

炭素繊維によるRC橋脚耐震補強の実験検討

滝本和志¹、浜田信彦²、金治英貞²、佐藤奈津代³、長澤保紀¹

¹正会員 清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 江東区越中島3-4-17）

²正会員 阪神高速道路公団 大阪建設局（〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16WTC37F）

³正会員 阪神高速道路公団 神戸第二建設部（〒650-0044 神戸市中央区東川崎町1-1-3）

1. はじめに

既設RC橋脚の耐震補強工事では、道路の分岐や合流地点で擁壁等が橋脚と隣接して施工空間が狭隘となっているために、補強材を配置することが困難な場合がある。このような場合の補強方法として、炭素繊維シートを貼り付け可能な柱面に貼り付け、擁壁等と隣接して炭素繊維シートを貼り付けられない柱面には貫通孔あるいは溝を設けて炭素繊維ストランドを通し、先に貼り付けた炭素繊維シート上に炭素繊維ストランドを扇状に広げてアンカー（以下CFアンカー）方式で定着させる補強方法がある。本研究は、このCFアンカー方式により既設橋脚を補強した場合の補強効果を、縮小モデルによる正負交番載荷実験を実施して実験的に検討したものである。

2. 実験概要

(1)試験体

試験体は表-1に示すように、せん断補強とじん性補強を行ったNo.1試験体と、補強後の曲げ耐力計算値とせん断耐力計算値がほぼ等しくなるようにせん断補強したNo.2試験体の2体とした。試験体の配

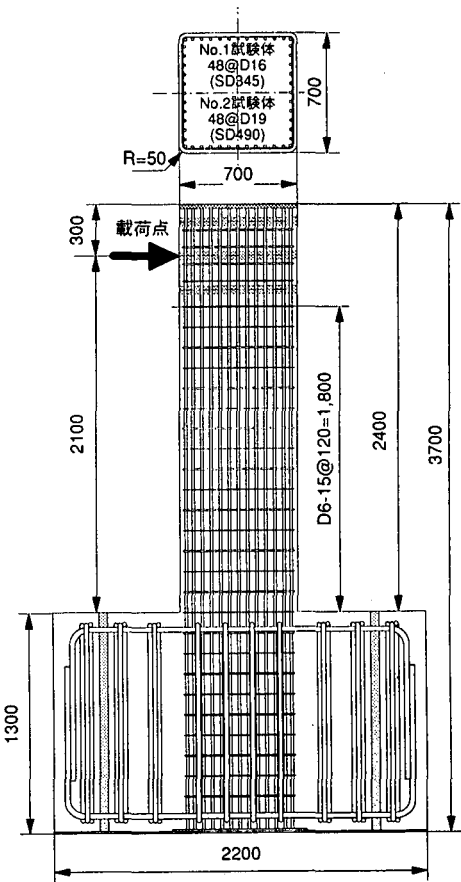


図-1 試験体の配筋と形状寸法

表-1 試験体の種類

試験体名	断面寸法	橋脚高さ	主鉄筋／軸方向鉄筋比	帯鉄筋／帯鉄筋比	補強目的 (シート層数)
No.1試験体	700×700	2,100	48-D16(SD345) 1.95%	D6@120	せん断補強＋じん性補強 (6層)
No.2試験体			48-D19(SD490) 2.82%	0.075%	せん断補強 (3層)

筋と形状寸法を図－１に示す。写真－１にNo.2 試験体の補強状況を示す。

表－２に柱部のコンクリートの材料試験結果を、表－３に鉄筋の引張試験結果を示す。

試験体正面が擁壁等に隣接していると想定して、試験体正面を除く３面に炭素繊維シートを水平にコの字状に巻き付けておき、試験体正面１面のみに炭素繊維ストランドを配置した。炭素繊維ストランドの両端は炭素繊維シート上で、ＣＦアンカーにより定着させた。

(2) C F アンカーを用いた補強方法

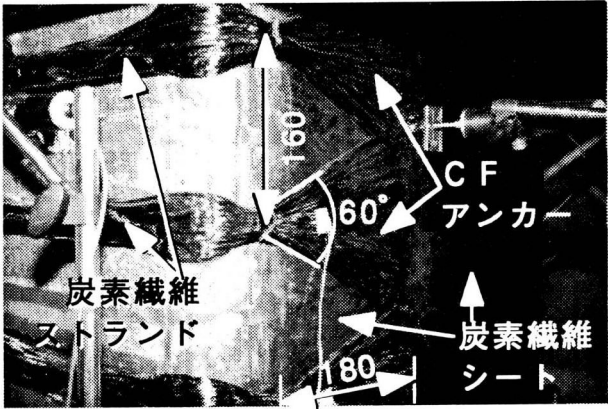
補強には目付量 300g/m^2 、引張強度 4820N/mm^2 の炭素繊維シートを用いた。ＣＦアンカーを用いた試験体の各耐力および各変位の計算値は道路橋示方書耐震設計編¹⁾に準じて求めた。計算ではＣＦアンカーを無視して、試験体柱面全周が炭素繊維シートで巻き付けられているものとし、炭素繊維シートを帯鉄筋に換算した。せん断補強ならびにじん性補強における炭素繊維シートの有効率については、種々の値が提案されているが、現状では統一されたものはない

表－２ コンクリートの材料試験結果

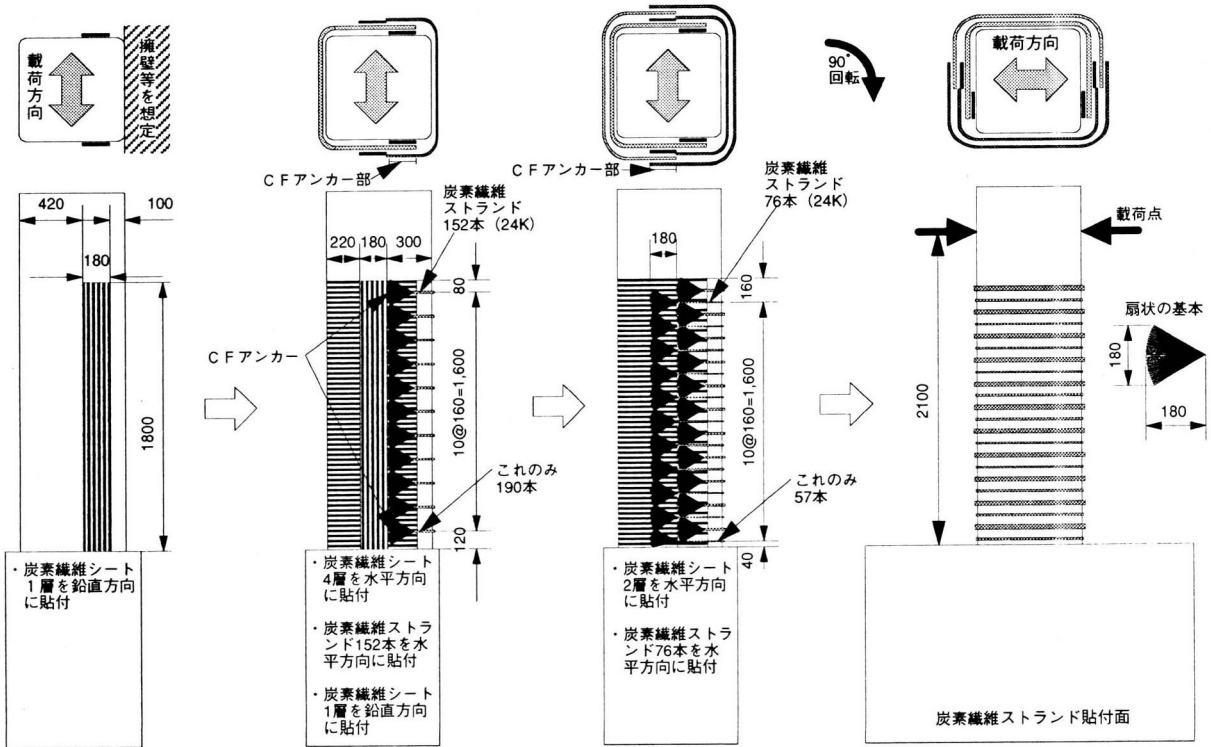
試験体名	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	ポアソン比
No.1試験体	30.6	2.54	26.2	0.197
No.2試験体	29.3	2.61	30.2	0.229

表－３ 鉄筋の引張試験結果

鉄筋の種類	降伏点 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	降伏ひずみ (μ)	破断伸び (%)
D6 鉄筋	391.2	554.6	2428	23
D16 鉄筋	402.6	584.1	2226	26
D19 鉄筋	531.1	738.1	3094	18



写真－１ No.2 試験体の補強状況

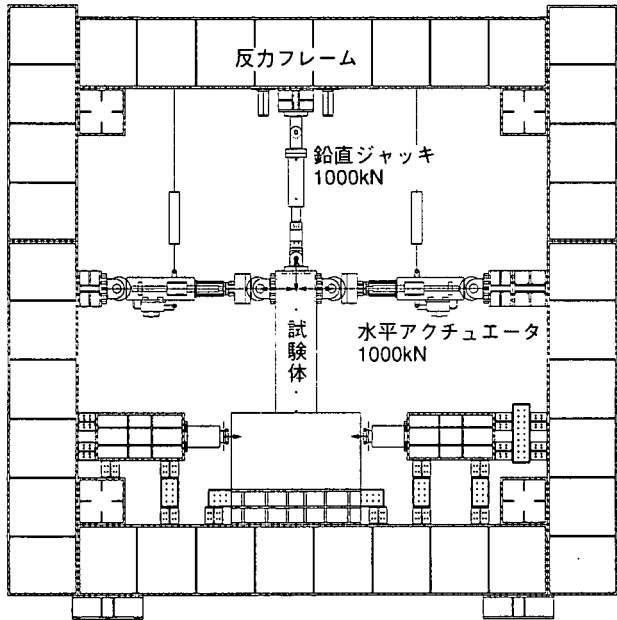


図－２ No.1 試験体の補強手順

ため、ここでは、文献2)に基づいてせん断補強、じん性補強ともに炭素繊維の有効ひずみを 4000μ として計算した。No.1試験体は6層、No.2試験体は3層を、それぞれ全高にわたって巻き付けた。

炭素繊維ストランドはCFアンカー部で扇状に広げるため、CFアンカー部では鉛直方向の分力が発生する。この分力によって炭素繊維シートが繊維方向に対して直角方向によじれるのを防ぐために、CFアンカー部にはあらかじめ鉛直方向に炭素繊維シートを1層貼り付けた。また、炭素繊維シートの水平力をすべてCFアンカー部で炭素繊維ストランドに伝達させるために、炭素繊維ストランドは炭素繊維シートの1.25倍の炭素繊維量とした。

CFアンカーの定着性能試験結果³⁾よりCFアンカーを扇状に広げる角度は 60° 、定着長さは180mm、



図－3 試験方法

CFアンカーで一度に定着できる炭素繊維シートの層数は4層まで、とした。6層貼り付けるNo.1試験体に関しては、CFアンカーの定着位置を水平方向に180mmずらして2箇所とし、4層分と2層分の炭素繊維ストランドを作製した。No.1試験体の補強手順を以下に記述する。(図－2参照)

- ① 4層分のCFアンカーを貼り付ける位置に、炭素繊維シートを1層、鉛直方向に貼り付ける。
- ② 炭素繊維シート4層を水平方向に貼り付ける。
- ③ 4層分の炭素繊維シートの1.25倍の炭素繊維量に相当する炭素繊維ストランドを水平方向に貼り付け、両端をCFアンカーで定着する。
- ④ 2層分のCFアンカーを貼り付ける位置に、炭素繊維シートを1層、鉛直方向に貼り付ける。
- ⑤ 炭素繊維シート2層を水平方向に貼り付ける。
- ⑥ 2層分の炭素繊維シートの1.25倍の炭素繊維量に相当する炭素繊維ストランドを水平方向に貼り付け、両端をCFアンカーで定着する。

No.2試験体は3層なので、4層を3層として①～③の補強手順で行った。

(3)試験方法

試験方法を図－3に示す。 1.67N/mm^2 の軸圧縮応力度が一定に作用するように鉛直荷重(814kN)を与え、橋脚頭部に水平荷重を作用させた。橋脚基部の最外縁主鉄筋のひずみを計測し、鉄筋の材料試験で求めた降伏ひずみに達したときの載荷点の変位を降伏変位とした。主鉄筋の降伏後は降伏変位の整数倍で載荷変位を増加させながら、各変位3回ずつ正負交番に載荷した。載荷中に急激な耐力低下が生じるか、各変位の第1サイクルでの最大荷重が降伏荷重を下回るまで載荷変位を増加させた。第1サイクルで降伏荷重が維持できた最大の載荷変位を終局変位とした。

表－4 計算結果一覧

試験体名	初降伏荷重 (kN)	降伏変位 (mm)	曲げ終局荷重 (kN)	終局変位 (mm)	じん性率	せん断耐力 (kN)
No.1試験体	504.7	9.4	677.6	58.0	6.2	1512.4
No.2試験体	859.2	13.4	1102.0	—	—	915.9

表－5 実験結果一覧

試験体名	降伏荷重 (kN)	降伏変位 (mm)	最大荷重 (kN)	終局変位 (mm)	じん性率	最大部材角
No.1試験体	613.8	12.0	710.3	72.0	6	1/30
No.2試験体	987.1	25.0	1162.9	75.0	3	1/28

3. 実験結果と考察

(1) 耐力および変形性能

各耐力およびじん性率の計算結果を表-4に、載荷実験結果を表-5に示す。水平荷重は軸力の水平方向成分と、軸力による付加曲げを考慮した値である。

No.1 試験体の降伏変位は12mmで、降伏荷重は614kNであった。2 δ_y の第1サイクル正方向載荷で最大荷重710kNを示した。じん性率は6となった。履歴曲線を図-4に示す。

No.2 試験体の降伏変位は25mmで、降伏荷重は987kNであった。3 δ_y の第1サイクル正方向載荷で最大荷重1163kNを示した。有効ひずみ4000 μ として求めたせん断耐力916kNを大きく上回った。じん性率は3である。履歴曲線を図-5に示す。

(2) 破壊状況

a) No.1 試験体

図-6に載荷終了後の炭素繊維ストランドおよびCFアンカーの破壊状況を示す。

No.1 試験体は4 δ_y の第1サイクル正方向載荷において載荷方向直角面（左面）基部のはらみ出し量が

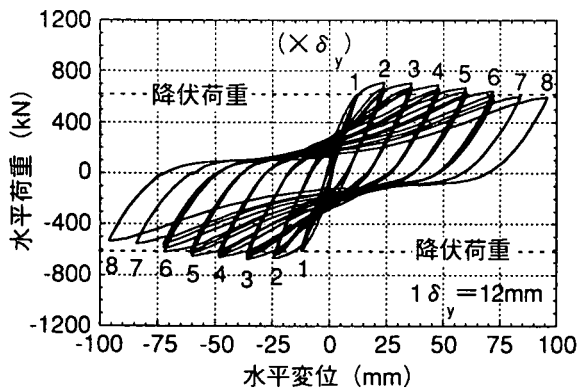


図-4 履歴曲線 (No.1 試験体)

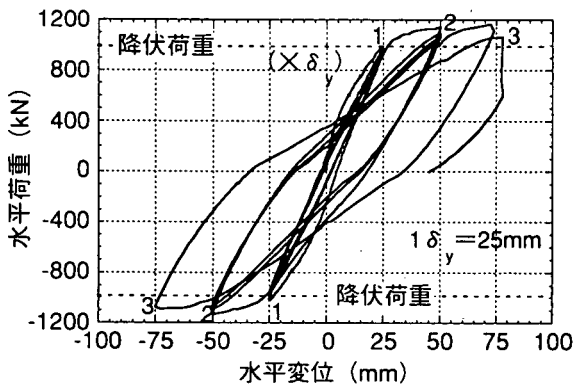


図-5 履歴曲線 (No.2 試験体)

20mmに達し、炭素繊維シートが既設コンクリート表面から剥離した。第2サイクルに入ったところで、圧縮側となる左面基部から2段目までの2層分のCFアンカーと炭素繊維シートの接着面で界面剥離が生じた。この界面剥離は、圧縮側の基部におけるはらみ出しにより生じたものである。5 δ_y の第1サイクル負方向載荷では、反対側の右面基部から2段目までの2層分のCFアンカーと炭素繊維シートの接着面で界面剥離が生じた。左右両面ともに剥離した1段目と2段目の2層分のCFアンカーの間に挟まれた最下段の4層分のCFアンカーと炭素繊維シートの間には剥離は生じてなかった。この時点で、基部から280mmの高さまでは4層分の補強量に減少したものの、耐力の低下は小さく、降伏荷重を上回っていたので載荷を続行した。6 δ_y の第1サイクル正方向載荷で左面最下段の4層分のCFアンカーの先端部が炭素繊維

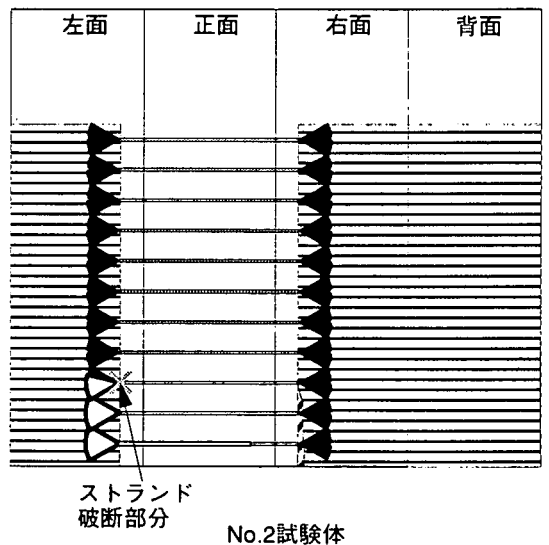
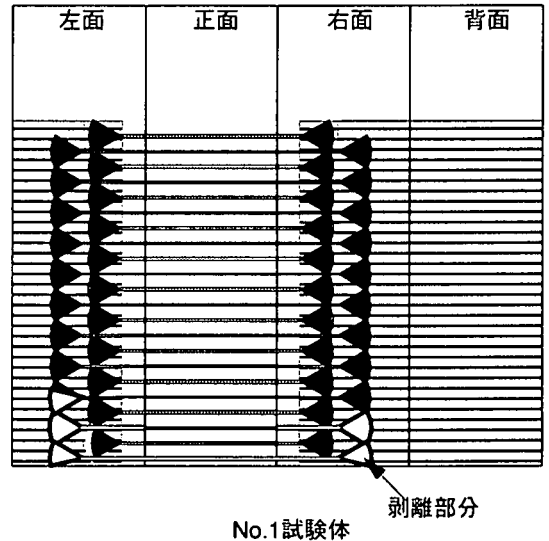


図-6 炭素繊維の破壊状況

シートから剥離しているのを確認した。

7 δ_y (部材角 1/25) の第1サイクル正方向載荷において最大荷重が降伏荷重を下回ったため、No.1 試験体のじん性率は6と判断した。降伏荷重を下回ったものの顕著な耐力低下が見られないため、さらに載荷変位を大きくして、8 δ_y の載荷を1サイクル実施した。実験終了時点では、左面基部から3段目の2層分のCFアンカーと炭素繊維シートの接着面においても、CFアンカー部の約半分が剥離していた。このように、2層分のCFアンカーと炭素繊維シートの接着面において界面剥離が生じていたが、荷重-変位関係では顕著な耐力低下が見られず、載荷終了まで安定した履歴曲線を示していた。

b) No.2 試験体

No.2 試験体は3 δ_y の第1サイクル負方向載荷において、右面基部から3段目の炭素繊維ストランドの位置までの炭素繊維シートが大声をともなって既設コンクリート表面から剥離した。3 δ_y の第2サイクル正方向載荷において、3 δ_y に到達する直前に、左面の下から3段目までのCFアンカーが炭素繊維シートから剥離して破壊に至った。せん断面において、顕著なせん断ひび割れは確認できなかった。No.2 試験体

のじん性率は3と判断したが、終局変位としてはNo.1 試験体とはほぼ同一であった。

(3) 基部はらみ出し分布

図-7、8に試験体基部の載荷方向直角面におけるはらみ出し分布を示す。凡例の[2+1]は2 δ_y の第1サイクル正方向載荷を示す。はらみ出し量は、橋脚中央の変位と載荷方向直角面の変位の差より求めた。ここでは、圧縮側となったときのはらみ出し分布を示している。

No.1 試験体の場合、左面のCFアンカーと炭素繊維シートの剥離が4 δ_y の第2サイクル正方向載荷時に生じており、はらみ出し量の急増している時点とほぼ一致している。No.2 試験体においても、基部では5mm 以上のはらみ出しが計測されている。

(4) 炭素繊維ひずみ分布

図-9にNo.1 試験体の炭素繊維ストランドの高さ方向のひずみ分布を示す。ひずみゲージは断面中央位置に貼り付けた。また、相対する位置の炭素繊維シートのひずみ分布を図-10に示す。基礎から120mm の高さにある4層分の炭素繊維ストランドは

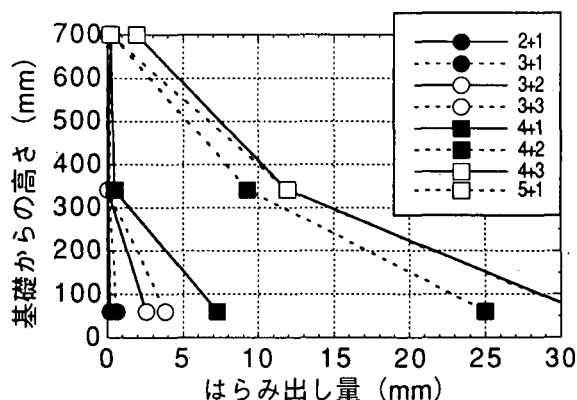


図-7 基部のはらみ出し分布 (No.1 試験体)

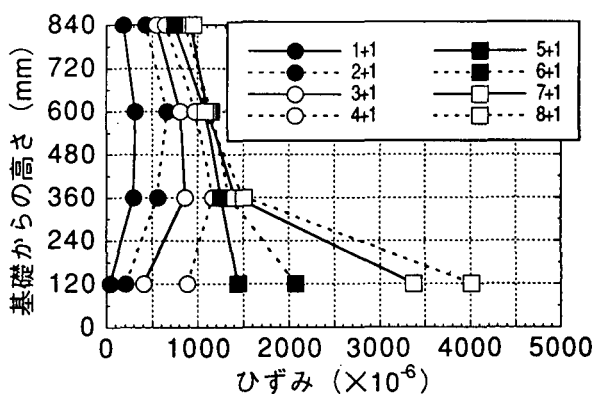


図-9 炭素繊維ストランドひずみ分布 (No.1 試験体)

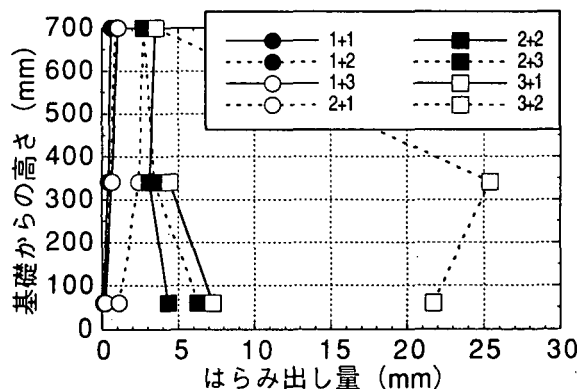


図-8 基部のはらみ出し分布 (No.2 試験体)

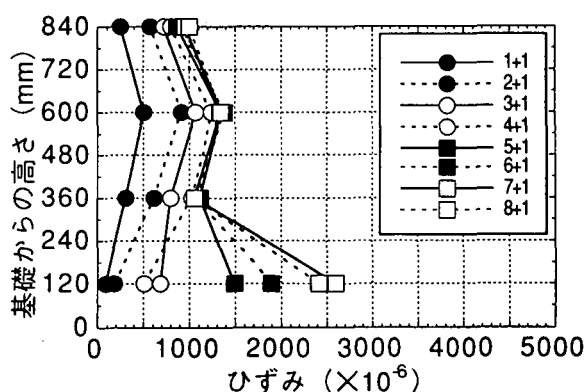


図-10 炭素繊維シートひずみ分布 (No.1 試験体)

+6 δ_y 載荷の第1サイクルで左面のCFアンカーの先端部が炭素繊維シートから剥離していたが、先端部のみの剥離で6 δ_y 載荷以降において、ひずみが急増している。炭素繊維シートは5 δ_y 以降、基礎から120mmの高さのひずみが急増している。

図-1 1、1 2にNo.2試験体の炭素繊維ストランドと炭素繊維シートのひずみ分布を示す。炭素繊維ストランドは基礎から440mmの高さまでは直線的にひずみが増加している。炭素繊維シートのひずみも炭素繊維ストランドと同様のひずみ分布となっている。

(5)補強効果の評価

No.1 試験体での「せん断補強効果+じん性補強効果」の検討においては、CFアンカーが6層分のうちの2層分について接着面での界面剥離を生じたが、じん性率6以上の変形性能を得、有効ひずみ4000 μ として算出したじん性率6.2を満足する結果を得た。さらに終局変位を越えて8 δ_y まで載荷したところ、残り4層分については接着面での界面剥離や、炭素繊維ストランドの破断も発生せず、粘りある緩やか

な荷重-変形関係を示した。

No.2 試験体での「せん断補強効果」の検討においては、せん断補強としては有効ひずみ4000 μ とする設計せん断耐力を十分上回り、曲げ耐力に到達して、じん性率3以上の変形性能を得た。結果的にせん断補強+じん性補強を施したことになった。

以上の結果からCFアンカー方式は、炭素繊維シートと同等程度の設計性能を満足していると評価できる。

4. まとめ

既設RC橋脚に擁壁などが隣接して施工空間が狭隘となり、補強材を配置することが困難な場合に対処するため、縮小モデルによる正負交番載荷実験を実施して、CFアンカー方式による補強方法の適用を実験的に検討した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- ① CFアンカー方式による補強方法は、炭素繊維シートの有効ひずみを4000 μ として炭素繊維シートを全面に巻き付けた場合と同等程度のじん性補強効果を有している。
- ② CFアンカー方式による補強方法は、炭素繊維シートの有効ひずみを4000 μ として炭素繊維シートを全面に巻き付けた場合と同等程度のせん断補強効果を有している。
- ③ CFアンカーの定着位置として、基部のはらみ出しのような面外変形が顕著な位置を避ける工夫をすれば、より一層のじん性補強効果が期待できる。

今後は、実橋脚への適用に向けて、さらに検討を続ける予定である。

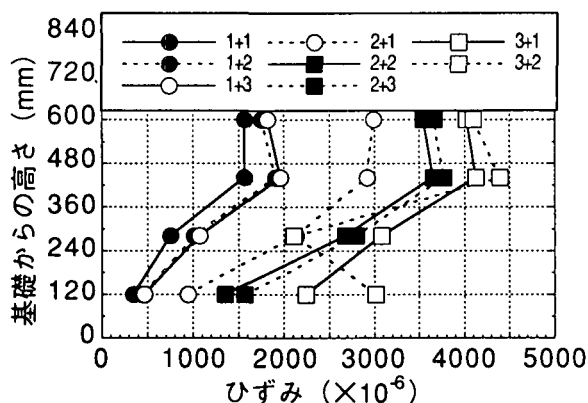


図-1 1 炭素繊維ストランドひずみ分布
(No.2 試験体)

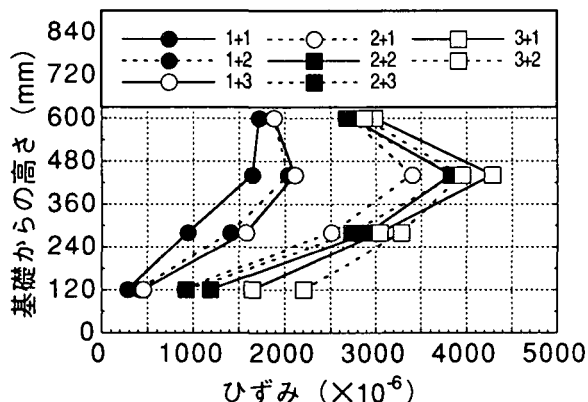


図-1 2 炭素繊維シートひずみ分布
(No.2 試験体)

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）、1996
- 2) M.J.N.Priestley, F.Seible, G.M.Calvi: Seismic Design and Retrofit of Bridges, WILEY-INTERSCIENCE, 1996
- 3) S-R-CF工法研究会：S-R-CF工法（既存柱の耐震改修設計施工指針）技術評価資料、1999.10