

論文 振動締め固めを受ける RCC の動的挙動に関する解析的検討

西治郎^{*1}・佐々木智^{*2}・菅井幸仁^{*3}・遠藤孝夫^{*4}

要旨：超硬練りコンクリートの振動ローラによる締め固め機構の解明のためには、締め固めエネルギーを与える外力の評価が重要と考えられる。そこで、本研究ではコンクリートの室内実験結果で生じている起振機の飛び跳ねによる突き固め現象に着目し、振動機械とコンクリートを一次元フォークトモデルで表されるコンクリート層上で起振機が振動する問題にモデル化し、1自由度系および2自由度系で数値計算を行い、実験の飛び跳ねによる加速度波形の乱れが定性的に表現できることを示した。

キーワード：RCC、振動解析、加速度波形、表面起振機

1. はじめに

ローラコンパクトコンクリート（以下RCCと略記）などの超硬練りコンクリートを振動ローラで締め固める工法は、施工の迅速性と経済性によりダムや道路舗装に採用され、その用途はますます拡大されつつある。この工法に関しては多くの研究が行われ、実用化が図られてきたが、今後更なる施工の合理化を図るためには締め固め機構の解明と締め固め度の評価法の確立が望まれる。土の分野では、振動ローラの輪加加速度を利用した締め固め管理手法に振動ローラ～地盤系を振動モデルとして解析した例が報告されている^{1)・2)・3)}。これは、振動ローラによる締め固めがある程度進行すると地盤の剛性が大きくなるために、振動ローラが跳躍するようになり、振動輪の振動特性が大きく変化することを利用し、締め固め管理手法の確立を目指したものである。一方、コンクリートの分野では振動機械とRCCの応答について実験的な研究がなされてきた。上野ら^{4)・5)}や早川ら⁶⁾は、表面起振機を用いた室内実験でRCC中に加速度や圧力がどのように伝播するかを詳細に検討して

いる。これらによれば、RCCの締め固めが進むとともに振動機の正弦波形が乱れる傾向が示されている。特に振動機の加速度が1Gを越えた場合、RCCの剛性が高いと振動機が飛び跳ねて突き固め状態になり、振動機のエネルギーがRCCの締め固めに寄与していない状態となることが報告されている。早川らによる室内実験結果の加速度波形を図-1に示す⁶⁾。



図-1⁶⁾ 室内実験における応答加速

これらの状況をふまえ、本研究ではRCCの室内実験結果を念頭に、先に述べた土質分野で用いられている解析法により起振機の飛び跳ねによる突き固め現象を数値的に検討する。

*1 東北学院大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 東北学院大学 工学部土木工学科（正会員）

*3 東北学院大学講師 工学部土木工学科（正会員）

*4 東北学院大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

2. 数値計算による起振機とコンクリートの挙動の検討

2. 1 計算手法

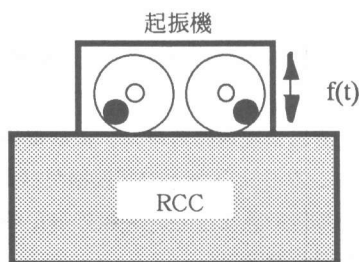


図-2 起振機～RCC系

数値計算では地盤上で振動する基礎の問題を参考に、図-2のように起振機～RCC系を考えた。ここではRCCをフォークトモデルで表される材料と仮定し、RCC層上で起振機が振動する問題に置き換えた。数値解析では、起振機のみを質点とした1自由度系（図-3）および、起振機とRCCのそれぞれを質点とした2自由度系（図-4）を考え両者の計算結果を比較検討した。1自由度系の運動方程式は式(1)で、2自由度系の運動方程式は式(2)で表される。

$$m_1\ddot{x} + c_1\dot{x} + k_1x = m_1g + F_0\sin(2\pi f_0t) \quad (1)$$

$$m_1\ddot{x} + c_1(\dot{x} - \dot{y}) + k_1(x - y) = m_1g + F_0\sin(2\pi f_0t)$$

$$m_2\ddot{y} + c_2\dot{y} + k_2y - c_1(\dot{x} - \dot{y}) - k_1(x - y) = m_2g \quad (2)$$

ここで、

m_1 : 起振機の質量 (kg)

m_2 : コンクリートの質量 (kg)

k_1, k_2 : RCCのパネ係数 (N/m)

c_1, c_2 : RCCの粘性減衰係数 (Nsec/m)

F_0 : 最大起振力 (N)

f_0 : 起振機の振動数 (Hz)

t : 時間 (sec)

g : 重力加速度 (m/sec²)

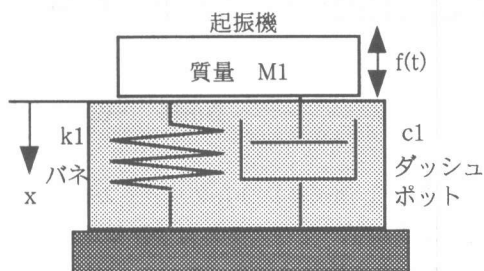


図-3 1自由度系振動解析モデル

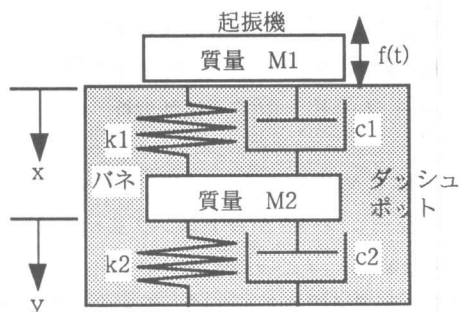


図-4 2自由度系振動解析モデル

x : 起振機の鉛直変位 (m)

y : RCCの鉛直変位 (m)

ここで x は起振機を載せる前のRCCの表面を基準とし、 y はRCCの中心面を基準に取り鉛直下向きを正としている。実際の起振機は振動条件によってはコンクリート表面から飛び上がって離れる場合も考えられる。そこで、計算過程でこの現象を表現するために、起振機がコンクリート表面から離れている間はコンクリートからの反力は働かないものと考えた。1自由度系においては起振機の変位が正のとき、式(1)中のパネ係数 k と粘性減衰係数 c の値を0とした。この場合の条件を式(3)に示す。

$$x > 0 \text{ のとき, } c_1 = 0.0, k_1 = 0.0 \quad (3)$$

また、2自由度系においては引張力が負の場合において、式(2)中のパネ係数 k と粘性減衰係数 c の値を0.5%に減少させた。この場合の条件を式(4)に示す。

$$c_1(\dot{x} - \dot{y}) + k_1(x - y) > 0 \text{ の時} \\ c_1 = 0.005 c_1 \quad k_1 = 0.005 k_1 \quad (4)$$

また、RCCの付加質量については、ここでは考慮しなかった。計算では、1自由度系の式(1)の運動方程式は線形加速度法により、また2自由度系の式(2)の運動方程式は平均加速度法を用いることにより解き、時間経過に伴う起振機の変位 x 、加速度 $\ddot{x}$ および、RCCの変位 y 、加速度 $\ddot{y}$ を算出した。

2.2 計算の対象

ここでは早川ら⁶⁾の行った室内実験をシュミレートすることとし、パラメータの値を設定した。この実験は、図-5⁶⁾に示すようにRCCを50cm×50cm×60cmの型枠の中に打ち込み、RCC上面を起振機によって締め固めるもので、締め固め過程における起振機やコンクリート中の加速度や圧力の伝播を計測したものである。解析では、これを図-3のようにモデル化し、この際パラメータとしてフォークトモデルとして考えたRCC層のパネ係数、粘性減衰定数等を考えた。

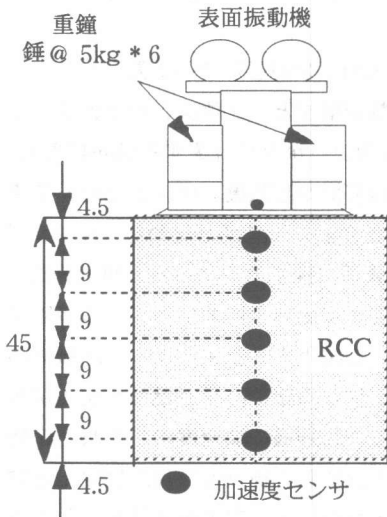


図-5⁶⁾ 解析対象実験

パネ係数 k は、コンクリートのヤング係数 E と断面積 A およびコンクリートの高さ l より

$$k = EA / l \quad (5)$$

で求められる。また、粘性減衰係数 c はパネ

係数 k と減衰定数 h および起振機の円振動数 ω より次式で算定される。

$$c = 2kh / \omega \quad (6)$$

ここでは、RCCがまだ締め固まらず起振機直下のコンクリートのみが締め固められる状態にあるとして、起振機の底面積をコンクリートの断面積とみなし、コンクリートのヤング係数を3.92, 4.9, 5.88, 9.8, 14.7, 19.6, 49.0 N/mm²と変化させ、起振機の振動数に対して減衰定数 h を0.3に仮定した。また起振機の最大起振力 F_0 を1540N一定とし、起振機の振動数も同様に $f_0=42.6$ Hz一定とした。表-1に計算で用いた起振機の振動条件に関するパラメータとその値を示す。

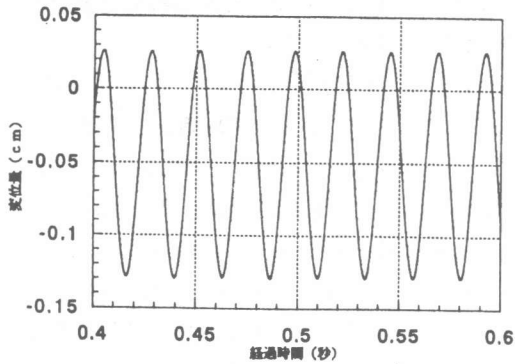
表-1 振動解析条件

	断面積 A (cm ²)	ヤング 係数E (N/mm ²)	パネ 剛性K (N/m)	粘性減衰 係数C (Nsec/m)
1自由 度系	707	3.92	628	1.41
		4.9	786	1.76
		5.88	943	2.11
		9.8	1571	3.52
2自由 度系	707	3.92	1257	2.81
		4.9	1571	3.52
		5.88	1885	4.23
		9.8	3142	7.04
		14.7	4712	10.56
		19.6	6283	14.09
		49.0	15708	35.21

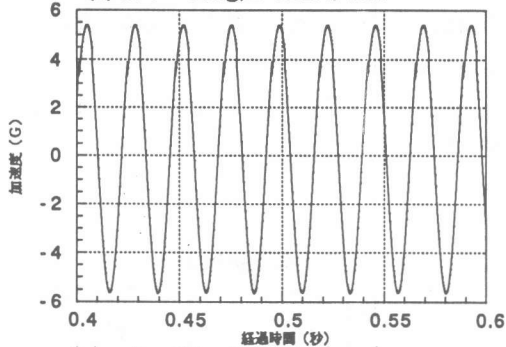
表-2⁶⁾ コンクリートの配合

単位量 (kg/m ³)				
W	C	S	G	計
113	323	780	1274	2490

2自由度系のコンクリートの質量は、実験におけるコンクリートの配合表を参考に算定した。結果の表示では、RCCの表面から鉛直上向きを正の方向にとって表わすものとする。

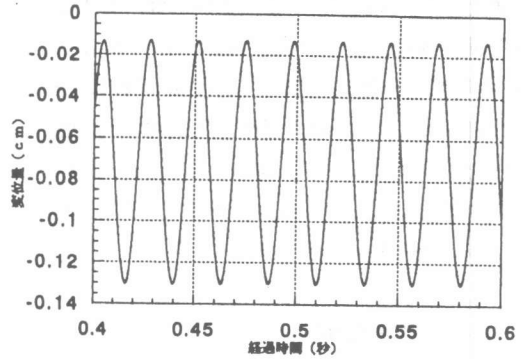


(a) $m_1 = 35\text{kg}, E = 3.92\text{N/mm}^2$

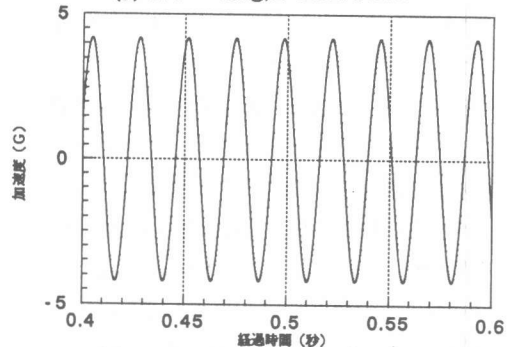


(b) $m_1 = 35\text{kg}, E = 3.92\text{N/mm}^2$

図-6 起振機の変位量と加速度



(a) $m_1 = 45\text{kg}, E = 3.92\text{N/mm}^2$



(b) $m_1 = 45\text{kg}, E = 3.92\text{N/mm}^2$

図-7 起振機の変位量と加速度

2. 3 計算結果と考察

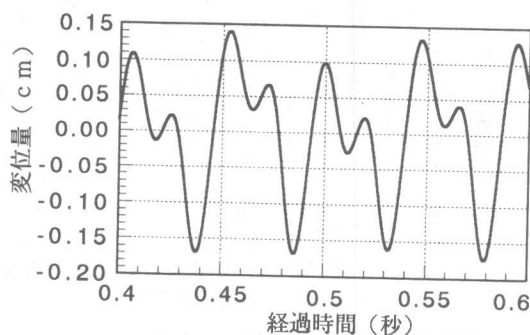
(1) 1自由度系の計算結果

1自由度系の計算結果のうち、同一のヤング係数 $E = 3.92\text{N/mm}^2$ をもつRCCを、質量の異なる起振機（質量 = 35kg, 45kg, ただし起振力は同じ）で締め固める場合を解析した結果を図-6, 図-7に示す。図-6では変位が負側にあり、RCC上の起振機が沈下して振動しており飛び跳ね現象は生じておらず変位

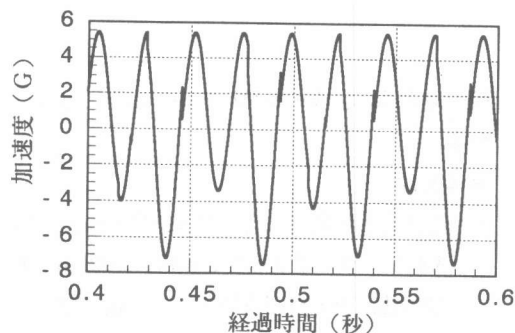
・加速度とも規則正しい正弦波となっている。図-7では変位がわずかに正側にでて、起振機が少しだけRCC表面より離れて浮き上がっていることを示しており、その結果RCC表面に落下して再接着する際にリバウンドの影響で加速度に乱れが生じている。しかしその乱れは少なく、加速度波形の正側と負側の絶対値はほぼ等しくなっている。図-8は起振機の質量を図-7と等しい35kgとしヤング係数を

$E = 5.88\text{N/mm}^2$ の場合について計算した。

ヤング係数が増すと、変位は正側に大きくなりRCC表面よりかなり跳躍する傾向にある。また変位の周期が起振機の周期と異なってきた、RCC表面より一旦飛び跳ねた起振機が落下しRCC表面に達する前にもう一度上向きの力により変位が上向きに増加し、その後RCC表面に落下し沈下する結果となり、起振機の加振周期と同じ周期での飛び跳ねや沈下が生じなくなる。起振機の加速度は、これらの変位の現象を反映して衝撃的な加速度変化を含んだものとなり、加速度の絶対値も正側と負側で大幅に異なる結果となる。これらの計算結果より、起振機の質量が同一の場合RCCのヤング係数が増加するに従い起振機が跳躍する傾向にあることが認められた。

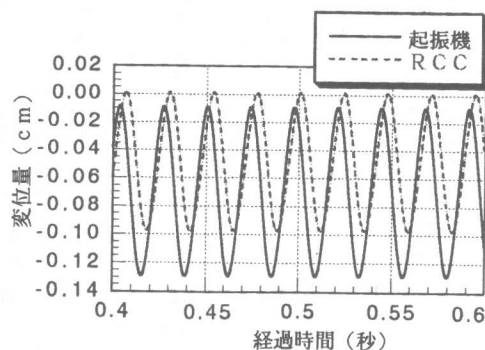


(a) $m_1 = 35\text{kg}, E = 5.88\text{N/mm}^2$

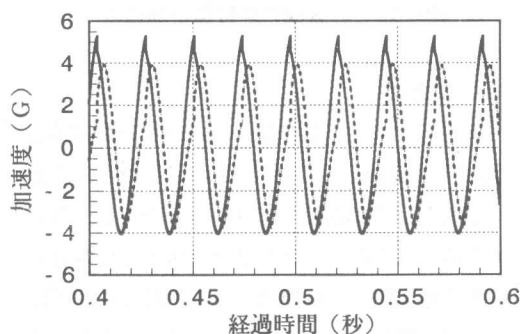


(b) $m_1 = 35\text{kg}, E = 5.88\text{N/mm}^2$

図-8 起振機の変位量と加速度



(a) $m_1 = 35\text{kg}, m_2 = 26.4\text{kg}, E = 5.88\text{N/mm}^2$



(b) $m_1 = 35\text{kg}, m_2 = 26.4\text{kg}, E = 5.88\text{N/mm}^2$

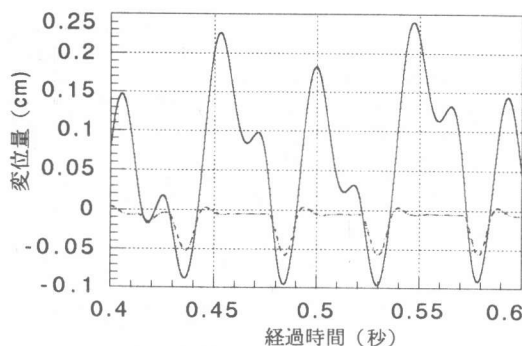
図-9 起振機の変位量と加速度

(2) 2自由度系の計算結果

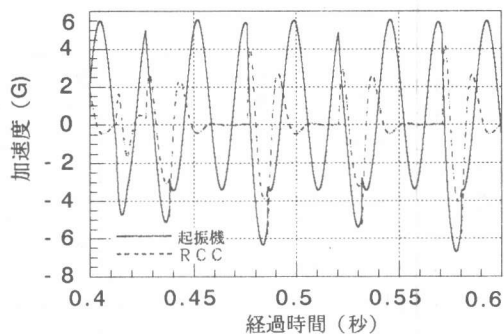
2自由度系の計算結果のうち起振機の質量が35kg, RCCの質量を26.4kgの場合で、ヤング係数 $E = 5.88\text{N/mm}^2$ として解析した結果を図-9に示す。変位はわずかに正の値を示しているが、起振機、RCCともに変位波形は規則正しい正弦波となっている。しかし、加速度波形においては若干の乱れが生じており、起振機とRCCの間に弱い引張り力が働いているものと考えられ、瞬間的な跳躍現象が起こっている。また変位・加速度ともに、起振機RCCの間に位相差が生じており振動の伝播速度が原因と考えられる。起振機質量およびヤング係数が等しい1自由度系の図-8と比較すると、図-8の方が変位加速度ともに図-9に比べて大きく乱れていることが分かる。この理由として、同じ起振力($F_0 = 1540\text{N}$)を与えて計算した中で、2自由度系はRCCの質量だけ1自由度系よりも増えており、系全体で見た質量が大きくなったことによるものと考えられる。

次に起振機質量が35kgRCCの質量を26.4kgの場合でヤング係数 $E = 14.7\text{N/mm}^2$ とした場合の解析結果を図-10に示す。

変位波形、加速度波形ともに大きく乱れ加速度波形に若干の位相差が見られるが、変位の負側のピークが起振機とRCCにおいて同時刻となっており、かつRCCの振動が大きく減衰していることが示されている。また図-9のヤング係数 $E = 5.88\text{N/mm}^2$ の変位波形と比較すると、起振機の変位波形における正側の最大値が図-9で約0.02cmであるのに対し、図-10では0.24cm程度と10倍以上の値を示している。かつ加速度波形においても正側の最大値はほぼ等しくなっているが、負側の最大値が図-9に比べて1.5倍程度になっており、跳躍時間の長い突き固めの状態になっているものと考えられる。図-1⁶⁾の早川氏らの行った室内実験による加速度波形と、本件究の加速度波形が一部定性的に一致していると見ることが出来る。



(a) $m_1 = 35\text{kg}, m_2 = 26.4\text{kg}, E = 5.88\text{N/mm}^2$



(b) $m_1 = 35\text{kg}, m_2 = 26.4\text{kg}, E = 5.88\text{N/mm}^2$

図-10 起振機の変位量と加速度

3. まとめ

本研究では、コンクリートの室内実験結果を念頭に起振機の飛び跳ねによる突き固め現象に着目し、振動機とコンクリートをフォークトモデルで表されるコンクリート層上で起振機が振動する問題に置き換え、一次元的に考えて数値的検討を行った。この際、パラメータとして起振機の質量やフォークトモデルとして考えたコンクリート層のパネ係数を考えた。この結果は次のようにまとめられる。

(1) 超硬練りコンクリートのヤング係数が増加すると起振機がコンクリート表面から跳び上がり、起振機の加速度波形にみだれが励起される。このみだれは、起振機がコンクリート表面から跳ね上がり、その後コンクリート表面に落下して衝突する状態により生ずるものである。

(2) 同一のヤング係数をもつRCCを締め固める場合、起振力が同じであれば起振機質量が小さく軽い場合に起振機の飛び跳ね現象が生じやすく、逆に起振機質量が大きく重い場合に起振機の飛び跳ねは生じにくい。

(3) 起振機の跳び上がりが生じない場合、RCCの変位波形は起振機の波形に対し位相差がでるが、跳び上がりが生じると、RCC中には一時的に振動伝播がとぎれRCCの振動が減衰し、位相差のない突き固めが起こることが示された。これらの結果は、室内実験⁶⁾で観測された結果と定性的に一致していると見ることができ、実

験の突き固め現象を表現しているように考えられる。

参考文献

- 1) 嶋津晃臣・見波 潔・中田公基・嶋田 功：振動ローラの輪加速度を利用した締固め管理手法，土木技術資料 27-11，pp.615-620, 1985
- 2) 建山和由・中島 聡・藤山哲雄：振動式締固め機械の振動特性を利用した地盤の締固め度の評価手法について，土木学会論文集，第487号/Ⅲ-26，pp.237-245，1994.3
- 3) 建山和由・藤山哲雄・西谷誠之：締固め施工における振動ローラの振動挙動に関する考察，土木学会論文集，第554号/Ⅲ-37，pp.231-247，1996.12
- 4) 上野 敦・国府勝郎：表面振動機による超硬練りコンクリートの締固め性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14 No.1，pp.433-438，1992
- 5) 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，Vol.15 No.1，pp.1185-1188，1995
- 6) 早川健司・国府勝郎・上野 敦：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17 No.1，pp.593-598，1995