

RC 橋脚の損傷に載荷履歴が及ぼす影響に関する一考察

高橋 良和¹・家村 浩和²・杉本 高志³

¹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)

²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)

³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)

RC 橋脚の性能を照査する実験手法として、正負交番載荷実験がよく用いられている。兵庫県南部地震後に改訂された道路橋示方書では、考慮すべき地震動を2種類に分け、実験結果を参考に、これら地震動による載荷履歴を考慮して橋脚の終局変位を設定している。一方、神戸海洋気象台波などを用いた検討では、構造物が地震開始後すぐに最大変形を経験し、その損傷過程は従来の正負交番載荷実験の結果と異なることがあることが報告されている。すなわち繰り返し回数だけでなく、振幅パターンもまた載荷履歴として考える必要がある。本研究では載荷履歴が RC 橋脚の損傷過程に及ぼす影響を、載荷実験および数値解析により検討した。

Key Words : RC pier, loading history, cyclic loading analysis

1. はじめに

RC 橋脚の性能を照査する実験手法として、正負交番載荷実験がよく用いられている。この実験は、両方向に繰り返し変形を経験させるため、地震入力による繰り返し応答を模擬するものと考えられている。道路橋示方書¹⁾では、考慮すべき地震動として海洋型地震動と直下型地震動を挙げている。そしてこれらの地震動の違いとして繰り返し回数を挙げ、この載荷履歴を考慮して、橋脚の終局変位を設定している。示方書では繰り返し回数だけ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。図-1 に著者らが実施したハイブリッド地震応答実験結果²⁾を示すが、本実験では構造物が地震開始後まもなく急激な大変形を経験し、対称断面にも関わらず、荷重-変位応答には正負側の耐力に大きな差が生じる結果となった。このような損傷過程は従来の徐々に振幅を大きくしていく実験方法では適切に表現できない恐れがある。

本研究ではまず、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実験を実施した。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比較検討した。次に数値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. 静的載荷実験

(1) 実験概要

本実験で用いた RC 柱供試体形状を図-2 に示す。せん断スパン長 1200 mm (せん断スパン比: 4.1)、また

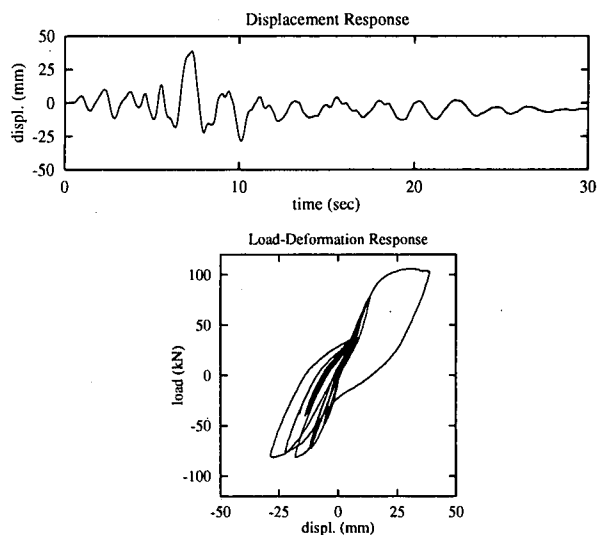


図-1 神戸海洋気象台記録によるハイブリッド実験結果

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 を用いた。

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回繰り返しとした。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-3)。

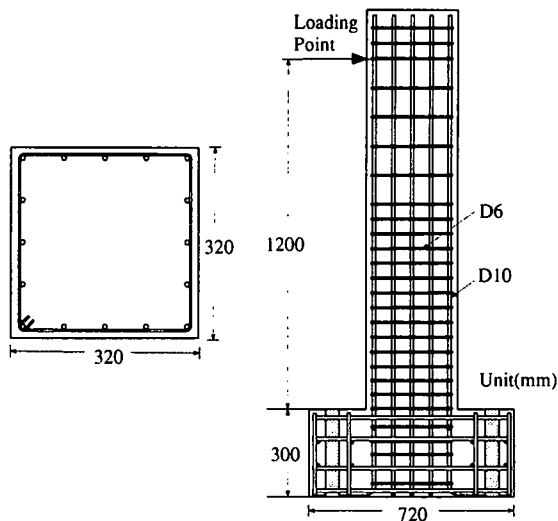


図-2 実験供試体

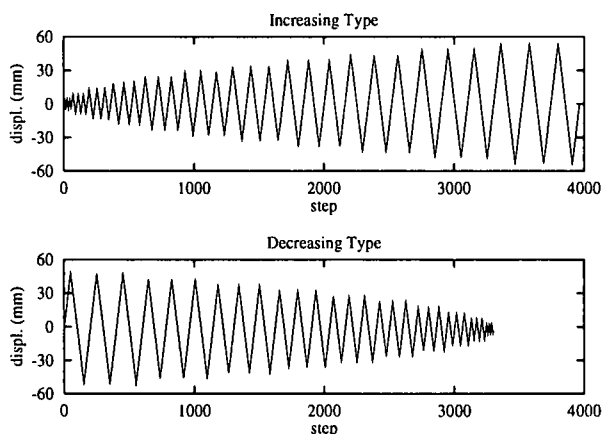


図-3 入力載荷波形

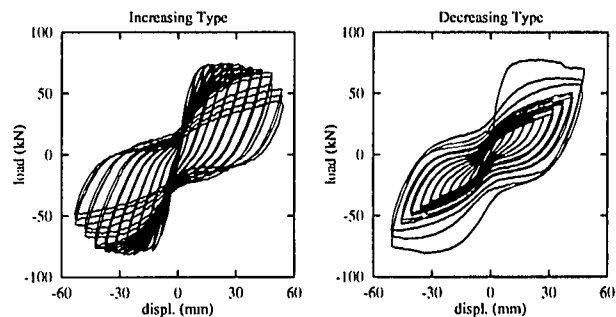


図-4 荷重-変位履歴

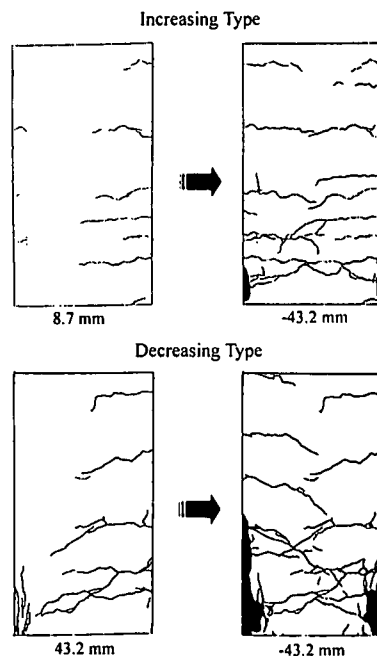


図-5 ひび割れ性状

(2) 実験結果及び考察

a) 荷重-変位履歴

実験より得られた荷重-変位履歴を図-4に示す。降伏変位は両供試体とも約5 mm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。

b) ひび割れ性状

載荷時のひび割れ図を図-5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6 cm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。

c) 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-6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 2000μ 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 1000μ 程になり、漸増

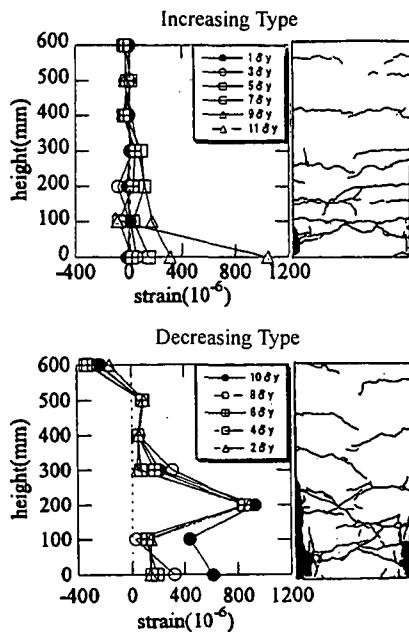


図-6 スターラップひずみ分布

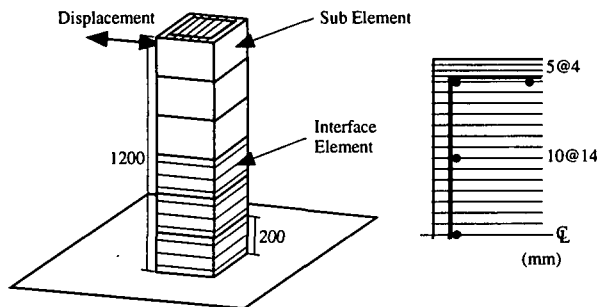


図-7 ファイバーモデル解析概要

型よりもせん断の影響が大きいことが分かる。

3. 正負交番載荷解析

(1) 解析手法

本解析では 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³⁾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-7 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。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平成 8 年度道路橋示方書に従った。ただし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。

(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

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
バウジング効果定数： R	19.8

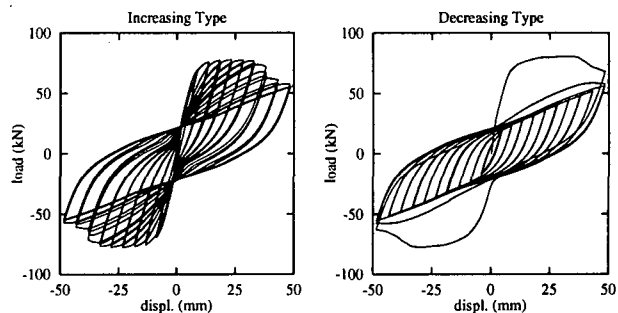


図-8 実験再現解析

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

抜け出し特性とした。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-8 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を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。

(3) 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。

a) 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

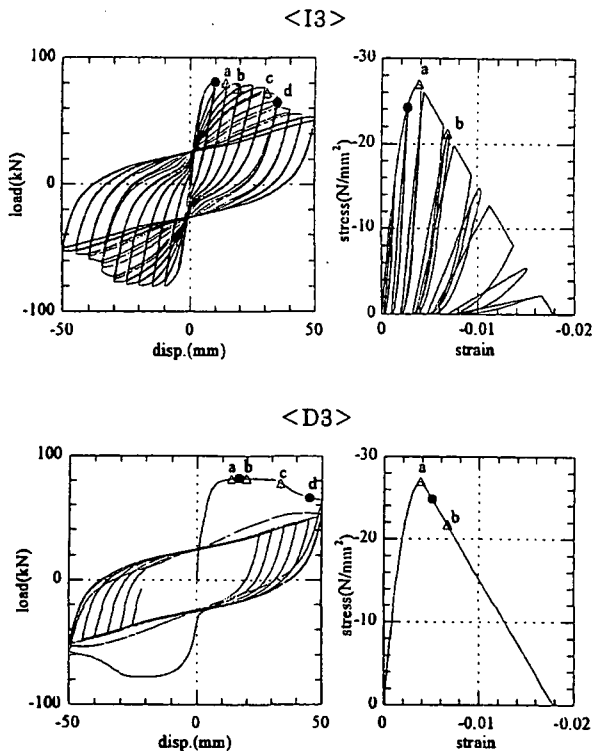


図-9 荷重-変位応答および応力-ひずみ応答

曲線を図-9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-9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、特に荷重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、荷重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30～34mm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であることから靱性率は7、9と大きな差が現われた。これはc点以後、コアコンクリートの破壊が進行し、繰返し回数の多い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、道示レベルでは荷重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。

b) 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-10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、荷重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

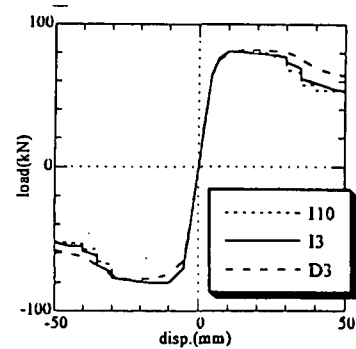


図-10 各解析ケースの包絡線

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返し損傷を受けた漸増型の方で、さらに繰返し回数の多いI10の耐力が大きく低下することになった。

4. まとめ

荷重履歴として変位振幅漸増型と漸減型波形を用いた実験では、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。すなわち荷重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ことが明らかとなった。そのため、早期に大変形を生じる損傷形態に関する評価手法が求められる。

またファイバーモデル解析手法により荷重履歴の影響を検討した結果、漸減型における正負の耐力のアンバランスなど、繰返しや振幅パターンに関し、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、さらに検討が必要である。

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) 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荷重実験，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，第2分冊，pp2105-2110 1998.
- 3) Danilo Ristić et. al：Stress-Strain Based Modeling of Hysteretic Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads，KUCE，No.86-ST-01 1986.
- 4) 武村浩志・川島一彦：荷重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，pp849-858 1997.