

論文 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

寺西 浩司^{*1}・半坂 昌広^{*2}・梶田 秀幸^{*3}・杉山 英祐^{*3}

要旨：本研究では、圧縮強度 150 N/mm²の超高強度コンクリートを始めとした 3 種類の強度のコンクリートに対して、自己収縮試験および圧縮クリープ試験を行った。その結果、自己収縮ひずみは、水結合材比が低いほど大きくなり、圧縮強度 150 N/mm²程度のコンクリートでは 550×10^{-6} 程度となる。また、超高強度から高強度域のコンクリートの場合、ベーシッククリープひずみは水結合材比に関わらずにほぼ一定で、トータルおよびドライビングクリープひずみは水結合材比が低いほどやや大きくなる、などの知見が得られた。

キーワード：超高強度コンクリート、トータルクリープ、ベーシッククリープ、自己収縮

1. まえがき

近年、高性能 A E 減水剤やシリカフュームなどの進歩により、圧縮強度が 150N/mm²を超えるような超高強度コンクリートの製造が可能になっている。しかし、このような超高強度コンクリートの性質については未だ十分には解明されておらず、実用化に当たっては、力学的性質や耐久性に関するデータをさらに蓄積していくことが重要となる。特に、クリープに関しては、圧縮強度 120N/mm²程度のコンクリートに対する後藤らの研究¹⁾が報告されているのみで、それより高い強度のコンクリートのクリープ性状は明らかになっていない。また、自己収縮に関しては、水結合材比 14~20%の超高強度コンクリートを対象とした都築らの研究²⁾などが報告されているものの、十分にデータが蓄積されているとはいえない。

以上の背景から、本研究では、圧縮強度を 150N/mm²を含めて 3 水準に変化させたコンクリートに対して、圧縮クリープ試験および自己収縮試験を行った。本報では、これらの結果を取りまとめて報告する。

2. 実験概要

2.1 実験要因とその水準

本実験では、コンクリートの設計基準強度として 60, 100, 150N/mm²の 3 水準を想定し、それぞれの設計基準強度に対応する水結合材比を 33, 22 および 14%に設定した（調査記号：N, H, UH）。このうちの水結合材比 14%が本実験の主な水準であり、他の 22 および 33%は比較用の水準である。

2.2 使用材料および調合

表-1に使用材料を示す。本実験では、セメントは低熱ポルトランドセメントを用い、骨材は強度の高い岩瀬産砕砂および砕石を使用した。また、シリカフュームは粉体状のものを使用した。表-2に、コンクリートの調合を示す。H および UH では、セメントの 10%を内割りでシリカフュームに置換した。また、スランプフローおよび空気量は、高性能 A E 減水剤および空気量調整剤（A E 助剤または消泡剤）の添加量により調整した。

2.3 練混ぜ方法

表-3に、コンクリートの練混ぜ時間を示す。本実験では、モルタル先練りとし、水結合材比

*1 名城大学 理工学部建築学科 助教授 工博 (正会員)

*2 名城大学 理工学研究科建築学専攻大学院生 (正会員)

*3 前田建設工業(株) 技術研究所 (正会員)

表-1 使用材料

材料	仕様
セメント	低熱ポルトランドセメント (密度:3.22 g/cm ³ , K ₂₈ =54.3N/mm ²)
細骨材	岩瀬産硬質砂岩砕砂 (表乾密度:2.62g/cm ³ , 吸水率:1.00%, FM:3.03)
粗骨材	岩瀬産硬質砂岩砕石 (表乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率:0.86%, 実積率:61.2%)
シリカフューム	粉体状 (密度:2.20g/cm ³)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
AE助剤	エーテルサルセート系
消泡剤	油脂系

表-2 コンクリートの調合

調合記号	水結合材比 (%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	質量(kg/m ³)				高性能AE減水剤 (kg/m ³)
						セメント	細骨材	粗骨材	シリカフューム	
N	33	55 ±7.5	3.0 ±1.5	48.3	165	500	805	901	—	4.50
H	22	65 ±10	1.5 ±1.0	41.7	150	614	741	868	68	8.87
UH	14	68 ±10	1.5 ±1.0	33.5	150	964	411	871	107	17.12

表-3 コンクリートの練混ぜ時間

調合記号	空練り (秒)	水・混和剤投入後 (秒)	粗骨材投入後 (秒)
N	0	60	60
H	60	90	90
UH	60	240	120

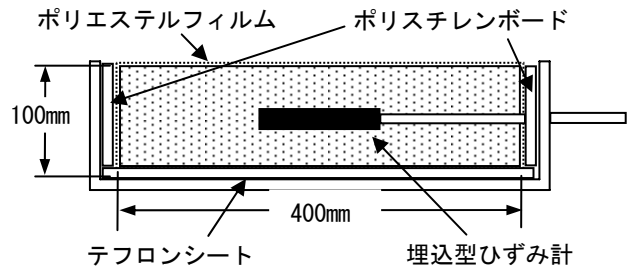


図-1 自己収縮試験の供試体の概要

の低い試料ほど長時間練り混ぜた。練混ぜには強制二軸練りミキサ (容量 55 l) を使用し、32.5l のコンクリートを 2 バッチ練り混ぜた後に、それらを練り合わせて試料 (65 l) とした。

2.4 試験方法

(1) 自己収縮試験

自己収縮試験は、「高流動コンクリートの自己収縮試験法」³⁾ に準拠して行った。ただし、本実験では、各水結合材比につき供試体を 1 本とした。図-1 に供試体の概要を示す。供試体は 10×10×40cm とし、埋め込み型ひずみ計を供試体の中心に設置した。ひずみの測定は、恒温恒湿室内 (温度 20℃, 相対湿度 60%) において、コンクリートの打設直後から開始した。そして、打設翌日に型枠を脱型し、水分の逸散を防ぐために供試体表面をシール (エポキシ樹脂を塗布) した上で測定を継続した。

(2) クリープ試験

(a) クリープひずみの計算方法

クリープ試験では、次式によって得られるトータルクリープひずみおよびベーシッククリー

プひずみを測定し、その結果からドライングクリープひずみを算出した。

$$\epsilon_{ct} = \epsilon_u - \epsilon_e - (\epsilon_d + \epsilon_a) \quad (1)$$

$$\epsilon_{cb} = \epsilon_s - \epsilon_e - \epsilon_a \quad (2)$$

$$\epsilon_{cd} = \epsilon_{ct} - \epsilon_{cb} \quad (3)$$

ここに、

- ϵ_{ct} : トータルクリープひずみ
- ϵ_{cb} : ベーシッククリープひずみ
- ϵ_{cd} : ドライングクリープひずみ
- ϵ_u : アンシール供試体の全ひずみ
- ϵ_s : シール供試体の全ひずみ
- ϵ_e : 載荷時弾性ひずみ
- ϵ_d : 載荷後の乾燥収縮ひずみ
- ϵ_a : 載荷後の自己収縮ひずみ

(b) 供試体

表-4 に、クリープ試験に関連する供試体を示す。本実験では、クリープ試験における載荷用の供試体の他に、クリープ試験開始以降の乾燥収縮および自己収縮ひずみを測定するための無載荷用の供試体を用意した。また、クリープ

表-4 クリープ試験に関連する供試体

測定対象	形状・寸法 (cm)	養生方法等		本数 (本)
		試験開始前	試験開始後	
ϵ_u	7.5 ϕ \times 15	密封養生 (20°C, 60%)	アンシール (載荷)	3
ϵ_s			シール (載荷)	3
$\epsilon_d + \epsilon_a$			アンシール (無載荷)	1
ϵ_a			シール (無載荷)	1
載荷時の 圧縮強度	10 ϕ \times 20		—	5

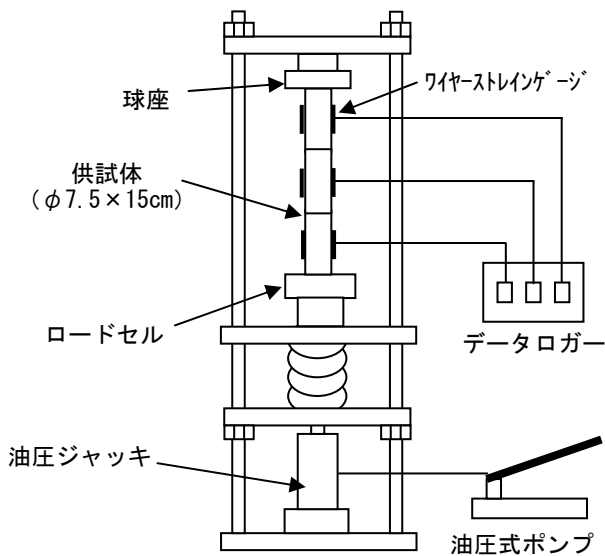


図-2 クリープ試験装置の概要

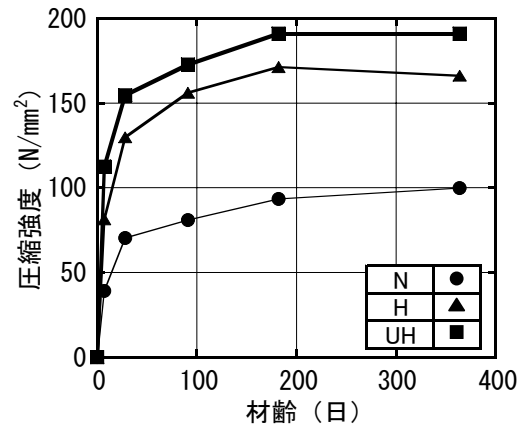
試験の載荷応力を設定するための圧縮強度試験用の供試体を用意した。これらの供試体は、型枠脱型後直ちに密封し、クリープ試験開始まで恒温恒湿室（温度 20°C，相対湿度 60%）において養生した。その後、ベーシッククリープ用および自己収縮用の供試体の場合は、表面をシール（エポキシ樹脂を塗布）して試験に供した。

(c) 試験装置

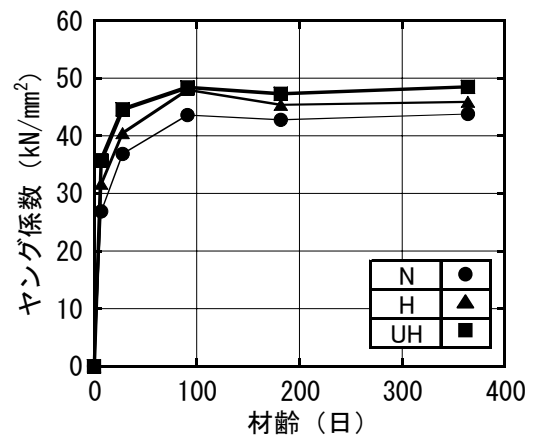
図-2 に、クリープ試験装置の概要を示す。本実験では、コイルスプリング式の試験装置を使用し、同一水結合材比、シール種別ごとに、供試体を縦に 3 本重ねて設置した。そして、供試体側面に貼付した 2 枚の防水型ワイヤーストレインゲージによりひずみを測定した。

(d) 載荷方法

クリープ試験は材齢 28 日から開始した。試験



(a) 圧縮強度



(b) ヤング係数

図-3 強度特性の経時変化(標準水中養生)

開始に当たっては、表-4 中に示した供試体を用いて圧縮強度を測定し、その 1/3 を載荷応力とした。また、クリープ試験は恒温恒湿室内で行った。なお、載荷応力の許容差は±0.2%とし、試験期間中に許容差を下回った場合には、その時期に関わらず、再載荷して許容差内に入るように載荷応力に調整した。

(3) 圧縮試験

コンクリートの強度特性の経時変化を調べるために、(2) 項における密封養生の供試体とは別に標準水中養生の供試体を用意して、圧縮強度およびヤング係数試験を行った。その際、試験材齢は 7, 28, 91, 182 および 364 日とし、各材齢につき 5 本の供試体の試験を行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 強度特性

図-3 に、圧縮強度およびヤング係数の経時変化を示す（標準水中養生の場合）。同図による

と、圧縮強度は、N、H、UHともに、材齢 28 日において、既に、想定した設計基準強度 60, 100, 150N/mm²をそれぞれ超えている。また、圧縮強度およびヤング係数は、材齢 28 日以降も徐々に増加している。

3.2 自己収縮

(1) 経時変化

図-4 に、自己収縮ひずみの経時変化を示す。同図によると、自己収縮ひずみは、N、H、UH のいずれの場合も、材齢 1 日程度まで急激に増加し、それ以降も徐々に増加している。そして、試験を終了した材齢 230 日の時点において、ほぼ定常状態に達している。

(2) 水結合材比の影響

図-5 に、自己収縮ひずみと水結合材比の関係を示す（材齢 28 および 182 日）。同図によると、自己収縮ひずみは、水結合材比が低いほど大きくなっており、水結合材比 14% の場合、材齢 182 日における自己収縮ひずみは、 550×10^{-6} 程度になっている。

3.3 クリープ

(1) 載荷応力および載荷時弾性ひずみ

表-5 に、クリープ試験における載荷応力および載荷時弾性ひずみを示す。同表からわかるように、水結合材比の低い供試体ほど、載荷応力および載荷時弾性ひずみが大きくなっている。

(2) クリープ試験関連の供試体のひずみ

図-6 に、無載荷供試体のひずみを差し引く前のクリープひずみ ($\epsilon_u - \epsilon_e$ または $\epsilon_s - \epsilon_e$) および無載荷供試体のひずみ ($\epsilon_d + \epsilon_a$ または ϵ_a) の経時変化を示す。ここで、 $\epsilon_u - \epsilon_e$ および $\epsilon_s - \epsilon_e$ の値は 3 本の供試体の平均値であるが、一部のケースでは、3 本のうちの 1 本の供試体のひずみが試験途中から異常値を示したため、その場合には、2 本の供試体の平均値を示してある。

同図によると、トータルクリープの場合は、 $\epsilon_u - \epsilon_e$ が水結合材比に関わらずにほぼ同一の曲線となっているのに対し、ベーシッククリープの場合は、水結合材比が低いほど $\epsilon_s - \epsilon_e$ が小さくなっている。また、図 (b) 中に示した ϵ_a は、水

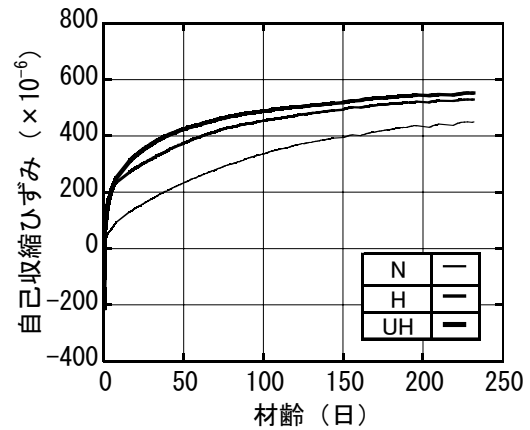


図-4 自己収縮ひずみの経時変化

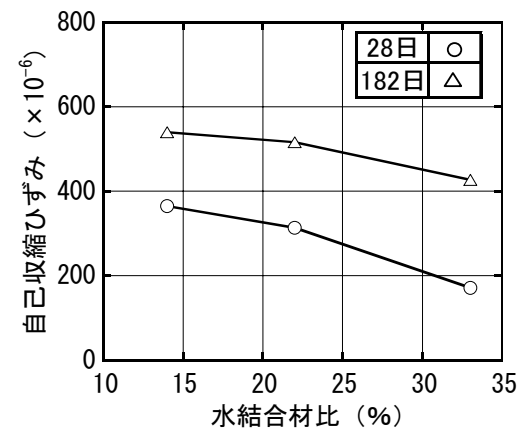


図-5 自己収縮ひずみと水結合材比の関係

表-5 載荷応力および載荷時弾性ひずみ

供試体種別		載荷応力* (N/mm ²)	載荷時弾性 ひずみ(×10 ⁻⁶)
N	アンシール	21.3 ± 0.4	646
	シール	(63.9)	631
H	アンシール	40.1 ± 0.8	858
	シール	(120.3)	978
UH	アンシール	50.4 ± 1.0	1188
	シール	(151.1)	1154

* () 内は、密封養生供試体における材齢 28 日の圧縮強度を示す。

結合材比が高いほど大きくなっているが、これは、図-4 からわかるように、クリープ試験の載荷材齢 (28 日) 以降では、水結合材比が高いほど自己収縮ひずみの増加量が大きくなるためである。

(3) 経時変化

図-7 に、トータル、ベーシックおよびドライングクリープひずみの経時変化を示す。同図

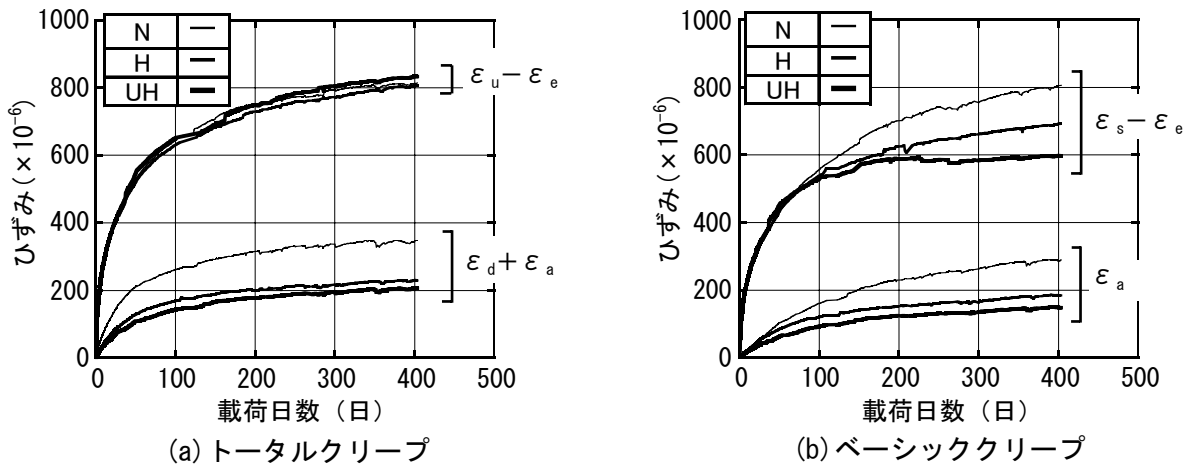


図-6 クリープ試験関連の供試体のひずみ

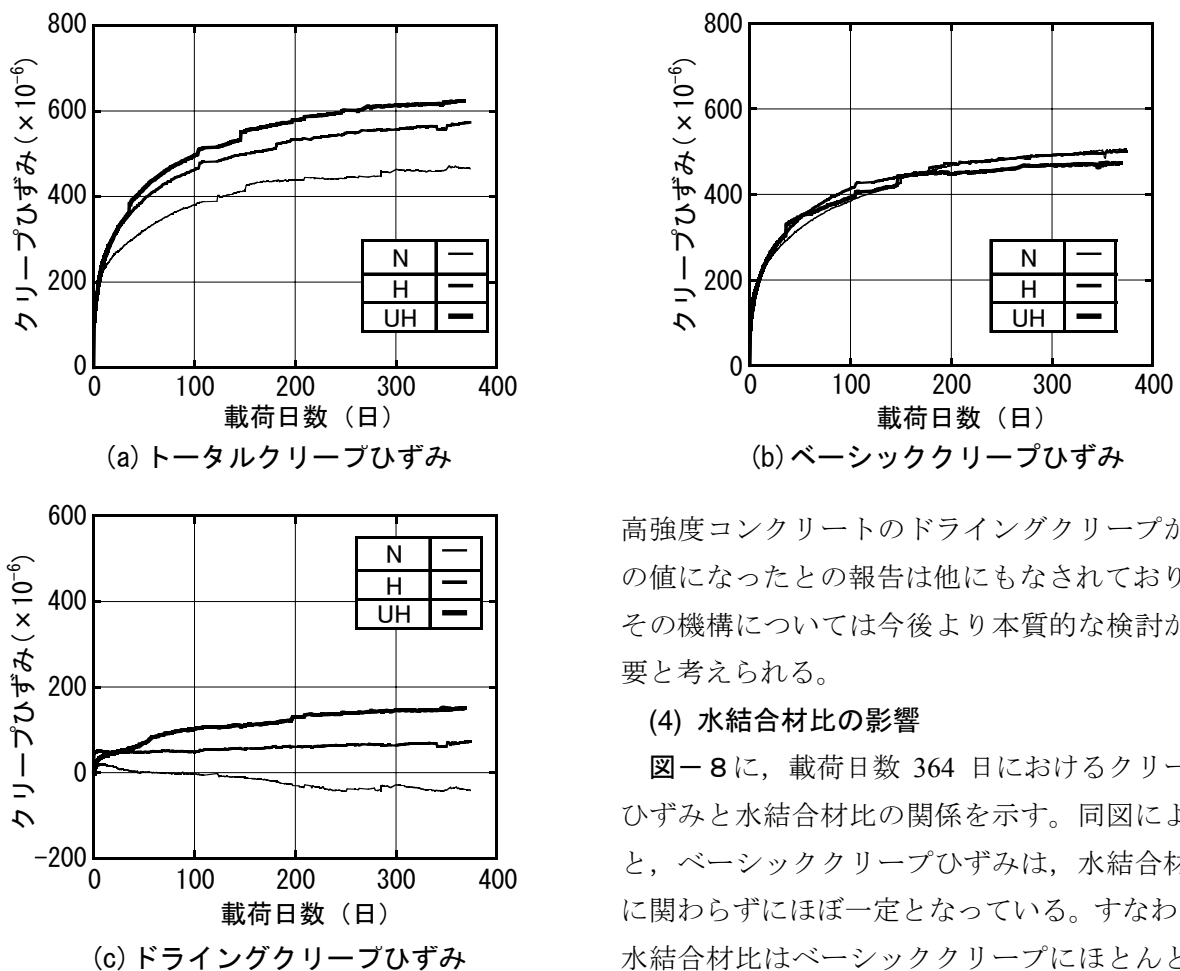


図-7 クリープひずみの経時変化

によると、トータルおよびベーシッククリープひずみは、N、H、UHのいずれの場合も、荷重初期に急激に増加し、時間の経過とともに増加率が徐々に小さくなっている。また、Nのドライングクリープひずみは荷重日数50日程度から負の値になっている。この原因は定かではないが、

高強度コンクリートのドライングクリープが負の値になったとの報告は他にもなされており⁴⁾、その機構については今後より本質的な検討が必要と考えられる。

(4) 水結合材比の影響

図-8に、荷重日数364日におけるクリープひずみと水結合材比の関係を示す。同図によると、ベーシッククリープひずみは、水結合材比に関わらずにほぼ一定となっている。すなわち、水結合材比はベーシッククリープにほとんど影響を及ぼさない。それに対して、トータルおよびドライングクリープひずみは、水結合材比が低くなるほどやや大きくなる傾向となっている。

図-9および10に、スペシフィッククリープひずみ(クリープひずみ/荷重応力)およびクリープ係数(クリープひずみ/荷重時弾性ひずみ)と水結合材比の関係を示す。ここで、図-7と表-5を比較すると、水結合材比の低下に伴

うトータルおよびベーシッククリープひずみの変化量は、荷重応力や荷重時弾性ひずみの増加量に比べて小さい。そのため、これらのスペシフィッククリープひずみやクリープ係数は、水結合材比が低いほど小さくなる傾向となっている。なお、これらのことは、コンクリート部材に作用する応力や弾性ひずみが同一な場合、水結合材比が低いほどクリープひずみが小さくなることを意味している。

4. まとめ

本研究では、圧縮強度を 150N/mm^2 を含めて3水準に変化させたコンクリートに対して、自己収縮試験および圧縮クリープ試験を行った。その結果から得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 自己収縮ひずみは、水結合材比が低いほど大きくなり、圧縮強度 150N/mm^2 程度の超高強度コンクリートでは 550×10^{-6} 程度となる。
- (2) 水結合材比 14~33%の範囲では、ベーシッククリープひずみは、水結合材比に関わらずにほぼ一定である。また、トータルおよびドライングクリープひずみは、水結合材比が低いほどやや大きくなる。
- (3) スペシフィッククリープひずみおよびクリープ係数は、水結合材比が低いほど小さくなる。すなわち、作用する応力や弾性ひずみが同一な場合、水結合材比が低いほどクリープひずみは小さくなる。

謝辞

本研究の実施に際し、名城大学学生・久保秀昭君、柴田浩之君の助力を得た。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 後藤和正, 小室努, 陣内浩, 川崎一三: 高強度コンクリートの圧縮クリープ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.625-630, 2000.6
- 2) 都築正則, 一瀬賢一, 神代泰道, 川口徹: 超高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす結合材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1,

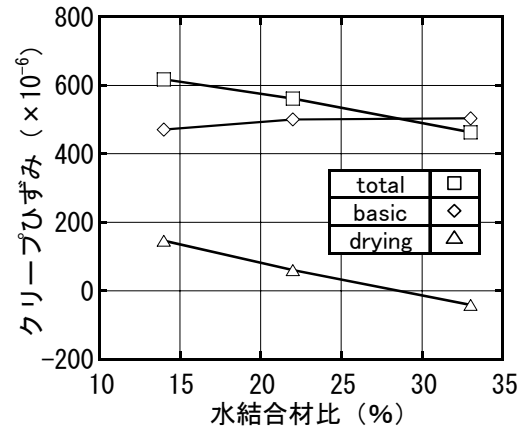


図-8 クリープひずみと水結合材比の関係 (荷重日数 364 日)

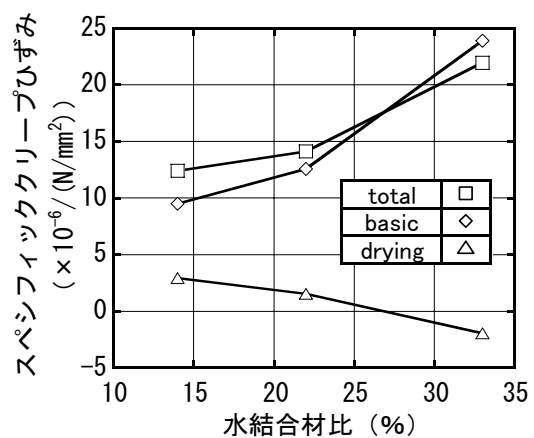


図-9 スペシフィッククリープひずみと水結合材比の関係 (荷重日数 364 日)

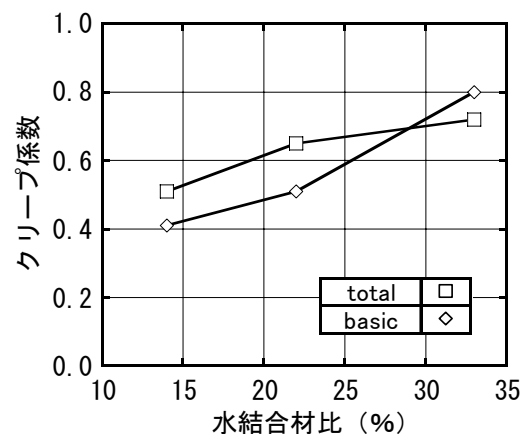


図-10 クリープ係数と水結合材比の関係 (荷重日数 364 日)

pp.1299-1304, 2004.6

- 3) 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリート研究委員会報告書(II), pp.149-160, 1994.5
- 4) 米倉垂洲夫: 水分の逸散とクリープ, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.37-42, 1994.9