

論文 塩害により鉄筋が腐食した RC 部材の曲げ性状

青山敏幸^{*1}, 下村 匠^{*2}, 丸山久一^{*3}

要旨: 塩害により内部の鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の力学挙動を数値計算により評価する手法を構築するため、付着劣化による鉄筋とコンクリートのすべり、コンクリートの引張剛性の低下、鉄筋の断面積の減少をモデル化し、部材の曲げ挙動に及ぼすそれらの影響を検討した。鉄筋の付着状態を変化させた実験を行い、提案した計算手法の適用性、および付着が劣化した実際の鉄筋コンクリート部材の挙動について検討した。

キーワード: 塩害, 鉄筋腐食, 付着劣化, コンクリートの引張剛性, 曲げ挙動, ひび割れ分散性

1. はじめに

新しいコンクリート構造物の設計システムとして性能照査型設計法が注目を集めている。設計システムの中に構造物の耐久性を合理的に取り入れるためには、供用環境の下での構造物の劣化過程を逐一予測し、保有する性能の経時変化を評価する技術の確立が不可欠である。

このことに基づき、著者らは、塩害による鉄筋コンクリート部材の曲げ耐力の経時変化を既往の知見に基づく物理モデルを組み合わせ、数値解析により予測するシステムを提案した¹⁾。本システムは、簡便なモデルを組み合わせ、全体のフレームを構成することに主眼を置いたものである。その研究過程において、コンクリート構造物の性能の経時変化を予測する技術の中で、今後の課題のいくつかを明確にすることができた。とりわけ、構造物中の構成材料の劣化を考慮して構造物の性能を定量的に評価することに関しては、既往の研究例が少なく、一般的な評価手法も見当たらないことが明らかとなった。

本研究では、内部の鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の曲げ耐荷性状をメカニズムに立脚して評価する方法について検討した。

2. 鉄筋の腐食の影響のモデル化

2.1 一般

鉄筋コンクリート中の鉄筋が腐食することにより、鉄筋の断面積が減少し、鉄筋とコンクリートの付着性状が変化し、腐食ひび割れが発生する。このうち断面積の減少を考慮することに困難はない。付着性状の変化と腐食ひび割れは、

- ①鉄筋とコンクリート間のすべりの発生
- ②かぶりコンクリートが負担する平均引張応力の低下
- ③曲げひび割れ分散性の変化

をもたらすと考えられる。本研究では、①②を考慮した計算法の検討に主眼を置く。

2.2 鉄筋とコンクリートのすべり

コンクリート中の鉄筋の周囲に腐食生成物が堆積することにより付着が劣化し、鉄筋とコンクリートの間にすべりが生じると考えられる。この場合、鉄筋のひずみと鉄筋位置におけるコンクリートのひずみは一致しない(図-1)。腐食が生じた部材は、鉄筋とコンクリートが完全に付着した状態と、完全なアンボンド状態の中間にあると考え、アンボンド PC 部材に対して提案された式(1)²⁾により、付着劣化区間における鉄筋とコンクリートのひずみを関係づ

^{*1} (株)ピー・エス 修士(工学) (正会員)

^{*2} 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 博士(工学) (正会員)

^{*3} 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 Ph.D. (正会員)

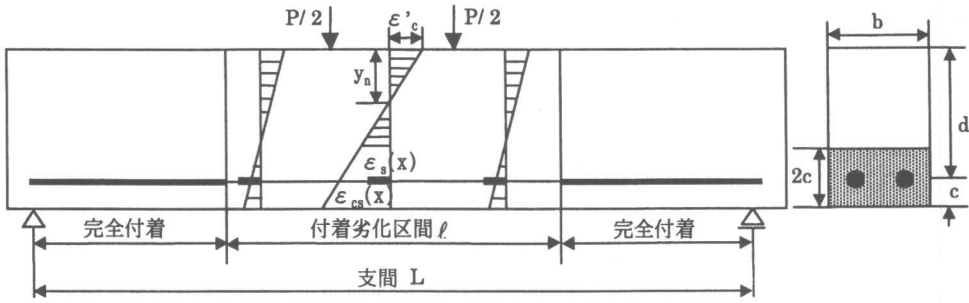


図-1 断面形状

けることにする。

$$\epsilon_s(x) = K_s \left(\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} \epsilon_{cs}(\xi) d\xi - \epsilon_{cs}(x) \right) + \epsilon_{cs}(x) \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon_s(x)$ ：鉄筋のひずみ、 $\epsilon_{cs}(x)$ ：鉄筋位置におけるコンクリートのひずみ、 ℓ ：付着劣化区間長、 K_s ：付着状態を表す係数 ($0 \leq K_s \leq 1$)、である。 K_s が0の時、鉄筋のひずみが鉄筋位置のコンクリートのひずみに一致する完全付着の状態を表し、 K_s が1の時、鉄筋のひずみが一様分布するアンボンドの状態を表す。式(1)は、付着劣化区間の両端においてすべりが0となる条件を満足する。

本論文に示す計算および実験では、図-1に示す鉄筋コンクリートはりを対象とした。はり両端部から一定長さの完全付着区間を仮定し、はり中央部に一様な付着劣化が生じるとした。

2.3 かぶりコンクリートの引張剛性の低下

一般の鉄筋コンクリート部材では、付着によりコンクリートに引張力が伝達され、鉄筋周辺のコンクリートは、曲げひび割れ発生後も平均的には引張力の一部を負担する。鉄筋の腐食により付着が劣化すると、コンクリートが受け持つ引張力が低下し、鉄筋コンクリートの引張剛性は低下すると考えられる。

腐食にともなうコンクリートの負担力の低下を、分散ひび割れモデルにより平均的に評価することにする³⁾。部材軸方向の鉄筋、コンクリートの応力分布を正弦関数と仮定し、鉄筋コンクリートの平均引張剛性を評価する方法である。鉄筋単体の応力-ひずみ関係を図-2により、

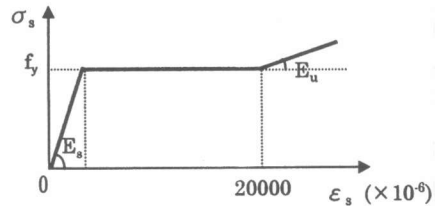


図-2 単体鉄筋の応力-ひずみ関係

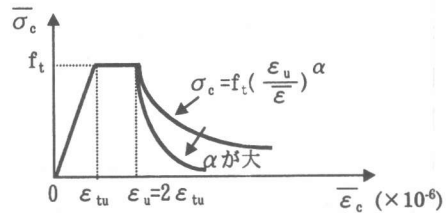


図-3 鉄筋周辺のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

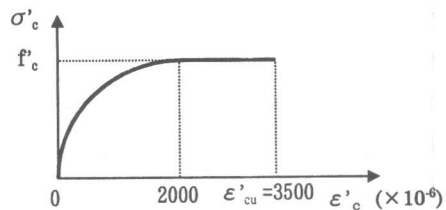


図-4 圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係

鉄筋周辺のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を図-3により与える。図-3の式中の α は付着の程度を表す係数であり、通常の鉄筋コンクリートでは0.4程度の値が用いられる³⁾。本研究では、腐食の程度に応じて α が変化するとした。

計算に用いたはりでは、かぶり厚さの2倍の高さの領域のコンクリートが付着による引張力を一様に負担するとする(図-1)。はりの挙

動の計算に先立ち、鉄筋と鉄筋周辺のコンクリートより成る部分の引張剛性を求めておき、これを用いてはりの曲げ挙動を計算する。

なお、付着が劣化し、鉄筋とコンクリートにすべりが生じた場合、各位置における鉄筋とコンクリートのひずみは一致しない。その場合、鉄筋のひずみを引張剛性に適用し、はりの各断面における引張力を評価することとする。

2.4 計算フロー

以上のモデルを用いて図-1の鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動を計算するフローを図-5に示す。等曲げ区間のコンクリートの圧縮縁ひずみ ϵ'_c を順次増加させ、はりの荷重と変形の関係を得る。コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係は図-4を用いる。

付着劣化が生じたはりでは、収束計算が必要になる。はりを軸方向に1cm間隔で要素分割し⁴⁾、図-5に示すように付着劣化区間における鉄筋位置のコンクリートの平均ひずみの仮定・修正を繰返し、すべての断面において支配方程式を満足する解を求める。

等曲げ区間のコンクリートの圧縮縁ひずみが3500 μ の時を終局状態とした。

3. 感度解析

3.1 付着劣化による鉄筋のすべりの影響

仮定したモデルが、評価される鉄筋コンクリートはり部材の曲げ挙動に及ぼす影響を検討するためにパラメータスタディを行った。計算では、表-1に示す断面諸元と、表-2に示す材料定数を用いた。

付着状態を表す係数 K_s の影響を検討するために、コンクリートの引張剛性を表す係数 α を0.4とし、 K_s を0,0.5,1と変化させた計算例について示す。図-6は荷重とはり中央のたわみの関係を、図-7は終局時の鉄筋のひずみ分布をそれぞれ示したものである。 K_s が大きくなるにつれ、すなわち付着が低下するにつれ、終局荷重、終局変形ともに低下することがわかる。

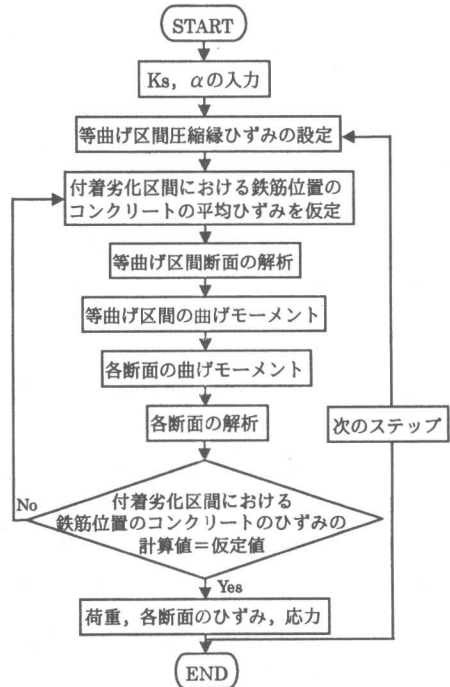


図-5 計算フロー

表-1 断面諸元

断面幅 b(mm)	有効高 d(mm)	かぶり c(mm)	支間 L(mm)	等曲げ区 間長(mm)	付着劣化 区間 l (mm)	鉄筋比 %
200	240	60	1800	200	800	0.83

表-2 材料定数

コンクリート		
圧縮強度 f'_c	引張強度 f_t	弾性係数 E_c
30.8MPa	2.6MPa	3.0×10^4 MPa
鉄筋		
降伏強度 f_y	弾性係数 E_s	弾性係数 E_u
400MPa	2.0×10^5 MPa	0.2×10^5 MPa

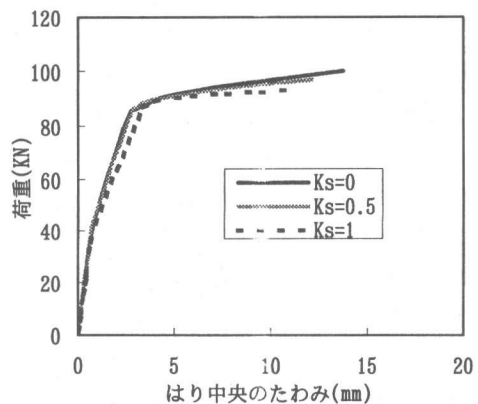


図-6 荷重-たわみ関係 (K_s を変化)

これは、付着劣化区間の鉄筋ひずみが一様分布に近づいていき、最大となる等曲げ区間の鉄筋ひずみが低下するためである。

荷重-たわみ曲線は、 K_s が0と0.5の場合とではほとんど同じとなっている。これは、図-7に示されるように部材軸に沿った変形状態の分布が異なっても、その所産であるたわみには現れにくいと考えている。ただし、完全なアンボンド状態 ($K_s=1$) まで付着が劣化すると、たわみが小さい範囲でも異なる挙動を示す結果が得られている。

3.2 付着劣化による引張剛性の低下の影響

コンクリートの引張剛性を表す係数 α の影響を検討する。図-8は、付着状態を表す係数 K_s を0(完全付着)とし、付着劣化区間における α を0.4, 0.6, 0.8と変化させた場合の荷重とたわみの関係である。

係数 α が大きくなるにつれ、すなわちコンクリートの負担する引張力が減少するにつれて、部材の剛性が低下し、曲げ耐力、終局変位ともに減少する結果となっている。

3.3 付着劣化と鉄筋断面積減少の複合

実際の鉄筋コンクリート部材では、内部の鉄筋が腐食した場合、鉄筋の断面積の減少、付着の劣化にともなう鉄筋とコンクリートのすべりおよびコンクリートの負担する引張力の減少が複合すると考えられる。これらが同時に生じたはり部材の曲げ挙動について検討する。

図-9は、通常のはり ($K_s=0, \alpha=0.4$)、鉄筋の断面積を10%減少させたはり ($K_s=0, \alpha=0.4$)、鉄筋の断面積の減少を10%減少かつ付着劣化を考慮するため係数を適当に定めたはり ($K_s=0.5, \alpha=0.6$)の荷重とたわみの関係を示している。鉄筋断面積の減少は、鉄筋比を小さくすることに他ならないので、終局耐力が低下し、終局変位が増大する結果となる。断面積の減少と付着劣化が複合するとした場合、終局耐力の低下に加え、終局変位も低下する結果となった。

本解析の範囲内では、部材の終局曲げ耐力の

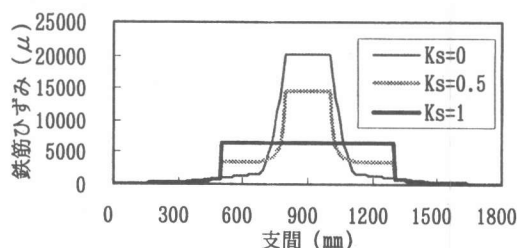


図-7 終局時における鉄筋のひずみ分布

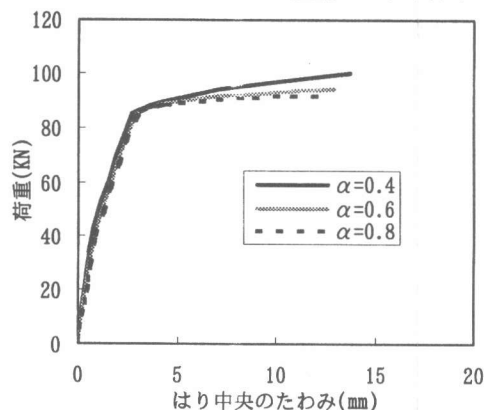


図-8 荷重-たわみ関係 (α を変化)

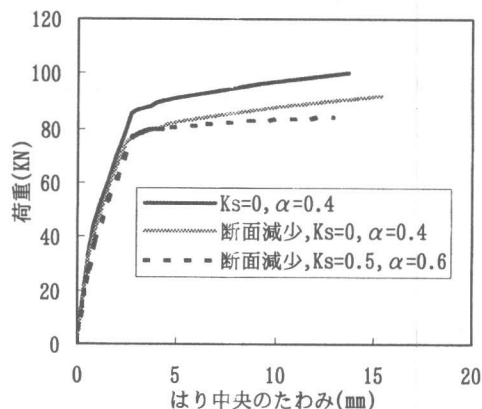


図-9 荷重-たわみ関係 (複合)

低下には鉄筋断面積の減少の影響が大きく、終局変位の低下には付着性状の影響が大きいといえる。

4. 付着を劣化させた RC はりの実験

4.1 実験概要

鉄筋が腐食することにより、鉄筋とコンクリートの付着性状が変化する。ここでは、付着の低下が実際の部材の曲げ挙動に及ぼす影響を総合的に検討するために、劣化区間における付着状態を意図的に低下させた鉄筋コンクリートは

表-3 供試体の諸元ならびに計算に用いた係数

供試体	断面幅b	有効高d	かぶりe	支間 L	付着劣化区間 l	主鉄筋	鉄筋比	Ks	α
	mm	mm	mm	mm	mm		%		
通常付着	200	240	60	1800	無し	2-D16	0.83	0	0.4
中間付着 1	200	240	60	1800	400	2-D16	0.83	0.5	0.6
中間付着 2	200	240	60	1800	800	2-D16	0.83	0.5	0.6
アンボンド	200	240	60	1800	800	2-D16	0.83	1	0.6
ひび割れ	100	240	40	1800	800	1-D16	0.83	0.5	

り供試体を作製し、曲げ载荷試験を行った。供試体の形状は、図-1に示したものである。供試体の種類、諸元を表-3に示す。

中間の付着状態は、鉄筋のまわりに油粘土を巻き、ふしが1mm程度出るようにすることにより実現した。これは、あらかじめ行った引抜き試験の結果をもとに決定した方法である。

アンボンド状態は、鉄筋をやわらかいビニールパイプで覆うことにより作り出した。

また、鉄筋に沿った腐食ひび割れが部材中の鉄筋の付着状態に及ぼす影響を検討するために、供試体表面から鉄筋に到達する幅2mmの人工ひび割れを設けた供試体を作製した。

载荷は、すべて等曲げ区間を40cmとした2点集中载荷とした。付着劣化区間における鉄筋のひずみ分布を測定した。

4.2 鉄筋のひずみ分布

図-10は、通常付着供試体、中間付着2供試体、ひび割れ供試体、アンボンド供試体の、鉄筋降伏時における鉄筋のひずみの軸方向の分布の実験値と計算値を示したものである。計算には、表-3に示した係数を用いた。アンボンド供試体では、コンクリートの引張剛性は考慮せず、鉄筋のみにより引張力が受け持たれるとした。

鉄筋とコンクリートの付着が低下するにつれて鉄筋のひずみ分布が付着劣化区間において一様分布に近づいていることが実験値に現れている。付着状態を表す係数を適切に定めた計算値は、この傾向を表していることがわかる。

ひび割れ供試体の鉄筋のひずみ分布は、中間付着の供試体の場合に近い実験結果が得られている。実際の鉄筋コンクリート部材では、腐食

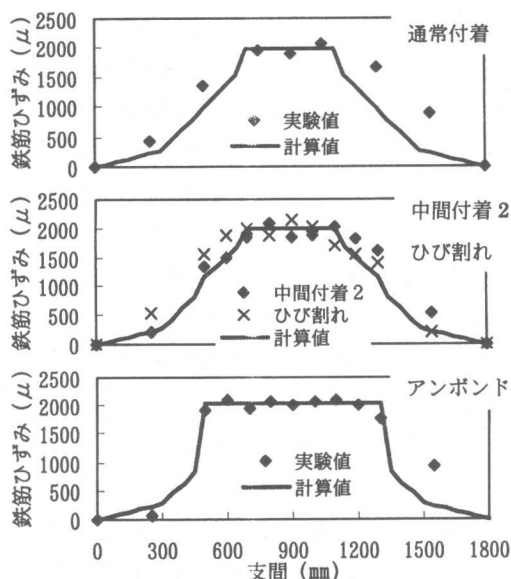


図-10 降伏時における鉄筋のひずみ分布

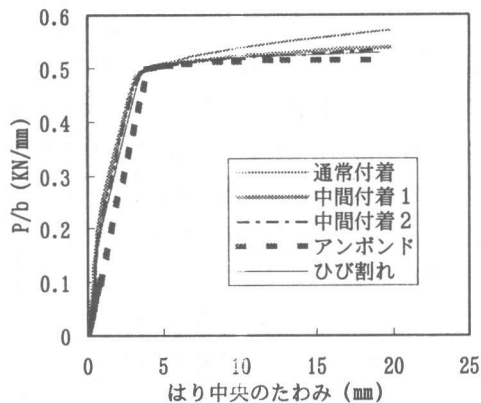


図-11 荷重-たわみ関係 (計算値)

生成物の堆積、腐食ひび割れの発生の両方が付着を低下させる原因として寄与していることが示唆される。

4.3 荷重-たわみ関係

各供試体の荷重と部材中央のたわみの関係の計算値を図-11に、実験値を図-12にそれぞれ示す。ひび割れ供試体のみ断面幅が他の供試

体と異なるので、荷重は単位断面幅あたりの値で示してある。

付着の低下、付着劣化区間の増大による、各供試体の部材の剛性の低下、曲げ耐力の低下の順序は、本計算方法により、大略的には表現し得ているといえる。しかし、中間付着およびひび割れ供試体の鉄筋降伏前における剛性の実験値は、計算で予測される以上に低下していること、および付着が劣化した供試体の終局変位は、計算値よりも小さくなることが明らかとなった。特にアンボンド供試体は、終局変位の実験値が計算値に比べて著しく小さい。これらは、用いた計算の仮定に含まれていない事象に起因していると考えられる。この理由のひとつは次節に述べる曲げひび割れ分散性の違いによるものと考えている。

4.4 曲げひび割れの分散性状

図-13 は代表的な供試体の曲げひび割れ性状である。付着が低下するにしたがい、曲げひび割れの分散性が低下し、ひび割れ間隔が大きくなっている。その結果、付着の低下した供試体では、ひび割れ断面における変形の局所化の程度が大きくなり、部材の変形の平均値が同じであっても、圧縮側のコンクリートが早く破壊条件に達したと考えられる。本研究における計算モデルでは、平均断面を対象としているためこのような曲げひび割れの分散性の変化に起因した変形の局所化は考慮できない。今後の課題である。ただし、実環境下に置かれた鉄筋コンクリート部材では、一般に曲げひび割れ発生後に腐食が進行するため、この問題は、腐食の進行過程の予測を含めたフレーム¹⁾の中で考えて行きたい。

5. まとめ

本研究では、内部の鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の曲げ耐荷性状の評価手法について検討を行い、以下のことが明らかとなった。

(1) 鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の

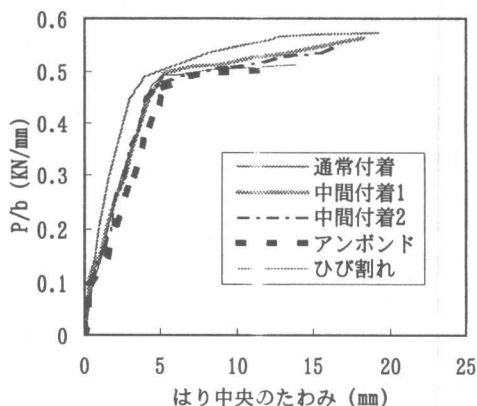


図-12 荷重-たわみ関係 (実験値)

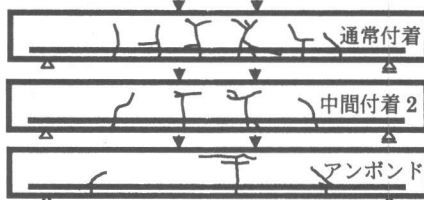


図-13 ひび割れ状況

曲げ耐力の低下には、付着の劣化よりも鉄筋腐食による鉄筋の断面積の減少の影響が大きい。

(2) 鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材では、腐食生成物の堆積、腐食ひび割れの発生の両方が原因となり、付着の劣化が生じていると考えられる。

(3) 付着が劣化した鉄筋コンクリート部材では、曲げひび割れ分散性が低下することによる、曲げ終局変形の低下が見られた。

参考文献

- 1) 濱田宏, 丸山久一, 下村匠, 青山敏幸: 腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の劣化予測モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp811-816, 1997
- 2) 梅原秀哲, 田辺忠顕, 吉田弥智: 鋼材の付着状態を考慮した PC ラーメンの履歴挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.396/V-9, pp. 89-98, 1988.8
- 3) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成側, 技報堂出版, 1991
- 4) 睦好宏史, 町田篤彦: FRP を外ケーブルに用いた PC はりの力学性状および曲げ耐力, 土木学会論文集, No.442/ V-16, pp.153-159, 1992.2