

水平2方向地震力を受けるコンクリート充填 正方形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する実験的研究

Experimental Study for the Seismic Performance of Concrete Filled Square Section Steel Bridge Piers
underbid-Literal Ground Motion Excitation

渡邊 剛士[†], 青木 徹彦^{††} 党 紀^{†††}
Takashi Watanabe, Tetuhiko Aoki, Dang Ji

Abstract In this study, uni-directional loading and bi-directional loading hybrid tests were conducted for concrete filled square sectional steel bridge piers. By comparing the seismic response of piers loaded uni-and bi-directionally, it was found that the restoring force of piers under realistic bi-literal excitation, was lower than the predicted based on uni-direction loading. The response displacement due to the bi-lateral loading tests, was larger than the uni-directional loading results. Also from comparing the hybrid test result with unfilled type piers, it is clarified that the concrete filled steel piers have better seismic performance under both uni-directional and bi-directional ground motion excitation.

1. はじめに

都市高速道路高架橋の鋼製橋脚の多くは車両衝突時の破壊防止のため、橋脚基部に低強度コンクリートが充填されている。兵庫県南部地震では、このような橋脚は、無充填の橋脚と比較して被害が軽微であり、基部鋼板の座屈が抑制されることで、耐震性能が向上できることが示された。

コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の耐震性能に関する従来の研究^{2)~7)}では、コンクリート充填橋脚は無充填のものに比べ、強度およびじん性が上昇することが確認されている。現行の道路橋示方書⁸⁾では、コンクリート充填橋脚は、基本的に、無充填鋼製橋脚と同様に、橋軸方向と橋軸直交方向からの地震波が、それぞれ独立作用するとして、耐震照査を行うこととしている。そのため、既往の研究のほとんどは、水平1方向載荷に基づいたものである。

しかしながら、近年の無充填の鋼製橋脚に対する水平2方向ハイブリッド実験¹⁾では、橋脚が水平2方向からの地

震力を同時に受ける場合、最大荷重および変形能力が、1方向載荷時に比べ、やや低下することや、応答変位が増大し、倒壊が発生する危険があるなどの結果が得られている。一方、コンクリート充填鋼製橋脚に対して、水平2方向から地震力が作用する場合の耐震性能や応答特性は明らかにされていない。

そこで本研究では、これらの問題を解明するため、コンクリート充填橋脚に対する水平2方向ハイブリッド実験を行い、その地震時挙動を明らかにする。

2. 実験計画

2・1 実験供試体および充填率

実験に用いる供試体は、材質がSM490、板幅450mm、板厚6mmの正方形補剛箱型断面とし、断面を構成する各面は2本の縦リブ(6×55mm)を有する。また、高さ方向に基部から900mmまでは225mm間隔で、それ以降は450mm間隔でダイアフラムが設けられている。供試体側面図を図-1(a)に、供試体断面図を図-1(b)に、供試体寸法および各パラメータを表-1に示す。

コンクリートの充填高さ h_c については、道路橋示方書より(1)式が示されている。

[†] 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻

^{††} 愛知工業大学 都市環境学科土木工学専攻(豊田市)

^{†††} 愛知工業大学 耐震実験センター PD(豊田市)

$$h_c = h(1 - M_{ys}/M_c) \quad (1)$$

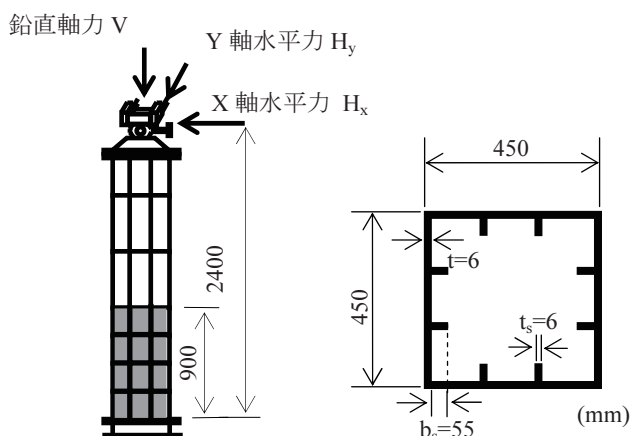
ここに, M_{ys} と M_c はそれぞれ鋼断面のみとコンクリートを充填した断面の曲げ耐力である.

コンクリートを充填する前後の断面の曲げ耐力比 M_c/M_{ys} を用いれば, 橋脚の最適充填率を計算できるが, 今日まで, コンクリート充填による耐力上昇に関する研究は十分に行われておらず, 実務的な計算方法は提案されていない.

過去の研究結果より, コンクリートを充填することで最大水平荷重が約 1.3 倍に上昇することが分かっている. この結果を参考にし, 本研究では, 曲げ耐力の上昇をやや過大に $M_c/M_{ys}=1.5$ と想定し, 最適充填率は $h_c/h=33.3\%$ と算出した. 実験ではコンクリートをダイアフラムまで充填すること⁹⁾とした. その場合, 充填率は 40%となる.

表-1 供試体寸法および各パラメータ

鋼種		SM490
供試体有効高さ	h(mm)	2400
補剛板幅	b(mm)	450
補剛板厚	t(mm)	6
リブ本数		2
リブ板幅	b_s (mm)	55
リブ板厚	t_s (mm)	6
ダイアフラム間隔	a(mm)	225
断面積	A(mm ²)	1.33×10^4
全断面降伏軸力	P_v (kN)	4321
断面 2 次モーメント	I(mm ²)	4.06×10^8
断面 2 次半径	r(mm)	175
補剛板幅厚比パラメータ	R_R	0.59
細長比パラメータ	λ	0.34
補剛材細長比パラメータ	λ_s	0.184
補剛材剛比	γ/γ^*	10.5



(a) 側面図 (b) 断面図

図-1 実験供試体概要図

2・2 実験装置

本研究で使用する実験装置の概要図を図-2 に示す.

実験では水平 2 方向および鉛直 1 方向から荷重をするため, 荷重点は 3 次元的な動きをすることから, これに対応するための 3 軸荷重装置が本学で開発された. この装置は中心に直径 90mm の芯が配置され, その中間部で鉛直軸回りおよび水平軸回りに回転可能である. これに x 方向, y 方向のアクチュエータの先端をそれぞれ取り付ける.

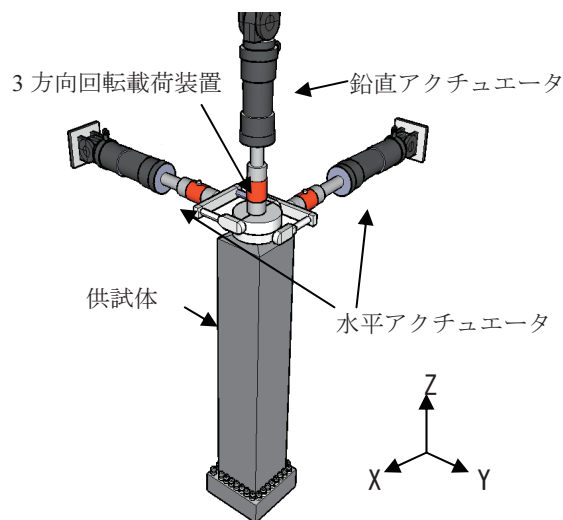


図-2 3 次元荷重システム

2・3 静的繰り返し実験

ハイブリッド実験に先立ち, 基本的な履歴特性を得るために静的繰り返し荷重実験を行う. 荷重方法は上部工重量を想定した一定の鉛直荷重 P のもとで, 繰り返し水平変位 δ を与える. δ 降伏変位 δ_0 を基準とし, 図-3 に示すように, $\pm 1 \delta_0, \pm 2 \delta_0, \dots$ と漸増させながら荷重する. また, 水平荷重が最大荷重の 7 割程度に低下した時点で実験を終了する. また, 実験装置は図-2 に示すものを用いる.

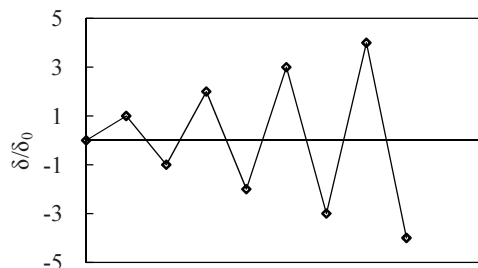


図-3 荷重パターン

2・4 ハイブリッド実験

ハイブリッド実験の数値解析部分は一般に Newmark β 法が用いられる. 本研究では以下の手順で実験を進める.

- 1) 入力地震波は 0.01 秒間隔の加速度データであり, この間隔を 1 ステップとして応答計算を行う.
- 2) N ステップの計算が終了し, N+1 ステップの計算をするとき, まず N ステップでの剛性 K を用いて予測変位 U_{n+1} を計算で求める.
- 3) 予測変位 U_{n+1} を相似則を用いて縮小し, 供試体に与え

る。

- 4) 基部回転や2方向加力の影響を考慮し¹⁾、変位の補正計算を行い、供試体に与える変位の修正を行う。
- 5) 計測した反力を用いて再度応答計算を行い、改善した予測変位 $U_{n+1, m}$ を求める。この予測変位と最初に求めた予測変位 U_{n+1} が許容範囲に入ったら、次のステップに移行する。範囲に入らなかった場合2)に戻り再度繰り返す。
- 6) 最後のステップまで、上述の2)~5)を繰り返す。

2・5 相似比および想定橋脚

ハイブリッド実験において、構造全体は実寸法で数値モデル化し、橋脚は縮小しモデル化した供試体を用いるため、相似比の設定が必要である。ここでは、実構造物と縮小モデルに同じ材料を用いると、両者の降伏ひずみと降伏応力が等しくなる。そのことを利用し、相似比を算出すると表-2のようになる。

また、実橋梁の固有周期は一般的に0.2秒~1.2秒が多い。そこで、今回は0.8秒になるように供試体と実橋脚の相似比を $S=4$ とした。その時の想定橋脚のパラメータを表-3に示す。

表-2 各物理量の相似比

-	倍率	項目	倍率	項目	倍率
長さ	1/S	応力	1	時間	1/S
面積	1/S ²	力	1/S ²	速度	1
体積	1/S ³	質量	1/S ³	加速度	S

表-3 想定橋脚のパラメータ

	実橋脚	供試体
相似率	1	1/4
高さ (mm)	9600	2400
上部工質量 (t)	1060	16.53
剛性 (kN/mm)	67.2	16.80
減衰定数 (kN・s/mm)	0.843	0.05
固有周期 (s)	0.789	0.197

2・6 入力地震波

ハイブリッド実験の入力地震波として、1995年に兵庫県南部地震で観測された神戸海洋気象台地盤上(I種地盤)の地震波(以降、JMAと呼ぶ)、JR西日本鷹取構内地盤上(II種地盤)の地震波(以降、JRTと呼ぶ)、およびポートアイランド内地盤上(III種地盤)の地震波(以降、PKBと呼ぶ)を用いる。これらを表-4にまとめる。同表の地震波記号は、地震波名のあとに、NS、EW方向成分の記号を付したものである。記号2Dは、NS方向成分とEW方向成分を同時に入力するものである。また、地盤種の定義は、I種地盤は良好な洪積地盤及び岩盤、III種地盤は沖積地盤のうち軟弱地盤、II種地盤はI種地盤及びIII種地盤のいずれにも

属さない洪積地盤及び沖積地盤である⁸⁾。また、NS方向がX軸、EW方向がY軸を示す。

表-4 入力地震波

地盤種別	入力地震波	最大加速度 (gal)
I	JMA-NS	-812
	JMA-EW	766
	JMA-2D	870
II	JRT-NS	687
	JRT-EW	-673
	JRT-2D	711
III	PKB-NS	-557
	PKB-EW	619
	PKB-2D	775

3. 実験結果

3・1 静的繰り返し実験

静的繰り返し実験で得られた水平変位-水平荷重履歴曲線を図-4に示す。同図は、コンクリート無充填の供試体の結果を破線で、コンクリートを高さ40%充填した供試体の結果を実線で示し、それぞれ比較したものである。また、同図の横軸は、降伏変位 $\delta_0=15\text{mm}$ で、縦軸は降伏荷重 $H_y=237\text{kN}$ で無次元化している。

それぞれの曲線を比較すると、コンクリート無充填の供試体に比べコンクリート充填されたほうが、最大荷重で約11%上昇した。また、最大荷重以降の荷重の低下が緩やかとなった。これは、コンクリートが供試体基部鋼板の座屈を抑えられ、剛性低下が緩和されたためである。

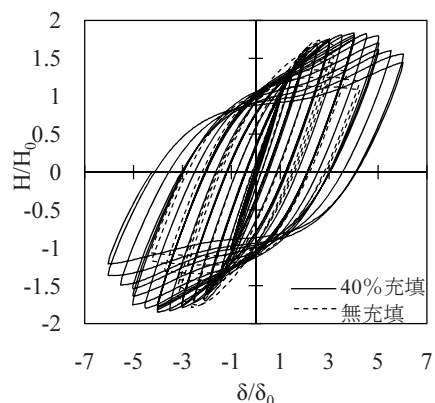


図-4 水平荷重-変位曲線

3・2 コンクリート充填橋脚の1方向載荷と2方向載荷の比較

2方向および1方向載荷ハイブリッド実験の結果を水平荷重-変位曲線、応答変位時刻歴に分け、図-5~図-6に示す。ただし、応答変位 (δ_x, δ_y) と水平荷重 (H_x, H_y) は、各実験に用いた供試体の降伏変位 δ_0 と降伏水平力 H_0 で無次元化している。

また, 2 方向载荷ハイブリッド実験の結果を実線, 1 方向ハイブリッド実験の結果を破線で表す. 1 方向载荷実験結果の NS, EW 成分のベクトル合成した結果は, 供試体の損傷が他方向载荷の影響を受けていない仮定の橋脚の水平 2 方向挙動を示すもので, 現設計法の基礎となっている考えに立つものである. これに対し, 2 方向载荷実験結果は実際の水平 2 方向同時载荷の挙動を示す.

3・2・1 水平荷重-変位履歴曲線

図-5 に各地盤種ごとの水平荷重-変位履歴を示す. 同図の縦軸は水平荷重, 横軸は水平変位である. 2 方向载荷実験と 1 方向载荷実験を比較するため, NS, EW 成分に分けて示している.

全体の傾向として 2 方向载荷実験の方が, 1 方向载荷実験に比べて最大荷重が最大 33%, 最小で 4%, 平均で約 15% 低下する結果となった. このことから, 2 方向载荷実験では 1 方向载荷実験に比べ損傷が大きいと考えられる. また, 1 方向载荷では, 履歴が一定のサイクルを描くが, 2 方向载荷では, 片方向に大きく変位する履歴が描かれる. これは, 他方向の影響を受けているためと考えられる.

3・2・2 応答変位時刻歴

図-6 に各地盤種の応答変位時刻歴を示す. 縦軸は応答変位, 横軸は経過時間である. また, 2 方向载荷実験と 1 方向载荷実験の結果を比較するために, NS, EW 成分に分けて示す.

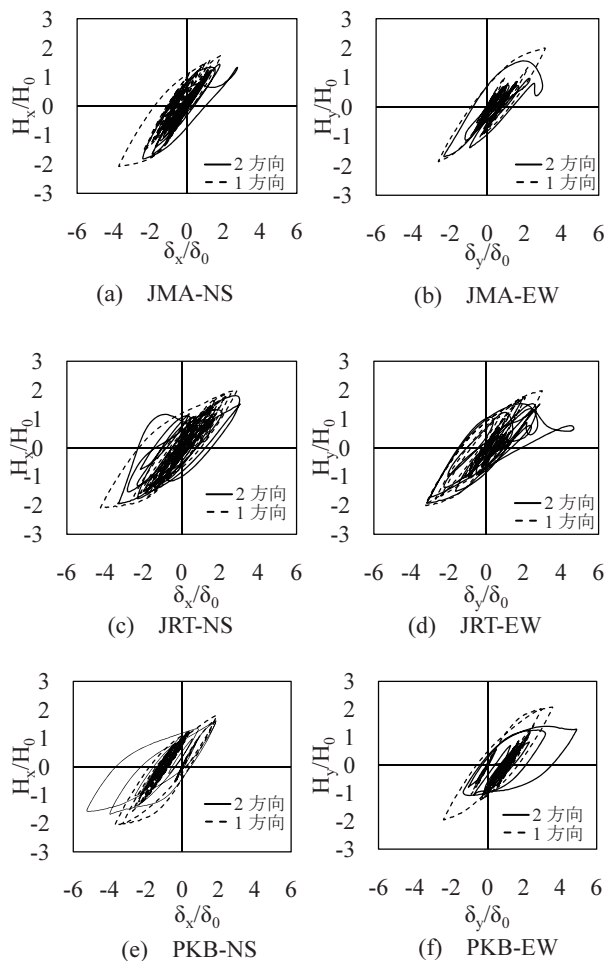


図-5 水平荷重-変位履歴曲線

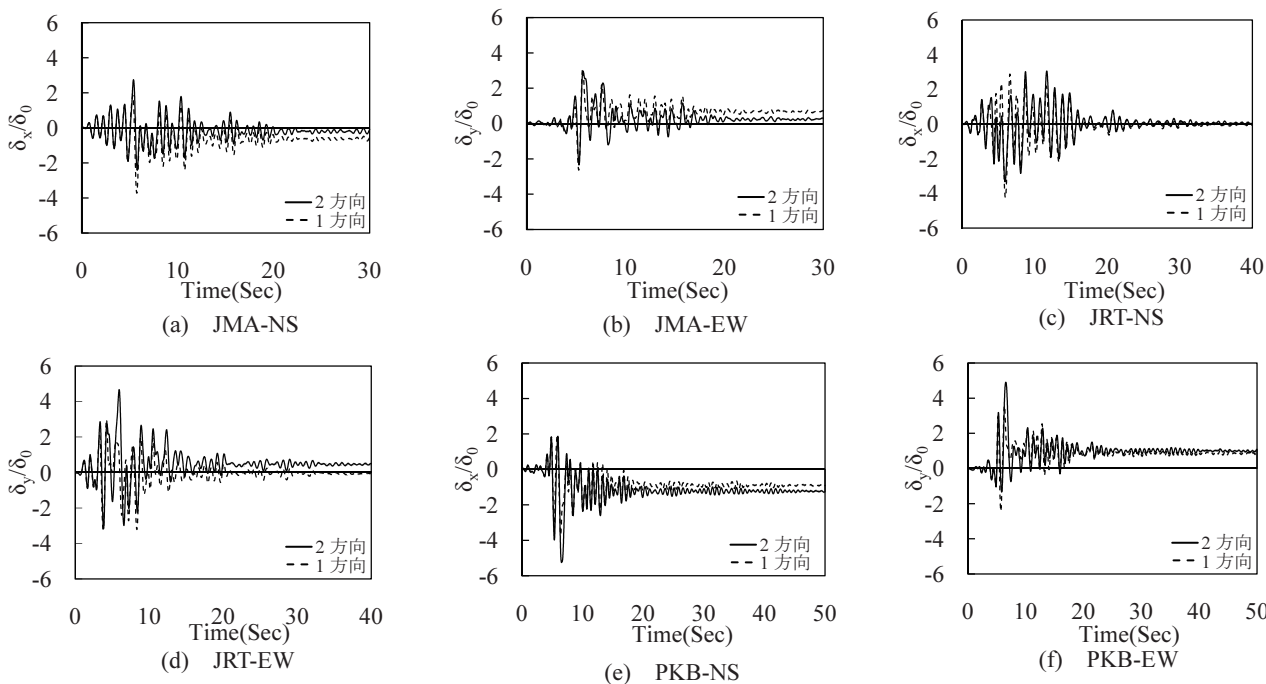


図-6 応答変位時刻歴

全体の傾向として2方向载荷実験と1方向载荷実験では残留変位にはそれほど大きな差がないが、I種地盤では1方向载荷実験が、II種、III種地盤では2方向载荷実験のほうが残留変位が大きい。また、最大応答変位でもI種地盤は2方向载荷実験に比べ1方向载荷実験の方が大きくなり、逆にII種、III種地盤では2方向载荷実験の方が大きい値となり、一定の傾向は見られなかった。

3・2・3 最大荷重

2方向実験と1方向実験で得られた最大荷重を図-7に示す。同図は各成分の最大値をプロットし、NS成分は△、▲、EW成分は□、■で、下記の式(2)を用いて、その時刻での合成応答変位を算出した。その値を同図に示し、図中に●で示す。

$$\text{合成値} = \sqrt{(\text{NS成分})^2 + (\text{EW成分})^2} \quad (2)$$

この結果から1方向実験に比べ2方向実験はすべての結果で1方向载荷より低い。2方向実験のベクトル合成荷重値と、それぞれの1方向実験の結果と比較すると、両者の最大荷重値は、ほぼ一致しているといえる。つまり、2方向载荷を受ける橋脚の最大荷重に関しては1方向载荷で得られる値あるいはそれらの平均値から、推定することができると思われる。

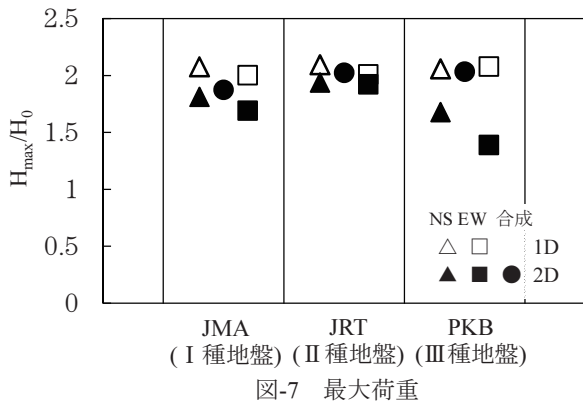


図-7 最大荷重

3・2・4 最大応答変位

ハイブリッド実験で得られた各地盤種の各方向最大応答変位およびベクトル合成した最大応答変位を、それぞれ図-8に示す。実験によって得られたそれぞれの変位を比較し、水平変位のNS成分の結果を△、▲で示し、EW成分を□、■で表す。また、入力した地震波の応答変位増分を用い、式(2)で算出し、その値を同図に示し、図中に○、●で示す。

同図の破線および実線で示すように、最大応答変位は1方向実験ではNS、EW成分とも地盤種に係わらず一定の値を取るが、2方向実験では、I種地盤からIII種地盤にかけて大きくなっている。また、I種地盤のNS、EW成分

と、II種地盤NS成分は、1方向実験の方が大きくなったが、逆にIII種地盤のNS、EW成分とII種地盤EW成分は、2方向実験の方が大きくなり、一定の傾向は見られない。

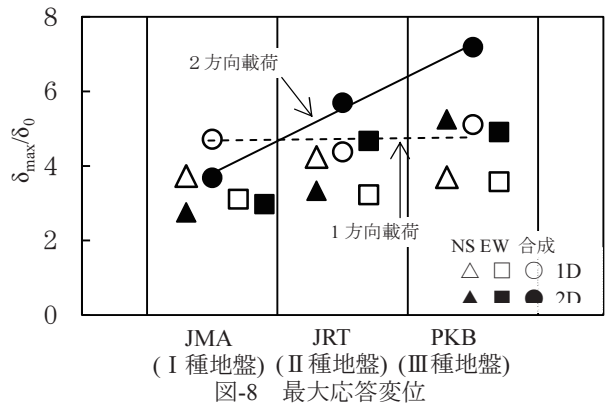


図-8 最大応答変位

3・2・5 累積エネルギー吸収量

各地盤種の2方向载荷実験および1方向载荷実験の累積エネルギー吸収量を図-9に示す。また、NS成分を△、▲で示し、EW成分を□、■で示す。同図の1Dは1方向载荷、NSはその成分を示している。また、図の縦軸は弾性エネルギー($E_0 = \delta_0 \times H_0 / 2$)で無次元化している。合成とあるのは、各方向NSとEW成分を足したもので○、●で示す。2方向と1方向载荷実験の結果を比較すると1方向に比べ2方向実験の方がエネルギー吸収量が多い。そのことから、1方向载荷の方に比べ2方向载荷は、橋脚が損傷していることが考えられる。

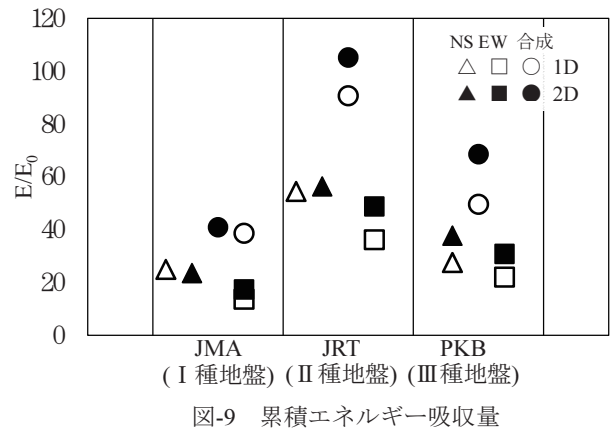


図-9 累積エネルギー吸収量

4. コンクリート充填橋脚と無充填橋脚の耐震性能の比較

コンクリートを部分的に充填することにより橋脚基部パネルの座屈を抑制するため、じん性が向上するが、実際にどの程度上昇するかは研究は少ない。より正確な検討のため、実地震波に近い2方向ハイブリッド実験を行い、比較する必要がある。そこで、過去に本学で行った無充填鋼製橋脚のハイブリッド実験の結果と今回行ったコンクリート充填鋼製橋脚の実験結果を比較する。

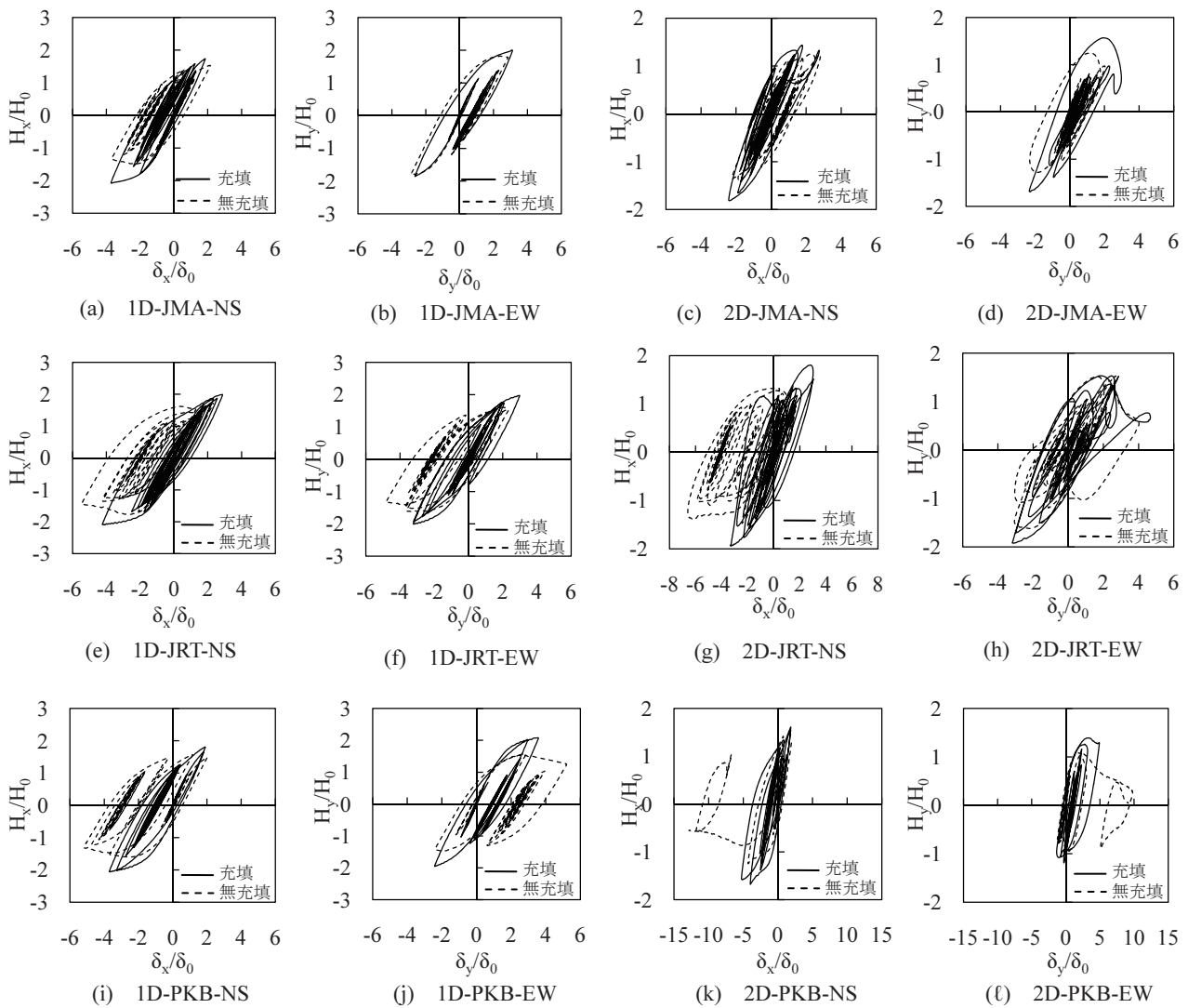


図-10 水平荷重-変位履歴曲線

4・1 水平荷重-変位履歴曲線

図-10(a)~(l)に各地盤種の各成分のコンクリート無充填供試体とコンクリート充填供試体の水平荷重-変位曲線を示す。コンクリート充填時の結果を実線、コンクリート無充填時の結果を破線で示す。縦軸は水平荷重、横軸は水平変位を示している。また、それぞれ、降伏荷重 H_0 、降伏変位 δ_0 で無次元化している。また、地盤種ごとの比較を、NS、EW 成分に分けて行った。

図-10(a)~(l)の結果から、すべての地盤種でコンクリート充填の供試体の方がコンクリート無充填の供試体に比べ最大荷重の上昇がみられた。コンクリートを部分的に充填することで橋脚の基部の座屈が抑制され、耐震性の向上ができたと考えられる。最大荷重や最大応答変位の結論、考察は後で記述する。

4・2 応答変位時刻歴

各実験で得られたコンクリート無充填供試体とコンクリート充填供試体の応答変位時刻歴結果を図-11(a)~(l)に示す。コンクリート充填時の結果を実線、コンクリート無充填時の結果を破線で示す。縦軸は応答変位、横軸は経過時間を示している。Ⅲ種地盤のコンクリート無充填鋼製橋脚の2方向載荷実験では橋脚が倒壊したと判定し、実験を途中で終了したため、データが途中までしかない。

応答変位の結果も復元力履歴と同じようにコンクリート充填の供試体の方がコンクリート無充填の供試体に比べ、最大応答変位と残留変位が低下している。特に、Ⅲ種地盤では、コンクリート無充填時には倒壊判定をしたが、コンクリート充填橋脚では、剛性が上昇し倒壊の判定をすることなく実験終了まで耐えている。これも、コンクリートを部分的に充填したため、基部の座屈が抑制されたためと考えられる。

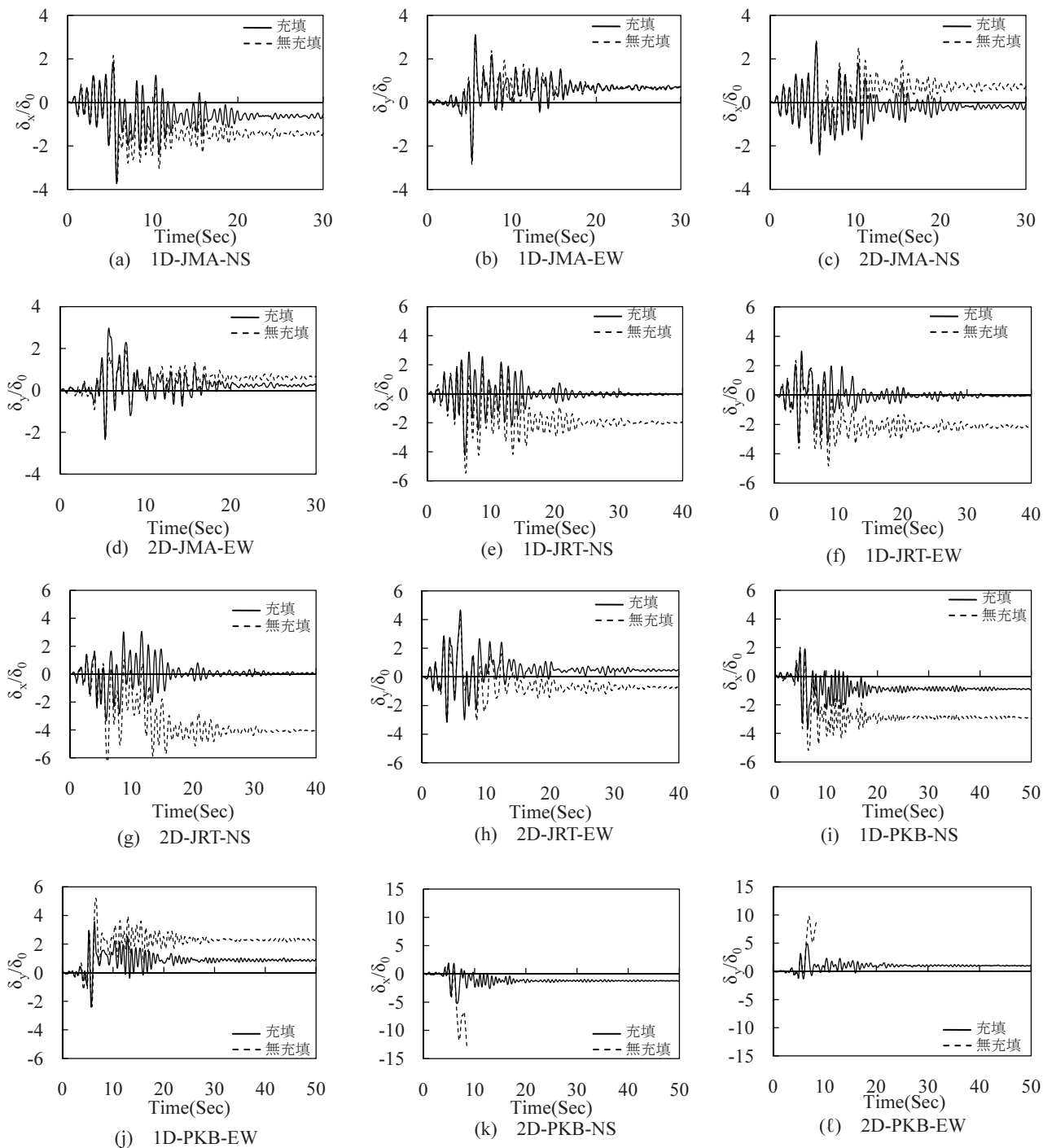


図-11 応答変位時刻歴

4・3 最大荷重

図-12(a), (b)に、各実験で得られたコンクリート無充填および充填橋脚の最大荷重の各成分の最大値をプロットしている。NS成分は△, ▲, EW成分は□, ■で示し、縦軸は最大応答変位、横軸は地盤種を示す。また、以下の図では、UCFはコンクリート無充填供試体、CFはコンクリート充填供試体を示し、▲, ■はコンクリート充填、△, □はコンクリート無充填を表す。

同図から分かるようにコンクリートを橋脚基部に充填

することで最大荷重には約20%~30%の上昇が見られた。また、1方向載荷実験ではコンクリート充填橋脚の最大荷重がすべての成分で同じ程度になり、2方向載荷実験では、I種、II種ではほぼ一定となったが、III種地盤は異なる結果となった。この理由としては、III種地盤にはI種、II種地盤と異なり、両方向の最大変位がほぼ同時に生じたため最大荷重が低下したのではないかと考えられる。

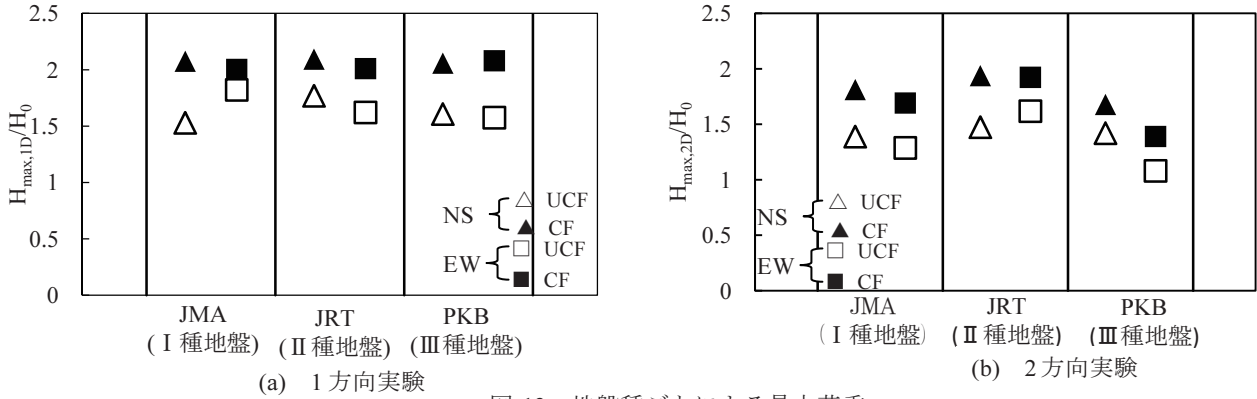


図-12 地盤種ごとの最大荷重

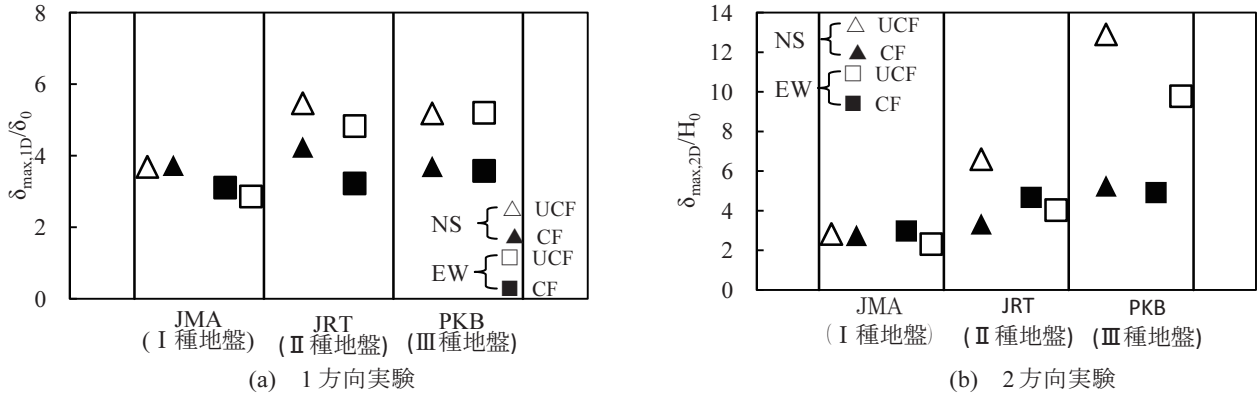


図-13 地盤種ごとの最大応答変位

4・4 最大応答変位

図-13(a), (b)に, 各実験で得られたコンクリート無充填および充填橋脚の最大応答変位の各成分の最大値を示す. NS 成分は△, ▲, EW 成分は□, ■で示す. 縦軸は応答変位, 横軸は地盤種である.

1 方向実験では I 種地盤を除き最大応答変位が減少する傾向にあったが, 2 方向実験では I 種, II 種地盤で NS 成分の最大応答変位はコンクリート無充填時に比べ減少したが, EW 成分は逆に増加した. これは, 他方向の影響を受けたためであると考えられる.

4・5 累積エネルギー吸収量

図-14(a), (b)に地盤種とコンクリート充填供試体, コンクリート無充填供試体のエネルギー吸収量の比較を示す. 図中の△, ▲は NS 成分, □, ■は EW 成分である. それぞれの合成値を○, ●で示している. また, 縦軸はエネルギー吸収量を弾性エネルギー吸収量で無次元化し, 横軸は各地盤種で示す.

同図から, 1 方向および 2 方向荷重で, コンクリート充填供試体の累積エネルギー吸収量がコンクリート無充填供試体と比べ減少する傾向となった. つまり, 基部にコンクリートを充填することにより, 橋脚の損傷を減らすことができたと考えられる. しかし, I 種地盤では逆に 1 方向荷重実験に比べ 2 方向荷重実験で累積エネルギー吸収量が増加する傾向となっている.

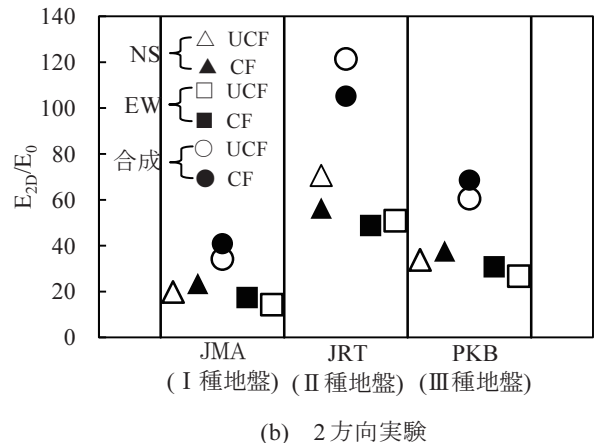
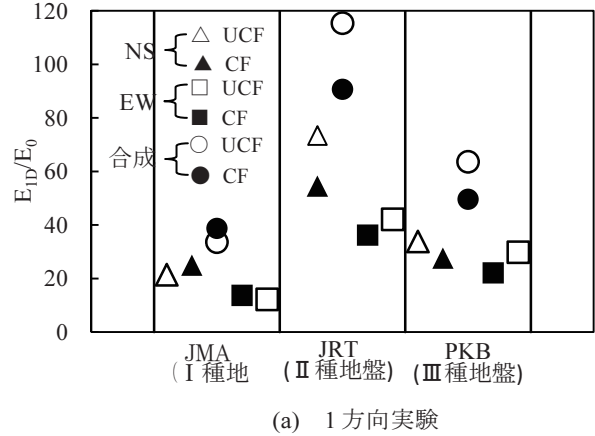


図-14 地盤種ごとの累積エネルギー吸収量の比較

5. 結論

本研究では、正方形補剛箱型断面の鋼製橋脚の基部にコンクリートを充填し、水平1方向および水平2方向コンクリート充填ハイブリッド実験を行い、結果の比較を行った。得られた結論を以下にまとめる。

a. 水平1方向載荷および2方向載荷ハイブリッド実験の比較

- (1) 水平2方向載荷を受ける橋脚のベクトル合成した最大耐力は、1方向載荷時との差が少なかった。このことから、2方向載荷を受ける橋脚の最大荷重に関しては1方向載荷で得られる値の平均値を用いて推定することができると思われる。
- (2) 2方向載荷時のコンクリート充填橋脚の応答変位は、地盤種がⅠからⅢ種、すなわち、岩盤から軟弱地盤になるにつれて、大きくなる傾向がある。一方、1方向載荷では一定の値となった。
- (3) コンクリート充填橋脚の1方向載荷、2方向載荷された供試体ともに、橋脚の残留変位は小さく、各実験の結果は、最も大きい値でも、橋脚高さの1/100以下になった。これはコンクリート充填の効果が現れたものと考えられる。

b. コンクリート無充填橋脚とコンクリート充填橋脚の比較

- (1) コンクリートを充填することにより、無充填時に比べ最大荷重が、10%~32%上昇が見られた。
- (2) 1方向載荷実験ではコンクリート充填した供試体の最大応答変位は、Ⅰ種地盤を除き、低減した。具体的には23%~33%減少する。

- (3) 水平2方向載荷供試体の累積エネルギー吸収量は、Ⅰ種地盤を除き、コンクリート充填橋脚で減少する傾向を示した。つまり、コンクリート無充填橋脚に対して橋脚の損傷が少なくなるといえる。

参考文献

- 1) 党紀,中村太郎,青木徹彦,鈴木森晶: 正方形断面鋼製橋脚の水平2方向載荷ハイブリッド実験,構造工学論文集,土木学会,Vol.56,pp.367-380,2010.3
- 2) 宇佐美勉,葛漢彬,水谷慎吾: コンクリートを部分的に充填した無補剛箱形鋼柱の繰り返し弾塑性挙動,構造工学論文集,土木学会,Vol.(A),pp.249-262,1993.3
- 3) 葛漢彬,宇佐美勉,戸谷和彦: 繰り返し荷重を受けるコンクリート充填柱の強度と変形能に関する研究,構造工学論文集,土木学会,Vol.40(A),pp.163-176,1994.3
- 4) 葛西昭,葛漢彬,宇佐美勉: コンクリート部分充填鋼製橋脚の耐震性能,橋梁と基礎,pp.23-29,1997.7
- 5) 葛漢彬,宇佐美勉: コンクリートを部分的に充填した鋼箱形断面柱の終局強度と変形能に関する解析的研究,土木学会論文集,No.696/I-58,pp.285-298,2002.1
- 6) 葛漢彬,宇佐美勉,戸谷和彦: 繰り返し荷重を受けるコンクリート充填鋼柱の強度と変形性能に関する研究,構造論文集,Vol.40A,pp.163-176,1994.3
- 7) H.B. Ge, K.A.S. Susantha, Y. Satake, T. Usami: Seismic demand predictions of concrete-filled steel box columns, *Eng. Strut.*, Vol.25:pp.337-345, 2003
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編,丸善,2002.4.

(受理 平成23年3月19日)