

論文 PC 緊張材で桁と剛結合したコンクリート橋脚の耐震性

平 陽兵^{*1}・松田 哲夫^{*2}・山口 隆裕^{*3}・池田 尚治^{*4}

要旨：橋脚と橋桁とをPC緊張材で剛結合する構造形式の耐震性を検討するために、実橋をモデル化した供試体を用いて静的正負繰返し载荷実験および準動的载荷実験を行った。その結果、PC緊張材で桁と剛結合した橋脚は十分な耐力と変形性能を有し、地震時においても柱の損傷はごくわずかで耐震性能に優れていることが明らかとなった。

キーワード：鉄筋コンクリート橋脚、準動的载荷実験、耐震性、剛結合、Uテンドン

1. はじめに

松山自動車道の重信川高架橋の上部工は、内外ケーブル併用のプレキャストセグメント工法により架設されている。高架橋は延長約1.9kmの多径間ラーメン構造であり、施工の省力化を図るために橋脚柱頭部の桁もプレキャストセグメントとし、桁と橋脚とはU字形に配置したPC緊張材（以下、Uテンドンとする）によって剛結合するという新しい工法が採用された[1]。

本研究は桁と橋脚をUテンドンによって剛結合した構造形式の耐力挙動を明らかにすることを目的としたものである。供試体には実構造物を約1/6にモデル化した独立柱形式のものを、静的正負繰返し载荷実験と地震時の挙動を把握するために動的映像記録化システムを組み入れた準動的载荷実験を行った。

2. 実験供試体

図-1にUテンドンによって剛結合した供試体の形状を、表-1に各供試体の諸元を示す。図に示すように供試体の形状はT形になっており、実験においては実構造物と上下が逆になり、桁を反力床に固定し橋脚に当たる柱部に载荷を行った。柱部は実際の橋脚を約1/6にモデル化したもので、断面寸法は500×400mmとなっている。供試体は柱と桁との結合方法の違いにより2種類のタイプがあり、鉄筋コンクリート構造でそれぞれが分離している柱と桁をプレストレス

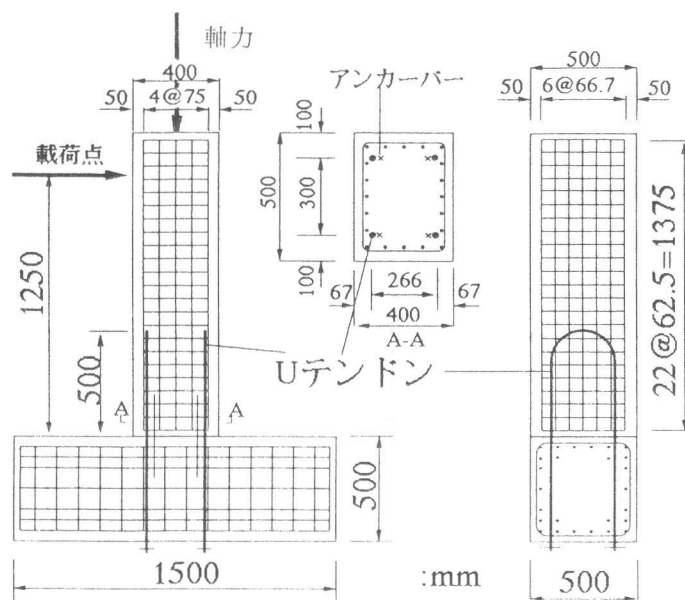


図-1 供試体の形状

* 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 高松建設局（正会員）

* 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）

によって剛結合したもの（PCタイプ）と、PCタイプとの比較のために作製した柱と桁が一体のRC構造のもの（RCタイプ）となっている。PCタイプのUテンдонは実構造物との比率を考慮してφ12.7mmPC鋼より線を使用した。PC鋼より線はφ26mmのシース管を通し、図-1に示すように載荷方向から見てU字形になるよう桁上面から1.25H（H：断面高さ）の位置で折り返し、桁の底面で定着してある。緊張力は1本あたり79.0kNとした。また、柱と桁が載荷荷重により水平方向にずれるのを防ぐために、アンカーバーとしてφ16mmの丸鋼4本を配してある。柱部の軸方向鉄筋にはD10およびD13、フープ筋にD6を用いており、鉄筋の配筋方法はRCタイプと同一となっている。また、PCタイプとRCタイプの曲げ耐力は同程度になるように設計されている。供試体の実験時のコンクリート圧縮強度は29.7MPaであった。表-2に、使用した鋼材の力学的特性を示す。

表-1 供試体の諸元

タイプ	供試体名 ¹⁾	軸方向鉄筋比 (%)	PC鋼材比 (%)	フープ筋比 (%)
PC	PC-S PC-PD1 PC-PD2	1.10	0	0.20
RC	RC-S RC-PD	1.10	0.20	0.20

1)(タイプ)ー

(載荷方法 S:静的載荷実験, PD:準動的載荷実験)

表-2 鋼材の力学的特性

鉄筋					
種類		降伏強度	引張強度	弾性係数	適用
呼び径	規格	(MPa)	(MPa)	(GPa)	
D6	SD295	340	530	190	フープ筋
D10	SD295	345	512	190	側方鉄筋
D13	SD295	339	502	180	主鉄筋

PC鋼より線			
種類	降伏荷重 (kN)	引張荷重 (kN)	弾性係数 (GPa)
φ12.7(SWPR7B)	168	186	194

3. 静的正負繰返し載荷実験

3. 1 実験概要

載荷には2本のアクチュエーターを使用し、柱断面に一定の軸圧縮応力0.98MPaを与えながら、水平変位または水平力を与えた。載荷方法は、材料の非線形性を考慮して求めたRCタイプの計算降伏荷重時の変位の正負の平均値を δ_{yc} として、変位を $1\delta_{yc}$ ずつ増加させながら載荷終了まで各変位段階で1回の正負載荷を行を行うことを基準とした。ただし、 $8\delta_{yc}$ においては5回の正負繰返し載荷を行った。実験はRC-Sより先に行い、PCタイプであるPC-Sにおいては降伏点が明確に示されないことが考えられたのでRC-Sの実験で得られた変位 δ_{yc} を基準にして載荷を行った。

3. 2 実験結果と考察

PC-SとRC-Sの静的正負載荷実験より得られた荷重－変位関係をそれぞれ図-2(a)と(b)に示す。変位は、水平力載荷位置での値を示す。なお、RC-Sの実験より得られた降伏荷重時の変位 δ_{yc} は5.0mmであった。PC-Sは変形量が $8\delta_{yc}$ を超えても耐力の低下が見られなかったため、 $12\delta_{yc}$ においても5回の繰返し載荷を行い、さらに負側のみ $-15\delta_{yc}$ まで載荷したが耐力の低下はほとんど生じなかった。PC-Sでは柱と桁の接合部での開口後に剛性が低下し始め、 $-8\delta_{yc}$ の時Uテンдонが降伏ひずみに達し耐力が最大値の125kNを示した。正側では降伏ひずみに達せず、耐力は負側と比べて10%程度小さい値を示した。Uテンдонの引張ひずみは、降伏点に達した $8\delta_{yc}$ 以降柱部の変形量が増大しているにもかかわらず減少しており、Uテンдонとグラウトとの間の付着切れが生じているものと思われた。接合部では変位の増加につれて開口幅が大きくなり、 $\pm 5\delta_{yc}$ 以降コンクリートに局所的な圧壊がみられたが、耐力の低下は小さいものであり耐荷挙動に大きな影響を

与えるものではなかった。PCタイプの耐荷挙動は大変形時の繰返し後でも残留変位の小さい弾性的な挙動を示し、非常に健全なものであった。また、柱と桁とが滑ることによる水平方向への変形は見られなかった。

RC-Sは軸方向鉄筋が降伏した後も耐力を保ちながら変形が進んでいるが、 $8\delta_{yc}$ において5回の繰返し载荷を行っている途中で、コンクリートの剥離とともに軸方向鉄筋が座屈し、接合部から15.5cm (0.4H) の高さにおけるフープ筋が降伏していた。この繰返しにより耐力が30%程度低下した。

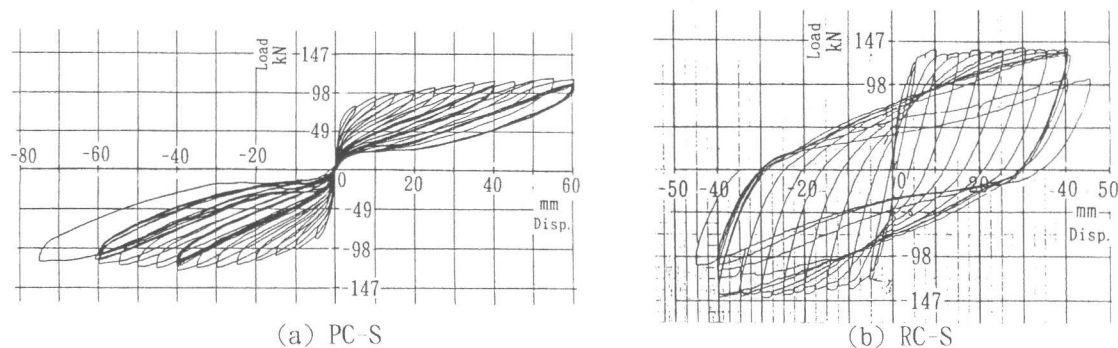


図-2 荷重-変位関係

図-3(a)(b)にPC-SとRC-Sの1回目の $+8\delta_{yc}$ 時のひび割れ状況をそれぞれ示す。PC-Sでは開口幅が約12.0mmとなり接合部における回転変形が大きく、柱には数本の曲げひび割れが生じた程度であった。Uテンダンの折り返し部が一種の段落とし部となり、斜めひび割れの発生が懸念されたが、この折り返し部周辺にはひび割れ幅が0.1mmと小さい曲げひび割れが生じただけで、これが大きく進展することはなかった。RC-Sでは曲げひび割れが多数発生しており、最大ひび割れ幅は4.0mmであった。またコンクリートの剥離も生じていた。

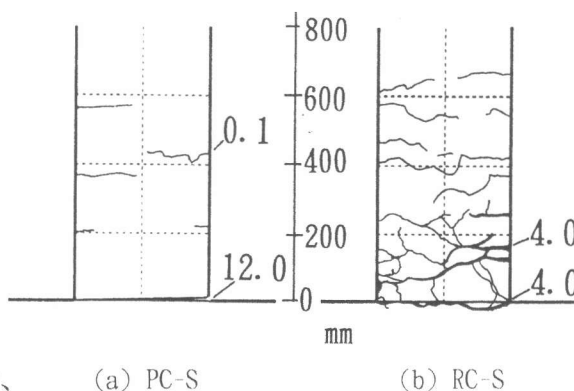


図-3 ひび割れ状況

4. 準動的载荷実験

4. 1 実験概要

兵庫県南部地震で記録された地震波を用いて、動的映像記録化システムを組み入れた準動的载荷実験を行った。入力地震波は神戸海洋気象台のNS成分の加速度波形とし、加速度データは0.01秒の時間間隔で15秒間とした。今回用いた入力加速度波形における最大加速度の生起時刻は初期微動を除いたため2.55秒時となっている。実験に用いた供試体と実験要因および初期入力データを表-3に示す。仮想質量は供試体を1質点系1自由度モデルと仮定し、固有周期が0.6秒および0.3秒となるようにして求めた。固有周期0.6秒は実構造物と対応するものであり、0.3秒は固有周期の影響を見るために、加速度応答スペクトルの大きいところに設定したものである。固有周期を求める際に用いた剛性は、静的载荷実験より得られたひび割れ前までの初期剛性とした。最大加速度の大きさは表の実験番号I～Ⅷに示す値としたが、ここで示す0.17G相当の加速度の値は、

PC鋼より線または鉄筋の応力がそれぞれ設計地震荷重時の応力に相当する1323MPa、294MPaとなるときの水平荷重の値を計算し、その荷重を仮想質量で除し、これを地盤の加速度としたものである。その他の加速度の大きさは0.17G相当との比例計算によって求めたものである。なお、実験Ⅰの0.195G相当は比較のために実験Ⅵと最大加速度の大きさを同じにしたものである。減衰定数は3%としPCタイプ、

RCタイプともに $1\delta_{yc}$

を越えてからは0とした。表-3に示すように、各供試体とも大きさの異なる加速度波形で2~3回の準動的載荷実験を加速度の小さい方から順に行った。

表-3 実験要因および初期入力データ

供試体名	実験 番号	固有周期 sec	初期剛性 kN/cm	仮想質量 ton	減衰定数	地震波レベル	最大加速度 gal
PC-PD1	I	0.6	686	626	0.03	0.195G相当	17.2
	II					818gal相当	73.6
	III					1636gal相当	147.2
PC-PD2	IV	0.6		626		0.17G 相当	15.0
	V	0.3		156		818gal相当	296.0
RC-PD	VI	0.6		626		0.17G 相当	17.2
	VII					818gal相当	84.5
	VIII					1636gal相当	169.0

4. 2 実験結果と考察

図-4と図-5にPC-PD1とPC-PD2、図-6にRC-PDの準動的載荷実験で得られた荷重-変位関係を示す。まずPCタイプについて考察してみる。実験ⅠとⅣの加速度レベルでは応答変位の最大値が $2\delta_{yc}$ 以下であり、Uテンドンは降伏しておらず弾性的な挙動を示している。実験Ⅱの818gal相当の加速度を入力した場合、4.30秒に負側で応答変位が $-5\delta_{yc}$ を超え最大となり、Uテンドンのひずみが降伏点に達したが残留変位の小さい弾性的な挙動を示している。実験Ⅱの4.29秒時の接合部付近の状態を写真-1に示す。柱と桁の接合部が開口している様子がよくわかる。ひび割れはコンクリートの圧縮側で接合部から鉛直方向に発生しているほかは特になかった。また、せん断による斜めひび割れも見られず、818gal相当の加速度でも柱はほとんど損傷を受けていないことがわかる。さらに、入力加速度が2倍大きい実験Ⅲでは最大応答変位が負側で $-15\delta_{yc}$ を越えており圧縮側のコンクリートが局部的に圧壊したが、大きな耐力の低下は生じずUテンドンが破断することもしなかった。実験Ⅴは固有周期を0.3秒として、実験Ⅱと同じ818gal相当の加速度で実験を行ったものであるが、生起時刻が4秒過ぎでアクチュエーターの載荷ストローク $\pm 100\text{mm}$ を超え実験継続不可能となった。このときは正負両側とも大きく応答し、柱の両側でコンクリートの圧壊が見られた。このことは、構造物の耐震性を検討する場合、構造物の固有周期と入力地震波の特性との関係の重要性を示すものである。

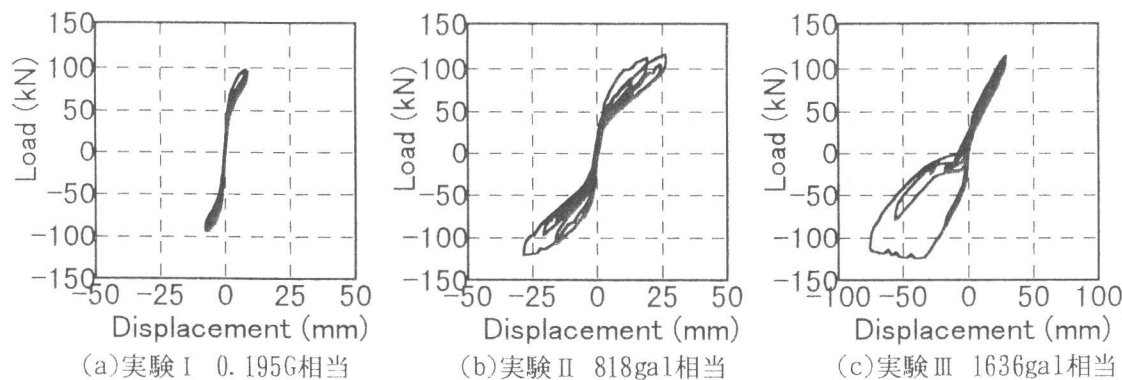
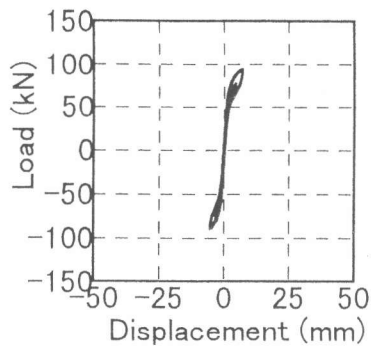
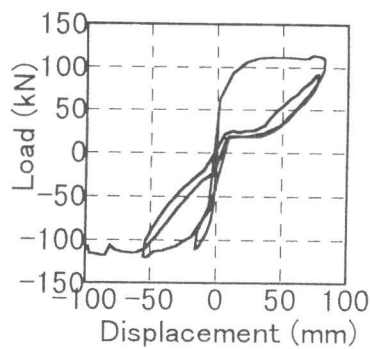


図-4 荷重-変位関係(PC-PD1)

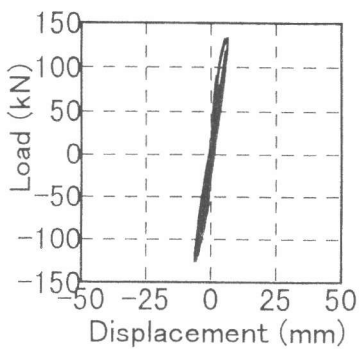


(a)実験Ⅳ 0.17G相当

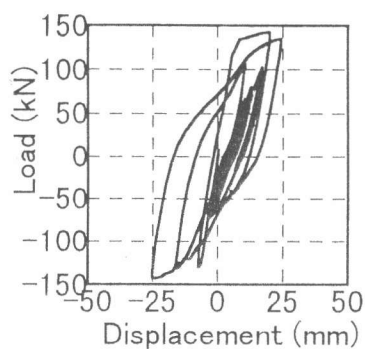


(b)実験Ⅴ 818gal相当

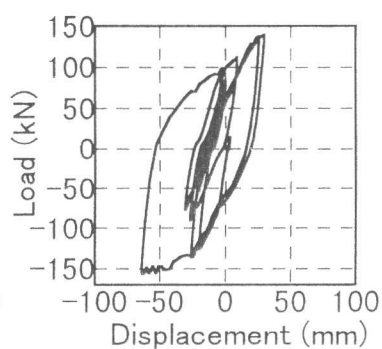
図-5 荷重-変位関係(PC-PD2)



(a)実験Ⅵ 0.17G相当



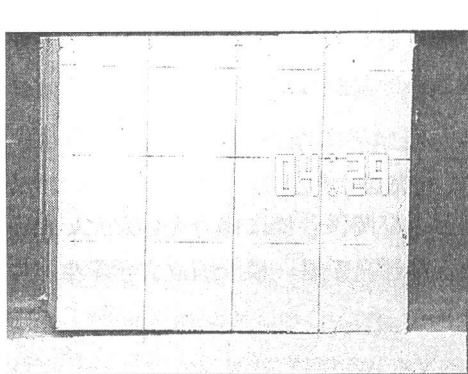
(b)実験Ⅶ 818gal相当



(c)実験Ⅷ 1636gal相当

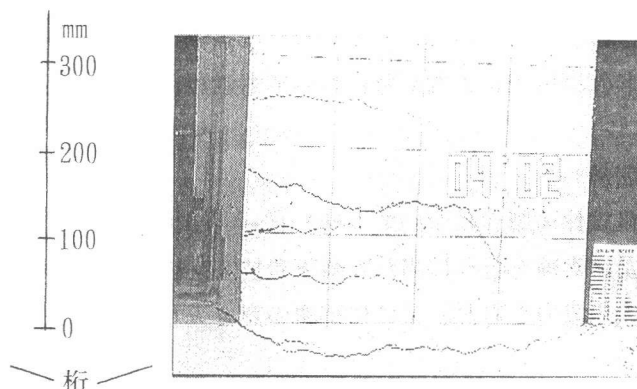
図-6 荷重-変位関係(RC-PD)

RC-PDでは実験Ⅵの0.17G相当の入力加速度で最大値が $1\delta_{ve}$ を超え、軸方向鉄筋が接合部で降伏ひずみに達していた。818gal相当の実験Ⅶでは応答変位が4.04秒に $-5\delta_{ve}$ を超え最大となった。実験Ⅶの4.02秒時の状態を写真-2に示す。柱と桁に多くのひび割れが生じており、かなりの損傷を受けていることがわかる。1636gal相当の実験Ⅷでは最大応答変位が $12\delta_{ve}$ を超え、かなり大きい応答を示した。しかし、地震波の後半においては変位振幅の小さい繰返しであったため静的載荷実験のような軸方向鉄筋の座屈をとまう破壊は起きなかった。



実験Ⅱ PC-PD1

写真-1

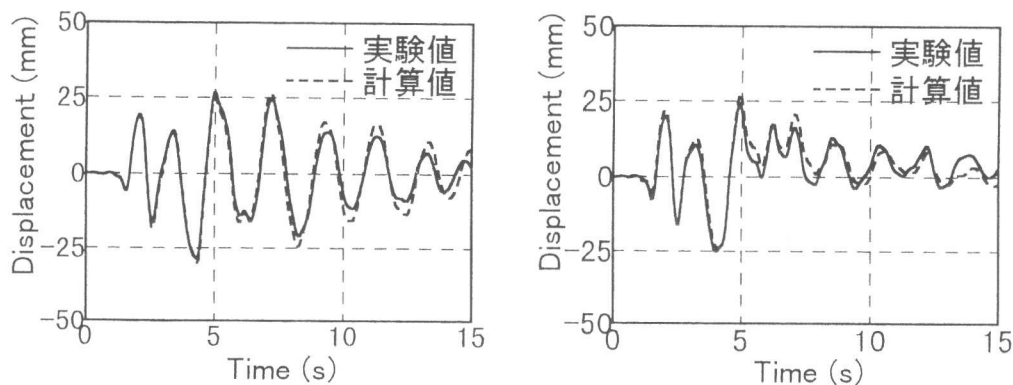


実験Ⅶ RC-PD

写真-2

4. 3 応答計算

静的載荷実験より得られた履歴特性を参考にしてモデル化し応答計算を行った。図-7(a)に実験Ⅱの時刻歴応答変位の実験値と計算値の比較、(b)に実験Ⅶの比較をそれぞれ示す。(a)のPCタイプでは包絡線を6本の直線で表し、除荷を2本の直線で表す原点指向型モデルとした。その結果、除荷時の剛性変化点を変化させることで地震波の後半における値も変化し、剛性変化点を適した値にすることで実験値をよく再現することができた。(b)のRCタイプでは包絡線を5本の直線で表し、塑性率に応じて剛性を低下させるモデルで計算を行った。計算値は応答変位、応答周期とも実験値をよくあらわしており、変形が正側へ偏っている様子も再現できた。



(a)実験Ⅱ (PCタイプ)

(b)実験Ⅶ (RCタイプ)

図-7 実験値と応答計算値の比較

5. まとめ

以上の実験結果をまとめると次の通りである。

- 1) Uテンドンを用いてプレストレスによって桁と柱を剛結合した供試体(PCタイプ)は、残留変位の小さいPC独特の耐荷挙動を示し、RCタイプに比べてコンクリートの損傷が少なく、大変形時における耐力の低下もわずかであった。
- 2) PCタイプは大きな地震力が作用した後においても橋脚に損傷がほとんど生じておらず、耐震性能に優れていることが示された。これはPCタイプの耐荷挙動が、Uテンドンが弾性内の挙動でありながら、部材の剛性が大きく変化するためだと考えられる。
- 3) 一種の段落とし部と考えられたPCタイプのUテンダンの折り返し部には小さな曲げひび割れが生じた程度で、大変形時においてもこれが大きく進展することはなかった。

謝辞

供試体の製作において(株)ピー・エスの河村直彦氏、および関係各位に協力をいただいた。また、実験を行うに当たり森下豊技官(横浜国立大学)および辻昌宏君(横浜国立大学学生)に多大の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 長谷俊彦, 馬場照幸, 岡田稔規, 吉松慎哉: 重信川高架橋の設計報告, プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集, pp. 397~pp. 400, 1995. 10