

論文 RCホロー桁のCFRPシート緊張接着補強効果に関する検討

栗根 聡^{*1}・幸左 賢二^{*2}・小林 朗^{*3}・丸野 泰史郎^{*4}

要旨：本研究では，実橋の 6/10 スケールの大型供試体に初期荷重を行なってひび割れ損傷状況を再現した供試体を用い，炭素繊維シート緊張接着工法の補強効果を実験および解析で検討した。実験では，シートの破断強度の 30%の緊張力を導入することにより，初期荷重の際に発生していたひび割れ幅が，52%低減することを確認した。また，段階施工を考慮した FEM 解析でも，炭素繊維シート緊張接着補強時のひび割れ幅の挙動を定性的に再現することができた。

キーワード：RC ホロー桁，炭素繊維シート，緊張接着，ひび割れ幅制御

1. はじめに

供用後 30 年以上を経過した RC 橋梁では，年々増加する交通量と車両の大型化にともなう耐力不足や，経年劣化による損傷が数多く報告されている。そのなかでも，RC 中空床版橋のひび割れ損傷が著しい状況であることが報告されており，早急な効果的な補修・補強の必要性が指摘されている¹⁾。

RC 中空床版橋のひび割れ損傷の補強工法のひとつに炭素繊維シート緊張接着工法があり，その補強効果について，供試体を用いた曲げ荷重実験などの研究成果が報告されている²⁾。しかし，スケールおよび損傷状況を実構造物に近い状態に再現した供試体実験は極めて少ない。

そこで本研究では，実際のひび割れ損傷状態を模擬した 6/10 スケールの大型供試体を用いて炭素繊維シートで補強した梁の曲げ荷重実験を行い，補強効果に関する検討を行った。また，

段階施工を考慮した弾塑性 FEM 解析を行い，実験結果を解析的に考察した。

2. 実験概要

本研究では，床版下面のひび割れ損傷が著しい状況にある A 高架橋（5 径間連続 RC 中空床版橋）の第 1 径間を対象橋梁とした。図 - 1 に A 高架橋第 1 径間の側面図および断面図を示す。供試体は，実橋の標準断面を対象に，ボイド 1 本分の断面を 6/10 にスケールダウンした RC 中空単純梁とし，圧縮および引張鉄筋比を近似させてモデル化を行った。

本実験では，表 - 1 に示す 3 種類の供試体を用いて荷重実験を行った。コンクリートは $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$ ，鉄筋は SD295 を用いた。なお，実験時に行った材料試験結果より，コンクリートの圧縮強度は，L-1 供試体は 33.4N/mm^2 ，L-2 供試体は 30.2N/mm^2 ，L-3 供試体は 39.5N/mm^2 ，

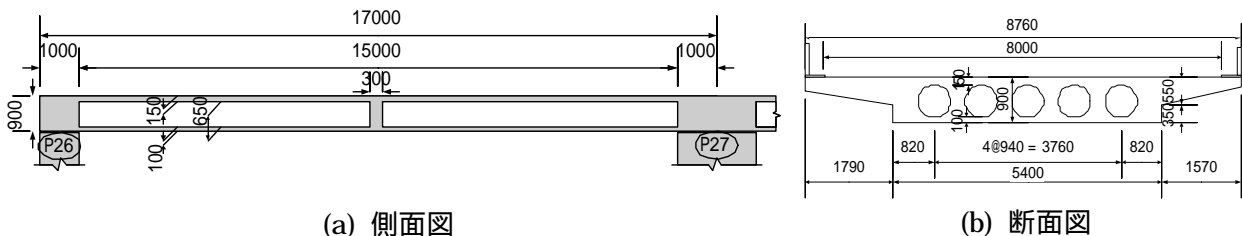


図 - 1 A 高架橋第 1 径間

*1 株式会社 修成建設コンサルタント 技術本部 構造部 工修 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部 建設社会工学科教授 Ph.D. (正会員)

*3 日鉄コンポジット 技術部 工修 (非会員)

*4 九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 (非会員)

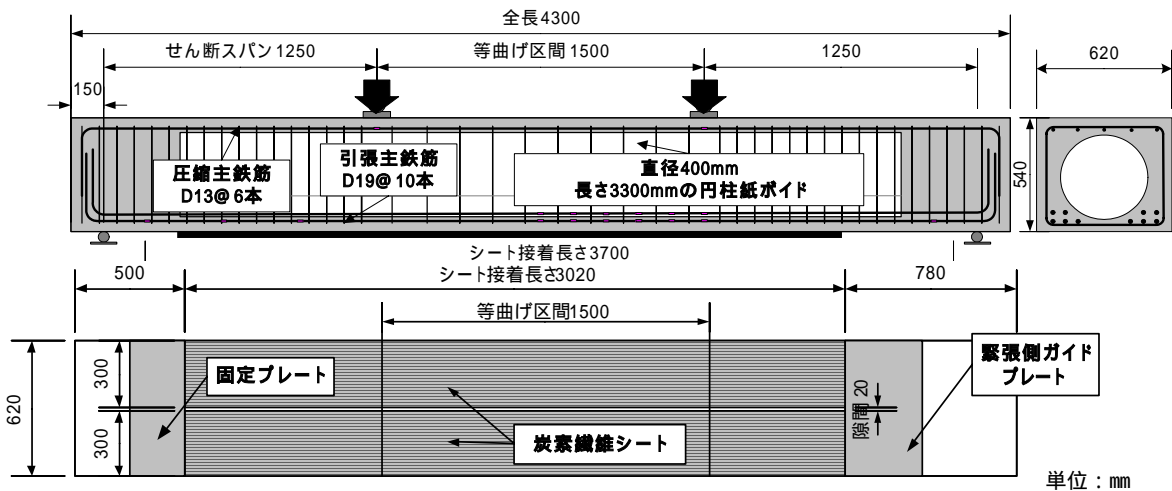


図 - 2 供試体概要 (L-3)

単位 : mm

鉄筋の降伏強度は 356 N/mm^2 であった。また、供試体の概要を図 - 2 に示す。部材下側には 10 本の引張主鉄筋を、ポイドを避けて 2 段配置とし、曲げ破壊によって終局状態となるように、せん断スパン間に十分な帯鉄筋を配筋することによって、せん断耐力を十分確保した。

L-2, L-3 供試体では、供試体下面でコンクリートのひび割れ幅を測定するために、部材中心線上に 20 mm の間隔を設け、これを挟んで引張強度 3400 N/mm^2 、幅 300 mm の炭素繊維シート (300 g/m^2 目付け, 1 層) を 2 枚平行に接着した。なお、シートはあらかじめ FRP 化しておいたものに樹脂を塗布して接着させた。

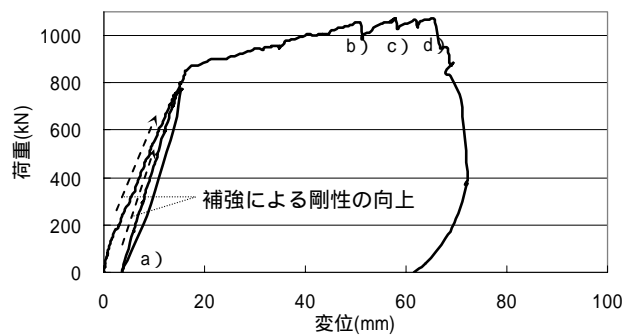
全供試体に対して、荷重載荷は 2 点載荷により行い、等曲げ区間に発生するひび割れの挙動を十分に観察するために、載荷点間隔を 1500 mm (有効高さの 3 倍) に設定した。荷重の載荷方法は、まず初期載荷として、荷重制御で引張鉄筋が初降伏するまで繰り返し載荷を行い、実橋で見られた約 0.25 mm の残留ひび割れを発生させた。その後、ひび割れ注入は行わず、L-2, L-3 には所定の補強を施し、引き続き変位制御で補強後載荷を行った。

なお、計測項目は、 載荷荷重、 支間中央部鉛直変位、 引張鉄筋およびシートのひずみ、 ひび割れ幅、 シートの接着状況とした。ひび割れ幅は、ひび割れの発生を確認した箇所にパイゲージを設置し、デジタルカメラで初期値を算出して、測定を行った。

表 - 1 供試体一覧

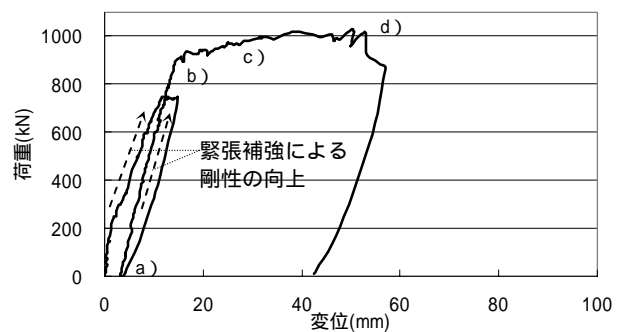
供試体名	緊張力	端部定着法	備考
L-1	0		無補強
L-2	0	定着用鋼板	無緊張補強
L-3	0.3ft	定着用鋼板	緊張補強

注) ft : 炭素繊維シートの引張強度



- a) シート補強 (0kN)
- b) シート左側ピ - リング剥離 (1055kN)
- c) シート右側ピ - リング剥離 (1072kN)
- d) 上端コンクリート圧縮破壊 (1069kN)

図 - 3 荷重 - 変位関係 (L-2)



- a) シート緊張補強 (0kN)
- b) シート左側ピ - リング剥離 (915kN)
- c) 上端かぶりの局部剥離 (950kN)
- d) 炭素繊維シート破断 (1012kN)

図 - 4 荷重 - 変位関係 (L-3)

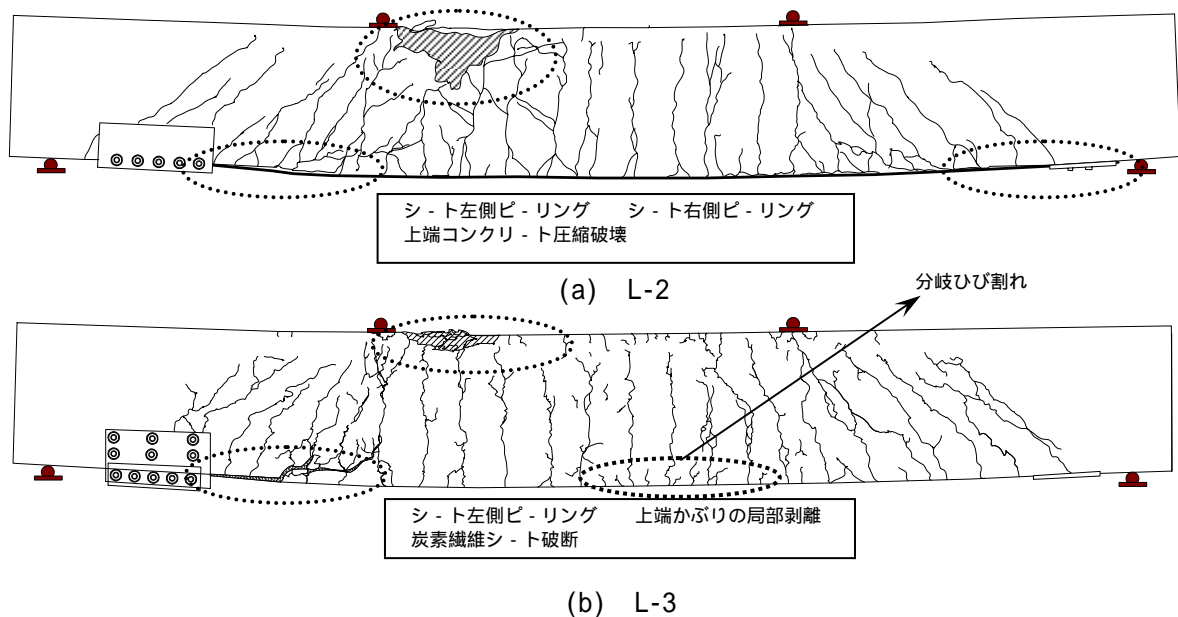


図 - 5 供試体ひび割れ進展図(終局状態)

3. 実験結果

3.1 荷重 - 変位関係

図 - 3 に L-2 供試体の、図 - 4 に L-3 供試体の荷重 - 変位関係をそれぞれ示す。図 - 3 より、L-2 供試体は荷重 900kN 時に供試体の降伏が確認された。その後、荷重 1055kN 時に左側せん断スパン間で、荷重 1072kN 時には右側せん断スパン間でピーリングが発生し、一旦は荷重が減少したが、定着用鋼板で固定しているために、シートが外ケーブル状態となるものの、その後荷重は暫増した。最終的には荷重 1069kN 時に上端コンクリートが圧縮破壊して、载荷を終了した。一方、L-3 供試体については、図 - 4 より、荷重 915kN 時に左側せん断スパン間においてピーリングが発生するとともに、供試体の降伏が確認された。その後、荷重 950kN 時に上部かぶりコンクリートが局部的に剥落した後も荷重は暫増し、最終的には荷重 1012kN 時に炭素繊維シートが破断して、载荷を終了した。なお、荷重 - 変位関係より、L-2、L-3 供試体ともに、初期载荷時を比較した場合、補強後载荷時の荷重 - 変位勾配が向上していることが見て取れる。

図-5 に供試体のひび割れ進展図を示す。ひび割れ本数が進展している初期状態の後、定常状態で L-2 供試体は、等曲げ区間に 10 本のひび割

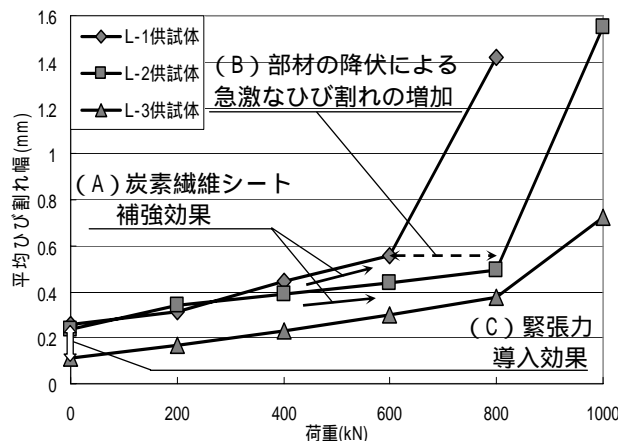


図 - 6 再载荷時の平均ひび割れ幅

れの発生を、L-3 供試体では 11 本のひび割れの発生を確認した。その後、L-1 供試体ではひび割れ本数の増加は確認されなかったが、L-2、L-3 供試体では 950kN を超過した後、微細な分岐ひび割れが発生した。

3.2 ひび割れ挙動

図 - 6 に、各供試体の 200kN 毎の平均ひび割れ幅の進展を示す。平均ひび割れ幅は、各供試体に 4~5 箇所設置したパイゲージの値より求めた。図 - 6 の(A)に示すように、L-1 と L-2 供試体を比較した場合、600kN までのひび割れ幅の増加量に差異が生じている。これは、炭素繊維シートを接着補強することで、鉄筋に生じている応力の一部をシートが負担することにより、ひび割れ幅の進展が低減したと考えられる。また、

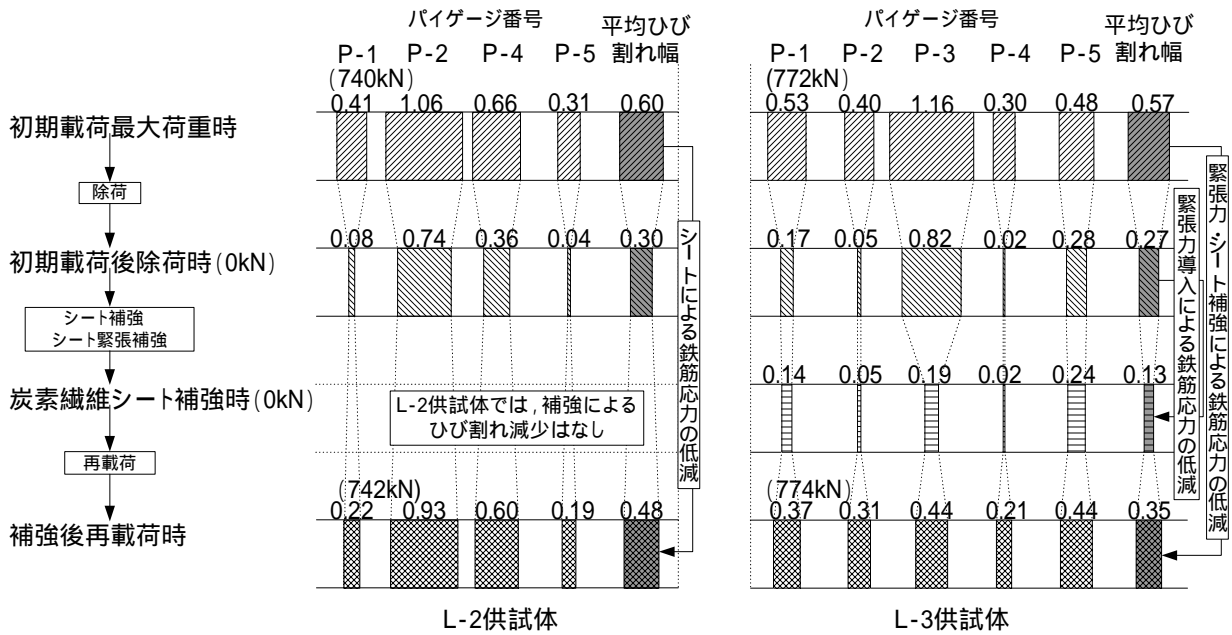


図 - 7 各状態におけるひび割れ幅の増減 (L-2, L-3) 単位 : mm

図中(B)に示すように L-1 供試体は 600kN 以降、L-2 供試体は 800kN 以降で、供試体の降伏により、急激なひび割れ幅の進展が確認できる。これも、鉄筋応力の低減により供試体の降伏荷重が上昇したためと考えられ、炭素繊維シートを接着補強もしくは緊張接着補強することで、使用状態での耐力の向上が期待できる。図中(C)に示すように、L-2 と L-3 供試体を比較した場合、発生しているひび割れ幅に差異が生じている。これは、炭素繊維シートに緊張力を導入することにより、初期載荷終了時に鉄筋に生じていた応力が低減し、ひび割れ幅の抑制が働くためと考えられる。

図 - 7 に補強供試体の各状態におけるひび割れ幅の増減を示す。L-2 供試体では補強時にひび割れ幅の変化は確認されなかったが、L-3 供試体では、緊張力導入による鉄筋応力の低減で、初期載荷除荷時に 0.27 mm であった平均ひび割れ幅が、補強後は 0.13 mm となり、48% に減少した。また、L-3 供試体では、初期載荷最大荷重時に 0.57 mm であった平均ひび割れ幅が、補強により 0.35 mm となった。これは先述した緊張力導入時における鉄筋応力の低減に加え、炭素繊維シート補強で鉄筋に作用する応力の一部をシートが負担することにより、ひび割れ幅の進展量が減

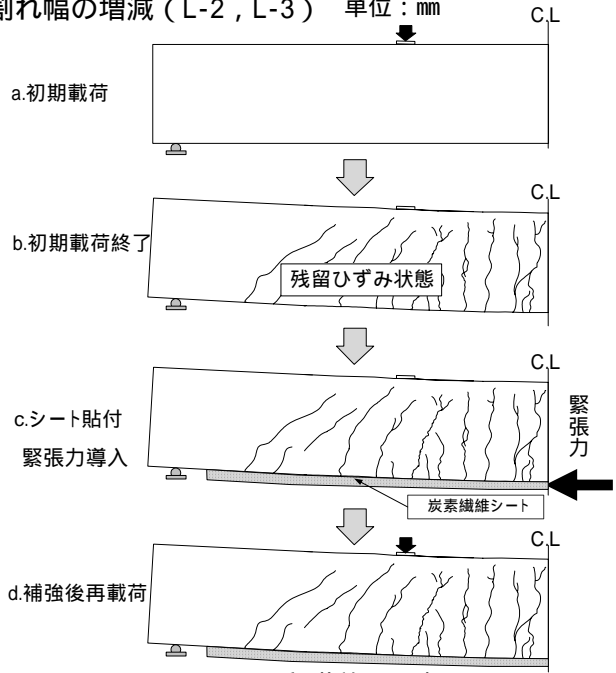


図 - 8 段階施工の概要

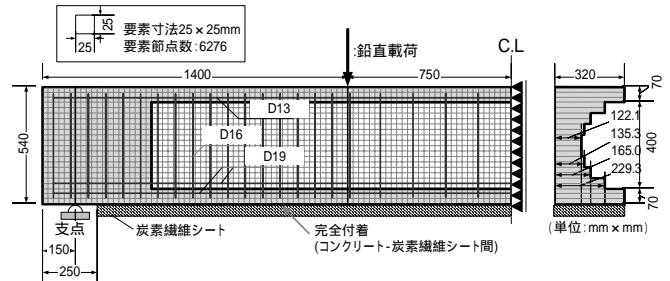


図 - 9 解析モデル

少したと考えられる。また、L-3 供試体では各ひび割れ幅がほぼ同様の増減量で進展しているに対し、L-2 供試体では各ひび割れ幅の増減量に差が生じていた。

4. 解析概要

以上の実験に対し、2次元弾塑性FEM解析を行った³⁾。ただし、本稿では代表例としてL-3供試体についての結果のみを示す。ここで、初期載荷による残留ひび割れ状態と補強工程を考慮するために、図-8に示す段階施工を考慮した。まず健全な状態の梁モデルに対し、実験の補強前載荷で測定された最大変位が生じるまで荷重増分載荷を行い(a)、この状態から除荷した後の残留ひび割れ状態を損傷梁モデルとする(b)。次に、損傷梁モデルを初期状態とし、これに炭素繊維シートや接着面のモデルを追加した後、炭素繊維要素に緊張力を導入することによって補強後の状態を再現し(c)、補強後載荷を行なった(d)。

図-9に解析モデルを示す。ボイド部分は横方向に8分割し、要素の厚さを変化させることによって表現した。なお、本解析では分散ひび割れモデルを用いた。また、コンクリートは、圧縮側に Drucker-Prager の破壊基準を、引張側に最大主応力基準を設定し、とくに引張側の履歴特性について、緊張力の導入効果とひび割れ性状を考慮するために、減衰が小さく除荷する際に0点に向かう原点指向型モデルとした。鉄筋は圧縮・引張側共に等方硬化則を用いたバイリニア型の履歴特性を設定した。炭素繊維シートは完全弾性体とし、コンクリート-炭素繊維シート間は完全付着とした。なお、解析では材料試験より得られた力学特性値を用いた。

5. 解析結果と考察

5.1 荷重-変位関係

実験および解析の荷重-変位関係を図-10に示す。0.4 P_y 時から P_y 時の勾配(以後、剛性勾配)を算出すると、補強前は実験で56.8kN/mm、解析で52.2kN/mm、補強後は実験で71.2kN/mm、解析で78.8kN/mmであり、補強前後の剛性の向上が解析上でも再現されたことが確認できた。

5.2 ひび割れ幅の挙動

図-11に荷重-平均ひび割れ幅関係を示す。実験ではパイゲージにより5箇所(P-1~P-5)のひび

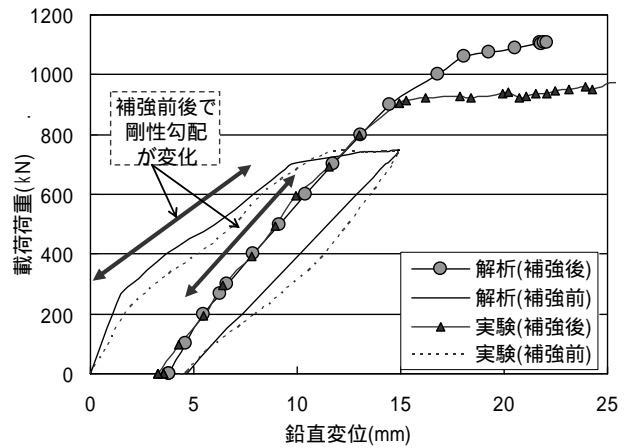


図-10 荷重 - 変位関係

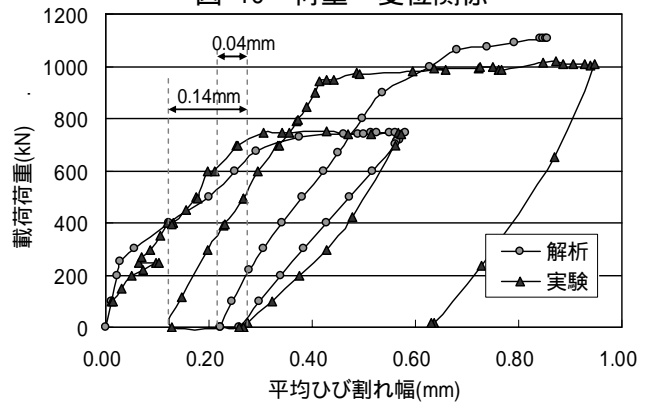


図-11 荷重 - 平均ひび割れ幅関係

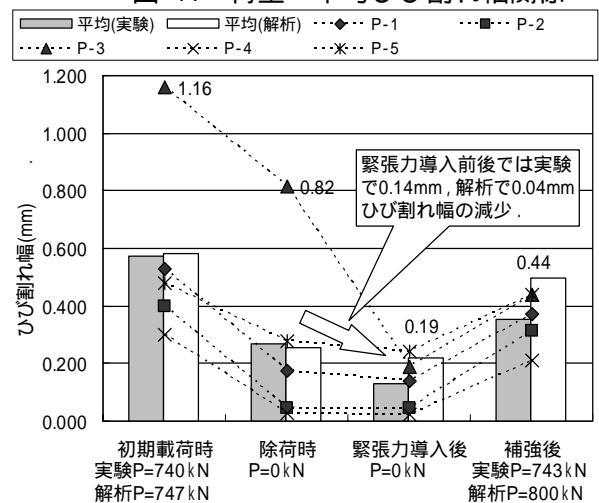


図-12 各状態のひび割れ幅挙動

割れ幅の測定を行ない、解析では実験におけるひび割れ発生時のコンクリートでのx軸方向の伸び量を微小と考え、土木学会コンクリート標準示方書によって算出した設計ひび割れ間隔ごとに区切った要素のx軸方向のコンクリート要素における伸び量をひび割れ幅とした。これらの平均の値を平均ひび割れ幅とする。これより算出した平均ひび割れ幅は、補強前載荷の除荷時までは解析結果が実験結果とよく一致しているものの、緊張力導入時による平均ひび割れ幅

の減少量が図-11 に示すように、実験で 0.14 mm (0.27 mmから 0.13 mm)、解析で 0.04 mm(0.26 mmから 0.22 mm)と異なっていることがわかる。ただし、簡便的に土木学会コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式を適応して降伏後のひび割れ幅を求めると、実験より得られた緊張力導入時の主鉄筋ひずみの減少量(156 μ)より、ひび割れ幅は 0.03 mmと算出され、解析結果とほぼ同等の値となった。さらに、図-12 に示す実験および解析による平均ひび割れ幅に併せて、実験で測定したひび割れごとの幅の挙動を見ると、P-3 のひび割れ幅が除荷時で 0.82 mm、緊張力導入後で 0.19 mmと、他と比較して大きく変動していることが分かる。したがって、緊張力導入時の平均ひび割れ幅の増減に差が生じた原因として、実験ではひび割れ損傷の局所化が生じたが、本解析手法では梁供試体を材料の均一な連続体として表現しているために、実験で生じたひび割れの局所化が表現できなかったためと考えられる。

5.3 炭素繊維シート発生ひずみ率

図-13 に炭素繊維シートの破断ひずみに対するひずみの割合を示す。補強後勾配が低下する以前、1.3Py(1.5 y)までの炭素繊維シートの発生ひずみ率は実験で 49%、解析で 45%と同様であり、補強後勾配の低下以前の使用状態における炭素繊維シートの挙動は定性的に再現された。

6. まとめ

今回、実橋のひび割れ損傷を模擬した供試体の曲げ載荷実験および2次元弾塑性FEM解析を行い、以下に示す結論を得た。

- (1) 炭素繊維シートに破断強度の30%の緊張力を導入して補強することで、鉄筋の応力低減が期待でき、供試体に生じていたひび割れ幅が抑制されることが確認された。また、炭素繊維シートを緊張接着補強することで、初期載荷最大荷重時に 0.57 mmであった平均ひび割れ幅が、補強後は 0.35 mmとなり、鉄筋に発生する応力の一部を炭素繊維シートが負担することが期待でき、ひび割れ幅が抑制さ

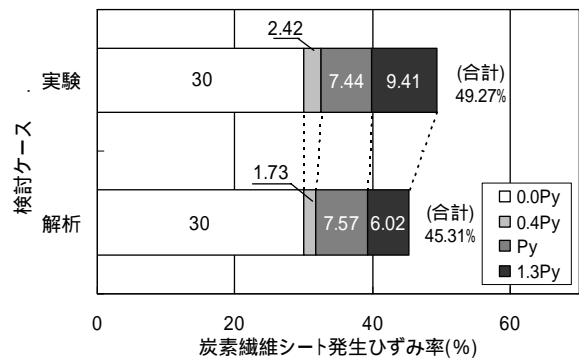


図-13 炭素繊維シート使用率

れることが確認された。

- (2) 段階施工 FEM 解析手法を用いることで、補強前の剛性(実験で 56.8kN/mm、解析で 52.2kN/mm)に対して補強後の剛性(実験で 71.2kN/mm、解析で 78.8kN/mm)が増加したことが確認でき、本手法で緊張接着補強による剛性向上効果が定性的に再現できた。
- (3) 損傷梁の補強シミュレーションに段階施工 FEM 解析手法を用いることで、緊張力導入時におけるひび割れ幅の低減(実験で 0.14 mm、解析で 0.04 mm減少)と、1.3Py 時の炭素繊維シート発生ひずみ率の低減(実験で 49%、解析で 45%減少)を確認でき、緊張接着補強時によるひび割れ幅の挙動や炭素繊維シート使用率が定性的に再現できた。実験と解析のひび割れ幅に違いが生じたのは、実験ではひび割れの局所化が生じたためと考えられる。

参考文献

- 1) 松下博通ほか：経年変化による損傷・劣化を受けた RC 中空床版橋の補修・補強、橋梁と基礎，pp.1-9，2005.4
- 2) 呉智深ほか：CFRPシート緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究，土木学会論文集，.641/V-64，pp.153-165，2002.2
- 3) 栗根聡ほか：RC 中空ホロー桁の炭素繊維シート接着補強効果の検討，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp.417-422，2005.11