

論文 有限要素法による鉄筋の腐食した RC 梁の耐力性能評価

李翰承^{*1}・友澤史紀^{*2}・野口貴文^{*3}・鹿毛忠継^{*4}

要旨：腐食鉄筋及び付着要素の材料物性を腐食重量減少率を変数とする算定式から求め、鉄筋の腐食した RC 梁の有限要素解析を行った結果、解析結果は鉄筋の腐食した RC 梁の載荷実験結果とよく一致し、得られた材料物性の算定式の妥当性が検証された。また、鉄筋の腐食した RC 梁の耐力低下の支配的な原因は、鉄筋の降伏点の低下であること、鉄筋の局所的な腐食がモーメントが大きい部分で発生する場合、その耐力低下がもっとも顕著であることがわかった。

キーワード：有限要素法、鉄筋腐食、RC 梁、耐力性能、

1. はじめに

RC 造建築物に発生する劣化現象（中性化、塩害、凍害など）の大部分は、鉄筋腐食による建築物の耐力性能低下につながることから、RC 造建築物の耐久設計及び最終的な寿命の評価は、鉄筋の腐食劣化に伴う構造耐力の低下に基づいてなされるのが適切である。また、鉄筋が腐食した RC 構造部材は、鉄筋の腐食程度によっては、補修とともに補強を施す必要のあるものがあり、その判断根拠としても鉄筋の腐食程度と RC 構造部材の構造性能を明確する必要がある。このような、鉄筋が腐食した構造部材の耐力低下は、かぶりコンクリートのひび割れ発生によるコンクリートの有効断面積の減少、鉄筋の断面減少による鉄筋の力学的性能の低下及び鉄筋とコンクリートの付着性能の低下がその原因であり、鉄筋の腐食程度を変数とする各材料要素の構成則を導き出せば、有限要素法（FEM）を用いて、鉄筋が腐食した RC 構造部材の耐力低下機構を明確にすることができると考えられる[1]。しかしながら、鉄筋の腐食に伴う RC 構造部材の耐力低下現象を定性的に検討した研究は数例あるものの[2]、有限要素解析に適用可能な定量的研究は殆どなされていない。

本研究の目的は、鉄筋が腐食した RC 梁の耐力性能を有限要素法によって解析的に求めることである。実験では、鉄筋の腐食程度を変数とした鉄筋及び付着要素の構成則を得るために、鉄筋の引張試験及び引き抜き付着試験が行われた。また、鉄筋が腐食した RC 単筋梁と複筋梁の載荷実験結果と鉄筋要素と付着要素の構成則を用い RC 梁の有限要素解析結果を比較検討し、各材料構成則の妥当性を検証した。そして、有限要素法によって各材料構成則のパラメータ解析を行い、鉄筋が腐食した RC 梁の耐力性能低下機構について検討した。

2. 鉄筋の腐食した RC 梁の有限要素解析方法

RC 梁は、コンクリート要素、鉄筋要素、鉄筋とコンクリートの付着要素で構成されており、鉄筋の腐食程度を変数とした各材料要素の構成則を実験から導出した後、構成則を用いて鉄筋の腐食程度から各材料物性を算出し、鉄筋の腐食した RC 梁の FEM 解析を行う。

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻，博士（工博）（正会員）

*2 東京大学教授 工学系研究科建築学専攻，工博（正会員）

*3 東京大学助手 工学系研究科建築学専攻，博士（工学）（正会員）

*4 建設省建築研究所 第2研究部，学術博士（正会員）

2. 1 腐食鉄筋要素の構成則

(1) 腐食鉄筋の構成則の設定方法

FEM解析での鉄筋のモデルとしては、図-1に示すバイリニアモデルがあり、その構成は降伏点、弾性係数で構成されている。従って、鉄筋の腐食程度（重量減少率で表現）を変数として腐食鉄筋の降伏点及び弾性係数を求めれば鉄筋の構成則を得ることができるが、図-2のように腐食重量減少率が同じでも、降伏点比（健全鉄筋の降伏強度に対する腐食鉄筋の降伏強度、 $(\sigma_{cy}/\sigma_{sy})$ ）は鉄筋の腐食形態によって異なることが予想される。それで、図-4に示すように鉄筋の孔食などによる影響も考慮できる方法として、腐食鉄筋の断面積は、健全鉄筋の断面積とし、見かけ上の腐食鉄筋の力学的性能を低下させる方法を用いることにした。また、鉄筋の降伏後の挙動は、第2剛性の値として一般的に用いられる1/1000という値を使用した[4]。従って、腐食鉄筋の構成則は、重量減少率（ Δw ）を変数として次の式で表す。図-3に鉄筋の引張実験の概要を示す[3]。

$$\text{降伏点} : \sigma_{cy} = (1 - \alpha \Delta w) \cdot \sigma_{sy} \quad (1)$$

$$\text{弾性係数} : E_{cs} = (1 - \beta \Delta w) \cdot E_{ss} \quad (2)$$

(2) 腐食鉄筋の引張実験及び腐食鉄筋の力学的性能の算出式

中性化による鉄筋腐食は全面均一腐食を、塩害による腐食は孔食を発生させやすいことから、実験では電食方法によって全面均一腐食を、塩分を添加したコンクリートに埋め込んだ鉄筋を高温乾燥繰り返し促進養生によって孔食を発生させ、腐食段階が異なる試験片の引張実験を行った。また、腐食鉄筋をクエン酸第二アンモニウムで洗って腐食前後の重量差から腐食重量減少率を求め、腐食鉄筋の力学的性能との関係を求めた。図-5は、降伏点比（腐食鉄筋の降伏点/健全鉄筋の降伏点）を、図-6は弾性係数比、図-7は伸び比である。また、実験結果に基づいた鉄筋性能の低減係数を表-1に示す。同じ腐食減量率でも塩害によって腐食した鉄筋の力学的性能は電食結果より小さい値を示しており、孔食などの局部腐食の影響が現れていると考えられる。従って、腐食したRC梁の有限要素解析の際に必要な腐食鉄筋の構成則である降伏点と弾性係数は、重量減少率を測定すれば表-1を用いて算出することができる。ここで、 α 、 β は低減係数で実験定数である。

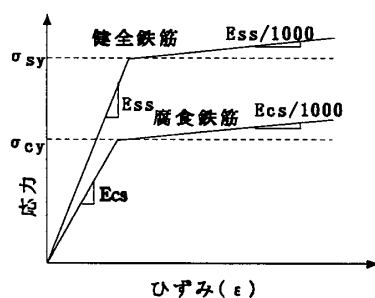


図-1 腐食鉄筋の構成則

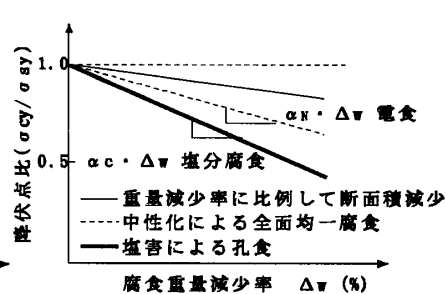


図-2 腐食重量減少率と降伏点比

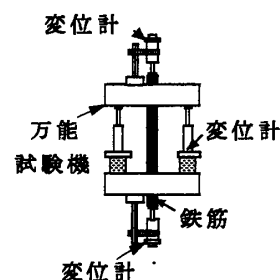


図-3 鉄筋の引張実験

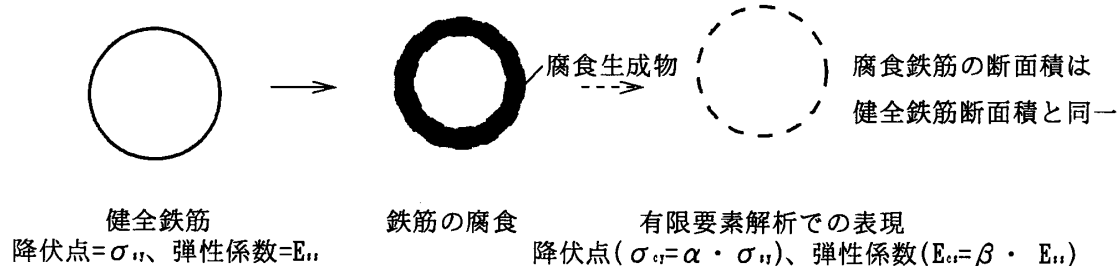


図-4 有限要素解析における腐食した鉄筋の表現方法

表-1 腐食鉄筋の力学的性能の算出式

力学的性能	腐食形態	腐食鉄筋の力学性能算出式	低減係数
降伏点*	電食実験	$\sigma_{cy} = (1 - 1.24(\Delta w/100)) \cdot \sigma_{sy}$	$\alpha = 1.24$
	塩分腐食	$\sigma_{cy} = (1 - 1.98(\Delta w/100)) \cdot \sigma_{sy}$	$\alpha = 1.98$
弾性係数	電食実験	$E_{cs} = (1 - 0.75(\Delta w/100)) \cdot E_{ss}$	$\beta = 0.75$
	塩分腐食	$E_{cs} = (1 - 1.13(\Delta w/100)) \cdot E_{ss}$	$\beta = 1.13$

*降伏点の算出には、健全鉄筋の公称断面積を用いることから、この値は見かけの降伏値である。

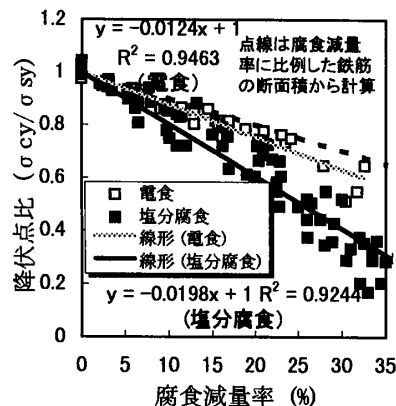


図-5 腐食減量率と降伏点比

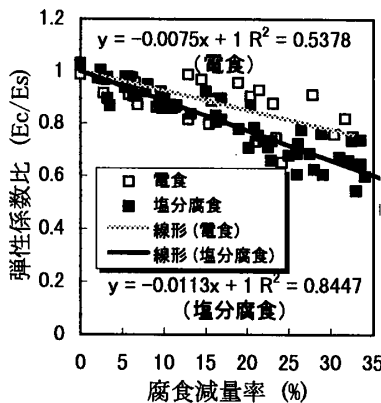


図-6 腐食減量率と弾性係数比

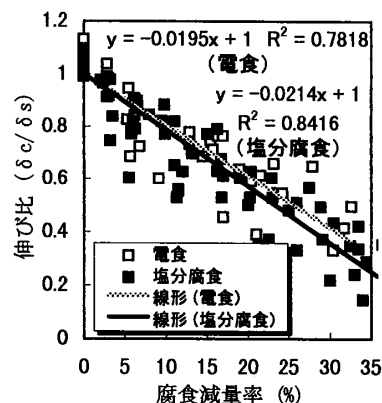


図-7 腐食減量率と伸び比

2. 2 腐食鉄筋とコンクリートの付着要素の構成則

(1) 付着要素の構成則の設定方法

鉄筋とコンクリートの付着の表現は、ボンドリンク要素や板ボンド要素を鉄筋とコンクリートの境界面に介在させる方法がある。付着要素は、図-8に示すように最大付着強度(τ_{max})と付着剛性(D_s)で構成されている。従って、鉄筋の腐食程度を変数として τ_{max} と D_s を求めれば、付着構成則を得ることができる。また、FEM解析では、図-9のように鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのひびわれ発生はないものとし、最大付着応力及び付着剛性を変化させることで表現した。

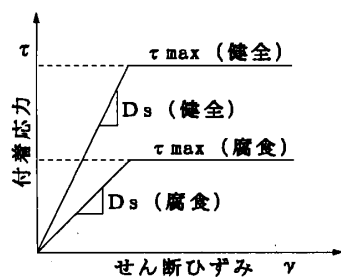


図-8 付着要素の構成則

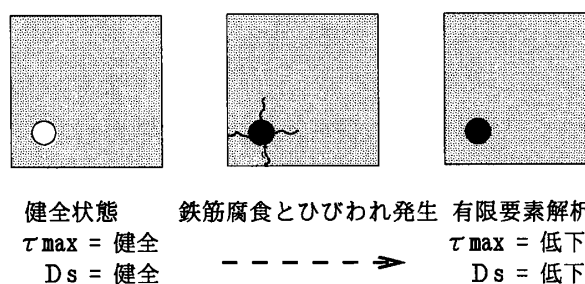


図-9 FEM解析における腐食鉄筋の付着の表現方法

(2) 引き抜き付着実験及び腐食鉄筋の力学的性能の算出式

図-10に引き抜き付着試験方法を示す。鉄筋腐食による付着特性の変化を用いてRC構造部材の有限要素解析を行う観点から、付着試験を図-11に示すように有限要素法によって逆解析し、最適な最大付着強度(τ_{max})と付着剛性(D_s)を求めることにした。図-12は、実験から得られた τ_{max} と D_s を用いて解析した結果であるが、 τ_{max} はほぼ実験と一致するが D_s は解析値が大きい。これは、実験の $\tau-\gamma$ 関係はマクロ的な平均値であり、解析では鉄筋の節によるひびわれを表現できなかったためであると考えられる。実験の $\tau-\gamma$ 曲線に合うように D_s を変化させ解析した結果、鉄筋の腐食減量率と τ_{max} 及び D_s は図-13及び図-14に示すように高い相関関係があり、腐食したRC梁の有限要素解析の際に必要な τ_{max} 及び D_s は、重量減少率を測定すれば表-2を用いて算出することができる。

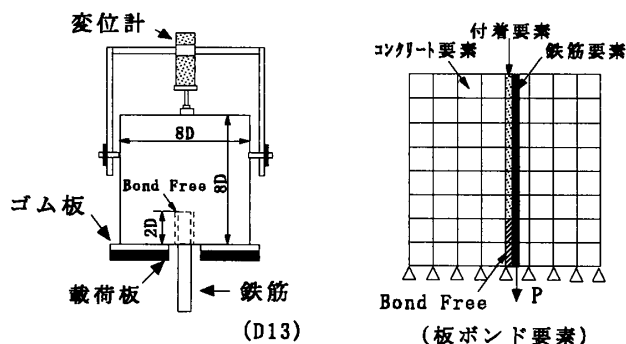


図-10 付着試験方法

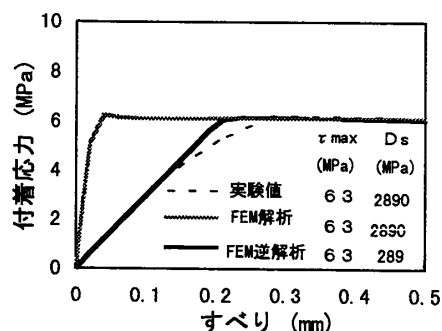


図-11 有限要素分割図

図-12 付着応力-すべり曲線(FEM解析)

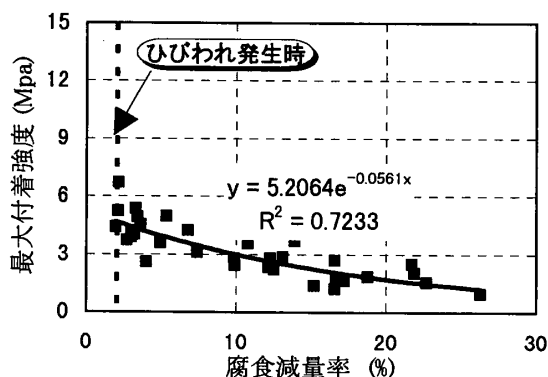


図-13 腐食減量率と最大付着強度(τ max)との関係

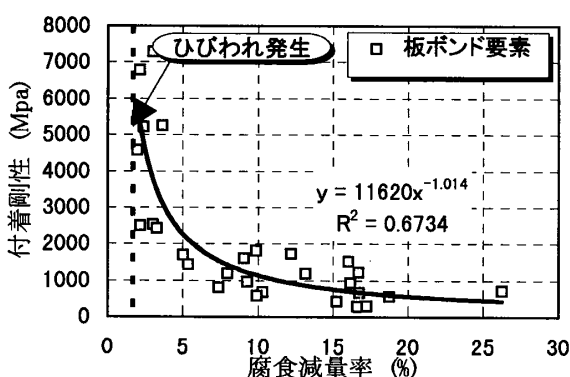


図-14 腐食減量率と付着剛性(Ds)との関係

表-2 鉄筋の腐食減量率を用いた付着要素の算定式

腐食減量率	最大付着強度 (τ max)	付着剛性 (Ds)	
		ボンドリンク要素	板ボンド要素
$\Delta W < \Delta W_c$	$\tau_{max} = 0.0334 \sigma_s - 1.93$	$Ds = 1.43 \sigma_s - 11.08$	$Ds = 1.63 \sigma_s - 159.7$
$\Delta W \geq \Delta W_c$	$\tau_{max} = 5.2064e^{-1.1561\Delta W}$	$Ds = 1117 \Delta W^{-1.114}$	$Ds = 11620 \Delta W^{-1.114}$

ここで、 σ_s : コンクリート強度、 ΔW : 腐食減量率、 ΔW_c : ひびわれ発生時の腐食減量率

2.3 コンクリートの構成則

鉄筋腐食によるコンクリートの力学的性能は変化しないこととし、コンクリート要素の構成則は、載荷実験時のコンクリートの圧縮強度試験から得られた1軸応力-ひずみ関係を図-15のようにモデル化して用いる。圧縮側は軟化を考慮した2直線モデルとした。

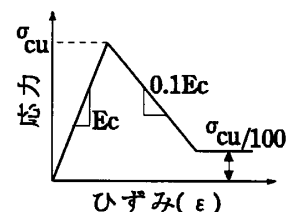


図-15 コンクリートの構成則

3. 鉄筋の腐食したRC梁の有限要素解析

3.1 解析試験体の形状及び解析概要

解析試験体は、図-16に示すように鉄筋の腐食程度が異なるRC単筋梁（電食による鉄筋腐食）と複筋梁（塩分による腐食）であり、支持点等の対称性を考慮して図-17に示す要素分割で梁の半分を解析対象とした。解析方法は材料の非線形性を考慮した2次元平面応力弾塑性解析とし、RC単筋梁は荷重増分法をRC複筋梁は変位増分法を用いて解析を行った。

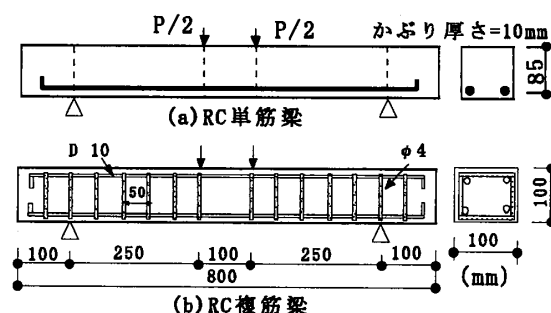


図-16 試験体の形状

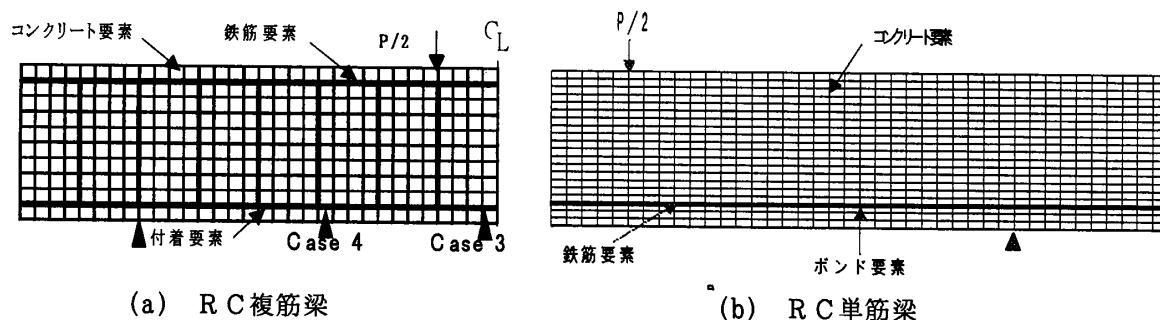


図-17 有限要素分割図

3.2 材料要素の構成則

- (1)コンクリート要素：等方性材料で4節点アイソパラメトリック平面応力要素を用いた。
- (2)鉄筋要素：鉄筋は主筋及びあばら筋をトラス要素で表現し、その物性はRC単筋梁の場合は電食による構成則をRC複筋梁の場合は塩分腐食による構成則を表-1を用いて算出した。
- (3)鉄筋とコンクリートの付着要素：付着要素は4節点アイソパラメトリック板ボンド要素を用いた。また、その物性は腐食重量減少率から表-2の算定式を用いて算出する。

3.3 解析結果

図-18は、RC単筋梁の荷重試験結果とFEM解析の結果の荷重-たわみ関係を比較したものであるが、解析結果は、鉄筋腐食によるRC梁の耐力と剛性の低下をよく表現している。また、図-19は、RC複筋梁の場合であるが、鉄筋が腐食したRC梁の荷重-たわみ関係の解析結果は、荷重実験結果とよい一致を示していることがわかる。従って、2項で求めた腐食重量減少率を変数とする鉄筋要素と付着要素の材料物性の算定式をから得られた鉄筋と付着の材料物性を入力することによって鉄筋の腐食したRC梁の耐力性能を評価できると考えられる。また、図-20はひびわれ状況である。

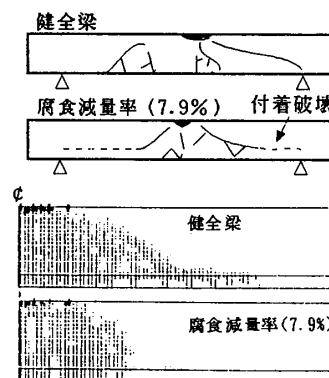
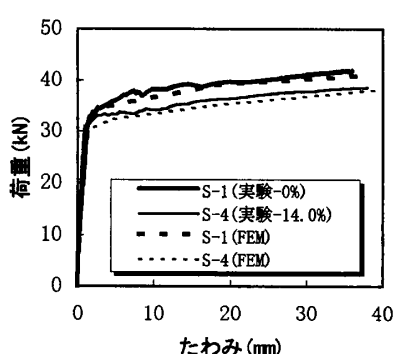
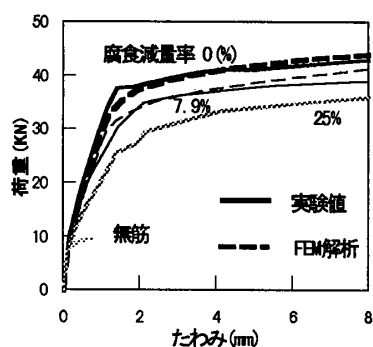


図-18 荷重-たわみ関係(単筋梁)

図-19 荷重-たわみ関係(複筋梁)

図-20 ひびわれ状況

3.4 材料要素のパラメータ解析

図-21は腐食減量率25%の場合、FEM解析による荷重-たわみ関係を示したものである。鉄筋の材料定数を変化させた結果、鉄筋が腐食したRC梁の耐力は鉄筋の降伏点に大きく影響を受けていて、弾性係数の変化は剛性に影響を及ぼすことがわかった。図-22に示すように最大付着強度及び付着剛性の低下は腐食された梁の耐力に鉄筋の降伏点及び弾性係数の場合ほど影響を与えなかったが、これは鉄筋の定着破壊が生じず、鉄筋のすべりがあまり生じなかったためであると考えられる。従って、鉄筋が腐食したRC単筋梁の耐力低下の原因は、主に鉄筋の腐食による鉄筋の断面

表-3 局部腐食による影響に関するケーススタディ

	腐食状態	鉄筋降伏点(σ_y)
Case 1	健全梁	3500 kgf/cm ²
Case 2	全体区間で14%腐食	2530 kgf/cm ²
Case 3	等曲げ区間での局部腐食	350 kgf/cm ²
Case 4	せん断区間での局部腐食	350 kgf/cm ²

欠損に起因する鉄筋の降伏点の低下であることがわかった。また、剛性の低下は鉄筋の弾性係数、最大付着強度及び付着剛性の変化がその原因であることがわかった。また、図-23は引張主筋の局部腐食の発生位置がRC構造部材の構造性能に及ぼす影響をケーススタディしたものである。等曲げ区間で局部腐食が生じた試験体は、せん断区間で局部腐食が生じた試験体より変形能力が小さい脆性破壊を示すことがわかった。また、全体的に14%腐食した試験体より局部的に腐食した試験体の耐力及び靱性が乏しいことから、モーメントが大きい部分で局部腐食が発生する場合、腐食による構造部材の耐力及び靱性が著しく低下することに注意する必要があると考えられます。

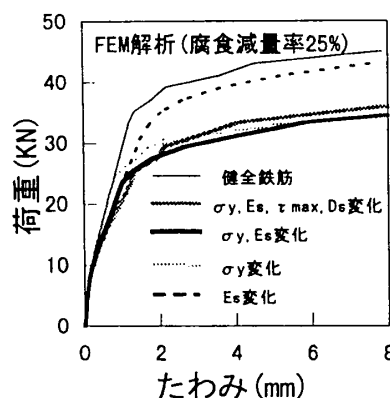


図-21 鉄筋要素の影響

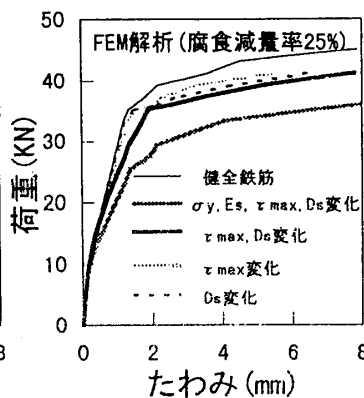


図-22 付着要素の影響

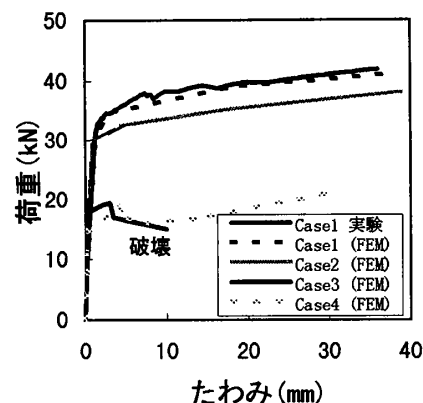


図-23 局部腐食の影響

4. まとめ

- (1) 健全鉄筋と腐食鉄筋の力学的性能比から腐食形態別（全面均一腐食、孔食）に鉄筋の力学的性能の低減係数を求め、腐食減量率から鉄筋の力学的性能を計算する算定式が得られた。
- (2) 鉄筋の腐食減量率から付着要素の最大付着強度及び付着剛性を計算する算定式が得られた。
- (3) 鉄筋及び付着要素の材料物性を腐食重量減少率を変数とする算定式から求め、鉄筋の腐食したRC梁のFEM解析を行った結果、載荷実験結果とよく一致し、算定式の妥当性が検証された。
- (4) 鉄筋が腐食したRC単筋梁の耐力低下の支配的な原因は、見かけ上の鉄筋の降伏点の低下であり、剛性の低下は腐食鉄筋の見かけ上の弾性係数及び最大付着強度、付着剛性がその原因である。
- (5) RC構造部材においてモーメントが大きい部分で鉄筋の局部腐食が発生する場合、鉄筋腐食による構造部材の耐力及び靱性が著しく低下することに注意する必要がある。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金一般研究(A)（課題番号：06402045、代表者：友澤史紀東京大学教授）の一部として行ったものであり、解析では(株)Total Information Serviceの金刀督純氏のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1]橘吉宏：鉄筋腐食によって損傷を受けたRC梁の挙動に関する考察、土木学会論文集、第402号、pp105-114、1989.2
- [2]Kiyoshi Okada, Kazuo Kobayashi, and Toyoaki Miyagawa(1988) Influence of longitudinal cracking due to reinforcement corrosion on characteristics of reinforced concrete members, ACI structural journal, pp 134-140.
- [3]李翰承他：鉄筋腐食が力学的性能の低下に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告書, Vol 17 No.1, pp877-882, 1995
- [4]鈴木紀雄：RC構造の非線形FEM解析のためのガイドライン(2), コンクリート工学, Vol. 31, No.9, pp79, 1993.9
- [5]李翰承他：鉄筋腐食が鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、pp534-539, 1995
- [6]李翰承他：鉄筋腐食がRC単筋梁の耐力性能低下に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、pp105-114、1995
- [7]李翰承、友澤史紀、野口貴文：塩害による鉄筋腐食がRC梁の耐力性能低下に及ぼす影響、コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム、pp87-92、1996.10