

# 論文 コンクリート構造橋脚の異なる地震波形による応答挙動に関する実験

河野 弘来<sup>\*1</sup>・山崎 淳<sup>\*2</sup>

要旨：従来の設計手法では本来動的な地震という現象を、静的な力に置き換えて設計を行っている。本論では、簡便ではあるが、設計の中に時刻歴応答解析を有効に組み込み、地震を動的に取り扱って設計する手法を提案している。また、従来の動的解析による照査においては、過去の強震記録波形を使用する事が多い。本論では、設計した構造物に対して最も厳しい模擬地震波（構造物の損傷に追従するように周期成分を調整したsine波形）を提案している。耐震性能の高い構造形式としてPC橋脚に着目し、縮小供試体を製作し、準動的載荷実験を行い、一連の設計手法の有効性について検討した。

キーワード：耐震設計手法、PC橋脚、模擬地震波、準動的載荷実験

## 1. はじめに

本研究では、コンクリート構造において、より耐震性能の高い構造形式や設計手法を見出すことを最終目的としている。研究対象は単柱式コンクリート構造橋脚（高さ：7m、上部構造重量：2000kN、断面寸法：1m×1m）としている。

近年、より耐震性能の高い構造形式として、橋脚の鉛直方向にプレストレスを導入したプレストレストコンクリート橋脚（以下、PC橋脚）が提案されている。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る多岐に渡る実験研究<sup>2)3)</sup>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。

また、本研究では、より耐震性能の高い構造物を設計するための耐震設計手法を考察している。地震は動的な現象であるから、耐震設計を行う段階においても、動的な検討を十分に考慮しながら構造断面を決定することが有効であると考えた。本論では、提案する耐震設計手法の中から、橋脚の損傷に追従するように周期成分を調整したsine波形の概念と作成方法、同波形を用いた時刻歴応答解析による照査と設計の手法を説明し、同手法によるPC橋脚1/10縮小供試体に対する準動的載荷実験結果を検討する。

## 2. 研究の方法

### 2-1 耐震設計手法

（従来の耐震設計）コンクリート構造橋脚に対する従来の耐震設計手法の概略の流れは、(i)断面の仮定、(ii)地震時における水平耐力や変形性能を計算し(iii)加速度応答スペクトルを介して、静的な地震時作用力を求め、(iv)地震時作用力に対する耐力や変形性能の照査を行う。

（提案する耐震設計手法）(1)断面の仮定、(2)耐震設計用の荷重～変位履歴ループの定義、(3)橋脚に生じる損傷による剛性低下：固有周期の伸長に追従するsine波の定義と時刻歴応答解析を入力波1波長毎の同時進行で行い、(4)解析によって得られる応答変位が、(2)で定義した変形性能：最大耐力点における変位、を超えないことの照査を行う。

従来の設計手法においても、構造が複雑、重要な構造物に対しては、過去の強震記録波形による動的解析を行い、照査する。一般に動的解析にはインプット・アウトプットの部分で多大な労力が必要である。また、動的解析ソフトの高度化により、解析そのものがブラックボックス化している傾向が強まっている。ゆえに、設計における動的解析の位置付けが、静的に設計した構造物に対する照査の意味合いが強くなり、設計

\*1 日本大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 工修（正会員）

\*2 日本大学教授 理工学部土木工学科 Ph.D.（正会員）

段階における試行錯誤の繰り返しルーチンの中に有効に組み込まれていない。

提案した設計手法は、設計者が設計段階において必要な数値等を、容易に把握可能な様に、極力簡便な手法が望ましいと考えた。本論で示している一連の設計計算（時刻歴応答計算も含む）は全て、市販の表計算ソフトでなされている。

## 2-2 縮小供試体に対する実験

本論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  $1/10$ ）

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。

縮小供試体に対して，静的正負交番荷重実験を行った。実験で得られた荷重～変位関係を図-3，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PC・RCとも6サイクル目の最大変位とした。（PC:60mm，RC:66mm）

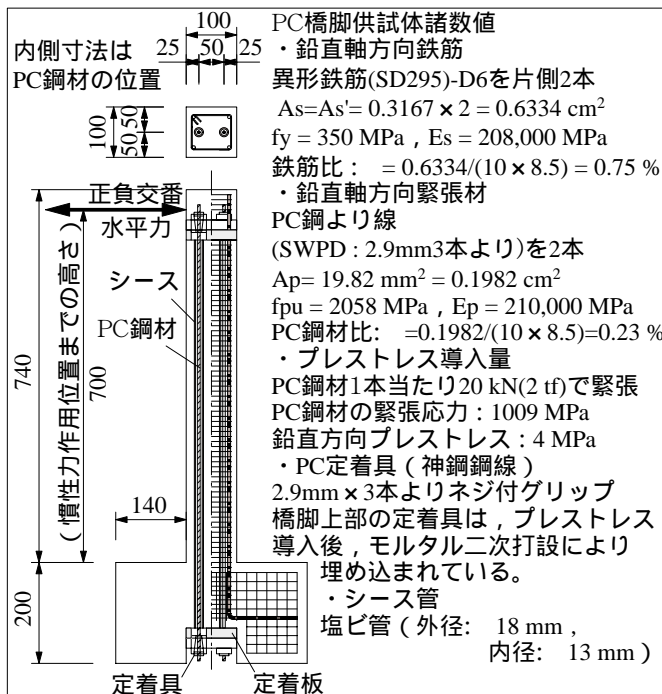


図-1 PC橋脚1/10縮小供試体

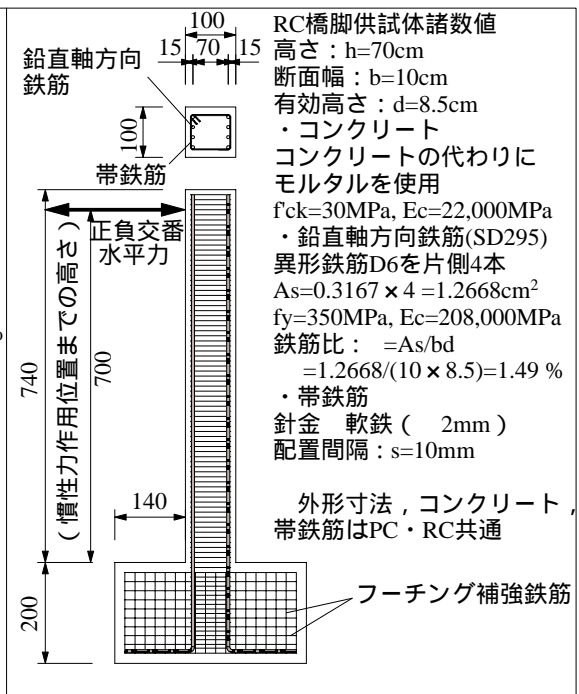


図-2 RC橋脚1/10縮小供試体

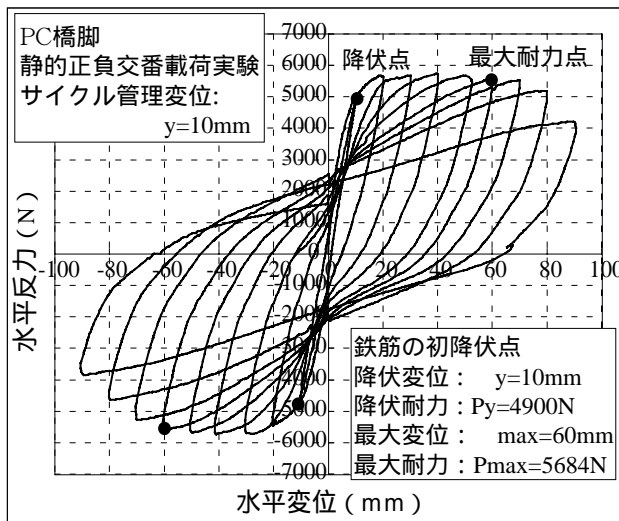


図-3 PC橋脚供試体の履歴ループ

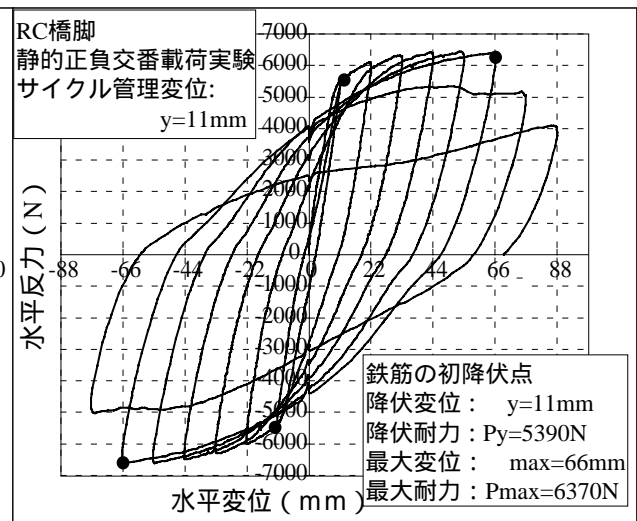


図-4 RC橋脚供試体の履歴ループ

### 2-3 履歴ループモデル

静的正負交番載荷実験の結果から，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載荷実験結果より次式で計算する。

「残留変位率 =  $R/(n \cdot y - y) = 1/(n-1) \times (R/y)$ 」  
 PC橋脚における残留変位率は，応答変位が3 y程度時には0.6，破壊に近い7 y近辺では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，鉄筋量を変化させた場合（ $=0.75 \sim 1.49\%$ ）でもほぼ一定であった。

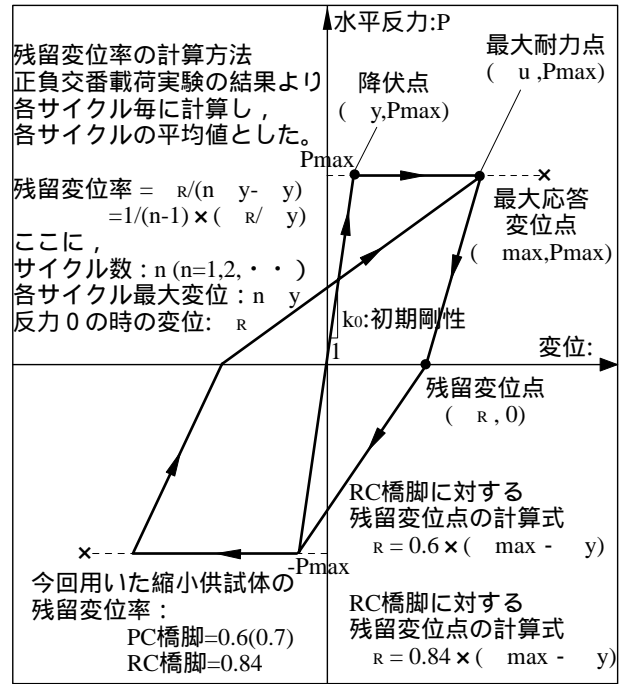


図-5 履歴ループモデル

### 2-4 入力地震波

準動的載荷実験に用いた入力加速度地震波形を図-6，図-7に示す。

従来の耐震設計において動的解析を行う際に用いる入力加速度波形は過去の強震記録を用いる事が多い。しかし，選択した強震記録がその構造物に対して最も危険な波であるかについては疑問が残る。そこで本論では，最も厳しいと考えられる模擬地震波を考案することとした。

比較のための，過去の強震記録波形として，1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台NS加速度成分を用いた。1995年以降に発生した地震(1999年台湾地震等)で観測された最大加速度振幅を考慮し，神戸波の最大加速度振幅が1000galになるように調整した。

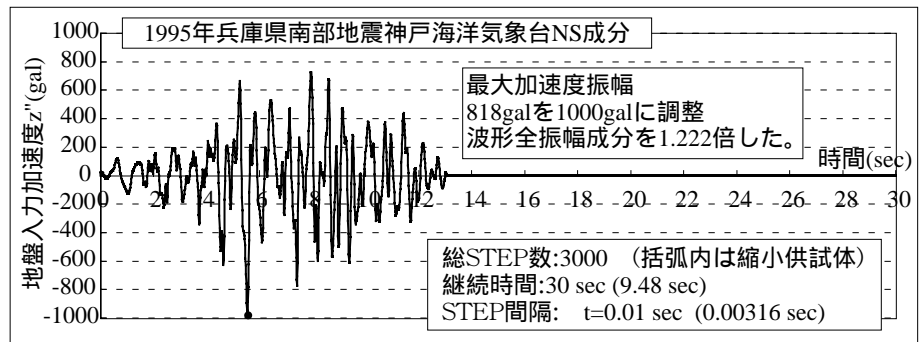


図-6 神戸波

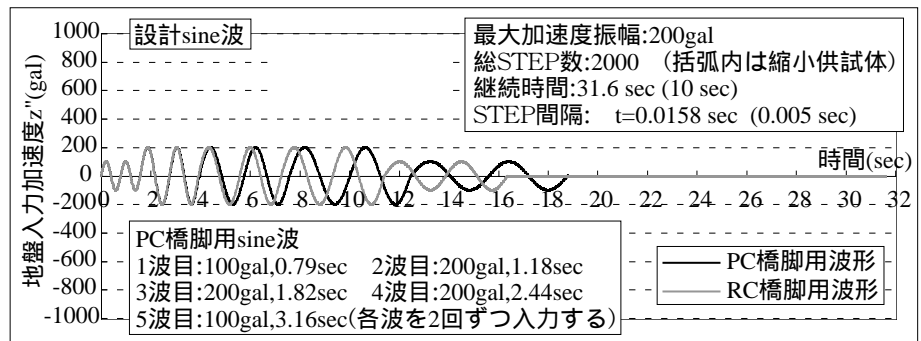


図-7 sine波

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，RC橋脚の場合それぞれについて，入力波形を作成した。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。

2-5 sine波形作成方法と応答解析による照査

橋脚の損傷 剛性低下 固有周期の伸長に追従するように周期成分を設定したsine波の作成方法を，PC橋脚供試体の場合について説明する。

1波目は振動開始の為に波で，振幅100gal，周期はPC供試体の固有周期0.37secよりも短い，0.25secとした。この1波目による応答は弾性範囲内で初降伏点には至らない。（図-8）

2波目がPC供試体の固有周期と同じ0.37secを周期とする振幅200galの波を2波長入力した。2波目入力後の応答履歴ループを図-8右側に示す。2波目入力後の最大応答変位と原点を結んだ直線の傾きが，この損傷状態における剛性であり，この剛性から3波目周期0.57secが計算により求まる。（図-9）

3波目を2波長入力した後の履歴ループを，

図-9右側に示す。3波目終了時の最大応答変位と原点を結んだ直線の傾き：剛性により計算されるこの損傷状態における固有周期は0.77secであり，これが4波目の周期になる。（図-10）

4波目を2波目入力後の応答履歴ループが図-10右側。正側の最大応答変位が静的正負交番载荷実験による破壊条件の60mmを超えたので，破壊したとみなす。

このように，時刻歴応答解析を行いながら，入力地震波の周期成分を決めていき，解析による照査も行う方法である。

同解析により得られた入力地震波を用いて，準動的载荷実験をPC供試体に対して行った。

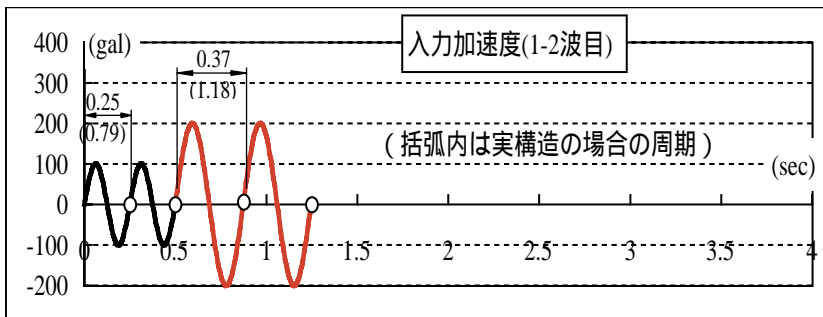


図-8 1・2波目の波形と応答履歴ループ

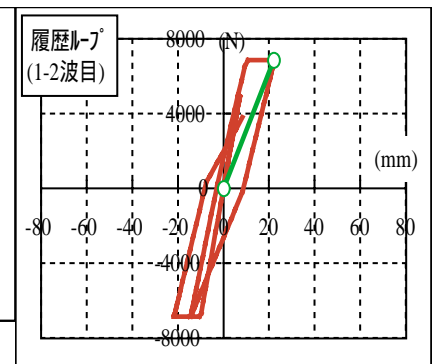


図-9 3波目までの波形と応答履歴ループ

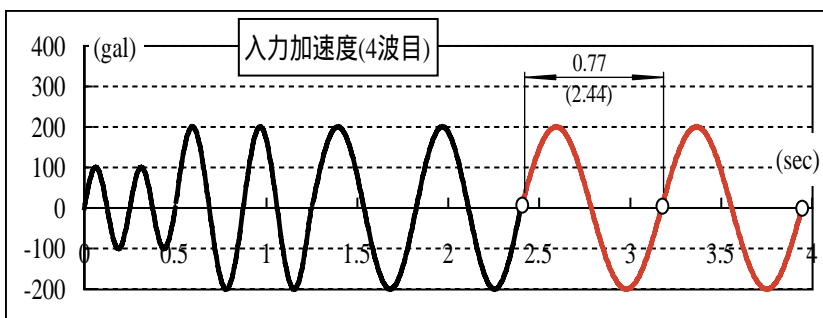
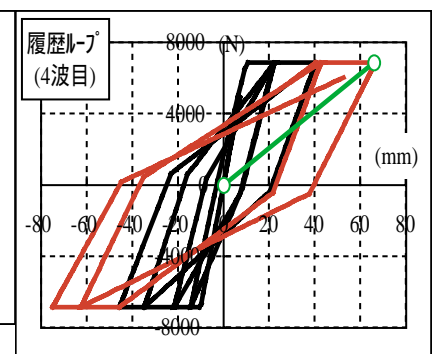


図-10 4波目までの波形と応答履歴ループ



### 3. 準動的載荷実験

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、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。本研究で用いた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。)

### 4 準動的載荷実験結果

#### 4-1 PC橋脚供試体・sine波の結果

準動的載荷実験結果(PC供試体・sine波)について、結果のまとめを表-1に、履歴ループを図-11に、応答波形を図-12に示す。図-11及び図-12の正側の四角点の応答変位は65mmで、破壊条件の60mmを超えたので、この点で破壊したと判断する。この点においてまだ最大耐力を保持していることから、実験を継続した。負側の三角点で応答変位が-72mmとなり、最大耐力に対する耐力の減少傾向が確認された。

表-1 sine波に対する応答変位・  
応答加速度の最大値及び残留変位

sine波に対する応答	応答変位 最大値	応答加速度 最大値	残留変位
PC-応答解析	-75 mm	525 gal	5 mm
PC-準動的実験	-72 mm	492 gal	-
解析/ 実験	104%	107%	-
RC-応答解析	50 mm	501 gal	3 mm

1：入力加速度の最大振幅は200gal  
2：RCの maxは66mm

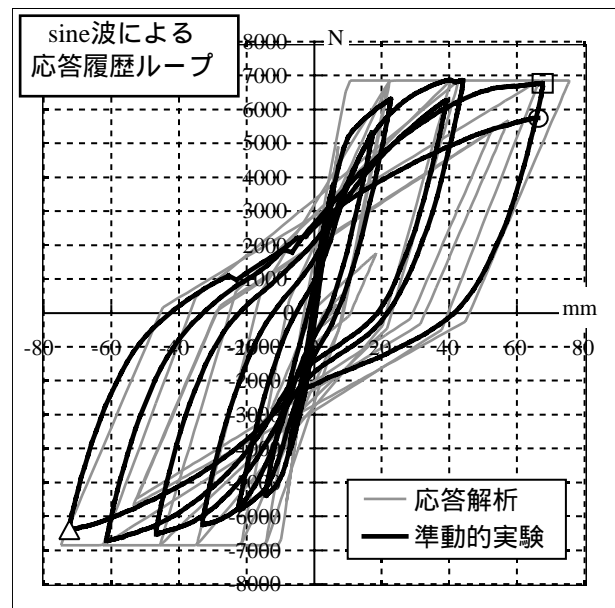


図-11 荷重～変位関係  
(PC橋脚供試体・sine波の場合)

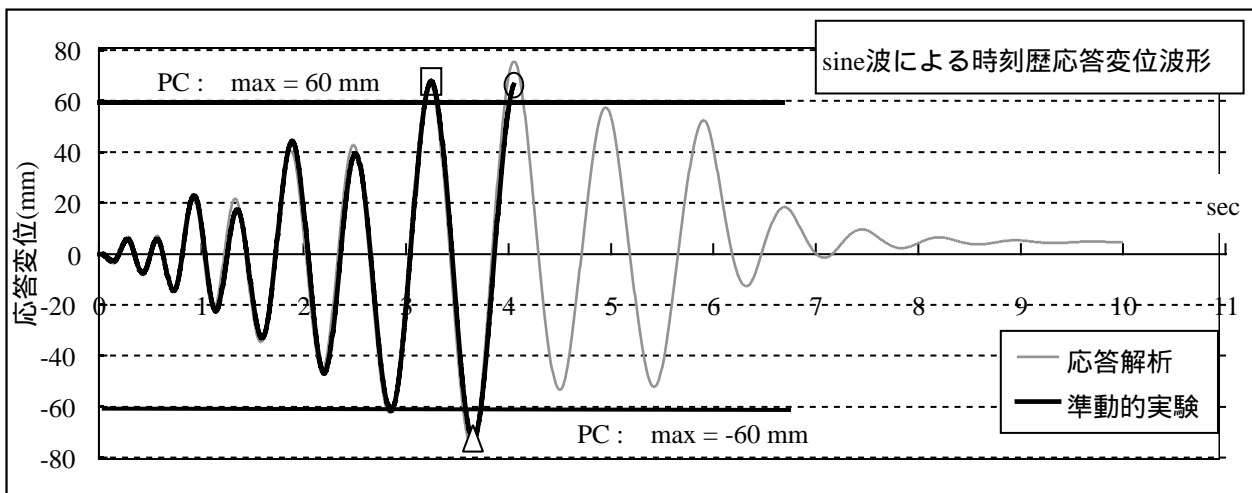


図-12 応答変位波形 (PC橋脚供試体・sine波の場合)

#### 4-2 PC橋脚供試体・神戸波の結果

実験と解析の結果を表-2, 履歴ループを図-13, 応答波形を図-14に示す。神戸波では破壊に至らなかった。

表-2 神戸波に対する応答変位・  
応答加速度の最大値及び残留変位

神戸波に 対する応答	応答変位 (正)最大値	応答変位 (負)最小値	応答加速 度最大値	残留変位
応答解析	27.2 mm	-37.4 mm	1140 gal	-2 mm
準動的実験	27.6 mm	-34.5 mm	1088 gal	-0.7 mm
解析 / 実験	99%	108%	105%	286%

入力加速度の最大振幅は1000gal

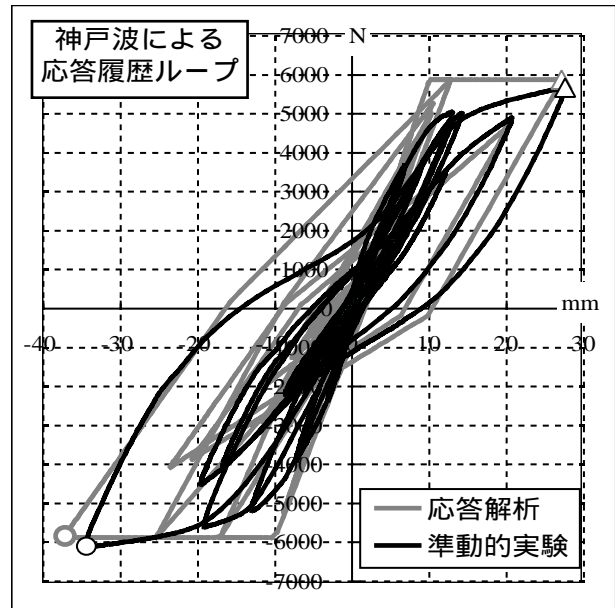


図-13 荷重～変位関係

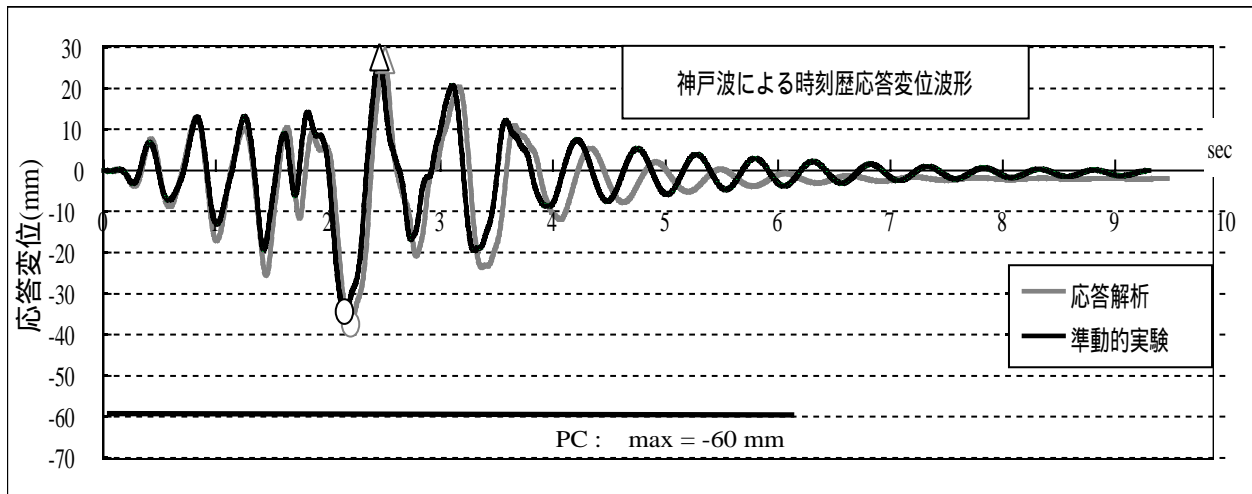


図-14 応答変位波形 (PC橋脚供試体・神戸波の場合)

#### 5. まとめ

・最大振幅1000galの強震記録波形(神戸波)で破壊されないPC橋脚が, 提案した手法による, 振幅が200galで周期成分を, 供試体の損傷状況により設定したsine波形を入力することにより, 破壊することを示した。

・最大加速度振幅200gal, 橋脚の損傷に合わせた周期成分を設定したsine波を入力した場合, PC橋脚は準動的载荷実験の結果破壊(耐力低下)した。

・最大加速度振幅を1000galに調整した神戸波を入力した場合, 設計したPC供試体は破壊しなかった。橋脚が保持する変形能力に対して53%の応答変位が生じた。

#### 参考文献

- 1) 河野弘来, 倉川義弘, 大熊英孝, 山崎 淳: 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, 第11回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp887-892, 2001.11
- 2) (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
- 3) (社)プレストレストコンクリート技術協会: 橋脚PC構造研究委員会 発表論文集, 平成11年11月
- 4) (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