

## 論文 鉄筋腐食と断面欠損によるRCはりの強度特性に関する実験的研究

有賀 貴志<sup>\*1</sup>・田辺 将樹<sup>\*1</sup>・吉川 和行<sup>\*2</sup>・渡辺 忠朋<sup>\*3</sup>

**要旨:** 鉄筋コンクリート構造を有する地下鉄トンネルでは、鉄筋腐食に起因した変状により、鉄筋の付着力の低下やコンクリートの浮きなどが生じる。検査において浮きが確認された場合、一般にはつり落としを行うが、鉄筋腐食と断面欠損が構造耐力に影響を与えることが懸念される。本研究では、鉄筋腐食および断面欠損を有する供試体を作製し、鉄筋とコンクリートの付着特性および断面欠損の有無に着目したRCはり部材の曲げ試験を行い、ひび割れ性状や曲げ耐力の検討を行った。その結果、はつり落としにおいてはRC構造の特性に対する考慮が必要であることが判明した。

**キーワード:** 腐食鉄筋, 断面欠損, 付着特性, 曲げ挙動, 荷重変位特性

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造を有する地下鉄トンネル等は、漏水等により鉄筋腐食が生じやすい環境にある。鉄筋腐食が生じた場合、その腐食膨張圧によるひび割れ等に起因してコンクリートに浮きが生じ、剥離・剥落により列車運行に支障を来す恐れがある。これを未然に防ぐため既往のマニュアル<sup>1)</sup>では目視あるいは打音検査により浮きが確認された場合、無筋、RCに係わらずはつり落としを行うことになっている。このため、RCでは局所的な付着切れに加えて断面欠損が生じることにより構造耐力への影響が懸念されるが、断面修復の力学的効果は必ずしも明らかになっていないことから、断面修復材自体の剥落を懸念して断面欠損部を残したまま供用される例も多い。

このような背景から、鉄筋とコンクリートの付着特性<sup>2),3)</sup>に着目した基礎実験や断面欠損が部材の強度特性に与える影響を把握することは非常に重要である。

そこで本論文では、断面欠損による部材の曲げ耐力と変形性能を、鉄筋とコンクリートの付着特性に着目したはり部材の曲げ実験により検討した結果について述べる。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験ケース

実験ケースおよび各ケースの供試体種別を表-1に示す。実験は、鉄筋腐食の有無と断面欠損の有無を想定した供試体を作製し、4ケース実施した。供試体種別は、断面欠損のない供試体（以下、標準供試体）をAグループ、断面欠損のある供試体（以下、欠損供試体）をBグループとし、各グループについて鉄筋腐食がない場合をA1, B1, 鉄筋腐食がある場合をA2, B2とした。

## 2.2 供試体の構造

標準供試体の寸法および配筋を図-1(a)、欠損供試体の寸法および配筋を図-1(b)に示す。

供試体は一般的なRC地下構造物を想定した寸法および配筋で作製した。標準供試体および欠損供試体の外形寸法はL4000mm×B250mm×H500mm、スパン長は3500mmとし、シアスパン比(a/d)は3.4とした。

鉄筋は、軸方向鉄筋を供試体断面の上下部に2本ずつ125mm間隔で配置した。なお、外形は揚重機の能力や養生水層寸法等の条件から決定し、また供試体断面下部の2本の引張鉄筋にのみ確実な腐食を導入するため帯鉄筋等の補強筋は配

\*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 (正会員)

\*2 (株) フジタ 技術センター 土木研究部 工修 (正会員)

\*3 北武コンサルタント (株) 専務取締役 工博 (正会員)

表－1 実験ケース・供試体種別

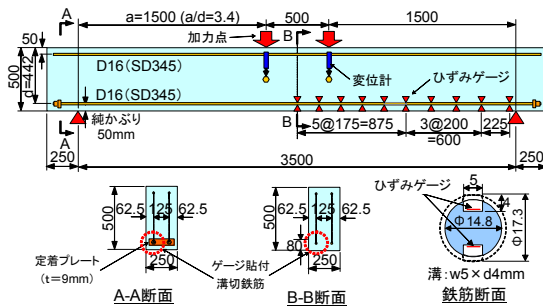
供試体種別	鉄筋腐食	断面修復	備考
A1	無	無	標準供試体
A2	有	無	〃
B1	無	有	欠損供試体
B2	有	有	〃

表－2 コンクリートの材料特性

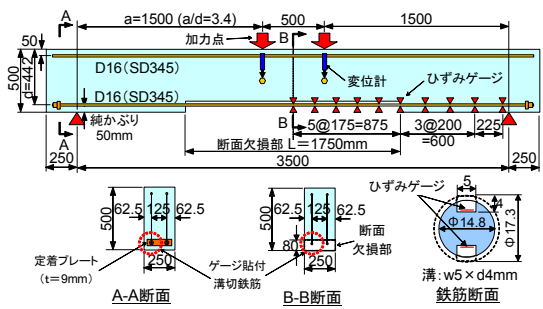
供試体種別	材齢	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
A1, B1	50 日	28.8	2.0×10 <sup>4</sup>	2.2
A2, B2		31.3	2.3×10 <sup>4</sup>	2.9

表－3 鉄筋の材料特性

呼び径	鋼種	降伏点(N/mm <sup>2</sup> ) (降伏ひずみ)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
D16	SD345	363 (2026μ)	1.98×10 <sup>5</sup>



(a) 標準供試体



(b) 欠損供試体

図－1 供試体の形状寸法および配筋

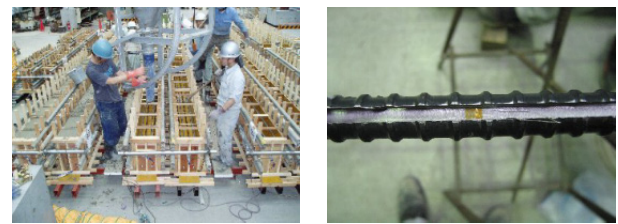
置しなかった<sup>4)</sup>。

鉄筋のかぶりは全供試体で共通とし、上下面を50mm、側方を54.5mmとした。なお、供試体断面下部の鉄筋には、L200mm×B9mm×H50mmの拔出し防止用定着プレートを取り付けた。

### 2.3 供試体作製方法

#### (1) 材料特性

コンクリートの材料特性を表－2、鉄筋の材料特性を表－3に示す。コンクリート材料は全ての供試体で共通とし、載荷時の強度が30N/mm<sup>2</sup>となるように呼び強度18N/mm<sup>2</sup>の早強コンクリートと、寸法が20mm以下の粗骨材を使用した。また、コンクリートは載荷時に加力面となる側から打設した。コンクリート打設時



(a)コンクリート打設 (b)鉄筋ゲージ貼付

写真－1 供試体作製状況

の状況を写真－1(a)に示す。なお、コンクリートの材料特性が鉄筋腐食のない供試体A1, B1と鉄筋腐食のある供試体A2, B2で異なるのは、供試体A2, B2では鉄筋を電氣的に腐食するために供試体を塩水へ浸漬させたためである。

鉄筋材料は全ての供試体で共通とし、呼び径D16 (SD345) を用いた。引張鉄筋となる供試体断面下部の鉄筋には幅5mm、深さ4mmの溝を切削し、軸ひずみ計測用のひずみゲージを貼付した後、エポキシ樹脂を充填した。鉄筋の切削寸法を図－1、切削状況を写真－1(b)に示す。

#### (2) 鉄筋腐食のある供試体の作製

本研究における鉄筋腐食のある供試体の作製は、既往の研究成果<sup>2),5)</sup>を参考にして図－2に示すように鉄筋を電氣的に腐食させる方法(以下、電食)で行った。

健全な鉄筋を埋設した供試体を、写真－2(a)に示すように、塩化ナトリウム水溶液を満した水槽に浸漬し、コンクリートが十分吸水した後、陽極を鉄筋、陰極をステンレス金網に接続

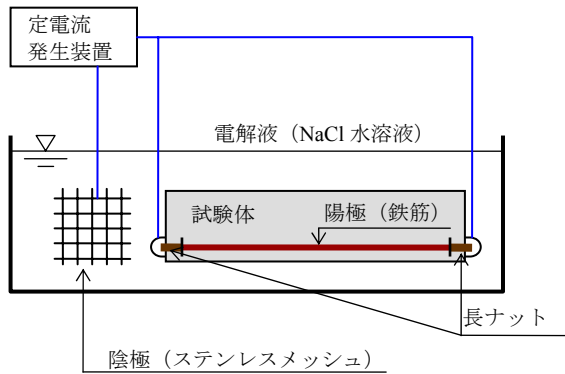


図-2 電食の概要

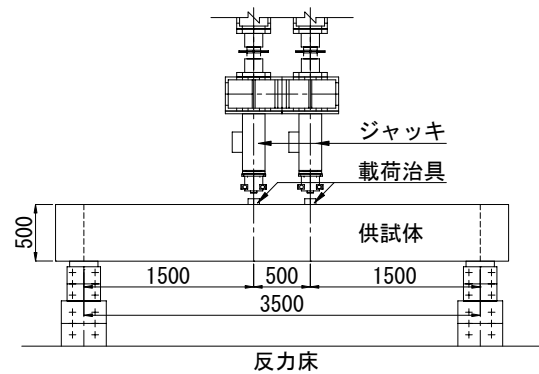
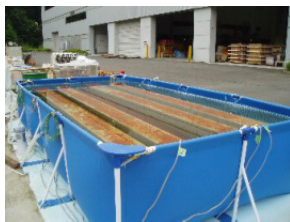


図-3 荷重装置



(a)供試体浸漬



(b)鉄筋腐食状況

写真-2 腐食鉄筋作製状況



(a)はつり状況



(b)断面欠損部

写真-3 断面欠損部作製状況

し、定電流発生装置により電流一定として2週間程度の通電を行った。

鉄筋腐食の程度は、腐食膨張によるコンクリートのひび割れ幅で管理するものとし、本研究ではひび割れ幅が平均的に0.3mm以上を目標とした。また、鉄筋全体に腐食が均等に発生するように、鉄筋は供試体内部に収めるものとし、定着プレートの外側に設置した長ナットを介して電極との接続を行った。このとき、陰極と短絡しないよう鉄筋の電極固定部が露出しないようコーキングを施した。

上記方法より得られた鉄筋の腐食減少率を既往の指針<sup>6)</sup>に則って算定したところ、供試体 A2 では3.0%、供試体 B2 では5.4%であった。

### (3) 断面欠損のある供試体の作製

供試体 B1, B2 の断面欠損部は、図-1 (b)に示すように引張鉄筋側の中央部に長さ1750mm (荷重スパン長の1/2)、深さ80mmの範囲として、写真-3 (a)に示すような方法で作製した。

## 2.4 荷重方法および計測項目

### (1) 荷重方法

荷重装置の概要を図-3に示す。実験では、供試体中央部に500mmの間隔で加力用治具を設置し、ジャッキにより2点単調荷重を行った。

また、荷重は弾性域においてはひび割れ発生に応じて約0.5kN間隔で行い、最大荷重以降は急激に進展する破壊状況に応じて極力細かい間隔で行った。

### (2) 計測項目

計測は、加力点の荷重および変位量、コンクリートひずみ、鉄筋軸ひずみについて、図-1に示す各位置で行った。なお、加力点の荷重および変位量は左右のジャッキ2箇所計測値を平均して算定し、鉄筋軸ひずみは鉄筋上下面に貼付した同位置での計測値を平均して算定した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 実験結果の整理方法

実験は、最大荷重以降、荷重が低下し供試体が破壊に至るまで荷重を行った。写真-4に示す供試体 A1, A2 では、図中に丸で示すせん断ひび割れが進展し斜め引張破壊に至り、供試体 B1, B2 では、供試体中央部に発生したひび割れが大きく開口し曲げ破壊に至った。

一方、一般に供用中の地下構造物の部材では、曲げ挙動が卓越していると想定される。このため本研究においては、はりの曲げ耐力を把握するために曲げ挙動が主体となる荷重ステップについて着目し、最大荷重以降の荷重低下ステップについては対象外とした。

ここで、曲げ挙動が主体となる荷重ステップの判定は、①供試体の中央上面において曲げ圧縮ひび割れが発生を目視で確認するまで、②供試体の中央上面で計測しているコンクリートひずみが最大値を記録するまで、③欠損供試体については、断面欠損部においてコンクリートと鉄筋が接触するまで、とした。

その結果、各供試体の曲げ挙動が主体となる荷重ステップは、供試体 A1 では上記の①、供試体 A2, B2 では上記の②（供試体 A2 :  $2396\mu$  , 供試体 B2 :  $1968\mu$  ）、供試体 B1 では上記の③、により各々判定した。

実験結果は、上記で判定された各荷重ステップにおける、①ひび割れ分布状況、②荷重変位特性、③鉄筋の軸ひずみと変位の関係、に関して分析及び考察を行った。

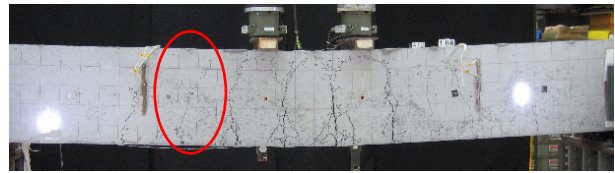
### 3.2 ひび割れ分布状況

#### (1) 標準供試体の比較

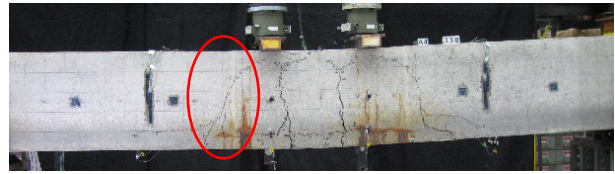
標準供試体のひび割れ分布状況を、写真-4 (a), (b)に示す。供試体 A1 では供試体に多くの曲げひび割れが発生しているのに対し、供試体 A2 ではひび割れ本数が少なく、発生位置は加力点の下側付近に集中している。なお、供試体 A2 では、供試体側面に鉄筋の腐食膨張による鉄筋軸方向のひび割れが生じており、荷重によりそのひび割れが進展した。

#### (2) 欠損供試体の比較

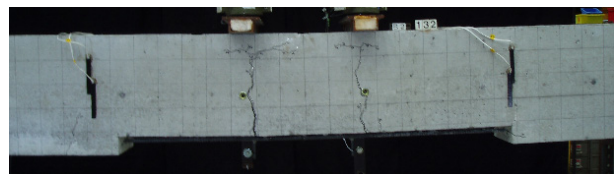
欠損供試体のひび割れ分布状況を、写真-4 (c), (d)に示す。供試体 B1 では、左右の荷重点の2箇所にはひび割れが発生したが、供試体 B2 は、荷重点中間にひび割れが発生した。なお、供試体 B2 では、鉄筋の腐食膨張による鉄筋軸方向のひび割れが、供試体側面の断面欠損部両端にあり、荷重によりそのひび割れが進展した。



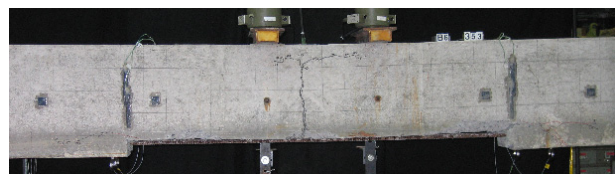
(a)標準供試体 A1（鉄筋腐食なし）



(b)標準供試体 A2（鉄筋腐食あり）



(c)欠損供試体 B1（鉄筋腐食なし）



(d)欠損供試体 B2（鉄筋腐食あり）

写真-4 ひび割れ分布状況

#### (3) 標準供試体と欠損供試体の比較

供試体 A1, A2 では、概ね供試体全体にひび割れが発生しているのに対し、供試体 B1, B2 では加力点下部付近にひび割れが集中して発生している。

#### (4) 考察

標準供試体、欠損供試体とも鉄筋腐食のある供試体の方が発生したひび割れ本数は少ない。これは、鉄筋の腐食によりテンションタイミング効果が有効に機能せず、円滑な応力分散が起きなかったためと考えられる。

また、標準供試体と欠損供試体を比べると、欠損供試体の方が発生したひび割れ本数は少ない。これは、供試体中央の断面欠損部では引張鉄筋が露出しており、荷重により供試体下部に生じた曲げ応力が鉄筋に伝達されることなく、コンクリートが脆性的に破壊したためと考えられる。

### 3.3 荷重変位特性

#### (1) 標準供試体の比較

各供試体の荷重変位特性を図-4に、最大荷重・加力点変位総括を表-4に示す。

荷重変位特性の勾配が最初に変化した点（以下、第一折れ点）の発生時の荷重および第一折れ点までの勾配は、供試体 A1, A2 とも概ね等しい傾向を示している。

最大荷重は、供試体 A1 では 49.5kN、供試体 A2 では 43.8kN であり、供試体 A1 の方が大きい。

#### (2) 欠損供試体の比較

第一折れ点発生時の荷重は供試体 B1 が供試体 B2 より小さいものの、第一折れ点までの勾配は概ね等しい傾向を示している。また、供試体 B1, B2 とも、第一折れ点発生後に荷重が低下し、載荷の進展とともに荷重が再び増加する挙動を示している。

最大荷重は、供試体 B1 では 40.0kN、供試体 B2 では 35.7kN であり、供試体 B1 の方が大きい。

#### (3) 標準供試体と欠損供試体の比較

第一折れ点発生時の荷重は標準供試体では約 20kN、欠損供試体では約 10kN であり、標準供試体の方が大きい。第一折れ点までの勾配は、全ての供試体で、概ね等しい傾向を示している。また、標準供試体では欠損供試体のような第一折れ発生後の荷重の低下は見られない。

最大荷重は、標準供試体が欠損供試体を上回り、 $A1 > A2 > B1 > B2$  の順である。

#### (4) 考察

鉄筋腐食がある場合、最大荷重は鉄筋腐食がない供試体と比較して、標準供試体、欠損供試体ともに 1 割程度低下する結果となった。これは鉄筋腐食による鉄筋定着部での付着切れの影響によるものと考えられる。

断面欠損がある場合、第一折れ点発生時の荷重は、標準供試体と比較して約 1/2 であった。これは、欠損供試体の断面欠損部では、標準供試体に比べて供試体のはり高が低いため、曲げ剛性が小さくなるためであると考えられる。

また、最大荷重は供試体 A1 に対して、供試体

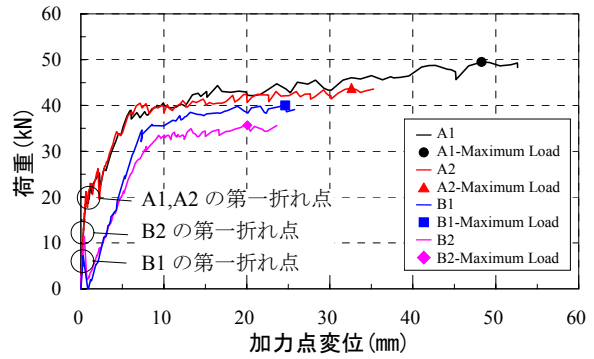


図-4 荷重変位特性

表-4 最大荷重・加力点変位総括表

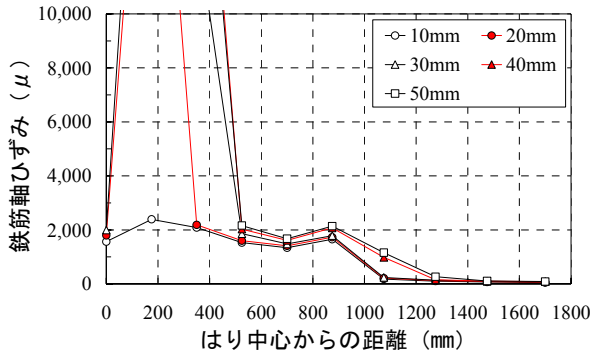
供試体種別	鉄筋腐食	断面欠損	最大荷重 (kN)	加力点変位 (mm)
A1	無	無	49.5	48.3
A2	有	無	43.8	32.6
B1	無	有	40.0	24.6
B2	有	有	35.7	20.1

B1 では約 2 割、供試体 B2 では約 3 割、低下する結果となった。これは、欠損供試体では第一折れ点発生後に荷重が低下し、載荷の進展とともに再び荷重が増加する挙動に起因しているものと考えられる。この挙動は、欠損供試体の断面欠損部では供試体断面下側の鉄筋が露出しており、コンクリートと鉄筋が分離しているために、載荷による荷重の伝達が断続的に行われたために生じたものと考えられる。

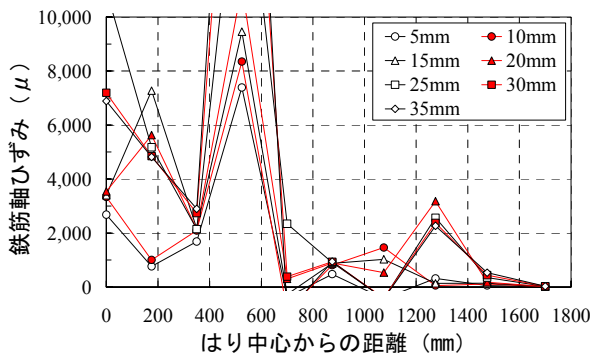
従って、断面欠損は鉄筋腐食よりもはりの曲げ性能に与える影響が大きくなると考えられる。

### 3.4 鉄筋軸ひずみと変位の関係および考察

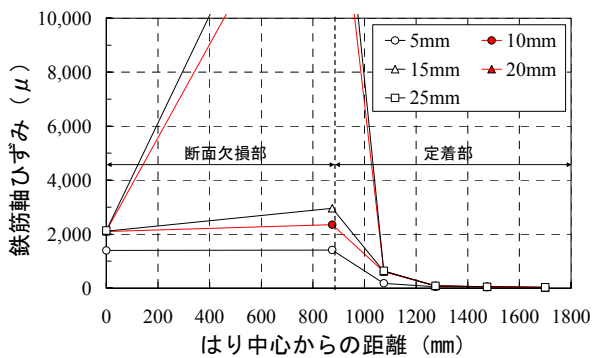
各供試体の鉄筋軸ひずみと変位の関係を図-5に示す。鉄筋腐食のない供試体 A1, B1 では、供試体の変位が増加すると定着部の鉄筋軸ひずみが漸増しており、付着が有効に働いていると考えられる。一方、鉄筋腐食のある供試体 A2, B2 では、供試体の変位が増加すると定着部の鉄筋軸ひずみが急激に変化しているが、写真-4によると当該部位ではひび割れが確認できないことから、鉄筋腐食による付着切れが発生しているものと考えられる。



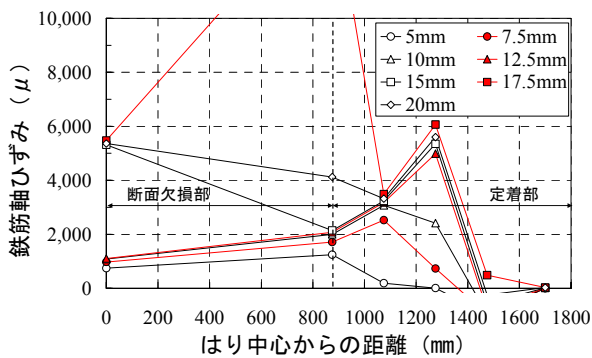
(a)標準供試体 A1 (鉄筋腐食なし)



(b)標準供試体 A2 (鉄筋腐食あり)



(c)欠損供試体 B1 (鉄筋腐食なし)



(d)欠損供試体 B2 (鉄筋腐食あり)

図-5 鉄筋軸ひずみと変位の関係

#### 4. 結論

本研究の条件における結論を以下に示す。

- (1) ひび割れの本数によって応力再配分の優劣を明確に把握できる。
- (2) 荷重の増加に伴う変形性能は、定着部の鉄筋腐食によって大きく損なわれる。
- (3) 欠損供試体の断面欠損部では、鉄筋腐食の有無に係わらず無筋コンクリートと同様の脆弱的な挙動を示す。
- (4) 断面欠損により部材の曲げ耐力は鉄筋腐食がない場合で2割、鉄筋腐食がある場合で3割程度低下する。
- (5) 部材の曲げ耐力に与える影響は、鉄筋腐食よりも断面欠損の方が大きい。
- (6) 鉄筋腐食に起因するコンクリートのはつきり落としを実施し、無補修で供用している構造については、断面欠損の大きさにもよるが、構造耐力が低下している可能性がある。

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) 鉄道総研：トンネル保守マニュアル(案),2002
- 2) 新井泰ほか：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,コンクリート工学年次論文報告集,Vol27, No.2, pp.739-744,2005
- 3) 岩波光保ほか：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
- 4) 古内仁ほか：鉄筋のコンクリートディープレームのせん断補強に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.11,No.2,pp.333-338,1989
- 5) 松尾豊史ほか：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐力機構に関する研究,コンクリート工学論文集,Vol.15,No.2,pp.69-77,2004
- 6) コンクリート工学協会規準集：コンクリート中の鋼材の腐食評価方法