

コンクリートの強度およびコンシステンシー に及ぼす骨材粒度の影響

正員 北海道大学工学部 教授 工博 横 道 英 雄

正員 北海道大学工学部

松 井 司

I. 緒 言

最近鉄筋コンクリートおよび PS コンクリートの発達に伴ない、高強度コンクリートに対する要求が大となつてきた。高強度コンクリートを得るためには、一般に単位セメント量を多くし、かつ、水セメント比を小さくすることが必要である。しかし、あまり単位セメントを多くすることは経済的に高くつくばかりでなく、乾燥収縮その他いろいろ悪影響を及ぼすものである。

現在、材齢 28 日の圧縮強度 500 kg/cm^2 を得るに必要な単位セメント量は、ほぼそれと同じ数値に相当する 500 kg/m^3 を必要であるとされている。しかし、ドイツでは単位セメント量 $300 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ で 28 日圧縮強度を $350 \sim 600 \text{ kg/cm}^2$ を出している。これはいろいろ原因があると思われるが、その一つに細骨材および細骨材を含めた全骨材の粒度が日本の土木学会コンクリート標準示方書に定められている骨材の程度と多分に相違しているためと思われる。

この点から本実験は、ドイツ規格を参考とし、5 種類の粒度曲線を選び、これにつき単位セメント量を 300, 350, 400 および 450 kg/m^3 の 4 種に変化させ、それぞれについて水セメント比を硬練りコンクリートを主体として 3~4 種のものを製作し、ワーカビリティ、圧縮強度、引張強度試験を行い、粒度を調整することによって、高強度のコンクリートを得られるか、また、高強度を得るためにはいかなる粒度曲線が良いかを確かめるために行つたものである。

II. 実験計画

(1) 骨材の粒度

ドイツでは DIN (ドイツ工業規格), RBB (ドイツ道路学会規格) によつて、細骨材の粒度 (図-1) と細骨材と粗骨材とを含めた全骨材の粒度 (図-2) を最良区域およびそれに準ずる範囲とに規定されていて、コンクリートの使用箇所の重要度によつて、骨材の粒度範囲を厳格にした

り、緩和したりしている。

骨材 (図-1), および粗骨材ではその最大寸法によつて、粒度範囲が規定され、この粒度範囲に納まることが要求されており、全骨材に対する粒度曲線は別に定められていない。ただ「絶対細骨材率および細骨材率は所定のウ

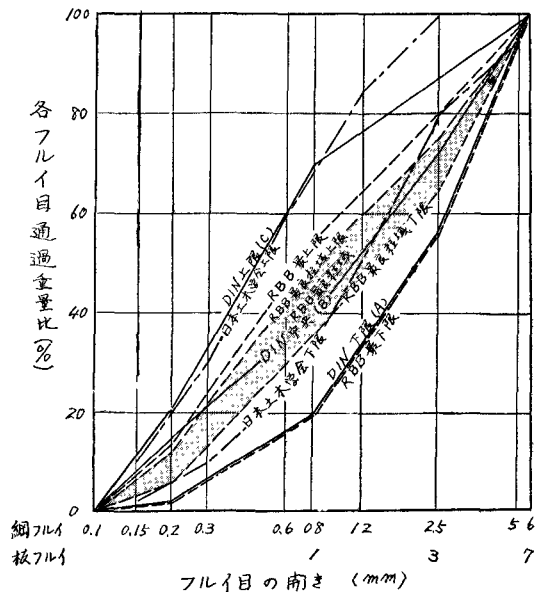


図-1 細骨材粒度

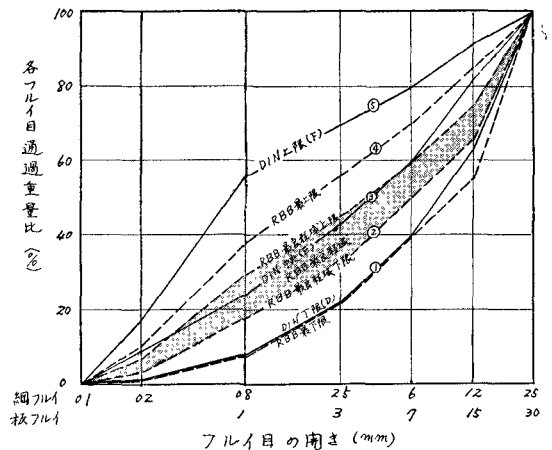


図-2 全骨材粒度

表-1 骨材の粒度 (各フルイ通過量 %)

フルイの開き 粒度番号		連 続 粒 度										不 連 続 粒 度		
		1		2		3		4		5		2G	3G	4G
		規格	実験	規格	実験	規格	実験	規格	実験	規格	実験			
網 フルイ	板 フルイ													
25	30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
12	15	63	63	65	65	82	82	85	85	92	92	52	74	78
6	7	40	40	50	50	60	60	70	70	80	80			
5			36.4		46.5		56.3		67.2		78	32.0	43.0	56.0
2.5	3	22	22.0	32	32.0	43	43.0	56	56.0	70	70.0	32.0	43.0	56.0
1.2			13.1		23.0		32.1		54.7		59.5	23.0	32.1	54.7
0.8	1	8	9.0	18	18.0	24	25.1	38	36.4	56	49.8	18.0	25.1	36.4
0.6			6.9		15.2		21.9		32.2		44.7	15.2	21.9	32.2
0.3			2.6		8.8		12.5		19.4		28.2	8.8	12.5	19.4
0.2		1	1.6	3	5.0	9	7.2	10	11.9	17	16.9	5.0	7.2	11.9
0.1			0.42		2.6		4.1		6.6		10.1	2.6	4.1	6.6

オーカビリチーが得られる範囲内で単位水量が最小となるよう試験によつて定める」と規定されているだけである。所定のウオーカビリチーが得られ単位水量が最小となる細骨材率を使用した場合にコンクリートの強度が果して最大となるかどうかはわからない。また、ドイツでは単位セメント量 $300 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ で圧縮強度が $350 \sim 600 \text{ kg/cm}^2$ も出していることを考え合わせて、ドイツ示方書の骨材粒度に合わせて骨材粒度を調整し、コンクリートの強度試験を行うことにした。

実験に使用した骨材の粒度は 図-2 中の数字を入れた 5本の曲線とし、数字はその粒度番号とした。なお、その詳細は表-1にも示した。

適当なある粒径のものが脱落している不連続粒度は強度が大きくなるということが言われているので、上記の粒度の他に $2.5 \sim 5 \text{ mm}$ の粒度が欠けているものについて行つてみた。その粒度は表-1に示すとおりで、不連続粒度 2G は $0 \sim 2.5 \text{ mm}$ までは連続粒度 2と同じであるが、 $2.5 \sim 5 \text{ mm}$ はなく、 5 mm 以上は連続粒度 2の 5 mm 以上と相似になるように比例配合した。不連続粒度 3G, 4G は同様に連続粒度 3, 4 から $2.5 \sim 5 \text{ mm}$ が脱落したものである。

(2) 配 合

コンクリートの配合は、連続粒度のそれぞれについて、

単位セメント量 $300, 350, 400$ および 450 kg/m^3 とし、水セメント比は単位セメント量 300 kg/m^3 のとき $40, 45$ および 50% , 350 kg/m^3 のとき $35, 40$ および 45% , 400 および 450 kg/m^3 のとき $30, 35, 40$ および 45% とし、ほぼ硬練りコンクリートを主体とすることにした。連続粒度 4 および 5 については、上記の配合ではウオーカビリチーを得られないので、さらに、水セメント比の大きいものについて行つた。

不連続粒度のものについては単位セメント量 400 kg/m^3 のみについて行い、水セメント比 $30, 35, 40$ および 45% とした。

III. 実 験 材 料

(1) セメント

セメントは日本セメント上磯工場製の普通ポルトランドセメントを使用した。その試験結果は表-2に示すとおりである。

(2) 骨 材

実験に使用した砂は幌別産および錦岡産のもので、砂利は富川産のものを使用した。砂はすべて 2.5 mm のフルイでフルイ分け、 2.5 mm 以下のものについて、幌別産および錦岡産とを適当に組合わせて指定された粒度になるように混合した。 $5 \sim 2.5 \text{ mm}$ のものについては、幌

表-2 セメント試験成績

試験項目	比重	粉 末 度		凝 結 試 験			安定性 フロー (浸水法)	強度試験 kg/cm ²	強度試験					
		ブレーション (cm ² /gr)	88μ 残分 (%)	水量 (%)	始発 時-分	終 結 時-分			曲 げ 強 度			圧 縮 強 度		
									3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
試験結果	3.14	3,210	2.9	26.8	2-19	3-19	良	228	31.4	52.4	72.5	116	220	398
規 格	>3.05	>2,300	<10		>1-00	<10-00	良		>12	>25	>36	>45	>90	>200

表-3 骨材試験成績

骨 材	比 重	吸 水 率 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	空 隙 率 (%)	洗い試験 (%)	有機不純 物 試 験	粗 粒 率
幌 別 産 砂	2.72	0.70	1,878	30.9	0.35	標準色以下	2.95
錦 岡 産 砂	2.72	0.96	1,825	32.9	1.9	同 上	1.96
富川産砂利	2.73	0.72	1,800	34.1	—	—	—

表-4 骨材粒度 (各フルイを通過する量 %)

骨 材	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm
幌 別 産 砂	100	59.6	31.4	11.9	1.9
錦 岡 産 砂	100	85.0	64.0	40.3	14.4

別産の荒い砂から採取した。砂利はフルイおよび粒度の関係から 25 mm の網フルイ、15 mm の板フルイ (網フルイ 12 mm に相当) および 5 mm の網フルイでフルイ分け、25~12 および 12~5 mm の 2 種を用いた。

骨材の試験結果は表-3、表-4のとおりである。また、全骨材についての粒度は表-1に示すとおりである。

IV. 実験方法

(1) 供試体の製作

コンクリートの製作は可傾式バッチミキサーを使用し、1種類の配合をバッチに作った。

供試体は $\phi 15 \times 30$ cm の標準供試体を使用し、1バッチ分 6 本製作した。その中 3 本は圧縮強度試験用に、残り 3 本は引張強さ係数試験用とした。各バッチごとにスランブを測定し、型枠えのコンクリート打込みはスランブ 7.5 cm 以下のものについては棒状内部振動機で、スランブ 7.5 cm 以上のものについては突棒による打込みを行った。脱型は成型後 1 日で行い、その後材齢 28 日まで $21 \pm 3^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。

(2) コンシステンシーの測定

コンシステンシーの測定はスランブ試験によつたが、硬練りコンクリートの測定には不適當である。ドイツ規格による貫入試験方法は硬練りコンクリートに適していると思われるので、貫入試験も行った。この貫入試験の器具は図-3に示すように、30 cm 立方の容器にコンクリートを打込み、その上に器具を乗せ、コンクリート上面より 20 cm 高さから重量 15 kg の a の部分を自然落下させ、コンクリートに貫入した深さが

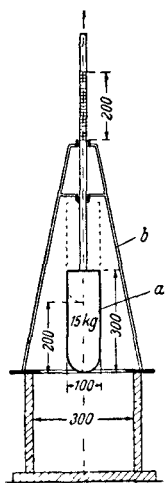


図-3
貫入試験装置

コンクリートのコンシステンシーを示すものである。この実験で、あまり軟らかいコンクリートには実施しなかつた。

(3) 強度試験

供試体はすべて材齢 28 日で強度試験を行つた。

圧縮強度試験に供する供試体は試験前に硫黄でキャッピングを行つた。圧縮強度試験は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」により行い、引張強さ係数試験は JIS A 1113「コンクリートの引張強さ係数試験方法」によつた。

V. 実験結果および考察

(1) コンシステンシー試験結果

スランブ試験の結果は表-5に、貫入試験の結果は表-6に示すとおりである。

単位セメント量、水セメント比の同じものでは、連続粒度 1 より 5 になるに従つてスランブは小さくなり、コンクリートは硬くなる傾向がある。粒度 1 ではコンクリートはややハーシュ気味で、スランブコーンを引抜くときコンクリートは崩れ落ちるような傾向にあつた。粒度 2 および 3 は、ウオーカブルなコンクリートであるが、スランブは粒度 3 が粒度 2 よりも小さくなり、コンクリートは硬めとなつた。同じウオーカビリチーを得るにはほぼ水・セメント比を約 5% 増す必要がある。粒度 4 および 5 について、水・セメント比の小さいものは湿つた切込砂利を練つたようなもので、振動機をかけても締固めのできないようなものができた。粒度 2 と同じウオーカビリチーを得るには粒度 4 で、水・セメント比にしてほぼ 10~15% 大きくしなければならず、粒度 5 については 20% 以上も大きくしなければならないので、粒度 4 および 5 は実用上不適である。

不連続粒度については、それぞれに相当する連続粒度にくらべやや硬めのコンクリートとなつた。

表-5 スランプ試験結果 (cm)

単位セメント量 kg/m ³	水・セメント比 %	連 続 粒 度					不 連 続 粒 度		
		1	2	3	4	5	2G	3G	4G
300	40	0.7	0.4	0.2	0				
	45	2.5	1.5	0.4	0				
	50	16.0	15.2	1.0	0	0			
	55				0.6				
	60				4	0			
	65					0.1			
350	35	0.2	0.5	0.1	0				
	40	0.7	0.6	0.2	0				
	45	14.5	7	0.6	0	0			
	50				2.2				
	55				5.4	0			
	60					0			
400	30	0.2	0	0	0		0	0	
	35	1.5	0.4	0	0		0.3	0	
	40	12.2	14.0	2.8	0		4.2	0.5	0
	45	19.7	20.4	16.2	0.3	0	18	17.8	0.5
	50				15	0			2.6
	55					0.5			
450	30	4.0	0.3	0	0				
	35	5.1	4	0.2	0				
	40	16.8	20.1	8	0.3	0			
	45			20	6.2	0.1			
						2.4			
	50								

表-6 貫入試験結果 (cm)

単位セメント量 kg/m ³	水・セメント比 %	連 続 粒 度					不 連 続 粒 度		
		1	2	3	4	5	2G	3G	4G
300	40	2.5	2	2	2				
	45	7	9.5	2.5	2				
	50	17	17	6	2	—			
	55				5.5				
	60				9	3			
	65					4			
350	35	3	2	1	2				
	40	6	6	1.5	2				
	45	11.5	16	6	2	—			
	50				8				
	55				17	3			
	60					6			
400	30	2	2	1	2		1.5	1	
	35	6	5	2	2		3.5	2	
	40	15	20	11.5	2.5	1.5	12	7.5	1.5
	45	—	—	—	5	3	—	—	4
	50					8			13.5
	55					—			
450	30	7	3	1.5	1.5				
	35	13	8.5	3.5	1.5				
	40	—	—	20	4	2			
	45			—	19	3			
						10			
	50								

貫入試験とスランプとの関係を見ると、粗細骨材率の割合が相当に影響し、砂利の多い粒度1では貫入量とスランプとはかなり接近するが、砂の多い4および5ではスランプに比べ貫入量がかかなり大きくなっている。一般にウオーカブルなコンクリートについてみると、スランプ0 cm に対して貫入量では 1~2 cm, スランプ 1 cm に対して貫入量 6~7 cm, スランプ 2.5 cm に対して貫入量 10~12 cm のように拡大するので、硬練りコンクリートのコンシステンシーを表わすには貫入試験による方が優れていることがわかった。

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験の結果は 表-7 のとおりである。供試体の表面が傾斜していたものが多くキャンピングで表面を修正しても、圧縮試験の結果、偏心荷重となつたものが相当にあつたため、試験誤差が大きく、測定値には矛盾した値があるが大体の傾向はわかる。

同じ単位セメント量、水・セメント比について比較してみると、粒度番号の大きいものほど圧縮強度が大きく

なっている。しかし、粒度番号4および5については、締固めが十分に行えなかつたほどのコンクリートのためかえつてコンクリートの圧縮強度は急激に落ちている。しかし、水・セメント比が大きくなつて、締固めが十分に行えるコンクリートになると、圧縮強度は大きくなっている。

連続粒度で最大強度を出しているものは、粒度3、単位セメント量 450 kg/m³、水・セメント比 30% で σ_{28} = 650 kg/cm² である。単位セメント量 300~400 kg/m³ であつて σ_{28} = 500 kg/cm² 以上のものは、粒度1では w/c = 30%, 粒度2では w/c = 35% 以下、粒度3では w/c = 40% 以下である。圧縮強度 500 kg/cm² 以上のコンクリートを製作するには、粒度2~3のもの、水・セメント比 35~40% を使用すれば、単位セメント量 300~400 kg/m³ でも十分に出せることがわかった。

水・セメント比が同じで、単位セメント量の多少によるコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響はこの実験では結論を出すことができなかった。

表-7 圧縮強度試験結果 (kg/cm²)

単位セメント量 kg/m ³	水・セメント比 %	連 続 粒 度					不 連 続 粒 度		
		1	2	3	4	5	2G	3G	4G
300	40	395	499	536	171				
	45	304	451	495	114				
	50	344	371	419	369	101			
	55				367				
	60				298	209			
	65					159			
350	35	465	529	536	168				
	40	352	460	531	288				
	45	381	414	489	392	52			
	50				412				
	55				365	220			
	60					320			
400	30	529	525	625	266		682	722	
	35	485	511	569	456		643	650	
	40	435	423	528	568		577	622	586
	45	385	416	455	483	367	488	545	522
	50				407	325			493
	55					393			
450	30	453	548	650	267				
	35	469	517	559	563				
	40	464	507	519	572	398			
	45			491	512	451			
	50					507			

表-8 引張強さ係数試験結果 (kg/cm²)

単位セメント量 kg/m ³	水・セメント比 %	連 続 粒 度					不 連 続 粒 度		
		1	2	3	4	5	2G	3G	4G
300	40	31.5	42.1	44.8	23.4				
	45	30.1	38.6	37.2	10.9				
	50	29.5	34.9	37.3	33.6	7.1			
	55				34.4				
	60				31.9	23.9			
	65					15.2			
350	35	40.6	40.0	45.2	12.4				
	40	36.8	37.0	41.3	17.8				
	45	35.4	35.6	39.9	38.9	5.2			
	50				36.3				
	55				32.9	18.9			
	60					28.9			
400	30	44.6	43.1	56.7	22.5		54.1	55.5	
	35	38.8	43.4	50.6	33.3		49.8	52.2	
	40	34.3	31.6	45.4	47.3		44.0	52.5	49.6
	45	33.9	35.1	41.3	36.2	36.2	41.6	45.1	44.1
	50				38.9	30.6			43.7
	55					32.4			
450	30	38.8	43.9	53.1	19.5				
	35	36.9	40.5	52.3	45.3				
	40	36.9	40.0	43.9	51.2	48.9			
	45			37.0	45.2	48.2			
	50					39.9			

不連続粒度のものは、単位セメント量 400 kg/m³ についてのみ行っているが、連続粒度よりはるかに強度が出た。それに相当する連続粒度よりは約 2 割強度が増加している。これは脱落している粒度 2.5~5 mm が適当であつたためと思われる。不連続粒度 2G では水・セメント比 40% 以下、粒度 3G、4G では 45% 以下が圧縮強度 500 kg/cm² 以上を出しており、また、粒度 2G では水・セメント比 35% 以下、粒度 3G では 40% 以下が圧縮強度 600 kg/cm² 以上も出た。最大強度は粒度 3G、水・セメント比 30% で 722 kg/cm² も出た。

(3) 引張強さ係数試験

引張強さ係数試験の結果は表-8のとおりである。

連続粒度 4 および 5 のウオーカブルでないコンクリートあるいは一部矛盾した値を除けば、引張強さ係数は圧縮強度のほぼ 1/11~1/13 位の値であつて、圧縮強度試験結果と似たような傾向が認められた。すなわち、ウオーカブルなコンクリートの範囲内では、同じ単位セメント量、水・セメント比であれば、粒度番号の大きいものほ

ど常に大きい値を示した。しかし、粒度 4 および 5 ではウオーカブルなコンクリートにするためには、水・セメント比を大きくしなければならないためには、あまり実用的でないで、粒度 3 が最も優れていることになる。

不連続粒度もそれに対応する連続粒度よりは強度が出ている。

VI. 結 論

以上の実験から、骨材粒度をいろいろに変えてコンクリートを製作した結果を要約すると次のとおりである。

(1) 硬練りコンクリートのコンシステンシーテストとしては貫入試験法が有利である。

(2) ウオーカブルなコンクリートは粒度 2 および 3、すなわち、RBB の最良粒域の下限および DIN の粒度曲線の中央 (E) であつて、粒度 1、すなわち、DIN の下限 (D) はややハーシェ気味である。また、粒度 4 および 5、すなわち、RBB の最上限および DIN の上限 (F) は、ウオーカブルなコンクリートするには水・セメント比を大

きくしなければならないために実用的でない。

(3) ウォーカブルな範囲内において、粒度番号の大きいものほど、圧縮強度および引張強さ係数が大きい。しかし、実用的な面からは粒度 3、すなわち、DIN の中央 (E) が一番優れ、次に粒度 2、すなわち、RBB 最良粒域の下限が良い。

(4) 2.5~5 mm の粒径を欠けた不連続粒度については単位セメント量 400 kg/m^3 のみしか行わなかったが、ウォーカブルなコンクリートが得られ、強度は連続粒度よりもはるかに大きい値を示した。

以上の実験は昭和 32 年 10 月より昭和 33 年 1 月までに北大工学部コンクリート実験室で行ったものである。