

# 引張鉄筋比の異なる RC はりのせん断強度に及ぼす 収縮・膨張の影響に関する一考察

広島大学大学院 学生会員 ○笹田 航平  
広島大学大学院 学生会員 宮本 和也  
広島大学大学院 正会員 半井 健一郎  
広島大学大学院 フェロー会員 佐藤 良一

## 1. はじめに

コンクリートの収縮は、耐久性あるいは機能性の低下のみならず、鉄筋コンクリートはり（以下、RC はり）のせん断強度低下への影響も指摘されている<sup>1), 2), 3)</sup>。一方、膨張コンクリートを用いた RC はりでは、ケミカルプレストレスによってせん断強度を向上できることが古くから報告されている<sup>4)</sup>。

文献 1), 2), 3) では、収縮の影響を受ける RC はりのせん断強度の評価に等価鉄筋比の概念が適用され、評価精度の向上が認められることが報告されている。しかし、これらは低水セメント比、高単位水量、高収縮骨材という点で通常のコンクリートとは異なる。

そこで本研究では、コンクリートの長さ変化量および鉄筋比を要因として、それらが市販の生コンクリートを用いて製造した RC はりのせん断強度に及ぼす影響を実験的に検討した。

## 2. 実験概要

### 2. 1 コンクリート使用材料および配合

本研究で用いたコンクリートの使用材料および配合を表 - 1, 2 に示す。

配合および養生方法を変えて、コンクリートの長さ変化を収縮・膨張の 2 水準に設定した。収縮コンクリートは膨張材を用いずに材齢 7 日から気中暴露し、乾燥収縮させた。膨張コンクリートは収縮コンクリートのセメント 30kg/m<sup>3</sup> を膨張材で内割置換し、アルミ粘着テープで封緘して膨張させた。

### 2. 2 はり供試体概要

RC はり供試体概要を図 - 1 に、せん断スパン内の変位計概要を図 - 2 に示す。体積変化の異なる RC はり供試体の鉄筋比  $P_s$  は、いずれも 0.79% および 1.52% の 2 水準とした。寸法は、はり幅 200mm、有効高さ 250mm、せん断スパン/有効高さ比 3 に統一した。

作製した後、載荷時期に達するまで、コンクリートの長さ変化とともに、RC はり支間中央の鉄筋ひずみの経時変化を計測した。

載荷試験は、長さ変化による鉄筋ひずみが所要の値に達した時点でを行った。試験条件は 2 点単純支持 2 点集中載荷とした。計測項目は、鉄筋ひずみ、荷重、支間中央のたわみ、せん断変位とした。RC はり供試体上で、せん断スパン内の変位計の位置を図 - 1 青線で示し、せん断スパン内の変位計を拡大して図 - 2 に計測項目を示した。

表 - 1 : コンクリートの使用材料

| 材料   | 記号 | 種類/物理的性質                              |
|------|----|---------------------------------------|
| 水    | W  | 工業用水                                  |
| セメント | C  | 普通ポルトランドセメント／密度：3.16g/cm <sup>3</sup> |
| 細骨材  | S  | 砕砂（石英粗面岩）／表乾密度：2.62g/cm <sup>3</sup>  |
| 粗骨材  | G  | 砕石（石英粗面岩）／表乾密度：2.65g/cm <sup>3</sup>  |
| 混和剤  | AE | AE減水剤標準型I種                            |
| 混和材  | EX | 低添加型石灰系膨張材／密度：3.16 g/cm <sup>3</sup>  |

表 - 2 : コンクリートの配合

| 配合名      | W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |     |     |      |
|----------|---------|---------|-------------------------|-----|----|-----|-----|------|
|          |         |         | W                       | C   | EX | S   | G   | AE   |
| 収縮コンクリート | 50      | 45.0    | 175                     | 350 | -  | 789 | 976 | 2.63 |
| 膨張コンクリート | 50      | 45.1    | 175                     | 320 | 30 | 791 | 976 | 2.63 |

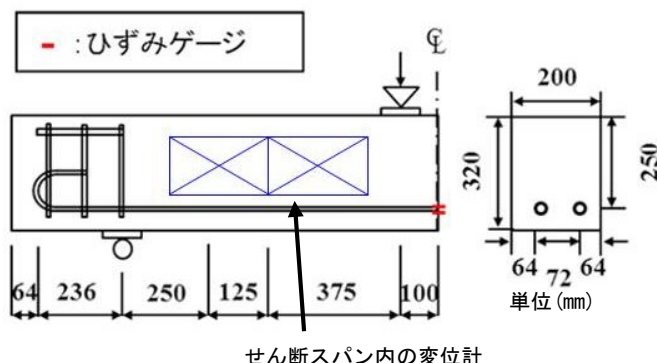


図 - 1 : 供試体概要（例、鉄筋比 0.79% の供試体）

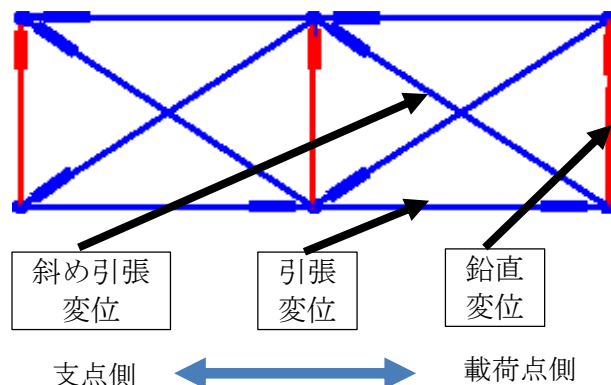


図 - 2 : せん断スパン内の変位計概要

3. 材料試験結果

材料強度試験結果を表 - 3 に示した。RC はり供試体に使用したコンクリートは載荷材齢に合わせた強度試験を行っていないため、材齢 1, 3, 7, 14, 28, 91 日に行った強度試験結果の回帰によって、載荷試験時の圧縮強度、静弾性係数の値を推定した。推定に用いた圧縮強度および静弾性係数の打込み時期ごとに 3 つの回帰曲線を図 - 3, 4, 5 に示す。

4. 養生中の鉄筋ひずみ

RC はりの支間中央における引張鉄筋、および RC はり定着域に設置した無拘束状態の鉄筋の温度ひずみを、ひずみゲージによって計測した。温度ひずみでは内部拘束が生じないとして、引張鉄筋ひずみから温度ひずみを差し引いて補正した値を鉄筋ひずみとした。その経時変化の計測結果を図 - 6 に示す。

収縮 RC はり供試体の鉄筋ひずみは、載荷試験時には、いずれの供試体においても  $100 \times 10^{-6}$  程度の収縮が生じていた。一方、膨張 RC はり供試体では、鉄筋比が大きなものほど鉄筋ひずみが小さく、その差は  $80 \times 10^{-6}$  程度であった。これらの結果、載荷試験時には、収縮側と膨張側で少なくとも  $200 \times 10^{-6}$  を超えるひずみ差が生じていた。なお、すべての供試体で、収縮によるひび割れはみられなかった。

5. 載荷試験結果

載荷試験結果を表 - 4 に、荷重と支間中央のたわみの関係を図 - 7, 8、荷重と各変位の関係を図 - 9~13 に示す。斜めひび割れ発生荷重を図 - 7~13 上では丸印 (○) として示した。また、載荷終了時点でのひび割れ状況の例を写真 - 1, 2, 3 に示す。いずれの写真にも定着部は写っていないが、ひび割れは進展していない。

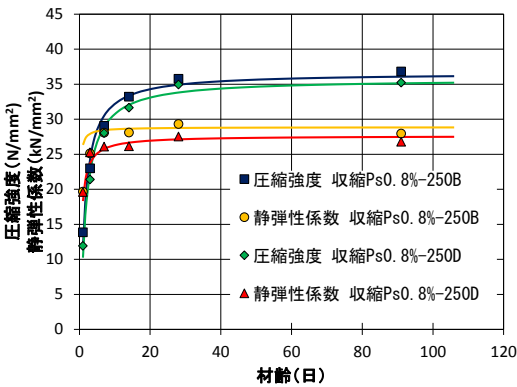


図 - 3 : 材料試験結果 (収縮 Ps0.8%)

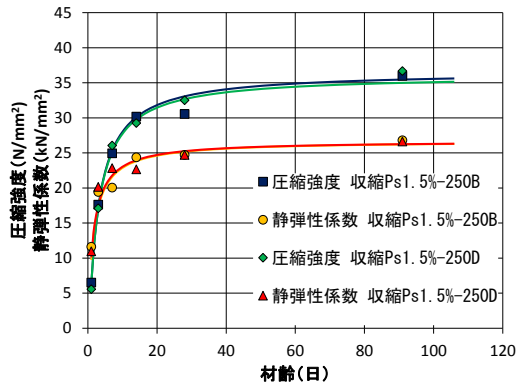


図 - 4 : 材料試験結果 (収縮 Ps1.5%)

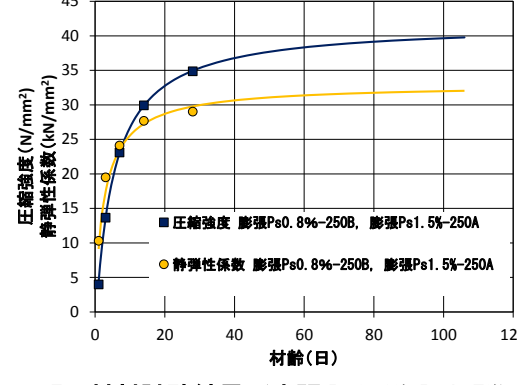


図 - 5 : 材料試験結果 (膨張 Ps0.8%, Ps1.5%)

表 - 3 : 材料試験結果 (試験材齢相当の回帰値)

| 供試体名          | 圧縮強度                 | 静弾性係数                 | 載荷材齢<br>(日) |
|---------------|----------------------|-----------------------|-------------|
|               | (N/mm <sup>2</sup> ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) |             |
| 収縮Ps0.8%-250B | 35.8                 | 27.9                  | 99          |
| 収縮Ps0.8%-250D | 35.0                 | 26.8                  | 101         |
| 収縮Ps1.5%-250B | 35.0                 | 26.0                  | 66          |
| 収縮Ps1.5%-250D | 36.7                 | 26.6                  | 94          |
| 膨張Ps1.5%-250A | 34.9                 | 29.0                  | 30          |
| 膨張Ps0.8%-250B | 34.9                 | 29.0                  | 29          |

※供試体名称：(配合名)Ps(鉄筋比)%(有効高さ) (供試体番号)

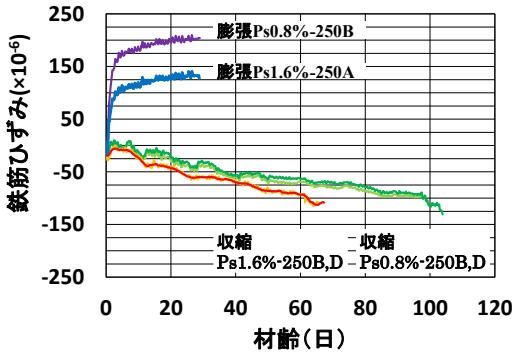


図 - 6 : RC はり供試体の鉄筋ひずみ

表 - 4 : 各供試体の斜めひび割れ発生強度

| 供試体名           | 載荷直前の鉄筋ひずみ<br>$\epsilon_{s0}$<br>( $\times 10^{-6}$ ) | 斜めひび割れ発生強度                       |                                            |                                          | 最大せん断強度<br>$\tau_u$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 破壊形態       |
|----------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|------------|
|                |                                                       | 目視                               | 斜め引張変位<br>$\tau_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 鉛直変位<br>$\tau_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |                                             |            |
|                |                                                       | $\tau_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\tau_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> )           | $\tau_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> )         |                                             |            |
| 収縮Ps0.8%-d250B | -96                                                   | (1.26)                           | -                                          | 1.24                                     | 1.77                                        | せん断-曲げ圧縮破壊 |
| 収縮Ps0.8%-d250D | -131                                                  | (1.20)                           | (1.33)                                     | 1.33                                     | 1.50                                        | せん断圧縮破壊    |
| 収縮Ps1.5%-d250B | -109                                                  | (1.50)                           | 1.53                                       | -                                        | 1.88                                        | せん断-曲げ圧縮破壊 |
| 収縮Ps1.5%-d250D | -134                                                  | (1.49)                           | 1.49                                       | -                                        | 1.77                                        | せん断圧縮破壊    |
| 膨張Ps0.8%-d250B | 204                                                   | (1.20)                           | -                                          | -                                        | 1.45                                        | せん断-曲げ圧縮破壊 |
| 膨張Ps1.5%-d250A | 127                                                   | (1.48)                           | 1.48                                       | -                                        | 1.64                                        | せん断引張破壊    |

※斜めひび割れ発生強度の値のうち、括弧書きのものは参考値である。

収縮 RC はり供試体では 30kN 程度、膨張 RC はり供試体では 60kN 程度で曲げひび割れが発生したのち、130～150kN 程度で斜めひび割れが発生したが、その後も荷重が増加し、140～180kN 程度でせん断破壊した。破壊形態としては、等曲げ区間のひび割れ貫通による破壊（本研究ではせん断-曲げ圧縮破壊と表記、写真 - 1）、上縁コンクリートの圧壊（同様にせん断圧縮破壊、写真 - 2）、斜め引張破壊（写真 - 3）となった。

一方で、斜めひび割れ発生荷重は荷重たわみ関係からは明確ではなかった。コンクリート強度および骨材強度が一般的なものであり、単位水量も過多でないため、骨材の噛み合わせ等の影響が顕れたものと考えられる。よって、本研究では、目視、鉛直変位、あるいは斜め引張変位により斜めひび割れ発生荷重を検討した。

斜めひび割れ発生荷重の判定は、ひび割れ発生を目視確認によって、 $\pm 15\text{kN}$  程度の精度で発生強度範囲を絞り込み、その範囲において、せん断スパン内の変位計の計測結果から変位の急変点を採用することとした。4 種類のせん断スパン内の変位計のうち、曲げ変形の影響を最も受けにくいと考えられる鉛直変位計が、斜めひび割れの発生の同定に最も適していると考えられた。そこで、まずは斜めひび割れが目視確認された荷重付近で鉛直変位の急変が確認された場合には、その荷重を斜めひび割れ発生荷重とした。しかし、斜めひび割れが鉛直変位の計測範囲を進展しない等によって鉛直変位が変化しなかった場合には、斜め引張変位の急変点によって発生荷重を決定した。ここで曲げによる斜め引張変位の増大を誤って、斜めひび割れ発生としないため、引張変位も確認した。ただし、膨張 Ps0.8%-250B については、せん断スパン内の変位計の測定に不備があったため、ひび割れ目視による荷重を参考値として採用した。そのひび割れ状況は、写真 - 1 に示した。

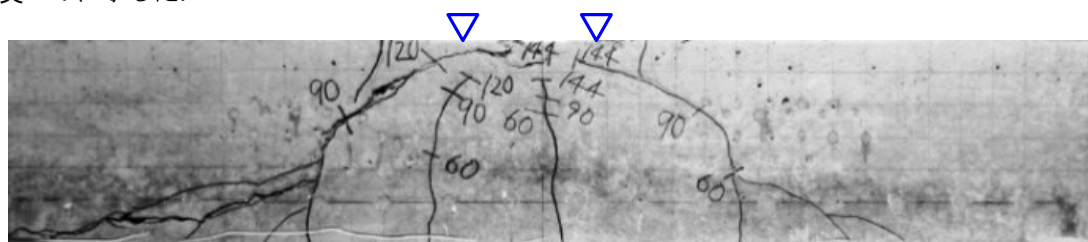


写真 - 1 : 膨張 Ps0.8%-250B ひび割れ状況（せん断-曲げ圧縮破壊例）

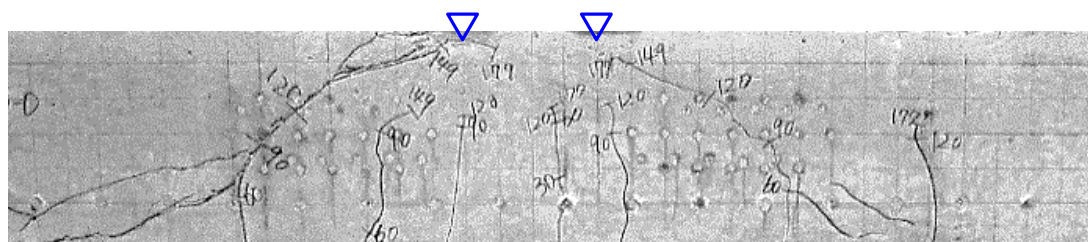


写真 - 2 : 収縮 Ps1.5%-250D ひび割れ状況（せん断圧縮破壊例）

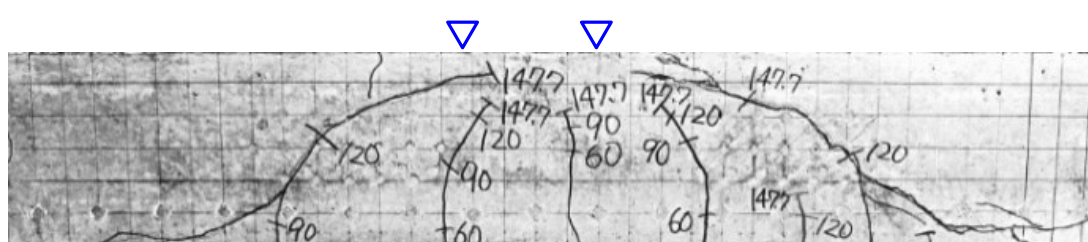


写真 - 3 : 膨張 Ps1.5%-250A ひび割れ状況（斜め引張破壊例）

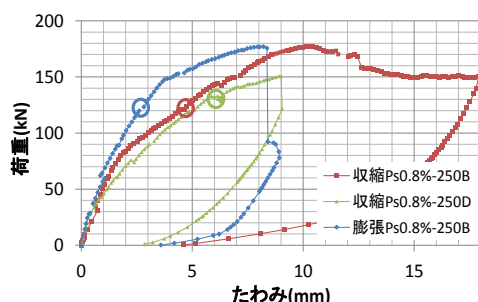


図 - 7 : 荷重たわみ関係 (Ps=0.79%)

※丸印は斜めひび割れ発生を示し、収縮 Ps0.8%-250B は目視を根拠とした値である。一方、収縮 Ps0.8%-250D、膨張 Ps0.8%-250B は、変位計を根拠とした値である。

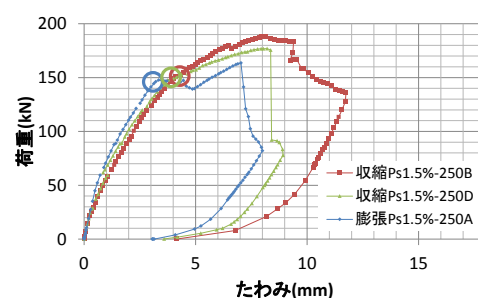


図 - 8 : 荷重たわみ関係 (Ps=1.52%)

※丸印は斜めひび割れ発生を示し、いずれの供試体も変位計を根拠に決定した。

表 - 5 : 実験値および算定値の比較

| 供試体名            | 載荷直前の鉄筋ひずみ,<br>およびコンクリート応力                     |                                          |                                                | 斜めひび割れ発生強度                       |                                        |                                        |                         |                         |
|-----------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                 |                                                |                                          |                                                | 実験値                              | 算定値                                    |                                        | 実験値/算定値                 |                         |
|                 |                                                |                                          |                                                |                                  | 二羽式                                    | 等価鉄筋比導入式                               | 二羽式                     | 等価鉄筋比導入式                |
|                 | $\varepsilon_{s0,def}$<br>( $\times 10^{-6}$ ) | $\sigma_{c,def}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_{s0,def}$<br>( $\times 10^{-6}$ ) | $\tau_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\tau_{c,cal}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\tau_{c,cal}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\tau_c / \tau_{c,cal}$ | $\tau_c / \tau_{c,cal}$ |
| 収縮 Ps0.8%-d250B | -96                                            | 0.24                                     | -105                                           | 1.24                             | 1.05                                   | 1.02                                   | 1.18                    | 1.22                    |
| 収縮 Ps0.8%-d250D | -131                                           | 0.32                                     | -143                                           | 1.33                             | 1.05                                   | 1.01                                   | 1.27                    | 1.32                    |
| 収縮 Ps1.5%-d250B | -109                                           | 0.47                                     | -127                                           | 1.53                             | 1.29                                   | 1.22                                   | 1.19                    | 1.25                    |
| 収縮 Ps1.5%-d250D | -134                                           | 0.58                                     | -156                                           | 1.49                             | 1.29                                   | 1.21                                   | 1.16                    | 1.23                    |
| 膨張 Ps0.8%-d250B | 204                                            | -0.50                                    | 222                                            | (1.20)                           | 1.05                                   | 1.13                                   | 1.14                    | 1.06                    |
| 膨張 Ps1.5%-d250A | 127                                            | -0.56                                    | 147                                            | 1.48                             | 1.30                                   | 1.39                                   | 1.14                    | 1.06                    |

※ 等価鉄筋比は二羽式に導入した。導入式： $\tau_c = f_c^{\frac{1}{3}} p_{s,e}^{\frac{1}{3}} \left( \frac{d}{1000} \right)^{-\frac{1}{4}} \left( 0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right)$

等価鉄筋比： $p_{s,e} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s - \varepsilon_{s0,def}} p_s$  , ゼロ応力状態の鉄筋ひずみ： $\varepsilon_{s0,def}$  ,

斜めひび割れ発生時の鉄筋ひずみ： $\varepsilon_s$

本実験において、RC はり供試体の斜めひび割れ発生強度を鉄筋比ごとに比較すると収縮・膨張によらず、ほぼ同等の強度となった。また、すべての RC はり供試体において、斜めひび割れ発生強度の算定値（二羽式）と実験値を比較すると、長さ変化量や引張鉄筋比に拘わらず、10～25%程度の過小評価が生じた。さらに、二羽式に等価引張鉄筋比の考え方を適用し、引張鉄筋比ごとに比較すると、膨張側では評価精度が向上するが、収縮側では、むしろ低下した。

以上の結果は、供試体が小さかったことなどによって斜めひび割れ発生が直ちに破壊につながらなかったことや、収縮量が十分に大きくなったことなどが影響している可能性がある。今後は、より長期材齢の供試体や寸法の大きな供試体での検討を行う必要がある。

## 6. まとめ

本実験の範囲において以下のことが得られた。

- 収縮・膨張の影響によって斜めひび割れ発生強度の顕著な影響は確認されなかった。
- 二羽式、あるいは等価引張鉄筋比導入した二羽式による評価のいずれも、実験結果をやや過小に評価した。
- 以上の結果は、供試体が小さかったことなどによって斜めひび割れ発生が直ちに破壊につながらなかったことや、収縮量が十分に大きくなったことなどが影響している可能性がある。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金 24246077（代表：佐藤良一）の助成を受けたものである。本紙面を借りて厚く御礼申し上げる。

## 参考文献

- 河金甲・佐藤良一：高強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響評価，土木学会論文集 E, Vol.65, No.2, pp.178-197, 2009.4
- 森戸重光・半井健一郎：収縮応力および収縮ひび割れが RC はりのせん断耐力に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.673-678, 2010
- 三谷昂大ほか：収縮による普通強度 RC はりのせん断強度低下とその評価，コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 2010
- 岡村甫・辻幸和：ケミカルプレストレストコンクリート部材の力学的諸性状，セメント技術年報, No.26, 1972
- 二羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986

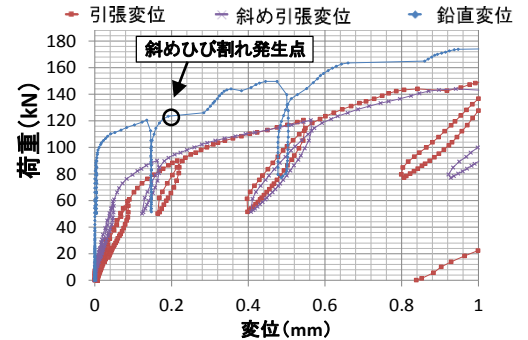


図-9：荷重－変位関係（収縮 Ps0.8%-250B）

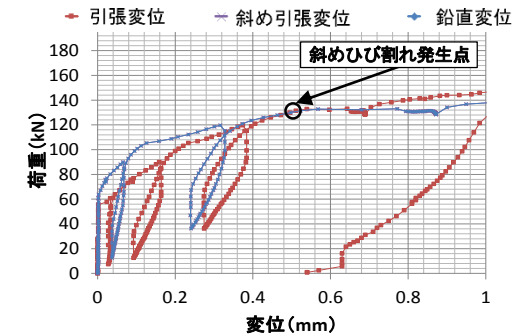


図-10：荷重－変位関係（収縮 Ps0.8%-250D）

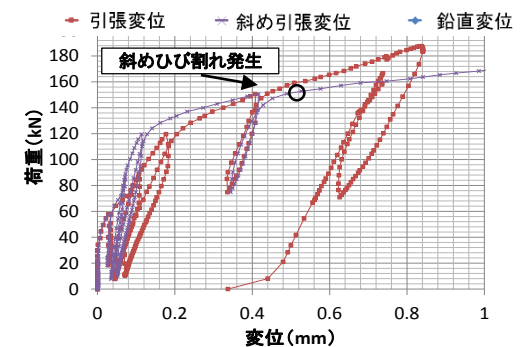


図-11：荷重－変位関係（収縮 Ps1.5%-250B）

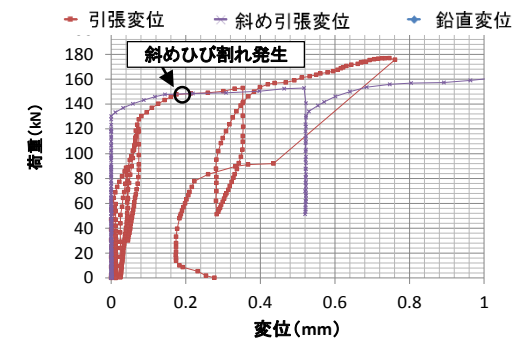


図-12：荷重－変位関係（収縮 Ps1.5%-250D）

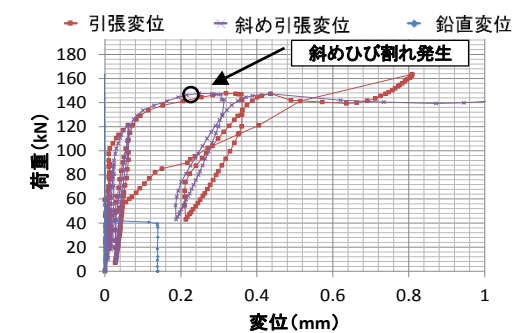


図-13：荷重－変位関係（膨張 Ps1.5%-250A）