

論文 超硬練りコンクリートの振動締固め試験に関する考察

町頭 佑樹^{*1}・國居 史武^{*2}・大津 政康^{*3}

要旨：最新のダム工法として注目されている RCD 工法において、敷き均し層厚の増加によって、物性値評価も含めた振動締固め過程の理論的取り扱いと定量化の重要性が指摘されている。そこで、本研究では超硬練りコンクリートの振動締固め挙動を解明することを目的として、振動締固め試験中に間隙水圧の計測を行った。使用したコンクリートの初期材齢における物性値を用いて境界要素法(BEM)解析を行い、定常振動場における間隙水圧分布を数値解析し、計測結果との比較検討を行った。さらに AE 計測も実施し発生挙動と沈下量、締固めエネルギー、充填率の関係について考察した。

キーワード：超硬練りコンクリート、締固め性試験、境界要素法、二相問題、AE

1. はじめに

RCCP 及び RCD 工法は、ダンプトラック等の汎用機械で運搬された貧配合コンクリートを、ブルドーザにより薄層に敷き均し、振動目地切り機で所定の位置に横目地を造成した後、敷き均したコンクリートの上面から振動ローラにより締固めを行う方法である。従来の工法に比べ、広い作業空間を利用した効率的な機械化施工ができ、施工費用の削減、施工日数の短縮、安全性に優れているなどの特徴を有していることから、今日では道路舗装やダム施工法の主流となっている。しかし、これらのコンクリートの締固め機構は完全に解明されているとはいえない¹⁾。例えば 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るが、施工日数短縮のためにその層厚は厚くなりつつあり、沈下量のみで締固め度を評価することは困難になっている。これらの理由から、物性値評価も含めた振動締固め過程の理論的定量化の重要性が指摘されている。さらに、コンクリートの締固め機構を明らかにすることは、今後の施工法の改良においても重要であると考えられる²⁾。

本研究では、超硬練りコンクリートの締固め

性試験を実施し、間隙水圧の計測を行った。その非定常状態から定常状態への遷移についてはアコースティック・エミッション (AE) の計測を行い、AE 発生挙動と締固め性試験で得られる沈下量、締固めエネルギー充填率との比較検討を行った。一方、初期材齢におけるコンクリートの透水係数、位相速度、Q 値などの物性値を用いて、境界要素法(BEM)解析を行った。これにより、定常振動場における間隙水圧分布を数値解析し計測結果との比較検討を行った。

2. 解析理論

解くべき未知数を振動変位 u と間隙水圧 P として、Biot の二相混合体理論³⁾に基づいた定式化を行うと、固相の釣合式は以下ようになる。

$$\rho \{ -(2\pi f)^2 \} \mu_i = (\lambda + \mu) u_{j,ji} + \mu u_{i,jj} + P_{,i} \quad (1)$$

液相の連続式は

$$P_{,ii} = -(\rho^f (2\pi f)^2 + 2\pi f i \frac{\gamma_w}{k}) u_{i,i} \quad (2)$$

ここで、 ρ : 固相の密度、 λ 、 μ : Lamé の定数、 f : 振動数、 ρ^f : 液相の密度、 γ_w : 液相の単位容積質量、 k : 透水係数

*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 独立行政法人 水資源機構 ダム事業部 工修 (正会員)

*3 熊本大学 大学院自然科学研究科環境共生科学専攻教授 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

式(1)と(2)を連成させ、骨材と結合材を固相、水を液相として取り扱い、固相-液相の二相問題を境界要素法(BEM)により動的解析⁴⁾を行った。なお、式(1)中の弾性定数 λ 、 μ は複素数として粘性の影響も考慮する。式(1)は圧力勾配を含むことにより、振動荷重を与えたときの液相の圧力の影響が考慮されることになる。

解析には定常振動状態に対する BEM に基づいた二次元動的解析プログラムに粘性の影響を考慮するため Q 値を導入し、材料特性に初期材齢におけるコンクリートの物性値を与えることにより、間隙水圧分布を解析した。

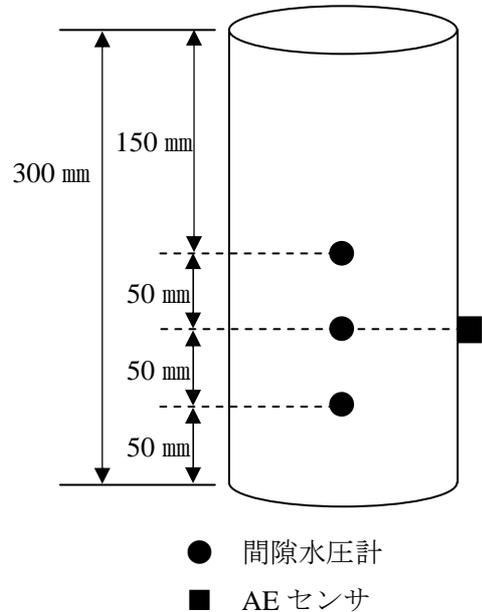


図-1 間隙水圧計およびAEセンサ配置図

3. 実験概要

3.1 締固め性試験

超硬練りコンクリートには既報⁵⁾を参考に、表-1に示す粗骨材の最大寸法 20mm、スランプ値 0cm、細骨材率 38.5%、普通ポルトランドセメントを用いた配合のコンクリートをフレッシュ状態で使用した。締固め性試験では、コンクリート締固め性状試験機(JSCE-F 508)を使用し、図-1に示す直径 150mm、高さ 300mm の鋼製円筒型枠を用い、締固め後の試料高さ 200mm を想定し、締固め前の試料高さを 250mm として超硬練りコンクリートを打設した。そして、間隙水圧計(型式 BP-RS)を深さ 150mm、200mm、250mm 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。さらに、型枠外面の深さ 200mm の位置に AE センサ(UT1000、共振周波数 1MHz、PAC 社製)を取り付け、80dB 増幅、閾値 42dB に設定して、AE を測定した。上部に直径 148mm の載荷板をのせ、29.4N の荷重載荷した状態で 42.6Hz の振動を 180 秒間与えた。

3.2 充填率と締固めエネルギー⁶⁾

締固め試験中の任意の時間 t_i における試料の充填率 γ_{ii} は式(3)によって計算される。

$$\gamma_{ii} = h / (h + x_i) \times 100 \quad (3)$$

ここで、 h : 試料の充填率 100%における高さ (=200mm)、 x_i : 試料高さ

一方、任意の締固め時間における締固めエネルギー E_{ii} は式(4)によって計算される。

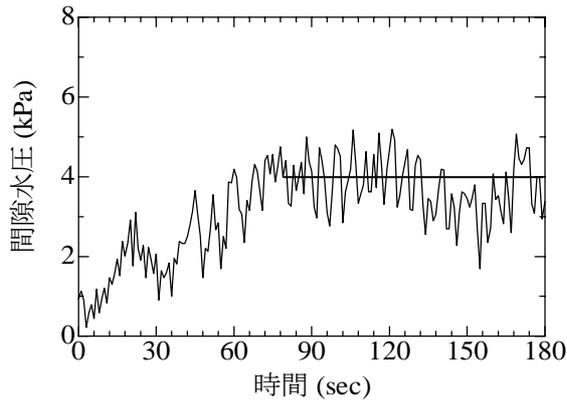
$$E_{ii} = m_{ii} \cdot \alpha_{max}^2 \cdot t_i / (2\pi)^2 f \quad (4)$$

ここで、 m_{ii} : 試料の密度、 α_{max} : 最大加速度

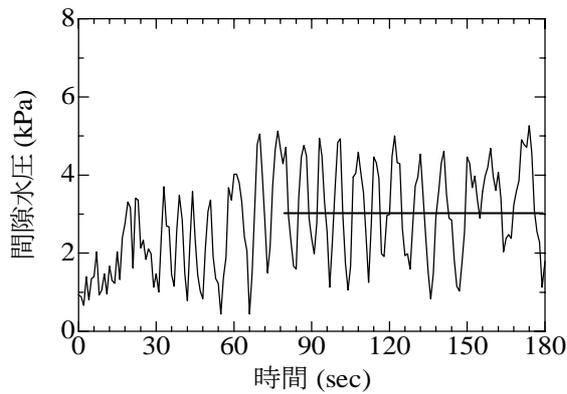
なお、締固め関数は、充填率と締固めエネルギーに関する 1 組のデータを、最小自乗法によって式(5)で近似する。

$$\gamma_i = C_i + (C_f - C_i) \{1 - \exp(-bE_i^d)\} \quad (5)$$

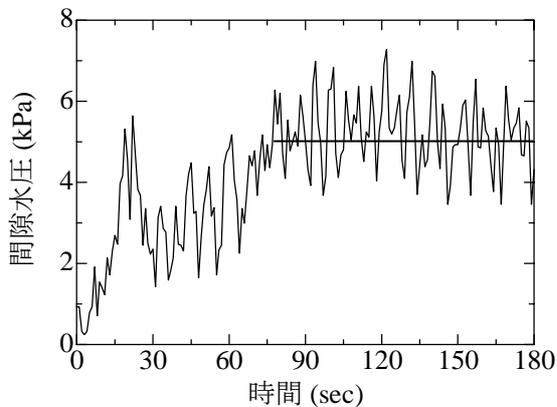
ここで、 C_i : 初期充填率、 C_f : 達成可能充填率、 b, d : 実験係数



(a) 深さ 15cm



(b) 深さ 20cm



(c) 深さ 25cm

図-2 実験結果 (間隙水圧)

4. 実験結果および考察

4.1 締固め性試験

(1) 間隙水圧分布

図-2 に締固め性試験により計測された間隙水圧と時間の関係をそれぞれ示す。間隙水圧は、どの深さにおいても 60 秒から 90 秒付近でほぼ一定になることが確認された。このことから 90 秒以降で定常状態に達していると考えられる。



写真-1 コンクリートの締め固まり状況

表-2 締固め性試験での定数

初期充填率 C_i	76.35
締固め効率 C_e	94.09
達成可能充填率 C_f	1.0572
実験係数 b	0.1662
実験係数 d	0.5297

間隙水圧は、供試体下部で最も大きな値を示しており、供試体中央部で他の 2 ヶ所よりも小さな値を示していた。これは、締固め性試験では、振動機本体下部に設置されているモータによる振動が生じているために供試体下部ほど締め固まり、供試体上部では、振動はあるものの、その大きさは小さいためと考えられる。図-2 より求められる各深さでの間隙水圧の平均値は、図中に示すように、深さ 15cm では 4kPa、深さ 20cm では 3kPa、深さ 25cm では 5kPa であった。

振動締固め終了後に円筒供試体の型枠を外して、そのフレッシュコンクリートを撮影したものを写真-1 に示す。これを観察すると、供試体は上部から下部まで良く締め固まっていることがわかる。

(2) 充填率

表-2 に示されたそれぞれの定数を用い、式(3)、式(4)、式(5)の計算を行った。図-3 に計測時間と沈下量の関係、図-4 に締固めエネルギーと充填率の関係を示す。本実験において計測された

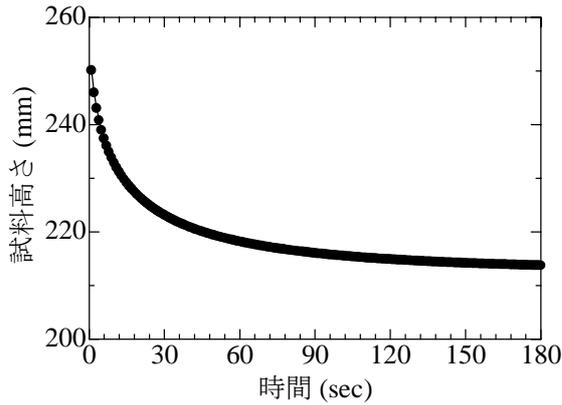


図-3 沈下量の経時変化

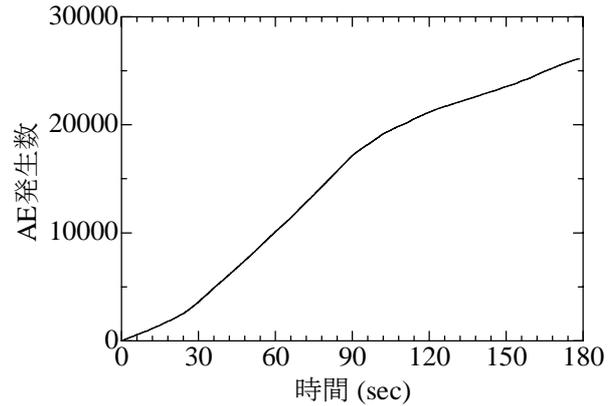


図-5 AE 累積曲線

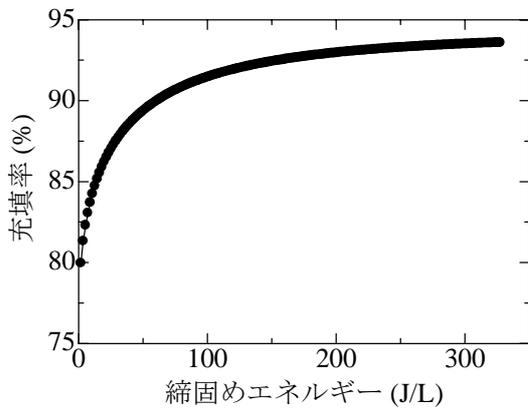


図-4 締固めエネルギーと充填率の関係

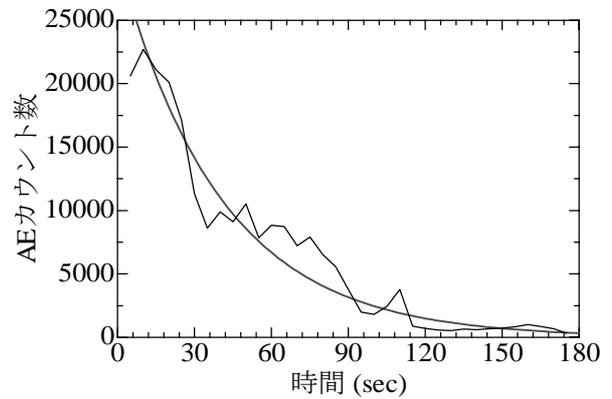


図-6 AE カウント数

振動締固め後の最終沈下量は 3.8cm であった。

図-3 より沈下量は 30 秒付近までは締固め初期として大きな沈下を起こすが、その後はほぼ一定になることが確認される。これに対応して、図-4 より充填率は締固め初期に急激に上がることがわかる。締固めエネルギーが 150(J/L)付近からは充填率がほぼ一定になり、コンクリートは十分に締め固められているものと考えられる。

(3) AE 発生挙動

図-5 に締固め性試験において計測された AE 発生総数と時間の関係を、図-6 と図-7 に 3 秒間隔での AE カウント数、AE エネルギーの関係を、図-8 に平均周波数の時間変化が示されている。累積によれば AE 発生総数は 30 秒付近までは、その勾配が緩やかであるが、30 秒から 90 秒付近にかけて勾配が急になり、90 秒以降は再びその勾配は緩やかになることが明らかとなった。この傾向は、図-3 に示す沈下量の経時変化とよく一致していると思われる。また、締固めエネ

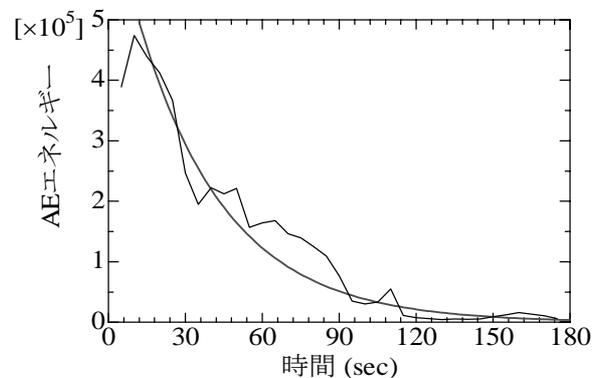


図-7 AE エネルギー

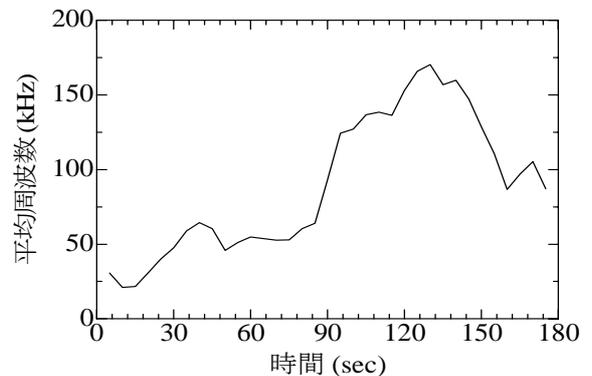


図-8 平均周波数

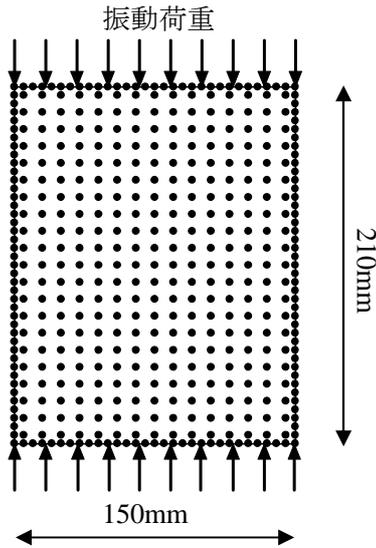


図-9 解析モデル

ルギーに関しては、75 (J/L) で充填率 90%，200 (J/L) でほぼ 93%に達していることが確認された。AE カウント数と AE エネルギーは共に 30 秒付近まで間では急激に減少し、30 秒から 90 秒付近までは緩やかに減少し、その後はほぼ一定の低い値を示した。これを図-4 と比較すると最初に減少する 30 秒付近で充填率が 90%，二回目に減少する 90 秒付近で充填率 92%に達していることが確認された。また、これらの減少量は図中の双曲線で近似されることが確認され、図-4 とよく対応していると考えられる。平均周波数は AE カウント数を継続時間で除して求めた。平均周波数は、90 秒付近までは低い値を示しているが、90 秒以降から急激に高くなることが明らかとなった。平均周波数の増加は、図-6 からカウント数が時間の経過とともに減少していることから、締固めに伴い発生する AE 波の継続時間が減少していることが考えられる。このことは、締固め進行に伴う骨材粒子の移動が徐々になくなることを示している。これらのことから、本実験では 90 秒以降で締固めはほぼ完了していると考えられる。以上のことから、AE 発生挙動から超硬練りコンクリートの振動締固め過程を評価できると考えられる。

4.2 BEM 解析

BEM 解析は最終沈下量を考慮して、図-9 に

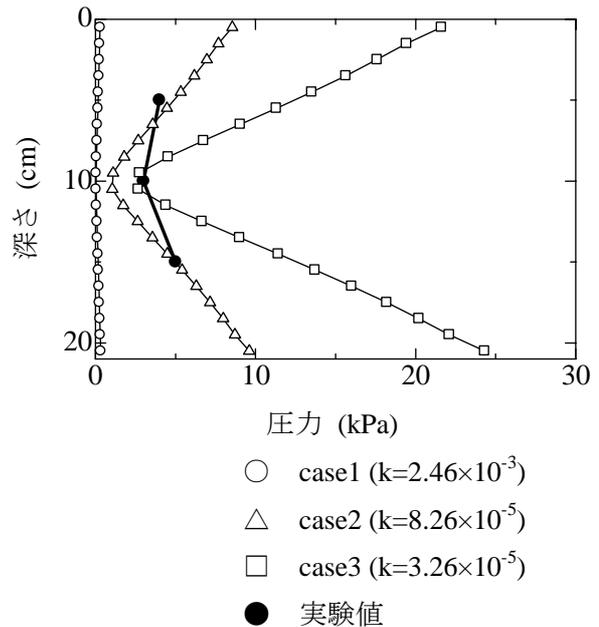


図-10 解析結果

表-3 振動締固め直後の物性値

湿潤密度 (g/cm ³)	2.41
含水比 (%)	5.81
間隙比	0.18
透水係数 (cm/sec)	2.46×10 ⁻³
P 波 (m/sec)	998
弾性係数 (GPa)	1.31
Q 値	22.5

示すコンクリートが打設された 150mm×210mm、境界上節点 144 点、内部点 315 点の 2 次元モデルとした。これは、型枠を含まず、コンクリートのみをモデル化しているため、境界上節点は振動に関しては自由境界に相当する。この場合、境界要素法でありながらモデルに内部点が必要なのは、モデル内部の間隙水圧と体積ひずみが未知量となるためである。このモデルの上下面境界点に振動締固め試験と同様、周波数 42.6Hz、振動荷重は上部に 29.4N、下部に 116.7N が载荷されているとした。表-3 に示すフレッシュ状態における超硬練りコンクリートの物性値⁷⁾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。また、既報によると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⁸⁾、透水係数の値を変化させたケースでのパラメータ解析を行った。

図-10 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。実測値に対応する case1 での結果は、実験値よりも小さい値を示している。case2 での解析値は、実験値に近い値を示し、上部、下部ではほぼ同じ値を示した。case3 での解析値は、中央部で実験値とほぼ一致した。どのケースにおいても解析値は中央部で小さく、下部で大きな値を示しており、すべてのケースで圧力分布は同じ傾向であることが確認された。また、透水係数を変化させた場合の解析値が実験値に近い値を示すことから、透水係数を中心としたパラメータの決定の精度についての検討が必要であると思われる。このように、解析的には多少の改良は残されているが、振動締固め試験中のコンクリートの挙動を解析的に明らかにすることができたと考えられる。

5. 結論

本研究では、超硬練りコンクリートの締固め性試験により、間隙水圧と AE 発生数の計測を行った。そして、初期材齢における超硬練りコンクリートの物性値を用いて、固相-液相から成る二相の連成モデルとした BEM 解析により間隙水圧分布を比較検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 締固め性試験において計測された間隙水圧は、供試体下部で最も大きい値を示していることが認められた。このことは、振動機本体下部に設置されているモータによる振動が生じているために供試体下部ほど締め固まり、供試体上部では、振動はあるものの、その大きさは小さいためと考えられる。
- (2) 締固め性試験で求められた沈下量、充填率と AE 発生挙動はほぼ対応が取れていることが確認された。このことから、AE を用いたコンクリートの締固め度評価の可能性が示された。
- (3) 初期材例における超硬練りコンクリートの物性値を用いて、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、透水係数を変化させたケースでの

間隙水圧が、実験値に近い値を示した。以上のことから、超硬練りコンクリートの振動締固め時の動的挙動を二相問題として BEM 解析により解析される可能性が示された。

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 Behaviors of Saturated Porus Media, The generalized Biot formulation and its numerical solution, Int.J.Numer.Anal.Meth.Geomech, Vol.8, p p.71-96, 1984.
- 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 quencymechanics, ASCE, Vol.117, No.5, pp.1136-1157, 1990.
- 5) 上野敦, 國府勝郎: 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, 1993.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書(規準編), JSCE-F 508-1999, 2002
- 7) 國居史武, 横山禎之, 野上圭一, 大津政康: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.319-324, 2001.7
- 8) 國居史武, 戸田和博, 大津政康: RCDコンクリートの振動締固めに関する考察, 第54回土木学会学術年次講演会講演概要集, No.5, pp.1010-1011, 1999.9.