

論文 クリープ試験に基づいた若材齢コンクリートの有効弾性係数に関する研究

長谷川健一^{*1}・入矢桂史郎^{*2}・梅原秀哲^{*3}

要旨：本研究では、Compensation Plane 法（以下 CP 法と略記）を用いて温度応力解析を行うとともに、実験より得られたクリープ式を用いて、初期ひずみ法によりクリープを考慮した温度応力を求め、結果を比較することにより若材齢のクリープ実験結果を反映させた有効弾性係数を算出した。その結果、有効弾性係数は圧縮領域では静弾性係数の約 70%、引張領域では約 105%であったのに対して、除荷領域での補正は必要ないことが明らかになった。

キーワード：温度応力、クリープ、リラクセーション、有効弾性係数、若材齢

1. はじめに

温度ひび割れを防止、あるいは制御するためには、温度応力を精度良く推定し、その結果を設計、施工に反映させて、温度応力を抑制する対策を講じる必要がある。一般に温度応力の予測には解析により温度分布を求め、それを荷重として若材齢時のコンクリートの物性を用いた応力解析が行われる。過去の研究成果として、温度分布に関しては精度良い予測が可能であることが明らかとなっている。しかし、温度応力の解析については種々の解析手法が提案されているが、クリープの影響については十分な考慮はされておらず、正確な予測ができないのが現状である。本研究の目的である若材齢コンクリートのクリープ挙動を実験的に解明し、セメントの水和熱に起因する温度応力の正確な予測に資するために、ここでは、CP 法を用いて温度応力解析を行った。さらにクリープ式を用いて、実際にモデル構造物に対して温度応力解析を行うことにより、その影響を検討するとともに、最も広く使用されている温度応力の簡易解析手法である CP 法に用いる有効弾性係数についての検討も行った。

本研究では、温度応力解析に用いるクリープ

式を得るために、コンクリートの載荷試験を行った。

2. 配合

使用した材料は、普通ポルトランドセメント、山砂（豊田市田粉山産、 $\gamma=2.55$, F.M=2.82）、碎石（春日井市外之原産、 $\gamma=2.65$, F.M=6.67）で、使用したコンクリートの目標強度は 30N/mm² 程度（28 日圧縮強度）の AE コンクリートとした。表 1 に示方配合を示す。

3. クリープ試験

3.1 試験ケース

既報¹⁾²⁾では若材齢コンクリートのクリープ挙動の解明、およびクリープ式構築を目的として、様々なパラメーターを用いてクリープ試験を行ってきたが、これらはいずれも載荷期間 5 日までの短期間の載荷試験であった。

表 1 コンクリートの配合

Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	AD
8.0	4.0	55	44.6	172	313	787	1015	1.16

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻（正会員）

*2 株式会社大林組 工事業本部 工博（正会員）

*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D（正会員）

しかし、クリープによるリラクセーションを考慮した温度応力を長期間にわたって精度良く解析するためには、2週間以上の載荷試験を行い、長期間の温度応力解析に対応できるクリープ式を構築する必要がある。そこで本研究では、応力強度比、載荷材齢をパラメーターとしたクリープ試験を行い、載荷後3週間まで計測を続けた。試験方法は引張載荷と圧縮載荷の2種類とし、それぞれの試験についてパラメーターとして応力強度比(=載荷応力/強度)を20%、40%の2水準、載荷材齢は1日、3日、5日の3水準とし、21日間の載荷試験を行った。試験は全行程において温度30℃、湿度98%で行い、得られたクリープ挙動をクリープひずみで評価し検討を行った。表2に今回行ったクリープ試験の試験ケースを示す。

3.2 供試体の作製方法

載荷試験には、圧縮試験、引張試験ともに、中心部分がφ7.5×13.4cmのドックボーン型供試体³⁾を用いた。また、クリープひずみと供試体温度を測定するために、供試体内部に埋め込み型ひずみ計と熱電対を設置した。載荷中は温度、湿度を制御したが、水分蒸発による乾燥収縮を防ぐために、供試体側面をアルミテープで被覆し、水分蒸発を防止した。養生方法は、打設後は温度20℃、湿度60%の恒温室内に24時間静置した後、温度30℃で所定材齢まで湿潤養生槽内に静置した。

表2 試験ケース

Case	応力強度比(%)	載荷材齢(日)	載荷期間(日)
圧縮	1	20	1
	2	20	3
	3	20	5
	4	40	1
	5	40	3
	6	40	5
引張	7	20	1
	8	20	3
	9	20	5
	10	40	1
	11	40	3
	12	40	5

21

3.3 載荷方法

圧縮クリープ試験には、恒温恒湿槽を有するレバー比1:40の二重てこ式圧縮クリープ試験機を用いて、温度30℃、湿度98%で試験を行った。

引張クリープ試験には、既報³⁾と同じてこ式クリープ試験機を用い、圧縮試験と同様に、温度30℃、湿度98%で試験を行った。

また、自己収縮等のクリープ以外のひずみは、同一環境内に静置した無載荷供試体により測定したひずみを、載荷供試体のひずみから差し引いて補正した。

3.4 試験結果

3.4.1 載荷期間とクリープひずみの関係

図1に、試験結果の一例として、Case.2(圧縮試験)、Case.8(引張試験)の、載荷期間とクリープひずみの関係を示す。図より、Case.2では、荷重載荷直後からクリープひずみは急激に増加し、載荷期間2日までに、最終クリープひずみ(載荷期間21日でのクリープひずみ)の約50%まで伸びたのに対して、Case.8では、載荷期間約6日で最終クリープひずみの50%まで伸びた。しかし、Case.2、Case.8ともに、クリープひずみは載荷期間15日ではほぼ収束した。また、他の全てのCaseについても、載荷期間15日以降のクリープひずみの伸びは、ほとんど見られなかった。

3.4.2 載荷材齢と最終クリープひずみの関係

図2に圧縮クリープにおける、最終クリープひずみと載荷材齢の関係を示す。図より、応力強度比が一定の条件では、載荷材齢が大きくなるにしたがってクリープひずみも大きくなる傾向にある。これは、応力強度比が一定の条件では、載荷材齢が大きくなるにしたがって載荷応力も大きくなるためである。しかし、その傾向は、載荷材齢3日以降は少なくなった。また、載荷材齢と、最終クリープひずみの間に、式(1)、(2)に示す指数関数の関係が成立することが確認された。

$$\varepsilon_{cr,20}(\tau_e) = 194.4(1 - \exp(-0.48\tau_e)) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cr,40}(\tau_e) = 610.7(1 - \exp(-0.27\tau_e)) \quad (2)$$

τ_e : 載荷材齢(日)

図3に引張クリープにおける、最終クリープひずみと載荷材齢の関係を示す。図より、圧縮クリープと同様に、応力強度比が一定の条件では、載荷材齢が大きくなる程クリープひずみは大きくなる傾向になった。また、載荷材齢と最終クリープひずみの間に、式(3)、(4)に示す指

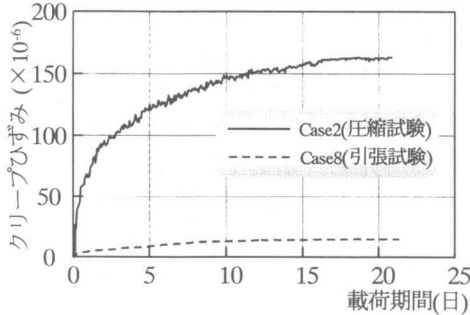


図1 クリープひずみと載荷材齢の関係

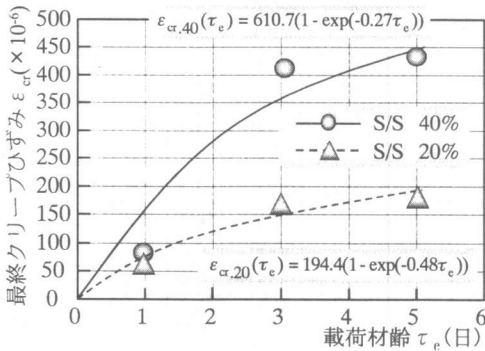


図2 最終クリープひずみと載荷材齢の関係 (圧縮クリープ)

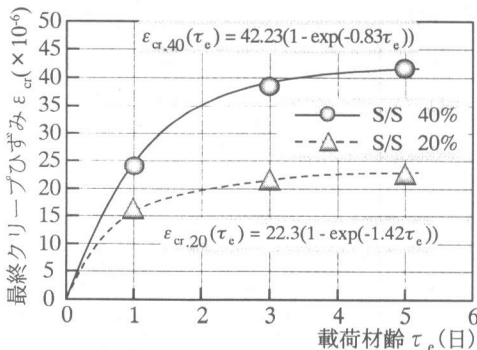


図3 最終クリープひずみと載荷材齢の関係 (引張クリープ)

数関数の関係が成立することが確認された。

$$\varepsilon_{cr,20}(\tau_e) = 21.3(1 - \exp(-1.42\tau_e)) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cr,40}(\tau_e) = 42.2(1 - \exp(-0.83\tau_e)) \quad (4)$$

τ_e : 載荷材齢(日)

4. クリープひずみの定式化

4.1 圧縮クリープ式

実験より得たクリープひずみと載荷期間の関係から、圧縮クリープにおける基本クリープ式を構築し、クリープに影響を与える要因についての補正係数を設定することにより、圧縮クリープ式を構築した。基本条件として、応力強度比 20%、載荷材齢 3 日、水セメント比 55%、細骨材率 44.6%、養生時・載荷時ともに温度 30℃ の試験結果を用いた。クリープモデルには既報²⁾に基づき Voigt 関数を用いた 5 要素レオロジーモデルを適用した。式(5)に、設定した圧縮クリープ式を示す。式中の各常数は、最小二乗法により設定した。また、除荷クリープに関しても、圧縮クリープ関数を除荷クリープ関数として用いた。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cr}(t_e, S/S, \tau_e) = & FS/S(S/S, \tau_e) \cdot FL(t_e) \cdot \\ & \{88.2(1 - \exp(-0.25t_e)) + \\ & 54(1 - \exp(-5.70t_e)) + 144t_e\} \quad (5) \end{aligned}$$

ε_{cr} : 圧縮クリープひずみ(×10⁻⁶)

t : 載荷期間(日)

τ_e : 載荷材齢(日)

$FS/S(S/S, \tau_e)$: 応力強度比による補正関数

$FL(t_e)$: 載荷材齢による補正関数

4.2 引張クリープ式

引張クリープ式についても、載荷材齢 3 日、養生温度 30℃、載荷温度 30℃、応力強度比 20% を基本条件として、このクリープひずみと載荷期間の関係を表わす基本クリープ関数を求め、補正係数を設定した。式(6)に、設定した引張クリープ式を示す。

$$\varepsilon_{cr}(t_e, S/S, \tau_e) = F_{S/S}(S/S, \tau_e) \cdot F_L(\tau_e) \cdot \{41.0(10 - \exp(-0.11t_e)) + 5.5(10 - \exp(-12.3t_e)) - 0.67t_e\} \quad (6)$$

ε_{cr} : 引張クリープひずみ($\times 10^{-6}$)

t : 載荷期間(日)

t_e : 載荷材齢(日)

$F_{S/S}(S/S, \tau_e)$: 応力強度比による補正関数

$F_L(\tau_e)$: 載荷材齢による補正関数

ここで得られた圧縮および引張クリープ式は、本実験結果からのみ求められたものであり、これまでのクリープ式¹⁾²⁾³⁾とは少し異なる。すなわち、まだ試験数が少ないためコンクリートの物性や応力条件が変化すると、その都度クリープ試験を実施して、クリープ式を求める必要がある。

5. クリープ関数を用いた温度応力解析

5.1 解析対象構造物

解析対象構造物は、図4に示す、地盤上に打設されたスラブ構造物とした。解析ケースは、スラブ幅を5m一定として、スラブ高さHを1m, 1.5mの2種類、スラブ長さLを5m, 15mの2種類に変化させ、これに対して拘束体(地盤)の弾性係数 E_R を $1.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, $5.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ の2種類に変化させた場合を組み合わせ、合計8ケースとした。さらに、それぞれのケースについて、地盤が構造物を拘束する効果を、外部拘束係数 R_N , R_{M1} , R_{M2} を用いて検討を行なった。表3に解析ケースを示す。また、このスラブ構造物は、実験に用いたものと同様の普通AEコンクリートから構成されているものとした。表4にコンクリートの物性値を示す。

5.2 解析手法

初めに、上記のスラブ構造物に対して、2次元有限要素温度解析法、およびCP法を用いて、クリープによるリラクゼーションを考慮しない温度応力解(以下、弾性解と称する)を求めた。次に、弾性解に対して、クリープ式を用いた初

期ひずみ法により、リラクゼーションの影響を考慮した温度応力解(以下、クリープ解と称する)を求めた。また、クリープ解との比較を行うために、RC示方書が提案している有効弾性係数を用いて、温度応力を算出した。(以下、RC示方書式解と称する)式(7)にRC示方書が提案する、有効弾性係数式⁴⁾を示す。この式は、温度応力解析に用いるコンクリートの静弾性係

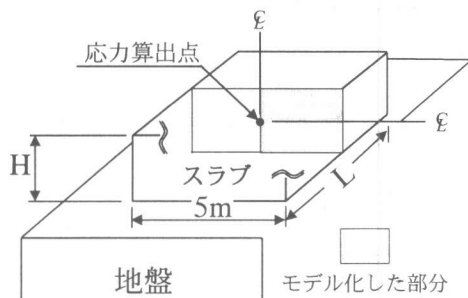


図4 解析対象構造物

表3 解析ケース

No	H(m)	L(m)	$E_R(\text{N/mm}^2)$	R_N	R_{M1}	R_{M2}	L/H
1	1.0	5.0	10000	0.35	0.8	1.5	5
2			50000	0.5	0.8	1.6	
3		15	10000	0.8	1.0	1.0	15
4			50000	0.9	1.0	1.0	
5	1.5	5	10000	0.25	0.2	1.2	3.3
6			50000	0.4	0.2	1.3	
7		15	10000	0.8	1.0	1.0	5
8			50000	0.9	1.0	1.0	

表4 コンクリートの物性値

	単位	
単位セメント量	kg/m ³	313.0
断熱温度上昇式 $Q=Q_{\infty}(1-\exp(-rt))$	Q_{∞}	47.4
	r	1.153
比熱	kcal/kg ^o C	0.26
熱伝導率	kcal/mh ^o C	2.0
ポアソン比		0.2
密度	kg/m ³	2400.0
熱膨張係数	1/ ^o C $\times 10^{-6}$	10.0
圧縮強度	N/mm ²	$\sigma_c=6.87\ln(X)+10.76$
引張強度	N/mm ²	$\sigma_t=0.602\ln(X)+0.9$
静弾性係数	N/mm ²	$E_c=0.947\ln(X)+1.37$

X: 有効材齢(日)

数を5日までの若材齢の期間は、若材齢コンクリートのクリープによる温度応力のリラクゼーションを考慮して、 $\phi(t)$ だけ低減するように規定しているものである。

$$E_e(t) = \phi(t) \cdot 4700 \cdot \sqrt{f'_c(t)} \quad (7)$$

$f'_c(t)$: 材齢 t 日における圧縮強度

$\phi(t)$: 材齢 3 日まで $\phi(t) = 0.73$

材齢 5 日以降 $\phi(t) = 1.0$

材齢 3 日から 5 日までは直線補間

5.3 解析結果

図 5～図 8 に、解析結果の一例として、上記の 3 つの解析値を比較したものを示す。図より、いずれのケースについてもほぼ同様の傾向を得た。圧縮域では、RC 示方書式解、クリープ解ともほとんど同じ値をとる結果となった。また、この区間ではクリープによるリラクゼーションの影響が大きく現れ、 $0.8\text{N/mm}^2 \sim 1.2\text{N/mm}^2$ 程度の応力低減があった。除荷域では、クリープ解の方が RC 示方書式解よりも若干ではあるが、リラクゼーション効果が大きく現れた。引張域ではいずれのモデル構造物においても引張応力の発生直後から、材齢 25 日程度までの間にクリープ解と RC 示方書式解の差が徐々に大きくなっていく結果となった。しかし、材齢 25 日以降はこの 2 つの解析値の差は安定しており、材齢 50 日でクリープ解の方が RC 示方書式解よりも $0.2 \sim 0.5\text{N/mm}^2$ 程度安全側の値を得た。これは、クリープ式を用いて、初期ひずみ法で解析を行った場合の応力の低減は、若材齢時に載荷される圧縮応力の低減分の影響が、RC 示方書に基づく解析よりも大きいと思われる。また、他の 4 ケースについても、同様の解析結果となった。

6 有効弾性係数の算出

6.1 有効弾性係数の算出方法

クリープ解を弾性解で除してその低減率（弾性係数比）を求め、この値を静弾性係数値に乗ずることにより、温度応力における有効弾性係

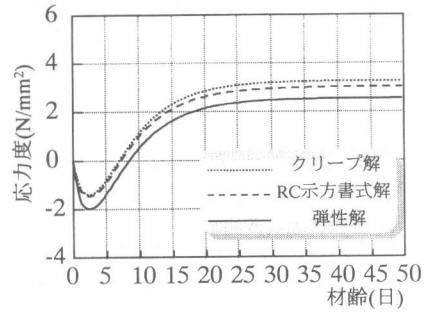


図 5 温度応力解析結果

解析 No. 1

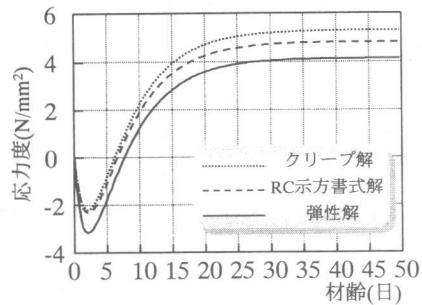


図 6 温度応力解析結果

解析 No. 3

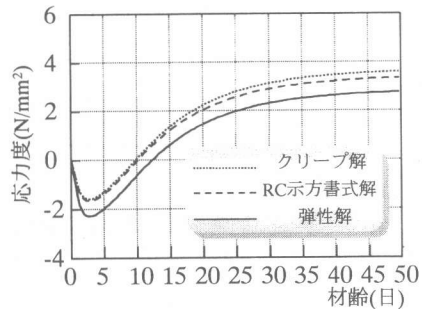


図 7 温度応力解析結果

解析 No. 5

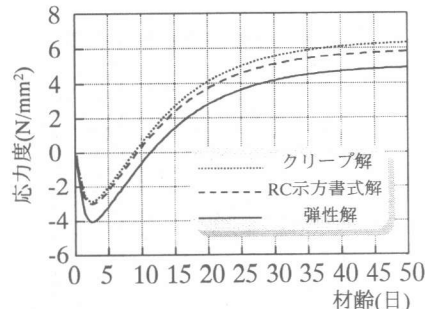


図 8 温度応力解析結果

解析 No. 7

数が算出できる。式(8)に有効弾性係数式を示す。

$$E_{eff}(t) = R(t) \cdot E(t) \quad (8)$$

$E_{eff}(t)$: 有効弾性係数

$E(t)$: 静弾性係数

$R(t)$: 弾性係数比(低減率)

6.2 弾性係数比の検討

弾性係数比は、材齢とともに変化するため、ステップごとの応力増分に対して算出した。また、応力が圧縮から引張に反転することや反転する時期が異なることなどから、数式の形で算出するのが困難であるためにここでは、低減率を算出し、その傾向をつかんだ上で平均的な弾性係数低減率を算出した。図9に、解析 No.1 に対して算出した弾性係数比を示す。図に示すように、載荷状態を、圧縮、除荷、引張の3つの部分に分けると、それぞれの載荷状態に対する弾性係数比は、ほぼ一定の値を取ることが明らかになった。そこで、この値を各載荷状態における弾性係数比とし、残りの11ケースについ

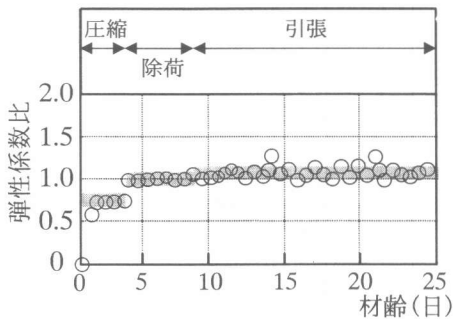


図9 弾性係数比

表5 弾性係数比解析結果

解析No	圧縮	除荷	引張
1	0.75	0.95	1.05
2	0.7	1.0	1.1
3	0.65	1.0	1.1
4	0.7	1.0	1.0
5	0.65	1.1	1.05
6	0.7	1.0	1.05
7	0.75	1.05	1.1
8	0.7	1.0	1.05
平均値	0.7	1.0	1.05

ても、同様の方法で解析を行い、その結果をまとめたものを、表5に示す。これより、構造物のL/H、および拘束体(地盤)の弾性係数の違いによる弾性係数比への影響はほとんどなく、それぞれの載荷状態における弾性係数比の平均値を求めると、圧縮時0.7、除荷時1.0、引張時1.05となった。

7. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 1) 実験に基づいたクリープ式を用いた温度応力解析は、RC示方書式に基づく温度応力解析よりも、圧縮域での応力低減効果が大きく、最終引張応力は大きくなる。
- 2) リラクゼーションによる応力低減は、若材齢時に載荷される圧縮応力の低減が大きい。
- 3) 応力の発生パターンが同一であれば、応力状態を区分して補正係数を定めることにより、クリープによるリラクゼーションの影響を厳密に考慮できると思われる。
- 4) 静弾性係数から有効弾性係数に換算する場合の補正係数は、圧縮時0.7、除荷時1.0、引張時1.05となった。

参考文献

- 1) 服部, 入矢, 上原, 梅原: 若材齢コンクリートにおける引張クリープの温度依存性に関する研究, コンクリート工学年次報告論文集, Vol.20, No.1, pp.1133-1138, 1998.6
- 2) 平本, 入矢, S.Gupta, 梅原: 若材齢コンクリートのクリープの材齢および載荷応力依存性, コンクリート工学年次報告論文集, Vol.19, No.1, pp.775-780, 1997.7
- 3) 根木, 入矢, 梅原: 若材齢のクリープがコンクリートの引張強度に与える影響に関する検討, コンクリート工学年次報告論文集, Vol.21, No.2, pp.757-762, 1999.7
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書(施工編), 17章マスコンクリート, pp173-193, 1996.3