

論文 疑似完全拘束実験による若材齢膨張コンクリートの応力挙動特性

朴 宣圭*1・丸山 一平*2・野口 貴文*3・五味 秀明*4

要旨：高強度コンクリートの自己収縮を低減する方法として、膨張材の利用が期待されており、有効であることが知られている。膨張コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を精度よく評価するためには、拘束されたコンクリートの諸性状を把握することが重要である。本研究では、実在構造物に近い拘束条件を再現することができる可変拘束応力試験機(VRTM: Variable Restraint Testing Machine)を用いて、若材齢における高強度膨張コンクリートを対象とし、疑似完全拘束された場合の応力変形挙動について普通高強度コンクリートと比較して検討を行って、得られたデータに考察を加える。

キーワード：自己収縮、膨張材、収縮ひび割れ抵抗性、応力変形挙動、引張クリープ

1. はじめに

低水セメントによって特徴付けられる高強度コンクリートは単位セメント量が大きいため、自己乾燥に起因する収縮が無視できない¹⁾。特に、外部拘束を受ける部材では、比較的初期から自己収縮による拘束応力が発生し、ひび割れの原因となる²⁾。ここで生じる収縮ひび割れは、コンクリート構造物の美観や耐久性の低下をもたらすため、その制御は極めて重要である。一方、自己収縮を低減する方法として膨張材の添加による収縮補償があり、低減方法として有効であることが知られている^{3, 4)}。膨張材による高強度コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を精度よく評価するためには、拘束された膨張コンクリートの応力挙動や弾性挙動を把握することが重要である。本論文では、28日の圧縮強度が80MPa水準の高強度膨張コンクリートを対象とし、実在構造物に近い拘束条件を再現することができる可変拘束応力試験機(Variable Restraint Testing Machine)を用いて、疑似完全拘束された場合の応力挙動について普通高強度コンクリートと比較して検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

実験で用い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: 3.16g/cm³)、膨張材はエトリンガイト-石灰複合系(密度: 3.16g/cm³)、細骨材は大井川産陸砂(密度: 表乾 2.57g/cm³)、粗骨材には青梅産碎石(密度: 表乾 2.65g/cm³)、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 **Table1** 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 Mixing proportion of concrete

Type	Unit weight [kg/m ³]					
	Water	Cement	EA	Fine Agg.	Coarse Agg.	HWRA [× Cement weight]
OHC	165	550	0	809	880	0.7%
EHC	165	540	10	809	880	0.7%

OHC: Ordinary High-strength Concrete

EHC: Expansive High-strength Concrete

EA: Expansive Additive

HWRA: High Range Water Reducing AE Agent

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 大学院生 工修 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 大学院生 工修 (正会員)

*3 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)

*4 電気化学工業(株) 特殊混和材事業部 特混技術課長 (正会員)

2.2 試験項目

(1) 強度試験

コンクリートの供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ のスチル簡易鋼性型枠を用い、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求めた。養生は 20°C の恒温室において封緘養生とした。

(2) 自己変形試験

高強度コンクリートにおける無拘束条件下での自己変形量の測定は、JCI自己収縮委員会報告書で提案した「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(案)」に準じて行った。鋼性型枠の寸法は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ である。自己変形量の測定はVRTMと同じように封緘養生を行い、養生温度は 20°C とし、変形の測定は両端からレーザー変位センサを用いて行った。

(3) VRTM 試験

本研究で用いられた可変拘束応力試験機(VRTM)はヨーロッパ諸国で行われている温度応力試験機(TSTM: Temperature Stress Testing Machine)^{5), 6)}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。VRTMの形状や寸法、制御フローなどについては既往の論文⁷⁾にすでに説明されている。

今回のVRTMによる拘束試験では、普通コンクリートの場合、 1×10^{-6} の歪みをトリガーとして、膨張コンクリートの場合は、 4×10^{-6} の歪みをトリガーとして各1回づつ行った。つまり、供試体の標点間はそれぞれ 1×10^{-6} 、 4×10^{-6} の誤差を許して、伸び計データがこの値に到達すると、そのひずみを0に戻す制御を行った。

普通のコンクリートの場合は、TSTMと同じように変位トリガーを非常に小さく設定して、完全拘束された供試体の応力と変位について検討した。それに対して、膨張コンクリートの場合は、変位トリガーを大きくすることで離散化した各ステップにおいて、荷重一定で変位を許し、自

己変形試験のデータを用いてクリープ値を得ることができる疑似完全拘束試験を行った。VRTM試験はコンクリートの凝結終結時より実験を開始し、それ以前においては10N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、温度管理は 20°C 一定とし、供試体はポリエステルフィルムを用いて封緘状態を保持した。

3. 実験結果及び考察

3.1 強度試験

Table 2 に普通高強度コンクリート(OHC)と膨張高強度コンクリート(EHC)の圧縮強度試験、割裂引張強度試験、圧縮弾性係数の結果を示す。強度成長の傾向は時間とともに順調に得られた。

Table 2 Properties of ordinary and expansive concrete with W/C of 30%

Cylinder Compressive Strength[MPa]			
Age [Days]	1	3	5
Ordinary Concrete	25.63	56.47	65.37
Expansive Concrete	29.06	59.10	67.40

Splitting Tensile Strength[MPa]			
Age [Days]	1	3	5
Ordinary Concrete	2.16	4.35	4.90
Expansive Concrete	2.52	3.32	4.44

E-modulus[GPa]			
Age [Days]	1	3	5
Ordinary Concrete	22.46	30.61	32.26
Expansive Concrete	24.26	30.56	35.30

3.2 自己変形試験

Fig. 1には普通高強度コンクリートと膨張高強度コンクリートの自己変形の結果を示す。普通高強度コンクリートは材齢5日までに 210×10^{-6} の連続的な自己変形を示しており、膨張材を用いた膨張高強度コンクリートの場合は、材齢5日までに 120×10^{-6} の自己変形を示した。これはエトリンガイト-石灰複合系膨張材の水和反応により、高強度コンクリートの自己収縮が補償されたためと考えられる。

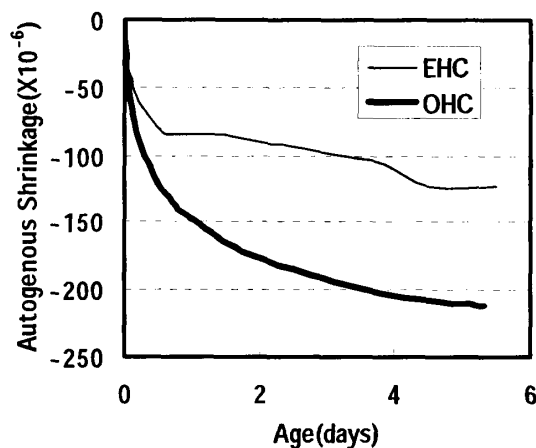


Fig. 1 Autogenous Shrinkage

3.3 VRTM 試験

(1) 温度及び変形

普通コンクリート及び膨張コンクリートにおける同時に測定した供試体内の温度履歴を Fig.2 に、また、VRTM 試験制御時、伸び計の変化を Fig.3 に示す。設定された変位トリガーの値を超えるケースが何回か見受けられたが、正常に機能していることがわかった。特に、材齢 1 日以前の時、伸び計の変化がトリガーの範囲を越えて非常に大きい値を示している。この制御の乱れは、生じる応力の不均質性によるものである⁸⁾。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ているが、これは自己変形よりも引張クリープの変形量が大きい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

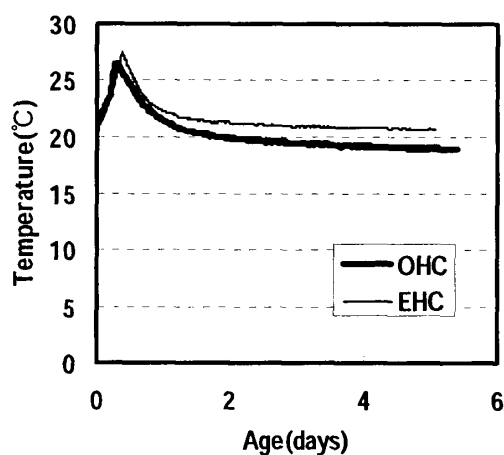


Fig. 2 Temperature history in concrete specimen

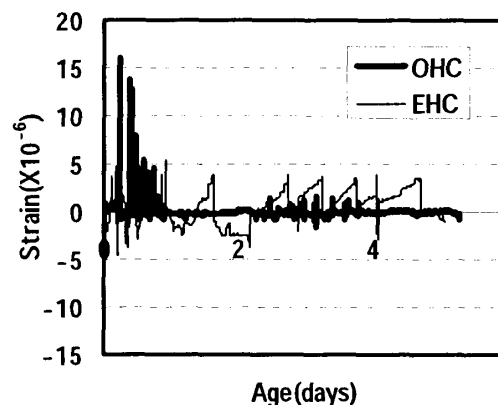


Fig. 3 Development of Strain under simulated complete restraint

えることができる。

(2) 引張応力の変化

普通コンクリート及び膨張コンクリートにおける同時に測定したVRTM実験の応力に関する結果を Fig.4 に示す。普通コンクリート場合は、変位トリガーを小さくしたもののなので、連続的な荷重の増加を示しており、材齢1日までは急激な荷重の増加を1.7MPaまで示し、その後、2.2日から応力が下がっている、この時点でひび割れが入ったと考えられる。このひび割れは脱型時に目視によって観測されないほどの微細ひび割れであることがわかった。一方、若材齢コンクリートの(ひび割れ応力)/(割裂引張強度)に関しては既往の研究によると、0.45から0.90まで広く散見されている⁹⁾。今回の破断時には50%と小さな値となっているが、同じ水セメン

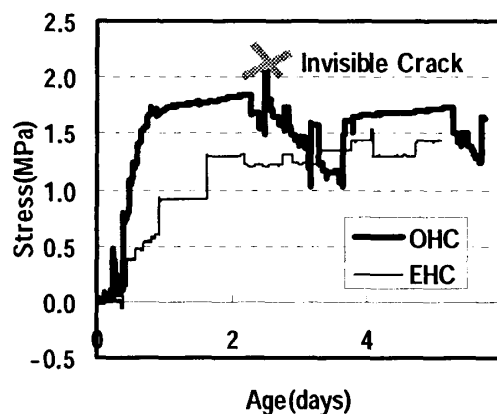


Fig. 4 Development of tensile stress under simulated complete restraint

ト比の疑似完全拘束試験の結果と一致している⁷⁾。また、粉体量が多いことを考慮すれば、評価できる値であるといえる。

膨張コンクリートの場合は、破断せず5日間、応力に耐え続けており、普通コンクリートより低い応力を示した。この応力は普通コンクリートと同じように自己収縮変形によって生じたものの、温度変化による温度応力を加味したものとなっている。5日後の疑似完全拘束による応力は、1.4MPaであり、変形トリガーを大きくしたので、離散化した荷重の増加になっていることがわかる。また、膨張コンクリートの自己変形が普通コンクリートのそれより低い値を示していることを考慮すると、疑似完全拘束された高強度コンクリートにおいては、膨張材を入れることで自己収縮応力を低減することができると判断できる。

(3) クリープひずみ及び単位クリープ

VRTM による疑似完全拘束試験では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、並行して自己変形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。つまり、自己変形供試体で測定されたひずみを自己収縮ひずみ(ϵ_{free})、VRTM の微小変形時に荷重が変化するときの変位を弾性ひずみ(ϵ_{vrtm})とすると、荷重一定時の膨張コンクリートの変位量をグラフから読みとり、その値を同じ時間帯の自己変形量から差し引くと、式(1)によってクリープ変形量が求められる^{10), 11)}。(Fig.5 参照)

$$\epsilon_{i, creep} = \epsilon_{i, free} - \epsilon_{i, vrtm} \quad (1)$$

ここで、

i: 応力一定時の各ステップ

$\epsilon_{i, creep}$: 各ステップにおけるクリープひずみ

$\epsilon_{i, free}$: 各ステップにおける自己収縮ひずみ

$\epsilon_{i, vrtm}$: 各ステップにおける弾性ひずみ

式(1)によって計算して得られた膨張コンクリートのクリープひずみの変化を膨張コンクリートの自己変形の試験結果とともに Fig.6 に示す。膨張コンクリートのクリープひずみ(ϵ_{creep})

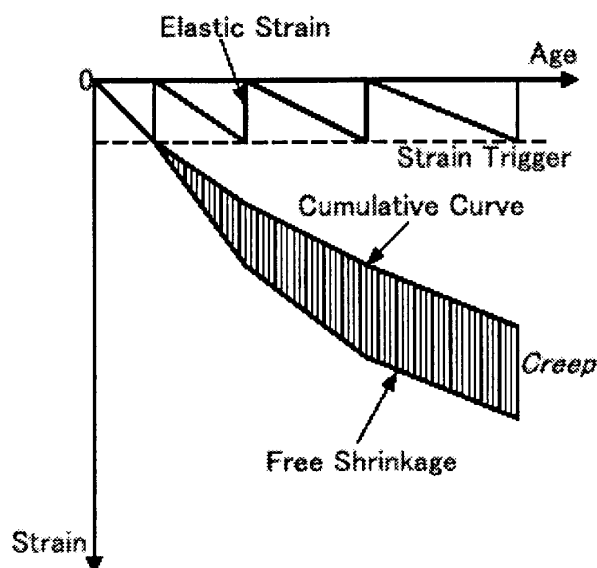


Fig. 5 Creep strain calculated from the data of restrained and free shrinkage tests.^{10), 11)}

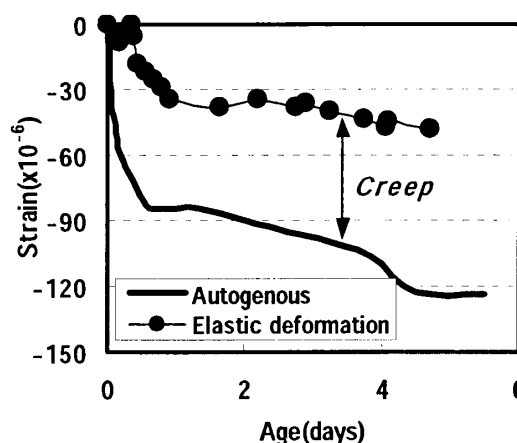


Fig. 6 Development of tensile creep versus age in Expansive Concrete

は、測定開始直後から材齢 24 時間までに急激に増加する傾向を示しており、その後材齢 5 日まで弱まりつつ増加した。ここで算出された膨張コンクリートのクリープひずみ(ϵ_{creep})は自己収縮の変位量(ϵ_{free})の 50%に相当する。つまり、疑似完全拘束だれた膨張コンクリートのクリープひずみは自己収縮ひずみの約 50%を示しており、本試験のように変位が疑似完全拘束される条件のもとでは、相当の応力が緩和されることになる。このクリープひずみは普通の高強度コンクリートのクリープひずみに比べて若干大きい値を示している¹¹⁾。

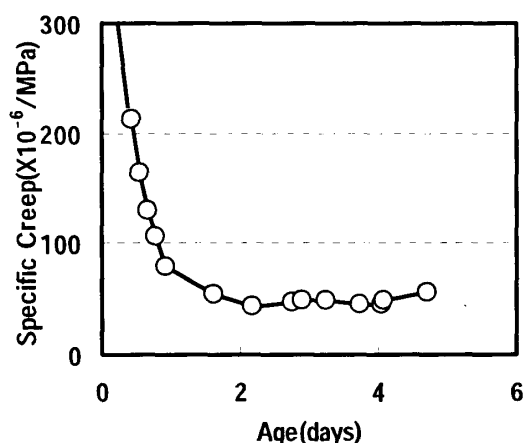


Fig. 7 Development of specific creep versus age in Expansive Concrete

Fig.7 は若材齢膨張コンクリートにおける引張単位クリープひずみの経時変化を示したものである。単位クリープは式(2)より求めた。

$$\varepsilon_{i,s-creep} = \varepsilon_{i,creep} / \sigma_i \quad (2)$$

ここで、

$\varepsilon_{i,s-creep}$: 各ステップにおける単位クリープ

$\varepsilon_{i,creep}$: 各ステップにおけるクリープ

σ_i : 各ステップにおける応力

膨張コンクリートの単位クリープは材齢の進行にともない大きく低下し、材齢 5 日には $50(X10^{-6}/MPa)$ の値を示している。これは、今回の試験が若材齢であることを考慮すると、次のように説明できる。コンクリートは持続応力条件下においても水和反応は活発に続き、新しく生成する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¹²⁾。つまり、新規水和生成物は生成後に加わる応力変化を負担することが考えられる。また、本研究の値は普通高強度コンクリートの単位クリープに関する報告¹³⁾に比べて小さい値を示しているが、発生した収縮量、膨張材の混和による水和生成物、引張拘束力等の違いによるものと考えられる。

(4) 膨張コンクリートの引張弾性係数

Fig.8 に膨張高強度コンクリートの実験結果から算出した VRTM 供試体の弾性係数とシリ

ンダー供試体の弾性係数を示す。シリンダー供試体も VRTM の供試体もほぼ同等な弾性係数値の増分を示しているが、シリンダー供試体が VRTM 供試体より全材齢に掛かって高い値を示した。この理由として、シリンダー供試体は圧縮変形ひずみのみ入っているのに対して、VRTM の供試体は引張変形ひずみにクリープひずみも含まれていることが考えられる。

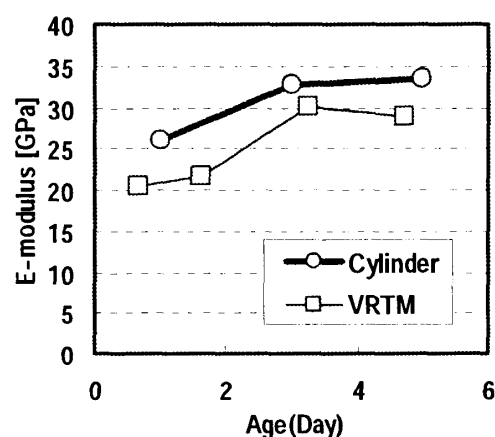


Fig. 8 Development of Cylinder and VRTM E-modulus in Expansive Concrete

4. 結論

今回の実験結果は少ない供試体数から得たものであるため、膨張材による高強度コンクリートの自己収縮ひび割れ低減をより定量的に把握するためには、さらなる検討が必要であるが、本研究の範囲では以下の結論が得られた。

- (1) 水セメント比 30% の高強度コンクリートにおいて、膨張材は自己収縮を低減するのに効果のあること、また、完全拘束されたコンクリート供試体の自己収縮によるひび割れの低減できることが確認された。
- (2) 膨張高強度コンクリートのクリープひずみは材齢 5 日で、自己変形量の 50% 程度の値が得られた。
- (3) 膨張高強度コンクリートにおいて、シリンダー供試体の圧縮弾性係数が VRTM に

よる引張弾性係数を上回ることが分かった。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮委員会報告書，2002. 9
- 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) 盛岡 実ほか：膨張材を混和した各種高流動モルタルの自己収縮，コンクリート工学年次論文集，Vol.22～2，pp.163-168，1998
- 4) 盛岡 実ほか：膨張材を混和したセメントペーストの化学収縮と自己体積変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.21-2，pp.157～162，1999
- 5) Springenschmid, R., Gierlinger, E., Kienozyski, 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
- 6) 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
- 7) 丸山一平ほか：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，日本コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 24, No1, pp.357～362，2002
- 8) 丸山一平ほか：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，日本コンクリート工学年次論文報告集（投稿中），2003
- 9) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存性変形に関するシンポジウム委員会報告書，pp164～166，2001
- 10) K.Kovler : Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage, Materials and Structures, 1994, 27, pp.324～330
- 11) Salah A. Altoubat and David A. Lange : Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age, ACI Material Journal, July-August 2001, pp.323～331
- 12) R. S. Ghosh : A hypothesis on mechanism of maturing creep of concrete, Materiaux et Constructions, Vol. 6, No. 31, pp.23-27, 1973
- 13) 五十嵐心一ほか：若材齢における高強度コンクリートの内部組織の特徴と自己収縮拘束特性，土木学会論文集，No. 704 ,Vol. 55, pp.173～186