

報告番号 ^{*} 第 2939 号

主論文の要旨

題名 鋼薄肉 I 形桁の横ねじれ耐荷力に
関する研究

氏名 前川幸次

主論文の要旨

報告番号	※ 第 乙	号	氏名	前川幸次
------	----------	---	----	------

鋼薄肉 I 形断面部材は製作加工が容易であることから、曲げ部材として広く利用されており、断面の強軸まわり（面内）の曲げに対して十分に抵抗するように荷重面内の曲げ剛性が大きく設計されている。このような部材は横方向変位およびねじれに対して適当な支持がされていないと、面内強度を十分に発揮することなく、横ねじれ座屈現象によって耐力を失う。すなわち、桁に強軸まわりの曲げを生じさせている荷重がある値に近づくと、荷重面内の曲げ剛性には余裕があるにもかかわらず、それまで僅かであった荷重面外の変形が急激に増大し、桁は不安定な状態となりこれ以上の荷重に抵抗できなくなる。面内強度を有効に利用するためには、桁の横ねじれ安定性について把握しておくことが重要である。

一般にこれまで、横ねじれ安定性は横ねじれ座屈強度（ここでは、真直ぐな桁の固有値問題として求まる分岐座屈を意味する）を用いて評価されてきた。ところが、実際の桁は残留応力などの材料的初期不整のみならず初期たわみ、荷重偏心などの幾何学的初期不整を持っている。そのような桁の横ねじれ安定性は横ねじれ耐荷力（ここでは、初期たわみを考慮した有限変位解析あるいは実験における最高荷重を意味する）により評価することが桁の強度を明確にするうえで妥当である。

本論文では鋼薄肉 I 形断面桁の横ねじれ安定問題について、解析理論の展開、数値解析による考察、実験による現象の把握、および設計のための横ねじれ基準強度式の提案を行う。各章の内容は次の

主論文の要旨

報告番号	※第 2 号	氏名	前川 幸次
------	--------	----	-------

ようである。

第1章には横ねじれ座屈に関する既往の研究を概説するとともに、本論文の内容と構成について述べる。

第2章は、曲線ばりの解析理論の展開と曲線桁の横ねじれ耐荷力の検討を行っている。本論文では横ねじれ座屈現象を横ねじれ耐荷力（荷重-変形曲線の最高荷重）として評価するために、初期横変形を考慮した非弾性有限変位解析を行う。そこで、初期横変形を曲線ばりの円弧で表し、支配方程式を導く方法を二通り示す。一つは変位の微小増分を考慮したつり合い条件式から導く方法であり、線形化有限変位理論と呼ばれている。また、数値計算法として、伝達マトリックス法を用いる。もう一方は、有限変形のひずみ・変位関係式と増分形で表された仮想仕事の原理を用いて導く方法であり、数値計算法としては剛性法を用いる。二つの解析手法はこの分野の先達が行った方法を参考にしたものであり、非弾性への拡張の手法と任意断面への拡張を示すことに力点が置かれている。なお、非弾性の影響は接線係数理論に基づいて、剛性の低下として評価する。二つの解析法に基づいた解析プログラムの妥当性は実験結果ならびに両者の解析結果の比較により確認される。

第3章では初期横たわみ、荷重偏心および残留応力などの初期不整を持つ圧延I形ばりの横ねじれ耐荷力を伝達マトリックス法による数値解析から求め、修正細長比 $\bar{\lambda} = \sqrt{M_P/M_E}$ および低減係数 $\delta_r = M_U/M_P$ を用いた座標上で検討する。得られた結果は次のようであ

主論文の要旨

報告番号

※ 第
2

号 氏名

前川幸次

る。

- 1) 幾何学的な初期不整を初期横たわみ，荷重偏心あるいはそれらの合成されたもので表した場合，荷重の偏心量が同じであれば，横ねじれ耐荷力の差はほとんどない。
- 2) 横ねじれ耐荷力に対する残留応力の影響は，固有値解析から得られる横ねじれ座屈強度に対する影響に比べれば小さい。
- 3) 初期横たわみの影響は修正細長比 $\bar{\lambda}$ が 1.1 付近で最も大きい（横ねじれ耐荷力と横ねじれ座屈強度の差が大きくなる）。
- 4) $\bar{\lambda}-\delta_r$ 座標上では，特に広幅フランジでない限り，はりの断面寸法の違いによる横ねじれ耐荷力曲線の差はあまりない。
- 5) パラメータ $\bar{\lambda}-\delta_r$ を用いれば，断面寸法，荷重状態（荷重の種類，載荷高）および境界条件にかかわらず，はりの弾性横ねじれ座屈強度は 1 本の弾性座屈曲線で表されるが，荷重状態あるいは境界条件によって異なる非弾性域での降伏領域の広がり差の影響は考慮できない。したがって，ECCS の提案曲線のように，すべてのはりの横ねじれ耐荷力曲線を 1 本の曲線で表すことには無理がある。
- 6) 横ねじれ耐荷力に対する種々の初期不整の影響，横ねじれ耐荷力と横ねじれ座屈強度の関係および不安定に至るプロセスは部材における降伏領域の広がりから明確に説明できる。

第 4 章は，横ねじれ座屈強度に及ぼす非弾性域でのモーメント勾配の影響を，溶接 I 形桁（プレートガーダ）の曲げ試験により調べたものである。桁は，実橋の約 1/3 スケール（I-520×110×4.5×8 mm

主論文の要旨

報告番号	※第 乙	号	氏名	前川幸次
------	---------	---	----	------

)のプレートガーダで、実橋に準じた方法で製作された。曲げ試験は、片曲げ、および一様曲げの二通りのモーメント勾配を考え、それぞれ支点と載荷点の横変形を拘束した、スパン中央1点載荷桁4体、および対称2点載荷桁4体によって実施されている。まず、プレートガーダの初期たわみおよび座屈変形性状について計測結果を検討し、次に、これまでに提案されている横ねじれ基準強度式と実験により得られた耐荷力の比較が行われる。また、本実験および圧延ばりに対する実験データのシミュレーションを、第2章に示した剛性法を用いて行っている。最後に、2点載荷桁の数値解析結果から得られる水平変形および断面回転角モードの変曲点間距離を用いた非弾性域における有効座屈長係数による実験値の評価について検討されている。得られた結果は次のようである。

- 1) 支点および載荷点に用いた横変位拘束治具は簡単でしかも十分な精度を有する。
- 2) 桁の崩壊形式はすべて横ねじれ座屈（圧縮フランジの水平座屈）が主であったが、崩壊における応力レベルが高くなる桁の圧縮フランジ、あるいは圧縮フランジの水平座屈による曲率中心側のフランジにおいてはねじれ変形が確認できた。しかし、このようなねじれ変形が発生した後も耐力を保つことがわかった。
- 3) 腹板の荷重による面外たわみは初期たわみの形状に影響される。
- 4) 桁の横ねじれ耐荷力に対する中間垂直補剛材の剛度、間隔の効果について明らかにすることはできなかった。

主論文の要旨

報告番号	※ 第 乙	号	氏名	前川幸次
------	----------	---	----	------

5) はり理論に基づく非弾性有限変位解析により得られた横ねじれ耐荷力は実験値と極めてよく一致し，フランジおよび腹板の幅厚比が小さいプレートガーダーでは局部座屈および断面変形が横ねじれ耐荷力におよぼす影響は小さく，このような解析法によりこの種のプレートガーダーの横ねじれ耐荷力を推定できる．

6) 弾性横ねじれ座屈強度を用いた無次元化座標上($\bar{\lambda}-\delta_r$)での耐荷力曲線は非弾性域でモーメント勾配によって明確な差を生じている．したがって，基準強度曲線をモーメント勾配別に **multiple curves** で表わすことが合理的である．

7) 2点載荷桁のように中間拘束された桁の実験値を両端にモーメント荷重が作用する桁の横ねじれ耐荷力として評価するために，有効座屈長係数を利用することができる．その場合，弾性拘束効果のみならず非弾性域での降伏に伴う拘束効果（有効座屈長係数）の変化を考慮する必要がある．

第5章は，まず，両端で横方向変形とねじりに対しても単純支持された圧延I形断面はりおよび溶接I形断面桁について行った横ねじれ耐荷力解析結果をもとに，非弾性域におけるモーメント勾配の影響を取り入れた横ねじれ基準強度式の提案を行っている．初期不整（初期たわみ，残留応力）の大きさを強度式のパラメータに取り入れることは困難であるので，次のような考えに基づいて行った横ねじれ耐荷力解析結果から強度式を近似する．

1) 基準強度式は下限値を与えるように，製作許容値であるところ

主論文の要旨

報告番号	※甲第 Z	号	氏名	前川幸次
------	----------	---	----	------

の $L/1000$ を初期たわみとして採用する。

2) 残留応力の違いによる横ねじれ耐荷力の差を明確にするために、圧延タイプと溶接タイプ（ガス切断）に分けて、基準強度式を提案する。そこで詳細な残留応力の実測データを利用することのできた圧延ばりおよび溶接桁についてそれぞれ一断面を用いて数値解析を行う。また、鋼種はSS41クラスを対象とした。

3) モーメント勾配のある桁の横ねじれ基準強度は、無次元座標 $\bar{\lambda}_0 = \sqrt{M_P/M_{ocr}} - \delta_r = M_U/M_P$ を用い、モーメント修正係数を一様曲げの場合の基準強度式に加算する方式で提案する。

次に、中間に横方向拘束材をもち、横変形に対して連続な桁の横ねじれ耐荷力を求めるために、提案した基準強度式と拘束柱の有効座屈長のノモグラフを用いる近似計算手法を提案する。有効座屈長係数の算定において、部材の降伏による critical segment と隣接 segment の剛比の変化を考慮するために、基準強度と弾性横ねじれ座屈強度の比を用いる。近似計算手法は有限変位解析により求めた解析値に対して数%の精度で、しかも安全側に評価できる。

以上のように、設計において最も一般的な荷重状態に対する基準強度式を提案し、また、先達によって提案された隣接 segment の拘束効果を考慮する手法を耐荷力レベルへ拡張する。

第6章は結語であり、各章の結果をもとに本論文の総括を行う。