

論文 RCD コンクリートの振動締固め過程に関する考察

國居史武^{*1}・横山禎之^{*2}・友田祐一^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨: RCD コンクリートの振動締固め過程を機構的に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 AE 発生挙動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透水係数・弾性係数などの物理量の測定も実施した。これらの実験データを用いて粘性の影響を考慮した固相-液相の 2 相モデルによる定常振動場の BEM 解析を行い、間隙水圧分布の解析的な検討を行った。

キーワード: RCD, 振動締固め, 境界要素法, 二相問題, アコースティック・エミッション

1. はじめに

RCD 工法がダム施工の実施に移されてからまだわずかではあるが、その技術開発はめざましいものがある。しかし RCD 工法において、VC 試験に代表される品質管理などの施工性に対して、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⁾。一般に RCD 工法において、締固め度は沈下量によって評価されていた。しかし、沈下量は打設時のコンクリートの層厚に比例することから、今日のように施工日数短縮のために RCD の層厚が厚くなってくると、沈下量のみで締固め度を評価することは困難になると考えられる。

本研究では、振動締固め試験において間隙水圧を測定し、コンクリートの動的挙動における非定常から定常への遷移については AE 計測により検討した。また、RCD コンクリートのフレッシュ状態での一連の物理量測定が実施された。これらの実験データを用いて固相-液相の 2 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、間隙水圧分布の再現について考察した。

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⁽³⁾に基づいた定式化を行うと、固相の釣合い式は

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

液相の連続式は

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

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 Lame 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 には粘性の影響も考慮する。

解析には定常振動状態に対する BEM⁽⁴⁾に基づいた二次元動的解析プログラム⁽⁵⁾に粘性の影響を考慮するために Q 値を導入し、実験条件や物理量測定の結果を与えることにより、圧力分布を解析した。

3. 実験概要

3.1 コンクリートの配合

RCD コンクリートは通常、最大粗骨材寸法が 80mm、細骨材率 30% 程度であるが、この配合では透水性コンクリートになるうえに、直径 20cm

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻 (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 熊本大学技官 環境システム工学科

*4 熊本大学教授 環境システム工学科 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/m³)			
				水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S
20	0	35	38.5	113	226	97	780
							1274

表-2 コンクリートの力学特性

圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)	ポアソン比
47.5	36.2	0.21

の供試体を用いた振動実験ではフレッシュコンクリートの動的挙動を把握するうえでは不適当であると考えられた。そこで、配合は表-1に示されているように最大粗骨材寸法を20mm、細骨材率を38.5%とし^①、コンクリート標準示方書(ダム編)^②に従い、単位セメント量の30%をフライアッシュで置換し、スランプ値を0cmとした。そのコンクリートの材齢28日における力学特性は表-2に示されている。

3.2 振動締め試験

図-1に示す直径20cm、高さ40cmの鋼製円筒型枠に表-1に示す配合のフレッシュコンクリートを入れ、敷き均した後、間隙水圧計を深さ0cm、20cm、40cmの3ヶ所に設置し、それぞれの位置での間隙水圧を測定した。その上に厚さ5mmの鋼製の蓋をし、振動器で392Nの荷重載荷した状態で60Hzの振動を与えた。AEセンサ(共振周波数60kHz、共振周波数60dB増幅)は鋼製円筒型枠外面に深さ0cm、20cm、40cmの3ヶ所に取り付け、AEの発生頻度を計測した。この測定時間は、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。

3.3 物理量試験

式(2)に示すように、解析にフレッシュコンクリートの密度と透水係数が必要となつたことから密度試験(JIS A 1202)により密度を、変水位透水試験(JIS A 1218)により定常状態におけるRCD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-3に示すように直径

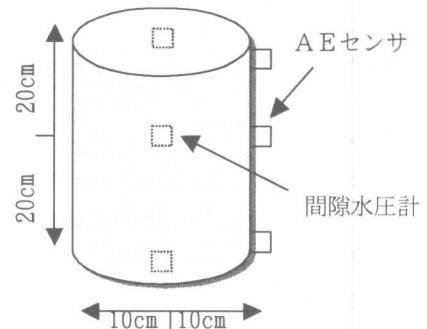


図-1 実験装置配置図

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に示す振動実験と等しい応力(12.5kPa)にするために振動器で98Nの荷重載荷した状態で60Hz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RCDコンクリートを作製した。その後、コンクリートを真空ポンプを用いて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。

また、フレッシュ状態における弾性係数は、10cm×10cm×10cmの鋼製型枠に変水位透水試験の場合と同様、同じ条件下で振動載荷により定常状態のコンクリートを作製し、携帯用超音波非破壊試験器(SIT-021型)を用いて、RCDコンクリート内を通る弾性波動の位相速度を計測することにより、実験的に決定した。

3.4 Q値の測定^③

減衰は波動がその伝播過程で波動エネルギーを失っていく現象のこと、弹性波の減衰は

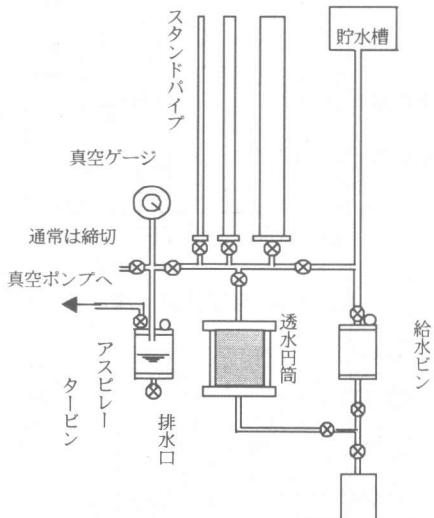


図-3 変水位透水試験装置

距離減衰と粘性減衰の2種類に分類することができる。ここで、粘性減衰の影響を考慮するために Q 値を導入する。

いま、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ると、伝播距離 d と Q 値を用いて次のように表現できる⁹⁾。

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

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、

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

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 値の計測装置が示されている。定

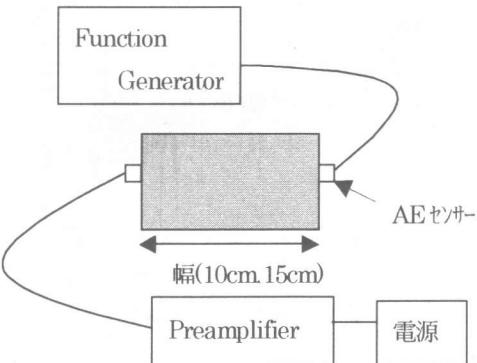


図-4 Q 値計測装置

常状態におけるRCDコンクリートを高さ10cm、奥行き10cmで、幅の異なる2種類の供試体(10cm, 15cm)に打設し、パルスを入力させてAE波を計測した。そして、得られた波形データをFFT処理し、フーリエ変換の比から Q 値を求めた。

4. 結果および考察

4.1 振動実験結果

図-5と図-6に実験により計測された最終沈下量3.5cmの場合の時間と間隙水圧の関係がそれぞれ示されている。供試体上部になるにつれて間隙水圧の値は大きくなり、特に深さ0cmの間隙水圧は他の2点に比べて著しく大きいことが認められる。また、振動荷重除荷後に円筒供試体を外してそのフレッシュコンクリートを撮影したものが写真-1に示されている。これを観察すると、供試体上部ではフレッシュコンクリートがよく締固まっているのに対して、供試体底面ではあまり締固まっていないことが確認された。これらのことから供試体上部の方にのみ振動が伝わり、その結果、負のダイレタンシーに伴う間隙水圧の増加が供試体上部にのみ生じたことを示していると考えられる。また、図-5から深さ0cmでは時間の増加と共に間隙水圧の値が単調に減少していることが認められる。一方、図-6から深さ20cmと40cmでは間隙水圧の値は、初期は深さ40cmに比べて深さ20cmの方が高い値を示し、一定の周期

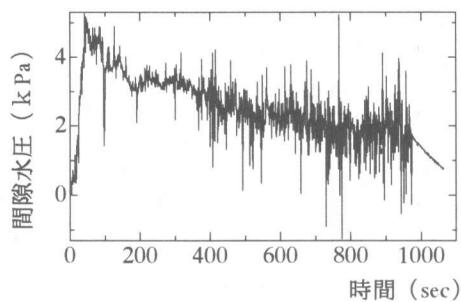


図-5 間隙水圧（深さ 0cm）

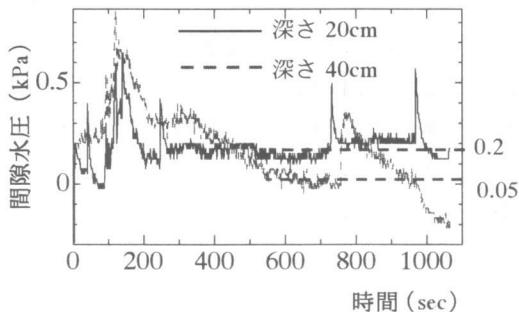


図-6 間隙水圧（深さ 20cm, 40cm）

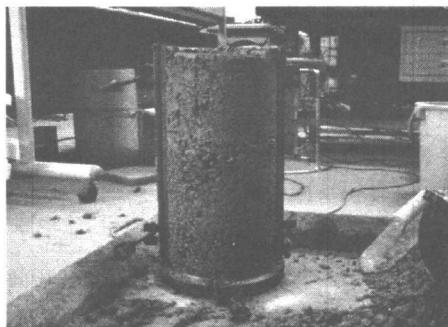


写真-1 コンクリート締固まり状況

で変動する非定常状態となる。そして、150秒を境に間隙水圧の値は共に減少し、その後深さ20cmの間隙水圧の方が深さ40cmに比べて高い値を示し、300秒以後から2点の間隙水圧は一定値に収束する定常状態に至ることが認められた。それぞれの間隙水圧の値は深さ20cmでは0.2kPa、深さ40cmでは0.05kPaであった。

図-7と図-8にそれぞれ実験により計測された深さ0cm、20cmにおける時間とAE発生数が示されている。AEカウント数は全体的に供試体上部になるつれ多くなる傾向にあるが、どの

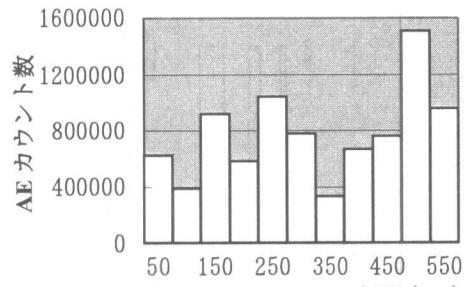


図-7 AE 発生頻度（深さ 0cm）

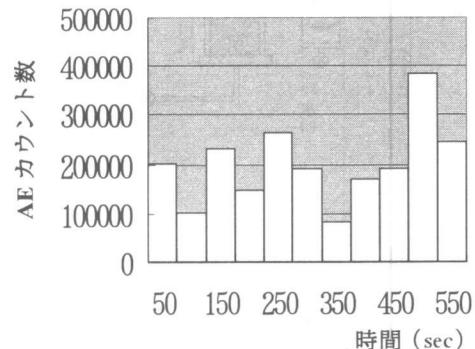


図-8 AE 発生頻度（深さ 20cm）

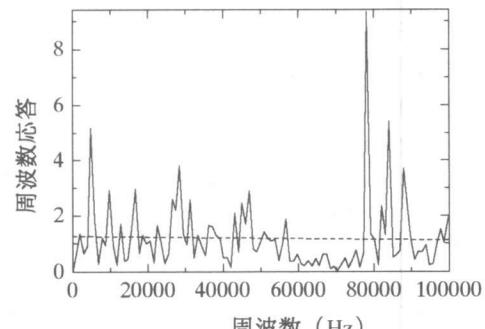


図-9 AE 波動の距離減衰特性

深さにおいても共通してAEカウントの値は300秒から350秒の間に大幅に減少し、その後ピーク値を示すことが認められた。これらのことからAEカウント数が大幅に減少する時間が間隙水圧の非定常状態と定常状態の境界であると考えられ、AEがコンクリートの締固め度評価に有効であること確認された。

4.2 物理量の測定結果

密度試験、変水位透水試験、弾性波計測の結果得られたフレッシュ状態におけるRCDコンク

表-2 物理量の測定結果

比重	2.75
湿潤密度 (g/cm^3)	2.41
含水比 (%)	5.78
透水係数 (cm/sec)	5.81×10^{-2}
P 波 (m/sec)	803
弾性係数 (GPa)	1.39
Q 値	35.68

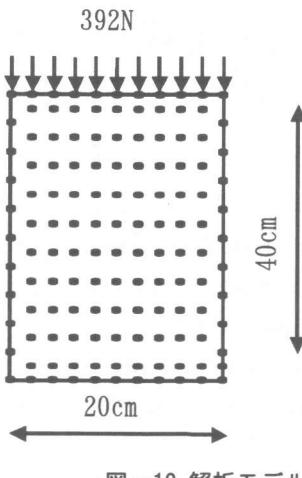


図-10 解析モデル

リートの物理量を表-2に示す。このことから定常状態における RCD コンクリートは砂、礫に近い透水性を有していることが明らかとなった。図-9は Q 値計測の際に検出された AE 波を FFT 处理後に、求められたフーリエ変換の比である。これを線形補間することにより、破線に示す直線の勾配から Q 値が求められた。その値は 35.68 で、このコンクリートは土 (Q=50) にほぼ近い値を示すことが明らかとなった。

4.3 BEM 解析の結果

BEM 解析は図-10 に示されているような RCD コンクリートが打設された $20\text{cm} \times 40\text{cm}$ の型枠を 2 次元モデルとした。型枠は含まず、RCD 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 60Hz、振動荷重 392N が載荷されて

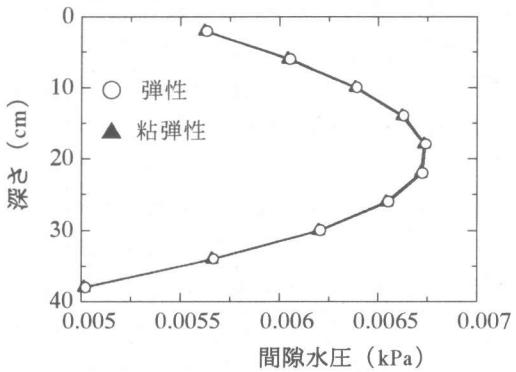


図-11 解析結果

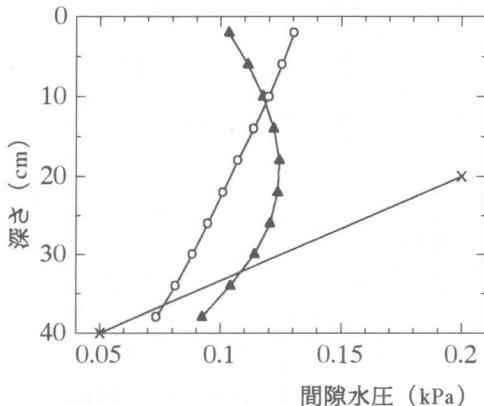


図-12 透水係数による圧力変動

表-3 解析ケース

記号	透水係数 (cm/sec)
○ (弾性)	5.81×10^{-2}
▲ (粘弾性)	1.29×10^{-3}
× 実験結果	

いるとした。

表-2 の値を用いて、振動締固め過程の定常状態における間隙水圧を BEM 解析により求めた。BEM 解析の結果を図-11 に示す。解析された間隙水圧は実験値に比べて著しく小さい値を示し、弾性問題、粘弾性問題とともにほぼ同じ圧力分布を示すことが分かる。なお、深さ 20cm と 40cm の間では、理論値の圧力分布は実験値と同様、深くなるにつれて間隙水圧が小さくなる傾向を示していた。しかし、深さ 0cm から 20cm の間では実験値との一致はよくない。これは、前述の締固めの不均一に関係していると思われる。

透水係数の変化による圧力変動が非常に大きいことが知られているので⁵⁾、表-3 の透水係数を変化させ、実験での分布とほぼ一致するように解析を試みた。その結果を図-12 に示す。弾性問題では物理量の測定により求められた透水係数の 100 分の 1 の大きさで実験結果の直線に近い値を示しているのに対して、粘弾性問題では、その 45 分の 1 の大きさで近い値を示していることが認められた。このことから、粘弾性体と弾性体では透水係数の変化の圧力分布への影響が異なることが明らかとなった。これより、解析により、さらに粘性と透水係数の関係を解明することが必要であると考えられる。また、透水実験の精度についても検討が必要と思われる。

5. 結論

本研究では、RCD コンクリートの振動締固め試験により得られた間隙水圧と AE 発生挙動が計測された。また、一連の物理量測定結果を用いて、粘性の影響が考慮された固相-液相から成る二相の連成モデルとした BEM 解析との比較検討の結果、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間隙水圧は、定常状態では供試体上部になるにつれて高い値を示し、特に供試体上部では著しく高い値を示すことが認められた。これは供試体上部にのみ振動が伝わったと考えられ、ダイレクタシーに伴う間隙水圧の増加が供試体上部にのみ生じたためであると考えられる。

(2) AE 発生頻度は、間隙水圧の非定常状態から定常状態に遷移する過程において、その数は大幅に減少し、その後ピークを示すことが供試体のどの深さにおいても認められた。このことから、AE を用いた RCD コンクリートの締固め度評価の有効性が明らかになった。

(3) 一連の物理量測定により、フレッシュ状態での定常状態下における RCD コンクリートの透水係数や弾性係数、Q 値などの物理量が得ら

れた。それらの値を用いて、固相-液相の二相モデルによる定常振動場の BEM 解析を行った結果、2 相問題の解析によって、実験での間隙水圧分布を再現する可能性が示された。今後さらに、実験での物性値の決定法も含めて詳細な検討が必要と考えられる。

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) O.C.Zienkiewicz and T.Shiomi : Dynamic Behavior of Saturated Porous Media ; The generalized Biot formulation and its numerical solution, Int.J.Numer.Anal.Methods Geomech., Vol.8, pp.71-96, 1984.12
- 4) A.H.D.Cheng, T.Badmus and D.E.Beskos : Integral Equation for Dynamic Poroelasticity in Frequency Domain with BEM solution, Journal of Engineering mechanics ASCE, Vol.117, No.5, pp.1136-1157, 1990
- 5) 上野修司、大津政康、友田祐一、重石光弘：超硬練りコンクリートの振動締固め機構の BEM 解析、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp.914-915, 1996.3
- 6) 早川健司、國府勝郎、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、pp.593-598, Vol.17, No.1, 1995.7
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書（ダム編）、pp.20-27、平成 8 年制定
- 8) 丹羽義次、大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版、pp.57-59, 1988
- 9) W.I.Fitterman : Dispersive Body Wave, J.Geophys.Res., Vol.67, No.13, pp.5279-5290, 1962