

# 超硬練り貧配合コンクリートの振動締め固めによる 充填性および強度について

## STUDIES ON VIBRATORY COMPACTION ON EXTREMELY DRY AND LEAN MIXTURES OF CONCRETE

阪 本 好 史\*

By Yoshifumi Sakamoto

### 1. ま え が き

コンクリート2次製品、とくに土木用コンクリートブロックの製造を目的として、貧配合で、振動締め固めを行なって即時脱型をする超硬練りコンクリートの配合設計指針をうるために、実験的研究を行なったものである。

コンクリートに振動を加えて打ち込み成形をすることは、*Jour. of ACI* をくってみると1933年頃から報文が多い。しかし、一般に普通の比較的富配合のプラスチックなコンクリートに関するものが多く、全くスランプのない、いわゆる超硬練りコンクリートに振動を加えて成形し、即時脱型するものは多くはないようである。

貧配合、超硬練り、振動締め固めコンクリートについては、*Bergstrom*<sup>1)</sup>によれば、硬練りの場合には *Deformability* は振動時間が長いほど効果が大きい。この傾向は *W/C* が小さいほど、セメントペースト量が少ないほど、粗骨材量が少ないほど著しい。*Cusens*<sup>2)</sup>は、型わくの深さが10 cm未満の場合には3000~8000 rpmの振動数をを用うべきであり、深い型わくの場合、dry mixや木製型わくの場合には比較的低い振動数で、振幅の大きい方がよく、また一般に加速度は4 g以上とすることを推奨している。振動台の振動数は、*Brush*<sup>3)</sup>の例では1260~3600 rpm、*ACI Committee 609*<sup>4)</sup>ではコンクリートのブロック用として1800~7200 rpmとし、低回転時の振幅1.6~3.2 mm、高回転時には1.3 mmという値を示している。山田<sup>5)</sup>によると欧州における即時脱型の実験で、振動数3000~7500 rpm、振幅3 mm程度の例を掲げている。*Washa*<sup>6)</sup>によれば、ブロック用として振動数6500 rpm、振幅0.8~1.0 mmを採用し、振動と同時に加圧する場合には700~900 kgを2~4秒加えて、振動数は1800~7200 rpm程度としている。*Green*<sup>7)</sup>は、振動数2100~14700 rpmの範囲で加速度を変化させて実験を行ない、単粒骨材の配合では、最適の振動数は骨材粒径の影響を受けて、粒径が増すほど大きくなる傾向があること、最適の振動数を加えた場合の強度は、平均強度より6~30%大きく、最適振動数より

少し高い振動数によって、しばしば強度は著しく低下すること、また強度には速度とか振幅よりも、どの振動数においても加速度が影響して、加速度が増すと強度も増すと説明している。つぎに配合の関係では、内山<sup>8)</sup>によれば、圧縮強度からみた場合に、単位セメント量が250 kg/m<sup>3</sup>で、振動打込みの時の最小の単位水量は約90 kg/m<sup>3</sup>であるという。石橋・四戸・有川<sup>9)</sup>は粗骨材最大寸法を20 mmを限度としている。*Kreman*<sup>10)</sup>によると、*L'Hermite*は粒径区分によって励起振動数を次式で示している。

$$d < 14 \cdot 10^6 / n^2$$

ただし、

*d*: 粒子径 (mm)

*n*: 振動数 (min<sup>-1</sup>)

*ACI Committee 211*<sup>11)</sup>では、*No-Slump Concrete*の必要水量や粗骨材量の概略値を与えている。山本・相沢・伊福部<sup>12)</sup>は、振動数9000 rpmのブロック成形機による実験から、空げき率が1%増すと、強度は約6%減少すること、空げき率の許容限度は8~9%であること、一般に *W/C* の増加にしたがって強度は増加すること、また単位セメント量は225 kg/m<sup>3</sup>以上が望ましく、貧配合のときは *s/a*, *W/C* の影響が大きいなどの結果をえている。

振動台については、実験では *Vertical linear vibration* および *Vertical circular vibration* のものが多く使用されており、時には外部振動機を数台とりつけたものもあって、振動の特性はあまり明確でない。

以上のように従来報文では、各人各様の結果を得ており、一貫した説明を求めることはむずかしい。

本報では、振動数3000~7800 rpm、振幅0.2~0.6 mmの範囲で成形する場合の、コンクリートの充填率および圧縮強度におよぼす粗骨材最大寸法、砂の粗粒率、単位水量、単位セメント量などの配合上のふくそうする要因機構の総合的影響を、多変量解析方法として重相関分析方法<sup>13)</sup>によって統計的に解析し、各要因の相関関係、有意性などについて検定した結果に基づいて、貧配合超硬練りコンクリートの配合基準と、条件の異なる場合の補正方法を提案したものである。

\* 正会員 八幡化学工業(株) 研究員

2. 使用材料, 装置および試験作業方法

(1) 使用材料

- ① セメント: B種高炉セメントを用いた。
- ② 細骨材: 福岡県遠賀川産, 性状は図-1, 表-1に示す。
- ③ 粗骨材: 高知県桂浜産の砂利, および福岡県門司産碎石, 性状は 図-1, 表-1 に示す。
- ④ 水 : 水道水を用いた。

図-1 骨材の粒度分布

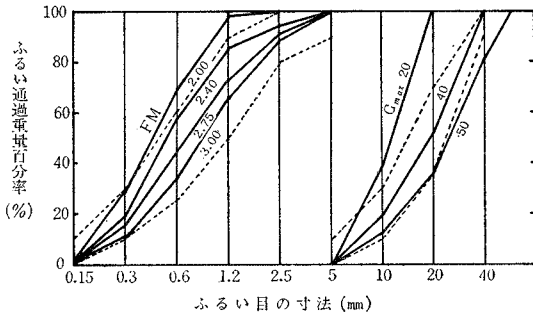


表-1 骨材の性状

骨材の種類別	比重	吸水量 (%)	洗い (%)	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	
				軽盛	標準
砂利 50 mm	2.68	—	—	—	—
” 40 ”	2.68	1.15	2.0	1770	1870
” 20 ”	2.68	—	—	1730	1890
碎石 40 ”	2.72	0.60	0.1	1590	1620
砂 FM 3.00	2.57	1.62	0.7	1520	1640
” 2.75	2.57	—	—	1530	1640
” 2.40	2.57	—	—	1480	1600
” 2.00	2.57	—	—	1440	1570

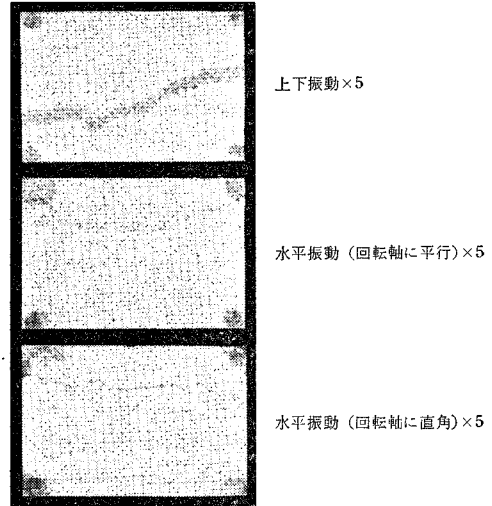
(2) 振動台

振動台 (450×450 mm) は, 振動数 1 800~7 800 rpm, 振幅 0.0~1.0 mm の範囲で連続可変のものを作製した (写真-1)。遠心力は公称 500 kg である。振動はテーブル上わくの下で偏心質量を回転させて強制振動を起こさせるものであるが, テーブル上わくは硬質の防振ゴムで

写真-1 実験用振動台



図-2 振動の記録



支持され, 水平動に対しては, 不完全ではあるが拘束する構造にしてあるので, 図-2 にその測定例を示すように, 主として上下方向に振動する。振動数および振幅は手持ち振動計<sup>14)</sup> (写真-2) によって, コンクリートを充填して振動締め固めをしている型わくの上部の振動を測定した。振動の波形については, 写真-3 に示すようにオシロスコープによって観察した結果, 比較的ひずみのない正弦波形であることを認めた。

写真-2 手持振動計

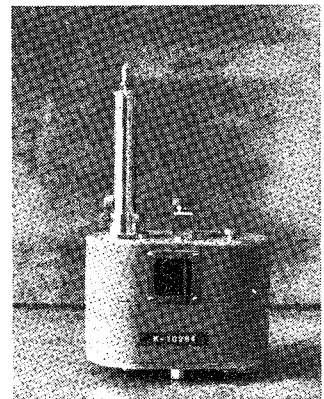
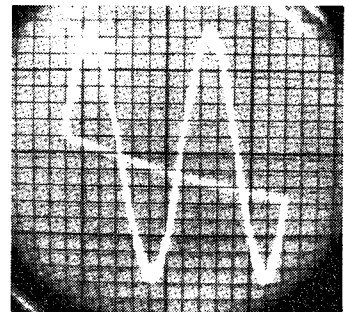


写真-3 上下振動波形の例



(3) 試験作業方法

a) 練りませおよび成形の標準作業方法

予備試験によって, つぎの作業方法を標準とした。

- ① ミキサに計量した材料を同時に投入して, 3 分間練りませる (ミキサは 2 切可傾式を用い, 1 バッチは 20 l 程度とした)。
- ② ミキサからコンクリートを受け皿に排出して, ショベルで均一になるように練りませる。
- ③ 振動台に固定した, 重量を測定した型わく (φ 15

×30 cm) に、ほぼ一杯になるようにコンクリートを軽く詰める。

④ 振動を加え始めると、コンクリートは沈下するので、その分だけコンクリートを手で補充する。

⑤ 所定の振動時間に達する5秒前にコンクリートを型わくの上面に約3 cmほど軽く手で盛り上げておいて、上から木板を当てて、手で押えた状態で定時に振動台を停止する。

⑥ コンクリートの上面を木鏝でならす。

⑦ 振動台からとりはずして、型わくごと重量を測定する。

⑧ ただちに側面の型わくだけを静かにとりはずす。

#### b) 養生方法

脱型した供試体は、所定の位置（この実験はすべて実験室内）に翌日まで静置する。材令1日にセメントペーストでキャッピングを施し、同じ位置に試験材令まで、空中に露出したままとする。

#### c) 供試体の充填率の求め方

振動成形をしたコンクリートの充填率は次式のようにして求めた。

充填率 (%)

$$= \frac{\text{コンクリートと型わくの重量} - \text{型わくの重量}}{\text{配合からきまる型わくの中のコンクリートの理論重量}} \times 100$$

供試体は原則として2個ずつ成形して、その平均値を求めた。

### 3. 実験の方法

この実験では一般にコンクリートの成形は上述の標準作業方法にしたがい、実験結果の判定には成形した供試体の充填率と圧縮強度について検討を加えた。

#### (1) 成形条件と締め固めたコンクリートの性質について

##### a) 振動数、振幅および加速度の影響

振動数と振幅を変化させて、2分間振動を加えて成形する。砂は粗粒率が2.75のもの、砂利は最大寸法が50, 40, 20 mm のものを用いた。コンクリートの配合は表-2 に示す通りである。

表-2 コンクリート配合表

配合記号	粗骨材最大寸法 (mm)	s/a (%)	W/C (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	計
A	20	40	55.0	110	200	848	1299	2457
B	40	40	52.5	105	200	853	1317	2475
C	50	30	45.0	90	200	650	1566	2506

##### b) 振動時間の影響

単位セメント量 200 kg/m<sup>3</sup>、粗骨材最大寸法 40 mm、砂の粗粒率 1.93~2.81、細骨材率 30~60%、単位水量 85~140 kg/m<sup>3</sup> のコンクリートに振動数 7200 rpm、振

幅 0.6 mm の振動を30秒~6分加えて成形する。実験はこの範囲の条件の組み合わせ40種類について行なった。

#### c) 振動成形時のコンクリートの状況

貧配合の超硬練りコンクリートを振動成形するような場合に、型わく中のコンクリートが流動するように変位することが観察される。これは同じコンクリートを Vee Bee 試験機で振動した場合にも同様である。そこで型わく内のコンクリートの内部においても運動していることを予想して、どのような変位をするものかを調べて、製品の均質化と、表面の仕上りを改善するために参考にするものである。実験は振動を受けているコンクリートのどの部分がどの程度の移動をしているかを知るために、供試体を作る際に高さ6 cm ほどの5層に別けて、各層の境界に白色セメントで水平に縞を作っておいて振動を加えた。一定の配合のコンクリートに一定の振動を加えて、30秒、1, 2, 3, 6分したら脱型して、表面に出た縞模様の乱れ方、および供試体を切断した切り口を観察することによって、振動時間と中のコンクリートの変位の状況を知ることができる。振動時間が長くなると、コンクリートの変位する量も大きくなり、層が逆転することも起こるので縞を層別に着色して区別した。

#### (2) 配合条件と締め固めたコンクリートの性質について

配合上のいろいろな要因が、締め固めたコンクリートの性質におよぼす影響を調べるもので、つぎのような配合の条件を組み合わせて、212種類のコンクリートについて、振動数7200 rpm、振幅0.6 mm、振動時間2分間として成形する。

単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>) 200, 220, 250, 280

粗骨材最大寸法 (mm) 50, 40, 20

細骨材率 (%) 25, 30, 40, 50

単 位 水 量 即時脱型することができて、振動により多量のペーストが流出したり、外観上不適当な豆板を生じなく、脱型後に沈下変形をしない範囲に定める。

#### (3) 碎石を使用する場合について

現場では碎石を使用する場合もあるので、砂利に対比して碎石の場合について調べるものである。振動締め固めの方法などは砂利の時と全く同様にして、

i) 単位水量 110 kg/m<sup>3</sup>、単位セメント量 200 kg/m<sup>3</sup>、細骨材率 40% の配合とし、振動数 7200 rpm、振幅 0.6 mm の振動を30秒、1, 2, 3, 6, 12分間加えて成形する。

ii) 表-8 に示すような配合とし、振動数 7200 rpm、振幅 0.6 mm、振動時間 2分間で成形する。

#### (4) 混和剤の影響について

貧配合、超硬練りコンクリートの振動締め固めに対す

る混和剤の影響を調べるものである。細骨材の粗粒率 2.75, 粗骨材最大寸法 20 mm の砂利, および混和剤には分散剤 P (リグニンスルホン酸カルシウム), AE 剤 V (変性アビエチン酸塩) を使用した。この実験には, 材料混合の方法 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, 配合の種類を B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, 混和剤の種類による効果を C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> とした三元配置法によった。

#### i) 材料混合の方法

超硬練りで, 貧配合の場合にはコンクリート中のペースト量が少なく, プラスチックなコンクリートのようになり練りまぜができませんので, つぎのような 2 通りの方法について比較した。

A<sub>1</sub>: 練りまぜ方法は, 従来の普通コンクリートの場合と同様に, セメント, 砂, 砂利および規定量の混和剤を水に溶解した混合水を同時にミキサに投入して, 3 分間混合する。

A<sub>2</sub>: 最初にセメントと規定量の混和剤を溶解した混合水を 2 分間練りまぜてペーストを作り, つぎに砂と砂利を投入して 3 分間練りまぜる。

#### ii) 配合の種類

配合は, その貧富による混和剤の効果の差を知るために, 単位セメント量を 200, 250 kg/m<sup>3</sup> とし, それぞれ充填率が約 99% になる水量を定めた。すなわち配合はつぎのとおりとした。

配合種別	セメント	水	細骨材率
B <sub>1</sub>	200 (kg/m <sup>3</sup> )	110 (kg/m <sup>3</sup> )	40 (%)
B <sub>2</sub>	250	100	40

#### iii) 混和剤の種類

混和剤には分散剤, AE 剤を 1 種類ずつ選び, つぎの 3 水準とした。

C<sub>1</sub>: プレーン

C<sub>2</sub>: 分散剤 P (セメント量の 0.5% 使用)

C<sub>3</sub>: AE 剤 V (セメント量の 0.04% 使用)

成形および養生方法は標準作業方法により, 振動数 7 200 rpm, 振幅 0.6 mm, 2 分間振動を加えた。

#### (5) 長期強度について

以上の実験は, 主として製造工程中の運搬時の所要強度から, 材令 3 ~ 4 日の強度について検討するものである。この実験ではそのようなコンクリートの長期間後に発現する強度を調べる。砂の粗粒率 2.75, 砂利の最大寸法 40 mm, 混和剤は分散剤 P および AE 剤 V を使用した。コンクリートの配合は表—15 に示す通りである。締め固めは振動数 7 200 rpm, 振幅 0.6 mm, 振動時間 2 分間とした。養生方法は材令 2 日までは 20°C 室内, 以後強度試験日まで 20°C 水中に養生した。

#### 記号

n: 振動数 (rpm)

b: 全振幅 (mm)

k: 加速度 (g)

t: 振動時間 (分)

ξ: 充填率 (%)

σ<sub>28</sub>: 圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>), 添字は材令 (日)

G<sub>max</sub>: 粗骨材最大寸法 (mm)

FM: 砂の粗粒率

FM<sub>(A)</sub>: 砂利, 砂混合物の粗粒率

s/a: 細骨材率 (%)

W: 単位水量 (kg/m<sup>3</sup>)

C: 単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>)

p: セメント ペースト量 (l/m<sup>3</sup>)

a: 全骨材量 (l/m<sup>3</sup>)

## 4. 実験結果と考察

### (1) 成形条件と締め固めたコンクリートの性質

#### a) 振動数, 振幅および加速度の影響

実験の結果は表—3 に示す通りである。この結果から成形した供試体の充填率または材令 3 日圧縮強度に対する, 振動数, 振幅, 加速度, 粗骨材最大寸法, 単位水量, 細骨材率などの重相関関係を明らかにした。計算は電子計算機 NEA C 2200 により, 解析の結果は表—4 にその例を示す通りである。圧縮強度への各要因の効果と, 充填率への効果はよく似た傾向が認められた。すなわち

i) 充填率と強度はここにとりあげた要因によって, 重相関係数, 回帰誤差 (標準偏差で表わしてある), 寄与率などの値から相当に高い相関を得ることがわかる。

ii) 充填率, 強度に関しては, 振動数と振幅を要因と考える方が, 加速度を要因とするよりも, やや精度よく推定することができる。

iii) 充填率と強度は, 振動数, 振幅, 粗骨材最大寸法, 細骨材率の 4 要因のうち, 振動数, 振幅, 細骨材率の 3 要因でも, また加速度と細骨材率の 2 要因からも精度よく推定できる。

表—3 測定結果

振動数 (r.p.m.)	振幅 (mm)	加速度 (g)	充填率 (%)			3日圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		
			配合A	配合B	配合C	配合A	配合B	配合C
6 780	0.6	15.4	100	98	100	124	110	152
5 340	0.6	9.6	99	97	99	124	99	145
7 120	0.5	14.1	100	98	100	129	103	155
5 340	0.5	8.6	98	98	99	109	104	153
7 260	0.4	11.8	98	98	99	118	91	160
5 350	0.4	6.3	96	97	98	107	87	150
3 590	0.4	2.9	95	96	98	73	79	140
7 050	0.3	8.5	97	98	99	92	115	162
5 225	0.3	4.3	96	96	97	91	98	126
3 900	0.3	2.6	95	96	98	93	97	137
6 840	0.2	5.2	95	96	98	72	95	144
5 100	0.2	2.3	93	92	96	56	69	119
4 150	0.2	2.1	92	91	96	48	51	117

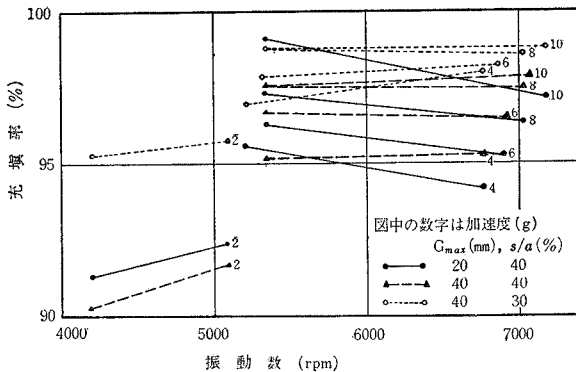
ただし, 充填率, 圧縮強度は供試体 3 個の平均値

表-4 (Y) 充填率 (%) と (1) 振動数 (rpm), (2) 振幅 (mm), (3) 加速度 (g), (4) 粗骨材最大寸法 (mm), (5) 単位水量 (kg), (6) 細骨材率 (%) との関係

変数の項目	相関係数	回 帰 係 数						回帰誤差	寄与率	偏 相 関 係 数
		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>			
Y 1246	0.898**	$\times 10^{-2}$ 0.063	9.7		-0.004		-0.192	1.000	0.78	$r_{x1y \cdot x2x4x6} = 0.626^{**}$
Y 3456	0.845**			0.28	0.143	0.886	-1.429	1.667		$r_{x2y \cdot x1x4x6} = 0.810^{**}$
Y 124	0.819**	0.063	9.7		0.044			1.288		$r_{x3y \cdot x1x2x6} = 0.772^{**}$
Y 126	0.898**	0.063	9.7				-0.188	0.987	0.73	$r_{x4y \cdot x1x2x6} = -0.034$
Y 146	0.661**	0.088			-0.004		-0.192	1.682		$r_{x4y \cdot x2x4x5} = 0.067$
Y 246	0.826**		11.1		-0.004		-0.192	1.264		$r_{x5y \cdot x2x4x6} = 0.664^{**}$
Y 345	0.854**			0.36	-0.036	-0.128		1.166		$r_{x6y \cdot x1x2x4} = 0.644^{**}$
Y 346	0.854**			0.36	-0.004		-0.192	1.166	0.71	$r_{x6y \cdot x2x4x5} = -0.008$
Y 356	0.854**			0.36		0.017	-0.218	1.166	0.71	
Y 456	0.378**				0.143	0.914	-1.571	2.113		
Y 12	0.795**	0.063	9.7					1.342	0.61	
Y 14	0.548**	0.088			0.044			1.849		
Y 16	0.661**	0.088					-0.188	1.659		
Y 24	0.739**		11.1		0.044			1.491		
Y 26	0.826**		11.1				-0.188	1.250	0.64	
Y 34	0.770**			0.36	0.044			1.410		
Y 35	0.846**			0.36		-0.100		1.177	0.70	
Y 36	0.854**			0.36			-0.188	1.150	0.71	
Y 45	0.418*				-0.036	-0.128		2.008		
Y 46	0.418*				-0.004		-0.192	2.008		
Y 56	0.418*					0.017	-0.218	2.008		
Y 1	0.512**	0.088						2.103		
Y 2	0.712**		10.4					1.531		
Y 3	0.745**			0.36				1.455		
Y 4	0.196				0.044			2.138		
Y 5	-0.402					-1.005		1.997		
Y 6	-0.418**						-0.188	1.981		

\* 危険率 5% で有意 \*\* 同 1% で有意

図-3 振動数と充填率との関係



iv) 充填率と強度に対して、振幅の方が振動数より相関が高い。

v) 振動数、振幅あるいは加速度が増すと充填率および強度は大となる (図-3)。

vi) 粗骨材最大寸法は、充填率や強度に対して、偏回帰係数が正または負の値をとり、絶対値も小さく、偏相関係数も小さいことから、他の要因の影響よりも小さいと考えられる。

vii) 充填率と強度に対しては、細骨材率は負相関を示す。

viii) 寄与率の大きい要因に対する重回帰式を推定すると、

$$\xi = 0.00063n + 9.7b - 0.004G_{\max} - 0.19s/a + 97$$

$$\sigma_3 = 0.0067n + 81.5b - 0.15G_{\max} - 5.09s/a + 233$$

のように表わされる。すなわち  $n, b$  が増すと  $\xi, \sigma_3$  は増し、 $G_{\max}, s/a$  が増すと  $\xi, \sigma_3$  は減少する。

b) 振動時間の影響

実験結果に対して、振動時間、単位水量、細骨材率を要因として、充填率および圧縮強度に関して、前と同様な方法で重回帰分析を行なった。すなわち、これらを要因と考える時、重回帰係数 0.95、寄与率 0.88 と高い相関が得られ、重回帰式はつぎのように推定される。

$$\xi = 0.62t + 0.262W - 0.69s/a + 91$$

$$\sigma_3 = 3.9t + 0.147W - 3.58s/a + 198$$

上式や偏相関係数などから、振動時間、単位水量が増すと充填率および強度は増し、細骨材率が増すと充填率、強度は減ずる傾向が認められる。

c) 振動成形時のコンクリートの状況

コンクリートの状態は写真-4~5 の例に示すように移動していることがわかる。コンクリートの移動には、振動台の特性、型わくの形や寸法などの影響が大きいと考えられる。この実験に用いた振動台のように偏心錘が 1 組のものは、水平方向の拘束度が低いと不整な運動をする。そして中のコンクリートは流れを生じながら締め固まる。したがって供試体の部分によって締め固まりの

写真-4 振動によるコンクリートの移動状況(外観)

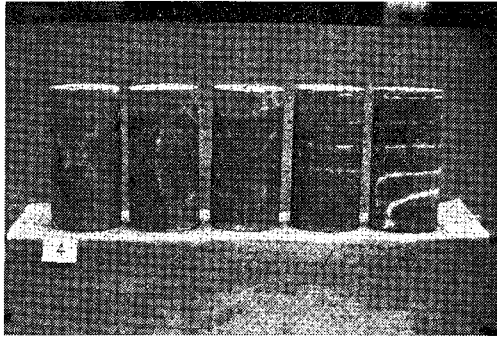


写真-5 振動によるコンクリートの移動状況(断面)



程度にムラを生じることになる。この実験によって、成形に際して、供試体の部分によって美しく仕上がった所と、あらあらしい豆板ようになる所があるが、全体を美しく仕上げるためには、コンクリートの配合条件によって改善できるものか、成形あるいは脱型の方法、または型わくの改造などで考慮されなければならないものの判別に役立った。

この実験による成形では、最も締め固まりの不十分な箇所は、モーターに近い側の下から1/4の高さの所、およびモーターから遠い側の上から1/4の高さの所であった。この部分は外観はあらあらしくて、その原因は振動によってコンクリートが移動してきて、その流れが型わくによって妨げられて、流れの向きが上または下の方向へ転向させられる場所に当たるためであろう。またコンクリートが水平に回転するように移動する場合もあるが、この時には、その方向に豆板の位置も片寄ってできる。また供試体の横断面をみてみても乱れを生じている。コンクリートの移動量は型わくに近い部分が、中心部より著しく大きい。したがって表面に豆板ができても、内部はよく締っており、豆板部分の深さは大して深いものではない。また豆板となる部分は、他の部分よりもコンクリート

の移動量も大きく、乱れも著しく、振動時間が長くなると縞が広がって不明瞭となっている。

(2) 配合条件と締め固めたコンクリートの性質

配合上の各種の要因がおよぼす効果を調べたものである。解析は各種の要因の組み合わせ212組の実測値から106組をランダムに選び、重回関分析を行なった。この

表-5 実験結果

	平均値	標準偏差	最大値	最小値
単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	106	17.5	130	85
充填率 (%)	97	3.8	100	89
4日圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	148	49.2	254	32

106組のデータにおける主な数値は表-5の通りである。

a) 充填率と各種要因との関係

① 充填率と粗骨材最大寸法、砂の粗粒率、細骨材率、単位水量、単位セメント量との関係

これらの要因についての解析の結果は表-6に示す通りである。偏相関係数の検定

の結果から、どの要因も充填率に対して著しく有意であるといえる。重回関係数も大きいので、重回帰式を推定するとつぎのようになる。

$$\xi = 0.07 G_{max} + 4.3 FM - 0.39 s/a + 0.223 W + 0.02 C + 69$$

すなわち、 $G_{max}$ ,  $FM$ ,  $W$ ,  $C$ が増すと $\xi$ は増し、 $s/a$ が増すと $\xi$ は減る。また同じデータによって、粗骨材最大寸法別に分析を行なうと、表-6の備考に示すように、充填率に対する重回関係数は前回よりも大きく、回帰誤差は小さい値を得ている。このことから充填率の推定には、粗骨材寸法別に行なう方が精度がよいと考えられる。また、ここにとりあげた要因の中では、単位セメント量の効果が最も小さく、要因としてとりあげなくてもほとんど同じ精度で充填率を推定しうることがわかる。

表-6 充填率、強度と配合要因との関係

項目	単相関係数	偏相関係数	偏回帰係数	備考		
充填率との関係	$G_{max}$	0.140	0.359**	0.073	5要因の時の重回関係数 0.72**	$G_{max}$ ごとに層別した時 $G_{max}$ 重回関係数 回帰誤差
	$FM$	0.133	0.533**	4.250		50 0.78** 0.8
	$s/a$	-0.114	-0.670**	-0.386		40 0.87** 1.5
	$W$	0.175	0.690**	0.223	20 0.82** 1.7	要因から $C$ を除いた時
	$C$	0.100	0.258**	0.023	2.00	$G_{max}$ 重回関係数 回帰誤差
4日圧縮強度係	$G_{max}$	0.110	0.520**	1.400	6要因の時の重回関係数 0.87**	50 0.78** 0.8
	$FM$	0.272**	0.383**	33.800		40 0.87** 1.5
	$s/a$	-0.565**	-0.590**	-3.810		20 0.80** 1.8
	$W$	-0.532**	0.171	0.498	寄与率	
	$C$	0.564**	0.770**	1.270	回帰誤差	
$\xi$	0.094	0.084	0.232	24.00		

\*\* 危険率 1% で有意 \* 同 5% で有意

② 充填率と砂の粗粒率, 粗骨材最大寸法, 細骨材率, セメントペースト量との関係

同じ実験データから重回帰式を推定するとつぎのように表わされる。

$$\xi = 4.5 FM + 0.07 G_{max} - 0.39 s/a + 0.19 p + 64$$

この関係は, 重相関係数 0.74, 回帰誤差 2.0 となっており,  $FM, G_{max}, p$  が増すと  $\xi$  は増し,  $s/a$  が増すと  $\xi$  は減る。要因として前節のように  $C$  と  $W$  をとつても, また  $p$  としてとり上げてほとんど同じ精度で  $\xi$  を推定できる。また  $G_{max}$  を省くと重相関係数 0.70, 回帰誤差 2.1 であつて, 要因から  $G_{max}$  を除いてもよいと考えられる。

③ 充填率と全骨材量, 全骨材の粗粒率, 水セメント比との関係

これらを要因として分析する時は, 重回帰式として次式を推定する。

$$\xi = -0.13 a + 6.2 FM_{(A)} + 4.6 W/C + 171$$

この関係では重相関係数 0.58, 回帰誤差 2.2 となっており, 要因の選び方としては, 他の場合にくらべて精度が低いといえる。

④ 条件の異なる場合の補正方法

以上のように考察してきた傾向を利用して, コンクリートの配合設計をする際に, 条件が異なった場合には, 所定の充填率を得るように, ほぼ表-7 のように補正を行なえばよいといえる。

表-7 条件の異なる場合の補正方法

変わる条件	補正の方法
粗骨材最大寸法 $\pm 10$ (mm)	$W \mp 3$ (kg/m <sup>3</sup> ), または $s/a \pm 2$ (%)
砂の粗粒率 $\pm 0.1$	$W \mp 2$ (kg/m <sup>3</sup> ), または $s/a \pm 1$ (%)
細骨材率 $\pm 1$ (%)	$W \pm 2$ (kg/m <sup>3</sup> )

(複号同順)

b) 圧縮強度と各種要因との関係

材令 4 日圧縮強度と, 粗骨材最大寸法, 砂の粗粒率, 細骨材率, 単位水量, 単位セメント量および充填率の関係について調べた。これらの変数に関して重相関分析を行なった結果は表-6 に示した通りである。寄与率や相関が高いので重回帰式を推定するとつぎようになる。

$$\sigma_4 = 1.4 G_{max} + 33.8 FM - 3.81 s/a + 0.498 W + 1.27 C + 0.232 \xi - 181$$

すなわち,  $G, FM, W, C, \xi$  が増すと  $\sigma_4$  は増し,  $s/a$  が増すと  $\sigma_4$  は減ることがわかる。

強度と水量だけの単相関係, すなわち, その側面の関係のみをみる時は, 水量は減らす方が強度が大となる関係を得ているが, 他の要因が組み合わさった場合には, 水量は多い方が強度は大きくなる傾向にあることが, 偏相関係数や偏回帰係数から考えられる。

以上のような関係から, コンクリートの配合の設計に際しては, 強度上からは粗骨材は大きく, 砂の粗粒率も

大きく, 細骨材率はできるだけ小さく選び, 水は脱型後に変型しない範囲で大きくとり, セメント量は多いほど圧縮強度の大きい製品を得ることができることがわかった。

(3) 碎石を使用する場合

碎石を使用する場合の実験 i), すなわち所定の配合のコンクリートに振動する時間を変えて, 充填率を測定した結果は図-4 に示すように同じ配合の場合には, 碎石の方が砂利の場合よりもやや詰まりにくい。振動時間が長くなるほど充填率は増加し, 碎石の場合には振動時間を 6 分間程度にすると, 砂利の場合の約 2 分間の振動を加えたことに相当する。すなわち, 碎石の場合には砂利の場合より振動時間を延長することによって, 充填率を砂利程度にすることもできると考えられる。

つぎに実験 ii) のように, 配合条件を変えた場合の実験結果は表-8 に示す通りである。すなわち, 配合と成形条件が同じ場合には, 充填率は碎石の方がやや低い。また強度は碎石の場合の方が約 10~20% 大きい。製品の表面の仕上りの状態は, 碎石の場合には細骨材率が 25% では外観があらあらしく, 少なくとも 30% 以上が望

図-4 振動時間と充填率の関係

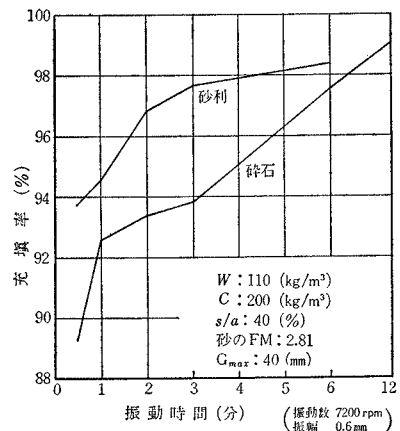


表-8 碎石と砂利の比較

砂の FM	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	充填率 $\xi$ (%)		4 日強度 $\sigma_4$ (kg/cm <sup>2</sup> )		$\xi$ 碎石 / $\xi$ 砂利 $\times 100$ (%)	$\sigma_4$ 碎石 / $\sigma_4$ 砂利 $\times 100$ (%)
				砂利	碎石	砂利	碎石		
2.00	25	90	200	99	92	172	129	93	75
		110	200	94	100	127	158	106	124
	30	105	200	100	100	152	164	100	108
		115	200	100	100	145	158	100	109
		105	220	99	98	179	192	99	107
	40	130	200	99	98	83	118	99	142
130		220	97	99	129	134	102	104	
2.75	30	95	200	100	98	185	202	98	109
		95	220	100	100	210	228	100	109
	40	115	200	99	100	103	177	101	172
		115	220	100	100	170	195	100	115
	50	130	200	99	98	96	132	99	138

ましい。一般には砂利の場合よりも、細骨材率を5%程度増した方がよい。碎石の場合には、砂利の場合よりも空げきが多いので、これを充填する意味でも、砂利の場合よりもモルタル量が多く必要なことが考えられる。また碎石を使用する場合の超硬練りコンクリートの練りまぜは、骨材の周囲に付着するペーストやモルタルが多く、造粒して丸くなるような傾向を生じがちで、しかも他の部分と分離しやすいので注意を要する。

(4) 混和剤の影響

材料混合の方法、配合の種類、混和剤の種類による効果を、試験条件にしたがって、ランダムな順序で実験を行ない、コンクリートの充填率および材令3日強度を測定した。結果は表-9に示す通りである。

表-9 混和剤の効果に関する実験結果

練りまぜ方法	混和剤	s/a (%)	W/C (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				3日強度		
				W	C	S	G	充 填 率 (%)	$\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
A	プレーン	40	55	110	200	848	1324	100	122	
		P	40	55	110	200	848	1324	100	148
		V	40	55	110	200	848	1324	98	111
	プレーン	40	40	100	250	840	1315	99	163	
		P	40	40	100	250	840	1315	99	181
		V	40	40	100	250	840	1315	97	150
B	プレーン	40	55	110	200	848	1324	99	94	
		P	40	55	110	200	848	1324	99	127
		V	40	55	110	200	848	1324	98	101
	プレーン	40	40	100	250	840	1315	96	95	
		P	40	40	100	250	840	1315	98	159
		V	40	40	100	250	840	1315	97	119

a) 充填率におよぼす影響

実験結果の充填率について分散分析の結果は表-10の通りである。

混合方法、配合の種類、混和剤の種類などの要因も著しく有意と判定される。

混合方法では、A<sub>1</sub>方法が充填率が大きくなるといえる。配合の種類では、B<sub>1</sub>配合の方が充填性がよい。

混和剤の種類では、プレーンの場合にくらべて、分散剤を使った場合には充填率が増し、AE剤使用の場合には、A<sub>1</sub>では充填率は小さくなり、A<sub>2</sub>ではやや大きくなっている。AとB、AとCの間には交互作用があると判定される。

以上のことから、充填率を増すために混和剤を使用す

表-10 分散分析表 (充填率について)

要 因	平方和	自由度	不偏分散	分 散 比	$F$ (0.01)	$F$ (0.05)
混合方法 (A)	5 320	1	5 320	17.80**	8.53	3.63
配 合 (B)	17 510	1	17 510	57.50**	8.53	
混 和 剤 (C)	9 443	2	4 722	15.50**	6.23	
A×B	2 734	1	2 734	8.97**	8.53	
A×C	2 543	2	1 272	4.19*		
誤 差	4 868	16	304			
計	42 418	23				

\*\* 危険率 1% で有意 \* 同 5% で有意

るには、練りまぜの際には全材料を同時に混合して用いる方法がよく、混和剤としてはAE剤より分散剤を選ぶのが効果的であるといえる。

b) 強度におよぼす影響

材令3日圧縮強度についての分散分析の結果は表-11の通りである。

表-11 分散分析表 (強度について)

要 因	平方和	自由度	不偏分散	分 散 比	$F$ (0.01)	$F$ (0.05)
混合方法 (A)	5 612	1	5 612	65.84**	8.53	3.63
配 合 (B)	3 775	1	3 775	44.29**	8.53	
混 和 剤 (C)	7 081	2	3 541	41.54**	6.23	
A×B	950	1	950	11.15**	8.53	
A×C	920	2	460	5.40*		
誤 差	1 364	16	85			
計	19 702	23				

\*\* 危険率 1% で有意 \* 同 5% で有意

表-12 混合方法の効果 (%)

方 法	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	100	100	100
A <sub>2</sub>	66.4	88.5	80.8

混合方法、配合種類および混和剤の種類の各要因とも著しく有意であると判定される。

表-13 配合の影響 (%)

配 合	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
B <sub>1</sub>	100	100	100
B <sub>2</sub>	119	124	123

混合方法の影響は表-12に示す通りで、A<sub>1</sub>方法の方が強度が大きくなるといえる。

表-14 混和剤の効果 (%)

方 法	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	100	115.5	91.9
A <sub>2</sub>	100	154	112

配合による影響は、混和剤別にみると表-13の通りで、B<sub>2</sub>配合の場合の方が強度は大きいといえる。

混和剤の種別による影響は、表-14に示す通りで、分散剤はプレーンの場合に対して、どちらの混合方法の場合にも強度は大きくなっている。AE剤の時には、A<sub>1</sub>方法では強度が低下し、A<sub>2</sub>方法では増加している。また強度に対しては、AE剤を使用するよりも分散剤を使用する方が効果的であることが表-14から判定される。

AとB、AとCの間には交互作用がある。

以上の結果から、貧配合超硬練りコンクリートの振動締め固めをする際に混和剤を選ぶには、充填率と強度の点からは、AE剤よりも分散剤の方が有効と考えられる。なお混合方法は、各材料を全部同時に混合する方法がよく、配合によっても影響を受けることがわかった。

(5) 長期強度の発現性

実験の結果は表-15に示す通りである。材令3日から91日まで、セメント水比と圧縮強度の関係は直線的に変化して、相関が大きいことが認められ、セメント水比が大きくなると強度も大きくなる(図-5)。

比較のために行なった、プラスチックでワーカブルなスランプ7.5cmのコンクリートの場合にくらべると、振動締め固めをしたコンクリートの材令28日圧縮強度



表-15 長期強度試験結果

混和剤	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	充填率の平均値 (%)	圧縮強度 (kg/cm²)				強度の伸び率	
						3 日	7 日	28 日	91 日	$\sigma_3/\sigma_{28}$	$\sigma_{91}/\sigma_{28}$
なし	61.2	40	110	180	98	109	151	248	289	0.44	1.17
	55.0	40	110	200	100	145	215	343	378	0.43	1.10
	48.9	40	110	225	100	157	225	340	415	0.46	1.22
	42.0	40	105	250	99	210	276	435	496	0.48	1.14
分散剤 (P)	55.0	40	110	200	100	114	212	376	462	0.30	1.23
	48.9	40	110	225	100	143	231	421	472	0.34	1.12
	42.0	40	105	250	99	180	292	501	544	0.36	1.09
AE剤 (V)	55.0	40	110	200	100	107	201	353	487	0.30	1.38
	48.9	40	110	225	100	138	222	373	443	0.37	1.19
	42.0	40	105	250	99	171	278	456	496	0.37	1.09

5. む す び

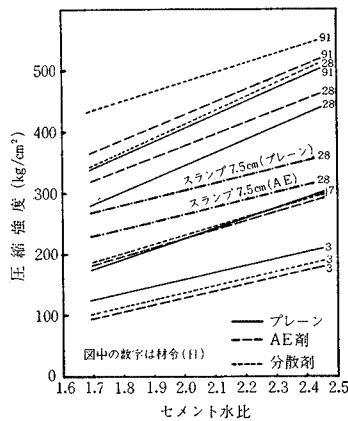
振動締め固めをする超硬練り貧配合コンクリートの配合設計の方針をまとめると、つぎのようにいえよう。ただし、標準の配合に使用する砂利および砂の粒度は、土木学会コンクリート標準示方書に示された標準粒度範囲のほぼ中央に入るものとする。砂の粗粒率は2.75である。

コンクリートのセメント量

は、この実験から、製品運搬時の初期強度、あるいは材令 28 日強度などから求められるが、コンクリート表面の仕上り状況から、単位セメント量としては 200 kg/m³ 以上が望ましい。つぎに水量は、表-16 に示す値を目

は、同じセメント水比の時でも大きい強度を得る傾向があることがわかる。すなわち、普通コンクリートにくらべると、強度については、単位セメント量は使用する単位水量が少ないために、同じセメント水比では単位セメント量を少なくしうるが、

図-5 セメント水比と圧縮強度との関係



それ以上に少ないセメント量で所要強度をうるようにコンクリートの配合設計をしうると考えられる。また、分散剤、AE 剤を用いた場合には充填率はほとんど変わらないが、強度では図-5 に示したように、材令 3 日ではプレーン コンクリートが最も強度は大きく、分散剤、AE 剤の順に強度は小さくなっている。材令 7 日になると、いずれもほとんど同程度の強度を示している。材令 28 日以降になると、強度は分散剤を使ったものが最も大きくなる。水セメント比 50% 付近では、材令 28 日強度は分散剤ではプレーンの場合の約 19% 増し、AE 剤では約 16% 増しとなっている。

長期強度については材令 28 日から 91 日にわたって約 10% 以上の伸びが期待される。

以上のことから、超硬練り貧配合の振動締め固めをしたコンクリートの強度はセメント水比との関係から設計することができ、材令 28 日強度は次式から推定することができる。

プレーンの場合  $\sigma_{28} = 215 C/W - 83$

分散剤使用の場合  $\sigma_{28} = 223 C/W - 32$

AE 剤使用の場合  $\sigma_{28} = 188 C/W + 3$

混和剤の種類としては、強度に対しては分散剤の使用が効果的であると考えられる。

表-16 基準配合表 (砂の FM=2.75)

粗骨材最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/cm³)
40	30	99
補 正 方 法		
変 わる 条 件	補 正 方 法	
粗骨材最大寸法 $\pm 10$ (mm)	$W \mp 3$ (kg/m³), または $s/a \pm 2$ (%)	
砂の FM $\pm 0.1$	$W \mp 2$ (kg/m³), または $s/a \pm 1$ (%)	
s/a $\pm 1$ (%)	$W \pm 2$ (kg/m³)	
砕石の場合	s/a + 5 (%)	

(複号同順)

標とすると便利であろう。この水量は、多くの実験の結果に基づくものであって、粒形などが良好な骨材の場合であるから、実際の場合には条件が異なるので、その時は表中の補正を行なえばよい。ただし、水量は普通コンクリートの場合と異なって、即時脱型した時に変形しない範囲で多くする方が充填性もよく、強度も大となる傾向がある。細骨材率の決定には、それぞれ使用する骨材の性状にしたがって調整しなければならないが、実験結果から充填性および圧縮強度に対しては、モルタル量として不足することのないこと、および十分に振動締め固めのできる範囲で、細骨材率は小さく選ぶのがよい。なお振動締め固めをする場合には、混和剤は充填率、強度などの点から AE 剤よりも分散剤の方が有効であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) S.G. Bergstrom: Laboratory test on Vibration of Concrete, Jour. ACI, Vol. 49, pp. 893~908, June 1953.
- 2) A.R. Cusens: The influence of amplitude and frequency in the compaction of concrete by table vibration, Magazine of Concrete Research, Vol. 10. No. 29, pp. 79~86, Aug. 1958.
- 3) G. Brush: Ein Untersuchung von Rüttelbeton, Zement, p. 16, Juni 1938.
- 4) ACI Committee 609: Consolidation of Concrete, Jour.

- ACI, Vol. 56, pp. 985~1012, Apr. 1960.
- 5) 山田順治：第4回国際コンクリート製品工業会議に出席して，セメントコンクリート，No. 202, pp. 9~19, 1963年12月.
  - 6) G.W. Washa : Vibration Practice in Pipe, Precast and Block Manufacture, Jour. ACI, Vol. 49, pp. 945~952, June 1953.
  - 7) H. Green : Compaction of Mortar and Concrete by vibration, Civil Engineering and Public Works Review, Vol. 57, No. 669, pp. 467~469, Apr. 1962; Vol.57, No. 670, pp. 632~634, May 1962.
  - 8) 内山 実：カタ練りコンクリートの経済的配合の設計，土木学会誌，35-4, pp. 6~11, 1950年4月.
  - 9) 石橋 実・四戸英男・有川 晋：機械振動詰即時脱型様式に使用する超硬練コンクリートの調査設計，日本建築学会論文集，57, pp. 121~124, 1957年7月.
  - 10) P. Kreman : Vibrationstechnik bei der maschinellen verdichtung von Frischbeton, Betonstein-Zeitung, Heft 4, pp. 186~191, Apr. 1963.
  - 11) ACI Committee 211 : Recommended Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete, Jour. ACI, Vol. 62, pp. 1~21, Jan. 1965.
  - 12) 山本 実・相沢亀之助・伊福部宗夫：超硬練コンクリートブロックの強度について，土木学会北海道支部技術資料，22, pp. 69~82, 1966年2月.
  - 13) たとえば，佐藤良一郎：数理統計学概説，初版，培風館，1951年.
  - 14) 萩原尊礼：振動測定，5版，室文館，1957年.

(1968. 3. 15・受付)