

## 内筒鋼管を用いたプレキャストPC橋脚の耐震設計法

鹿島建設(株) 技術研究所 正会員 工修 ○山野辺 慎一  
 鹿島建設(株) 技術研究所 博(工) 曾我部 直樹  
 国土交通省 国土技術政策総合研究所 工博 運上 茂樹  
 (独)土木研究所 博(工) 堺 淳一

Precast prestressed concrete bridge piers are constructed by piling up bridge pier segments. Embedded internal steel pipes penetrate external steel pipes across the segmental joints, which are then completed by prestressing the steel and injecting grout. In precast prestressed concrete bridge piers, the shear force acting on the segmental joints is transmitted to segments via the grouted internal pipes, the grout, and the external steel pipes. Prestressing the steel tensions it against bending and is expected to reduce residual displacement after an earthquake. In this study, a design model was proposed for prestressed concrete bridge piers with internal steel pipes and the seismic design method was examined.

Key words : Precast PC pier, Internal steel pipe, Seismic design method

### 1. はじめに

プレストレスを橋脚に導入した PC 橋脚では、高強度材料の使用により断面の縮小が可能になること、大規模地震後の残留変位が低減することなど、優れた構造的長を期待することができる<sup>1)</sup>。一方、橋脚の施工にプレキャスト工法を適用すれば、熟練技術者を集中的に配置したコンクリート製品工場等で製作されたプレキャストセグメントを、現場にて組立て・接合することにより橋脚を構築できることから、施工の急速化や品質の向上を図ることができる。すなわち、橋脚用のプレキャストセグメントを PC 鋼材によるプレストレスで接合、一体化させたプレキャスト PC 橋脚は、構造性能、急速施工、品質において優れた橋脚構造であるといえる。プレキャスト PC 橋脚については、耐震性に関する研究例が少ない等の理由により、その国内における適用実績は少ないが、近年、増加している都市内の連続高架橋の建設や、交通量の多い交差点の立体交差化事業では、工期の短縮が急務となっており、その必要性が高まっている。

このような背景に対し、著者らは、すでに内筒鋼管を用いたプレキャスト PC 橋脚を開発し、要素実験、および縮小模型による静的載荷実験などにより、その基本的特性を確認している<sup>2)</sup>。このプレキャスト PC 橋脚は、プレキャストセグメント部材を高さ方向に積み重ね、セグメント相互に鋼管を挿通し、鋼管内に配置した PC 鋼材を緊張し軸方向に連結した橋脚構造である。このようなプレキャスト PC 橋脚を地震国である我が国において適用するためには、耐震設計における限界状態や照査方法を整備する必要がある。そこで、本研究では、静的載荷実験や既往の設計基準等に基づき、プレキャスト PC 橋脚の耐震性能を満足するような限界状態を定めた。また、プレキャスト PC 橋脚の構造特性を反映できる設計モデルを構築し、耐震性能の照査方法について検討した。

### 2. 内筒鋼管を用いたプレキャストPC橋脚

#### 2.1 構造の概要

本研究で対象とするプレキャストPC橋脚は、図-1に示すように橋脚用プレキャスト (PCa) セグメント、PC鋼材、内筒鋼管、外筒鋼管からなり、工場あるいは現地製作ヤードにおいて、橋脚軸方向に輪切りにした形状で外筒鋼管を埋設した橋脚用PCaセグメントを製作し、現地において構築する。構築手順は、PCaセグメントを積上げて、外筒鋼管の中にその継目部を貫通するように内筒鋼管を配置し、その中にPC鋼材を

挿入・緊張，一体化して構造体とする。その後，外筒鋼管と内筒鋼管の空隙，内筒鋼管とPC鋼材の空隙にグラウトを充てんして完成させるものである。

このプレキャストPC橋脚では，PCaセグメントの継目部に作用するせん断力は，グラウトが充てんされた内筒鋼管のダウエル作用によりPCaセグメントに構造的に伝達し，曲げに対しては，高い降伏強度を有するPC鋼材が引張鋼材として機能することを想定している。また，PC鋼材で2~4N/mm<sup>2</sup>のプレストレスを導入することにより，橋脚全体の構造特性にPC橋脚の特徴である原点指向性が付与され<sup>1)</sup>，地震後の残留変位の低減を図っている。なお，内筒鋼管は，セグメント中央部で分割されるため，曲げ耐力には引張鋼材として寄与しない。

以上のような構造によりプレキャストPC橋脚は，一般のRC橋脚に比べ橋脚断面が小さくなるほか，残留変位が小さいこと，PCa継目部の貫通部材が内筒鋼管とPC鋼材のみであるため急速施工性に優れること，工場製作のPCa部材を使用するため高い品質を実現できること，などの特徴を有している。

### 2.2 基本的な構造特性

プレキャストPC橋脚の基本的な構造特性を明らかにすることを目的として，図-2に示すような試験体に対する正負交番載荷実験を行った<sup>2)</sup>。試験体の概要は，以下に示す通りである。

- ・ 柱基部で曲げ破壊するように，セグメント内部には十分なせん断補強筋を配置した。
- ・ 内筒鋼管は，柱頭部からフーチング下面まで貫通して配置した。
- ・ PC鋼材を緊張して，コンクリートに対して5.5N/mm<sup>2</sup>のプレストレスを導入した。
- ・ PC鋼材と内筒鋼管，内筒鋼管と外筒鋼管の空隙は，それぞれPCグラウトにより充填した。

実験は，試験体に対して，上部構造重量と橋脚重量に相当する一定軸力 (2.0N/mm<sup>2</sup>) を作用させつつ，

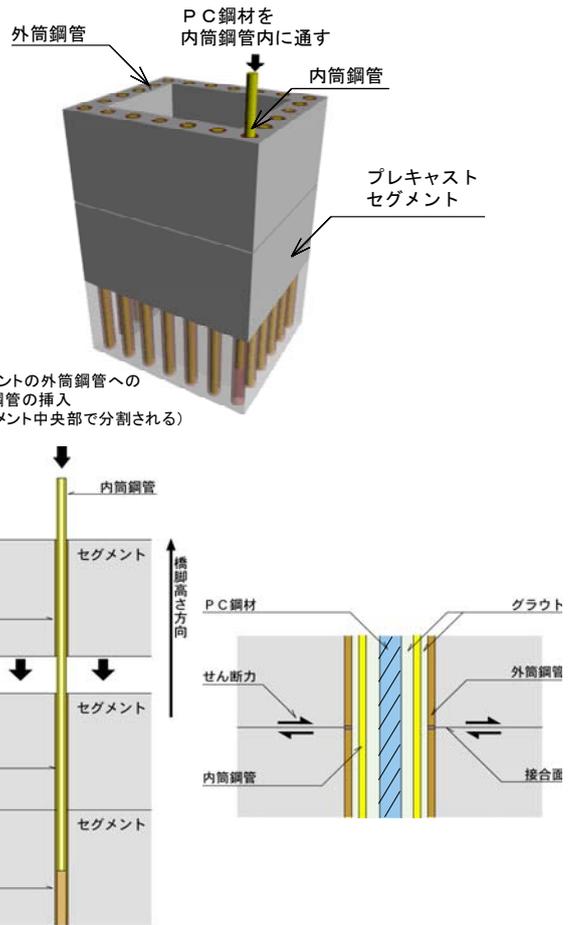
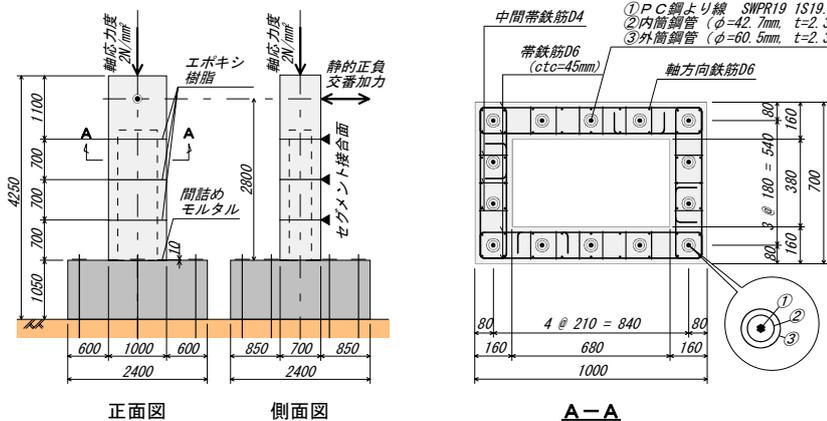


図-1 内筒鋼管を用いたプレキャスト PC 橋脚



※1 柱部分とフーチング部分は同じコンクリートを使用している。  
 ※2 内筒鋼管は柱頭部からフーチング下面まで貫通して配置してある。  
 ※3 外筒鋼管はセグメント接合面で分断されている。

### 試験体

図-2 正負交番載荷実験の試験体と実験状況



### 実験状況

水平方向から押引用の油圧ジャッキで、地震時を想定した曲げせん断の静的漸増正負交番载荷を行った。

図-3に、水平荷重-水平変位関係について示す。実験では、約330kNで最下部セグメントとフーチングの境界にひび割れが発生して剛性が低下するものの、PC鋼材の降伏まで耐力が徐々に増加し、その後、緩やかに耐力が低下するという破壊性状を示した。試験体には、死荷重に相当する軸力とプレストレスにより $7.5\text{N/mm}^2$ の高い軸圧縮応力が作用していたため、脆性的な破壊性状を示すことが想定されたが、じん性に富む曲げ特性を示すことが確認された。また、履歴特性には原点指向性が確認され、一般的なRC橋脚に比べるとエネルギー吸収性能は小さくなるが、地震後の残留変位を小さくできることが確認できる。一方、図-4に示すように、回転角ごとの試験体の変形形状からは、プレキャストPC橋脚の曲げ変形が橋脚基部に集中して、橋脚全体がロッキング的な挙動を示していることが分かる。このようなロッキング挙動を示す場合には、基部におけるPC鋼材の引張ひずみが局所的に増加し、破断することが懸念されるが、本実験では終了時までPC鋼材の破断は確認されなかった。これは、別途、要素試験で確認されている内筒鋼管とPCグラウトとの付着強度が $0.02\sim 0.1\text{N/mm}^2$ 程度と小さいために、橋脚が曲げ変形した際に内筒鋼管とグラウトの付着が切れ、PC鋼材のひずみが平滑化することにより、橋脚基部でのPC鋼材のひずみの集中が緩和されたためであると考えられる。

### 3. プレキャストPC橋脚の耐震設計

プレキャストPC橋脚の耐震設計では、道路橋示方書V耐震設計編<sup>3)</sup>に従い、レベル1地震動とレベル2地震動を想定し、それぞれに対する耐震性能を照査する。レベル1地震動に対しては、コンクリート、PC鋼材、内筒鋼管のそれぞれの損傷が軽微であることを確保する。レベル2地震動に対しては、PCセグメントの帯鉄筋および中間帯鉄筋に拘束されるコンクリートが圧縮力を保持できる状態であると共に、PC鋼材の引張降伏、内筒鋼管のせん断降伏を防ぐ。PC鋼材が弾性挙動内であれば、既往の実験結果<sup>2)</sup>から残留変位がほぼゼロとなるため、残留変位を照査する必要は無い。また、地震時にPC鋼材が降伏すると導入されているプレストレスの大きさが地震中に変化し、耐震性能が低下することが考えられるため、PC鋼材は降伏させないこととした。内筒鋼管は、継目部ですれが残留しないように、そのせん断降伏を防ぐこととした。さらに、応答回転角が $0.06\text{rad}$ 以上の曲げ特性については、実験結果などの実績が少ないことから、応答回転角に制限値を設けることとした。ここに示したような各限界状態をプレキャストPC橋脚が満足することができれば、地震後においてもPC鋼材を交換しなくても、地

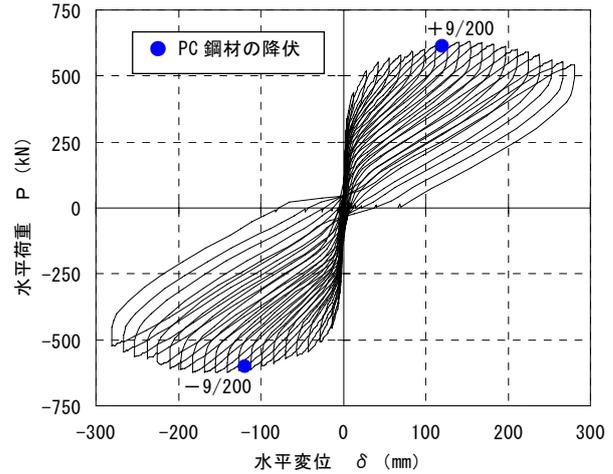


図-3 水平荷重-水平変位関係

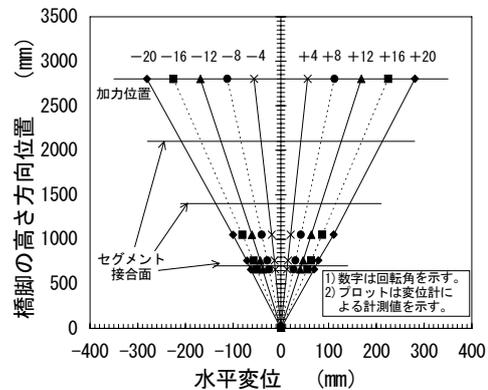


図-4 試験体の変形形状

表-1 プレキャストPC橋脚の制限値

	PC鋼材	プレキャストセグメント	内筒鋼管	応答回転角
耐震性能1	引張応力が $0.8\sigma_{pu}$ あるいは $0.9\sigma_{py}$ の小さい方の値より小さい	・最外縁コンクリートの曲げ圧縮応力が $0.5\sigma_{ck}$ 以内 ・コンクリートの平均せん断応力が道路橋示方書IV下部構造編4.2 <sup>3)</sup> に規定される許容せん断応力以内	せん断応力が $60\text{N/mm}^2$ 以内	0.06rad以内
耐震性能2		・最外縁コンクリートの圧縮ひずみが道路橋示方書IIIコンクリート橋編4.2.3 <sup>3)</sup> に規定される終局ひずみ以内 ・道路橋示方書V耐震設計編10.5 <sup>3)</sup> によるせん断耐力が作用せん断力以上	せん断応力が降伏せん断強度以内	

震前と同様の性能を確保できる。

表-1にプレキャストPC橋脚における耐震性能1, 2に対する制限値を示す。レベル1地震動に対しては、震度法による応答値が耐震性能1の制限値以内であること、また、レベル2地震動に対しては後述する設計モデルを用いた動的解析による応答値が、耐震性能2の制限値以内であることを照査する。なお、それぞれの制限値は、既往の実験結果<sup>2)</sup>と道路橋示方書等<sup>3)</sup>の既往の設計基準を参考として設定した。

#### 4. プレキャストPC橋脚の設計法

##### 4.1 設計モデル

プレキャスト PC 橋脚が地震により曲げ変形して、導入プレストレスを超えるような増加応力が PC 鋼材に作用した場合、内筒鋼管とグラウトとの付着力が小さいことから、PC 鋼材のひずみが平滑化される。そのため、プレキャスト PC 橋脚では、通常の RC 橋脚のように曲げひび割れが分散せず、最下部セグメントとフーチングとの境界部が大きく目開きしてロッキングするような曲げ変形性状を示すことが実験により明らかとなっている。そこで、本研究では、プレキャスト PC 橋脚の特徴である PC 鋼材のひずみの平滑化と、基部におけるロッキング挙動を考慮できる設計モデルとして図-5に示すようなモデルを提案した。

同モデルでは、最下部セグメントとフーチングの境界部に、ロッキングバネ要素として回転バネ要素を設け、それより上部については、通常のRC部材と同様にモーメント-曲率関係からなる梁要素で構成されていることを特徴とする。ロッキングバネ要素の骨格曲線（ひび割れ点、降伏点）については、プレキャスト PC 橋脚の特徴である内筒鋼管とグラウトの付着切れに伴うPC鋼材のひずみの平滑化と、プレキャストセグメントの継目部におけるロッキング挙動に起因する変形を基部に集約して設定する。また、履歴特性については、履歴吸収エネルギー性能から決定する。

##### 4.2 ロッキングバネ要素の特性

###### (1)ひび割れ点 (C点)

(a)C 点の曲げモーメント： $M_c$ (kN・m)

フーチングと最下部セグメントの境界部にひび割れが発生する時（ロッキング挙動を示し始める時）のモーメントであり、次式により算出する。

$$M_c = (\sigma_{ce} + \sigma_N) Z_e \dots (1)$$

ここで、 $\sigma_{ce}$ はプレストレスによる応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_N$ は上部構造による軸応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $Z_e$ は橋脚断面の断面係数(mm<sup>3</sup>)である。

(b) C 点の回転角： $\theta_{pc}$ (rad.)

ひび割れ点におけるロッキングバネの回転角であり、ひび割れと同時にロッキング挙動を示す。

$$\theta_{pc} = 0 \dots (2)$$

###### (2)降伏点 (Y点)

(a)Y 点の曲げモーメント： $M_y$ (kN・m)

橋脚基部の断面における最外縁の PC 鋼材が降伏する時のロッキングバネの曲げモーメントであり、プレストレス分を軸力に置き換え、PC 鋼材の降伏強度を実際の降伏強度と緊張による初期応力の差分とすることにより、プレストレスの影響を間接的に考慮した平面保持の仮定に基づいた断面解析により算出する。なお、曲げモーメントの算出時に考慮する引張鋼材は PC 鋼材分のみとした。

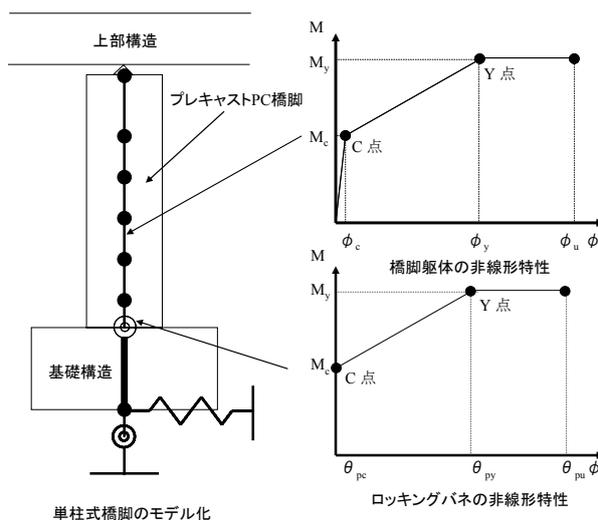


図-5 プレキャスト PC 橋脚の設計モデル

(b) Y点の回転角： $\theta_{py}$ (rad.)

ロッキング部の降伏時の回転角は、PC鋼材のアンボンド化を考慮して算出した降伏回転角から、橋脚躯体の変形分を差し引いて算出する。

$$\theta_{py} = \frac{1}{h} \left[ \delta_y - \frac{1}{2} h^2 \left\{ \left( 1 - \frac{M_c}{M_y} \right) \phi_y + \frac{M_c}{M_y} \phi_c \right\} \right] \dots (3)$$

ここで、 $\phi_y$ は平面保持の仮定を用いた断面解析における最外縁のPC鋼材が降伏する時の曲率(1/m)、 $\phi_c$ はひび割れ点における曲率(1/m)である。

$\delta_y$ は、降伏時における上部構造の慣性力の作用位置の変位であり、回転部が基部のみである場合、以下のような考え方にに基づき算出できる。図-6に示すようにプレキャストPC橋脚の曲げ変形(セグメント継目部の目開き+躯体の弾性変形)を、橋脚躯体を剛体とした回転によるものとする、幾何学的な関係から、上部構造の慣性力の作用位置の変位と平滑化されたPC鋼材ひずみとの関係が次式のように求まる。

$$\delta_y = \frac{h \cdot h'}{e} \varepsilon'_y \dots (4)$$

ここで、 $h'$ はPC鋼材の配置区間、もしくは、レベル2地震時にPC鋼材のひずみが平滑化される区間(m)、 $\varepsilon'_y$ はPC鋼材の降伏ひずみからプレストレスの導入に伴う初期ひずみを差し引いた見かけの降伏ひずみ、 $e$ はPC鋼材の中立軸からの距離(m)であり、断面計算における中立軸位置から算出できる。図-7に示すように、(4)式によるPC鋼材の増分ひずみとプレキャストPC橋脚の変形量の関係は、前述の実験による結果にほぼ近似しており、(4)式の妥当性を確認することができる。

また、図-8には、プレキャストPC橋脚の荷重-変位関係について、(1)~(4)式で算出される特性を与えた設計モデルによる計算値と前述の実験結果との比較を示す。同図より、提案する設計モデルに基づく計算値が、実験結果を安全側に評価していることが分かる。

(3)履歴特性

プレキャストPC橋脚における履歴特性は、実験でも確認されたように、導入したプレストレスの効果により高い原点指向性を示し、残留変位とエネルギー吸収が小さいという特徴を有している。また、プレキャストPC橋脚では、レベル2地震時においてもPC鋼材が降伏しないことを想定しているため、その履歴特性はRC橋脚および降伏を許容するPC、PRC橋脚<sup>1)</sup>と大きく異なる。そこで、レベル2地震時に対する耐震設計を行う際のプレキャストPC橋脚の履歴特性としては、図-9に示すような非線形弾性特性を有するモデルとした。なお、実際には内筒鋼管やPC鋼材とグラウト間の摩擦やコンクリートの多少の変形により履歴吸収エネルギーによる減衰効果が期待できるが、これは別途、

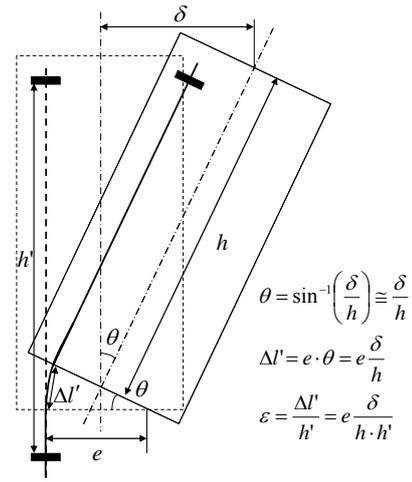


図-6 ひずみが平滑化したPC鋼材のモデル化

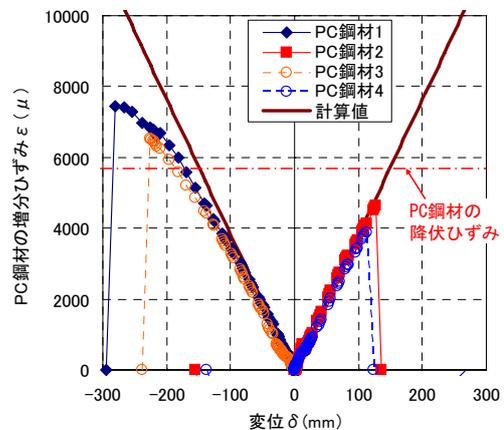


図-7 載荷点変位とPC鋼材ひずみの関係

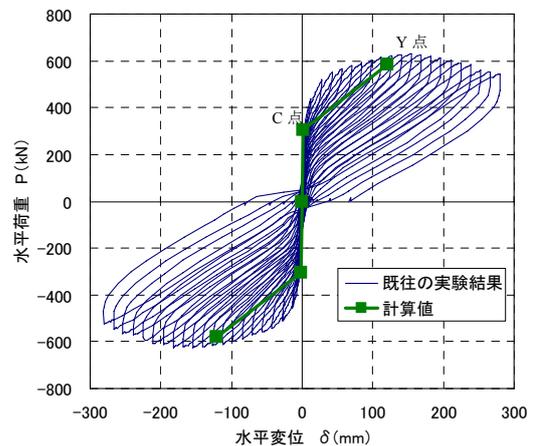


図-8 実験結果と設計計算値の比較

等価粘性減衰定数として考慮することとした。例えば、前述の実験では、PC鋼材の降伏までに8回の繰返しを行っているが、図-10に示すように各載荷サイクルの履歴面積による等価粘性減衰定数は、5%程度で安定している。

### 4.3 せん断耐力

プレキャスト PC 橋脚のせん断耐力は、PCa セグメント本体のせん断耐力と PCa セグメントの継目部におけるせん断耐力の小さい方となる。PCa セグメント本体のせん断耐力は、RC 橋脚に準じて、道路橋示方書 V 耐震設計編<sup>3)</sup>に従って算出することとした。

一方、既往の実験結果<sup>2)</sup>では PCa セグメントの壁厚(T)と内筒鋼管の外径(φ)の比(T/φ)が 4.0 以上であれば、内筒鋼管のダウエル作用により、PCa セグメントの継目部において次式に示されるせん断力を伝達できることが明らかとなっている。そこで、PCa セグメントの継目部におけるせん断耐力については、T/φが 4.0 以上となる内筒鋼管の適用を前提とした上で、次式により算出する。

$$P_{sy} = \frac{\tau_{sy} \cdot \pi \cdot r_i \cdot t_i}{2} n \cdot \dots (5)$$

ここで、 $P_{sy}$ はせん断耐力(N)、 $\tau_{sy}$ は内筒鋼管のせん断降伏応力度(N/mm<sup>2</sup>)、 $r_i$ は内筒鋼管の内径(mm)、 $t_i$ は内筒鋼管の板厚(mm)、 $n$ は断面内の内筒鋼管の本数である。

### 5. まとめ

本研究で得られた知見は、以下のようである。

- (1) 内筒鋼管を用いたプレキャストPC橋脚の耐震性能の考え方と制限値を整理した。
- (2) プレキャストPC橋脚の設計モデルとして、同橋脚の曲げ特性を反映させたトリリニア型の非線形弾性特性を有するロッキングバネ要素を用いたモデルを提案した。
- (3) プレキャストPC橋脚の正負交番載荷実験結果から、ロッキングバネ要素の等価粘性減衰定数を5%程度とすることによって、同橋脚の履歴吸収エネルギーによる減衰効果を考慮できることを確認した。

提案した設計法については、別途、都市内高架橋を想定して同設計法により試設計したプレキャストPC橋脚の縮小模型に対してレベル1、レベル2地震動を入力した震動台実験を行い、その妥当性について検証を行っている<sup>4)</sup>。なお、本研究の一部は、(独)土木研究所と民間3社(鹿島建設(株)、(株)ピーエス三菱、三井住友建設(株))との共同研究(「耐震性に優れたプレキャストコンクリート橋脚構造の耐震設計法」、平成18~19年度)として実施したものである。

### 参考文献

- 1) 池田, 森, 吉岡: 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, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.5, pp.40-47, 1998年
- 2) 新井, 日紫喜, 須田, 山本, 滝沢, 尾鍋; 新しいプレキャストPC橋脚の開発, 鹿島技術研究所年報, 第48号, pp.25-30, 2000年
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書 IIIコンクリート橋編, IV下部構造編, V耐震設計編, 2000年
- 4) 曾我部, 山野辺, 新井, 運上, 塚: 内筒鋼管を用いたプレキャストPC橋脚の振動台実験, 第12回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム論文集, pp.283-288, 2009年1月

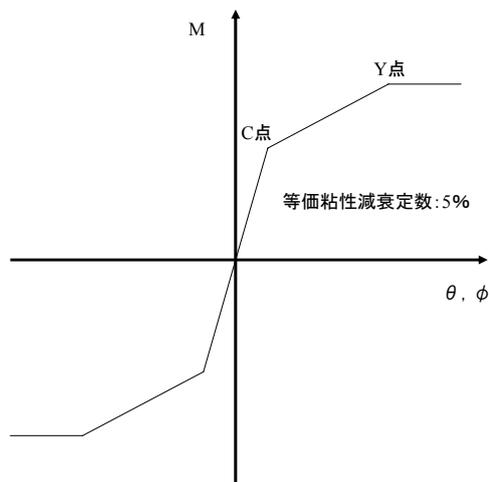


図-9 プレキャストPC橋脚の履歴特性

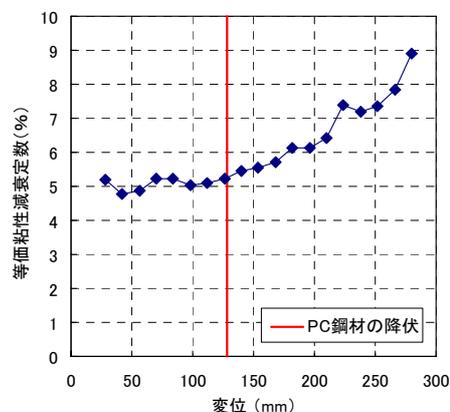


図-10 等価粘性減衰定数のモデル化