

プレキャストプレストレスト橋脚の耐震性に関する実験的研究 (その2)

長岡技術科学大学 環境・建設系 正会員 丸山 久一

俵福田組 建設本部 技術部

○ 小泉 善弘

同 上

正会員 関塚 真

同 上

柳 益夫

1. はじめに

コンクリート橋脚は平成7年兵庫県南部地震で被災し、大きな慣性力を受ける曲げ部材であることが再認識された。高い耐力や優れた力学的復元性を持つPC構造の優位性が着目され、研究成果¹⁾が得られている。また、土木構造物の課題として生産性や耐久性の向上があり、その解決手段にプレキャスト化がある。

これらの利点を併せ持つプレキャストプレストレスト橋脚 (以下、プレキャストPC橋脚と記す) の耐震性能評価方法を明らかにし、その構造および設計方法の確立を行うことが本研究の目的である。前稿²⁾では供試体実験を行い基本的な耐震特性を把握し、「構造物としての妥当性と実現性がある」ことを報告している。

本稿では①供試体の実験結果、②実験で得られた荷重-変位履歴曲線を基に設定した復元力特性モデル、③このモデルを用いた非線形動的応答計算の結果を示し、プレキャストPC橋脚の耐震性について報告する。

2. 供試体実験

2.1 目的

実験の目的は、プレキャストPC構造の基本的な強度・変形特性を確認することである。実験結果に基づき復元力特性モデルを設定する。基本的な特性としては①荷重-変位包絡線、②荷重-変位履歴曲線、③限界耐力と変位、の3点である。

2.2 想定橋脚と供試体の製作

供試体は道路橋の橋脚を想定したものである。

表-1に緒元一覧、図-1に形状を示す。鉄筋コンクリート構造 (以下、RCと略称) 1体、柱脚をPC鋼材のみでフーチングと結合した構造 (以下、PCと略称) 4体の計5体である。PC4体は、使用鋼材の材質・量を統一し、グラウト・プレストレスの有無、プレキャスト/一体打ち、の組み合わせを変えてある。

RCは、道路橋示方書で設計されたある橋脚を縮小したもので、PC4体の寸法はこれと同一にした。耐震設計上の地盤種別はI種である。構造寸法の縮尺Sは1/10で、中空断面である。一体PCについて構造計算を実施し、柱基部での軸方向プレストレスを震度法レベルに対してフルプレストレスとなるように決定し、道路橋示方書・同解説Ⅲに基づき地震時保有水平耐力を照査している。水平方向プレストレスは、実験パラメー

表-1 供試体緒元一覧

供試体名	鉄筋 コンクリート	プレキャスト PC	アンボンド PC	一体PC	プレストレス PC
コンクリート圧縮強度(MPa)	27.7	51.8	57.1	61.6	51.3
ジャッキによる軸力	400kN (柱脚での鉛直応力 2.25MPa)				
軸方向鉄筋比 (%)	1.67	—	—	—	—
帯筋比 (%)	0.88	—	—	—	—
軸方向PC鋼材比 (%)	—	0.56	0.56	0.56	0.56
水平方向PC鋼材比 (%)	—	0.96	0.96	0.96	0.96
軸方向プレストレス(MPa)	—	5.59	5.59	5.59	0.00
水平方向プレストレス(MPa)	—	2.80	2.80	2.80	2.80
軸方向PC鋼材のグラウト	—	有り	無し	有り	有り
プレキャスト/一体打ち	RC 一体打ち	プレキャスト	プレキャスト	PC 一体打ち	PC 一体打ち
略記号	RC	PCa	UB	PC	OPC

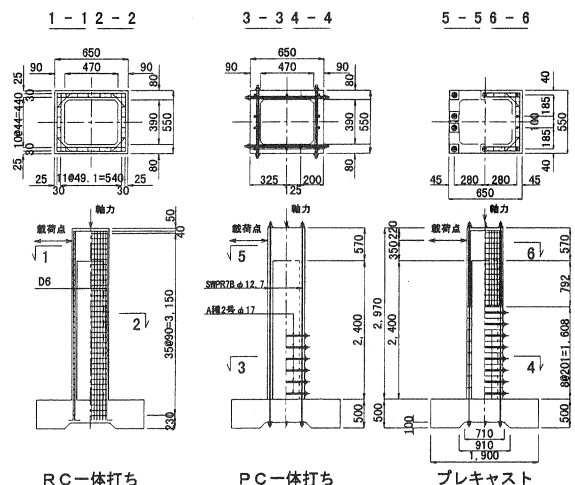


図-1 供試体形状

ターになると考えられるが、本実験では軸方向値の1/2とした。プレキャスト構造の供試体は一体PCを水平・鉛直の2方向に分割製作し、エポキシ樹脂とPC鋼材の緊張により一体化したものである。

2.3 実験方法

鉛直に供試体を設置し、図-1で荷重点と示した位置にアクチュエーターを用いて水平荷重した。最初に荷重制御で正負のひび割れを確認し、続けて $\pm H/200$ (H: 載荷スパン 2750mm)の整数倍で変位制御荷重した(図-2参照)。最大荷重を確認した後、荷重ステップでの荷重が最大荷重の8割まで低下した時点を終局とし、実験終了とした。反力フレームに設置した加力ジャッキにより柱頂面に一定軸力を与えている。

測定項目は、①軸力および水平荷重、②供試体水平・鉛直変位、③鋼材ひずみ、④プレキャストセグメント継目の開口変位である。ひびわれ・破壊状況を観察記録した。

2.4 実験結果

図-3に各供試体の荷重-変位履歴曲線を示す。表-2に実験結果一覧を示す。降伏点Yは図-4に示すように骨格曲線をトリリニア型とした部材降伏点である。図-8、9に累積吸収エネルギーと残留変位を後述する復元力モデルでの値と一緒に示す。供試体実験から以下のようなことが確認された。

- ①PCはRCと比べ、残留変位が小さく原点指向性の強い履歴曲線を示す。靱性やエネルギー吸収能が小さい。
- ②プレキャストPCは一体PCと比べ、コンクリートの損傷が少なく強度・変形性能で優れ、剛性低下もない。
- ③アンボンドPCはプレキャストPCと比べ、鋼材のひずみ増加が小さく一体PCと同じS字型の履歴を示す。強度も小さく、低下傾向を確認しない時点で基部コンクリートが損壊し、残留変位が大きくなった。
- ④プレストレス $\bar{0}$ は鋼材が柱基部で伸びだしが大きくなりスリップ型の剛体変形挙動が顕著になる(荷重点変位は計器治具が緩み不正確。柱基部から65cm上方の変位計測値との比較で履歴の定性的な一致を確認)。
- ⑤プレストレス $\bar{0}$ を除くPC供試体で、エネルギー吸収能・残留変位に差はない。強度・変形性能は変わる。

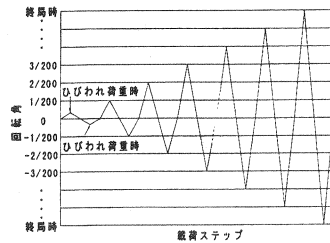


図-2 荷重載荷ステップ

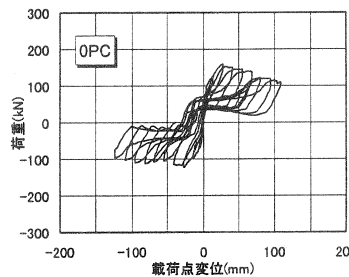
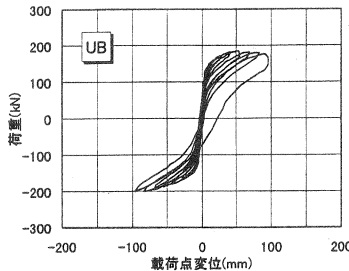


図-3 供試体実験での荷重-変位曲線

表-2 実験結果一覧

	ひび割れ点 C		降伏点 Y		終局点 U		靱性率 $\delta u / \delta y$
	荷重 P_c (kN)	変位 δ_c (mm)	荷重 P_y (kN)	変位 δ_y (mm)	荷重 P_u (kN)	変位 δ_u (mm)	
鉄筋	84.7	2.96	202.9	15.14	160.0	96.4	
コンクリート	-78.7	-2.84	-197.6	-15.91	-194.5	-107.5	
プレキャスト	150.3	6.11	264.3	32.86	206.3	152.8	4.7
PC	-119.5	-4.62	-248.7	-30.36			
アンボンド	104.8	3.43	182.5	27.00	166.4	96.4	3.6
PC	-109.0	-3.57	-200.7	-40.50			
一体 PC	127.6	4.41	258.3	30.79	203.8	61.2	2.0
	-141.8	-5.13	-238.6	-28.55			
プレストレス 筋 PC	80.0	(-)	166.6	(-)	106.7	(-)	(-)
	-68.9	(-)	-123.6	(-)			

上段/下段: 正側載荷時/負側載荷時。(): 正確な値を得られず記載できない。

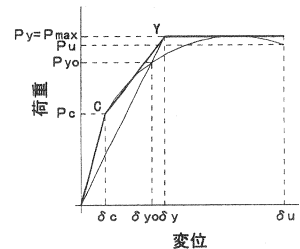


図-4 骨格曲線

3. 復元力特性のモデル

実験で得られた履歴特性を表現できる復元力特性モデルを次のように作成し、その検証を行なった。載荷点変位が正確に得られなかったプレストレス0供試体を除き、4供試体についてモデルを検討した。骨格曲線とその値は図-4および表-2を用いた。

3.1 モデル化の方法

鈴木ら³⁾はPC橋脚の地震時応答を求めるため、剛性低下型トリリニアモデル(武田モデル)を基本として、PC鋼材と鉄筋の耐力分担率を用いた復元力特性モデルを提案している(「PRC復元力モデル」と呼ぶ、図-5および式3.1~3.5)。

$$\gamma = \frac{M_{pu}}{M_{pu} + M_{su}} \leq 0.8 \quad (\text{式 3.1})$$

ここに、 γ : PC鋼材耐力分担率,
 M_{pu} : PC鋼材が負担する曲げ耐力,
 M_{su} : 鉄筋が負担する曲げ耐力

$$K_y = \frac{P_c + P_{y0}}{\delta_c + \delta_{y0}} \left(\frac{\delta_m}{\delta_{y0}} \right)^{-\alpha} \quad (\text{式 3.2})$$

$$P_d = \gamma \cdot P_m \quad (\text{式 3.3})$$

$$\delta_d = \delta_m + \frac{P_d - P_m}{K_y} \quad (\text{式 3.4})$$

$$\delta_y = (1 - \gamma) \left(\delta_m - \frac{P_m}{K_y} \right) \quad (\text{式 3.5})$$

ここに、P: 復元力、 δ : 変位、
 K_r : 除荷剛性、
 α : 剛性低下率=0.4。
 添え字 c, y0, m, d はそれぞれ
 ひびわれ時、鉄筋降伏時、最大
 応答時、第1除荷点。
 δ_r : 残留変位

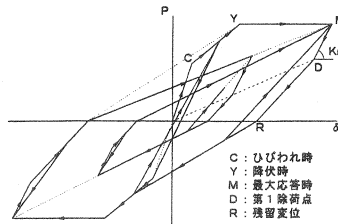


図-5 PRC復元力モデル

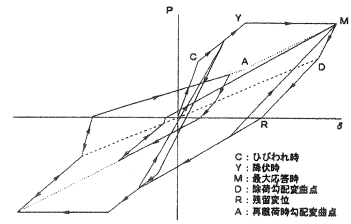
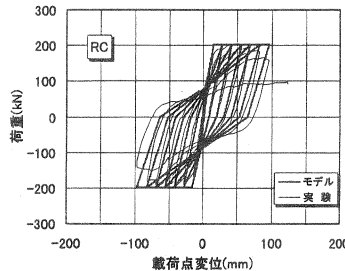


図-6 プレキャストPC復元力モデル

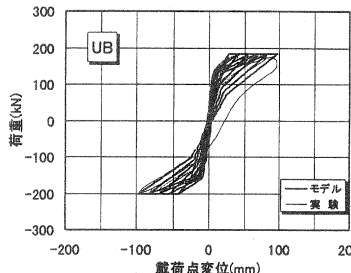
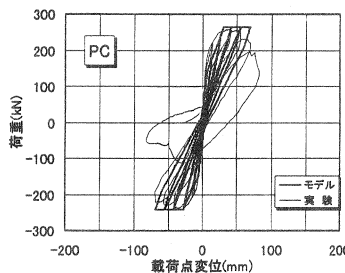
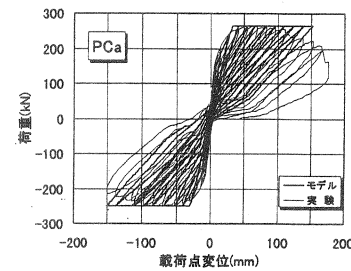
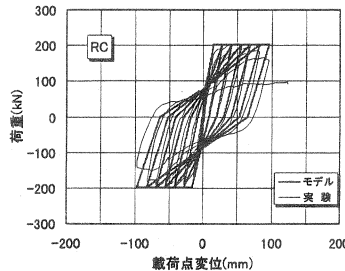


図-7 荷重-変位曲線比較

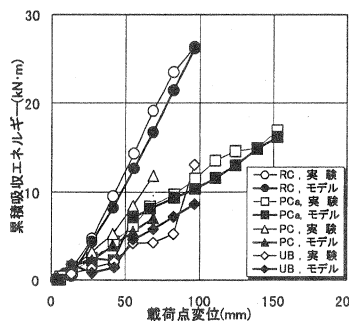


図-8 累積吸収エネルギー比較

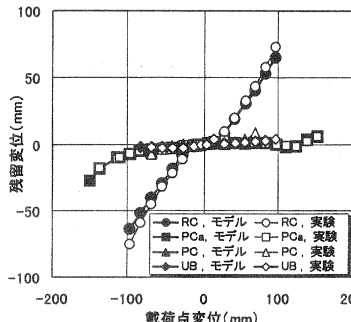


図-9 残留変位比較

「PRC復元力モデル」で計算し

た履歴曲線を実験値と比較すると、RCは紡錘型の履歴を、一体PCでは原点指向性の強い履歴挙動を再現できるのに対し、プレキャストPCでは荷重0付近で急激に原点指向する変化点を表現できない。

そこで、プレキャスト形式の2供試体の履歴モデルを図-6に示す「プレキャストPC復元力モデル」とし、変化点A, D, Rの値は実験結果を抽出し最小二乗処理した一次式(式3.6, 3.7)で計算する。

$$\frac{\delta_i}{\delta_{\max}} = a_i \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} + b_i \quad (\text{式 3.6}), \quad \frac{P_i}{P_{\max}} = c_i \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} + d_i \quad (\text{式 3.7})$$

ここに、 δ_i , P_i : 変化点の変位および荷重, a_i , b_i , c_i , d_i : 係数および定数
 δ_y , $\delta_{\max}$, $P_{\max}$: 降伏点変位, 既往最大変位および既往最大荷重

3.2 モデルの検証

鉄筋コンクリートおよび一体PC供試体に「PRC復元力モデル」、プレキャストPCおよびアンボンドPC供試体に「プレキャストPC復元力モデル」を適用し、実験結果と比較をしこれらのモデルの妥当性を検証する。図-7~9に荷重-変位曲線、累積吸収エネルギーおよび残留変位の比較をそれぞれ示す。これらの一致が確認でき、耐震性能を表現していると判断する。

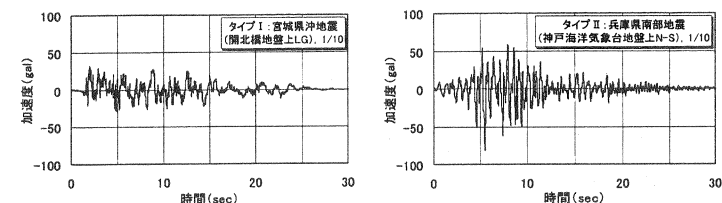


図-10 地震入力波形

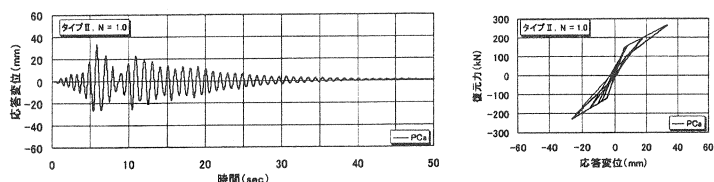


図-11 応答計算結果 ($h=0.02$)

4. 非線形動的応答計算

4.1 計算方法

前述した復元力モデルを用いて、1質点系動的応答計算を行った。供試体の製作で想定した2径間連続Tラーメン橋の橋脚が橋軸直角方向に加振される状態を想定したものとなる。積分法には線形加速度法を用い、積分時間間隔を0.001秒とした。復元力モデルを実橋の1/10供試体で設定したものであることから、実橋と供試体の周期特性を合わせる計算方法⁴⁾で相似則を考慮した。仮想質量には橋脚柱の慣性力分布が高さ方向に一様であると仮定し、負担する上部工質量と、柱質量の33/140を考慮した。

4.2 入力地震波

供試体の製作で想定した橋脚は耐震設計上の地盤種別がⅠ種地盤である。この点を考慮し、入力地震はⅠ種地盤の2波形を用いることとした(図-10)。それぞれ道路橋示方書で示されているタイプⅠおよびタイプⅡ地震に対応する。応答に対する塑性率の影響を確認するため、4供試体毎に入力加速度倍率 N を1.0~3.0まで0.5刻みで変えた5ケースを計算する。

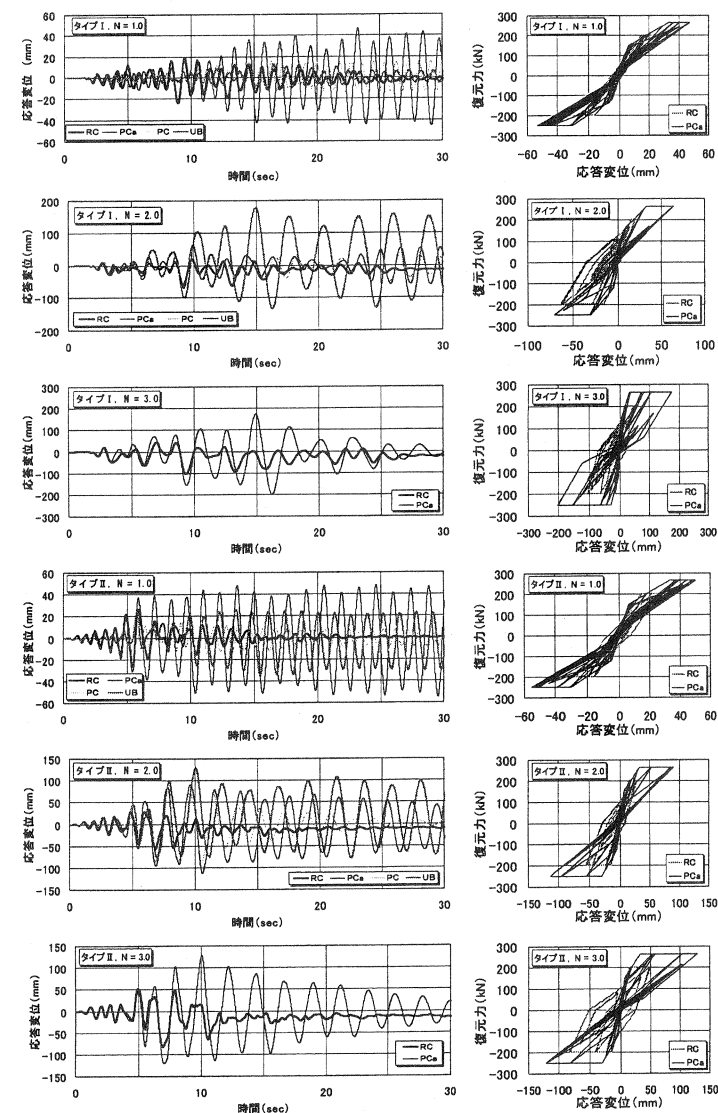


図-12 応答計算結果 ($h=0.0$)

4.3 粘性減衰を考慮しない

応答計算結果

図-11に、プレキャストPC供試体について速度比例減衰定数 h を 0.02 とした場合の応答計算結果を示す。地震波はタイプIIで入力加速度倍率 N は 1.0 である。この場合、応答はわずかに降伏を超える程度に収まり、耐震性能が十分あることが確認できる。

応答計算の目的は、プレキャストPC橋脚について復元力モデルの違いによる応答を比較しようとするものである。したがって、ここでは速度に比例する減衰を無視 ($h=0$) した応答計算を行い、結果を整理することとする。図-12にこの応答計算結果例を示す。

入力加速度倍率と余裕度 (最大応答変位/終局変位) の関係を図-13に示す。図-12で確認できるとおり、プレキャストPCはRCと比較して最大応答変位は大きくなるのだが、図-13に示すように終局変位との比で橋脚の耐震性能を比べると、その値は同程度となること

がわかる。一体PCとアンボンドPCでは、入力加速度倍率が 1.5 倍以上では応答変位が大きくなり、2 倍以上では余裕度が 1 を超える。応答が降伏を超える場合、PC 構造の中ではプレキャストPCが最も耐震的であるといえる。入力加速度倍率と最大変位比 (正側最大変位と負側最大変位の比またはその逆数で 1 以下と定義) の関係を図-14に示す。この図から、プレストレスが導入されることによって、応答に偏りがなくなることが確認できる。

4.4 エネルギー一定則および変位一定則の適用性について

地震応答の規則性を表現するものとしてエネルギー一定則および変位一定則がある。道路橋示方書で採用されている地震時保有水平耐力法は、Newmark ら⁵⁾ によるエネルギー一定則に基づくものであるが、エネルギー吸収能の低いPC構造への適用は問題があると考えられていた。しかし、増川らの研究⁶⁾ はPC構造のエネルギー一定則による地震時応答の推定精度がRC構造と同程度であることを明らかにしている。

そこで、プレキャストPC橋脚に関する規則性を検討した。この結果を図-15に示す。それぞれの解析ケースに対して弾性応答計算を行って得られる弾性応答最大荷重 P_e と降伏荷重 P_y との比 P_e/P_y と、非線形動的応答計算で得られた最大応答変位 δu と降伏変位 δy との比 (応答塑性率 $\mu = \delta u / \delta y$) の交点をプロットしたものである。エネルギー一定則および変位一定則の関係式は、それぞれ (式 4.1)、(4.2) で示される。これらも図中に曲線で示してある。

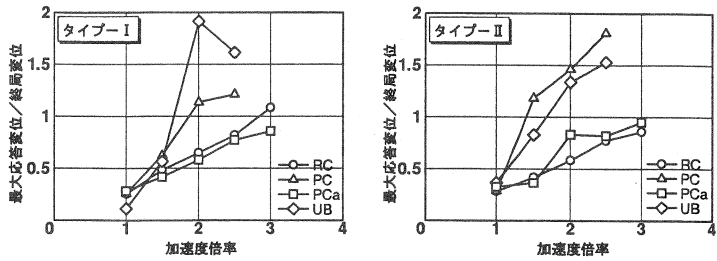


図-13 余裕度 (最大応答変位/終局変位) と加速度倍率の関係

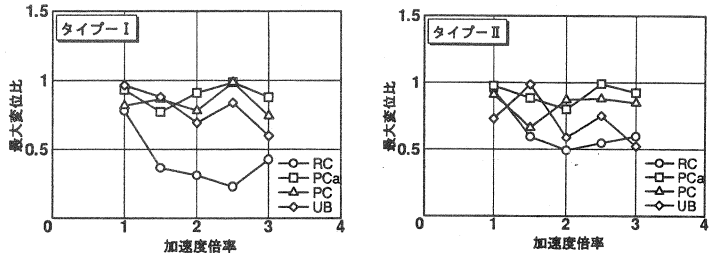


図-14 最大変位比と加速度倍率の関係

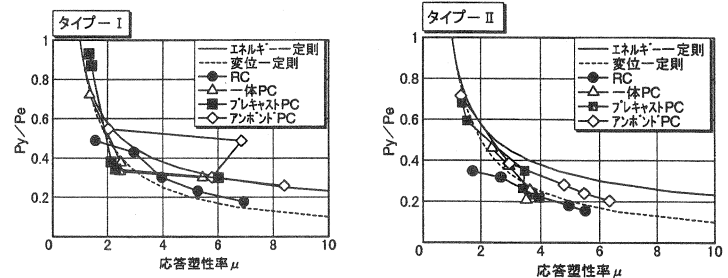


図-15 P_y / P_e と応答塑性率 μ の関係

$$\text{エネルギー一定則} \quad \mu = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{P_e}{P_y} \right)^2 + 1 \right\} \quad (\text{式 4.1}), \quad \text{変位一定則} \quad \mu = \frac{P_e}{P_y} \quad (\text{式 4.2})$$

アンボンドPCを除いて、プロットがタイプⅠ地震波、タイプⅡ地震波ともにエネルギー一定則による推定値より小さくなった。特にタイプⅡ地震波では P_y/P_e が小さくなるにつれてエネルギー一定則より変位一定則による推定値に近づく傾向がある。また、一体PCとプレキャストPCを比較してみると応答塑性率にほとんど差がないことからプレキャストPCのエネルギー一定則による地震時応答の推定精度は一体PCと同程度であることがいえる。

5. まとめ

プレキャストPC橋脚の実験的研究として実施した、実験と実験に基づく解析結果を以下にまとめる。

- ① PC構造に関してグラウト・プレストレスの有無、プレキャスト／一体打ち、の組み合わせを変えた橋脚の縮小供試体とRC供試体の静的正負交番載荷実験を行なった。PC構造のエネルギー吸収能および残留変位はRC構造より小さく、PC供試体間でその差はない。復元力特性、強度や終局変位には差がある。
- ② 各供試体の復元力モデルを検討し、プレキャストPC橋脚の復元力特性は既往モデルでは再現できず、新たに再載荷時剛性変化点を加え作成したスリップ型のモデルが適している。
- ③ 復元力モデルを用い、速度比例減衰を考慮しない1自由度系の非線形動的応答計算を行い、構造の違いによる応答の比較や規則性の検討を行った。プレキャストPC橋脚は、RC橋脚と比較すると最大応答変位が大きくなる傾向があるが、高い変形性能を有するためRC橋脚と同等の耐震性能を有する。プレストレスの導入は応答の偏りを防ぎ、付着が応答を抑制し耐震性能を向上させる。しかし、履歴ループによる振動減衰が小さいため振動が長期化する傾向がある。

プレキャストPC橋脚の性能をさらに引き出すために必要な課題を以下に示す。

- ① 本研究の成果は供試体実験に基づくもので、現状ではプレキャストPC橋脚の復元力特性は実験で数値を決定する必要がある。実験が不要な、材料物性の関数としてのモデル定式化が必要である。
- ② 履歴ループによる振動減衰効果が小さく、構造物全体としての減衰性を定量的に評価する必要がある。

(謝辞)

本稿は長岡技術科学大学と榊福田組の共同研究成果である。長岡技術科学大学の中村祐剛技官、修士学生だった中野将宏、田中竜一、パイタウン ヨードパニッチ、西岡大介の各氏には実験の実施とその結果整理をいただいた。榊ピーエスからは供試体製作や貴重なアドバイスをいただいた。ここに記し感謝をいたします。

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, 1999.11
- 2) 丸山久一, 関塚真, 小泉善弘, 柳益夫:プレキャストPC橋脚の耐震性に関する実験的研究, プレストレストコンクリート技術協会第10回シンポジウム論文集, pp.293-298, 2000.10
- 3) 鈴木宣政, 森拓也, 山口隆裕, 池田尚治:プレストレストコンクリート橋脚の復元力モデル, プレストレストコンクリート技術協会第9回シンポジウム論文集, pp.673-678, 1999.10
- 4) 才塚邦宏, 伊藤義人, 木曾英滋, 宇佐美勉:相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.179-190, 1995.1
- 5) Veletsons, A. S. and Newmark, N. M. : Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple System to Earthquake Motions, Proc.2nd WCEE, pp.895-912, 1960
- 6) 増川淳二, 日紫喜剛啓, 荒井崇裕:PC構造へのエネルギー一定則の適用性検討, プレストレストコンクリート技術協会第9回シンポジウム論文集, pp.703-708, 1999.10