

石炭灰をリサイクル活用した人工骨材の開発ならびに それを用いたコンクリートの諸特性

Development of Artificial Aggregates Made from Coal Ash and Properties of Concrete Using These Aggregates

和美広喜 新井一彦 笠井 浩
稲垣和彦¹⁾ 森田 哲²⁾

要 約

石炭灰の有効利用として、大量に活用が見込める人工骨材の開発に着目し検討を行った結果、開発目標を満足する骨材が既存の骨材製造設備を用いて製造できる見通しが得られた。試作した骨材は、JIS A 5002に適合する人工軽量骨材であり、この骨材を用いたコンクリートは、建設省通達による性能判定基準に適合し、同通達による最大設計基準強度である27N/mm²以下における現場打ちコンクリートへ適用できることが確認された。また、コンクリート打込み後の養生条件を変えた実験結果から、試作した骨材の高吸水性による骨材内の水分がコンクリートの自己養生機能を発揮することが分かった。

目 次

- I. はじめに
- II. コンクリート用石炭灰人工骨材の開発
- III. CA 骨材を用いたコンクリートの諸特性に関する実験
- IV. おわりに

I. 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、排出の割合の大部分を占め、強熱減量の多い石炭灰は、未利用のまま最終処分場で埋め立て処理がされている。今後この最終処分場の確保も困難な状況になりつつあり、未利用資源の有効利用技術の確立が重要な課題となっている。

一方、コンクリートに使用されている天然骨材は、今まで大量に消費されてきており、その枯渇化が危惧されている。また地球環境の保全や循環型社会形成の観点からも、天然骨材は、今後むやみに採掘することは好ましくない状況になることが予測される。

このような背景から、石炭灰をコンクリート用骨材に活用することは、極めて重要なことと言える。

石炭灰のコンクリート用骨材としては、旧くは昭和60年頃に国内産の石炭灰と少量の微粉末を原料とした人工軽量骨材¹⁾が開発されている。この骨材は軽量かつ15%以上の高い吸水率を保持したものである。これを用いたコンクリートは頁岩系軽量コンクリートとほぼ同程度の強度であるが、乾燥収縮や中性化など耐久性に係わる性質は若干劣っている。この理由として、骨材の焼成温度が低いことを挙げ、骨材表面が頁岩系骨材よりも粗状になっている²⁾と述べている。また、近年では、石炭灰、ペントナイト、石灰石微粉末を原料とした絶対密度1.8~2.1g/cm³程度の高強度人工骨材³⁾が開発されている。この骨材はやや密度が大きいコンクリートとして

の軽量化の効果は比較的少ないことや焼成温度が1300℃程度³⁾と高温のため、焼成時の熱エネルギーも多く必要とする。

本研究では、約1100℃で熔融し焼成に省エネルギー化が図れる頁岩微粉末に着目し、石炭灰と頁岩微粉末を混合・造粒し焼成した軽量、高強度でかつ高吸水性を有する石炭灰人工骨材の開発を行った。

II. コンクリート用石炭灰人工骨材の開発

1. 開発目標

石炭灰と頁岩微粉末の二原料を活用した新たな骨材（以下、CA骨材と呼ぶ）を開発するにあたり、その開発目標を以下のように設定した。

- (1) 既存の人工軽量骨材の製造設備で製造が可能であること。
- (2) 開発したCA骨材を用いたコンクリートの単位容積質量が2.0t/m³以下の軽量性を図るため、CA骨材の絶対密度は、1.8g/cm³以下であること。
- (3) 軽量で高強度コンクリート（コンクリートの圧縮強度が60N/mm²程度まで）に対応可能な骨材強度を有すること。（骨材の圧壊荷重が1000N以上であることを目標）
- (4) 使用時の骨材に一定の吸水率を付与でき、これによるコンクリートの自己養生機能が期待できる高吸水（15%以上）型骨材であること。

2. CA骨材の製造原料とその製造方法

(1) 製造原料

CA骨材の製造で用いた主原料は石炭灰と頁岩微粉末である。石炭灰は火力発電所において海外炭を燃焼した際の副産物である粗粉を使用した。頁岩微粉末は、通常の人工軽量骨材の原料である膨張性頁岩を微粉碎したものである。その他、造粒性を高めるために粘結材として、ペントナイト及び特殊増粘剤を用いた。

(2) CA骨材の製造方法

CA骨材の製造工程をFig.1に、製造方法の概略を以下に示す。

1) 関東支店 2) 東京支店

- タンクから排出された各原料は計量器で所定量を計量し、粉体攪拌混合機で攪拌した後、スクリー型混練機で加水・混練した。
- 混練した材料は、ロール型押し造粒機で造粒し、生ペレットを得た。生ペレットの形状は、直径5～13mm、長さ10～15mm程度の円柱体である。
- 生ペレットはスクリーニングした後、直径3m長さ約60mのロータリーキルンで焼成しCA骨材を製造した。骨材の焼成温度はキルン挿入口で約250℃、キルン内で約1100℃である。

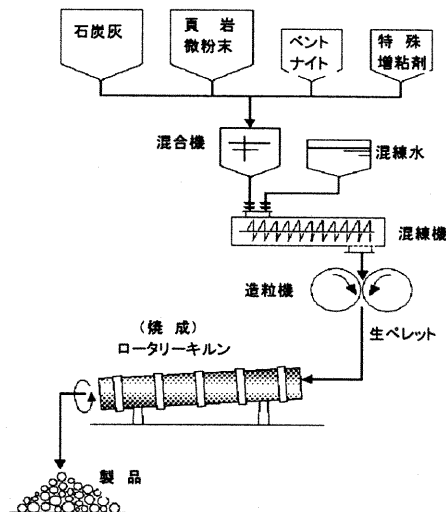


Fig.1 Production Flow of Artificial Aggregate made from Coal Ash

3. CA骨材の実機焼成実験

(1) 目的

CA骨材は既存の人工軽量骨材の製造設備を用いて試作し、開発目標(値)に適合するか否かを確認することを目的として実験を行った。石炭灰と頁岩微粉末の配合割合(質量比)は第1回目の実験では70:30とした。第2回目の実験では同様に60:40とした。

(2) 試験項目及び方法

- 絶乾密度及び24時間吸水率: JIS A 1135「構造用軽量粗骨材の絶乾密度及び吸水率測定方法」によった。
- 圧壊荷重: JIS Z 8841「造粒物—強度試験方法」によった。
- 単位容積質量及び実績率: JIS A 1104「骨材の単位容積質量及び実績率試験方法」によった。
- ふるい分け試験: JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」によった。
- 骨材の断面観察: 試作骨材を紙やすりで研磨し、観察用試料を作製した後、顕微鏡で断面の写真撮影を行った。
- 骨材の細孔径分布: 水銀圧入法により、3.75～7500nm範囲の細孔半径の細孔量を測定した。

(3) 実験結果及び考察

第1回目及び第2回目の実機焼成実験結果をTable 1に示す。

a. 絶乾密度, 吸水率, 圧壊荷重

第1回目の実機焼成実験では、絶乾密度は1.52g/cm³、24時間吸水率は17.2%、圧壊荷重は327Nであった。絶乾密度及び吸水率は開発目標(値)を満足したが、圧壊荷重は開発目標(値)を満足し

なかった。

第2回目の実機焼成実験では、絶乾密度は1.51g/cm³、24時間吸水率は8.2%、圧壊荷重は1136Nであった。絶乾密度及び圧壊荷重は開発目標(値)を満足し、特に骨材の圧壊荷重は、第1回目の実機焼成骨材に比べて約4倍以上の高い強度が得られた。また、市販の人工軽量粗骨材(メサライト:以下、M骨材と呼ぶ)の圧壊荷重は500N程度であることから、2倍以上の高い強度が得られた。吸水率は製造後に煮沸吸水を行い、その後JIS A 1135に準じ試験した結果16%であり、開発目標(値)を確保していることを確認した。

b. 単位容積質量, 実績率, ふるい分け

第2回目の実機焼成骨材の単位容積質量は1.016kg/lであり、第1回目の実機焼成の場合よりも約5%軽量化された。骨材の実績率は、第1回目の方が70.5%で、約4%大きかった。ふるい分け試験による粒度分布は両者共にほぼ同程度であり、粗粒率は第1回目が5.62で第2回目は5.57とほとんど同じであった。

c. 骨材の断面観察

第2回目の実機焼成で試作したCA骨材の外観をPhoto 1に、骨材の断面写真をPhoto 2に示す。

生ペレットは円柱形で造粒されたが、ロータリーキルン内から産出された多くの骨材は、楕円形あるいは球形に近い形状をしていた。

CA骨材の断面を観察した結果、本骨材は、約1mmの表皮部分が茶系で内部は灰系の状態で焼結されていた。頁岩微粉末の熔融温度は約1100℃で、石炭灰の場合は1300～1400℃であるため、頁岩微粉末が低温で先に熔融し、石炭灰を包み込んだ状態で焼結されたものと考えられる。

Table 1 Test Results of Aggregate Produced from Coal Ash in Plant

焼成 実験 No.	石炭灰 混入率 (%)	絶乾 密度 (g/cm ³)	24時間 吸水率 (%)	煮 沸 吸水率 (%)	圧 壊 荷 重 (N)	単位容 積質量 (kg/l)	実績率 (%)	ふるい分け試験(通過率)					粗粒率
								20	15	10	5		
第1回	70	1.52	17.2	—	327	1.073	70.5	100	100	86	37		5.62
第2回	60	1.51	8.2	16.0	1136	1.016	67.3	100	100	84	44		5.57

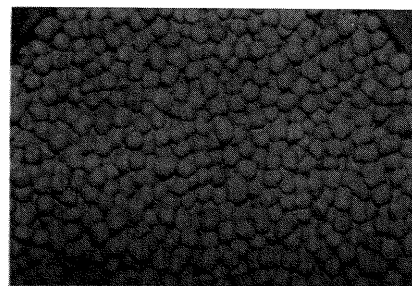


Photo 1 External Appearance of Aggregate made from Coal Ash

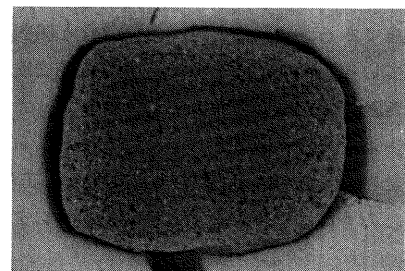


Photo 2 Section of Aggregate made from Coal Ash

d. 骨材の細孔径分布

第2回目の実機焼成で試作したCA骨材の細孔径分布結果をFig.2に、比較のために、M骨材の細孔径分布結果をFig.3に示す。図中に、各々の総細孔量を示す。

CA骨材の細孔径分布は100~4000nmの範囲にあり、片寄りのない一様な分布を示していた。一方、M骨材の場合は広範囲に分布しており、本骨材と比べて100nm以下の領域の細孔径が多いことが特徴的である。なお、CA骨材の総細孔量は111.08mm³/gで、M骨材の場合の208.16mm³/gに比して約53%少なく、CA骨材はM骨材よりも緻密であることがわかった。

4. JIS A 5002に対する適合試験

第2回目の実機焼成で試作したCA骨材について、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」の適合性を確認するため試験を行った。試験に用いた骨材は煮沸吸水前のものであり、また粒度調整を行ったものである。試験結果をTable 2に示す。これより、本骨材は化学試験においてはすべての項目に適合し、物理試験結果より区分「HA」に適合した。また、コンクリート試験結果より、区分「419」に相当した。したがって本骨材は人工軽量骨材「HA-419」に相当する骨材であることが確認された。

5. 建設省「人工軽量骨材の判定基準」に対する適合試験

第2回目の実機焼成で試作したCA骨材について、建設省住指発32号による「人工軽量骨材を用いる軽量コンクリートの使用基準及び性能判定基準」の適合性を確認するため、同基準にしたがい各種品質試験を行った。コンクリートの調査及びフレッシュコンクリートの試験結果をTable 3に示す。使用した骨材は、粗骨材が5mm以上で煮沸吸水後のCA粗骨材、細骨材が天然砂であり、コンクリートの区分は軽量1種コンクリートである。フレッシュコンクリートは全ての調査において、所要のスランブ及び空気量を満した。品質試験の結果をTable 4に示す。これより、CA骨材を用いたコンクリートは、載荷3年まで試験中のク

リーブ係数を除いた6項目の試験について全て適合した。特に、水セメント比が約45~55%の範囲における各調査のコンクリートの気乾単位容積質量は1.84~1.86 t/m³の範囲を示し、全て1.9を下回り、CA骨材を用いたコンクリートは軽量コンクリートといえる。圧縮強度はD調査の349kgf/cm²からA調査の497kgf/cm²と、住指発の規定値に対して約40~55%大きい値を示し、十分な性能を保持していた。材齢91日における乾燥収縮率は5.4~5.6×10⁻⁴で、住指発の規定値よりも56~60%小さい値を示した。なお、クリープ係数は材齢91日までの結果では1.0以下を示しており、材齢3年までに住指発の規定値である2.5を上回る確率は極めて低いと推測される。以上のことから、本粗骨材を用いたコンクリートは設計基準強度27N/mm²(規定値で示されている単位:270kgf/cm²)以下の現場打ちコンクリートへ適用できることが確認された。

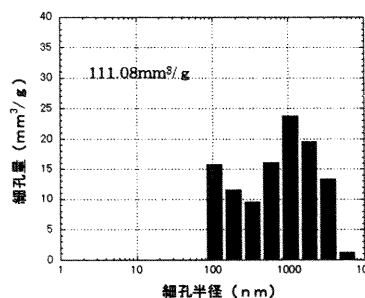


Fig. 2 Pore Diameter of Aggregate made from Coal Ash

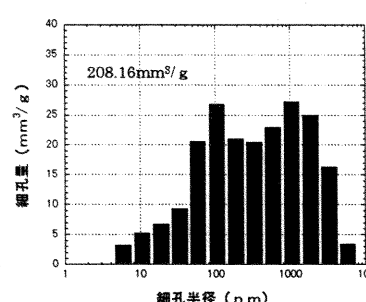


Fig. 3 Pore Diameter of Mesalite Aggregate (M)

Table 2 Test Results of Aggregate made from Coal Ash and Criteria of JIS A 5002

試験項目	化学試験			物理試験							コンクリート試験		
	強熱減量 (%)	SO ₃ (%)	NaCl (%)	絶対密度 (g/cm ³)	表見密度 (g/cm ³)	24時間吸水率 (%)	有機不純物	粘土塊量 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	圧縮強度 (N/mm ²)	
試験値	0.09	0.17	0.001	1.5	1.6	6.64	標準色より淡い	0.03	0.96	65.3	1.943	48.2	
規格値 呼び名 (区分)	1以下	0.5以下	0.01以下	1.5以上 2.0未満 (H)	-	-	標準色より淡い	1以下	-	60以上 (A)	1.8以上 2.0未満 (19)	40以上 (4)	

Table 3 Mix Proportion of Concrete and Test Results of Fresh Concrete

コンクリートの種類	粗骨材	細骨材	調査記号	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量					フレッシュコンクリートの試験結果				
								W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	CA骨材 (kg/m ³)	混和剤量 (C×%)	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m ³)	コンクリート温度 (°C)
軽量1種	CA骨材	天然砂	A調査	15±2	5±1.5	44.8	43	179	400	720	547	0.025	14.5	28.0×27.0	5.5	1.940	20.0
			B調査	15±2	5±1.5	50.6	44	177	350	757	553	0.025	15.0	31.0×30.0	5.8	1.924	20.0
			C調査	21±1	5±1.5	48.2	46	193	400	754	507	0.025	20.5	38.5×38.5	5.0	1.948	20.0
			D調査	21±1	5±1.5	54.6	47	191	350	793	511	0.025	21.0	42.0×41.0	5.3	1.935	20.0

※ CA骨材: 絶対状態で表示 (絶対密度: 1.49g/cm³、使用時吸水率18.8%、混和剤: AE剤 (ヴィンソル) 使用

Table 4 Test Results of Concrete and Criteria of Notification of the Ministry of Construction

調査の種類	ブリーディング量 (cc/cm ²)		気乾単位容積質量 (t/m ³)		圧縮強度 (F) 材齢28日 (kgf/cm ²)		引張強度 材齢28日 (kgf/cm ²)		付着強度 材齢28日 (kgf/cm ²)				長さ変化率 材齢91日 (×10 ⁻⁴)	
	実測値	判定	実測値	判定	実測値	判定	実測値	判定	上段		下段		実測値	判定
A調査	—	—	1.857	適合	497	設計基準	33.4	適合	108	適合	114	適合	—	—
B調査	—	—	1.843	適合	379	強度270	—	—	—	—	—	—	5.4	適合
C調査	0.18	適合	1.856	適合	397	(kgf/cm ²)	—	—	—	—	—	—	5.6	適合
D調査	0.22	適合	1.844	適合	349	まで適用可	30.4	適合	47.6	適合	66.8	適合	—	—
住指発の規定	0.5以下 (C、D調査のみ)		細骨材が川砂の場合 全ての調査共に1.9以下		適用条件 A調査: 320以上 B調査: 270以上 C調査: 280以上 D調査: 230以上		20以上かつ 0.06F以上 (A、D調査のみ) A調査判定値: 29.8以上 D調査判定値: 20.9以上		上段1/15Fかつ (9+2/75F) 以上 (A、D調査のみ) A調査判定値: 33.1以上 D調査判定値: 23.3以上		下段1/10Fかつ (13.5+1/25F) 以上 (A、D調査のみ) A調査判定値: 49.7以上 D調査判定値: 34.9以上		B調査: 9×10 ⁻⁴ 以下 C調査: 10×10 ⁻⁴ 以下 (B、C調査のみ)	

※ 単位は建設省住指発32号に表示されているものを使用している。

Ⅲ. CA 骨材を用いたコンクリートの諸特性に関する実験

1. 実験目的

現在、日本建築学会の 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、所定期間の型枠の存置や散水養生等である。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ても、それと同程度の効果がある養生方法が望まれている。

前章で述べたように、試作した CA 骨材は、コンクリートの単位容積質量が 2.0 以下と軽量であり、骨材の圧壊荷重は 1000N を超えた高強度を有し、吸水率が 15% 程度と高いことを特徴とする。特に CA 骨材は吸水率が高いことより、養生中に骨材内の水分が放出されることによるコンクリートのセルフキュアリング効果が期待できる。本実験ではこの効果の確認を行うと共に各種養生条件を変化させた時の CA 骨材コンクリートの諸特性を検討した。

2. 実験計画

(1) コンクリートの種類と使用材料

コンクリートの種類は、CA 骨材を使用したコンクリート（以下、CA 骨材コンクリートと呼ぶ）と比較のために砕石を骨材とする普通コンクリート（以下、天然骨材コンクリートと呼ぶ）の 2 種類とした。使用材料を Table 5 に、CA 骨材の絶対密度及び吸水率を Table 6 に、CA 骨材の粒度分布を Table 7 に示す。

(2) コンクリートの調査

コンクリートの調査は Table 8 に示すように、生コン工場出荷量の多い水セメント比である 50% とした。目標スランプは 18cm、目標空気量は天然骨材コンクリートが 4.5%、CA 骨材コンクリートは 5% とした。CA 骨材コンクリートに用いた骨材は、煮沸吸水後のもので、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。さらに CA 骨材の粒度分布測定の結果、CA 骨材だけでは 2.5mm 以下の微粒分の骨材が不足するため、天然砂を混合して補った。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した⁴⁾。

(3) 養生条件

本実験では、養生条件を変えたときのコンクリートのセルフキュアリングの効果を確認する目的から、Fig.4 に示す 7 種類の養生条件を設定した。

(4) 試験項目及び方法

a. フレッシュコンクリート試験

フレッシュコンクリート試験では、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。CA 骨材コンクリートの空気量は、骨材修正係数により補正した。

b. 圧縮強度ならびに静弾性係数試験

圧縮強度用試験体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱とし、JIS A 1108 に準じて試験を行った。静弾性係数は JIS 原案によった。

c. コンクリートの含水率

コンクリートの含水率の算定は、乾燥前の供試体の質量を測定した後、105℃で 10 日間乾燥後の質量を測定し、乾燥前後の質量差を乾燥後の質量で除した。

d. 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験体は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱とし、Fig.4 の①③④⑤について、JIS A 1129 に準じて長さ変化及び質量変化を試験した。養生方法の相違を検討する目的から、長さ変化の基長は脱型 1 日後直ちに測定した。また、①③及び④の試験体は所定の湿潤材齢まで封緘養生し、以降は温度 20℃湿度 60% 室に保存した。⑤のものは材齢 7 日まで水中養生し、以降は温度 20℃湿度 60% 室に保存した。

e. 促進中性化試験

促進中性化試験体は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱とし、日本建築学会の「高耐久鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）同解説の付録」に準じて、CA 骨材コンクリートと天然骨材コンクリートとの比較試験を行った。中性化の促進条件は温度 20℃、相対湿度 60%、炭酸ガス濃度 5% とした。

Table 5 Materials for Concrete

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57.9%)
CA骨材	石灰灰人工骨材(絶対密度、吸水率は、Table6を参照)
水	調布市上水道水
混和剤	ad1:リグニンスルホン酸系AE減水剤(P社製) ad2:空気量調整剤(P社製)

Table 6 Physical Properties of Aggregate made from coal ash

CA骨材	粒径(mm)	絶対密度(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

Table 7 Test Results of Sieve Analysis of aggregate made from coal ash

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

Table 8 Mix Proportion of Concrete

コンクリートの種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)							
		W	C	S	G	—	—	ad1	ad2
天然骨材コンクリート	50	180	360	793	943	—	—	0.25	0.001
CA骨材コンクリート	50	180	360	577	75	CA大	CA中	ad1	ad2
						278	326	0.25	0.0005

※ CA骨材:絶対状態にて表示

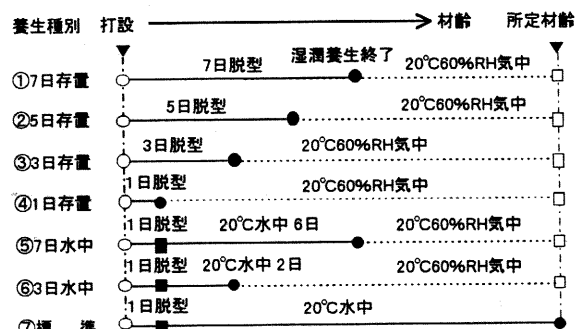


Fig. 4 Curing Condition

3. 実験結果及び考察

(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 Table 9 に示す。両コンクリート共に所要のスランプ、空気量が得られた。CA 骨材コンクリートの練り上がり時の単位容積質量は $1.90\text{t}/\text{m}^3$ で、天然骨材コンクリートよりも 17.4%軽量化されていた。

(2) 養生条件と圧縮強度の関係

材齢 28 日における養生条件と圧縮強度の関係を Fig.5 に、材齢 91 日の場合を Fig.6 に示す。天然骨材コンクリートと CA 骨材コンクリートの型枠存置による養生と標準養生との比較において、天然骨材コンクリートにおける材齢 28 日の圧縮強度は、標準養生の場合が最も大きく、型枠存置期間が短くなるにつれて圧縮強度が低下する傾向にあった。材齢 91 日の場合は材齢 28 日の場合よりも、その傾向がより顕著に認められた。一方、CA 骨材コンクリートにおける材齢 28 日の圧縮強度は、型枠存置期間による相違はほとんど認められず、型枠存置による養生の方が標準養生よりもやや大きい傾向にあった。材齢 91 日の場合も材齢 28 日とほぼ同じ傾向を示した。

CA 骨材コンクリートの材齢 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おり、型枠存置による養生と同様な傾向を示していた。一方、天然骨材コンクリートの場合は、標準養生よりも大きく、型枠存置による養生の場合と異なる傾向を示した。これより、天然骨材コンクリートは型枠存置による養生だけでは不十分で、他の方法による養生水の補給が必要であることが確認できた。

コンクリートの含水率と材齢との関係を Fig.7 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養生を上廻っている。これを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。

(3) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を Fig.8 に示す。

材齢 28 日で標準養生した場合の静弾性係数の平均値は天然骨材コンクリートが $2.98 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ 、CA 骨材コンクリートは $2.11 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ であり、CA 骨材コンクリートの方が 30%程小さい値を示した。日本建築学会の RC 規準式との対応では、CA 骨材コンクリートの場合、材齢 7 日で $\gamma = 1.9$ 、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。

(4) 養生条件と長さ変化率及び質量変化率との関係

長さ変化率と材齢の関係を Fig.9 に、質量変化率と材齢の関係を Fig.10 に示す。天然骨材コンクリートの材齢 91 日における長さ変化率は養生方法に関係なく、 -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、型枠存置期間が長いほど長さ変化率は小さかった。

天然骨材コンクリートの質量変化率は、型枠存置期間が長いほど小さい傾向にあったが、材齢 91 日において 1~2%の範囲でほぼ収束していた。一方、CA 骨材コンクリートの場合は、天然骨材コンクリートと同様に型枠存置期間が長いほど小さい傾向にあったが、材齢 91 日では 5~6%の範囲にあり、天然骨材コンクリートよりも大

Table 9 Test Results of Fresh Concrete

コンクリートの種類	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

*補正後の空気量

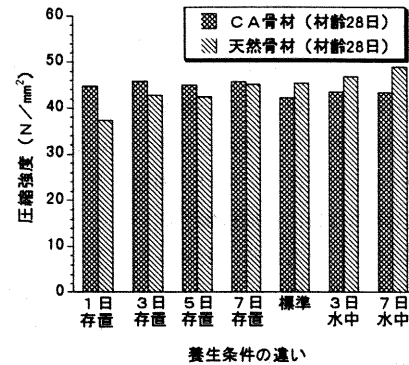


Fig. 5 Relationship between Compressive Strength and Curing Condition at age of 28 days

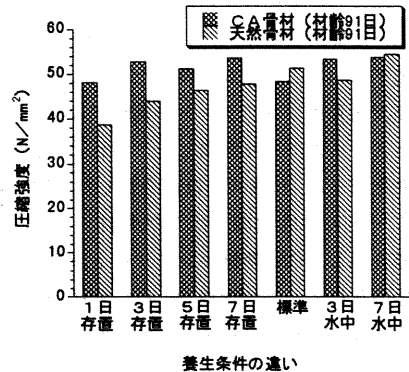


Fig. 6 Relationship between Compressive Strength and Curing Condition at age of 91 days

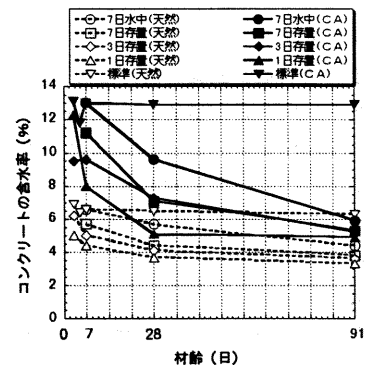


Fig. 7 Water Content Ratio of Concrete

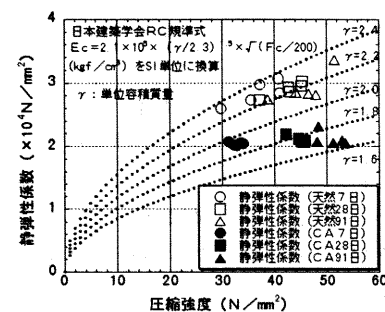


Fig. 8 Relationship between Compressive Strength and Static Modulus of Elasticity

きな値を示した。一般に、質量変化率が大きいほど長さ変化率も大きくなると言われているが、CA 骨材コンクリートでは、Fig.11 に示すように、質量変化が大きい材齢 28 日までの長さ変化が小さく、質量変化だけでは長さ変化の説明がつかない。ここで、Fig.7 で示したコンクリートの含水率と材齢の関係を見ると、両者のコンクリートの含水率の変化と質量変化率の変化とは、ほぼ同様な傾向を示している。すなわち、天然骨材コンクリートは元来含水率が少ないため質量変化率も小さいが、CA 骨材コンクリートは含水率が多いため質量変化率も大きいと考えられる。CA 骨材コンクリートの長さ変化率が小さいことについては、前述したように、CA 骨材コンクリートの含水率は特に初期材齢で高いことより、十分な養生水が細孔内に確保されているため、セメントマトリックスの収縮を養生水が緩和させる作用を持つと共に、CA 骨材界面の細孔内にはセメント水和物が生成されている⁴⁾ことから、セメントマトリックスと骨材との付着が良好な状態にあるためと考えられる。

(5) 促進中性化試験結果

材齢 3 ヶ月までの促進中性化試験を行った結果を Fig.12 に示す。図中の太線は、和泉式⁵⁾を用いて W/C 50%, CO_2 濃度 5% の促進中性化環境下における推定式を導いたものである。CA 骨材コンクリート及び天然骨材コンクリートの実験式は、今回の実験データを用いて $Y=A\sqrt{t}$ 式により回帰した。これより、天然骨材コンクリートの中性化深さは、和泉式とほぼ合致した。本回帰式による CA 骨材コンクリートの中性化深さは天然骨材コンクリートよりも約 30% 小さい値を示し、CA 骨材コンクリートは中性化の進行を抑制する効果が認められた。この理由は、CA 骨材の保有水分が空気中の炭酸ガスの内部への侵入を抑制しているためと考えられる。

IV. おわりに

本研究では、石炭灰の大量利用が見込めるコンクリート用骨材の開発について検討を行った結果、開発目標(値)を満足した石炭灰人工骨材が既存の骨材製造設備を用いて製造できる見通しが得られた。試作した CA 骨材は、JIS A 5002 に適合する人工軽量骨材であること、この骨材を用いたコンクリートは、建設省通達による性能判定基準に適合したことより、設計基準強度 $27N/mm^2$ 以下の現場打ちコンクリートへ適用できることが確認された。また、吸水率の高い CA 骨材を用いたコンクリートは、JASS5 の規定より早期に型枠を脱型し気中養生しても、標準養生と同等以上の強度発現が認められた。さらに乾燥収縮の低減や中性化の進行抑制にも有効なコンクリートであることが分かった。今後、CA 骨材コンクリートの長期にわたる耐久性状を確認すると共に、これらの特性を活かした高耐久コンクリートへの適用の可能性を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 是石俊文ほか；フライアッシュを利用した人工 軽量骨材の開発、セメントコンクリート、No.478,(1986.12), pp.18-27.
- 2) 菊池雅史,向井毅；石炭灰軽量骨材の構造用コンクリート骨材としての適用性(第1報),日本建築学会構造系論文集第 402 号,(1989.8),pp.27-36.
- 3) 曾根徳明；石炭灰を主原料とした高強度人工骨材,コンクリート工学,Vol.36,No.12,(1998.12),pp.3-10.

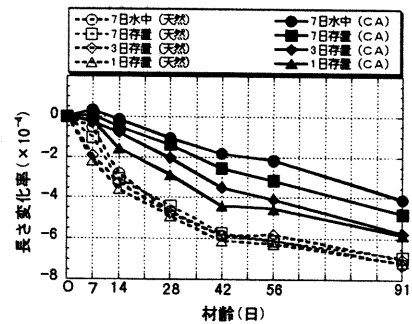


Fig. 9 Length Change by Difference of Curing Condition

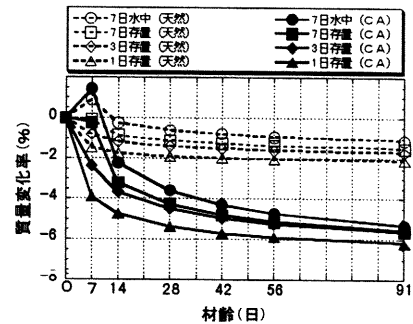


Fig. 10 Mass Change by Difference of Curing Condition

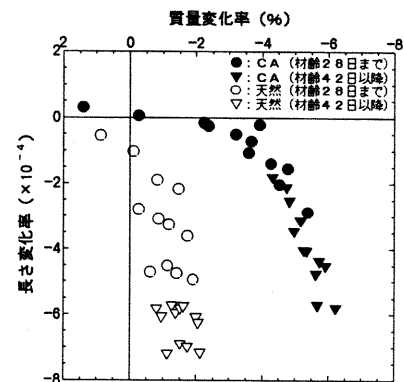


Fig. 11 Relationship between Mass Change and Length Change

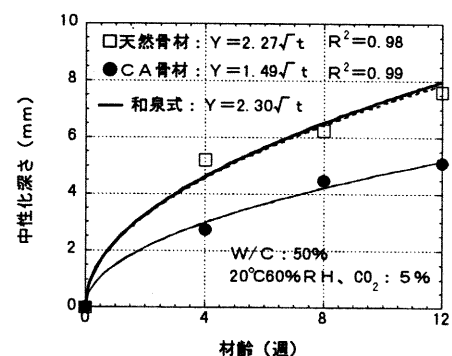


Fig. 12 Neutralization Depth by Accelerated Test at age of 3 month

- 4) 笠井浩,和美廣喜,新井一彦,森田哲；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,コンクリート工学年次論文集,Vol.22,No.2,(2000.6),pp.1273-1278.
- 5) 和泉登志；コンクリートの中性化に基づく鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計手法に関する研究,大阪大学学位論文,(1991.12),pp.261-262.