

ハイブリッド載荷実験に基づく 2 方向地震力を受ける RC 橋脚の耐震性

永田聖二¹, 早川涼二¹, 川島一彦², 渡辺学歩³

¹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 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²工博, 東京工業大学教授, 大学院理工学研究科土木工学専攻 (同上)

³工修, 東京工業大学大学院助手, 大学院理工学研究科土木工学専攻 (同上)

1. まえがき

現在の耐震設計では橋軸方向, 橋軸直角方向それぞれに独立して耐震性能を照査し, 2 方向地震力の同時作用の影響が見込まれていない. 2 方向地震力を同時に受ける RC 橋脚の挙動については, 川島・長谷川らが長方形断面 RC 橋脚を対象に, 1 方向載荷の場合に比較して 2 方向載荷した場合には, 橋脚の隅角部から損傷が始まり, 耐力の低下が激しいこと, 履歴吸収エネルギーが小さいことを示した¹⁾. 益子らは 2 方向ハイブリッド実験を行い, 2 方向地震力が RC 橋脚に作用すると, ある 1 方向の変形が大きい場合には 2 軸間の相互作用により, これに直行する方向に耐力低下が見られることを示した²⁾. 西田・運上らは, 正方形断面および円形断面を有する RC 単柱式橋脚に対する振動台実験を行い, 2 方向入力を与えると, 橋脚基部の全面に損傷が生じることを示した^{3,4)}. 早川らは斜め方向, 矩形, 円形, 楕円形に単純化した履歴を用いて 2 方向地震力を受けた場合の耐力低下のメカニズムを明らかにすると同時に, ファイバー要素解析により, 載荷履歴を精度良く再現できることを示している⁵⁾.

以上が RC 橋脚に対する 2 方向地震力の影響に関する主な研究であるが, 2 方向地震力を受けた場合の RC 橋脚の非線形応答に関する研究はほとんど行なわれていない. そこで本研究では, 正方形断面を有する 6 体の供試体を用いて RC 橋脚に 2 方向同時に地震動が作用した場合の地震応答を 1 方向だけに地震動を入力した場合との比較で明らかにすることを目的として, ハイブリッド載荷実験⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾および繰り返し載荷実験を行なった.

2. 実験供試体および載荷方法

(1) 実験供試体

実験供試体は図-1 に示すように, 400mm×400mm の正方形断面を有する RC 単柱式橋脚である. 6 体の

橋脚は同一特性を有しており, 基部から水平アクチュエータの載荷点までの有効高さは 1350mm, かぶりコンクリートの厚さは 40mm である. また, せん断支間比は 3.75 である.

軸方向鉄筋としては D13(SD295A)を 16 本配置し, 帯鉄筋としては, D13(SD295A)を 50mm 間隔で配置した. 橋脚模型は, これを小さな実橋脚と見なして 1996 年道路橋示方書に従い, 地震時保有耐力法に基づいて設計した. 模型橋脚が支持する上部構造の質量を 16t(橋脚基部の軸応力=1Mpa), 橋脚の固有周期を 1 秒, 地盤種別は II 種と見込み, タイプ I, タイプ II 地震動に対して断面を決定した. この結果, 軸方向鉄筋比(面積比), 帯鉄筋比(体積比)はそれぞれ 1.27%, 0.79%となった. 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 20mm の粗骨材を用いた. スランプは 175~190mm, 圧縮強度は 26.6~28.0Mpa である.

(2) 実験方法

実験は東京工業大学の耐震実験施設を用いて行なった. 鉛直方向のアクチュエータにより 160kN の軸力を荷重制御で加え, 橋脚基部から 1350mm の位置に取付けた 2 台の水平方向アクチュエータを用いて水平力を与えた. ハイブリッド実験では, 橋脚は実験模型により, 桁は解析上 1 質点系の質量として, それぞれモデル化した. また, ハイブリッド実験では 3 径間分の質量として 50t を模型橋脚が支持する水平方向の質量とした.

実験ケースを表-1 に示す. 繰り返し載荷実験では 1 方向載荷と 2 方向載荷を行なった. 2 方向載荷の場合は 2 方向載荷の軌跡が円形となるようにした. ハイブリッド実験では地震動強度を 2 段階に変化させて, 1 方入力した場合と 2 方向入力した場合に対して実験を行なった. 入力地震動としては図-2 に示す兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された NS 成分および EW 成分を用いた. 以下に示す結果では, NS 成分を作用させた方向を N 面, S 面, EW

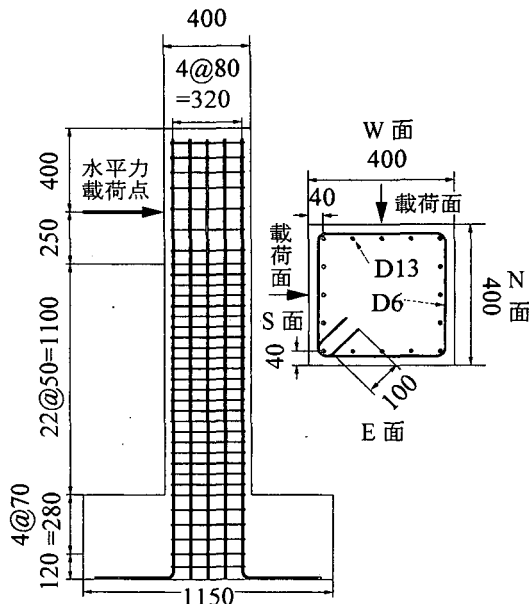


図-1 実験供試体

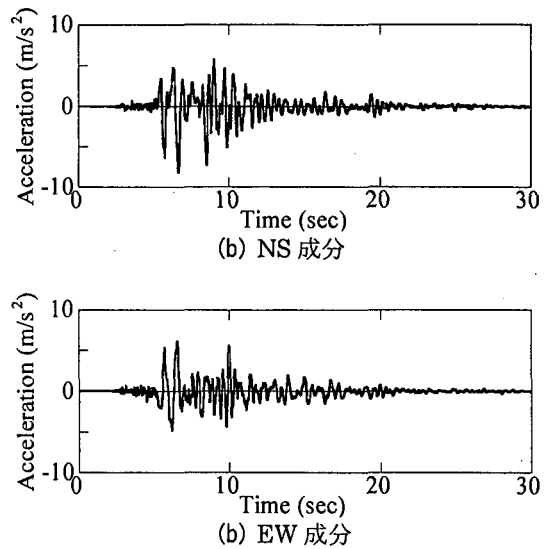


図-2 入力加速度

表-1 実験ケース

実験ケース	1	2	3	4	5	6
載荷方法	くり返し載荷実験		ハイブリッド実験			
	1方向	2方向	1方向		2方向	
			Kobe30%	Kobe35%	Kobe30%	Kobe35%

成分を作用させた方向をE面、W面と呼ぶ。振幅はオリジナル記録の30%および35%に変化させた。以下、これらをそれぞれKobe 30%、Kobe 35%地震動と呼ぶ。1方向入力の場合にはNS成分を作用させた。なお、地震強度がオリジナル記録に比較して小さいが、これは上述したように、橋脚が水平方向に支持する上部構造質量として16tを想定して橋脚を設計したのに対して、ハイブリッド載荷実験では、橋脚が水平方向に支持する上部構造の質量を50tとしたためである。このため、Kobe 30%、Kobe 35%程度の入力が橋脚の非線形応答を再現するために現実的なレベルとなった。

積分時間間隔は0.02秒とした。これは、数値積分において精度良く解を求めるためには、 Δt を小さくするのが一般的であるが、ハイブリッド載荷実験に用いる数値計算では、 Δt を小さくすると、数値計算の各ステップで供試体に与える変位も小さくなり、アクチュエータにより精度良く載荷できないためである。

3. 損傷の進展と地震応答特性

(1) 1方向入力した場合

1方向に繰り返し実験を行なった場合の損傷を図-3(1)に示す。載荷に伴い橋脚基部で水平曲げひび割

れが成長していき、ドリフト3%になるとN面においてかぶりコンクリートが圧壊し、剥離し始める。

ドリフト3.5%になると、これがN面、S面でさらに進み、ドリフト4%になるとかぶりコンクリートが大きく剥離すると同時に、コアコンクリートにも著しい損傷が生じ、軸方向鉄筋や帯鉄筋が露出するようになる。ドリフト4.5%では、さらに損傷が進展する。

この場合の載荷作用点における水平力～水平力の履歴曲線を示すと図-4(1)のようになる。ドリフト1%以降水平耐力は安定し、ドリフト3%で耐力は最大となる。その後ドリフト3.5%まではほぼ安定した水平耐力を保つが、上述したようにドリフト4%に入ると、かぶりコンクリートの剥離や軸方向鉄筋の座屈により耐力が低下し始め、3回目の載荷になると上述した最大耐力の78%にまで低下する。ドリフト4.5%では、最大耐力の63%にまで耐力が低下する。最大曲げ耐力はN面側(+側)では119.8kN、S面側(-側)では124.5kNであり、平均122.3kNである。降伏後安定していた曲げ耐力が20%以上低下し始める変位を終局変位と定義すると、終局変位は、N面側には4.0%ドリフト、S面側には4.5%ドリフト、平均4.25%ドリフトとなる。

これに対して、1方向に地震動を作用させてハイブリッド載荷実験を行い、載荷終了後の損傷を図-5(1)に示す。Kobe 30%を1方向に入力するとS面側からW面E面に曲げ引張による水平クラックが伝

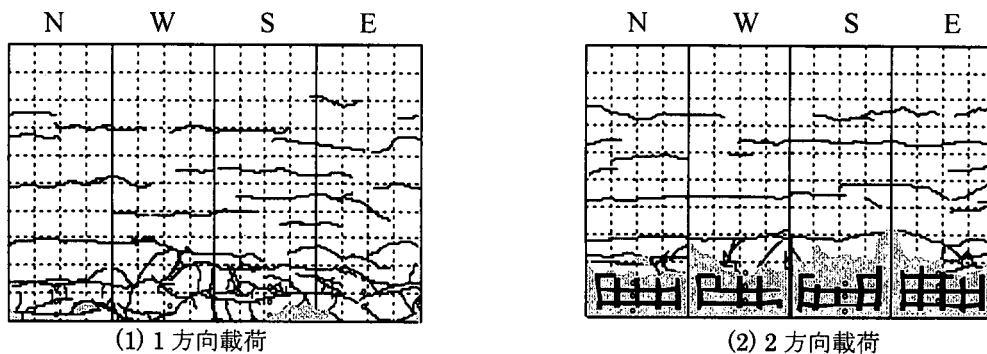


図-3 繰り返し載荷した場合の損傷状況(ドリフト3.5%載荷終了後)

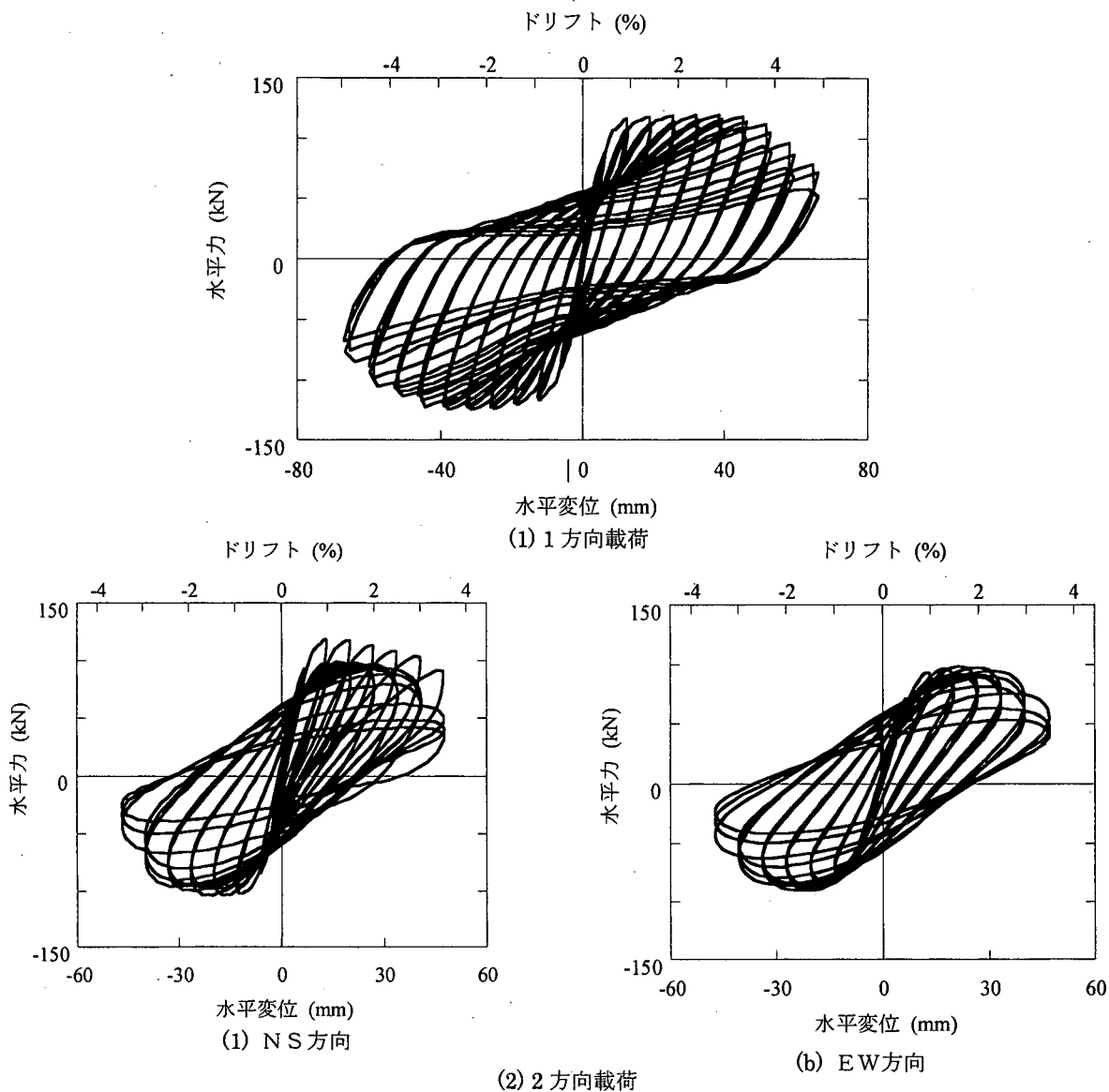
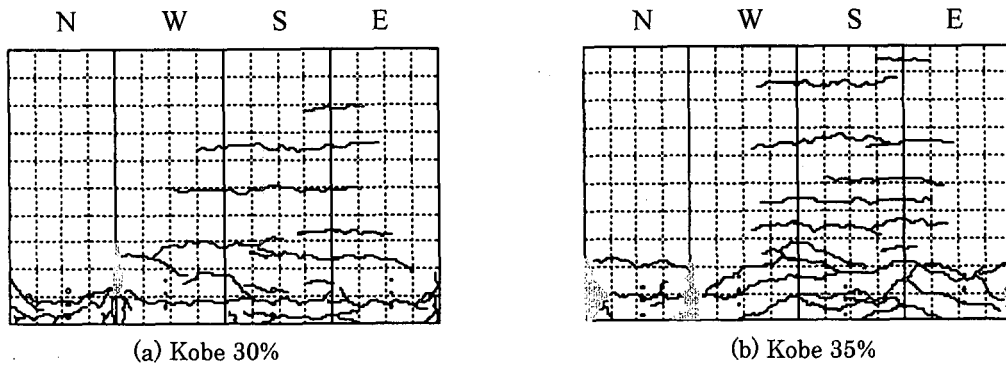


図-4 繰り返し載荷した場合の履歴曲線

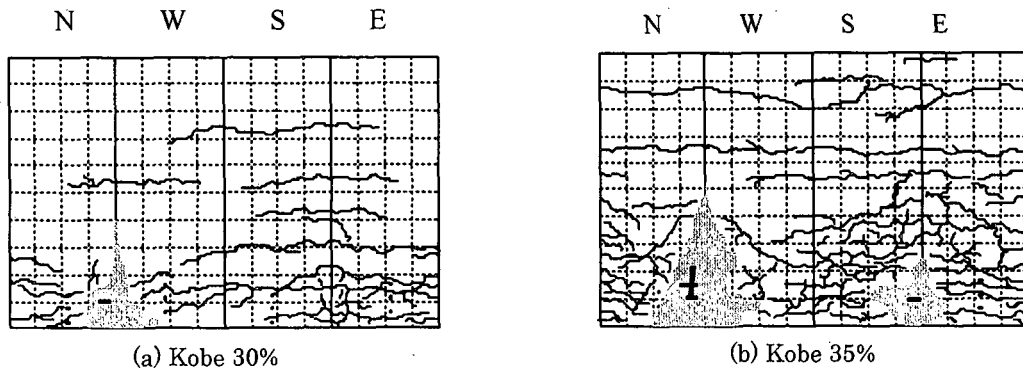
わり、S面では基部から0.1m, 0.2m, 0.3m, 0.5m, 0.65mの高さに生じる。N面でも水平クラックは生じるが、基部から0.1mの高さに限られる。このようになるのは、図-6(1)に示すように、橋脚の応答がN面側に偏っているためである。最大応答変位は、N面ではドリフト3.5%であるのに対して、S面側では

ドリフト1.5%と小さい。さらに載荷終了後には、N面側にはドリフト0.4%の残留変位が生じる。

図-7は水平力～水平変位の履歴曲線である。これを図-4(1)に示した繰り返し載荷実験から得られた履歴曲線と比較すると、+側(N面側)には曲げ耐力は127.9kN程度で、繰り返し載荷実験の場合に生じ



(1) 1方向載荷した場合



(2) 2方向載荷した場合

図-5 ハイブリッド実験終了後の損傷状況

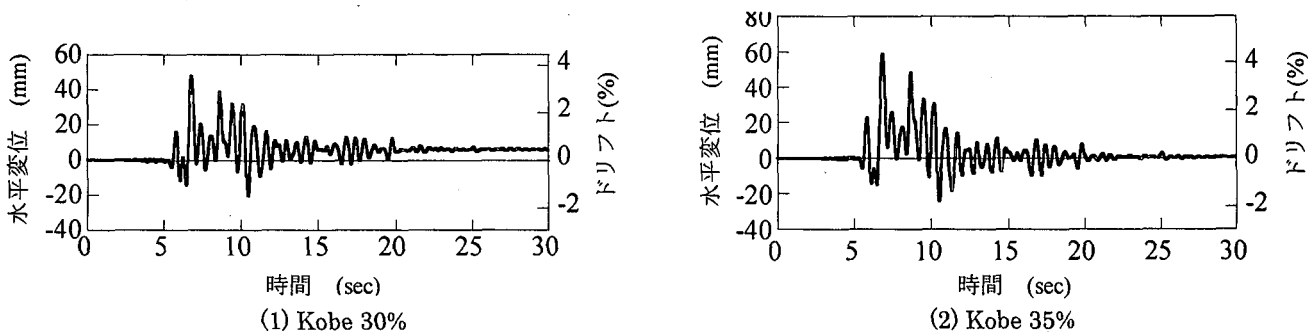


図-6 1方向加振した場合の応答変位

た 122.3kN と比較して 5%程度大きい。これは、上述したように S 面側には応答があまり生じなかったためである。ハイブリッド載荷による N 面側 (+側) への最大応答は 3.5%ドリフトであり、この段階に至るまでには、まだ水平耐力は低下していない。これは繰り返し載荷実験においても同様である。

Kobe 35%を入力した場合には、図-5(1)(b)に示したように、Kobe 30%を入力した場合よりも S 面側の曲げクラックがさらに多くなり、N 面側のコーナーではかぶりコンクリートの圧縮による剥離が生じている。図-6(2)に示したように、応答変位は N 側にバイアスがかかっており、この方向のドリフトは 4.3%であるのに対し、S 側でのドリフトは 1.7%に過ぎない。ただし、N 側の残留変位はほとんど生

じていない。図-7(2)に示した履歴曲線も Kobe 30%の場合よりもさらに応答が大きくなっただけで、全体的な特徴は変わらない。繰り返し載荷実験では、ドリフト 4.5%から曲げ耐力は顕著に減少し始めるが、ハイブリッド載荷実験では、最大応答はドリフト 4.3%と、ドリフト 4.5%には達していない。したがって、ハイブリッド載荷実験ではこの段階までに曲げ耐力が低下しないことは、繰り返し載荷実験から見て、特に異なる点ではない。なお、載荷後の調査では、Kobe 30%、Kobe 35%のいずれかを 1 方向に入力した場合においても、軸方向鉄筋、帯鉄筋ともに損傷がなく、図-5(1)に示した N 面のかぶりコンクリートの損傷もかぶり表面からの深さ 5mm 程度であった。

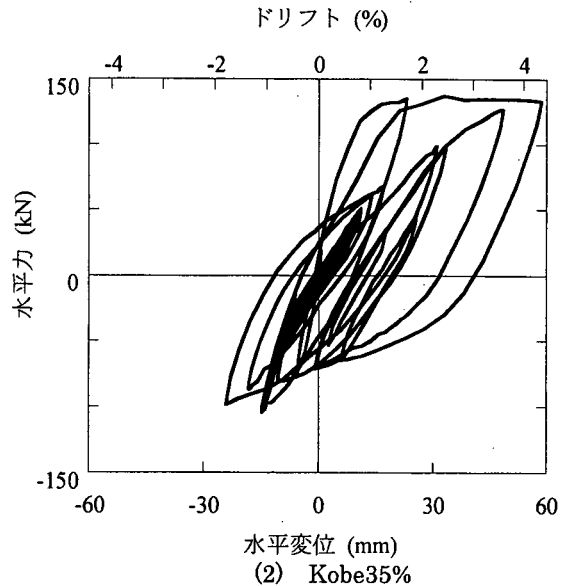
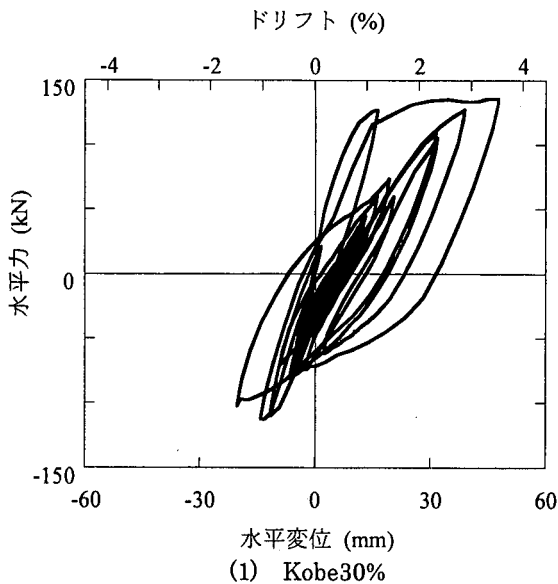
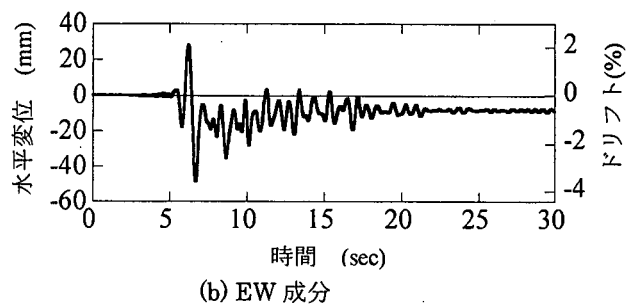
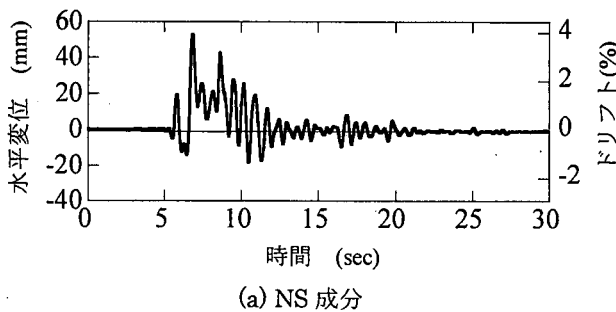
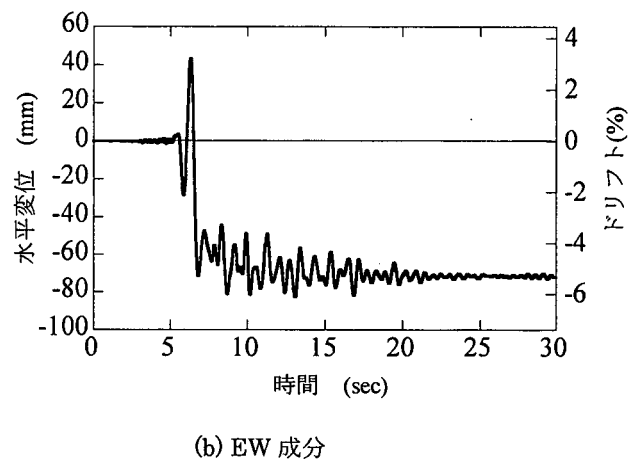
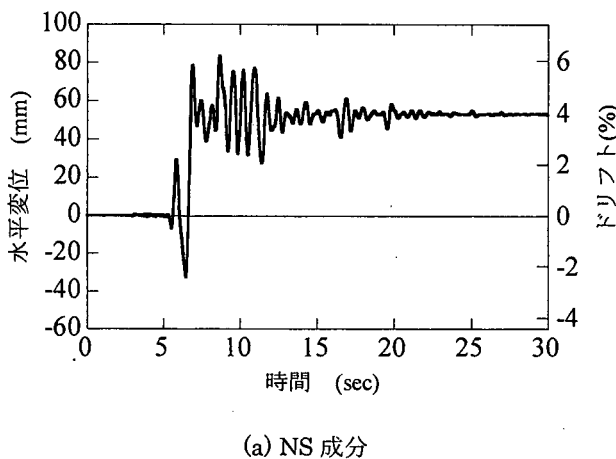


図-7 1方向加振した場合の履歴



(1) Kobe 30%



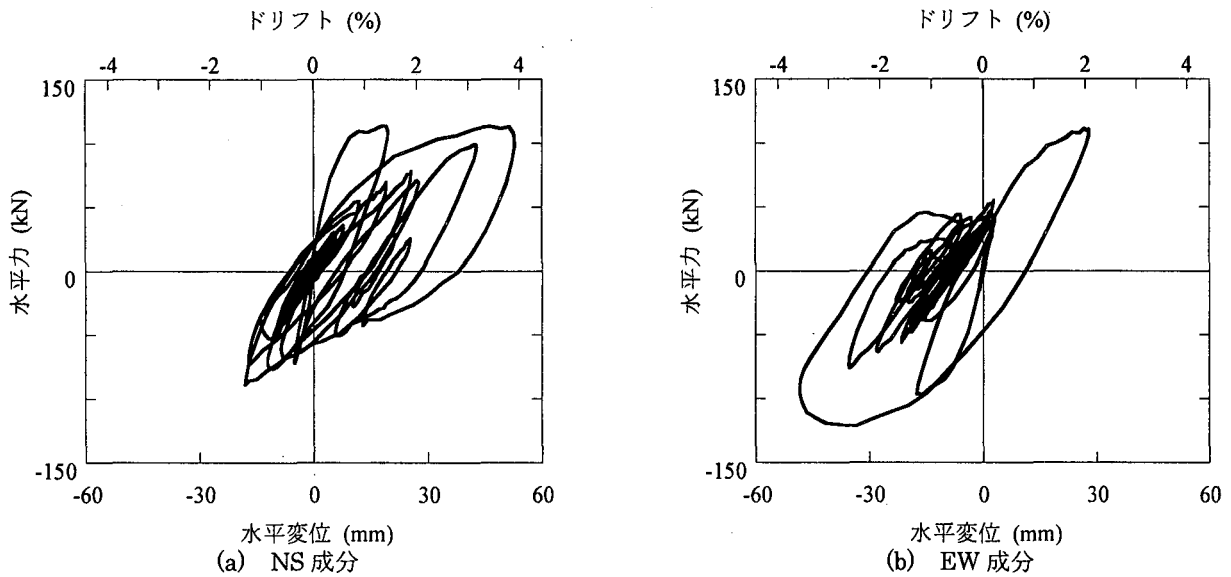
(2) Kobe 35%

図-8 2方向加振した場合の応答変位

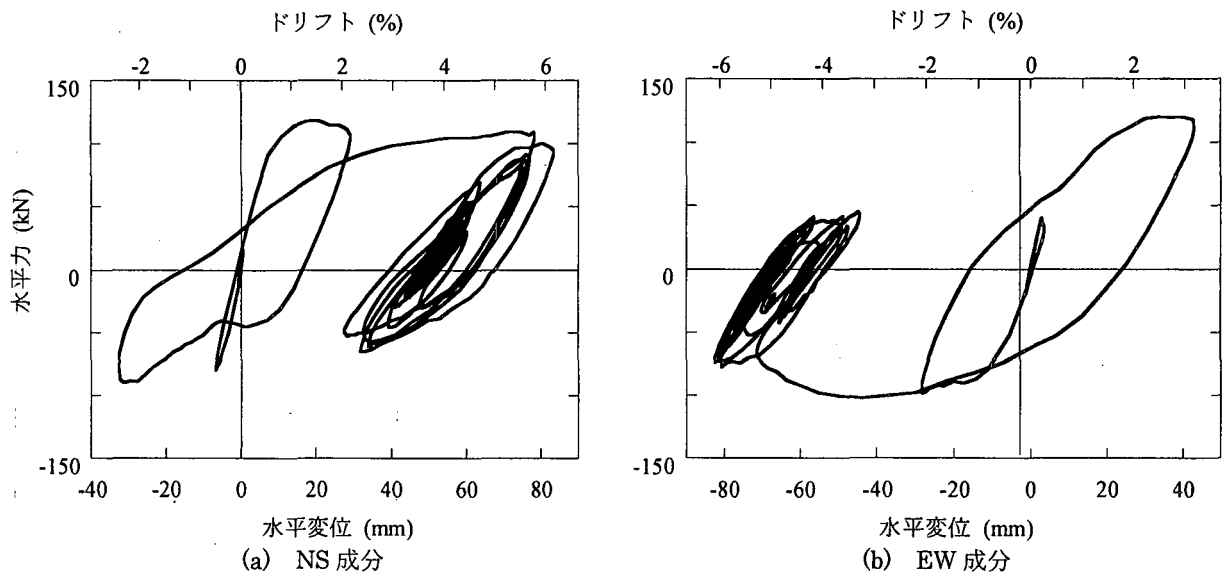
(2) 2方向入力の場合

2方向繰り返し載荷実験(円形載荷)を行なった場合の損傷を図-3(2)に示す。ドリフト1.5%で4隅に斜めや縦方向のひび割れが入り、2.5%ドリフトになると4隅だけではなく4面をかぶりコンクリートの剥落が顕著になる。ドリフト3.5%になると橋脚基部から200mm程度の範囲をかぶりコンクリートが全面的に剥落し、全ての軸方向鉄筋が座屈する。この場合の履歴曲線が図-4(2)である。履歴曲線のコーナ

ーが丸くなっているのが特徴で、これはある方向に載荷したことに伴う他方向の曲げ耐力の低下が、2方向の載荷により連続的に生じるためである⁵⁾。上述した定義に基づく終局変位は、N面側には3.5%ドリフト、S面側には3.0%ドリフト、平均3.25%ドリフトとなり、1方向繰り返し載荷した場合に比較して2方向繰り返し載荷した場合には、1%ドリフトだけ終局変位は大きくなる。最大曲げ耐力はN面側では118.8kN、S面側では103.5kNであり、平均111.2kN



(1) Kobe30%



(2) Kobe 35%

図-9 2方向加振した場合の履歴

である。平均値で比較すると1方向繰り返し载荷した場合の91%と低くなっている。

これに対して、2方向に地震動を作用させてハイブリッド载荷実験を行なった後の損傷を図-5(2)に示す。Kobe 30%を2方向に入力すると、S面とE面のコーナー(以下、SE隅角部と呼ぶ)において、曲げ圧縮に伴い、コンクリートが剥離する。S面とE面のコーナー(以下、SE隅各部と呼ぶ)においても、かぶりコンクリートが剥離するが、NW隅各部のように大きく剥離するには至らない。载荷後の調査では、軸方向鉄筋、帯鉄筋ともに損傷は生じていない。

载荷点における橋脚の応答変位を示すと、図-8のようになる。ここには、後述するKobe 35%の場合の応答も比較のため示している。これによれば、Kobe 30%を入力した場合には、NS成分を作用させた方向

には、図-6(1)に示したようにこれを1方向入力させた場合と良く似た応答となる。しかし、最大応答は+側(N面側)には3.9%ドリフト、-側(S面側)には1.3%ドリフトであり、これは1方向入力した場合(それぞれ3.5%ドリフト、1.5%ドリフト)に比較して、N面側では11%大きく、S面側では15%小さい。この方向には残留変位はほとんど生じない。一方、EW成分を作用させた方向には、W側(-側)に0.6%相当の残留変位が生じる。最大応答はW側には3.6%ドリフト、E側(+側)には2.1%ドリフトである。

これを水平力～水平変位関係の履歴曲線として示すと、図-9のようになる。ここには、後述するKobe 35%の場合の履歴も比較のため示している。Kobe 30%を入力した場合には、最大復元力はN面側に110.8kN、S面側には83.6kNと、図-7(1)に示したハ

表-2 最大応答変位, 残留変位および耐力

(1) 1方向入力した場合(NS成分)

載荷方法		終局変位 (ドリフト%)	残留変位 (ドリフト%)	最大耐力 (kN)
繰り返し載荷実験		4.2	—	122.3
ハイブリッド 実験	Kobe30%	3.5	0.4	127.9
	Kobe35%	4.3	0	131.3

(2) 2方向入力した場合

載荷方法		NS成分			EW成分		
		終局変位 (ドリフト%)	残留変位 (ドリフト%)	最大耐力 (kN)	終局変位 (ドリフト%)	残留変位 (ドリフト%)	最大耐力 (kN)
繰り返し載荷実験		3.2	—	111.2	3.2	—	111.2
ハイブリッド 実験	Kobe30%	3.9	0	110.8	3.6	0.6	112.7
	Kobe35%	6.2	3.5	115.6	6.1	5.3	113.6

イブリッド載荷実験により1方向入力した場合よりもそれぞれ13%, 15%程度小さい。S側とE側では履歴曲線はコーナーが丸くなっている。これは、図-4(2)に示した2方向繰り返し載荷の場合の履歴曲線と同様であり、2方向の曲げ耐力のインターアクションによるものである。

次に、Kobe 35%を2方向に入力した場合には図-5(2)(b)に示したように、損傷はKobe 30%を2方向に入力した場合よりも著しくなっている。すなわち、橋脚の4面で多数の曲げクラックが生じている他、NW隅角部のかぶりコンクリートだけでなくコアコンクリートの剥離が広い範囲で生じる他、SE隅角部でもかぶりおよびコアコンクリートの剥離が生じる。上述したように、Kobe 30%を2方向に入力した場合には軸方向鉄筋、帯鉄筋ともに損傷は生じなかったが、Kobe 35%を2方向に入力した場合には、NW隅角部付近で1本、SE隅各部付近で3本の軸方向鉄筋が座屈した。ただし、帯鉄筋には損傷は生じていない。

図-8(2)に示した応答変位の時刻歴によれば、NS成分方向には7.2秒の段階から、またEW成分方向には7.4秒の段階からそれぞれの応答は大きく1方向に残留する。残留変位はNS成分方向には3.5%ドリフト、EW成分方向には5.3%ドリフトと極めて大きい。変位制御の実験では生じない大きな残留変位が、ハイブリッド実験では、コンクリートと軸方向鉄筋の損傷に伴って現れることが重要である。

図-9(2)に示した履歴曲線によれば、最大耐力はNS方向には、+1.2%ドリフト付近では116kNであるが、+6%ドリフト付近では99kNと小さくなる。EW方向にも同様で、最大耐力は、変位が-2%ドリフト付近では114kNであるが、-6%ドリフト付近では76kNと小さくなる。

4. 結論

本研究では、正方形断面を有する6体のRC供試体を用いて、変位漸増型の繰り返し載荷実験と地震動強度を2段階に変化させて、1方向入力した場合と2方向入力したハイブリッド載荷実験を行なった。本検討の結果得られた結論は以下の通りである。

- (1) 同一変位振幅における繰り返し回数を3回とした変位漸増型の繰り返し実験と比較して、ハイブリッド実験では橋脚の損傷は全体的に小さい。
- (2) 1方向に地震動を与えた場合には、載荷方向に直交する相対する面から損傷が進展するのに対して、2方向に地震動を与えた場合には、隅角部から4面に損傷が進展し、損傷のレベルも1方向だけに地震力を与えた場合よりも著しい。この特徴は繰り返し実験においてもハイブリッド載荷実験においても変わらない。
- (3) 変位制御に基づく繰り返し載荷実験とは異なり、ハイブリッド実験では、載荷に伴い残留変位が生じる。残留変位は大きなもので、例えばKobe 35%を入力した場合には、NS成分、EW成分の入力最大応答変位のそれぞれ56%、86%を残留変位が占める。

謝辞：本研究に際しては、東京工業大学土木工学専攻川島研究室の中澤宣貴、松川亮平、中村剛、宮路健太郎、福田智之の各氏に供試体の作製および実験につき、ご支援頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1)川島一彦、長谷川金二：鉄筋コンクリート橋脚の動的耐力に及ぼす水平 2 方向同時載荷の影響、土木技術資料、Vol. 34-7、1992
- 2)益子直人、睦好宏史、Willam Tanzo、町田篤彦：仮動的実験を用いた 2 方向地震力を受ける RC 橋脚の弾性応答性状：コンクリート工学年次講演論文集、Vol.16、No.2、pp. 1271-1276、1994
- 3)西田英明、運上茂樹、長屋和宏：正方形断面 RC 柱の水平 2 方向非線形領域加振振動台実験、第 26 回地震工学研究発表会講演論文集、土木学会、pp. 913-916、2001
- 4) 西田英明、運上茂樹：円形鉄筋コンクリート柱の水平方向加振振動台実験、第 5 回地震時保有水平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、2002
- 5)早川涼二、川島一彦、渡邊学歩：2 方向地震力を受ける RC 橋脚の耐震性に関する研究、第 6 回地震時保有水平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、2003
- 6)才塚邦宏、伊藤義人、木曾英滋、宇佐見勉：相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察、土木学会論文集、No.507/I-30、pp. 179-190、1995
- 7)中島正愛、赤澤隆士、阪口理：サブストラクチャ仮動的実験の数値計算法、日本建築学会構造系論文報告集第 454 号、pp. 61-71、1993
- 8)Shing, P. B., Vannan, M.T. and Cater: Implicit Time Intergration for Pseudodynamic Tests, Earthquake Engng. Struct. Dyn, Vol. 20, pp. 551-576, 1991
- 9)家村浩和：ハイブリッド実験の発展と将来、土木学会論文集、第 365 号、I-3, pp. 1-10、1985