

# 論文 拘束条件が高強度コンクリートの自己収縮特性に及ぼす影響

早野 博幸<sup>\*1</sup>・丸山 一平<sup>\*2</sup>・岸良 竜<sup>\*3</sup>・野口 貴文<sup>\*4</sup>

**要旨**：高強度コンクリートに関して、拘束条件を無拘束，擬似無拘束，擬似完全拘束および中間的な拘束となる部分拘束を擬似的に再現し，若材齢時における変形挙動について検討を行った。その結果，擬似無拘束下では設定した応力トリガーの違いによる差異が生じ，ひずみ差は各トリガー応力下でのクリープ挙動の違い，応力に関してはリラクゼーション量の違いが表れているものと考えられる。また，部分拘束に関しては外部拘束をバネ定数で表し，コンクリート自体の剛性を随時測定して制御に用いることによって，実建造物の拘束剛性を模擬した実験が可能であり，コンクリート挙動が再現できることを示した。

**キーワード**：拘束条件，高強度コンクリート，自己収縮，クリープ，バネ定数

## 1. はじめに

多くのRC構造物で使用されている高強度コンクリートは，スパンの長大化や高層化だけでなく，高耐久化をも実現可能とする材料である。一方で，低水セメント比であるため自己収縮や温度変形などによって拘束条件の厳しい場合にはひび割れの発生が懸念される<sup>1)</sup>。高強度コンクリートは組織を緻密化することで様々な劣化因子を遮蔽するものであるが，ひび割れが発生した場合には耐久性を大きく損なうことになる。

したがって，各構造物・部位で想定される拘束条件において，自己収縮が卓越する若材齢時の硬化過程に着目し，その変形特性について解明することが重要となる。

本研究では，擬似的に様々な拘束条件を再現し，拘束条件下における高強度コンクリートの若材齢時における自己収縮ひずみや応力挙動，さらにはクリープ特性に及ぼす拘束状態の影響について明らかにすることを目的とし，実験的検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および調査条件

本実験で使用した材料を表-1，コンクリートの調査を表-2に示す。コンクリートの流動性に関してはスランプフローを60±10cmとした。

### 2.2 実験方法

収縮試験は，目的に応じてコンクリートの拘束条件を各種変化させた次の4条件を設定した。

表-1 使用材料

記号	材料名	物性および成分
C	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm <sup>3</sup> ，比表面積 3290cm <sup>2</sup> /g
S	大井川産陸砂	表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> ，吸水率 1.97%
G	青梅産碎石	表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> ，吸水率 0.60%
SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系

表-2 コンクリートの調査

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				SP (C×%)
			W	C	S	G	
25	44.9	2.0	160	640	719	903	0.85

\*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 工修 (正会員)

\*2 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 助教授 工博 (正会員)

\*3 太平洋セメント (株) 中央研究所 工修

\*4 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 助教授 工博 (正会員)

### (1) 無拘束試験（自己収縮試験）

無拘束条件下での自己収縮試験は、日本コンクリート工学協会の「セメントペースト、モルタル及びコンクリートの自己収縮及び自己膨張試験方法」<sup>2)</sup>に準じ、ポリエステルフィルムで密閉したコンクリート(100×100×400mm)のひずみを低圧力型接触変位計で測定した。測定材齢は、全ての試験で共通とし材齢7日までとした。

### (2) 擬似無拘束試験

以降の実験では、任意の拘束条件下における硬化過程のコンクリート挙動が測定できる可変拘束応力試験機VRTM<sup>3)</sup> (Variable Restraint Testing Machine, 図-1 参照) を用いた。本試験機は、中央に打ち込まれたコンクリートの試験区間(長さ500mm, 断面100×100mm)の変位ならびに応力状態をモニタリングし、クロスヘッドを任意に制御することによって様々な拘束条件を擬似的に再現することができるものである。

擬似無拘束の制御では、一定許容応力(応力トリガー)以下に常にコンクリートを制御することにより、擬似的な無応力状態におけるコンクリートの自己収縮ひずみ挙動の観察を目的としている。本研究では、応力トリガーは0.01, 0.02, 0.1N/mm<sup>2</sup>の3種類とした。

### (3) 部分拘束試験

通常、コンクリート構造物は何らかの形で外部拘束を受けており、無拘束と完全拘束の中間

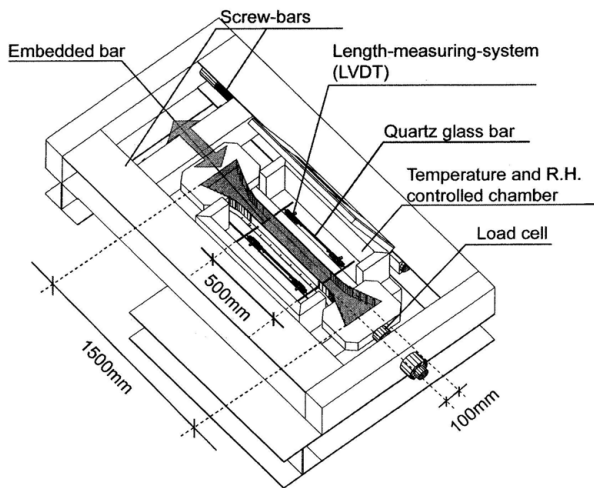
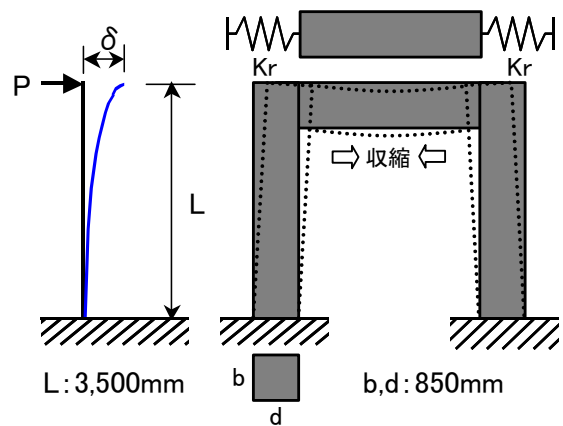


図-1 可変拘束応力試験機(VRTM)<sup>3)</sup>

的な状態にあるといえるが、このような拘束条件の下でコンクリートの挙動を把握することが重要となる。そこで、本実験ではこの外部拘束をバネ定数で表し、対象とする硬化過程のコンクリートの剛性変化も考慮して任意の拘束状態が再現可能となる新たな制御方法を考案した。また、これが実験的に制御・再現できるかの検討も併せて行った。

今回は、外部拘束バネ定数 $K_r$ を比較的簡易な条件を想定して図-2のように設定した。詳細には、ラーメン構造の既設の柱 ( $E:36\text{kN/mm}^2$ )の横方向の剛性を外部拘束として梁を打設するもので、ここでは梁部材の軸力の影響のみを対象とした。各寸法などの条件を図中に併記したが、 $K_r$ は $109.6\text{kN/mm}$ となる。試験では、コンクリートを打込み後、凝結の始発時から測定を開始し、以下のような制御(図-3 参照)を行った。

①各ステップの基準ひずみおよび基準応力を格納する(最初はともに0)。②クロスヘッドを固定しておき、ひずみ、応力が徐々に増加してひずみトリガー( $4\mu$ )に達するとひずみを基準ひずみまで戻す(支柱剛性拘束下でのひずみトリガーによる完全拘束制御)。③完全拘束制御を繰り返すうちに応力が増大し、応力トリガー( $0.5\text{N/mm}^2$ )に達する図-3のA点から応力を基準応力のB点まで戻す。④この移動による応力変化 $\Delta\sigma$ (荷重値Lに変換)とひずみ変化 $\Delta\varepsilon$ (変位Dに変換)よりコンクリートのバネ定数 $K_c$ を式(1)によって算出



$$K_r = P / \delta = P / (PL^3 / 3EI) = 3EI / L^3 \quad E: 36\text{kN/mm}^2, I = bd^3 / 12$$

図-2 部分拘束制御の外部拘束バネ定数の設定条件

する。

$$Kc = \frac{\Delta L}{\Delta D} \quad (1)$$

$Kc$  : コンクリートのバネ定数(N/mm)

$\Delta L$  : 荷重の変化(N)     $\Delta D$  : 変位の変化(mm)

⑤ 予め設定した外部拘束バネ定数  $Kr$  と④で測定した  $Kc$  を用いてバネ定数の比を求め、式(2)によって移動すべきひずみを算出する。なお、式(1)、(2)の  $Kc$  および  $\epsilon \text{ move}$  は B 点に達した瞬時に計算され、すぐに C 点に移動する。ここで初めて部分拘束制御となる。

$$\epsilon \text{ move} = \left( 1 - \frac{Kc}{Kc + Kr} \right) \Delta \epsilon \quad (2)$$

$\epsilon \text{ move}$  : ひずみの移動分( $\times 10^{-6}$ )

$\Delta \epsilon$  : 除荷によるひずみ変化( $\times 10^{-6}$ )

⑥ 移動後のひずみおよび応力を次ステップの部分拘束制御のため、新たに基準ひずみおよび応力として格納する。この①～⑥のステップを繰り返すことによって制御が行われる。

#### (4) 擬似完全拘束試験<sup>3)</sup>

擬似完全拘束試験は、コンクリートを擬似的に完全拘束したもので、ひび割れが最も発生しやすい条件を実現するものである。また、コンクリートが自ら収縮するという状況に対するひび割れ抵抗性を評価するものであり、コンクリートの自己収縮ひび割れを対象としたポテンシャルを計測する試験と換言できる。制御は、応力トリガー制御( $0.01\text{N/mm}^2$ )のもとで変形させ(擬似無拘束)、ひずみトリガー( $4\mu$ )に達すると、ひずみが 0 になるまでクロスヘッドを移動させる。この制御を繰り返すことで、コンクリートの測長区間変位をひずみトリガー値以内に保持する。なお、各トリガー値は既往の研究<sup>3)</sup>を参考にして決定した。また、収縮試験と併せて材齢 1, 3, 7 日に  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の供試体にて圧縮強度およびヤング係数の測定を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 無拘束試験および擬似無拘束試験

無拘束におけるコンクリートのひずみと擬似

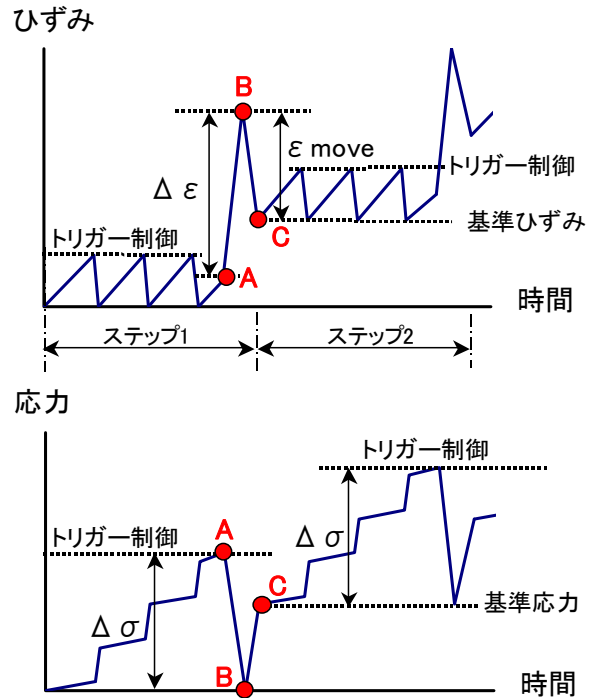


図-3 部分拘束制御方法

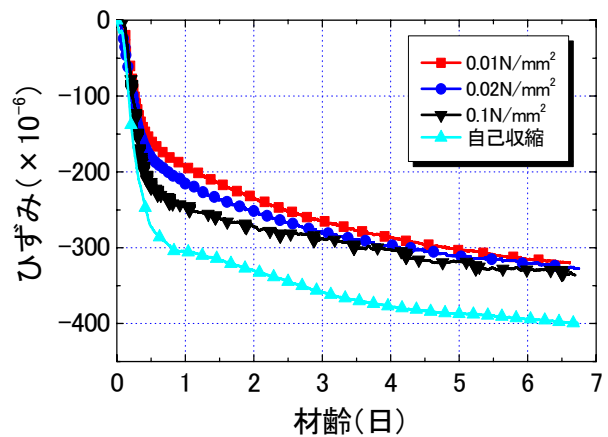


図-4 無拘束、擬似無拘束試験でのひずみ変化

無拘束試験のひずみの結果を併せて図-4 に示す。材齢 3 日程度まではトリガー応力が大きいほど収縮ひずみが増大しており、それ以降はほぼ同様な挙動を示していることがわかる。擬似無拘束試験のひずみは無拘束の自己収縮ひずみと異なり、設定したトリガー応力までは図-1のようにクロスヘッドが支柱で固定されているため、その剛性に応じて拘束された状態となる。図-5 に応力とひずみの関係の一例(トリガー  $0.1\text{N/mm}^2$ )を示すが、この中でトリガー応力までのひずみ成分(a)は自己収縮ひずみ、弾性ひずみ、

クリープひずみ(非回復性のクリープひずみ含む)の和となる。トリガー応力に達するとクロスヘッドが除荷する方向に移動するため、ひずみ成分(b)では自己収縮ひずみ、弾性ひずみ、クリープひずみとリカバリークリープひずみがさらに発生する。擬似無拘束試験によるひずみは、クリープの重ね合わせの原理が成り立ち非回復性のクリープの影響を考慮していない線形と考えると、本来は何も外力が加わらない自己収縮と同一になるはずである。载荷中となる膨脹側のクリープと除荷による収縮側のクリープが相殺して、クリープの影響は長期的にみると無くなるからである。しかし、実際にはリカバリークリープの終局値とひずみの初期値の差となる非回復性の塑性ひずみが生じるため、除荷しても(a)と(b)のクリープひずみは同値とならない。したがって、擬似無拘束ひずみではこの差の累積が自己収縮ひずみとの差として表れているものと考えられる。また、コンクリートの剛性が高くなるにつれて、トリガー間の応力差で生じるこの差異は小さくなっていくため、材齢3日以降では同様な挙動を示したと推測できる。トリガー応力を小さく設定した0.01、0.02N/mm<sup>2</sup>では、材齢1日以降の自己収縮ひずみの挙動と同様な傾向を示していることから、若材齢時において上記のような現象が顕著に表れている可能性がある。

擬似無拘束試験における各トリガーでのコンクリートの応力変化を図-6に示す。ひずみの結果を反映するように収縮ひずみによる引張応力が発生し、トリガーに達すると応力はキャンセルされ、それぞれトリガー応力を超えることなくこの繰り返しで正確に制御されていることが確認できる。また、トリガー応力が小さいほど、若材齢時ほどラインが密になっており、応力変化が激しく制御回数が増大していることも伺える。このトリガー応力に除荷の制御回数を乗じた応力の累積値をトリガーごとに各々算出し、材齢との関係を図-7に示す。擬似無拘束では無拘束と違い、応力発生からトリガーに達して除

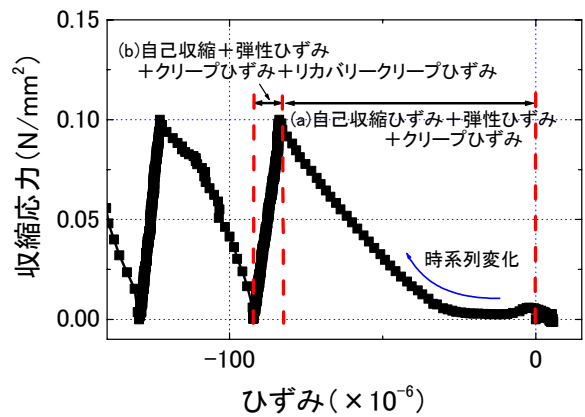


図-5 応力とひずみの関係(トリガー0.1N/mm<sup>2</sup>)

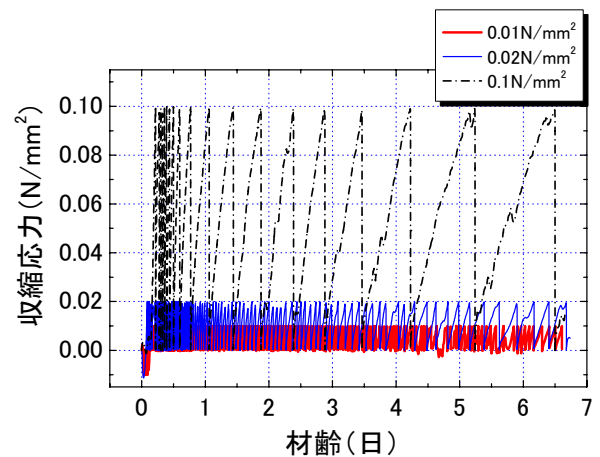


図-6 擬似無拘束試験における収縮応力の変化

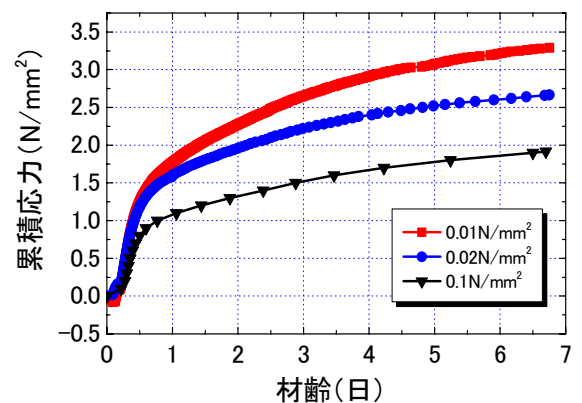


図-7 擬似無拘束試験における累積応力の変化

荷するまでの間はリラクゼーションが生じる。リラクゼーションに影響する要因としては、拘束による発生応力の値や履歴、その期間などが挙げられる。したがって、ここではトリガー値とその回数の影響を検討するため、応力の累積値について検討を行った。図より、トリガー応力が大きいほど累積応力は小さくなる傾向が認められる。この理由としては次のことが考えら

れる。疑似無拘束の応力は、制御 1 サイクル中の応力緩和挙動となるリラクゼーションの影響を受ける。したがって応力下での制御サイクル時間が長ければ、それだけリラクゼーションが大きくなるため、1 サイクルの制御時間の増大に伴い、発生する収縮応力は低下する。これに加えて、トリガー値が大きいほど高応力下での履歴時間が長くなり、その結果リラクゼーション量が大きくなることから、このような結果に繋がったものと考えられる。

### 3.2 部分拘束試験および擬似完全拘束試験

疑似完全拘束試験の結果は、一種の材料特性値を表すのに対して、部分拘束試験は現実的な中間的拘束下でのコンクリートひずみあるいは発生応力を予測・評価できることが最大の特長である。部分拘束制御によるひずみの変化を図-8 に示す。ここでは、まず理論通りの制御が実際に行われているかどうかを確認するため、一例として材齢 3.115 日付近でのひずみの変化(値は小数点以下 1 桁まで表示)を図-9 に示す。このステップにおいては、A点(-77.5 $\mu$ )で応力トリガーに達し、応力を前ステップ終了後の基準応力までキャンセルする方向に動くため、収縮ひずみは一時的に増加する。基準応力に達した点がB(-93.5 $\mu$ )であり、この差である $\Delta \epsilon$ に試験区間 500mm を乗じて変位は 8 $\mu$ m となる。一方、この移動時の荷重変化は応力トリガー値の 0.5N/mm<sup>2</sup> となるためこれを荷重に変換して 5000N となり、この材齢におけるコンクリートのバネ定数は変位を荷重で除して 625kN/mm と算出できる。これらを基に、式(2)に代入すると  $\epsilon_{move}$  は 2.4 $\mu$  となり、B点から 2.4 $\mu$  移動したC点(-91.1 $\mu$ )が制御後のひずみとなる。部分拘束制御によるひずみは応力トリガーに達した後、その材齢時のコンクリート剛性に応じて決定されるものであり、本来のひずみは図-8 の点線で示したものとなる。以上のように、理論通りの制御がなされていることから、本結果は一定剛性で外部拘束されたコンクリートの挙動が再現でき

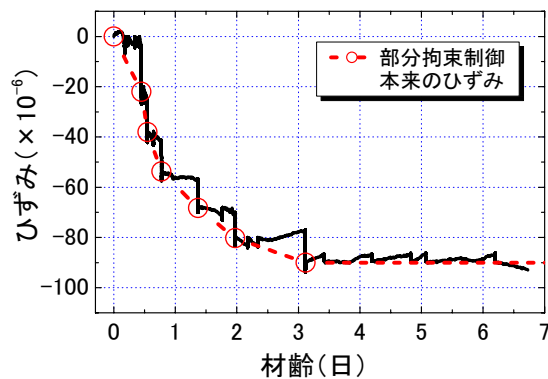


図-8 部分拘束試験におけるひずみの変化

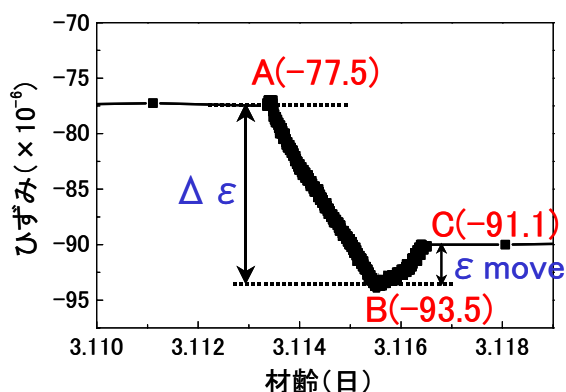


図-9 部分拘束制御時のひずみの変化

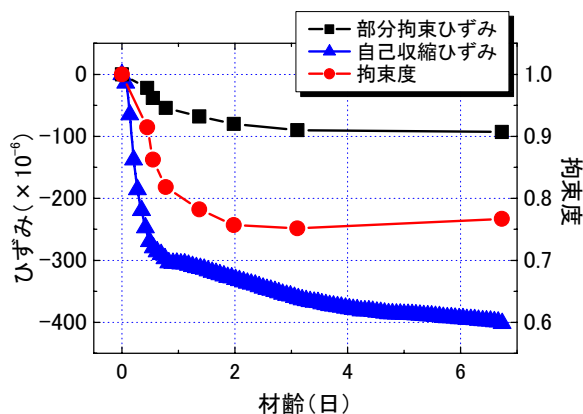


図-10 部分拘束試験における拘束度の変化

ていることが実証された。

また、本条件の拘束設定がどの程度の拘束度に値するかについて、無拘束での自己収縮ひずみおよび部分拘束ひずみより算出した。結果を図-10 に示す。拘束度は測定中のコンクリート剛性が高くなるとともに低下していき、材齢 2 日程度からは 0.75 程度に落ち着いた。このように、別途無拘束での試験を併せて行うことで、



拘束度も算出することが可能となる。

擬似無拘束(トリガー $0.01\text{N}/\text{mm}^2$ )、擬似完全拘束および部分拘束試験における応力変化を図-11に示す。部分拘束に関しては、ひずみと同様に制御直後の応力を点線で併記した。擬似完全拘束の応力は、自己収縮ひずみの変化が激しい材齢1日までに $2\text{N}/\text{mm}^2$ 近い引張応力を発生し、その後の完全拘束制御時に応力が増加して最終的に $3.21\text{N}/\text{mm}^2$ の引張応力が発生した。この測定終了直後に、同じ試験体を用いてクロスヘッド速度 $0.02\text{mm}/\text{min}$ で直接引張試験を行ったが、その値は $3.94\text{N}/\text{mm}^2$ となった。これらの数値より、完全拘束のように非常に厳しい拘束条件下では、自己収縮応力のみでひび割れ発生強度の80%程度を占める結果となり、この数値は極めて大きなものであるといえる。

一方で、無拘束制御ではトリガー値以下の無応力状態を再現しているため、 $0.01\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の応力は発生していない。部分拘束では材齢3日までに $1.2\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の引張応力が発生し、その後は大きな変化はなく、最終的に無拘束と擬似完全拘束の中間に位置している結果となった。また、部分拘束の制御中に得られたバネ定数およびそれをヤング係数に変換した値を図-12に示す。圧縮強度試験時のヤング係数も併記した。この両者を比較すると、測定したバネ定数はヤング係数とほぼ同程度の値を示していることから、剛性を正確に捉えていることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 擬似無拘束試験のトリガー間の違いによるひずみ差は、各トリガー応力下での若材齢時におけるクリープ挙動の違い、応力に関してはリラクゼーション量の違いが表れているものと考えられる。
- (2) 擬似完全拘束条件下においては、本研究のような高強度調合では自己収縮応力のみでひび割れ発生強度の80%程度を占めるという極めて大きな数値となった。

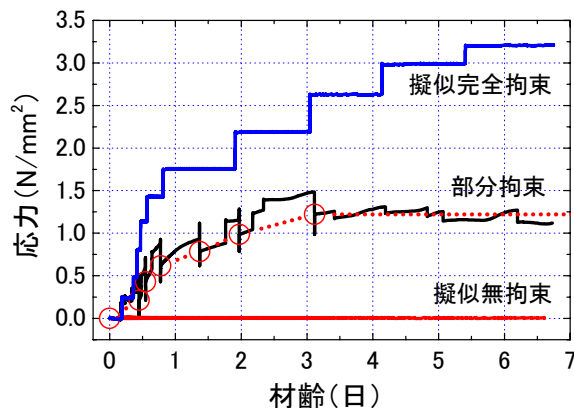


図-11 各拘束条件における応力変化

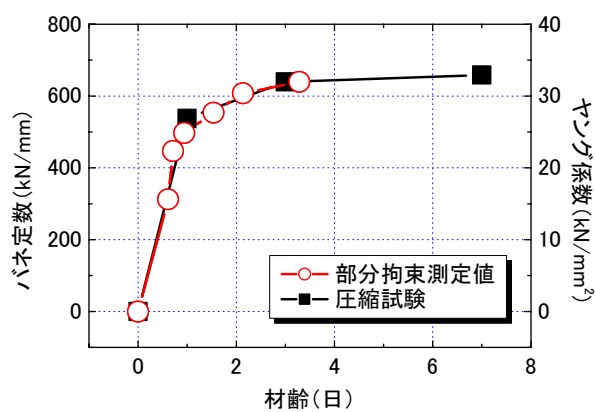


図-12 バネ定数とヤング係数の変化

- (3) 中間的な拘束状態となる部分拘束試験においては、外部拘束バネ定数とコンクリートの剛性変化をバネ定数に変換して用いることで、実構造物の拘束剛性を模擬した実験が可能であり、コンクリートの挙動を再現できることを示した。また、測定したコンクリートのバネ定数は妥当な数値であることが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.97-101，2002.9
- 2) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.195-198，1996.11
- 3) 丸山一平ほか：擬似完全拘束下における若材齢高強度コンクリートの性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.485-490，2003.7