

## 論文 超硬練りコンクリートの突固めによる締固め試験

中島 聡\*1・堤 知明\*2・天明 敏行\*3・村上 祐治\*4

**要旨：**RCD工法における超硬練りコンクリートのブルドーザによる転圧効果を明らかにするため、通常は土質材料について行われる大型突固め試験を実施した。大型突固め試験で得られた突固め回数と密度比の関係には双曲線近似を行い評価した。突固め試験とRCD工法におけるブルドーザによる撒き出し時の締固め効果について比較を行うため、密度比の変化量と、加速度や圧力などにより締固め力を比較検討した。

**キーワード：**超硬練りコンクリート、締固め、突固め試験、ブルドーザ

## 1. はじめに

RCD工法における超硬練りコンクリートの締固めは、約1mの厚さまでブルドーザにより薄層で撒出した後、振動ローラーによる転圧が行われている。振動ローラーによる締固め効果は、密度増加への寄与は小さいが強度増加には大きく貢献すると言われており、密度増加の観点からはブルドーザによる撒き出し時の締固め効果が大きいと言われている<sup>1)</sup>。また、振動ローラの転圧による密度の増加が明らかなのは、せいぜい50cm以浅の部分であり、それ以深の部分はブルドーザによる撒き出し時に密度が増加しているという報告もある<sup>2)</sup>。したがって超硬練りコンクリートの締固め特性を解明し、より一層の施工の合理化を進めるためには、振動ローラーによる締固め効果と同様にブルドーザによる締固め効果についても解明する必要がある。

本論文では、ブルドーザの転圧による超硬練りコンクリートの締固め特性を実験的に解明するために室内試験を実施したものである。なお、振動ローラーによる転圧は機械的な振動力によるもので、ブルドーザによる締固めは衝撃力によるので

あると考えられる。そこで室内試験は、同じく衝撃力による締固めが行われる突固め試験により行った。突固め試験を実施した従来の研究結果では、コンクリートの締固めは衝撃力を用いる突固めよりも機械的な振動力が効率的であることや、試料の構成粒子を大きな衝撃力によって鉛直方向に強制的に移動させるために骨材粒子の接触部に局所的に大きな力が発生し骨材粒子を破壊させるおそれもあることが指摘されている<sup>3)</sup>。同様なことはブルドーザによる転圧時にも発生しうると考えられる。

ブルドーザと突固め試験の締固め効果を比較するために、その密度変化とともに、加速度と圧力に関しても、ブルドーザによる撒き出し時のコンクリート内の計測値と、突固め試験における供試体内の計測値との比較を行った。

## 2. 突固め試験の概要

## 2.1 試験装置

試験装置は大粒径材を含む土質材料に用いられる大型突固め試験装置であり、直径30(cm)、高さ35.4(cm)の鋼製のモールドに入れた試料に、

\*1 ハザマ 土木本部 道路・造成統括部 工修 (正会員)

\*2 東京電力(株) 電力技術研究所 工博 (正会員)

\*3 ハザマ 土木本部 ダム統括部 (正会員)

\*4 ハザマ 技術研究所 技術研究部 工博 (正会員)

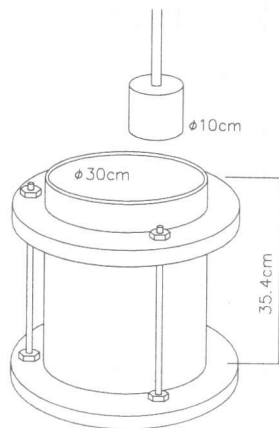


図-1 突固め試験装置概要

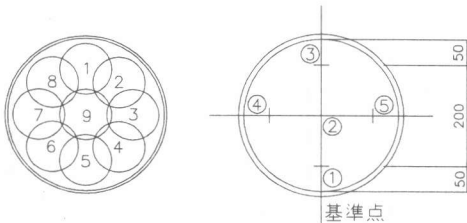


図-2 重錘落下方法

図-3 供試体高さ計測位置

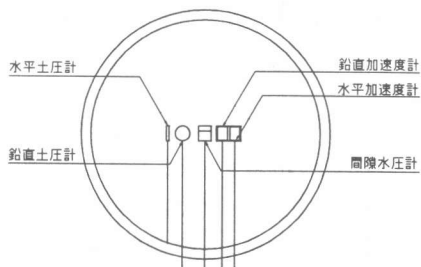


図-4 計測器埋設位置

10(kg)の重錘を高さ30(cm)から落下させるものである。装置の概要を図-1に示す。重錘の直径が10(cm)であるのに対し、モールドの直径が30(cm)であることから、モールド内を均一に締固めるため、平面的な重錘の落下位置は図-2に示すように8回でほぼ一周する円を描き、最後に中心部に落下するようにモールドを回転させている。

## 2.2 試験材料および試験ケース

セメントは中庸熟ポルトランドセメントを使用

表-1 試験ケース

結合材量 C+F (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 s/a (%)	フライアッシュ置換率 F/C+F (%)	VC値 (秒)	試験時間			
				直後	2h後	4h後	直後
				計器位置			底部
				中央			
110	29	30	10	○	○	○	○
			20	○	○	○	○
			30	○			
			40	○			○
90	32		20	○			
			30	○			
120	28		20	○			
			40	○			

した。超硬練りコンクリートの最大骨材寸法は150(mm)とした。試験ケースの一覧を表-1に示す。試験の基本ケースは、結合材量110(kg/m<sup>3</sup>)、フライアッシュ置換率30(%)、細骨材率29(%)である。VC値は20秒を基本ケースとし、練混ぜ完了直後に突固め試験を実施するが、放置によるスランプロスが締固めに及ぼす影響を調べるために、2時間と4時間後に突固めを行う試験も実施した。

試料はフルミックスのコンクリートを53(mm)でウェットスクリーニングした材料を使用した。ウェットスクリーニングの大きさは、モールド内での骨材の位置が試験結果に影響を与えないように、試料の最大粒径がモールドの直径の5分の1以下となるようにした。練混ぜた試料は練混ぜ直後にVC値を計測して品質を確認するとともに、突固め試験の直前にVC試験を実施している。

突固めを行う前の供試体の初期密度比は75(%)を目標とした(密度比とは理論密度に対する比である)。そのため供試体の作製にあたっては、供試体を4層の高さに等分割し、各層毎に目標の密度となるように計算した質量を投入して所定の高さとすることにより、各層毎に目標とする密度比が得られるようにした。

モールド内の試料の密度(単位容積質量)は、モールド内に投入した試料の質量を、試料表面の高さを図-3に示す5点で計測して求めた試料の体積で割ることにより求めた。重錘の落下回数は

表-2 試験結果

結合材量 C+F	フライアッシュ 置換率 F/C+F	VC値 (秒)	試験時間	計器位置	試験時VC値 (秒)	初期密度比 (%)	試験完了時 密度比 (%)	増加密度比 (%)
110	30	10	直後	中央	11	83.0	99.7	16.7
		20			23	75.8	96.2	20.4
		30			33	80.9	96.6	15.7
		40			38	79.9	97.1	17.2
90	30	20	直後	中央	19	79.3	97.4	18.1
		30			34	78.8	95.9	17.1
120	30	20	直後	中央	19	78.6	97.7	19.1
		40			16	77.7	97.8	20.1
110	30	10	2h後	中央	38	79.7	98.2	18.5
		20			56	78.8	95.0	16.2
		10	4h後	中央	77	76.0	96.2	20.2
		20			56	75.8	95.5	19.7
		10	直後	底部	10	78.5	97.4	18.9
		20			21	81.7	97.3	15.6
		40			44	76.3	94.6	18.3

100回としたが、沈下量の計測は重錘が一通り落下する9回毎に行った。

また、突固め試験時の鉛直土圧、水平土圧、間隙圧、鉛直加速度と水平加速度を計測するため、計測器を図-4に示す配置で埋設し、突固め試験中は連続して計測した。加速度計などの計測器は基本的には供試体の中央部に入れたが供試体の底部に入れた試験も実施している。

### 3. 試験結果

突固め試験の結果を表-2に示す。同表には突固め試験直前に計測したVC値も示している。突固め試験直前のVC値と突固め試験の前後の密度比の関係を図-5に示す。同図よりVC値が小さい材料ほど突固め試験後に大きな密度比が得られていることがわかる。しかしながら、供試体の初期密度比が75(%)となるように作成したにもかかわらず、VC値が小さく締固まりやすい材料では、供試体を作製した時点ですでに自重により密度比が高くなっている。そのためVC値の違いが、突固めによる密度比の増加量に及ぼす影響よりも、初期密度が与える影響が大きな結果となっている。

次にVC値がともに20秒で、結合材量が異なるケースについて、突固め回数と密度比および密度

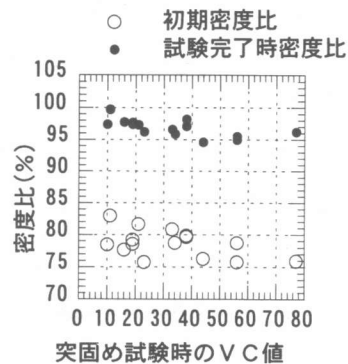


図-5 突固め試験時のVC値と突固め試験前後の密度比の関係

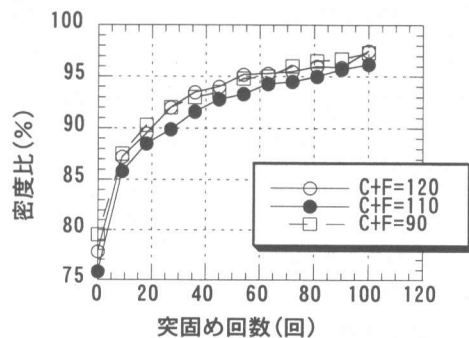


図-6 結合材量による突固め回数と密度比の比較

比の増加量を比較した結果を図-6に示す。同図において結合材量の違いによる差は明確ではない。

表-3 双曲線近似の結果

結合材量 C+F	フライッシュ置換率 F/C+F	VC値 (秒)	試験時間	計器位置	初期密度比 (%)	初期密度増加勾配 1/a	増加収束密度比 1/b	収束密度比 (%)
110	30	10	直後	中央	83.0	1.036	19.4	102.4
		20			75.8	1.525	23.0	98.8
		30			80.9	0.861	18.6	99.5
		40			79.9	0.960	19.7	99.6
90	30	20	直後	中央	79.3	1.236	20.7	100.0
		30			78.8	1.290	19.2	98.0
120	30	20	直後	中央	78.6	1.347	21.7	100.3
	40	20			77.7	1.454	22.4	100.1
110	30	10	2h後	中央	79.7	1.370	22.9	102.6
		20			78.8	1.081	18.6	97.4
		10	4h後	中央	76.0	1.319	21.3	97.3
		20			75.8	1.242	22.5	98.3
		10	直後	底部	78.5	1.134	22.2	100.7
		20			81.7	0.779	18.6	100.3
		40	76.3	1.013	21.1	97.4		

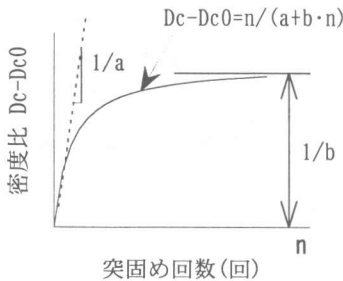


図-7 双曲線近似曲線

#### 4. 締固めのモデル化

##### 4.1 双曲線近似手法

超硬練りコンクリートの突固め回数と密度比の変化の関係をモデル化するために双曲線近似法を適用した。近似を行う双曲線は式(1)で表される(図-7)。

$$Dc - Dc0 = n / (a + b \cdot n) \quad (1)$$

n: 突固め回数, a, b: 定数

Dc0: 初期密度比, Dc: 密度比

$$d(Dc - Dc0) / dn = 1/a \quad (n = 0) \quad (2)$$

$$Dc - Dc0 = 1/b \quad (n = \infty) \quad (3)$$

式(1)における, 定数 1/a は密度比増加の初期接線勾配を表す。また, 1/b は無限に载荷を続

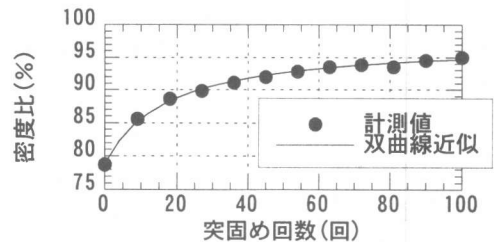


図-8 近似曲線との比較

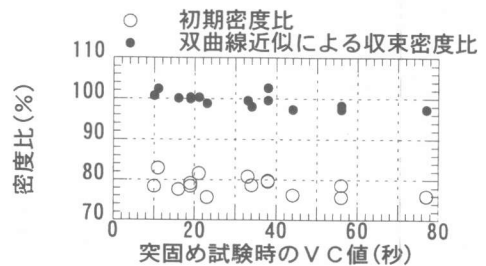


図-9 突固め試験直前のVC値と収束密度比の関係

けたときに達成できる増加収束密度比を表す<sup>4)</sup>。

##### 4.2 双曲線近似法の適用結果

実測の密度比の変化と近似曲線を比較した結果を図-8に示す。同図より両者は非常によく一致しており, 土質材料と同じく<sup>4)</sup>, 突固め回数と密度比の関係が双曲線により近似できることがわかる。

表-4 締固め時の加速度と圧力の比較

	ブルドーザによる転圧時	突固め試験
加速度(m/s <sup>2</sup> )	0.5	10~15
圧力(N/m <sup>2</sup> )	30~300	200~300

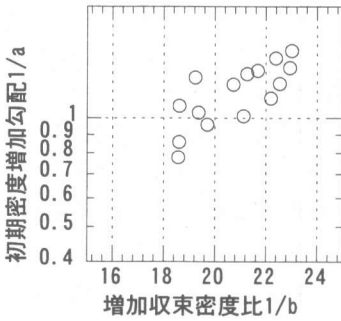


図-10 増加収束密度比 1/b と 初期密度増加勾配 1/a の関係

すべての試験ケースについて近似を行った結果を表-3に示す。また、突固め試験直前のVC値と収束密度比の関係を図-9に示す。同図よりVC値が小さい材料ほど収束密度比が大きくなる傾向があることがわかる。しかしながら、VC値が小さいケースでは、初期の状態ですでに密度比が高く、突固めによる密度増加に注目した場合にはほとんど差が無い。したがって、初期密度比の影響が大きいといえる。

#### 4.3 締固め特性

増加収束密度比が大きいほど載荷直後の密度変化も大きいため、初期密度増加勾配 1/a が大きくなることが予想される。そこで増加収束密度比 1/b と初期密度増加勾配 1/a の関係を図-10に比較した。同図より増加収束密度比 1/b が大きいほど、初期密度増加勾配 1/a が大きくなることがわかった。

### 5. ブルドーザと突固め試験の比較

#### 5.1 密度比による比較

試験施工における振動ローラによる転圧直前の深度方向の密度比は 90~95(%)の間にあると言える。超硬練りコンクリートをダンプアップした時の密度比を計測したところ、約 75(%)であったため、振動ローラによる転圧の直前までの密度増加はブルドーザによる敷均しによって生じたと言える。したがってブルドーザによる転圧効果

は、密度比の増加で 15~20(%)であると言える。この値がブルドーザにより転圧する場合の密度増加のほぼ収束値であると考え、突固め試験により生じている密度増加は 20~25(%)程度であるため(図-9)、突固め試験の方が若干締固め力が大きいといえる。一方、ブルドーザによる転圧では、密度増加は収束値に達しておらず、さらに転圧することにより突固め試験と同等の密度に収束するのであれば、ブルドーザによる撒き出し走行回数と、重錘の落下回数に比例関係を見出すことができる。その場合には、例えば突固め回数 10 回がブルドーザによる 1 回走行に相当すると言う表現ができる。そのためには、ブルドーザの走行回数と密度増加の関係を計測する必要がある。

#### 5.2 加速度等による比較

ブルドーザによる撒き出し時に計測される加速度および土圧と、突固め試験時に計測された加速度および土圧を表-4に示す。同図より土圧のレベルはほぼ一致しているが、加速度のレベルは大きく異なっていることがわかる。

ブルドーザの撒き出しには加速度がほとんど発生していないことから、ブルドーザによる撒き出し時の加速度を計測する前には衝撃的な載荷であると考えていた、ブルドーザによる載荷は比較的静的な繰返し載荷であると考えなければならない。ただし、静的な接地圧を上回る荷重が計測されていることから、衝撃的な成分を含むことも確認できる。ブルドーザの走行速度も締固めに影響を与える可能性が考えられる。

また間隙圧に関しては、突固め試験時にはほとんど発生しておらず、液化化は生じていないと考えられる。このことは、ブルドーザによる撒き出し時と同じである。

今後、加速度と土圧の影響を明確にするために

は、重錘の重量や落下高さを変化させて、ブルドーザの撒き出し時と同程度の土圧と加速度が得られた時に、密度変化のレベルが同程度になるか確認する必要がある。そのためには、各種の締め固め試験の加速度、土圧を計測するとともに、その密度比の増加量を調べることにより、締め固めに影響を与える成分について明らかにしていく必要があるといえる。

## 6. まとめ

ブルドーザによる超硬練りコンクリートの締め固め特性について明らかにすることを目的として、大型突固め試験を実施した。その結果、以下の見解が得られた。

(1) VC値が小さい材料ほど突固め試験後に大きな密度比が得られていることがわかった。しかしながら、VC値が小さいケースでは、初期の状態で、すでに密度比が高くなっているため密度比の増加量で比較すると明確な差は見られず、初期密度が及ぼす影響が大きいとわかった。

(2) 結合材量が異なるが、VC値が同じ場合には、結合材量の違いによる締め固め特性の差は確認されなかった。

(3) 突固め回数と密度比の関係に対して、双曲線による近似を行った結果、突固め回数と密度比の関係は双曲線により近似できることがわかった。

(4) VC値が小さい材料ほど双曲線による近似により求めた収束密度比が大きくなる傾向があることがわかった。しかしながら、増加収束密度比とVC値の関係は明確とはならなかった。

(5) 増加収束密度比が大きいほど載荷直後の密度変化も大きいので、初期密度増加勾配も大きくなる。そのため増加収束密度比と初期密度増加勾配の間には相関関係があることが確認できた。

(6) 締め固めによる密度変化によりブルドーザによる撒き出しと突固め試験を比較した結果、突固め試験の方が、密度の増加量が大きく、締め固め力が大きいことがわかった。

(7) ブルドーザによる撒き出し時に計測される加速度および土圧と、突固め試験時に計測された加速度および土圧を比較した結果、土圧のレベルはほぼ一致しているが、加速度のレベルは大きく異なっていることがわかる。したがって、突固め試験の方が密度増加量の結果と同様に締め固め力が大きいと考えられる。今後、重錘の重量や落下高さを変化させて、ブルドーザの撒き出し時と同程度の土圧と加速度が得られた時に、密度変化のレベルが同程度になるか確認する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 松本徳久, 佐谷靖郎, 志賀三智: RCDコンクリートの現場転圧実験, 土木学会論文集, Vol. 391, No. VI-8, pp. 97~106, 1988. 3
- 2) 國府勝郎, 上野敦: 締め固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計, 土木学会論文集, Vol. 532, No. V-30, pp. 109-118, 1996. 2
- 3) 堤知明, 安田登, 松島学, 村上祐治, 中島聡: 振動ローラーによる超硬練りコンクリートの締め固めモデルの研究, 超硬練りコンクリート技術に関するシンポジウム論文集, pp. 115-118, 1998
- 4) 島昭治郎, 建山和由, 石澤利明: 振動ローラーを用いた現場締め固めにおける密度予測に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 364, No. III-4, pp. 229-237, 1985. 12