

高強度フライアッシュ人工骨材を用いた高耐久性の高強度軽量コンクリート

三浦 律彦 近松 竜一
十河 茂幸**High-durability, High-strength Structural Light-weight Concrete with
Artificial High-strength Coarse Aggregate made from Fly Ash**Norihiko Miura Ryuichi Chikamatsu
Shigeyuki Sogo**Abstract**

Artificial light-weight aggregate, made mainly from expansive shale that has been burned has generally been used for light-weight concrete. However, this type of aggregate has high water adsorption, because of the high proportion of air voids. This may often cause high slump loss or aggravation of pumpability resulting in poor on site material handling. A new type of artificial high-strength aggregate made from fly ash, having lighter density than expansive shale, has been manufactured for trial and practical study. It is almost round shape, and shows so much higher strength, and so much lower water adsorption, that it effectively improves concrete pumpability and durability. This paper describes experimental results of flowability, pumpability, strength properties and durability of high-strength light-weight structural concrete. In conclusion, it is proved that we can obtain high-durability high-strength light-weight structural concrete, with artificial high-strength aggregate made from fly ash.

概 要

人工軽量骨材は、これまで膨張頁岩を焼成したものが一般に使用されてきた。この骨材は内部に多くの空隙を含み、吸水率が数十%と大きいため、打込み時にスランプやポンプ圧送性の低下をまねき、現場施工の観点からは扱いにくい骨材であった。これに対し、近年、資源の有効利用等の観点から、膨張頁岩より密度が小さいフライアッシュを主原料とした高強度人工骨材が試作され、実用化が試みられている。この高強度FA人工骨材は粒子形状が球形で強度が高く、吸水率が小さい等の特徴があり、ポンプ圧送時の施工性や耐久性が改善できると判断された。本研究では、この骨材の特徴から、構造用高強度・軽量コンクリートへの適用を想定し、施工性や強度特性、耐久性について実験的に検討を加えた。その結果、この骨材を使用することで、流動性、充てん性に優れ、高強度で高い耐久性能を有する高性能な構造用高強度・軽量コンクリートが実現できることが確認された。

1. はじめに

人工軽量骨材は、これまでは膨張頁岩を焼成・発泡させて軽量化したものが商品化され¹⁾、建築工事を主体として使用されてきた。これらの人工軽量骨材は、内部に多くの空隙を有し、骨材自体の吸水率が大きく、コンクリート製造時の品質変動や、運搬・打込み時のスランプロス、ポンプ圧送性の低下など、普通骨材に比べて取扱いが難しい材料であった。また、圧送性を確保するためにプレウェッティング（事前飽水）させた状態では、耐凍結融解抵抗性が低いなどの問題があり、これまでに土木構造物への適用はごく一部の用途に限られていた²⁾。

これに対し、資源の有効利用や環境問題の観点から、火力発電所等で大量に副産されるフライアッシュを原料とした人工軽量骨材の開発が進められている³⁾。筆者らは、フライアッシュを原料とした高強度人工骨材の研究に参画するとともに、当社保有技術であるニューロクリートの高機能化の一手段として独自の研究を進めてきた。この高強度フライアッシュ人工骨材（以下FA骨材と略称）は、膨張頁岩より素材の密度が小さいフライアッシュを主原料とし、空隙が少ない緻密な状態に造粒・焼成したもので、骨材自体の強度が天然骨材並みに高く、吸水率が1%程度以下と小さく、粒子形状が球形である等の特徴を有している。

本研究では、構造用の高強度・軽量コンクリートへの適用を想定し、FA骨材を用いたコンクリートの流動性、ポンプ圧送性、各種の強度特性、耐久性状に関して普通骨材（砕石）と対比しながら実験的に検討を行った。

2. 高強度フライアッシュ人工骨材の概要

2.1 従来の人工軽量骨材の製造法と品質上の課題

我国では、1955年にはJIS A5002において軽量骨材が初めて規格化され、天然軽量骨材が一部で使用されていた。人工軽量骨材の使用は1960年代からであり、1965年に建築学会のJASS 5に人工軽量骨材の施工標準が制定され、1967年に土木学会で設計施工指針（案）が制定されてからは使用量が増加し、オイルショック直前の1973年にはピークで175万m³もの人工軽量骨材が出荷されていた⁴⁾。

この頃から使用されている人工軽量骨材の原料は膨張頁岩が主体で、これを粉砕・分級し、焼成する。膨張頁岩は加熱すると、1000～1200℃で分解ガスが発生し、このガスにより多孔質構造を形成しながら膨張する。その後、300℃程度まで冷却した後、水槽に漬けて熱間吸水させ、粗骨材の場合には25～30%程度の吸水状態で出荷する⁴⁾。

この骨材の内部空隙はほとんどが連続空隙と考えられ、低圧で容易に吸水するが、一部に未吸水部が残っていると、ポンプ圧送時に作用する圧力で骨材内部に水分の移動が生じ、コンクリートの流動性が低下したり、圧送中に管内閉塞が生じたりする原因となる。従って通常は骨材に十分なプレウェットングを施すと共に、スランプを大きめに設定するよう配合修正される。このため軟練りの建築工事に多く使用されてきた。土木構造物においては、プレウェットングした人工軽量骨材を用いたコンクリートの耐凍結融解抵抗性が劣ることから、橋梁の床版などの一部を除き、あまり使用されなかった。

2.2 新しい人工軽量骨材の開発

近年、上記の課題を解決する目的や資源リサイクルの観点から、新しい人工軽量骨材が開発されるようになってきた。近年の人工軽量骨材開発の流れをFig. 1に示す。新しい軽量骨材の開発は、空隙構造を変える技術を主体として、焼成温度や方法、粉砕過程の加工度、発泡剤等の改質剤量を調整することで進められる。従来品から見た改善性能として、高強度化、高耐久化、超軽量化、高断熱化、意匠性向上等があり、それぞれの目的に応じた製品が開発されている。今回対象としたFA骨材は、高強度化、高耐久化を目標として開発されたものである。

2.3 高強度フライアッシュ人工骨材の特徴

エネルギー政策の転換により、我が国の火力発電所で発生する石炭灰の量は、21世紀初頭には1,000万トンを超えると予想されており、その有効利用が重要な課題となっている。このような観点から、電力業界やセメント業界が中心となって、密度の小さいフライアッシュを原料

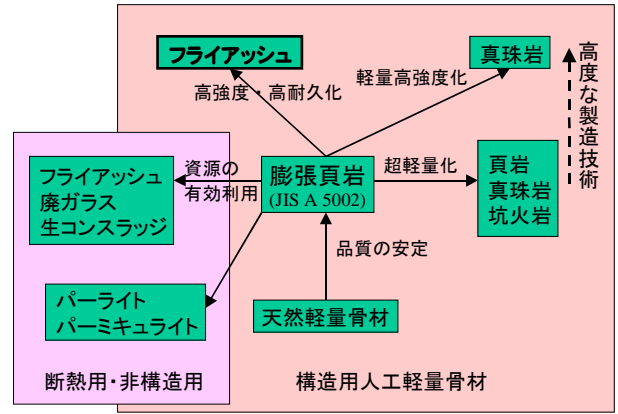


Fig. 1 近年の人工軽量骨材開発の流れ⁴⁾
Flow of Development of Light-weight Aggregate

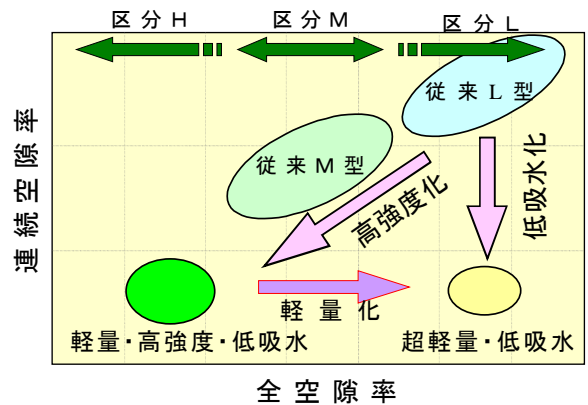


Fig. 2 人工軽量骨材の品質改善の概念⁴⁾
Concept of Improvement of Aggregate Property

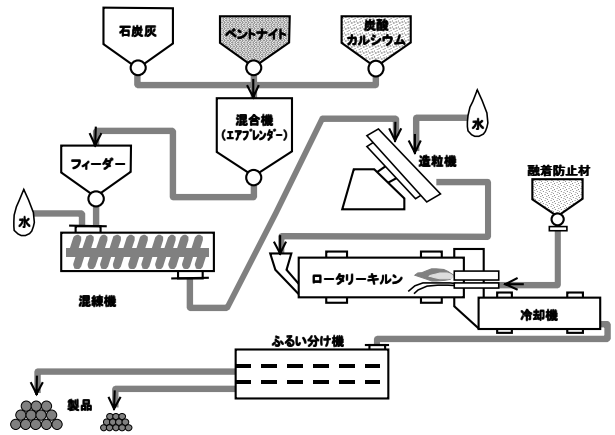


Fig. 3 高強度FA人工骨材の製造工程³⁾
Manufacturing Process of Artificial FA Aggregate

とした人工軽量骨材の開発が進められている³⁾。この骨材の開発概念は、Fig. 2に示すように骨材中の全空隙および独立空隙を減少させて骨材自体の強度を高め、吸水率を低減する点にある。強度や吸水率を改善することの反動として、骨材自体の密度は少し重くなり、JIS A5002の密度による分類では「H」と同等である。FA骨材の製造工程をFig. 3に示す。この製法の特徴は石炭灰（フ

ライアッシュ)を主原料として造粒し、セメント製造で使うロータリーキルンを用いて高温で焼成する点にあり、内部空隙の少ない密実な組織構造が作れる特徴がある。

F A 骨材の特徴を従来品と対比してTable 1に示す。骨材自体の圧縮強度は200N/mm²以上と考えられている³⁾。

3. 実験概要

3.1 実験シリーズ

実験は3つのシリーズで実施した。実験シリーズ1では、水セメント比の異なる普通スランブ配合と高強度高流動配合について、主として流動性やポンプ圧送性、強度特性に及ぼす骨材種類の影響を検討した。また実験シリーズ2,3では、水セメント比40%の高流動配合について、主として耐久性に及ぼす骨材種類の影響を検討した。

3.2 コンクリートの使用材料と配合

コンクリートの使用材料をTable 2に示す。実験シリーズ1ではOPCとS1,GN1,GL1を使用した。この場合の普通スランブ配合は、各種粗骨材につき、スランブ12cmで水セメント比が45,55,65%の3種類とスランブを8cmと18cmに変化させた水セメント比55%の2種類の合計5種類とした。また、高強度高流動配合は、各種粗骨材につき水セメント比が25,27,30,35%の4種類(目標スランブフロー:650±50mm,空気量:3±0.5%)とした。

実験シリーズ2ではHPCにLf5を併用し、骨材はS2,GN2,GL2の小さなサイズのものを使用した。実験シリーズ3の使用材料は実験シリーズ1と同じである。実験シリーズ2,3の配合例をTable 3に示す。実験シリーズ2は、モデル試験体打設⁵⁾の関係上、レディーミクストコンクリート工場で製造し、アジテータトラックで約20分かけて運搬した。実験シリーズ1およびシリーズ3は通常のサイズの骨材を使用し、試験室のミキサで製造した。

実験シリーズ2,3の高流動配合の目標強度は50N/mm²に設定し、水セメント比は一律40%とした。目標スランブフローは600±50mm,空気量は4.5±1.5%とした。

既往の実験結果³⁾では、F A 骨材は球形で流動性が改善され、これを用いた場合の単位水量は普通骨材(砕石)に比べて少なくなることが確認されていたが、今回の実験結果においても10kg/m³少なくできた。

実験シリーズ2では粗骨材の最大寸法が10mm以下と大変細かく、さらに細目砂と石灰石粉を併用したため、単位水量は普通骨材GN2で200kg/m³,F A 骨材GL2で190kg/m³と通常(例えば、実験シリーズ3の普通骨材GN1で170kg/m³,F A 骨材GL1で160kg/m³)より30kg/m³も多くなっている。

3.3 試験項目

コンクリートの試験項目は以下に示す13項目とした。フレッシュコンクリートでは(1)スランブ(スランブフロー)試験,(2)空気量試験(JIS圧力法),(3)単位容積質量の測定(空気量測定容器による),(4)ブリーディング

Table 1 人工軽量骨材の特徴の比較
Comparison of Usual Type and New Type of Artificial Lightweight Aggregates

	従来の人工軽量骨材	高強度 FA 人工骨材
原材料	膨張頁岩	石炭灰
発泡の有無	有	無
形状	不定形	ほぼ真球状
粒度範囲	15~05 mm	20~05 mm
絶乾密度	1.3±0.2 g/cm ³ 程度	1.8±0.1 g/cm ³ 程度
24hr 吸水率	約 15~20	1.0%以下
表乾密度	1.6±0.2 g/cm ³ 程度	1.85±0.1 g/cm ³ 程度
JIS の分類	M	(H) [*]
適用強度	60N/mm ² 以下	110 N/mm ² 以下

(注^{*}) F A 骨材は現行 JIS A5002 の規格には該当しない

Table 2 コンクリートの使用材料
Materials for Concrete

分類	略号	種類	比重
セメント (C)	OPC	普通ポルトランドセメント	3.16
	HPC	早強ポルトランドセメント	3.14
混和材 (Lf)	Lf5	粉末度 5,000cm ² /g クラスの石灰石粉	2.71
細骨材 (S)	S1	普通骨材(最大寸法 5.0mm 山砂)	2.58
	S2	普通骨材(最大寸法 1.2mm 山砂)	2.60
粗骨材 (G)	GN1	普通骨材(最大寸法 20mm 砕石)	2.64
	GN2	普通骨材(最大寸法 9mm 豆砂利)	2.59
	GL1	高強度 FA 人工骨材(最大寸法 15mm)	1.87
	GL2	高強度 FA 人工骨材(最大寸法 10mm)	1.87
混和剤 (Ad)	SPA	ポリカル系高性能 AE 減水剤 SP-8S	-

Table 3 コンクリートの配合例
Examples for Mix Proportions of Concrete

実験シリーズ	骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SPA P _x %
				W	C	Lf	S	G	
1 (OPC)	普通	25.0	47.0	158	629	-	756	871	1.7
	軽量	25.0	47.0	158	629	-	756	617	1.3
2 (HPC)	普通	40.0	47.9	200	500	111	692	749	1.8
	軽量	40.0	44.3	190	475	106	663	598	1.7
3 (OPC)	普通	40.0	49.2	170	425	-	826	871	1.2
	軽量	40.0	49.1	160	400	-	846	636	1.2

(注) SPA の添加率%は粉体総量 P (=C+Lf) に対する重量%

試験(JIS法,実験シリーズ2のみ),(5)加圧ブリーディング試験(JSCE法)を実施した。硬化コンクリートの強度特性では,(6)圧縮強度試験(100mm×h200mm供試体),(7)割裂引張強度試験(同上),(8)静弾性係数の測定(6)で同時計測),(9)単位容積質量の計測(6)で同時計測)を実施した。耐久性に関する試験は,(10)乾燥収縮試験(JIS法,乾燥開始材齢7,28日),(11)凍結融解試験(JSCE法,試験開始材齢14,28日),(12)透水試験(150mm×h150mm供試体インプット法,実験シリーズ2のみ),(13)塩分浸透試験(12)と同じサイズ,人工海水に約9ヶ月間

浸漬し、割裂して表面からの浸透深さをフルオレセインナトリウムによる着色の有無で計測)を実施した。

4. 実験結果と考察

4.1 フレッシュコンクリートの特性

4.1.1 流動性状に及ぼす骨材種類の影響 実験シリーズ1における単位水量とスランプの関係を図4に示す。同じスランプを得るのに必要な単位水量は、FA骨材を使用すると碎石に比べて約12kg/m³少なくなった。また、図5に示すように、高流動コンクリートで同一スランプフローを得るのに必要な混和剤添加率においても、FA骨材を使用した方が0.2~0.4%だけ低減でき、低水セメント比ほど低減効果が大いことが判明した。これは粒子形状が丸く適度の粒度分布を有しており、流動性状が改善されるためと思われる。

4.1.2 空気量,単位容積質量 FA骨材を使用すると碎石に比べて空気量が若干減少する傾向が認められた。従ってAE助剤の量を少し多めにする必要がある。単位容積質量は、実験シリーズ3の碎石を使用した配合で2.24、FA骨材では2.03となり、1割程度軽量化が達成できた。他の実験シリーズにおいても普通スランプ配合、高流動配合とも同様に1割程度の軽量化が確認された。

4.1.3 ブリーディング水量 実験シリーズ2の高流動配合では、FA骨材を用いた場合のブリーディング率が2.44%で碎石の1.93%に比べて2割程度大きくなった。これはコンクリートの流動性が比較的高いことや、粒子形状が丸くて水の移動を妨げにくいためと考えられる。

4.1.4 加圧ブリーディング特性 ポンプ圧送性を調べる目的で行った加圧ブリーディング試験の結果を図6に示す。図中網掛けした範囲が普通スランプコンクリートで圧送可能と考えられる領域であるが、高流動コンクリートの場合には下限を外れても(例えばC)圧送できることが確認されている。全般に、FA骨材を用いた方が碎石よりも加圧ブリーディング水量が少なくなる傾向にあるが、何れも圧送できる範囲にあると判断できる。

しかし、プレウェットしていないFA骨材を用いた低スランプ配合(軽量F)では脱水量が著しく少なく、圧送可能領域から大きく外れ、ポンプ圧送付が困難となると判断された。これは、単位水量が少ない12cm程度の低スランプでは、本来少ない余剰水が圧力によって骨材中に吸水され、流動性が著しく低下するため、改善策として十分なプレウェット(例えばE)が必要と思われる。一方、プレウェットした骨材でも、高圧が作用するとさらに若干吸水が進むため、FA骨材の加圧ブリーディング水量が碎石より減少したと思われる。

なお、従来の人工軽量骨材では、加圧ブリーディングはほとんど発生しないことが知られており、FA骨材は比較的碎石に近い加圧特性を示すことが確認された。

4.2 硬化コンクリートの強度特性

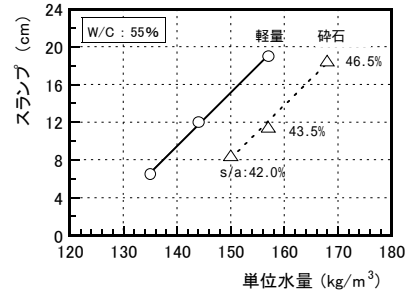


Fig. 4 単位水量とスランプの関係(実験シリーズ1)
Relationship between Unit Water Content and Slump

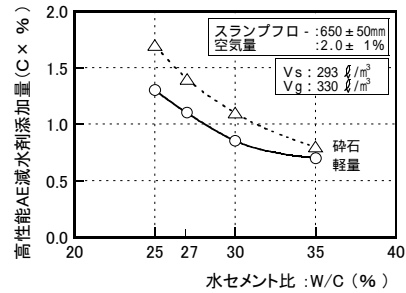


Fig. 5 水セメント比と混和剤添加量の関係(実験シリーズ1)
Relationship between W/C and SPA Dosage (Series 1)

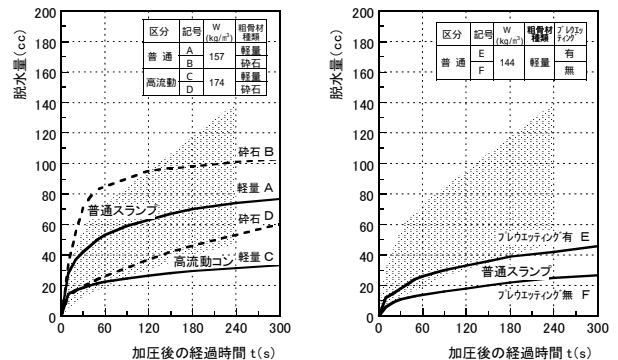


Fig. 6 加圧ブリーディング試験結果(実験シリーズ1)
Results of Bleeding Test under Pressure (Series 1)

4.2.1 圧縮強度の発現性状 水セメント比45,55,65%の普通スランプコンクリート、および25,27,30,35%の高流動コンクリート配合における、セメント水比と圧縮強度の関係を図7に示す。従来品の軽量骨材(図中印)は碎石に比べて若干低い強度を示し²⁾、特に水セメント比35%未満では強度の増進がほとんど見られず、60N/mm²程度で頭打ちとなるが、FA骨材(印)は碎石(印)とほぼ同様にセメント水比4.0(水セメント比25%)まで直線関係を示し、最高で110N/mm²もの高強度が得られることが判明した。特に高流動配合では、同じ水セメント比でも碎石よりも高い圧縮強度となった。これは碎石が扁平で角張った形状であるのに対し、FA骨材は球状で応力集中が起こりにくいことが一因と思われる。

4.2.2 引張強度と圧縮強度の関係 割裂引張強度と圧縮強度の関係を図8に示す。高流動、普通スランプ配合にかかわらず、碎石、FA骨材ともほぼ1つの曲線で示される関係にあることが確認された。換言すれば、

F A 骨材を使用したコンクリートの引張強度特性は通常の砕石を使用したコンクリートと大差ないと考えられる。
 4.2.3 静弾性係数 各種コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係をFig. 9に示す。同一強度で比べた場合、F A 骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は砕石より少し小さくなった。これは従来から言われているコンクリートの単位容積質量の違い(4.1.2参照)が影響していると思われる。配合の違いでは高流動配合の方が両者の差が少し大きくなったが、これは前述のF A 骨材による圧縮強度の増進傾向も影響していると考えられる。図中に示した従来品(印)と比べると、F A 骨材は砕石に近い静弾性係数を示していると考えられる。

4.3 長期耐久性に関する特性

4.3.1 乾燥収縮特性 実験シリーズ3における乾燥収縮試験結果をFig. 10に示す。試験開始材齢の違いによらず、F A 骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは砕石より 200×10^{-6} 程度小さくなった。一方、質量減少率は単位容積質量の軽いF A 骨材の方が、また試験開始材齢が早い方が少し大きくなった。乾燥収縮ひずみが小さくなったのは、単位水量を 10kg/m^3 低減できたことや、骨材吸水による養生効果のためではないかと思われる。単位水量が多い実験シリーズ2では、乾燥収縮ひずみや質量減少率の値は全般に大きくなったものの、全体の傾向は同じで、F A 骨材では砕石より3割ほど低減できた。

4.3.2 耐凍結融解抵抗性 実験シリーズ2における凍結融解試験結果をFig. 11に示す。プレウェッティングした場合でも良好な耐凍結融解抵抗性を示した。試験開始時のコンクリート強度は普通骨材で 43.4 N/mm^2 、F A 骨材で 49.8 N/mm^2 あり、この程度の強度が有れば4%程度の空気量で十分な耐久性を有する軽量コンクリートが作れることが判明した。なお、強度と空気量のバランスによっては十分な耐凍結融解抵抗性が得られないこともあるが⁶⁾、空気量を少し割り増すことで改善可能と思われる。

4.3.3 水密性 透水試験結果の一例をFig. 12に示す。F A 骨材を用いた高流動コンクリートの透水係数は $8 \times 10^{-13}\text{cm/s}$ で砕石の $6.8 \times 10^{-13}\text{cm/s}$ と大差ない結果であった。このことから、水密性に関してはF A 骨材が弱点となる可能性は低いと考えられる。

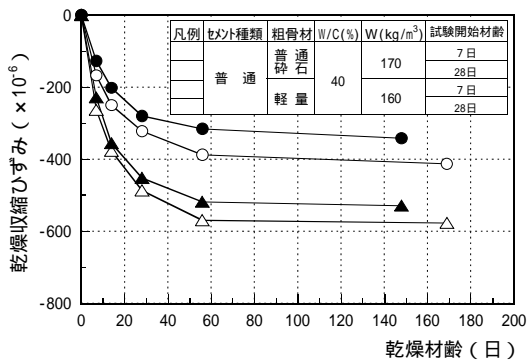


Fig. 10 乾燥収縮試験結果 (実験シリーズ 3)
 Results of Drying Shrinkage Test (Series 3)

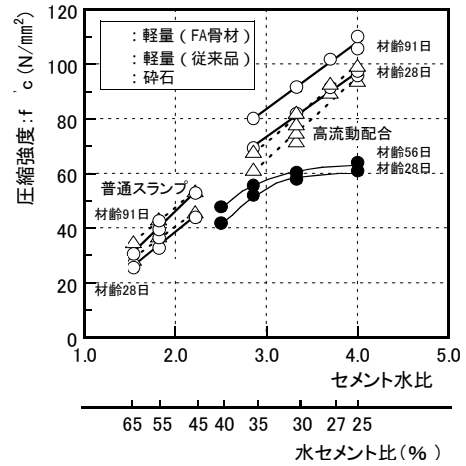


Fig. 7 セメント水比と圧縮強度の関係 (実験シリーズ 1)
 Relationship between C/W and Compressive Strength

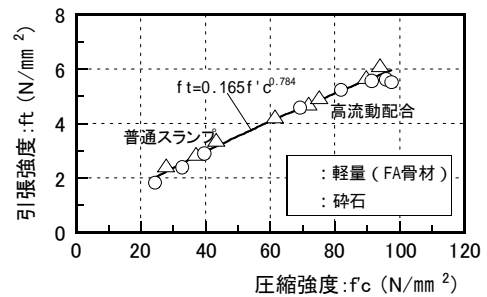


Fig. 8 割裂引張強度と圧縮強度の関係 (実験シリーズ 1)
 Relationship between Tensile Strength and Compressive Strength (Series 1)

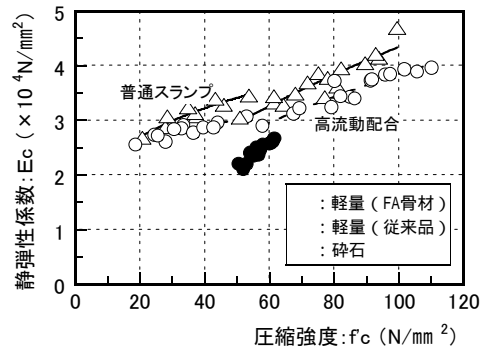


Fig. 9 静弾性係数と圧縮強度の関係 (実験シリーズ 1)
 Relationship between Young's Modulus and Compressive Strength (Series 1)

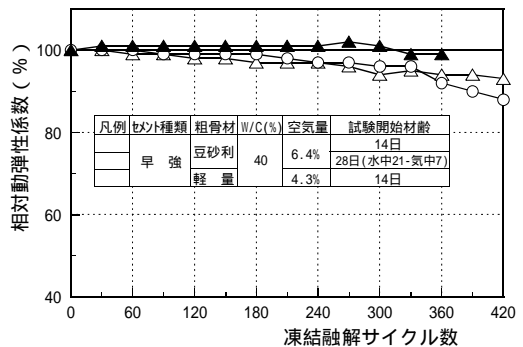


Fig. 11 凍結融解試験結果 (実験シリーズ 2)
 Results of Freezing and Thawing Test (Series 2)

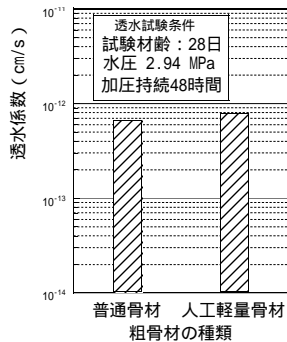


Fig. 12 透水試験結果 (実験シリーズ 3) Result of Water Permeability Test

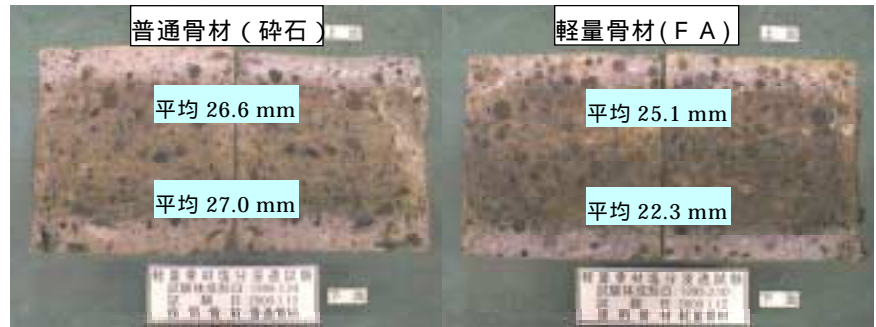


Photo. 1 塩分浸透試験における浸透深さの測定結果の一例 (実験シリーズ 3) Measuring Examples for Salt Permeability Test of Concrete (Series 3)

4.3.4 遮塩性 塩分浸透試験結果の一例をPhoto. 1に示す。供試体の上下面付近で白色化している領域が塩分の浸透が確認された範囲で、表面からの平均深さで浸透深さを示す。FA骨材を用いた場合の塩分浸透深さは砕石に比べて若干小さく、FA骨材が浸透上の弱点になることはなく、遮塩性が高いことが確認された。

4.4 構造用軽量コンクリートとしての適用性の検討

FA骨材は粒子形状が球形で、角張った砕石に比べて流動性が改善され、単位水量や単位セメント量の低減が可能であることが確認された。このことは単に高流動コンクリートへの適用性が高いだけでなく、例えばマスコンクリートにおける温度応力の低減や、薄い部材における乾燥収縮ひび割れの低減にも効果があり、高品質なコンクリートが製造できると思われる。また、強度特性に関する試験結果などから判断すると、FA骨材は当初目標とした廃棄物の有効利用といった環境的側面からのみならず、それ自体高品質のコンクリート材料と考えられ、現場打ちコンクリートへの適用性は高いと判断される。

さらに、田中らの研究⁵⁾から明らかのようにFA骨材が鉄筋コンクリートの力学性状に及ぼす影響はなく、通常の天然骨材や砕石と同様にかなり高い強度レベルの高強度コンクリート構造物に適用可能と判断された。

また、長期耐久性にも優れていることから、海洋環境下で使用される大型橋梁の主塔や、RC製あるいは合成構造の浮体構造物等への適用性も高く、高性能な構造用軽量コンクリートであると結論付けることができる。

5. まとめ

本研究で明らかになった知見は以下の通りである。

- (1) FA骨材は粒子形状が丸く、適度の粒度分布を有しているため、これを用いたコンクリートの流動性状は砕石に比べて改善され、単位水量は $10\text{kg}/\text{m}^3$ 以上低減でき、混和剤添加量も10~25%程度低減できる。また、砕石より軽量の骨材であることから、高強度配合でも単位容積質量は2.0程度まで軽量化できる。
- (2) 加圧ブリーディング試験結果より、FA骨材は若干の圧力吸水があるものの、従来の人工軽量骨材に比べる

- とポンプ圧送性に及ぼす影響は少ない。なお、12cm程度のスラブの場合でも、従来通りのプレウェッティング処理を行えばポンプ圧送できる可能性がある。
- (3) FA骨材を用いたコンクリートは砕石と同様に $100\text{N}/\text{mm}^2$ 程度までの高強度化が達成できた。圧縮強度と引張強度の関係は砕石と同等であった。静弾性係数は砕石よりは若干低いが、従来の人工軽量骨材に比べると大きく、全般に砕石に近い構造性能を示した。
 - (4) FA骨材を用いると乾燥収縮は砕石より 200×10^{-6} 程度低減できた。また、プレウェッティングした場合でも適量の空気を連行することで高い耐凍結融解抵抗性が確認された。さらに、水密性や遮塩性などの耐久性能も砕石と同等以上に高いことが証明された。
 - (5) FA骨材を用いることにより、ポンプ施工できる高耐久性の構造用高強度軽量コンクリートが達成できる。

謝辞

末筆ながら、実験に際しFA骨材のご提供を戴いた高強度人工骨材コンクリート研究会に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤木英一：軽量骨材，コンクリート工学，Vol.34，No.7，pp.26~28，1996.7
- 2) 三浦律彦，十河茂幸ほか：海洋構造物に用いる高強度軽量コンクリートに関する研究，大林組技術研究所報 No.34，pp.67~71，1987.2
- 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，pp.3~10，1998.12
- 4) 日本コンクリート工学協会：高性能軽量コンクリート研究委員会報告書，2章，3章，pp.3~32，2000.8
- 5) 田中浩一，大内一：RC主塔を対象とした中空RC梁のせん断試験，大林組技術研究所報 No.61，pp.39~44，2000.7
- 6) 十河茂幸，三浦律彦，近松竜一：石炭灰製高強度人工骨材を用いたコンクリートの強度・耐久性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.259~264，2000.6