

鉄筋コンクリート橋脚の耐力・変形のエネルギー的評価

東京工業大学 山田真幸*
東京工業大学 三木千寿**
東京工業大学 館石和雄**
住友建設(株) 瀬間 優***
住友建設(株) 玉置一清***

鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能に与えるパラメータとして、載荷繰返し数、帯鉄筋間隔、段落し、巻き立て補強の有無およびかぶりコンクリートの有無に着目し、正負交番載荷実験により検討した。実験結果の整理にあたっては、荷重-変位関係の他に、履歴吸収エネルギーに着目した。また、特に主鉄筋のひずみの発生性状と試験体の変形性能との関係に着目し、上記のパラメータが鉄筋ひずみに与える影響について詳細に検討した。

1. はじめに

阪神大震災でコンクリート橋脚が甚大な被害を受けて以降、その耐震性の評価手法の高精度化や合理的な補修・補強方法の開発が強く望まれている。コンクリート構造物の耐震性能は荷重と変位の関係からじん性率などの指標を求め、それにより評価されるのが一般的である。しかし荷重-変位関係に与える様々なパラメータの影響について、必ずしも十分にされているとはいえない。そこで本研究では、鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能に与える種々のパラメータの影響を明らかにするために、様々な諸元を有する試験体を製作し、水平交番繰返し載荷実験を実施した。着目したパラメータは、載荷繰返し数、帯鉄筋間隔、段落し、巻き立て補強の有無およびかぶりコンクリートの有無である。実験結果の整理にあたっては、一般的に用いられる荷重-変位関係の他に、履歴吸収エネルギーに着目した。また、主鉄筋のひずみの発生性状と試験体の変形性能との関係に着目し、上記のパラメータが鉄筋ひずみに与える影響について詳細に検討した。

キーワード：鉄筋コンクリート橋脚、鉄筋ひずみ、エネルギー吸収

*大学院修士課程, 03-5734-2596

**土木工学科, 03-5734-2596

***土木本部土木設計部, 03-3225-5135

2. 試験体

試験体は表1に示すように帯鉄筋間隔、主鉄筋量などを様々に変えた6体を製作した。Type1, Type2は全く同一の諸元を持つものであり、帯鉄筋間隔を250mmと大きくしている。Type3はType1,2と比較して帯鉄筋間隔が100mmと小さいものである。Type4は段落部でのせん断破壊をねらい、曲げ耐力が相対的に高くなるように主鉄筋量を増したものである。Type5はType4と同一の諸元を有するが、試験体の外面にアラミド繊維による巻き立て補強を行っている。Type6はType3と同様の諸元であるが、かぶりコンクリートの厚さを非常に薄くしており、帯鉄筋がほぼ露呈している。また、かぶりコンクリートを無くしたことによって断面寸法は小さくなっている。Type6の断面寸法が小さいことを除けば、いずれの試験体も全体形状は図1に示すとおりである。

3. 試験方法

試験装置の概略を図2に示す。鉛直ジャッキにより死荷重応力を想定した1MPaの応力を試験体に負荷し、さらに水平方向に正負交番載荷を行う。鉛直ジャッキ上部にはスライダーが取り付けられており、水平方向

表1. 試験体一覧

試験体名	Type1	Type2	Type3	Type4	Type5	Type6
断面寸法(mm)	300×300	300×300	300×300	300×300	300×300	250×250
帯鉄筋間隔(mm)	250	250	100	250	250	100
段落し	有	有	有	有	有	無
主鉄筋比 (段落部)	2.25 (1.13)	2.25 (1.13)	2.25 (1.13)	2.89 (1.13)	2.89 (1.13)	4.16
帯鉄筋比	0.08	0.08	0.21	0.08	0.08	0.25
載荷繰返し数	3	10	3	3	3	3
δ_y (実測値)	10.0	10.9	8.9	12.6	10.4	10.4
備考					アラミド 補強	かぶり 無し
破壊 モード	基部曲げ	基部曲げ	基部曲げ	段落部 せん断	基部曲げ	基部曲げ

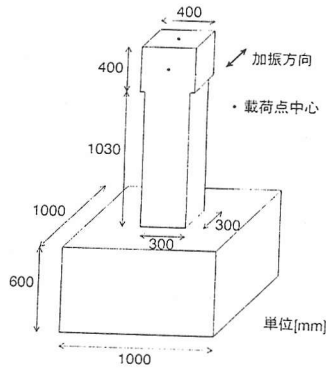


図1. 試験体全体形状

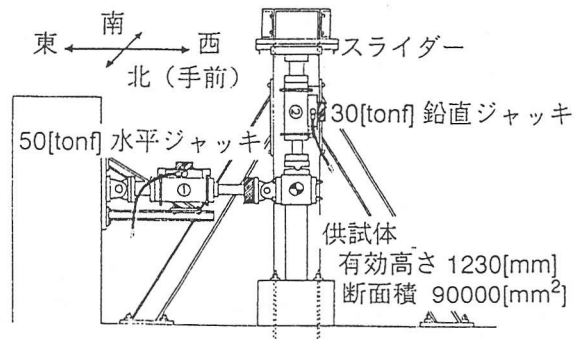
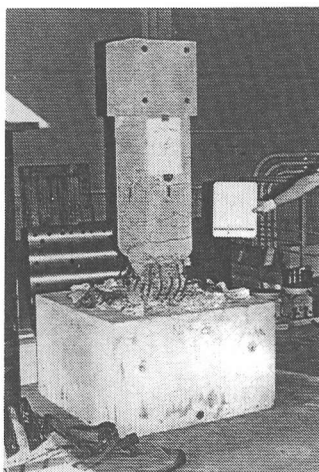


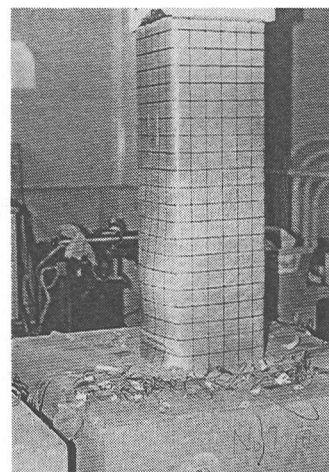
図2. 載荷システム



(a)Type1



(b)Type4



(c)Type5

図3. 破壊形態

載荷により試験体が変形してもそれに追従できるようになっている。試験は載荷点における試験体の変位を常にモニターし、その変位量を制御することにより行った。

載荷パターンは一般的に行われているように、降伏

変位 δ_y を基準とし、それを正負繰返ししながら累加していくものとした。同一変位振幅計による繰返し回数は3回を原則としたが、Type2については繰返し回数の影響を見るために、繰返し回数を10回としている。

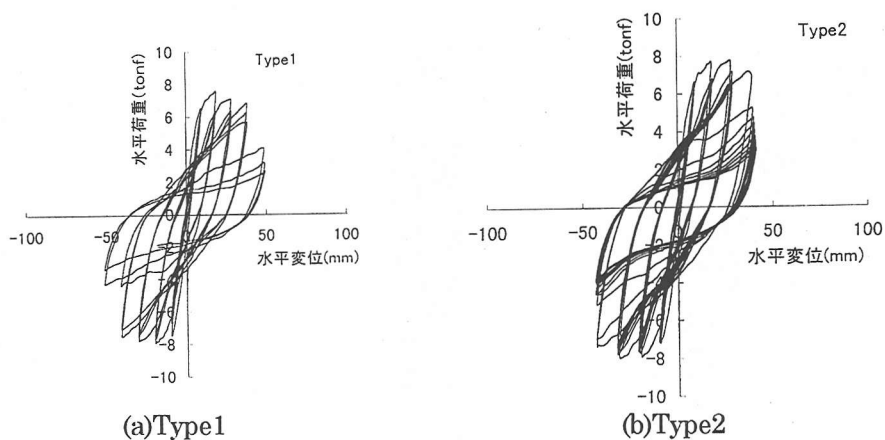


図 4. Type1,2 の荷重-変位関係

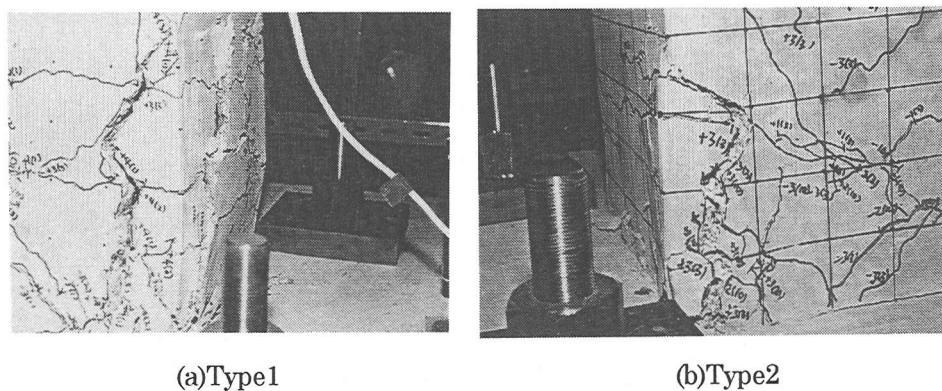


図 5. 耐力低下直前の損傷状況

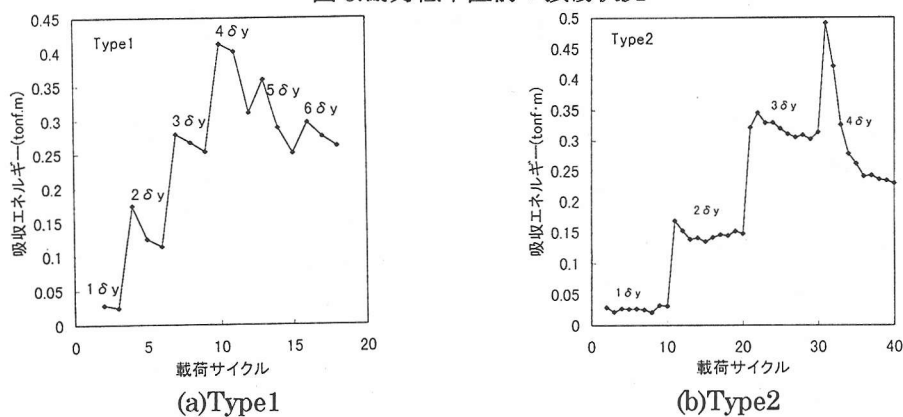


図 6. Type1,2 の吸収エネルギーの変化

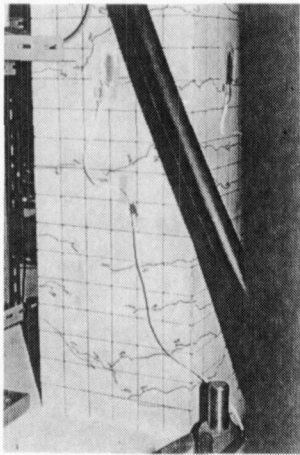
4. 破壊形態

最終的な破壊形態の一覧を表 1 の最下段に示す。また、例として Type1,4,5 の最終状態を図 3 に示す。Type4 では想定どおり段落し部でのせん断型の破壊となっているが、他のタイプはすべて基部での曲げ破壊であった。アラミド繊維による補強を行った Type5 で

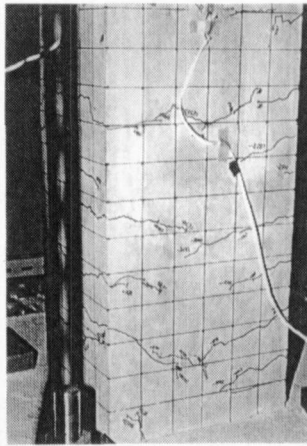
は最終的には基部付近に膨らみが見られた。試験終了後にアラミド繊維を除去したところ、膨らんでいた位置のコンクリートは粉状になっており、鉄筋は湾曲していた。

5. 試験結果

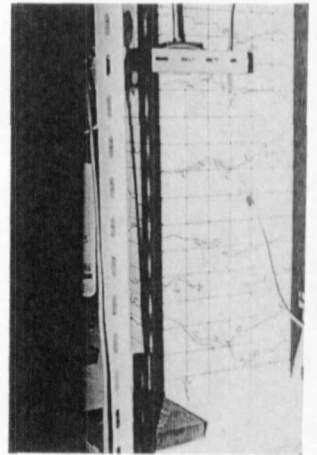
(1) 繰返し回数の影響



(a) $2\delta y$, 1回目

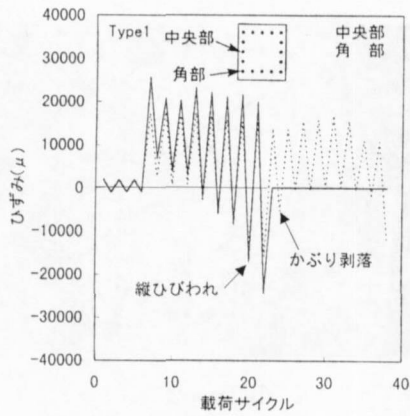


(b) $2\delta y$, 3回目

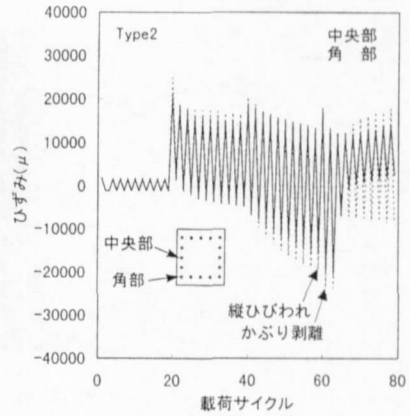


(c) $2\delta y$, 10回目

図7. 損傷の進展(Type2)

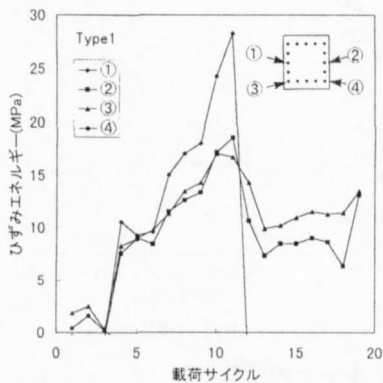


(a) Type1

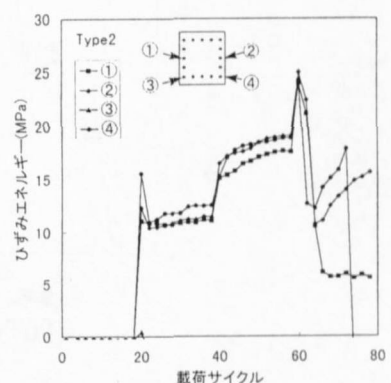


(b) Type2

図8. Type1,2の鉄筋ひずみの変化



(a) Type1



(b) Type2

図9. Type1,2の鉄筋ひずみエネルギーの変化

同一の試験体諸元で同一変位振幅での荷重繰り返し回数のみが異なる Type1, Type2 試験体の水平荷重-水平変位の関係を図4に示す。横軸の水平変位は、フーチングの動きを補正した値である。

Type1, 2の結果を比較すると、 $4\delta y$ の正側の1回目の荷重までは非常に近い履歴となっているが、繰り

返し回数が10回の Type2 では、その後急激に耐力が低下している。Type1でも $4\delta y$ の負側の3回目の荷重時に耐力の低下が見られる。著しい耐力の低下が見られた荷重サイクルの直前の試験体の様子を図5に示すが、いずれの試験体でも縦方向のひび割れと、かぶりコンクリートの剥離が顕著に現れた時点で耐力の低

下が生じている。

水平変位・水平荷重の関係から、各サイクル毎の履歴吸収エネルギーを求めた結果を図6に示す。同一振幅での吸収エネルギーの推移に着目すると、いずれの試験体でも初载荷のときに最も吸収エネルギーが大きく、その後低下する傾向が認められる。これは荷重-変位関係において、第一サイクルでの耐力が最も高く、その後の変位の繰り返しに伴いある値に落ち着くことから推定することができる。これは、変位を増加させた载荷サイクルの第一回目にはコンクリートのひび割れの発生・進展が生じるが、その後の载荷ではひび割れの発達が徐々に収まるためであると考えられる。特に、同一振幅の繰り返し回数を10回としたType2では、最初の3サイクル程度までは吸収エネルギーが減少するが、その後はほぼ一定値となっている。Type2の変位振幅 $2\delta y$ でのひび割れ観察結果を図7に示すが、ひび割れの進展はほぼ3サイクル目で落ち着いており、エネルギー吸収の変化曲線の傾向と一致している。

試験体基部の主鉄筋に貼ったひずみゲージの値の载荷サイクルによる変化を図8に、また、応力ひずみ関係としてバイリニア、移動硬化則を仮定してひずみから応力を求め、それによって計算した一载荷サイクルあたりの鉄筋のひずみエネルギーを計算した結果を図9に示す。いずれの試験体でも $2\delta y$ の1回目载荷時に大きな引張塑性ひずみを生じているが、繰り返しとともにひずみが圧縮側に移動する傾向が見られる。しかしひずみエネルギーでみるとその値は増加しており、1载荷サイクルでのひずみの振幅は増加していることがわかる。繰り返しとともにひずみが圧縮側に移動するのは、鉄筋の繰り返し硬化の影響や、コンクリートの破壊状態や付着性状の変化が原因であると考えられる。

図8をみると、いずれの試験体においても鉄筋のひずみが圧縮の-0.02になった付近でかぶりの剥離、すなわち鉄筋の顕著な湾曲が発生していることは興味深い。Type1はType2よりも同一振幅での繰り返し回数が少ないことから、繰り返しによるひずみの圧縮側への移動がType2よりも小さく、 $3\delta y$ の载荷終了時にも0.01程度である。それに対し、繰り返し回数が多いType2では、繰り返しごとに圧縮側への移動が生じ、

$3\delta y$ 終了時にはほぼ-0.02まで到達している。これ

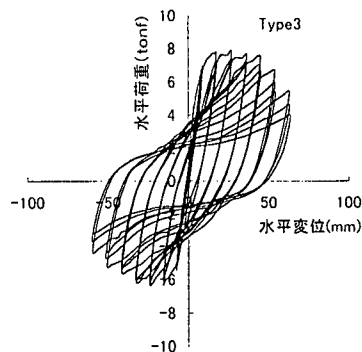


図10.荷重変位関係(Type3)

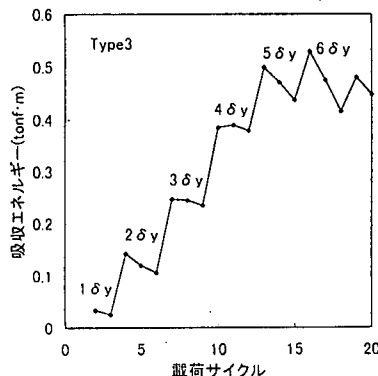


図11.吸収エネルギー(Type3)

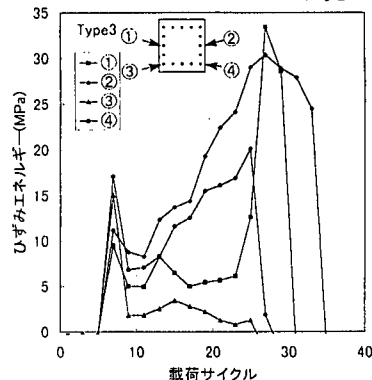


図12.鉄筋ひずみエネルギー(Type3)

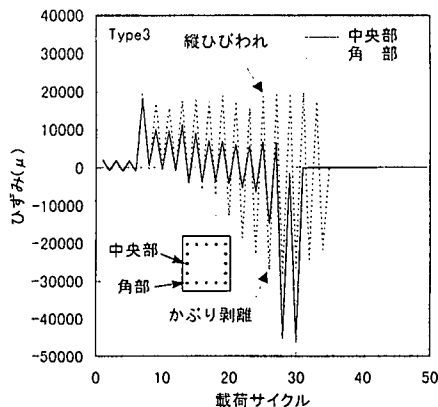


図13.鉄筋ひずみ(Type3)

は、耐力の急激な低下がType1では $4\delta y$ の-3回目に、Type2では $4\delta y$ の+2回目に生じた傾向とよく一致している。

(2) 帯鉄筋間隔の影響

帯鉄筋間隔が100mmのType3の荷重変位関係を図10に、吸収エネルギーの変化を図11に示す。帯鉄筋間隔が250mmではほぼ同一の諸元をもつType1の結果(図4,6)と比較すると、帯鉄筋間隔が狭いType3では $5\delta_y$ 程度まで安定した履歴を描いており、Type1と比較して変形性能が向上していることがわかる。吸収エネルギーでもType1と同様に安定して増加している点は同様であるが、Type3では耐力の低下後も吸収エネルギーの減少量がType1と比較して小さい。

Type3の基部における主鉄筋のひずみエネルギーの変化を図12に示す。ひずみエネルギーは測点によってばらつきがあるが、測点2,4についてみると、 $2\delta_y$ の1回目の荷重時に大きな値となっていることを除いてはType1,2での傾向と同様である。図13に基部における主鉄筋のひずみの変化を示す。Type1,2と同様に、載荷繰り返しとともにひずみが圧縮側に移動しており、また、ここでもかぶりの剥離は鉄筋の圧縮ひずみが0.02程度になった時点付近で生じている。ただし圧縮ひずみが0.02になる時点はType1よりもやや遅くなっている。これは帯鉄筋によるコンクリートの拘束効果の影響によるものと考えられる。

(3) せん断破壊

段落し部でのせん断破壊を生じたType4の荷重-変位関係を図14に、エネルギー吸収量の変化を図15に示す。この試験体では $3\delta_y$ で急激に耐力が低下しており、変形性能に乏しい。エネルギー吸収でも、 $2\delta_y$ においてすでに比較的大きな減少傾向が見られる。

この試験体では試験体基部の主鉄筋のひずみは小さく、ほぼ弾性範囲内に収まっていた。これは破壊現象が段落し部で生じていることから当然である。段落し部の主鉄筋のひずみエネルギーの変化を図16に、ひずみゲージの値の変化を図17に示す。測点1についてみると初載荷から0.02程度の大きなひずみが生じており、ひずみエネルギーも大きい。その後の繰り返しによってややひずみエネルギーは上昇するが、これまでの例に見られたようなひずみの圧縮側への移動が生じていない段階で試験体が耐力を失っている。すなわち、せん断破壊については、鉄筋のひずみと鉄筋の湾曲が

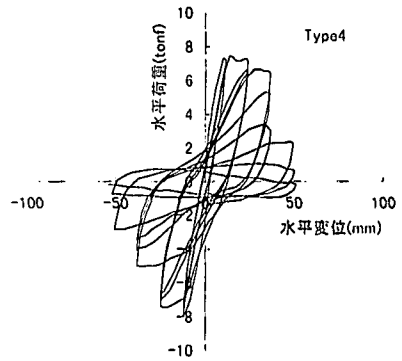


図14. 荷重変位関係(Type4)

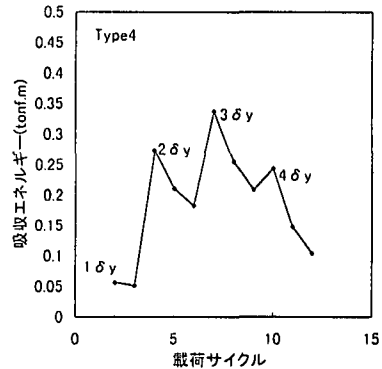


図15. 吸収エネルギー(Type4)

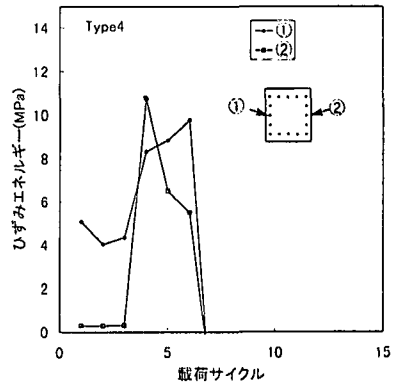


図16. 鉄筋ひずみエネルギー(Type4)

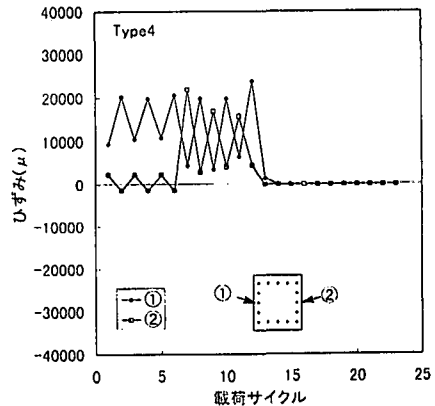


図17. 鉄筋ひずみ(Type4)

はじまる時点の関係は認められない。

(4) アラミド補強の影響

図18にアラミド繊維による補強を行ったType5の

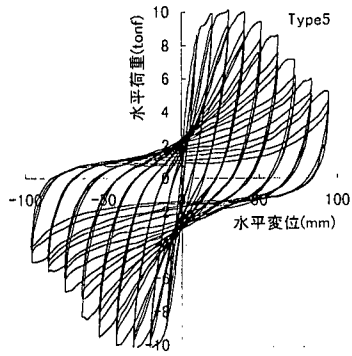


図 18. 荷重変位関係(Type5)

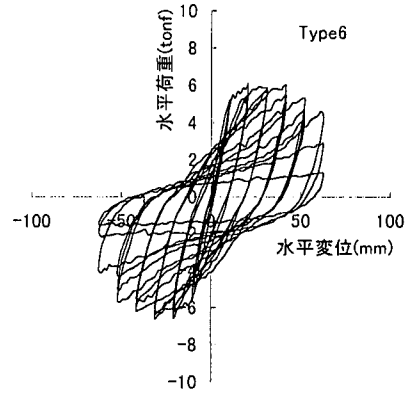


図 22. 荷重変位関係(Type6)

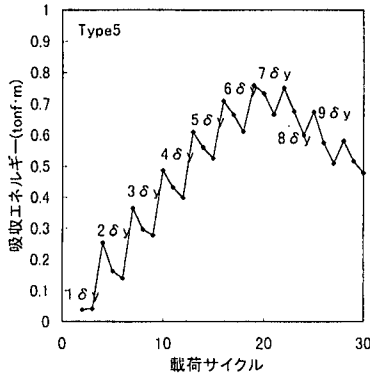


図 19. 吸収エネルギー(Type5)

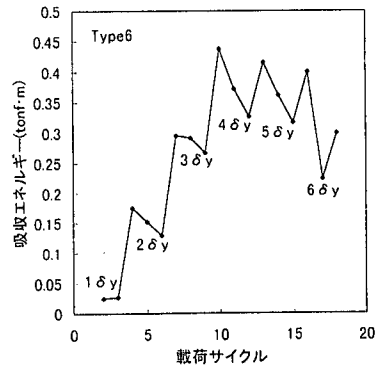


図 23. 吸収エネルギー(Type6)

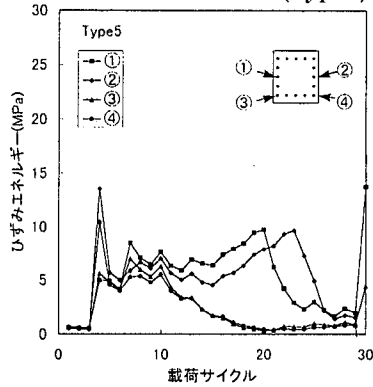


図 20. 鉄筋ひずみエネルギー(Type5)

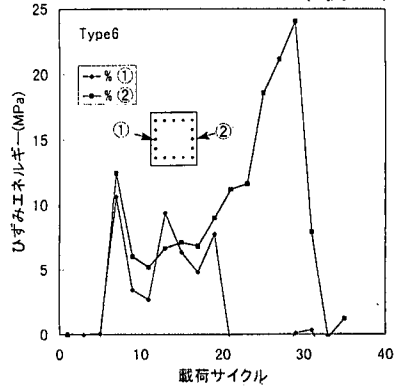


図 24. 鉄筋ひずみエネルギー(Type6)

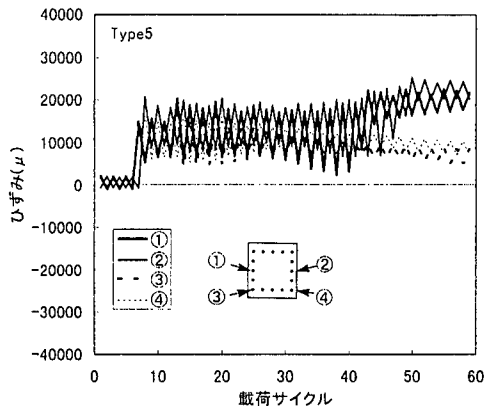


図 21. 鉄筋ひずみ(Type5)

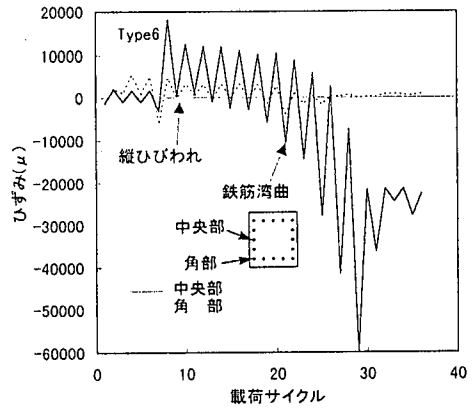


図 25. 鉄筋ひずみ(Type6)

荷重-変位関係を示す。Type5 ではかなりの変位まで非常に安定した履歴となっている。ただし荷重の繰り返とともに、徐々に耐力が低下している。図 19 に吸収エネルギーの変化を示す。Type1,2,3 と同様に、載

荷とともに安定して上昇している様子が分かる。

図 20 に基部の主鉄筋のひずみエネルギーの変化を、図 21 にひずみの変化を示す。Type1,2,3 では荷重回数に伴ってひずみエネルギーが上昇したが、Type5 につ

いては $2\delta y$ の初載荷時に大きなひずみエネルギーとなつて以降、載荷回数とともにほぼ一定、あるいは減少する傾向にあることがわかる。また、ひずみの変動をみても、繰返しによる圧縮側への移動は認められず、ほぼ一定の引張ひずみを中心に変動している。これはアラミドによる高い拘束により、コンクリートの破壊やコンクリートと鉄筋の付着性状の変化が押さえられるためであると考えられる。

(5) かぶりコンクリートの影響

かぶりコンクリートを無くした Type6 の荷重—変位関係と吸収エネルギーの変化を図 22,23 に示す。この試験体は、かぶりが無いことを除いて Type3 試験体とほぼ同様の諸元を持っている。Type3 の結果（図 10,11）と比較して、Type8 では断面積が減少した分耐力が小さく、また Type3 では $5\delta y$ から耐力の低下が生じているのに対し、Type8 では $4\delta y$ において耐力が低下し始めている。 $5\delta y$ での耐力の低下も、Type8 の方が程度が大きい。このことはエネルギー吸収の変化をみると明確にわかる。すなわち、かぶりコンクリートの有無によるじん性の変化は本試験体の場合には $1\delta y$ 程度であった。

基部における主鉄筋ひずみエネルギーの変化を図 24 に、ひずみの変化を図 25 に示す。鉄筋に明確に湾曲が確認されたのは $4\delta y$ の変位載荷時であり、Type3 と比較すると早くなっている。また、このときの鉄筋

ひずみはほぼ -0.01 の時点であり、Type1,2,3 と比較すると小さい。これはかぶりコンクリートによる拘束効果がないためであると考えられる。

6. まとめ

様々な諸元を有するコンクリート橋脚モデル試験体に正負交番繰返し載荷実験を行うことにより、様々なパラメータが耐震性能に及ぼす影響について検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

- ・耐力は鉄筋の座屈が生じてから急激に低下する
- ・同一変位振幅を 3 回繰返した場合と 10 回繰返した場合とを比較した結果、コンクリートの破壊の進行が 3 回程度で収まることから、それ以上の繰返しによっては耐力や吸収エネルギーは低下しない。しかし、鉄筋ひずみが繰返しとともに圧縮側へ移動することから、繰返し回数は鉄筋の座屈の発生時期に影響を及ぼす可能性がある。
- ・鉄筋の座屈が発生するときの鉄筋ひずみは -0.02 程度である。ただしせん断破壊の場合の鉄筋の湾曲については当てはまらない。
- ・アラミドによる巻き立て補強により、鉄筋のひずみは小さい振幅に押さえられ、また安定して変動する。これにより、鉄筋の座屈が発生せず、じん性の高い挙動を示す。
- ・かぶりコンクリートがない場合、本試験体ではじん性率に 1 程度の低下が生じた。

Strengthening and Ductility of RC Bridge Piers

M. Yamada, C. Miki, K. Tateishi, M. Sema and K. Tamaki

Strengthening and Ductility of reinforced concrete piers were experimentally investigated. The effect of the number of loading cycles, tie reinforcement ratio, termination of reinforcement at mid-height, reinforcement by aramid cloth and cover concrete were studied with focusing on the absorbed energy during the loading cycles and the relationship between strain behavior of reinforcing bar and ductility of piers.