

# 表面振動機による超硬練りコンクリートの 締固めに関する基礎実験

## FUNDAMENTAL EXPERIMENTS ON COMPACTION OF EXTREMELY STIFF CONSISTENCY CONCRETE BY SURFACE VIBRATOR

加賀谷 誠\*・徳田 弘\*\*・川上 洵\*\*\*

By Makoto KAGAYA, Hiroshi TOKUDA and Makoto KAWAKAMI

The compaction mechanism was examined based on the vertical movements of each constituent material which were found by mix analysis test results of concrete in prismatic specimen during the vibration process. Both water cement ratio  $W/C$  and air content  $a$  were pointed out as the important internal composition factors influencing on mechanical properties, and the relation between a parameter  $(W/C+k \cdot a)$  and compressive strength was obtained. Furthermore, since the compaction degree could be evaluated by the parameter, this was applicable to compaction control as a quality characteristic. This was designated as compaction factor  $CF$ , and relations between  $CF$  and compacting conditions such as vibrator weight, vibrating frequency, amplitude and specimen size were examined.

*Keywords*: extremely stiff concrete, compaction mechanism, mechanical properties, compaction control

### 1. ま え が き

近年、コンクリートダムの施工法として、超硬練り貧配合コンクリートを振動ローラーにより締固める RCD 工法が注目されている<sup>1)</sup>。これについて使用材料、配合設計、施工法などの面から検討を加えた試験データ<sup>2)~4)</sup>や現場から採取したコアの圧縮強度試験結果<sup>5), 6)</sup>が報告されている。また、本工法に関するいくつかの報告<sup>7)~12)</sup>によれば、この種のコンクリートの締固め機構が明らかにされていないこと、1リフトの高さ方向における圧縮強度分布に不均一性が認められること、振動機の機械特性と作業効率の関係が十分に解明されていないことなどの問題点が指摘されている。

嶋津ら<sup>13)</sup>は、機械特性の中で振幅が締固め効果に大きな影響を有すること、締固めエネルギーと圧縮強度および密度の間に相関が認められることを述べ、また、中内ら<sup>14)</sup>は、締固めエネルギーと表面沈下量の間に関係が認められること、表面沈下量は締固め効果の指標になり得ることを報告した。これらの成果は、この種のコンクリー

トの締固め特性について貴重な示唆を与えているが、上記問題点を十分に解決したとはいえない。

本研究では、これらの問題点の解明を図るため、まず締固め過程における柱状試験体各層の組成成分量の変動程度を配合分析により求め、その結果から各成分の鉛直方向の移動傾向を把握したうえ、これに基づき締固め機構を明らかにした。また、組成成分量の変動が力学的性質に影響を及ぼすことは明らかであって、その主要な影響因子は水セメント比  $W/C$  と空気量  $a$  であることを指摘した。そして、両因子を組み合わせた  $(W/C+k \cdot a)$  と圧縮強度の関係式を示し、さらに、この項をパラメーターとして締固め度の評価が可能であり、したがって、これが締固め度管理の特性値になり得ることを示した。次に、振動機の機械特性と締固め度の関係ならびに試験体の高さおよび断面積と締固め度の関係について検討した。なお、実際の RCD 工法では打込み面にモルタルを敷きならした後、ブルドーザーによるコンクリートの薄層まき出しを行い、振動ローラーによる締固めを行うが、本実験ではコンクリートを打込み後、ただちに締固めを行った。このように実施工では打込み面に敷きモルタルが塗り込まれているし、締固め開始前にブルドーザーの転圧効果によりある程度締固めが先行しているのに対し、本実験ではモルタルの敷きならしを行って

\* 正会員 工修 秋田大学助手 鉱山学部土木工学科  
(〒010 秋田市手形学園町1-1)

\*\* 正会員 工博 秋田大学教授 鉱山学部土木工学科(同上)

\*\*\* 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部土木工学科  
(同上)

いないし、先行締固めに相当する段階がないなど両者の間に相違がある。しかし、敷きモルタルが締固めの進行程度に及ぼす影響はごく小さいと判断されること、本実験においてブルドーザーによる締固め程度に達した段階後の各組成成分の挙動と実施工におけるそれとの間に大きな相違はないと思われることから、本実験により超硬練り貧配合コンクリートの締固め機構など上記問題点を解明するための基礎資料が得られるものと考える。

2. 実験概要

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

普通ポルトランドセメント (NPC), フライアッシュを 30 % 混和した中庸熱ポルトランドセメント (FAC), 天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤 (AEA), リグニンスルホン酸塩を主成分とする減水剤 (WRA) を使用した。骨材は川砂 (RS), 川砂利 (RG), 砕砂 (CS) および砕石 (CG) であり, それらの物理的性質を Table 1 に示す。

Table 2 にコンクリートの配合および材令 28 日における力学的性質を示す。Mix No.1 および 2 のコンクリートの配合設計は文献<sup>4)</sup>を参考にしてこれを行った。まず, 本研究の目的からみて, VC 値と水セメント比の決定にあたり特に条件はないものと判断し, 既往のデー

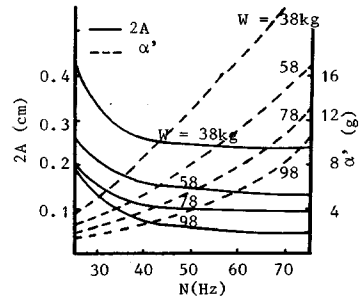


Fig.1 Characteristics of Surface Vibrator.

タを参考にしてそれぞれ 20±5 秒, 80 % と定めた。次に, 適当と思われる細骨材率を仮定し, セメント量を一定とし水量を変えたコンクリートの VC 試験から単位水量を決定した。さらに, セメント量と水量を一定にし, 細骨材率を変えたコンクリートの VC 試験を行い, 得られた最小 VC 値に対応する細骨材率を所要値とした。なお, Mix No.3 のコンクリートの配合は, 現在 RCD 工法により施工中の Tダムの内部コンクリートを 40 mm ふるいでウェットスクリーニングしたものに相当する。なお, Mix No.1 および 2 では NPC, RS, RG を使用し, 後者に AEA を添加した。Mix No.3 では, FAC, CS, CG, WRA を使用した。

(2) 試験体の作製

Table 3 に試験体の種類を示す。S は標準円柱供試体, P-1~3 は高さの異なる小型角柱試験体, L は大型試験体である。後述のように, 試験体 P および L から所定の材令で配合分析試験用試料および力学的性質測定用コア供試体をそれぞれ採取した。コンクリートの練りまぜには容量 50 l の強制練りミキサーを使用し, 全材料投入

Table 1 Physical Properties of Aggregates.

Kinds of Aggregate	Specific Gravity	Water Absorption (%)	Fineness Modulus F.M.
River Sand (RS)	2.54	2.71	2.61
Crushed Sand (CS)	2.57	2.67	2.62
River Gravel (RG)	2.56	3.30	7.28
Crushed Stone (CG)	2.59	2.16	7.35

Table 2 Mix Proportions and Mechanical Properties of Concrete.

Mix No.	G <sub>max</sub> (mm)	VC Value (sec)	Air Content (%)	W/C+F (%)	F/C+F (%)	s (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )					Mechanical Properties (kgf/cm <sup>2</sup> )			
							W	C	F	S	G	Ad-mixture	$\sigma_c$	$\sigma_t$	E
1	40	20±5	1.5±0.5	79.8	0	33.0	130	163	0	687	1361	—	136	15.3	2.14 × 10 <sup>5</sup>
								163							
2	40	20±5	5±0.5	79.9	0	33.0	115	144	0	679	1346	0.101	103	12.8	1.87 × 10 <sup>5</sup>
								144							
3			1.5±0.5	73.0	30	46.2	135	130	55	932	1096	0.463	135	20.0	1.98 × 10 <sup>5</sup>
								185							

Table 3 Kinds of Specimen.

	Specimen	Shape and Size
S	Standard Specimen	φ15×30cm
P-1	Small Prismatic Specimen	15×15×25cm
		15×15×33cm
P-2		15×15×33cm
P-3		15×15×40cm
L	Large Specimen	75×75×33cm

Table 4 Characteristic Ranges of Surface Vibrator.

Weight of Head (kgf)	38~98
Frequency (Hz)	0~75
Amplitude (cm)	0~0.48
Centrifugal Force (kgf)	0~560
Compaction Plate (cm)	14.5×14.5

Table 5 Vibrating Compaction Conditions.

No.	Vibrating Compaction Time (sec)	Weight W (kgf)	Frequency N (Hz)	Amplitude 2A (cm)	Layer Thickness H (cm)	Specimen Size
I	15,60,120,180,300	38	50	0.18	25	P-1
II	180	38,58,78	50	0.12	25	
III	90	38	25,50,75	0.18	25	
IV	90	38	50	0.15,0.20,0.25	25	
V	30,90,180	38	75	0.18	25,33,40	
VI	15,60,180	38	50	0.25	33	P-2, L

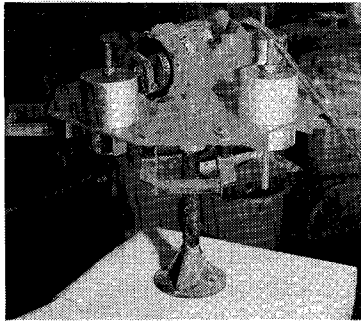


Photo 1 Surface Vibrator.

後 90 秒間練りませた。

供試体 S の締固めには、振動数 50 Hz、振幅 0.25 cm、重量 35 kgf の振動ランマーを用い、文献<sup>4)</sup>に準じてこれを行った。試験体 P および L の締固めには、Table 4 および Fig. 1 に示す性能の試作した容量可変型表面振動機を用い、一層で締固めた。その外観を Photo 1 に示す。この振動機の振動数  $N$  はインバーターによって、振幅  $2A$  は偏心錘の角度調整によって、重量  $W$  は 1 枚 2.5 kgf の錘を所定枚数だけ取り付けることによってそれぞれ変えることができる。 $N$ 、 $2A$  および加速度  $a'$  は、振動機に取り付けた加速度変換器を通して動ひずみ計および記録計から読み取った。Table 5 に締固め条件を示す。表中の各特性値は振動機の性能範囲を考慮して設定されたものであり、振動数と振幅は RCD 工法において通常使用されているローラーの振動特性範囲内にある。

試験体 L の締固めは、Fig. 2 に示すように振動機を順次移動させながらこれを行った。たとえば、各位置での締固め時間を 5 秒間とすると、1 サイクルの締固めによって隅角部 (7.5×7.5 cm) で 5 秒間、縁辺部 (7.5×60 cm) で 10 秒間、その他の部分 (60×60 cm) で 20 秒間締め固められる。本実験では、その他の部分の単位面積当たりの締固め時間が試験体 P-2 の場合と等しくなるように締固め条件 VI により締固めた。

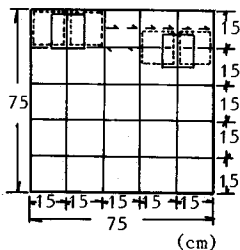


Fig. 2 Vibrating Compaction of Specimen L.

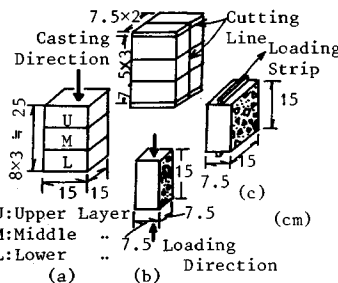


Fig. 3 Concrete Specimens for Mix Analysis (a), Compressive Strength and Modulus of Elasticity Test (b) and Tensile Strength Test (c).

(3) 配合分析試験<sup>15)</sup>

締固められた試験体各部の配合を求めるため、P-1~3 および L をそれぞれ 2 個作製し、一方を各材料の単位量、他方を空気量の測定に用いた。Fig. 3(a) は試験体 P-1 の場合であって、締固めが終わってから約 2 時間経過後、上・中・下層から断面 15×15 cm、層厚約 8 cm の試料を採取した。試料の重量を測定後、その一部から 5 mm ふるいを用いたウェットスクリーニングにより約 50 g のモルタルを採取した。これを高周波加熱により脱水した後、塩酸溶解および水酸化ナトリウム溶液による滴定試験から水セメント比を求めた。残りの試料について洗い分析試験を行い、細・粗骨材量を求めた。他方、空気量測定用試験体の各層から形状を乱さないように試料を採取し、これを水で満たしたワシントン型エアメーターの容器に入れ、あふれ出た水量から試料の体積を求めた。試料中の空気泡を攪拌により消散させ、容器内の水位低下分に相当する水量から空気量を求めた。以上の測定結果から試験体各層の配合を求めた。

試験体 P-2 および 3 の場合、層厚約 8 cm の試料を上・中・下層から、また、試験体 L の場合、中心部および側壁付近の高さ方向各位置から同様にして試料を採取し、配合分析試験を行った。

(4) 力学的性質の測定

試験体各部の力学的性質を求めるため、P-1~3 および L をそれぞれ 2 個作製し、一方を圧縮強度と弾性係数測定、他方を引張強度測定に用いた。Fig. 3(b) は試験

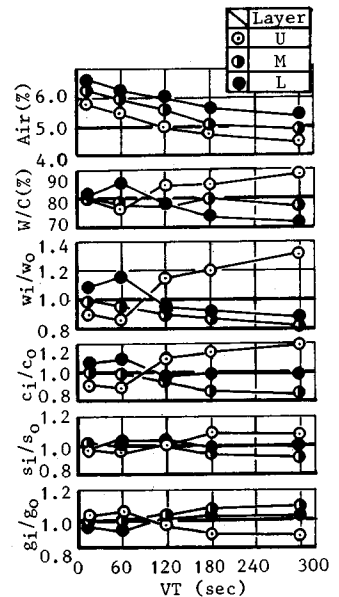


Fig. 4 Variation of Composition in Each Layer with Change of Vibrating Time VT.

体 P-1 の場合であって、カッターを用いて各層から 2 個の  $7.5 \times 7.5 \times 15$  cm 切断片を切り出し、これらを圧縮強度と弾性係数の測定に供した。Fig. 3(c) は引張強度の測定方法であって、試験体の各層から切り出した  $15 \times 15 \times 7.5$  cm 切断片について  $1 \times 1 \times 15$  cm 鋼製分布板を用いた割裂試験を行った。密度は切断片の重量と容積から求めた。

試験体 P-2 および 3 の場合、上・中・下層から上記と同じ形状寸法の切断片を切り出し、力学的性質を測定した。また、試験体 L の場合、各層から  $\phi 10 \times 10$  cm のコアを採取し、高さ方向における力学的性質の分布性状を求めた。測定材令を 28 日とし、それまで標準湿潤養生を行った。切断片およびコアの採取は材令 26 日で行った。

なお、粗骨材の最大寸法が 40 mm であるのに対して、試験体 P の圧縮強度測定用切断片の断面積は  $7.5 \times 7.5$  cm であって過小であり、その影響が測定値に含まれることが懸念された。そこで、これについてあらかじめ実験的検討を行ったところ、この種のコンクリートでは、このような影響はごく小さいと判断された。また、割裂引張強度の算出式が円断面、線荷重を原則としているのに対して、本実験では、 $15 \times 7.5$  cm 断面の供試体に分布板を載せて測定を行っているのので、得られた強度は参考値にとどめたい。

### 3. 締固め機構の検討

本章では、まず、締固め過程における試験体各層の組成成分の変動状態を配合分析試験により明らかにした。次に、その結果から各成分の高さ方向における移動傾向を把握し、これに基づき締固め機構について若干の考察を試みた。

#### (1) 締固め過程における内部組成の変動

Fig. 4 に、締固め過程における試験体各層の組成成分の変動状況の一例を示す。これは、Mix No. 2 のコンクリートを用いて、締固め条件 I により試験体 P-1 を作製し、配合分析試験を行った結果であって、締固め時間と空気量、水セメント比ならびに水、セメント、細骨材および粗骨材の単位量比の関係が各層ごとに示されて

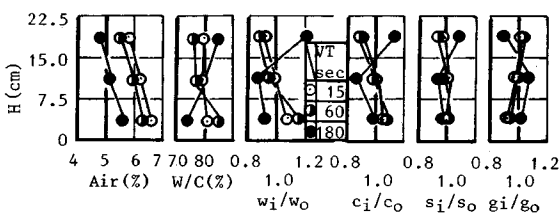


Fig. 5 Distributions of Constituent Materials in the Vertical Direction.

いる。単位量比は、各層におけるある材料の単位量と示方配合におけるそれとの容積比である。図中の横太線は示方配合における各値を示す。

空気量は各層とも締固め時間とともに減少傾向を示すが、下層では上層より約 1 % 多い。

水セメント比は、締固め時間とともに上層で増加、下層で減少傾向を示すが、約 90 秒までは下層の方が大きく、その後、大小関係は逆転し、時間とともに両者の差は大きくなる。中層では上・下層のほぼ中間に位置する。水量比とセメント量比の経時変動傾向はほぼ同様であって、約 60 秒まで上層で減少し、下層で増加するが、その後約 90 秒までの間に上層で急激に増加し、さらに漸増傾向、下層では漸減傾向を示し、時間とともに両者の差は大きくなる。中層では下層とほぼ同様な変動傾向を示すが約 90 秒以後、最小値となる。

細骨材量比の経時変動傾向は、水およびセメントの場合とほぼ同様である。粗骨材量比は、振動時間とともに上層で減少、中・下層で増加傾向を示す。これらの変動範囲は、およそ 0.9~1.1 であり、他の組成成分の単位量比の変動程度より小さい。

Fig. 5 は、前図を試験体の高さ方向における分布状態に書き改めたものであって、締固め時間ごとに示されている。図中の縦太線は示方配合における各値である。空気量は、上層から下層へ増加傾向を示し、締固め時間とともに各層で減少する。

水セメント比は、締固め時間 15 および 60 秒において下層で最も大きい。180 秒では上層から下層へ減少傾向を示す。水およびセメントの単位量比は、締固め時間 15 および 60 秒で上層から下層へ増加傾向を示すが、180 秒では上層で最も大きく、下層、中層の順に小さくなる。

細骨材量比の分布傾向は、水およびセメントの場合とほぼ同様である。粗骨材量比は、締固め時間 15 および 60 秒で上層から下層へわずかに減少傾向を示すが、180 秒では増加傾向に転ずる。

#### (2) 締固め機構についての考察

Photo 2 に、試験体 P-1 を 15、60 および 180 秒締固めたときの側面の状態を示す。締固め時間 15 秒では試

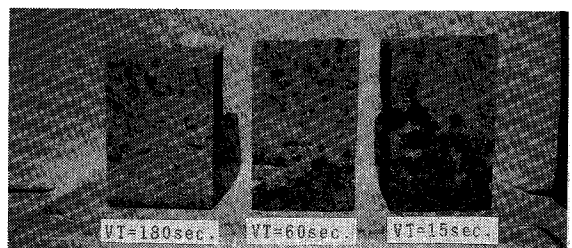


Photo 2 Side View of Specimen P-1.

験体のおよそ下半分に不十分な締固めに起因するジャンカが認められるし、60秒では最下部にのみそれが認められるが、180秒では全く認められない。このことから表面振動機による締固め効果は表層部から下方に向かって進行すること、十分な締固め度を得るための締固め時間は60～180秒の範囲内に存在することがわかる。

次に、Fig. 4 および 5 に示した組成成分量の経時変動および高さ方向分布に基づき、締固め機構について定性的な考察を試みる。

試験体の空気量は、各締固め段階で下方ほど多く、締固め時間の経過とともに全体的に漸減傾向を示す。これは締固めが上部から下部に向かって進行することに起因するのであって、まず、表層部が高密度になるとこれより下方の空気泡はこの密な層を通過して逸散するのが難しく、その一部がコンクリート内部にとどまる。締固めの進行とともに高密度層の厚さが大きくなると、下部の空気泡の逸散はさらに困難となるため、下層ほど多くの空気泡が残留することになる。

各締固め段階で水の動きが顕著に認められた。すなわち、締固めの初期では急激に下降し、その後上昇へと転じ、さらにゆるやかな上昇傾向を示した。これは初期段階では、中・下層の締固め度がいまだ不十分で空隙の多い状態にあるため、締固めによって圧縮された上層の水は容易に中層を通過して下層へ流動するからである。締固め効果が中層を経て下層に達すると、それまで下層部にたまっていた水に圧力が加わり、上昇を開始する。さらに締固めを継続しても、締固め度が高くなっているため、著しい水の動きはなく、ゆるやかな上昇傾向を示す。締固め作用によるセメントの動きは水の場合と類似していることが認められた。これはセメント粒子が水の下降流あるいは上昇流によって搬送されるからである。実際にはセメントペーストの状態で流動するが、水セメント比が大きいため締固め作用により水の一部がペーストから分離すると考えられる。粘性の小さい水はペースト部分よりも容易に流動するので、その動きはセメントの場合より大きいのである。

締固めによる細骨材の動きは、その程度は小さいもの水およびセメントの場合と類似していることが認められた。これは細骨材中の微細粒子が水あるいはペーストの流動によって搬送されるからであろうと考えられる。

一方、粗骨材の動きは、水、セメントおよび細骨材の場合と全く逆であることが認められた。締固めの初期段階では上層でペースト量が減少するため粗骨材の占める割合は増加し、ペースト量が増加する下層ではその割合が減少する。つまり、見掛け上、粗骨材は上昇したことになる。締固め時間とともに粗骨材粒はわずかに沈降してペーストおよびモルタルと置き換わるため、粗骨材量

は上層で減少、下層で増加の傾向に転ずる。前述のように締固めの初期に水は急激に下降し、次いで上昇に転ずるが、上昇流の発生は粗骨材粒の沈降が支配的要因であると考えられる。

以上のように、締固め過程における水、セメント、細骨材および粗骨材の動きの間には互いに密接な関連があるが、空気泡はこれらの成分の動きによって影響されることなく、上昇傾向のみを示すことがわかる。

#### 4. 締固め度の評価

本章では、まず、過剰締固め段階をも含め、力学的諸性質に及ぼす締固め時間の影響を明らかにした。次に、これらの性質の中で最も重要と考えられる圧縮強度に着目し、これと、前章で述べた内部組成との関係について検討した。さらに、締固め度の尺度として締固め係数  $CF$  を提案した。

##### (1) 締固め時間と力学的性質の関係

Fig. 6 は、Mix No. 2 のコンクリートを用いて、締固め条件 I により試験体 P-1 を作製し、各層の圧縮強度、引張強度、弾性係数および密度を測定した結果である。図中の横太線は標準供試体による各値である。前 3 者の経時変化をみると、締固め開始後 15 秒では上層ほど大きく時間とともに各層とも増加してそれらの間の差は小さくなり、120～180 秒で最大値に達する。その後減少傾向に転ずるが、上層における各値が最も小さい。また、120～180 秒までの増加割合は下層ほど大きく、上層ではごく小さい。密度は締固め時間 180 秒まで上層ほど大きく、時間とともに各層間の差は小さくなる。その後上層でわずかな減少傾向、中・下層でわずかな増加傾向を示す。なお、本実験と実施工では、コンクリートの配合

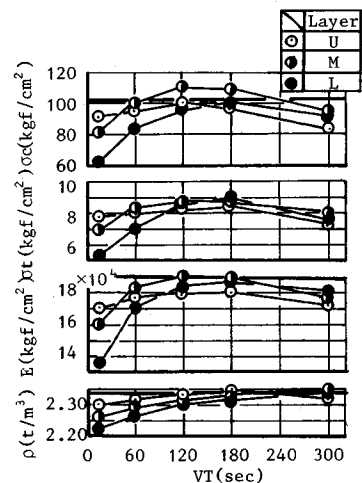


Fig. 6 Relations between Vibrating Time VT and Mechanical Properties in Each Layer.

や施工条件が異なるので厳密な比較はできないが、実際の振動ローラーによる締固めエネルギー<sup>13)</sup>に対応する締固め時間はおよそ60~120秒であって、上図からはほぼ十分な締固め程度に達していると判断される。

Fig. 7は、前図を試験体の高さ方向における分布状態に書き改めたものであって、締固め時間ごとに示されている。圧縮強度、引張強度および弾性係数の高さ方向分布をみると、15秒では上層ほど大きい、60秒以上では中層部が最も大きい。また、15~180秒における各層の力学的性質の変動範囲は下層ほど大きく、上層ではほぼ一定値とみなすことができるほど小さい。密度は各締固め時間で上層ほど大きい、時間とともに各層で増加する。その増加割合は下層ほど大きい。

このような現象が認められるのは、前章で述べたように、締固め効果が表層部から下方に向かって進行するからであって、初期では表層付近の締固め度が高く、下部ほど空隙が多いため、上層ほど力学的性質が大きくなる。また、締固め時間15~180秒において上層の力学的諸性質が大きく変化しないのは、その締固め度がすでにピーク値付近に達しているからである。さらに、120~180秒以上で各層の諸性質が減少傾向を示すのは、Fig. 4に示したように締固めによって水が上昇し、上層ほど水セメント比が大きく、また、下層ほどセメントペースト量が少なく、かつ、空気量が多いからである。なお、中層の強度が60秒以上で最大となった原因は明らかでないが、その内部組成と深い関連があるものと思われる。また、上層の密度が減少するのは締固めによって粗骨材が

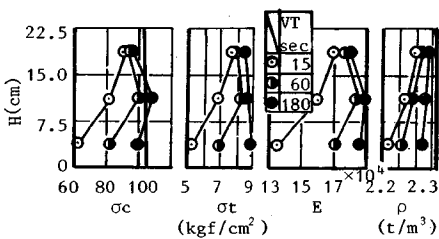


Fig. 7 Distributions of Mechanical Properties in the Vertical Direction.

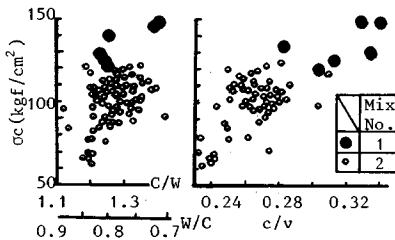


Fig. 8 Relations of Cement Water Ratio  $C/W$  and Cement Void Ratio  $c/v$  versus Compressive Strength  $\sigma_c$ .

沈降し、密度の小さいモルタルあるいはペーストと置き換わるからである。

Mix No. 1 および 2 のコンクリートを用い、それぞれ締固め条件 I および I ~ V によって作製した試験体について、各層の圧縮強度と引張強度ならびに圧縮強度と弾性係数の関係を検討したところ、多少のばらつきを示すが圧縮強度の増加とともに引張強度および弾性係数は増加傾向を示すことがわかった。したがって、圧縮強度から両性質をある程度推定可能であって、以下では圧縮強度を対象とし、これと内部組成の関係を検討する。

(2) 圧縮強度に影響を及ぼす内部組成因子

内部組成と圧縮強度の関係について種々の説が発表されているが、現在広く用いられているのは水セメント比説と空隙説である。Fig. 8は、前節で述べた圧縮強度試験結果をセメント水比およびセメント空隙比により整理したものである。相関係数は前者で0.38、後者で0.43であって、セメント空隙比を因子とした方がやや高い相関関係が得られるものの、ともにばらつきが大きく、これらを内部組成因子として採用することは適当でないと思われる。

施工現場において、コンクリートの密度を特性値として締固め管理を行うことがある。しかし、Fig. 6に示したように、締固め時間120~180秒まで密度と圧縮強度の間にある程度の相関が認められるが、これ以上では同様な相関関係が認められない。このように過剰締固め段階では密度を因子として圧縮強度を評価することは適当でないことがわかる。

より高い精度の強度式を得るために、締固め過程において大きく変動した組成成分に着目し、これらを強度に対する影響因子とみなすことにした。Fig. 4に示したように、締固めによる空気、水、セメント、細骨材および粗骨材の単位量比の変動範囲は、それぞれおよそ0.9~1.3、0.8~1.3、0.8~1.2、0.9~1.1および0.9~1.1であって、特に、前3者の変動程度が大きい。また、Fig. 9に Mix No. 2 のコンクリートの配合分析から得た結果を示すが、水セメント比と水あるいはセメントの単位量比の間にある程度の相関が認められる。以上より、空気量と水セメント比が圧縮強度に影響を及ぼす主要な

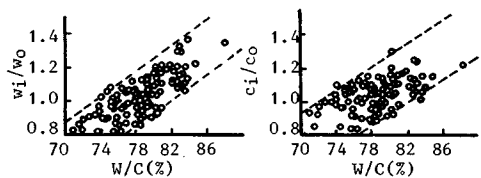


Fig. 9 Relations of Unit Water Content Ratio  $w_i/w_0$  and Unit Cement Content Ratio  $c_i/c_0$  versus Water Cement Ratio  $W/C$ .

内部組成因子であると判断される。

(3) 締固め度の評価方法

Popovics は Abrams の強度式をもとにコンクリート中の空隙と水セメント比をパラメーターとした関係式 (1) を提案した<sup>16)</sup>。

$$\sigma_c = \frac{A}{B^{w/c}} \times 10^{-ra} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\sigma_c$ : 圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $W/C$ : 水セメント比、 $a$ : 空気量 (%) であって、 $W/C$  と  $a$  はフレッシュコンクリートについての測定値である。  $A$  と  $B$  はセメントの種類、材令、養生条件などによって定まる実験定数であり、 $r$  は使用材料などによって定まる実験定数である。式 (1) を変形すると次のようになる。

$$\log \sigma_c = \log A - \log B(W/C + ra/\log B) \dots \dots \dots (2)$$

上式は、 $\sigma_c$  を対数目盛にとれば  $(W/C + ra/\log B)$  と直線関係になる。 Fig. 8 に示した強度試験結果を式 (2) にあてはめると次のようになる。

$$\log \sigma_c = 2.384 - 0.227(W/C + 0.168 a) \dots \dots \dots (3)$$

Fig. 10 に、 $(W/C + 0.168 a)$  と  $\sigma_c$  の関係を示す。図から、この項が小さいほど圧縮強度は増加する傾向が認められる。これは、締固め過程において水セメント比と空気量が同時に減少するか、あるいは、一方の値が増加しても他方が大きく減少し、その結果この項がより小さな値になれば、これに対応して圧縮強度は増大することを意味している。相関係数は 0.88 であって、セメント水比あるいはセメント空隙比を因子とした場合よりも高い精度の強度式であることがわかる。

$(W/C + 0.168 a)$  に Mix No. 2 のコンクリートの示方配合における  $W/C = 0.799$  と  $a = 5\%$  を代入すると 1.639 となり、さらにこの値を式 (3) に代入すると  $\sigma_c = 103 \text{ kgf/cm}^2$  を得る。これは標準供試体による圧縮強度の平均値と一致する。つまり、この項が締固め初期における大きな値から徐々に減少しておよそ 1.64 になれば十分な締固め状態に達したと判断できるのであって、著者らはこれを締固め係数  $CF$  とよび、この係数によって締固め度を評価することにした。

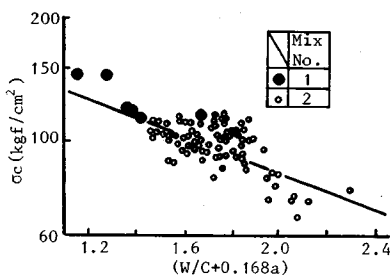


Fig. 10 Relations between  $(W/C + 0.168 a)$  and Compressive Strength  $\sigma_c$ .

Fig. 11 は、一例として、Mix No. 2 のコンクリートを締固め条件 I で締固めたときの時間と  $CF$  の関係であって、Fig. 4 および 6 に対応している。図から、締固め時間とともに各層の  $CF$  は減少傾向を示すこと、その減少程度は下層ほど大きいこと、上層の  $CF$  は 60 秒以上でほとんど変化しないことが認められる。一方、Fig. 6 から締固め時間 120~180 秒で圧縮強度はピーク値に達しており、その範囲は 95~110 kgf/cm<sup>2</sup> であって、標準供試体の強度試験結果から求めた 2  $\sigma$  限界の下限值 93 kgf/cm<sup>2</sup> を上回っている。これに対応する  $CF$  は Fig. 11 から 1.65~1.80 であることから、実際にはこの範囲を目標にして締固めの管理を行えば全高さにわたって十分な締固め度が得られることになる。

Fig. 12 に、各締固め段階における空気量、水セメント比、圧縮強度および  $CF$  の高さ方向分布を模式的に示す。パターン I は上・中・下層ともに所定の  $CF$  に達していない場合、II、III および IV はそれぞれ上層のみ、上・中層のみおよび全層が所定の  $CF$  に達した場合、V は過剰に締固めた場合である。図から、締固めプロセスにおける上記 4 要因の変化傾向がわかるし、あらかじめパターン IV における  $CF$  の高さ方向分布を求めてお

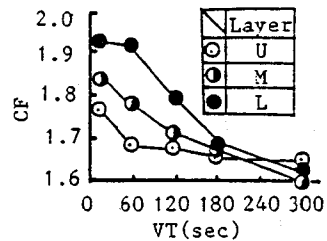


Fig. 11 Relations between Vibrating Time  $VT$  and Compaction Factor  $CF$ .

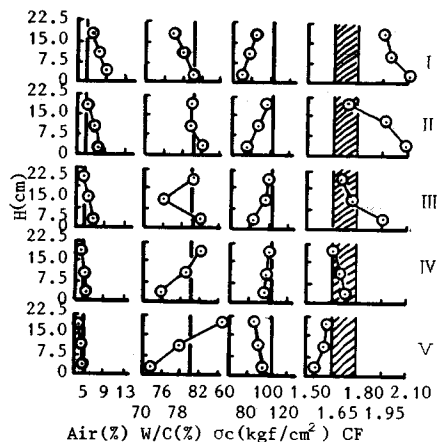


Fig. 12 Vertical Distribution Patterns of Air Content, Water Cement Ratio  $W/C$ , Compressive Strength  $\sigma_c$  and Compaction Factor  $CF$  at Each Compaction Level.

けば、上層の CF のみを測定することによって締固め度の管理が可能である。

5. 締固め条件と締固め度の関係

本章では、振動機の機械特性である振動機重量、振動数および振幅とコンクリートの締固め度の関係について検討した。さらに、締固め度に及ぼすコンクリートのまき出し厚さの影響を明らかにするため、高さの異なる試験体を作製し、その締固め度を測定した。次に、小型試験体ではコンクリートがモールドにより拘束されるため締固めによる流動状態が現場における場合と異なることが懸念されたので、大型試験体を作製し、その締固め度を小型試験体の場合と比較検討した。

(1) 振動機の機械特性と締固め度の関係

機械特性として振動機の重量、振動数および振幅を取り上げ、各特性が締固め度に及ぼす影響を検討した。

Fig. 13 はその結果であって Mix No. 2 のコンクリートを締固め条件Ⅱ、ⅢおよびⅣによってそれぞれ締固めたときの CF が各層ごとに示されている。図中の斜線部分は十分な締固め度に達したと判断される締固め係数 CF の範囲である。図から、振動機重量、振動数および振幅がそれぞれ増加すると CF は減少傾向を示すことが認められる。このような性能の振動機を用いた場合、CF の減少傾向に対し最も大きい影響を及ぼす特性は振動数であることから、特にこの特性値を適切に設定することによってより効果的な締固めが可能になると考えられる。

上記の各特性が締固め仕事量に及ぼす影響を一括して表わすため、締固めエネルギー算定式(4)が用いられている<sup>3)</sup>。

$$E = 2A \left( W + \frac{F}{2} \right) N \cdot t \cdot \frac{1}{S} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、E：締固めエネルギー (kgf・cm/cm<sup>2</sup>)、2A：振幅 (cm)、W：振動機重量 (kgf)、F：起振力 (kgf)、N：振動数 (Hz)、t：締固め時間 (s)、S：締固め板の

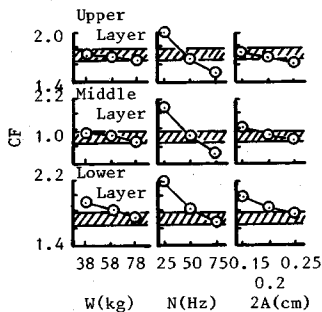


Fig. 13 Effects of Vibrator Weight W, Vibrating Frequency N and Amplitude 2A on Compaction Factor CF.

面積 (cm<sup>2</sup>) である。式(4)における起振力 F は一般に次式(5)で表わされる。

$$F = (2\pi N)^2 R M \dots\dots\dots (5)$$

ここに、M：振動機の偏心錘の重量 (kgf)、R：錘の偏心距離 (cm) であり、起振力は最大加速度と偏心錘重量の積で表わされる。

式(4)は、その形から明らかなように試料の単位表面積に加えられる理論エネルギーであり、式(5)から加速度は振動数の2乗と振幅に比例することがわかる。実際には、振動機重量を増すとこれに伴って振幅と振動数の低下は避けられないのであって、このような場合、式(4)により算定したエネルギーは過大な値を与えることになる。この差異をできるだけ消去するため、設定した振動数と振幅から起振力を求めるのではなく、測定加速度 a' (g) を用いることにした。

$$F = a' M \dots\dots\dots (5')$$

Fig. 14 は、Mix No. 2 のコンクリートを締固め条件Ⅰ～Ⅳにより締固めたとき、式(4)および(5')により算定した締固めエネルギーと CF の関係を各層について示したものである。図中の斜線部分は十分な締固め度に達したと判断される CF の範囲である。この範囲の締固めエネルギーは、上・中・下層でそれぞれおよそ 200～600、400～1300、800～2000 kgf・cm/cm<sup>2</sup> であることから、全高さにわたって十分な締固め状態とするための最小エネルギーはおよそ 800 kgf・cm/cm<sup>2</sup> となる。式(4)にこの値を代入すると振動機の諸特性と締固め時間に関して多くの組合せが得られるが、経済性などの条件を考慮のうえ、最も効率のよい組合せを選択すればよいことになる。

(2) 試験体の寸法と締固め度の関係

以上の実験は試験体 P-1 を用いて行ったが、同じ断面で高さを大きくした場合、これが締固め度に及ぼす影響を検討した。Fig. 15 はその結果であって、Mix No. 2 のコンクリートを用いて締固め条件Ⅴによって試験体 P-1, 2 および 3 を作製し、上・下層の CF を測定した

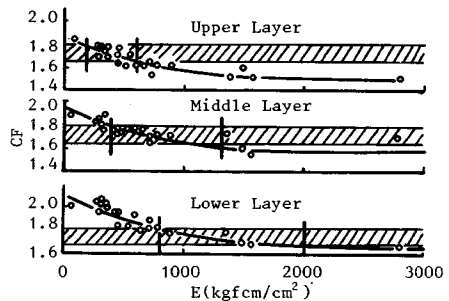


Fig. 14 Relations between Compaction Energy E and Compaction Factor CF.



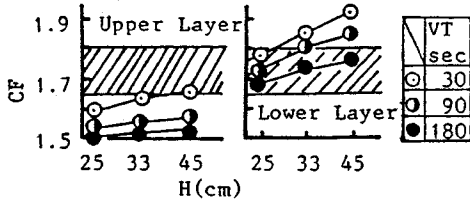


Fig. 15 Relations between Specimen Height  $H$  and Compaction Factor  $CF$ .

ものである。図から、試験体の高さが大きくなるほど各締固め時間における  $CF$  は増加する傾向にあること、この増加程度は上層よりも下層で大きいことが認められる。これは高さが大きくなると締固め効果が下層まで伝わりにくいが、上層部は比較的容易に締固まることを意味している。また、上層の  $CF$  はほとんどが十分な締固め度に達したと判断される範囲を下回っているが、下層ではこれを上回るものが認められ、高さ方向の締固め度にアンバランスが生じている。これは前節で述べたように、機械特性値の不適切な組合せに起因するのであって、特に設定振動数が過大であったためと考えられる。

次に、試験体の高さを一定とし、その断面を大きくしたときの締固め度について検討した。使用したコンクリートは Mix No. 3、試験体は P-2 および L、締固め条件は VI であり、試験体 L の締固め方法は Fig. 2 に示したとおりである。

Fig. 16 は、試験体 P-2 の圧縮強度と試験体 L の中心部および側壁部の圧縮強度を対応させて示したもので、締固め時間と測定位置は記号で区分されている。なお、側壁部から切り出されたコアの断面中心とせき板の距離は約 10 cm であった。図から、試験体 L の中心部および側壁部の強度は P-2 のそれよりそれぞれ 10 kgf/cm<sup>2</sup> および 30 kgf/cm<sup>2</sup> 程度低いことが認められる。P-2 と L の中心部における単位面積当たりの締固め時間が等しかったにもかかわらずこのような結果が生じたのは、前者ではコンクリートがモールドと締固め板により拘束されるため締固めによる流動の程度は小さいが、後者では、

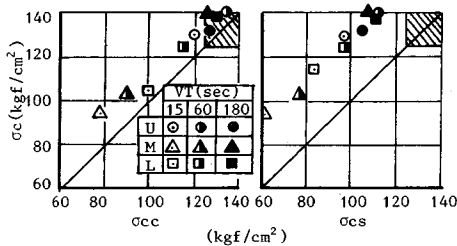


Fig. 16 Comparisons between Compressive Strengths of Specimen P-2 and those of Specimen L ( $\sigma_c$ : P-2,  $\sigma_{cc}$ : Central Portion of L,  $\sigma_{cs}$ : Side Wall Portion of L).

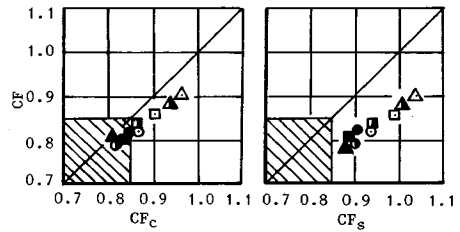


Fig. 17 Comparisons between Compaction Factors of Specimen P-2 and those of Specimen L ( $CF$ : P-2,  $CF_c$ : Central Portion of L,  $CF_s$ : Side Wall Portion of L).

側方への流動と締固め板周辺への盛り上がりが生じるなど流動の程度が大きいため前者ほど容易に十分な締固め状態に達しないからである。このことは両者の配合分析試験結果の比較から裏付けされる。すなわち、締固め過程における組成成分量の変化傾向はいずれも Fig. 4 に示したものと同様であったが、増加あるいは減少傾向に転ずる時間は L の場合の方が長いことから、締固めの進行程度に遅れがあると判断された。一方、L の側壁部における強度低下は、締固めによる流動の程度が大きいこと、中心部におけるよりも締固め時間が短いため、モルタルの行きわたりが不十分であったことに起因すると考えられる。

次に、締固め係数  $CF$  により締固め度を評価する。試験体 P-2 および L による配合分析および圧縮強度試験結果を式 (2) にあてはめると次のようになる、

$$\log \sigma_c = 3.366 - 1.515(W/C + 0.054a) \dots \dots \dots (6)$$

Fig. 17 は、上式中の  $(W/C + 0.054a)$  から求めた試験体 P-2 の  $CF$  と L の中心部および側壁部の  $CF$  を対応させて示したもので、締固め時間と試料の採取位置の記号は前図と同じである。図から L の  $CF$  はすべて P-2 のそれより大きく、特に側壁部で著しいことが認められる。これらの対応関係は Fig. 16 に示した結果と類似している。以上の結果から、L の締固め度を P-2 の場合と同程度にするためには、締固め時間を長くするなどして締固め仕事量を増す必要があると判断される。

この実験シリーズでは、過剰に締固めた試験体を作製していないので  $CF$  の下限値を求めることはできないが、標準供試体の圧縮強度試験結果から求めた  $2\sigma$  限界の下限値 122 kgf/cm<sup>2</sup> を目標強度と仮定し、これを式 (6) に代入して  $CF$  の上限値 0.85 を得た。これを満足する範囲を Fig. 16 および 17 に示した。

## 6. 結 論

以上、超硬練り貧配合コンクリートの振動締固め機構、締固め度の評価法、締固め度に及ぼす締固め条件の影響について述べてきた。それらを要約すると以下のである。

(1) 表面振動機による締固め効果は表層部から下方に向かって徐々に伝播する。その間に、水およびセメントペーストの動きが顕著に認められた。すなわち、初期では急激に下降し、その後上昇へと転じ、さらにゆるやかな上昇傾向を続ける。

(2) 細骨材は、(1)で述べた水およびセメントペーストの下降流あるいは上昇流に搬送されて移動する。この移動程度は水あるいはセメントの場合より小さい。

(3) 締固めによる細骨材の動きはごく小さく、その移動方向は水、セメントおよび細骨材の場合と逆である。これは、粗骨材が移動して水、セメントペーストあるいはモルタルと置き換わることを意味する。

(4) (1), (2), (3)の結果より、締固め過程における水、セメント、細骨材、粗骨材は相互に密接な関連を保ちながら移動し、ある締固めレベルに達することがわかる。一方、空気泡はこれらの動きに大きく影響されることなく、終始上昇傾向のみを示す。

(5) セメント水比、セメント空隙比あるいは密度と圧縮強度の間に高い相関関係は認められなかった。圧縮強度に影響を及ぼす主要な内部組成因子は水セメント比  $W/C$  と空気量  $a$  であって、両因子からなる  $(W/C + k \cdot a)$  をパラメーターとした強度式を示した。

(6) (5)に示したパラメーターによって締固め度の評価が可能であり、これを締固め度管理の特性値として適用する手法を示した。

(7) 振動機の重量、振幅、締固め時間の組合せを決めるにあたり、特に振動数の設定が不適切であれば1リフトの高さが大きいほど高さ方向における締固め度の分布状態が不均一となる場合がある。

(8) 室内実験に使用される小型試験体では、コンクリートがモールドにより拘束されるため、その流動程度は現場における場合より小さく、したがって、両者の締固め度に差異があると考えられた。そこで、大型試験体を作製し、両締固め度の対応関係を明らかにした。

謝 辞：本実験を行うにあたり、建設省東北地方建設局企画部技術管理官 鳥居欽吾氏（前・玉川ダム工事事務所所長）から多大のご指導とご援助を得た。また、表面振動機の試作にあたり、林パイブレーター株式会社からご協力を得た。ここに記して謝意を表します。なお、本研究は、昭和60, 61年度文部省科学研究費補助金（一般研究（C）課題番号60550331）によったことを付記

する。

#### 参 考 文 献

- 1) 上阪恒雄・塩入淑史：締固め工法における進歩—RCD工法を中心に—、コンクリート工学、Vol.23, No.7, pp.74~81, 1985.
- 2) 中原 康ほか：振動ローラ締固めコンクリート工法の開発研究（その1~5）、鹿島建設技術研究所報第26~29号、1978~1980.
- 3) (財)国土開発技術研究センター：RCD工法によるダム施工、pp.32~47, 1981.
- 4) (財)国土開発技術研究センター：RCD工法技術指針（案）、pp.11~17, 1981.
- 5) 小住有巧・小林茂敏：超かた練りコンクリート—RCD工法への適用—、土木技術、第36巻、12号、pp.85~91, 1981.
- 6) 藤沢侃彦：コンクリートダムにおける品質管理、コンクリート工学、Vol.21, No.7, pp.73~78, 1983.7.
- 7) 広瀬利雄・志木茂明・竹村公太郎：RCDコンクリート工法によるダムの施工に関する研究、土木学会論文集、第303号、pp.93~108, 1980.11.
- 8) 根上義昭・嶋田 洋・奥村忠彦：150mmの粗骨材を用いたRCDコンクリート—新中野治水ダム減勢工部の施工—、セメントコンクリート、No.420, pp.26~35, 1982.2.
- 9) Schrader, E. K. : The First Concrete Gravity Dam Designed and Built for Roller Compacted Construction Methods, Concrete International, Vol.4, No.10, pp.15~24, Oct. 1982.
- 10) Hirose, T. and Yanagida, T. : Dam Construction in Japan, Burst of Growth Demands Speed, Economy, Concrete International, pp.4~19, May 1984.
- 11) 原田譲治：RCD工法による玉川ダムの施工、セメントコンクリート、No.457, pp.49~58, March 1985.
- 12) 青柳征夫：ローラーコンパクトドコンクリートの技術開発の現状と今後の課題、電力土木、No.188, pp.5~10, 1984.1.
- 13) 嶋津晃臣ほか：RCDコンクリートの締固め実験、建設省土木研究所資料、1980号、1983.3.
- 14) 中内博司・中川喜樹・庄野 昭：RCCコンクリートの締固めに関する研究（第1報）、間組研究年報、pp.85~91, 1981.
- 15) 加賀谷誠・徳田 弘・川上 洵：各種混和剤を用いたコンクリートの振動締固めによる材料分離現象、材料、Vol.32, No.353, pp.161~167, 1983.
- 16) Sandor Popovics : New Formulas for the Prediction of the Effect of Porosity on Concrete Strength, ACI Journal, Vol.82, No.2, pp.136~146, March-April 1985.

(1986.8.14・受付)