

フライアッシュ起源高強度人工骨材コンクリートの 長期性状に関する研究

石川, 嘉崇
電源開発株式会社茅ヶ崎研究所

小山, 智幸
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

伊藤, 是清
東海大学

<https://doi.org/10.15017/1462172>

出版情報 : 都市・建築学研究. 24, pp.131-138, 2013-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン :
権利関係 :

フライアッシュ起源高強度人工骨材コンクリートの 長期性状に関する研究

Study on Long Term Properties of Concrete with High Strength Artificial Aggregate

石川嘉崇*1, 小山智幸*2, 伊藤是清*3

Yoshitaka ISHIKAWA, Tomoyuki KOYAMA and Korekiyo ITO

In this study, the long term exposure test of concrete specimens using ‘High Strength Artificial Aggregate’ (hereafter called FA aggregate) which has a dense structure through properly controlled production was carried out. After ten years of exposure, the compressive strength of concrete using FA aggregate with water/cement ratio of 30 and 55% was the same as that of crushed stone concrete (hereafter called NA concrete), and was greater than that of ordinary artificial light weight aggregate concrete under the same conditions. And the carbonation rate of FA concrete was smaller than that of NA concrete.

Keywords : Fly Ash, High Strength Artificial Aggregate, Long Term Properties, Exposure Test
 フライアッシュ, 高強度人工骨材, 長期性状, 曝露実験

1. はじめに

フライアッシュを有効利用する方法の一つとして開発され実用化されている人工骨材には、発泡型と高強度型が存在する。前者が比較的低強度の軽量コンクリート用骨材として用いられるのに対し、後者は緻密で吸水率が小さく、普通骨材と同程度の強度を有するため適用範囲が広く、高強度コンクリートへの使用も可能である¹⁾。この高強度人工骨材(以下FA骨材)に関する研究は種々なされ、骨材物性、コンクリートの調合方法、フレッシュ性状、強度ならびに耐久性状について広範な検討がなされている²⁾。

本研究は、FA骨材を使用したコンクリートの長期にわたる強度発現性状や耐久性状に関して検討を行ったものである。

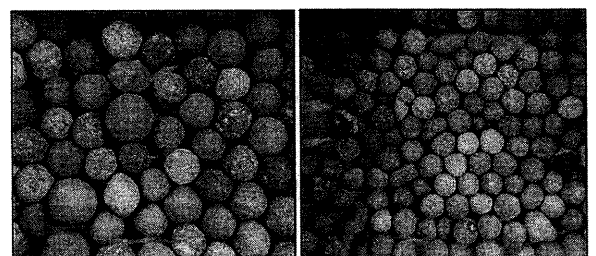
2. FA骨材の概要

FA骨材は、主原料であるフライアッシュを焼結材であるベントナイトおよび比重と成分を調整するための炭酸カルシウムと混合、加水・混練して所定の粒度分布になるよう造粒後、焼成した緻密な人工骨材である¹⁾。基礎

表1 粗骨材の諸元

	FA骨材	人工軽量骨材	普通骨材
記号	FA(通常吸水) FAT(熱間吸水)	LA	NA
産地等	FA起源	膨張性頁岩起源	青梅産砕石
寸法	1505	1505	2005
表乾密度 (g/cm ³)	1.85	1.63	2.72
吸水率 (%)	FA1510 : 2.49 FA1005 : 1.48 FAT1510 : 3.06 FAT1005 : 2.45	27.0	0.83
実積率(%)	63.0	60.4	59.6

*熱間吸水：骨材を110℃で加熱し、水中で急冷



FA1510

FA1005

写真1 FA骨材の外観

*1 電源開発(株)茅ヶ崎研究所

*2 都市・建築学部門

*3 東海大学

表2 各シリーズの概要

シリーズ	試験体(cm)	調合の種類	曝露条件
大型部材	150×70×25	2(W/C)	屋外
高強度	10φ×20	12(骨材,W/C)	—
曝露環境	10φ×20 10×10×40	8(骨材,W/C)	標準, 簡易封緘, 温暖地屋外

物性を表1に, 外観を写真1に示す。なお表には, 比較のため, 本研究で使用した市販の人工軽量骨材ならびに普通骨材の物性も併記している。

3. 検討の概要

研究は, 表2に示す, 大型部材による検討, 高強度コンクリートへの適用, 種々の環境への長期曝露の3シリーズに大別される。いずれも表1および表3に示す材料を用いて2001年に試験体を作成した。

表3 使用材料

	種類	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント 低熱ポルトランドセメント	密度: 3.16cm ³ /g 密度: 3.22cm ³ /g
水	水道水	—
細骨材	大井川産川砂	表乾密度 2.70 g/cm ³ , 吸水率 1.66%
混和剤	wr:AE 減水剤 sp:高性能 AE 減水剤 ac:AE 剤	標準形(I種) ポリカルボン酸系,標準形(I種) フライッシュ用(I種)

各シリーズで材料の組合せは異なる。練混ぜには100リットル二軸ミキサを使用した。細・粗骨材とセメントを投入後10秒間空練りし, 混和剤を累加計量した水を加えてから中速で90秒練り混ぜた。本稿では長期曝露性状に関する検討結果を示す。

表4 曝露環境シリーズの調合

調合No.	記号	セメント	粗骨材	スランブスランブフロー(cm)	空気量(%)	W/C(%)	S/a(%)	単位量 (kg/m ³)							
								W	C	S	G		混和剤(C×%)		
											5~10	10~15	wr	sp	ae
1	FA30	低熱	FA	50 ±	4 ±	30	44.0	165	550	742	356	291	1.70	-	0.004
2	FAT30		FAT												
3	LA30		LA												
4	NA30		NA												
5	FA55	普通	FA	18 ±	5 ±	55	46.0	175	318	840	372	304	-	0.025	0.011
6	FAT55		FAT												0.009
7	LA55		LA												0.010
8	NA55		NA												0.017

FA,FAT,LA,NAは表1, wr,sp,aeは表3の記号に対応

表5 曝露環境シリーズの初期性状

調合No.	記号	フレッシュコンクリート			硬化コンクリート (材齢28日)			
		コンクリート温度(°C)	スランブスランブフロー(cm)	空気量(%)	単位容積質量(t/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)	超音波伝播速度(m/sec)	動弾性係数(×10 ³ N/mm ²)
1	FA30	17.2	47.0	5.0	2.104	66.1	4,393	36.6
2	FAT30	17.1	48.0	5.1	2.085	57.3	4,308	34.8
3	LA30	17.1	48.0	4.9	1.981	47.1	4,032	29.0
4	NA30	17.0	55.0	3.7	2.438	62.9	4,643	47.3
5	FA55	18.3	17.5	5.9	2.039	34.4	4,113	31.1
6	FAT55	18.0	19.5	5.0	2.082	33.3	3,994	29.9
7	LA55	18.3	19.5	6.0	1.945	32.1	3,632	23.1
8	NA55	18.5	17.7	5.6	2.350	32.3	4,176	36.9

表4に曝露環境シリーズの調査を示す。骨材はFA骨材、熱間吸水を行ったFA骨材(以下FAT骨材)、LA骨材、NA骨材を使用した。熱間吸水の目的は人工骨材中に完全に吸水させることによる圧送性の向上などである。表1に示すように、熱間で吸水を行ったFATの方がFAよりも吸水量が大きい。フレッシュ性状および材齢28日における硬化コンクリートの性状を表5に示す(試験方法の詳細は後述する)。FAT骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、FA骨材を用いた場合よりも若干小さくなっており、この範囲内では熱間吸水の効果は認められない。また、水セメント比55%の比較的低強度のコンクリートでは、骨材の種類による差はほとんど見られないが、水セメント比30%の場合にはFA骨材を用いたコンクリートの強度が最も大きく、LA骨材を用いたものが最も小さくなっている。また動弾性係数は、水セメント比によらずNA骨材を用いたコンクリートが最も大きく、次いでFA骨材、FAT骨材、NA骨材の順となっている。

以後試験体は所定の環境で曝露を開始した。曝露方法および曝露場所は、「標準」：電源開発(株)茅ヶ崎研究センター噴霧養生室で20℃標準養生、「簡易封緘」：同研究センター実験室(温度20℃、湿度60%)にて脱型した状態でビニル袋内に入れて静置、「温暖地屋外」：九州大学箱崎キャンパス建築材料実験室屋上とした。試験体は10φ×20cmとした。「温暖地屋外」の曝露状況を写真2に示す。曝露開始後10年目に試験体を回収し、主として下記の測定を行った。

1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験はJIS A 1108-2006に準じた。なお、試験体本数は、標準養生シリーズではそれぞれ2体ずつとし、その他のシリーズでは3体ずつとした。

2) 引張強度試験

引張強度試験は、割裂引張強度試験により行った。

3) 静弾性係数

静弾性係数は、最大荷重の1/3における応力度とひずみ度から求めた。ひずみ度は、圧縮強度試験時においてコンプレッソメータを用いて測定した。

4) 超音波伝播速度および動弾性係数

超音波測定器を用いて供試体の超音波伝播時間を求め、式(1)から超音波伝播速度を算出した。動弾性係数は、超音波伝播速度もとに、式(2)から算出した。

$$V_p = \frac{L}{T} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V_p :超音波伝播速度(m/sec)、 L :供試体長さ(m)、 T :伝播時間(sec)

$$E_D = 1.02 \times 10^{-3} \cdot \gamma_t \cdot V_p^2 \cdot \frac{(1 + \mu_0) \cdot (1 - 2\mu_0)}{\dots\dots\dots (1 - \mu_0)} \quad (2)$$

ここに、 E_D :動弾性係数(N/mm²)、 γ_t :単位容積質量(t/m³)、 V_p :超音波伝播速度(m/sec)、 μ_0 :動ポアソン比(0.2と仮定)

5) 中性化

引張強度試験後の割裂した試験片を用いて中性化深さを測定した。中性化深さは供試体の円形端面より1.5cmを除き、長手方向を6等分して、計12点の平均値を求めた。

6) 単位容積質量

強度試験直前において、供試体の質量、直径および高さを測定し、単位容積質量を求めた。

7) 色差

屋外曝露供試体の表面の汚れを評価するために、供試体表面の物体色(L*a*b*表色系)を接触型色彩色差計で測定した。供試体表面の物体色は、供試体の側面4列につき、それぞれ3点ずつ測定し、その平均値を用いて簡易封緘養生供試体を基準とした色差を式(3)から算出した。

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ΔE^*_{ab} :色差、 L^*_1 、 a^*_1 、 b^*_1 :屋外曝露供試体の表面色、 L^*_2 、 a^*_2 、 b^*_2 :簡易封緘養生供試体の表面色、 L^* :明度、 a^* 、 b^* :色度

8) 目視観察

ひび割れの有無および状態を目視観察し、ひび割れが確認されたものについては、最大ひび割れ幅をクラックスケールで測定した。

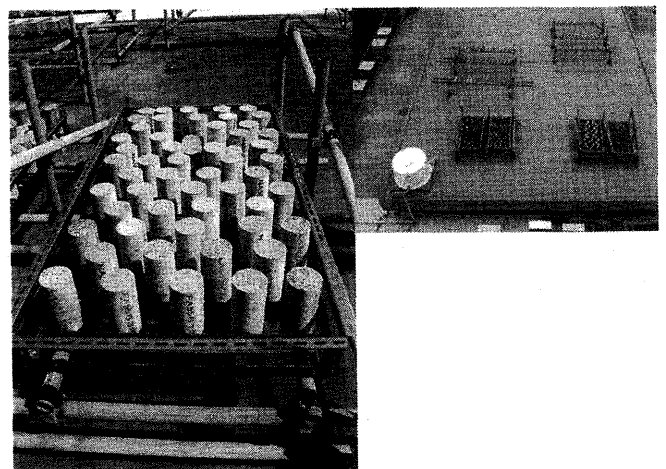


写真2 「温暖地屋外」の曝露状況

9) 細孔径分布

細孔径分布測定用の試料は、割裂引張試験後の供試体の表層部（試験体の円形端面より約1cmの深さの部分）および中央部（試験体の両円形端面からほぼ等距離の部分）をダイヤモンドカッターによりφ100×5mmの円盤状に切り出し、アセトンに浸漬して付着水を取り除いた。この円盤状試料の中心部分から、ニッパーを用いて一辺が約5mmの小片となるよう、粗骨材を含まないように切断して得た試料を真空乾燥した後、細孔径分布の測定に用いた。細孔径分布の測定は、測定試料約3gと水銀を測定用セルに封入後、圧力を段階的に増加させながら水銀を圧入して細孔容積を測定した。

細孔径-細孔容積曲線は、(a)式の細孔径(直径)と圧入圧の関係から細孔径を計算し求めた。

$$d = -4\gamma \cos \theta / P \quad \dots\dots\dots (a)$$

ここで

- d : 細孔径 (直径) μm
- γ : 水銀の表面張力 N/m
- θ : 水銀と試料との接触角 $^{\circ}$
- P : 圧入圧 MPa

4. 結果の概要

1) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図1に示す。同図左側にはW/Cが30%のシリーズ（以下、W/C30%シリーズ：低熱ポルトランドセメント使用）を、右側にはW/Cが55%のシリーズ（以下、W/C55%シリーズ：普通ポルトランドセメント使用）をそれぞれ示している。

圧縮強度に及ぼす骨材種別の影響は、材齢10年目においても、先に示した材齢28日の結果とほぼ同様であり、水セメント比で傾向が異なっていることがわかる。すなわち、比較的低強度のW/C55%シリーズでは、FA骨材（高強度人工骨材）、FAT骨材（同、熱間吸水）、LA骨材（一般の人工軽量骨材）を用いた場合のいずれも、NA骨材（一般的な碎石）を用いた場合と同等以上の圧縮強度が得られているのに対して、80~95N/mm²程度の高強度が得られているW/C30%シリーズでは、NA骨材と比較して、FA骨材の場合が同程度であり、FAT骨材、LA骨材の順に小さくなった。圧縮強度試験後において試験体の破壊状態を観察した結果、W/C55%シリーズよりもW/C30%シリーズの方が骨材破壊を多く生じており、LA骨材を用いた場合が最も顕著であった。上記のような結果となった理由として、既往の研究²⁾でも述べられているように、高強度領域においては骨材自体の強度が大きく影響するため、骨材強度が小さいLA骨材を用いた場合の圧縮強度が小さくなったものと考えられる。一方、FA骨材を用いた場合は、高強度領域においてもNA骨材

と何ら遜色ない強度が得られており、長期材齢においてもその優位性を確認することができた。

曝露（養生）条件の影響については、全体的な傾向として、屋外曝露が標準養生と同程度かやや大きくなっており、簡易封緘養生が最も小さくなっていることがわかる。これは、簡易封緘養生では、他の曝露環境よりも乾燥しやすいため、水和反応が妨げられたことが原因として考えられる。ただし、いずれの場合も材齢28日と比較して強度は増進しており、曝露による劣化の兆候は見られない。

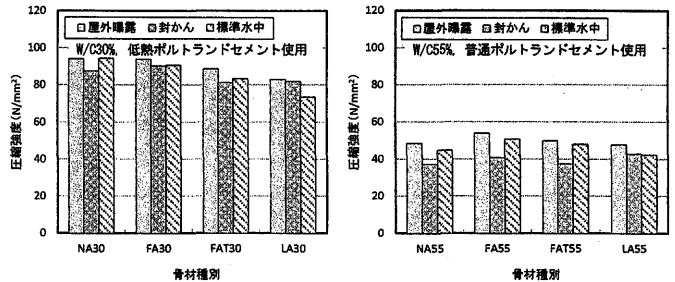


図1 圧縮強度性状

2) 圧縮強度と引張強度の関係

圧縮強度と割裂引張強度との関係を図2に示す。図中には、高強度領域までを考慮した両者の関係式^{3),4)}から得られる推定値を破線で示している。今回の実験から得られた圧縮強度に対する引張強度の比は、NA骨材では1/21~1/15、FAおよびFAT骨材では1/25~1/16、LA骨材では1/27~1/16となった。同図より、NA骨材においては提案式に比較的近い値が得られていることがわかる。一方、FA骨材、FAT骨材、LA骨材では、ばらつきはあるが、NA骨材を用いた場合よりも強度比は小さく、既往の研究¹⁾で得られている傾向と同様に高強度になるほどその差は大きくなった。また、強度比はやや小さい値となった。

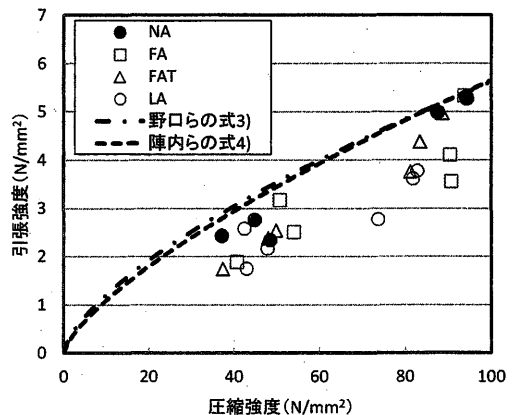


図2 圧縮強度と割裂引張強度との関係

3) 静弾性係数および動弾性係数

圧縮強度と静弾性係数との関係を図3に示す。図中には、New RC式から得られる値の80%値を実線（普通骨材を想定）と破線（軽量骨材を想定）を示している。ここで、式中の単位容積質量の値は、実測値をもとに、NA骨材では2.3 t/m³、FA骨材では2.0 t/m³を用いた。既往の研究⁹⁾と同様に、NA骨材を用いたコンクリートよりもFA骨材を用いた場合の方が静弾性係数は小さくなり、高強度になるほどその傾向が顕著になった。ただし、これらの値は、New RC式から得られる値の80%値よりも大きくなった。

動弾性係数と静弾性係数との関係を図4に示す。両者の関係は、骨材種別、養生条件、調合の違いにかかわらず、ほぼ直線で表すことができ、動弾性係数は静弾性係数よりも30%程度大きくなった。

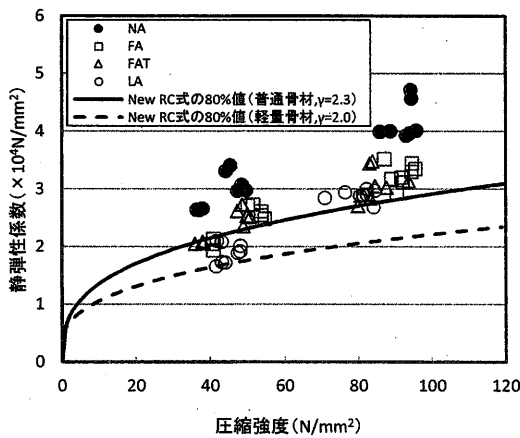


図3 圧縮強度と静弾性係数との関係

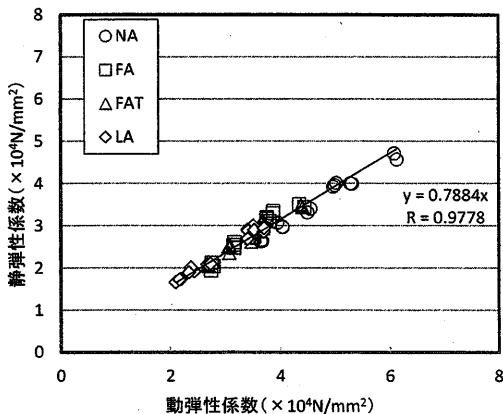


図4 動弾性係数と静弾性係数との関係

4) 中性化

W/C55%シリーズの中性化試験結果を図5に示す。なお、W/C30%シリーズはほとんど中性化が生じていなかった。屋外曝露供試体の中性化深さは、人工骨材の種類にかかわらず、砕石を用いた場合の約半分以下となった。人工軽量骨材を用いたコンクリートの長期屋外曝露に関

する研究⁹⁾では、軽量コンクリートの中性化深さは普通コンクリートよりも小さな値を示すと報告されており、高強度人工骨材を用いた場合においても同様の傾向が得られた。一方、簡易封緘養生供試体のFA骨材およびFAT骨材を用いた場合はNA骨材と同程度であり、LA骨材の場合はこれらの骨材よりも中性化深さが大きくなった。このように、曝露環境によって中性化性状が異なったのは、降水などによる硬化体内部の含水率や骨材の保水性などが影響したためであると推察される。

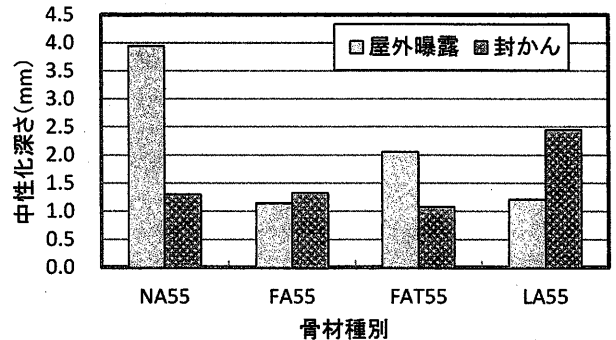


図5 中性化性状 (W/C55%シリーズ)

5) 表面の色差およびひび割れの状態

簡易封かん養生供試体を基準とした屋外曝露供試体表面の色差を図6に示す。色差はW/C30%シリーズの方が小さくなった。この違いは供試体表面の緻密さに依存しているものと考えられる。

供試体のひび割れの状態を観察した結果、屋外曝露したW/C30%の人工骨材シリーズにおいて表面に0.05mm程度の微細ひび割れが生じていた。特に、LA骨材を用いた供試体ではひび割れが全面にわたって発生しており、FA骨材、FAT骨材の順にひび割れの範囲は小さくなった。ただし、強度や中性化の状況から判断すると、ひび割れは極表面のものであり、これらの性状にほとんど影響していないものと考えられる。先に述べた人工軽量骨材を用いたコンクリートの長期屋外曝露に関する研究⁹⁾においても、硬化体内部に微細なひび割れが発生したとの報告がされているが、今回のひび割れの発生原因については今後の課題としたい。

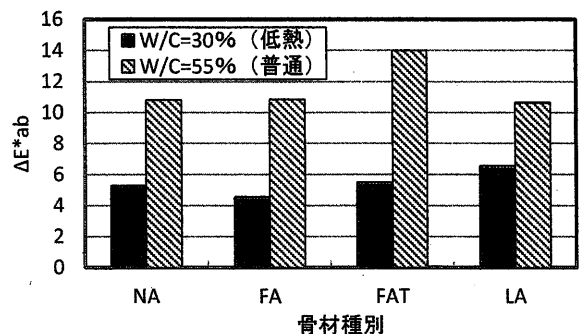


図6 屋外曝露供試体表面の色差

6) 細孔径分布

6-1) 総細孔量

図7 (W/C: 30%) および図8 (55%) に総細孔量の分布を示す。図7から、W/C: 30%の場合には、全体的に表層部より中央部の総細孔量が小さく、標準養生を除くとFA骨材とNA骨材は概ね同程度の値を示す。一部簡易封緘養生のFAT骨材のケースで中央部が表層部より大きな総細孔量を示す。温暖地曝露の状況では、FA骨材が一番小さい値を示しているが、表層部と中央部の差はほとんどみられない。一方、W/C: 55%の場合(図8)は、全体的にW/C: 30%の場合に比較して総細孔量が、1.5倍程度大きな値を示す。各骨材に関する大小関係は、概ねW/C: 30%の場合と同様である。特徴的な現象は、W/C: 30%の場合と異なりFA骨材が表層部より中央部の方が総細孔量が多い場合があることである。

る。この原因については、今後細孔径の分布形状も含めて詳細な検討が必要である。

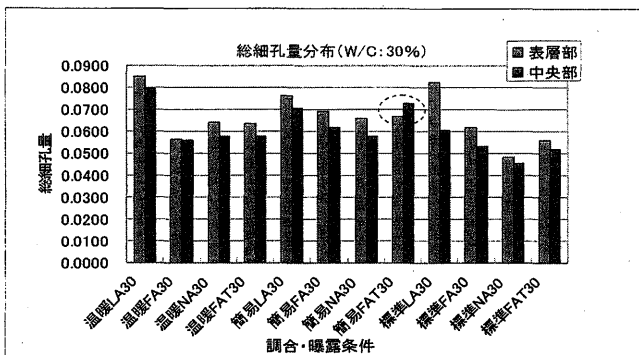


図7 総細孔量の比較 (W/C: 30%)

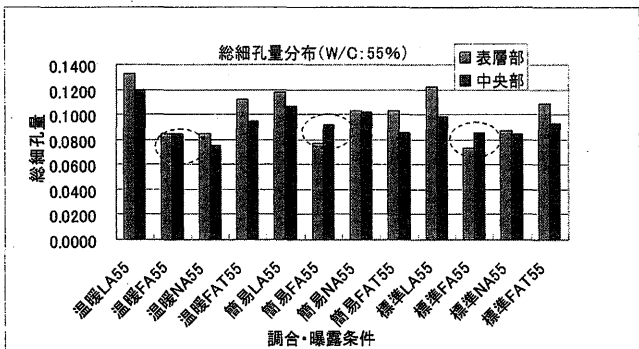


図8 総細孔量の比較 (W/C: 55%)

6-2) 50nmで分割した場合の検討

6-1)で見られたFA骨材に関する特徴的な現象について、総細孔量を50nmで分割して検討した。図9および図10に簡易封緘養生(W/C: 55%)の場合を、図11および図12に標準養生の場合を示す。簡易封緘養生の場合には、中央部が大きくなった原因としては、50nm以上の細孔量が増加したため(50nm未満の細孔量はほぼ同様)である。また、標準養生の場合には、中央部が大きくなった原因としては、50nm未満の細孔量が増加したため(50nm以上の細孔量は若干中央部が大きい程度)であ

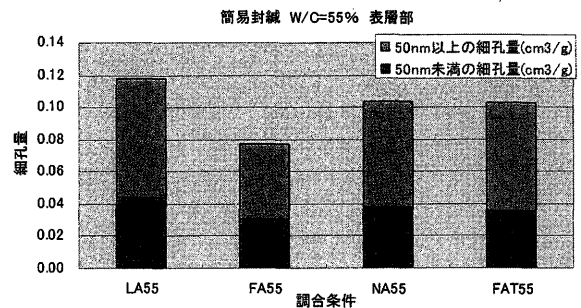


図9 表層部細孔量 (FA55%: 簡易封緘)

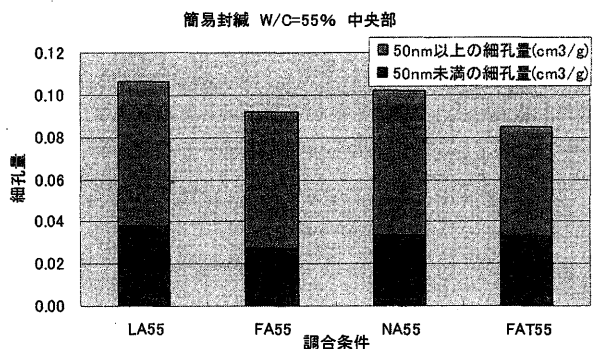


図10 中央部細孔量 (FA55%: 簡易封緘)

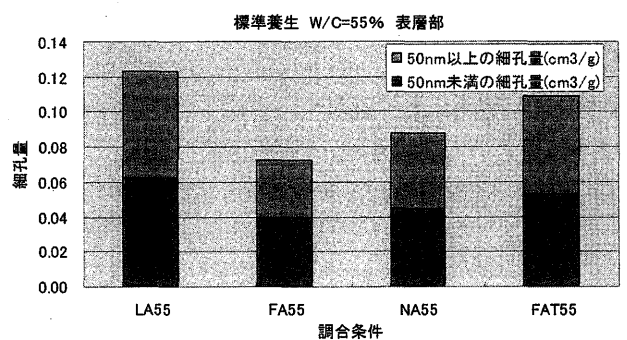


図11 表層部細孔量 (FA55%: 標準)

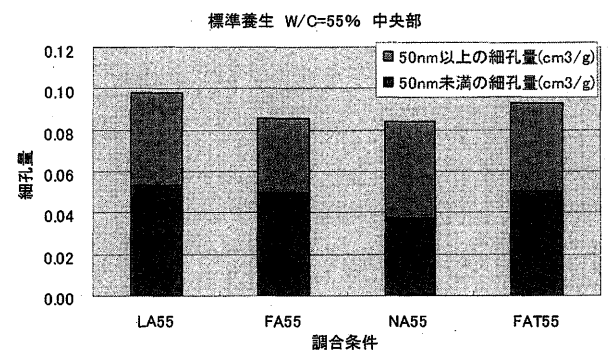


図12 中央部細孔量 (FA55%: 標準)

6-3) 圧縮強度との相関

圧縮強度と総細孔量との関係を図13に示す。既往の研究から、圧縮強度と総細孔量との間には相関関係が成立

することが知られている。今回の実験においても、概ね圧縮強度と総細孔量との間に相関関係が成立することがわかる。

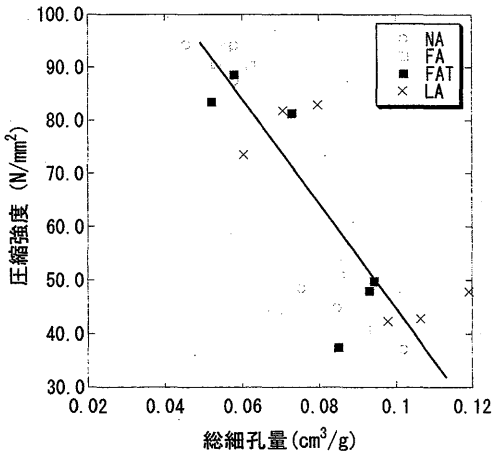


図 13 圧縮強度と総細孔量との関係

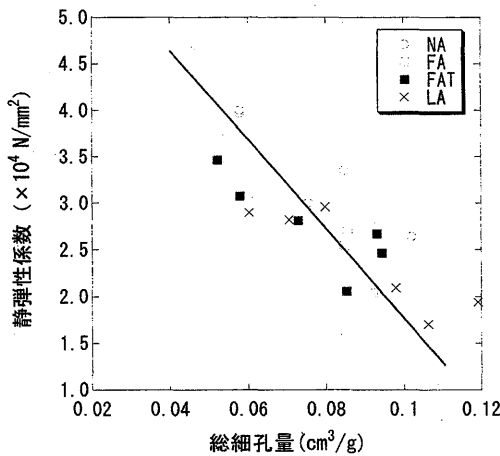


図 14 静弾性係数と総細孔量との関係

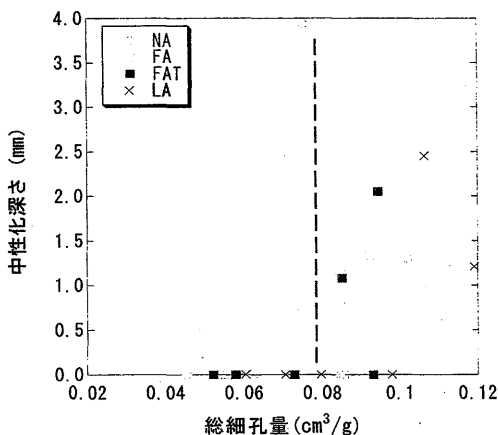


図 15 中性化深さと総細孔量との関係

6-4) 静弾性係数との相関

静弾性係数と総細孔量との関係を図 14 に示す。圧縮強度と同様に相関関係が成立し、NA 骨材については、同

じ総細孔量に対しては、他の骨材よりも大きな静弾性係数を示している。

6-5) 中性化深さとの相関

中性化深さについては、全体の傾向として総細孔量が $0.08\text{cm}^3/\text{g}$ を境に中性化が進行していることがわかる。ここからは、総細孔量の増加と共に中性化深さも大きくなる。

5. まとめ

本研究は、フライアッシュを主原料とした高強度人工骨材を使用したコンクリートに関して、種々の環境下において屋外への曝露実験も行いながら、10年の長期にわたる強度発現性状や耐久性状について検証を行ったものである。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 高強度人工骨材 (FA 骨材) を用いたコンクリートは、高強度コンクリートの領域においても、砕石を用いた場合と同等以上の強度を長期材齢にわたって示した。一方、市販の人工軽量骨材は高強度域において砕石を用いた場合に比べて強度が低くなった。これらは高強度領域においては骨材自体の強度が大きく影響するためであると考察した。また、いずれの曝露条件においても材齢 28 日と比較して強度は増進しており、曝露による劣化の兆候は見られなかった。
- 2) 今回の実験から得られた圧縮強度に対する引張強度の比は、砕石コンクリートでは $1/21 \sim 1/15$ 、FA 骨材を用いたコンクリートでは $1/25 \sim 1/16$ 、市販の人工軽量骨材を用いたコンクリートでは $1/27 \sim 1/16$ となった。すなわち砕石コンクリートにおいては既往の提案式に比較的近い値となったが、人工骨材を用いた場合には高強度になるほど強度比はやや小さい値となった。
- 3) 圧縮強度と静弾性係数との関係は、既往の研究と同様に、砕石を用いたコンクリートよりも FA 骨材を用いた場合の方が静弾性係数は小さくなり、高強度になるほどその傾向が顕著になった。ただし、その値は、New RC 式から得られる値の 80% 値よりも大きい値であった。
- 4) いずれの骨材を用いた場合も W/C30% のコンクリートは 10 年間の自然曝露でほとんど中性化が生じていなかった。W/C55% の場合、人工骨材を用いたコンクリートの中性化深さは砕石コンクリートと同程度以下であった。
- 5) 水銀圧入式ポロシメータにより得られた総細孔量と強度や弾性係数、中性化性状には高い相関がみられた。

以上、フライアッシュ起源人工骨材を用いたコンクリートの性状が長期にわたり良好であることが確認された。別途 SEM 及び EPMA によるコンクリートの組織観察を実施中であり、多方面からさらに詳細な検討を行う予定

である。

〈謝辞〉

実験に際して、開発設計コンサルタント安田幸弘氏、CTEC 木下茂氏、本学卒論生の藤井伸允君(当時)の多大な貢献を得た。ここに謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 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, pp.3-10, 1998.12
- 2) 石川嘉崇, 早川光敬, 笹原厚, 加藤将裕, 安田正雪, 友澤史紀, フライアッシュを主原料とした人工軽量骨材の高強度コンクリートへの適用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第554号, pp.1-8, 2002.4
- 3) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第472号, pp.11-16, 1995.6
- 4) 陣内浩, 枘田佳寛, 早川光敬, 並木哲: 180N/mm²クラスまでの高強度コンクリートの各種強度と長期力学特性, セメント・コンクリート論文集, No.57, pp.428-435, 2003
- 5) 大久保孝昭他: 長期間屋外曝露された人工軽量骨材コンクリートの諸性状, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.23-29, 2002.11

(受理: 平成25年5月23日)