

若材齢コンクリートの水和反応進行の影響 を考慮した引張クリープ推定式の提案

吉武 勇¹・中村秀明²・永井泉治³・浜田純夫⁴

¹学生会員 修士(工学) 山口大学大学院理工学研究科博士後期課程(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

³正会員 株式会社エイトコンサルタント(〒700-0087 岡山県岡山市津島京町 3 丁目 1-21)

⁴正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

マスコンクリートや高強度コンクリートなど、若材齢時にひび割れの発生が懸念されるコンクリートでは、若材齢時の引張クリープ特性の明確化が必要不可欠である。若材齢コンクリートの引張クリープ特性に最も大きな影響を及ぼす要因として水和反応の進行が挙げられるが、既往の研究においては、その影響を考慮したクリープ推定式の提案はあまり見受けられない。本研究は、若材齢時における水和反応の進行の影響を考慮に入れた引張クリープ推定式の提案を行うとともに、その引張クリープ推定式によりマスコンクリートの温度応力緩和に及ぼす影響について検討を行った。

Key Words : mass concrete, early age concrete, hydration, tensile creep strain, specific creep

1. はじめに

コンクリートのクリープに関する既往の研究では、コンクリート部材の変形予測や、プレストレストコンクリートにおける導入プレストレスの減退程度の把握を行う目的から、圧縮クリープに関する研究が引張クリープに関する研究に比べて極めて多い。

また、コンクリートのひび割れ発生予測を対象とする引張クリープに関する研究においても、そのほとんどが十分に強度が発現したコンクリートを用いた研究が多く、クリープ・リラクゼーション挙動が顕著な若材齢時における引張クリープに関する研究は極めて少ないのが現状である。しかしながら、マスコンクリートにおける温度ひび割れや高強度コンクリートの自己収縮ひび割れ等に代表されるように、若材齢時に生じるひび割れ発生例も少なくなく、若材齢コンクリートの引張クリープ予測は、コンクリート構造物の設計にあたり極めて重要な要因のひとつに挙げられる。

若材齢コンクリートの引張クリープに関する既往の研究では、高強度コンクリートの自己収縮力を想定した伊藤らの研究¹⁾、マスコンクリートの温度応力を想定した森本らの研究²⁾および入矢・梅原らの一連の研究^{3)~6)}が挙げられる。これらの研究成果によりマスコンクリートの温度応力解析においても、ク

リープを強度の関数として取り扱う必要があることがわかった。ここで若材齢コンクリートのクリープ特性に最も大きな影響を及ぼすと考えられる要因は、若材齢時に最も顕著なコンクリートの水和反応の進行(強度の増進)であると思われる。しかしながら、若材齢時における載荷期間中の水和反応の進行を考慮した研究例は少なく、そのクリープ推定式の提案はあまりなされていない。特にマスコンクリート構造物のような部位ごとに温度履歴が異なり、それに伴い水和反応の進行が異なるコンクリートにおいては、その影響を考慮できるクリープ推定式が要求される。そのためには、クリープ試験期間中における水和反応の進行の影響を排除できる環境下において実験を行う必要があるものと考えられる。

本研究は、試験期間中における水和反応の進行がクリープに及ぼす影響を把握するため、低温環境下において水和反応の進行を抑制した状態における若材齢コンクリートの引張クリープ試験を行い、その実験結果をもとに若材齢コンクリートの引張クリープ推定式の提案を行った。また、本研究で提案する引張クリープ推定式を用いて、比較的活発な水和反応進行過程における実験結果との適合性について検討するとともに、マスコンクリートの温度応力緩和にもたらずクリープ推定式の影響の明確化を図った。

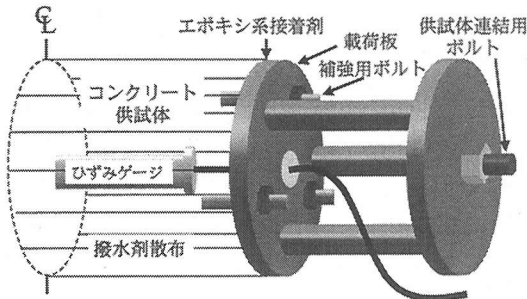


図-1 実験供試体詳細図

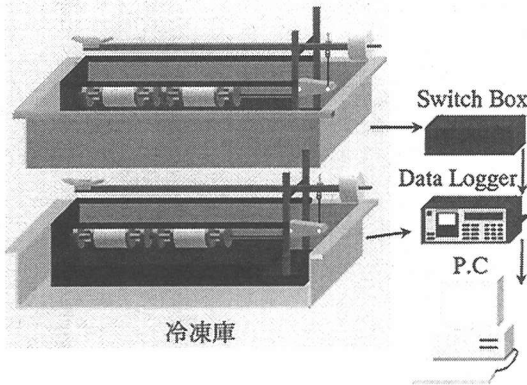


図-2 実験方法

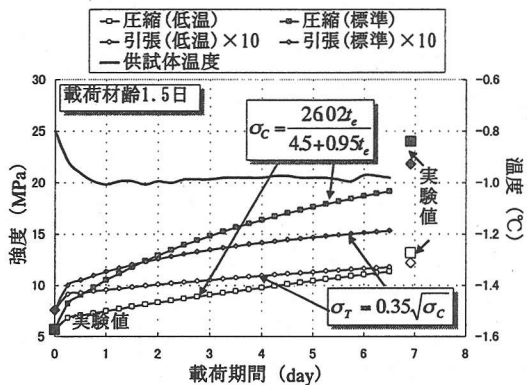


図-3 試験中の強度発現推定と供試体温度の一例

2. 水和反応抑制下における引張クリープ実験

(1) 実験方法

実験に用いたコンクリート供試体は $\phi 10 \times h 20 \text{cm}$ の円柱型供試体であり、中心部には測温機能を有する埋め込み型ひずみゲージが埋設されている。また図-1に示されるように供試体表面には、水分の浸入を防ぐために撥水処理が施されており、供試体の端面には、補強用ボルトが埋め込まれている。供試体

表-1 実験項目

応力強度比 (%)	荷重材齢(日)					
	1.5	2	3	5		
セメントの種類	普通	20	○●	○●	○●	
		30	○	○	○	
		40	○●	○●	○●	破断
		50	○	○	破断	破断
高炉	40	20	○	—	○	
		40	○	○	—	○

○低温養生(平均温度 -1°C)、●標準養生(温度 20°C)

表-2 コンクリートの配合条件

配合記号	セメント	単位量 kg/m^3				混和剤 l/m^3	
		W	C	S	G	AE	防凍
○30	普通	165	300	812	1047	0.25	6.0
B30	高炉	165	300	814	1050	0.25	6.0

表-3 使用材料の諸物性値

セメント種類	比重	比表面積 cm^2/g	細骨材	F.M	
				比重	最大寸法
普通	3.15	3200	粗骨材	2.60	2.36
高炉	3.04	3950		2.72	20mm

は補強用ボルトとエポキシ系接着剤によりステンレス製の荷重板に取り付けられている。ここで実験供試体は打設後1日で脱型し、荷重まで標準養生(20°C 水中)を施したものである。なお、実験は若材齢コンクリートの水和反応を抑制する目的から、平均室温 -1°C ($\pm 0.25^{\circ}\text{C}$)の冷凍庫内に設置された大型水槽内において、1:40のレバー式引張クリープ試験装置を用いて行った(図-2参照)。また、本研究ではクリープ試験供試体と同環境下にひずみゲージを埋設した無荷重供試体を設置し、両者のひずみ差から荷重によるひずみを求めた。ひずみ変化の測定は、パソコンのプログラムによって15分毎にデータロガーから GPIB インターフェースを介してパソコンのハードディスクに記録した。ここで引張クリープ試験の荷重荷重の決定にあたり、引張クリープ試験用供試体と同時に作製したコンクリート供試体($\phi 10 \times h 20 \text{cm}$)を用いて、引張クリープ試験開始直前に圧縮ヤング率・割裂引張強度試験を行った。ここで、クリープ試験の荷重時における非弾性ひずみを考慮するため、この圧縮ヤング率試験結果を基に、クリープひずみを算出した。また、引張クリープ試験終了時においても、標準養生および冷凍庫内の水槽で養生(以下、

低温養生と略す)されたコンクリート供試体について強度試験を行い、水和反応の抑制程度の把握を行った。一例として、載荷材齢1.5日の場合におけるクリープ試験期間の強度の経時変化(推定)および供試体温度を図-3に示す。この結果より、標準養生に比べ低温養生の強度発現性は著しく小さく、低温養生を施すことで水和反応の進行を抑制できるものと考えられる。なお、実験条件としては、載荷時の材齢(以下、載荷材齢と表す)を1.5, 2, 3, 5日とし、応力強度比(載荷応力/載荷時のコンクリートの強度)を20, (30), 40, (50)%について実験を行った。本研究で行った実験項目の詳細を表-1に示す。

(2) 使用材料と配合条件

本研究では、水和反応の進行が引張クリープ現象に与える影響を検討する目的から、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント(B種)を使用した(以下、それぞれ普通、高炉セメントと表す)。本研究で作製したコンクリートの配合条件および使用材料の諸物性値をそれぞれ表-2, 表-3に示す。

3. 若材齢コンクリートのクリープ構成式

コンクリートのクリープ現象の定式化には、弾性バネ、粘性ダッシュポットを有するMaxwellモデルやVoigtモデルがしばしば利用されている⁹⁾。しかしながら、これらのモデル単体では、実際のコンクリートの挙動を的確に表現することは困難である。そのため、本研究では図-4に示される3つのレオロジーモデル(以下、それぞれVMモデル、VVモデル、VVDモデルと表す)を用い、各実験結果について式(1)~(3)に示される各クリープ推定式の諸係数の算出を試みた。また、クリープ推定式の未定係数をできるだけ少なくかつクリープ現象を的確に表現する目的から、本研究では別途、式(4)および式(5)に示される式を用いて回帰を行った。なお、実験値の回帰にあたり、本研究では実験値との2乗誤差を最小となるよう係数選定を行う最小2乗法を用いた。

$$J = a + b[1 - \exp(-ct)] + dt \quad (1)$$

$$J = a[1 - \exp(-bt)] + c[1 - \exp(-dt)] \quad (2)$$

$$J = a[1 - \exp(-bt)] + c[1 - \exp(-dt)] + et \quad (3)$$

$$J = a + b[1 - \exp(-ct^d)] \quad (4)$$

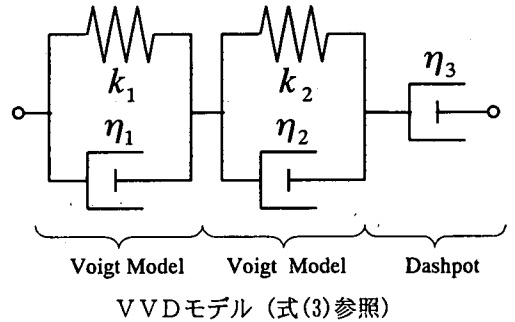
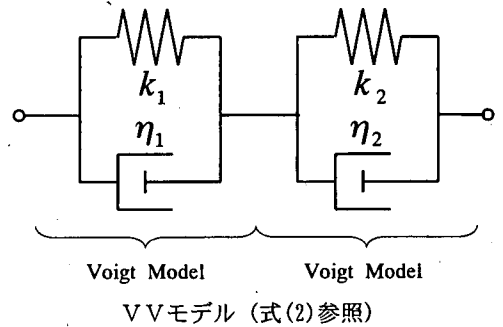
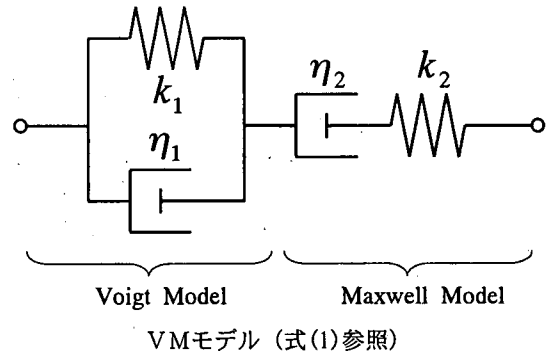


図-4 粘弾性レオロジーモデル

$$J = a\sqrt{t} + b[1 - \exp(-ct^d)] \quad (5)$$

ただし、 J はSpecific Creep(単位クリープ: μ/MPa)であり、 a, b, c, d, e は実験定数、 t は載荷期間(day)を示す。

4. 結果と考察

(1) Specific Creep(単位クリープ)の回帰

載荷に伴うひずみを回帰する場合、応力の関数としてとらえるのは非常に困難かつ複雑であるため、一般的には応力の影響を無次元化できるSpecific

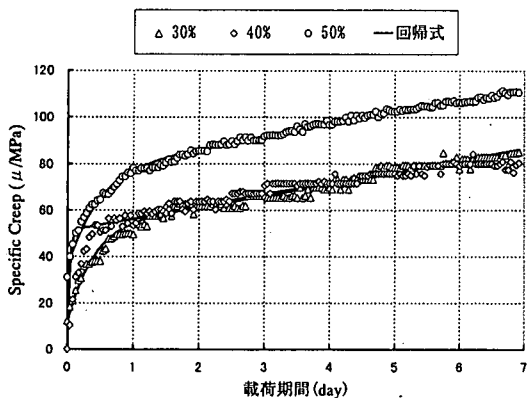


図-5 VMモデルによる Specific Creep の回帰結果

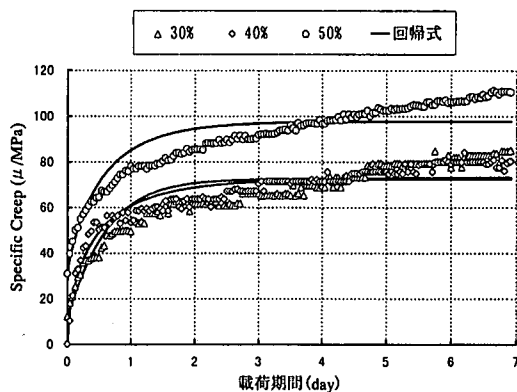


図-8 式(4)による Specific Creep の回帰結果

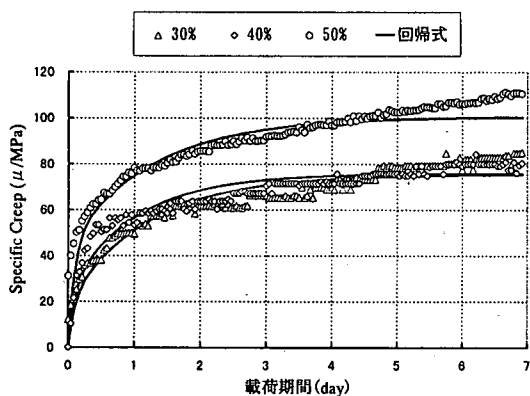


図-6 VVモデルによる Specific Creep の回帰結果

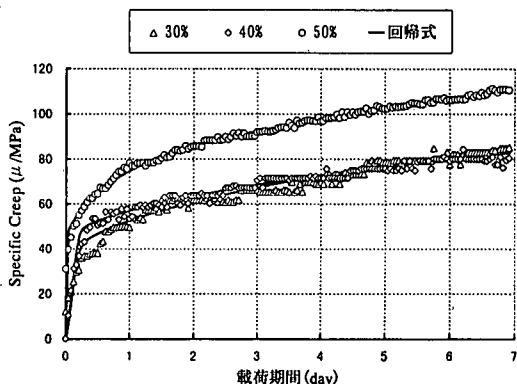


図-9 式(5)による Specific Creep の回帰結果

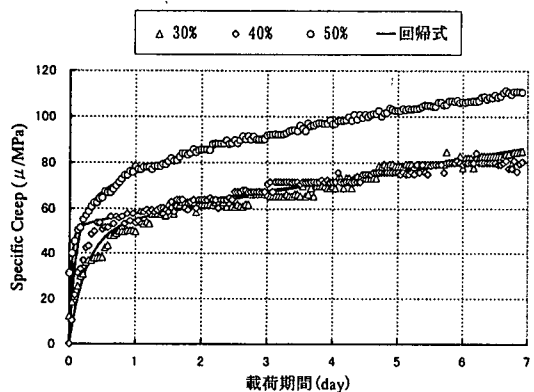


図-7 VVDモデルによる Specific Creep の回帰結果

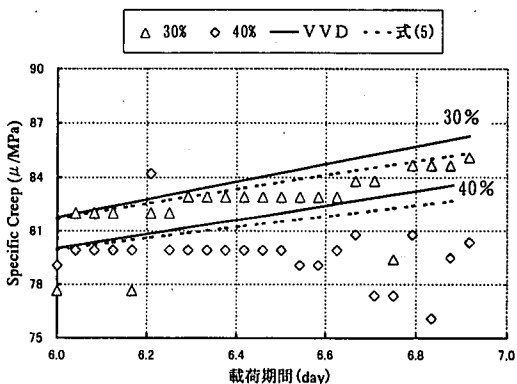


図-10 VVDモデルおよび式(5)の載荷長期時の適合性

Creepやクリープ係数がしばしば用いられる。特にマスコンクリートの温度応力解析など、常時作用する応力が変動する場合には、このSpecific Creepが有用なものになる。

ここで実験によって得られた結果をもとに算出されたSpecific Creep(載荷材齢1.5日)に対し、式(1)～

式(5)の各式で回帰を行ったところ、それぞれ図-5～図-9に示される結果が得られた。なお、Specific Creepの回帰にVMモデルを介した式(1)や式(4)を適用したのは、載荷瞬間におけるクリープひずみ(瞬間クリープひずみ)を考慮するためである。本来ならば、クリープひずみはバネ要素を用いて表されないが、この量が非常に小さく且つ瞬間的なものであるため、

本研究ではパネ要素が最も適しているものと考え、これを用いた。一般的にクリープ回帰に用いられるレオロジーモデルを介した式(1)~(3)では、載荷初期において特に大きな差は見受けられないが、載荷期間5日程度以降ではVVモデルを介した式(2)は一定値に収束する傾向があり、逆にVMモデルの式(1)、VVDモデルの式(3)は実験値と比べ徐々に大きな値を推定する傾向がある。例として載荷期間6日以降における式(3)の回帰結果を図-10に示す。これは両式の第2項および第3項である dt 、 et の影響が大きいものと推察される。

また、図-8に示される式(4)を用いた回帰結果では、徐々にクリープひずみ分が増加する実験値に対し、比較的早期に一定値に収束する傾向がみられ、載荷期間5日以降では $5\sim 10\mu\text{MPa}$ 程度小さい値となっている。式(5)の回帰結果(図-9参照)では、載荷初期から長期に渡って、実験値とほぼ一致していることがわかる。特に図-10に示されるように載荷期間が長い時(ここでは6日を例としている)のひずみに対し、VMモデルやVVDモデルに見受けられる過剰な推定ひずみ値に比べ、比較的精度よく追従できているものと思われる。これは、クリープひずみの発生速度が徐々に小さくなる特性を、式(5)の第1項である $a\sqrt{t}$ を用いることで精度よく回帰できたものと推察される。

この結果より、若材齢コンクリートの引張クリープ現象を回帰するにあたり、本研究で提案する式(5)を用いることで比較的精度よく推定できるものと思われる。クリープひずみと載荷応力は非線形な関係にあるが、応力強度比40%以下において両者の非線形性は非常に小さいと考えられるため、本研究では線形として取り扱った。また、応力強度比40%以上のSpecific Creepに関しては、線形性の成立が認められる応力強度比40%以下のSpecific Creepに比べて大きくなることが予想される。しかしながら、高応力域(応力強度比40%以上)では実際に生じるクリープは線形式による推定クリープより大きくなり、温度ひび割れ発生に対し安全側の指標となり得るため、本研究ではクリープの応力に対する非線形性を特に考慮していない。

(2) 引張クリープ推定式の構築

コンクリートは特に若材齢時にその力学的特性が大きく変化するものである。現状の若材齢コンクリートのクリープ推定式は、特に水和反応の進行の影響を考慮したものではなく、ただ載荷時の強度のみに大きく依存したクリープ推定式である^{3)~5)}。そこで本研究では、水和反応の進行の影響を排除する目的

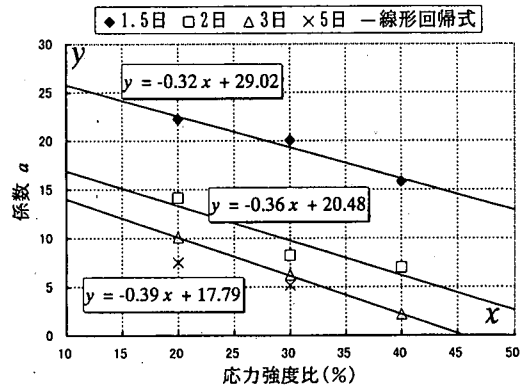


図-11 式(5)-係数 a と応力強度比の関係

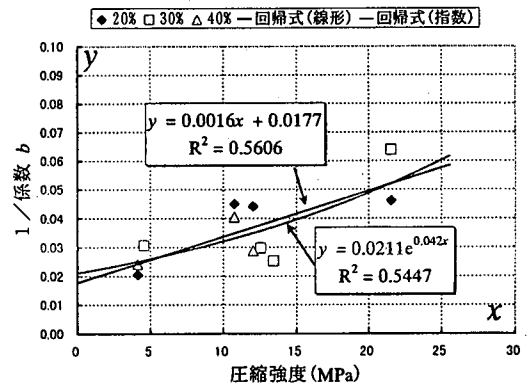


図-12 式(5)-係数 b と圧縮強度の関係

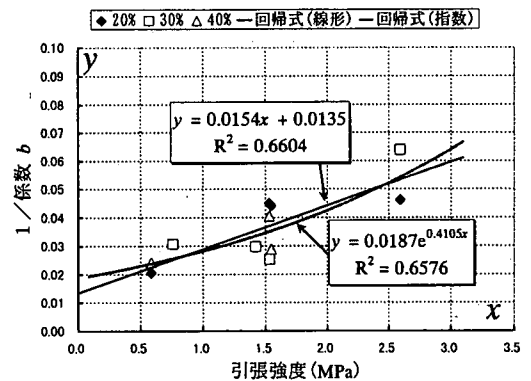


図-13 式(5)-係数 b と引張強度の関係

から、低温環境下において水和反応を抑制したコンクリートに対し引張クリープ試験を行い、そこで得られた結果をもとに様々な推定式の適用性について検討を試みた。その結果、若材齢コンクリートのSpecific Creepは、式(5)で示される回帰式を用いることが適当であることがわかった。ここで、この結果をもとに実験値の回帰結果より得た諸係数について

影響を及ぼすパラメータを整理し、式(5)に示される引張クリープ推定式を、一般的なコンクリートに対し適用を可能にするとともに、若材齢時における水和反応の進行の影響を考慮できる引張クリープ推定式の構築を試みた。

a) 係数 a の特性

コンクリートのクリープ現象に対し、強度の1/3程度の応力域では、クリープひずみは荷重応力に比例し、その比例定数は圧縮・引張とも同じであるというDavis-Granvilleの法則が最も簡便であるため¹⁰⁾、実用上広く利用されている。しかしながら、実際のコンクリートでは、Davis-Granvilleの法則の成立範囲内においても、応力強度比が高くなるほど荷重初期時にクリープひずみが大きく発生するとともに、早期に一定値に収束する傾向があるため、必ずしも荷重過程(特に荷重初期)におけるクリープひずみと荷重応力の線形性の成立は認められない。このことは、クリープひずみの発生が比較的一定に収束した場合において、ひずみ発生速度を支配する式(5)の係数 a に着目すれば、応力強度比が高まるにつれて係数 a が小さくなることを意味している。また荷重材齢の延長に伴い強度は増進し、コンクリートは粘性流動的性質の占める割合が小さくなるため、係数 a は全体的に徐々に小さくなるものと予想される。

これらの予想をもとに係数 a と応力強度比の関係を整りしてみると図-11の結果が得られた。また、荷重材齢5日の結果は、荷重材齢3日の結果に比べ有意な差がほとんど認められなかった。このことより荷重材齢3日以降は荷重材齢3日の結果を用いることで代用できるものと考えられる。図-11の結果よりクリープひずみと荷重応力に線形性が成立する範囲内の応力域では、係数 a と応力強度比に線形の関係があることがわかる。またその勾配は-0.32~-0.39程度とほぼ一定であることがわかる。なお、引張クリープ式の構築には勾配の平均値である-0.36を用いることとする。厳密には、係数 a はクリープ量を左右するものであるが、次に述べる係数 b ほどその影響は大きくないため、本研究では係数 a を応力強度比の関数として取り扱った。また応力強度比が高まるにつれ、クリープ量を小さく推定することができるため、温度ひび割れ発生に対し比較的 safety 側の指標となり得るものと考えられる。

b) 係数 b の特性

係数 b は、荷重過程全般に渡ってSpecific Creep量に対する影響が大きい。また引張クリープひずみと荷重応力の線形性が成立する範囲内において、クリープひずみの発生が安定した時のSpecific Creepは応力強度比(およそ40%以下)によらずほぼ一定である。

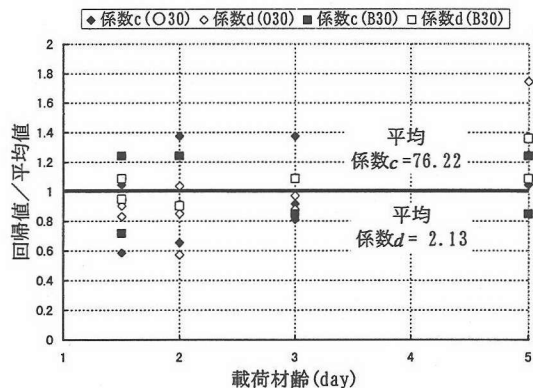


図-14 係数 c , d のばらつき

表-4 係数 c , d の影響 ($a=10, b=20$ の場合)

荷重 期間 hour	基準		$c(-40\%)$		$c(+40\%)$		$d(-20\%)$		$d(+20\%)$	
	c	d	c	d	c	d	c	d	c	d
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	9.3	7.0	11.2	16.3	5.4					
4	20.3	16.8	22.2	23.5	14.9					
6	24.6	23.2	24.9	25.0	22.8					
8	25.8	25.5	25.8	25.8	25.6					
10	26.5	26.4	26.5	26.5	26.4					
12	27.1	27.1	27.1	27.1	27.1					
14	27.6	27.6	27.6	27.6	27.6					
16	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2					

そのため、係数 b は応力強度比によらず、荷重時におけるコンクリートの強度によって一定の値をとるものと考えられる。また、係数 b は係数 a 同様に強度増進に伴い小さくなることが予想される。本研究では係数 b とコンクリートの強度に反比例の関係があると仮定し、係数 b の逆数と荷重時におけるコンクリート強度の関連性について検討した。

図-12と図-13はそれぞれ荷重時のコンクリートの圧縮強度、引張強度と係数 b の逆数について整理したものである。両者の比較を行うと、若干ながら引張強度で整理した図-13のほうが、 R^2 値(寄与率: 相関係数の2乗値)が大きく、ばらつきが少ないことがわかる。しかしながら、一般的にマスコンクリートの温度応力解析において、コンクリートの引張強度やヤング係数等は、全て各(有効)材齢における圧縮強度をもとに求められており¹¹⁾、(有効)材齢の進行に伴って変化する圧縮強度を用いてクリープ量を推定するほうが直接的かつ簡易的であると思われる。したがって引張クリープ推定式の構築には、係数 b の逆数と各(有効)材齢における圧縮強度の関係式を用いることが望ましいものと考えられる。また、両図には得られた結果に対し、線形回帰および指数回帰を行っているが、両者に大きな差がないことから、本

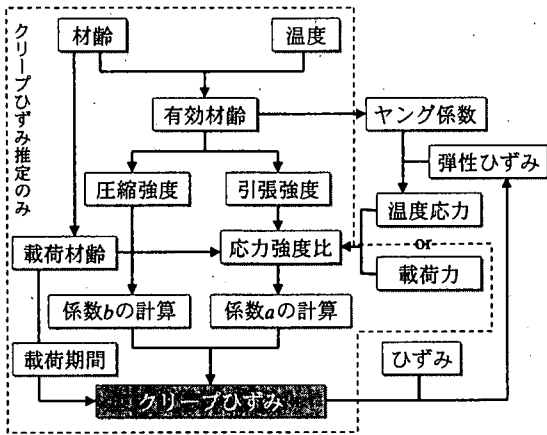


図-15 引張クリープひずみ推定フロー

研究では引張クリープ推定式の構築にあたり、線形回帰式を適用することとした。

c) 係数c, 係数dの特性

係数cおよび係数dはいずれもクリープひずみ発生速度に関する定数のひとつであるが、クリープひずみに対する影響度は係数aや係数bの影響度ほど大きなものではないと考えられる。ここで、係数cおよび係数dについて、両者の平均値からのばらつきを図-14に示す。この結果より係数c, dがそれぞれ-40~+40%, -20~+20%程度のばらつきがあることがわかる。しかしながらこのばらつきを考慮して推定したSpecific Creepには、比較的荷重の初期に影響が現れるのみで、あまり大きな影響はみられなかった(表-4参照)。そのため、本研究ではクリープ推定式の構築にあたり、得られた全ての結果の平均値である係数c(c=76.22)と係数d(d=2.13)を用いることとした。

d) 引張クリープ推定式の提案

以上の結果をまとめ、定式化を行うと式(6)~(8)に示されるものとなる。この引張クリープ推定式は、図-15に示されるように荷重期間中のコンクリートの強度や強度増進に伴う実質的な応力強度比等をパラメータとしているため、水和反応の進行の影響を考慮できるものと思われる。

$$J = a \left(\frac{S}{\sigma_T}, \tau \right) \sqrt{t} + b(\sigma_c) \left[1 - \exp(-76.22t^{2.13}) \right]$$

(6)

$$a \left(\frac{S}{\sigma_T}, \tau \right) = -0.36 \frac{S}{\sigma_T} + \begin{cases} 29.02 \dots (\tau = 1.5) \\ 20.48 \dots (\tau = 2) \\ 17.79 \dots (\tau \geq 3) \end{cases}$$

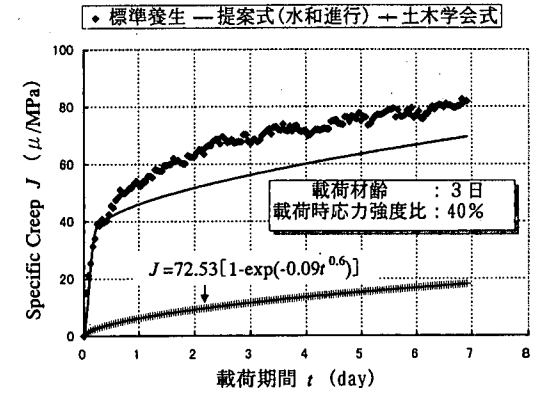
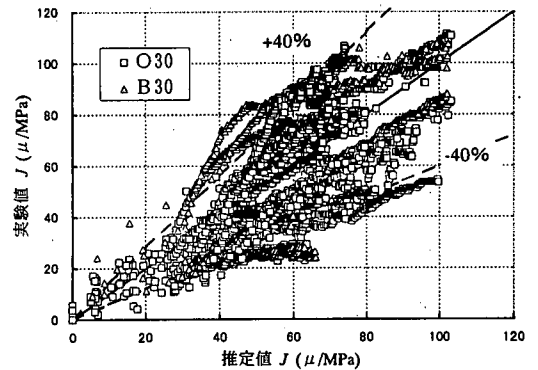
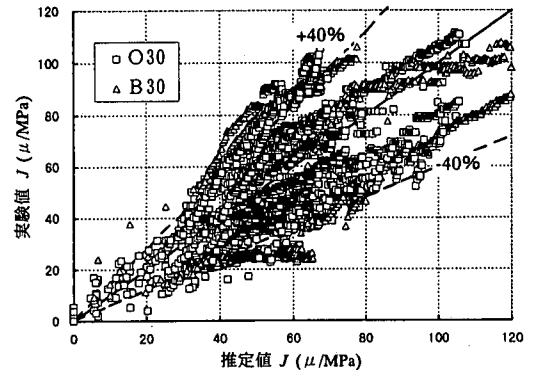


図-16 引張クリープ提案式と実験値の適合性



A) 28日強度からの推定



B) 荷重時強度からの推定

図-17 引張クリープ提案式のばらつき

$$b(\sigma_c) = \frac{1}{0.0016\sigma_c + 0.0177}$$

(8)

ただし

J : Specific Creep (μ/MPa)

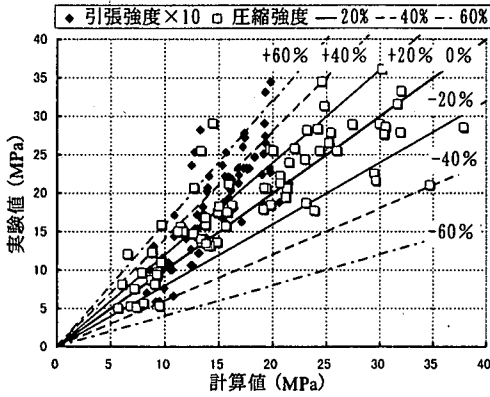


図-18 若材齢コンクリートの強度推定値のばらつき

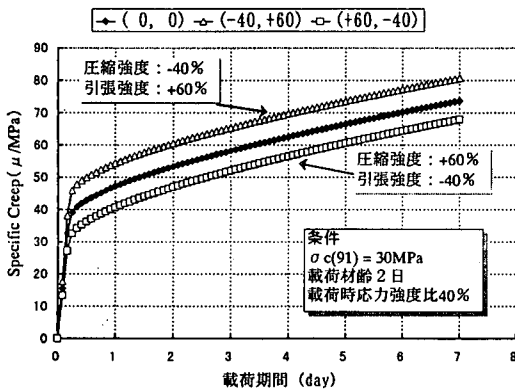


図-19 強度のばらつきによるクリープ推定値への影響

$$\frac{S}{\sigma_T} : \text{応力強度比 (\%)}$$

τ : 載荷材齢 (day)

σ_c : 圧縮強度 (MPa)

t : 載荷期間 (day)

である。

ここで、載荷材齢3日、載荷時における応力強度比40%の条件のもと、式(6)~(8)を用いて標準養生20℃におけるSpecific Creepの推定を行った。なお、Specific Creepの推定にあたり、水和反応の進行過程を考慮するには、載荷期間におけるコンクリートの強度増進性を定式化しなければならない。そこで本研究では、コンクリート標準示方書に記載されている式(9)~(11)を用いて、コンクリートの圧縮・引張強度の材齢変化を簡易的に算出した¹¹⁾。

$$t_e = \frac{\int_0^{t'} (\theta + 10) dt}{30} \quad (9)$$

$$\sigma_c(t_e) = \frac{t_e}{\alpha + \beta t_e} \sigma_c(91) \quad (10)$$

$$\sigma_T(t_e) = 0.35 \sqrt{\sigma_c(t_e)} \quad (11)$$

なお、 t' 、 t_e 、 θ 、 $\sigma(t_e)$ はそれぞれ材齢(day)、有効材齢(day)、コンクリートの温度(℃)、強度(MPa)を表し、添字C、Tはそれぞれ圧縮、引張を意味する。また、 α 、 β は普通セメントの場合、それぞれ4.5および0.95であり、高炉セメントの場合ではそれぞれ6.2、0.93である。

具体的な算定方法としては、標準養生20℃で用いた実験供試体と同時に作製した円柱供試体(φ10×h20cm)の材齢28日圧縮強度より推定される材齢91日強度を算出し、その結果をもとに載荷材齢3日における圧縮・引張強度を求めた。そして載荷期間の経過に伴い水和反応が進行することから、積算温度に基づく有効材齢の関数である式(9)~(11)より推定されるコンクリートの引張強度から、実質的な応力強度比を算出し、各計測間隔における係数aを求めた。また式(10)により推定される圧縮強度を基に、係数bの算定を随時行った。このように本研究で提案する引張クリープ推定式は、一般的な温度応力解析において使用される強度推定式をパラメータとして用いるため、比較的容易に引張クリープの影響を考慮できるものと考えられる。

ここで図-16にSpecific Creepの実験結果および推定値の比較を示す。なお、推定値は本研究で提案する引張クリープ推定式およびコンクリート標準示方書¹²⁾に記載されたクリープ評価式(図中において土木学会式と略す)である。ここで、土木学会式によるクリープの推定値は、本実験値に比べ非常に小さい値を推定していることが分かる。これは土木学会式が基本的に強度が長期材齢コンクリートの圧縮クリープ試験結果に基づいているためと思われる。したがって、若材齢コンクリートの引張クリープに適用するに際し、本研究の提案式に比べ土木学会式はクリープ量を過小に評価する傾向がみられるものと予想される。また、この図より載荷初期において、本研究の提案式による推定値は実験値と比較的良く一致していることがわかる。しかしながら、載荷期間が長くなるにつれて、徐々に本研究で提案する推定値が実験値より下回る傾向がみられた。本推定値は低温環境下におけるクリープ実験から求めており、クリープ現象の温度励起特性を考慮できないため、同じ水和反応進行過程においても標準養生のクリープより小さい値を推定する傾向がある。しかしなが

らクリープ量を過小評価するということは、温度応力の算定に限れば、ひび割れ発生に対し安全側の指標となり得るため、本提案式では、特にこのクリープの温度励起特性について考慮していない。本提案式に対して温度の影響があるのは、水和の進行に関する有効材齢の算出のみである。なお、このクリープの温度励起特性の定式化に関しては、今後研究を進めて行く予定である。また、クリープの推定に用いるコンクリートの強度推定式にもばらつきがみられ、これらの原因によって実験値と推定値の差は生じたものと推察される。

ここで、本研究で提案する引張クリープ推定値と実験値のばらつきを定量的に評価するため、推定値と実験値のばらつきについて検討した(図-17参照)。なお、この実験結果は各養生(低温養生、標準養生)における載荷後1~7日に得られた実験データであり、強度推定の基となる材齢91日強度をA)28日強度で算定した場合、およびB)載荷時の強度から算定した場合についてまとめている。阪田ら¹³⁾は、CEB/FIP-90式やBazant式などの線形クリープ予測式に基づいた推定値に対し、実験値は±40%程度のばらつきを有することを報告している。図-17からわかるように、本研究で提案する引張クリープ推定式も、他の線形クリープ推定式同様に約40%程度のばらつきを有する結果となった。また、同図には高炉セメントを用いた場合(配合記号B30)におけるばらつき程度も示しており、図よりセメントの違いによる推定精度の差はみられないことがわかる。したがって引張クリープ推定にあたり、セメントの違いに伴う補正は必要ないものと考えられる。

ここで、クリープ推定値がばらつく最も大きな原因のひとつとして考えられる若材齢コンクリートの強度推定式と実験値の比較を図-18に示す。なお、同図は若材齢(材齢7日まで)における標準養生、低温養生および浅上らの研究¹⁴⁾による断熱養生(断熱温度上昇過程)を行ったコンクリートを対象としている。この図より強度推定値は、実験値に比べおよそ-40~+60%程度ばらつきを有することがわかる。特に引張強度推定値のほとんどは、実験値を下回る傾向がみられた。これは、推定式による引張強度は安全側の値を算出するように係数0.35にされており、実際の引張強度より2割程度低減されているため¹¹⁾、本研究により得られた実験結果よりも下回る結果となったものと推察される。

これらの実験結果に基づきコンクリートの強度のばらつきがクリープ推定値に及ぼす影響について検討するため、圧縮・引張強度をそれぞれ強度推定値の-40%および+60%分加算された引張クリープの推

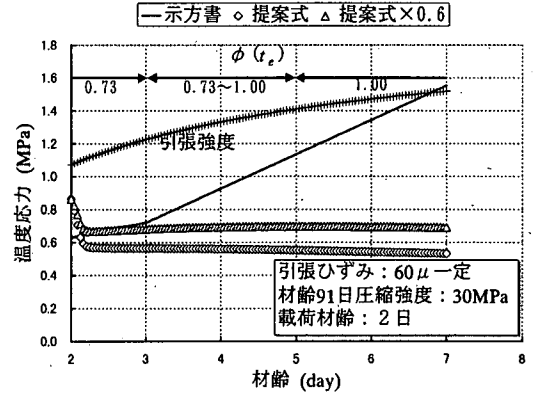


図-20 クリープを考慮した温度応力算定結果の一例

定を行った。図-19に材齢91日圧縮強度30MPa、載荷材齢2日および載荷時応力強度比40%の場合における推定結果を示す。なお同図の凡例において、括弧内の2つの数字はそれぞれ圧縮、引張強度の増加分(%)を表す。この結果より、載荷材齢2日においてコンクリートの推定強度が-40~+60%異なることで引張クリープ推定値に対し±10μ/MPa程度の差が生じることがわかる。

本来ならば、低温環境下におけるクリープ試験過程のコンクリート強度を基にクリープ推定式のばらつき評価を行うことが望ましいが、本研究では供試体作製の制約上、載荷時および試験終了時のみ強度試験を行ったため、試験過程におけるコンクリート強度は、示方書の強度推定式で代用した。そのため、強度推定式のばらつきに伴う引張クリープのばらつきが生じたものと考えられる。また、比較的強度試験結果がばらつきやすい若材齢コンクリートを対象としていることもばらつきが生じた要因のひとつと思われる。

上記の推定強度が及ぼす影響以外にクリープ推定値にばらつきが生じる要因として、クリープひずみ発生温度依存性や引張クリープ発生機構を挙げるができる。一般にコンクリートは環境温度の高温化に伴いクリープひずみの発生が励起される特性を有する。特に温度の影響は、強度が十分に発現していない若材齢ほど大きいという報告がなされている⁶⁾。現在、若材齢コンクリートのクリープひずみの温度依存性に関する研究がいくつか報告されているが^{3), 4), 6), 7)}、そのほとんどがほぼ一定に収束したひずみ発生結果をもとに提案されているもので、載荷過程における温度依存性を考慮できるものではない。したがって本研究で提案する推定式は、これらの見解より若材齢コンクリートのクリープの温度依存性に関し、その影響を考慮していない。またコンクリ

ートの引張クリープ発生はマイクロクラックの進展性等に大きく影響を受けるため¹⁵⁾、供試体によってクリープひずみの発生にばらつきが生じるものと思われる。

以上の結果より、若材齢コンクリートの引張クリープの高精度予測には、水和進行特性や力学的物性値の明確化(特にクリープひずみと載荷応力の非線形性)、およびクリープひずみ発生温度依存性等を明確化し、その影響を考慮する必要があるものと思われる。また、若材齢コンクリートの引張クリープひずみ発生機構の体系化により推定精度は向上するものと考えられる。

(3) 温度応力緩和にもたらす影響

現在、一般的な温度応力解析では若材齢コンクリートのクリープによる応力緩和作用を考慮するため、コンクリート標準示方書に従い温度応力算定に用いるヤング係数を低減する有効ヤング係数(式(12)参照)が用いられている¹¹⁾。

$$E_e = \phi(t_e) \times 4700 \sqrt{\sigma_c(t_e)}$$

$$0 \leq t_e \leq 3 \Rightarrow \phi = 0.73$$

$$3 \leq t_e \leq 5 \Rightarrow \phi = 0.135 t_e + 0.325$$

$$5 \leq t_e \Rightarrow \phi = 1.00$$
(12)

しかしながら、この有効ヤング係数を用いる方法は設計用値であるため、安全側の指標となる傾向が強く、また引張力の作用に伴うクリープ増分の影響を考慮できない特徴がある。梅原ら³⁾はクリープ関数を用いて算定した温度応力は、有効ヤング係数による算定結果に比べ約50%程度小さくなることを報告している。

そこで本研究では、示方書による有効ヤング係数、本研究が提案する引張クリープ推定式およびクリープ推定式のばらつきを考慮して40%低減したものについて、それぞれ各有効材齢時のヤング係数にひずみを掛け合わせるにより温度応力の算定を試みた。温度応力の算定では引張クリープの影響を明確にするため、コンクリートに作用する全引張ひずみは60 μ で一定と仮定し、引張力作用材齢2日、コンクリート温度20 $^{\circ}$ C、材齢91日圧縮強度30MPaの場合において、図-15に示されるクリープ・応力推定フローに基づき、時間ステップ毎に若材齢時における温度応力の算定を試みた(図-20参照)。この結果より、一例ではあるが本研究で提案するクリープ推定式を用いた温度応力算定結果が示方書に比べ、引張応力作用時は約30%程度大きく、長期に渡っては約50%

程度小さいことがわかる。これは有効ヤング係数が引張力作用に伴うクリープひずみ分を考慮できないことによるものと推察される。また、示方書の有効ヤング係数は設計用であり、クリープの他に収縮等の様々な影響も低減係数内に一括して含まれるため、このような差が生じたものと思われる¹⁶⁾。ここで、推定値のばらつきを考慮した算定結果と推定値を比べると、約0.2MPa程度大きくなっているが、有効ヤング係数を使用した場合に比べて非常に小さいことがわかる。このことより、引張クリープのばらつきが温度応力推定結果にもたらす影響はあまり大きくないものと思われる。なお、実際のマスコンクリート構造物の温度ひずみは時系列的に変動するため、それに応じて引張クリープも複雑な挙動を示すことが予想される。今後は、本研究で提案する引張クリープ推定式を用いて温度応力解析を行い、既往の評価方法との比較を行う予定である。

5. 結論

本研究は、マスコンクリートの温度ひび割れ発生予測の高精度化を目的に、温度応力の緩和に影響が大きいと考えられる若材齢コンクリートのクリープ試験を行った。特に若材齢コンクリートの水和反応の進行を考慮するため、その影響を小さくできると考えられる低温環境下において、水和反応の進行を抑制した状態のもとでコンクリートの引張クリープ試験を行った。ここで得られた結果をもとに、数種類のレオロジーモデルを介したクリープ推定式およびそこから派生したクリープ推定式による回帰を試みた。また、得られた回帰結果より、水和反応の進行の影響を考慮できる若材齢コンクリートの引張クリープ推定式の構築を行い、それを用いてマスコンクリートの温度応力緩和にもたらす影響について調べた。本研究の範囲内において得られた結論を以下に要約する。

- ① 本研究で提案する引張クリープ推定式において、載荷期間 t を d 乗する方法は、実験定数を少なくかつ比較的精度の高い回帰が行える。
- ② 本研究で提案する引張クリープ推定式により若材齢コンクリートの強度発現に伴うクリープひずみ量の減少および実質的な応力強度比の低下を考慮できる推定が可能である。
- ③ 一例ではあるが、コンクリート標準示方書の有効ヤング係数を用いる方法に比べ、引張クリープ推定式を用いた温度応力推定値は約50%程度小さくなる場合がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、高海克彦助教授および上田満助教授に多くの御助言をいただきました。また、試験装置作成にあたり、株式会社山陽ハイテックの末広 篤氏、河嶋好雄氏から多大な協力を受けました。最後に実験の実施および資料の整理にあたって林 一成氏、三村陽一氏をはじめとする山口大学工学部社会建設工学科施設材料学研究室の各位に多大の協力を受けました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤秀敏, 田澤栄一, 大島邦裕, 小野 敦: 高強度コンクリートの若材齢引張クリープに及ぼす水分移動の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 679~684, 1998. 7.
- 2) 森本博昭, 平田正成, 小柳 治: 若材齢コンクリートのリラクゼーション特性とその評価法に関する研究, 土木学会論文集, No. 396/V-9, pp. 59~68, 1988. 8.
- 3) 野村幸広, 上原 匠, 梅原秀哲: クリープを考慮したマスコンクリートの温度応力に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp. 1121~1126, 1993. 6.
- 4) 後藤忠広, 上原 匠, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートのクリープ挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 1133~1138, 1995. 6.
- 5) 平本昌生, 入矢桂史郎, グプタ スプティック, 梅原秀哲: 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論文報告集, Vol. 19,

- No. 1, pp. 775~780, 1997. 6.
- 6) 服部達也, 入矢桂史郎, 上原 匠, 梅原秀哲: 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論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 673~678, 1998. 7.
- 7) 入矢桂史郎, 平本昌生, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究, 土木学会論文集, No. 599/V-40, pp. 1~14, 1998. 8.
- 8) 入矢桂史郎, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの比較に関する研究, 土木学会論文集, No. 599/V-40, pp. 105~117, 1998. 8.
- 9) W. フリュゲ: 粘弾性学, 堀 幸夫訳, 培風館, 1973. 10.
- 10) 西村 昭, 藤井 学, 湊 俊: 最新 土木材料, 森北出版, 1987. 12.
- 11) 土木学会コンクリート標準示方書(施工編): 土木学会, pp. 173~193, 1996.
- 12) 土木学会コンクリート標準示方書(設計編): 土木学会, pp. 17~40, 1996.
- 13) 阪田憲次, 綾野克紀: コンクリートの非線形クリープ予測式の提案, 土木学会論文集, No. 451/V-17, pp. 179~188, 1992. 8.
- 14) 浅上 修, 中村秀明, 浜田純夫: 断熱温度上昇過程におけるマスコンクリートの力学的性質, 土木学会論文集, No. 538/V-31, pp. 69~79, 1996. 5.
- 15) 吉本 彰: コンクリートの変形と破壊, 学献社, 1990.
- 16) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書(昭和 61 年制定)改訂資料, コンクリートライブラリー61号, pp. 49~83, 1986. 10.

(1998. 10. 26 受付)

A STUDY ON THE TENSION CREEP EQUATION DURING HYDRATION IN THE EARLY AGE

Isamu YOSHITAKE, Hideaki NAKAMURA, Senji NAGAI and Sumio HAMADA

Mass concrete structures, especially having high strength concrete tends to occurs cracks in the early age and rather precise creep properties in the early age for these structures are required for the analysis. The tension creep properties in the early age are largely affected by the hydration amount, this effect have not been evaluated in the previous research. In the present research a creep equation for the concrete with young age has been proposed which can evaluates the factor of the hydration amount.