

応答初期に大変形を経験したRC橋脚の変形特性に 関する考察

高橋 良和*・家村 浩和**・杉本 高志***

*正会員 工（修）京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

**フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

***正会員 （株）石川島播磨重工業技術開発部（〒253-8501 横浜市磯子区新中原町1）

1. はじめに

兵庫県南部地震では、今まで想定していなかった強烈な地震動により、数多くの橋梁が甚大な被害を受けた。この地震の経験を受け、道路橋示方書¹⁾をはじめとして、ほとんどの設計示方書が改訂された。道路橋示方書では海洋型地震動だけでなく、新たに直下型地震動を考慮することとなった。そしてこれらの地震動の特徴として繰り返し回数を挙げ、特にRC橋脚ではこの載荷履歴を考慮して、橋脚の終局変位を設定するなど、積極的に載荷履歴を考慮しているといえる。

繰り返し回数がRC橋脚の変形性能に与える影響が大きいことは、多くの研究者により研究され、明らかとなってきた。しかし示方書では繰り返し回数の方に着目されているが、振幅パターンもまた載荷履歴の重要な要素である。武村・川島²⁾は、載荷履歴に着目した正負交番載荷実験を実施し、繰り返し回数のみならず、振幅を漸増させた場合と漸減させた場合の供試体の変形特性および耐力に大きな違いが生じることを指摘している。このような損傷過程が実際に生じるのかについてさらに検討が必要ではあるが、兵庫県南部地震以降もほとんど検討されていないのが現状である。

本研究ではまず、著者らが実施した兵庫県南部地震記録を用いたハイブリッド地震応答実験結果に対し、入力地震動が構造物の変位応答特性と履歴応答に及ぼす影響について検討する。その検討結果を参考として、RC柱の供試体を作成し、変位振幅漸増および漸減波形を用いて静的繰り返し載荷実験を実施した。ここでは変位-荷重関係や破壊性状などに着目し、載荷履歴がRC橋脚の損傷過程に及ぼす影響について検討した。さらに設計で良く用いられているファイバーモデル解析により載荷実験を再現し、どの程度載荷履歴の影響を表現できるか等について検討を行った。

2. 兵庫県南部地震記録を用いたハイブリッド地震応答実験

兵庫県南部地震以降、地震動に対する検討が数多く行われた。兵庫県南部地震は、神戸海洋気象台やJR鷹取駅記録に代表されるように、固有周期が0.3～1.0秒の比較的広い範囲で2Gを越える非常に強烈な地震動であった。兵庫県南部地震での地震記録で注目されたのは、その強さだけではない。その強烈な地震力が短時間に集中していたことも重要な特徴である。

このように、直下型地震の特徴は、大きなパワーを短時間に放出することと言える。それではこのような地震動がRC構造物に入力するとどのような応答を示すのか。著者らは中空断面RC橋脚および鋼管コンクリート橋脚模型に対し、正負交番載荷実験およびハイブリッド地震応答実験を実施しているが、そこで興味深い結果を得ている³⁾⁴⁾。

図-1,2に変位、履歴応答結果を示す。また正負交番載荷実験により得られた荷重-変位骨格曲線を同時に示している。供試体は対称断面を有することから、骨格曲線は原点对称の履歴形状をしている。同じ諸量を持つ供試体に対して、神戸海洋気象台記録を入力したハイブリッド実験を行った場合、橋脚が対称断面を有するにも関わらず、荷重-変位応答には正負側の耐力に大きな差が生じる応答を示している。ここで構造物は地震開始後まもなく急激な大変形を経験しており、処女載荷時のような応答を示している。このため履歴形状に差が表れたと考えられる。これは直下型地震による応答特性をよく表しているものと考えられる。本実験では中空断面橋脚を対象にしていることからその影響は大きく現れていることも考えられるが、このような応答は従来行われてきている正負交番載荷実験では、表現できない恐れがある。このような非対称履歴は入力地震動と大きく関係すると思われるが、タイプII地震動に対する橋脚の応答性状に対応した静的載荷実験の

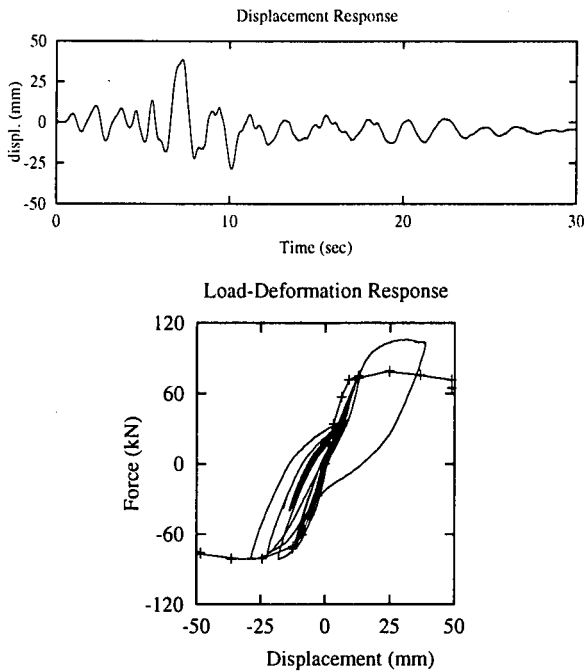


図-1 中空断面 RC 橋脚のハイブリッド実験結果³⁾

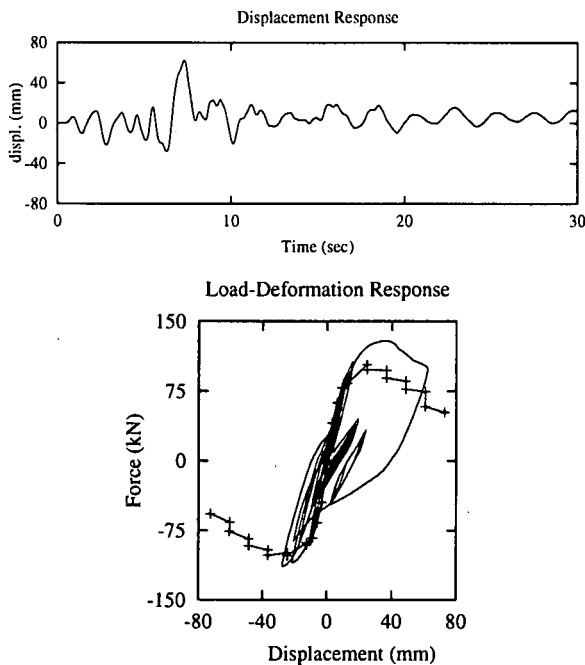


図-2 鋼管コンクリート橋脚のハイブリッド実験結果⁴⁾

検討を含め、載荷履歴の影響をさらに検討する必要がある。

3. 載荷履歴に着目した正負交番載荷実験

3.1 実験概要

先のハイブリッド地震応答実験では、構造物が応答初期に大変形を経験する可能性が示された。そこでこの様な載荷履歴を静的実験でも考慮する必要があると考える。ここでは振幅漸増、漸減型波形を用い、正負

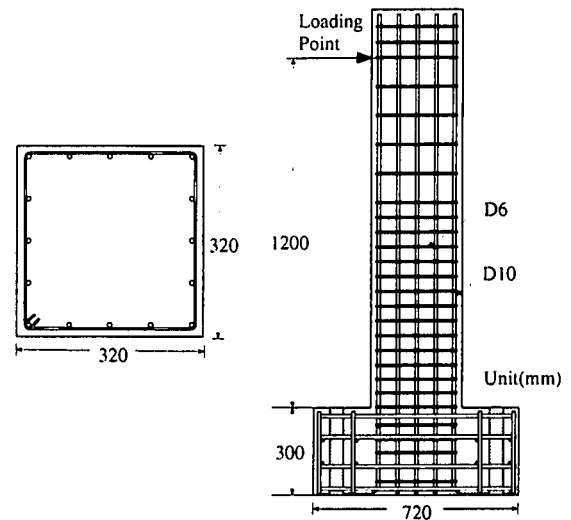


図-3 実験供試体

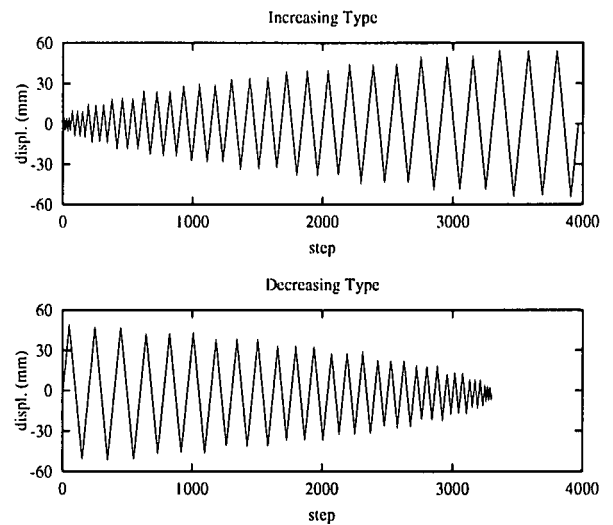


図-4 入力載荷波形

交番載荷実験を行った。

本実験で用いた RC 柱供試体形状を図-3 に示す。せん断スパン長 1200 mm (せん断スパン比: 4.1)、またスターラップ間隔を 50 mm とした。主鉄筋には SD295 D10 を、スターラップには SD345 D6 を用いている。

載荷は一定軸力下 (面圧 2.87 MPa) で、正負交番載荷を行った。載荷波形として 2 パターン用い、1 つは従来より標準的に用いられている変位振幅漸増型であり、降伏変位 5 mm を δ_y とし、その整数倍の増分でそれぞれ 3 回繰り返した。2 つめに最大変形を地震直後に経験する波形を模擬するものとして、漸減型波形を設定した。漸増型の実験結果において耐力が低下し始める変位 $10 \delta_y$ を最大振幅として、 $1 \delta_y$ ずつ変位振幅を小さくした。繰り返し回数は 3 回である (図-4)。

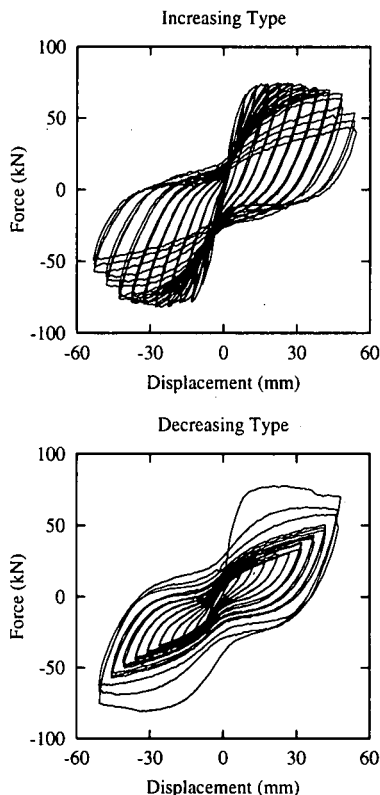


図-5 荷重-変位履歴

3.2 実験結果及び考察

(1) 荷重-変位履歴

実験より得られた荷重-変位履歴を図-5に示す。降伏変位は両供試体とも約5mmであり、降伏後は耐力をほぼ一定に保ちながら終局または除荷点に至った。耐力に関しては、正側ではわずかに漸減型の方が大きい値となったが、これは漸減型では1サイクル目は片押し載荷と同じであり、繰り返し損傷を受けていないためである。また負側については当初予想していたほどではないが、漸減型の方が耐力が小さくなった。これは正側での損傷のためと、漸増型では変位の小さいときは繰り返し損傷が少ないためである。加えて漸減型では最大振幅が $7\delta_y$ の時点で主鉄筋が疲労破断した。これは耐力には目立った影響はなかったが、漸増型では見られない現象であり、また繰り返し載荷の途中であることから片押し載荷であっても見られない現象と思われる。

(2) ひび割れ性状

載荷時のひび割れ図を図-6に示す。漸増型では曲げひび割れが支配的に発生している。また圧縮による縦ひび割れは変位が $6\delta_y$ から著しくなり、 $7\delta_y$ ではかぶりコンクリートの剥離が起こった。しかし損傷の進展は緩やかであった。これに対し漸減型では、1サイクル目でひび割れは急激に中央部を越え、端から6cmまで曲げひび割れであったものが、中央付近でせん断ひび割れに移行した。これらの損傷に伴い2サイクル目で

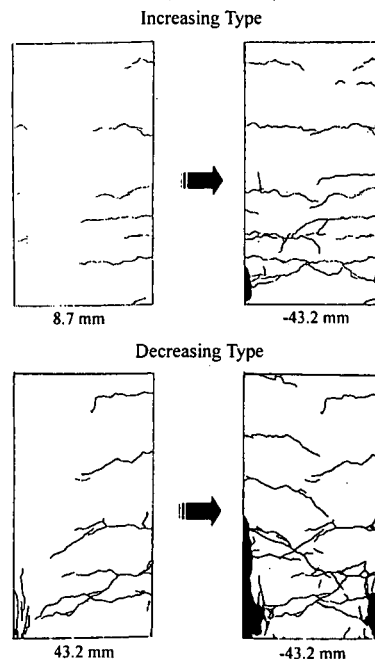


図-6 ひび割れ性状

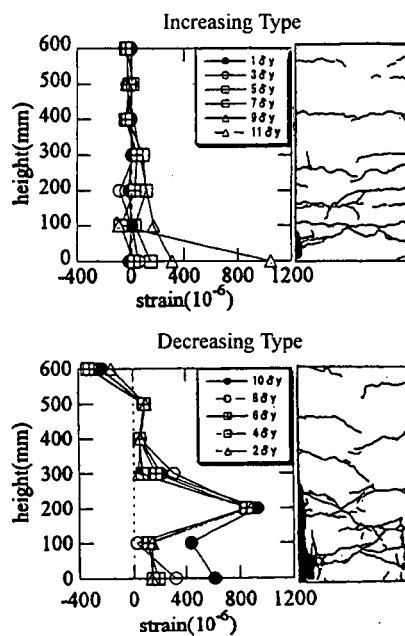


図-7 スターラップひずみ分布

コンクリートの剥離、剥落が起こり、耐力が急激に減少した。これらは急激な変形によりひび割れが内部まで進展するため、抵抗断面が減少し、せん断の影響が大きく現われたためである。このように振幅パターンの差異により、耐力のみならず破壊性状も異なるものとなった。

(3) スターラップひずみ

スターラップの高さ方向のひずみ分布および実験終了時のひび割れ図を図-7に示す。漸増型ではひずみのほとんどが 400μ 以内に収まっており、基部の損傷が

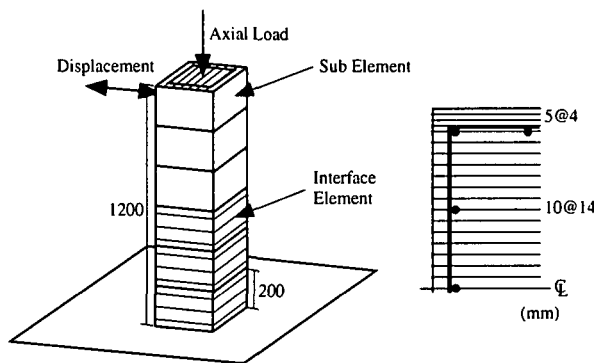


図-8 ファイバーモデル解析概要

表-1 材料モデル	
拘束コンクリート：修正六車モデル	
最大応力度： σ_c	27.0 MPa
最大応力時ひずみ： ϵ_c	3870 μ
終局ひずみ： ϵ_{cu}	17900 μ
鉄筋：Menegotto-Pinto モデル	
初期弾性係数： E_{s1}	210.0 GPa
2次剛性： E_{s2}	0.02 E_{s1}
降伏ひずみ： ϵ_{sy}	1600 μ
バウジンガー効果定数：R	19.8

激しい載荷終盤で一部大きな値を取っているのみである。スターラップの降伏ひずみが約 2000 μ であることを考えても、漸増型では曲げ破壊モードが卓越していたと言える。しかし漸減型においては、斜めひび割れが交差している位置でひずみが 1000 μ 程になり、漸増型よりもせん断の影響が大きいことが分かる。

4. 正負交番載荷解析

4.1 解析手法

本解析は Ristić らが強震時の非線形構造物応答を予測するため開発したファイバーモデル解析手法による部材変形解析⁶⁾によって RC 橋脚の静的正負交番載荷による変形性能を照査するものである。モデル供試体の各要素を図-8 に示すように分割した。載荷条件は実験と同じとする。表-1 に材料モデルの諸定数を示す。拘束コンクリートの応力-ひずみ関係のスケルトンについては道路橋示方書¹⁾に従った。かぶりコンクリートは帯鉄筋による横拘束を受けていないために、最大圧縮応力は 24.4 MPa、その時のひずみを 2000 μ とした⁷⁾。コンクリートの終局ひずみは、応力が低下域に入り 0 になるときのひずみとし、引張り強度は無視した。

4.2 実験再現解析

本解析法を用いて、実験結果の再現を試みた。実験では部材の変形の他に、基部での鉄筋の抜け出しが無

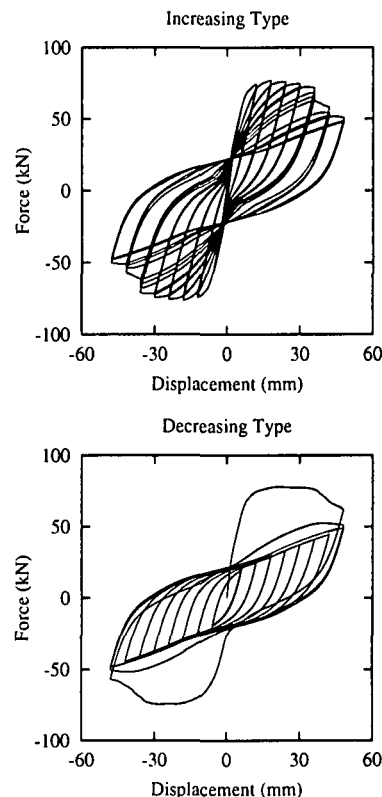


図-9 実験再現解析

視できない。そこで基部で測定した変位を用いて基部でのモーメント-回転角関係を求め、この包絡線を鉄筋抜け出し特性とした⁸⁾。この非線形バネをファイバーモデルの基部に取り付け、解析を行った。ここでバネの特性は、振幅漸増ケースについて調整している。

解析結果を図-9 に示す。振幅漸増ケースでは、ほぼ実験結果を再現できているのに対して、漸減ケースでは実験より解析の方が大きく損傷しており、再現できているとはいえない。この原因として、載荷履歴により鉄筋の抜け出し特性も異なっていることが考えられる。そこで本研究では、部材変形に載荷履歴が与える影響を特に着目するため、解析上基部は固定とし、比較検討を行うこととした。

4.3 処女載荷振幅の影響

まず、処女載荷の振幅を $2\Delta_y$ から $10\Delta_y$ まで変化させ、履歴形状に与える影響について検討した。

図-10 に解析結果を示す。正側への処女載荷における耐力は当然ながらいずれも同じであるのに対し、負側での耐力は正側への処女載荷振幅が大きくなるにつれて小さくなっている。これはコンクリートの応力-ひずみ履歴関係と大きく関係しているが、正側処女載荷振幅が大きい場合には、圧縮側コンクリートが圧壊し、変形が小さくても以後は応力を負担できないことに起因している。

ただ、負側の耐力の差は大きくない。実際には鉄筋

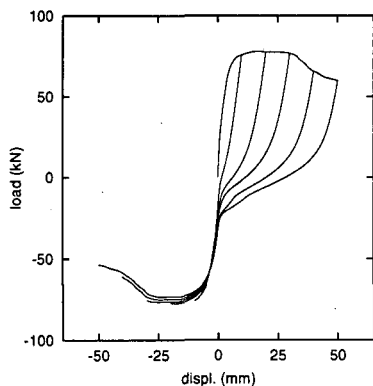


図-10 処女載荷振幅による影響

表-2 入力波形		
解析ケース	振幅パターン	繰り返し回数
I10	漸増	10
I3	漸増	3
D3	漸減	3

の座屈等が生じるため、本解析結果より大きく差が生じるものと考えられ、この影響を考慮した解析が必要と考えられるが、処女載荷振幅により正負側のスケルトン曲線の耐力差が生じることが分かる。

4.4 入力履歴の影響

ここでは振幅パターンと繰り返し回数をパラメータとして解析を行った。用いた入力波形を表-2に示す。

(1) 終局点に関する検討

道示では、入力地震動の違いをコンクリートの終局ひずみの差として表現している。そこでここでは、各載荷履歴における終局ひずみと終局点に着目して検討を行った。

解析より得られた解析ケース I3 と D3 の荷重-変位履歴曲線及び最外縁コアコンクリートの応力-ひずみ履歴曲線を図-11に示す。終局点として、最外縁コアコンクリート応力の最大点（道示タイプ I 地震動に対する終局点、a 点とする）、その 80%まで低下した点（道示タイプ II 地震動に対する終局点、b 点）降伏後耐力が低下し始める点（c 点）、最大耐力の 80%まで低下する点（d 点）を設定し、図-11 上に示した。また最大耐力点も示してある。

実際の設計において用いられる a、b 点については、特に載荷履歴による違いは確認できなかった。これら 2 点とも耐力がほぼ一定に保持されている区間に位置し、載荷履歴の影響がそれほど顕著ではないためと考えられる。c 点を比較した場合も変位は 30~34 mm であり明確な差は表われなかった。d 点では、変位はそれぞれ 35mm、45mm であり、降伏変位が 5mm であることから韌性率は 7、9 と大きな差が現われた。これ

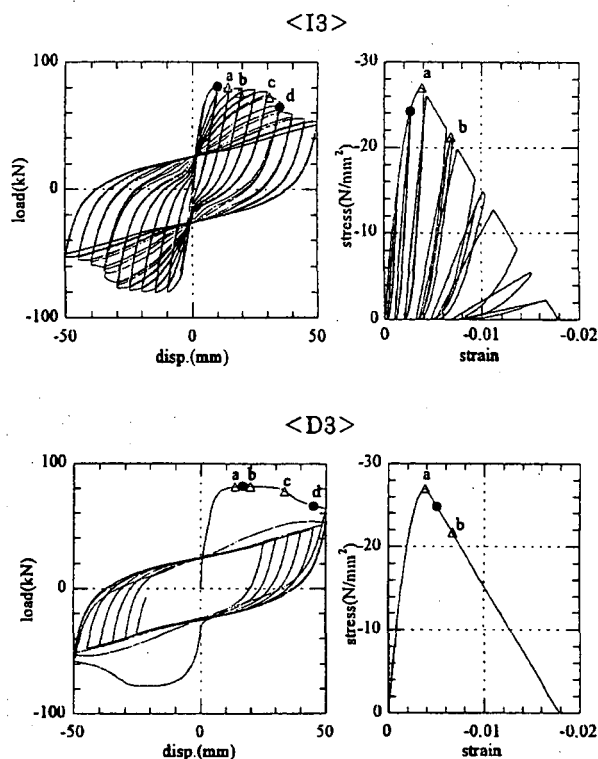


図-11 荷重-変位応答および応力-ひずみ応答

は c 点以後、コアコンクリートの破壊が進行し、繰り返し回数の多い I3 では耐力が急速に減少していったためである。以上より、道示レベルでは載荷履歴の差はあまり見受けられないが、実挙動の終局と考えられる d 点では大きな差が現れた。

(2) 耐力に関する検討

荷重-変位履歴曲線の包絡線を比較した図を図-12に示す。漸増型と漸減型を比べると、漸増型は原点に対してほぼ対称であるのに対し、漸減型では正側でやや大きく、負側で小さくなっており、それほど顕著ではないものの、載荷履歴の影響が確認できる。また負側では変位が約 $-2\delta_y$ までは漸増型の方が耐力が大きいが、約 $-6\delta_y$ から耐力低下が際立ち、繰り返し回数が多い I10 はさらに耐力が低下している。これに対し漸減型では耐力低下が緩やかであることがわかった。これは負側で変位の小さい時には繰り返し損傷の少ない漸増型の方が耐力が大きく、正側で大きな損傷を受けた漸減型の方が耐力が低下しやすいためと思われる。また変位が大きくなると繰り返し損傷を受けた漸増型の方で、さらに繰り返し回数の多い I10 の耐力が大きく低下することになった。

5. 動的解析との対応

タイプ II 地震動に対しても正負交番載荷実験が地震応答を模擬することができるためには、ここまで述べてきたような載荷初期に大きな変形を与える場合との

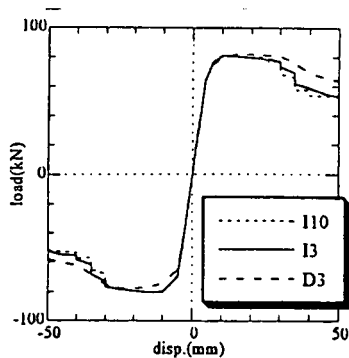


図-12 各解析ケースの包絡線

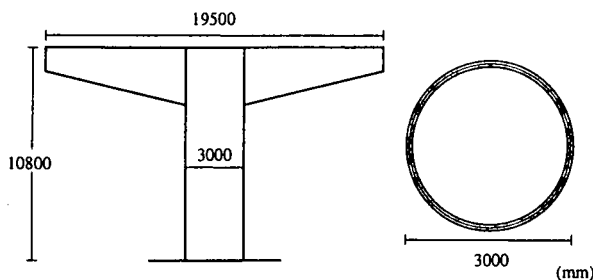


図-13 解析対象橋脚

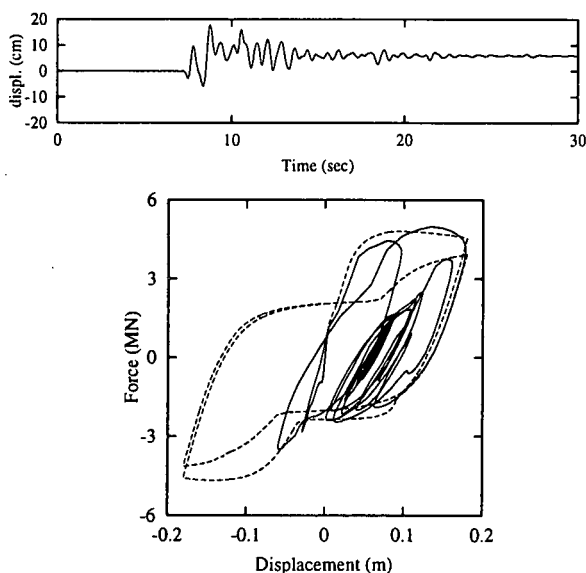


図-14 動的解析と正負交番載荷解析結果の比較

対応性を検討する必要がある。一般に大変形時における繰り返しは耐力低下が激しいので、タイプ II 地震動での RC 橋脚の応答を模擬するためには、大変形で 2 回程度、正負交番載荷をすればよいと考えられる。そこで、都市内高速道路の標準的橋脚である図-13 に対して、大振幅 2 回正負交番載荷解析結果と、タイプ II 地震動を用いた動的解析結果とを比較する。

図-14 に神戸海洋気象台記録を用いた動的解析と正負交番載荷解析（点線）結果を示す。動的解析結果を見ると一方向へ片流れをしているため、正側ではまず一回目の載荷の骨格曲線に近い履歴を示し、それ以降

は二回目の載荷骨格曲線と対応していることが分かる。非対称履歴の問題についてはさらに検討が必要であるが、大変形正負交番載荷解析（実験）と動的解析とを対応づけることは可能であると考えられる。

6. まとめ

- 神戸海洋気象台波形を用いたハイブリッド地震応答実験では、構造物が応答初期に大変形を呈し、履歴が非対称となる可能性が示された。
- 変位振幅漸増型と漸減型波形を用いた静的実験では、正側では漸減型の方がわずかに耐力が大きいが、負側では変位の小さい時は損傷の激しい漸減型の方が耐力が小さくなることがわかった。また漸増型では曲げひび割れが支配的であるのに対し、漸減型では曲げせん断ひび割れが多く発生した。すなわち載荷履歴は単に耐力だけに影響するのではなく、損傷性状に与える影響も大きい。
- ファイバーモデル解析手法により、漸減型における正負の耐力のアンバランスなど、載荷履歴に関して実験を定性的に再現できており、ある程度評価することはできる。しかしながら、実験では漸減型ではせん断の影響が大きくなるなどが確認されており、大変形時におけるせん断変形の影響や鉄筋の座屈を考慮した解析が必要と考える。
- タイプ II 地震動による動的解析結果と大振幅正負交番載荷載荷結果の履歴性状は似ており、応答特性を模擬することは可能であると考えられる。さらに非対称履歴が動的応答に及ぼす影響について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書同解説 V 耐震設計編，1996。
- 2) 武村浩志・川島一彦：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，構造工学論文集，Vol.43A，pp.849-858 1997。
- 3) 家村浩和・高橋良和・田中克直・前堀伸平：中空断面 RC 高橋脚の耐震性能に関する載荷実験，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2105-2110 1998。
- 4) 家村浩和・加藤敏明・高橋良和・前堀伸平：鋼管・コンクリート複合構造橋脚の耐震性能に関する載荷実験，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，第 2 分冊，pp.2099-2104 1998。
- 5) 高橋良和・家村浩和・杉本高志：RC 橋脚の損傷に載荷履歴が及ぼす影響に関する位置考察，第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，Vol.2，pp.713-716 1999。
- 6) Danilo Ristić, Yoshikazu Yamada and Hirokazu Iemura: Stress-Strain Based Modeling of Hysteretic Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads, KUCE, No.86-ST-01 1986。
- 7) 堺淳一・川島一彦：ファイバー要素を用いた地震応答解析における上下方向応答に関する検討，第 2 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.379-382 1998。
- 8) 幸左賢二・小林和夫・村山八州雄・吉澤義男：大型 RC 橋脚模型試験体による塑性変形挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，No.538 / V-31，pp.47-56 1996。