

# 振動台によるローラーコンパクテッドコンクリートの振動締固め特性とレオロジー特性の検討

遠藤孝夫\*・加藤治\*\*・栗田守朗\*\*\*・  
青柳征夫\*\*\*\*

RCCの振動締固め性状の解明を目的に、振動台上のモールドにコンクリートを充填して加振し、締固め性状を調べた。また、振動下のモルタルやコンクリートのレオロジー特性も計測した。この結果、加えられる加速度や運動エネルギーが増加するとコンクリートの粘性が低下して液状化し、急激に締固めが進行すること、さらに、締固め性状は加速度や運動エネルギーで説明できることが示された。

**Keywords** : roller-compacted concrete, fresh concrete, compaction behavior, rheological property, liquefaction

## 1. まえがき

超硬練りのコンクリートを振動ローラーで締固める工法（ここではローラーコンパクテッドコンクリート工法と呼ぶことにし、以後RCCと略記する。）は、施工の迅速性と経済性により国内でもいくつかのダムで採用されてきた。また、最近では一般の道路舗装にも適用されて、その用途は益々拡大されつつある。

この工法に関しては多くの実用的な研究が実施され成果を取ってきたが、いまだに締固め機構の不明確さに起因する課題が残っている。すなわち、打込み方法や締固め方法、あるいは材料のコンシステンシーの相違が締固め度に及ぼす影響や、これらの要因を考慮した合理的な施工法が確立されているとはいえない。

RCCの締固め機構に関しては、徳田等<sup>1)~3)</sup>が振動バイブレーターと振動テーブルを用いて締固め性状を間隙水圧、水セメント比、強度、セメントペーストの移動等の観点より検討し、表面振動締固め性状を定性的に明らかにし、間隙水圧による施工管理法を提案しているが、これ以外、この方面の研究はほとんど見当たらない。

一般に、コンクリートの締固め現象は、コンクリート中の粗骨材とモルタルが移動しながら内部の空気を排除しつつ、最も密度が大となるように再配置されることと考えられている。このための必要条件は第一にモルタルが流動しやすいこと、第二に粗骨材の再配置に必要な適切な力あるいは運動エネルギーが外から供給されることであると思われる。

そこで、本報告ではRCCの締固め条件の基礎的資料を得ることを目的に、振動台によるRCCの沈下性状よりRCCの締固め性状に及ぼす振動要因とコンシステンシーの影響を検討し、次に各振動条件下でのフレッシュモルタルやコンクリートのレオロジー特性の試験を行い、RCCの流動化の条件を明らかにしようとするものである。

## 2. 振動台によるRCCの締固め特性の検討

ここでは、RCCを円筒形容器に充填し、変位振幅および加速度をパラメーターとして振動台で振動締固めを行い、沈下挙動を解析し、締固め性状に及ぼす振動条件とコンクリートのコンシステンシーの影響を検討する。

### (1) 実験概要

#### a) 実験に用いたコンクリート<sup>4)</sup>

使用したセメントは中庸熱ポルトランドセメントで、細骨材は比重2.62、吸水率2.12%、粗粒率2.75%の天然砂、また、粗骨材は比重2.65、吸水率0.85%の硬質砂岩の碎石である。

コンクリートの配合は一般的に使用されているRCD用コンクリートの配合を参考にし、セメント(C)とフライアッシュ(F)を $(C+F)=120\text{Kg/m}^3$ 、 $F/(C+F)=30\%$ と定め、混和剤は遅延型減水剤で、単位結合材料の0.25%を使用した。表-1に配合表を示す。なお、このコンクリートは40mmふるいで湿式ふるい分けしたコンクリートによる後述の小型VC値が12秒程度のものである。また、コンシステンシーの影響に関する実験では、表-1の配合のうち単位水量のみを変化させた合計5種類の配合のコンクリートを用いた。

コンクリートの練り混ぜは、容量300lの可傾式ミキサーを用い、40mmふるいで湿式ふるい分けしたものを試験に供した。また、各試料の初期密度が各実験ケースで同一となるように、密度 $2.13\text{g/cm}^3$ を目安に試料の高

\*正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所  
耐震部 材料研究室長 (〒270-11 我孫子市我孫子1646)

\*\*正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所  
原燃サイクル部 輸送・貯蔵研究室 主査研究員

\*\*\*正会員 工修 清水建設(株)技術研究所

\*\*\*\*正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 特任研究員

さおよび重量を調整し、2層に分け各層100回の突き固めを行った。

b) 実験装置と測定項目<sup>9)</sup>

実験の状況は図-1に示すとおりで、コンクリート表面にアクリル板および20kgの重錘を載せ、油圧サーボ型振動台を用いて加振した。また、コンクリートを充填した容器は内径48cm、高さ40cmの大型VC試験用円筒型枠である。

コンクリートの初期密度および加振終了後の最終密度は、試料の高さおよび重量を測定して求め、加振中のコンクリート表面の沈下量の経時変化は、歪ゲージ型変位形で測定した。

本実験では振幅制御および加速度制御による正弦波の上下方向加振を実施した。振幅制御実験では振幅を0.50, 0.75および1.00mmとして、振動数を10~70Hz間で10Hz間隔で変化させ、加速度制御実験では加速度を1.0Gから11.0Gまでとして、振動数を30, 50および70Hzと変化させた。

コンシステンシーを計るためのVC試験は、振動数50Hz、加速度11.0Gの条件で、加振開始後アクリル板全面にペーストが付着するまでの時間(秒)をVC値として求めた。尚、小型VC試験では、同一の加振条件で内径24cm高さ20cmの容器を用いた。

(2) 実験結果および考察

a) 沈下曲線のモデル化

沈下挙動の評価式はいくつか考えられるが、ここでは、以下の考察に必要な範囲にとどめ、次の解析法を導入する。

いま、コンクリート中の空気量の減少速度は、その時点のコンクリートに含まれている空気量に比例すると考える。空気を含まないコンクリートの体積を $V_c$ 、その時点でコンクリートに含まれている空気量を $V_a(t)$ 、容器の断面積を $A_v$ とすると、コンクリートの表面の高さ $l(t)$ は、

$$l(t) = (V_c + V_a(t)) / A_v \quad (1)$$

$$\therefore V_a(t) = A_v l(t) - V_c \quad (2)$$

仮定より、

$$\frac{dV_a(t)}{dt} = A_v \frac{dl(t)}{dt} = -kV_a(t) \quad (3)$$

となる。ここに $k(>0)$ は比例定数である。

式(3)を $V_a(0) = V_0$ (ここに $V_0$ は最初の空気量)の条件のもとに解けば、

$$V_a(t) = V_0 e^{-kt} \quad (4)$$

を得る。したがって

$$l(t) = \frac{V_c + V_0 e^{-kt}}{A_v} \quad (5)$$

ここで初期のコンクリートの高さを $l_0$ とすると

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)	W		F		S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							* 混和剤
		C+F		C+F			結合剤		G					
		C	F	C	F		W	S	80mm - 40	40mm - 20	20mm - 10	10mm - 5		
80	1.5	83.3	30	32	120	100	711	1585				0.25		
					84	36				501	516	304	197	

\*混和剤は遅延型減水剤であり、結合材料の0.25%を用いた。

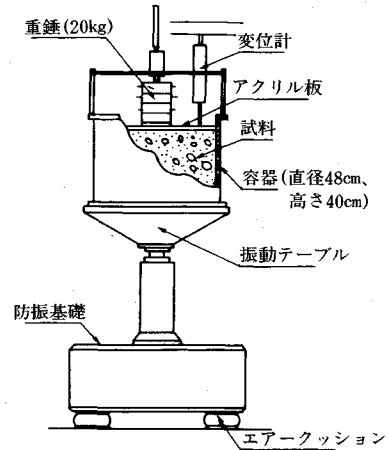


図-1 実験装置

$$l(t) = l_0 = \frac{V_c + V_0}{A_v} \quad (6)$$

定義より沈下率は、

$$y(t) = \frac{l_0 - l(t)}{l_0} = \frac{V_0}{V_c + V_0} (1 - e^{-kt}) \quad (7)$$

ここで

$$\frac{V_0}{V_c + V_0} = m \quad (8)$$

とおけば、

$$y(t) = m(1 - e^{-kt}) \quad (9)$$

となる。なお、上式における未定数 $m$ および $k$ は伊藤・岡本<sup>9)</sup>にならって、非線形最小2乗法によって決定するものとする。

なお、この場合の最終の沈下率は、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = m \quad (10)$$

また、沈下率の速度は、

$$\frac{dy}{dt} = m k e^{-kt} \quad (11)$$

であり、初速度は、

$$\left[ \frac{dy}{dt} \right]_{t=0} = m k \quad (12)$$

となる。したがって、 $m$ は初期の全体積に占める空気量の比率(空隙率あるいは最終沈下率)を示し、 $k$ は単位の初期空隙率における初期沈下速度を表す。以上の方法を本実験にあてはめた結果を表-2および図-2、図

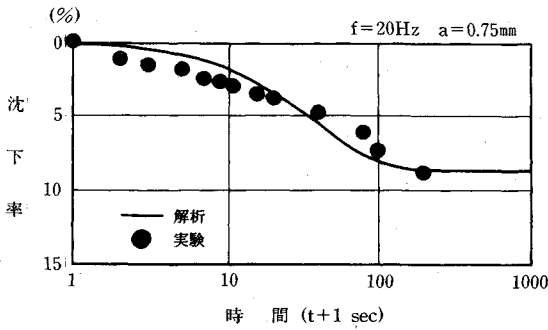


図-2 コンクリートの沈下性状

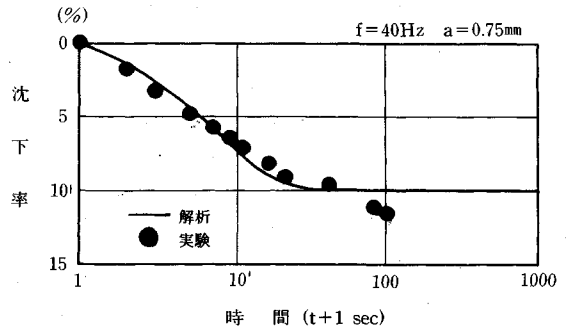


図-3 コンクリートの沈下性状

一3に示す。これらより全体的には解析値が実験値と良く対応していると考えられる。

b) 沈下性状に及ぼす振動条件の影響

初期沈下速度  $k$  と加速度との関係を図-4に示す。これより、加速度が大きくなると初期沈下速度  $k$  が大きくなるが、ある加速度を越えると  $k$  はほぼ一定の値となる。

ところで、フォークト (Voigt) モデル (弾性係数  $E$ 、粘性係数  $\eta$ ) のクリープ曲線は、応力を  $\sigma_0$ 、ひずみを  $\epsilon$  とすれば、

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta}t\right) \right\} \dots\dots\dots(13)$$

であり、式(9)とは、見かけ上

$$m \sim \sigma_0/E \dots\dots\dots(14)$$

$$k \sim E/\eta \dots\dots\dots(15)$$

の対応関係が成立している。(これは、コンクリートが容器に詰められているからであり、コンクリートが Voigt モデルで表されることを意味しない。)

$k$  は  $E/\eta$  とのアナロジーをもち、 $E$  は弾性係数であり、その次元は工学的に  $\text{kgf/cm}^2$  である。そこで、この次元を別の観点から眺めてみると、

$$\begin{aligned} 1\text{kgf/cm}^2 &= 9.8 \times 10^5 \text{dyn/cm}^2 \\ &= 9.8 \times 10^5 \text{erg/cm}^3 \end{aligned}$$

となり、 $E$  の次元は単位体積あたりのエネルギーになっている。一方、締固めにおけるエネルギーの重要性がすでに指摘されており<sup>7)</sup>、締固めには何らかの形の単位体積あたりのエネルギーが関係しているものと推察される。

ここでは、理論的根拠は十分ではないが、理解し易い単位体積あたりの運動エネルギーの最大値  $Ek$  をまずとりあげ、検討してみる。 $Ek$  は次式で表わされる。

$$Ek = \frac{1}{2} \rho a^2 \omega^2 (\text{erg/cm}^3) \dots\dots\dots(16)$$

ここで、 $\rho$ : 試料の密度 ( $\text{g/cm}^3$ )

$a$ : 振動台の振幅 (cm)

$\omega$ : 振動台の振動の角速度 (rad/s)

表-2 (1) 沈下性状の解析結果

No	振動数 (Hz)	振幅 (mm)	加速度 (G)	E k	解 析		沈下終了	
					m	k	時間	E d
1	10	0.5	0.2	12	-	-	-	-
2		0.75	0.3	28	0.9	2.778	-	-
3		1.0	0.4	49	0.6	1.922	-	-
4	20	0.5	0.8	49	0.9	0.641	-	-
5		0.75	1.2	111	8.7	0.026	-	-
6		1.0	1.6	196	11.8	0.078	59	5782
7	30	0.5	1.8	111	14.1	0.030	154	8547
8		0.75	2.7	249	10.8	0.104	44	5478
9		1.0	3.6	442	10.5	0.143	32	7072
10	40	0.5	3.2	196	11.4	0.061	75	7350
11		0.75	4.8	442	10.1	0.141	32	7072
12		1.0	6.4	786	10.9	0.244	19	7467
13	50	0.5	5.0	307	11.7	0.094	49	7522
14		0.75	7.6	691	10.1	0.179	26	8983
15		1.0	10.1	1228	12.5	0.234	20	12280
16	60	0.5	7.3	442	13.8	0.125	37	8177
17		0.75	10.9	995	13.5	0.251	18	8955
18		1.0	14.5	1768	14.3	0.192	24	21216
19	70	0.5	9.9	602	9.8	0.208	22	8622
20		0.75	14.8	1354	10.4	0.203	23	15571
21		1.0	19.7	2406	8.7	0.224	21	25263

表-2 (2) 沈下性状の解析結果

No	加速度 (g)	振動数 (Hz)	振幅 (mm)	E k	解 析		沈下終了	
					m	k	時間	E d
1	1	30	0.28	34	3.5	0.112	-	-
2		50	0.10	12	10.4	0.048	96	576
3	3	30	0.83	303	11.6	0.099	47	7121
4		50	0.30	109	10.6	0.065	71	3870
5	5	70	0.15	56	10.0	0.041	112	3136
6		30	1.38	841	10.7	0.288	16	6728
7	7	50	0.50	303	12.5	0.119	39	5909
8		70	0.25	154	13.3	0.044	105	8085
9	9	30	1.93	1648	8.3	0.282	18	14832
10		50	0.70	593	9.2	0.185	25	7413
11	11	70	0.35	303	13.7	0.105	44	6666
12		50	0.89	981	7.7	0.254	18	8823
13	13	70	0.46	500	8.0	0.163	28	7000
14		50	1.09	1465	10.9	0.256	18	13185
15	15	70	0.56	747	10.9	0.226	20	7470

$m$  は加振時間が無限大で得られる終局の沈下率 (最終沈下率) あるが、この値の99%の沈下率に到達するまでに要する時間を沈下終了時間  $t_c$  と定義する。

$k$  と  $Ek$  との関係を図-5に、沈下終了時間  $t_c$  と  $Ek$  との関係を図-6に示す。これらより、 $Ek$  が  $800 \sim 1000 \text{ erg/cm}^3$  までは、 $k$  は  $Ek$  に比例して大きくなり、沈下終了時間  $t_c$  は減少するが、それ以上の  $Ek$  では、 $k$  の増加は見られず、 $t_c$  も  $Ek$  約  $700 \text{ erg/cm}^3$  以上でほぼ一定となる。これらのことより、振動締固めに有効な運動エネルギーの上限が存在すると見られる。

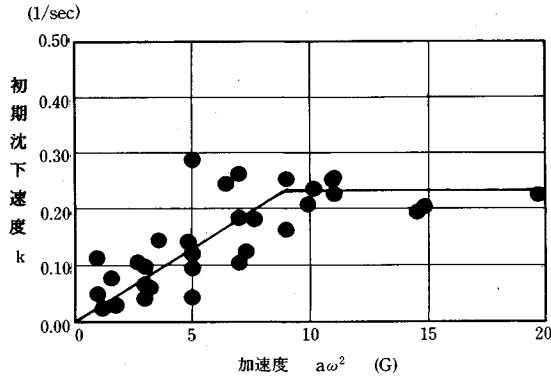


図-4 k と加速度の関係

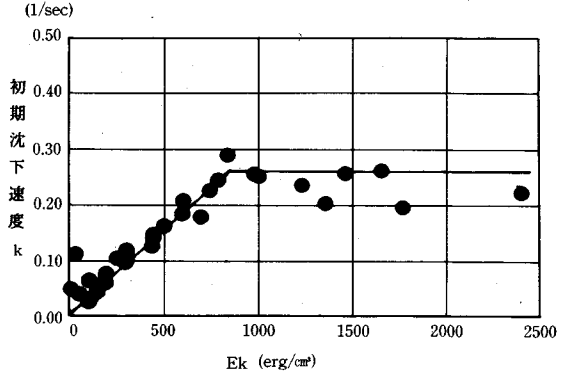


図-5 k と Ek の関係

最終沈下率  $m$  と  $Ek$  との関係を図-7 に示す。最終沈下率が急増するのは、およそ  $100 \text{ erg/cm}^2$  以上の領域であり、そこでは  $m$  は  $10\sim 15\%$  の値となる。ただし、 $Ek$  が  $100 \text{ erg/cm}^2$  でも加速度が約  $1.5 \text{ G}$  以下の場合には最終沈下率は  $10\%$  を越えていない。また、RCC の初期密度は、当初目標としていた値 ( $2.13 \text{ g/cm}^3$ ) に極めて近いもので、このとき空隙率は  $12\sim 15\%$  であったが、締め終了後の最終密度は、 $Ek$  がおよそ  $100 \text{ erg/cm}^2$  以上では約  $2.4 \text{ g/cm}^3$  と、理論密度の約  $95\%$  以上の値 (空隙率は  $5\%$  以下) を示し、十分に締めめがなされたものと考えられた。

次に、沈下をもたらす要因について考える。いま、運動エネルギーの時間に対する平均値を考え、これと沈下終了時間  $tc$  との積を消費エネルギー指標  $Ed$  と名付けて検討を行うことにする。

$$Ed = \rho a^2 \omega^2 tc / 4$$

$Ek$  と消費エネルギー指標  $Ed$  の関係を表-2 および図-8 に示す。これらの図表より、 $Ek$  がおよそ  $1000 \text{ erg/cm}^2$  以下では、消費エネルギー指標は  $5000\sim 10,000 \text{ erg}\cdot\text{sec/cm}^2$  とほぼ一定であるが、それ以上では消費エネルギー指標が増大することがわかる。これより、例えば、振動数  $40 \text{ Hz}$ ・振幅  $1 \text{ mm}$  ( $Ek \approx 800 \text{ erg/cm}^2$ ) では約  $10$  秒程度の加振で締め固まるが、 $Ek$  が約  $1000 \text{ erg/cm}^2$  以上ではエネルギーが浪費されることになる。

c) コンシステンシーと VC 値の関係

基本配合を基準として単位水量のみを変化させた5種類のコンクリートの振動締め実験の結果を表-3 に示す。これらより、試料1~5の小型 VC 値は目標とした水準を満足するものであった。一方、大型 VC 値は、試料5 (小型 VC 値50秒) の場合のみ測定不能であった。

前述した解析法によれば、VC 値が大きくなるとともに、沈下速度が遅くなり、最終沈下率が小さくなる傾向が認められる。また、試料1~3までは最終密度が  $2.4 \text{ g/cm}^3$  以上であったのに対し、試料4および5の場

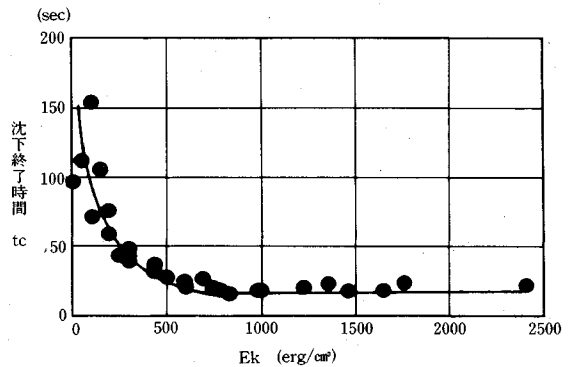


図-6 tc と Ek の関係

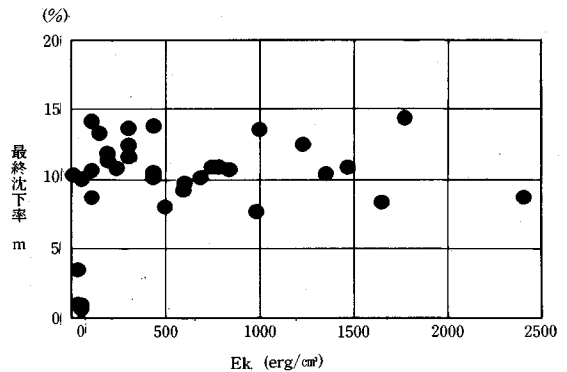


図-7 m と Ek の関係

合には  $2.2\sim 2.3 \text{ g/cm}^3$  となっており、締め固めが不十分であるものといえる。

したがって、同じ締め固め効果を得るためには、VC 値の大きいものほど長時間を要すること、すなわち、コンシステンシーが大きいほど締め固めに多くのエネルギーが必要であること、また、小型、大型 VC 値がそれぞれ  $30$  秒および  $300$  秒を越えるようなコンシステンシーの大きいコンクリートの場合には、振動締めによる効果はあまり期待できないことが明らかとなった。

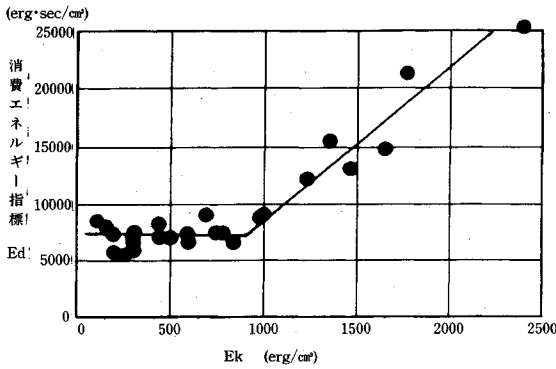


図-8 EdとEkの関係

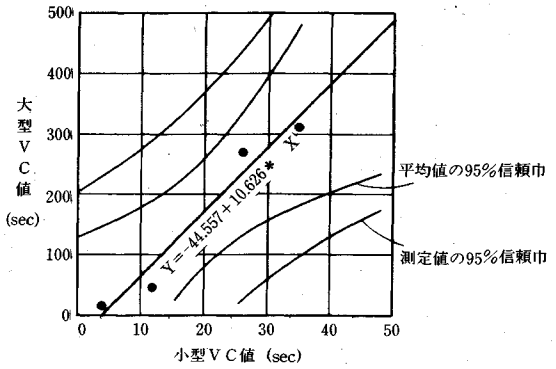


図-9 大型VC値と小型VC値の値の関係

表-3 コンシステンシーの影響試験

試料No	振動数 (Hz)	加速度 (g)	Ek	単位水量 (kg/m³)	小型VC値 (sec)	大型VC値 (sec)	初期密度 (g/cm³)	最終密度 (g/cm³)	m (%)	k (1/sec)	沈下終了時間 (sec)	Ed (erg/cm³)
1	50	11	1465	105	4	15	2.153	2.419	11.0	0.337	13.6	19924
2				100	12	45	2.170	2.424	10.5	0.262	17.6	25784
3				95	26	270	2.198	2.426	9.4	0.242	19.0	27835
4				90	35	310	2.120	2.277	7.2	0.280	16.4	24026
5				85	50	-	2.180	2.346	7.1	0.110	41.9	61384

これらの結果より、RCCの施工現場でコンクリートの品質管理に用いられてきたVC試験は、コンシステンシーを求めるほか打設されたRCCの品質を判断するうえできわめて重要なものであることが確認された。また、図-9に示すように、試験例は少ないが大型VC値と小型VC値はほぼ比例関係にあることから試験法が簡便な小型VC試験で現場の管理が行えるものと思われる。

これまでの検討結果より、ここで選定したRCD用の配合では、図-10に示すように、単位体積あたりの運動エネルギーEkの最大値が100 erg/cm³以上であればVC値は測定可能であるが、試験時間の短縮化あるいは前述のように有効な振動エネルギー等を考慮すれば、単位体積あたりの運動エネルギーの最大値を800±200 erg/cm³の範囲に選ぶことが推奨される。これに対する適切なVC試験の振動条件の一例は、振動数40 Hzおよび振幅1.0 mmの条件となる。

### 3. モルタルとコンクリートのレオロジー特性の振動依存性に関する検討

ここではRCCの流動化の条件を明らかにする目的で、まず、各振動条件下でフレッシュモルタルのレオロジー特性を明らかにし、次にコンクリートでこの特性を確かめることにした。なお、実験では本来フルミックスのコンクリートを用いるべきであるが、ここでは試験上の制約から20 mmふるいで湿式ふるい分けした試料を用いることにした。従って、フルミックスのコンクリー

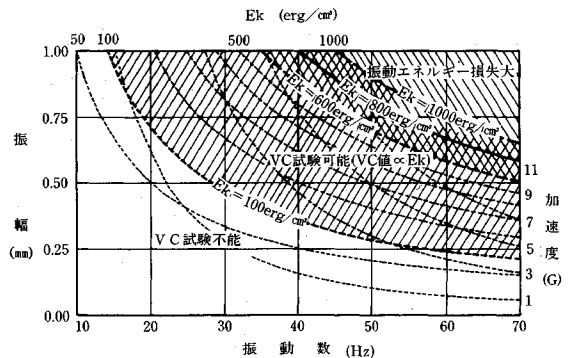


図-10 VC試験の振動条件

トと湿式ふるい分けしたコンクリートとの挙動の違いの検討は今後の課題としたい。

#### (1) 実験概要

##### a) 使用材料および配合

使用材料と基本配合は、2. で用いたものと同一である。レオロジー定数の測定では、同一試料を用いて長時間計測する必要があり、その間の試料の特性が不変という条件を満たす必要から、モルタルは基本配合の粗骨材の部分と空気量1.5%を除いて、結合材を全てフライアッシュにおきかえた配合とし、コンクリートは、基本配合のセメントを同体積のフライアッシュにおきかえた配合とした。

##### b) 実験装置

本研究では、超硬練りコンクリートの振動時の粘性を測定する一方法として、球引き上げ式粘度計を採用した。

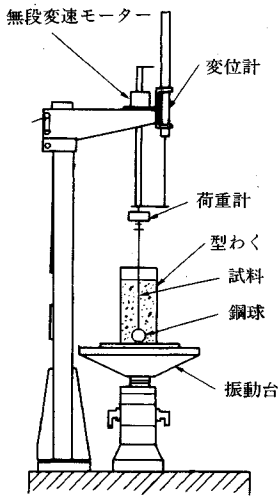


図-11 引き上げ球式粘度計

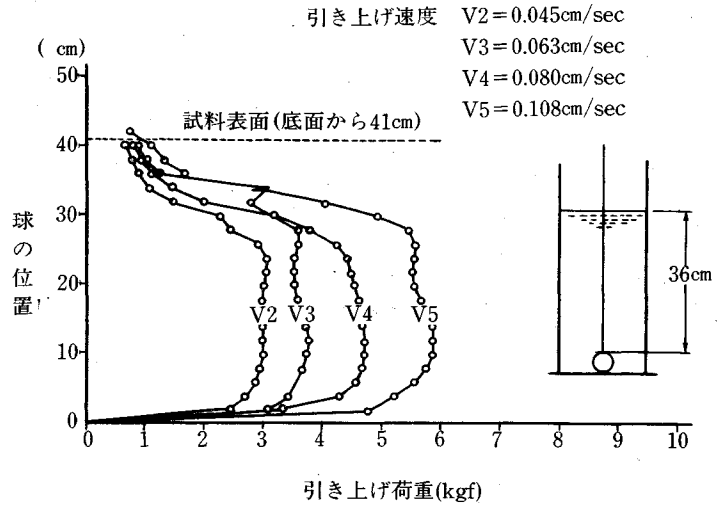


図-12 装置寸法の検討 (球径 5 cm の場合)

この粘度計を用いた実験の概要を図-11に示す。振動台は2. で用いたものと同一である。

c) 装置の寸法に関する予備検討

球引き上げ式粘度計を用いる場合、適切な引き上げ距離(層厚)と側壁の影響を調べておく必要がある。そこで、まず、引き上げ距離の影響を調べるために、試料をモルタルとし、標準型枠(直径 20 cm, 高さ 54 cm)と球径 5 cm の鋼球を用い、層厚を 17 cm, 29 cm, 41 cm と変化させ無振動で実験を行った。その結果、層厚が 41 cm の場合底面より約 5 cm~25 cm の範囲で一定荷重が得られ、層厚は 40 cm 程度必要であることが示された。

つぎに、型枠の側壁による影響を調べるため、鋼球の球径を 3 cm, 5 cm, 10 cm と変化させ、無振動で実験を行った。その結果、球径 5 cm の鋼球を用いた場合は、図-12に示すように、引き上げ速度の違いによる引き上げ荷重の差がはっきりと表われ、測定値の精度が十分期待できたので、この球径を採用することにした。

d) 実験手順

練りまぜは、モルタルの場合は手練りで、コンクリートの場合は可搬式傾胴ミキサを用いて行った。また、コンクリートの場合はそのまま試験に供すると骨材が大きくて試験条件から適切ではないため、20 mm ふるいで湿式ふるいわけをした試料を用いた。

試料は作製後すぐに試料温度を測定するとともに、モルタルの場合は、フロー値、コンクリートの場合は空気量および小型 VC 値を測定し、コンシステンシーを調べた。次に、型枠の底部中央位置に鋼球を正しく置いてこの時点の荷重計をゼロにセットし、試料を所定の高さ(球の頂点から層厚 36 cm)まで満たした。その際、型枠内の試料が密実に充填されるように 3 層(1層 12

cm)に分けて詰め込み、1層につき 25 回ずつ突き棒で突き固めた。その後、試料を充填した型枠を振動台上に固定し、所定の振動条件で加振すると同時に、埋設した鋼球を無段変速モーターにより鋼棒を介して一定速度(最大約 0.25 cm/s)で引き上げた。この時、鋼球の引き上げにより生じる抵抗(荷重)と変位を記録した。本実験では、球の引き上げ速度を 5 段階に変えて、この操作を繰り返し行い、これを 1 回の試験とした。

実験は振幅制御実験と加速度制御実験の 2 種類とし、振幅 0.1~1.0 mm, 振動数 10~60 Hz, 加速度 0.04~10 G の条件内で行った。さらに、比較のため無振動における実験も行った。

(2) 実験結果と考察

a) 荷重と速度の決定

球引き上げ式粘度計による測定結果の一例を図-13(a), (b)に示す。(a)は無振動時、(b)は加振時の荷重-変位曲線である。無振動時においては、荷重がほぼ安定している範囲を定め、この間の平均値を引き上げ荷重とした。一方、加振時においては、振動の影響を受け荷重の変動が大きくなるため、デジタルフィルター(Hanning ウィンドウ)<sup>8)</sup>による荷重-変位曲線の平滑化処理を行なったのち、無振動時と同様の方法で引き上げ荷重を求めた。なお、実験で得られる引き上げ荷重は、浮力分だけが少なくなっていることから、以下では浮力の影響を補正した抵抗力 F を用いて解析した。

さらに振幅制御時に得られた加速度、および加速度制御時に得られた振幅の実測値は、以下に示す振幅、振動数および加速度の関係式をほぼ満足するものであったため、結果の整理にはこの関係を用いた。

$$\alpha = 4\pi^2 af^2 \dots \dots \dots (17)$$

ここで、 $\alpha$ : 加速度,  $f$ : 振動数,  $a$ : 振幅

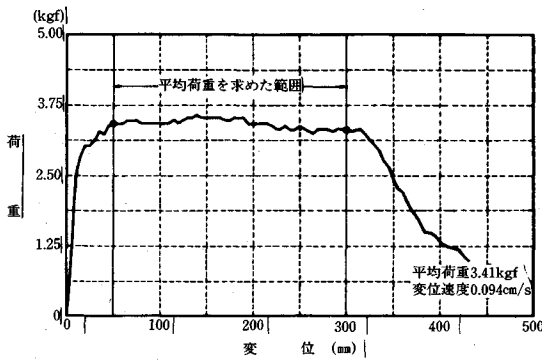


図-13 (a) 無振動時の荷重の決定方法

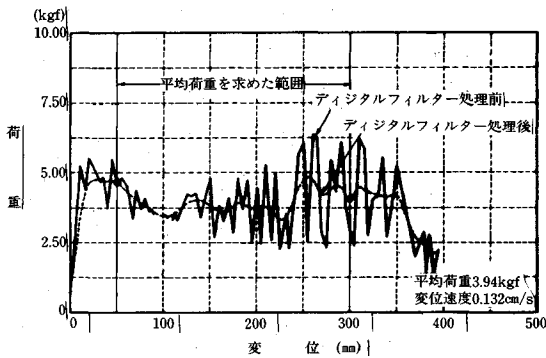


図-13 (b) 加振時の荷重の決定方法

b) RCC の流動特性

以下では、RCC に用いられているモルタルとコンクリートを、ビンガム(Bingham)流体と仮定してレオロジー一定数を求めることにする。ビンガム流体の構成式と球を引き上げるときの球の抵抗力は次式で表される<sup>9)</sup>。

$$\text{構成式 } \tau = \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} + \tau_y \dots\dots\dots(18)$$

$$\text{抵抗力 } F = 12\pi r^2 (V\eta_{pl}/2r + \beta\tau_y) \dots\dots\dots(19)$$

- ここで、
- $\tau$  : セン断応力
  - $\tau_y$  : 降伏値
  - $\eta_{pl}$  : 塑性粘度
  - $\dot{\gamma}$  : ひずみ速度
  - $F$  : 球の抵抗力
  - $\beta = \frac{7\pi}{24}$  : (Ansleyの提案値)
  - $V$  : 球の引き上げ速度
  - $r$  : 球の半径

降伏値と塑性粘度を得るため、 $\tau = F/(12\pi r^2)$ 、 $\dot{\gamma} = V/2r$ を計算し、 $\dot{\gamma}$ - $\tau$ 面上にプロットし、その回帰直線式の傾きから $\eta_{pl}$ を、また、 $\tau$ 軸の切片を $\tau'$ として $\tau = \tau'/\beta$ から降伏値を求める。

モルタルの無振動時における降伏値は2042 Paで塑性粘度は9816 Pa・sであった。また、加振時における $\dot{\gamma}$ - $\tau$ 関係の例を図-14に、降伏値および塑性粘度を表-4に示す。これらの図表より、モルタルの場合、無振

動時も加振時もひずみ速度とせん断応力の関係はほぼ直線で表すことができ、ビンガム流体として表現できることが示された。

また、振幅制御実験時は各振幅で、振動数10 Hzの時の塑性粘度は、無振動時よりも大きく、逆に、振動数が10 Hz以上では塑性粘度が急激に小さくなる傾向が認められた。さらに、降伏値も振幅、加速度および振動数が增大するとともに小さくなり、0に近づく傾向を示した。以上のことから、各振幅において振動数が10 Hzの時を境界にして、振動数がそれ以上に増加すると急激に流動化が進むと考えられる。

これに対して、加振レベルが高い加速度制御時は、降伏値および塑性粘度は無振動時に比べかなり小さくなり、振動数の違いによる差はほとんど認められなかった。これらより、加振レベルが低いとモルタルが無振動時より若干密となるため、塑性粘度が大きくなるが、加振レベルが上がると、流動化が起こって、塑性粘度の急激な低下が生ずると考えられる。

コンクリートの加振時における $\dot{\gamma}$ - $\tau$ 関係の例を図-15に、また、降伏値および塑性粘度を、表-5に示す。なお、表-5の中で、一線の部分は、引き上げ抵抗が大きくて計測出来なかった部分である。これらの結果より、振幅制御実験時の各振幅において、振動数の増加に伴い、降伏値および塑性粘度が減少することが示された。また、振幅0.3 mm、0.5 mmで振動数40 Hz~50 Hz、振幅0.75 mmで振動数30 Hz~40 Hzにかけては降伏値および塑性粘度の減少が顕著であった。したがって、コンクリートもこれらの振動数を境界にして、それ以上振動数を増加させると流動性が過度になる。

また、同一の振動条件(振幅0.3 mm、加速度3.02 G、振動数50 Hz)におけるコンクリートとモルタルの降伏値を比較してみると、モルタルの2 Paに対して、コンクリートは約12倍の25 Paであった。さらに、塑性粘度は、モルタルの149 Pa・sに対して、コンクリートは約15倍の2066 Pa・sであった。同一の振動条件でモルタルとコンクリートの双方について実験ができたのはこの1ケースだけではあるが、この結果から他の振動条件におけるモルタルとコンクリートの降伏値、および塑性粘度をある程度推測できるものと考えられる。

これまでの結果より、RCCのような超硬練りのコンクリートでも、ある加振レベルを越えると、球引き上げ式粘度計を使用することによりレオロジー一定数を近似的に求め得ること、および加振レベルをある一定の値以上に上げると急激に塑性粘度が減少して流動化し、液状化に類似した現象が生じることが示唆された。

c) 塑性粘度に及ぼす運動エネルギーと加速度の影響

モルタルやコンクリートに与えられる外的条件とし

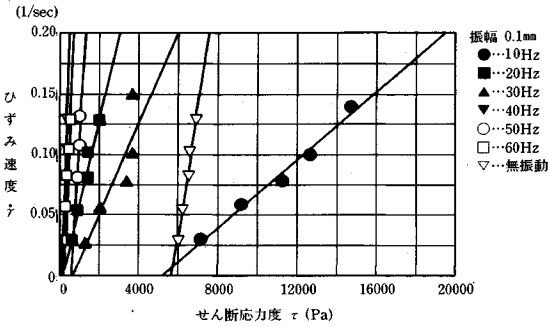


図-14 モルタルの  $\dot{\gamma}$  と  $\tau$  の関係

表-4 モルタルの降伏値と塑性粘度

制御方式	振動条件			Ansley式	
	振幅 (mm)	加速度 (G)	振動数 (Hz)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)
振幅制御	0.1	0.04	10	1887	71319
		0.16	20	51	14480
		0.36	30	232	27175
		0.64	40	33	2042
		1.01	50	201	3788
		1.45	60	56	2844
	0.2	0.08	10	802	25555
		0.32	20	53	5495
		0.73	30	49	2868
		1.29	40	7	1287
		2.01	50	34	2482
		2.90	60	19	1317
	0.3	0.12	10	251	51874
		1.09	30	0	1856
		3.02	50	2	149
加速度制御	0.62	1.00	20	9	860
			30	-	-
			40	14	1093
	0.10	1.50	30	14	1313
			50	1	1662
			25	3	626
	0.39	2.00	35	9	473
			50	14	773

て、振動台がモルタルやコンクリートに与える単位体積当たりの運動エネルギーの最大値  $E_k$  と加速度を用いてレオロジー特性との関係を考えてみる。

モルタルやコンクリートの塑性粘度と  $E_k$  および加速度との関係を図-16、図-17に示す。これらより、モルタルやコンクリートは、ある加振レベル（コンクリートでは、最大運動エネルギーで  $100 \text{ erg/cm}^3$ 、加速度で  $2 \text{ G}$ ）以上ではある程度流動化が生じて、引上げ球によるレオロジー測定が可能になるものと考えられる。更に加振レベルを上げると（コンクリートでは、最大運動エネルギーで約  $700 \text{ erg/cm}^3$  以上、加速度で約  $5 \text{ G}$  以上）、降伏値と塑性粘度の急激な減少が引き起こされることから、一層の流動化が進むものと思われる。

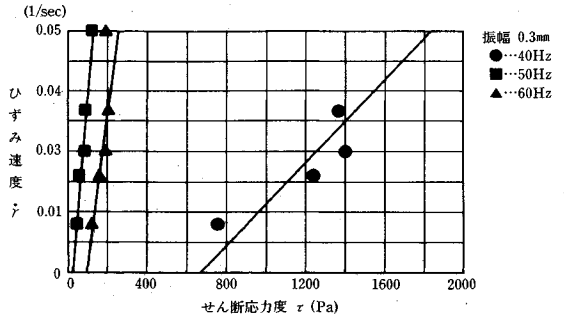


図-15 コンクリートの  $\dot{\gamma}$  と  $\tau$  の関係

表-5 コンクリートの降伏値と塑性粘度

制御方式	振動条件			Ansley式	
	振幅 (mm)	加速度 (G)	振動数 (Hz)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)
振幅制御	0.10	1.45	60	-	-
		1.93	40	727	23402
		3.02	50	25	2066
	0.30	4.35	60	105	3180
		0.81	20	-	-
		1.81	30	-	-
	0.50	3.22	40	81	10384
		5.04	50	2	1747
		7.25	60	20	2020
	0.75	2.72	30	16	19191
		4.83	40	23	991
		5.04	50	9	975
	1.00	3.63	30	14	8398
		6.44	40	-	-
		10.06	50	-	-

従って、RCCの振動締固めでは、ある一定の運動エネルギーあるいは加速度を与えることにより、流動化が生じ、これが締固めを容易にしているものと考えられる。

#### 4. 振動を受けるコンクリートの締固め性状に対する考察

これまでに行った実験とその結果の考察より、ここで選定したRCC用コンクリートに限定し、振動台で加振された場合の締固め性状について考察する。

振動台によるRCCの締固めを考えると、ある一定の加速度や運動エネルギー（下位限界と名づける。）を越えて初めて締固めが進行し、加速度や運動エネルギーを増すと、締固めの進行速度が増大している。さらに加速度や運動エネルギーを増すと、締固めの進行速度がこれ以上増加しない点（上位限界と名づける。）に到達する。この締固めが可能となる領域（下位限界以上）では、レオロジー試験の結果より、コンクリートの塑性粘度が下がり、流動化し始めることが確かめられている。また、下位限界から上位限界までは、締固めに要する全エネルギーはほぼ一定と考えられ、上位限界以上では、エネル



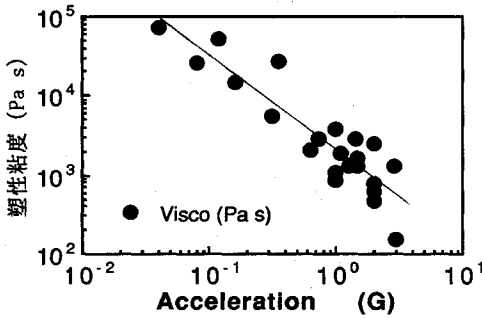


図-16 モルタルの塑性粘度と加速度の関係

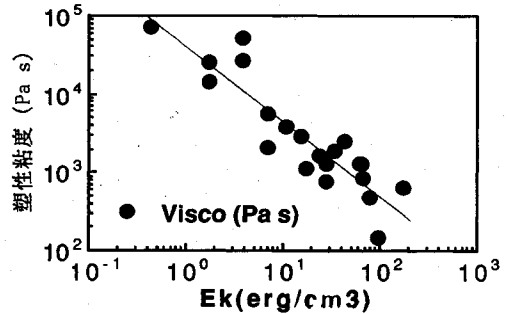


図-18 モルタルの塑性粘度と運動エネルギーの関係

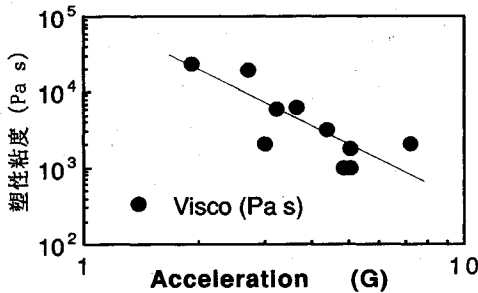


図-17 コンクリートの塑性粘度と加速度の関係

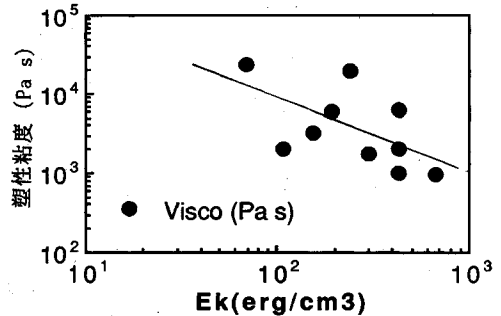


図-19 コンクリートの塑性粘度と運動エネルギーの関係

ギーの浪費があり、全エネルギーは増大する傾向が認められた。

以上のことより、振動台で振動を受ける RCC の締固め性状は、コンクリートに加えられる加速度または運動エネルギーによって評価できることが示された。

なお、現場での RCC の施工は、振動ローラーにより RCC の表面より振動を与えるものであり、コンクリート中の加速度や運動エネルギーは表面から深さ方向に減少し、振動台で加振する場合と異なっている。従って、現場施工の締固めを論ずるには、ここでの成果を踏まえた別の検討が必要である。

## 5. 結 論

本研究では、ローラーコンパクテッドコンクリートの振動締固め性状を検討するため、振動台を用いて、加振されているフレッシュコンクリートの締固め性状に及ぼす振動要因とコンシステンシーの影響ならびにフレッシュモルタルとコンクリートのレオロジー特性を検討した。得られた主な結論は次の通りである。

(1) フレッシュコンクリートの締固め性状に及ぼす振動要因とコンシステンシーの影響

a) 沈下速度がコンクリートの空気量に比例すると仮定して導いた解析式は、沈下性状をよく表現できる。

b) 沈下速度は単位体積あたりの運動エネルギーの最大値 ( $Ek$ ) に比例して増大するが、限度以上の  $Ek$

では一定となり、両者の間には振動数、振幅にかかわらず同一のきわめて明瞭な相関関係が認められ、 $Ek$  が締固め性状の指標になることが明らかになった。

c) 単位体積あたりの運動エネルギーの平均値と沈下終了時間の積の消費エネルギー指標によって、締固めに必要なエネルギーは一定であり、それ以上のエネルギーは浪費されることが明らかとなった。

d) これまで現場で用いられていた VC 値は、コンクリートのコンシステンシーと相関が極めて高く、フレッシュコンクリートの品質管理に有効である。一方、大型のモールドによる VC 値と小型のモールドによる VC 値がほぼ比例関係にあり、簡便な試験法である小型 VC 試験でも現場の管理を行える。

(2) 振動を受けるフレッシュモルタル、コンクリートのレオロジー特性

a) 加振されているモルタルおよびコンクリートの挙動は、ピンガム流体でほぼ近似できる。

b) モルタルとコンクリートは、最大振動エネルギーや最大加速度がある一定値を超えると降伏値や塑性粘度が低下し流動化する。この流動化は、最大加速度や最大振動エネルギーの増加とともに進行する。また、これにより RCC の締固めが促進されるものと考えられる。

c) 流動化に必要な加振レベルは、モルタルやコンクリートに加えられる単位体積当たりの最大運動エネルギーもしくは最大加速度で評価できる。

本研究により、RCCの振動要因が締固めに及ぼす影響ならびに流動化の条件をある程度把握することができた。今後は、振動ローラーによる転圧締固め実験によりRCCの実挙動を検討する予定である。

謝辞 本研究のとりまとめにおいて貴重な助言をいただいた電力中央研究所主任研究員河角誠博士に謝意を表します。また、実験でご援助いただいた金森洋史氏(清水建設)、桜井和正氏(当時、東京理科大生)および電力中央研究所 笠原 清氏、の各氏にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 加賀谷・徳田・川上：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，土木学会論文集，第384号/V-7，pp.53~62，1987.8.
- 2) 徳田・加賀谷・川上・辻子：超硬練りコンクリートの締固め度に及ぼす打込み方法および締固め方法の影響に関する基礎実験，土木学会論文集，第408号/V-11，pp.91~99，1989.8.
- 3) 徳田・加賀谷・川上・辻子：間隙水圧計による超硬練りコンクリートの締固め度の判定，コンクリート工学論文集，第1巻第1号，pp.1~9，1990.1
- 4) 笠原・青柳・河角・遠藤・加藤：ローラーコンパクトドングリートコンクリートのマスコンクリート構造物への適用ーその1 コンクリートの基本配合の選定ー，電力中央研究所報告，384020，1985.1.
- 5) 加藤・河角・遠藤・青柳・笠原：ローラーコンパクトドングリートコンクリートのマスコンクリート構造物への適用ーその4 振動テーブルによるRCCの締固め性状の検討ー，電力中央研究所報告，U87075，1988.6.
- 6) 伊藤・岡本：レオロジー方程式に関する二、三の考察とレオロジー定数の計算処理，舞鶴高専紀要，第20号，pp.50~56，1985.3.
- 7) 川崎・越川・佐藤：内部振動機による締固め有効範囲の推定に関する研究，フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集，pp.127~132，1989.4.
- 8) 大崎順彦：地震時のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp.154~157，1981.
- 9) 岸谷孝一・岡 成一：フレッシュセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数測定，日本建築学会論文報告集，第305号，pp.1~7，1981.7.
- 10) 岩崎：振動によるフレッシュコンクリートの液状化と内部振動機の作用領域に関する考察，土木学会論文集 第426号/V-14，pp.1~18，1991.2
- 11) 広瀬・志水・竹村：R.C.D.(Roller Compacted Dam)コンクリート工法によるダムの施工に関する研究，土木学会論文報告集 第303号，pp.93~108，1980.11.
- 12) 松本・佐谷・志賀：RCDコンクリートの現場転圧実験，土木学会論文集 第391号/VI-8，pp.97~106，1988.3.
- 13) 古賀政二郎：コンクリート新技術・RCDコンクリート，コンクリート工学，Vol.18，No.8，pp.79~80，1980.8.

(1991.7.31 受付)

STUDY ON THE COMPACTION BEHAVIOR AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRESH CONCRETE FOR ROLLER COMPACTION DURING VIBRATION BY MEANS OF VIBRATION TABLE

Takao ENDO, Osamu KATO, Morio KURITA and Yukio AOYAGI

To clarify the effect of vibration on the roller compaction of concrete for RCC, time subsidence curves of concrete were measured under various vibration conditions. Also, plastic viscosities and yield stresses of mortar and concrete were measured by a pulling up sphere type viscometer during vibration.

When the acceleration or kinetic energy supplied to mortar and concrete increased and exceeded a certain limit, the plastic viscosity of mortar and concrete decreased remarkably, resulting in increased liquefaction and compaction. Thus, the compaction behavior could be expressed by the acceleration or kinetic energy of such mortar and concrete.