

(133) PC 構造へのエネルギー一定則の適用性検討

鹿島建設(株) 技術研究所

○増川 淳二

同上

正会員 日紫喜剛啓

同上

新井 崇裕

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)橋脚における耐震設計では、地震時非線形応答を簡便的に推定する方法として、一般的にNewmarkら<sup>1)</sup>によるエネルギー一定則(図-1参照)が用いられており、非線形応答解析と模型実験の比較などから、その適用性については十分検討されている<sup>2)</sup>。しかしながら、これをプレストレストコンクリート(PC)構造に適用しようとした場合、PC構造はRC構造に比べて、一般に減衰が小さく、原点指向型に近い復元力特性を示す<sup>3)</sup>ことから、適用性について問題が生じる可能性がある。そこで、1質点系のモデルを対象に、非線形動的解析を行って、復元力モデルの違いが応答値に及ぼす影響を確認し、PC構造へのエネルギー一定則の適用性について検討した。

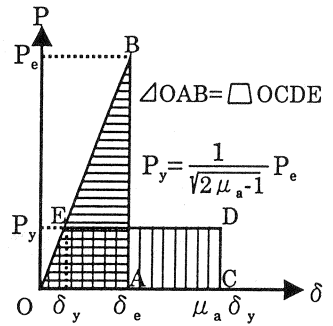


図-1 エネルギー一定則

2. 解析の条件及び方法

PC構造へのエネルギー一定則の適用性は、図-2に示す1質点系モデルを対象に、復元力モデル、地震波、固有周期、降伏強度を変化させ、非線形動的解析を行って検討する。

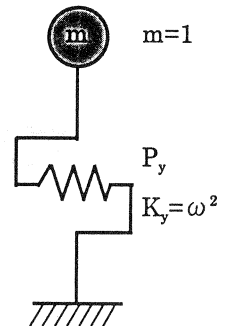


図-2 解析モデル

RC部材の復元力モデルとしては、RC部材の復元力特性を良く表すといわれる武藤モデルがあるが、除荷剛性が低下しないため、等価減衰定数が実際のRC構造物と比較して大き目の値となる場合がある。そこで、本論文では、武藤モデルの除荷剛性を塑性率 $\mu$ に応じて低下させ、実際のRC部材の挙動をより高い精度で表す事ができる除荷剛性低下型武藤モデル<sup>5)</sup>(以下、RCモデルと称す)を用いる。このモデルでは、除荷剛性 $K$ を塑性率 $\mu$ に応じて、式(1)のように低下させている。等価減衰定数を図-3に、RCモデルを図-4に示す。

$$K = \mu^{-1/\mu} \cdot K_y \quad (1)$$

( $K_y$ :降伏剛性)

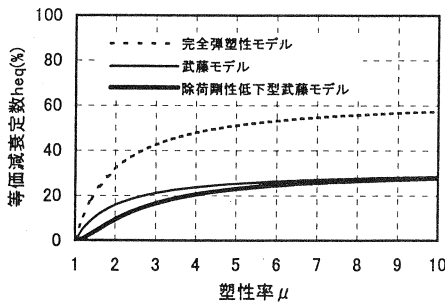


図-3 等価減衰定数

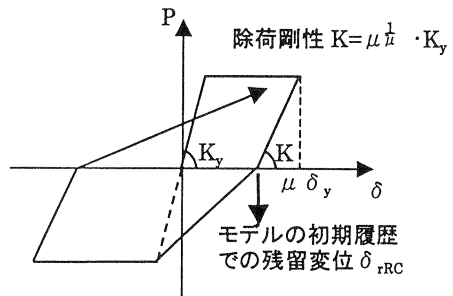


図-4 RCモデル(ひび割れ無視)

PC 部材の復元力特性はプレストレス導入量によって異なり、プレストレス導入量が多いほど、等価減衰定数及び残留変位が小さくなる。文献3)のPC橋脚の正負交番載荷実験結果によると、RC橋脚と比較して、等価減衰定数が約70%、50%、40%の時に、残留変位はそれぞれ約85%、40%、33%程度となっており、ほぼ等価減衰定数と残留変位の関係は比例関係にあるといえる。そこで、PC部材の復元力モデルは、図-5に示すとおり、RCモデルの残留変位 $\delta_{rRC}$ を70%、50%、30%と減少させたものを用いる。また、極端な場合を想定して、残留変位を0(原点指向型)とした場合も解析する。等価減衰定数は、RCモデルと比較して、残留変位を低下させたのと同じ比率で低下する。以下、これらのPC部材を想定した復元力モデルをPCモデルと称す。

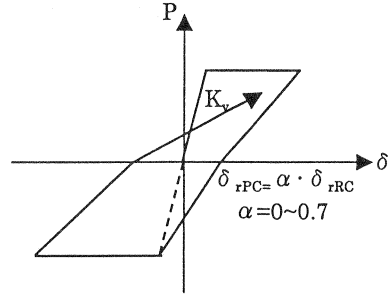


図-5 PCモデル(ひび割れ無視)

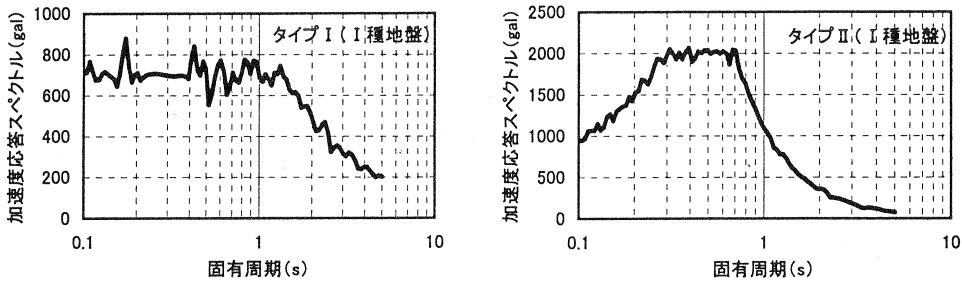


図-6 使用した地震波の加速度応答スペクトル

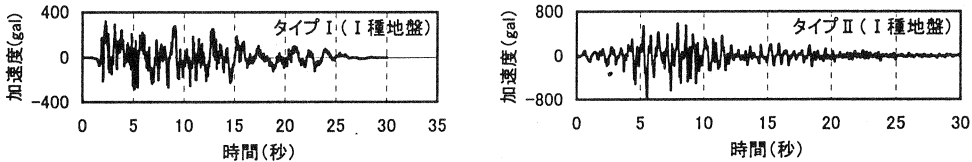


図-7 使用した地震波の波形

解析のパラメータとしては、上記の復元力モデルの他、

- ・地震波 (I種地盤におけるタイプI及びタイプII地震波<sup>6)</sup>)
- ・固有周期  $T_{eq}$  (0.3, 0.6, 0.9, 1.2秒)
- ・ $P_y/P_e$  (復元力モデルの降伏耐力/弾性応答最大作用荷重)

とした。ただし、ここでの固有周期  $T_{eq}$  は降伏時剛性での固有周期とし、地震波は加速度応答スペクトルの周期帯の乱れの少ない文献6)のスペクトルフィッティング波とする。使用した地震波の加速度応答スペクトル及び地震波形を、それぞれ図-6、7に示す。

その他の条件は以下の通りである。

- ・積分方法: Newmark の  $\beta$  法
- ・減衰: 弾性解析, 非線形解析ともに5%

解析のフローを図-8に示す。解析では、応答塑性率の他に、正側と負側の最大応答変位の絶対値の比率と残留変位量も算出した。

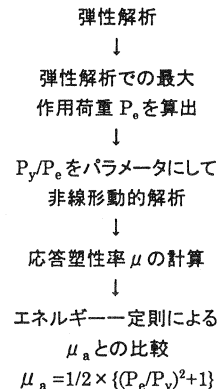


図-8 解析フロー図

3. 解析結果

まず始めに、タイプI地震波で  $T_{eq} = 0.6$  秒,  $P_y/P_e = 0.3$  の場合の、RCモデルとPCモデルの残留変位が50%と0%のときの応答履歴を図-9に示す。以下の解析は、前述のパラメータを変化させ、それぞれの場合において、図-9と同様に、応答塑性率  $\mu$  (=最大応答変位/降伏変位  $\delta_y$ )、残留変位 /  $\delta_y$ 、正負の最大応答の絶対値の比 ( $\min(\mu^+, |\mu^-|) / \max(\mu^+, |\mu^-|)$ ) を計算した。

タイプI地震波の場合の各復元力モデルの応答塑性率  $\mu$  と  $P_y/P_e$  の関係を図-10に、 $P_y/P_e$  と  $\mu/\mu_a$  ( $\mu_a$ : エネルギー一定則による塑性率) の関係を図-11に示す。図中に、エネルギー一定則による値も示している。ちなみに、 $P_y/P_e = 0.3$  のとき、 $\mu_a$  は6程度である。タイプI地震波では、RCモデル、PCモデルとも  $T_{eq} = 0.9$  秒までは、エネルギー一定則より大き目の応答となっているが、 $T_{eq} = 1.2$  秒では  $P_y/P_e$  が小さくなるにつれて、エネルギー一定則よりも小さくなる傾向を示している。PCモデルは、残留変位が0のモデルを除いて、ほぼRCモデルと同じ応答値を示したが、残留変位が0のPCモデルは、他のモデルと比較して応答変位が常に大きくなっている。これは、タイプI地震波は、波の繰返し数が多いことにより履歴ループが数多く描かれ、等価減衰定数が応答変位に与える影響が大きいため、等価減衰定数が0であるPCモデル(残留変位0%)の応答変位が大きくなったと考えられる。

実際のPC部材は、文献3)等によると、等価減衰定数は30%以上はあるため、上記の結果より、地震時の応答塑性率はRC部材と同等と見なして良いと考えられる。

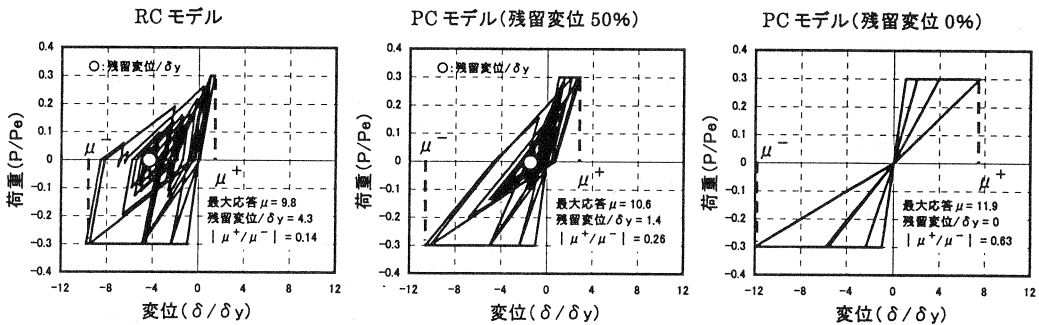


図-9 各復元力モデルの履歴応答(タイプI地震波, 固有周期 0.6 秒,  $P_y/P_e = 0.3$ )

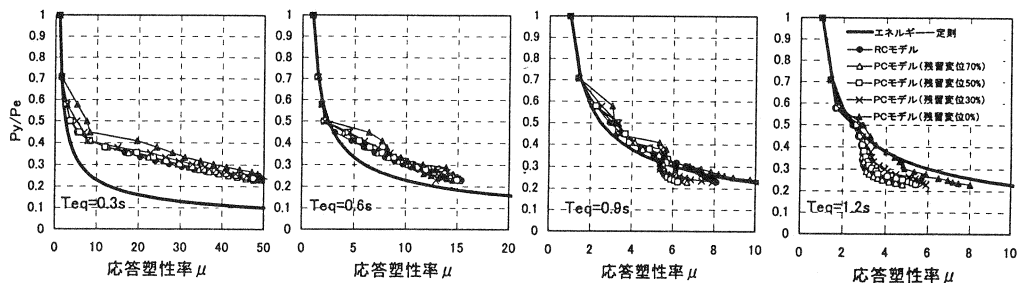


図-10 各復元力モデルの応答塑性率  $\mu$  と  $P_y/P_e$  の関係(タイプI地震波)

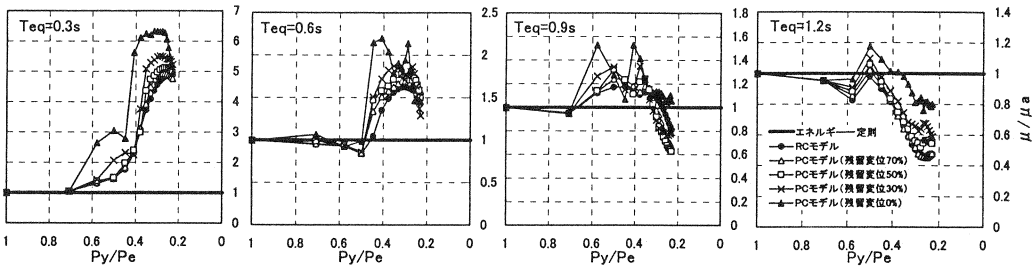


図-11 各復元力モデルの  $P_y/P_e$  と  $\mu/\mu_a$  ( $\mu_a$ : エネルギー一定則による塑性率) の関係(タイプ I 地震波)

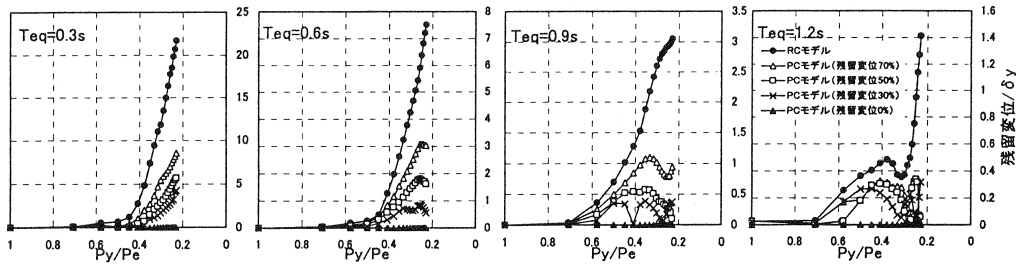


図-12 各復元力モデルの  $P_y/P_e$  と残留変位  $\delta_y$  の関係(タイプ I 地震波)

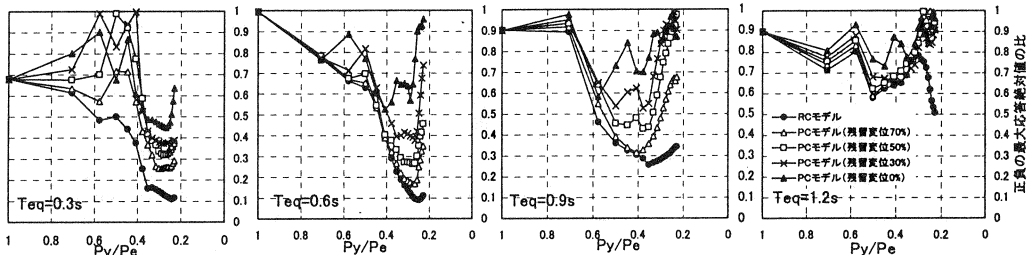


図-13 各復元力モデルの  $P_y/P_e$  と正負の最大応答変位の絶対値の比の関係(タイプ I 地震波)

次に、タイプ I 地震波の場合の各復元力モデルの  $P_y/P_e$  と残留変位  $\delta_y$  の関係を図-12 に示す。どの固有周期でも、復元力モデルの残留変位が少ないものほど、非線形応答解析での残留変位が小さくなっている。しかも、例えば残留変位が 70% の PC モデルは、非線形応答解析での残留変位が RC モデルのケースの 50% 以下になる場合が多く、復元力モデルの残留変位の比率  $\delta_{rPC}/\delta_{rRC}$  以上に、地震時の残留変位が低減される傾向がある。

タイプ I 地震時の  $P_y/P_e$  と正負の最大応答変位の絶対値の比は、図-13 に示すとおりで、RC モデルの場合は、正負の応答変位が大きく異なる、つまり片側に変位が大きく偏るが、PC モデルの場合は、復元力モデルの残留変位の割合が小さいものほど変位が片側に偏りにくい。また、RC モデル、PC モデルに共通して、 $P_y/P_e$  が小さいほど、固有周期  $T_{eq}$  が小さいほど片側に変位が偏っている。

タイプ II 地震波の場合の各復元力モデルの応答塑性率  $\mu$  と  $P_y/P_e$  の関係を図-14 に、 $P_y/P_e$  と  $\mu/\mu_a$  の関係を図-15 に示す。タイプ II 地震波では、RC モデル、PC モデルとも  $T_{eq}=0.6$  秒以上は、エネルギー一定則よりも小さ目の応答を示し、この傾向は  $P_y/P_e$  が小さくなるにつれて顕著になる。PC モデルは、ほぼ RC

モデルと同じ応答値を示した。残留変位が0のPCモデルも、タイプI地震波のときとは異なり、他のモデルと同じような応答を示している。これは、タイプII地震波は、波の繰り返し回数が少ないため、大きな履歴ループが描かれず、等価減衰定数の違いが応答変位に表われにくかったためと考えられる。

次に、タイプII地震波の場合の各復元力モデルの  $P_y/P_e$  と残留変位  $\delta_y$  の関係を図-16に示す。タイプI地震波の場合と同様に、どの固有周期でも復元力モデルの残留変位が少ないものほど、非線形応答解析での残留変位が小さくなっているが、その比率は固有周期や  $P_y/P_e$  の値によって異なっており、復元力モデルの残留変位の比率  $\delta_{rPC}/\delta_{rRC}$  が必ずしも非線形応答解析での残留変位量に反映されていない。これは、タイプII地震動の加速度応答スペクトルが  $T_{eq}=0.7$  秒以降急激に変化するため、塑性化にともなう長周期化や等価減衰定数の増加量によって、入力地震波の加速度応答スペクトルの値が大きく変化し、構造物の履歴応答が大きく異なってくるのが原因であると考えられる。

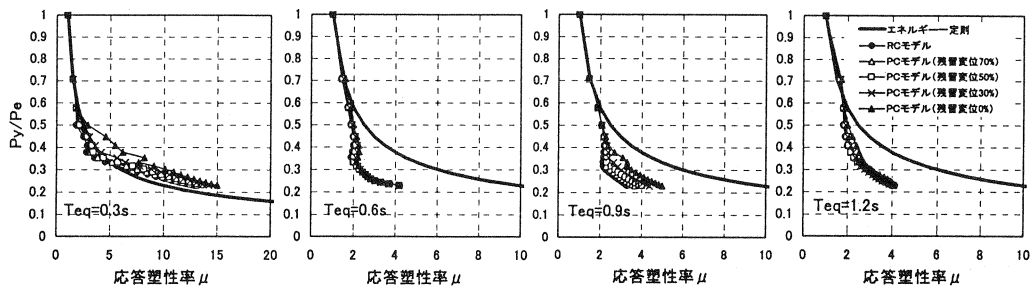


図-14 各復元力モデルの応答塑性率  $\mu$  と  $P_y/P_e$  の関係(タイプII地震波)

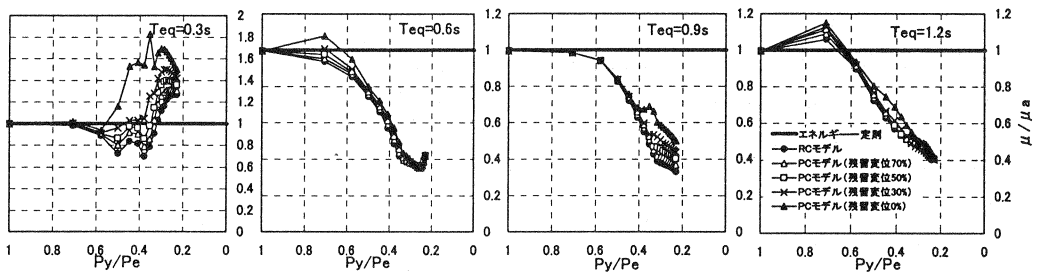


図-15 各復元力モデルの  $P_y/P_e$  と  $\mu/\mu_a$  ( $\mu_a$ : エネルギー一定則による塑性率) の関係(タイプII地震波)

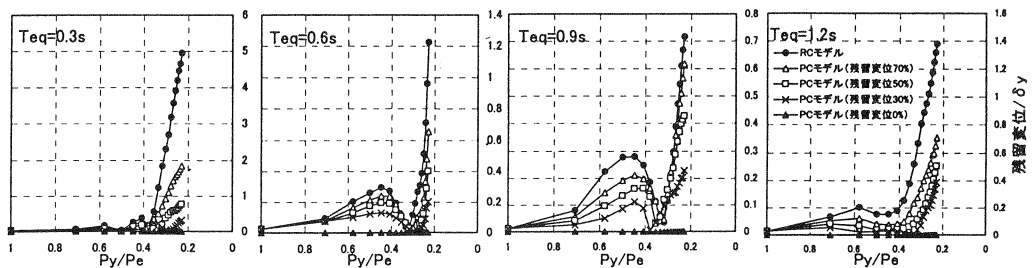


図-16 各復元力モデルの  $P_y/P_e$  と残留変位  $\delta_y$  の関係(タイプII地震波)

最後に、タイプII地震時の  $P_y/P_e$  と正負の最大応答変位の絶対値の比の関係を図-17に示す。タイプII地震波の場合も、PCモデルは、RCモデルと比較して片側に変位が偏りにくいと言える。しかしながら、前述のとおり、固有周期が0.6秒と0.9秒の間で加速度応答スペクトルの急激な変化があるため、タイプI地震動の時のような固有周期や  $P_y/P_e$  の値に対する明確な傾向は見られない。

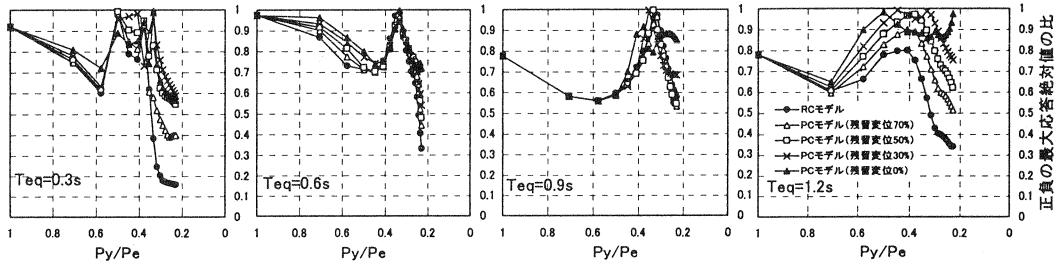


図-17 各復元力モデルの  $P_y/P_e$  と正負の最大応答変位の絶対値の比の関係(タイプII地震波)

#### 4. おわりに

本論文では、1質点系のモデルを対象に、非線形動的解析を行って、復元力モデル・固有周期・地震波・弾性応答荷重に対する降伏耐力の比などの違いが応答変位に及ぼす影響を確認し、PC構造へのエネルギー一定則の適用性について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- ①RC部材と比較して等価減衰定数が30%程度以上のPC部材は、RC部材とほぼ同じ応答塑性率を示し、固有周期0.6秒以下の短周期帯の構造物で、弾性応答荷重に対する降伏耐力の比を低くしすぎなければ、エネルギー一定則で概ね安全側に評価できる。
- ②PC部材の残留変位量は、RC部材よりも大幅に小さくなる傾向があり、復元力モデルの残留変位の比率以上に地震時の残留変形を減少させることが出来る場合もある。
- ③PC部材は、RC部材と比較して、正負の最大応答変位量の差が小さいため、効率良く地震エネルギーを吸収できる。

最後に、本解析は、(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」(委員長:池田尚治)の中で行った解析を基に、追加検討を行ったものである。委員長及び関係各位に深く謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Veletsos, 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
- 2) 例えば、川島、長谷川、長島、小山、吉田:「鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発に関する研究」、土木研究所報告190号、1993.9 など
- 3) 池田、森、吉岡:「プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究」、プレストレストコンクリート、vol.40, No.5, pp.40-47, 1998.9
- 4) 武藤 清:構造物の動的設計、丸善、1977
- 5) 湯川、緒方、須田、齊藤:「中空断面鉄筋コンクリート高橋脚の耐震性能」、土木学会論文集、No.613/IV-42, pp.103-120, 1999.2
- 6) 日本道路協会:道路橋方書・同解説 V 耐震設計編、1996.12