

# 乾燥収縮が断続的に拘束されたコンクリートにおける変形と応力の導入

コンクリート研究室 佐藤 誠二  
指導教員 下村 匠

**要旨：**乾燥収縮が拘束された条件下におけるコンクリートの応力-有効ひずみ関係の性質を検討するため、一軸拘束収縮試験体を用いて、乾燥途上に吸湿に転じる場合、拘束が解放される場合の試験を行った。吸湿による拘束応力の除荷過程では、応力-有効ひずみ関係が直線的となること、有効ひずみが完全に回復しないことを明らかにした。コンクリートを拘束している鋼材を取り除くことにより、乾燥収縮が拘束されたコンクリートの有効ひずみには、瞬間弾性ひずみ、時間依存性回復ひずみ、非回復ひずみが含まれることを明らかにした。

**キーワード：**乾燥収縮、応力-有効ひずみ関係、一軸拘束収縮試験

## 1. はじめに

コンクリートは温度変化、自己収縮、乾燥収縮により収縮する。自由な収縮が拘束されると、その度合いに応じてコンクリートには引張応力および引張有効ひずみが徐々に導入される。これらが、コンクリートの引張強度または限界ひずみに達した時ひび割れが生じると考えられる。したがって、収縮ひび割れの予測のためには、収縮が拘束されたときのコンクリートへの応力および有効ひずみの導入特性、ひび割れ条件を明らかにする必要がある。

これらは、時間依存性変形特性、破壊条件に他ならないが、ここで重要であるのは、コンクリートの収縮特有の事情、たとえば時間スケール、水和の進行、内部拘束の影響などに対応した引張変形特性、破壊条件が必要であることである。これらの事情は対象となるコンクリートの収縮の種類によって個々の影響要因の比重が異なる。本研究は乾燥収縮に主眼を置くものである。この観点から青木は、乾燥収縮の収縮速度に対応した時間スケール、乾燥の有無による内部拘束の影響を実験パラメータに選び、コンクリートの時間依存性引張変形特性とひび割れ応力を検討した。佐藤らは JIS 一軸拘束収縮供試体にひずみ制御装置を組み合わせて、乾燥収縮が拘束された条件下にお

ける、応力の導入性状に関する検討を行なっている。しかし、時間スケールが短く、内部拘束の影響を排除できる自己収縮に比べて、乾燥収縮に関するこの種の検討例は多くないのが現状である。

本研究では、新たな試みとして、JIS 一軸拘束収縮試験を応用して、乾燥期間中に拘束解放および吸湿させる実験を行う。このようにして、乾燥収縮が拘束され応力の導入過程にあるコンクリートを除荷することにより、有効ひずみに含まれる、瞬間弾性ひずみ、塑性（非回復）ひずみ、回復クリープ（遅れ弾性ひずみ）を実験的に抽出し、検討する。

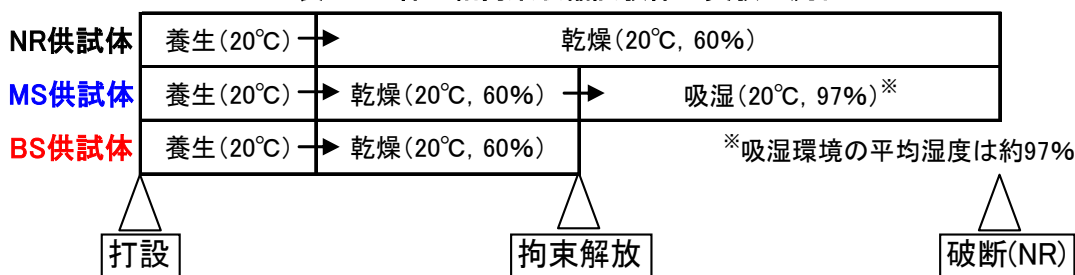
## 2. 実験概要

### 2.1 実験シリーズ

乾燥収縮が断続的に拘束されたコンクリート供試体の乾燥条件および拘束条件を変化させる一軸拘束収縮試験を行った。各実験の流れを表-1 に示す。また、乾燥途中において吸湿させる実験、拘束を途中解放する実験の各供試体概要を表-2 および 3 に示す。供試体数は、各試験 1 体ずつとした。

実験に用いたコンクリートの配合および使用材料を表-4 に示す。コンクリート打設時には、バイブレーターによる締固めを行った。一軸拘束

表-1 各一軸拘束収縮試験体と実験の流れ



収縮試験，自由収縮試験の供試体は，打設後，ポリエチレンシートを用いて乾燥を防ぎ，室温 20℃の室内に静置した。24 時間後に脱型し，直ちに供試体全面をアルミテープでシールし，再び同室内で乾燥開始まで養生させた。

## 2.2 乾燥途中で吸湿させる一軸拘束収縮試験

NR 供試体，MS 供試体は，図-1 に示す JIS 一軸拘束収縮試験体を用いる。本試験は，コンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性を評価する試験として広く用いられており，コンクリート供試体の軸方向の収縮を，左右に配した鋼材により外的に一軸線拘束し，試験区間に断面を貫通するひび割れを発生させるものである。

試験区間のコンクリート断面の応力と平均ひずみを測定するため，拘束鋼材の軸方向ひずみを基長 5mm のひずみゲージにより，コンクリート打設直後より 6 時間間隔で測定した。また，試験区間の打設面および底面にゲージプラグを取り付け（基長 300mm），コンタクトゲージによりコンクリート表面の平均ひずみを乾燥開始時より測定した。

NR 供試体の試験条件は，乾燥開始から試験区間が破断するまで一定環境（温度 20±1℃，湿度 60±5%）の室内で乾燥させる一般的な一軸拘束収縮試験に準じた。

MS 供試体は，まず，NR 供試体と同じ温度 20±1℃，湿度 60±5% の環境で乾燥させ，コンクリートの引張応力が各供試体の既定値に達したときに，供試体を高湿度環境下に置くことで，コンクリートを吸湿膨張させ，除荷挙動を検討する試験体である。高湿度環境は，立てた状態の一軸拘束収縮供試体が入る大きさの空間の骨組みを恒

表-2 吸湿させる供試体概要

供試体名	養生日数(日)	最大応力(MPa)
NR-23	23	破断
MS1.5-23		1.5
NR-14	14	破断
MS2.0-14		2.0
MS2.5-14		2.5

表-3 拘束解放する供試体概要

供試体名	養生日数(日)	最大応力(MPa)
NR-23	23	破断
BS1.5-23		1.5
BS2.5-23		2.5
NR-15	15	破断
BS1.5-15		1.5
BS2.5-15		2.5

表-4 コンクリートの配合および使用材料

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G	Ad1	Ad2
55.0	45.1	165	300	804	1037	0.75	0.90

W：水道水

C：普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>)

S：細骨材(密度 2.62g/cm<sup>3</sup>)

G：粗骨材(密度 2.78g/cm<sup>3</sup>，最大寸法 20mm)

Ad1：AE 減水剤

Ad2：AE 剤(100 倍希釈)

温室内に塩ビ管で作製し，上からビニールをかぶせて作った。ビニール内には水を張ったバットを置き，湿らせた布を吊るすことで高湿度環境を作り出した。試験中のビニール内部は，温度 19±1℃，平均湿度は約 97%であった。

一軸拘束収縮試験と並行して，角柱供試体（断

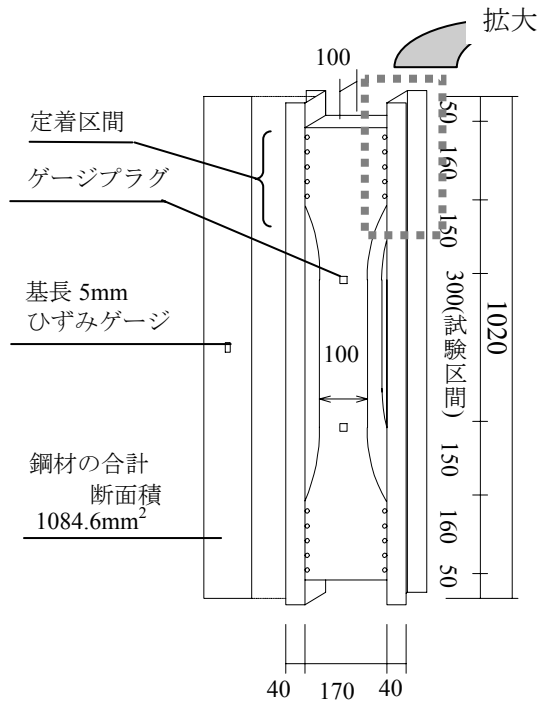


図-1 一軸拘束収縮試験体

面 100×100mm, 長さ 400mm) を用いて自由収縮を測定した。自由収縮ひずみの測定はコンタクトゲージにより行い, 基長は 300mm とした。乾燥条件は, 対応する一軸拘束収縮試験体と同じとした。

### 2.3 拘束を途中解放する一軸拘束収縮試験

BS 供試体は, NR 供試体と同じ環境で乾燥させ, コンクリートの引張応力が 1.5 および 2.5MPa に達したときに, コンクリートを一軸拘束している鋼材を取り除くことにより瞬間的に除荷し, 除荷時の挙動を検討する試験体である。この試験体は, 乾燥期間中にコンクリートから拘束鋼材を取り外すことができるように JIS 一軸拘束収縮試験体の定着区間に工夫を施したものである。コンクリートと拘束鋼材を直接定着させずに, 両者間に厚さ約 4 mm の鋼板を挟んでいる (図-2)。鋼板には φ9mm の丸鋼を JIS 試験体と同じ間隔で各 5 本溶接し, 打設時よりコンクリートと定着させる。コンクリート打設時には鋼板と拘束鋼材は 4 箇所においてボルトとナットで接合しておく。乾燥期間中の任意の時点でナットを外すことで, 試験体から拘束鋼材のみを取り外すことができる。供試

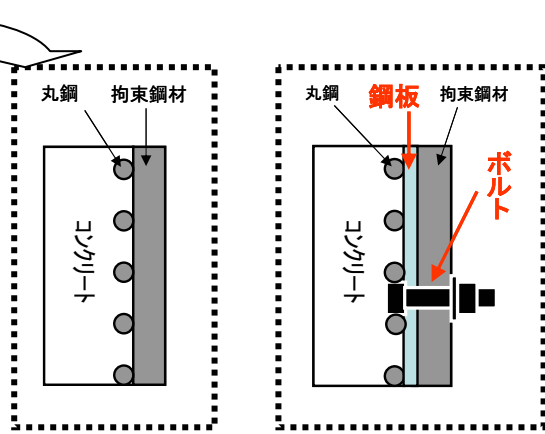


図-2 従来および拘束解放可能な定着区間

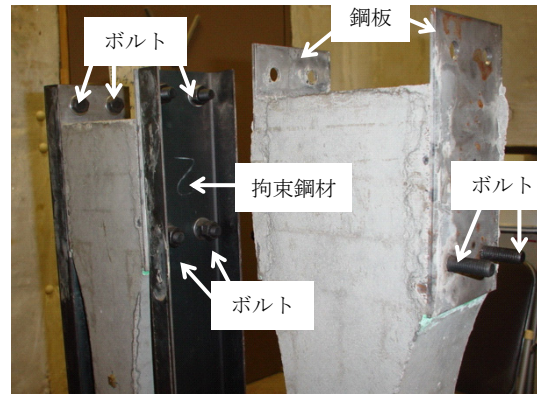


図-3 拘束解放前後の供試体状況

体の寸法・形状および鋼材の断面積などの定着区間以外の部分は, 図-1 に示す JIS 試験体と同じである。

本試験体は, 予備実験により鋼板と拘束鋼材とのすべりがなく, 通常の JIS 一軸拘束収縮試験と同じ拘束状態が得られることを確認した。また, 任意の時点において供試体から比較的容易に拘束鋼材を取り外すことができることも確認した。拘束鋼材除去前後の試験体の状況を図-3 に示す。

## 3. 実験結果

### 3.1 応力と有効ひずみの算出法

実験結果より一軸拘束収縮供試体のコンクリートの応力は次式で求める。

$$\sigma = -\frac{A_s}{A_c} E_s \varepsilon_s \quad (1)$$

ここに,  $\sigma$ : 試験区間のコンクリート断面の応力,  $A_s$ : 拘束鋼材の断面積,  $A_c$ : 試験区間のコンクリ

ートの断面積,  $E_s$ : 拘束鋼材の弾性係数,  $\varepsilon_s$ : 拘束鋼材のひずみである。

コンクリートの有効ひずみは次式で求める。

$$\varepsilon_e = \varepsilon_c - \varepsilon_{sh} \quad (2)$$

ここに,  $\varepsilon_e$ : 試験区間のコンクリートの有効ひずみ,  $\varepsilon_c$ : 試験区間のコンクリートのひずみ,  $\varepsilon_{sh}$ : 自由収縮供試体のひずみである。なお, 試験区間のコンクリートのひずみのかわりに拘束鋼材のひずみを用いることがある。ただし, 鋼材を途中で取り外す試験体の場合, コンタクトゲージにより測定したコンクリートのひずみを用いなければならない。

### 3.2 乾燥途中で吸湿させる一軸拘束収縮試験

#### (1) ひずみの経時変化

NR-23 および MS1.5-23 供試体の拘束鋼材のひずみ, 自由収縮ひずみの経時変化を図-4 に示す。

乾燥開始前から自己収縮により徐々に応力が導入され, 乾燥開始時において約 0.7MPa となっている。乾燥開始後, 3 日でコンクリートの応力が約 1.5MPa となったため, 乾燥環境を高湿度環境に変更した。その環境下では, 拘束鋼材および自由収縮ひずみの値は徐々に減少した。つまり, 乾燥による収縮過程から, 吸湿による膨張過程に移行した。

吸湿 25 日で MS 供試体の自由収縮ひずみは乾燥開始時まで回復した。鋼材のひずみは乾燥開始時よりも小さい値まで回復し, ゼロに近づいた。

#### (2) 応力-有効ひずみ関係

各供試体の応力-有効ひずみ関係を図-5 に示す。なお, 拘束鋼材のひずみは打設時より計測しているが, NR-23 および MS1.5-23 供試体の自由収縮ひずみは, 材齢 9 日から測定を開始したため, それ以前の有効ひずみはゼロとして描いている。

乾燥による応力導入過程では応力-有効ひずみ関係は直線的となっている。これは既往の研究においても見られる傾向である。

乾燥環境変化後, 吸湿による除荷過程においても応力-有効ひずみ関係は直線的な経路をたどっている。その傾きは乾燥時よりも大きい。また

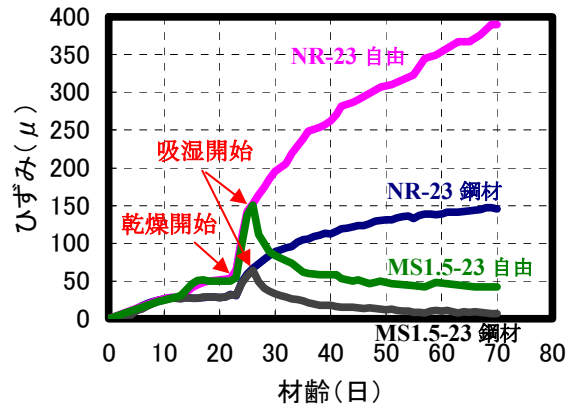


図-4 ひずみの経時変化

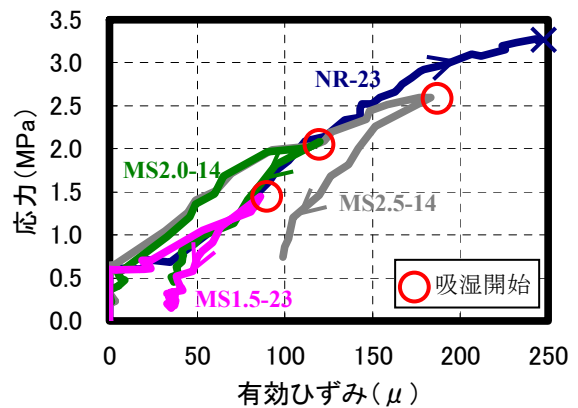


図-5 応力-有効ひずみ関係

原点を指向せず, 応力がゼロに漸近しても残留ひずみが存在する傾向を示している。本供試体の除荷過程は, 瞬間的ではなく吸湿によりゆっくりと行なわれているため, 除荷により回復するひずみには, 瞬間成分と時間依存性成分が含まれている。したがって, 応力がゼロに漸近したときの残留ひずみは非回復成分がほとんどであると考えられる。乾燥収縮の拘束による持続荷重によって, 非回復の引張ひずみが導入されていることが示唆される。これは, 持続引張と乾燥収縮の内部拘束による非回復の損傷によるものと考えられる。ただし, 乾燥過程と吸湿過程とではコンクリート断面内部のひずみ分布, 応力分布が異なることによりもたらされる断面レベルの非可逆性が影響している可能性もある。

### 3.3 拘束を途中解放する一軸拘束収縮試験

#### (1) ひずみの経時変化

NR-23, BS1.5-23 および BS2.5-23 供試体の拘束鋼材のひずみ, 自由収縮ひずみの経時変化を図-

6 に示す。一軸拘束収縮試験体の定着部分を脱着可能とした BS 供試体の鋼材ひずみ-材齢関係は通常の一軸拘束収縮試験体 (NR 供試体) のそれとよく一致しており、今回作製した供試体が、コンクリートの収縮を十分に拘束していることが確認できる。

BS1.5-23 および BS2.5-23 供試体の試験区間のコンクリートの実ひずみは、一軸収縮拘束試験体の打設面および底面のひずみをコンタクトゲージにより測定し、2 つの測定値を平均している。拘束鋼材除去 (除荷) 以前については、拘束鋼材のひずみとコンクリートのひずみはよく一致している。

拘束解放時、瞬間的にコンクリートのひずみが増大し、その後時間とともに漸増している。瞬間的なひずみの増大は拘束応力が解放されることによる弾性成分で、時間とともに漸増する成分は時間依存性回復成分と自由収縮が含まれている。コンクリートに作用する応力が大きくなるほど瞬間的に回復する弾性ひずみも大きくなっていることがわかる。

## (2) 応力-有効ひずみ-材齢関係

各供試体の応力-有効ひずみ関係および有効ひずみ-材齢関係を図-7 および 8 に示す。BS 供試体については、有効ひずみの計算には実ひずみの値を用いることで拘束鋼材除去後のコンクリートの有効ひずみを算出した。なお、BS1.5-23 供試体は、拘束解放後、測定途中にゲージプラグが破損してしまい、それ以降の測定はできていない。

除荷直後、瞬間的に回復する弾性ひずみ、その後、時間に依存する遅れ弾性ひずみ、最終的に非回復のひずみが残ることがわかる。つまり、従来の一軸拘束収縮試験体の有効ひずみとして観察していたひずみには、これらの成分が含まれていることが実験的に明らかとなった。

コンクリートに導入された応力が大きいほど、瞬間弾性ひずみおよび非回復ひずみは大きい結果となった。しかし、本実験において、時間に依存する遅れ弾性ひずみに、応力の違いによる明確な差は認められなかった。

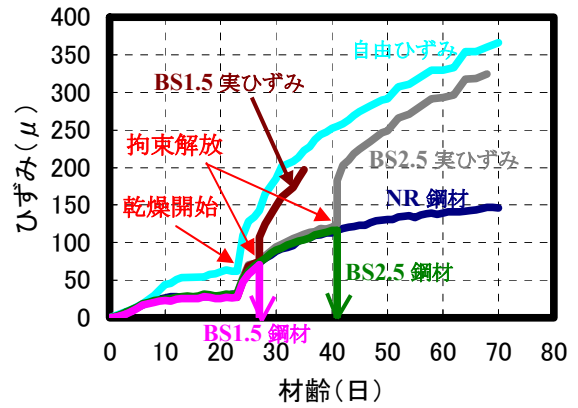


図-6 ひずみの経時変化

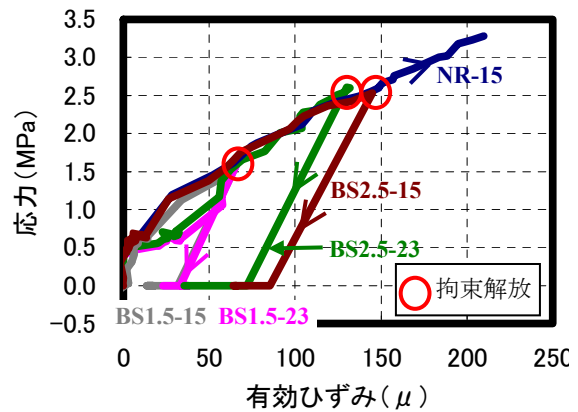


図-7 応力-有効ひずみ関係

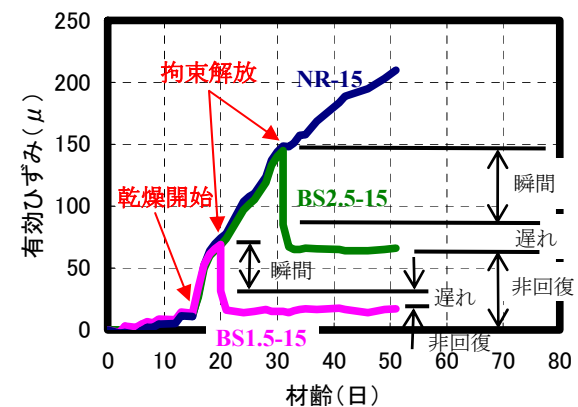
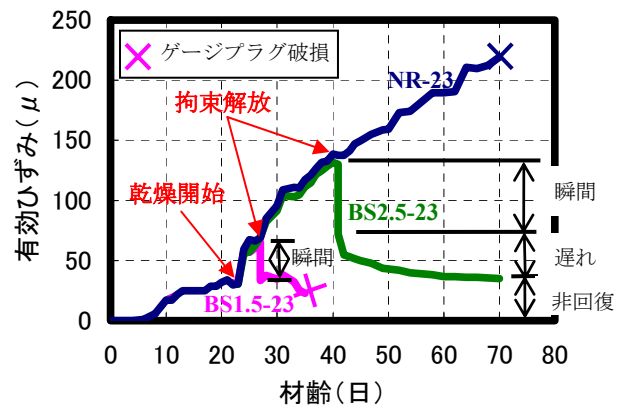


図-8 有効ひずみ-材齢関係

### (3) 最大応力－有効ひずみ成分関係

各 BS 供試体の最大応力と有効ひずみ成分の関係を図-9 に示す。また、NR 供試体の応力－有効ひずみ関係も同図に示す。なお、BS1.5-23 供試体については、測定途中にゲージプラグが破損したため瞬間弾性ひずみのみ図示している。

コンクリート中に導入される応力と有効ひずみ成分の瞬間弾性ひずみは直線的な関係となっている。また、瞬間弾性ひずみと遅れ弾性ひずみの和と最大応力の関係は、コンクリートの静弾性係数 ( $3.2 \times 10^4 \text{MPa}$ ) の直線とほぼ同じ関係を示している。このことより、一軸拘束収縮試験において観察される有効弾性係数がコンクリートの静弾性係数より小さくなっている理由として、非回復ひずみに相当する部分によるものであると考えられる。

各 MS 供試体の最大応力と有効ひずみ成分の関係を図-10 に示す。吸湿による応力緩和は徐々に行われるため、瞬間弾性ひずみと遅れ弾性ひずみが同時に観測される。瞬間弾性ひずみと遅れ弾性ひずみの和は、ほぼ、静弾性係数の直線上にプロットされる。これは、拘束を途中解放する実験と同じ傾向であり、瞬間的に拘束が解放された供試体と吸湿により徐々に引張ひずみが回復する供試体の瞬間ひずみと遅れひずみの和は等しいことが考えられる。

## 4. まとめ

乾燥収縮が拘束されたコンクリート一軸拘束供試体の乾燥条件および拘束条件を変化させる実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 乾燥途中において環境を湿度 60% から 100% に変化させることにより、乾燥収縮から吸湿膨張に転じるが、自由収縮ひずみは完全には回復しない。
- (2) 吸湿膨張による除荷過程では、直線的な応力－有効ひずみ関係が観察された。
- (3) 乾燥収縮が拘束されたコンクリートの有効ひずみには、除荷時に瞬間的に回復する弾性ひずみ成分、遅れ弾性ひずみ成分、非回復ひずみ成分

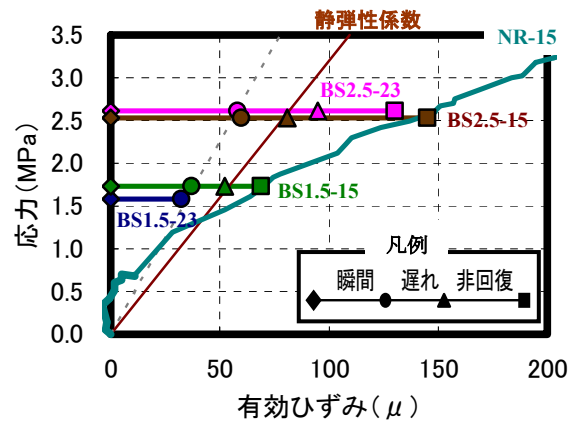


図-9 最大応力－有効ひずみ成分関係 (BS)

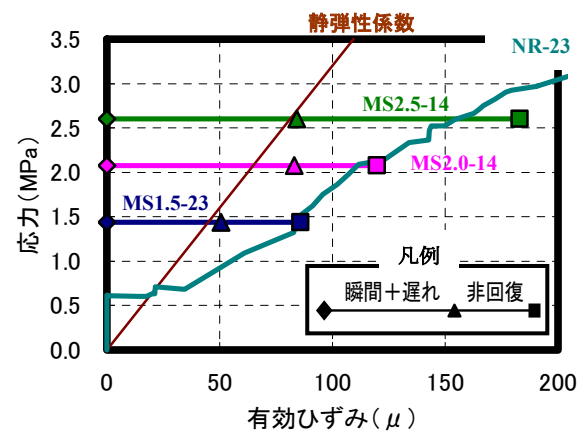


図-10 最大応力－有効ひずみ成分関係 (MS)

分が含まれることが明らかとなった。

- (4) 持続载荷されたコンクリートに導入する応力が大きいほど、除荷時の瞬間弾性ひずみおよび非回復ひずみは大きくなることが明らかとなった。遅れ弾性ひずみに及ぼす応力の影響は、本実験の範囲では明確には認められなかった。
- (5) コンクリートに導入した最大応力と除荷時の瞬間弾性ひずみは直線関係にあり、応力の除荷方法によらず、瞬間弾性ひずみと遅れ弾性ひずみの和は、コンクリートの静弾性係数に近似する傾向が確認された。
- (6) 一軸拘束収縮試験において観察される有効弾性係数がコンクリートの静弾性係数より小さい理由は、非回復ひずみに相当する部分であることが明らかとなった。