

載荷履歴特性が鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす影響

Effect of loading hysteresis on ductility capacity of reinforced concrete bridge piers

武村浩志*, 川島一彦**

Hiroshi TAKEMURA and Kazuhiko KAWASHIMA

*工修 東京工業大学研究生 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)

To investigate an effect of loading hysteresis on ductility capacity of reinforced concrete bridge piers, a series of loading tests were conducted for six specimens with same size and strength using different loading hysteresis. Number of loading cycles in the step-wise increasing or decreasing loading hysteresis and loading in only one direction are considered as parameter to be clarified. It was found from the tests that loading hysteresis have a great influence on ductility capacity of reinforced concrete bridge piers. The ductility capacity of the specimens loaded in the step-wise decreasing loading hysteresis is larger than that of the specimens loaded in the step-wise increasing loading hysteresis.

It is shown that ductility capacity used in seismic design should be carefully clarified depending on duration and strength of bridge response during a design earthquake.

Key Words ; seismic design, bridges, reinforced concrete bridge pier, loading hysteresis, ductility capacity

1. はじめに

兵庫県南部地震では、RC橋脚に甚大な被害が生じ、改めて地震時保有水平耐力法に基づく耐震設計の重要性が広く認識された¹⁾。今回の地震の特徴は、継続時間は短かったが、神戸海洋気象台²⁾あるいはJR鷹取駅³⁾での記録に代表されるように、地盤種別がⅠ種あるいはⅡ種と判定される地点で減衰定数5%の弾性応答スペクトルが、固有周期0.3~1秒の比較的広い範囲で2gにも達するすさまじい地震力が生じた点である。平成2年道路橋示方書では、減衰定数5%で表した0.7~1gの弾性応答地震力に対してじん性をチェックするという地震時保有水平耐力の照査法が取り入れられているが、これは1923年関東地震の際の東京に生じたであろうと推定される地震力が想定されたもので、継続時間としては60秒あるいはそれ以上とみなされる地震動が考えられている。

一方、RC橋脚に代表される構造部材が繰り返し地震力を受けた場合の動的耐力や変形性能は、従来、振動台実験⁴⁾やスード載荷実験⁵⁾ 6) 等による検討も行われているが、主として橋脚基部を固定し、変位制御に基づき、橋脚頭部にある荷重ステップごとに一定振幅の荷重を一

定回数作用させるという載荷実験によって求められてきた。この載荷方法では、載荷をどのような順番で与えるか(以下、載荷履歴と呼ぶ)、また、順次載荷変位振幅を大きくしていく方式の載荷履歴(一定振幅変位漸増方式)を選ぶとすれば、載荷変位振幅を増加させるピッチ(以下、これも載荷履歴に含めて考える)や、それぞれの載荷変位振幅ごとに作用させる載荷の繰り返し回数(以下、載荷繰り返し回数と呼ぶ)を地震時に構造物に生じる応答との関係でどのように与えるかが重要である。しかし、こうした点については、従来あまり突き詰めた検討は行われてきていないのが実状である。

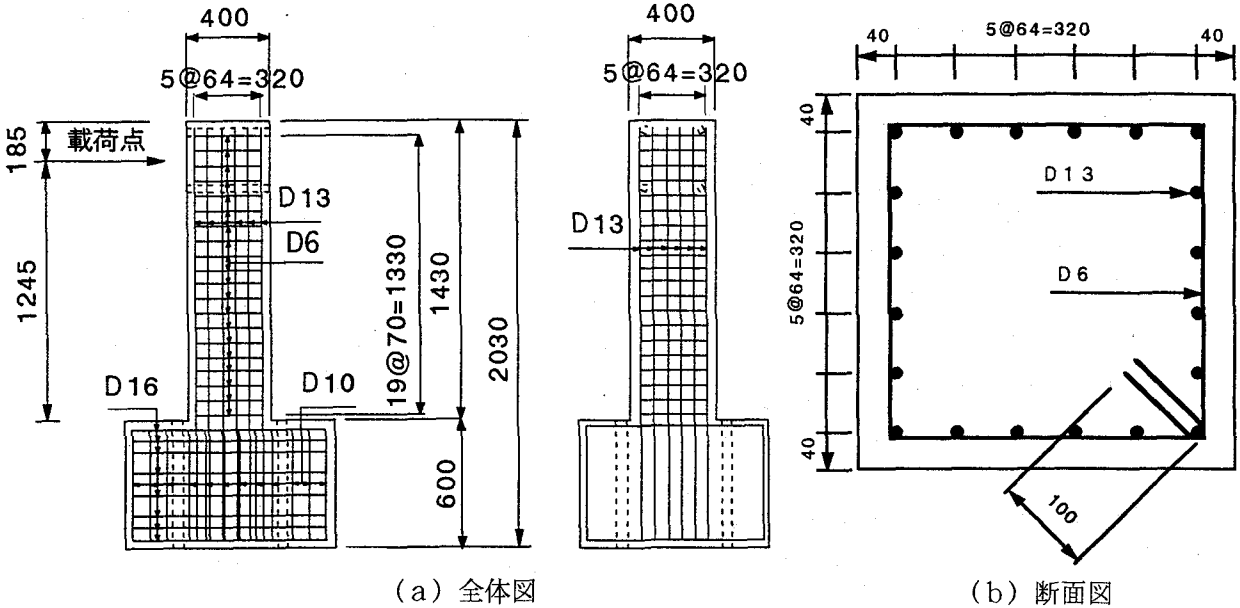
こうした中で川島らは、RC橋脚を対象に正弦波を基本とし、その作用変位振幅の増加方向を変化させた載荷履歴や繰り返し回数の検討を行い、こうした特性がRC橋脚の変形性能に大きな影響を与えることを明らかにしている^{7) 8)}。ここでは、兵庫県南部地震の経験から、改めてこの問題を検討することを目的に実施した一連の繰り返し載荷実験結果に基づき、載荷履歴がRC橋脚の変形性能に及ぼす影響について報告するものである。

表－1 載荷実験当日のコンクリート圧縮強度一覧

載荷タイプ	圧縮強度 (MPa)			
	(1)	(2)	(3)	平均
タイプ1	36.2	33.7	37.7	35.9
タイプ2	35.1	36.3	35.7	35.7
タイプ3	34.4	35.3	33.1	34.3
タイプ4	33.5	33.4	32.8	33.2
タイプ5	37.4	37.4	35.4	36.8
タイプ6	36.2	35.5	36.1	35.9

表－2 道路橋示方書に基づく供試体の
水平耐力および変形性能

		水平耐力 (kN)	水平変位 (mm)
初降伏		124.5	6.0
降伏		163.7	7.2
終局	タイプⅠ	163.7	25.3
	タイプⅡ	163.7	32.2
終局じん性率	タイプⅠ	—	3.5
	タイプⅡ	—	4.5
許容じん性率	タイプⅠ	—	2.7
	タイプⅡ	—	3.3



図－1 実験に用いた供試体

2. 実験に用いた供試体及び実験方法

実験に用いたのは、図－1に示すように同一の寸法及び強度、配筋を有する6体の供試体である。供試体の断面は400mm×400mmの正方形で、基部から頂部までの全高は1430mmである。基部から載荷点位置までの有効高さは1245mmであるため、せん断支間比は3.46となる。主鉄筋にはD13を用い、途中で段落としはせず頂部まで伸ばしてある。帯鉄筋としてはD6を70mm間隔で配置し、長さ100mmのフックを135度に折り曲げてコアコンクリート内に定着した。コンクリートとしては普通ポルトランドセメントを用い、最大粒径25mmの骨材を用いた。載荷実験当日のコンクリートの平均圧縮強度は表－1に示す通りであり、33.2～36.8MPaである。主鉄筋比は1.58%であり、また、

$$\rho_s = \frac{4A_h}{s d} \tag{1}$$

で与えられる帯鉄筋比 ρ_s (体積比) は0.57%である。ここで、 A_h 、 s 、 d は、それぞれ帯鉄筋の断面積、間隔、有効長である。

この供試体の降伏時の水平耐力および変位を平成8年の道路橋示方書に基づいて計算すると表－2のようになる。なお、実験では実橋脚に比較して断面が小さいため、フーチングからの鉄筋の抜け出しに伴う変位が無視できない大きさとなる。これが実験結果にどのような影響を与えるかについては、今後検討していかなくてはならない。ここでは、小さな実橋脚とみなして実験結果を見ていくことにするが、表－2にはこの影響を太田らの方法⁹⁾で修正した結果を示してある。これによると、初降伏変位 δ_y は6.0mm、降伏変位は7.2mmとなる。なお、初降伏変位とは最外縁鉄筋が降伏する時の変位、降伏変位とは初降伏割線剛性が終局耐力に達する時の変位をいう。終局変位はタイプⅠの地震動で25.3mm、タイプⅡの地震動で32.2mmであるから、終局じん性率はタイプⅠの地震動では3.5、タイプⅡの地震動では4.5、許容じん性率はタイプⅠの地震動では2.7、タイプⅡの地震動では3.3となる。ここで、タイプⅠの地震動とは1923年関東地震のように載荷繰返し回数が多い地震動、タイプⅡの地震動とは兵庫県南部地震のように載荷繰返し回数が少ない地震動である。平成8年道路橋示方書で

は、繰返し回数のおおよそのイメージとして、タイプⅡの地震動では1～3回、タイプⅠの地震動では10回程度が挙げられている。

なお、載荷に用いる基準変位としては、従来、初降伏変位が用いられてきたことから、ここでは初降伏変位 $\delta_y = 6.0\text{mm}$ を用いることとする。なお、以下では、特に断らない限り、これを降伏変位と呼ぶことにする。

また、実験では平成2年および平成8年道路橋示方書に合わせて、履歴曲線の包絡線において、最大耐力付近で安定していた耐力が、かぶりコンクリートの剥落や主鉄筋の破断によって急速に低下し始める時を終局とし、この時の変位を終局変位と定義することとした。

実験では、供試体を反力床に固定し、上部構造重量に相当する一定の軸力を与えながらアクチュエータで水平方向に正負交番載荷した。水平荷重の載荷履歴に関しては次章に示す。軸力としては、都市高速タイプの橋脚を想定し、軸応力度が 0.98MPa (10kgf/cm^2) となるように 156.8kN (16tf) を作用させた。

橋脚の寸法は実橋脚の $1/8$ を想定しているが、相似則を考えずに、これが小さな実物であると考えて、上記の軸力をこの橋脚が支持する上部構造重量とみなし、橋脚の降伏剛性から固有周期を算定すると 0.13 秒となる。また、平成8年道路橋示方書に基づいて地震時保有水平耐力法によって耐震性を評価すると、せん断耐力が 209.7kN 、曲げ耐力が 163.7kN で、曲げ破壊先行型の橋脚と判定される。固有周期との関係は整合しないが、Ⅰ種地盤を考慮して設計水平震度を 2.0 とすると、タイプⅠおよびタイプⅡの地震動に対して、許容じん性率はそれぞれ 2.7 および 3.3 であるから、等価水平震度は 0.45 、 0.36 となり、等価慣性力は 70.6kN (タイプⅠの地震動)、 56.4kN (タイプⅡの地震動) となる。地震時保有水平耐力は 150.1kN であるから、この橋脚はタイプⅠおよびタイプⅡのいずれの地震動に対しても安全側と判定されることになる。

3. 実験に用いた載荷履歴

今回の実験では、兵庫県南部地震による地震動記録を用いた橋脚の非線形動的解析¹⁰⁾に基づき、橋脚に生じる地震応答特性から図-2に示す6種類の載荷履歴を考えることとした。載荷履歴の特徴とその背景は、以下の通りである。なお、載荷変位振幅を漸増させていくタイプ1、2、3、5では、最終的に耐力が大きく低下するまで載荷を繰り返した。また、載荷変位振幅を漸減させるタイプ4および6では、第1回目の変位振幅としては、従来もしばしば検討されている $10 \sim 12\delta_y$ を上回る大きな変位を目指すこととし、載荷装置の制約も考慮して $18\delta_y$ とした。

(1) タイプ1の載荷履歴

一定振幅変位漸増方式により、 $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、…というように、 $\pm 1\delta_y$ ずつ各3回の載荷繰

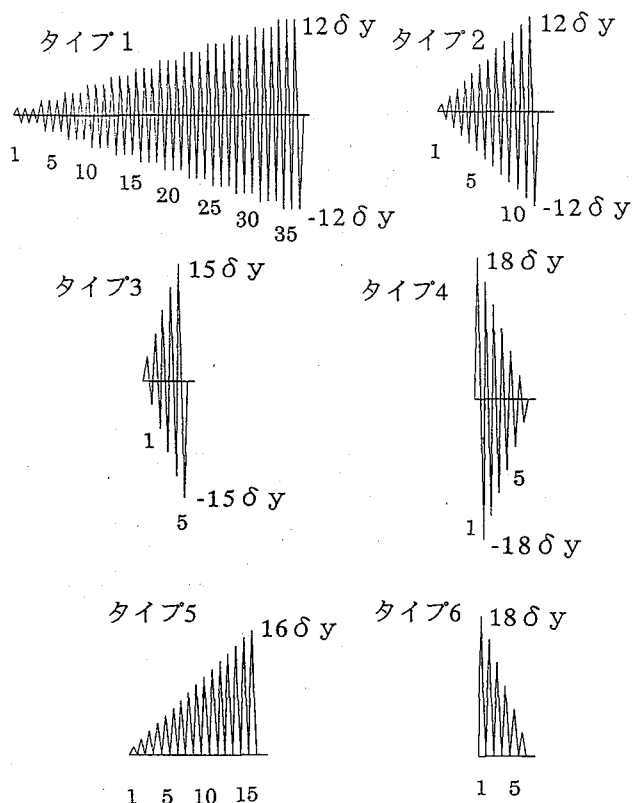


図-2 実験に用いた載荷履歴

返し回数で変位振幅を順次増加させていくものである。一般に、従来の載荷実験でよく採用されてきた載荷方法である。

(2) タイプ2の載荷履歴

タイプ1と同じ一定振幅変位漸増型載荷であるが、同一変位振幅における載荷繰返し回数を1回とした場合である。タイプ1よりも地震動の継続時間が短い場合に、このような応答が生じると考えられる。

(3) タイプ3の載荷履歴

タイプ2では $\pm 1\delta_y$ ずつ載荷振幅変位を増加させていくのに対して、これは $\pm 3\delta_y$ ずつ振幅変位を増加させていく場合である。タイプ2よりもさらに継続時間が短い場合で、例えば兵庫県南部地震のように短時間に強い地震力が作用する場合を想定した載荷である。

(4) タイプ4の載荷履歴

タイプ3とは反対に最初に大きな振幅変位で載荷し、その後 $\pm 3\delta_y$ ずつ振幅変位を減少させていく場合である。これも、兵庫県南部地震のように直下型で初めから強い地震動が作用する場合を想定したものである。

(5) タイプ5の載荷履歴

以上に示したタイプ1～4のように正負両方向ではなく、片側(正側)のみに $1\delta_y$ ずつ振幅変位を増加させていく場合である。強い地震力を受けた場合には、残留変位が生じ、橋脚の地震応答が一方に偏る場合も考えられる。こうした場合の地震応答を想定した載荷方法である。また、本研究の目的とは関係がないが、現場載荷実

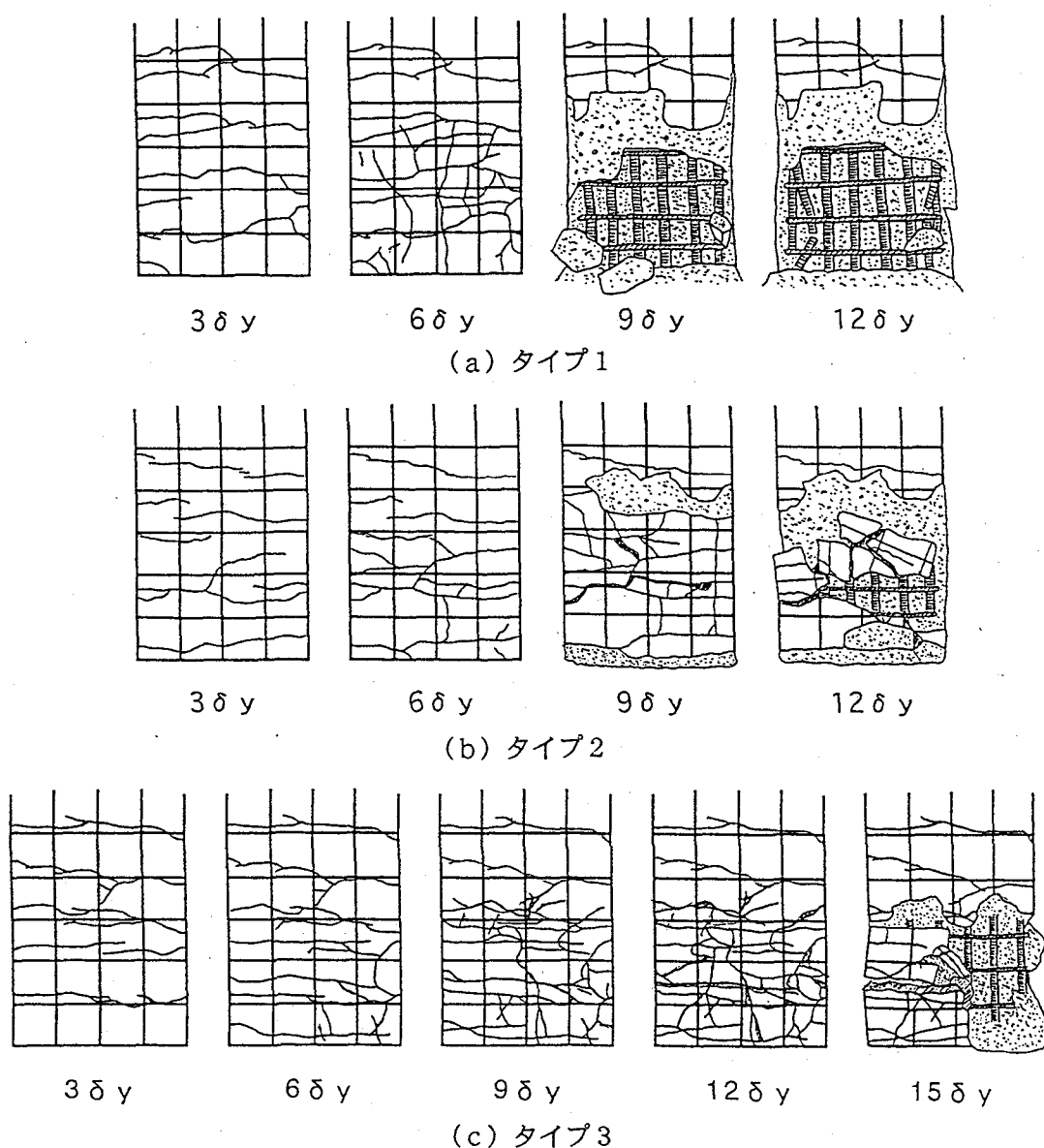


図-3 載荷変位振幅を順次増加させていった場合の損傷状況の比較

験では実験装置の制約から、このような載荷方法を用いることが多い。

(6) タイプ6の載荷履歴

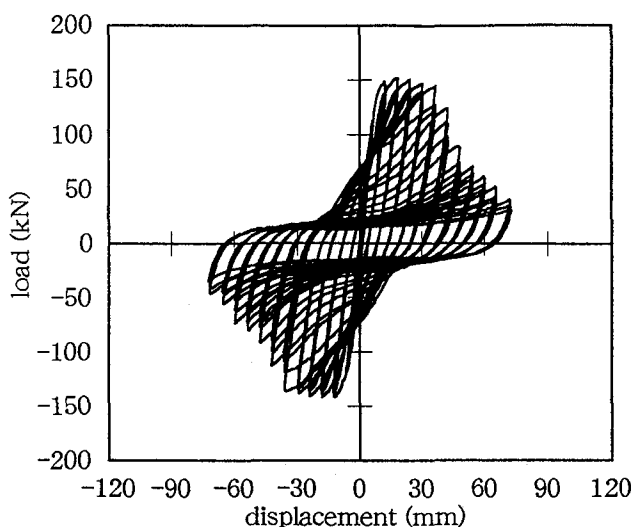
タイプ5とは載荷変位振幅の大小関係を反対にしたもので、タイプ4のように変位振幅を $3\delta_y$ ずつ減少させていく場合である。兵庫県南部地震のように直下型で初めから強い地震力を受け、一方向に残留変位が生じる場合の橋脚の地震応答を想定した場合である。

4. 一定変位振幅漸増方式における同一変位振幅での載荷繰り返し回数の影響

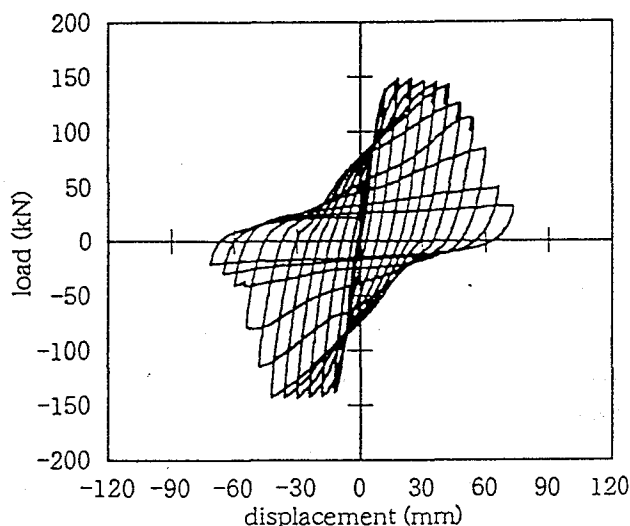
タイプ1、2、3のように載荷変位振幅を順次増加させていった場合の載荷に伴う損傷の進展状況を図-3に示す。ここでは、図-3を含めて以下すべて載荷方向と直行する面の損傷状況を示している。これによれば、い

ずれの載荷においても、載荷の進展に伴って、まず、降伏荷重以上の荷重を受けると引張り側の主鉄筋が降伏し、この主鉄筋がある値以上まで伸びた後に除荷すると、その鉄筋は面外に座屈し、それに伴いかぶりコンクリートが剥離する。逆方向に載荷を加えると、かぶりコンクリートの剥離からさらに進んで剥落し、新しく引張り側になった主鉄筋も降伏する。この状態から再除荷すると、この伸びた主鉄筋も面外に座屈し、この面のかぶりコンクリートが剥離する。このような載荷をさらに進めると、かぶりコンクリートが剥落し、最初の状態に比べて抵抗断面が減少するために、当初の耐力よりも低下するという損傷過程をとる。

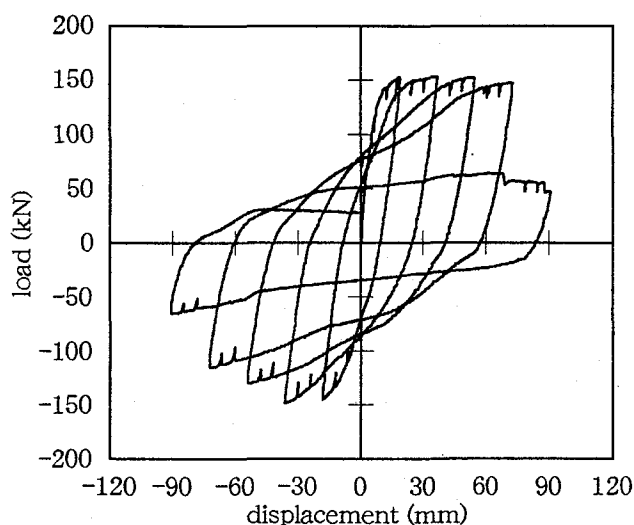
同一変位振幅での載荷を3回ずつ繰り返すタイプ1では $11\delta_y$ になって主鉄筋が破断した。タイプ2および3ではそれぞれ $12\delta_y$ 、 $15\delta_y$ まで載荷したが、この範囲では



(a) タイプ1



(b) タイプ2



(c) タイプ3

図-4 荷重変位振幅を順次増加させていった場合の履歴曲線の比較

主鉄筋は破断しなかった。タイプ1、2、3でそれぞれ、 $7\delta_y$ 、 $9\delta_y$ 、 $13\delta_y$ が終了した段階でかぶりコンクリートが剥落した。荷重履歴も含めて、全体としての荷重繰返し回数が少ない程、かぶりコンクリートが剥落する時の変位は大きくなることがわかる。

次に、実験から得られた荷重位置における水平荷重と水平変位の履歴曲線を示すと図-4のようになる。同一変位における荷重がわずかに低下している箇所が多数あるが、これは、ひび割れを観察するために変位をホールドしたために生じたものである。また、図-5は履歴曲線をその包絡線で比較したものである。これによれば、いずれの場合にも150kN程度の耐力を保っているが、こうした最大耐力付近で安定していた耐力が急速に低下し始める変位、すなわち終局変位には大きな違いがあり、タイプ3のように終局変位に到るまでの繰返し回数が4回と少ない場合には、終局変位は72mm ($12\delta_y$)であるのに対して、タイプ1やタイプ2のように終局変位に到るまでの繰返し回数がそれぞれ18回、7回と多い場合には、終局変位はそれぞれ36mm ($6\delta_y$)、42mm ($7\delta_y$)である。したがって、タイプ1の終局変位を基準にすれば、タイプ2の終局変位はほとんど同じであるが、タイプ3の終局変位は約2倍に増加することになる。このように同一の特性を持つRC橋脚であっても、タイプ3のように荷重繰返し回数が少ない場合には、終局変位を大きくとることができるという点は、兵庫県南部地震のように直下型で継続時間の短い地震動の作用を受ける場合のRC橋脚の耐震性を考える上で重要であると考えられる。こうしたタイプの地震応答を受ける場合には、タイプ1やさらには従来よく用いられてきた一定変位振幅漸増方式で同一変位振幅の荷重繰返し回数

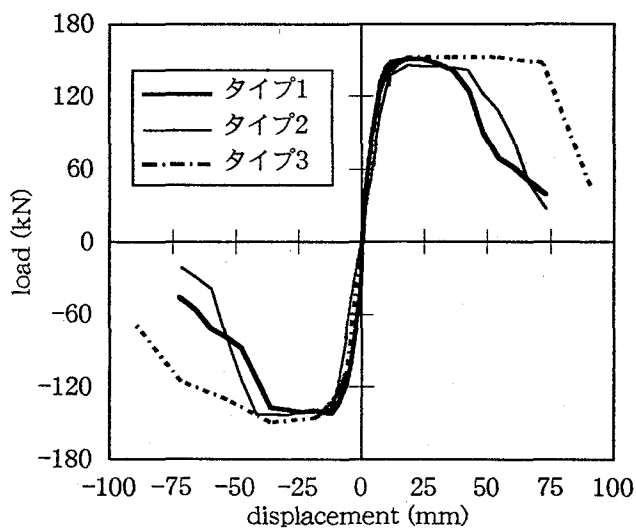


図-5 荷重変位振幅を順次増加させていった場合の履歴曲線の包絡線の比較

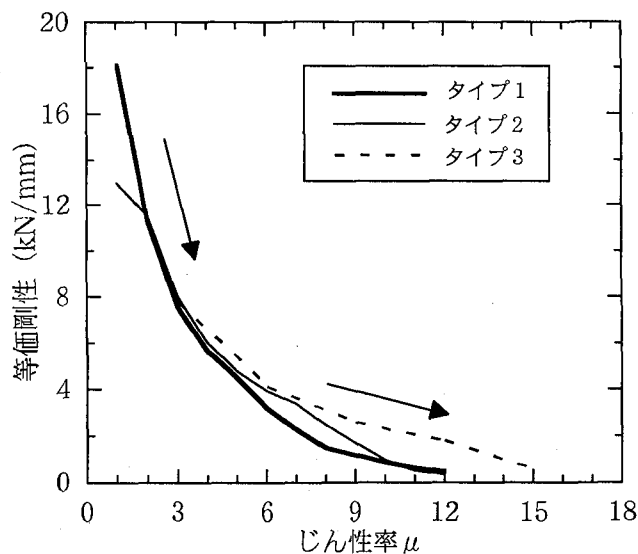


図-6 荷重変位振幅を順次増加させていった場合の等価剛性の比較

を10回とした荷重実験結果から得られている知見とは、大きく損傷状況が異なるということを、今後、耐震設計に取り入れていく必要があると考えられる。

図-6 は等価剛性の比較を示したものである。ここで、等価剛性とは、1つの履歴曲線の変位の最大点と最小点を結んだ直線の傾きとして定義している。これによれば、等価剛性はじん性率が増加するにつれて単調に減少する。じん性率が3以下と小さい範囲では、この関係にはタイプ1、2、3の違いはほとんど認められないが、それ以上のじん性率になると、タイプ3の方がタイプ1や2よりも等価剛性が大きくなる。

5. 荷重変位振幅を順次増加させる場合と減少させる場合の橋脚の動的特性の比較

タイプ3のように荷重変位振幅を $3\delta_y$ から $15\delta_y$ まで $3\delta_y$ ずつ順次増加させていった場合とタイプ4のように最初に $18\delta_y$ の荷重を行い、以下、 $3\delta_y$ ずつ荷重変位振幅を順次減少させていった場合の損傷状況を比較した結果が、図-7である。なお、ここに示すタイプ4の損傷状況は、1サイクル目の $18\delta_y$ に向かう正側の荷重途中のものである。

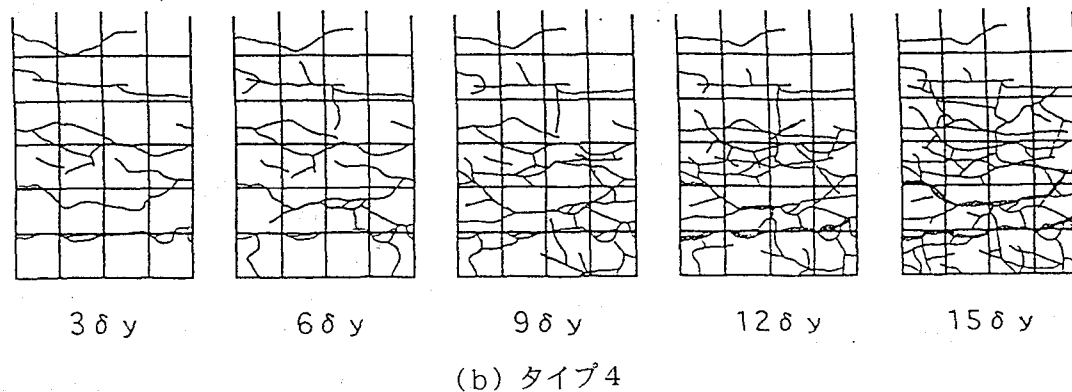
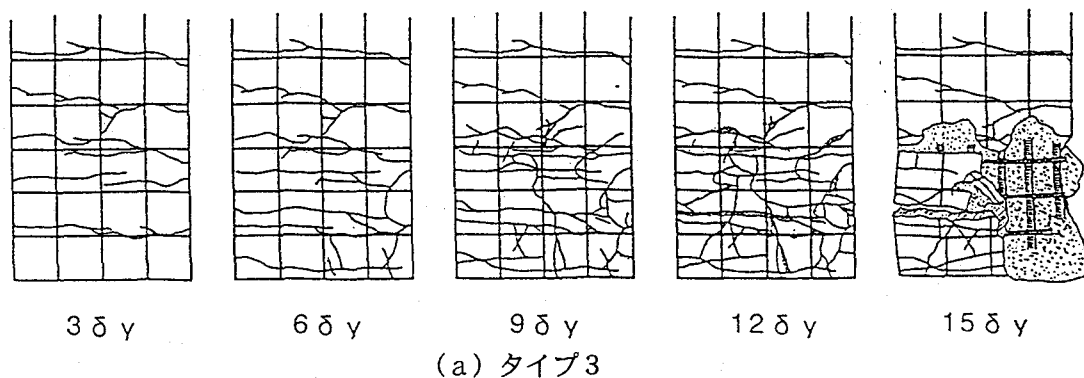
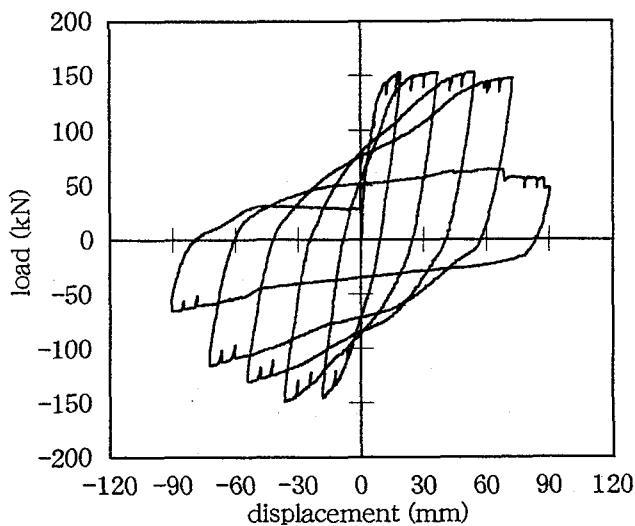
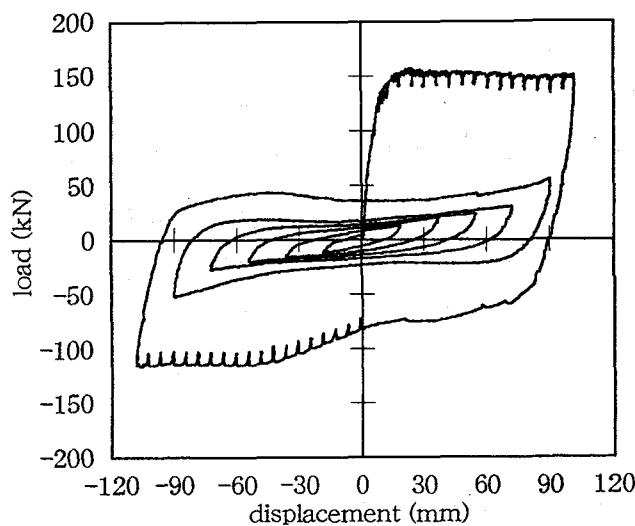


図-7 荷重変位振幅を順次増加させる場合と減少させる場合の損傷状況の比較



(a) タイプ3



(b) タイプ4

図-8 載荷変位振幅を順次増加させた場合と減少させた場合の履歴曲線の比較

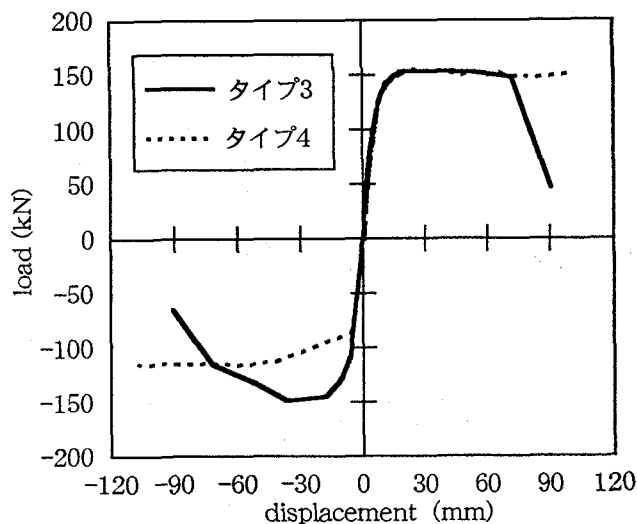


図-9 載荷変位振幅を順次増加させた場合と減少させた場合の履歴曲線の包絡線の比較

タイプ3の損傷状況は、すでに前述した通りである。タイプ4の場合には、1サイクル目の $18\delta_y$ に向かう載荷過程では、最初のうちはコンクリートの引張り面に曲げ引張りひび割れが生じる。5 δ_y を過ぎると、圧縮側のコンクリート面にも圧縮によるひび割れが生じ始め、11 δ_y に達するとこの面のかぶりコンクリートが剥離するまでに到った。ここから除荷を始めると、今まで引張り側にあった主鉄筋が面外に座屈し、さらに $-18\delta_y$ に向かう過程で、この面のかぶりコンクリートが剥落した。このように供試体の大部分の損傷は、ほとんど1サイクル目で生じてしまい、2サイクル目($\pm 15\delta_y$)以降にはそれほど大きな損傷の進展は生じなかった。

履歴曲線を図-8に示す。タイプ4では、1サイクル目の $18\delta_y$ に到る載荷では、降伏変位以降ほとんど耐力は一定値を保ったままであり、少なくとも $18\delta_y$ (108mm) までには耐力低下は生じない。タイプ3の終局変位は $12\delta_y$ であるから、タイプ4の終局変位は少なくともこの1.5倍に相当する。図-9は履歴曲線をその包絡線で比較したものである。正側(1番目のサイクルで荷重を作用させた側)では、タイプ3、4ともに同程度の耐力となっているが、負側では、1番目のサイクルの除荷時に圧縮側のかぶりコンクリートが大きく剥落するタイプ4では、この段階から耐力が低下し、115kNとタイプ3の77%になっている。

6. 一方向だけに載荷する場合の橋脚の動的特性

一方向だけに載荷した場合の損傷状況が図-10である。負側には載荷しないため、タイプ5の場合には3 δ_y 程度までは圧縮面では当然ながらほとんど引張り領域に入らないためひび割れは生じない。しかし4 δ_y を越すと、除荷時に圧縮面でも曲げ引張りひび割れが生じるようになった。これは、載荷振幅が大きくなると正側に残留変位が生じるようになり、荷重を0に戻した時の中立軸が圧縮面側にずれるようになったために、変位を0に戻す際に、圧縮面も引張り領域に入るようになったためである。さらに載荷を続けると、引張り面側での主鉄筋の面外方向への座屈が大きくなり、かぶりコンクリートが剥落していった。

これに対してタイプ6では、1サイクル目の $18\delta_y$ に向かう載荷においては、損傷状況はタイプ4と同じである。すなわち5 δ_y 程度までは、コンクリートの引張り面に曲げ引張りひび割れが生じるだけであるが、これを上回ると圧縮側のコンクリート面に圧縮によるひび割れが入り始め、 $12\delta_y$ に達するとかぶりコンクリートが剥離するようになる。この状態から除荷する過程での損傷状況もタイプ4と同じであり、この段階までは引張り側にあった主鉄筋が圧縮力を受けて面外方向に座屈し、この面のかぶりコンクリートも剥落した。ただし、タイプ4のように負側への載荷はしないため、最終的な損傷度合

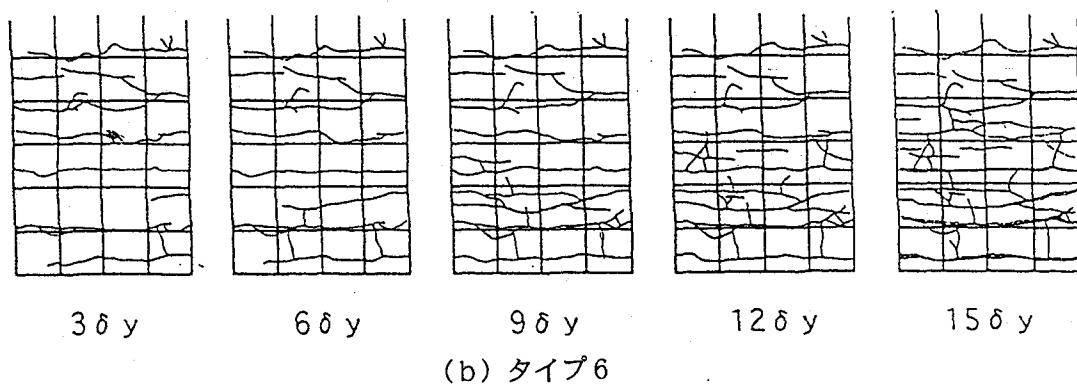
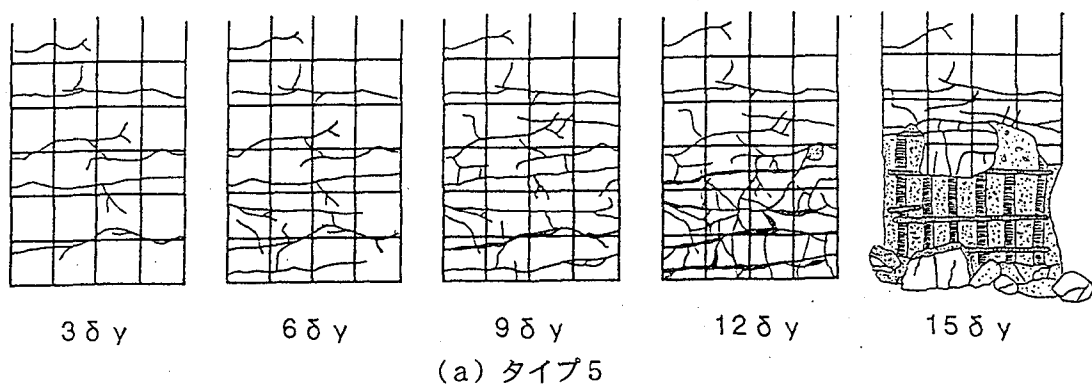


図-10 一方向だけに載荷した場合の損傷状況の比較

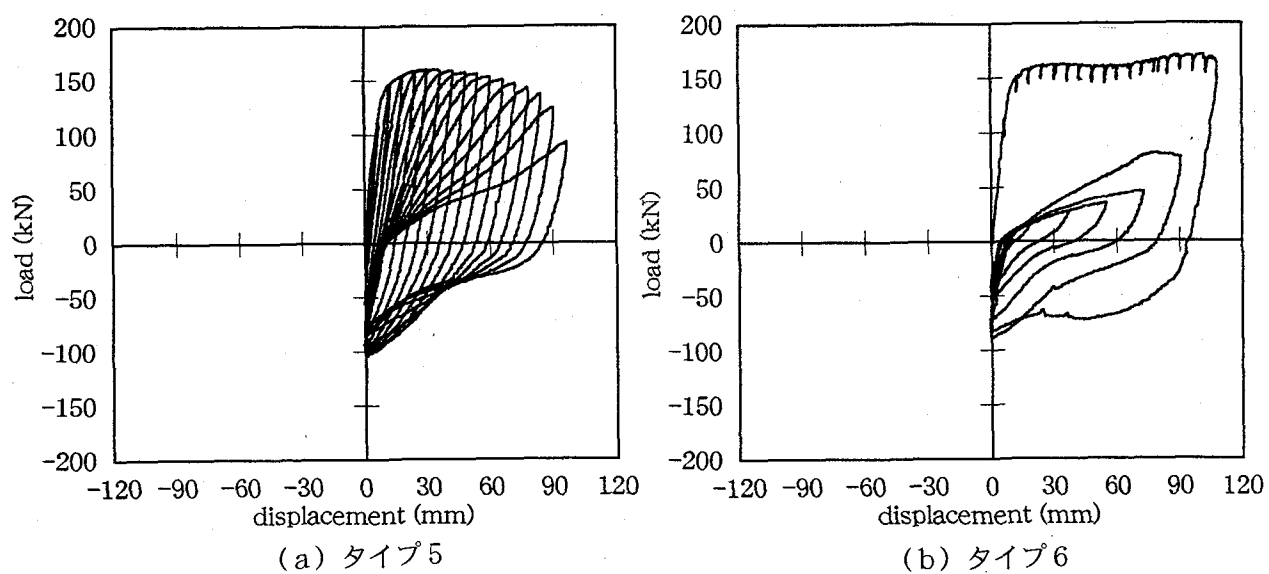
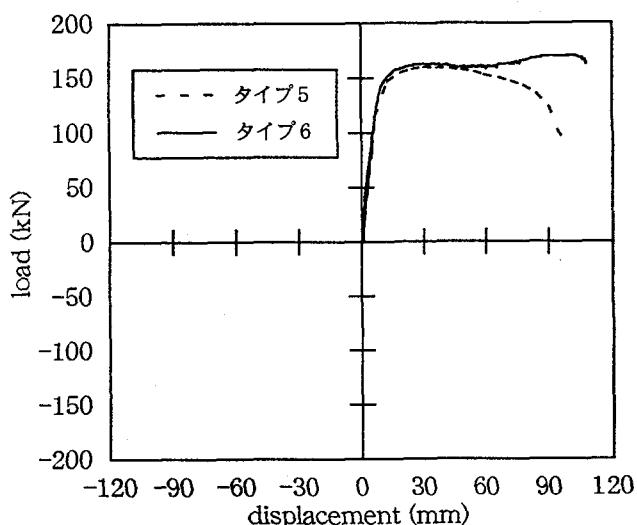
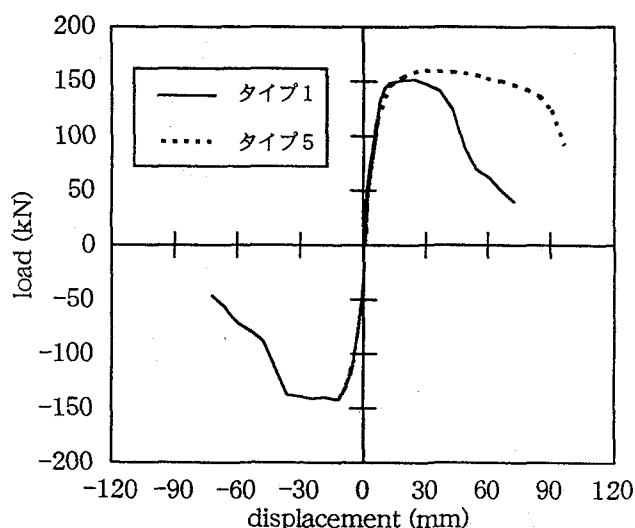


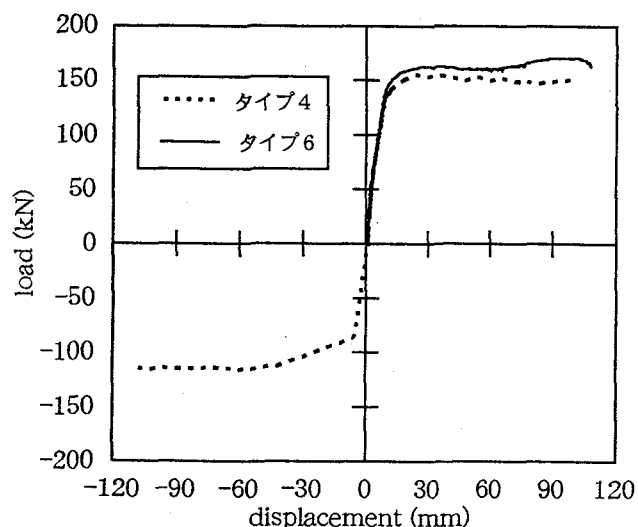
図-11 一方向だけに載荷した場合の履歴曲線の比較



(a) 一方向だけに荷重変位振幅を順次増加させる場合と減少させる場合



(b) 荷重変位振幅を順次増加させる場合



(c) 荷重変位振幅を順次減少させる場合

図-12 一方向だけに荷重した場合の履歴曲線の包絡線の比較

いはタイプ4よりも低い。

図-11に履歴曲線を、また、図-12にこの包絡線の比較を示す。図-12(a)からわかるように、タイプ5の耐力は荷重変位の増大とともに徐々に低下していく。これは、正負交番荷重のように引張り側のコンクリートが一時期に剥落することがないためである。また、図-12(b)でタイプ5とタイプ1の包絡線を比較すると、正側で最大耐力のはっきりした低下が始まるのは、当然タイプ5の方がタイプ1よりも遅いことがわかる。また、図-12(c)でのタイプ4とタイプ6の包絡線は正側ではほとんど同じであるが、これは上述したように、1サイクル目の正側の荷重における損傷メカニズムが同じであるためである。2サイクル目の正側の最大耐力に注目すると、タイプ4では約55kNであるのに対して、タイプ6では77kNとタイプ6の方が40%大きい。これは、タイプ6ではタイプ4のように負側には荷重していないため、引張り側のかぶりコンクリートの剥落がほとんど生じないためである。このように、一方向だけに偏って繰り返し荷重した場合には、引張り側のかぶりコンクリートの剥落が生じにくいという点から、同じだけの振幅で両方向に荷重した場合よりも損傷度は低くなる。

7. 結論

地震時にRC橋脚に作用する応答履歴と、従来行われてきた変位制御下の繰り返し荷重実験に採用されてきた荷重方法との間のギャップを埋めるための一環として、一定変位振幅漸増(減)型の荷重方式において、同一変位振幅の荷重繰り返し回数、荷重を単調増加させるか単調減少させるか、一方向側のみ荷重した場合の影響を、同一特性を有する曲げ破壊先行型の6体のRC供試体に対する荷重実験に基づいて検討した。フーチングから軸方向鉄筋の抜け出しの影響の評価など、まだいろいろ検討すべき事項が残っているが、本解析結果をまとめると、以下のようになる。

1) 一定変位振幅漸増方式において、変位ステップの増加割合および同一変位振幅における荷重繰り返し回数の組合せを、それぞれ $1\delta_y$ と3回(タイプ1)、 $1\delta_y$ と1回(タイプ2)、 $3\delta_y$ と1回(タイプ3)とすると、タイプ3の終局変位は $2\delta_y$ とタイプ1やタイプ2の約2倍となる。ただし、最大耐力や等価剛性に対する荷重履歴特性や荷重繰り返し回数の影響はほとんどない。

2) 一定変位振幅で荷重を漸増させるか漸減させるかによって、供試体の変形特性および耐力には大きな違いが生じる。すなわち、荷重を漸減させる場合には、最大変位に到る1サイクル目の正側の荷重時では、一方向荷重と同じ状態になるため終局変位が大きくなるが、この状態からの除荷過程では、引張り側のかぶりコンクリートが大きく損傷し、急速に耐力を低下させる。したがって、正側の耐力には違いは生じないが、負側の耐力は荷

重を漸減させる場合の方が漸増させる場合よりも小さくなる。

3) 変位ステップの増加割合と載荷繰返し回数が同じであれば、ある方向(正側)の変位にだけ載荷を漸増した場合には、正負交番載荷した場合に比較して最大耐力の低下割合が小さくなり、終局変位も増加する。同様に、正側の変位だけに繰返し載荷を漸減して加える場合には、上記2)に示した一定変位振幅漸減型の場合とよく似た特性を示す。ただし、負側に載荷しない分だけ、耐力の低下割合は正側のみに繰返し載荷する場合の方が小さい。

4) RC橋脚の変形性能や耐力は、載荷履歴や載荷繰返し回数によって大きく異なる。特に、上記1)の繰返し回数の影響は顕著である。地震動のタイプによってRC橋脚の地震応答は異なるため、耐震設計においては、地震動の特性に応じて同一の橋脚であってもその動的特性、特に終局変位を変化させていくことが大切である。例えば、遠距離大規模地震のように繰返し回数が多い地震動と、平成7年兵庫県南部地震による神戸のように強度は大きい繰返し回数が少ない地震動とでは、異なる終局変位を採用するといった方法が有効であると考えられる。

5) 今後の載荷実験に際しては、設計対象とする地震動の特性を念頭において載荷履歴を決めていくことが重要である。

謝辞

本研究に係わる実験に際しては、(株)ピー・エスの野村貞広氏をはじめ、佐藤幸一氏、桜田道博氏、日高重徳氏等の御援助を得ました。さらに、東京工業大学土木工学科研究生の細谷学氏には供試体の設置等で大変お世話になりました。さらに、実験に際しては、東京工業大学土木工学科の三木千壽教授、館石和雄講師、穴見健吾助手のご指導を得ました。ここに記して厚くお礼申し上げます。次第です。

参考文献

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、建設省、平成7年
- 2) 日本気象協会：気象庁87型電磁式強震計データ 平成7年兵庫県南部地震 神戸海洋気象台記録、平成5年
- 3) Nakamura, Y. : Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, JR Earthquake Information No.23c, Railway Research Institute, 1995.2
- 4) 川島一彦、長谷川金二：鉄筋コンクリート橋脚の非線形地震応答特性及びエネルギー一定則の適用性に関する実験的研究、土木学会論文集、No.483/I-26, pp.137~146, 1994.1
- 5) 山口隆裕、武村浩志、柳井修司、池田尚治：鉄筋コンクリート柱の耐震性能とその動的挙動、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.16, No.2, pp.1265~1270, 1994
- 6) 宇佐美勉、才塚邦宏、木曾英滋、伊藤義人：ハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の強震時挙動、土木学会論文集、No.519/I-32, pp.101~113, 1995.7
- 7) 川島一彦、長谷川金二、長島博之、小山達彦、吉田武史：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発に関する研究、土木研究所報告第90号、建設省土木研究所、1993.9
- 8) Kawashima, K. and Koyama, T. : Effect of cyclic loading hysteresis on dynamic behavior of reinforced concrete bridge piers, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.5. No.2, pp.343~350, 1988.10
- 9) 太田実：単一柱形式鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計法に関する研究、研究所報告第153号、建設省土木研究所、1980.3
- 10) 堺淳一、川島一彦、武村浩志：試設計に基づく耐震技術基準の変遷に伴うRC橋脚の耐震性向上度の検討、構造工学論文集、1997.3 (投稿中)

(1996年9月6日受付)