

論文

[1007] 粗・細骨材に火山灰を使用したコンクリートの強度特性

正会員 角 徹三 (豊橋技術科学大学建設工学系)
正会員 〇堀 誠治 (熊谷組)

1. はじめに

河川骨材の枯渇、海砂による塩害、碎石によるアルカリ骨材反応、人工軽量骨材の高騰などにより、骨材供給の危機が叫ばれている現在、我が国に豊富にある火山灰のコンクリート用骨材としての使用を再検討することは、大いに意義のあることと思われる。

細骨材にシラス、粗骨材に碎石を使用したコンクリートについては、武若ら¹⁾の研究があるが、本研究では、細骨材にシラス、粗骨材に火山レキを使用したコンクリート (以下、火山灰コンクリート) について、3種類の実験 (A・B・C) を行った。実験Aでは、規則性のある調合計画に基づく火山灰コンクリートの実験を行い、そのワーカビリティと強度を検討した。実験Bでは、シラスの粒度がモルタルのフロー値・強度に及ぼす影響について検討した。実験Cでは、シラスの粒度がコンクリート強度に及ぼす影響について捕足的な実験を行った。この3種類の実験により、火山灰コンクリートの強度特性を把握するとともに、既往の実験²⁾も加えて強度推定式の提案を試みた。

表. 1 骨材の性質

2. 使用材料

① セメント：普通ポルトランドセメント (比重3.15) ② 骨材：細骨材として鹿児島産シラス・豊川産川砂・豊浦標準砂、粗骨材として大島産火山レキを使用した。表. 1 に示すように、シラスと川砂では粗粒率・比重・吸水率とも極端に異なる。また、同じシラスでも、採取場所によってはS3とS1のように粗粒率が異なる。粗骨材

骨材区分	骨材種別	記号	粗粒率	比重		吸水率 (%)	使用実験
				絶乾	表乾		
細骨材	鹿児島産シラス ('85)	S3	1.53	2.06	2.17	5.3	既往の実験 ²⁾
	≥ 0.15mm	S3c	—	1.93	2.07	8.5	
	< 0.15mm	S3f	—	2.33	—	—	
	鹿児島産シラス ('87)	S1	0.44	2.30	2.31	1.4	A
	≥ 0.15mm	S1c	—	2.16	2.24	3.5	
	< 0.15mm	S1f	—	2.36	—	—	
	鹿児島産シラス ('88)	S	1.43	2.07	2.15	4.0	B, C
	≥ 0.15mm	Sc	—	1.92	2.03	5.9	
	< 0.15mm	Sf	—	2.38	—	—	
	豊川産川砂 ('88)	R	3.08	2.56	2.61	1.9	B
豊浦標準砂 ('88)	SS	0.97	2.55	2.56	0.62	B	
粗骨材	大島産火山レキ ('85)	V1	6.24	1.25	1.58	25.6	既往の実験 ²⁾
	大島産火山レキ ('87)	V2	6.42	1.61	1.89	16.9	

は表乾状態で使用したが、シラスの表乾定義に疑問が残るため、細骨材はすべて絶乾状態で用いた。③ 混和剤：必要に応じて高性能減水剤を使用した。

3. 規則性のある調合計画に基づいた火山灰コンクリートの実験 (実験A)

本実験では、実験変数として単位セメント量・水セメント比・細骨材率・高性能減水剤使用量を設定し、統一性のある調合計画に基づいて実験を行い、火山灰コンクリートの強度特性の概要を把握することを試みた。

3-1. 調 合

単位セメント量・水セメント比・細骨材率・高性能減水剤使用量の4つを実験変数とした。表.

2に示すように各実験変数を設定し、合計375種類の調合を計画した。しかし、極端にワーカビリティの悪いと予想されるものは打設しなかったため、実際には162種類の調合のコンクリートの実験を行った。表中の丸印が実際に打設したコンクリートである。この中で、●はワーカブルなコンクリート、○は固すぎたためワーカブルでないコンクリート、⊕は骨材分離したためワーカブルでないと判断したコンクリートの調合を表している。以下の図においても、この記号を踏襲した。ここで、ワーカブルなコンクリートとは、スランプ5~20cmのものである。ただし、スランプ20cm付近では、目視により骨材分離したかどうかを判定した。

表. 2 調合計画表

単位 セメント量 (kg/m ³)	細骨材率(%) H使用量(%) 水セメント比(%)	30		35		40		45		50			
		.8	.4	.0	.8	.4	.0	.8	.4	.0	.8	.4	.0
400	85			⊕		⊕		⊕	⊕	●	●	●	●
	80			⊕		⊕	●	●	●	●	●	○	○
	75			⊕	●	●	●	●	○	○			
	70			⊕	●	●	●	○					
	65	⊕	●	●	○	○							
375	85			⊕		⊕	●	●	●	○	○	○	○
	80			⊕	⊕	●	●	●	○	○	○		
	75			⊕	●	●	○	○					
	70	⊕	●	●	○	○							
	65	○	○	○									
350	85			⊕	●	●	●	○	○	○	○		
	80			⊕	●	●	○	○					
	75			⊕	●	○	○						
	70	●	○	○									
	65	○	○	○									
325	85	⊕	●	●	○	○			○				
	80	●	●	○	○	○							
	75	○	○	○			○						
	70	○	○	○									
	65	○											
300	85	●	○	○	○	○							
	80	○	○	○									
	75	○											
	70	○											
	65	○											

* H: 高性能減水剤(セメント質量に対する比で示した。)

3-2. 実験結果

(1) スランプと単位水量

図. 1はスランプと単位水量の関係を細骨材率別に示したものである。ただし、高性能減水剤を使用していないもののみを示した。この図より、細骨材率の大きいものほど、同一スランプを得るのに、より多くの単位水量を必要とすることが分かる。また、ワーカブルなコンクリートを得ようとするれば、単位水量260kg/m³程度以上必要であることも読み取れる。

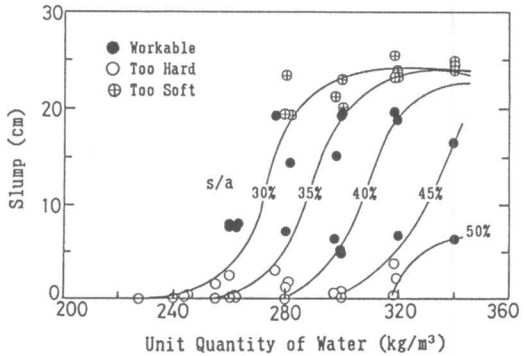


図. 1 スランプと単位水量

(2) 圧縮強度とセメント水比

図. 2に示すように、火山灰コンクリートにおいても普通コンクリートと同様に圧縮強度(4週)とセメント水比の間に相関がある。細骨材率30%、35%では右上がりの関係を維持しているが、40%、45%および50%では圧縮強度を最大にするセメント水比がそれぞれに特定できる。このように、細骨材率によって圧縮強度とセメント水比の関係が異なることから、火山灰コンクリートの圧縮強度はセメント水比のみでなく細骨材率

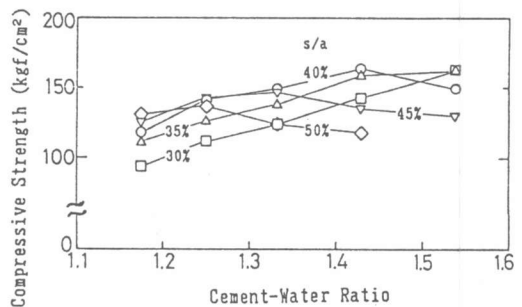


図. 2 圧縮強度とセメント水比

にも依存することが分かる。

(3) 圧縮強度と単位細骨材量

図.3に圧縮強度(4週)と単位細骨材量の関係を示す。図中の曲線は、水セメント比別のデータをそれぞれ二次曲線で回帰したものである。これらの曲線より、圧縮強度を最大にする単位細骨材量がそれぞれ特定できる。これは、主にシラスを絶乾状態で使用したこと、その微粒分(0.15mm未満)の形状がワーカビリティに悪影響を及ぼすことが原因であろう。つまり調査時の水セメント比が同じであってもシラスの単位量が多いと、その吸水性のため実質的な水セメント比は低下し、これにより圧縮強度はある範囲までは上昇する。しかし、単位細骨材量が多くなるに従って極端にワーカビリティが悪くなると、コンクリート打設時の締め固めの程度が低くなり、圧縮強度は低下する。以上の理由により、圧縮強度を最大にする単位細骨材量が特定できるものと思われる。

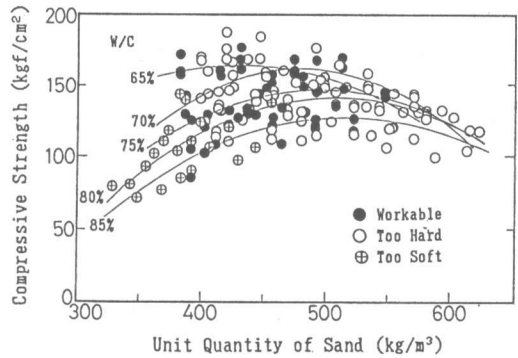


図.3 圧縮強度と単位細骨材量

4. シラスの粒度がモルタルのフロー値・強度に及ぼす影響(実験B)

実験Aと既往の実験²⁾では、シラスの粒度に明らかな違いがみられる(図.4 S1とS3)。このことがコンクリートのワーカビリティや強度に多大な影響をもたらしているため、それを無視して両者を比較することはできないものと思われる。従って、シラスの粒度の違いがコンクリートの特性に与える影響を直接検討する前に、ここではまず、モルタルのフロー値や強度にどのような影響を与えるのかを実験的に明確にした。

4-1. 調査

シラスの粒度を図.4に示すように設定した。S1~S6はシラス、Rは川砂、SSは標準砂を表している。ここで、S1は鹿児島産シラス('87)、S3は鹿児島産シラス('85、既往の実験²⁾)、S5は豊川産川砂('88)(表.1)

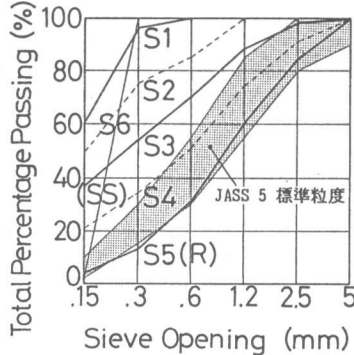


図.4 粒度分布の設定

表.3 粗粒率・絶乾比重

記号	細骨材	粗粒率	絶乾比重
S1	シラス	0.44	2.20
S2		0.91	2.15
S3		1.53	2.09
S4		2.29	2.02
S5		3.08	1.94
S6		0.97	1.93
R	川砂	3.08	2.56
SS	標準砂	0.97	2.55

と同じ粒度である。また、S6は豊浦標準砂(SS)と同じ粒度に設定した。この様に粒度調整した細骨材を用いて調査を計画した。表.3に細骨

表.4 調査計画表

細骨材の種類	W/C、s/cを一定にした場合の調査		F.V.を一定(200±15mm)にした場合の調査		
	W/C (%)	s/c	細骨材の種類	W/C (%)	s/c
S1	85	2.5	S1	105	2.5
S2			S2	90	
S3			S3	77	
S4			S4	67	
S5			S5	65	
S6			S6	96	
R			R	49	
SS			SS	58	
S1	70	2	S1	83	2
S2			S2	75	
S3			S3	70	
S4			S4	58	
S5			S5	55	
S6			S6	80	
R			R	45	
SS			SS	50	
S1	55	1.5	S1	70	1.5
S2			S2	64	
S3			S3	57	
S4			S4	55	
S5			S5	47	
S6			S6	60	
R			R	39	
SS			SS	43	

材の粗粒率と絶乾比重を示す。

表. 4 に調合計画表を示す。実験変数は、① 細骨材の種類 (S1~S6・R・SS) ② 水セメント比 (W/C) ③ セメントに対する細骨材の容積比 (s/c) の三つとした。調合の方針は大きく分けて次の二つとした。

(a) W/C、s/c を一定にした。

[W/C, s/c] → [85%, 2.5]・[70%, 2]・[55%, 1.5] の3パターン×骨材8種類=24種類の調合とした。まず、s/c を決定した後、骨材8種類を使用するモルタルすべてが打設可能となるようW/C を決定し、上記のような [W/C, s/c] の組み合わせとした。

(b) フロー値を一定(200±15mm)にした(そのために、水セメント比を調整した)。

フロー値=200±15mm とするために、s/c・骨材の種類 の組合せに応じてW/C を変化させ、24種類の調合とした。

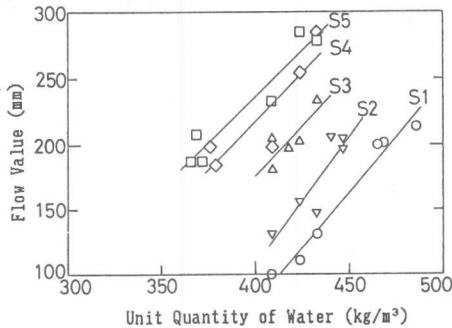
4-2. 実験結果

(1) フロー値と単位水量

図. 5 (a) にフロー値と単位水量の関係を示す。図中の直線は最小二乗法で回帰したものである。図はシラスの粒度が細かい(粗粒率が小さい)程、同一フロー値を得るための単位水量は大きくなることを示している。これはシラスの0.15mm未満の含有量 (S1 > S2 > S3 > S4 > S5) が、大きく影響を与えているものと思われる。

図. 5 (b) は、骨材の質の違い (S5 [シラス] と R [川砂]、S6 [シラス] と SS [標準砂]) によるフロー値と単位水量の関係を示したものである。シラスは同粒度の川砂、標準砂に比べ、同一フロー値を得るのに、いずれもより多くの単位水量を必要とする。これは、シラスの吸水率が大きいことと、その形状の悪さが影響しているものと思われる。

以上のことより、シラスの使用により特定のフロ



(a) S1~S5の比較

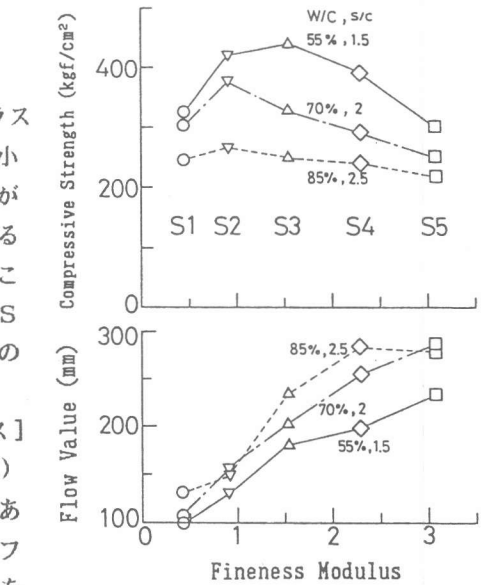
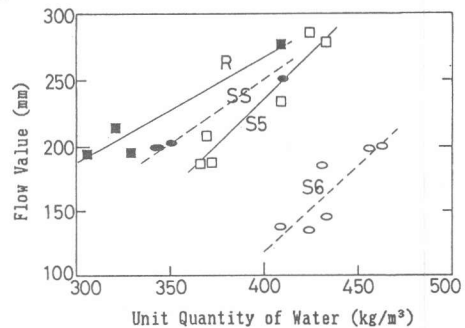


図. 6 粗粒率がモルタルの諸特性に及ぼす影響



(b) S6とSS、S5とRの比較

図. 5 フロー値と単位水量

一値を得るための単位水量増大は避け難く、特に粗粒率の小さい（微粒分の多い）シラスを用いると、なおさらその傾向は強まると言える。

(2) 粗粒率がフロー値および強度に及ぼす影響

図.6にフロー値・圧縮強度（4週）と粗粒率との関係を示す。図中のデータは、W/C・s/c一定のものである。シラスの粗粒率が大きい程、モルタルのフロー値は大きくなる。S1を使用したモルタルは、いずれも固すぎて打設困難な状態であったが、S5は[W/C, s/c] → [55, 1.5]を除いて骨材分離を起こしている。圧縮強度はS2、S3あたりで最大となる。W/C, s/c一定の場合は、圧縮強度を最大にするシラスの粗粒率が特定できる。

5. シラスの粒度がコンクリート強度に及ぼす影響（実験C）

実験Bではシラスの粗粒率がモルタルの強度に及ぼす影響を示したが、ここでは、コンクリート強度への影響を調べるため、細骨材にS3、S5を使用したコンクリートについて補足的な実験を行った。

5-1. 調 合

単位セメント量を一定にし、シラスの粒度・水セメント比・細骨材率の3つを実験変数として計画を行った。表.5に調合計画表を示す。表に示すように、単位セメント量は400kg/m³で一定、細骨材の種類はS3・S5の2種類、細骨材率は30%・40%・50%の3種類で調合した。水セメント比は適度なワーカビリティが得られるよう決定し、合計13種類の調合で実験を行った。

表.5 調合計画表

単位セメント量 (kg/m ³)	細骨材の種類	細骨材率 (%)	水セメント比 (%)
400	S3	30	50
			60
		40	60
			65
		50	60
			65
	80		
	S5	30	50
			60
		40	60
			65
		50	60
			60
65			

5-2. 実験結果

図.7に圧縮強度（4週）とセメント水比の関係を示す。コンクリートがワーカブルな範囲ではセメント水比説が成り立つが、ワーカブルでなくなると成り立たなくなっている。火山灰コンクリートの圧縮強度はセメント水比のみではなく、細骨材率や細骨材の粒度にも依存する。

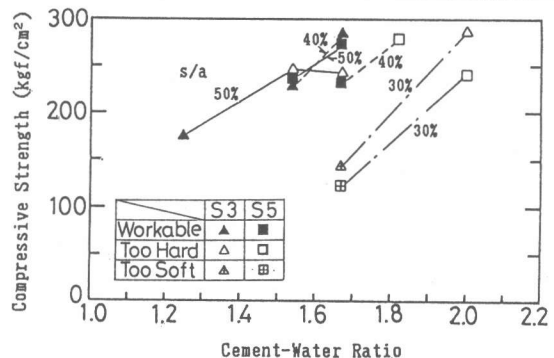


図.7 圧縮強度とセメント水比

6. 圧縮強度推定式の提案

上述の火山灰コンクリートの特性を踏まえた上で、ここでは、セメント水比説を拡張した強度推定式の提案を試みた。推定式(1)を以下に示す。

$$F = \alpha_0 + \alpha_1 C/W + \alpha_2 (S - P_1)^2 + \alpha_3 (G - P_2)^2 + \alpha_4 (f_m - P_3)^2 \quad (1)$$

ここに F : 圧縮強度 (kgf/cm²)
 C/W : セメント水比 1.18 ~ 2.00
 S : 単位細骨材量 0.329 ~ 0.624 (t/m³)

G : 単位粗骨材量 0.452 ~ 0.878 (t/m³)
 f_m : 細骨材の粗粒率 0.44 ~ 3.08

実験A (図. 3) より、水セメント比一定の場合、圧縮強度を最大にする単位細骨材量が特定できることが分かった。従って、式(1)ではセメント水比に加えて単位細骨材量を二次関数形で付加した。さらに、単位粗骨材量についても同様に二次関数形で付加した²⁾。また実験B (図. 6) より、W/C・s/c一定の場合、モルタルの圧縮強度は特定の粗粒率で最大値をとることが分かった。本研究では、このことがコンクリートの圧縮強度でも成り立つものとし、式(1)のように細骨材の粗粒率を二次関数形で与えた。

式(1)の偏回帰係数を、実験A、Cおよび既往の実験²⁾より得られた207個のデータ(全て3個のシリンダー圧縮試験の平均値)をもとに、重回帰分析により計算し、以下の推定式を得た。

$$F = -20.3 + 159C/W - 2480(S - 0.477)^2 + 397(G - 0.773)^2 - 9.02(f_m - 2.85)^2 \quad (2)$$

式(2)による推定値と実験値の関係を図. 8に示す。自由度調整済み寄与率0.850、標準偏差15.5kg/cm²と、比較的高い推定精度を得た。ただし、本推定式が成立するのは上記の調査の範囲内である。

7. まとめ

本研究の範囲内での結論を以下に記す。

- 1) 火山灰コンクリートのスランプは、単位水量・細骨材率に依存する。
- 2) シラスの粗粒率はモルタルのフロー値に影響を与える。粗粒率が小さいほど、ある特定のフロー値を得るための単位水量は増大する。
- 3) シラスの粗粒率はモルタルの圧縮強度に影響を与える。水セメント比、細骨材セメント比が一定の場合、モルタルの圧縮強度を最大にする粗粒率が特定できる。
- 4) セメント水比のみでなく、単位細骨材量・単位粗骨材量・細骨材の粗粒率を説明変数として取り入れることにより、火山灰コンクリートの圧縮強度推定式が得られた。

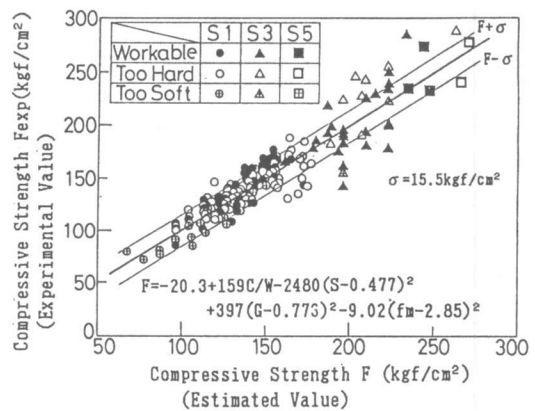


図. 8 実験値と推定値

参考文献

- 1) 武若耕司、松本 進、川俣孝治：しらすのコンクリート用細骨材への利用に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集9-1、1987、PP.7~12
- 2) 角 徹三、中村聖吾：シラスの微粒分が火山灰コンクリートの強度とワーカビリティに与える影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、1986、PP.69~70
- 3) 角 徹三、佐野誓治、堀 誠治 他：粗・細骨材に火山灰を用いたコンクリートの強度推定に関する提案、日本建築学会東海支部研究報告集、1988、PP.21~24