

論文 アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の靱性能に関する 実験的研究

三上 浩^{*1}・佐藤昌志^{*2}・谷本俊充^{*3}・松岡健一^{*4}

要旨：RC 橋脚の耐震補強工法として施工が簡便なアラミドテープを巻き付ける工法を提案し、実物橋脚の 1/3 ~ 1/5 模型を用いて水平交番載荷実験によって靱性能を検討した。本研究では特に橋脚模型に段落し部を設け、上部工の死荷重を模擬した 20 tf の鉛塊を模型頭部に設置して実験を行った。また、炭素繊維製のテープを用いた場合と靱性能を比較した。その結果、(1) 段落しによって靱性能が大きく低下する。(2) 段落し部の靱性能はアラミドテープや炭素テープの巻き付けによって大きく改善される。(3) 試験体の耐力低下は、アラミドテープ補強では鉄筋の座屈によって、炭素テープ補強ではコーナー部の破断によって生じる。などが明らかとなった。
キーワード：耐震補強、アラミドテープ、靱性能、RC 橋脚

1. はじめに

炭素繊維やアラミド繊維などの連続繊維製のテープやシートは、軽量かつ高強度で施工性が良いことから、既設構造部材の補強材としての適用が可能であると考えられる。特に、平成 7 年 1 月の阪神・淡路大地震における RC 橋脚が示したような脆性破壊を抑制する補強工法として、連続繊維材料を橋脚に巻き付けて補強する工法は有望であると考えられる。

本研究は、繊維材料のなかでも靱性に富み、しなやかさや引張強度に優れたアラミド繊維に着目して RC 橋脚の巻き付け補強材としての適用性を、主として靱性能の観点から検討したものである。RC 橋脚の靱性能は軸方向鉄筋の段落しの有無、巻き付け補強の有無及び補強材料の種類などによって変化すると考えられるため、これらをパラメータとする橋脚模型を製作して水平交番載荷実験によって靱性能を検討した。本実験での計測項目は荷重及び変位と柱基部の鉄筋の軸方向歪であり、検討は主として荷重-変位関係及び柱高さ方向の変形分布特性に着目して行った。最後に、変位の残留率、終局塑性率、等価剛性、等価粘性減衰定数などの靱性能を示す指標を用いて検討を行っている。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の一覧を表-1 に示す。試験体の名称のうち、頭文字 N、A、C はそれぞれ無補強、アラミド補強、炭素補強を示し、- 以後の数字は段落しの状態を示している。段落しの靱性能に与える影響を比較検討するために、段落しなしの試験体も実験した。段落しを設けた試験体の軸方向鉄筋は、柱基部から柱高さの 1/3 以上の範囲で鉄筋量を半分に減少させた。図-1 に試験体の寸法及び配筋の例を示す。軸方向鉄筋には D13 を用い、柱基部の鉄筋比は 1.9 % とした。また、スターラップとして D10 を 20 cm 間隔に配置した。用いた鉄筋は全て SD295A である。

図-2 に FRP テープの巻き付け状況を示す。用いた FRP テープの幅はいずれも 37.5 mm で、中心

*1 三井建設(株)技術研究所 主任研究員、工博(正会員)

*2 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室長(正会員)

*3 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室(正会員)

*4 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科、工博(正会員)

間隔を 75 mm として 9 段巻き付けとしている。なお、間隔を設けて巻き付けたのは、ひびわれ調査などの維持管理を容易にするためである。巻き付けは主として段落し部分をせん断補強することを目的として、段落し部の高さ ($h = 50 \text{ cm}$) の上方 $1B$ (B : 試験体の幅) 及び下方 $0.5B$ の範囲について行った。ただし、アラミドテープの巻き付けは 2 層、炭素テープは 4 層として体積補強割合を同程度 ($0.16 \sim 0.17 \%$) とした。

テープの巻き付け施工は、コンクリート表面をケレン仕上げ

した後にプライマーを塗付し、テープを巻き付けた後にエポキシ樹脂を含浸硬化させて行った。なお、試験体のコーナー部は長辺が 20 mm の二等辺三角形形状のスペーサを設置した後にコンクリートを打設することで面取りを行っている。表 2 に FRP テープの材料特性 (カタログ値) を示す。炭素テープ 4 層の $E \times A$ (弾性係数 \times 断面積) 及び引張耐力は、アラミドテープ 2 層の各々 2 倍程度大きい。なお、コンクリートの設計基準強度は 240 kgf/cm^2 であり、実験時の材令における平均圧縮強度は 260 kgf/cm^2 であった。

2.2 実験方法

水平荷重は圧縮・引張り両用の油圧ジャッキを用いて上部工の死荷重を模擬した重量 20 tf の鉛塊の高さ方向中心部に水平に加力している。従って加力スパンは図 1 に示すように 190 cm である。なお、フー

チングは 8 本の PC 鋼棒を用いて反力ベッドに緊結した。また、鉛塊部分に水平荷重を交番して載荷するため、柱上部は図 2 に示すように載荷用金物にて十分な補強を行っている。水平荷重はロードセルによって測定し、油圧ジャッキに対して反対側に設置した変位計によって、載荷点の水平変位及びフーチングの天端より 20、50、100 cm の位置で橋脚の水平変位を測定した。なお、フーチングの天端にも変位計を設置して固定状態を検討し、完全固定に近い状態であることを確認している。

実験では水平荷重を交番載荷しているが、初めに引張力を載荷していることによりこれを正載荷とし、圧縮力を負載荷とした。なお、橋脚基部の軸方向鉄筋が降伏するまでは以下のように載荷を行った。最初の正載荷において引張側鉄筋の歪が 500μ になるまで載荷し、次に負載荷において反対側の鉄筋が 500μ になるまで載荷する。以後、この繰り返しを鉄筋歪が 1000μ 、 1300μ 、 1500μ の各レベルに対し

表 1 試験体の一覧

試験体の名称	補強材料	段落し
N-0	無補強	無し
N-1/3		$h = H \times 1/3 = 50 \text{ cm}$
A-1/3	アラミド繊維	$h = H \times 1/3 = 50 \text{ cm}$
C-1/3	炭素繊維	$h = H \times 1/3 = 50 \text{ cm}$

表 2 FRP テープの材料特性

補強材 (37.5 mm 幅)	弾性係数 (kgf/mm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	1 層の厚さ (mm)	巻き付け層数	$E \times A$ (tf)	引張耐力 (tf)
炭素テープ	23,500	50,000	0.165	4 層	581.6	12.4
アラミドテープ	11,100	29,000	0.306	2 層	254.7	6.7

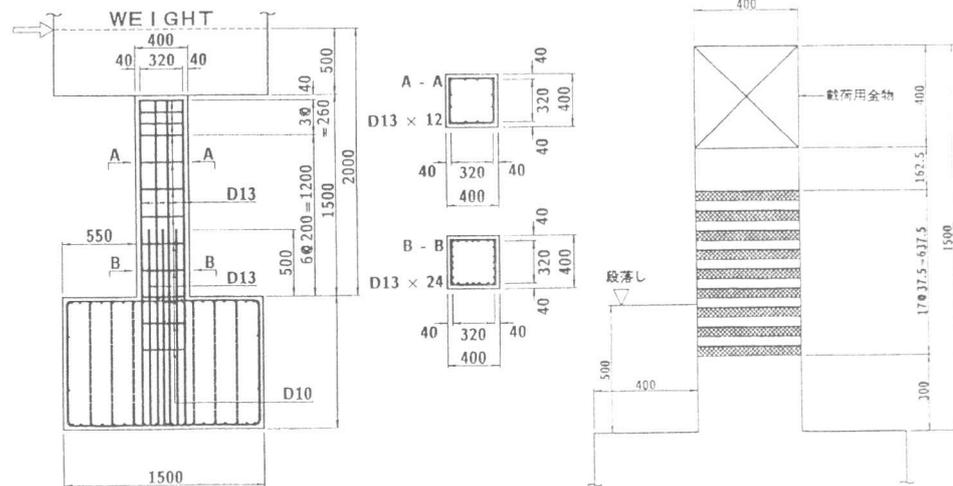


図 1 試験体寸法及び配筋図 (mm)

図 2 補強状況図 (mm)

て行う。相対する鉄筋歪が 1500μ になった時点で軸方向鉄筋が降伏したものとみなし、正・負載荷を平均して橋脚基部の降伏荷重 (P_y)、降伏変位 (δ_y) を決定した。このような載荷方法は、正・負載荷における変形状態をできるだけ同程度にするように配慮したためである。その後、 δ_y 、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ … の各変位段階に対して正負 5 回の交番載荷を行った。なお、載荷は荷重が P_y を下回る程度に減少するまで行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重-変位関係

図-3~6 に各試験体の荷重と載荷点の変位の関係を示す。図-3 より、段落しない無補強の試験体の P_y は正・負載荷時を平均すると 7.5 tf 程度であり、 δ_y は 24 mm 程度であることが分かる。荷重は $2\delta_y$ で P_y の 1.3 倍程度を示した後、 $3\delta_y$ 、 $4\delta_y$ と繰返し載荷が進むにつれて低下し、 $4\delta_y$ の 3 回目正載荷時に基部コンクリートの圧縮破壊が顕著となり P_y を下回る荷重レベルになった。なお、最大変位 (δ_u) は 97 mm 程度である。

図-4 に基部から 1/3 以上の範囲で段落しを行った無補強の試験体の荷重-変位関係を示す。 P_y は約 7.0 tf、 δ_y は約 22 mm であり、ほぼ N-0 と同程度であった。また、段落し部の鉄筋もほぼ同荷重で降伏した。 $2\delta_y$ では N-0 と同様に荷重が増加しているが、その増加割合は N-0 に比べて小さい。 $3\delta_y$ の一回目の正・負載荷における荷重は $2\delta_y$ の一回目を若干下回る程度であったが、 $3\delta_y$ で繰返しを行うにつれて荷重は大きく低下し、 $3\delta_y$ の 4 回目正載荷において段落し部のコンクリートが剝落し、鉄筋が座屈して P_y を下回る荷重レベルになった。 δ_u は 66 mm 程度であり、N-0 の 68% 程度と小さくなっている。

以上を要約すと、N-1/3 は N-0 に比べて最大耐力 (P_u) が 83% 程度、最大変形量 (δ_u) が 68% 程度であり、N-0 が $4\delta_y$ 3 回目で耐力を失ったのに対して $3\delta_y$ で耐力を失うなど、段落しない試験体に比べて靱性能が低い。

図-5 に基部から 1/3 で段落しを行い、アラミドテープで補強した試験体の荷重-変位関係を示す。 P_y 、 δ_y は各々 7.6 tf、19 mm 程度であり、N-1/3 と比べて P_y は 10% 程度増加し、 δ_y は 15% 程度

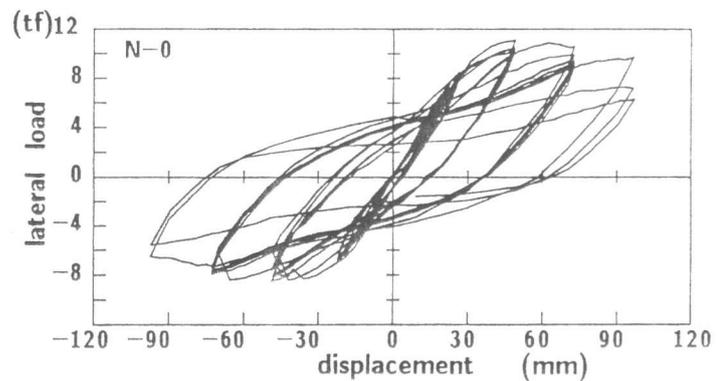


図-3 N-0 試験体の荷重-変位曲線

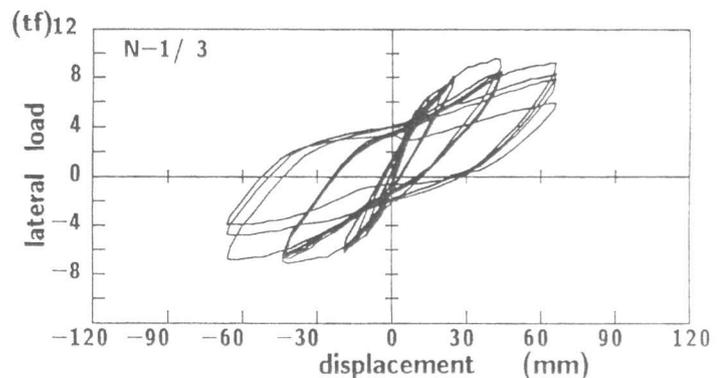


図-4 N-1/3 試験体の荷重-変位曲線

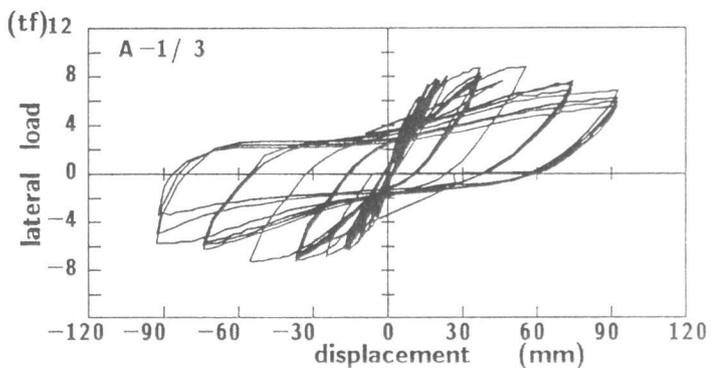


図-5 A-1/3 試験体の荷重-変位曲線

減少している。2 δy で荷重は増加し最大となっているが、荷重の増加量は N - 1/3 よりも少なく 0.4 tf 程度であった。その後、載荷振幅の増加にともない荷重は徐々に低下するが、一方で変形は増大して 5 δy の 4 回目正載荷で段落し部のテープ間のコンクリートが剥落し、鉄筋が座屈して P_y を下回る荷重レベルとなった。終局時の変形量 (δu) は N - 1/3 の 1.37 倍程度 (90 mm) である。なお、終局状態でもアラミドテープに損傷はみられなかった。

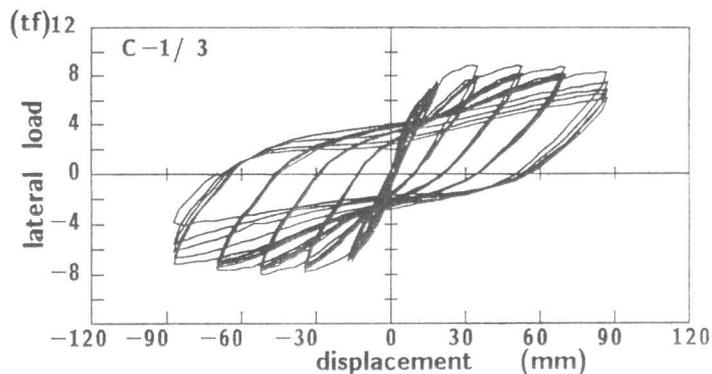


図-6 C-1/3 試験体の荷重-変位曲線

図-6 に、基部から 1/3 の高さで段落しを行い、炭素繊維で補強した試験体の荷重-変位関係を示す。 P_y は約 7.3 tf、 δy は 17.4 mm であり、A - 1/3 とほぼ同程度であった。2 δy で最大耐力 (P_u) を示したが、 P_u と P_y の差は A - 1/3 よりも大きく約 1.2 tf であった。A - 1/3 と異なり、載荷振幅が大きくなっても荷重レベルはほとんど低下せず、5 δy の 5 回目負載荷で段落し部の炭素テープのうち一段のコーナー部において部分的に亀裂が生じて急激に耐力の低下を示した。なお、最大変位量 (δu) は 90 mm 程度であり A - 1/3 と同程度であった。

以上の結果から、FRP テープ巻き付けの効果を要約すると、 P_y 、 P_u は三者でほぼ同様であり、FRP テープの巻き付けによる段落し部の曲げ耐力の増加はみられない。しかし、 δy は無補強に比べて 80 ~ 84 % 程度と小さくなっている。これは、巻き付けによって剛性が若干増加したためと考えられる。 δu は、無補強に比べて FRP 補強した方が 40 % 程度大きくなり、FRP 補強によって変形性能が大幅に向上することが分かる。A - 1/3 と C - 1/3 を比較すると、載荷振幅や最大耐力は C - 1/3 の方が若干大きいものの大差はない。一方、補強したテープの $E \times A$ や引張耐力は C - 1/3 の方が A - 1/3 の 2 倍程度大きいものの、炭素テープはコーナー部の破断によって耐力低下が生じているため留意する必要がある。

図-7 に荷重-変位関係の包絡線及び無補強に対する計算結果を示す。包絡線は、各載荷振幅の一回目の荷重-変位関係を用いて示した。図より、N - 1/3 は荷重がほぼ一定となる領域が A、C - 1/3 に比べて小さく、靱性の乏しいことが分かる。一方、A、C - 1/3 では荷重がほぼ一定を示す領域の広がりと同程度であるが、C - 1/3 は A - 1/3 よりも若干荷重が安定している。なお、計算値は断面分割法により、実測値のコンクリート

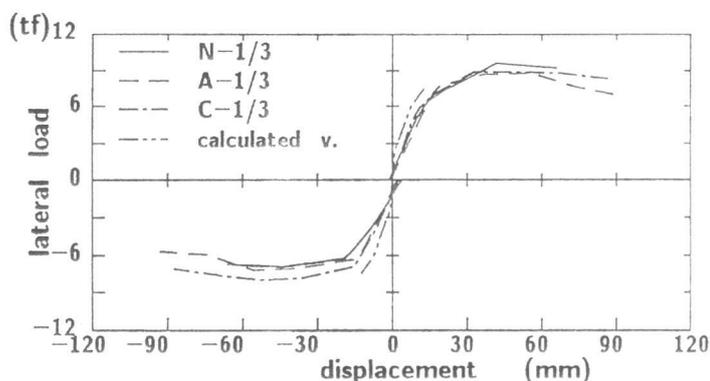


図-7 荷重-変位関係の包絡線及び計算値

の強度及び鉄筋の規格値を用いて、解がほぼ一定して得られる分割数以上として、5 mm 厚の 80 分割で行っている。変形量は段落し部で基部の配筋による曲率と段落しをした配筋による曲率を考慮して算出している。図より、 P_y 、 P_u の計算値は平均した正・負載荷の実測荷重とほぼ対応していることが分かる。一方、終局変位の計算値は実測変位の 20 % 程度である。これは、変位量の 7 割程度を占める鉄筋の抜け出しの影響 [1] を計算では考慮していないためと考えられる。

3.2 靱性能の検討

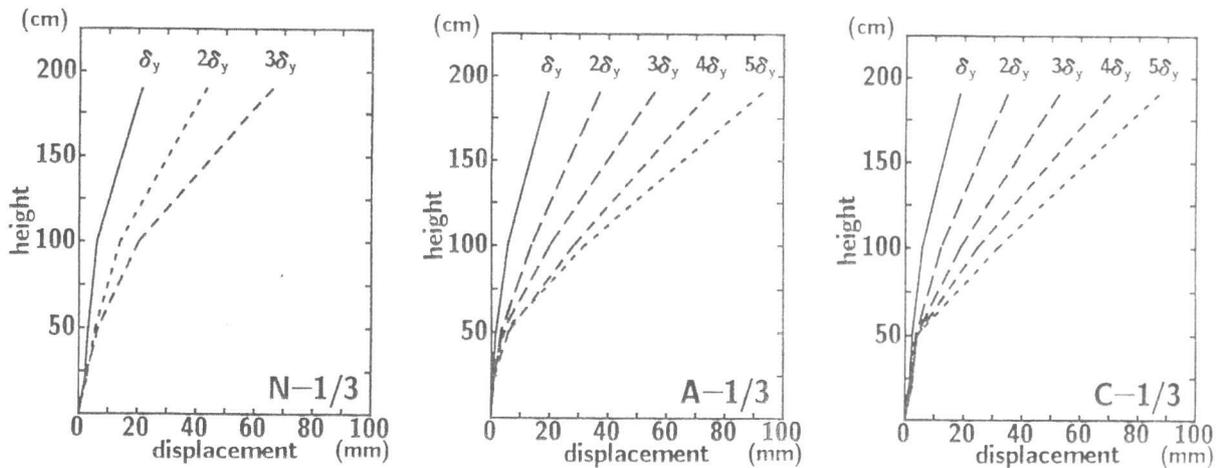
表一 3 に実験結果を整理している。水平交番載荷は、正・負載荷で荷重-変位関係が同様になるように配慮して行ったが、 P_y 、 P_u ともに正載荷の方が大きくなっている。なお、表中には δ_u を δ_y で除した値を終局塑性率と定義して示した。これより、N - 1/3 が 3.0 と最も終局

表一 3 実験結果

試験体の名称	変位 (mm)		耐力 (tf)						終局塑性率 δ_u/δ_y
	δ_y	δ_u	P_y			P_u			
			正	負	平均	正	負	平均	
N-0	24.2	96.8	8.2	6.8	7.5	11.0	8.5	9.8	4.0
N-1/3	21.9	65.7	8.0	6.0	7.0	9.2	7.0	8.1	3.0
A-1/3	18.5	90.0	8.9	6.2	7.6	8.8	7.2	8.0	4.9
C-1/3	17.4	90.0	7.5	7.0	7.3	9.0	8.0	8.5	5.2

塑性率が小さく、これを補強した A - 1/3、C - 1/3 では 5 程度と段落しない試験体以上に大きくなり、FRP テープの巻き付けによって靱性が大きく改善されていることが分かる。

図一 8 に N、A、C - 1/3 の各載荷振幅における橋脚高さ方向の変位分布 (変形モード) を示した。なお、変位は正載荷の一回目における値である。これより、N - 1/3 が比較的なだらかな変形状態を示しているのに対して、A - 1/3、C - 1/3 はほぼ段落し部 ($h = 50$ cm) を起点として変形しているため、橋脚天端の変位は主として段落し部の変形角 (回転) に影響されていることが分かる。このため、変形モードをよりなだらかにするためには、FRP テープを縦張りするなどによって段落し部の曲げ耐力を向上させる必要があるものと考えられる。



図一 8 変位分布

図一 9 に試験体の塑性化の程度を示す一つの尺度として N、A、C - 1/3 の残留変位率を示した。残留変位率は、各載荷振幅の正載荷一回目における除荷時の残留変位量を最大変位 δ_u で除した比率である。これから、 $3\delta_y$ までは N - 1/3 の残留変位率が他に比べて 2 倍近く大きいことが分かる。一方、A - 1/3 と C - 1/3 はほぼ同様な傾向を示し、 $2\delta_y$ から $5\delta_y$ までほぼ直線的に変位率が増加している。しかしながら、載荷振幅が大きくなるに従い A - 1/3 の残留変位率が C - 1/3 よりも徐々に大きくなっている。図一 10 に文献 [1] を参考にして求めた N、A、C - 1/3 の等価剛性を示した。用いた荷重-変位関係は各載荷振幅の正・負載荷一回目のものである。これより、等価剛性は載荷振幅の増加に対応して指数関数的に減少していることが分かる。無補強のものは δ_y で 350 tf/m 程度の剛性が終局時には 1/3 程度に減少している。一方、A - 1/3 の δ_y における等価剛性は 400 tf/m 程度であり、N - 1/3 よりも 50 tf/m 程度大きい。終局時には δ_y の剛性の 1/6 程度に低下している。C - 1/3 は A - 1/3 とほぼ同様であり、

終局時の等価剛性は δ_y における値の 1/5 程度である。図-11 に、等価剛性算定時と同じ荷重-変位関係より求めた等価粘性減衰定数を示す。なお算出方法は文献 [1] と同様とした。全試験体ともに $2\delta_y$ で勾配が急変し、それ以後の載荷振幅では減衰定数が直線的に増加している。N-1/3 では δ_y で 8% 程度のものが終局時には 20% 程度になっている。一方、A-1/3 では 6.5% が 26% 程度となり、 δ_y における減衰定数の 4 倍程度を示している。C-1/3 は A-1/3 と同様な傾向を示し、終局における減衰定数は 26.5% であり、 δ_y における 5.3% の約 5 倍に増加している。

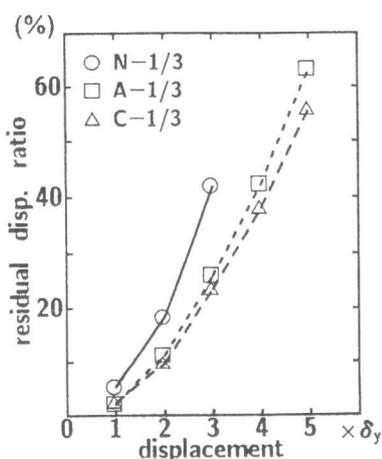


図-9 残留変位率

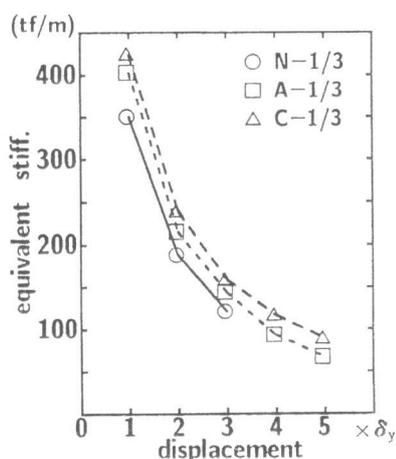


図-10 等価剛性

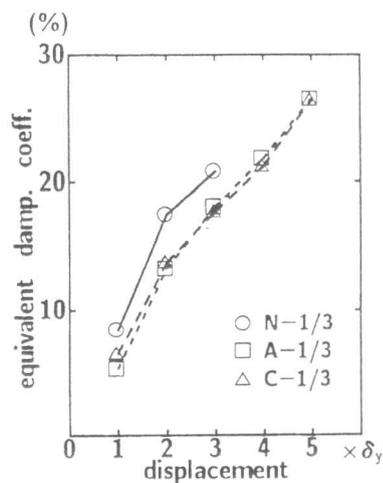


図-11 等価粘性減衰定数

4. まとめ

RC 橋脚の補強工法としてアラミドテープ巻き付け工法を提案し、実物橋脚の 1/3 ~ 1/5 模型を用いて水平交番載荷実験によって靱性能を検討した。本研究の範囲内で明らかになったことを要約すると、

- (1) 段落しによって靱性能は大きく低下するため、十分に留意する必要がある。
- (2) 段落し部に FRP テープを巻き付けることで変形性能は増大し、靱性が大幅に向上する。
- (3) 炭素繊維テープで補強した場合には、アラミドテープと異なりコーナー部の破断によって破壊が激激に進行する可能性があり、留意する必要がある。

今後は、段落し部にテープを縦張りすること等で曲げ耐力を向上させ、その上にテープを巻き付けることでせん断破壊を防止した場合の靱性能を検討する予定である。なお、本研究を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学科の岸徳光助教授はじめ大学院生の大山高輝君、亀石暁君ほかの構造力学講座の皆様にご多大なる御支援を頂きました。また、FRP テープの巻き付け施工はショーボンド建設(株)の皆様にご支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 太田実：繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第 292 号、pp.65 ~ 74、1979.12