

## 論文 鉄筋コンクリート円断面橋脚の地震時挙動とその動的映像

大野晋也\*<sup>1</sup>、坪井聡\*<sup>2</sup>、山口隆裕\*<sup>3</sup>、池田尚治\*<sup>4</sup>

**要旨:** 兵庫県南部地震で被災した鉄筋コンクリート円断面橋脚の地震時挙動およびその破壊過程を把握するためにモデル化した供試体を用いて載荷実験を行った。実験結果から、設計で想定していた以上の地震力が作用する場合、主鉄筋の一部を引張部定着した供試体は曲げ降伏後、定着位置でせん断破壊し、耐荷挙動は極めて脆性的であることが示された。また、動的映像記録化システムを用いた準動的載荷実験より、地震時の鉄筋コンクリート円断面橋脚の破壊過程をビデオ映像として得ることができた。

**キーワード:** 円断面橋脚、主鉄筋の引張部定着、準動的載荷、動的映像記録化システム

## 1. はじめに

先の兵庫県南部地震では、設計での想定を大幅に上回る地震力が作用したことにより、鉄筋コンクリート(以下、RCと記す)橋脚に甚大な被害が生じた。これらのRC橋脚の多くは、せん断に対する計算方法や主鉄筋の引張部定着(以下、途中定着と記す)方法に関する規定の見直しが図られた1980年以前の規準を基に設計・施工されており、現在の規準と比較すると主鉄筋の定着長および帯鉄筋量が異なっている。

本研究は、これらの被災したRC橋脚のうち単柱式のRC円断面橋脚を参考にして実験供試体を製作し、載荷実験によりその耐震性能及び破壊のメカニズムを把握することを目的とした実験的研究である。実験は静的正負繰返し載荷により基本的な耐荷能力を把握し、次いでビデオを用いた動的映像記録化システム[1]により準動的載荷を行い、視覚および力学の両面から地震時の応答挙動を検討することとした。

## 2. 実験供試体

供試体は配筋方法の違いにより、途中定着有り(CTタイプ)と途中定着無し(Nタイプ)の2種類のタイプとし、両タイプの部材寸法は等しくした。CTタイプの供試体の形状を図-1に、各供試体の諸元を表-1にそれぞれ示す。CTタイプは、対象としたRC円断面橋脚を基にモデル化したものであり、せん断スパンの1/4である柱根元から300mmの所で、2段に配筋した主鉄筋のうちの1/3の量に相当する内側の主鉄筋すべてを途中定着している。図-1にはCTタイプの降伏抵抗曲げモーメントと作用モーメントを示す。降伏抵抗曲げモーメントは、断面の最外縁の引張鉄筋が計算上降伏ひずみに達する時のモーメントを材料の非線形性を考慮して断面を一次的にモデル化(以下、ファイバーモデルと記す)して求めた値で、定着長は考慮していない。計算上主鉄筋の応力が294MPa(3000kgf/cm<sup>2</sup>)となる設計地震力作用時においては問題はないが、予想を超える大きな

\* 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 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)

外力を受けて柱根元部が降伏する時には途中定着位置でも降伏する特性となっている。また、主鉄筋の定着長を考慮すると途中定着部の方が柱根元部より、早期に降伏するものと思われる。Nタイプは、CTタイプとの比較のために途中定着している主鉄筋を無しとした供試体で、主鉄筋は1段配筋でCTタイプの2/3の量となっており、それに伴いNタイプの柱根元から300mmまでの帯鉄筋比もCTタイプより小さくなっている。土木学会のコンクリート標準示方書[2]のせん断耐力算定式を用いると、CTタイプ、Nタイプの各断面のせん断耐力は終局曲げ耐力よりも十分大きなものとなっている。

全供試体とも帯鉄筋の定着は重ね継手とし、その定着長は帯鉄筋径の30倍以上とした。また、コンクリートの粗骨材の最大寸法は10mmとした。柱部分に使用したコンクリート及び鉄筋の力学的特性をそれぞれ表-2と表-3に示す。

載荷には2本のアクチュエーターを使用し、図-1に示すように鉛直方向に軸圧縮応力度が1.96MPaとなる一定の軸力を与えながら水平変位または水平荷重を与えた。載荷方向は図-1の南北方向となる橋軸直角方向とした。以降、北側へ押し

の荷重および変位を正(+)の符号で、南側への引きの荷重および変位を負(-)の符号で示す。また、ひび割れの計測および準動的載荷実験におけるビデオ映像の記録は供試体の西面で行った。

### 3. 静的正負繰返し載荷実験

#### 3.1 載荷方法

載荷方法は、計算降伏荷重時の変位の正負の平均値を1 $\delta y$ として、変位を1 $\delta y$ ずつ増加させ

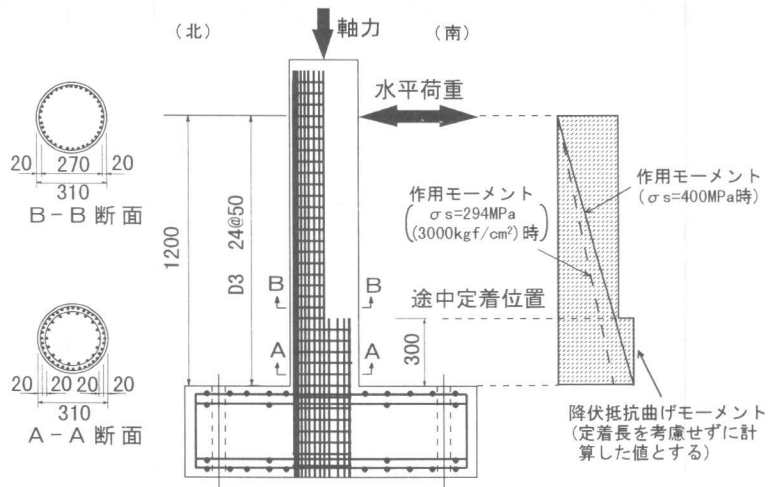


図-1 供試体図 (CTタイプ)

表-1 供試体の諸元

タイプ	供試体名 <sup>1)</sup>	軸方向鉄筋比 <sup>2)</sup>	フープ筋比 <sup>3)</sup>
CT	P-CT-ST	2.3% (1.5%)	0.2% (0.1%)
	P-CT-PD1		
	P-CT-PD2		
N	P-N-ST P-N-PD1	1.5%	0.1%

- 1) P-(タイプ)- (載荷方法)  
(タイプ) CT:途中定着有り N:途中定着無し  
(載荷方法) ST:静的載荷 PD:準動的載荷  
2), 3) ( )内の値は途中定着位置以上での値を示す

表-2 コンクリートの力学的特性

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
24	2.2	22	0.2

表-3 鉄筋の力学的特性

種類	呼び径 規格	降伏強度	引張強度	弾性係数	適用箇所
		(MPa)	(MPa)	(GPa)	
D3	-	320	410	191	帯鉄筋
D6	SD345	400	500	178	主鉄筋

ながら、載荷終了まで各変位段階で1回の正負荷荷を行った。計算降伏荷重は、ファイバーモデルにより求めた値で、CTタイプの場合、途中定着をしていないものとして求めた。

### 3. 2 実験結果と考察

各供試体の計算耐力と実験結果を表-4に、実験より得られた無次元化した荷重-変位曲線の包絡線を図-2にそれぞれ示す。縦軸と横軸の値は、各供試体の最大耐力と降伏変位で除した値とした。途中定着の有るP-CT-STは、計算降伏荷重時には柱の基部及び途中定着位置の引張側最外縁の主鉄筋が、ほぼ降伏ひずみに達しており、 $-2\delta y$ 時には途中定着位置辺りの曲げひび割れは斜めひび割れへと成長した。 $5\delta y$ 時には途中定着位置でコンクリートの剥離、主鉄筋の座屈が生じ耐力が低下した。図-1の抵抗モーメントやこれらの結果から明白のように、CTタイプは許容応力度設計法を十分満足しているが、柱根元での終局限界状態までの耐力の上昇を考えると、途中定着位置は不適切であることがわかる。

途中定着の無いP-N-STは、主鉄筋の降伏後も耐力を保ちながら変形が進んでいるが、 $-6\delta y$ 時には、柱の根元で主鉄筋の座屈が生じ耐力の低下がみられた。図-3(a)、(b)に各供試体の $-5\delta y$ 載荷時のひび割れ状況を示す。P-CT-STが、途中定着位置で大きく破壊しているのに対して、P-N-STは、柱根元辺りを中心に曲げひび割れが発生している様子がよくわかる。

各供試体の終局変位を荷重-変位曲線上の最大耐力の80%を下回らない最大変位とし、その値をそれぞれの降伏変位で除した値を各供試体の靱性率とすると、P-CT-STは4、P-N-STは6となった。

## 4. 準動的載荷実験

### 4. 1 実験概要

準動的載荷とは、コンピューターによって計算された応答変位を供試体に強制変位として与え、その時の復元力を用いて次のステップの振動方程式を解き、載荷を繰り返し行い、地震時の応答挙動を生起する実験手法である。なお、計算された応答変位が水平アクチュエーターの載荷限界ストローク約 $\pm 100\text{mm}$ を越える場合、暫定的に載荷限界の変位量をそのステップでの応答変位と

表-4 計算耐力と実験結果

供試体名	計算値	実験値		
	降伏荷重 $P_y$ (kN)	$P_y$ 時の変位 $\delta y$ (mm)	最大耐力 $P_{max}$ (kN)	最大耐力時の変位 ( $\delta y$ )
P-CT-ST	56	7.7	73	-3
P-N-ST	44	6.3	61	3

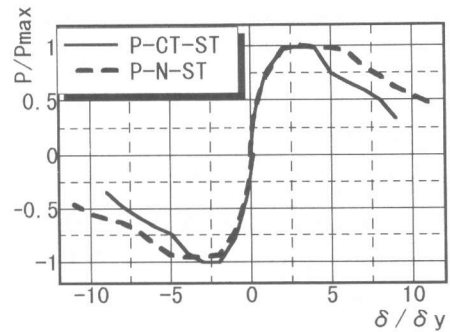


図-2 無次元化した荷重-変位曲線の比較

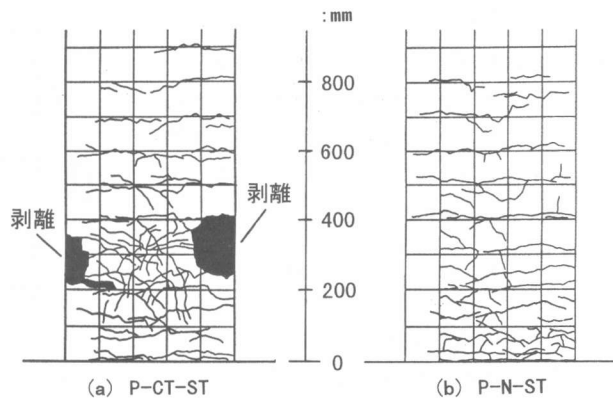


図-3 ひび割れ状況

表-5 準動的載荷実験に用いた初期設定値

実験番号	供試体名	固有周期 (s)	初期剛性 (MN/m)	仮想質量 (t)	減衰定数 <sup>*1</sup>	降伏変位 (mm)	作用地震波	加速度レベル	入力最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )
I	P-CT-PD1	0.55	19.6	150.2	0.03	7.7	J R 鷹取駅	642gal相当	77
II	P-CT-PD2						神戸海洋气象台	818gal相当	98
III	P-N-PD1					6.3	J R 鷹取駅	642gal相当	64

\*1: 減衰定数(h)は、主鉄筋降伏後はh=0とする。

し、その時の復元力を用いて載荷を継続させることとした。

実験に用いた初期設定値を表-5に示す。地震波は兵庫県南部地震の際に、J R 鷹取駅及び神戸海洋气象台で観測された加速度波形のNS成分を用いた。加速度データは、最大加速度の生起時刻をJ R 鷹取駅は4.64秒時に、神戸海洋气象台は2.55秒時となるように、時間間隔を0.01秒として15秒間入力した。地震波の最大加速度の大きさは、主鉄筋の応力が設計地震力作用時の許容応力度である294MPa(3000kgf/cm<sup>2</sup>)に達する時の計算上の荷重と仮想質量から求めた加速度を、応答を考慮するために道路橋示方書[3]に規定される固有周期別係数で除した値を、実橋での設計上の地盤加速度0.2gに相当すると考え、比例計算によりそれぞれの加速度レベルに相当する加速度を求めた。初期剛性は静的正負繰返し載荷実験から得られた荷重-変位履歴曲線の原点と正側のひび割れ前の点とを結ぶ割線剛性とした。仮想質量は、部材を1自由度にモデル化して、固有周期と初期剛性により決定した。これまでの研究の結果から減衰定数(h)は、静的正負繰返し載荷実験で得られた降伏変位を基準として、降伏前はh=0.03とし降伏後はh=0とした。

#### 4. 2 実験結果と考察

実験で得られた時刻歴応答変位曲線を図-4(a)、(b)、(c)に、復元力-応答変位曲線を図-5(a)、(b)、(c)にそれぞれ示す。また、写真-1(a)、(b)と写真-2(a)、(b)に、実験Iおよび実験IIIの時刻歴応答変位曲線中に示した各生起時刻における供試体の被災状況を示す。これらの写真は動的映像記録化システムにより撮影した映像をビデオプリンターで出力したもので、写真中の数字が地震波の生起時刻を示す。CTタイプにJ R 鷹取駅の地震波を入力した実験Iでは、写真-1(a)に示

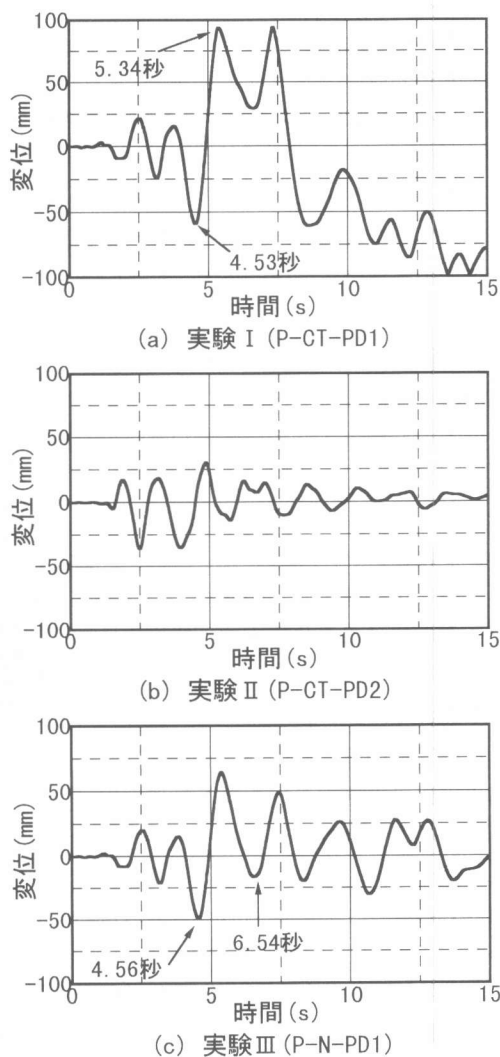
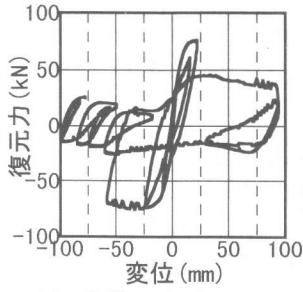
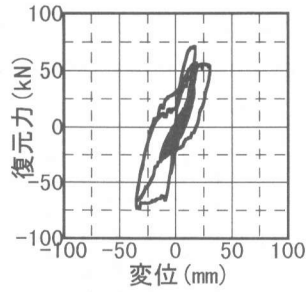


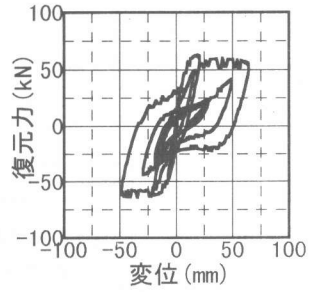
図-4 時刻歴応答変位曲線



(a) 実験 I (P-CT-PD1)



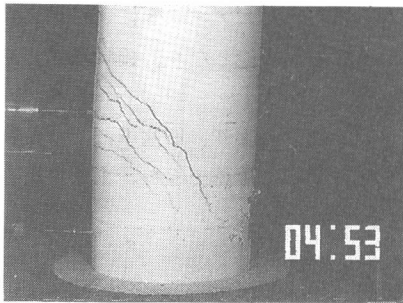
(b) 実験 II (P-CT-PD2)



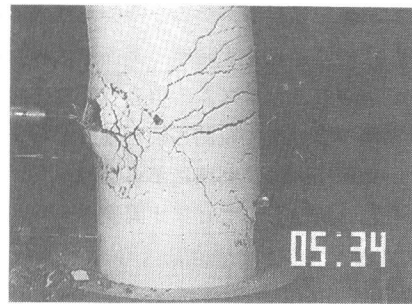
(c) 実験 III (P-N-PD1)

図-5 復元力-応答変位曲線

すように、4.53秒時には応答変位が $-7\delta_y$ を超え、途中定着位置に生じた曲げひび割れが斜めひび割れへと成長している。応答変位が荷装置の能力を超えた5.34秒時には、写真-1(b)に示すように、途中定着位置の圧縮側でかぶりコンクリートが剥離し、主鉄筋が座屈し、耐力は最大耐力の約50%にまで低下している。その後の応答挙動から考えると、この供試体は実験上の変位限界がなければ倒壊に至ったものと思われる。CTタイプに神戸海洋気象台の地震波を入力した実験IIでは、実験Iと同様に、破壊は途中定着位置に集中し、耐力は最大耐力の約70%にまで低下した。応答挙動は、実験Iと比べてかなり異なり、このことは橋脚の固有周期と入力地震波の特性との関係の重要性を示している。NタイプにJR鷹取駅の地震波を入力した実験IIIでは、4.54秒時には約 $-8\delta_y$ を記録し、圧縮側でコンクリートが圧壊している。4.56秒時の状態を写真-2(a)に示す。5.39秒時には正側で $10\delta_y$ を超え最大となり、その後負側に応答した6.54秒時には写真-2(b)に示すように、根元から断面高さの範囲のかぶりコンクリートが剥離している。ただし、耐力の

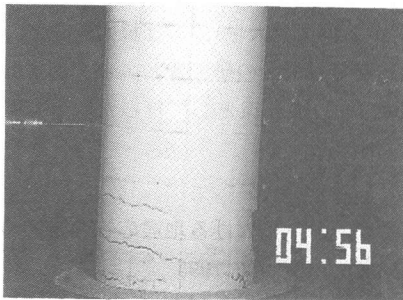


(a)

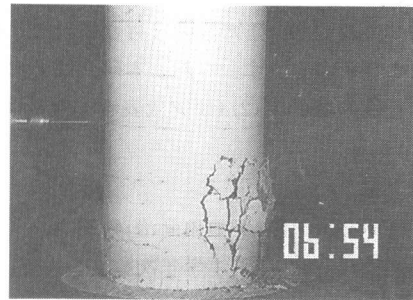


(b)

写真-1 実験 I (P-CT-PD1)



(a)



(b)

写真-2 実験 III (P-N-PD1)

低下はほとんど見られない。載荷終了時の各供試体のひび割れ状況を図-6(a)、(b)、(c)にそれぞれ示す。静的載荷実験と同様に、CTタイプは途中定着位置、Nタイプは柱根元から断面高さの部分に損傷が集中していることがよくわかる。

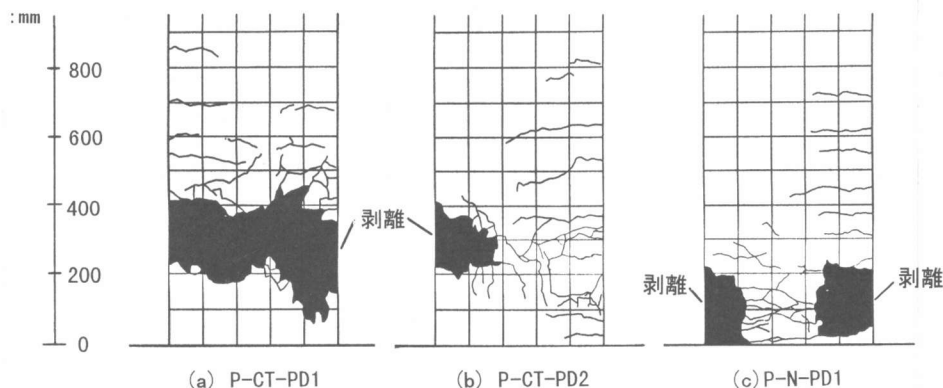


図-6 ひび割れ状況

## 5. まとめ

本研究より得られた結果をまとめると次の通りとなる。

- 1) 曲げ降伏後主鉄筋の途中定着部でせん断破壊の生じたCTタイプの供試体は、脆性的な耐荷挙動を示し急激に耐力が低下した。橋脚を合理的に設計するためには、橋脚基部が限界状態に達したときに途中定着位置での連続鉄筋が降伏しないようにすることが重要である。
- 2) 準動的載荷実験により、橋脚の地震時の応答挙動が、入力加速度の大きさだけでなく、橋脚の固有周期と入力地震波の特性との関係により大きく異なることを示すことができた。
- 3) 動的映像記録化システムを用いた準動的載荷実験から得られたビデオ映像により、RC橋脚が破壊していく過程を実時間で画面上に繰り返し生起することが可能となり、橋脚基部と途中定着部での破壊のメカニズムの相違を詳細に観察することができた。
- 4) 兵庫県南部地震で観測された地震波の一つを作用させることにより、旧基準により設計されたRC円断面橋脚は、倒壊に至る様相を呈することが実験によって確認できた。また、倒壊に至る様相を動的映像としてビデオ画像に生起させることができた。

## 謝辞

供試体の製作において須田氏(鹿島(株))、宇都宮氏(住友金属工業(株))、岩渕氏(オリエンタル建設(株))の関係各位に御協力を頂いた。実験に用いた加速度波形は、土木研究所の運上氏から提供して頂いた。また実験を行うに当たり森下豊技官(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、本研究は土木学会吉田賞選考委員会の研究費および文部省科学研究費・重点領域研究(2)(研究代表者、池田尚治) No.08248211の一環として行ったものである。

## 参考文献

- [1] 柳井修司・山口隆裕・池田尚治:鉄筋コンクリート2層ラーメンにおける地震応答の動的映像化実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No2, pp. 481-486, 1995
- [2] 土木学会:コンクリート標準示方書 [平成8年制定] 設計編、1996
- [3] 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編