

RC 中空ホロー桁の炭素繊維シート接着補強効果の検討

(株) 修成建設コンサルタント 正会員 工学修士 ○粟根 聡
 九州工業大学 正会員 Ph. D. 幸左賢二
 九州工業大学 非会員 博士 (工学) 宇野裕教
 九州工業大学 非会員 藤井康彦

1 はじめに

都市高速道路には、供用後約30年以上を経過するRC橋梁が増えてきており、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、劣化等の損傷が数多く報告されている。本研究の対象とした都市高速道路においては、特にRC中空床版橋が他の形式構造物に比べて損傷が著しい状況であることが報告されており、早急に効果的な補修・補強を行うことが必要とされている。

炭素繊維シートをRC梁下面に接着補強した実験は数多く行われてきており補強効果や破壊パターンなどの研究成果が報告されている¹⁾。しかし、供試体形状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。本研究では6/10スケールの大型の供試体を用い、シート補強前に初期荷重を行い、残留ひび割れを発生させ、緊張力の有無による炭素繊維シートの挙動と供試体のひび割れ性状について検討を行った²⁾。

2 実験概要

本研究では、対象橋梁としてA高架橋(5径間連続RC中空床版橋)の第1径間を選定した。A高架橋は床版下面のひび割れ損傷が激しい橋梁の中のひとつである。図-1に第1径間の側面図及び断面図を示す。供試体は径間中央部の断面を対象に、圧縮および引張鉄筋比(表-1)をそれぞれ一致させ、実橋の床版断面のうちボイド1本分の断面をRC中空単純梁としてモデル化したものを用いた。

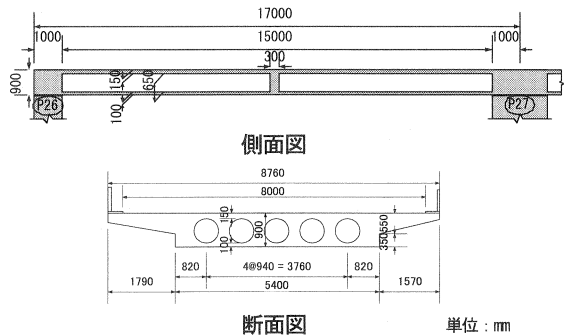


図-1 対象径間概要図

表-1 実橋と供試体の鉄筋比

	A高架橋	L-1, L-2	L-3
圧縮主鉄筋比	0.35	0.38	0.38
引張主鉄筋比	1.53	1.36	1.36

表-2 炭素繊維シートの諸元

繊維目付	(g/m ²)	300
厚さ	(mm)	0.167
引張強度	(N/mm ²)	3400
引張弾性率	(N/mm ²)	2.3 × 10 ⁵

実験はL-1(無補強), L-2(目付け300g/m²炭素繊維シート1層補強, 無緊張), L-3(目付け300g/m²炭素繊維シート1層補強, 緊張力1020N/mm²)の3体を行った。

表-2に供試体に接着した炭素繊維シートの諸元を、図-2に本実験で用いた供試体形状を示す。供試体は対象橋梁の断面の6/10のスケールとし、曲げひび割れの挙動に注目することから、引張鉄筋ひずみが等分布となる区間を十分確保するため荷重点間隔1500mm(有効高さの3倍)の2点荷重とした。

終局状態での曲げ挙動の検討を行うため、せん断スパン間に帯鉄筋を密に配筋し、曲げ耐力の1.5倍のせん断耐力を確保している。L-2, 3供試体で使用した炭素繊維シートは、実構造物の補強レベルに相似させ、幅300mmの炭素繊維シートを二枚並べて接着し、供試体下面のひび割れ幅を測定するために中央ラインに20mmの隙間を設けている。また、シートの接着方法に関しては、炭素繊維シートを予めFRP化した後に、接着面にプライマーを塗った状態でコンクリート下面に接着させる手順で施工した。L-2, 3に関しては初期荷重により引張鉄筋が降伏する時点まで繰り返し荷重を行い、平均残留ひび割れ幅が約0.2mm発生した時点で、炭素

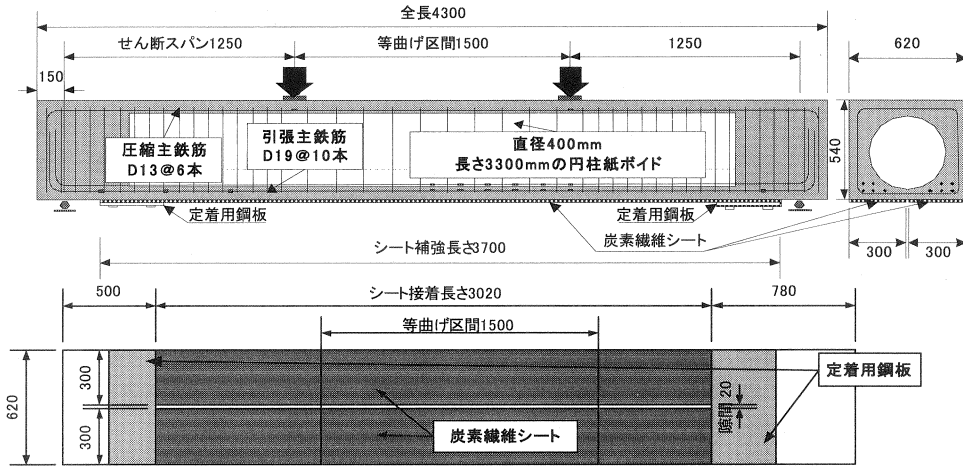


図-2 供試体形状および下面炭素繊維シート接着状況

単位: mm

繊維シートのみによる補強効果を見るため、ひび割れ注入は行わずに炭素繊維シートを下面接着して養生を行なった。また、L-3 は、図-2 に示すとおり定着用鋼板に設置したPC鋼棒を油圧ジャッキにより引張り、炭素繊維シートに緊張力を導入した。

主な計測項目は鉛直変位、引張鉄筋およびシートのひずみ、シートの剥離状況およびひび割れ状況である。また、本実験では、等曲げ区間に発生したひび割れ幅を精度よく測定するため、パイ型ゲージとデジタルカメラによる画像計測を併用して行った。図-3 にデジタルカメラによるひび割れの画像計測方法を示す。各ひび割れは複数点 (L_1, L_2, L_3) で幅を計測し、その平均値を開口したひび割れ幅とした。

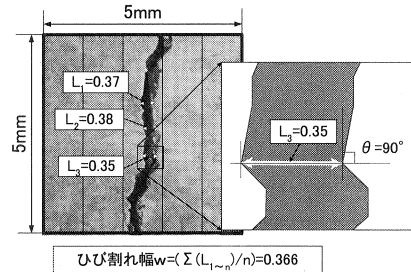


図-3 ひび割れ幅の画像計測方法

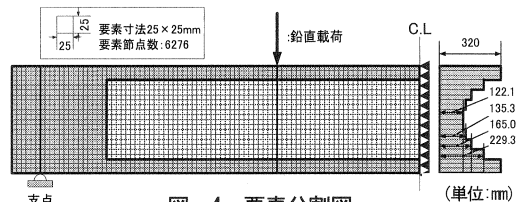


図-4 要素分割図

(単位: mm)

3 解析概要

RC中空梁供試体を対象として、FEM弾塑性解析ソフトDIANAを用い、実験供試体の再現性の検討を行った。図-4 に要素分割図を示す。解析は梁供試体の対称性を考慮して4分の1部分をモデル化し、ボイド部は横方向に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。荷重条件としては、荷重点において鉛直方向の荷重制御とした。L-2 に関しては、実験と同様の条件で評価を行うために実験結果を参考に、図-5 に示す段階施工解析を行った。まず、初期荷重により変形を与え(図-5 a)、荷重除荷後の鉄筋ひずみが500 μ に達した時点(図-5 b)で、コンクリート-炭素繊維シート間を完全付着と仮定し、炭素繊維シート要素で補強を行い(図-5 c)、再荷重(図-5 d)を行った。各要素には図-6 に示す応力-ひずみモデルを用いる。コンクリートと炭素繊維シート要素には8節点アイソパラメトリック要素

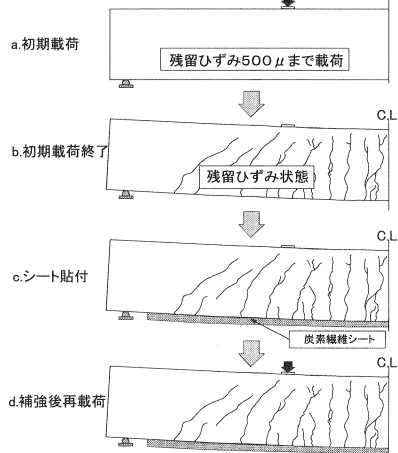


図-5 段階施工解析概要

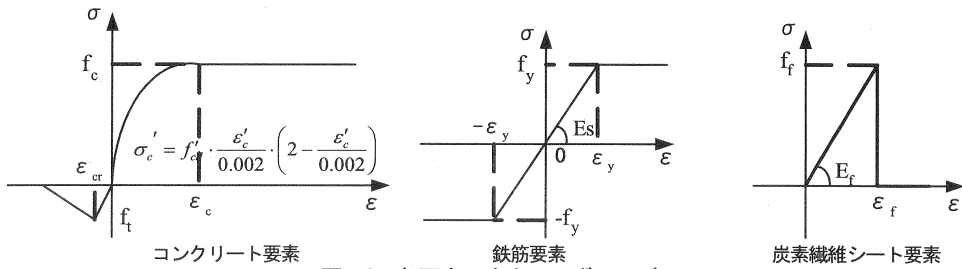


図-6 各要素の応力-ひずみモデル

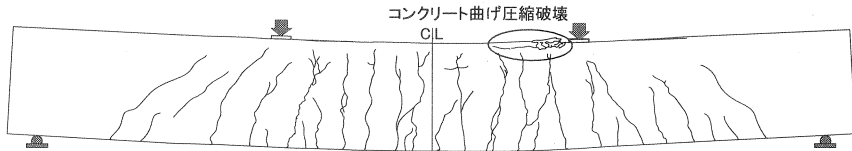


図-7 L-1 破壊状況

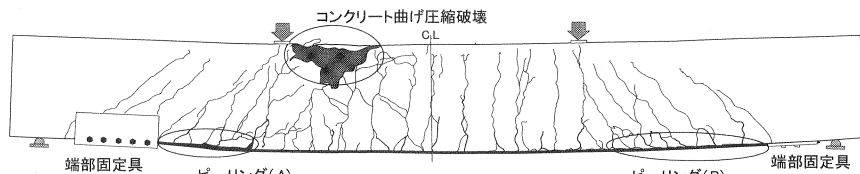


図-8 L-2 破壊状況

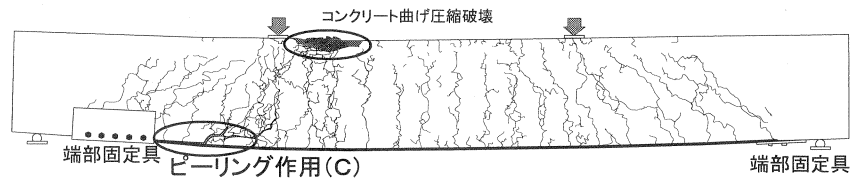


図-9 L-3 破壊状況

を用いており、コンクリートの構成則は、圧縮領域にはDrucker-Pragerの破壊基準を、引張領域には最大主応力基準を用いた。炭素繊維シートの構成則は破断強度に達した時点で応力が0となるモデルとした。鉄筋には埋め込み鉄筋要素を用い、鉄筋-コンクリート間は完全付着と仮定している。鉄筋の構成則としてはvon-Mises降伏破壊基準を用いた。材料定数として炭素繊維シートには設計強度を用い、コンクリートおよび鉄筋の材料特性には実験値を用いている。

4 実験結果

4.1 最終破壊状況

図-7, 8, 9にL-1, L-2, L-3の最終破壊状況を示す。L-1は引張鉄筋の降伏後、上縁のコンクリートの圧縮破壊で終局に至り、L-2は炭素繊維シート補強後の荷载で、左右両側のせん断スパン間でシートのピーリング作用が生じた後、上縁のコンクリートの圧縮破壊で終局に至っている。写真-1にL-2のピーリング発生部分(A)の状況を示す。L-3は、左せん断スパン間でのシートのピーリング作用発生の後、上部曲げ圧縮破壊を経て左せん断スパン間でのシート破断で終局に至っている。

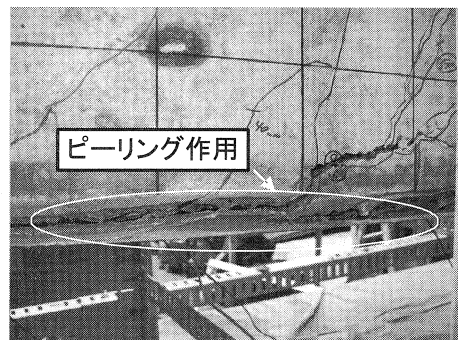


写真-1 L-2のピーリング(A)の状況

4.2 荷重－変位関係

図-10にはL-1およびL-2供試体の荷重－変位関係を示す。L-1供試体は最外縁引張鉄筋の降伏以降剛性が徐々に低下し、783kNで等曲げ区間内全域で上段引張鉄筋ひずみが降伏に達した時点で荷重勾配がほぼ一定となり、変位87mmで断面上縁のコンクリートの曲げ圧縮破壊が発生し終局に達している。L-1の解析結果もほぼ同様の荷重で剛性が低下し、実験値の挙動を追っていることがわかる。L-2の初期載荷においてはL-1とほぼ同様の挙動を示している。その後、残留変位4mmで補強を行い、825kNで上段引張鉄筋が等曲げ区間全域で降伏値に達し、その後剛性が急激に低下している。L-2の解析結果も実験値と同程度の荷重で引張鉄筋が降伏し剛性が低下しており、大規模な剥離が発生する以前の挙動については実験値と同様の傾向を示していることがわかる。

実験においては、その後1055kNで左側せん断スパン間のピーリング作用により一度荷重が低下した後再び上昇し、右側せん断スパン間においても1069kNでピーリング作用により同様の挙動が生じ、荷重1072kN変位67mmで上縁のコンクリートが曲げ圧縮破壊し終局に至っている。

図-11にはL-2、L-3供試体の実験結果を示す。L-3供試体は補強後の荷重－変位の傾きが、67.21kN/mmから80.25kN/mmと剛性の向上が認められるが、L-2供試体が変位66mmで上縁コンクリートの圧壊により、終局に至るのに対してL-3供試体は変位55mm時にシート破断により終局に至っている。

4.3 ひび割れの進展状況

各供試体の等曲げ区間のひび割れの発生本数の挙動を図-12に示す。L-1およびL-2の初期載荷時でのひび割れ発生挙動においては両者とも400kNまではひび割れ本数が増加する傾向であり、土木学会式により算出されるひび割れ間隔189mmと同程度の間隔150mmでひび割れが発生している³⁾。L-2は補強後、初期載荷の最大荷重に相当する770kNまでは新たなひび割れは発生することなく、既に発生しているひび割れが進展するのみであったが、二段目の引張鉄筋の降伏後800kN以降、徐々に新たなひび割れが発生し、終局状態では無補強時の2倍のひび割れ本数が発生し、ひび割れの分散効果が確認できた。L-2とL-3比較した場合、ほぼ同等の挙動を示し、補強後のひび割れ本数もほぼ同じになっている。

L-2の実験および解析で得られたひび割れ幅の制御効果の検討を行うため、初期載荷での最大荷重である

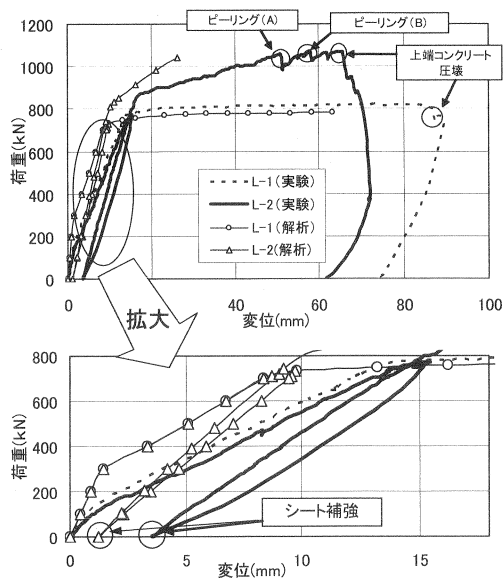


図-10 L-1, L-2 供試体 荷重－変位関係

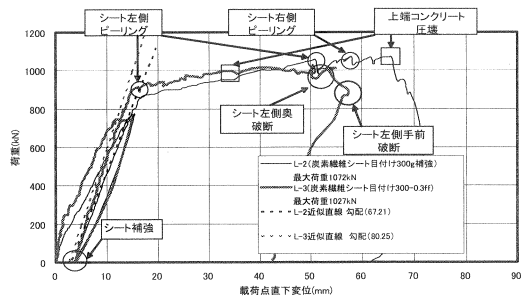


図-11 L-2, L-3 供試体の荷重－変位

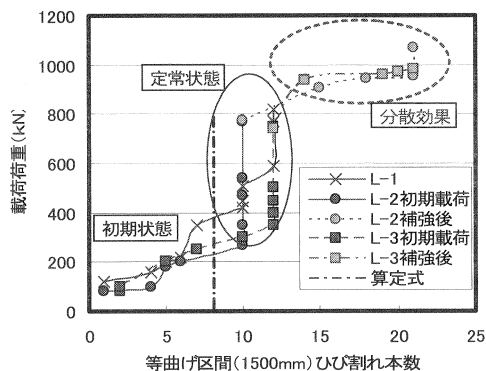


図-12 ひび割れ本数の挙動

770kN で補強前後のひび割れ幅の平均値を比較した。図-14 に示す解析値の算出方法としては、まずコンクリート要素をひび割れ発生位置で分けし、各区分内すべての下縁コンクリート要素の最大主ひずみの平均値と、区分したひび割れ間隔の距離をかけ合わせたものである。図-15 に補強前後及び除荷時の実験と解析で得られたひび割れ 5本の幅の平均値を示す。実験で得られたひび割れ幅は初期荷重での最大荷重770kNで0.55mmまで開き、除荷後の残留ひび割れは0.2mmであったが補強後の770kN 荷重時には補強前の70%である0.35mmにとどまり、ひび割れ幅の低減効果が確認できた。一方、解析値においてはわずかな低減に留まる結果が得られた。

次に等曲げ区間の最下段引張鉄筋ひずみに関して、初期荷重の最大荷重でひび割れ幅と同様の比較を行った。実験値および解析値の等曲げ区間内の平均値を図-16 に示す。実験値と解析値はともに初期荷重最大荷重時に 2000 μ 程度発生していたひずみが、除荷後に 500 μ となり、補強後の荷重では補強前よりも約 100 μ 低下した値が得られた。これはL-2の荷重-変位関係において補強の前後で、剛性がわずかしか回復していないことと一致しており、シート補強によるひび割れ幅の制御効果に比べるとわずかな効果であることが分かる。ひび割れ幅が大きく低減された原因として、補強後の作用荷重770kN 以降、目視によりひび割れの分散性が確認されていることから、初期のひび割れがシート接着に伴う樹脂含浸効果によりひび割れの拡大が防止され、その結果新たな位置でひび割れが発生することにより、初期のひび割れ幅の進展が抑止されたことが考えられる。

4.4 炭素繊維シートの剥離挙動

ここでは、代表例としてL-2 供試体の挙動について説明を加える。

図-17 にL-2 供試体の下面に接着した炭素繊維シートの各荷重ステップにおける剥離進展状況および、シート剥離図に示すように直線上に設置したひずみゲージの測定値の挙動を示す。

本実験で補強した炭素繊維シートは2. に記したように、樹脂の硬化後に供試体に接着させたことから、養生直後から、直径1, 2cm程度の微小な空隙が数カ所確認されていた。荷重を載荷してから徐々にそれらの空隙部分の剥離が進展し、800kNでは図-17(a)に示すまで拡大した。さらに載荷荷重1000kNでは図-17(b)に示すように空隙部分の剥離面積の拡大とともに初期荷重で生じたひび割れの端部からの剥離が確認できた。図-17(c)には左側せん断スパン間のピーリング発生後の剥離状況および剥離発生前後でのひずみ分布を示

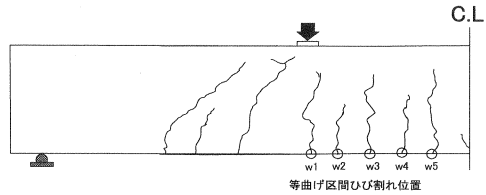


図-13 L-2 初期荷重 770kN 時ひび割れ進展図

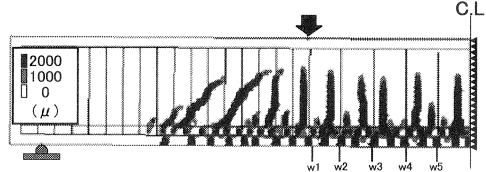


図-14 L-2 解析モデル荷重 770kN 時

最大主ひずみコンター図

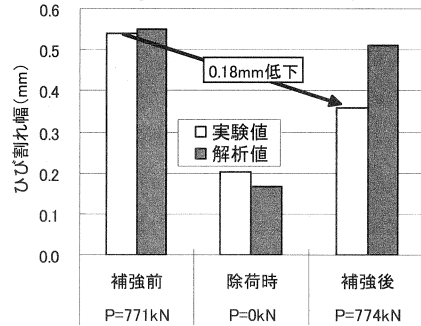


図-15 L-2 供試体のひび割れ幅の低減効果 (実験, 解析)

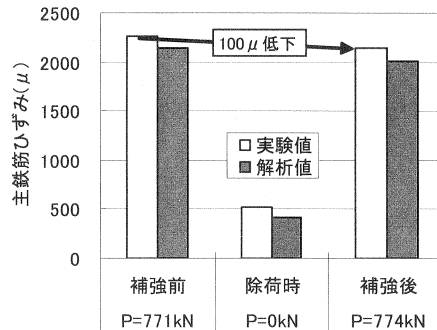


図-16 L-2 供試体の主鉄筋ひずみの低減効果 (実験, 解析)

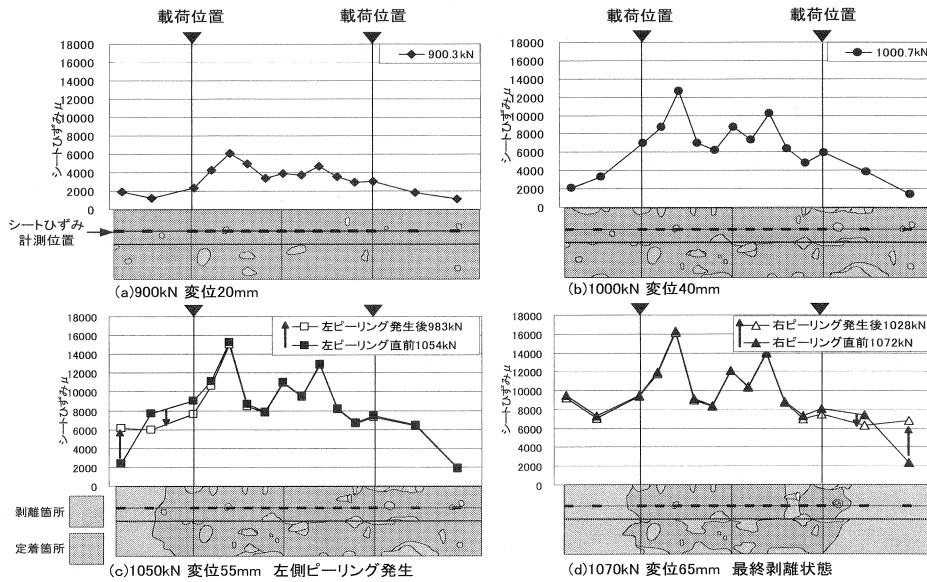


図-17 L-2 供試体の各ステップにおけるシートひずみ挙動と剥離の進展

す。ピーリング発生前は支点に近づくにつれて小さなひずみ値を示しており、せん断スパン間でひずみに大きな差があるが、ピーリング発生後ではせん断スパン間ではシートがアンボンド状態となることから、ひずみ量 6000μ とほぼ均等な値を示していることが確認できる。また、等曲げ区間内のひずみも 10000μ に達し、シートが十分に抵抗していることが分かる。図-17(d)には(c)と同様に右側せん断スパン間でのピーリング発生時の挙動を示している。右側においても左側と同様の傾向を示していることがわかる。一方、等曲げ区間ではシートひずみが破断ひずみ近くまで進展しているが最終状態においても十分な定着が残っていることが確認され、破断することなく曲げ圧縮破壊により終局を迎えており、施工直後の空隙やひび割れ発生部に発生した剥離が直接的には耐力に影響を及ぼしていないことが分かる。

5 まとめ

- (1) L-1およびL-2の初期荷重により発生したひび割れは土木学会式により算出されるひび割れ間隔とほぼ一致した。
- (2) 初期荷重後、ひび割れ注入を行わず炭素繊維シートの補強を行ったL-2, 3は引張鉄筋降伏以降もひび割れの分散効果が見られた。また、端部に鋼板を定着させることによりピーリング発生以降も、炭素繊維シートが外ケーブル状態となるので、耐力を持続させる効果が得られた。
- (3) シートの剥離挙動として、空隙からの剥離の進展および初期ひび割れ位置からの剥離の発生、せん断スパン間の斜めひび割れ発生位置からのピーリングが発生したが、等曲げ区間内には大きな剥離の進展は認められなかった。
- (4) 緊張を導入したL-3は、L-2 供試体と比較して初期剛性の回復が認められた。

参考文献

- 1) 幸左賢二ほか：緊張した炭素繊維シートによる RC 中空床版橋の補強効果に関する検討，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. 467-472，2004. 10
- 2) 趙 唯堅・丸山 久一：多段配筋を有する鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ性状に関する実験的研究，土木学会論文集 V，490/V-23 号，pp. 137 - 145，1994. 5
- 3) 角田与史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅，コンクリートジャーナル，Vol. 8, No. 2，pp1-10，1970