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*1, 田辺 将樹*1, 吉川 和行*2, 渡辺 忠朋*3

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 車運行に支障を来たす恐れがある。これを未然 に防ぐため既往のマニュアル¹⁾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^{2),3)}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)
- 北武コンサルタント(株) 専務取締役 工博(正会員) *3

供試体種別	鉄筋腐食	断面修復	備考
Al	無	無	標準供試体
A2	有	無	11
B1	無	有	欠損供試体
B2	有	有	"

表-1 実験ケース・供試体種別



(a) 標準供試体



図-1 供試体の形状寸法および配筋

置しなかった⁴⁾。

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 の抜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/mm²となるように呼び強度 18N/mm²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

表-2 コンクリートの材料特性

/₩ ३★ /₩ 15€ 0//	材齢	圧縮強度	弾性係数	割裂強度
1代码1个性加		(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
A1, B1	50 B	28.8	2.0×10 ⁴	2.2
A2, B2	50 F	31.3	2.3×10 ⁴	2.9

表-3 鉄筋の材料特性

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



(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 では鉄筋を電気的に腐食するため 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^{2),5)}を参考にして**図-2**に示 すように鉄筋を電気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たし 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





(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^の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 (載荷スパン長の 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 載荷方法および計測項目

(1) 載荷方法

載荷装置の概要を図-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点単調載荷を行った。

また,載荷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 貼付した同位置での計測値を平均して算定した。

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 が破壊に至るまで載荷を行った。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載荷ステップに 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載荷ステップ 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 載荷ステップは,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 µ, 供試体 B2:1968 µ),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載荷ステッ 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,載荷によりそ 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,左右の載荷点 の2箇所にひび割れが発生したが,供試体B2は, 載荷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,載荷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スティフ ニ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,載荷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 試体の方が大きいが, 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



表-4 最大荷重・加力点変位総括表

供試体	鉄筋	断面	最大荷重	加力点変位
種別	腐食	欠損	(kN)	(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。



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
- 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
- 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