

[1217] ローラーコンパクテッドコンクリートの締固め挙動に関する研究

遠藤孝夫^{*1}・河角 誠^{*2}・松井 淳^{*3}・栗田守朗^{*4}

1. はじめに

ローラーコンパクテッドコンクリート（以下 RCC と略記）の振動転圧による締固め挙動は未だ不明な点があるため、本論文では施工実験を行い、RCC の表面沈下量、RCC 中の加速度、土圧、内部変位を計測するとともに、これらを検討して、振動転圧時の RCC 中の加速度と圧力挙動のシミュレーションを試みた結果について記述するものである。

2. 実験の概要

2. 1 施工方法

施工実験は、8つのレーンで行った（図-1）。コンクリートは、単位結合材料 $120\text{kg}/\text{m}^3$ 、単位水量 $95\text{kg}/\text{m}^3$ ならびに細骨材率 $s/a = 35\%$ のもので、目標の小型 VC 値は 10 秒程度で通常の RCC コンクリートと同等のものである。RCC の仕上り厚さは、粗骨材最大寸法が 40mm の No. 1～No. 6 のレーンについては 30cm とし、最大寸法を 80mm とした No. 7 および No. 8 のレーンについては 50cm とした。RCC はブルドーザーによる敷きならしを行った後、振動ローラー（ドイツ BOMAG 社製 BOMAG 200W）で締固めた。また、RCC の締固め特性を把握するために、① RCC 表面および RCC 内部沈下量、② 振動ローラーおよび RCC 中の加速度、③ RCC 中の圧力の測定を行った。

2. 2 RCC の内部沈下量、加速度、圧力の測定法

内部変位計は、本実験のために特に新しく考案したもので、歪ゲージタイプの変位計を内部に取り付けたものである。内部変位計を図-1 と図-3 に示す場所に設置し、動歪アンプを通して変位をレコーダーに記録した。RCC 中の加速度は、図-1 および図-3 に示すように設置して測定した。また、振動輪の加速度も同時に測定した。加速度の測定方向は①鉛直方向（Z 方向）②ローラー進行方向（X 方向）③ローラーの進行に直交する方向（Y 方向）の 3 方向である。 RCC 中の圧力は、加速度計と同じ高さに土圧計を設置して鉛直方向の圧力を測定した。

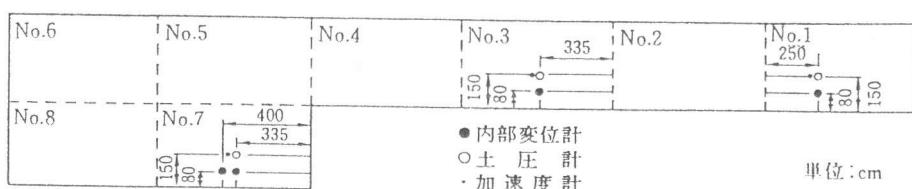


図-1 レーンの分割と計器埋設位置

*1 (財) 電力中央研究所我孫子研究所構造部建設材料グループリーダー、工博（正会員）

*2 (財) 電力中央研究所我孫子研究所構造部建設材料グループ、工博（正会員）

*3 (財) 電力中央研究所我孫子研究所構造部建設材料グループ、工修

*4 清水建設株式会社、工修（正会員）

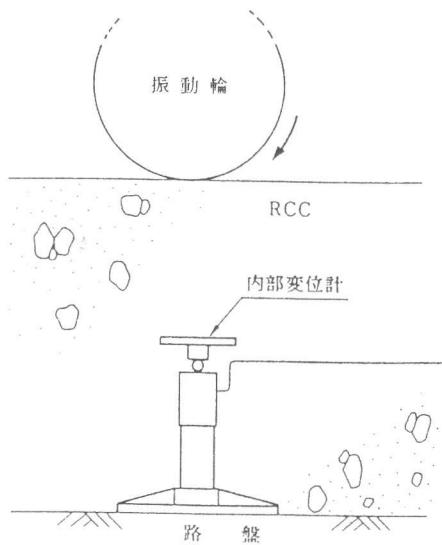


図-2 内部変位計

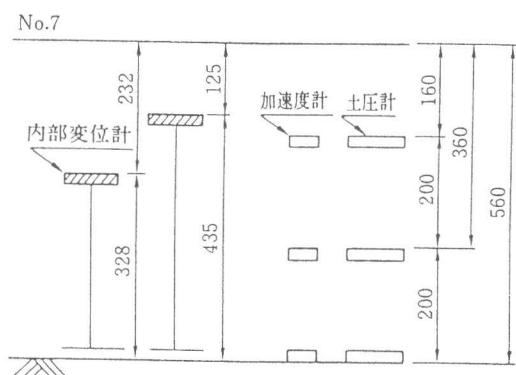


図-3 埋設設計器の位置 (No. 7 レーン)

2.3 実験の結果

測定データのうち、加速度、圧力、RCC 内部変位の結果の一例を図-4 に示す。

RCC の表面沈下量の挙動は、従来の実験式でよく表された（図-5）[1]。

RCC の内部沈下量の測定結果の一例を図-6 に示す。振動転圧の下部変位計の記録より、振動ローラーの通過の際に RCC は粘弾性的な挙動を示しながら永久変形が増加すること、永久変形は 2 往復程度まで急激に増加し、それ以後は微増する傾向にあることが明らかにされた。

加速度測定結果の一例を図-7 に示す。加速度は Z 方向が卓越し、Z 方向の加速度は深さ方向に大きく減衰すること、しかし、X 方向は、RCC 上部および中部で振動輪の X 方向の加速度と同等あるいはそれ以上となり、振動輪と RCC との相互作用で、RCC 表面近傍で複雑な挙動が生じていることを示唆している。

深さ方向の圧力の分布の一例を図-8 に示す。深さ方向の圧力分布は、深さが増すに従い減衰しており、その傾向はどのレーンでも同様であった。また、RCC の下部では、 0.5 kg/cm^2 程度の圧力を繰り返し受けている。

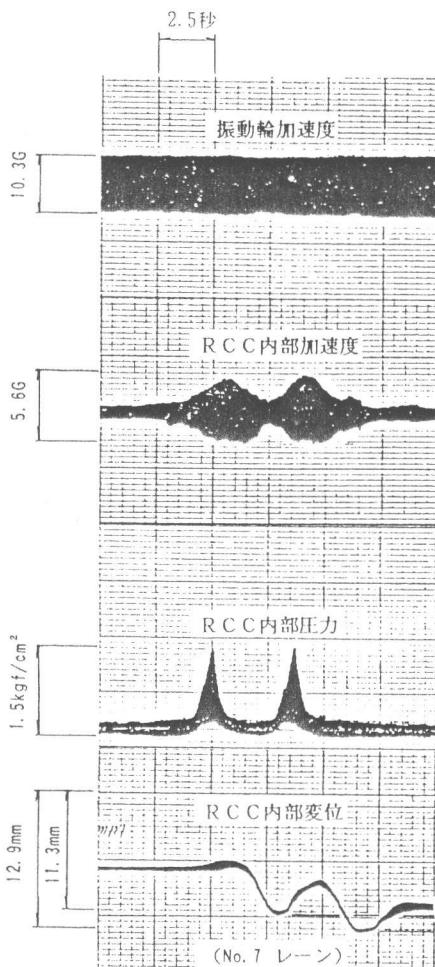


図-4 測定波形の一例

3. RCC中の加速度と圧力のシミュレーション

RCCの締固め時の動的挙動を解析するため、RCCを粘弾性体と考えて粘弾性4要素モデルによる動的解析プログラムを開発した。これは、通常の静的弾性プログラムに、粘弾性4要素モデル(図-9)の構成則、さらに動的解析に必要な質量マトリックス、減衰マトリックスと運動方程式の解法(Newmarkの β 法)を付加することにより実現させた。本研究では、計算時間の制約から二次元ひずみ場に限定して解析を行った。

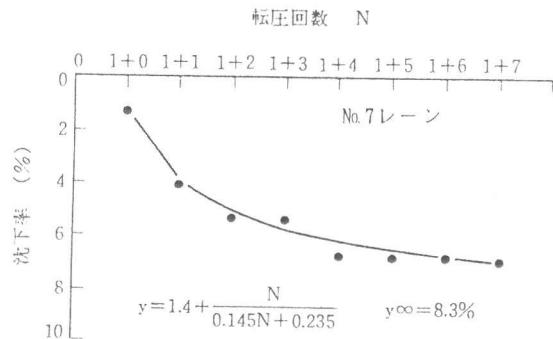


図-5 表面沈下率と転圧回数の一例

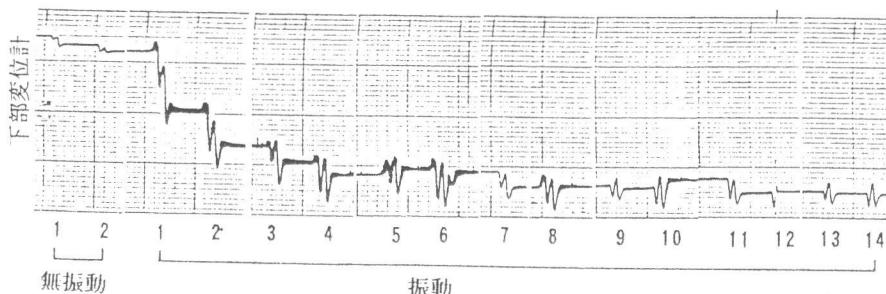


図-6 内部変位計の記録 (No. 7 レーン)

3. 1 RCCの粘弾性定数の決定

(1) 内部変位計に生ずる変位

RCCの粘弾性定数は、試験施工時に RCC の内部に設置した内部変位記録をもとに定めることにした。そのため、まず、平面ひずみ場で集中荷重が半無限弾性体表面に作用した場合の弾性体内部の鉛直変位式を導き、この荷重が移動する交通荷重とした場合の鉛直変位式に修正する。さらに、簡単のために材料のポアソン比 ν が 0.5 となる非圧縮性物体を仮定し、弾性体を粘弾性体 (Maxwell体) と考え、弾性-粘弾性対応の原理により弾性定数や荷重をラプラス変換し、これを整理して時間領域に逆変換することにより、平面ひずみ場の粘弾性半無限体に集中荷重が作用し、一定速度で表面を移動する場合の内部の鉛直変位式を求めた。

次に、変位計が RCC の内部に設置されていることを考え、変位計で計測される変位を求める。

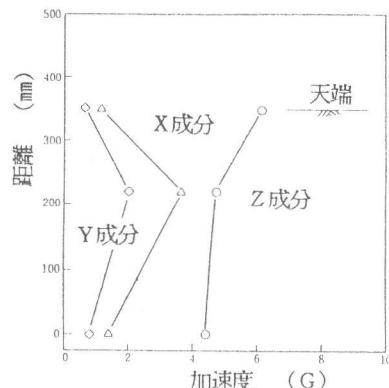


図-7 加速度分布 (No. 1 レーン)

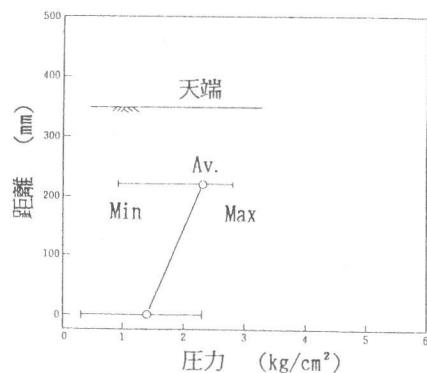


図-8 圧力分布 (No. 1 レーン)

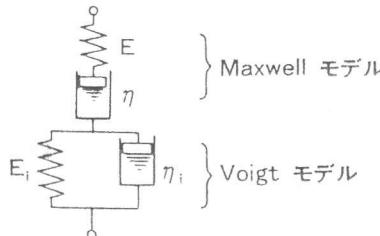


図-9 粘弾性4要素モデル

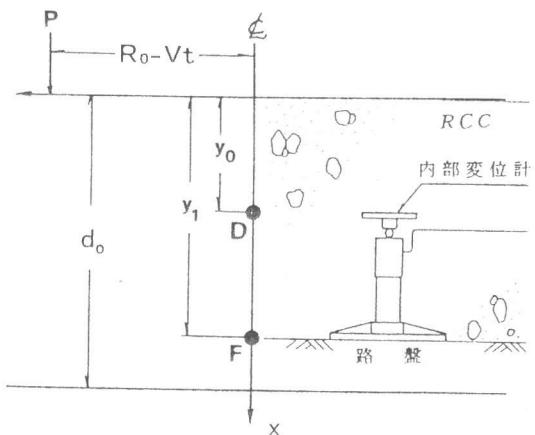


図-10 RCC中の内部変位測定位置

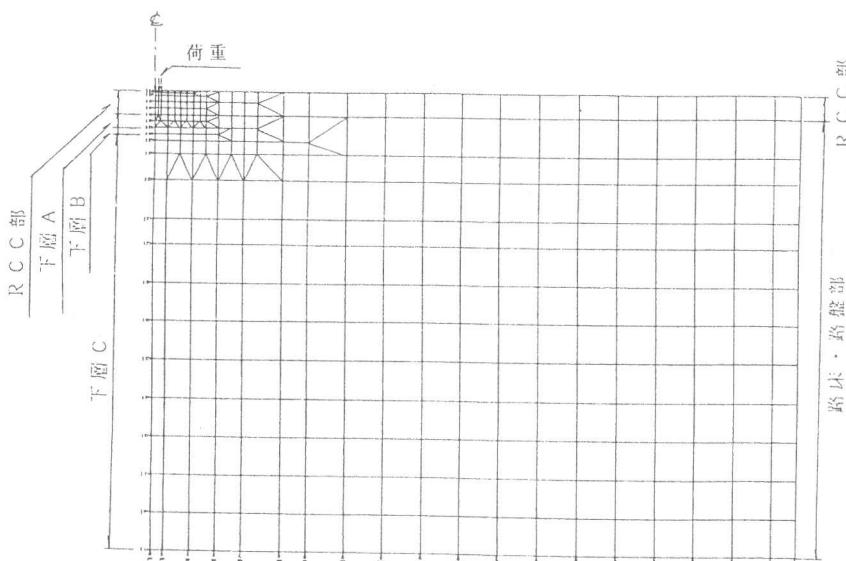


図-11 解析に用いた有限要素のメッシュ図

これは、図-10に示すように、変位計が表面から y_1 の距離にあるF点に設置されたと考え、表面から y_0 の距離にあるD点とF点との相対変位を考えればよい。この場合、相対変位は、D点とF点の鉛直変位の差であり、次のように表わされる。

$$\Delta \delta_v(t) = (\delta_v(t))_D - (\delta_v(t))_F$$

$$= -\frac{P_o}{\pi q_1} \cdot \frac{1}{2V} \left(R_o \times \{ \log(R_o^2 + y_0^2) - \log(R_o^2 + y_1^2) \} \right.$$

$$\left. - (R_o - Vt) \{ \log((R_o - Vt)^2 + y_0^2) - \log((R_o - Vt)^2 + y_1^2) \} \right)$$

$$-\frac{P_o}{\pi} \cdot \frac{p_1}{q_1} \left(\log \sqrt{(R_o - V t)^2 + y_o^2} - \log \sqrt{(R_o - V t)^2 + y_1^2} + \frac{(R_o - V t)^2}{(R_o - V t)^2 + y_o^2} - \frac{(R_o - V t)^2}{(R_o - V t)^2 + y_1^2} \right)$$

表-1 解析で使用したRCCの材料定数

解析例	E (kg/cm ²)	η (kg sec/cm ²)	E_i (kg/cm ²)	η_i (kg sec/cm ²)	ポアソン比 ν
CASE 7A	100,000	200	200	0.11	0.4
CASE 7B	100,000	100	100	0.055	0.4

ここで、 R_o は任意の距離、 V は走行荷重の速度、 P_o は荷重の絶対値、 $p_1 = \eta / E$ 、 $q_1 = \eta$ (図-9) である。

(2) 粘弾性定数と解析対象のモデル化

No.7レーンの2つの内部変位計とNo.3レーンの内部変位計の記録にMaxwellモデルより得られた式(1)を適用した結果、このモデルで無振動時の内部変位挙動がほぼ近似でき、単純Maxwell要素のバネ定数として、66~209 kg/cm²、粘性定数は17~383 kg·sec/cm²が得られた。

解析では、ここで求めたMaxwell要素のバネに小さな粘性を持つダッシュポットが並列につながれたVoigtモデルを考え、これが無振動締固めのような準静的問題ではダッシュポットの効果が発揮されていなかったと考え、別のMaxwell要素に直列に連結した4要素モデルを用いている。そして RCC の減衰定数 h を $h=0.07$ と仮定し、材料定数を表-1、2のように定めた。またポアソン比 ν は 0.4 に仮定した。

計算には、図-11に示されるメッシュを用い、境界には粘性要素を配置し、振動ローラーを模擬し静荷重と正弦荷重を加えて作用させた。

表-2 解析で使用したRCCの下層の材料定数

解析例	下層種類	E (kg/cm ²)	ポアソン比 ν	減衰定数 h
CASE 7A CASE 7B	下層 A	3,000	0.4	0.05
	下層 B	1,000	0.4	0.04
	下層 C	750	0.4	0.04

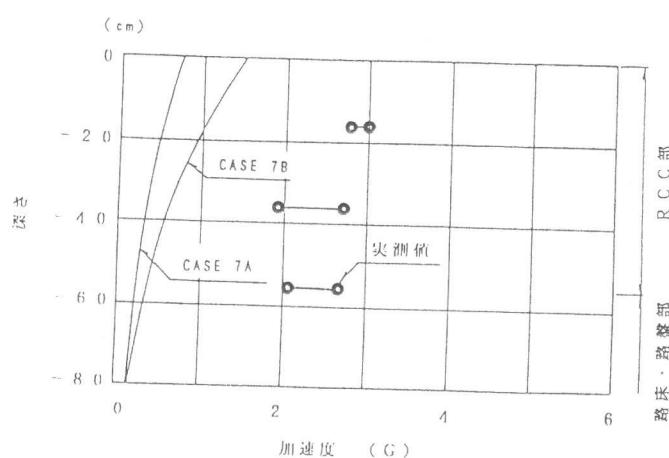


図-1-2 加速度の鉛直方向分布 (No. 7 レーン)

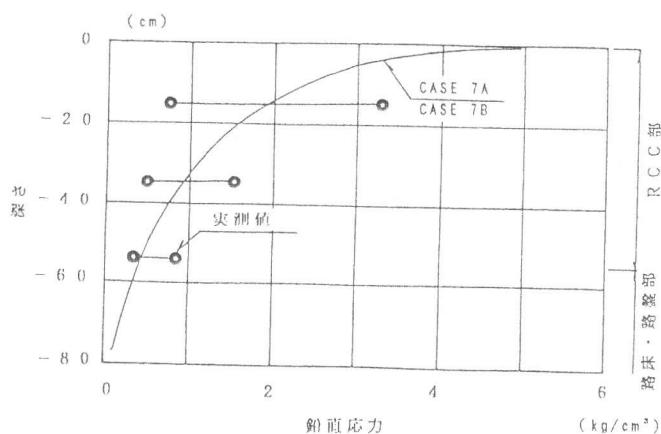


図-1-3 圧力の鉛直方向分布 (No. 7 レーン)

3. 2 解析の結果と検討

No. 7レーンについて解析して得られた変位、加速度の時刻歴をみると、各点の変位と加速度は、載荷荷重と同じ周波数で振動していることおよび載荷点よりも距離が離れるとともに減少して伝播していくことが示された。また、解析結果より、加速度の鉛直方向最大値分布を実測値とともに示すと図-12のようになる。これらより、計算値は実測値より小さくなっていることがわかる。しかし、土圧計で得られた圧力と計算で得られた鉛直方向の圧力分布とを比較すると図-13のようになり、圧力の実測値と計算値はほぼ対応していることが示された。

これらより、実際の RCC の見かけの材料定数は、計算で与えた材料定数より小さいと考えられる。これは、実際の施工では振動輪近傍だけで加振されているようであり、連続体の仮定は加速度を小さく与えるように作用すると考えられる。しかし、圧力はほぼ近似していることから、見かけの材料定数の補正を行えば、この粘弾性モデルを用いた本解析法により、RCC の締固め時における加速度や圧力の伝播は、ほぼ説明できると考えられる。

4. おわりに

ここでは、試験施工により RCC の振動締固め挙動を観測し、RCC 中の加速度と圧力のシミュレーションを試みた。これらの結果は以下に要約される。

- (1) RCC の表面沈下量は、振動転圧の初期に多く、以後次第に少なくなり、転圧回数の関数として表示される。
- (2) RCC の内部沈下挙動は粘弾性的な挙動を示し、永久変形は初期ほど大きく、徐々に減少し、本試験施工では振動転圧回数 7 往復程度で収束した。
- (3) 振動輪の加速度の絶対値は、締固めの程度によらず大きな変化はみられなかったが、RCC 中の鉛直方向の加速度絶対値は上層から下層へ向かって減衰することが確認された。ただし、RCC の上層部では、振動輪の加速度は鉛直方向が卓越しているにも拘らず、鉛直の他、進行方向や進行方向に垂直な方向の加速度も励起され、複雑な力を受けていていることが明らかになった。
- (4) RCC 中の圧力は、上層部から下層部にかけて大きく減衰していることが示された。
- (5) 振動締固め時の RCC 中の鉛直圧力分布については、実験値と計算値がほぼ一致したが、鉛直加速度についてはよい近似が得られなかった。今後、RCC のレオロジー定数の決定法も含めより詳細な解析的検討が必要である。

参考文献

- 1) 栗田守朗ほか：RCC コンクリートの締固め性状に関する一研究、清水建設研究所報、第38号、pp. 67-80、1983. 10
- 2) 山田嘉昭：塑性・粘弾性、有限要素法の基礎と応用シリーズ 6、pp. 124-147、培風館、1983
- 3) S. P. Timoshenko and J. N. Goodier : Theory of Elasticity, Third Edition, International Student Edition, 1970