流動コンクリートの諸性質に及ぼす単位セメント量の影響[†]

松下 博通* 峰 祥彦** 徳光 善治*

Effect of Unit Cement Content on Properties of Superplasticized Concrete

by

Hiromichi MATSUSHITA

(Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

Yoshihiko MINE

(Student of Mastercourse Kyushu University, Fukuoka)

and Yoshiharu TOKUMITSU

(Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

In the field of civil engineering, the use of superplasticizer is expected to be applied practically to improve workability of low slump concrete. It is supposed that low slump concrete get smaller effect of superplasticizer or larger tendency of segregation because of its larger size of aggregate, smaller s/a or smaller unit cement content. But studies on the use of superplasticizer to low slump concrete are not enough, and especially reports about superplasticized concrete using aggregate of more than 40 mm size is scarce.

From such viewpoints, this study was aimed to clarify the influence of unit cement content on the effect of superplasticizer by examining the properties of superplasticized concrete in which slump of base concrete was 4 or 8 cm and cement content was varied.

The essential conclusions obtained are as follows.

(1) The effect of superplasticizer on consistency of concrete changed with unit cement content (or unit fine powder content) of base concrete, and the consistency increased with increasing cement content.

(2) There existed the minimum content of superplasticizer required to obtain its effect according to unit cement content, and it remarkably changed at about 260 kg/m³ of unit cement content (or 390 kg/m³ of fine powder content).

(3) There existed the maximum possible gain in slump obtained from the addition of superplasticizer, which changed with unit cement content of base concrete. Segregation was produced if slump higher than the maximum value was attempted without increasing fine powder content of concrete.

(4) The properties of superplasticized concrete of low slump except the above mentioned were almost the same as that of high slump. (Received July 20, 1982)

キー・ワード：流動コンクリート，配合，流動化効果，分離，単位セメント量

1 ま え が き

高性能減水剤のあと添加により流動性を高めたコンクリート，いわゆる流動コンクリートは，良好な硬練りコンクリートの品質を確保しながら，良好な施工性を有するものとして，近年，その利用が広まっている。

コンクリートの流動化の主目的は，建築の分野と土木の分野では多少異り，前者では，従来から多用されているスランブ 18～21 cm の軟練りコンクリートの単位水量を減じて，その品質を改善することになり，後者では，スランブ 2.5～8 cm の硬練りコンクリートのワーカビリティの増大をはかり，施工性を改善することにあると考えられる。

今日までの流動コンクリートの研究成果および施工

[†] 原稿受理 昭和57年7月20日

* 正 会 員 九州大学工学部 福岡市東区箱崎

** 九州大学大学院 福岡市東区箱崎

実績をみると、その多くは、粗骨材の最大寸法（以下、M. S. と記す）が 25 mm までの比較的軟練りのコンクリートに関するものが多く、M. S. 40 mm のコンクリートに関するものは少い。一方、イギリスセメントコンクリート協会²⁾は、流動コンクリートの配合上の注意点として、セメントや細骨材の 0.3 mm 以下の微粉部分が、M. S. 40 mm のコンクリートでは 400 kg/m³ 以上必要であり、細骨材の微粉量が少い場合には、その一部をボゾランや石粉などで置換することが良策であること、ベースコンクリートの細骨材率は、流動コンクリートの分離を防ぐため、通常のコンクリートの 4～5% 増加する必要があることなど報告している。我国においてもベースコンクリートの配合は、基本的には、イギリスの方法とほぼ同様の方法を講じなければならないことが明らかにされている。これらのことから、流動コンクリートにおける流動化剤の流動化効果および流動化後の分離防止のためには、セメントを含めた微粉量の影響が大きいことが予想される。したがって、M. S. 40 mm の硬練りコンクリートのように、単位セメント量や細骨材率が小さいため、微粉量の少いコンクリートでは、流動化剤のあと添加による流動化効果が小さかったり、あるいは、分離しやすくなることが考えられる。

以上の観点から、本研究は、微粉量を変化させるために単位セメント量を変化させた M. S. 40 mm でスランプ 4～8 cm のベースコンクリートに流動化剤をあと添加した流動化コンクリートの諸性質を調べることにより、流動化効果に及ぼす単位セメント量の影響

を明らかにしようとするものである。

2 実験概要

2・1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は海砂を、粗骨材は福岡県久山産角せん岩碎石を使用した。これらの物理試験結果は Table I に示す通りであり、細骨材には 0.3 mm 以下の微粉は 19% 含まれている。混和剤は、ベースコンクリートには AE 減水剤としてリグニンスルホン酸塩系のもの（ボゾリス No. 8 IMP）を、あと添加の流動化剤にはナフタリンスルホン酸塩系のもの（N₁: NP-10）、メラミンスルホン酸塩系のもの（N₂: NP-20）および N₁ に凝結遅延効果を加味したもの（N₁R: NP-10R）の 3 種を使用した。

2・2 コンクリートの配合

実験の計画の要因と水準を Table II に示す。単位セメント量（C）は、M. S. 40 mm の場合、マスコンクリートを想定した 240 kg/m³、一般土木用コンクリートを想定した 280 kg/m³、舗装コンクリートを想定した 320 kg/m³ の 3 種、M. S. 20 mm の場合、PC

Table II. Factors and levels of experimental plan.

Factor	Level	
Max size of agg. (mm)	40	20
Unit cement content (kg/m ³)	240, 280, 320	400
Superplasticizer	N ₁ , N ₂ , N ₁ R	N ₁ , N ₂
Slump (cm)	Base concrete	4, 8
	Superplasticized concrete	8
	4, 8, 12, 15	12, 15, 18

Table I. Properties of materials.

Sieve size (mm)		Percentage passing									F M	Specific gravity
		40	20	10	5	2 5	1 2	0 6	0 3	0 15		
Aggregate	Sea sand	—	—	—	100	95	79	50	19	1	2 56	2 59
	(4005)	100	50	20	0	—	—	—	—	—	7 30	2.98
	Crushed stone	—	100	40	0	—	—	—	—	—	6.60	2 98
(2005)												
Cement		(Ordinary portland cement), Specific surface (Blaine) 3 200(cm²/g)									3 17	

Table III. Mix proportions of base concrete

M. S. of agg. (mm)	C (kg/m ³)	Slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)			AE agent (×C %)	Under 0.3 mm (kg/m ³)
					W	S	G		
40	240	4	60.4	38	145	726	1368	0.25	378
		8	62.9	38	151	716	1361		376
	280	4	50.7	36	142	680	1392		409
		8	52.9	36	148	675	1380		408
	320	4	43.8	35	140	644	1402		442
		8	45.8	35	146	639	1397		441
20	400	8	39.5	41	158	718	1180		536

用コンクリートを想定した 400 kg/m³ の 1 種とした。ベースコンクリートのスランプは 4 cm と 8 cm の 2 種である。

ベースコンクリートの配合は、Table II に示した水準から、試験的に求め、Table III のように決定した。ここで、細骨材率は、あくまでもベースコンクリートのワーカビリティが良好になるようにして定めたものである。従来の流動コンクリートの配合に関する報告では、細骨材率は、流動化後のコンクリートのスランプにより定まるが、このスランプが 15 cm 以下では、流動化による細骨材率の補正の必要はないとされている。本研究では、流動化後のスランプが 15 cm 程度までであり、また、研究目的が、流動化効果に及ぼす微粉量の影響を調べることであり、そのために単位セメント量を変化させているため、流動化後のコンクリートの細骨材率はベースコンクリートの細骨材率と同一とした。なお、コンクリート中に含まれる 0.3 mm 以下の微粉量を Table III に合わせて示す。

2・3 コンクリートの製造と試験方法

コンクリートの製造は 100 l の可傾式ミキサーを用いた。ベースコンクリートは全材料投入後 3 分間練り混ぜたのち、スランプ、空気量、ブリージング、凝結の各試験を実施するとともに、強度試験用供試体を作製した。流動コンクリートは、ベースコンクリートの打設後 20 分間ミキサー内にコンクリートを静置したのち、流動化剤を添加し、2 分間の再練り混ぜを実施して、同様の試験を実施した。なお、打設時のコンクリート温度はすべて 10～13℃であった。

強度試験には、M. S. 40 mm のコンクリートでは $\phi 15 \times 30$ cm, M. S. 20 mm のものでは $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を用いた。スランプ、空気量、ブリージングの各試験はすべて JIS に従い、凝結試験は AS TM によるプロクター針貫入抵抗、静弾性係数は AS TM によるワイヤストレーンゲージを用いた方法により行った。

3 実験結果および考察

Table IV に実験結果の一覧を示す。

3・1 流動化効果

Table IV. Experimental results.

C (kg/ m³)	SP	Slump(cm)		SP content (×C %)	Slump (cm)	Air (%)	Experimental values								
		Base	SP				Final bleed (%) (cc/cm³)		Setting time (h-m) Initial Final		Comp. streng. (kg/cm²) [7 days] [28 days]		Tens streng (kg/cm²)	Modulus of elasticity (×10⁹kg/ cm²)	
240	N ₁	4	—	0	3 5	3 4	5 34	0 16			168	292	25 6	2 58	
			8	1.00	3.5→7 5	3.4→2.3	7 13	0 21			259	334	26 6	2 80	
			10	1.08	3.5→10 0	3 8→2 9	6 57	0 19			236	323	26 1	2 80	
			12	1.15	4 0→12 0	3 4→2 2	7 58	0 21			208	250	27 4	2 30	
		8	—	0	8 0	3 5					177	266			
			12	1 05	8 0→11 0	3 5→2 5					180	273			
		15	1 26	8 0→15 0	3 5→2 3					133	201				
280	N ₁	4	—	0	4 0	4 5	4 35	0 08	8-25	10-35	239	361	28 6	3 14	
			8	0 85	5 0→8 5	3 5→2 7	6 02	0 16	8-50	10-35	226	398	34 6	2 89	
			10	0 90	5 0→10 0	4 0→3 3	6 25	0 17	10-00	12-00	221	385	33 3	2 86	
			12	1 10	5 0→12 0	4 2→2 5	6 34	0 18	12-00	13-55	196	401	34 9	3 05	
		8	—	0	7 5	4 2	4 68	0 13	8-20	10-35	240	302			
			12	0 90	7 0→12 0	4 2→2 8	5.08	0 15			234	314			
			15	1 10	7.0→15.0	4 2→2 6	5 59	0 17	12-20	14-40	220	328			
			N ₂	4	10	1 41	4 5→10 0	3 8→3 5	3 91	0 11	12-00	15-25	304	383	
	8	15		1.41	7 5→15 0	3 8→2 9	4 63	0 14	16-40	20-50	264	355			
	N ₁ R	4		10	0.95	4 0→11 0	3 8→2 7	7 53	0 22	16-25	19-10	298	383		
		8		15	0 90	8 5→15 5	3 8→3 1	6 05	0 16			246	328		
	320	N ₁	—	0	3 5	3.8	2 82	0 08	6-50	9-35	344	418	30.1		
4			8	0 49	3.5→7 0	3 8→2 8					363	490	30 5		
10			0 55	4 0→9 0	4 1→3 1	3 23	0 08	9-10	11-35	388	455	30 4			
N ₂		4	10	0 96	4 0→9.0	4 1→4 0			8-55	11-40	360	455	32 1		
N ₁ R	4	10	0 53	4 0→10.0	4 1→2.7	3 31	0.10	15-10	18-30	350	463	30 2			
400	N ₁	—	0	7.5	5 0					382	483	36.4	3 48		
		8	12	0 33	8 5→12.0	5 4→4 2					384	502	32 5	3 42	
		15	0.40	7 5→15.0	5.0→4 5					403	535	31 1			
		18	0.50	8 5→17 0	5 4→4 8					403	507	31 7	3 54		
	N ₂	12	0 70	7 0→12 0	4 9→3 9					429	579				
		8	15	0 80	7 0→15 0	4 4→4 1				376	513		3.61		
		18	0 90	7 0→19 0	4 4→4 0					397	546

Fig. 1. The effect of superplasticizer.

Fig. 1 に流動化剤 (N_1) 添加量とスランプの関係を示す。プロット点に S を付したものは肉眼観察で明らかに分離が認められたものを示す。

従来の研究報告に比べて、流動化剤添加量に対してスランプ増大量が小さい傾向が見られるが、これはコンクリート温度が影響しているものと考えられる⁶⁾。

添加量とスランプの関係は、2本の直線で近似される傾向を示している。すなわち、流動化剤の添加量が小さくスランプの増大がほとんど期待できない。図中で破線で示した領域と、流動化剤添加量に比例してスランプが増大する。図中で実線で示した領域がある。流動化剤の添加による流動化効果が認められない領域は、単位セメント量が小さいものほど広がっており、これらのことから、流動化剤添加量にはそれ以上でなければ流動化効果が認められないという最低添加量が存在し、それが単位セメント量(あるいは単位微粉量)により異なるものと考えられる。いま、単位セメント量

に対する流動化剤の最低必要添加量を求めると、Fig. 2 に示す通りとなる。これより、流動化効果を得るための流動化剤の最低必要添加量は、ベースコンクリートのスランプが 4 cm であっても、8 cm であっても差異は認められず、単位セメント量が小さくなるに従ってかなり急激に大きくなっており、単位セメント量 240 kg/m^3 では $0.85 \times C\%$ 程度まで達している。したがって、良好な流動コンクリートを得るための最低の単位セメント量(あるいは最低微粉量)が存在するものと考えられる。

つぎに、Fig. 1 において実線の傾きで示される流動化剤の添加量に対するスランプ増大量の関係には、ベースコンクリートのスランプの差異による影響はほとんど見られず、単位セメント量により変化し、これが大きいほど流動化効果も大きくなっている。但し、単位セメント量 240 kg/m^3 のものについては傾きが大きくなっているが、これは流動化剤添加量が 1.1% を越えるコンクリートが分離しており、見かけ上スランプが大きくてためと考えられる。これより、スランプ増大量に対する流動化剤添加量も、単位セメント量(あるいは単位微粉量)の影響を受けるものと考えられる。また、Fig. 1 より推定される最大可能スランプ増大量を求めると、単位セメント量により異なり、 320 kg/m^3 以上では 8 cm 以上、 280 kg/m^3 では 7~8 cm、 240 kg/m^3 では 5~6 cm である。

以上の二点より、良好な流動コンクリートを得るためには、ある一定量以上の単位セメント量(あるいは単位微粉量)が必要であり、また、その一定量以上の単位セメント量の場合でも比較的これが少ない場合には、分離防止という面から最大可能スランプ増大量が存在することが明らかである。しかし、一般的な土木用コンクリートの範囲内では、ワーカビリティの点に関しての問題はないといえよう。

なお今回、Table II に示す実験とは別に、単位セメント量 240 kg/m^3 のものに碎石微粉末 (0.15 mm 以下、ブレーン比表面積 $2440 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、比重 3.02) を加えたコンクリートの実験を行ってみたが、一部で最低必要添加量の減少が見られたものの、微粉量の増加によるベースコンクリートのスランプ低下が大きく、総体的には良好な結果は得られなかった。このことから、微粉についてはその形状等の物性の選定も重要であることが示唆された。

以上はすべて流動化剤 N_1 に関する結果であるが、他 2 種の流動化剤 N_2 、 N_1R を添加したコンクリートについても、 N_2 における化学的組成の違いに起因する添加量の絶対量の違いを除いては、ほぼ同様の結果であった。

3・2 空気量

Fig. 2. The relation between unit cement content and minimum superplasticizer content required.

Fig. 3. The change of air content by superplasticizing.

Fig. 3 にベースコンクリートの空気量と流動化後のコンクリートの空気量の関係を示す。空気量の変化には、ベースコンクリートのスランプ、単位セメント量、使用流動化剤の違いによる明確な傾向は認められず、スランプ増大に伴いわずかず減少する傾向があり、全般的に1%前後の減少となっている。このことから、流動コンクリートの耐久性はベースコンクリートに比較して低下することも予想され、注意が必要である。

3.3 ブリージング

ブリージング試験の測定結果の一例として、単位セメント量 280 kg/m³ の場合のブリージング率の経時変化曲線を Fig. 4 に示す。流動化剤添加により最終ブリージングが増加するほか、打設後2時間前後までのブリージング速度も増大する傾向が認められ、この傾向はすべての配合について同様であった。

Fig. 5. The relation between slump and final rate of bleeding.

Fig. 4. An example of result of test for bleeding (unit cement content C=280 kg/m³).

Fig. 5 は流動化後のスランプと最終ブリージング率の関係を示したものであるが、最終ブリージング率増加の傾向はセメント量が少いほど大きくなっている。

3.4 凝結時間

Fig. 6 はプロクター針貫入抵抗値の時間的変化を示したものであるが貫入抵抗値の対数と経過時間の間には直線関係があるといえる。流動化剤添加量の増加に伴い直線は右へ移動しているが、その傾きはほとんど変わらない。すなわち、流動化剤添加により凝結は遅延されるが、その始発から終結までの時間は変わらないといえる。N₂ を使用した場合も同様であるが、遅延の割合が N₁ に比べて大きくなっている。

Fig. 6. Results of test for setting time by penetration resistance.

Fig. 7 は流動化後のスランプと凝結終結時間の関係を示したものである。流動化剤が N₁ の場合、これらの関係は単位セメント量やベースコンクリートのスランプに関係なく、ほぼ一本の直線とみなされ、同一スランプで比較した場合には流動化添加による凝結時間の変化はほとんど見られない。流動化剤が N₂ および N₁R の場合、N₁ に比べて3~6時間遅延されている。

Fig. 7. The relation between slump and final setting time.

3・5 圧縮強度

Fig. 8, 9 にベースコンクリートの圧縮強度と流動化後のコンクリートの圧縮強度の関係を、それぞれ材令 7 日および 28 日について示す。従来から言われているように流動化後のコンクリートの強度はベースコンクリートの水セメント比により支配されており、同一スランプで比較した場合には流動コンクリートの方が強度が大きい。図中で S を付したものは、Fig. 1 と同様に肉眼観察により明らかに分離が認められたコンクリートであり、分離による強度低下が見られる。Fig. 8 と 9 を比較すると、いずれもほとんどの流動コンクリートの強度がベースコンクリートのそれを上回っているが、その割合は 7 日強度の方が小さく、流動化剤添加による強度発現の遅れがその原因として考えられる。なお、強度特性について使用流動化剤の違いによる影響はほとんど見られなかった。

Fig. 8 The change of compressive strength by superplasticizing (age; 7 days).

Fig. 9. The change of compressive strength by superplasticizing (age; 28 days).

以上により、流動化剤添加によりコンクリートが分離した場合には強度が低下することから、260 kg/m³ 前後のある一定量の最低必要セメント量（あるいは微粉量）が存在し、単位セメント量 240 kg/m³（単位微粉量 380 kg/m³）は、良好な流動コンクリートを得るためには過少であるといえる。

3・6 引張強度

Fig. 10 に圧縮強度と引張強度の関係を示す。これらの関係には流動化剤添加による影響は認められず、流動化剤添加により圧縮強度が変化した場合には、それに対応して引張強度も同様に変化するとはいえる。

Fig. 10. The relation between compressive strength and tensile strength (age; 28 days).

3・7 静弾性係数

Fig. 11 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中の破線は土木学会の基準を、鎖線は ACI の基準を表している。引張強度の場合と同様に、これらの関係にも流動化剤添加による影響は認められない。よって流動コンクリートについても、従来のコンクリートと同様な方法で、圧縮強度から弾性係数を推定することが可能であると考えられる。

Fig. 11. The relation between compressive strength and elastic modulus (age; 28 days).

4 ま と め

M. S. 40 mm の骨材を用いて、単位セメント量を変化させ、微粉量が流動コンクリートの流動化効果およびその諸性質に及ぼす影響を調べた結果、次のようなことが明らかとなった。

(1) 流動化剤添加によるコンクリートの流動化効果は、一般土木用硬練りコンクリートの範囲内では、ベースコンクリートの単位セメント量、あるいは単位微粉量に大きく影響され、これが大きいほど流動化効果が大きい。

(2) 流動化剤添加による流動化効果を得るためには、単位セメント量（微粉量）に応じた、流動化剤の最低必要添加量が存在し、それは単位セメント量 260 kg/m³（単位微粉量では 390 kg/m³）前後で大きく変化する。

(3) 流動化剤添加により得られる最大可能スランプ増大量は、単位セメント量により異なり、320 kg/m³ 以上では 8 cm 以上、280 kg/m³ では 7~8 cm、240 kg/m³ では 5~6 cm であり、微粉量を増すことなしにこれら以上のスランプ増大量を得ようとする場合に

は、コンクリートに分離が生じる。

(4) 流動化剤添加により空気量は全般に約 1% 減少する。よって、流動コンクリートの耐久性はベースコンクリートのそれに比べて低下することが予想され、注意が必要である。

(5) 流動化剤添加量が多いほどブリージングは増大し、その傾向はセメント量が少いほど大きい。

(6) 流動化剤添加により凝結は遅延されるが、その始発から終結までの時間は変わらない。

(7) 分離のない流動コンクリートは、ベースコンクリートと同等以上の強度を有しているが、材令 7 日までの若材令においては若干の強度発現の遅れが見られる。

(8) 圧縮強度と引張強度および弾性係数の関係は、流動化添加剤添加による影響をほとんど受けない。

本実験では、流動化効果に影響を及ぼす微粉としていかなる粒径のものを考慮すべきであるかについては明らかにされておらず、現在検討中である。

最後に、本実験に際して九州大学土木実験室の各位に、多大の労を頂いたことを記し、謝意を表する。

(昭和57年2月28日 土木学会西部支部研究発表会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 高性能減水剤の応用, コンクリート工学, **18**, No. 7 (1980).
- 2) Cement and Concrete Association, Superplasticizing Admixtures, January (1976).
- 3) 日本建築学会編, “流動化コンクリートの技術の現状” (1979).
- 4) 西林新蔵, 矢村 潔, 吉野 公, 第8回セメント・コンクリート研究討論会要旨集, p. 27 (1981).
- 5) 武田一久, 建築技術, No. 317, p. 79 (1978).
- 6) 岸谷孝一, 橘高 章, 児玉和巳, 福馬直昭, 中川 脩, セメント技術年報, **32**, 335 (1978).