

論文 表面振動機による超硬練りコンクリートの締固め機構に関する研究

早川健司^{*1}・國府勝郎^{*2}・上野 敦^{*3}

要旨：表面振動機による超硬練りコンクリートの締固め機構を解明することを目的として室内実験を行い、振動条件を変化させたときの締固め層内の振動応答挙動の検討を行った。この結果、締固め層の応答加速度の締固め進行にともなう変化は、コンクリートの沈下量に支配されていることが示された。また、質量が大きい振動機は、質量が小さい振動機より効率よく締固めできることが示された。締固め層の応答加速度の深さ方向分布は、振動機質量と起振力とから決定される振動機の加速度に支配されることが示され、締固め層内の締固めエネルギーの推定が可能であることを示した。

キーワード：表面振動機，超硬練りコンクリート，加速度，振動数

1. はじめに

転圧コンクリート舗装に用いる超硬練りコンクリートは、単位水量を著しく減じたコンクリートであるため、十分に締固めのできる適切な配合の選定および締固め条件の決定が重要となる。締固めには表面振動機が採用されているが、締固め層の上層部では高密度が得られても、下層部では十分な密度が得られないなどの問題が生じている。このような問題を解決するためには、表面振動機による締固め機構を解明し、理論的に適切な締固め条件を決定することが必要である。

このような背景から、本研究では表面振動機の振動条件を変化させたときの締固め層内の振動応答挙動を検討し、締固め機構を解明しようとするものである。

2. 実験方法

2. 1 使用材料および配合

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材には上野原産砕砂を使用し、粗骨材には八王子産の碎石2005を使用した。

コンクリートの配合は、モルタル粗骨材空隙比(km)を1.60、ペー스트細骨材空隙比(kp)を1.66、水セメント比を35%としたものであり、マーシャル突固め試験および締固め性試験〔1〕によって十分に締固めることのできるコンシステン

表-1 コンクリートの配合

G _{m, s} mm	K _m	K _p	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
20	1.60	1.66	35	38.5	113	323	780	1274

表-2 コンシステンシー試験結果

マーシャル突固め試験	締固め性試験			
締固め率 (%)	初期充填率 (%)	E98 (J/1)	達成可能充填率 (%)	締固め係数
97.7	80.33	324	99.73	0.9366

*1東京都立大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2東京都立大学教授 工学部土木工学科（正会員）

*3東京都立大学助手 工学部土木工学科（正会員）

一をもつことが確認されたものを使用した。コンクリートの配合を表－1、コンシステンシー試験結果を表－2に示す。

2. 2 締固め性試験

締固めを行うときの振動機の加速度が一定値以上の範囲では、同一配合の締固めによる充填率の増大は、振動条件にかかわらず式（1）に示す締固めエネルギーによって一義的に決定できることが著者らによって明らかにされている[1]。締固め性試験は、振動台上で試料を締固める際の締固めエネルギーによる充填率の変化を式（2）に示す締固め関数で近似し、この関数から誘導される指標によって、コンクリートの締固め性を評価するものである。

$$E = m \cdot \frac{(\alpha_{\max})^2}{4\pi^2 f} \cdot t \quad (1)$$

ここに、 E ：締固めエネルギー(J/l)、 m ：試料の単位容積質量(kg/l)、
 $\alpha_{\max}$ ：最大加速度(m/s²)、 f ：振動数(Hz)、 t ：振動時間(sec)

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i) \cdot \{1 - \exp(-b E^d)\} \quad (2)$$

ここに、 γ ：充填率(%)、 C_i ：初期充填率(%)、 C_f ：達成可能充填率(%)、 b 、 d ：実験定数
 本実験では、この試験によって得られる締固めエネルギーと充填率との関係と、2. 3に示す表面振動機による振動応答試験の結果を比較検討している。

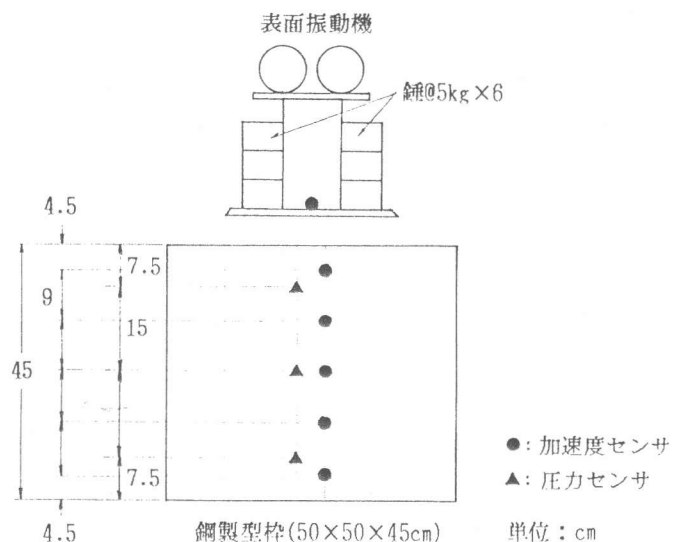
2. 3 振動応答実験

(1) 表面振動機

実験に使用した表面振動機は、底板の直径が30cmで、振動機質量を35～65kgの範囲で10kgごとに変化できる試作のものである。また、偏心質量の回転数による振動数制御であり、振動数の上限は60Hzである。

(2) 供試体および振動条件

締固めの進行に伴う振動応答挙動の変化を検討するための供試体は、コンクリートスラブ上に固定した平面50×50、高さ60cmの鋼製型枠中で試験した。すなわち、本実験におけるコンクリート試料はスラブに支持されている。試料を材料分離に注意して型枠内に投入しながら、加速度センサを等間隔に4個埋設し、層厚30cmに均した。また、加速度センサは上部からNo.1～No.4とした。振動条件は、締固め挙動に対する振動機質量の影響を検討するため、振動機質量を変化させ加速度が4.5Gになるように振動数を調整して行った(表－3中の)。



図－1 センサの埋込み位置

加速度および圧力の深さ方向分布を検討するための供試体は、締固め後の層厚約30cmを想定し、締固め前の層厚を45cmとした。図-1に示す位置に加速度センサ5個および圧力計3個を埋設した。締固め層内の圧力の測定は、骨材による荷重の局所的な作用を防ぐために、圧力計の上下約10mm厚さに標準砂を投入した。実験は、まず振動機の質量を65kg、振動数58.4Hzで3分間の締固めを行った後、表-3に示す条件で、それぞれ振動機質量および振動数を順次変化させて応答加速度および圧力を測定した。実験終了後、コンクリート表面からセンサまでの距離を測定し、各層の応答加速度および圧力の位置とした。

表-3 振動条件

振動機 質量(kg)	振動数 (起振力) Hz N		加速度 G
3 5	42.6	1520	4.5
	48.4	1962	5.8
	53.6	2406	7.1
	58.4	2857	8.4
4 5	42.6	1520	3.5
	48.4	1962	4.5
	53.6	2406	5.5
	58.4	2857	6.5
5 5	42.6	1520	2.9
	48.4	1962	3.7
	53.6	2406	4.5
	58.4	2857	5.3
6 5	42.6	1520	2.4
	48.4	1962	3.1
	53.6	2406	3.8
	58.4	2857	4.5

3. 実験結果および考察

3.1 締固め進行にともなう振動応答挙動の変化

応答加速度の締固め時間による変化の代表例として、振動機質量35kg、振動数42.6Hzのときの結果を図-2に示す。振動機の加速度はほぼ一定であるが、応答加速度は締固め初期に振動機の加速度より大きな値を示し、その後、減少して一定値を示した。また、応答加速度は底部ほど早く安定状態に移行した。このような傾向は、他の振動条件によるものも同様の傾向を示した。締固め層内の実測応答加速度からコンクリートが受けている締固めエネルギーを計算すれば、別途行う締固め性試験によって得られる締固め曲線によって、締固め層内の充填率が推定可能であることが示されている[2]。そこで締固め性試験による締固め曲線と同様にコンクリートが締め固まると仮定して、実測応答加速度から締固めエネルギーを計算して締固め曲線を求め、締固め時間と締固め層の沈下の関係に変換した。この結果が図-3である。コンクリートの沈下が小さくなる時間と加速度が安定する時間はほぼ一致することが示されている。したがって、コンクリートが急激に沈下する締固め初期において応答加速度は大きな値を示し、空隙減少の割合が小さくなることにより締固め層の沈下が小さくなると応答加速度が安定すると考えられる。つまり、締固め進行による応答加速度の変化は、コンクリートの締固めによる沈下の程度に支配されていると言える。

また、締固め初期においては、図-4に示すように振動機は振動していても締固め層は応答していない部分が見られる。振動機の振動数に対するコンクリートの応答回数の比を効率とし、こ

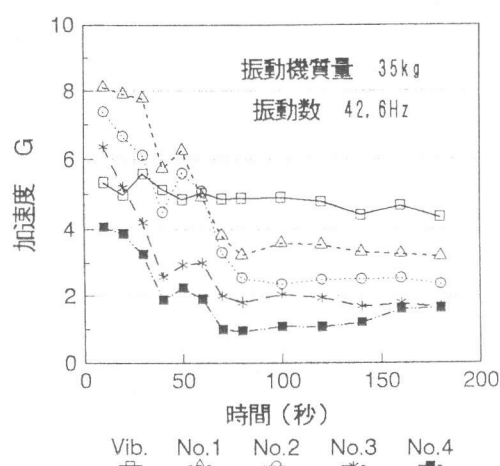


図-2 応答加速度の経時変化

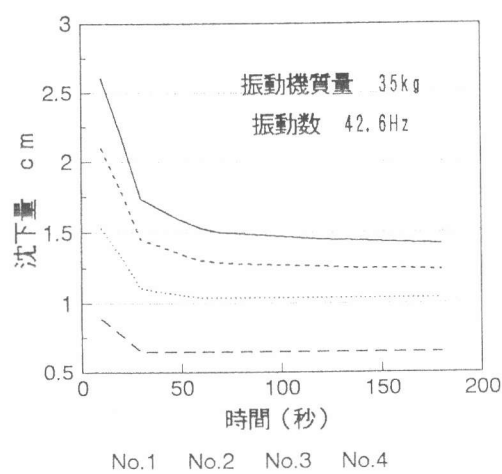
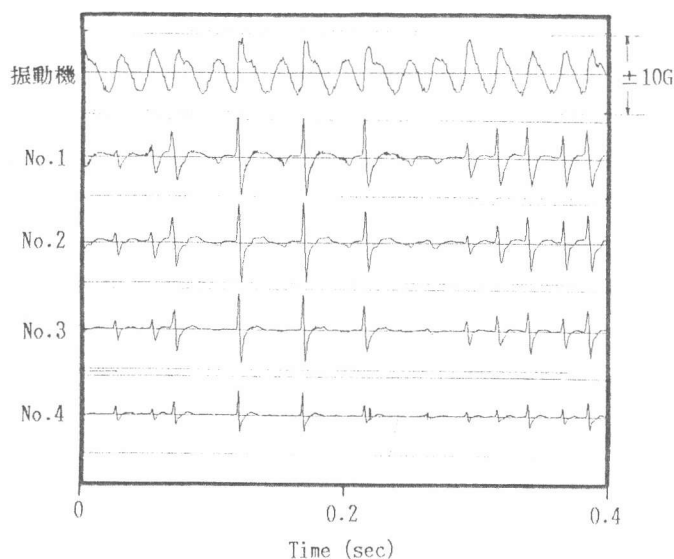


図-3 締固め時間と締固め層の沈下



図－4 振動応答波形（35kg, 42.6Hz）

表－4 締固め効率に対する振動機質量の影響

時間 (秒)	振質量 (kg)			
	35	45	55	65
5	0.4	0.7	0.9	1
10	0.5	0.8	0.9	0.9
20	0.3	0.7	0.9	0.9
30	0.7	0.7	1	0.9
40	0.6	0.8	1	1
50	0.5	1	1	1
60	0.6	1	1	1
70	1	1	1	1

の現象を整理すると表－4 のようになる。振動機質量が大きい方が効率が大きいこと、また締固め時間が経過しコンクリートの密度が高くなると効率は1となるが、これまでに要する時間は振動機質量が小さい方が大きい傾向が見られる。この現象は振動機がコンクリート上面で跳躍していることによると考えられ、振動機の質量を大きくすることにより跳躍現象を少なくすることができ、締固めの効率が良くなるが示された。

3. 2 応答加速度および圧力の深さ方向分布

(1) 加速度の深さ方向分布

締固めエネルギーの分布を明らかにするためには、締固めを支配する加速度の深さ方向分布を明確にする必要がある。このため、振動条件を変化させたときの応答加速度を検討した。振動機質量を55kgとした条件で、振動数を変化させたときの代表的結果を図－5に示す。振動機の加速度は、振動機質量を一定とした条件で起振力を大きくするとこれに比例して大きくなる。そして、その値は式(3)から求まる値とほぼ同じであり、振動機質量と起振力との関係から把握できることが示された。

$$\alpha_{\max} = \frac{m r (2 \pi f)^2}{M} \quad (3)$$

ここに、 $\alpha_{\max}$ ：振動機の加速度(m/s^2)、 m ：偏心質量(kg)、 r ：偏心距離(m)、

f ：振動数(Hz)、 M ：振動機質量(kg)

コンクリート中の応答加速度は締固め層の上層部では振動機の加速度とほぼ同等の値であるが、下層に向かって減少し、下層部の応答加速度は2G以下で振動機の加速度の大きさによる差はわずかである。超硬練りコンクリートの限界加速度が2.5G程度であること[1]を考慮すれば、十分に締固められる加速度が伝播されていないことが分かった。

また、振動機の加速度を4.5Gとした条件で、振動機質量の影響を検討したのが図－6である。中層部までは振動機質量の大きいほうが応答加速度も大きいとその差はわずかである。また、下層部においてはほぼ同じ値を示していることも考慮すれば、深さ方向分布に対する振動機質量

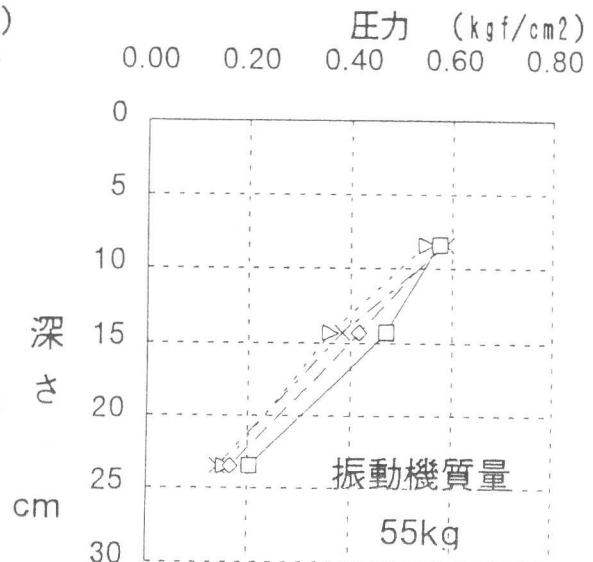
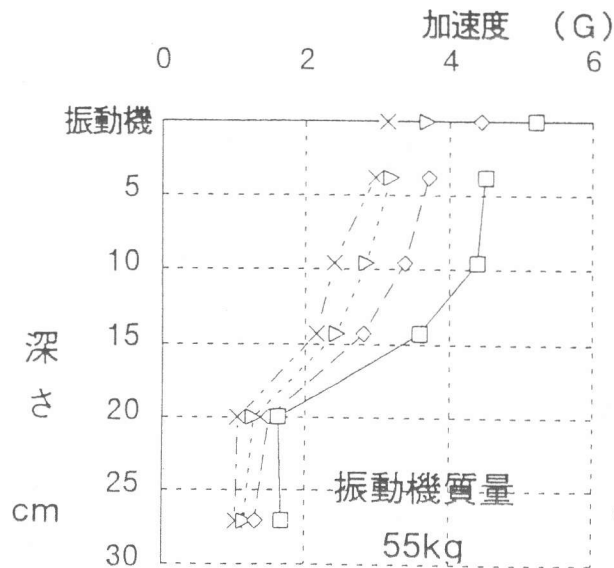


図-5 応答加速度の深さ方向分布

図-8 圧力の深さ方向分布

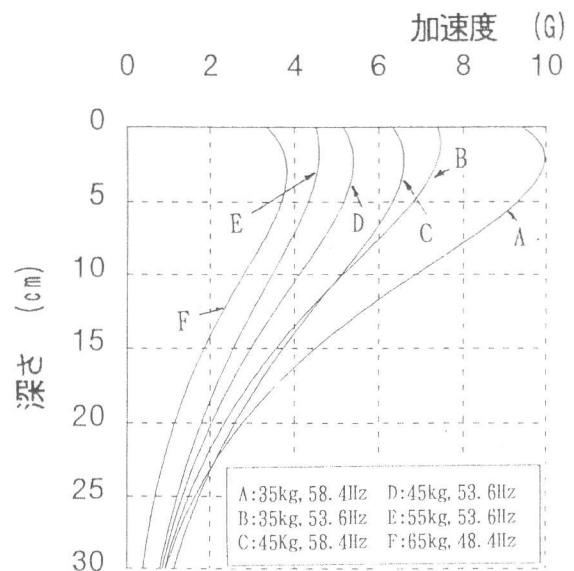
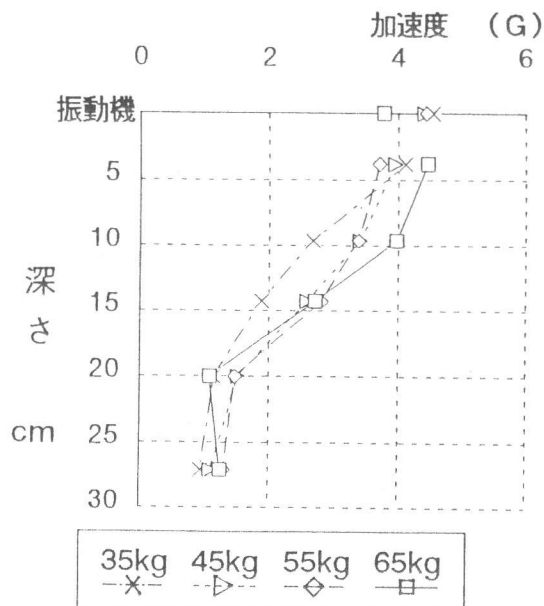


図-6 振動機加速度を一定としたときの
応答加速度の深さ方向分布

図-7 応答加速度の減衰曲線

の影響は少なく、振動機質量は振動機の入力加速度を決定する主要因となっているだけであると考えられる。十分に締固められたコンクリート試料を弾性体であるとすれば、弾性論の教えるところにより、半無限体に表面から振動荷重が作用する場合の深さ方向分布は、式(4)のような関数となる[3]。A、B、C、Dの定数は入力振動荷重およびコンクリートの物性によって得られる定数であるが、これらを把握することが現時点では困難であるため、ここでは測定値から関数を求めるにとどめた。この結果を図-7に示す。振動機の加速度を把握できれば、締固め層の加速度分布をほぼ把握でき、締固めエネルギーの推定が可能になることが示された。

$$\alpha_z = A \cdot \text{EXP}(-B \cdot Z) - C \cdot \text{EXP}(-D \cdot Z) \quad (4)$$

ここに、 Z ：コンクリート表面からの高さ(cm)、 α_z ：深さ Z cmにおける加速度 (G)

(2) 圧力の深さ方向分布

コンクリートの締固めを支配する主要因は加速度であり、コンクリートの応答加速度に基づく締固めエネルギーを計算すれば、充填率の推定は可能である。しかし、転圧コンクリートの締固めにおいて圧力も1つの要因であると言える。コンクリート中の圧力を測定し、応答加速度との関係を検討した。図-8に示すように圧力は深さ方向にほぼ直線的に減少している。振動機質量を一定とし振動数を変化させた場合、応答加速度は振動数の増大に伴って大きな値を示すが、圧力はほぼ同等の値であり、その減衰傾向も同様である。すなわち、圧力に影響を与える主要因は、振動機質量であると言える。

一方、単位水量が $100 \sim 120 \text{ kg/m}^3$ の超硬練りコンクリートに圧力 2 kgf/cm^2 程度を作用させても、80%以上の充填率を達成することは困難である[4]。したがって、本実験のように 1 kgf/cm^2 程度の圧力は充填率の向上をほとんど期待できないと考えられる。以上のことから、下層部の充填率は、締固めの初期の加速度による寄与が支配的であると思われる。

4 まとめ

表面振動機による超硬練りコンクリートの締固め機構を解明するために、振動条件を変化させて振動応答挙動を検討した結果、次のことが明らかになった。

(1) 締固め層内の応答加速度は、締固め時間とともに減少し、安定した値を示すようになる。

このような時間変化は、締固めによるコンクリート試料の変位に支配されている。

(2) 振動機質量が小さい場合、振動機の跳躍現象が大きくなり締固め効率がわるいことが明らかになった。この現象は振動機質量を大きくすることにより回避され、重い振動機を使用することの優位性が示された。

(3) 締固め層内の応答加速度分布は、振動機質量と起振力とから決定される振動機の加速度によってほぼ一義的に決定することができることが示された。今後、締固め層の支持条件およびコンクリートの物性による影響を検討する必要がある。

(4) 締固め層内の圧力は直線的に減少し、振動機質量が同じであれば振動数を変化させてもその分布傾向は同等であり、圧力に対しては振動機質量が支配的要因であることが示された。

謝辞

この研究の一部は、平成5年度文部省科学研究費補助金(一般研究(C)課題番号05650441)によって実施したものである。

参考文献

- 1) 国府勝郎・近藤拓也・上野 敦：RCCP用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究、No. 46セメント・コンクリート論文集、pp964～969、1992. 12
- 2) 上野 敦・国府勝郎：表面振動機による締固めエネルギーとコンクリートの充填率に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集第15巻第1号、pp1185～1188、1993. 12
- 3) 岡本舜三：建設技術者のための振動学、オーム社書店
- 4) セメント協会：転圧コンクリートの締固めに関する研究、R-8、p. 18、1993