約5年間の実測データに基づくコンクリートのクリープ・収縮寸法効果の評価と クリープ予測方法の提案

AN EVALUATION OF CREEP AND SHRINKAGE SIZE EFFECTS BASED ON ABOUT FIVE YEARS MEASUREMENTS AND A PROPOSAL OF PREDICTION MODEL FOR CONCRETE CREEP

今本 啓一*, 山本 俊彦**, 大岡 督尚***

Keiichi IMAMOTO, Toshihiko YAMAMOTO and Tokunao OH-OKA

It is well known that size of concrete member strongly affects its creep and shrinkage behaviors. In this study, creep and shrinkage strains of 50 and 130 MPa concretes in various size square columns were measured for about 5 years. The effects of size on shrinkage and creep were discussed through comparisons between the observed values and the calculated values by CEB-FIP 1990 and JSCE model codes. The results showed that these models, especially CEB-FIP 1990 Model Code (MC90) codes, could evaluate the relative changes of creep and shrinkage due to specimen size. This might indicate that the combination of accurate shrinkage and creep evaluations of reference specimen (Ex.10cm square column) and the size effect factor of MC90 enables the correct evaluation of shrinkage and creep of various size square columns. In this paper, a revised MC90 adjusted to creep data in Japan was also proposed.

Keywords: shrinkage, creep, size effect, column, high strength concrete, long-term measurement

収縮, クリープ, 寸法効果, 柱, 高強度コンクリート, 長期測定

1. はじめに

コンクリートのクリープ・収縮による時間依存変形はコンクリート自体のひび割れ発生の主要な原因であるのみならず, たわみ等, 構造物の長期的な使用性にも影響を及ぼす重要な要因の一つである。このため, これらクリープ・収縮予測のための式が提案され^{1),2),3)}, 一部実用に供されているものもある⁴⁾。この分野で蓄積されている多くのデータは小型の試験体を用いて得られたものであり, 予測式もこれらデータに基づいて構築されたものが多い。したがって, これら予測式を用いる上で実大部材との関連を検討することは実用上きわめて重要であるが, この種の検討は必然的に大規模な実験に基づかざるを得ないため, 小型の供試体と比較した研究例は極めて少ないのが現状である^{4),5),6),7)}。

T.C.Hansen⁸⁾らは⁹⁾普通強度レベルのコンクリートを対象とし, 直径4~24インチの円柱供試体, 11.5x4.25~46x17インチのI型供試体の材齢4年にわたるクリープ・収縮ひずみを測定した。ここでは, 長期的なクリープ・収縮に及ぼす部材寸法の影響は極めて大きく, さらにその影響は部材の体積表面積比で統一的に評価できることが示されている。また, A. H. Bryant¹⁰⁾らは⁹⁾, 普通強度レベルのコンクリートを対象とした約6年にわたるクリープ・収縮の実験データを整理し, ACI209モデルコードはその影響を過小評価するとともに, 同コードの時間関数項に部材寸法の影響を考慮することによって実験値を精度よく追跡できることを示している。一方国内においては, 安田ら¹¹⁾により普通強度レベルのコン

クリートを対象とした10x10~80x80cm部材の材齢11年までのクリープ・収縮測定が実施された。ここでは部材断面が大きくなるほどクリープは小さくなるが, 収縮ひずみについては, 乾燥開始が7,28日では部材間の差が小さいことが報告されている。梶田ら¹²⁾によって実施された60及び100MPa級の高強度コンクリートを対象とした20x20~60x60cm部材の材齢1年までのクリープ・収縮測定実験では, 強度レベルの高い方がひずみ(弾性ひずみ+収縮ひずみ+クリープひずみ)の増進が小さいことが報告されている。ここでは部材寸法の影響に関する詳細は報告されていない。

以上のように, クリープ・収縮を包含したコンクリートの時間依存特性に及ぼす部材寸法の影響に対しては, その研究例の少なさからも統一的な見解が得られていないのが現状である。さらに国内の材料を用いたコンクリートのクリープ・収縮特性は必ずしも国外の予測式によって精度よく評価できるとは限らないとの報告もあり⁸⁾, 今後, 本分野におけるこの種のデータを蓄積することはきわめて重要と考える。

本研究では, 50MPa, 130MPa級の2種類の強度レベルのコンクリートについて, 10x10cm~50x50cmを中心とした最大450x1300cmまでの種々の断面寸法の試験体の約5年間にわたるクリープ・収縮ひずみ測定を実施した。本論はその結果に基づき, クリープ・収縮ひずみに及ぼす部材寸法の影響について検討を行い, 特に広範囲な部材寸法に対応するクリープ予測への道筋について提案を行うものである。

* 足利工業大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

** 大同工業大学建設工学科建築学専攻 教授・工博

*** 東急建設(株)技術研究所 主任研究員・博士(工学)

Assist. Prof., Dept. of Architecture, Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Construction, Daido Institute of Technology, Dr. Eng.
Senior Research Engineer, Institute of Technology, Tokyuu Const. Co., Ltd., Dr. Eng.

2. クリープ・収縮に及ぼす部材寸法の影響の検討

2.1 実験概要

2.1.1 使用材料及び計画調査

本研究で使用したコンクリートは、強度レベル 50MPa, 130MPa 級の 2 種類である。それぞれの使用材料及び計画調査を表 1, 2 に示す。

表 1 使用材料

	50MPa	130MPa
セメント C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm ³	早強ポルトランドセメント 密度 3.14 g/cm ³
細骨材 S	川砂 密度 2.57 g/cm ³	川砂 密度 2.60 g/cm ³
粗骨材 G	硬質砂岩碎石 密度 2.60 g/cm ³	石英片岩碎石 密度 2.63 g/cm ³
混和材 SF	—	シリカフェーム 密度 2.2 g/cm ³
混和剤 Ad	AE 減水剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表 2 計画調査

強度 レベル	W/(C+SF) (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	SF	S	G	Ad
50 MPa	45.0	45.9	157	349	—	827	994	0.87
130 MPa	23.0	45.0	165	645	72	682	842	25.2

2.1.2 硬化コンクリート性状

本研究で使用したコンクリートの圧縮強度およびヤング係数を表 3 に示す。

表 3 コンクリートの圧縮強度およびヤング係数

強度レベル	28 日標準水中養生		28 日現場水中養生	
	圧縮強度	ヤング係数	圧縮強度	ヤング係数
50MPa	—	—	40.1MPa	28.8GPa
130MPa	124MPa	37.1GPa	—	—

2.1.3 部材条件および測定方法

本研究で使用した部材の形状を表 4 に示す。

表 4 部材形状および条件

強度 レベル	用途	縦 x 横 x 長さ cm	軸方向鉄 筋比(%)	ひずみ 測定	応力 強度比
50 MPa	クリープ	10x10x40	Plain	E.G ^{*3}	0.15
		25x25x160	Plain		0.14
		25x25x160	0.32		0.14
		50x50x310	Plain		0.14
		50x50x310	0.32		0.14
		200x1000x800	0.32		0.10
		450x1300x1800	0.32		0.15
	乾燥収縮	10x10x40	Plain	0	
		25x25x100 ^{*1}	Plain		
		25x25x160	0.32		
		50x50x100 ^{*1}	Plain		
		50x50x310	0.32		
		200x1000x800 ^{*2}	0.32		S.F.G ^{*4}
450x1300x1800 ^{*2}	0.32	S.F.G ^{*4}			
130 MPa	クリープ	10x10x40	Plain	E.G	0.28
		25x25x160			0.26
		50x50x310			0.28
	乾燥収縮	10x10x40			0
		25x25x100 ^{*1}			
		50x50x100 ^{*1}			

10x10x40cm, 25x25x160(100)cm および 50x50x310(100)cm 試験体は横置きで設置された鋼製型枠に打設し、その収縮ひずみは、断面中心部に設置された埋込み型ひずみ計 (Embedded gauge: E.G 表中*3) により測定した。乾燥収縮測定開始材齢は 50MPa 試験体で 14 日, 130MPa 試験体で 28 日であり、その時点まで試験体上面は湿布養生とした。断面寸法 25x25 および 50x50cm 試験体の端面は、乾燥防止の目的で、鋼板によりシールした (表中*1)。断面寸法 200x1000cm および 450x1300cm 試験体は反力壁 (応力導入は鉛直方向) であり、0.32%の軸方向鉄筋が配置されている。ここでは、上記の試験体 (断面寸法 10x10~50x50cm) と同一バッチのコンクリートにおける 1 箇所の計測値を用いた (計測位置: 図 1)。既往の文献⁹⁾によると、鋼材が配置された部材の乾燥収縮ひずみは、無応力計 (Stress free type gauge: S.F.G 表中*4) によりおおそ評価できることが示されている。図 2 に示す緊張力導入前後の無応力計および埋込み型ひずみ計の変化について、無応力計の測定値は、載荷による変化が生じておらず、周囲の拘束の影響を受けていないと考えられる。以上より、本研究では、無応力計による測定値は、無筋 (Plain) 状態の反力壁の乾燥収縮ひずみにほぼ相当すると仮定した。なお測定開始 (材齢 14 日) までは型枠を存置した。

図 1 反力壁におけるひずみ計・無応力計埋設位置

図 2 反力壁 (D450xW1300cm) におけるひずみ履歴

クリープ試験体の載荷開始材齢は 50MPa 試験体で 41 日, 130MPa 試験体で 28 日とした (50MPa 試験体は乾燥開始から載荷まで気中乾燥状態)。10x10x40cm 試験体はバネ式クリープ試験機により、25x25x160cm および 50x50x310cm 試験体はφ32PC 鋼棒により、そして反力壁はφ12.7PC ストラッド鋼線 (450x1300cm : 29 本, 200x1000 : 11 本) により応力を導入した。なお、450x1300cm および 200x1000cm 反力壁の応力導入は

それぞれ約5日および約3日を要している。本論のクリープひずみは載荷完了以降のひずみを対象とし、埋込み型ひずみ計 (E.G) の測定値から、同一断面の無載荷試験体の収縮ひずみを差し引くことにより求めた。反力壁については、無応力計 (S.F.G) の測定値に、後述する鉄筋の影響を考慮した値を差し引くことによりクリープひずみを求めた。

10x10x40cm, 25x25x160cm および 50x50x310cm 試験体の載荷応力は、ロードセルにより計測した。一方、反力壁における導入応力 ($\sigma(t)$) は載荷時の導入軸力を初期値とし、反力壁コンクリートのひずみのロス分が鋼材ひずみのロスであると仮定した下式により算定した。

$$\sigma(t) = \sigma_0 - \Delta \varepsilon(t) \cdot E_s \cdot A_s / A_c \quad (1)$$

ここで、

σ_0 : 導入軸力 (MPa)

$\Delta \varepsilon(t)$: コンクリートのひずみロス (=鋼材ひずみロス)

E_s : スtrandのヤング係数 (MPa)

A_s : スtrandの総断面積 (cm²)

A_c : コンクリートの断面積 (cm²)

図3, 4はクリープ試験における載荷応力履歴を示したものである。10x10x40cm, 25x25x160cm および 50x50x310cm 試験体については適宜導入応力の調整を行っている。図に示すように、反力壁も含めた約5年間の軸応力変動は50および130MPaクラスのコンクリート試験体でそれぞれ5および2%程度となっており、概ね安定した応力の導入が図られているものと考えられる。

図3 載荷応力履歴 (50MPa)

図4 載荷応力履歴 (130MPa)

2.1.4 環境条件

測定時における雰囲気温度、相対湿度の変化を図5, 6に示す。本実験では、50MPa試験体は雨掛りの無い屋内、130MPa試験体は公称 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, $60 \pm 5\% \text{R.H.}$ の恒温恒湿室内にて計測を行った。各条件における温度、湿度の変化を図5, 6に示す。なお、50MPa試験体の計測においては相対湿度の測定を行っていないため、ここでは雰囲気温度の測定結果のみを示す。計測期間中の平均気温は 14.1°C 、最高温度、最低温度はそれぞれ 31.0°C , 2.1°C であった。130MPa試験体における計測期間中の平均気温、平均相対湿度はそれぞれ 20.8°C (最高 22.0°C , 最低 19.7°C), 55.9% (最高 59.7% , 最低 52.0%)であった。

図5 雰囲気温度の変化 (50MPa)

図6 雰囲気温度湿度の変化 (130MPa)

2.2 実験結果

2.2.1 収縮ひずみ

50MPa試験体の収縮ひずみ測定結果を図7に示す。図は型枠脱型 (材齢14日) 以降の変化を示したものである。10x10x40cm試験体の収縮ひずみは概ね脱型後材齢500日で安定し、25x25x160(Plain:100)cm および 50x50x310(Plain:100)cm試験体の収縮ひずみは概ね脱型後材齢1200日で安定している。鉄筋の拘束により有筋 (Re-bar) 試験体の収縮ひずみは、無筋 (Plain) のそれと比較して若干小さく、その割合は約0.8である。450x1300cm および 200x1000cm反力壁の収縮ひずみは脱型後材齢約1500日の範囲内ではほとんど進展していない。脱型後材齢約1500日時点の収縮ひずみは、10x10x40cm試験体では約 1200×10^{-6} に達し、450x1300cm および 200x1000cm反力壁では約 100×10^{-6} 程度である。断面寸法が大きくなるほど収縮ひずみが小さくなる傾向が顕著である。同図にはCEB-FIP Model Code1990 (MC90) および土木学会普通強度予測式 (JSCE(N)) による計算結果が示されている。同式における相

対湿度の入力値としては、近隣地区でこの期間測定された相対湿度の平均値：67.7%（最高：84%，最低：46%）を用いた。いずれの式も実測値を過少評価する結果となっている。

図7 収縮ひずみの変化 (50MPa)

130MPa 試験体の収縮ひずみ測定結果を図8に示す。図はクリープ載荷材齢（28日）以降の変化を示したものである。10x10x40cm, 25x25x100cm および 50x50x100cm 試験体とも、収縮ひずみは概ね脱型後材齢800日で安定する傾向が見られる。10x10x40cm 試験体の収縮ひずみは脱型後材齢約1700日で約 200×10^{-6} であり、断面寸法が25x25, 50x50cm と大きくなるにつれ収縮ひずみが小さくなる傾向が、本強度レベルにおいても認められる。同図には MC90 および土木学会高強度予測式 (JSCE(H)) による計算結果が示されている。本強度はいずれの予測式の適用範囲を超えたものであるため本結果はあくまで参考値となるが、実測値に対する JSCE 式予測値は若干の過大評価、MC90 予測値は若干過少評価となる傾向にある。

図8 収縮ひずみの変化 (130MPa)

2.2.2 クリープ

50MPa 試験体の単位クリープひずみの測定結果を図9に示す。図は軸力導入以降の変化を示したものである。10x10x40cm, 25x25x100cm および 50x50x100cm 試験体とも、単位クリープひずみは載荷後材齢約4年を経ても若干であるが漸増する傾向にある。10x10x40cm 試験体の単位ク

リーブひずみは載荷後材齢約1500日で約 $220 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ であり、断面寸法が25x25, 50x50cm と大きくなるにつれひずみが若干小さくなる傾向にある。鉄筋の有無による単位クリープひずみの差は顕著には認められない^{appendix1}。このことから、200x1000cm, 450x1300cm 反力壁のクリープは、埋込み型ひずみゲージの測定値から、鉄筋の影響を考慮して、無応力計の値に0.8を乗じた値を差し引いて求めた。これによると、部材寸法の大幅な増大により、クリープが明らかに低下する傾向が認められる。なお、同図には MC90 および土木学会普通強度予測式 (JSCE(N)) による計算結果が示されている。同式における相対湿度の入力値は、前述の収縮ひずみのそれと同じ値を用いているが、いずれの式も実測値を過少評価する結果となっている。骨材岩種などの影響が大きいものと思われるが詳細な原因は不明である。MC90 について、載荷後材齢約1500日の値を最終値とみなして実測値にフィットさせた太曲線 (Revised MC90) も表示した。断面の小さな部材では外気温湿度の変化の変動により初期のひずみに乖離が生じているが、その影響が相対的に小さい大断面部材 (50x50cm 以上) では良い一致が見られている。したがって最終値を精度良く推定できれば、経時的な変化も概ね評価できるものと思われる。

図9 単位クリープひずみの変化 (50MPa)

130MPa 試験体のクリープひずみ測定結果を図10に示す。図は載荷 (材齢28日) 以降のひずみの変化を示したものである。10x10x40cm, 25x25x160cm および 50x50x310cm 試験体とも、単位クリープひずみは概ね脱型後材齢900日で安定する傾向が見られる。10x10x40cm 試験体の単位クリープひずみは載荷後材齢約1700日で約 25×10^{-6} であり、前述の50MPa試験体と比較して約1/10程度である。断面寸法が25x25, 50x50cm と大きくなるに伴い、寸法に伴う一定の傾向は認められないが、その値は10x10x40cm 試験体と比較して若干小さくなる。単位クリープひずみの差としてみた場合、部材寸法の増加に伴う130MPaコンクリートのひずみの低下は、前述の50MPaコンクリートのひずみ低下に比較して極めて小さい。同図には MC900 および JSCE(H) による計算結果が示されている。本強度はいずれの予測式の適用範囲を超えたものであるため、前述の収縮ひずみ同様、本結果はあくまで参考値となるが、実測値に対する JSCE 式予測値および MC90 予測値はいずれも過大評価となる傾向にある。

図 10 単位クリープひずみの変化 (130MPa)

2.3 考察

2.3.1 収縮ひずみに及ぼす部材寸法の影響

50, 130MPa 試験体の収縮ひずみ比(Shrinkage strain ratio)と仮想部材厚 h もしくは体積表面積比 v/s の関係を図 11, 12 に示す。収縮ひずみ比におけるひずみの値は、10x10cm 試験体の収縮ひずみに対する各試験体の値の割合として算出した。なお、50MPa については脱型後材齢約 1500 日時点、130MPa については脱型後材齢約 1700 日時点のものである。図 11 は部材断面寸法 50x50cm 試験体までの結果を示したものである。図に示されるように、強度レベルに関わらず部材断面の増大に伴い、部材中心部の収縮ひずみはほぼ一定の低下傾向を示し、本検討の範囲内では収縮ひずみは約 40%低下する。この低下傾向は MC90, JSCE(適用範囲外の 130MPa は除く)のいずれによっても概ね評価できている。

図 11 収縮ひずみの比と寸法の関係 (50x50cm まで)

図 12 は、50MPa 試験体について、部材断面寸法 450x1300cm 試験体まで拡張した結果を示したものである。図に示されるように、部材断面の増大に伴う中心部の収縮ひずみの低下は著しく、同寸法における収縮ひずみは 10x10cm 試験体の約 5% (低下量約 95%) となる。この低下傾向は MC90 によって概ね評価できている。本部材寸法は JSCE 式の適用範囲外であるため、ここでは計算結果を示していない。前述した図 7, 8 そして既往の文献⁹⁾より、各種断面コンクリートの収縮ひずみを直接的に既往の予測式で算定することは困難であるものの、図 11,12 の結果よ

り、10x10cm 試験体の収縮ひずみを精度よく求めた上で、既往のモデルコードを用いて部材寸法補正を行うことで、各種断面の収縮ひずみを精度良く推定することが可能と考えられる。

図 12 収縮ひずみの比と寸法の関係 (450x1300cm まで)

2.3.2 単位クリープひずみに及ぼす部材寸法の影響

50, 130MPa 試験体の単位クリープひずみ比(Specific creep strain ratio)と仮想部材厚 h もしくは体積表面積比 v/s の関係を図 13, 14 に示す。単位クリープひずみ比におけるひずみの値は、10x10cm 試験体の単位クリープひずみに対する各試験体の値の割合として算出した。なお、50MPa については載荷後材齢約 1500 日時点、130MPa については載荷後材齢約 1700 日時点のものである。図 13 は部材断面寸法 50x50cm 試験体までの結果を示したものである。図に示されるように、強度レベルに関わらず部材断面の増大に伴い部材中心部の単位クリープひずみは若干の低下傾向を示す。本検討範囲内ではその大きさは約 10~20%であり、収縮ひずみのそれ(約 40%)と比較した低下量は小さい。MC90 は強度レベルに関らず部材寸法の増大に伴う単位クリープひずみの低下を表現するが、JSCE(N)と(H)では部材寸法の影響の考慮に差異がみられる。測定データは概ねその中間に位置する。

図 13 単位クリープの比と寸法の関係 (50x50cm まで)

図 14 は、50MPa 試験体について、部材断面寸法 450x1300cm 試験体まで拡張した結果を示したものである。図に示されるように、部材断面の増大に伴う中心部の単位クリープひずみの低下は断面寸法 50x50cm 以降も進んでおり、本検討範囲内の断面寸法における単位クリープひずみ低下量は 10x10cm 試験体の約 50%となり、前述の収縮ひずみのそれ(約

95%)と比較して小さい。この低下傾向は MC90 によって概ね評価できている。図 9, 10 より, 各種断面のコンクリートの単位クリープひずみを直接的に既往の予測式で算定することは困難であるものの, 図 13, 14 の結果より, 10x10cm 試験体の単位クリープひずみを予め精度よく求めた上で, 既往のモデルコードを用いて部材寸法補正を行うことで, 各種断面のクリープひずみを精度良く推定することが可能と考えられる。

図 14 単位クリープの比と寸法の関係 (450x1300cm まで)

3. 既往の実験データに基づくクリープ予測当てはめ式の提案

3.1 予測当てはめ式の位置づけ

10x10cm 試験体の収縮・クリープひずみを予め把握することにより, 各断面の収縮・クリープひずみを概ね精度良く推定できる可能性のあることを記述した。10x10cm 試験体の収縮ひずみを, 短期データに基づいて推定する手法は既に検証している¹⁰⁾。この方法は管理された環境下であれば精度面で満足の行くものであり, また, 収縮ひずみを測定すること自体は実験的な労力をそれほど要しないことから, 比較の実用的なアプローチであると考えられる。一方, クリープについては実験的な労力が収縮ひずみのそれよりも相対的に大きいことから, これに関しては調査・環境条件より算定できることが望ましい。ここでは既往の実験データに基づくクリープ係数の予測当てはめ方法を検討することにより, 広範囲な部材寸法に対応するクリープ予測への道筋について提案を行うものである。当てはめの基本式としては, 前述の知見に基づき, MC90 をベースに検討を行うこととする。

3.2 既往の実験データの概要

本研究で検討するクリープ実験データは10x10x40cm角柱もしくは10x20cm円柱試験体を用いたものであり, 既往の検討¹¹⁾に用いられたものを対象とした。実験シリーズとしての総数は約80件であり, 10x10x40cmもしくはφ10x20cm試験体を用いた圧縮クリープを対象としている。クリープの平均材齢はそれぞれ約250日であり, 1シリーズあたり平均約3~5程度のデータ(データ総数: 約399)を使用した。調査対象コンクリートの平均圧縮強度は61 MPa(最大135 MPa, 最小20 MPa)である。なおデータの抽出にあたり, クリープの数値が記載されているものについてはその値を採用し, 図化されているものについては, 該当図より読みとることとした。

3.3 当てはめ式の提案

MC90 は以下の式により表される。本論では, 図 9, 10, 13, 14 の結果に基づき, 本式における寸法効果を表す項 (ϕ_{RH} , $\beta_c(t-t_0)$) はそのままとし, それ以外の項を実験データにフィットさせることにより, 当てはめ式を

構築することとした。

・ CEB-FIP1990

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (2)$$

ここに,

$\phi(t, t_0)$: 終局クリープ係数(notional creep coefficient)

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

$$\phi_{RH} = 1 + (1 - RH/RH_0) / [0.46 \cdot (h/h_0)^{1/3}]$$

$$\beta(f_{cm}) = 5.3 / (f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}$$

$$\beta(t_0) = 1 / (0.1 + (t_0/t_1)^{0.2})$$

$$\beta_c(t - t_0) = [(t - t_1)/t_1 / (\beta_H + (t - t_1)/t_1)]^{p_3}$$

$$\beta_H = 150 [1 + (1.2 RH/RH_0)^{18}] \cdot h/h_0 + 250 \leq 1500$$

$$h = 2A_c/u$$

$\phi(t, t_0)$: 材齢 t_0 (日) で載荷した材齢 t (日) でのクリープ係数

$\beta_c(t - t_0)$: 時間に依存するクリープの進行を表す係数

RH: 相対湿度(%) RH_0 : 100%

f_{cm} : 材齢 28 日圧縮強度(MPa) f_{cm0} : 10MPa

h : 仮想部材厚(mm) A_c : 部材断面積

u : 部材断面の外気に接する部分の長さ

h_0 : 100mm t_1 : 1(日)

検討の手順は以下により行う。

- ① 式(2)において当該材齢(t_0)のクリープデータ ($\phi(t_0, t_0)$) に対し, 下式(3)により ϕ_0 を推定する。

$$\phi_0 = \phi(t_0, t_0) / \beta_c(t_0 - t_0) \quad (3)$$
- ② この ϕ_0 を ϕ_{RH} で除し, 同一載荷材齢 (28 日) のデータについて, $\beta(f_{cm}) / (\beta(t_0) / \beta(28))$ と $1/(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}$ の関係を検討する。これを図 15 に示す。このデータ群に対して直線回帰を行い, この関係式を用いて $\beta'(f_{cm})$ とする。

図 15 $\beta(f_{cm})$ と $1/(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}$ の関係

- ③ 同一シリーズで載荷時材齢を変化させた実験データを対象に, ①の手法で ϕ_0 を推定し, これを ϕ_{RH} 及び②で得られた式により除す。これによって得られた $\beta(t_0)$ に相当する。載荷材齢 28 日の値に対する比の逆数と $(\beta(28)/\beta(t_0))$ と $(t_0/t_1)^{0.2}$ の関係を図 16 に示す。このデータ群に対して直線回帰を行い, この関係式を用いて $\beta'(t_0)$ とする。

図 16 $(\beta(28)/\beta(t_o))$ と $(t_o/t_1)^{0.2}$ の関係

以上より当てはめ式は以下の通りとなる。

$$\phi(t, t_o) = \phi_o \cdot \beta_c(t - t_o) \quad (4)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \phi_o &= \phi_{RH} \cdot \beta'(f_{cm}) \cdot \beta'(t_o) \\ \phi_{RH} &= 1 + (1 - RH/RH_o) / [0.46 \cdot (h/h_o)^{1/3}] \\ \beta'(f_{cm}) &= 3.32 / ((f_{cm}/f_{cmo})^{0.5} - 0.51) \\ \beta'(t_o) &= 1.81 - 0.43(t_o/t_1)^{0.2} \end{aligned}$$

3.4 実験データとの比較

式(2)に示す MC90 と当てはめ式(4)による計算値と実験値の比較を図 17, 18 に示す。本提案式の強度の適用範囲は、検討したデータより上限 130MPa である。実験データとの適合性は下式に示す誤差係数(E)により評価した¹²⁾。図に示すように MC90 では実験値との間に若干の乖離が生じているが、上記のデータフィットにより、誤差係数の評価においては約 24%適合性が改善されている。しかしながらそれでも図 18 に示す実験値と計算値は、最大 1/2~2 倍程度の範囲で差が生じている。解析上、乾燥収縮拘束応力の変動に及ぼすクリープ変動の影響の大きさは、収縮ひずみのそれと比較して 1/10 程度であることが示されている¹³⁾ものの、この精度のさらなる改善が今後の課題であるとする。

図 17 実験値と計算値の比較 (MC90)

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n 1/\varepsilon_{mi}}{N} \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{mi})^2}{n} \right]^{0.5} \cdot 100 \quad (5)$$

ここに、

N: 実験シリーズ数

n: 実験データ数

ε_{mi} : 測定値

ε_{pi} : 算定値

図 18 実験値と計算値の比較 (当てはめ式)

4. まとめ

本研究では、50MPa、130MPa 級の 2 種類の強度レベルのコンクリートについて、10x10cm~50x50cm を中心とした最大 450x1300cm までの種々の断面寸法の試験体の約 5 年間にわたるクリープ・収縮ひずみ測定を実施した。その結果に基づいて、クリープ・収縮ひずみに及ぼす部材寸法の影響、既往のモデルコードによる寸法効果評価の適用性について検討を行った。本研究の結果を以下にまとめる。

- 1) 部材寸法が大きくなるほど、クリープ・収縮ひずみは小さくなる。クリープひずみに及ぼす部材寸法の影響は、収縮ひずみに及ぼす部材寸法の影響と比較して相対的に小さい。
- 2) 単位クリープひずみについてみた場合、部材寸法の増加に伴う 130MPa 強度レベルコンクリートのひずみの低下は 50MPa 強度レベルコンクリートのひずみ低下に比較して極めて小さい。
- 3) 部材寸法の増加に伴う相対的なクリープ・収縮ひずみの低下傾向は既往の予測式である CEB-FIP1990 Model Code により概ね評価可能である。
- 4) 以上より、例えば 10x10cm 断面の試験体を基準として、その値を把握することにより、各種断面のクリープ・収縮ひずみを精度良く推定することが可能であると考え、本論においてクリープ予測当てはめ式についての提案を行った。

参考文献

- 1) CEB-FIP: Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton, 1990
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002.4
- 3) N.J. Gardner: Design Provisions for Shrinkage and Creep of Concrete,

ACI SP-194, pp.101-133, 2000.8

- 4) T.C. Hansen, A.H. Mattock: Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete, Journal of ACI., pp.267-289, 1966.2
- 5) A. H. Bryant, C. Vadhavakkitt: Creep, Shrinkage-Size, and Age at Loading Effects, ACI Materials Journal, pp.117-123, 1987.
- 6) 安田正雪他: 大型コンクリート柱部材の圧縮クリープ性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1256-1257, 1991.9
- 7) 榊田佳寛他: 高強度コンクリートを用いた柱部材の圧縮クリープ性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1511-1512, 1993.9
- 8) 今本啓一, 山本俊彦: 既往の実験データに基づいたコンクリートの乾燥収縮予測当てはめ式の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.552, pp.1-6, 2002.2
- 9) 武田均他: 壁状コンクリート構造物中の無応力計のひずみに関する検討, 土木学会第 49 回年次学術講演会, pp.712-713, 2004.
- 10) 石井寿美江, 今本啓一: 短期の実験データに基づくコンクリートの乾燥収縮量の予測, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工, pp.115-116, 2003.9
- 11) 日本建築学会: プレストレスト (鉄筋) コンクリート構造部材の設計法—現状と将来—, pp.1-9, 2000.4.
- 12) Neville A.M., Dilger W.H., and Brooks J.J.: Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, 1983.
- 13) 関田徹志他: 収縮ひび割れ制御に関する性能設計について—その 2 収縮ひび割れ発生確率モデル, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.45-48, 2005.3

Appendix 1

鉄筋コンクリート (RC) 部材のクリープについて

RC 部材のクリープ載荷ではコンクリートの単位応力度あたりのクリープ ($S(t)$) は以下の付式(1)により表すことができる, すなわち,

$$S(t) = (\varepsilon_f - \varepsilon_{fc}) / \sigma_c(t) \quad \text{付(1)}$$

ここに,

 $\sigma_c(t)$: コンクリートの応力度, ε_f : 無載荷の RC 部材のひずみ ε_{fc} : 載荷された RC 部材のひずみ

この状況で, コンクリート自体のクリープによりコンクリートと鉄筋の応力分担率が変化することが考えられる ($\sigma_c(t)$ が時間とともに変化する)。今, RC 部材のクリープ載荷試験において, 以下の仮定を設ける。

1. RC 部材への載荷荷重は, 鉄筋とコンクリートに作用する荷重の和である。
2. クリープ載荷において, 鉄筋ひずみとコンクリートひずみは等しい。

この場合, コンクリートの応力度 $\sigma_c(t)$, は, 1 の力の釣り合いおよび 2 のひずみの適合条件より, 付式(2)で表すことができる。

$$\sigma_c(t) = P / (A_c + E_s / E_{ec}(t) \cdot A_s) \quad \text{付(2)}$$

ここに,

 $\sigma_c(t)$: コンクリートの応力度

P: 載荷荷重(kN)

 A_c : コンクリート断面積(mm²) E_s : 鉄筋ヤング係数(kN/mm²) $E_{ec}(t)$: コンクリートのクリープを考慮したヤング係数(kN/mm²)

$$E_{ec}(t) = E_c / (1 + \phi(t, t_o))$$

 $\phi(t, t_o)$: 材齢 t_o (日) で載荷した材齢 t (日)でのクリープ係数 A_s : 鉄筋断面積(mm²)

今, 本論で検討した 50MPa 強度レベルの断面 50x50cm RC 部材について, 鉄筋比をパラメータ (0~3%) に取ったコンクリート応力度の変化及び単位クリープひずみの変化を付図 1 および 2 に示す。コンクリートの応力度は鉄筋の存在により減少 (鉄筋に応力が移行) し, 結果として単位クリープひずみは増加する傾向にある。しかしながら本研究で対象とする鉄筋比 0.32%では鉄筋比 0% (無筋) と比較してその変化は図に示すように小さく, これが本実験でも無筋部材と RC 部材でクリープに大きな差を生じなかった一因と考えられる。以上の考察に基づき, 本実験では RC 部材のクリープをほぼ無筋部材のそれと同等として取り扱うこととした。

付図 1 コンクリート応力度の変化 (50x50cm 部材)

付図 2 単位クリープひずみの変化 (50x50cm 部材)

(2004年12月10日原稿受理, 2005年3月23日採用決定)