鋼箱桁支点上ダイヤフラムの挙動に関する基礎的研究

１９８１年12月

清　水　　茂

鋼箱桁支点上ダイヤフラムの挙動に関する基礎的研究

1981年12月

清水　茂

目　　　　次

1. 序　　　　論

1－1　はじめに

鋼箱桁橋は，特に，そのねじりに対するすぐれた特徴から，近年，都市部の高架橋をはじめとする曲線橋に多く用いられるようになっている。また，直線橋であっても，主桁に箱型断面を用いたものは多い。

鋼箱桁橋において，ダイヤフラム*は，重要な構成部材の一つである。ダイヤフラムは，その力学的な役割から，中間ダイヤフラムと支点上ダイヤフラムに大別される。

中間ダイヤフラムは，桁の断面形状を保持し，桁のねじり抵抗を確保することが主たる目的と考えられている。そのため，中間ダイヤフラムの設計をする場合，桁のねじりや断面変形について検討する必要がある。また，中間ダイヤフラムは，その性格から，ダイヤフラムそのものに対する考察よりも，その，桁に対する影響が重視される場合が多い。

一方，支点上ダイヤフラムは，大きな支点反力を受けるため，支点反力を吸収し，それを桁に伝達させることが，その最大の目的である。すなわち，支点上ダイヤフラムは，それ自身が，耐荷力などに十分留意して設計されていなければならない。この意味で，中間ダイヤフラムは二次部材であり，支点上ダイヤフラムは一次部材であると言える。

さて，鋼箱桁橋に関する研究は，従来，その多くが，桁のねじりや断面変形に注目して行われてきた。これに伴い，中間ダイヤフラムについても，種々の研究がなされている。そして，上記の目的を達するための，中間ダイヤフラムの間隔や必要剛度など，設計に必要な事項についても，次第に明らかにされてきた。また，箱桁そのものの応力状態についても，せん断遅れを中心に，研究が進められてきた。

一方，支点上ダイヤフラムは，それが重要な部材であるにもかかわらず，従来，あまり研究されて

---

* 「隔壁」と「ダイヤフラム（又はダイアフラム）」は，本来，同一のものを指す用語であり，文献1）～55）をみても，「隔壁」という用語と「ダイヤフラム」という用語を使っているものの両方があるが，全体的にみると，「ダイヤフラム」を使っている文献が多い。文献1）～55）などから判断すると，隔壁は，充腹板，あるいはそれに近い状態の板形式のものを指すのに対し，ダイヤフラムは，開口部が非常に大きくラーメン状になったものや，トラス形式の対傾構などを含む場合が多いようである。本論文では，原則として，「ダイヤフラム」を用いる。

いないように思われる。

1969から1971年にかけて，世界各地で大型鋼箱桁橋の架設途中における落橋事故が相ついだ。これらの中で，1970年 6月に発生した英国のMilford Haven橋における事故は，支点上ダイヤフラムの強度が不足していたことが原因とされている。Milford Haven 橋は，ブロック工法で架設された逆台形箱型断面を有する連続橋であり，各ブロックは地上で組み立てられた後に，橋のすでにできている部分の上をトロッコに載せられて，桁の先端まで運ばれるようになっている。事故は，桁が張出し梁の状態で，ブロックが張出し部上を移動中に，張出し部が中間支点上で折れ曲るようにして起った（図1－1）。この事故，および，同年10月の，同じ英連邦内のオーストラリアのWest Gate 橋

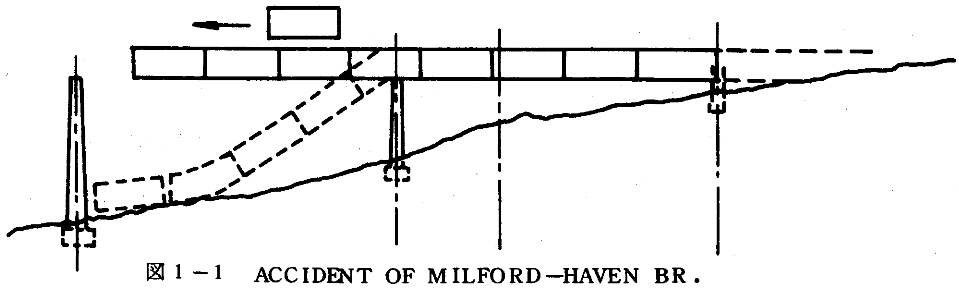


図1－1 ACCIDENT OF MILFORD—HAVEN BR.

の事故を契機に，英国に，「鋼箱桁橋の設計と架設に関する調査委員会（The Committee of In－quiry into Basis of Dsign and Method of Erection of Steel Box Girders. 委員長がBristol大学の Merrison 教授であるので，Merrioson 委員会ともよばれる）」がつくられ，支点上ダイヤフラムに関する研究が集中して行われた。この委員会の最終報告書付録Iには，鋼箱桁橋の暫定設計製作基準（Interim Design and Workmanship Rules, Merrison レポートとよばれることもある。以下本論文では，*IDR*と略称する）が示されている。[122] *IDR*は，支点上ダイヤフラムを含んだ鋼箱桁橋の設計を体系的にまとめた最初のものであるが，その指針は，非常に複雑であり実用には不便であること，この指針に従って設計，製作を行うと，費用が高くつくことなどの欠点も指摘されている。

本研究は，連続鋼箱桁の，主として中間支点付近に注目し，支点上ダイヤフラム，およびその近傍の挙動を実験的，数値的に調べたもので，その結果を，*IDR*と比較し，考察し，鋼箱桁の支点付近の設計のための基礎資料を得ようとするものである。

1－2 従来の研究

前節で触れたように，鋼箱桁に関する研究は，全体的には，かなり多いものの，[126] 支点上ダイヤフラムに注目した研究は，非常に少ないようである。従来の研究について整理すると，以下のようになる。

中間ダイヤフラムを有する箱桁に関する研究は，そのほとんどがダイヤフラムの桁に対する影響や効果に注目したものである。中間ダイヤフラムは，支点上ダイヤフラムに比べ，ダイヤフラムパネルがうける面内力は小さいため，支点上ダイヤフラムに比し，ダイヤフラムパネルの応力などが問題とされることは比較的少ないためであろう。

小松らは、中間ダイヤフラムは，その面内剛性が無限大として，箱桁の挙動を調べている[1)~5)]。前述のように，中間ダイヤフラムに関する研究では，ダイヤフラムそのものよりも，桁への影響のみを問題としたものが多い。1）～5）もそのような文献である。中間ダイヤフラムがある程度以上の剛性を持っている場合，その面内剛性を無限大として，取り扱いを簡略にしているわけである。

坂井らは，Vlasov の理論[125)]から，Cheung が導いた*FSM*（Finite Strip Method，有限帯板法）[35)~38)]と同様な手法を提案し[6)]，それをもとにして，剛な中間ダイヤフラムを有する桁の解析を行っている[7)~10)]。これらのうち，文献９）は，中間ダイヤフラムの間隔を具体的な設計基準の形で提案したものである。

坂井らは，さらに，一般化座標から，ブロックを用いた有限要素法を提案し，箱桁の解析に適用している[11)~12)]。

鳥居は，Vlasov の理論[125)]をもとに，縦リブとの関係も考慮に入れて，ダイヤフラムを有する箱桁を調べた[13)]。

また，矢嶋らも，Vlasov の理論を用いて，中間ダイヤフラムの効果を調べている[14)~15)]。

一方，Abdel－Samad らは，Vlasov の一般化座標から，弾性地盤上のはりと中間ダイヤフラムを有する箱桁の類似性に注目し，言わゆる*BEF*（Beam on Elastic Foundation）アナロジーを提案した[16)~18)]。これは，その後*IDR*の中間ダイヤフラムの設計式に採用された。坂井らは，*BEF*アナロジーを修正したものとして，Beam アナロジーを提案し，ブロック有限要素法と併せて中間ダイヤフラムを有する箱桁を解析し，中間ダイヤフラムの設計基準を提案している[19)~21)]。

Djubek らも，Vlasov の一般化座標を用いて，一室から四室までの箱桁を解き，Abdel－Samad とよく一致する結果を得た[22)]。このほか，Champbell－Allen[23)]，Oleinik[24)] らも，*BEF*により中間ダイヤフラムを有する箱桁の研究をしている。これらのうち，文献23）は，コンクリートの箱桁を対象にしており，コンクリート箱桁では，中間ダイヤフラムはあまり効果がない，という結果が示されている。

また，能町[25)]，Richimond[26)27)]らのように，折板理論による，ねじりをうける箱桁に注目した研究もみられる。

中井らは，伝達マトリックス法により，曲線箱桁橋を解析した[28)29)]。特に，29）は，計算，模型実

験のほか，現存する26橋についての各種パラメータの調査結果[131]も併せ，考察がなされている。

さて，FEM（Finite Element Method，有限要素法）は，解くべき連立方程式の元数が増大することを除けば，ほとんどの条件の構造物を解析できる手法であり，箱桁の解析にも多く利用されている。

Chapman らは，FEMとBEFを用い，いくつかのモデルを設定して比較し，BEFでは，曲げやねじり，そりに伴うせん断ひずみは考慮できない，としている[30]。Sisodia らは，斜のコンクリート箱桁をFEMにより解き，コンクリート箱桁では，中間ダイヤフラムは効果がないばかりでなく，むしろ有害でさえある，とした[32]。

また，Crisfield[31]，Rabizadeh ら[33]，Lee ら[34]による，FEMを用いた研究もある。文献33）は，FEMの自由度を減らすため，ダイヤフラムは入れず，その位置で箱桁の隅角部を直角に保つ，という条件を加えることにより，ダイヤフラムの代用とした。

FEMは，上述のように，原理的にはほとんどすべての条件の構造物を解けるものであるが，現実には，連立方程式が大きくなる，という数値計算上の制約から，研究の対象が限られる場合が多い。上記の文献11），12）や 33）は，この制約を解消しようとしたもの，と言うことができる。さて，C−heung は，FEMに，Rayleigh−Ritz 法を組合せた手法として，FSMを提案した[35~38]。これは，そのままではダイヤフラムを考慮することはできないが，その後，文献39），133）のように，中間ダイマフラムの剛性を橋軸方向にFourier 展開する方法，文献40）〜43），135）のように，中間ダイヤフラムと桁との間の不静定力を求める方法などの改良が，提案されている。

Priestley は，合成樹脂により作られた模型により実験を行い，結果をFSM，三次元および二次元のFEM，BEFによる解と比較している[44]。

箱桁のフランジ有効幅を扱った研究としては，前出1）のほか，114）〜121），132）のようなものがある。これらのうち，120）はその結果がIDRの有効幅に関する規程を作る際に参考にされている。

一方，支点上ダイヤフラムに関する研究には，以下のようなものがある。

El −Gaalyらは，FEMにより支点上ダイヤフラムの応力分布やその安定性について調べている。文献45），46）では，ダイヤフラムのみを取り出し，シャイベのように扱っており，荷重は，腹板からのせん断力のみを考慮している。

Dowlingらは，長方形・台形断面箱桁の支点上ダイヤフラムの崩壊挙動に関する実験を行い，ダイヤフラムの破壊モードや初期不整の影響を調べている[47][48]。これは，Merrison 委員会に関連して行われたものである。Herzog は，これらの結果をもとに，ダイヤフラムの耐荷力について考察を加え

ている[53)]。

Crisfiel らは，支点上ダイヤフラムについての非線型解析をFEMにより行い，結果をIDRと比較している[49) 50)]。Simonian らも，支点上ダイヤフラムについて調べ，ダイヤフラムとフランジ，腹板の間の不静定力について説明している[51),52)]。また，54)，55)，135）～137）のような文献もある。

以上のように，中間ダイヤフラムを含んだ箱桁に関する文献は多いが，支点上ダイヤフラムについての研究は，あまり多くはない。支点上ダイヤフラムは，中間ダイヤフラムにくらべ，大きな支点反力を受けるため，上記の45）以降55）までの文献は，そのほとんどがダイヤフラムの座屈を考慮している。支点上ダイヤフラムに関する研究のうち，その設計について直接触れているのは，54)，55)のみである。これらのうち，54）は，現在，英国で作成中の新示方書ＢＳ 5400の，ダイヤフラムに関する部分を解説したものである。ＢＳ 5400のPrat 3では，IDRをもとに，ダイヤフラムの設計基準などを決めている[138)～141)]。

なお，支点上ダイヤフラムの設計では，支点反力の大きさを知ることが重要である。文献 113）では，下部構造の設計の必要性から，曲りばりの支点反力分配の特性を求めている。

さて，上で説明したように，支点上ダイヤフラムは，その設計にあたり，座屈に対する考慮が必要とされる。また，支点付近の腹板やフランジも，その，座屈，あるいは後座屈の挙動が問題となる場合が多い。板・プレートガーダーの座屈，あるいは後座屈については，非常に多くの研究が行われている[127)]。板，特に補剛材つきの板の座屈・耐荷力に関する文献としては，56）～77）などのようなものがある。これらのうち，73）～77）は，FEMによる座屈解析について説明したものである。また59）～61）は，Merrison 委員会における，一連の箱桁の耐荷力に関する研究の一部として行われた文献である。

プレートガーダーの曲げ，あるいはせん断耐荷力に関する研究の主なものとしては，文献78）～104）のようなものがある。これらのうち，89）は，道路橋示方書・同解説（Ⅱ）鋼橋編[123)]（以下，示方書という）の，プレートガーダーの耐荷力に関連した規程についての解説である。また，100）は，耐荷力に関する多くの数値的な研究成果を，電子計算機により整理・検索しようとしたものである。

一方，直接に箱桁の耐荷力について研究したものは，45）～55）のように支点上ダイヤフラムに関するものや，59）～61）のほか，105）～111）のようなものがある。これらのうち，106）～107）は，47），60）とともに，Merrison 委員会に関連して行われたものであり，いずれも，ICEのProceedings[112)] に含まれている。

Dowling らは，文献 105）で，実験により得られた，箱桁の曲げによる破壊形式について述べてい

る。文献106）は，Rockyらによるもので，支点付近の腹板パネルのせん断耐荷力の実験結果などが示されている。この実験における模型は，箱桁ではなくプレートガーダーであるが，箱桁では，支点反力は支点上ダイヤフラムを通じて腹板に作用することから，支点反力に相当する荷重を腹板上に直接かけるのではなく，広幅の鉛直補剛材に載荷させている。Dibleyらは，文献107）で，二径間連続箱桁の模型実験を行った。この実験では，左右支承の高さの違いなどが桁の崩壊形式に与える影響などが調べられている。

三上らによる文献108）は，直交異方性板理論にもとづく，箱桁の耐荷力の簡易計算法を示したものであり，109）は，箱桁のフランジおよび腹板の座屈を，箱桁の断面性状，材料特性などをパラメータにして解析している。

110）は，箱桁のフランジ，腹板の強度を米国の在来の示方書との関連で説明している。また，111）は，実際に製作された箱桁の各部材の初期不整を統計的に調べ，耐荷力との関係について考察したものである。

以上概観したように，鋼箱桁の支点上ダイヤフラムに関する研究，および支点付近の耐荷力に関するる研究は，他の同種の研究に比べ，少ないと言わざるを得ない。

本研究は，鋼箱桁の中間支点上ダイヤフラムに関する弾性および破壊実験，端支点上ダイヤフラムの破壊実験を行い，支点上ダイヤフラム，およびその近傍の腹板，フランジの応力分布や破壊形式を調べるとともに，有限要素法による応力の計算値，*IDR*を実験用模型に適用した結果と併せ，支点上ダイヤフラムおよびその近傍の桁の挙動を知ろうとするものである。そして，*IDR*を設計に用いる場合の注意事項など，支点上ダイヤフラムの設計に対する若干の考察も行った。

1－3　本論文の構成と概要

本論文は，8章より成っている。このうち，第2章，第3章は，ダイヤフラムを有する箱桁の*FSM*による計算方法，および支点上ダイヤフラムに関する模型実験の概要を説明したものである。第4章は，支点反力の決定に関するものであり，第5章，第6章では，それぞれ弾性および破壊の実験，数値計算等の結果を示している。また，第7章では，設計に関する考察を述べている。以下，本論文の各章ごとの概要を説明する。

第2章では，まず，箱桁のような構造物の解析に有用とされている*FSM*の式を示す。*FSM*は，Cheung により定式化された手法であり，構造物を，橋軸直角方向には通常の有限要素法と同様に扱っているが，橋軸方向には，Rayleigh－Ritz法的な考えを取り入れている。*FSM*は，箱桁のような構造物を解く場合，有限要素法において，解くべき連立方程式の元数を減らすために改良を加えた

もの，ということができる。しかし，*FSM*は，そのままではダイヤフラム等を考慮することができない。*FSM*において，中間ダイヤフラムなどを考慮するためには，大別して，ダイヤフラムの剛性を桁の剛性と同様に，橋軸方向の級数に展開する方法と，ダイヤフラムなどからの不静定力を，外力と同様に桁に作用させる方法がある。第2章では，続いて，これら2種類の*FSM*の改良について，その定式化も含めて示すとともに，これらの得失について説明する。また，本論文第7章では，一部，支点上ダイヤフラムの座屈解析を*FEM*により行っている。そのため，第2章では，さらに*FEM*による板の座屈解析の定式化を，Gallagher の教科書に基づいて示し，それと，支点上ダイヤフラムの座屈解析の関係について触れた。

第3章は，支点上ダイヤフラム，およびその近傍の桁の，挙動に関する実験の概要を説明を示したものである。本研究では，中間支点について，弾性実験と耐荷力実験，端支点について，耐荷力実験を行っている。これらのうち，弾性実験は第5章に，耐荷力実験は第6章に関連したものであり，模型の形状や載荷方法，ひずみ等の測定位置などは，それぞれの章で説明している。そのため，第3章では，これらの実験に共通した，支持装置，載荷装置についてのみ触れている。

さて，支点上ダイヤフラムを設計するためには，支点反力の大きさを知ることが必要である。扱っている桁が直線で，しかも，左右対象の断面を有する場合，荷重も左右対象であれば，左右支承における支点反力は等しいものとなる。しかし曲線桁の場合、一般に左右の支点反力は異なっている。第4章では，曲線箱桁の中間支点における左右支承への反力の分配について，桁の曲率や中間ダイヤフラムの有無などをパラメータとした解析を行った。

第5章では，まず，*FSM*による数値計算のためのモデル，および実験用モデルについて説明し、次いで，弾性実験について，ひずみ測定位置などの説明をする。その後，計算および実験より得られたダイヤフラムの応力分布を示す。さらに，桁からダイヤフラムに作用している不静定力，支点付近の桁の応力分布，支点上ダイヤフラムやその近傍の応力に対する中間ダイヤフラムの影響について触れた。

第6章では，中間支点，端支点それぞれの模型についての説明，破壊実験の概要について説明した後に，中間支点，端支点それぞれの，支点上ダイヤフラム，桁の強度などについて説明している。ここでは，ダイヤフラムや腹板，フランジのひずみ分布，荷重変形曲線などを示すとともに，模型に*IDR*を適用して応力照査をした結果や，ダイヤフラムの強度と桁の崩壊形式の関係についても考察を加えた。

第7章では，第4章のパラメータ解析に用いたモデルに対して*FEM*により座屈解析を行い，*IDR*のダイヤフラム設計に関する規程における，ダイヤフラムパネルの応力分布の仮定や座屈係数につ

いて検討した。そして，その結果修正された座屈係数を，第6章のモデルに適用してIDRによる応力照査を行い，第6章の結果と比較している。また，第4章以降に得られた事項を参考にして，ダイヤフラムの応力照査などの際に用いるダイヤフラムパネルの応力分布のモデル化について考察し，より正確と思われるダイヤフラムパネルの応力分布の仮定を示した。さらに第7章では，第4章以後の結果をふまえ，支点上ダイヤフラム設計上の注意事項などを列記した。

第8章では，以上の結果を併せ，結論を下している。

2. 有限帯板法による箱桁の解析および有限要素法によるダイヤフラムの座屈解析

2－1 まえがき

有限帯板法(Finite Strip Method,FSM)は，Y.K.Cheung により提案された,有限要素法(Finite Element Method, FEM)系の数値計算法であり[36-38]，箱桁橋のような折板構造物の解析に有用な手法とされている。有限帯板法の解析原理は，概ね次のようである（図2－1）。

① 構造物を，図2－1に示すように，橋軸方向の帯板要素に分割する。

② 各節線上で，変位を三角級数で表す。

③ 各要素内の変位関数を②の級数で表す。

④ ③の変位関数を用い，三角級数の各項ごとに，通常の有限要素法に準じて剛性行列を計算する。

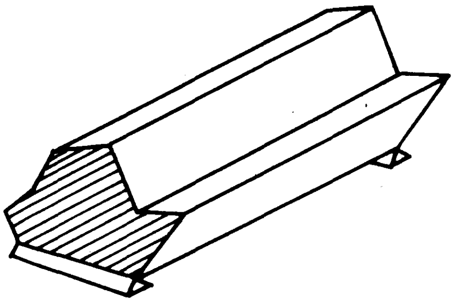


図2—1 FOLDED PLATE STRUCTURE

上記の解析においては,通常,以下の仮定がおかれている。

a）構造物の両端は単純支持されており，また，そこには，面内剛性が無限大，面外には抵抗しないダイヤフラムがあるものとする。

b）構造物は，橋軸方向に対しては，幾何学的にも，材料特性上も，変化がないものとする。

これらのうち，a) は，節線変位を三角級数で展開する必要上置かれたものである。Cheung の文献[38]では，この級数を，双曲線関数も含めた形で扱い，他の境界条件の問題を解く場合についても触れられている。しかし実際の箱桁橋などでは，支点上には隔壁ないしはそれに準ずる部材が置かれるのが普通であり，a)の仮定は，実用上は問題はないと思われる。そこで，本論文では，三角関数のみを考えることとしたものである。なお，この仮定により，変位関数に三角級数を用いた有限帯板法では当然，端支点上の隔壁に関しては，考察できないことになる。

一方，b)の仮定は，剛性行列などを計算する際に必要となる，橋軸方向の積分に関連して置かれたものである。すなわち，構造物が橋軸方向に一定であると，この方向の積分が容易となるうえ，2－2－5で述べるように，三角関数の直交性から，解くべき連立方程式が簡略化される，という利点がでるわけである。

さて，箱桁橋では，桁の中間にダイヤフラムを設けることが多い。ところが，中間ダイヤフラムを

有する桁は，前記の仮定b)に反することになる。すなわち，中間ダイヤフラムを有する桁に対しては有限帯板法は，そのままの形では適用できず，何らかの改良が必要とされることになる。この改良には，大別して，次の二種類の方法が考えられる。

イ）中間ダイヤフラムの剛性を，箱桁を形成する帯板要素の場合と同じく橋軸方向の三角級数で展開し，ダイヤフラムの剛性と桁の剛性を同様に扱う。

ロ）中間ダイヤフラムと桁との間の不静定力を求めておき，桁は，この不静定力に等しい外力をうける，中間ダイヤフラムのないものとして扱う。

本論文では，以下，イ)の方法を直接法，ロ)の方法を間接法ということにする。本章では，まず，Cheungの文献に従って帯板要素の剛性行列を示した後に，直接法，間接法について説明し，考察する。

一方，ダイヤフラムの座屈解析においては，本論文では，ダイヤフラムを，圧縮をうける板としてダイヤフラムのみを取り出して計算している。この座屈解析には，有限要素法を用いたが，その定式化は，Gallagher らの文献[73, 128] によっている。本章の最後では，本論文で用いた，座屈問題に対する有限要素法の定式化について触れることとする。

2－2　帯板要素の剛性行列[36, 38]

2－2－1　変位関数

いま，帯板要素の一つを取り出し，図2－2に示すように座標をとるものとする。図中，X，Y，Zは全体座標系，x，y，zは局所座標系である。局所座標系は，y軸が全体座標系のY軸と一致しており，x軸，z軸はX軸，Z軸とγの角度をなしている。箱桁の橋軸は，y軸の方向にとるものとする。帯板要素は，幅b，長さℓとし，帯板の両側の節線は$x=o$の節線をi，$x=b$の節線を

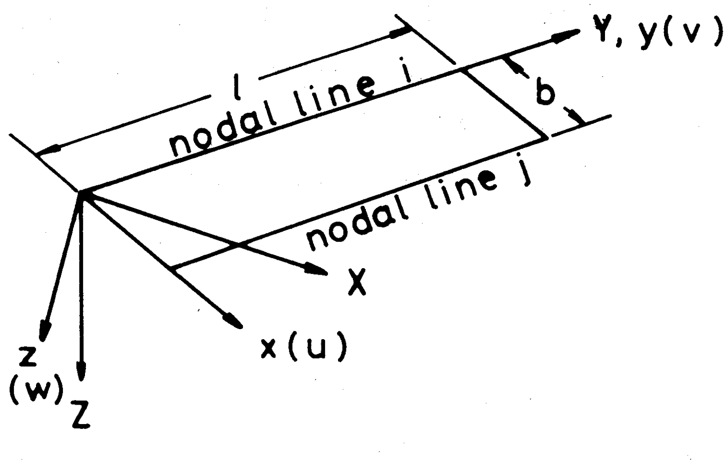


図2－2　TYPICAL STRIP AND COORDINATE SYSTEMS

jとする。また，局所座標系におけるx，y，z方向の変位をそれぞれu，v，wとし，y軸回りの回転変位をΨとする。

節線 i における u, v, w, ψ を u_i, v_i, w_i, ψ_i とすると，これらは，それぞれ y の関数 $u_i=u_i(y)$, $v_i=v_i(y)$, $w_i=w_i(y)$, $\psi_i=\psi_i(y)$ となる。２－１で説明した仮定a)より，$y=o$，$y=\ell$ では u, w, $\psi=o$ となることに注意しながら, u_i, v_i, w_i, ψ_i を三角級数で展開すると,

$$u_i = \sum_m u_{im}\sin k_m y \qquad (2-1(a))$$

$$v_i = \sum_m v_{im}\cos k_m y \qquad (2-1(b))$$

$$w_i = \sum_m w_{im}\sin k_m y \qquad (2-1(c))$$

$$\psi_i = \sum_m \psi_{im}\sin k_m y \qquad (2-1(d))$$

となる。ただし，$k_m = \dfrac{m\pi}{\ell}$ である。節線 j においても同様に,

$$u_j = \sum_m u_{jm}\sin k_m y \qquad (2-2(a))$$

$$v_j = \sum_m v_{jm}\cos k_m y \qquad (2-2(b))$$

$$w_j = \sum_m w_{jm}\sin k_m y \qquad (2-2(c))$$

$$\psi_j = \sum_m \psi_{jm}\sin k_m y \qquad (2-2(d))$$

式２－１，２－２より，帯板要素内の点（x，y）における変位 u, v, w, ψ は,

$$u = \sum_m \left\{ \left(1-\frac{x}{b}\right)u_{im} + \frac{x}{b}u_{jm} \right\}\sin k_m y \qquad (2-3(a))$$

$$v = \sum_m \left\{ \left(1-\frac{x}{b}\right)v_{im} + \frac{x}{b}v_{jm} \right\}\sin k_m y \qquad (2-3(b))$$

$$w = \sum_m \left\{ \left(1-\frac{3x^2}{b^2}+\frac{2x^3}{b^3}\right)w_{im} + \left(x-\frac{2x^2}{b}+\frac{3x^3}{b^2}\right)\psi_{im} + \left(\frac{3x^2}{b^2}-\frac{2x^3}{b^3}\right)w_{jm} + \left(\frac{x^3}{b^2}-\frac{x^2}{b}\right)\psi_{jm} \right\}\sin k_m y \qquad (2-3(c))$$

$$\psi = \frac{\partial w}{\partial x} \qquad (2-3(d))$$

となる。

２－２－２　面内剛性行列

２－２－１で求めた変位関数（２－３）を、ひずみ－変位関係式

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial u}{\partial x} \\ \dfrac{\partial v}{\partial y} \\ \dfrac{\partial v}{\partial x} + \dfrac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} \qquad (2-4)$$

に代入し，マトリックス表示すると，

$$\{\varepsilon\}=\sum_m [B_{pm}]\ \{\delta_{pm}\}$$

ただし，$\{\delta_{pm}\}=\{u_{im}\ v_{im}\ w_{im}\ \psi_{im}\}^T$である。また，$[B_{pm}]$の内容は，付録A－1に示す。ここで，式（2－5）は，$[B_p]=[\,[B_{p1}]\ [B_{p2}]\ [B_{p3}]\cdots\cdots\,]$，$\{\delta_p\}^T=\{\,\{\delta_{p1}\}^T\{\delta_{p2}\}^T\{\delta_{p3}\}^T\cdots\cdots\}$とおくことにより，

$$\{\varepsilon\}=\sum_m [B_{pm}]\{\delta_{pm}\}=[B_p]\{\delta_p\} \qquad (2-6)$$

と表わしておく。また，応力－ひずみ関係式は，

$$\{\varepsilon\}=\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\end{Bmatrix}=[D_p]\ \{\varepsilon\} \qquad (2-7)$$

$$\left([D_p]=\begin{bmatrix}\dfrac{E}{1-\nu^2} & \dfrac{\nu E}{1-\nu^2} & 0\\ \dfrac{\nu E}{1-\nu^2} & \dfrac{E}{1-\nu^2} & 0\\ 0 & 0 & \dfrac{E}{2(1+\nu)}\end{bmatrix},\ E\text{はヤング率，}\ \nu\text{はポアソン比}\right)$$

である。

一方，節線i，j上に作用するx，y方向の荷重$X_i=X_i(y)$，$Y_i=Y_i(y)$，$X_j=X_j(y)$，$Y_j=Y_j(y)$についても，変位と同様に，y軸方向の三角級数で表わし，この帯板要素の全ポテンシャルエネルギーU_pを求めると，

$$U_p\ =\ \frac{1}{2}\int_V\{\varepsilon\}^T\{\sigma\}\,dV-\int_0^{\ell}\{\delta_{p.}\}^T\{F_{p.}\}\,dy \qquad (2-8)$$

となる。ただし，

$$\{\delta_{p.}\}=\begin{Bmatrix}u_i\\ v_i\\ u_j\\ v_j\end{Bmatrix}=\sum_n\begin{Bmatrix}u_{in}\ \sin\ k_ny\\ v_{in}\ \cos\ k_ny\\ u_{jn}\ \sin\ k_ny\\ v_{jn}\ \cos\ k_ny\end{Bmatrix}=\sum_n[R_{pn}]\ \{\delta_{pn}\} \qquad (2-9(a))$$

$$\{F_{p.}\}=\begin{Bmatrix}X_i\\ Y_i\\ X_j\\ Y_j\end{Bmatrix}=\sum_n\begin{Bmatrix}X_{in}\ \sin\ k_ny\\ Y_{in}\ \cos\ k_ny\\ X_{jn}\ \sin\ k_ny\\ Y_{jn}\ \cos\ k_ny\end{Bmatrix}=\sum_n[R_{pn}]\ \{F_{pn}\} \qquad (2-9(b))$$

であり，

$$[R_{pn}] = \begin{bmatrix} \sin k_n y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos k_n y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin k_n y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos k_n y \end{bmatrix} \qquad \text{——— } (2-9(c))$$

である。また，$\{F_{pn}\}^T = \{ X_{in}\ Y_{in}\ X_{jn}\ Y_{jn} \}^T$ である。

式（2−8）に，式（2−6），式（2−7）を代入すると，

$$U_p = \frac{1}{2} t \int_0^{\ell}\int_0^{b} \{\delta_p\}^T [B_p]^T [D_p] [B_p] \{\delta_p\}\, dxdy - \int_0^{\ell} \{\delta_p\}^T \{F_p\} dy$$

$$\text{——— } (2-10)$$

となるが，$\{\delta_p\}^T = \{ \{\delta_{p1}\}^T \{\delta_{p2}\}^T \cdots\cdots \}$，$[B_p] = [[B_{p1}]\ [B_{p2}] \cdots\cdots]$ であり，$\{\delta_p\}$，$\{F_p\}$ についても同様に $\{\delta_p\} = \sum_n [R_{pn}]\{\delta_{pn}\} = [[R_{p1}][R_{p2}] \cdots\cdots]\ \{ \{\delta_{p1}\}^T \{\delta_{p2}\}^T \cdots \}^T$，$\{F_p\} = [[R_{p1}]\ [R_{p2}] \cdots\cdots]\ \{ \{F_{p1}\}^T \{F_{p2}\}^T \cdots\cdots \}^T$ であるから，

$$U_p = \sum_m \sum_n \Big[\frac{t}{2} \{\delta_{pm}\}^T \int_0^{\ell}\int_0^{b} [B_{pm}]^T [D_p] [B_{pn}]\, dxdy\, \{\delta_{pn}\}$$

$$- \{\delta_{pm}\}^T \int_0^{\ell} [R_{pm}]^T [R_{pn}]\, dy\, \{F_{pn}\} \Big]$$

となる。ただし，この帯板要素の厚さを t とする。

いま，$\frac{t}{2}\int_0^{\ell}\int_0^{d} [B_{pm}]^T [D_p] [B_{pn}]\, dxdy = [S_{pmn}]$，$\int_0^{\ell} [R_{pm}]^T [R_{pn}]\, dy$

$= [R_{pmn}]$ とおくと，U_pは，

$$U_p = \sum_m \sum_n \Big[\{\delta_{pm}\}^T [S_{pmn}] \{\delta_{pn}\} - \{\delta_{pm}\}^T [R_{pmn}] \{F_{pn}\} \Big]$$

$$\text{——— } (2-11)$$

と書き直される。〔 S_{pmn}〕の内容は，付録A－2に示す。

ここで，ポテンシャルエネルギーU_pを最小にするため，$\{\partial U_p/\partial \delta_p\}=0$とすると，式（2－11）は

$$\sum_m \sum_n \left[[S_{pmn}]\{\delta_{pn}\} - [R_{pmn}]\{F_{pn}\} \right] = \{0\} \qquad (2-12)$$

となる。式（2－12）を書き直すと，

$$\begin{bmatrix} S_{p11} & S_{p12} & \cdots\cdots & S_{p1r} \\ S_{p21} & S_{p22} & \cdots\cdots & S_{p2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{pr1} & S_{pr2} & \cdots\cdots & S_{prr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{p1} \\ \delta_{p2} \\ \vdots \\ \delta_{pr} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{p11} & R_{p12} & \cdots\cdots & R_{p1r} \\ R_{p21} & R_{p22} & \cdots\cdots & R_{p2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{pr1} & R_{pr2} & \cdots\cdots & R_{prr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{p1} \\ F_{p2} \\ \vdots \\ F_{pr} \end{Bmatrix} \qquad (2-13(a))$$

または，

$$[S_p]\{\delta_p\} = [R_p]\{F_p\} \qquad (2-13(b))$$

となる。rは，三角級数の項数である。

2－2－3　曲げ剛性行列

帯板要素の曲げ剛性行列を求める手順は，2－2－2で説明した面内剛性行列を求める場合と同じである。曲げの場合は，平面応力問題における応力－ひずみ関係式（2－7）に代えて，モーメント－曲率関係式

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = [D_b]\{\chi\} \qquad (2-14(a))$$

を用いる。ここに，

$$\{\chi\} = \begin{Bmatrix} -\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2\dfrac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \qquad (2-14(b))$$

$$[D_b] = \begin{bmatrix} D_1 & \nu D_1 & 0 \\ \nu D_1 & D_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1-\nu}{2} D_1 \end{bmatrix}, \quad D_1 = \frac{E\,t^3}{12(1-\nu^2)} \qquad (2-14(c))$$

である。この式（2－14(b)）に2－2－1で求めた変位関数（2－3）を代入し，マトリックス表示すると，

$$\{\chi\} = \sum_m [B_{bm}]\{\delta_{bm}\} \qquad (2-15)$$

が得られる。ただし，$\{\delta_{bm}\}^T=\{w_{im}\ \ \Psi_{im}\ \ w_{jm}\ \Psi_{jm}\}$である。また，$[B_{bm}]$ の内容は付録A－3に示す。

式（2－15）を，式（2－6）と同様に，$[B_b]=[[B_{b1}]\ [B_{b2}]\cdots\cdots]$，$\{\delta_b\}^T=\{\{\delta_{b1}\}^T\{\delta_{b2}\}^T\cdots\cdots\}$とおくことにより，

$$\{\chi\} = \sum_m [B_{bm}]\{\delta_{bm}\} = [B_b]\{\delta_b\} \qquad (2-16)$$

と表しておく。すると全ポテンシャルエネルギーU_bは，

$$U_b = \frac{1}{2}\int_0^\ell\int_0^b\{\chi\}^T\{M\}\,dxdy-\int_0^\ell\{\delta_{b.}\}^T\{F_{b.}\}\,dy \qquad (2-17)$$

であるから，これに式（2－14(a)），（2－16）を代入すると，

$$U_b = \frac{1}{2}\int_0^\ell\int_0^b\{\delta_b\}^T[B_b]^T[D_b][B_b]\{\delta_b\}\,dxdy$$

$$-\int_0^\ell\{\delta_{b.}\}^T\{F_{b.}\}\,dy \qquad (2-18)$$

となる。ただし，

$$\{\delta_{b.}\}=\begin{Bmatrix} w_i \\ \Psi_i \\ w_j \\ \Psi_j \end{Bmatrix}=\sum_m\begin{Bmatrix} w_{im} \\ \Psi_{im} \\ w_{jm} \\ \Psi_{jm} \end{Bmatrix}\sin k_m y=\sum_m [R_{bm}]\{\delta_{bm}\} \qquad (2-19(a))$$

$$\{F_{b.}\}=\begin{Bmatrix} Z_i \\ M_i \\ Z_j \\ M_j \end{Bmatrix}=\sum_m\begin{Bmatrix} Z_{im} \\ M_{im} \\ Z_{jm} \\ M_{jm} \end{Bmatrix}\sin k_m y=\sum_m [R_{bm}]\{F_{bm}\} \qquad (2-19(b))$$

であり，

$$[R_{bm}]=\begin{bmatrix} \sin k_m y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin k_m y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin k_m y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin k_m y \end{bmatrix} \qquad (2-19(c))$$

である。また，$Z_i = Z_i(y)$, $Z_j = Z_j(y)$は，各々，節線i，j上に作用するz方向の荷重，$M_i = M_i(y)$，$M_j = M_j(y)$は節線i，j上に作用する，それぞれの節線回りのモーメント荷重であり，$\{Fb_m\}^T = \{Z_{im} M_{im} Z_{jm} M_{jm}\}$である。以下，2－2－2と同様な手順で，

$$\sum_m \sum_n \left[[Sb_{mn}] \{\delta b_n\} - [Rb_{mn}] \{Fb_n\} \right] = \{0\} \qquad (2-20)$$

を得る。ただし，$[Sb_{mn}] = \frac{1}{2} \int_0^{\ell} \int_0^{d} [Bb_m]^T [Db] [Bb_n] \, dxdy$，$[Rb_{mn}] = \int_0^{\ell} [Rb_m][Rb_n] dy$ である。$[Sb_{mn}]$の内容は付録A－4に示す。式（2－20）を，式（2－13）のように書き直すと，

$$\begin{bmatrix} Sb_{11} & Sb_{12} & \cdots\cdots & Sb_{1r} \\ Sb_{21} & Sb_{22} & \cdots\cdots & Sb_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Sb_{r1} & Sb_{r2} & \cdots\cdots & Sb_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta b_1 \\ \delta b_2 \\ \vdots \\ \delta b_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Rb_{11} & Rb_{12} & \cdots\cdots & Rb_{1r} \\ Rb_{21} & Rb_{22} & \cdots\cdots & Rb_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Rb_{r1} & Rb_{r2} & \cdots\cdots & Rb_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Fb_1 \\ Fb_2 \\ \vdots \\ Fb_r \end{Bmatrix} \qquad (2-20(a))$$

または，

$$[\mathbf{S}b] \{\delta b\} = [\mathbf{R}b] \{Fb\} \qquad (2-20(b))$$

となる。

2－2－4　帯板要素の剛性行列

2－2－2，2－2－3では帯板の剛性を面内、面外それぞれに対して求めたが，ここでは，それらを合わせ，帯板要素の剛性行列を完成させる。いま，

$$\{\delta_m\}^T = \{u_{im} v_{im} w_{im} \Psi_{im} u_{jm} v_{jm} w_{jm} \Psi_{jm}\} \qquad (2-21(a))$$

$$\{F_m\}^T = \{X_{im} Y_{im} Z_{im} M_{im} X_{jm} Y_{jm} Z_{jm} M_{jm}\} \qquad (2-21(b))$$

とすると，式（2－13），式（2－14）より，

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots\cdots & S_{1r} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots\cdots & S_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{r1} & S_{r2} & \cdots\cdots & S_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots\cdots & R_{1r} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots\cdots & R_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{r1} & R_{rr} & \cdots\cdots & R_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_r \end{Bmatrix} \qquad (2-22(a))$$

または，

$$[\mathbf{S}] \{\delta\} = [\mathbf{R}] \{F\} \qquad (2-22(b))$$

が得られる。ここに$[S_{mn}]$は

$$[S_{mn}] = \begin{bmatrix} [Sp_{mn}^{11}] & \mathbf{0} & [Sp_{mn}^{12}] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [Sb_{mn}^{11}] & \mathbf{0} & [Sb_{mn}^{12}] \\ [Sp_{mn}^{21}] & \mathbf{0} & [Sp_{mn}^{22}] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [Sb_{mn}^{21}] & \mathbf{0} & [Sb_{mn}^{22}] \end{bmatrix} \qquad (2-23(a))$$

$$[R_{mn}] \quad \begin{bmatrix} [Rp_{mn}^{11}] & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [Rb_{mn}^{11}] & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & [Rp_{mn}^{22}] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & [Rb_{mn}^{22}] \end{bmatrix} \qquad \text{———————— (2 —23(b))}$$

である。式（2 —23(a)），（2 —23(b)）中にある〔Sp_{mn}^{ij}〕，〔Sb_{mn}^{ij}〕，〔Rp_{mn}^{ii}〕，〔Rb_{mn}^{ii}〕は，各々，〔Sp_{mn}〕，〔Sb_{mn}〕，〔Rp_{mn}〕，〔Rb_{mn}〕を構成する，2行2列のサブマトリックスで，

$$[Sp_{mn}] = \begin{bmatrix} [Sp_{mn}^{11}] & [Sp_{mn}^{12}] \\ [Sp_{mn}^{21}] & [Sp_{mn}^{22}] \end{bmatrix}, \quad [Sb_{mn}] = \begin{bmatrix} [Sb_{mn}^{11}] & [Sb_{mn}^{12}] \\ [Sb_{mn}^{21}] & [Sb_{mn}^{22}] \end{bmatrix},$$

$$[Rp_{mn}] = \begin{bmatrix} [Rp_{mn}^{11}] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [Rp_{mn}^{22}] \end{bmatrix}, \quad [Rb_{mn}] = \begin{bmatrix} [Rb_{mn}^{11}] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [Rb_{mn}^{22}] \end{bmatrix},$$

であり，$\mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ である。

2—2—5　座標変換・全体剛性

式（2 —22）における帯板要素の剛性行列は，図2 − 2中の局所座標系により求めたものである。いま，全体座標系における節線変位，節線荷重を示すために式（2 —21）の各記号の上に −（バー）をつけて表すものとする。すなわち，節線 i，j の全体座標系における変位，節線 i，j に作用する全体座標系における荷重は，

$$\{\bar{\delta}_m\}^T = \{\ \bar{u}_{im}\ \bar{v}_{im}\ \bar{w}_{im}\ \bar{\Psi}_{im}\ \bar{u}_{jm}\ \bar{v}_{jm}\ \bar{w}_{jm}\ \bar{\Psi}_{jm}\ \} \qquad \text{———————— (2 —24(a))}$$

$$\{\bar{F}_m\}^T = \{\ \bar{X}_{im}\ \bar{Y}_{im}\ \bar{Z}_{im}\ \bar{M}_{im}\ \bar{X}_{jm}\ \bar{Y}_{jm}\ \bar{Z}_{jm}\ \bar{M}_{jm}\ \} \qquad \text{———————— (2 —24(b))}$$

と表す。$\{\bar{\delta}_m\}$ と $\{\delta_m\}$，$\{\bar{F}_m\}$ と $\{F_m\}$ の関係は，図2 − 3を参照して，

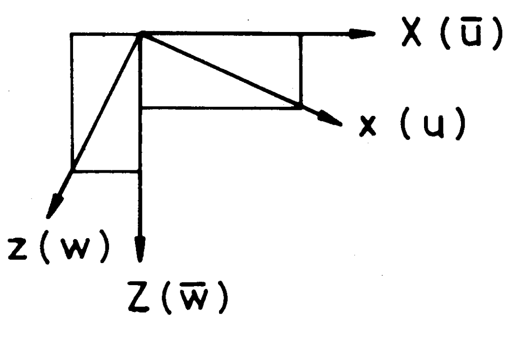


図2—3　COORDINATE TRANSFORMATION

$$\{\overline{\delta}_m\} = [T]\{\delta_m\} \qquad \text{(2-25(a))}$$

$$\{\overline{F}_m\} = [T]\{F_m\} \qquad \text{(2-25(b))}$$

となる。ただし，

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\gamma & 0 & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(2-25(c))}$$

である。ここで，

$$[\mathbf{T}] = \underbrace{\begin{bmatrix} [T] & & \mathbf{0} \\ & [T] & \\ \mathbf{0} & & \ddots\ [T] \end{bmatrix}}_{r\text{回}} \qquad \text{(2-26)}$$

として，式（2－22）に（2－26），（2－25）を代入すると，$[\mathbf{T}]^{-1} = [\mathbf{T}]^{\mathrm{T}}$だから，

$$[\mathbf{T}][\mathbf{S}][\mathbf{T}]^{\mathrm{T}}\{\overline{\delta}\} = [\mathbf{T}][\mathbf{R}][\mathbf{T}]^{\mathrm{T}}\{\overline{F}\} \qquad \text{(2-27(a))}$$

を得る。これを書き直すと，

$$\begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & \cdots & \overline{S}_{1r} \\ \overline{S}_{21} & \overline{S}_{22} & \cdots & \overline{S}_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{S}_{r1} & \overline{S}_{r2} & \cdots & \overline{S}_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{\delta}_1 \\ \overline{\delta}_2 \\ \vdots \\ \overline{\delta}_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{R}_{11} & \overline{R}_{12} & \cdots & \overline{R}_{1r} \\ \overline{R}_{21} & \overline{R}_{22} & \cdots & \overline{R}_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{R}_{r1} & \overline{R}_{r2} & \cdots & \overline{R}_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{F}_1 \\ \overline{F}_2 \\ \vdots \\ \overline{F}_r \end{Bmatrix} \qquad \text{(2-27(b))}$$

となる。ただし，

$$[\overline{S}_{mn}] = [T][S_{mn}][T]^{\mathrm{T}} \qquad \text{(2-28(a))}$$

$$[\overline{R}_{mn}] = [T][R_{mn}][T]^{\mathrm{T}} \qquad \text{(2-28(b))}$$

である。

さて，帯板要素からなる構造物の全体剛性は，式（2－27(b)）中の$[\overline{S}_{mn}]$各々について，通常の有限要素法の全体剛性の組立てと同様な手順により組立てた行列$[\overline{S}_{gmn}]$を考えればよい。これは$[\overline{S}_{mn}]$が，通常の有限要素法の場合の要素剛性に相当するからである。$[\overline{R}_{mn}]$についても同様に$[\overline{R}_{gmn}]$を組み立てることができる。

言い換えると，

$$[\overline{S}_{gmn}] = \Sigma [\overline{S}_{mn}] \qquad (2-29(a))$$

$$[\overline{R}_{gmn}] = \Sigma [\overline{R}_{mn}] \qquad (2-29(b))$$

である。式（2－29）中のΣは，帯板要素についての総和を示す。すると，この構造物を解くための方程式は，

$$\begin{bmatrix} [\overline{S}_{g11}] & [\overline{S}_{g12}] & \cdots & [\overline{S}_{g1r}] \\ [\overline{S}_{g21}] & [\overline{S}_{g22}] & \cdots & [\overline{S}_{g2r}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [\overline{S}_{gr1}] & [\overline{S}_{gr2}] & \cdots & [\overline{S}_{grr}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{\delta}_{g1} \\ \overline{\delta}_{g2} \\ \vdots \\ \overline{\delta}_{gr} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [\overline{R}_{g11}] & [\overline{R}_{g12}] & \cdots & [\overline{R}_{g1r}] \\ [\overline{R}_{g21}] & [\overline{R}_{g22}] & \cdots & [\overline{R}_{g2r}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [\overline{R}_{gr1}] & [\overline{R}_{gr2}] & \cdots & [\overline{R}_{grr}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{F}_{g1} \\ \overline{F}_{g2} \\ \vdots \\ \overline{F}_{gr} \end{Bmatrix} \qquad (2-30(a))$$

または，

$$[\mathbf{S}_g] \{\overline{\delta}_g\} = [\mathbf{R}_g] \{\overline{F}_g\} \qquad (2-30(b))$$

となる。ただし，

$$\{\overline{\delta}_{gm}\}^T = \{\overline{u}_{1m}\ \overline{v}_{1m}\ \overline{w}_{1m}\ \overline{\Psi}_{1m}\ \overline{u}_{2m}\ \overline{v}_{2m}\ \overline{w}_{2m}\ \overline{\Psi}_{2m} \cdots \cdots \overline{u}_{Nm}\ \overline{v}_{Nm}\ \overline{w}_{Nm}\ \overline{\Psi}_{Nm}\} \qquad (2-31(a))$$

$$\{\overline{F}_{gm}\}^T = \{\overline{X}_{1m}\ \overline{Y}_{1m}\ \overline{Z}_{1m}\ \overline{M}_{1m}\ \overline{X}_{2m}\ \overline{Y}_{2m}\ \overline{Z}_{2m}\ \overline{M}_{2m} \cdots \cdots \overline{X}_{Nm}\ \overline{Y}_{Nm}\ \overline{Z}_{Nm}\ \overline{M}_{Nm}\} \qquad (2-31(b))$$

である。ここに，Nは，この構造物を構成する節線数である。

以上により，帯板要素からなる構造物を解くためには，式（2－30）から$\{\overline{\delta}_{gm}\}$を求め，これを式（2－1）等に代入して節線の変位を求めればよいことになる。式（2－30）中の$[\overline{S}_{gmn}]$は，通常の有限要素法における全体剛性行列に相当するものである。今まで説明してきたように，$[\overline{S}_{gmn}]$は，帯板要素からなる3次元構造物を図2－2の$x-z$面内の2次元構造物のように扱って求めたものである。そして，図2－2のy軸方向への有限要素分割に代え，この方向の変位を三角級数で表現したものということができる。

さて，式（2－30）において，$[\overline{S}_{gmn}]$，$[\overline{R}_{gmn}]$に注目すると，これらはいずれも，その成分として，$\int_0^\ell \sin k_m Y \cdot \sin k_n Y dY$，または$\int_0^\ell \cos k_m Y \cdot \cos k_n Y dY$ を持っている。この積分は，$m=n$のとき$\frac{\ell}{2}$に，$m \neq n$のとき0となる。したがって，式（2－30）は，

$$\begin{bmatrix} [\bar{S}g_{11}] & & & \mathbf{0} \\ & [\bar{S}g_{22}] & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & [\bar{S}g_{rr}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\delta}g_1 \\ \bar{\delta}g_2 \\ \vdots \\ \bar{\delta}g_r \end{Bmatrix} = \frac{\ell}{2} \begin{Bmatrix} \bar{F}g_1 \\ \bar{F}g_2 \\ \vdots \\ \bar{F}g_r \end{Bmatrix} \qquad (2-32)$$

となる。この式を見ると，この方程式は，三角級数の各項ごとに独立となっている。すなわち，帯板要素からなる構造物を解く場合，式（2 −30）にある大きな連立方程式を扱うのではなく，$[\bar{S}g_{mm}]\{\bar{\delta}g_m\}=\frac{\ell}{2}\{\bar{F}g_m\}$ なる方程式を r 回計算すればよいことになる。

2 − 3　中間ダイヤフラムの剛性行列（直接法）

2 − 3 − 1　変位関数

$X-Z$ 平面内にある中間ダイヤフラムを，**図 2 − 4** のような三角形要素に分割する。いま，中間ダイヤフラムが，平面応力状態にあるものとして，この三角形要素の，有限要素法における剛性行列を求める。

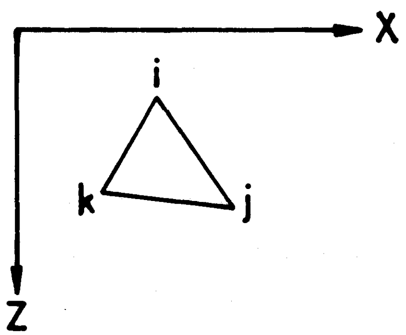


図 2—4　TYPICAL DIAPHRAGM ELEMENT

この三角形要素を構成する節点を，**図 2 − 4** に示すように，i，j，k とし，節点 i，j，k における X 方向，Z 方向の変位を，$\{\bar{\delta}_d\}=\{\bar{u}_i\bar{w}_i\bar{u}_j\bar{w}_j\bar{u}_k\bar{w}_k\}^T$ とする。これを，$Y=\ell_f$ におけるパルス関数として，Y 軸方向の三角級数に展開する。ℓ_f は，この中間ダイヤフラムの位置である。すると，

$$\{\bar{\delta}_d\}=\sum_m \begin{Bmatrix} \bar{u}_{im} \\ \bar{w}_{im} \\ \bar{u}_{jm} \\ \bar{w}_{jm} \\ \bar{u}_{km} \\ \bar{w}_{km} \end{Bmatrix} \sin k_m Y \Big|_{Y=\ell_f} = \sum_m \{\bar{\delta}_{dm}\} \sin k_m Y \Big|_{Y=\ell_f} \qquad (2-33)$$

と書ける。この三角形要素内のひずみは，一定とし，通常の有限要素法における，定ひずみ三角形要素の場合と同一の扱いをすると，ひずみとして，

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon x \\ \varepsilon z \\ \gamma xz \end{Bmatrix} = \{\varepsilon d\} = [Bd]\{\bar{\delta}d\} \qquad \text{———— (2 −34(a))}$$

が得られる。〔Bd〕は，

$$[Bd] = \frac{1}{2A}\begin{bmatrix} Zj-Zk & 0 & Zk-Zi & 0 & Zi-Zj & 0 \\ 0 & Xk-Xj & 0 & Xi-Xk & 0 & Xj-Xi \\ Xk-Xj & Zj-Zk & Xi-Xk & Zk-Zi & Xj-Xi & Zi-Zj \end{bmatrix}$$

———— (2 −34(b))

であり，Aは，この三角形要素の面積，Xi, Zi, Xj, Zj, Xk, Zk はそれぞれ，節点i，j，kのX，Z座標である。ここで，〔Bd_m〕＝〔Bd〕・$\sin k_m Y$ とすると，式（2 −34(a)）は，

$$\{\varepsilon d\} = \sum_m [Bd_m]\{\bar{\delta}d_m\}\Big|_{Y=\ell_f} \qquad \text{———— (2 −34(c))}$$

となる。

2 − 3 − 2　剛性行列

この三角形要素の全ポテンシャルエネルギーUdは，

$$Ud = \frac{1}{2}\int_V \{\varepsilon d\}^T\{\sigma d\}dV - \{\bar{\delta}d\}^T\{\bar{F}d\}$$

———— （2 −35）

である。ここに，$\{\sigma d\}$は，この要素内の応力であり，

$$\{\sigma d\} = \begin{Bmatrix} \sigma x \\ \sigma z \\ \tau xz \end{Bmatrix} = [Dd]\{\varepsilon d\} \qquad \text{———— (2 −36(a))}$$

である。ただし，Eをこの要素を構成する材料のヤング率，νをポアソン比として，

$$[Dd] = \frac{E}{1-\nu^2}\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \qquad \text{———— (2 −36(b))}$$

である。また，$\{\bar{F}d\}$は，この三角要素の各節点に作用する節点力ベクトルである。式（2 −35）に（2 −36），（2 −34）を代入し，また，三角形要素の板厚をt_dとすると，

$$
\begin{aligned}
Ud &= \sum_m \sum_n \Big[\frac{Atd}{2} \{\bar{\delta}d_m\}^{\mathrm{T}} [Bd_m]^{\mathrm{T}} [Dd] [Bd_n] \{\bar{\delta}d_n\} \\
&\qquad - \{\bar{\delta}d_m\}^{\mathrm{T}} [Rd_{mn}] \{\bar{F}d_n\} \Big] \\
&= \sum_m \sum_n \Big[\{\bar{\delta}d_m\}^{\mathrm{T}} [Sd_{mn}] \{\bar{\delta}d_n\} - \{\bar{\delta}d_m\}^{\mathrm{T}} [Rd_{mn}] \{\bar{F}d_n\} \Big] \qquad (2-37)
\end{aligned}
$$

である。ただし， $[Sd_{mn}] = \dfrac{Atd}{2} [Bd_m]^{\mathrm{T}} [Dd] [Bd_n] = \dfrac{Atd}{2} [Bd]^{\mathrm{T}} [Dd] \times [Bd] \cdot \sin k_m \ell_f \cdot \sin k_n \ell_f$ であり，$[Rd_{mn}]$ は，$\sin k_m \ell_f \cdot \sin k_n \ell_f$ を要素とする対角行列である。ここで Ud を最小とすることにより，式（2 −30）と同じ形の式

$$
\begin{bmatrix}
Sd_{11} & Sd_{12} & \cdots & Sd_{1r} \\
Sd_{21} & Sd_{22} & \cdots & Sd_{2r} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
Sd_{r1} & Sd_{r2} & \cdots & Sd_{rr}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix} \bar{\delta}d_1 \\ \bar{\delta}d_2 \\ \vdots \\ \bar{\delta}d_r \end{Bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
Rd_{11} & Rd_{12} & \cdots & Rd_{1r} \\
Rd_{21} & Rd_{22} & \cdots & Rd_{2r} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
Rd_{r1} & Rd_{r2} & \cdots & Rd_{rr}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix} \bar{F}d_1 \\ \bar{F}d_2 \\ \vdots \\ \bar{F}d_r \end{Bmatrix}
\qquad (2-38)
$$

を得る。この場合，座標系は，**図−2−2**のXYZ座標系（すなわち全体座標系）を用いているので座標変換は不要である。

2−3−3　自由度についての注意

本節で説明した，ダイヤフラムの剛性の計算では，1節点当たりの自由度は2，すなわち，節点変位や節点力は，X方向とZ方向のもののみを考えている。一方，帯板要素では2−2で説明した通り1節点当たり，X，Y，Z方向および節点回りの回転方向の，4自由度としている。そのため，式（2 −38）と（2 −30）を組み合わせる際，ダイヤフラムに関する節点の自由度を，見かけ上，帯板要素のそれと同じ4に合わせる必要がある。具体的には，式（2 −38）にある，各行列，ベクトルのi行目，j列目が，$2i-1$行目，$2j-1$列目になるようにし，座標のY，Ψに相当する行または列を0とする。このことは，言い換えると，ダイヤフラムは，Y方向，Ψ方向の剛性が0，ということになる。なお，この操作により，この構造物に，ダイヤフラムのみに関係し，帯板要素とは接していない節点があると，剛性行列の，その節点の，座標Y，Ψに関する行と列が，すべて0となり，そのままでは連立方程式が解けない。この場合には，このような節点に対しては，上述の操作をしないでおくか，または，すべてが0となるような行と列に対して，通常の有限要素法における境界条件の処理と同様な操作を行えばよい。

2－3－4　直接法の得失

中間ダイヤフラムを含む箱桁を，ここで示した直接法により解く場合，式（2－30）と（2－38）を組み合わせればよい。さて，2－2－5で説明した通り，有限帯板法では，得られた連立方程式は，三角級数の各項ごとに独立となるため，大次元連立方程式を解くことに代え，比較的小次元の連立方程式を何回か解けばよい。このことは，有限帯板法の大きな利点の一つである。さて，式（2－38）をみると，この式中の〔S_{dmn}〕，〔R_{dmn}〕は，いずれも，$\sin k_m \ell_f \cdot \sin k_n \ell_f$ を含んではいるが，これは，帯板要素の場合と異なり，$m \neq n$ においても0とはならない。これは中間ダイヤフラムの存在が，2－1で述べた有限帯板法における仮定のうち，b）（構造物は，橋軸方向には，材料的にも幾何学的にも一定）に反するためである。このことにより，有限帯板法により中間ダイヤフラムを含む箱桁を解く場合，直接法においては，連立方程式の，三角級数の各項ごとの独立性が失われ、大次元連立方程式を解く必要が生じる。言い換えると，直接法では，有限帯板法の利点の一つを犠牲にすることにより，中間ダイヤフラムを考慮することを可能にした，といえる。有限帯板法の，この利点をできるだけ損なわないまま，中間ダイヤフラムを扱えるようにした方法が，2－4で述べる間接法である。

さて，いま，有限帯板法で，弾塑性問題を扱うことを考えてみる。通常の有限要素法では，ある要素が弾性状態から塑性状態になることを考える場合，通常，その要素内の各部分が同時に，弾性から塑性になるものとする。しかし，有限帯板法では，帯板要素は橋軸に沿って，橋の起点から終点にまでわたっているため，ある帯板要素内の各部分が同時に弾性状態から塑性状態になることはまれである。すなわち，有限帯板法により弾塑性問題を扱う際には，橋軸方向に，材料特性が一定でない場合を考えなければならない。このような場合は，中間ダイヤフラムを直接法により扱う場合と同じく，帯板要素の剛性行列式（2－30）は，三角級数の各項ごとには独立ではなくなる。

また，中間ダイヤフラムを含む箱桁について，振動のような固有値問題を扱う場合などは，箱桁と中間ダイヤフラムを一体として考える必要が生じることがあろう（後述の間接法では，箱桁は，不静定力をうける，中間ダイヤフラムを含まない構造として扱われている）。

したがって，直接法は，単に，中間ダイヤフラムを有する箱桁を解く場合には，有限帯板法の特長を活かすことができないという欠点があるが，弾塑性問題や固有値問題などと組み合わせた問題に対しては，直接法が有用であろう。

2－4　中間ダイヤフラムを含む箱桁の解析（間接法）

2－4－1　概　　説

本章でいう間接法とは，中間ダイヤフラムを有する箱桁を，桁とダイヤフラムの間の不静定力に等

しい外力をうける，ダイヤフラムを有しない桁として扱うものであり，その解析の手順は，不静定構造物を解く場合と全く同じである。この解析法については，文献40)，41)などで述べられている。また，この解析法は，ダイヤフラムからの不静定力に代えて，中間支点からの不静定力（すなわち支点反力）を考えることにより，容易に連続箱桁の解析に拡張して適用することができる。以下，間接法による計算手順を説明する。ただし，以下の説明では，座標は図２－２の全体座標系を用いるものとする。

2－4－2　不静定力の誘導

まず，解析の対象となる系から，中間ダイヤフラム・中間支点をすべて取り去った系を考える。この系を，基本系とする。すると，基本系は，有限帯板法で，そのまま計算することができる。この基本系に，与えられた荷重が作用した場合の，不静定力の作用位置における，基本系の変位を，有限帯板法で計算する。この変位を $\{\delta_0\}$ とする。ただし，$\{\delta_0\}^T=\{\{\delta_{01}\}^T\{\delta_{02}\}^T\cdots\cdots\{\delta_{0i}\}^T\cdots\cdots\}$，$\{\delta_{0i}\}^T=\{u_{1i}^0\ w_{1i}^0\ u_{2i}^0\ w_{2i}^0\ \cdots\cdots u_{ni}^0\ w_{ni}^0\ \cdots\cdots\}$ であって，u_{ni}^0，w_{ni}^0 は，それぞれ，i 番目の中間ダイヤフラム（または支点）のある箱桁断面における n 番目の節線の，X 方向，Z 方向の変位である。

一方，この箱桁に作用している不静定力を $\{X_1\}$ とする。ただし，$\{X_1\}^T=\{\{X_{11}\}^T\{X_{12}\}^T\cdots\cdots\cdots\{X_{1i}\}^T\cdots\cdots\}$，$\{X_{1i}\}^T=\{X_{1i}^1\ Z_{1i}^1\ X_{2i}^1\ Z_{2i}^1\ \cdots\cdots X_{ni}^1\ Z_{ni}^1\ \cdots\cdots\}$ であって，X_{ni}^1，Z_{ni}^1 は，それぞれ，i 番目の中間ダイヤフラム（または中間支点）のある箱桁の断面における，n 番目の節線の X 方向，Z 方向の不静定力である。また，この不静定力が基本系に作用した場合の，中間ダイヤフラム（または中間支点）と桁の結合点の変位を $\{\delta_1\}$ とする。

ただし，

$$\{\delta_1\}^T = \{\{\delta_{11}\}^T\{\delta_{12}\}^T\cdots\cdots\{\delta_{1i}\}^T\cdots\cdots\},$$
$$\{\delta_{1i}\}^T = \{u_{1i}^1\ w_{1i}^1\ u_{2i}^1\ w_{2i}^1\ \cdots\cdots u_{ni}^1\ w_{ni}^1\ \cdots\cdots\}$$

である。添字の意味は，不静定力のそれと同じである。これと，基本系のたわみ性行列を〔F〕とすると，

$$\{\delta_1\} = [F]\ \{X_1\} \qquad \text{———————————} (2-39)$$

を得る。式（2－39）の詳細は，付録 B－1に示す。また，中間ダイヤフラムの剛性行列を〔K〕，中間ダイヤフラムに作用する力を $\{X_2\}$，中間ダイヤフラムに，力 $\{X_2\}$ が作用した場合の，ダイヤフラムと箱桁の結合点における変位を $\{\delta_2\}$ とすると，

$$\{X_2\} = [K]\ \{\delta_2\} \qquad \text{———————————} (2-40)$$

である。ただし，$\{X_2\}$，$\{\delta_2\}$，〔K〕は，いずれも，すべての中間ダイヤフラムについて考える。

さて，中間ダイヤフラムの場合，適合条件から，

$$\{\delta_0\} + \{\delta_1\} = \{\delta_2\} \qquad \text{――――――}(2-41(a))$$

$$\{X_1\} + \{X_2\} = 0 \qquad \text{――――――}(2-41(b))$$

これらの式と，式（2 −39），（2 −40）から，不静定力$\{X_1\}$は，

$$\{X_1\} = -(\,[I] + [K]\,[F]\,)^{-1}\,[K]\,\{\delta_0\} \qquad \text{――――――}(2-42)$$

となる。〔I〕は単位行列である。

次に中間ダイヤフラムが，中間支点と同じ断面にある場合（すなわち，中間支点上ダイヤフラムの場合）は，式（2 −39），（2 −40），（2 −41）を直接支持されている節線（節点）に関する部分と，そうでない部分に分けて考える。すなわち，

$$\{\delta_0\} = \begin{Bmatrix} \bar{\delta}_0 \\ \bar{\bar{\delta}}_0 \end{Bmatrix} \qquad \{\delta_1\} = \begin{Bmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\bar{\delta}}_1 \end{Bmatrix} \qquad \{X_1\} = \begin{Bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{\bar{X}}_1 \end{Bmatrix}$$

などである。ここで，上線一本の部分は，支点とは接していない節線に関するもの，上線二本の部分が，支点と接している節線に関するものである。すると，式（2 −39），（2 −40），（2 −41(a)）は，

$$\begin{Bmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\bar{\delta}}_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{\bar{X}}_1 \end{Bmatrix} \qquad \text{――――――}(2-43(a))$$

$$\begin{Bmatrix} \bar{X}_2 \\ \bar{\bar{X}}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\delta}_2 \\ \bar{\bar{\delta}}_2 \end{Bmatrix} \qquad \text{――――――}(2-43(b))$$

$$\begin{Bmatrix} \bar{\delta}_0 \\ \bar{\bar{\delta}}_0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\bar{\delta}}_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{\delta}_2 \\ \bar{\bar{\delta}}_2 \end{Bmatrix} \qquad \text{――――――}(2-43(c))$$

となる。ここで，支持されている節点の変位が0，すなわち，$\{\bar{\bar{\delta}}_2\} = 0$ より，式（2 −43(b)），（2 −43(c)）はそれぞれ，

$$\begin{Bmatrix} \bar{X}_2 \\ \bar{\bar{X}}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\delta}_2 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{21} \end{bmatrix} \{\bar{\delta}_2\} \qquad \text{――――――}(2-43(d))$$

$$\begin{Bmatrix} \bar{\delta}_0 \\ \bar{\bar{\delta}}_0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\bar{\delta}}_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{\delta}_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad \text{――――――}(2-43(e))$$

である。式（2 −43(a)）より$\{\bar{\delta}_1\} = [F_{11}\ F_{12}]\ \{X_1\}$であり，式（2 −43(e)）より$\{\bar{\delta}_0\} + \{\bar{\delta}_1\} = \{\bar{\delta}_2\}$であるから，式（2 −42）を求めるのと同様にして，

$$\{X_1\} = -\left(\,[I] + \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{21} \end{bmatrix} [F_{11}\ F_{12}]\,\right)^{-1} \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{12} \end{bmatrix} \{\bar{\delta}_0\} \qquad \text{――――――}(2-44)$$

を得る。

なお，現実の構造物としては考えられないものであるが，中間支点のみがあり，その上にダイヤフラムがない場合は，式（2 −43(a)）で $\{\bar{X}_1\}=0$ とおき，次のようになる。すなわち，$\{\bar{\bar{\delta}}_1\}=[F_{22}]\times\{\bar{\bar{X}}_2\}$ であり，また，式（2 −43(e)）より $\{\bar{\bar{\delta}}_0\}+\{\bar{\bar{\delta}}_1\}=0$ であるから，

$$\{\bar{\bar{X}}_1\}=-[F_{22}]^{-1}\{\bar{\bar{\delta}}_0\} \qquad (2-45)$$

である。

これらの式のうち，〔I〕は単位行列 $\begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{21} \end{bmatrix}$ は，ダイヤフラムの剛性行列のうち，支持されていない節点に関する列のみを取り出したもの，〔F_{11} F_{12}〕は，たわみ性行列のうち，支持されていない節線に関する行のみを取り出したものであり，〔F_{22}〕は，たわみ性行列のうち，支持されている節線に関する行と列からなるものである。

間接法においても，直接法の場合と同じく，ダイヤフラムの節点の自由度は，X方向，Z方向の2としている。したがって，箱桁とダイヤフラムの間の不静定力も，X方向，およびZ方向のみを考えている。また，中間支点においても，その取り扱いをダイヤフラムと合わせるため，X方向，Z方向の2自由度としている。したがって，式（2 −39）～（2 −45）中の，箱桁基本系のたわみ性行列は，X方向，およびZ方向のみを考えればよい。

2 − 5　曲線桁への拡張

2 − 5 − 1　概　説

今までの説明は，すべて，桁が直線の場合に関するものであった。2 − 5では桁が曲線である場合について，Cheung の文献37)，38) をもとに説明する。

曲線桁の場合は，桁を構成する帯板要素を，フランジに相当する扇形帯板要素と，腹板に相当する円錐帯板要素に分けて考える。座標は，直線桁の場合は直交座標系を用いたが，曲線桁の場合，円筒座標系を用いる。これらについては，図2 − 5に示す。

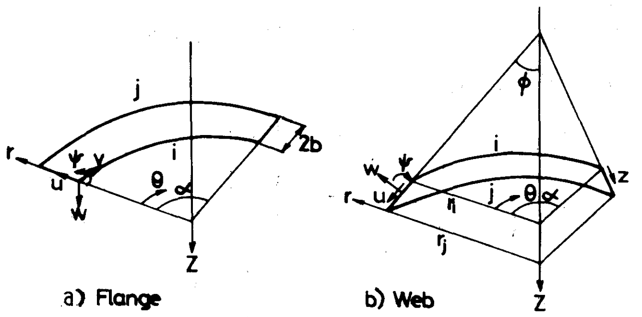


図2 —5　TYPICAL CURVED STRIPS

直線桁では，帯板要素の節線変位は，Y軸方向の三角級数に展開したが，曲線桁の場合，この三角級数は，図2 − 5の θ 方向に展開する。これに伴い，直線桁で，橋軸方向にとっていた量（桁長，中間ダイヤフラムの位置など）は，中心角で表現する。

以下，曲線桁の場合の帯板要素の剛性行列を，２－２に準じて求める。

２－５－２　扇形帯板要素の剛性行列

２－５－１で説明した通り，曲線桁では，節線変位は，θ 方向の三角級数に展開される。すなわち，節線 i，j における変位は，式（２－１），（２－２）中の$\sin k_m y$, $\cos k_m y$ を, $\sin k_m\theta$, $\cos k_m\theta$ としたものにすればよい。ただし，この場合，$k_m = m\pi/\alpha$ であり，α は帯板要素の中心角である。そして，２－２における座標 x が，この場合の半径方向（r 方向）に相当することに気をつけると，この扇形帯板要素内の，点（r，θ）における変位は，次のようになる。

$$u = \sum_m \left\{ \left(1-\frac{R}{2}\right) u_{im} + \frac{R}{2} u_{jm} \right\} \sin k_m\theta \qquad \text{(2-46(a))}$$

$$v = \sum_m \left\{ \left(1-\frac{R}{2}\right) v_{im} + \frac{R}{2} v_{jm} \right\} \cos k_m\theta \qquad \text{(2-46(b))}$$

$$w = \sum_m \left\{ \left(1-\frac{3}{4}R^2+\frac{1}{4}R^3\right) w_{im} + \mathrm{b}\left(R-R^2+\frac{R^3}{4}\right) \Psi_{im} \right.$$

$$\left. + \left(\frac{3}{4}R^2-\frac{1}{4}R^3\right) w_{jm} + \mathrm{b}\left(\frac{R^3}{4}-\frac{R^2}{2}\right) \Psi_{jm} \right\} \sin k_m\theta \qquad \text{(2-46(c))}$$

$$\Psi = \frac{\partial w}{\partial r} \qquad \text{(2-46(d))}$$

ここで，$R = \dfrac{r - r_i}{\mathrm{b}}$ ，$b = \dfrac{r_j - r_i}{2}$ である。また，内側節線を i，外側節線を j とし，内側節線，外側節線の曲率半径を，各々，r_i，r_j とする。$u_{im}, v_{im}, w_{im} \Psi_{im}$ は第 i 節線の，$u_{jm}, v_{jm}, w_{jm}, \Psi_{jm}$ は第 j 節線の，三角級数の第 m 項に対する変位の係数である。

さて，帯板要素の面内のひずみは，

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial u}{\partial r} \\ \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial v}{\partial \theta} + \dfrac{u}{r} \\ \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u}{\partial \theta} + \dfrac{\partial v}{\partial r} - \dfrac{v}{r} \end{Bmatrix} \qquad \text{(2-47)}$$

であるから，これに，式（２－46）を代入して，

$$\{\varepsilon\} = \sum_m [P_m] \{\delta p_m\} \qquad \text{(2-48)}$$

を得る。ただし，$\{\delta p_m\}^{\mathrm{T}} = \{u_{im}\ \ v_{im}\ \ u_{jm}\ \ v_{jm}\}$ である。〔P_m〕の内容は，付録 A－５に示す。

ここで，座標系が円筒座標であることに注意すれば，２－２と全く同様にして，三角級数の第m項における，扇形帯板要素の剛性行列

$$〔K_{fp}〕_m = t\int_{r_i}^{r_j}\int_0^{\alpha}〔P_m〕^T〔Dp〕〔P_m〕r d\theta dr = t\cdot\frac{\alpha}{2}\int_{r_i}^{r_j}〔C_{pm}〕r dr \qquad (2-49)$$

を求めることができる。tは，この要素の板厚であり，〔D_p〕は式（２－７）のものと同じである。〔C_{pm}〕の内容については，付録A－６に示す。

一方，面外剛性については，式（２－14(b)）に相当する曲率ベクトルが

$$\{\chi\} = \begin{Bmatrix} \chi_r \\ \chi_\theta \\ \chi_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\dfrac{\partial^2 w}{\partial r^2} \\ -\dfrac{1}{r}\left(\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial^2 w}{\partial\theta^2} + \dfrac{\partial w}{\partial r}\right) \\ -\dfrac{2}{r}\left(\dfrac{\partial^2 w}{\partial r\partial\theta} - \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial w}{\partial\theta}\right) \end{Bmatrix} \qquad (2-50)$$

であるから，これに式（２－46）を代入すると

$$\{\chi\} = \sum_m〔B_m〕\{\delta_{bm}\} \qquad (2-51)$$

である。$\{\delta_{bm}\}^T = \{w_{im}\ \Psi_{im}\ w_{jm}\ \Psi_{jm}\}$である。また，〔$B_m$〕の内容は，付録$A$－７に示す。したがって，三角級数の第$m$項の，面外剛性行列は，

$$〔Kfb〕_m = \int_{r_i}^{r_j}\int_0^{\alpha}〔B_m〕^T〔Db〕〔B_m〕r d\theta dr = \frac{\alpha}{2}\int_{r_i}^{r_j}〔C_{bm}〕r dr \qquad (2-52)$$

となる。〔Db〕は式（２－14(c)）と同じものである。〔C_{bm}〕の内容は，付録A－８に示す。

扇形帯板要素の剛性は，式（２－49）と（２－52）を組み合わせることにより得られる。直線桁の場合と異なり，扇形帯板要素では，得られた剛性行列に対し，座標変換をする必要はない。しかし，前に説明したように，節線iは曲率の内側，節線jは外側でなければならない。すなわち，構造物を帯板要素に分割する際の，節線の番号づけに，制約があるので注意する必要がある。

2－5－3　円錐帯板要素の剛性行列

図2－5に示したような要素内の，座標（z，θ）における変位は，式（2－3）や（2－46）の場合と同様に，

$$u = \sum_m \left\{ \left(1-\frac{z}{d}\right) u_{im} + \frac{z}{d} u_{jm} \right\} \sin k_m\theta \quad \text{――――――}(2-53(a))$$

$$v = \sum_m \left\{ \left(1-\frac{z}{d}\right) v_{im} + \frac{z}{d} v_{jm} \right\} \cos k_m\theta \quad \text{――――――}(2-53(b))$$

$$w = \sum_m \left\{ \left(1-\frac{3z^2}{d^2}+\frac{2z^3}{d^3}\right) w_{im} + \left(z-\frac{2z^2}{d}+\frac{z^3}{d^2}\right) \Psi_{im} + \left(\frac{3z^2}{d^2}-\frac{2z^3}{d^3}\right) w_{jm} + \left(\frac{z^3}{d^2}-\frac{z^2}{d}\right) \Psi_{jm} \right\} \sin k_m\theta \text{－}(2-53(c))$$

$$\Psi = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{――――――}(2-53(d))$$

と表わすことができる。ここに，dは帯板要素の幅，u_{im}，v_{im}，Ψ_{im}は，それぞれ第i節線における，u_{jm}，v_{jm}，w_{jm}，Ψ_{jm}は，それぞれ第j節線における，変位の，三角級数の第m項の係数である。また，円錐帯板要素の，ひずみ・曲率ベクトルは，

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{z\theta} \\ \chi_z \\ \chi_\theta \\ \chi_{z\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial u}{\partial z} \\[2ex] \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial v}{\partial \theta} + \dfrac{w\cos\phi + u\sin\phi}{r} \\[2ex] \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u}{\partial \theta} + \dfrac{\partial z}{\partial z} - \dfrac{v\sin\phi}{r} \\[2ex] -\dfrac{\partial^2 w}{\partial z^2} \\[2ex] -\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \dfrac{\cos\phi}{r^2}\dfrac{\partial v}{\partial \theta} - \dfrac{\sin\phi}{r}\dfrac{\partial w}{\partial z} \\[2ex] 2\left(-\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial^2 w}{\partial z\partial \theta} + \dfrac{\sin\phi}{r^2}\dfrac{\partial w}{\partial \theta} + \dfrac{\cos\phi}{r}\dfrac{\partial v}{\partial z} - \dfrac{\sin\phi\cos\phi}{r^2}v\right) \end{Bmatrix}$$

――――――（2－54）

である[37]。これに式（2－53）を代入すると，

$$\{\,\varepsilon\,\} = \sum_m \left[\, T_m \,\right] \{\, \delta_m \}$$ ――――――――――（2－55）

を得る。ここに，$\{\delta_m\}^T = \{\, u_{im} \;\; v_{im} \;\; w_{im} \;\; \Psi_{im} \;\; u_{jm} \;\; v_{jm} \;\; w_{jm} \;\; \Psi_{jm} \,\}$ である。また，$[T_m]$ の内容は，付録A－9に示す。一方，この場合の材料特性行列［Dw］は，

$$[Dw] = \begin{bmatrix} t\cdot[Dp] & 0 \\ 0 & [Db] \end{bmatrix}$$ ――――――――――（2－56）

である。［Dp］，［Db］は，それぞれ式（2－7），（2－14(a)）にあるものと，同じものである。円錐帯板要素では，式（2－54）でもわかるように，面内変形と面外変形は，独立してはいないので，剛性も，面内，面外に対して，同時に求めなければならない。以下，今までのものと同様な手順により，円錐帯板要素の，三角級数の第m項に対する剛性行列［Kw］$_m$ が求まる。すなわち，

$$[Kw]_m = \int_0^d \int_0^\alpha [T_m]^T [D_m] [T_m] \, r d\theta dz$$

$$= \frac{\alpha}{2} \int_0^d [Cw_m] \, rdz$$ ――――――――――（2－57）

である。［Cw_m］の内容は，付録A－10に示す。

さて，式（2－57）で求めた剛性は，**図2－5**に示したような局所座標系で求めたものである。これを全体座標系に変換するための変換行列は，**図2－6**を参照して，

$$\{\,\delta_m\,\} = [R]\{\,\bar{\delta}_m\,\}$$ ――――（2－58）

ただし，$\{\bar{\delta}_m\}$は，全体座標系における変位である。また，$[R]$は，

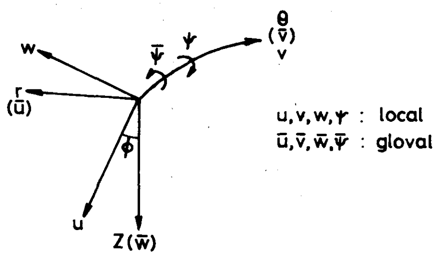


図2－6　LOCAL AND GLOVAL COORDINATE OF WEB STRIPS

$$[R] = \begin{bmatrix} [r] & 0 \\ 0 & [r] \end{bmatrix} \quad ; \quad [r] = \begin{bmatrix} \sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cos\phi & 0 & \sin\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

である。

よって，円錐帯板要素の，三角級数の第m項における，全体座標系での剛性行列$[\bar{K}w]_m$は，

$$[\overline{K}w] = [R]^{T}[Kw]_{m}[R] \qquad (2-59)$$

である。

2－5－4　ダイヤフラムとの関係

曲線桁に対して，中間ダイヤフラム，あるいは中間支点を考える場合の手順は，直線の場合とほとんど同じである。

まず，直接法の場合，中間ダイヤフラムを，図2－5の，座標rとzにより処理すればよい。この場合，2－3にある各式の，橋軸方向の量（Y，ℓ，ℓfなど）が，すべて中心角により表されるほかは，2－3と同様な手順により，剛性行列が求まる。間接法の場合も，同じく付録B－1中で，ℓfiなどが中心角により表されることを除けば，不静定力を求める式は，2－4中にあるものと全く同じである。

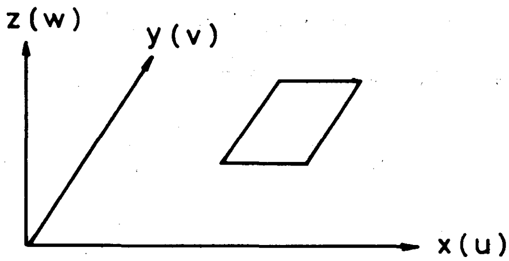


図2―7　COORDINATE SYSTEM OF PLATE BENDING

2－6　ダイヤフラムの座屈解析

薄板が，面内変形と面外変形を同時にうけているとする。いま，この板が，図2－7の$x-y$平面内にあるとすると，ひずみ－変位の関係式は，

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \qquad (2-60(a))$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} - z\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \qquad (2-60(b))$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - 2z\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y} \qquad (2-60(c))$$

である。式（2－60）のようなひずみをうける要素のひずみエネルギーUeは，

$$Ue = \frac{1}{2}\int_V (\overset{0}{\sigma}_x\varepsilon_x + \overset{0}{\sigma}_y\varepsilon_y + \overset{0}{\tau}_{xy}\gamma_{xy})\,dV \qquad (2-61)$$

である。ただし，$\overset{0}{\sigma}_x$，$\overset{0}{\sigma}_y$，$\overset{0}{\tau}_{xy}$は，式（2－60）のひずみに伴う応力で，$\overset{0}{\sigma}_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)$，$\overset{0}{\sigma}_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x)$，$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{xy}$，$E$はヤング率，$\nu$はポアソン比である。式（2－61）に（2－60）を代入し，4次の微小項を無視すると，Ueは，

$$U_e=\frac{1}{2}\ \frac{Et}{1-\nu^2}\int_A\left\{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+2\nu\frac{\partial u}{\partial x}\ \frac{\partial v}{\partial y}+\frac{1-\nu}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2\right\}dA$$

$$+\frac{D}{2}\int_A\left\{\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+2\nu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\ \frac{\partial w^2}{\partial y^2}+2\,(1-\nu)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right)^2\right\}dA$$

$$+\frac{1}{2}\ \frac{Et}{1-\nu^2}\int_A\left\{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\nu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\left(\frac{\partial v}{\partial y}+\nu\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right.$$

$$\left.+\frac{1-\nu}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\frac{\partial w}{\partial x}\ \frac{\partial w}{\partial y}\right\}dA \qquad \text{———}(2-62)$$

となる。ただし，tは，この要素の板厚，$D=\dfrac{Et}{12\,(1-\nu^2)}$ である。式（2－62）の第1項は，面内ひずみのみが生じる場合（すなわち，座屈が発生する以前）のひずみエネルギーであり，この板の面内に関する挙動は独立に扱うとすると，この項は省略されることになる。一方，この板要素の，面内応力（座屈前の応力）をσ_x，σ_y，τ_{xy}とすると，式（2－62）の第3項は，

$\dfrac{t}{2}\displaystyle\int_A\left\{\sigma_x\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\sigma_y\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\tau_{xy}\frac{\partial w}{\partial x}\ \frac{\partial w}{\partial y}\right\}dA$ である。すると，式（2－62）は，

$$U_e=\frac{D}{2}\int_A\left\{\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+2\nu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+2\,(1-\nu)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right)^2\right\}dA$$

$$+\frac{t}{2}\int_A\left\{\sigma_x\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\sigma_y\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+2\tau_{xy}\frac{\partial w}{\partial x}\ \frac{\partial w}{\partial y}\right\}dA$$

$$\text{———}(2-63)$$

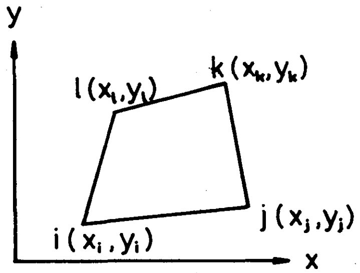


図2—8　QUADRILATERAL ELEMENT

となる。ここで，**図2－8**のような四角形要素のたわみ$W=W(x,\ y)$を

$$W=\alpha_1x^3+\alpha_2x^2+\alpha_3x+\alpha_4y^3+\alpha_5y^2+\alpha_6y$$
$$+\alpha_7x^3y+\alpha_8x^2y+\alpha_9xy+\alpha_{10}xy^3+\alpha_{11}xy^2+\alpha_{12}$$

$$=\{\,x^3\ \ x^2\ \ x\ \ y^3\ \ y^2\ \ y\ \ x^3y\ \ x^2y\ \ xy\ \ xy^3\ \ xy^2\ \ 1\,\}\begin{Bmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\\ \vdots\\ \alpha_{12}\end{Bmatrix}$$

$$=\{B\}^T\{\alpha\} \qquad \text{———}(2-64)$$

とおくと，節点変位$\{\delta_S\}$は，

$$\{\delta_S\}=[Bf]\{\alpha\} \qquad \text{———}(2-65)$$

と表すことができる。ここに，

$$\{\delta_S\}^T=\{W_i \ \ \theta_{xi} \ \ \theta_{yi} \ \ W_j \ \ \theta_{xj} \ \ \theta_{yj} \ \ W_k \ \ \theta_{xk} \ \ \theta_{yk} \ \ W_\ell \ \ \theta_{x\ell} \ \ \theta_{y\ell}\}$$

である。W_i は節点 i のたわみ，θ_{xi} は節点 i の x 軸回りの回転，すなわち，$\left.\frac{\partial w}{\partial y}\right|_{x=x_i,\ y=y_i}$ である。他の記号も同様である。〔 Bf 〕の内容は，付録A－11に示す。すると，Wは，

$$W=\{B\}^T\cdot[Bf^{-1}]\cdot\{\delta_S\}=\{N\}^T\{\delta_S\} \qquad (2-66)$$

となる。これを式（2 −63）に代入し，文献73），128）と同じ表現をすると，

$$U_e=\frac{\{\delta_S\}^T}{2}[Kb]\{\delta_S\}+\frac{\{\delta_S\}^T}{2}[K_{gx}]\{\delta_S\}$$

$$+\frac{\{\delta_S\}^T}{2}[K_{gx}]\{\delta_S\}+\frac{\{\delta_S\}^T}{2}[K_{gxy}]\{\delta_S\}$$

$$=\frac{\{\delta_S\}^T}{2}[K_{gy}]\{\delta_S\}+\frac{\{\delta_S\}^T}{2}[K_G]\{\delta_S\} \qquad (2-67)$$

となる。〔 Kb 〕は，通常の，板の曲げに対する剛性行列であり，

$$[Kb]=\int_A [Bf^{-1}]^T[Sf]^T[Db][Sf][Bf^{-1}]\,dA \qquad (2-68(a))$$

である。〔 Sf 〕は，

$$\{\chi\}=\begin{Bmatrix} -\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\[2ex] -\dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\[2ex] 2\dfrac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\end{Bmatrix}=[Sf]\{\alpha\}=[Sf][Bf^{-1}]\{\delta_S\} \qquad (2-68(b))$$

より得られる行列であり，その内容は，付録A－12に示す。

一方，〔 Kgx 〕，〔 Kgy 〕，〔$Kgxy$〕は，

$$[Kgx]=\int_A(\sigma_x t)\{N_x\}\{N_x\}^T dA \qquad (2-69(a))$$

$$[Kgy]=\int_A(\sigma_y t)\{N_y\}\{N_y\}^T dA \qquad (2-69(b))$$

$$[Kgxy]=\int_A\{(\tau_{xy}t)(\{N_x\}\{N_y\}^T+\{N_x\}\{N_y\}^T)\}dA \qquad (2-69(c))$$

と表すことができる。ここに，$\frac{\partial w}{\partial x}=\{N_x\}^T\{\delta_S\}=\{B_x\}^T[Bf^{-1}]\{\delta_S\}$，$\frac{\partial w}{\partial y}=\{N_y\}^T\times$

$\{\delta_s\}^{\mathrm{T}}=\{By\}\,[Bf^{-1}]\,\{\delta_s\}$である。

すると，式（2－69）は，

$$[C_{Nx}]=\{Bx\}\{Bx\}^{\mathrm{T}},$$

$$[C_{Ny}]=\{By\}\{By\}^{\mathrm{T}},$$

$$[C_{Nxy}]=\{Bx\}\{By\}^{\mathrm{T}}+\{Bx\}\{By\}^{\mathrm{T}}$$

とおいて，

$$[Kgx]=\int_A(\sigma_x t)\,[Bf^{-1}]^{\mathrm{T}}\,[C_{Nx}]\,[Bf^{-1}]\,dA \qquad (2-70(a))$$

$$[Kgy]=\int_A(\sigma_y t)\,[Bf^{-1}]^{\mathrm{T}}\,[C_{Ny}]\,[Bf^{-1}]\,dA \qquad (2-70(b))$$

$$[Kgxy]=\int_A(\tau_{xy} t)\,[Bf^{-1}]^{\mathrm{T}}\,[C_{Nxy}]\,[Bf^{-1}]\,dA \qquad (2-70(c))$$

となる。$[C_{Nx}]$，$[C_{Ny}]$，$[C_{Nxy}]$は付録A－13に示す。式（2－70）により得られた$[K_G]=[Kgx]+[Kgy]+[Kgxy]$が，この板要素の初期応力行列である。これにより，

$$[Kb]\{\delta_s\}-\lambda[K_G]\{\delta_s\}=0 \qquad (2-71)$$

なる固有値問題を解けば，座屈応力，変形モードを求めることができる。

さて，上で説明してきたことは，板の座屈解析についてのものである。本論文では，ダイヤフラムを，圧縮をうける板，と考えることにより，上述の式を用いることにする。そのための手順は，おおよそ次の通りである。

① 2－5までの手順により，ダイヤフラムを有する箱桁を，弾性範囲内で計算する。この計算により，ダイヤフラムの，弾性範囲での応力分布が得られる。

② ダイヤフラムのみを取り出し，圧縮をうける板として，座屈解析を行う。このとき，式（2－70）におけるσ_x，σ_y，τ_{xy}，すなわち，ダイヤフラムの各要素の初期応力は，①で求めたダイヤフラムの応力を用いる。

なお，以後の計算では，ダイヤフラムの要素分割にあたっては，箱桁も含めた全体解析（弾性解析）では三角形平面応力要素を用い，座屈解析では，四角形要素を用いている。これは，平面応力状態では，三角形要素によっても，比較的よい精度で解析でき，また，応力集中点などに対して，分割を細かくすることが容易であること，一方，座屈解析のように面外変形を考える場合は，四角形要素が有利であること，のためである。

具体的には，三角形要素による分割から得られた応力を，その位置の四角形要素の初期応力としている。ひとつの四角形要素に対し，対応する三角形要素が複数ある場合には，これらの三角形要素の応力を平均し，これを四角形要素の初期応力とした。

3.　支点上ダイヤフラムの挙動に関する実験の概要

3－1　概　　説

本研究における実験は，表3－1に示す7体の模型について行なわれた。これらのうち，モデルGⅡ2，GⅡ3，GⅡ4の3体，およびAⅠ，AⅡの2体，計5体は，中間支点上ダイヤフラムに，モデルBⅠ，BⅡの2体は，端支点上ダイヤフラムに注目したものである。また，GⅡ2，GⅡ3，GⅡ4は，桁の弾性挙動に，AⅠ，AⅡ，BⅠ，BⅡは，主として桁の耐荷力と崩壊形式に注目して行なわれた。これらの各場合別の実験の詳細は，関係する章で説明するので，本章では，全ての実験に共通な載荷装置，支持装置等について説明する。

なお，以後，モデルGⅡ2，GⅡ3，GⅡ4に関する実験をGシリーズ，モデルAⅠ，AⅡに関する実験をAシリーズ，モデルBⅠ，BⅡに関する実験をBシリーズとよぶことにする。

3－2　支持装置・載荷装置　（Aシリーズ，Gシリーズ）

Gシリーズ，およびAシリーズの模型は，いずれも，桁長 $l=10m$，桁高 h は最大 150 cm（Gシリーズ），または 144 cm（Aシリーズ）で，いずれも，約4％の勾配を持つ変断面桁である。いずれの桁も，両端に端支点上ダイヤフラム，桁の中央部に中間支点上ダイヤフラムを有している。これらの桁は，図3－1に示すように，連続桁の中間支点付近に注目し，曲げモーメントがゼロとなる点の内側の区間のみを取り出して，単純桁として実験を行うものである。載荷の際は桁は上下逆に設置し，中間支点における反力を荷重として作用させている。

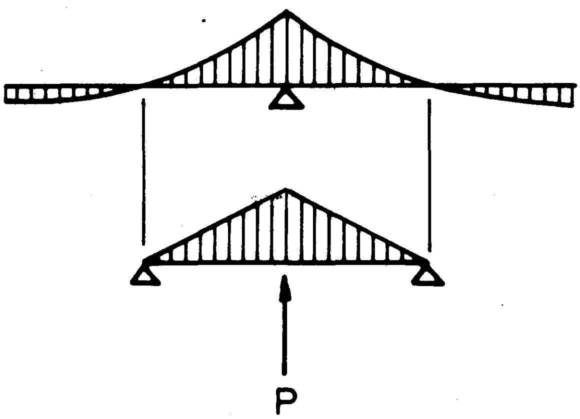


図3－1　SIMULATION OF SIMPLE BEAM

この実験は，名古屋大学工学部土木工学科構造実験室において行われた。この実験室は，テストベッドのアンカー用穴間隔が最大8 m であるため，桁長10 m の

Gシリーズ，およびAシリーズの供試体設置には，図3－2に示すような補助支持装置を用いた。この支持装置は，図3－2に示すように，アンカーボルトでテストベッドに固定し，供試体はその上に設置している。また，Gシリーズの実験では，スパン中央断面でずり荷重を作用させるので，図3－3に示すような門型の支持枠により，負反力をうけるようにした。桁端では，いずれも，ローラーにより供試体を支持している。これにより，ずり荷重による断面の反りなどの，橋軸方向の移動に対して拘束を少なくした。また，供試体や支持装置の初期不整により，ローラーとソールプレートの間にスキ間が開くことが考えられるため，厚さの異なるフィラープレートを何枚か用意し，これをローラーとソールプレートの間にはさみ込むことにより，空間を埋めた。

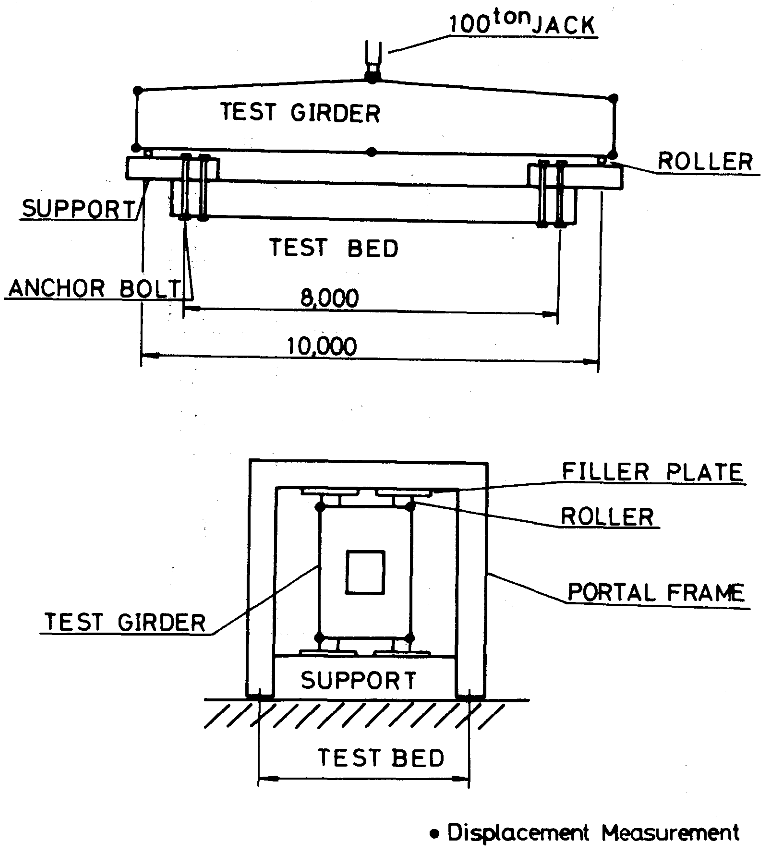


図3—2 TEST SETUP

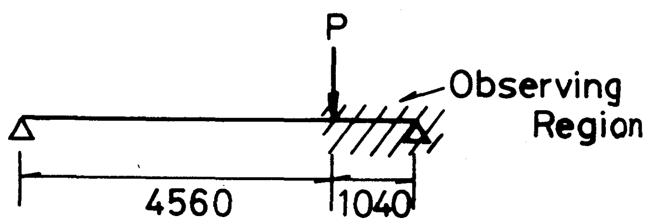


図3—3 LOADING ON B SERIES MODELS

3—3 支持装置・載荷装置（Bシリーズ）

Bシリーズの模型は，長さ5.6 mの長方形等断面桁である。この模型は，端支点に注目したもので

あるので，荷重は，注目する端支点に寄った断面に作用させ，曲げモーメントに比べ，せん断が卓越するようにした（図3－3）。また，Bシリーズにおいても，支点はローラーを用いている。

表3－1 TEST MODELS

中間支点	弾性	GII 1 GII 2 GII 3
	破壊	AI AII
端支点		BI BII

4. 曲線箱桁の支点反力分配

4－1 まえがき

連続曲線箱桁の中間支点上ダイヤフラムを設計する場合，中間支点における支点反力を知ることが必要である。中間支承が，橋軸に対して左右対称であるような2点支持の場合，桁が直線であれば，左右の支承における反力は，荷重も対称である限り，理論上等しくなる。しかし，曲線桁の場合は，荷重が対称であっても，左右支点の反力は，一般に異なるものとなる。

さて，連続曲線箱桁において，中間支点における左右の支承への反力分配について，その比が推定できると便利である。宮脇らの文献113）ではこれについて，下部構造の設計の必要上，曲がりばりの支点反力の特性を求めている。この文献では，左右の支点反力をR_A，R_B，左右支点の間隔を$2l$，ねじりモーメントをM_T，主桁の反力をSとして，

$$R_A,\ R_B = \frac{1}{2}\left(S \pm \frac{M_T}{l}\right) \qquad (4-1)$$

とし，この式を用いるためのM_Tを求めることを中心に説明がなされている。

本章は，次章以後の考察の参考にするため，桁の曲率や中間ダイヤフラムの有無などに応じ，連続曲線箱桁の支点反力分配が，どのようになるかを調べたものである。

4－2 解析モデル

解析に用いたモデルは，図4－1に示す3種類の断面を持つ箱桁である。これらのモデルは，いずれも，次章以後で用いられるものと同じものである。これらのうち，Model Aは，断面の高さHと

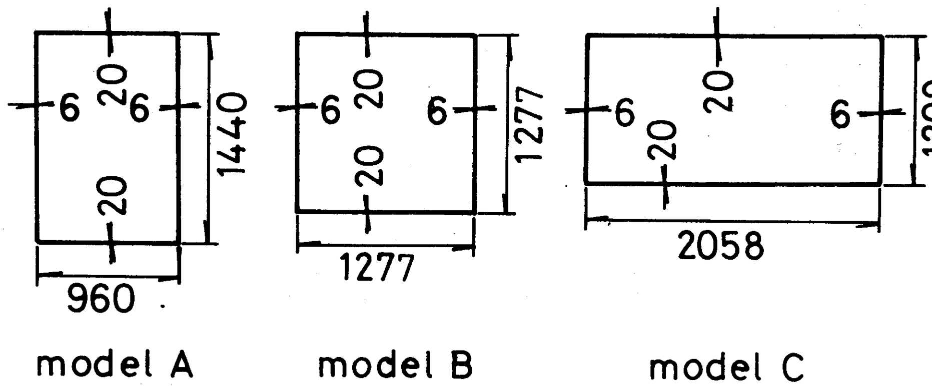


図4－1 CROSS SECTIONS OF MODEL GIRDERS

幅Bの比 H/B ＝1.5である。Model B, Cは，H/Bが，各々，1.0，0.5であるが，断面二次モーメントが，Model Aと同じになるように，断面寸法が決められている。モデルの平面図形は，**図4－2 a**）に示すようなもので，桁の全長Lと半径Rの比をパラメータとし，L/Rを0.5，1.0，1.5，

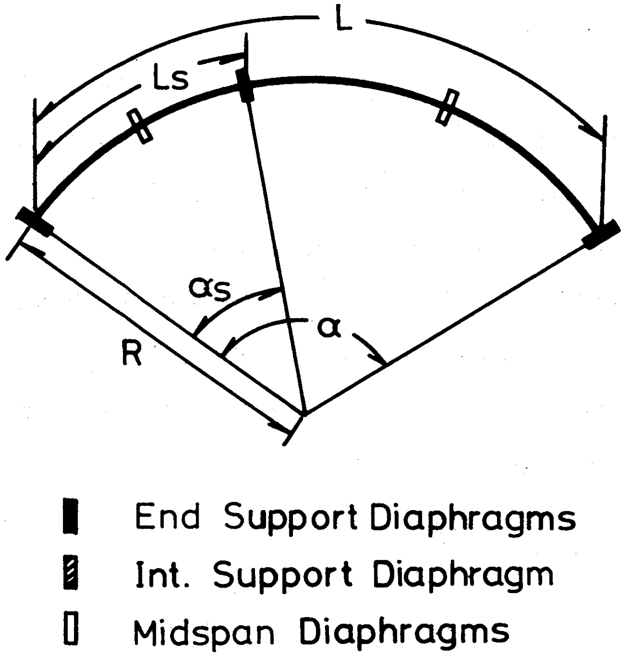


図4－2 a) PLANE VIEW OF TYPICAL GIRDER

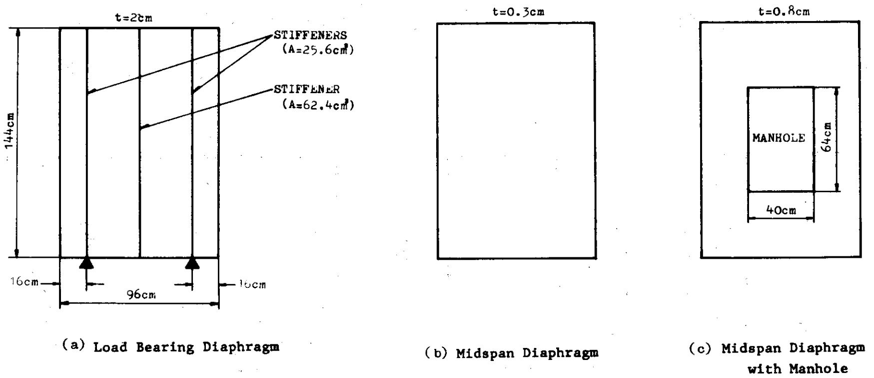


図4－2 b) DETAILS OF DIAPHRAGMS

2.0と変化させている。桁の全長Lは，L＝30mのものを主として扱ったが，L＝10m～60mの範囲内で変化させた場合も考えている。これらのモデルの中間支点は，**図4－2**において，$\alpha_s=\alpha/2$の断面，すなわち桁の中央にあるものを主として扱い，この断面に，厚さ20㎜の，支承上に補剛材を有する中間支点上ダイヤフラムを想定した。また，中間支点上ダイヤフラムのほか，中間ダイヤフラムを考慮した場合も扱った。ここで考えた中間ダイヤフラムは，厚さ t＝3㎜で充腹板形式のものと，厚さ t＝8㎜で 640㎜×400㎜のマンホールを有するものの，2種類である。これらについては，**図4－2 b)**に示す。

中間支点における支承の位置は，その断面内の腹板直下，および,そこからB/6，B/3づつ内側に入った場合について考えた。荷重は，上フランジに1.0㎏/㎠の等分布荷重を満載した。

中間支点における反力は，曲線の外側のものをXout，内側のものをXinとし，反力分配特性は，μ＝Xout／（Xout＋Xin）なる無次元量について議論する。この定義から，当然のことながら，μ＝0.5のとき，左右支承の反力は等しく，$\mu<0.5$のとき，Xin＞Xout である。以下，この無次元量μを，支点反力分配係数，あるいは単に，分配係数とよぶことにする。

4－3　支点反力分配特性

4－3－1　曲率の影響

図4－3，**図4－4**は，桁長L＝30mの場合について，桁の曲率半径Rと，支点反力分配係数μの関係を図示したものである。これらのうち，**図4－3**は，支承が腹板下よりB/6づつ内側に寄った場合について，桁の断面が各々異なるModel A，B，Cそれぞれのμを示している。また,**図4－4**は，Model Aについて，支承位置のμへの影響をみるための図である。また，**図4－3**中，実線は中間ダイヤフラムのない場合，破線は，各スパンの中央に充腹板形式の中間ダイヤフラムを有している場合

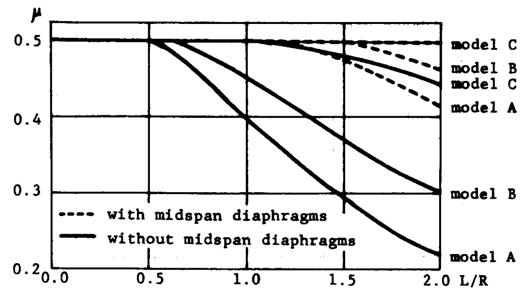


図4－3　DISTRIBUTIONS OF REACTION FORCES

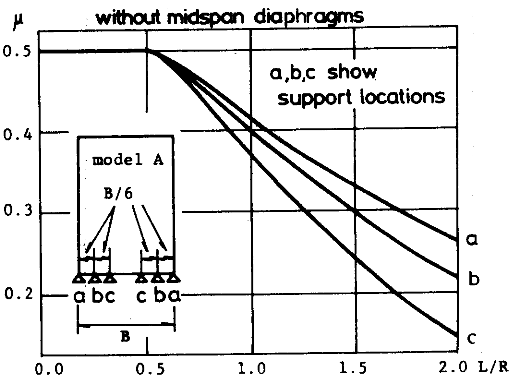


図4－4　DISTRIBUTIONS OF REACTIONS CORRESPONDING TO THE LOCATIONS OF SUPPORTS

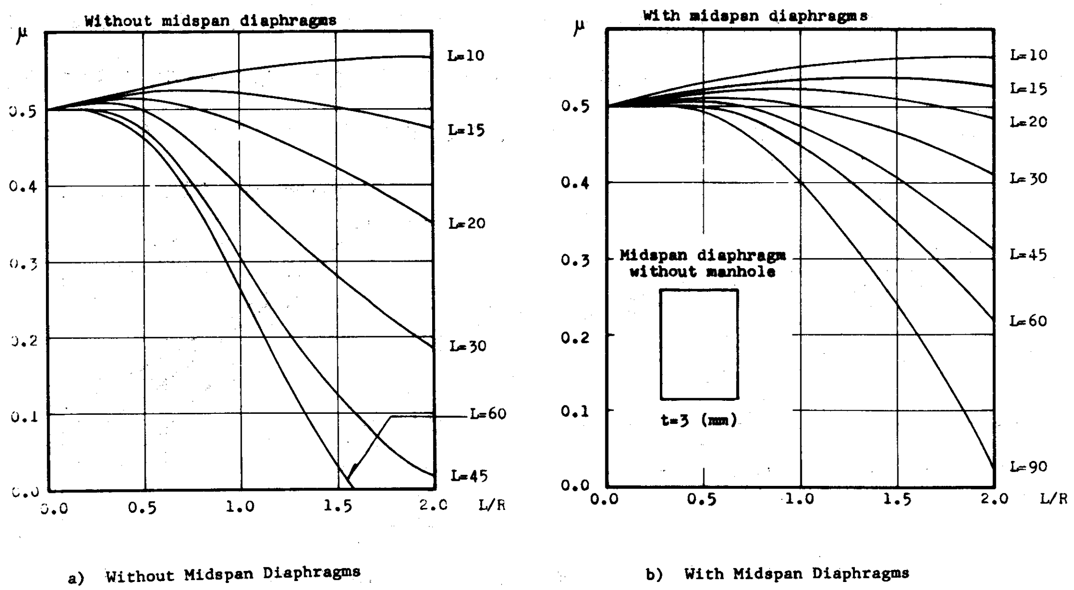
のものである。

図4－3，4－4をみると，L＝30mの場合，μは0.5以下の値を示しており，曲線の内側の支承における反力が大きいことを示している。また，これらのうち，どの場合も曲率が小さくなり，桁が直線に近くなると，左右の反力は均等化されている。図4－3からは，H/Bが大きく，断面が縦長で，左右の支承間隔が相対的に小さいものが，左右の反力の差が大きいことがわかる。また，図4－4は，同一断面の桁であっても，左右の支承間隔が小さいと，分配係数は小さくなり，左右の反力の差が大きくなっていることを示している。式（4－1），すなわち，文献113）によると，左右支承の間隔（式（4－1）中のl）が小さくなるほど，左右の反力の差が大きくなるが，図4－3，4－4の結果からも，このことが確認された。

次に，図4－3に破線で示した，中間ダイヤフラムを有する桁の場合，反力分配係数μは，中間ダイヤフラムのない場合に比べ，0.5にかなり近い値を示している。Model C では，この図に示したL＝30mの場合，μは，ほとんど0.5に近い値であり，左右の反力は，ここで扱った範囲内では，曲率にかかわらず，ほぼ等しくなっている。また，Model A，Bにおいても，L/Rが，各々1.0，0.5程度以下では，Xin とXout は，ほぼ等しい。

4－3－2 桁長の影響

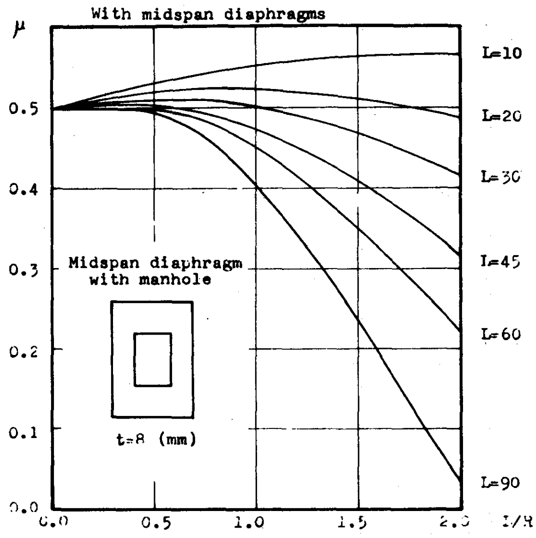
Model Aにおいて，桁の全長Lを変化させた場合の分配係数を図示すると，図4－5のようになる。このうち，図4－5 a）が，中間ダイヤフラムのない場合，b）が，充腹板形式の中間ダイヤフラムが，



a) Without Midspan Diaphragms　　b) With Midspan Diaphragms

図4－5 DISTRIBUTIONS OF REACTION FORCES CORRESPONDING TO LENGTH OF GIRDERS

各スパンの中央に1枚づつ入った場合，**c)** が，マンホール形式の中間ダイヤフラムが，各スパンの中央に1枚づつ入った場合である。なお，実際の設計では，桁の全長Lが変化すると，桁の断面が変わり，これに伴い左右の支承間隔も変わることになる。しかし，**図4－3**，**図4－4**の結果からもわかるように，支承の間隔が変化すると，このことが，分配係数に影響を与えることが考えられる。そこで，ここでは便宜上，すべての長さのモデルについて，L＝30*m*の場合と同じ断面を用いている。

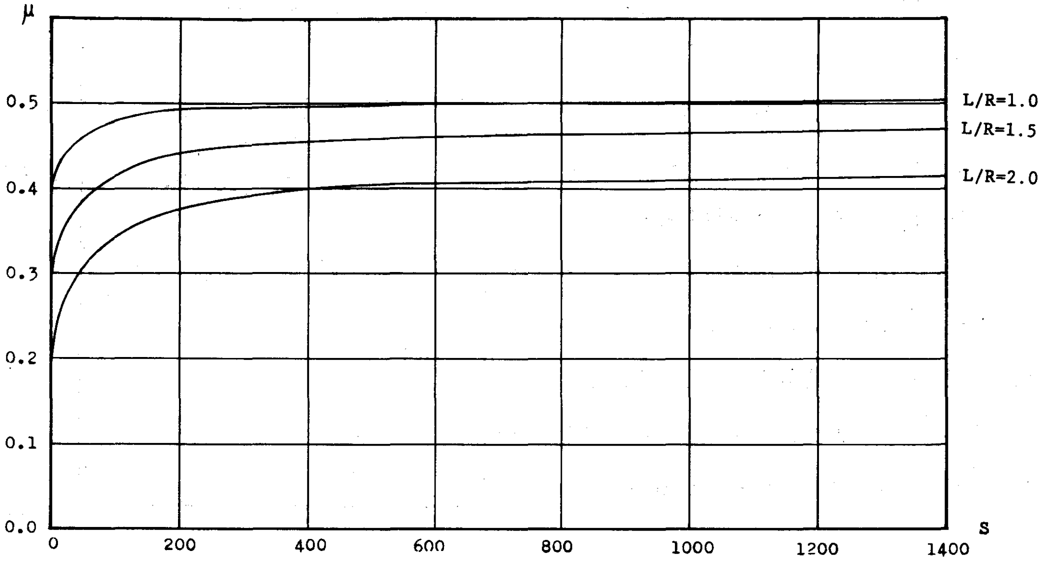


c) With Midspan Diaphragms with Manhole

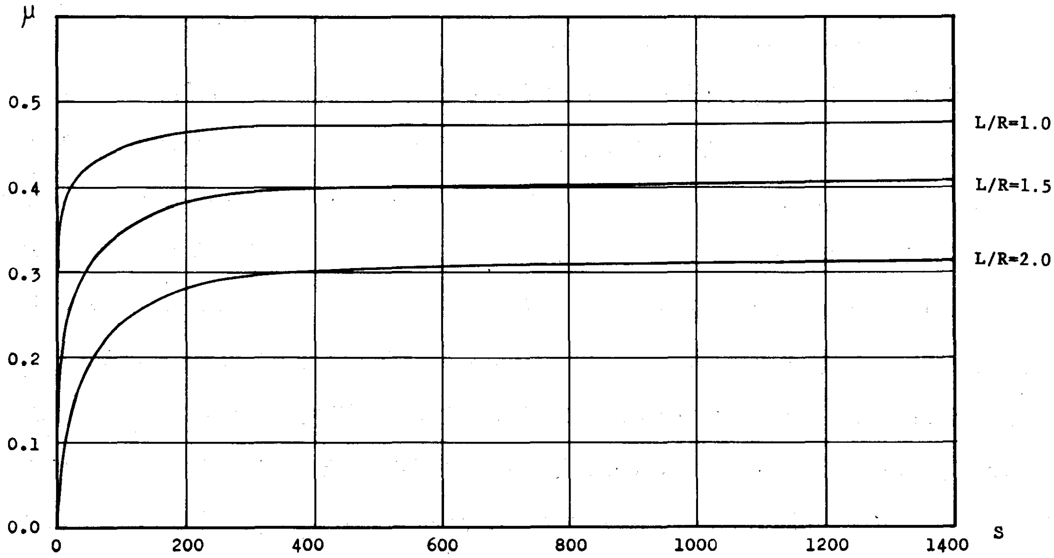
図4 —5　(CONT'D)

図4－5をみると，中間ダイヤフラムの有無にかかわらず，桁長Lが小さいほどμは大きくなり，L＝10*m*の場合は，ここで検討した全範囲で0.5を超えている。言い換えると，桁長が小さいものでは，桁長の大きいものとは逆に，曲線外側の支承における反力が大きくなることがわかる。中間ダイヤフラムのない場合，L＝15*m*の桁では，L/Rが0.5，1.0のとき，μは0.5を上回るがL/R＝1.5で，μはほぼ0.5，L/R＝2.0で，μは0.5を下回っている。そして，桁長Lが大きくなるにつれ，μは小さくなり，L＝60*m*の場合，L/Rが1.5を超えると，μが負，すなわち，曲線の外側の支承で，負反力が生じていることがわかる。ただし，中間ダイヤフラムがないまま，桁の全長Lが大きくなることは，実際には，まず考えられないため，この負反力の発生は，実用上は問題にはならないと思われる。中間ダイヤフラムが，各スパンの中央に1枚づつ入った場合をみると，桁長の大きい場合については，いずれも，μは，中間ダイヤフラムのない場合に比べ大きくなっている。そして，L＝15*m*のモデルでは，L/Rがここで扱った全範囲で，L＝20*m*のモデルでも，L/R＝0.5，1.0，1.5で，μが0.5を上回っている。しかし，L＝10*m*のモデルでは，**図4－5**の**a)**，**b)**，**c)** いずれの場合も，μはほとんど同じ値を示している。

一方，**図4－5**の**a)**，**b)**，**c)** を比べると，この両者は，いずれもほとんど同じ結果を示しており，ダイヤフラムの形式は，この図でみる限り，反力分配にほとんど影響を与えていないことがわかる。



a） L＝30 m



b） L＝45 m

図4—6 RELATIONS BETWEEN THE REACTION DISTRIBUTIONS AND STIFFNESS OF INTERMEDIATE DIAPHRAGMS

4—3—3 ダイヤフラム剛度の影響

図4—3，4—5 b）では，充腹板形式の中間ダイヤフラムは，板厚を3㎜としたが，示方書[123)]によると，鋼材の板厚は，8㎜以上でなければならないとされている。そこで，中間ダイヤフラムの板厚が，分配係数に与える影響を調べたものが，**図4—6**である。**図4—6**中の**a）**は，桁の全長L＝30mの場合，**b）**は，L＝45mの場合である。用いた断面は，いずれもModel Aで，L/R＝1.0，1.5 2.0の場合について調べている。なお，これらの図では，充腹板形式の中間ダイヤフラムと，マンホ

ール形式のそれを統一的に扱うため，板厚の代わりに，IDR[122] 6. 3. 4に示される，ダイヤフラムの無次元剛度Sを用いている。各々のダイヤフラム形式における，板厚と無次元剛度Sの関係は，表4－1に示す。また，Sの求め方の概略については，付録B－2に示す。なお，**図4－6**では，中間ダイヤフラムのないものを，S＝0としている。

図4－6 a) をみると，中間ダイヤフラムのない場合，分配係数は，L/Rに応じ0.2ないし0.4の値を示している。そして，Sが大きくなるにつれ，μは，はじめ急激に大きくなっている。ところが，Sがある程度大きくなると，これらの曲線の傾きは小さくなり，Sが，L/R＝2.0のモデルで600，L/R＝1.5で400，L/R＝1.0のモデルで200程度以上では，分配係数はほとんど一定で，各々，μ＝0.42，0.47，0.51に収束している。**図4－6 b)** の，L＝45*m*の場合も同じく，Sが小さいときは，μは急激に変化し，Sが，L/R＝2.0で500，L/R＝1.5で400，L/R＝1.0のモデルで300程度以上で，ほぼ一定となり，各々，μ＝0.32，0.41，0.48に収束している。文献10)によると，中間ダイヤフラムを有する曲線箱桁に，ずり荷重が作用した場合の断面変形は，ダイヤフラムの板厚が小さい間は，板厚の変化に応じて急激に変化するが，板厚がある程度以上であれば，板厚が変化しても，断面変形の量はほとんど一定である。また，文献20)でも，直線箱桁について，中間ダイヤフラムの剛度が小さいと，断面の変形などに対するダイヤフラム剛度の影響は大きいが，中間ダイヤフラム剛度がある程度以上となれば，断面変形などは，剛度を無限大とした場合の値に収束することが示されている。**図4－6**からは，中間支点における反力分配に対する，中間ダフヤフラムの剛度の影響についても，文献11)，12)と同様な傾向があることがわかる。

さて，前述のように，**図4－5 b)，c)** の，充腹板形式とマンホール形式の中間ダイヤフラムの，いずれの場合でも，分配係数はほとんど同じであった。**図4－5**などで用いた，中間ダイヤフラムの無次元剛度Sは，表4－1より，充腹板形式のもの（厚さt＝3㎜）がS＝928，マンホール形式のもの（t＝8㎜）がS＝3037であり，一見，かなりの差があるように見えるにもかかわらず，μに対する影響がほとんど同じなのは，この2種類のダイヤフラムのSが，**図4－6**において，μがほとんど一定となる区間に入るような値であるからであろう。

表4－1 UNDIMENSIONED STIFFNESS OF INTERMEDIATE DIAPHRAGMS CORRESPONDING TO THE PLATE THICKNESS

t (mm)	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8
S（充腹板形式）	155	309	619	928	1237	1547	1856	2165	2475
S(マンホール形式)	190	380	760	1140	1519	1899	2276	2657	3037

以上のことから，中間ダイヤフラムの剛度が小さいうちは，剛度が増すにつれ，μは増大するものの，剛度がある程度以上の値であれば，剛度が変化してもμはほとんど変化せず，ある値に収束し，しかもその収束値は，必ずしも0.5に近い値であるとは限らない，ということがわかる。表4－1などから判断すると，示方書の規定を満足する程度の板厚を有する中間ダイヤフラムは，概ね，図4－6におけるμが一定なる区間に入るものとしてよい，と思われる。

4－3－4　ダイヤフラム間隔の影響

図4－3，図4－5，図4－6では，中間ダイヤフラムは，いずれも，各スパンに1枚づつ入った場合を扱った。そのため，中間支点上，端支点上を含めたダイヤフラム間隔は，示方書[123)]の規定よりも，かなり大きなものとなっている。そこで，各スパンの中間ダイヤフラム数を，1枚から2枚，3枚と増し，ダイヤフラム間隔を変えた場合の分配係数を示したのが，図4－7である。図4－7のa)

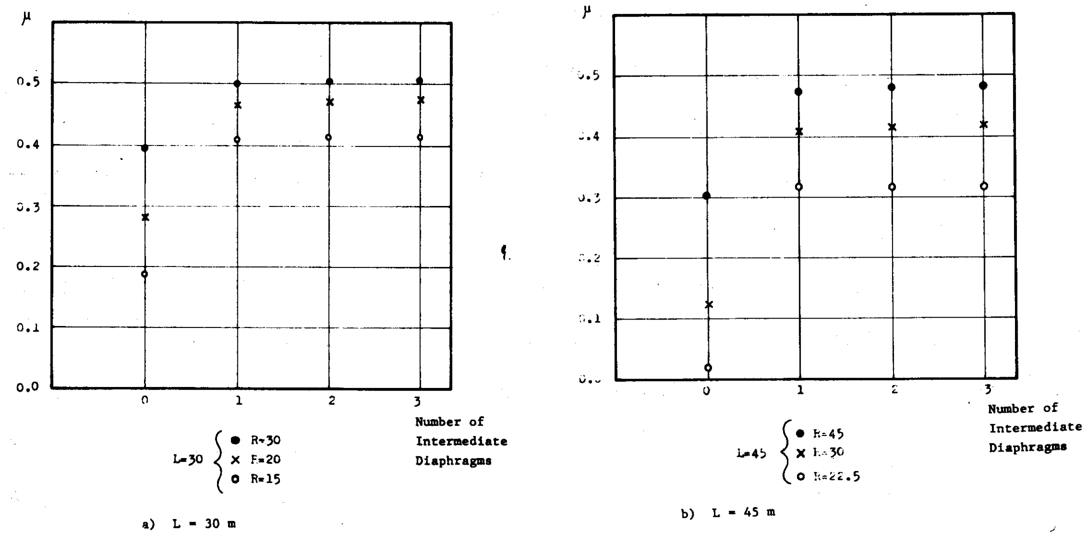


図4－7　REACTION DISTRIBUTIONS CORRESPONDING TO THE NUMBER OF INTERMEDIATE DIAPHRAGMS

は，L＝30 m，b)は，L＝45mの場合についてのものであり，いずれもModel A の断面を用いている。また，これらのモデルの中間ダイヤフラムは，充腹板形式のものである。図4－7を見て明らかなように，中間ダイヤフラム数が増しても，分配係数はほとんど変わらない。L＝30mで，L/R＝1.0のモデルについてみると，各スパンにおける中間ダイヤフラム数が1と2の時の，分配係数の差は，0.6％程度であった。よって，本章で取扱った程度の構造物であれば，中間ダイヤフラムの間隔

は，反力分配には，ほとんど影響しないことがわかる。

4－3－5　支点位置の影響

前節までは，中間支点は桁の中央断面，すなわち，図4－8において，l＝L/2なる断面にあるものとしていた。本節では，図4－8に示すように，中間支点が桁の軸方向に移動し，スパン割が橋軸方向に非対称となった場合について，反力分配特性を調べる。

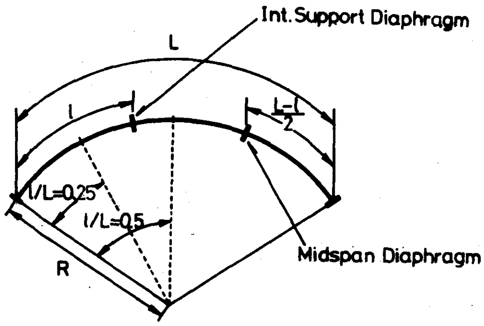


図4－8　LOCATION OF INTERMEDIATE SUPPORT

図4－9が，中間支点が，l＝0.5 Lから0.25 Lまで移動した場合の，分配係数の変化を図示したものである。用いたモデルは，Model Aの断面を有するL＝30*m*のものである。図中の実線が，中間ダイヤフラムがない場合の分配係数を示している。一方，中間支点の位置が，0.35 L～0.25 Lのものについては，長径間側のスパン中央に，充腹板形式の中間ダイヤフラムが入った場合も扱った。図4－9に破線で示したのが，それである。この図を見ると，中間支点が，l＝0.5 Lから0.25 Lに移動するにつれ，分配係数は，いずれも減少しているのがわかる。桁の曲率が大きくなるほど，その傾向は著しく，中間ダイヤフラムのない場合，l＝0.25 Lのときのμは，l＝0.5 Lのそれと比べ，L/R＝0.5で89％，L/R＝1.0で58％，L/R＝1.5のモデルでは24％の値となっている。

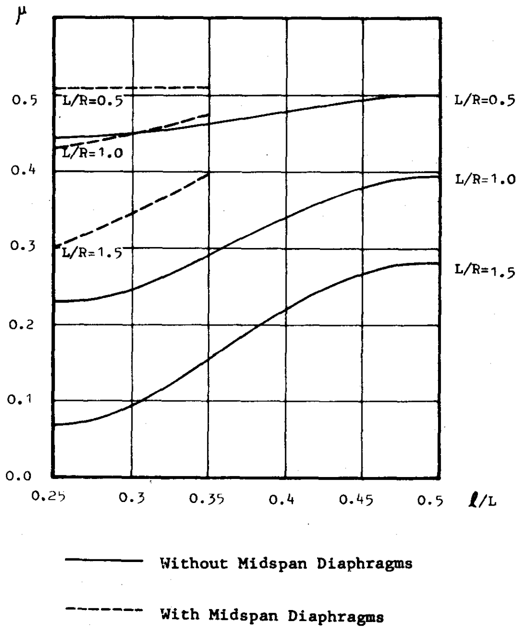


図4－9　RELATIONS BETWEEN THE REACTION DISTRIBUTIONS AND LOCATIONS OF INTERMEDIATE SUPPORTS

長径間側に中間ダイヤフラムが入った場合，分配係数は，前節までのものと同様に，大きくなっている。L/R＝0.5のモデルでは，中間ダイヤフラムがあることにより，中間支点が移動しても，μはほとんど0.5の値を示している。しかし，L/R＝1.0，1.5のモデルでは，中間ダイヤフラムがない場合と同じく，中間支点の位置がl＝0.25 Lに近づくにつれ，μは減少しており，L/R＝1.5では，中間支点がl＝0.35 Lで，μ＝0.4であったものが，l＝0.25 Lで，μ＝0.3となっている。

4－4　ま と め

曲線箱桁の中間支点上ダイヤフラムの設計には，その断面における支点反力が必要である。中間支点における左右支承への支点反力の分配については，荷重が等分布荷重満載の場合，次のようなことが言える。

イ）中間ダイヤフラムのない桁では，桁長の短いものを除き，内側支承の反力が，外側支承の反力を上回り，左右支承の反力に差がみられる。桁長が大きいほど，また，桁の曲率が大きいほど，この傾向は著しい。しかし，中間ダイヤフラムを入れることにより，左右支承の反力は，かなり均等化される。

ロ）中間ダイヤフラムは，左右反力の均等化という点のみから考えれば，ある程度以上の剛度を有していればよく，それ以上剛度を増してもあまり意味はない。本研究で扱った範囲内では，示方書[123)]の規定を満足する程度のダイヤフラムであれば，反力分配に対しても，十分に剛なダイヤフラムと同程度の効果がある。中間ダイヤフラムの剛度が，IDR 6. 2. 4の無次元剛度S＝300程度以上となると，左右支承の反力は，それ以上は均等化されず，支点反力分配係数は，一定値に収束する。

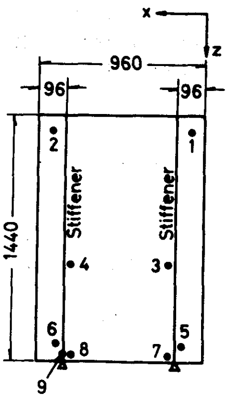
ハ）1スパンにある中間ダイヤフラムの数は，本研究で扱った範囲内では，1枚あれば，支点反力の分配に対しては十分である。中間ダイヤフラム数を増しても，分配係数はほとんど変化しない。

ニ）上記ロ），ハ）いずれの場合も，曲率の大きいモデルでは，支点反力分配係数は，0.5より小さい値に収束する。

ホ）中間支点が桁の中央部から端部に寄ると，分配係数は減少する。

なお，L＝30m，R＝20m（L/R＝1.5）で，厚さ3㎜の充腹板形式の中間ダイヤフラムを，各ス

表4－2　STRESSES OF DIAPHRAGM ON CASE OF $\mu=0.5$



• : Observing Points

注目点	σ_x	σ_z
1	-236 -236 (0)	-219 -221(0.9)
2	-296 -296 (0)	-283 -282(0.4)
3	77 78(1.3)	-200 -207(3.5)
4	214 208(2.8)	-138 -129(6.5)
5	332 338(1.8)	-893 -931(4.3)
6	319 313(1.9)	-936 -898(4.1)
7	276 295(6.9)	-1367 -1424(4.2)
8	297 278(6.4)	-1449 -1393(3.9)
9	— —	-2570 -2671(3.9)

(kg/cm²)

上段　$\mu=0.47$
下段　$\mu=0.50$
（）　誤差（%）

パンに2枚づつ有するモデル（ダイヤフラム間隔5 m）は，**図4－7 a**）にもあるように，$\mu=0.47$ であるが，このモデルについて，左右反力が等しい，すなわち $\mu=0.5$ として中間支点上ダイヤフラムの応力を求め，比較すると，表4－2のようになる。これを見ると，両者の応力の差は，数パーセント以内である。これから類推すると，μ が0.47～0.53程度の場合，左右支承の反力は等しいと扱っても，中間支承上ダイヤフラムの応力については，概ね，妥当な評価が可能と思われる。

5　中間支点上ダイヤフラムおよびその近傍の応力状態

5－1　まえがき

箱桁におけるダイヤフラムは，支点上ダイヤフラムと，中間ダイヤフラムに大別される。このうち，中間ダイヤフラムは，箱断面の形状保持などを目的としたものであり，言わば，二次部材であるのに対し，支点上ダイヤフラムは，支点反力をうけ，伝達するための，一次部材と考えることができる。中間ダイヤフラムについては，従来，多くの研究がなされている。これらのうちでは，小松らの研究[1)～3)]，坂井らの初期の研究[6)～9)]などのように，ダイヤフラムを完全に剛としたもの，坂井らの研究[10),11),20)]などや，Abdel－Samad[16),17)]らのように，ダイヤフラムの面内剛性をも考慮したものに大別される。また，文献29)のように，コンクリート箱桁におけるダイヤフラムの必要性に関する研究もみられる。これらの中で，文献17）は，ＩＤＲ[122)]の中間ダイヤフラムの設計に関する部分に引用されており，また，9），20)でも中間ダイヤフラムの設計基準の提案がされている。しかしながら，中間ダイヤフラムに関する研究は，いずれも，ダイヤフラムの桁に対する影響が，その考察の中心部分となっている。これは，中間ダイヤフラムは，支点上ダイヤフラムと比較して，小さな力しかうけないこと，中間ダイヤフラムが前述のように，桁の断面変形を拘束するためのものである等，桁への影響が問題となること，など，中間ダイヤフラム自身の性格のためであろう。一方，支点上ダイヤフラムに関する研究は，El－Gaalyらによる数値解析[45),46)] Dowlingらによる実験的研究[48),105)]などがみられる。このうち，45)，46)は，ダイヤフラムのみを取り出し，それをシャイベとして有限要素法により解析したものである。また，Sawkoらも，有限要素法による支点上ダイヤフラムの数値解析を行っている[51)]。支点上ダイヤフラムは，支点より大きな反力をうけるため，当然，ダイヤフラムの面内応力が問題となるうえ，ダイヤフラムの座屈などについても考える必要がある。文献45)，46)，48)～51)，105）でも，ダイヤフラムの面内応力のほか，座屈について考察している。

本章では，連続箱桁の中間支点上ダイヤフラムについての，弾性範囲内での，有限帯板法による数値計算，および実験により得られる結果について考察する。このほか，中間ダイヤフラムの中間支点上ダイヤフラムへの影響，中間支点近傍の，腹板，フランジの，弾性範囲内での応力状態についても触れる。ダイヤフラムや腹板の座屈に関しては，次章で説明することにする。

なお，箱桁では，このほか，桁の両端部に端支点上ダイヤフラムが設けられている。しかし，有限帯板法では，２章で説明したとおり，端支点上ダイヤフラムは考慮することはできない。また，本章

における実験でも，端支点上ダイヤフラムに対しては，調査を行っていない。したがって，本章では，端支点上ダイヤフラムを無視し，単にダイヤフラムというときは，中間支点上ダイヤフラムと中間ダイヤフラムのみをさすものとする。また，支承というときも，同じく，中間支点における支承をいう。

5－2　解析および実験モデル

本章で扱うモデルは，表5－1に示すように、大別すると4種類に分けられる。これらのうち，タイプGについては，実験と数値計算の両方から，また他のタイプについては，数値計算からのみ検討している。以下，各タイプごとに，説明する。

5－2－1　数値解析用モデル

a）　タイプR

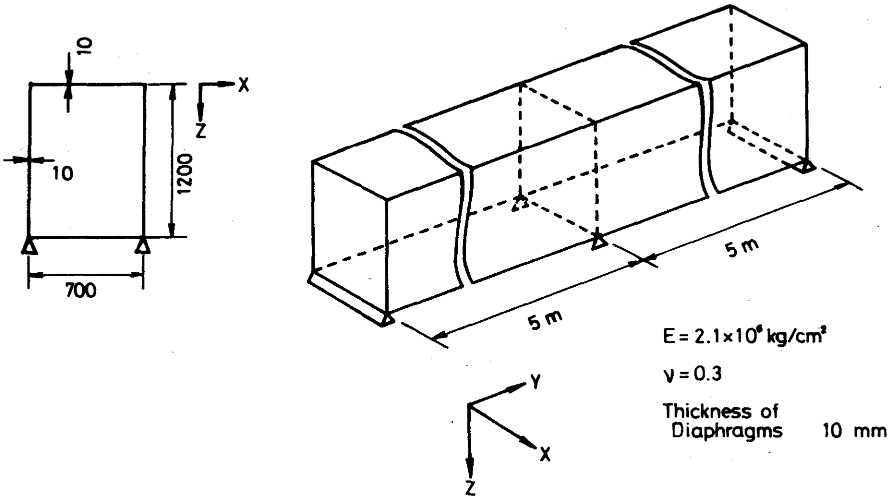


図5－1　TYPE R MODELS

タイプRのモデルは，図5－1に示すような形状のものである。このモデルは,文献6）をもとに決めたものであり，中間支点における支承は腹板の直下にある。中間支点上ダイヤフラムは桁の中央に，また，モデルR3における中間ダイヤフラムは，各スパンの中央にあるものとする。タイプRのモデルにおけるダイヤフラムは，いずれも充腹板形式のものであり，その要素分割，および桁の帯板分割は，図5－2に示す。また荷重は0.1 ㎏／㎠ の等分布荷重満載である。

b）　タイプT

このモデルは，文献45)，46)と同じ台形断面を有しており，支承は腹板直下にある。ダイヤフラムの板厚や解析に用いたヤング率も，文献45）に合わせてある。なお　これらの文献は，ダイヤフラム

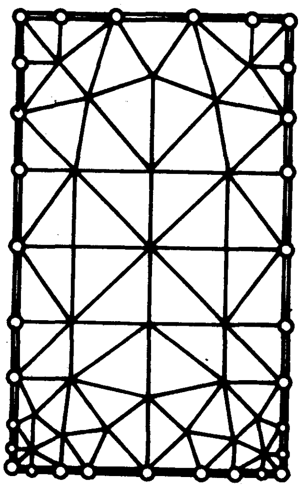


図5－2　FSM IDEALIZATION OF TYPE R MODELS

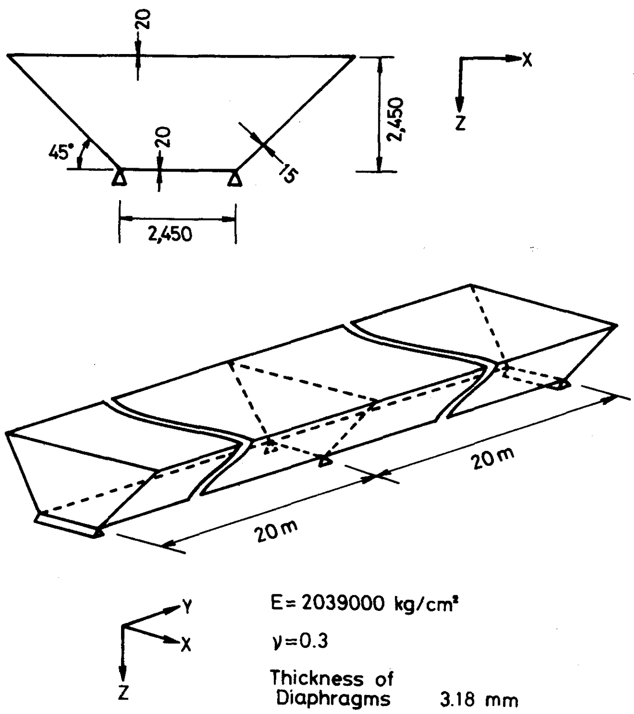


図5－3　TYPE T MODELS

のみを取り出して解析したものであり，ダイヤフラムを含む桁については触れられてはいない。したがって，本研究においては，桁の断面をタイプR，E，Gと比較して，**図5－3**に示すようなモデルを考えた。このモデルにおける荷重は，上フランジに0.1㎏／㎠の等分布重満載のほか，文献45）との比較のため，**図5－4**のような腹板に対するせん断力が作用した場合も考えている。タイプTのモデルにおけるダイヤフラムの要素分割，および桁の帯板分割は**図5－5**に示す。

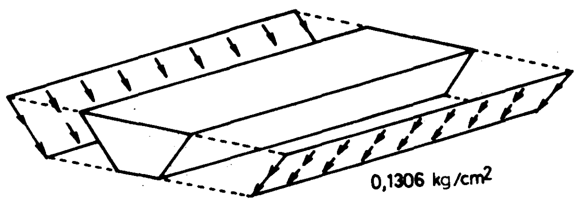


図5－4　LOADING CONDITIONS IN COMPARISON WITE REF. 45）

c）　タイプEおよびタイプG

タイプEおよびGのモデルは，他のモデルとは異なり，**図5－6**に示すように，連続桁の中間支点付近の，曲げモーメントの符号が反転する区間のみを取り出したものである。したがって，これらのタイプでは，桁は，単純桁と同様に扱われていることになる。解析に用いた桁の全長は，10ｍであるが，タイプEでは，図

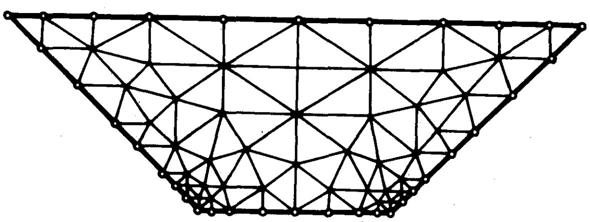


図5－5　FSM IDEALIZATION OF TYPE T MODELS

5－6にも示したように，桁の全長を30mとした場合についても考えた。タイプＥおよびＧにおける数値解析用のモデルは，いずれも，実験用の模型をもとに，その形状，寸法が決められている。実験用モデルに関する説明は，5－3－2で説明するが，数値計算用モデルでは，桁は，実験用模型の中間支点における断面を有する等断面桁とし，桁に対する補剛材を省略するなど，計算をするうえでの簡略化がなされている。

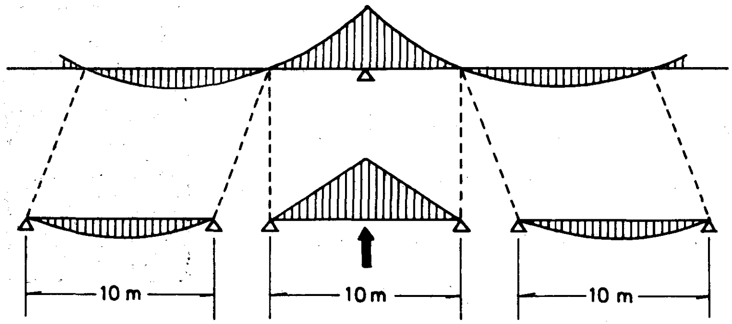


図5—6　SIMPLIFIED MODELS ON CONTINUOUS GIRDERS

タイプＥのモデルは，図5－7に示すような形状，寸法を有している。これらのモデルは，いずれも中間ダイヤフラムがなく，また，支点上ダイヤフラムには，補剛材を有するもの（U２FR，E２WR，E２FR）と補剛材のないもの（U２F，E２W，E２F）がある。タイプＥのモデルにおける，ダイヤフラムの要素分割，桁の帯板分割，およびダイヤフラムにおける補剛材の断面積は，図5－8に示す。ダイヤフラムの板厚は，いずれも，6㎜である。また，E２W，E２WRの各モデルは，支承が腹板直下にあり，U２F，U２FR，E２F，E２FRでは，支承は，腹板直下より140㎜だけ内側に寄っている。タイプＥのモデルにおける荷重は，U２F，U２FRについては上フランジに等分布荷重満載，その他のモデルについては，支点反力のみを，集中荷重として作用させている。荷重の大きさは，支点反力が167ｔ，等分布荷重は，桁長が30mの連続桁において，中間支点反力が167ｔになるような

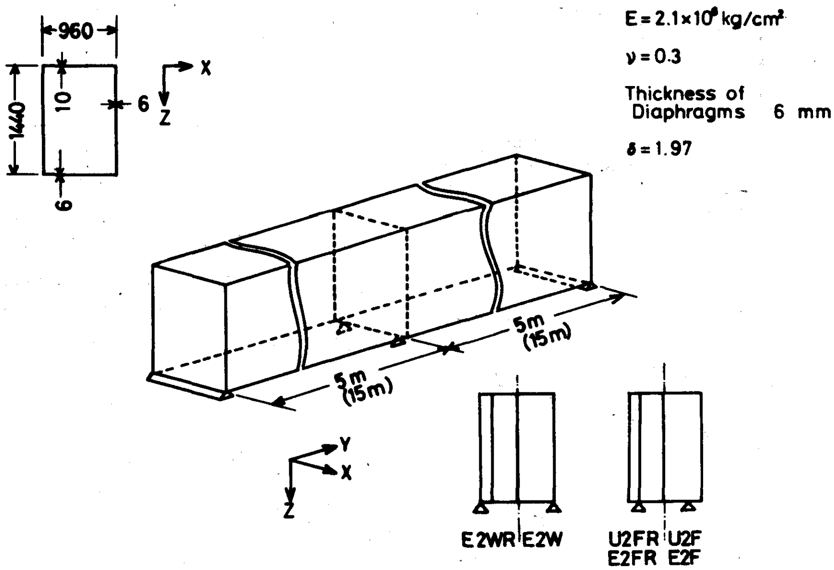


図5—7　TYPE E MODELS

大きさ，すなわち0.9278㎏／㎠の等分布荷重とした。タイプEのモデルで，荷重の大きさを，支点反力をもとに決めたのは，実験では，支点反力を荷重として作用させるため，上フランジに載っている等分布荷重よりも，支点反力の方が重要であるからである。

タイプGのモデルは，**図5－9**に示すような形状，寸法を有している。これらのモデルのうち，GⅡ0は中間ダイヤフラムのないも

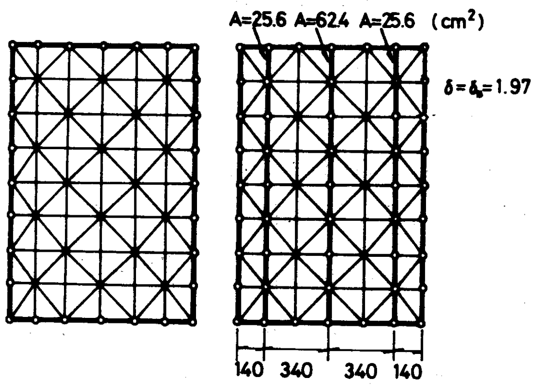


図5－8　FSM IDEALIZATION OF TYPE E MODELS

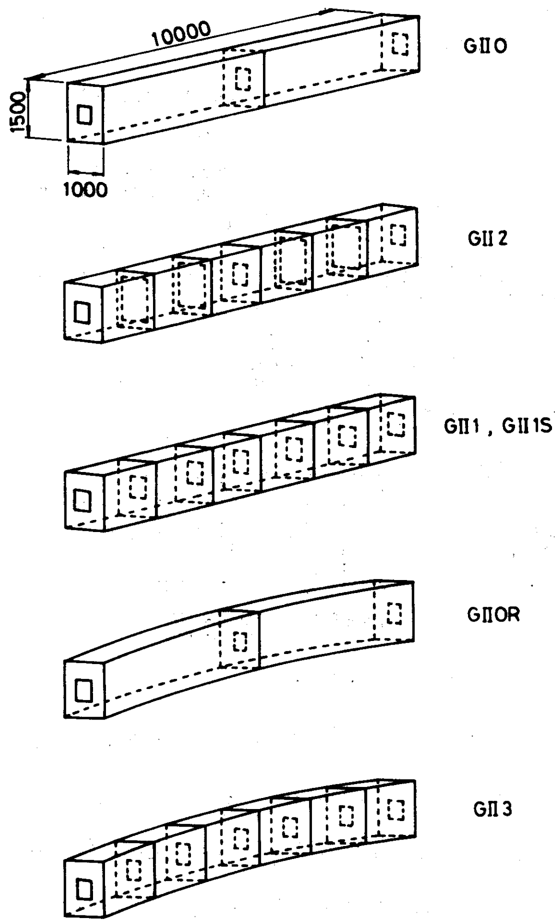


図5－9 a）TYPE G MODELS

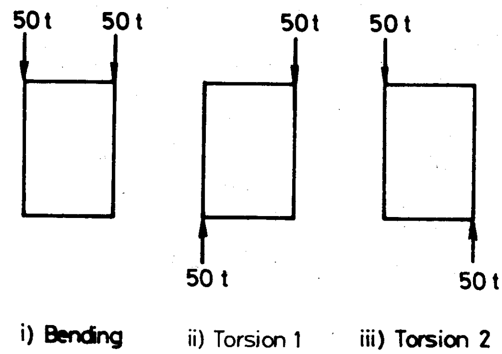


図5－9 b）LOADINGS OF TYPE G TESTS

の，GⅡ1は，**図5－9**の中に示すような，マンホール形式の中間ダイヤフラムを，GⅡ2はラーメン形式の中間ダイヤフラムを有している。また，GⅡ1Sは，GⅡ1において，中間ダイヤフラムの板厚を10倍としたものである。すなわち，これらのモデルは，GⅡ0，GⅡ2，GⅡ1，GⅡ1Sの順に，中間ダイヤフラムの剛度が大きくなっている。ダイヤフラムの板厚は，支点上ダイヤフラムが19㎜，中間ダイヤフラムが12㎜であり，支点上ダイヤフラムは，このほか，支承上に断面積66㎠の補剛材，マンホールの周囲に断面積5.4㎠または6㎠の補剛材を有している。また，タイプGのモデルでは，中間支点における支承の位置は，腹板直下である。タイプGのモデルにおける荷重は，この支承位置に，反力に相当する集中荷重を考

えた。また，曲線桁であるGⅡ3，GⅡ4（いずれも実験用モデル）では，ねじりに対する桁の挙動を知るために，ずり荷重をかけた場合も扱っているため，比較のため，数値計算用のモデルにおいても，同様に，ずり荷重を考えた。これらの荷重については，図5－9 b）に示す。また，タイプGの桁桁における，ダイヤフラムの要素分割，および桁の帯板分割を，図5－10に示す。

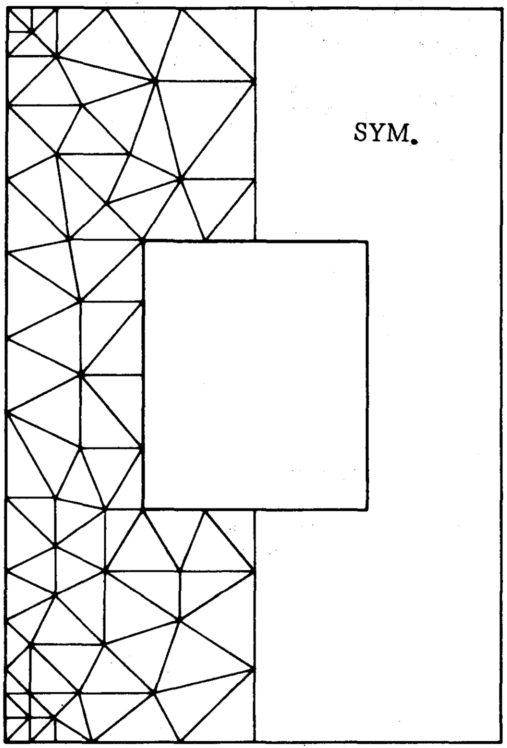


図5－10 a） FEM IDEALIZATION OF INTERMEDIATE SUPPORT DIAPHRAGM

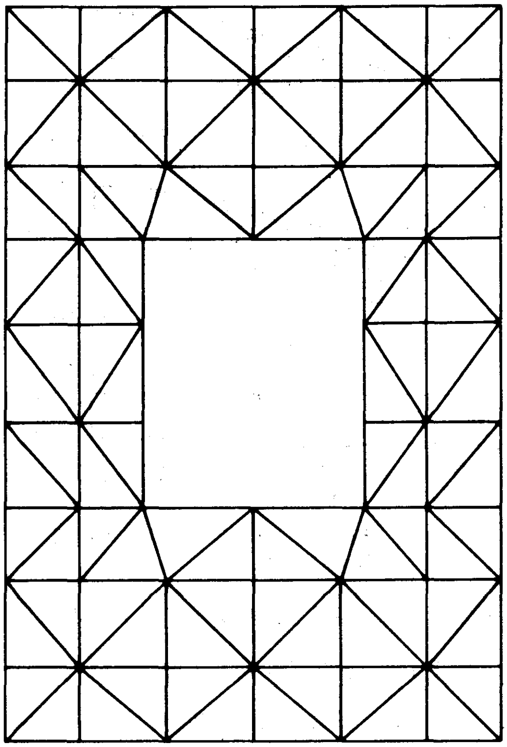


図5－10 b） FEM IDEALIZATION OF INTERMEDIATE SUPPORT DIAPHRAGMS FOR PARAMETRIC STUDY

5－2－2 実験用モデル

実験に用いたモデルは，GⅡ2，GⅡ3，GⅡ4の3体である。これらの模型は，図5－11に示すように，桁高さが4％の勾配をもつ，変断面桁である。これらの桁のうち，GⅡ2は直線桁，GⅡ3およびGⅡ4は，曲率半径20mの曲率を有する曲線桁である。いずれの桁も，端支点上ダイヤフラム（D0），中間支点上ダイヤフラム（D3）のほか，各スパン2枚ずつの中間ダイヤフラム（桁端より順にD1，D2）を有している。また，各ダイヤフラム間の腹板，フランジには，鉛直補剛材が，等間隔に3本ずつ入っているほか，上下フランジ，左右腹板には，橋軸方向に、1本ずつ補剛材が配置されている。中間ダイヤフラムは，GⅡ2およびGⅡ4がラーメン形式，GⅡ3がマンホール形式である。これらの構造は，図5－12に示す。

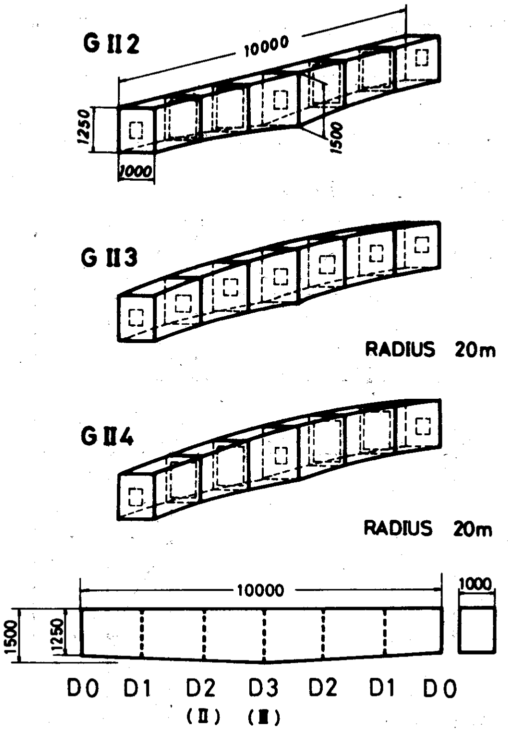


図5—11　TEST GIRDERS OF TYPE G MODLS

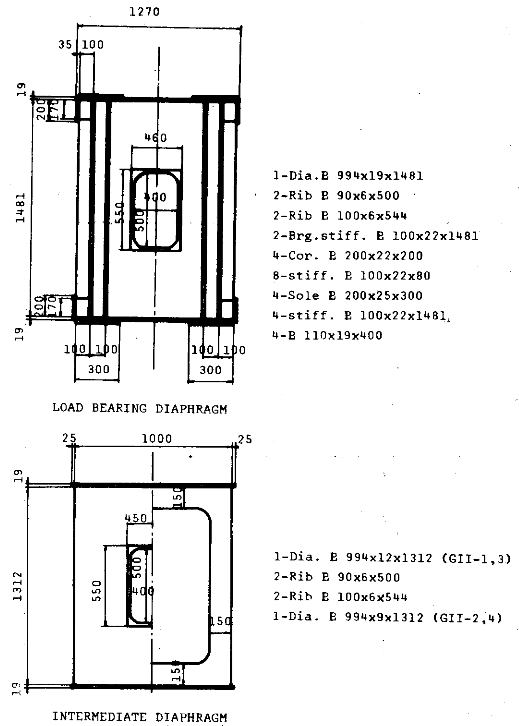


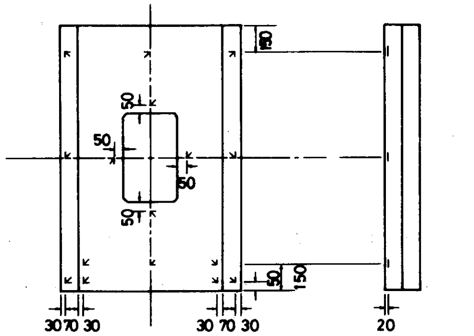
図5—12　DETAILS OF DIAPHRAGMS OF TEST GIRDERS

桁の全長は，GⅡ2，GⅡ3，GⅡ4とも10mである。したがって，この模型のみをみると，GⅡ3，GⅡ4では，桁の全長Lと曲率半径の比L／R＝0.5となる。ただし，この桁は，**図5－6**にも示したように，連続桁の中間支点付近のみを取り出したものである。いま，**図5－6**を参照して，桁の全長L＝30mと仮定すると，L／R＝1.5となる。4章で示した結果では，適当な中間ダイヤフラムを有する桁では，L／Rが1.5程度以下であれば，左右支承への反力分配については，桁はほぼ直線とみなせる，となっている。したがって，少なくともGⅡ3については，左右の反力は，ほぼ等しいとしてよいものと思われる。

5－3　弾性試験の概要

モデルGⅡ2，GⅡ3，GⅡ4に対する弾性実験の概要は，3章で示したことのほかは，以下に示すとおりである。

載荷は、**図5－9**に示すように，2点載荷による曲げのほか，曲線桁におけるねじりを想定して，ずり荷重を考えた。ずり荷重は，直線桁では，図において時計回りの方向のみを載荷したが，曲線桁においては，荷重の作用方向により，曲線の内側と外側では異なる挙動を示すことが考えられるので時計回り，反時計回りの2種類の状態を考えた。なお，これらの桁は，実験時には上下逆に設置し，



↘ : Strain Gauges (Tri-axial)

| : Strain Gauges (Mono-axial)

図5 —13 STRAIN GAUGE LOCATIONS OF TEST GIRDERS

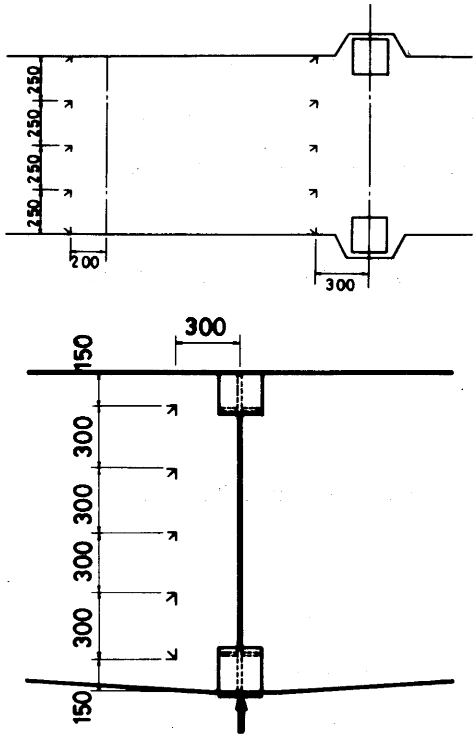


図5—13 (CONT'D)

支点反力に相当する荷重は，上から下向きに作用させている。模型におけるひずみ測定位置は，**図5—13**に示す。支点上ダイヤフラムでは，載荷点付近に応力集中が予想されるので，その付近で，ひずみを密に測定した。また，載荷点から離れた部分では，マンホールの周辺を中心に，ひずみゲージを貼った。ダイヤフラムパネルのひずみ測定に用いたひずみゲージは，いずれも３軸ゲージであり，ダイヤフラムの片面のみに貼っている。また，支点上補剛材の垂直応力を知るため，各補剛材について１軸ゲージを３枚ずつ貼付した。

腹板，フランジでは，中間支点，および中間支点からＬ／６だけ離れた断面で，ひずみを測定した。各断面の測定点数は，フランジでは，せん断遅れを測定できるように，フランジ一面につき５点とし，腹板についても，フランジに合わせ，一面につき５点とした。すなわち，１断面につき，上下フランジ，左

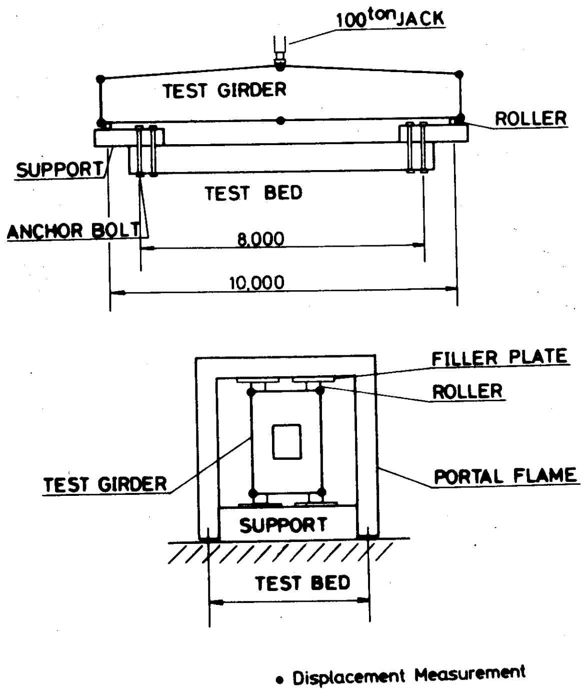


図5—14 TEST SETUP

右腹板の合計で，20点のひずみ測定点を設けたことになる。これらのゲージは，いずれも，腹板，フランジの外側にのみ貼付しているが，実際にゲージを貼った断面は，上記の断面から20〜30cmずらしてある。これは，これらの断面には，いずれもダイヤフラムがあることから，それによる応力の乱れを避けるため，また，中央断面には載荷用の受圧板があり，位置的にゲージを貼付できないためである。

変位は，**図5—14**中に黒丸で示した点において，3方向の変位を測定した。桁端においても変位を測定しているのは，桁のそりの測定のほか，支点の沈下や浮き上がりなどによる桁の剛体変形を知るためである。

5—4　ダイヤフラムの応力分布

5—4—1　タイプRのモデルにおけるダイヤフラムの応力分布

図5—15は，モデルR3の，支点上ダイヤフラムの応力分布である。これをみると，支点付近では大きな鉛直方向応力σ_zがみられる。σ_zが大きな値を示す範囲は，上方のやや中央部に向かって伸びており，ダイヤフラム下縁の中央部では，大きな応力値は出ていない。一方，ダイヤフラムの水平方向応力σ_xは，支点付近でも大きな応力集中は生じていない。ダイヤフラム中央のやや下寄りに，若干大きな応力がみられる程度である。**図5—15**の応力分布，特にσ_zの分布をみると，文献45）にあるようにダイヤフラム自体が，アーチ作用により支点反力をかなり負担しているのがわかる。

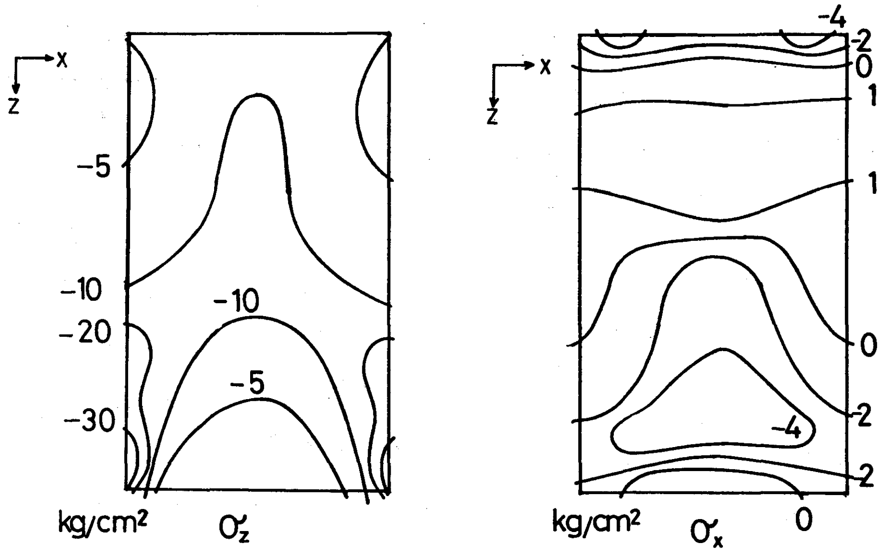


図5—15　STRESS DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGM (MODEL R3)

中間ダイヤフラムのない，モデルR2では，図には示していないが，支点上ダイヤフラムの応力分布は，R3の場合とほとんど同じとなっている。

5－4－2　タイプＴのモデルにおけるダイヤフラムの応力分布

図５－16は，モデルＴ３における，支点上ダイヤフラムの応力分布である。この場合も，中間ダイヤフラムのないモデルＴ２の，支点上ダイヤフラムの応力分布は，モデルＴ３のそれと，ほとんど同じとなった。タイプＴにおいて，鉛直方向応力σ_zが支承の近傍で特に大きな値を示し，σ_zが大きな値を示す範囲がダイヤフラム中央に向かって斜め上方に拡がっているのは，タイプＲの場合と同様である。水平方向応力σ_xは，腹板と接している側辺沿いに引張応力が分布し，支承付近では，σ_zほどではないにせよ，大きな応力がみられることが，タイプＲの場合と異なっている。

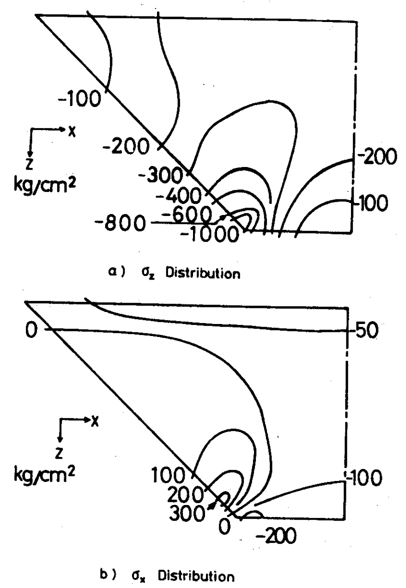


図５－16　STRESS DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGM (MODEL T３)

5－4－3　タイプＥのモデルにおけるダイヤフラムの応力分布

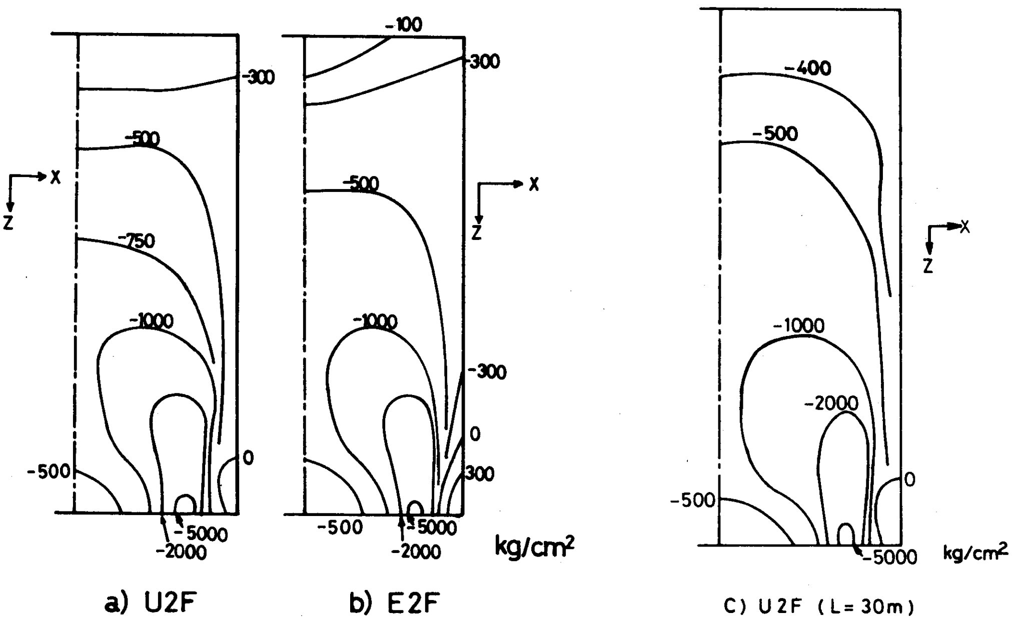


図５－17　σ_z－DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGM (MODEL U２F AND E２F)

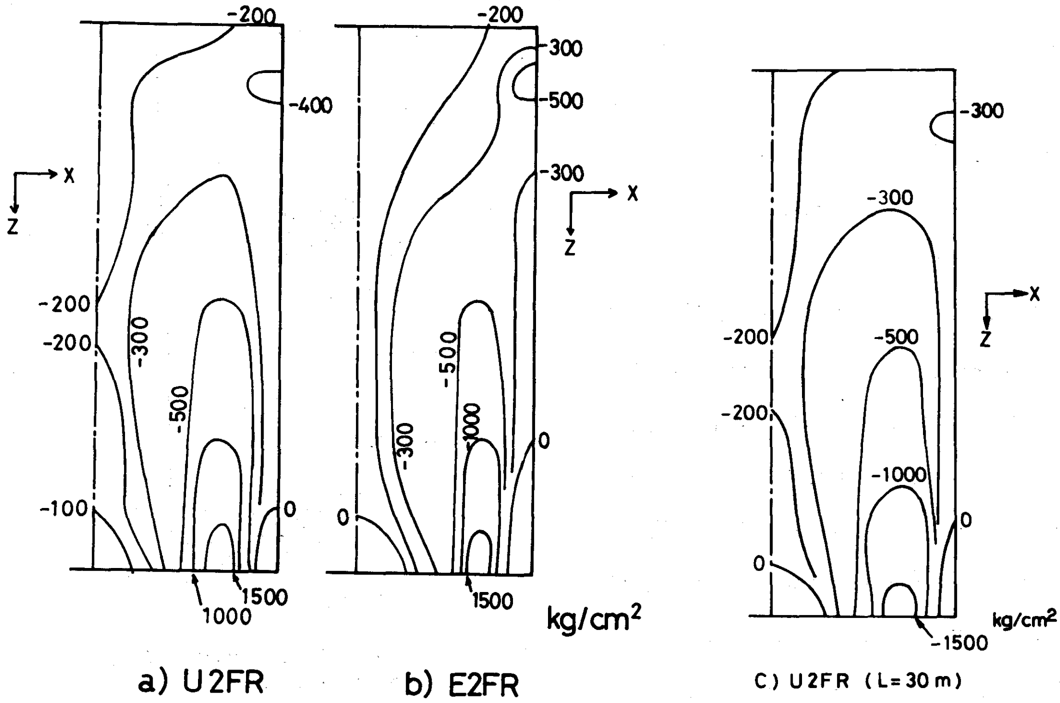


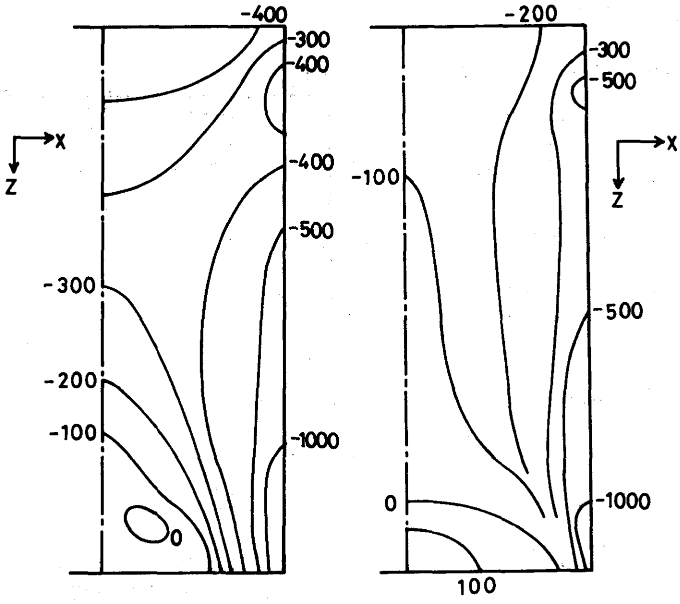
図5—18　σ_z —DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGMS WITH STIFFENERS (MODEL U2FR AND E2FR)

図5—17 a), **b)** は，等分布荷重を満載したモデルＵ２Ｆと，支点反力のみを考えたモデルＥ２Ｆの，支点上ダイヤフラムの鉛直方向応力σ_zの分布図である。これをみると，両者とも，σ_zの分布はほぼ同じであることがわかる。一方，**図5—18 a)**, **b)** は，**図5—17**と同様なモデルにおいて，ダイヤフラムに補剛材がついた，モデルＵ２ＦＲ，Ｅ２ＦＲについて，同様にσ_zの分布を示したものである。この場合は，応力の値が小さいような領域では，応力分布の傾向に若干の違いがみられるが，ダイヤフラムの設計に際して問題になると思われる，大きな応力が発生している部分では，２つのモデルの応力分布は，おおむね同じ傾向を示している。ここに示した図は，桁長L＝10mの場合についてのものであるが，５－２－１で説明した，L＝30mの場合も，ダイヤフラムの応力分布はこれらの図とほとんど同じであった。Ｕ２Ｆ，およびＵ２ＦＲの，L＝30mの場合について示すと，各々**図5—17 c)**, **5—18 c)** のようになる。L＝10mの場合と30mの場合で，応力分布がほぼ同じであることから，連続箱桁における中間支点上ダイヤフラムの評価にあたっては，連続桁の中間支点付近のみを取り出して，それを単純桁化した桁に，支点反力のみを集中荷重として作用させればよいことがわかる。

次に，**図5—17 b)**（モデルＥ２Ｆのダイヤフラム応力分布）と，**図5—18 b)**（モデルＥ２ＦＲのダイヤフラムの応力分布）から，補剛材の有無によるダイヤフラムの応力分布の相違を調べてみる。モ

デルＥ２Ｆでは，σ_zの分布の傾向は，タイプＲやタイプＴの場合と同じく，大きな応力の発生している領域が，支承部からダイヤフラム中央部に向け，斜め上方に拡がっている。一方，補剛材つきの，モデルＥ２ＦＲでは，当然のことながら，σ_zは，Ｅ２Ｆに比べて全体的に小さくなっている。また，応力値の等高線は，補剛材に沿って鉛直上方に伸びており，Ｅ２Ｆなどのように，大きな応力のある領域が，ダイヤフラム中央に向けて拡がる傾向はみられない。

図５－19は，タイプＥにおいて，支承が腹板直下にある，モデルＥ２Ｗ，Ｅ２ＷＲの，ダイヤフラムのσ_zを示したものである。この図と，図５－17ｂ)，５－18ｂ）を比較することにより，支承位置の，ダイヤフラムの応力への影響をみることができる。図より，支承が腹板直下にある場合は，Ｅ２Ｆ，Ｅ２ＦＲと異なり，ダイヤフラムには極端な応力集中はみられず，また，大きな応力が発生する領域は，腹板に沿って上方に拡がっていることがわかる。すなわち，支承が腹板直下にある場合は，腹板がダイヤフラムパネルに対する補剛材と同じ効果を示していることになる。事実，図５－20に示すように，支承が腹板の直下にあるモデルでは，腹板には大きなσ_zが発生している。図５－20は，腹板が支点上ダイヤフラムと接している部分の鉛直方向応力をプロットしたものであり，Ｅ２Ｗ,Ｅ２ＷＲ,Ｅ２Ｆ，Ｅ２ＦＲの４つのモデルについて示している。この図をみると，支承が腹板直下にある場合は，ダイヤフラムにおける補剛材の有無にかかわらず，腹板のσ_zはほとんど同じであり，その大きさは，腹板直下で2,500 kg／cm²程度となっている。一方モデルＥ２Ｆ，Ｅ２ＦＲ



a) E2W　　b) E2WR

図５－19　σ_Z—DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGMS (MODEL E2W AND E2WR)

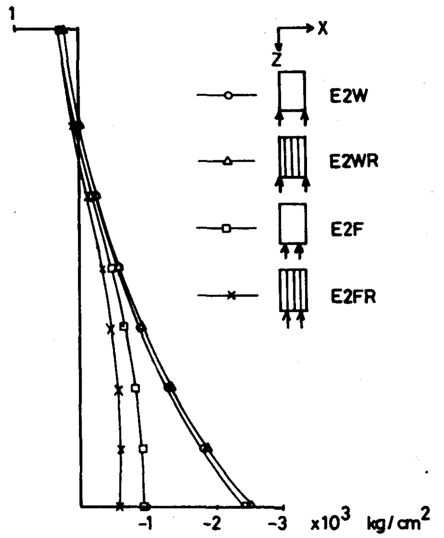
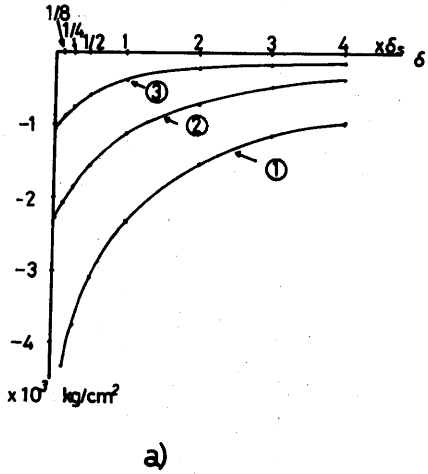


図５－20　VIRTICAL—DIRECTION STRESSES IN WEB PLATES

では，腹板のσ_zはいずれも1,000㎏／㎠以下であり，また，ダイヤフラムにおける補剛材の有無による腹板のσ_zの差も，はっきりと認められる。

さて，モデルＥ２ＦＲにおいて，補剛材の断面積をパラメータとし，補剛材の断面積の，ダイヤフラムの断面積に対する比δ（以下，リブ面積比という）を，図５－６に示した場合（$\delta=\delta_S=1.97$）の１／８，１／４，１／２，２倍，３倍，４倍とした場合の，ダイヤフラムの応力は，図５－21 a)のようになる。この図は図５－21 b）に示した①，②，③の各点におけるσ_zを，リブ面積比に応じてプロットしたものである。なお①，②，③の各点のうち，①は補剛材，②，③はダイヤフラムパネル上の点である。この図より，図５－18 b）に示した状態，すなわち$\delta=\delta_S$の場合には，補剛材は，約2,300㎏／㎠の応力を負担しているのがわかる。そして，δが小さくなると，補剛材の応力は，急激に小さくなり，また，δが大きくなると，応力は，しだいに減少し，$\delta=4\delta_S$程度では，$\sigma_S=1,000$㎏／㎠程度となっている。ダイヤフラムパネルの応力は，δが小さい区間では，補剛材ほどではないにせよ大きく変化している。しかし，δが大きくなった場合のσ_zの変化は，補剛材に比べると，ゆるやかであり，注目点③の場合，δが，δ_Sの３～４倍程度となると，補剛材の断面積をそれ以上大きくしても，それがダイヤフラムパネルの応力に，ほとんど影響を与えないことがわかる。



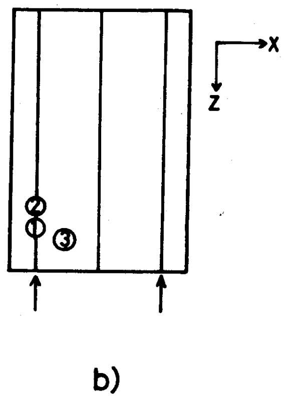


図５—21　STRESSES IN DIAPHRAGM CORRESPONDING TO THE AREA OF STIFFENERS

５－４－４　タイプＧのモデルにおけるダイヤフラムの応力分布（ＦＳＭ）

図５－22は，モデルＧⅡ２に，曲げ，およびずり荷重が載荷された場合の，中間支点上ダイヤフラムの鉛直方向応力σ_zの分布を，ＦＳＭによる数値計算により求めたものである。図５－22 a）の，曲げ載荷とは，５－２－１で説明したように，連続桁の中間支点付近のみを取り出して単純桁のように扱っているモデルに対し，支点反力に相当する集中荷重を載荷することである。ＧⅡ２では，支承，

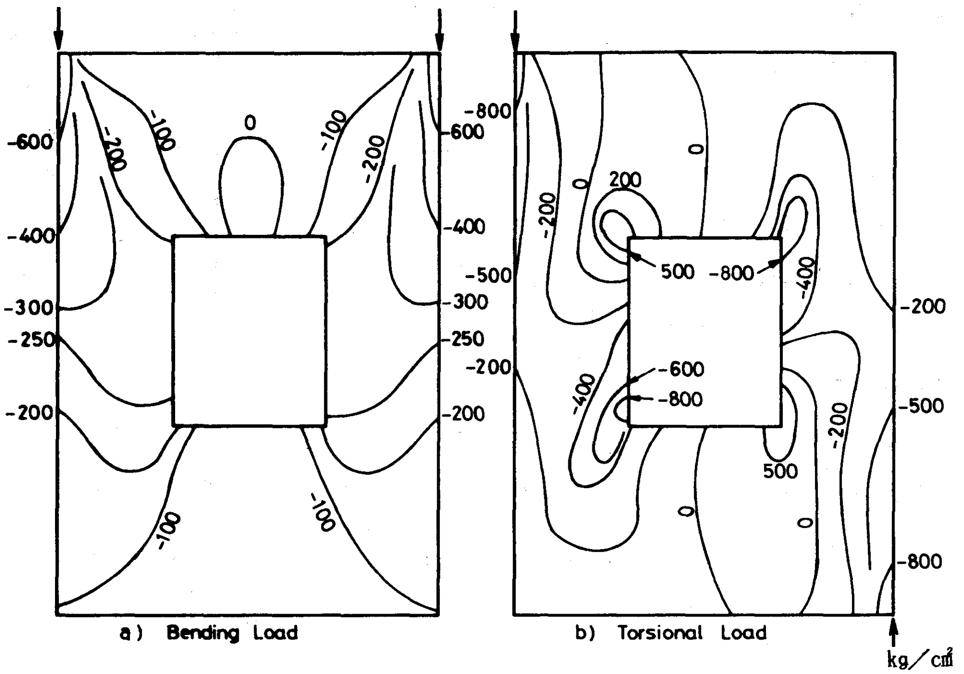


図5—22　σ_Z—DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGM (MODEL GⅡ2)

すなわち載荷点は，腹板直下（またま直上）にとっているため，曲げ載荷の場合のσ_zの分布は，モデルＥ２Ｗと似た傾向を示している。すなわち，載荷点付近で若干の応力集中がみられ，大きな応力は，ダイヤフラムの腹板に沿った部分に発生している。そして，マンホールの左右では，200～300㎏／㎠の応力がみられ，また，マンホールの上下ではごく小さな応力しか発生していないのがわかる。この載荷状態の場合は，マンホールの偶角部では，応力集中は起こっていない。

ずり荷重が載荷された場合，σ_zは，載荷点付近およびその直上（または直下）の，腹板に沿った部分で大きな値を示していることは，曲げ載荷の場合と同様である。しかし，その値は，曲げ載荷の場合に比べると，大きなものとなっている。有限要素法では，応力集中の応力は，通常，正確に求めることはできないが，参考のために，この解析により得られた載荷点直上の要素の応力を示すと，曲げ載荷の場合，約750㎏／㎠であるのに対し，ずり荷重の場合，約900㎏／㎠であった。一方，マンホール周囲には，曲げ載荷の場合と異なり，大きな応力が発生している。この応力は，ずり荷重の載荷点を結ぶ，対角線上にある偶角部では引張，反対方向の対角線上では圧縮となっており，マンホールの辺上では，小さな区間で，σ_zが500㎏／㎠程度から－800㎏／㎠程度まで，急変している。

図5—23は，モデルＧⅡ２の支点上ダイヤフラムに発生している主応力の大きさを，その方向とともに示したものである。この図では，実験においてひずみを測定した点と同じ位置における応力を示

している。この図において，実線は引張応力，破線は圧縮応力を示し，その大きさは，この図中のスケールに従ったものとなっている。曲げ載荷の場合，主応力は，載荷点付近では，そこから放射状に拡がっているが，ダイヤフラム中央部の腹板沿い，またはマンホール側辺沿いでは，主応力はほとんど鉛直方向を向いており，マンホールの上下では，ほとんど水平となっている。ずり荷重が作用した場合は，主応力は，載荷点を結ぶ対角線の方向に向いており，その値も曲げ載荷の場合よりも大きい。また，曲げ載荷の場合，ダイヤフラム中央では，横方向の引張応力はごく小さいのに対し，ずり載荷の場合，横方向には圧縮応力と同程度か，それ以上の大きさの引張応力がみられる。

5—4—5　実験によるダイヤフラムの応力分布

図5—24は，モデルGⅡ2，GⅡ3，GⅡ4に，$P_1 = P_2 = 50$ tの曲げ荷重が載荷された場合の，ダイヤフラムの主応力の大きさとその方向を，**図5—23**と同様に示

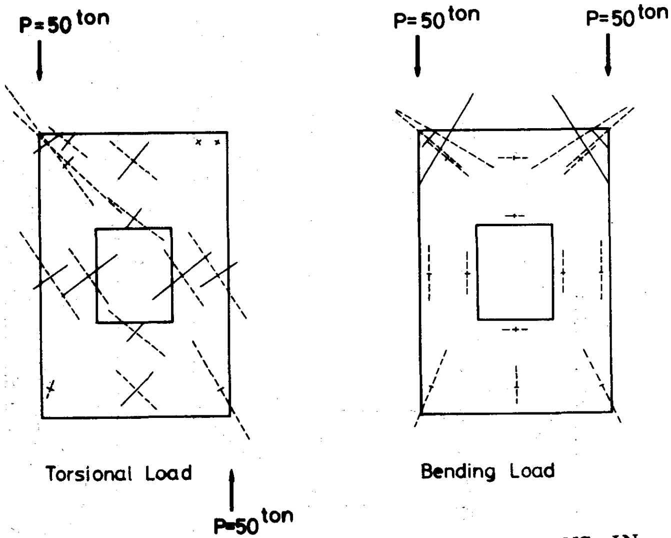


図5—23　PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGM BY FSM (MODEL GⅡ2)

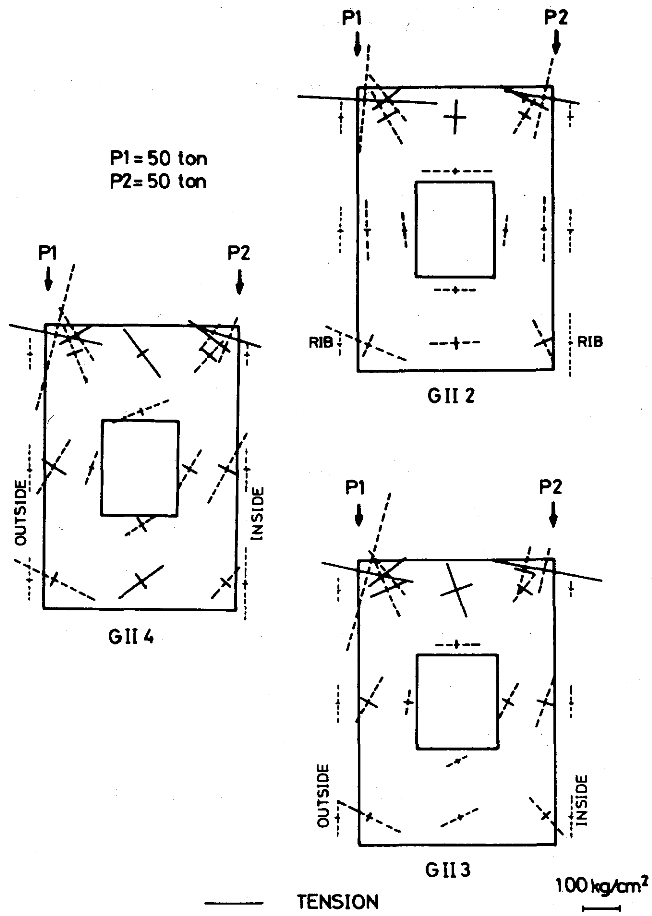


図5—24　PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTIONS BY TEST (BENDING LOAD)

したものである。曲線桁であるモデルGⅡ３，GⅡ４では，図の右側が曲率の内側である。また，図の左右の外側には，補剛材の応力を示してある。

GⅡでは，載荷点直下で大きな主圧縮応力を示しており，さらに，中立軸付近の主圧縮応力は，ほぼ鉛直方向を示しており，また，マンホールの直上，直下では，ほぼ水平方向を示している。また，載荷点直下では，主圧縮応力と主引張応力がほぼ同一の大きさであるが，これより離れるにしたがって，主引張応力が小さくなっている。この結果を，**図５—23ａ**）の，ＦＳＭにより数値的に求めた主応力分布と比較すると，中立軸付近では，この両者は，方向，大きさともに，よく一致している。載荷点付近では，大きさはおおむね一致しているが，実験により得られた主応力方向が，載荷点から放射状に拡がる傾向は，数値計算により得られた場合ほどはみられない。これは，測定上の誤差のほか，実験においては，荷重は数値計算にあたって理想化されたように，１点に集中してかかるのではなく，200㎜× 300㎜の大きさを持つ受圧板を介して，ある程度の大きさの範囲内での分布荷重としてかかること，および，数値計算では，腹板の100㎜内側のダイヤフラムパネル上にある支承上耐荷補剛材を，腹板に接している耐荷補剛材と一体化して扱っていることが原因と思われる。

GⅡ３桁では，載荷点直下における主応力の方向，大きさは，平均的にみると，　Ⅱ２とほぼ同様な傾向を示している。しかし，この場合，曲率の外側の方が内側に比べて，主圧縮応力は，大きな値となっている。中立軸付近の主圧縮応力は，大きさはGⅡ２のそれらとほぼ同じであるが，その方向は，時計方向に傾いており，曲率の影響が現われていることがわかる。

GⅡ４桁では，主応力の方向，大きさともに，GⅡ３とほぼ同様な傾向であった。補剛材については，GⅡ２，GⅡ３，GⅡ４のすべてについて，載荷点に近い測定点よりも，中立軸付近，または載荷点と反対側の測定点での応力の方が大きいことがわかる。

図５—25は，**図５—24**と同じく，ダイヤフラムの主応力の大きさ，方向を示したものであるが，この図は，ずり荷重が載荷された場合のものである。５－３で説明したとおり，直線桁であるモデルGⅡ２に対しては，図の時計方向のずり荷重のみを，また曲線桁であるGⅡ３，GⅡ４に対しては，両方向のずり荷重を載荷した。また，**図５—25**に示したのは，いずれも，荷重の大きさが，$P_1 = P_2 = 50\,t$ の場合のものである。

図の断面を時計方向に回転させる荷重が作用した場合，GⅡ２，GⅡ３，GⅡ４の各桁の主応力の大きさ，方向は，おおむね同様な傾向を示しており，載荷点間近の測定点を除いては，主圧縮応力の方向は，上下の載荷点を結ぶ方向に傾いている。しかし，載荷点間近では，主圧縮応力の方向は，他の測定点とは逆方向に傾いている。ただし，GⅡ４の上載荷点付近では，測定上の誤差と思われる誤差のため，主応力の大きさ，方向は，GⅡ２，GⅡ３とは異なっている。これらの結果を，ＦＳ

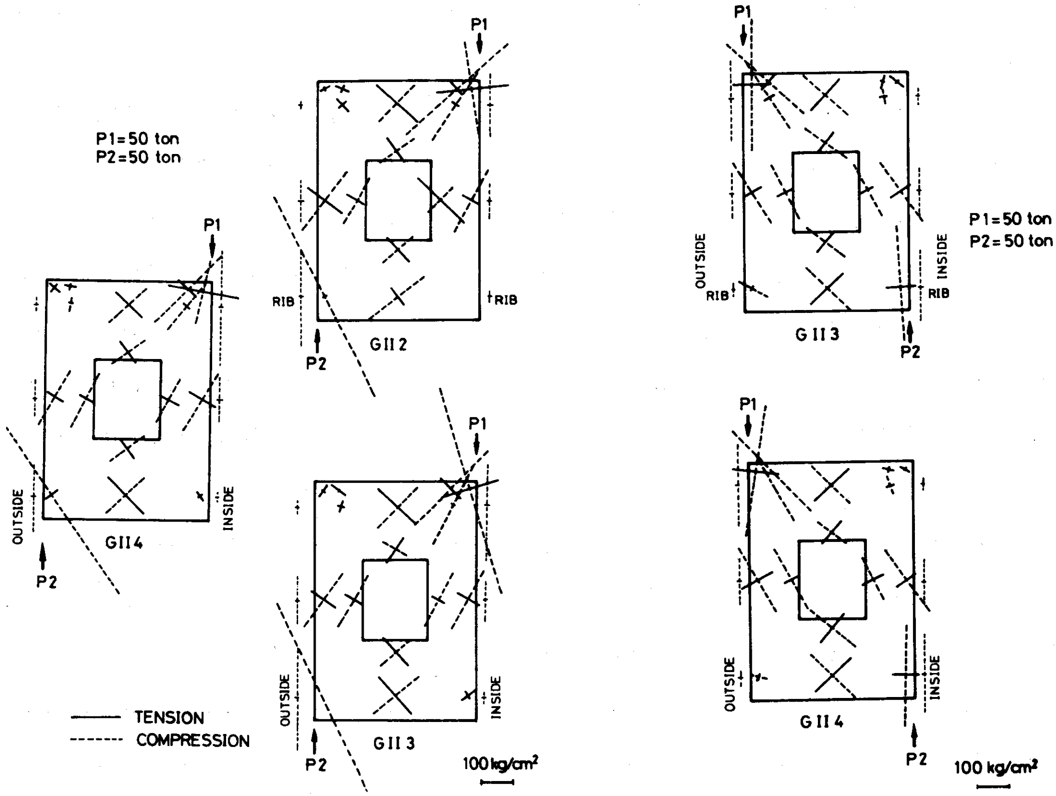


図5—25　PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTIONS BY TEST（TORSIONAL LOAD）

Mにより求めた主応力と比較すると，載荷点間近の主圧縮応力の方向を除いては，両者はほぼ一致した。載荷点間近の主圧縮応力方向が，数値計算による結果と実験結果で異なっているのは，曲げの場合と同様な理由によるものと思われる。また，ＦＳＭによる結果と同じく，実験による主応力も，その大きさは，曲げ載荷の場合よりもずり載荷の場合の方が大きい。

図の断面を反時計方向に回転させるようなずり荷重が載荷された場合の，ＧⅡ３，ＧⅡ４の主応力は，時計方向のずり荷重の場合と比較すると，その大きさはほぼ同じであり方向がほぼ逆，すなわち，おおむね対称な分布を示している。しかし，載荷間近の測定点では，主圧縮応力の方向は，ほぼ鉛直であり，載荷点の近傍では，桁の曲率により，左右方向の特性が異なっていることがわかる。ずり荷重が作用する場合の補剛材の応力は，曲げの場合と異なり，載荷点に近い測定点で大きく，そこから離れるにしたがって小さくなる傾向がみられる。

5—5　ダイヤフラムに作用する不静定力

本論文における数値解析では，２章で説明したとおり，箱桁とダイヤフラムの間の不静定力を求め，それを荷重として箱桁やダイヤフラムにかけて解析している。すなわち，ダイヤフラムは，不静定力

に等しい荷重をうけるシャイベと考えることもできる。このダイヤフラムに作用する力があらかじめわかれば，ダイヤフラムは単独に解析できることになる。文献45）などでは，ダイヤフラムに作用する力として腹板からのせん断力のみを考慮して，ダイヤフラムを単体として解析している。本節では，Ｔ２，Ｕ２Ｆ，Ｕ２ＦＲの各モデル支点上ダイヤフラムに対する不静定力を示すとともに，モデルＴ３とＴ２Ｓのダイヤフラムの応力分布を文献45）の結果と比較してみる。

モデルＴ２のダイヤフラムに対する不静定力は，**図５－26**のようになる。このモデルでは，上フランジに等分布荷重を満載しているため，ダイヤフラム上辺に圧縮力がみられる。支承部付近で大きな力がみられ，ダイヤフラム側辺に作用する力が文献45）と逆になっているのは，この図では支点反力の影響も含んでいるからである。すなわち，文献45）では，不静定力は，支承で支持されたシャイベに作用しているのに対し，**図５－26**では，この図に示した不静定力だけでつり合っていることになる。

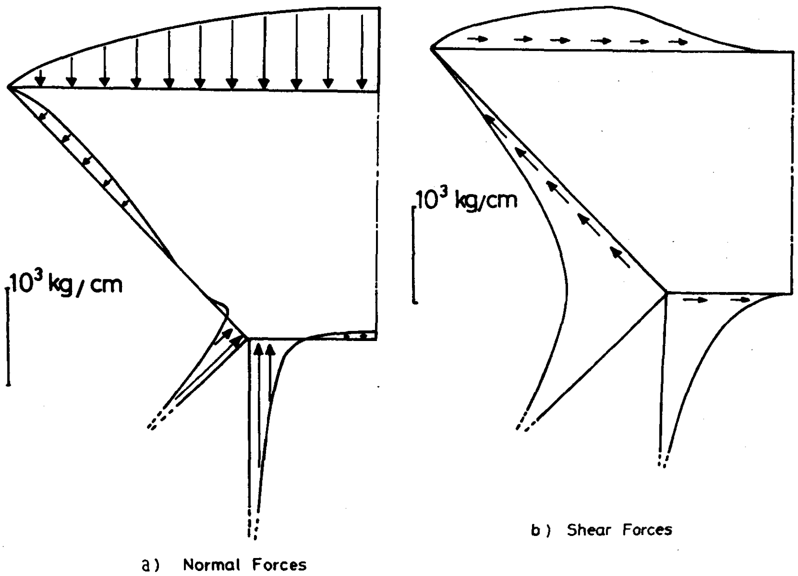


図５－26　HYPERSTATIC FORCES TO DIAPHRAGM（MODEL T２）

一方，モデル**Ｕ**２Ｆ，Ｕ２Ｆ Ｒについて同様な図を描くと，**図５－27**のようになる。これらのモデルでは，支配的なのは鉛直方向の力であるので，**図５－27**では鉛直方向の力のみ示してある。これらのモデルでは，腹板からの下向きのせん断力が，ダイヤフラム上辺の等分布荷重による圧縮力よりはるかに大きい。またダイヤフラムパネルに補剛材のないＵ２Ｆでは，ダイヤフラム側辺のせん断力は，下部ではかなり大きく，上部では小さい値であるのに対し，Ｕ２ＦＲでは，その分布はＵ２Ｆよりは均等化

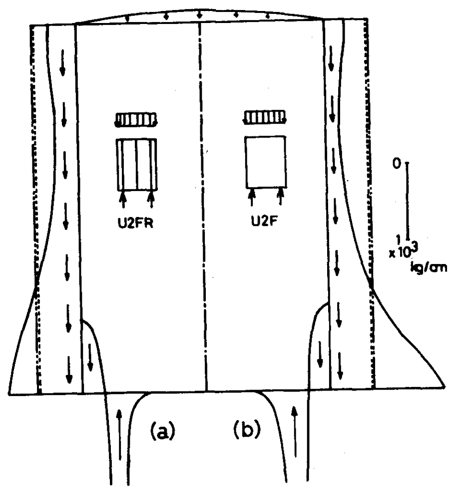


図５－27　HYPERSTATIC FORCES TO DIAPHRAGMS（MODEL U２F AND U２FR）

されている。

図5―27において，破線は，このダイヤフラム側辺に作用するせん断力の平均値を，二点鎖線は，支点反力をダイヤフラム側辺の長さで割ったものである。図より，これらの２つの値はほとんど一致している。すなわち，このモデルでは，ダイヤフラムに作用している力は，支点反力が卓越しており，その支点反力とつり合うせん断力が，ダイヤフラム側辺に作用している，と考えることができる。これをみると，モデルＵ２ＦＲの場合，ダイヤフラムに作用する力としては，支点反力と，図中の破線または一点鎖線で示されるせん断力を考えれば，ダイヤフラムの応力は，おおむね評価できるものと思われる。一方，Ｕ２Ｆでは，このせん断力の分布はＵ２ＦＲに比べ，かなり不均等であるので，せん断力をこれらの直線で近似するには若干の無理があろう。

さて，図5―16では，モデルＴ３におけるダイヤフラムの応力分布を示した。モデルＴ２の応力分布もモデルＴ３とほとんど同じであった。これらのタイプＴのモデルでは，ダイヤフラムの形状，寸法は，文献45）のモデルの形状，寸法に合わせてある。文献45）におけるモデル，および主な結果は図5―28のようである。すなわち，文献45）では，ダイヤフラムのみを取り出して平面応力状態のシャイベのように扱い，図5―28 a）に示すようなせん断力を荷重として作用させている。図5―16の結果と図5―28 b），c）の応力分布の傾向を比較してみると，両者は明らかに異っていることがわかる。特に，水平方向応力σ_zの分布を示す等応力線は，図5―28では横方向に走っており，ダイヤフラムに面内曲げが発生していることを示しているが，図5―16では，そのような傾向は全くみられない。一方，モデルＴ２Ｓでは，ダイヤフラムの応力分布は，図5―28とおおむね似た傾向であった。

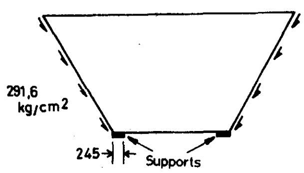
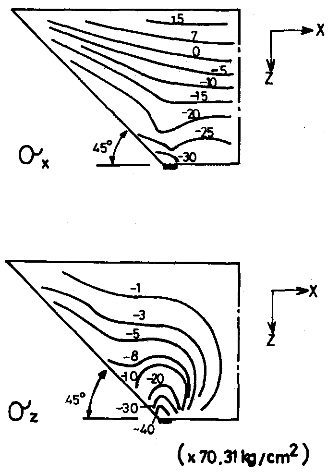


図5―28　a) Idealization
MODELS AND RESULTS IN REF.45)



b) Stress Distributions
図5―28　(CONT'D)

5―6　腹板，フランジの応力

タイプＧのモデルに，$P_1 = P_2 = 50$ t の曲げ荷重が作用した場合の，腹板，フランジの応力を，実験および有限帯板法による数値計算により求めた結果を，以下に示す。

図5―29は，中間支点上断面における，上下フランジの橋軸方向直応力を示したものである。図

中，黒丸印（—•—），白丸印（—○—）で示した線は，各々実験および数値計算により得られた応力である。単純はり理論，すなわち，$\sigma = M/W$（Mは曲げモーメント，Wは断面係数）により得られた応力も，一点鎖線で示してある。単純はり理論による応力は，GⅡ3，GⅡ4の各モデルについても，直線桁の場合の値である。

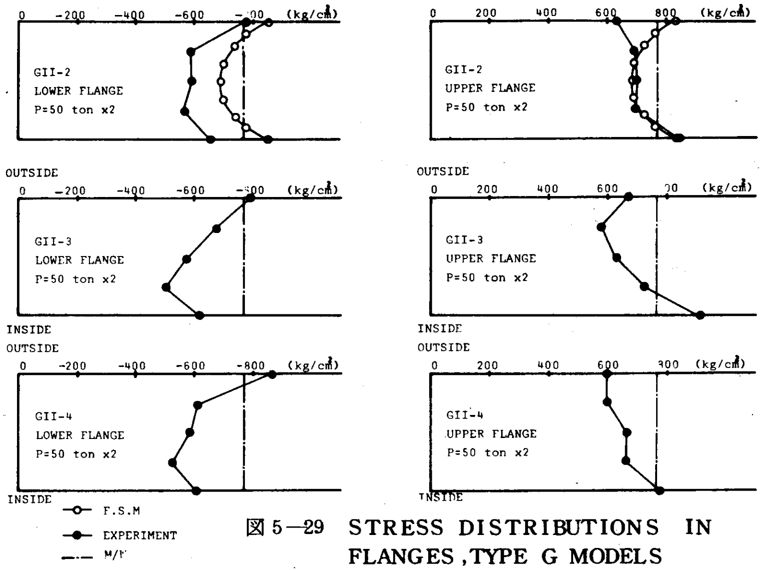


図5—29 STRESS DISTRIBUTIONS IN FLANGES, TYPE G MODELS (SECTION III)

この図から，特にGⅡ2桁では，せん断遅れの影響がかなり顕著に現われているのがわかる。GⅡ4の上フランジでは，応力分布の実験値は多少乱れているが，それ以外のモデルGⅡ3，GⅡ4では，曲率の影響による応力分布の傾きがみられる。

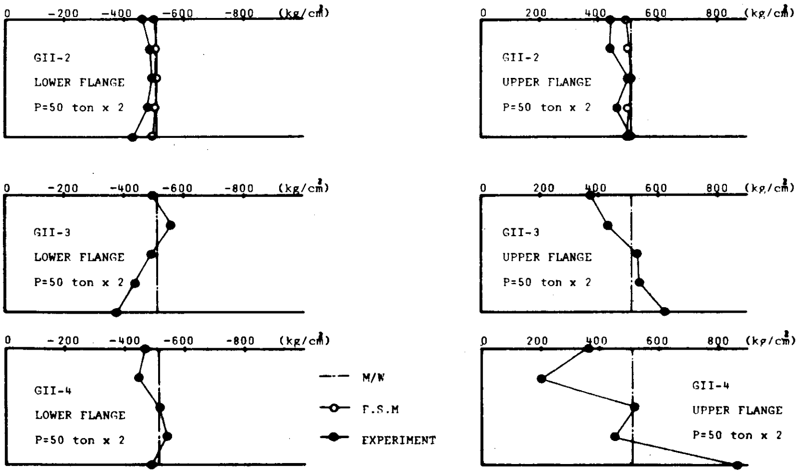


図5—30 STRESS DISTRIBUTIONS AT SECTION II IN FLANGES (TYPE G MODELS)

図5—30は 中間支点から，$L/6$（Lは桁の全長）だけ端部に寄った断面，すなわち中間ダイヤフラムD2のある断面における上下フランジの応力を，**図5—29**と同様に示したものである。この断面においては，応力の値は**図5—29**の場合に比べると，当然，小さくなっており，また，実験値はモデルGⅡ4をはじめとして，上フランジでは応力の乱れがみられる。また，この断面における応力分布は，支点上断面の場合とは逆に，わずかではあるが，負のせん断遅れの傾向が認められる。片持ちばりや連続ばりにおける負のせん断遅れについては，小松らや中井らによって研究されている[1), 114)]。研究においては前述のように，連続ばりの中間支点付近のみを取り出し，実質的には単純ばりと同様な取り扱いをしているが，このような単純ばりの場合においても，負のせん

断遅れが発生することがあり得ることが確かめられた。

図5—31は，ずり荷重が作用した場合の，中間支点上断面における腹板，フランジの橋軸方向直応力の分布を示したものである。ずり荷重の場合，荷重の大部分をダイヤフラムが，負担しているため，腹板，フランジの応力は小さく，最大でも，応力の絶対値は70〜80kg／cm²程度である。図をみると，腹板については，実験値はかなり乱れているが，モデルGⅡ2，GⅡ3の実験値，GⅡ2に対する計算値は，いずれも載荷点付近で符号が反転する傾向をみせている。フランジについては，数値計算による応力はほぼ直線分布をしている。実験値は乱れているが，おおむね計算値に沿う傾向がみられる。

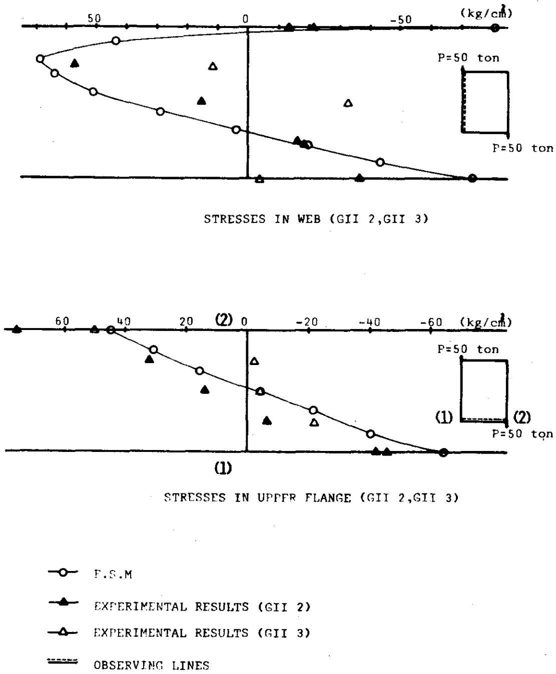


図5—31　STRESS DISTRIBUTIONS IN FLANGE AND WEB (SECTION III,G II 2,G II 3)

5—7　中間ダイヤフラムの影響

図5—24，図5—25をみると，モデルGⅡ3とGⅡ4の間には，ダイヤフラムの応力分布には大きな差異は認められない。また，図には示していないが，モデルR2とR3，T2とT3のダイヤフラムの応力分布もほとんど同じであった。これらのことから，中間ダイヤフラムの有無は，支点上ダイヤフラムの応力分布には大きな影響を与えないことが予想される。そこで，タイプGについて，中間ダイヤフラムの剛度が異なるGⅡ0，GⅡ2，GⅡ1，GⅡ1Sの各モデルについて支点上ダイヤフラムおよび腹板，フランジの応力を比較してみる。前に説明したように，GⅡ0は中間ダイヤフラムのないモデル，GⅡ2はラーメン形式の中間ダイヤフラムを有するモデル，GⅡ1はマンホール形式の中間ダイヤフラムを有するモデルであり，GⅡ1SはGⅡ1において中間ダイヤフラ

表5—1　ANALYZED AND EXPERIMENTED MODELS

			長方形断面	台形断面	長方形断面（タイプE）		長方形断面（タイプG）	
			(タイプR)	(タイプT)	リブなし	リブつき	直線	曲線
中間ダイヤフラムなし	等分布桁重満載	支承は腹板下	R2	T2	——	——	——	——
		支承は下フランジ	——	——	U2F	U2FR	——	——
	反力のみ	支承は腹板下	——	——	E2W	E2WR	GⅡ0	GⅡ0R
		支承は下フランジ	——	——	E2F	E2FR	——	——
	腹板にせん断力		——	T2S	——	——	——	——
中間ダイヤフラムあり	各スパン1枚		R3	T3	——	——	——	——
	各スパン2枚	マンホール形式	——	——	——	——	GⅡ1,GⅡ1S	GⅡ3*
		ラーメン形式	——	——	——	——	GⅡ2*	GⅡ4*

* ：実験用モデル

ムの板厚を10倍にしたものである。すなわち，中間ダイヤフラムの剛度は，GⅡ0，GⅡ2，GⅡ1，GⅡ1Sの順に大きくなることになる。

表5－2 a)，b) は，それぞれ曲げ，およびずり荷重が作用した場合の，ダイヤフラム上の各点における応力を，縦方向に上記の各モデルを，横方向に注目点をとって示したものである。これらの注目点の位置は，1～6の記号で，表中の図に示してある。この表をみると，これら各モデルの間で，ダイヤフラムの応力にはほとんど差がないことがわかる。また，**表5－3** は，中間支点上断面における，上フランジおよび腹板の，橋軸方向の応力を示したものである。この表では，横方向に各モデルを，縦方向に，腹板，およびフランジ上の点を1～17の記号でとっている。これらの測定点の位置は，表中の図に示してある。この表からも，中間ダイヤフラムの有無による各注目点における応力の値の差は，ほとんどないことがわかる。

一方，**表5－4** は，マンホール形式の中間ダイヤフラムを有する曲線桁GⅡ3と，中間ダイヤフラムのない曲線GⅡ0Gについて，**表5－2** と同様にダイヤフラムの応力を比較したものである。ずり荷重が作用した場合は，曲線桁の場合であっても，ダイヤフラムの応力は，GⅡ0RとGⅡ3で，大きな差はみられない。

表5－2 a)　RESULTS OF PARAMETRIC STUDY BY FSM (BENDING LOAD)

MODEL		1	2	3	4	5	6
GⅡ0	σ_x	-27.0	-27.0	35.0	7.3	7.4	59.6
	σ_y	333.2	333.2	-14.0	150.5	150.5	19.6
	τ_{xy}	12.2	-12.2	7.4	-1.9	1.9	-10.7
GⅡ2	σ_x	-27.3	-27.3	34.8	7.3	7.3	60.7
	σ_y	331.3	331.3	-14.0	150.4	150.4	19.7
	τ_{xy}	11.6	-11.6	7.4	-1.5	1.5	-10.8
GⅡ1	σ_x	-27.3	-27.3	34.6	7.3	7.3	60.3
	σ_y	331.2	331.2	-14.5	150.4	150.4	19.7
	τ_{xy}	11.3	-11.3	7.5	-1.4	1.4	-10.8
GⅡ1S	σ_x	-28.6	-28.6	33.4	7.3	7.3	60.1
	σ_y	327.9	327.9	-14.8	150.3	150.3	20.0
	τ_{xy}	9.1	-9.1	7.7	-0.6	0.6	-11.0

kg/cm²

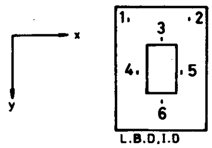


表5－2b)　RESULTS OF PARAMETRIC STUDY BY FSM (TORSIONAL LOAD)

MODEL		1	2	3	4	5	6
GⅡ0	σ_x	10.1	-2.3	26.0	12.9	0.4	24.4
	σ_y	407.0	1.3	-3.7	151.7	148.9	-4.2
	τ_{xy}	120.1	-14.0	163.3	181.8	188.9	161.2
GⅡ2	σ_x	10.2	-2.4	25.8	13.0	0.4	24.2
	σ_y	406.9	0.9	-3.8	151.7	148.8	-4.2
	τ_{xy}	120.6	-13.4	164.6	183.3	190.4	162.1
GⅡ1	σ_x	10.2	-2.4	25.8	13.0	-0.4	24.2
	σ_y	407.1	0.8	-3.8	151.6	148.8	-4.2
	τ_{xy}	120.5	-13.4	164.1	182.8	189.9	162.1
GⅡ1S	σ_x	10.3	-2.5	25.9	12.9	0.4	24.3
	σ_y	406.4	0.6	-3.7	151.5	148.7	-4.2
	τ_{xy}	120.5	-13.5	163.6	182.1	189.2	161.5

kg/cm²

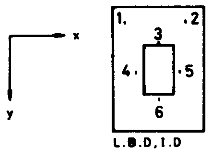


表5－3 a)　NORMAL STRESSES IN FLANGE AND WEB BY FSM (BENDING LOAD)

(kg/cm²)

No. \ MODEL	GⅡ1S	GⅡ1	GⅡ2	GⅡ0
1	-1023	-1029	-1030	-1032
2	-623	-621	-621	-619
3	-368	-367	-366	-365
4	-213	-213	-212	-211
5	-54	-54	-54	-53
6	120	121	120	121
7	275	276	275	275
8	420	420	419	418
9	619	618	618	617
10	864	870	870	872
11	825	832	833	834
12	748	747	747	747
13	702	700	700	699
14	687	686	685	685
15	702	700	700	699
16	748	747	747	747
17	825	832	833	834

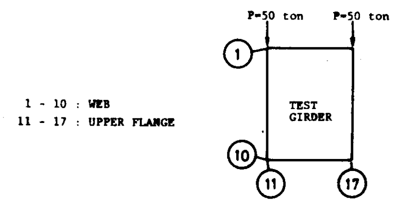
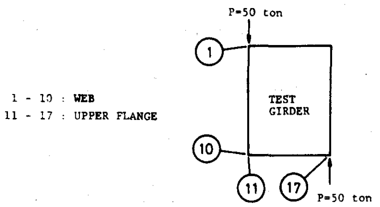


表5－3 b)　NORMAL STRESSES IN FLANGE AND WEB BY FSM (TORSIONAL LOAD)

(kg/cm²)

No. ＼ MODEL	GII 1S	GII 1	GII 2	GII 0
1	-86.0	-85.6	-86.6	-91.5
2	43.7	46.7	43.7	41.1
3	68.5	69.0	68.3	66.8
4	64.6	65.0	64.6	63.7
5	51.7	52.0	52.0	51.7
6	27.9	28.2	28.5	29.0
7	2.9	3.2	3.7	4.9
8	-19.2	-19.1	-18.3	-16.4
9	-42.2	-42.2	-42.2	-39.2
10	-72.9	-73.7	-73.0	-68.5
11	-63.7	-64.6	-63.9	-59.6
12	-40.9	-41.1	-40.3	-37.6
13	-22.0	-22.1	-21.7	-20.4
14	-4.1	-4.3	-4.3	-4.3
15	16.4	16.3	15.9	14.7
16	32.7	32.8	31.9	29.3
17	44.6	45.3	44.5	40.0

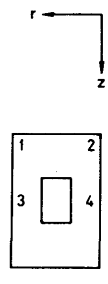


曲げが作用する場合は，ずり荷重の場合と異なり，GⅡ0RとGⅡ3の間では，応力の値に違いがみられ，注目点2では，中間ダイヤフラムがある場合の方が，それがない場合に比べ，σ_rで約1.4倍，σ_zで約1.5倍，τ_{rz}で約2.6倍，大きな応力となっている。しかし**図5－24**をみると，GⅡ3とGⅡ4の実験による応力には，大きな違いはみられない。すなわち，タイプGにおける曲線桁に曲げが作用する場合，中間ダイヤフラムのないモデルと中間ダイヤフラムを有するモデルの間では，支点上ダイヤフラムの応力に差はあるが，中間ダイヤフラムを有するものについては，中間ダイヤフラムの形式の違いは，支点上ダイヤフラムの応力に対して影響はあまり与えないことがわかる。

表5－4　NORMAL STRESSES IN DIAPHRAGMS OF CURVED MODELS BY FSM

	MODEL		1	2	3	4
BENDING	GII OR	σ_r	-153.5	-95.3	-1.8	0.5
		σ_z	-136.5	-15.9	-71.7	39.9
		τ_{rz}	-139.8	27.6	-104.4	-150.6
	GII 3	σ_r	-121.9	-135.0	-0.1	-0.1
		σ_z	-91.0	-24.0	-31.6	4.2
		τ_{rz}	-98.6	70.5	-28.7	-76.6
TORSIONAL 1	GII OR	σ_r	59.8	24.1	0.8	1.8
		σ_z	103.6	106.9	75.0	210.0
		τ_{rz}	126.6	-42.2	202.5	187.3
	GII 3	σ_r	61.1	22.8	0.9	1.8
		σ_z	104.8	105.9	75.7	208.3
		τ_{rz}	127.6	-40.9	204.3	189.0
TORSIONAL 2	GII OR	σ_r	32.2	58.5	2.3	0.7
		σ_z	102.2	105.1	211.0	76.4
		τ_{rz}	44.5	-127.0	-187.8	-201.5
	GII 3	σ_r	31.4	59.9	2.3	0.7
		σ_z	101.1	106.2	209.8	76.9
		τ_{rz}	43.5	-128.0	-189.5	-203.1

kg/cm²



5－8　まとめ

本章では，二径間連続の直線，および曲線箱桁橋の，中間支点上ダイヤフラム，およびその近傍の腹板，フランジについて，弾性範囲内での数値計算，および実験により得られた応力を示した。以上の結果をまとめると，次のようになる。

1）ここで扱ったすべてのモデルで，支点上ダイヤフラムは，支承付近で大きな鉛直方向応力が発生している。支承上に耐荷補剛材のないモデルの場合，大きな鉛直方向応力のみられる領域は，言わゆるアーチ作用により，支承部からダイヤフラム中央部に向け，斜め上方に拡がっている。しかし，ダイヤフラムに支承上耐荷補剛材があると，応力は補剛材に沿って拡がる。支承が腹板直下にある場合は，腹板が補剛材と同様な働きをする。この場合は，当然，腹板に大きな鉛直方向圧縮力が発生す

るので，腹板に対する補剛材が必要であることがわかる。

2）ダイヤフラムに補剛材がつくと，ダイヤフラムの応力は，当然小さくなるが，リブ面積比 δ をあまり大きくしても無意味である。δ が $\frac{1}{2}\delta_S \sim \delta_S$（$\delta_S$ は図5－6に示したダイヤフラムの場合のリブ面積比で，$\delta_S = 1.97$ である）程度であれば，ダイヤフラムの応力はすでに小さくなっている。

3）　タイプRのモデルでは，ダイヤフラムに作用する不静定力は，支点反力によるもののほか，腹板からのせん断力が支配的である。支承上に補剛材があれば，腹板からのせん断力は直線分布を仮定しても，ダイヤフラムの応力は，おおむね評価できるものと思われる。

4）タイプTのモデルでは，不静定力として，腹板からのせん断力のほか，ダイヤフラム上辺に大きな圧縮力が働いており，腹板からのせん断力のみを考えるのは不十分である。上フランジに等分布荷重が満載されたモデルのダイヤフラムの応力分布は，腹板からのせん断力のみを考えて，ダイヤフラムを分離して解析した結果と，その傾向は異なっている。すなわち，ダイヤフラムを箱桁から分離して解析する場合には，そのモデルの挙動を十分に表すことができるような不静定力をとらなければならない。

5）タイプGのモデルについて調べられたダイヤフラムの主応力分布からは，載荷点付近では，主圧縮応力は，そこから放射状に拡がっていることがわかる。。曲げ荷重が載荷された場合，中立軸付近の主応力方向は，直線桁ではほぼ鉛直であるが，曲線桁では，載荷点側で内寄りとなる方向に回転している。また，ずり荷重が作用する場合は，主応力方向は，上下の載荷点を結ぶ方向に傾いている。

6）タイプGのモデルの，補剛材の応力は、曲げが作用した場合、載荷点近くよりも，載荷点から離れた点の方が大きい。

7）曲線桁の場合，載荷点付近の応力は，曲線の外側で大きく，内側で小さな値を示す傾向がある。

8）フランジの応力は，中間支点付近では，せん断遅れが，L／6だけ桁端に寄った断面では，負のせん断遅れがみられる。

9）直線桁では，中間ダイヤフラムの形式や，その有無は，支点上ダイヤフラムやその付近の応力には，ほとんど影響を与えない。曲線桁では，中間ダイヤフラムの有無は，支点上ダイヤフラムの応力に影響を与えるが，中間ダイヤフラムを有するモデルどうしでは，その形式の相違は，支点上ダイヤフラムにはあまり影響を与えないものと思われる。

6. 支点上ダイヤフラムの強度と桁の耐荷力

6－1 まえがき

箱桁橋の支点上ダイヤフラムは，一般に，大きな支点反力をうけるので，その強度が問題とされることが多い。第5章で説明した，支点上ダイヤフラムに関する文献45），46），48）～51），105）は，いずれもダイヤフラムの座屈について触れている。

Dowlingら[48),105)]は，長方形，台形断面の支点上ダイヤフラムの崩壊挙動に関する実験を行い，ダイヤフラムの応力分布や破壊モード，支点の製作上の初期不整の影響を調べている。Crisfieldら[50)]は，支点上ダイヤフラムの強度について，有限要素法により解析し，結果をIDRと比較している。また，El－Gaaly[45)46)]による支点上ダイヤフラムに関する研究では，無補剛ダイヤフラムの座屈荷重と，直交異方性板として扱った補剛ダイヤフラムの座屈荷重の関係などを求めている。Sawkoら[51)]も，有限要素法により支点上ダイヤフラムを解析し，補剛材の相違によるダイヤフラムの座屈荷重の変化などを調べている。

このように，支点上ダイヤフラムの強度に関する研究は，いくつかを挙げることができるが，その数は，箱桁に関する他の問題（箱桁の全体解析，断面変形問題や中間ダイヤフラムなど）と比較すると，かなり少ないと言わざるを得ない。

一方，プレートガーダーの腹板等の耐荷力については，小松ら[104)]の研究や，Basler[91)]の研究をはじめ，多くの研究成果が発表されており，例えば腹板のせん断強度に対する，フランジの強度の影響などが明らかにされている。しかしながら，箱桁については，支点付近の腹板の強度に与えるダイヤフラムの影響などの研究はみられない。

本章では，箱桁の中間支点上，および端支点上ダイヤフラムとその近傍に注目した実験をもとに，その実験結果やIDR[122)]との比較，有限要素法による数値解析などから，支点上ダイヤフラム等の強度について考察する。

支点上ダイヤフラムに関する実験は，曲げが支配的である中間支点付近，せん断が支配的である端支点付近のそれぞれに対し，各2体づつの模型を用いて行われた。この実験では，主として次の事項に注目した調査が行われた。

1）中間支点上ダイヤフラム，端支点上ダイヤフラムの剛度の違いによる各ダイヤフラムの応力（ひずみ）分布，桁の崩壊機構，変形性状を調べる。

2）中間支点上の断面内で，1点支承，2点支承と，異なる支持方法とした場合の，ダイヤフラムお

よび桁の応力分布，局部変形の相違を調べる。

なお，この実験は，実際に計画されている橋に関連して行われたものであり，上記注目事項のうち，2）は，完成後は2点支持となる橋梁であっても，架設中は一時的に1点支持となるため，それを想定したものである。

6－2　実験モデル

6－2－1　中間支点付近に注目した実験のモデル

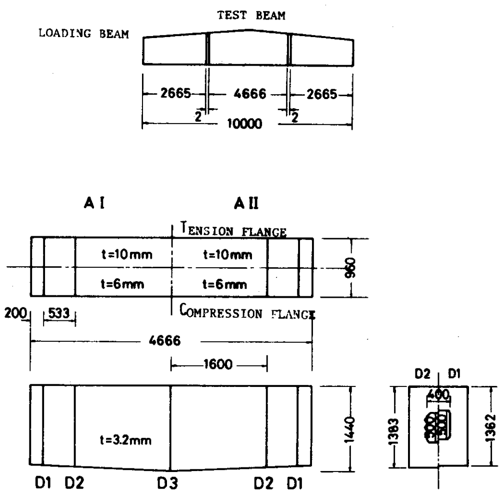


図6－1 a)　TEST GIRDERS (A SERIES)

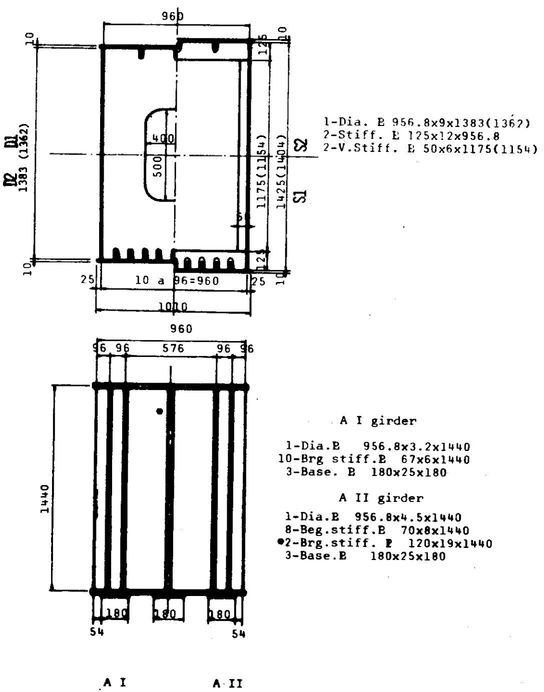


図6－1 b)　DETAILS OF DIAPHRAGMS

この実験は，図6－1に示すような，AⅠ，AⅡ2体の模型に対して行われた。これらの模型は，第5章におけるタイプGのモデルと同じく，連続桁の中間支点部のみを取り出して，単純桁のように扱ったものであり，桁高4％の勾配をもつ変断面桁である。AⅠ，AⅡ2体の模型はいずれも，図6－1に示すように，長さ4.667 *m*の試験桁と，長さ2.665 *m*の補助桁2本より成っており，これらは，1断面につき，200本のHTボルトにより接合されている。この補助桁は，1組のみ製作し，AⅠ，AⅡの両者に共通に利用した。

試験桁は，その中央，すなわち中間支点上ダイヤフラムD_3を有するほか，図に示す位置に，中間ダイヤフラムD_1，D_2，D_2とD_3の間に，鉛直補剛材S_1，S_2が配置されている。また，橋軸方向には，

圧縮フランジに9本，引張フランジに3本，腹板は，片側につき4本の補剛材が配置されている。これらについては，**図6－2**に示す。AⅠ，AⅡは，中間支点上ダイヤフラムD_3を構成する板の板厚と補剛材の断面積のみが異なっており，他はすべて同一の公称寸法に作られている。

試験桁は，おおよそ次の方針により設計されている。

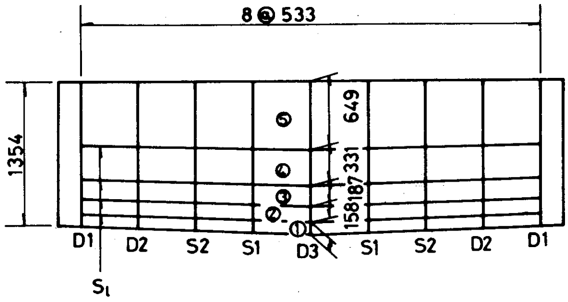


図6－2　WEB PANELS AND STIFFENERS

ⅰ）腹板の高さと使用板厚の比b/tを，計画中の実橋のそれと一致させる。計画によると，腹板高さ9 m，板厚t＝20㎜の桁が考えられているため，$b/t = 450$となる。模型の縮尺を1/6程度とし，模型において$t = 3.2$ ㎜の板厚の鋼材を用いるものとすると，$b = 1.44$ mとなる。

ⅱ）中間支点上断面において，上フランジ，下フランジに生じる曲げモーメントによる縁応力σ_D，σ_Bと，腹板に生じるせん断応力τ_Wの比$\sigma_D : \sigma_B : \tau_W$を，計画中のそれに近いものとさせる。計画によると，$\sigma_D : \sigma_B : \tau_W = 0.8 : 1.0 : 0.3$と想定されている。一方，この模型では，おおよそ，$\sigma_D : \sigma_B : \tau_W = 0.88 : 1.0 : 0.35$となる。

ⅲ）腹板の水平補剛材の間隔，本数は，計画中のそれをもとに決める。

ⅳ）腹板，上下フランジの補剛材は，上記ⅰ），ⅱ)により得られた断面に対し，示方書[123)]により検討する。支点上ダイヤフラムは，ⅰ），ⅱ）より得られた断面に対し，後述のように設計する。

図6－1，**図6－2**に示された試験桁の寸法は，このように決められたものである。以下，試験桁の腹板のうち，曲げによる応力の大きいパネル，すなわち**図6－2**のパネル①について，その安全性を検討する。

この桁の最大断面における断面二次モーメントは，$I = 1.211 \times 10^6$ ㎝^{4}，中立軸から圧縮縁までの距離は，$y = 76.51$㎝である。この断面に，支点反力（すなわち荷重）$P(t)$が作用するときの，このパネルの応力は，**表6－1 a)**のようになる。したがって，このパネルがMisesの降伏条件により降伏するときの荷重P_yは，降伏応力を$\sigma_y = 3000$ kg/㎠とすると，3000 kg/㎠$= 18.3 \cdot P_y$より，$P_y = 164\,t$となる。また，この桁の全塑性モーメントM_pは，$M_p = 533\,t \cdot m$となるので，全断面が降伏するときの荷重P_pは，$M_p = P_p \cdot l/4$（lは桁長）より，$P_p = 213\,t$となる。

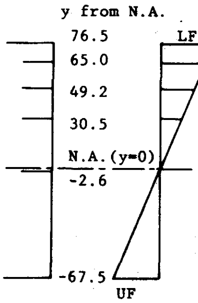
次に，模型の腹板の各パネルにつき，座屈に対する安全性を検討すると，**表6－1 b)**のようにな

表6—1 REFERENCE STRENGTHS OF A SERIES GIRDERS

a) Stresses of Panel ① by Load P (t)

	kg/cm^2
σ (normal stress)	15.7P
τ (shear stress)	5.43P
$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma^2+3\tau^2}$	18.3P

b) Buckling Strength of Web Panels



PANEL	b (cm)	$\alpha=a/b$	σ_e (kg/cm^2)	σ_{cr} (kg/cm^2)	τ_{cr} (kg/cm^2)	P_{cr} (ton)	P_u (ton)
1	11.5	4.63	1468	6327	8118	252	—
2	15.8	3.37	782.5	3540	4452	167	—
3	18.7	2.85	555.3	2712	3237	166	—
4	33.1	1.61	177.6	1464	1222	132	—
5	64.9	0.82	46.15	—	551.0	101	247

(a=53.3 cm)

る。この表で，パネルの番号1～5は，各々，**図6—2**のパネル①～⑤を示す。また，D, α, σ_e, σ_{cr}, τ_{cr} は，各々，パネルの幅，縦横比，Eulerの座屈応力,曲げおよびせん断座屈応力である。P_{cr} は，各パネルが座屈するときの，桁に作用する荷重である。これは，作用する面内応力が引張となるパネル5においては，τ_{cr} より，パネル1からパネル4においては，示方書[123] 8.4の腹板の座屈に対する組合せ安全率 ν_B を1とすることにより求めたものである。また，P_u は，Baslerの式[91]により求めたパネル5の耐荷力に対する荷重である。

以上のことから，この桁は，$P=101t$ で腹板パネル5がせん断座屈，$P=164t$ でパネル1が降伏し，$P=213t$ で全断面が降伏することにより，崩壊することがわかる。

一方，支点上ダイヤフラムについては，支承上耐荷補剛材とダイヤフラムパネルの一部（ここではソールプレート幅）を有効面積とする柱とみなし，AⅡでは，$P=164t$ に耐える程度,AⅠでは，AⅡに比べて小さな断面としている。実際には，2点支承に対する柱の有効面積は，支承1つにつき，AⅡで30.5㎠，AⅠで21.8㎠であるので，柱の降伏するときの荷重は，AⅡで183t, AⅠで131 t である。なお，示方書[123] 8.7 1に規定されているように，桁高の1/2を座屈有効長として，この柱の座屈荷重を求めると，1支承につき，AⅡで1,607t，AⅠで1,032t であるので，これらの柱の座屈は，考えなくてもよいと思われる。

以上のことより，AⅠでは，支点上ダイヤフラムの破壊により桁が破壊し，AⅡでは，桁と支点上

ダイヤフラムが，ほぼ同時に破壊することになる。

以下，モデルＡＩ，ＡⅡによる実験をＡシリーズとよぶことにする。

6－2－2　端支点付近に注目した実験のモデル

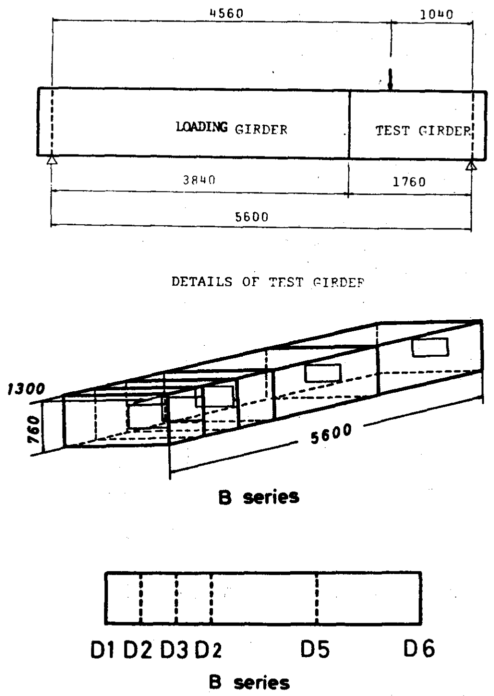


図6―3ａ）　TEST GIRDERS (B SERIES)

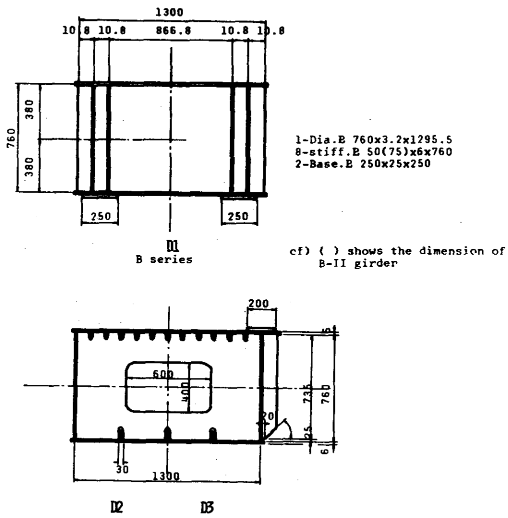


図6―3ｂ）　DETAILS OF DIAPHRAGMS

端支点付近に注目した実験は，**図6－3**に示すような形状をした，ＢＩ，ＢⅡの２体の模型について行われた。これらの模型は，いずれも，図に示すように，長さ 1.76 *m*の試験桁と，3.84 *m*の補助桁より成っており，これらは，160本のＨＴボルトにより接合されている。Ａシリーズの模型と同じく，補助桁は１体のみ製作し，ＢＩ，ＢⅡに共通に利用した。試験桁は，端支点上に支点上ダイヤフラムD_1を有するほか，図に示す位置に，中間ダイヤフラムD_2，D_3を有している。これらのうち，D_3は集中荷重をうけるため，板厚，補剛材の有無がD_2と異なっている。このほか，腹板には，D_2とD_3の間の各腹板パネルに，90㎜×６㎜の鉛直補剛材が３本づつ，50㎜×4.5㎜の水平補剛材が左右に各１本づつ配置されており，また，上フランジには，38㎜×4.5㎜の補剛材が11本，下フランジには，75㎜×６㎜の補剛材が３本，それぞれ橋軸方向に配置されている。これらについては，**図6－3**のほか，**図6－4**に示す。ＢＩ，ＢⅡは，端支点上ダイヤフラムを構成する支承上耐荷補剛材の断面のみが異なっており，他の部分は，すべて同一の公称寸法で作られている。

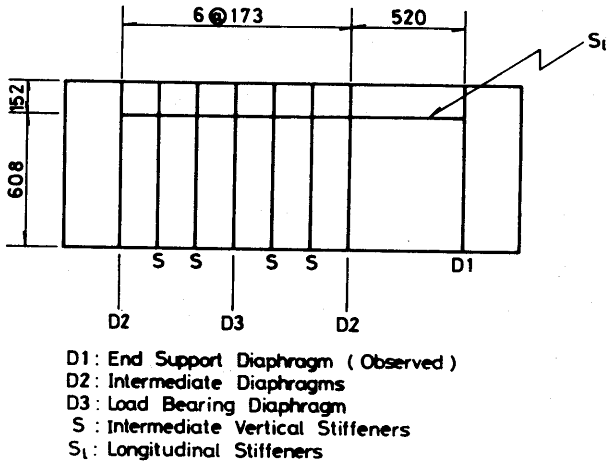


図6—4 WEB PANELS OF TEST GIRDERS (B SERIES)

モデルBⅠ，BⅡの，腹板パネルのうち最も支点寄りのパネル，すなわち，D_1とD_2の間のパネルでは,鉛直補剛材は配置されていない。すなわち，このパネルが，腹板の中で最も強度が小さいことになる。$\sigma y = 2,700$ ㎏/㎠として,Baslerの式[91]により，このパネルのせん断耐荷力を求めると，次のようになる。（図6—5）。

このパネルは，高さ608㎜，幅520㎜板厚4.5㎜であるから，文献91)における式14，すなわち極限強度Vuと,降伏せん断力Vpの比，$Vu/Vp = 0.916$である。従って，このパネルの極限強度Vuは，$Vu = 39.1t$となる。せん断力が，腹板の深さ方向に一様に分布していると仮定し，腹板が左右2枚あることを考えると，パネルの極限強度に対応するこの断面のせん断力V'_u，すなわち考えている端支点の反力は，$97.7t$である。よって，これに対応する終局荷重P_{cr}は，$120t$である。

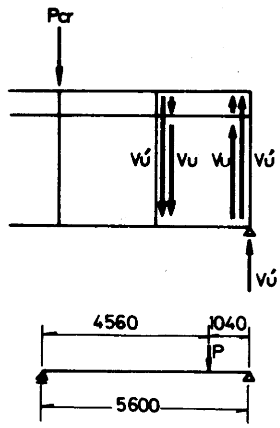


図6—5 SHEARING FORCES FOR WES PANELS

一方，支点上ダイヤフラムを，支承上耐荷補剛材とソールプレート上のダイヤフラムパネルを有効断面とする柱と考えると，支点上ダイヤフラムは，BⅠでは，$133t$，($P_1 = P_2 = 66.3t$)，BⅡでは，$173t$，($P_1 = P_2 = 86.2t$）で降伏する程度の断面である。なお，AⅠ，AⅡの場合と同じく，示方書[123]8。7。1に規定されているように座屈有効長を決めて，これらの柱の座屈荷重を求めると，BⅠでは$3,884t$，BⅡでは$12,696t$であるので，示方書による限り，これらの柱の座屈は，考慮しなくてよい。

以下，端支点付近に注目した実験を，Bシリーズとよぶ。

6—3 耐荷力実験の概要

6—3—1 Aシリーズの実験概要

Aシリーズの模型に対する荷重は，支点反力を想定したものであるが，第5章におけるタイプGの

実験と同じく，桁を上下逆に設置し，上から下向きに載荷している。荷重は，図６－６ｂ）に示すような２点載荷のほか，架設時に１点支持になることを考えて，１点載荷も行っている。実際には，ＡⅠ，ＡⅡそれぞれに対して，１点載荷により弾性実験を行った後に，２点載荷による破壊実験を行った。

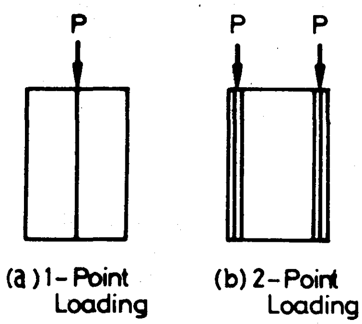


図６—６　LOADING FOR A SERIES TEST

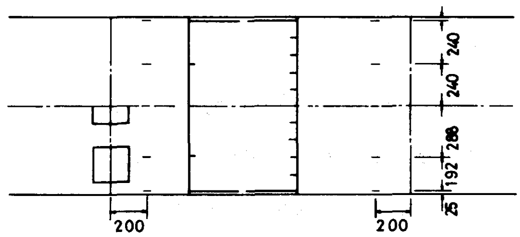
Ａシリーズの模型に対するひずみ測定位置は，図６－７に示す。

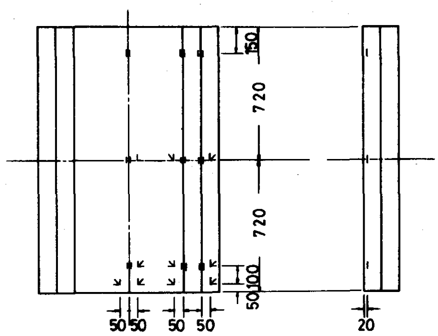
ダイヤフラムは，図の下側（載荷点側）に，ひずみゲージを密に貼付した。これらのゲージは，主応力の方向を知るため，三軸のものを用いており，ダイヤフラムパネルの片面にのみ貼付している。支承上耐荷補剛材については，図の右側，および中央のものについてのみ，補剛材の上部，中部，下部の３か所の表，裏に一軸ゲージを貼付している。

腹板，フランジについては，第５章のタイプＧのモデルに対する実験と同じく，中間支点上断面から200 ㎜離れた位置に，図に示したように，フランジには一軸ゲージを，腹板には三軸ゲージを配置した。このうち，腹板については，ひずみゲージは，片側の表，裏の両面に貼付した。

桁のたわみは，中間支点上断面（すなわち載荷断面）の左右の腹板直下で測定したほか，桁端部でも，支点の沈下を測定した。また，腹板については，図６－８の1～17で示す断面の①～⑧で示す点について，面外変形を測定した。

なお，Ａシリーズでは，模型を，D_3の 断面を持つ等断面桁と仮定するなど，理想化されたモデルに対し，有限帯板法による数値解析も行っている。このための要素分割は，図６－９に示す。





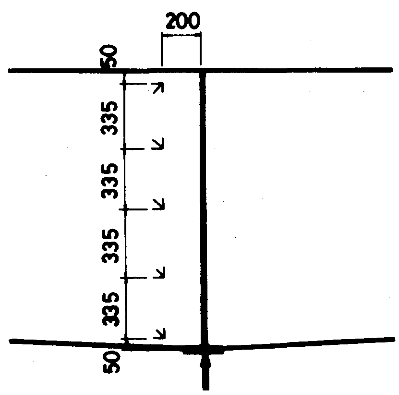


図６—７　STRAIN GAUGE LOCATIONS (A SERIES)

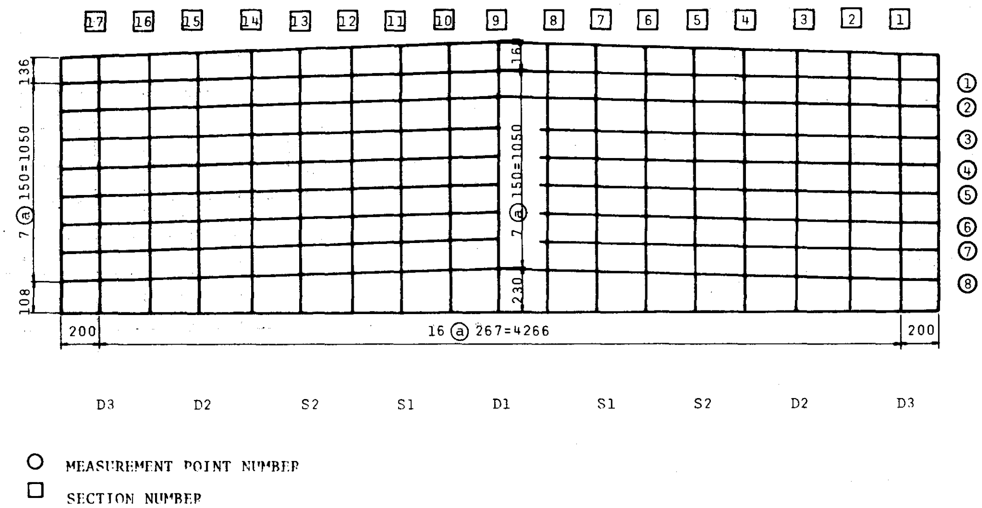
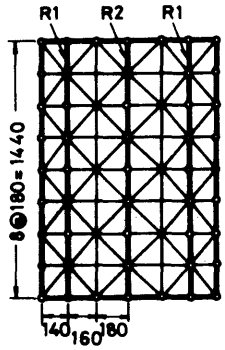


図6—8　MEASUREMENT POINTS OF DEFORMATIONS IN WFBS (A SERIES)



	R1	R2
AI	16.08	8.04
AII	22.40	45.60

(cm²)

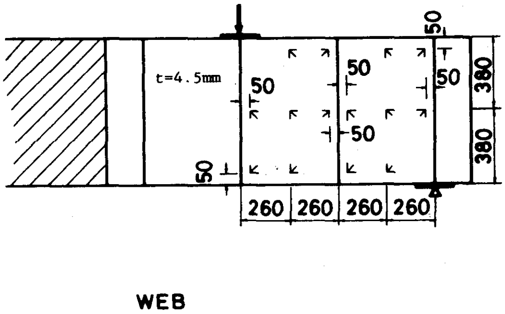


図6—9　FSM AND FEM IDEALIZATION

6—3—2　Bシリーズの実験概要

Bシリーズは，端支点に関する実験であり，荷重は，図6—9に示すように，全長5.6 mの模型の，注目する端支点から1.04 mの位置の，腹板直上に作用させている。

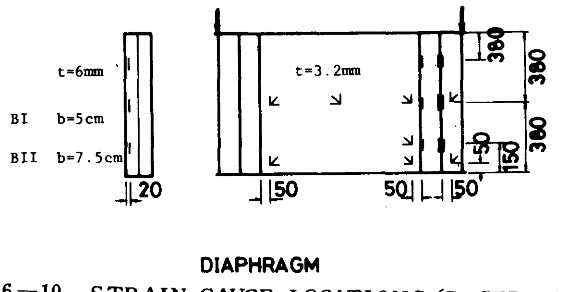


図6—10　STRAIN GAUGE LOCATIONS (B SERIES)

モデルBⅠ，BⅡにおけるひずみゲージ貼付位置は，図6—10に示す。ダイヤフラムについては，Aシリーズ等の場合と同じく，図の右側の支承付近を中心に，三軸ゲージを配置した。また，支承上耐荷補剛材は，図の右側の2本について，その上部，中部，下部の表，裏に貼付している。腹板については，Bシリーズでは，せん断力による張力場の形成が重要となることから，張力場の形成が予想

される方向を中心に，三軸ゲージを貼付した。腹板に対するひずみゲージは，Aシリーズでは，片側の表，裏に貼付したが，Bシリーズでは，模型の寸法がAシリーズのそれよりも小さく，内部での作業が困難なため，片側の表面にのみ貼付した。

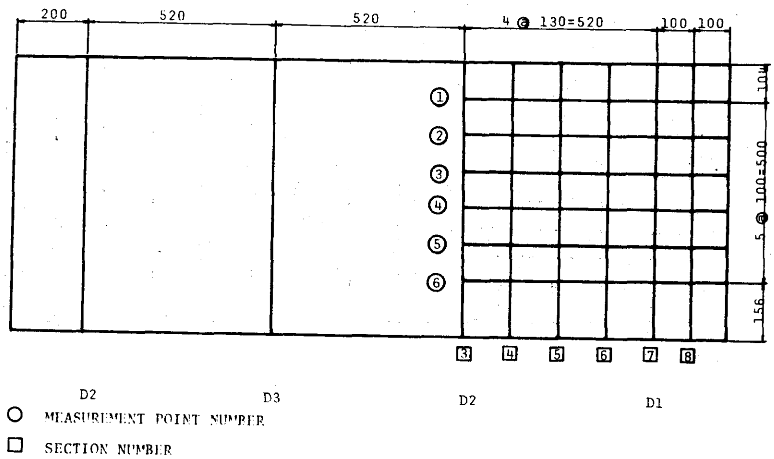


図6—11　MEASUREMENT POINTS OF DEFORMATIONS IN WEBS（B SERIES）

Bシリーズにおけるたわみの測定は，Aシリーズと同じく載荷断面の腹板直下で行ったほか，桁端で支点の沈下も測定した。また，腹板については，図6—11の3～8で示す断面の，①～⑥で示す点で，面外変形を測定した。

6—4　中間支点上ダイヤフラムおよび桁の強度

6—4—1　ダイヤフラムのひずみ分布

図6—12は，1点載荷時の支承上ダイヤフラムの，主ひずみの大きさと方向を，$P=20\,t$，$P=60\,t$（AⅠでは59.9 t）の場合について示したものである。なお，図中の二点鎖線は，このスケールでは描ききれなかったものである。

同一荷重値に対しては，AⅠ，AⅡでは，主ひずみにかなりの違いがみられ，AⅠでは，載荷点付近に主ひずみの局部的な乱れがみられる。

図6—13は，$P=60\,t$（AⅠでは59.9t）のときの,載荷点下の耐荷補剛材とその近傍のダイヤフラムパネルの，ひずみ測定位置での鉛直方向直応力σ_Zの,高さ方向の変化の様子を示したものである。この図には，IDR[122] 11. 2。2 により計算された応力，および有限帯板法による数値解析結果も示してある。IDRによる計算については，付録B—3で説明する。この図でいう応力の実験結果とは，IDR，有限帯板法による結果と比較するために，便宜上，ひずみと

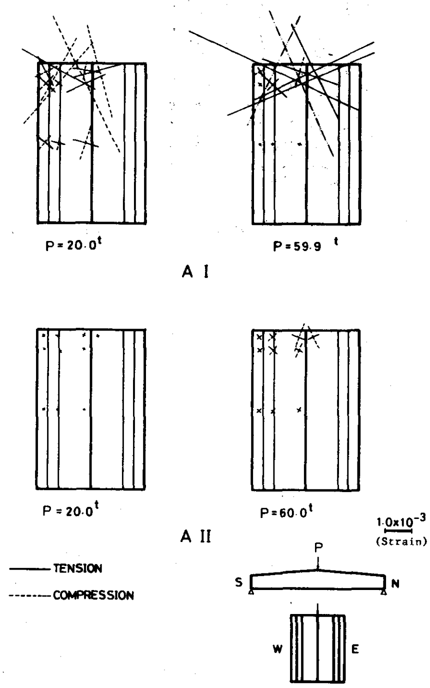


図6—12
PRINCIRAL STRAIN DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGMS

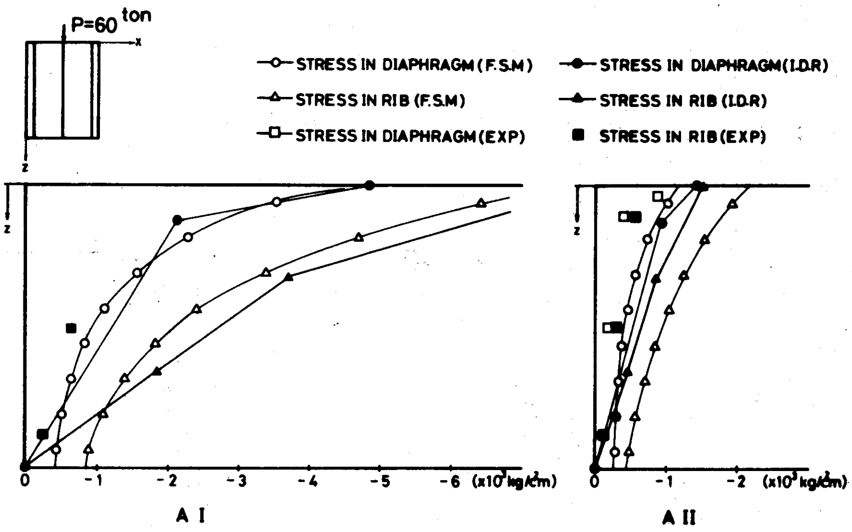


図6—13　NORMAL STRESS (σ z) DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGMS AND RIBS

応力が，どこまでも比例するものとして求めたものである。図より，AIの応力は，AⅡのそれに比べてはるかに大きく，ダイヤフラムの板厚，および耐荷補剛材の断面の違いによる影響が，応力の大きさに明瞭に現れていることがわかる。なお，この図では，AIのダイヤフラムパネルにおける実測値，耐荷補剛材の載荷点間近の測定点における実測値は示していない。これは，AIでは，1点載荷による弾性実験中，$P=59.9t$ で，載荷点付近に予期せぬ局部変形が生じて測定値が乱され，他の結果と比較し得るひずみが得られなかったためである。**図6—12**で，AIのダイヤフラムパネルの主ひずみ分布が乱れているのも，同じ理由によるものである。

図6—14は，2点載荷による破壊実験時の，ダイヤフラムパネルの主ひずみの大きさと方向を，**図6—12**と同様に示したものである。この図に示したひずみは，荷重が，AIで，$P=181.5\ t$，($P_1=85.6t$，$P_2=95.9t$)，AⅡでは，$P=190.8t$，($P_1=95.5t$，$P_2=95.3t$) のときのものである。この図においても，AI，AⅡの主ひずみは，かなり異なる値，方向を示しており，AIのひずみ分布は乱れている。AIは，$P=181.5$ t で，図の左側の載荷点直下で，局部変形が生じたた

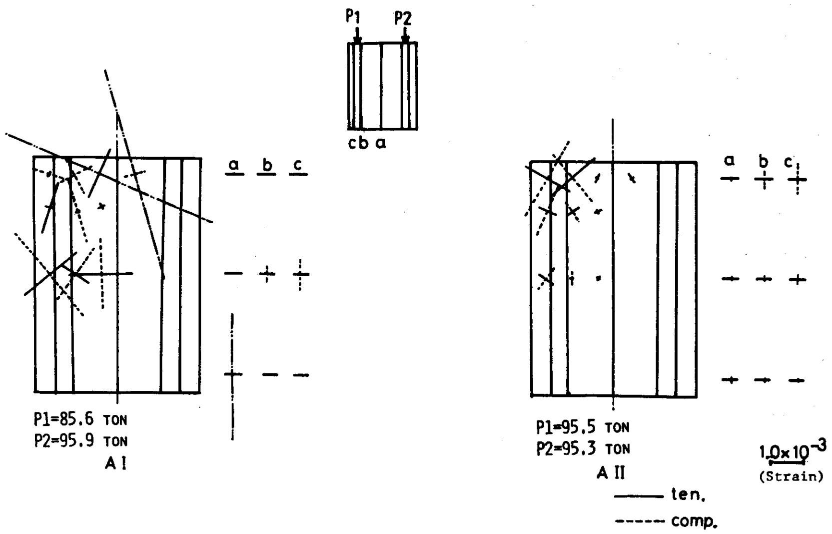


図6—14　PRINCIPAL STRAIN DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGMS

めである。AⅡでは，主ひずみは，図6—12，図6—14ともに，載荷点より，放射状に拡がるように分布している。

図6—15は，$P=60\,t$（$P_1=P_2=30\,t$）の荷重が作用したときの，載荷点下の耐荷補剛材と，その近傍のダイヤフラムパネルの応力σ_zを，図6—13と同様に示したものである。この場合は，応力の分布は，AⅠ，AⅡで，傾向の大きな違いはみられない。AⅠ，AⅡいずれも，IDRと有限帯板法の結果はよく一致しており，AⅡでは，実験結果とこれらの計算結果もよく一致している。しかし，AⅠの実験結果は，計算により得られた応力よりも大きな値となっている。

図6—16は，有限帯板法により求めたダイヤフラムパネルの，実験によるひずみ測定点と同じ位置における主ひずみを，その方向と大きさについて示したものである。AⅡでは，実験結果と数値解析による結果は，よく似た傾向を示している。AⅠについては，この数値解析では，座屈等は考慮されていないため，

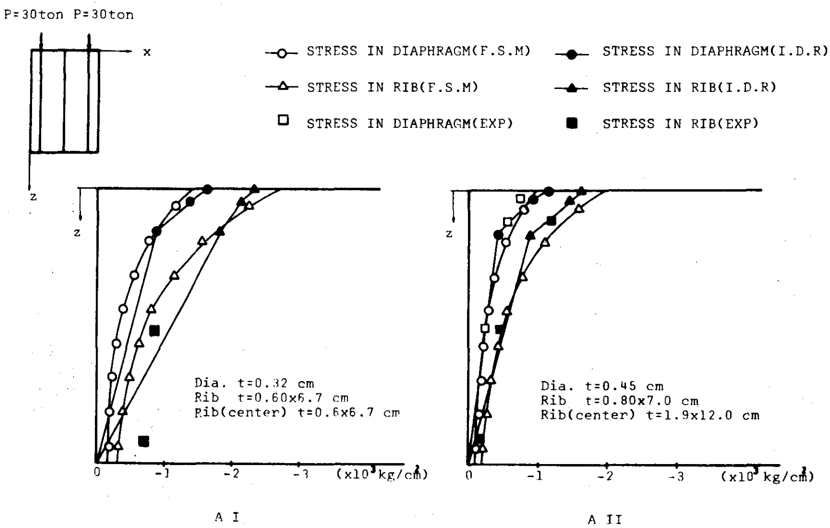


図6—15 NORMAL STRESS (σz) DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGMS AND RIBS

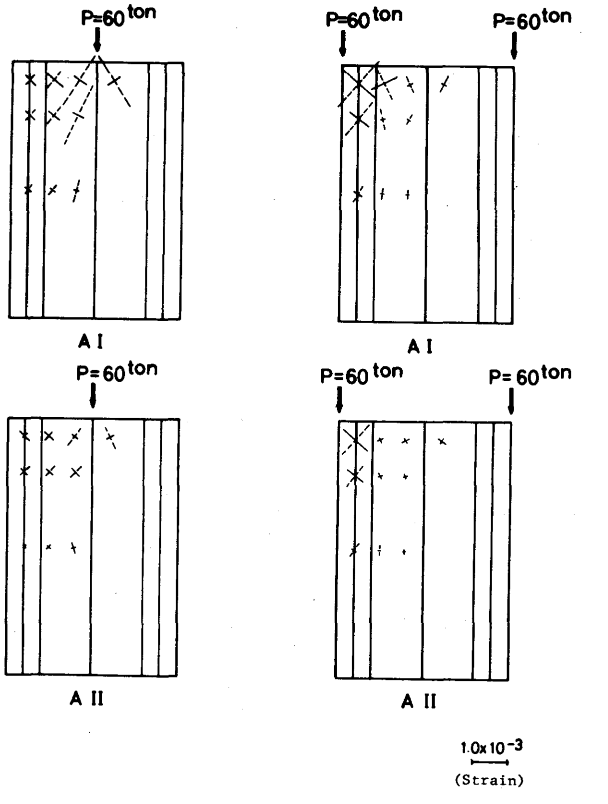


図6—16 PRINCIPAL STRAIN DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGMS BY FSM

実験結果のようなひずみの乱れはみられず，その大きさがやや大きい事を除けば，AⅡとほとんど同じひずみ分布となっている。

6―4―2　フランジ，腹板のひずみ分布

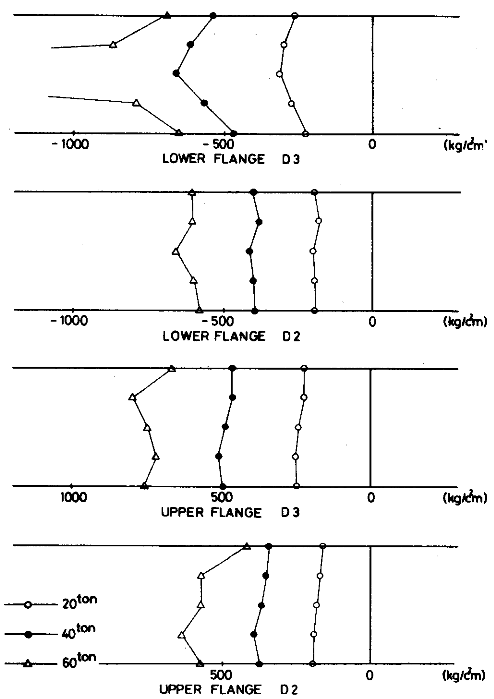


図6―17
NORMAL STRESS (σx) DISTRIBUTIONS IN FLANGES ,A I (D3 ,D2)

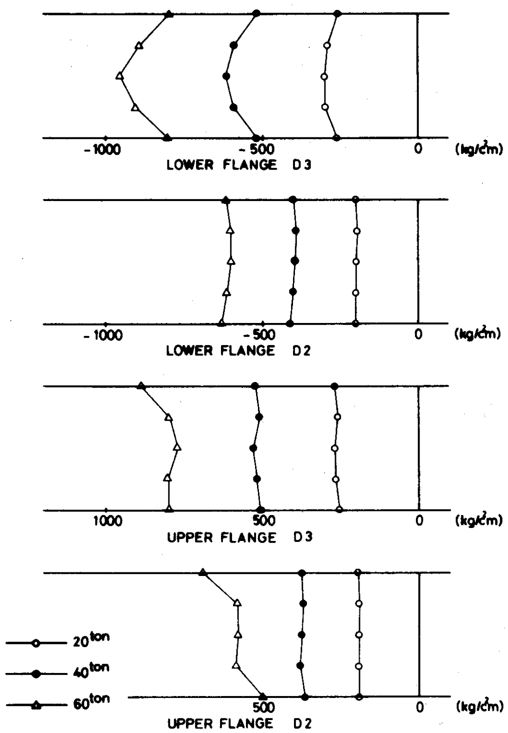


図6―18
NOMAL STRESS (σx) DISTRIBUTIONS IN FLANGE ,A II (D3 ,D2)

図6―17は，1点載荷によるAⅠの，D_3，D_2の断面における圧縮フランジと引張フランジの，橋軸方向の応力分布を，荷重の大きさとともに示したものである。ここでいう応力とは，便宜的に，ひずみと応力が，どこまでも比例するものとして得られた値である。D_3の断面においては，載荷点直下のダイヤフラムの局部変形の影響で，荷重が増加するにしたがい，圧縮フランジの中央部の応力に大きな変化が生じていることがわかる。圧縮フランジのD_2断面，および引張フランジでは，$P=20t$，$40t$のときには，応力は，ほとんど一定の分布をしている。この図からは，せん断遅れ，負のせん断遅れの傾向は認められない。$P=60t$では，これらの応力は，圧縮フランジのD_3断面におけるほどではないが，分布性状が乱れている。

図6―18は，AⅡについて，**図6―17**と同様に，フランジの応力を示したものである。いずれも，応力の大きさは，おおむねAⅠのそれと同じであるが，AⅡでは，応力分布の乱れは，ほとんどみら

れない。圧縮フランジのD_3断面で，載荷点に近い中央部の応力が，腹板直上の応力に比べて大きく，負のせん断遅れと同様な応力分布となったほかは，いずれも，わずかながら，せん断遅れがみられる。

図6－19，図6－20は，1点載荷による腹板の応力を示したものである。ＡⅠ，ＡⅡともに，腹板のひずみは，腹板パネルの外面，内面の両面で測定したが，これらの図では，外面，内面それぞれについての応力のほか，両者の平均値も示した。ＡⅠでは，これらの応力は，いずれも，ほぼ直線分布をしている。ＡⅡでは，腹板パネルの引張フランジ寄りの部分で，外面で引張，内面で圧縮となるような応力を示しており，この部分で，腹板が外側へ面外変形していることがわかる。しかし，内外面の応力を平均したものは，おおむね直線分布となっている。

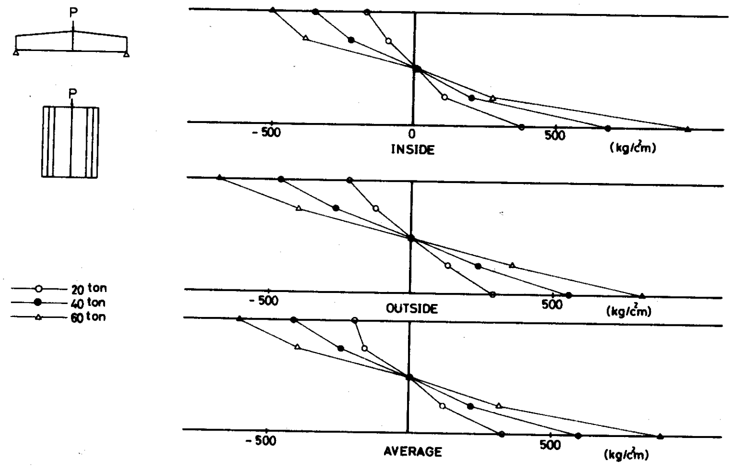


図6－19　NORMAL STRESS (σx) DISTRIBUTIONS IN WEB，A I (D3)

図6－21，図6－22は，2点載荷による破壊実験時の，ＡⅠ，ＡⅡのフランジのひずみを示したものである。弾性実験の場合と異なり，これらのひずみは，大きく乱れている。ＡⅠ，ＡⅡとも，引張フランジのひずみの乱れが，圧縮フランジのそれと比べ大きいことがわかる。図6－23，図6－24は，2点載荷による腹板のひずみを，図6－19，図6－20と同様に，内面，外面，両者の平均で示したものである。いずれも，1点載荷の場合に比べ，乱れたひずみ分布となっている。ＡⅡでは，内面，外面の平均をとると，直線分布に近くなるが，ＡⅠでは，平均をとったものでも，そのような傾向はみられない。これらのひずみ分布の乱れは，左右のジャッキの荷重が同じではなく，桁にねじりが生

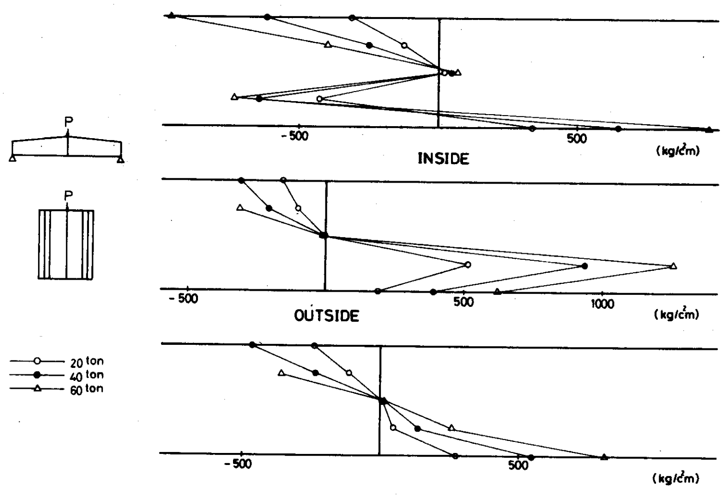


図6－20　NORMAL STRESS (σx) DISTRIBUTIOMS IN WES，A II (D3)

じることなどのほか，腹板に対するひずみゲージの貼付数が，補剛材等で区切られた腹板パネルの数に比べて少なく，腹板パネルの変形を正確に測定できなかったことが，原因と考えられる。

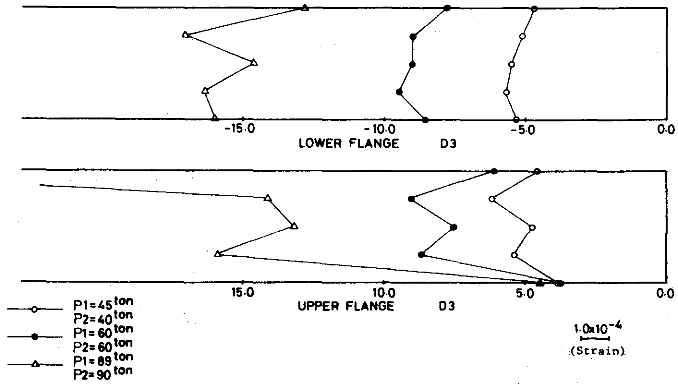


図6－21　STRAIN DISTRIBUTIONS IN FLANGES, A Ⅰ (D3)

6－4－3

荷重変形曲線

2点載荷による荷重Pと，桁の中央断面（すなわち載荷断面）のたわみδの関係を，AⅠ，AⅡに対して示したものが，**図6－25**である。この図では，荷重Pは左右の荷重P_1，P_2の和，たわみδは，中央断面における左右腹板下のたわみδ_1，δ_2の平均値である。また，これらのδ_1，δ_2は，桁端部で測定した支点の沈下による成分を差し引いてある。

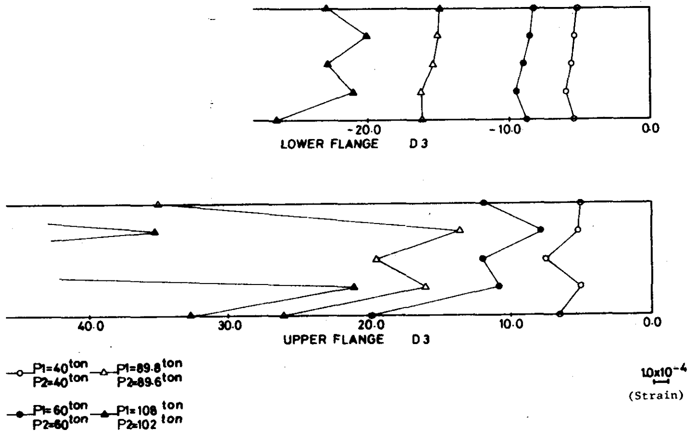


図6－22　STRAIN DISTRIBUTIONS IN FLANGES, A Ⅱ (D3)

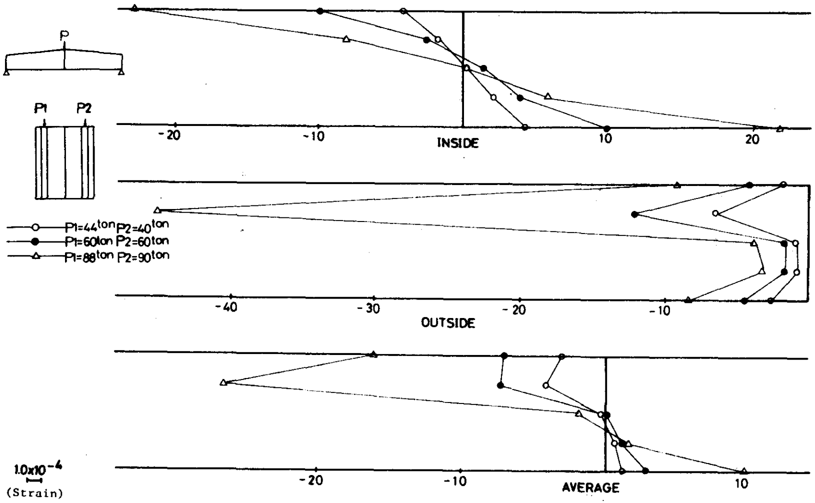


図6－23　STRAIN DISTRIBUTIONS IN WEB, A Ⅰ (D3)

AⅠでは，6－4－1で説明したとおり，ダイヤフラムD_3と支承上耐荷補剛材に局部変形が生じているが，桁の最大荷重は，この局部変形により決まった。すなわち，AⅠの$P-\delta$曲線は，ほとんど直線のまま，最大荷重$Pmax = 179t$（$P_1 = 88.9t$，$P_2 =$

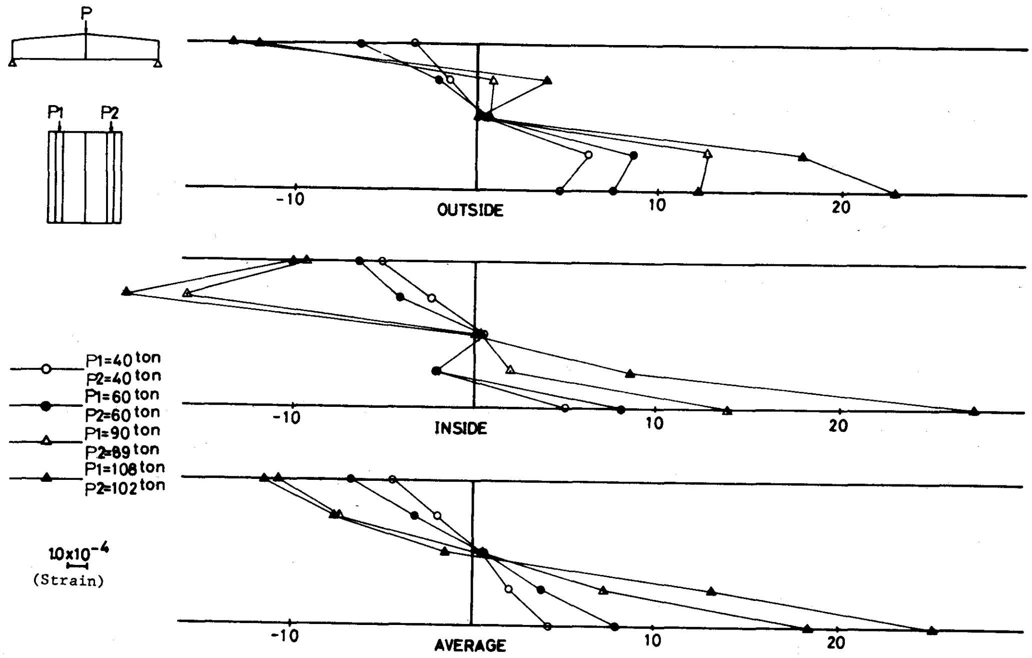


図6—24　STRAIN DISTRIBUTIONS IN WEB, A II (D3)

90.0t)に達し，そこで突然の除荷状態となった。P—δ曲線が，ほとんど直線のままであることから，最大荷重に達した段階においても，桁は，まだ健全であったことがわかる。

一方，AⅡでは，荷重と変形の関係は，なめらかな曲線をたどり，ジャッキの最大容量（$100t+100t$）に達しても桁の剛性は失われることはなく，荷重は，上昇からほぼ水平に移る傾向がみられた。このときの荷重は，$Pmax=216t$（$P_1=110.8t$, $P_2=105.6t$）であった。

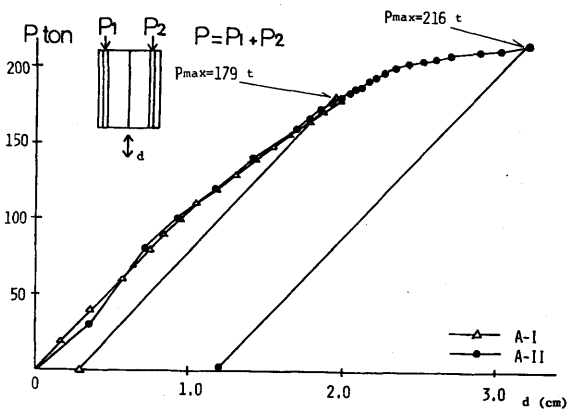


図6—25　LOAD-DEFLECTION CURVES (A SERIES)

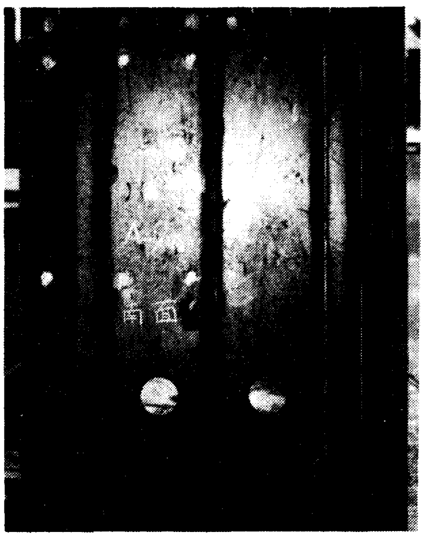
6—4—4　ダイヤフラムおよび腹板の変形

AⅠは，1点載荷時に，$P=59.9t$で，ダイヤフラムパネル，補剛材の載荷点直下における局部変形により，最大荷重となった。AⅠ桁の2点載荷は，1点載荷によりダイヤフラムに変形が生じた後に，ジャッキの位置を変えて行われたため，この場合，ダイヤフラムにかなりの初期変形を有する状態で行われたことになる。したがって，2点載荷時の桁の挙動は，この初期変形の影響があるものと考え

られる。ＡＩ桁のダイヤフラムD_3 の変形状態を，**図6―26**に示す。これは，すべての実験終了後の残留変形を測定したものであり，**図6―26ａ）**が補剛材の変形，**ｂ）**がダイヤフラムパネルの変形である。これらの図は，いずれも，ひずみゲージを貼付した面から観察したものであり，裏面からみると，当然，凹凸の関係は逆になる。一方，ＡⅡ桁では，実験終了後も，ダイヤフラムには何ら異常は認められなかった。ＡＩとＡⅡ各々について，実験終了後にダイヤフラムのみを切り出したものを，**写真6―1**に示す。

腹板については，ＡＩでは最大荷重があまり大きくないことから，目立った変形はみられなかった。

a） Model A I



b） Model A II

写真 6―1　DIAPHRAGMS AFTER TEST

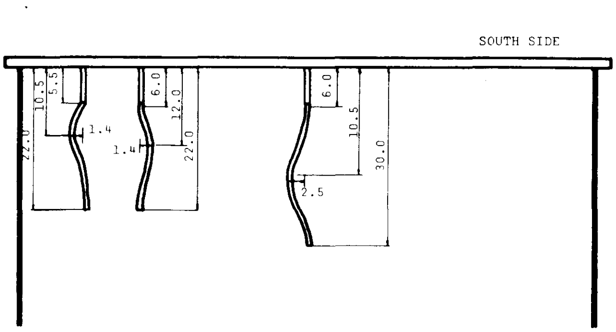


図6―26 a）　LOCAL DEFORMATION OF RIBS AFTER TEST ,A I

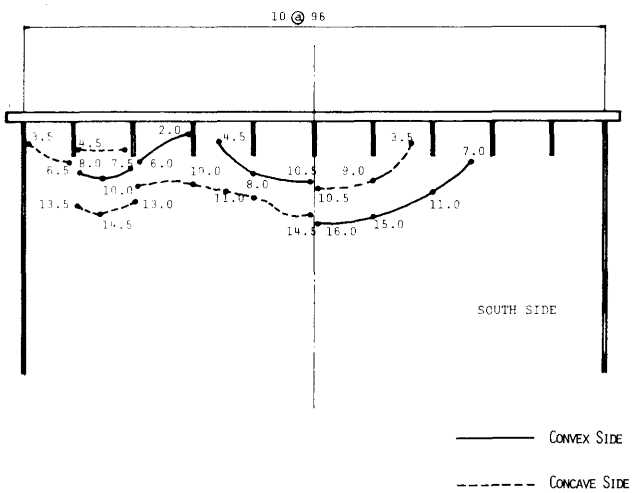


図6―26 b）　LOCAL DEFORMATION OF DIAPHRAGM PANEL AFTER TEST ,A I

AⅡでは1点載荷時に，**図6－20**で示したように，面外変形によると思われるひずみが測定されたが，これも，視察ではほとんど観察されなかった。一方，AⅡの2点載荷時には，荷重$P=160t$ 前後から，腹板にせん断座屈波が目立ちはじめ，張力場的な変形がみられた。この様子を**写真6－2**に示す。

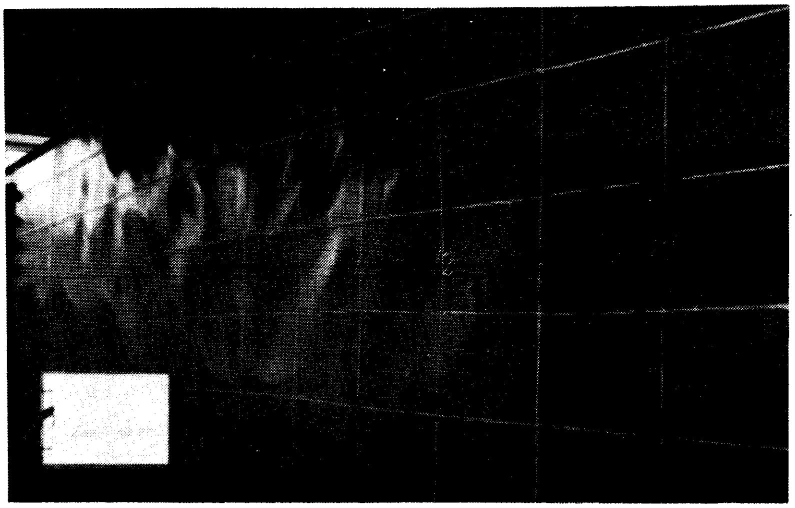


写真6－2　DEFORMATION OF WEB PANELS (A　II)

6－4－5　材料試験

AⅠ，AⅡの模型の製作に使われた鋼材（$SS41$）の機械的性質を知るため，実験終了後，これらの模型から，JIS 1号試験片を切り出し，引張試験を行った。その結果，この鋼材のヤング率は，平均2.04×10^6 kg/cm²，ポアソン比は，平均0.28，降伏応力は，平均2,960kg/cm²であった。

6－4－6　IDR[122]による応力照査

6－4－1では，ダイヤフラムパネルや補剛材の，実験により得られた応力を，IDRおよび有限帯板法による応力と比較した。この図に示したIDRによる補剛材の発生応力の計算では，ダイヤフラムパネルも，反力の一部を負担するものとしている。すなわち，付録B－3で説明している式付B3－2で，$K=0.65$として計算したものである。6－4－1の **図6－15**をみると，AⅡの実験結果は，IDR，有限帯板法による計算結果とほぼ同じである。AⅠでは，ダイヤフラムパネルの局部変形により，実験からは，IDRや有限帯板法と比較し得る結果は得られなかったが，これら2つの計算値はよく一致している。すなわち，IDRにより計算された発生応力は，おおむねよい結果を与えており，IDRにおける発生応力のモデル化および算定式は，おおむね妥当なものであると言えよう。

次に，実験により得られた模型の崩壊荷重に対して，これらの模型の中間支点上ダイヤフラムなどの強度が，IDR の規定を満足しているかどうかの照査を行う。IDR による応力照査の概略は，付録B－3で説明する。

表6－2は，IDR により得られたダイヤフラムの強度σ_{ult}と，等価有効応力σ_eを，ダイヤフラム下端（$z=0\,m$，すなわち支承直上）と，上端（$z=1.44\,m$）で示したものである。付録B－3で説明しているように，応力照査は，σ_{ult}とσ_eの大小を比較することにより行われる。**表6－2**のa)は，1点載荷，b)は，2点載荷の場合のものである。また，表中，パネル1とは，**図6－2**で示した中間支点上ダイヤフラムのうち，外側の補剛材と腹板にはさまれた最外縁のパネルであり，そのすぐ内側のパネルがパネル2，最も内側のパネルがパネル3である。

表6－2　STRENGTH OF LOAD BEARING DIAPHRAGMS

a) A Concentrated Load at Center

MODEL	PANEL	Z cm	σ_e kg/cm²	σ_{ult} kg/cm²
A I	3	0 144	4811 689	1956 2400
A II	3	0 144	1477 494	2208 2400

b) 2 Concentrated Loads

MODEL	PANEL	Z cm	σ_e kg/cm²	σ_{ult} kg/cm²
A I	1	0 144	4731 817	2304 2400
	2	0 144	4534 1580	2280 2400
	3	0 144	4577 1736	1512 2400
A II	1	0 144	4336 591	2196 2400
	2	0 144	4127 1574	1880 2400
	3	0 144	4156 1455	1800 2400

表6－2をみると，A I 桁は，1点載荷，2点載荷いずれの場合も，$z=0$，すなわち支承直上（実験では載荷点直下）で，$\sigma_e > \sigma_{ult}$となり，IDR の規定に違反していることになる。これらの計算では，荷重係数は1（安全率1に相当）としているため，IDR によれば，A I は，1点載荷，2点載荷いずれの場合も，実験により得られた崩壊荷重に荷重が達する以前に，崩壊することになる。一方，A II では，1点載荷時には，$\sigma_e < \sigma_{ult}$でIDR の規定を満足しているが，2点載荷では，$\sigma_e > \sigma_{ult}$であり，A I と同様にIDR に違反している。

表6－3 a)

STRENGTH OF LOAD BEARING STIFFENERS FOR ONE CONCENTRATED LOAD AT CENTER

Z (cm)	MODEL / (kg/cm²)	A I	A II
0	σ_{1s} σ_{1char}	8227 2400	1492 2400
D/3	σ_{1s} σ_{1char}	3700 750	870 2300
2D/3	σ_{1s} σ_{1char}	1800 750	470 2300

一方，支承上耐荷補剛材について，IDR によるその強度特性値σ_{1char}と，照査応力σ_{1s}を示すと，**表6－3**のようになる。σ_{1char}とσ_{1s}についても，付録B－3で説明してあるように，$\sigma_{1s} \leqq \sigma_{1char}$となることにより，補剛材の安全性を照査できる。**表6－3**では，**表6－2**と同じくa)が1点載荷，b)が2点載荷に対するものであり，$z=0$，すなわち支承直上（載荷点直下）および，桁高Dの1/3，2/3

の点について示してある。この表をみると，補剛材についても，ダイヤフラムパネルの場合と同じく，AⅡの1点載荷の場合を除いては，$\sigma_{1s} > \sigma_{1char}$となっている。すなわち，AⅠ，AⅡの模型が，IDRの規定を満足するためには，いずれも，ダイヤフラムの板厚や，補剛材の断面を大きくする必要があることになる。いま，2点載荷時のAⅡ桁（ダイヤフラムパネルの板厚 $t = 4.5$ ㎜）について，補剛材の断面をそのままとして，パネルの板厚を6.8㎜，9㎜（各々，4.5㎜の1.5倍，2倍）とした場合の，等価有効応力σ_eと，強度σ_{ult}を求めると，**表6－4**のようになる。この表は，ダイヤフラムにおけるパネル1の支承直上の部分について調べたものである。この表から，$\sigma_e < \sigma_{ult}$ となるパネルの板厚を線形補間により求めると，$t = 8.3$ ㎜である。すなわち，AⅡ桁において，ダイヤフラムパネルの板厚を8.3㎜以上としなければ，2点載荷時にはIDRの規定は満足しないことになる。実験によると，AⅡ桁では，2点載荷時でもダイヤフラムは健全なままで，全く異常がみられず，桁全体が塑性モーメントに達し，腹板のせん断座屈と相まって崩壊している。

表6－3 b）

STRENGTH OF LOAD BEARING STIFFENERS

Z (cm)	(kg/cm²) MODEL	A I	A Ⅱ
0	σ_{1s} σ_{1char}	7018 2400	6349 2400
D/3	σ_{1s} σ_{1char}	3680 1056	2800 1204
2D/3	σ_{1s} σ_{1char}	1830 1056	1410 1204

以上のことから，IDRは，ダイヤフラムや補剛材の発生応力の評価については，おおむね妥当であるものの，それらの強度については過小評価していると言えよう。

6－4－7　ダイヤフラムの剛度と桁，ダイヤフラムの挙動および崩壊形式の関係

6－4－1から6－4－6に説明したことから，ダイヤフラムの剛度とその挙動，崩壊形式との関係についてまとめると，以下のようになる。

1点載荷時には，AⅠ桁では，中間支点上ダイヤフラムに大きなひずみがみられ，$P = 59.9t$ で，ダイヤフラムパネルおよび補剛材が，荷重直下で局部座屈変形した。一方，AⅡでは，$P = 60.0t$ でも目立った変化は認められず，測定されたひずみも小さいものであった。2点載荷時でも，AⅠでは，ダイヤフラムに，$P = 179t$（$P_1 = 88.9t$，$P_2 = 90.0t$）で，局部座屈変形が生じたが，AⅡでは，$P = 216t$（$P_1 = 110.8t$，$P_2 = 105.6t$）でも，ダイヤフラムの変形は認められなかった。AⅠにおけるダイヤフラムの崩壊形式は，**写真6－1**，**図6－26**に示すように，支承上耐荷補剛材とダイヤフラムパネルの，鉛直荷重にともなうねじり局部変形と，板パネルの局部変形であった。

図6－25の荷重変形曲線をみると，AⅠでは，この曲線がほとんど健全なまま，最大荷重P_{max} =

179t に達している。このとき，桁については，載荷点付近で，ダイヤフラムの局部座屈変形にともなうフランジの沈下がみられたほかは，ほとんど異常が認められなかった。これに対し，AⅡでは逆に，ダイヤフラムに何ら変化のないまま，$P_{max}=216t$ で，崩壊に近い状態となった（実際には，この時点でジャッキの最大容量に達し，除荷の段階まで追うことはできなかったが，荷重変形曲線はこの時点でほぼ水平になっているため，$P=216t$ を最大荷重とみなしてもよいと思われる）。6－2－1で説明したとおり，これらの模型に用いられた材料の降伏応力を $\sigma y=3{,}000kg/cm^2$ とすると，桁の全断面が曲げにより降伏する全塑性モーメント $M_p=533t\cdot m$ であり，これに対応する降伏荷重 $P_p=213t$ である。また，AⅡ桁では，腹板にせん断座屈によると思われる変形がみられた。したがって，AⅡでは，断面の曲げ降伏により P_{max} に達し，腹板のせん断力による崩壊と相まって，耐荷力が決まったとみられる。

以上を要約すると，ダイヤフラムの強度の小さいAⅠでは，桁は健全なまま，ダイヤフラムの局部座屈により崩壊し，ダイヤフラムの強度の大きいAⅡでは，逆に，ダイヤフラムが健全なまま，桁の降伏により崩壊したといえる。

6－5　端支点上ダイヤフラムおよび桁の強度

6－5－1　ダイヤフラムのひずみ分布

図6－27は，BⅠ，BⅡそれぞれの端支点上ダイヤフラム，および支承上耐荷補剛材のひずみを，荷重が，およそ $P=80t$（$P_1=P_2=40t$），$P=120t$（$P_1=P_2=60t$）の場合について示したものである。BⅠ，BⅡは，補剛材の断面が，各々50×6㎜，75×6㎜と異なっているのみで，それ以外は，すべて同一の公称寸法によって作られている。この図中，ダイヤフラムの主ひずみ図の右側に示したa，bは，補剛材a，bのひずみの大きさを表わしている。**図6－27**をみると，補剛材の効果が明瞭に現われている。BⅠ，BⅡともに，腹板と補剛材の間のパネルで45°傾いた方向に，大きなひずみを示しており，この部分に大きなせん断力が生じていることがわかる。これらのひずみは，支点から離れた中位軸付近でも，支点近

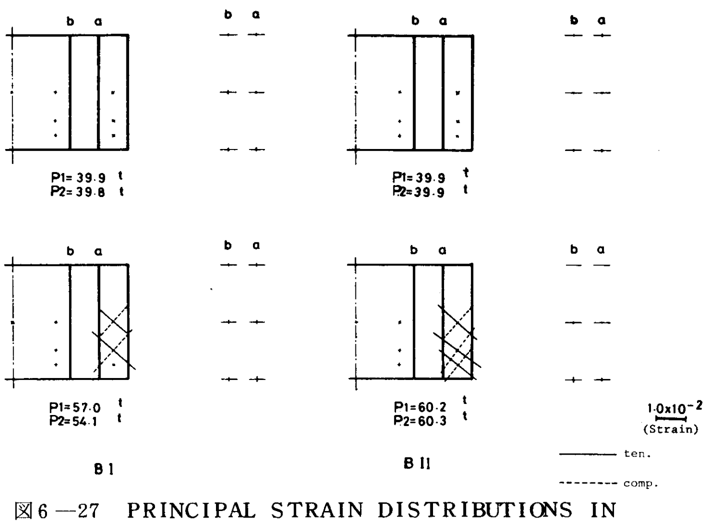


図6－27　PRINCIPAL STRAIN DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGMS

くの測定点とほとんど同じ大きさである。一方，ダイヤフラムの中央部のパネルでは，支点近くであっても，大きなひずみは測定されなかった。なお，ＢⅠでは，補剛材と腹板の間のパネルの最下端部で，局部的な面外変形がみられた。

図6－28は，ダイヤフラムパネル，および補剛材の鉛直方向応力の，高さ方向の変化を，荷重がP=80t（P_1＝P_2＝40t）の場合について示したものである。この図には，IDR[123]により求めた応力も示してある。いずれも，

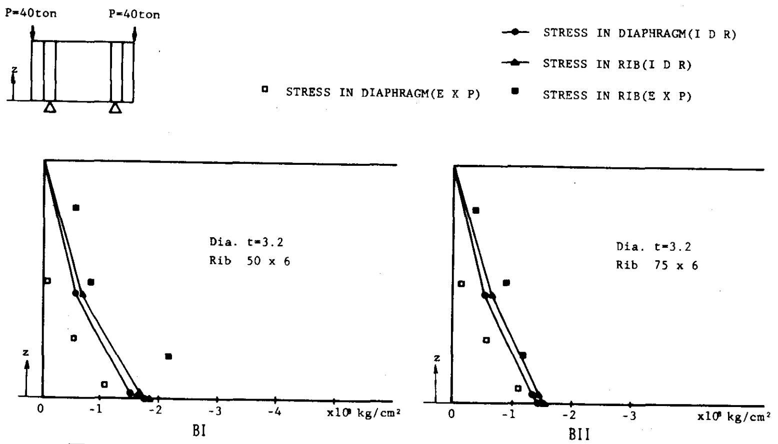


図6－28　NORMAL STRESS（σz）DISTRIBUTIONS IN DIAPHRAGMS

ＢⅠの方が，ＢⅡより大きな応力を示している。ＢⅠ，ＢⅡともに，応力の実測値は，IDRによる値に比べ，補剛材では大きく，ダイヤフラムパネルでは小さくなっている。

6－5－2　荷重変形曲線

図6－29は，ＢⅠ，ＢⅡにおける荷重と桁のたわみの関係を図示したものである。ＡⅠ，ＡⅡの場合と同じく，荷重は$P=P_1+P_2$を，たわみは，載荷断面における左右腹板下のたわみδ_1，δ_2の平均値を用いている。Ａシリーズの場合と異なり，この図では，ＢⅠ，ＢⅡともに，明瞭な平坦部がみられる。これは，次項で説明するように，腹板パネルが斜張力場を形成して，変形が増加していく様子を示している。この平坦部は，ＢⅡの方が，ＢⅠより約10t程度高くなっている。ＢⅠ，ＢⅡは，支承上耐荷補剛材以外は，すべて同一の公称寸法で作られている。また，いずれの桁においても，ＢⅠ桁の支承直上におけるダイヤフラムパネルの小さな局部変形のほか，ダイヤフラムには，何ら異常は認められなかった。したがって，ＢⅠ，ＢⅡ両者の耐荷力の差は，支承上耐荷補剛材の強度の違いが，桁端ダイヤフラムの斜張力場の

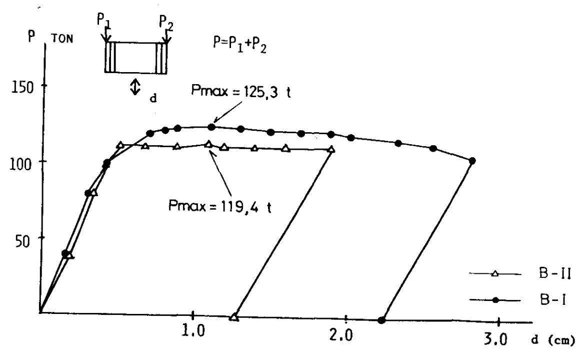


図6－29
LOAD－DEFLECTION CURVES（B SERIES）

アンカー部としての働きに影響をおよぼしたとみることができる。

6―5―3　腹板のひずみおよび変形

図6―30は，ＢⅠ，ＢⅡそれぞれの，腹板の主ひずみについて，その方向と大きさを図示したものである。いずれも，腹板パネルの対角線方向に大きな引張がみられる。この主引張ひずみの大きさと，荷重の大きさの関係を，荷重変形曲線のように描くと，**図6―31**のようになる。図中にａ，ｂで示すように，**図6―31ａ）**は，各腹板パネルの左上部の測定点について，**図6―31ｂ）**は，各腹板パネルの中央部の測定点についてのものである。端支点寄りのパネルでは，いずれも，荷重が，ＢⅠで$P=114.5t$（$P_1=58.2t$，$P_2=56.3t$），ＢⅡで$P=120.6t$（$P_1=60.3t$，$P_2=60.4t$）を超えると，ひずみが急激に増加している。このことと，図6―29の荷重変形曲線を併せて考えると，端支点寄りの腹板パネルは，ＢⅠで$P=115t$，ＢⅡで$P=120t$程度から，斜張力場を形成していることがわかる。一方，腹板における斜張力場の形成は，視察

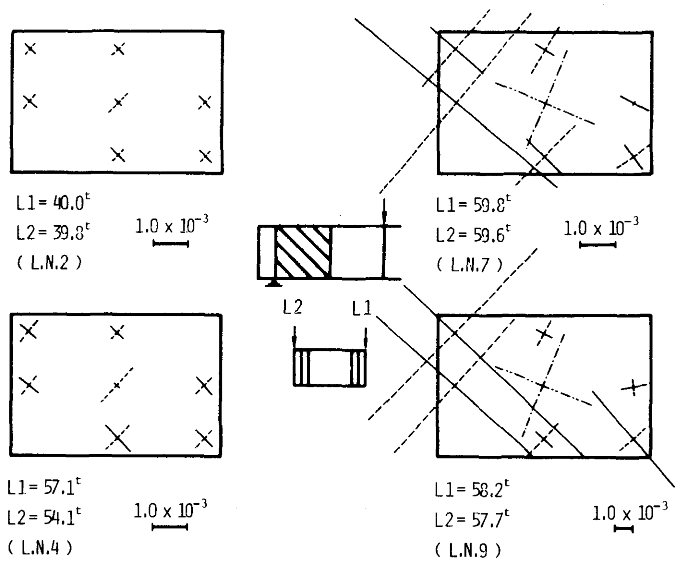


図6―30 a）PRINCIPAL STRAIN DISTRIBUTIONS IN WEB，B Ⅰ

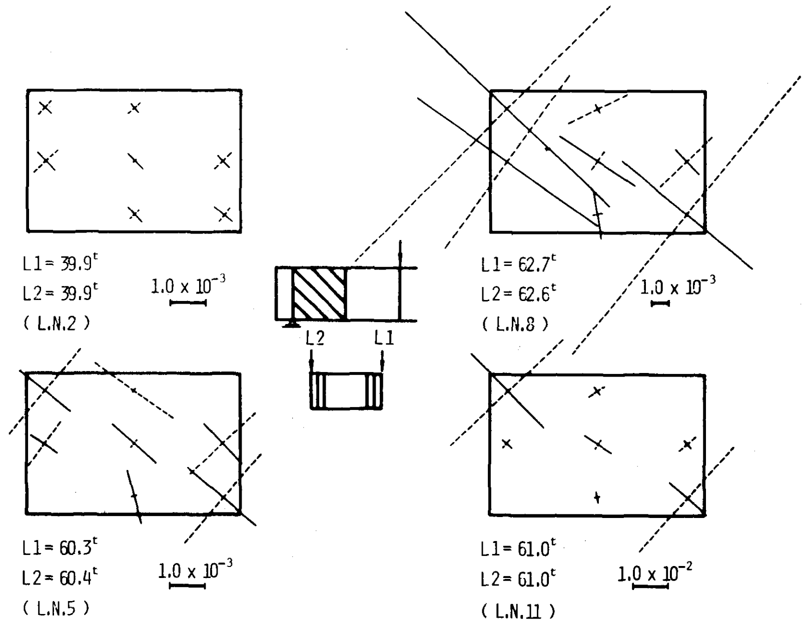


図6―30 b）PRINCIPAL STRAIN DISTRIBUTIONS IN WEB，B Ⅱ

によっても，ほぼ上記の荷重に達した時点から確認された。すなわち，BⅠで，荷重が$P=114.5t$，BⅡで$P=123t$（$P_1=61.4t$，$P_2=61.6t$）前後で，明らかにせん断座屈とわかる変形が，腹板パネルにみられるようになった。除荷直前の最終荷重段階における腹板の変形を，**写真6－3**に示す。また，腹板の変形位置を**図6－32**に示す。水平補剛材の上下のパネルで斜張力線は分かれており，水平補剛材がパネルの後座屈変形に対して有効に作用していることがわかる。

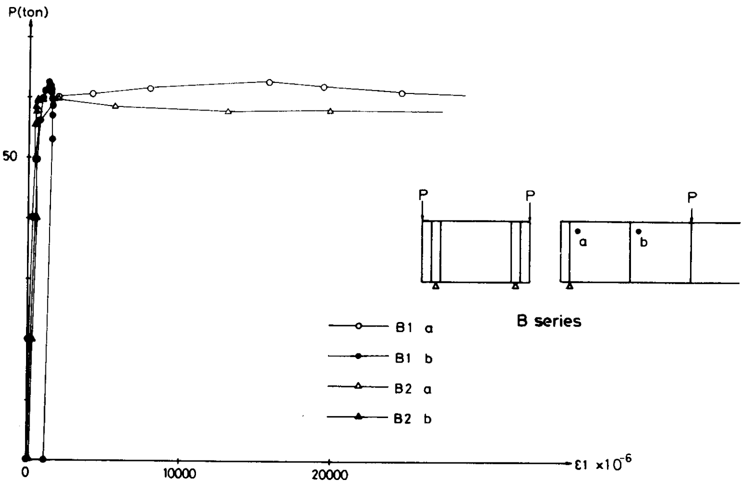


図6－31 a） LOAD－PRINCIPAL STRAIN CURVES

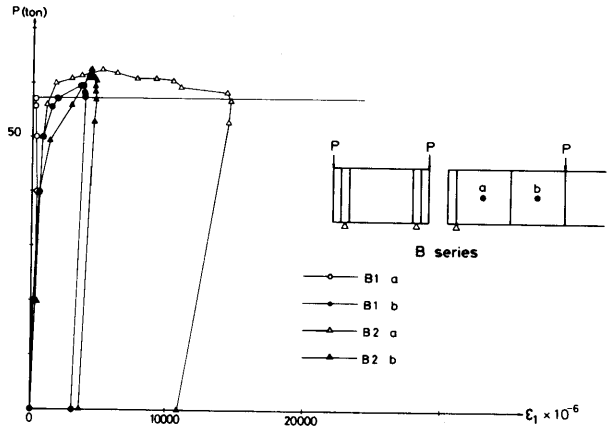
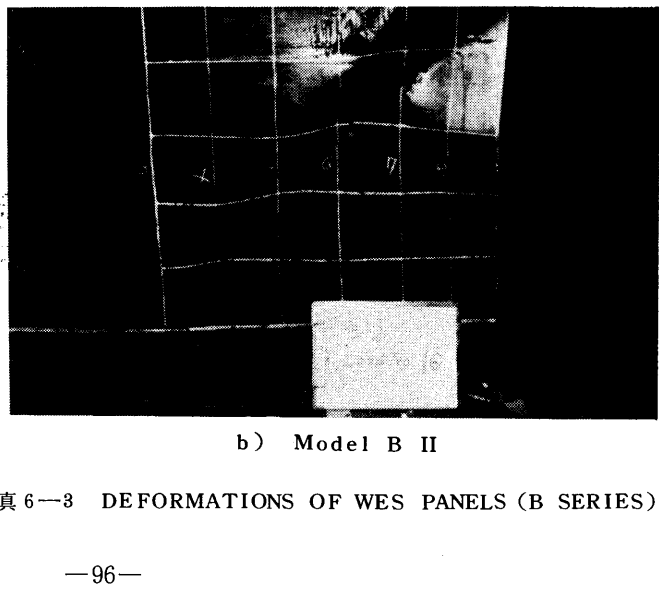


図6－31 b） LOAD－PRINCIPAL STRAIN CURVES

6－5－4 材料試験

Aシリーズの場合と同じく，BⅠ，

a） Model B Ⅰ



b） Model B Ⅱ

写真6－3 DEFORMATIONS OF WES PANELS（B SERIES）

BⅡの模型に用いられた材料の機械的性質を知るために，実験終了後の模型からJIS 1号片を17本切り出し，引張試験を行った。その結果，全試験片の平均は，ヤング率2.08 ×10^6 kg/cm²，ポアソン比0.27，降伏応力σyは，3,250kg/cm²であった。しかし，降伏応力は，Aシリーズに比べ，バラつきが大きかった。すなわち，ダイヤフラムパネル，フランジから切り出した9本は，σyが，2,794 ～ 3,180 kg/cm² の範囲内であったのに対し，支承上耐荷補剛材，腹板から切り出した7本は，σyが，3,383 ～3,844kg/cm²の範囲内であった。残る1本は，腹板の端支点から離れたパネルから切り出したもので，σy＝3,158 kg/cm²であった。すなわち，実験中に大きなひずみが発生した部分から切り出した材料試験片が，大きな降伏応力を示している。したがって，これらの試験片で大きな降伏応力が測定されたのは，実験時にひずみ硬化域まで達する変形をうけたため，除荷後の材料試験では，見かけ上のσyが増大したためと思われる。

6－5－5　IDRによる応力照査

6－5－1で示した図6－28をみると，実験により得られた発生応力は，IDRによる値と比べ，ダイヤフラムパネルでは小さく，補剛材では大きくなっている。この図に示したIDRによる補剛材の応力は，Aシリーズの場合と同じく，式付B3－2で，K＝0.65，すなわちダイヤフラムパネルも反力を負担する，として求めたものである。式付B3－2で，K＝0，すなわち，ダイヤフラムパネルが反力を負担しないものとして補剛材の応力を求めたところ，実験により得られた値と，おおむね一致した。このことと，図6－28を併せ考えると，BI，BⅡでは，支点反力の大部分は，支承上耐荷補剛材により受け持たれ，ダイヤフラムパネルは，支点反力はあまり負担しないと言える。

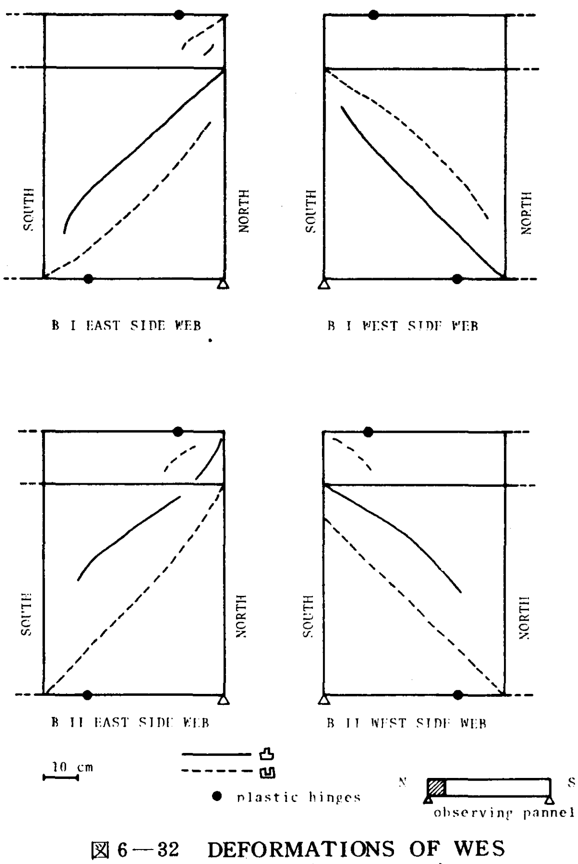


図6－32　DEFORMATIONS OF WES PANELS (B SERIES)

一方，AI，AⅡの場合と同じく，実験により得られた最大荷重を用いて，付録B－3により，ダ

表6—4　σ_e AND σ_{ult} CORRESPONDING TO PANEL THICKNESS

t (mm)	σ_e (kg/cm²)	σ_{ult} (kg/cm²)	σ_{ult} / σ_e
4.5	4336	2196	0.506
6.8	2952	2400	0.813
9.0	2220	2400	1.081

表6—6　STRENGTH OF LOAD BEARING STIFFENERS

Z (cm)	MODEL / (kg/cm²)	B I	B II
0	σ_{1s}	4721	3286
	σ_{1char}	2400	2400
D/3	σ_{1s}	2890	1960
	σ_{1char}	2175	2159
2D/3	σ_{1s}	1370	950
	σ_{1char}	2175	2159

表6—5　STRENGTH OF LOAD BEARING DIAPHRAGM PANELS

MODEL	PANEL	Z cm	σ_e kg/cm²	σ_{ult} kg/cm²
B I	1	0	3274	2307
		76	2918	2400
	2	0	3284	2280
		76	2966	2400
	3	0	2131	1920
		76	890	2400
B II	1	0	4174	2304
		76	2839	2400
	2	0	3178	2280
		76	2865	2400
	3	0	1984	1920
		76	802	2400

イヤフラムパネル，補剛材について，限界強度σ_{ult}およびσ_{1char}と，照査応力σ_eおよびσ_{1s}を求めると，**表6—5**，**表6—6**のようになる。**図6—5**では，腹板と外側の支承上耐荷補剛材にはさまれたダイヤフラムパネルをパネル1，2本の補剛材にはさまれたパネルをパネル2，中央部のパネルをパネル3で表しており，これらのパネルの$z=0$ cm（ダイヤフラム下端）と，$z=76$cm（ダイヤフラム上端）におけるσ_{ult}，σ_eを示している。また，**表6—6**は，補剛材のσ_{1char}とσ_{1s}を，$z=0$，$D/3$，$2D/3$（Dは桁高さで$D=76$cm）の位置について示した。

表6—5からは，パネル3の上部をのぞいて，いずれも$\sigma_e>\sigma_{ult}$となった。また，補剛材についても，いずれも$\sigma_{1s}>\sigma_{1char}$となっている。すなわち，ダイヤフラムパネル，補剛材ともに，IDRの規定に違反していることになる。これらの表に示した値は，いずれも崩壊に対する荷重係数を1.0として求めたものである。すなわち，BⅠ，BⅡとも，IDRによれば，実験により得られた最大荷重に達する以前に，ダイヤフラムパネル，支承上耐荷補剛材が崩壊していることになる。実際には，BⅠのダイヤフラムのパネル1において，その最下部のごく小さな部分で局部変形がみられたほかは，BⅠ，BⅡとも，ダイヤフラム，補剛材ともに何ら異常は認められず，桁の最大荷重は，腹板により決まった。すなわち，Bシリーズの結果からも，IDRは，発生応力の大きさの推定には有効であるが，ダイヤフラム，支承上耐荷補剛材の強度を過小評価している，ということができる。

6－5－6　支承上耐荷補剛材の強度と桁の挙動および崩壊形式の関係

6－5－1から6－5－5で説明したことをもとに，ダイヤフラムパネルや補剛材の強度と，桁の挙動，崩壊形式についてまとめると，以下のようになる。

ＢⅠ，ＢⅡは，支承上耐荷補剛材の断面が異なっているのみであり，他の条件はすべて同一である。ダイヤフラムのひずみは，補剛材の断面が大きいＢⅡが，ＢⅠより小さな値であり，補剛材の効果が認められる。しかし，Ｂシリーズでは，ＢⅠのパネル１の下部における局部的な変形を除けば，ダイヤフラムはいずれも載荷の最終段階まで健全であり，ダイヤフラムの崩壊に対する考察は得られなかった。

Ｂシリーズでは，ＢⅠ，ＢⅡともに，桁の最高荷重は腹板の強度により決まったと考えられる。これらの最高荷重は，ＢⅡが，ＢⅠに比べ６ t 上回っている。腹板の強度の算定については，多くの式が提案されているが[91),104)他多数]，これらは，いずれもダイヤフラムの強度とは無関係に決められている。しかし，この実験からは，支点上ダイヤフラム，支承上耐荷補剛材は，腹板に対しても効果的に働くことがわかる。

6－6　ま　と　め

本章では，箱桁の中間支点，端支点付近に注目し，それぞれについて，支点上ダイヤフラムの強度の異なる２体づつの模型に対して行われた耐荷力実験の結果をもとに，桁の崩壊形式やIDRとの比較などについて考察した。以上のことをまとめると，次のようになる。

１）ダイヤフラムは，支点付近に大きな応力（ひずみ）が生ずるが，補剛材によって，効果的に発生応力（ひずみ）を小さくすることができる。Ｂシリーズにおいては，支点反力の多くの部分は，補剛材が負担する。

２）ダイヤフラムを補強することは，腹板のせん断耐荷力の向上にも効果がある。逆に，ダイヤフラムは，腹板のせん断による斜張力場のアンカー部として作用することから，腹板と接するダイヤフラムパネルでは，腹板への影響について配慮が必要である。

３）IDRは，ダイヤフラムパネル，補剛材の発生応力を推定するには有効である。しかし，IDRにより得られた強度は，かなり安全側の値を示しており，ダイヤフラムパネル，補剛材の強度を過小評価している。

４）ダイヤフラムパネルの，支点から離れた部分では，IDRにより検討しても，なお強度に余裕がある。したがって，支承付近には，主耐荷補剛材に加え，十分な副耐荷補剛材を配置し，主耐荷補剛材やダイヤフラムパネルの断面を減少させることが，合理的と思われる。

7. 設計に対する考察

7－1 まえがき

鋼箱桁橋の設計に関しては，指針，あるいは設計基準に類するものは，いくつか提案されている。しかし，設計基準を体系的にまとめたものとしては，*IDR*[122] がある。*IDR*は，1969年～1971年に，英連邦を含む各地で相ついだ箱桁橋の事故を契機にまとめられたものである[126),129)]。*IDR*は，箱桁の設計基準を体系的に示した最初のものである，という意義があるものの，本論文6－4－5，6－5－5，あるいは付録B－3で示したように，部材の強度に対する評価が安全側に過ぎる点や，その適用に複雑な手順が必要とされるなどの問題点も指摘されている。

さて，箱桁の重要な構成部材の一つであるダイヤフラムは，支点上ダイヤフラムと中間ダイヤフラムに大別される。このうち，中間ダイヤフラムについては，*IDR*のほか，坂井[20),21)]により，設計方法などが示されている。

一方，支点上ダイヤフラムについては，まだ研究があまり進んでいないこともあって，*IDR*のほかは詳しい設計方法は提案されていないようである。鋼道路橋設計便覧[124)] では，示方書[123)] 8.7.1（荷重集中点の補剛材）をもとに，鉛直方向応力を求めるようになっている。

本章では，支点上ダイヤフラムの有限要素法による座屈解析を行い、その結果を*IDR*による結果と比較するなど，*IDR*をもとに，支点上ダイヤフラムの設計について若干の考察を加える。

7－2 解析モデル

本章では，主として，本論文第4章で用いたモデルA，B，C（**図4－1**）により，ダイヤフラムパネルの応力，座屈係数などについて検討している。**図4－1**におけるモデルAは，第5章，第6章で用いられた実験用モデルをもとに、その断面が決められている。これらのモデルについて、4章により得られた反力により，モデルAのダイヤフラムパネル，補剛材の応力を求めると，**図7－1**のようになる。**図7－1 a)**は，ダイヤフラムパネルの，**図7－1 b)**は，補剛材の鉛直方向応力を，桁の曲率がL／Rが，0.5，1.0，1.5の場合について示したものである。図中の太線は，*IDR*によるもの，細線は，*FSM*によるものであり，また，破線は内側支承，実線は外側支承についてのものである。ただし，4章で示したとおり，L／R＝0.5の場合は，反力分配係数は，ほとんど0.5に近いため，外側支承についてのみ示した。

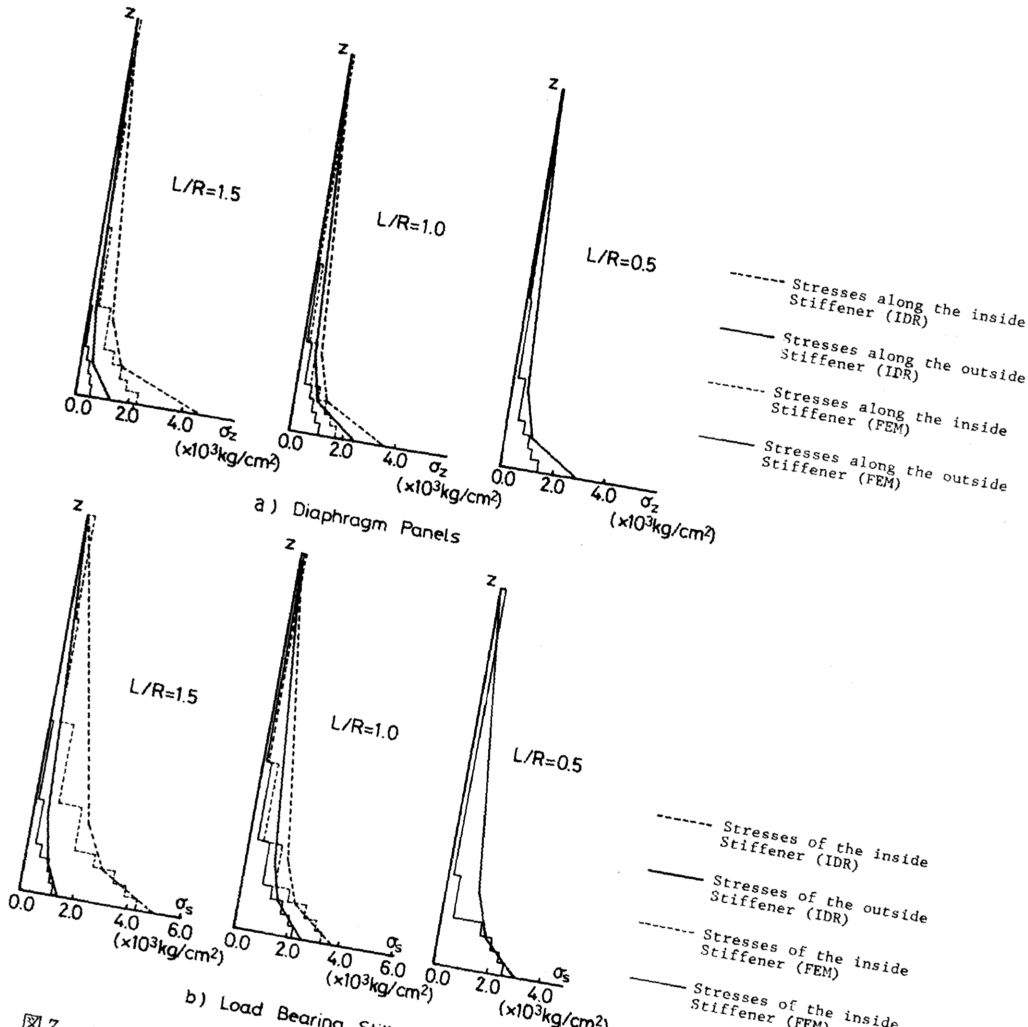


図7－1　COMPARISONS OF STRESSES BETWEEN IDR AND FEM

これをみると，補剛材では，ＩＤＲおよびＦＳＭによる応力は，ほぼ一致している。ダイヤフラムパネルでは，ＩＤＲがＦＳＭよりも大きな応力を与えている。これは，ＩＤＲでは，支承上の補剛材と接する位置における応力が求まるのに対し，ＦＳＭでは，ある大きさをもったダイヤフラムパネルの要素内での，平均的な応力しか求まらないためと思われる。このことを考えあわせると，曲線桁においても，支承を内側と外側に分けて，その各々について反力を求めれば，ＩＤＲにおける発生応力推定の式は，そのまま用いることができるといえる。

7－3　ＩＤＲにおける応力の仮定

ＩＤＲ11.3.2.1によると，補剛されたダイヤフラムにおける板パネルの応力は，図7－2のように

仮定されている。すなわち，*IDR*では，考えているパネルに対し，σ_{n_1}，σ_{n_2}が一様に作用するように仮定している。σ_{n_1}は，*IDR* 11. 3. 2. 1より，ダイヤフラムパネル下端より，$b^*/2$の高さにおける断面に対して求められた値である（b^*はパネル幅）。

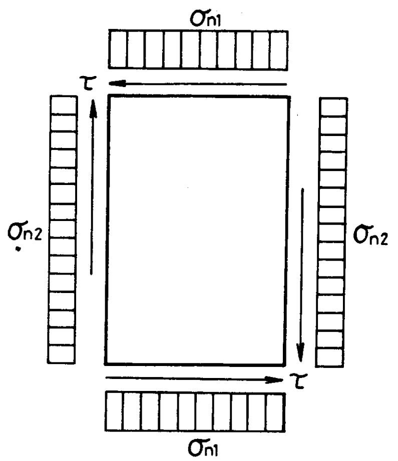


図7―2　MODEL OF STRESSES IN IDR

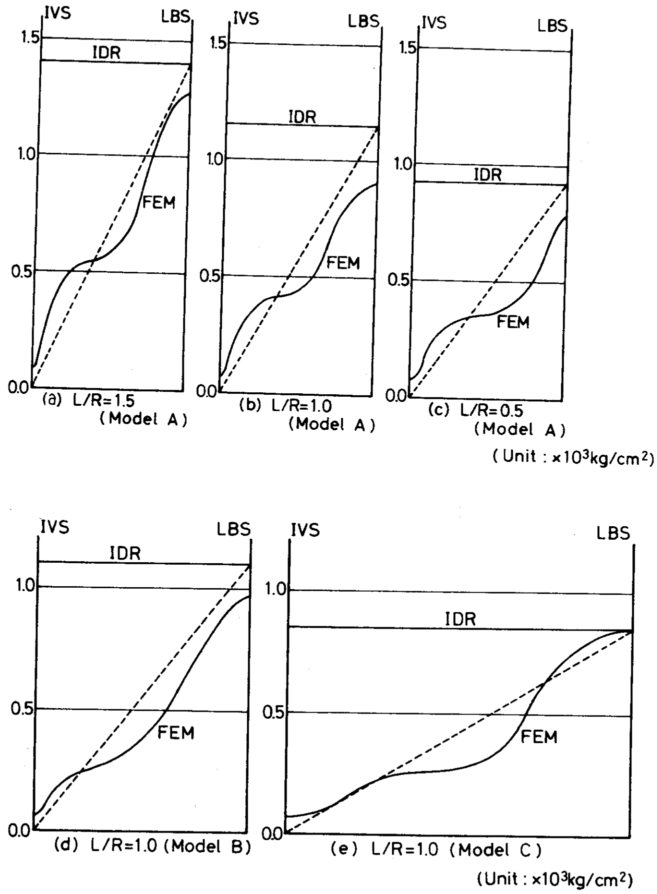


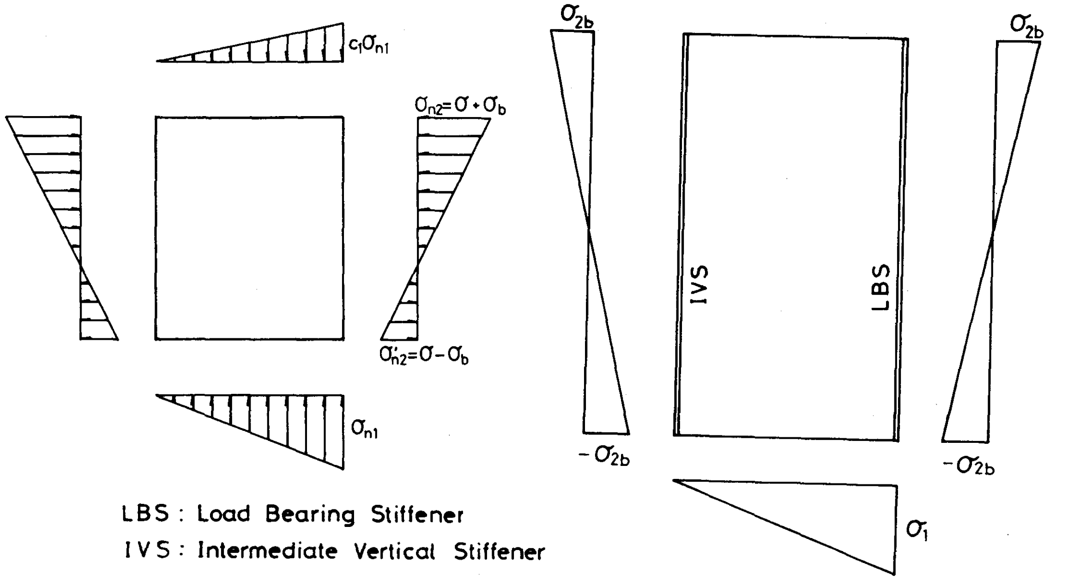
図7―3　COMPARISONS OF σ_{n1} BETWEEN IDR AND FEM

さて，モデル*A*，*B*，*C*について，*FSM*により得られた，上記断面の応力を調べてみると，**図7－3**に示すようになる。この図では，右側が支承上耐荷補剛材，左側がダイヤフラム中央の鉛直補剛材の位置であり，*FSM*により計算された応力が，支承上補剛材に接する部分では大きく，ダイヤフラム中央では小さくなっている。*IDR*では，ダイヤフラムの中央部付近でも，支承上補剛材側と同じ応力を仮定しているため，ダイヤフラム中央部付近では，*FSM*によるものに比べ，かなり大きな応力を示すことになる。本論文第6章では，*IDR*により得られた強度は，実験による強度をかなり下回っており，*IDR*は，桁の強度を過小評価していることを示したが，上記の応力分布の仮定も，その理由の1つであると思われる。**図7－3**をみると，ダイヤフラムパネルの応力は，図中の破線で示したような三角形分布を仮定できれば，より正確な評価ができるであろうことがわかる。

一方，水平方向の応力については，*IDR*では，その条項11. 3. 2. 1で，$\sigma+\sigma_b$から$\sigma-\sigma_b$まで変化する場合（すなわち，曲げと一様圧縮が同時に作用する場合）であっても，パネルの強度算定に

用いる水平方向応力は，一様な直応力に換算している。

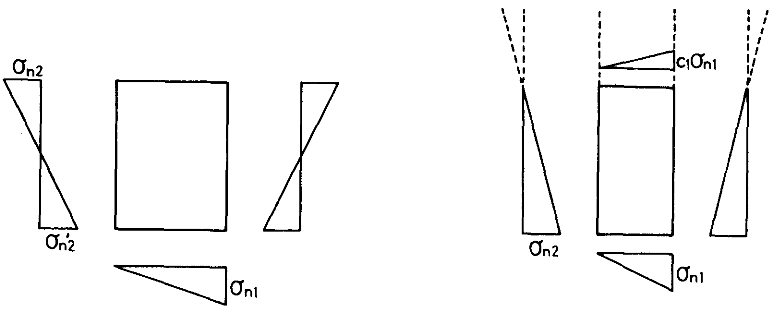
以上のことを考え併せると，ダイヤフラムパネルの座屈強度算定のための直応力のモデル化は，図7－4のようにするとよいであろう。すなわち，ダイヤフラムに発生している応力は，図7－4 b）



a) Stresses of Typical Panel　　b) Idealized Stresses of Support Diaphragm

図7—4　PROPOSED MODEL OF STRESSES

に示すように，鉛直方向についてはダイヤフラム下端で，支承上補剛材側で σ_{n1}，中間鉛直補剛材側で0となる三角形分布，ダイヤフラム上端では0とする。水平方向応力は，*IDR*の 11. 2. 4から求まる面内曲げ応力 σ_b を，そのまま用いるものとする。したがって，一般的なダイヤフラムパネルにおける直応力は，図7－4 a）のような形となる。この図中の，σ_{n2} と σ'_{n2} の関係，係数 C_1 は，考えているパネルの位置とダイヤフラム全高に対するパネルの高さによって決まる。例えば，ダイヤフラムパ



a) The Panel with whole hight　　b) The Panel on lower half of Diaphragm

図7—5　EXAMPLES OF STRESS—MODEL

ネルの下端から上端までにわたるパネルの場合，応力は，$\sigma_{n2} = -\sigma_{n2}' = \sigma_{2b}$，$C_1 = 0$となる（**図7－5 a**））。また，ダイヤフラムの高さ方向の中央に水平補剛材がある場合の，下側のパネルについては，$\sigma_{n2} = 0$，$\sigma_{n2}' = -\sigma_{2b}$，$C_1 = 1/2$である（**図7－5 b**））。

さて，このように仮定された応力分布を用いて，パネルの座屈について検討しようとすると，その計算を解析的に行うことは，現実にはかなり難しいものとなってしまう。したがって，実際に**図7－4**のような応力を仮定して座屈に対する検討を行うためには，有限要素法等による数値計算が必要となろう。

7－4　座屈係数の比較

IDR 11.3.2.1の図11.10.では,ダイヤフラムパネルの座屈における座屈係数K'が与えられている。一方，有限要素法によるダイヤフラムの座屈解析から求まる座屈応力をもとに，座屈係数を知ることができる。そこで，モデル*A*，*B*，*C*について，*IDR*および有限要素法による座屈係数を比較してみると，**表7－1**のようになる。この表で，K_I' が*IDR*による座屈係数，K_F' が有限要素法による

表7―1　DIFFERENCE OF BUCKLING COEFFICIENT BETWEEN IDR AND FEM

H / B	ϕ	L / R	K_I'	K_F'	$K_I' - K_F'$
1.5	4.44	2.0	3.11	12.06	8.96
		1.0	3.31	12.21	8.90
		0.5	3.76	12.71	8.95
1.0	3.02	1.0	3.72	12.05	8.33
		0.5	3.91	12.92	9.01
0.5	1.47	1.0	4.41	13.06	8.65

座屈係数である。表から明らかなように，ここで検討したすべてのモデルで，K_I' とK_F'の差が，8.3～9.0程度の値となっている。すなわち，*IDR*による座屈係数を，8.3～9.0程度割増せば，有限要素法による座屈係数に近い値となる。そこで，第6章の**表6－2**，**6－3**に示したモデルのうち，主なパネルについて，座屈係数を，*IDR*図11.10により得られた値に8.0だけ加えて，強度を求めたところ，**表7－2**のような結果が得られた。当然のことながら，いずれもパネルの強度σ_{eult} は，**表6－2**，**6－3**に示されたものより大きくなっており，Bシリーズのモデルにおいては，強度は，材料の降伏に支配されていることがわかる。しかし，この補正によっても，なおAⅡの一点載荷時をのぞいて，応力の照査値は，強度を上回っている。

表7―2　ULTIMATE STRENGTH OF DIAPHRAGM PANELS USING MODIFIED BUCKLING COEFFICIENTS

kg/cm^2

MODEL	PANEL	$\sigma_{e\,ult}$	
		Table 6-2,6-3	This Chapter
A I	3 *	1965	2160
A II	3 *	2208	2304
A I	3	1512	2112
A II	3	1800	2160
B I	1	2304	2400
	2	2280	2400
B II	1	2304	2400
	2	2280	2400

* show the case of 1-Point Loading

なお，*IDR*により座屈係数や強度を求めようとすると，各種の数値を図から読み取らなければならない場合が多い。そのため，ある入力量に対する結果を読み取る際に，*IDR*では，若干の誤差が生じることは避けられない。また，入力量に対応する図が直接与えられていない場合，誤差はさらに大きくなることが考えられる。*IDR* 11.3.2.1 では，入力に直接対応する図がない場合，中間値に対しては，線形補間により結果を読み取ることとしている。しかし，入力量が，与えられた図の範囲外となった場合については，*IDR*は，明確な処理を説明していない。また，例えば，水平方向応力 σ_{n2} のごく小さなパネルについて，座屈係数を求める場合など，入力するパラメータが片寄った値であると，入力量のわずかな変動により結果が大きく異なることもある。すなわち，*IDR*では，応力照査の結果には必ず若干の誤差が入っていることになり，また，設計の条件によっては，誤差はかなり大きなものになる可能性もあると言える。

7－5　設計における注意

第4章から本章前節まで説明してきたことから，ダイヤフラム設計に対する注意等をまとめると，以下のようになる。

支点上ダイヤフラムの発生応力の推定には，*IDR*を用いてよい。

示方書　では，支点上ダイヤフラムの応力度算定については，直接の規程はないが，その条項8.7.1では，プレートガーダーにおける荷重集中点の構造について説明されている。また，鋼道路橋設計便覧[124]では，ダイヤフラムの応力は，ダイヤフラム上端で0となるような三角形分布を仮定しているが，その算定に用いるダイヤフラムパネルの有効幅は，示方書8.7.1によるものとしている。有効幅は，ダイヤフラム上端から下端にわたって一定である。一方，*IDR*では，ダイヤフラムパネルの応力は，基本的には上端で0となるような三角形分布であるが，有効幅は，**図付B3－1** に示すように，支承直上では小さく，支承から離れるにつれて大きくなるように決められている。**図5－18**や図7－3などをみると，ダイヤフラムの応力は，補剛材に沿って分布しており，補剛材から離れるに従って急激に減少している。すなわち有効幅は，示方書や便覧のように，ダイヤフラムの上下にわたって一定とするのが現象に合っていると言える。しかし，*IDR*により求めた応力は，有限帯板法による応力とおおむね一致したこと，*IDR*により計算された強度は，かなり余裕のあるものであることなどから，ダイヤフラムパネルの発生応力の推定には，*IDR*の式を用いてよいものと思われる。

> *IDR*は，支点上ダイヤフラムの強度を過小評価している。*IDR* 11.3.2.1における座屈係数は，*IDR*の図11.10より得られる値に8.0を加えた値を用いてよいものと思われる。

表6－2から表6－6，および第6章で示した実験結果などから判断する限り，*IDR*の指針は，ダイヤフラムパネルや補剛材の強度を過小評価していると言える。一方，*IDR*の 図11.10から得られた座屈係数と，有限要素法により計算されたそれを単純に比較すると，有限要素法が，8.3～9.0程度大きな値を与えている。すなわち，*IDR*によりパネルの強度を求める際に，座屈係数は，8.0程度割増しできる可能性のあることを示している。実際に，*IDR*による座屈係数を8.0だけ割増しして計算してみると，パネルの強度は若干増加し，パネルによっては，座屈が支配的であった強度が，この修正によって，降伏が支配的な状態になるなどの変化がみられた。しかし，それでもなお，この強度は，実験により得られた強度より小さいものであった。

ただし，ここでいう座屈係数の差は，多くの場合について検討した結果得られたものではない。また，*IDR*による座屈係数と，*FEM*によるそれとの差が生ずる理由について，理論的な裏付けがあるわけではない。

さて，*IDR*で，ダイヤフラムパネルの強度を過小評価している原因の一つとして，ダイヤフラムパネルの応力分布の仮定が挙げられる。これについては，**図5－18**や**図7－3**から，次の注意を挙げ

ることができる。

> ダイヤフラムパネルの強度の算定の際には，可能ならば，パネルの応力を**図7－4**のように仮定すればよい。**図7－4**中のσ_{n1}などは*IDR*より求まるものであり，また，C_1などは考えているダイヤフラムパネルの位置によって決るものである。

図5－18や**図7－3**をみると，ダイヤフラムパネルの鉛直方向応力は，支承上補剛材から離れるにしたがって減少し，ダイヤフラム上端で0となると考えられる。さらに，ダイヤフラムの面内曲げによる水平方向応力も考えると，結局，**図7－4 b)** のような応力分布が仮定でき，これから，考えているダイヤフラムパネルの位置や大きさにより，**図7－4 a)** が仮定される。

> 曲線桁におけるダイヤフラムを設計する場合，まず，それぞれの支承について反力を求めたのち，直線桁と同様に扱えばよい。

中間支点における左右支承への支点反力分配については，本論文第4章からその傾向を知ることができる。ダイヤフラムパネルの鉛直方向応力は，**図7－1**に示すように，それぞれの支承上について独立して求めることができる。水平方向応力については，*IDR* 11. 2. 4では，曲げ理論によってよいとしているので，便覧[124]の図3－57のようにして求めることができる。なお，第4章の結果から，曲線桁であっても，荷重が左右対称であれば，左右の支承における支点反力が等しいとみなせる場合は，かなり多いと思われる。

7－6 ま と め

支点上ダイヤフラムは，その挙動と腹板，フランジ，その他の部材との関係などが複雑なため，多くの条件を考慮したパラメトリックな解析は困難である。**図7－4**で示した，ダイヤフラムパネルの応力のモデル化についてみても，考えなければならないパラメータは，パネルの大きさやσ_{n1}，σ_{2b} τなどのほか，そのパネルの位置と大きさによって決まるσ_{2b}とσ_{n2} σ'_{n2}の関係，係数C_1がある。

*IDR*は，その応力照査の手順が，実用には複雑すぎるとされているが，これらのパラメータをすべて考慮した設計基準を設けると，それは，*IDR*以上に複雑なものとなってしまう可能性もある。*IDR*で，一様な応力分布を仮定しているのは，一つには，照査に用いるパラメータを少なくするため，という意味もあると考えられる。しかし，*IDR*により得られたパネルの強度は，実際の強度よ

りもかなり小さい，ということから，その応力分布のモデル化は，適当なものとは言い難い。今後は**図7－4**で示した応力のモデルを活かしながら，比較的容易な応力照査が可能となるような，式，あるいは図表等を求めることが，ダイヤフラムの設計基準などを決めるうえで必要となろう。そのための方法として，例えば，図7－4におけるC_1の大きさやσ_{n2}，σ'_{n2}の関係などは，考えているパネルの位置や大きさによって決ることから，これらをパネルの縦横比にそのパネルの位置を表すパラメータを加えることにより，C_1，σ_{n2}，σ'_{n2}を表現するということも，一案として考えられる。

現在のところ，支点上ダイヤフラムの設計基準をまとまった形で提示しているのは，*IDR*だけのようである*。本章で示した設計上の注意事項など，本章の内容は，いずれも，第4章～第6章の実験，数値計算から経験的に導かれたものであり，理論的な根拠を与えるまでには至っていない。今後は，これらの事項について，さらに調査を進めることは，当然，必要であろう。一方，ダイヤフラムパネルの応力のモデル化について，例えば，本章の**図7－4**で説明したモデルのように，現象を適切に表現するようなものを用いて，しかも実用性のある設計法を提案するための検討が，要求される。

＊　英国で現在，正式制定のために準備中の新示方書ＢＳ 5400 の Part 3 では，*IDR*などをもとにした，より簡略な設計基準案が提案されている。これについては，付録Ｂ－4に示す[138~141]。

8. 結　　　　論

本研究に対する結論は，第4章～第7章に，それぞれ，まとめとして示してあるが，ここでは，それらを総括して示す。

鋼箱桁橋は，高いねじり剛性を有するなど，そのすぐれた力学的特性のため，曲線桁を中心に，多くの橋に用いられている。ところで，大型鋼箱桁橋に関しては，1969年～1971年にかけて諸外国でその架設中の落橋事故が相ついだ。しかし，箱桁橋については，体系的な設計基準は我が国ではまだ確立されておらず，外国においても，上記の事故後に制定された暫定設計基準（*IDR*）があるのみである（現在，英国で，*IDR*をもとにした新示方書が作成中である）。

さて，箱桁では，特定の部材，あるいは現象については，すでに多くの研究が行われている。中間ダイヤフラムを有する箱桁の挙動，せん断遅れなどである。そして，中間ダイヤフラムについては，設計基準の具体案が提案されている。しかし，支点上ダイヤフラムについては，それが重要な部材であるにもかかわらず，あまり研究されていない。*IDR*では，支点上ダイヤフラムを含めた箱桁の設計基準を定めているが，その基準は複雑さ，あるいは経済性などからの疑問も指摘されている。

本研究は，連続鋼箱桁の中間支点上ダイヤフラム，端支点上ダイヤフラムに関する実験および*FSM*による計算を行い，その挙動や，強度と破壊形式の関係を調べ，支点上ダイヤフラム，およびその近傍の設計のための基礎的資料を得ようとするものである。

まず2章では，本研究で用いた*FSM*の定式化を，Cheung らの文献に従って行った。また，*FSM*を，中間ダイヤフラム等を有する箱桁に適用する手法についても，直接法・間接法の2種の方法を，文献39)，133）や文献40）～43)，135）などに基づいて示した。これらのうち，間接法は，*FEM*において解くべき連立方程式を小さくできる，という*FSM*の特徴をある程度活かした手法であるので，本研究における*FSM*による数値計算も，すべて間接法によった。なお，*FSM*は，その性質上，端支点上ダイヤフラムについて考慮することはできない。これは，*FSM*の定式化をする際，変位などを三角級数で展開しているからである。このため，中間支点上ダイヤフラムとともに端支点上ダイヤフラムも扱った第6章では，端支点上ダイヤフラムについてはＦＳＭによる数値計算は行っていない。

本研究では，中間支点，および端支点上ダイヤフラムの挙動や崩壊形式についての実験を行っている。これらの実験については，関連する章でそれぞれ詳しく説明をしているが，第3章では　これらの実験に共通する，模型の支持装置，載荷装置について述べた。

さて，支点上ダイヤフラムや支点付近の桁の設計には，支点反力を知る必要がある。第4章では，

2径間連続の曲線箱桁の中間支点における左右支承への反力分配について考察した。その結果，①一部の極端な場合を除けば，一般的に，内側支承における反力が外側支承における反力を上回るが，中間ダイヤフラムにより左右支承の反力は均等化されること，②中間ダイヤフラムの剛度はある程度以上であれば十分であり，*IDR* 6.2.4.のダイヤフラムの無次元剛度S＝ 300程度以上となると，剛度を増しても，左右支承の反力はそれ以上は均等化されず，中間ダイヤフラムの数も，左右支承への反力の均等化という点のみからみれば，1スパンに1枚あれば十分であること，③中間支点が桁の中央断面の位置から桁端に寄ると，左右支承における反力の差は拡がり，中間支点が桁の1/4の点にある場合，支点反力分配係数は，中間支点が桁の中央にある場合に比べ，桁長Lと曲率半径Rの比に応じL／R＝ 0.5 で89%，L／R＝ 1.0で58%，L／R 1.5で24%の値になること，などがわかった。

第5章では，2径間連続の直線および曲線箱桁橋の，中間支点上ダイヤフラム，およびその近傍の桁の，弾性範囲内での応力を，実験結果，および*FEM*の結果により示した。支点上ダイヤフラムの応力は，ダイヤフラムに補剛材がない場合，支承部からダイヤフラム中央に向け，アーチ状に分布しているが，補剛材があると，応力は補剛材に沿った分布形を示す。支承が腹腹直下にある場合，ダイヤフラムの応力に対して腹板が補剛材と同様な働きをするが，このときは，腹板に生ずる鉛直方向応力に対する補剛材が必要である。ダイヤフラムに作用する力は，支点反力のほか，腹板からのせん断力も重要である。しかしモデルによっては，腹板からのせん断力のほか，ダイヤフラム上辺からの圧縮が支配的となる場合もある。従って，ダイヤフラムのみを分離して解析する際には注意が必要である。一方，補剛材の応力は，載荷点直下よりも，そこからある程度離れた点の方が大きい。曲線桁では，実験によるダイヤフラムの載荷点付近の応力は，曲線の外側で大きく，内側で小さな値を示す傾向がある。第4章の結果によると，支点反力は，内側が大きな値を示すことになるが，この実験では支点反力に相当する荷重は，左右とも同じ大きさにして載荷している。そのため，ダイヤフラムの応力は，相対的に内側が小さくなるような挙動を示したものであろう。また，直線桁では，中間ダイヤフラムの有無や剛度の大小は，支点上ダイヤフラムの応力にはほとんど影響を与えない。曲線桁においても，その影響は小さい。

第6章は，直線箱桁の，支点上ダイヤフラム，およびその近傍の桁の耐荷力に関する章であり，曲げが支配的な中間支点付近と，せん断が支配的な端支点付近について，実験や，その結果の*IDR*との比較などを行った。その結果，①支承上補剛材によって効果的にダイヤフラムパネルの応力を小さくすることができ，モデルによっては，支点反力のほとんどを補剛材が負担すること，②ダイヤフラムの剛度を増すことは，それ自身の強度が増すほか，腹板のせん断耐荷力向上にも効果があること，③*IDR*は，ダイヤフラムパネルの発生応力の推定には有効であるが，その強度についてはかなり過

小評価していること，などが言える。また，ダイヤフラムの，支承から離れた部分では，*IDR*により検討しても，なお，強度に余裕があることから，支承付近では副耐荷補剛材をある程度密に配置し，支承から離れた部分まで達する主耐荷補剛材の断面や，ダイヤフラムパネルの板厚は，他の支障がない程度に減少させることが合理的と思われる。

第7章では，それ以前の章で得られた結論をもとに，ダイヤフラムパネルの*FEM*による座屈解析の結果なども併せ，支点上ダイヤフラム設計上の注意事項について，*IDR*との関係も含め考察した。また，ダイヤフラムパネル内での応力分布について，*IDR*で用いている分布形と，*FSM*により得られた分布の相違も示した。支点上ダイヤフラム設計のうえでの注意事項などとして，①発生応力の推定には*IDR*を用いてよいこと，②ダイヤフラムの強度を評価する場合，水平方向の発生応力が小さいダイヤフラムパネルでは，*IDR*により得られたパネルの座屈係数に8.0を加えた値を，設計の際に用いる座屈係数とすればよいと思われること，③曲線桁においては，内側支承と外側支承それぞれについて反力を求めれば，以後は，直線桁と同様な取り扱いをすればよいこと，などを述べた。
また，第7章では，ダイヤフラムの座屈に対する照査のための，パネルの応力モデル化について，若干複雑にはなるものの，より望ましい応力分布の仮定を示した。

支点上ダイヤフラムは，その挙動と腹板，フランジ等他の部材との関係が複雑なため，多くの条件を考慮したパラメトリックな取り扱いは困難である。支点上ダイヤフラムの挙動を支配すると思われるパラメータは，ダイヤフラム自身に関係したもののみを挙げても，その形状（すなわち箱桁の断面形），開口部の有無やその形状，寸法，補剛材の位置やその本数，断面積，ダイヤフラムパネルの板厚などが考えられ，また，ダイヤフラムの周囲の部材，例えば腹板においても，その板厚，鉛直，水平（橋軸方向）の補剛材の位置や断面積など，非常に多い。また，支点上ダイヤフラムを含む桁の形状（直線か曲線か，など）や寸法なども，当然，支点上ダイヤフラムに影響をあたえる。本研究で行った実験では，第5章で，桁の形状，中間ダイヤフラムの剛度をパラメータとし，第6章では，支承上耐荷補剛材の寸法のみをパラメータとしている。従って，この研究の結果のみから，多くの場合に関する考察を得ることは難しい。また，本研究で示された結論は，いずれも経験的に求められたものであり，理論的な根拠を与えるまでには至っていない。支点上ダイヤフラムに関する研究はまだ少なく，これらの解明は，今後の課題としなければならない事項が多い。

しかしながら，本研究からは，支点上ダイヤフラムの桁（特に腹板）への影響などが，ある程度明らかにされた。また，ダイヤフラムパネルの応力照査にあたって，より望ましい応力分布の仮定も示された。さらに，中間支点上ダイヤフラム設計のために必要な支点反力の推定法も述べられている。

謝　　辞

本研究を行うにあたって，名古屋大学工学部の 福本唀士 教授， 成岡昌夫 教授（現摂南大学）， 梶田建夫 助教授，信州大学工学部の 吉田俊弥 教授には，終始，懇切丁寧なる御指導，有益なるご助言を賜りました。衷心より厚く御礼申し上げます。

大阪市立大学の 中井　博 教授には，実験を行ううえで，多くの御教示をいただきました。また，愛知工業大学の 青木徹彦 助教授，大同工業大学の 水澤富作 講師には，実験用器材の提供その他のご協力をいただきました。名古屋大学工学部技官　玉田伸一氏（現名古屋市消防局），大同工業大学学生（当時）の猪野・岡部・森本の各氏には，実験のスタッフとして研究に参加していただきました。

名古屋大学工学部の 菊地洋一 教授，島田静男　教授，信州大学工学部の 草間孝志 教授には，論文をまとめるうえでの御助言をいただきました。名古屋大学大学院　古田秀博氏（現横河橋梁製作所），信州大学大学院　金原慎一氏（現宮地鐵工所）には，実験・数値計算等に協力していただきました。信州大学大学院　金子俊一・吉川　薫，信州大学工学部事務官・新保裕子の各氏には，製図，清書，資料の複写，校正などをしていただいたほか，信州大学工学部橋梁研究室の学生諸氏（当時）にも，多大な協力をいただきました。

これらの方々にも厚く御礼申し上げます。

本研究中の実験は，大阪市土木局から名古屋大学への委託研究の一部として行われた。模型の設計・製作は，大阪市土木局橋梁課・三菱重工業神戸造船所でなされたものである。これらの関係の方々にも，併せて感謝致します。

なお，本研究における数値計算には，東京大学および名古屋大学の大型計算機センター，信州大学データステーションを利用したことを付記しておく。

付　　録 — A

A－1　〔B_{pm}〕の内容

$$[B_{pm}]=\begin{bmatrix} -\frac{1}{b}sn & 0 & \frac{1}{b}sn & 0 \\ 0 & -(1-\frac{x}{b})k_m sn & 0 & -\frac{x}{b}k_m sn \\ (1-\frac{x}{b})k_m cs & -\frac{1}{b}cs & \frac{x}{b}k_m cs & \frac{1}{b}cs \end{bmatrix}$$

ただし，$sn=\sin k_m y$, $cs=\cos k_m y$, $k_m=\frac{m\pi}{\ell}$

A－2　〔S_{pmn}〕の内容

$$[S_{pmn}]=\frac{t}{2}\int_0^{\ell}[S'_{pmn}]dy$$

$$[S'_{pmn}]=\begin{bmatrix} \frac{E_1}{b}S+\frac{b}{3}GKC & \frac{\nu E_1}{2}k_nS+\frac{G}{2}k_mC & -\frac{\nu E_1}{b}S+\frac{b}{6}KGC & -\frac{\nu E_1}{2}k_nS+\frac{G}{2}k_mC \\ & \frac{b}{3}E_1KS+\frac{G}{b}C & -\frac{\nu E_1}{2}k_mS-\frac{G}{2}k_mC & \frac{b}{6}E_1KS-\frac{G}{b}C \\ & & \frac{E_1}{b}S-\frac{b}{3}GKC & \frac{\nu E_1}{2}k_nS+\frac{G}{2}k_mC \\ & Sy_{mm}. & & \frac{b}{3}E_1KS+\frac{G}{6}C \end{bmatrix}$$

ただし，$E_1=\frac{E}{1-\nu^2}$, $G=\frac{E}{2(1+\nu)}$

$S=\sin k_m y\cdot\sin k_n y$

$C=\cos k_m y\cdot\cos k_n y$

$K=k_m\cdot k_n$

A－3　〔B_{bm}〕の内容

$$
[B_{bm}] = \left[\begin{array}{c|c|c|c}
\left(\frac{6}{b^2} - \frac{12x}{b^3}\right) sn & \left(\frac{4}{b} - \frac{6x}{b^2}\right) sn & \left(-\frac{6}{b^2} + \frac{12x}{b^3}\right) sn & \left(-\frac{6}{b^2} + \frac{2}{b}\right) sn \\
\hline
\left(1 - \frac{3x^2}{b^2} + \frac{2x^3}{b^3}\right) k_m^2 sn & \left(x - \frac{2x}{b} + \frac{x^3}{b^2}\right) k_m^2 sn & \left(\frac{3x^2}{b^2} - \frac{3x^3}{b^3}\right) k_m^2 sn & \left(\frac{x^3}{b^2} - \frac{x^2}{b}\right) k_m^2 sn \\
\hline
2\left(-\frac{6x}{b^2} + \frac{6x^3}{b^3}\right) k_m cs & 2\left(1 - \frac{4x}{b} + \frac{3x^2}{b^2}\right) k_m cs & 2\left(\frac{6x}{b^2} - \frac{6x^2}{b^3}\right) k_m cs & 2\left(\frac{3x^2}{b^2} - \frac{2x}{b}\right) k_m cs
\end{array} \right]
$$

ただし，$sn = \sin k_m y$，$\mathrm{cs} = \cos k_m y$

A－4　〔S_{bmn}〕の内容

$$[S_{bmn}] = \frac{1}{2}\int_0^{\ell}\int_0^{b} [S'_{bmn}]\,dx\,dy$$

$$
[S'_{bmn}] = \left[\begin{array}{c|c|c|c}
\begin{array}{l}
\frac{36}{b^4}\left(1-\frac{4x}{b}+\frac{4x^2}{b^2}\right)DS \\
+\frac{6}{b^2}\left(1-\frac{2x}{b}-\frac{3x^2}{b^2}+\frac{8x^3}{b^3}-\frac{4x^4}{b^4}\right)k_m^2 D_1 S \\
+\frac{6}{b^2}\left(1-\frac{2x}{b}-\frac{3x^2}{b^2}+\frac{8x^3}{b^3}-\frac{4x^4}{b^4}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\left(1-\frac{6x^2}{b^2}+\frac{4x^3}{b^3}+\frac{9x^4}{b^4}-\frac{12x^5}{b^5}+\frac{4x^6}{b^6}\right)K^2 DS \\
+144\left(\frac{x^2}{b^4}-\frac{2x^3}{b^5}+\frac{x^4}{b^6}\right)KD_G C
\end{array} &
\begin{array}{l}
\frac{12}{b^3}\left(2-\frac{7x}{b}+\frac{6x^2}{b^2}\right)DS \\
+\frac{2}{b}\left(2-\frac{3x}{b}-\frac{6x^2}{b^2}+\frac{13x^3}{b^3}-\frac{6x^4}{b^4}\right)k_m^2 D_1 S \\
+\frac{6}{b^2}\left(x-\frac{4x^2}{b}+\frac{5x^3}{b^2}-\frac{2x^4}{b^3}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\left(x-\frac{2x^2}{b}-\frac{2x^3}{b^2}+\frac{8x^4}{b^3}-\frac{7x^5}{b^4}+\frac{2x^6}{b^5}\right)K^2 DS \\
+\frac{24}{b^2}\left(-x+\frac{5x^2}{b}-\frac{7x^3}{b^2}-\frac{3x^4}{b^3}\right)KD_G C
\end{array} &
\begin{array}{l}
\frac{36}{b^4}\left(-1+\frac{4x}{b}-\frac{4x^2}{b^2}\right)DS \\
+\frac{6}{b^2}\left(-1+\frac{2x}{b}+\frac{3x^2}{b^2}-\frac{8x^3}{b^3}+\frac{4x^4}{b^4}\right)k_m^2 D_1 S \\
+\frac{6}{b^4}\left(3x^2-\frac{8x^3}{b}+\frac{4x^4}{b^2}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\frac{1}{b^2}\left(3x^2-\frac{2x^3}{b}-\frac{9x^4}{b^2}+\frac{12x^5}{b^3}-\frac{4x^6}{b^4}\right)K^2 DS \\
+144\left(-\frac{x^2}{b^4}+\frac{2x^3}{b^5}-\frac{x^4}{b^6}\right)KD_G C
\end{array} &
\begin{array}{l}
\frac{12}{b^3}\left(1-\frac{5x}{b}+\frac{6x^2}{b^2}\right)DS \\
+\frac{2}{b}\left(1-\frac{3x}{b}-\frac{3x^2}{b^2}+\frac{11x^3}{b^3}-\frac{6x^4}{b^4}\right)k_m^2 D_1 S \\
+\frac{6}{b^3}\left(-x^2+\frac{3x^3}{b}-\frac{2x^4}{b^2}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\frac{1}{b}\left(-x^2+\frac{x^3}{b}+\frac{3x^4}{b^2}-\frac{5x^5}{b^3}+\frac{2x^6}{b^4}\right)K^2 DS \\
+\frac{24}{b^3}\left(2x^2-\frac{5x^3}{b}+\frac{3x^4}{b^2}\right)KD_G C
\end{array} \\
\hline
 &
\begin{array}{l}
\left(\frac{16}{b^2}-\frac{48x}{b^3}+\frac{36x^2}{b^4}\right)DS \\
+\frac{2}{b}\left(2x-\frac{7x^2}{b}+\frac{8x^3}{b^2}-\frac{3x^4}{b^3}\right)k_m^2 D_1 S \\
+\frac{2}{b}\left(2x-\frac{7x^2}{b}+\frac{8x^3}{b^2}-\frac{3x^4}{b^3}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\left(x^2-\frac{4x^3}{b}+\frac{6x^4}{b^2}-\frac{4x^5}{b^3}+\frac{x^6}{b^4}\right)K^2 DS \\
+2\left(1-\frac{8x}{b}+\frac{10x^2}{b^2}-\frac{24x^3}{b^3}+\frac{9x^4}{b^2}\right)KD_G C
\end{array} &
\begin{array}{l}
\frac{12}{b^3}\left(-2+\frac{7x}{b}-\frac{6x}{b^3}\right)DS \\
+\frac{6}{b^2}\left(-x+\frac{4x^2}{b}-\frac{5x^3}{b^2}+\frac{2x^4}{b^3}\right)k_m^2 D_1 S \\
+\frac{2}{b^3}\left(6x^2-\frac{13x^3}{b}+\frac{6x^4}{b^2}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\frac{1}{b^2}\left(3x^3-\frac{8x^4}{b}+\frac{7x^5}{b^2}-\frac{2x^6}{b^3}\right)K^2 DS \\
+\frac{24}{b^2}\left(x-\frac{5x^2}{b}+\frac{7x^3}{b^2}-\frac{3x^4}{b^3}\right)KD_G C
\end{array} &
\begin{array}{l}
\frac{4}{b^2}\left(2-\frac{9x}{b}+\frac{9x^2}{b^2}\right)DS \\
+\frac{2}{b}\left(x-\frac{5x^2}{b}+\frac{7x^3}{b^2}-\frac{3x^4}{b^3}\right)k_m^4 D_1 S \\
+\frac{2}{b^2}\left(-2x^2+\frac{5x^3}{b}-\frac{3x^4}{b^2}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\frac{7}{b}\left(-x^3+\frac{3x^4}{b}-\frac{3x^5}{b^2}+\frac{x^6}{b^3}\right)K^2 DS \\
+\frac{2}{b}\left(-2x+\frac{11x^2}{b}-\frac{18x^3}{b^2}+\frac{9x^4}{b^3}\right)KD_G C
\end{array} \\
\hline
 & \mathrm{Symm.} &
\begin{array}{l}
\frac{36}{b^4}\left(1-\frac{4x}{b}+\frac{4x^2}{b^2}\right)DS \\
+\frac{6}{b^4}\left(-3x^2+\frac{8x^3}{b}-\frac{4x^4}{b^2}\right)k_m^2 D_1 S \\
+\frac{6}{b^4}\left(-3x^2+\frac{8x^3}{b}-\frac{4x^4}{b^2}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\left(\frac{9x^4}{b^4}-\frac{12x^5}{b^5}+\frac{4x^6}{b^6}\right)K^2 DS \\
+144\left(\frac{x^2}{b^4}-\frac{2x^3}{b^5}+\frac{x^4}{b^6}\right)KD_G C
\end{array} &
\begin{array}{l}
\frac{12}{b^3}\left(-1+\frac{5x}{b}-\frac{6x^2}{b^2}\right)DS \\
+\frac{3}{b^2}\left(3x^2-\frac{11x^3}{b}+\frac{6x^4}{b^2}\right)k_m^2 D_1 S \\
+\frac{6}{b^3}\left(x^2-\frac{3x^3}{b}+\frac{2x^4}{b^2}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\frac{1}{b^3}\left(-3x^4+\frac{5x^5}{b}-\frac{2x^6}{b^2}\right)K^2 DS \\
+\frac{24}{b^3}\left(-2x^2+\frac{5x^3}{b}-\frac{3x^4}{b^2}\right)KD_G C
\end{array} \\
\hline
 & & &
\begin{array}{l}
\left(\frac{36x^2}{b^4}-\frac{24x}{b^3}+\frac{4}{b^2}\right)DS \\
+\frac{2}{b^2}\left(-x^2+\frac{4x^3}{b}-\frac{3x^4}{b^3}\right)k_m^2 D_1 S \\
+\frac{2}{b^2}\left(-x^2+\frac{4x^3}{b}-\frac{3x^4}{b^2}\right)k_n^2 D_1 S \\
+\left(\frac{x^6}{b^4}-\frac{2x^5}{b^3}+\frac{x^4}{b^2}\right)K^2 DS \\
+4\left(\frac{9x^4}{b^4}-\frac{12x^3}{b^3}-\frac{4x^2}{b^2}\right)KD_G C
\end{array}
\end{array}\right]
$$

ただし，$K=k_m k_n$，$S=\sin k_m y\ \sin k_n y$，$C=\cos k_m y\cos k_n y$，$D=\dfrac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$，$D_1=\nu D$，$D_G=\dfrac{1-\nu}{2}D$

A－5　〔P_m〕の内容

$$
[P_m]=\left[\begin{array}{c|c|c|c}
-\frac{1}{2b}sn & 0 & \frac{1}{2b}sn & 0 \\
\hline
\frac{1}{r}\left(1-\frac{R}{2}\right)sn & -\frac{1}{r}\left(1-\frac{R}{2}\right)k_m sn & \frac{1}{r}\frac{R}{2}\,sn & -\frac{1}{r}\frac{R}{2}k_m sn \\
\hline
\frac{1}{r}\left(1-\frac{R}{2}\right)k_m cs & -\frac{1}{2b}cs-\frac{1}{r}\left(1-\frac{R}{2}\right)cs & \frac{1}{r}\frac{R}{2}k_m cs & \frac{1}{2b}cs-\frac{1}{r}\frac{R}{2}cs
\end{array}\right]
$$

ただし，$sn=\sin k_m\theta$, $cs=\cos k_m\theta$, $k_m=\frac{m\pi}{\alpha}$

A－6　〔C_{pm}〕の内容

$$
[C_{pm}]=\left[\begin{array}{c|c|c|c}
\begin{array}{l}KS_{11}^2+2K_1S_{11}S_{21}\\+KS_{21}^2+K_gS_{31}^2\end{array} & \begin{array}{l}K_1S_{11}S_{21}+KS_{21}S_{22}\\+K_gS_{31}S_{32}\end{array} & \begin{array}{l}KS_{11}S_{13}+K_1S_{21}S_{13}\\+KS_{21}S_{23}+K_1S_{11}S_{23}\\+K_gS_{31}S_{33}\end{array} & \begin{array}{l}K_1S_{11}S_{24}+KS_{21}S_{24}\\+K_gS_{31}S_{34}\end{array} \\
\hline
 & KS_{22}^2+K_gS_{32}^2 & \begin{array}{l}K_1S_{22}S_{13}+KS_{22}S_{23}\\+K_gS_{32}S_{33}\end{array} & KS_{22}S_{24}+K_gS_{32}S_{34} \\
\hline
 & Sym. & \begin{array}{l}KS_{13}^2+2K_1S_{23}S_{13}\\+KS_{23}^2+K_gS_{33}^2\end{array} & \begin{array}{l}K_1S_{13}S_{24}+KS_{23}S_{24}\\+K_gS_{33}S_{34}\end{array} \\
\hline
 & & & KS_{24}^2+K_gS_{34}^2
\end{array}\right]
$$

ただし，$K=\frac{Et}{1-\nu^2}$，$K_1=\nu K$，$K_g=\frac{Et}{2(1+\nu)}$

Sij は，〔P_m〕の i 行 j 列の要素

A－7　〔B_m〕の内容

$$
[B_m]=\left[\begin{array}{c|c|c|c}
\left(-\frac{3R}{2b^2}+\frac{3}{2b^2}\right)sn & \left(\frac{2}{b}-\frac{3R}{2b}\right)sn & \left(\frac{3R}{2b^2}-\frac{3}{2b^2}\right)sn & \left(\frac{1}{b}-\frac{3R}{2b}\right)sn \\
\hline
\begin{array}{l}\frac{1}{r^2}\left(1-\frac{3}{4}R^2+\frac{1}{4}R^3\right)k_m^2 sn \\ +\frac{1}{r}\left(\frac{3R}{2b}-\frac{3R^2}{4b}\right)sn\end{array} & \begin{array}{l}\frac{b}{r^2}\left(R-R^2+\frac{R^3}{4}\right)k_m^2 sn \\ +\frac{1}{r}\left(2R-1-\frac{3R^2}{4}\right)sn\end{array} & \begin{array}{l}\frac{1}{r^2}\left(\frac{3}{4}R^2-\frac{R^3}{4}\right)k_m^2 sn \\ +\frac{1}{r}\left(\frac{3R^2}{4b}-\frac{3R}{2b}\right)sn\end{array} & \begin{array}{l}\frac{b}{r^2}\left(\frac{R^3}{4}-\frac{R^2}{2}\right)k_m^2 sn \\ +\frac{1}{r}\left(R-\frac{3R^2}{4}\right)sn\end{array} \\
\hline
\begin{array}{l}\frac{2}{r}\left(\frac{3R}{2b}-\frac{3R^2}{4b}\right)k_m cs \\ +\frac{2}{r^2}\left(1-\frac{3}{4}R^2+\frac{R^3}{4}\right)k_m cs\end{array} & \begin{array}{l}\frac{2}{r}\left(2R-1-\frac{3R^2}{4}\right)k_m cs \\ +\frac{2b}{r^2}\left(R-R^2+\frac{R^3}{4}\right)k_m cs\end{array} & \begin{array}{l}\frac{2}{r}\left(\frac{3R^2}{4b}-\frac{3R}{2b}\right)k_m cs \\ +\frac{2}{r^2}\left(\frac{3}{4}R^2-\frac{R^3}{4}\right)k_m cs\end{array} & \begin{array}{l}\frac{2}{r}\left(R-\frac{3R^2}{4}\right)k_m cs \\ +\frac{2b}{r^2}\left(\frac{R^3}{4}-\frac{R^2}{2}\right)k_m cs\end{array}
\end{array}\right]
$$

ただし，$R=\frac{r-r_i}{b}$，$k_m=\frac{m\pi}{\alpha}$，$sn=\sin k_m\theta$，$cs=\cos k_m\theta$

A－8　〔C_{bm}〕の内容

$$
[C_{bm}]=\left[\begin{array}{c|c|c|c}
\begin{array}{l}DB_{11}^2+2D_1\ B_{21}B_{11} \\ +DB_{21}^2+D_g B_{31}^2\end{array} & \begin{array}{l}DB_{11}B_{12}+D_1\ B_{12}B_{21} \\ +D_1\ B_{11}B_{22}+DB_{21}B_{22} \\ +D_g\ B_{31}B_{32}\end{array} & \begin{array}{l}DB_{11}B_{13}+D_1\ B_{21}B_{13} \\ +D_1\ B_{11}B_{23}+DB_{21}B_{23} \\ +D_g\ B_{31}B_{33}\end{array} & \begin{array}{l}DB_{11}B_{14}+D_1\ B_{21}B_{14} \\ +D_1\ B_{11}B_{24}+DB_{21}B_{24} \\ +D_g\ B_{31}B_{34}\end{array} \\
\hline
 & DB_{12}^2+2D_1\ B_{22}B_{12} & \begin{array}{l}DB_{12}B_{13}+D_1\ B_{22}B_{13} \\ +D_1\ B_{12}B_{23}+DB_{22}B_{23} \\ +D_g\ B_{32}B_{33}\end{array} & \begin{array}{l}DB_{12}B_{14}+D_1\ B_{22}B_{14} \\ +D_1\ B_{12}B_{24}+DB_{22}B_{24} \\ +D_g\ B_{32}B_{34}\end{array} \\
\hline
 & Symm. & \begin{array}{l}DB_{13}^2+2D_1\ B_{23}B_{13} \\ +DB_{23}^2+D_g\ B_{33}\end{array} & \begin{array}{l}DB_{13}B_{14}+D_1\ B_{23}B_{14} \\ +D_1\ B_{13}B_{24}+DB_{23}B_{24} \\ +D_g\ B_{33}B_{34}\end{array} \\
\hline
 & & & \begin{array}{l}DB_{14}^2+2D_1\ B_{24}B_{14} \\ +DB_{24}^2+D_g\ B_{34}^2\end{array}
\end{array}\right]
$$

ただし，$D=\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$，$D_1=\nu D$，$D_g=\frac{t^3}{12}\cdot\frac{E}{2(1+\nu)}$

B_{ij} は〔B_m〕の i 行 j 列の要素

A − 9　〔T_m〕の内容

$T_{11}=-\frac{1}{d}s$

$T_{15}=\frac{1}{d}s$

$T_{21}=\frac{1}{r}(1-\frac{z}{d})s\,s_\phi$

$T_{22}=-\frac{1}{r}(1-\frac{z}{d})k_m s$

$T_{23}=\frac{1}{r}(1-\frac{3z^2}{d^2}+\frac{2z^3}{d^3})s\ \ c_\phi$

$T_{24}=\frac{1}{r}(z-\frac{2z^2}{d}+\frac{z^3}{d^2})s\ \ c_\phi$

$T_{25}=\frac{1}{r}\ \ \frac{z}{d}s\ \ s_\phi$

$T_{26}=-\frac{z}{rd}k_m s$

$T_{27}=\frac{1}{r}(\frac{3z^2}{d^2}-\frac{2z^3}{d^3})s\ \ c_\phi$

$T_{28}=\frac{1}{r}(\frac{z^3}{d^2}-\frac{z^2}{d})s\ \ c_\phi$

$T_{31}=\frac{1}{r}(1-\frac{z}{d})k_m c$

$T_{32}=-\frac{1}{d}c-\frac{1}{r}(1-\frac{z}{d})c\ \ s_\phi$

$T_{35}=\frac{1}{r}\ \ \frac{z}{d}k_m c$

$T_{36}=\frac{1}{d}c-\frac{z}{rd}c\ \ s_\phi$

$T_{43}=(\frac{6}{d^2}-\frac{12z}{d^3})s$

$T_{44}=(\frac{4}{d}-\frac{6z}{d^2})s$

$T_{47}=(-\frac{6}{d^2}+\frac{12z}{d^3})s$

$T_{48}=(-\frac{6z}{d^2}+\frac{2}{d})s$

$T_{52}=-\frac{1}{r^2}(1-\frac{z}{d})k_m s\,c_\phi$

$T_{53}=\frac{1}{r^2}(1-\frac{3z^2}{d^2}+\frac{2z^3}{d^3})k_m^2 s$

$\quad-\frac{1}{r}(-\frac{6z}{d^2}+\frac{6z^2}{d^3})s\ \ s_\phi$

$T_{54}=\frac{1}{r^2}(z-\frac{2z^2}{d}+\frac{z^3}{d^2})k_m^2 s$

$\quad-\frac{1}{r}(1-\frac{4z}{d}+\frac{3z^2}{d^2})s\ \ s_\phi$

$T_{56}=-\frac{z}{r^2 d}k_m s\ \ c_\phi$

$T_{57}=\frac{1}{r^2}(\frac{3z^2}{d^2}-\frac{2z^3}{d^3})k_m^2 s$

$\quad-\frac{1}{r}(\frac{6z}{d^2}-\frac{6z^2}{d^3})s\ \ s_\phi$

$T_{58}=\frac{1}{r^2}(\frac{z^3}{d^2}-\frac{z^2}{d})k_m^2 s\ \ -\frac{1}{r}(\frac{3z^2}{d^2}-\frac{2z}{d})s\ \ s_\phi$

$T_{62}=-\frac{2}{rd}c\ \ c_\phi\ \ -\frac{2}{r^2}(1-\frac{z}{d})c\ \ s_\phi c_\phi$

$T_{63}=\frac{2}{r}(\frac{6z}{d^2}-\frac{6z^2}{d^3})k_m c$

$\quad+\frac{2}{r^2}(1-\frac{3z^2}{d^2}+\frac{2z^3}{d^3})k_m c\ \ s_\phi$

$T_{64}=\frac{2}{r}(-1+\frac{4z}{d}-\frac{3z^2}{d^2})k_m c$

$\quad+\frac{2}{r^2}(z-\frac{2z^2}{d}+\frac{z^3}{d^2})k_m c\ \ s_\phi$

$T_{66}=\frac{2}{rd}c\ \ c_\phi\ \ -\frac{2z}{r^2 d}c\ \ s_\phi c_\phi$

$T_{67}=\frac{2}{r}(\frac{6z^2}{d^3}-\frac{6z}{d^2})k_m c\ \ +\frac{2}{r^2}(\frac{3z^2}{d^2}-\frac{2z^3}{d^3})k_m c\ \ s_\phi$

$T_{68}=\frac{2}{r}(\frac{2z}{d}-\frac{3z^2}{d^2})k_m c\ \ +\frac{2}{r^2}(\frac{z^3}{d^2}-\frac{z^2}{d})k_m c\ \ s_\phi$

その他の要素は 0

T_{ij} は〔T_m〕の要素

ただし，$k_m=\frac{m\pi}{\alpha}$，$s=\sin k_m\theta$，$c=\cos k_m\theta$，$s_\phi=\sin\phi$，$c_\phi=\cos\phi$

A－10　〔C_{wm}〕の内容

$$
[C_{wm}] = \begin{bmatrix} [C_{wm_{11}}] & [C_{wm_{12}}] \\ [C_{wm_{21}}] & [C_{wm_{22}}] \end{bmatrix}
$$

$$
[C_{mw_{11}}] = \begin{bmatrix}
\begin{array}{l} KT_{11}^2+2K_1T_{21}T_{11} \\ +KT_{21}^2+K_gT_{31}^2 \end{array} &
\begin{array}{l} K_1T_{22}T_{11}+KT_{22}T_{21} \\ +K_gT_{32}T_{31} \end{array} &
K_1T_{23}T_{11}+KT_{23}T_{21} &
K_1T_{24}T_{11}+KT_{24}T_{21} \\
 &
\begin{array}{l} KT_{22}^2+K_gT_{32}^2 \\ +DT_{52}^2+D_gT_{62}^2 \end{array} &
\begin{array}{l} KT_{23}T_{22}+D_1T_{43}T_{52} \\ +DT_{53}T_{52}+D_gT_{63}T_{62} \end{array} &
\begin{array}{l} KT_{24}T_{22}+D_1T_{44}T_{62} \\ +DT_{54}T_{62}+D_gT_{64}T_{62} \end{array} \\
 & &
\begin{array}{l} KT_{23}^2+DT_{43}^2 \\ +DT_{53}^2+D_gT_{63}^2 \\ +2D_1T_{53}T_{43} \end{array} &
\begin{array}{l} KT_{24}T_{23}+DT_{44}T_{43} \\ +D_1T_{54}T_{43}+D_1T_{44}T_{53} \\ +DT_{54}T_{53}+D_gT_{64}T_{63} \end{array} \\
 & Symm. & &
\begin{array}{l} KT_{24}^2+DT_{44}^2 \\ +DT_{54}^2+D_gT_{64}^2 \\ +2D_1T_{54}T_{44} \end{array}
\end{bmatrix}
$$

$$
[C_{mw_{12}}] = \begin{bmatrix}
\begin{array}{l} KT_{15}T_{11}+K_1T_{25}T_{11} \\ +KT_{25}T_{21}+K_gT_{35}T_{31} \\ +K_1T_{15}T_{21} \end{array} &
\begin{array}{l} K_1T_{26}T_{11}+KT_{26}T_{21} \\ +K_gT_{36}T_{31} \end{array} &
K_1T_{27}T_{11}+KT_{27}T_{21} &
K_1T_{28}T_{11}+KT_{28}T_{21} \\
\begin{array}{l} K_1T_{15}T_{22}+KT_{25}T_{22} \\ +K_gT_{35}T_{32} \end{array} &
\begin{array}{l} KT_{26}T_{22}+K_gT_{36}T_{32} \\ +DT_{56}T_{52}+D_gT_{66}T_{62} \end{array} &
\begin{array}{l} KT_{27}T_{22}+D_1T_{47}T_{52} \\ +DT_{57}T_{52}+D_gT_{67}T_{62} \end{array} &
\begin{array}{l} KT_{28}T_{22}+D_1T_{48}T_{52} \\ DT_{58}T_{52}+D_gT_{68}T_{62} \end{array} \\
K_1T_{15}T_{23}+KT_{25}T_{23} &
\begin{array}{l} KT_{26}T_{23}+D_gT_{66}T_{63} \\ +DT_{56}T_{53}+D_1T_{56}T_{43} \end{array} &
\begin{array}{l} DT_{27}T_{23}+DT_{47}T_{43} \\ +D_1T_{57}T_{43}+D_1T_{47}T_{53} \\ +DT_{57}T_{53}+D_gT_{67}T_{63} \end{array} &
\begin{array}{l} KT_{28}T_{23}+DT_{48}T_{43} \\ +DT_{58}T_{53}+D_1T_{58}T_{43} \\ +D_1T_{48}T_{53}+D_gT_{68}T_{63} \end{array} \\
K_1T_{15}T_{24}+KT_{25}T_{24} &
\begin{array}{l} KT_{26}T_{24}+D_1T_{56}T_{44} \\ +DT_{56}T_{64}+D_gT_{66}T_{64} \end{array} &
\begin{array}{l} KT_{27}T_{24}+DT_{47}T_{44} \\ +D_1T_{57}T_{44}+D_1T_{47}T_{54} \\ +DT_{57}T_{54}+D_gT_{67}T_{64} \end{array} &
\begin{array}{l} KT_{28}T_{24}+DT_{48}T_{44} \\ +D_1T_{58}T_{44}+D_1T_{48}T_{54} \\ +DT_{58}T_{54}+D_gT_{68}T_{64} \end{array}
\end{bmatrix}
$$

$$
[C_{mw_{21}}] = [C_{mw_{12}}]^T
$$

A－10　続き

$$
[C_{mw22}] = \begin{bmatrix}
KT_{15}^2+KT_{25}^2+Kg\,T_{35}^2+2K_1 T_{25}T_{15} & K_1 T_{26}T_{15}+KT_{26}T_{25}+Kg\,T_{35}T_{36} & K_1 T_{27}T_{15}+KT_{27}T_{25} & K_1 T_{28}T_{15}+KT_{28}T_{25} \\
 & DT_{26}^2+Dg\,T_{36}^2+DT_{56}^2+Dg\,T_{66} & KT_{27}T_{26}+D_1 T_{47}T_{56}+DT_{57}T_{56}+Dg\,T_{67}T_{66} & KT_{28}T_{26}+D_1 T_{48}T_{56}+DT_{58}T_{56}+Dg\,T_{68}T_{66} \\
 & Symm. & KT_{27}^2+DT_{47}^2+DT_{57}^2+Dg\,T_{67}^2+2D_1 T_{57}T_{47} & KT_{28}T_{27}+DT_{48}T_{47}+D_1 T_{58}T_{47}+D_1 T_{48}T_{57}+DT_{58}T_{57}+Dg\,T_{68}T_{67} \\
 & & & KT_{28}^2+DT_{48}^2+DT_{58}^2+Dg\,T_{68}^2+2D_1 T_{48}T_{58}
\end{bmatrix}
$$

A－11　$[B_f]$ の内容

$[B_f]=$

$$
\begin{bmatrix}
x_i^3 & x_i^2 & x_i & y_i^3 & y_i^2 & y_i & x_i^3 y_i & x_i^2 y_i & x_i y_i & x_i y_i^3 & x_i y_i^2 & 1 \\
0 & 0 & 0 & -3y_i^2 & -2y_i & -1 & -x_i^3 & -x_i^2 & -x_i & -3x_i y_i^2 & -2x_i y_i & 0 \\
3x_i^2 & 2x_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 3x_i^2 y_i & 2x_i y_i & y_i & y_i^3 & y_i^2 & 0 \\
x_j^3 & x_j^2 & x_j & y_j^3 & y_j^2 & y_j & x_j^3 y_j & x_j^2 y_j & x_j y_j & x_j y_j^3 & x_j y_j^2 & 1 \\
0 & 0 & 0 & -3y_j^2 & -2y_j & -1 & -x_j^3 & -x_j^2 & -x_j & -3x_j y_j^2 & -2x_j y_j & 0 \\
3x_j^2 & 2x_j & 1 & 0 & 0 & 0 & 3x_j^2 y_j & 2x_j y_j & y_j & y_j^3 & y_j^2 & 0 \\
x_k^3 & x_k^2 & x_k & y_k^3 & y_k^2 & y_k & x_k^3 y_k & x_k^2 y_k & x_k y_k & x_k y_k^3 & x_k y_k^2 & 1 \\
0 & 0 & 0 & -3y_k^2 & -2y_k & -1 & -x_k^3 & -x_k^2 & -x_k & -3x_k y_k^2 & -2x_k y_k & 0 \\
3x_k^2 & 2x_k & 1 & 0 & 0 & 0 & 3x_k^2 y_k & 2x_k y_k & y_k & y_k^3 & y_k^2 & 0 \\
x_\ell^3 & x_\ell^2 & x_\ell & y_\ell^3 & y_\ell^2 & y_\ell & x_\ell^3 y_\ell & x_\ell^2 y_\ell & x_\ell y_\ell & x_\ell y_\ell^3 & x_\ell y_\ell^2 & 1 \\
0 & 0 & 0 & -3y_\ell^2 & -2y_\ell & -1 & -x_\ell^3 & -x_\ell^2 & -x_\ell & -3x_\ell y_\ell^2 & -2x_\ell y_\ell & 0 \\
3x_\ell^2 & 2x_\ell & 1 & 0 & 0 & 0 & 3x_\ell^2 y_\ell & 2x_\ell y_\ell & y_\ell & y_\ell^3 & y_\ell^2 & 0
\end{bmatrix}
$$

ただし，x_i，y_i，x_j，y_j，x_k，y_k，x_ℓ，y_ℓ は，各々節点 i，j，k，ℓ の x，y 座標

A－12　〔S_f〕の内容

$$
[S_f]=\begin{bmatrix}
-6x & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6xy & -2y & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -6y & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6xy & -2x & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6x^3 & 4x & 2 & 6y^2 & 4y & 0
\end{bmatrix}
$$

A－13　〔C_{nx}〕〔C_{ny}〕〔C_{nxy}〕の内容

$$
[C_{nx}]=
$$

$$
\begin{bmatrix}
9x^4 & & & & & & & & & & & \\
6x^3 & 4x^2 & & & & & & & & & & \\
3x^2 & 2x & 1 & & & & & & & \mathit{Symm.} & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\
9x^4y & 6x^3y & 3x^2y & 0 & 0 & 0 & 9x^4y^2 & & & & & \\
6x^3y & 4x^2y & 2xy & 0 & 0 & 0 & 6x^3y^2 & 4x^2y^2 & & & & \\
3x^2y & 2xy & y & 0 & 0 & 0 & 3x^2y^2 & 2xy^2 & y^2 & & & \\
3x^2y^3 & 2xy^3 & y^3 & 0 & 0 & 0 & 3x^2y^4 & 2xy^4 & y^4 & y^6 & & \\
3x^2y^2 & 2xy^2 & y^2 & 0 & 0 & 0 & 3x^2y^3 & 2xy^3 & y^3 & y^5 & y^4 & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
$$

A－13　続き

〔C_{ny}〕

$$
=\begin{bmatrix}
0 & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & & & & & & \textit{Symm.} & & & \\
0 & 0 & 0 & 9y^4 & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 6y^3 & 4y^2 & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 3y^2 & 2y & 1 & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 3x^3y^2 & 2x^3y & x^3 & x^6 & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 3x^2y^2 & 2x^2y & x^2 & x^5 & x^4 & & & & \\
0 & 0 & 0 & 3xy^2 & 2xy & x & x^4 & x^3 & x^2 & & & \\
0 & 0 & 0 & 9xy^4 & 6xy^3 & 3xy^2 & 3x^4y^2 & 3x^3y^2 & 3x^2y^2 & 9x^2y^4 & & \\
0 & 0 & 0 & 6xy^3 & 4xy^2 & 2xy & 2x^4y^4 & 2x^3y & 2x^2y & 6x^2y^3 & 4x^2y^2 & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
$$

〔C_{nxy}〕

$$
=\begin{bmatrix}
0 & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & & & & & & & & & \\
9x^2y^2 & 6xy^2 & 3y^2 & 0 & & & & & \textit{Symm.} & & & \\
6x^2y & 4xy & 2y & 0 & 0 & & & & & & & \\
3x^2 & 2x & 1 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\
3x^5 & 2x^4 & x^3 & 9x^2y^3 & 6x^2y^2 & 3x^2y & 6x^5y & & & & & \\
3x^4 & 2x^3 & x^2 & 6xy^3 & 4xy^2 & 2xy & 5x^4y & 4x^3y & & & & \\
3x^3 & 2x^2 & x & 3y^3 & 2y^2 & y & 4x^3y & 3x^2y & 2xy & & & \\
9x^3y^2 & 6x^2y^2 & 3xy^2 & 3y^5 & 2y^4 & y^3 & 10x^3y^3 & 7x^2y^3 & 4xy^3 & 6xy^5 & & \\
6x^3y & 4x^2y & 2xy & 3y^4 & 2y^3 & y^2 & 7x^3y^2 & 5x^2y & 3xy^2 & 5xy^4 & 4xy^3 & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
$$

付　録　—　B

付録　B—1

$\{\delta_1\}=\{F\}\{\chi_1\}$　（式２－39）の詳細

今，$\{\delta_1\}$，$\{\chi_1\}$を，２－４－２のようにとる。有限帯板法では，三角級数の各項は独立であるから，三角級数の第m項に対する，基本構のたわみ性行列を〔F_m〕とすると，模擬的に，{変位$_m$}＝〔F_m〕{荷重$_m$}と書くことができる。{変位$_m$}，{荷重$_m$}は，それぞれ，変位，荷重の，三角級数に展開した場合の第m項の係数である。すると　不静定力$\{\chi_1\}=\{\{\chi_{11}\}^T\{\chi_{12}\}^T\cdots\cdots\{\chi_{1j}\}^T\cdots\cdots\}^T$ が作用した場合の$\{\delta_{1i}\}$は，

$$\{\delta_{1i}\}=\sum_m\{\delta_{1i\cdot m}\}\sin k_m\ell_{fi}$$
$$=\sum_m[F_m]\sin k_m\ell_{fi}\left[\{\chi_{11\cdot m}\}+\{\chi_{12\cdot m}\}+\cdots\cdots+\{\chi_{1j\cdot m}\}+\cdots\right]$$

——————（付Ｂ１－１）

である。$\{\delta_{1i\cdot m}\}$は，$\{\delta_{1i}\}$の，$\{\chi_{1j\cdot m}\}$は$\{\chi_{1j}\}$の，三角級数の第m項の係数である。また，第i番目の中間ダイヤフラム（または中間支点）は，$Y=\ell_{fi}$ なる位置にあるものとする。$\{\chi_{1j\cdot m}\}=\sin k_m\ell_{fi}\cdot\{\chi_{1\cdot j}\}$　であるから，式付Ｂ１－１は，

$$\{\delta_{1i}\}=\sum_m\cdot\sum_j[F_m]\sin k_m\ell_{fi}\cdot\sin k_m\ell_{fj}\cdot\{\chi_{1j}\}$$

——————（付Ｂ１－２）

となる。この式を，すべての中間ダイヤフラム（または中間支点）について書き下せば，結局，

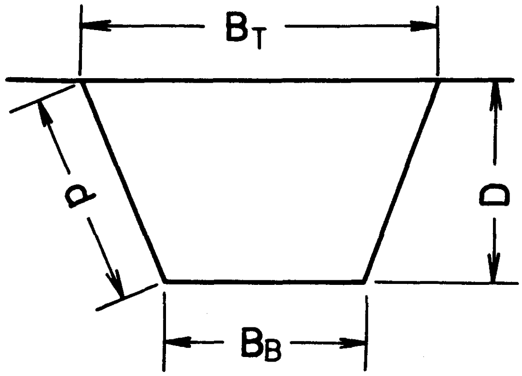
$$\{\delta_1\}=\begin{Bmatrix}\delta_{11}\\ \delta_{12}\\ \vdots\\ \delta_{1i}\\ \vdots\end{Bmatrix}=\sum_m\begin{bmatrix}F_m s\ell_1 s\ell_1 & F_m s\ell_1 s\ell_2 & \cdots\cdots F_m s\ell_1\, s\ell_j\cdots\cdots\\ F_m s\ell_2 s\ell_1 & F_m s\ell_2 s\ell_2 & \cdots\cdots F_m s\ell_2\, s\ell_j\cdots\cdots\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ F_m s\ell_i s\ell_1 & F_m s\ell_i s\ell_2 & \cdots\cdots F_m s\ell_i\, s\ell_j\cdots\cdots\\ \vdots & \vdots & \vdots\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\chi_{11}\\ \chi_{12}\\ \vdots\\ \chi_{1j}\end{Bmatrix}$$
$$=[F]\{\chi_1\}$$

——————（付Ｂ１－３）

を得る。ただし，$S\ell_i=\sin k_m\ell_{fi}$ である。

付録　B－2

ダイヤフラムの無次元剛度についての補足



図A—B 2—1
TYPICAL SECTION OF BOX GIRDERS

本論文で，中間ダイヤフラムの剛度を表すために用いた，ダイヤフラムの無次元剛度Sは，IDR[122]の 6.3.4 に規定されているものである。これは，文献16)，17) などに示されている，BEFアナロジーに基礎を置いたもので，ダイヤフラムの板厚やせん断弾性係数，ダイヤフラムの面積などのほか，箱桁の断面変形に対するラーメン剛性などを含んだものとなっている。Sを求める式は，文献20) で指摘されているように，かなり複雑である。Sは，次のように表される。

$$S = \frac{G \cdot t_D \cdot L_b^2 \cdot \delta_b^2 \cdot K}{2A_P \cdot L_D} \qquad \text{（付B 2－1）}$$

ここに，G，t_D，A_D は,各々，ダイヤフラムのせん断弾性係数，板厚，ダイヤフラムの面積であり，L_D はダイヤフラム間隔である。L_b は，箱桁断面の寸法を**図付B 2－1**のようにとったとき，

$$L_b = \sqrt{D^2 + \left(\frac{B_T + B_B}{2}\right)^2} \qquad \text{（付B 2－2）}$$

すなわち，断面の対角線長である。

δ_b は，ダイヤフラムの変形に関係した量であり，

$$\delta_b = \frac{D^2 \cdot \frac{2}{K}\left(1 + \frac{B_T}{B_B}\right)}{\sqrt{D^2 + \left(\frac{B_T + B_B}{2}\right)^2}} \qquad \text{（付B 2－3）}$$

である。

Kは，BEF（弾性床上のはり）理論における地盤係数に相当する量で，BEFアナロジーでは，桁の断面のラーメン剛性に関係したものである。Kは，

$$K=\frac{24\,(B_T+B_B)}{B_T\cdot B_B\left\{\frac{d}{D_{YC}}\left[\frac{2B_TB_B}{B_T+B_B}-V_D\,(2B_T+B_B)\right]+\frac{B_T^2}{D_{YT}}\left[\frac{B_B}{B_T+B_B}-V_D\right]\right\}}$$

（付B 2 − 4(a)）

であるが，IDRでは，この式をグラフ化して，

$$K=\frac{24\,D_{YT}\,R}{B_T^3}$$

（付B 2 − 4(b)）

のように簡単にしている。すなわち，この式中のRを，図から読み取るわけである。

式（付B 2 − 4(a)）中のV_Dは，

$$V_D=\frac{\frac{1}{D_{YC}}\left[\left(2B_T+B_B\right)B_T\cdot B_B\cdot d\right]+\frac{1}{D_{YT}}\left[B_B\cdot B_T^3\right]}{(B_T+B_B)\left\{\frac{B_T^3}{D_{YT}}+2d\left[\frac{B_T^2+B_TB_B+B_B^2}{D_{YC}}\right]+\frac{B_B^3}{D_{YB}}\right\}}$$

（付B 2 − 5）

であるが，IDRでは，これも図から求められるようになっている。

なお，D_{YC}，D_{YT}，D_{YB}は,各々,腹板，上フランジ，下フランジの，橋軸方向単位長さ当りの，横断面方向の曲げ剛度である。

付録　B − 3

*IDR*についての補足 [122), 126), 129), 130)]

英国の鋼箱桁橋の暫定設計基準（*IDR*）[122)] では，支点上ダイヤフラムにおける発生応力や強度の算定式が説明されている。本文6 − 4 − 1，6 − 4 − 6で示した*IDR*による応力や強度も，これに

よったものである。

IDRは，荷重係数設計法を全面的に取り入れ，限界状態を設計の基礎としているなどの特徴がある。この限界状態も，崩壊，供用，疲労の3つが考慮されているが，本論文では，これらのうち，崩壊限界状態についてのみ考察する。

IDRによる，ダイヤフラムパネル，および支承上耐荷補剛材における発生応力の算定式は，次のようである。

$$\sigma_1 = \frac{R_v \left(1 - \frac{Z}{D}\right)}{0.75\Sigma A_{sz} + (b_{eff} - \Sigma W_c)\, t_D} \qquad \text{(付B 3 − 1)}$$

$$\sigma_{1s} = \frac{R_v \left(1 - \frac{Z}{D}\right)}{Kb'_{eff} \cdot t_D + \Sigma A_{sz}} + \frac{R_\ell}{\Sigma A_{sz}} \qquad \text{(付B 3 − 2)}$$

ここに，σ_1，σ_{1s} は，高さDのダイヤフラムの下（支承）からZの断面における，ダイヤフラムおよび補剛材の鉛直方向応力であり，R_v は，荷重係数倍された支点反力，R_ℓ は，補剛材上端に作用する係数倍された荷重，A_{sz}は，補剛材の断面積，b_{eff}およびb'_{eff}は，支点反力を負担するダイヤフラムパネルの有効幅，W_Dは，注目する断面における，橋軸方向補剛材等によるダイヤフラムの切欠幅，t_Dは，ダイヤフラム板厚である。Kは，補剛材設計の際，ダイヤフラムが反力を負担するものとするとき0.65，そうでないとき0である。これらの式は，支点断面内で2支承の場合の式であるが，式付B 3 − 1では，1支承の場合，支承回りのトルクを考慮するようになっている。

これらの式からわかるように，IDRでは，ダイヤフラム，あるいは補剛材の応力は，基本的には三角形分布と仮定された支点反力を，考えている断面の有効な断面積で割った形をしている。

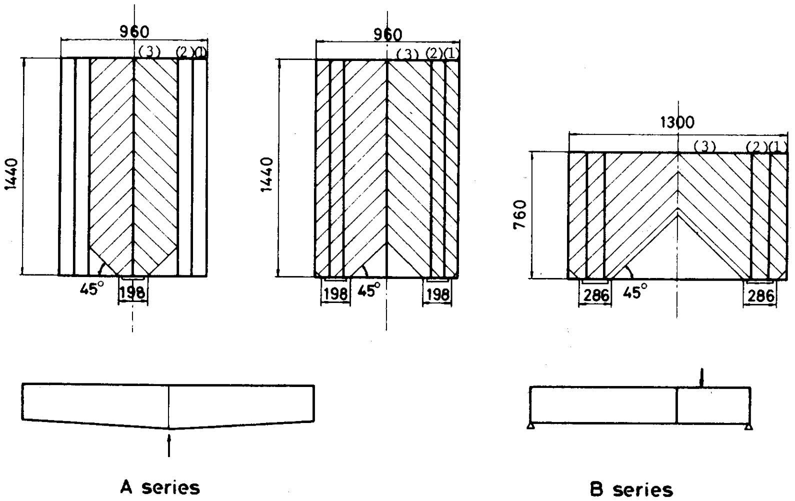
本論文で扱っているようなモデルの場合，IDRによると，ダイヤフラムパネルの有効幅は，**図付B 3 − 1**の斜線部のようになる。

示方書[123]や鋼道路橋設計便覧[124]では，式付B 3 − 1に相当する式では，補剛材の全断面を有効としているのに対し，IDRでは，式付B 3 − 1に示すように，補剛材は，ダイヤフラムパネルの応力算定の場合には，その断面の75%のみ有効としている。

一方，ダイヤフラムパネル，補剛材の応力照査は，次のように行われる。

a)　ダイヤフラムパネル

まず，式付B 3 − 1によって得られる鉛直応力σ_1のほか，IDR 11.2 に示された式によって，ダイヤフラムパネルの水平方向応力σ_2，せん断応力τを求める。σ_2は，ダイヤフラムの面内曲げから



図A−B３−１　EFFECTIVE WIDTH BY IDR

求まるようになっている。これらのσ_1，σ_2，τから，*IDR* 11. 3. 2に従い，有効応力σ_{n1}，σ_{n2}，τ_{eff}を求め，さらに，等価有効応力σ_eを，

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2 - \sigma_{n1}\sigma_{n2} + 3\tau_{eff}^2} \qquad \text{（付B３−３）}$$

なる式より求める。このσ_eと，パネルの座屈応力σ_{ecrit}，パネルの縦横比ϕ，降伏応力σ_y，および，σ_{n1}またはσ_{n2}から，*IDR* 11. 3. 2中の図を用いて，パネルの強度σ_{ult}が求まる。ダイヤフラムパネルの応力照査は，σ_{ult}と，発生応力σ_1，σ_2，τから求まる等価照査応力〔σ_e〕の大小を比較することにより行われる。

ｂ）　補剛材

補剛材の上側1/3，中央1/3，下側1/3に対して，それぞれ応力の特性値σ_{1schar}を求める。σ_{1schar}は，*IDR* 11. 4. 1に従い，補剛材の降伏応力σ_{ys}，または，ねじり座屈応力$\sigma_{\tau s}$，残留応力σ_{RS}のほか，*IDR*中の図から求まる付加応力σ_aより計算される。σ_{1schar}と式付B３−２で求めたσ_{1s}の大小を比較することにより，応力照査が行われる。

実際に上記a)，b)により応力照査をするためにダイヤフラムパネルの強度σ_{ult}，あるいは，補剛材の応力特性値σ_{1schar}を求めようとすると，その手順や計算式は，かなり複雑なものになる。

付録　B－4

BS 5400　Part 3について[138~141]

BS 5400は，英国の鋼，コンクリート，合成桁についての新しい設計・架設基準である。この基準は，10編より成っており，鋼橋の設計は，その第3編で説明されている。第3編は，現在，制定のための準備が行われており，その草案には，「これは草案であり，正式な基準として用いてはならない」旨の注意がつけられている。箱桁橋のダイヤフラムは，この草案の第5章（はり）の部分で触れられている。これらの規程案は，*IDR*の指針を含み，それをより単純化したものである。

この草案では，ダイヤフラムパネルの応力照査にあたっては，照査に用いるパネルの発生応力は，耐荷補剛材の応力とし，耐荷補剛材の有効断面以外では，原則として鉛直方向応力は無視してよいこと，ダイヤフラムの断面が長方形でその高さと板厚の比が一定値以下であるなど，いくつかの条件が満たされれば，座屈に対する照査は省略できること，などが述べられている。

耐荷補剛材の応力は，ダイヤフラムパネル下端から直線的に減少すると仮定された支点反力を，その有効断面で割ったものとして求められている。この有効断面とは，補剛材自身の断面に，若干のダイヤフラムパネルを加えたものとなっている。ダイヤフラムパネルの有効幅は　その板厚や隣接した補剛材との間隔などから決められている。*IDR*では，ダイヤフラムパネルの応力は，補剛材とは別に求めていたが，*BS* 5400では，この応力を，ダイヤフラムパネルと補剛材の両者に用いている。

また，*BS* 5400では，*IDR*では考慮されていないダイヤフラムの面外曲げについても考慮されている。

参　考　文　献

a）中間ダイヤフラム・箱桁の断面変形に関するもの

1）小松定夫：連続箱桁の shear lag について,土木学会論文集, 第58号, 昭和33年９月, pp. 11～26

2）小西一郎, 小松定夫：単純支持曲線桁橋の立体的解析, 土木学会論文集, 第90号, 昭和38年２月, pp. 11～26

3）小西一郎, 小松定夫：簿肉連続曲線桁の立体的解析, 土木学会論文集, 第91号, 昭和38年３月, pp. 13～23

4）小西一郎, 小松定夫：簿肉曲線桁の基礎理論, 土木学会論文集, 第87号, 昭和37年11月,pp. 35～46

5）小松定夫, 中井　博, 田井戸米好：ねじり定数比とねじり曲げ剛比から考察した曲線桁設計々算法への一提言, 土木学会論文報告集, No.224, 1974. 4

6）奥村敏恵, 坂井藤一：簿肉平坂より成る立体的構造物の静力学的解析に関する一方法とその応用, 土木学会論文報告集, No.176, 1970. 4, pp. 43～59

7）奥村敏恵, 坂井藤一：箱型ばりの断面変形と中間ダイアフラムの影響, 土木学会論文報告集, No.190, 1971. 6, pp. 23～36

8）奥村敏恵, 坂井藤一：リブ付台形桁の断面変形挙動とダイヤフラムの効果, 土木学会論文報告集 No.209, 1973. 1, pp. 1～14

9）坂井藤一, 長井正嗣：鋼箱げた橋におけるダイアフラム間隔の決定に関する一試案, 関西道路研究会々報, No.2, 1976. 11, pp. 37～42

10）坂井藤一, 中村秀治：簿肉曲線ばりの板殻構造としての一解析法, 土木学会論文報告集, No.235, 1975. 3, pp. 41～54

11）坂井藤一, 長井正嗣, 佐野信一郎：ブロック有限要素法による簿肉箱桁の立体解析, 土木学会論文報告集, No.255, 1976. 11, pp. 17～29

12）坂井藤一, 長井正嗣：ブロック有限要素法による簿肉曲線箱桁の立体解析, 土木学会論文報告集, No.295, 1980. 3, pp. 1～13

13）鳥居邦夫：箱桁ダイヤフラムの改良に関する一試案とそれに対する検討, 横河橋梁技報, 9, 1979. 11, pp. 24～35

14) Yajima, S.: Berechnungen und Modellversuche zum Hohlkastenträger unter Torsions-belastung mit Berücksichtigung verschiedener Querschotte und Querschottanordnungen, Stahlbau, 12, 1976, pp. 371 ~ 377

15) Hirashima, M., Yajima, S.: Beitrag zur Berechnungen von Quershotten in Hohlkastenträgen, Proc. JSCE, №264, 1977.8, pp. 113 ~ 123

16) Abdel-Samad, S. R.: Analysis of Multicell Box Girders with Diaphragms, Ph. D. Thesis, Univ. Illinois, 1967

17) Write, R.N., Abdel-Samad, S.R., and Robinson, A.: BEF Analogy for Analysis of Box Girders, Proc. ASCE, 94, ST 7, 1968, pp. 1719 ~ 1743

18) Abdel-Samad, S.R., Write, R.N., and Robinson, A.: Analysis of Box Girders with Diaphragms, Proc. ASCE, 94, ST10, 1968, pp. 2231 ~ 2256

19) 坂井藤一, 長井正嗣, 近藤膺舒, 石丸 勝：鋼箱桁橋の中間ダイアフラム設計法に関する一研究, 川崎重工技報, №65, 1977. 12, pp. 51~56

20) 坂井藤一, 長井正嗣：鋼箱桁橋中間ダイアフラム設計法に対する一試案, 土木学会論文報告集, №261, 1977. 5, pp. 21~34

21) 坂井藤一, 長井正嗣：曲線鋼箱桁橋の中間ダイヤフラム設計法に関する一提案, 土木学会論文報告集, №305, 1981. 1, pp. 11~22

22) Djubek, J., and Balaz, I: Box Shaped Girders, Int. Jour. Mech. Sci., 17, 1975, pp. 617 ~ 625

23) Champbell-Allen, D., and Wedgewood, R.J.L.: Need for Diaphragm in Concrete Box Girders, Proc. ASCE, 97, ST 3, 1971, pp. 825 ~ 842

24) Oleinik, J.C., and Heins, C.P.: Diaphragms for Curved Box Beam Bridges, Proc. ASCE, 101, ST10, 1975, pp. 2161 ~ 2178

25) 能町純雄：剛なダイアフラムで等区画に分けられる薄肉長方形箱桁の曲げ振りについて, 土木学会論文報告集, №146, 1967. 10, pp. 13 ~ 21

26) Richmond, R.: Twisting of Thin-Walled Box Girders, Proc. ICE, 33, 1966, pp. 659 ~ 675

27) Dalton, D.C. and Richmond, R.: Twisting of Thin-Walled Box Girders of Trapezoidal Cross-Section, Proc. ICE, 39, 1968, pp. 61 ~ 73

28) 中井 博, 事口寿男：伝達マトリックス法による曲げねじりを受ける薄肉曲線桁の解析と断面力, 変形量に関する研究, 土木学会論文報告集, №233, 1975. 1, pp. 55 ~ 70

29) 中井　博，村山泰男：ダイアフラムを有する曲線箱桁橋のずり応力の解析と設計への応用，土木学会論文報告集，No. 309，1981．5，pp. 25～39

30) Chapman, J.C., Dowling, P.J., Lim, P.T.K., and Billington, C.J.: The Structural Behaviour of Steel and Concrete Box Girder Bridges, Structural Engeneer, 49, 1971, pp. 111～120

31) Crisfield, M. A.: Finite Element Method for the Analysis of Multiceller Structures, Proc. ICE, 48, 1971, pp. 413～437

32) Sisodia, R. G., Gahli, A., and Cheung, Y.K.: Diaphragms in Single and Double-Cell Box Bridge with Varing Angle of Skew, Jour. ACI, 1972, pp. 415～419

33) Rabizadeh, R.O. and Shore, S.: Dynamic Analysis of Curved Box-Girder Bridges, Proc. ASCE, 101, ST 9, 1975, pp. 1899～1912

34) Lees, A.W., Thomas, D.L., and Wilson, R.R.: Analysis of Vibration of Box Beams, Jour. Sound Vib., 45, 1976, pp. 559～568

35) Cheung, Y.K.: Finite Strip Method Analysis of Elastic Slabs, ASCE, 94, EM6, 1968, pp. 1365～1378

36) Cheung, Y.K.: Folded Plate Structures by Finite Strip Method, Proc. ASCE, 95, ST12, 1969, pp. 2963～2979

37) Cheung, M.S., and Cheung Y.K.: Analysis of Curved Box Girder Bridges by Finite Strip Method, Publ. IABSE, 31-I, 1971, pp. 1～19

38) Cheung, Y.K.: Finite Strip Method in Structural Analysis, Pergamon Press, 1976

39) 中村秀治：断面変形を考慮した簿肉ばりの振動解析，土木学会論文報告集，No. 223，1974．3，pp. 11～22

40) Massonet, C.: Nagoya Lectures on Numerical Method for the Linear and Non-Linear Analysis of Beams, Plates and Shells, Dept. Civ. Eng., Nagoya Univ. 1974, pp. 30～31

41) 大塚久哲，吉村虎蔵，彦坂　熙，藤津卓司：有限帯板法による中間隔壁をもつ曲線箱桁橋の解析，九州大学工学集報，49－2，昭和51年3月，pp. 67～74

42) 大塚久哲，吉村虎蔵，彦坂　熙，平田勝啓：床版と桁の偏心結合を考慮した曲線桁橋の解析，土木学会論文報告集，No. 259，1977．3，pp. 11～23

43) 大塚久哲，吉村虎蔵，彦坂　熙：曲線箱桁における中間隔壁の補剛効果，橋梁と基礎，78－1，pp. 39～42, 78－2，pp. 40～43, 1978

44) Priestley, M.J.N. : Testing a Single Cell Box-Girder Model, Road Research Unit Bulletin, No.25, National Road Boad, New Zealand, 1974

b) 支点上ダイヤフラムに関するもの

45) Rocky, K.C., and El-Gaaly, M.A. : Stability of Load Bearing Trapezoidal Diaphragms, Publ. IABSE, 32-II, 1972, pp. 155 ~ 172

46) El-Gaaly, M.A. : Stability of Orthogonally Stiffened Load Bearing Trapezoidal Diaphragms, Publ. IABSE, 34-II, 1974, pp. 73~89

47) Dowling, P.J., Loe, J.A., and Dean, J.A. : The Behaviour up to Collapse of Load Bearing Diaphragms in Rectangular and Trapezoidal Stiffened Steel Box Girders, in[112], pp. 95~117

48) Dowling, P.J. : Strength of Steel Box Girders, Proc. ASCE, 101, ST 9, 1975, pp. 1929 ~ 1944

49) Puthli, R.S., and Crisfield, M.A. : Strength of Stiffened Box Girder Diaphragms, TRRL Supplementary Report 353, Structural Department, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 1977

50) Crisfield, M.A. : A Combined Rayleigh-Ritz / Finite Element Method for the Non-Linear Analysis of Stiffened Plate Structure, Computer and Structures, 8, 1978, pp. 678 ~ 689

51) Sawko, F. and Simonian, W.S. : Elastic and Buckling Analysis of Trapezoidal Support Diaphragms in steel Box Girders, Proc. ICE, II, 1978. 3, pp. 17~39

52) Simonian, W.S. : Investigation into Elastic and Buckling Behaviour of Trapezoidal Support Diaphragms in Steel Box Girder Bridges, Ph.D. Thesis, Univ. Liverpool, 1975

53) Herzog, M. : Die Traglast der Lagerquersheiben stählerner Kastenträger nach Versuchen, Bauingenieur, 52, 1977, pp. 263 ~ 265

54) Flint, A.R., and Wood, J.G.M. : Analysis for Box Girder Diaphragms simplified for the New Code, The Design of Steel Bridges Edited by K.C. Rocky and H.R. Evans, GRANADA, London, Toronto, Sydney New York, 1981

55) Proposed Design Specifications for Steel Box Girder Bridges, January 1980, Final Report, No. FHWA-TS-80-205, Repared for Federal Highway Administration Office of

Research and Developement, Washington D.C., 20590

c）板の耐荷力に関するもの

56）三上市蔵，堂垣正博，米沢　博：連続補剛板の非弾性圧縮座屈，土木学会論文報告集，No. 298，1980。6，pp. 17〜30

57）宇佐美勉：補剛材つき板の弾性ならびに非弾性圧縮座屈強度，土木学会論文報告集，No. 228，1974. 8，pp。13〜28

58）宇佐美勉，福本唀士：圧縮力と曲げモーメントを受ける補剛材つき板の座屈強度と設計，土木学会論文報告集，No. 247，1976. 3，pp. 35〜49

59）Massonnet, C.：Tokyo Seminar on Some European Contributions to the Design of Metal Structures, with Emphasis on Plasticity and Stability Ultimate Strength and Optimum Design of Steel Buildings, and Steel Plate and Box Girders, Dept. Civ. Eng., Nagoya Univ。, 1974

60）Massonnet, C., and Maquoi, R.：New Theory and Test on the Ultimate Strength of Stiffened Box Girders, in〔112〕, pp. 131 〜 143

61）Dorman, A.P., and Dwight, J.B.：Tests on Stiffened Compression Plates and Plate Panels, in〔112〕, pp. 63〜75

62）奥村敏恵，西野文雄，長谷川彰夫：箱型断面柱の局部座屈強度，土木学会論文報告集，No. 205，1972。9，pp。19〜30

63）長谷川彰夫，大田孝二，西野文雄：補剛された板要素の座屈強度に関する二，三の考察，土木学会論文報告集，No. 232，1974. 12, pp. 1 〜15

64）長谷川彰夫，長浜正孝，西野文雄：圧縮を受ける補剛された板の座屈強度，No. 236，1975. 4，pp. 1 〜14

65）小松定夫，北田俊行，宮崎清志：残留応力および初期たわみを有する圧縮板の弾塑性解析，土木学会論文報告集，No. 244，1975. 12, pp. 1 〜14

66）小松定夫，牛尾正之，北田俊行：補剛材を有する圧縮板の極限強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 255，1976. 11, pp. 47〜61

67）小松定夫，牛尾正之，北田俊行：補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 265，1977. 9，pp. 25〜35

68) 小松定夫，北田俊行：初期不整を有する圧縮板の極限強度特性に関する研究，土木学会論文報告集，No.270，1978．2，pp．1～14

69) 小松定夫，牛尾正之：圧縮補剛板の弾塑性座屈強度と合理的設計法について，土木学会論文報告集，No.278，1978。10，pp.39～52

70) 小松定夫，牛尾正之，北田俊行，奈良　敬：縦横に補剛された圧縮板の極限強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.288，1979。8，pp.13～28

71) 小松定夫，北田俊行：補剛された圧縮板の弾塑性有限変位挙動の一解析手法，土木学会論文報告集，No.296，1980。4，pp．1～12

72) 小松定夫，北田俊行：初期不整をもつ補剛された圧縮板の極限強度の実用計算法，土木学会論文報告集，No.302，1980．11，pp。1～13

d）ＦＥＭによる座屈解析（関係分）

73) Gallagher, R.H., Gellatly, R.A., Padlog, J., and Mallett, R.H.: A Discrete Element Procedure for Thin-Shell Instability Analysis, AIAA Jour., 5, 1967. 1, pp. 138 ~ 145

74) Vos, R.G., and Vann, W.P.: A Finite Element Tensor Approach to Plate Buckling and Postbuckling, IJNME, 5, 1973, pp. 351 ~ 365

75) Pica, A., and Wood, R.D.: Postbuckling Behaviour of Plates and Shells using a Mindlin Shallow Shell Formulation, Comp. Struc., 12, 1980, pp. 759 ~ 768

76) Pifko, A., and Isakson, G.: A Finite-Element Method for the Plastic Buckling Analysis of Plates, AIAA Jour., 7, 1969.10, pp. 1950 ~ 1957

77) Przemieniecki, J.S.: Discrete-Element Method for Stability Analysis of Complex Structures, Jour. Royal Aero. Soc., 72, 1968.12, pp. 1077 ~ 1086

e）プレートガーダーの耐荷力

78) Khan, Md. Z., and Jhons, K. C.: Buckling of Web Plates under Combined Loadings, ASCE, 101, ST 10, 1975, pp. 2079 2092

79) Lee, H. P., and Harris, P. J.: Post-Buckling Strength of Thin-Walled Members, Comp. Struc., 10, 1979, pp. 689 ~ 702

80) 新延泰生：プレートガーダー腹板のせん断座屈後の強度に関する一考察，土木学会論文報告集，No.303， 1980．11，pp. 15〜30

81) 三上市蔵：圧縮補剛フランジの設計法についての概説，土木学会論文報告集，No.297， 1980.5，pp. 123〜126

82) 前川幸次，吉田博：伝達マトリックス法による曲線I形ばりの耐荷力解析，土木学会論文報告集 No.312， 1981.8， pp. 27〜37

83) 長谷川彰夫，西野文雄，奥村敏恵：水平補剛材を有するプレート・ガーダーの曲げ耐荷力実験，土木学会論文報告集，No.234， 1975.2，pp. 33〜44

84) 長谷川彰夫，西野文雄，奥村敏恵 ： 水平補剛材を有するプレート・ガーダーのせん断耐荷力，土木学会論文報告集，No.235， 1975.3， pp. 13〜28

85) 長谷川彰夫，和田耕造，西野文雄：プレート・ガーダーの曲げ耐荷力に関する新しい理論，土木学会論文報告集，No.300， 1980.8， pp. 33〜42

86) 長谷川彰夫，和田耕造，西野文雄：ウェブの剛性に注目したプレートガーダーの曲げ耐荷力実験，土木学会論文報告集，No.305， 1981.1，pp. 1〜9

87) 長谷川彰夫，堀口隆良，西野文雄：プレートガーダーの耐荷力に関する一考察，橋梁と基礎，11， 1977.4， pp. 25〜32， 1977.5，pp. 8〜12

88) 長谷川彰夫，西野文雄：プレートガーダーの荷重係数設計に関する一試案，橋梁と基礎，13， 1979.8，pp. 7〜12

89) 西野文雄，長谷川彰夫：プレートガーダー，道路橋示方書II鋼橋編改訂の運用と背景，橋梁と基礎，15， 1981.6，pp. 8〜13

90) Basler, K., and Thürlimann, B.: Strength of plate Girders in Bending, ASCE, 87, ST6, 1961, pp. 153〜181

91) Basler, K.: Strength of Plate Girders in Shears, ASCE, 87, ST7, 1961, pp. 151〜180

92) Basler, K.:Sterngth of plate Girders in Combined Bending and Shear, ASCE, 87, ST7, 1961

93) Fukumoto, Y., and Galambos, T.V.:Inelastic Latelal-Torsional Buckling of Beam-Columns, ASCE, 92, ST2, 1966, pp. 41〜61

94) Cooper, P.B.: Strength of Longitudinally Stiffened Plate Girders, ASCE, 93, ST2, 1967, pp. 419〜451

95) Fujii, T.,Fukumoto,Y., Nishino,F., and Okumura,T.:Pesearch Works on Ultimate Strength of Plate Girders and Japanese Provisions on Plate Girder Design, IABSE Colloq. on Design of Plate Girders for Ultimate Strength, London, 1971

96) 福本唀士，伊藤義則：フランジの局部座屈強度とフランジ幅厚比制限，土木学会論文報告集，No. 160，昭和43年12月，pp. 27〜38

97) 福本唀士，藤原　稔，渡辺信夫：溶接Ｉ形部材の横倒れ座屈に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 189，1971．5，pp. 39〜51

98) 福本唀士，久保全弘：横構・対傾構をもつ桁の横倒れ座屈強度，土木学会論文報告集，No. 196，1971．12，pp. 19〜28

99) 塩見弘幸、福本唀士：鋼構造部材の耐荷力の一算定法，土木学会論文報告集，No. 309，1981．5，pp. 155〜158

100) 福本唀士，伊藤義人：鋼構造部材の耐荷力評価システムのための数値データバンクの作成と利用，土木学会論文報告集，No. 312，1981．8，pp. 59〜72

101) Owen, R., and Rocky, K.C.:Ultimate Load Behaviour of Longitudinally Reinforced Webplates Subjected to Pure Bending, Publ. IABSE, 30−I, 1970

102) Rocky, K.C. and Skaloud, M.:The Ultimate Load Behaviour of Plate Girders Loaded in Shear, Struc. Eng., 50, 1972．1，pp. 29〜48

103) Herzog, M. A. M.: Ultimate Static Strength of Plate Girders from Test, ASCE, 100, ST5, 1974, pp. 849〜864

104) Komatsu S.:Ultimate Strength of Stiffened Plate Girders Subjected to Shear, IABSE, Colloq. Design of Plate Girders for Ultimate Strength, London, 1971

f）箱桁の耐荷力（bとの重複分を除く）

105) Dowling, P.J., Chatterjee, S., Frieze, P.A., and Moolani, F.M.:Experimental and Predicted Collapse Behaviour of Rectangular Steel Box Girders, in〔112〕, pp. 77〜94

106) Rocky, K. C., Evans, H.R., and Porter, D.M.:Ultimate Load Capacity of Stiffened Webs Subjected to Shear and Bending, in〔112〕, pp. 45〜61

107) Dibly, J.E., and Manoharan, A.:Experimental Behaviour of a Two−Span Continuous Box Girder, in〔112〕, pp. 119〜130

108）三上市蔵，堂垣正博，宮花邦広，米沢　博：曲げを受ける鋼箱桁の非弾性連成座屈，土木学会論文報告集，No. 301, 1980. 9, pp. 23〜36
109）三上市蔵，堂垣正博　武田八郎：鋼箱桁の終局強度の近似算定法，土木学会論文報告集，No. 298，1980．6，pp. 147 〜 150
110）Walchuk, R.:Proposed Specifications for Steel Box Girder Bridges, ASCE, 106, ST 12, 1980 pp. 2463 〜 2474
111）日本鋼構造協会関西地区連絡会：鋼橋部材の形状初期不整と耐荷力の統計学的研究，JSSC, 16, No. 170，1980．4，pp. 10〜43
112）" Steel Box Girder Bridges", Proc. Int. Conf. organized by ICE in London, 13〜14 Feb., 1973

g）支点反力分配に関するもの

113）宮脇秀年，森　茂美，：二径間連続曲線桁の支点反力特性についての一考察，橋梁，1979．4，pp. 46〜51

h）フランジ有効幅（主要なもの，a との重複分を除く）

114）中井　博，村山泰男：片持ばりのNegative Shear Lag の解析とその応用，土木学会論文報告集，No. 256，1976．12，pp. 21〜33
115）中井　博，事口寿男：伝達マトリックス法による鋼床版連続桁橋の有効幅の解析，土木学会論文報告，No. 251，1976．7，pp. 29〜44
116）三上市蔵：〔115〕への討議，土木学会論文報告集，No. 264，1977．8，pp. 125 〜 126
117）小松定夫，北田俊行：斜張橋のシアラグ解析とその設計計算への適用に関する研究，土木学会論文報告集，No. 254，1976．10，pp. 13〜26
118）Evans, H.R., and Taherian, A.R.:The Prediction of the Shear Lag Effect in Box Girders, Proc. ICE, Part 2, 63, 1977, pp. 69〜92
119）Malcolm, D.J., and Redwood, R.G.:Shear Lag in Stiffened Box Girders, ASCE, 96, ST 7, 1970, pp. 1403 〜 1419
120）Moffatt, K.R., and Dowling, P.J.:Shear Lag in Steel Box Girder Bridges, Struc.Eng., 53, 1975．10, pp. 439 〜 448

121）Brown, C.W. et al.:Discussion on 〔120〕, Struc. Eng., 54, 1976. 8, pp. 285～298

i）その他一般的なもの

122）The Committee into the Basis of Design and Method of Erection of Steel Box Girder Bridges:Interim Design and Workmanship Rules, Her Majesty Stationaly O－ffice, London, 1973

123）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，丸善，昭和55年2月

124）日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，丸善，昭和54年2月

125）Vlasov, V.Z.（奥村敏恵ほか訳） 薄肉弾性ばりの理論，技報堂，1967

126）小松定夫他：箱げた橋、鋼橋，設計編2章けた橋（小西一郎編），丸善，1975

127）小松定夫，福本唀士：座屈理論，鋼橋，基礎編（小西一郎編），丸善，1977

128）Gallagher, R.H.，川井忠彦訳：有限要素法の基礎，丸善，1976

129）関西道路研究会道路橋調査委員会耐荷力小委員会：鋼箱桁橋の設計に関する調査研究，橋梁，1978.3より連載

130）建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室：鋼製箱げた橋の設計および架設についての調査報告書（Report of the Merrison Committee）第Ⅰ，Ⅱ編翻訳，土木研究所資料第1226号，昭和52年3月

131）海上大型橋りょう鋼構造調査委員会：長大箱げた橋の実績調査と文献調査，建設コンサルタンツ協会近畿支部，昭和54年7月

j）著者に関するもの

132）斉藤正之，清水　茂，吉田俊弥：単純曲線箱桁のフランジ有効幅の簡易計算式，土木学会第35回年次学術講演会概要集，Ⅰ－63，昭和54年9月

133）吉田俊弥，清水　茂：ダイヤフラムの面内変形を考慮した箱型断面桁の解析，土木学会中部支部研究発表会概要集，Ⅰ－7，昭和51年1月

134）吉田俊弥，梶田建夫，清水　茂：ダイヤフラムを有する箱桁の挙動について，土木学会中部支部研究発表会概要集，Ⅰ－6，昭和52年1月

135）清水　茂，梶田建夫，成岡昌夫：連続箱桁における中間支承部の応力状態について，土木学会論

文報告集, No.276, 1978. pp。13〜23

136) 福本唀士, 清水　茂, 古田秀博：鋼箱桁支点上ダイヤフラムの強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.318, 1982. 2, 掲載予定

137) 福本唀士, 清水　茂, 古田秀博：鋼箱桁の中間支承部の応力状態, 土木学会第33回年次学術講演会概要集, I—64, 昭和53年9月

k) BS 5400関係（aとの重複分を除く）

138) 西村　昭, 加藤　寛, 中村浩志, 総田完治：英国における新しい橋梁共通規準BS 5400 について, 橋梁と基礎, 13, 1979. 7, pp. 21〜29

139) 前田幸雄：イギリスの新しい橋梁規準BS 5400 の紹介, 橋梁と基礎, 15, 1981. 2, pp. 20〜25

140) Nethercot, D. A., 金井道夫訳：英国の新しい鋼橋設計示方書BS 5400—Part 3について, 橋梁と基礎, 15, 1981。10, pp. 20〜26

141) British Standard Institution：Draft for Public Comment of "BS 5400：Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 3：Code of Practice for Design of Steel Bridges", London, 1979

l) その他（本文中で直接引用はしていないが, 研究を行ううえで参考にしたもの, 本研究に関係のある内容のもの）

142) 近藤膺舒, 坂井藤一, 田部井誠：開口部を有する鋼箱げた橋中間ダイアフラムの剛度補正係数, 土木技術, 36, 1981. 3, pp. 101 〜 104

143) 山村信道, 成岡昌夫：フランジ有効幅の最近の研究の展望, 橋梁と基礎, 7, 1973. 5, pp. 5〜11

144) 栗本公夫, 梶田建夫, 成岡昌夫,：箱桁構造解析における Finite Element Method と Finite Strip Method について, 土木学会中部支部研究発表会概要集, 昭和48年2月, I—6

145) 吉田俊弥, 和田三夫：連続曲線箱桁の解析および実験, 土木学会中部支部研究発表会概要集, 昭和48年2月, I—18

146) 酒造敏廣, 中井　博：曲線箱桁橋のダイヤフラム設計法に関する研究, 土木学会第33回年次学術講演会概要集, 昭和53年9月, I—65

147) Sargious, M. A., Dilgar, W. H., and Hawk, H.：Box Girder Bridge Diaphragms with Openings, ASCE, 105, ST 1, 1979, pp. 53〜65

148) 土木学会鋼構造委員会架設小委員会：鋼構造架設の現況とその問題点, 土木学会誌, No.59,

1974. 6, pp. 53～62
149) 福本唀士，倉西　茂，西野文雄：鋼構造の極限強度の評価と設計への指針，土木学会誌，No.62，1977. 12, pp. 41～46
150) “鋼箱げた橋の設計基礎と架設方法に関する調査中間報告書”（成岡昌夫他訳），道路，1972. 8，pp. 88～95
151) “鋼箱ゲタ橋の設計と架設の調査委員会の調査中間報告書付録A”(成岡昌夫他訳),橋梁と基礎, 7，1973. 7～8，1974. 5
152) 成岡昌夫，伊藤鉱一：Merrison 委員会中間報告書発表以後のイギリスの新聞記事より，橋梁と基礎，6，1972. 9，pp. 27～31
153) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会・座屈分科会：補剛材つき圧縮板の設計要領（案），昭和48年度本州四国連絡橋公団委託本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書別冊1，昭和49年3月
154) 島田静雄：土木応用数学，共立出版，昭和42年
155) 島田静雄：橋りょうの進歩と破壊の歴史，土木工学と安全，土木施工，16，1975. 7，1975. 8
156) “橋梁の設計と施工”，これからの道路第3編，関西道路研究会創立30周年記念誌，昭和54年11月
157) 小松定夫：応用マトリックス代数，土木技術者のための新数学講座，土木学会誌，55，1970. 6，pp. 71～78，1970. 7，pp. 74～78
158) Zienkiewicz, O.C., 吉識雅夫，山田嘉昭監訳：基礎工学におけるマトリックス有限要素法，培風館，1975
159) Zienkiewicz, O.C., and Cheung, Y.K., 吉識雅夫監訳：マトリックス有限要素法，培風館，1970
160) 戸川隼人：微分方程式の数値計算，オーム社，1973
161) 成岡昌夫，丹羽義次，山田善一，白石成人：構造力学Ⅲ板の力学，丸善，1970
162) 成岡昌夫：構造力学要論，丸善，1974
163) 川本眺万：応用弾性学，共立出版，1968
164) 三本木茂夫，吉村信敏：有限要素法による構造解析プログラム，コンピュータによる構造工学講座Ⅰ－1－B，培風館
165) 信原泰夫，桜井達美，吉村信敏：有限要素法のプログラム・デザイン，コンピュータによる構造工学講座Ⅱ－2－B，培風館，1972
166) 川井忠彦：座屈問題解析，コンピュータによる構造工学講座Ⅱ－6－B，培風館，1974

167）吉田俊弥，三井康司，清水　茂：切欠を有する鋼板の塑性領域の拡がりについて，第2回光弾シンポジューム論文集，1974．12, pp. 79～84

鋼箱桁支点上ダイヤフラムの
挙動に関する基礎的研究

発行日　　1981年12月
発行者　清 水　　茂
印刷所　　コロニー印刷