

# 盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する研究

永井裕之<sup>\*1</sup>・三反畑勇<sup>\*1</sup>・黒台昌弘<sup>\*2</sup>・中島 聡<sup>\*3</sup>・木村 誠<sup>\*3</sup>

盛土の締固めにおいて、要求性能を満足するための施工方法と最適な締固め機械の選定手法および品質管理手法を提案することを目的に、屋内のコンクリートピットで盛土工事現場（砂質系土質）を模擬した実験を行った。実験には現場で一般的に使用されている最新型の大型締固め機械などを使用し、締固め回数に応じた地盤の密度、地盤反力係数および加速度応答システム表示値などを測定した。実験の結果、今回使用した地盤材料においては、最適な締固め回数は8回であり、締固め施工に適している材料は細粒分含有率 $F_c=10\%$ もしくは $15\%$ 、含水比が最適含水比より $1\%$ 程度乾燥側の材料であることがわかった。また、飽和度率（※）が $95\%$ 以下であれば、地盤反力 $K30$ によって締固め度（密度）を管理することが可能であることがわかった。加速度応答システムについては、飽和度率が約 $80\%$ より乾燥側、施工含水比を最適含水比より $1\%$ 以上乾燥側の場合には、加速度応答システムを用いて締固め度および地盤剛性値を推定することが可能であることがわかった。なお、締固め効果は、無振動締固め機械よりも振動締固め機械の方が大きいことが確認された。

キーワード：盛土、締固め機械、乾燥密度、飽和度、加速度応答システム

## 1. はじめに

「締固め」は盛土構造物の品質を左右する重要な施工方法であり、土の乾燥密度測定に基づく締固め度などによって施工品質管理が行われている。しかし、近年、豪雨や地震によって重要な盛土構造物が崩壊する事例も発生しており、被災事例調査や模型実験などによれば、締固め不足が要因の一つであると考えられる。盛土に求められる要求品質（豪雨・地震に対する耐災害性など）が従来より増してきた現在、締固め度の設定だけでなく、それを確実に達成するための適切な締固め機械の選定、施工手法、および品質管理手法を精緻なものにする必要がある。

そこで、盛土締固め施工における、①品質の均一性確保

のための施工手法、②施工機械の最適な選定手法、③盛土の品質をより総合的に判断するための品質管理手法、を提案することを目的に、実際の施工機械を用いた締固め実験を実施した。実験は、独立行政法人土木研究所の大型ピットにおいて、盛土（砂質系土質）の工事現場を模擬した実験フィールドを作成し、大型締固め機械を用いて行った。実験結果から締固め機械の性能と盛土品質（締固め状況）の実態を明確にし、施工条件に応じた適切な施工手法（施工厚さ・締固め回数）および機種選択を行うための基礎資料を整理した。さらに、地盤反力係数や加速度応答法などの測定を数多く実施して、従来の品質管理指標である土の密度との相関性などを検証した結果、盛土品質管理を効率的に行える可能性が明らかになった。また、土の飽和

表－1 大型締固め機械の仕様

写真					
呼称	SV512振動無	タイヤローラ	ブルドーザ10t	SV512振動有	BW141
メーカー：型式	酒井：SV512D	日立：CP210	CAT：D5K-LGP	酒井：SV512D	BOMAG：BW141AD-4AM
質量(kg)	11050	11000	10300	11050	8700
前輪荷重(kg)	5700	—	—	—	—
振動輪荷重(kg)	—	—	—	5700	4550
起振力(kN)	—	—	—	226	144
振動数(Hz)	—	—	—	27.5	45
締固め幅(m)	2.130	2.275	—	2.13	1.50
接地圧(kPa)	—	—	28	2.13	—
静圧	前輪静線圧(kN/cm)：0.262	平均接地圧(kPa)：390	—	27.5	—
動静圧(kN/cm)	—	—	—	1.323	1.257

\*1 土木研究部 \*2 先端・環境研究部 \*3 東北支店

度に着目した盛土品質管理の有効性が示唆された。

本報告は、平成23年度～25年度の3年間、独立行政法人土木研究所（先端技術チーム・施工技術チーム）と民間10社（㈱大林組、鹿島道路㈱、㈱安藤・間、㈱不動テトラ、前田建設工業㈱、酒井重工業㈱、西松建設㈱、コベルコ建機㈱、三笠産業㈱、西尾レントール㈱）が共同で実施した「盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する研究」の成果1～24)の一部である。なお、共同研究ではプレートコンパクタ等の小型締固め機械を用いたピット実験も実施したが、本報告では主に大型締固め機械による研究成果のみを示す。

## 2. 研究概要

盛土構造物は使用する土および締固め機械が多種多様であるため、全ての施工条件を網羅した実大実験を行うのは困難である。そこで、図-1の研究フローに示すように、土質と締固め機械をそれぞれ数種類選定し、施工時の土の含水比も変化させた締固め実験を実施した。

締固め機械には、日本国内で一般的に用いられている大型締固め機械の中から、表-1に示す4つの機種を選定した。地盤材料としては、細粒分含有率が異なる5種類の砂質土系土質を選定した。表-2に地盤材料の物理特性

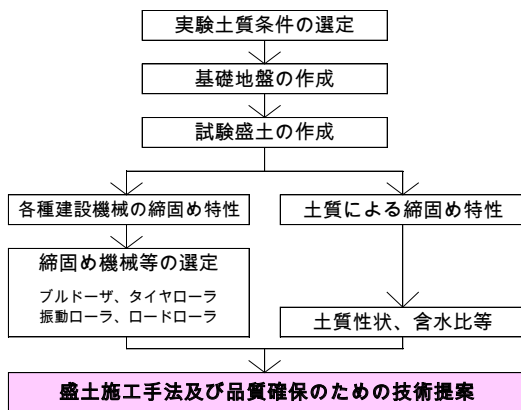


図-1 研究フロー

表-2 土の物理特性

呼称	土質(1)	土質(2)	土質(3)	土質(4)	土質(5)
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.647	2.666	2.675	2.681	2.665
最大粒径 $D_{max}$ (mm)	9.5	9.5	9.5	19	4.75
細粒分含有率 $F_c$ (%)	4.3	14.8	15.3	33.4	57.1
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )※	1.571	1.625	1.674	1.666	1.531
最適含水比 $w_{opt}$ (%)	18.2	17.8	16	18.8	24.9
最適飽和度 $S_{ropt}$ (%)	70.3	74.1	71.6	82.7	89.6

※:JIS A 1210 A-c 法による

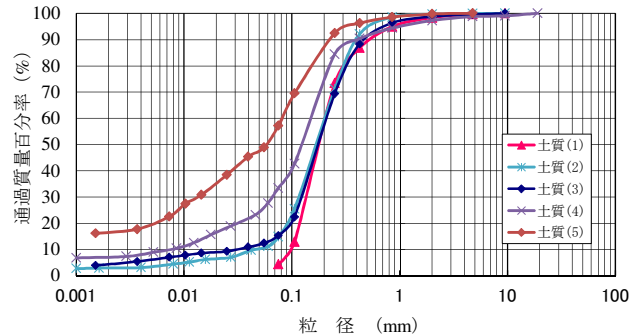


図-2 粒径加積曲線

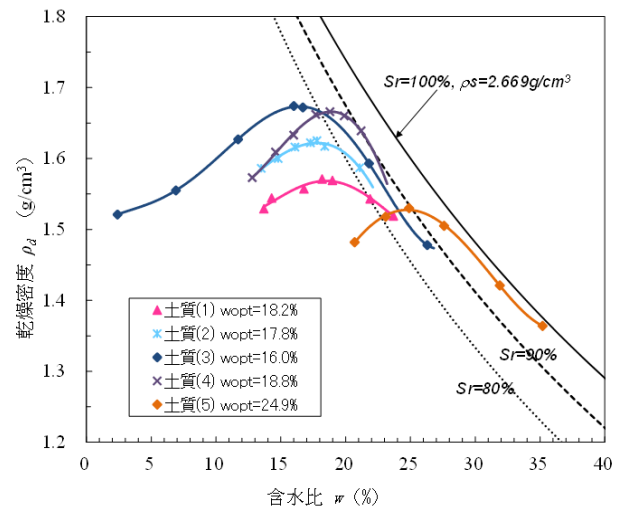


図-3 締固め曲線

表-3 ピット実験ケースのマトリックスと含水比測定結果

土質 (最適含水比%)		土質(1) (18.2)	土質(2) (17.8)		土質(3) (16.0)		土質(4) (18.8)	土質(5) (24.9)	
目標含水比(%)		16.0	16.0	17.0	10.5	15.0	16.0	18.0	—
呼称		含水比領域(1-1)	含水比領域(2-2)	含水比領域(2-1)	含水比領域(3-3)	含水比領域(3-1)	含水比領域(3-2)	含水比領域(4-1)	含水比領域(5-1)
機械名	SV512 振動有	—	16.2 (opt-1.6)	17.0 (opt-0.8)	10.1 (opt-5.9)	14.7 (opt-1.3)	15.9 (opt-0.1)	18.3 (opt-0.5)	28.2 (opt+3.3)
	BW141	16.3 (opt-1.9)	16.3 (opt-1.5)	17.3 (opt-0.5)	—	—	15.8 (opt-0.2)	18.2 (opt-0.6)	—
	タイヤローラ	—	16.7 (opt-1.1)	17.3 (opt-0.5)	10.5 (opt-5.5)	14.8 (opt-1.2)	16.1 (opt+0.1)	17.6 (opt-1.2)	28.3 (opt+3.4)
	SV512 振動無	—	16.0 (opt-1.8)	17.2 (opt-0.6)	10.0 (opt-6.0)	14.9 (opt-1.1)	16.4 (opt+0.4)	18.0 (opt-0.8)	—
	ブルドーザ 10t	—	—	—	10.0 (opt-6.0)	14.9 (opt-1.1)	17.1 (opt+1.1)	—	35.5 (opt+10.6)

を、**図-2**に粒径加積曲線、**図-3**に締固め曲線を示す。

ピット実験は、これらの土質と締固め機械を組み合わせ、土の含水比も変化させることで、**表-3**に示す30ケースの条件で実施した。なお、「-」は実験を実施していない条件を表している。

土の含水比は、**表-3**に示す目標含水比になるように調整して使用したが、土質(5)は細粒分が多く含水比の調整が困難であったため購入時の含水比のまま実験に使用した。また、**表-3**には実験時に測定した含水比を示しているが、4章に示す実験結果の整理では、土質毎の実験グループを表す「含水比領域○-○」の呼称の他に、個別の実験ケースを示す「opt ± ○○」の表示を用いている。

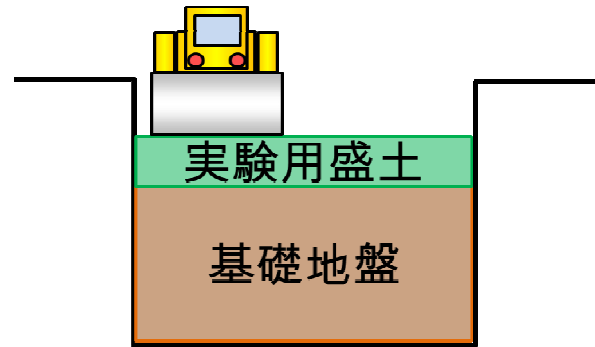
### 3. 実験方法

#### 3.1 実験ピット

本実験は、土木研究所の土工実験棟実験ピット（幅5m×長さ44.8m×深さ4m、鉄筋コンクリート製）で実施した。**図-4**にピット形状を示す。



図-4 実験ピットの形状（平面図，縦断面図）



ピット幅5m×深さ4m

図-5 ピット内の実験フィールド概要（横断面図）

#### 3. 実験フィールド作成方法

実験ピットのコンクリート底面の固さが実験に影響を与えないように、**図-5**に示すように、**表-3**の土質(3)を十分に締固めて厚さ2.7mの基礎地盤を作成した。基礎地盤は、材料の含水比が最適含水比16%になるよう調整し、層厚（仕上がり厚さ）0.3m毎に盛り立てタイヤローラ（**表-1**）で8回転圧した結果、締固め度95%以上が得られている。

次に、基礎地盤上に**表-3**のように含水比調整した土を、**表-4**に示す撒き出し厚さ（仕上がり厚さが0.3m程度になるよう設定）で敷き均して実験フィールドを作成した。敷き均し後の初期状態（締固め機械による締固め施工を始める前の状態）については、0.1m<sup>3</sup>クラス油圧ショベル（自重2.7ton）にてクローラ走行を2回（往復）行った状態とした。**写真-1**に初期状態を、**写真-2**に実験状況を示す。なお、基礎地盤は繰返し使用し、実験用盛土だけを順次入れ替えて締固め実験を実施した。

表-4 撒き出し厚さ（大型締固め機械）

SV512振動有	0.45
BW141	0.45
タイヤローラ	0.40
SV512振動無	0.40
ブルドーザ 10t	0.40



写真-1 実験ピット（初期状態）



写真-2 実験状況

#### 3.3 締固め（走行）方法

本実験では、前節3.2に示した実験フィールド上を、締固め機械で16回走行（8往復）して締固めを行い、その途中および締固め完了後の各種データを計測した。

#### 3.4 品質試験項目

品質試験項目の概要、測定時機、測定数等を、**表-5**～**表-8**に示す。

表－5 計測項目（密度・含水比）

試験方法	概要	計測時期	測点	規定等
コアサンプル	内径0.1m, 高さ0.1mのコアサンプラーを用い、地表面～0.1m, -0.1m～-0.2m, -0.2m～-0.3m, のそれぞれの深さにおける密度・含水比を測定した。	0, 2, 4, 6, 8, 12, 16 回走行後	3	JGS1613-2003 「コアによる土の密度試験方法」
RI密度計	フィールドテック社製FT-102を用いて、密度・含水比を測定した。	0, 2, 4, 6, 8, 12, 16 回走行後	9	JGS1614-2003 「RI計器による土の密度試験方法」
SDG	TRANSTECH SYSTEMS 社製SDGを用いて、密度・含水比を測定した。	0, 2, 4, 6, 8, 12, 16 回走行後	3	—

表－6 計測項目（地盤反力係数）

試験方法	概要	計測時期	測点	規定等
平板載荷試験	平板載荷試験により地盤反力係数（ $K_{30}$ 値）を測定した。	16回走行後	3	JIS A 1215 「地盤の平板載荷試験方法」
小型 FWD 試験	東京測器研究所製 KFD-100A を用いて地盤反力係数（ $K_{30}$ 値）を測定した。	0, 2, 4, 6, 8, 12, 16 回走行後	3	土木学会編 「FWD および小型 FWD 運用の手引き」
動的平板載荷試験（重錘落下試験）	アプライドリサーチ社製 IST03 を用いて地盤反力係数（ $K_{30}$ 値）を測定した。	0, 2, 4, 6, 8, 12, 16 回走行後	30	—

表－7 計測項目（加速度応答値）

試験方法	概要	計測時期	測点	規定等
$\alpha$ システム	$\alpha$ システム研究会によって開発されたシステム。SV512 振動有, BW141 に搭載して測定した。「みだれ率」を出力する。	すべての走行時	—	—
CCV システム	酒井重工業によって開発されたシステム。SV512 振動有, BW141 に搭載して測定した。「CCV 値」を出力する。	すべての走行時	—	—
Evib システム	BOMAG によって開発されたシステム。BW141 に搭載して測定した。「Evib 値」を出力する。	すべての走行時	—	—

表－8 計測項目（沈下量）

試験方法	概要	計測時期	測点	規定等
沈下量	レベル測定器を用いて表面高さを計測し、締固めによる地盤表面沈下量を測定した。	0, 2, 4, 6, 8, 12, 16回走行後	3	—
走行速度	レーン中 10 m を通過する時間をストップウォッチにて計測し走行速度を算出した。	すべての走行時	—	—

表－9 実験ケースと計測項目

機 械 名	土質	土質(1)	土質(2)		土質(3)			土質(4)	土質(5)
	目標含水比 (%)	16.0	16.0	17.0	10.5	15.0	16.0	18.0	—
	呼称	含水比領域(1-1)	含水比領域(2-2)	含水比領域(2-1)	含水比領域(3-3)	含水比領域(3-1)	含水比領域(3-2)	含水比領域(4-1)	含水比領域(5-1)
SV512 振動有	—	S, 平, F, 動, $\alpha$ , C	S, 平, F, 動, $\alpha$ , C	S, 平, F, 動, $\alpha$ , C	動 $\alpha$ , C	R, 平, F, 動, $\alpha$ , C	平, F, 動, $\alpha$ , C	S, 平, F, 動, $\alpha$ , C	平, F, 動, $\alpha$ , C
BW141	S, F, 動, $\alpha$ , C, V	S, 平, F, 動, $\alpha$ , C, V	S, 平, F, 動, $\alpha$ , C, V	—	—	平, F, 動, $\alpha$ , C, V	S, 平, F, 動, $\alpha$ , C, V	—	
タイヤローラ	—	S, 平, F, 動	S, 平, F, 動	動	R, 平, F, 動	平, F, 動	S, 平, F, 動	平, F, 動	
SV512 振動無	—	S, 平, F, 動	S, 平, F, 動	動	R, 平, F, 動	平, F, 動	S, 平, F, 動	—	
ブルドーザ 10t	—	—	—	動	R, F, 動	平, F, 動	—	平, F, 動	

凡例：R：RI密度計，S：SDG，平：平板載荷試験，F：小型FWD試験，動：動的平板載荷試験，

$\alpha$ ： $\alpha$ システム，C：CCVシステム，V：Evibシステム

注) コアサンプル，走行速度，沈下量は全てのケースで実施した。



表-10 試験結果 (締固め回数との比較) (1)

項目	振動なし		
	ブルドーザ	タイヤローラ	振動ローラ (振動なし) :SV512
乾燥密度	<p>締固め回数-乾燥密度 (平均値: 深さ10-30cm:ブルドーザ)</p>	<p>締固め回数-乾燥密度 (平均値: 深さ10-30cm:タイヤローラ)</p>	<p>締固め回数-乾燥密度 (平均値: 深さ10-30cm:SV512振動無)</p>
	<p>締固め回数-締固め度 (平均値: 深さ10-30cm:ブルドーザ)</p>	<p>締固め回数-締固め度 (平均値: 深さ10-30cm:タイヤローラ)</p>	<p>締固め回数-締固め度 (平均値: 深さ10-30cm:SV512振動無)</p>
	<p>締固め回数-沈下量 (測点1, 2, 3の平均値:ブルドーザ)</p>	<p>締固め回数-沈下量 (測点1, 2, 3の平均値:タイヤローラ)</p>	<p>締固め回数-沈下量 (測点1, 2, 3の平均値:SV512振動無)</p>
飽和度	<p>締固め回数-飽和度 (平均値: 深さ10-30cm:ブルドーザ)</p>	<p>締固め回数-飽和度 (平均値: 深さ10-30cm:タイヤローラ)</p>	<p>締固め回数-飽和度 (平均値: 深さ10-30cm:SV512振動無)</p>
	<p>K30 (FWD) -締固め回数 (南・中・北の平均値:タイヤローラ)</p>	<p>K30 (FWD) -締固め回数 (南・中・北の平均値:タイヤローラ)</p>	<p>FWD試験 K30-締固め回数 (南・中・北の平均値:SV512振動無)</p>
	<p>K30 (重錘) -締固め回数 (南・中・北の平均値:タイヤローラ)</p>	<p>K30 (重錘) -締固め回数 (南・中・北の平均値:タイヤローラ)</p>	<p>重錘落下試験 K30-締固め回数 (南・中・北の平均値:SV512振動無)</p>
小型 FWD	<p>K30 (MN/m²) vs consolidation times (roller)</p>	<p>K30 (MN/m²) vs consolidation times (roller)</p>	<p>FWD試験 K30-締固め回数 (roller)</p>
動的平板載荷	<p>K30 (MN/m²) vs consolidation times (roller)</p>	<p>K30 (MN/m²) vs consolidation times (roller)</p>	<p>FWD試験 K30-締固め回数 (roller)</p>
	<p>K30 (MN/m²) vs consolidation times (roller)</p>	<p>K30 (MN/m²) vs consolidation times (roller)</p>	<p>FWD試験 K30-締固め回数 (roller)</p>
	<p>K30 (MN/m²) vs consolidation times (roller)</p>	<p>K30 (MN/m²) vs consolidation times (roller)</p>	<p>FWD試験 K30-締固め回数 (roller)</p>

表-11 試験結果（締固め回数との比較）(2)

項目	振動あり	
	振動ローラ（振動あり）：SV512	振動ローラ（振動あり）：BW141
乾燥密度	<p>締固め回数-乾燥密度(平均値:深さ10~30cm:SV512)</p>	<p>締固め回数-乾燥密度(平均値:深さ10~30cm:BW141)</p>
	締固め度	<p>締固め回数-締固め度(平均値:深さ10~30cm:SV512)</p>
沈下量		<p>締固め回数-沈下量(測点1,2,3の平均値:SV512)</p>
	飽和度	<p>締固め回数-飽和度(平均値:深さ10~30cm:SV512)</p>
K <sub>30</sub>		<p>FWD試験 K30-締固め回数 (南・中・北の平均値:SV512)</p>
	動的平板載荷	<p>重錘落下試験 K30-締固め回数 (南・中・北の平均値:SV512)</p>

表-12 試験結果 (地盤反力 K30 との比較) (1)

項目	振動なし			
	ブルドーザ	タイヤローラー	タイヤローラー	振動ローラー (振動なし) :SV512
乾燥密度	<p>乾燥密度-K30 (平均値: 深さ10~30cm:ブルドーザ)</p>	<p>乾燥密度-K30 (平均値: 深さ10~30cm:タイヤローラー)</p>	<p>乾燥密度-K30 (平均値: 深さ10~30cm:タイヤローラー)</p>	<p>乾燥密度-K30 (平均値: 深さ10~30cm:SV512振動無)</p>
飽和度: 最適飽和度 (非飽和度率)	<p>飽和度/最適飽和度-K30(重積) (平均値: 10~30cm:タイヤローラー)</p>	<p>飽和度/最適飽和度-K30(重積) (平均値: 10~30cm:タイヤローラー)</p>	<p>飽和度/最適飽和度-K30(重積) (平均値: 10~30cm:タイヤローラー)</p>	<p>飽和度/最適飽和度-K30(重積) (平均値: 10~30cm:SV512振動無)</p>

表-13 試験結果（地盤反力 K30 との比較）(2)

振動あり	
項目	振動ローラ (振動あり) : BM141
乾燥密度	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p style="text-align: center;">振動ローラ (振動あり) : SV512</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p style="text-align: center;">振動ローラ (振動あり) : BM141</p> </div> </div>
飽和度 ÷ 最終飽和度 (飽和度率)	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"></div> <div style="width: 45%;"></div> </div>

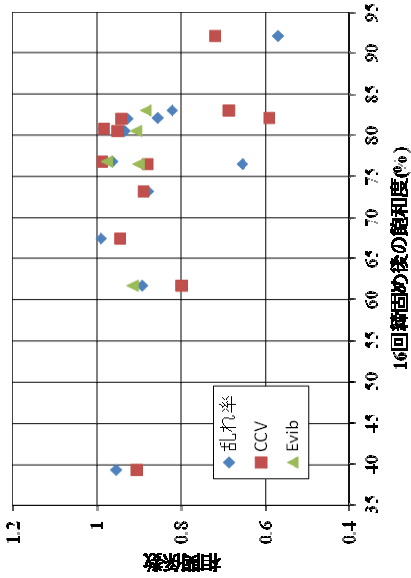


表-14 試験結果 (加速度応答値との比較) (1)

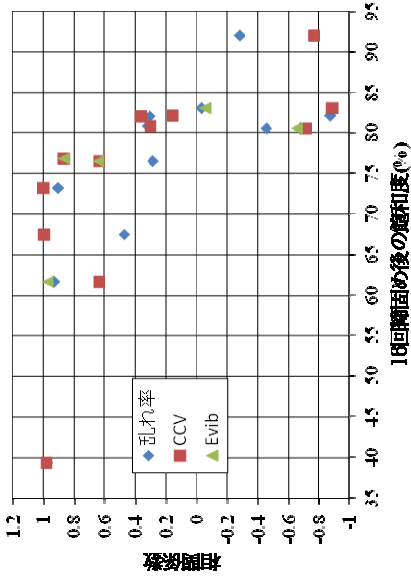
項目	地盤反力 $K_{90}$	
	乾燥密度	動的平板載荷試験
SV512	<p><b>乾燥密度</b></p> <p>加速度応答法と小型FWDの関係(CCV)</p> <p>小型FWD試験 K30FWD(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>CCV値</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>	<p><b>動的平板載荷試験</b></p> <p>小型FWD試験と密度の関係</p> <p>乾燥密度(g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>小型FWD試験 K30FWD(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>
	<p><b>SV511</b></p> <p>加速度応答法と重錘落下試験の関係(CCV)</p> <p>重錘落下試験 K30重錘(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>CCV値</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>	<p><b>小型FWD</b></p> <p>加速度応答法と重錘落下試験の関係(<math>\alpha</math>システム)</p> <p>重錘落下試験 K30重錘(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>乱れ率</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>
SV512	<p><b>乾燥密度</b></p> <p>加速度応答法と小型FWDの関係(CCV)</p> <p>小型FWD試験 K30FWD(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>CCV値</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>	<p><b>動的平板載荷試験</b></p> <p>重錘落下試験と密度の関係</p> <p>乾燥密度(g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>重錘落下試験 K30重錘(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>
SV511	<p><b>乾燥密度</b></p> <p>加速度応答法と小型FWDの関係(CCV)</p> <p>小型FWD試験 K30FWD(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>乱れ率</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>	<p><b>動的平板載荷試験</b></p> <p>重錘落下試験と密度の関係</p> <p>乾燥密度(g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>重錘落下試験 K30重錘(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>
SV512	<p><b>乾燥密度</b></p> <p>加速度応答法と小型FWDの関係(CCV)</p> <p>小型FWD試験 K30FWD(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>CCV値</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>	<p><b>動的平板載荷試験</b></p> <p>重錘落下試験と密度の関係</p> <p>乾燥密度(g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>重錘落下試験 K30重錘(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>●土質(2),Opt-1.6,SV512 ◆土質(2),Opt-0.8,SV512 ▲土質(3),Opt-5.9,SV512 ▲土質(3),Opt-1.3,SV512 ●土質(3),Opt-0.1,SV512 ◆土質(4),Opt-0.5,SV512 ●土質(5),Opt+3.3,SV512</p>

表-15 試験結果 (加速度応答値との比較) (2)

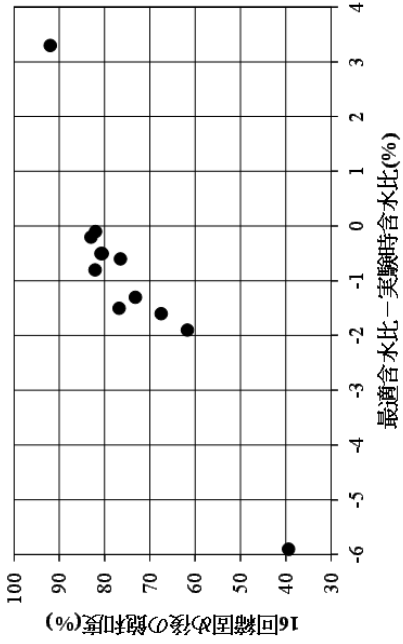
項目	地盤反力 $K_{30}$	
	小型FWD	動的平板載荷試験
乾燥密度	<p><b>加速度応答法と密度の関係 (CCV)</b></p> <p>乾燥密度 (g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>ccv値</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>	<p><b>加速度応答法と密度の関係 (CCV)</b></p> <p>小型FWD試験 (30FWD)(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>ccv値</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>
	<p><b>加速度応答法と密度の関係 (αシステム)</b></p> <p>乾燥密度 (g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>乱れ率</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>	<p><b>加速度応答法と密度の関係 (αシステム)</b></p> <p>小型FWD試験 (30FWD)(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>乱れ率</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>
Evib	<p><b>加速度応答法と密度の関係 (Evib)</b></p> <p>乾燥密度 (g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>Evib値</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>	<p><b>加速度応答法と密度の関係 (Evib)</b></p> <p>小型FWD試験 (30FWD)(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>Evib値</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>
	<p><b>加速度応答法と重錘落下試験の関係 (αシステム)</b></p> <p>重錘落下試験 (30FWD)(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>乱れ率</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>	<p><b>加速度応答法と重錘落下試験の関係 (αシステム)</b></p> <p>重錘落下試験 (30FWD)(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>ccv値</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>
<p><b>加速度応答法と重錘落下試験の関係 (Evib)</b></p> <p>重錘落下試験 (30FWD)(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>Evib値</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>	<p><b>加速度応答法と重錘落下試験の関係 (Evib)</b></p> <p>重錘落下試験 (30FWD)(MN/m<sup>3</sup>)</p> <p>ccv値</p> <p>                     ●土質(1),opt-1.9,BW141                      ●土質(2),Opt-1.5,BW141                      ●土質(2),Opt-0.5,BW141                      ●土質(3),Opt-0.2,BW141                      ●土質(4),Opt-0.6,BW141                 </p>	



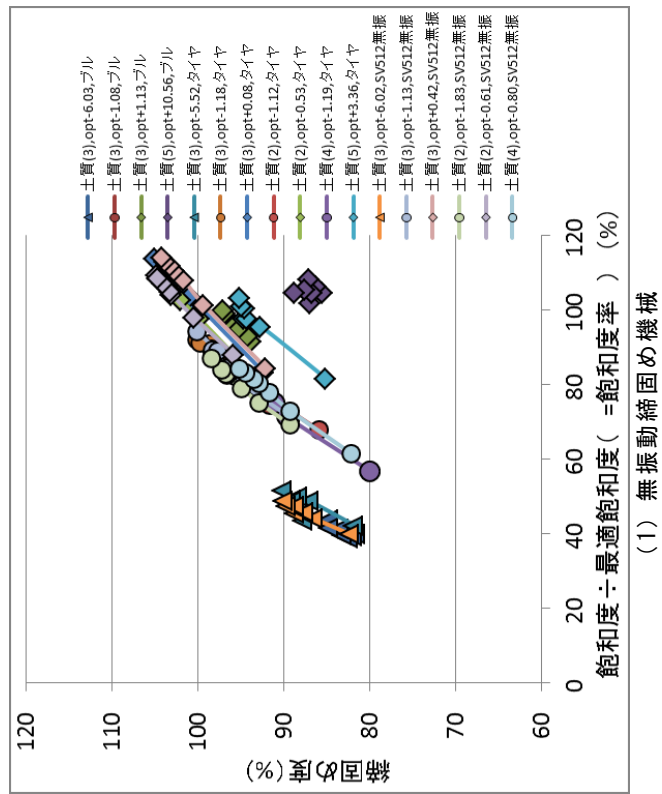
図一6 加速度応答システムと締固め度の相関



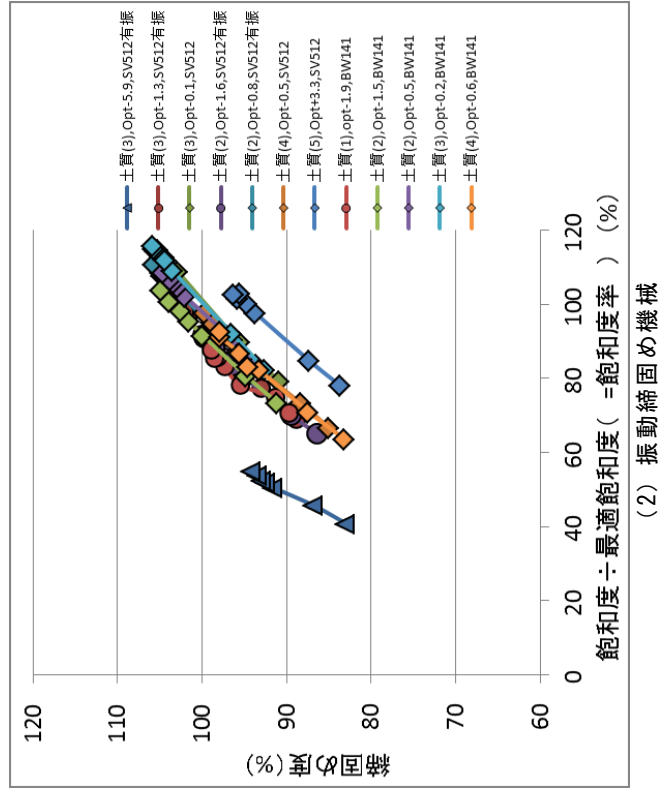
図一7 加速度応答システムと地盤剛性の相関



図一8 加速度応答システムと地盤剛性の相関



(1) 無振動締固め機械



(2) 振動締固め機械

図一9 締固め度と飽和度率の相関

## 4. 実験結果

### 4.1 大型締固め機械・振動なし

試験結果のうち、締固め回数と乾燥密度、締固め度、沈下量、飽和度、K30 の関係を表-10、表-11 に、K30 と乾燥密度、飽和度、飽和度から最適飽和度を除した値（以下；飽和度率）の関係を表-12、表-13 に示す。なお、最適飽和度とは、室内締固め試験で最大乾燥密度、最適含水比を示したときの飽和度の値とする（21）。

#### (1) 転圧回数と乾燥密度、締固め度、飽和度、沈下量

乾燥密度、締固め度、飽和度については、表-10 に示す通り、すべての材料において、全重機ともに転圧回数の増加に伴い緩やかに上昇し、転圧回数 2～6 回における増加量は大きく、8 回以降は微増であった。

沈下量については、すべての土質において、全重機ともに転圧回数の増加に伴い増加していることが確認された。沈下量の大きさは、土質 (3)、土質 (2)、土質 (4)、土質 (5) の順に増加している。

締固め度  $D_c$  については、タイヤローラ、振動ローラ（振動なし）においては、土質 (3) の乾燥側 ( $w_{opt}-5 \sim -6\%$ ) では、盛土の品質管理規定値である締固め度  $D_c=90\%$  以下の結果であったが、その他の材料ではいずれも  $D_c=90\%$  以上であった。ブルドーザにおいては、土質 (3) の乾燥側 ( $w_{opt}-6\%$ )、土質 (5) の湿潤側 ( $w_{opt}+10.6\%$ ) で  $D_c=90\%$  以下であった。その他の材料ではいずれも  $D_c=90\%$  以上であったが、他重機と比べて締固め効果が小さかった。

#### (2) K30 と乾燥密度、飽和度率

表-13 に示す通り、K30 値については、全重機ともに、乾燥密度の増加に伴う増減の傾向が最適含水比付近で二分されることが確認された。すなわち、最適含水比付近～乾燥側（含水比  $W < W_{opt}-1\%$ ）で締固め回数の増加に伴い K30 値は増加し、最適含水比付近～湿潤側（含水比  $W > W_{opt}-0.5\%$ ）で K30 値は低下傾向を示した。また、含水比が最適含水比より離れるほど、増減の傾向は顕著となることが確認された。そこで、最適飽和度の異なる 5 種類の土質材料の試験データを比較するため、まず、実験で得られた飽和度と室内試験で得られた各土質の最適飽和度との比（以下飽和度率）を求め、K30 値との関係について調べた。表-13 より、飽和度率が 95% 以上のときに K30 値は低下傾向にあり、飽和度率が 95% 以下のときに K30 は増加傾向にあることがわかった。このことから、K30 は飽和度率 95% 付近、かつ最適含水比より 1% 以上乾燥側で大きくなることがわかった。

#### (3) 締固め度と飽和度率の関係

図-9 に、締固め度と飽和度率の関係を示す。概ねすべてのケースで、飽和度率と締固め度には高い相関がある

ことが確認できた。これより、飽和度率を用いた締固め度の管理が実現可能であると考えられる。

### 4.2 大型締固め機械・振動有り

#### (1) 転圧回数と乾燥密度、締固め度、飽和度、沈下量

表-11 に示す通り、いずれの重機においても、転圧回数の増加に伴い、乾燥密度、締固め度、飽和度は緩やかに上昇することがわかった。また、転圧回数 2～6 回における増加量は大きく、8 回以降は微増であった。締固め度  $D_c$  の結果を比較すると、いずれも盛土の品質管理規定値である締固め度  $D_c=90\%$  以上の結果であった。

#### (2) K30 と各指標の比較

表-13 に示す通り、K30 値については、いずれも重機においても、締固め回数の増加に伴う増減の傾向が最適含水比付近で二分されることが確認された。すなわち、最適含水比付近～乾燥側（含水比  $W < W_{opt}-1\%$ ）で締固め回数の増加に伴い K30 値は増加し、最適含水比付近～湿潤側（含水比  $W > W_{opt}-0.5\%$ ）で K30 値は低下傾向を示した。また、含水比が最適含水比より離れるほど、増減の傾向は顕著となることが確認された。そこで、前項と同様に、飽和度率により結果を比較すると、飽和度率が 95% 以上のときに K30 値は低下傾向にあり、飽和度率が 95% 以下のときに K30 は増加傾向にあることがわかった。このことから、振動ローラ（振動あり）においても、K30 は飽和度率 95% 付近、かつ最適含水比より 1% 以上乾燥側で大きくなることがわかった。

#### (3) 加速度応答値と各指標の比較

表-14、表-15 には、加速度応答値 (CCV,  $\alpha$  システム,  $E_{vib}$ ) と乾燥密度、飽和度、飽和度率の関係を示す。各グラフには加速度応答値と各指標の寄与率 ( $R$  の 2 乗) を示している。加速度応答システムの適用範囲を検討するため、各グラフの寄与率を含水状況すなわち飽和度で整理することを試みた。各相関係数と締固め度を 16 回締固め後の飽和度で整理したものを図-6 に、各相関係数と動的平板載荷試験による地盤剛性値を 16 回締固め後の飽和度で整理したものを図-7 に示す。図-6、図-7 より、各加速度応答システムと締固め度（密度）および地盤剛性値（地盤反力係数 K30 値）とは、16 回締固め後の飽和度が約 80% より乾燥側であれば高い相関性を保持することができ、加速度応答システムを用いて締固め度および地盤剛性値を推定することが可能であるといえる。また、各加速度応答システム間の差異は特になく考えられる。

次に、16 回締固め後の飽和度と実験時含水比と最適含水比との差（値が低い方が乾燥側）との関係を図-8 に示す。図-8 より、飽和度を上記の範囲に維持するためには、施工時含水比を最適含水比より約 1% 以上乾燥側に設定す

ればよいといえる。

以上を整理すれば、施工時含水比を最適含水比より約1%以上乾燥側にし、施工途中で含水状態が変化しないよう注意すれば、加速度応答システムを用いて締固め度および地盤剛性値を推定することが十分可能であるといえる。

#### (4) 締固め度と飽和度率の関係

図-9より、概ねすべての材料、重機において、飽和度率と締固め度は高い相関を確認することができた。これより、飽和度率を用いて、締固め度を管理することが可能であるといえる。

## 5. まとめ

大型締固め機械を用いた実験を行なった結果、下記の知見を得た。

### (1) 無振動締固め機械

今回の使用材料では、最適な締固め回数は8回であり、締固め施工に適している材料は土質(2)および(3)、含水比は最適含水比-1.0%~最適含水比であった。

飽和度率と地盤反力係数K30値と締固め度の関係より、飽和度率およびK30値(飽和度率95%以下の場合)によって盛土の品質(密度)を管理することが可能であると考えられる。

今回使用した、タイヤローラ、SV512無振動では重機による試験結果の差異はなく、同等の品質を確保することができると考えられる。一方、ブルドーザは締固め機械としての能力は低く、締固め機械としてその効果を期待することは難しい。

### (2) 振動締固め機械

今回の使用材料では、最適な締固め回数は8回であり、締固め施工に適している材料は土質(2)および(3)、含水比は最適含水比-1.5%~最適含水比であった。

飽和度率と地盤反力係数K30値と締固め度の関係より、飽和度率およびK30値(飽和度率95%以下の場合)によって盛土の品質(密度)を管理することが可能であると考えられる。

加速度応答値については、飽和度約80%より乾燥側、かつ施工時含水比を最適含水比より約1%以上乾燥側であれば、加速度応答値を用いて締固め度および地盤剛性値を推定することが可能であるといえる。

**謝辞:** 本報告書は、独立行政法人土木研究所と民間企業10社で実施した共同研究の成果の一部を取りまとめたものであり、研究を進めるにあたっては土木研究所の宮武裕昭氏、森芳徳氏、藤田智弘氏、藤野健一氏、茂木正晴氏、

橋本毅氏をはじめ、各企業の担当者に大変お世話になりました。ここに記して深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 土木研究所：盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する研究 共同研究報告書(整理番号第461号)、平成26年12月
- 2) 森芳徳、宮武裕昭、藤田智弘、藤野健一、茂木正晴、橋本毅：盛土施工における締固め特性について(その1)～全体総括～、第69回土木学会年次学術講演会、pp.685-686、2014.
- 3) 永井裕之、茂木正晴、橋本毅、山下章、山口達也、松尾健二：盛土施工における締固め特性について(その2)～大型無振動締固め機械による締固め特性～、第69回土木学会年次学術講演会、pp.687-688、2014.
- 4) 松尾 健二、茂木正晴、橋本毅、古屋弘、内山恵一、山口達也：盛土施工における締固め特性について(その3)～大型振動締固め機械と加速度応答法の適用性～、第69回土木学会年次学術講演会、pp.689-690、2014.
- 5) 古屋弘、茂木正晴、橋本毅、小葉はるな、黒台昌弘、小林純：盛土施工における締固め特性について(その4)～施工機械の違いによる適用性～、第69回土木学会年次学術講演会、p.691-692、2014.
- 6) 佐藤靖彦、岩谷隆文、茂木正晴、橋本毅、須永久治、山口秀樹：盛土施工における締固め特性について(その5)～小型締固め機械の締固め特性～、第69回土木学会年次学術講演会、pp.693-694、2014.
- 7) 岩谷隆文、佐藤靖彦、茂木正晴、橋本毅、丸山史郎：盛土施工における締固め特性について(その6)～締固めによる地盤反力係数K30の特性～、第69回土木学会年次学術講演会、pp.695-696、2014.
- 8) 橋本毅、茂木正晴、藤野健一、須永久治、大中康弘、佐藤靖彦：盛土施工における締固め特性について(その7)～小型締固め機械に搭載した加速度応答システムの適用検討～、第69回土木学会年次学術講演会、pp.697-698、2014.
- 9) 古屋弘、茂木正晴、松尾健二、永井祐之：盛土施工における締固め特性について(その1)～室内締固め試験との関係に関する一考察～、第49回地盤工学研究発表会、pp.1009-1010、2014.
- 10) 松尾健二、橋本毅、古屋弘、内山恵一：盛土施工における締固め特性について(その2)～振動ローラ締固めにおける加速度応答の適用性について～、第49回地盤工学研究発表会、pp.1011-1012、2014.
- 11) 岩谷隆文、藤野健一、茂木正晴、橋本毅：盛土締固め時の乾燥密度と表面沈下量の関係、第68回土木学会年次学術講演会、pp.433-434、2013.
- 12) 橋本毅、茂木正晴、藤野健一、山口秀樹：電磁波を利用した土の現場密度試験の適用性について～砂質土における実験結果～、第68回土木学会年次学術講演会、pp.435-436、2013.
- 13) 茂木正晴、藤野健一、小橋秀俊、藪雅行、岩谷隆文：盛土施工における締固め特性について～盛土の効果・効率的な施工に関する研究(実験概要)～、第67回土木学会年次学術講演会、pp.857-858、2012.
- 14) 西山章彦、茂木正晴、黒台昌弘、小林純、高橋浩：盛土施工における締固め特性について(その1)～大型締固め機械の締固め特性について～、第67回土木学会年次学術講演会、pp.857-858、2012.



- 演会, pp. 855-856, 2012.
- 15) 砂町康夫, 山口達也, 内山恵一, 木村誠, 藤野健一, 高橋浩, 小林純: 盛土施工における締固め特性について (その2) - 加速度応答法の適用範囲の検討 -, 第 67 回土木学会年次学術講演会, pp. 845-846, 2012.
  - 16) 佐藤靖彦, 須永久治, 山口秀樹, 橋本毅, 藪雅行: 盛土施工における締固め特性について (その3) - 狭隘部に用いる小型締固め機械の特性について -, 第 67 回土木学会年次学術講演会, pp. 851-852, 2012.
  - 17) 岩谷隆文, 茂木正晴, 西山章彦, 須永久治: 盛土施工における締固め特性について (その4) - 動的平板載荷試験装置の盛土品質管理の適用性について -, 第 67 回土木学会年次学術講演会, pp. 853-854, 2012.
  - 18) 橋本毅, 小橋秀俊, 茂木正晴, 佐藤精彦, 大中康弘: 盛土施工における締固め特性について (その5) - 小型締固め機械における加速度応答システムの適用性について -, 第 67 回土木学会年次学術講演会, pp. 847-848, 2012.
  - 19) 藪雅行, 小橋秀俊, 藤野健一, 堤祥一: 締固め機械の選定が盛土の締固め度に及ぼす影響に関する模型実験, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp. 973-974, 2012.
  - 20) 岩谷隆文, 茂木正晴, 橋本毅, 小橋秀俊: 盛土締固め品質管理における一考察, 47 回地盤工学研究発表会, pp. 979-980, 2012.
  - 21) 橋本毅, 藤野健一, 藪雅行, 岩谷隆文: 小型締固め機械の締固め特性について, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp. 977-978, 2012.
  - 22) 龍岡文夫: 技術手帳, 盛土の締固めにおける飽和度管理の重要性, 地盤工学会誌, pp. 39-40, 2015. 7
  - 23) 龍岡文夫ら: 地盤工学・技術ノート, 盛土の締固め 1 ~ 20 回, 基礎工, 2013 年 7 月号 ~ 2015 年 2 月号
  - 24) 龍岡文夫, 藤代健司, 須藤雅人, 建山和由, 根本忠: 乾燥密度と飽和度の関数として締固めた土の物性, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp. 575-578, 2013

## Study on the Optimum Construction Method and Advanced Quality Control for a High Quality Fill

Hiroyuki NAGAI, Isamu SANDANBATA, Masahiro KURODAI, Satoshi NAKAJIMA and Makoto KIMURA

An experiment that simulated a fill construction site (sandy soil) at an indoor concrete pit was conducted for the purpose of proposing a construction technique that satisfies the required performance, the selection method of the most suitable compacting equipment and the quality control technique for fill compaction. The latest large compacting equipment that is typically used was used in the experiment, and the density of the foundation, the coefficient of ground reaction and the acceleration response system indication value all depended on the number of times the compaction was measured. The results of the experiment showed that the most suitable number of times of compaction was eight times, and that the material suitable for compaction was sand with a fine fraction content rate  $F_c$  of 10% to 15% and the material whose moisture weight percentage was about 1% from optimum weight percentage toward the dry side was clarified as the foundation material used this time. When the degree of saturation was less than 95%, it was possible to manage the degree of compaction (the density) by subgrade reaction K30. It was possible to estimate the compaction degree and the foundation stiff value by using an acceleration response system in the case that the degree of saturation rate is less than 80% and the moisture weight percentage of the construction material is about 1% from the optimum moisture weight percentage toward the dry side. Furthermore, it was confirmed that a compaction machine with vibration compacts the fill better than a machine without vibration does.