

論文 各種補強工法を用いた鉄筋コンクリートはりの力学的性状

高橋博威*¹・睦好宏史*²・近藤悦郎*³

要旨：老朽化した鉄筋コンクリートはりを想定して、外ケーブル工法、鋼板接着工法、炭素繊維シート接着工法を用いて補強し、各補強工法が曲げおよびせん断に対してどの程度有効であるかを実験的に検討した。外ケーブル工法および鋼板接着工法では、曲げおよびせん断に対して補強効果が確認された。また、外ケーブル工法ではケーブルを曲げ上げることによって、鋼板接着工法では、供試体側面に斜め鋼板を接着することによってせん断に対する補強効果が得られた。

キーワード：せん断補強、曲げ補強、外ケーブル工法、炭素繊維シート、鋼板接着工法

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化による耐力低下や、道路構造令の設計荷重の増大などによって、既設コンクリート構造物の補強の必要性が高まっている。鉄筋コンクリートはりの補強工法としては外ケーブル工法や鋼板接着工法などが主に用いられているが、それぞれの補強効果を比較した研究はあまり行われていない[1][2]。RC部材を曲げに対して補強した場合、補強により曲げ耐力の増加量がせん断耐力の増加量に比べ著しく大きい場合、終局破壊形式がせん断破壊となることが考えられる[3]。特に、桁の下面を鋼板により接着した場合、補強用の鋼板はせん断補強に寄与しないため、せん断に対する補強として、供試体側面に斜め鋼板を接着する必要がある。これまでも供試体側面に鋼板を接着した例はあるが、鋼板が変形に追随せずに座屈してしまう例が報告されている。

本研究では、外ケーブル工法、鋼板接着工法、炭素繊維シート接着工法を取り上げ、各工法の補強効果を実験的に検討を行った。外ケーブル工法では、ケーブルを直線配置したものと曲げ上げ配置したもの、鋼板接着工法では、供試体下面のみ鋼板を接着したものと、側面にも斜め鋼板を接着したものの補強効果について、炭素繊維シート工法では、炭素繊維シートの剥離が問題となっており、これを防ぐことを目的として、両端部をアンカープレートと拡張式アンカーを用いて固定したもの、樹脂のみで接着されたものについて比較検討した。

2. 実験概要

2. 1 実験要因

実験要因を表-1に示す。供試体は全部で7体である。No. 1は比較の基準となる無補強の供試体とし、No. 2, No. 3は外ケーブル工法、No. 4, No. 5は鋼板接着工法、No. 6, No. 7は炭素繊維シート接着工法によりそれぞれ補強したものである。No. 2ではケーブルを直線配置、No. 3ではケーブルを曲げ上げ配置とし、せん断に対する補強効果を検討するためのものである。No. 4では供試体下面のみに鋼板を接着し、曲げ耐力のみを増加させたものである。No. 5は、曲げ補強とともにせん断補

*1 首都高速道路公団（正会員）

*2 埼玉大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

*3 ショーボンド建設（株） 土木研究所、工修（正会員）

強用の斜め鋼板を供試体側面に接着し、曲げとせん断の両方に対する補強効果を検討するものである。この場合、鋼板が剥離しないよう接着長を十分とり、両端を拡張式アンカーボルトで固定した[4]。No. 6は樹脂のみで炭素繊維シートをはり下面に接着した供試体であり、No. 7ではさらに炭素繊維シート両端にアンカープレート接着してアンカーボルトで固定し、炭素繊維シートが剥離をしないよう工夫をした。

2.2 供試体

供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体はいずれも高さ30cm、幅15cm、長さ300cmのRCはりで、引張鉄筋としてD16を2本、圧縮鉄筋としてD6を2本配筋した。スパン260cm、等曲げモーメント区間92cmの2点载荷とし、せん断スパン有効高さ比は3.0である。また、D6のスターラップを28cm間隔で配置した。使用材料の材料特性を表-2に示す。コンクリートの圧縮強度は、No. 1, 2, 4, 5が316kgf/cm²、No. 3, 6, 7が286kgf/cm²である。

2.3 実験方法

補強する前のRC供試体において、引張鉄筋の計測応力度が道路橋示方書による許容応力度 ($\sigma_{sa}=1800\text{kgf/cm}^2$) となるまで载荷し、曲げひび割れを発生させた後に一旦除荷した。その後、No. 1は補強せずに終局状態まで载荷を行った。No. 2, No. 3ははり両端にケーブルの定着用ブロック、はり中央にデビエータをエポキシ樹脂で接着し、PC鋼棒で固定した。外ケーブルには、SWPR7A $\phi 12.4$ のPC鋼より線を直線あるいは曲げ上げ配置して、約6tfのプレストレスを導入した。No. 4は供試体下面全幅に、板厚2.3mm、SS400の鋼板を拡張式アンカー

表-1 実験要因

No.	補強工法	使用材料、寸法、その他
1	無補強	主鉄筋 D16×2本、スターラップ D6@280
2	外ケーブル (直線配置)	PC鋼より線、SWPR7A $\phi 12.4$ ×2本 導入プレストレス 6tf
3	外ケーブル (曲げ上げ配置)	PC鋼より線、SWPR7A $\phi 12.4$ ×2本 導入プレストレス 6tf、曲げ上げ角度6.6°
4	鋼板接着 (せん断補強無)	曲げ補強用：SS400、150×2.3×2400mm エポキシ樹脂(樹脂厚1mm)、拡張式アンカー
5	鋼板接着 (せん断補強有)	曲げ補強用：SS400、150×2.3×2400mm せん断補強用：SS400、30×2.3×424mm エポキシ樹脂(樹脂厚1mm)、拡張式アンカー
6	炭素繊維接着 (アンカー無)	炭素繊維シート：150×0.167×2400mm、1層
7	炭素繊維接着 (アンカー有)	炭素繊維シート：150×0.167×2400mm、1層 定着用鋼板：150×6×70mm、拡張式アンカー

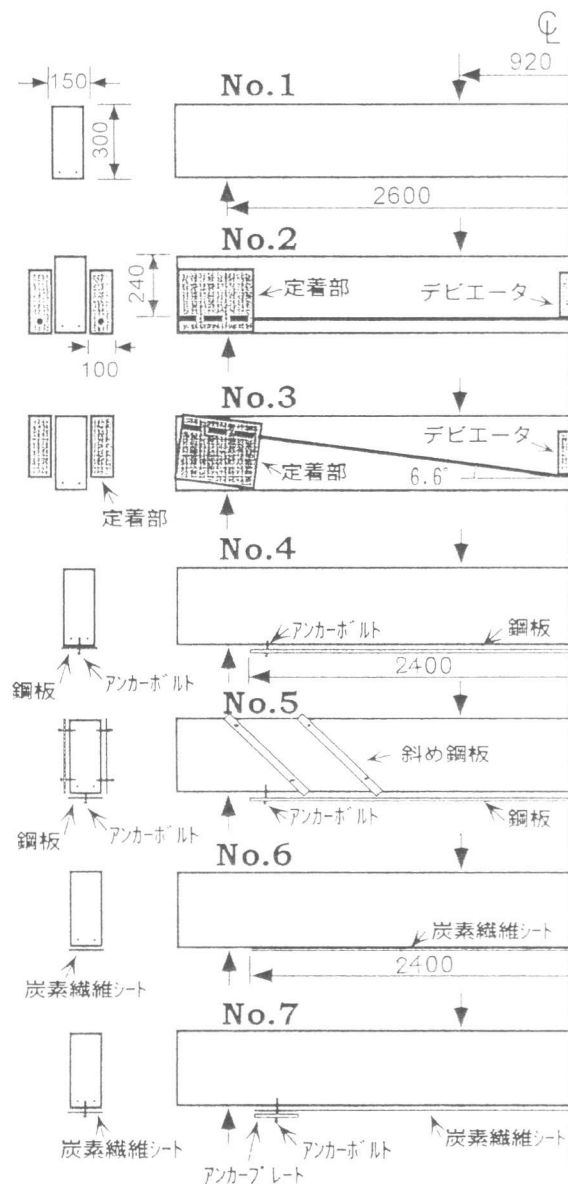


図-1 供試体形状寸法(mm)

で固定し、鋼板端部をシールした後
にエポキシ樹脂を注入した。その際、
樹脂厚が約1mmになるようにあらかじめ
スペーサーを設置した。No. 5はNo.
4と同様にした後、せん断補強用に板
厚2.3mm、幅3cmの鋼板を約45度の角
度で供試体側面に曲げ補強と同様に
設置した。No. 6は、供試体下面に樹
脂を塗布した後に炭素繊維シートを

表 2 材料特性

種 類	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
鉄筋 D 6	3330	4720	1840000
鉄筋 D16	3659	5306	1845000
PC鋼線 φ12.4	17064	18945	1922800
鋼板 SS400	3722	4915	
炭素繊維		52300	2440000

貼り付け、その上から樹脂を含浸させた。No. 7では、No. 6と同様にした後炭素繊維シート両端
に15cm×7cmの鋼板を接着し、アンカーで固定した。いずれもエポキシ樹脂が硬化した後、破壊ま
で載荷を行った。その際、中央変位、コンクリートひずみ（上縁、上縁より7.5、15、22.5、28cmの
箇所）、鋼板外側表面ひずみ、炭素繊維シート外側表面ひずみ、スターラップひずみ、斜め鋼板
ひずみを測定し、ひび割れの観察を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 破壊性状

実験結果と計算耐力を表-3に、ひび割れ状況を図-2に示す。曲げ耐力は、外ケーブル工法
では変形の適合条件とケーブル偏心量の変化を考慮した精算法、鋼板接着工法、炭素繊維シート
接着工法では平面保持の法則が成り立つと仮定して算定した。せん断耐力は、岡村・檜貝式[5]
を用いて算定した。この際、 β_p の項における引張鉄筋として外ケーブル、鋼板、炭素繊維シートの
断面積は考慮していない。また、斜め鋼板は、同位置に同断面積の折曲鉄筋が配置されているも
のとして算定した。

No. 1の無補強供試体は、曲げ破壊した。外ケーブル工法のケーブルを直線配置したNo. 2では、
せん断ひび割れが発生し徐々に進展したが、せん断破壊には至らず曲げ破壊した。計算ではせん
断破壊となるが、せん断ひび割れが載荷点付近まで進展したにもかかわらず、曲げ破壊したこと
から、外ケーブルによってプレストレスを導入した場合、タイドアーチが形成され、計算値以上
のせん断力に耐えられるものと思われる。ケーブルを曲げ上げ配置したNo. 3では、曲げひび割れ
からわずかにせん断ひび割れが発生したが、その後ほとんど進展せずに曲げ破壊した。

表-3 実験結果と計算耐力

No.	補強工法	計算耐力(tf)		荷 重 (tf)	鉄筋の許容応力度時 主鉄筋ひずみ(μ)		最大荷重 (tf)	破壊形式
		曲 げ	せん 断		補強前	補強後		
1	無補強	9.6	12.4	3.7	862	-	10.0	曲げ
2	外ケーブル(直線配置)	16.9	14.7	4.1	868	441	15.3	曲げ
3	外ケーブル(曲げ上げ配置)	12.5	16.2	3.5	883	431	14.0	曲げ
4	鋼板接着(せん断補強無)	15.9	12.4	3.4	844	487	10.8	せん断
5	鋼板接着(せん断補強有)	15.9	22.3	3.8	866	535	12.2	剝離
6	炭素繊維接着(アンカー無)	16.5	12.4	3.2	852	861	12.8	剝離
7	炭素繊維接着(アンカー有)	16.5	12.4	3.8	854	903	13.0	剝離

鋼板接着工法で補強したNo. 4では、補強後曲げひび割れはほとんど進展せず、せん断ひび割れの発生と同時にせん断破壊した。このため、せん断に対して補強するために、斜め鋼板を側面に貼りつけたNo. 5では、No. 4のせん断破壊荷重に達してもせん断ひび割れは発生せず、さらに大きな荷重に耐えた。その後、突然曲げ補強用鋼板が剥離し、それと同時にせん断ひび割れが発生し、耐力も急激に低下した。せん断ひび割れは発生したが、斜め鋼板位置で止まっているものも数本あり、斜め鋼板がせん断力に抵抗したものと思われる。

炭素繊維シート接着工法で曲げ補強したNo. 6では、補強後も曲げひび割れが進展したが、炭素繊維シートがせん断ひび割れ部から徐々に剥離し、かぶりコンクリートと共にほぼ全域で剥離した。No. 7では、炭素繊維シート両端をアンカープレートとアンカーボルトで固定したものの、最終的にはアンカープレートから抜け出すようにして剥離した。

3. 2 荷重-変位関係

各供試体の荷重とスパン中央変位の関係を図-3に示す。外ケーブル工法で補強後、剛性が大きくなり、約40~50%最大耐力が増加した。鋼板接着工法では、いずれも鋼板が剥離したために最大耐力は計算値に比べかなり小さかったが、剛性は外ケーブル工法よりも大きくなった。炭素繊維シート接着工法は無補強供試体に比べ、最大耐力が約30%大きく、曲げ剛性は変化せず、炭素繊維シート剥離後は同様の挙動を示した。アンカーで定着したものは定着しないものに比べ、炭素繊維シートが剥離する変位が10mmほど大きくなった。

3. 3 主鉄筋ひずみの変化

表-3より主鉄筋が許容応力度に達した時の荷重における、主鉄筋ひずみを補強前後で比較した。外ケーブル工法、鋼板接着工法では、主鉄筋のひずみは補強前の50~60%程度に減少し、補強効果が認められた。炭素繊維シート接着工法では、補強後の主鉄筋ひずみは補強前より若干増加している。

3. 4 スターラップひずみの変化

荷重-スターラップひずみ関係を図-4に示す。外ケーブル工法では、ケーブルを曲げ配置したものは直線配置したもの 비해、スターラップが受け持つせん断耐力が小さくなっていることが分かる。これは、ケーブルを曲げ上げたためにケーブル張力の垂直方向成分によってせん断力に抵抗したものと考えられる。また、鋼板接着工法においてもせん断補強用斜め鋼板のあるものは無いものに

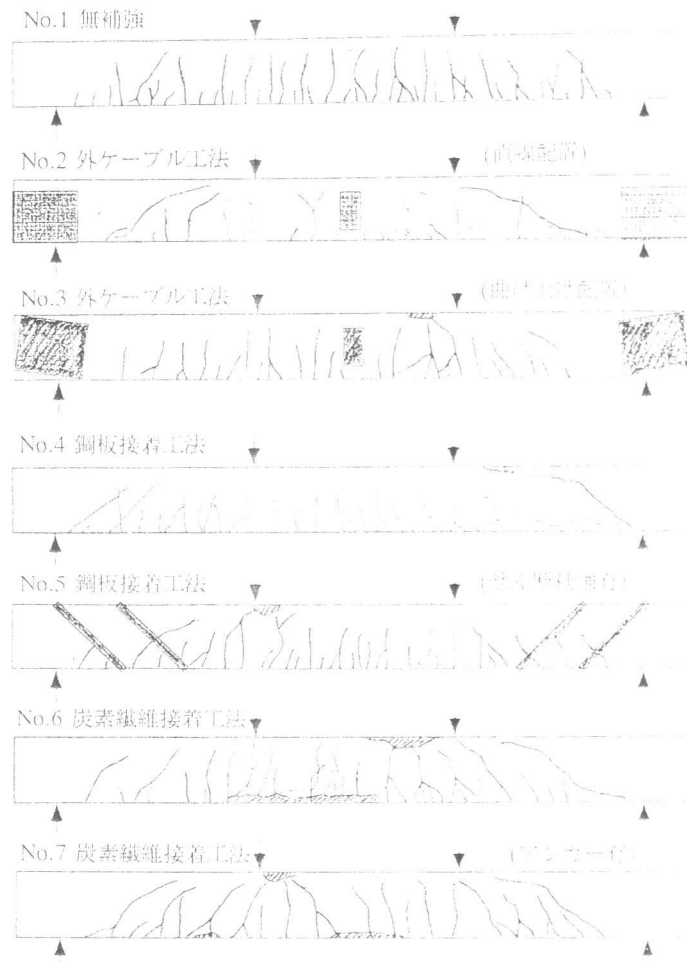


図 2 ひび割れ状況

比ベスターラップのひずみは小さく、せん断補強効果が認められた。

3. 5 ひずみ分布

鋼板接着工法、炭素繊維シート接着工法の弾性域におけるスパン中央断面のひずみ分布をそれぞれ図-5、図-6に示す。鋼板接着工法では、鋼板とはりが一体化しており、概ね平面保持が保たれていることが認められる。一方炭素繊維シート接着工法では、炭素繊維シートのひずみははりの下縁から2cmの位置におけるひずみよりかなり小さい値を取っている。これは、炭素繊維シートが均一に伸びずにひび割れ部などで局部的に伸びているため、ひずみを測定した位置ではひび割れは貫通していない。このため、炭素繊維シートのひずみは小さくなったものと思われる。

3. 6 鋼板、炭素繊維シートのひずみ

鋼板接着工法の場合、はり下面に接着した鋼板のスパン中央における最大荷重時におけるひずみはNo. 4が1710 μ 、No. 5が1574 μ であり、鋼板が降伏する前に剥離によって破壊に至った。また、破壊時の斜め鋼板のひずみは、最も大きいもので約400

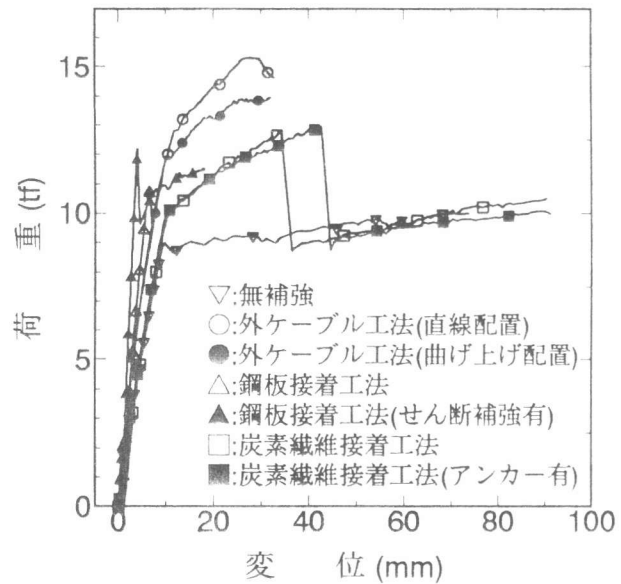


図-3 荷重-変位関係

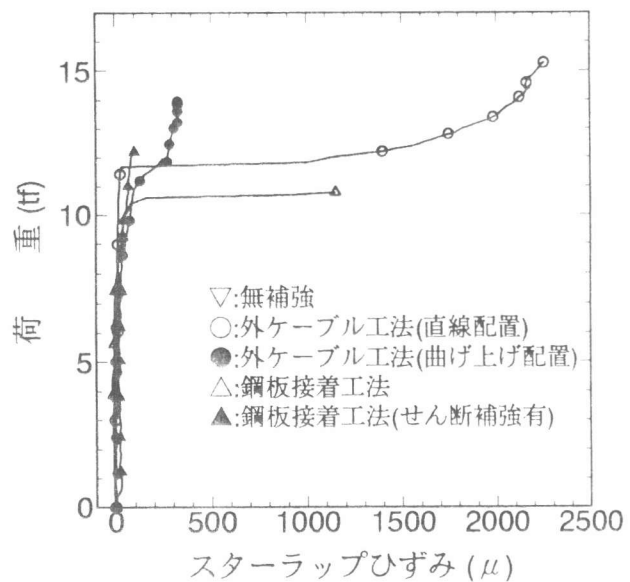


図-4 荷重-スターラップひずみ関係

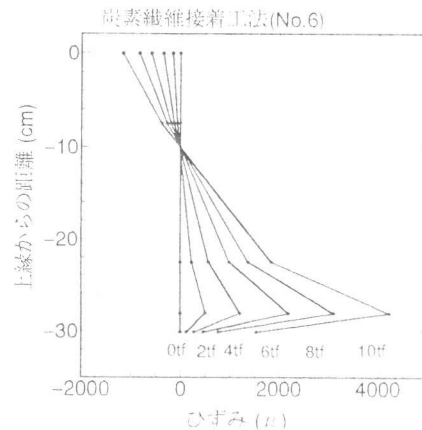
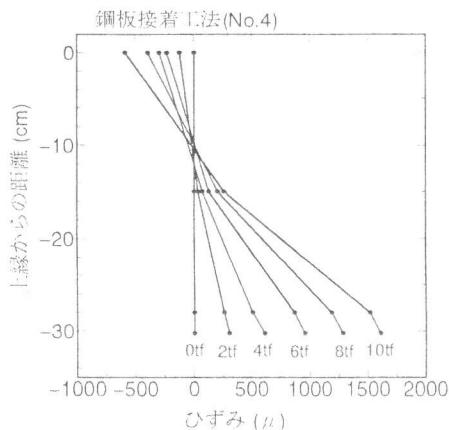


図-5 スパン中央断面におけるひずみ分布 図-6 スパン中央断面におけるひずみ分布

μ 、そのときのスターラップのひずみは約200 μ 程度であり、斜め鋼板によってせん断力の一部が受け持たれ、その分スターラップの受つせん断力が軽減されたと思われる。

炭素繊維シート接着工法の場合、炭素繊維シートのスパン中央におけるひずみは最大荷重の時に最も大きく、No.6では、12.8tfの時に7719 μ 、No.7では、13.0tfの時に11161 μ であり、アンカープレートおよびアンカーボルトによって定着することによって、定着しないものに比べて炭素繊維シートの高強度特性が発揮できると考えられる。しかしながら、No.6,7ともに炭素繊維シートの剥離により急激に耐力が落ちたため、剥離しないようさらにアンカーボルトを増やしたり、また数ヶ所で定着するなどの改善が必要であると思われる。

4. まとめ

本研究より、以下の知見を得た。

(1)外ケーブル工法で補強した場合、曲げ耐力の増加とともにせん断耐力も増加し、ケーブルを曲げ上げ配置した場合の方が、直線配置した場合に比べせん断耐力の増加が期待できる。

(2)鋼板接着工法では、曲げ耐力が増大するため、終局破壊形式がせん断破壊となる恐れがある。このためはり側面に斜め鋼板を接着することによって、せん断ひび割れの発生を抑制でき、せん断補強効果が期待できる。

(3)炭素繊維シートを補強に用いた場合、はり部材の剛性は変化しない。また、炭素繊維シートの高強度を有効に活用するためには定着方法を開発する必要がある。

このように各補強方法には、メリットとデメリットがあり、既設構造物の状態、条件等によって最適と考えられる補強工法を用いる必要がある。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、埼玉大学学部生、梅原正貴君（現 前田建設工業（株））に多大の協力を頂いた。ここに記して、謝意を表する次第である。

参考文献

- [1]木曾茂、緒方紀夫、安藤博文、新藤竹文：車両の大型化に対するコンクリート橋の補強に関する実験的研究、土木学会第49回年次講演概要集、第5部、pp. -、1994.9
- [2]木曾茂、緒方紀夫、安藤博文、新藤竹文：車両の大型化に対するコンクリート橋のせん断補強に関する実験的研究、土木学会第50回年次講演概要集、第5部、pp. 462-463、1995.9
- [3]高橋博威、近藤悦郎、佐野 正、睦好宏史：外ケーブル式PCはりのせん断耐力に関する実験的研究、土木学会第50回年次講演概要集、第5部、pp. 896-897、1995.9
- [4]佐野正、小俣富士夫、三浦尚：鋼板接着により補強された鉄筋コンクリート梁の曲げ性状、構造工学論文集、Vol. 39A、pp. 1361-1370、1993.3
- [5]Okamura, H, Higai, T, "Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement," Proceedings of JSCE No. 300, August, 1980