

水平 2 方向荷重を受けるコンクリート充填円形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する研究

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

木下 光[†], 袁 輝輝^{††} 青木 徹彦^{†††}
Hikaru Kishita, 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 12 test specimens with circular cross-section. The height of the filled concrete is up to the 25% and 50% of the pier height. The earthquake acceleration data recorded on the medium ground in 1995 Kobe Earthquake were used in the hybrid tests. 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. 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の鋼製橋脚の多くは、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されている。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、地震時に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^{1)~6)}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。

しかし、既往の研究は水平 1 方向独立载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。また、道路橋示方書⁷⁾では、コンクリート充填橋脚は、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。しかし実際の地震は 3 方向成分を有しており、鉛直方向は影響が小さいため考慮しないとしても、水平 2

方向同時载荷の影響は考慮しておくべきである。

近年の正方形断面の無充填鋼製橋脚およびコンクリート充填を施した鋼製橋脚に対する水平 2 方向ハイブリッド実験の結果⁸⁾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 方向载荷時に比べ低下することが確認されている。また、応答変位が 1 方向载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、円形断面の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、現行の設計法に基づいたコンクリート充填率および、既存の鋼製橋脚に多く用いられているコンクリート充填率の円形断面鋼製橋脚に対し、水平 1 方向ハイブリッド実験と水平 2 方向ハイブリッド実験を行い、これら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明らかにする。

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 SS400、外径 480mm、

† 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)

板厚 6mm の円形断面橋脚である。供試体基部から載荷点までの有効高さは $h=2250\text{mm}$ 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。橋脚の構成断面の径厚比パラメータは $R_t=0.076$ 、細長比パラメータは $\lambda=0.292$ である。これらの値は式(1)、式(2)によって求める。供試体の各寸法及びパラメータを表-1 に示す。

$$R_t = \frac{R \sigma_y}{t E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2)$$

ここに、 R ：板厚中心位置の半径、 t ：板厚、 E ：弾性係数、 ν ：ポアソン比、 r ：断面二次半径、 σ_y ：鋼材の降伏応力である。

表-1 供試体の各寸法及びパラメータ

鋼種		SS400
降伏応力	$\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	245
供試体有効高さ	$h(\text{mm})$	2250
外径	$D(\text{mm})$	480
板厚	$t(\text{mm})$	6
断面積	$A(\text{mm}^2)$	8935
断面 2 次モーメント	$I(\text{mm}^2)$	2.51×10^8
断面 2 次半径	$r(\text{mm})$	168
径厚比パラメータ	R_t	0.076
細長比パラメータ	λ	0.292
軸力比	P/P_y	0.144
軸力	$P(\text{kN})$	315

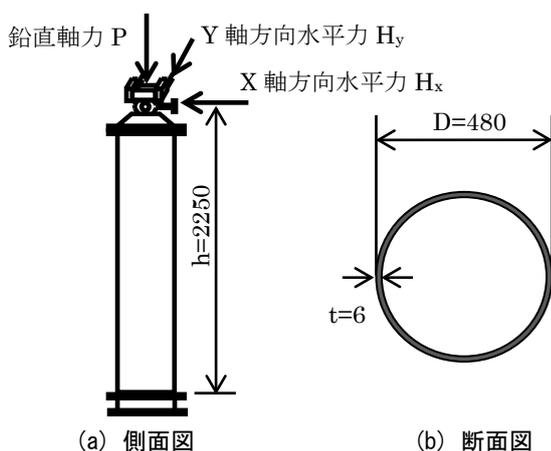


図-1 実験供試体概要図 (単位：mm)

2・2 コンクリート充填率

道路橋示方書⁷⁾ではコンクリートの充填高さは、コンクリート充填面直上の鋼断面の水平耐力が橋脚基部の水平耐力を上回るように設定するためコンクリート充填高さを、式(3)で与えている。

$$h_c > h(1 - M_{ys}/M_a) \quad (3)$$

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_{ys} ：鋼断面の降伏曲げモーメント、 M_a ：合成断面の許容曲げモーメントである。

鋼断面の曲げモーメント M_{ys} とコンクリート充填部の曲げモーメント M_a を計算で求めると、その比 M_{ys}/M_a は約 0.5 となり、その場合の充填率は有効高さに対して 50% となり、供試体基部から $h_c=1125\text{mm}$ までコンクリートを充填することになる。

また、既存の鋼製橋脚では、車や船の衝突による破損を防ぎ、かつ基礎構造の設計に大きな影響を与える自重の増加をなるべく軽減するために、基部から鋼製橋脚の外径 D の約 0.5~1.5 倍の高さまでコンクリートを充填されたものが多い。このような橋脚を想定した実験を行うことを目的とし、コンクリート充填率 25% を代表値として用いた。この場合供試体基部から約 563mm (外径の約 1.17 倍) までコンクリートを充填することになる。

すなわち、本研究ではコンクリート無充填および充填率 25% と 50% の 3 種類の橋脚を用いて実験を行う。充填コンクリートは低強度コンクリートを用い、圧縮強度は約 22N/mm^2 である。

2・3 実験載荷装置

本研究で使用する実験載荷装置の概要を図-2 に示す。2 方向載荷ハイブリッド実験では地震の慣性力に相当する水平 2 方向および上部工に相当する一定軸力を鉛直 1 方向から載荷するため、載荷点は 3 次元的な動きをする。これに対応する 3 軸載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なアームが 2 方向に付いている。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。

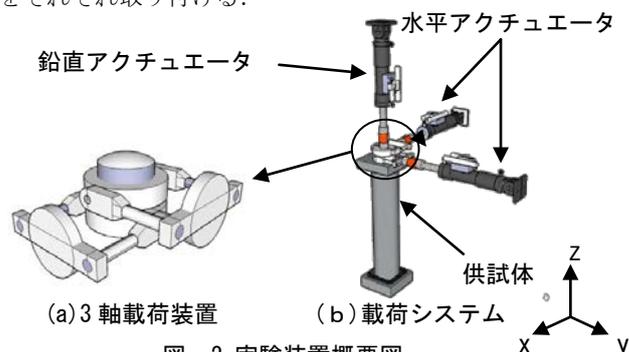


図-2 実験装置概要図

2・4 静的繰り返し実験

ハイブリッド実験に先立ち、橋脚の基本的な履歴特性を得るために静的繰り返し載荷実験を行う。載荷方法は上部工重量を想定した一定の鉛直荷重 P を与え、1 方向の水平繰り返し載荷を行う。水平変位 δ としては降伏変位 δ_0 を

基準とし、±16σ、±28σ、…と漸増させながら載荷する。

2.5 ハイブリッド実験

2.5.1 想定実橋脚

ハイブリッド実験は、構造全体を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、両者のひずみと降伏応力が等しくなることを利用し、相似比を算出する。各物理量の相似比は表-2 のようになる。また、実橋脚の固有周期は一般的に0.2～1.2秒が多い。そこで、今回は想定実橋脚の固有周期が約0.7秒になるように供試体と実橋脚の相似比を $S=4$ とした。想定実橋脚のパラメータを表-3に示す。

想定橋脚の上部工質量 m は、供試体の鉛直荷重比 $P/P_3=0.144$ から、 $m=514(t)$ と算出した。また、想定実橋脚の剛性 $k_0=43$ (kN/mm)と固有周期 $T=0.687$ (s)は、試験体の剛性から相似率を用いて算出し、減衰定数 $h=0.05$ 、減衰係数 $c=0.470(kN \cdot s/mm)$ とする。

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

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)	9000	2250
上部工質量 (t)	514	32
剛性 (kN/mm)	43.00	10.75
減衰係数 (kN・s/mm)	0.470	0.059
固有周期 (s)	0.687	0.343

2.5.2 入力地震波

ハイブリッド実験の入力地震波として、1995年兵庫県南部地震においてJR西日本鷹取構内地盤上(Ⅱ種地盤)で観測された地震波(以下、JRTと呼ぶ)を用いる。これを表-4にまとめる。同表の入力地震波の記号は、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。

2.5.3 ハイブリッド実験手順

ハイブリッド実験の数値解析にはNewmark β法を用い、以下の手順で実験を進める。

表-4 入力地震波

地盤種別	入力地震波	最大加速度(gal)
Ⅱ	JRT-NS	687
	JRT-EW	-673
	JRT-2D	711

- 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、まず想定実橋脚の初期剛性 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、相似比を用いて縮小し、供試体に与える変位を求めるが、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う。供試体には実時間内ではなくゆっくりと載荷する。
- 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}^* 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。もし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。

3. 実験結果

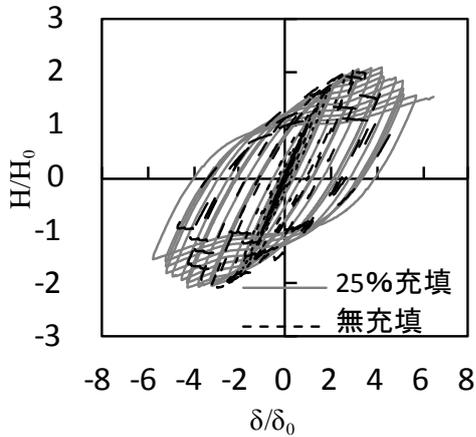
3.1 静的繰り返し実験

静的繰り返し載荷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、破線は無充填を示す。また、各充填率での包絡線を図-4に示す。同図の荷重 H および変位 δ は、降伏荷重 $H_0=85.6kN$ および降伏変位 $\delta_0=8.46mm$ で無次元化している。

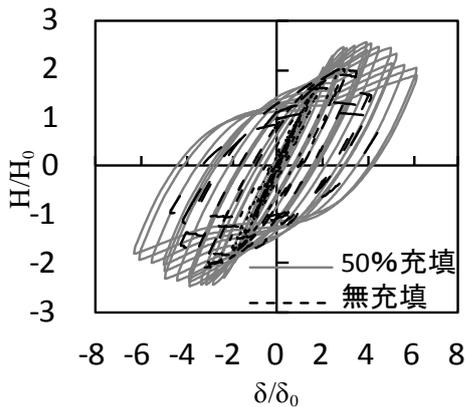
それぞれの結果を比較すると、充填率25%と50%では無充填に比べ、最大荷重がそれぞれ、約2%および約25%上昇している。本実験では3つの充填率を対象としているが、すべての供試体において、座屈は基部に生じている。無充填供試体が最大荷重以降の荷重が著しく低下しているのに比べ、25%充填及び50%充填ともに最大荷重以降の荷重の低下が緩やかになっている。これは橋脚内部に充填したコンクリートが橋脚基部の局部座屈を有効に抑制したためであると思われる。

また、充填率25%の場合、大きな水平荷重が生じて、橋脚が大きく傾くと内部に充填したコンクリートと橋脚とのせん断抵抗力が小さいために、水平力載荷時の圧縮側でコンクリートが担う荷重が少なく、鋼板が受け持つ荷重が多くなるため、無充填橋脚とほぼ同じ程度の最大荷重となったと思われる。しかし充填率50%の場合コンクリートと橋

脚との接地面積が大きくせん断抵抗力が大きいために、コンクリートが圧縮力の一部を分担し、鋼管との合成断面となり、さらにコンクリートにより鋼板の変形が拘束されるため、無充填よりも最大荷重が25%も上昇したと考えられる。



(a) コンクリート充填率 25%



(b) コンクリート充填率 50%

図-3 水平荷重-水平変位履歴曲線

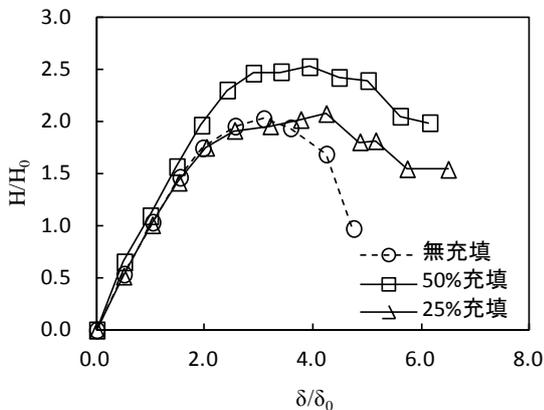


図-4 包絡線

3・2 1方向および2方向載荷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 にハイブリッド実験で得られた水平荷重-水平変位履歴曲線を示す。図中の荷重、変位は無充填橋脚の静的繰り返し載荷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。2方向同時載荷実験では、NSおよびEW方向から荷重と変位がそれぞれ計測されているため、各方向成分として分けて結果を表示する。

同図に示すように、いずれの結果においても、1方向載荷の荷重の最大値は、2方向載荷の荷重よりも大きくなっており、充填率25%及び50%においては、荷重の最大点付近が2方向載荷の結果に比べ、鋭角な履歴形状をしている。すなわち、1方向では荷重が増加している途中、変位が反転し荷重が低下したため、最大耐力点後の荷重の低下が見られない。一方、2方向載荷では、1方向載荷の結果よりも、荷重の最大点で楕円形の曲線を描いており、最大耐力に達した後、耐力が低下していると考えられる。実験後の橋脚の損傷度をみても1方向載荷に比べ2方向載荷の方が明らかに大きな座屈が生じている。

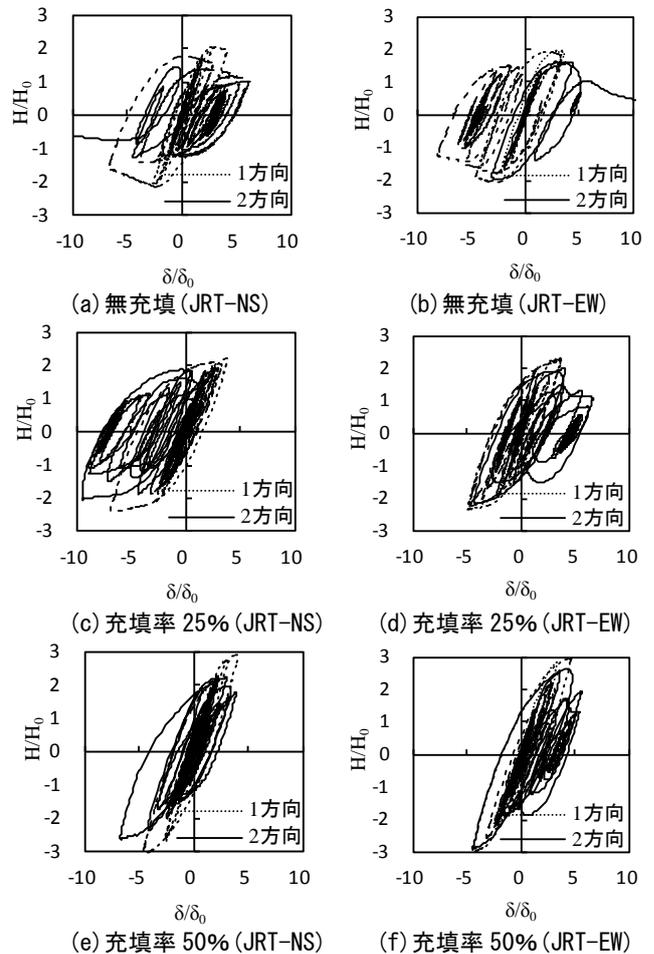


図-5 水平荷重-水平変位履歴曲線 (20%充填)

3・2・2 応答変位時刻歴

図-6に鋼製橋脚の応答変位時刻歴を示す。2方向载荷のNSおよびEW方向成分を実線で、また1方向载荷実験の結果を破線で示す。縦軸の変位は、前述の降伏変位 δ_0 で無次元化している。図-6を見ると、1方向载荷に比べ、2方向载荷の応答変位が大きくなっている。すべての充填率において約5秒以降に変位が増加し、1方向载荷に比べ2方向载荷の変位が大きくなり始めている。特に図-6(a), (b)の無充填供試体を2方向载荷した場合、5秒付近で供試体が著しく損傷し、倒壊に至った。充填率25%の場合、橋脚基部に軽微な損傷しか確認できず、残留変位も小さかったが、2方向载荷では、NSおよびEW方向ともに変位が大きくなり、橋脚基部に座屈が発生した。充填率50%の場合、多少のずれは生じたが、応答変位はほぼ同じような波形を示し、供試体に大きな損傷は見られず、また残留変位も小さい。

3・2・3 水平変位軌跡

図-7はNSおよびEW方向の水平面内の応答変位をそれぞれ縦軸と横軸にとったもので、橋脚上部質点の平面上の変位軌跡である。2方向実験結果を実線で1方向実験結果を破線で示す。図-7より1方向と2方向実験の応答挙動が異なっており、すべての充填率において1方向载荷に比べ2方向载荷の方が南東方向に変位が大きくなっている。2方向载荷においては、破線の円形で示した部分に、斜め方向に直線的な応答軌跡が現れている。これはNSおよび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。このように地震波によっては橋脚方向および橋脚直角方向の応答変位が同時刻に最大値を迎えることがあり、1方向独立载荷する場合に比べ、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。

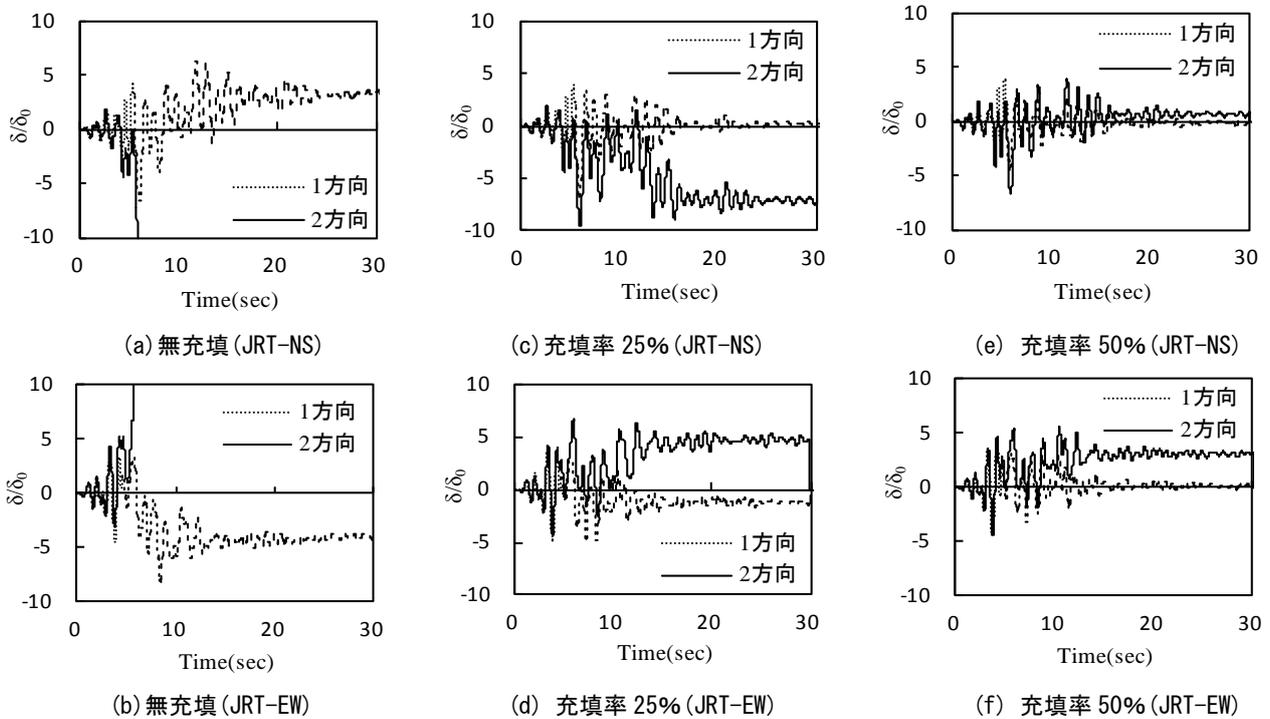


図-6 1方向および2方向载荷時の応答変位時刻歴

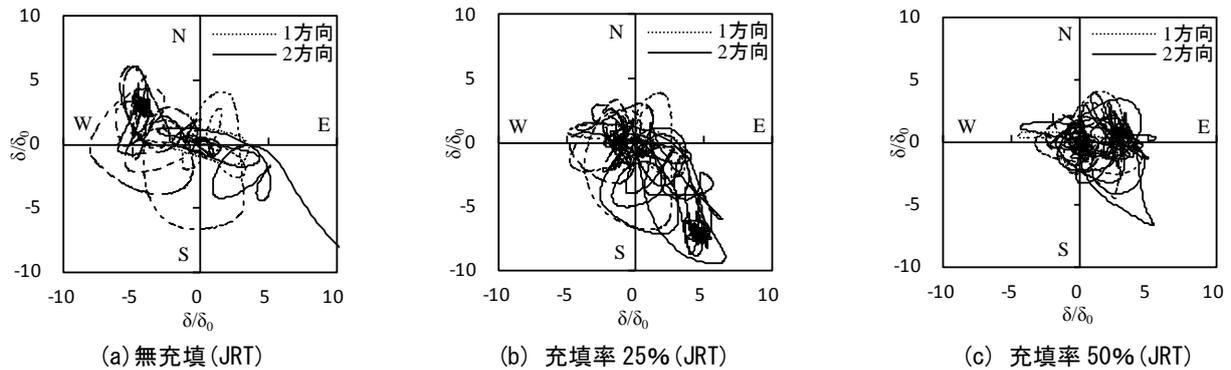


図-7 橋脚上部質点の応答変位軌跡

3・2・4 最大応答変位および残留変位の比較

ハイブリッド実験で得られた各充填率の供試体の NS, EW 方向およびそれらのベクトル合成値の最大応答変位 δ_{max} および残留変位 δ_r を図-8, 9 に示す。合成値は式(4)により算出した。1方向载荷の結果を白色, 2方向载荷の結果を黒色とその上の数値で示している。無充填の2方向载荷の結果は途中で倒壊に至り, 载荷を終了したため, 値は表示した結果よりも著しく大きくなる。図中の矢印は倒壊したことを表す。

$$\delta_s = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \quad (4)$$

図-8 より, すべての結果において1方向载荷に比べ, 2方向载荷の最大応答変位がかなり大きくなっている。右端に示す合成値においては1方向载荷に比べ, 2方向载荷の最大応答変位が, 無充填, 充填率25%および充填率50%の場合に, それぞれ, 約91%以上, 63%および63%大きな値となった。

また, 無充填の場合に比べコンクリートを充填することにより, 1方向と2方向载荷の最大応答変位の差を著しく低減させる効果があることが分かる。

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あり, 現行道路橋示方書において限界値は橋脚高さ h の1%とされている。本研究で用いた供試体の場合 $h/100=2.7\delta_0$ となる。これを図中に破線で示す。

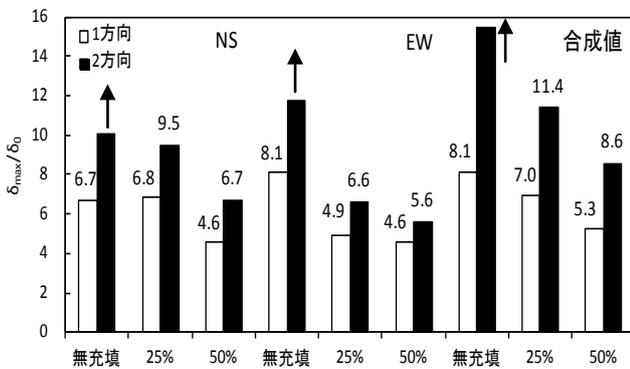


図-8 最大応答変位の比較

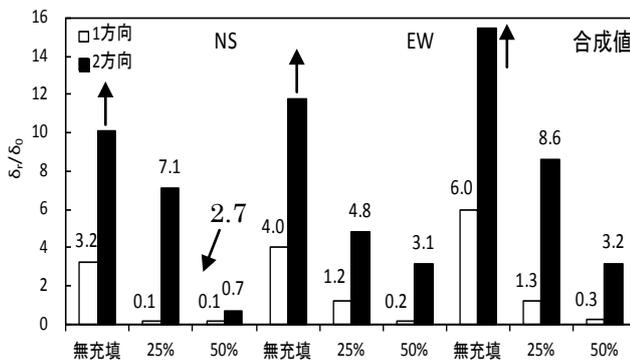


図-9 残留変位の比較

図-9 より, 残留変位も最大応答変位と同様な傾向があり, すべての結果において1方向载荷よりも2方向载荷の方が残留変位が大きい。具体的には, 合成値において1方向载荷に比べ, 2方向载荷の残留変位は, 無充填, 充填率25%および50%充填でそれぞれ, 2.6倍以上, 6.6倍および10.6倍大きな値となった。限界値で考察すると, 無充填の供試体は, すべて限界値を超えている。また充填率25%および50%においては, 1方向载荷の結果ではすべて限界値以内に収まっているのに対し, 2方向载荷の結果では50%充填のNS方向以外すべて限界値を超えている。したがって, 2方向同時载荷による橋脚への影響は大きく, 1方向载荷に基づいた耐震照査では, 地震時の応答結果が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。また, この結果も最大応答変位と同様, 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残留変位の1方向载荷と2方向载荷の差を低減させる効果があることも示している。

3・2・5 最大荷重における比較

図-10 は1方向载荷ハイブリッド実験におけるNSおよびEW方向の最大荷重(白および灰色)と2方向同時载荷における最大荷重(黒)を棒グラフに示したものである。2方向载荷時の最大値は各方向から計測された荷重の値を0.01秒ごとに式(5)より算出し, その最大値を求めた。

$$H_s = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (5)$$

図-10 より, 1方向独立载荷におけるNSおよびEW方向ならびに2方向同時载荷の最大荷重を比較してみると差(約2.5%)はほとんど見られない。よって, 2方向同時载荷時の荷重の最大値は1方向同時载荷時のNSおよびEW方向の最大荷重から推測できると言える。

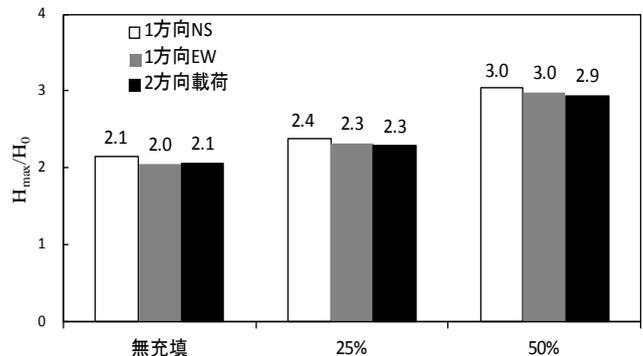


図-10 最大荷重の比較

3・2・6 累積エネルギー吸収量の比較

図-11 は累積エネルギー吸収量のNSおよびEW方向の和を棒グラフに示したものである。図中の累積エネルギー吸収量 ΣE は無充填橋脚の静的繰り返し载荷実験で得られ

た弾性エネルギー吸収量 $E_0=362\text{kN}\cdot\text{mm}$ で無次元化している。図-11 より、和で比較すると1方向载荷に比べ2方向载荷の方が平均約48%大きな値を示している。なお無充填の2方向载荷の結果は途中で倒壊に至り、载荷を終了したため、値が小さくなっている。これにより、2方向载荷の方が供試体に与えるエネルギーが大きく、危険なことを示している。

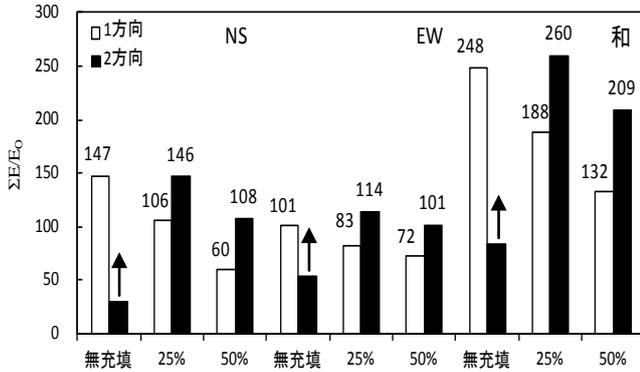


図-11 累積エネルギー吸収量の比較

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

ハイブリッド実験で得られた無充填、充填率25%および充填率50%のそれぞれの最大応答変位および残留変位の合成値を、図-12, 13に示す。○は1方向载荷、■は2方向载荷の結果を表し、いずれもNSおよびEW方向の合成値である。

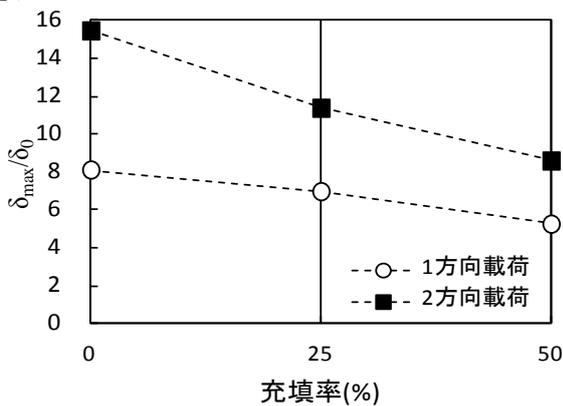


図-12 最大応答変位の比較

図-12より、最大応答変位は前述のように2方向载荷のほうが大きい、コンクリート充填率が大きくなると、1方向と2方向载荷ともに小さくなっている。1方向载荷では無充填に対して充填率25%では14%、充填率50%では35%値が小さくなり、2方向载荷では無充填に対して充填率25%では26%、充填率50%では44%値が小さくなった。

図-13より、残留変位でも同様な傾向が得られ、1方向載

荷では無充填に対して充填率25%では79%、充填率50%では96%値が小さくなり、2方向载荷では無充填に対して充填率25%では45%、充填率50%では79%値が小さくなった。これはコンクリートにより、橋脚基部の変形が拘束され、座屈を有効に抑制したためである。

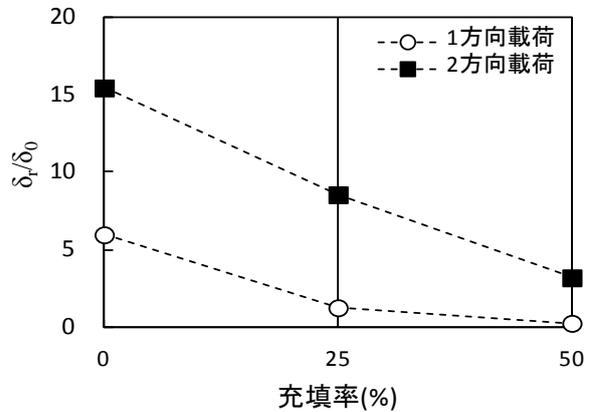


図-13 残留変位の比較

4・2 最大荷重

図-14は各充填率別の最大荷重の平均値を示したものである。○は1方向载荷におけるNSおよびEWの平均値、■は2方向载荷の結果を示す。

図-14より、2方向载荷は1方向载荷とほぼ同じ値を示した。コンクリートの充填率を増加させると、最大荷重は増加するが、その変化の程度は充填率に対して比例せず、1方向载荷では無充填に対して充填率25%では12%、充填率50%では44%値が大きくなり、2方向载荷では無充填に対して充填率25%では11%、充填率50%では43%値が大きくなった。充填率25%ではコンクリートは橋脚内部で拘束されず鋼板との間にすべりが生じたことから充填高さが不十分な場合は最大荷重が無充填とあまり変わらないものと思われる。また充填率50%に対しては、内部でコンクリートが拘束され圧縮力をコンクリートが分担するため最大荷重も増加したと考えられる。

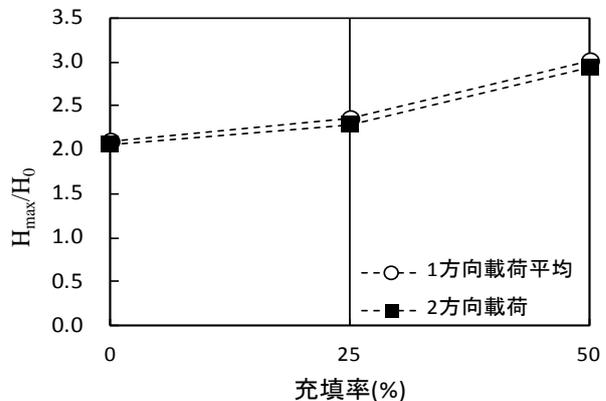


図-14 最大荷重の比較

4・3 累積エネルギー吸収量

図-15は1方向荷重および2方向荷重されたコンクリート無充填, 充填率 25%, 充填率 50%の供試体の累積エネルギー吸収量の和を充填率に対し示したものであり, 前述と同様 E_0 で無次元化している. 無充填供試体の2方向荷重の結果は途中で倒壊に至り中断したため, 値が小さくなっている.

累積エネルギー吸収量はコンクリートを充填することにより値が低くなる傾向が見られた. これは荷重に対して, 地震による応答変位が小さくなり, 橋脚の損傷が少なくなったためと思われる.

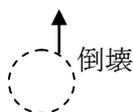


図-15 累積エネルギー吸収量の比較

5. 結論

本研究では, コンクリートを部分的に充填した円形断面橋脚を対象に, 水平1方向と2方向同時荷重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) 3種の充填率に対する最大応答変位及び残留変位は, 1方向荷重に比べ, 2方向荷重の結果の方が大きく, 最大応答変位では, 無充填, 充填率 25%, 充填率 50%に対し, それぞれ 91%以上, 63%, 63%大きな値となった. また, 残留変位はそれぞれ 2.6倍以上, 6.6倍および 10.6倍大きな値となった. このことから, 1方向荷重の結果に基づいた耐震照査では, 危険側の評価結果となる可能性がある.
- 2) 水平2方向荷重を受ける橋脚の最大荷重は, 各1方向の最大荷重とほぼ同じである(平均の差 2.5%). このことから, 2方向荷重時の最大荷重は1方向荷重時の NS, EW 方向の各最大荷重値から推測できるといえる.
- 3) 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, 応答変位が低減された. 2方向荷重の結果において最大応答変位では, 無充填に比べ充填率 25%では 26%, 充填率 50%では 44%値が小さくな

った. 残留変位では無充填に対して充填率 25%では 45%, 充填率 50%では 79%値が小さくなった.

- 4) コンクリートの充填率を増加させると, 最大荷重は増加したが, その変化の程度は充填率に対して比例せず, 充填率 25%ではコンクリートは橋脚内部で拘束されず鋼板との間にすべりが生じたことからコンクリート無充填と同程度となった. また充填率 50%の場合, 内部でコンクリートが拘束され圧縮力をコンクリートが分担するため最大荷重が増加した.

参考文献

- 1) 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.39(A), pp.249-262, 1993.3
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2012.3.
- 8) 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方向荷重ハイブリッド実験, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.56, pp.367-380, 2010.3

(受理 平成 25 年 3 月 19 日)