

水平2方向同時載荷されたコンクリート充填鋼製橋脚の耐震性能 に関するハイブリッド実験

Hybrid Experimental Study on Seismic Performance of Partially Concrete Filled Steel Bridge Piers under Bi-Directional Loading

小澤 拓也[†], 袁 輝輝^{††} 青木 徹彦^{†††}
Takuya Ozawa, Huihui Yuan, Tetuhiko Aoki

Abstract To investigate the seismic performance of partially concrete-filled steel bridge piers under actual earthquake excitations, cyclic static loading tests, single - and bi - directional hybrid loading tests were conducted using total 20 test specimens with square section. The height of the filled concrete is changed in 20% and 40% of the pier height. Three different earthquake acceleration data specified in the Japanese design code based on Kobe earthquake are used in the hybrid test. From the experimental results it was observed that the strength and ductility of the steel columns with concrete filled decreased considerably under bi-directional hybrid loading in comparison with those under single-directional hybrid loading, especially for the cases of medium and soft ground. The filled-in concrete was effective in improving the seismic behavior of steel bridge piers, especially for case of sufficient length of concrete filled.

1. 序論

都市内の高架高速道路では、トラックなどの車両からの衝突による橋脚の重大な損傷を防止するために、橋脚基部にコンクリートを充填することが多い。兵庫県南部地震以降、基部にコンクリートを充填した鋼製橋脚は、基部鋼板の座屈が抑制され、無充填橋脚より損傷が少なく、耐震性能が向上することが確認されている。

過去のコンクリート充填鋼製橋脚の耐震性能に関する研究²⁾⁷⁾は、水平1方向独立載荷に基づく実験結果や解析によるものがほとんどである。これらの研究によると、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。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じように、橋軸方向と橋軸直交方向からの地震波が、それぞれ独立に作用するとして耐震照査を行うこととされている。

しかしながら、最近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の結果⁹⁾によると、橋脚は水平2方

向からの地震力を同時に受ける場合、その最大荷重および変形能力が、1方向載荷時に比べ低下していることや、応答変位が1方向載荷の場合より増大し、倒壊が発生する場合があります。危険で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方向から地震動が作用する場合の耐震性能や応答特性は今日まで十分に明らかにされていない。

そこで本研究では、コンクリートの充填率を変えた鋼製橋脚と無充填の鋼製橋脚の水平2方向ハイブリッド実験を行い、水平2方向地震動を受けるコンクリート充填鋼製橋脚の応答挙動と耐震性能、充填率の違いによる影響についての検討を行う。

2. 実験計画

2・1 実験供試体

実験で使用した供試体は、鋼種 SM490、板幅 450mm、板厚 6mm の正方形補剛箱型断面橋脚である。各板パネルに縦方向補剛材（リブ）を2本ずつ配置し、基部から鉛直方向に900mmまでは225mm間隔、それ以降は450mm間隔でダイアフラムを設置する。供試体基部から載荷点までの有効高さは $h=2400\text{mm}$ である。無充填供試体の側面図、および断面図を図□1に示す。橋脚の構成断面の幅

† 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 都市環境学科土木工学専攻(豊田市)

厚比パラメータは $R_f=0.13$, 細長比パラメータは $\lambda=0.35$ である. 供試体の各寸法及びパラメータを表-1 に示す.

表-1 供試体の各寸法及びパラメータ

鋼種		SM490
供試体有効高さ	$h(\text{mm})$	2400
補剛板幅	$b(\text{mm})$	450
補剛板厚	$t(\text{mm})$	6
リブ板幅	$b_s(\text{mm})$	55
リブ板厚	$t_s(\text{mm})$	6
ダイアフラム間隔	$a(\text{mm})$	225
断面積	$A(\text{mm}^2)$	1.33×10^4
全断面降伏軸力	$P_y(\text{kN})$	4321
断面 2 次モーメント	$I(\text{mm}^2)$	4.06×10^8
断面 2 次半径	$r(\text{mm})$	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

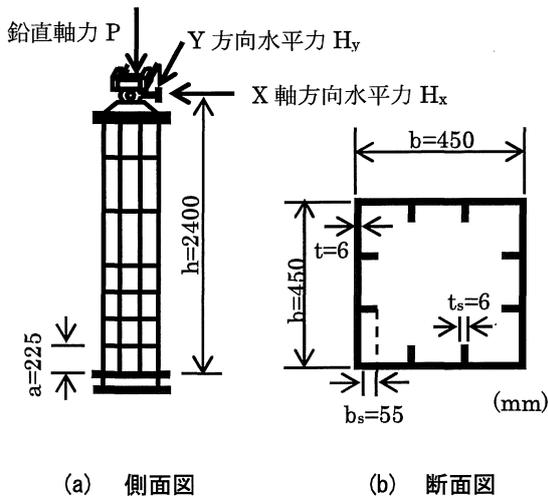


図-1 実験供試体概要図

道路橋示方書⁸⁾ではコンクリートの充填高さは鋼断面とコンクリート充填断面が同時に降伏に達するようなコンクリート高さを最適充填高さとして, 式(1)で与えられている.

$$h_c = h(1 - M_s) / M_c \quad (1)$$

ここに, h_c : コンクリートの充填高さ, h : 供試体の有効高さ, M_s : 鋼断面の抵抗モーメント, M_c : コンクリート充填部の抵抗モーメントである.

鋼断面の抵抗モーメント M_s とコンクリート充填部の抵抗モーメント M_c を簡単な設計計算で求めると, 比 M_{ys}/M_c は0.59となる. その場合の充填率は有効高さに対して41%となる. しかし, 今回の実験ではダイアフラム位置までコンクリートを充填することとし⁹⁾, 実際には供試体基部から

$h_c=900\text{mm}$ までコンクリートを充填する. この場合, 充填率は約40%となり, ほぼ式(1)による充填率と同じ値となる.

また, 現在一般に使用されている鋼製橋脚の幅厚比パラメータ R_f は0.3以下, 軸力比が0.2以下であり, そのような鋼製橋脚に対してコンクリートの最適充填率は15~20%であるとした実験的報告²⁾⁴⁾がある. このような過去の研究を本実験で用いる供試体に当てはめると $M_{ys}/M_c=0.80$ となり, 充填高さは約20%となる. よって供試体基部から $h_c=450\text{mm}$ までコンクリートを充填した供試体も作成する. 充填コンクリートは早強コンクリートを用い, 圧縮強度は約 21N/mm^2 である.

ハイブリッド実験では, 相似率 $S=4$ を用いる. すなわち想定実橋脚が供試体の4倍の大きさとする. 想定橋脚の上部工質量 m は, 試験体の鉛直荷重比 $P_0/P=0.15$ から, $m=1048\text{t}$ と算出した. また, 想定実橋脚の剛性 $k_0=64$ (kN/mm)と固有周期 $T=0.8$ (秒)は, 試験体の剛性から相似率を用いて算出し, 減衰定数 $\delta=0.05$, 減衰係数 $c=0.843$ (kNs/mm)とする.

2・2 実験载荷装置

本研究で使用する実験载荷装置の概要を図-2 に示す. 実験では水平2方向および鉛直1方向から载荷するため, 载荷点は3次元な動きをする. これに対応する3軸载荷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, その中間部に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.

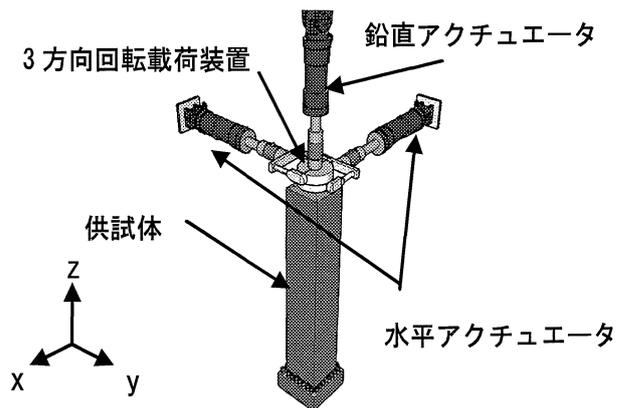


図-2 3次元载荷システム

2・3 静的繰返し実験

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返し载荷実験を行う. 载荷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, 繰返し水

平変位 δ を与えた載荷を行う。 δ は降伏変位 δ_0 を基準とし、 δ_0 の整数倍の変位を3回、次に $0.5\delta_0$ 増加した載荷を1回というように、載荷変位を漸増させながら載荷する。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とする。

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たとし、N+1ステップの計算をするとき、まず初期剛性 K_0 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ら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 相似率および想定橋脚

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、橋脚は縮小モデル化した供試体を用いるため、相似率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

項目	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

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、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(以下、JMAと呼ぶ)、JR西日本鷹取構内地盤上(II種地盤)の地震波(以下、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(以下、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、実験でNS方向成分とEW方向成分を同時に入力する場合を示す。

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
減衰係数 (kN*s/mm)	0.843	0.05
固有周期 (s)	0.789	0.395

表-4 入力地震波

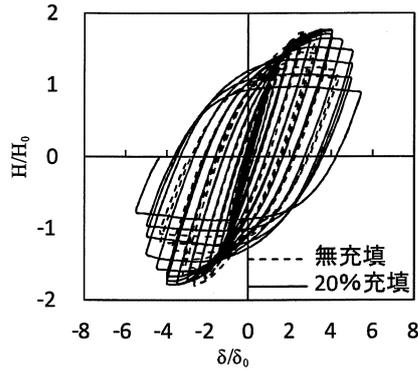
地盤種別	入力地震波	最大加速度 (gal)	平均値 (gal)
I	JMA-NS	-812	816
	JMA-EW	766	
	JMA-2D	870	
II	JRT-NS	687	690
	JRT-EW	-673	
	JRT-2D	711	
III	PKB-NS	-557	650
	PKB-EW	619	
	PKB-2D	775	

3. 実験結果

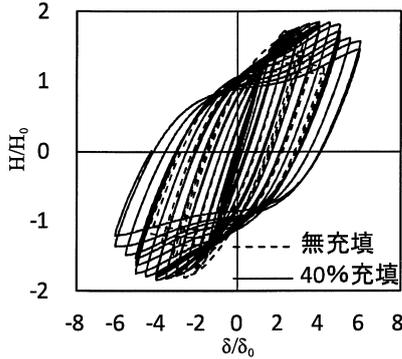
3・1 静的繰り返し実験

静的繰り返し実験で得られた水平荷重-水平変位履歴曲線を図-3に示す。図中の実線はコンクリートを充填した場合を、無充填は破線を示し、同図の荷重と変位は、降伏荷重 H_0 と降伏変位 δ_0 で無次元化している。また、引張りおよび圧縮側の履歴曲線は同等の履歴を示すため、正負両側の各サイクルの除荷点の平均値を取り、包絡線を求め、図-4に示す。

それぞれの曲線を比較すると、充填率20%と40%では無充填に比べ、最大荷重がそれぞれ、約5%および約10%上昇している。また、充填率20%の場合、コンクリート充填面直上に座屈が生じ、最大荷重後の低下が著しい。これはコンクリート充填された供試体のコンクリート充填された基部に座屈が生じることなく充填直上の鋼板部で座屈が生じたためと思われる。また、充填率40%の場合では、最大荷重以降、緩やかに荷重が低下した。これは供試体のコンクリートが充填された基部にわずかな座屈変形が生じていることから破壊の進行が緩やかであったためと考えられる。



(a) 充填率 20%



(b) 充填率 40%

図-3 水平荷重-変位曲線

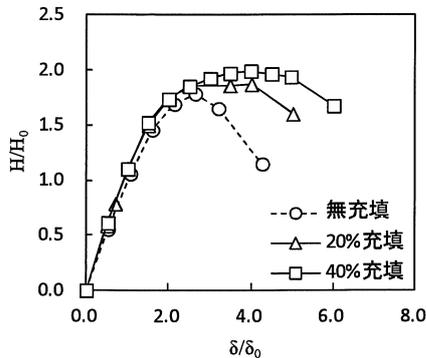


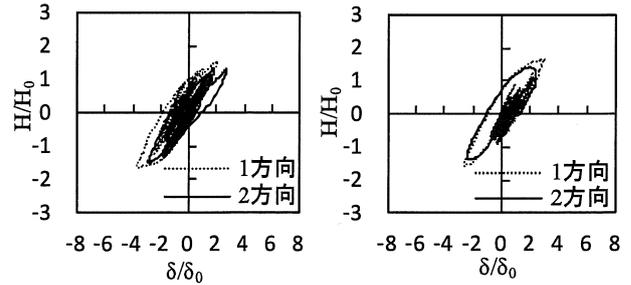
図-4 包絡線

3・2 1方向および2方向荷重による橋脚応答の相違

3・2・1 水平荷重-変位履歴曲線

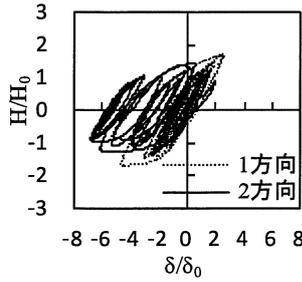
図-5 にコンクリートを 20% 充填した鋼製橋脚を例にハイブリッド実験で得られた水平荷重-変位履歴曲線を示す。図中の荷重, 変位は静的繰り返し実験で得られた降伏荷重 H_0 と降伏変位 δ_0 で無次元化している。

全ての地震波で, 1 方向荷重の荷重の最大値は, 2 方向荷重よりも大きく, 鋭角な履歴形状をしている。すなわち, 1 方向荷重では荷重が増加している途中, 最大耐力に達する前に変位が反転し荷重が低下したと考えられる。一方, 2 方向荷重では, 楕円形の曲線を描いており, 最大耐力に達した後, 荷重が低下したと考えられる。これは, コンクリートを 40% 充填した鋼製橋脚においても同じ傾向が見られる。



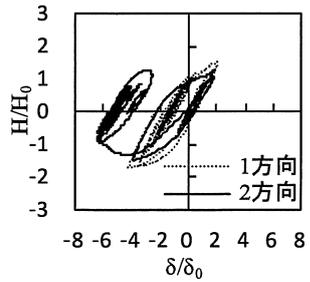
(a) I 種地盤 (JMA-NS)

(b) I 種地盤 (JMA-EW)



(c) II 種地盤 (JRT-NS)

(d) II 種地盤 (JRT-EW)



(e) III 種地盤 (PKB-NS)

(f) III 種地盤 (PKB-EW)

図-5 水平荷重-水平変位履歴曲線 (20% 充填)

3・2・2 応答変位時刻歴

図-6 にコンクリートを 20% 充填した鋼製橋脚を例に, 応答変位時刻歴を示す。2 方向荷重の NS, EW 方向成分を実線で, また, 1 方向荷重実験の結果を破線で示す。縦軸の変位は δ_0 で無次元化している。図-6 を見ると, I 種地盤では差が見られないが, II 種地盤と III 種地盤において, 予想通り 2 方向荷重のほうが応答変位は大きくなった。特に図-6(e), (f) の III 種地盤の NS, EW 方向では最大応答変位付近でコンクリート充填面直上において溶接部にクラックが生じ, その後の応答変位が大きくなった。

図には示していないが, コンクリートを 40% 充填した鋼製橋脚においても, II 種・III 種地盤で, 2 方向荷重の変位が大きくなったが, III 種地盤では橋脚基部に座屈が発生し, コンクリートが座屈を有効に抑制されたことによって, 40% 充填の方が 20% 充填のケースよりも応答変位が小さくなった。

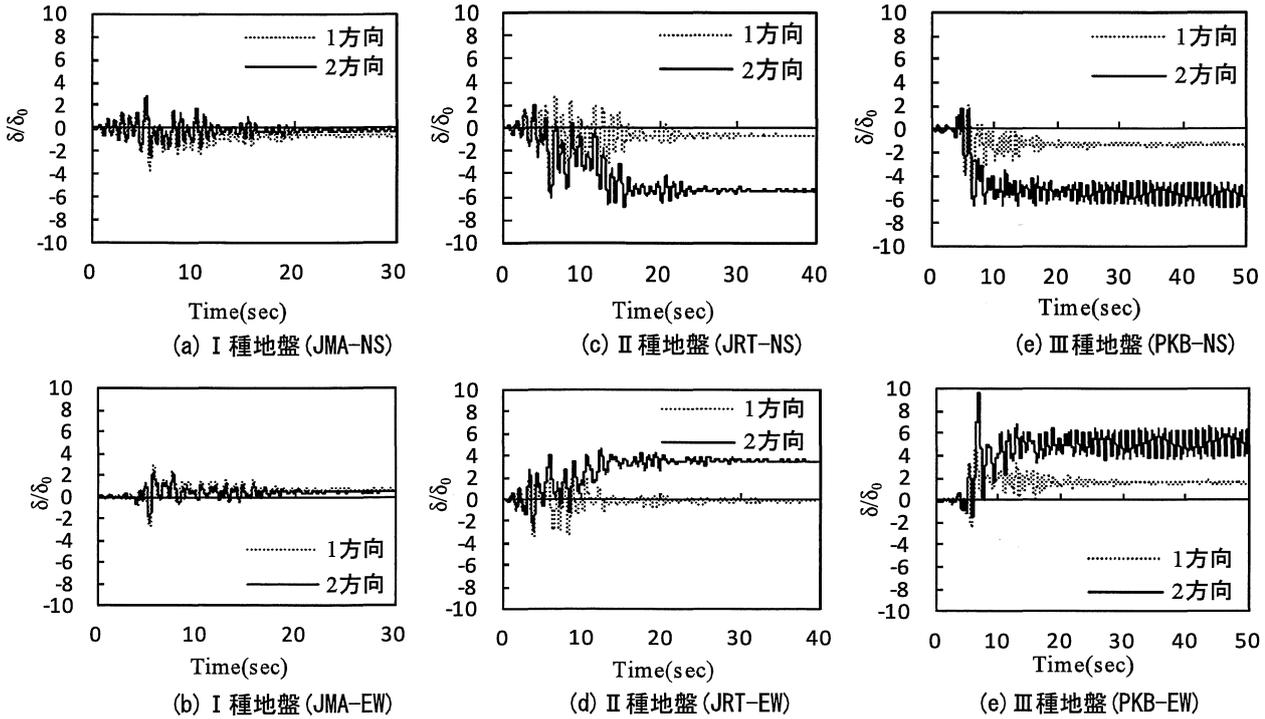


図-6 1方向および2方向载荷時の応答変位時刻歴(20%充填)

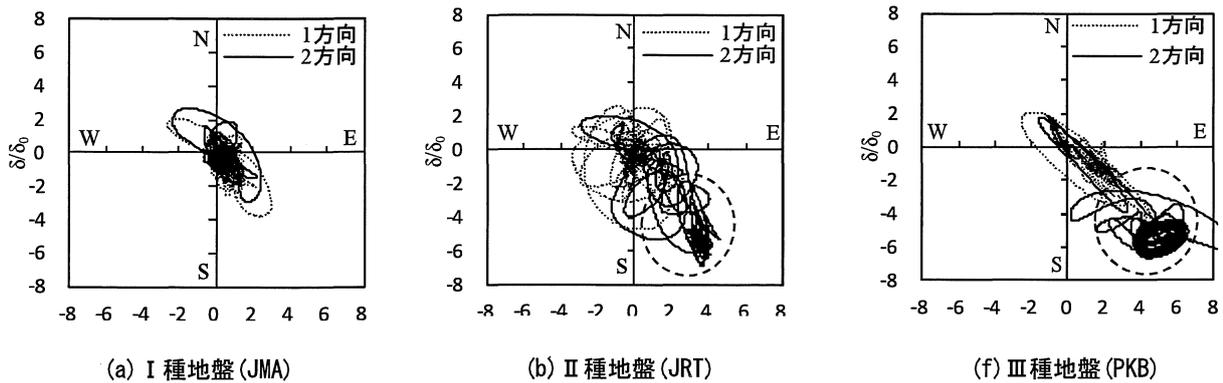


図-7 橋脚上部質点の応答変位軌跡(20%充填)

3・2・3 水平変位軌跡

図-7はコンクリート充填高さ20%の供試体を例に、NS、EW方向の応答変位をそれぞれ横軸と縦軸にとったもので、橋脚上部質点の平面上の変位軌跡である。2方向実験を実線で1方向実験を破線で示す。図-7から1方向と2方向実験の応答挙動が異なっていることがわかる。とくにII種地盤とIII種地盤では、2方向载荷実験で破線の円形でマークした部分に示されるように、斜め方向にほぼ直線的な応答軌跡が現れている。これはNS、EW方向の応答変位がほぼ同時に最大値となったことを示している。このように1方向のみに個別に载荷するより、2方向载荷のほうが橋脚の損傷は大きくなると考えられる。

3・2・4 最大応答変位および残留変位の相違

ハイブリッド実験で得られた各充填率の最大応答変

位 δ_{max} および残留変位 δ_r の値を図-8、9に示す。1方向载荷はNS、EW方向の平均値を、2方向载荷は式(2)によるベクトル合成値である。1方向の結果を左側の黒色、2方向の結果を白色とその上の数値で示している。

$$\delta_{max} = \sqrt{\delta_{xr}^2 + \delta_{yr}^2} \quad (2)$$

図-8から、I種地盤では1方向载荷による最大応答変位が若干大きく、他の地震波では2方向载荷の結果がかなり大きくなっている。常識的には、2方向同時载荷の方で応答変位が大きくなるが、I種地盤ではどのコンクリート充填率でも、ほぼ同程度である。この原因は现阶段では不明である。

図-9は残留変位の結果である。残留変位は地震終了後の高速道路の使用性に関する重要なパラメータで、現行道路橋示方書では限界値は橋脚高さの1%となり、本試験体の δ_r/δ_0 では1.6となる。これを図中に破線で示す。また、III種地盤のコンクリート無充填橋脚の残留変位は非常に大

きく、図のスケール内に表していない。

図-9の残留変位も最大応答変位と同様な傾向があるが、地震波によって異なり、II種地盤とIII種地盤では1方向载荷と2方向载荷の差が最大応答変位よりも大きい。したがって、II種、III種地盤では、2方向同時载荷による橋脚への影響が大きくなり、1方向载荷に基づいた結果のみによる耐震照査では、過小な評価結果となる可能性があることに注意が必要である。

図-10, 11はコンクリート無充填, 20%充填, 40%充填の最大応答変位および残留変位の平均値を地盤種別ごとのにプロットしたもので、○は1方向载荷, □は2方向载荷による結果を示している。

図-10, 11の実線で示すように、1方向载荷では最大応答変位と残留変位ともに地盤種に関係なくあまり大きな違いは見られないが、2方向载荷ではI種地盤からIII種地盤になるにつれ、値が大きくなった。

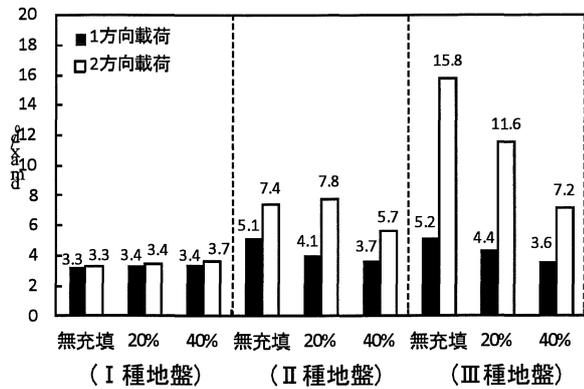


図-8 最大応答変位の比較

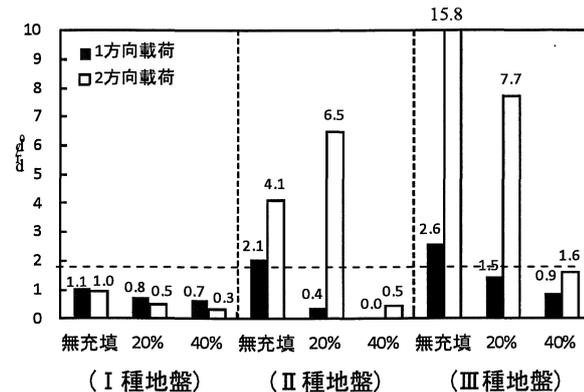
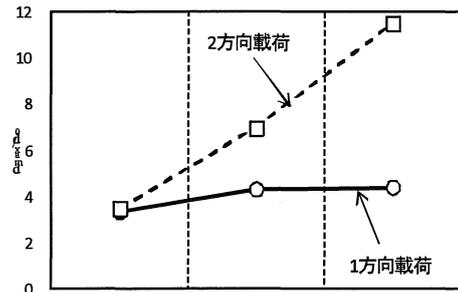


図-9 残留変位の比較

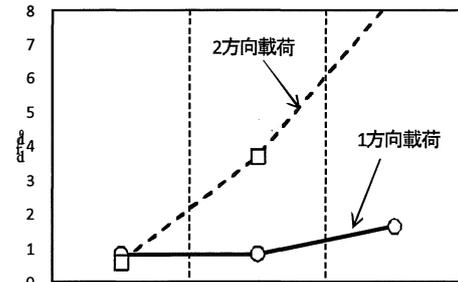
3・2・5 最大荷重における相違

図-12は1方向独立载荷ハイブリッド実験におけるNS, EW方向の最大荷重(黒および灰色棒)と2方向同時载荷における最大荷重(合成値)(白棒)を棒グラフに示したものである。2方向载荷時の合成値の最大値は式(3)より算出した。

$$H_{max} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (3)$$



(I種地盤) (II種地盤) (III種地盤)
図-10 最大応答変位の比較(平均値)



(I種地盤) (II種地盤) (III種地盤)
図-11 残留変位の比較(平均値)

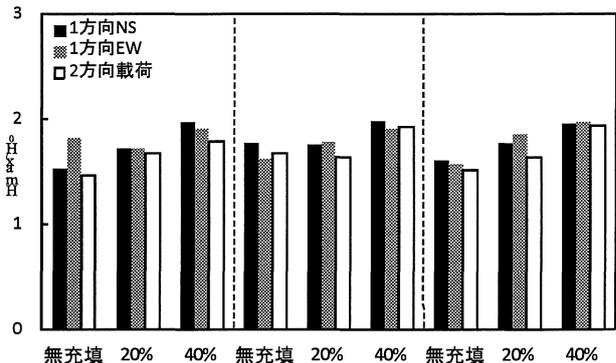
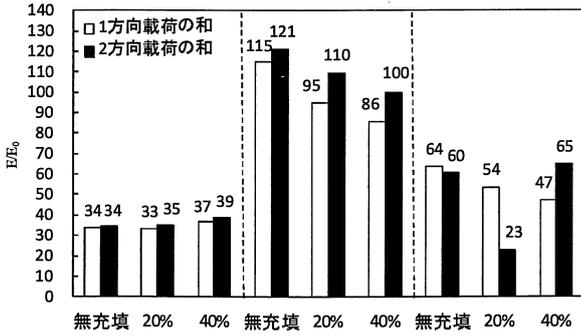


図-12 最大荷重の比較

図-12より、各地盤種とも、またどのコンクリート充填率でも2方向载荷と1方向NS, EW方向の最大荷重の差は見られない。よって、2方向载荷時の荷重の最大値は1方向载荷時のNS, EW方向の平均値から推測できると言える。

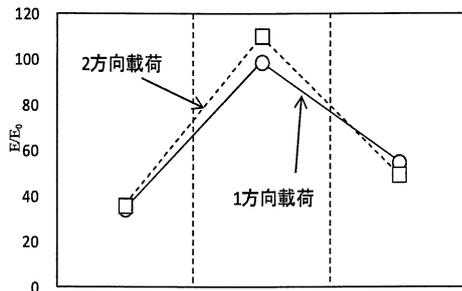
3・2・6 累積エネルギー吸収量の相違

図-13は累積エネルギー吸収量のNS, EW方向の和を棒グラフに示したもので、図-14はこれらの平均値をプロットしたものである。図-13, 14より、1方向载荷と2方向载荷の実験結果の差は地盤種によりばらつきが見られる。また、累積エネルギー吸収量はII種地盤で最も大きい値を示している。III種地盤では実験が終了した時の供試体の損傷が著しく、累積エネルギー吸収量が低下し、低い値になった。



(I種地盤) (II種地盤) (III種地盤)

図-13 累積エネルギー吸収量の比較



(I種地盤) (II種地盤) (III種地盤)

図-14 累積エネルギー吸収量の比較(平均値)

4. コンクリート充填率の影響

4.1 最大応答変位及び残留変位

図-15, 16はコンクリート無充填, 20%充填, 40%充填における1方向および2方向載荷ハイブリッド実験で得られた最大応答変位および残留変位の合成値をI種地盤, II種地盤, III種地盤について平均した図である。○を1方向載荷, □を2方向載荷で示す。

図-15に示すように, コンクリート無充填に比べコンクリートを充填することにより最大応答変位を大幅に低減させる効果が見られた。特に2方向載荷では無充填時に比べ, 最大応答変位が20%充填では約14%, 40%充填では約38%小さくなった。また1方向載荷と2方向載荷の差も小さくなり, 無充填に対して20%充填では27%, 40%充填では, その差はほとんどなくなった。

図-16より, 最大応答変位と同様に残留変位もコンクリートを充填することにより残留変位が低減する効果が見られ, 1方向載荷はコンクリート無充填に対して20%充填では約53%, 40%充填では約72%小さくなった。また, 2方向載荷ではコンクリート無充填に対して20%充填では約42%, 40%充填では約88%小さくなった。1方向載荷と2方向載荷の差も小さくなり, 無充填に対して20%充填では27%, 40%充填では, その差はほとんどなくなった。

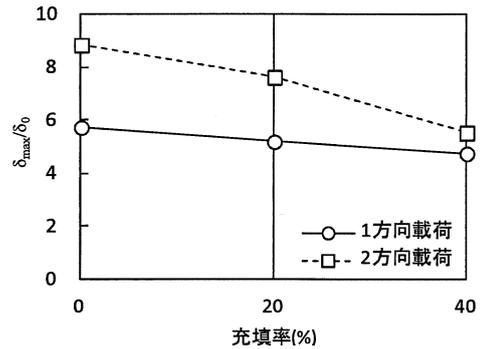


図-15 最大応答変位の比較

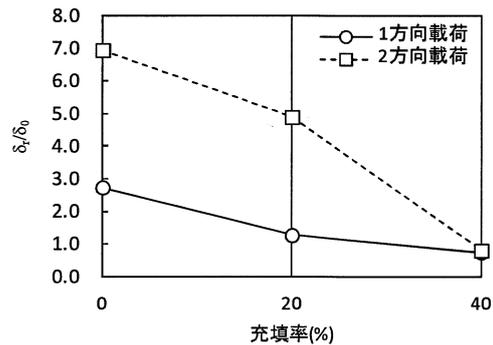


図-16 残留変位の比較

4.2 最大荷重

図-17は各充填率別の1方向載荷実験で得られたNS, EW方向と2方向載荷実験で得られた最大荷重の3つの地盤種について平均値したものである。○は1方向NS, △は1方向EW, □は2方向載荷の合成値の最大荷重を示す。図-17より, 1方向載荷と2方向載荷ではほぼ同じ値を示すが, コンクリートの充填率が増加すると, 若干最大荷重は増加したが, その変化の程度は最大応答変位や残留変位に比べて小さい。以上からコンクリート充填の効果は最大荷重の上昇に対して少なく, 応答変位や残留変位に寄与することがわかる。最大荷重の変化が少ないことは橋脚下部の基礎の耐力を向上させなくてよいことから好都合である。しかし, コンクリート20%充填ではコンクリートを充填したことによって, 基部鋼板の座屈が抑制されたが, コンクリート充填部直上の鋼断面で座屈が発生し, コンクリート40%充填では, 基部鋼板の座屈を有効に抑制でき, 最大荷重が他のものより若干大きくなった。

4.3 エネルギー吸収量

図-18は, コンクリート無充填, 20%充填, 40%充填における1方向載荷および2方向載荷実験から得られたエネルギー吸収量の和を平均したものである。

同図から, 充填率が上昇しても, 1方向載荷と2方向載荷の差に一定の傾向は見られなかった。

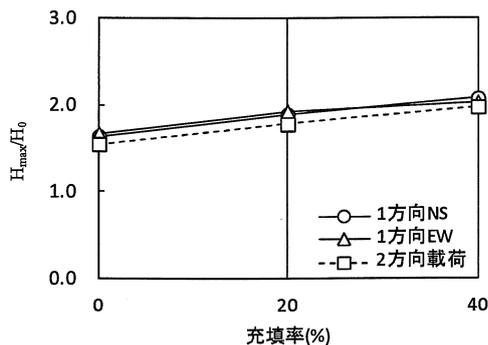


図-17 最大荷重の比較

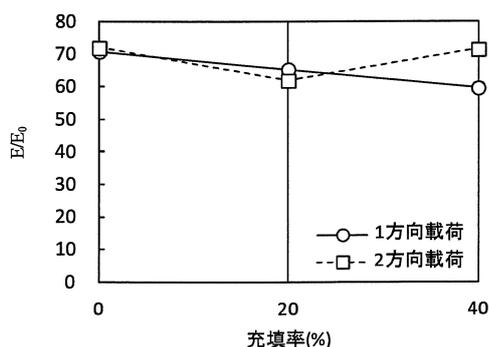


図-18 エネルギー吸収量の比較

5. 結論

本研究では、コンクリートを部分的に充填した橋脚に対して、3種類の地震波を用い、水平1方向と2方向同時載荷するハイブリッド実験を行った。実験によって得られた結論を以下にまとめる。

1方向載荷と2方向載荷の比較

(1) 各充填率での最大応答変位及び残留変位は、地震波によって異なるが、II種地盤とIII種地盤では1方向載荷と2方向載荷の結果の差が大きく、最大応答変位では約62%および約161%と2方向載荷のほうが大きくなった。また、残留変位はそれぞれ約344%および約408%と大きくなった。このことから、地震波によっては、2方向同時載荷による橋脚への影響が大きくなり、1方向載荷の結果での耐震照査では、危険側の評価結果となる可能性がある。

(2) 水平2方向載荷を受ける橋脚の最大荷重は、各1方向の最大荷重の平均値とほぼ同じである(平均誤差5%)。このことから、2方向載荷時の最大荷重は1方向載荷時のNS、EW方向の各最大荷重の平均値から推測できるといえる。

コンクリート充填による効果

(1) 部分的にコンクリートを充填することにより、基部鋼板の座屈が抑制され、最大応答変位及び残留変位は低減され、1方向と2方向載荷実験の差も小さくなった。特に

40%充填においてはその効果が顕著に表れた。しかし、20%充填では、コンクリート充填部直上の鋼断面で座屈を生じたため、コンクリート充填部で確実に破壊が生じるように充填高さを設定することが望ましい。

(2) 最大荷重はコンクリートを部分的に充填しても、1方向載荷か2方向載荷でほとんど違いが見られず、充填率が高くなると、最大荷重の値は大きくなったが、大きな上昇は見られなかった。

参考文献

- 1) 覚紀, 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. Struct.*, 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.