

論文 高強度コンクリートのクリープ性状に及ぼす粗骨材の破砕値の影響

鶴田浩章^{*1}・松下博通^{*2}・藤本良雄^{*3}

要旨：本研究では粗骨材物性が及ぼすクリープ特性への影響を明らかにするために、破砕値の大きさにより異なる4種の粗骨材を使用して粗骨材以外の材料は全て等しい高強度コンクリートに対してP C鋼棒式による圧縮クリープ試験を行い、単位クリープ及び回復クリープを測定した。その結果、破砕値が大きい粗骨材を使用したコンクリートでは単位クリープが大きくなる傾向にあったが、クリープ係数の変化はほんのわずかであった。また、破砕値が大きい粗骨材を使用した場合には残留ひずみも大きく、破砕値によって非回復性クリープ成分を評価できる可能性があることが判った。

キーワード：粗骨材, 400kN 破砕値, クリープ, 高強度コンクリート, 圧縮強度

1. はじめに

昨今、コンクリートの要求性能が多様化し、高流動コンクリートや高強度コンクリートの適用事例が多くなってきている。また、仕様規定型設計から性能規定型設計への移行についての検討も活発に行われてきている。コンクリート用骨材については、限られた天然骨材を有効に利用するためにも再生骨材の利用促進が重要な課題であり、それを可能にするためには骨材の品質とそれを使用して作製されるコンクリートの性能との関係を把握することが必要になる。

コンクリートのクリープの主要因はペーストにあり、骨材はペーストのクリープを拘束すると考えられている。そこで、骨材の違いにより拘束度にわずかな差異が生じる。また、著者らは British Standard BS 812 に規定されている粗骨材の 400kN 破砕値（以下、破砕値と略）が高強度コンクリートの圧縮強度と密接な関係にあることを既に報告している¹⁾。コンクリートのクリープは圧縮強度と密接な関係にあると言われており、高強度コンクリートにおける圧縮強度と破砕値の関係から破砕値がクリープに間接的な影響を及ぼすのではないかと考え粗骨

材が及ぼすクリープへの影響について検討を行うことにした。

本研究では同一配合で粗骨材種類だけを変えた高強度コンクリートの圧縮クリープ試験を行い、単位クリープ及び回復クリープを測定し、粗骨材の破砕値とクリープの関係を把握することを試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15 g/cm^3 ，比表面積 $3,300 \text{ cm}^2/\text{g}$ ），細骨材は海砂（密度 2.58 kg/l ，粗粒率 3.08），混和材としては高炉スラグ微粉末（密度 2.89 g/cm^3 ，比表面積 $6,070 \text{ cm}^2/\text{g}$ ），混和剤はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤（密度 1.04 g/cm^3 ）を使用し、高強度コンクリートとの比較のために作製した $W/B=50\%$ のコンクリートにはリグニンスルホン酸系 AE 減水剤（密度 1.14 g/cm^3 ）を使用した。粗骨材（最大寸法 20mm）は表-1 に示す4種類を使用し、粗骨材種類以外の材料は全て同一の物を使用した。ただし、 $W/B=50\%$ については角閃岩 1 種類を使用した。

^{*1} 九州大学大学院助手 工学研究科建設システム工学専攻 工修（正会員）

^{*2} 九州大学大学院教授 工学研究科建設システム工学専攻 工博（正会員）

^{*3} ㈱富士ピー・エス 福岡支店技術部技術部長（正会員）

表－１ 使用した粗骨材の物性試験結果

骨材岩種	密度 (kg/l)	吸水率 (%)	粒形判定 実積率(%)	すりへり減量 (%)	破砕値 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (GPa)
安山岩	2.73	0.72	57.1	10.0	9	153	69.6
結晶片岩	2.81	0.52	59.4	15.7	13	201	72.5
角閃岩	2.73	1.00	59.0	21.6	17	—	—
軽量骨材	1.46	12.6	55.0	36.5	36	—	—

なお、本研究では破砕値の範囲を広く設定することにしたが、破砕値の大きな砕石が入手できなかったため、膨張頁岩を原料とした非造粒型人工軽量骨材を使用した。BS 812 では破砕値が 30 以上の骨材には 10% 細粒値が適用されると規定されており、JIS A 1121 には構造用軽量骨材にはすりへり減量試験は適用されないと規定されている。したがって、今回使用した軽量骨材はそれらに該当するが、他の砕石との比較のために破砕値及びすりへり減量を測定して表中に示した。表－１中の圧縮強度及び静弾性係数は、粗骨材の母岩から $\phi 25 \times 50$ mm のコアを抜き出して圧縮試験を行い求めた値であるが、角閃岩及び軽量骨材についてはコアが抜き出せなかったため測定できなかった。

2.2 配合

本研究では高炉スラグ微粉末をセメントに対して置換率 50% で使用し、水結合材比 28%，単位水量 170kg/m³，細骨材率 45.7%，目標空気量 2%，単位粗骨材絶対容積は 330l/m³，混和剤使用量は結合材質量の 1% とした。また、比較のために用いた普通コンクリートの配合はスラグ置換率、単位水量及び単位粗骨材絶対容積が高強度コンクリートの場合と同一で、水結合材比 50%，細骨材率 50.6%，目標空気量 5% とし、AE 減水剤添加量は結合材 100kg あたり 250 ml とした。粗骨材として角閃岩を使用し

た場合の配合を配合例として表－２に示す。

2.3 供試体作製及び養生方法

供試体は 10×10×40cm の角柱とし、供試体中央に $\phi 30$ mm のシース管を設置し、粗骨材種類毎に 2 体ずつ作製した。

打設後は室温 20±2℃，湿度 90±5% 一定の室内に保管し、水分の蒸発を防ぐために打設面を湿布及びビニールシートで覆い、打設後 24 時間で脱型した。その後、水中養生を材齢 28 日まで行い、クリープ試験に供した。なお、供試体の乾燥収縮を考慮するために無載荷の供試体をクリープ測定供試体と同一条件で作製、養生し保管した。また、載荷材齢時のコンクリートの圧縮強度を把握するために $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を粗骨材種類毎に 3 本ずつ作製し、クリープ測定用供試体と同一条件で養生し 28 日強度及び静弾性係数を求めた。

2.4 載荷方法

持続荷重の載荷は材齢 28 日時点において室温 20℃，湿度 55±5% の室内で行った。載荷方法はセンターホールジャッキで $\phi 17$ mm の PC 鋼棒を引張り、アンカープレートを紹介して供試体端部にナットで定着することにより持続応力を導入した。その際、載荷面の凹凸を少なくするため、アンカープレートと供試体載荷面の間にエポキシ樹脂を薄く塗布した。また、導入した持続応力はコンクリート供試体の弾性ひずみが 500×10^{-6} になる応力を目標とした。なお、クリープ供試体図を図－１に示す。

2.5 測定方法

(1) クリープ

① 載荷直後～6 時間

コンクリートのひずみは供試体に貼付したひ

表－２ コンクリートの配合

W/B (%)	単位量(kg/m ³)					
	W	C	BS	G	S	混和剤
28	170	304	304	900	717	6.04
50	170	170	170	900	869	850ml

W:水, C:セメント, BS:高炉スラグ微粉末
G:粗骨材, S:細骨材

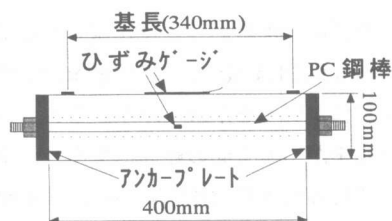


図-1 クリープ供試体図

ずみゲージ（測長 60mm）で測定し、コンクリートに作用する応力は PC 鋼棒に貼付したひずみゲージ（測長 5 mm）の値より算出した。同時に同一条件で養生・保管された無载荷の供試体から乾燥収縮ひずみを測定した。

② 載荷後 6 時間以降

コンクリートのひずみは図-1 に示されるように基長 340mm のコンパレータ法で測定し、乾燥収縮ひずみも同一の方法で測定した。

(2) 回復クリープ

載荷後経過日数が 1 年を経過した後に、導入した持続応力を解放して回復クリープを測定した。測定はひずみゲージ（測長 60mm）を供試体の両側面に貼付し、再度 PC 鋼棒を緊張しナットを緩めることで荷重を解放してデータロガーで行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 コンクリートのフレッシュ性状及び強度

表-3 に使用したコンクリートのスランプフ

使用粗骨材	W/B (%)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)
安山岩	28	665	2.0
結晶片岩		555	1.8
角閃岩		565	2.6
軽量骨材		830	1.9
角閃岩	50	72 (スランプ°)	2.5

表-4 材齢 28 日時のコンクリートの圧縮強度、静弾性係数及び（導入応力／圧縮強度）比

使用粗骨材	W/B (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (GPa)	(応力/強度) 比 (%)
安山岩	28	85.2	43.3	23.5
結晶片岩		82.3	43.7	24.7
角閃岩		75.6	36.2	20.4
軽量骨材		67.3	33.8	19.2
角閃岩	50	46.4	30.1	27.8

ロー及び空気量を示す。表-4 には材齢 28 日時のコンクリートの圧縮強度、静弾性係数及びクリープ試験における（導入応力／圧縮強度）比（表中には（応力/強度）比と省略）を示す。

3.2 単位クリープの経時変化

今回用いた PC 鋼棒式のクリープ試験では、持続応力導入後クリープの発生に伴い導入応力が減少していく。したがって、弾性ひずみの減少を補正する必要があるが、それには補正時点でのコンクリートの静弾性係数を把握しなければならない。本研究においては静弾性係数の経時変化を把握していないので、載荷時弾性ひずみから増加するひずみをクリープひずみとして単位クリープを計算している。除荷直前における導入応力の減少率は、W/B=28% の場合粗骨材種類によらずほぼ同一で平均 0.15%，W/B=50% の場合 0.41% と小さいので問題ないものとした。

図-2 は持続荷重載荷後の経過日数と単位クリープの関係を示している。図中の 2 本の曲線はそれぞれ W/B=28%，50% の場合に土木学会コンクリート標準示方書の単位クリープ予測式（式(1)、(2)）により算出した算定値を示す。

$$\varepsilon'_{cc} = [1 - \exp\{-0.09(t-t')^{0.6}\}] \cdot \varepsilon'_{cr} \quad (1)$$

$$\varepsilon'_{cr} = 15(C+W)^{2.0}(W/C)^{2.4}(\log_e t')^{-0.67} + 4500(C+W)^{1.4}(W/C)^{4.2} \times [\log_e (V/S)/10]^{-2.2}(1-RH/100)^{0.36}t_0^{-0.30} \quad (2)$$

ここで、 ε'_{cc} は有効材齢 t' で載荷されたコンクリートの有効材齢 t における単位応力当たりのクリープひずみ、 ε'_{cr} は単位応力当たりのクリープひずみの最終値（ $\times 10^{-10}/(N/mm^2)$ ）を示す。

図-2 から今回使用した高強度コンクリートの単位クリープは通常強度コンクリートの場合の 1/4 程度であることがわかる。また、この示方書式は $40\% \leq W/C \leq 65\%$ のコンクリートを対象としており、圧縮強度も $70N/mm^2$ までは適用上限とされている。さらに、今回の体積表面積比 V/S は 25mm であるが、示方書式の対

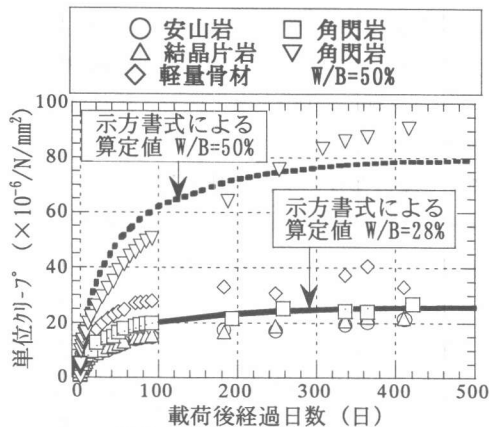


図-2 載荷後経過日数と単位クリープの変化

象は $100\text{mm} \leq V/S \leq 300\text{mm}$ となっている。このように、様々な条件が違っているが、実験値と予測式による算定値はほぼ同様の傾向を示している。

3.3 粗骨材物性値の分布特性

図-3(a)と(b)は粗骨材の吸水率と破碎値の分布特性の違いを調べるために、文献²⁾⁻⁶⁾から碎石 95 種類、再生骨材 8 種類の吸水率と破碎値を調べ度数分布で表したものである。

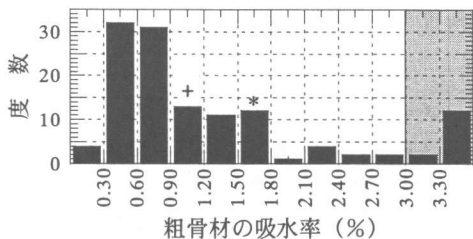


図-3(a) 粗骨材の吸水率の度数分布

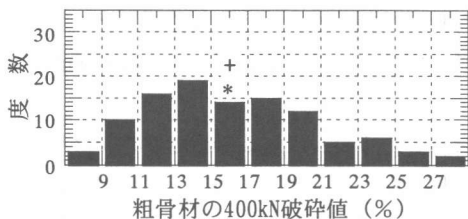


図-3(b) 粗骨材の400kN破碎値の度数分布

図-3(a)中の網掛け部は JIS A 5005 コンクリート用碎石の物理的性質の規格を満たさない範囲を示す。なお、両図中の“*”は碎石と再

生骨材を含めた場合の平均値が属する階級を示し、“+”は JIS A 5005 の規格を満たす骨材のみの平均値が属する階級を示す。これらの図より、吸水率が 1 % 未満の範囲に集中し、平均値に対して対称な分布ではないのに対し破碎値は集中することなく平均値を中心に対称な分布で、しかも分布がなだらかで幅広いことがわかる。さらに、再生骨材の吸水率は碎石と比較して極端に大きいのが、破碎値は碎石と再生骨材でそれほど大きく変わらないため、再生骨材を含めても極端に大きい階級の度数が増えることが少ないことが判る。

3.4 粗骨材品質と単位クリープの関係

図-2 より $W/B=28\%$ においては、粗骨材種類によって単位クリープの大きさに若干のばらつきが生じていることがわかる。そこで、使用した粗骨材の品質として破碎値とすりへり減量を着目し単位クリープの大きさとの関係を持続荷重載荷後の日数毎に示した図が図-4である。

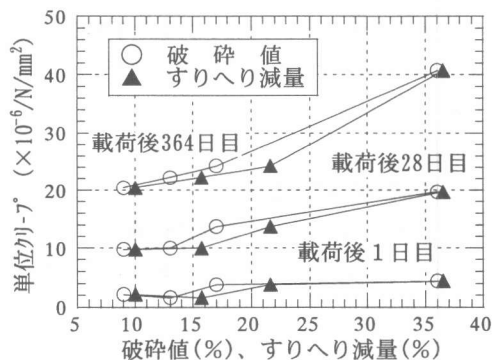


図-4 粗骨材の破碎値、すりへり減量とコンクリートの単位クリープの関係

図より破碎値、すりへり減量のどちらにおいてもそれらが大きくなると、単位クリープも大きくなる傾向を示している。次に、粗骨材の吸水率と単位クリープの関係を示したのが図-5である。碎石の吸水率が JIS のコンクリート用碎石の物理的性質において 3.0 % 以下と規定されていることや図-3(a)からも判るように規定を満たす碎石の吸水率はほぼ 1 % 未満に集中することから、極端に吸水率の大きい軽量骨材

を用いたコンクリートの単位クリープと砕石を用いたコンクリートの場合を同一図中に示した図-5では、図-4と比較して吸水率と単位クリープの関係が明瞭ではない。

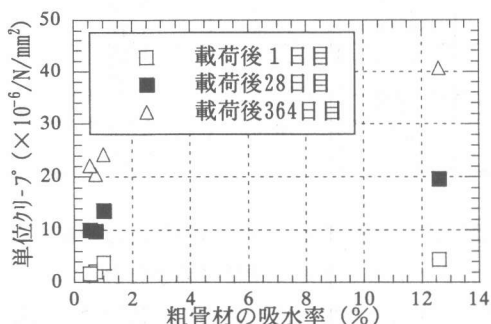


図-5 粗骨材の吸水率と単位クリープの関係

3.5 破砕値とクリープ係数の関係

図-6は粗骨材の破砕値とクリープ係数の関係について示したものである。図中に破線で示した算定値は、式(3)を基にコンクリート標準示方書の示方書式(式(1)及び(2))で予測された単位クリープと同示方書設計編に示されたコンクリートのヤング係数を用いて算出したクリープ係数の算定値である。ここではコンクリートの圧縮強度を考慮して $E_{cc}=38\text{kN/mm}^2$ とした。

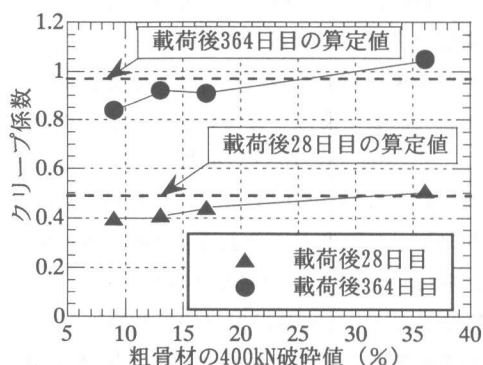


図-6 粗骨材の破砕値とクリープ係数の関係

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{cc}}{\sigma_{cp}} \times E_{cc} \quad (3)$$

ここで、 φ ：クリープ係数、 ε_{cc} ：圧縮クリープひずみ、 σ_{cp} ：作用圧縮応力度、 E_{cc} ：載荷

時材齢のコンクリートのヤング係数である。図より破砕値が大きくなっても、クリープ係数の増加は最大0.2程度でほんのわずかな変化であった。これは、破砕値がコンクリートの静弾性係数と相関が高いことに影響されており、破砕値が大きくなるとコンクリートの静弾性係数が小さくなることでクリープ係数の変化が小さくなったと考えられる。

3.6 回復クリープについて

図-7はクリープ試験において持続荷重を載荷してから除荷して回復クリープを測定する間における弾性ひずみ、クリープひずみ、回復クリープひずみの経時変化をコンクリート供試体の単位応力あたりのひずみとして示したものである。なお、単位応力あたりの回復クリープひずみは測定したひずみを除荷直前まで供試体に作用していた応力で除した値とした⁷⁾。

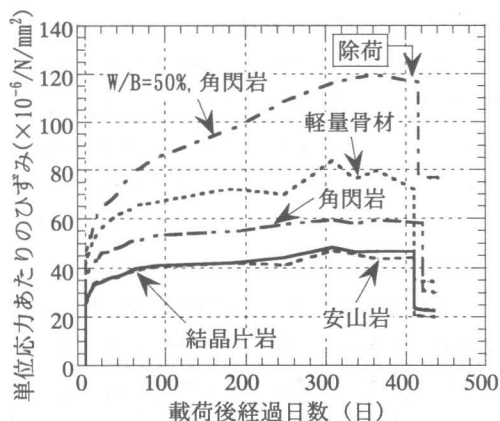


図-7 載荷後の日数経過に伴う単位応力あたりのひずみの変化

W/B=50%の場合と比較してクリープ係数が半分以下であるW/B=28%の場合は、残留ひずみが非常に小さくなっていることが判る。

表-5は供試体毎の弾性ひずみ、クリープひずみ、回復クリープ等を単位応力あたりのひずみとして表したものである。なお、表中の回復クリープは除荷後25日経過時の値であり、残留ひずみの割合は弾性ひずみ及びクリープひずみに対する残留ひずみの割合を意味している。

表-5 単位応力あたりのひずみ一覧

W/B (%)	使用 粗骨材	単位応力あたりのひずみ ($\times 10^{-6}/\text{N/mm}^2$)					残留ひずみの 割合 $\varepsilon_r/(\varepsilon_0 + \varepsilon_c)$
		載荷時弾性 ひずみ ε_0	最終クリープ ε_c	除荷時弾 性ひずみ	回復クリープ	残留ひずみ ε_r	
28	安山岩	25.3	18.8	21.7	2.49	19.9	0.45
		24.5	24.0	22.0	3.24	23.2	0.48
	結晶片岩	24.0	21.8	21.2	2.63	22.0	0.48
		24.4	22.2	21.4	2.65	22.6	0.48
	角閃岩	31.2	26.7	27.7	4.34	25.9	0.45
		31.0	27.2	25.7	2.51	30.0	0.52
50	軽量骨材	38.9	33.1	26.0	11.6	34.3	0.48
	角閃岩	36.2	80.2	33.9	5.94	76.6	0.66
		37.3	101.6	36.7	5.71	96.5	0.69

表より W/B=50%の場合と比較して高強度コンクリートの場合は残留ひずみ自体も小さく、弾性ひずみ及びクリープひずみに対する残留ひずみの割合も小さくなることが判る。さらに、使用粗骨材に着目すると破砕値が大きい粗骨材を用いた場合ほど単位応力あたりの残留ひずみが若干大きくなっている。単位応力当たりのクリープひずみも同様の傾向を示すので、同一の W/B においては粗骨材種類によらず、弾性ひずみ及びクリープひずみに対する残留ひずみの割合はほぼ等しい値となっている。したがって、粗骨材の破砕値によって非回復性クリープ成分を評価できる可能性があることが判る。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめて示す。

- ①使用した粗骨材の種類の違いにより単位クリープの大きさに若干の差異が認められた。特に、破砕値が大きくなるとコンクリートの単位クリープも大きくなる傾向が確認できた。
 - ②破砕値と単位クリープには、破砕値が大きくなると単位クリープも大きくなる傾向が認められたが、破砕値が大きくなってもクリープ係数の増加は最大 0.2 程度であり、ほんのわずかな変化であった。
 - ③回復クリープを考慮した場合の残留ひずみにも破砕値の間接的影響が見られ、粗骨材の破砕値によって非回復性クリープ成分を評価できる可能性があることが判った。
- 一般に粗骨材の静弾性係数がクリープの評価

指標となっているが、今回着目した破砕値はコンクリートのクリープ特性に前述のような影響を及ぼすことが判った。さらに、破砕値は粗骨材のすりへり減量や静弾性係数と比較して試験の手間が少ないことから、クリープに対する粗骨材品質の影響を評価する指標として有効であると言える。

参考文献

- 1) 鶴田浩章・松下博通ほか：粗骨材の破砕値が及ぼす高強度コンクリートの圧縮強度への影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.991-996, 1998.7
- 2) 土木研究所：河川砂利以外の骨材を使用した場合のコンクリートの研究，第 20 回建設省技術研究発表会，pp.45-70, 1966.11
- 3) 飛坂基夫：高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす骨材の影響，セメント・コンクリート No.394, pp.30-33, 1979.12
- 4) セメント協会コンクリート専門委員会：粗骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響，セメント・コンクリート，No.395, pp.45-53, 1980.1
- 5) 笠井芳夫ほか：再生コンクリートの諸物性に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集 No.50, pp.802-807, 1996.5
- 6) 鯉江利夫ほか：再生骨材の簡易コンクリートへの適用性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1, pp.1099-1104, 1997.6 他 9 編
- 7) Neville, A.M. et al.: Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, 1983