膨張材を用いたコンクリートのクリープ性状に関する研究

A STUDY OF CREEP BEHAVIOUR OF
CONCRETE USING EXPANSIVE ADMIXTURE百瀬 晴基*, 閑田 徹志**, 溝 渕 利 明***, 三 橋 博 三****
Haruki MOMOSE, Tetsushi KANDA, Toshiaki MIZOBUCHI
and Hirozo MIHASHI

This paper aims at clarifying creep behavior of concrete involving expansive (expansive concrete) additive in early age. This clarification is achieved via proposing a new creep model for expansive concrete based on observation in early age strain behavior. This model is verified using compressive early age creep experiment for expansive concrete, in which ages at loading are varied in 0.5, 1.0 and 2.0 day. The experimental results are reasonably reproduced, and the accuracy of the proposed model is demonstrated. Finally, the proposed model is found to be utilized for quantitatively evaluating chemical pre-stress generated in restrained expansive concrete elements, which is very effective to control shrinkage cracking in reinforced concrete structural elements.

Keywords: Concrete, Expansive Additive, Shrinkage Reducing Admixture, Creep
コンクリート, 膨張材, 収縮低減剤, クリープ

1. はじめに

建築物の高耐久性化に対する社会的要求から、RC造構造物の耐久性に大きな影響を与える収縮ひび割れを低減し定量的に制御する技術への需要は極めて高い。収縮ひび割れを低減する手法として、石灰岩を使用するなど材料・調合を検討し収縮量を低減する方法、打設工区を縮小するなど拘束度を低減する方法、鉄筋量を増しひび割れ幅を抑制する方法など、数多くの手法が存在する¹⁾。これらの対策手法は経験的に効果が高いことが知られているものの、その効果は同じ指標で定量的に明らかになっていない。また、これらの対策手法は実構造物における定量的な効果の予測が難しく、合理的な判断から実構造物に適用されるに至っていない²⁾。

このような背景のもと、著者らは膨張材や収縮低減剤などひび割れ低減に有効な材料のひび割れ抵抗性を評価することを目的として、これらの材料を混入したコンクリートについて一軸拘束実験を行い独自の評価指標を導入してひび割れ抵抗性を定量的に評価した³⁾。その結果、膨張材と収縮低減剤、膨張材と低熱ポルトランドセメントを併用したコンクリートが、高いひび割れ抵抗性を有していることが確認でき、実躯体においてもそのひび割れ抵抗性が高いことを実証している^{4), 5)}。このような収縮ひび割れ抵抗性の高いコンクリ

ート(以下、本コンクリートと略称する)の実構造物への適用に関して定量的な判断を実施するためには、本コンクリートの実躯体におけるひび割れ抵抗性について、定量的な評価および予測が不可欠であるといえる。

しかしながら、本コンクリートに代表される膨張材を混入したコンクリートにおけるひび割れ低減効果を予測するためには、最大の特徴である材齢初期の膨張によるケミカルプレストレスを定量的に予測する必要があるが、現状ではこの予測方法は確立されているとは言い難い。この予測に関連した知見として、辻等は拘束の程度によらず膨張材の仕事量は一定であるとする仕事量一定則を提案しており、この手法は広く知られている⁶⁾。しかし、この仕事量一定則は拘束体である鋼材量が入力項目の一つであり、外部拘束が支配的である建築構造物では外部拘束による拘束度が自明でないため、仕事量一定則を適用する事は難しい。仕事量一定則以外のケミカルプレストレスの予測手法として佐藤等は線形クリープ則を用いた応力解析手法を検討している。この手法を用いることにより、膨張材を混入した高強度コンクリートの発生応力を精度良く予測でき、結合材が強固である高強度域では線形クリープ則が適用できる事を証明しているものの、普通強度域における検証はされてい

* 鹿島技術研究所建築生産グループ 研究員

** 鹿島技術研究所建築生産グループ 上席研究員・Ph. D.

*** 法政大学工学部都市環境デザイン工学科

教授・博士(工学)

**** 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

Research Engineer, Kajima Tech. Research Institute

Supervisory Research Engineer, Kajima Tech. Research Institute, Ph. D.

Prof., Department of Civil and Environmental Engineering, Hosei University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Tohoku University, Dr. Eng.

い⁷⁾。

本論では、本コンクリートのひび割れ抵抗性を定量的に評価・予測することを目的として、膨張材を混入したコンクリートのクリープ式を提案すると共に、普通強度域における Step by Step 法による応力解析手法の妥当性を検証する。クリープ式を提案するにあたって、本コンクリートの膨張過程におけるクリープ特性を把握するべく、若材齢時のクリープ実験を行った。さらに、拘束度を変化させた複数の一軸拘束試験体を作製し、提案したクリープ式を用いて Step by Step 法による応力解析を実施した。

2. 若材齢時におけるクリープ実験概要

2.1 実験要因

実験要因と水準を表-1に示す。本実験では、表-1に示す計9ケースについて、圧縮クリープ実験を実施した。実験要因は、コンクリート種類と荷重材齢の2要因とした。コンクリート種類は、膨張材と低熱ポルトランドセメントを併用したコンクリート(以下、LE)、膨張材と収縮低減剤を併用したコンクリート(以下、NES)、比較対象である普通コンクリート(以下、N)の3水準とした。荷重材齢は、膨張材の膨張過程におけるクリープ特性を把握するべく、始発を0日とした0.5、1.0、2.0日の3水準とした。

2.2 使用材料及び割合

割合表を表-2に、使用材料を表-3に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントを使用し、粗骨材は硬質砂岩を使用した。膨張材はエトリンガイト・石灰複合系の低添加型膨張材、収縮低減剤は低級アルコール系を使用した。割合は、水結合材比45%、単位水量170kg/m³、膨張材添加量20kg/m³、収縮低減剤添加量6kg/m³、空気量4.5%とした。また、膨張材はセメント量の外割り、収縮低減剤は単位水量の内割りとした。

2.3 実験方法

試験体詳細図を図-1に示す。圧縮クリープ実験はJIS原案(コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案))に準拠した⁸⁾。1割合につき、φ150×300mmの荷重試験体を6体、鉄筋比0.1%のネジ鉄筋で拘束したφ150×300mmの無荷重試験体を2体作製した。始発を0日とした材齢0.5日時点において全ての試験体を脱型し、20℃封緘養生とした。荷重試験体は1水準につき2体づつ、荷重材齢時圧縮強度の0.3倍の応力で荷重した。ひずみ計測は変位計を用いて試験体の長さ変位を測定し、長さ変化を試験体長さで除した値を試験体のひずみとした。

これまでの研究において、膨張材を混入したコンクリートでは、無拘束試験体で発生する膨張ひずみが型枠等の微小な拘束の影響によりバラツキが大きくなるため、膨張ひずみが安定する鉄筋比0.1%の微拘束試験体のひずみを自由ひずみとする事を提案している⁹⁾。圧縮クリープ試験JIS原案では無荷重試験体として無拘束試験体を用いるが、今回は膨張材を混入したコンクリートを対象としているため、鉄筋比0.1%の微拘束試験体は無荷重試験体とした。また、始発を0日として材齢を換算するため、凝結試験(JIS A 1108)を行い始発時間と終結時間を測定した。

また、1割合につきφ150×300mmの試験体を18体作製し、それぞれ材齢0.5、1.0、2.0、7、14、28日において、3体づつ圧縮強度試験(JIS A 1108)及びヤング係数試験(JIS A 1149)に供した。クリ

ープ実験に供する試験体と同様に、始発を0日とした材齢0.5日時点において全ての試験体を脱型し、その後20℃封緘養生とした。

3. クリープ実験結果および考察

3.1 クリープ係数の算定方法

クリープ実験結果の評価値として、CEB-FIP1990式で定義されているクリープ係数(材齢28日の弾性ひずみに対するクリープひずみ

表-1 実験要因と水準

NO	記号	セメント	膨張材	収縮低減剤	荷重材齢
1	LE-0.5	低熱 ポルトランド セメント	20kg/m ³	-	0.5日
2	LE-1.0				1.0日
3	LE-2.0				2.0日
4	NES-0.5	普通 ポルトランド セメント	20kg/m ³	6kg/m ³	0.5日
5	NES-1.0				1.0日
6	NES-2.0				2.0日
7	N-0.5	普通 ポルトランド セメント	-	-	0.5日
8	N-1.0				1.0日
9	N-2.0				2.0日

表-2 割合表

記号	W/B(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)					
			水	収縮 低減剤	セメント	膨張材	山砂	碎石
LE	45.0	45.6	170	-	358	20	780	962
NES	45.0	45.5	170	6	358	20	775	962
N	45.0	45.5	170	-	378	-	774	962

* 収縮低減剤は単位水量の内割り

表-3 使用材料

種類	材料名	密度(g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
	低熱ポルトランドセメント	3.22
膨張材	エトリンガイト・石灰複合系	3.20
細骨材	静岡産山砂	2.56
粗骨材	奥多摩産硬質砂岩	2.65
収縮低減剤	低級アルコール系	1.00
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	1.00

表-4 強度試験結果

材齢 (日)	圧縮強度(N/mm ²)			ヤング係数(×10 ³ N/mm ²)		
	LE	NES	N	LE	NES	N
0.5	3.1	5.2	6.5	3.8	12.0	13.2
1	6.5	12.9	13.2	12.6	19.6	19.9
2	10.3	21.1	21.9	16.1	25.1	24.5
7	22.8	35.3	37.5	24.7	28.7	29.1
14	29.3	41.8	43.1	27.4	31.0	30.6
28	39.1	45.6	47.8	30.1	32.4	31.8

図-1 クリープ試験体詳細

の比)¹⁰⁾, ACI209 式で定義されているクリープ係数(載荷時の弾性ひずみに対するクリープひずみの比)¹¹⁾, 土木学会式で定義されているスペシフィッククリープひずみ(載荷時の応力に対するクリープひずみの比)¹²⁾, などが挙げられる。本実験では, CEB-FIP1990 式で定義されるクリープ係数を用いることとした。クリープ係数およびクリープひずみの算出は以下のように表現される。

$$\phi(t, t_0) = -\varepsilon_{cre}(t, t_0) / (\sigma_c(t_0) / E_c(28)) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cre}(t, t_0) = \varepsilon_c(t, t_0) - \varepsilon_{csh}(t, t_0) \quad (2)$$

ここで, $\phi(t, t_0)$, $\varepsilon_{cre}(t, t_0)$, $\sigma_c(t_0)$, $E_c(28)$, $\varepsilon_c(t, t_0)$, $\varepsilon_{csh}(t, t_0)$, t , t_0 はそれぞれクリープ係数, クリープひずみ, 載荷応力, 材齢 28 日のコンクリートのヤング係数, 載荷試験体のひずみ, 無載荷試験体

のひずみ, 材齢, 載荷材齢を表す。

3.2 クリープ実験結果

強度試験結果を表-4に, 各ひずみ結果を図-2に, クリープひずみ結果を図-3に, クリープ係数結果を図-4に示す。図-4から, 膨張材無混入のNでは材齢180日時点におけるクリープ係数が載荷材齢によらず2前後であるのに対し, 膨張材を混入したLE-0.5では11, LE-1.0では4.5, NES-0.5では4.5程度とNを大きく上回る値を示すことが分かった。また, 載荷材齢が進むに従いその差は減少し, 載荷材齢2.0日ではクリープ係数に与える調合の影響は認められなかった。

この膨張コンクリートの若材齢時におけるクリープ係数が増大する原因として, 膨張期間における膨張ひずみが影響していると考

図-2.a 各ひずみ結果(LE)

図-2.b 各ひずみ結果(NES)

図-2.c 各ひずみ結果(N)

図-3.a クリープひずみ結果(LE)

図-3.b クリープひずみ結果(NES)

図-3.c クリープひずみ結果(N)

図-4.a クリープ係数(LE)

図-4.b クリープ係数(NES)

図-4.c クリープ係数(N)

えられる。図-5は、材齢 t_0 において、圧縮方向に一定応力を載荷した場合のコンクリートひずみの模式図である。普通コンクリートのクリープひずみの定義では、載荷ひずみ(ϵ_{cNR})と無載荷ひずみ(ϵ_{cshNR})との差をクリープひずみ(ϵ_{creNR})としている。膨張コンクリートにおいても、膨張が安定した後は、普通コンクリートと同様である。しかしながら、載荷材齢が膨張期間中である場合、無載荷ひずみ(ϵ_{cshEX})の符号が逆転するため、載荷ひずみ(ϵ_{cEX})と無載荷ひずみ(ϵ_{cshEX})との和がクリープひずみ(ϵ_{creEX})となる。膨張コンクリートの若材齢時のクリープが大きな値を示す原因は、無載荷試験体で認められる膨張挙動が載荷試験体では認められず、膨張する無載荷ひずみ(ϵ_{cshEX})がクリープひずみに含まれる事によるものと推測される。

本実験においても、図-2の無載荷ひずみ結果から、LE では材齢 1.0 日、NES では 0.5 日まで膨張期間であること、図-4のクリープ係数結果から、LE では 1.0 日、NES では 0.5 日までクリープ係数が極度に大きいことが確認できることから、この仮説は一定程度の信頼性を有していると考えられる。

3.3 膨張材を混入したコンクリートのクリープ式の提案

Step by Step 法による応力解析を実施することを念頭に、クリープ実験結果を数式化し、膨張材を混入したコンクリートのクリープ式を提案する。図-4から、既存の予測式である CEB-FIP1990 式は、実験結果を過小評価しており、膨張コンクリートの特殊なクリープ挙動を再現できていないが、今回提案したクリープ式は、既存の CEB-FIP1990 式に比べて精度良く実験値を再現できている。なお、提案するクリープ式は、膨張コンクリートの若材齢クリープが見掛け上増大する実験結果を対象に、現象論的視点から数式化したものである。したがって、この提案式は、物理的メカニズムに立脚していない経験式として位置づけられ、得られるクリープ係数については見掛けの値であることに留意が必要である。

本式は、(3)式に示すようにクリープ試験における無載荷試験体の膨張ひずみによるクリープ(以下、膨張クリープ)と、載荷試験体による通常のクリープ(以下、載荷クリープ)は別の機構であると仮定し、それぞれを足し合わせた形とした。

$$\phi(t, t_0) = \phi_{\infty EX} \times \beta_{cEX}(t, t_0) + \phi_{\infty CEB} \times \beta_{cCEB}(t, t_0) \quad (3)$$

ここで、 $\phi(t, t_0)$ 、 $\phi_{\infty EX}$ 、 $\beta_{cEX}(t, t_0)$ 、 $\phi_{\infty CEB}$ 、 $\beta_{cCEB}(t, t_0)$ はそれぞれクリープ係数、膨張クリープの終局クリープ係数、膨張クリープの速度項、載荷クリープの終局クリープ係数、載荷クリープの速度項を表す。

載荷クリープには、既存の予測式である CEB-FIP1990 式を用いることとした。しかしながら、図-4から、CEB-FIP1990 式は、膨張材を混入した LE および NES だけでなく、N においても精度が低いことが確認できる。日本コンクリート工学協会自己収縮委員会では、CEB-FIP1990 式は、クリープの進行速度が遅く、若材齢のクリープ係数を精度良く予測できないことを示唆しており、CEB-FIP1990 式を修正した式(以下、JCI 式)を提案している¹³⁾。この式は、終局クリープ係数 ϕ_{∞} と、クリープの進行速度を決定する β_H を、圧縮強度もしくはヤング係数に依存する値とし、高強度コンクリートの若材齢クリープを精度良く再現している。

膨張材無混入の N、膨張挙動が安定した LE-2.0、NES-1.0、NES-2.0 について、最小 2 乗法により ϕ_{∞} と β_H を同定した。同定した β_H 、

図-5 クリープひずみ算出方法の概念図

図-6 β_H の検討

CEB-FIP1990 式の β_H 、JCI 式の β_H を図-6 に示す。JCI 式は CEB-FIP1990 式に比べて実験値に近い値を示しているものの、高強度コンクリートを対象とした式であるため、普通強度域である本実験結果とは若干差異が認められる。また、図中に示すように、本実験結果は、JCI 式を基に最小 2 乗法により定数を修正した式(以下、JCI 修正式)で精度良く数式表現することができる。今回は、載荷クリープの進行速度を決定する β_H に JCI 修正式を導入した式を用いることとした。載荷クリープの終局クリープ係数、載荷クリープの速度項は以下のように表現される。

$$\phi_{\infty CEB} = \phi_{RH} \times \beta(f_{cm}) \times \beta(t_0) \quad (4)$$

$$\beta_{cCEB}(t, t_0) = ((t-t_0)/t_1) / (\beta_H + (t-t_0)/t_1) \quad (5)$$

$$\beta_H = 7.49 \times \exp(5.30 \times f_c(t_0)/f_c(28)) \quad (6)$$

ここで、 ϕ_{RH} 、 $\beta(f_{cm})$ 、 $\beta(t_0)$ 、 $f_c(t_0)$ 、 $f_c(28)$ はそれぞれ乾燥クリープの影響の項、圧縮強度の影響の項、載荷材齢の影響の項、載荷材齢 t_0 における圧縮強度、材齢 28 日における圧縮強度を表す。

膨張クリープの支配的要因は、無載荷ひずみの膨張挙動にあると考え、無載荷ひずみを数式化しクリープ式中に反映させることとした。膨張クリープの終局クリープ係数、膨張クリープの速度項は以下のように表現される。

$$\phi_{\infty EX} = \alpha_1 \times \exp(m_1 \times (t_0)^{m_2}) / (f_c(t_0)/f_c(t_1)) \quad (7)$$

$$\beta_{cEX}(t, t_0) = (\beta_{cEX}(t) - \beta_{cEX}(t_0)) / (1 - \beta_{cEX}(t_0)) \quad (8)$$

$$\beta_c \exp(t) = 1 - \exp(m_1 \times (t)^{m_2}) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{sh}(t) = m_0 \times (1 - \exp(m_1 \times (t_0)^{m_2})) \quad (10)$$

ここで、 α_1 は膨張クリープの大きさを決定する項、 m_0 、 m_1 、 m_2 、は無載荷ひずみの膨張挙動を表す係数を表す。 m_0 、 m_1 、 m_2 、は(10)式を用いて最小2乗法により無載荷ひずみをフィッティングし同定した。同定した結果、係数 α_1 、 m_1 、 m_2 は、LEではそれぞれ18.808、-1.035、1.948、NESではそれぞれ22.244、-2.978、2.067の値が得られた。

4. 拘束度を変化させた一軸拘束実験

4.1 実験要因

普通強度域における Step by Step 法による応力解析手法の妥当性を検証することを念頭に、解析対象となる実験データを抽出することを目的に拘束度を変化させた複数の一軸拘束実験を実施した。

実験要因と水準を表-5に示す。本実験では、表-5に示す計5ケースについて、一軸拘束実験を実施した。実験要因は、拘束度であり内部鉄筋比0.1、0.4、1.0、4.0、8.0%程度の5水準とした。

4.2 使用材料及び調査

コンクリートは膨張材と低熱ポルトランドセメントを併用したLEとし、クリープ試験体を作製した同じバッチのコンクリートを用いた。セメントは低熱ポルトランドセメント、粗骨材は硬質砂岩、膨張材はエトリンガイト・石灰複合系の低添加型膨張材を使用した。調査は、水結合材比45%、単位水量170kg/m³、膨張材添加量20kg/m³、空気量4.5%とした。

4.3 実験方法

試験体詳細図を図-7に示す。一軸拘束実験は、膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法B法(JIS A 6202)に準拠した。試験体数は1ケースあたり3体とし、始発を0日としてひずみゲージにより鉄筋のひずみ量を計測した。試験体の養生は20℃封緘養生とした。なお、コンクリートの内部発生応力は、(11)式により鉄筋のひずみ量から計算によって求めた。(11)式は、力の釣り合い式から内部鉄筋のひずみとコンクリートのひずみが等しいと仮定し求めた。

$$\sigma_c(t) = \varepsilon_s(t) \times E_s \times A_s / A_c \quad (11)$$

ここで、 $\sigma_c(t)$ 、 $\varepsilon_s(t)$ 、 E_s 、 A_s 、 A_c はそれぞれ材齢 t 日におけるコンクリートの応力、材齢 t 日における鉄筋のひずみ、鉄筋のヤング係数、鉄筋の断面積、コンクリートの断面積を表す。本実験では、 E_s は210000N/mm²と仮定した。

4.4 実験結果

一軸拘束実験結果を図-8に示す。図-8から、各試験体のひずみ挙動は内部鉄筋比が大きくなる程、最大膨張量が小さい結果となった。各試験体の応力実験結果は、材齢0日直後から膨張材の影響により圧縮応力が発生し、内部鉄筋比が大きいく程、最大圧縮応力が大きい結果となった。

5. 一軸拘束実験における解析的検討

5.1 Step by Step 法による解析手法

Step by Step 法は、クリープ進行曲線を用いて任意の時刻分割に従い、時間間隔毎の変化応力による変化ひずみを求積していく解析

法である。タイムインターバルの増分応力を加算している点では増分法と同じだが、Step by Step 法は各インターバルの応力緩和の時間的変化を考慮できる点が異なる。Step by Step 法の数式表現を(12)～(15)式に示す⁷⁾。本解析では、鉄筋比0.1%の試験体にお

表-5 実験要因と水準

記号	セメント	膨張材	収縮低減剤	内部鉄筋	内部鉄筋比
LE-0.1%	低熱 ポルトランド セメント	20kg/m ³	-	M4	0.10%
LE-0.4%				M8	0.41%
LE-1.0%				M12	0.93%
LE-4.0%				M24	3.82%
LE-8.0%				M33	7.41%

図-7 試験体詳細図

表-6 各係数値及び定数値

項目	記号		項目	記号	
クリープ係数	α_1	18.808	微拘束ひずみ	$m0$	528
	$m1$	-1.296		$m1$	-1.296
	$m2$	1.212		$m2$	1.212
圧縮強度	$f_c(28)$	39.1	ヤング係数	$E_c(28)$	30143
	S	0.380		S	0.380
	α_f	0.920		α_E	0.971
	t_{β}	0.127		t_{β}	0.127

図-8.a ひずみ実験結果

図-8.b 応力実験結果

るコンクリートのひずみ結果(以下、微拘束ひずみ)をインプットデータとして解析を行なった。

$$\sigma_c(t_{i+1/2}) = 1/J(t_{i+1/2}) \times \{ \varepsilon_c(t_{i+1/2}) - \varepsilon_{cre}(t_{i+1/2}) - \varepsilon_{sh}(t_{i+1/2}) \} \quad (12)$$

$$\Delta \sigma_c(t_i) = \sigma_c(t_{i+1/2}) - \sigma_c(t_{i-1/2}) \quad (13)$$

$$J(t_{i+1/2}, t_i) = 1/E_c(t_i) + \phi(t_{i+1/2}, t_i)/E_c(28) \quad (14)$$

$$\varepsilon_{cre}(t_{i+1/2}) = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \sigma_c(t_j) \times J(t_{i+1/2}, t_j) - J(t_{i+1/2}, t_i) \times \sigma_c(t_{i-1/2}) \quad (15)$$

$\sigma_c(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ でのコンクリート応力

$\varepsilon_c(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ でのコンクリートの実ひずみ

$\varepsilon_{sh}(t_{i+1/2})$: コンクリートの微拘束ひずみ

$\phi(t_{i+1/2}, t_i)$: ステップ t_i で載荷されたステップ $t_{i+1/2}$ のクリープ係数

$E_c(t_i)$: ステップ t_i でのヤング係数

$E_c(28)$: 材齢 28 日でのヤング係数

5.2 増分応力ひずみ関係

材齢 t における一軸拘束試験体のコンクリートおよび鉄筋の応力ひずみ関係は、それぞれ増分形式で(16)(17)式のように表される。本実験では、養生温度を 20℃ 一定の条件下としているため、温度変化により発生する温度ひずみは考慮しないこととした。

$$\Delta \sigma_c(t) = E_c(t) \times (\Delta \varepsilon_c(t) - \Delta \varepsilon_{cre}(t) - \Delta \varepsilon_{sh}(t)) \quad (16)$$

$$\Delta \sigma_s(t) = E_s(t) \times \Delta \varepsilon_s(t) \quad (17)$$

ここで、 $\Delta \sigma_c(t)$, $E_c(t)$, $\Delta \varepsilon_c(t)$, $\Delta \varepsilon_{cre}(t)$, $\Delta \varepsilon_{sh}(t)$ はそれぞれコンクリートの応力増分、ヤング係数、全ひずみ増分、クリープひずみ増分、微拘束ひずみ増分を表し、 $\Delta \sigma_s(t)$, $E_s(t)$, $\Delta \varepsilon_s(t)$ はそれぞれ鉄筋の応力増分、ヤング係数、全ひずみ増分を表す。

5.3 コンクリートの力学特性

クリープ係数は、3.2 節で提案したクリープ式を用いることとし、

表一 6 の係数の値を用いた。 m_1 , m_2 は微拘束ひずみの膨張挙動を表す係数であり、今回は精度の良い解析を実施するべく、内部鉄筋比 0.1% のひずみ結果から同定した値を用いた。

コンクリートの圧縮強度 $f_c(t)$, ヤング係数 $E_c(t)$ は、CEB-FIP1990 式を用いた¹⁰⁾。それぞれの数式を以下に示す。

$$f_c(t) = \alpha_f \times f_c(28) \times \exp(S \times (1 - ((28 - t_{fs}) / (t - t_{fs}))^{0.5})) \quad (18)$$

$$E_c(t) = \alpha_E \times E_c(28) \times (\exp(S \times (1 - ((28 - t_{fs}) / (t - t_{fs}))^{0.5}))^{0.5} \quad (19)$$

ここに、 t_{fs} : 凝結の終結材齢(日), α_f , α_E : 終局値を表す係数, S : 発現の早さを表す係数

5.4 微拘束ひずみ

本解析においてインプットデータとなる微拘束ひずみ ε_{sh} は、100 × 100 × 400mm の LE-0.1% のひずみ結果から得るものとした。実験での養生条件は 20℃ の封緘養生としている。 ε_{sh} は以下の数式を用いて表した。(20) 式で実験結果とのフィッティングを行い、表一 6 の係数の値を得た。

$$\varepsilon_{sh} = m_0 \times (1 - \exp(m_1 \times (t - t_{fs})^{m_2})) \quad (20)$$

5.5 解析結果

Step by Step 法による各ひずみ解析結果を図一 9 に、応力解析結果を図一 10 に示す。図一 10 から、解析結果では全ての試験体において、膨張材のケミカルプレストレスを概ね良い精度で再現できていることが確認できた。このことから、提案した膨張材を混入したコンクリートのクリープ式および本解析手法は妥当であると考えられる。

ケミカルプレストレスの予測手法として良く知られている仕事量一定則による予測手法と、Step by Step 法による応力解析手法を比較した⁶⁾。仕事量および仕事量から求める最大圧縮応力の数式表現を以下に示す。

図一 9. a 各ひずみ解析結果 (LE-0.4%)

図一 9. b 各ひずみ解析結果 (LE-1.0%)

図一 9. c 各ひずみ解析結果 (LE-4.0%)

図一 9. d 各ひずみ解析結果 (LE-8.0%)

図一 10. a 応力解析結果 (LE-0.4%)

図一 10. b 応力解析結果 (LE-1.0%)

図一 10. c 応力解析結果 (LE-4.0%)

図一 10. d 応力解析結果 (LE-8.0%)

$$U = 0.5 \times p \times E_s \times (\varepsilon_{s\ cp})^2 \quad (21)$$

$$\sigma_{cpa} = (2 \times p \times E_s)^{0.5} \times (U)^{0.5} \quad (22)$$

ここで、 U 、 p 、 E_s 、 $\varepsilon_{s\ cp}$ 、 σ_{cpa} はそれぞれ膨張コンクリートがなす仕事量、拘束鋼材比、鉄筋のヤング係数、拘束鋼材の伸びひずみ、ケミカルプレストレスを表す。

実験結果から算定した仕事量を図-11に示す。今回は、LE-1.0%の実験結果から算定した仕事量を用いて、その他の試験体における最大圧縮応力を予測した。ケミカルプレストレスの予測結果を図-12に示す。Step by Step 法による応力結果では、全ての試験体において膨張材のケミカルプレストレスを概ね良い精度で予測できているのに対し、仕事量一定則による予測結果では、適用範囲である内部鉄筋比(0.67~4.22%)において概ね圧縮応力が予測できているものの、適用範囲外である LE-8.0%では実験値を過大評価していることが確認できた⁶⁾。

文献3)では、水セメント比50%の普通コンクリートに対して、内部鉄筋比8.0%程度の一軸拘束ひび割れ試験を実施しており、その拘束度は0.63であった。文献14)では、RC造建築構造物の壁部の拘束度は0.6程度であり、基礎梁の拘束がある1F下層部では0.9程度であると報告しており、解析対象をRC造建築構造物の壁部とした場合、仕事量一定則の適用範囲外での予測が必要であると考えられる。

本解析手法の最終的な解析対象は、RC造建築構造物の壁・床等を対象としており、仕事量一定則によるケミカルプレストレスの予測は適用範囲外となる可能性が高いことから、本目的においてはStep by Step 法による応力解析手法の方が本コンクリートのひび割れ低減効果を予測する手法として適していると考えられる。

6. まとめ

本論では、膨張材と収縮低減剤、あるいは膨張材と低熱ポルトランドセメントを併用したコンクリートのひび割れ抵抗性を定量的に評価・予測することを目的として、膨張材を混入したコンクリートのクリープ式を提案すると共に、普通強度域におけるStep by Step 法による応力解析手法の妥当性を検証した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 拘束度を変化させた複数の解析ケースにおいて、膨張材によるケミカルプレストレスを精度良く再現できていることから、提案した膨張材を混入したコンクリートのクリープ式および本解析手法は妥当であると考えられる。
- 2) 膨張材を混入したコンクリートの膨張期間のクリープ係数は普通コンクリートに対して最大5倍程度と非常に大きく、載荷材齢が進むに従いその差は小さくなるのが分かった。
- 3) 膨張材を混入したコンクリートの若材齢のクリープ係数は、CEB-FIP1990 式では再現できないこと、提案したクリープ式では概ね精度よく再現できることが確認できた。
- 4) 仕事量一定則を用いたケミカルプレストレスの予測手法は、適用範囲である内部鋼材量 0.4~4.0%の試験体では、精度良く発生応力を予測できているが、適用範囲外である内部鋼材量 8.0%の試験体では精度の良い予測は難しいことが確認できた。

図-11 仕事量の算定(実験結果) 図-12 ケミカルプレストレスの予測

ここで提案した膨張コンクリートのクリープ式は、本研究におけるクリープ実験結果の範囲から得られた経験式であり、厳密な適用範囲の検証については、データの蓄積を待つ必要がある。この汎用性の検討に関しては今後の研究課題としたい。

謝辞

本研究を実施するにあたり、貴重なご意見を頂いた広島大学佐藤良一教授に記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ・メカニズムと対策技術の現状，2003
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策指針・同解説，2002
- 3) 百瀬晴基，関田徹志，石田雅利，桜本文敏：膨張材及び収縮低減剤を併用したコンクリートのひび割れ抵抗性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No. 587，pp. 7-14，2005
- 4) 関田徹志，百瀬晴基，桜本文敏：膨張材と収縮低減剤を併用したコンクリートによる床スラブのひび割れ低減効果に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 501-506，2004
- 5) 関田徹志，百瀬晴基，桜本文敏，鈴木康範，小田部裕一：ひび割れ低減コンクリートの開発(その3~4)，建築学会大会梗概集，pp. 109-112，2003
- 6) 辻幸和：ケミカルプレストレスの推定方法について，セメント技術年報，NO. 27，pp. 340-344，1973
- 7) SATO, R, DILGER, W.H and UJIKE, I: Deformation and Thermal Stress of Concrete Beams Constructed in Two Stages, Int. RILEM Sym. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, pp. 313-320, Munchen Oct. 1994
- 8) コンクリート工学協会：特集*標準化を待つ試験方法，コンクリート工学，Vol. 23，No. 3，pp. 55-56，1985
- 9) 百瀬晴基，関田徹志，鈴木康範，小林隆芳：低熱ポルトランドセメントと膨張材を混入したコンクリートの膨張収縮挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 495-500，2004
- 10) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON: CEB-FIP Model Code 90, Thomas Telford, 1990
- 11) ACI Committee 209: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, 1982
- 12) 土木学会，コンクリート標準示方書[構造成能照査編]，2002
- 13) 日本コンクリート工学協会，自己収縮委員会報告書，1996
- 14) 鈴木計夫，大野義照，清水久博：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生に関するモデル架構の拘束率，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 5-8，1988

(2006年3月29日原稿受理，2006年7月3日採用決定)