

## PC 構造物の一質点系非線形地震応答解析

○ 東京大学 会員外 壁谷澤寿一  
 千葉大学 正会員 小谷俊介  
 東京大学 会員外 壁谷澤寿海

### 1. 研究目的

プレストレストコンクリート部材 (PC 部材) は繰り返し荷重に対する履歴においてピンチングといわれる挙動を示す。本研究では PC 部材の履歴モデルを有する一質点系 (SDF) 非線形地震応答解析を行い、モデルの特性を変化させて応答に対する影響を検討するとともに、一般 RC 部材の履歴モデルである武田モデルの応答と比較する。また、等価線形化における近似手法の妥当性を検討した。

### 2. PC 部材モデルの履歴特性

一般に PC 部材は RC 部材と比較したとき、弾塑性域におけるピンチングにより履歴エネルギーの消費は少ない。これを考慮した履歴モデル  $\lambda$  (PC モデル) が提案されている。RC 部材の代表的なモデルである武田モデル  $\lambda=0$  と比較して、その履歴の特徴は以下の(1)(2)のように要約される (図 1 参照)。ここで、部材の曲げ耐力比  $\lambda$  は (PC 鋼材による部材降伏耐力の増分) / (部材降伏耐力) で定義され、PC 鋼材量により 0~1 の範囲の値をとりうる。また、プレストレス (圧縮応力) の効果によるひび割れ強度の増分は  $f_a$  と定義し、初期剛性で強度  $f_a$  に対応する点を A 点とする。

(1) PC モデルの除荷剛性  $K$  はプレストレス影響係数  $\lambda'$  の関数として(1)式で与えられ、一般に RC モデルより低い除荷剛性となる。

$$K = \lambda' K_a + (1 - \lambda') K_c \quad (1)$$

ここで、 $K_c$  は RC モデルと同じ除荷剛性、 $K_a$  は降伏前は最大応答点から A 点に向かう剛性、降伏後は降伏点から A 点に向かう剛性を RC モデルと同様に除荷剛性低下指数  $\gamma'$  により塑性率に応じて漸減させる。 $\gamma'$  および  $\lambda'$  は、PC 部材の実験結果に適合するように、曲げ耐力比  $\lambda$  に応じて与えられている<sup>1)</sup>。 $\lambda=0$  では RC モデルとほぼ同様になり、 $\lambda$  が大きいとピンチング挙動が著しくなるが、残留変形は小さくなる。

(2) RC モデルでは両側にひび割れが入ると除荷後の再載荷では降伏点に向かうのに対し、PC モデルでは除荷方向の最大応答点に向かう。

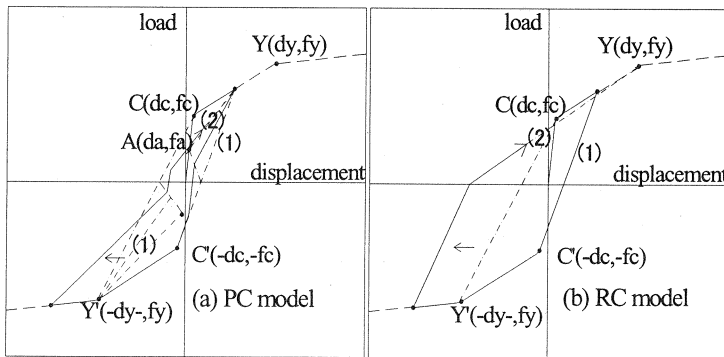


図 1 PC モデルと RC モデルの復元力特性

ここでは、構造物全体を 1 自由度系に縮約したときに、その履歴挙動は構成部材の履歴モデルで代表されるとして、非線形地震応答解析を行った。降伏後剛性を初期剛性の 1% とし、また降伏点における割線剛性は初期剛性の 1/3、ひび割れ荷重は降伏荷重の 1/3 とした。

RC モデルと PC モデルの履歴挙動を図 2 に比較する。PC モデルの部材曲げ耐力比  $\lambda$  を 0, 0.54, 1.0 とした。PC モデルは曲げ耐力比  $\lambda$  が小さい場合は、履歴エネルギーが大きい。 $\lambda=0$  では小振幅以外 RC モデルと同様の履歴性状になるが、降伏前の挙動が多少異なる (図 2 (b))。 $\lambda=1.0$  では繰返しによる履歴エネルギーの小さく、荷重がゼロのときの残留変位が小さくなる (図 2 (d))。

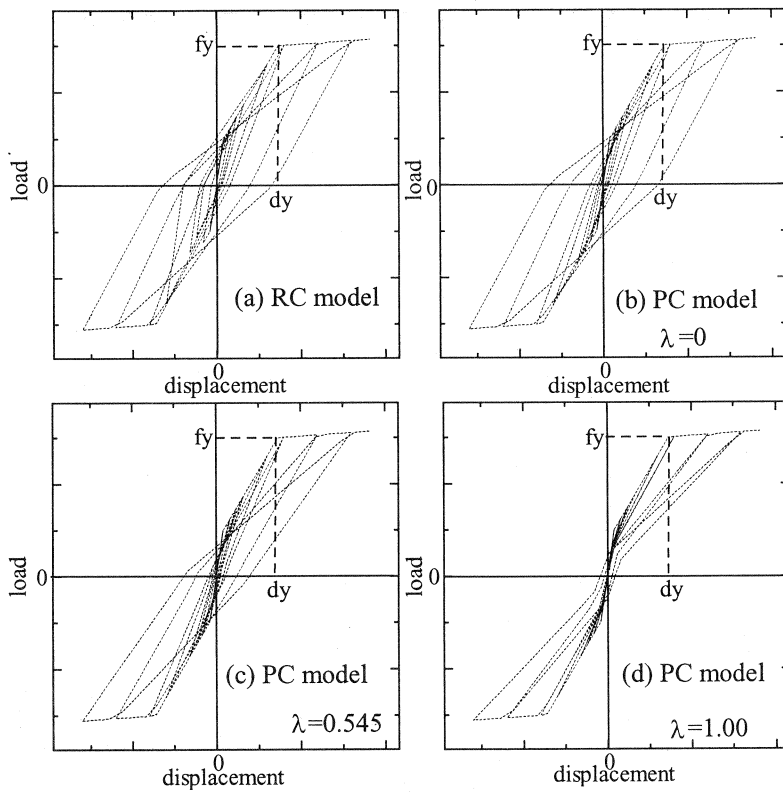


図2 RCモデルとPCモデルの履歴特性の比較

### 3. 履歴性状の地震応答への影響

PCモデルを非線形地震応答解析プログラムSDF<sup>3)</sup>に組み込んで応答解析を行い、履歴性状の違いが最大応答変形に与える影響を検討した。地震波は日本建築センターによる模擬波(BCJL2 最大速度60kine)を用いた。減衰は剛性比例型とし、減衰定数は初期剛性に対して0.05とした。降伏耐力をせん断係数で0.3、弾性固有周期は0.7と1.0(s)の場合について、RCモデルとPCモデルによる正負の最大応答塑性率と曲げ耐力比との関係を図3に示す。

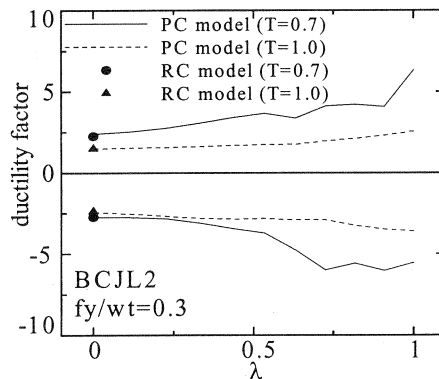


図3 PCモデルの曲げ耐力比による応答の変化

塑性率は2から7程度である。一般的に、RCモデルよりもPCモデルの方が最大応答は大きく、PC鋼材による降伏耐力の増分の比率が大きい $\lambda$ の大きなPCモデルで応答が大きくなる傾向が見られる。しかし、 $\lambda=0.5$ 程度以下の範囲ではPCモデルの応答はRCモデルとあまりかわらない。

#### 4. 実地震波応答と等価線形化手法による応答推定

振動中の代表的な等価周期  $T_e$  と、履歴によるエネルギー消費に応じた等価粘性減衰  $h_{eq}$  を用いて、線形弾性応答で構造物の非線形最大応答を近似する等価線形化手法<sup>4)</sup>の一つである Capacity Spectrum Method (CSM) 法を用いて最大応答を推定することを検討する。Capacity Spectrum Method (CSM) 法では原点から最大応答点に向かう割線剛性による等価周期  $T_e$  と、塑性率に応じた等価粘性減衰を与えることにより、作図的、漸近的に最大応答を推定する。CSM では弾性時の粘性減衰定数を 0.05 とするとき、等価減衰  $h_e$  は、(2)式により、履歴による等価粘性減衰  $h_{eq}$  を付加して評価する。

$$h_e = h_{eq} + 0.05 \quad (2)$$

等価粘性減衰  $h_{eq}$  は、履歴消費エネルギーを定常応答状態における等価な減衰エネルギーに置換する。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \times \alpha \quad (3)$$

$\Delta W$  : 最大応答点の振幅による履歴エネルギー

$W$  : 最大応答値に対応する基準の弾性歪エネルギー

$\alpha$  : 非定常応答を考慮した低減係数

建築基準法による限界耐力計算<sup>5)</sup>では、 $h_{eq}$  は塑性率  $\mu$  の関数とする。例えば、(4)式で表される等価粘性減衰は、除荷剛性低下指数  $\gamma=0.5$  である武田モデルに対して、非定常応答を考慮した低減係数は  $\alpha=0.8$  に相当する。そこで、等価粘性減衰  $h_{eq}$  は(2)(3)式( $\alpha=0.8$ )による値とする。

$$h_{eq} = \frac{1}{4} \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) \quad (4)$$

曲げ耐力比が変化したとき、固有周期は 0.7s の PC モデルの非線形応答と等価線形弾性応答による推定値の推移を図 4 にそれぞれ実線と破線で示す。構造物モデルの降伏耐力はせん断係数で 0.3 とした。構造物モデルの耐力は地震波には継続時間が長い 1985 年 Chile 地震の記録 (CHILE と略称) と継続時間が短い兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の記録 (JMA) を用いた。

CHILE による応答は曲げ耐力比の増加に伴う変化が小さく、等価線形化手法による応答で近似される。これに対して JMA による応答は部材曲げ耐力比が大きい場合、最大応答が急激に上昇する。等価線形化手法による応答の場合は緩やかであり、曲げ耐力比が大きくなるに従い、非線形地震応答と等価線形応答の誤差が大きくなる。

等価線形化手法の粘性減衰は(2)式より想定する最大変形を用いて算定されるが、非線形地震応答の粘性減衰は剛性に比例して徐々に低下する。PC モデルでは、特に  $\lambda$  が大きい場合には、塑性率の増加にもなると履歴消費エネルギーがあまり増大しないので、RC モデルに比べて履歴減衰に対する粘性減衰の比率は大きい。そこで PC モデルの応答では振動中の代表的な履歴剛性が弾性剛性よりも最大応答に向かう剛性に近い値であると仮定して、等価線形化手法の粘性減衰を最大応答に向かう剛性に比例する値とし、等価減衰を(5)式により修正する。

$$h_e = h_{eq} + 0.05 \times \frac{T}{T_e} \quad (5)$$

T : 構造物の初期弾性固有周期

この減衰を用いた等価線形化手法の応答と曲げ耐力比の関係を図 4 に点線で示した。等価減衰を(5)式で修正することにより、線形応答は、CHILE の応答では PC モデルの時刻歴応答に近い値を保ちつつ、JMA の応答は曲げ耐力比の増大とともに非線形応答解析と同様に大きくなる。

図 5 に粘性減衰を変化させた時の JMA と CHILE の線形弾性応答スペクトルを示す。等価周期の範囲では粘性減衰による応答の変化は JMA の応答においてより顕著である。従って JMA の場合、粘性減衰は等価周期に応じて正しく評価しなければ、線形化による推定精度は低くなる。逆に CHILE の場合、この周期帯において減衰の線形弾性応答スペクトルへの影響は例外的に小さい。等価減衰を(5)式により修正することで線形化による応答近似の精度はあまり向上しない。すなわち RC モデルと同様、(2)式から得られる等価減衰を用いた等価線形化によっても応答が精度よく近似される。一方、 $\alpha$  の値は(2)式を前提に粘性減衰が 0.05 の RC モデルの等価線形化において線形応答と履歴応答が一致するように経験的に定められたものである。(5)式による PC モデルの線形化は粘性減衰を修正しているので、RC モデルの等価線形化手法と同様に  $\alpha = 0.8$  とすると、線形化による応答近似の精度はかえって低くなる。

したがって、この PC モデルによる非線形地震応答は、等価粘性減衰を JMA の場合は(5)式、CHILE の場合は(2)式、とした場合の線形応答によって精度よく近似される傾向にある。

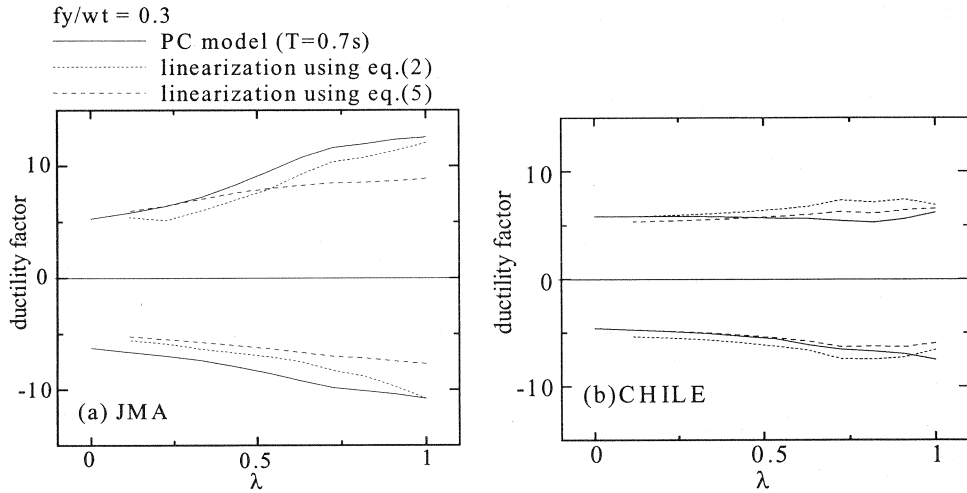


図4 JMA と CHILE に対する最大応答と応答推定値

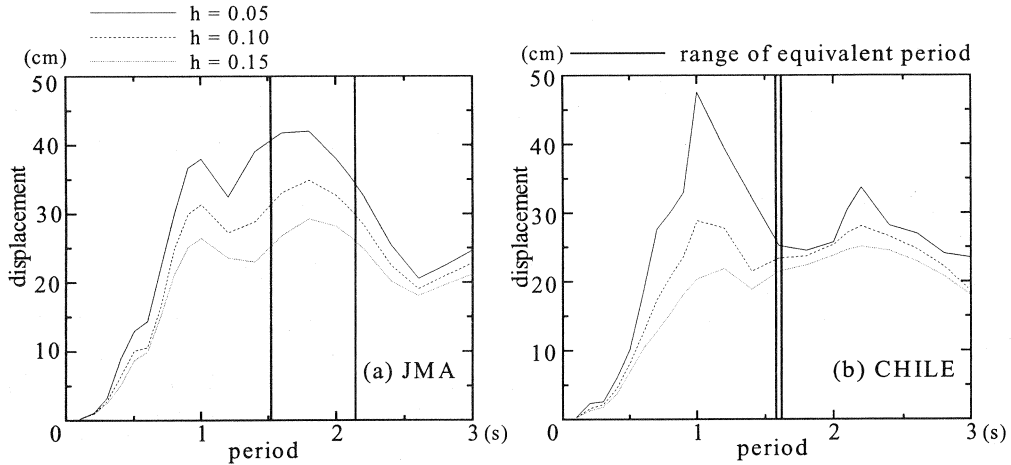


図5 JMA と CHILE の線形弾性応答スペクトル

## 6. まとめ

PC モデルの履歴形状が地震応答に与える影響を一質点系地震応答解析によって検討した。行った解析の範囲では以下の結論が得られた。

- (1) PC モデルの最大応答変位は一般に RC モデルに比べて大きくなる。部材の曲げ耐力比 $\lambda$ が大きい場合、特に $\lambda=0.5$ 程度以上の範囲で応答は増大する。
- (2) 曲げ耐力比 $\lambda$ が大きい PC モデルでは履歴減衰が小さいので、粘性減衰の影響が大きくなる。従来の等価線形化では剛性低下による粘性減衰の低下を考慮していない。線形応答が粘性減衰によって大きく変化する場合、線形化による応答推定は PC モデルの応答を明らかに過小評価することになる。
- (3) 粘性減衰の低下を考慮し、等価減衰の評価で粘性減衰の項を等価周期に応じて低減する近似手法を提案した。これにより PC モデルの線形化による推定精度が向上することを示した。

### 【参考文献】

- 1) 林三雄他：PC 部材の履歴特性と PC 造建物の地震応答性状、プレストレスト・コンクリート、, Vol. 37, No. 4, July 1995, pp. 57-67.
- 2) Takeda, T., M. A. Sozen and N. N. Nielsen, "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes," Journal, Structural Division, ASCE, Vol. 96, No. ST12, 1970, pp. 2557-2573.
- 3) Otani, S., "Hysteresis Model of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis," Journal, Fac. of Eng., Univ. of Tokyo, Series B, Vol. XXXVI-II, No. 2, Sept. 1981, pp. 407-441.
- 4) 柴田明徳：最新耐震構造解析、最新建築学シリーズ9、森北出版、1981.
- 5) 日本建築センター国土交通省建築研究所：限界耐力計算法の計算例とその解説、建築研究振興協会、2002