

## 論文 疑似完全拘束実験による若材齢コンクリートの時間依存的力学特性

丸山 一平\*1・朴 宣圭\*2・野口 貴文\*3

要旨：低水セメント比に代表される高性能コンクリートは、高強度・高耐久性を実現できる材料として重要視されているが、若材齢時の自己収縮を起因とするひび割れが問題となっている。つまり、拘束条件下における低水セメント比のコンクリートは自己収縮および温度による変形を拘束されることで内部応力が発生し、表面ひび割れだけでなく貫通ひび割れを起こす可能性がある。本研究では、ひび割れ危険性を定量的に推定するのに必要な水和反応過程にあるコンクリートの時間依存応力・変形特性を把握するのに必要な疑似完全拘束実験法を提案し、得られたデータに考察を加える。

キーワード：疑似完全拘束，引張クリープ，引張弾性係数，時間依存特性。

## 1. はじめに

低水セメント比に代表される高性能コンクリートは、高強度・高耐久性を実現できる材料として注目を集めており、実際に利用されているが<sup>1)</sup>、自己収縮・温度変形・乾燥収縮などを起因として、拘束条件下でひび割れを起こす危険性があることが指摘されている<sup>2)</sup>。自己乾燥を含めた乾燥、および温度変化によるコンクリートの変形は凝結後、セメントマトリックスが応力伝達可能な状態になってから拘束が可能となり、拘束下において引張応力によってマトリックス中の最弱引張応力もしくは変形、エネルギーを越えた場合にひび割れを発生させる。ここで生じるひび割れは、美観を損うこと<sup>3)</sup>、構造物内に漏水を許すこと<sup>4)</sup>、コンクリート内部への塩分・二酸化炭素類の侵入を許し、鉄筋の腐食ひいては構造物耐力を奪うこと<sup>5)</sup>、といった現象を引き起こす。本研究では、若材齢時のひび割れ発生条件を定量的に抽出することを目的とした実験方法を提案し、実際にその実験方法で得られたデータに関して言及する。

## 2. 疑似拘束試験

## 2.1 実験方法概要

## (1) TSTM 試験

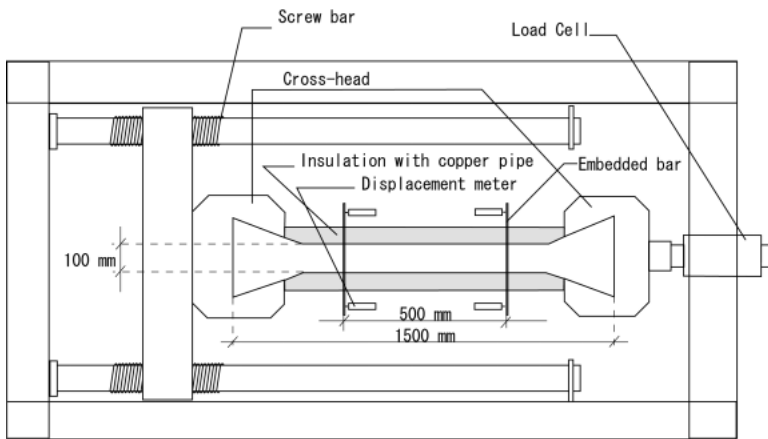
本研究で提案する疑似拘束試験方法、および試験機はヨーロッパ諸国で行われている TSTM (Temperature Stress Testing Machine)<sup>6)7)</sup>による試験方法の概念を引き継ぎ、より広範なコンクリートの物性を定量的・経時的に測定するために考案したものである。TSTM 試験機は鳩の尾の形にテーパした両端を持つ供試体をクロウという爪を持った拘束部材で拘束する。片方のクロウは高い剛性をもつフレームに接着されており、もう片方は荷重を測定するロードセルとクロウの位置を制御するアクチュエータに固定されている。供試体の中央部、すなわちテーパのかかっていない断面一部分に2点、標点を取り、この2点間の距離が常に一定になるようにアクチュエータを制御する。コンクリートが温度変形・自己収縮・乾燥収縮現象に起因する変形を拘束することで拘束応力下における応力を測定する装置である<sup>8)</sup>。

## (2) 試験機の概要

\*1 東京大学大学院生 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 工修 (正会員)

\*2 東京大学大学院生 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 工修 (正会員)

\*3 東京大学助教授 東京大学大学院工学系研究科 工博 (正会員)



**Fig. 1 Top view of experimental setup for the measurement of stress and strain development of hardening concrete under variable restraint condition (VRTM)**

今回の疑似完全拘束試験用に設計した試験機、VRTM(Variable Restraint Testing Machine)試験機はTSTMと同様、テーパのある供試体をクロスヘッドで拘束し、中央部の測定標点間の距離を監視しながら、そのクロスヘッドを制御する。標点間距離は500mmあり、断面は中央部で100mm×100mmとなっている。Fig.1に全体の概略図を示す。クロスヘッドの制御はアクチュエータと異なり、ネジ棒の回転をクロスヘッドの移動に変換することで制御を行う。供試体型枠は銅板とウレタンフォームによって構成されており、供試体4面は断熱されている。ウレタンフォームの内部には銅製パイプが蛇行しており、この中を温度調節された水が流れるようになっている。水の温度で供試体温度を一定温度・任意の温度履歴に制御することが可能となっている。

### (3)VRTM 試験機の制御フロー

Fig.2にVRTM試験機の制御フローとそのときの変位・荷重の関係を示す。制御フローは以下ようになる。

[Step 1]クロスヘッドはポジションを固定とし、試験機内の供試体の寸法変化を拘束する。このときの拘束度合いはFig.2中のScrew barの剛性に依存することになる。供試体が膨張・収縮を起こそうとした場合にその変形が拘束され、

応力が発生する。理想的には、このときの変位は変化しない。一定時間この状態を保持すると、供試体の変形を起こそうとする力に依存して応力が増大していく。

[Step 2]この応力を監視し、所定の応力に達したら、応力を緩和するようにクロスヘッドを移動させる。クロスヘッド移動のトリガーとなる所定の応力は試験パラメータの一つで

あり、任意の値を設定することができる。このパラメータを荷重トリガーと呼ぶことにする。また、[Step 1]、[Step 2]の過程の繰り返しを疑似無拘束と呼ぶ。応力発生 - 応力緩和を繰り返すうちに供試体は本来あるべき変形に近い形で変形を起こすが、この時の疑似無拘束変形と無拘束変形との差異は荷重トリガーの大きさに依存する。なぜなら、変形をScrew barの剛性で拘束して応力値を観測している間に、クリープ・リラクゼーション挙動がおこるためである。

[Step 3]供試体の変形量を監視し、所定の値を超えた場合には、試験開始時の位置に戻す。このときの所定の値も試験パラメータの一つであり、任意の値を設定することができる。この値を変位トリガーと呼ぶ。この値の変化はTSTM試験によって達成される完全拘束試験との値との差異となって現れる。この後、変位を元に戻したときの荷重を基準とし、[step 1]、[Step 2]を繰り返す。

VRTM試験機は、荷重トリガー・変位トリガーともに非常に小さく設定したときにはTSTM試験機と同等の実験を行うことが可能であるとともに、変位トリガーを大きくすることで離散化した荷重の積み重ねで完全拘束を模することができる。離散化した各ステップにおいて、荷重一定で変位を許すことから、並行して自己収縮試験を行った値を用いることでクリープ値を得ることもできる。また、微小変形時に、荷重が変化するときの変位を同時に計測し、その時の弾性係数を測定することが可能となる。

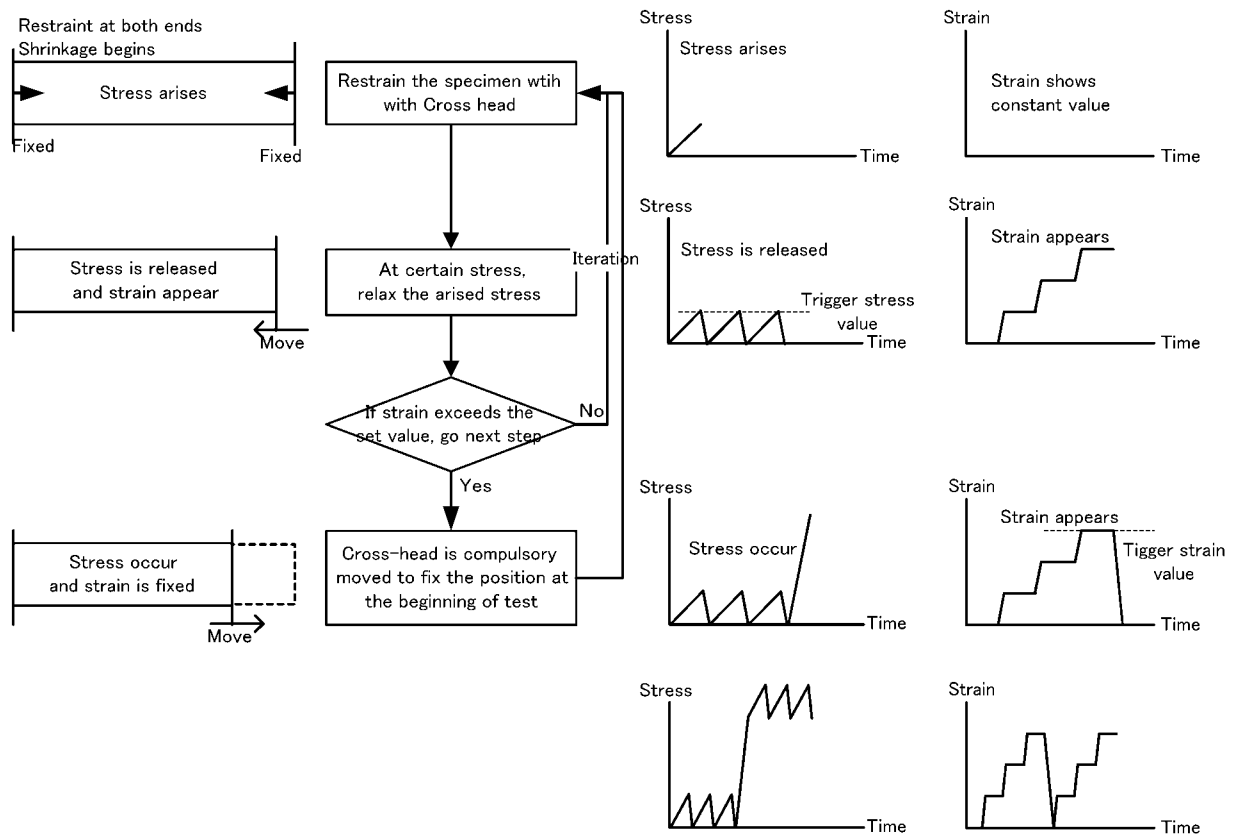


Fig. 2 Program flow of simulated-complete restraint test for controlling Cross-head and schematic graphs of stress and strain with elapse of time

## 2.2 使用材料および調合

今回の実験で使用した材料は以下の通りで、セメントは普通ポルトランドセメント(密度:  $3.16\text{g/cm}^3$ , 比表面積:  $3260\text{cm}^2/\text{g}$ ), 細骨材は大井川産陸砂(密度: 表乾  $2.57\text{g/cm}^3$ , 吸水率:  $1.97\%$ , F.M.:  $2.73$ ), 粗骨材には青梅産碎石(密度: 表乾  $2.65\text{g/cm}^3$ , 吸水率:  $0.59\%$ , F.M.:  $6.75$ ), 混和剤は市販の高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系) を用いた。調合は Table 1 に示すように水セメント比  $30\%$  とし, 以下に示すものを用いた。

Table 1 Mixture proportion of concrete

Unit weight [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]				
Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Agent [ $\times$ Cement weight]
165	550	809	880	0.7%

## 2.3 試験項目

### (1) 強度試験

供試体は  $100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体を用い, 圧縮および, 割裂引張試験を材齢 1, 3, 5 日に行った。圧縮強度試験は圧縮弾性係数試験も兼ね, 変位量と荷重の関係から弾性係数をもとめた。養生は  $20^\circ\text{C}$  の恒温室において封緘養生とした。

### (2) VRTM 試験

今回の実験では, TSTM 試験に近い設定として, 荷重トリガー  $25\text{N}$ (応力  $2.5 \times 10^{-4}\text{MPa}$ ), 変位トリガー  $0.0005\text{mm}$ (歪  $1 \times 10^{-6}$ ) のもの(Case 1)と, 極端に離散化した例として, 荷重トリガー  $25\text{N}$ (応力  $2.5 \times 10^{-4}\text{MPa}$ ), 変位トリガー  $0.006\text{mm}$ (歪  $12 \times 10^{-6}$ ) (Case 2)の 2 種類を各 1 回ずつおこなった。VRTM 試験は凝結終結時より実験を開始し, それ以前においては  $10\text{N}$  の荷重トリガーを用いて疑似無拘束状態を保持した。測定期間は 5 日間とし, 温水による温度管理は  $20^\circ\text{C}$  一定で, 供試体はポリエステルフィルムを用いて封

減状態を保持した。

### 3 実験結果とその考察

#### 3.1 基礎物性

Table 2 に円柱供試体を用いた圧縮強度試験，割裂引張試験，圧縮弾性係数の結果を示す。強度成長の傾向は良好に得られた。

Table 2 Basic properties of concrete with W/C of 30%

Cylinder Compressive Strength			
Time [Day]	1	3	5
Strength [MPa]	25.63	56.47	65.37

Splitting Tesile Strength			
Time [Day]	1	3	5
Strength [MPa]	2.16	4.35	4.90

E-modulus			
Time [Day]	1	3	5
E-modulus [GPa]	22.46	30.61	32.26

#### 3.2 VRTM 試験

VRTM 実験の応力に関する結果を割裂引張強度試験の結果とともに Fig.3 に示す。また、同時に測定した供試体内の温度履歴を Fig.4 に、同じ調合部材を用いて測定した自己収縮試験体の測定結果を Fig.5 に示す。Case1 の実験では、荷重トリガーと変形トリガーを小さくしたものであるため、連続的な荷重の増加を示し、一方荷重トリガーを大きくした実験では、離散化した荷重の増加になっていることがわかる。Case 1 においては材齢およそ 2 日でひび割れが発生した。両者ともに、材齢 2 日までは急激な荷重の増加を 1.5MPa まで示し、その後は Case2 のみの結果として、荷重の増加傾向は弱まりつつ 2.2MPa まで値は増加した。この応力は自己収縮変形によって生じたものに、温度応力を加味したものとなっている。

ほぼ同様な荷重増加傾向を Case2 も示していることを考慮すると、今回実験したコンクリー

トにおいては、自己収縮による引張応力の増加と引張強度の成長との兼ね合いで、この時点で破断の危険にさらされたと推察することができる。

若材齢コンクリートの(ひび割れ応力)/(割裂引張強度)に関しては諸処の論文があり、0.5<sup>9)</sup>から 0.93<sup>10)</sup>まで広く散見されるが、今回の破断時には 0.5 と小さな値となった。粉体量が多いことを考慮すれば、評価できる値ではあるが一般的な文献によって挙げられている数値よりもかなり小さな値となっている。

Case1, Case2 の両者で応力一定時の変位量  $\epsilon_{deformation,total}$  を式(1)によって定義し、グラフから読みとり算出し検討を行った。

$\epsilon_{deformation,total}$  はクリープ変形量と自己変形量の合計を意味している。

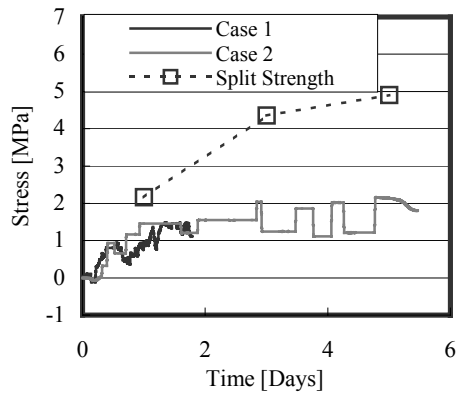
$$\epsilon_{deformation,total} = \sum_i^n \epsilon_{deformation,i} \quad (1)$$

i: 応力一定時の各ステップ

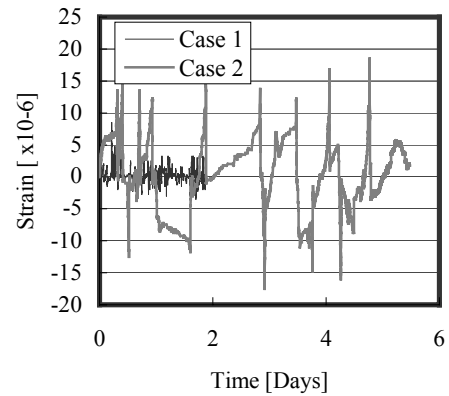
$\epsilon_{deformation,i}$ : 各ステップにおける変位量

検討の結果、Case2 の方が Case1 よりも大きいことがわかった。この  $\epsilon_{deformation,total}$  の差は、発生している応力によって生じる弾性変位量の 10% に相当する。引張応力の履歴とそれともなう変形がコンクリート供試体の物性に变化をもたらし、ひび割れ発生に寄与したと仮定した場合に、クリープ量を大きく起こした方がひび割れ発生に対して抵抗力があるということがいえる。この傾向は文献 11) の傾向とも一致する。

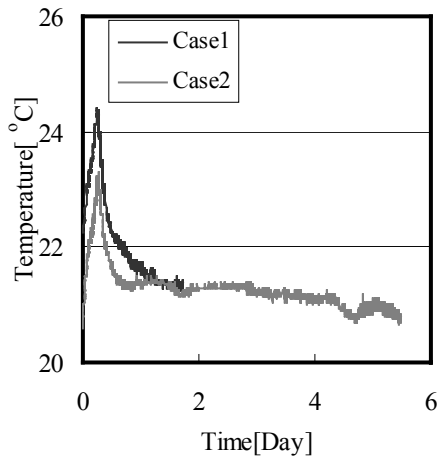
Fig.6 に VRTM 試験制御時の伸び計の変化を示す。変位トリガーの値を超えるケースが何回も見受けられたが、荷重の変化に対してはそれほど鋭敏に影響があるわけではなく、また実験機のトリガーは設定した荷重において正常に機能し、コンクリートが波動のように遅れて挙動していることが見て取れた。また、図から伸び計の示すコンクリートの変形が原点を中心として正の値と負の値の両方を示した。



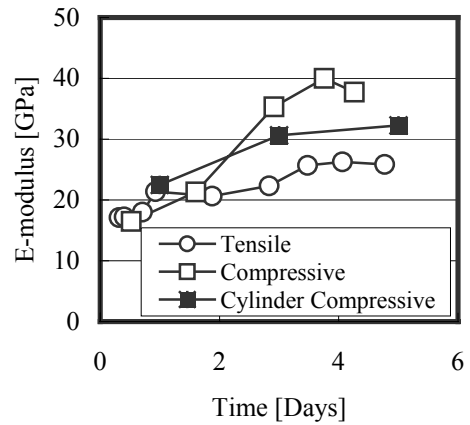
**Fig. 3 Development of Splitting Tensile Strength and stress under simulated-complete restraint**



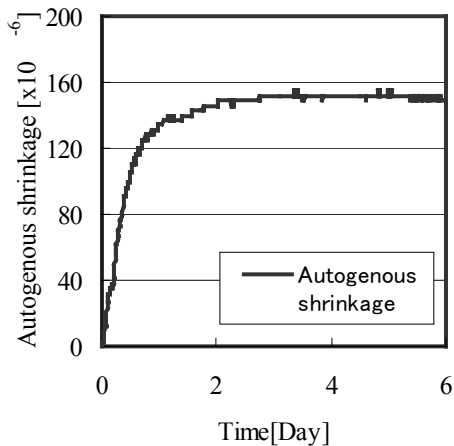
**Fig. 6 Development of Strain under simulated-complete restraint**



**Fig. 4 Temperature history in concrete specimen**



**Fig. 7 Development of Compressive E-modulus and Tensile E-modulus**



**Fig. 5 Autogenous Shrinkage**

これは弾性変形、引張クリープによる変形および自己変形にもとづく変形量の総和であることから、自己変形よりも引張クリープの変形量が大ききときには負の値を示し、逆の場合には正の値を示したものと考えることができる。

Fig. 7 に Case2 の実験の実験結果から算出した供試体の弾性係数を示す。圧縮側に变化する場合(図中 Compressive)と引張側に变化する場合(図中 Tensile)には、同一コンクリートでいずれも引張側に応力がかかっている状態での変化であるにもかかわらず、異なる弾性係数を示した。材齢 2 日ほどまでは、圧縮側も引張側もほぼ同等な弾性係数値の増分をみせるが、それ以後

降圧縮弾性係数の大幅な増加が見られる。この現象を説明する仮説として、若材齢時であることを考えると、圧縮側の変形には抵抗としてゲル内の水分の移動も含まれるのに対して引張側の変形にはこの抵抗が変形方向に関しては含まれないということが考えられる。

#### 4 まとめ

- (1) 完全拘束条件下でのコンクリートの自発的内部応力増大を測定する TSTM のコンセプトに基づいた試験機を提案した。
- (2) 疑似完全拘束下における水セメント比 30% の封緘コンクリートは材齢 2 日あたりにひび割れの危険性が高まる。
- (3) 微小変形での圧縮弾性係数と引張弾性係数を比較した場合に、材齢 2 日までは同等の増進を示すのに対し、それ以降は引張弾性係数が圧縮弾性係数を下回る。
- (4) 今回導出した上述の結果は供試体数が少ないものから得たものであるため、上述した傾向をより定量的に把握するべく、さらなる検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 中根 淳：高強度コンクリート外観，コンクリート工学，Vol.40，No.1，pp58-61，2002.1
- 2) e.g. Editor V.Baroghel-Bouny，P.-C. Aitcin: Shrinkage of Concrete Shrinkage 2000 Proceedings of the International RILEM Workshop，RILEM Publications S.A.R.L.，Oct.2000
- 3) 兼松学，北垣亮馬，野口貴文，友澤史紀：2次元フーリエ変換によるコンクリートの汚れの評価手法に関する基礎的研究 コンクリート工学年次論文集，Vol.22-1，pp.211-216，2000
- 4) e.g.Ghandehari，C. M. M.，Shah，S. P.，and Karr，A.: Estimation of Water Flow through Cracked Concrete under Load，ACI Material Journal，pp567-575，Sep-Oct 2000
- 5) e.g. Otsuki，N.，Miyazato，S.，Diola N. B.，and Suzuki H.: Influence of Bending Crack and Water-Cement Ratio on Chloride-Induced Corrosion of Main Reinforcing Bars and Stirrups，ACI Material Journal，pp454-464，July-Aug 2000
- 6) Springenschmid，R.，Gierlinger，E.，Kienozycycki，W.: Thermal Stresses in Mass Concrete: New Testing method and The Influence of Different Cements，5th Int Conference on Large Dams (ICOLD)，Lausanne，CH，pp57-72，1985
- 7) Van Breugel，K.，Vries，J.: Mixture optimization of HPC in view of autogenous shrinkage，Proc. 5th Int. Symp. on Utilization of High Strength/High Performance Concrete，Sandefjord，pp. 1041-1050，1999
- 8) Lura，P.，Van Breugel，K. and Maruyama，I.: Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete，Cement and Concrete Research，Volume 31，Issue 12，pp1867-1872，Dec. 2001
- 9) 安田正雪，阿部道彦，笹原 厚，桃谷 智樹：各種高流動コンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験，日本コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No1，pp.147-152，1996
- 10) Byfors，J.: Plain Concrete at Early Ages，Stockholm，Swedish Cement and Concrete Research Institute，1980
- 11) 根木崇文，入谷桂史郎，梅原秀哲：若材齢のクリープがコンクリートの引張破壊に与える影響に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp757-762，1999