

# 報告 SRC 部材の曲げ性状

下野一行\*1・佐藤勉\*2・渡辺忠朋\*3

**要旨：** SRC 構造物の安全性を検討するためには、SRC 部材の変形性能を十分に検討しておく必要がある。本論では SRC 部材の曲げ降伏時までの曲げ変形性状に着目し、既往の実験結果をもとに曲げ剛性の評価方法の検討を行った。検討では SRC 柱の曲げ剛性評価に鉄筋コンクリート部材の評価方法を適用した。計算による降伏変位量は、曲げ剛性の低下を考慮して求め、実験結果と比較検討を行った。その結果、降伏変位は軸方向鉄筋の抜け出しの影響を考慮することで評価できる結果となった。また、降伏荷重までの変位量についても同様の仮定により変位量を推定できることを明らかにした。  
**キーワード：** 鉄骨鉄筋コンクリート、曲げ剛性、降伏変位量

## 1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（以下 SRC という）構造物の設計を行う上で、SRC 部材の曲げ変形性状を定量的に評価することは、中小地震等による構造物の変位量を推定する上で重要な事項である。また、SRC 部材の靱性能等の定量化を行う上でも、靱性能率の基準となる降伏変位を推定することは必要なことである。そこで、SRC 柱の曲げ降伏時までの変形性状を明らかにするために、既往の実験結果[1,2,3,4]を基に検討を行ったので以下に報告する。

表1 供試体使用材料および諸元(1)

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体および諸元

供試体はすべて断面幅×断面高さ×せん断スパン=42×42×111cmの形状にH型鋼材、鉄筋を適宜配置したSRC柱の模型である。使用材料と諸元を表1および表2に、概略形状を図1に示す。

供試体	コンクリート		鉄骨		軸方向鉄筋	
	弾性係数 KN/mm <sup>2</sup>	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 KN/mm <sup>2</sup>	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 KN/mm <sup>2</sup>	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>
A-1	28.0	29.5	199.6	304.0	232.7	339.3
A-2	25.1	30.0	228.1	304.0	234.2	339.3
A-3	25.3	31.2	277.9	304.0	246.6	339.3
C-1	26.0	29.3	233.7	340.3	234.4	339.3
D-1	26.1	30.4	382.4	304.0	215.6	339.3
D-2	26.7	29.8	321.0	304.0	226.2	339.3
E-2	30.3	29.5	160.7	326.6	309.7	388.3
F-1	30.6	30.4	170.4	348.1	276.3	388.3
F-2	24.5	30.2	203.5	348.1	289.4	388.3
G-1	20.5	24.7	262.2	302.0	165.4	336.4
G-2	20.6	25.7	174.8	302.0	200.3	336.4
G-3	22.0	28.1	225.1	299.1	198.9	344.2
G-4	21.7	28.1	208.7	299.1	262.5	344.2

### 2.2 載荷方法

載荷方法は供試体に軸力一定の条件下で柱頭部を載荷点とする静的交番載荷を行なった。降伏変位量  $\delta y$  は柱模型下端的引張鉄筋またはH型鋼材フランジが降伏ひずみに達したときの変位量とし、このときの水平荷重を降伏荷重とした。載荷はまず荷重制御で降伏荷重まで載荷する。そして  $1\delta y$  を片振幅とした交番載荷を行なう。以降は変位  $1\delta y$  の正数倍を片振幅とした交番載荷を  $2\delta y$ 、 $3\delta y$ 、・・・と変位制御で漸次振幅を増加させながら行なった。

\*1～\*3 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 橋梁担当 (正会員)

表2 供試体使用材料および諸元(2)

供試体	鉄骨(ビルトアップ)		引張鉄筋		せん断補強鉄筋		鋼材比 P <sub>s</sub> (%)	鉄骨鉄筋比 A <sub>st</sub> /A <sub>r</sub>	軸力比
	寸法		使用鋼材	引張鉄筋比 P <sub>t</sub> (%)	使用鋼材	せん断補強鉄筋比 P <sub>w</sub> (%)			
	B <sub>s</sub> ×D <sub>s</sub> × tw×tf(mm)	(フランジ/ウェブ) Af/Aw							
A-1	250×250×10×10	2.174	6-D13	0.49	無	0.00	5.00	4.80	0.10
A-2	250×250×10×10	2.174	6-D13	0.49	D10@226	0.15	5.00	4.80	0.10
A-3	250×250×10×10	2.174	6-D13	0.49	D10@113	0.30	5.00	4.80	0.09
C-1	126×250×6×6	1.059	6-D13	0.49	D10@226	0.15	2.53	1.93	0.10
D-1	250×250×10×10	2.174	6-D13	0.49	D10@226	0.15	5.00	4.80	0.02
D-2	250×250×10×10	2.174	6-D13	0.49	D10@226	0.15	5.00	4.80	0.20
E-2	250×250×10×10	2.174	3-D29 2-D25	1.89	D10@226	0.15	7.47	1.24	0.10
F-1	126×250×6×6	1.059	3-D29 2-D25	1.89	D10@226	0.15	5.00	0.50	0.10
F-2	126×250×6×6	1.059	3-D29 2-D25	1.89	D10@226	0.15	5.00	0.50	0.20
G-1	250×250×10×10	2.174	6-D13	0.49	D10@113	0.30	5.00	4.80	0.17
G-2	250×250×10×10	2.174	6-D13	0.49	D10@113	0.30	5.00	4.80	0.24
G-3	250×250×8×8	2.137	6-D16	0.77	D10@226	0.15	4.70	2.46	0.15
G-4	250×250×8×8	2.137	6-D16	0.77	D10@226	0.15	4.70	2.46	0.22

B<sub>s</sub>:鉄骨フランジ幅(図1参照)

tf:鉄骨フランジ厚さ

D<sub>s</sub>:鉄骨ウェブ長さ(図1参照)

tw:鉄骨ウェブ厚さ

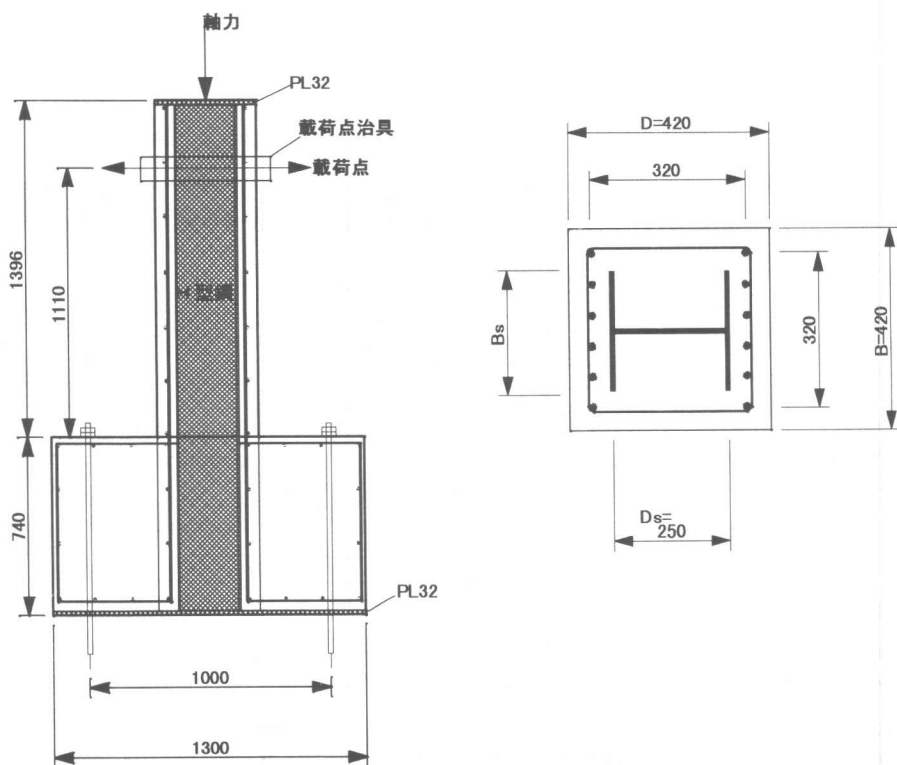
A<sub>f</sub>/A<sub>w</sub>:鉄骨フランジ部面積とウェブ部面積との比

P<sub>s</sub>:部材断面積に対する鉄骨と軸方向鉄筋の総断面積の比を百分率で表示した値

軸力比:コンクリートの圧縮強度に関する軸方向応力の比

鉄骨の材質はSS400使用

引張鉄筋の材質はS D 2 95使用



(E-2, F-1, F-2のみ軸方向鉄筋は4段)

図1 供試体概略形状

単位(mm)

### 2.3 測定項目

主な測定項目は各載荷荷重と供試体の水平変位量のほか、柱下端から柱頭部に向かって約0cm, 11cm, 23cm, 45cm, 68cmそして柱下端からフーチング内に向かって約8cm, 18cm, 36cm, 54cmの各断面における鋼材および鉄筋に貼り付けたひずみ量、および柱下端から柱頭部に向かって約14cm, 20cm, 26cm, 32cm, 38cm, 40cmの位置のコンクリート表面のひずみ量である。また、コンクリート表面のひび割れ状況を目視により観察した。

## 3. 実験結果

### 3.1 ひび割れ性状

曲げ降伏時のひび割れ状況の一例として、A-1, E-2供試体の1 $\delta y$ 時のひび割れ状況を図2に示す。A-1供試体のひび割れ発生状況では、斜めひび割れが発生しているものの、一般的に曲げひび割れが発生していることが確認できた。しかし実験供試体の中には、E-2供試体のように斜めひび割れが曲げひび割れに対して顕著に発生したものもあった。

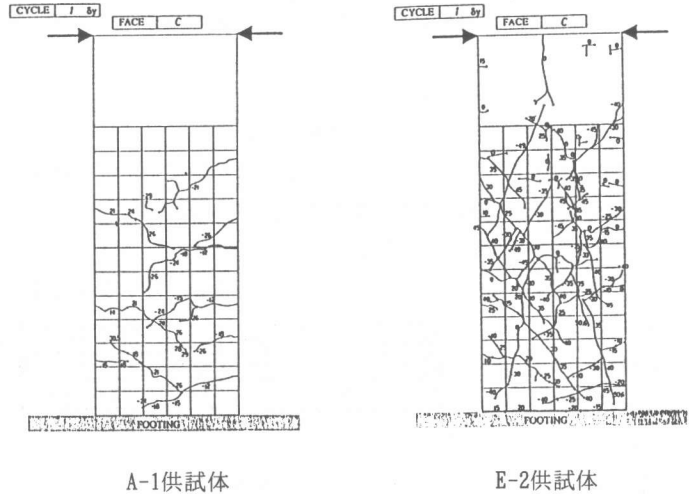
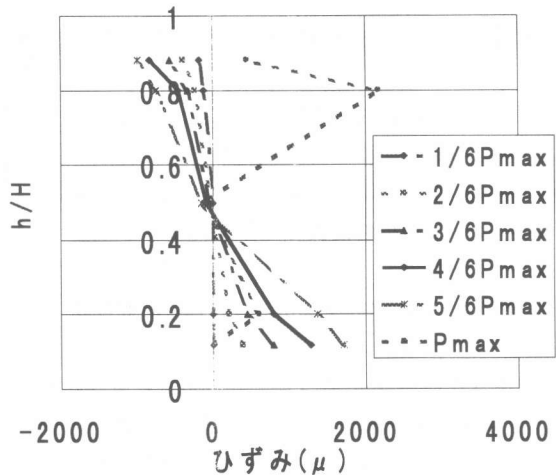


図2 ひび割れ発生状況 (1 $\delta y$ )

### 3.2 断面のひずみ分布

供試体柱下端部での鉄筋、鉄骨のひずみ分布の一例を、図3に示す。横軸は断面内の軸方向鉄筋および鉄骨のひずみ量である。圧縮側を負、引張側を正とした。また縦軸は断面下面からの距離と断面高さの比で示した。全ての供試体において比較的荷重レベルの低い領域では、鉄筋ひずみ・鉄骨ひずみとも圧縮領域から引張領域へ断面の高さ方向にほぼ直線的に変化していることがわかる。降伏荷重付近となる4/6 Pmaxでは比較的平面保持の法則が成り立っていると考えられる。しかし最大荷重に近づくにつれ、ひずみ分布は直線的に変化せず、平面保持の法則が成り立たなくなっていることがわかる。これは荷重レベルの大きい領域になるとコンクリートと鉄骨との付着がなく



h: 部材断面の引張縁からひずみゲージまでの距離  
H: 部材断面高さ

図3 断面内のひずみ分布  
(A-1供試体)

なり、鉄骨が単体的に挙動している影響によるものと考えられる。

#### 4. 降伏変位の推定

##### 4.1 降伏変位

断面内のひずみ分布の状況によると、降伏荷重程度までは概ね平面保持が成り立つと考えられる。そこで曲げひび割れ発生以降におけるSRC部材の剛性を評価する上で、本検討では鉄骨を鉄筋に換算し、RC部材の曲げ剛性評価手法のSRC部材への適用を試みた。曲げ剛性の評価には、文献[5]による換算断面二次モーメントを用いる方法(式(1))を用いた。

$$I_e = (\sigma_{scr} / \sigma_s)^3 I_g + \{1 - (\sigma_{scr} / \sigma_s)^3\} I_{cr} \leq I_g \quad (1)$$

ここに、

$I_e$  : 換算断面二次モーメント

$I_g$  : 全断面有効の断面二次モーメント

$I_{cr}$  : 中立軸以下のコンクリート部分を除いた断面二次モーメント

$\sigma_{scr}$  : 曲げひび割れ発生時の引張鉄筋応力度

$\sigma_s$  : 荷重作用時の引張鉄筋応力度

表3 降伏変位量1 ( $\delta_{yex} - \delta_{y0cal}$ )

計算による降伏変位量は、柱下端に作用する曲げモーメントMに対して曲率

( $M/E_c I_e$ )を求め、式(2)により数値積分することによって求めた。

$$\delta = \sum \{ (\phi_i y_i + \phi_{i-1} y_{i-1}) / 2 \} \Delta y_i \quad (2)$$

ここに、

$\phi_i, \phi_{i-1}$ : 橋脚天端から数えてi番目およびi-1番目の断面における曲率

$y_i, y_{i-1}$ : 橋脚天端から数えてi番目およびi-1番目の断面までの橋脚天端からの距離

$\Delta y_i$ : 脚天端から数えてi-1番目の断面の間の距離

実験値( $\delta_{yex}$ )と、式(2)による計算値( $\delta_{y0cal}$ )との関係を表3および図4に示す。なお、コ

ンクリートの弾性係数は材料試験により得られた値を用いた。図4より、計算による降伏変位量は、実験結果を過小に評価する傾向となった。これは、材料実験による割線弾性係数を用いたことにより降伏時の曲げ剛性が異なるためと考えた。

そこでひび割れ発生時の荷重 $P_{cr}$ および変位量 $\delta_{cr}$ から、せん断スパンをLとして $P_{cr} \cdot L^3 / (3 \delta_{cr} \cdot I_g)$ よりコンクリートの弾性係数を求め、適用した。結果を表4および図5に示す。図5より、図4と比較して $\delta_{yex} - \delta_{y0cal}$ は減少し、計算値は実験値に近づく傾向となった。

供試体	A-1	A-2	A-3	C-1	D-1	D-2	E-2	F-1	F-2	G-1	G-2	G-3	G-4
$\delta_{yex}(mm)$	5.7	6.3	6.6	4.8	5.1	6.0	9.0	8.3	9.3	8.2	9.0	8.6	9.5
$\delta_{y0cal}(mm)$	2.2	2.4	2.5	1.9	2.0	2.6	2.4	2.4	2.9	3.2	3.2	3.1	2.8

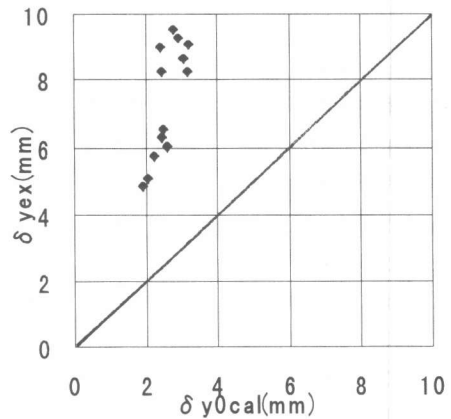


図4 降伏変位量の比較1 ( $\delta_{yex} - \delta_{y0cal}$ )

表4 降伏変位量2 ( $\delta y_{ex} - \delta y_{0cal}$ )

4.2 降伏変位の分離

供試体	A-1	A-2	A-3	C-1	D-1	D-2	E-2	F-1	F-2	G-1	G-2	G-3	G-4
$\delta y_{ex}(mm)$	5.7	6.3	6.6	4.8	5.1	6.0	9.0	8.3	9.3	8.2	9.0	8.6	9.5
$\delta y_{0cal}(mm)$	3.6	3.1	4.2	2.6	3.6	3.4	3.2	3.8	4.4	6.9	6.0	5.7	4.9

R C部材では、軸

方向鉄筋の抜け出しによるく体の回転変位の影響を考慮する場合がある[6]。そこでSRC部材にも同様に軸方向鉄筋の抜け出しによる影響があると考えた。

計算値から抜け出しによるく体の回転変位量( $\delta y_{1cal}$ )は文献[6]から、式(3)により求めた。

$$\delta y_1 = h \cdot \Delta L_y / (d - X_y) \quad (3)$$

ここに、

$\delta y_1$ : 降伏時の軸方向鉄筋の抜け出しによる回転変位量

h: 断面高さ d: 有効高さ

$\Delta L_y$ : 降伏時の軸方向鉄筋の抜け出しによる回転変位量

$X_y$ : 降伏時の圧縮縁から中立軸までの距離

実験値の抜け出し量には、柱く体以下の引張鉄筋に生じたひずみ量を数値積分することにより求め、軸方向鉄筋の抜け出しによるく体の回転変位量( $\delta y_{lex}$ )を得た。表5および図6より、SRC部材においてもRC部材と同様に軸方向鉄筋の抜け出しによるく体の回転変位が存在することがわかる。また、式(4)より求めた $\delta y_{0ex} - \delta y_{0cal}$ は、ほぼ等しい結果になった(表6、図7)。

表5 降伏変位量3 ( $\delta y_{lex} - \delta y_{1cal}$ )

$$\delta y = \delta y_0 + \delta y_1 \quad (4)$$

供試体	A-1	A-2	A-3	C-1	D-1	D-2	E-2	F-1	F-2	G-1	G-2	G-3	G-4
$\delta y_{lex}(mm)$	2.0	2.5	3.2	2.2	2.8	2.4	3.2	3.2	3.2	3.5	3.8	4.6	3.8
$\delta y_{1cal}(mm)$	2.7	2.7	2.8	3.0	2.5	3.0	3.4	3.2	3.5	2.9	3.2	3.1	3.5

ここに、

$\delta y$ : 柱部材載荷点の降伏変位量

$\delta y_0$ : 降伏時のく体変形による回転変位量

$\delta y_1$ : 降伏時の軸方向鉄筋の抜け出しによるく体回転変位量

5. 荷重-変位の関係

図8には、A-1供試体による降伏荷重までの荷重-変位量の関係の一例を示す。計算値の変位量は、式(2)で求め、式(4)の関係が、降伏時まで適用できると仮定して鉄筋の抜け出しによる回転変位量を求め、その和とした。ここで、ひび割れ発生荷重以降の抜け出しによる回転変位量は、ひび割れ発生時までには抜け出しはないものとし、

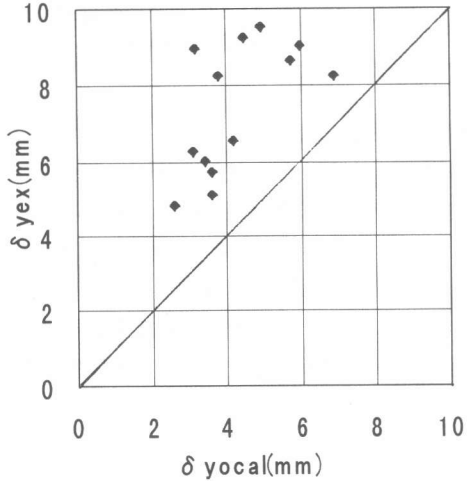


図5 降伏変位量の比較2 ( $\delta y_{ex} - \delta y_{0cal}$ )

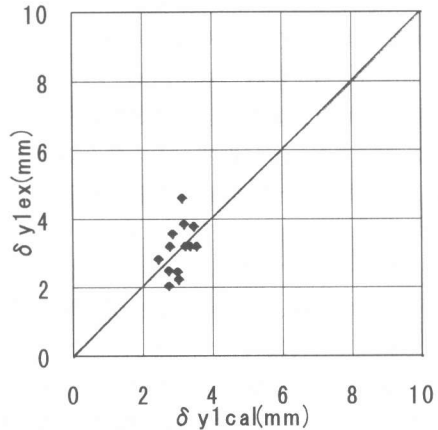


図6 降伏変位量の比較3 ( $\delta y_{lex} - \delta y_{1cal}$ )

$\delta y_{cal}$ を各作用荷重ごとに比例配分することで求めた。その結果、抜け出しによる回転変位量をおおむね適切に評価できる結果となった。

表6 降伏変位量4 ( $\delta y_{0ex} - \delta y_{0cal}$ )

供試体	A-1	A-2	A-3	C-1	D-1	D-2	E-2	F-1	F-2	G-1	G-2	G-3	G-4
$\delta y_{0ex}(mm)$	3.7	3.8	3.4	2.6	2.3	3.6	3.4	3.4	3.4	4.7	5.2	4.0	5.8
$\delta y_{0cal}(mm)$	3.6	3.1	4.2	2.6	3.6	3.4	3.2	3.8	4.4	6.9	6.0	5.7	4.9

## 6. まとめ

本検討により得られた結果を以下に示す。

- 1) S R C柱部材のひび割れによる曲げ剛性の低下はR C部材の手法を適用することで概ね妥当に評価できる。
- 2) S R C柱部材の降伏変位を推定する場合には、軸方向鉄筋の抜け出しによる影響を考える必要がある。

## 参考文献

- [1]川井治、穴見源八、村田清満、木下雅敬：鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げおよびせん断耐力試験、土木学会第49回年次学術講演会、平成6年9月
- [2]村田清満、穴見源八、川井治、寺田昌弘：軸力と曲げを受けるS R C橋脚柱の変形特性、土木学会第49回年次学術講演会、平成6年9月
- [3]川井治、村田清満、木下雅敬、寺田昌弘：軸力と曲げを受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の交番載荷試験、鉄道総研報告、V01.9, No4, 1995.4
- [4]川井治、木下雅敬、村田清満、寺田昌弘：曲げと軸力を受けるS R C柱の曲げ耐力と変形性能、土木学会第50回年次学術講演会、平成7年9月
- [5]角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状、土木学会論文集、第384号、V-7, 1987.7
- [6]石橋忠良、吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究、土木学会論文集、第390号、V-8、pp.57-66、1988.2

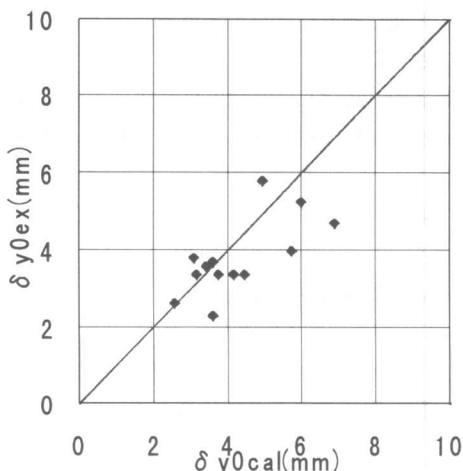


図7 降伏変位量の比較4 ( $\delta y_{0ex} - \delta y_{0cal}$ )

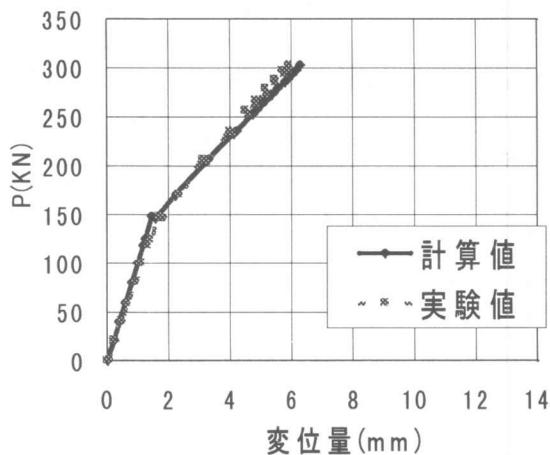


図8 荷重と変位の関係 (A-1供試体)