

論文 上下動と水平動を受ける逆L字形コンクリート橋脚の 地震応答特性に関する研究

池端信哉^{*1}・坪井聡^{*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を受ける逆L字形コンクリート橋脚が上下方向と水平方向の地震動を受ける場合の応答特性を把握しようとするものである。実験の結果、偏心鉛直荷重の変動は逆L字形橋脚の地震応答挙動に致命的な影響を与えるものではなかったが、地震波の水平成分と鉛直成分との組み合わせによっては応答変位がさらに大きくなるなど、橋脚にとって危険側の状況となる恐れのあることが示された。また、橋脚の軸方向にプレストレスを導入することにより、従来の鉄筋コンクリート橋脚に比べ残留変位を低減できることが確認された。

キーワード：偏心鉛直力、上下動、残留変位、プレストレスコンクリート

1. はじめに

高速道路のインターチェンジやジャンクションなどには、立地的な制約から上部構造支持部の張出しが片側に長い逆L字形の橋脚が採用されることがあるが、こういった橋脚には上部構造の重量および張出し部の自重によって常時偏心鉛直荷重が作用している。このような橋脚に大きな地震力が作用したときの応答挙動の検討が必要と思われる^{1) 2)}。

また逆L字形橋脚では地震波加速度の鉛直成分の作用に伴って変動する偏心鉛直力も地震時の応答挙動に大きな影響を与えると考えられる。本研究は、地震時の上下動によって変動する偏心鉛直力と水平動による横方向振動とを同時に受ける鉄筋コンクリートおよびプレストレスコンクリート偏心橋脚の地震応答特性を把握することを目的とした実験的研究である。

2. 実験概要

2.1 実験供試体と載荷方法

実験に使用した供試体の形状と諸元をそれぞれ図-1と表-1に示す。実験供試体は柱部と張

出し部とも一辺400mmの正方形断面で、張出し部で破壊が生じないように設計した。供試体は鉄筋コンクリート構造（以下RCタイプ）と軸方向にプレストレスを導入することにより耐震性能の向上を図ったプレストレスコンクリート構造（以下PCタイプ）の2種類とした。RCタイプとPCタイプの曲げ耐力はほぼ同じになっている。供試体数は両タイプとも2体ずつの計4体である。実験は地震時の応答挙動を生起させるために準動的（仮動的）地震応答載荷システムを用いて行った。RC、PCそれぞれのタイプの1体には作用地震波の鉛直成分により偏心鉛直荷重を変動させて載荷し、残りの1体には比較のために上下動を考慮せずに鉛直荷重を一定に保って載荷した。

載荷には鉛直、水平の2本のジャッキを用い、それぞれを独立に制御した。常時の偏心死荷重としては157kN（偏心がないとして載荷した場合1MPaの軸方向圧縮応力度に相当）の鉛直荷重を載荷し、偏心量は川島・運上らの研究³⁾を参照して求めた。これによると実構造物における逆L字形橋脚の柱基部に生じる曲げモーメン

*1 横浜国立大学大学院 工学研究科計画建設学専攻（正会員）

*2 日本道路公団 東北支社 工修（正会員）

*3 横浜国立大学助手 工学部建設学科 工博（正会員）

*4 横浜国立大学教授 工学部建設学科 工博（正会員）

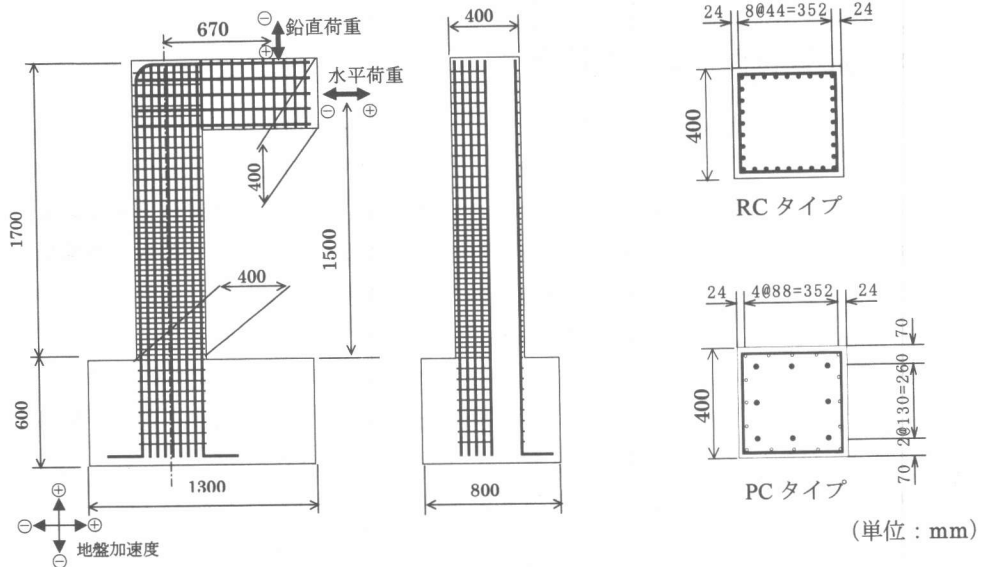


図-1 供試体形状

表-1 供試体概要

	補強筋 (鋼材比)		PC鋼材	コンクリート強度 (MPa)	プレストレス (MPa)
	軸方向鉄筋	帯鉄筋			
RCタイプ	32-D13 (2.60%)	28D6@30 (0.50%)	—	37	—
PCタイプ	16-D10 (0.72%)	—	8×SWPR7B (0.50%)	34	4

トのうち偏心鉛直力によるもの (M_0) と設計地震力によるもの (M_E) との比 (M_0/M_E) の平均値は 0.8 程度、 $M_E / (M_E + M_0)$ の比で 0.55 程度となっている。これに対応させて本供試体における偏心量は 670mm とした。柱断面の設計に際しては張出し側の鋼材量を少なくすることも考えられるが、ここでは対称配筋として柱断面の設計を行った。

2.2 初期設定

準動的地震応答載荷実験に使用した初期設定値を項目別に以下に示す。

(1) 地震波：実験に使用した地震波を図-2 に示す。地震波は兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台 (I 種地盤) で観測された加速度波形の NS 成分と UD 成分である。初期微動および後半部分を省略し継続時間を 15 秒間とした。実際に観測された加速度データの時間間隔は 0.02 秒であるが、今回は制御の安定化をはかるため 0.01 秒間隔に線形補間して用いた。最大加速度は水平方向で -818gal、鉛直方向で +332gal となっ

ている。

供試体は道路橋示方書⁴⁾のタイプIIの地震動に対して設計されたものとし、対象構造物をB種、 $\delta u = 5 \delta y$ (δu : 終局変位, δy : 降伏変位) と想定し、実構造物と供試体の耐荷能力を考慮した相似則を適用して入力加速度を調整した。これにより水平方向の加速度の補正係数は 0.17 となった。なお、逆L字形橋脚のように常時偏心荷重を受けている場合、水平方向地震波の極

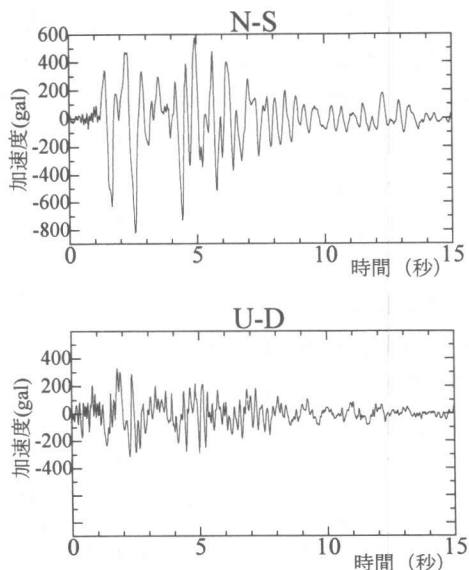


図-2 入力地震波

性により大きく応答変位が異なることが示されているが²⁾、今回の極性は張出し側に大きく応答するように設定したものである。鉛直荷重の載荷に関しては、橋脚の軸方向の剛性は曲げ剛性に対して十分に大きいことから、鉛直方向の応答による増幅がほとんどないと考え、鉛直方向の加速度による偏心鉛直荷重の変動のみを考慮した。すなわち、入力加速度の倍率を1倍として初期値の157kNを基点に計算した鉛直荷重を変動させて載荷した。今回用いた地震波では鉛直荷重の最大値は+332gal時の210kN、最小値は-315gal時の107kNとなる。

(2) 初期剛性：初期剛性Kは、既往の静的載荷実験⁵⁾により得られた結果を参照し、荷重-変位曲線の原点とひび割れ発生時の点とを結ぶ割線剛性とした。今回の実験に用いた初期剛性は全供試体共通で49.0kN/mmとした。

(3) 固有周期と仮想質量：固有周期Tは0.30秒とした。仮想質量Mは固有周期および初期剛性の値から次式により求めた。

$$M = T^2 \cdot K / 4\pi^2$$

この結果117tonとなった。

(4) 減衰定数：水平方向の減衰定数は、主鉄筋の降伏前は $h=0.03$ 、降伏後は $h=0$ とした⁶⁾。

3. 実験結果と考察

図-3 に実験より得られた時刻歴応答変位曲線を、図-4 には復元力-応答変位曲線をRCタイプ、PCタイプそれぞれについて示す。PCタイプで上下動を考慮した供試体は、地震波の生起時刻1.76秒時に載荷装置の都合により実験が停止したが、PC鋼材が降伏していないこと、耐力の低下が見られなかったことから一旦初期の状態に戻し、再度初めから実験を行った。結果はその際に得られたものである。図では張出し側に動くときの荷重および変位を正としている。

逆L字形橋脚においては、上下動の影響を考慮せずに鉛直荷重を一定に保った場合でも振動の中心は張出し側にドリフトし、応答変位が張出し側に偏っていくことが確認された。RCタイプの場合はPCタイプに比べてその傾向が顕著であり、残留変位も非常に大きくなっている。

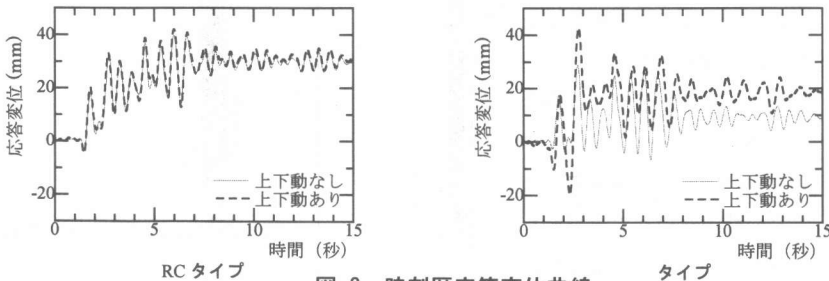


図-3 時刻歴応答変位曲線

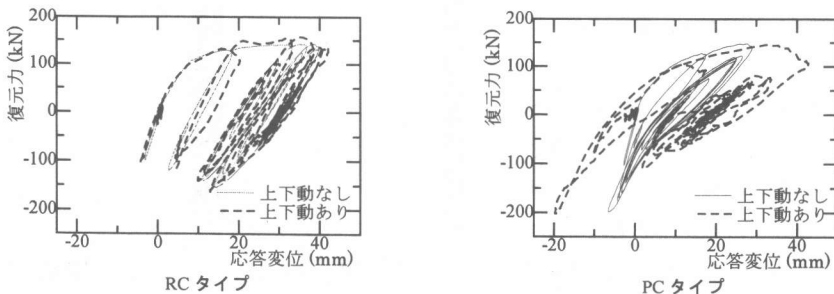


図-4 復元力-応答変位関係

上下動の影響を考慮し鉛直荷重を変動させて
 載荷した場合、RC タイプでは鉛直荷重が一定
 の場合とほぼ同じ応答挙動を示したが、PC タイ
 プでは異なった結果となった。応答の全振幅も
 大きくなり、残留変位も増大している。RC タ
 イプで上下動の影響によって応答に変化が生じ
 ていないことの原因としては、地震作用時早期
 に振動の中心がドリフトし変形量が大きくなり、
 供試体の剛性がかなり低下し、固有周期が長く
 なったためと考えられる。一方、PC 供試体では
 上下動を考慮した場合、張出し側と逆側に大き
 く応答するなど、上下動を考慮しない場合と比
 べて大きく異なった応答を示すという興味深い
 結果となった。2.3 秒時には-20mm の変位を記
 録している。これは張出しと逆側に最大荷重が
 生じ、かつ鉛直荷重が最小となったときであり、
 張出しの逆側に応答する条件が重なったため
 であると考えられる。今回の実験では鉛直荷重の
 変動が橋脚の地震応答挙動に致命的な影響を与
 えるものではなかったが、地震波の水平成分と
 鉛直成分との組み合わせによっては応答変位が
 さらに大きくなる恐れのあることが示された。
 表-2 に実験により得られた最大応答変位およ
 び実験終了時である 15 秒時の残留変位を示す。
 PC タイプの残留変位は上下動を考慮した場合
 RC タイプの 2/3 程度、考慮しない場合 1/
 3 程度であり、地震後の橋脚の供用性を考えた
 場合、PC 構造は好ましい性能を持つことがわか
 る。今回の供試体は張出し側にもその反対側
 にも同量のプレストレスを導入しているが、偏
 心による曲げモーメントによって引張りを受ける
 側に、より大きなプレストレスを導入すること
 で、残留変位をさらに抑制できるものと考えら
 れる。写真-1 に 15 秒時の基部の損傷状況を
 示す。RC タイプと PC タイプを比べて見ると
 両タイプともせん断ひび割れは確認できないが、
 曲げひび割れは RC タイプの方が本数も多く
 その間隔も密であることがよくわかる。上下
 動の影響をしてみると、RC タイプの基部の損
 傷に顕著な差は認められないが、PC タイプの
 場合鉛直

荷重を変動させて載荷した供試体には他の供
 試体にはない張出し側基部のコンクリートの
 圧壊が見られた。ただし、この供試体は 1.76
 秒時まで載荷後、再載荷したものであり、
 圧壊が生じたのが上下動の影響によるもの
 かどうかは、本実験結果からだけでは明確に
 述べることはできない。また今回の供試体は
 応答が偏ったため結果的に非対称載荷とな
 っており、参考文献 5) で行われた静的な
 対称載荷と比べ基部の損傷は軽微なもので
 あった。

一度大変形を受けた逆 L 字形橋脚の保有耐
 力や応答特性を把握するため、同一の地震波
 をもう一度入力するという実験を PC タイプ
 で鉛直荷重一定の場合を除く各供試体につ
 いて行った。

表-2 最大応答変位・残留変位

RC タイプ	最大変位			残留変位
	上下動なし	+39.8	-3.18	+29.9
上下動あり	+42.1	-4.68	+31.2	
PC タイプ	上下動なし	+28.9	-6.60	+8.96
	上下動あり	+42.8	-19.8	+18.5

(単位:mm)

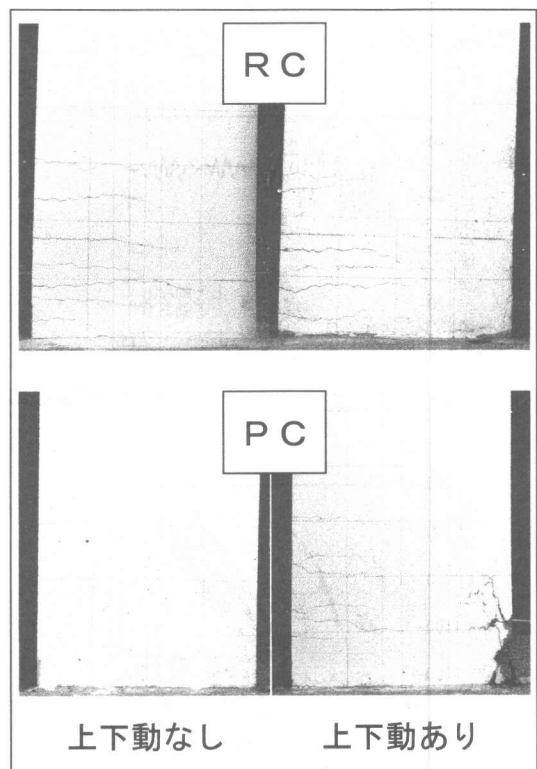


写真-1 基部の損傷状況

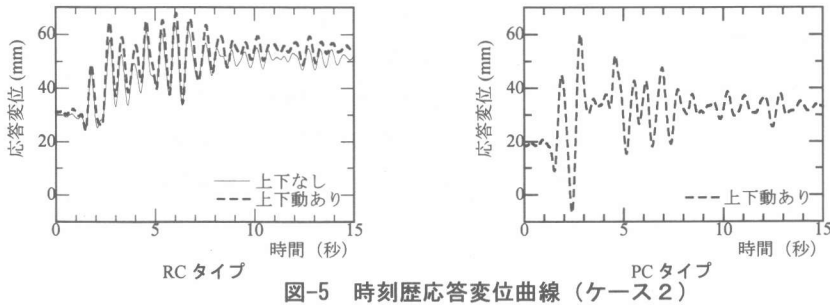


図-5 時刻歴応答変位曲線 (ケース2)

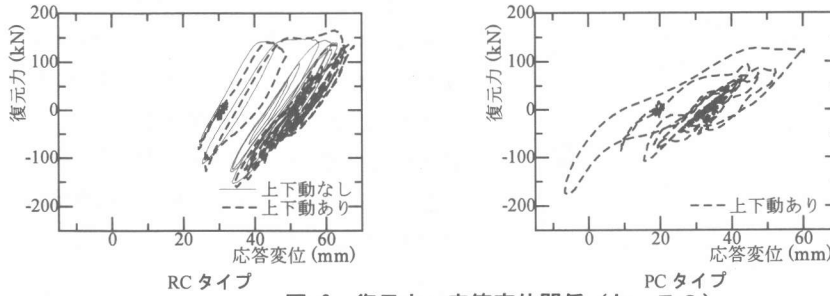


図-6 復元力-応答変位関係 (ケース2)

この場合をケース2とし、図-5および図-6に得られた結果を示すが、一度目の载荷に比べて早期から変位が張出し側に進行することが示されている。

この結果から、一度大きな地震を経験し損傷を受けた逆L字形橋脚は、大規模な余震が発生した際にはさらに大きく張出し側に変位が進行し残留変位が一層大きくなることがわかった。

4. 応答解析

RCタイプの供試体について時刻歴応答解析を行った。解析に使用したのは、鉄筋降伏後の除荷時剛性を塑性率により低下させる剛性低下型モデルである。この解析モデルは一般の偏心がない橋脚においては高い精度で解が得られることがわかっている。このモデルに偏心鉛直力を考慮した正負非対称な復元力特性を入力することにより、逆L字形柱に適用した。また、解析においては上下動による偏心鉛直荷重の変動を、柱基部への付加モーメントに置換している。解析に用いた復元力特性を図-7に、応答解析結果と実験結果との比較を図-8に示す。解析結果は、振動の細部で実験結果と差がある

ものの、振動の中心が張出し側にシフトしていく様子および最大応答変位など、全体的な挙動をよく表現している。

実験においては、上下動の有無に関わらず得られる応答挙動はほぼ同じものとなったが、解析においても同様な結果となった。実験と解析の両方において、今回の実験の範囲内ではRC柱の変位応答挙動は上下動の有無による影響をほとんど受けないことを示すことができた。

偏心橋脚では、除荷時の剛性変化の割合が一般の橋脚と異なるが、それを正しく表現することによって今後さらに精度の良い解が得られると考えられる。

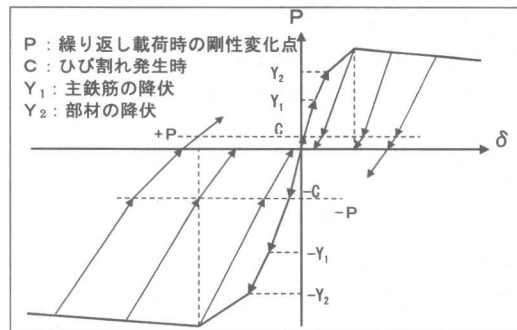


図-7 復元力モデル

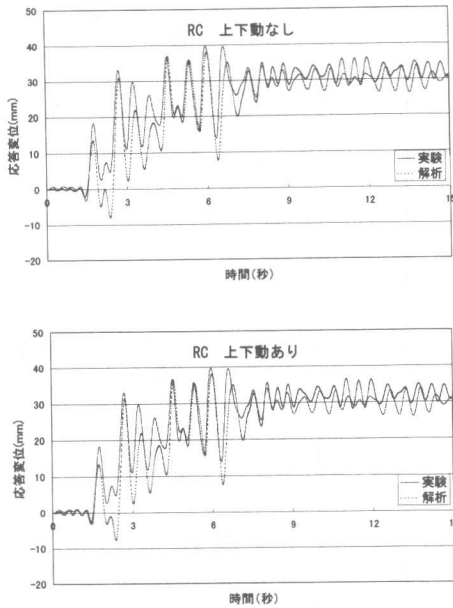


図-8 実験値と解析値の比較

5. 結論

本研究により得られた結果をまとめると次の通りとなる。

(1) 逆L字形橋脚では上下動の影響の有無に関わらず早期から振動の中心が張出し側にドリフトし、応答が偏る傾向が示された。ただし、基部の損傷状況は、一般的な静的正負繰返し載荷実験の結果⁵⁾と比較した場合、軽微なものであった。

(2) PC 構造は RC 構造に比べて残留変位抑制の効果が高く、常時偏心鉛直荷重を受ける逆L字形橋脚においてもその構造形式は好ましいものであることが確認された。

(3) 偏心鉛直荷重の変動が逆L字形橋脚の地震応答挙動に致命的な影響を与えるものではなかったが、地震波の水平成分と鉛直成分の組み合わせによっては応答変位がさらに大きくなるなど、橋脚にとって危険側の条件となる恐れのあることが示された。

(4) 偏心鉛直荷重を受ける逆L字形橋脚は、一度大きな地震を経験し残留変位が生じている場合、再び地震が起これば張出し側に一層変位が

進行することが示された。

(5) 偏心鉛直力を考慮した正負非対称な復元力モデルを用いて地震応答解析を行うことにより、偏心柱特有の地震作用時初期から応答変位が偏心側にドリフトする挙動を解析的に求めることができた。

謝辞

供試体の製作において(株)富士ビー・エスの大田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)に参加協力を得た。ここに感謝の意を表します。なお、本研究は文部省科学研究費・特定領域研究(A)

(2) No.11115210(研究代表者 池田尚治, 領域代表者 土岐憲三教授)の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 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荷挙動について, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp351-354, 1998
- 2) 坪井聡, 池端信哉, 山口隆裕, 池田尚治: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp1189-1194, 1999
- 3) 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
- 4) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, (社)日本道路橋会, 1996
- 5) 池田尚治, 森拓也, 吉岡民夫: 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, プレストレスコンクリート, Vol.40, No.5, 1998
- 6) 山口隆裕, 武村浩志, 平陽兵, 池田尚治: 鉄筋コンクリートの準動的載荷実験における歪速度および粘性減衰の影響, コンクリート工学論文集, 第7巻第2号, 1996