

水平2方向地震力を受ける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応答実験的研究

袁 輝輝¹・党 紀²・青木 徹彦³

¹学生会員 愛知工業大学 工学部都市環境学科 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町1247)
E-mail: macarians@gmail.com

²正会員 埼玉大学助教 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
E-mail: dangji1980@yahoo.co.jp

³正会員 愛知工業大学教授 工学部都市環境学科 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町1247)
E-mail: aoki@aitech.ac.jp

本論文では、水平2方向地震動を受けるコンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の耐震性能を調べるため、正方形断面供試体10本を用い、静的繰返し実験、水平1方向および2方向ハイブリッド実験を実施した。実験では、3種の地震波のNSとEW方向の加速度時刻歴記録を用い、地震波を独立1方向入力および水平2方向同時入力するハイブリッド実験を実施した。これらの実験結果から、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は1方向のみ入力する場合の相違を検討した。特に、水平2方向の同時作用により、鋼製橋脚の損傷が大きくなるが、コンクリートの適切充填により損傷の低減の効果があることを明らかになった。

Key Words : steel bridge pier, concrete filled, hybrid test, bi-directional seismic response

1. はじめに

現行の道路橋示方書では、鋼製橋脚の耐震設計では、大地震時の非線形変形が許容され、水平地震力を橋梁の橋軸方向と橋軸直交方向に独立に作用させ場合の照査をそれぞれ行う方法が採用されている¹⁾。しかし実地震波は任意の方向から構造物に3次元的に作用し、水平2方向非線形変形による復元力の相互作用効果を無視すると、橋の耐震性能を真実に評価することが難しい。

水平2方向地震力を受ける場合、鋼製橋脚の耐震性能を明らかにするため、近年では、橋脚上部載荷点を含む水平面上で円形や矩形などの形状の変位パターンを与えた水平2方向載荷実験^{2), 3)}や有限変位解析⁴⁾が行われてきた。これらの実験と解析の結果によると、水平2方向載荷実験で得られた橋脚の最大耐力は、非線形復元力が水平2方向相互作用の効果により、従来の1方向の結果を下回り、種々の載荷オービットパターンによって相互作用の効果が異なり、最大耐力低下の度合いも変化していることが分かった。また従来行われたハイブリッド実験^{5)~8)}では、1方向独立に作用とした場合より、水平2方向地震力を同時に作用された橋脚の応答変位は、最大2倍大きくなった⁸⁾。

一方、都市内の高速道路高架橋の鋼製橋脚は、兵庫県南部地震以前から、車両の衝突によるダメージや地下水が下から橋脚に浸入することを防ぐため、橋脚基部に部分的にコンクリートを充填しているものがある。兵庫県南部地震では、このようなコンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の被害は従来の鋼製橋脚より低い程度にとどまったことが報告され⁹⁾、その後、新設橋梁の鋼製橋脚や既存鋼製橋脚を耐震補強する場合には、橋脚基部に積極的にコンクリート充填が行われている。

橋脚基部にコンクリートを適切に充填した鋼製橋脚に対して、過去に行われてきた水平1方向載荷実験および解析^{10)~15)}の結果に比べ、その最大耐力が無充填時の約1.3倍、変形能力が約2倍まで上昇し、耐震性能が格段に向上することができる。しかし、水平2方向地震動を受ける場合、コンクリートを充填した鋼製橋脚の地震応答挙動が無充填橋脚のように著しい低下があるか、水平1方向載荷時と同様に優れた耐震性能があるか、また従来の解析手法が適用できるかなど、様々の問題はまだ解明されていない。

そのうち、大地震時に鋼製橋脚の水平2方向応答挙動と耐震安全性は最も懸念されている課程と思われる。そこで、本研究では、コンクリートを部分的に充填された鋼製橋脚を研究対象とし、水平2方向

強い揺れを受けた場合の応答挙動と耐震安全性を解明するために、基礎的な応答実験（ハイブリッド実験、仮動的実験）を行う。将来的に、本研究の実験データを用いて、従来の解析法の検証、必要に応じて、新たに解析法や耐震性能設計法までの提案と検証などが期待できる。

従って、本研究では、まず2つタイプのコンクリート部分的充填鋼製橋脚の最大耐力と変形性能の基本的特性を1方向静的繰り返し実験で調べる。つぎに、設計用地震動記録の水平2方向加速度データを用い、水平1方向地震動のみを入力するハイブリッド実験と、水平2方向地震動を同時入力するハイブリッド実験とを行い、水平1方向と2方向に地震動作用された橋脚の最大応変位、残留変位、最大耐力およびエネルギー吸収量などの耐震性能を示す指標に対して比較的検討を行う。最後に、コンクリート無充填鋼製橋脚の結果8)と比較することによって、コンクリートを充填しない、充填不足、適切充填した場合の水平2方向相互作用による応答性状の違いを検討し、その根本的な原因を分析してみる。

2. 実験計画および実験方法

(1) 実験供試体と充填率

本研究の実験に用いる供試体は、材質SM490、板幅450 mm、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本のリブ（6×55 mm）で補剛され、橋脚の高さ方向に基部から900 mmまで225 mm間隔で、それ以降は450 mm間隔のダイヤフラムで補剛されている。供試体側面図とを図-1(a)、断面図を同図(b)、供試体寸法および各パラメータを表-1に示す。なお、幅厚比パラメータ R_R 、 R_F 、細長比パラメータ λ 、補剛材細長比パラメータ λ_s は下記の式によって算出されている¹⁾。

$$R_R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_R}} \quad (1)$$

$$R_F = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_F}} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

$$k_F = \frac{(1+\alpha^2)^2 + n\gamma_l}{\alpha^2(1+n\delta_l)} \quad (\alpha \leq \alpha_0) \quad (4)$$

$$k_F = \frac{2(1+\sqrt{1+n\gamma_l})}{1+n\delta_l} \quad (\alpha > \alpha_0) \quad (5)$$

ここで、 α ：補剛板の縦横寸法比(=0.5)、 α_0 ：限界縦横寸法比(= 3.27)、 γ_l ：縦方向補剛材の剛比、 δ_l ：縦方向補剛材 1 個の断面積比、 b ：板幅、 t ：板厚、 σ_y ：フランジ板パネルの降伏応力、 E ：弾性係数、 ν ：ポアソン比、 n ：補剛板のサブパネル数、 r ：断面 2 次半径、 h ：供試体の高さ、 k_R ：座屈係数(= $4n^2$)、 k_F ：座屈係数(式(4),(5))である。

道路橋示方書¹⁾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として式(6)で与えている。

$$h_c = (1 - M_{ys} / M_a) h \quad (6)$$

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} = 充填したコンクリート直上の鋼断面の降伏曲げモーメント、 M_a = 橋脚基部の合成断面の許容曲げモーメントである。鋼断面と合成断面の曲げモーメントを本実験供試体に対して道路橋示方書に示した方法を用い¹⁾、プログラミング(Visual Basic)で求めると、それらの比は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。今回の実験ではダイヤフラム位置までコンクリートを充填することとし、実際には基部から $h_c = 900$ mmまでコンクリートを充填し、タイプ1の試験体を作成した。この場合、充填率は約37.5%となり、ほぼ式(6)による充填率と同じ値となる。

また、既存の鋼製橋脚では、前述のように地下水の浸入や車両の衝突によるダメージを防ぐために、耐震性能を意図せずに、橋脚の断面幅の0.5~1.0倍の高さでコンクリートを充填されたものが多く、この

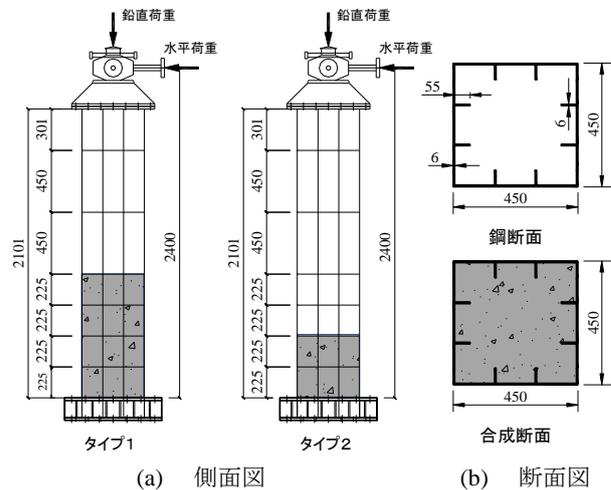


図-1 実験供試体

表-1 供試体寸法および各パラメータ

鋼種	SM490	
板幅	b (mm)	450
板厚	t (mm)	6
リブ幅	b_s (mm)	55
リブ板厚	t_s (mm)	6
ダイヤフラム間	D (mm)	225
供試体有効高さ	h (mm)	2400
断面積	A (cm ²)	133
断面 2 次モーメント	I (cm ⁴)	4.06×10^4
幅厚比パラメータ	R_R	0.517
幅厚比パラメータ	R_F	0.169
細長比パラメータ	λ	0.344
補剛材細長比パラメータ	λ_s	0.184
補剛材剛比	γ/γ^*	10.5

表-2 鋼材の引張実験結果

	E (N/mm ²)	σ_0 (N/mm ²)	ϵ_0 (μ)	ν
平均値	2.12×10^5	391	1870	0.284

ような橋脚に対する耐震安全性を確認するため、本研究に使用する供試体に対して、断面幅450mmと同じ高さまで充填する供試体をタイプ2として作成した。タイプ2の試験体の充填率は $h_c/h = 18.8\%$ となる。

タイプ2の橋脚は、コンクリートを充填した際に、意図的に耐震性能を向上しようとしているものではない。式(6)の定義によれば、最適な充填率以上に充填しない場合、コンクリート充填直上断面が先に座屈するため、コンクリート充填不足とも呼ばれている。

従来の実験的研究^{11),13)}で既に解明したように、式(6)を概ねに満足したタイプ1の試験体は、あるいはそれ以上に充填しても、基部のコンクリート充填断面が先に破壊し、コンクリート充填による効果がそれ以上にならないと思われる。

コンクリートを最適充填率以下に充填しても、無充填鋼製橋脚と同じように、無充填補剛断面の座屈による破壊モードとなるため、充填率が変化すれば、終局耐力と靱性が連続に変化するが、本研究では、最低限の基本的検討が必要として、最適充填率の半分を用いたタイプ2の試験体のみを載荷する。

以下では、この2つタイプの試験体の充填率を簡単に $h_c/h = 0.4$ および 0.2 と表記する。供試体鋼板の引張試験により、降伏応力 σ_0 、降伏ひずみ ϵ_0 、ヤング率 E およびポアソン比 ν を求めた。これらの平均値を表-2に示す。充填コンクリートは早強コンクリートを用い、呼び強度は 16 N/mm^2 、圧縮強度は約 21 N/mm^2 である。

(2) 実験システム

静的およびハイブリッド実験に使われる載荷装置は、図-2および写真-1に示すように、水平2方向および鉛直方向に、それぞれ1000kNアクチュエータ（理研精械社製）3基を用いる。鉛直方向のアクチュエータを固定するために、写真中に青色の開閉できるピラミッド式トラス反力装置を用い、水平2方向載荷用のアクチュエータの回転ピンの後部は、赤色にペイントした組み立て式の三角形反力フレームに固定している。

3次元的に載荷するために、3次元補正計算機能のある高度な計測-制御連動システムが必要となる。著者らは、文献8)および文献17)で無充填鋼製橋脚に対する3次元的載荷を行っており、載荷システム、計測、制御および補正など、基本的に本研究と同じであり、詳細には文献8)と文献17)を参照されたい。

(3) 水平1方向静的繰返し実験

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、水平1方向静的繰返し載荷実験を行う。載荷方法として、試験体の上部水平変位を漸増させながら繰返し載荷する。一定鉛直荷重 P は、ハイブリッド実験も含めたすべてのケースで、一定の軸力比 $P/P_0=0.15$ とし、橋脚供試体の軸降伏力 $P_0 (= A \times \sigma_y = 4320 \text{ kN})$ から、 $P=648 \text{ kN}$ と算出した。ここに、 A ：断面積、 σ_y ：公称降伏強度 325 N/mm^2



写真-1 実際に使われる載荷装置

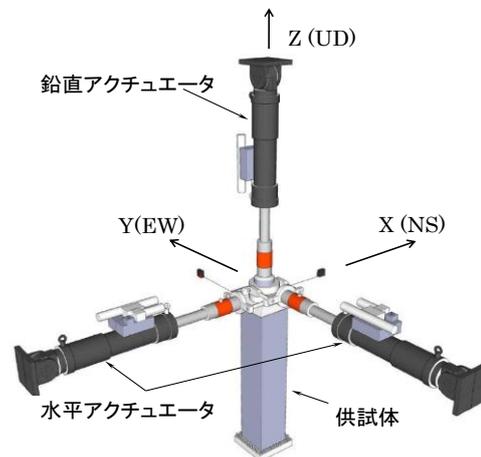


図-2 載荷装置

表-3 想定1質点系モデル諸元

項目	$h_c/h = 0.2$	$h_c/h = 0.4$
高さ h_0 (mm)	9600	9600
軸力 P (kN)	10368	10368
上部質量 m (t)	1058	1058
弾性剛性 k_0 (kN/mm)	76.7	83.9
減衰係数 c (kN s/m)	900.8	942.2
周期 T (s)	0.74	0.71

表-4 入力地震波

試験体名	地盤種別	波形方向	PGA (gal)
JMA-NS	I種地盤 (JMA)	NS	812
JMA-EW		EW	766
JMA-2D		NS+EW	888
JRT-NS	II種地盤 (JRT)	NS	687
JRT-EW		EW	673
JRT-2D		NS+EW	726
PKB-NS	III種地盤 (PKB)	NS	557
PKB-EW		EW	619
PKB-2D		NS+EW	791

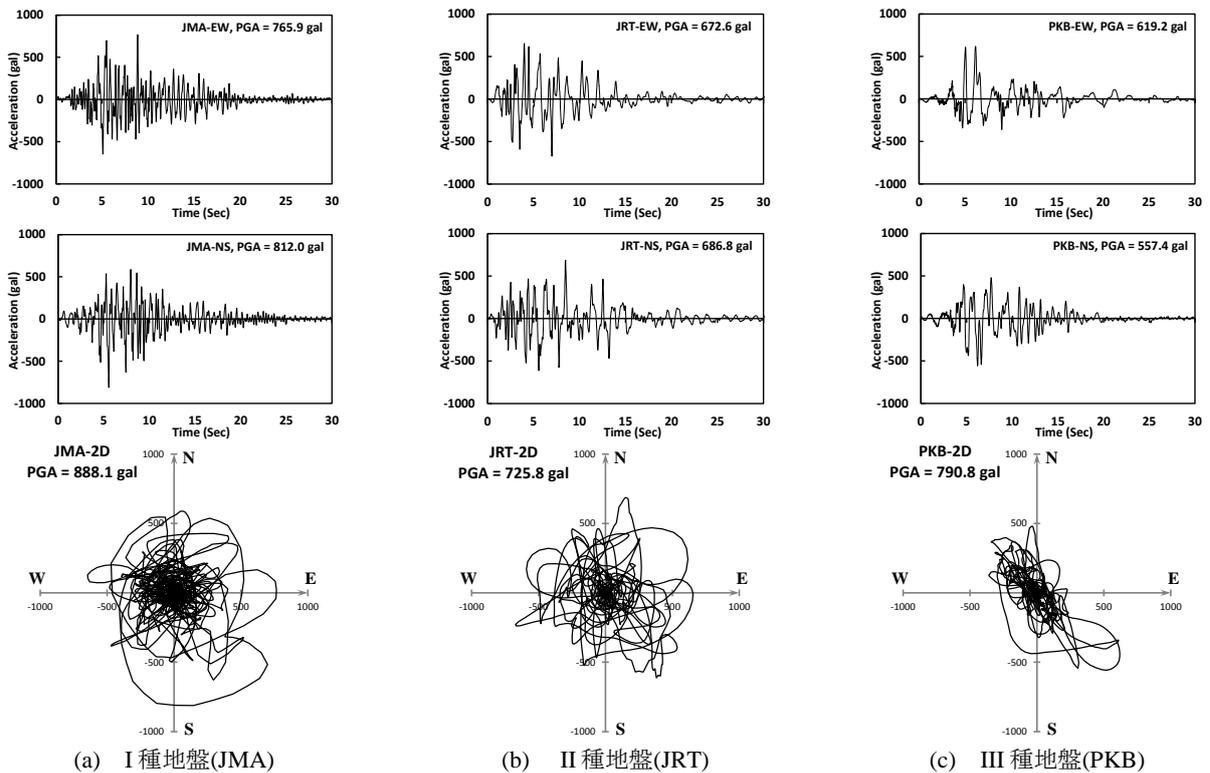


図-3 入力地震波加速度データ

である。

繰り返し水平載荷では降伏変位 δ_0 を基準とし、 δ_0 の整数倍の変位を3回、つぎに $0.5\delta_0$ 増加した変位を1回、載荷変位を漸増させながら載荷する。ただし、降伏変位 δ_0 は、同じ構成断面を有するコンクリート無充填鋼製橋脚の値 $\delta_0=15\text{mm}$ を用いる⁸⁾。

(4) ハイブリッド実験

ハイブリッド実験システムは、解析部と実験部で構成され、解析部における数値積分のアルゴリズムは、文献17)で述べたように、時間刻みごとの積分を行う。はじめに初期剛性による予測変位を算出し、供試体の微小ステップ区間内の載荷による橋脚復元力をフィードバックし、これを繰り返し収束計算を行う。解析の時間間隔は $\Delta t = 0.01$ 秒とする。

a) 想定実橋脚モデル

実橋梁は載荷供試体の4倍のものを想定した。解析では1つの橋脚と上載する桁を含めた橋梁1質点モデルとし、それぞれ質量 m 、初期剛性 k_0 および減衰係数 c は実大橋脚構造の値を用いる。実験の各解析諸元は相似則から算出した。各項目ごとの値を表-3に示す。

実橋梁の鉛直荷重は、前述の供試体の鉛直荷重 $P = 648 \text{ kN}$ から、荷重の相似比16 (長さの相似比4) を用いて 10368 kN となる。これを $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ で除じて実橋梁の質量 $m = 1058\text{t}$ を算出した。初期剛性 k_0 は、後述の静的繰返し実験結果から算出した値である。減衰係数 c は、減衰定数 $h (=0.05)$ により算出した。

b) 入力地震波

橋脚に入力する地震波は、道示¹⁾で与えられてい

るレベル2タイプIIのI、IIおよびIII種地盤上の設計用地震動で兵庫県南部地震神戸海洋気象台(JMA)、JR鷹取駅(JRT)およびポートアイランド(PKB)の3つである。各入力地震波の加速度時刻歴および水平面の加速度オービットを図-3に示す。各地震波のNSとEW方向成分(-NS、-EW)の最大加速度(PGA)および水平2方向成分を合成した(-2D)最大加速度を表-4に示す。図に示すように、加速度オービットは、特に強い方向性を示していない、ななめ楕円形状を示したPKB地震波の場合としても、楕円形の短軸方向もかなりのPGAを示している。

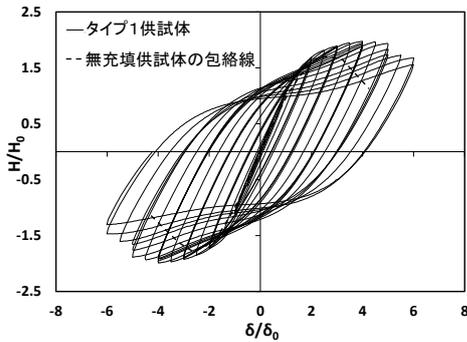
c) 供試体

1方向載荷するハイブリッド実験では、上記3つの地震波のNSとEW方向成分に対して、各1台の供試体を用いて載荷を行い、すなわち合計6体の供試体を用いる。水平2方向載荷するハイブリッド実験では、地震波の水平2方向加速度のNS、EW方向成分を1質点系のX方向とY方向に入力する。予測した応答変位を、図-2に示すように、供試体のX軸とY軸に載荷し、復元力フィードバックを用い、応答値を修正する。ハイブリッド実験の試験体名は、表-4に示すように入力地震波名の後に、1方向実験の場合、入力方向のNSあるいはEWを、2方向の場合、符号2Dを付けることとする。

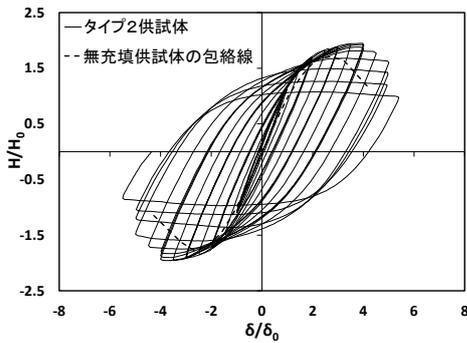
3. 実験結果

(1) 静的繰返し実験結果

タイプ1およびタイプ2のコンクリート部分的に充填した鋼製橋脚供試体に対して、静的繰返し実験を行い、得られた荷重-変位履歴曲線を図-4に



(a) タイプ 1 供試体($h_c/h = 0.4$)



(b) タイプ 2 供試体($h_c/h = 0.2$)

図-4 静的繰返し荷重時の荷重 - 変位履歴曲線

表-5 静的繰返し実験結果

供試体	タイプ 1	タイプ 2	無充填
h_c/h	0.4	0.2	0.0
H_y (kN)	252	250	233
δ_y (mm)	15.0	15.0	15.0
H_m (kN)	465	442	414
δ_m (mm)	59.8	52.5	39.6
δ_{95} (mm)	77.3	63.9	45.1

示す。図中の横軸は水平変位、縦軸は水平荷重であり、それぞれ降伏変位 $\delta_0 = 15$ mmと降伏荷重 $H_0 = 233$ kNで無次元化されている。表-5に示すように、タイプ 1 およびタイプ 2 の供試体の最大荷重はそれぞれ $H_{m,type1} = 465$ kN($1.99H_0$)および $H_{m,type2} = 442$ kN($1.87H_0$)となった。この結果は先に行った無充填鋼製橋脚の実験⁸⁾による最大荷重414 kN($1.78H_0$)に比べ、それぞれ約16%および約9%上昇している。

タイプ 2 の供試体の荷重実験では、コンクリート充填面直上付近に座屈が生じ、最大荷重とその変位が無充填時より上昇したが、履歴曲線は無充填のと同じように、包絡線において、最大荷重後の耐力がすぐに低下した。これは、無充填補剛鋼断面の座屈による劣化の共通的特徴である。一方、コンクリートを適切に充填したタイプ 1 供試体の荷重実験では、図に示すように、無充填およびタイプ 2 の供試体より最大荷重が上昇し、塑性率が向上したほか、最大荷重以降の荷重低下がより緩やかで、履歴ループごとの曲線では、鋼断面の座屈劣化により一時低下したものの、コンクリート部分が圧縮力を負担し

表-6 ハイブリッド実験結果

供試体	地盤種	荷重方向	δ_{max}/δ_0	δ_r/δ_0	H_{max}/H_0
タイプ 1 $h_c/h = 0.4$	I 種	1D-NS	3.73	0.55	2.12
		1D-EW	3.11	0.72	2.04
		2D	3.68	0.31	1.91
	II 種	1D-NS	4.24	0.07	2.14
		1D-EW	3.22	0.06	2.05
		2D	5.59	0.51	2.07
	III 種	1D-NS	3.69	0.91	2.10
		1D-EW	3.57	0.95	2.12
		2D	7.18	1.66	2.08
タイプ 2 $h_c/h = 0.2$	I 種	1D-NS	3.76	0.77	1.89
		1D-EW	2.99	0.68	1.90
		2D	3.44	0.47	1.85
	II 種	1D-NS	4.73	0.68	1.94
		1D-EW	3.40	0.09	1.97
		2D	7.82	6.49	1.81
	III 種	1D-NS	4.25	1.38	1.96
		1D-EW	4.51	1.65	2.04
		2D	倒壊	倒壊	1.81
無充填 $h_c/h = 0.0$ (参考文献 8) によるデータ)	I 種	1D-NS	3.69	1.43	1.56
		1D-EW	2.86	0.72	1.86
		2D	3.33	1.00	1.49
	II 種	1D-NS	5.46	1.98	1.80
		1D-EW	4.82	2.09	1.65
		2D	7.40	4.13	1.71
	III 種	1D-NS	5.18	2.95	1.64
		1D-EW	5.20	2.32	1.61
		2D	倒壊	倒壊	1.55

$\delta_0 = 15$ mm, $H_0 = 233$ kN

ため、水平力がまた上昇することとなっている。

以上のように、コンクリートの充填率が充填不足と適切充填となった場合、鋼製橋脚の破壊モードが違い、1方向荷重時の耐震性能と履歴特性が異なっていることは、従来の実験現象による知見と一致している^{11)~15)}。

(2) 応答変位における相違

a) 応答変位時刻歴

図-5に水平2方向同時に地震動を与えた橋脚のハイブリッド実験による応答変位のNS, EW方向成分の時刻歴を実線で、またNS, EW方向に1方向独立荷重の結果を破線で表す。縦軸の変位は降伏変位 $\delta_0 = 15$ mmで無次元化されている。同図の左2列はタイプ 1 の橋脚(40%充填)を用いた、右2列はタイプ 2 の橋脚(20%充填)を用いた結果を示し、上から I 種、II 種および III 種地盤の設計地震波(JMA, JRT, PKB)に対する結果を示す。また最大応答変位 δ_{max}/δ_0 および残留変位 δ_r/δ_0 の各値を表-6にまとめる。

図-5(1)に示すように、コンクリートを適切に充填したタイプ 1 の鋼製橋脚では、水平2方向荷重による応答変位と水平1方向荷重による応答変位の時刻歴波形が一致しており、水平2方向荷重による応答変位がやや大きいものとなっている。これは、従来の無充填鋼製橋脚の実験結果と異なっている。従来の無充填鋼製橋脚を対象にしたハイブリッド実験で得られた応答変位時刻歴では、特に II 種地盤地震波JRTと III 種地盤地震波PKBを入力した際に、1方向と2方向入力による応答変位の差が大きく、2方

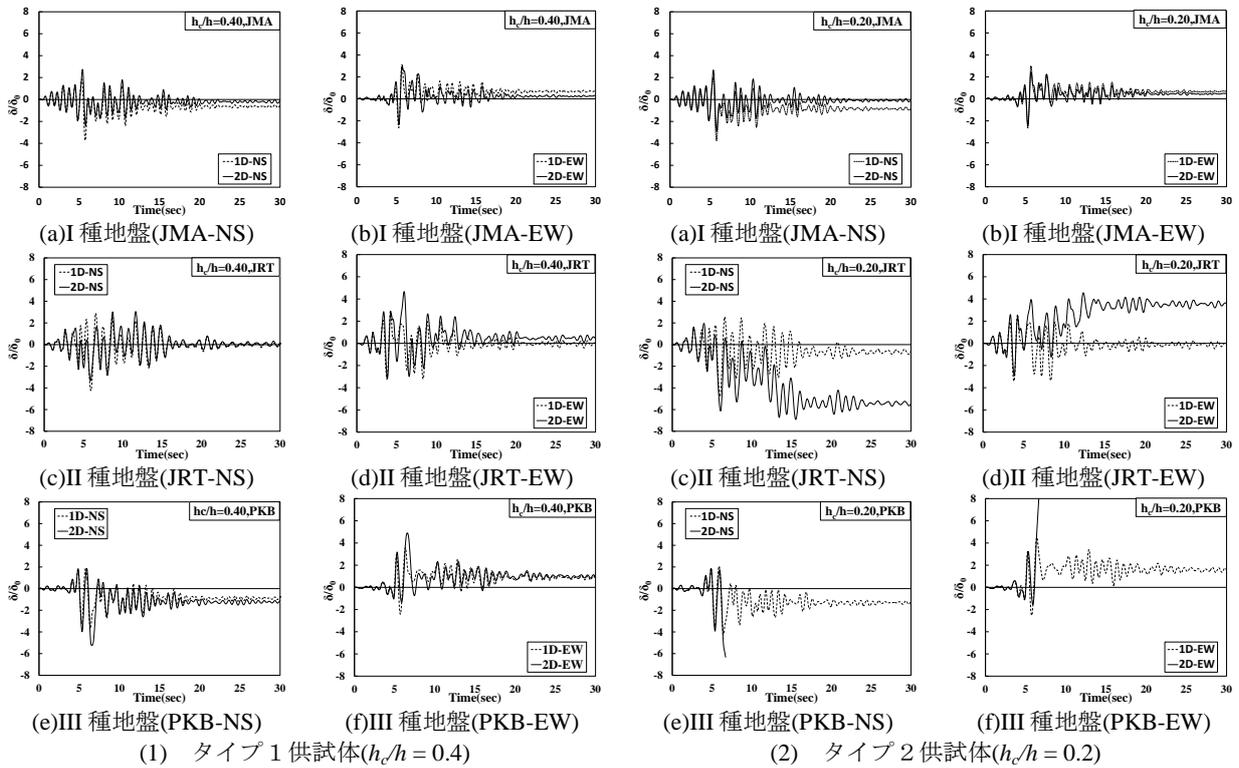


図-5 1方向および2方向載荷時の応答変位時刻歴

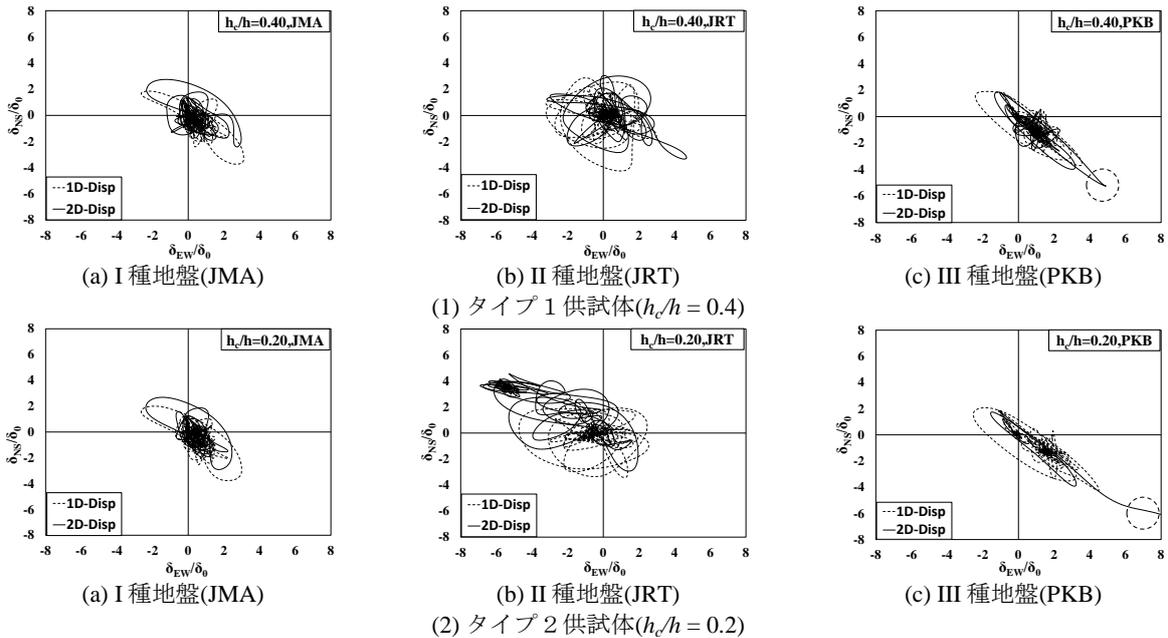


図-6 水平2方向を合成した応答変位軌跡 (橋脚上部質点の変位軌跡)

向入力する場合、応答変位が発散し、橋脚が倒壊していくケースも数少ない。コンクリートを充填したことによって、水平2方向入力による応答の差が少なくなった原因として、コンクリート充填による耐力と靱性の向上の結果、水平2方向相互作用による荷重低下と損傷集中の度合いが抑えられたと思われます。

一方、充填率不足のタイプ2の応答変位履歴曲線では、上段に示すI種地盤地震波(JMA)を入力した結果では1方向載荷と2方向載荷による応答の差は

あまり見られていないが、中段のII種地盤地震波(JRT)を入力した結果では、2方向実験より応答変位時刻歴はかなり大きくなって、一方に偏って、大きい残留変位のままで終了した。III種地盤地震波(PKB)を入力とした2方向載荷の結果では1方向載荷時の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NS、EW方向とも応答変位が著しく大きくなり、応答変位が単調に増加した。実験は時刻歴上の7秒付近で、応答変位が発散し、橋脚が倒壊していく結果となる

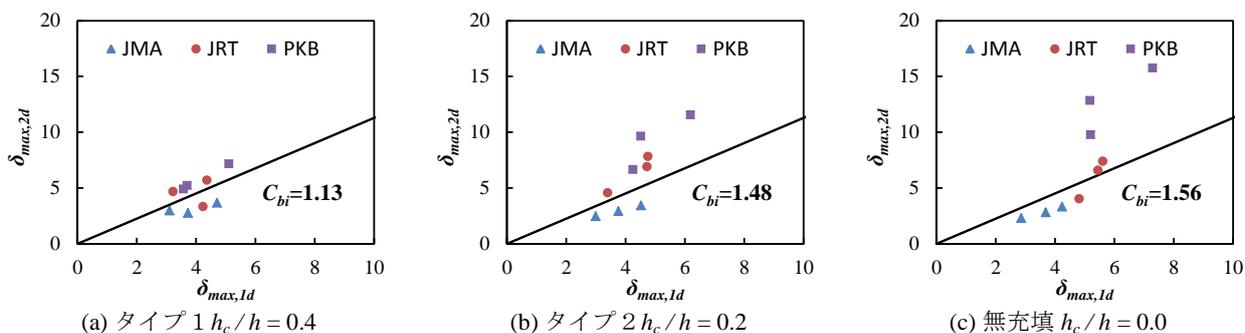


図-7 地盤種別の違いによる最大応答変位の変化

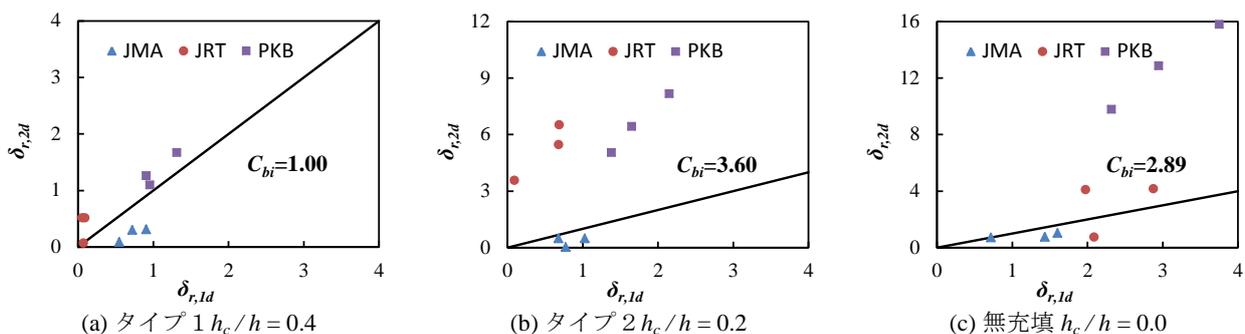


図-8 地盤種別の違いによる残留変位の変化

と判断され、実験安全上のために载荷が止められた。従来の無充填の鋼製橋脚もこのような結果を得られており、タイプ2の供試体の水平2方向応答挙動は、無充填橋脚と類似していると思われる。

b) 変位軌跡(オービット)

NS, EW方向の応答変位 δ_{NS} , δ_{EW} の時刻暦を水平面に映して、それぞれ横軸および縦軸に描くと橋脚上部質点の平面上の変位軌跡となる。図-6では、2方向载荷実験の結果を実線で、1方向载荷実験の結果を破線で示す。図から見られるように、1方向と2方向実験で得られた変位軌跡は基本的に同じ形状が得られており、地震波の水平2方向成分の位相特性によるものと思われる。ただし、水平2方向地震動を受けた場合、オービットの形状は細長くなる傾向が見られる。特にIII種地盤地震波(PKB)を入力した場合、2方向载荷によるオービットは、図中の破線の円形でマークしたところに、1方向载荷の結果より斜め方向に長くなって、タイプ2の供試体を用いた結果では、単調に発散していく形状になった。これは、水平2方向同時载荷により、損傷が断面の一部に集中し、応答もこの方向に偏っていく原因と考えられる。

c) 最大応答変位

水平1方向と2方向载荷による最大応答変位の違いを図-7で比較する。図中では、水平2方向の応答変位の最大値とそれぞれ水平2方向における応答変位の最大値を地震波ごとにプロットしている。同図のコンクリート無充填($h_c/h = 0.0$)の結果は文献8)から引用している。

同図から、2方向载荷された橋脚の最大応答変位

は、II種とIII種地盤地震波JRTおよびPKBを用いた結果において、図に示すように、1方向载荷時より著しく大きくなっている。コンクリート無充填あるいはコンクリートが十分に充填していない場合に2方向载荷すると、III種地盤地震波(PKB)の応答は、橋脚の崩壊になった。このように、より良好な地盤では水平2方向相互作用による応答増大が少なく、より軟弱な地盤では応答増大の傾向が見られている。ただし、本研究では地盤種ごとに1セットの地震記録のみを用いた。なお、入力した地震波は1方向入力に基づいた解析時に用いる設計地震波であり、設計地震応答スペクトルに調整されたものである。このような傾向を確認するため、将来に適切な解析法を検証した上で、多数のオリジナル地震波を用いる解析結果を用いる検討が必要である。

なお、水平1方向最大応答 δ_{1d} から水平2方向応答 δ_{2d} を下記の線形近似式で推定できるとと思われる。

$$\delta_{2d} = C_{bi}\delta_{1d} \quad (7)$$

ただし、 C_{bi} は水平2方向相互作用効果による応答の増大係数である。この近似式を用い、タイプ1、タイプ2および無充填橋脚の場合の実験データで C_{bi} を同定し、近似した結果を図中の実線で示す。

図に示すように、コンクリートを十分に充填したタイプ1の橋脚は、水平2方向の応答変位増大の比率 C_{bi} は、約1.13であり、水平2方向地震力を受けるコンクリートを十分に充填した鋼製橋脚の応答変位は、水平2方向相互作用を無視した場合の応答がやや大きくなることが分かる。充填不足のタイプ2の橋脚と無充填橋脚の C_{bi} より、より大きくなっている。大変形領域における応答の急上昇も見られている。

したがって、コンクリートを十分に橋脚基部に充填した鋼製橋脚は、従来の実験結果と違い、応答が

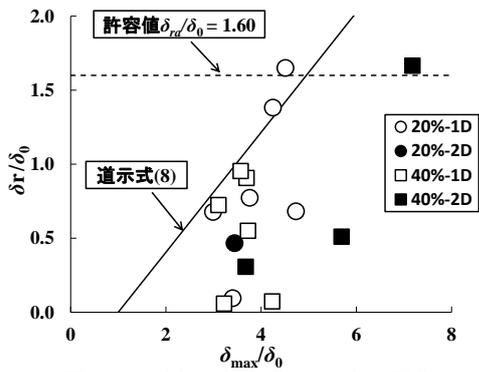


図-9 残留変位と最大変位の関係

少し水平2方向相互作用より大きくなるものの、少し安全側に設計すれば、従来通りの設計法も特に大きな差が出ない傾向を示唆していると思われる。

d) 残留変位および最大応答変位の関係

1方向および2方向載荷ハイブリッド実験で得られた橋脚の残留変位 δ_r を図-8に示す。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、その許容値は橋脚高さの1%となっている。この値は本研究に使用する供試体に対しては $\delta_r=1.6\delta_0$ に相当する。

図-8に示すように、全体的な傾向は図-7の最大応答変位と同様であるが、無充填および充填不足のタイプ2の橋脚用いた場合、2方向相互作用による増大率 C_{bi} は最大応答変位の結果よりも著しく大きくなっている。したがって、この場合も1方向載荷に基づいた結果のみによる耐震照査では、約実の1/3に、過小評価となる可能性がある。ただ、十分に充填した鋼製橋脚の水平2方向応答は、1方向載荷時と大差がない結果となった。したがって、コンクリートを十分に充填した場合、橋脚の地震後使用性能照査において、水平2方向の相互作用を無視しても、大きく偏った結果とならないと思われる。

図-8(a)に示す40%充填のタイプ1の橋脚では、1方向および2方向載荷の残留変位の差は20%充填時より著しく小さくなった。2方向載荷のⅢ種地盤で最大となっているが、それでも $1.7\delta_0$ 程度である。したがって、コンクリートを十分に充填すれば、大変形領域における残留変位を抑制する効果が大きいと思われる。

道路橋示方書V・耐震設計篇¹⁾では、橋脚の地震時最大応答変位 δ_{max} から、地震後の残留変位 δ_r の推定式を下記のように提示している。

$$\delta_r/\delta_0 = C_R(\delta_{max}/\delta_0 - 1)(1 - r_k) \quad (8)$$

ここで、補正係数 C_R と2次剛性と初期剛性の比 r_k は、コンクリート充填橋脚に対して、それぞれ0.45と0.1である。

軌跡と見なされる。従来のハイブリッド実験は1方向載荷がほとんどであるが、このようにNSとEW方向の結果を合成した場合、すなわち、図中に破線で示す結果は、2方向載荷よりやや大きい範囲に現れ、現実のものとは異なっている。

上式(8)およびハイブリッド応答実験で得られた最大応答変位と残留変位の関係を図-9に示す。同図で、コンクリートを20%および40%充填した供試体の1方向実験で得られた残留変位をそれぞれ円形マーク(○)と正方形マーク(□)で示している。●印および■印は2方向載荷時の結果である。ただし、コンクリートを20%充填のタイプ2の橋脚を2方向載荷した場合、図に示したようにⅡ種、Ⅲ種地盤地震波を入力したケースでは、橋脚の倒壊に近い応答になっており、残留変位が非常に大きくなったため、検討範囲外として、図中に示していない。

図-9からわかるように、道式(8)で計算した結果(図中実線)は、■印で示す2方向載荷に対しては、安全側過ぎるが、1方向載荷の実験結果の上限を示しており、式(8)は1方向載荷に対しては橋脚の残留変位のよい推定式となっている。

(3) 復元力における相違

a) 復元力履歴曲線

ハイブリッド実験で得られた荷重-変位履歴曲線を図-10に示す。図中の荷重、変位はそれぞれ静的繰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。

図中の実線で示す2方向実験の履歴曲線の水平荷重の最大値は、破線で示す1方向載荷よりいずれのケースでも小さくなっている。1方向載荷の荷重のピーク点では鋭角な折線となっている。すなわち荷重の増加の途中で変位が反転し荷重低下したことが見てとれるため、反転した時点では橋脚の有する最大耐力に達していないと考えられる。

一方、2方向実験の結果(図中の実線)は、緩やかな山形を描く曲線が現れており、どの時点でも橋脚の最大耐力に達していると考えられ、2方向同時載荷による橋脚の早期荷重の低下が見られる。3つの地震波を入力した結果を比較すると、それぞれ荷重低下の程度は異なり、一定の傾向は見られていない。しかし、図中から見られるように、同じ地震波を入力したそれぞれタイプ1とタイプ2の橋脚の復元力低下の性状が類似しており、地震波の水平2方向位相成分の特性に依存している可能性が高いと思われる。

b) 水平2方向復元力軌跡における相違

水平復元力 $\{H\}=\{H_{EW}, H_{NS}\}$ を平面上に描いた軌跡を図-11に示す。図中の実線は、2方向載荷実験の結果を示し、破線は、NSとEW方向の各1方向載荷実験をそれぞれ縦軸および横軸に描いた結果を示す。1方向載荷では、ある方向と、それに直交する方向の荷重が相互に影響しない時の仮定の橋脚の復元力

c) 最大荷重における相違

3つの地盤種Ⅰ、ⅡおよびⅢにおける地震波JMA, JRT, PKBに対する1方向独立載荷ハイブリッド実験におけるNS, EW方向の最大荷重と2方向同時載

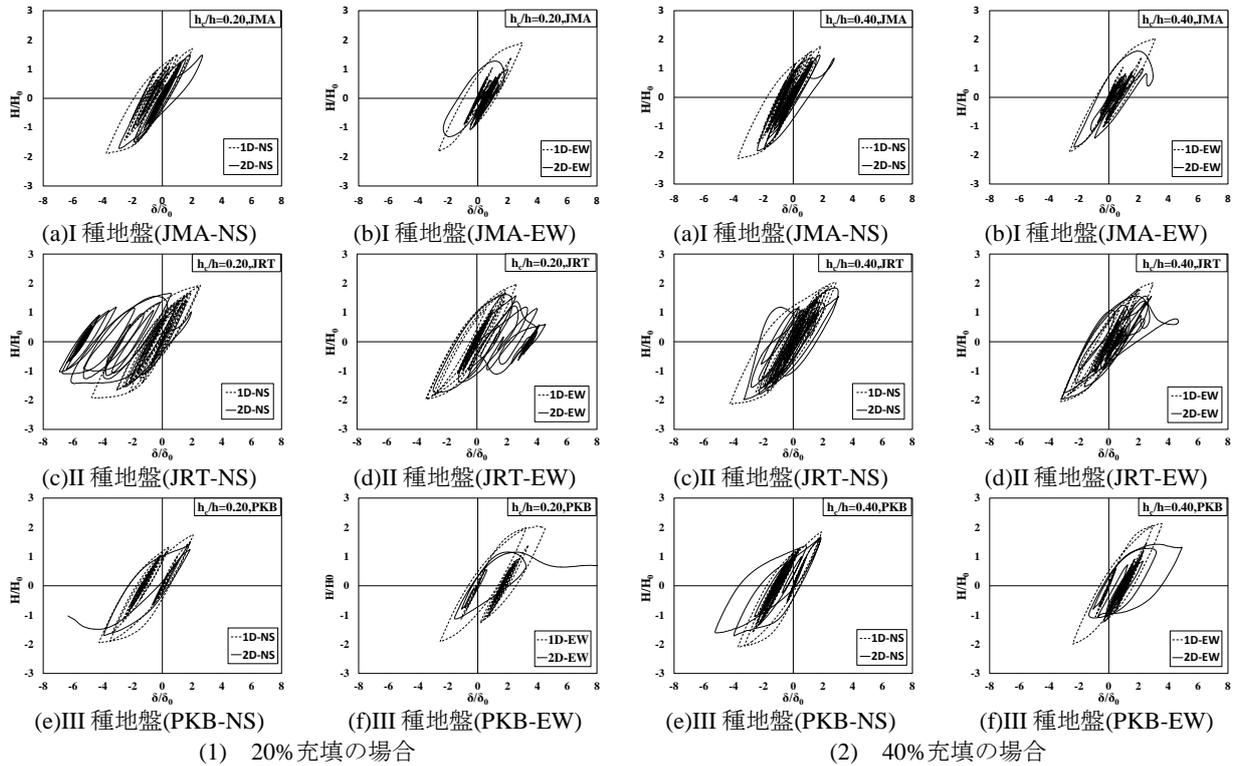


図-10 1方向および2方向荷重の復元力履歴

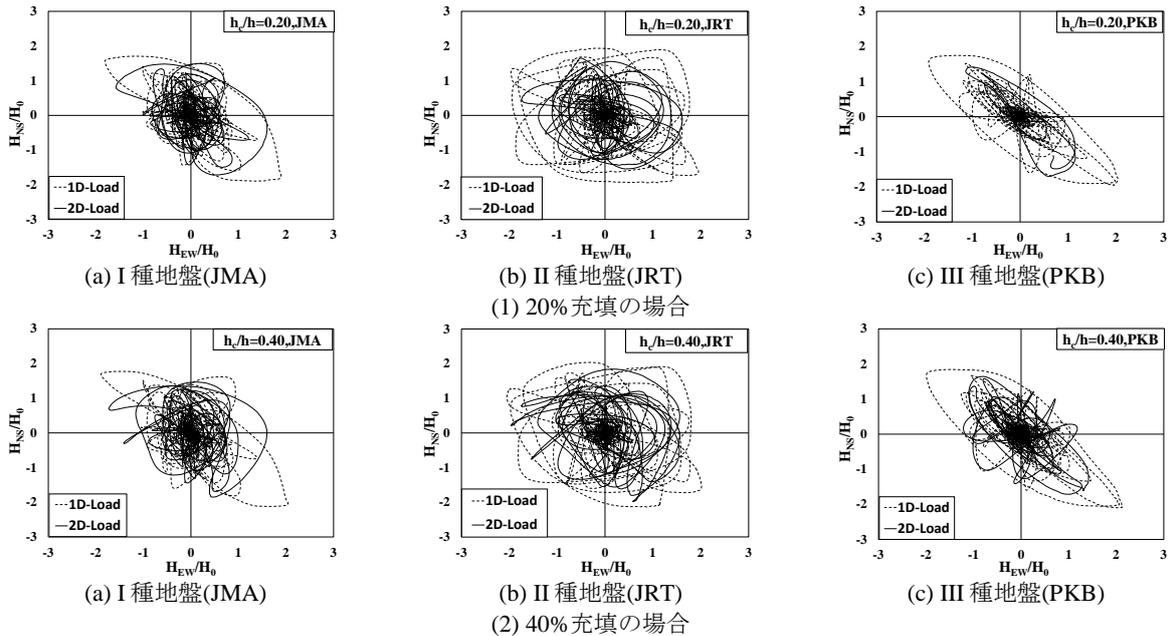


図-11 水平2方向復元力軌跡

荷時の最大荷重を図-12に示し、各値を表-6にまとめる。同図中の破線は、静的繰返し実験で得られた最大荷重 $H_{m,00}$ ($1.78H_0$)、 $H_{m,20}$ ($1.87H_0$)および $H_{m,40}$ ($1.99H_0$)である。ただし、前述のように、すべての1方向ハイブリッド実験では、橋脚の応答反力が橋脚の持つ最大耐力に達していないと思われるため、これらのハイブリッドで得られた最大荷重は、橋脚の最大耐力に達する前の、最大応答反力と見なされる。

図-12に示すように、2方向荷重された橋脚の最大合力は、入力地震波、応答の卓越方向(図-6と図-11参照)とコンクリート充填率あるいは充填の有無

2)-4)に関係なく、1方向荷重の最大荷重とほぼ同じ値を示している。

図-12に示す1方向荷重の最大荷重値 $H_{max,1D}$ および同図の2方向荷重による合力最大値 $H_{max,v,2D}$ は、図中破線で示す静的繰返し実験で得られた値にほぼ等しい。静的繰返し実験では、図-4に示すように、橋脚に漸増的な変位を与えたが、今回のハイブリッド実験で供試体に与えた地震応答は、図-10に示すように、数回の弾性域の繰返しの後、直ちに最大荷重に至るまで上昇していた。静的実験では最大荷重に至るまでの供試体に与える累積損傷が一般にハ

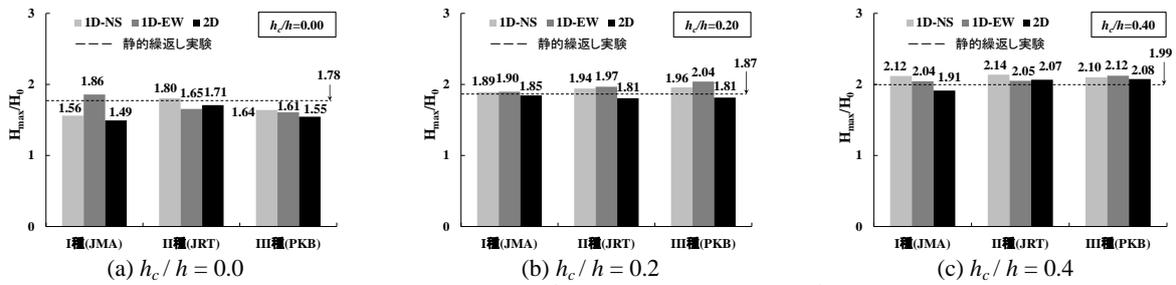


図-12 地盤種別の違いによる最大荷重値の変化

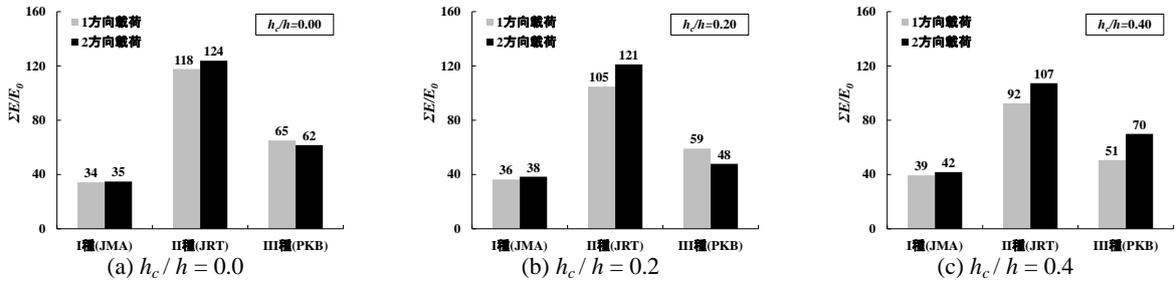


図-13 地盤種別の違いによる橋脚の地震時のエネルギー吸収量の変化

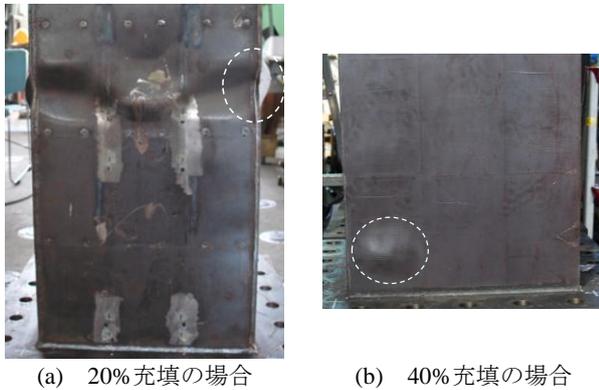


図-14 PKB地震動を受けた橋脚の損傷状況

イブリッド実験より大きいため、静的繰返しの場合の最大荷重は若干小さい荷重となったと思われるが、大差はない。したがって、2方向地震動を受ける場合でも、最大荷重は静的繰返し実験結果から推定できると考えられる。

(4) 累積エネルギー吸収量と損傷状況

各実験で得られた橋脚のエネルギー吸収量(NS方向の結果+EW方向の結果)を入力地震波ごとに図-13に示す。同図に示すように、1方向と2方向載荷の差はあまりなく、地盤種の違いによるバラツキの方が大きい。全体的に見ると、2方向載荷された鋼製橋脚のエネルギー吸収量は、1方向載荷のそれぞれの方向の和より平均約1.2倍大きかった。図-13のIII種地盤でのエネルギー吸収量が小さいのは、エネルギーを十分吸収する前に早期に崩壊したためである。

各実験後に、橋脚基部パネルの損傷状況を観察したところ、コンクリートを40%充填したタイプ1の橋脚供試体の基部では、すべての1方向載荷実験で、パネル外表面に目立っている座屈損傷がほぼ見あらず、水平2方向載荷時では少し損傷が見えますが、最も損傷した橋脚は図-14(b)に示しているIII種地

盤地震動PKBを2方向入力した結果であり、損傷はより軽微の段階にとどまっている。しかし充填不足のタイプ2(20%充填)の橋脚では、同図(a)のようにコンクリート充填面直上に座屈が生じ、実験終了した時の供試体の損傷が著しいものとなった。

(5) コンクリート充填率による変化

以上のように、橋脚基部にコンクリート充填による鋼製橋脚の耐震性能の向上について、従来ではすでに多くの研究で実験および解析的に検討した。ここでは、水平2方向に地震力に作用された場合でも、コンクリート部分的に充填した鋼製橋脚の耐震性能向上について、異なる点があるかないかについて、応答実験結果を用いて検討する。

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、残留変位および最大荷重の比較を図-15、16および17に示す。各図中、NSとEW方向の各1方向載荷実験の結果をそれぞれ○印および△印で、2方向載荷実験の結果を■印で表している。なお、各実験結果の荷重、変位はそれぞれコンクリートを充填しない橋脚の静的繰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。

図-15に示すように、I種地盤を除き、コンクリートを充填することにより最大応答変位を低減させる効果は、1方向載荷時の結果と同様またその以上に見られた。なお、充填率が上昇することと比率に効果の連続的な向上が見られている。特に2方向載荷では無充填時に比べ、コンクリートを橋脚に十分に充填した場合、最大応答変位が各地震波平均的に約38%という顕著な低減があった。

図-16より、残留変位についても、最大応答変位とほぼ同様、コンクリート充填による低減効果が見られ、水平1方向載荷時以上な抑制効果が明らかといえる。

図-17では、コンクリート充填率の違いによる最

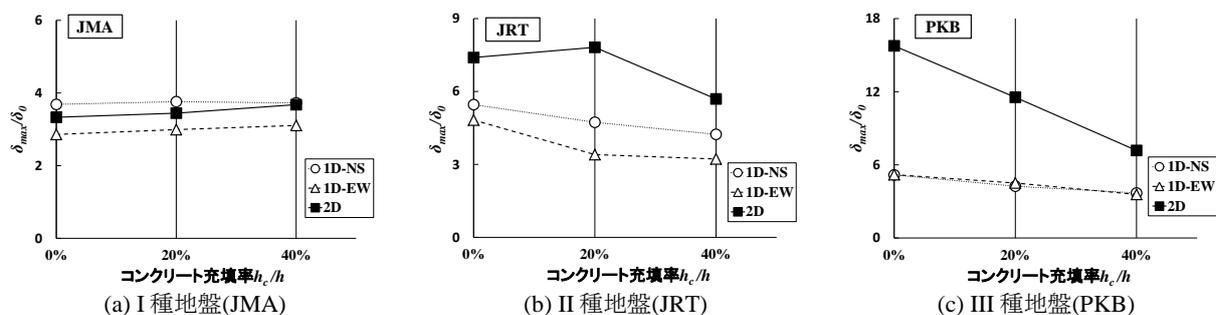


図-15 コンクリート充填率と最大応答変位

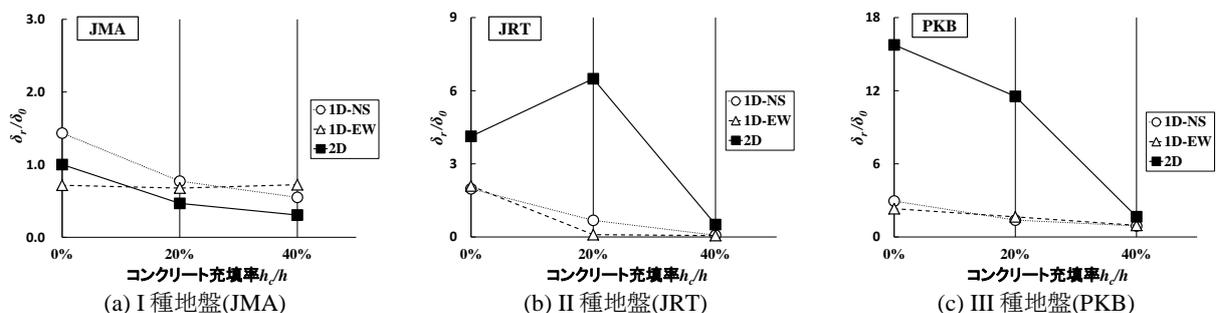


図-16 コンクリート充填率と残留変位

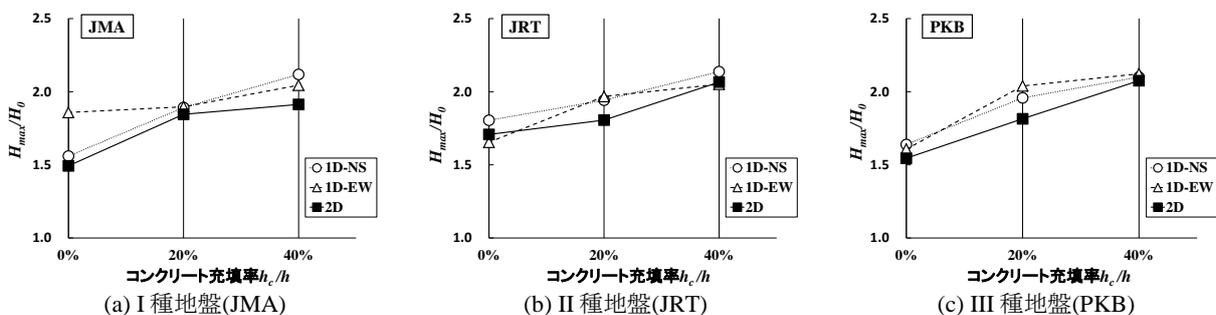


図-17 コンクリート充填率と最大荷重

大荷重の変化を示す。同図より、1方向荷重と2方向荷重ではほぼ同じ値を示し、コンクリートの充填による最大荷重値の上昇の割合は、水平2方向荷重時と同じく見られる。

4. 結論

本研究では、コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚に対して、静的繰り返し実験、3種類の地震波を用いた水平1方向と2方向同時荷重するハイブリッド実験を実施した。これらの実験結果から、以下の知見を得た。

- (1) 水平2方向地震動を受けるコンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚は、水平1方向荷重された場合と比べ、応答変位が大きくなり、オービットが細長く伸びる。ただし、その相違の度合いは地震波の特性によって、大きく影響を受ける。したがって、合理的設計法の確立のためにはできるだけ多くの地震波を用いた検討が必要であると思われる。
- (2) ハイブリッド実験で得られた残留変位の関係を、道式と比較したところ、道式はコン

クリートを十分に充填した鋼製橋脚に対する1方向荷重の場合には実験値の上限値に位置しており、十分安全な推定値となっている。

- (3) 2方向荷重された鋼製橋脚の水平合力はほぼ1方向荷重時の最大荷重を超えない傾向であり、ほぼ等しく、また約5%小さくなっている。よって2方向荷重時の最大荷重は従来の推定式を用いれば良いと言える。
- (4) コンクリートを適切に充填した鋼製橋脚の地震時損傷は、水平2方向荷重によるエネルギー吸収量が少し増やしており、水平1方向荷重より損傷が生じやすくなったが、無充填および充填不足より軽微なものとなっている。
- (5) 本研究で行った水平2方向荷重実験では、道式(6)による十分な高さまで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るため、最大耐力が上昇し、最大応答変位及び残留変位は低減されるなど、従来の1方向荷重実験による結果には大きく変わりなく、またその以上の耐震性能向上の効果が見られている。

謝辞：本研究は平成22年度科学研究費補助金（課題番号 21560508代表 青木徹彦）を使用して行われた。実験に際しては研究室の卒業研究学生、技術員鈴木博氏の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2012年3月。
- 2) 後藤芳顯，江坤生，小畑誠：2方向繰り返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.181-198，2005年1月。
- 3) 青木徹彦，大西哲広，鈴木森晶：水平2方向荷重を受ける正方形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.63，No.4，pp.716-726，2007年10月。
- 4) 後藤芳顯，江坤生，小畑誠：2方向繰り返し荷重を受ける矩形断面鋼製橋脚柱の履歴特性，土木学会論文集，Vol. 63，No. 1，pp. 122-141，2007年2月。
- 5) Watanabe, E., Sugiura, K. and Oyawa, W.O.: Effects of Multi-Directional Displacement Paths on the Cyclic Behaviour of Rectangular Hollow Steel Columns, Journal of Structural Engineering and Earthquake Engineering, pp.29-48, 2005.7.
- 6) 後藤芳顯，小山亮介，藤井雄介，小畑誠：2方向地震動を受ける矩形断面鋼製橋脚の動特性と耐震照査法における限界値，土木学会論文集，Vol. 65，No. 1，pp.61-80，2009年2月。
- 7) 永田和寿，渡辺英一，杉浦邦征：水平2方向に地震力を受ける角形鋼製橋脚の弾塑性応答性状に関する研究，構造工学論文集，Vol.50A，pp.1427-1436，2004年3月。
- 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方向載荷ハイブリッド実験，構造工学論文集，Vol.56A，pp367-380，2010年3月。
- 9) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告—土木建造物の被害，第1章橋梁，丸善，pp47-222，2002年3月。
- 10) 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，Vol.39A，pp.249-262，1993年3月。
- 11) 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能に関する研究，構造工学論文集，Vol.40A，pp.163-176，1994年3月。
- 12) 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年7月。
- 13) 森下益臣，青木徹彦，鈴木森晶：コンクリート充填円形鋼管柱の耐震性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.73-83，2000年3月。
- 14) 才塚邦宏，宇佐美勉，木曾英滋，伊藤義人：コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験，構造工学論文集，Vol.41A，pp277-288，1995年3月。
- 15) 後藤芳顯，G. P. Kumar，川西直樹：充填コンクリートとの相互作用を考慮した円形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動のFEM解析，土木学会論文集，Vol.65 No.2，pp.487-504，2009年5月。
- 16) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル，鹿島出版会，2008年5月。
- 17) 党紀，青木徹彦，五十嵐晃：水平2方向地震動を受ける鋼製橋脚の耐震安全性に関する実験的研究，土木学会論文集 A1，Vol.68(4)，pp.1627-1641，2012年。

(2013. 9. 19受付)

EXPERIMENTAL STUDY FOR SEISMIC PERFORMANCE OF CONCRETE FILLED SQUARE SECTION STEEL BRIDGE PIERS UNDER BI-LATERAL GROUND EXCITATION

Huihui YUAN, Ji DANG, Tetsuhiko AOKI

The performance of concrete partially filled steel bridge piers under bi-directional earthquake conditions is investigated using 20 square-section specimens through cyclic static loading tests and single- and bi-directional hybrid loading tests. Three different acceleration records of Kobe earthquake in 1995 with two horizontal components were subjected to bridge model in hybrid tests. The experimental results clarified that the maximum and residual displacement under actual earthquake conditions cannot be correctly estimated by conventional single-directional loading test results, and the sufficiently filled concrete technique can effectively improve the seismic resistance performance in steel bridge piers during bi-directional earthquake excitation as same as due to those of single directional loading.