

論文 混合細骨材におけるスラグ混合率の測定方法の提案

黒井登起雄*1・松村仁夫*2

要旨：『フェロニッケルスラグ細骨材コンクリート施工指針(案)』（1994年）には、重液によって骨材粒子を比重分離するフェロニッケルスラグ細骨材混合率（FNS混合率）推定のための試験方法が規定されている。ここでは、有機化学物質の危険な薬品に指定されている四臭化エタン（純液比重 2.96/20℃）と四塩化炭素（純液比重 1.58/20℃）が使用されている。そこで、本研究では、細骨材の比重差に着目し、混合率測定のための比重試験方法およびスラグ混合率の測定精度などを検討するとともに、『比重試験』によるスラグ混合率測定に関する新しい試験方法を提案した。

キーワード：フェロニッケルスラグ、銅スラグ、混合細骨材、混合率、見掛けの真比重

1. まえがき

近年、比重 2.7以上のフェロニッケルスラグ（FNSと呼称）および3.6程度の銅スラグ（CUSと呼称）などの産業副産物がコンクリート用細骨材としてJIS化された。これらの細骨材と比重 2.6程度以下の普通細骨材（砂および砕砂）を混合して使用する場合、FNSあるいはCUS混合率（容積百分率）を簡便に試験する方法が骨材の品質管理試験の上で要望されている。FNS混合率を推定する試験は、重液によって細骨材粒子を比重分離する方法が既にある¹⁾が、しかし、重液が四臭化エタンと四塩化炭素を混合した有機化学物質で、危険な薬品に指定されているため、新しいFNSあるいはCUS混合率の測定方法の検討が望まれている。そこで、本研究では、細骨材の比重差に着目し、混合率測定のための比重試験方法およびFNSあるいはCUS混合率の測定精度などを各種細骨材によって検討するとともに、『比重試験』によるスラグ混合率測定に関する新しい試験方法を提案した。

2. 比重試験によるFNSあるいはCUS混合率の測定方法

2.1 測定方法の考え方

FNSおよびCUS細骨材の比重と砂、砕砂などの普通細骨材の比重にはかなりの差がある。比重試験によるFNSあるいはCUS混合率の測定は、このように比重に大きな違いのある混合細骨材の場合に、有効な方法である。

FNSあるいはCUS細骨材と普通細骨材を混合率 $m\%$ （容積百分率）で混合したとき、混合細骨材の比重は、式[1]から算定できる。

$$\rho_{s+n} = \frac{(\rho_s - \rho_n)}{100} \cdot m + \rho_n \quad [1]$$

ここに、 ρ_{s+n} ；混合細骨材の比重、 ρ_s ；FNSあるいはCUS細骨材の比重、 ρ_n ；砂および砕砂の比重

混合細骨材のFNSあるいはCUS混合率 m は、それぞれの細骨材の比重が既知であれば、式[2]から求めることができる。

$$m = \frac{\rho_{s+n} - \rho_n}{\rho_s - \rho_n} \cdot 100 \quad [2]$$

2.2 FNSあるいはCUS混合率の測定のための比重試験

FNSおよびCUS混合細骨材は、構成細骨

*1 足利工業大学助教授 工学部土木工学科 正会員

*2 足利工業大学教務職員 工学部土木工学科 正会員

材の比重が相違すること、FNSおよびCUS細骨材の粒形が球形のものもあること、混合する砂および砕砂には0.15mm以下の微粒分が多く含まれるものが多いこと等から、表乾状態の判定が難しく、比重試験に表乾状態の試料を用いることは、非常に難しいと考えられる。したがって、比重試験に用いる骨材は、『絶乾状態にした細骨材を用いる』のが適切である。

コンクリートの配合におけるFNSあるいはCUS混合率は、表面乾燥飽水（表乾）状態の見掛けの比重によって設定されるので、混合率の測定における比重は、「見掛けの表乾比重」が妥当と考えられる。しかし、混合細骨材は、コンクリートの練混ぜ時に配合計算によって別々に混合されるばかりでなく、あらかじめ骨材が混合されていることも多い。この場合、混合率測定において、混合砂それぞれの単独の比重が解らないことが多い。そこで、これらにも対応するために、単独の細骨材の比重の変動範囲が小さくなる、すなわち、細骨材の空隙の多少（吸水率）による影響を含まない『真比重』を測定することのほうがよいと考えられる。

なお、細骨材の真比重 ρ_r と表乾比重 ρ_s 、吸水率 Q との間には、式(3)、式(4)に示すような関係がある。

$$\rho_s = \frac{\rho_r (Q + 100)}{100 + \rho_r Q} \quad (3)$$

$$\rho_r = \frac{\rho_s}{(1 - \rho_s) \cdot \frac{Q}{100} + 1} \quad (4)$$

$$\approx \frac{\rho_s (1 - \frac{Q}{100})}{1 - \rho_s \cdot \frac{Q}{100}}$$

2.3 比重試験の方法

混合率を測定するための比重試験は、JIS A 1109に準じて行うこととする。JIS A 1109の比重試験は、表乾比重および吸水率を求めるために、表乾状態の細骨材を準備して行っているが、FNSまたはCUS細骨材の表乾状態の作製は、

粒径が偏っていたり、粒形が球状であったりする場合、非常に難しく、また、FNSまたはCUS混合細骨材は、それを構成する単独の細骨材のそれぞれの比重が解らないことが多いので、FNSまたはCUS混合率測定のための比重試験は、絶乾状態の細骨材を用いる、真比重の測定が良いと考えられる。

混合細骨材の比重試験から得られた『真比重($\rho_{r(s,r,n)}$)』によるFNSまたはCUS混合率の測定値 m' は、式(5)を用いて算定することができる。

$$m' = \frac{\rho_{r(s+n)} - \rho_{r,n}}{\rho_{r,s} - \rho_{r,n}} \cdot 100 \quad (5)$$

3. 比重試験によるFNSおよびCUS混合率算定とその問題点の検討

FNSおよびCUS混合率と混合細骨材の比重との関係を各種の細骨材による実験によって調べ、算定混合率の精度を検討した。

3.1 使用細骨材および実験方法

(1) 使用細骨材 細骨材は、普通細骨材5種類（鬼怒川産KRおよび大井川産川砂OR、長浜町海砂DR、六ヶ所村産洗砂B'R、葛生町産砕砂）、FNS細骨材3種類（キルン水砕砂A、電炉風砕砂B'、電炉水砕砂D）、CUS細骨材5種類（A、B、C、D、E、F）とした。混合細骨材は、FNSあるいはCUS細骨材と普通細骨材との混合とし、設定混合率 m は、主に30、50、70%の3水準とした。

(2) 実験方法 比重試験は、水の置換法によるJIS A 1109に準ずる方法とし、『見掛けの真比重』を24、48、72時間吸水後に測定した。試料は、絶乾状態にした約500gの細骨材とした。

3.2 比重試験による混合率算定の問題点とその測定精度

(1) 真比重の測定方法 表-1は、JISに準じた試験によって求めた見掛けの真比重の測定値に及ぼす吸水時間の影響を示す。表-1より、絶乾状態の細骨材を用いた比重試験の場合、比重の測定値は、24時間程度の吸水により飽水

表-1 細骨材の比重と吸水時間との関係

細骨材の種類	吸水時間 / 見掛けの真比重*					
	24 h		48 h		72 h	
川砂(大井川産)	2.67	2.67	2.67	2.67	2.68	2.67
	2.67		2.67		2.67	
	2.67		2.67		2.67	
川砂(鬼怒川産)	2.71	2.70	2.71	2.70	2.71	2.71
	2.70		2.70		2.70	
	2.70		2.70		2.71	
海砂(長浜町産)	2.69	2.69	2.71	2.70	2.70	2.70
	2.69		2.70		2.70	
	2.69		2.69		2.69	
FNS B'	2.88	2.89	2.90	2.90	2.92	2.92
	2.88		2.90		2.91	
	2.90		2.91		2.92	
FNS D	2.93	2.93	2.93	2.93	2.94	2.94
	2.94		2.94		2.94	
	2.93		2.93		2.94	
FNS D	2.94	2.94	2.95	2.96	2.95	2.96
	2.95		2.96		2.96	
	2.94		2.96		2.96	
CUS C-25S	3.61	3.61	3.61	3.61	3.62	3.61
	3.61		3.61		3.61	
	3.61		3.61		3.61	
CUS C-12S	3.59	3.59	3.60	3.60	3.60	3.60
	3.59		3.59		3.59	
	3.60		3.60		3.60	

* 絶乾状態の試料500.0gを用い、JIS 1109に規定する方法に準じて求めた試験値

表-2 各種細骨材の比重試験結果

細骨材の種類	真比重*1	見掛けの真比重*2	表乾/絶乾比重(参考値)*3
川砂(鬼怒川産)	2.62	---	2.60/2.56*4
" (大井川産)	2.61	2.71	2.62/2.58*4
		2.67	
" (")	2.57	2.66	2.60/2.54*4
		2.70	
海砂(長浜町産)	2.63	2.69	2.62/2.58*4
砕砂(葛生産)		2.70	
FNS	A	3.07	3.06~3.13
	B'	3.02	2.84~2.97
	D	2.99	2.94/2.91*4
CUS	A	3.55	3.48~3.63
	B	3.52	3.45~3.63
	C	3.44	3.54~3.67
	C-2.5S	---	3.61/3.60*4
	C-1.2S	---	3.61/3.60*4
	D	3.54	3.30~3.68
	E	3.62	3.21~3.51
F	3.45	3.45~3.60	

*1 微粉砕試料による測定値(試料量: 50.0g)

*2 JIS A 1109に準じて絶乾試料で求めた値

*3 製品出荷時の平均的な絶乾比重(JIS A 1109の規定による試験値)を示す。

*4 JIS A 1109の規定に従って求めた表乾比重/絶乾比重

状態となり、一定値を示す『見掛けの真比重』を表すものと考えられる。しかし、微細な空隙を多く含む一部のFNS細骨材などにおいては、48~72時間以上の吸水時間を要するようである。このときの見掛けの真比重は、川砂が2.67および2.70、FNSおよびCUS細骨材がそれぞれ2.90~2.93および3.59~3.60の値である。

表-2は、各種細骨材の比重試験結果を示す。大部分の普通細骨材は、岩種として安山岩、砂岩、石灰岩で構成されていることが多いため、真比重が約2.69~2.70と、非常に狭い範囲にあると云われている。表-2より、細骨材の見掛けの真比重の測定値は、2.66~2.71(平均値2.69)の範囲にあり、真比重に近似しているようである。また、FNS細骨材およびCUS細骨材の見掛けの真比重も、それぞれ2.92~2.96(平均値2.94)および3.48~3.71(平均値3.58)の範囲にある。これは、絶乾状態の細骨材によるJISに準じた比重試験が、真比重の簡易的な測定法として有効であることを示すものである。

(2) 比重試験によるFNSまたはCUS混合率の算定精度 図-1および図-2は、設定値30、50、70%としたFNS混合細骨材(B'+B'R、D+DR)のFNS混合率と見掛けの真比重(測定値)との関係をそれぞれ示した。

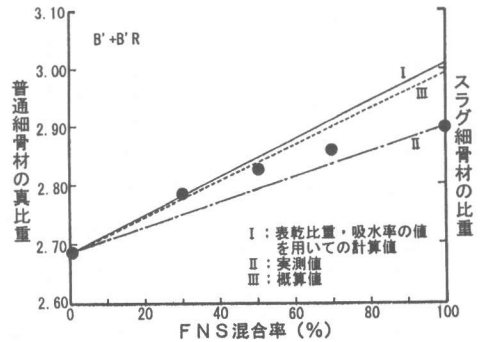


図-1 FNS混合率と真比重との関係 (電炉風砕砂、B'+B'R)

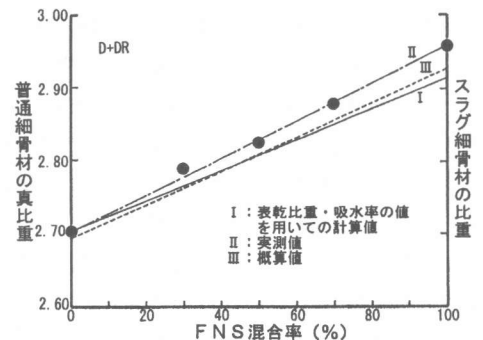


図-2 FNS混合率と真比重との関係 (電炉水砕砂、D+DR)

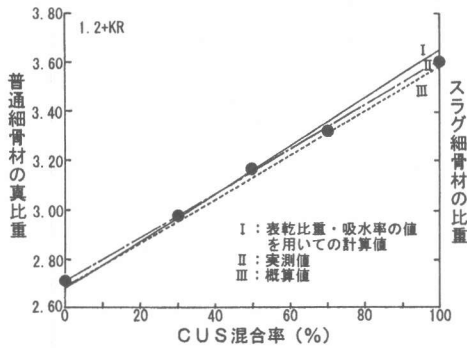


図-3 CUS混合率と真比重との関係
(C-1.2S+KR)

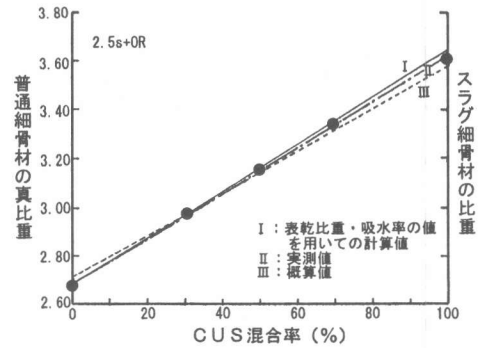


図-4 CUS混合率と真比重との関係
(C-2.5S+OR)

表-3 比重試験により求めた混合細骨材のFNSまたはCUS混合率

種類	FNSまたはCUS混合率						
	m (設定値)	m_1' (測定値)*1	m_1' / m	m_2' (測定値)*2	m_2' / m	m_3' (測定値)*3	m_3' / m
FNS	30%	29.1%	0.97	39.3%	1.31	36.0%	1.20
B' + B'R	50	41.6	0.83	61.1	1.22	52.0	1.04
	70	57.3	0.82	82.8	1.18	60.0	0.86
FNS	30%	40.0	1.33	32.3%	1.08	36.0%	1.20
D + DR	50	65.0	1.30	55.4	1.11	56.0	1.12
	70	90.0	1.29	74.7	1.07	76.0	1.09
CUS	30%	30.0	1.00	29.8%	0.99	31.8%	1.06
C-1.2S+KR	50	50.9	1.02	51.0	1.02	53.0	1.06
	70	67.7	0.97	70.1	1.00	71.0	1.01
CUS	30%	29.9	1.00	32.7%	1.09	30.6%	1.02
C-2.5S+OR	50	50.9	1.02	55.4	1.11	53.0	1.06
	70	72.9	1.04	77.0	1.10	76.6	1.09

*1 表乾比重、吸水率から求めた単独骨材の真比重を用いて算定した混合率 … [I]

*2 試験によって求めた単独骨材の見掛けの真比重を用いて算定した混合率 … [II]

*3 単独骨材の真比重の概略値 (FNS細骨材 2.94、CUS細骨材 3.58、普通細骨材 2.69) を用いて算定した混合率 … [III]

また、図-3および図-4は、CUS混合細骨材 (C-1.2S+KR、C-2.5S+OR) のCUS混合率と見掛けの真比重 (測定値) との関係を示した。なお、図中のI、II、IIIは、式[1]から単独細骨材の比重によって定まるFNSまたはCUS混合率の測定結果を示したものである。Iは、表乾比重と吸水率 (JIS試験値) から求めた単独細骨材の真比重で算定した混合率の計算式、IIは、比重試験によって測定した真比重から算定した混合率の計算式、単独骨材の真比重の概略値 (FNS細骨材 2.94、CUS細骨材 3.58、普通細骨材 2.69) から算定した混合率の計算式をそれぞれ示したものである。表-3は、見掛けの真比重の測定値から算定した

FNS混合細骨材 (B' + B'R、D + DR) およびCUS混合細骨材 (C-1.2S+KR、C-2.5S+OR) のFNSまたはCUS混合率の算定値とその値の設定値との比を示したものである。図-1～図-4より、各々の混合細骨材の見掛けの真比重 (測定値) は、FNSあるいはCUS混合率 (設定値) が30、50、70%と大きくなるに従って増大する。また、式[1]によって単独細骨材の比重と混合率とから求めた混合細骨材の比重とかなりよく一致している。

表-3より、混合細骨材の見掛けの真比重の測定値から式[5]を用いて算定したFNSあるいはCUS混合率 m' は、B' + B'Rの場合に、普通細骨材とFNS細骨材の比重差が小さいため、

表-4 各種の単独細骨材の比重、吸水率および混合細骨材の混合率との関係

混合細骨材の種類	表乾比重 ρ_s	吸水率 Q (%)	見掛けの真比重* ρ_r	混合率と比重との関係式
FNS B' + B' R	2.94 2.62	1.13 1.60	3.01 2.69	$m = 313 \rho_r (s+n) - 841$
FNS D + DR	2.86 2.60	0.72 2.25	2.90 2.70	$m = 500 \rho_r (s+n) - 1350$
CUS C-1.2S + K R	3.61 2.60	0.22 1.76	3.63 2.68	$m = 105 \rho_r (s+n) - 282$
CUS C-2.5S + O R	3.61 2.62	0.16 1.46	3.63 2.68	$m = 105 \rho_r (s+n) - 282$

* 表乾比重と吸水率とから算定した値

表-5 比重試験により求めた混合細骨材のFNS混合率

種類	FNS混合率				
	m (設定値)	m_1' (測定値)*1	m_1' / m	m_3' (測定値)*2	m_3' / m
A + AR	50%	46.0%	0.92	84.0%	1.68
B' + B' R	50%	44.8%	0.90	56.0%	1.12
	60	51.1	0.85	64.0	1.07
D + DR	30%	45.0%	1.50	40.0%	1.33
	50	70.0	1.40	60.0	1.20

*1 表乾比重、吸水率から求めた単独骨材の真比重を用いて算定した混合率

*2 単独骨材の真比重の概略値を用いて算定した混合率

m_1' 、 m_2' および m_3' のいずれにおいても、若干測定誤差が大きいが、その他の混合細骨材の場合、混合率 m' は、単独細骨材の真比重として「表乾比重、吸水率による計算値を用いる場合 (m'_1)」(表-4)、「試験値を用いる場合 (m'_2)」、「概略値を用いる場合 (m'_3)」のいずれにおいても、かなり高精度の結果が得られ、CUS混合率においては±5%程度の正確さが期待できる。

表-5も、見掛けの真比重の測定値から算定したFNS混合細骨材(A + AR、B' + B' R、D + DR)のFNS混合率の値とその設定値との比を示したものである。FNS混合細骨材のいずれの場合とも、FNS混合率 m' は、若干測定誤差が大きくなり、混合率の目安を確かめる程度の精度である。

以上のように、FNSおよびCUS混合細骨材の混合率は、比重試験による方法によって目安となる精度で測定可能である。

4. 『比重試験による混合率の測定方法(案)』の提案

4.1 適用範囲

この規格は、フェロニッケルスラグ細骨材あるいは銅スラグ細骨材と普通細骨材の混合細骨材の混合率を試験する方法について規定する。

備考 この規格の引用規格を、次に示す。

JIS A 1109 細骨材の比重及び吸水率試験方法
JIS Z 8401 数値の丸め方

4.2. 比重試験方法

(1) 器具 ① はかり；はかりは、ひょう量2kg以上で、感量が0.1gまたはこれより良いものとする。

② フラスコ；フラスコは、容量500mlのメスフラスコとする。

(2) 試料

試料は、代表的なフェロニッケルスラグ混合細骨材あるいは銅スラグ混合細骨材を数箇所から10kg以上採取し、105~110℃の乾燥炉に入れ、恒量となるまで乾燥する。乾燥した試料は、放冷し、四分法または試料分取器によって所定量となるまで縮分する。その量は、約500gとし、2個準備する。

(3) 比重試験

比重試験は、JIS A 1109に準じて、次のとおりに行う。

① 約500gの絶乾状態の試料の質量 (W_D) を0.1gまで正確に測定する。

② 500ml メスフラスコを目盛線まで水を入れ、その質量 (W) を正確に測定する。また、フラスコだけの質量 (W_0) もあらかじめ測定する。

フラスコの容積 (V) は、式(6)から求める。

$$V = W - W_0 \quad [6]$$

③ 試料を500mlのメスフラスコに入れ、目盛線の近くまで水を加える。

④ フラスコを転がして、細骨材中の巻き込み気泡を除去した後、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中に24時間以上浸漬する*1。

*1 24時間以上静置して、試料が飽水状態になるまで吸水させる。

⑤ 24時間以上の時間静置した後、水をフラスコを目盛線まで正確に加え、その質量 ($[W_{s+w}]_t$) を測定する。

⑥ フラスコに加えた水の全質量 (W_1) は、式(7)から求める。

$$W_1 = [W_{s+w}]_t - W_0 - W_D \quad (= V \rho_w) \quad [7]$$

⑦ 細骨材の見掛けの真比重 ρ_r は、式(8)から求める。

$$\rho_{r(s+n)} = \frac{W_D}{W - [W_{s+w}]_t + W_D} \quad [8]$$

⑧ 試験は、(2)で採取した試料について2回行い、その平均値をとる。

4.3 フェロニッケルスラグ細骨材(FNS)および銅スラグ細骨材(CUS)の混合率の算定

① FNSあるいはCUS混合率の測定値 m' (%) は、4.2(3)の比重試験で得られた『真比重 ($\rho_{r(s+n)}$)』から式(9)を用いて算定する。

$$m' = \frac{\rho_{r(s+n)} - \rho_{rn}}{\rho_{rs} - \rho_{rn}} \cdot 100 \quad [9]$$

ここで、 m ; FNSあるいはCUS混合率の測定値 (%)、 $\rho_{r(s+n)}$; 混合細骨材の見掛けの真比重、 ρ_{rs} 、 ρ_{rn} ; FNS細骨材あるいは

CUS細骨材および普通細骨材(砂または砕砂)の見掛けの真比重

② FNS細骨材あるいはCUS細骨材および普通細骨材の見掛けの真比重は、式(3)および式(4)の関係によって、それぞれの単独の細骨材の表乾比重から求めた値を用いる*2。

*2 FNSあるいはCUS混合細骨材を構成するそれぞれの単独細骨材の表乾比重が判らない場合は、次の方法で求めた値を用いる。

(a) 単独細骨材がすべて入手できるときは、4.2(3)の方法によって見掛けの真比重を測定する。

(b) 単独細骨材が入手できないときは、見掛けの真比重として、FNS細骨材2.92~2.96、CUS細骨材3.48~3.71、普通細骨材(砂および砕砂)2.66~2.71の値を用いてもよい。

5. まとめ

FNSあるいはCUS混合細骨材の混合率(FNSあるいはCUS)を推定するための従来の『重液によって細骨材粒子を比重分離する方法』に代わり、『比重試験による方法』について、実験によって検討した。その結果、混合細骨材のスラグ混合率は、 $\pm 5\%$ 程度のかかなり高い正確さで測定できることが確かめられ、新しく『スラグ混合率測定のための比重試験による方法』を提案した。なお、今後現場における適用性と精度について検討が必要である。

謝辞

本研究の一部は、土木学会スラグ細骨材コンクリート研究小委員会(委員長 山本泰彦 筑波大学教授)よりの寄附金を受けて、指針改訂作業の一環として行ったものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 ; フェロニッケルスラグ細骨材コンクリート施工指針(案)、コンクリート・ライブラリーNo.78、pp.82~pp.93、1994.1