

人工軽量骨材コンクリートの配合設計 に関する基礎的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE DESIGN OF ARTIFICIAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE MIX

西 林 新 蔵*

By Shinzo Nishibayashi

1. ま え が き

わが国における人工軽量骨材の歴史は浅く、とくに現在欧米各国で実用化されているような膨張頁岩、焼成フライアッシュなどの人工骨材の生産が開始されたのはここ数年のことである。この間に人工軽量骨材に関する関心が高まったのは、構造物の長大化、超高層化にともなう自重の低減をはかるとともに、天然産川砂、川砂利の産出量が減少の一途をたどっていることも大きな原因となっている。構造物の自重の低減に関しては、たとえば長大橋においては自重が設計荷重の大部分を占めているので、橋梁自重の低減は設計上きわめて重要であり、また高層建築ではとくに床版自重が軽減されれば、基礎の簡素化、また耐震上からも重要構造部分の設計が有利となる。このように軽量コンクリートに対する期待は、コンクリートそのものの強度が小さくは望み得べきことではない。近年ようやく実用の域に達した人工軽量骨材は吸水性も少なく、コンクリートとしての品質管理も比較的容易で、圧縮強度 400~500 kg/cm² 程度の強度までであれば天然普通骨材コンクリートと全く同様に容易に得られるようになり、つぎの時代の骨材として大いに期待できるものと考えられる。わが国で現在市販され、かつ建設省の認定を受けている人工軽量骨材は昭和 40 年末現在 5 銘柄であるが、このうちメサライト、セイライト（非造粒型）はコーテッドタイプ、ライオナイト、ジョーライト、ピルトン（造粒型）はペレタイズドタイプとなっている。現在まで発表されているこれら人工骨材に関する研究結果^{1), 2), 3)}によると、それらの物理的性質は天然普通骨材の性質と相当に異なり、したがってこのような骨材を用いたコンクリートの配合、フレッシュおよび硬化コンクリートの性質もまた普通コンクリートと相違することが容易に推察できる。さらにまた、これを鉄筋コンクリート、鉄骨コンクリート、プレストレストコンクリート等の構造材として使用する場合にも多くの研究すべき問題点がある⁴⁾。たとえば構造物の設計の立場から考えると、変形、鉄筋との付着性、収縮およびクリープ、せん断耐力の問題などである。すなわち人工軽量骨材コンクリートの特性からくるこれら構造物設計

上の諸問題をよく理解してはじめて、その特性を生かした構造物の設計が可能になるものである。

人工軽量骨材コンクリートに関しては前述したようにコンクリートの諸性質、構造物の設計等に数多くの研究課題を有しているが、本研究はこれらのうち昭和 40 年 6 月末現在建設省で認可され、かつ市販されている 3 種類の人工軽量骨材のうち細粗骨材とも供給されている 2 種類の骨材について、セメントの種類、水質、気象、温度、養生、試験方法などの諸条件を全く同一にして一連の試験を行ない、コンクリートの配合設計上の問題点および人工軽量骨材コンクリートの諸性質を実験的に検討した。ここでは一連の実験のうちコンクリートの配合設計上の問題点について述べ、その他の結果については稿を改めて発表する。

2. 実 験 計 画

人工軽量骨材コンクリート（以下軽量コンクリートと略称する）の配合を決定するには、普通天然骨材コンクリート（普通コンクリートと略称）と同様に所要の強度と施工に必要なワーカビリティを有し、でき上がりが均一で耐久性があることと、同時にでき上がりコンクリートの比重（単位容積重量）も所要の値を超えないようにしなければならない^{5), 6)}。これらコンクリートの配合を決定する際考慮しておかねばならない要因としては、骨材の種類、セメント量、水セメント比、骨材粒度、細骨材率、スランプ、連行空気量、混和剤の種類などがあげられる。本研究においては上述した諸要因のうち、つぎに述べるようなとくに影響の著しいと思われる要因を選び、骨材の種類とくに骨材の形状によって配合にどの程度の影響が現れるかについて検討した。要因としてはスランプ、単位水量、F.M.（容積）、 s/a 、連行空気量をえらびつぎに示すようなこれらの相互の関係について考察を加えた。

- (1) スランプと単位水量との関係
- (2) 細骨材率と単位水量との関係
- (3) 細骨材粒度と単位水量との関係
- (4) 空気量と単位水量および圧縮強度との関係

(1)~(4)の実験においては条件を等しくするため、単位セメント量は 300 および 400 kg/m³、空気量の検討

* 正会員 工修 京都大学助教授 工学部 交通土木工学教室

表-1 まだ固まらないコンクリートの性質に関する実験計画表

要 因	水 準
骨 材 の 種 類	造 粒 型 (ライオナイト:L) 非造粒型 (メサライト:M)
セメント量 (kg/m ³)	300, 400
s/a (%)	42, 44, 46, 48 (C=300 kg/m ³) 36, 38, 40, 42 (C=400 kg/m ³)
スランブ (cm)	2.0, 4.0, 6.0, 8.0
F.M.	2.8, 3.0, 3.3
空 気 量 (%)	3.5, 5.0, 6.5

を行なう以外はすべて non AE コンクリートを対象とし、AE コンクリートの空気量の調節にはビンゾールを使用し、また細粗骨材は非造粒型(メサライト:略称 M)と造粒型(ライオナイト:L)を使用した。

実験計画表を表-1 に示す。

3. 使用材料

(1) セメント

全試験に使用したセメントはO社製普通ポルトランドセメントで、この試験結果を表-2 に示す。

(2) 骨 材

本実験で使用した細粗骨材は昭和 41 年 9 月現在建設省の認可をうけた人工軽量骨材のうち、メサライト(非造粒型)、ライオナイト(造粒型)で、それらの諸試験結果を以下に述べる。

a) フルイ分け試験 細骨材のフルイ分け試験結果を表-3、図-1, 2 に示す。粗粒率 F.M. (容積) は 2.8, 3.0, 3.3 を目標とし、1.2 mm 通過分と残留分の割合を

表-3 細骨材のフルイ分け試験結果

種 類	粒 度 分 布 (容積残留 %)					F.M.
	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	
造 粒 型 (L)	5.7	39.7	64.8	79.6	90.1	2.80
	13.1	48.1	68.9	81.3	90.3	3.04
	25.5	58.5	74.7	84.4	91.0	3.31
非造粒型 (M)	11.0	37.1	60.0	80.4	93.0	2.82
	13.7	46.4	65.9	83.3	93.9	3.03
	17.7	59.8	74.5	87.5	95.4	3.35

適当に変えて所要の F.M. となるよう調整したものである。粗骨材に対する試験結果を表-4、図-3 に示す。粗骨材は 15~10 mm, 10~5 mm の 2 種類にフルイ分けられていたので、これらを 1:1 の割合に混合して使用した。

b) 比重試験 骨材の比重試験(表乾状態)は JIS A 1109 に、軽量骨材の見掛け比重(絶乾状態)は JIS A 5002 に試験方法がそれぞれ規定されている。本実験では全骨材を表乾状態で使用したが、骨材試験では表乾状態、絶

表-4 粗骨材のフルイ分け試験結果

種 類	粒 径 (mm)	粒 度 分 布 (容積残留 %)					F.M.
		20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm	
造 粒 型 (L)	10~15	0.6	5.2	85.6	100.0	100.0	6.86
	5~10	0	0	3.9	94.0	100.0	5.98
	混合 1:1	0.3	2.6	44.8	97.0	100.0	6.42
非造粒型 (M)	10~15	0.2	7.6	93.4	100.0	100.0	6.93
	5~10	0	0	17.2	97.6	99.6	6.14
	混合 1:1	0.1	3.8	55.2	98.8	99.8	6.54

図-3 粗骨材粒度曲線

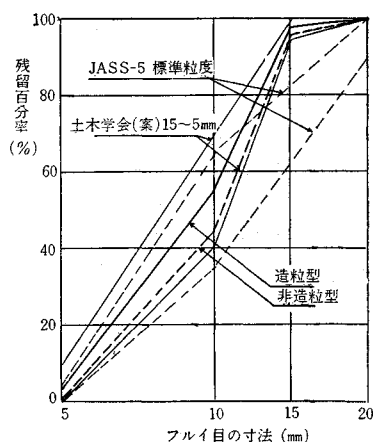


図-1 細骨材(造粒型:L)の粒度曲線

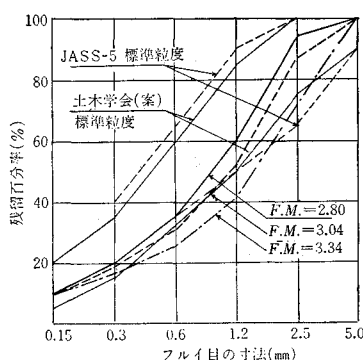


図-2 細骨材(非造粒型:M)の粒度曲線

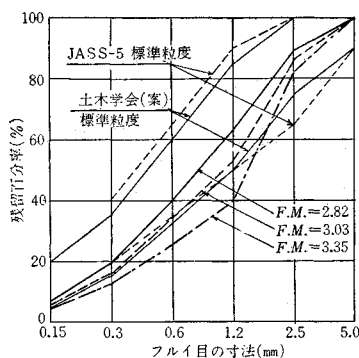


表-2 セメント試験成績表(普通ポルトランドセメント)

比 重	粉 末 度 (ブレン法) (cm ² /gr)	凝 結			安 定 性	フ ロ ー (mm)	強 さ (kg/cm ²)					
		水 量 (cc)	始 発 (時一分)	終 結 (時一分)			曲 げ 強 さ			圧 縮 強 さ		
							3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
3.16	3 200	109	2-10	3-03	良	243	30.5	45.1	68.1	114	201	381

乾状態における比重をそれぞれ各粒径別に求め、また実際に使用した F.M. (容積), 2.8, 3.0, 3.3 については混合砂の表乾および絶乾状態に対する比重を求めた。結果を表—5, 6 に示す。

c) 吸水量 吸水量の試験方法は前述した比重測定の規定 (JIS A 1109) および JIS A 5002 の見掛け比重測定時の吸油量を測定する方法を採用した。結果を表—5, 6 に示す。表—5, 6 には各粒径別および混合骨材の吸水率を重量百分率と容積百分率で示し、また各粒径別の吸水率 (JIS A 5002 による) と時間との関係を図—4, 5 に示す。これらより造粒型と非造粒型とによって吸水率の大きさに相当の差があり、後者は前者の約 3 倍の吸水率となっている。なお、24 時間吸水量はいずれの骨材でも全吸水量の 90% 以上となり、以後の吸水速度は非

表—5 細骨材の比重および吸水量試験結果

種 類	粒 径 (mm)	比 重		吸 水 率			F.M.
		1 ⁽¹⁾	2 ⁽²⁾	1 ⁽¹⁾ (wt)	2 ⁽²⁾ (wt)	3 ⁽²⁾ (vol)	
造 粒 型 (L)	2.5	1.70	1.66	1.39	1.41	2.34	2.80 ⁽³⁾ 3.04 ⁽⁴⁾ 3.34 ⁽⁴⁾
	1.2	2.04	1.85	3.49	4.04	7.47	
	0.6	2.15	1.96	4.22	4.75	9.31	
	0.3	2.26	2.06	3.39	3.84	7.91	
	0.15	2.31	2.14	2.14	2.61	5.59	
	0.15以下	2.80	2.38	0.45	0.45	1.07	
	混細骨	1.93	1.74	4.09	4.66	8.11	
	骨	1.94	1.75	4.32	4.92	8.61	
	合材	1.92	1.76	4.04	4.56	8.03	
非 造 粒 型 (M)	2.5	1.95	1.60	11.80	11.80	18.80	2.82 ⁽³⁾ 3.03 ⁽⁴⁾ 3.35 ⁽⁴⁾
	1.2	2.04	1.65	11.10	12.90	21.29	
	0.6	2.16	1.68	12.60	13.40	22.51	
	0.3	2.21	1.84	10.25	11.75	21.62	
	0.15	2.26	1.91	6.50	7.35	14.04	
	0.15以下	2.69	2.29	0.70	0.70	1.60	
	混細骨	1.81	1.67	12.61	13.90	23.22	
	骨	1.84	1.70	13.60	14.07	23.91	
	合材	1.82	1.69	12.73	14.28	24.15	

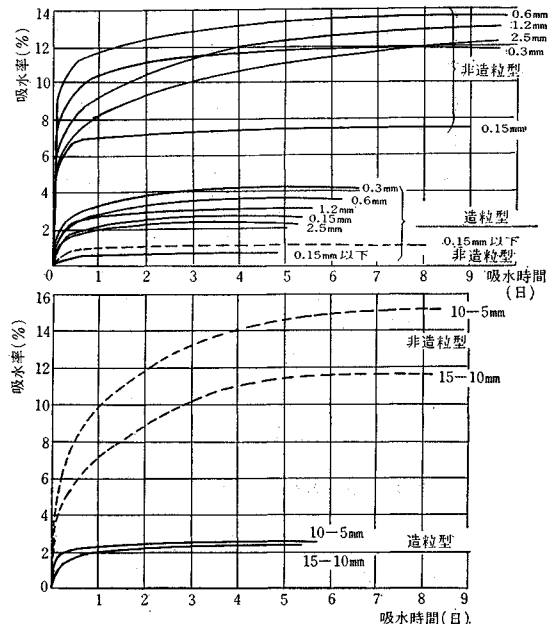
注: (1) JIS A 1109 (表乾状態)

(2) JIS A 5002 (絶乾状態)

(3) 全試験に使用した F.M.

(4) F.M. に関する試験に使用

図—4 人工軽量細骨材の粒径別吸水時間曲線



図—5 人工軽量粗骨材の粒径別吸水時間曲線

常に小さく、完全吸水に達するには 7~9 日間を要する。これら骨材試験の結果より、本実験においては吸水量の管理をより厳重に行なうため、使用骨材はすべて 24 時間水中にて飽水させた後、水きりを十分に行ない表面水のある状態でただちにビニール袋に入れ、7~10 日間密封しさらに吸水させ、使用時には表乾あるいは表面水の状態をチェックして実際の試験に供した。

d) その他の試験 骨材の単位容積重量試験 (ジグギング法), 空げき率, 実積率, BS 812 による破碎試験, 化学分析, 化学的有害物および物理的安定性試験の諸結果を表—6, 7, 8 に示す。

以上使用骨材に対して種々の試験を行ないその結果を示したが、これら骨材の性質は、粒形が粒状と碎石状と

表—6 粗骨材の物理的性質に関する試験結果

種 類	粒 径 (mm)	比 重		吸 水 率 (%)			単位容積重量 (kg/m ³)	実 績 率 (%)	空 げ き 率 (%)	破 碎 試 験 ⁽³⁾	
		1 ⁽¹⁾	2 ⁽²⁾	1 ⁽¹⁾ (wt)	2 ⁽²⁾ (wt)	3 ⁽²⁾ (vol)				10%破碎値 (t)	40t 破碎率 (%)
造 粒 型 (L)	10~15	1.40	1.24	1.96	2.18	2.71	878	70.8	29.2	10.9	35.9
	5~10	1.44	1.32	1.63	2.20	2.93	907	68.7	31.3		
	混合 1:1	1.42	1.28	1.80	2.19	2.82	900	70.3	29.7		
非造粒型 (M)	10~15	1.42	1.26	7.22	11.40	14.38	803	63.7	36.3	10.0	29.2
	5~10	1.45	1.31	8.07	11.68	15.30	809	61.7	38.3		
	混合 1:1	1.44	1.29	7.65	11.54	14.84	815	63.1	36.9		

注: (1) JIS A 1109 (表乾状態) (2) JIS A 5002 (絶乾状態) (3) B.S. 812

表—7 人工軽量骨材の化学分析試験結果 (%)

骨 材 種 別	Ig. loss.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
ライオナイト (L)	0.0	75	15	2.6	0.2	2.4	2.6
メサライト (M)	0.2	68	17	5.1	3.0	1.6	2.0

表-8 化学的有害物, 物理的安定性試験結果

試 験 項 目	ライオナイト		メサライト	
	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材
強 熱 減 量 (%)	0.0		0.2	
無 水 硫 酸 (SO ₃) (%)	0.0		0.0	
塩 化 物 (NaCl) (%)	0.00		0.00	
塩化カルシウム (CaO) (%)	1.15		2.10	
有 機 不 純 物	無色		無色	
骨材の損失量 (wt%)	1.0	1.3	5.0	3.7

に分れ, 吸水率が相当異なる以外は本質的にはほとんど等しい性質を有していることがわかる。なお, 実際の試験では骨材を表乾状態で使用したので吸水率の影響はほとんど現われず, フレッシュ コンクリートの性質に影響するのは粒形のみと考えてもよい。

4. コンクリートの練りまぜ

軽量コンクリートの練りまぜは重力式ミキサよりも強制攪拌式ミキサの方が練りまぜ効率が良好といわれている⁷⁾。しかし本実験に先立って行なった 3 切可傾式重力式ミキサの練りまぜ性能試験の結果, つぎに示すような材料投入順序の場合, コンクリートの均等性は普通コンクリートとほとんど変わらなかった。本実験においては重力式ミキサを使用した。材料の投入順序は

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} W &\rightarrow \frac{1}{2} (G+S+C) \rightarrow \frac{1}{3} W \\ &\rightarrow \frac{1}{2} (G+S+C) \rightarrow \frac{1}{3} W \end{aligned}$$

で, 練りまぜ時間は いずれも全材料投入後 3 分間とした。ミキサから排出されたコンクリートは練り板上 3 往復の練り返しを行なった後, まだ固まらないコンクリートのスランプ, 空気量の測定を行ない, 2. (4) の空気量と圧縮強度との関係を求めるための供試体 (15φ30 cm) は, まだ固まらないコンクリートの試験条件を満足したものから, 1 パッチについて 4 本ずつ製作した。なお, 1 配合のコンクリートは 3 パッチくり返し, 練りまぜの順序は無作為に決めて実施した。

5. 実験結果およびその考察

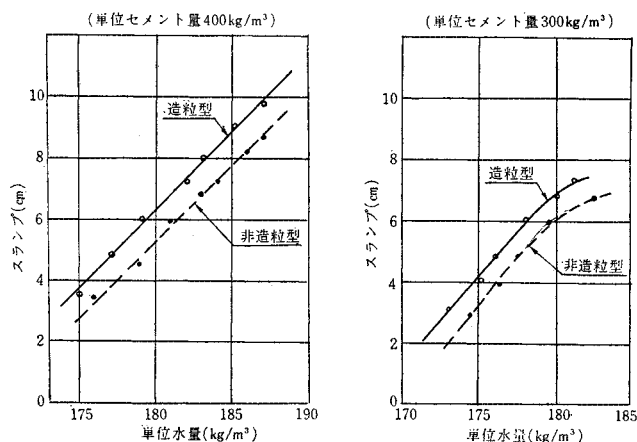
(1) スランプと単位水量との関係

単位セメント量 300 kg/m³ および 400 kg/m³ に対し *s/a* をそれぞれ 44%, 40% と一定にし, 単位水量を 1~2 kg/m³ ずつ変化した場合のスランプ試験結果を図-6 に示す。

これらを考察すると, セメント量 300 kg/m³ の場合単位水量の増加にしたがってスランプはほぼ直線的に増大し, *w/c* が約 60% 以上 (スランプは L: 6 cm 以上,

M: 5.5 cm 以上) となると直線関係からはずれ, 横軸 (単位水量) に対し凸の曲線となる。これはコンクリートのプラスチシー, フロービリティ等の阻害と骨材の分離によって正確なコンシステンシーを表わさなくなることによるものと考えられる。骨材 L と M とを比較すると, 直線から曲線に移る点は骨材 M の方がやや単位水量の少ない点で起こる。すなわち骨材 M の方が, 単位水量を増加するとワーカビリティの阻害とくに骨材分離

図-6 セメントのスランプと単位水量との関係



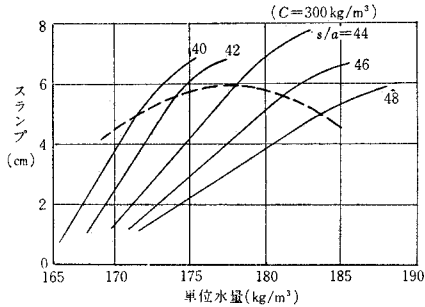
の傾向が若干早く現われるようである。

単位セメント量 400 kg/m³ の場合, 骨材 L, M とともに全く同様の傾向を示す。

本実験においては, *w/c* が 40~60% の範囲のコンクリートについてその傾向を検討したが, この範囲内においてはコンシステンシーはもちろんのこと, その他のワーカビリティを表わす性質は何ら普通コンクリートと変わりなく, むしろワーカビリティの良好なコンクリートが得られる。また同一水量においては骨材 L の方がスランプが得やすい。すなわち骨材 L の方が同一スランプを得るに要する水量が少ないことを示し, その量は 2~4 kg/m³ である。

これらの関係から軽量コンクリートにおいては, スランプ 1 cm 増加させるに要する水量はセメント量 300 kg/m³ で 1.7 kg/m³, 400 kg/m³ で約 2.0 kg/m³, すなわち単位水量を 1 kg/m³ 増すとスランプは約 0.5 cm 増大することになる。普通コンクリートではスランプを 1 cm 増大あるいは減水せしめるためには, 単位水量を 1.2% 増減すればよいという相当精度のよい実験結果が発表され配合修正に用いられているが, 本実験より軽量コンクリートにおいては, 使用セメント量によって若干の差があるが, 単位水量を 1.0% 増減することによってスランプ 1 cm の調整は可能である。

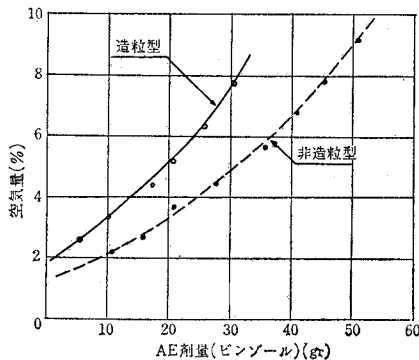
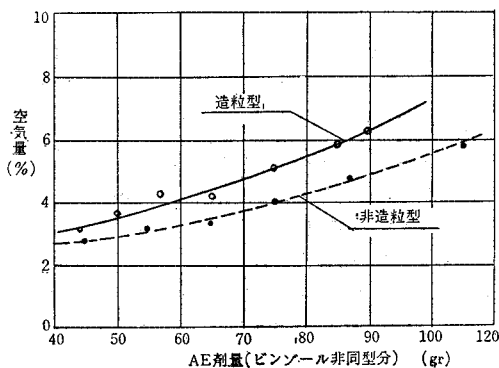
図-7 に示すように骨材 L に対し単位セメント量を 300 kg/m³ と一定にし, *s/a* を種々変化した場合のス

図-7 スランプと s/a および単位水量との関係 (造粒型)

ランプと単位水量との関係を実験的に検討した。それによると直線から曲線へ移る点は s/a の大きさによって異なり、その点の軌跡を求めると 1 本の曲線が得られる。前述したようにこの移行点をワーカビリティ良好の限界点であると仮定すると、軌跡の最大値を示す s/a が、最適の s/a であると仮定してもよいようである。したがって骨材 L の適当な s/a の値は、セメント量 300 kg/m^3 に対し 44% と考えられる。なお、この関係についてはさらに詳細な検討を行なう予定である。

(2) AE 剤 (ビンゾール) 添加量と空気量との関係

AE 剤の添加量を種々変化させ、スランプ ($6 \pm 0.5 \text{ cm}$) および s/a (300 kg/m^3 : 42%, 400 kg/m^3 : 38%) 一定

図-8 AE 剤添加量と空気量との関係 (単位セメント量 300 kg/m^3)図-9 AE 剤添加量と空気量との関係 (単位セメント量 400 kg/m^3)

のコンクリートの空気量 (全空気量) をローリング法で測定した結果を図-8, 9 に示す。

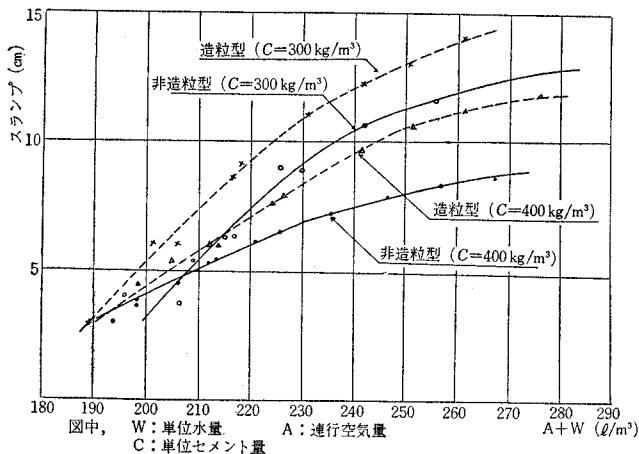
単位セメント量 300 kg/m^3 の場合、これらの関係は図に示すように横軸に対して凹の曲線関係となる。エントラップト エアは骨材によってやや異なるが、これを無視して考えても骨材 L は骨材 M より曲線の立ち上りすなわち勾配が急で、同一空気量を得るに要する AE 剤量は少なくすむことがわかる。いま全空気量 5% を得るに要する AE 剤量 (ビンゾール固形分) は、骨材 L に対し約 20 g/m^3 、骨材 M に対し約 30 g/m^3 、ビンゾール 20% 溶液のセメント量に対する割合で表わすと、骨材 L に対し $C \times (0.03 \sim 0.04)\%$ 、骨材 M で $C \times (0.05 \sim 0.06)\%$ となり、固形分で考えて 10 g/m^3 、セメント量との割合では $C \times 0.02\%$ の差がでる。普通コンクリートの場合、河川産骨材 (丸味のある骨材) よりも砕石、砕砂の方が同一空気量を得るに要する AE 剤量が多くなることが知られているので、これら軽量骨材による AE 剤量の差は主として骨材形状 (粒形と破砕形) によるものと考えられる。普通コンクリートに対する実験例によると、セメント使用量 300 kg/m^3 に対し、全空気量 5% を得るに要するビンゾール量 (20% 溶液) は $C \times (0.02 \sim 0.03)\%$ となっていることから、骨材 L は普通骨材とほぼ同程度あるいはやや多く ($C \times 0.01\%$ 程度)、骨材 M では $C \times (0.02 \sim 0.03)\%$ 程度多く量の AE 剤を添加したほうがよいことがわかる。

単位セメント量 400 kg/m^3 の場合もほぼ同様の傾向を示しているが、これらの関係を示す曲線の立ち上り (勾配) はセメント量 300 kg/m^3 の場合よりもゆるやかである。すなわちセメント量が多くなると同一空気量をうるに要する AE 剤量は大きくなる傾向を示す。全空気量 5% を得るためには、骨材 L に対しビンゾール固形分で 75 g/m^3 、骨材 M では 95 g/m^3 、ビンゾール 20% 溶液をセメント量との割合で示すと、骨材 L に対し $C \times (0.09 \sim 0.10)\%$ 、骨材 M で $C \times (0.12 \sim 0.13)\%$ となりセメント量が大になるにつれて両骨材間の差が大きくなる。なお、普通コンクリートの場合には 5% の全空気量を得るためには $C \times 0.09\%$ 程度の AE 剤量を必要とする実験結果が得られている。

軽量コンクリートにおいては一般にエントラップトエアが普通コンクリートよりも $0.5 \sim 1.5\%$ 大きく、また耐久性についても不明の点が多いので、全空気量は $5 \sim 7\%$ を標準とすることが望ましいと考えられる。

(3) スランプと単位水量 + 空気量 ($A + W$) との関係

(1) では単にスランプと単位水量のみとの関係について述べたが、ここでは空気量の要素を単位水量に入れ、その容積について考察してみる。全空気量は $5 \pm 1\%$ となるよう AE 剤 (ビンゾール) で調整し、水量の増減

図-10 スランプと単位水量+空気量 ($A+W$) との関係

によってのみスランプを変化させることを試みた。結果を図-10に示す。

単位セメント量 300 kg/m^3 の場合スランプ約 9 cm (単位水量+空気量の容積は骨材 L: 約 220 l/m^3 , 骨材 M: 約 230 l/m^3) まではほぼ直線的に変化するが、それ以上水量を増すと 5.(1) の結果と同様スランプはあまり増加せず、それらの関係は曲線となる。non AE コンクリートではこの直線から曲線への移行点はスランプで約 6 cm のところであったが、空気を連行することによってプラスチシチー、フローベリチーが良好に、また骨材分離の傾向が少なくなり、コンクリートのワーカビリティが改善されることを示している。骨材 L と M とを比較すると、単位水量に若干の差があるので、同一水量+空気量の容積に対するスランプは骨材 L の方が大である以外に、直線部の勾配は両骨材とも全く等しいが曲線部の勾配は骨材 M の方は小さく、単位水量の増加によるワーカビリティ増の程度が小さくなる傾向を示している。

単位セメント量 400 kg/m^3 の場合もほぼ同様の傾向を示している。すなわち、骨材 L ではスランプ約 10 cm ($W+A: 240 \text{ l/m}^3$) まで、骨材 M では約 7 cm ($W+A: 230 \text{ l/m}^3$) まで直線関係を示しているが、単位水量がそれ以上になると曲線関係に移行する。しかしその曲線の勾配は両骨材の場合ともほとんど変わらず、かつセメント量 300 kg/m^3 の場合よりも小さい。

これらの結果より空気連行によるコンクリートのワーカビリティ改善の程度は、セメント量が少ない場合の方が著しいことがわかる。これはセメント量が多いとそれ

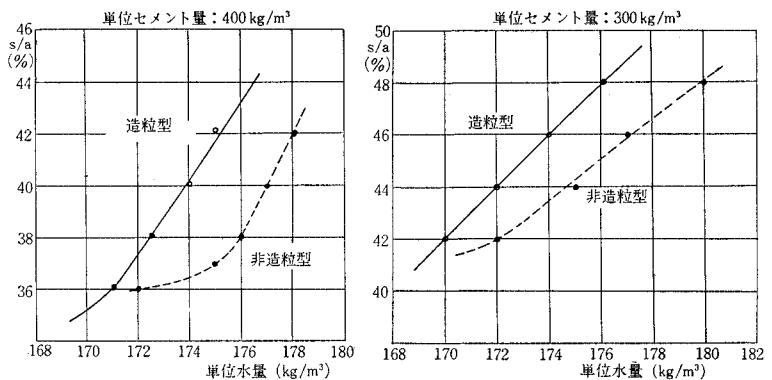
だけセメントペーストの量が大となり、とくにプラスチシチーが良好となるからである。したがってコンシステンシーに最も大きな影響を与えるのは単位水量であるが、ワーカビリティ全体を考える場合には、セメントペースト量(空気量を含めた)との関連を明らかにする必要がある。

(4) s/a と単位水量との関係

s/a を 4 種類すなわち単位セメント量 300 kg/m^3 に対し $42, 44, 48, 400 \text{ kg/m}^3$ に対し $36, 38, 40, 42\%$ を選び、同一スランプ ($6 \pm 0.5 \text{ cm}$) を得るに要する単位水量を求めた。その結果を図-11に示す。

骨材 L について考えてみると、この範囲の s/a では、これらの関係はほぼ直線で表わ

すことができ、セメント量が少ないほど直線の勾配が大きいことがわかる。したがってセメント量が多いときは s/a を変化させても水量におよぼす影響は少なく、 s/a が小さくなると直線関係が崩れ単位水量減少の割合が大となる傾向を示している。また s/a が小さすぎるとコンクリートのワーカビリティは著しく阻害されるので、 s/a の範囲としては直線関係が得られる範囲が適当と考えられる。したがって骨材 L における適当な s/a の範囲としては、セメント量 400 kg/m^3 で $37 \sim 44\%$, 300 kg/m^3

図-11 s/a と単位水量との関係

で $42 \sim 48\%$ と推定される。

同様に骨材 M では、セメント量が少ない場合は直線関係が得られるが、多い場合は s/a を減少させると単位水量を大幅に減少しうる。その傾向をくわしく確かめるため $s/a: 37\%$ のコンクリートを追加的に実験した結果、図-11に示すような関係が得られたが、 s/a を 37% あるいは 36% まで減少すると、プラスチシチー、フィニッシュビリティが阻害され、たとえ水量を減少することが可能であってもワーカビリティが阻害されるので施工に適するコンクリートを得ることができない。したがって骨材 M ではセメント量 400 kg/m^3 の場合、良好なワ

ーカビリチーのコンクリートを得るには s/a を若干大きめに選んだほうがよい。適当な s/a の範囲としては、セメント量 300 kg/m^3 に対し $43\sim 48\%$ 、 400 kg/m^3 に対し $38\sim 44\%$ 程度と推定される。さらに骨材 M においては適当な s/a の範囲内では、 s/a を 1% 減少することによってセメント量 300 kg/m^3 の場合単位水量を $1.0\sim 1.3 \text{ kg/m}^3$ 、 400 kg/m^3 に対し $0.5\sim 1.0 \text{ kg/m}^3$ 減少することが可能である。

骨材 L と M とを比較すると、前述したように良好なワーカビリチーが得られる s/a の範囲はわずかに異なり、骨材 M のような非造粒型骨材の場合 s/a を若干大きめに選んだほうがワーカビリチーの点が得策である。これは骨材の形状と粗骨材の空げき率の違いによるものと考えられる。砕石コンクリートは河川産骨材を使用する場合よりも s/a を若干大きく選んだほうが良いといわれており、また粗骨材 M の方が若干空げき率が大きいことからこの事実が伺われる。

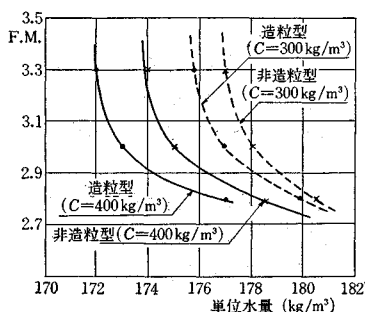
普通天然骨材を使用した場合、 s/a を 1% 減少すると同一スランプとするためには単位水量を 1.5 kg/m^3 減少すればよいとされている。軽量コンクリートにおいては骨材の種類、セメント使用量によってやや異なるが、減少水量は $s/a 1\%$ について 1 kg/m^3 と考えて差し支えないようである。また一般に s/a を大きくするとコンクリートのプラスチシチーや均等性が良好となる利点を有するが、同一強度を得るためには単位水量およびセメント使用量を多くする必要がある。

(5) 細骨材の F.M. (容積) と単位水量との関係

現在市販されている人工軽量細骨材の F.M. (容積) は 3.0 前後のものが多く、したがって F.M. の変化は生産管理の良否によって若干差があるとしても、 ± 0.2 程度の範囲内にあると予想される。本実験においては F.M. の上限を 3.3 、下限を 2.8 とし、標準の F.M. を 3.0 の 3 種類について、同一スランプを得るに要する単位水量の変化について検討した。得られた結果を図-12 に示す。

試験結果は、骨材の種類にかかわらずほぼ同様の傾向を示し、F.M. が小さくなるにしたがって単位水量の増大がみられ、とくに F.M. が標準値 3.0 より小さい場合

図-12 軽量細骨材の粗粒率 (F.M.) と単位水量との関係



にその傾向が著しい。これらの結果より軽量細骨材においてはその粒度管理が重要で、とくに F.M. が小さくならないよう粒度、すなわち 0.3 mm 以下の微細部分が多すぎないよう管理に注意を払う必要がある。

骨材 L と M とを比較すると、F.M. の減少による水量変化は骨材 L の方がやや大きいようである。

土木学会コンクリート標準示方書によれば、普通天然骨材の場合細骨材の F.M. が 0.20 以上の変化を示したとき、配合を変えるべきことを規定している。前述したように人工軽量骨材では F.M. が 3.0 以上の場合、 0.3 変化しても水量は 1 kg/m^3 前後の変化にすぎないが、F.M. が 3.0 以下では 0.2 の変化に対し水量が $3\sim 4 \text{ kg/m}^3$ 変化する。したがって人工軽量細骨材においては普通砂の場合よりもこの規定をやや厳重にしたほうがよく、F.M. の変化が $0.10\sim 0.15$ 程度でも配合を修正する必要があると考えられる。

なお、コンクリートのワーカビリチーの点から見れば、F.M. は小さいほど良好のように観察された。

(6) 空気量と圧縮強度との関係

水セメント比および s/a を同一にした軽量コンクリートの全空気量と材令 28 日における圧縮強度との関係を図-13 に、また non AE コンクリートの強度を 100 とした場合の空気量と圧縮強度減少率との関係を図-14 に示す。本実験においては実用的な空気量の範囲として $3\sim 7\%$ を選んだが、この範囲以下ではコンクリートの耐久性を向上させるための効果は期待できないし、またこの範囲以上では、空気量の増大による強度の低下が著しくなる。

図-13 空気量と材令 28 日における圧縮強度との関係

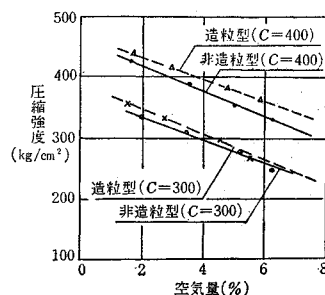


図-14 空気量と圧縮強度減少率との関係

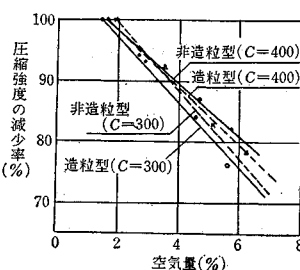


図-14 より単位セメント量 300 kg/m^3 ($w/c=0.55$)、 400 kg/m^3 ($w/c=0.41$) いずれの場合も空気量の増大による強度の低下は、骨材の種類にかかわらずほぼ等しく、空気量 1% 増加することによって圧縮強度は $4.5\sim 5.5\%$ 減少することがわかる。骨材別では、骨材 L は空気量 1% 増加することによって圧縮強度は $4\sim 5\%$ 減少

し、一方骨材 M では 5~6% 低下する。すなわち骨材 M の方が空気連行による圧縮強度低下におよぼす影響が若干大きいようである。

なお、普通コンクリートでは一般に同一水セメント比における空気量増大による強度の低下率は 4~6% といわれているので、本質的には軽量コンクリートも普通コンクリートと同様の傾向を示すと結論してもよいであろう。

本実験では AE 剤としてビンゾールを使用した。AE 剤よりも減水性分散剤を使用する方が単位水量をより多く減少でき、したがって空気量の増大による強度の低下は、水セメント比の減少で補なわれ強度低下が小さくなる。この点については同時に行なった人工軽量コンクリートの諸性質に関する一連の実験で検討したので稿を改めて発表する。

(7) 配合設計における修正値

前述した諸試験結果をもとにして、配合設計を行なう際に必要な修正値の私案を表-9 のように提示する。

表-9 配合における修正値

変化した要因	単位水量	s/a	材令28日 圧縮強度
スランプ 1 cm の増減に対し	1.0~1.2%		
空気量 1% の増減に対し	±1.5%* ±3.0%**	±0.5% ±0.5%	
砂の F.M. 0.1 の増減に対し		0.4~0.5%	
s/a 1% の増減に対し	1 kg/m ³		
空気量 1% の増に対し			-(4~6)%*

。 AE 剤のみ ** 分散剤 + AE 剤

骨材の種類とくに造粒型と非造粒型とによってこれらの数値には若干の差はあるが、試験においては必ず誤差が含まれるものであるから、骨材の種類による差はこれを一応無視して考えることにした。また、直接求め得ない修正値についてはスランプと単位水量あるいは s/a と単位水量との関係を参照して求めた。

表-9 は現在市販されている程度の良質の骨材であればそのまま利用できるものと考えられるが、吸水量が異常に大きい骨材あるいは骨材強度が極端に劣り構造用軽量コンクリートに不適なものではこの表に示す数値とは相当の差のあることが予想されるので、改めて試験を行ない諸数値を決定する必要があるだろう。

6. 結 論

本研究においては、現在市販されている人工軽量骨材のうちから、粗細骨材とも製造されかつ骨材形状(造粒型、非造粒型)の異なる代表的な 2 銘柄を選び、軽量コンクリートの配合設計を行なう場合あるいは配合修正を行なうにあたって問題とすべき諸要因を取り上げ、同一条件のもとで実際にコンクリートの練りまぜを行ない実

験的にこれを問題点を検討した。得られた結果を要約し、さらに今後の問題点について述べ結論に代える。

人工軽量コンクリートの配合に関する基礎的研究として、スランプと単位水量、AE 剤添加量と連行空気量、s/a の変化と単位水量、細骨材の F.M. の変化と単位水量、空気量と圧縮強度との関係などについて考察し、その結果をもとにして配合修正値の私案を提示した。これらの実験より骨材の種類、AE 剤混入の有無などによって若干の差はあるが、普通コンクリートの配合設計において従来から用いられている諸数値をわずかに修正するだけで十分利用できることがわかった。しかし軽量コンクリートにおいては骨材分離に対する抵抗性や、フローワビリチー、プラスチックチーなどのワーカビリチーの良好な範囲(たとえば骨材の分離がなくコンクリートのワーカビリチーが良好な s/a あるいはスランプなどの範囲)は普通コンクリートよりも狭く、その範囲を個々の骨材についてあらかじめ決めておくことも非常に重要であると考えられる。

その他骨材の吸水状態、骨材最大寸法あるいは細骨材の微粒分の多少によるコンクリートのワーカビリチーにおよぼす影響などについてはさらにくわしい実験を行なう必要があろう。これらのうち骨材最大寸法は現在市販されている骨材の大部分は 20~15 mm 程度であるので、それ以上の骨材が製造された場合に考えればよい。骨材の吸水状態、あるいは細骨材の微粒分の多少による影響については本実験と別途に検討を加えている。

まだ固まらない軽量コンクリートに関する問題点としては、本研究で取りあげたコンクリートの配合上の諸問題以外に、

コンクリートの練りまぜの問題：ミキサの種類、材料投入の順序、練りまぜ時間等

施工の問題：コンクリートの運搬、締め固め、表面仕上げ等

など主として施工上の問題点についても究明しておく必要がある。

本研究と併行して行なった、固まった軽量コンクリートの諸性質(強度、弾性係数、乾燥収縮、クリープ、凍結融解に対する抵抗性)、RC、PC、合成桁など構造物の設計上の問題点に関する研究などについては稿を改めて報告する。

軽量コンクリートを土木構造物に利用することは今後ますますさかんになると思われるが、本研究結果が軽量コンクリートの発展にわずかなりとも寄与できれば幸である。

なお本研究は昭和 40 年度、文部省科学研究(各個研究)の一部として行なった。また本研究を遂行するにあたり実験計画、実施等で関西軽量コンクリート研究グループの諸氏から、また関係骨材メーカーから多大のご援助

を賜ったことに対し深甚の謝意を表する次第である。

また本文は昭和 42 年 3 月ハンガリー、ブタペストで開催された軽量コンクリートに関するシンポジウム (RILEM 主催) に提出した論文を邦訳し若干の考察を追加したものである。

参 考 文 献

- 1) 小坂義雄：人工軽量骨材コンクリートの物理的性質，日本材料学会編，人工軽量骨材コンクリート，昭和 40 年 11 月。
- 2) Andrew Short & William Kinnibrug : Lightweight Concrete, C.R. Books Limited 1963.
- 3) Shideler J.J. : Lightweight-Aggregate Concrete for

Structural Use, Jour. of ACI, Oct. 1957.

- 4) 六車 照：人工軽量コンクリート構造物の設計上の問題点，日本材料学会編，人工軽量骨材コンクリート，昭和 40 年 11 月。
- 5) George H. Nelson & Otto. C. Frei : Lightweight Structural concrete Proportioning and Control. Jour. ACI, January 1958.
- 6) 西林新蔵：人工軽量骨材コンクリートの配合，日本材料学会編，人工軽量骨材コンクリート，昭和 40 年 11 月。
- 7) 村田二郎：強制練りミキサーによる軽量コンクリートの練りまぜ，日本 A.C.I. 構造軽量コンクリートシンポジウム論文集。

(1966.9.28・受付)