

論文 断面欠損が生じたRCはりの補修効果に関する実験的研究

新井 泰^{*1}・有賀 貴志^{*2}・平野 勝識^{*3}・渡辺 忠朋^{*4}

要旨：鉄道トンネルでは、無筋、RCの構造種別に関わらず、打音検査により「浮き」があると判断される場合、はつり落としを行っている。しかしRC構造では、当該措置により断面欠損とそれに伴う鉄筋・コンクリート間の局所的な付着切れが発生し、保有耐力への影響が懸念される。本研究では、この影響を緩和する一手法である断面修復を「浮き」が発生しやすい鉄筋腐食箇所に適用した場合の力学的な効果について、腐食鉄筋とコンクリートの付着特性に着目した梁部材の曲げ実験を行うことにより検討した。その結果、鉄筋腐食の有無を踏まえて適切な断面修復を行えば、部材の曲げ耐力の回復を期待できることがわかった。

キーワード：断面修復，腐食鉄筋，曲げ挙動，荷重変形特性，付着特性

1. はじめに

鉄道トンネルでは、山陽新幹線の覆工剥落事故以降、トンネル安全問題検討会の答申を受けて、無筋、RCの構造種別にかかわらず剥落に対する健全度評価を実施している。即ち、打音検査により「浮き」があると判断された場合、はつり落としを行うが、RC構造を採用している地下鉄トンネル等においては、「浮き」が鉄筋腐食箇所に発生しやすいことに加え、当該措置により断面欠損とそれに伴う鉄筋・コンクリート間の局所的な付着切れが発生するため、保有耐力への影響が懸念されている。

この影響の緩和を目的として、従来から適用されている断面修復は、その一手法として有効な対策工と考えられる。しかし、その力学的な効果については必ずしも明確になっておらず、事業者によっては、断面修復材自体の剥落を危惧して断面欠損を生じさせたまま供用している例もある。

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に着目した基礎実験¹⁾や実現場のひび割れ調査結果の数値シミュレーション²⁾等を実施してきたが、本論文では、断面修復による部材の曲げ耐力の回復状況を、腐

食鉄筋とコンクリートの付着特性に着目した梁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 供試体の構造と実験ケース

供試体の形状寸法と配筋を図-1に、実験ケースを表-1に示す。当該構造は一般的な開削トンネルを想定し、実大のスラブ相当として、外形はW250×H500×L4000mm、鉄筋は供試体断面の上下に125mm間隔で2本配置した。なお、外形は揚重機の能力や養生水槽寸法等の条件から決定し、また引張鉄筋のみに確実な腐食を導入すべく帯鉄筋等の補強筋は配置しなかった^{3),4)}。

実験ケースは、パラメータを断面修復の有無、供試体断面下部に配した2本の鉄筋腐食の有無として設定した。なお、鉄筋かぶりパラメータとせず、上・下面かぶりは50mm、側方かぶりは54.5mmに固定した。

さらに、当該鉄筋腐食による鉄筋膨張に起因した供試体下部に発生する線状のひび割れ（以下、線状腐食ひび割れ）にひび割れ注入材（以下、注入材）を施した場合の力学的な効果を確認するための実験ケースも併せて設定した。

*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 (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)

*3 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 工修 (正会員)

*4 北武コンサルタント(株) 専務取締役 工博 (正会員)

2.2 供試体作成方法

(1) 材料物性値

コンクリートの材料物性値を表 - 2 に、鉄筋の材料物性値を表 - 3 に示す。本研究では、実験時の強度が 30 N/mm^2 程度となるように呼び強度 18N の早強コンクリートを使用し、粗骨材寸法は 20mm 以下とした。なお、コンクリートは加力面となる方向から打設した。各供試体は打設後 10 日で脱型し、鉄筋腐食供試体（以下、腐食供試体）については通電を行うため、さらに平均水温 28°C の塩水に約 2 週間浸漬した。

鉄筋は、全数 D16 (SD345) を使用した。

(2) 腐食供試体の作成方法

本研究では、腐食供試体の作成にあたり、既往の研究成果^{1),4)}を参考にして鉄筋を電氣的に腐食させる方法を採用した。当該方法の概要を図 - 2 に示す。本研究で用いた供試体では、鉄筋端部を全て供試体内部に収め、通電用端子として長ナットを用いた。これは過去の腐食供試体作成時の経験から、鉄筋を供試体から露出させると、当該箇所付近に局所的な腐食を誘発し、鉄筋全長に均等な腐食状態の作成が困難になると判断されたからである。

また、JCI 規準「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に則って算定した供試体種別毎の腐食減少率は、R2 が 2.0%、R3 が 1.3%、D2 が 3.0% となった。

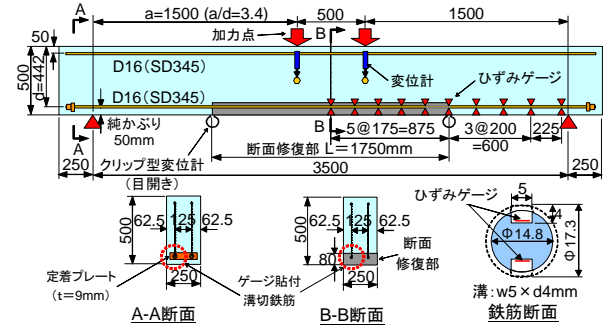
(3) 修復供試体の作成方法

図 - 1 (a) に示す断面修復状態を想定した供試体（以下、修復供試体）は、形状寸法および外観が図 - 1 (b) に示す比較用ダミー供試体（以下、ダミー供試体）のスパン中央部に、深さが 80mm 、長さが純スパン長の半分である 1750mm の断面欠損を機械はつりで作成後、表 - 4 の材料物性値を有する断面修復材（以下、修復材）を施すことによって作成した。この際、修復材の施工方向は、地下鉄トンネルの上床版を想定して写真 - 1 (a) に示すように上向き施工とした。

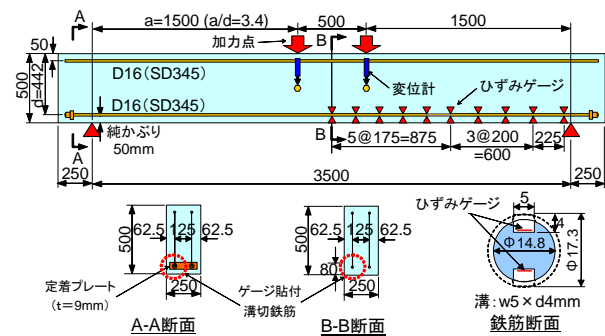
なお、当該修復材は、プレミックスタイプのポリマーセメントモルタルであり、厚付時の施

表 - 1 実験ケースとパラメータ

供試体種別	断面修復	鉄筋腐食	ひび割れ注入
R1	有	無	無
R2	有	有	無
R3	有	有	有
D1(比較用)	無	無	無
D2(比較用)	無	有	無



(a) 供試体種別：R1・R2・R3



(b) 供試体種別：D1・D2

図 - 1 供試体の配筋と形状寸法

表 - 2 コンクリートの材料物性値

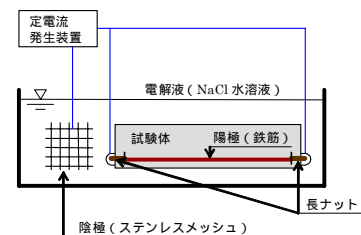
供試体種別	材齢	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)	割裂強度 (N/mm ²)
R2, R3, D2	試験時	31.3	2.30	2.9
R1, D1	50 日	28.8	2.00	2.2

表 - 3 鉄筋の材料物性値

呼び径	鋼種	降伏点 (N/mm ²) (降伏ひずみ)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)
D16	SD345	363 (2026 μ)	19.2

表 - 4 修復材の材料物性値

曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)	付着強度 (N/mm ²)	記事
11.5	41.0	2.05	2.2	ポリマーセメント系

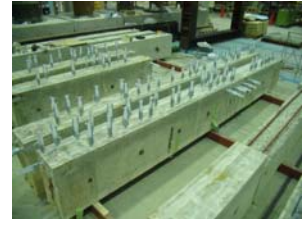


長ナットと鉄筋は、エンドプレートを通じてねじ止め固定されており、実験時の鉄筋の抜け出し防止を図っている。

図 - 2 腐食供試体の作成方法の概要



(a) 防錆剤塗布状況 (b) 上向き施工状況
写真 - 1 修復供試体作成状況



(a) 注入材の外観 (b) 注入状況
写真 - 2 注入供試体作成状況

表 - 5 注入材の材料諸元 (:公称値(28日))

材齢	曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	接着強度 (N/mm ²)	記事
試験時 (50日)	9.22	31.0	5.39	ポリマー セメント

工性を考慮して、微細なポリプロピレン繊維があらかじめ混入されている。

また、鉄筋腐食のある修復供試体（以下、腐食修復供試体）の作成にあたり、断面欠損作成時に露出する腐食鉄筋については、実務上の取り扱いに準じて、写真 - 1 (b)に示すように、錆を除去した後、防錆剤を塗布した上で修復材を上向きで施した。

(4) ひび割れ注入供試体の作成方法

ひび割れ注入を想定した供試体は、2.1で説明した線状腐食ひび割れの中に表 - 5に示す材料諸元を有する無機系の注入材を施すことによって作成した。無機系の注入材は火災時の有毒ガスの発生や地下水汚染等の心配が無く、地下鉄トンネルでは使用実績が多い。なお、修復材同様、上向き施工とする予定であったが、注入の質を優先させることとし、下向き施工とした。

2.3 載荷方法および計測項目

載荷は、図 - 1に示すように、スパン長が3500mm、シアスパン比(a/d)が3.4となる位置に設置した2台の油圧ジャッキにより行い、最大荷重までは約0.5kN間隔で、最大荷重以降は進展する破壊状況に応じて極力細かい間隔で行った。計測は、加力点荷重（以下、荷重）、加力点変位（以下、変位）のほか、コンクリートひずみ、鉄筋軸ひずみ、断面修復境界の目開き量について図 - 1に示す各位置で行った。

なお、実験結果で示す荷重と変位は、左右の加力ジャッキに付したロードセルおよび変位計の計測値を平均して算定し、鉄筋軸ひずみは、鉄筋上下面に幅5mm、深さ4mmの溝を切削し、溝底の上下に175~200mm間隔で貼付したひずみゲージの計測値を平均して算定した。

3. 実験結果と考察

3.1 曲げ挙動の判断の考え方

本研究で対象とする変状は、基本的に供用中の構造物で想定される程度のものであり、実験結果の分析にあたっては、せん断ひび割れが進展し斜め引張破壊に至る以前の曲げ挙動が主体となる載荷ステップの範囲で行う必要があった。

そこで、本研究においては、供試体の中央上面（圧縮側）に曲げ圧縮挙動によるひび割れが発生するまで、または、供試体の中央上面（圧縮側）において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、の載荷ステップを曲げ挙動が主体となる載荷ステップの範囲とみなした。

3.2 実験結果の分析項目

表 - 1に示した実験ケース毎に、3.1で説明した考え方に則って曲げ挙動とみなすことができる載荷ステップ範囲を確定し、実験結果を分析することとした。分析項目としては、ひび割れ分布状況、荷重変形特性、断面修復部（図 - 1(a)参照）の始・終端部（以下、修復境界）の目開き量と変位の関係、鉄筋軸ひずみと変位の関係、を考慮し、については、3.1で説明した載荷ステップ範囲における最終ステップの写真から把握することとした。

3.3 ひび割れ分布状況（写真 - 3，4）

(1) 修復供試体とダミー供試体の比較

修復供試体の全てにおいて、左右の修復境界上から加力点に向けてひび割れが発生しているが、ダミー供試体においてはいずれも発生していない。

無腐食供試体同士の比較において、D1 では供試体全体にわたり均等にひび割れが発生しているのに対して、R1 では、D1 より少なくなっている。

一方、腐食供試体同士の比較において、R2 では曲げひび割れの発生本数が D2 より極端に少なくなっている。また、D2 については、腐食鉄筋の設置高さ位置で供試体軸方向にひび割れが伸びている。

(2) 腐食供試体と無腐食供試体の比較

ダミー供試体同士の比較において、D1 では供試体全体にわたり均等にひび割れが発生しているのに対して、D2 では D1 より少なくなっている。

一方、修復供試体同士の比較において、R1 では供試体全体にわたり均等にひび割れが発生しているのに対して、R2 ではひび割れの発生本数が R1 より極端に少なくなっている。

(3) ひび割れ注入の有無による比較

R2 と R3 の比較において、R3 では 供試体全体にわたり均等にひび割れが発生しているのに対して、R2 では R3 より少なくなっている。

(4) 考察

修復供試体のひび割れ発生状況において、ひび割れの発生本数がダミー供試体のそれと比較して少なくなる傾向にあること、左右の修復境界から加力点に向けてひび割れが全数発生していること、等は、供試体内の応力伝達機構がダミー供試体と異なることに起因していると考えられ、ひび割れ分布状況が両者で等しくなることは無いものと考えられる。

なお、両者における供試体内の応力伝達機構に差異が生じる理由としては、修復供試体の断面修復部において、コンクリートと明らかに異



(a) 供試体種別 R1



(b) 供試体種別 R2



(c) 供試体種別 R3

写真 - 3 修復供試体のひび割れ発生状況



(a) 供試体種別 D1



(b) 供試体種別 D2

写真 - 4 ダミー供試体のひび割れ発生状況

なる材料物性値（表 - 4）を有する修復材があと施工され、断面修復部とそれ以外の部位で鉄筋との相互作用が異なってくる等が考えられる。

鉄筋腐食の有無がひび割れ分布状況に与える影響については、腐食状況が鉄筋全長に対して必ずしも均等ではないこと、腐食に伴う膨張圧が均一になりにくいこと、等により線状腐食ひび割れの発生形態にばらつきが発生し、定量的に把握することは困難であると考えられる。

3.4 荷重変形特性（図 - 3，表 - 6）

(1) 修復供試体とダミー供試体の比較

全ての修復供試体において、第一折れ点発生時期がダミー供試体より遅くなっており、かつ当該点までの勾配が概ね等しくなっている。

無腐食供試体同士の比較において、最大荷重

は R1 が D1 を若干上回り、変位は R1 が最小となっている。

一方、腐食供試体同士の比較において、最大荷重および変位は R2, R3 が D2 を大きく上回っている。

(2) 腐食供試体と無腐食供試体の比較

ダミー供試体同士の比較において、最大荷重および変位は D1 が D2 を上回っている。

一方、修復供試体同士の比較において、最大荷重は R1 が R2, R3 を若干上回り、変位は R1 が最小となっている。

(3) ひび割れ注入の有無による比較

荷重変位履歴から判断できる大きな差異は見られない。

(4) 考察

鉄筋腐食の有無に関係なく、全ての修復供試体において最大荷重が概ね等しくなった理由としては、断面修復を施すことによって、鉄筋との付着が確保されたこと、腐食供試体の断面修復においては、鉄筋の錆を除去した後、ひび割れの無い修復材が施され、断面修復部では、鉄筋との付着特性が改善されたこと、等が考えられる。

図 - 3 において、第一折れ点発生時期がダミー供試体と修復供試体で異なる理由としては、前者では、後者のように機械はつりによる断面欠損作成作業が無く、鉄筋とコンクリートの付着特性は供試体全長に対して不変であり、加力開始後の鉄筋からコンクリートへの応力再配分が円滑に進み、ひび割れが前者より早く発生することに起因していると考えられる。

また、無腐食修復供試体 (R1) と腐食修復供試体 (R2, R3) で異なる理由としては、鉄筋とコンクリートの付着特性の相違が考えられる。

一般にひび割れ注入では、鉄筋膨張による鉄筋・コンクリート間の微細な隙間に注入材が浸透し、両者の付着改善による力学的な効果が期待される。しかし、実験後の供試体内部調査から、注入材が当該範囲まで十分浸透していたとは言い難く、上記の効果の有無を当該結果から

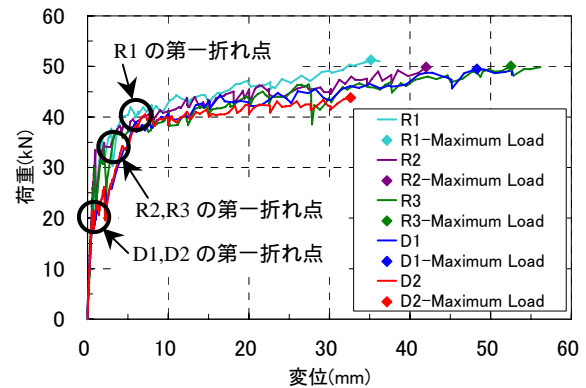


図 - 3 荷重変形特性

表 - 6 最大荷重・変位総括表

供試体種別	最大荷重(kN)	変位(mm)
R1	51.3	35.2
R2	49.9	42.0
R3	50.1	52.5
D1	49.5	48.3
D2	43.8	32.6

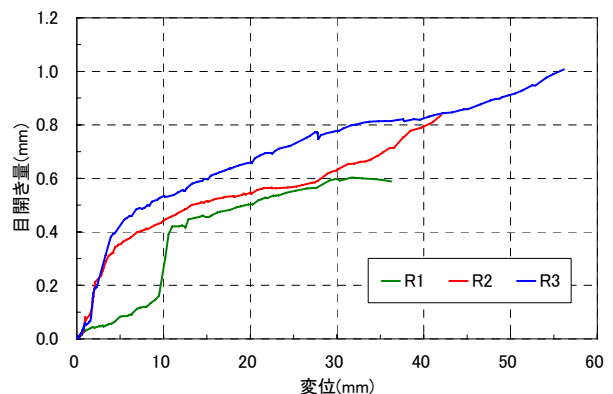


図 - 4 修復境界の目開き量と変位の関係

判断するには、更なる分析が必要と考えられる。

3.5 修復境界の目開き量と変位の関係

無腐食修復供試体 R1 と腐食修復供試体 R2, R3 に関する修復境界の目開き量と変位の関係を図 - 4 に示す。同図によると R1 では、加力開始後しばらくは漸増傾向を示すものの、変位 9mm 付近を境に急増し、その後再度漸増傾向を示している。

これに対して R2, R3 では、加力開始直後から急増傾向を示し、変位 3mm 付近を境に漸増傾向に転じている。この目開き量の増加傾向変化時期は、図 - 3 で示した第一折れ点発生時期と概ね合致しており、この結果は、修復供試体の挙

動が修復境界付近の挙動として端的に表れることを示していると考えられる。

3.6 鉄筋軸ひずみと変位の関係

無腐食修復供試体 R1, 腐食修復供試体 R2 および腐食標準供試体 D2 に関する鉄筋軸ひずみと変位の関係を図 - 5 (a), (b), (c)に各々示す。

R1 では, 変位の増加に伴い定着部の鉄筋軸ひずみが漸増しており, コンクリートとの付着が有効に働いていると考えられる。

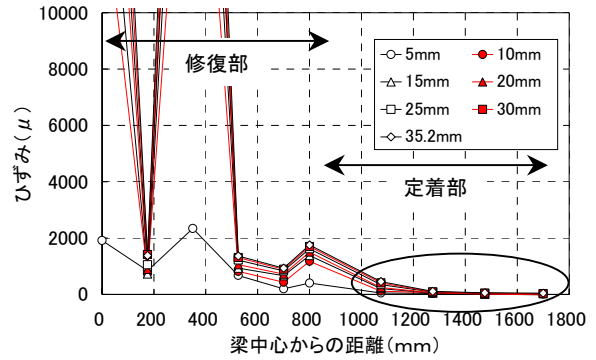
R2 では, 変位の増加に伴い, 定着部の鉄筋軸ひずみが急増しているが, これは加力に伴うひび割れの発生を示すものである。一方, 断面修復部については, R1 の定着部のように, 変位の増加に伴い鉄筋軸ひずみが漸増しており (図 - 5 (a)の丸枠参照), コンクリートとの付着が有効に働いていると考えられる。

D2 では, 定着部と断面修復部のいずれにおいても, ひび割れ発生の影響とコンクリートとの付着切れ傾向が顕著に表れている。しかし, この D2 と同じ腐食供試体である R2 の断面修復部では, 断面修復にあたり修復箇所で錆が除去され, 防錆剤を塗布されるため, 図 - 5 (b)の丸枠に示すようにコンクリートとの付着特性が改善され, 結果的に最大荷重と変位が D2 より共に大きくなっている。

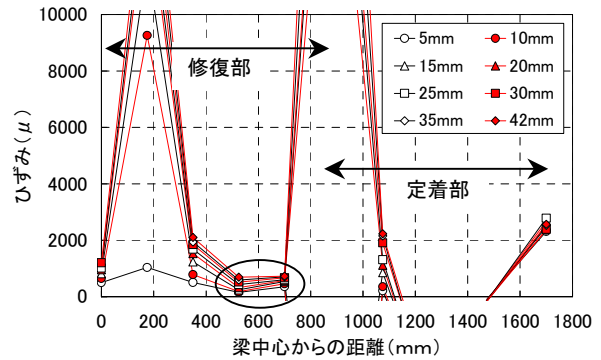
4. 結論

- (1) 荷重変形特性は, 断面修復部外側の定着部における鉄筋とコンクリートの付着特性によって大きく変化する。
- (2) 腐食修復供試体では, 断面修復にあたり修復箇所で錆が除去され, ひび割れの無い修復材が施されるため, 鉄筋との付着特性が改善され, 無腐食標準供試体に近い曲げ耐力の回復を期待できる。
- (3) RC 構造に対してはつり落としを行う場合, 無筋構造との違いに留意し, 鉄筋とコンクリートの付着を確保できるようにする必要がある。

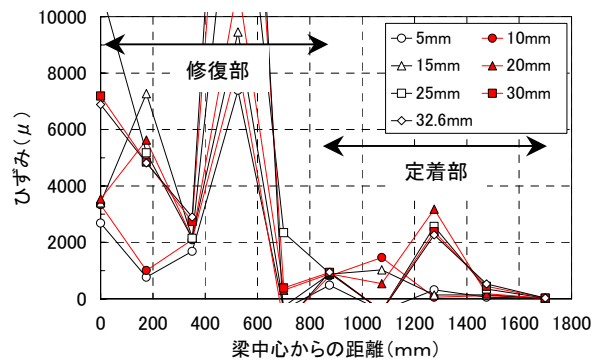
なお, 本研究は, 国土交通省の鉄道技術開発費補助金を得て行った。



(a) R1



(b) R2



(c) D2

図 - 5 鉄筋軸ひずみと変位の関係

参考文献

- 1) 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, Vol.27, No.2, pp.739-744, 2005.
- 2) 新井泰ほか：非線形挙動を考慮した開削トンネルのひび割れ調査結果シミュレーション, トンネル工学論文集, Vol.15, pp.173-181, 2005.
- 3) 古内仁ほか：鉄筋のコンクリートディープビ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.
- 4) 松尾豊史ほか：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp.69-77, 2004.