

河川内の RC 橋脚における曲げ補強工法の開発

松本 恵美・山口 治・三澤 孝史

河積阻害率の制約を受ける河川内橋脚の既設 RC 柱に対して耐震補強が可能な薄層の曲げ補強工法を開発した。柱の軸方向および周方向の補強鋼材に高強度鉄筋を使用して、吹付けモルタルで既設柱と一体化することで薄層化を実現した。軸方向鉄筋先端を突起加工することで、定着性能向上と既設鉄筋の損傷リスク低減を可能にした。また、プレミックスの吹付けモルタルの使用で型枠作業が不要となり、施工の効率化と品質の安定を実現した。これにより RC 巻き立て工法に比べ補強厚さを 1/3 程度に低減でき、揚重設備を必要としない RC 柱の曲げ補強が可能となった。

キーワード：耐震補強, 曲げ補強, 高強度鉄筋, 吹付けモルタル, プレミックス

1. はじめに

近年、大量輸送や車両高速化に伴う荷重の増加、設計地震動の変更による要求耐力の上昇等の建設当時の使用環境の変化によって、既存 RC 柱の曲げ耐力が不足し、補強が必要な事例が生じている。

現行の既設 RC 柱の曲げ補強では、RC 巻き立て工法や鋼板巻き立て工法を適用することが標準となっている。しかし、RC 巻き立て工法では、巻き立て厚さが厚く、断面寸法が大きくなるため、河積阻害率の制約を受ける河川内橋脚や建築限界の制約を受ける箇所では適用できない場合がある。比較的薄層で補強できる鋼板巻き立て工法においても、施工時に揚重設備を要する点から、橋梁の桁下など狭隘な場所では施工性の低下や施工費増が課題である。このことから、仕上がりが厚さが薄く、施工性・経済性に優れた補強工法が求められている。

そこで、補強鋼材を普通鉄筋から高強度鉄筋に変更して小径化を図り、高耐久性の吹付けモルタルで既設柱と一体化することで、補強の厚さが薄く軽量化が可能となった。型枠省略による工程短縮および施工性の向上とコスト削減を実現する RC 柱の曲げ補強工法（以下、本工法）を開発した。

本工法の耐震性能は、補強軸方向鉄筋の定着性能試験および実大橋脚を参考とした壁式橋脚の 1/4 縮小モデルによる静的正負交番載荷実験（以下、正負交番載荷実験）により確認した¹⁾。また、施工の効率化と品質の安定を目的に、吹付けモルタルのプレミックス化

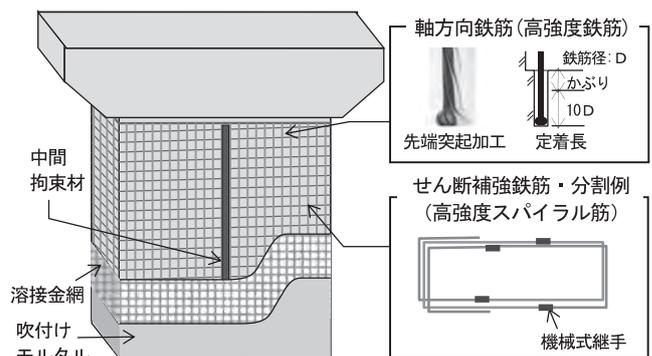
に向けた配合検討と吹付け実験を実施した。

本稿では、本工法の曲げ補強効果の確認のために実施した正負交番載荷実験結果および施工の効率化に向けた吹付けモルタルのプレミックス化の検討結果を報告する。

2. 工法概要

図—1 に、本工法の補強構造の概要図、図—2 に補強部断面詳細図を示す。既設 RC 柱の外側に配置する軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋には高強度鉄筋を用い、吹付けモルタルで既設柱と一体化させる。軸方向鉄筋には、降伏強度 $1,275 \text{ N/mm}^2$ の高張力鋼（以降、ウルボン）または降伏強度 685 N/mm^2 の高強度鉄筋（以降、USD685）を使用する。せん断補強鉄筋は、スパイラル状に加工したウルボンを使用する。

高強度鉄筋を使用することで、普通鉄筋に比べて鉄



図—1 高強度鉄筋を用いた曲げ補強工法の概要

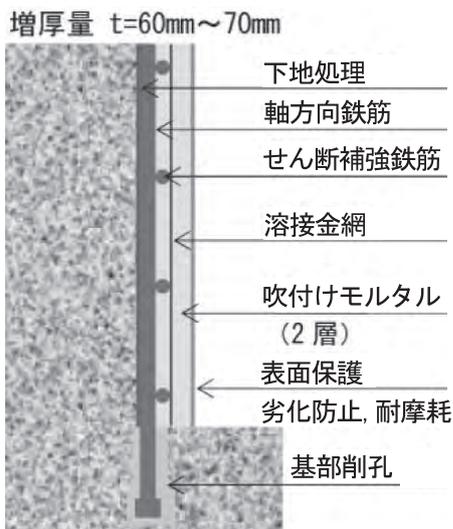


図-2 補強部断面詳細図

筋径を小さくでき、補強厚さが標準で60mm～70mmと薄くできる。補強軸方向鉄筋は、短い定着長で所定の定着力を確保するため、鉄筋の先端を突起状に加工し、専用の定着材でフーチングに定着する。補強軸方向鉄筋の定着長は、かぶりを除き鉄筋径の10倍の長さを確保することで十分な定着力を発揮することを試験により確認した。また、高強度鉄筋は、普通鉄筋に比べ削孔径を10%程度低減でき、削孔による既設鉄筋の損傷リスクを抑えられる。せん断補強鉄筋は、実績のある既設RC柱のせん断補強工法「スパイラル筋巻立工法」²⁾と同様、工場加工したウルボンの分割ピースを現場でスパイラル状に組み立てる。接合部分は機械式継手とすることで施工性が向上する。

本工法では、断面寸法が大きい橋脚においても、中間拘束材を用いることによって長辺の中間部でのせん断補強鉄筋のはらみ出しを抑制し、所定の耐震性能を発揮することを実験により確認した。

吹付けモルタルには、特殊混和剤などの収縮低減剤や合成短繊維を使用して、ひび割れ抵抗性と耐久性の向上を図った。現地で練り混ぜて吹付けることで補強部が薄くでき、型枠組立・解体の省略による施工の効率化が可能となる。

さらに、全ての工程において人力施工を標準としており、狭隘箇所や揚重困難な橋桁下部での施工を可能にした。RC巻き立て工法に比べて、補強厚さが1/3程度に低減されるほか、鋼板巻き立て工法で必要な揚重機械が不要となり、狭隘箇所でも適用できるため、施工性の向上および適用場面の拡大が可能となる。

3. 力学性能確認実験

(1) 定着性能試験

補強軸方向鉄筋の定着性能確認のため、補強鉄筋の種類（ウルボン、USD685）、先端形状（球形突起あり、突起なし）、定着長（10D, 20D D:鉄筋径）をパラメータとした引抜き試験を実施した（写真-1）。試験は、コンクリートブロックを削孔した孔に、補強鉄筋を所定の定着長で、専用の定着材により定着させ、油圧ジャッキで引張力を作用させた。試験は、鉄筋の変位と荷重を計測し、鉄筋の規格降伏強度相当以上の引張荷重を確認して終了とした。



写真-1 引き抜き試験状況

試験結果を表-1に示す。先端の突起がない場合は、規格降伏強度に達する前に鉄筋が抜け出したのに対して、突起がある場合は、定着長10D, 20Dともに、規格降伏強度以上の引張荷重においても荷重の低下はなく、抜け出しは見られなかった。これより、補強軸方向鉄筋の先端に突起を設けて、10Dにかぶりを加えた長さを定着長として確保する仕様とした。

表-1 定着性能試験結果

試験ケース	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
鉄筋種類	ウルボン (φ12.6 mm)		USD685 (D10)		
規格降伏強度	1,275 N/mm ²		685 N/mm ²		
先端形状	突起なし		球形突起		
定着長	20D		10D	20D	10D
最大引張応力 (N/mm ²)	920 (鉄筋抜け出し)	1,344	1,358	860	861

(2) 正負交番載荷実験

(a) 試験体

正負交番載荷実験の試験体は、実大の鉄道橋脚を参考に、1/4 縮小試験体（断面寸法 1.5 m×0.5 m）を用いた。実験ケースを表-2 に示す。

表-2 正負交番載荷実験ケース

ケース	引張鉄筋	せん断補強鉄筋
N	D13 (SD345), 25 本 引張鉄筋比 0.45%	D6 (SD295A), 6 本 200 mm ピッチ, 千鳥配置 せん断補強鉄筋比 0.06%
曲げ補強部		
ケース	引張鉄筋	せん断補強鉄筋
B1	ウルボン U7.1 13 本 (SBPDL 1275/1420) 補強筋比 0.07%	ウルボン U7.1 (SBPDL 1275/1420) 2 本 75 mm ピッチ 継手なし 補強筋比 0.07%
B2	D10 (USD685) 13 本 補強筋比 0.13%	補強筋比 0.07%
B3	ウルボン U7.1 13 本 (SBPDL 1275/1420) 補強筋比 0.07%	ウルボン U7.1 (SBPDL 1275/1420) 2 本 75 mm ピッチ 機械式継手 補強筋比 0.07%

補強なしの試験体（ケース N）と、これに曲げ補強した試験体 3 体（ケース B1~B3）の計 4 体について正負交番載荷実験を行った。補強軸方向鉄筋は、ケース B1, B3 でウルボンを、ケース B2 で USD685 を使用し、フーチングへの埋め込み側のすべての鉄筋先端に突起を設けて定着させた。せん断補強鉄筋は、全補強ケースでウルボンのスパイラル筋を用いた。実大橋脚での補強工事では継手が必要になることを考慮し、ケース B1, B2 はネジ式の機械式継手、ケース B3 は継手なしとすることで、継手が耐震性能に与える影響を確認した。

ケース N の構造図を図-3 に示す。ケース N は、曲げ破壊先行であるが現行の耐震基準で曲げ耐力が不足する柱となるよう配筋を決定した。

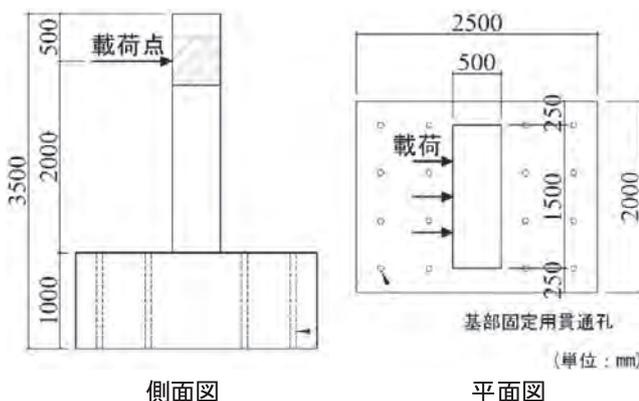


図-3 試験体構造図 (ケース N)

補強配筋断面図を図-4 に示す。補強軸方向鉄筋量は、「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」³⁾（以下、RC 標準）により、ケース B1~B3 において、曲げ耐力がケース N の 1.5 倍程度を目標に計画した。また、曲げせん断耐力比は、ケース N と同程度になるように、せん断補強筋（スパイラル筋）を配筋した。



図-4 補強配筋断面図 (ケース B1)

コンクリートの配合は、実大橋脚を想定して試験柱部で 27 N/mm² 相当とした。吹付けモルタルは、「スパイラル筋巻立工法」²⁾ と同様に、圧縮強度 50 N/mm² とした。

断面寸法の大きい柱に対して、せん断補強筋（スパイラル筋）による軸方向鉄筋の座屈抑制効果を向上させるため、中間拘束材（PL75 mm×28 mm, SS400）を両側に配置し、柱の長辺中央部に設けた貫通孔に φ13 mm の PC 鋼棒を通して両面からナットで拘束した。

写真-2 に試験体製作状況を示す。フーチングに削孔した孔に補強軸方向鉄筋を建て込み、定着材により



(a) 軸方向鉄筋の設置

(b) せん断補強鉄筋の組立



(c) モルタル吹付け

(d) 補強完了

写真-2 試験体製作状況

定着した（写真—2 (a)）。続いて，中間PC鋼棒の挿入・定着，せん断補強筋の設置，中間拘束材の取り付けの順に施工した（写真—2 (b)）。その後，吹付け定規を設置し，吹付けモルタルを2層に分けて施工し（写真—2 (c)），試験体を完成させた（写真—2 (d)）。

(b) 実験方法

試験体フーチング部をPC鋼棒（φ32mm）により反力床に固定し，柱上部に鉛直载荷用油圧ジャッキにより上部工相当の一定軸力1.0N/mm²を载荷した状態で，水平载荷用油圧ジャッキにより交番载荷した。鉛直载荷用油圧ジャッキは，スライダ支承を介して载荷フレームに設置し，試験体の水平変位を妨げない構造とした。

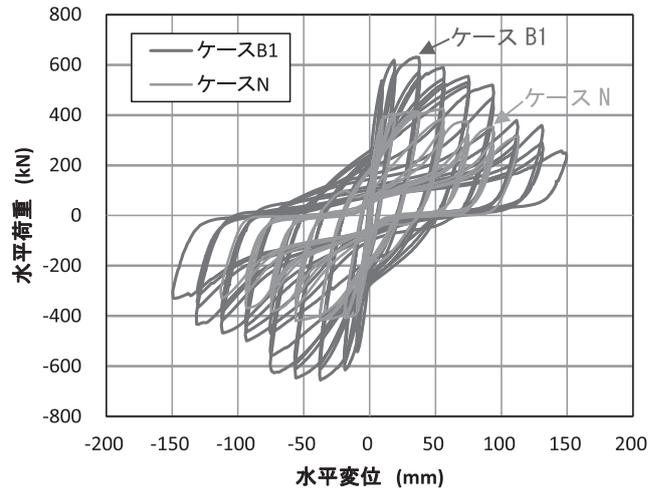
载荷は，ケースNについて所定の軸力導入後，軸方向鉄筋が降伏するまで荷重制御で水平载荷し，正負载荷時における降伏変位の平均値を1δ_yとした。軸方向鉄筋の降伏後は変位制御により，1δ_y，2δ_y，4δ_y…と偶数倍に変位レベルを増加させて载荷した。なお，各変位レベルにおける繰り返し回数は3回とした。ケースB1~B3については，ケースNの1δ_yを用いて変位制御で载荷した。载荷は，荷重が最大荷重の1/2程度を下回った時点で終了した。

(c) 実験結果

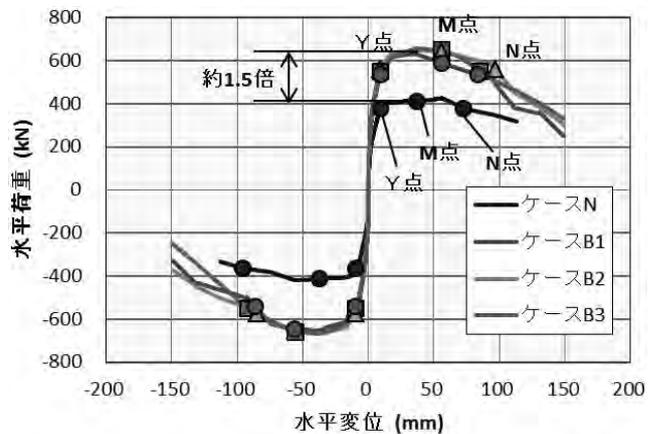
正負交番载荷実験の結果，補強した試験体の破壊過程は，曲げひび割れの発生，既設および補強の軸方向鉄筋の降伏，柱基部コンクリートおよび補強部の吹付モルタルの圧壊，吹付モルタルの剥落，軸方向鉄筋の座屈，破断が生じ，全ての試験ケースにおいて曲げ破壊した。補強ケースでは，既設柱と補強部分の剥離がなく，破壊の過程やひび割れの性状から既設柱と補強部分が一体化していることが確認できた。なお，せん断補強筋（スパイラル筋）は補強ケース全てにおいて破断や継手の損傷は見られなかった。

载荷点における水平荷重と水平変位の関係の一例を図—5に，各ケースの包絡線を図—6に示す。図中には，Y点（損傷レベル1限界点），M点（損傷レベル2限界点），N点（損傷レベル3限界点）³⁾を併記する。曲げ補強したケースB1~B3は，耐力，変形性能に大きな差は無く，M点の荷重（耐力）がケースNに比べ1.5倍程度増加し，N点変位（変形性能）は約1.1~1.2倍に増加した。

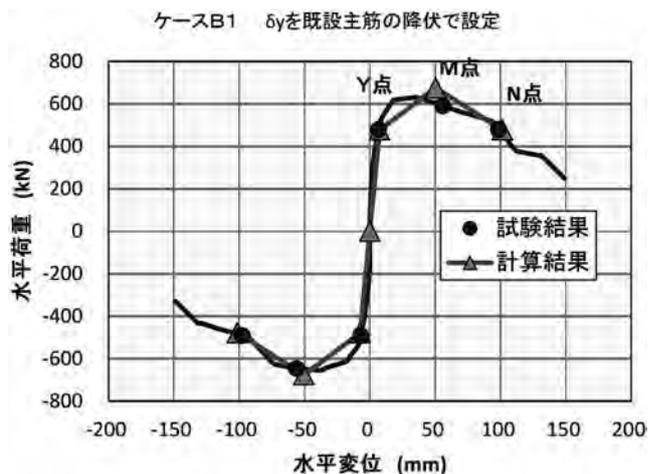
図—7に，ケースB1について既設部分と補強部分が一体と仮定して，RC標準に準拠して算出した計算結果と実験結果の比較を示す。RC標準に準拠して算出した計算値は，試験結果と概ね良い整合を示しており，既存の設計式を用いて評価できることを確認し



図—5 水平荷重—水平変位関係（ケースB1）



図—6 各ケースの包絡線の比較



図—7 実験結果と計算結果の比較（ケースB1）

た。ケースB2，B3についても同様であった。

補強軸方向鉄筋の定着性状を確認するため，交番载荷実験後にフーチングに定着された補強軸方向鉄筋近傍をコア削孔し取り出した。補強軸方向鉄筋，定着材，コンクリートが強固に付着し隙間や浮きなどは見られず，定着が切れたことによる抜け出しの痕跡は見られ

なかった。また、補強軸方向鉄筋周辺の吹付けモルタル片を観察した結果、吹付けモルタル片の内側に鉄筋のふしの跡が明瞭に残っており、抜け出しの痕跡は見られなかった。

上述のとおり、交番載荷実験により、高強度鉄筋を使用する本工法による曲げ補強効果を確認することができた。

4. 省力化施工の検討

(1) 吹付けモルタル工の現状と改善点

本工法では、RC柱のせん断補強工法として実用化されている「スパイラル筋巻立工法」²⁾の吹付けモルタル材料と施工技術を適用した。この現場配合吹付けモルタル材（以下、現場配合材料）は、ひび割れ抵抗性と耐久性を有し、材料費用を抑えられる利点がある反面、所定の品質を確保するために細骨材の含水率によって現場で配合を替える必要があるなど施工性に課題があった。そこで、ひび割れ抵抗性と耐久性を確保し、施工時の品質安定および施工の効率化を目的に、吹付けモルタルのプレミックス化を検討した。

(2) プレミックスモルタルの検討

プレミックス化に当たり、現場配合材料の品質を確保し、施工の効率化に寄与するよう、粉体と水を現場で練り混ぜて施工できる材料を目標とした。

現場配合材料では、粉体・乾燥剤の5種（セメント、細骨材、膨張材、シリカヒューム、合成短繊維）と液体混和剤2種（収縮低減剤、高性能AE減水剤）、水を使用している。液体材料を同等性能の粉体に置き換えた配合で2ケース（配合1, 2）、品質の確保に重点を置き、現場配合材料の粉体部分のみをプレミックスとした配合で2ケース（配合3, 4）の計4ケースを製作した。また、材料調達の容易さを考慮し、細骨材を2種類とした。配合1と配合3は天然川砂の乾燥材、配合2と配合4は人工珪砂をブレンドして現場配合相当の粒度とした材料を使用した。

(3) 吹付け実験

各配合の材料を練り混ぜた後、L型擁壁（高さ1,800 mm、幅2,000 mm）に、本工法を模擬して補強軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋を配置した模擬壁面に吹付けた。補強軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋にはウルボン（φ12.6 mm）を使用した。実験状況を写真—3に示す。吹付け実験では、モルタルの物性（練り混ぜ性能、圧縮強度、テーブルフロー値、既設壁面



写真—3 吹付け実験状況

への付着性能、ひび割れ抵抗性)、および施工性（圧送性、吹付けの可否、コテ均し性状の評価)を確認した。

(4) 吹付け実験結果

吹付け実験結果を表—3に示す。収縮低減剤と減水剤を粉体で添加した配合1と配合2は、練り混ぜ後の圧送中に配管内で閉塞したため、現場適用が困難と判断し、吹付け実験および物性値の試験を省略した。

表—3 吹付け実験結果

試験項目/配合		配合1	配合2	配合3	配合4
モルタル物性試験	練り混ぜ性能	○良好	○良好	○良好	○良好
	圧縮強度 (N/mm ²)	-	-	65.0	69.8
	テーブルフロー (mm)	-	-	146×145	142×138
	付着性能 (N/mm ²) ばらつき【標準偏差】	-	-	2.34 【0.21】	2.20 【0.55】
	ひび割れ抵抗性	-	-	○初期ひび割れなし	○初期ひび割れなし
施工試験	圧送性	×閉塞 圧送不可	×閉塞 圧送不可	○良好	○良好
	吹付けの可否	-	-	○良好	○良好
	コテ均し性状	-	-	○良好	△可能
材料価格比 (現場配合材料を1.0)		1.81	1.65	1.70	1.54

収縮低減剤と減水剤を液体で添加した配合3と配合4は施工可能であったが、骨材に人工珪砂を使った配合4は、圧送圧力が高くコテ均しの抵抗が大きい結果であった。モルタル物性値は、どちらも規格値を満足する結果であったが、付着試験（試験数n=4）を実施した結果では、配合3に比べて配合4では付着性能にばらつきが見られた。

材料価格は天然川砂を使った配合3が配合4に比べて1割程度、現場配合材料に比べて7割程度増加する



写真一4 プレミックス型モルタルの屋外暴露状況

結果となった。これらのことから、適用する現場の状況に応じて、施工性の良い配合3と経済性に優位な配合4を選択できる。

また、モルタルを吹付けたL型擁壁を2017年3月より、写真一4に示すように、屋外（茨城県つくば市の奥村組 技術研究所敷地内）に暴露しており、約1年経過した時点で乾燥収縮などによるひび割れは発生していない。

5. おわりに

正負交番載荷実験の結果から、本工法 RC 柱の曲げ補強工法により曲げ耐力が約 1.5 倍向上し、変形性能が 1.1~1.2 倍に増加するとともに、曲げ補強効果を既存の設計式により評価できることが確認できた。また、吹付けモルタルはプレミックス化により、現場での配合や計量作業が軽減されて施工の効率化が可能となった。

今後は、鉄道橋、道路橋をはじめとした曲げ補強を

必要とする RC 柱に対して、施工性が良く、耐久性が高い薄層の耐震補強技術として、本工法を提案していきたいと考える。

謝 辞

なお、本開発において、公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室に試験計画および結果の評価について技術指導をいただいた。ここに深謝する。

J C M A

《参考文献》

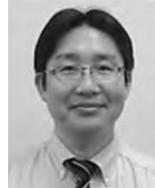
- 1) 山口治, 松本恵美, 三澤孝史, 廣中哲也: 高強度鉄筋を用いた既設 RC 柱の曲げ補強工法の開発, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, V-174, pp.347-348, 2017.9.
- 2) 財団法人鉄道総合技術研究所, 「既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針-スパイラル筋巻立工法編-」, 1996.12.
- 3) 公益財団法人鉄道総合技術研究所, 「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)」, 丸善, 2004.4.

【筆者紹介】

松本 恵美 (まつもと えみ)
 (株)奥村組
 東日本支社 リニューアル技術部技術課



山口 治 (やまぐち おさむ)
 (株)奥村組
 東日本支社 リニューアル技術部工事所支援グループ
 グループ長



三澤 孝史 (みさわ たかし)
 (株)奥村組
 技術研究所 土木研究グループ
 グループ長

