

# 八二カムプレキャスト柱合成構造橋脚の開発

## 正負交番載荷模型実験による耐力評価

野村 敏雄 大 口 健

(土木技術本部設計第一部)

加藤 敏明

(土木技術本部構造技術部)

### Development of Composite Pier Combined Steel Tube and Precast Hexagonal Column

#### Endurable Load Evaluation by Cyclic Loading Experiment

Toshio Nomura Takeshi Ohguchi

Toshiaki Kato

#### Abstract

Structural simplicity by composite structure, and light weight, and quality improvement by precasting are the main labor saving techniques in construction of bridge piers. However, precasting is not widely used yet, because precast elements are heavy and expensive. Thus, a new composite structure is proposed in order to improve the precasting method. The structure is composed of the columns which are arranged in a honeycomb pattern. One column is composed of a steel tube and a precast hexagonal column. A cyclic loading test was carried out to determine the basic characteristics of the failure mode, the endurable load and the connection strength of each column. The following were concluded. (1)The composite section specimen showed behavior equivalent to that of the integral section specimen. The failure mode of the composite section specimen was bending failure in lower part of the column. (2)All specimens had sufficient energy absorbing capacity. (3)No connections of composite section specimens failed.

#### 概 要

橋脚の省力化工法として、複合構造の採用による構造の簡素化とプレキャスト化による軽量化、品質向上が主要要素技術として挙げられる。しかし、プレキャスト化技術は、部材の重量が大きく、コストアップになることなどから、いまだ普及に至っていないのが現状である。そこで、これらのプレキャスト化の課題を解決するために、六角プレキャスト柱の中に鋼管を配置し、これらを八二カム構造に組み合わせた構造を提案した。破壊モード、耐力力および各柱の連結部の強度など基本的な特性を把握するため、正負交番載荷実験を行った結果、以下のことがわかった。

(1)合成断面は、一体断面とほぼ同等の挙動を示し、破壊形態は柱下端の曲げ破壊である。

(2)いずれの試験体も、十分なエネルギー吸収能力が期待できる。

(3)合成断面の連結部は健全性が維持される。

#### 1. はじめに

橋脚の省力化工法に関する研究開発が近年積極的に進められており、鋼管・コンクリート複合構造の採用に見られる構造の簡素化とプレキャストによる軽量化、品質向上が主要要素技術として挙げられる。しかし、プレキャスト化に関しては、コンクリート構造物の品質や耐久性向上に対する要求性能が一層厳しくなっているにもかかわらず、重量が大きく、コストアップになることから、いまだ普及に至っていないのが現状である。一方、最近のコンクリートへの信頼性低下は、コンクリート構造物

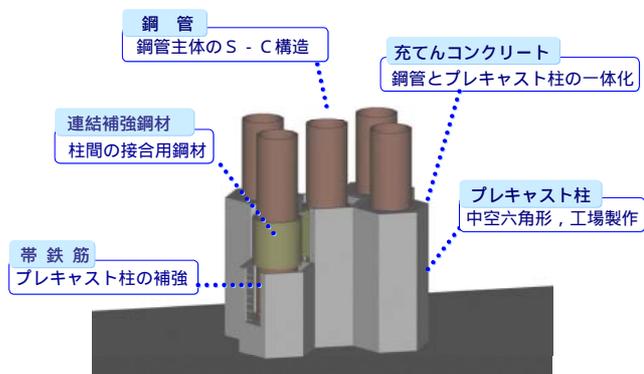


Fig. 1 構造概念図

Structure Outline

の品質や耐久性向上に対する要求を一層厳しくしているとともに、熟練労働者の枯渇による施工の省力化への要求も従来以上に高まってきている。

そこで、これまでのプレキャスト化の問題点を解決するために、六角プレキャスト柱の中に鋼管を配置し、これらを八ニカム構造に組み合わせた構造（ハイプレックス工法：Hyplex Method）を提案した。

本構造は、以下の特徴を有する。

(1) 内型枠として鋼管、外型枠として六角形の中空プレキャスト柱を用い、それらの間に、コンクリートを充填して1本の柱を形成する。

(2) それらを八ニカム状に配置し、鉛直方向の数箇所のみで連結して、一体性を確保する。

また、当該構造の効果として、1) シェル構造に近い断面であることによる軽量化、2) 鉄筋組と型枠組の省略による施工の簡略化と急速施工、3) 施工が容易で施工欠陥が生じにくいことによる高品質化 等が挙げられる。

本稿では、当該構造の破壊モード、耐荷力など基本的な特性を把握するために正負交番載荷実験を行った結果を報告するものである。

## 2. 実験内容

### 2.1 試験体

試験体は、せん断スパン比 $a/d=4.0$ （一定）とした柱2体である。2体は、Fig.2に示すように配置した5本の独立した六角形断面柱（PX-5-1）と全体が一体化されている一体断面柱（PX-5-2）である。なお、PX-5-1の連結部には318.5の鋼管を配置し、それぞれの鋼管を厚さ10mmの鋼材で結んだ構造である。Table1に試験体一覧を示す。

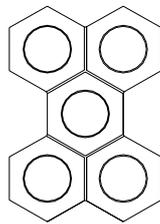
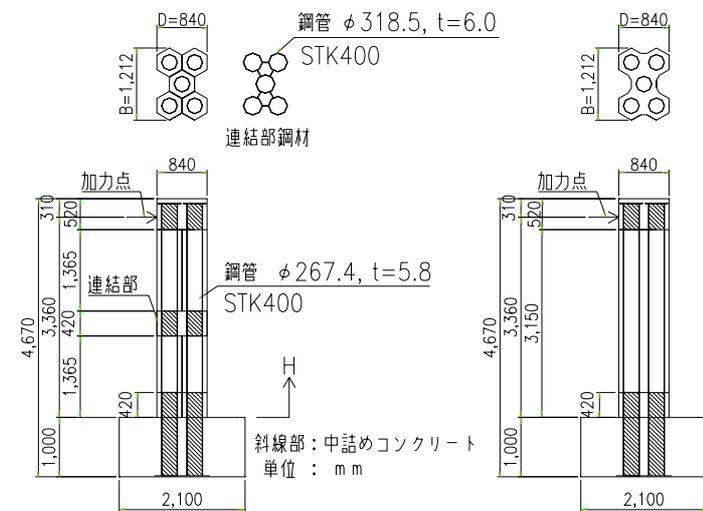


Fig. 2 断面図  
Cross Section



(1) PX-5-1

Fig. 3 試験体形状  
Shape of Specimen

(2) PX-5-2

### 2.2 使用材料

各材料の力学的特性に関する試験結果をTable2～3に示す。

### 2.3 加力装置

載荷装置をFig.4に示す。試験は、部材角 $R=1/200$ ,  $1/100$ ,  $2/100$ ,  $3/100$ ,  $4/100$ ,  $5/100$ でそれぞれ3サイクルの正負繰返し載荷した後、 $R=9/100$ まで載荷した。なお、軸力は導入していない。

Table 1 試験体一覧

Test Specimens		
試験体	試験体断面 B×D	備考
PX-5-1	1212mm×840mm	合成断面
PX-5-2	1212mm×840mm	一体断面

Table 2 コンクリート材料試験結果  
Mechanical Properties of Concrete

試験体	圧縮強度 ( $N/mm^2$ )	引張強度 ( $N/mm^2$ )	弾性係数 ( $N/mm^2$ )
PX-5-1	37.8	3.1	$2.36 \times 10^4$
PX-5-2	32.4	2.5	$2.09 \times 10^4$

Table 3 鋼管材料試験結果  
Mechanical Properties of Steel Tube

種別	引張強度 ( $N/mm^2$ )	伸び (%)	降伏点強度 ( $N/mm^2$ )	弾性係数 ( $N/mm^2$ )
STK400	481	30.5	402	$2.35 \times 10^5$

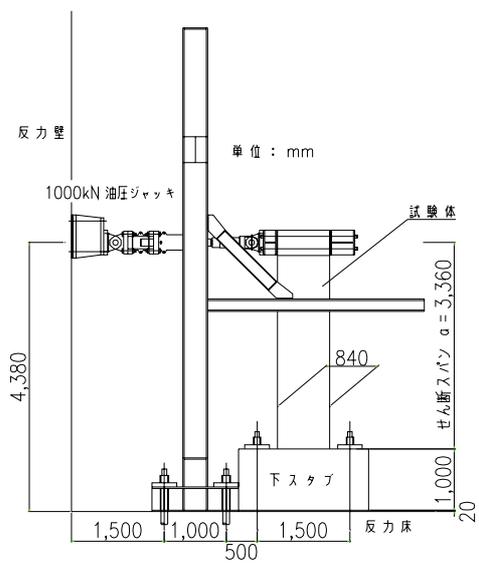


Fig. 4 加力装置  
Loading Apparatus

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重 - 変位関係と破壊経過

Fig.5~6に荷重 - 変位関係を、Table4に、実験および解析における諸荷重の一覧を示す。ここに、累加強度とは、断面中心周りで求めた鋼管の全塑性モーメントによる耐力をRC耐力に加えたものである。また、重ね耐力とは、柱1本あたりの曲げ耐力を5本分重ね合せた荷重である。

PX-5-1は、40kNで曲げひび割れが発生した。450kNで鋼管の降伏が確認された後、R=2/100の第1サイクルで最大荷重(664kN)に達した。その後、基部で圧壊が始まり、R=4/100で鋼管の座屈を目視により確認した。連結部は斜めひび割れが発生するものの大きな損傷は見られなかった。

PX-5-2の破壊形態もPX-5-1とほぼ同様であった。Photo 1, 2にそれぞれの最終破壊状況を示す。

Fig.5, Fig.6から明らかなように、PX-5-1, PX-5-2ともほぼ同等の変位性状となった。これはPX-5-1の連結部において、柱間に作用するせん断力が分担され、PX-5-2と同様に各柱に軸力が伝達されたと考えられる。

また、いずれの試験体も、最大荷重は累加強度、重ね耐力以上を示すが、曲げ耐力には達していない。これは、本実験では、鋼管とコンクリートの付着を確保するための対策を特に講じていないために、平面保持が早い段階から成立しなくなることによると考えられる。なお、2体とも紡錘型の履歴曲線を示しており、エネルギー吸収能は良好である。

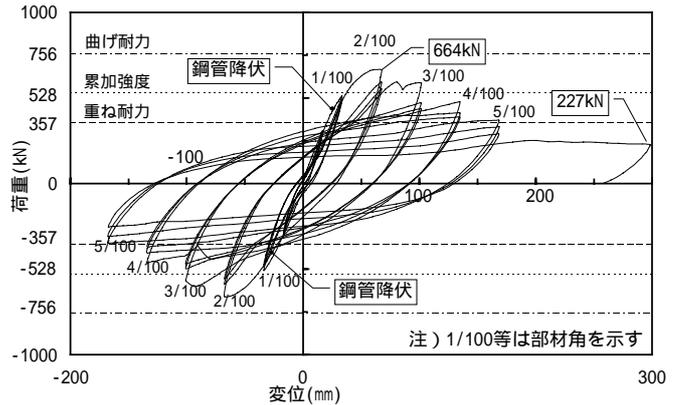


Fig.5 荷重 - 変位関係(PX-5-1)  
Load-Displacement Relationship

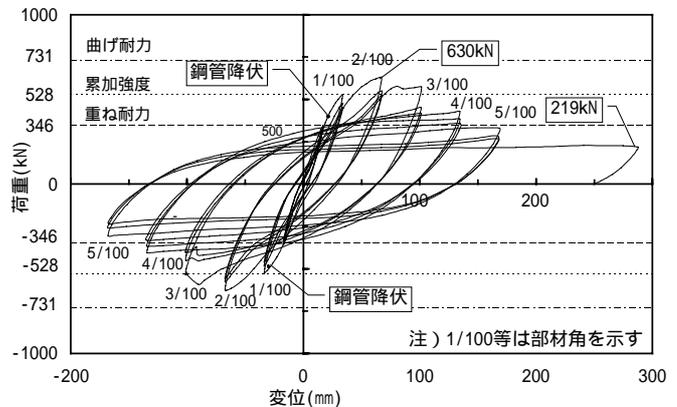


Fig.6 荷重 - 変位関係(PX-5-2)  
Load-Displacement Relationship

Table 4 諸荷重一覧  
Summary of Experimental Result

	PX-5-1		PX-5-2	
	荷重 P (kN)	比率 (P/曲げ耐力)	荷重 P (kN)	比率 (P/曲げ耐力)
曲げ耐力 (解析値)	756	-	731	-
最大荷重 (実験値)	664	0.88	630	0.86
重ね耐力 (解析値)	357	0.47	346	0.47
最終 (実験値)	227	0.30	219	0.30

#### 3.2 ひずみ分布

PX-5-1について、Fig.7に鋼管の引張縁ひずみ分布を示す。R=1/300以降は計測不能部分が増えるため十分な分布形が得られないが、高さ方向のひずみ分布は、基部~0.5D (H=420mm D:加力方向長さ840mm)の区間で卓越している。また、H=1575mmにおいて、ひずみが減少する。これは、連結部の影響を受けていると考えられる。すなわち、ひずみ分布は2層ラーメン構造に近い分布形状を示しており、二カ所の連結部で力が伝達されたと考えられる。

PX-5-2について、Fig.8に鋼管の引張縁ひずみを示す。ひずみ分布は柱曲げモーメント分布に近い分布形状を示しており、高さ方向の全体に渡って力が伝達されたと考えられる。

Fig. 9, 10に鋼管降伏時のH=0.0D~1.0Dのひずみ分布を示す。図中の太線は、各鋼管内でのひずみ分布を示す。いずれも、鋼管降伏時には、H=1.0Dで平面保持は成立するが、柱基部(H=0.0D)では崩れており、平面保持は柱基部から成立しなくなると考えられる。また、各鋼管のひずみの絶対値は異なるが、勾配はほぼ同一である。このことから、軸力は相違するが、等しい曲げひずみを生じており、単独および合成柱全体で曲げ荷重を分担していることが伺える。



Photo 1 破壊状況 (PX-5-1)  
Failure Condition

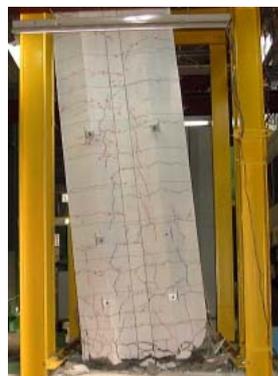


Photo 2 破壊状況 (PX-5-2)  
Failure Condition

3.3 鋼管の軸力および応力分布

Fig. 12, 13にPX-5-1の部材角 $R=1/200$ 、および $R=2/100$ の鋼管の軸力分布を示す。鋼管の応力は、Fig. 11に示すように円周方向3点(  $=0, 90, 180^\circ$  )で計測された鉛直ひずみ値を直線補間して任意点のひずみを求める。次に、応力 - ひずみのバイニリア - ヒステリシスを仮定することによって応力度に変換し、これを円周方向に積分することによって軸力を求める。

Fig. 12より、 $R=1/200$ には鋼管の付着が良好であり、鋼管の軸力は、2, 3サイクル目でもその性状は変わらない。しかし、最大荷重時の $R=2/100$ では、1サイクル目よりも2, 3サイクル目は鋼管の軸力が圧縮側に向かっている。これは、付着力の低下によりコンクリートが負担する圧縮力が減少し、鋼管で圧縮力を負担したと考えられる。

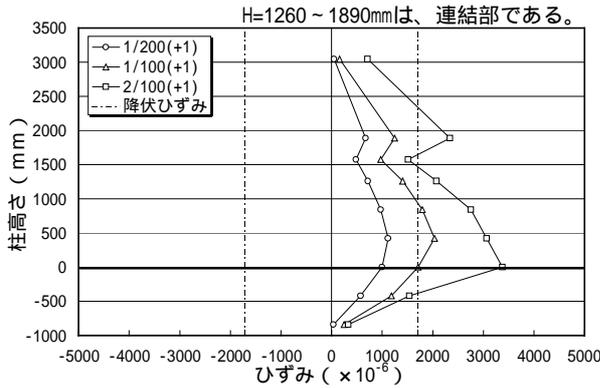


Fig. 7 鋼管鉛直方向ひずみ分布  
(PX-5-1 引張縁 正荷重時)

Vertical Strain Distribution of Steel Tube  
(PX-5-1 Tension Edge Positive-Load-Condition)

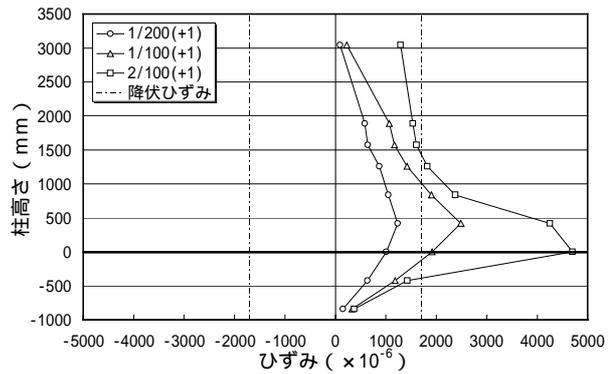


Fig. 8 鋼管鉛直方向ひずみ分布  
(PX-5-2 引張縁 正荷重時)

Vertical Strain Distribution of Steel Tube  
(PX-5-2 Tension Edge Positive-Load-Condition)

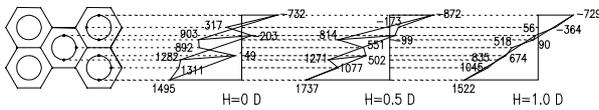


Fig. 9 ひずみ分布 (PX-5-1)  
Strain Distribution

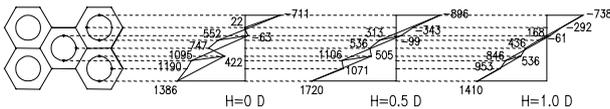


Fig. 10 ひずみ分布 (PX-5-2)  
Strain Distribution

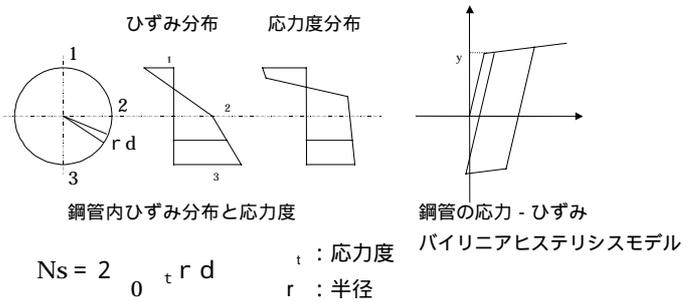


Fig. 11 鋼管軸力の算定モデル  
Actual Force Model of Steel Tube

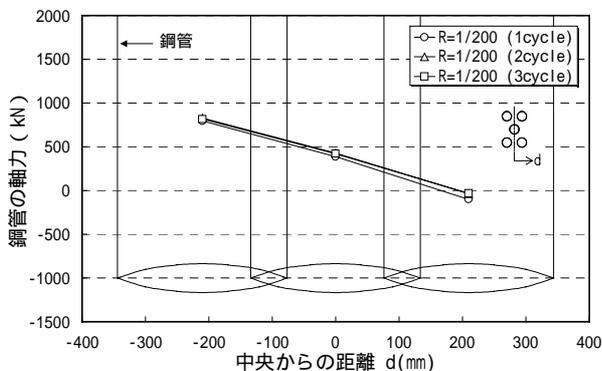


Fig. 12 鋼管の軸力分布 ( $R=1/200$ )  
Actual Force Distribution of Steel Tube

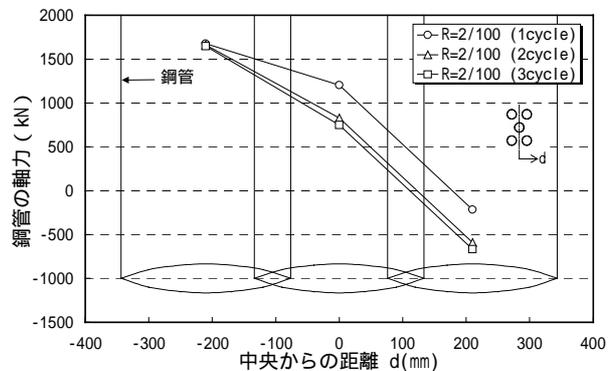


Fig. 13 鋼管の軸力分布 ( $R=2/100$ )  
Actual Force Distribution of Steel Tube

### 3.4 エネルギー吸収性能

Fig.14に荷重 - 変位関係のループ面積で得られるエネルギー吸収量を示す。正荷重第1サイクルが第2サイクルより小さくなっている部分があるのは、第1サイクルは前変位振幅の終点を起点とすることによる。R=4/100以降は1サイクル目を除き、エネルギー吸収性能が低下する傾向にある。

PX-5-1, PX-5-2ともほぼ同等のエネルギー吸収性能を示し、合成断面 (PX-5-1) でも一体断面 (PX-5-2) と同様のエネルギー吸収量が期待できる。

### 3.5 塑性ヒンジ長

PX-5-1に関し、今回実験で得られたデータにより塑性ヒンジ長を求める。変形モードより求める方法と鋼管ひずみより求める方法の2通りで算出する。

まず、変形モードよりどの位置で柱部が回転しているかを求める。高さ - 回転角の関係をFig.15に示すが、基部から0.5D (H=420mm) の位置で回転角が急増している。次に、測定可能な断面中心の鋼管のひずみ分布から曲率分布を求めるとFig.16のようになる。この結果からも、基部から0.5Dで曲率が急増していることが分かる。したがって、塑性ヒンジ長は0.5D程度と考えられる。

## 4. 非線形三次元 F E M解析

PX-5-1に関して、実験結果を解析で表現し、耐力評価および柱基部や連結部材の合理的な設計法を確立するために、非線形三次元 F E M解析 (使用プログラム：当社開発 FINAL<sup>1)</sup>) を実施した。

### 4.1 解析モデル

解析モデルをFig.17に示す。荷重および構造の対称性から、水平荷重載荷方向を含む鉛直面を対象とした全体の1/2モデルとした。境界条件は、スタブ下面において全固定とし、コンクリートはソリッド要素を鋼管はシェル要素を用いた。また、鋼管とコンクリート間の付着は、鋼管とコンクリートの要素間に設けた接合要素で考慮することとし、リブなし鋼管を使用した場合の付着力を用いた ( $= 0.49N/mm^2$ )<sup>2)</sup>。

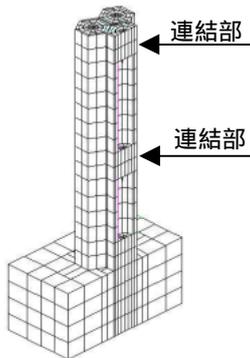


Fig.17 解析モデル  
Analysis Model

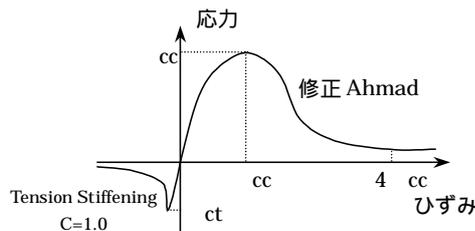


Fig.18 コンクリートの材料モデル  
Property of Concrete

コンクリートの応力 - ひずみモデルをFig.18に、鋼管の応力 - ひずみモデルをFig.19に示す。

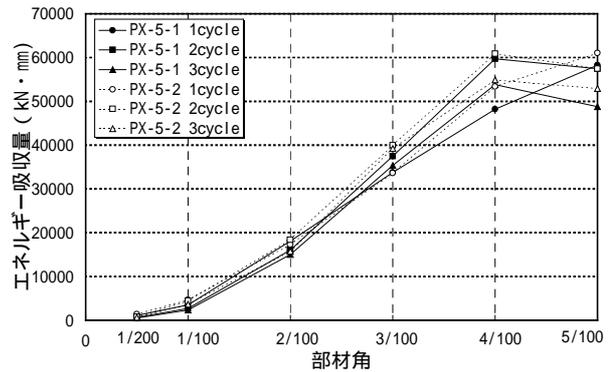


Fig.14 各サイクルごとのエネルギー吸収量  
Energy Absorbing Capacity at Each Cycle

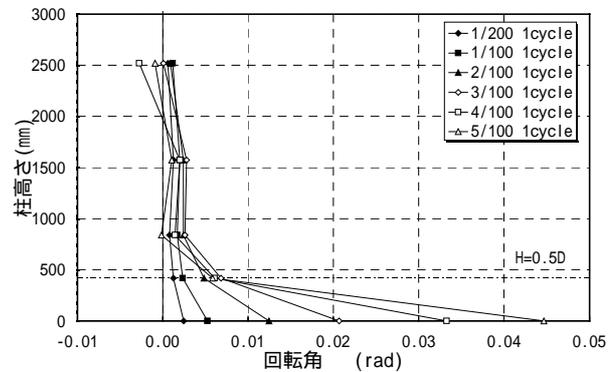


Fig.15 柱の回転角分布

Rotation Angle Distribution of Column

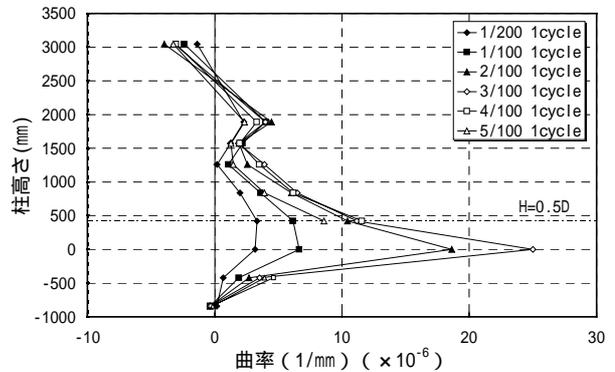


Fig.16 柱の曲率分布

Curvature Distribution of Column

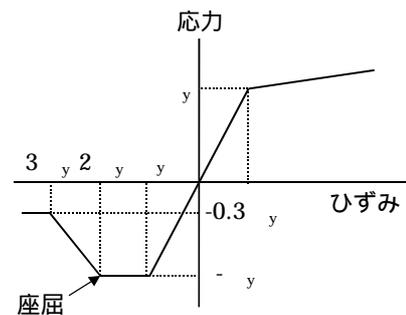


Fig.19 鋼管の材料モデル  
Property of Steel Tube

## 4.2 解析結果

### 4.2.1 荷重 - 変位関係

解析結果をFig.20に示す。降伏荷重は、実験の511kNに対し、解析は533kNであった。また、最大荷重も解析値と実験値は良く一致しており、本解析の妥当性を示している。しかし、特に、 $R=3/100$  ( $t=100.8\text{mm}$ )以降では、繰返しに伴う耐力低下は十分に再現できていない。この原因として、鋼管の座屈およびその後鋼管が引張られて、早期に鋼管が破断していること等が考えられる。

本解析モデルを用いて、柱基部の一体性を確認し、耐力増加を検討するために、スタブ内の鋼管とコンクリートを完全付着とした場合、リブ付き鋼管による付着強度増加を図った場合について検討した。リブ付き鋼管の付着強度は $6.7\text{N}/\text{mm}^2$ <sup>3)</sup>とした。曲げ耐力を1.0とした場合、リブ付き鋼管では0.91、リブなし鋼管では、0.88であり、リブ付き鋼管を使用の方が若干耐力が向上する。したがって、RC理論により求めた曲げ耐力を低減することによって、当該構造の耐力評価を行うことが可能であることが考えられる。ただし、低減量は、鋼管配置や連結部の間隔等の影響を受けることが予測されるので、さらに検討が必要である。

### 4.2.2 連結部に作用するせん断力

連結部鋼材に作用するせん断力をFig.21に示す。スタブ内の鋼管とコンクリートの付着を完全付着とした場合とリブ付き鋼管を使用した場合の解析も示す。連結部に作用するせん断力は、実験では200kNであり、リブなしの場合は実験値とよく一致している。一方、リブ付き鋼管を使用した場合は、222kNで約10%増加する。また、完全付着の場合でも連結部に作用するせん断力は580kNであることが分かった。この場合にも応力度は $\sigma=136\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であり、十分に余裕があることが分かった。これは、当初、2本柱で解析し、柱下端が曲げ耐力に達する時に連結部の鋼材が降伏するとして板厚を決めていたためである。しかし、実際には柱下端が曲げ耐力に達しても、連結部はせん断破壊が生じないことになる。したがって、解析結果を考慮すると連結部に作用するせん断力に対して部材厚は7mmで対応可能であり、大幅な合理化を行うことができると考えられる。

## 5. まとめ

ハニカムプレキャスト柱合成構造橋脚の基本性能を確認するために正負交番荷重実験を行った結果、おおむね良好な破壊モードや耐力力が示された。また、FEM解析によりその挙動を把握できることが確認された。今回得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1)合成断面(PX-5-1)は、一体断面(PX-5-2)とほぼ同等の挙動を示し、破壊形態は柱下端の曲げ破壊である。
- (2)合成断面は、十分なエネルギー吸収能が期待できる。

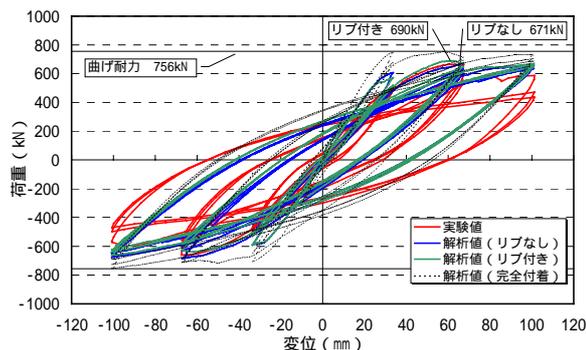


Fig.20 荷重 - 変位関係の比較  
Comparison of Load-Displacement Relationship

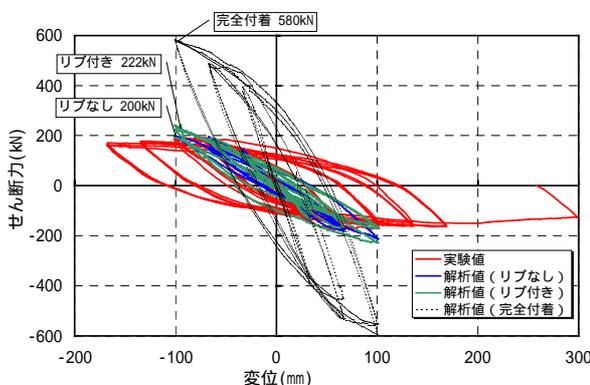


Fig.21 せん断力 - 変位関係  
Shear Force-Displacement Relationship

- (3)合成断面の連結部では、健全性が維持される。
- (4)曲げ耐力は、RC理論により求めた耐力を低減することにより評価できる。

今回の実験により、橋脚としての要求性能を満足することが確認され、軽量化、施工の簡素化などが可能になることが分かった。今後は、柱基部や連結部の構造の詳細を検討し、性能の改善と部材の合理化を図り、設計法の確立を目指したいと考えている。

### 参考文献

- 1)米澤，長沼，江戸：有限要素法を用いたコンクリート充填鋼管柱の履歴特性に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol22，No.3，2000年
- 2)田中，大内，長沼，緒方：水平力を受ける鋼管・コンクリート複合構造橋脚の挙動評価，土木学会論文集No. 648/V-47，2000年5月
- 3)大内，水田，市川，小島：鋼管・コンクリート複合構造高橋脚模型の水平加力試験，コンクリート工学年次論文報告集 Vol17，No.2，1995年