

論文 腐食した RC 曲げ部材の引張鉄筋の破断に関する検討

大屋戸 理明*1・金久保 利之*2

要旨: 腐食した鉄筋コンクリート部材の力学性能の評価に関し、腐食に伴う耐力の低下を推測することとなり、その破壊性状が脆性的か否かを推測することもまた極めて重要である。特に引張鉄筋の破断は、構造物の崩壊にも繋がりがねず、その推測は重要な意味を持つ。しかし、一方向曲げ载荷試験における既往の研究では、前者に対する検討例は多いものの、後者について定量的な検討が行われた例は少ない。そこで本論では、既往の载荷試験結果を参考に、腐食した RC 曲げ部材の引張鉄筋が破断に至るまでの部材の挙動について、解析により定量的に検討した。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 梁, 腐食, 質量減少率, 断面積標準偏差, 脆性破壊

1. はじめに

長期使用した鉄筋コンクリート(RC)構造物の補修の判断に資する等を主な目的とし、劣化による力学性能の低下、特に鉄筋の腐食に伴う部材力学性状の変化を把握する試みがされている。これらの多くは、電食、乾湿繰り返しまたは自然暴露等により、コンクリート中の鉄筋に腐食を生じさせた梁部材の曲げ载荷試験を行って、腐食の進行に伴う部材力学性状の変化を観察している¹⁾。それらの研究では、定量的には主に部材耐力の低下が、検討されており、腐食程度の指標として質量減少率 C (鉄筋の対象区間における腐食に伴う減少質量の、元の質量に対する比率)が主に用いられている。

ところで、腐食した RC 部材の力学性能の評価に関しては、腐食に伴う耐力低下のみならず、その破壊性状が脆性的か否かを推測することもまた極めて重要である。特に引張鉄筋の破断は、桁などの静定構造物の場合は構造物の崩壊にも繋がりがねず、その影響は大きい。実際に過去の研究事例では、繰り返し载荷時でない一方向単調载荷の実験であっても、特に腐食の程度が大きい場合に鉄筋の破断が生じた例が報告^{2)~4)}されている。しかしながら、腐食した RC 部材の引張鉄筋の破断に関連して、定量的に検討された事例は極めて少ない。

一方、筆者らは過去に、3D スキャナにより精緻に計測した腐食鉄筋の断面積分布を考慮し、微小区間に生じるひずみを積算することで、その力学性状即ち応力-ひずみ($\sigma-\epsilon$)関係が推測可能となり、またその結果を用いて部材の力学挙動を再現できることを明かにしている²⁾。この手法(次章にその概略を示す)は、単純なロジックでありながら、鉄筋の局所断面の応力状態と部材の挙動を载荷状態の逐次変化に応じて関連づけることが可能なため、部材の降伏・終局(最大荷重時)と鉄筋の降伏・破断(引張強度時)とを対応させることができ、上記の腐食した RC 部材中の引張鉄筋の破断を推測する手法と

して使用できる可能性がある。

そこで本論ではこの手法を用い、腐食した RC 曲げ部材の引張鉄筋が破断に至るまでの部材の挙動について、解析的に検討を行うこととする。

2. 解析手法

2.1 力学モデル

図-1に腐食鉄筋の力学モデル作成手法²⁾を概略的に示す。まず、鉄筋の軸方向に微小(本論では1mm)な区間 i を考え、この両端に引張力 P が作用した場合のひずみ ϵ_i について、その区間の断面積 A_i と素材自体の $\sigma-\epsilon$ 関係($\sigma=f(\epsilon)$)を用いて式(1)のように求める。次いで、評価区間全体 L における伸び ΔL を、微小区間のひずみと区間長の積を順次加算する式(2)で求め、 $\Delta L/L$ により平均ひずみを算出する。

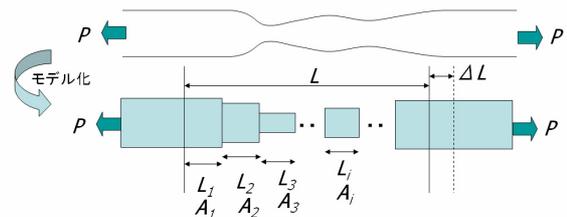


図-1 腐食鉄筋の力学モデル

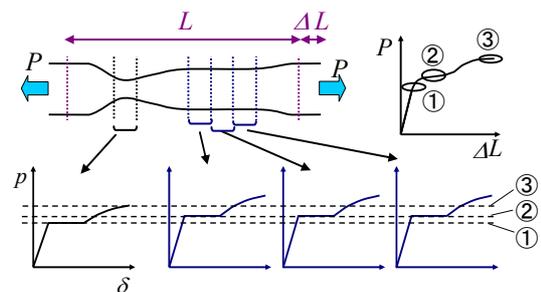


図-2 評価区間全体における局所断面の影響

*1 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 筑波大学 システム情報工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

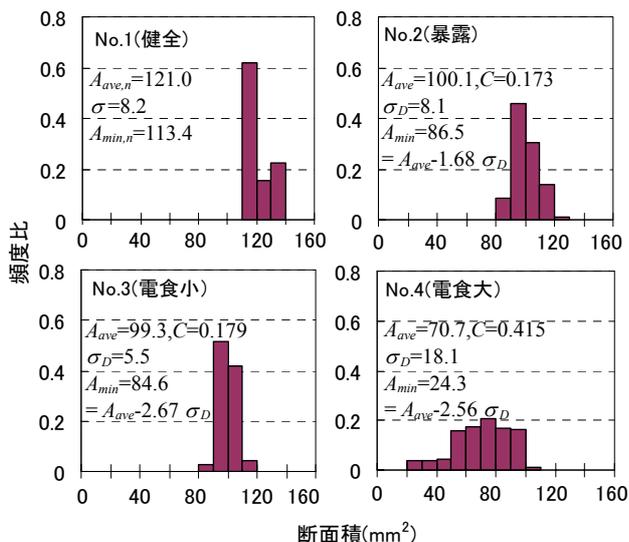
$$\sigma_i = P/A_i = f(\varepsilon_i) \quad \therefore \varepsilon_i = f^{-1}(\sigma_i) \quad (1)$$

$$\Delta L = \sum \varepsilon_i \cdot L_i \quad (2)$$

このモデルでは、図-2に示すように、仮にある局所断面で降伏しても、それが極めて限られた範囲でしか生じていなければ、評価区間全体ではあたかも降伏していないかのように振る舞い(図-2①)、他の大半の断面が降伏した時点で、評価区間全体が降伏だなの状態として顕在化する(図-2②)。さらに荷重が増加し、最も断面積の小さい断面が引張強度に達すれば、評価区間全体でもそれ以上の荷重は保持できず、鉄筋は破断する(図-2③)。即ちこの力学モデルでは、従来のように腐食鉄筋を単なる細い鉄筋と考えるのではなく、断面積が場所によって異なるために、 σ - ε 関係が変質した鉄筋として解釈することに特徴がある。弾性限界と引張強度は最小断面積に支配され、評価区間全体の降伏(伸びが顕著になる段階)は最小断面積よりもむしろ断面積分布に支配される。なお、本論では、素材自体の σ - ε 関係として、健全鉄筋の引張試験結果²⁾を用いて設定している。また、1カ所でも局所的に引張強度に達した段階で、鉄筋が破断したと判断する。

2.2 断面積分布

力学モデルにて考慮する腐食鉄筋の断面積分布は、実構造物を中心として暴露試験体を加えた腐食鉄筋を3Dスキャナで調査した結果⁵⁾を参考として用いる。局所断面減少量 D_{local} の分布として正規分布を仮定し、健全鉄筋の平均断面積 $A_{ave,n}$ から減じることで断面積分布が作成できる。ただし D_{local} は、 $D_{ave} \pm 3\sigma_D$ (D_{ave} は平均断面減少量、 σ_D は断面減少量の標準偏差で、両者の単位は mm^2)



A_{ave} : 平均断面積, A_{min} : 最小断面積, σ_D : 標準偏差。
添字の n は健全鉄筋を示す。断面積と標準偏差の単位は (mm^2)

図-3 断面積のヒストグラム²⁾

の範囲に限定する。これは、図-3に示した文献²⁾中の腐食鉄筋のヒストグラムを参考としたものである。鉄筋No.2, No.3およびNo.4の最小断面積は、平均断面積を A_{ave} とすると、それぞれ $A_{ave}-1.68\sigma_D$, $A_{ave}-2.67\sigma_D$ および $A_{ave}-2.56\sigma_D$ であり、いずれも $A_{ave}-3\sigma_D$ 以内にある。

2.3 断面解析

以上は鉄筋単体の挙動に対する考慮方法であるが、部材の曲げ解析については、腐食鉄筋の力学モデルを部材曲げ耐荷メカニズムの中に取りこんで考慮する必要がある。本論では、文献²⁾中に示したように、断面積分布によって定まる引張鉄筋の σ - ε 関係を、平面保持を仮定した部材断面解析に適用して行う。部材の曲げ変形は、せん断スパンを微小区間に分割(本論では100分割)した各断面の曲率を算出し、これを部材軸に沿って2階積分することにより算出する。コンクリートの σ - ε 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する。従って、鉄筋とコンクリートとの付着については考慮されない。また、コンクリートの終局ひずみを、示方書等で示され一般に用いられる値($\varepsilon_{cu}=0.0035$)とし、縁ひずみがこれに達するか、引張鉄筋が破断に至った時点で部材断面解析を終了する。

3. 解析対象および解析ケース

3.1 解析対象

本論では解析対象として、既往の単純曲げ載荷試験で引張鉄筋の破断が生じた電食試験体²⁾を用いた。図-4に試験体形状寸法および配筋を、表-1に載荷試験結果(終局耐力 P_u , 質量減少率 C および破壊モード)を、図-5に載荷試験で得た荷重-変位関係をそれぞれ示す。これらによれば、載荷試験では質量減少率 C が0.21の場合と0.24の場合とで引張鉄筋の破断の有無が相違して

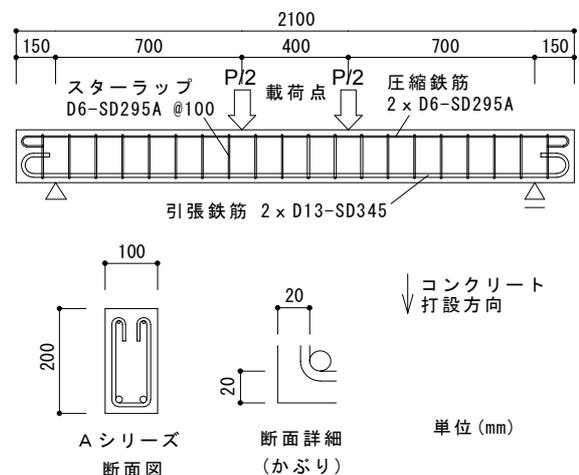


図-4 試験体形状寸法および配筋²⁾

表-1 載荷試験結果²⁾

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	2
C5	8.7	0.17	0.44	0.37, 0.50	2+

*mode: 破壊モード 1: 引張鉄筋降伏後にコンクリート圧壊
2: 引張鉄筋の破断 2+: 同 (低鉄筋比はりの挙動)

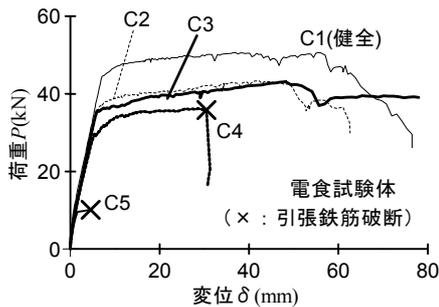


図-5 荷重-変位関係 載荷試験結果²⁾

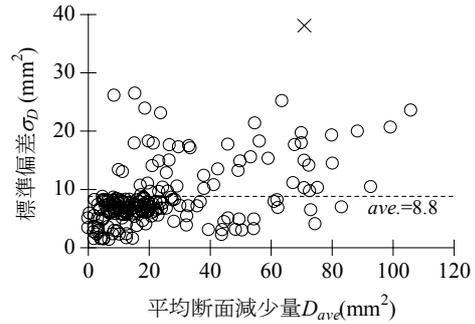
おり、腐食程度としてはわずかな差で引張鉄筋の破断が生じるか否かが分かっている。鉄筋が破断した試験体のうち、試験体 C4 は、載荷が進行し部材が曲げ降伏して靱性に富む挙動を示すと思われた矢先に突如引張鉄筋が破断しており、試験体 C5 は、曲げひび割れ発生と同時にいきなり鉄筋が破断する、いわゆる低鉄筋比はりの挙動を示しており、両者とも危険な破壊形態であった。

3.2 解析ケース

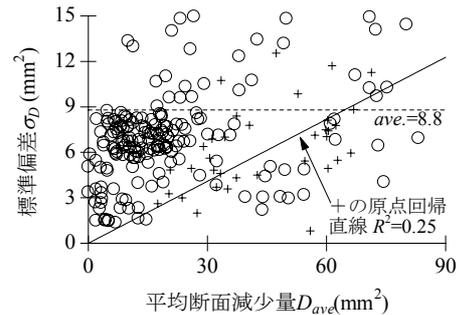
解析ケースは、質量減少率 C と断面積標準偏差 σ_D (断面減少量標準偏差 σ_D と同値、以下単に標準偏差 σ_D と称す)をパラメータとした。

質量減少率 C の検討範囲は、本論では鉄筋破断を対象とすることから、 $C=0.2\sim 0.6$ 程度と腐食程度の大きい範囲に設定した。

標準偏差 σ_D の検討範囲の上限は、図-6に示した実構造物主体の調査結果⁵⁾から得た平均値 $8.8(\text{mm}^2)$ を参考に、その1.5倍の $13.2(\text{mm}^2)$ に設定した。既往の研究例では、標準偏差 σ_D が検討された事例は多くない。本論で根拠とした実構造物の調査結果は、図-7に示したように最大断面減少量の予測にも使用できる参考値であるが、他の研究では、質量減少率 C が増加するに従って標準偏差 σ_D も大きくなるとする考え方⁶⁾もある(図-6(2)参照)。いずれにしてもそのばらつきは大きく、標準偏差 σ_D の推測は未解決の課題であるが、本論ではそれらを網羅するよう、平均よりやや大きめに標準偏差 σ_D の上限を設定し、また下限については、図-3に示した値のうち最小の $5.5(\text{mm}^2)$ を参考に、その約 $1/2\sim 1/3$ の $2(\text{mm}^2)$ に設定した。



(1) 全調査データ



(2) (1)の部分拡大に文献⁶⁾を加筆⁵⁾(+点)

図-6 平均断面減少量 D_{ave} と標準偏差 σ_D ⁵⁾

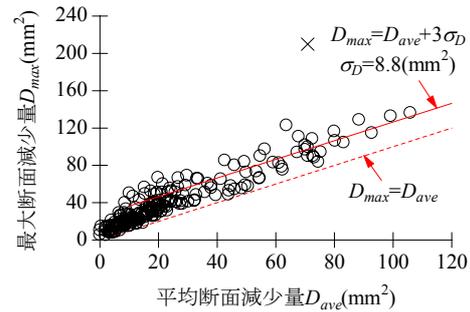


図-7 平均断面減少量 D_{ave} と最大断面減少量 D_{max} ⁵⁾

注: 図-6・7における×点は、ひび割れから海水の侵入を受けて極端に局部的に腐食した鉄筋の測定結果

なお、図-6中には電食による腐食鉄筋(D13)4本のデータを含み、それらは $3.9 < D_{ave} < 30(\text{mm}^2)$ 、 $6.6 < \sigma_D < 10.6(\text{mm}^2)$ の範囲にある。図-6の点群の存在範囲と比べ顕著な偏りはないため、以下の検討では腐食の原因が自然環境によるか電食によるかについて特段区別しない。

4. 解析結果と考察

4.1 正規分布を仮定した力学モデルの検証

正規分布を仮定した腐食鉄筋の挙動の再現性について検証する。図-8は、断面積ヒストグラムについて、3D スキャナにより $1(\text{mm})$ 間隔で実測した結果(文献²⁾中の鉄筋No.3、区間長 300mm)と、この平均断面積 A_{ave} と標準偏差 σ_D を用い、正規分布を仮定して作成したものととの比較を示したものである。また、図-9は、実測断

面積分布より求めた σ - ϵ 関係解析結果と、正規分布を仮定した断面積分布より求めたそれとの比較を示したものである。なお、図-9以降に示す鉄筋 σ - ϵ 関係については、縦軸は公称断面積に対する応力で表記する。図-8に示すように、正規分布を仮定した断面積ヒストグラムは実測と必ずしも一致しないが、図-9によれば両者による σ - ϵ 関係は良好な一致が見られる。本論では力学的挙動を対象とするので、正規分布を仮定して作成した断面積分布を用いても差し支えないと考えられる。

4.2 鉄筋の力学モデルの変化

鉄筋の σ - ϵ 関係解析結果の例を図-10に示す。

図-10(1)(2)によると、質量減少率 C を0.2に固定した場合、標準偏差 σ_D が増大するに従って、弾性限界、引張強度および終局ひずみの低下が生じている。特に、標準偏差 σ_D が増大するに従って著しい終局ひずみの低下が見られ、また弾性限界以降の勾配の変化が急激なものから緩慢なものへ遷移している。その一方で、降伏だなの荷重（例えば破断している $\sigma_D = 13.2\text{mm}^2$ を除く各結果のひずみ0.009時の荷重）および原点付近の弾性係数には目立った変化がない。標準偏差 σ_D は、主に腐食鉄筋の力学モデルの横軸（ひずみ）に影響を与える。

これに対して図-10(3)によると、標準偏差 σ_D を文献記載²⁾の平均値 $8.8(\text{mm}^2)$ に固定した場合、質量減少率 C が増大するに従って、弾性限界、引張強度および終局ひずみが低下し、弾性限界以降の勾配の変化は遷移してい

ない。一方、降伏だなの荷重および原点付近の弾性係数も比例して低下している。質量減少率 C は、主に腐食鉄筋の力学モデルの縦軸（応力）に影響を与えることが理解できる。

4.3 荷重-変位関係

部材の荷重-変位関係解析結果の例を、実験結果（試験体C4）と比較して図-11に示す。計測で得られた断面積分布をそのまま解析に適用した場合、実験結果が比較的良好に再現できることが文献²⁾に示されているが、本論のように正規分布を仮定した断面積分布によって鉄筋力学モデルを作成しても実験結果を再現可能であることが分かる。

部材解析結果の例を図-12に示す。質量減少率 C を0.3に固定した場合、標準偏差 σ_D が小さく均一に腐食していれば部材は降伏し、靱性を発揮する。しかし、腐食にばらつきがある（ σ_D が大きい）場合、載荷途中で引張鉄筋が破断する。その境界は $\sigma_D = 6.0 \sim 8.8(\text{mm}^2)$ の間にあ

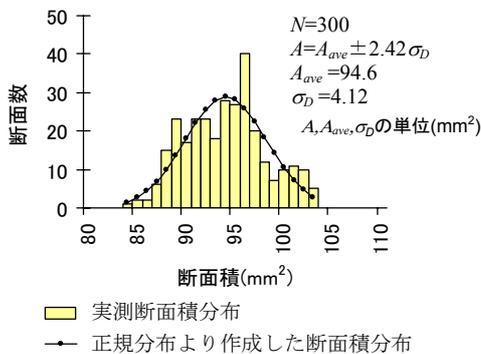


図-8 実測と正規分布の断面積ヒストグラムの比較

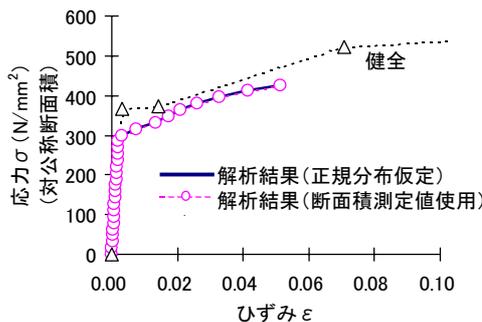
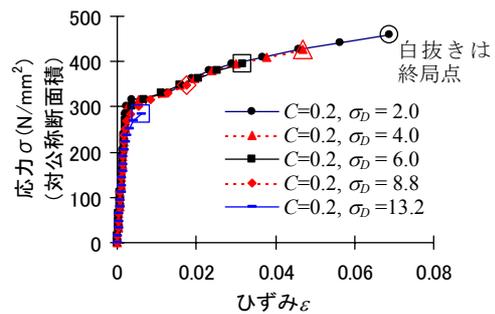
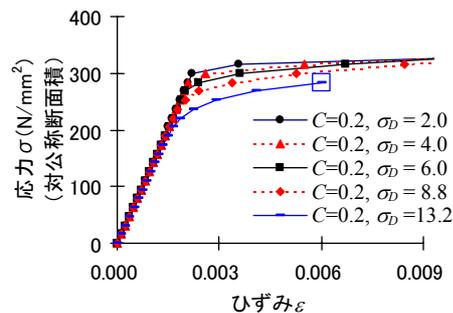


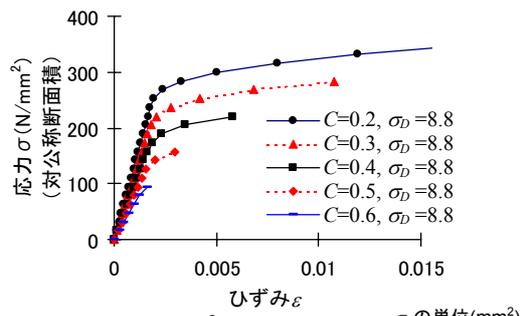
図-9 σ - ϵ 関係解析結果の比較



(1) $C=0.2$ 一定の場合



(2) (1)の部分拡大

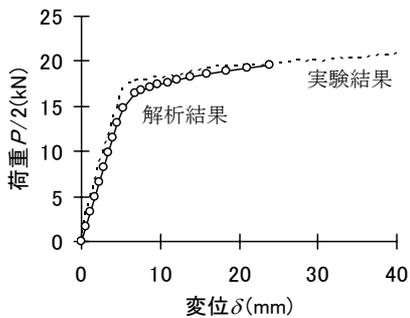


(3) $\sigma_D=8.8\text{mm}^2$ 一定の場合

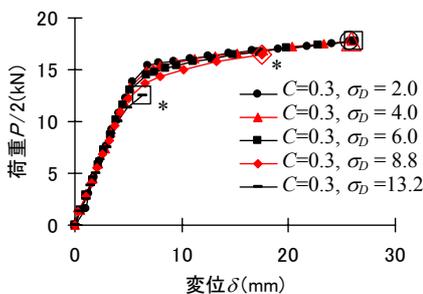
図-10 鉄筋の σ - ϵ 関係解析結果

り、これは実際に生じる可能性の大きいばらつきの程度である（実構造物の調査事例図－6を参照）。また、破断する場合でも部材の挙動が異なる場合があり、 $\sigma_D=8.8(\text{mm}^2)$ の場合は部材が降伏挙動を示した後に破断し、 $\sigma_D=13.2(\text{mm}^2)$ の場合は部材降伏に至る前に破断する。一方、標準偏差 σ_D を固定し、質量減少率 C を変動させた場合の例を示したのが図－1 2(2)である。 $\sigma_D=6.0(\text{mm}^2)$ に固定した場合、 $C=0.4\sim 0.5$ で破断が生じている。なお、図－1 2(1)にて $\sigma_D = 2.0\sim 6.0(\text{mm}^2)$ の間で終局変位に変動がないのは、これらの解析ケースではコンクリートの縁応力度が終局ひずみに達して断面解析が終了しているためであり、図－1 2(2)の $C=0.2\sim 0.4$ の間で終局変位が増加しているのは、終局状態のコンクリートと釣り合うのに必要な鉄筋力を発揮する時の引張鉄筋のひずみが、鉄筋断面の減少に伴って増加するためである。

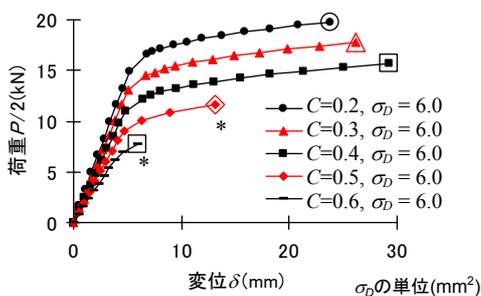
このように本手法により、引張鉄筋が破断するか否か



図－1 1 荷重－変位関係 解析結果



(1) $C=0.3$ 一定の場合



(2) $\sigma_D=6.0(\text{mm}^2)$ 一定の場合

白抜きは終局点を、* は破断を示す

図－1 2 荷重－変位関係 解析結果

に加え、破断に至るまでの部材の降伏挙動について推測することが可能となる。

4.4 最大荷重および終局ひずみ

終局変位と最大荷重の解析結果を表－2にまとめる。質量減少率 C が一定であっても、標準偏差 σ_D が小さい場合は鉄筋破断が生じず、大きい場合に生じている。逆に、同じ標準偏差 σ_D であっても、質量減少率 C が小さい場合には鉄筋破断が生じず、大きい場合に生じている。この傾向は、最小断面積が質量減少率 C から標準偏差 σ_D の定数倍（本論では3倍）の断面積を減じた値で最小断面積が表現されることを考慮すると、定性的には容易に理解できる。表中の○は載荷試験結果（試験体C4）の推測される位置を示す。載荷試験結果から、質量減少率 C が0.21～0.24の間に破断有無の境界があることが推測されることから、表に示した解析結果とは概ね良好な対応を示していると言える。これより、通常生じるばらつき（ $\sigma_D=8.8\text{mm}^2$ 程度）を前提とすれば、本試験体の引張鉄筋を破断させないためには $C=0.2\sim 0.3$ 程度に抑える必要があることが確認される。

4.5 既往の載荷試験結果による試算

本手法を既往の載荷試験結果に適用し、同様に試算を行った。

使用した載荷試験結果は前節までと同様、腐食したRC梁を単純曲げ試験に供し引張鉄筋が破断したもので、その諸元を表－3に示す。文献³⁾は断面幅×高さが100×100(mm)の小型の梁で、引張鉄筋には $\phi 6$ が用いられている。文献⁴⁾は断面幅×高さ=240×200(mm)であり、引張鉄筋にはD16が3本用いられている。前節までの試験体（図－4）は、この両者の中間の規模に位置づけられる。なお、本解析手法では鉄筋の素材自体の $\sigma-\epsilon$ 関係と断面積分布が必要となるが、文献^{3,4)}ではそれらを対象としていないため記載がない。このため本論では、前節までに用いたのと同じ鉄筋の力学モデルを用いて解析を行っ

表－2 解析結果（終局変位・最大荷重）

		終局変位 δ_{max} (mm)				
$C \setminus \sigma_D$		2.0	4.0	6.0	8.8	13.2
0.2		23.3	23.5	23.8	24.3	9.3
0.3		25.8	25.9	26.2	17.5	6.4
0.4		28.7	28.9	29.2	9.8	3.7
0.5		32.7	32.8	13.2	4.8	2.7
0.6		38.0	18.6	6.0	3.3	1.2
		最大荷重 $P_{max}/2$ (kN)				
$C \setminus \sigma_D$		2.0	4.0	6.0	8.8	13.2
0.2		19.6	19.7	19.7	19.6	16.1
0.3		17.8	17.8	17.7	16.4	12.5
0.4		15.9	15.7	15.6	12.7	8.0
0.5		13.7	13.6	11.6	8.4	5.1
0.6		11.5	10.0	7.7	5.1	1.9

網線：鉄筋破断 σ_D の単位(mm²)

表-3 既往の試験諸元

文献	矢野ら ³⁾	村上ら ⁴⁾	筆者ら ²⁾
部材幅B (mm)	100	240	100
部材高H, 有効高D (mm)	100.87	200.160	200.173.5
せん断スパンa (mm)	225	725	700
引張鉄筋径(mm)	6	16	13
引張鉄筋比 p_t	0.36%	1.55%	1.46%
最大荷重 P_{max} *(kN)	2.35	23.0	18.1
質量減少率C*	0.42*	0.264	0.24

*: 破断した試験体の値 * *: 局部腐食試験体の腐食対象範囲

た。従って本検討は、実験結果との対応よりも解析結果同士の比較を主目的となる。

解析結果の終局変位と最大荷重を表-4~5にまとめる。概ね前節の解析結果(表-2)と同様の傾向が見られるが、文献³⁾の場合は文献⁴⁾に比べ、質量減少量Cや標準偏差 σ_D の影響が鋭敏に現れ、より小さい $C \cdot \sigma_D$ で破断している。これは、部材断面および鉄筋量が小さいためと考えられる。腐食のばらつきはかぶりや局所のコンクリートの品質などによって決まると考えられ、引張鉄筋の径の違いによって標準偏差 σ_D が変動することは考えにくい。このため、部材寸法や鉄筋量が小さいほど、腐食に伴う部材力学性状の変化が鋭敏に現れ、破断を防ぐための検討はより慎重にすべきと考えられる。

5. まとめ

本論では、脆性的な破壊性状となる引張鉄筋の破断に着目し、既往の載荷試験結果を参考に、腐食したRC曲げ部材の引張鉄筋が破断に至るまでの部材の挙動について、解析により考察を行った。その結果、以下の事項を確認した。

- (1) 正規分布を仮定して鉄筋断面積分布を設定し、作成した力学モデルにより、実際の鉄筋の力学性状を模擬できる。また、質量減少率は応力に、標準偏差はひずみに主に影響を与える。
- (2) (1)の鉄筋力学モデルを用いて、部材の断面解析が可能であり、破断に至るまでの部材の挙動を鉄筋断面積標準偏差と関連づけて推測できる。
- (3) 標準偏差を実構造物で得られた平均値(8.8mm²)に設定する場合、本試験体の諸元では質量減少率0.2~0.3で引張鉄筋の破断が推測され、載荷試験結果と整合した。また、既往の載荷試験結果の諸元で試算を行った結果、部材寸法や鉄筋量が小さい場合は、腐食のばらつきの影響は相対的に大きくなる。

本論の成果を活用するには、質量減少率と標準偏差の入力値が必要である。既往の技術では、既存構造物に対してそれらの精度よい推定を行うことは困難であり、概略的な値を用いざるを得ない。しかしながら、個々の部材の挙動、特に引張鉄筋の破断を概略的にでもイメージ

表-4 文献³⁾の解析結果

終局変位 δ_{max} (mm)					
$C \setminus \sigma_D$	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
0.2	13.9	13.9	10.3	5.6	3.8
0.3	15.5	10.1	7.7	3.8	2.4
0.4	17.7	10.2	5.6	2.4	1.6
最大荷重 $P_{max}/2$ (kN)					
$C \setminus \sigma_D$	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
0.2	5.0	5.0	4.7	4.2	3.9
0.3	4.5	4.1	3.9	3.4	3.1
0.4	3.9	3.6	3.1	2.7	2.4

網掛: 鉄筋破断 σ_D の単位(mm²)

表-5 文献⁴⁾の解析結果

終局変位 δ_{max} (mm)					
$C \setminus \sigma_D$	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
0.2	21.0	21.0	21.2	21.5	14.7
0.3	23.8	23.8	23.9	14.5	9.0
0.4	27.2	27.2	18.5	8.8	5.8
最大荷重 $P_{max}/2$ (kN)					
$C \setminus \sigma_D$	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
0.2	53.6	53.5	53.5	53.3	49.9
0.3	48.8	48.5	48.3	44.3	40.1
0.4	43.5	43.1	40.1	34.9	30.6

網掛: 鉄筋破断 σ_D の単位(mm²)

できるということは重要な意味を持つ。今後は入力値の推定精度や解析精度の向上が必要である一方、本論のように腐食鉄筋の断面積のばらつきを定量的に考慮することが、より一般に行われるべきと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会報告書, pp.36-43, 2006.
- 2) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 佐藤勉: 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, 土木学会論文集, Vol.62, No.3, pp.542-554, 2006.
- 3) 矢野真義, 宮里心一: 鉄筋コンクリート梁の曲げ性状に及ぼす腐食形態の影響, 土木学会第60回年次学術講演会, 5-172, pp.343-344, 2005.
- 4) 村上祐貴, 木下哲秀, 鈴木修一, 福本幸成, 大下英吉: 鉄筋腐食を生じたRC梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.1, pp.61-74, 2006.
- 5) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 飯島亨: 実構造物の調査結果に基づく腐食鉄筋の力学性状の評価, 土木学会論文集, Vol.3, No.1, pp.143-155, 2007.
- 6) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘, 中村晃史, 伊藤始: 繰返し荷重を受けるRCはりの構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響, 港湾空港技術研究所資料, No.1079, 2004.