

論文 常時偏心鉛直荷重が作用するコンクリート橋脚の耐震特性について

坪井聡*¹・池端信哉*²・山口隆裕*³・池田尚治*⁴

要旨：本研究は常時偏心鉛直荷重が作用するコンクリート橋脚について、構造形式、および地震波の極性に着目し耐震性能を検討したものである。実験の結果、常時偏心鉛直荷重の作用するコンクリート橋脚は偏心のない橋脚に比べて靱性のある挙動を示すが、地震波の極性に拘わらず張り出し側に変形が増大することが認められた。また常時偏心鉛直荷重が作用する橋脚に軸方向プレストレスを導入した場合、従来の鉄筋コンクリート橋脚に比べて残留変位を抑制する効果が認められた。

キーワード：地震時挙動、橋脚、偏心荷重、残留変位

1. はじめに

都市内高架橋などに採用されている上部構造支持部の張り出しが片側に大きい逆L字形橋脚は常時に偏心鉛直荷重を受けており、大地震時には張り出し側に変形挙動の卓越する恐れがある。本研究は、常時偏心鉛直荷重を受ける鉄筋コンクリート（以下 RC と記す）橋脚が水平方向の地震力を受けたときの耐震性の検討を目的としたものである。実験には RC 柱供試体と、その耐震性能の向上を目的として軸方向にプレストレスを導入した PC 柱供試体とを用いた。載荷実験としては静的正負繰返し載荷実験と、実地震下での応答挙動を生起させるため準動的載荷実験を行った。また対象とした部材の特殊性から準動的載荷実験では偏心方向と地震波の極性に着目し、入力地震波の極性のみを逆とした場合の影響についても検討することとした。

2. 実験概要

2.1 偏心曲げモーメントの置換

本実験では、載荷装置の制約から供試体の形状は逆L字形ではなく普通の対称な鉛直柱とし、偏心鉛直荷重の影響を実験の最初に与える水平荷重（以下、偏心相当荷重と記す）によって考慮することとした。すなわち図-1に示すように、偏心鉛直力によって柱基部に加わる曲げモーメント（図-1、a）を、水平荷重によって生じる曲げモーメント（同b）に置き換えて載荷実験を行うこととした。このとき柱全高に作用する曲げモーメント分布が台形とは異なって三角形となり、せん断力分布も実際の逆L字形柱と若干異なるが、耐荷挙動を支配する柱基部での曲げモーメントは逆L字形柱とほぼ同じであることから、この方法を採用した。なおせん断に関しては今回の載荷方法の方が厳しい条件となっている。

偏心相当荷重は文献を参照して¹⁾ 次のように求めた。文献によると、逆L字形橋脚の柱基部に生じる曲げモーメントのうち、鉛直力の偏

※1 横浜国立大学工学研究科 計画建設学専攻（正会員）

※2 横浜国立大学 工学部建設学科

※3 横浜国立大学助手 工学部建設学科（正会員）

※4 横浜国立大学教授 工学部建設学科 工博（正会員）

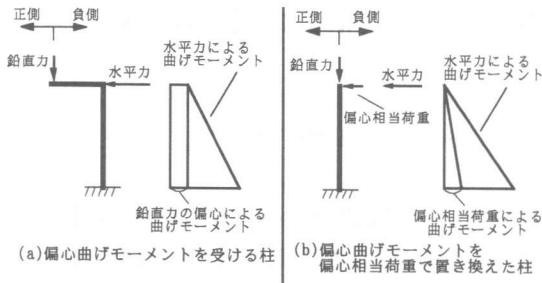


図-1 偏心曲げモーメントの
偏心相当荷重への置換

によるもの (M_o) と設計地震力によるもの (M_e) との比の平均値は 0.82 であり、設計では橋脚の張り出しの逆の側 (以下、負側と記す) の主鉄筋量は、橋脚の張り出している側 (以下、正側と記す) の 1.82 倍となるが、今回の供試体では正負両側の主鉄筋量を同じとした。 $M_o/M_e=0.82$ より $M_o/(M_e+M_o)=0.45$ となるから、設計地震荷重時に負側の主鉄筋に作用する応力度 ($\sigma_s=294 \text{ MPa}$ ($=3,000 \text{ kgf/cm}^2$) とした) のうち鉛直力の偏心によるものは、

$$294 \times 0.45 = 132 \text{ MPa}$$

ということになる。RC 柱供試体において負側主鉄筋の応力が $\sigma_s=132 \text{ MPa}$ となる時の水平荷重を曲げ解析より求めると $P_o=70 \text{ kN}$ となり、これを偏心相当荷重とした。PC 柱も比較のために偏心相当荷重は同じとした。

2.2 実験供試体

供試体形状を図-2 に、諸元を表-1 に示す。RC 柱供試体と PC 柱供試体の曲げ耐力はほぼ同じとなるようにした。また主鉄筋量は正側と負側で同じとした。PC 鋼材にはより線を用い、プ

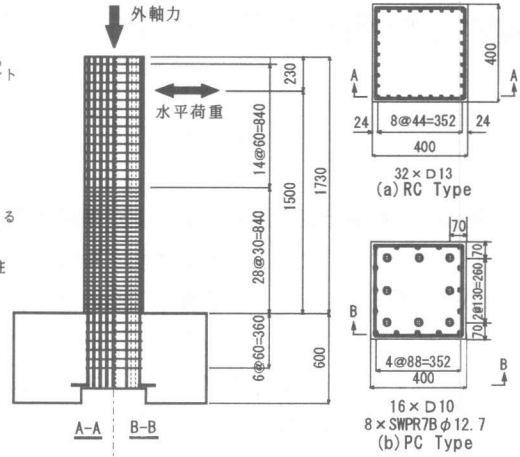


図-2 供試体形状

表-2 材料の力学的特性

種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D6	407	612	/	161
D10	402	586		190
D13	400	490		184
SWPR7B	1.75×10^3	1.94×10^3		194
コンクリート	/	3.0	51	28

レストレスは文献2) を参考に 4 MPa とした。使用した鋼材とコンクリートの力学的特性を表-2 に示す。

2.3 荷重方法

既往の研究¹⁾ の振動台実験で、逆L字形橋脚は正側に偏って振動することが示されている。今回の静的正負荷重実験ではこれを参考に、正側に偏って荷重することにした。荷重ステップを図-3 に示す。正側に偏心相当荷重を荷重し、その位置から正側には回転角 r が $1/200$ の整数倍となる変位で各サイクル毎に増やしていく。

表-1 供試体の諸元

供試体名 ^{※1}	補強筋 (鋼材比)			コンクリート強度 (MPa)	フ°レストレス (MPa)	外軸応力 (MPa)
	軸方向鉄筋	帯鉄筋	PC 鋼材			
RE-ST	32D13 (2.6%)	28D6@30 (0.50%)	8×SWPR7B $\phi 12.7$ (0.50%)	51	4.0	1.0
RE-PD						
RE-PDR						
PE-ST	16D10 (0.72%)	/	/	/	/	/
PE-PD						
PE-PDR						

※1 (タイ°) - (荷重方法)

(タイ°) R;RC P;PC

(荷重方法) ...ST;静的荷重 PD;準動的荷重 (順波) PDR;準動的荷重 (逆波)

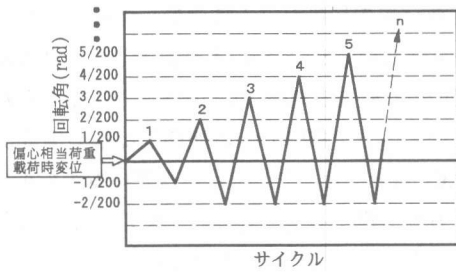


図-3 荷重ステップ

負側への変形量は $r = -2/200$ を限度とし、以降各サイクル一定とした。なお上部工の自重を想定した軸力（以下、外軸力）1.0 MPa を偏心相当荷重載荷前に載荷した。準動的載荷実験でも同様に、外軸力と偏心相当荷重を載荷した時点を地震作用前の状態と仮定し載荷を始めた。本論文内で示す荷重、変位、回転角の値は偏心相当荷重載荷時を基点としたものである。

3. 静的正負載荷実験

3.1 耐荷挙動

実験より得られた降伏荷重および曲げ耐力、等の結果を表-3に示す。ここで降伏荷重は負側主鉄筋が降伏応力度に達した時の水平荷重としている。図-4には得られた荷重-変位関係の正側領域を示す。なお関連する実験において、本実験での供試体と同形状の供試体を用い、偏心曲げモーメントの作用していない状態での正負繰り返し載荷実験が行われており²⁾、その耐荷挙動の結果を今回の結果との比較のために参照した。ただしコンクリートの圧縮強度が本実験より小さく、35MPaである。また図-4においては対称載荷実験についても偏心相当荷重分を差し引いて示している。RC柱供試体 RE-STは回転角 $r = 9/200$ で最大耐力 158kN を記録して正側下端部が圧壊、そのサイクルの負側載荷で負側の主鉄筋が基部から 25cm 付近で座屈した。しかし耐力低下はほとんどなく、この後も供試体は粘りのある挙動を示したが、 $r = 14/200$ で急激に耐力が低下し最大耐力の 63%となった。

PC柱供試体 PE-STは $r = 3/200$ で最大耐力 154 kN を記録した。以降 9/200 載荷時に正側下端部

表-3 静的載荷実験結果

構造	降伏荷重 (kN)	降伏変位 (mm)	最大荷重 (kN)
RC	95	6.6	158
PC	87	6.0	154

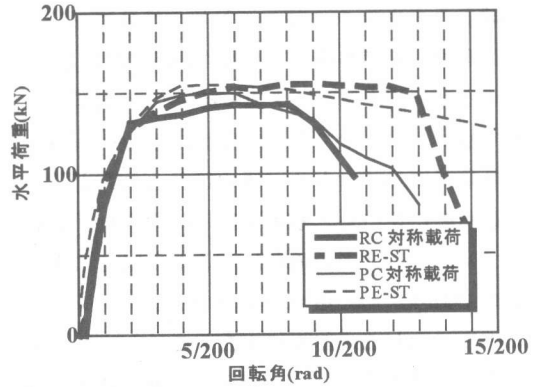


図-4 荷重-変位関係

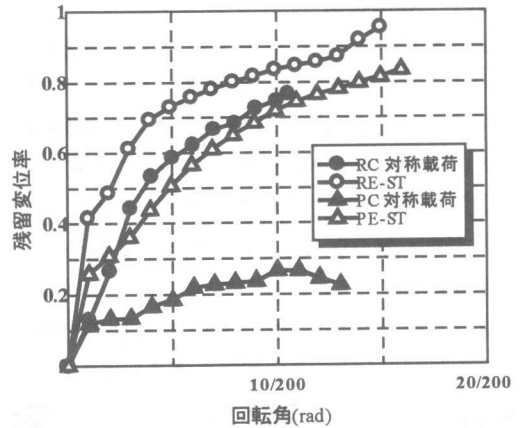


図-5 残留変位率

においてかぶりの剥離があったものの、負側ではかぶりの剥離、主筋の座屈ともに認められず健全であった。この後、 $r = 12/200$ で負側の PC 鋼材が降伏したが、正側では最終載荷時 ($r = 16/200$) まで PC 鋼材の降伏はなく、急激な耐力の低下は認められなかった。

図-4から RC 柱と PC 柱とも偏心鉛直荷重を考慮して偏載荷を行った方が、対称に載荷した場合に比べて靱性のある耐荷挙動を示すことが認められる。また、PC 柱の方が RC 柱よりも対称載荷と偏載荷の両ケースにおいて靱性のある挙動を示した。

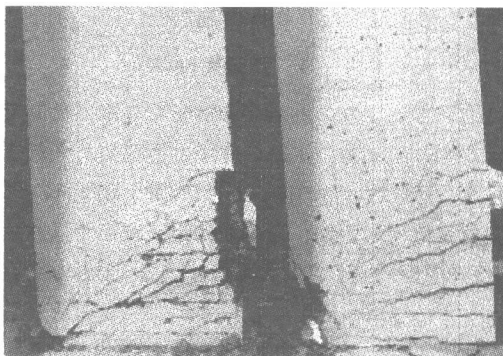
3.2 残留変位の比較

残留変位を各サイクルでの最大変位で除した値を残留変位率とし、それらの比較を図-5に示す。残留変位率に関しては、偏載荷の方が対称載荷よりも大きくなっており、設計においては注意すべきである。また対称載荷におけるPC柱の残留変位率はこれまでの結果^{3) 4)}と同様、RC柱に比べてかなり小さくなることが示された。

偏載荷においてもその傾向は見られたが、対称載荷時に比べると残留変位率は大きい。これはプレストレスを対称に導入したことによるものであり、偏心鉛直力を受ける柱にプレストレスを導入して残留変位率を小さくしようとする場合には偏心に合わせたプレストレスの導入を行うことが必要である。

3.3 損傷状況

供試体 RE-ST と PE-ST の $r=14/200$ 載荷時におけるひび割れ発生状況を写真-1に示す。写真-1に示すようにPC柱とRC柱の終局時付近での損傷状況は大きく異なっており、RC柱では負側の主鉄筋が座屈し外側に歪曲したためにフーチング上面から高さ1Hに渡って負側のかぶりが剥離しているのに対して、PC柱では剥離は見られない。またPC柱ではRC柱に比べて曲げひび割れが少なく、その間隔も疎であった⁵⁾。



(正側) (負側) (正側) (負側)
(a) RC柱 (b) PC柱

写真-1 ひび割れ発生状況 ($r=14/200$)

4. 準動的載荷実験

4.1 初期設定

a) 入力地震波: 地震波は兵庫県南部地震にお

いて神戸海洋気象台 (I種地盤) で観測された加速度波形のNS成分の15秒間とした。最大加速度の生起時刻が2.55秒となるように初期微動及び後半部分を省略し、時間間隔は解の精度から0.01秒とした。ここでは地震波の極性を逆にしたものも用いることとし、正側に大きく応答する極性を持つ波を以後順波と記し、その逆の極性を持つ波を逆波と記すこととする。

b) 初期剛性: 各供試体の初期剛性は、静的正負載荷実験の結果を参照して荷重-変位曲線の原点とひび割れ時とを結ぶ割線剛性とした。初期剛性はRC柱供試体; 53.2 kN/mm、PC柱供試体; 45.6 kN/mmである。

c) 固有周期と仮想質量: RC柱の固有周期を0.30秒として仮想質量Mを求めた。M=121 tonはPC柱についても同じとした。この時PC柱供試体の固有周期を仮想質量と初期剛性から求めると0.32秒となり、仮想質量、固有周期共にRC柱とほぼ同じ条件で実験を行ったことになる。

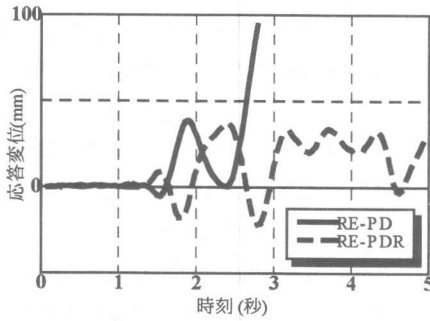
d) 減衰定数: 主鉄筋の降伏前は $h=0.03$ 、降伏後は $h=0$ とした。

e) 地震波の入力倍率: 各供試体で共通の0.25倍とした。道路橋示方書⁶⁾に準拠した方法により設定した場合、対象構造物をB種の橋、 $\delta u=5\delta y$ (δu 、 δy : 道示V9.3に規定する設計終局変位および降伏変位)と想定し耐荷能力の相似則を考慮すると、入力倍率はRC柱、PC柱ともに0.17倍となる。今回の実験ではこの設定方法の約1.5倍の強さを持つ地震波を入力し、大変形時での応答挙動を見ることとした。

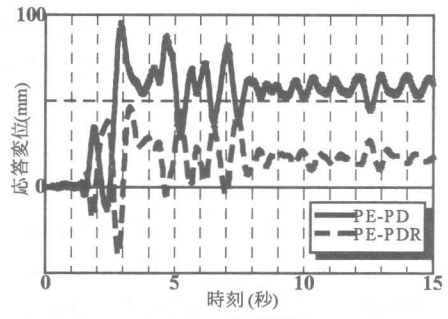
4.2 実験結果と考察

4.2.1 地震波の極性の違いによる影響

実験で得られた時刻歴応答変位曲線を図-6に示す。なお、RE-PD供試体およびRE-PDR供試体は試験装置の都合により、それぞれ $t=2.74$ 秒、 $t=4.90$ 秒で実験を中止した。偏心軸力を受ける場合順波はもちろん逆波でもRC柱、PC柱ともに応答が正側に偏る結果となった。ただしPC柱の場合、順波作用時の振動のドリフト量は逆波の2倍程度となっており、RC柱

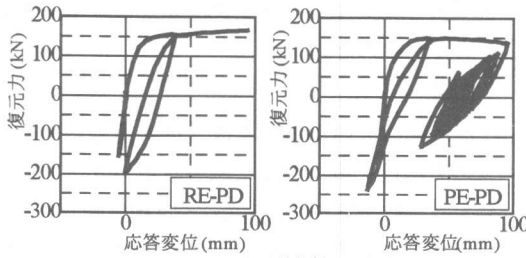


(a)RC柱供試体

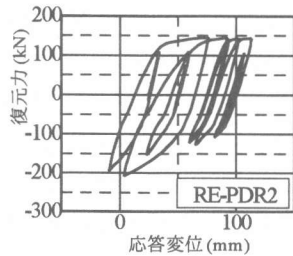
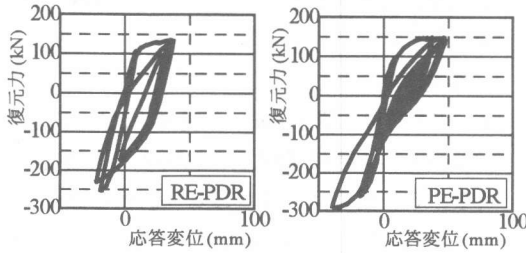


(b)PC柱供試体

図-6 時刻歴応答変位曲線



(a) 順波



(b) 逆波

図-7 復元力-応答変位曲線

にもその傾向は見られる。また PC 柱の残留変位は順波では 60.0mm だったのに対して逆波では 17.4mm であり非常に大きな差となっている。実験が最後まで行われた PC 柱において、作用地震波の極性が逆になったときの損傷状況の違いについて見てみると、順波では正側のみで圧壊が生じたのに対し、逆波では正側と負側の両方で圧壊が生じていた。以上の結果から地震波

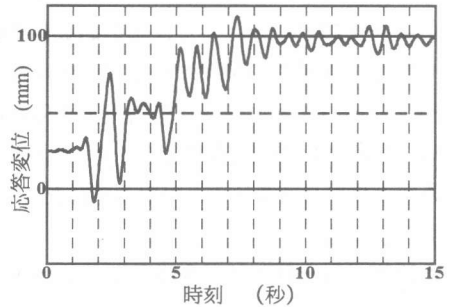


図-8 時刻歴応答変位曲線 (RE-PDR2 供試体)

の極性によって、偏心鉛直力を受ける橋脚では応答挙動が大きく異なり、損傷状況にも違いの生じることが明らかにされた。

4.2.2 RC 柱と PC 柱との応答挙動の比較

実験で得られた復元力-応答変位曲線を図-7に示す。この中で RE-PDR2 とは RE-PDR 供試体が実験を中止した状態から水平荷重を偏心相当荷重まで戻し、2度目の準動的载荷を行ったものである。初期設定値は RE-PDR と同じである。図-7(a)に順波での結果を示すが、この場合早期に大変形し、PC 柱の PC 鋼材も降伏したため RC 柱と応答挙動に大きな差は見られない。一方逆波作用時では RC 柱の履歴ループは紡錘形に近い形状を示すのに対し、PC 柱では $P = -70\text{kN}$ 付近で履歴曲線がくびれ、残留変位が 0mm に近づくという PC 柱特有の挙動が見られた。これらのことから偏心曲げモーメントの大きさに見合ったプレストレス量を負側に導入することにより、残留変位量を意図的に調整できると考えられる。

図-8にRE-PDR2の時刻歴応答変位曲線を示す。残留変位が25.2mm生じた状態から2度目の载荷を始めており、逆波であっても正側へのドリフト量は100mmとかなり大きなものとなっている。RC供試体は塑性変形能に優る反面、鉄筋の座屈などから残留変位が累積してこのような挙動を示すと考えられる。このことから、偏心鉛直力を受けるRC橋脚が被災して残留変形が残っている場合には、地震波の極性に関わらず余震による変形が急激に正側に進行することが予想される。また、準動的载荷実験で得られた応答挙動の結果から見て、作用地震波の極性の違いにもよるが、静的载荷で偏载荷を行い、その負側の最大変形量を $r=-2/200$ としたことは妥当であることが確認された。

5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 鉛直力の偏心による曲げモーメントを水平荷重で置き換え、地震時の変形挙動を模擬し片側に偏った静的正負载荷実験を行うことにより、容易に偏心鉛直荷重を受ける柱の地震時の耐荷挙動を把握することができた。

(2) RC柱、PC柱ともに偏心鉛直荷重を考慮して偏った载荷を行う方が、対称に载荷した場合より靱性のある耐荷挙動を示すことが明らかとなった。またPC柱の方が対称载荷と偏载荷の両ケースにおいてRC柱よりも靱性のある挙動となることが示された。

(3) 静的正負载荷実験の結果からPC柱とRC柱の終局時付近における損傷状況は大きく異なることが分かった。PC柱においては負側での座屈が発生せず、また曲げひび割れの発生間隔も疎であることが示された。

(4) 常時偏心鉛直荷重が作用する橋脚の地震時応答挙動は地震波の極性によって大きく異なることが示された。すなわち偏心鉛直荷重が作用する橋脚の設計においては順波と逆波の2種類の地震波について検討する必要があると考えられる。

(5) 常時偏心鉛直荷重が作用する橋脚にプレストレスを導入する場合には、偏心曲げモーメントの大きさに応じてプレストレス導入量を負側に適切に増やすことにより、残留変形抑制効果の増大および地震時における正側への変位卓越の抑制が期待できると思われる。

(6) 常時偏心鉛直荷重が作用するRC橋脚が被災してある程度の残留変形が生じた場合、極性が逆波の余震であっても応答挙動は正側方向へ大きくドリフトし、残留変形が急激に増大することが示された。

謝辞

供試体の製作においては(株)富士ビー・エスの太田氏と成末氏にご協力を頂いた。また実験を行うにあたり、森下豊技官(横浜国立大学)、白浜寛君(現(株)鹿島建設)、佐々木健君(現建設省)に参加協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川島一彦、運上茂樹、長島博之、飯田寛之、向秀毅：RC橋脚の動的耐力に関する実験的研究(その5) 偏心曲げを受けるRC橋脚の動的耐力・変形性能、土木研究所資料、No.3319、1995
- 2) (社)プレストレスコンクリート技術協会橋脚PC構造研究委員会：プレストレスコンクリート橋脚の耐震性に関する研究(その1)、1998
- 3) 伊藤忠彦、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応答挙動、コンクリート工学年次論文報告集 vol19.2、pp1197-1202、1997
- 4) 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耐震性能、コンクリート工学年次論文報告集 vol20.3、pp745-750、1998
- 5) 池田尚治、山口隆裕、坪井聡：偏心鉛直荷重のもとでのコンクリート橋脚の横方向耐震挙動について、第3回都市直下地震総合シンポジウム講演概要集、1998
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、pp65-70、1996