

論文 RCD 用コンクリートの締固めメカニズムに関する研究

堤 知明^{*1}・松島 学^{*2}・村上祐治^{*3}・中島 聰^{*4}

要旨：RCD 用コンクリートの締固めメカニズムを解明するため、砂の液状化強度試験で用いられる繰返し載荷三軸試験器により、練り混ぜ直後の超硬練りコンクリートに対して動的な応力振幅、拘束応力、初期密度比の条件を変えて、載荷試験を行い、その密度変化を調べた。その試験結果をもとに、締固めに与える鉛直応力振幅、初期密度比の効果を明らかするとともに、RCD 用コンクリートの振動ローラーによる締固めをシミュレーションした。

キーワード：超硬練りコンクリート、フレッシュコンクリート、締固め、三軸試験

1. はじめに

RCD 工法とは貧配合の超硬練りコンクリートを、約 1m 厚さまでブルドーザーにより薄層で撒出し、振動ローラーにより締固める工法である。RCD 工法に関して更なるコストダウンを図るために、振動ローラーによる締固めの厚層化が求められており、そのためには RCD 用コンクリートの締固めメカニズムの解明が不可欠である。

RCD 用コンクリートの締固めメカニズムに関する従来の研究としては、直径 500mm の円筒モールド内の RCD 用コンクリートを上載した起振機の鉛直振動により締固める方法²⁾ や、振動台上のモールドにコンクリートを充填して加振する方法¹⁾ などが実施され、締固めエネルギーや振動加速度との関係が示されている。

本論文は、RCD 用コンクリートの締固め時の応力状態から締固めメカニズムを解明するために、砂の液状化強度試験で用いられる繰返し載荷三軸試験器³⁾ により、練り混ぜ直後の超硬練りコンクリートに対して鉛直方向の静的載荷応力と動的な応力振幅、水平方向の拘束応力、初期密度比の条件を変えて、繰返し載荷三軸試験を行い、その結果について示すものである。

2. 試験の概要

2. 1 試験装置

試験装置を図-1 に示す。試験装置は高さ 100mm、直径 50mm の円柱形をした供試体に対して、油圧により鉛直圧 σ_1 を、空気圧から水压を介して拘束圧 σ_3 を載荷するものである。鉛直圧は、静的な載荷とともに、荷重振幅 σ_{1D} を変化させた動的繰返し載荷を行うことができる（図-2）。供試体はゴムスリーブにより包まれて

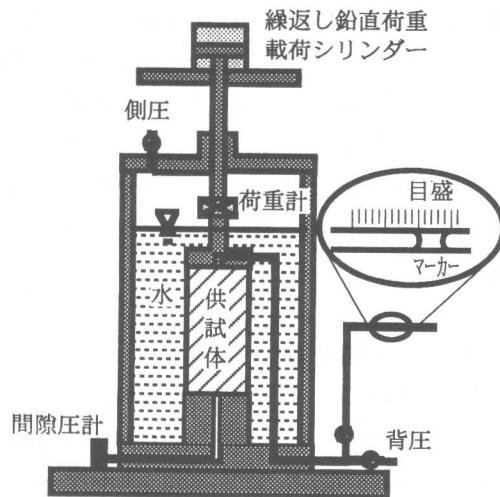


図-1 試験装置

*1 東京電力(株) 電力技術研究所 構造研究室主任研究員 工博(正会員)

*2 東電設計(株) 技術開発本部 コンクリート・材料チーム次長 工博(正会員)

*3 ハザマ 技術本部・技術研究所 第二研究室主任研究員 工博(正会員)

*4 ハザマ 土木本部 道路・造成統括部 工修(正会員)

表-1 示方配合

	示方配合(kg/m^3)							VC値			
	水 W	セメント C	フライ ッシュ F	細骨材 S	粗骨材(mm)			AE減水剤 NO.8	<40mm	<10mm	
					120-80 G1	80-40 G2	40-20 G3	20-5 G4			
フルミックスコンクリート	80.0	91.0	39.0	641.7	421.8	421.8	421.8	421.8	1.30	17秒	28秒
25mm以下の骨材の場合	129.0	169.6	72.7	1229.2	0.0	0.0	0.0	808.0	2.423	—	27秒

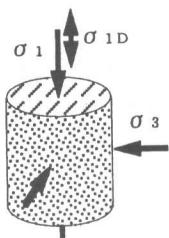


図-2 供試体の応力状態

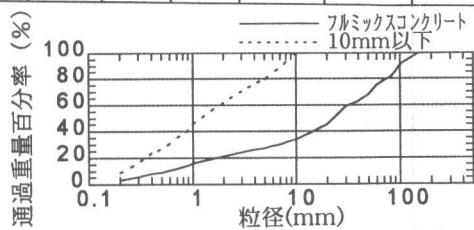


図-3 粒度分布の比較

おり、拘束水が侵入することは無い。また、供試体下面において間隙圧を計測することができる。

液状化強度試験では供試体の空気間隙率を低下させる(飽和度を上昇させる)ために、背圧を作成させ、供試体内の気圧を高くして空気を圧縮するが、今回の試験は間隙の空気量の変化を計測することが目的であるため、背圧はかけていない。

試験は載荷試験中に供試体内の空気の排出を許す排水状態と、供試体に通じる経路を閉じて空気の排出を許さない非排水状態で行った。排水試験においては供試体内から排出された空気量は、供試体と同じ高さに水平に設置した計測管内のマーカーの位置により計測した。この手法により、供試体内に背圧がかかることなく空気を排出することができた。

2. 2 試験材料

RCD用コンクリートの骨材の最大粒径は120mm程度であるが、繰返し載荷試験の供試体は高さが100mm、直徑が50mmであるため最大粒径を10mm程度とする必要がある。

RCD用コンクリートの締固めにおいては、大粒径の骨材間の大きな空隙を埋める締固めはブルドーザーによる敷均し時にほぼ完了し、振動ローラーによる締固めは比較的小粒径の骨材間の空隙を埋めるものであると考えられる。そこで、試験

に用いた材料は最大粒径120mmのフルミックスのRCD用コンクリートを10mmフルイでウェットスクリーニングしたもの用いることとした。

また、1供試体で使用する材料は約200cm³であるのに対して、供試体毎に約0.5m³のフルミックスの練り混ぜを行うことは多大な労力を要するため、25mm以下の骨材のみを用いて混合し、10mmフルイでウェットスクリーニングしたときのVC値が同じ値となるように配合(表-1)を決定した。同表から、40mmでウェットスクリーニングしたものより10mmでウェットスクリーニングしたもののがVC値が大きくなっていることがわかる。骨材の粒度分布を図-3に示すが、10mmフルイでスクリーニングすることにより粒度分布は悪くなっていることがわかる。

2. 3 試験ケース

試験ケースの一覧を表-2に示す。同表には、間隙の空気がすべて10mm以下の混合材の中に入るとして算定した、フルミックスの状態での密度比も示している。供試体は高さ10cmのモールド内に、3層に分けて所定の密度となるように突き棒で突固めて作製した。

各試験の応力状態を図-4に示す。動的載荷試験開始時の水平応力と鉛直応力の比は、静止土圧係数の一般的な値である0.5とした。これによ

表-2 試験ケース

排水条件	排水	非排水	非排水						
初期密度(g/cm ³)	2.000	2.000	2.000	2.172	2.333	2.000	2.000	1.959	1.959
側圧(kPa)	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	98.1	98.1	49.0	49.0
初期鉛直圧(kPa)	98.1	98.1	98.1	98.1	98.1	196.1	196.1	98.1	98.1
鉛直圧振幅(kPa)	36.8	56.4	78.5	78.5	78.5	117.7	152.0	17.7	58.8
フルミックス時の密度比	90	90	90	94	98	90	90	90	90

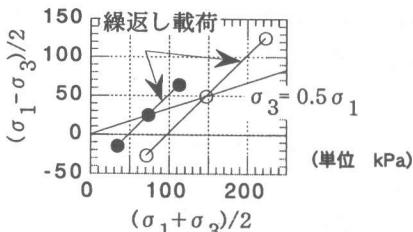


図-4 試験時の応力状態

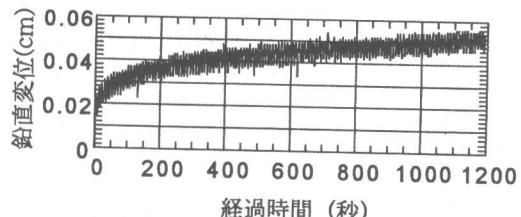


図-5 経過時間と鉛直変位の関係（排水）

り敷均し後の応力状態と、振動ローラーの起振力による動的締固めの効果を反映することができる。

3. 試験結果

排水試験における載荷時間と鉛直変位、体積変化の測定結果の例を図-5、6に示す。また、非排水試験における載荷時間と鉛直変位、間隙圧の測定結果を図-7、8に示す。

試験結果をもとに以下の式により、密度比の経時変化を求めた。

排水条件

$$D_c = D_{c0} \cdot 100 / (100 - v) \quad (1)$$

非排水条件

$$D_c = D_{c0} \cdot (1 + \Delta u) / (1 + D_{c0}/100 \cdot \Delta u) \quad (2)$$

(D_c : 密度比, D_{c0} : 初期密度比, Δu : 間隙圧の変化, v : 体積ひずみ)

非排水条件の場合は、間隙空気に関して $PV = \text{一定}$ (P : 壓力, V : 体積) が成り立つとして密度比を算定した。

排水条件と非排水条件について、初期密度比、水平応力、初期鉛直応力を同一の条件とし、鉛直応力振幅の違いにより密度変化を比較した結果を図-9、10に示す。同図より排水と非排水試験の両者ともに、鉛直応力振幅が大きくなると、

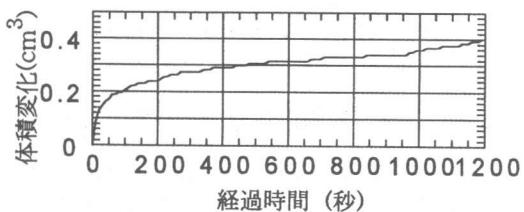


図-6 経過時間と体積変化の関係（排水）

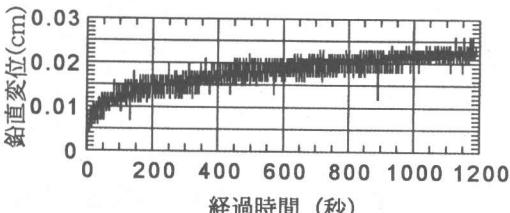


図-7 経過時間と鉛直変位の関係（非排水）

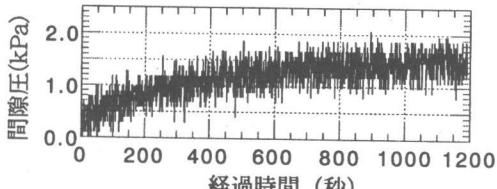


図-8 経過時間と間隙圧の関係（非排水）

密度の増加も大きくなることがわかる。

同様に排水条件のもとで、水平応力、初期鉛直応力、鉛直応力振幅を同一の条件として、初期密度の違いについて比較した結果を図-11に示

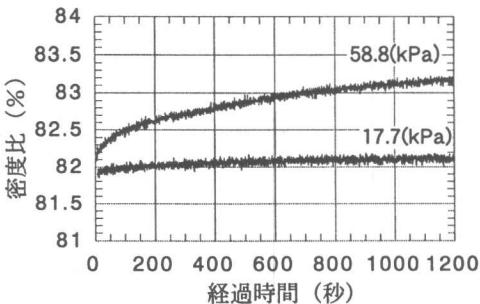


図-9 鉛直圧振幅と密度比の比較（非排水）

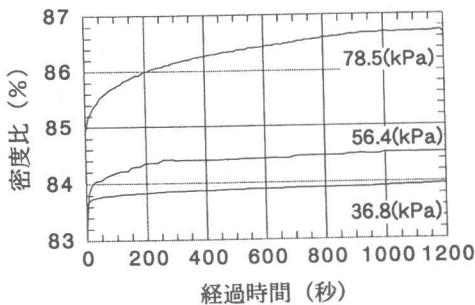


図-10 鉛直圧振幅と密度比の比較

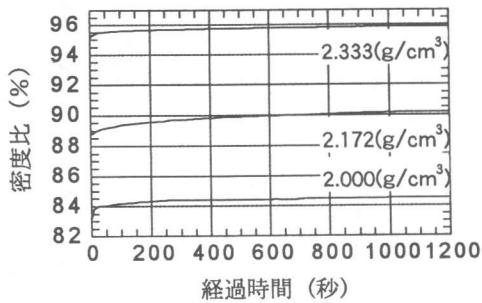


図-11 初期密度比と密度比の変化の比較

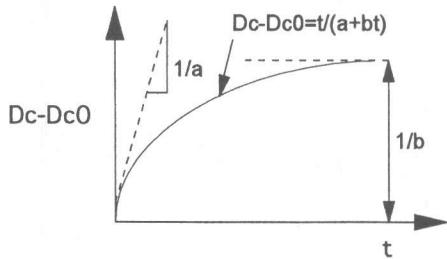


図-12 双曲線による近似

す。同図より初期密度比が小さいほど密度増加は大きいことがわかる。

4. 双曲線近似法による解析

4. 1 近似手法

載荷時間と密度変化の関係を式(3)で示される双曲線で近似する。同式において $(1/a)$ は、式(3)を載荷時間 t で微分した式(4)から明らかなように、 $t=0$ における初期接線勾配を表す。また、 $(1/b)$ は式(3)において、 $t=\infty$ としたときに式(5)が得られることから明らかなように、無限に載荷を続けたときに達成できる密度比を表している⁴⁾。式(3)の関係を図-12に示す。同一の条件で試験した場合、排水試験と非排水試験の結果には、ほとんど差がなかった。

$$D_c - D_{c_0} = t / (a + b \cdot t) \quad (3)$$

D_c ：載荷後の密度比(%)

D_{c_0} ：初期密度比(%)

t ：載荷時間(秒)

a, b ：鉛直応力振幅、初期密度比によって決まる定数

$$\begin{aligned} d(D_c - D_{c_0}) / dt &= a / (a + b \cdot t)^2 \\ &= 1/a \quad (t=0) \quad (4) \end{aligned}$$

$$D_c - D_{c_0} = 1/b \quad (t=\infty) \quad (5)$$

4. 2 近似結果

各試験結果について、双曲線近似の結果得られた定数 a, b の値を表-3に示す。これらの値は鉛直応力振幅と初期密度比の関数であると考えられるため、以下ではそれらの影響について考察する。

(1) 定数 a の近似

同一の初期密度比で比較した定数 a と鉛直応力振幅 σ_{1D} の関係を図-13に示す。同図から、鉛直圧振幅と定数 a の間には負の相関関係があることがわかる。すなわち、鉛直応力振幅が大きくなると密度比の変化的初期接線勾配が大きくなる。この関係を式(6)により近似した。

$$a = 1987.8 / \sigma_{1D} \quad (6)$$

同様に鉛直応力振幅が一定のもとでの初期密度比と定数 a の関係を図-14に示す。同図より初期密度比と定数 a の間には正の相関関係がある

表-3 定数の算定結果

排水条件	排水	排水	排水	排水	排水	排水	排水	非排水	非排水
初期密度(g/cm ³)	2.000	2.000	2.000	2.172	2.333	2.000	2.000	1.959	1.959
側圧(kPa)	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	98.1	98.1	49.0	49.0
初期鉛直圧(kPa)	98.1	98.1	98.1	98.1	98.1	196.1	196.1	98.1	98.1
鉛直圧振幅(kPa)	36.8	56.4	78.5	78.5	78.5	117.7	152.0	17.7	58.8
a	61.587	25.755	51.994	68.93	87.921	17.864	19.748	93.105	73.578
b	1.381	0.705	0.425	0.534	1.092	0.272	0.13	1.809	0.583
D _{co}	83.23	83.12	84.55	88.76	95.00	82.05	82.05	81.58	81.58

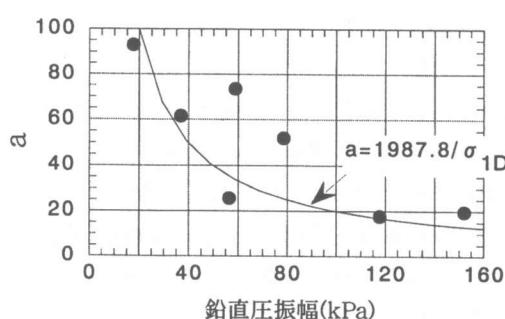


図-13 鉛直圧振幅と定数 a の関係

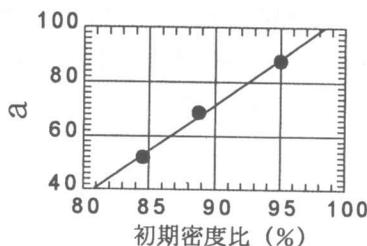


図-14 初期密度比と定数 a の関係

ことがわかる。すなわち初期密度比が小さいと初期接線勾配が小さくなることを示している。この関係を式(7)により近似する。

$$a = 3.408 D c - 235.17 \quad (7)$$

以上の式(6), (7)の関係を合わせることにより、定数 a は式(8)に示すように鉛直応力振幅と初期密度比の関係で表すことができる。

$$a = 1987.8 / \sigma_{1D} + 3.408 D c - 279.45 \quad (8)$$

(2) 定数 b の近似

定数 a と同様の手法により、定数 b を式(9)により推定する。実測の定数 b と式(9)により推定した定数 b の関係を図-15 に示す。同図より両者には非常によい相関があることがわかる。

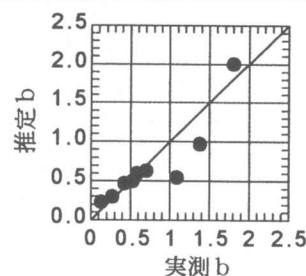


図-15 実測値と推定値の比較（定数 b）

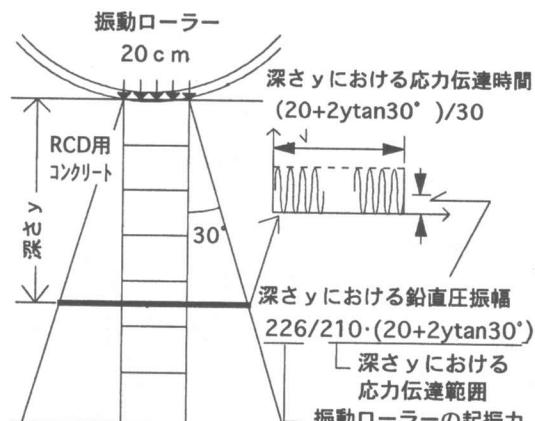


図-16 締固めシミュレーションの条件

$$b = 35.4 / \sigma_{1D} + 0.00778 \cdot (D c - 82) \quad (9)$$

5. 締固めのシミュレーション

試験結果について双曲線近似を行った結果得られた、密度変化と鉛直応力振幅、初期密度、載荷時間の関係をもとに、以下の条件(図-16)のもとで振動ローラーによる締固め時の締固めのシミュレーションを行う。

- ・振動ローラーと RCD 用コンクリートの接地面積は 2.1m (輪幅) × 20cm とする。

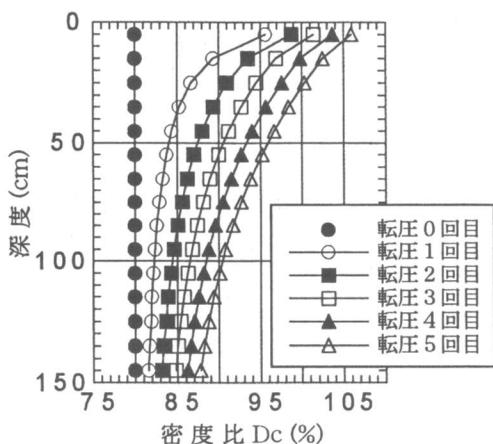


図-17 シミュレーション結果

- ・RCD用コンクリート内の応力は30°の角度で伝播する。
 - ・振動ローラーの走行速度は30cm/秒とする。
 - ・振動ローラーの動荷重は225.552(kN)とする。
- 初期の密度比を80%とした場合に、式(8), (11)から定数a, bを求め、式(3)により載荷時間中に変化する密度比を計算した結果を図-17に示す。同図より深度とともに密度の上昇量が小さくなっていることがわかる。

6. 結論

RCD用コンクリート材料について、繰返し載荷試験を行い、締固めに与える鉛直応力振幅、初期密度比の効果を調べ、以下の結果を得た。

- ・繰返し載荷による密度の変化は載荷振幅が大きいほど大きい。
- ・繰返し載荷による密度の変化は初期密度比が小さいほど大きい。
- ・載荷時間と密度変化の関係は双曲線で近似できる。また双曲線で近似した場合、初期勾配と最終密度比は載荷振幅と初期密度比の関数で表される。
- ・双曲線近似の結果を用いて、振動ローラーによる締固めをシミュレーションを行った結果、深度方向に締固めの密度が低下していく様子がシミュレーションされた。

今後は、振動ローラーによる転圧時の初期密度

について、ブルドーザーによる敷均し時の転圧効果の評価、試験施工結果との比較を行うことにより、より確実な締固めシミュレーション手法を確立していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 遠藤孝夫, 加藤治, 栗田守朗, 青柳征夫: 振動台によるローラーコンパクテッドコンクリートの振動締固め特性とレオロジーの検討, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.109-118, 1992.8
- 2) 永山功, 渡辺和夫, 伊藤文夫: RCD用コンクリートの締固め機構に関する実験的検討(2), ダム技術, No.67, pp.16-24, 1992
- 3) 土質試験法(第3回改訂版)編集委員会編: 土質試験の方法と解説, pp.424-450, 土質学会, 1991
- 4) 畠昭治郎, 建山和由, 石澤利明: 振動ローラーを用いた現場締固めにおける密度予測に関する研究, 土木学会論文集, 第364号/III-4, pp.229-237, 1985.12