

論文 疑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

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行った結果に関して考察したものである。

キーワード：疑似完全拘束, 引張クリープ, 自己収縮応力, 水和反応

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¹⁾、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²⁾。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、水和反応に伴い硬化し、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下において引張応力を生じさせる。この状況において、コンクリートの(ひずみ、応力あるいはエネルギーで評価可能と考えられている)キャパシティを越えた場合には、コンクリートにひび割れが生じると考えて良い。ここで生じるひび割れは、美観を損うこと³⁾、構造物内に漏水を許すこと⁴⁾、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の耐久性を奪うこと⁵⁾、といった現象を引き起こす。このような現象は、建造物のライフサイクルを早めるためにマクロとして環境負荷を生じさせる。一方で、建造物のユ

ーザーに対しても、ライフサイクルコストの増大を招き、経済的にミクロな視点からみても望ましいことではない。これら両者の視点を鑑み、建設材料としてのコンクリートは要求された性能を予測通りに発揮させるために、ひび割れ制御の技術の開発を必要としている。

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、高強度コンクリートを対象として疑似完全拘束試験を行い自己収縮応力の発現現象を継時的に観察し、考察を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

本研究で行った調査を **Table 1** に示す。本研究では、高強度コンクリートを研究対象として、水セメント比 0.22 および 0.30 のコンクリートにおいて実験を行った。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産陸砂(密度：表乾 2.58g/cm³, 吸水率：1.97%, F.M. : 2.73), 粗骨材には青梅産碎石(密度：表乾 2.65g/cm³, 吸水率：0.59%, F.M. : 6.75), 混和剤は市販の

*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)

Table 1 Mixture proportion of concrete

Weight per unit						
Water to binder ratio	Water [kg]	Cement [kg]	Fine aggregate [kg]	Coarse aggregate [kg]	Agent [× Cement weight]	
0.22	165	750	646	880	1.2%	
0.30	165	550	809	880	0.75%	

高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）を用いた。

2.2 実験項目

今回の実験では、2.1 に示したコンクリートに対して圧縮強度試験、圧縮ヤング係数試験、引張割裂試験、自己収縮試験、疑似完全拘束試験を行った。

圧縮強度試験、圧縮ヤング係数試験および引張割裂試験は、寸法φ100×200mm のシリンダー供試体を高剛性試験機を用いて試験した。養生は封緘養生とし、20℃一定の恒温室において試験材齢まで保管した。試験材齢は材齢 1 日、3 日および 5 日に行い、3 本の供試体による試験結果の平均値を実験値とした。

自己収縮試験は、JCI 法にのっとり、横置き 100×100×400mm 直方体供試体にガイドを埋設し、非常に接触抵抗の小さな LVDT によって測定を行った。供試体はポリエステルフィルムで封緘し、さらに型枠との間にテフロンシートを敷くことで摩擦の低減を図った。試験開始材齢は後述する疑似完全拘束試験において、変形に伴う応力が観測された時点とした。これは、VRTM 試験との材齢の整合性を取るためである。

疑似完全拘束試験は、VRTM (Variable Restraint Testing Machine) によっておこなった⁶⁾。VRTM は、テーパー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。本研究では既報に示した疑似完全拘束制御を用いて、離散化した拘束状態をコンクリートに対して与えた⁶⁾。拘束の度合いを制御するパラメータは、両者の調合に対して同一なものを用い、変形トリガーを 4×10^{-6} とし、荷重トリガーは 0.01N/mm^2 を与えた。

簡潔にこの制御パラメータを説明する。VRTM における疑似完全拘束試験では、離散化

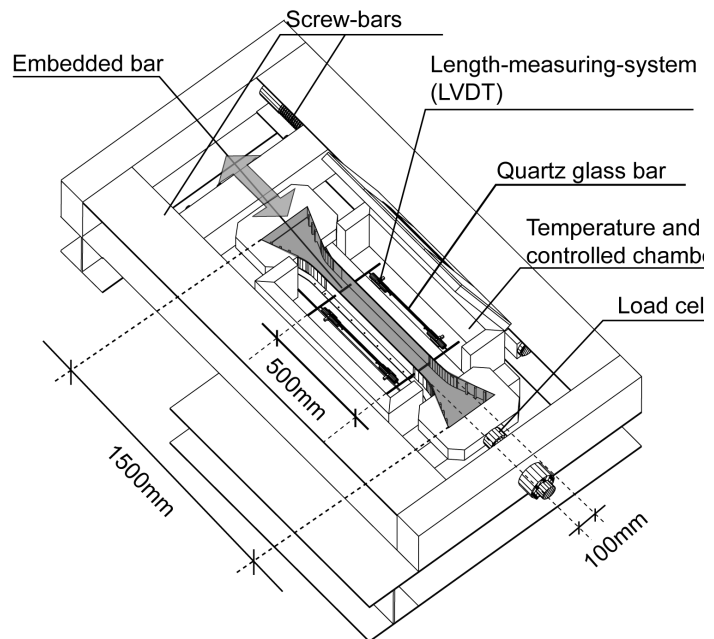


Fig. 1 Top view of experimental setup for the measurement of stress and strain development of hardening concrete under variable restraint condition (VRTM)⁷⁾

した状態の完全拘束試験を実施する。この疑似完全拘束においては、荷重一定値を保持する制御機構と変形を測定標点間の距離を一定に保持する制御機構の二つが繰り返し行われる。荷重一定値を保持する場合、ネジ棒の剛性で拘束している供試体に対してプラスマイナスの範囲で荷重トリガー分の自由度を許し、この荷重トリガーに達するとクロスヘッドを動かし、保持すべき荷重にまで荷重を変化させる。また、変形トリガーは、変形を始める測定標点間距離を保持する制御における許容度を表し、一定荷重条件下で変形する供試体に対し、変形トリガーだけ変形した供試体を、始めの測定標点間距離に戻すことになる。

なお、本研究には2002年に行われた日本コンクリート工学協会主催のコンクリートの自己収縮研究委員会で行った共通試験の結果が含まれている²⁾。

2.3 強度・ヤング係数・割裂引張試験の実験結果

Table 2 に円柱供試体を用いた強度試験、割裂引張試験、圧縮ヤング係数の結果を示す。N30-I、N30-II は水セメント比 0.3、N22 は水セメント比 0.22 のコンクリート供試体であることを示す。ここで、N30-I および N30-II 両者とも普通セメントであるが、異なるものであり、それぞれ S 社製、T 社製である。また、N22 は S 社製である。

強度成長の傾向は良好に得られた。割裂引張強度試験に関しては若干データのばらつきが大きく、水セメント比 0.22 のものと 0.30 のものでは、水セメント比 0.22 のものが大きいことが予測されるが、それに反する結果となっている。

2.4 自己収縮試験および疑似拘束試験の実験結果

Fig.2 に自己収縮試験の結果を示す。自己収縮量は N30-I は、材齢 5 日におよそ 250×10^{-6} まで到達した。同じ普通ポルトランドセメントを用い、かつ同量の単位水量を持つ N22 は材齢 2 日まではほぼ N30-I と同様な収縮を見せた後、引

Table 2 Experimental results of basic properties

Cylinder compressive strength [MPa]			
Age [Day]	1	3	5
N30-I	29.1	59.1	67.4
N30-II	29.2	59.5	70.2
N22	63.1	93.6	101.5

Splitting tensile strength [MPa]			
Age [Day]	1	3	5
N30-I	2.52	3.32	4.44
N30-II	2.41	3.63	4.37
N22	3.28	3.57	4.17

E-modulus [GPa]			
Age [Day]	1	3	5
N30-I	24.3	30.6	35.3
N30-II	24.9	31.5	34.6
N22	33.1	38.7	39.7

き続き収縮速度を保ったまま材齢 5 日に 350×10^{-6} まで到達した。一方で、同じ調合で異なる普通セメントを用いた N30-II においては材齢 12 時間までの挙動は N30-I とほぼ同じように見られるが、その後は N30-I よりも小さい 150×10^{-6} の値にとどまった。その収縮に対応した疑似完全拘束下の自己収縮応力の発現結果を **Fig.3** に示す。また、このときの制御の状態を示す VRTM 供試体中のひずみの継時変化を引張側を正として **Fig.4** に、また温度変化の様子を **Fig.5** に示す。N30-I および N30-II は材齢 1 日の時点で約 1.4N/mm^2 の値まで自己収縮応力を発現させた。その後、しばらく、同程度の自己収縮力を保持しながら材齢 2.5 日程度で応力を急激に低下させた。この応力低下は、試験後の脱型では供試体表面からひび割れの確認が目視でできなかったものの、微細なひび割れが内部に起こったことによると考えることができる。応力低下をひび割れ発生の根拠とすることは、必要条件ではあるが、内部温度が大きな変化を起こしていない点、また、VRTM の制御機構で急激にひび割れが標点間内に生じた場合に、ひび割れによって生じる変形を制御するようにクロ

スヘッドが動くことから応力が結果として小さくなるように制御される点，同一水セメント比における供試体で再現性が得られている点によってひび割れが発生したものと推察されるものである。

N22 は材齢 5 日までひび割れずに応力を増大させていき，最終的には自己収縮応力は 3.2N/mm^2 に達した。

Fig.4 の材齢初期に見られる制御の乱れは，次のように説明が可能である。若材齢時におけるセメント粒子同士の連結は硬化したコンクリートよりも弱い。この連結は強固であればあるほど，連続固体としての性質を持つが，逆に連結

が粗である場合には流体に近い挙動を示す。連結が弱い時期に急激でかつ微小な応力場が生じた場合，流体のように応力場が波のようにして伝達することが考えられる。これは，VRTM 供試体中では，拘束力を受けている両端に高応力場が生じる一方，中央部の標点間には応力場が遅れて徐々に伝わり，供試体は均質な応力場を持つように変化することを意味する。収縮時には，ひずみ計の示す挙動は拘束応力を与えた瞬間には収縮を示したままであり，応力場が均一になるに連れ，膨張側に変形を始める。つまり，初期のこの制御系のぶれは，コンクリートの性質に基づくものと推論することができる。

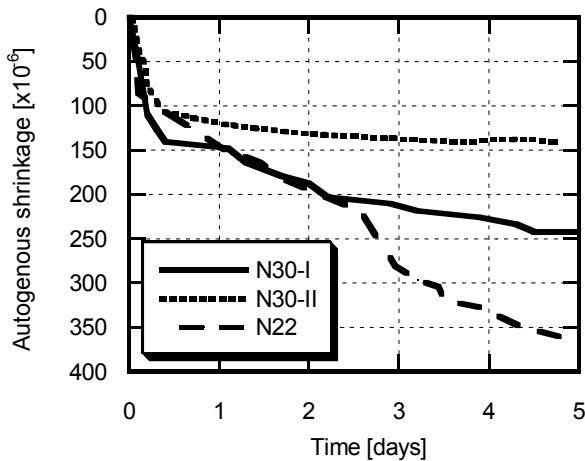


Fig. 2 Autogenous shrinkage of concrete.

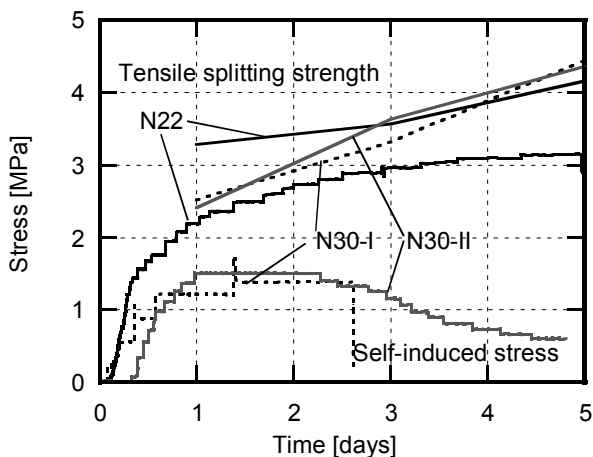


Fig. 3 Development of self-induced stress under quasi-complete restraint condition and tensile splitting strength of cylinder concrete specimen.

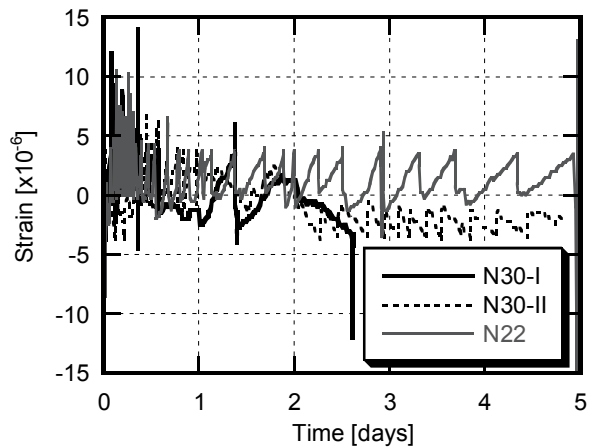


Fig. 4 Strain of specimen of VRTM under quasi-restraint controlling.

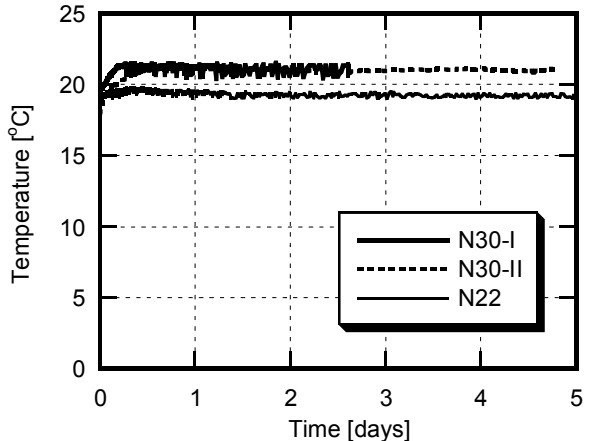


Fig. 5 Temperature history in specimen of VRTM.

VRTMのような離散化した制御系では、制御範囲が小さくなればなるほど、若材齢時にはこのようなマクロにみた仮定が成り立たなくなる可能性がある。

3. 考察

定性的にひび割れ状態と変形の間係を捉えるために、Kovlerの提案⁸⁾に従って、VRTM制御中の変形量と自己収縮変形との比較によって変形の成分分析を行う(Fig.6 参照)。この提案は、疑似完全拘束制御時に現れる弾性変形の積み重ねと自己収縮変形の差異が応力緩和挙動による変形であるとし、この変形量を継時応力下でのクリープとして評価するべきとの提案である。ここで、Kovlerによって定義されたクリープはいわゆる一定持続応力下における変形挙動とは異なり、疑似完全拘束下において生じる応力発現に応じて生じる応力緩和挙動であり、ここでは時々刻々水和によって変化しているクリープ性能に加え、収縮しようというコンクリートの性質によって応力が徐々に増加している状態における計算上の変形量を拘束応力下でのクリープと定義している。この提案に従って、VRTMによる試験結果と自己収縮試験の結果を用いて描いたグラフが Fig.7 である。ここで示されるように、破断の生じた N30-Iの方がより大きなクリープを表しており、自己収縮応力条件下における破断という面からみて、破断点では、塑性域が大きく、強度の限界に近かったことが見て取れる。定性的にはあるが、VRTM試験機の実験結果と自己収縮変形の実験結果を用いることで、クリープ変形量の占める割合によって、ひび割れ危険性の傾向を捉えることができた。

また、ここで注意しなくてはならないのは、持続応力条件下においてコンクリートは水和過程にある点である。このことは新規に生成される水和物のうち、外部生成物は応力無し状態で生成されることを意味する。つまり、生成後に加わる応力変化によって新規水和生成物内に応力が生じ、セメントペーストマトリックス内部には応力の分布が生じる(Fig.8 参照)。このこ

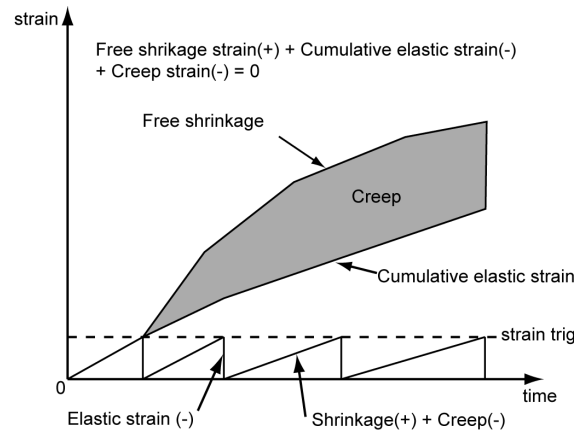


Fig. 6 Schematic diagram of VRTM test^{8) 9) 7)}.

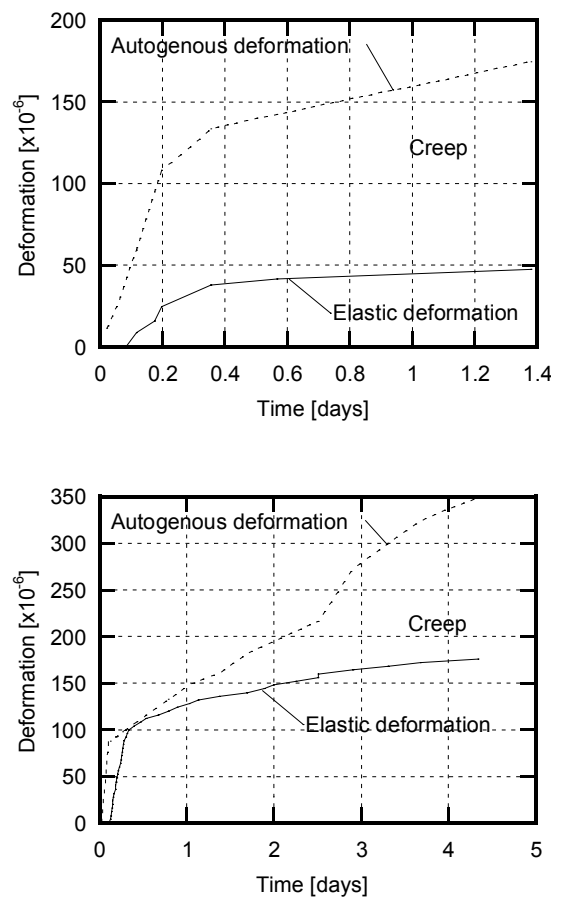


Fig. 7 Autogenous deformation and elastic deformation in VRTM test. Above: N30-I, Below: N22.

とは、Fig.7で描かれたクリープがマクロに見たときの定性的指標にすぎないことを意味し、ミクロに見たときの水和生成物に生じるクリープと対応がとれていないことを意味している。特に、Fig.7に見られる水セメント比の違いによる

クリープ量の違いは、水和に伴う弾性係数、自己収縮、水和生成物量に依存したクリープ性状等、諸処の生成速度のバランスによって決定されており、セメントペーストマトリックスに生じているクリープの評価を行うには、そのミクロな構造を評価する必要がある。そのため、水和の進行とともに生じる载荷条件下におけるひび割れ危険性に関して、Kovler の提案は、定性的な評価が可能であるが、詳細な応力状況の評価にはならないことに注意が必要である。

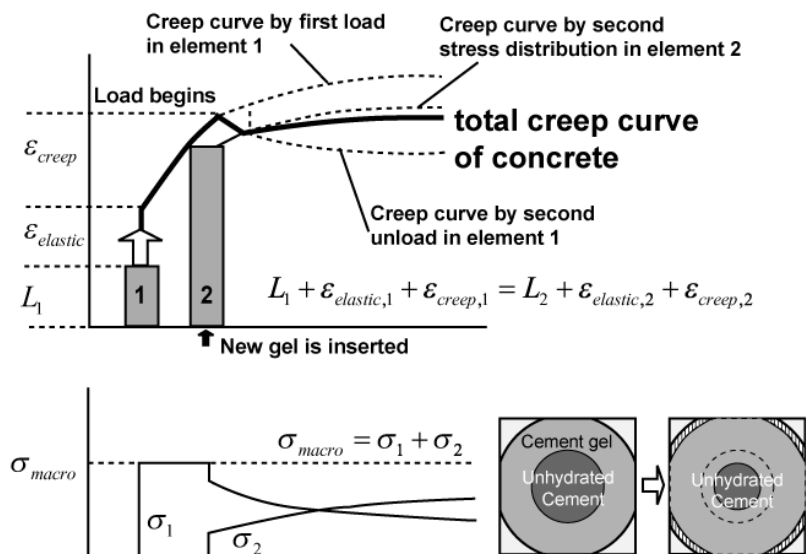


Fig. 8 Schematic representation of hydrated cement paste structure under load

4. まとめ

本研究では以下の知見を得た。

- ・ 疑似完全拘束試験を高強度コンクリートに行い自己収縮応力を測定したところ、W/C が 0.22 では 5 日で 3.2N/mm^2 の応力を生じ、0.30 のものは材齢 2.5 日で破断した。
- ・ 自己収縮ひび割れの危険性に関しては、Kovler の提案図⁸⁾を用いると、塑性を表すクリープ変形量の評価によってひび割れ危険性を評価できる可能性があるという知見を得た。しかし、本質的には水和過程を考慮したミクロな構造を評価する必要がある点にも言及した。

参考文献

- 1) 中根 淳：高強度コンクリート概観，コンクリート工学，Vol.40，No.1，pp58-61，2002.1
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，2002.9
- 3) e.g. 審良善和，武若耕司，山口明伸，久馬公司：酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.649-654，2001

- 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. 塚原絵万，魚本健人：ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第 11 巻第 1 号，pp.75-83，2000.1
- 6) 丸山一平，朴 宣圭，野口貴文：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.357-364，2001
- 7) 丸山一平，マイクロメカニクスに基づくコンクリートの時間依存特性，東京大学学位論文，2003
- 8) Kovler, K., Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage, Material and Structures, pp.324-330, 1994
- 9) Salah, A. A., and Lange, D. A., Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age, ACI Material Journal, pp.323-331, 2001