

論文 載荷条件が超高強度コンクリートの圧縮クリープ特性に及ぼす影響

松田 拓^{*1}・河上 浩司^{*2}・西本 好克^{*3}

要旨 : $F_c150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを対象とし、施工時荷重の圧縮クリープ特性への影響を確認すべく、載荷材齢および載荷応力の異なる長期圧縮クリープ試験、および載荷応力を段階的に増加させた長期圧縮クリープ試験を実施しそれらの特性を確認した。その結果、載荷応力が大きく載荷材齢が早いほど圧縮クリープひずみは大きくなり、最終的な載荷応力が同じであっても、載荷材齢の違いや載荷応力の変動により、終局の圧縮クリープひずみは異なることがわかった。また、従来式による圧縮クリープひずみ評価手法の、荷重が段階載荷的に増加する場合を含めた長期実測値への適用性について検討した。

キーワード : 超高強度コンクリート, 圧縮クリープ, 載荷条件

1. はじめに

構造物を高層化し、かつ柱断面の増加なく軸力を保持すべく、設計基準強度(以下、 F_c)で 100N/mm^2 を上回る超高強度コンクリートが実用化されている¹⁾。現状では、超高強度コンクリートの収縮・クリープや強度特性については未解明な部分が残されており、設計・施工を合理化し汎用性を増すためには更なるデータ・知見の蓄積が求められる²⁾。

コンクリートのクリープ特性に影響を及ぼす要因として、載荷材齢や載荷応力等の荷重条件が挙げられる。圧縮強度が 120N/mm^2 程度までの高強度コンクリートについては、クリープ係数は載荷時の圧縮強度が高いほど小さく、載荷材齢が早いほど大きくなることが示され、これらのデータベースよりいくつかの評価式が提案されている³⁾⁴⁾⁵⁾。また、 $F_c120\text{N/mm}^2$ 級以上の高強度コンクリートについても、クリープ係数は水結合材比の低下に伴い小さくなることが示されている⁶⁾⁷⁾。

今回、 $F_c150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを対象とし、施工時荷重の圧縮クリープ(以下、クリープ)特性への影響を確認すべく、載荷材齢

および載荷応力の異なる長期クリープ試験、および載荷応力を段階的に増加させた長期クリープ試験を実施した。さらに、従来のクリープ評価式の、荷重が段階的に増加する場合を含めた長期実測値への適用性について検討した。

2. 試験概要

2.1 使用材料と調合および試験体種類

使用材料を表-1に、コンクリート調合およびフレッシュ性状を表-2に示す。結合材には低熱ポルトランドセメントにシリカフュームを質量比で 10%置換したものを使用した。フレッシュ性状はコンクリート温度 20°C 、スランプフロー 70cm を目標とし、 20°C の室内において強制二軸ミキサを使用し製造した。

クリープ試験体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体とし、1 試験ケースあたり 3 体作製した。各試験体はコンクリート打設後に封かんし、 20°C 一定に制御した室内に静置(以下、 20°C 封かん)した。

また、 20°C 封かん養生および標準養生条件の円柱強度供試体を作製し、所定の材齢 t 日での圧縮強度 $f(t)[\text{N/mm}^2]$ および静弾性係数 $E(t)[\text{kN/mm}^2]$ を確認した。

*1 三井住友建設(株) 技術研究所 修士(工学) (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 博士(工学) (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

表-1 使用材料

材料名	記号	種類	諸物性
結合材	C	低熱ポルトランドセメント	密度:3.24(g/cm ³), 比表面積:3300(cm ² /g)
	SF	シリカフューム	密度:2.20(g/cm ³), 比表面積:226000(cm ² /g)
細骨材	S	茨城県岩瀬産硬質砂岩砕砂	表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率1.41%, 粗粒率2.67
粗骨材	G	茨城県岩瀬産硬質砂岩砕石	表乾密度:2.65g/cm ³ , 吸水率0.66%, 粗粒率6.76
化学混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

表-2 コンクリート調合およびフレッシュ性状

W/B (%)	S/a (%)	単位容積質量(kg/m ³)					フレッシュ性状			
		W	C	SF	S	G	温度(°C)	空気量(%)	スランブフロー値(cm)	室温(°C)
15	39.6	150	900	100	524	811	21.0	1.0	74.5×73.0	20.5

表-3 クリープ試験ケース

	材齢t(日)				備考
	0 ≤ t < 7	7 ≤ t < 14	14 ≤ t < 28	28 ≤ t ≤ 600	
CASE-1	0	48.3 (0.40)	48.3 (0.34)	48.3 (0.30)	材齢7日で $\sigma(t) = f(28) \times 0.3$ として保持
CASE-2	0	36.6 (0.30)	42.6 (0.30)	48.3 (0.30)	材齢7, 14, 28日で $\sigma(t) = f(t) \times 0.3$ と段階的に増加
CASE-3	0	0	0	48.3 (0.30)	材齢28日で $\sigma(t) = f(28) \times 0.3$ として保持
無荷荷	0	0	0	0	自由ひずみを測定

表中の数字は荷重応力 $\sigma(t)$ [N/mm²] を表し, () は荷重応力と荷重時の圧縮強度の比 $\sigma(t)/f(t')$ を表す。

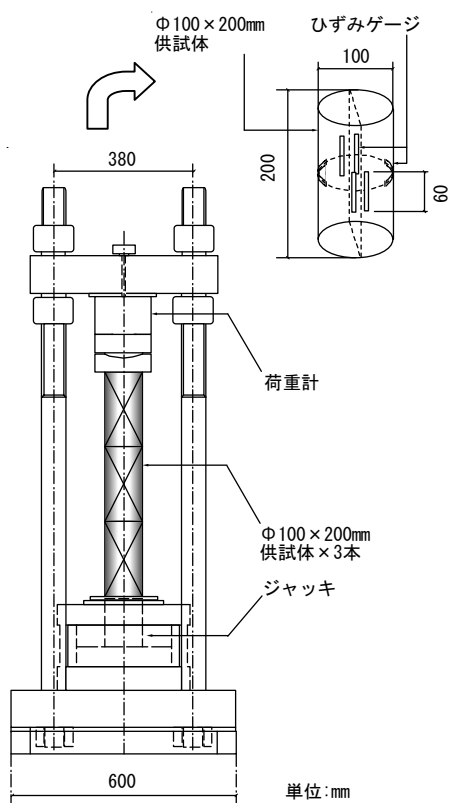


図-1 クリープ試験装置およびひずみ測定箇所

2.2 クリープ試験手順

図-1 にクリープ試験装置およびコンクリートのひずみ測定箇所を示す。クリープ試験手順は JIS 原案⁸⁾ に準拠し, 3本の試験体を鉛直に積み重ね 20°C 封かん条件で実施した。試験体のひずみは, ひずみゲージを試験体の荷重方向に4枚, 荷重直交方向に2枚取付け測定し, 3本の測定値の平均値とした。ひずみゲージは荷重直前に試験体の封かんを解いて取付け, 取付け後に速やかに再度封かんした。

同様の手順で 20°C 封かん養生の無荷荷試験体

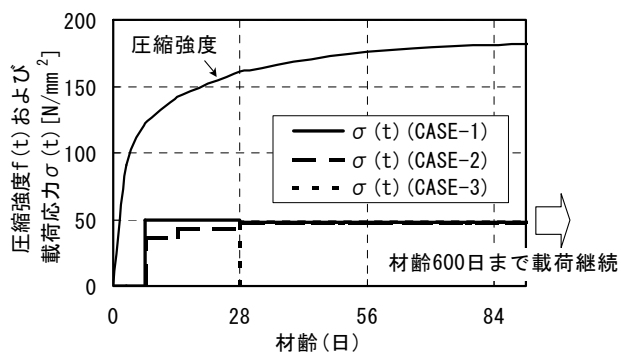


図-2 圧縮強度の発現と荷重応力との関係

を作製し, クリープ試験体の材齢 7 日以降の自由ひずみを測定した。

表-3 と図-2 に, 試験ケースごとの荷重条件を示す。CASE-1 は荷重応力 $\sigma(t)$ [N/mm²] を材齢 7 日で $f(28) \times 0.3$ とした。CASE-2 は $\sigma(t)$ を材齢 7 日で $f(7) \times 0.3$, 材齢 14 日で $f(14) \times 0.3$, 材齢 28 日で $f(28) \times 0.3$ と段階的に増加させた。CASE-3 は $\sigma(t)$ を材齢 28 日で $f(28) \times 0.3$ とした。 $\sigma(t)$ は, 荷重直前に 20°C 封かん養生円柱強度供試体の $f(t)$ を確認し決定した。CASE-1 の $\sigma(t)$ の決定には材齢 7 日時点で $f(28)$ が必要となるため, 予備試験により $f(28)$ を確認した。いずれの試験ケースも, 最終的な $\sigma(t)$ は $f(28) \times 0.3 = 48.3 \text{ N/mm}^2$ である。

表-4 圧縮強度および静弾性係数試験結果

試験種類	養生条件	材齢(日)								備考
		3	7	14	28	56	91	182	365	
f(t) [N/mm ²]	20℃封かん	90.8	122	142	161	176	182	185	195	
	標準養生	-	139	158	174	191	199	-	196	
E(t) [kN/mm ²]	20℃封かん	33.2	37.8	41.0	44.3	46.9	46.1	46.7	50.6	

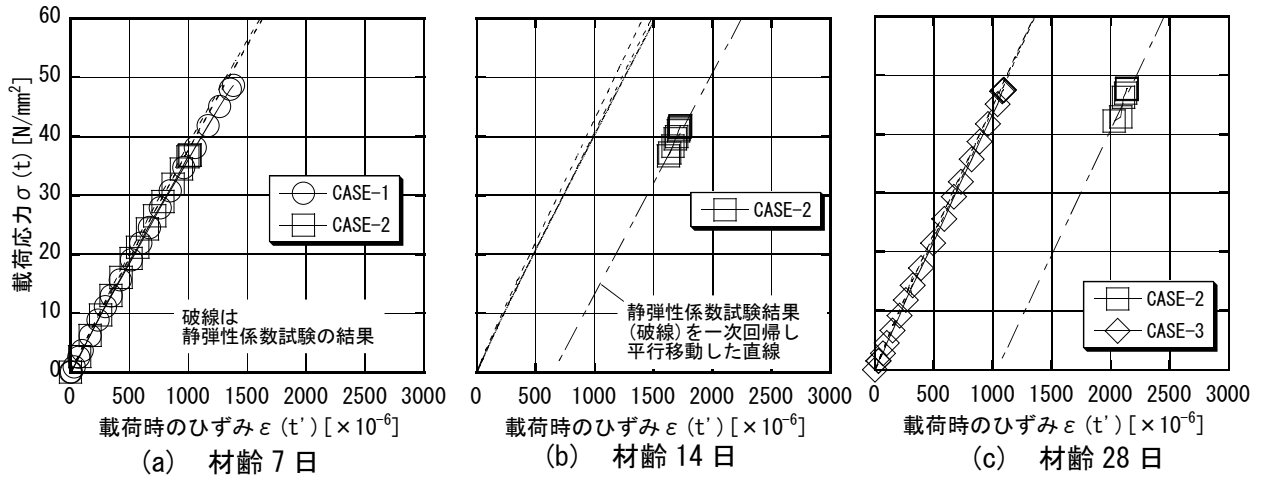


図-3 載荷時の応力-ひずみ関係

3. 試験結果

3.1 圧縮強度および静弾性係数

表-4 に f(t) と E(t) の試験結果を示す。f(t) および E(t) いずれも材齢 28 日時点で材齢 365 日時点の 80% 以上発現し、その後も徐々に増大した。

3.2 載荷時の応力-ひずみ関係

図-3 に、クリープ試験の載荷応力増加時と静弾性係数試験のそれぞれの応力-ひずみ関係について、圧縮方向を正とし示す。どちらの場合も載荷応力と載荷時のひずみは直線関係にあった。また、それぞれの傾きは、段階的に荷重を増加させた CASE-2 を含め、概ね一致した。

3.3 ポアソン比

図-4 に、載荷応力増加時の載荷方向と載荷直角方向のひずみを抽出し、両者の絶対値の関係を示す。長期段階載荷を実施した CASE-2 を含め、弾性変形時のポアソン比 $\mu(t) \approx 0.2$ であった。

3.4 全ひずみおよびクリープひずみ

図-5 に、載荷方向の材齢 t 日でのクリープ試験体の載荷方向の全ひずみ $\epsilon(t) [\times 10^{-6}]$ を示す。材齢 600 日付近において、何れの試験ケースの $\epsilon(t)$ もほとんど増進が見られず、この時点でクリープ挙動はほぼ終局状態と考えられる。

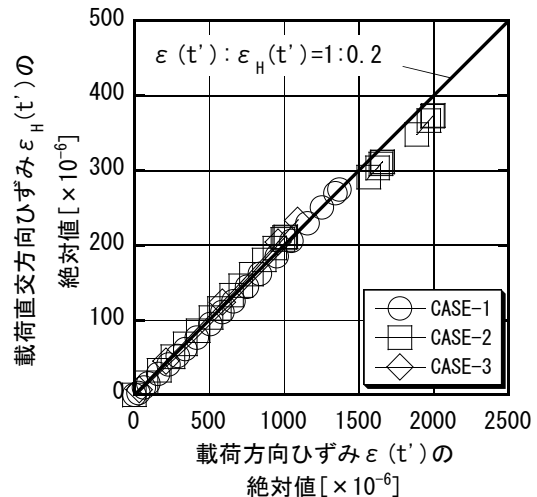


図-4 載荷時の方向別のひずみ変化

$\epsilon(600)$ は、CASE-1 では約 $3100 [\times 10^{-6}]$ 、CASE-2 では約 $2700 [\times 10^{-6}]$ 、CASE-3 では約 $2000 [\times 10^{-6}]$ であった。無載荷試験体の自由ひずみ $\epsilon_{sh}(600)$ は、約 $250 [\times 10^{-6}]$ であった。

図-6 に、材齢 t' 日で載荷した試験体の載荷方向のクリープひずみ $\epsilon_c(t, t') [\times 10^{-6}]$ の実測値を示す。 $\epsilon_c(t, t')$ は式(1)より算出した。

$$\epsilon_c(t, t') = \epsilon(t) - \epsilon_e(t') - \epsilon_{sh}(t) \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon_e(t')$: 載荷材齢 t' 日に生じた載荷方向の弾性ひずみ $[\times 10^{-6}]$ 、 $\epsilon_{sh}(t)$: 材齢 t 日での載荷方向の自由ひずみ $[\times 10^{-6}]$

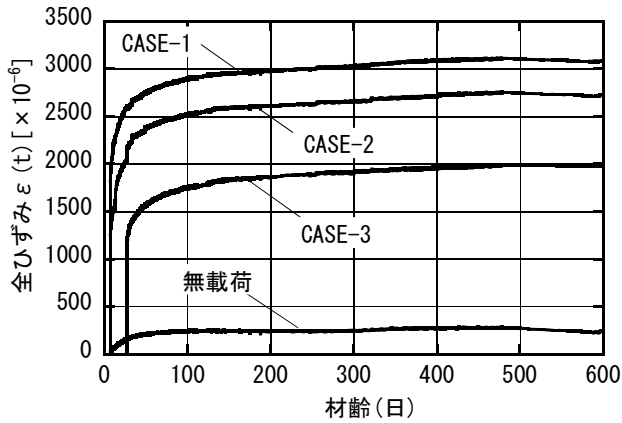


図-5 全ひずみの経時変化

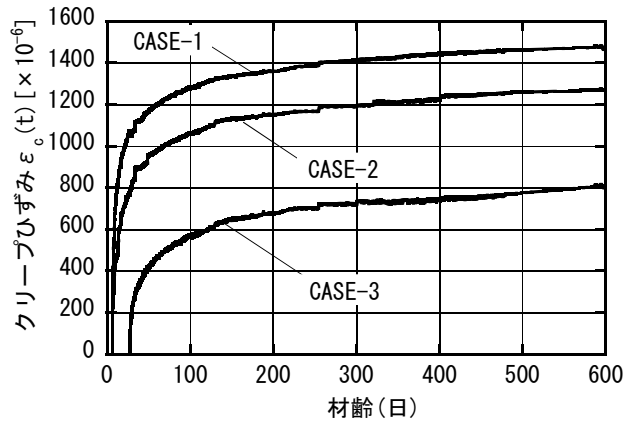


図-6 クリープひずみの経時変化

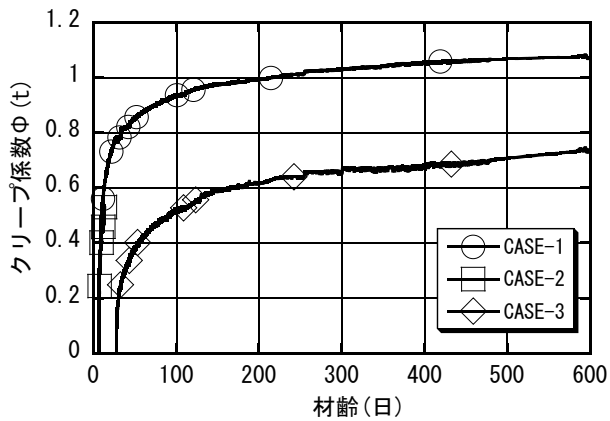


図-7 クリープ係数の経時変化

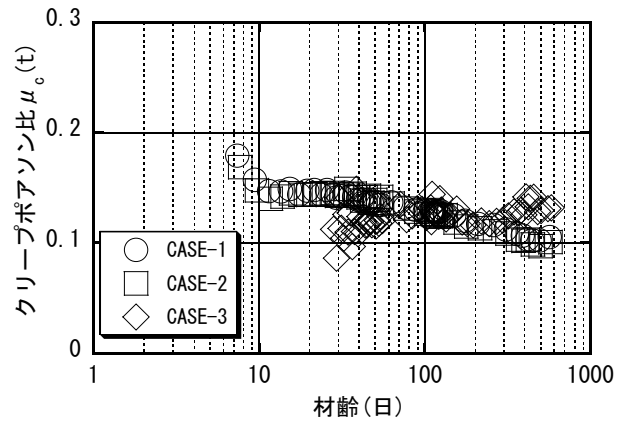


図-8 クリープポアソン比の経時変化

CASE-2 の $\varepsilon_c(t, t')$ の算出に際しては、 $\varepsilon_c(t')$ を 荷重材齢 7, 14, 28 日それぞれの弾性ひずみ増分とした。CASE-3 の $\varepsilon_c(t, t')$ の算出に際しては、 $\varepsilon_{sh}(t)$ を材齢 28 日以降の増分とした。

材齢 600 日での $\varepsilon_c(t, t')$ は、CASE-1 では約 $1450 [\times 10^{-6}]$ 、CASE-2 では約 $1250 [\times 10^{-6}]$ 、CASE-3 では約 $800 [\times 10^{-6}]$ であった。

最終的な荷重応力が同じであっても、荷重材齢の違いや荷重応力の変動により、終局クリープひずみは異なる結果となった。終局クリープひずみは、荷重材齢が早いほど大きく、荷重応力が大きいほど大きくなった。

3.5 クリープ係数

図-7 に、実測値より式(2)により算出したクリープ係数 $\phi(t, t')$ の経時変化を示す。ただし、CASE-2 については材齢 7~14 日の範囲で表示している。

$$\phi(t, t') = \varepsilon_c(t, t') / \varepsilon_c(t') \quad (2)$$

CASE-1 と CASE-3 は荷重応力 $\sigma(t)$ が同じ $f(28)$

$\times 0.3$ である。両者のクリープ係数 $\phi(t, t')$ を比較すると、荷重材齢 $t' = 7$ 日である CASE-1 の方が $t' = 28$ 日である CASE-3 よりも初期の進行速度が速く、一定値に早く収束する傾向が見られた。また、終局クリープ係数 ϕ_0 は荷重材齢が早いほど大きくなり、CASE-1 では $\phi_0 = 1.07$ 、CASE-3 では $\phi_0 = 0.73$ であった。

材齢 7 日に荷重した CASE-1 と CASE-2 の $\phi(t, t')$ を比較すると、 $\sigma(t)/f(t') = 0.4$ である CASE-1 の方が、 $\sigma(t)/f(t') = 0.3$ である CASE-2 よりも、材齢 7~14 日の範囲で約 1.25 倍大きい結果となった。

3.6 クリープポアソン比

図-8 に、式(3)により求めたクリープポアソン比 $\mu_c(t, t')$ の経時変化を示す。

$$\mu_c(t, t') = -\varepsilon_{Hc}(t, t') / \varepsilon_c(t, t') \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{Hc}(t, t') : \varepsilon_c(t, t')$ と同様にして求めた荷重直交方向のクリープひずみ $[\times 10^{-6}]$ 何れの試験ケースも $\mu_c(t, t')$ は 0.2 よりも小さく、終局値で概ね 0.10~0.15 の範囲にあった。

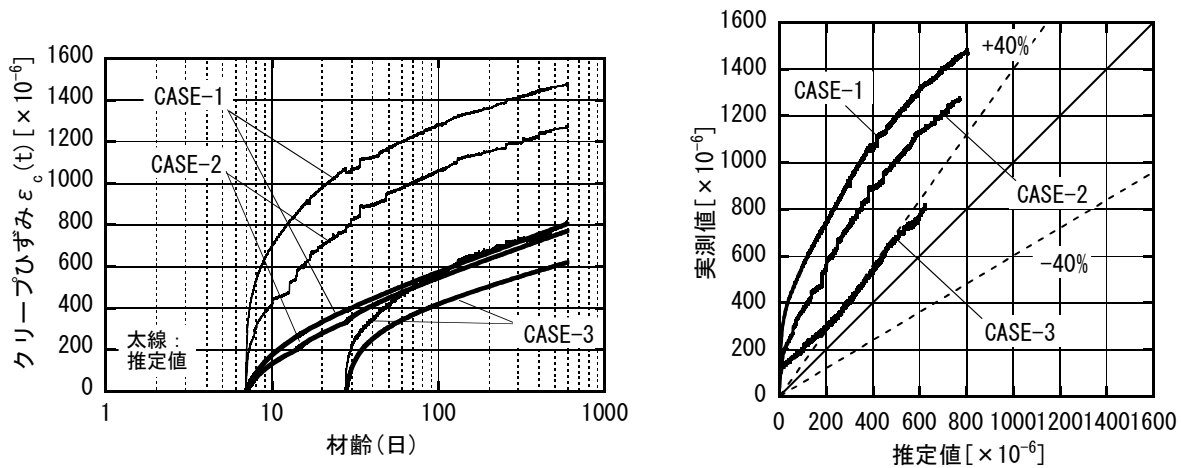


図-9 JSCE 式による推定値と実測値との比較

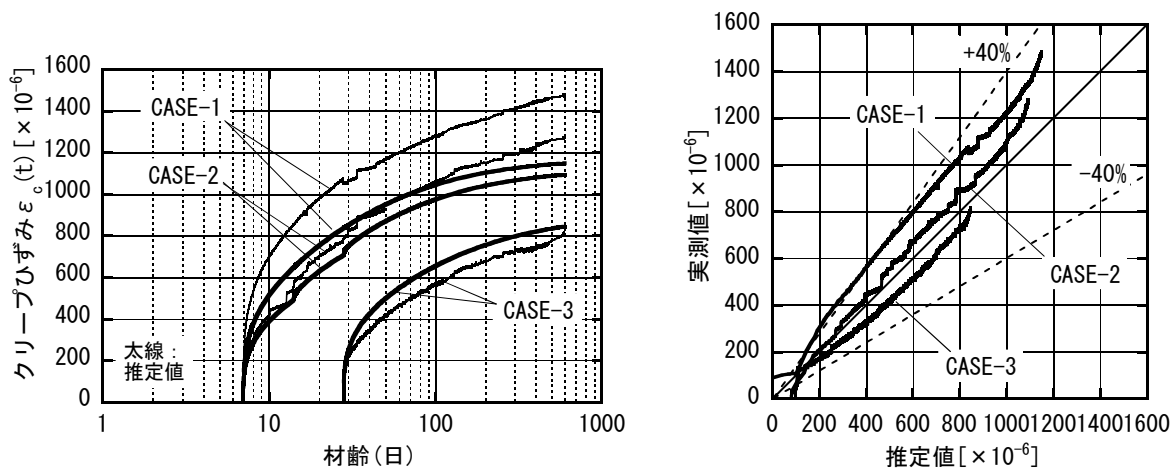


図-10 JCI 式による推定値と実測値との比較

4. 従来式によるクリープひずみの評価

従来のクリープひずみ評価式の、超高強度コンクリートのクリープ評価への適用性を検討する。今回、比較的高強度域を対象とし導出された JSCE 式⁵⁾および JCI 式⁴⁾を用いて検討した。

また、荷重が段階的に増加する場合のクリープひずみは、重ね合わせの原理⁹⁾に基づき、変動応力の増分 $\Delta\sigma(t')$ に対するクリープひずみ $\Delta\varepsilon_c(t, t')$ を算出し加算することで求めた。すなわち、CASE-2 の $\varepsilon_c(t, t')$ の算出に際し、材齢 7~14 日での $\Delta\sigma(t')$ を 36.6N/mm^2 、14~28 日での $\Delta\sigma(t')$ を $42.6-36.6=6.00\text{N/mm}^2$ 、28~600 日での $\Delta\sigma(t')$ を $48.3-42.6=5.70\text{N/mm}^2$ とした。

4.1 JSCE 式による推定値

圧縮強度が 55N/mm^2 を超える高強度コンクリートのクリープひずみは、式(4)で与えられる。

$$\varepsilon_c(t, t')/\sigma(t) = \{4W(1-RH/100)+350\} \div \{12+f(t')\} \times \log(t-t'+1) \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon_c(t, t')/\sigma(t)$: 単位クリープひずみ [$\times 10^{-6}/(\text{N/mm}^2)$]、 W : 単位水量 [kg/m^3] ($130 \leq W \leq 130$)、 RH : 相対湿度 [%] ($40 \leq RH \leq 90$)、ただし、 $f(t') \leq 80\text{N/mm}^2$

式(4)の導出は圧縮強度 120N/mm^2 までのデータベースに基づき検討されており、極めて簡便な式ながら、 $\pm 40\%$ の精度が示されている³⁾¹⁰⁾。

推定値に、式(4)の W として 150kg/m^3 、 RH として 100% 、 $f(t')$ に実測値を適用し推定値を算出した結果を図-9 に示す。 $\sigma(t)/f(t')=0.3$ 、 $t'=28$ 日である CASE-3 以外は、実測値が推定値の $\pm 40\%$ の範囲をはずれ、載荷材齢が早く載荷応力が大きいほど推定値は実測値を小さく評価する結果となった。

4.2 JCI 式による推定値

JCI 式は、 $f(28)$ が $89.7 \sim 126.3\text{N/mm}^2$ の範囲のデータより導出されたものであり、式(5)~(7)で表される。

$$\phi_{CEB}(t,t') = \phi_0 \times [(t-t') / \{\beta_H + (t-t')\}]^{0.3} \quad (5)$$

$$\phi_0 = 0.826 \times \{E(t') / E(28)\} - 1.67 \quad (6)$$

$$\beta_H = 0.0588 \times \exp\{7.75E(t') / E(28)\} \quad (7)$$

ただし、 $\phi_{CEB}(t,t') = \phi(t,t') \times E(t') / E(28)$

$E(t')$, $E(28)$, $f(t')$, $\epsilon_s(t')$ に実測値を適用し推定値を算出した結果を図-10に示す。何れの結果も、実測値は推定値の±40%の範囲内にあり、特に $\sigma(t)/f(t')=0.3$ であるCASE-2とCASE-3について実測値と同等の値が得られた。

JCI式は、 ϕ_0 と β_H を載荷時の圧縮強度 $f(t')$ や静弾性係数 $E(t')$ の関数とし、材齢に伴うクリープ進行特性の変化がJSCE式よりも厳密に考慮されている。このため、載荷材齢7日の推定値がJSCE式に比べ精度よく得られたと考えられる。

以上の結果より、今回の実験範囲において、JCI式によりFc150N/mm²級超高強度コンクリートの荷重が段階的に増加する場合を含めたクリープ挙動の長期実測値を概ね評価できた。

5. まとめ

Fc150N/mm²クラスの超高強度コンクリートのクリープ特性について以下の知見を得た。

- (1)長期段階載荷における弾性変形時の応力-ひずみ関係は、材齢と養生条件を同じくした静弾性係数試験の結果と同等である。
- (2)載荷応力が同じ場合、載荷材齢が早いほどクリープひずみ及びクリープ係数の進行速度は速く、一定値への収束も早い。また、終局クリープひずみおよび終局クリープ係数は大きくなる。
- (3)載荷材齢が同じ場合、載荷応力が大きいほど、クリープひずみおよびクリープ係数は大きい。
- (4)最終的な載荷応力が同じであっても、載荷材齢の違いや載荷応力の変動により、終局のクリープひずみは異なる。
- (5)材齢28日圧縮強度の30%を、材齢7日で載荷した場合の終局クリープ係数は1.07、材齢28日で載荷した場合の終局クリープ係数は0.73であった。
- (6)弾性変形時のポアソン比は0.2程度であり、ク

ープ試験時のポアソン比は0.10~0.15の範囲にある。

(7)JCI式によるクリープひずみ評価手法により、荷重が段階的に増加する場合を含めたクリープ挙動の長期実測値を概ね評価できた。

謝辞 今回報告した試験データは、(株)フジタ、三井住友建設(株)による共同研究成果の一部です。関係諸氏には多大なるご協力、有益なご意見を頂きました。ここに記し厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 河上浩司ほか：150N/mm²級高強度コンクリートの強度発現に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.1235-1240，2006
- 2) 松田拓ほか：初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの自己収縮特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.1247-1252，2006
- 3) 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変形に関するシンポジウム委員会報告書，pp.117-121，2001.7
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，pp.98-113，1996.11
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp.30-31，2002
- 6) 片寄哲務ほか：超高強度コンクリートの圧縮クリープ性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.391-392，2005.9
- 7) 寺西浩司ほか：Fc150N/mm²クラスの超高強度コンクリートのクリープおよび自己収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.499-504，2005
- 8) 特集*標準化を待つ試験方法：JIS原案コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案)，コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp.55~56，1985.3
- 9) 岩崎訓明：コンクリートの特性，共立出版株式会社，pp.116-117，1975.12
- 10) 阪田憲次ほか：高強度域を考慮した乾燥収縮ひずみおよびクリープ予測式の提案，土木学会論文集 V-53，No.690，pp.1-19，2001.11