

7. プレストレスを導入した RC 橋脚の残留変位の制御と耐震設計

1. 序論

1995年に起きた兵庫県南部地震により、多くのRC橋脚に被害が生じた。被害を受けた橋脚は、崩壊したもの、地震後の供用性能を満たすことができないと判断されて取り壊されたもの、復旧工事により再び供用されたものに分けられる。この場合、被災したRC橋脚を復旧できるかどうかを判断した指標の一つに地震後の残留変位があげられる。即ち、橋脚の残留変位が橋脚高さの1/60程度、または15cm程度生じた場合には、残留変位を強制的に修復することは困難であり、橋脚の取り替えが必要とした事例が報告されている。このことから、道路橋示方書では、RC橋脚の許容残留変位を橋脚高さの1/100と定めている¹⁾。また、コンクリート標準示方書では、地震後に要求される構造物の耐震性能を表す指標として地震後の残留変位が明記されている²⁾。このように、昨今のRC構造物の耐震設計法は、地震後の耐震性能（要求性能）に基づく手法が一般になりつつあり、耐震性能のひとつである地震後の残留変位を如何に制御するかが大きな課題である。

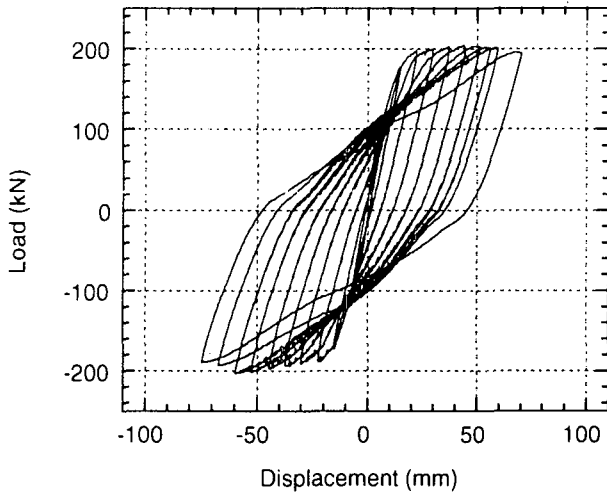
残留変位を制御する方法の一つにプレストレスを断面に導入する手法が考えられる。プレストレストコンクリート（以下PC）部材の復元力特性は、一般に通常のRC部材と比べて、1）塑性域に入ってから除荷した場合（以下PRC橋脚）、原点を指向し、残留変位は小さくなる、2）エネルギー吸収能は小さい、3）PC鋼材にはプレストレスが導入されているため、座屈が生じにくい等があげられる（図-1参照）。RC橋脚にプレストレスを導入した場合、プレストレス量や鉄筋比等を適切にコントロールすれば、残留変位の低減が可能となり、RC橋脚の耐震性能を向上させることができる。このような試みがこれまで池田等^{3)~6)}、著者等^{7)~9, 18)}によっていくつか報告されている。本論では、PRC橋脚の復元力モデルの提案を行い、実地震波を用いた非線形残留変位応答スペクトルを求め、残留変位を制御するための耐震設計手法について検討した。

2. PRC橋脚の復元力モデル

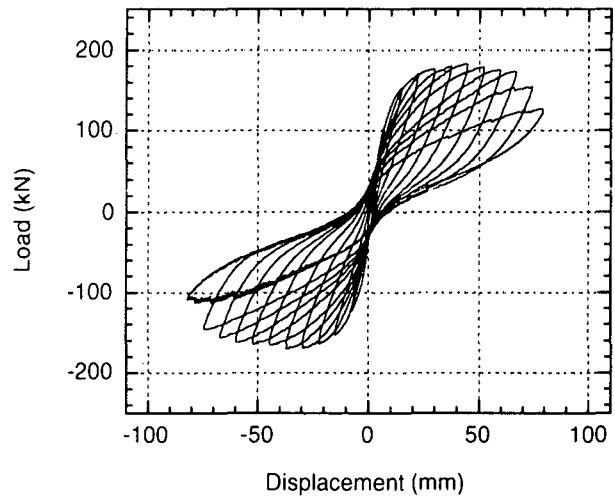
1.1 復元力モデル

PRC橋脚の地震応答性状を精度よく求めるためには、精度よい復元力-変位関係を求める必要がある。復元力-変位関係は、1）材料の応力-ひずみレベルから、ファイバーモデルやFEM等により求める方法、2）復元力モデルを作成する方法が一般的である。ここでは、精度及び簡便さから復元力モデルによる方法を用いることにする。PRC部材の復元力モデルはこれまで主に建築分野で提案されてきている^{12,13)}。これらのモデルを本実験結果に適用した所、履歴性状は本実験結果と比較的よく一致するが、本研究の重要な要因である残留変位については、精度よく求めることができないことが明らかとなった。このため、新たにPRC橋脚に適用するための復元力モデルを提案することにする。

まず、断面におけるPC鋼材の寄与率をプレストレス導入率（ λ ）を定義することにする¹⁸⁾。



a) Specimen S-1 (RC, $\lambda = 0.0$).



b) Specimen S-2 (PRC, $\lambda = 0.66$).

図—1 荷重—変位曲線

$$\lambda = \frac{\sum(A_{ps} \cdot f_p)}{\sum A_s \cdot f_s + \sum A_{ps} \cdot f_p} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 A_s ：引張力を負担する軸方向鉄筋の断面積、 A_{ps} ：引張力を受け持つ PC 鋼材の断面積、 f_p ：各 PC 鋼材の引張応力、 f_s ：各軸方向鉄筋の引張応力。式 (1) における A_s 、 A_{ps} 、 f_p 、 f_s は、断面におけるコンクリートの圧縮縁ひずみが 0.0035 に達した時（一般に言う曲げ終局時）、引張力が生じている鋼材の断面積 (A_s 、 A_{ps}) 及び各々の鋼材に生じている引張応力 (f_p 、 f_s) を表している。図—2 は P R C 橋脚用に提案した復元力モデル¹⁸⁾の概略図を示したものである。R C と P C 部材の復元力特性における主な違いは、履歴曲線の膨らみ、即ち除荷剛性が挙げられる。P C 部材の場合は、除荷曲線に変曲点 (T_p) があり、この変曲点から原点を指向する傾向にある。この程度は、P C 鋼材量すなわちプレストレス導入率 (λ) に依存している。このようなことから、復元力モデルは通常の R C の剛性劣化型復元力モデルに P C の特性を取り入れたものである。即ち、基本的な履歴ルールは Takeda Model¹⁹⁾に基づいており、除荷剛性については、2つの傾きで表現される。折り返し点後の除荷剛性 (K_{r1}) は Takeda Model で表され、さらに、荷重が Q 低下した点 (T_p) から第 2 除荷剛性 (K_{r2}) へと変化する。Q 及び K_{r2} は λ の大きさによって変化する。以下に除荷剛性を表す式を示す。

$$Q = Q_{\max}(1 - \lambda) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 Q_{\max} ：最大耐力

$$K_{r1} = \frac{Q_c + Q_y}{D_c + D_y} \left| \frac{1}{\mu} \right|^\alpha \dots\dots\dots(3)$$

$$\alpha = 0.40$$

$$\mu = \frac{D_{\max}}{D_y} \dots\dots\dots(4)$$

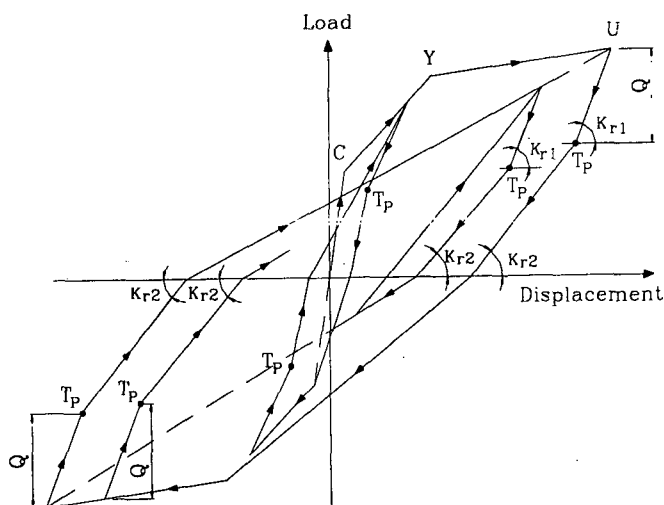
ここに、 K_{r1} は第1除荷剛性、 D は変位、 Q は荷重を示し、添字 c, y, \max は各々クラック点、降伏点、最大点を示す。

$$K_{r2} = \frac{Q_c + Q_y}{D_c + D_y} \left| \frac{1}{\mu} \right|^\beta \dots\dots\dots(5)$$

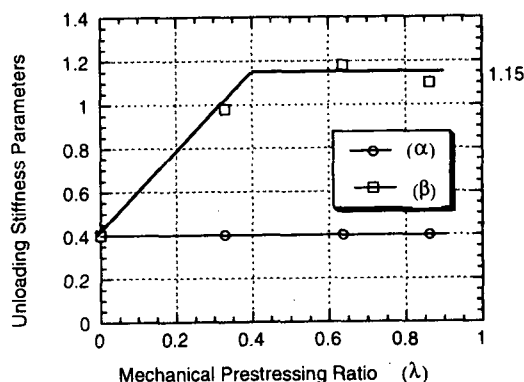
β の値は、本実験結果及び他の実験結果^{5,10)}を参照して以下のように決定した。式から明らかのように、RC部材の場合は $\lambda=0$ となり、除荷剛性は K_{r1} のみとなる。

$$\beta = \begin{cases} 1.875 \times \lambda + 0.40 (0 \leq \lambda \leq 0.40) \dots\dots\dots(6) \\ 1.15 (0.40 \leq \lambda) \end{cases}$$

このように、提案した復元力モデルはRCからPRC、PC部材に至る復元力モデルを連続的にかつ簡単に表現することが可能である。



a) Hysteretic rules.



b) Unloading stiffness parameters.

図一2 PRC橋脚の復元力モデル

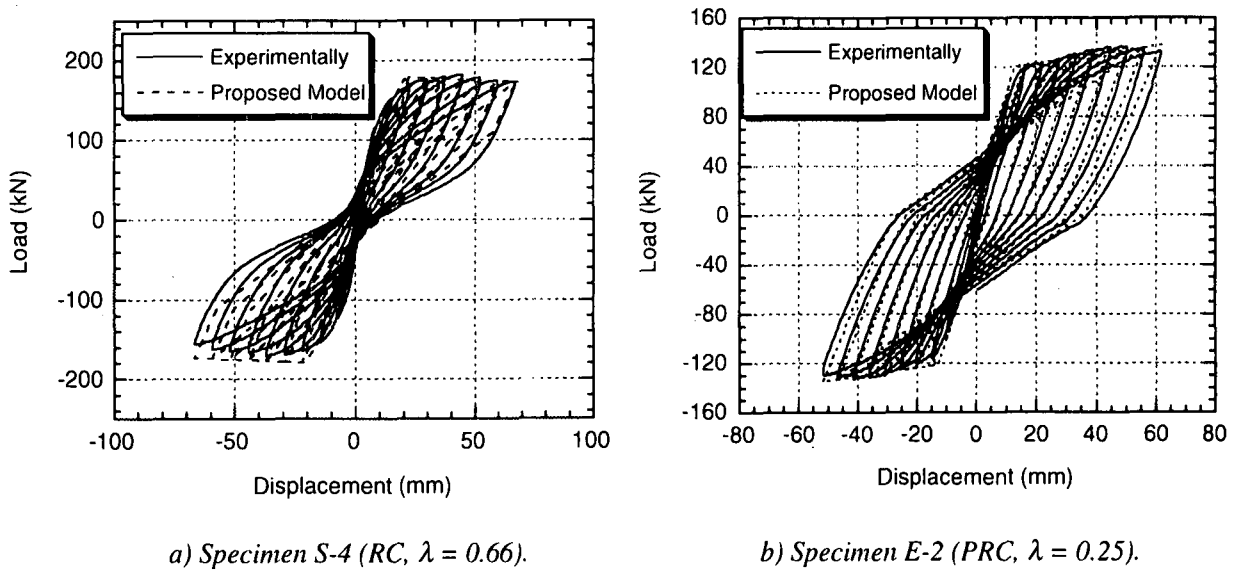
1.2 復元力モデルの精度の検討

図一3は正負繰り返し実験から得られた復元力と提案した復元力モデルを比較したものである¹⁸⁾。図から分かるように、提案した復元力モデルはPRC橋脚の履歴性状及び残留変位を精度よく表現している。

2. 残留変位応答スペクトル¹⁸⁾

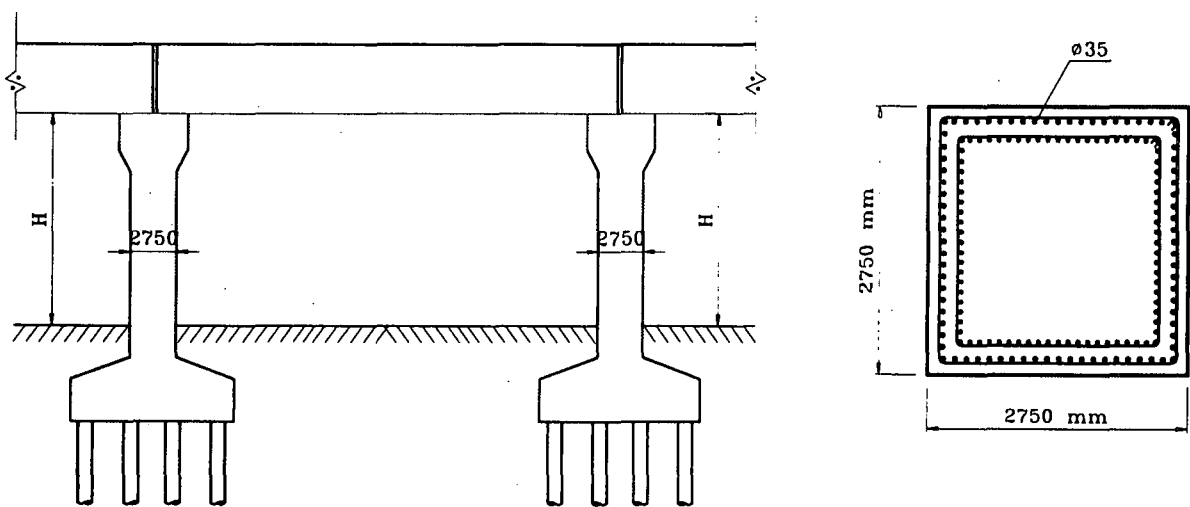
最近のRC橋脚の耐震設計では、地震後の供用性能に基づいて、何らかの形で残留変位を規定する傾向にある。このようなことから、PRC橋脚を実際に適用するに当たって、地震後の供用性能に基づいて要求される残留変位と、これを満足させるプレストレス量を設計時においてある程度把握しておくことが必要である。ここでは、PRC橋脚の残留変位応答スペクトルを求めて、残留変位とプレストレス量の関係を定量的に求めることにする。また、プレストレ

スを導入することによって、履歴面積が減少することから、応答変位が大きくなることが考えられる。このため、変位応答スペクトルも併せて示すことにする。



図一3 復元力モデルの比較

計算に用いたRC橋脚は図一4に示す構造物を用いた¹⁷⁾。地震波は1995年に兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測されたNS波(最大加速度:818gal)を用いた。降伏震度(P_y/mg , P_y :降伏耐力, m :マス質量)は0.35と0.6の2種類とし、プレストレス導入率(λ)を0, 0.33, 0.66の3種類とした。なお、残留及び変位応答スペクトルの計算には、提案した復元力モデルを用いた。従って、ここで述べるスペクトルは非線形応答スペクトルである。また、一般性を持たすために変位はすべて回転角で表している。



図一4 解析に用いたRC橋梁

図-5は残留変位応答スペクトルを示したものである¹⁸⁾。兵庫県南部地震では、降伏震度 (P_y/mg) が 0.35 の時、固有周期が約 0.5 秒より小さい場合には、RC 橋脚の残留変位は 1/100 よりも大きくなり、復旧に支障をきたすことが考えられる。この場合、プレストレスを導入することによって、残留変位は著しく小さくなる。すなわち、プレストレス導入率 (λ) が大きくなるほど残留変位は小さくなる事が明瞭に分かる。降伏震度が 0.6 の RC の場合、固有周期が 0.4 秒付近で残留変位が 1/100 よりも大きくなっている。この場合には、プレストレスを導入するよりも断面形状などを変化させて残留変位を抑制した方が合理的であろう。図-6は提案した復元力モデルを用いて計算した非線形変位応答スペクトルを示したものである。プレストレス導入率 (λ) が 0.66 の場合、短周期領域 (0.3 秒以下) において最大応答変位が大きくなる傾向がある。しかし、 λ が 0.33 の場合には RC とほとんど同じである。

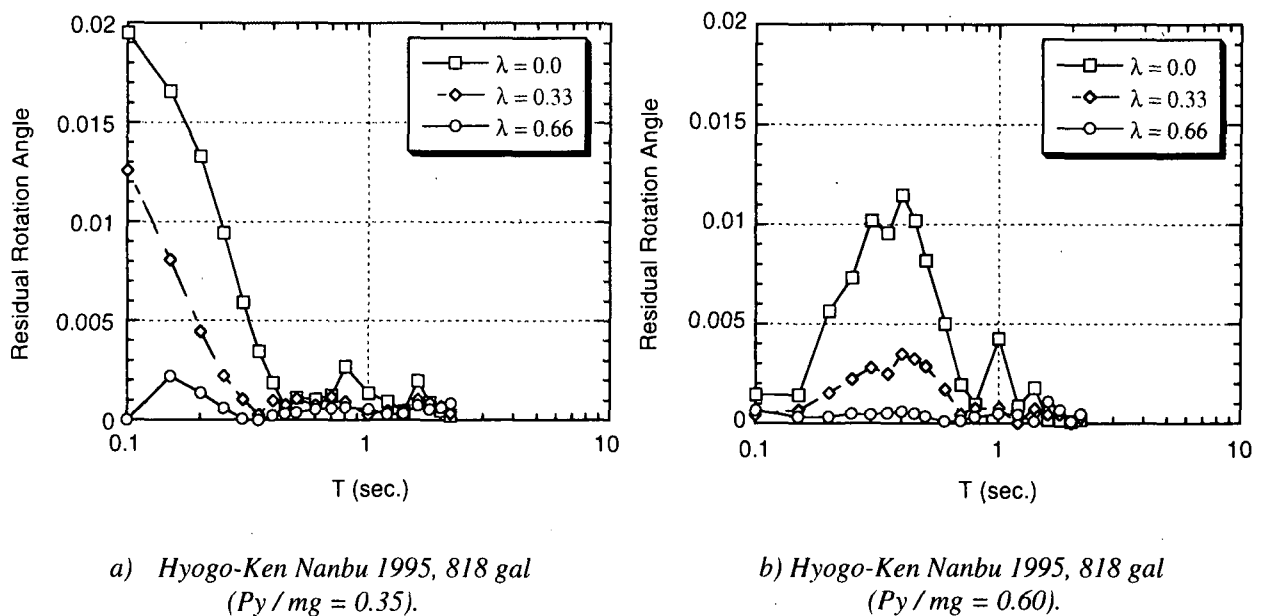


図-5 残留変位応答スペクトル

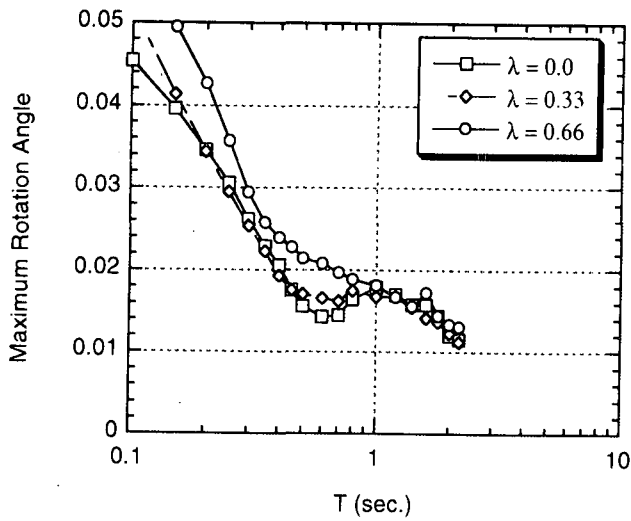
以上述べたように、PRC 橋脚の残留変位性状ならびに最大応答変位特性が応答スペクトルから明らかとなった。PRC 橋脚を実際に適用する場合には、これらを考慮し、最適なプレストレス導入率を定めることが必要である。

3. PC 鋼材の配置方法

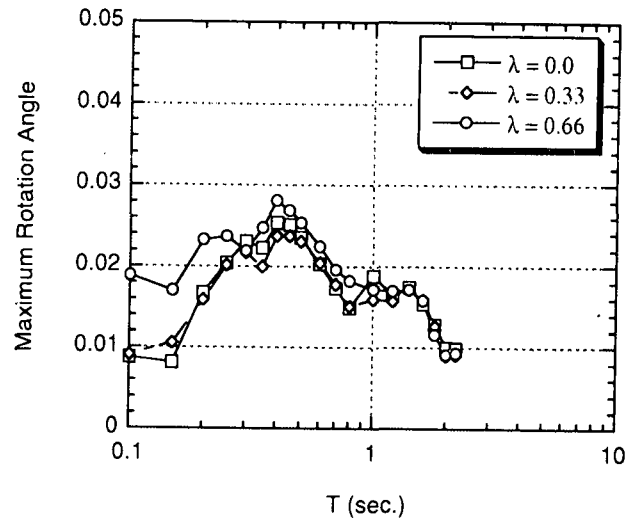
PRC 橋脚における、PC 鋼材の配置方法は、図-7に示す各種工法が現在考えられている¹⁰⁾。PC 鋼材を配置する際には、摩擦による損失が少なくなるように配置し、部材全長に渡って導入プレストレスの、急激な増減がないように配置することが必要である。

謝辞

本研究の一部は、(社)PC 技術協会「橋脚 PC 構造研究委員会(委員長 池田尚治)」の一環として行われたものである。

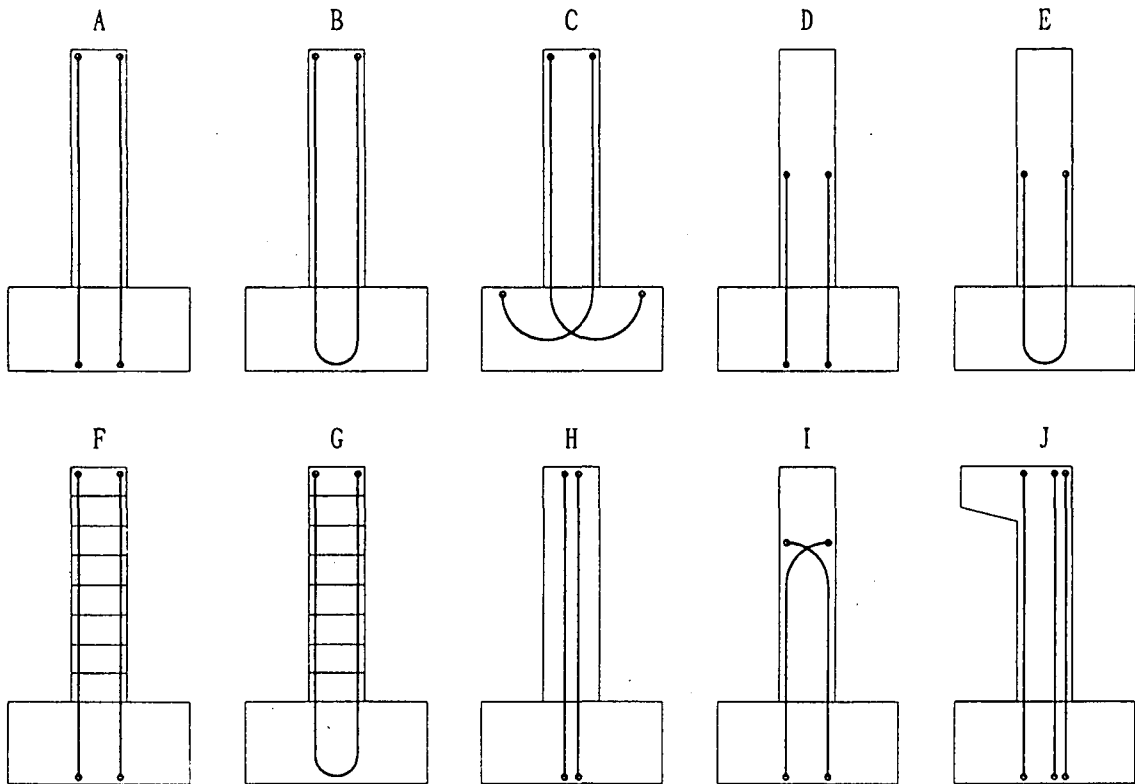


a) Hyogo-Ken Nanbu 1995, 818 gal
($P_y/mg = 0.35$).



b) Hyogo-Ken Nanbu 1995, 818 gal
($P_y/mg = 0.60$).

図一6 非線形応答変位スペクトル



図一7 PC 鋼材の配置方法

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 日本道路協会, 平成8年
- 2) コンクリート標準示方書, 耐震設計編, 土木学会, 平成8年

- 3) 白浜寛, 山口隆裕, 池田尚治 : 軸方向プレストレスを有するコンクリート橋脚の地震時応答挙動, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 20, No.3, pp.745-750, 1998.
- 4) S. Ikeda : Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns and Improvement by Vertical Prestressing, Proceedings of the 13th FIP Congress on Challenges for Concrete in the Next Millennium, Vol.12, May 1998.
- 5) 池田尚治, 森拓也, 吉岡民夫 : プレストレスコンクリート橋脚の耐震性に関する研究, プレストレスコンクリート, Vol.40, No.5, pp.40-47, 1998.
- 6) 新井崇裕, 日紫喜剛啓, 池田 : プレストレスコンクリート橋脚の耐震性能に関する実験的検討, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集第 5 部.
- 7) 稲田文展, 睦好宏史, Zatar,W : プレストレスを導入した RC 橋脚の耐震性状, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.20, No.3, pp.739-744, 1998.
- 8) Zatar,W, Mutsuyoshi,H. and Inada, H. : Dynamic Response Behavior of Prestressed Concrete Piers under Severe Earthquake, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.20, No.3, pp.1003-1008, 1998.
- 9) Zatar,W, and Mutsuyoshi,H. : Seismic Behavior of Prestressed Concrete Piers : 「塑性域の繰り返し劣化性状と地震応答」に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.369-376, 1998.
- 10) 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 (案), (社) プレストレストコンクリート技術協会, 平成 11 年 6 月.
- 11) Inoue,S., Miyagawa, T. and Fujii, M.:Effecte of Loading Histories on the Energy Dissipation of Partially Prestressed Concrete Beams, FIP Symposium of Modern Prestressing Techniques and their Applications, Kyoto, Japan, pp.175-182, 1993.
- 12) Nakashima, M., Kaminosono,T., Ishida, M. and Ando,K. : Integration Techniques for Substructure Pseudo Dynamic Test, 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Vol.2,pp.515-524, 1990.
- 13) 岡本 伸, 加藤 博人: 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. 33, No4, pp.52-63, 1991.
- 14) 林三雄, 岡本伸, 小谷俊介, 加藤博人, Jinhua, F. : P C 部材の履歴特性と P C 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, pp.57-67, 1995.
- 15) Takeda, T., Nielsen, N.N. and Sozen, M.A.:Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake, Proc. of ASCE, ST, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, 1970.
- 16) 川島一彦, Macrae, G. A., 星隈順一, 長屋和宏 : 残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.183-192, 1994.
- 17) 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書, 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会, 平成 7 年 12 月.
- 18) 睦好宏史, Zatar,W, 牧剛史 : プレストレスを導入した鉄筋コンクリート橋脚の耐震性状, 土木学会論文集投稿中

(睦好宏史)