

鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート 部材の曲げ性状に与える影響

大屋戸 理明¹・金久保 利之²・山本 泰彦³・佐藤 勉⁴

¹正会員 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:oyado@rtri.or.jp

²正会員 筑波大学助教授 システム情報工学研究科(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:kanakubo@kz.tsukuba.ac.jp

³正会員 筑波大学教授 システム情報工学研究科(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:yamamoto@kz.tsukuba.ac.jp

⁴正会員 (財)鉄道総合技術研究所 耐震構造(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:ben@rtri.or.jp

本論文では、コンクリート構造物を長期使用する際の安全性の判断に資することを目的とし、腐食に伴う鉄筋断面の減少と部材曲げ性状の関係について、部材試験と鉄筋の断面積分布の計測結果をもとに検討した。部材試験では、電食試験体と暴露試験体あわせて13体の試験結果を用い、鉄筋の質量減少率と耐力の関係を検討した。その結果、質量減少率以上に鉄筋の引張強度および終局耐力が減少する場合があります。より正確な推定のためには鉄筋の断面積分布を把握する必要があることを示した。鉄筋の断面積分布の計測では、3Dスキャナによる断面積分布の計測結果と引張試験結果との関係を分析した。これにより、断面積分布の不均一性が鉄筋および部材の降伏近傍の挙動に影響を与えることを明らかにした。

Key Words : corrosion, bending, static loading, percentage weight loss, ultimate strength

1. はじめに

コンクリート構造物を長期使用する際、多くは材料劣化が不可避であるが、使用する限りはいかなる場合でも耐力等の力学性能の確保が必須となる。長期使用したコンクリート構造物の取り替えや補修・補強の判断に資することを主な目的として、劣化による力学性能の低下、特に鉄筋の腐食に伴う部材耐力の低下の程度を把握する試みがされている。

鉄筋が腐食した部材の耐力評価には、腐食後の鉄筋の断面積を劣化程度の指標として用いるのが本来適切であるが、鉄筋の断面積自体を測ることが困難であったため、別の指標により腐食程度を評価する方法が採られていた。腐食程度と部材耐力の関する研究は1980年代はじめごろから見られ、当初の研究^{1),2)}では、コンクリート表面のひび割れ幅や本数を腐食程度の指標として用いる試みが積極的に行われていた。しかし、ひび割れの計測は実構造物でも実施可能であり有用であるものの、その測定値

は腐食程度と必ずしも対応しない。この観点から当初の研究²⁾においても、あわせて腐食量と耐力との比較が試みられていたが、その評価については限定的なものにとどまっていた。

文献³⁾には、クエン酸二アンモニウム水溶液等の薬剤で除錆することにより腐食後の残存質量を計測し、腐食に伴う質量減少分の腐食前質量に対する割合(質量減少率、式(1))を腐食程度の指標として用い、部材耐力や材料強度との関係を評価する試みがまとめられている。

$$C = \Delta w / w \quad (1)$$

ここに、 C : 質量減少率、 Δw : 腐食に伴う質量減少分、 w : 腐食前の質量

質量減少率は、測定区間における平均的な断面減少の程度を示す。これにより、たとえば部材の終局耐力は以下のように評価することができる。

$$P_{uc}/P_{um} = 1 - k \cdot C \quad (2)$$

ここに、 P_{uc} ：腐食後の部材終局耐力、 P_{um} ：腐食前の部材終局耐力、 k ：質量減少率 C に比例した低下の程度を表す係数

この手法は、腐食程度と各指標との関係を簡潔に表現できる手法として現時点で広く認められていると思われ、例えば文献⁴⁾などで用いられているほか、筆者らも過去にこの手法で検討^{5),6),7)}を行った。しかし、既往の研究成果は後述するように k の値に差異が見られ、考え方は統一されていない。本論文では、新しい手法により鉄筋の断面積の測定を試み、鉄筋の質量減少率と材料強度および部材耐力との関係について、より定量的に評価することを目的とする。

2. 静的曲げ載荷試験

(1) 試験体の概要

a) 試験体の劣化手法と諸元

本論文で用いる試験体の一覧を表-1に、形状寸法と配筋を図-1に示す。試験体は全て同じ形状の曲げ破壊型鉄筋コンクリート部材であり、暴露試験体

表-1 試験体の一覧

促進劣化方法	試験体名			
	腐食なし ⁵⁾	暴露 20 ヶ月 ⁵⁾	暴露 12 年 ^{6),7)}	
暴露	S-0N	SD-1N, SD-2N, SD-3N, SD-4S	M1, M2, M3	
	腐食なし(0)	腐食小(0.35)	腐食中(0.84)	腐食大(1.33)
電食	C1	C2	C3	C4, C5

試験体 M1, M2, M3 は文献^{6),7)}ではそれぞれ C, B, A と表記。() 内は電食時鉄筋単位表面積あたり積算電流量($A \cdot h/cm^2$)。

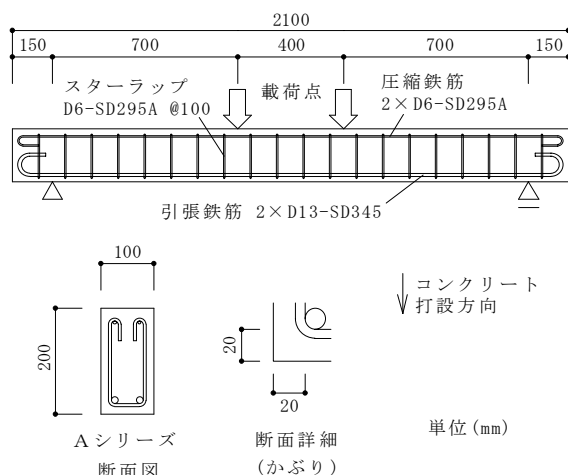


図-1 試験体形状寸法および配筋

(S,Mシリーズ)と電食試験体(Cシリーズ)の2種類である。コンクリートの配合を表-2に示す。

暴露試験体は8体で、筆者らが過去に行った研究に用いたものである^{5),6),7)}。暴露方法を図-2に示す。これらの試験体には、載荷によりあらかじめ曲げひび割れを導入し、別の試験体（同時に作成され、文献⁸⁾で用いた疲労試験用のもの）と組み合わせて鋼棒で締め付け、曲げひび割れの開口を保持した。自然暴露は都市近郊部で行い、暴露当初17ヶ月は3%塩水を1日3回（雨天時を除く）撒くことで、コンクリート中に塩分を大量に浸透させ、鉄筋に腐食を生じさせた。暴露20ヶ月時におけるコンクリート中の全塩化物イオン量は、最も少ない位置（撒水面からの深さ50mmの位置）でおよそ $5kg/m^3$ であった。暴露試験体8体は同時に作成されており、Sシリーズは20ヶ月、Mシリーズは12年と暴露期間が異なる。なお、これらの試験体には、コンクリートの練り混ぜ水にNaClを混入したものが含まれているが、コンクリート強度や弾性係数の他には力学的な影響は小さいと考えられるので、以降の考察ではこれらを特に区別しない。

電食試験体は、上記暴露試験体の質量減少率の範囲（0.02～0.10程度）を補完することと、既往の多くの研究結果³⁾との比較を目的として、別の試験体⁹⁾と同時に作成した。試験体数は5体で、引張鉄筋の質量減少率を試験体の変動因子とした。電食は、電食槽内への試験体設置方法および回路構成を既往の研究と同じ方法（図-3⁹⁾）とし、暴露試験体との整合を目的として、引張鉄筋だけでなく全ての鉄筋が

表-2 コンクリートの配合*

シリーズ	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)					AE 減水剤 (C×%)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	NaCl	
S,M	50	165	245	932	953	10**	
C	45	164	252	833	1049	10	0.25

* 設計基準強度=24N/mm²、スランプ=8±2.5cm、空気量=4±1%、水セメント比=65%

**一部の試験体は NaCl を混入していない。

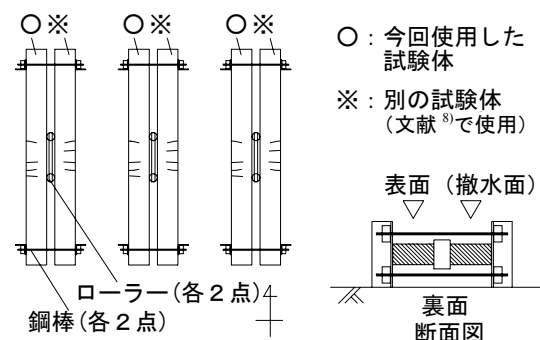


図-2 試験体暴露方法

腐食するようにした。電食で目標とする腐食程度は、実構造物の鉄筋腐食の調査結果¹⁰⁾を参考に、腐食程度の大きい場合の質量減少率を50%程度とし、積算電流量により制御した。

b) 載荷・計測方法および材料の力学特性

載荷試験では、図-1に示す位置を載荷点・支承位置とした。計測項目は荷重、変位その他、一部の試験体では引張鉄筋に沿うひび割れの幅および引張鉄筋のひずみを計測した。載荷は暴露試験体Mシリーズはインストロン型アクチュエータによる変位制御で、それ以外は荷重制御で行った。

コンクリートの圧縮強度は、試験体SシリーズとCシリーズについては試験体と同時に作成した円柱供試体により求め(表-3)、暴露期間の長い試験体Mシリーズについては、各試験体から採取した小径コア(φ50×100mm)の試験値を補正¹¹⁾して求めた(表-4)。鉄筋の力学特性は、健全時(試験体Cシリーズ)については表-5に示す値であった。劣化後については、載荷試験終了後に各試験体から引張鉄筋を採取し、JCI-SC1に準拠した方法による質量減

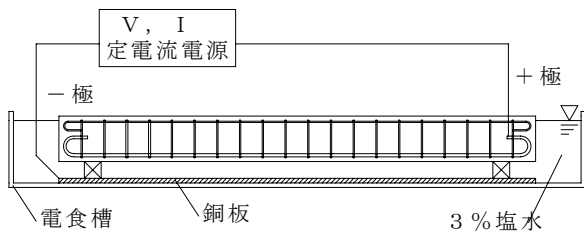


図-3 電食による促進劣化方法

表-3 コンクリート圧縮強度
(S・Cシリーズ試験時)

試験体名	S-0N	SD-1N,2N,3N		SD-4S
圧縮強度	21.7	23.2		29.7
試験体名	C1	C2	C3	C4,C5
圧縮強度	29.8	30.8	42.3	34.3

単位：N/mm²

表-4 コンクリート力学特性⁶⁾ (Mシリーズ試験時)

試験体	静弾性係数	圧縮強度	β^*	補正強度*
M3	19700	28.5	77.2	27.6
M2	31800	42.4	45.1	40.2
M1	31800	38.6	51.2	36.8

*コンクリート強度の供試体寸法による補正式¹¹⁾

$$\sigma / \sigma_0 = (V / V_0)^{1/(\beta-1)}$$

ここに、 σ 、 σ_0 : 補正後、補正前の圧縮強度、 V 、 V_0 : 補正後、補正前の供試体体積、 β : 材料定数で、圧縮強度を用いて算出
単位：N/mm²

少率の測定と、引張試験を行った。なお、質量減少率の算出式(式(1))における腐食前質量 w の値として、電食試験体Cシリーズではあらかじめ測定した腐食前の鉄筋質量を用い、それ以外の暴露試験体S,Mシリーズでは新たに入手した健全な同じ種類の鉄筋質量を用いた。

(2) 試験結果と考察

a) ひび割れ状況

載荷試験におけるひび割れ状況の例を図-4に示す。電食試験体C2の載荷によるひび割れは、健全な試験体C1より少ない。暴露試験体M2では、部材降伏付近までひび割れがほとんど確認できなかった。

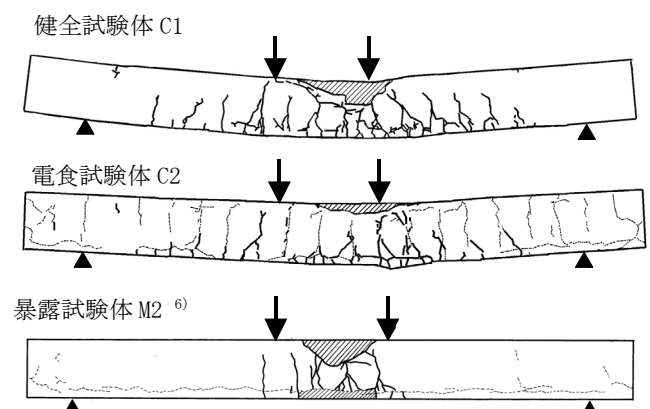
ここで、電食試験体C2のひび割れ状況によると、引張鉄筋下側のかぶりコンクリート部分の曲げひび割れは、健全試験体C1と比べて必ずしも少ないわけではなく、曲げひび割れが載荷以前から存在していた腐食ひび割れにつながっていると見られる。その結果として、部材中央付近に載荷による新たな曲げひび割れの発生が少なくなったと推察される。一方の暴露試験体M2の場合は、電食試験体C2と様相が異なり、載荷によるひび割れがかなり少ない。特にせん断スパンにはほとんど発生しておらず、軸方向鉄筋下側のかぶりコンクリートのひび割れも少ない。これは、引張鉄筋とコンクリートの付着が損な

表-5 鉄筋の力学特性(試験体Cシリーズ・健全)

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
D13*	366	195	433	26.0
D6*	355**	193	417	26.3

* D13は引張鉄筋、D6はスターラップおよび圧縮鉄筋

** 0.2%オフセット耐力



実線：載荷によるひび割れ
破線：載荷以前に確認された腐食ひび割れ
斜線部：載荷によるコンクリートのはく落箇所

図-4 載荷試験後のひび割れ状況の例

われていることが一因と考えられる．同じ暴露試験体M3の鉄筋ひずみの測定結果を図-5⁷⁾に示す．荷重 $P=22\text{kN}$ 付近を境に，荷重の増加に伴ってひずみ ε_{sb} の値が減少しており， ε_{sa} および ε_{sc} の勾配も変化している．これは，付着が損なわれているとする上記の推測と整合する．

b) 荷重変位関係と質量減少率

荷重 P と部材中央部のたわみ（変位 δ ）の関係を図-6に示す（暴露試験体は文献^{6),7)}の再掲）．電食試験体C4とC5の2体を除く全ての試験体において，引張鉄筋は降伏後に破断せずコンクリートの圧壊により破壊した．一方，電食試験体C4とC5の2体は，引張鉄筋の破断により破壊した．このうち，電食試験体C5はひび割れの発生とほぼ同時に破壊に至る挙動（低鉄筋比はりの挙動）を示したが，C4は部材降伏時点以上の荷重を保ち，変形が進んだ段階で引張鉄筋の破断により破壊した．引張鉄筋の破断は

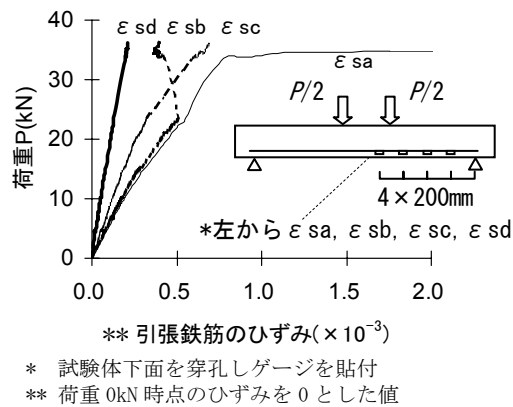


図-5 引張鉄筋のひずみの測定結果⁷⁾（試験体 M3）

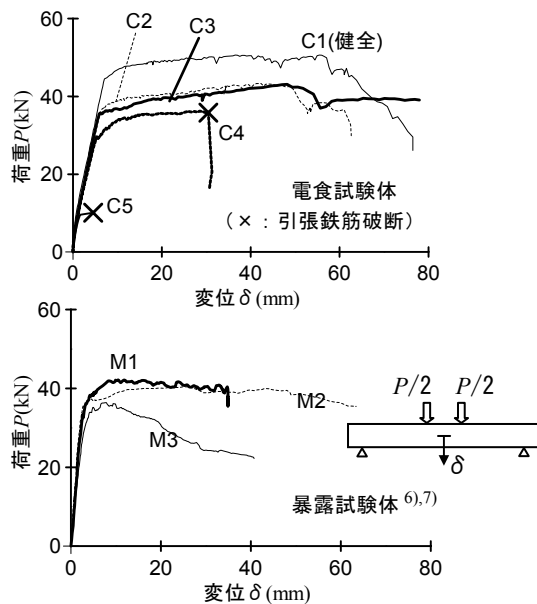


図-6 荷重-変位関係

予兆もなく突然生じ危険なため，何らかの方法でこの現象の発生を予測する必要がある．なお，暴露試験体M3は，部材降伏以降の変位増加に伴い，ただちに荷重が低下に転じ韌性に乏しい挙動を示している．この試験体は図-7に示すように，部材降伏以後に顕著な側面コンクリートのはく落が生じており，これが影響を与えたものと思われる．

試験体の耐力と引張鉄筋の質量減少率との関係を考察する．前節で述べたように，試験体により鉄筋とコンクリートとの付着の状態が異なっているとも考えられるが，これによる耐力への影響の考慮は不要である．これは，本試験体のような単純はり部材では，コンクリートが圧縮力を負担し，部材端部における引張鉄筋の定着が損なわれない場合，付着が損なわれても等曲げ区間のひび割れ断面における力の釣り合い状態は変化しないためである．なお，付着が失われることにより，平面保持の仮定が成立しなくなる可能性がある．これにより，せん断スパンにおける耐荷機構が変化し，部材の剛性は変化するが，曲げ耐力には影響がない．

部材の降伏耐力は，引張鉄筋の降伏によるか，または荷重-変位関係の接線勾配の変化により定めるのが一般的である．しかし，前者の方法で降伏耐力を求めることは，腐食した鉄筋のひずみの計測が難しく，また腐食鉄筋は降伏点が明確でない場合がある¹²⁾ため容易でない．また後者の方法として，たとえば荷重-変位関係を 図-8(a) のように複数の直線

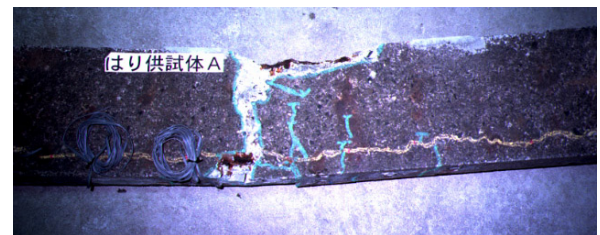
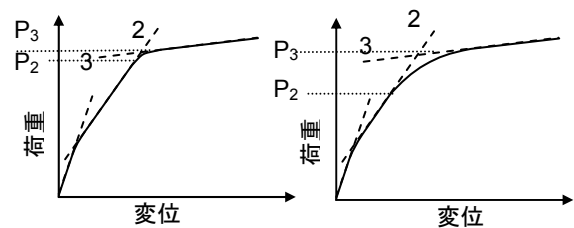


図-7 荷重後の試験体中央部外観（暴露試験体M3）



(a) 通常の場合

(b) 鉄筋が腐食した場合

2,3: 近似直線の番号

P_2 , P_3 : 直線2または3から離れる時点の荷重

で近似し、おおむね P_3 に近い荷重として定義する方法がある。健全な部材の場合、おおむね弾性を保っている荷重 P_2 と、変位が著しく進展を始める荷重 P_3 は通常近い値となる。しかし、鉄筋が腐食した部材では、たとえば試験体C4やM3のように P_2 と P_3 が離れたり（図-8(b)）、試験体M3のように P_3 が最大荷重となる場合がある。従って、健全な部材と腐食した部材とでは降伏耐力の意味が異なることになる。

以上により本論文では、鉄筋が腐食した部材の降伏を検討する場合、 P_2 から P_3 に至る経路を追跡することを目標として4章で検討し、本章では主に部材終局耐力（載荷試験で確認された最大荷重）および鉄筋引張強度について検討する。なお、本論文では、図-8における P_2 から P_3 に至る領域全体を降伏と称する。

載荷試験結果は、破壊時にはいずれも引張鉄筋が降伏強度以上の引張応力を負担していると考えられるので、引張鉄筋の質量減少率による終局強度の評価が可能と考え、これを検証した。各試験体の終局耐力 P_u および各試験体から採取した鉄筋の質量減少率 C を表-6に、腐食試験体の終局耐力 P_{uc} と健全試験体の終局耐力 P_{un} との比（終局耐力比）を質量減少率 C と対比して図-9に示す。表-6では、試験体の破壊モードを併記した。なお、暴露試験体Mシリーズの質量減少率はせん断スパン（約700mm）から採取した2本の引張鉄筋について算出しており、電食試験体C2～C5については引張鉄筋全体について算出している。いずれも部位による腐食程度の相違は外

表-6 鉄筋の質量減少率と試験体の終局耐力

試験体名	終局耐力 P_u		質量減少率 C		*mode
	(kN)	耐力比	平均	各試験片の値	
C1	50.6	1.00	0.00	-	1
C2	43.0	0.85	0.21	0.20, 0.22	1
C3	42.7	0.84	0.10	0.10, 0.11	1
C4	36.2	0.72	0.24	0.22, 0.26	3
C5	8.7	0.17	0.44	0.37, 0.50	4
M1 ^(6),7)	36.4	0.72	0.14	0.13, 0.14, 0.16	2
M2 ^(6),7)	40.5	0.80	0.13	0.13, 0.13, 0.12, 0.15	1
M3 ^(6),7)	42.2	0.83	0.11	0.10, 0.11, 0.12, 0.12	2
S-0N ⁽⁵⁾	52.5	1.00	0.00	-	1
SD-1N ⁽⁵⁾	47.1	0.90	0.02	0.00, 0.03	1
SD-2N ⁽⁵⁾	45.6	0.87	0.04	0.03, 0.04	1
SD-3N ⁽⁵⁾	48.1	0.92	0.01	0.00, 0.03	1
SD-4N ⁽⁵⁾	49.5	0.94	0.02	0.02, 0.02	1

*mode: 破壊モード

1: 引張鉄筋降伏後にコンクリート圧壊

2: 同上（降伏時に最大荷重）

3: 引張鉄筋の破断

4: 同上（低鉄筋比はりの挙動）

観からは明確に確認できなかったため、平均値を試験体の代表値として取り扱う。耐力比の算出の際、同じ条件で製作された健全試験体と比較するため、暴露試験体は試験体S-0Nを健全試験体とし、電食試験体は試験体C1を健全試験体として扱っている。

図中の式は回帰直線を示す（式(2)参照）。全点に対する回帰直線の k の値は1.64であり、参考のために低鉄筋比の挙動となったC5を除いた場合でも1.35である。いずれも1を超過しており、質量減少率以上に部材終局耐力が低下することが確認できる。暴露試験体のみを対象とした回帰直線（図中○のみ回帰対象、点線）の k は1.97であり、全数を対象とした k よりも大きい。

図-9 に示した部材耐力と質量減少率の関係を、既往の研究成果^(13),14)と比較する（図-10）。なお、文献⁽⁴⁾については、質量減少率を鉄筋径から算出しており、他と異なるため除外した。また、本研究のうち低鉄筋比はりの挙動を示したC5試験体は、質量減少率の値が他と著しく異なるため除外した。この場合の質量減少率の範囲は0～0.3程度であり、各点は質量減少率の如何に関わらず、概ね直線上に位置している。文献⁽¹³⁾の結果は本研究と同様の傾向を示しているが、文献⁽¹⁴⁾の結果は他より耐力低下の程度が小さく、質量減少率 C の小さい場合は耐力比

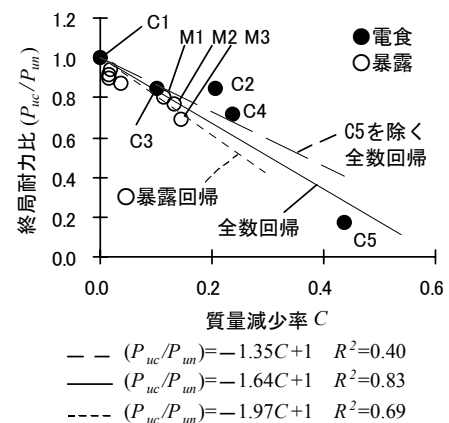


図-9 終局耐力比と質量減少率

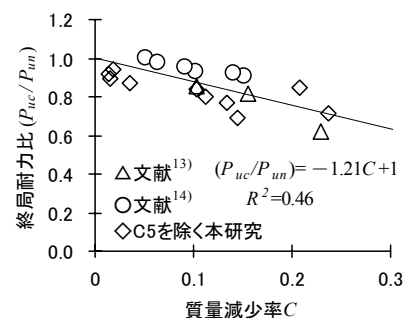


図-10 終局耐力比と質量減少率
（既往の研究との比較）

が1を超過しているものもある．全数に対する回帰直線の k は1.21となった．

同様に，載荷試験後に破砕して採取した腐食鉄筋に対し，質量減少率と引張強度比（同一種類の健全鉄筋の引張強度 f_{sun} に対する，腐食した鉄筋の引張強度 f_{suc} の割合）との関係を調べた．本試験体と同じ条件で自然暴露⁸⁾もしくは電食⁹⁾させた試験体から採取した鉄筋の試験結果と合わせて図-11に示す．式(2)の (P_{uc}/P_{un}) を (f_{suc}/f_{sun}) と置き換えたときの k の値は1.35と，部材終局耐力のそれと同様に1を上回っており，引張強度は質量減少率以上に低下することが確認できる．質量減少率の大きい範囲の引張強度の低下が著しいが，データが少なくその評価は今後の課題である．参考のため，仮に C の範囲を0.35未満に限定した場合の回帰直線を併せて示した．決定係数は小さくなるが， k の値はやはり1を上回る．

各指標の k をまとめて表-7に示す．暴露試験体から採取した鉄筋の k は電食の場合より多少大きいが，有意な差とは言いがたい．部材に対する k が鉄筋に対する k より大きいことについては，圧縮側のコンクリートの破壊によって降伏以後に荷重が増加しなくなったことが一因と考えられ，この傾向は電食試験体よりも暴露試験体で顕著である（図-6,7参照）．この検討については，圧縮側のコンクリートおよび鉄筋単体の降伏近傍の挙動を精査する必要がある．表には，既往の研究から k の大きい例として文献³⁾の値を，小さい例として文献¹⁰⁾の値を併記した．文献

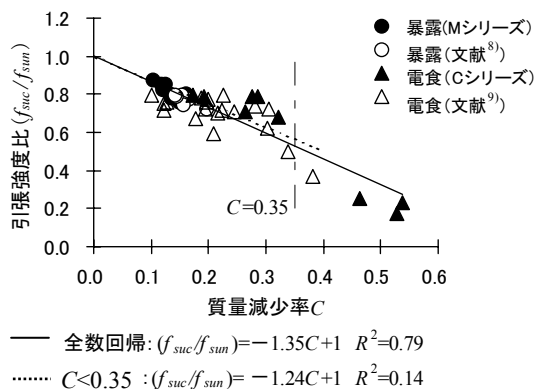


図-11 引張強度比と質量減少率

表-7 質量減少率 C と k の関係

	暴露	電食	全数	文献 ³⁾	文献 ¹⁰⁾
鉄筋	1.41	1.34	1.35	2.17	1.17
部材	1.97	1.59	1.64	—	—

文献^{3), 10)}は降伏強度に対する値

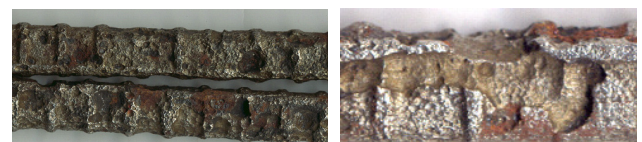
の値は降伏強度に対する値であり直接比較は出来ないが，本研究の鉄筋は両者の間に位置していると見られる．鉄筋に対する k の値が研究により異なるのは，鉄筋の径や孔食・欠損の大きさが異なっていることが一因と考えられる．いずれにしても k の値は1を超過しており，質量減少率以上に強度や耐力が低下することについては一致しているものと見られる．

一方，既往の研究¹⁵⁾では本試験結果と異なり，劣化した鉄筋の強度は質量減少率以上に低下しない($k=1$)とされている．このように，鉄筋に対する k の値が相違する原因について，以下に考察する．

文献¹⁵⁾ではこの違いは，太径(D16)の鉄筋は孔食による応力集中の影響が小さいためとされているが，今回の対象(D13)は文献¹⁵⁾の径に近く，太い鉄筋でも孔食が大きければその影響は無視できないと考えられる．ここでは別の要因を検討する．

この違いの要因として，質量減少率の計測手法の違いが挙げられる．今回の試験範囲のように腐食程度が著しい鉄筋を除錆する際は，薬剤に長時間漬せきした後ワイヤブラシ等を用いて物理的に腐食生成物を取り除く作業を要する．特に今回の暴露試験体では著しい孔食が生じており，その内部を一つひとつピックで掻き出している．文献¹⁵⁾では除錆のためにサンドブラストを行っており，この除錆方法の違いにより鉄筋形状および断面積の違いを生じる可能性がある．また，本研究では試験片全体の重量から質量減少率を求めたのに対し，文献¹⁵⁾の引張強度の評価では試験片の破断箇所の近傍128 mmの範囲で質量減少率を測定している．破断箇所近傍で測定した質量減少率は破断部の断面積の欠損率に近づくと考えられるので，文献¹⁵⁾の条件で測定した場合は k は1に近づくと推察される．

また，腐食後の形状そのものが異なることも要因の一つと考えられる．本研究の暴露試験体から取り出した鉄筋の形状を図-12に示す．なお，除錆後時間が経った後に撮影しており，部分的に腐食が発生しているが，形状は除錆直後の状態を保っている．暴露試験体から採取した鉄筋は，塩害のために表面



(a) 暴露試験体から採取した鉄筋

(b) 暴露試験体から採取した鉄筋(拡大)

図-12 腐食鉄筋の形状

が虫食い状に腐食し、局部的な欠損が著しい。このような鉄筋が引張力を受けた場合、局部的な欠損が与える影響は無視できないと考えられる。

以上により、腐食鉄筋の力学特性を推定する場合、腐食量の測定手法および腐食後の鉄筋の形状による影響を考慮する必要があると言える。また、腐食した部材の耐荷特性を検討する場合にも、これを反映する必要がある。

3. 鉄筋の腐食性状の評価

(1) 測定方法

腐食した鉄筋コンクリート部材の耐力を評価する際に鉄筋の力学性状の把握は必要不可欠であるが、特に質量減少率と強度や耐力との関係を検討する場合は引張鉄筋の断面減少の非一様性について知る必要があることを述べた。本章では、腐食に伴う断面積のばらつきを詳細に検討する。

腐食量のばらつきについて、鉄筋のみかけの最小径（任意の方向から測った鉄筋径の最小値）をノギスにより測定した研究例がある^{10),16)}が、鉄筋の形状の違いを取り扱ううえでは、より正確かつ間隔を小さく断面積を計測することが望まれる。このため、本研究では腐食後の鉄筋の形状を非接触レーザー方式による3Dスキャナにより計測した。

3Dスキャナの諸元を表-8に、外観と鉄筋の計測方法の概要を図-13に示す。この装置は、以下の手順で計測対象の表面形状を計測する。まず、ある一定の高さ（ z ）から水平にレーザー光を照射し、対象表面に現れるビームスポットの平面上の位置（ x, y ）を3角測量の原理により計測する。これをターンテーブルを回転させながら円周方向に等間隔で繰り返し、ターンテーブルが一周した後に高さ方向に一定の距離だけレーザー光ユニットを移動させて同じ動作を行う。これを測定エリア全体にわたり繰り返すことで、計測対象の表面形状を取得する。すなわちこの装置は、ターンテーブルの回転と同期した計測手順をとることにより、対象物を全周から計測することができるので、本研究で対象とする鉄筋の断面積および形状を効率よく計測することができる。長さ400mmの鉄筋を高さ1mmきざみで計測する場合、計測時間は20分程度であり、円周方向の計測ピッチは計測時間に影響しない。

なお、図-13のように鉄筋を設置する場合、レーザー光の照射が水平方向に固定されているので、上下の切断面を直接計測出来ない。また、鉄筋下端の

表-8 3Dスキャナの諸元

スキャン方式	スポットビーム三角測量方式
使用レーザー	波長:600~700nm 最大出力:1.0mW 未満 パルス幅:350 μ s パルス周波数:2857Hz
スキャンピッチ	円周方向 0.2~60° 高さ方向 0.2~406.4mm
最大スキャン領域	直径 254mm, 高さ 406.4mm

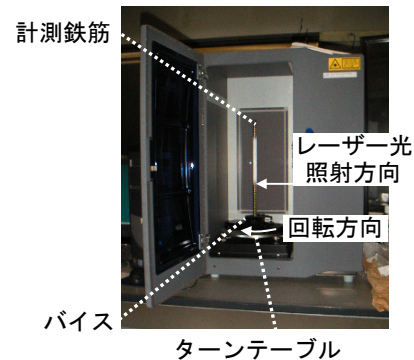


図-13 3Dスキャナの外観と計測方法の概要



図-14 白色塗料塗布状況

バイス（万力）で固定する部分も計測できない。このように装置は1度の計測で対象全体の形状を捉えることはできず、体積を直接求めることには向かない。本研究ではこの装置を、主に鉄筋の形状と断面積の分布を求めることに用いる。

(2) 計測精度

この3Dスキャナはレーザー光の反射を利用するが、測定対象の表面に光沢のある場合等に、計測結果にノイズが生じやすくなる。これを低減しビームスポットをより正確に認識させるため、計測する前に鉄筋の表面に白色塗料を塗布した（図-14）。

また、計測には、鉄筋をターンテーブルの中心線上に設置する必要があるが、意図せず傾けて設置した場合には計測断面が楕円となり、面積が増大する。その概念と丸棒の場合の影響について試算した結果を図-15に示す。傾ける角度 θ は、過大な（ターンテーブルの中心線上に計測対象が存在しない）場合は計測不能となるので、計測できる最大限に傾けた場合を想定し、試験片長さ L と直径 d の関数で与え

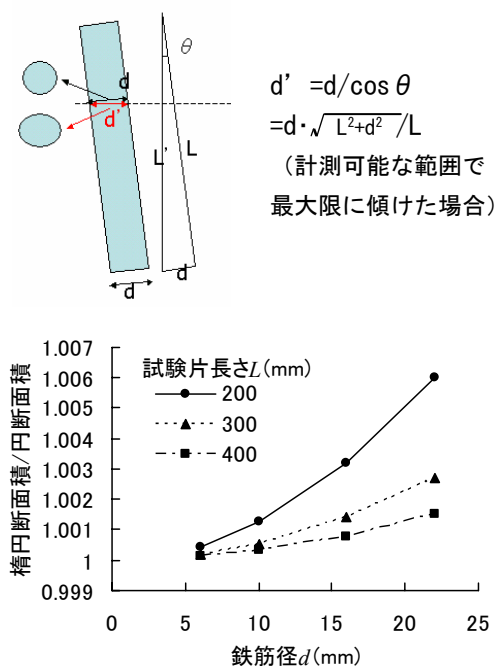


図-15 斜めに鉄筋を設置した場合の影響

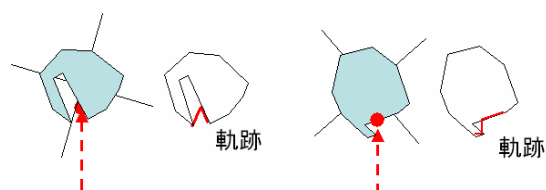


図-16 中心方向以外の孔食・出張りの影響

ている。面積が増大する割合（縦軸）は楕円の長軸により決まり、試験片長さ L が短く鉄筋径 d が大きいほど影響が大きい、通常使用する範囲ではその影響は1%に満たない。

また、表面の凹凸が著しく、特に図-16のように中心方向以外に孔食や出張りがある場合に、レーザー光が内側に入射されずに正確に計測できなくなる。この現象による誤差が実際にどの程度発生するかは、計測対象の鉄筋の表面形状とターンテーブル上の鉄筋の設置状態によって異なる。

計測結果の一例を図-17に示す。3D スキャナにより計測した鉄筋の腹の断面積(b)は 196.4mm^2 であったが、輪切りにしたもの(c)を別の手法（画像処理）で計測した結果は 178.9mm^2 であった。後者を真値とすると、真値は3D スキャナの計測値の0.91倍である。同じ検証を別の鉄筋（D10）に対して行っても、ほぼ同じ結果が得られた。この差については、ノイズ、白色塗料の影響のほか、3D スキャナの

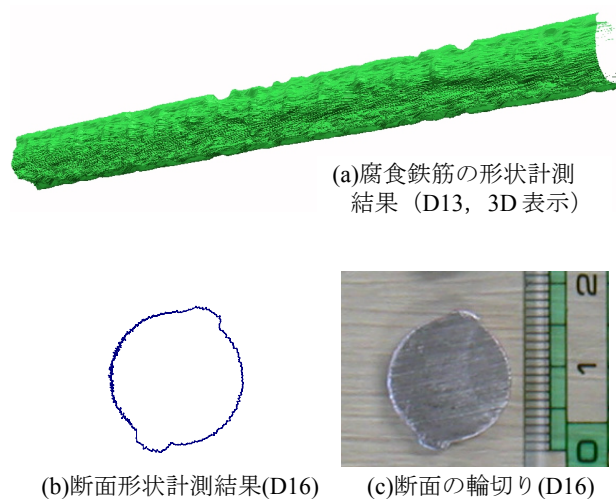


図-17 3D スキャナによる計測結果の例

表-9 計測対象とした鉄筋の概要

No.	対象鉄筋	規格	C, L	備考
1	健全鉄筋	D13	0.70	
2	暴露鉄筋	D13	0.15, 150	暴露試験体 (M2)から採取
3	電食鉄筋	D13	0.12, 360	文献 ⁹⁾ の電食試験体から採取
4		D13	0.40, 360	電食試験体 (C5)から採取
5	実構造物鉄筋	D16	0.39, 250	スラブ下面 (波節*) ¹⁰⁾
6		D10	-270	柱帯筋

C : 質量減少率 L : 計測長(mm) - : データ無し

*波節 : 鉄筋の軸に対して節が斜めの鉄筋

他は竹節 : 鉄筋の軸に対して節が直角の鉄筋

ビームスポットから座標を算出するための内部演算処理の設定（一般的な計測対象の表面状態にあわせて最適化されている）の影響を含む。このように、3D スキャナによる計測結果をそのまま用いることは必ずしも適切ではないが、図-17のとおり形状は正確に捉えているので、補正を加えることで3D スキャナの計測の効率性を活用できると考えられる。なお、以降の検討では、3D スキャナの断面積の計測結果は補正係数0.91を乗じて用いる。

(3) 計測結果

この3Dスキャナにより、本試験体の引張鉄筋における断面積のばらつきを検証した。対象鉄筋を表-9に示す。本試験体から電食鉄筋と暴露鉄筋1本ずつを計測対象とし、文献⁹⁾の電食鉄筋と実構造物から採取した鉄筋¹⁰⁾も対象に加えた。計測間隔は、鉄筋軸方向に1mmとし、円周方向に1°とした。

3D スキャナにより求めた鉄筋断面積の軸方向の

分布を図-18に、実構造物から採取した鉄筋No.5の外観を図-19に示す。鉄筋No.1(健全)は節の部分と腹の部分とが明確に区別でき、節の高さと間隔が規則正しく観察される。公称断面積は腹と節のほぼ中間の断面積に相当し、平均断面積を上回る。暴露試験体から採取した鉄筋No.2は、節と腹の部分とが明瞭に区別でき、図-12からも理解できるとおり、腐食後も節が残っていることが判別できる。一方、電食試験体から採取した鉄筋No.3,4は、暴露試験体から採取した鉄筋No.2と異なり、節の痕跡が希薄である。電食により腐食した場合、鉄筋表面が均等に腐食す

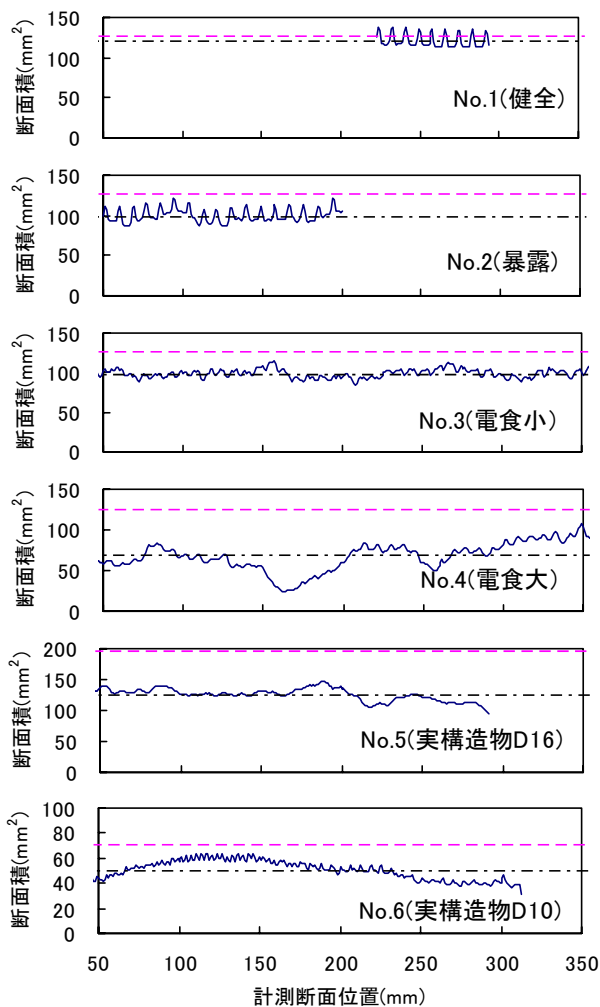
るのではなく、節の部分から先に溶出して形状が平滑化する状況が伺える。実構造物から採取した鉄筋についてみると、竹節である鉄筋No.6は節の痕跡が見られ、この点では電食よりも暴露鉄筋に近い。鉄筋No.5は中性化と塩害の複合要因により腐食した鉄筋である。これは、図-19に示した外観からも分かるように、全長に亘り平均的に腐食しており、鋭い切れ込みという意味での局所的な欠損は小さい。このように、腐食後の鉄筋の形状は、腐食環境によって相当異なることが分かる。

D13鉄筋No.1～No.4の断面積のヒストグラム(計測断面数で基準化したもの)を図-20に示す。鉄筋No.2(暴露)のヒストグラムは山型であり、平均断面積より小さい断面積の部分が多く存在することがわかる。鉄筋No.3(電食)と鉄筋No.2(暴露)は平均断面積がほぼ同じであるが、鉄筋No.3(電食)は鉄筋No.2(暴露)よりも標準偏差が小さく、電食により鉄筋の表面が平滑化される傾向と整合する。ただし、平均断面積が異なる鉄筋No.3と4を比較すると、平均断面積が小さい鉄筋No.4の標準偏差が大きく、腐食程度が大きい場合はより小さい断面積の存在する割合が高くなることがわかる。

質量減少率に相当する指標として平均断面減少率 C_2 (式(3))を考える。

$$C_2 = (A_n - A_c) / A_n \quad (3)$$

ここに、 A_n ：健全鉄筋の平均断面積、 A_c ：腐食鉄筋の平均断面積である。図-20の結果より、腐食に

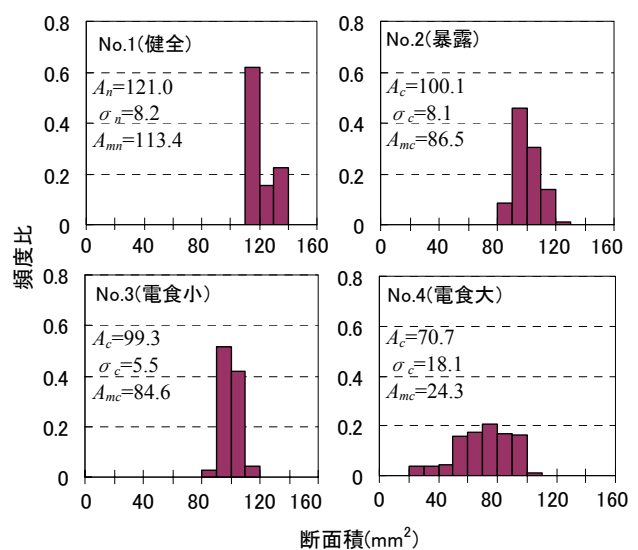


(破線：公称断面積 一点鎖線：平均断面積)

図-18 鉄筋の断面積の軸方向分布



図-19 実構造物から採取した鉄筋 No.5¹⁰⁾の外観



A ：平均断面積、 A_m ：最小断面積、 σ ：標準偏差。
添字の n は健全鉄筋を、 c は腐食鉄筋を示す。

図-20 断面積のヒストグラム

よって最小断面積 A_m が減少した程度を (A_{mc}/A_{mn}) により表す。ここに、 A_{mc} ：腐食鉄筋の最小断面積、 A_{mn} ：健全鉄筋の最小断面積とする。平均断面減少率 C_2 と (A_{mc}/A_{mn}) の関係を図-21に示す。式(2)において (P_{uc}/P_{un}) を (A_{mc}/A_{mn}) に、 C を C_2 に置き替えたときの k は1.76であり、局所的な腐食による断面欠損は、平均的な断面減少に対しておよそ1.8倍だけ進行していることになる。このことは、質量減少率と部材終局耐力（図-9）および鉄筋引張強度（図-11）の关系到大きく影響を与えていると推察される。

なお、図-18および図-20では、電食試験体から採取した鉄筋No.3は形状が平滑化しているように推察されたが、図-21によれば、平均断面積に対する最小断面積の比は暴露試験体から採取した鉄筋No.2とほぼ同じである。すなわち、電食鉄筋では暴露鉄筋と異なり節の痕跡が希薄となり、断面積の標準偏差がやや小さくなるものの、最も細い部分の断面積に着目すると、電食鉄筋と暴露鉄筋は同程度となる場合があることを示している。節が残っていることや、ばらつきの大小、および最も細い部分の断面積がどのように力学性状に影響するかについては、簡単な仮定に基づく解析により次章で検討する。

4. 断面積分布を考慮した強度・耐力の検証

(1) 腐食した鉄筋の力学特性の推定

3D スキャナにより求めた腐食した鉄筋の断面積分布をもとに、鉄筋の力学性状の推定を試みる。

腐食鉄筋の力学性状は、断面積の分布のほか、腐食鉄筋の形状（孔食による鋭い切れ込み状の欠損）などにより影響を受ける可能性がある。ここではこれらの要因のうち、静的な挙動に対しては断面積の分布が最も強く影響すると仮定し、断面積の分布をモデル化した解析により、鉄筋および部材の力学特性をトレースすることが可能か考察する。

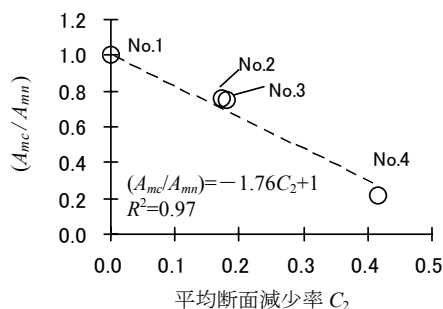


図-21 平均断面減少率 C_2 と A_{mc}/A_{mn} の関係

推定手法の概念を図-22に示す。まず、鉄筋の軸方向に微小な区間 i を考える。この区間の両端に引張力 P が作用した場合のひずみ ϵ_i は、素材自体の σ - ϵ 関係（ $\sigma = f(\epsilon)$ ）とその区間の断面積 A_i から、以下の式により定まると仮定する。

$$\begin{aligned}\sigma_i &= P/A_i = f(\epsilon_i) \\ \epsilon_i &= f^{-1}(\sigma_i)\end{aligned}\quad (4)$$

また、鉄筋の引張試験において、測定区間 L における伸び ΔL は、微小区間のひずみ ϵ_i と区間長 L_i の積を順次加算することにより求められると仮定する。 ΔL を測定区間 L で除した値は、測定区間全体における平均ひずみとなる。

$$\Delta L = \sum \epsilon_i \cdot L_i \quad (5)$$

なお、解析における微小区間の長さが比較的大きい場合、断面積の軸方向分布が実際と相違し、通常は精度は低下すると考えられる。しかし、断面積が比較的均一である場合など、実際とほぼ同じ断面積分布（ヒストグラム）となることも想定され、誤差は区間長だけでなく形状や測定位置にも依存する。

この仮定を検証するため、切削により腐食を模擬した鉄筋（D16）に対し、引張試験を実施した。鉄筋の切削は、コンクリート中の腐食のばらつきを模擬し、全体に切削する部分（平面切削）と局部的に切削する部分（曲面切削）に分けて行った。切削に際しては、図-20の鉄筋No.2,3を参考に、質量減少

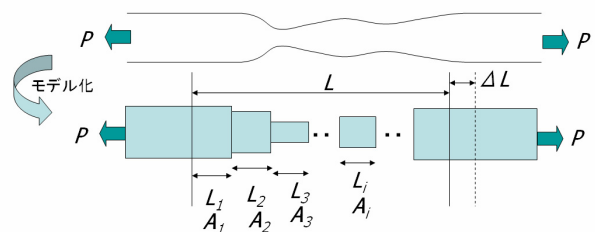


図-22 鉄筋力学性状の推定手法の概念

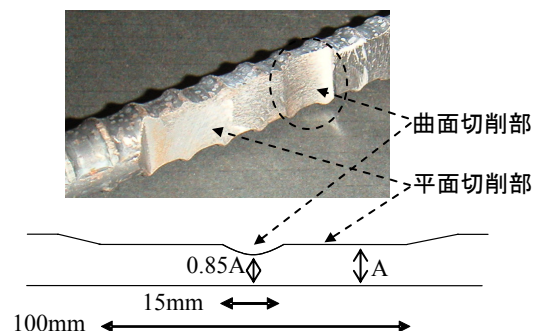


図-23 鉄筋の切削状況

率を15～20%程度とし、曲面切削の区間の長さを切削区間全体の15%とし、最小断面積は平面切削部の腹の断面積の85%となるようにした(図-23)。なお、切削時の熱の影響を最小限に留めるため、ダイヤモンドカッターにより切削を行っている。切削後の断面積分布を図-24に示す。平面切削部および曲面切削部の最小断面積はそれぞれ148.5および125.0mm²で、その比は0.84であり、概ね想定通りの断面積分布が得られている。

鉄筋の引張試験では、設定した間隔(公称径の16倍)にターゲットを取り付け、区間伸びを計測すると同時に、伸び計およびひずみゲージで局所ひずみも併せて計測した。試験状況を図-25に示す。

解析結果を変位計から得た区間伸び計測値と併せて図-26に示す。解析に用いる鉄筋素材自体の $\sigma - \epsilon$

ϵ 関係($\sigma = f(\epsilon)$)は、健全な鉄筋の引張試験における腹の断面の $\sigma - \epsilon$ 関係を用いた。解析に用いる微小区間の長さは、横筋や孔食による断面積のばらつきを表現できる間隔とし、3Dスキャナの計測間隔と同じ1mmとした。解析値は実験値に比べ、特に降伏以降のひずみが小さい。この原因として、解析に用いる各断面積が過大であることが挙げられる。即ち、解析では実測した全断面積を有効として応力とひずみを算出しているが、実際には出張り部分などが剛性に寄与していない可能性があり、この部分を適切に控除する必要がある。鉄筋の断面積分布を腹の断面積で包絡して再設定し(図-24参照)、同様に解析すると図-27の結果が得られ、良好に実験結果を再現できることが分かる。このことから、断面積分布の測定により、腐食した鉄筋の力学特性を把握できる見通しが得られる。また、図-27に示すとおり、最小断面の降伏は弾性限界を、平面切削部の降伏は降伏棚を決定づけていることが分かる。

(2) 鉄筋の腐食による部材力学特性への影響

推定した腐食鉄筋の力学特性を用い、部材の曲げ性状への影響を検討する。前節の手法により、鉄筋のある一定の試験区間に対する $\sigma - \epsilon$ 関係は、鉄筋の断面積分布に依存して定まる。これを平面保持を

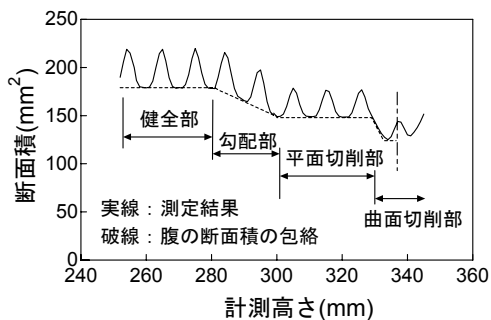


図-24 模擬腐食鉄筋の断面積分布測定結果

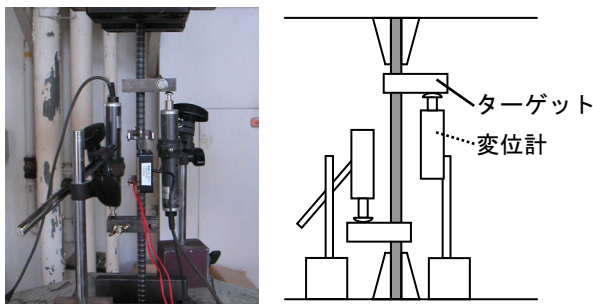
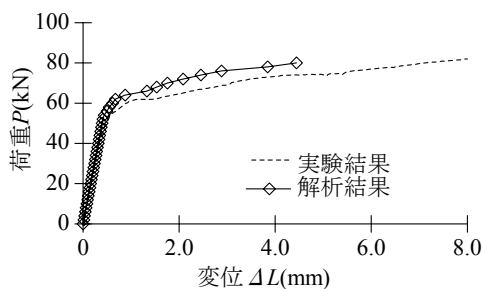
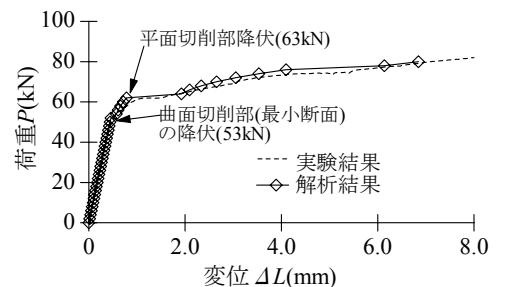


図-25 模擬腐食鉄筋の引張試験状況



(断面積分布を補正しない場合)

図-26 模擬腐食鉄筋の荷重-変位関係解析結果



最小断面積124(mm²)×降伏強度=53(kN)
平面切削部148(mm²)×降伏強度=63(kN)
(健全鉄筋の腹の断面積に対する降伏強度=425(N/mm²))

(断面積分布を補正した場合)

図-27 模擬腐食鉄筋の荷重-変位関係解析結果

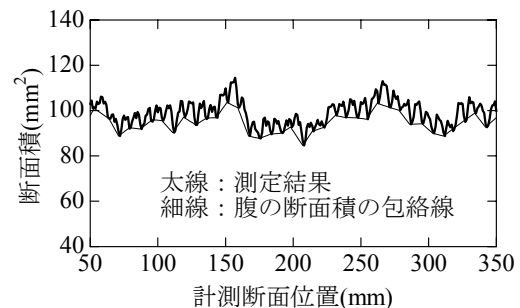


図-28 鉄筋の応力-ひずみモデル作成に用いる鉄筋断面積分布の設定

仮定した断面解析に適用する。

この方法を2章の試験体諸元に適用し、解析を行った。腐食鉄筋の $\sigma - \varepsilon$ 関係は、図-18の電食鉄筋No.3に対して最小断面を包絡する図-28の断面積分布を仮定し、解析で得た図-29の $\sigma - \varepsilon$ 関係を用いた。コンクリートの $\sigma - \varepsilon$ 関係は、圧縮に対しては一般的な e 関数法を用い、引張に対しては無視した。曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係の解析結果を図-30に示す。ここでは、等曲げモーメント区間における鉄筋の $\sigma - \varepsilon$ 関係が前節の関係と等価であると仮定した。腐食鉄筋を仮定した場合の $M - \phi$ 関係は、健全鉄筋を仮定した場合と異なり、降伏モーメントが小さく、降伏後のモーメント M が漸増する関係となっている。これは図-27から、局部的に腐食した部

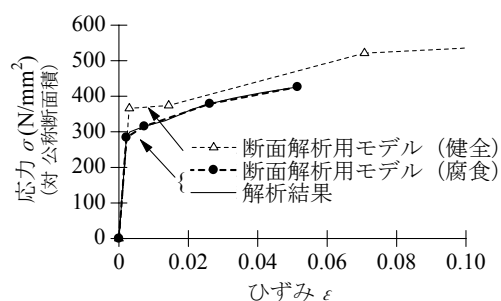


図-29 $M - \phi$ 関係の解析に用いる鉄筋の応力-ひずみモデル

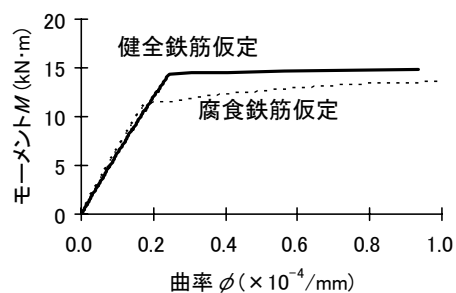


図-30 鉄筋の力学性状による $M - \phi$ 関係への影響

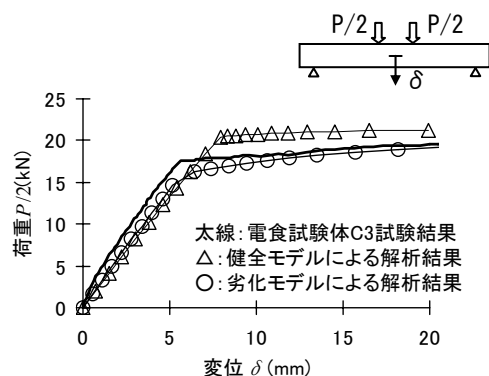


図-31 鉄筋の力学性状を変化させた $P - \delta$ 関係

分の降伏によると推察される。同様に、試験体の部材軸に沿って2階積分を実行し、荷重-変位関係の解析を行った。解析結果(図-31)は、質量減少率が同程度の電食試験体C3の試験結果と降伏後の荷重が概ね一致しており、鉄筋の断面積分布を適切に設定することにより、部材の力学性状を把握できる見通しが得られる。

5. 結論

鉄筋が腐食したコンクリート部材の曲げ性状について、実験と解析から以下の知見を得た。

- (1) 電食により腐食させた部材の載荷試験を実施し、既往の試験結果と併せて検討した。この結果、鉄筋の引張強度および部材の終局耐力は、鉄筋の局部的な断面減少の影響により、質量減少率以上に低下することが明らかとなった。また、より正確な推定のためには、鉄筋の断面積分布を詳細に把握する必要があることを指摘した。
- (2) 鉄筋の断面積分布を把握する手法として、3Dスキャナによる断面計測手法を適用し、形状を的確に効率よく取得できる見通しを得た。この計測結果を踏まえ、切削により腐食を模擬した鉄筋に対する引張試験を実施し、断面の不均一性を考慮した鉄筋の力学性状の推測を可能とした。また、この結果をもとに、部材の降伏近傍の挙動を再現することができた。

なお、本研究は国土交通省の補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 宮川豊章, 小林和夫, 岡田清: 腐食鉄筋を用いたコンクリート曲げ部材の力学的挙動について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, V-86, pp.171-172, 1981.
- 2) 武若耕司, 松本進: コンクリート中の鉄筋腐食がRC部材の力学的性状に及ぼす影響, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.177-180, 1984.
- 3) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, pp.43-74, 1998.
- 4) 中川貴之, 瀬下雄一, 堤知明, 安田登: 塩害劣化環境下にあるRC構造物の維持管理支援システムの開発, コンクリート工学, Vol.40, No.3, pp.53-58, 2002.
- 5) 山住克巳, 宮本征夫, 佐藤勉: 鉄筋を腐食させたRCはりの劣化状態と耐力について, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp.557-562, 1990.

- 6) 大屋戸理明, 西脇敬一, 長谷川雅志, 永岡高: 長期暴露した鉄筋コンクリート梁の劣化性状と耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1315-1320, 2001.
- 7) 長谷川雅志, 西脇敬一, 大屋戸理明, 永岡高, 佐藤勉: 長期暴露した塩分を含む鉄筋コンクリート梁の力学性状, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, V-360, pp.722-723, 2000.
- 8) 西脇敬一, 大屋戸理明, 長谷川雅志, 永岡高: 鉄筋が腐食したRC梁の疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.783-788, 2002.
- 9) 大屋戸理明, 長谷川雅志, 佐藤勉: 促進劣化させた鉄筋コンクリートはりの疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.961-966, 2002.
- 10) 柏原茂, 谷村幸裕, 泉並良二, 木村元哉: 実構造物から採取した腐食鉄筋の引張降伏強度推定に関する一考察, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, V-358, pp.718-719, 2000.
- 11) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮力学特性に及ぼす供試体寸法・形状の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第473号, pp.19-28, 1995.
- 12) 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文: 鉄筋の腐食がその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集, Vol.17, No.1, pp.877-882, 1995.
- 13) 島弘, 堤知明, 入江正明, 鈴木正敏: 鉄筋が腐食した一方向RCスラブの曲げ耐力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.563-568, 1990.
- 14) 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文, 大村陳庭: 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論文報告集, pp.87-92, 1996.
- 15) 岩波光保, 横田弘, 佐藤文則: 鉄筋腐食がRCはりの耐荷性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1501-1506, 2002.
- 16) 松尾洋, 五角亘, 下村匠: 鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の引張剛性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1327-1332, 2001.

(2005.10.25 受付)

INFLUENCE OF CORROSION OF REINFORCING BARS ON BENDING PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Michiaki OYADO, Toshiyuki KANAKUBO, Yasuhiko YAMAMOTO
and Tsutomu SATO

This paper studied about the influence of corrosion of reinforcing bars on bending performance of reinforced concrete (RC) members in order to serve for maintenance of RC structures. Bending tests on corroded RC members and 3 dimensional shape scanning of the corroded reinforcing bars were carried out. It was proved that tensile strength of reinforcing bars and ultimate strength of RC members were decreased by not only the weight loss (which means the averaged reduction of cross section) of the reinforcing bar but also the localized corrosion. It was also clarified that the localized corrosion of reinforcing bars had effect on the stress-strain relationships of reinforcing bars around the yield point.