

論文 石炭灰人工骨材を用いたコンクリートのセルフキュアリング効果に関する実験研究

笠井 浩^{*1}・和美 廣喜^{*2}・新井 一彦^{*3}・森田 哲^{*4}

要旨:火力発電所から排出される石炭灰の増大に伴い、その有効利用を図るために最近、石炭灰と頁岩粉末を原料とした人工骨材が開発された。この骨材の高吸水性に着目し、それによるコンクリートのセルフキュアリング効果について実験研究を行った。その結果、CA骨材を用いたコンクリートは型枠存置期間が1日でも標準養生と同等の圧縮強度で、乾燥収縮も天然骨材コンクリートの57~85%となり、その効果が確認された。

キーワード:石炭灰、人工骨材、軽量、高強度、高吸水率、セルフキュアリング

1. はじめに

火力発電所から排出される石炭灰の増大に伴い、その有効利用が急務となっている。石炭灰の良質なものはフライアッシュとしてコンクリート用混和材に利用されているが、排出割合の大部分を占める強熱減量の多い石炭灰の利用技術の確立が必要である。

このようなことから最近、石炭灰と頁岩微粉末を混合焼成した人工骨材（以下、CA骨材と呼ぶ）が開発された。この骨材は二成分の微粉末を原料とするため、その混合比を変えることによって使用目的に応じた強度、吸水率及び密度を得ることができる。

現在、日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説JASS 5鉄筋コンクリート工事では、コンクリート打ち込み後数日間の湿潤養生が義務づけられている。この場合の湿潤養生とは、所定期間の型枠存置、散水等である。しかし実際の建築工事においては、他の工事が並行して進められているため、適切な湿潤養生を行うことが難しい状況にある。従って、コンクリートの品質確保に対して、理想的な湿潤養生を施さなくとも、それと同程度の効果がある養生方法が望まれている。

今回開発したCA骨材は従来の人工軽量骨材の2倍以上の1000Nを超える圧壊荷重で、高吸水性を有している。コンクリート打込み後において、その骨材自身の含有水分がコンクリートの自己湿潤養生に寄与すること（以下セルフキュアリングと呼ぶ）が判明すれば、コンクリートの品質向上はもとより施工の合理化に繋がる。

セルフキュアリング効果とは、同材齢の気中養生強度の標準養生強度に対する比が大きいか同等であれば、その効果が示されることになる。また、骨材からの水分補給の効果によって、気中養生下でもセメントの水和が促進するため、乾燥収縮の低減や中性化の進行抑制等、耐久性からもその効果が推察される。

本研究では、実際の現場での各種養生条件を想定し、試作した高吸水性のCA骨材を用いたコンクリートのセルフキュアリング効果について実験的に究明するものである。

2. 実験

2.1 養生方法

図-1に養生方法を示す。JASS 5による湿潤養生期間の規定値は5日あるいは7日であるが、これらにほぼ合致するのが、①と②の養生である。また、CA骨材コンクリートのセルフ

*1 鹿島建設(株)技術研究所 建築技術研究部

主任研究員 修士〔工学〕（正会員）

*2 鹿島建設(株)技術研究所 企画管理室

担当部長 博士〔工学〕（正会員）

*3 鹿島建設(株)技術研究所 建築技術研究部

生産・材料グループ長 博士〔工学〕（正会員）

*4 鹿島建設(株)技術研究所 建築技術研究部

(前) 研究員

キュアリング効果を確認する目的から、JASS 5 の湿潤養生期間より短い養生期間として③及び④の養生を設定した。さらに外部から水分が補給され、より理想的な養生として⑤、⑥及び⑦の養生を設定した。

2.2 コンクリートの種類及び使用材料

実験に用いたコンクリートは、碎石及び A E 減水剤を用いた普通コンクリート（以下、天然骨材コンクリートと呼ぶ）と CA 骨材及び A E 減水剤を用いた軽量コンクリート（以下、CA 骨材コンクリートと呼ぶ）とした。

使用材料の一覧を表-1 に示す。

CA 骨材の絶乾密度及び吸水率を表-2 に、その粒度分布を表-3 に示す。

2.3 コンクリートの調合及び練混ぜ

コンクリートの調合を表-4 に示す。

調合は目標スランプ 18cm、水セメント比 50% とした。目標空気量は天然骨材コンクリートが 4.5%、CA 骨材コンクリートが 5% とした。

CA 骨材は、骨材の有効利用の観点から、5mm 以下の細骨材領域を含んだ状態で使用した。その混合は表-3 の骨材粒度分布結果を基に、表-2 に示す粒径別の質量混合比によった。また、表-3 の骨材の粒度分布測定の結果、2.5mm 以下の微粒分の骨材は 18% 程度であり、この領域の骨材が不足するため、天然砂を混合して補なった。CA 骨材と天然砂の混合比は、総骨材量として最密充填に近い値になるように、両者の混合比を変え最も実積率の高いものを選定した。最密充填試験方法は、既往の文献¹⁾による $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の容器に所定の割合の骨材を詰め、嵩高さを求める方法と 2 L 容器に骨材を詰め、質量測定による方法で行った。

試験結果を図-2 に示す。この結果、両者の試験方法で天然砂容積／総骨材容積が 33.8% の時に最密充填を示した、この時の CA 骨材と天然砂の割合にて定めた。

コンクリートの練混ぜは、容積 100 L の強制 2 軸型ミキサを用い、所定の材料投入後 30 秒間

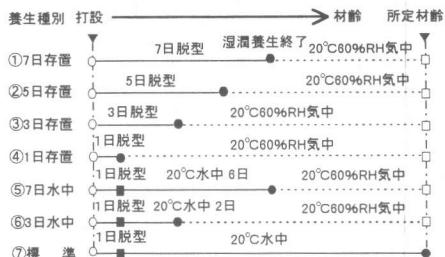


図-1 養生方法

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.16kg/l T社製)
細骨材	新潟産陸砂(表乾密度2.60kg/l、吸水率1.88%、粗粒率2.53)
粗骨材	奥多摩産硬質砂岩(表乾密度2.65kg/l、吸水率0.94%、実積率57.99%)
CA骨材	石炭灰+膨張頁岩人工骨材(24h吸水率8.2%、他は表-2参照)
水	調布市上水道水
混合剤	ad1:リグニスルホン酸系AE減水剤(P社製)及びad2:空気量調整剤(P社製)

表-2 CA骨材の絶乾密度及び吸水率

CA骨材	粒径(mm)	絶乾密度(kg/l)	吸水率(%)	骨材混合比(質量比)
大	15~10	1.54	15.3	11
中	10~5	1.50	16.6	41
小	5~0	1.61	14.9	48

表-3 CA骨材の粒度分布

CA骨材	通過率(単位:上段mm、下段%)					粗粒率
	15	10	5	2.5	1.2	
粒度分布	100	89	48	18	4	5.41

表-4 コンクリートの調合

骨材種類	W/C(%)	単位量(kg/m ³)						
		W	C	S	G	CA大	CA中	
天然骨材	50	180	360	793	943	—	—	ad1 ad2
		180	360	793	943	—	—	0.25 0.001
CA骨材	50	W	C	S	CA大	CA中	CA小	ad1 ad2
		180	360	577	75	278	326	0.25 0.0005
※CA骨材は絶乾状態で表示								

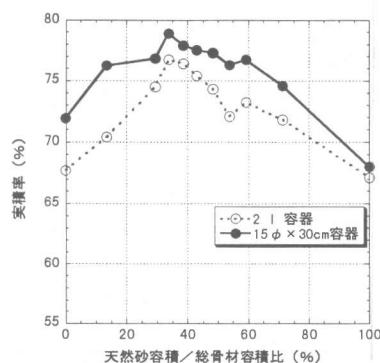


図-2 CA骨材の最密充填試験結果

空練り後、所要量注水し 90 秒間攪拌して行った。

2.4 試験項目及び試験方法

(1) フレッシュコンクリート試験

スランプ、スランプフロー、練上り温度、単位容積質量を測定した。なお、CA骨材コンクリートの空気量は、JIS A 1118 に準じて骨材修正係数による補正を行った。

(2) 圧縮強度ならびに静弾性係数

圧縮強度試験用供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱とし、所定の材齡時に JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行った。また、静弾性係数は JIS 原案によった。供試体は上面の水分の蒸発を防ぐため、脱型するまで上面はビニルフィルムで封緘した。

(3) 引張強度

引張強度試験用供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱とし、所定の材齡時に JIS A 1113 を参考に引張強度試験を行った。供試体は脱型するまで上面はビニルフィルムで封緘した。

(4) コンクリートの含水率

コンクリートの含水率測定の供試体は、引張強度試験後のものを用いた。供試体の質量を測定した後、 105°C 乾燥器で 10 日間乾燥後その質量を測定し、乾燥前後の質量差を乾燥後の質量で除して、コンクリートの含水率を算定した。

(5) 乾燥収縮

供試体は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ を用いた。養生方法の相違を検討する目的から脱型 1 日後直ちに基長を測定した。測定供試体は図-1 の①③④⑤とした。①③及び④のものは所定の湿潤材齡まで封緘養生し、それ以後は温度 20°C 湿度 60% 室に保存した。⑤のものは所定材齡まで水中養生し、以後は温度 20°C 湿度 60% 室に保存した。

(6) コンクリートの骨材界面の観察

コンクリートの骨材界面の観察は、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。観察試料は圧縮強度試験に用いた供試体をダイヤモンドカッターで切断し、 $\phi 20\text{mm} \times 5\text{mm}$ 厚とした。その後試料はアセトンで水和停止させ、24 時間真空乾燥後、白金コーティングした。

3. 結果及び考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5 に示す。コンクリートは分離もなく、良好なフロー性状を示した。

3.2 養生条件の違いが圧縮強度に及ぼす影響

型枠存置による湿潤養生期間と圧縮強度の関係を図-3 に示す。型枠存置による湿潤養生期間が 7 日までの圧縮強度は、材齡 28 日及び 91 日のいずれにおいても天然骨材コンクリートよりも CA 骨材コンクリートの方が大きく、湿潤養生期間が短いほど、その差は顕著である。

また、天然骨材コンクリートの圧縮強度は、湿潤養生期間が長いほど大きくなるが、CA 骨材コンクリートは湿潤養生期間による差が少なかった。

表-5 フレッシュコンクリートの性状

骨材の種類	スランプ(cm)	スランプフロー(mm)	空気量(%)	温度(°C)	単容質(t/m ³)
天然骨材	17.5	291 × 289	4.6	20.6	2.30
CA骨材	19.0	347 × 353	6.0	20.6	1.90

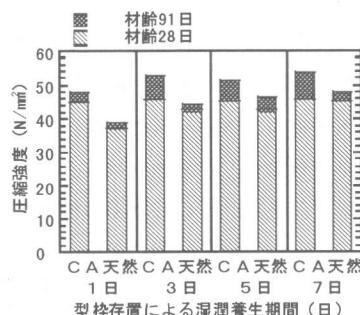


図-3 湿潤養生期間と圧縮強度の関係

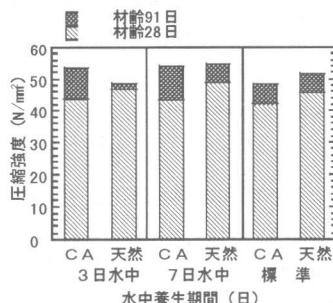


図-4 水中養生期間と圧縮強度の関係

水中養生期間と圧縮強度の関係を図-4に示す。CA骨材コンクリートの材齢3日及び7日まで水中養生した圧縮強度は、材齢28日及び91日のいずれにおいても標準養生よりも大きくなっている。型枠存置による湿潤養生（以下、型枠存置養生と呼ぶ）と同様な傾向を示していた。天然骨材コンクリートの場合は、7日水中養生した圧縮強度は標準養生よりも大きく、型枠存置養生の場合と異なる傾向を示した。これは、天然骨材コンクリートの場合は型枠存置養生のみでは養生水が不十分であると言える。

標準養生の圧縮強度に対する型枠存置養生の圧縮強度の比と材齢との関係を図-5に示す。

CA骨材コンクリートの圧縮強度比（型枠存置養生／標準養生）は7日以降の材齢において1.0を上回っていた。ただし型枠1日存置養生の圧縮強度比は材齢91日で同じだった。それに対して、天然骨材コンクリートの圧縮強度比は、すべての材齢にて1.0以下であり、型枠存置養生期間が短いものほど圧縮強度比が小さかった。

天然骨材コンクリートは材齢の進行に伴い、標準養生のものは型枠存置養生のものより、強度増進が大きいことは容易に推測できる。しかし、CA骨材コンクリートの現象はそれのみでは説明ができない。CA骨材コンクリート及び天然骨材コンクリートの含水率の材齢における変化についての分析が必要となる。

コンクリートの含水率と材齢との関係を図-6に示す。CA骨材コンクリートの材齢7日の含水率は、型枠1日存置養生の場合でも天然骨材コンクリートの標準水中養生を上回っている。これはコンクリート質量に対する含水率である。表-6を基に、容積含水率に換算すると、両者共に含水率は約15%でほぼ同じである。従ってCA骨材コンクリートは、脱型1日後においてもセメントの水和増進が著しい初期材齢に、養生水が確保されているため、それ以後の長期強度の増進に寄与しているものと考えられる。以上のことより、CA骨材コンクリートは圧縮強度比が大きく、セルフキュアリング機能を有す

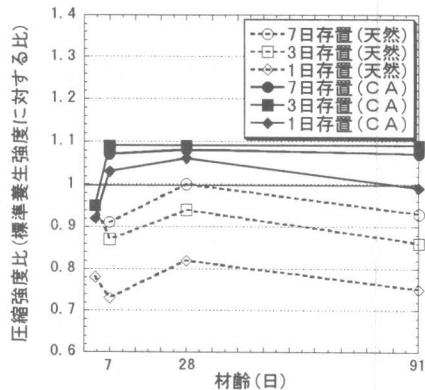


図-5 圧縮強度比と材齢の関係

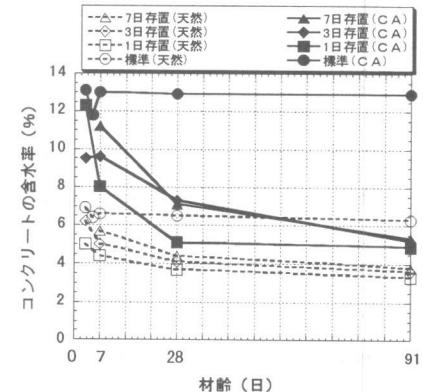


図-6 コンクリートの含水率と材齢の関係

表-6 単位容積質量と材齢の関係

骨材の種類	7日		28日		91日	
	標準養生 各温度養生 の平均値	各温度養生 の平均値	標準養生 各温度養生 の平均値	各温度養生 の平均値	標準養生 各温度養生 の平均値	各温度養生 の平均値
CA骨材セメントの単位容積質量(kg/m^3)	1.954	1.882	1.954	1.836	1.956	1.814
天然骨材セメントの単位容積質量(kg/m^3)	2.374	2.327	2.346	2.294	2.343	2.285

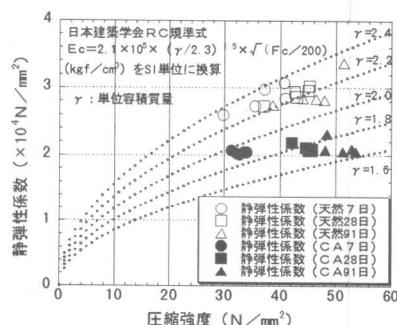


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

ることが確認できた。

3.3 圧縮強度と静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-7に示す。材齢28日における天然骨材コンクリートの平均静弾性係数は $2.98 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、CA骨材コンクリートでは $2.11 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ であった。圧縮強度の増大と共に天然骨材コンクリートの静弾性係数は大きくなる傾向にあったが、CA骨材コンクリートはほとんど変わらない傾向を示した。RC規準式との対応では、CA骨材コンクリートの場合、標準養生では $\gamma = 1.8$ 、他の養生条件では材齢7日で1.9、材齢28日で1.8、材齢91日で1.65を採用すると概ね適合する。

3.4 養生条件の違いが引張強度に及ぼす影響

養生条件の違いによる引張強度と材齢との関係を図-8に示す。一部試験においてばらついたデータがあるがそれを除くと、CA骨材コンクリートの引張強度は、いずれの材齢においても養生による影響が少ない。

天然骨材コンクリートの引張強度は、養生方法によって異なり、標準養生が最も大きい。また、型枠存置期間が長い養生のもの程、引張強度は標準養生に近い値を示した。これらの結果は、引張強度においても圧縮強度と同様にセルフキュアリング効果があることを示している。

圧縮強度と引張強度の関係を図-9に示す。

CA骨材コンクリートの引張強度は圧縮強度に対し概ね1/15程度であり、天然骨材コンクリートと比較すると、その比は小さい値を示した。また従来の人工軽量骨材と同程度の値だった²⁾。

3.5 乾燥収縮

乾燥収縮率と材齢との関係を図-10に示す。

天然骨材コンクリートの材齢91日の乾燥収縮率は、養生方法の差に関係なく 7×10^{-4} 程度であった。一方、CA骨材コンクリートの場合は、 $4.0 \sim 5.8 \times 10^{-4}$ の範囲にあり、湿潤養生期間が長いほど小さかった。

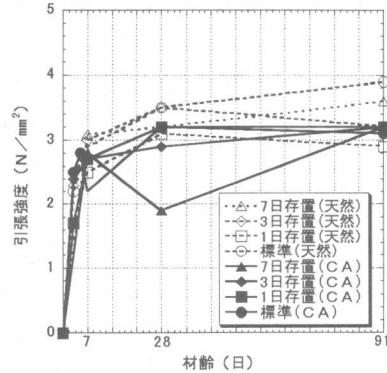


図-8 引張強度と材齢の関係

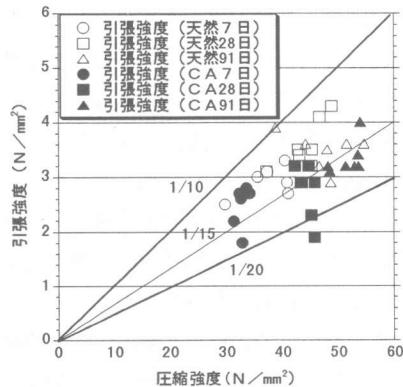


図-9 圧縮強度と引張強度の関係

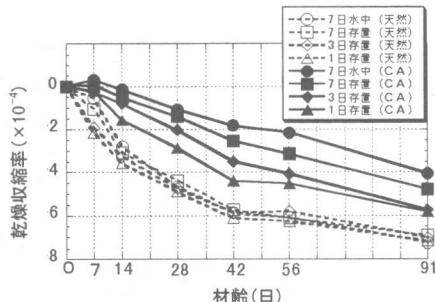


図-10 乾燥収縮と材齢の関係

これは、CA骨材コンクリート自身の含水率の差による影響と考えられる。

なお、長期にわたって両者の違いを検討する必要があるが、材齢91日の範囲におけるCA骨材コンクリートは、乾燥収縮でもセルフキュアリング効果が認められた。

3.6 CA骨材コンクリートの骨材界面の観察

型枠1日存置養生したCA骨材コンクリートの材齢28日における骨材の界面をSEMで観察した一例を写真-1～2に、標準養生の天然骨材コンクリートの例を写真-3に示す。写真-1を見ると、CA骨材の表面形状は凹凸状態であった。また、CA骨材の内部は空隙が多数認められた。

両者の骨材界面を高倍率撮影した結果、天然骨材コンクリートは、骨材自身が緻密なため、セメントマトリックスと骨材との界面は明瞭に識別が可能であった。しかし、CA骨材コンクリートは、CA骨材表層の空孔中にセメント水和物が認められ、これによって、骨材との界面は明瞭に識別することが困難であった。

この現象はCA骨材とセメントマトリックスとが一体化していることを示すと考えられ、CA骨材の界面において付着性状が向上している可能性がある。この現象だけでは、今回の実験結果に対しての影響度合いは不明であるが、中性化の進行や塩分の浸透など耐久性に影響を及ぼす因子を低減することも考えられ、今後さらに検討を行う予定である。

4.まとめ

本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 材齢28日及び91日におけるCA骨材コンクリートの型枠存置養生の圧縮強度は、天然骨材コンクリートの型枠存置養生よりも大きかった。
- 2) CA骨材コンクリートの型枠存置養生の圧縮強度は、標準養生による圧縮強度よりも大きく、材齢91日においても圧縮強度比が1.0以上を示した。
- 3) CA骨材コンクリートの材齢91日の乾燥収縮率は $4.0\sim 5.8\times 10^{-4}$ の範囲にあり、材齢91日では天然骨材コンクリートの57～85%であった。

以上の結果、本研究で用いたCA骨材コンクリートは、CA骨材中の水分がコンクリートの養生に寄与していることが確認された。

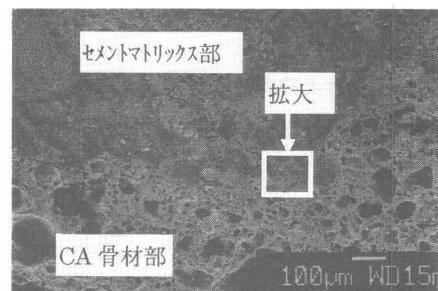


写真-1 CA骨材コンクリートの界面（50倍率）

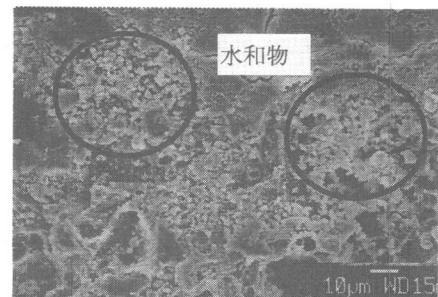


写真-2 CA骨材コンクリートの界面（500倍率）

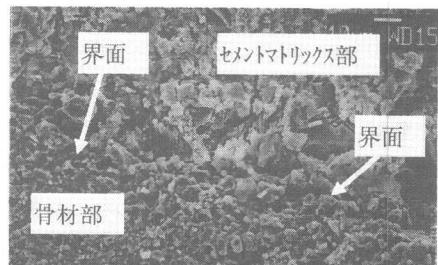


写真-3 天然骨材コンクリートの界面（500倍率）

参考文献

- 1) 林瑞華、岩室大、藤井康志、本間札人、大澤清八、山本康弘：超高強度コンクリートと骨材に関する研究、日本建築学会大会学術梗概集(関東)，pp969～970，1993
- 2) 日本建築学会：軽量コンクリート調合設計・施工指針案・同解説，1981

謝辞：顕微鏡観察に当たり、(株)宇部三菱セメント研究所の朝倉悦郎氏、川端秀和氏に貴重なご助言を頂いた。感謝の意を表します。