

論文 超硬練りコンクリートの振動締固め機構の解明に関する研究

國居史武*1・横山禎之*2・野上圭一*3・大津 政康*4

要旨: 超硬練りコンクリートの振動締固め機構を解明することを目的として、振動締固め試験により計測された間隙水圧と振動変位の変化について検討した。フレッシュ状態での定常振動状態における供試体上部の締固め度を考慮した場合の物性値の測定も実施した。これらの実験データを用いて固相-液相の二相問題の BEM 解析を行い、定常振動場における間隙水圧分布と振動変位分布の解析的な検討を行った。その結果、本解析により振動締固め試験での定常状態における間隙水圧、振動変位を再現する可能性が示された。

キーワード: 超硬練りコンクリート、振動締固め、境界要素法、二相問題、振動変位

1. はじめに

RCD 工法は超硬練りコンクリートを用い、大型汎用機械によりコンクリートの運搬、敷均し、締固めを行うダムの施工システムで、今日ではダム施工法の主流となっている。しかし RCD 工法において、日常の施工管理として VC 値によるコンシステンシー管理などが行われているが、その締固め機構は完全に解明されているとは言えない^{1), 2)}。また超硬練りコンクリートの振動締固めについては、一次元の構造モデルと Voigt モデルによる粘弾性の材料モデルを用いたシミュレーションなどが行われているが³⁾、コンクリート中を伝わる波動のコンクリートに対する液状化作用を考慮した解析⁴⁾はあまり行われていない。

本研究では昨年度の研究成果に基づいて、大型モデルを用いた振動締固め試験において間隙水圧と応答加速度の測定を行った。また、供試体上部の締固め度を考慮した超硬練りコンクリートのフレッシュ状態での物性値の測定を行った。これらの実験データを用いて固相-液相の二相モデルによる定常振動場を境界要素法(BEM)を用いた解析により、間隙水圧分布と振動変位分布の再現性について考察した。

2. 解析手法

解くべき未知数を振動変位 u と間隙水圧 p とする Biot の二相混合体理論に基づいた定式化を行うと、固相の釣合い式は

$$\rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} = (\lambda + \mu) u_{j,j} + \mu u_{i,jj} + p_{,i} \quad (1)$$

液相の連続式は

$$p_{,ii} = -\rho^f \frac{d^2 u_{k,k}}{dt^2} - \frac{\gamma_w}{k} \frac{du_{k,k}}{dt} \quad (2)$$

のように与えられる。ここで、 ρ^f : 固相の密度、 γ_w : 液相の単位体積重量、 k : 透水係数、 λ 、 μ は Lamé の定数である。

式 (1) と式 (2) を連成させ、固相-液相の二相問題を BEM 解析する。なお、式 (1) 中の λ 、 μ には複素数として粘性の影響も考慮する。

解析には定常振動状態に対する二次元動的 BEM 解析プログラムに粘性の影響を考慮した Q 値を導入し、実験条件や物性値測定の結果を与えることにより、圧力分布、振動変位、体積ひずみを解析した。

3. 実験概要

3.1 振動締固め試験

実験には表-1 に示す粗骨材の最大寸法

- * 1 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生科学専攻 (正会員)
- * 2 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻
- * 3 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻
- * 4 熊本大学大学院教授 自然科学研究科環境共生科学専攻 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G
20	0	35	38.5	113	226	97	780	1274

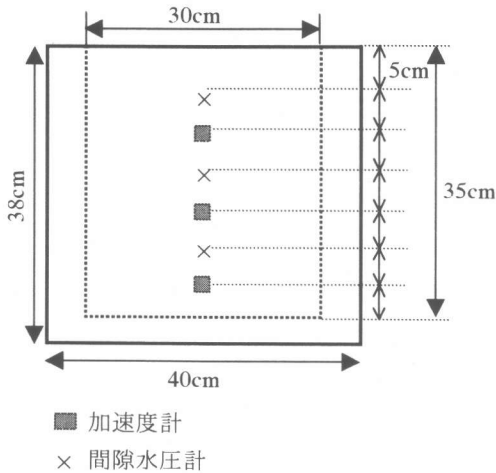


図-1 センサ配置図

20mm, 細骨材率 38.5%, スランプ 0cm の配合の超硬練りコンクリートを使用した。

振動締固め試験は側壁の影響を考慮するために、幅 30cm, 奥行き 30cm, 高さ 35cm の木製型枠を用いた。そして表-1 に示す配合のフレッシュコンクリートを投入し、敷き均した後、図-1 に示すように小型間隙水圧計（型式 BP-RS）を深さ 5cm, 15cm, 25cm の 3ヶ所、防水型加速度計（ARH-100A, 応答周波数範囲 0~180Hz）を深さ 10cm, 20cm, 30cm の 3ヶ所にそれぞれ設置し、それぞれの位置での間隙水圧、応答加速度を測定した。その上に厚さ 5mm の鋼製の蓋をし、振動器で 1125N の荷重载荷した状態で 130Hz の振動を与えた。

応答加速度の計測には DR-F1（TEAC 社製）を用い、サンプリング周波数 2kHz, データ抽出間隔を 20 秒とし、これら測定時間は、間隙水圧の値が一定となる定常状態が確認できるまでとした。

3.2 物性値の測定

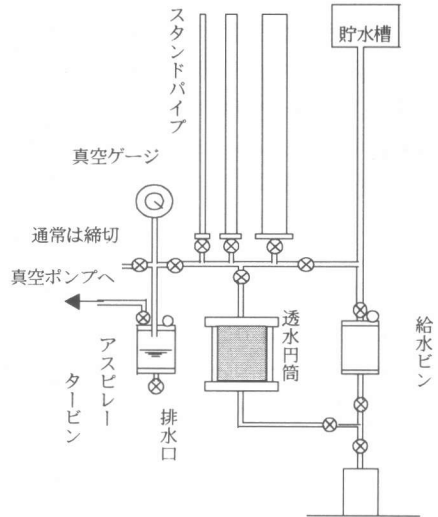


図-2 変水位透水試験装置

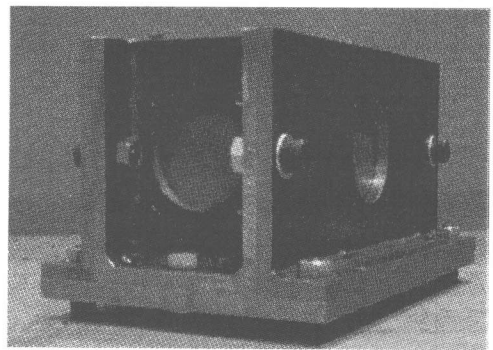


図-3 物性値測定専用型枠

既報⁴⁾ではフレッシュコンクリートの物性値の測定については再検討となったことから、供試体上部の締固め度の高い領域を除去せずに、5cm 程度の余盛を行って締固めた後に、物性値の測定を行った。密度は密度試験（JIS A 1202）、透水係数は変水位透水試験（JIS A 1218）により締固め後の定常状態におけるコンクリートの透水係数をそれぞれ測定した。

変水位透水試験は図-2 に示すような装置に

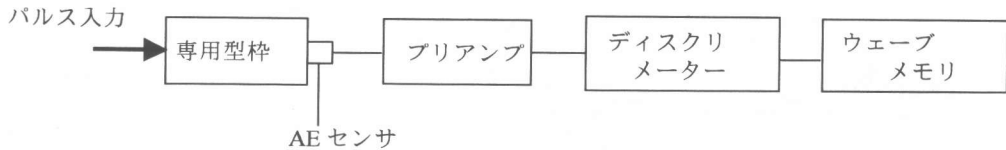


図-4 Q 値測定装置

において、直径 10cm、高さ 12.7cm の透水円筒に表-1 のフレッシュコンクリートを充填後に鋼製の蓋をし、図-1 に示す振動締め試験と等しい応力 (12.5kPa) にするために振動器で 98N の荷重載荷した状態で 130Hz の振動を 400 秒間与え、振動載荷試験を行った定常状態下と同様なコンクリートを作製した。その後、このコンクリートを減圧吸水法により飽和状態にし、JIS 型変水位透水試験器 (SS-S-356) で透水係数を測定した。

フレッシュ状態における弾性係数は板厚の影響を考慮するために、図-3 に示す鋼製と厚さ 2mm のアクリル部からなる幅 10cm、奥行き 20cm、高さ 12.5cm の物性値測定専用型枠に変水位透水試験と同様の条件により定常状態におけるコンクリートを作成し、携帯用超音波非破壊試験器 (SIT-021 型) を用いてコンクリート内を通る弾性波の位相速度を計測することにより実験的に決定した。

3.3 Q 値の測定

粘性減衰の影響を考慮するために Q 値を導入した。エネルギー E を持つ波動が一波長の距離を進む間に失うエネルギーを ΔE とすると、材料の距離減衰特性を表す Q 値は次式のように定義される。

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} \quad (3)$$

ここで、材料内の AE 波の伝播過程における周波数応答 $U(f)$ を距離減衰によるものと考え、伝播距離 d と Q 値を用いて次のように表現できる。

$$U(f) = \exp\left(-\frac{\pi f}{v_p Q} d\right) \quad (4)$$

この場合に式 (1)、(2) の定常状態における波数 k_w は複素数となり、

$$k_w = \frac{2\pi f}{V} + \frac{i}{2Q} \frac{2\pi f}{V} \quad (5)$$

と表わされる。ただし、V は P 波 (V_p) および S 波 (V_s) の伝播速度である。

図-4 に Q 値の計測装置を示す。フレッシュ状態の超硬練りコンクリートを図-2 に示す物性値測定専用型枠に打設後、振動載荷により定常状態にした。その後シャープペンシルの芯圧折によりアクリル部にパルスを入力させて、他端に取り付けた AE センサ (AE-901S) により AE 波を計測した。得られた波形データを FFT 処理し、幅 10cm と奥行き 20cm の経路でのフーリエ変換の比から式 (4) により Q 値を求めた。なお、反射などの影響は同じ板厚の型枠で実験を行い、周波数領域の割り算を実施しているので相殺される。

4. 結果および考察

4.1 振動締め試験の結果

図-5、図-6、図-7 に振動締め試験により計測された最終沈下量 4cm となるまでの時間と間隙水圧の関係がそれぞれ示されている。間隙水圧はどの深さにおいても 200 秒付近からほぼ一定となることが確認された。その値はそれぞれ深さ 5cm では 0.7kPa、深さ 15cm では 0.6kPa、深さ 25cm では 0.4kPa であった。

図-8、図-9、図-10 には得られた応答加速度を 2 回積分することにより得られた鉛直方向の振動変位の時間変化が示されている。振動変位は 100 秒までは急激に減少するが間隙水圧分布と同様、100 秒付近から次第に一定となることが確認された。以上のことから、本実験では

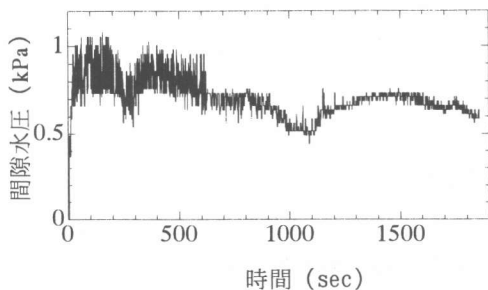


図-5 間隙水圧 (深さ 5cm)

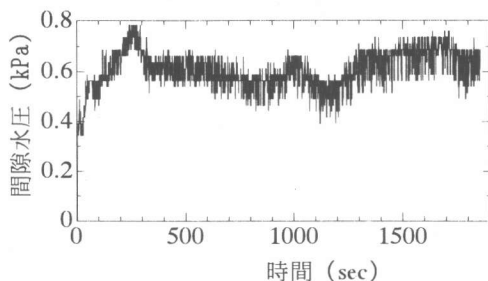


図-6 間隙水圧 (深さ 15cm)

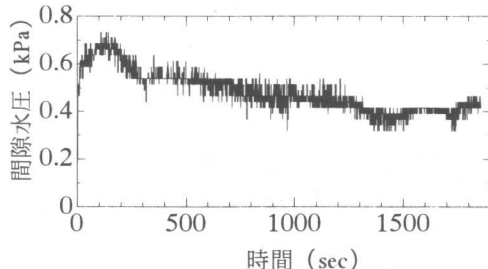


図-7 間隙水圧 (深さ 25cm)

表-2 センサ移動量

	締固め前 (cm)	締固め後 (cm)
間隙水圧計	5	9
	15	16.5
	25	25.5
加速度計	10	12.5
	20	21
	30	30

100 秒以降で定常状態に達していると考えられる。また、これらの図から供試体上部ほど振動がよく伝わり、ダイレタンスーが供試体上部に卓越して起こっていることが考えられる。

なお、振動締固め終了後、コンクリート内に設置したセンサの位置を測定したところ、表-2のように沈下していた。各センサは供試体上

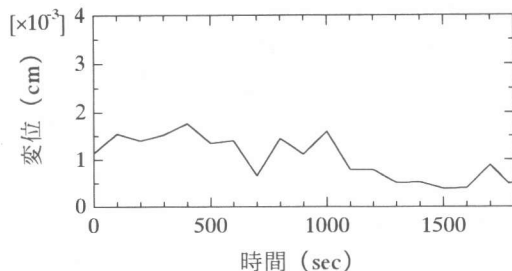


図-8 振動変位の時間変化 (深さ 10cm)

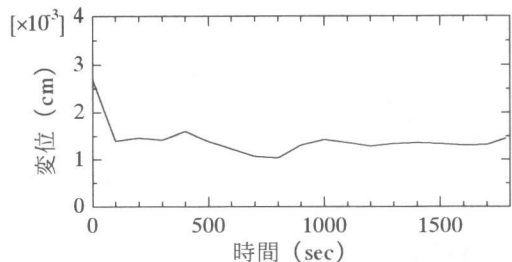


図-9 振動変位の時間変化 (深さ 20cm)

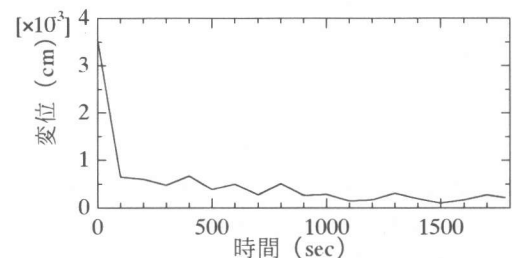


図-10 振動変位の時間変化 (深さ 30cm)

表-3 物性値の測定結果

湿潤密度 (g/cm ³)	2.41
間隙比	0.18
含水比 (%)	5.81
透水係数 (cm/sec)	2.46×10^{-3}
P 波 (m/sec)	709
弾性係数 (GPa)	1.31
Q 値	61.83

部に設置されたものほど移動量が多いことから、供試体上部ほど変位が大きいことが考えられる。

4.2 物性値の測定結果

密度試験、変水位透水試験、弾性波計測の結果得られた供試体上部の締固め度を考慮した場合のコンクリートの物性値を表-3に示す。

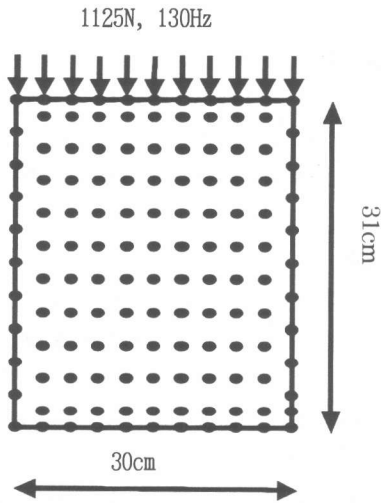


図-11 解析モデル

既報⁴⁾での物性値と比較して、供試体上部を考慮すると超硬練りコンクリートの透水係数は大きく変化したが、他のパラメータについてはあまり大きな変化が見られなかった。

4.3 BEM 解析の結果

BEM 解析は図-2 の最終沈下量を考慮して、図-11 に示されているようなコンクリートが打設された 30cm×31cm の 2 次元モデルとした。型枠は含まず、コンクリートのみをモデル化している。境界上節点は 40 点、内部点は 90 点である。このモデルのコンクリートの表面境界点に振動実験と同様、周波数 130Hz、振動荷重 1125N が載荷されているとした。表-3 の物性値を用いて、振動締固め過程の定常状態における間隙水圧、振動変位、体積ひずみを BEM 解析により求めた。

図-12 に BEM 解析により求められた間隙水圧を実験値と比較して示す。解析値は実験値に比べて少し大きい値を示すがその傾きはほぼ同じである。そして、弾性問題、粘弾性問題ともにほぼ同じ圧力分布を示していた。

図-13 に BEM 解析により求められた振動変位を実験で加速度より求められた結果と比較して示す。解析値はモデル上部では実験値に比べ

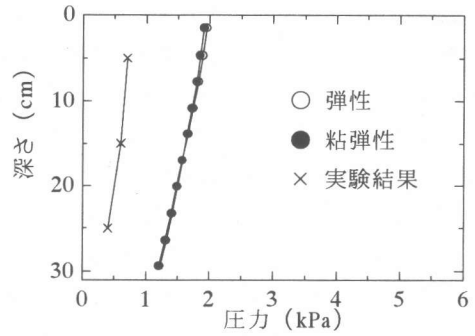


図-12 解析結果 (間隙水圧)

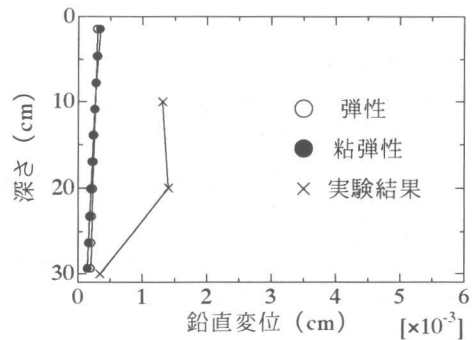


図-13 解析結果 (振動変位)

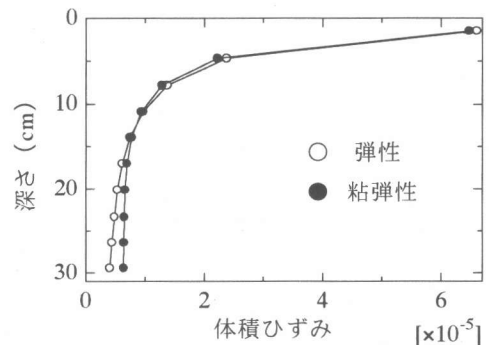


図-14 解析結果 (体積ひずみ)

小さい値を示していたが、深さ 30cm ではほぼ等しい値を示していた。また傾きは実験値と同様、供試体上部ほど高い値を示し、弾性問題と粘弾性問題との差はほとんど見られなかった。

これらの実験と解析の差については、まだまだ物性値も含めて検討は不十分と考えられる。しかし、昨年度の結果に比べれば、その一致はかなり改善されており、今後、実験方法、物性値の決定法、解析法の改良も含めて実用的な評価手法の開発を目指す必要がある。

図-14にはBEM解析により求められた体積ひずみが示されている。体積ひずみはモデル上部では高い値を示しているが、深さ 10cm より下側では大きく変動していないことが明らかとなった。これは振動が供試体上部のみに伝わるために起こる体積変化が、供試体上部に卓越して起こっていることを示しているものと考えられる。また、体積ひずみにおいても、弾性問題と粘弾性問題との差は、底部を除けばあまり見られなかった。

5. 結論

本研究では、超硬練りコンクリートの振動締固め試験により間隙水圧と応答加速度を計測した。そして、供試体上部の締固め度を考慮した場合の物性値測定結果を用いて、固相-液相から成る二相の連成モデルとした BEM 解析における間隙水圧と振動変位を比較検討した結果、以下のようなことが明らかになった。

(1) 振動締固め試験から計測された振動変位は、定常状態では供試体上部になるにつれて高い値を示していることが認められた。これは供試体上部ほどダイランシーによる間隙水圧の増加が生じ、その結果、体積減少が生じていると考えられる。

(2) 供試体上部の締固め度を考慮した場合における定常状態下の超硬練りコンクリートの物性値が得られた。それらの値を用いて、定常振動場における固相-液相の二相モデルによる BEM 解析を行った。その結果、昨年度に比べて実験結果と解析結果の一致は改善された。これによって二相問題の解析により、振動締固め試験での定常状態における振動変位分布を再現する可能性が示された。

(3) 求められた超硬練りコンクリートの物性値を用いて BEM 解析を行い、弾性問題と粘弾性問題との解析を比較検討した結果、間隙水圧、振動変位、体積ひずみそれぞれの分布においてあまり違いは見られなかった。以上のことから、今回の大型モデルでは粘性の影響はほとんど

見られなかった。

今回、供試体型枠の大型化によって粘性の影響は少ないという結果が得られたが、起振力は小さく、実際との対応も不十分であり、この点についてはさらに検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 國府勝郎, 牛島栄: 超硬練りコンクリートの現状, コンクリート工学, Vol.36, No.8, pp.3-9, 1998.8
- 2) 國府勝郎, 牛島栄, 森博嗣: 超硬練りコンクリート研究委員会報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.29-38, 1998.7
- 3) 松森誠志, 國府勝郎, 三栖幸彦, 上野敦, 早川健司: 転圧コンクリートの配合設計・転圧設計および施工管理への締固め性試験の応用, 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, 土木学会, コンクリート技術シリーズ 37, pp.1-8, 2000
- 4) 國居史武, 横山禎之, 友田祐一, 大津政康: RCD コンクリートの振動締固め過程に関する考察, コンクリート工学年次論文集, pp.409-414, Vol.22, No.2, 2000.6