

石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートの流動性と諸性状

藤原 敏弘* 井戸 勇二*
阿部 哲良* 大村 隆一郎*
瀬尾 正幸*

要 旨

石灰石微粉末は、コンクリートの流動性の改善および水和発熱の低減効果などから、その使用が注目されている。本研究では、石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートの流動性および諸性状について検討した。主な結果として以下の所見を得た。

- (1)石灰石微粉末を用いたモルタルの流動特性の定量化。
- (2)モルタル試験結果を基にした石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートのスランプフローの予測と流動性の向上。
- (3)水粉体比を一定とした場合の石灰石微粉末混入による単位セメント量の減少にともなう終局断熱温度上昇量の低減。
- (4)石灰石微粉末はセメントの初期水和の促進に寄与する。

1. まえがき

高流動コンクリートは粉体を多量に用いるが、この粉体の一部として、不活性で発熱には寄与せず、高い流動性も得られる石灰石微粉末を用いることが注目されている。しかし、その調合と性状についての定量的な評価は明らかにされていない。そこで、本研究では石灰石微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートの調合設計方法を作成するためにモルタルの流動性に及ぼす石灰石微粉末の粉末度と使用量の影響を検討した。また、これを基に調合したコンクリートの諸性状を実験的に検討した。

2. モルタル試験

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。石灰石微粉末は、銘柄、粉末度の違う8種類を用いた。セメントおよび石灰石微粉末については、岡村ら¹⁾の提案するフレッシュ性状に関するペースト試験に準じて、拘束水比 β_p および変形係数 E_p を測定した。結果を表-2に示す。表中のTO、NF、TRは銘柄を表し、数字は粉末度の違いを表す。銘柄が同

一であれば、拘束水比および変形係数は粉末度にほぼ比例している。

2.2 試験方法

表-3に試験の要因と水準を示す。細骨材容積比 s/m (s : 細骨材容積, m : モルタル容積) を45%一定とし、水粉体比 W/P (W : 水の重量, P : 粉体重量) を25、30、35%の3水準、石灰石微粉末置換率 L/P (L : 混和材重量) を20、35、50%の3水準とした。また同一調合について高性能AE減水剤添加率 SP/P (SP : 混和剤重量) も3水準変化させた。本項では、これらについてフロー試験とロート試験を実施した。

モルタルの練り混ぜ方法は、JIS R 520「セメントの物理試験方法」に規定されているミキサーを用い、練り混ぜ水は、2回に分割して与えた。1次水 $W1$ の設定は、粉体の品質管理試験により得られるペーストの相対フロー面積比 ρ と水粉体容積比の直線関係における(図-1参照) $\rho = -3$ に対応する V_w/V_p (V_w : 水の容積, V_p : 粉体の容積) の値を x とし、 $W1 = x \times V_p$ により求めた。1バッチの練り混ぜ量は1.5リットルとし、混和剤添

表-1 使用材料

名称	記号	種類	備考
水	W	上水	比重1.0
セメント	C	普通 * 銘柄トシメント	比重3.16, 粉末度3260cm ² /g
混和材	L	石灰石微粉末	比重2.71~2.73 粉末度2700~19000cm ² /g
細骨材	S	山砂: 砕砂 =50:50	山砂: 表乾比重2.58, 吸水率1.39 砕砂: 表乾比重2.64, 吸水率1.97
混和剤	SP	高性能 AE減水剤	* リン酸系、比重1.05

表-2 粉体の物性値

粉体の種類	比重	粉末度 (cm ² /g)	拘束水比 β_p	変形係数 E_p	50% 平均 粒径(μ m)
L TO35	2.71	3530	0.674	0.055	30.4
L TO89	2.71	8170	1.168	0.157	6.7
L TO110	2.71	11000	1.345	0.160	-
L TO200	2.71	18870	1.861	0.253	2.4
L NF80	2.71	2930	0.695	0.057	32.5
L NF250	2.71	5800	0.740	0.066	18.8
L NF350	2.73	8830	0.779	0.085	7.9
L TR250	2.71	2720	-	-	49.8
C セメント	3.16	3260	1.024	0.061	-

* 技術研究所

加の効果が安定する時期を考慮して、練り混ぜ30分後の試料の採取を行うこととする。また、室温は 20 ± 1 とする。

フロー試験は、JIS R 5201に規定しているフローコーンに試料を天端まで満たした後に取り去り、振動を与えず広がったフローの最大の径とそれに直交する径の平均をフロー値とし、このフロー値を式(1)に代入して得られる相対フロー面積比 m を用いて評価する。ロート試験ではV字型のロートの下部の流出口(下部口3cm角)を塞ぎ、試料をロートの天端まで詰め、流出口を開放して開口した瞬間がロートの上部から見えるまでの時間をストップウォッチで計測し、その流下時間から式(2)で算定される相対ロート速度比 Rm を用いて評価する。

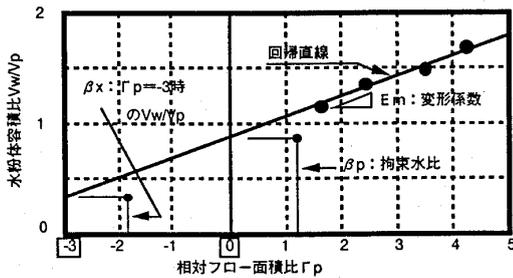
$$m = (F_m^2 - F_0^2) / F_0^2 \quad (1)$$

$$Rm = 10 / Tm \quad (2)$$

ここに、 F_m : モルタルフロー値 (mm)

F_0 : フローコーンの径 (100mm)

Tm : モルタルロート流下時間 (秒)



図一 拘束水比と変形係数

表一 3 モルタル試験の調査要因と水準

調査要因	水準
水粉体比 W/P(%)	25,30,35
石灰石微粉末置換率 L/P(%)	0,20,35,50
石灰石微粉末の種類	表2の8種類
高性能AE減水剤 SP/P(%)	3水準
粗骨材容積比 s/m(%)	45

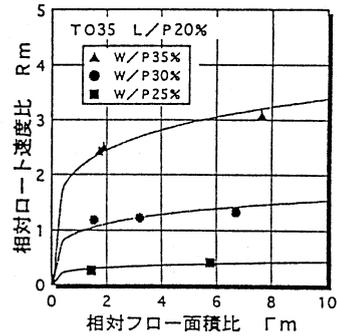
2.3 試験結果

水粉体比別の m と Rm の関係の一例を図一 2 に示す。石灰石微粉末の種類及び、置換率によっておおむね図一 3 の様な関係に集約できる。ここで、 m と Rm の関係は式(3)および式(4)で近似できると言われる²⁾。

$$Rm = A \cdot m^{0.2} \quad (\text{水粉体比一定}) \quad (3)$$

$$Rm = B \cdot m \quad (\text{SP添加率一定}) \quad (4)$$

石灰石微粉末の種類、W/P、L/Pごとに、試験結果を式(3)に近似して係数Aを求めた。実験を行った範囲内では、W/Pの増加に伴い係数Aも増加する。また、SP/Pを増加すると m の変化量に比べ Rm の変化量は小さい。



図一 2 水粉体比別のモルタル試験結果

よって、 m の変化はSP/Pに大きく依存し、 Rm の変化はW/Pに大きく依存すると考えられる。

図一 4 に、L/Pと係数Aの関係の一例(TO35)を示す。L/PおよびW/Pの増加に伴い、係数Aも増加しているが、W/Pにより大きく依存して変化していると考えられる。

図一 5 に m とSP/Pの関係の一例(TO35)を示す。両者の間には比例関係がみられ、個々に単回帰分析を行った結果、傾きはほぼ同じとなった。そこで傾きを平均化して一定とし、改めて回帰分析した結果が図中の直線である。よって、式(5)を定義することとした。

$$SP/P = a \cdot m + b \quad (5)$$

式(5)に示した傾き(a)は石灰石微粉末の種類の違いによる影響を受けて変化し、切片(b)はW/P、L/Pおよび、石灰石微粉末の種類各因子に影響を受けて変化すると考えられる。そこで、aおよびbに、それぞれ式(6)および式(7)の重回帰分析式を適用する。なお、石灰石微粉末の種類による影響は個々の特性値である拘束水比、変形係数で評価する。

$$a = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \quad (6)$$

$$b = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \quad (7)$$

ここで、 $a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_5$: 偏回帰係数

x_1 : 石灰石微粉末の拘束水比

x_2 : 石灰石微粉末の変形係数

x_3 : 水粉体比

x_4 : 石灰石微粉末置換率

次に、図一 6 にW/Pと係数Aの関係の一例(L/P=20%)を示す。水粉体比と係数Aの間には指数関数で表現される関係がみられるため、式(8)を定義する。図中の曲線は最小2乗法による分析結果によるものである。

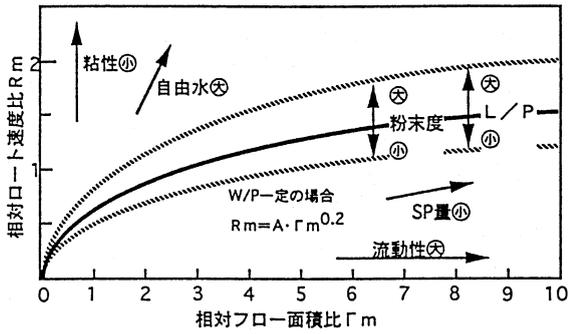


図-3 mとRmの関係

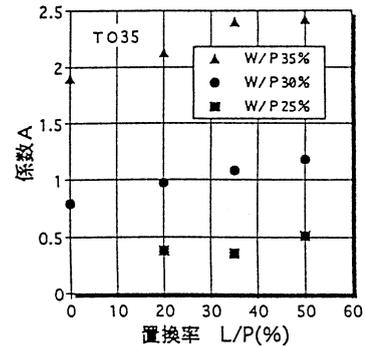


図-4 石灰石微粉末置換率と係数Aの関係

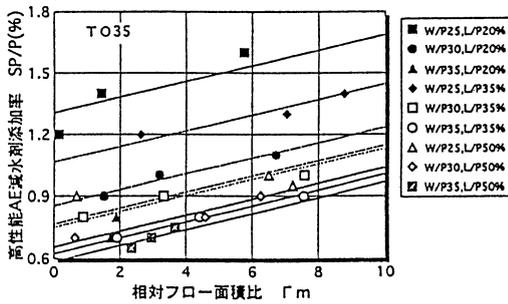


図-5 mとSP/Pの関係

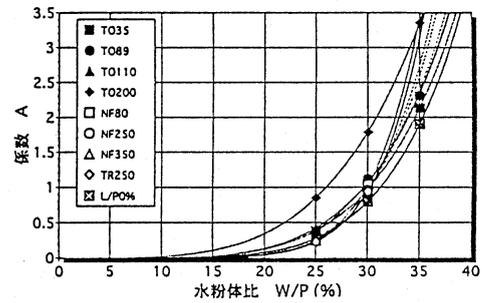


図-6 W/Pと係数Aの関係

$$A = e \cdot (W/P) \quad (8)$$

式(8)に示した および は、L/Pおよび石灰石微粉末の種類に影響されて変化すると考えられるため、 および についてそれぞれ式(9)および式(10)の重回帰分析式を考える。

$$= {}_1 \cdot X_1 + {}_2 \cdot X_2 + {}_3 \cdot X_4 + {}_4 \quad (9)$$

$$= {}_1 \cdot X_1 + {}_2 \cdot X_2 + {}_3 \cdot X_4 + {}_4 \quad (10)$$

ここで、 ${}_1 \sim {}_4$ 、 ${}_1 \sim {}_4$: 偏回帰係数

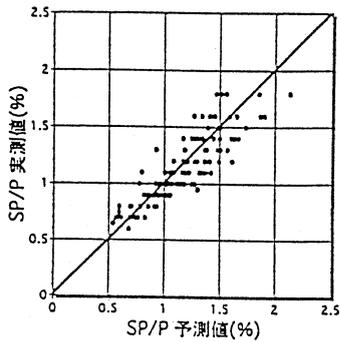
式(6)、式(7)、式(9)および、式(10)の重回帰分析結果を表-4に示す。これらの偏回帰係数と式(5)および式(8)を用いて、SP/Pと係数Aの予測ができる。

図-7および図-8にSP/P、係数Aの予測式を用いた予測値と実測値の関係を示す。予測値と実測値はほぼ合致しており、式(5)および式(8)の有効性が示された。

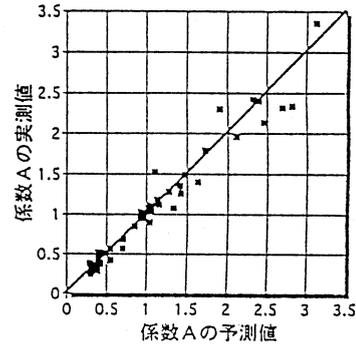
以上の検討により、石灰石微粉末を用いたモルタルのW/P、L/P、 ρ 、Ep、SP/Pにより mおよびRmまたはフロー値およびロート流下時間の予測が可能となった。

表-4 重回帰分析結果

		偏回帰係数	t 検定値
a 観測値7 重決定係数 R ² =0.7033977	切片: a ₃	-0.0049	0.8405
	拘束水比: x 1	0.0600	0.0219
	変形係数: x 2	0.0045	0.9323
b 観測値41 重決定係数 R ² =0.8234005	切片: b ₅	2.9139	18.2060
	拘束水比: x 1	-0.1421	-3.4907
	変形係数: x 2	-0.1466	-1.4055
	水粉体比: x 3	-0.0574	-11.2069
	石粉置換率: x 4	-0.0056	-3.5807
α 観測値17 重決定係数 R ² =0.7461922	切片: α ₄	-33.4539	-6.4486
	拘束水比: x 1	14.3202	1.0472
	変形係数: x 2	-38.8237	-0.4730
	石粉置換率: x 4	0.1997	3.0973
β 観測値17 重決定係数 R ² =0.7263456	切片: β ₄	9.6283	6.3634
	拘束水比: x 1	-3.9530	-0.9911
	変形係数: x 2	10.8078	0.4515
	石粉置換率: x 4	-0.0567	-3.0126



図一 7 SP/P の予測値と実測値



図一 8 係数 A の予測値と実測値

3. フレッシュコンクリート試験

3.1 使用材料および割合

W/P=30%を基準として、コンクリートのフレッシュ試験を実施した。コンクリートは、表一1に示す材料に粗骨材（碎石 2005、表乾比重 2.67、吸水率 0.84）を加えて製造した。また、コンクリートの割合は、高性能 AE 減水剤添加率を表一5に示す品質項目を満足するように調整し、表一6に示すように決定した。

3.2 試験結果

全割合のフレッシュ試験結果を表一7に、スランブフローの経時変化を図一9に示す。練り混ぜ完了後60分において、石灰石微粉末未混入の割合No.1ではスランブフロー値が増加し、石灰石微粉末を混入した割合の場合ではスランブフロー値が減少する。これは、石灰石微粉末の混入によって、SP/P が小さくなったためと考えられる。

経過時間 10分における、水粉体比が異なる割合No.8、No.10および、No.11のU₁ 充填時間、V₆₅ ロート流下時間および、スランブフロー50cm到達時間を、図一10に示

す。W/Pが小さくなると、全ての試験項目で値が増加し、粉体量の増加に伴い粘性が高くなる傾向を示した。

3.3 SP 添加量

表一5に示すフレッシュ性状の基準値を得る為に必要なSP添加量と、L/P、粉末度およびW/Pの関係を図一11に示す。石灰石微粉末の置換率が増加し、セメント量が減少するに伴い、SP添加量は減少した。また、石灰石微粉末の粉末度が大きくなるに伴い、SP添加量は増加した。さらに、W/Pが大きくなるに伴い、SP添加量は減少した。

表一 5 コンクリート試験項目

試験項目	規格値および備考
スランブフロー	65±5cm
50cm到達時間	-
V ₆₅ 漏斗流下時間	20秒以下
U ₁ 充填高さ	300mm以上
U ₁ 充填時間	-
空気量	4.5±1.0%
単位体積重量	-
コンクリート温度	20±3℃

表一 6 高流動コンクリートの割合

割合 No.	供試体名	石灰石微粉末 (L)の種類	Ls混入率 (L/(C+L)) (%)	水粉体比 (W/P) (%)	s/m	s/a	単位量 (1 m ³ あたり)						SP	AE	断熱温度上昇試験の実施
							(kg)			(ℓ)					
							W	C	L	S	G				
1	N	未混入	0	30.0	45	49.6	175	584	-	765	806	300	1.70	0.005	○
2	TO35-35	TO35	35	"	"	"	170	369	199	"	"	"	1.15	0.002	○
3	TO47-20	TO47	20	"	"	"	172	460	115	"	"	"	1.25	0.003	○
4	TO47-35		35	"	"	"	170	369	199	"	"	"	1.20	0.002	○
5	TO47-50		50	"	"	"	168	280	280	"	"	"	1.05	0.002	○
6	TO89-35	TO89	35	"	"	"	170	369	199	"	"	"	1.25	0.002	○
7	NF80-20	NF80	20	"	"	"	172	460	115	"	"	"	1.20	0.003	×
8	NF89-35		35	"	"	"	170	369	199	"	"	"	1.20	0.001	×
9	NF89-50		50	"	"	"	168	280	280	"	"	"	1.10	0.001	×
10	NF89-35-27.5		35	27.5	"	"	162	384	207	"	"	"	1.35	0.001	×
11	NF89-35-32.5		35	32.5	"	"	177	355	191	"	"	"	1.10	0.001	×

表 - 7 フレッシュコンクリートの試験結果

調査NO.	供試体名	時間	スランプ高 (cm)	50cm到達 (sec)	V ₆₅ (sec)	U1充填高さ (mm)	U1充填時間 (sec)	空気量 (%)	単位重量 (tf/m ³)	温度(°C)
1	N	10	66.5	6.4	11.7	359	19.7	5.1	2.33	21.4
		30	67.5	6.0	11.5	358	23.9	5.4	2.32	19.4
		60	69.5	5.9	13.7	359	22.2	5.4	2.32	18.9
2	TO35-35	10	65.5	4.1	9.2	358	16.6	5.5	2.29	21.4
		30	67.0	4.4	8.8	359	17.2	4.4	2.30	20.6
		60	67.0	4.8	10.0	359	16.2	5.1	2.28	19.4
3	TO47-20	10	65.5	5.7	14.6	360	20.4	4.3	2.33	22.2
		30	67.5	5.8	13.4	362	19.0	4.4	2.33	20.9
		60	64.5	6.1	16.0	362	21.8	4.9	2.32	19.5
4	TO47-35	10	66.5	4.7	10.0	357	19.5	3.6	2.33	21.9
		30	69.0	5.1	14.7	360	17.2	3.8	2.33	20.9
		60	67.5	5.3	12.9	357	20.1	4.1	2.33	19.0
5	TO47-50	10	63.0	5.0	15.2	353	19.0	4.6	2.30	20.6
		30	64.5	4.4	14.2	356	18.3	4.8	2.30	19.9
		60	60.0	6.1	13.4	353	20.5	4.9	2.31	18.6
6	TO89-35	10	67.0	4.0	9.1	359	15.0	5.2	2.30	19.9
		30	68.5	4.1	10.9	360	14.9	5.0	2.32	18.6
		60	66.5	5.0	10.3	360	14.9	5.2	2.31	18.0
7	NF80-20	10	63.0	6.7	9.9	360	16.3	5.4	2.29	21.2
		30	64.5	5.9	11.5	358	16.3	5.3	2.29	20.7
		60	61.0	5.8	12.8	348	18.2	5.4	2.30	19.8
8	NF80-35	10	66.0	5.0	11.5	358	17.9	4.2	2.32	22.9
		30	69.0	5.3	13.1	360	20.3	3.7	2.33	20.8
		60	69.0	5.6	14.3	358	23.4	3.9	2.33	19.1
9	NF80-50	10	67.0	4.8	8.4	360	16.0	5.1	2.29	20.3
		30	69.0	5.6	9.8	365	14.7	4.4	2.30	20.5
		60	68.5	5.6	10.1	360	15.7	4.6	2.31	19.0
10	NF80-35-27.5	10	66.0	6.5	17.3	358	23.6	4.2	2.33	19.8
		30	68.5	7.1	17.7	358	24.5	4.0	2.35	18.7
		60	67.0	6.9	19.9	356	32.5	4.0	2.34	17.9
11	NF80-35-32.5	10	66.5	3.3	6.5	361	12.6	3.7	2.32	19.9
		30	69.0	3.3	7.2	363	15.9	3.8	2.30	18.8
		60	67.5	3.2	8.3	359	15.3	3.9	2.31	17.4

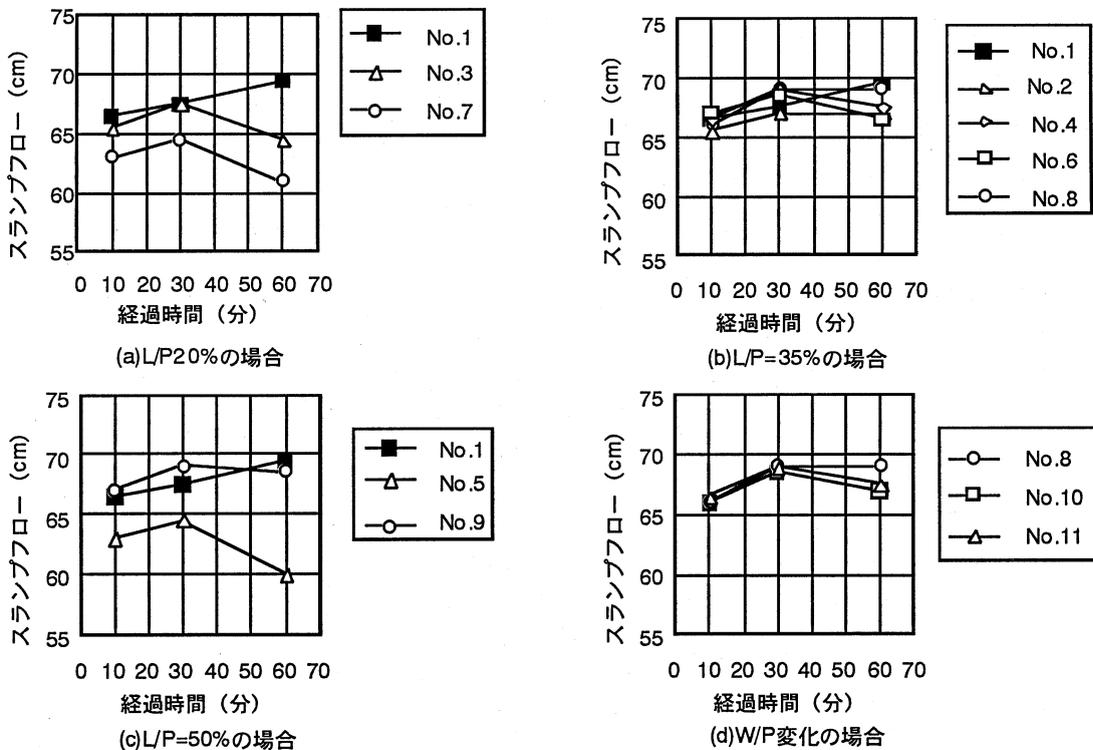


図 - 9 スランプフローの経時変化

3.4 モルタル試験から得られた流動性予測式の
コンクリートへの適用

谷口ら³⁾による式(11)および式(12)を用い、練り混ぜ終了30分後のコンクリートのスランブフロー値Fcをモルタルフロー値Fmに、コンクリートのV₆₅ロート流下時間Tcをモルタルロート流下時間Tmに置換し、それらの値を、2.3項で導いた流動性関係式(5)および式(8)に代入して得られたSP/PおよびRmの値と実験値との関係を図-12および図-13に示す。

$$F_m = (F_c - 12.9) / 0.20 \quad (11)$$

$$T_m = T_c \quad (12)$$

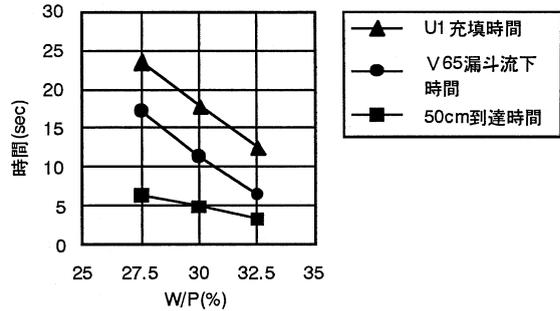


図 - 10 W/P とフレッシュ性状の関係

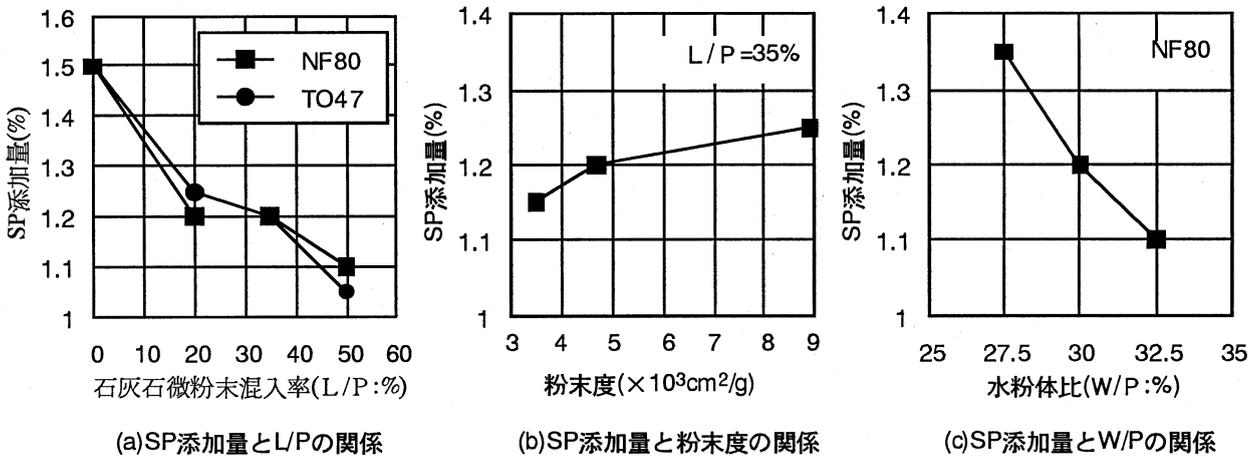


図 - 11 高性能AE減水剤添加率

図-12および図-13から、所定のスランブフローを得るためのSP添加量は、モルタルの試験結果をもとにある程度予測が可能といえる。しかし、Rmで間接的に表されるV₆₅ロート流下時間はばらつきが大きく、本実験の範囲ではモルタル試験結果をもとにした予測は困難であった。このばらつきは、モルタルと異なりコンクリート中には粗骨材が存在し、V₆₅ロート流下途中に発生する粗骨材相互のかみ合いがV₆₅ロート流下時間に影響を与えるためと考えられる。したがって、モルタル試験結果からコンクリートのVロート流下時間を予測するには、フレッシュコンクリートの粘性や骨材の粒度および粗骨材量などを加味して考慮する必要がある。

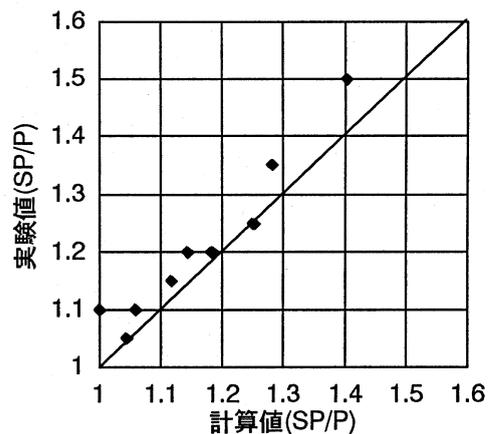


図 - 12 SP/P の予測値と実験の関係

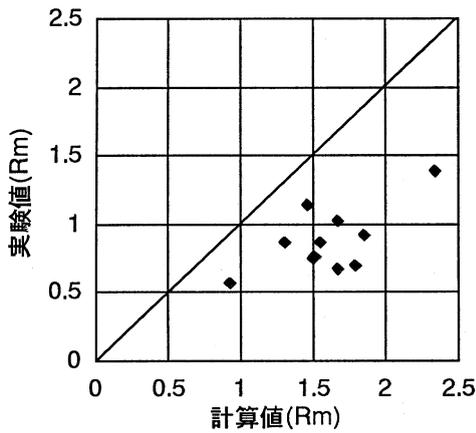


図 - 1 3 R m の予測値と実験の関係

4 . コンクリートの断熱温度上昇試験

石灰石微粉末混入率が異なる、調査No.1およびNo.3～No.5の断熱温度上昇量と材齢の関係を、図 - 1 4 に示す。石灰石微粉末の置換率が増加すれば、相対的に単位セメント量は減少し、終局断熱温度上昇量(Q)は抑制される。表 - 8 に示す各試料の終局断熱温度上昇量より、単位セメント量 100kgの減少に対し終局断熱温度上昇量は約 8 減少する結果が得られた。試験より得られた断熱温度上昇曲線を、式(13)を用いて近似し、得られた各係数の値を表 - 8 に示す。

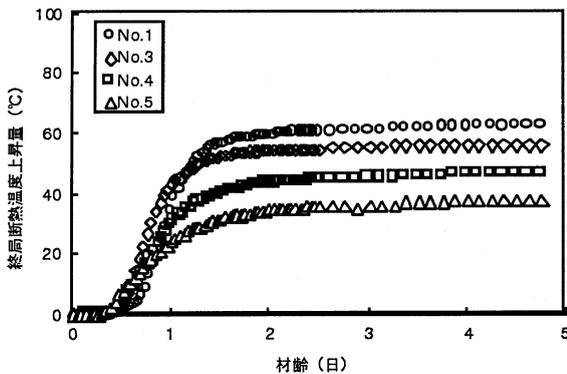


図 - 1 4 断熱温度試験結果

表 - 8 熱物性の近似値

調査	L/P (%)	C(kg/m ³)	Q _∞ (°C)	α	t ₀ (日)
No.1	0	584	63	2.76	0.553
No.3	20	460	56	2.74	0.495
No.4	35	369	47	1.86	0.374
No.5	50	280	39	1.51	0.343

$$Q = Q_{\infty} \{1 - e^{-\alpha(t-t_0)}\} \quad (13)$$

ここで、Q：断熱温度上昇量()
 α：発熱速度係数
 t：経過時間(日)
 t₀：遅延時間(日)

単位セメント量が減少すると発熱速度が小さくなる傾向が見られ、終局断熱温度上昇量も低下する。また、初期発熱の遅延が見られるのは高性能 AE 減水剤の使用による影響と思われる、SP/Pが減少すれば遅延時間も減少した。

ここで、石灰石微粉末がセメントの水和反応に与える影響を確認するために、水和発熱速度を算出する。鈴木らの研究⁴⁾に倣い、温度がT± となる前後2点と対象点(t,T)とを通過する二次曲線を求め、図 - 1 4 中に示す断熱温度上昇曲線の傾き $d T_{ad}/dt$ を温度Tにおける二次曲線の勾配とし、これを式(14)に代入して水和発熱速度 (H)を算出した。

$$H = \frac{cp}{C} \cdot \frac{dT_{ad}}{dt} \quad (14)$$

ここで、T=T₀+ T_{ad}
 T₀：打設温度()
 t：経過時間(日)
 c：コンクリートの平均比熱
 ρ：コンクリートの密度
 C：単位セメント量

図 - 1 5 に、式(14)より算出した水和発熱速度と材齢の関係を示す。いずれの試料においても1次ピークとみなせる水和発熱速度の急激な増加と減少が見られ、続いて2次ピークとみなせる水和発熱速度が若干増加する期間を経た後に、収束する傾向を示す。今回の試験結果では、石灰石微粉末を混入した場合には顕著な1次ピークが見られ、水和発熱速度の最大値は1次ピークが2次ピークより大きい。これに対して、石灰石微粉末を混入していない調査No.1では、水和発熱速度の最大値は1次ピークが2次ピークと比較して若干小さい。石灰石の主成分である炭酸カルシウムの微粉末がエーライトの初期水和速度を促進する⁵⁾と言われており、本試料においても石灰石微粉末の混入が水和の促進に寄与しているものと思われる、特に、初期水和を促進する結果が得られた。

また、L/P=35%の条件のもとで石灰石微粉末の粉末度を変化させた場合において、終局断熱温度上昇量および水和発熱速度の違いは見られなかった。

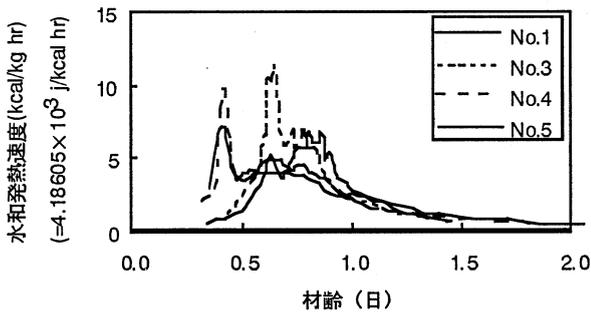


図 - 15 水和発熱速度と材齢の関係

5. コンクリートの圧縮強度試験

図 - 16 に NF80 と TO47 を用いたコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。石灰石微粉末の置換率が増加するに伴い、圧縮強度は小さくなった。セメントより粉末度の高い石灰石微粉末を粉体として混入すると、硬化コンクリートは緻密になるものの、石灰石微粉末は硬化後の強度にはほとんど寄与しないため、水セメント比が減少し強度は減少すると言える。

図 - 17 に L/P = 35% としたときの石灰石微粉末の粉末度と圧縮強度の関係を示す。粉末度による圧縮強度の違いは見られなかった。

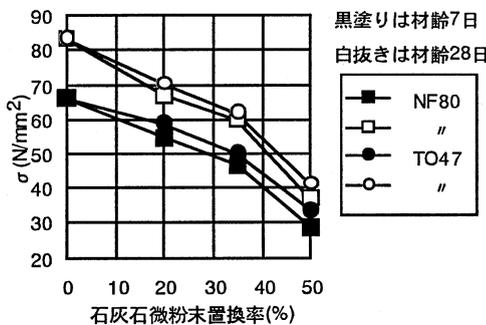


図 - 16 L/P と圧縮強度の関係

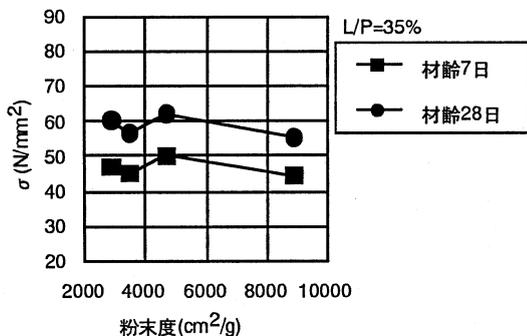


図 - 17 粉末度と圧縮強度の関係

6. あとがき

石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートの諸性状について実験を実施した結果、以下の所見が得られた。

- 1) 石灰石微粉末を用いたモルタルの流動特性は、高性能 AE 減水剤添加率、水粉体比、石灰石微粉末置換率、石灰石微粉末の拘束水比および変形係数を用いて定量化することが可能である。
- 2) 石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートのスランプフローを、式(5)、(11)を用いて予測することが可能である。
- 3) 石灰石微粉末は強度には寄与しないが、石灰石微粉末を混入することにより流動性が増し、高性能 AE 減水剤使用量は減少する。また、水粉体比を一定とした場合、単位セメント量が減少することにより、終局断熱温度上昇量も低減される。
- 4) 石灰石微粉末を混入した試料では、一時的に水和発熱速度が急激に増加する領域が存在し、石灰石微粉末がセメントの初期水和の促進に寄与していると思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、宇都宮大学工学部 柘田佳寛教授に貴重なご助言を頂いた。また、柘田研究室の皆様にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 岡村甫・前川宏一・小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、pp.24 ~ 59、1993
- 2) 小澤一雅・枝松良展・竹内博幸・岡村甫：モルタル試験による自己充填コンクリートに用いる粉体の評価、第48回セメント技術大会講演集、pp.344 ~ 349、1994
- 3) 谷口秀明・増田和機・牛島栄：自己充填コンクリートのポンプ圧送による品質変化、自己充填コンクリートセミナー論文報告集、pp.95 ~ 102、1997
- 4) 鈴木康範・辻幸和・前川宏一・岡村甫：コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化、土木学会論文集 第414号、Vol.12、pp.155 ~ 163、1990
- 5) 浅賀喜与志・久我比呂氏：粒度の異なる炭酸カルシウム添加がセメントの水和反応に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No.51、pp.20 ~ 25、1997