

炭素繊維シートを用いて耐震補強した 円形断面鉄筋コンクリート橋脚の繰返し載荷実験

米田慶太¹・川島一彦²・庄司学³

¹学生会員 東京工業大学大学院修士課程（〒112-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

²フェロー 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科（同上）

³正会員 工修 東京工業大学 工学部土木工学科 助手（同上）

1. まえがき

兵庫県南部地震による鉄筋コンクリート橋脚の被害から、既設橋脚のじん性の向上が求められている。じん性向上のひとつの方法として施工性の良さから炭素繊維シートによる耐震補強法が注目されており、これまで多くの実験的研究が行われている。しかしながら、その実験供試体の多くは矩形断面であり、円形断面橋脚を対象とした研究は非常に少ないのが現状である。

そこで本研究では帯鉄筋量、炭素繊維シート補強量のちがいにより、円形断面鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能にどのような影響を及ぼすかについて実験的検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験に用いた供試体と実験方法

本実験では表-1、図-1に示すような帯鉄筋量、炭素繊維シート量をパラメータとした合計6体の供試体を用いた。

供試体は直径 400mm の円形断面であり、橋脚基部から載荷点までの高さは 1350mm、せん断支間比は 3.375 である。軸方向鉄筋はいずれの供試体にも SD295 の D16 を 1 2 本配置した。軸方向鉄筋比は

1.89%である。帯鉄筋は間隔を 150mm（A シリーズ）、300mm（B シリーズ）の 2 種類に変化させ、SD295 の D6 を配置した。帯鉄筋体積比 ρ_s にすると 0.256%（A シリーズ）、0.128%（B シリーズ）となる。

本実験では表-2に示すような特性を有する炭素繊維シートを 1 層および 2 層周方向に巻き付けて横拘束した。炭素繊維シートの体積比 ρ_{CF} にすると 0.111%（1 層巻き）および 0.222%（2 層巻き）となる。炭素繊維シートの幅は 250mm で、1 層巻きの場合は基部から高さ 1000mm まで带状に巻き付け、2 層巻きの場合は 1 層目は 1 層巻きの場合と同じように巻き、2 層目は 1 層目とは幅 1/2 だけずらして巻き付けた。周方向のラップ長は 100mm とし、載荷方向と直角方向の面（図-1における N,S 面）で交互にラップした。

施工手順としては、コンクリートと炭素繊維シートの付着不良が生じないようにするためにコンクリート表面の目荒らしを最初に行って空隙を露出させた。そして、プライマーを塗布した後パテによりコンクリート表面の不陸を修正し、含浸樹脂であるレジンを用い炭素繊維シートをコンクリートに接着させた。なお、表-2に示した実験値とは実験供試体と同じ条件で含浸樹脂を塗布し養生した炭素繊維シートを、炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法(JIS

表-1 実験供試体の特性

	Aシリーズ			Bシリーズ		
供試体名	A1	A2	A3	B1	B2	B3
断面直径	400mm					
載荷点高さ	1350mm					
せん断支間比	3.375					
軸鉄筋比	1.89%					
帯鉄筋	D6@150mm			D6@300mm		
帯鉄筋比 ρ_s	0.256%			0.128%		
炭素繊維シート比 ρ_{CF}	0%	0.111%	0.222%	0%	0.111%	0.222%
コンクリート強度	30.0MPa	30.0MPa	27.4MPa	30.0MPa	30.0MPa	27.4MPa

表-2 炭素繊維シートの材料特性

		公称値	実験値
繊維目付量	g/m ²	200	200
シート厚さ	mm	0.111	0.111
引張強度	N/mm ²	3400	4476
弾性係数	GPa	230	266
破断ひずみ	%	1.50	1.63

K 7073)に準拠して素材メーカーで試験した結果である。

コンクリートの呼び強度は 24MPa、スランプは 180mm とし最大粒径 20mm の粗骨材を使用した。実験時のコンクリートの圧縮強度は 27.4～30.0MPa であった。

本実験では、一定振幅変位漸増方式によりドリフト比 0.5%に相当する変位 6.75mm を基準振幅として、その整数倍の変位振幅でそれぞれ繰り返し回数 3 回の正負交番载荷を行った。ここで、ドリフト比とは橋脚基部から载荷点高さまでの距離に対する载荷点の水平変位の比である。繰り返し载荷実験では、一般に降伏変位を基準変位として用いることが多いが、実験では降伏変位を求めることがなかなか困難であることから、ここでは降伏変位に代えてドリフト比 0.5%に相当する変位を基準変位とした。なお、道路橋示方書¹⁾に基づいて A1, B1 無補強供試体について初降伏変位および降伏変位を求めると、それぞれ 4.4mm, 5.7～5.8mm となる。ただし、これはフーチングからの軸方向鉄筋の抜けだしを見込まない値であり、過去の多くの実験で径 400mm 程度の供試体の場合では、この 2 倍程度の変位を与えないと橋脚基部の鉄筋は降伏しない。

载荷速度は 0.81～8.91mm/sec (0.03Hz) であり、橋脚天端には 1.47MPa (15kgf/cm²) の一定軸力を作用させた。なお、以後加振機が供試体を押す場合を + 载荷、引く場合を - 载荷と呼ぶ。

3. 破壊性状

図-2, 3 には供試体の最終損傷状況を展開図として示した。炭素繊維シートで補強していない A1 供試体では载荷を始めると、ドリフト比 1.0%程度より基部から高さ 150mm, 300mm, 450mm 付近において周方向にひび割れが発生した。これは、帯鉄筋が配置されている位置に相当する。ドリフト比が 3.0% となると一面側 (図-1 における W 面) において基部から高さ 100mm まで軸方向鉄筋に沿って鉛直方向にひび割れが発生した。ドリフト比 3.5% になると + 面、一面両面で軸方向鉄筋の座屈に伴いかぶりコンクリートが橋脚基部から 300mm 程度の高さまで剥落し、耐力が急激に低下した。ドリフト比が 4.0%に

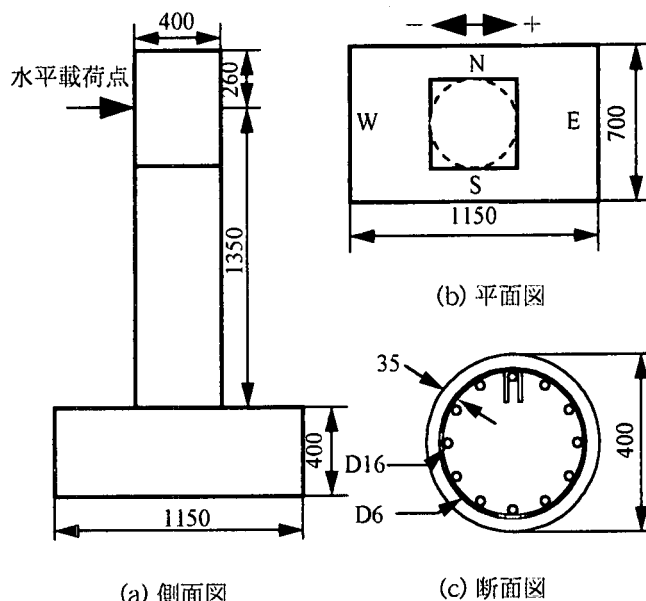


図-1 実験供試体

なると最大耐力の 50%以下まで耐力が低下し、実験を終了した。同じく炭素繊維シートで補強していない B1 供試体では、ドリフト比 0.5%で帯鉄筋を配置している橋脚基部から 300mm の位置で周方向のひび割れが発生し始め、次にドリフト比が 1.0%になると橋脚基部から 1 段目と 2 段目の帯鉄筋の中間で周方向ひび割れが発生した。ドリフト比が 1.5%の载荷後には高さ 150mm において周方向ひび割れが全周にわたって発生し、ドリフト比 2.5%になると一面側の高さ 200mm ほどまでのコンクリートが剥落した。ドリフト比が 3.5%では + 面、一面側両面にて軸方向鉄筋が座屈し、かぶりコンクリートが剥落し、耐力も急激に低下した。

炭素繊維シートにより補強した B2 供試体では、载荷後ドリフト比 1.5%までは载荷に伴いみみしと音がする程度で外観上変化はなかった。ドリフト比が 2.0%になると基部と基部から 150mm, 300mm 付近の 2 カ所で上下方向に炭素繊維シートが裂け、その幅が徐々に広がり、ドリフト比が 3.0%には炭素繊維シートが破断した。その後、高さ 200mm までの範囲で炭素繊維シートの破断が数カ所で生じた。ドリフト比が 5.5%になると基部付近で炭素繊維シートが大きく破断し、実験供試体が载荷方向と直角方向にドリフト比にして 7%以上傾斜したため実験を終了した。従来、载荷方向と直角方向に傾斜することはあまり注目されていないが、橋脚が基部で塑性化した場合はこうした残留変位に留意しておく必要がある²⁾。

A2, A3, B3 供試体も損傷過程は B2 供試体同様であり、実験供試体が载荷方向と直角方向にドリフト比にして 7%以上傾斜した際に実験を終了したが、炭素繊維シートを 1 層巻いた A2, B2 供試体に比較し

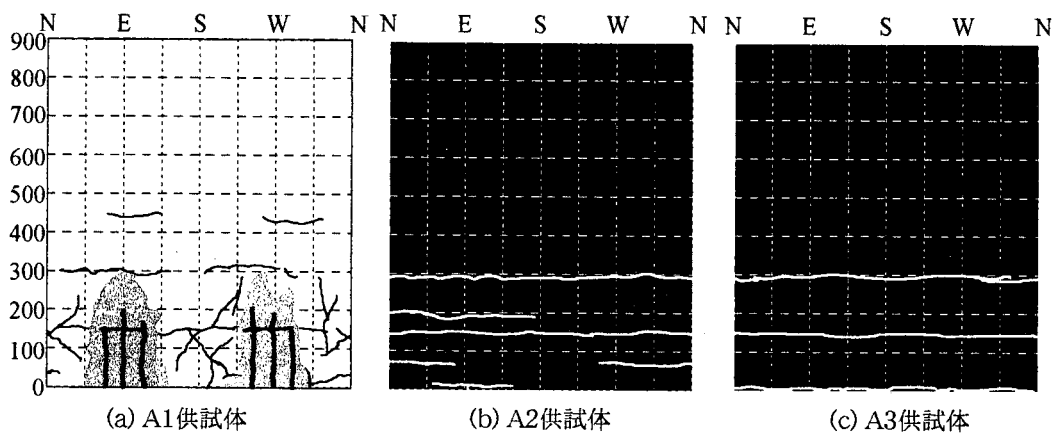


図-2 Aシリーズ($\rho_s = 0.128\%$)最終損傷状況

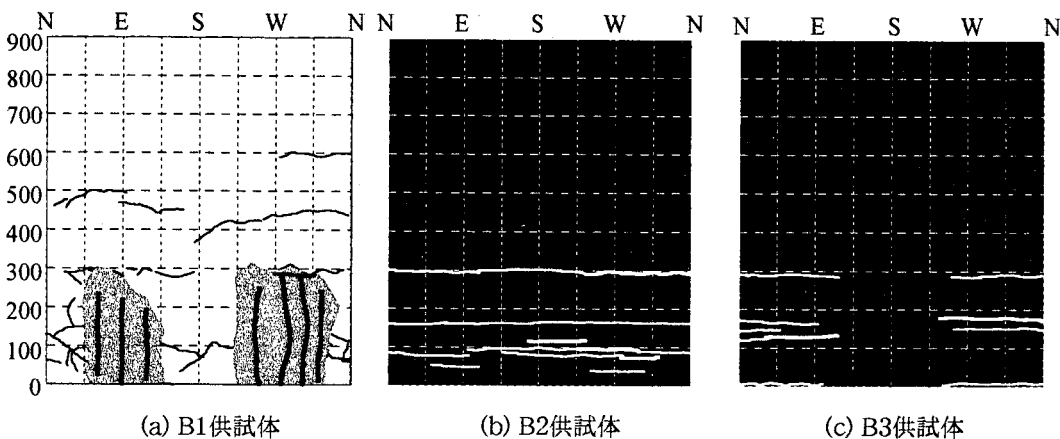


図-3 Bシリーズ($\rho_s = 0.256\%$)最終損傷状況

て2層巻いた A3, B3 供試体では、炭素繊維シートが破断した箇所や程度はわずかであり軸方向鉄筋のフーチングからの抜けだしによる基部の開きはより大きく生じていた。実験終了後炭素繊維シートを高さ 300mm 程度まで取り除いた所、A2, B2 供試体には周方向に最大で幅 2mm 程度のひび割れが生じているのが確認された。また、A3, B3 供試体では炭素繊維シートが裂けた箇所と基部においてコンクリートに最大で幅 2mm 程度の周方向ひび割れが生じていたが、炭素繊維シートが裂けなかった部分は損傷が生じていなかった。かぶりコンクリートを取り除いて内部の軸方向鉄筋や帯鉄筋をチェックしたが、いずれの供試体でも軸方向鉄筋、帯鉄筋とも座屈等の損傷は生じていなかった。

4. 耐力および変形性能

繰り返し載荷実験により得られた各供試体の載荷点位置における水平力～水平変位の履歴曲線を示した結果が図-4 であり、図-5, 6 はこれらの履歴曲線を包絡線で比較したものである。A1 供試体は最大耐力 108kN まで達しドリフト比が 3.0% まで安定した履歴曲線を描くが、ドリフト比が 3.5% になると軸方向

鉄筋が座屈してコンクリートが剥落するに至って耐力が低下し始めた。これに対して A2, A3 供試体は最大耐力到達後、緩やかに耐力が減少して行くが実験終了まで安定した履歴を示す。最大耐力の 80% を下回るのは A2, A3 供試体ではドリフト比がそれぞれ 5.0%, 4.5% の時であった。

B1 供試体はドリフト比 1.5% で最大耐力を示し、ドリフト比 3.0% になるとかぶりコンクリートが剥落し、急速に耐力が減少した。ドリフト比が 3.5% になると最大耐力の 50% 程度まで耐力が低下した。これに対して B2, B3 供試体では最大耐力の 80% を下回るのはそれぞれドリフト比が 5.0%, 4.5% の時であり、A2, A3 供試体同様最大耐力後実験終了まで安定した履歴形状を示した。今回の実験ではじん性向上を目的として周方向に炭素繊維補強を行ったので A2, A3 供試体は A1 供試体と、また B2, B3 供試体は B1 供試体と最大耐力はほとんど変わらない。

一方、変形性能は図-5 に示すように、無補強の A1, B1 供試体では耐力が最大耐力の 80% を下回るドリフト比はそれぞれ 3.5%, 3.0% となった段階であるのに対して、炭素繊維シートによって補強した供試体では上述したようにドリフト比 4.5~5.0% の時であり、炭素繊維シートによるじん性補強効果が見ら

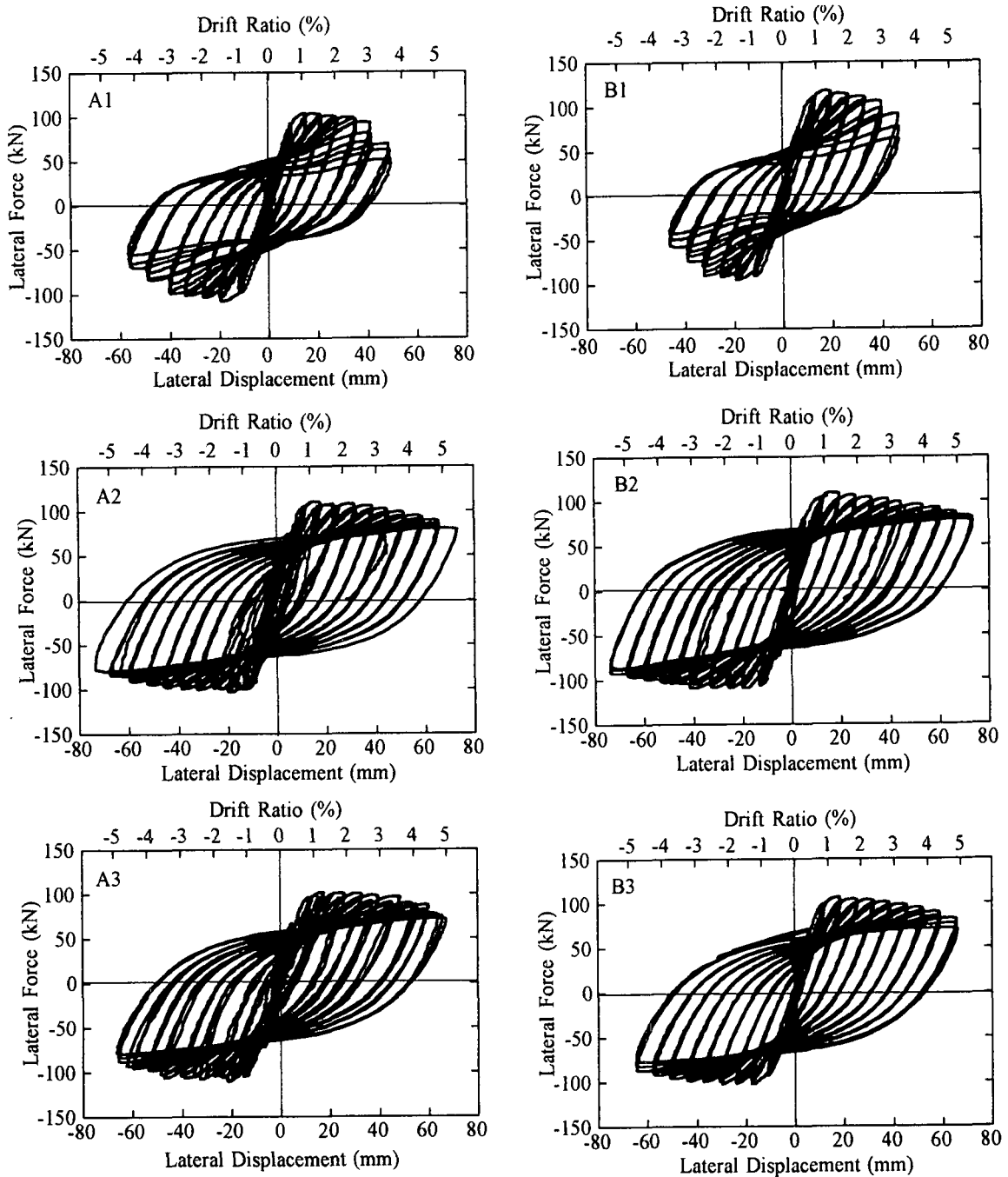


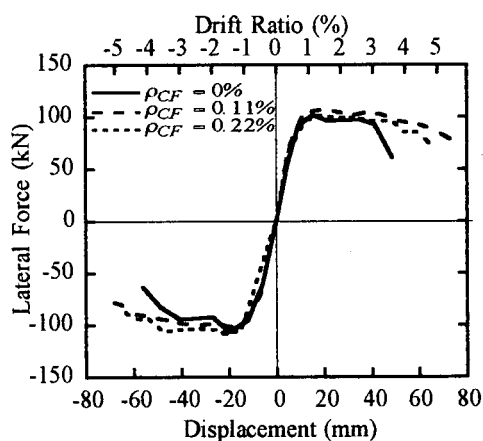
図-4 水平力～水平変位履歴曲線

れる。しかし炭素繊維シートを2層($\rho_{CF}=0.222\%$)巻いた場合には、1層($\rho_{CF}=0.111\%$)巻いた場合に比較し、A、Bいずれのシリーズでもドリフト比にして0.5%程度変形性能が低下した。これは、高さ300mm程度までの範囲のコンクリートは150mm位置付近にひび割れが入っているが全体としては損傷度は小さく、また軸方向鉄筋のフーチングからの抜けだしによる基部の開きが大きかったことから、A3、B3供試体では基部へ損傷が集中し、そのため変形性能が低下したと思われる。また、図-6から帯鉄筋比が異なっても炭素繊維補強量が同じであれば、包絡線はほぼ一致しており、変形性能に顕著な違いは見ら

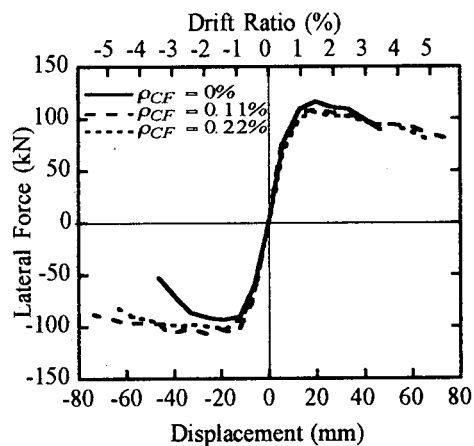
れなかった。

5. 周方向に生じるひずみ性状

基部付近での帯鉄筋、炭素繊維シートの横拘束効果を検討するために、帯鉄筋間隔が150mmであるAシリーズに対して一面(図-1のW面)の基部から高さ150mm位置での帯鉄筋ひずみと炭素繊維シートおよびコンクリート表面の周方向のひずみをそれぞれ各載荷段階ごとに図-7に示す。図-7(a)によるとA1供試体では載荷が進行するにつれてコンクリート表面のひずみも増加しドリフト比3.0%でコンク

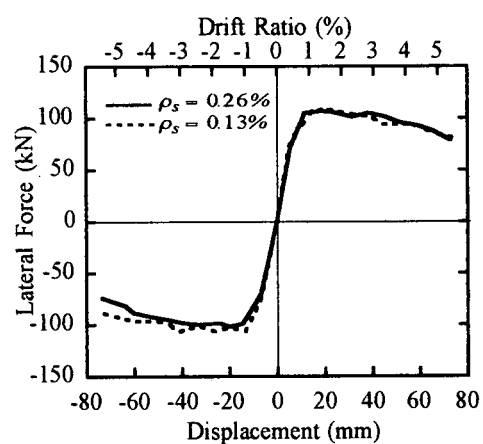


(a) $\rho_s = 0.128\%$ の場合

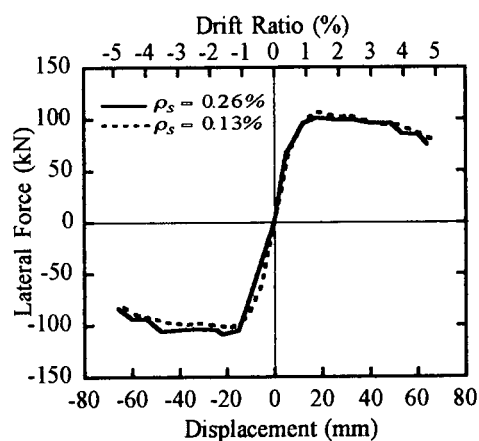


(b) $\rho_s = 0.256\%$ の場合

図-5 炭素繊維シート量の影響

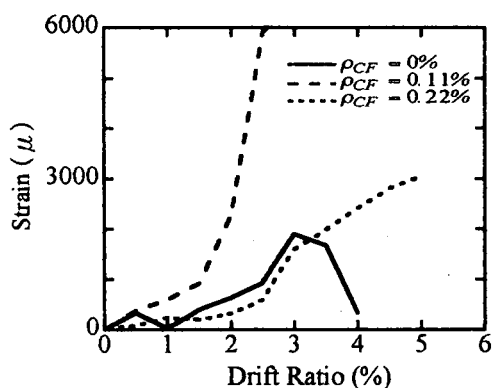


(a) $\rho_{CF} = 0.111\%$ の場合

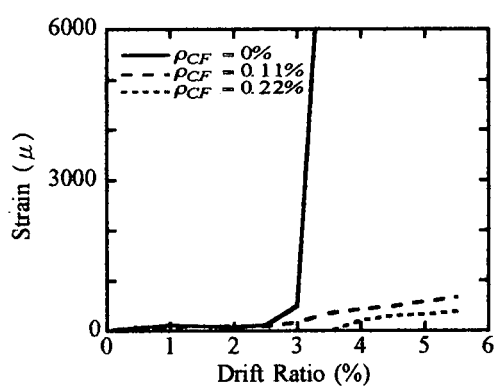


(b) $\rho_{CF} = 0.222\%$ の場合

図-6 帯鉄筋比の影響



(a) 炭素繊維シート ($\rho_{CF} = 0.11, 0.22\%$) もしくは
コンクリート表面 ($\rho_{CF} = 0\%$) のひずみ



(b) 帯鉄筋ひずみ

図-7 -(W)面基部から150mm位置におけるドリフト比～周方向ひずみ関係

リートの表面ひずみが 2000μ 程度で最大となり、その後、表面ひずみは低下している。これは、かぶりコンクリートにひび割れが生じ、結果としてひずみを測定した位置においては引張応力は生じなくなったためと考えられる。

炭素繊維シートで補強した A2, A3 供試体においても載荷の進行とともに炭素繊維シートの周方向ひずみは増加しており、最大ひずみは A2, A3 供試体でそれぞれ 6000μ 以上、 3000μ である。炭素繊維シート量のちがいに、A2 供試体では A3 供試体よりも大きなひずみが生じている。なお、A2 供試体ではドリフト比が 1.5% となった段階から炭素繊維シートが上下方向に裂けたが、それがひずみを測定した位置に近かったため、この影響を受けてドリフト比 1.5% 以降ひずみが大きくなった可能性がある。

一方、図-7(b)より帯鉄筋ひずみを見てみると、A1 供試体はドリフト比が 3.5% の段階から帯鉄筋ひずみが増加して降伏ひずみを越えている。これは、ドリフト比が 3.5% となった段階で軸方向鉄筋が座屈したためと考えられる。これに対して A2, A3 供試体では帯鉄筋ひずみは最大でも 800μ 、 400μ 程度と大きくない。A1 供試体のように無補強供試体では軸方向鉄筋が座屈するまでのひずみは 100μ 程度であり、内部コンクリートを拘束するためだけではそれほど大きなひずみは生じていない。興味深いのは、コンクリートや炭素繊維シート表面に生じる周方向ひずみが帯鉄筋に生じる周方向ひずみ比べ大きいことである。これは炭素繊維シートやコンクリートの表面には、内部コンクリートの変形に加えかぶりコンクリートの変形や損傷、軸方向鉄筋や帯鉄筋のはらみだしを拘束するためと考えられる。したがって、同一高さであっても炭素繊維シートの方が帯鉄筋よりも大きな拘束力を与えるため、炭素繊維シート体積比 ρ_{CF} が同じであれば今回の実験で対象とした程度に帯鉄筋比 ρ_s が異なっても同等の変形性能を有していたと思われる。

6. 結論

円形断面鉄筋コンクリート橋脚を対象に帯鉄筋量、炭素繊維シート量の違いの影響を検討するために正負交番載荷試験を行った。本研究で得られた結論を示すと以下ようになる。

(1) 最大耐力の 80% まで耐力が低下する時のドリフト比は炭素繊維シートによる補強を行っていない A1, B1 供試体では 3.0~3.5% であったのに対して、炭素繊維シートで補強をした供試体では 4.5~5.0% であり、円形断面鉄筋コンクリート橋脚に対して周方向に炭素繊維シートを巻き付け補強を行うと変形性能が向上する。

(2) 炭素繊維シートを 2 層 ($\rho_{CF}=0.222\%$) 巻いた

場合には 1 層 ($\rho_{CF}=0.111\%$) 巻いた場合に比較して、A, B いずれのシリーズでドリフト比で 0.5% 程度変形性能が低下した。これは、炭素繊維シートにより強く補強した結果、損傷が基部に集中し、かえって変形性能が低下したためである。したがって変形性能を大きくするためには、それに適切な炭素繊維シート補強量がある。

(3) 同一高さにおける炭素繊維シートと帯鉄筋の周方向のひずみを比較すると炭素繊維シートには 3000μ 以上ひずみが生じているのに対して帯鉄筋には $400\sim 800\mu$ 程度と小さなひずみしか生じていない。これは炭素繊維シートやコンクリートの表面には、内部コンクリートの変形に加えかぶりコンクリートの変形や損傷、軸方向鉄筋や帯鉄筋のはらみだしを拘束するためと考えられる。

(4) (3) の結果、帯鉄筋に比較して炭素繊維シートによる拘束力が大きく、今回の実験で対象とした程度に帯鉄筋比 ρ_s が異なっても同等の変形性能を有していた。

謝辞：本実験を実施するにあたって(株)三菱化学の星島時太郎氏、藤田崇氏からは炭素繊維シートの巻き立てに関して、(株)コンステックの伊藤功一氏、小野定氏、矢田聡氏、阿部一郎氏、今井睦子氏からは赤外線カメラによる撮影に関して多大なご支援を頂きました。(株)ピー・エスの武村浩志氏、鈴木和典氏には供試体製作ヤードの設置に際して、実験供試体製作に際しては建設省土木研究所の長屋和宏氏、東京工業大学川島研究室の堺淳一氏、渡辺学歩氏、宇根寛氏、剣持安伸氏、永井政伸氏、細入圭介氏、斉藤淳氏、山岸睦功氏にご協力いただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編，1996。
- 2) Kawashima, K., Gregory, A. MacRae, Hoshikuma, J. and Nagaya, K.: Residual displacement response spectrum, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol.124, No.5, pp.523-530, 1998.
- 3) (財)土木研究センター：炭素繊維を用いた耐震補強法研究会報告書，1998。
- 4) 細谷学，川島一彦：炭素繊維シートで横拘束したコンクリート柱の応力度～ひずみ関係に及ぼす既存帯鉄筋の影響とその定式化，土木学会論文集 V-43, pp.25-42, 1999。
- 5) 細谷学，川島一彦：炭素繊維シートと帯鉄筋で横拘束したコンクリート柱の軸方向応力度—軸方向ひずみ関係の定式化，東京工業大学土木工学科耐震工学研究グループ，TIT/EERG98-3, 1998。