

報告 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートのクリープ係数予測式の一提案

石関 浩輔^{*1}・関田 徹志^{*2}・全 振煥^{*3}・溝渕 利明^{*4}

要旨：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの温度応力解析の実施を想定し、本コンクリートのクリープ係数が解析結果に与える影響を評価することを目的として、日本建築学会編のマスコン指針に示されるクリープ係数予測式による算定値との比較と、本コンクリートのクリープ係数の定式化を試みた。検討の結果、本コンクリートのクリープ係数は予測式による算定値と比較して同等または小さいことを確認した。また、マスコン指針の予測式を修正することにより、本コンクリートのクリープ係数を予測可能であることが示された。

キーワード：高炉セメント、高炉スラグ微粉末、温度応力、クリープ係数、マスコンクリート

1. はじめに

コンクリートの環境負荷の1つに、コンクリートの構成材料を製造する上で排出される二酸化炭素がある。この二酸化炭素の多くは、ポルトランドセメントの原料であるクリンカーの焼成時に発生するものであり、コンクリート材料の環境負荷低減を実現するためには、クリンカー分を環境負荷の小さい産業副産物で代替することが有効である。

これに対し、筆者らは代替とする産業副産物として高炉スラグ微粉末に着目し、普通ポルトランドセメント(以下、Nセメント)の約65%を高炉スラグ微粉末で置換した高炉スラグ高含有セメント(以下、HSセメント)を用いたコンクリート(以下、HSコンクリート)を開発した。これまでの検討により、一般的な高炉セメントB種コンクリートと比較して最高温度および見かけの線膨張係数が小さいことにより、本コンクリートが優れた温度ひび割れ抵抗性を有することを明らかにし¹⁾、実構造物のマスコンクリート部材への適用を進めてきた²⁾。

さらに、筆者らは既報³⁾においてHSコンクリートを対象としたクリープ試験を実施し、載荷材齢3日のクリープ係数について、HSコンクリートが普通ポルトランドセメントコンクリート(以下、Nコンクリート)の50%程度小さいことを報告した。このことは、マスコンクリートの温度ひび割れの観点からは、温度降下時のクリープによる応力緩和がNコンクリートよりも小さく、温度ひび割れ発生の可能性が高いことを示唆している。

以上の背景より、本研究ではHSコンクリートのクリープ係数が温度応力解析結果に与える影響を評価することを目的として、既報³⁾の結果を整理し、日本建築学会

「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」⁴⁾(以下、マスコン指針)に示されるクリープ係数予測式の算定値と比較した。また、マスコン指針に示されるクリープ係数予測式を修正し、HSコンクリートのクリープ係数の定式化を試みた。

2. 実験

2.1 実験概要

表-1 に実験要因と水準の組合せを示す。実験要因はセメント種類、水セメント比(W/C)、クリープ載荷材齢の3要因とした。セメント種類はHSセメントおよびNセメントの2水準とした。W/Cは、HSコンクリートでは55、45、38%の3水準とし、NコンクリートではHSコンクリートのW/C = 45%と同一呼び強度を想定したW/C = 47%の1水準とした。クリープ載荷材齢は1、3、7、14、28日の5水準とした。すべての水準において、圧縮強度試験およびクリープ試験を実施した。

表-2 に圧縮強度試験計画を示す。圧縮強度はJIS A 1108コンクリートの圧縮強度試験方法に準拠した。試験材齢はクリープ試験の載荷材齢と同一とし、材齢3、28日についてはすべての水準で実施した。供試体は試験材齢まで温度20±2°Cで封かん養生とした。

表-3 にクリープ試験計画を示す。クリープ試験体は載荷試験体と無載荷試験体の2種類とし、文献5)を参考に埋め込みひずみ計を埋設したφ100×200mmの試験体を作製した。すべての試験体は、載荷材齢まで温度20±2°Cで封かん養生とし、載荷開始直前に脱型し側面をアルミテープにより封かんした。また、両試験体の乾燥条件を同等とするため、載荷開始以降は無載荷試験体の上

*1 鹿島建設(株)技術研究所 建築生産グループ 研究員 修士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設(株)技術研究所 建築生産グループ グループ長 Ph.D. (正会員)

*3 鹿島建設(株)技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*4 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

表－1 実験要因と水準の組合せ

記号	セメント種類	W/C(%)	クリープ試験(載荷材齢)
HS55	HS	55	3日
HS45		45	1, 3, 7, 14, 28日
HS38		38	3日
N47	N	47	3日

表－2 圧縮強度試験計画

記号	圧縮強度試験(封かん)				
	1日	3日	7日	14日	28日
HS55	-	○	-	-	○
HS45	○	○	○	○	○
HS38	-	○	-	-	○
N47	-	○	-	-	○

表－3 クリープ試験計画

記号	クリープ試験(載荷材齢)				
	1日	3日	7日	14日	28日
HS55	-	HS55-3d	-	-	-
HS45	HS45-1d	HS45-3d	HS45-7d	HS45-14d	HS45-28d
HS38	-	HS38-3d	-	-	-
N47	-	N47-3d	-	-	-

表－4 使用材料の一覧

材料	記号	種類	物性
セメント	N	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³
	HS	高炉スラグ高含有セメント	密度2.98g/cm ³
細骨材	S1	山砂(千葉県市原市万田野産)	表乾密度2.58g/cm ³
	S2	砕砂(栃木県佐野市仙波産)	表乾密度2.65g/cm ³
粗骨材	G1	砕石(栃木県佐野市仙波産)	表乾密度2.70g/cm ³
	G2	砕石(埼玉県秩父郡横瀬町産)	表乾密度2.70g/cm ³
水	W	上水道水	-
混和剤	Ad	AE減水剤標準形 (リグニンスルホン酸系化合物と ポリカルボン酸系化合物の複合体)	密度: 1.0g/cm ³

表－5 調合の一覧

記号	W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)							Ad (C×%)
			W	N	HS	S1	S2	G1	G2	
HS55	55	47.7	176	-	320	420	420	474	474	1.10
HS45	45	45.3	179	-	398	382	382	474	474	1.10
HS38	38	42.5	183	-	482	340	340	473	473	1.10
N47	47	45.3	187	398	-	305	456	474	474	1.10

下端面をアルミテープにより封かんした。

クリープ試験は JIS A 1157 コンクリートの圧縮クリープ試験方法に準拠した。載荷荷重は、載荷材齢時の圧縮強度の 1/3 とした。試験は温度 20±2℃、湿度 60±5% RH の恒温恒湿室で実施した。クリープ試験の載荷材齢は、HS45 では 1, 3, 7, 14, 28 日とし、HS55, HS38 および N47 では 3 日とした。

表－4 に使用材料の一覧を、表－5 に調合の一覧を示す。セメントは N セメントおよび比表面積 4000cm²/g の高炉スラグ微粉末を用いた HS セメントとした。細骨材、粗骨材、水および混和剤はすべての水準で共通とした。

全調合で目標スランブ 18cm、目標空気量 4.5%とし、実出荷における運搬ロスを見込んでスランブ管理値を 20±2.5cm、空気量管理値を 5.0±1.5%とした。練混ぜには強制 2 軸ミキサを用いた。材料は一括投入とし、練混ぜ時間は全材料投入後 45 秒(HS38 は 60 秒)とした。

2.2 実験結果

表－6 にフレッシュ試験結果を示す。いずれもスラン

表－6 フレッシュ試験結果

記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
HS55	20.0	5.0	21
HS45	21.0	5.0	21
HS38	19.0	4.0	21
N47	21.5	5.0	22

表－7 強度試験結果

記号	圧縮強度(N/mm ²)				
	1日	3日	7日	14日	28日
HS55	-	14.4	-	-	29.9
HS45	3.7	19.8	29.0	33.7	38.0
HS38	-	24.0	-	-	45.3
N47	-	24.0	-	-	41.7

表－8 強度試験結果(再試験)

記号	圧縮強度(N/mm ²) (再試験)				
	1日	3日	7日	14日	28日
HS55	-	14.7	-	-	30.4
HS45	3.6	20.1	29.4	34.2	38.4
HS38	-	24.4	-	-	45.9
N47	-	24.4	-	-	42.2

表－9 ヤング係数試験結果(再試験)

記号	ヤング係数(kN/mm ²)				
	1日	3日	7日	14日	28日
HS55	-	22.6	-	-	32.1
HS45	10.8	23.6	28.9	31.6	33.6
HS38	-	26.7	-	-	34.3
N47	-	25.5	-	-	32.2

ブおよび空気量が管理値内でありワーカビリティの良好なコンクリートであった。

表－7, 表－8 に強度試験結果を示す。なお本実験では、クリープ試験体と同時に作製した供試体で圧縮強度試験を行った際、試験機不良によりヤング係数が正しく得られなかったため、同一調合で再度供試体を作製し、再試験を行った。したがって、圧縮強度については再試験の結果も併せて示す。表－8 より、圧縮強度は、材齢 3 日では HS45 : 20.1N/mm², N47 : 24.4N/mm², 材齢 28 日では HS45 : 38.4N/mm², N47 : 42.2N/mm² であり、同一呼び強度を想定した調合において、HS45 の強度が N47 に比べ 4N/mm² 程度小さい結果であった。また、表－7, 表－8 より、圧縮強度の再試験結果と当初の結果の差は最大で約 0.6N/mm² であり、当初の試験結果との差は 2%程度であることから、圧縮強度およびヤング係数については再試験結果を採用しても問題ないと考えられる。

3. 既存式によるクリープ係数の評価

3.1 評価手法

マスコン指針⁴⁾に準じてマスコンクリート部材に使用された HS コンクリートの温度応力解析を実施することを想定し、HS コンクリートのクリープ係数を評価した。

クリープ係数の評価に際し、材齢は(1)式により温度の影響を等価な材齢に換算できる有効材齢を用いた。

$$t_e = \sum_{i=0}^n \Delta t_i \cdot \exp \left\{ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/t_1} \right\} \quad (1)$$

ここに、 t_e ：有効材齢(日)、 Δt_i ：温度 T が継続する期間(日)、 $T(\Delta t_i)$ ： Δt_i の間継続するコンクリート温度($^{\circ}\text{C}$)、 t_1 ：材齢を規格化する単位で1日である。本実験のクリープ試験は $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の環境下で行ったため、有効材齢は材齢と等価である。

コンクリートの圧縮強度は、表-8 に示される試験結果を用いて、マスコン指針に示される予測式(2)の係数を最小二乗法で回帰することによって同定した。

$$f_c(t_e) = \exp \left[s \left\{ 1 - \left(\frac{28}{(t_e - s_f)/t_1} \right)^{0.5} \right\} \right] f_{c28} \quad (2)$$

ここに、 $f_c(t_e)$ ：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)、 f_{c28} ：有効材齢 28 日の圧縮強度(N/mm^2)、 s ：セメント種類に関わる定数、 s_f ：硬化原点のための補正項(日)である。

コンクリートのヤング係数は、表-9 に示される試験結果を用いて、マスコン指針に示される予測式(3)に追加したフィッティング係数を最小二乗法で回帰することによって同定した。

$$E_c(t_e) = 3.35 \cdot 10^4 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_c(t_e)}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

ここに、 $E_c(t_e)$ ：コンクリートのヤング係数(N/mm^2)、 γ ：コンクリートの気乾単位容積質量(t/m^3)、 k_1 ：骨材による係数、 k_2 ：混和材による係数、 k_3 ：フィッティング係数である。

クリープ係数の予測値は、マスコン指針に示される予測式(4)により求めた。

$$\begin{aligned} \phi(t_e, t_0) &= \phi_0 \cdot \left[\frac{(t_e - t_0)/t_1}{\beta_H + (t_e - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \\ \phi_0 &= 1.05 \cdot (E_c(t_0)/E_{c28})^{-1.04} \\ \beta_H &= c \cdot (E_c(t_0)/E_{c28})^4 + 7.6 \\ c &= 117 - 1.11 \cdot f_{c28} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\phi(t, t_0)$ ：材齢 28 日のヤング係数を基準とした載荷時材齢を考慮したクリープ係数、 ϕ_0 ：クリープ係数の終局値、 β_H ：クリープの進行速度を表す係数、 t_0 ：載荷時有効材齢、 E_{c28} ：有効材齢 28 日のヤング係数(N/mm^2)、 $E_c(t_0)$ ：載荷時材齢 t_0 におけるヤング係数(N/mm^2)である。

一方、クリープ試験から得られたクリープ係数の実験値については(5)式のように、CEB-FIP⁶⁾で採用されている材齢 28 日の弾性ひずみに対するクリープ係数を用いて整理した。

$$\phi(t_e, t_0) = \frac{\varepsilon_{cre}(t_e, t_0)}{\sigma_c(t_0)/E_{c28}} \quad (5)$$

ここに、 $\varepsilon_{cre}(t, t_0)$ ：材齢 t_0 日に載荷された材齢 t 日のクリ

表-10 予測式の係数一覧

コンクリート種類	予測式の係数					
	圧縮強度		ヤング係数			
	s	s_f	k_1	k_2	k_3	γ
HSコンクリート	0.26	0.73	1.2	0.95	0.97	2.4
Nコンクリート	0.27	0.00	1.2	0.95	0.93	2.4

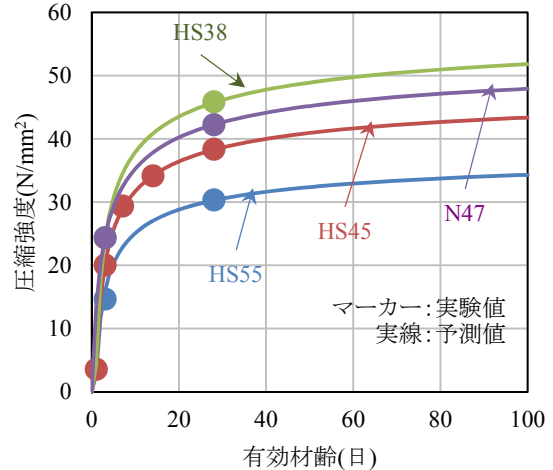


図-1 圧縮強度の回帰結果

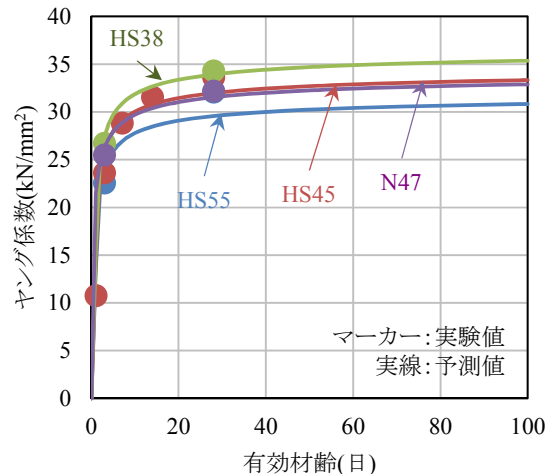
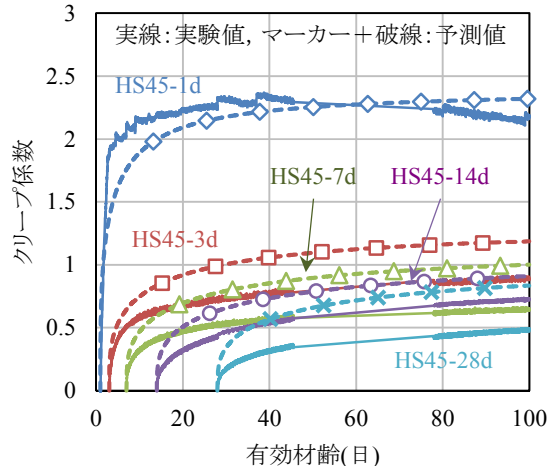


図-2 ヤング係数の回帰結果



※材齢 45～77 日データ取得不可

図-3 クリープ係数(HS45)

ープひずみ， $\alpha_c(t_0)$ ：材齢 t_0 日に載荷された載荷応力 (N/mm²)である。

3.2 評価結果

表－10 に同定後の圧縮強度およびヤング係数の予測式の係数を示す。また，図－1，図－2 に圧縮強度およびヤング係数の回帰結果を示す。これらの回帰結果は，クリープ係数の算定のインプットとした。

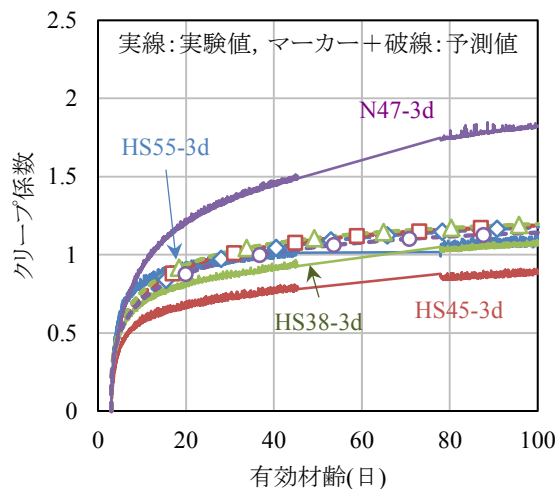
図－3 に HS45 のクリープ係数の評価結果を示す。なお，本実験ではクリープ試験中の計測器不良により有効材齢 45～77 日までのクリープひずみデータが取得不可であったため，当該期間の実験値は直線で補間した。図－3 より，載荷材齢 1 日のクリープ係数に関しては，有効材齢 40 日以降は予測値と実験値が概ね同等であり，既存の予測式を用いた場合でもクリープ係数を正しく予測可能であると考えられる。ただし文献 4)では，マスコンクリートの温度ひび割れのうち，貫通ひび割れとなりやすく耐久性低下および漏水の要因となる外部拘束によるひび割れについて『引張応力が最大となるのは，コンクリート温度が降下する打設後数日であり』とされており，有効材齢 40 日以降の予測値と実測値の一致が必ずしも温度応力を低減できない可能性もある。一方，載荷材齢 3 日以降のクリープ係数に関しては，載荷直後から実験値が予測値より小さく，既存の予測式を用いた場合にはクリープ係数を過大評価する可能性がある。

図－4 に載荷材齢 3 日のクリープ係数の評価結果を示す。図－4 より，HS コンクリートではクリープ係数の実験値が予測値と概ね同等または予測値よりも小さい結果となった。一方，N コンクリートは載荷直後から実験値が予測値よりも大きい結果となった。なお，HS コンクリートにおいて，本実験の範囲では W/C がクリープ係数に与える影響については確認できなかった。

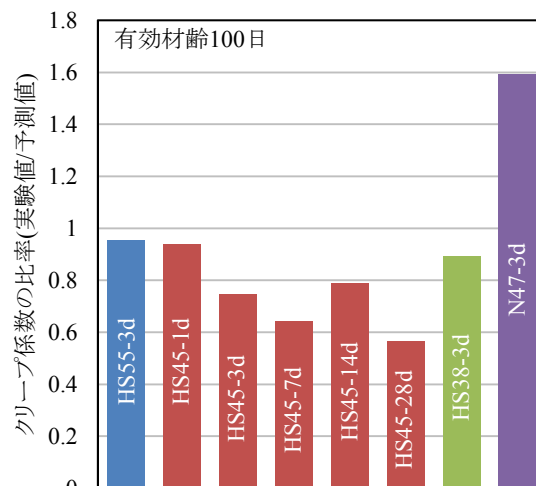
図－5 に有効材齢 100 日におけるクリープ係数の予測値に対する実験値の比率を示す。本実験の範囲では，N コンクリートのクリープ係数の実験値は予測値の 1.6 倍程度であった。このことは，N コンクリートのクリープによる応力緩和が温度応力解析の結果よりも大きく，解析結果が安全側であることを意味する。一方，HS コンクリートのクリープ係数の実験値は予測値の 0.6～1.0 倍程度であった。このことは，N コンクリートとは対照的に，HS コンクリートのクリープによる応力緩和が温度応力解析の結果よりも小さく，解析結果が危険側であることを意味する。なお，本実験の範囲では，HS コンクリートにおける載荷材齢および水結合材比とクリープ係数の比率との明確な関係性は確認できなかった。

4. クリープ係数の修正予測式の提案

前述のとおり，HS コンクリートに対してマスコン指



※材齢 45～77 日データ取得不可
図－4 クリープ係数(載荷材齢 3 日)



図－5 クリープ係数の比率

表－11 低減係数の一覧

記号	低減係数 α_ϕ (載荷材齢)				
	1日	3日	7日	14日	28日
HS55	-	0.96	-	-	-
HS45	1.03	0.74	0.66	0.76	0.56
HS38	-	0.88	-	-	-
N47	-	1.47	-	-	-

針に示されるクリープ係数予測式を用いた場合，クリープ係数を過大に評価し，温度応力解析においては危険側の解析結果が得られる可能性がある。そこで，マスコン指針に示されるクリープ係数予測式を修正し，HS コンクリートのクリープ係数を適切に評価可能な修正予測式 (6)を提案する。

$$\phi_{\text{mod}}(t_e, t_0) = \alpha_\phi \cdot \phi(t_e, t_0) \quad (6)$$

ここに， $\phi_{\text{mod}}(t_e, t_0)$ ：修正クリープ係数， α_ϕ ：低減係数である。修正クリープ係数は，クリープ係数の実験値を用いて，低減係数 α_ϕ を最小二乗法で回帰することによって同定した。

表-11 に低減係数 α_ϕ の一覧を示す。また、図-6、図-7 に、クリープ係数の同定結果を示す。いずれの水準についても、修正予測式を用いることによりクリープ係数が比較的精度良く予測できていると考えられる。

マスコン指針におけるクリープ係数予測式(4)は、クリープ係数の終局値およびクリープの進行速度を表す係数が、材齢 28 日のヤング係数に対する載荷時のヤング係数の比(ヤング係数比)により整理されている。そこで、修正予測式(6)の低減係数 α_ϕ をヤング係数比により表すことを試みた。

図-8 に、HS コンクリートのヤング係数比と低減係数の関係を示す。図-8 より、本実験の範囲において HS コンクリートの低減係数の予測式(7)を提案する。

$$\alpha_\phi = A \cdot (E_c(t_0) / E_{c28}) + B \quad (7)$$

ここで A 、 B ：定数である。図-8 より A 、 B を同定すると、 $A = -0.75$ 、 $B = 1.4$ が得られた。

また、図-8 よりヤング係数比の小さい材齢初期には低減係数が 1.0 程度であり、ヤング係数比の増大に伴って低減係数が低下する傾向が確認できた。文献 7)では、圧縮強度試験結果から求めたコンクリートのヤング係数と、一軸拘束試験結果から求めたコンクリートの見掛けのヤング係数を用いてコンクリートの見掛けのクリープ係数を算出し、概ね有効材齢 7 日までは見掛けのクリープ係数が増大するが、一方で有効材齢 7 日以降では見掛けのクリープ係数が低下することを報告しており、本実験の結果はこれと同様の傾向を示すものであった。

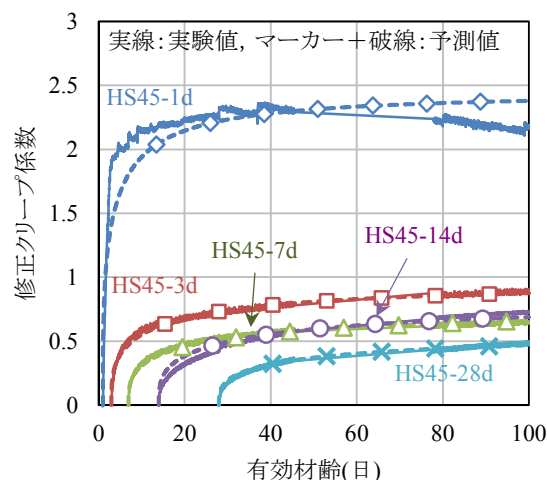
5. 結論

HS コンクリートのクリープ係数が温度応力解析結果に与える影響を評価することを目的として、HS コンクリートのクリープ係数の定式化を試みた。

1. HS コンクリートのクリープ係数をマスコン指針に示される予測式により算出した値と比較すると、載荷材齢 1 日では同等だが、載荷材齢 3 日以降では小さい。このことから、既存の予測式を用いるとクリープ係数を過大評価する可能性がある。
2. HS コンクリートのヤング係数の修正予測式を提案し、低減係数をヤング係数比により整理した結果、ヤング係数比の小さい材齢初期には低減係数が大きく、ヤング係数比の増大に伴って低減係数が低下する傾向が確認できた。これは既往の報告とも一致する傾向であった。

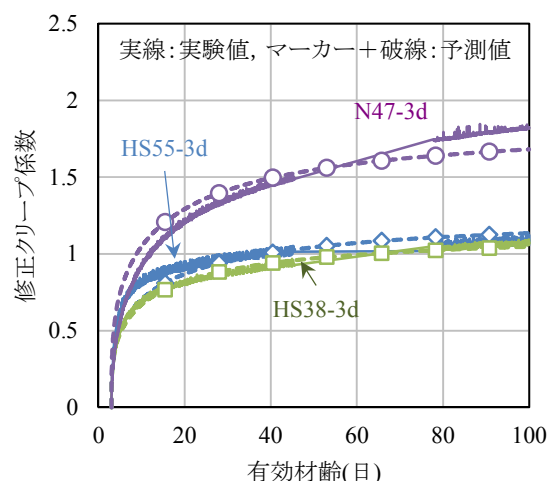
謝辞

本研究は JSPS 科研費 15H04084 の助成により実施した。ここに記して謝意を示す。



※材齢 45～77 日データ取得不可

図-6 クリープ係数の同定結果(HS45)



※材齢 45～77 日データ取得不可

図-7 クリープ係数の同定結果(載荷材齢 3 日)

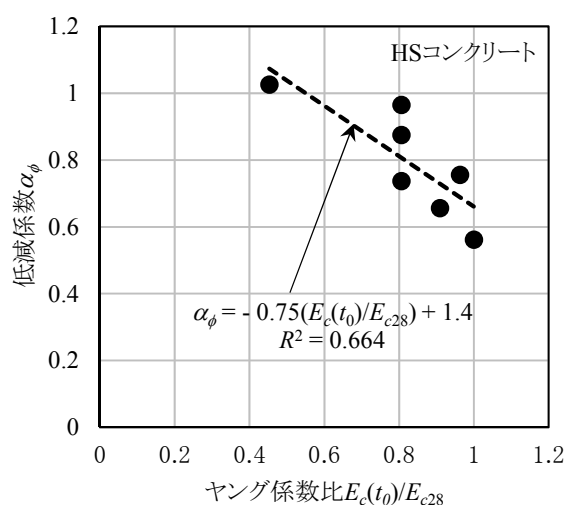


図-8 ヤング係数比と低減係数の関係

参考文献

- 1) 稲葉洋平ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性評価，日本

建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.9-10, 2013.8.

- 2) 田中秀樹ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの実構造物への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.537-538，2015.9.
- 3) 石関浩輔ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートのクリープ特性に関する基礎検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，pp.167-168，2016.8.
- 4) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)同解説，2008.
- 5) 百瀬晴基ほか：高炉セメント B 種コンクリートの収

縮ひび割れ抵抗性の定量評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.79, No.706, pp.1717-1727, 2014.12.

- 6) Comité Euro - International Du Béton : CEB - FIP Model Code 1990, 1991.
- 7) 溝淵利明，石関浩輔，関田徹志，新井淳一：高炉スラグ高含有セメントコンクリートのひび割れ抵抗性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.531-536, 2016.7.