

論文 鉄筋腐食が部材の強度特性に及ぼす影響に関する実験的研究

新井 泰^{*1}・渡辺 忠朋^{*2}・平野 勝識^{*3}・吉川 和行^{*3}

要旨：鉄筋腐食による地下構造物の変状に対して、安全余裕の算定方法や補強対策工の設計手法について十分な検討がなされていない現状がある。本研究では、腐食鉄筋とコンクリートの付着特性に着目したせん断実験として、鉄筋をコンクリートブロックによって直接加力し、ダウエル効果を確認するための実験と、コンクリートのせん断強度とダウエル効果を同時に考慮できる逆対称加力式せん断実験を行い、鉄筋腐食が部材のせん断強度特性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、鉄筋腐食は鉄筋・コンクリート間の付着劣化や膨張ひびわれを誘発し、これらが部材のせん断強度や変形性能に与える影響も非常に大きくなることがわかった。

キーワード：地下構造物, 腐食鉄筋, 付着, ダウエル作用, せん断強度特性, せん断挙動

1. はじめに

開削工法で築造された古い地下構造物の変状には、さまざまな要因で発生したクラックに地下水が浸透し、季節変動による乾湿の繰り返しを経て鉄筋が腐食することに起因する事例が多いものの、それらに対する合理的な管理手法については未だ確立されていない。また、当該事例の中で、著しい鉄筋腐食が見られ、鉄筋とコンクリートの定着が不十分であると想定される箇所に対する合理的な安全余裕の算定法や補強対策工の設計手法についても十分な検討は行われていない。

このような状況を踏まえ、筆者らは腐食鉄筋とコンクリートの付着特性^{1),2)}に着目した様々な基礎実験とシミュレーション³⁾を実施しているが、本論文では、鉄筋腐食が部材のせん断強度特性に及ぼす影響を把握するために行った部材実験に関する結果と考察について述べる。

なお、実験は、①鉄筋かぶりをパラメータとする梁試験体の鉄筋をコンクリートのブロック（以下、加力ブロック）によって直接加力し、ダウエル効果を確認するための実験^{4),5)}（以下、ダウエル試験）、②スパン中央部のせん断力が一

定となるような形状を有する試験体の断面中心に鉄筋を配し、コンクリートのせん断強度とダウエル効果を同時に考慮できる逆対称加力実験（以下、せん断試験）の2種類について行った。

2. 実験概要

2.1 材料諸元

試験体の材料諸元を表-1に示す。コンクリート強度は設計強度 24N/mm²の早強コンクリートとし、粗骨材寸法を 15mm 以下とした。鉄筋は、ダウエル試験では D25 (SD345)、せん断試験では D16 (SD345) とした。なお、コンクリートは加力時に上面となる方向から打設した。

表-1 材料諸元

(1)コンクリート

実験ケース	材齢	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数(1/3) (×10 ⁴ N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
ダウエル試験	試験時 (41日)	29.8	2.50	3.0
せん断試験	試験時 (41日)	29.8	2.50	3.0

(2)鉄筋

実験ケース	呼び径	鋼種	降伏点 (N/mm ²) (降伏ひずみ)	弾性係数 (3/4σ時) (N/mm ²)
ダウエル試験	D25	SD345	375 (2026×10 ⁻⁶)	1.916×10 ⁵
せん断試験	D16	SD345	379 (2078×10 ⁻⁶)	1.875×10 ⁵

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル研究室 工修 (正会員)

*2 北武コンサルタント(株) 常務取締役 工博 (正会員)

*3 (株) フジタ 技術センター 土木研究部 工修 (正会員)

2.2 電気腐食による腐食試験体の作成方法

図-1に電気腐食の概要を示す。健全な鉄筋を埋設した試験体を塩化ナトリウム溶液の電解液に浸漬し、陽極を鉄筋端部に接続し、電解液中に設置したステンレスメッシュを陰極として通電を行った。通電は、試験体表面に鉄筋腐食の膨張圧で発錆したひび割れから、鉄筋発錆の兆候である緑青色のにじみが電解液中に確認されるまで行った。この緑青色のにじみは、試験体を気中に取り出した段階で赤褐色に変化する。なお、ダウエル試験体において鉄筋が露出するスリットと加力ブロックは、通電による腐食膨張により加力不能になる可能性があったため、アルミ箔で覆いシリコンコーキングした。

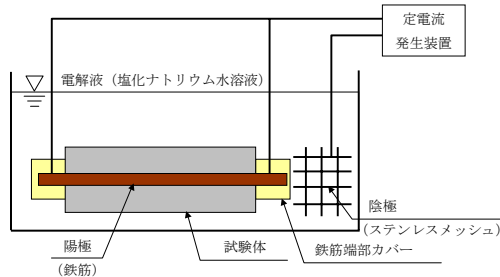


図-1 電気腐食の概要

2.3 鉄筋の腐食減少率

鉄筋の腐食減少率を求めるために、荷重試験体から鉄筋を取り出し、10%クエン酸アンモニウムに浸漬し腐食生成物を除去した。JCI 規準集「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠し、腐食生成物の除去前後の質量変化を鉄筋の腐食減少率として算出した。その結果、腐食減少率はダウエル試験体で1.1%、せん断試験体で1.5%であった。

3. ダウエル実験

3.1 目的

RC 構造物のせん断耐力は、圧縮部コンクリートのせん断耐力、骨材のかみ合わせ、鉄筋のダウエル作用、せん断補強筋によるせん断抵抗など複数の因子によって構成されていることが知られている。RC 構造物のせん断耐力、破壊モードは、コンクリートと軸方向鉄筋の付着特性に依存するため、鉄筋腐食した RC 部材のせん断強度特性を評価するにあたって、軸方向鉄筋のダ

ウエル作用を適切に把握する必要がある。

鉄筋のダウエル作用に關与するパラメータとしては、コンクリート・鉄筋に作用する引張力、鉄筋径、側方かぶりなどが考えられるが、本研究では、実験パラメータを側方かぶりと鉄筋腐食の有無として実験を行った。

3.2 試験体の概要

試験体の概要を図-2に示す。既往の知見⁵⁾より底面かぶりは25mmで一定とし、側方かぶりは50mmと30mmとした。鉄筋腐食の有無は、試験体断面中央に1本だけ配した鉄筋の電気腐食の有無によって健全な試験体と腐食した試験体を作り分けた。なお、スパン中央部にある幅200mmの加力ブロックの両端は、幅3mmのスリットを設けて縁切りした。

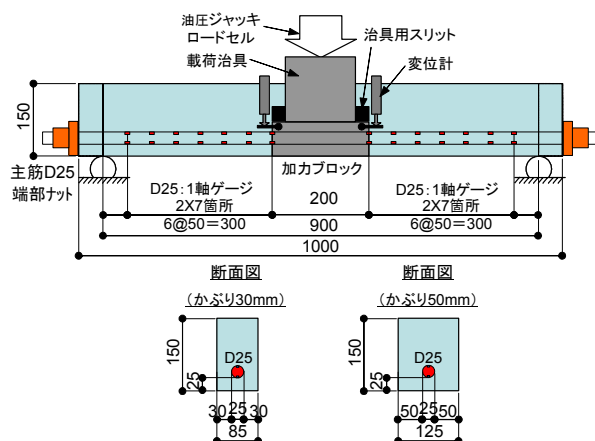


図-2 試験体、荷重・計測システムの概要

3.3 実験方法

実験は、スパン中央に設けた高さ30mm×幅200mmの治具用スリットに、t=19mm、SS400の鋼板で構成された箱状の荷重治具を挿入し、コンクリートの加力ブロックと一体化した鉄筋を油圧ジャッキにより直接加力して行った。データ収録は、最大荷重までは1kN間隔の荷重制御で行い、最大付近以降は急激に進展する破壊状況に応じて更に細かい間隔で行った。

鉄筋のひずみは鉄筋上下面に幅5mm×深さ3mmの溝を切削し、溝底面に50mm間隔でひずみゲージを14箇所貼付し計測した。なお、当該ゲージは養生により鉄筋腐食の影響を受けない。

加力ブロック鉛直変位は、当該ブロックの左右表裏4箇所の計測値を平均して求めた。

3.4 実験結果

(1) ピーク荷重

実験結果を表-2に示す。ピーク荷重は、鉄筋腐食の無いD1,D3と鉄筋腐食の有るD2,D4で大きな差は無かった。これは、電気腐食時の保護養生により、加力ブロック近傍の鉄筋が十分腐食できなかったためであると考えられる。

表-2 実験結果

側方かぶり (mm)	鉄筋の状態 (D25, SD345)	試験名	ピーク荷重 (kN)	ピーク荷重時変位 (mm)
50	健全	D1	14.7	1.36
	電気腐食	D2	14.4	0.66
30	健全	D3	10.8	0.60
	電気腐食	D4	10.7	0.64



写真-1 鉄筋腐食状況 (D4)

(2) 荷重変位関係

側方かぶりが50mmであるD1,D2試験体の荷重と加力ブロック鉛直変位の関係を図-3に示す。ピーク荷重、剛性はD1~D4共にほぼ同等であり、鉄筋腐食の影響は見られない。ポストピークではD2,D4試験体の方が低い荷重水準で推移し、荷重低下が階段状に発生している。これは、前述のように腐食試験体の加力ブロック近傍に鉄筋の腐食が無く、また、本試験方法では加力ブロック両側からひび割れが進展し、荷重低下は付着ひび割れが鉄筋の発錆部位に到達した際に大きく発生するためと考えられる。

ここでポストピーク挙動に腐食が与える影響を把握するため、荷重変位曲線0~5mmの範囲で面積(エネルギー)を算定した。側方かぶりとの関係を図-4に示す。これより、鉄筋の腐食減少率が同等でも側方かぶりの大きい方が腐食によるエネルギー低下が大きいことがわかる。

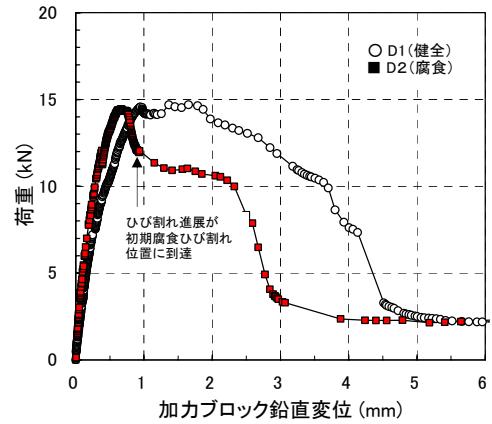


図-3 荷重変位関係 (かぶり 50mm)

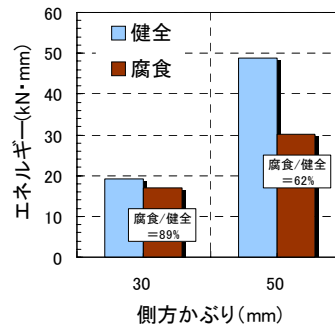


図-4 側方かぶりとエネルギー

(3) 鉄筋のひずみ

鉄筋の曲率分布を図-5、図-6に示す。D1では、ピーク荷重時変位1.0mm以降から梁両端方向に向かって徐々に曲率が増加している。一方、D2では、ピーク荷重時変位0.5mm以降急速に梁端部まで曲率が増加している。

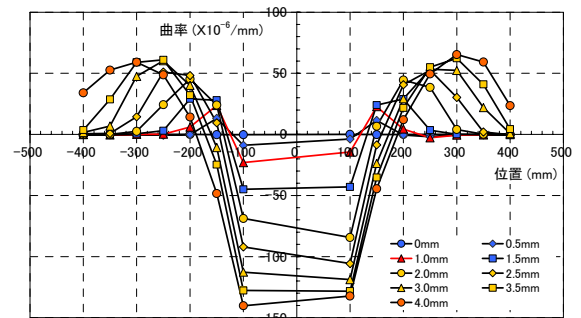


図-5 鉄筋の曲率分布 (健全 : D1)

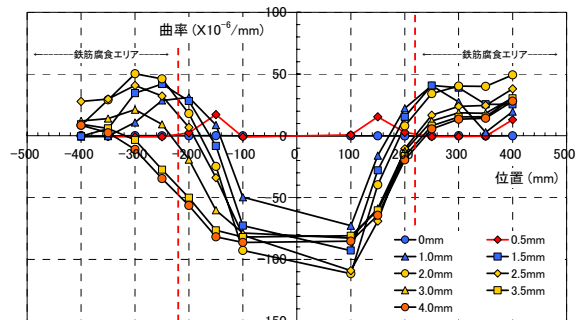


図-6 鉄筋の曲率分布 (腐食 : D2)

4. せん断実験

4.1 目的

RC 構造物のせん断挙動において、ダウエル作用は非常に重要な検討項目である。また、実際の構造系に関するせん断挙動を実験によって模擬する場合は、前項のダウエル実験のように予めスリット等を設けることなく、コンクリートのせん断強度とダウエル作用を同時に考慮できることが望ましい。

これらの要求に対しては、数多くの試験体形状および試験方法が提案されているが⁶⁾、多くの場合、せん断成分以外の応力の混在を余儀なくされるため、いずれも最終的な破壊性状について十分な再現性を得るには至っていない。

そこで本研究では、これらの課題を克服すべく、張らの研究⁷⁾にある、スパン中央部のせん断力が一定となるような形状寸法を有する梁試験体を用いた逆対称加力式実験を行い、コンクリートのせん断強度とダウエル作用を同時に評価することを試みた。

4.2 試験体の概要

製作した試験体の配筋と形状寸法、外観を図-7、写真-2(a)、(b)に各々示す。張らの研究は、無筋コンクリート梁の純せん断破壊の再現を目的としており、スパン中央部の応力・ひずみ分布が図-8のようになることを想定して試験体の形状寸法を決定している。

そこで本研究では、試験体の形状寸法と補強筋の配置について上記の研究成果を参考にして決定し、梁断面中心に鉄筋1本とスパン中央部以外に補強筋を配することとした。

なお、S2 試験体に関しては、側方かぶりの小さいスパン中央部に、鉄筋腐食に起因した鉄筋膨張による微細なひびわれ（以下、腐食ひびわれ）が、錆汁を伴い多数発生していた。

4.3 実験方法

実験は、図-9に示す荷重・計測システムを用いて行った。荷重は、油圧ジャッキ（以下、ジャッキ）による荷重制御方式とし、その刻みは約 1kN とした。計測は、ピーク荷重までは

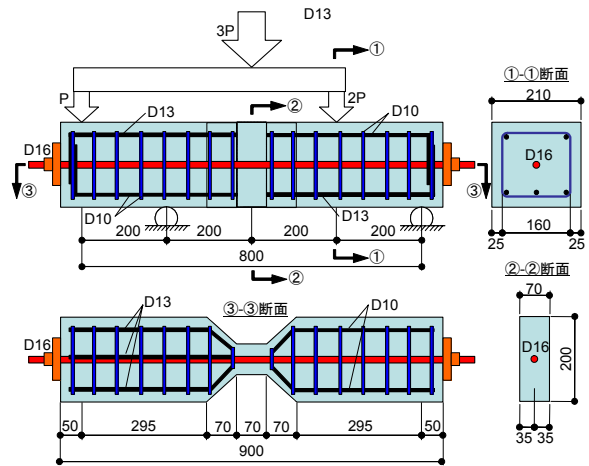
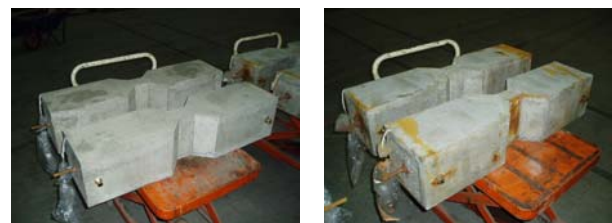
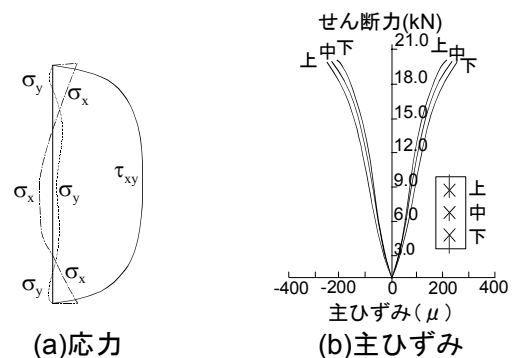


図-7 S1, S2 試験体の配筋と形状寸法



(a) S1 試験体 (b) S2 試験体
写真-2 S1, S2 試験体の外観



(a) 応力 (b) 主ひずみ
図-8 ②-②断面の応力・主ひずみ分布⁷⁾

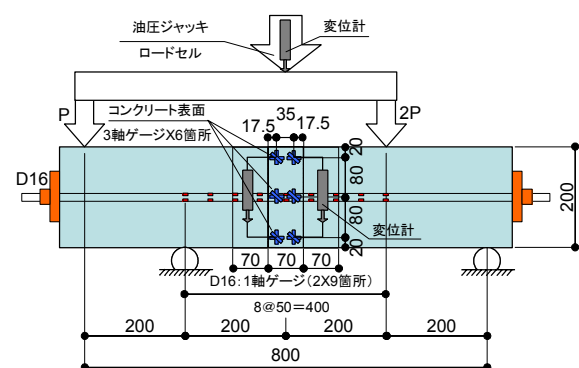


図-9 荷重・計測システムの概要

概ね荷重と同等のピッチで行い、ピーク荷重以降は急激に進展する破壊状況を確認しながらできる限り細かく行った。

4.4 実験結果

(1) 破壊性状

S1, S2 試験体の破壊性状を写真-3(a), (b)に各々示す。いずれも、スパン中央部において約45度方向に斜めの破壊面が形成されている。

(2) 荷重変位特性

載荷荷重とジャッキ変位の関係を図-10に示す。ピーク荷重は、鉄筋腐食が無いS1が、鉄筋腐食の有るS2より大きくなっており、S2においては、ピークまでの荷重変位関係に非線形性が見られる。この理由として、S2では①試験開始以前に腐食ひびわれが多数発生していること、②鉄筋とコンクリートの付着がS1と比べて著しく劣っていること、が挙げられる。

なお、ポストピークの収束荷重のピーク荷重に対する割合を当該試験におけるダウエル作用とみなすならば、S1では既往の知見にある30%と概ね同等の26%となるのに対し、S2ではそれよりもさらに7%程度小さい19%となり、鉄筋腐食によるダウエル作用の低減が顕著に表れている。

(3) 鉄筋の曲率とせん断力の関係

本研究では、載荷の進展に伴う鉄筋の変形状況を鉄筋の曲率により把握することとした。整理した結果を図-11に示す。S2ではせん断力(τ)が最大せん断力(τ_{max})の40%程度になった段階から、S1では少し遅れて70%程度になった段階から試験体中央近傍で大きなせん断変形が発生し、ピーク荷重時のS1の曲率は $\pm 100 \mu / \text{mm}$ 程度、S2の曲率は $\pm 50 \mu / \text{mm}$ となっている。

(4) せん断変形量とせん断力の関係

せん断変形量とせん断力の関係を図-12に示す。S1ではピーク荷重に達する直前でせん断変形が急激に発生しているが、S2では載荷開始直後から徐々に発生していることがわかる。

これは、腐食鉄筋とコンクリートの付着が弱く、載荷開始直後から鉄筋・コンクリート間で相対変位が発生している状況を表しているものと考えられ、4.4(2)で説明したダウエル作用の低減傾向の主要因と判断できる。



(a) S1 試験体 (b) S2 試験体

写真-3 S1, S2 試験体の破壊性状

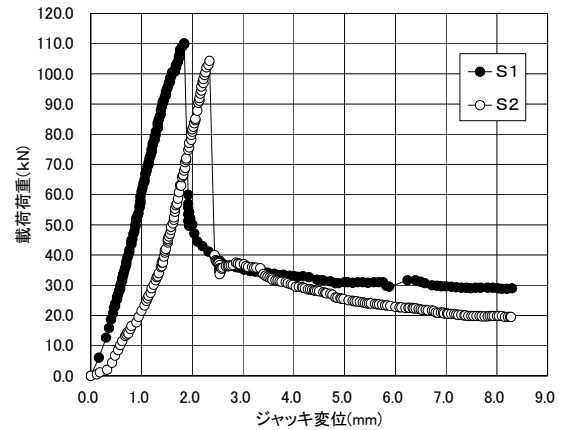


図-10 載荷荷重とジャッキ変位の関係

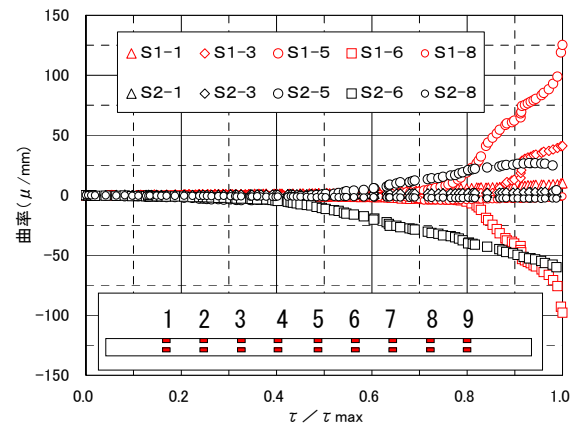


図-11 鉄筋の曲率とせん断力の関係

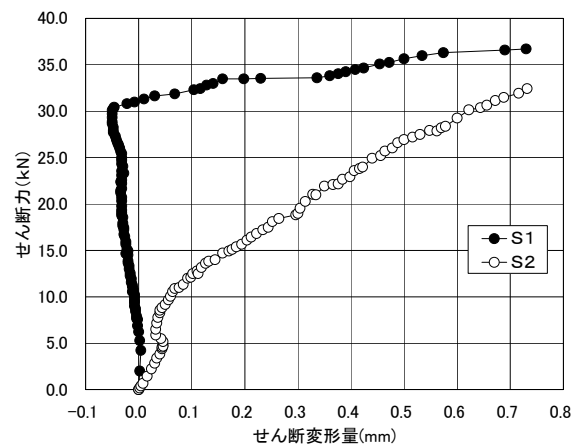
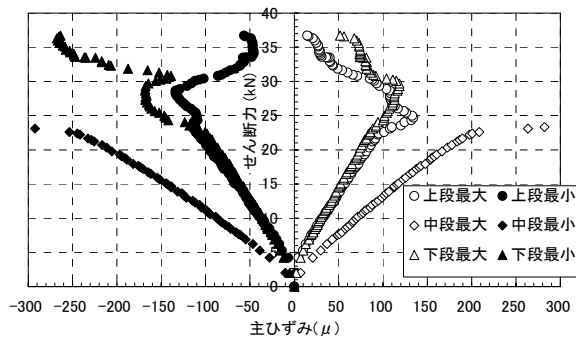
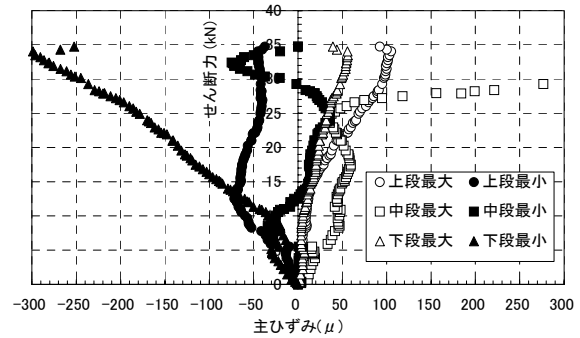


図-12 せん断変形量とせん断力の関係



(a) S1 試験体



(b) S2 試験体

図-13 せん断面近傍の主ひずみ分布

(5) せん断面近傍の主ひずみ分布

S1 と S2 のせん断面近傍の主ひずみ分布状況を図-13(a), (b)に各々示す。S1 では張らの無筋コンクリート梁に関する実験結果にあるように、横軸を主ひずみ、縦軸をせん断力としたグラフにおいて、最大主ひずみと最小主ひずみが縦軸に対して対称となり、当該値は中段のひずみゲージにおいて最大になる。S2 では前者のような幾何学的な傾向が見出せないが、これは腐食ひびわれが、荷重開始以降に発生するひずみの分布を乱している結果と判断できる。

5. 結論

各々の実験から得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉄筋の腐食は、せん断耐力とダウエル作用に顕著な影響を与える。
- (2) 腐食ひびわれは、荷重の増加に伴い構造体内部に発生するひずみ分布を著しく乱すとともに、荷重に伴う非線形挙動を誘発する。
- (3) 鉄筋の腐食は、荷重の増加に伴う変形抑止効果を著しく低減させる。

6. 今後の課題

地下構造物のうち、漏水、中性化等に起因した鉄筋腐食により健全度が著しく低くなっている箇所の耐力評価を行う場合は、本研究で明らかにしたような各種の影響を適切に考慮することが重要である。

今後は、当該実験結果の詳細分析により得られた構成則を用いて実現場の変状シミュレーション

を行ない、知見の妥当性を検証するとともに、それらの結果を別途報告する予定である。

なお、本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を得て行った。

参考文献

- 1) 島ほか：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，第 378/V-6，pp. 165-174，1987. 2.
- 2) 島ほか：腐食した鉄筋の局所付着応力-局所すべり関係，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13，No. 1，pp. 663-668，1991.
- 3) 新井ほか：コンクリートと鉄筋の付着特性に関する実験・解析(その 2)，土木学会第 59 回年次学術講演会，Vol. 9，No. 2，pp. 797-798，2004.
- 4) 古内仁ほか：鉄筋のダウエル作用における変形状について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 8，pp. 509-512，1985.
- 5) 日比野ほか：離散型要素を用いた鉄筋コンクリート部材のダウエル特性に関する 3 次元有限要素法解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 26，No. 2，pp. 979-984，2004.
- 6) 野口：コンクリートの非線形性状-圧縮・引張・曲げ・せん断実験，コンクリート工学，Vol. 39，No. 9，pp. 110-114，2001.
- 7) 张琦,过镇海：混凝土抗剪强度和剪切变形的研究，建筑结构学报，No. 5，pp. 17-24，1992.