

人工軽量骨材コンクリートの品質向上に関する研究

— 基礎物性および自己充てん性 —

Study on Quality Improvement of Lightweight Aggregate Concrete

— Basic Physical Properties and Self-Compactability —

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
三上 浩 HIROSHI MIKAMI
浅井 洋 HIROSHI ASAI
樋口 正典 MASANORI HIGUCHI
藤田 学 MANABU FUJITA

本研究では、PC部材への適用を想定し、比較的高い強度域の軽量コンクリートを対象に、各種人工軽量粗骨材を用いたコンクリートの基礎的な物性を調べた。実験の結果、軽量コンクリートの圧縮強度には、人工軽量粗骨材の種類と含水率が影響を及ぼし、割裂引張強度の変動に対しては、5mm未満の過小粒が影響を及ぼすこと等が確認された。また、新たな性能として、自己充てん性を付与した高流動軽量コンクリートに関する実験を行った結果、最も高い自己充てん性レベル（土木学会が規定するランク1）を満足する高流動軽量コンクリートを製造できることがわかった。

キーワード: 人工軽量骨材コンクリート, 高流動コンクリート, 自己充てん性, 強度, ヤング係数

The purpose of this study is to improve the quality of high strength and lightweight aggregate concrete for PC members. As a result of the experiment of concrete used various lightweight aggregates, it was confirmed that the kind and moisture content of the aggregate influenced compressive strength and the aggregate of less than 5mm influenced the fluctuation of tensile strength. Furthermore, it was found to be able to product high-fluidity lightweight aggregate concrete which had high self-compactability level (rank 1 by JSCE).

Key Words: Lightweight Aggregate Concrete, High-Fluidity Concrete, Self-Compactability, Strength, Young's Modulus

1. はじめに

我が国における構造用人工軽量骨材の歴史は、1961年に三井金属鉱業（株）がアメリカから技術導入し、1964年にメサライトの製造販売を開始したことに始まる¹⁾。構造用人工軽量骨材の出荷量は、高度経済成長に伴って急増していたが、1973年、1979年における2度のオイルショックによって急減し、1986年にはピーク時の1/3にまで落ち込んだ。その後、景気の回復に伴って増加し始めたが、再度バブル崩壊で1991年をピークに低迷を続けている。今日までにさまざまな人工軽量骨

材の開発や新たな製造会社の出現があったが、現在、コンクリート工事で使用されているものは、古くから製造されてきたメサライトとアサノライトがほとんどである。

したがって、構造用人工軽量骨材を用いたコンクリート（以下、軽量コンクリートと呼ぶ）の実用性を考えれば、市販の構造用人工軽量骨材を如何にうまく活用するかが重要になる。一つには、通常のコンクリートに比べて単位容積質量が小さいため、部材の軽量化を図ることができるが、コンクリートの単価が普通骨材コンクリートよりも高いので、たとえば、橋梁でいえば、上部構造ばかりでなく、下部構造および基礎構造を含めて経

表-1 使用材料

材料名	種類, 物性, 成分	記号
水	水道水	W
セメント	早強ポルトランドセメント, 密度3.13g/cm ³	C
細骨材	鬼怒川産川砂(表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率2.68%)	S1
	葛生産砕砂(硬質砂岩, 表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.94%)	S2
粗骨材	メサライト (製品工場用)	MA
	メサライト (生コン工場用)	MB
	アサノライト (生コン工場用)	AB
混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)	SP
	AE剤	AE

表-2 配合

No.	質量と容積の区分	W/C (%)	s/a (%)	単位量				
				上段: 質量 (kg/m ³)		下段: 絶対容積(m ³ /m ³)		
				W	C	S		G
1	質量	33.0		160	485	338	351	485
	容積	103	41.8	0.160	0.155	0.133	0.133	0.370
2	質量	40.0		160	400	371	385	485
	容積	125	44.1	0.160	0.128	0.146	0.146	0.370
3	質量	50.0		160	320	404	420	485
	容積	157	46.2	0.160	0.102	0.159	0.159	0.370

G:MAaの絶対密度1.31g/cm³を用いた場合の質量

済性を高める総合的な設計を行うことが必要である。また、軽量コンクリートは、軽量化を図ることにより、単位容積質量以外の品質・性能も通常のコンクリートと異なる。このため、軽量コンクリートの利点を有効に活用するとともに、軽量コンクリートの欠点を改善し、他の性能とも組み合わせ、より付加価値のあるコンクリートを検討することが重要である。

近年の軽量コンクリートの主な用途は建築物であり、土木構造物、特に PC 橋に使用する比較的高い強度域の軽量コンクリートの品質・性能あるいはそれに及ぼす影響要因等が必ずしも十分に確認されていない。そこで、本論文においては、PC 橋への軽量コンクリートの適用を対象とし、人工軽量粗骨材の種類がコンクリートの品質に及ぼす影響を確認するとともに、新たな性能の一つとして自己充てん性を付与した高流動軽量コンクリートの検討を行った。

2. 人工軽量骨材の種類がコンクリートの品質に及ぼす影響

(1) 目的

人工軽量骨材協会 (ALA 協会) では、構造用人工軽量骨材としてメサライトとアサノライトを認定し、国内の大多数の工事ではそのいずれかを使用している。また、レディーミクストコンクリート工場 (以下、生コン工場) と製品工場には、同じ製品名であっても含水率の異なるものが出荷されている。基本的には、それらは同程度の品質を持つもので、得られる軽量コンクリートの品質・性能も同等であると考えられている。しかし、同一条件で比較したデータは少なく、また、PC 部材への適用を対象にした研究報告も少ない。軽量コンクリートの

高品質・高性能化を図るうえでは、それらの品質の違いを十分に把握しておく必要がある。

(2) 実験方法

使用材料および配合を、それぞれ、表-1、表-2 に示す。PC 部材への適用を想定し、セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。人工軽量骨材は粗骨材 (最大寸法 15mm) のもので、写真-1 に示す製品工場用メサライト (記号: MA)、生コン工場用のメサライト (記号: MB) および生コン工場用のアサノライト (記号: AB) を使用した。なお、製品工場用は低含水状態、生コン工場用は高含水状態であるほか、メサライトの製品工場用は造粒したものであるのに対し、生コン工場用は造粒したもの以外に破碎したものを多く含んでいる点で違いがある。

また、人工軽量粗骨材は、JIS A 5002 において 5mm ふるいを通過する本来細骨材として計上する過小粒の比率として 0~15%の範囲を許容している。しかし、その範囲は決して狭いとはいえず、過小粒がコンクリートの品質に及ぼす影響も明確になっていない。そこで、5mm ふるいを通過させていない過小粒を含むもの (記号: a) と通過させた過小粒を含まないもの (記号: b) を作り、コンクリートの品質に及ぼす影響を確認することとした。

水セメント比は 33, 40, 50%の 3 水準とし、単位粗骨材絶対容積を一定 (0.370m³/m³) とした。水セメント比による粘性の違いを考慮し、水セメント比が小さいほど、スランブは大きくした (図-1 参照)。コンクリートのスランブおよび空気量 (5.0±1.0%) の調整には、それぞれ、高性能 AE 減水剤、AE 剤を用いた。

コンクリートの品質は、スランブ、空気量、圧縮強



(a) 製品工場用メサライト



(b) 生コン工場用メサライト



(c) 生コン工場用アサノライト

写真-1 実験に使用した人工軽量粗骨材

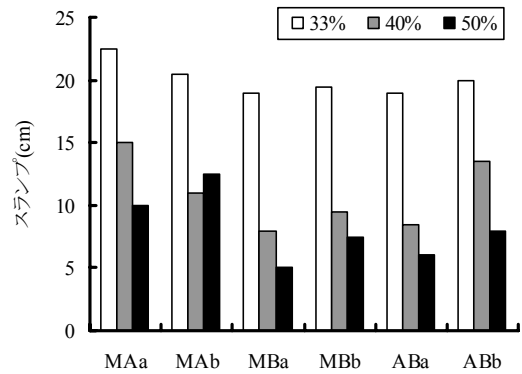
度、ヤング係数および割裂引張強度（いずれも材齢 28 日、標準水中養生）によって評価することとした。

(3) 人工軽量骨材の品質

人工軽量粗骨材の密度および吸水率を、表-3 に示す。表中の諸値は、メーカーから提出される試験成績表の値ではなく、入荷後に骨材試験を行った結果である。骨材工場ですべて事前吸水（プレソーキング）された高含水状態の人工軽量粗骨材の表乾密度は種類が違って大きく異なるが、絶乾密度および含水率は種類による違いが認められる。低含水状態の製品工場用メサライトは、コンク

表-3 人工軽量粗骨材の密度および吸水率

	メサライト				アサノライト (生コン工場用, 高含水)	
	製品工場用 (低含水)		生コン工場用 (高含水)		あり	なし
過小粒	あり	なし	あり	なし	あり	なし
記号	MAa	MAb	MBa	MBb	ABa	ABb
表乾密度(g/cm ³)	1.39	1.41	1.65	1.70	1.64	1.66
絶乾密度(g/cm ³)	1.31	1.34	1.31	1.36	1.23	1.25
吸水率(%)	5.8	5.9	25.8	24.8	34.0	32.7



人工軽量粗骨材の種類および過小粒の有無

図-1 人工軽量粗骨材の種類および過小粒の有無がスランプに及ぼす影響

リートの製造時および硬化までの間に急激な吸水が生じないように、数日間浸水しておいたが、得られた吸水率はメーカーから提示された 24 時間吸水率と大きく異なることがわかった。また、過小粒を含む生コン工場用骨材(a)は、これを含まない骨材(b)に比べて、いずれの骨材においても吸水率が大きい。すなわち、これは、過小粒の混合比率を考えれば、この吸水率が 5mm 以上の粗骨材に比べて相当に高いことを示唆するものである。

(4) フレッシュコンクリートの品質（スランプ）

図-1 は、高性能 AE 減水剤の使用量を水セメント比ごとに一定（W/C=33% : SP=1.2%, W/C=40, 50% : SP=0.7%）とした場合の骨材の違いおよび過小粒の有無が軽量コンクリートのスランプに及ぼす影響を調べたものである。生コン工場用骨材を使用した場合には、骨材の種類が異なってもほとんどスランプには影響しないことがわかる。メサライトと比較すると、製品工場用は生コン工場用に比べてスランプが大きくなる傾向があり、その傾向はスランプを小さく設定した水セメント比 40, 50%で明確となる。製品工場用メサライトに一部除き、過小粒を含むことによりスランプは若干小さくなるが、

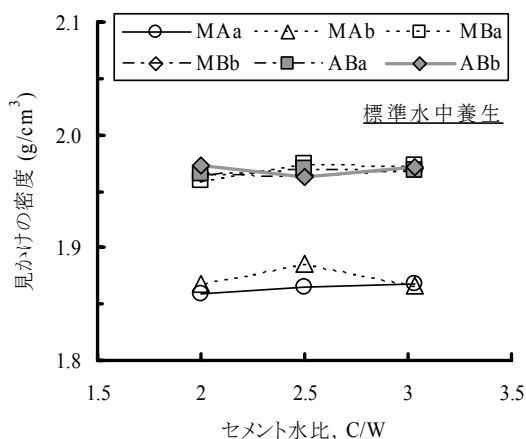


図-2 セメント水比と見かけの密度の関係

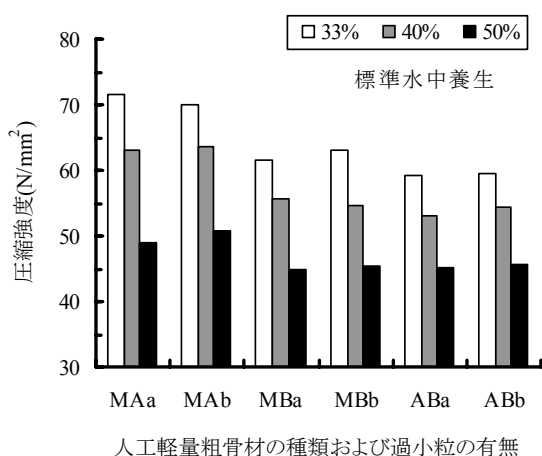


図-3 人工軽量粗骨材の種類および過小粒の有無が圧縮強度に及ぼす影響

スラブを大きくした水セメント比 33%ではほとんど過小粒の影響はほとんど認められない。ただし、過小粒の比率の変動を確認していない場合には、砂の表面水率、人工軽量粗骨材の含水率の変動等と誤って判断し、水量を変更してしまう可能性があるので注意が必要である。

(5) 硬化コンクリートの品質

図-2 に示すとおり、硬化コンクリートの見かけの密度は、人工軽量粗骨材の種類および過小粒の有無にかかわらず、含水率の違いによって異なり、高含水状態の骨材を使用した場合には平均で 1.97g/cm^3 、低含水状態の骨材を使用した場合には平均で 1.87g/cm^3 である。これは、配合から算出される単位容積質量とほぼ一致する。したがって、低含水状態の骨材を使用した場合にも、事前に浸せきしておけば、練混ぜから硬化過程においてコンクリート中の水分を吸収することはない、密度の変化も生じることがないようである。

図-3 は、人工軽量粗骨材の種類および過小粒の有無

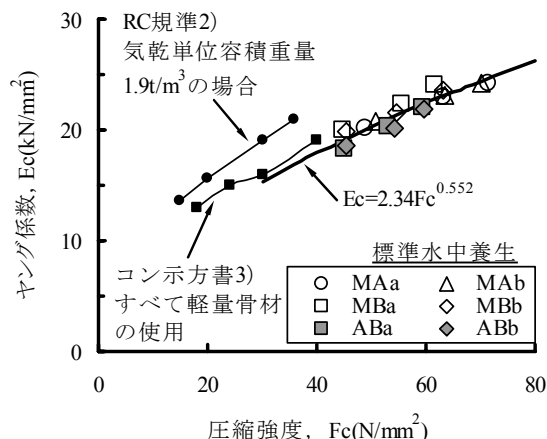


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

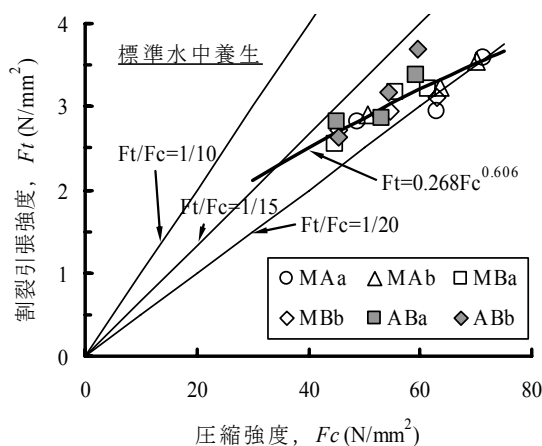


図-5 圧縮強度と割裂引張強度の関係

が圧縮強度に及ぼす影響を調べたものである。過小粒が圧縮強度に及ぼす影響は、いずれの骨材においても見られない。圧縮強度は、水セメント比にかかわらず、低含水骨材を事前に水中に浸せきしておいた骨材(MA)を使用したコンクリートが最も高く、水セメント比 33%においては 70N/mm^2 を超える。高含水骨材と比較すると、水セメント比が 50%においては、骨材の種類の影響は認められないが、水セメント比が小さくなるほど、メサライトを用いたコンクリートは、アサノライトを用いた場合よりも圧縮強度が高くなっている。表-3 に示すとおり、メサライトはアサノライトに比べて多少ではあるが、密度が大きく、吸水率が小さいので、骨材の強度も若干高い可能性があり、これがコンクリートの圧縮強度の相違に現れたものと思われる。

圧縮強度とヤング係数の関係を、図-4 に示す。RC 規準 2) およびコンクリート標準示方書 3) で示された設計値として用いる値を結んだ線に比べ、今回の実験で得られた任意の圧縮強度に対するヤング係数の値は小さい。しかし、それらは設計用値であるため、実際の製造・施工

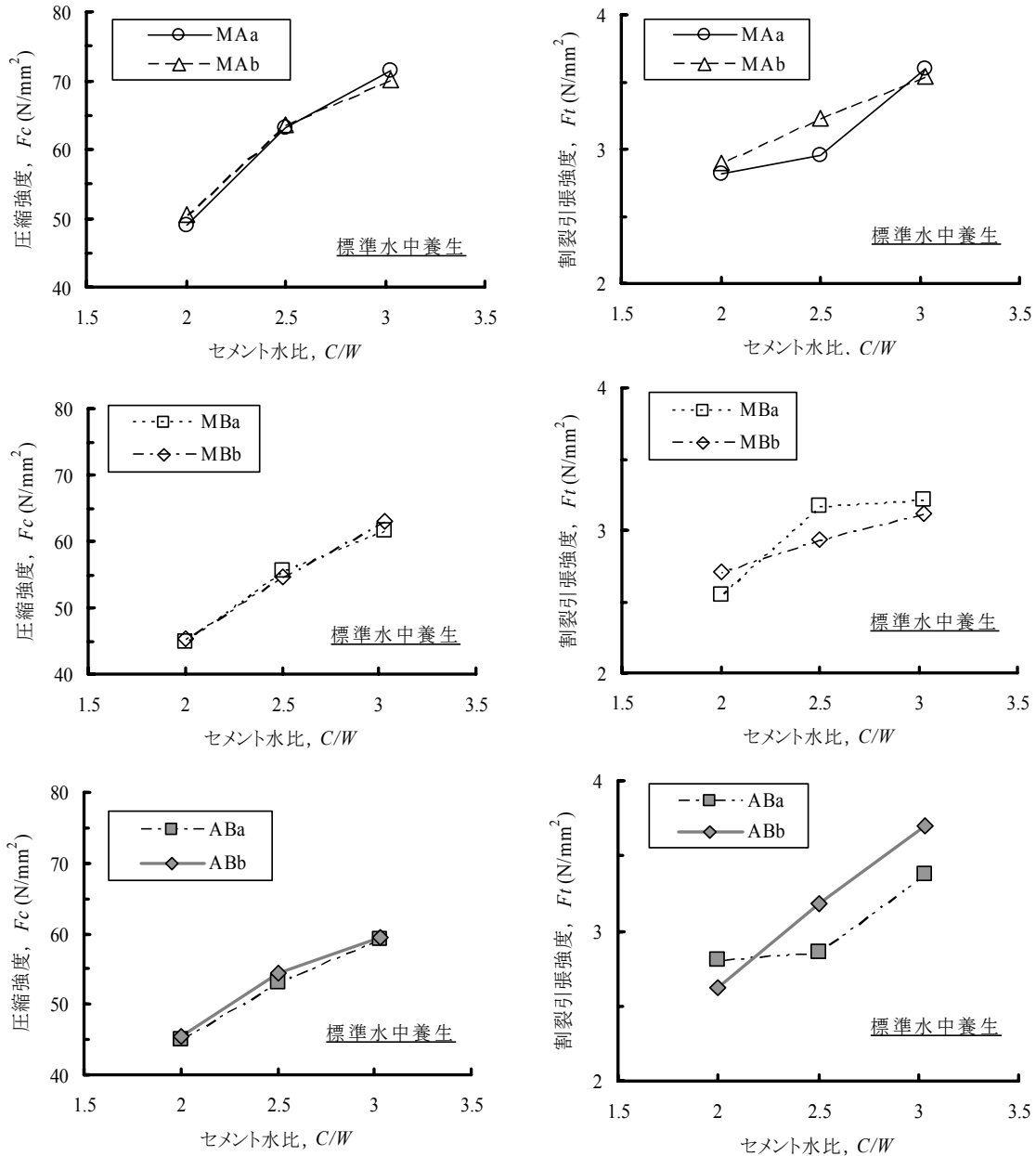


図-6 人工軽量粗骨材中の過小粒が軽量コンクリートの圧縮強度および割裂引張強度に及ぼす影響

では、実測の圧縮強度（40～70N/mm²程度）に対してどの程度の安全率を見込むかが重要になる。なお、生コン工場用の2種類の骨材を比較すると、メサライトのヤング係数は、圧縮強度の場合と同様にアサノライトよりも若干高い。

図-5 は、圧縮強度と割裂引張強度の関係を示したものである。RC 規準では、軽量コンクリートの割裂引張強度と圧縮強度の比は、1/9～1/15 の範囲であるとされる。しかし、今回の実験のように高強度域における割裂引張強度と圧縮強度の比は 1/15～1/20 程度に低下することがわかる。また、割裂引張強度と圧縮強度の比は、前述のヤング係数の場合に比べてばらつきが大きい。

そこで、骨材の種類ごとに過小粒の有無が圧縮強度および割裂引張強度に及ぼす影響を調べたものが、図-6 である。前述のとおり、図-3 においても確認されたが、いずれの骨材においても、圧縮強度に対しては過小粒の影響は全く認められない。しかし、割裂引張強度においては、過小粒が含まれる場合にはこれに含まない場合に比べて、セメント水比と割裂引張強度の直線関係が成立していない。(3) で述べたとおり、生コン工場用の人工軽量粗骨材に関しては、過小粒が含まれると、吸水率が増加するため、過小粒は 5mm 以上の粗骨材よりも空げきが多いことになる。これが割裂引張強度の変動を大きくする主な要因であると考えられる。なお、製品

表-4 配合条件

質量と容積の区分	W/C (%)	W/P (%)	単体量				
			上段：質量 (kg/m ³)				
			下段：絶対容積(m ³ /m ³)				
質量	容積	W	P		G, Vg	V	
			C	LF			
質量	32~50	32~47	155~185	329~548	0~158	495~577	0~0.5
容積	100~157	100~148	0.155~0.185	0.105~0.175	0~0.060	0.300~0.350	-

G:表乾密度1.65g/cm³で計算した場合の質量,Vgは容積

工場用の人工軽量粗骨材では、吸水率において過小粒の影響が明確には現れなかったが、割裂引張強度の変動は過小粒の存在により大きくなる傾向がある。現状では、この過小粒を含まない状態で出荷するのは製造ロスの増加とコストの関係等により難しいが、この過小粒の比率が大きく変動しないように管理しておくことが必要であると思われる。

3. 自己充てん性を有する高流動軽量コンクリートの検討

(1) 目的

軽量コンクリートの欠点の一つとしては、振動・締固め作業によって人工軽量粗骨材が上面に浮き上がりやすくなる。上面に浮き上がった粗骨材を抑え、平滑に仕上げるためには、特別な器具（タンパー）を使用し、入念に仕上げ作業を行う必要がある。また、コンクリート部材の品質および性能を考えても、上面に人工軽量粗骨材が多く、下面にモルタルが多くなった状態は好ましいものではない。しかし、浮上りを恐れ、振動・締固めを十分に行わない場合は、コンクリート内部に粗大な空気を巻き込んだり、未充てん箇所を生じたりする可能性がある。

このような観点から、振動・締固めを行わなくても充てんできる性能（自己充てん性）を付与した高流動コンクリート技術と軽量コンクリートの融合は解決手段の一つと考えられる。しかし、コンクリート標準示方書⁵⁾では、軽量コンクリートを高流動コンクリートにする場合には高流動コンクリートの章を参考にするとしているが、同章には人工軽量骨材の使用に対する記述はなく、コンクリート標準示方書よりも詳細な内容が記述された高流動コンクリート施工指針⁶⁾も同様である。したがって、高流動軽量コンクリートを実現するためには、材



写真-2 高流動軽量コンクリートのスランプフロー試験の状況

料・配合の条件とフレッシュ性状の関係をあらかじめ十分に確認しておく必要がある。

(2) 実験方法

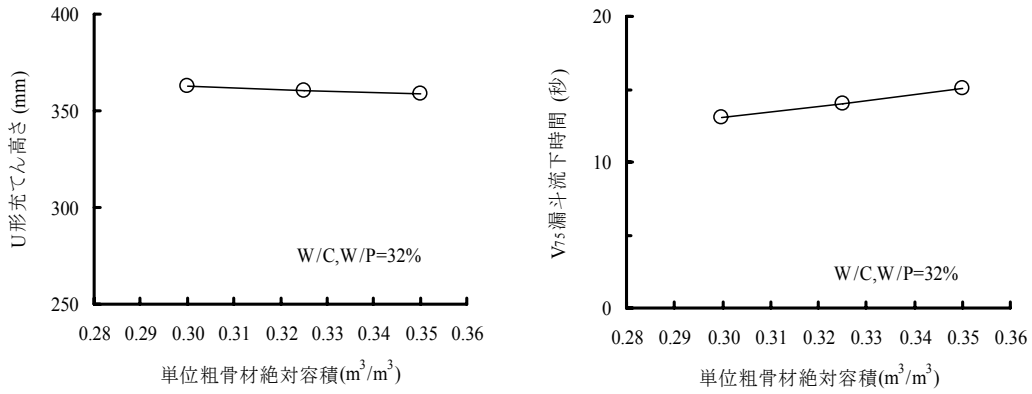
配合条件を、表-4 に示す。人工軽量粗骨材には表-1 に示す骨材 MB を使用した。その他のセメント、細骨材および混和剤は前章と同一のものである。細骨材は、高流動コンクリートに適切な混合比率（川砂：砕砂=0.3:0.7）⁷⁾に変更した。また、一部の配合では、セメントを石灰石微粉末（記号：LF、密度 2.64g/cm³、比表面積 4,000cm²/g 級）、増粘剤（セルロース系、記号：V）を用いた。

フレッシュコンクリートの品質は、高流動コンクリート施工指針⁶⁾に基づき、スランプフロー、スランプフロー500mm 到達時間、U 形充てん高さ（自己充てん性ランク 1 の障害）、V₇₅ 漏斗流下時間および空気量を測定した。スランプフローは 650mm 程度、空気量は 5.0±1.0%の範囲になるよう、混和剤の使用量を調整した。

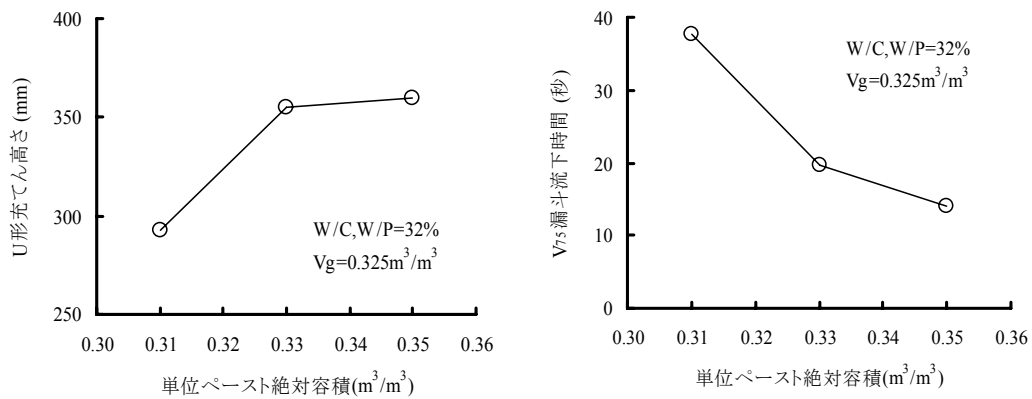
(3) 実験結果および考察

写真-2 は、高流動軽量コンクリートの品質を判定するために実施したスランプフロー試験の状況である。

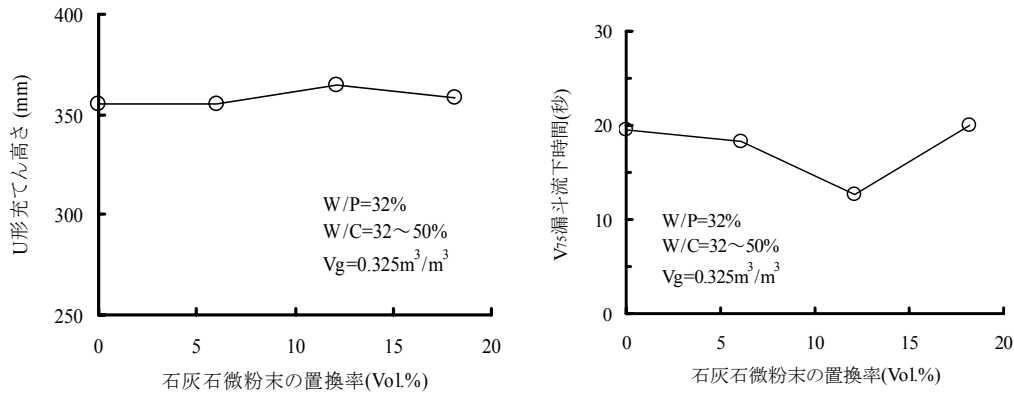
図-7 は、単位粗骨材絶対容積、単位ペースト絶対容積、石灰石微粉末の置換率および高流動コンクリートの種類が U 形充てん高さと V₇₅ 漏斗流下時間にそれらの値に及ぼす影響を調べたものである。U 形充てん高さは、コンクリート標準示方書に従い、300mm 以上が確保されれば、想定した自己充てん性のランク 1（最も厳しい条件）を満足するものと考えられる。V₇₅ 漏斗流下時間の目安は、普通骨材を使用した場合には 9~20 秒であるが、試料の密度が異なれば、流下時間が異なるほか、人



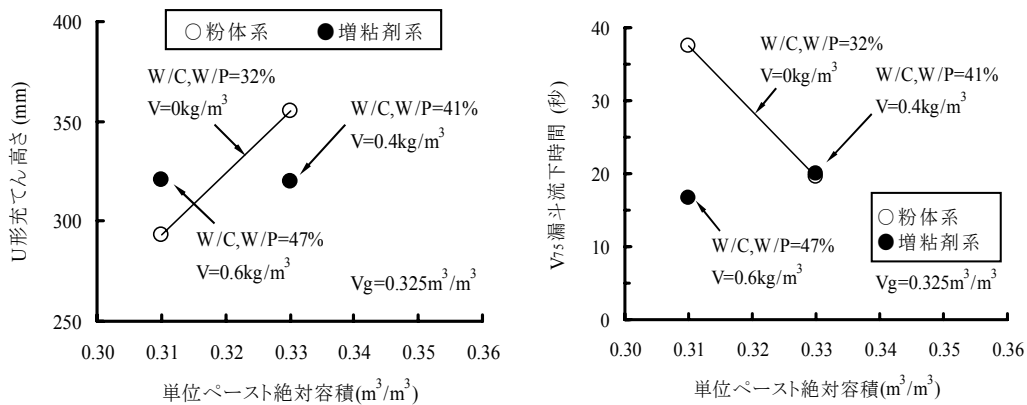
(a) 粉体系高流動軽量コンクリートにおける単位粗骨材絶対容積の影響



(b) 粉体系高流動軽量コンクリートにおける単位ペースト絶対容積の影響



(c) 粉体系高流動軽量コンクリートにおける石灰石微粉末の置換率の影響



(d) 粉体系と増粘剤系の比較

図-7 U形充てん高さおよびV₇₅漏斗流下時間に及ぼす要因

工軽量粗骨材の分離を抑制するうえで適切な粘性を有しなければならない一方で、ポンプ圧送性等を考慮すれば極端に粘性が高い状態も避けなければならない。今後、それらのことを考えて最適な流下時間を検討しなければならないが、今回の実験では、 V_{75} 漏斗流下時間が 15 秒前後であれば材料分離を生じず、良好な状態であると見なすことができた。

軽量コンクリートの要求性能は軽量化であるため、単位粗骨材絶対容積は所定のフレッシュ性状が得られる範囲でなるべく多いほうがよい。普通骨材を用いた場合には、自己充填性のランク 1 を得るための単位粗骨材絶対容積は、 $0.28 \sim 0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ が目安となる。しかし、人工軽量粗骨材を用いた場合には、図-7(a)に示すとおり、 $0.30 \sim 0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の範囲で変化させても、U 形充填高さ、 V_{75} 漏斗流下時間ともにほとんど変化が見られない。

単位ペースト絶対容積は、図-7(b)に示すように、 $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ よりも少なくなると、U 形充填高さの低下、 V_{75} 漏斗流下時間の増加が急激に発生する。このため、粉体系の高流動軽量コンクリートにおいては、単位ペースト絶対容積は $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 程度確保する必要がある。

高い強度が必要でない場合、セメントのみでは粘性が高すぎる場合、あるいはアルカリ総量が $3.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ を超える場合等には、石灰石微粉末を使用することがある。図-7(c)に示すとおり、置換率（容積）は 0~18% の範囲では、U 形充填高さには全く影響していない。しかし、 V_{75} 漏斗流下時間は、置換率 12% までは低下するが、それよりも大きい場合には増加に転じている。置換率を 18% とした場合の水セメント比は 50% となる。この場合のスランプフロー試験後のコンクリート先端には、ややペーストが先走りしている状況が見られた。したがって、セメントから石灰石微粉末の置換によりコンクリートの粘性が低下し、やや材料分離を生じ始めたことが、 V_{75} 漏斗流下時間の増加に起因した可能性がある。

図-7(d)は、水セメント比を大きくし、増粘剤で粘性を付与した高流動コンクリート（増粘剤系）と、前述の粉体系を比較したものである。水セメント比に応じて適切に増粘剤の使用量を決めれば、粉体系と同等あるいは同等以上の増粘剤系高流動軽量コンクリートの製造が可能であることがわかる。

4. まとめ

PC 部材への適用を想定し、比較的高い強度域の軽量コンクリートを対象に、人工軽量粗骨材の種類がコンクリートの品質に及ぼす影響の確認と、自己充填性を付

与した高流動軽量コンクリートの検討を行った結果、以下のことがわかった。

- ① 生コン工場用の人工軽量粗骨材を対象とした場合には骨材の種類がスランプに及ぼす影響は比較的小さいが、製品工場用と生コン工場用の相違および過小粒の有無は、スランプに若干影響する。
- ② 軽量コンクリートの圧縮強度には、含水率と人工軽量粗骨材の種類が影響し、過小粒の有無は影響を及ぼさない。しかし、割裂引張強度の変動に対しては、過小粒の影響を及ぼす。また、高強度域における任意の圧縮強度に対するヤング係数ならびに割裂引張強度は、低い強度域から想定される値よりも小さい。
- ③ 生コン工場用の人工軽量粗骨材を用いた場合、粉体系、増粘剤系のいずれの系に関しても自己充填性のランク 1 を満足する高流動コンクリートを製造できることがわかった。また、単位粗骨材絶対容積は、普通骨材を対象とした示方書の目安の値よりも多くても自己充填性のランク 1 を得ることができる。

なお、筆者らは軽量コンクリートの品質・性能の向上を目的として、軽量コンクリートの低収縮化、高じん性化等についても検討を行っており、これについては稿を改めて掲載を予定している^{7), 8)}。

参考文献

- 1) 笠井芳夫：軽量コンクリート，技術書院，2002.11
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—，1999.11
- 3) 土木学会：2007 年改定コンクリート標準示方書，設計編，2008.3
- 4) 土木学会：2007 年改定コンクリート標準示方書，施工編，2008.3
- 5) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，1998.7.
- 6) 谷口秀明，渡辺博志，竹中秀樹，三加 崇：PC 橋の改造技術に関する研究—その 4：大規模な断面修復の材料および施工に関する検討—，プレストレストコンクリート，Vol.50, No.2, pp.92-100, 2008.3
- 7) 谷口秀明，浅井洋，樋口正典，三上浩，藤田学：低収縮コンクリートの開発と実構造物への適用，三井住友建設技術研究所報告 第 6 号，2008（投稿中）
- 8) 谷口秀明，浅井洋，樋口正典，三上浩，藤田学：高じん性コンクリートの開発—ビニロン繊維補強コンクリートの基礎物性—，三井住友建設技術研究所報告 第 6 号，2008（投稿中）