

論文 吹き付け工法により補強した RC はりの曲げ性状に関する研究

加納 暢彦*¹・小玉 克巳*²・佐藤 貢一*³・地頭園 博*⁴

要旨:本研究は、劣化を再現した鉄筋コンクリートはり(以下 RC はり)に、ポリマーセメントモルタルを用いて、現施工方法のコテ塗り工法と、施工の簡略化を目的とした吹き付け工法の2種類の施工方法で補強を行い、静的載荷と繰返し載荷の曲げ性状の検討を行った。その結果、静的載荷試験、繰返し載荷試験においても、最大耐力の増大、疲労寿命の向上、たわみ量の低減効果、主鉄筋応力度の低減効果などに補強効果が確認された。その結果、吹き付け工法を用いた場合付着強度が向上し、すでに補強効果が確認されているコテ塗り工法と比較しても同程度以上の補強効果を示す結果が得られた。

キーワード:吹き付け工法、コテ塗り工法、RC はり、ポリマーセメントモルタル、補強

1. はじめに

近年、道路橋 RC 床版の損傷が多く報告されており、原因として交通量の増大や車両重量の増大などが挙げられている。また設計荷重が B 活荷重_[1]に変更され、車両による繰返し環境下における床版への雨水の浸入などが劣化を促進させている報告_[2]があり、床版の補強工法の早急な開発が望まれている。

著者らはこれまで損傷を受けた床版の補強工法として、床版下面に鉄筋を配置しポリマーセメントモルタルで一体化する下面増厚工法を提唱してしてきた。これまでの研究では、コテ塗り工法と注工法を用いて数種の材料において交通振動を想定した振動を与えた施工環境で実験を行い、静的耐力力及び疲労性状が向上することが確認できた。_[3]しかしコテ塗り工法と注工法は、施工者の経験や技術の差が生じやすく、また施工者の確保の問題からも新しい工法の開発が必要となってきた。

そこで本研究では、作業の簡略化のために施工方法に吹き付け工法を用い、RC はり実験において静的載荷試験及び繰返し載荷試験を行った。材料は、付着力に富んだアクリル系の吹き付け用材料を用い、補強効果の確認されているポリアクリル酸エステル系材料との比較検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 実験供試体

実験に用いた RC はりは、図-1 に示すもので全長 120cm、幅 20cm、高さ 15cm とした。主鉄筋、スターラップには、D10 鉄筋 (SD295A、公称断面積 0.7133cm²) を用い、主鉄筋は間隔 10cm で2本、スターラップは 7cm 間隔で 14 本配置した。RC はりに用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用し水セメント

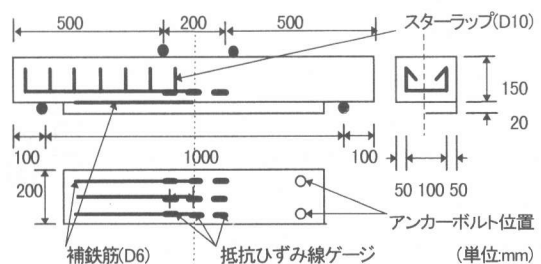


図-1 RCはり供試体概略図

- | | | |
|---------------|-------------------|-------|
| *1 武蔵工業大学大学院 | 工学研究科土木工学専攻 | (正会員) |
| *2 武蔵工業大学教授 | 工学部土木工学科、工博 | (正会員) |
| *3 奈良建設(株) | 土木技術研究所主任研究員 | (正会員) |
| *4 三菱マテリアル(株) | セメント研究所セメント研究部副部長 | (正会員) |

比 64.5%とした。RC はりは、材令 28 日まで湿布養生を実施した。各材料性状は、表-1 に示す。

2. 2 補強材料

本研究では、吹き付け用材料のアクリル系ポリマーセメントモルタルを材料 A、また今回参考とし

て過去の研究でコテ塗り材料として用いていたポリアクリル酸エステル系ポリマーセメントモルタルを材料 B とし、各強度性状は表-2 に示す。付着強度試験以外の強度試験は、JIS R 5201 に準拠し、付着強度試

表-1 材料強度表

	水セメント比	圧縮強度	弾性係数
コンクリート(RC はり)	64.5 %	24.8 MPa	23.8 GPa
	引張降伏強度	破断強度	弾性係数
D6 鉄筋(SD295A)	356.7 MPa	519.4 MPa	172.5 GPa
D10 鉄筋(SD295A)	372.4 MPa	519.4 MPa	188.1 GPa

(注)コンクリートは材令28日強度

表-2 補強材料強度表

材料名	曲げ強度	圧縮強度	付着強度	弾性係数
材料 A(吹き付け時)	10.2 MPa(1.41)	38.6 MPa(1.86)	3.06 MPa(2.01)	11.4 GPa(1.39)
材料 A	8.42 MPa(1.17)	30.0 MPa(1.44)	2.29 MPa(1.51)	10.3 GPa(1.25)
材料 B	7.22 MPa(1.00)	20.8 MPa(1.00)	1.52 MPa(1.00)	8.23 GPa(1.00)

(注)すべて、材令28日強度

験は建設省建築研究所式付着強度試験で行い、コンクリートとポリマーセメントモルタルの付着強度を計測した。

また材料 A は、水セメント比 45%、ポリマーセメント比 31.25%で配合で、材料 B には水セメント比 60%、ポリマーセメント比 15%で配合した材料を用いた。2 材料とも下面増厚工法で重要となる床版との追従性を高めるために、コンクリートよりも弾性係数を抑え、コンクリートとの付着強度を高めた材料を使用している。特に吹き付けをした材料 A は、材料 B に比べ各強度、弾性係数ともに上回り、特に付着強度に関しては材料 B の2倍の強度を示した。

また、同じ材料を用いても工法が材料性状に与える影響も大きく、各強度、弾性係数が向上している。特に圧力をかけ吹き付けるため、付着強度はコテ塗りの約 1.3 倍に向上する結果が得られた。これは、空気の圧力で材料の密度が高まり密実になることと、施工時間が短縮されたため材料が良質な状態で施工できることなどが原因と考えられる。

2. 3 吹き付け工法

今回用いた吹き付け工法は湿式で行い、練り上がったモルタルをポンプで圧送し、高圧力のエアと混合して吹き付けを行う工法を採用した。

表-3 に吹き付け条件による密度と材料のロ

ス率を示す。ロス率とは、吐出した材料の付着しなかった割合とし、材料 B においては現場での密度とロス率を参考にした。吹き付け距離 10cm は跳ね返りのため少しロス率が高いが、補強鉄筋とはり母体との界面にポリマーセメントモルタルを充填させるために用いた。吹き付け距離 30cm は、ロス率が低く密度も高い利点をもち、増厚時に少しでも材料ロスを抑えるために用いた。両条件とも現場での材料 B の値と比べても、ロス率は同程度あるいはそれ以下に抑えられている。

2. 4 補強板の補強方法

供試体は、補強実施以前に無補強はりの主鉄筋降伏応力度 75%になるまで静的に載荷し劣化を再現し

表-3 密度、ロス率一覧表

材料、条件	密度	ロス率
材料 A(吹き付け距離 10cm)	1.98 g/cm ²	16.4 %
材料 A(吹き付け距離 30cm)	2.04 g/cm ²	9.7 %
材料 B (コテ塗り時)*	1.90 g/cm ²	約 15 %

* 現場での値を参考

た。その後ミニディスクサンダーでコンクリート表面の脆弱部分を除去しアンカーボルトを用いて、D6 鉄筋の補強筋(強度性状は表-1)を間隔 5cm で 3 本配置で固定した。

また、付着強度と補強鉄筋量のバランスがはく離発生に大きく影響していると考え、別試験において D6 鉄筋 2、3、4 本の供試体で静的載荷試験を行った。その試験において D6 鉄筋 3 本までは、最大耐力の向上が見られたがそれ以上になると過鉄筋状態となりはく離を発生してしまうため今回 D6 鉄筋 3 本を採用した。

施工は、はり下面より吹き付け工法とコテ塗り工法 2 種類で補強厚 2cm になるまで補強を行った。吹き付け工法は 2 層に分けて行い、1 層目で鉄筋が隠れる程度の厚さを吹き付け距離 10cm で吹き付け、2 層目で 2cm になるまで吹き付け距離 30cm で吹き付けを行った。コテ塗り工法も吹き付け工法同様 2 層に分けて施工を行った。接着界面は、材料 A は散水した後半乾きの状態で行い、材料 B は含浸用ポリマーセメントを用いた後半乾きの状態で行った。その後、材令 28 日まで気中乾燥養生を行い試験を行った。

2. 5 載荷試験方法

(1) 静的載荷試験

静的載荷試験方法は、スパン 100cm、載荷スパン 20cm の 2 点載荷とし漸増載荷方式にて曲げ試験を行った。載荷方法は、無補強はり荷重制御にて 0~10kN、0~30kN まで載荷しその後除荷する、その後変位制御によって破壊するまで載荷した。補強はりは、0~30kN のつぎに 0~60kN まで載荷し、その後破壊まで載荷した。計測は、ロードセルにより最大耐力、変位計により中央点のたわみ量、抵抗線ひずみゲージにより主鉄筋、補強鉄筋のひずみ量を測定した。

(2) 繰り返し載荷試験

繰り返し載荷試験方法は、上限荷重を 26.5kN(無補強はりの破壊荷重の約 70%)と、36.3kN(無補強はりの破壊荷重の約 95%)、下限荷重を 2.0kN、載荷速度を 5HZ とした。また繰り返し回数 1、5、50、5 千、1.5 万、5 万、15 万、30 万、50 万、100 万、150 万、200 万で上限荷重まで静的載荷試験を行い、静的載荷試験同様に計測を行った。200 万回後は、静的載荷試験を行い残存耐力を測定した。

3. 静的載荷試験結果

3. 1 最大耐力、破壊形態に関して

表-4 に、静的載荷試験での最大耐力を、表-5 に破壊形態を示す。

無補強はりは、最大耐力 38.2kN で破壊したのに対して、補強はりはすべて約 1.9 倍の耐力を示し、補強効果が確認された。材料 A の吹き付け工法(以下 no. 1)は、材料 B のコテ塗り工法(以下 no. 2)と比べても最大耐力に大差はなく、吹き付け工法を用いても従来と同程度の補強効果が確認された。終局限界状態設計法の曲げ終局耐力の値_[4]との比較では、両補強はりは複合断面ではない無補強はりと同様の計算値を 4 割程度上回る値を示した。

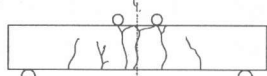
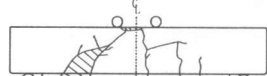
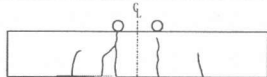
破壊形態に関しては、無補強はり荷重点直下のひびわれが進展し曲げ破壊を起こした。無補強はりは、

表-4 静的載荷試験最大耐力一覧表

供試体		曲げ終局耐力計算値	最大耐力
無補強		27.5 kN (1.0)	38.2 kN (1.39)[1.0]
材料A吹き付け工法	no. 1	54.5 kN (1.0)	74.0 kN (1.34)[1.94]
材料Bコテ塗り工法	no. 2	54.5 kN (1.0)	71.8 kN (1.32)[1.88]

(注) []内は、無補強はりの実験値を、()内は、計算値を 1.0 としたときの値

表-5 静的載荷試験破壊形態一覧表

供試体	無補強	
破壊形態		
曲げ破壊		
供試体	no. 1	
破壊形態		
せん断破壊		
供試体	no. 2	
破壊形態		
はく離曲げ破壊		

(注) 斜線部分は抜け落ち部分を、太線部分ははく離部分を示す。

荷重が最大になるまでは同じように曲げひびわれが進展するが、no. 1は補強部分の端部よりせん断破壊を起こし、no. 2は端部のひびわれ部分から載荷点直下のひびわれ部分まではく離を生じ、はく離曲げ破壊を起こした。同一補強鉄筋量の条件でありながら no. 2がはく離を起こしたことから、吹き付け工法によって付着強度が増加し母体と補強部の一体性が高まったため、はく離抑制効果の向上が確認された。

3. 2 主鉄筋応力度に関して

図-2 には、荷重と主鉄筋応力度のグラフを示す。ここでの計算値は、使用限界状態設計法の鉄筋応力の算出式_[4]を用い、材料 A で補強したときの値を用いた。また全断面有効とは、断面計算のときに母体コンクリートにひびわれが無く断面全体を有効として計算した状態であり、引張側無視とはひびわれ発生後に中立軸以下のコンクリート部を考慮しない場合とする。

無補強はりは、無補強供試体に比べ常に小さい主鉄筋応力度となり低減効果が確認された。また no. 1は、no. 2と比べて 30kN 付近まではほぼ同じ主鉄筋応力度となっているが、それ以降 no. 1の方が小さい主鉄筋応力度を示し、吹き付け工法を用いても従来と同程度以上の低減効果が発揮されることが確認された。これは、no. 1の方がひびわれ幅小さく、ひびわれ本数が多く応力分散したためと考えられる。

3. 3 たわみ性状に関して

図-3 には、補強はりの荷重とたわみのグラフを、図-4 には塑性域におけるグラフを示す。図-3 の計算値は、使用限界状態設計法のたわみ量の算出式_[4]を用い、材料 A で補強したときの値を用いた。また、たわみ量の算出には換算断面2次モーメントを用いたブランソン式_[4]場合の計算も行った。

no. 1と no. 2は、無補強はりに対し常にたわみ量が低減されていることから工法を問わず補強効果が確認された。荷重-たわみ曲線からは、工法によるたわみ量の違いは見られず、ほぼ同じ程度のたわみ量を示している。また荷重-たわみ曲線は、両補強はりは、換算断面2次モーメントを用いた計算値とほぼ近い値を示しながらたわみ量を増加した。

50kN 程度で両補強はりとも引張側無視の値を超えて急激に増大する。このとき no. 1は耐荷力を急激に失わず靱性が高いが、no. 2ははく離が生じたため急激に補強効果を失いポストピーク以降破壊に至る傾向が見られた。

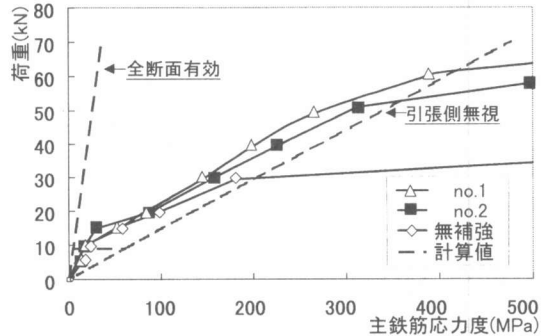


図-2 荷重と主鉄筋応力度の関係

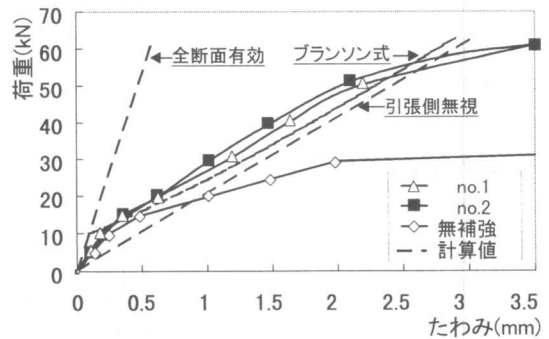


図-3 荷重とたわみ量の関係

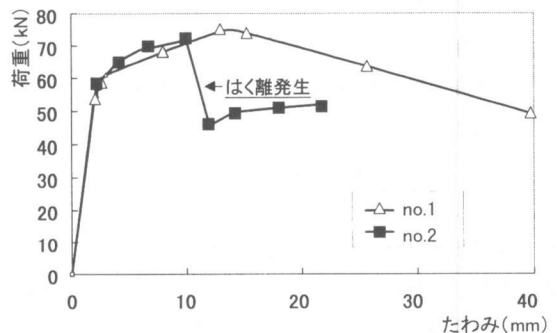


図-4 荷重とたわみ量の関係(塑性域)

4. 繰り返し載荷試験結果

4. 1 疲労寿命、破壊形態に関して

表-6 に繰り返し載荷試験の結果を示す。破壊形態に関しては、疲労破壊したものはその状態を、しなかったものは疲労試験後の静的載荷での破壊形態を示す。

上限荷重 26.5kN において

無補強はりは、25 万回で疲労破壊したのに対し両補強はりは、200 万回で疲労破壊せず、上限荷重 36.3kN は、無補強はりの破壊荷重程度の荷重なのに対して補強はりは、118 万回以上の繰り返し回数となり工法を問わず疲労寿命の延長が確認された。また特に no. 1 は、上限荷重 36.3kN でも疲労破壊せず no. 2 の 118 万回を上回り、高い補強効果を示した。

破壊形態に関しては、上限荷重 26.5kN の供試体は、静的載荷試験の破壊形態と同様になった。上限荷重 36.3kN の供試体は、表-

7 に示すように no. 1 は主鉄筋と補強鉄筋が疲労破断して曲げ破壊を起こし、no. 2 ははく離発生後に主鉄筋が疲労破断し曲げ破壊を起こした。no. 2 は、はく離により補強効果を失って破壊に至っている。一方 no. 1 は、はく離を生じず鉄筋の疲労破断が破壊につながった。同一補強筋量の条件で no. 1 は、はく離を発生しなかったことから吹き付け工法での付着強度の向上によりはく離抑制効果が高まったと考えられる。これらに結果より、むしろ繰り返し載荷環境には付着強度の方が影響が重要であると考えられる。

4. 2 主鉄筋応力度に関して

図-5.6 に、各上限荷重における繰り返し回数と主鉄筋応力度の関係を示す。計算値は3. 2 で用いたもので、点線は残留応力を示す。残留応力とは、各測定回数間に生じた応力を示す。

上限荷重 26.5kN において両補強はりは、無補強はりの主鉄筋応力度を常に下回り吹き付け工法においても主鉄筋応力度の低減効果が確認された。また、両補強はりとも主鉄筋応力度は定常化しており、残留応力の増加もなく、残存耐力の低下もないことから繰り返し載荷における劣化はないと考えられる。

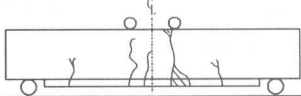
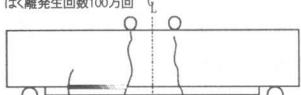
上限荷重 36.3kN において工法別に関しては、no. 2 は、no. 1 に比べて5000 回以降の応力の増加が残留応力を含めて大きくなっている。これは、no. 2 は、ひびわれ本数が少なく、ひびわれ幅も吹き付け工法が 0.2mm 程度だがコテ塗り工法は 0.25mm 程度と大きく

表-6 繰り返し載荷試験結果一覧表

供試体	上限荷重	繰り返し回数	破壊形態	残存耐力
無補強	26.5kN	25 万回	曲げ破壊*	なし
no. 1	26.5kN	200 万回	せん断破壊	73.5kN
	36.3kN	200 万回	曲げ破壊*	53.8kN
no. 2	26.5kN	200 万回	曲げはく離破壊	72.0kN
	36.3kN	118 万回	はく離後曲げ破壊*	なし

*：鉄筋が疲労破断破断を起こした供試体

表-7 上限荷重 36.3kN 破壊形態表

供試体	上限荷重
破壊形態	36. 3 kN
no. 1	
曲げ破壊 (鉄筋破断)	
no. 2	
はく離後曲げ破壊 (鉄筋破断)	

(注)太線部分は、はく離部分を示す。

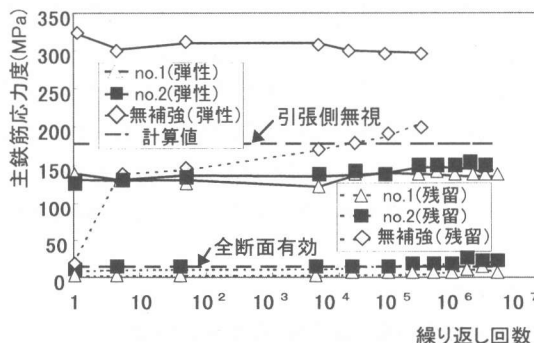


図-5 主鉄筋応力度と繰り返し回数の関係

(上限荷重 26.5kN)

0.25mm 程度と大きくなっており、応力が載荷点直下のひびわれに集中したためと考えられる。しかし、no. 1は、弾性応力、残留応力の増加も少なく繰り返し載荷環境下においても高い補強効果が確認された。

4. 3 たわみ量に関して

図-7に、たわみと繰り返し回数のグラフを示す。計算値は3.3で用いたもので、点線のたわみは、残留たわみを示す。残留たわみとは、各測定間に生じたたわみを示す。

上限荷重 26.5kN では、主鉄筋応力度と同様に無補強はりのたわみ量を下回り、吹き付け工法においてもたわみ量の低減効果が確認された。また上限荷重 36.3kN では、no. 1は、no. 2に比べて常に小さいたわみ量を示した。これは、補強部の剛性の違いと、コテ塗り工法のはりはひびわれが載荷点直下に集中したため大きいたわみ量を示したと考えられる。no. 2は、破壊前まで弾性たわみ量は定常化しているが、残留たわみが1mm を越えたあたりで急激に弾性たわみが増大して破壊に至っている。no. 1の残留たわみも、50 万回あたりから増大しており、弾性たわみの増大、残存耐力の低下からも劣化が進行していたと考えられる。

5. まとめ

2種類のポリマーセメントモルタルと施工方法を用いて補強したRC はりにおいて、静的載荷試験および繰り返し載荷試験を行った結果以下のことがいえる、①静的載荷試験において両工法とも最大耐力の向上、たわみ量、主鉄筋応力度の低減効果が確認された。②繰り返し載荷試験において両工法とも疲労寿命の延長、たわみ量、主鉄筋応力度の低減効果が確認された。③過去に補強効果の確認されているコテ塗り工法と比べて、吹き付け工法は材料の強度、特に付着強度 が著しく向上し補強部と母材との一体性が向上するため疲労寿命、はく離抑制効果に関してより高い補強効果が確認された。

【参考文献】

- [1] 道路橋示方書・同解説、日本道路協会
- [2] 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、1987。
- [3] 加納暢彦・小玉克巳・佐藤貢一：繰り返し載荷を受ける下面増厚した補強 RC はりに関する研究、土木学会年次学術講演集、pp1084-1085、1996. 9
- [4] コンクリート標準示方書設計編、土木学会

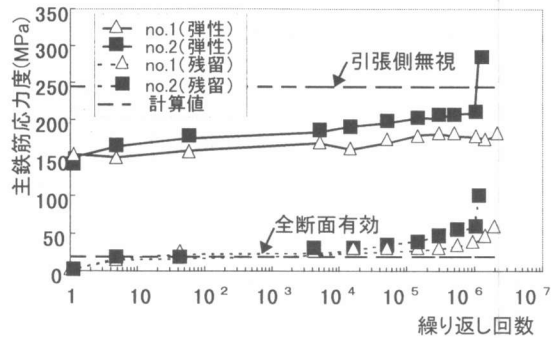


図-6 主鉄筋応力度と繰り返し回数の関係
(上限荷重 36.3kN)

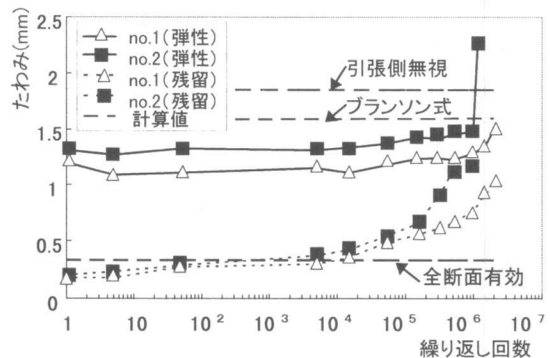


図-7 たわみ量と繰り返し回数の関係
(上限荷重 36.3kN)