

RC 中空床版橋の炭素繊維シート緊張接着補強に関する実験的研究

Experimental Study on the Strengthening Effects on RC Hollow Slab with Prestressed Carbon Fiber Sheets

栗根聡*, 幸左賢二**, 丸野泰史郎***, 宇野裕教****

Satoshi Awane, Kenji Kosa, Taishiro Maruno, Hironori Uno

*工修 (株) 修成建設コンサルタント 構造部 (〒553-0002 大阪市福島区鷺洲2-5-15)

**Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

***九州工業大学大学院 建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

****博(工) 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

Experimental study was conducted to evaluate the effect of prestressed carbon sheets, using 6/10 scale specimens modeled damaged RC hollow section on the elevated bridges. The test results which induced prestress about 30 % of the ultimate strength of carbon sheets, can increase ultimate strength about 30 % and can reduce crack width about 60%.

Key Words : RC hollow slab, Large - sized test specimens, carbon fiber sheets, Reinforcement, crack

キーワード: RC, 中空床版橋, 大型供試体, 炭素繊維シート, 補強, ひび割れ

1. はじめに

近年, 都市高速道路においては供用開始から30年以上を経過した橋梁構造物が増えてきており, 年々増加する交通量と車両の大型化に伴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. 本研究で対象とした都市高速道路においても橋梁の損傷が報告されているが, 中でも RC 中空床版橋が他の橋梁形式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¹⁾. RC 中空床版橋の代表的な損傷状況として, 図-1 に橋梁支間中央部付近の下面のひび割れ損傷状況を示す. 図-1 に示すように支間中央部付近の橋軸直角方向に曲げ耐力不足と思われるひび割れが多数見られる.

RC 中空床版橋の補修・補強に関する代表的な工法のひとつに炭素繊維シート接着工法があり, その補強効果に関しては供試体による曲げ載荷実験などが多数行われており, 耐力向上や破壊性状などが確認されている^{2), 3)}.

しかし, ひび割れ損傷に着目し, 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を用いた実験は極めて少ない. そこで本研究では, 実橋のひび割れ状況を可能な限り忠実に再現した供試体を用いて曲げ載荷実験を行い, 炭素繊維シート緊張接着工法の補強効果を確認した.

本研究の特徴は, 以下の通りである.

- ① 実橋と供試体のスケールの違いによる影響を極力排除するため, 実橋の 6/10 スケールの大型供試体を使用した.
- ② 炭素繊維シートの補強前に初期載荷を行って残留ひび割れを発生させ, 実橋のひび割れ損傷状態を再現した.
- ③ 炭素繊維シートにプレストレスを導入し, プレストレス導入によるひび割れ幅抑制効果を実験的に確認した.

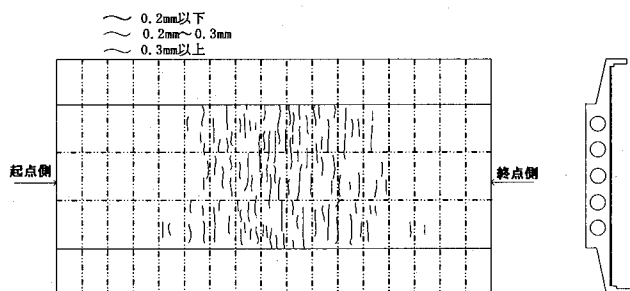


図-1 RC 中空床版橋の代表的な損傷事例

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験供試体は北九州高速道路のA高架橋（RC5 径間連続中空床版橋）をモデル橋梁とし、A高架橋の第1径間の支間中央部における断面のひび割れ性状を、6/10スケールの大型供試体を用いて再現した。図-2 にA高架橋の側面図および断面図を示す。

実験供試体は、実橋の全断面のうちボイド1本分の断面をRC中空単純梁としてモデル化した。供試体の鉄筋量は、圧縮および引張鉄筋比をそれぞれ実橋に極力近似させた。表-1 に供試体と実橋の断面寸法および鉄筋比の比較を、表-2 に本実験における供試体の一覧を示す。

図-3 にL-3の供試体形状、計測箇所および供試体下面の炭素繊維シートの貼り付け状況を、表-3 に部材の材料特性を示す。

今回の実験においては、終局状態での曲げ破壊挙動に関する検討を行うため、せん断スパン間に帯鉄筋を密に配筋し、各供試体とも曲げ耐力の2倍ほどのせん断耐力を確保した。また、L-2、L-3 供試体では、幅300mmの炭素繊維シートを並べて接着し、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。

表-1 供試体と実橋の断面寸法比較

	供試体	実橋	比率
桁高(mm)	540	900	0.60/1
桁幅(mm)	620	940(ボイド1本分)	0.66/1
ボイド径(mm)	400	650	0.62/1
上床版厚(mm)	70	150	0.47/1
下床版厚(mm)	70	100	0.70/1
圧縮主鉄筋比	0.73	0.83	0.88/1
引張主鉄筋比	2.75	2.39	1.15/1

表-2 供試体一覧

供試体名	炭素繊維シート枚数	緊張力	端部定着法	備考
L-1	0	0	—	無補強
L-2	1	0	定着用鋼板	無緊張補強
L-3	1	0.3ff	定着用鋼板	緊張補強

注) ffは炭素繊維シートの引張強度

表-3 材料特性

材料	特性	特性値		
		L-1	L-2	L-3
コンクリート	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	33.4	30.2	39.5
	降伏強度 f_y (N/mm ²)	357		
鉄筋	引張強度 f_u (N/mm ²)	520		
	弾性係数 E_f (kN/mm ²)	230		
炭素繊維シート (PAN系高強度)	引張強度 f_f (N/mm ²)	3400		
	繊維目付け (g/m ²)	300		
	厚さ (mm)	0.167		

(注) 炭素繊維シートの材料特性は規格値を示す

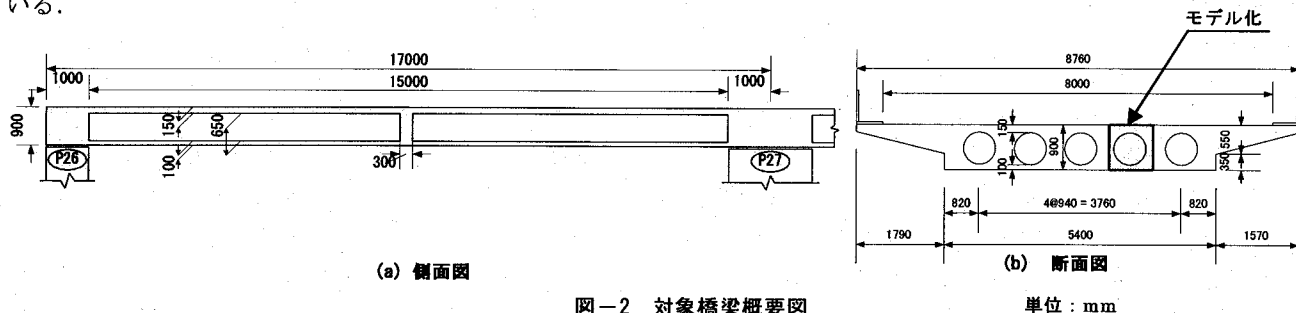


図-2 対象橋梁概要図

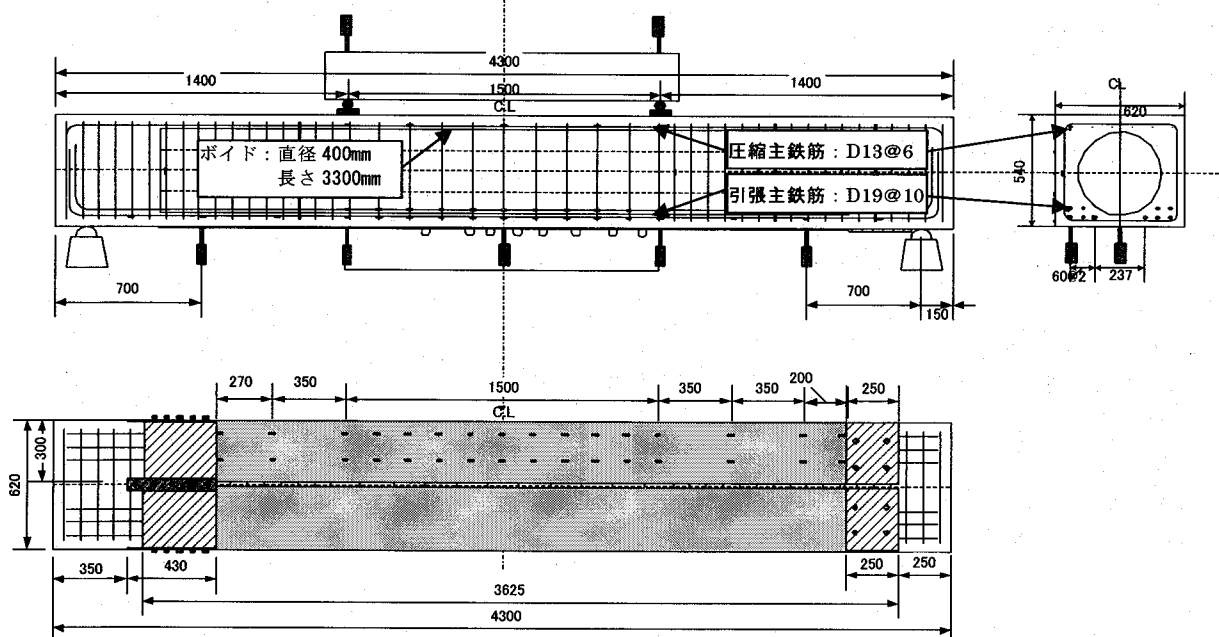


図-3 供試体形状 (L-3) および計測箇所 単位: mm

2.2 プレストレスの導入方法

今回の実験においては、厚さ約 0.17mm の薄い炭素繊維シートにプレストレスを導入するために、従来の PC 鋼材の緊張・定着装置とは違った、新たな緊張・定着装置を開発する必要があった。そこで今回、供試体レベルでの使用に留まらず、実橋の補修・補強にも適用できるようにポストテンション方式による炭素繊維シートの緊張・定着装置の開発を実験に先立ち行った。

炭素繊維シートにプレストレスを導入する方法の流れを図-4 に、プレストレスの導入方法の詳細を図-5 に示す。今回開発した緊張・定着装置の設置方法は、以下の通りである。なお、緊張管理は緊張側定着部に取り付けたロードセルによる荷重管理とした。L-3 供試体では、炭素繊維シートに 0.3ff の緊張力 ($P=102.2\text{kN}$) が導入されたことをロードセルにより確認したが、この時供試体下面には、計算上約 1.5N/mm^2 程度のプレストレスが導入されることを想定している。

- ① 炭素繊維シートに樹脂を含浸させ、スライドプレート (図-5(b)) と固定プレート (図-5(c)) を樹脂接着する。
- ② 各プレートを炭素繊維シートに接着した後、供試体に設置したガイドプレート (図-5(a)) へスライドプレートを挿入し、固定プレートを供試体にボルト留めする。
- ③ 炭素繊維シートに樹脂を塗布し、図-5(c) に示すように PC 鋼棒をスライドプレートに取り付け、PC 鋼棒を用いてスライドプレートを油圧ジャッキで緊張する。
- ④ 導入した緊張力を保持した状態で、1 週間の樹脂硬化期間をおく。
- ⑤ 樹脂硬化後、スライドプレートをガイドプレートへボルト止めし、油圧ジャッキを開放して PC 鋼棒を取り外す。

2.3 載荷概要および計測概要

載荷方法は、図-3 に示すように供試体を単純支持として、スパン中央部における静的 2 点載荷とした。載荷板には幅 100mm、長さ 700mm の鋼板を、支点板には幅 120mm、長さ 600mm の鋼板を使用し、載荷板、支点板の上部には丸鋼を溶接した。載荷点間隔は、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、有効高さの 3 倍の 1500mm とした。

L-2, L-3 供試体については、初期載荷により平均残留ひび割れ幅を、実橋の平均残留ひび割れ幅である 0.25mm 発生させることを目標として、引張鉄筋が降伏するまで繰り返し載荷を行った。平均残留ひび割れが 0.25mm に達した時点で荷重を除荷し、ひび割れへの樹脂注入は行わずに炭素繊維シートを供試体下面に緊張接着

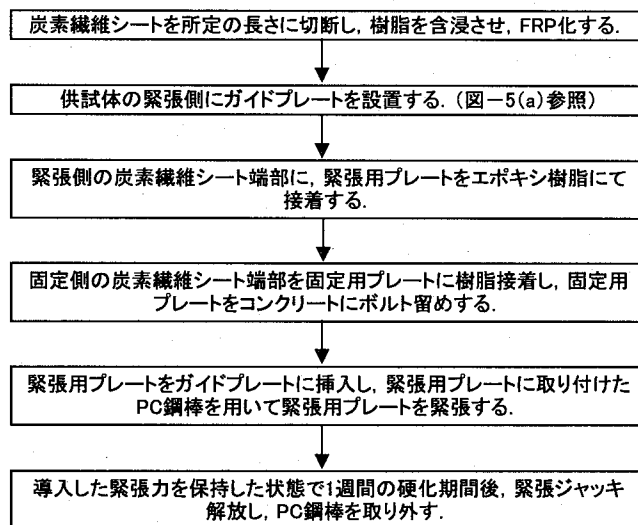


図-4 炭素繊維シートの緊張手順

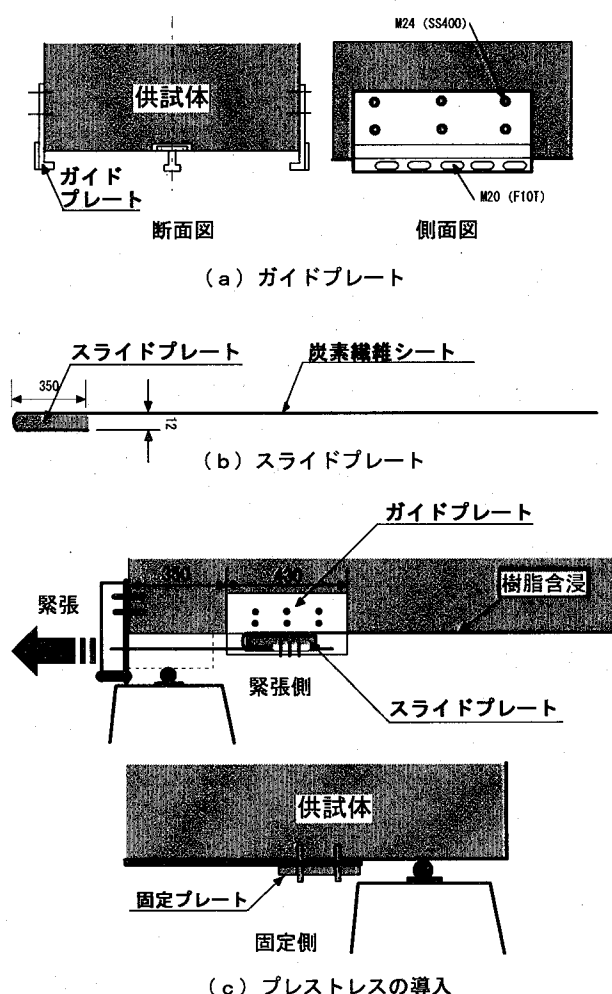


図-5 プレストレスの導入方法

(L-2 は無緊張) して養生を行い、補強後の載荷を行った。実際の平均残留ひび割れ幅は、L-2 供試体で 0.24mm、L-3 供試体で 0.28mm であった。

補強後の加力は上段の引張主鉄筋が降伏するまでは荷重制御で行い、荷重ステップ増加量は 25kN を基本とした。上段鉄筋の降伏を確認した後は、変位制御で加力を行った。各載荷ステップ終了後には 0kN まで除荷し、ひび割

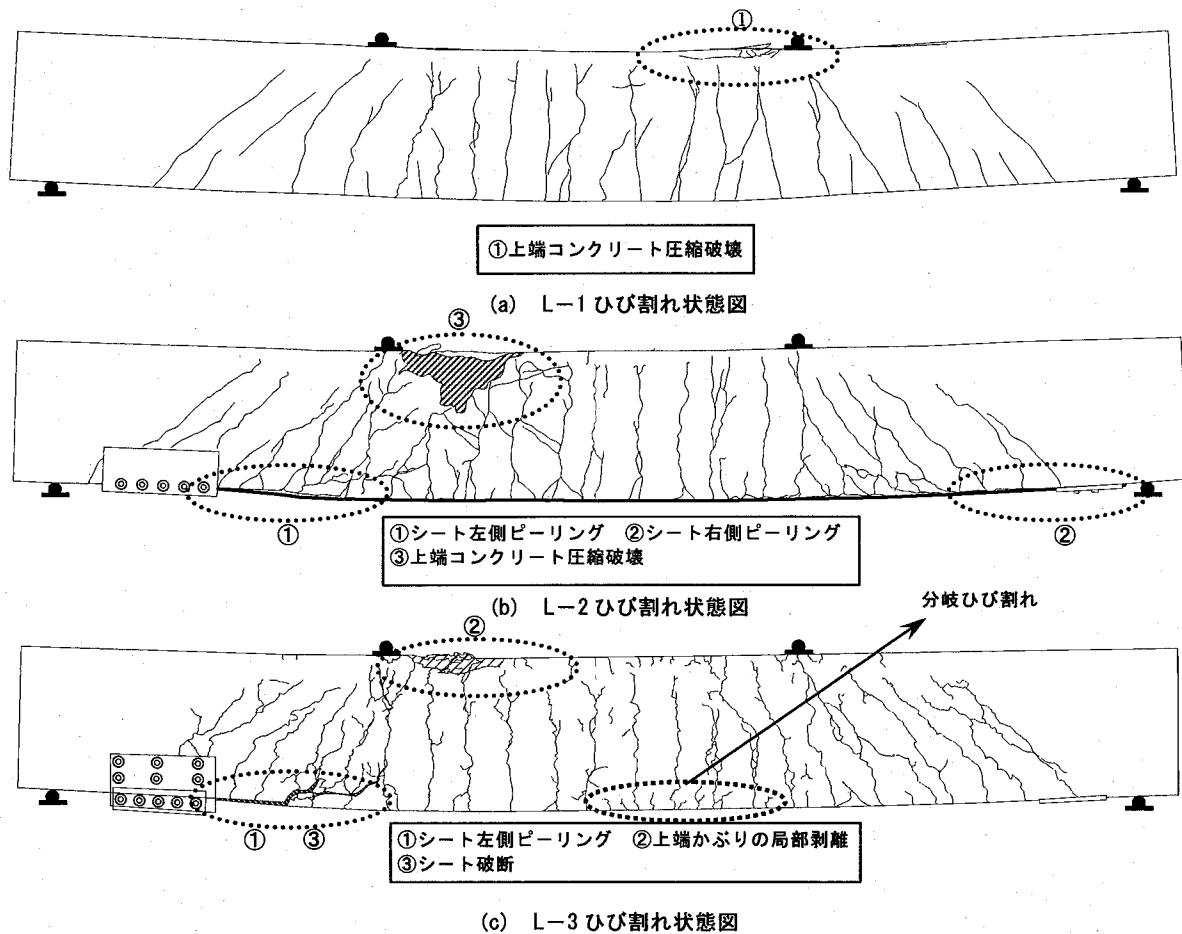


図-6 供試体ひび割れ状態図(最終破壊状況)

れ状況を目視により観察した。計測項目は、①スパン中央部における鉛直変位②引張鉄筋およびシートのひずみ、③シートの剥離進展、④ひび割れ幅に関して計測を行った。ひび割れ幅は、初期载荷において発生した残留ひび割れ幅をデジタルカメラで測定し、発生箇所に設置したパイ型ゲージの初期値として測定した。

3. 実験結果

3.1 L-1 供試体

図-6 にひび割れ進展状況を、図-7 に L-1 供試体の荷重-変位関係を示す。図-7 から分かるように、L-1 供試体は 633kN で下段鉄筋が降伏し、荷重-変位関係の勾配が低下した。783kN で上段鉄筋(2 段配筋の 2 段目の鉄筋)が降伏して以降、荷重-変位曲線の勾配がほぼ一定となり、変位 87mm で上縁コンクリートが圧縮破壊し、終局に達している。

図-8 に等曲げ区間における荷重-ひび割れ本数関係を示す。ひび割れの発生および進展状況は図-6(a)、8 から分かるように、荷重が 100kN を超えた辺りからひび割れ発生本数が増加したが、400kN~600kN まではひび割れ本数は増えずに、等曲げ区間内に 10 本ひび割れが発生し、600kN 以降にもう 1 本新たなひび割れが発生した。終局状態は、図-6(a)に示すように等曲げ区間右側の載

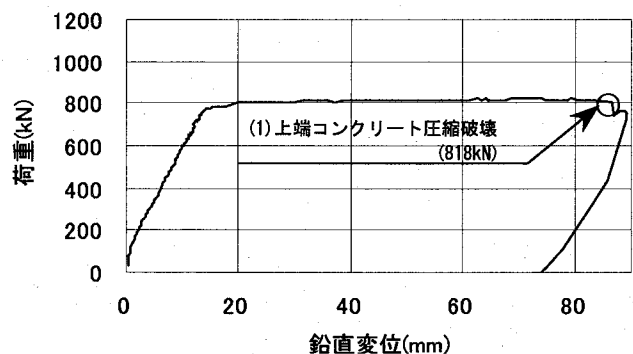
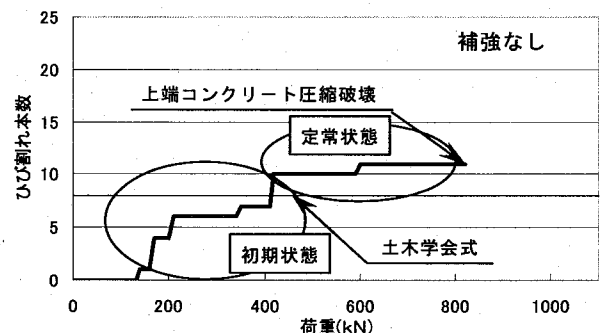


図-7 荷重-変位関係 (L-1 供試体)



注) 土木学会式: コンクリート標準示方書「設計編」より求めたひび割れ本数 n (本)

$$n = \frac{\text{等曲げ区間スパン長 (mm)}}{4c + 0.7(Cs - \phi)}$$

 c : コンクリートのかぶり
 Cs : 鉄筋間隔
 ϕ : 鉄筋径

図-8 荷重-ひび割れ本数関係図 (L-1 供試体)

荷点近傍でコンクリートが圧縮破壊した。

3.2 L-2 供試体

図-9 に L-2 供試体の荷重-変位関係を示す。図-9 から分かるように、L-2 供試体は 825kN で上段鉄筋が降伏して以降、勾配が急激に低下し、1055kN で左側せん断スパン間においてシート剥離（ピーリング）が発生し、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 でピーリングにより同様の挙動が生じ、荷重 1072kN、変位 67mm で上縁コンクリートが圧縮破壊し、終局に至っている。

図-6(b) にひび割れ進展状況を、図-10 に等曲げ区間における荷重-ひび割れ本数関係を示す。ひび割れの発生および進展状況は、図-6(b)、10 から分かるように、荷重が 100kN を超えた辺りからひび割れ発生本数が増加し、300kN を超えた辺りで等曲げ区間に 10 本のひび割れが発生した。その後炭素繊維シート補強を行なった後は、900kN 付近まで新たなひび割れは発生しなかったが、900kN 以降に微細な分岐ひび割れが多数発生した。終局状態では、図-6(b) に示すように等曲げ区間左側の荷点近傍でコンクリートが圧縮破壊した。

図-11 に炭素繊維シートのひずみの分布と剥離進展状況を示す。図-11 中、斜線でハッチングしてある箇所が炭素繊維シートが剥離した箇所であり、ピーリング発生後、荷重の増加とともにシートの両端部から剥離が進展しているのが分かる。

図-11(下)の炭素繊維シートのひずみ分布から分かるように、ピーリング発生時のシートひずみは等曲げ区間(図中、1400mm~2900mm の区間)では、10000 μ 以上発生している箇所もあるが、ピーリング発生箇所(せん断スパン間)では、4000~6000 μ 程度のひずみでピーリングが発生している。これは、原田ら⁴⁾のせん断力の大きな区間において 4000 μ 程度のシートひずみでピーリングが発生するという報告とも一致している。

また、ピーリング発生後、脆性的なせん断破壊に至らなかったのは、今回の実験では両端部を鋼板で固定しているため、ピーリングが発生してもシートがアンボンド状態で、両端部の鋼板に固定されるためだと考えられる。

3.3 L-3 供試体

図-6(c) にひび割れ進展状況を、図-12 に L-3 供試体の荷重-変位関係を示す。図-12 より分かるように、L-3 供試体については 740kN で上段主鉄筋が降伏したものの、急激な勾配の低下は起こらず、荷重 915kN で左側せん断スパン間において局所的なピーリングが発生した後急激に変位が増加し、荷重 1027kN でシート破断により終局に至っている。

図-13 に等曲げ区間における荷重-ひび割れ本数関

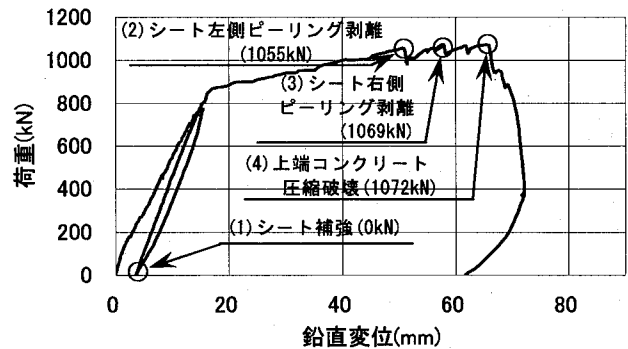


図-9 荷重-変位関係 (L-2 供試体)

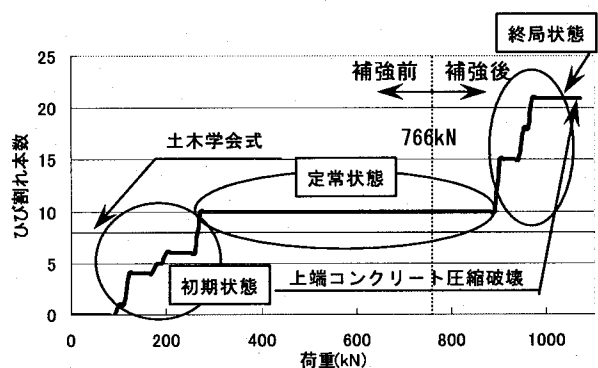


図-10 荷重-ひび割れ本数関係図 (L-2 供試体)

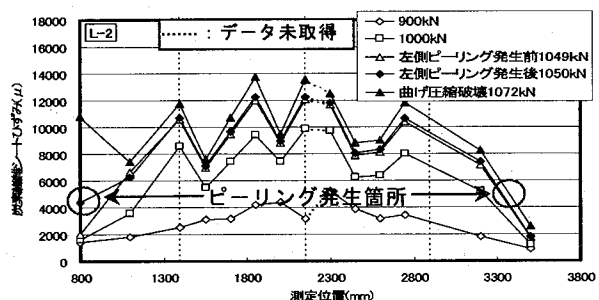
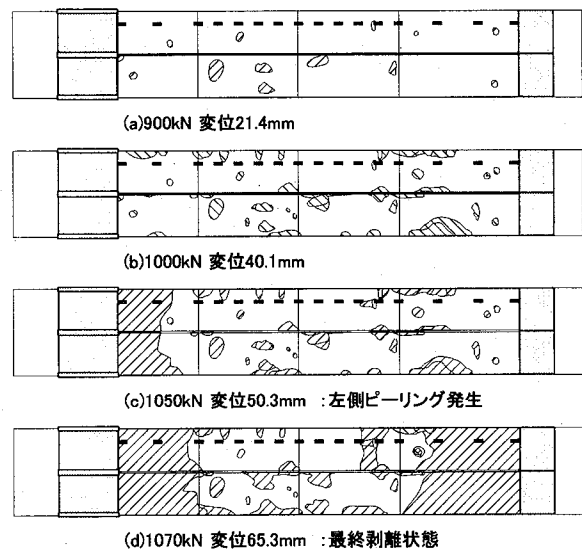


図-11 炭素繊維シートのひずみ分布と剥離進展図 (L-2 供試体)

係を示す。ひび割れの発生および進展状況は、図-6(c)、13から分かるように、荷重が300kNを超えた辺りからひび割れ発生本数が急激に増加し、600kNを超えた辺りで等曲げ区間に11本のひび割れが発生した。炭素繊維シート補強を行った後は、950kN付近まで新たなひび割れは発生しなかったが、950kN以降に微細な分岐ひび割れが多数発生した。終局状態では、図-6(c)に示すように左側のせん断スパン内で炭素繊維シートが剥離破断した。

図-14に剥離進展と炭素繊維シートのひずみの分布を示す。剥離進展図を見て分かるように、端部で接着時にむらが生じた。なお、炭素繊維シートのひずみ分布は緊張力導入以降のひずみの増分を示した。

図-14(下)の炭素繊維シートのひずみ分布図から分かるように、供試体左側に発生した局所的なピーリングがある程度の範囲まで広がった時の荷重(950kN)におけるピーリング発生箇所のシートひずみ増分は、L-2供試体同様4000~5000 μ 程度となっている。以上のことから、シートの剥離現象は、シートとコンクリートのひずみ差に支配され、炭素繊維シートひずみの増分が4000 μ 程度になったときにピーリング現象が発生するものと考えられる。従って、炭素繊維シートへのプレストレス導入が、ピーリングの発生荷重に与える影響はほとんどないと考えられる。

また今回、L-3供試体はシート破断により終局に至った。これは、L-3供試体では炭素繊維シートにプレストレスを導入しているため、シートには約4500 μ の初期ひずみが発生しており、上縁コンクリートの圧壊よりも先にシートが破断ひずみに達したと考えられる。すなわち、図-14(下)の炭素繊維シートのひずみ分布は、緊張補強後の増加ひずみを示すものであるが、シート破断箇所の増加ひずみは7500 μ であり、初期ひずみを足し合わせると、12000 μ となりシートの破断ひずみに近づいている。

4. 実験結果の考察

4.1 各供試体の補強後の剛性の比較

炭素繊維シート補強後の各供試体の荷重-変位勾配を図-15、一次剛性の相違を表-4に示す。なお、L-1供試体は鉄筋降伏まで載荷後の再載荷時の荷重-変位関係を示す。ここで、一次剛性とは、最下段の鉄筋が降伏した時の点と原点とを結んだ直線の勾配のことであり、鉄筋の降伏までのたわみややすさを表し、発生するひび割れ量と相関性がある。

図-15および表-4から分かるように炭素繊維シートで補強したL-2供試体の一次剛性は無補強のL-1供試体の一次剛性と比較して約1.64倍の値となっており、さらに、炭素繊維シートを緊張補強したL-3供試体では、L-1供試体の約1.94倍となっている。

表-5に鉄筋降伏時の断面の曲げ剛性を示す。ここで

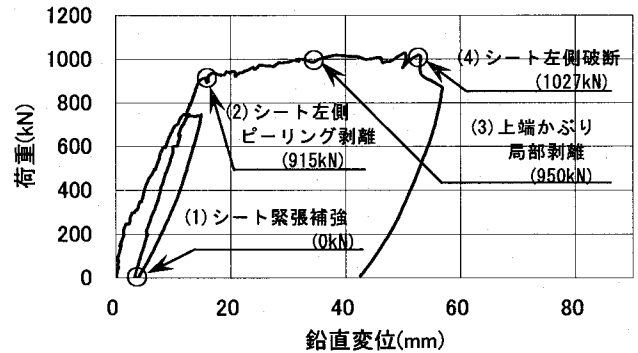


図-12 荷重-変位関係(L-3供試体)

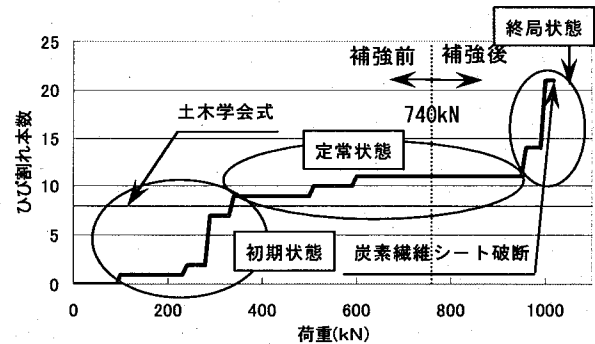


図-13 荷重-ひび割れ本数関係図(L-3供試体)

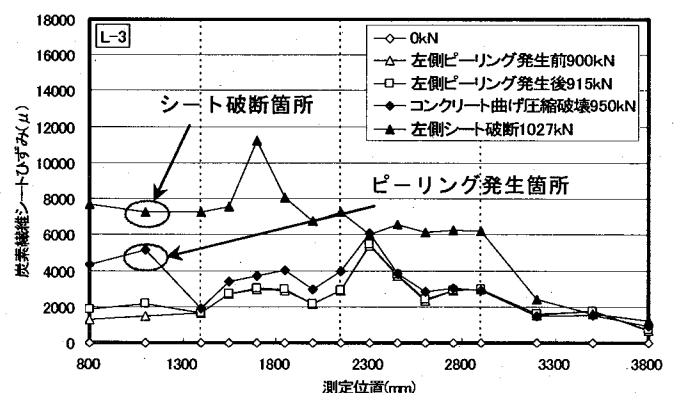
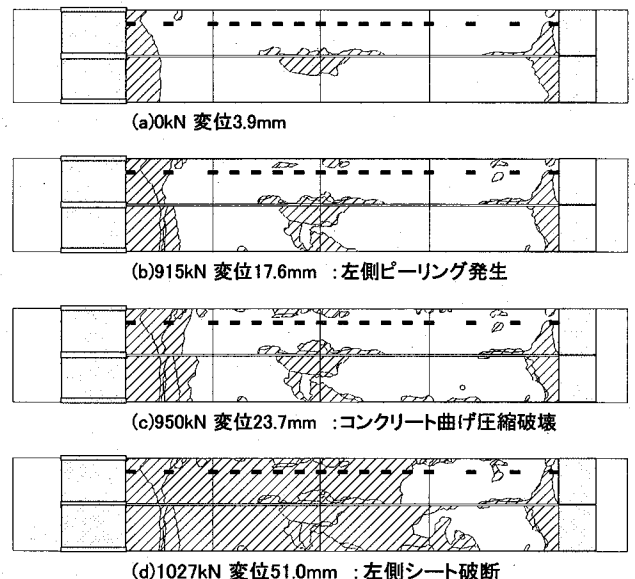


図-14 剥離進展と炭素繊維シートのひずみ分布図(L-3供試体)

曲げ剛性とは、 $EI=M/\phi$ で計算される軸方向鉄筋および炭素繊維シートも考慮した断面の曲げ剛性の計算値である。表-5の曲げ剛性は桁のたわみやすさを表し、表-4の一次剛性と正比例の関係にある。しかしながら各供試体の曲げ剛性を比較すると、L-2 供試体で L-1 供試体の約 1.06 倍、L-3 供試体で約 1.09 倍でしかなく表-4の一次剛性と差異が生じている。これは、供試体を炭素繊維で補強することによる剛性の向上よりも、炭素繊維を供試体下面に接着する際に樹脂がひび割れの中に含浸するひび割れ修復効果の方が大きいためと考えられる。しかし、主鉄筋降伏後の剛性については、補強の有無で大差はなく、樹脂によるひび割れ修復効果は主鉄筋降伏後にはあまり効果がないと考えられる。

同様に、プレストレスを導入した L-3 供試体と、無緊張の L-2 供試体の初期剛性を比較すると、L-3 供試体の方が L-2 供試体に比べて約 18% 剛性が向上しており、炭素繊維シートの破断強度の 30% のプレストレスを導入した場合、無緊張補強に対して 2 割、一次剛性が向上することが分かった。これもプレストレスの導入による剛性の向上だけでなく、樹脂の含浸効果が高まるためと考えられる。

また、表-6に各供試体の終局荷重の比較を示す。なお、表-6の解析値は 2 次元弾塑性 FEM 解析⁵⁾による値である。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。解析手法は、実験と同様の条件で評価を行うために、段階施工解析 (①健全な梁への載荷 ②荷重を除荷し、実橋の鉄筋ひずみを再現することで残留ひずみ状態を再現 ③残留ひずみ状態に炭素繊維要素を導入し補強を再現 ④補強後の再載荷) を行った。表-6から分かるように終局耐力は実験値と解析値はほぼ一致しており、終局耐力に関してはほぼ期待通りの補強効果が得られていることが分かる。

4.2 炭素繊維シート補強によるひび割れ幅抑制効果

ひび割れ幅の計測は、初期ひび割れが確認された箇所にパイ型ゲージを取り付けそれぞれのひび割れ幅を計測した。また、等曲げ区間全体については、シート接着時にはパイ型ゲージを取り外すことから補強後のひび割れ幅については、デジタルカメラによって載荷中のひび割れ幅の計測を実施した。図-16には L-2 供試体の各荷重段階におけるひび割れ幅の変化を示す。図-16から分かるように、L-2 供試体では初期載荷最大荷重 (鉄筋降伏時) に 0.61mm であった平均ひび割れ幅が、補強後載荷時の同じ荷重時に 0.49mm まで低減しており、式(1)で定義される低減率は、20.1%である。このようにひび割れ幅の減少は、シート補強および樹脂のひび割れへの浸入による剛性の向上によると考え

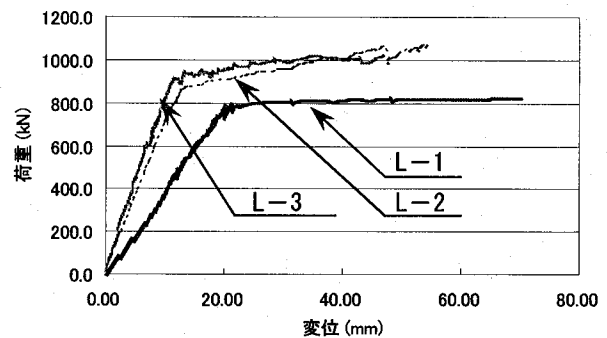


図-15 炭素繊維シート補強後の剛性の比較

表-4 各供試体の一次剛性の差

	L-1		L-2		L-3	
	荷重 kN	変位 mm	荷重 kN	変位 mm	荷重 kN	変位 mm
初期載荷後	0.00	0.00	0.33	3.63	1.00	5.71
上段鉄筋降伏点	665.33	17.50	873.00	17.65	914.00	18.10
差異	665.33	17.50	872.67	14.02	913.00	12.39
一次勾配	38.01 (kN/mm)		62.24 (kN/mm)		73.72 (kN/mm)	

表-5 剛性 (EI) の算出

	曲げ剛性 EI (kN・m ²)	比率
L-1	69.278	1.000
L-2	73.076	1.055
L-3	75.133	1.085

表-6 終局荷重の比較

	終局荷重 (kN)		
	実験値	解析値	L-1に対する比率 (実験値)
L-1	818	795	1.000
L-2	1072	1050	1.311
L-3	1027	1070	1.256

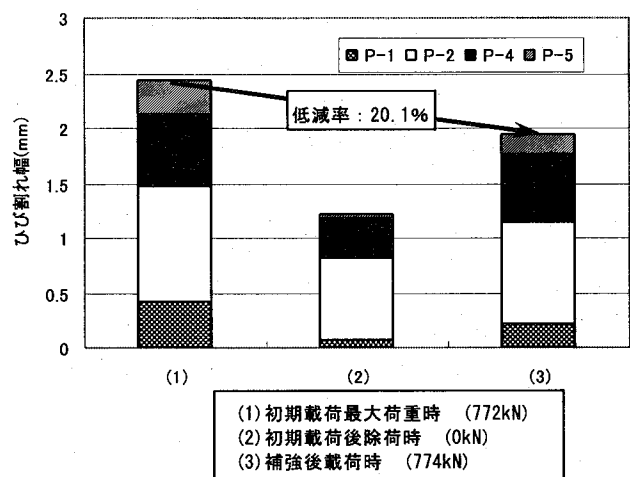


図-16 シート補強によるひび割れ幅の低減 (L-2 供試体)

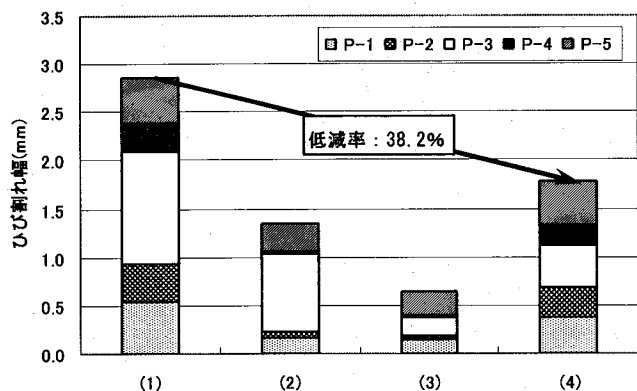


図-17 シート補強によるひび割れ幅の低減(L-3 供試体)

られ、シート接着工法にはひび割れ幅の抑制効果が期待できることが分かる。

$$\text{低減率 } \gamma = \left(1 - \frac{\text{補強後のひび割れ幅}}{\text{初期載荷時のひび割れ幅}}\right) \times 100 \dots (1)$$

図-17 には、L-3 供試体のシート補強による、等曲げ区間のひび割れ幅の変化を示す。L-3 供試体においても、シート接着時にはパイ型ゲージを取り外すことから、緊張力導入後のひび割れ幅は、デジタルカメラにより計測された値を示している。プレストレスを導入した L-3 供試体では、補強前の鉄筋降伏時には 0.57mm であった平均ひび割れ幅が、補強後には 0.35mm となり、低減率としては 38.2% と L-2 供試体よりも大きくなっている。

L-2 供試体と L-3 供試体のひび割れ幅低減率を比較すると、L-2 供試体はひび割れ幅の大きなひび割れも、小さなひび割れも全てのひび割れがほぼ 20% 前後の低減率となっているのに対し、L-3 供試体ではプレストレスを導入するため、一度残留ひび割れが閉じ、ひび割れ幅の大きなひび割れほど低減率が大きくなる傾向になっている。このように、プレストレス導入工法ではひび割れ幅の均等化も期待できると考えられる。

4.3 プレストレス導入によるひび割れ幅抑制効果

図-18 に、無緊張供試体である L-2 供試体と緊張供試体である L-3 供試体の補強後の等曲げ区間における平均ひび割れ幅の比較を示す。図-18 から分かるように、各荷重レベルにおいて緊張供試体である L-3 供試体の方が平均ひび割れ幅が小さくなっており、緊張接着工法の方がひび割れ幅抑制効果が大きいと言える。

表-7、図-19 に L-3 供試体における、初期載荷後の残留ひび割れ幅とプレストレス導入後のひび割れ幅の変化を示す。表-7、図-19 のひび割れ幅は、図-3 に示す

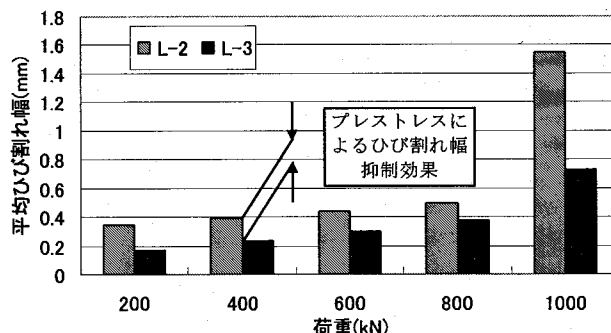


図-18 平均ひび割れ幅-荷重関係

表-7 シート緊張によるひび割れ幅の減少

	除荷時(残留幅) (P=0kN)	緊張力導入後 (P=0kN)	低減率 (%)
P-1	0.17	0.14	19.3
P-2	0.05	0.05	0.5
P-3	0.82	0.19	76.9
P-4	0.02	0.02	2.2
P-5	0.28	0.24	13.5

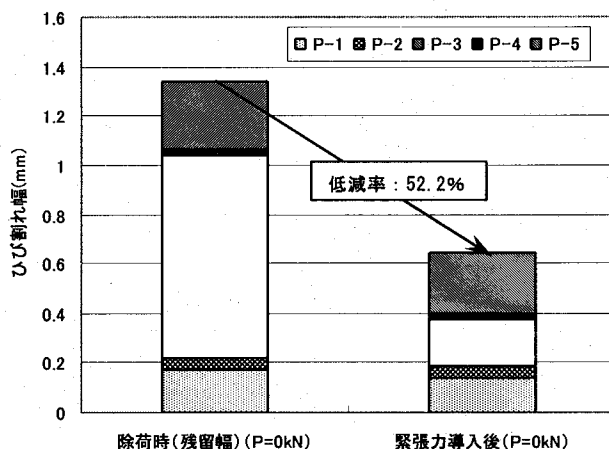


図-19 シート緊張によるひび割れ幅の低減(L-3 供試体)

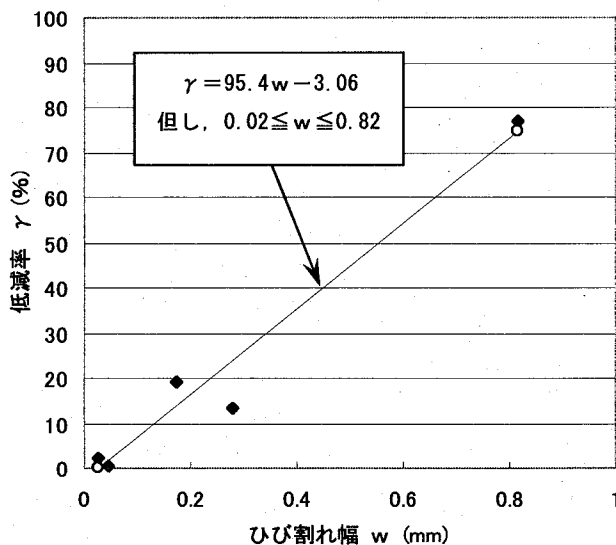


図-20 残留ひび割れ幅と低減率の相関図

ように、等曲げ区間に発生したひび割れ部に設置した 5 つのパイ型ゲージ (P1~P5) の値である。表-7、図-19 より、残留ひび割れ幅が大きいほどひび割れ幅の低減率が大きく、プレストレスを導入することにより残留ひび割れ幅が均等化される傾向があることが伺える。図-20 には、残留ひび割れ幅と低減率の関係を示す。図-20 より、残留ひび割れ幅と低減率にはほぼ直線の関係が成立していることが分かる。プレストレス導入により、剛性の低下したひび割れ幅の大きな断面ほど、ひび割れ幅がよく閉じることを示しており、シート緊張接着工法にはひび割れ幅の不均一を制御する効果があることが推測される。

4.4 L-3 供試体の鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

図-21 には補強前の最大荷重時(744kN)の主鉄筋ひずみ、および、ひび割れ幅の分布を示す。図-21 に示すように、等曲げ区間(測定位置 1400mm~2900mm)に係わらず、ひずみおよびひび割れ分布には、大きな変動が認められる。また、鉄筋ひずみとひび割れ幅の間には明確な相関関係が認められ、鉄筋ひずみの大きな箇所(測定位置 3000mm 付近)では、ひび割れ幅も約 1.2mm と大きく、除荷後にも 0.8mm の残留ひび割れが発生している。次に図-22、23 は、シート緊張補強後の荷重 743 kN、荷重 1000kN までの載荷によるそれぞれのひび割れ幅およびひずみの増分を示す。図-22、23 に示すとおり、等曲げ区間においては、ひずみおよびひび割れ幅の増分がいずれも均等な傾向を示している。これは、前述のように、緊張および補強により、ひび割れ幅および剛性の均等化が生じ、これにより、同様に、補強後のひび割れ幅の進展にも均等化現象が生じたと考えられる。

4.5 ひび割れ本数の進展状況

ひび割れ本数の進展状況について比較を行う。ひび割れ本数のカウントについては、シート補強までは供試体下面において行い、シート補強後は供試体側面より観察し、供試体側面の底辺から進展したひび割れを本数とし、計上している。図-8 に L-1、図-10 に L-2、図-13 に L-3 供試体のひび割れ本数の進展状況を示す。図に示すように、いずれの供試体も 300~400kN 付近までの、ひび割れ本数が進展する初期状態、ひび割れ本数が増加せず、ひび割れ幅のみが進展する定常状態、分岐ひび割れが増加する終局状態に区分することができる。L-1 供試体においては無補強のため、定常状態以降にひび割れ本数の増加を確認することができなかったが、各供試体ともほぼ同様のひび割れ本数の進展傾向が見られたため、ここでは、L-3 供試体のひび割れ進展状況について、詳細に考察する。

図-24 に、L-3 におけるひび割れ本数の進展状況を示

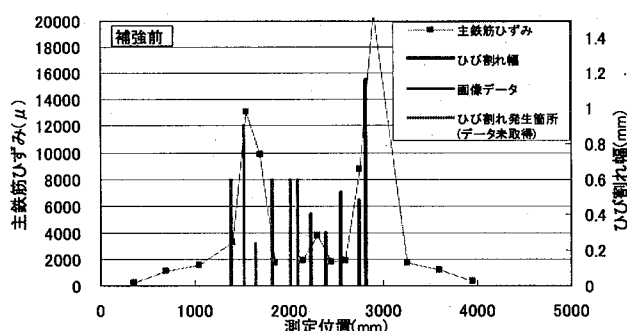


図-21 鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

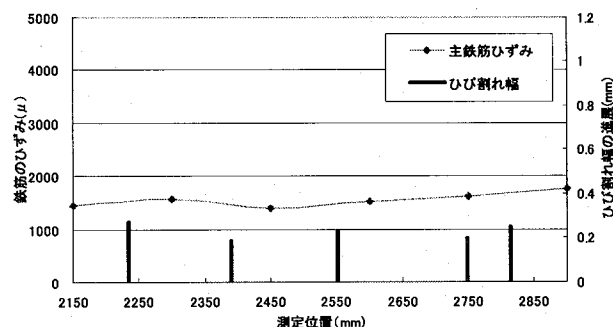


図-22 補強後の鉄筋ひずみとひび割れ幅の差異
(補強時と P=743kN 時の差異)

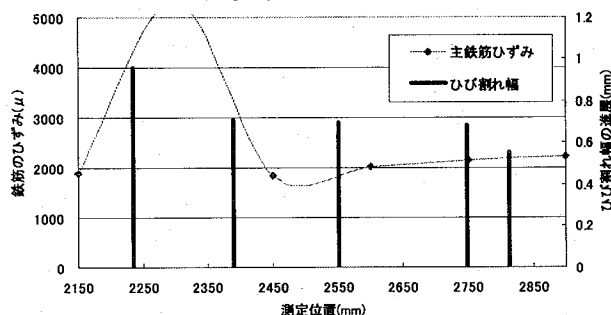


図-23 補強後の鉄筋ひずみとひび割れ幅の差異
(補強時と P=1000kN 時の差異)

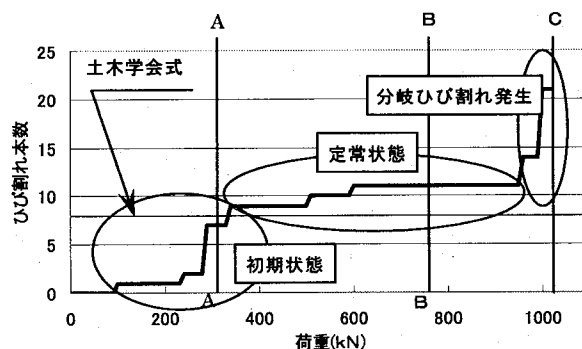


図-24 ひび割れ本数進展状況

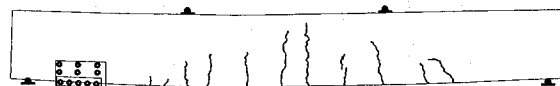


図-25 初期状態におけるひび割れ状態(A)

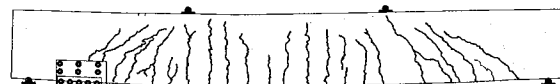


図-26 定常状態におけるひび割れ状態(B)

す。図-24において、A部は初期状態における荷重 300kN 時の状態を示し、そのときのひび割れ状態を図-25に示す。荷重 300kNの際、等曲げ区間において発生したひび割れ本数は7本であり、せん断スパン間で発生したひび割れ本数は4本であった。また、図-24において、B部は定常状態(シート補強時)を示し、そのときのひび割れ状態を図-26に示す。定常状態において等曲げ区間で発生したひび割れ本数は11本であり、せん断スパン間で発生したひび割れ本数は12本であった。L-3においては終局直前まで、等曲げ区間において目立ったひび割れ本数の進展はなく、定常状態と同数である11本のひび割れの幅が進展していた。定常状態では一定であったひび割れ本数が、終局状態(図-24におけるC部)においては、図-6(c)に示すように増加が見られ、定常状態で発生していた11本以外に10本もの比較的小さな幅の分岐ひび割れが発生した。新たに発生したひび割れは、定常状態のひび割れと比較した場合、ひび割れの長さ、幅ともに微細であった。

L-1で確認することができなかった終局直前の微細なひび割れの発生は、シート補強する際に行ったシートと供試体の接着工法による効果と考えられる。今回用いたシート補強の工法では、シート両端部を鋼板で固定し、シートと供試体の間に、樹脂を塗布し接着を行っている。シートと供試体の間に樹脂を塗布することにより、供試体に生じていたひび割れの間隙に樹脂が浸入し、ひび割れが閉口すると同様の効果が得られたと考えられる。ひび割れが閉口することにより、剛性の回復とともに、ひび割れの再分配が行われ、微細な分岐ひび割れが発生したと考えられる。

5. 結論

今回、実橋のひび割れ損傷を模擬したRCホロー桁を炭素繊維シートで補強した供試体の曲げ載荷実験を行い、以下に示す結論を得た。

- (1) ひび割れ損傷が発生したRCホロー桁を、炭素繊維シートで補強することにより、ひび割れ幅抑制効果があることが分かった。シート補強することによるL-1とL-2の剛性(EI)の比率は、計算値では1.06倍程度と見込まれていたものの、荷重-変位関係より算出した一次剛性の実験値は1.64倍であった。これは、炭素繊維シートで補強することにより、ホロー桁の剛性が向上することと、樹脂がひび割れの中に含浸することによる、ひび割れ

修復効果が大きいと考えられる。

- (2) L-2, L-3 供試体ではせん断力の大きな区間において、炭素繊維シートのひずみが 4000μ 程度に達した時にシートのピーリングが発生した。これは、ピーリング現象は、シートとコンクリートのひずみ差とせん断力に支配されるため、せん断力の大きな区間でのひずみがある限界点(4000μ 程度)に達した時に発生すると考えられる。
- (3) ひび割れ損傷が発生したRCホロー桁に引張強度の30%のプレストレスを導入した炭素繊維シートを補強することにより、補強後の残留ひび割れ幅を抑制する効果だけでなく、ひび割れ幅の不均一を制御する効果があることがわかった。これは、プレストレスを導入することにより、特に剛性の低い大きなひび割れ幅が閉じることによって、各々のひび割れの残留ひび割れ幅が均等化されるためだと考えられる。
- (4) 今回開発した炭素繊維シートの緊張・定着装置により、所定の緊張力($P=1020\text{N}/\text{mm}^2$)が導入できたことがロードセルにより確認できた。また、供試体の終局耐力としては、ほぼ解析値と同様の結果が得られた。

参考文献

- 1) 松下博通, 村山隆弘, 岡弘幸, 今吉計二, 渡邊哲夫, 林田卓也: 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, 松崎智優, 福沢公夫, 神田建: 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, No. 641/V-64, pp. 153-165, 2002. 2
- 3) 岳尾弘洋, 松下博通, 佐川康貴, 牛込敏幸: せん断スパン比を変化させたCFRP補強梁の載荷実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21/No. 2, pp. 205-210, 1999. 6
- 4) 久保田慶太, 原田哲夫, 永瀬政敏, 岳尾弘洋: 曲げ補強用炭素繊維シートの剥離進展メカニズムと端部定着法について, 土木学会年次講演概要集第5部, Vol. 56, pp. 1210-1211, 2001. 9
- 5) 栗根聡, 幸左賢二, 宇野裕教, 藤井康彦: 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, 2005.11

(2006年9月10日受付)