

PC橋脚に対して異なる地震波形を入力した場合の応答挙動に関する実験

日本大学 大学院 工修 正会員 ○河野 弘来
 五洋建設(株) 北陸支店 倉川 義弘
 東鉄工業(株) 横浜支店 大熊 英孝
 日本大学 理工学部 工博 正会員 山崎 淳

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋脚(以下、PC橋脚)に対して数種の観測強震波、sine波を入力加速度波とした時刻歴応答解析及び準動的載荷実験を行い、入力波形の違いによる応答挙動の比較を行う。PC橋脚に関する既往の研究として、横浜国立大学の池田教授らにより、PC橋脚は従来の鉄筋コンクリート橋脚(以下、RC橋脚)にない耐震性能を持つことが見出されている。本研究では、同程度の剛性・最大耐力となるように設計したPC橋脚とRC橋脚に対して、同条件下での解析・実験を行い、両者の動的応答挙動の違いについて調べる。

2. 研究の方法

本研究では想定実構造橋脚として、高さ:7m、上部構造重量:W=2000kN、断面寸法:1m×1m(単柱式)のRC橋脚、及び、鉛直方向に4MPaのプレスタスを導入したPC橋脚を対象とした。これを1/10縮小した橋脚供試体を製作し、静的正負交番載荷実験によりその耐荷力・変形性能を調べた。動的応答挙動を調べる際に用いる入力地震波として、最大加速度振幅を1000galに補正した強震記録波形、1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台NS成分(以下、神戸波)、1999年台湾集集地震TCU129EW成分(以下、台湾波)、1940年アメリカ合衆国カリフォルニア州エルセントロ市NS成分(以下、エルセントロ波)及び、最大加速度振幅は200galで、周期成分を構造物の固有周期の損傷に伴う変化に合わせて調整したsine波、の4種の波形を用いた。PC橋脚・RC橋脚に対して、これらの4種の加速度波形を入力した場合の時刻歴応答解析を行った。PC橋脚に対して準動的載荷実験を行い、動的応答挙動を得た。

3. 対象構造物

3-1 1/10縮小供試体

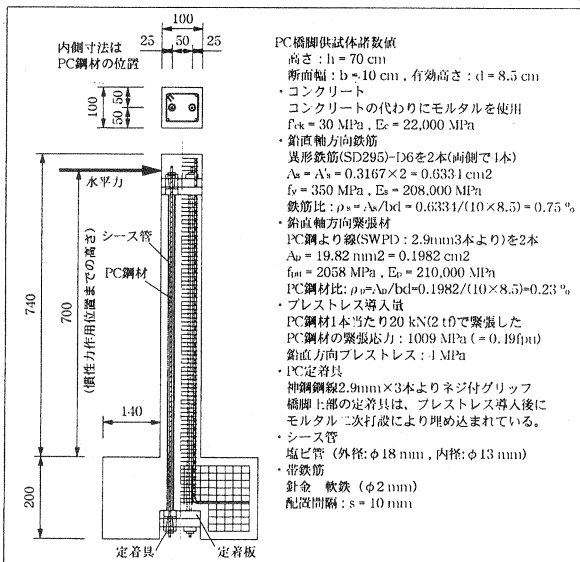


図-1 PC橋脚1/10縮小供試体

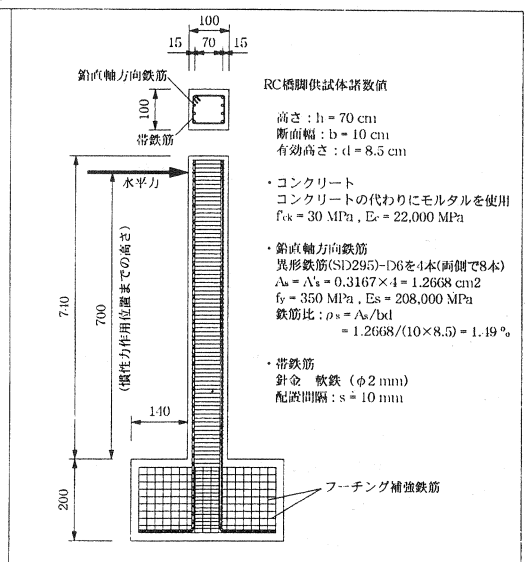


図-2 RC橋脚1/10縮小供試体

PC橋脚1/10縮小供試体の側面図、断面図、配筋、PC鋼材の配置、材料特性を図-1に示す。RC橋脚1/10縮小供試体について図-2に示す。供試体の製作において、本研究ではコンクリートの代わりに、モルタルを使用している。モルタルを使用する根拠は、(1)主鉄筋・帯鉄筋間隔が狭いこと、(2)実験工程短縮のため7日強度で $f_{ck}=30$ MPa程度とするため。供試体製作から実験までの工程は、RC橋脚の場合、モルタル打設以後、養生約1週間後に実験を行った。PC橋脚の場合、モルタル打設から約1週間後にプレストレス導入、続いて橋脚頂部に対する二次打設を行い、その約1週間後に実験を行った。プレストレスの導入は、独自の「プレストレス導入装置」により、2本のPC鋼材を同時に緊張し、所定のプレストレスを導入した。シース管には市販の塩ビ管を用いた。PC鋼材に対するグラウトは無しとした。プレストレス量・グラウトの有無については、プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン[1]を参考にして、PC橋脚特有の原点復元性が多く発揮されるよう考慮して決めた。供試体のフーチングに対しては、主鉄筋の引き抜け、及び、PC鋼材緊張時にフーチングに作用するせん断力に抵抗するため、水平方向に異形鉄筋(D6)、鉛直方向に帯鉄筋と同じ針金を、配置間隔:20mmで格子状に配置した。

3-2 縮小供試体に対する静的正負交番荷重実験

縮小供試体に対して、図-10に示す静的水平荷重試験台を用いて、静的正負交番荷重実験を行った。実験で得られた荷重～変位関係（履歴ループ）を、PC橋脚について図-3に、RC橋脚について図-4に示す。本研究では上部構造による鉛直軸力を作用させていない。橋脚基部に対して曲げとせん断が作用した場合の結果である。本研究での橋脚の破壊判定基準は、静的正負交番荷重実験における、最大耐力に到達したサイクルの最大変位とした。

(PC橋脚の場合： $\delta_{max} = 7\delta_y = 70$ mm、RC橋脚の場合： $\delta_{max} = 6\delta_y = 66$ mm)

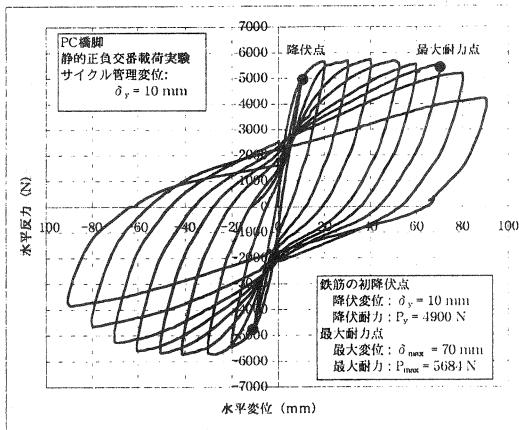


図-3 PC橋脚供試体の履歴ループ

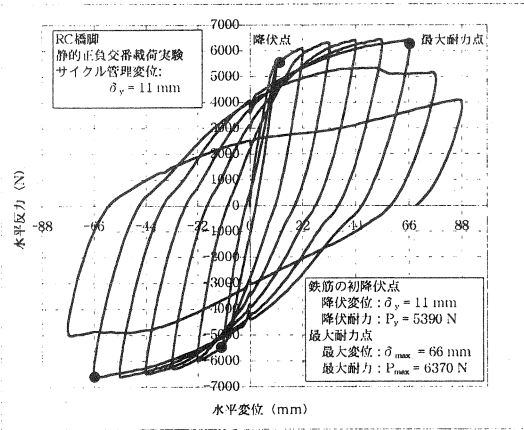


図-4 RC橋脚供試体の履歴ループ

3-3 履歴ループモデル

静的正負交番荷重実験の結果から、時刻歴応答解析に用いる履歴ループモデルを図-5に示すように定義した。PC橋脚とRC橋脚の残留変位を計算するために、「残留変位率」を設定した。この残留変位率を静的正負交番荷重実験結果より計算する。PC橋脚における残留変位率は、応答変位が $3\delta_y$ 程度の時には0.6、破壊に近い $7\delta_y$ 付近では0.7とした。PC橋脚の残留変位率は鉄筋量に対するPC鋼材量の割合、導入プレストレス量等により変化すると考える。(A_p/A_sが増、もしくは、P/Sが増ならば、残留変位率は減) 一方、RC橋脚の残留変位率は0.84であり、これは鉄筋量が変化した場合でもほぼ一定である。(鉄筋比： $\rho_s = 0.75\%$ 、 1.0% 、 1.49% の場合について確認した。)

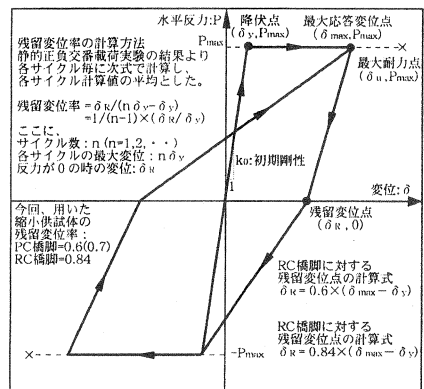


図-5 履歴ループモデル

3-4 想定実構造物と縮小供試体の対応

想定実構造物と縮小供試体の相似則、及び、準動的載荷実験特有の実験条件の設定における考慮を表-1に示す。本研究では縮小供試体における応力状態が想定実構造物と同じになるように縮小率を設定した。(上部構造重量: W は $1/n^2$ 、入力波の振幅: z'' は 1 、入力波の周期は $1/\sqrt{10}$) 表-1中の矢印は各項目の数値を決めた時の順序を示している。外形寸法等は、想定実構造物の値を決めてから、供試体の寸法を縮小率により計算した。鉄筋量等は、縮小供試体の設計をした値から、想定実構造物の値を計算した。想定実構造物の最大耐力・変形能力は、縮小供試体に対する静的正負交番載荷実験結果に縮小率を乗じて計算した値を用いる。

慣性力による曲げ応力の一連の計算過程において、想定実構造物と縮小供試体の相似則を簡便に説明する為に、慣性力算出式を仮定したり(※2)、数値例を与えて(入力波の振幅・周期)示している。

3-5 想定実構造物に対する示方書による照査

平成8年道路橋示方書V耐震設計編の震度法と地震時保有水平耐力法、昭和61年コンクリート標準示方書による耐震設計の方法により、水平耐力について照査する。想定実構造物の水平耐力は示方書記載の手法によらず、表-1の値を用いる。

道示による耐震設計で用いる固有周期には橋脚の重量: W_p

表-1 想定実構造物と1/10縮小供試体の対応

		実構造物		縮小供試体	縮小率(n=10)
上部構造重量: W		1960 kN (200 tf)	→	19.6 kN (2 tf)	$1/100=1/n^2$
橋脚高さ: H		7 m	→	70 cm	$1/10=1/n$
断面幅: b		1 m	→	10 cm	$1/10=1/n$
断面高さ: h		1 m	→	10 cm	$1/10=1/n$
有効高さ: d		0.85 m	→	8.5 cm	$1/10=1/n$
鉄筋量: A_s	PC橋脚	63.34 cm ²	←	0.6334 cm ²	$1/100=1/n^2$
	RC橋脚	126.68 cm ²	←	1.2668 cm ²	$1/100=1/n^2$
鉄筋比: ρ_s	PC橋脚	0.75%	←	0.75%	1
	RC橋脚	1.49%	←	1.49%	1
鉄筋の強度: f_y		350 MPa	←	350 MPa	1
PC鋼材量: A_p		1982 mm ²	←	19.82 mm ²	$1/100=1/n^2$
PC鋼材比: ρ_p		0.23%	←	0.23%	1
橋脚断面積: $A = b \times h$		1 m ²	→	100 cm ²	$1/100=1/n^2$
断面係数: $Z = bh^2/6$		0.167 m ³	→	167 cm ³	$1/1000=1/n^3$
上部構造重量の軸応力: W/A		2.0 MPa	→	2.0 MPa	1
鉛直軸方向プレストレス		4.0 MPa	→	4.0 MPa	1
PC橋脚縮小供試体の静的正負交番載荷試験の結果(軸力無し: $W = 0$ kN)					
鉄筋初降伏時	変位: δ_y	10 cm	←	10 mm	$1/10=1/n$
	荷重: P_y	490 kN (50 tf)	←	4900 N (500 kgf)	$1/100=1/n^2$
最大耐力時	変位: δ_{max} (= $7 \delta_y$)	70 cm	←	70 mm (= $7 \delta_y$)	$1/10=1/n$
	荷重: P_{max}	568 kN (58 tf)	←	5684 N (580 kgf)	$1/100=1/n^2$
剛性(降伏時): $k = P_y / \delta_y$		49 kN/cm (5 tf/cm)	←	490 N/mm (50 kgf/mm)	$1/10=1/n$
固有周期: $T = 2\pi \sqrt{m/k}$		1.27 sec	←	0.40 sec	$1/\sqrt{10}=1/\sqrt{n}$
RC橋脚縮小供試体の静的正負交番載荷試験の結果(軸力無し: $W = 0$ kN)					
鉄筋初降伏時	変位: δ_y	11 cm	←	11 mm	$1/10=1/n$
	荷重: P_y	539 kN (55 tf)	←	5390 N (550 kgf)	$1/100=1/n^2$
最大耐力時	変位: δ_{max} (= $6 \delta_y$)	66 cm	←	66 mm (= $6 \delta_y$)	$1/10=1/n$
	荷重: P_{max}	637 kN (65 tf)	←	6370 N (650 kgf)	$1/100=1/n^2$
剛性(降伏時): $k = P_y / \delta_y$		49 kN/cm (5 tf/cm)	←	490 N/mm (50 kgf/mm)	$1/10=1/n$
固有周期: $T = 2\pi \sqrt{m/k}$		1.27 sec	←	0.40 sec	$1/\sqrt{10}=1/\sqrt{n}$
上部構造質量: $m = W/g$ (※1)		20.4 ton	→	0.204 ton	$1/100=1/n^2$
入力波振幅: z''		200 gal (2.0 m/sec ²)	→	200 gal (2.0 m/sec ²)	1
慣性力: $P_A \approx m \times z''$ (※2)		400 kN (40.8 tf)	→	400 N (408 kgf)	$1/100=1/n^2$
慣性力によるモーメント $M_A = P_A \times H$		2800 kN-m (286 tf-m)	→	280 kN-cm (28.6 tf-cm)	$1/10000=1/n^4$
M_A による曲げ応力 $\sigma = M_A/Z$		17 MPa (171 kgf/cm ²)	→	17 MPa (171 kgf/cm ²)	1
入力波周期: 固有周期の相似比		(例) 1.5 sec	→	0.474 sec	$1/\sqrt{10}=1/\sqrt{n}$

(※1) 重力加速度: $g = 9.8$ m/sec²

(※2) 実際には $P_A = m \times (x'' + z'')$ であるが、このように仮定した。

を考慮するので、その場合の固有周期は $T = 1.29$ sec である。照査した結果を表-2に示す。保耐法(タイプII)の場合に、PC橋脚・RC橋脚ともに照査の判定が不可となった。

表-2 耐震設計規準による水平耐力の照査

縮小供試体の実験結果数値を相似率に従って変換し想定実構造物の値とした	PC橋脚		RC橋脚		
	水平耐力	判定	水平耐力	判定	
静的正負交番載荷実験結果	降伏点	490 kN (50 tf)	-	539 kN (55 tf)	-
	最大耐力点	568 kN (58 tf)	-	637 kN (65 tf)	-
S61年RC示(被災の程度:健全維持・ $1\delta_v$)		431 kN (44 tf)	○	431 kN (44 tf)	○
H8年道示V耐震設計編	震度法	362 kN (36.9 tf)	○	362 kN (36.9 tf)	○
	保耐法(タイプII)	652 kN (66.5 tf)	×	713 kN (72.3 tf)	×

設定した設計条件(地盤種別:1種、地域区分:A、重要度の区分:B種)

4. 時刻歴応答解析

4-1 入力地震波

想定実構造物に対する時刻歴応答解析、及び、縮小供試体に対する準動的載荷実験に用いた入力加速度地震波形を図-6~9に示す。入力波の振幅については、強震記録において台湾波の最大加速度振幅が986galであることから、割増して1000galとし、各波形の加速度振幅を最大振幅が1000galとなるように調整した。

sine波形については、構造物の損傷→剛性低下→固有周期の伸長に対して、2波長毎にsine波の周期をその時点における構造物の固有周期に合わせる方法で設定した。PC橋脚の場合、強制振動を開始させる1波目は、応答が弾性範囲に収まるよう、100gal,0.79secを2波長入力する。2波目は、想定実構造物の固有周期に合致した、200gal,1.18secを2波長入力する。2波目終了時における最大応答変位が23.7cmよりこの時点での固有周期を計算すると1.82sec。これを3波目の周期とする。3波目:200gal,1.82secを2波長入力。3波目終了時点の最大応答変位は42.9cmより4波目は2.44secと決まる。(以後、同) 2波長ずつ入力する根拠は共振現象による応答増幅を見るため。各波形の尻には、自由振動による収束をさせるための振幅0の区間を付加した。

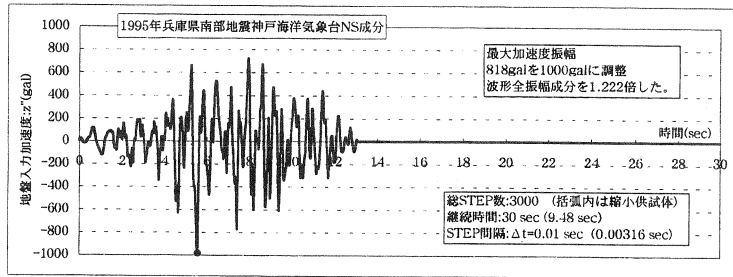


図-6 神戸波

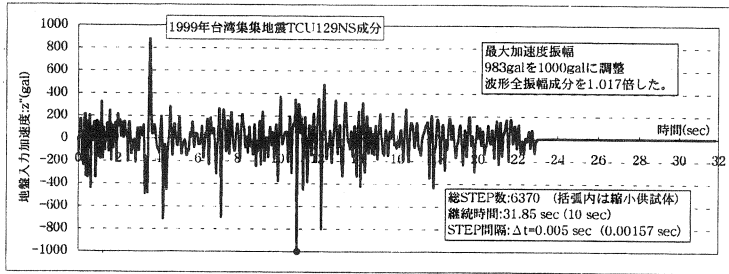


図-7 台湾波

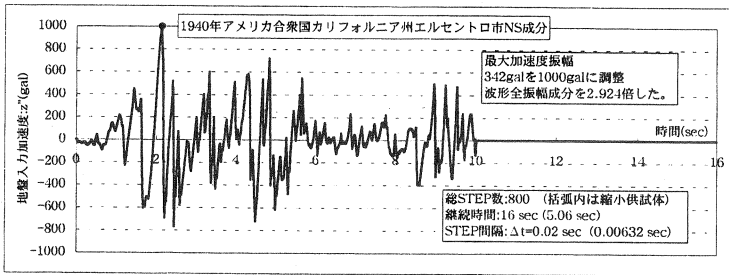


図-8 エルセントロ波

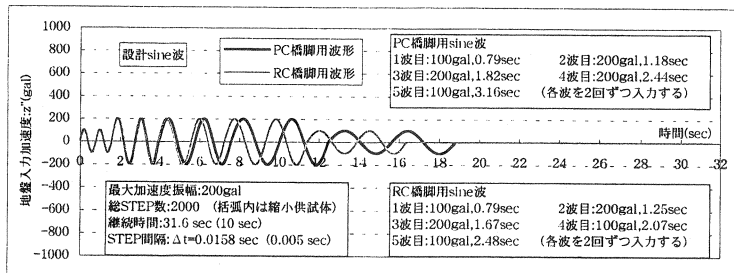


図-9 sine波

4-2 時刻歴応答解析の結果

想定実構造物の各入力波形に対する時刻歴応答解析結果を、PC橋脚については表-3に、RC橋脚については表-4に示す。阪神波とsine波の応答波形について、準動的載荷実験結果と合わせて、図-12~17に示す。強震記録3波の中でPC橋脚・RC橋脚とも最大の応答変位が生じたのは神戸波であったが、破壊には至らなかった。PC橋脚-sine波では最大応答変位(74.9cm)が変形性能 $7\delta_y=70\text{cm}$ を超えたので破壊と判定する。RC橋脚-sine波では破壊しない。 $(x''_{\text{max}}=46.6\text{cm} \leq 6\delta_y=66\text{cm})$

表-3 PC橋脚の応答解析結果

PC橋脚	応答変位 最大値(x_{max})	応答変位 最小値(x_{min})	応答加速度 最大値($ z'' _{\text{max}}$)	残留変位 (δ_R)
神戸波	27.2 cm	-37.4 cm	1140 gal	-2.0 cm
台湾波	24.4 cm	-10.2 cm	1112 gal	3.4 cm
札幌波	33.5 cm	-21.0 cm	1267 gal	5.0 cm
sine波	75.6 cm	-74.9 cm	525 gal	4.5 cm

表-4 RC橋脚の応答解析結果

RC橋脚	応答変位 最大値(x_{max})	応答変位 最小値(x_{min})	応答加速度 最大値($ z'' _{\text{max}}$)	残留変位 (δ_R)
神戸波	17.7 cm	-37.6 cm	1202 gal	-8.3 cm
台湾波	23.3 cm	-9.8 cm	1068 gal	5.5 cm
札幌波	33.6 cm	-13.7 cm	1278 gal	6.8 cm
sine波	49.4 cm	-49.6 cm	501 gal	3.2 cm

5. 準動的載荷実験

5-1 準動的載荷実験の方法

準動的載荷実験は、別名で仮動的、疑似動的、pseudo-dynamic、on-line、hybridなど研究者によっていろいろな名称で呼ばれる。水平荷重を静的に与えるが、図-11に示す計算・載荷・測定の流れによって実験を行うことにより、供試体に発生する相対的な応答挙動を得る実験方法である。本研究では図-10に示す準動的載荷実験システムにより実験をおこなった。この実験装置には上部構造重量を作用させる仕組みが無いので、実験における上部構造重量は仮想とした。準動的載荷実験は、PC橋脚に対する入力波を神戸波とsine波の2case実施した。(今後、供試体に上部構造重量を作用させる載荷機構を組み込み、実験を行う予定である。)

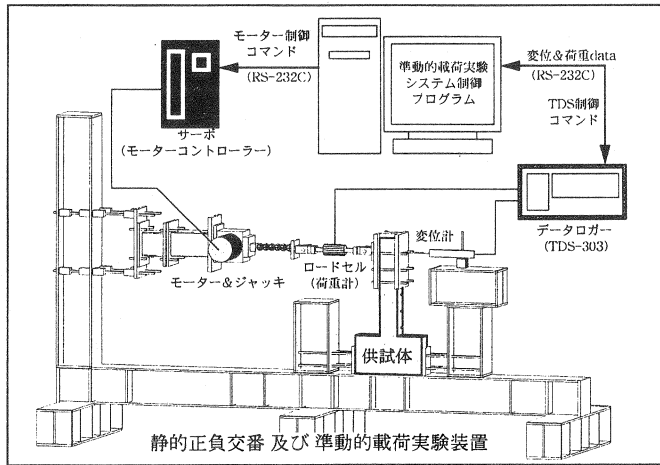


図-10 準動的載荷実験システム構成

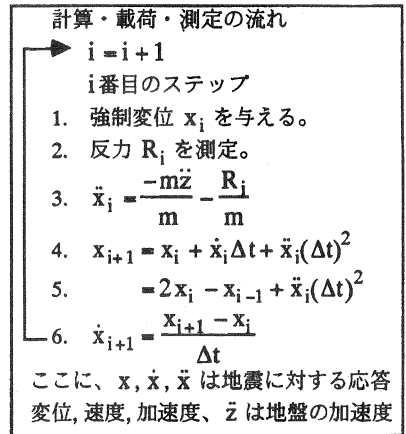


図-11 準動的載荷実験の計算・載荷・測定の流れ

5-2 準動的載荷実験結果

縮小供試体に対して実施した準動的載荷実験結果について、結果のまとめを表-5に、履歴ループと応答波形を図-12~17に示す。準動的載荷実験値に対する時刻歴応答解析の応答変位及び応答加速度の精度は約10%以内で大きめに出る傾向がある。

表-5 PC橋脚縮小供試体の準動的載荷実験結果

		応答変位 最大値(x_{max})	応答変位 最小値(x_{min})	応答加速度 最大値($ z'' _{\text{max}}$)	残留変位 (δ_R)
神戸波	準動的実験値	27.6 mm	-34.5 mm	1088 gal	0.7 mm
	応答解析値	27.2 mm	-37.4 mm	1140 gal	-2.0 mm
	解析値/実験値	99%	108%	105%	-286%
sine波	準動的実験値	67.6 mm	-72.4 mm	492 gal	-
	応答解析値	75.6 mm	-74.9 mm	525 gal	4.5 mm
	解析値/実験値	112%	103%	107%	-

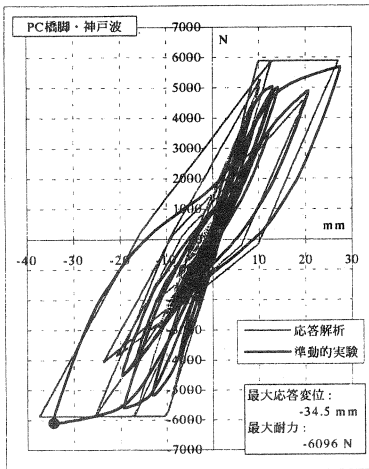


図-12 荷重～変位関係

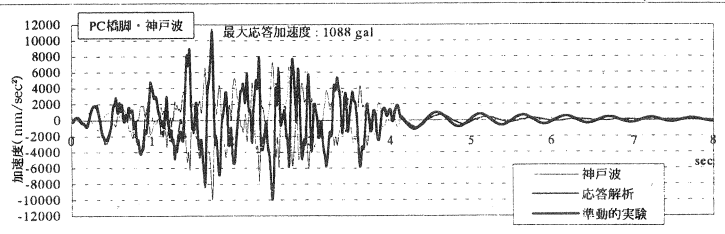


図-13 応答加速度波形 (PC橋脚・阪神波)

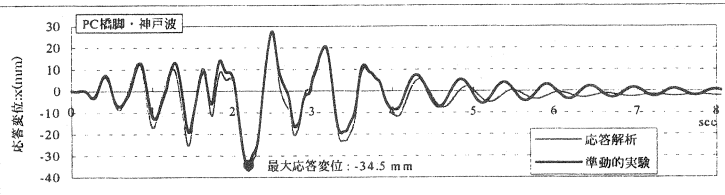


図-14 応答変位波形 (PC橋脚・阪神波)

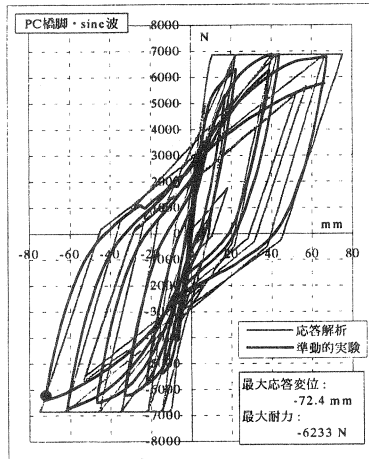


図-15 荷重～変位関係

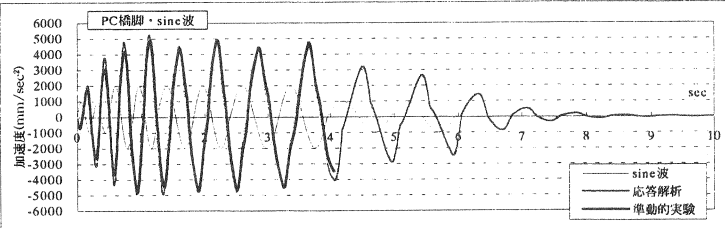


図-16 応答加速度波形 (PC橋脚・sine波)

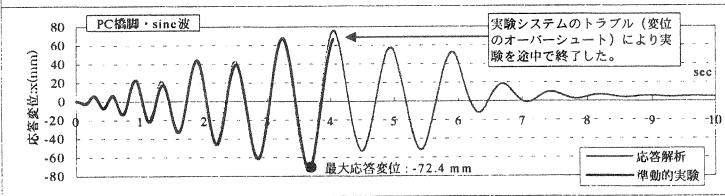


図-17 応答変位波形 (PC橋脚・sine波)

6. 結論

- ・ W=2000kN、高さ7m、1m×1m断面、単柱式PC橋脚(プレストレスト:4 MPa)とRC橋脚に対して、最大振幅を1000galに調整した神戸波、台湾波、エルセントロ波を入力し応答解析を行った結果、PC橋脚・RC橋脚ともに破壊しなかった。
- ・ 最大振幅が200galで周期を調整したsine波を入力した場合、PC橋脚は破壊に到ることが応答解析により得られ、縮小供試体に対する準動的載荷実験の結果から、PC橋脚が破壊(耐力低下)に至ることが確認できた。
- ・ 残留変位率を用いた履歴ループモデルによる時刻歴応答解析による準動的載荷実験に対する精度は約10%だった。

謝辞

PC鋼線及び定着具は、神鋼鋼線工業株式会社に寄贈頂いた。実験研究費の一部は、株式会社エスイーの委託研究費によった。関係者各位に厚く御礼申し上げます。また、本研究は、第二著者 倉川 及び 第三著者 大熊が、日本大学理工学部土木工学科に在学中に実施した実験研究に基づいている。

参考文献

- [1] (社)プレストレストコンクリート技術協会：プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン、平成11年11月
- [2] (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、平成8年12月
- [3] (社)土木学会：昭和61年制定 コンクリート標準示方書 設計編、昭和61年