

段落しを有する鉄筋コンクリート柱の破壊過程と アラミド繊維巻き立てによる補強効果の検討

FAILURE MECHANISMS OF RC PIERS WITH TERMINATION OF REINFORCEMENT AT MID-HEIGHT AND RETROFITTING BY ALAMID SHEET

山田 真幸*、三木 千壽**、館石和雄***、権藤健二****

Masaki YAMADA, Chitoshi MIKI, Kazuo TATEISHI and Kenji GONDOU

*工修 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

**工博 東京工業大学教授 工学部 土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

***工博 東京大学助教授 生産技術研究所第 5 部 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

**** 住友建設(株) 設計部 (〒160 東京都新宿区荒木町 13-4)

In this paper, ductility of RC bridge pier with termination of reinforcement at mid-height was studied. To discuss the structural details to prevent shearing failure, reversed cyclic horizontal tests were carried out with some types of specimens. The specimens have different details, lateral tie's interval, shape of cross-section, thickness of cover concrete and retrofitting by alamid sheet. As results, each specimens had distinctive failure processes. Especially the cracks generated at the termination of reinforcement became diagonal shearing cracks. RC pier confined by alamid sheet increases its ductility and round cross-section is possible to get much confinement effect than square cross-section.

Keywords: RC bridge pier, confining effect, cross-sectional shape, alarmed sheet

1. はじめに

阪神淡路大震災では、鉄筋コンクリート橋脚の倒壊あるいは崩壊が原因で落橋を生じた橋梁の多くでせん断破壊の発生が認められた¹⁾。また、1980年以前の鉄筋コンクリート橋脚の設計基準では、現在の耐震設計レベルではせん断耐力が不十分なものがあり²⁾、特に橋脚基部より上方に設けられる主鉄筋段落し部での損傷が目立った。鉄筋コンクリート橋脚の曲げ破壊、せん断破壊は異なった機構で発生し特徴的な破壊過程をとる。曲げ破壊を生じる場合には比較的大きな靱性が期待できるが、せん断破壊を生じる場合には急激な水平方向耐力の低下を伴い危険である。そのため、現在の鉄筋コンクリート橋の耐震設計法はせん断破壊を防止する事により靱性を確保し、落橋等の致命的な被害を防止するという考え方に基いている³⁾。本研究では鉄筋コンクリート橋脚を対象として、靱性の向上および段落し部でのせん断破壊の防止を目的とし、帯鉄筋、かぶりコンクリート、アラミド繊維巻き立て補強の靱性改善効果を検討した。そのため、断面形状、補強シートの有無、かぶりコンクリートの有無、帯鉄筋間隔等構造ディテールの異なる鉄筋コンクリート橋脚模型を作成し、正負交番載荷実験を行い破壊に至るまでの挙動を観察した。アラミド繊維巻き立て補強については、既存の鉄筋コンクリート橋脚の補強

を目的としている。アラミド繊維シートは非常に大きな引張強度を有する繊維でできた布であり、カーボン繊維シート、鋼板等とは異なり軽量かつ非常にしなやかで施工しやすい特徴を持つ。また、補強目的に応じて補強量の増減を行う事ができ経済的である⁴⁾。しかし、しなやかな布状であるため、せん断破壊の防止効果として期待できるのは引張強度による拘束及びせん断補強のみで、面外方向の曲げ剛性は期待できない。

2. 実験の概要

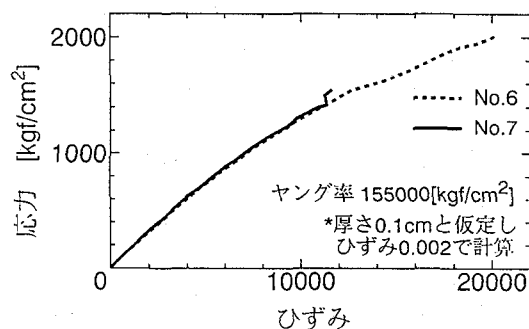
2.1 供試体

正方形断面及び円形断面を持つ7体の供試体を用いた。諸元を表-1に示す。基部から荷重載荷点までの高さは1240mm、断面積はかぶりコンクリートを有していないNo.5供試体を除いて900cm²である。せん断支間比は円柱供試体で4.1、角柱供試体で4.8である。主鉄筋は円柱角柱共に16本で、かぶりコンクリート厚は40mmである。配筋図は損傷過程とともに示す。No.7は円柱供試体No.1に200g/m²のアラミド繊維シートをエポキシ樹脂接着剤で巻き立てる補強を施したものである。No.6は角柱供試体No.2に、同様に80g/m²のアラミド繊維シートを3重に補強したものである。アラミド繊維シートの材料試験結果を図-1に示す。

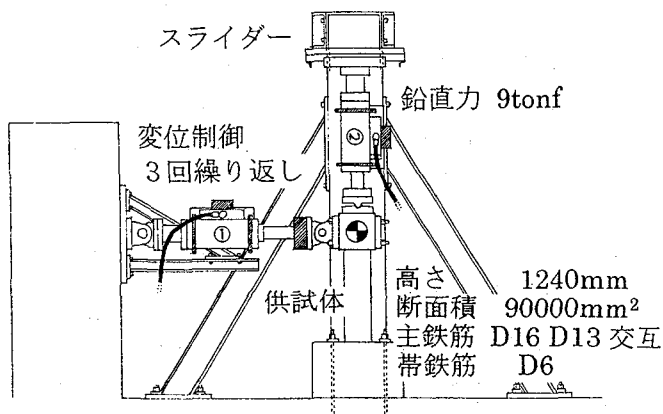
表－１ 供試体の諸元

供試体名	断面形状	断面寸法 mm	帯鉄筋 間隔 mm	段落し	主鉄筋比* %	帯鉄筋比 %	コンクリート強 度kgf/cm ²	備考
No. 1	円	φ 340	250	有	2.89 (1.13)	0.07	263	
No. 2	角	300×300	250	有	2.89 (1.13)	0.08	394	
No. 3	円	φ 340	100	有	2.89 (1.13)	0.19	318	
No. 4	角	300×300	100	有	2.25 (1.13)	0.21	472	
No. 5	角	300×300	100	無	4.16	0.25	395	鉄筋かぶり無し
No. 6	角	300×300	250	有	2.89 (1.13)	0.08	395	アラミド巻立補強
No. 7	円	φ 340	250	有	2.89 (1.13)	0.07	340	アラミド巻立補強

* () 段落し部



図－１ アラミド繊維シート引張試験結果



図－２ 載荷装置及び供試体

2. 2 実験装置

載荷装置はデジタル制御方式の2台の油圧ジャッキを用いた。載荷装置及び供試体を図－2に示す。一つは反力床から水平方向に、もう一つは固定されたフレームから鉛直方向に取り付けられている。鉛直方向ジャッキ基部には滑らかに動くスライダーが取り付けられており、一般的な鉄筋コンクリート橋脚の死荷重分に相当する鉛直方向軸応力10 kgf/cm²を供試体に加えながら載荷実験を行った。

2. 3 載荷方法

実験方法は一定振幅変位漸増方式正負交番繰返し載荷実験とした。載荷パターンを図－3に示す。地震動を模した載荷パターンであり、水平方向ジャッキで中立軸を中心に一定変位振幅で3回載荷を繰返し、変位を増加させた。この際、基準となる降伏変位は円柱供試体、角柱供試体ともに基部最外縁の主鉄筋が降伏した時とし、歪みゲージの値をモニターしながら載荷を行い決定した。

3 実験結果と考察

3. 1 実験結果一覧

表－2に正負交番載荷実験で得られた各供試体の降伏変位及び降伏荷重、靱性率、主鉄筋の座屈確認状態等を示す。図－4～10に各供試体の荷重変位曲線を、荷重変位曲線の包絡線の比較を図11(a)～(e)に示す。

配筋図及び損傷過程を図－12～16に示す。靱性率は各変位振幅での荷重が降伏荷重以下となった時を終局とし、正負両側で求めたものを平均した。また、ほとんどの供試体でかぶりコンクリートの剥落後に主鉄筋がジャッキの動きに伴い側方に大きくせり出す現象が観察され、このときを主鉄筋の座屈時とした。

3. 2 帯鉄筋の拘束効果

段落しを有し補強を行っていない供試体 No. 1、No. 2 はともに帯鉄筋間隔が250 mmであり、No. 1 は円形断面、No. 2 は正方形断面である。両供試体とも段落し部でせん断破壊を生じた。損傷過程、図－12、13からは共に段落し部にせん断破壊特有の斜め引張りひび割れが発生し、せん断変形を生じた事がわかる。ひび割れの成長では、載荷初期に発生したひび割れが斜め引張りひび割れに成長して破壊面を形成し、また、破壊面となるひび割れはかなり早い時期に発生する傾向がある。4δyの損傷を比較すると角型供試体のほうが若干広範囲でかぶりコンクリートの剥離が生じた。主鉄筋の座屈は円柱 No. 1 で2δy、角柱 No. 2 では3δyで発生し、ほぼ同時に急激な耐力の減少を生じている。荷重変位曲線、図－4、5からは円柱で2δy、角柱では3δyで急激な耐力の低下が生じていることがわかる。主鉄筋の包絡線を比較すると(図－11(a)参照)靱性に大きな差は無く、せん断破壊の防止において断面形状による目立った差異

表-2 実験結果一覧

供試体名	断面形状	帯鉄筋間隔 mm	主鉄筋降伏変位 δy mm	主鉄筋降伏荷重 tonf	最大耐力 tonf	靱性率	主鉄筋座屈の確認	備考
No. 1	円	250	13.5	7.3	7.6	1.7	$2\delta y$	
No. 2	角	250	12.6	7.6	7.7	1.5	$3\delta y$	
No. 3	円	100	10.5	6.7	8.0	3.4	$4\delta y$	
No. 4	角	100	8.9	6.1	7.1	5.7	$6\delta y$	
No. 5	角	100	10.4	5.2	6.4	5.4	$4\delta y$	鉄筋かぶり無し
No. 6	角	250	10.4	8.8	10.0	5.6	不明	アラミド巻立補強
No. 7	円	250	10.0	6.6	10.0	9.5以上	座屈せず	アラミド巻立補強

*主鉄筋降伏荷重、最大耐力、靱性率は正負両側の平均値

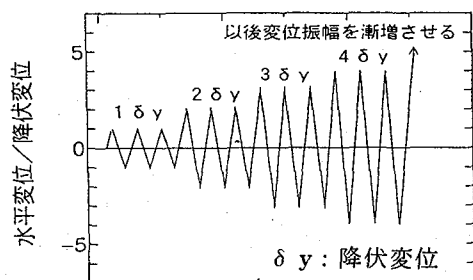


図-3 载荷パターン

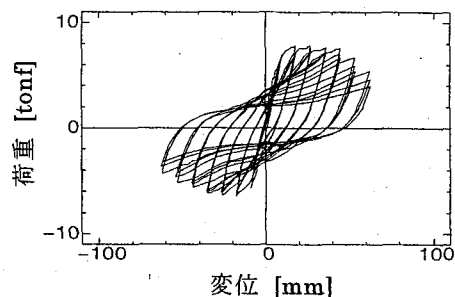


図-7 No. 4 供試体 荷重変位曲線

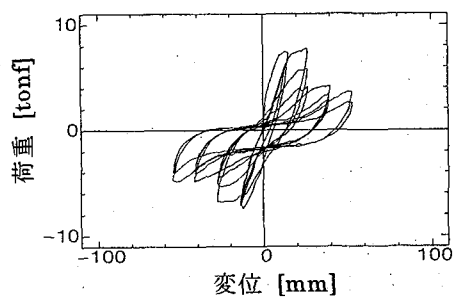


図-4 No. 1 供試体 荷重変位曲線

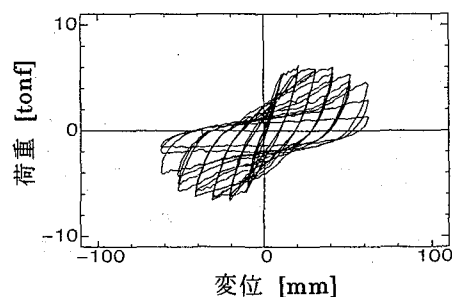


図-8 No. 5 供試体 荷重変位曲線

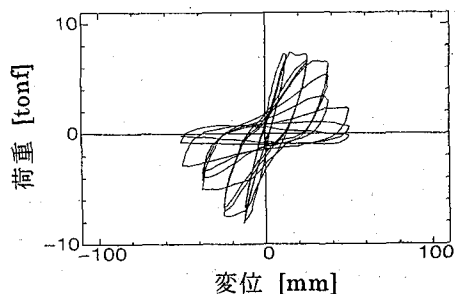


図-5 No. 2 供試体 荷重変位曲線

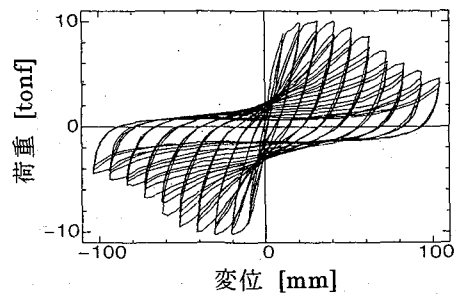


図-9 No. 6 供試体 荷重変位曲線

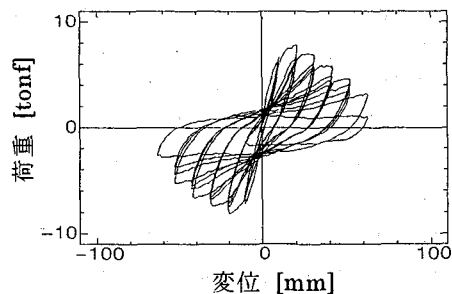


図-6 No. 3 供試体 荷重変位曲線

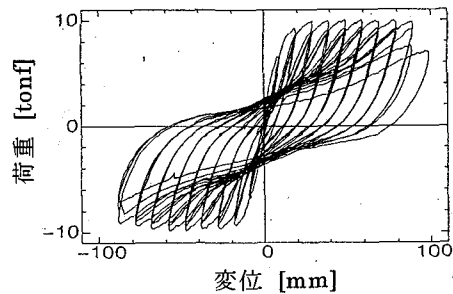
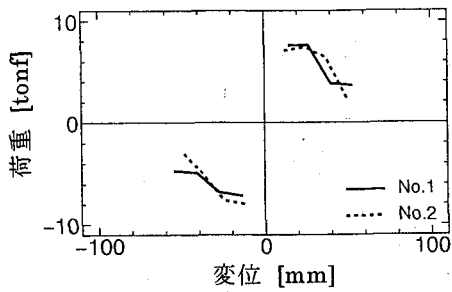
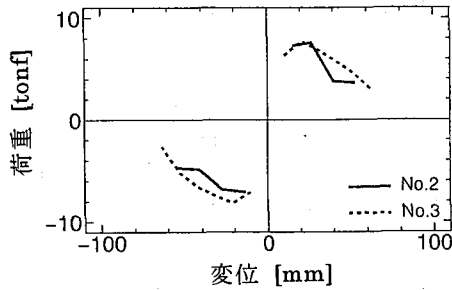


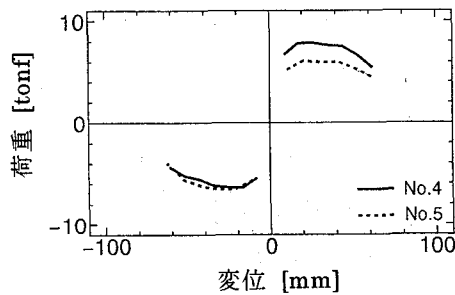
図-10 No. 7 供試体 荷重変位曲線



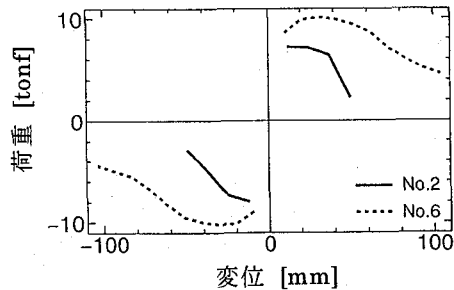
(a) 断面形状の影響



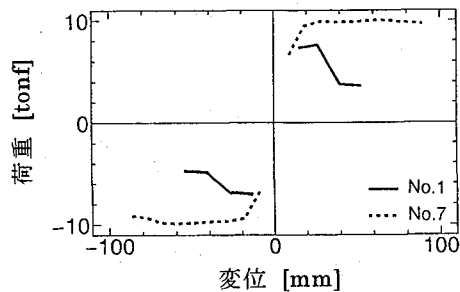
(b) 帯鉄筋間隔の影響



(c) かぶりコンクリートの影響



(d) アラミド繊維巻き立て補強 (角柱)



(e) アラミド繊維巻き立て補強 (円柱)

図-1.11 荷重変位曲線の包絡線

は認められない。

帯鉄筋間隔がより狭い100mmの段落しを有する円形断面の供試体 No.3 では破壊モードが変わり、段落し部を中心とした曲げ変形が観察され、曲げ破壊を生じた。荷重変位曲線、図-6では比較的ゆるやかな耐力の減少が観察され、荷重変位曲線の包絡線の比較、図-1.11(b)からは靱性が向上していることがわかる。

損傷過程、図-1.4において、ひび割れの成長パターンで特に注目すべきことは、曲げ破壊を生じたにも関わらず段落し部から発生したひび割れが、下方に斜めひび割れ状に成長していることである。せん断破壊を生じた帯鉄筋間隔が250mmのNo.1供試体の損傷過程(図-1.2参照)と比較するとひび割れパターンは非常に似ており、せん断変形が生じている事がわかる。主な変形が生じた供試体の中間部は、発生する曲げ応力が供試体基部で発生する曲げ応力より小さく、相対的にせん断応力が卓越する応力場である。また、コンクリートの引張強度は非常に小さく、発生するひび割れは供試体の変形に非常に敏感である。これらの理由により段落し部で発生したひび割れは斜め引張りひび割れに成長したと考える。段落し部からひび割れが発生する場合、帯鉄筋間隔、破壊モードに関らずせん断変形が生じ易く、段落し部は拘束等によるせん断破壊防止策がより必要であると考えられる。

3.3 かぶりコンクリートの拘束効果

帯鉄筋間隔100mmの角型供試体No.4とはほぼ同一の諸元を持ち、帯鉄筋の表面までしかコンクリートを持たない供試体No.5を用い、かぶりコンクリートの拘束効果を検討した。両供試体は共に基部で大きな損傷を生じ、ここでは段落しの有無の破壊性状への影響は無視できる。

荷重変位曲線の包絡線の比較、図-1.11(c)ではNo.5の方が耐力は小さいものの大きな差はあらわれない。しかし、破壊モードに関しては、No.4は供試体基部では曲げ破壊を生じたのに対し、かぶりコンクリートを持たないNo.5供試体では曲げ破壊からせん断破壊への破壊モードの移行が生じ、かぶりコンクリートの有無の影響がみられた。No.4損傷過程の観察からは、載荷の初期に高さ方向全域に一定間隔でひび割れが発生した後、基部のひび割れの成長が卓越して損傷が進行し、破壊に至っている事がわかる(図-1.5参照)。鉄筋コンクリートの最大曲げひび割れ間隔はかぶりコンクリート厚さの関数である事が報告されている^{5) 6)}が、本研究で扱ったかぶり厚さ40mmでは明らかにかぶり厚さに起因すると思われるひび割れは見られなかった。No.4のひび割れの発生位置は帯鉄筋の位置とほぼ一致している。この原因の一つとして、鉄筋とコンクリートの純付着強度が非常に小さいことがあげられる。また、水平方向に配置された鉄筋では打設時に鉄筋下面にブリージングにより水膜や空隙が生じるにより付着強度が1/2から1/4程度に低下することも原因であると考えられる⁷⁾。このため、

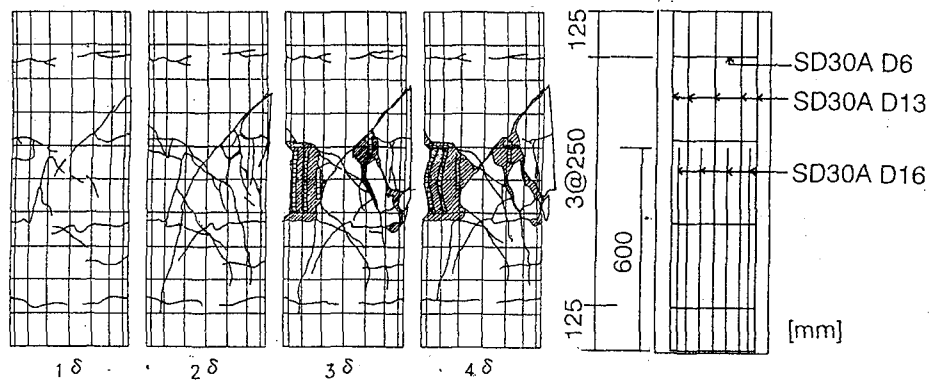


図-1 2 No.1 供試体 配筋図及び損傷過程 (円形断面 帯鉄筋間隔 250mm)

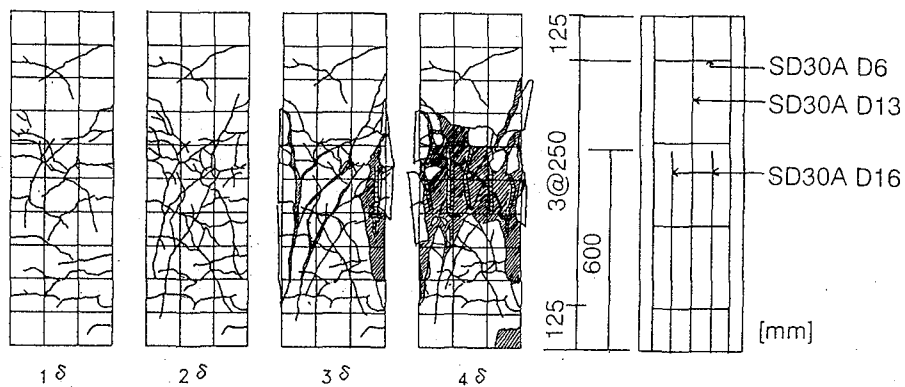


図-1 3 No.2 供試体 配筋図及び損傷過程 (正方形断面 帯鉄筋間隔 250mm)

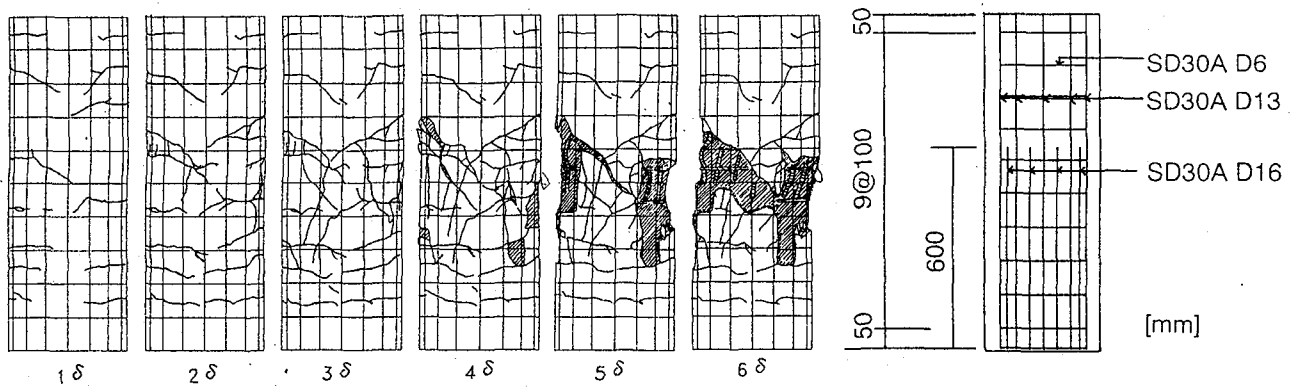


図-1 4 No.3 供試体 配筋図及び損傷過程 (円形断面 帯鉄筋間隔 100mm)

帯鉄筋がある位置でコンクリートの引張強度が相対的に小さくなり、帯鉄筋位置でひび割れが発生したと考える。

一方、かぶりコンクリートを持たない角型供試体No. 5ではひび割れパターンは非常に特徴的で、比較的短いひび割れが比較的密に発生している(図-1 6 参照)。これはかぶりコンクリートが無いことから帯鉄筋の有無による供試体表面の強度差が無く、帯鉄筋が発生するひび割れの位置を決定するものではないためと思われる。そのために供試体は滑らかな曲率で変形し、短いひび割

れが比較的密に発生したと考える。載荷初期は基部の曲げ変形が卓越していたが、損傷が進行するに伴い短いひび割れが繋がるようにしてせん断破壊面を形成した。かぶりコンクリートが無い事による載荷初期に生じるひび割れのパターンは破壊モードに影響が大きく、せん断破壊が生じ易かったと考える。また、供試体の基部は5δy付近で表面のコンクリートが剥落しはじめたが、この後は鉄筋の付着が減少して一種の無筋コンクリートのようになり、せん断破壊が生じ易くなったと考える。かぶり

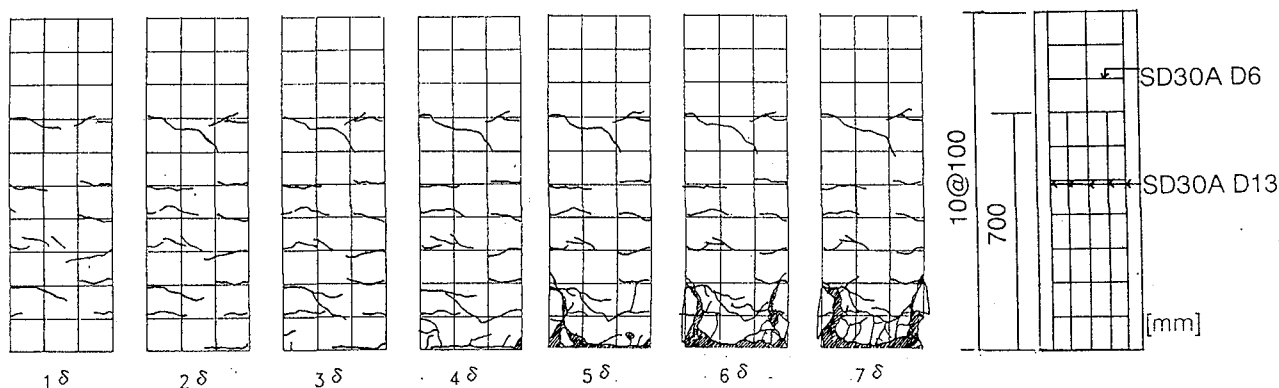


図-15 No.4 供試体 配筋図及び損傷過程 (正方形断面 帯鉄筋間隔 100mm)

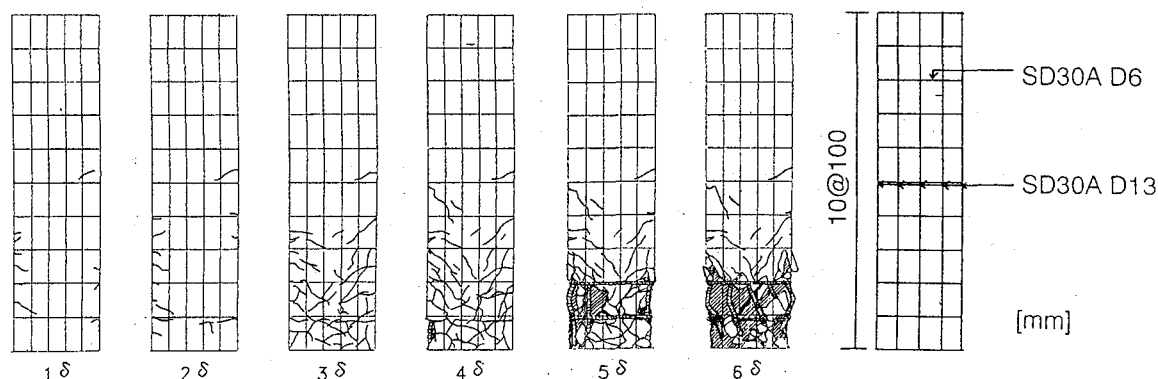


図-16 No.5 供試体 配筋図及び損傷過程 (正方形断面 帯鉄筋間隔 100mm かぶりコンクリート無し)

コンクリートの拘束効果に関して須田ら⁸⁾は、実験より主鉄筋の座屈の抑制にかぶりコンクリートが大きく貢献している事を示している。本研究で主鉄筋の座屈に着目すると、No.4ではおよそ $5\delta_y$ から基部のかぶりコンクリートが剥離し始め、主鉄筋の座屈は $6\delta_y$ で発生した。それに対し、No.5では主鉄筋の座屈は $4\delta_y$ で確認され、No.4と比較すると $2\delta_y$ ほど早く生じている。主鉄筋の座屈に関しては、かぶりコンクリートの拘束効果が若干認められる。

3.4 アラミド繊維シート巻き立て補強

No.6 供試体は先に示した段落しを有する帯鉄筋間隔 250mm、角型供試体 No.2 にアラミド繊維巻き立て補強を行ったものである。アラミド繊維巻き立て補強により靱性率は 1.5 から 5.6 に改善された (図-9 参照)。しかしながら、荷重変位曲線の包絡線の比較、図-11 (d) からは補強の無いものがせん断破壊を生じた $4\delta_y$ 付近から耐力が低下している事がわかる。このときの補強シートの表面を図-17 に示す。斜め引張りひ割れが生じており、内部でせん断破壊が生じたと考える。また、荷重の終盤には基部の補強シートがはらみ出す現象が観察された (図-18)。

No.7 供試体は円形断面、帯鉄筋間隔 250mm の供

試体 No.2 に補強を行ったものであり、装置の限界により荷重を中止した。荷重変位曲線、図-10 では変位が増大してもほぼ最大水平方向耐力を保ち、包絡線の比較、図-11 (e) では靱性率が 1.7 から 9.5 以上へ大幅に向上したことがわかる。荷重中止直前に基部の補強シートに亀裂が入り (図-19)、若干の水平耐力の低下が見られたが、せん断変形は観察されなかった。

両供試体とも実験終了後補強シートを撤去したが、補強シートとコンクリートとの付着は人の手で少しづつ剥がせる程度であった。角型供試体 No.6 では基部で主鉄筋の座屈が生じており、角の主鉄筋が内側に面中央部の主鉄筋は外側に変形していた (図-20)。それに対して丸型供試体 No.7 では主鉄筋の座屈は見られなかった (図-21)。断面形状の違いによる補強効果の違いについては、角型断面より円形断面に拘束を行う方が大きな靱性の改善効果が得られた。

4. 鉄筋コンクリート柱の拘束効果についての考察

各供試体の破壊過程を観察すると、巻き立て補強のない場合、曲げ破壊、せん断破壊いずれの破壊モードを生じていても最終的な状態では鉄筋との付着を失ったコアコンクリートが帯鉄筋の間からこぼれだし水平方向耐力を失った。荷重時の供試体の高さを観察すると荷重初期は

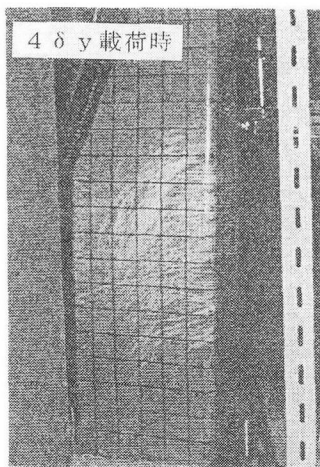


図-17 No.6 供試体
アラミド繊維補強表面

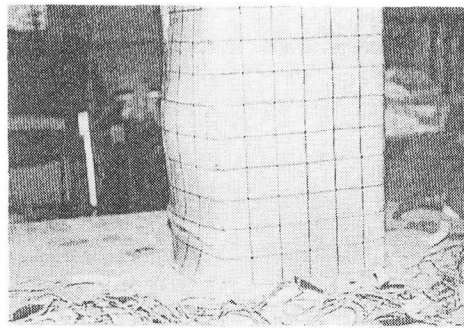


図-18 No.6 供試体
補強シートのはらみだし変形

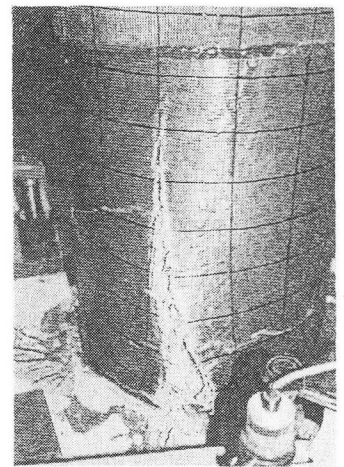


図-19 No.7 供試体
補強シートに生じた亀裂

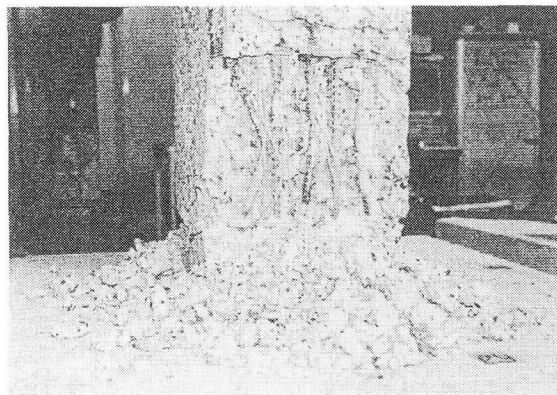


図-20 No.6 供試体 補強シート撤去後

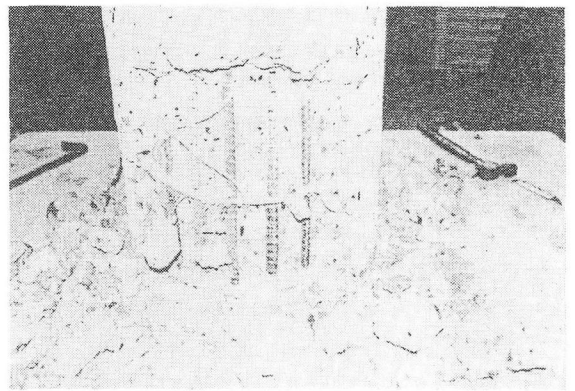


図-21 No.7 供試体 補強シート撤去後

徐々にその高さは増加し、ある状態以降供試体の高さが急激に減少する（図-22（a）、（b））。高さの増加の原因は交番載荷では曲げ変形の中立軸が移動し主鉄筋に伸びが生じるためと考える。またその際、損傷部のコアコンクリート組織の密度は低下していると考え。主鉄筋の基部からの抜け出しの影響も考えられるが、基部で破壊した供試体と段落し部で破壊した供試体との比較では大きな差は見られず抜け出しの影響は無視できる。

多くの供試体で急激な高さの減少が生じるとほぼ同時に主鉄筋の座屈現象が観察された。この高さの急激な減少の開始は、破壊されかつ密度の減少したコアコンクリート組織が圧縮力により崩壊し、コア外にこぼれ出す現象の始まりと考えられる。以降コンクリートは圧縮力を負担しなくなり、終局を迎えると考え。正負交番載荷実験において一般に観察される主鉄筋が大きく側方に變形する座屈現象は、主鉄筋の圧縮力耐荷機構の消失ではなく、コンクリートの圧縮力耐荷機構の消失に伴う現象であると考察する。鉄筋コンクリート柱を帯鉄筋等で周方向に拘束することはせん断補強筋としてせん断変形を

抑えることのほか、載荷の最終段階にはコアコンクリートの崩壊を防ぎ圧縮力耐荷機構を保つ効果があると考え。またこの圧縮力耐荷機構への補強効果は破壊過程の終盤にあらわれるので靱性に大きく影響する。

本研究でのアラミド繊維巻き立て補強は角柱、円柱共に帯鉄筋に比較して大きな靱性改善効果が見られた。アラミド繊維巻き立て補強を行った供試体の基部のコンクリートは実験終了時には角柱、円柱共に粉砕されていたが締め固められており、補強シートを撤去しても崩壊しなかった。鉄筋コンクリート柱をアラミド繊維シートで面状に拘束することにより、帯鉄筋ではコンクリートが崩壊し始める載荷領域でもコンクリートの圧縮力耐荷機構が保たれ、靱性改善に絶大な効果が得られたと考える。また、角型供試体 No.6 では補強シートがはらみ出す変形を生じた。正方形の角柱への補強は真円にまで変形する余地があり、崩壊したコアコンクリートがこぼれだして変形が生じたと考える。その断面積の増加は約1.27倍であり、変形が終わるまでアラミド繊維シートの圧縮力耐荷機構への補強効果が発揮されず、水平方向耐力

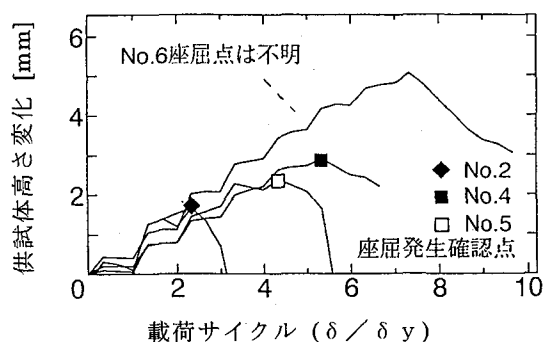


図-2 2 (a) 供試体の高さの変化 (角柱供試体)

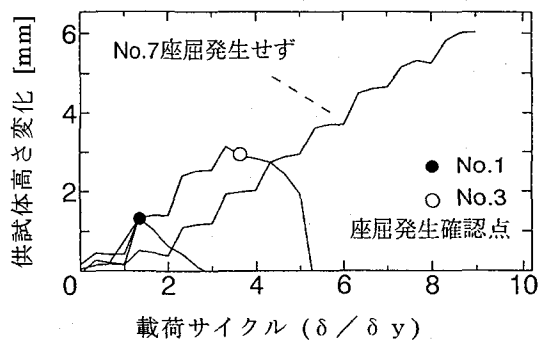


図-2 2 (b) 供試体の高さの変化 (円柱供試体)

が低下したものと考える。アラミド繊維のような剛性の低い素材で巻き立て補強を行う場合、角型断面柱では載荷終盤に補強シートのはらみ出し変形が生じ圧縮力耐力機構に対する補強効果が減少してしまう。

本研究では帯鉄筋の補強効果において断面形状による靱性率の顕著な差は見られなかった。既往の研究では、正負交番載荷により鉄筋コンクリート柱の段落し部の破壊性状を調査した山本ら⁹⁾は、靱性率に関して円形断面、正方形断面での大きな差異を見出していない。正負交番載荷ではコアコンクリートの損傷が著しく、帯鉄筋の様な線状のものでは断面形状の影響が表われるほどのコアコンクリートの崩壊を防ぐ効果は生じにくいと考える。

一方、星限ら¹⁰⁾は帯鉄筋拘束柱の圧縮試験の結果から、最大圧縮応力に関しては、正方形拘束の場合、円形拘束で得られる拘束効果の20%程度である事を示しており、円形に拘束を行った場合最大圧縮力は大きく増加するとしている。また、脆性的な破壊を防ぐには帯鉄筋の断面積を大きくするよりも設置間隔を密にするほうが有利であることを示している。この研究では単調圧縮であるために載荷に伴い供試体の高さは減少し、コアコンクリートの密度は増加する。コンクリートの損傷は正負交番載荷によるものと比べて少ないと考えられる。そのため帯鉄筋のような線状のものでも十分にコアコンクリートの拘束が可能であったと考えられる。

5. まとめ

鉄筋コンクリート橋脚模型を用いた正負交番載荷実験を行い、帯鉄筋、かぶりコンクリート、アラミド繊維巻き立て補強の拘束による靱性向上効果を検討した。本検討の結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 段落しを持つ鉄筋コンクリート柱は、段落し部で発生したひび割れが、破壊モード、帯鉄筋による拘束にあまり影響されずに斜めひび割れに成長し、せん断変形が生じ易い。
- 2) かぶりコンクリートによる拘束は認められるが、本研究において主鉄筋の座屈発生の遅延はかぶりコンクリートを持つ供試体と比較して2δy程度であった。しか

し、破壊モードへの影響は大きく、かぶりコンクリートが無い事により生じるクラックパターンはせん断破壊を招く可能性がある。

3) 帯鉄筋、アラミド繊維シート等による拘束はせん断変形を直接的に防止するだけではなく、破壊過程の終盤には崩壊したコンクリートをコアコンクリート内にとどめ、圧縮力耐力機構を保つ効果がある。

4) 靱性向上にはコンクリートをコア内にとどめておくことが重要である。面状に拘束することによりコンクリートが圧縮破壊した後も圧縮力耐力機構を保つことが可能で、帯鉄筋による拘束よりも効果的である。また、帯鉄筋による拘束でも帯鉄筋間隔を狭める事が靱性向上に効果的である。

参考文献

- 1) 土木学会：阪神大震災震害調査緊急報告会資料、1995
- 2) 村岡 甫・佐伯光昭・金津 努・鈴木基行・松本信之：コンクリート構造物の耐震設計基準の変遷、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、土木学会、pp563-570、1996
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説、1996
- 4) 鉄道総合技術研究所：アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針、1996
- 5) 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.9、1970
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編、1986
- 7) 村田二郎・長瀧重義・菊川浩治：土木材料コンクリート、1989
- 8) 須田久美子・村山八洲雄・一宮利通・新保 弘：RC橋脚における柱筋の座屈メカニズムの考察、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、土木学会、pp571-578、1996
- 9) 山本 強・石橋忠良・大坪正行・小林晋爾：鉄筋を途中定着した橋脚の耐震性能に関する実験的研究、土木学会論文集、第348号/V-1、pp.61-70、1984
- 10) 星限順一・川島一彦・長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力ひずみ関係、土木学会論文集、第520号/V-28、pp.1-11、1995

(1997年9月26日受付)