

論文 振動締固めを受ける超硬練りコンクリートの物性値の同定

畑澤洋平^{*1}・千葉佳和^{*2}・菅井幸仁^{*3}・遠藤孝夫^{*1}

要旨: 締固めエネルギーに基づく超硬練りコンクリートの充填率の評価法が提案されている。これを現場施工に適用するためには、振動力やコンクリートの物性値、施工基盤の力学的特性をもとに、コンクリート中の加速度を算定し、エネルギーに換算する必要がある。そこで、本論文は締固め時の超硬練りコンクリートの物性値を簡易に求めることを目的に、室内で上載式振動機を用いて締固める際のコンクリート中の加速度データを用い、振動モデルと逆解析手法によってコンクリートの物性値を求めることを試みたものである。

キーワード: 超硬練りコンクリート, Gauss-Newton法, 物性値

1. はじめに

超硬練りコンクリート施工のさらなる合理化を図るためには、層厚の割り増しや、簡易な施工管理法の開発が今後の課題と考えられる。前者の目的を達成するためには、室内試験によりコンクリートのコンシステンシーや締固め性を求め、これをもとに直ちに現場における締固め機械や層厚の検討ができ、施工計画が構築できるようにすることが大切であると考えられる。

現在、超硬練りコンクリートの締固め度（充填率）を締固めエネルギーに着目して求める締固め性試験が提案されている¹⁾。この方法は、室内における振動台による振動試験により超硬練りコンクリートの締固め度（充填率）と与えた振動エネルギーの関係（締固め曲線）を求めるものである。また、その後の研究では、表面振動機を用いた実験で得られるコンクリート内部の加速度から締固めエネルギーを計算し、コンクリート各層の充填率を別に行った締固め性試験で得た締固め曲線によって算定すれば、全体の充填率が精度良く求められることが示されており、基本的には締固め性試験が現実の施工へ適用可能であることが示唆されている。

超硬練りコンクリートの配合設計から現場施工、コンクリートの品質管理まで考えれば図-1のようなフローが考えられる。すなわち、配合設計からコンシステンシー等を求め、コンクリートの物性を評価し、締固め機械や施工条件等を考え、これらより解析モデルを考えて、数値解析によりコンクリート層内の加速度を予測できれば、これより直ちに締固めエネルギーが計算でき、締固め曲線よりコンクリート各層の充填率が予測できることになる。

この際、締固められるコンクリート中の加速度の分布を適切に算定することが重要となるが、締固められる超硬練りコンクリート内部の振動応答挙動は、締固めの進行とともに大きく変化するようであり、このことから振動締固め中にコンクリートの物性値がどんどん変化していくと考えられ、物性値の評価が大きな問題として浮上してくる。

このような背景から、本論文では、上載式振動機を使ってコンクリートを上部から締固める室内実験で測定されたコンクリート中の応答加速度をもとに、逆解析により締固め進行時における超硬練りコンクリートの物性値を得ること

*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 東北学院大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*3 東北学院大学助教授 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）

ができれば、締固め施工管理システムの確立に大きく寄与できるものと期待されることから、この方法の適用性を検討した。

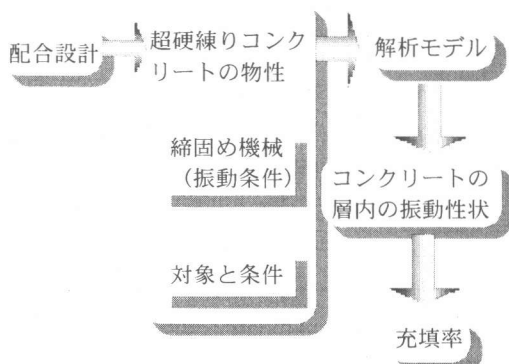


図-1 締固め品質管理フロー

2. 解析の対象とした実験

2.1 概要

ここでは、逆解析により振動締固め時のコンクリートの物性値を求めるために、まず杉森²⁾らの行った上載式振動機を用いた振動締固め実験の概要を示す。次に、逆解析により得られるコンクリートの物性値の妥当性を検討するため三栖³⁾らが行った一軸圧縮試験の概要を示す。

2.2 上載式振動機による振動締固め実験

杉森²⁾らの行った室内実験は、締固め進行過程のコンクリート層内の加速度を、図-2に示す締固め層に加速度センサを埋設して計測したものである。鋼製型枠の寸法は60×60×60cmで、コンクリートは3層に分けて投入され、初期充填率が83%になるように、初期高さは1層12cmの3層36cmとして試験を行っている。また、締固め終了時のコンクリートの層厚は30cmとなっている。

コンクリートの配合は表-1に示される。さらに、表面振動機の質量65kg、振動数60Hz、起振力2915(N)の条件で締固めを行っている。

表-1 コンクリートの配合表

k_m	k_p	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			Mass (kg/l)	
				水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)		
1.65	1.37	35	42	120	343	681	1186	2.5

k_m : モルタル粗骨材空隙比 Mass: 単位容積質量
 k_p : ペースト粗骨材空隙比

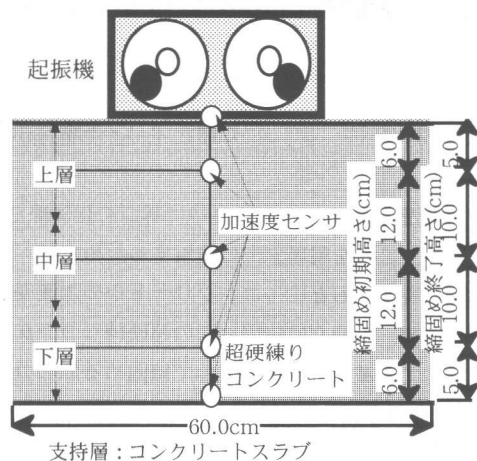


図-2 室内実験

2.3 ヤング率測定実験

締固め進行過程におけるフレッシュコンクリートの物性変化を把握するために、三栖³⁾らは充填率とヤング率の関係に着目してヤング率測定試験(一軸圧縮試験)を行った。一軸圧縮試験の概要を図-3に示す。

コンクリートは、表-1の配合とし、供試体の作製は締固め性試験装置を用い、次のように行っている。すなわち、練り混ぜ後、直ちにφ10×20cm供試体用型枠に対して充填率100%に相当する試料を計量し、ホッパを有する型枠に投入する。これを電磁式加振機に設置して加振し、加振中の試料上面の高さをレーザー変位計で計測し、任意の供試体高さで振動を止めることによって、任意の充填率の供試体を作製している。この供試体を一軸圧縮試験に使用し、変位と荷重の関係曲線を求めている。

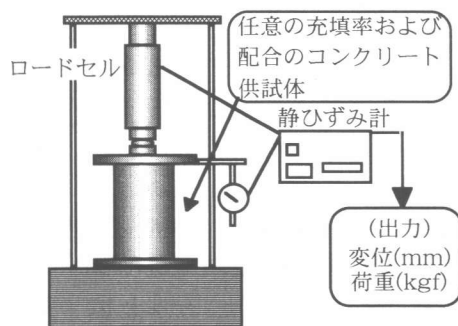


図-3 一軸圧縮試験

3. 数値計算による超硬練りコンクリートの物性値の同定

3.1 概要

ここでは、締固めを受ける超硬練りコンクリートの物性値を同定するための解析手法を示す。

3.2 振動解析手法

数値計算では地盤上で振動する基礎の問題を参考に考えた。ここで、超硬練りコンクリートを粘弾性体と仮定し、並列に連結した1次元フォークトモデルを材料モデルとし、コンクリート層上で起振機が振動する問題に置き換えた。モデルを図-4に示す。運動方程式は、式(1)で表される。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{P\} \quad (1)$$

ここに、

- [M] : 起振機と各層の質量 (kg)
- [K] : 起振機と各層のバネ係数 (kgf/cm)
- [C] : 起振機と各層の粘性減衰係数 (kgf sec/cm)
- [P] : 外力 (N)

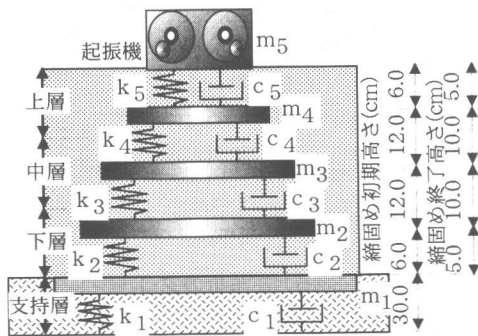


図-4 シミュレーションモデル

各層を起振機、上層、中層、下層に分けそれぞれの応答加速度を求めている。起振機の質量、超硬練りコンクリートの各層の質量の中心を基準とし鉛直下向きを正としている。

入力する値として質量、ヤング係数、粘性減衰係数を決定する。質量は、断面積、単位容積質量、コンクリートの高さより求められる。単位容積質量は、時間ごとに変化するため締固めエネルギーの算定式より求める。また、各時間ごとの各層は

単一の密度であると仮定している。締固めエネルギーの算定式を式(2)に示す。

$$E_i = \int F dx = \rho \frac{\alpha_{\max}^2}{4\pi^2 f} t_i \quad (2)$$

ここに、

- E_i : 時間 t_i における締固めエネルギー (J/l)
- ρ : 試料の単位体積質量 (kg/l)
- α_{\max} : 振動台の最大加速度 (m/sec²)
- f : 振動数 (Hz)
- t_i : 振動時間 (sec)

また、コンクリート高さは、上部より表面振動機で激しく超硬練りコンクリートが締固められるため変動する。よって、各時間での高さを求める。コンクリートの各時間での高さは、充填率と締固めエネルギー算定式より締固めエネルギーに対する充填率が求められる。締固めエネルギーに対する充填率の算定式を式(3)に示す。

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i) \left\{ 1 - \exp(-b \cdot E^d) \right\} \quad (3)$$

ここに、

- γ : 締固めエネルギーに対する充填率 (J/l)
- C_i : 初期充填率 (%)
- C_f : 達成可能充填率 (%)
- b, d : 実験定数

実測応答加速度は波形に乱れがある。この乱れの原因の一つは振動機の跳躍である。また、振動機の跳躍はコンクリート面に衝撃的に作用するため跳躍による加速度は締め固めにおいて無視できない。建山¹⁾らは土の締め固め度を評価する施工管理手法として振動ローラ、地盤系を2自由度振動モデルで置き換え数値計算により地盤剛性の変化にともなう振動ローラの振動挙動の変化の特徴について検討を行っている。このモデルでは、土と振動ローラの振動輪との間に引張力は働かないと考え、地盤反力が負値をとるときには地盤と振動ローラを切り離し振動輪の跳躍現象を考慮している。本研究においてもこの手法を適用し、多質点系で跳躍を表現した。引張力が負の場合において、式(1)中のバネ係数 k と粘性減衰係数 c の値を0.5%とした。これは、計算時の不安定さを取り除くために、影響がないと思われる範囲

で小さくしたものである。この場合の条件を式(4)に示す。

$$c_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + (x_5 - x_4) < 0 \quad \text{の時}$$

$$c_5 = 0.005 \times c_5, \quad k_5 = 0.005 \times k_5 \quad (4)$$

また、超硬練りコンクリートの付加質量については、ここでは考慮しなかった。

3.3 逆解析手法

Gauss-Newton法を用いて超硬練りコンクリートの物性値を求めた³⁾。そして、これより得られた各層の物性値を元に多質点系モデルの振動解析に用いて加速度波形を求めた。次に、解析より得られたバネ係数kとコンクリートの断面積Aおよびコンクリートの高さlよりヤング係数Eを式(5)で算定する。

$$E = k l / A \quad (5)$$

また、解析より得られた粘性減衰係数cとバネ係数kおよび起振機の円振動数 ω より減衰定数hを式(6)で算定する。

$$h = c \omega / 2k \quad (6)$$

シミュレーションフローを図-5に示す。

また、解析条件は、表面振動機の質量65kg、コンクリートとの接地面積706.9cm²、振動数60Hz、加速度4.5Gとした。超硬練りコンクリートの初期高さは1層12cmの3層36cmとし、締固め終了時の高さを30cmとした。また、支持層はコンクリートスラブとした。

逆解析は0.0~0.1秒、70.0~70.1秒、140~140.1秒、180~180.1秒の区間で行った。

4. 計算結果と考察

逆解析結果のヤング係数の経時変化と減衰定数の経時変化のグラフを図-6、図-7に示す。ヤング係数は、締固めの進行に従って増加の傾向を示すが140秒前後になると増加の割合が緩くなる。これは、振動締固めによって、コンクリート中の空隙がモルタルで充填され、コンクリートが徐々に高密度となって、剛性がある一定値に収束するためだと思われる。

減衰定数は、ヤング係数が増加すると共に減少傾向にある。これは、加えられる加速度や運動工

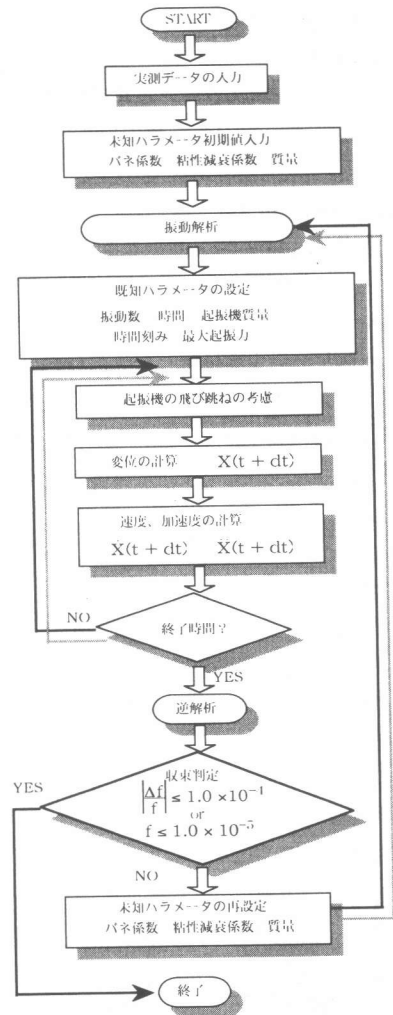


図-5 逆解析のフロー

ネルギーが増加するとコンクリートの空隙が除去され内部で消費されるエネルギーが少なくなるため、見かけ上粘性が低下するものと考えられる。

逆解析によって得られたコンクリートの物性値より振動解析を行い、得られた応答加速度波形を杉森らの行った室内実験結果と比較したグラフを図-8~図-15に示す。これらの図では、応答加速度波形を、測定時間0.0~1.0秒、180.0~180.1秒の二つの区間で表示している。

締固め初期(0.0~0.1秒)の実測応答加速度は、表面振動機の加速度(4.5G)より大きな値を示している。また、起振機とコンクリート(上層、

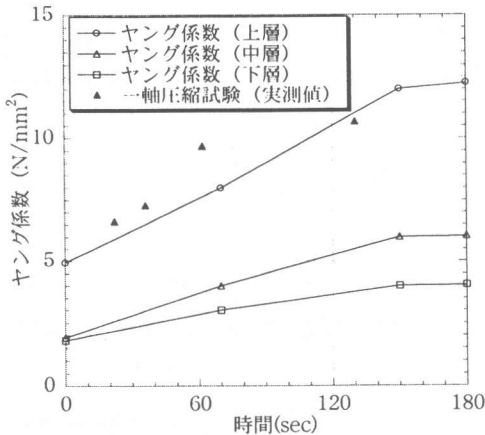


図-6 ヤング係数の経時変化

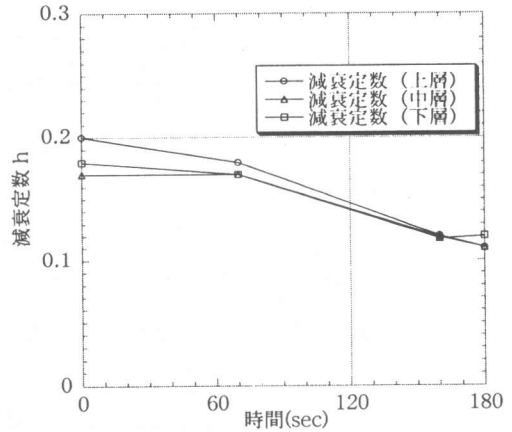


図-7 減衰定数の経時変化

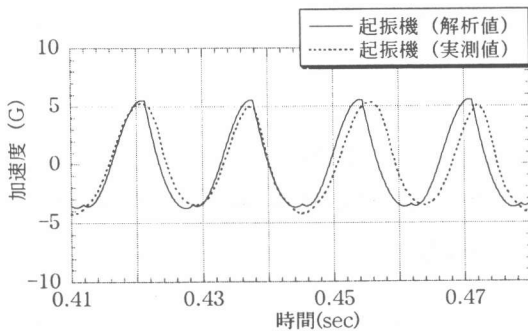


図-8 実測応答加速度と解析値 (起振機 締固め初期)

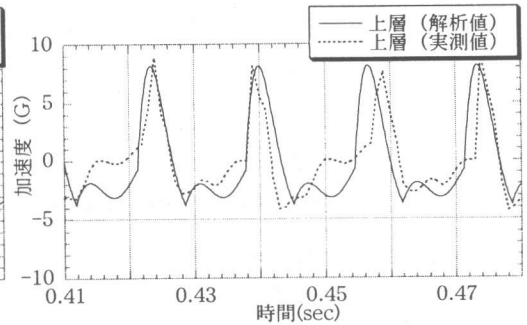


図-9 実測応答加速度と解析値 (上層 締固め初期)

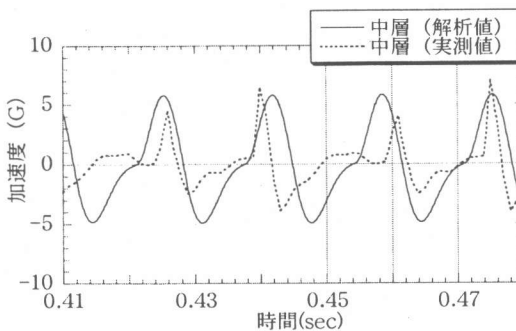


図-10 実測応答加速度と解析値 (中層 締固め初期)

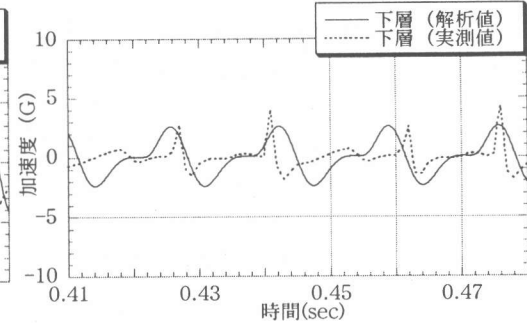


図-11 実測応答加速度と解析値 (下層 締固め初期)

中層、下層)では、若干の位相差が見られる。これはコンクリート中の粘性が大きいためであると考えられる。解析値の応答加速度は、起振機部分で若干の乱れが生じており、起振機とコンクリート間に引張力が働いて、瞬間的な跳躍現象が起こっていると考えられる。また、上層、中層、下層の実測応答加速度は激しく乱れており、これはコンクリートの急激な沈下が原因であると考えられる。解析においても加速度は激しく乱れている。

実測値と解析値を比較すると応答加速度の大きさ、周期等を見ても、ほぼ良好に一致していると見ることが出来る。締固め終期の実測応答加速度は表面振動機の跳躍による乱れは締固め初期に比べ少なく、正弦波に近い応答となっている。これは、解析結果でもほぼ一致した応答を見せている。

5. まとめ

超硬練りコンクリートの物性値を簡易に求める

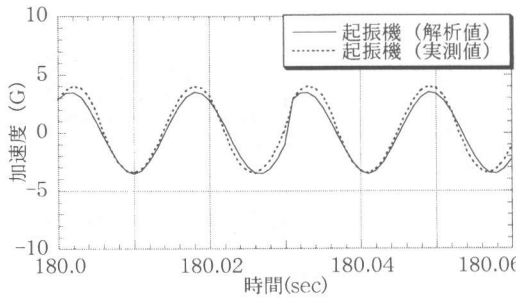


図-12 実測応答加速度と解析値（起振機 締固め終期）

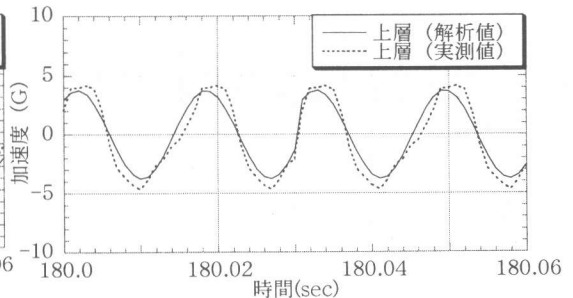


図-13 実測応答加速度と解析値（上層 締固め終期）

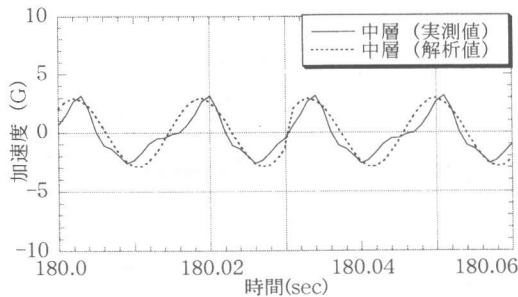


図-14 実測応答加速度と解析値（中層 締固め終期）

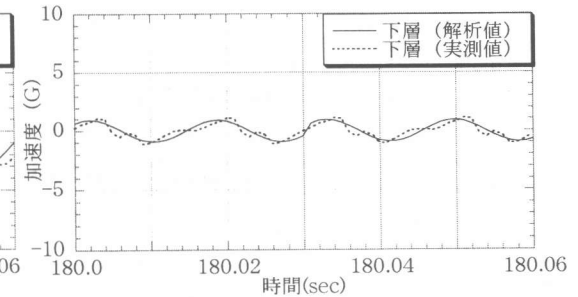


図-15 実測応答加速度と解析値（下層 締固め終期）

ことを目的に、上載式振動機を用いてコンクリートを上部から締め固めた際の加速度データを入力とし、多質点系振動モデルとGauss-Newton法による逆解析により、振動締め固めを受ける超硬練りコンクリートの物性値の同定を試み、得られた値を用いて解析を行い、得られた各層の応答加速度波形と実験値とを比較検討し、次の結論を得た。

- 1) 両者から得られた応答加速度波形は、各時間ではほぼ良好に一致していると判断された。
- 2) 一軸圧縮試験で得られた超硬練りコンクリートのヤング係数と逆解析で得られたヤング係数は良好に近似していた。
- 3) 逆解析で求めたヤング係数は、深さとともに減少傾向にあること、また締め固めによってコンクリートの剛性が大きくなり減衰定数が減少する事が明らかになった。従って、振動モデルを仮定し、これらのバネ定数や減衰係数を逆解析によって求めれば、締め固め管理システムに寄与できる見通しを得た。

今後の課題

今後は、振動モデルの質点を増やし、より精度良く加速度を表現する予定である。

参考文献

- 1) 上野敦，国府勝郎：表面振動機による締め固めエネルギーとコンクリートの充填率に関する研究 Vol. 15, No1, コンクリート工学年次論文集, pp. 1185~1188, 1992
- 2) 杉森誠志，国府勝郎，三栖幸彦，上野敦，早川健司：転圧コンクリートの配合設計および施工管理に対する締め固め性試験の応用，コンクリート技術シリーズ No. 37, フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題 第Ⅱ編 シンポジウム論文集, pp. II-1~II-8, 2000
- 3) 三栖幸彦：表面振動機による超硬練りコンクリートの締め固め挙動とそのシュミレーションに関する研究，東京都立大学，修士論文，1998. 3
- 4) 建山和由，藤山哲雄，西谷誠之：締め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 / pp. III-47, 1996. 12
- 5) 畑澤洋平，坂西 馨，菅井幸仁，遠藤孝夫：超硬練りコンクリートのレオロジー特性の同定，コンクリート技術シリーズ No.37, フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題 第Ⅱ編 シンポジウム論文集, pp. II-9~II-12, 2000