

# 腐食鋼板の圧縮強度の簡易評価法 に関する検討

杉浦邦征<sup>1</sup>・田村功<sup>2</sup>・渡邊英一<sup>3</sup>・伊藤義人<sup>4</sup>・藤井堅<sup>5</sup>・野上邦栄<sup>6</sup>・永田和寿<sup>7</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都大学大学院助教授 工学研究科都市環境工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)  
E-mail:sugiura@csd.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北本線長町駅付近高架化長町北工区/鹿島・仙建共同企業体(〒982-0003仙台市太白区郡山1-1-1)

<sup>3</sup>フェロー会員 京都大学名誉教授 (財)大阪地域計画研究所理事長(〒561-0834豊中市庄内栄町2-21-1)

<sup>4</sup>フェロー会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603名古屋市千種区不老町)

<sup>5</sup>正会員 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻(〒739-8527広島県東広島市鏡山1-4-1)

<sup>6</sup>正会員 首都大学東京助教授 都市環境学部都市環境学科(〒192-0397八王子市南大沢1-1)

<sup>7</sup>正会員 名古屋工業大学大学院助教授 工学研究科社会工学専攻(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

正弦波で単純モデル化した仮想的腐食形状および実腐食形状を有する周辺単純支持の鋼板に対する数値シミュレーションにより、様々な腐食形状が残存圧縮性能に与える影響について検討した。その結果、腐食鋼板の圧縮強度は断面積の減少により著しく低下すること、応力伝達軸方向のみならずその直交方向の板厚分布も耐荷力に大きく影響することが明らかとなった。数値シミュレーション結果に基づき、応力伝達軸方向、およびその直交方向の板厚分布を考慮して、任意の腐食性状を有する鋼板の実用的な圧縮強度推定法を提案した。一方、腐食に伴う減厚による板厚中心の偏心の影響について検討を行ったが、今回用いた板厚分布においては最大で10%程度の耐荷力変動であり、種々の耐荷力評価式による推定値のばらつきの範囲であり、大きく影響しないことがわかった。

*Key Words* :corroded steel plate, compression, residual strength, effective plate thickness

## 1. はじめに

現在、高度経済成長期に建設された多くの構造物が老朽化し、様々な損傷事例が報告されるにつれ、構造物の維持管理が極めて重要な課題として認識されるようになった。特に、鋼構造に関しては、供用期間における劣化要因の一つに腐食が挙げられ、例えば、名取らは、鋼道路橋を対象として、腐食損傷事例を紹介するとともに点検に際しての留意事項や重要点検部位などを取りまとめている<sup>1)</sup>。このような腐食鋼構造物に関する既往の研究成果としては、腐食形態の解析ならびに腐食形態のモデル化<sup>2)~4)</sup>、腐食鋼板の有効板厚評価や腐食鋼部材の耐荷力評価<sup>5)~13)</sup>、腐食を考慮した構造変化にも対応できる構造解析手法の開発<sup>14)~16)</sup>などが挙げられる。

このように最近多くの研究が進められているにもかかわらず、実務においては、腐食損傷の評価の多くが技術者の主観に依存することが多く、明確な力学的な根拠に裏付けられた判断がなされることは非常に稀と言われている。その要因としては、腐食を生じさせる環境が多様

であること、現地での腐食形状のデータ採取が困難であること、腐食によって生じる鋼板表面の凹凸が力学的挙動に与える影響に関して統一的な見解が提示されていないことなどが挙げられる。したがって、既存の研究成果に加え、系統立てた多方面からの取り組みが必要である。

例えば、著者らは、沿岸環境における鋼構造物の耐久性評価を目的として、約19年間厳しい海洋環境において曝露された鋼管から切り出した試験体に対してレーザー変位計を用いて表面形状ならびに板厚の計測を行い、実環境における鋼部材の腐食形状を把握するためのデータを収集した。この計測結果によると、腐食損傷は飛沫帯でもっとも激しく、続いて干満帯、海中部の順であり、部位により腐食形状は大きく異なり、それぞれの部位において適切な防食法を採用する必要性を示した。また、計測結果を反映させた腐食鋼管モデルを作成し、数値シミュレーションにより腐食鋼部材の圧縮性能評価を行い、腐食鋼部材の評価には平均板厚を標準偏差で補正することが有効であることを示してきた<sup>12)</sup>。

一方で、以上のような過去の多くの検討は、撤去され

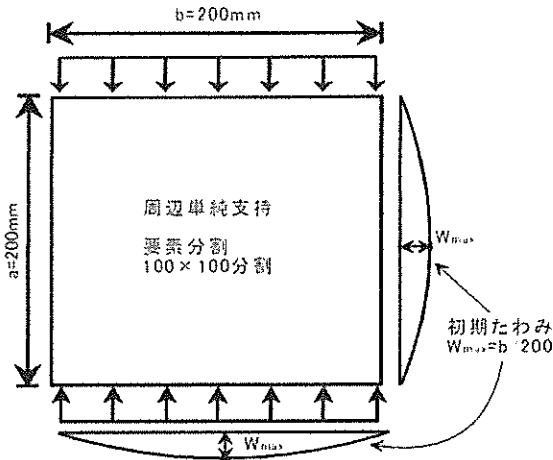


図-1 解析モデルの概要

た腐食構造物に対して（もしくは、促進腐食試験により模擬試験体を作成）、設備の整った実験室内で形状計測、板厚計測を行い、続いて性能評価を行ってきた。しかし、腐食鋼構造物の補修・補強、もしくは撤去・再構築を検討する上で、実環境におかれた腐食鋼構造物の残存耐力力・変形能などの力学性状を評価する必要があり、その腐食形状をどの程度正確に現場計測し、限られた計測結果に基づき如何に構造モデルを構築するかについて検討した研究事例はない。既存の港湾鋼構造物の防食・補修マニュアルによれば、10cm×10cmパッチ内において5点の板厚計測により平均板厚を決定するといったガイドラインが存在するのみである<sup>17)</sup>。

一方、米国においても、既設鋼橋における腐食損傷の構造性能に及ぼす影響に関する研究は行われており、それらの成果は文献18)に詳細に取りまとめられているが、性能評価のための断面計測、部材形状計測に関するガイドラインは示されていない。そこで、著者らは、文献12)で対象とした腐食鋼管から、板状試験体を切り出し、その表面腐食形状を高精度に計測して、板状の引張試験片としてその断面性状と引張耐力、破断性状などに関連付け、性能評価のための板厚計測方法（計測間隔）について検討した結果、0.3mm程度の間隔での計測により断面積を正確に評価でき、その最小断面積で引張耐力を精度よく評価できることを示した<sup>19)</sup>。すなわち、最小断面における平均板厚で構造寸法を評価すべきとした。また、腐食鋼管の圧縮耐力評価に関しても、短柱圧縮試験を実施し、加えて、幾何形状、腐食性状を反映した構造モデルによる弾塑性有限変位解析を実施してきた。その結果、構造モデルが適切であれば、現行の離散解析技術により耐荷力ならびに破壊性状を精度よく評価可能であることを示してきた<sup>20)</sup>。現在も、性能評価ガイドライン策定に向けて、組み合わせ断面力下における耐力評価、現場で

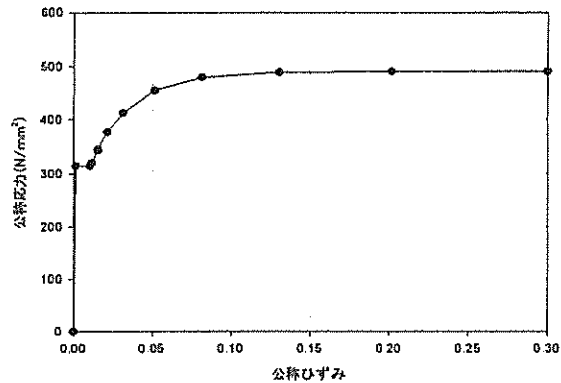


図-2 解析に用いた応力-ひずみ関係

の板厚計測の再現性などの検討を現在も継続中である。

そこで、本研究では、圧縮力下における腐食鋼板の簡易耐力評価法、すなわち実用的な性能評価法の構築を目指し、汎用有限要素解析コードABAQUS (Ver.6.4)を用いて、弾塑性有限変位解析を行い、応力伝達軸方向ならびにその直交方向における板厚分布性状の圧縮耐力に及ぼす影響を評価した。また、数値シミュレーション結果より、簡易な耐力評価法を提案し、文献12)で対象とした腐食鋼管において計測した表面腐食形状を有する鋼板の耐力評価も加え、提案式の有効性を検討した。

## 2. 解析モデルおよび解析ケースの概要

解析モデルの概要を図-1に示す。応力伝達軸方向とその直交方向の板厚変化の影響を相対比較するため、正方形板(200mm×200mm)を対象とし、基準耐力評価の基本として周辺単純支持条件を設定した。要素は4節点低減積分シェル要素を使用し、分割数は縦横ともに100分割とし、層分割は、11層とした。初期不整としては、各種製作基準の許容値を参考に最大値が板幅 $b$ の $1/200$ のsin半波形の初期変形を考慮したが、腐食進行とともに残留応力分布がどのように変化するか十分な知見が得られていない現状を踏まえて、残留応力は考慮しないこととした。なお、パラメトリック解析では、腐食による板厚中心の偏心は考慮していないが、この影響に関しては、別途検討した。なお、鋼種はSM490Y材を想定し、弾性係数 $210\text{kN/mm}^2$ 、降伏応力 $315\text{N/mm}^2$ 、降伏後の応力-ひずみ関係はJSSC/鋼構造新技術委員会で提案された関係式<sup>21)</sup>を用い、ミーゼスの降伏関数および等方硬化則を採用した。解析に用いた鋼材の応力-ひずみ関係を図-2に示す。

本解析では、板厚分布を正弦波で単純モデル化し、板厚が変化する方向、板厚が変化する波長、平均板厚、板厚の変化率を変えながら鋼板の凹凸が力学特性に与える

表-1 解析モデルケース

波形 パターン No.	縦波モデル (A)	横波モデル (B)	縦横波モデル (C)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

注)濃淡で板厚の大きさをあらわしている。

淡：薄い，濃：厚い


薄い  厚い

表-2 幅厚比パラメータおよび板厚変化率

幅厚比 パラメータ R 式(1)	板厚 変化 率 (%)	平均 板厚 (mm)	最大 板厚 (mm)	最小 板厚 (mm)	最大 板厚の 幅厚比 パラメータ	最小 板厚の 幅厚比 パラメータ
0.5	±10	8.15	8.97	7.34	0.45	0.56
	±30		10.60	5.71	0.38	0.71
	±50		12.23	4.08	0.33	1.00
	±80		14.67	1.63	0.28	2.50
1.0	±10	4.07	4.48	3.66	0.91	1.11
	±30		5.29	2.85	0.77	1.43
	±50		6.11	2.04	0.67	2.00
	±80		7.33	0.81	0.56	5.00
1.5	±10	2.72	2.99	2.45	1.36	1.66
	±30		3.54	1.90	1.15	2.14
	±50		4.08	1.36	1.00	3.00
	±80		4.90	0.54	0.83	7.49

影響を検討する。解析モデルケースの一覧を表-1に示す。ここで、設定した解析ケースにおいて、応力伝達軸方向（荷重軸方向）にのみ板厚が変化する板厚分布を有するモデルを縦波モデル(A)、その直交方向（板幅方向）にのみ板厚が変化するものを横波モデル(B)、応力伝達軸方向、およびその直交方向ともに板厚が変化するものを縦横波モデル(C)と呼ぶこととする。各モデルにおいて板厚変動の波数を1/2波、1波で両端が厚い場合、1波で中央が厚い場合、2波で両端が厚い場合、2波で中央が厚い場合、5波、10波と変化させ、それぞれ波形パターンとして1~7の番号を付ける。また、幅厚比パラメータRが0.5, 1.0, 1.5になるように、平均板厚をそれぞれ8.15mm, 4.07mm, 2.72mmに設定した。さらに、最大、最小板厚が平均板厚から±10%, ±30%, ±50%, ±80%となるように板厚変化率を調整した。設定パラメータのまとめを表-2に示す。解析ケースの呼び名は、例えば、応力伝達軸方向にのみ板厚が変化する、波の数が5波、幅厚比パラメータが1.0、板厚変化率が30%の場合にはA6-1.0-30%と呼ぶこととする。

### 3. 解析結果および考察

#### (1) 荷重-変位関係

縦波モデルA1-1.0, A2-1.0, A6-1.0, 横波モデルB1-1.0, B2-1.0とB3-1.0, B6-1.0, 縦横波モデルのC1-1.0, C2-1.0, C6-1.0の荷重-変位曲線を一例として、圧縮力および縮みを平均板厚を有する一様鋼板の降伏荷重、降伏変位で無次元化して、それぞれ図-3~図-5に示す。

縦波モデルではどのケースも板厚変化率が大きくなるにつれて断面積の減少により最大耐力、最大荷重時縮み量(以後、変形性能と呼ぶ)ともに低下している。しかし、

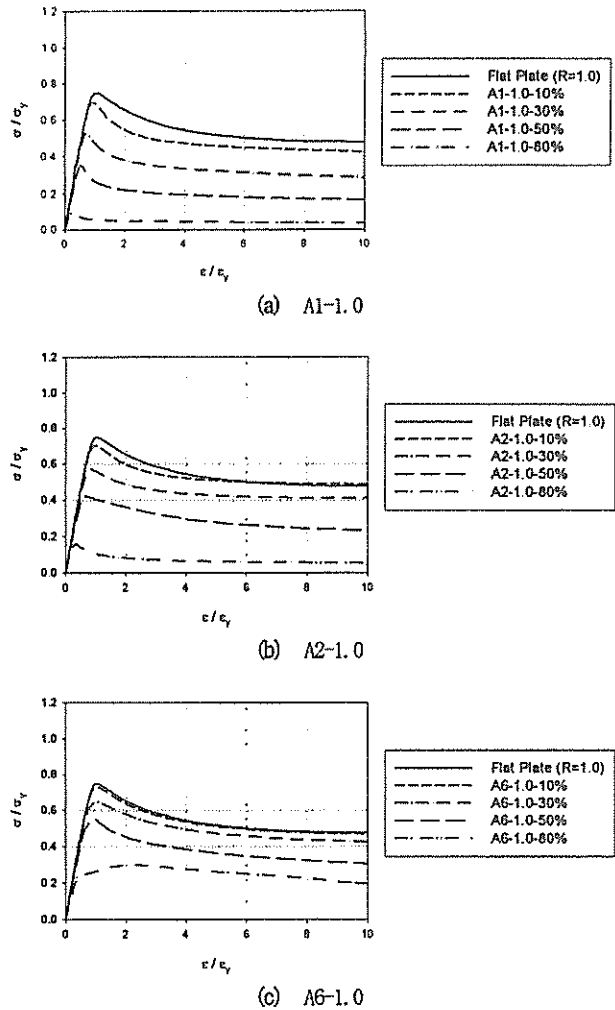
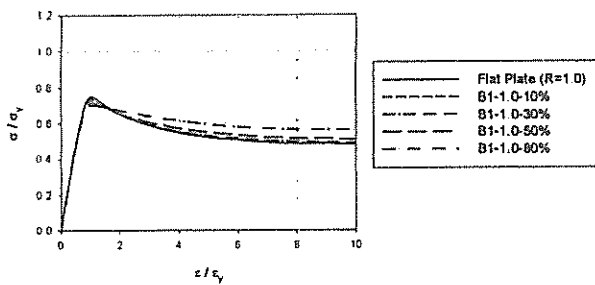


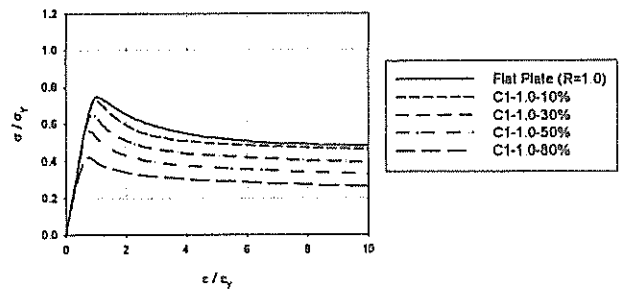
図-3 縦波モデルの荷重-変位曲線 (R=1.0)

板厚変動の波長が短くなるにつれて耐荷力の低下は減少傾向にある。これは板厚の薄い部分と厚い部分が近接して交互に存在するために厚い部分が薄い部分の面外変形を拘束して、薄い部分においても降伏後に十分ひずみ硬化することにより圧縮耐力が上昇したと考えられる。図-3(c)中のA6-1.0-80%の荷重-変位曲線からはひずみ硬化の影響が顕著に現れているのが分かる。

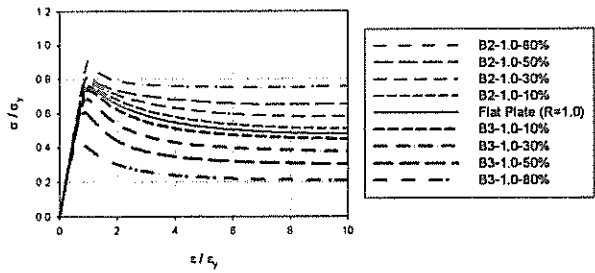
横波モデルでは図-4(b)より板の側辺側が厚い場合(B2)には圧縮耐力は上昇し、側辺側が薄い場合(B3)には低下することが分かる。これは側辺の厚い部分が板の面外変形の抑制に貢献しているものと考えられる。板が圧縮力を受けるとき、座屈によって生じる板中央部のたわみは幅方向の応力分布を不均一にし、側辺近傍での荷重分担が増える。荷重の増加とともにこの傾向は増加し、板の側辺部に塑性化が集中し、終局荷重に達するまで板中央部の応力除荷が進行していく。つまり、B2では荷重をより多く負担する側辺が厚いために最大荷重は上昇し、側辺が薄いB3は荷重が低下する。これ



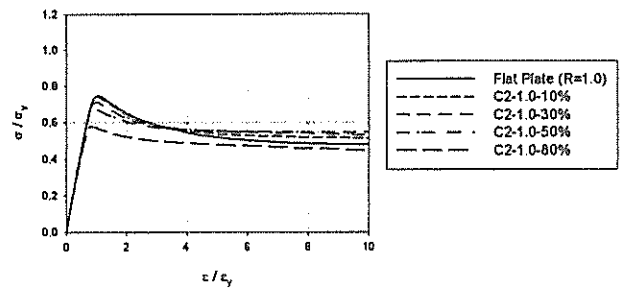
(a) BI-1.0



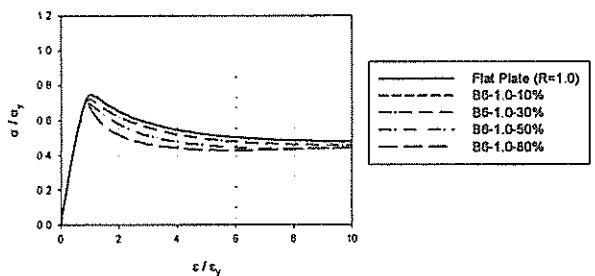
(a) CI-1.0



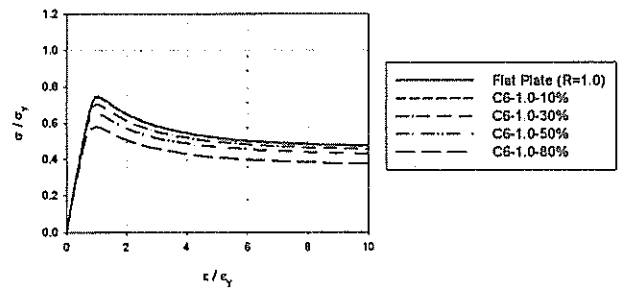
(b) B2-1.0, およびB3-1.0



(b) C2-1.0



(c) BG-1.0



(c) CG-1.0

図-4 横波モデルの荷重-変位曲線 (R=1.0)

図-5 縦横波モデルの荷重-変位曲線 (R=1.0)

らの傾向は、文献22)の幅方向テーパ板の圧縮強度の結果と一致する。しかし、波数が大きくなると、大きな差異はない。

また、縦横波モデルは応力伝達軸方向、およびその直交方向の双方の影響を受けて耐荷力が変化していると考えられるが、板厚変化率が増えるに従って最大荷重は低下する傾向にある。

(2) 既存の耐荷力評価式との比較

既存の耐荷力評価の推定幅と板厚変化の影響を相対比較するため、本解析で得られた結果と種々の耐荷力曲線との比較を縦波モデル、横波モデル、縦横波モデルそれぞれについて図-6～図-8に示す。なお、図中の点における幅厚比パラメータR、終局強度 $\sigma_x/\sigma_y$ は、平均板厚で評価した値をプロットしている。図中で比較する耐荷力曲線は、弾性座屈曲線、道路橋示方書で規定されている耐荷力曲線、BS449 (1959) の公式を基に決められた三上曲線、初期不整のない圧縮版に有効幅の概念を導入して

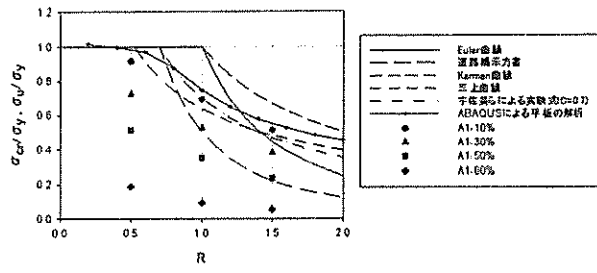
誘導されたKarman曲線、初期不整の影響を導入した宇佐美らによる実験式、同様のモデルに対するABAQUSによる平板の解析結果である。なお、耐荷力曲線の詳細は、文献23)を参照して頂きたい。それぞれの式における座屈強度 $\sigma_{cr}$  (もしくは、終局強度 $\sigma_u$ ) は、以下の幅厚比パラメータRによって式(2)～式(5)のように表される。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

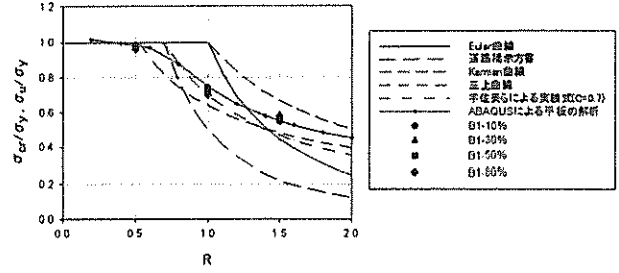
ここで、 $b$ : 板幅、 $t$ : 板厚、 $\sigma_y$ : 降伏応力、 $E$ : ヤング係数、 $\nu$ : ポアソン比、および $k$ : 座屈係数 (周辺単純支持の場合は4) である。

・弾性座屈曲線

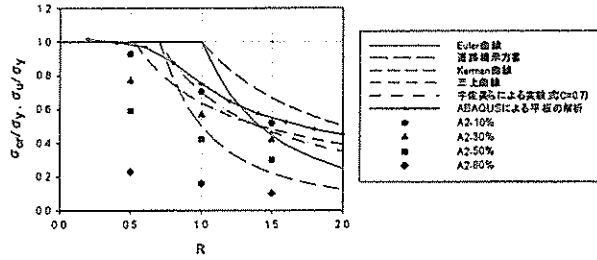
$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \frac{1}{R^2} \quad (2)$$



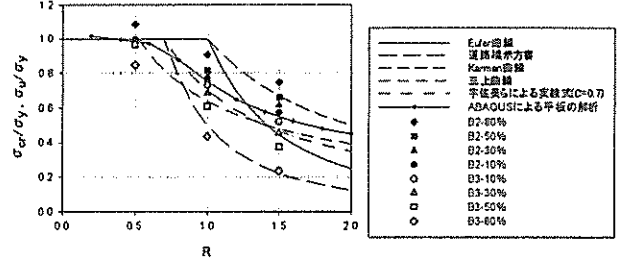
(a) A1



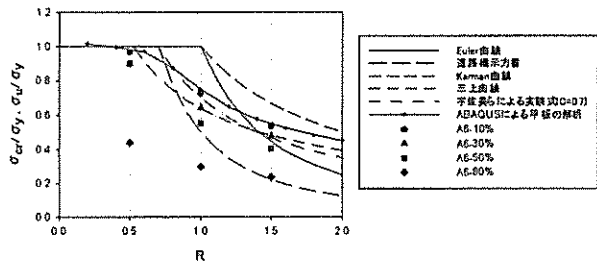
(a) B1



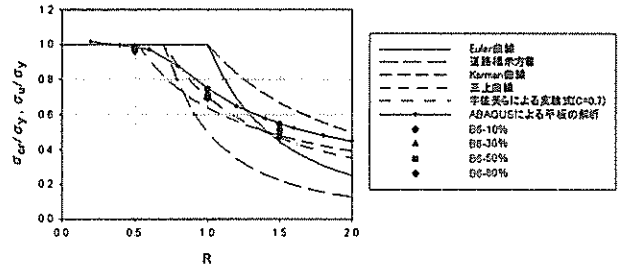
(b) A2



(b) B2およびB3



(c) A6



(c) B6

図-6 縦波モデルの圧縮耐力と既存の強度式との比較

図-7 横波モデルの圧縮耐力と既存の強度式との比較

・道路橋示方書

$$\begin{cases} \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = 1.0 & R \leq 0.7 & (3a) \\ \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{0.5}{R^2} & R > 0.7 & (3b) \end{cases}$$

・Kaman曲線

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{1}{R} \quad (4)$$

・三上曲線

$$\begin{cases} \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = 1.0 & R \leq 0.526 & (5a) \\ \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \left(\frac{0.526}{R}\right)^{0.7} & R > 0.526 & (5b) \end{cases}$$

・宇佐美らによる実験式

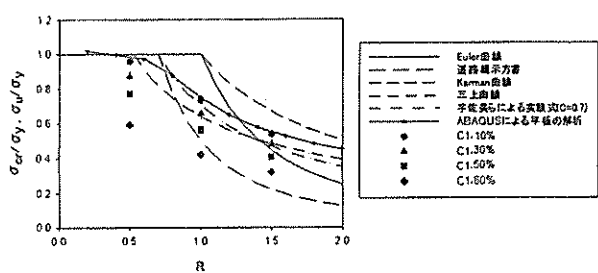
$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{C}{R} \quad (6)$$

(ただし、図中の曲線は、 $C = 0.7$ の時)

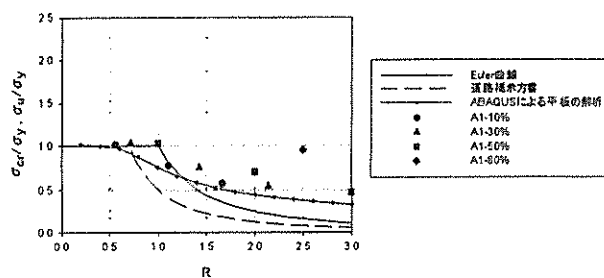
縦波モデルは前述のように断面積の減少により板厚変化率が増えるにつれて終局強度は著しく低下する。また、強度の低下量は板厚変動の波長が短くなるにつれて軽減される傾向にあることが分かる。

横波モデルでは、側辺部が厚いB2では終局強度は上昇し、側辺部が薄いB3では低下していることが分かる。また幅厚比パラメータ $R$ が大きくなるにつれて、終局強度の変動量も大きくなる。これは、座屈後の側辺部での応力分担が大きく、板厚変動が終局強度に与える影響が増加するためである。一方で、図-7(a)と図-7(c)では終局強度の変化量は、他と比較すると相対的に極めて小さい。凹凸を有する鋼板の強度を精度よく推定するには幅方向の板厚分布を独立に考慮する必要がある。

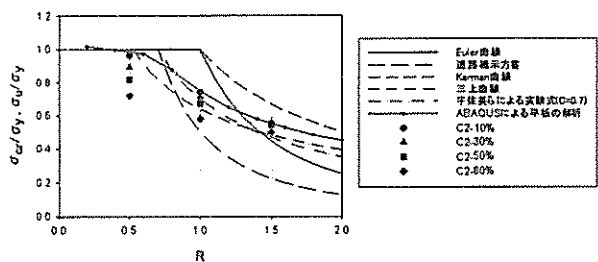
縦横波モデルでは板厚変動の波長が短くなるにしたがって低下量は減少傾向にある。このことから波長の短い凹凸より波長の長い凸凹による板厚の変動が耐力に大きく影響していると考えられる。



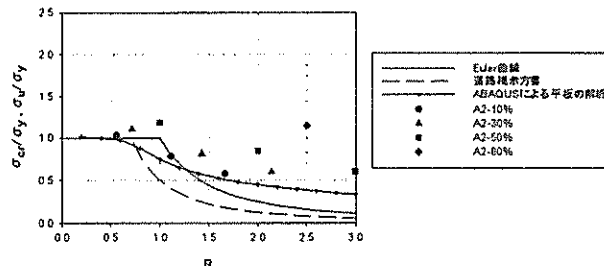
(a) C1



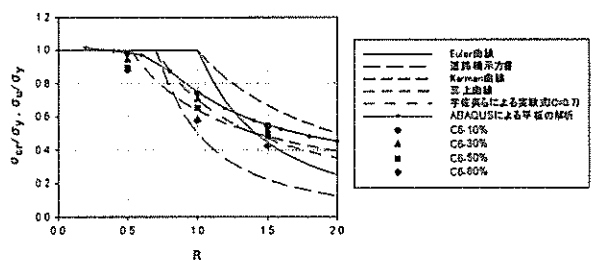
(a) A1



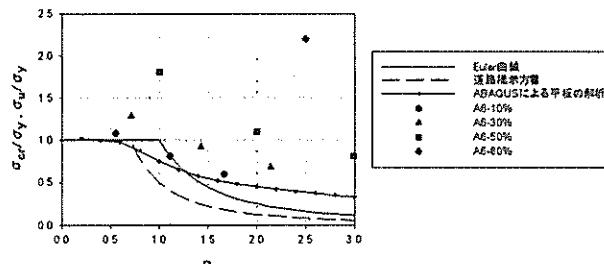
(b) C2



(b) A2



(c) C6



(c) A6

図-8 縦横波モデルの圧縮耐力と既存の強度式との比較

図-9 縦波モデルでの最小断面平均板厚評価

4. 圧縮耐力評価に関する考察

(1) 簡易評価法

3(2)での考察を踏まえて、ここでは凹凸を有する鋼板の圧縮強度推定法の構築を試みる。特に、ABAQUSによる平板解析結果を真値とし、その座屈曲線に合うような有効板厚の評価法を検討する。

前述のように、縦波モデルの耐力の低下は断面積の減少によって起こると考えられる。そこで、応力伝達軸方向の板厚変化に対しては最小断面における平均板厚で評価することとする。最小断面平均板厚を用いた幅厚比パラメータ、座屈強度の関係を図-9に示す。これらの図より、板厚変動の波長が長く、板厚変化率が低い場合には比較的推測できているが、板厚変動波長が短く、板厚変化率が高くなるにつれて過度に安全側の評価となる。しかし、実際に起こりうる腐食形状を想定する場合には、引張耐力の評価と同様に、応力伝達軸方向の板厚変動に対しては最小断面平均板厚で強度を推定することは妥当

であり、精度向上のため、文献20)で提案するように座屈波長を考慮して板厚の平均化を行う対象領域を補正するのが望ましい。本研究ではアスペクト比1のみを対象としたので、細長い板に対する検討が今後の課題である。

横波モデルは、後座屈強度評価の有効幅理論から分かるように、側辺近傍の板厚が厚くなると耐力は上昇し、薄くなると低下する。そこで、図-10のように板を側辺部分と中央部分に分割してそれぞれの平均板厚に対して重み付けをして有効板厚の評価を補正することを考える。まず、係数 $\alpha$ を用いて両側辺からそれぞれ $1/2ab$ を側辺部分、それ以外を中央部分と定義する。次に側辺部分の平均板厚 $t_1$ 、中央部分の平均板厚 $t_2$ のそれぞれに対して重み $\beta_1, \beta_2$ を掛け合わせて推定板厚 $t_{est}$ とする。この様にして算出された推定板厚 $t_{est}$ は、次式のように表される。

$$t_{est} = \alpha \cdot \beta_1 \cdot t_1 + (1 - \alpha) \cdot \beta_2 \cdot t_2 \quad (7)$$

ここで、 $\alpha$ : 側辺部分と中央部分の境界を定義する係数

$$t_{est} = \alpha \cdot \beta_1 \cdot t_1 + (1 - \alpha) \cdot \beta_2 \cdot t_2$$

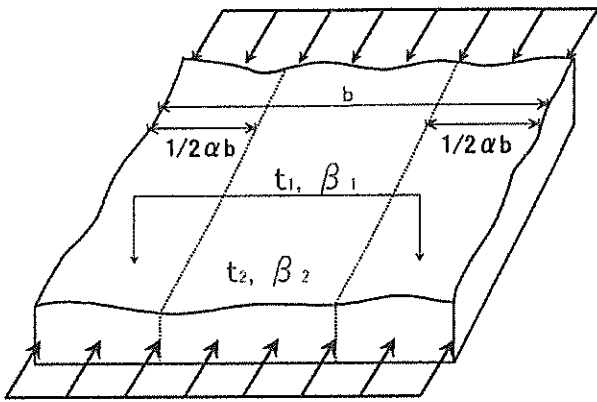


図-10 幅方向板厚分布を考慮した強度推定法概念図

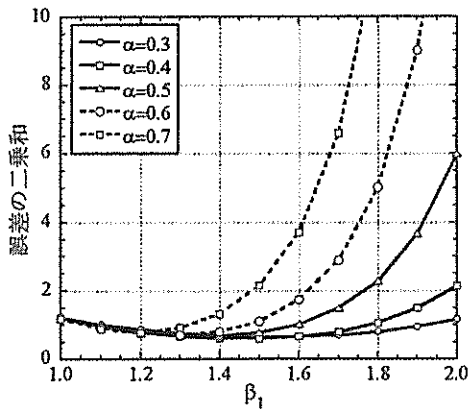


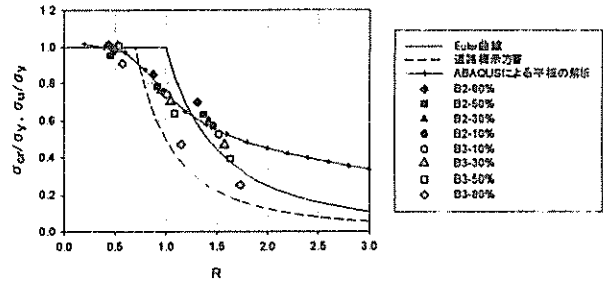
図-12 誤差の二乗和に及ぼす  $\alpha$  と  $\beta$  の影響

(ただし,  $0 < \alpha < 1$ ),  $t_1$ : 側辺部分の平均板厚,  $t_2$ : 中央部分の平均板厚,  $\beta_1$ : 側辺部分の重み,  $\beta_2$ : 中央部分の重みである。ただし,  $t_1$  と  $t_2$  が等しいときは推定板厚  $t_{est}$  もそれと等しくなるので,  $\beta_2$  は  $\alpha$  と  $\beta_1$  を用いて次のように表される。

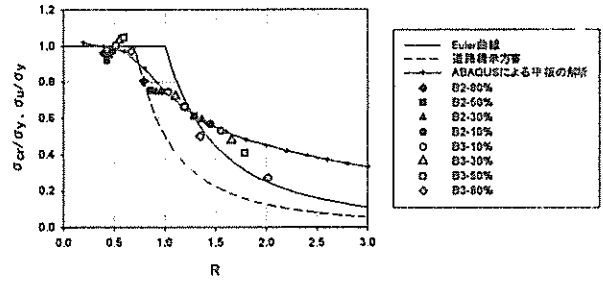
$$\beta_2 = \frac{1 - \alpha \cdot \beta_1}{1 - \alpha} \quad (8)$$

$\alpha$  を 0.3~0.7,  $\beta_1$  を 1.0~2.0 まで 0.1 間隔で変化させて, それぞれのパラメータ値によって算出される推定板厚  $t_{est}$  を用いて横波モデル B2, B3 の解析結果を整理した。図-11 には,  $\alpha$  が 0.6 で,  $\beta_1$  および  $\beta_2$  を変化させたときの結果を一例として示す。ここで,  $\alpha$  が 0.6,  $\beta_1$  が 1.4,  $\beta_2$  が 0.4 のときに平板の解析結果と比較的一致していると判断し, この値を用いて腐食鋼板の強度推定を行った(図-12 参照)。なお, 最適値の決定には, 多様な腐食パターンに対する検討が必要である。

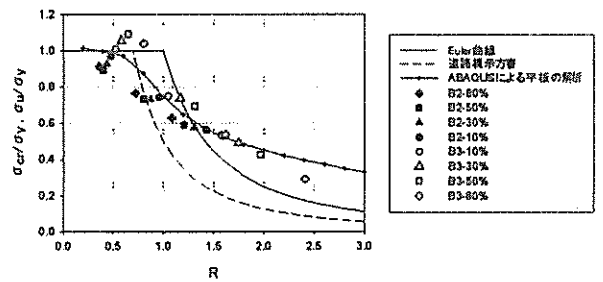
縦横波モデルは軸方向, 幅方向それぞれの方向の板厚変動を考慮する必要があるので以下のように二段階で考える。まず, 軸方向の断面積の分布を調べて最小断面位



(a)  $\alpha=0.6, \beta_1=1.2, \beta_2=0.70$

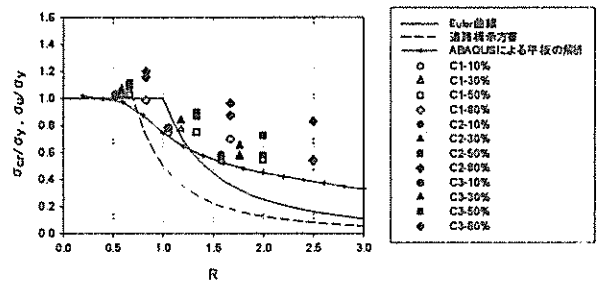


(b)  $\alpha=0.6, \beta_1=1.4, \beta_2=0.40$

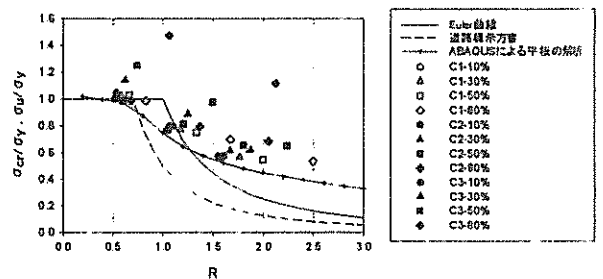


(c)  $\alpha=0.6, \beta_1=1.6, \beta_2=0.10$

図-11 推定板厚  $t_{est}$  で評価した横波モデルの強度曲線



(a) 最小断面平均板厚で評価



(b) 補正後 ( $\alpha=0.6, \beta_1=1.4, \beta_2=0.40$ )

図-13 縦横波モデルの強度推定結果



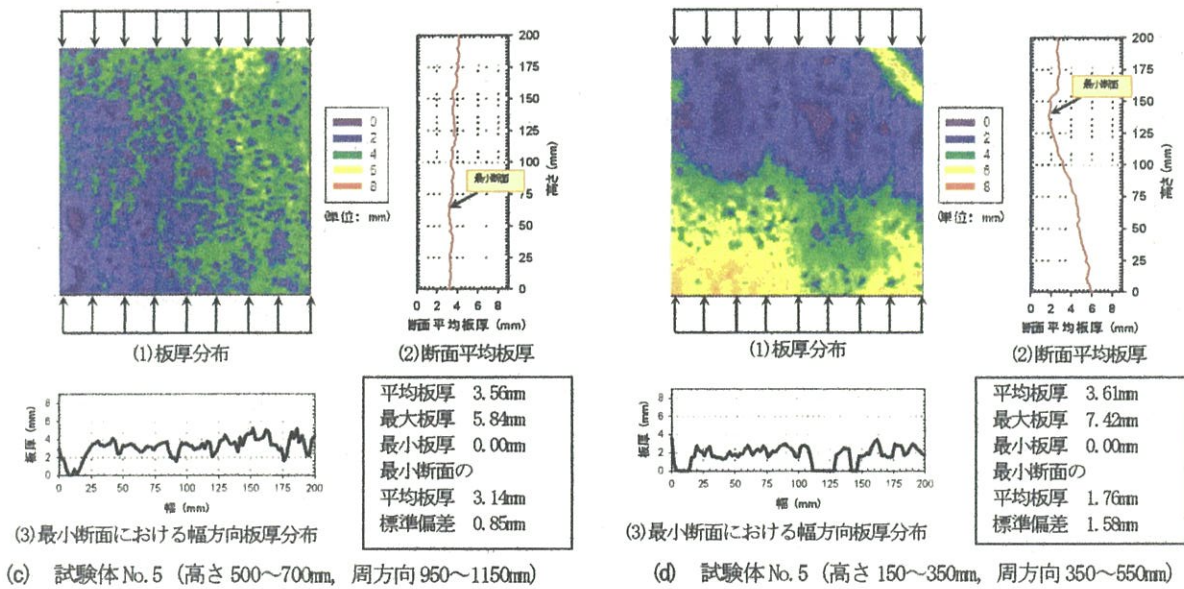
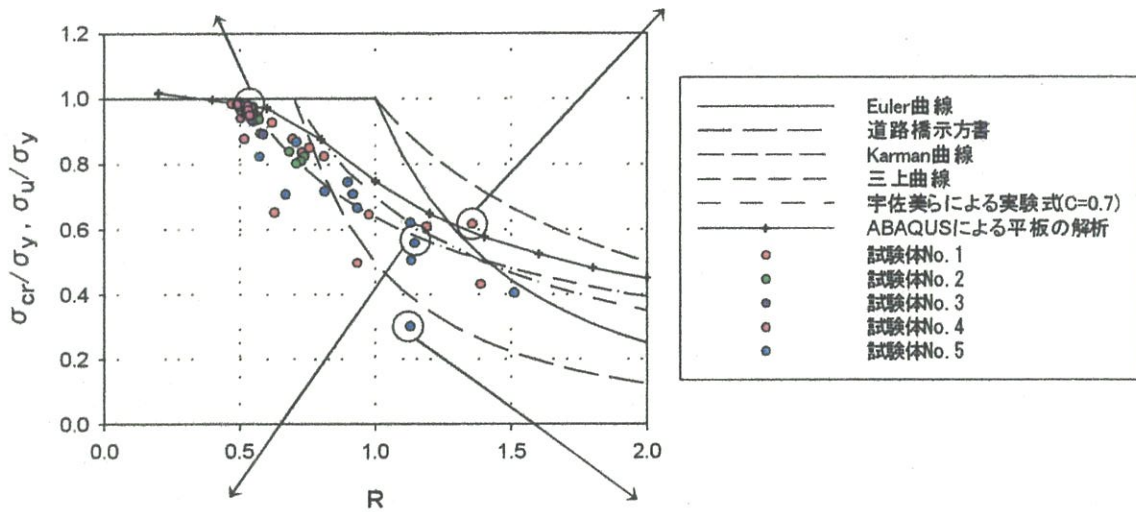
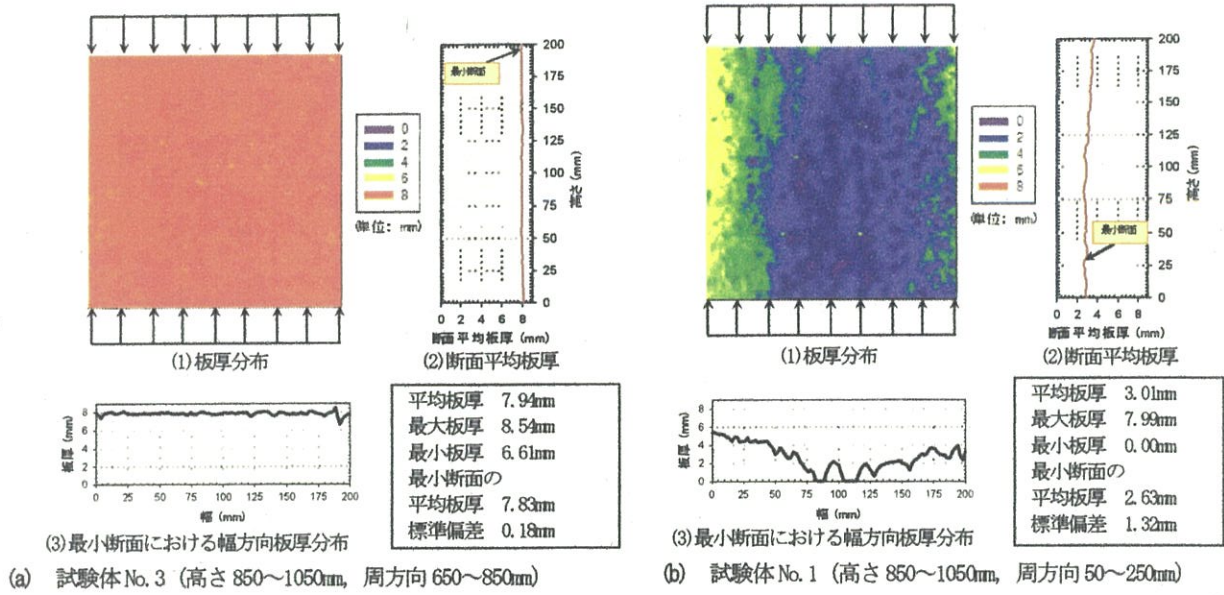
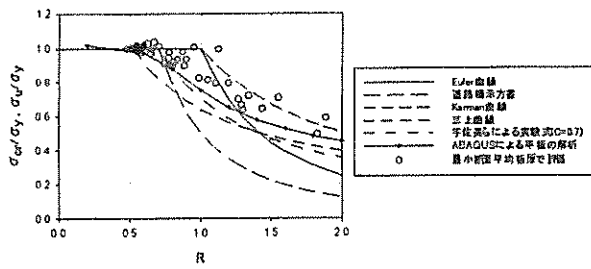
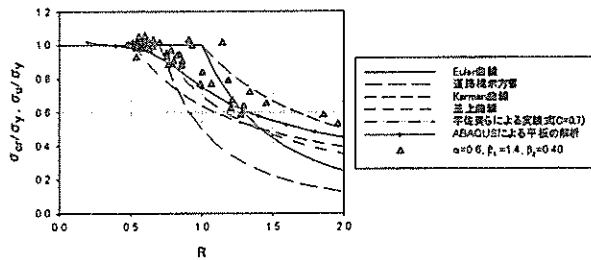


図-14 腐食鋼板の耐力力曲線と特徴的な板厚分布



(a) 最小断面平均板厚で評価した場合の推定精度



(b) 補正後の推定精度 (α=0.6, β<sub>1</sub>=1.4, β<sub>2</sub>=0.40)

図-15 腐食を有する鋼板の強度推定結果

置を探す。次に、最小断面における幅方向の板厚分布を横波モデルと同様の考え方で補正して推定板厚とすることを考える。図-13に縦横波モデルC1, C2, C3に対して上記の方法により算出された推定板厚を用いて解析結果を整理したものを示す。その結果、C2は精度が向上したが、C3は過度に安全側に評価してしまうという結果となった。この原因としては、第一段階において最小断面における評価がかなり安全側であること、応力伝達軸方向とその直交方向の板厚変動が相互に耐荷力に対して影響を及ぼしあっていることなどが原因と考えられる。今後は板厚変動が鋼板の力学的性状に与える影響をさらに詳細に調査し、推定精度の向上が必要である。

(2) 実腐食形状を用いた鋼板の強度特性評価

本節では、前節と同様の鋼板モデルに対して文献12)の腐食鋼管の計測データにおける試験体No.1~No.5の各試験体(φ400mm, 長さ1200mmの円筒試験体; 詳細な形状は文献12)を参照して頂きたい)から高さ方向3箇所(150mm~350mm, 500mm~700mm, 850mm~1050mm), 周方向4箇所(50mm~250mm, 350mm~550mm, 650mm~850mm, 950mm~1150mm)における200mm×200mm(計測点は101点×101点)の12箇所を局所的に取り出したときの板厚分布(計60パターン)を各節点に入力して解析を行った。解析対象は鋼板であり、板と管の形状の違いから腐食形状も異なる可能性があるが、実環境における不規則性のある板厚分布を用いて解析を行うことは有効であると考えられる。なお、貫通孔は要素を取り除

くことでモデル化した。ここでは、腐食による板厚中心の偏心の影響については考慮していないが、その影響については最後に別途検討する。

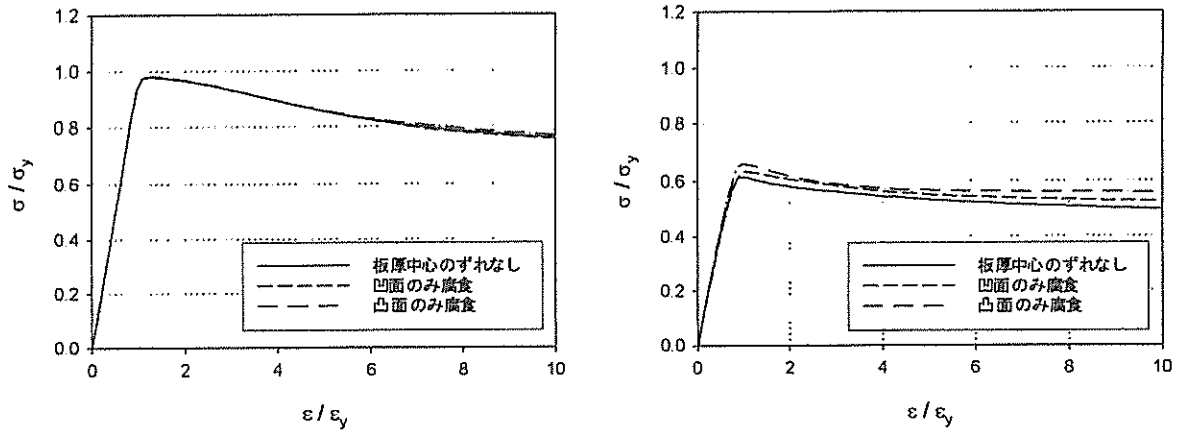
図-14に板厚を平均板厚で評価したときの幅厚比パラメータ、終局強度をプロットした結果を示す。解析結果を耐荷力曲線と比較すると、平均板厚で評価するとばらつきが大きく、ほぼ危険側の評価となることが分かる。この中で特徴的な板厚分布を取り上げて考察をしてみる。図-14(a)は、腐食が軽微で一様板厚に近い場合、その強度は平均板厚ではほぼ評価できている。一方、図-14(b)では、中央部分には孔食が多数存在する激しい腐食を有する鋼板であるが、側辺で板厚が厚くなっているために平均板厚で評価する以上の強度を有している。また、図-14(c)は、全体的に細かい凹凸を有する鋼板であるが、断面積の減少が小さいために平均板厚での評価に比べて少し低い程度である。最後に、図-13(d)は部分的に断面積が著しく減少しているために強度の低下は著しい。これらの傾向は前節のモデル化された板厚分布を有する鋼板の解析結果と類似している。

以上のように、腐食鋼板はその圧縮強度を平均板厚で評価すると危険側になる可能性が高い。そこで、実腐食形状を有する鋼板に対して前述の提案した推定法の適用性を検討する。図-15に最小断面平均板厚で評価した場合と、提案した推定法により補正した後の結果を示す。今回の解析結果から、最小断面平均板厚で評価することで安全側に比較的よく推定できていることがわかる。耐荷力評価のための有効板厚であるためには、一様な板厚の平板解析の結果が、多様な腐食鋼板の耐荷力評価結果の平均値であるべきと考えられる。一方で、図-15(b)に示すように板幅方向の板厚補正を考慮すると、図-15(a)に示す単純な最小断面平均板厚を用いた評価と比べても、それほど劇的に推定誤差を小さくすることはできていないが、ばらつきを小さく、しかも一様板厚の平板解析結果が平均値推定に近づいている点から、板幅方向の板厚変化を考慮することの有効性が伺える。

(3) 腐食による板厚中心の偏心の影響

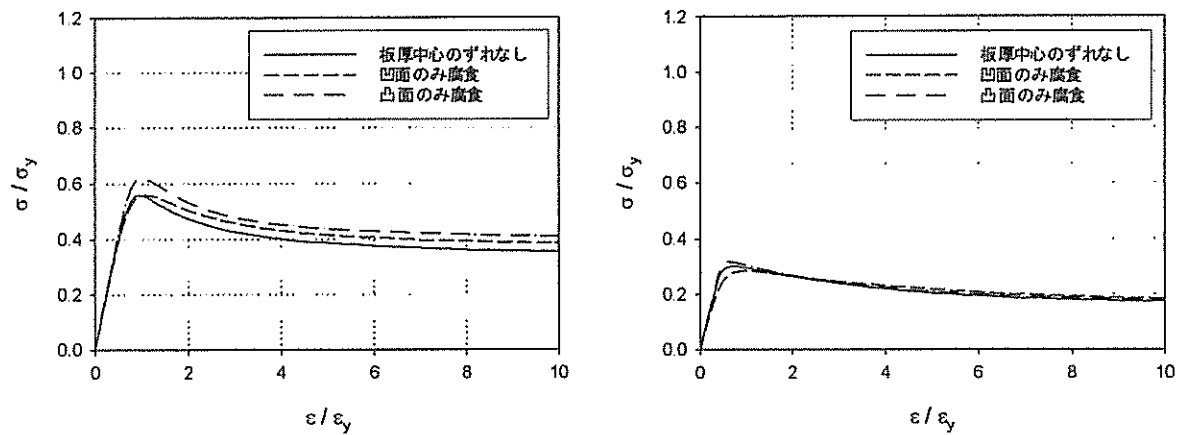
鋼板が腐食により減厚すると、板厚中心が偏心するために付加的な板曲げ作用が働くと考えられる。ここでは、4(2)の腐食鋼板を用いてこの影響について検討する。基本モデルは4(2)と同様であり、極端な腐食進行例として、鋼板の初期たわみに対して凸側表面、もしくは凹側表面の片側のみが腐食した場合を想定して節点座標を定義して解析を行った。なお、板厚分布は図-14に示されている4パターンを対象とした。

荷重-変位関係として、圧縮力および縮みを、それぞれの平均板厚を有する一様な鋼板の降伏荷重、降伏変位



(a) 試験体 No. 3 (高さ 850~1050mm, 周方向 650~850mm)

(b) 試験体 No. 1 (高さ 850~1050mm, 周方向 50~250mm)



(c) 試験体 No. 5 (高さ 500~700mm, 周方向 950~1150mm)

(d) 試験体 No. 5 (高さ 150~350mm, 周方向 350~550mm)

図-16 板厚中心の偏心の影響

で無次元化して、図-16に示す。図-16(a)のように腐食が軽微の場合には、板厚中心の偏心は少ないためにその影響はほとんど受けない。図-16(b)~図-16(d)においては板厚中心の偏心が耐荷力に与える影響の傾向を捕らえることは難しく、初期たわみと腐食形状の相互の関係により変化することが分かる。今回はそれぞれのケースにおいて顕著な差異は見られないものの、極端な片側腐食状態においても、最大で10%程度の耐荷力の差異となり、有効板厚ならびに圧縮耐荷力の推定のばらつきと比して、それほど大きくないと判断できる。

## 5. 結論

腐食形状を単純にモデル化し、不均一な板厚分布を有する周辺単純支持の鋼板に対する圧縮耐荷力性状を数値

シミュレーションにより明らかにした。また、実腐食性状を考慮した鋼板に対しても同様なシミュレーションを実施し、腐食形状が残存性能に与える影響について多方面より検討した。その結果、腐食鋼板の強度は断面積の減少により著しく低下すること、応力伝達軸方向のみならず、その直交方向の板厚分布も圧縮耐荷力に大きく影響していることが明らかとなった。また、応力伝達軸方向、その直交方向（幅方向）の板厚分布を考慮した腐食を有する鋼板の圧縮強度推定法の構築を試みた。最後に、腐食に伴う減厚による板厚中心の偏心の影響についても検討を行った。その結果、今回用いた板厚分布においては最大で10%程度の耐荷力の差が生じるが、各種耐荷力評価式による推定値のばらつきと比して大きく影響しないことがわかった。なお、アスペクト比、初期不整などの影響を明らかにし、精度向上が今後の課題である。

謝辞：本研究は、社団法人土木学会・構造工学委員会・沿岸環境における鋼・複合構造物の防食および耐久性評価に関する研究小委員会の研究成果をまとめたものである。社団法人日本鉄鋼連盟および委員の方々から貴重な試験体の提供ならびに有益な助言を頂いた。ここに記して、深謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, No.668A-54, pp.299-311, 2001.1.
- 2) 山本正弘, 広沢規行, 吉田耕太郎, 加藤忠一, 羽田隆司: 海洋で曝露した鋼材の腐食形態の解析, *Zairyo-to-Kankyo*, 41, pp.803-808, 1992.
- 3) 奥村誠, 藤井堅, 塚井誠人: 空間的自己相関を考慮した鋼板腐食形状のモデル化, 土木学会論文集, No.642IV-50, pp.109-116, 2001.3.
- 4) 藤井堅, 海田辰将, 平井勝志, 奥村誠: 腐食鋼板表面形状モデル作成における空間的自己相関モデルの適用性, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.48A, pp.1031-1038, 2002.3.
- 5) 松本勝, 白井義朗, 中村幾雄, 白井成人: 腐食鋼板の有効板厚評価法の一提案, 橋梁と基礎, Vol.23, No.12, pp.19-25, 1989.
- 6) 村中昭典, 皆田理, 藤井堅: 腐食鋼板の表面形状と残存耐力, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.44A, pp.1063-1071, 1998.3.
- 7) 野上邦栄, 山沢哲也, 小栗友樹, 加藤美幸: 腐食減厚に伴う合成I桁及びI断面柱の残存耐力評価に関する一考察, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.47A, pp.93-102, 2001.3.
- 8) 森猛, 渡邊一, 花井資之: 腐食した鋼板の表面形状シミュレーションと腐食鋼桁の曲げ耐力, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.49A, pp.675-686, 2003.3.
- 9) 海田辰将, 藤井堅, 原考志, 中村秀治, 上野谷実: 腐食鋼板のせん断耐力とその評価法, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.50A, pp.121-130, 2004.3.
- 10) 海田辰将, 藤井堅, 中村秀治: 腐食したフランジの簡易な圧縮強度評価法, 土木学会論文集, No.766I-68, pp.59-71, 2004.7.
- 11) 海田辰将, 藤井堅, 宮下雅史, 上野谷実, 中村秀治: 腐食したブレーガーダーの残存曲げ強度に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, pp.139-148, 2005.3.
- 12) 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 杉浦邦征, 永田和寿, 岡扶樹: 海洋環境において腐食した鋼管の形状計測と残存耐力に関する検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, pp.1103-1110, 2005.3.
- 13) 大西弘志, 松井繁之: 腐食鋼板の力学的挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, pp.1111-1118, 2005.3.
- 14) 後藤芳顕, 川西直樹: 腐食や補修の影響を考慮した長期間の力学性能評価のための構造解析法の開発, 土木学会論文集, No.689I-57, pp.85-100, 2001.10.
- 15) 後藤芳顕, 川西直樹: 腐食と補修履歴を考慮した鋼構造物の耐震性能評価のための解析手法, 土木学会論文集, No.738I-64, pp.233-244, 2003.7.
- 16) 後藤芳顕, 川西直樹: 腐食などの体積欠損による鋼構造物の残留応力・残留たわみの変化の解析と圧縮板の残存耐力評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, pp.127-138, 2005.3.
- 17) (財) 沿岸開発技術研究センター: 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル (改訂版), pp.239-240, 1993.4.
- 18) Kulicki, J.M., Prucz, Z., Sorgenfrei, D.F., Mertz, D.R. and Young, W.T.: Guidelines for Evaluating Corrosion Effects in Existing Steel Bridges, NCHRP Report 333, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, USA, 1990.12.
- 19) 杉浦邦征, 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 永田和寿, 岡扶樹: 腐食鋼板の引張力学性状評価のための板厚計測および有効板厚に関する考察, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.52A, pp.679-688, 2006.3.
- 20) 藤井堅, 近藤恒樹, 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 杉浦邦征, 野上邦栄, 永田和寿: 海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.52A, pp.721-730, 2006.3.
- 21) 鋼構造新技術小委員会: 鋼橋の耐震設計指針と耐震設計のための新技術, 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG, 1996.7.
- 22) 杉浦邦征, 山口隆司, 熊野拓志, 渡邊英一: 板幅方向にテーパーを有する鋼製周辺単純支持板の圧縮強度と変形能, 土木学会論文集, No.780I-70, pp.231-239, 2005.1.
- 23) 土木学会: 座屈設計ガイドライン (板要素), 土木学会, pp.161-191, 1987.10.

(2005. 9. 30受付)

## SIMPLIFIED EVALUATION OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CORRODED STEEL PLATES

Kunitomo SUGIURA, Isao TAMURA, Eiichi WATANABE, Yoshito ITOH,  
Katashi FUJII, Kuniei NOGAMI and Kazutoshi NAGATA

The necessity of assessing the durability of structures such as bridges and offshore structures has arisen recently. It is obvious that the maintenance of infrastructures has become a key issue to assure the desired performance in operational condition and to prolong the life of structures. As for the life cycle performance of the steel elements in the marine atmosphere, in particular, the damage due to corrosion is important rather than that by fatigue. Investigated herein is the effect of the surface profile of corroded steel plates on the compressive strength by the elasto-plastic finite displacement analysis, by using the fictitious surface profile as well as the surface profile measured for the corroded steel pipes subjected to the corrosion exposure in the field under severer marine environment for about 20 years. The simple strength evaluation is proposed by considering the plate thickness variation in the smallest cross section.