

論文 約5年間のクリープ・収縮ひずみ測定データに基づく部材寸法の影響評価

今本 啓一^{*1}・山本 俊彦^{*2}・大岡 督尚^{*3}

要旨：50MPa, 130MPa 級の2種類の強度レベルのコンクリートについて、10×10cm～50×50cm を中心とした最大 450×1300cm まで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、部材寸法の影響について検討した。1)クリープひずみに及ぼす部材寸法の影響は、収縮ひずみのそれと比較して相対的に小さい。2) 高強度コンクリートにおける、寸法にともなうクリープひずみの低下量は著しく小さい。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 CEB-FIP Model Code1990 により概ね評価可能である。などの知見を得た。

キーワード：クリープ, 収縮, 高強度コンクリート, 寸効効果, CEB-FIP Model Code1990

1. はじめに

コンクリートのクリープ・収縮はコンクリート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、構造物の使用性にも影響を及ぼす要因の一つである。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^{1),2)}。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^{4),5),6),7)}。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、10×10cm～50×50cm を中心とした最大 450×1300cm まで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結果について述べるものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び計画調査

コンクリートの使用材料, 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 3.16kg/l	早強ポルトランドセメント 密度 3.14kg/l
細骨材 S	川砂 密度 2.57kg/l	川砂 密度 2.60kg/l
粗骨材 G	硬質砂岩碎石 密度 2.60kg/l	石英片岩碎石 密度 2.63kg/l
混和材 SF	—	シリカフェューム, 密度 2.2kg/l
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

2.2 硬化コンクリート性状

圧縮強度及びヤング係数を表-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	—	—

2.3 部材条件および測定方法

部材の形状を表-4 に示す。10×10×40cm, 25×25×160(100)cm および 50×50×310(100) cm 試験体の収縮ひずみは、断面中心部の埋込み型ひずみ計 (E.G 表中*3) により測定した。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 25×25 お

*1 足利工業大学 工学部建築学科 講師 博士 (工学) (正会員)

*2 大同工業大学 建設工学科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 東急建設 (株) 技術研究所 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

よび 50×50cm 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 200×1000cm および 450×1300cm 試験体は反力壁であり、0.32%の軸方向鉄筋が配置されている(表中*2)。既往の文献⁸⁾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(S.F.G 表中*4)により評価できることが示されている。また図-1 に示す位置に設置した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、荷重による変化が生じておらず、拘束の影響を受けていないと考えられる(図-2)。以上より、無応力計による測定値は、無筋(Pt:0%)状態の反力壁の乾燥収縮ひずみに相当すると仮定した。

表-4 部材形状および条件

強度レベル	用途	縦×横×長さ cm	Pt (%)	ひずみ 測定	軸力 比
50 MPa	クリープ	10×10×40	0	E.G ^{*3}	0.15
		25×25×160	0		0.14
		25×25×160	0.32		0.14
		50×50×310	0		0.14
		50×50×310	0.32		0.14
		200×1000×800	0.32		0.10
		450×1300×1800	0.32		0.15
	乾燥収縮	10×10×40	0	0	
		25×25×100 ^{*1}	0		
		25×25×160	0.32		
		50×50×100 ^{*1}	0		
		50×50×310	0.32		
		200×1000×800 ^{*2}	0.32		
		450×1300×1800 ^{*2}	0.32	S.F.G ^{*4}	
130 MPa	クリープ	10×10×40	0	E.G	0.28
		25×25×160			0.26
		50×50×310			0.28
	乾燥収縮	10×10×40	0	0	
		25×25×100 ^{*1}			
		50×50×100 ^{*1}			

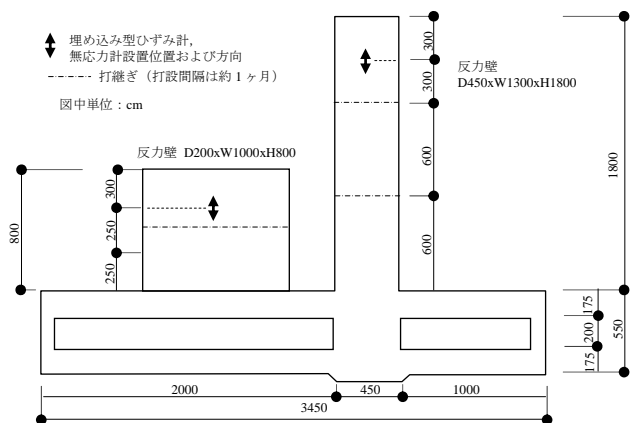


図-1 反力壁におけるひずみ計・無応力計埋設位置

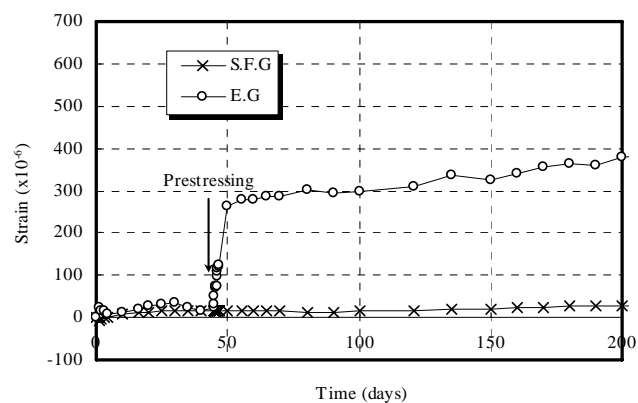


図-2 反力壁 (D450×W1300cm) におけるひずみ履歴

クリープ試験体の養生方法は乾燥収縮試験体のそれと同一とした。10×10×40cm 試験体はバネ式クリープ試験機により、25×25×160cm および 50×50×310cm 試験体はφ32PC 鋼棒により、そして反力壁はφ12.7PC ストランド鋼線 (450×1300cm : 29 本, 200×1000 : 11 本) により応力を導入した。荷重材齢は 50MPa 試験体で 41 日, 130MPa 試験体で 28 日である。なお、450×1300cm および 200×1000cm 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荷重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、同一断面緒元の無荷重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。反力壁における応力変動は荷重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。

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

ここで、

$\sigma(i)$: 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 : ストランドのヤング係数 (MPa)

A_s : ストランドの総断面積 (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荷重応力履歴を示す。反力壁も含めた約 5 年間の軸応力変動は 50 及び 130MPa クラスの試験体でそれぞれ 5 及び 2% 程度となっており、概ね安定した応力導入が図られている。

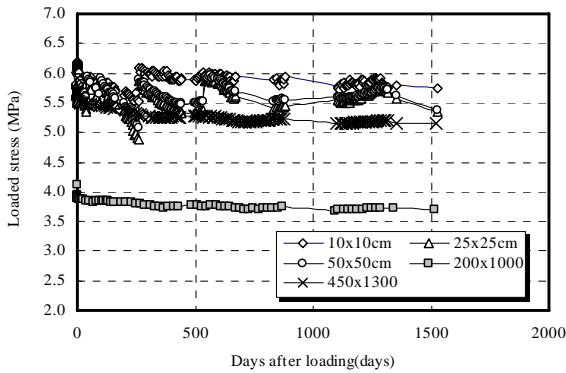


図-3 荷重応力履歴 (50MPa)

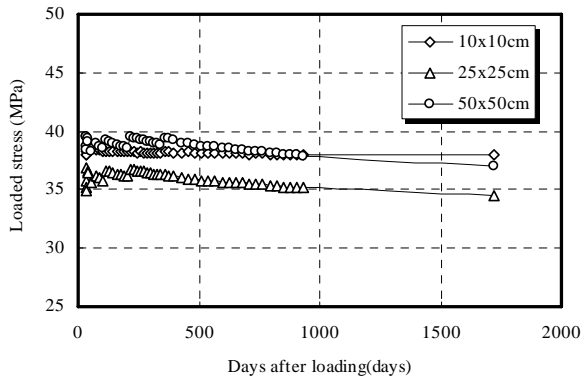


図-4 荷重応力履歴 (130MPa)

2.4 環境条件

測定中の気温度、相対湿度の変化を図-5、6に示す。

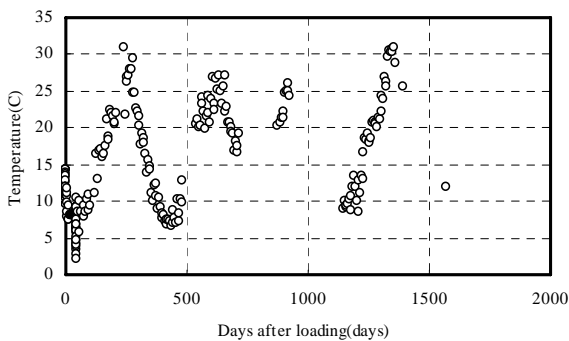


図-5 雰囲気温度の変化 (50MPa)

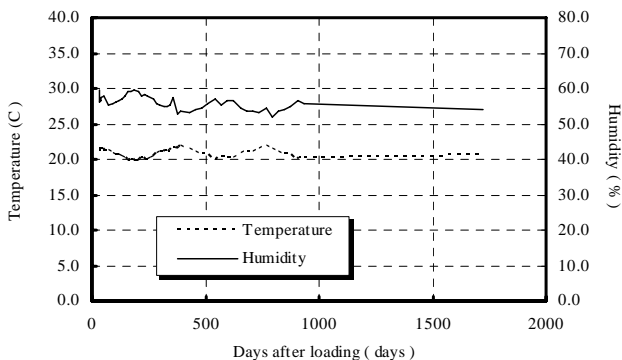


図-6 雰囲気気温湿度の変化 (130MPa)

50MPa 試験体は屋内、130MPa 試験体は $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内にて計測を行った。計測期間中の平均気温は 50MPa で 14.1°C 、(最高温度 31.0 、最低温度 2.1°C) であった。130MPa 試験体では平均気温、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。

3. 実験結果

3.1 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。10×10×40cm 試験体の収縮ひずみは脱型後材齢 500 日で安定し、25×25cm および 50×50cm 試験体の収縮ひずみは概ね 1200 日で安定している。無筋(Pt:0%)に対する有筋 (Re-bar) 試験体の収縮ひずみの割合は約 0.8 である。450×1300cm および 200×1000cm 反力壁のひずみは材齢約 1600 日の範囲内ではほとんど進展していない。10×10×40cm 試験体の収縮ひずみは材齢約 1600 日で約 1200×10^{-6} に達し、450×1300cm および 200×1000cm 反力壁のひずみは同材齢で約 100×10^{-6} である。同図には CEB-FIP Model Code1990 (仮想部材厚は測定断面で算定) および土木学会普通強度予測式 (JSCE: 適用上限 55MPa) 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、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。いずれも実測値を過少評価している。

130MPa 試験体の収縮ひずみ測定結果を図-8に示す。図はクリープ荷重材齢 (28 日) 以降の変化を示したものである。10×10×40cm 試験体の収縮ひずみは概ね材齢 800 日で安定し、25×25×100cm および 50×50×100cm 試験体の収縮ひずみも概ね同時期に安定している。10×10×40cm 試験体の収縮ひずみは材齢約 1800 日で約 200×10^{-6} であり、断面寸法が 25×25、50×50cm 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 CEB-FIP Model Code1990 (MC90) および土木学会高強度予測式 (JSCE) 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 式予測値は過大評価、

MC90 予測値は若干過少評価となる傾向にある。

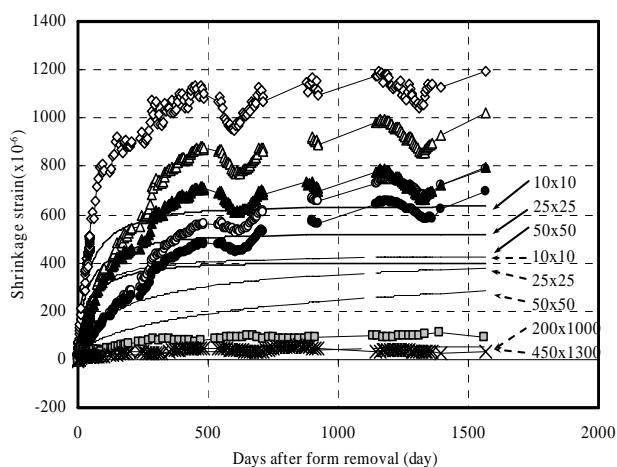
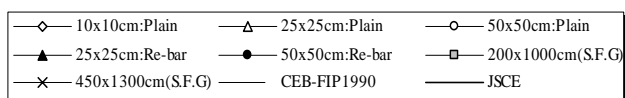


図-7 収縮ひずみの変化 (50MPa)

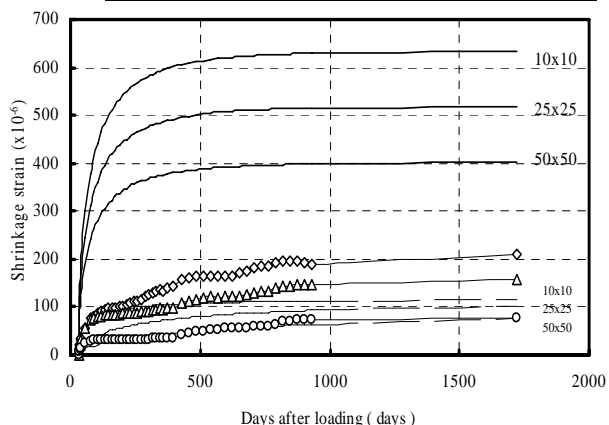
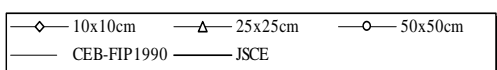


図-8 収縮ひずみの変化 (130MPa)

3.2 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(材齢41日、但し反力壁は+3~5日)以降の変化を示したものである。10×10×40cm 試験体の単位クリープひずみは概ね脱型後材齢900日で安定し、25×25×160cmおよび50×50×310cm試験体の単位クリープひずみも概ね同時期に安定する傾向が見られる。10×10×40cm 試験体の単位クリープひずみは材齢約1800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25×25、50×50cmと大きくなるに伴い、寸法に伴う一定の傾向は認められるが、その低下度合いは50MPaコンクリートと比較して著しく小さい。同図にはMC90および土木学会高強度予測式(JSCE)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、

みの差は顕著ではない。このことから、200×1000cm、450×1300cm 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。部材寸法の大幅な増大により、クリープは明らかに低下している。同図にはMC90およびJSCE(適用範囲の寸法50×50cmまでを記載)による計算値が示されている。同式における相対湿度入力値は、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。

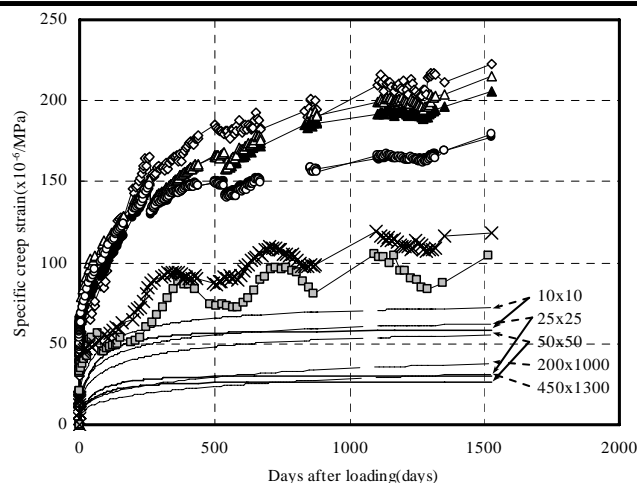
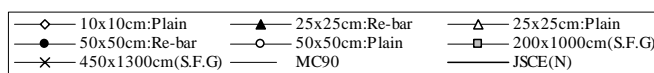


図-9 単位クリープひずみの変化 (50MPa)

130MPa 試験体のクリープひずみ測定結果を図-10に示す。図は軸力導入(材齢28日)以降のひずみの変化を示したものである。10×10×40cm 試験体の単位クリープひずみは概ね脱型後材齢900日で安定し、25×25×160cmおよび50×50×310cm試験体の単位クリープひずみも概ね同時期に安定する傾向が見られる。10×10×40cm 試験体の単位クリープひずみは材齢約1800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25×25、50×50cmと大きくなるに伴い、寸法に伴う一定の傾向は認められるが、その低下度合いは50MPaコンクリートと比較して著しく小さい。同図にはMC90および土木学会高強度予測式(JSCE)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 式および CEB-FIP Model Code 予測値はいずれも過大評価となる傾向にある。

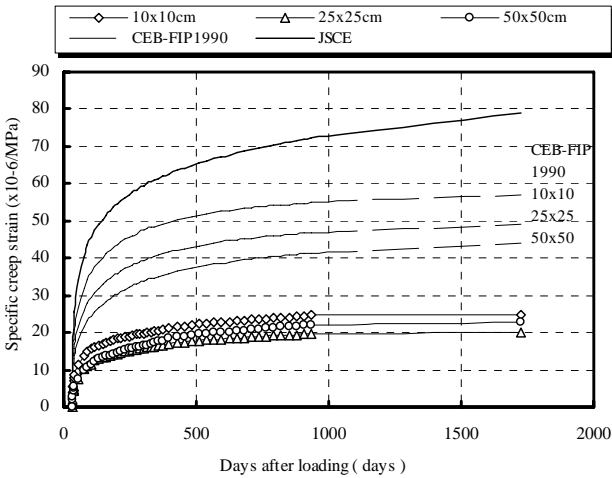


図-10 単位クリープひずみの変化 (130MPa)

4. 考察

4.1 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。収縮ひずみ比は、50MPa については材齢約 1600 日、130MPa については材齢約 1800 日の 10×10cm 試験体の収縮ひずみに対する各試験体の値の比とした。図-11 は部材断面寸法 50×50cm 試験体までの結果を示す。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 60%に低下する。この低下傾向は MC90, JSCE のいずれによっても概ね評価できる。

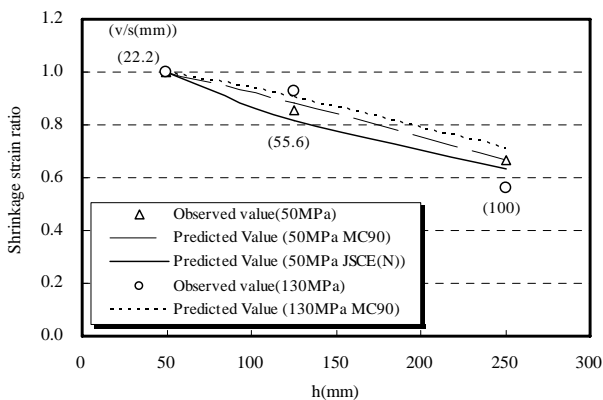


図-11 収縮ひずみの比と寸法の関係 (50×50cm まで)

図-12 は、50MPa 試験体について、部材断面寸法 450×1300cm 試験体までの結果を示したものである。部材断面の増大に伴う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、10×10cm 試験体の約 5%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 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 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、10×10cm 試験体の収縮ひずみを予め精度よく求めた上で、これを基準として既往のモデルコードにおける部材寸法評価により、各種断面の収縮ひずみを評価することが可能と考えられる。

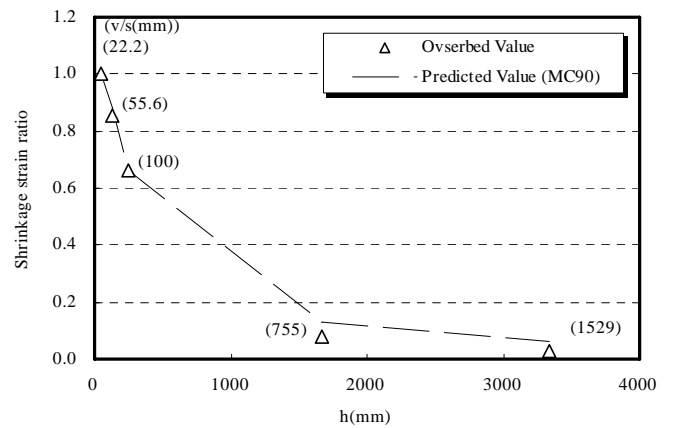


図-12 収縮ひずみの比と寸法の関係 (~450×1300cm)

4.2 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 50MPa については材齢約 1600 日時点、130MPa については材齢約 1800 日時点のものであり、10×10cm 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。図-13 は部材断面寸法 50×50cm 試験体までの結果を示した。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。

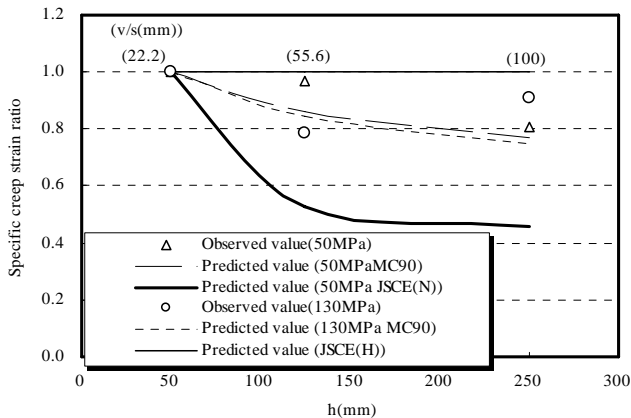


図-13 単位クリープの比と寸法の関係 (50×50cm まで)

図-14 は、50MPa 試験体について、部材断面寸法 450×1300cm 試験体までの結果を示したものである。部材断面の増大に伴う単位クリープひずみの低下は断面寸法 50×50cm 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。前述した図-9, 10 より、各種断面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-12, 13 の結果より、10×10cm 試験体の単位クリープひずみを予め精度よく求め、既往のモデルコードの部材寸法評価とあわせて、各種断面の単位クリープひずみを推定することが可能と考えられる。

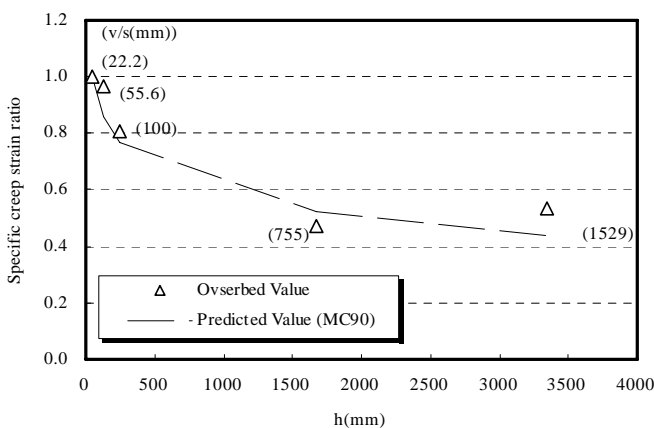


図-14 単位クリープの比と寸法 (450×1300cm まで)

5. まとめ

50MPa, 130MPa 級の 2 種類の強度レベルのコンクリートについて、10×10cm～50×50cm を中心とした最大 450×1300cm まで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、部材寸法の影響について検討した。結果を以下にまとめる。

- 1) クリープひずみに及ぼす部材寸法の影響は、収縮ひずみのそれと比較して相対的に小さい。
- 2) 高強度コンクリートにおける寸法にともなうクリープひずみの低下量は、著しく小さい。
- 3) 部材寸法の増加に伴うクリープ・収縮ひずみの相対的低下は、仮想部材厚もしくは体積表面積比を用いて MC90 により概ね評価可能である。以上より、10×10cm 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・収縮ひずみを適切に評価することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) CEB-FIP: Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton, pp.54-55,1990
- 2) 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, 2002.4
- 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. Vadhanavikkitt: 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) 梶田佳寛他：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) 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, 1994.