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見することができ 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),粗骨材には青梅産砕石(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								
Unit weight [kg/m ³]								
Туре	Water	Cement	t 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 100×200mm 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 の恒温室 において封緘養生とした。

(2)自己变形試験

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× 100×400mm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 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 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 expansiveconcrete 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 自己变形試験

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ので,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 のに,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(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(yrtm)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)

$$\mathcal{E}_{i,creep} = \mathcal{E}_{i,free} - \mathcal{E}_{i,vrtm} \tag{1}$$

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(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(cree)は自 己収縮の変位量(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。

$$\varepsilon_{i,s-creep} = \varepsilon_{i,creep} / \sigma_i \tag{2}$$

ここで,

_{i,s-creep}: 各ステップにおける単位クリープ _{i,creep}: 各ステップにおけるクリープ _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の状態で生成さ 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ので,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

- 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) Springenshmid, R., Gierlinger, E., Kienozycki, 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