

主鉄筋段落としを有するRC橋脚の破壊特性

栗田裕樹¹・佐々木智大²・川島一彦³・渡邊学歩⁴・右近大道⁵・梶原浩一⁶

¹ 学生会員 東京工業大学工学部土木工学科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

² 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 修士課程（同上）

³ フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻（同上）

⁴ 正会員 工博 東京工業大学大学院助手 理工学研究科土木工学専攻（同上）

⁵ 正会員（独）防災科学技術研究所（〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21）

⁶ 正会員 工博（独）防災科学技術研究所（同上）

1. まえがき

1995年兵庫県南部地震では主鉄筋段落とし部を有する橋脚にせん断破壊が発生し、倒壊や落橋といった甚大な被害を引き起こした。我が国では1978年宮城県沖地震あたりから主鉄筋段落とし部を有する橋脚の被害が知られ始め、1982年浦河沖地震により静内橋の被害が生じたのを契機に、その重大性が注目されるようになった¹⁾。また、1978年宮城県沖地震の被害を受け、1980年道路橋示方書において主鉄筋の定着長の規定やコンクリートの許容せん断応力の見直しが行なわれた。

その後、主鉄筋段落としによる影響やその判定法が山本ら²⁾、尾坂ら³⁾、川島ら⁴⁾によって開発されてきた。兵庫県南部地震以降には、池端らによって主鉄筋段落とし部で曲げせん断破壊した橋脚の実験的研究が行なわれている⁵⁾。この中で池端らは、隣り合う外見上同一の2基の橋脚のうち一方が倒壊しもう一方が倒壊しなかったことに着目し、鉄筋の配筋により大きく損傷が異なることを示している。

以上のように、主鉄筋段落とし部の定着長不足による曲げせん断破壊に関して現在までいろいろな検討が行なわれてきている。しかし、主鉄筋段落とし部を有するRC橋脚の載荷履歴による影響に関する研究はまだ少ない。そこで今回、主鉄筋段落としを有するRC橋脚を用いた実験を行ない、載荷履歴による破壊特性への影響を検討する。

2. 実験供試体および載荷方法

(1) 実験供試体

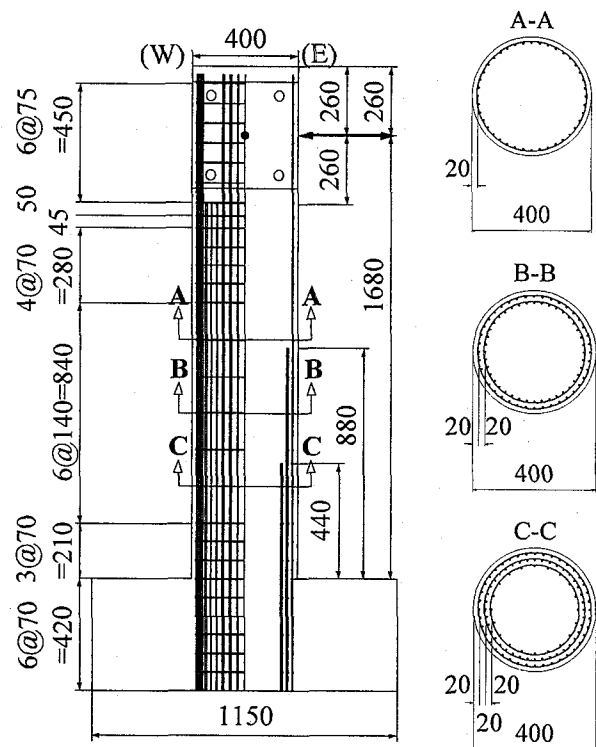


図-1 実験供試体

直径400mmの円形断面を有するRC単柱式橋脚模型を3体製作した。模型の特性を図-1に示す。この模型は、E-defenseで計画されているC1実験における実大RC橋脚模型（以下C1模型と記す）を1/4.5に縮小したものであり、基部から水平アクチュエータまでの有効高さは1680mm、せん断支間比は4.2である。

軸方向鉄筋にはSD345、径6mmの異形鉄筋を、帯鉄筋にはSD295、径3mmの異形鉄筋を使用した。

表-1 軸方向鉄筋比および帯鉄筋比

基部からの高さ (mm)	軸方向鉄筋		帯鉄筋	
	本数	面積比	間隔	体積比
0 ~ 210	100	0.025	70mm	0.0026
210 ~ 440	100	0.025	140mm	0.0012
440 ~ 880	80	0.02	140mm	0.0009
880 ~ 1050	40	0.01	140mm	0.0002
1050 ~ 1680	40	0.01	70mm	0.0010

表-2 載荷方法およびコンクリート強度

載荷方法	1 方向 プッシュオーバー	1 方向繰り返し	1 方向ハイブリッド
コンクリート強度	22.4MPa		26.4MPa
弾性係数	25.1GPa		21.2GPa

軸方向鉄筋は、C1 模型の基部では SD345、径 32mm で、軸方向鉄筋比 2.5%であることから、本実験では鉄筋径を 6mm とし、軸方向鉄筋比がほぼ 2.5%となるように軸方向鉄筋の本数を 100 本とした。また、C1 模型ではフーチング上面より高さ 1.95m と 3.95m の 2 箇所です中定着されているため、縮小模型においてはフーチング上面より 440mm と 880mm の高さです中定着した。軸方向鉄筋の本数は、基部から下部段落とし部までは 100 本、下部段落とし部から上部段落とし部までは 80 本、上部段落とし部より上は 40 本とした。引張試験によれば、軸方向鉄筋の降伏強度は平均 382.4MPa、引張強度は平均 524.9MPa、弾性係数は平均 190.4GPa である。

帯鉄筋は、C1 模型の基部では SD295、径 10mm、帯鉄筋の体積比が 0.26%であることから、縮小模型では帯鉄筋径を 3mm とし、帯鉄筋の体積比がほぼ 0.26%になるようにフーチング上面から 210mm までを 70mm 間隔とした。基部以外も C1 模型との整合を考慮し、フーチング上面より 210mm から 1050mm までは 140mm 間隔、1050mm より上は 70mm 間隔とした。すべての供試体で定着は重ね継ぎ手とし、定着長は鉄筋径の 30 倍とした。帯鉄筋の引張試験は試験装置の制約から行なえなかったが、軸方向鉄筋とほぼ同じ特徴を有していると考え。

以上より、供試体の軸方向鉄筋比および帯鉄筋の体積比は表-1 のようになる。

コンクリートには普通ポルトランドセメントを使用し、粗骨材の最大粒径は 13mm とした。スランブは 18cm、載荷実験前後に行なったテストピースに対する一軸圧縮試験の結果は表-2 に示すとおりである。

(2) 載荷方法

東京工業大学の耐震実験施設を用いて、1 方向のプッシュオーバー載荷、繰り返し載荷、ハイブリッド載荷を各 1 体ずつ行なった。

a) 1 方向プッシュオーバー載荷

基部から高さ 1680mm の位置を水平アクチュエータにより変位制御で 1 方向に載荷した。これとは直交方向にもう 1 本の水平アクチュエータを取り付け、載荷直交方向に模型が倒れないように変位制御した。また、一定軸力 145kN を鉛直アクチュエータで荷重制御により橋脚上端に作用させた。以下に示す 1 方向繰り返し載荷、1 方向ハイブリッド載荷も同様の条件で行なった。

載荷速度は 1mm/sec とし、損傷状況を確認するため、ドリフト 0.5% (=8.4mm) ごとに平均して 10 分間載荷をホールドし、最終的に模型が破壊したドリフト 3.5%まで載荷した。

b) 1 方向繰り返し載荷

ドリフト 0.5%を基準に、この整数倍のドリフトで変位制御により繰り返し載荷した。ただし、ドリフト 0.5%の載荷前に慣らしとしてドリフト 0.1%の載荷を行なった。同一変位の繰り返し回数は 3 回とし、3 回の繰り返しに要する時間を 100sec とした。載荷は模型が破壊したドリフト 3.0%まで行なった。

c) 1 方向ハイブリッド載荷

桁・橋脚系を、1 方向地震力を受ける 1 質点系としてモデル化し、ハイブリッド載荷を行なった。相似率は、長さは S (=1/4.5)、時間および応力は 1.0 とした。相似則に基づき質量、加速度の相似率を求めると、ともに 1/4.5 となる。各パラメータは表-3 のとおりである。入力地震動としては、図-2 に示す 1995 年兵庫県南部地震において JR 鷹取駅で

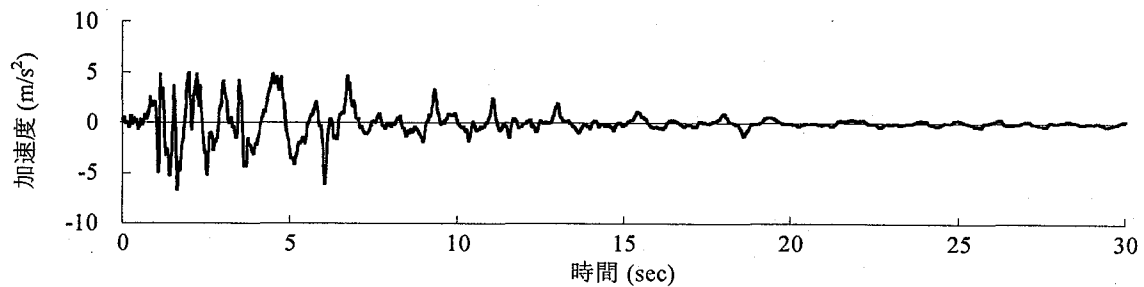


図-2 入力地震動

表-3 1方向ハイブリッド載荷に用いた各パラメータ

相似比	$S=1/4.5$
寸法 L	$S=1/4.5$
時間・周期 T	1
質量 M	$S=1/4.5$
速度 LT^{-1}	$S=1/4.5$
加速度 LT^{-2}	$S=1/4.5$
応力 $ML^{-1}T^{-2}$	1
荷重 MLT^{-2}	$S^2=1/20.25$
剛性 MT^{-2}	$S=1/4.5$
密度 ML^{-3}	$S^{-2}=20.25$

観測された EW 成分を用い、加速度振幅を 22.2% ($=1.0/4.5$) に縮小した。

数値積分には Shing らの方法⁶⁾を用い、さらにアクチュエータによる P-Δ 効果の補正⁷⁾も行なった。初期剛性には、1 方向繰り返し載荷実験で最初に行なった慣らし載荷によって得られた荷重～変位関係より、これを線形近似して得られた剛性 (11kN/mm) を使用した。また、減衰定数は 2%、積分時間間隔は 0.02 秒とした。

(3) 計測

各実験において、模型に作用させた鉛直力、水平力、載荷点における水平変位および鉛直変位、軸方向鉄筋と帯鉄筋のひずみ、さらに鉛直方向の相対変位、橋脚基部から一定の高さにおける水平変位をそれぞれ測定した。

3. 1 方向プッシュオーバー載荷実験

0.5%ドリフトごとの損傷の進展を図-3 に示す。ここで、載荷は E 方向から W 方向に行なっている。ドリフト 1～1.5%では、E 面の基部から上部段落とし部にわたって水平方向のひび割れが生じる。ドリフト 2%付近になると E 面の上部段落とし部から W

面の下部段落とし部にかけて斜めひび割れが発生する。ドリフト 3%になると斜めひび割れが貫通し、ドリフト 3.3%でせん断破壊した。最終的に模型をドリフト 3.5%まで載荷して実験を終了した。

水平力～水平変位の履歴は図-4 のようになる。復元力はドリフト 1.7%で最大 (106.7kN) となる。その後、ドリフト 3%付近までは復元力は徐々に減少し、3%以降急速に減少する。

4. 1 方向繰り返し載荷実験

EW 方向に行なった 1 方向繰り返し載荷の各ドリフトごとの損傷の進展を図-5 に示す。ドリフト 1.5%では、N 面および S 面に斜めせん断ひび割れが生じ、ドリフト 2.0%になると、W 面上部段落とし部から E 面下部段落とし部にかけて斜めひび割れが入ったが、最終的にこのせん断破壊面を境として橋脚躯体の上部がずり落ちるには至らなかった。その代わりに、W 面上部段落とし部ではかぶりおよびコアコンクリートが大きく剥落し、せん断破壊面を境にして上部の橋脚躯体が E 方向に約 20mm 横に滑った。しかし、この段階になってもせん断破壊面から上部の躯体がせん断破壊面に沿ってずり落ちることとはなく、せん断破壊面から下部の躯体が上部段落

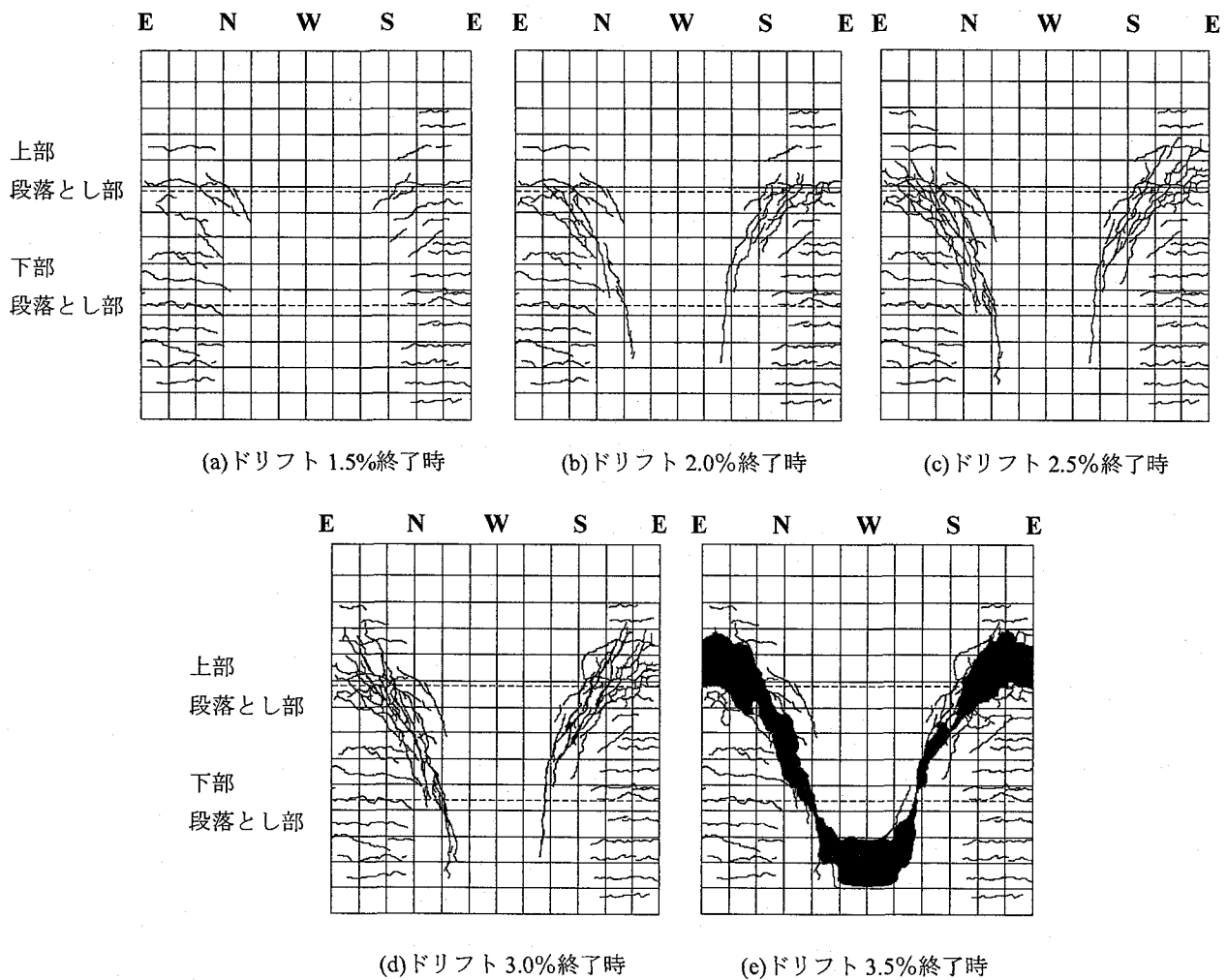


図-3 1方向プッシュオーバー載荷した場合の各載荷終了時の損傷

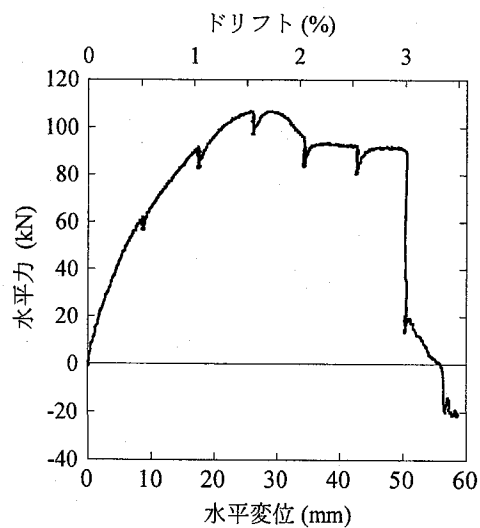


図-4 1方向プッシュオーバー載荷した場合の載荷点における水平力～水平変位の履歴

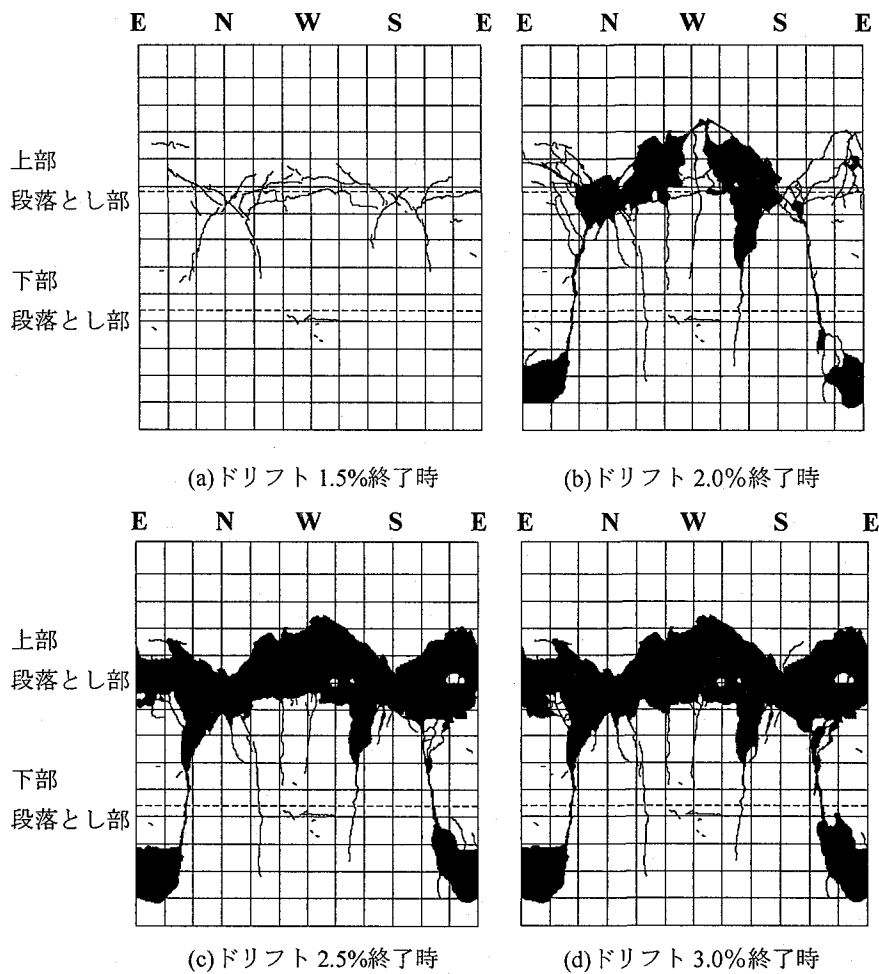


図-5 1方向繰り返し荷重した場合の各荷重終了時の損傷

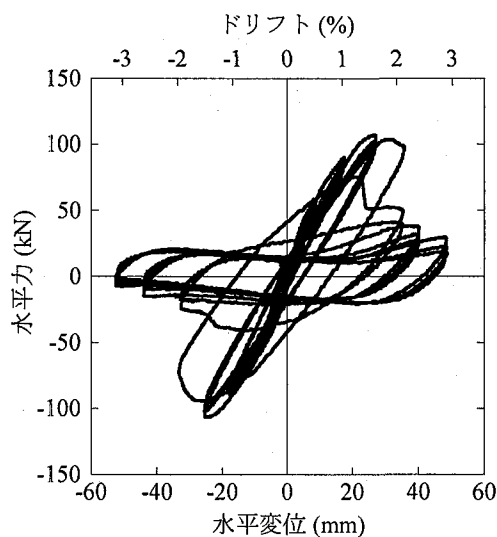


図-6 1方向繰り返し荷重した場合の荷重点における水平力～水平変位の履歴

とし位置であたかもペDESTALのように上部の躯体を支持した結果、これ以降の荷重では上部段落とし位置をピンとして上部の躯体が回転した。この点が、1方向プッシュオーバー荷重および後述する1

方向ハイブリッド荷重による破壊モードと異なっている。これは、変位制御により正負交番で順次変位振幅を大きくして荷重した結果、いずれか1方向のせん断破壊面が急成長してせん断破壊面から上部の

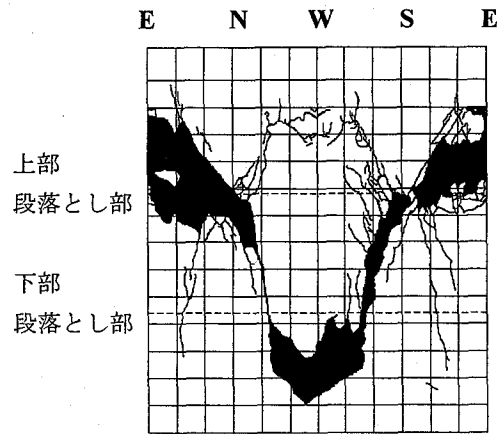


図-7 1方向ハイブリッド載荷終了後の損傷

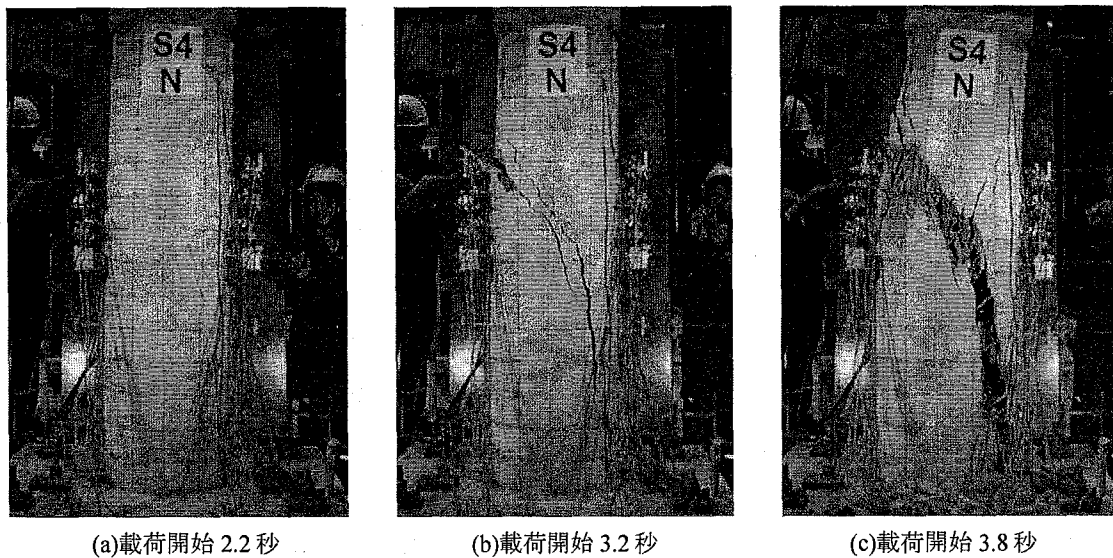


図-8 1方向ハイブリッド載荷した場合の損傷の進展

躯体がずり落ちるには至らなかったためと考えられる。図-6 は水平力～水平変位の履歴である。復元力の最大値は+側で 107.4kN、-側で 106.8kN、平均 107.1kN で、ともにドリフト 1.5%のときに最大となっている。1 方向プッシュオーバー載荷した場合と比較すると、最大耐力やこれがドリフト 1.5%程度で生じることは同じであるが、最大耐力到達後、1 方向プッシュオーバー載荷ではドリフト 3%まで最大耐力の 83%程度の復元力を保っているのに対し、1 方向繰り返し載荷した場合にはいっきに最大耐力の 35%まで復元力が低下している点が異なっている。

5. 1方向ハイブリッド載荷実験

EW 方向に 1 方向ハイブリッド載荷実験を行なった場合の実験後の損傷は図-7 に示すとおりであり、1 方向プッシュオーバー載荷した場合と同じく斜め

せん断破壊となった。図-8 は実験時の写真である。損傷の進展を見てみると、まず載荷開始 2.2 秒で N、S 面において E 面上部段落とし部から W 面下部段落とし部にかけて斜めせん断ひび割れが入り、その後損傷が進展している。3 秒を過ぎると E 面上部段落とし部および W 面下部段落とし部でコンクリートが剥落し、N 面および S 面にも剥落が進展する。3.8 秒になると、E 面から W 面に向けてせん断破壊面から上部の躯体が滑り落ち、終局状態となった。載荷は 4.2 秒に終了している。

載荷点における応答変位を図-9、水平力～水平変位の履歴を図-10 に示す。復元力の最大値は、+側に 101.7kN、-側には 111.2kN で、ともにドリフト 1.7%のときに生じている。

1 方向のプッシュオーバー載荷、繰り返し載荷、およびハイブリッド載荷した場合の水平力～水平変位の履歴を比較すると、図-11 のようになる。最大耐力とこれが生じるドリフトは、プッシュオーバー

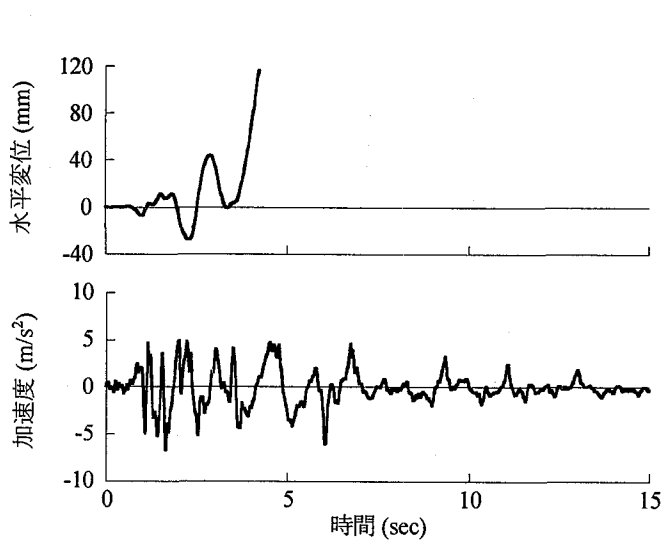


図-9 入力地震動と載荷点における橋脚の応答変位

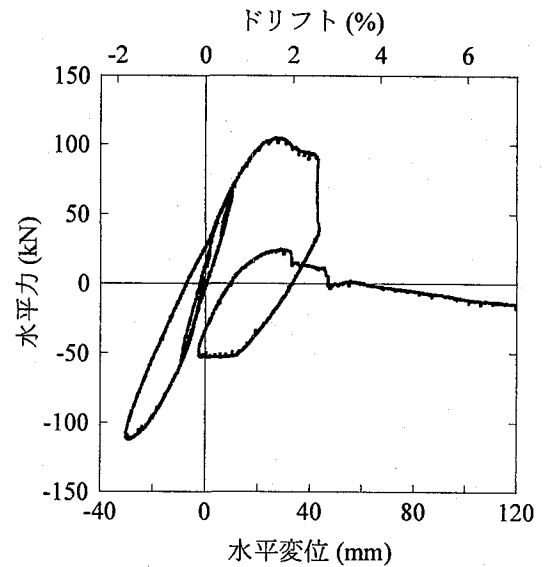


図-10 1方向ハイブリッド載荷した場合の載荷点における水平力～水平変位の履歴

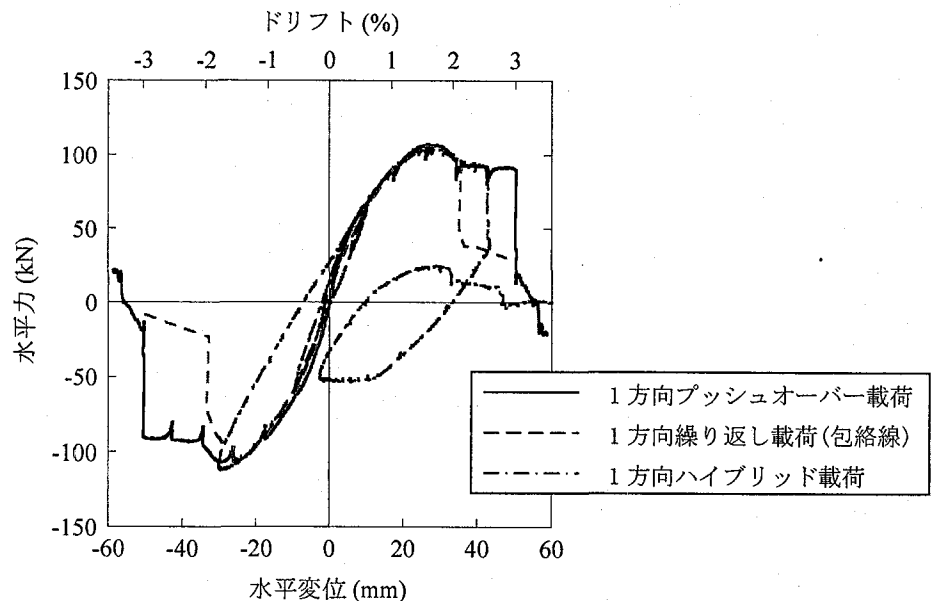


図-11 各載荷方法による水平力～水平変位の履歴の比較

載荷、繰返し載荷、ハイブリッド載荷のいずれにおいてもほとんど差はないが、その後の履歴は異なる。ハイブリッド載荷やプッシュオーバー載荷した場合には復元力はいったん最大耐力の 83%程度まで緩やかに低下した後、ハイブリッド載荷した場合にはドリフト 2.6%から、またプッシュオーバー載荷した場合には 3%から、それぞれ復元力が急速に低下し始める。これに対して、繰返し載荷した場合にはドリフト 2%の 2 回目の載荷で復元力は一気に低下する。この理由は、繰返し載荷ではドリフト 2%の 2 回目の載荷までに累積すると 10 回の繰返し載荷を受けているのに対して、プッシュオーバー

載荷では除荷は受けておらず、ハイブリッド載荷でも 2 回の履歴しか受けていないためである。すなわち、せん断破壊する場合にも、その変形性能に及ぼす繰返し載荷回数の影響は大きいことを示している。

6. 結論

主鉄筋段落とし部を有する円形断面 RC 橋脚模型に対して、1 方向プッシュオーバー載荷、1 方向繰返し載荷、1 方向ハイブリッド載荷を行なった。本研究より得られた結論をまとめると、以下のよう

になる。

1) 1 方向プッシュオーバー載荷, 1 方向繰り返し載荷, 1 方向ハイブリッド載荷の 3 つの載荷方法では, いずれも最大耐力およびこれが生じるドリフトは同程度の値 (110kN, 1.5%) となる。しかし, その後の復元力の低下は載荷方法によって大きく異なり, 繰り返し載荷した場合は 2% ドリフトから急激に復元力が減少するのに対して, ハイブリッド載荷およびプッシュオーバー載荷した場合にはそれぞれドリフト 2.6%, 3.0% 程度にならないと復元力の急速な低下は生じない。

2) 1 方向繰り返し載荷した場合には, 上部段落とし位置から下部段落とし位置に至る 2 本の大きな斜めせん断ひび割れが生じ, そのうちの 1 本が著しく成長するが, 斜めせん断破壊面に沿う上部躯体のずり落ちには至らず, あたかも上部段落とし位置を中間ヒンジとして回転する破壊モードとなった。これは, 1 方向プッシュオーバー載荷や 1 方向ハイブリッド載荷とは異なる破壊モードである。

謝辞: 供試体設計において, (独)土木研究所の堺淳一氏, および横浜国立大学の池田尚治名誉教授にご指導いただきました。また, 東京工業大学川島研究室の室谷奈津美, 松本崇志, 河野直也, Le Anh Ngoc の各氏には実験の際にご支援をいただきました。ここに記し, 厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 浅沼秀弥: 静内橋地震災害調査, 土木技術資料, Vol. 25, No. 11, pp.15-20, 1983.
- 2) 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.
- 3) 尾坂芳夫, 鈴木基行, 寺澤正人, 小林茂敏: RC はりのせん断耐力に及ぼす引張主鉄筋途中定着の影響に関する研究, 土木学会論文集, 第 366 号/V-4, pp. 133-142, 1986.
- 4) 川島一彦, 星隈順一, 運上茂樹: 鉄筋コンクリート橋脚・主鉄筋段落し部の耐震判定法とその適用, 土木学会論文集, No. 525/I-33, pp. 83-95, 1995.
- 5) 池端信哉, 足立幸郎, 山口隆裕, 池田尚治: 準動的載荷による RC 橋脚の地震被災挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 1255-1260, 2001.
- 6) Shing, P. B., Vannan, M. T., and Cater, E.: Implicit Time Integration for Pseudodynamics Tests, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, pp. 551-576, 1991.

- 7) 永田聖二, 渡邊学歩, 川島一彦: 3 次元ハイブリッド載荷実験におけるアクチュエータによる P- Δ 効果の補正法, 土木学会論文集, No. 801/I-73, pp. 197-212, 2005.