

ハイブリッド載荷実験に基づく 2 方向地震力の同時作用が単柱式 RC 橋脚の耐震性に及ぼす影響

荻本英典¹，川島一彦²，渡邊学歩³，早川涼二⁴，永田聖二⁵

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 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）

³ 正会員 工修 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）

⁴ 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）

⁵ 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博士後期課程（同上）

1. まえがき

1995 年の兵庫県南部地震以降、地震時保有耐力法が橋梁の耐震設計の主流となってきた。しかしながら、現在でも 2 方向地震力の取り扱いには以前からの慣習がそのまま適用され、橋軸方向、橋軸直角方向それぞれ独立に耐震設計が行われている。

2 方向地震力を同時に受ける RC 橋脚の耐震性に関しては、繰り返し載荷実験やハイブリッド載荷実験、振動台実験等により検討されてきている。例えば、川島・長谷川らは長方形断面 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ている¹⁾。益子・睦好らは 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って、これに直行する方向に耐力低下が生じることを示している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、橋脚基部全面に損傷が生じることを示している^{3,4)}。早川らは繰り返し載荷実験により、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⁾。

しかし、2 方向地震力を受ける RC 橋脚の非線形応答に関する研究は始まったばかりで、載荷履歴が橋脚耐力や変形性能に及ぼす影響は明らかにされていない。

そこで本研究では、正方形断面の RC 単柱式橋脚を対象に水平 2 方向の地震力を同時に受けた場合の耐震性を検討するため、一定軸力下で 2 方向のハイブリッド載荷実験を行うと同時に、早川が行った繰り返し載荷実験⁵⁾との比較を行う。

2. 実験供試体および載荷方法

(1) 実験供試体

実験供試体は早川らが 2 方向繰り返し載荷実験に用いたものと同じであり、図-1 に示すような 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厚は 40mm である。せん断支間比は 3.75 となる。

橋脚模型は、これを小さな実橋脚と考え、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ものである⁶⁾。地震時保有耐力法では、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 間隔でそれぞれ配置した。その結果、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%となる。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。スランブは 78~93mm、載荷実験当日に行ったテストピースの一軸圧縮試験から求めた圧縮強度は表-1 示す通りであり、25.4~34.2MPa 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。ハイブリッド実験では、橋脚は模型により、桁は 1 質点系の質量として解析によりモデル化した。3 径間連続橋を念頭におき、橋脚は上下方向に 1 径間の桁重量に相当する 16t の質量を、また水平 2 方向に 3 径間に相当する 50t の質量を支持するものとした。このため、鉛直方向のアクチュエータにより 160kN の軸力を荷重制御に加え、橋脚基部から 1350mm の位置に取り付けた 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⁷⁾。

前出の表-1 には実験ケースも示している。ハイブリッ

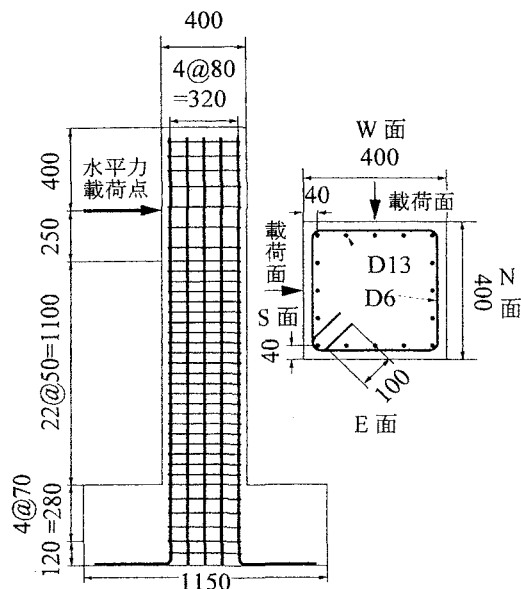
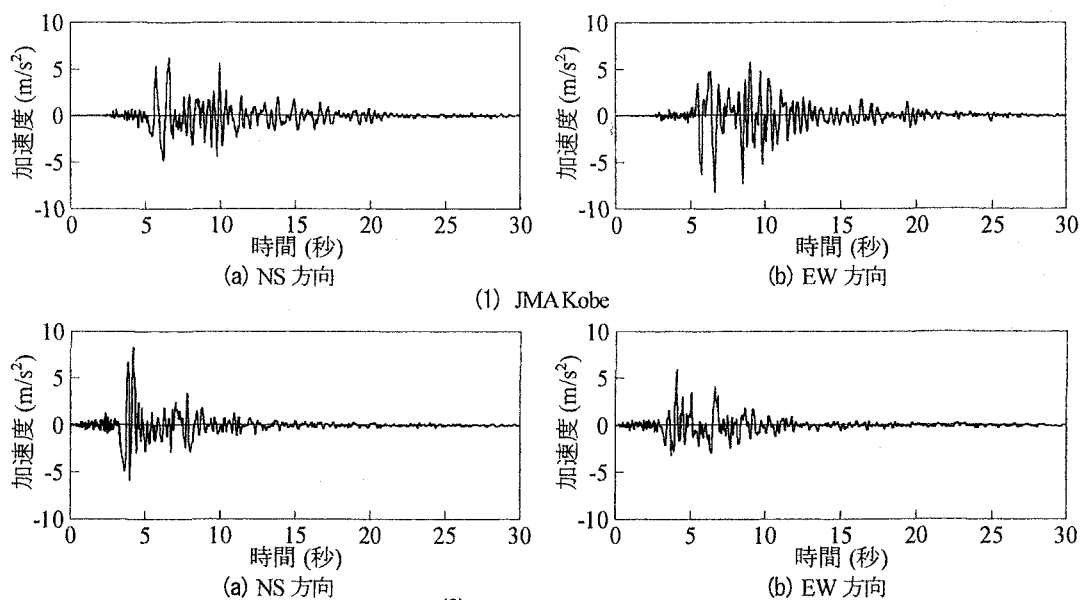


図-1 実験供試体

表-1 実験ケース

実験ケース	P-1	P-2	P-3	P-4
コンクリート強度 (MPa)	28.68	25.43	27.16	26.93
載荷方法	1 方向	2 方向	1 方向	2 方向
	Kobe 30%		Kobe 40%	

実験ケース	P-5	P-6	P-7	P-8
コンクリート強度 (MPa)	31.17	34.23	30.05	26.22
載荷方法	1 方向	2 方向	1 方向	円形
	Sylmar 50%		繰り返し載荷	



(2) Sylmar Parking Lot

図-2 入力地震動

ド実験では、地震動強度を2段階に変化させて、それぞれ1方向および2方向に入力した。入力地震動としては図-2に示すように、1995年兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された記録の加速度振幅を30%、40%に縮小した地震動（それぞれKobe 30%、Kobe 40%地震動と呼ぶ）と1994年Northridge地震においてSylmar Parking Lotで観測された記録の加速度振幅を50%に縮小した地震動（Sylmar 50%地震動と呼ぶ）を用いた。1方向載荷の場合にはNS成分を作用させた。

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成分を作用させた方向をE面、W面と呼ぶ。

地震動強度がオリジナル記録に比べ小さいが、これは上述したように、上部構造質量として水平方向に16tを支持すると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と仮定したためである。

また、ハイブリッド実験では減衰定数 h は0.02、積分時間間隔 Δt は0.01秒とした。

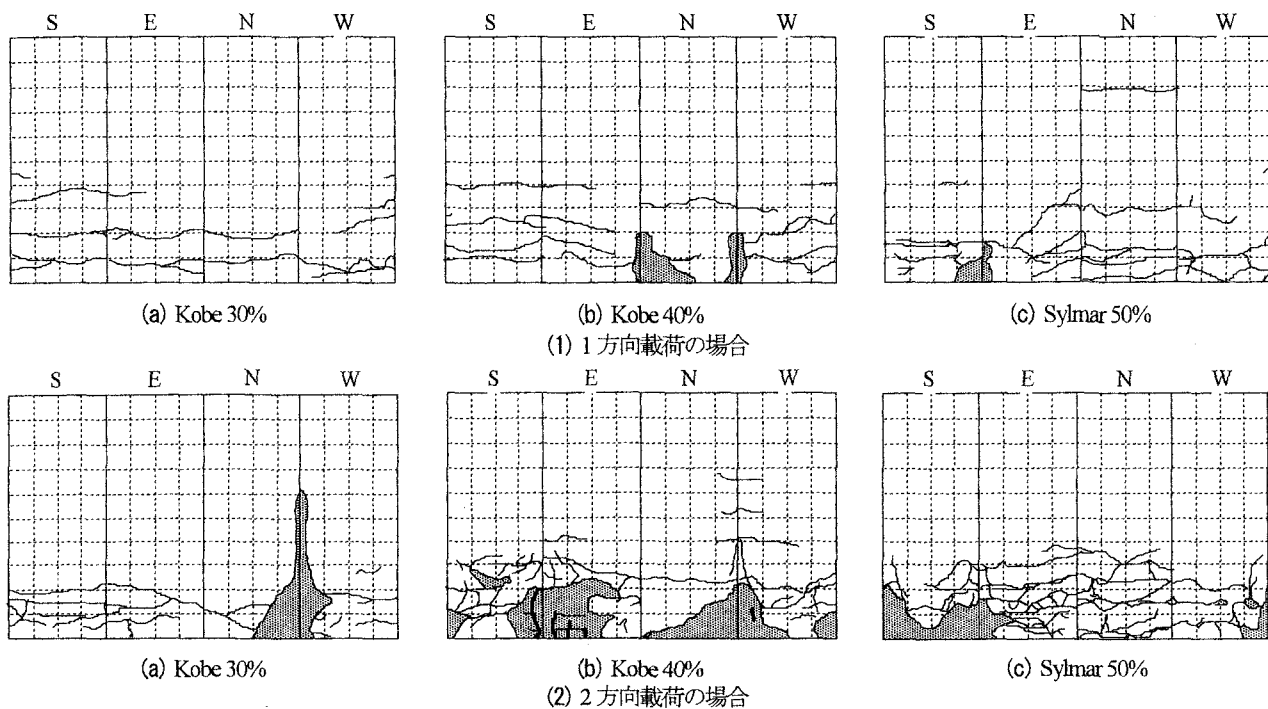


図-3 ハイブリッド実験の損傷状況

3. 1 方向載荷を行った場合

(1) Kobe 30%を入力した場合

載荷終了後の損傷を示すと図-3(1)(a)のようになる。4面にわたり、曲げ引張クラックが基部から0.1, 0.2mの位置に入るが、コンクリートは剥離するには至らない。図-4(1)は載荷高さにおける応答変位を示した結果である。最大変位は+側にドリフト3.4%、-側にドリフト2.0%である。載荷後には残留変位はほとんど生じない。載荷高さにおける水平力～水平変位の履歴を示すと図-5(1)のようになる。ドリフト1%で橋脚模型は塑性化し、安定した履歴を示す。+側および-側の最大耐力は、それぞれ139.5kN, 106.6kNである。

(2) Kobe 40%を入力した場合

図-3(1)(b)に示すように、Kobe 30%を入力した場合よりも曲げクラックが多くなり、N面側のコーナーではかぶりコンクリートの圧縮が生じる。

応答変位は図-4(2)のとおりである。S面よりもN面側に応答変位が大きくなっている。N面側の最大ドリフトは5.4%でありKobe30%の場合よりも58.8%大きくなっている。載荷終了後にはN面側にドリフト0.86%の残留変位が生じる。図-5(2)に示す履歴曲線もKobe 30%の場合より応答が大きくなっているが全体としての特徴は変わらない。

(3) Sylmar 50%を入力した場合

載荷後の損傷を図-3(1)(c)に示す。S面とE面でのコーナー（以下、SE隅角部と呼ぶ）でかぶりコンクリートの剥落が生じている。これは、図-4(3)に示すように、応答変位がN面よりもS面側にドリフト4.8%と大きく偏っているためである。

履歴曲線は図-5(3)に示す通りであり、S面側には曲げ耐力は141.6kN程度である。これは、上述したKobe30%、Kobe40%の場合のN面側の最大耐力とほぼ同程度である。載荷終了後の残留変位はS面側へドリフト0.54%である。

なお、載荷後の調査では上記3ケースとも軸方向鉄筋、帯鉄筋はいずれも損傷していない。

4. 2 方向載荷を行った場合

(1) Kobe 30%を入力した場合

図-3(2)(a)に示すように、N面とW面のコーナー（以下、NW隅角部と呼ぶ）において、曲げ圧縮に伴い、かぶりコンクリートが剥落する。剥落は基部から0.6mの高さにまで達している。SE隅角部においても、かぶりコンクリートが剥離したが、NW隅角部のように大きく剥落するには至らなかった。

図-6(1)に示すように、NS方向の応答変位はKobe 40%の1方向載荷の場合と同じように一側より+側に大きくなっている。N面側の最大応答はドリフト4.3%であり、

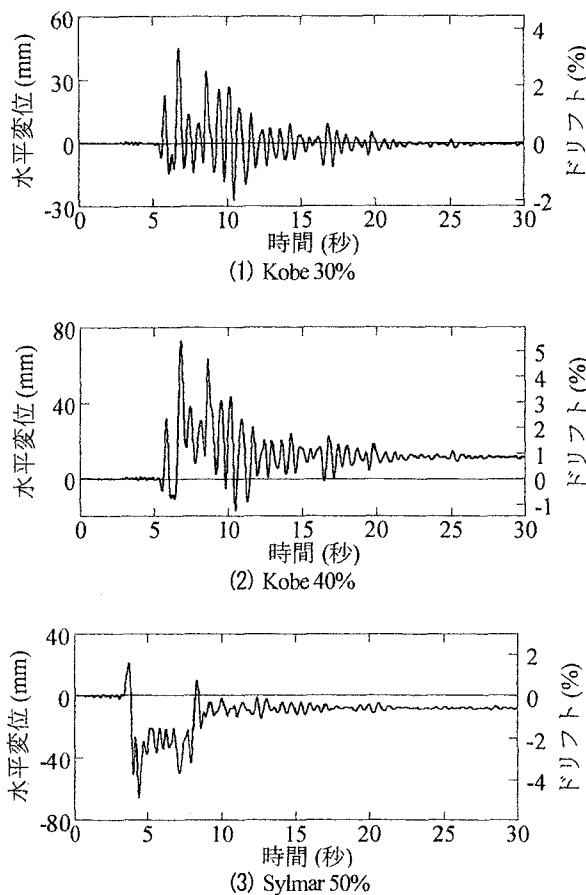


図-4 1方向載荷した場合の応答変位

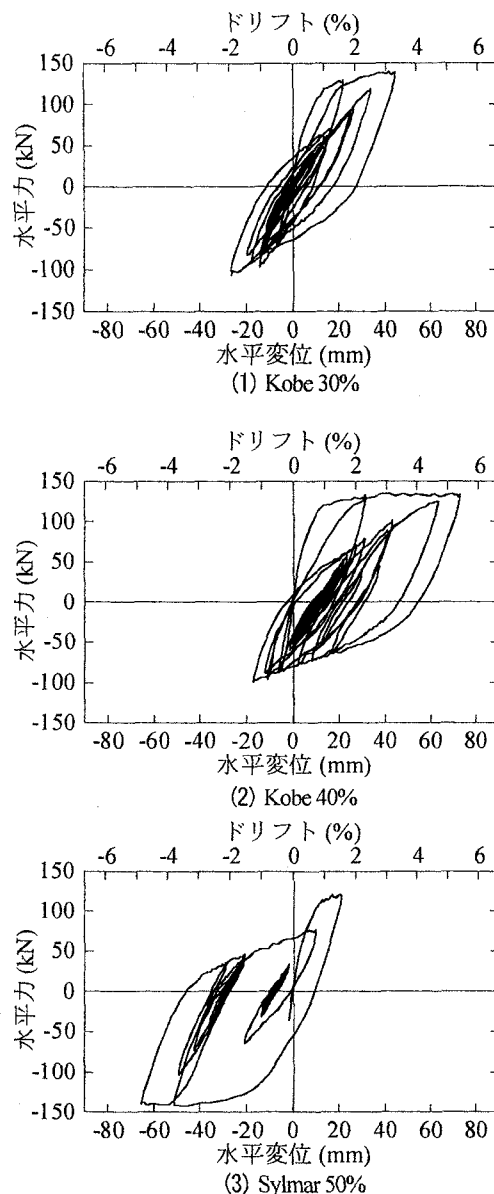


図-5 1方向載荷した場合の履歴

これは1方向入力した場合に比べて、26.5%程度大きくなっている。一方、EW方向の応答変位を見てみると、+側（E面側）への最大変位はドリフト2.2%であるのに対して、-側（W面側）へはドリフト3.6%と、W面側への最大変位の方が大きい。これによって上述したようなNW隅角部の損傷が大きくなったと考えられる。載荷終了後には、N面側へはドリフト0.80%、W面側へはドリフト0.26%の残留変位を生じた。Kobe 30%の1方向載荷と比べると2方向載荷した場合には、NS方向に大きな残留変位が生じたことがわかる。

履歴曲線は図-7(1)に示す通りである。最大耐力は、N面側には115.2kN、S面側には90.6kNとなっており、これらは図-5(1)に示した1方向載荷の場合と比較して、N面側では17.4%、S面側では17.7%それぞれ小さくなっている。一方、EW方向の最大耐力はE面側で120.5kN、W

面側で127.7kNとなっている。なお、W面側での履歴曲線では変位が極大となる付近でコーナーが丸みを帯びているのが特徴である。これは2方向曲げによるインターアクションによるものである⁹⁾。鉄筋については特に損傷は見られない。

(2) Kobe 40%を入力した場合

Kobe 40%を2方向に入力した後の損傷は、図-3(2)(b)に示す通りであり、明らかにKobe 40%を1方向に入力した場合よりも著しい。4面全てにおいて多数の曲げクラックが生じているほか、かぶりコンクリートが隅角部から側面に進展する形で剥離している。SE隅角部では損傷がコアコンクリートに及び、コアコンクリートも剥落している。今までに示した実験ではいずれの場合も鉄筋に損傷は生じていなかったが、この実験ではS面、E面に配

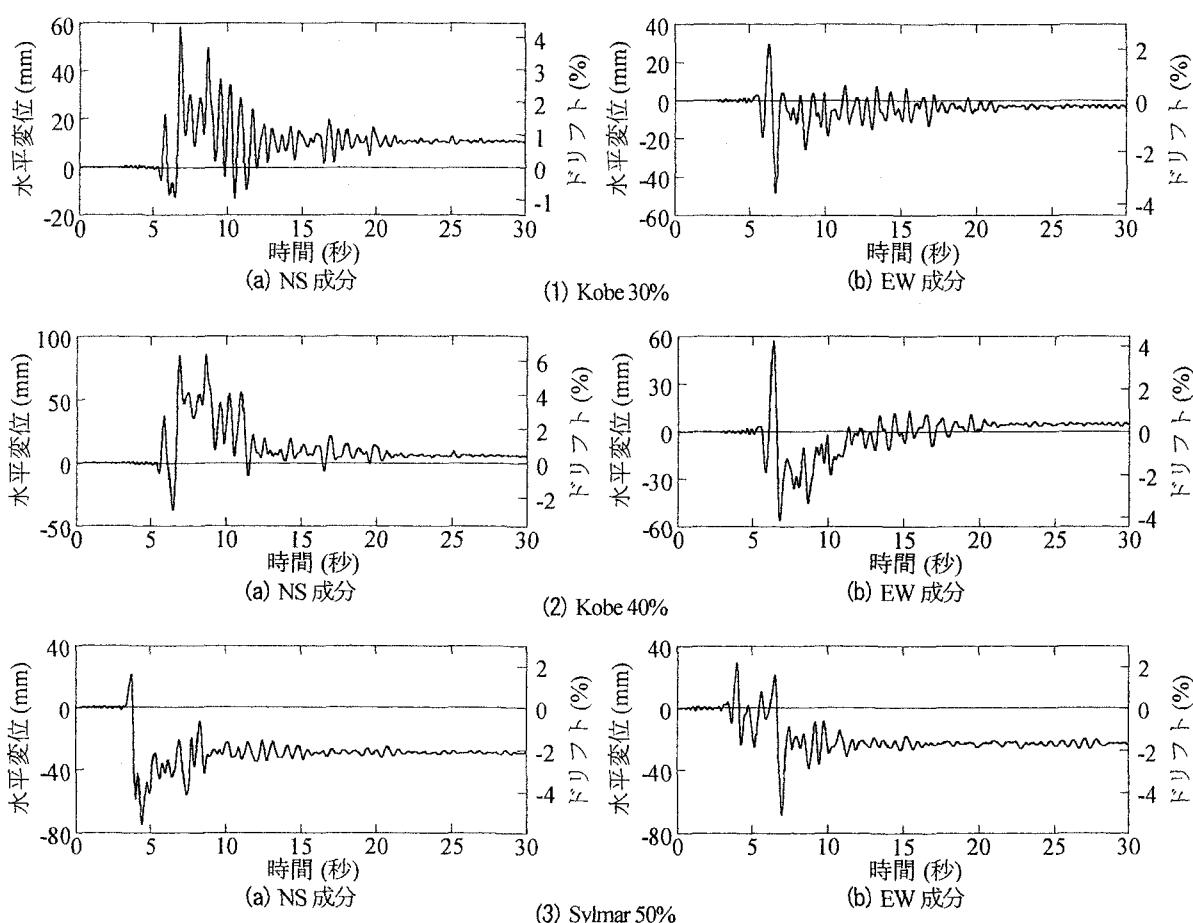


図-6 2方向載荷した場合の応答変位

置してある計8本の軸方向鉄筋が局部座屈した。

図-6(2)に示す応答変位の時刻歴によると、NS方向には6.6秒から始まる+側(N面側)への大きな応答によってN面側へバイアスがかかる。残留変位はN面側へドリフト0.43%となっている。Kobe 40%の1方向入力では、最大応答はN面側にドリフト5.4%であったのに対して、2方向入力した場合にはN面側にドリフトが6.4%に増加している。一方、EW方向では、6.6秒頃から+側(W面側)へ大きくシフトし、最大ドリフト4.2%を迎えるが、加振後には+側(E面側)へドリフト0.34%の残留変位を生じる。

履歴曲線は図-7(2)に示す通りである。NS方向には曲げ耐力は、+1.1%ドリフト付近では118kNである。その後、応答を繰り返し、最初に+6%ドリフト程度の応答が生じた際には、曲げ耐力はまだ118kNと低下していないが、2回目に+6%ドリフトに達した時には曲げ耐力は108kNとなり、約8.5%低下している。一方、EW方向では最大耐力は+側には109.0kN、-側には最大耐力が101.8kNとなっている。また、W面側の履歴曲線はKobe 30%2方向入力と同様に丸みを帯びたものとなっている。

(3) Sylmar 50%を入力した場合

Sylmar 50%を2方向に入力した後の損傷は、図-3(2)(c)に示す通りである。S面で広範囲にかぶりコンクリートが剥離した。図-3(1)(c)に示したSylmar 50%を1方向に入力した場合に比べると、曲げ水平クラックがより高密度に生じている。Kobe 40%の2方向載荷では軸方向鉄筋が局部座屈したが、Sylmar 50%の2方向載荷では鉄筋に損傷は生じなかった。

図-6(3)に示す応答変位によると、NS方向には4.4秒で-側(S面側)にドリフト5.5%と最大になった後、橋脚は最後までS面側に偏ったまま振動を続け、最終的にドリフト2.1%の残留変位を生じる。Sylmar 50%を1方向に入力した場合には、S面側への最大応答はドリフト4.8%であり、2方向入力した場合の方が最大応答は0.7%ドリフトだけ大きい。EW方向でも6.9秒において-側(W面側)で最大応答を迎えた後、W面側に偏って振動し続け、載荷終了時にはドリフト1.7%の残留変位が生じた。

図-7(3)の履歴曲線によると、NS方向では-4.2%ドリフト時に最大耐力が124kNであるが、-5.4%ドリフト時には115kNと8%程度の耐力が低下している。前述したよ

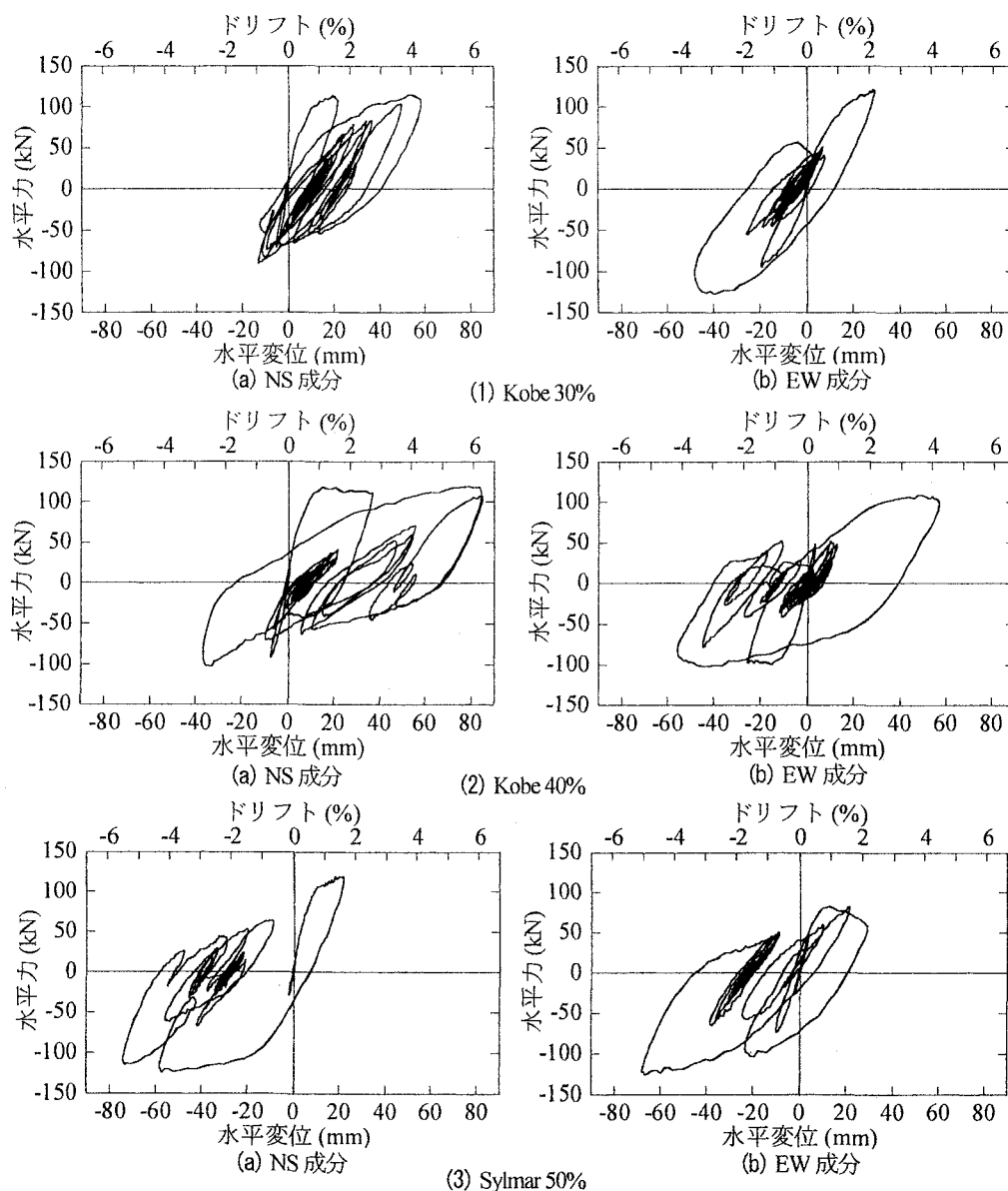


図-7 2方向載荷した場合の履歴

うに, Sylmar 50%を1方向入力した場合の最大耐力は142kNであり,2方向入力した場合の方が最大耐力は13%小さくなる。一方,EW方向では+側載荷でのポストピークが負勾配になっている。また,2方向の曲げ耐力のインターアクションにより履歴のコーナーが丸みを帯びている。

5. 繰り返し載荷実験との比較

図-8に早川が行った繰り返し載荷実験⁵⁾の履歴を示す。早川が行った1方向繰り返し載荷,円形繰り返し載荷はともにドリフト0.5%を基準に,その整数倍で変位制御により順次変位振幅を増大させていった。同一変位振幅による繰り返しは3回とし,円形繰り返し載荷では,

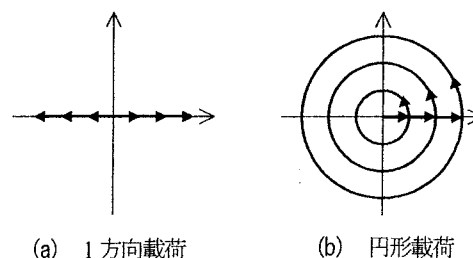


図-8 繰り返し載荷の履歴

y方向の変位をx方向から $\pi/4$ だけ遅らせて正弦波により変位を与えた。

1方向繰り返し載荷した場合の損傷の進展を図-9(1)に示す。1方向繰り返し載荷では載荷変位振幅の増大とともに橋脚基部で水平曲げひび割れが次第に成長し,ドリフト3%で,S面においてかぶりコンクリートが圧縮破壊し,剥落する。ドリフト3.5%になると,これがS面,N面で

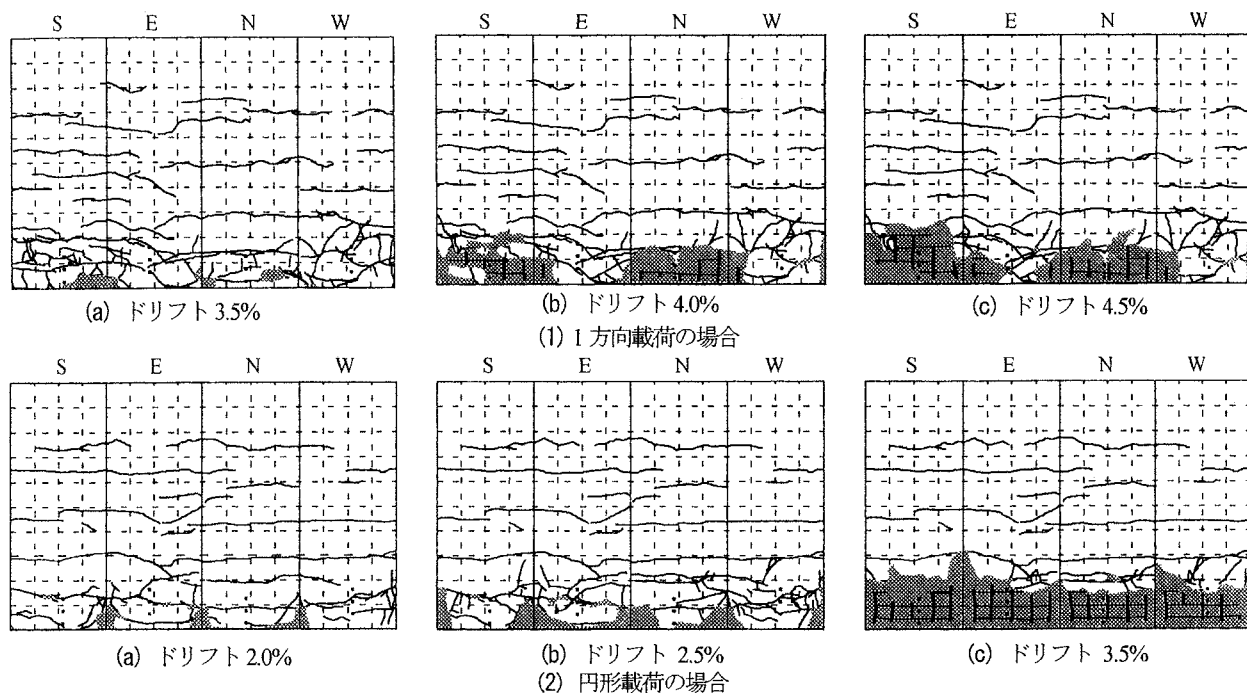


図-9 繰り返し荷重実験の損傷状況

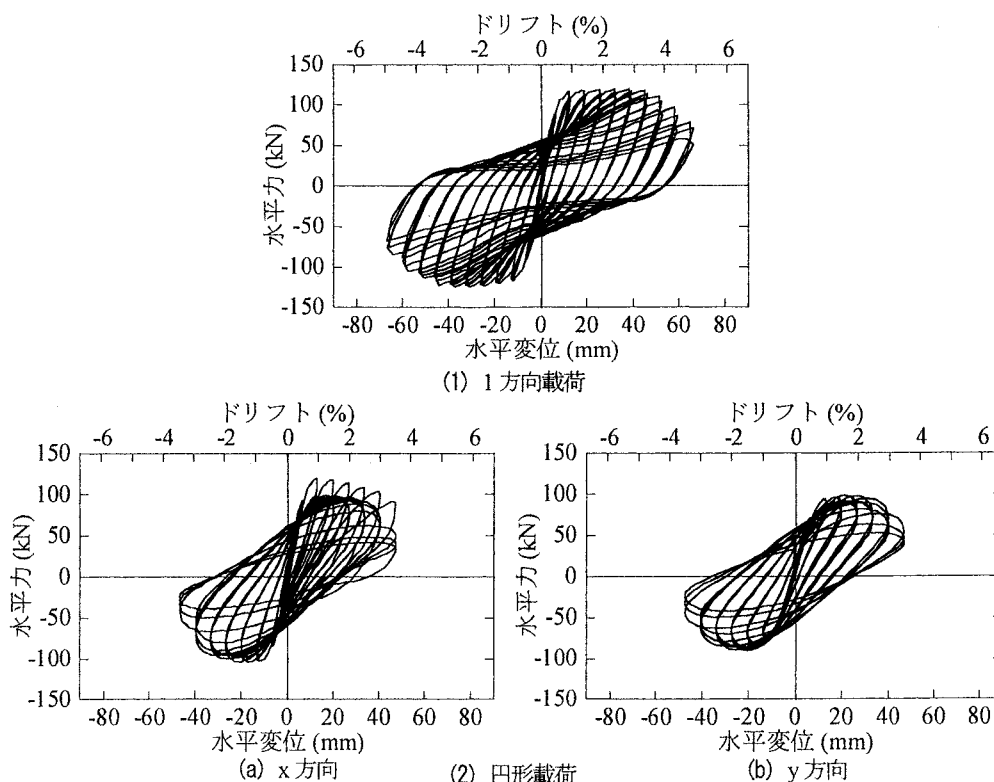


図-10 繰り返し荷重した場合の履歴

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落すると同時に、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。S、N 面に配置された軸方向鉄筋は面外座屈し、外側にわずかにふくらんだ状態となる。ドリフト 4.5%では損傷が

さらに進展する。ドリフト 5%に達すると、S 面、N 面では橋脚基部から 200mm の範囲にわたってかぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋も局部座屈する。

円形繰り返し荷重した場合には、ドリフト 1.5%で隅角部にひび割れが入り、2.5%ドリフトになると隅角部だけ

ではなく面がかぶりコンクリートの剥落が顕著になる。ドリフト3.5%に達すると、橋脚基部付近でかぶりコンクリートが全面的に剥落し、軸方向鉄筋が露出した。後述するように、この段階で耐力低下が著しくなったため、ここで載荷を打ち切っている。図-9(2)は主要な載荷ステップ終了後における損傷を示したものである。1方向繰返し載荷では、コンクリートの剥落がN面、S面を中心に起きているのに対し、円形繰返し載荷では全ての面で起きているのが特徴である。円形繰返し載荷ではドリフト3.5%までしか載荷を行うことができなかった。これはどの2方向ハイブリッド実験の最大ドリフトよりも小さいが、繰返し載荷実験による損傷はハイブリッド載荷実験に比較して著しく大きいことがわかる。

繰返し載荷実験の履歴曲線を図-10に示す。1方向繰返し載荷では、図-10(1)よりドリフト1%程度になると塑性状態となる。その後ドリフト3.5%まではほぼ安定し、110kN程度の値を保つが、ドリフト4%に入るとかぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈により耐力が低下し始める。最大曲げ耐力は+側(N面側)では119.8kN、-側(S面側)では124.5kNであり、平均122.3kNである。前述した1方向のハイブリッド実験の結果と比較を行うと、いずれの入力地震動の場合にもハイブリッド実験で求めた応答が卓越する側の最大耐力は、1方向繰返し載荷実験の平均耐力よりも10~16%大きい。これは、同程度変位した場合の損傷がハイブリッド実験の方が繰返し載荷実験よりも小さいためである。

円形繰返し載荷実験では、図-10(2)に示すように履歴曲線のコーナーが丸くなっていることが特徴的である。円形繰返し載荷のNS方向の最大曲げ耐力は、+側(N面側)では103.1kN、-側(S面側)では98.7kNで、平均100.9kNである。また、EW方向の最大曲げ耐力は+側(E面側)では100.6kN、-側(W面側)では88.3kNであり、平均94.5kNである。前述した2方向ハイブリッド実験の応答が卓越する側での最大耐力の方が、円形繰返し載荷の最大耐力よりNS方向では14~23%、EW方向では15~35%大きい。

また、ハイブリッド実験では明確な耐力低下は生じないが、繰返し載荷実験ではドリフト3.0%以降の耐力低下が著しい。

6. 結論

本研究では、同一の正方形断面を有するRC製供試体を用いて、KobeおよびSylmarの2種類の地震動を用いた1方向および2方向のハイブリッド載荷実験を計6ケースに対して行うと同時に早川らが行った繰返し載荷実験との比較を行った。本検討の結果、得られた結論は以下の通りである。

1) 1方向加振した場合には、載荷方向に直交する面から

損傷が進展するのに対して、2方向に加振した場合には、隅角部から4面に損傷が進展する。2方向加振した場合の損傷は1方向加振した場合の損傷に比べて著しい。この結果、2方向加振した場合の最大耐力は1方向加振した場合の最大耐力に比較して低い。

- 2) Kobe 40%の2方向入力とSylmar 50%の2方向入力では最大応答変位についてはそれほど差がないが、載荷終了後の残留変位はSylmar 50%の2方向入力の方がNS成分では4.8倍、EW成分では5倍と著しく大きい。すなわち、残留変位は入力地震動によって大きく異なる。
- 3) 同一変位振幅における繰返し回数を3回とした変位漸増型繰返し実験³⁾と比較して、ハイブリッド実験の損傷は全体的に小さい。例えば、ハイブリッド載荷実験の中で損傷が最も著しいKobe 40%の2方向載荷実験と円形繰返し載荷を比較すると、円形繰返し載荷ではドリフト3.0%以降、急速に耐力が低下するが、Kobe 40%の2方向載荷では明確な耐力低下がない。また、Kobe 40%を2方向に載荷した場合の最大応答変位は、NS方向でドリフト6.2%、EW方向でドリフト4.2%と円形繰返し載荷のドリフト3.5%に比べ大きい。損傷はハイブリッド実験の方が円形繰返し載荷よりも小さい。

謝辞：本研究に際しては、東京工業大学理工学研究科土木工学専攻川島研究室の中村剛、市川吉洋、福田智之、宮路健太郎、木島健、タイからの研究生であるSumnieng Ongsupankulの各氏に供試体作製および実験において多大なご支援を頂きました。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、陸好宏史、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、土木学会論文集、投稿中
- 6)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、1996.12
- 7)永田聖二、渡邊学歩、川島一彦：ハイブリッド実験におけるアクチュエータによるP-Δ効果の補正とその検証、第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2004