

土 木 研 究 所 資 料

コア材料の転圧厚さに関する実験的検討

平成10年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所
ダム部 フィルダム研究室

Copyright ©1997 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



土木研究所資料
第3568号 1998年3月

コア材料の転圧厚さに関する実験的検討

フィルダム研究室 室 長 吉田 等
主任研究員 豊田光雄
前 研究員 山本裕之*
前 室 長 中村 昭**

要 旨

本報文では、比較的礫分を多く含む風化花崗岩とロームの混合材からなるコア材料を用いた現場盛立試験により、一層当りのまき出し、転圧厚さがコア材料の品質としての現場密度および透水係数に与える影響について検討した結果を述べたものである。

なお、本試験では密度、含水比の測定にRI密度水分計を用いた。

キーワード：転圧厚さ、転圧回数、コア材料、乾燥密度、RI密度計

*) 現 北海道開発庁 忠別ダム建設事業所

**) 現 北陸地方建設局富山工事事務所長

目 次

1. はじめに	1
2. コア材料のまき出し厚さ、仕上り厚さと転圧機種の実態	2
3. 試験概要	4
3.1 試験ケース	4
3.2 試験材料	6
3.3 盛立試験ゾーンの造成方法と締固め機械	7
3.4 試験および測定	11
4. 転圧回数と締固め度の関係	20
4.1 試験値のばらつき	20
4.1.1 密度のばらつき	20
4.1.2 含水比のばらつき	20
4.1.3 粒度分布のばらつき	25
4.2 転圧回数と密度の関係	26
4.3 ブルドーザの敷均し時の影響と振動ローラの起振力の違いによる影響	28
4.3.1 ブルドーザによる敷均し時の影響	28
4.3.2 起振力の違いによる影響	29
4.4 転圧回数と沈下率の関係	30
5. 転圧厚さとまき出し方法の違いによる締固め密度と透水係数	33
5.1 転圧厚さの比較	33
5.1.1 締固め密度	33
5.1.2 転圧厚さと透水係数	39
5.2 まき出し方法の比較	41
6. まとめ	42
参考文献	43

1. はじめに

ロックフィルダムの工事は種々の工事要素から構成されるが、それらの中でコアゾーンの盛立工事が全体工期を左右するクリティカルな工事となる場合が多い。コア材料は、含水比を最適含水比からやや湿潤側で管理しつつ締め固める必要があることから、現場では降雨量と気温に関して厳密な盛立規制を行うため、特に寒冷地で施工されるダムは年間の施工可能日数がかなり少なくなる。加えて週休2日制の導入等により、今後建設される大規模なロックフィルダムの工期は、さらに長期化するものと予想される。

ロックフィルダムのコアゾーンは、ダム本体の遮水機能を受け持ついわばダムの心臓部であるため、従来より品質管理に細心の注意を払いつつ丹念な締固めが行われてきた。一般的に、コアの盛立は一層当たりの仕上がり厚を20cmとしてタンピングローラにより締め固める施工法が採用されることが多いが、寒河江ダムのように堤高が100mを超える大規模なロックフィルダムでも、コアゾーンとして所有の品質を確保するために、仕上がり厚さを15cmとして施工した例もある。

一方、締固め機械は、起振力の大きな振動ローラの出現などにより、コア材料の特性によっては一層当たりの転圧厚さを増大できる可能性が出てきた。コアゾーンとしてこれまでと同等以上の品質を確保した上で、転圧厚さを増大することができれば盛立速度が向上し、ひいてはダムの全体工期を短縮することができる。

本報文は、コアゾーンとして所有の品質を確保したうえで、一層当たりの転圧厚さを増大させることの可能性を調査することを目的として、礫分を比較的多く含む風化崗岩とロームの混合材からなるコア材料を用いた現場盛立試験を行い、一層当たりの転圧厚さの変化が、コアゾーンの密度や透水性に与える影響について調査した結果について述べたものである。

2. コア材料のまき出し厚さ、仕上がり厚さと転圧機種の実態

1970年以降建設された建設省系のフィルダム12ダムのコア材料のまき出し厚さなどと転圧機種の実態について調査^{1)~12)}した結果を表-1に示す。12ダムにおけるコア材料の粒度分布を図-1に示す。最大粒径は200mm以下で統一土質分類法による砂分(4.75mm以下)の含有率は40~70%、0.075mm以下の細粒分の含有率は15~25%である。材質は風化粘板岩、シルト質粘土、花崗岩の風化したものなど所要の性質を有するさまざまな材料が用いられている。

仕上がり厚さについては、盛立試験でまき出し厚さをいろいろ変えた試験が行われているが、実施工においては図-2に示すように仕上がり厚さは15~20cmがほとんどである。転圧機種は、タンピングローラがほとんどで振動ローラの利用は少ない。なお、事例は少ないが仕上がり厚さが30cmの場合は河床砂礫にシルト質粘土を混合したものや角礫混じりまき土であり、振動ローラ、振動タンピングローラで締め固めている。

表-1 調査対象ダムの施工実態表

ダム名	竣工年	所在地	ダム高さ、コア部体積	コア材料の種類、混合比	転 圧 機 種	転圧厚さ (t ₁) 仕上り厚さ (t ₂) 転圧回数 (N)
1 大雪	1975	北海道	86.5m 390,600m ³	風化粘板岩	複胴20t シープスフートローラ 2台	t ₁ =20cm t ₂ =15cm N=12回
2 岩屋	1977	岐阜	127.5m 468,400m ³	崖錐層：風化層 =1:1 (54:46)	タンピングローラ WS-21, CAT-825 V=5~6km/h	t ₂ =15cm N=12回
3 漁川	1980	北海道	45.5m 80,100m ³	河床砂礫：シルト質粘土 =1:0.2 (密度比)	8t級振動ローラ 15t V=8km/h	t ₁ =37cm t ₂ =30cm N=6回以上
4 白川	1981	山形	66.0m 225,400m ³	花崗岩の風化層	タンピングローラ 15t V=8km/h	t ₂ =20cm N=8回以上
5 七北田	1982	宮城	73.0m 413,600m ³	玄武岩風化残留土(粗粒) ：泥流堆積物(細粒) =4:1 (体積比3:1)	タンピングローラ30t 自走式 CAT-825B V=4km/h	t ₂ =20cm N=12回
6 十勝	1985	北海道	84.3m 542,400m ³	風化粘板岩(細粒) シルト材(細粒)	自走式コンパクター 33t	t ₁ =25cm t ₂ =20cm N=8回
7 奥野	1989	静岡	63.0m 246,300m ³	凝灰角礫岩 安山岩	コンパクター CAT825C V=4km/h	t ₁ =25cm N=12回以上
8 寒河江	1990	山形	112.0m 962,400m ³	崖錐堆積物	タンピングローラ30t	t ₁ =20cm t ₂ =15cm N=12回
9 奈良俣	1990	群馬	158.0m 1,405,000m ³	角礫混じりまき質堆積物	振動タンピングローラ 20t SPF60	t ₁ =36cm t ₂ =30cm N=8回以上
10 阿木川	1990	岐阜	101.5m 554,300m ³	恵那礫岩層	自動式タンピングローラ 30t V=4~5km/h	t ₂ =15cm以下 N=12回
11 七ヶ宿	1991	宮城	90.0m 596,600m ³	段丘堆積物 細粒：粗粒=1:6~7	タンピングローラ 30t 825B V=4km/h	t ₂ =20cm N=8回
12 山瀬	1991	秋田	62.0m 230,200m ³	泥流堆積物：熔結凝灰岩 =2:1	タンピングローラ 17t CAT815	t ₂ =20cm N=10回以上

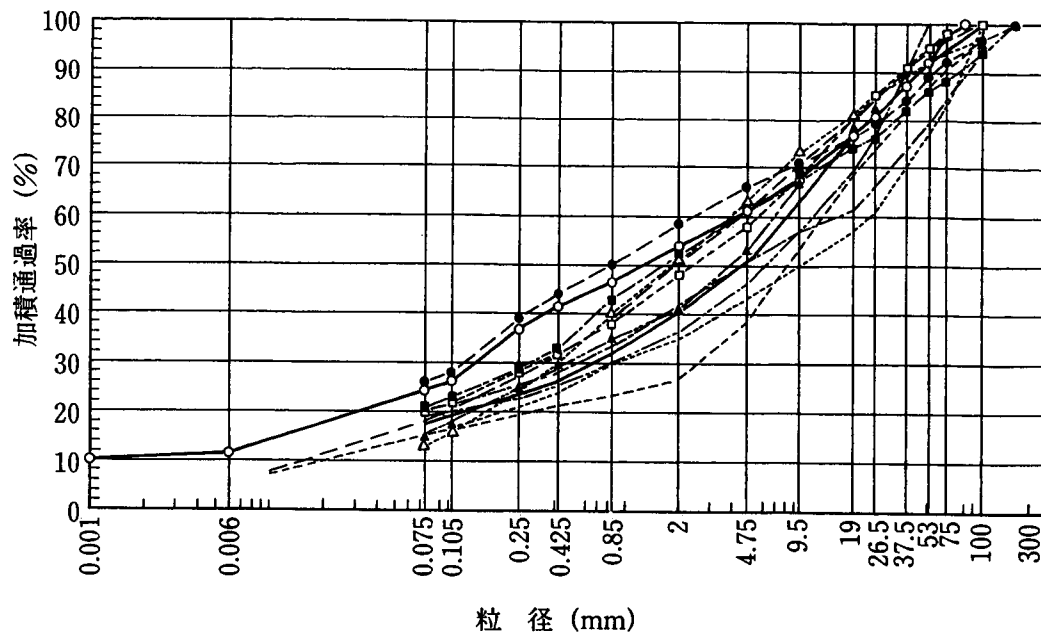


図-1 12ダムのコア材料と粒度曲線

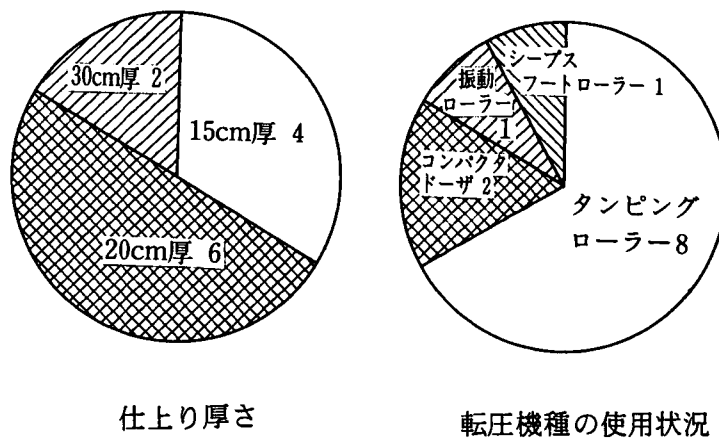


図-2 実態調査による仕上り厚さと転圧機種の使用状況 (12ダム)

3. 試験概要

コア材料の盛立において、転圧厚さおよびまき出し方法の違いが転圧後の締固め密度や透水係数に与える影響を調べることを目的とした現場試験を行った。なお、本試験では締固め機種は材料特性（まさ系）を考慮して振動ローラとした。

3.1 試験ケース

試験ケースを表－2に示す。層厚はまき出し時と仕上り時では異なるが、本文中では混乱を避けるため、層厚に関する記述は転圧厚さという呼称で統一する。

試験ケースは転圧厚さを20cm～40cmの範囲で変え転圧を行った3ケースと20cm厚を2層まき出した後、40cm厚で転圧を行った1ケースの計4ケースについて行った。

CASE 1が転圧厚さ $H=20\text{cm}$ 、CASE 2が $H=30\text{cm}$ 、CASE3が $H=40\text{cm}$ である。CASE3AとCASE3Bの違いは、CASE3Aは一気に40cmまき出した後に転圧する方法で、CASE3Bは20cmづつに分けて2回まき出した後に層全体を転圧する方法をとっており、まき出し方法の違いに着目した試験である。

なお、実際の転圧厚さの決定に関しては、「3.3 盛立試験ゾーンの造成方法と締固め機械」のところで説明する。

表－2 試験ケース

ケース	転圧厚さ	試験条件
CASE 1	20 (23) cm	転圧機種：1機種 (SV510DV) 試験含水比：最適含水比 転圧回数： $N=0, 2, 4, 6, 10, 14$ 回 転圧速度： $V=3\text{km/時}$ 試験層数：3層
CASE 2	30 (34) cm	
CASE 3A	40 (45) cm	
CASE 3B	20 (22) cm×2層	

() 内はまき出し厚さを示す。

転圧回数と密度の関係を求める方法では、多くのダムでは転圧回数毎に試験ゾーンを変える方法が用いられているが、この方法によると、各々試験ゾーンで粒度のばらつき、ブルドーザ走行によるまき出し状態の差（初期密度が異なると想定される）が生じ、転圧回数と密度の関係を精度良く求めることが困難と考えられる。このため、本試験においては非破壊試験であるR I測定法を用いて同一の試験ゾーンで転圧回数と密度の関係を求めることにした。

転圧回数 N は、 $N=0$ 回（まき出し、敷均し直後）、2、4、6、10、14回までの6段階に分け、各転圧段階ごとに同一測点でR I法による密度・含水比測定を繰り返した。なお、レベル測量による沈下量の測定も行い、沈下率からも締固め度の評価を行うことにした。

また、各ケースの最上層においては、14回の転圧と測定を終了した後に、最上層の転圧層相当分を置換法による密度試験と置換孔を利用した現場透水試験を行った。

図－3に盛立試験のフローを示す。

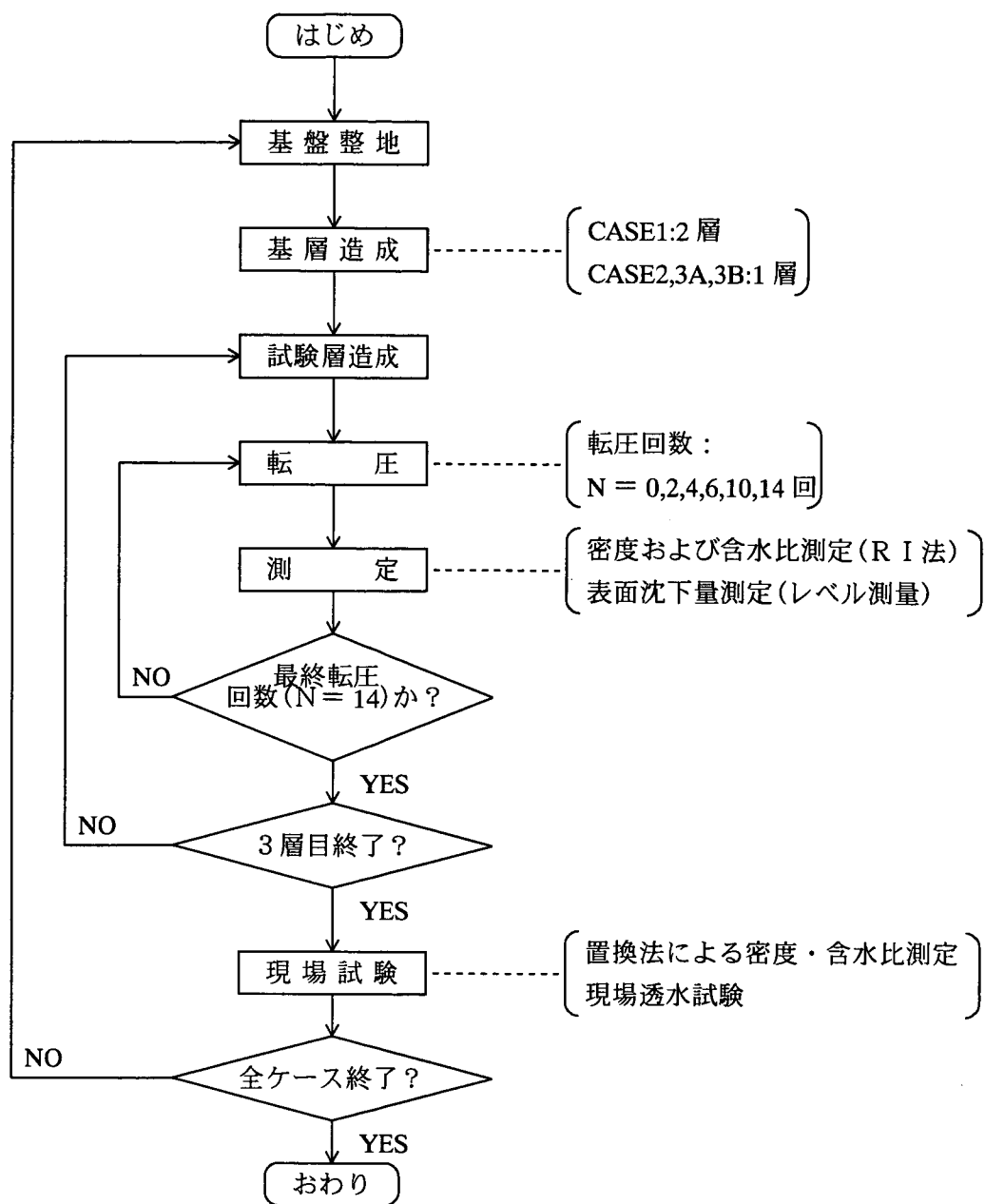


図-3 盛立試験のフロー

3.2 試験材料

対象としたコア材料は粗粒材（風化花崗岩の岩礫を含むまき土）に細粒材（細粒まき土とローム）をそれぞれ2対1の割合で混合したものである。

粗粒材の真比重 G 、含水比 w はそれぞれ2.65、4%で、細粒材のそれは $G=2.73$ 、 $w=30$ 数%を示し、細粒材の含水比は高い。混合した材料の w は14~15%である。

図-4に各試験ケースの盛立ゾーンで採取したコア材料の粒度分布曲線（4~8地点から採取した平均値）を示す。最大粒径150mm、統一土質分類法による砂分（4.75mm）以下の含有率は65~70%、粘土、コロイドの細粒分（0.075mm）以下の含有率は25%である。各試験ケース間の粒度のばらつきは少なく、ほぼ同じ粒度分布であるといえる。

室内試験によると突固めエネルギー1Ecにおける最適含水比および最大乾燥密度はそれぞれ17.4%、 1.747t/m^3 である。

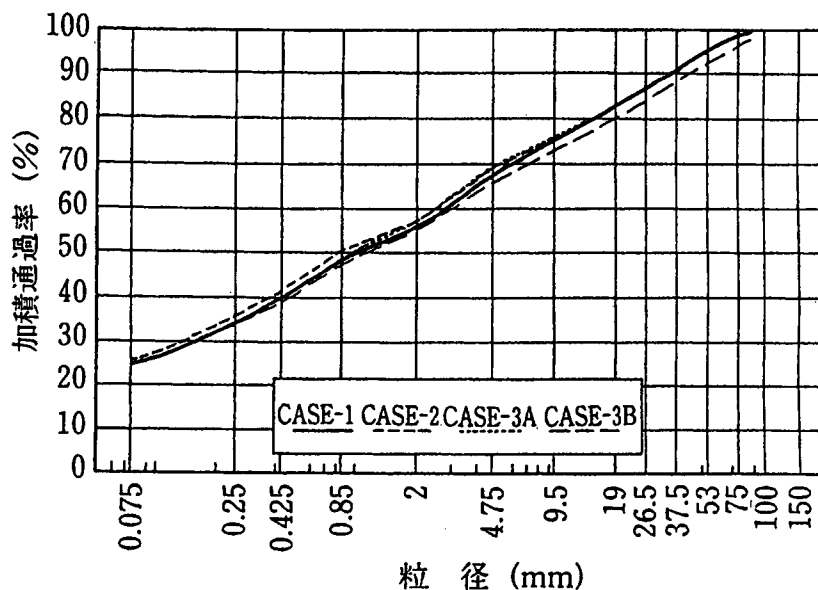


図-4 試験材料の粒度分布

3.3 盛立試験ゾーンの造成方法と締固め機械

図-5に各試験ケースの盛立試験ゾーンの配置、大きさを示す。試験レーンの幅は2m×2レーンの4mとし、その両側に2m幅のサイドレーンを設けて転圧効果の散逸を防いだ。対象とした試験層は基盤の影響を受けないように、基盤の上に試験層と同じ要領で盛り立てた基層を設け、その上に試験層を3層盛り立てた。基層の施工厚については、CASE1は $H=20\text{cm}$ を2層盛り、CASE2は $H=30\text{cm}$ 、CASE3Aは $H=40\text{cm}$ 、CASE3Bは $H=20\text{cm} \times 2$ を1層盛り立てた。基盤の整地状況および基層のまき出し状況、転圧状況を写真-1、写真-2、写真-3に示す。その上に各ケースとも試験層を3層設けた。以下、3層の試験層を下位層から1層目、2層目、3層目と呼ぶ。

盛立ゾーンの造成にあたっては、まき出しにはバックホー（ 0.7m^3 ）とダンプトラック（11t）を用いた。敷均しはブルドーザ27t級（D85A）で行い、試験ゾーン間で締固め前の粒度の初期状態に差がでないように注意して走行した。まき出し厚さは基層の造成時に転圧状況と沈下状況を観察して、CASE1では23cm、CASE2では34cm、CASE3Aでは45cm、CASE3Bでは $22\text{cm} \times 2$ 層とした。転圧には振動ローラ（SV510DV）を用いた。試験層のまき出し、敷均し、転圧状況を写真-4、写真-5、写真-6に示す。

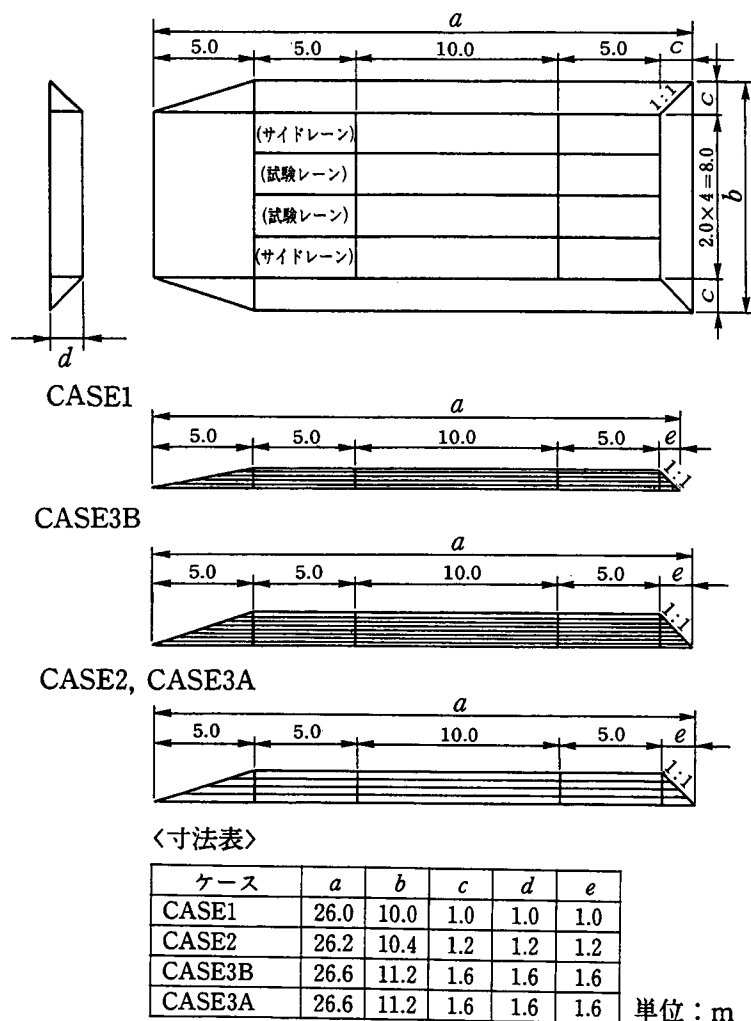
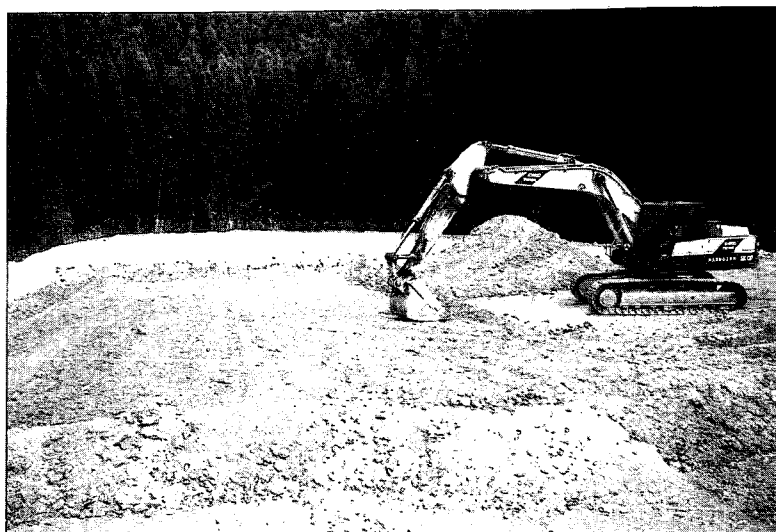
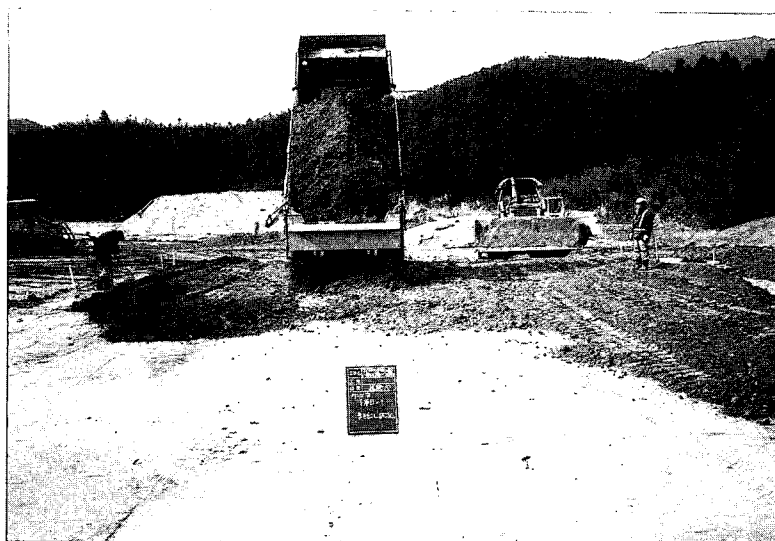


図-5 試験ゾーン概要図



写真－１ 基盤整地状況



写真－２ 基層まき出し状況



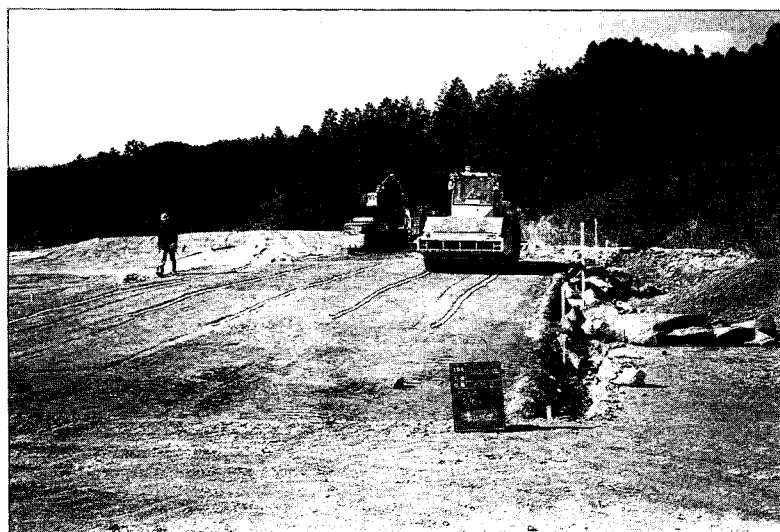
写真－３ 基層転圧状況



写真－４ 試験層まき出し状況



写真－５ 試験層敷均し状況



写真－６ 試験層転圧状況

今回の試験に用いた振動ローラの基本諸元を表－３に、姿図を図－６に示す。締固め機械はＲＣＤコンクリートダム用に開発された振動ローラをコア材料に対しての走行性を良くするために、後輪をタイヤに変更して改良したものである。最大起振力は23tonで鉛直振動が卓越しており、横振動が非常に少ない機種である。試験では走行速度を3km/h、起振力を17tonに設定して行った。また、起振力の違いによる比較をするために、CASE2、CASE3Aの最終転圧層の転圧回数N＝2回以降において、起振力を17tonと23tonの試験も行った。

表－３ 締固め機種

車 両 型 式		S V 5 1 0 D V 振動ローラ	
重 量	総重量 (kg)	11,400	
	前輪荷重(kg)	6,500	
	後輪荷重(kg)	4,900	
線 圧 (静荷重時) (kg/cm)		30.2 (前輪)	
起振性能	振動数 (Vpm)	低 ; 2,400	高 ; 1,800
	起振力 (kg)	低 ; 17,000	高 ; 23,000
走行性能 (km/h)	1 速	低速 ; 0～4	高速 ; 0～5
	2 速	低速 ; 0～5.5	高速 ; 0～8
	3 速	低速 ; 0～6.5	高速 ; 0～11
車 両 寸 法	全 長 (mm)	5,680	
	全 幅 (mm)	2,350	
	全 高 (mm)	2,230	
	軸 距 (mm)	3,000	
	締固め幅 (mm)	2,150	
	最低地上高 (mm)	435	
最 小 回 転 半 径 (m)		5.7	
登 坂 能 力 (度)		24	
起振装置	動 力 伝 達	静 油 圧 式	
	起 振 機	2 軸 偏 心 ・ 可 変 式	
	装 置 位 置	前 輪 胴 内 部	

3.4 試験および測定

図-7に試験位置を示す。試験の種類、試験位置は各ケース、各層に共通である。各転圧回数ごとに行うR I測定は同一の測点で実施している。

R I測定では各転圧厚さに対応して、測定深度の異なる3種類のR I計器を用いて、試験層全体の密度と含水比を測定した。ただし、 $H=40\text{cm}$ の場合の含水比の測定には、測定深さ30cmの水分計を用いた。また、転圧厚さ $H=40\text{cm}$ の2ケース(CASE3A、3B)については、図-8に示すように測定深さ40cmと20cmの密度計を用い、1層内の上半層と下半層の締固め密度を求めた。なお、上半層の密度=測定深さ20cmの密度、下半層の密度=(測定深さ40cmの密度) $\times$ 2-(上半層の密度)である。

標準型R I密度水分計、大型表面型R I密度水分計を写真-7、写真-8に示す。図-9にR I計器の概念図を示す。表-4、表-5に標準型R I密度水分計、大型表面型R I密度水分計の仕様を示す。

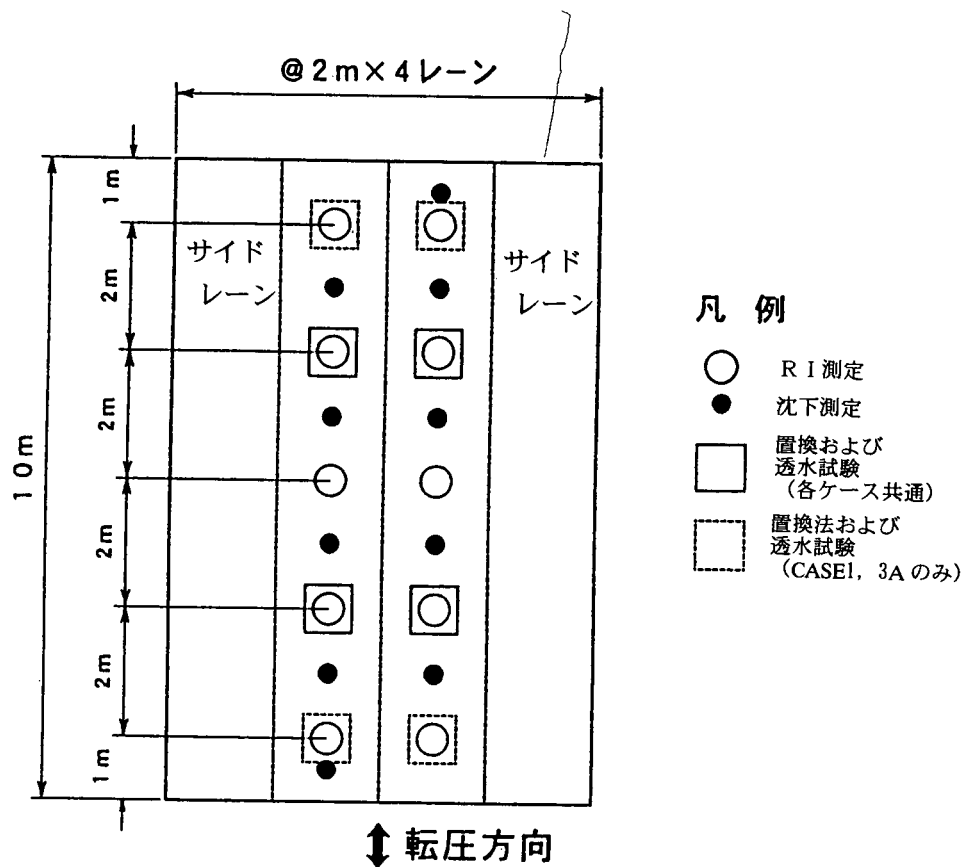


図-7 現場試験位置図

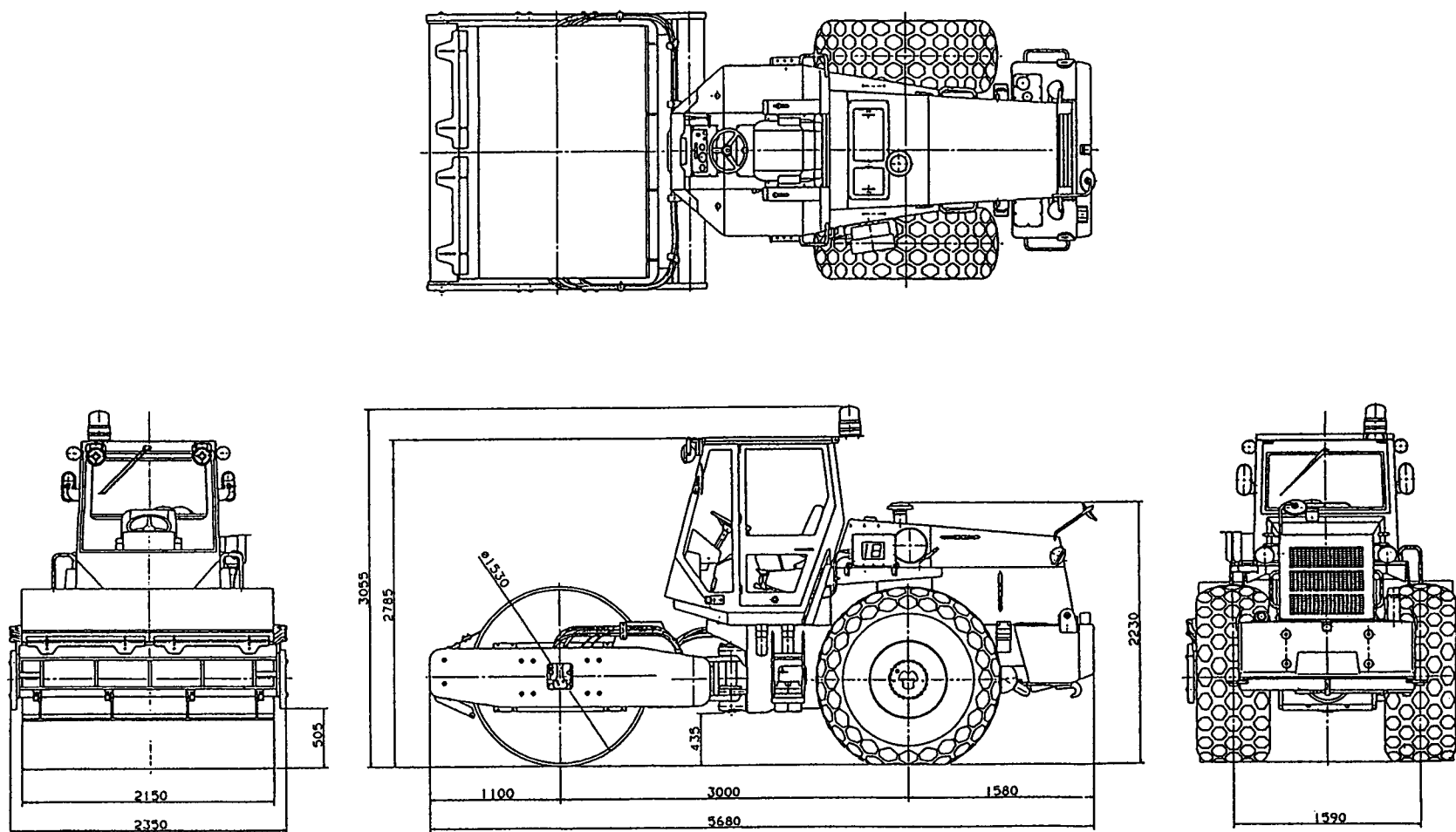


図-6 振動ローラの姿図 (SV510DV)

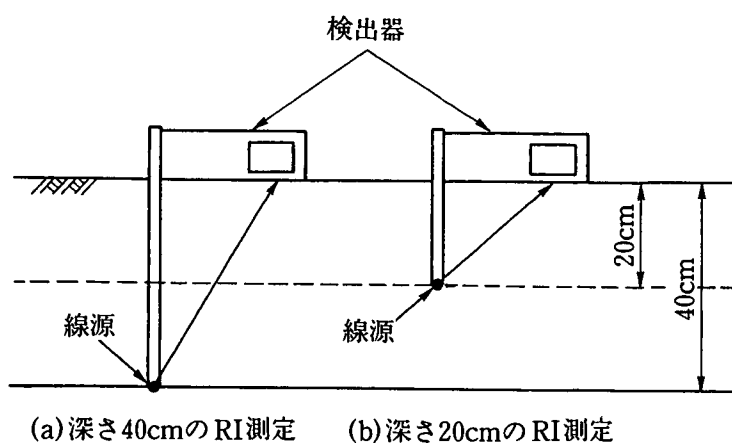
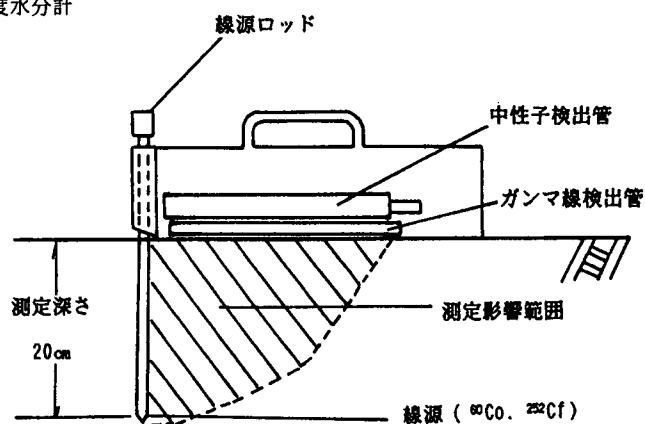


図-8 H=40cmのRI測定

a) 標準型RI密度水分計



b) 大型表面型RI密度水分計

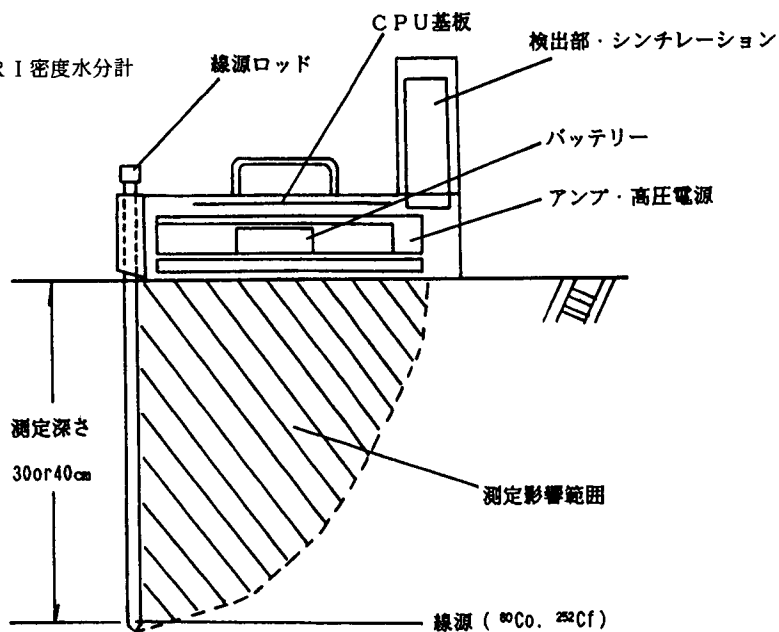


図-9 RI測定器の構造概要

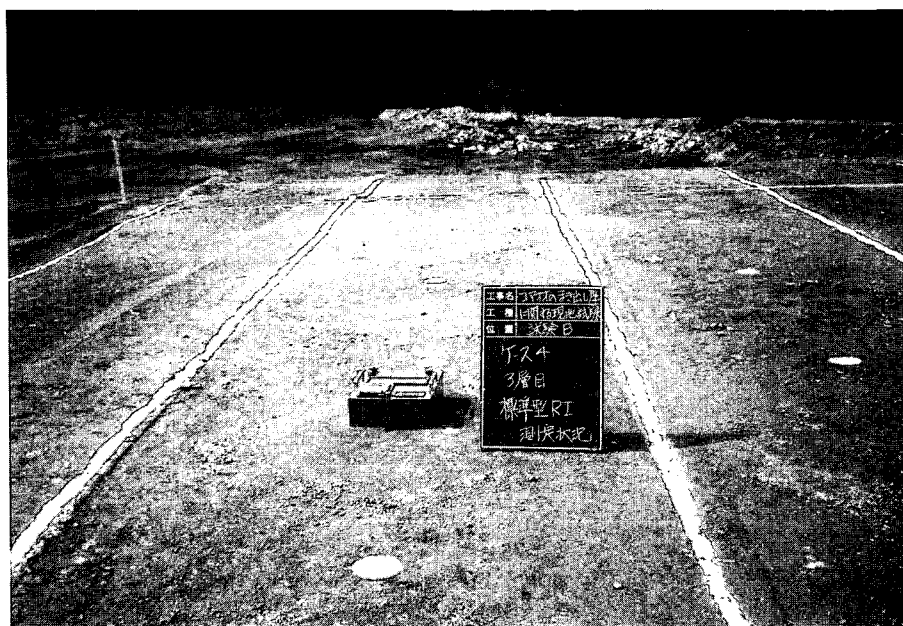


写真-7 標準型R I 密度水分計測定状況

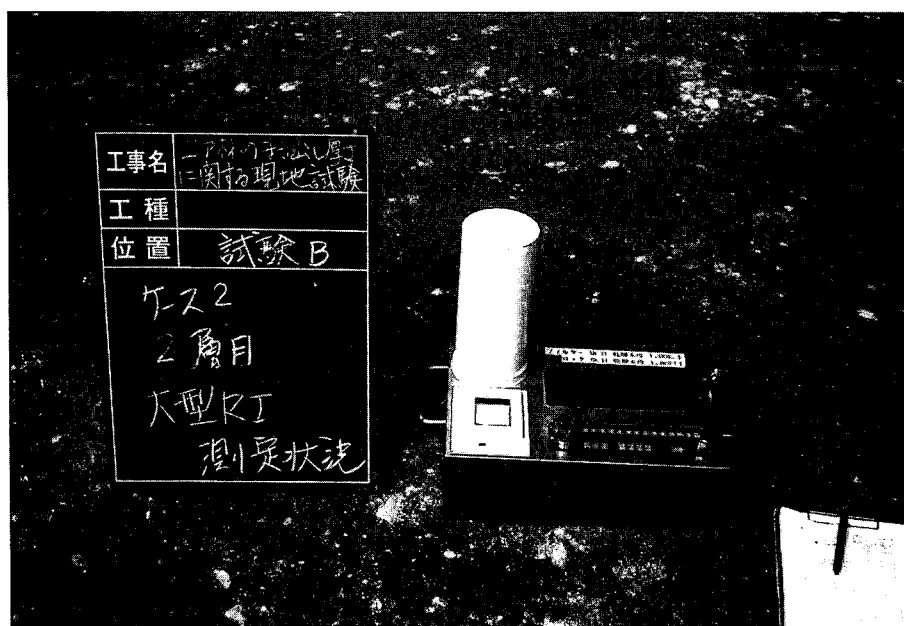


写真-8 大型表面型R I 密度水分計測定状況 (CASE2)

表-4 標準型R I 密度水分計の仕様

	密 度 計	水 分 計
測定方式	ガンマ線透過型	速中性子線透過型
測定範囲	湿潤密度 0.8~2.8 t/m ³	含水量 0~1.0 t/m ³
線 源	コバルト60 (⁶⁰ Co) 2.6メガベクレル (MBq) 半減期5.26年	カリフォルニウム252 (²⁵² Cf) 1.1メガベクレル (MBq) 半減期2.65年
検 出 器	ガイガーミュラー (GM) 管	ヘリウム (³ He) 管
測定深さ	20 cm	
測定時間	標準体：10分 現場：1分	
表 示	大型液晶ディスプレイ、一括画面	
記 録 器	プリンター	
内部電源	バッテリー (充電式)、DC 6 V、充電器内蔵 連続使用可能時間：12時間以上	
外部電源	AC 100 V (充電用電源)	
使用温度	0℃~50℃	

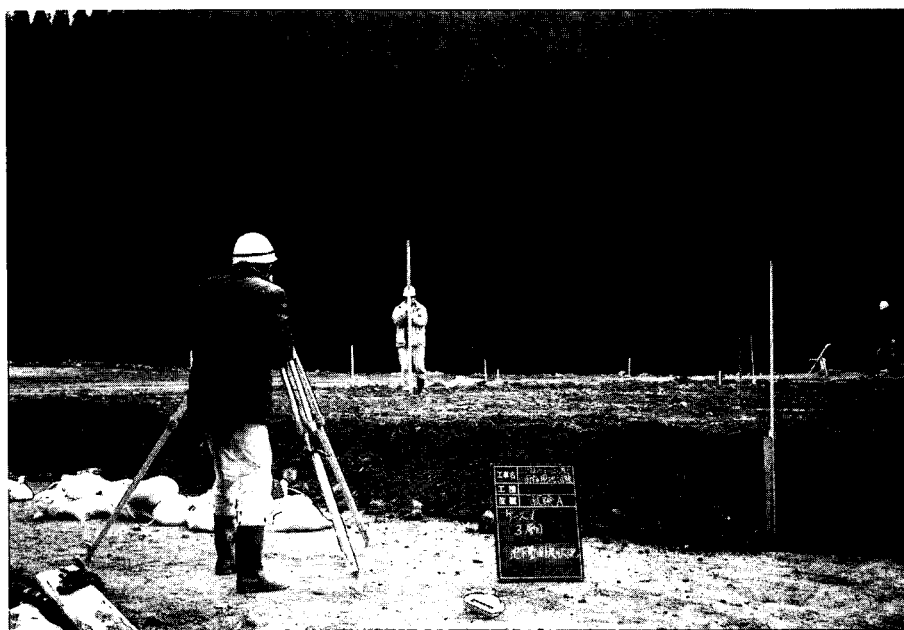
表-5 大型表面型R I 密度水分計の仕様

	密 度 計	水 分 計
測定方式	ガンマ線透過型	速中性子線透過型
測定範囲	0.8~2.8 (t/m ³)	0~1.0 (t/m ³)
測定深さ	30 cm, 40 cm	30 cm
透過距離	50 cm	37 cm
線 源	コバルト60 : 2.6メガベクレル (MBq)	カリフォルニウム252 : 1.1メガベクレル (MBq)
検 出 器	NaIシンチレーション検出器	³ He比例計数管
測定時間	1分 (繰り返し測定随意)	
使用温度	0~50℃	
表 示	液晶デジタル表示 (236×62mm)	
記 録	プリンタ	
電 源	内蔵電池 (充電式・連続10時間以上使用可能)	
本体重量	約20 (kg)	
本体寸法	約450W×300D×140H (mm)	

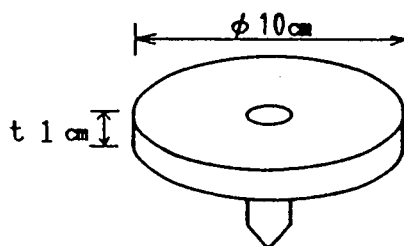
沈下量の測定はレベル測量において対象とする試験層で転圧回数毎に測定した（写真－９）。測定には図－１０に示すような標識プレートを設置し、常に同一の測点で実施した。置換法による密度測定（写真－１０、写真－１１、写真－１２）、置換孔を利用した透水試験（写真－１３）は最終転圧層（３層目）の最終転圧（ $N=14$ 回）後、図－７に示す試験位置において表－６に示す試験条件で行った。

なお、転圧後の粒度試験は置換孔を掘削した試料を用いて行った。

試験数量を表－７に示す。



写真－９ 表面沈下量測定状況



図－１０ 標識プレート

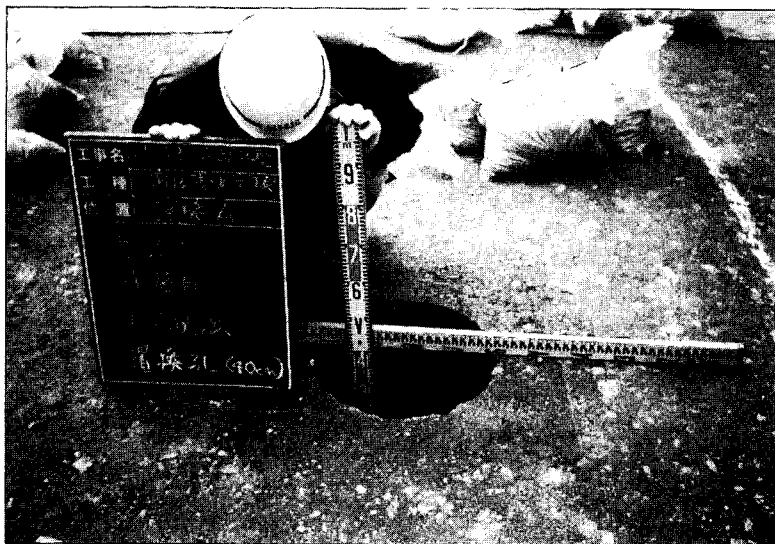


写真-10 置換孔 (L=40cm)

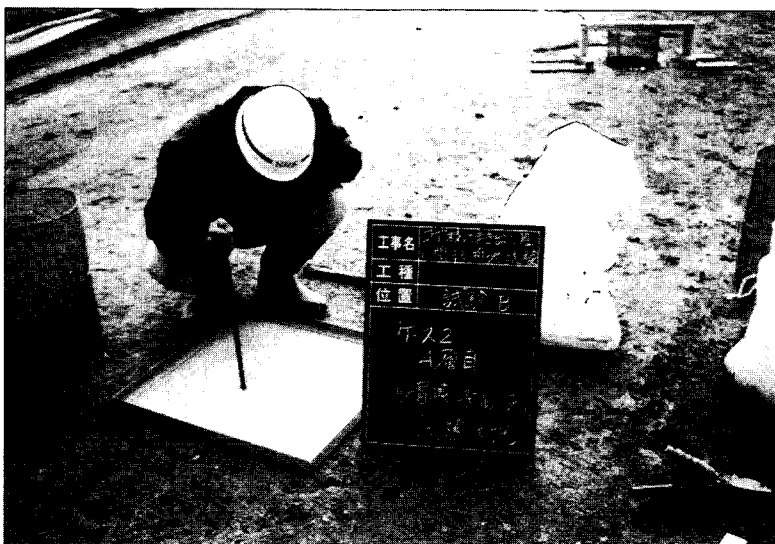


写真-11 砂置換法試験状況 (CASE1, 2)



写真-12 水置換法試験状況 (CASE3A, 3B)

表－6 置換法による密度測定法と透水試験法

	転圧厚さ	密 度			透 水 係 数		
		孔径	孔深	測 定 法	孔径	孔深	測 定 法
CASE 1	20cm	φ 25cm	20cm	砂置換（突砂）	φ 25cm	20cm	変水位法
CASE 2	30cm	φ 35cm	30cm	砂置換（突砂）	φ 35cm	30cm	変水位法
CASE 3 A	40cm (40cm×1層)	φ 45cm	20cm	水置換	φ 45cm	40cm	変水位法
		φ 45cm	40cm	水置換			
CASE 3 B	40cm (20cm×2層)	φ 45cm	20cm	水置換	φ 45cm	40cm	変水位法
		φ 45cm	40cm	水置換			



写真－13 透水試験全景

表－7 試験数量

試験項目	試験ケース	規格	数量
密度および含水比試験	CASE 1	標準型 R I 法～L=20cm	10測点×6転圧ケース×3層＝180測点
	CASE 2	大型 R I 法～L=30cm	"＝180測点
	CASE 3 A	大型 R I 法～L=40cm ※含水比はL=30cm	"＝180測点
		標準型 R I 法～L=20cm	"＝180測点
	CASE 3 B	大型 R I 法～L=40cm ※含水比はL=30cm	"＝180測点
		標準型 R I 法～L=20cm	"＝180測点
	CASE 1	砂置換法～φ25cm×h20cm	8測点×1(最終転圧層)＝8測点
	CASE 2	砂置換法～φ35cm×h30cm	4測点×1(")＝4測点
	CASE 3 A	水置換法～φ45cm×h20cm	8測点×1(")＝8測点
		水置換法～φ45cm×h40cm	8測点×1(")＝8測点
	CASE 3 B	水置換法～φ45cm×h20cm	4測点×1(")＝4測点
		水置換法～φ45cm×h40cm	4測点×1(")＝4測点
表面沈下量	CASE 1	レベル測量～標点プレート	10測点×6転圧ケース×3層＝180測点
	CASE 2	"	"＝180測点
	CASE 3 A	"	"＝180測点
	CASE 3 B	"	"＝180測点
透水試験	CASE 1	変水位法～砂置換孔を利用	8測点×1(最終転圧層)＝8測点
	CASE 2	"	4測点×1(")＝4測点
	CASE 3 A	変水位法～水置換孔を利用	8測点×1(")＝8測点
	CASE 3 B	"	4測点×1(")＝4測点
粒度試験	CASE 1	置換孔材料	8測点×1(最終転圧層)＝8測点
	CASE 2	"	4測点×1(")＝4測点
	CASE 3 A	"	8測点×3(注1)＝24測点
	CASE 3 B	"	4測点×3(注1)＝12測点

- ・ R I 法による測定は1測点あたり4方向測定する。
- ・ L は測定深さを表す。
- ・ CASE1では通常の試験に加え、サイドレーンを利用しほぐした状態での転圧試験も実施した。
- ・ CASE 2、3Aの最終転圧層の転圧回数N＝2回までは起振力17tonで転圧し、それ以降は、片方のレーンにおいて起振力を23tonに変えた試験を行っている。
- ・ (注1) 最終転圧層の全層、上半層、下半層の3ケース

4. 転圧回数と締固め度の関係

4.1 試験値のばらつき

フィルダム材料の場合、一般的には密度のばらつきは含水比の違い、粒度の違いに影響されるといわれている。そこで、密度、含水比、粒度のばらつきについて検討してみる。

4.1.1 密度のばらつき

図-11は各ケース毎の転圧回数 $N=0, 2, 4, 6, 10, 14$ 回における全測点の乾燥密度を度数分布で示したものである。測定数は30測点（試験層の3層分に相当し、1層当たり10測点）および25測点（CASE 2、3Aの最終転圧層の $N=2$ 回以降はレーンの片側において起振力を変えた試験を行ったため）で、図中には乾燥密度の平均値 μ および標準偏差 σ を記している。なお、一点当たりの測定値はRI密度計による4方向の測定値の平均値である。図-11からわかるように各転圧回数とも測定値はばらついているが、まき出し直後の標準偏差は大きく、転圧が進むにつれて標準偏差は小さくなり、均質に締め固められていく傾向を示している。また、図-12は各ケースの最終転圧層である3層目における転圧回数と乾燥密度の関係を示したものである。ここで、全層とは1転圧層($H=40\text{cm}$)全体をいい、表層とは1転圧層の上半層($H=20\text{cm}$)をいう。この図からも、転圧回数の増加に伴い密度のばらつきは小さくなり転圧効果（転圧回数と密度増加の関係）が現れていることがわかる。

4.1.2 含水比のばらつき

図-13は図-11の密度を測定したときの含水比の値を度数分布で示したものである。含水比は平均値 $\pm 2\%$ の範囲内にばらついており、この変動が締固め密度のばらつきをもたらす一因となっていると考えられる。また、図-14は各ケースの最終転圧層である3層目における転圧回数と含水比の関係を示したものである。密度の場合とは異なり、転圧回数の増加に伴い含水比が変化したり含水比のばらつきが減少するというわけではない。

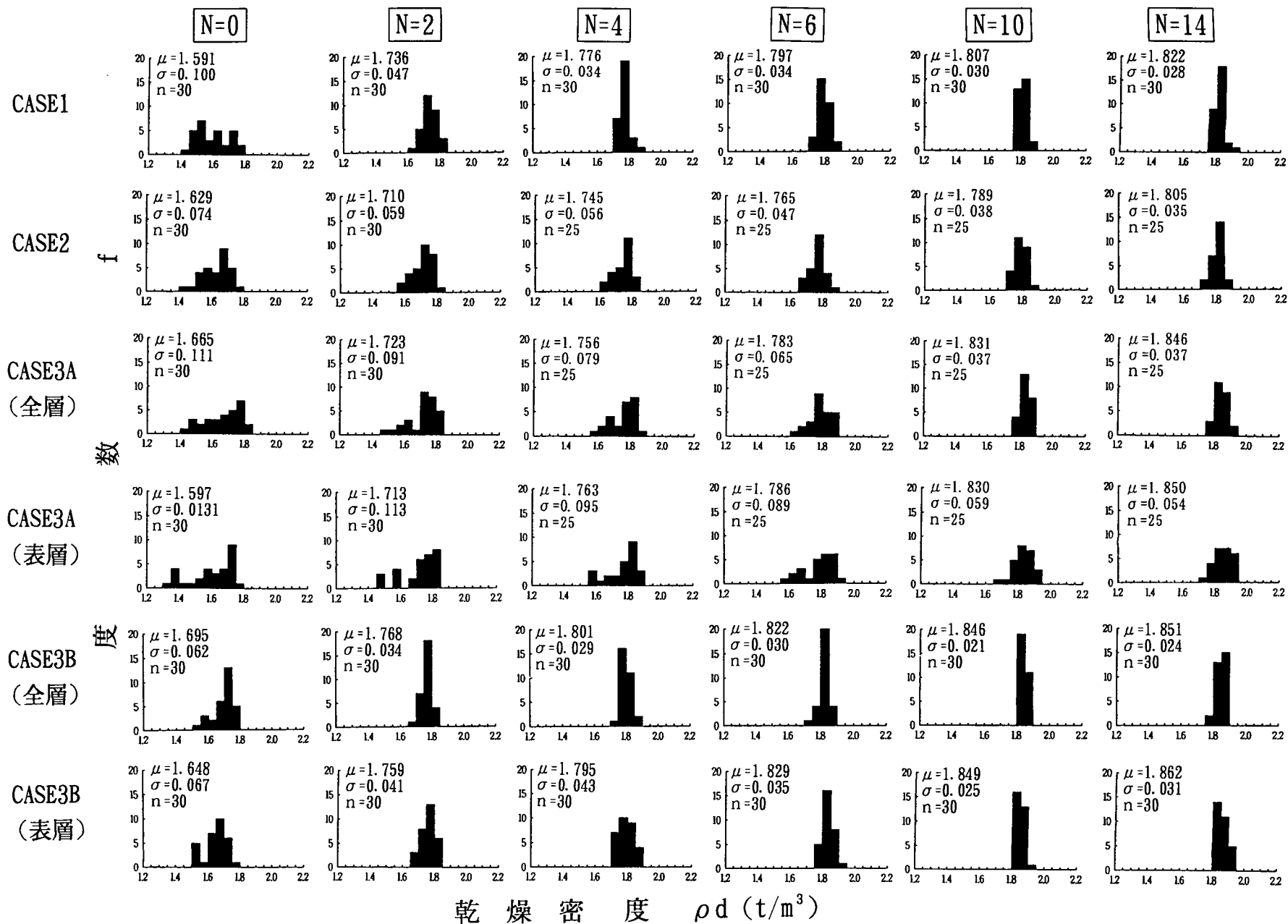


図-11 試験値のばらつき (乾燥密度)

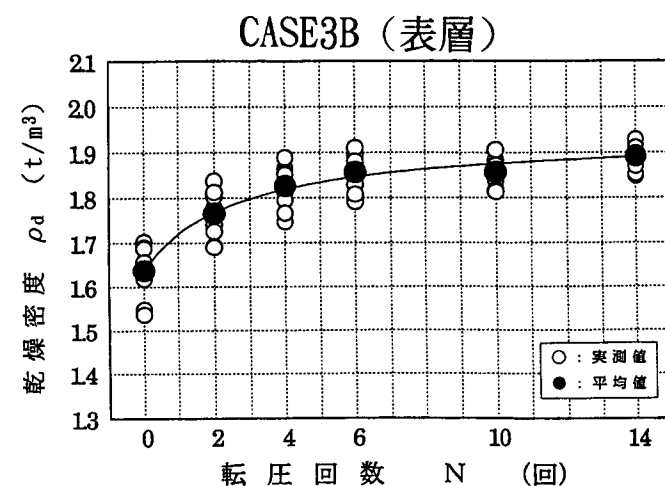
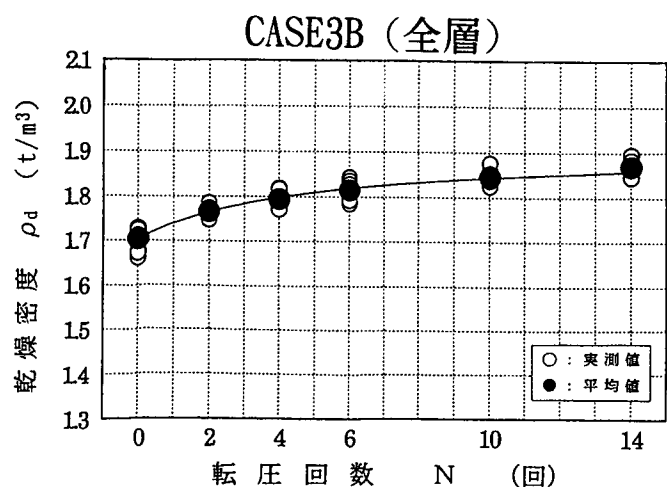
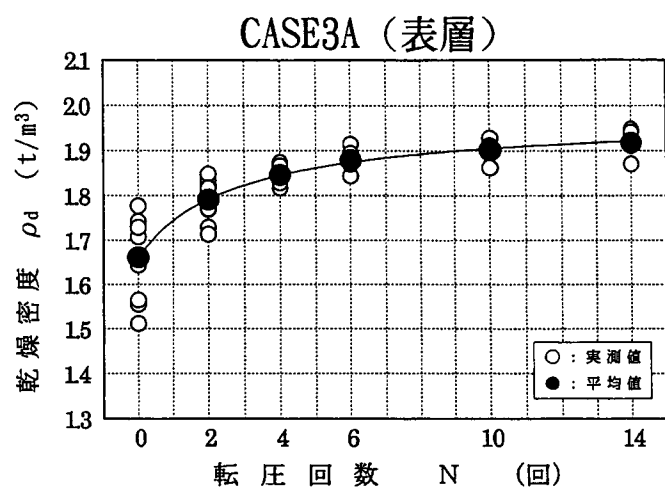
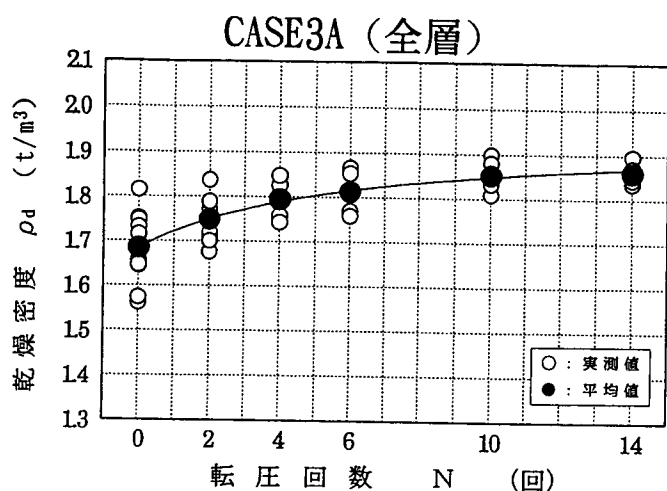
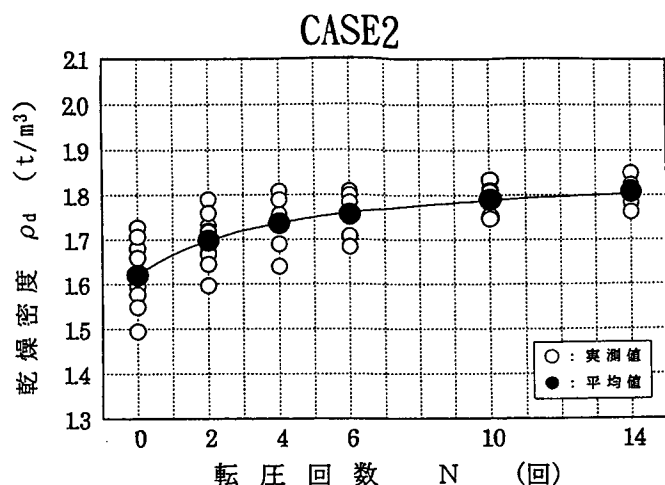
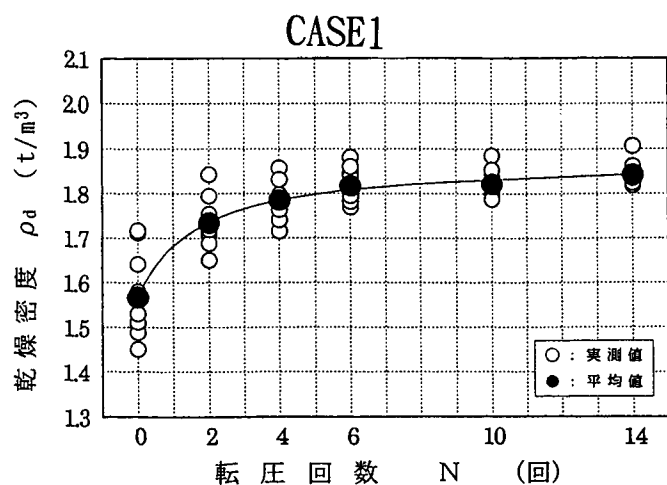


図-12 転圧回数と乾燥密度の関係 (最終転圧層)

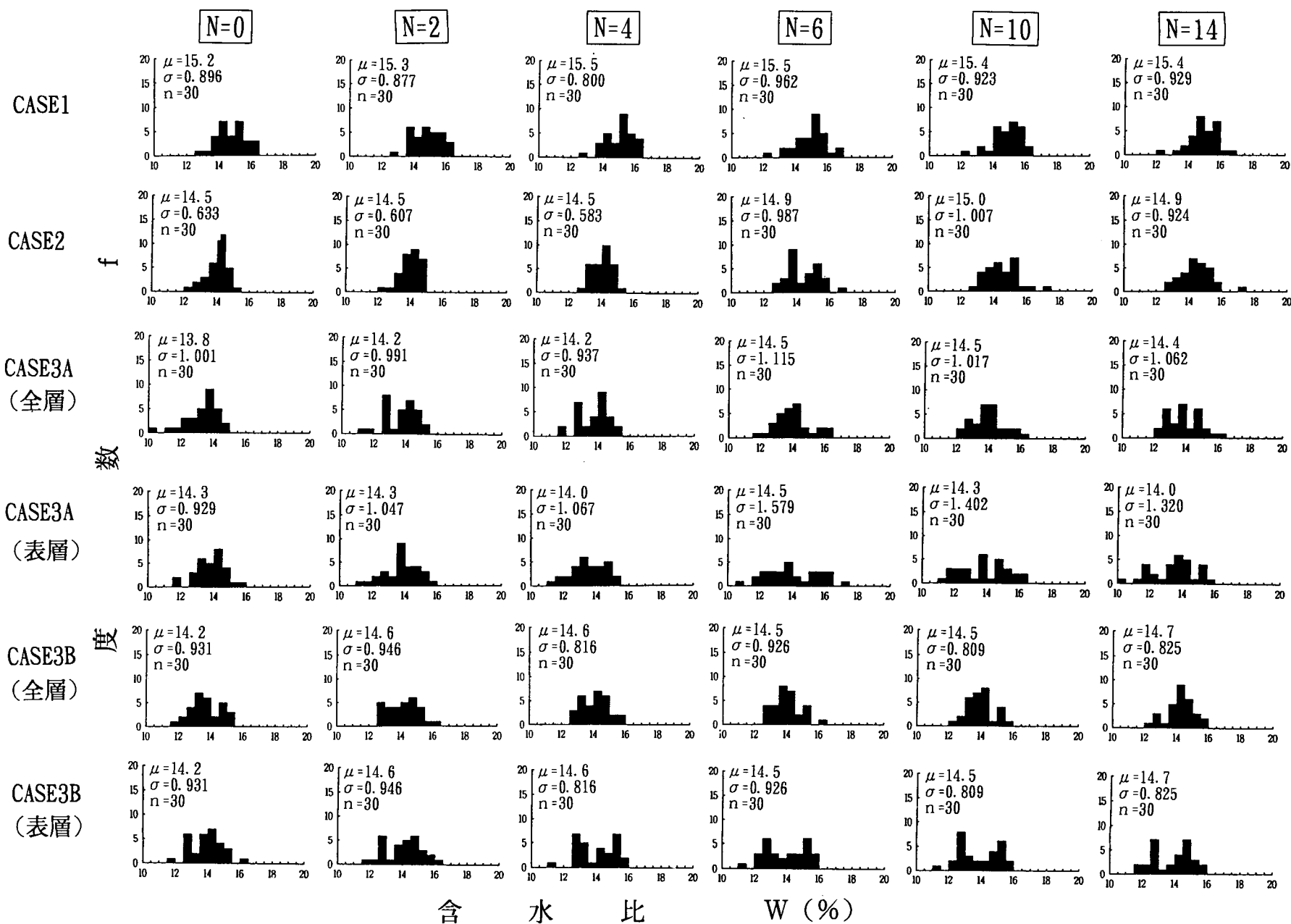


図-13 試験値のばらつき (含水比)

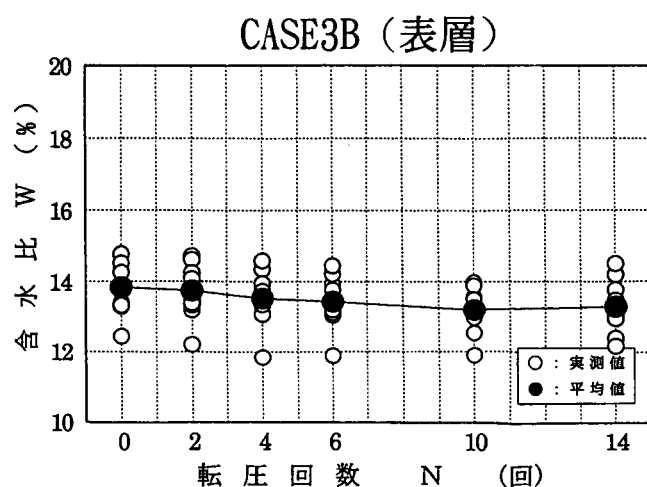
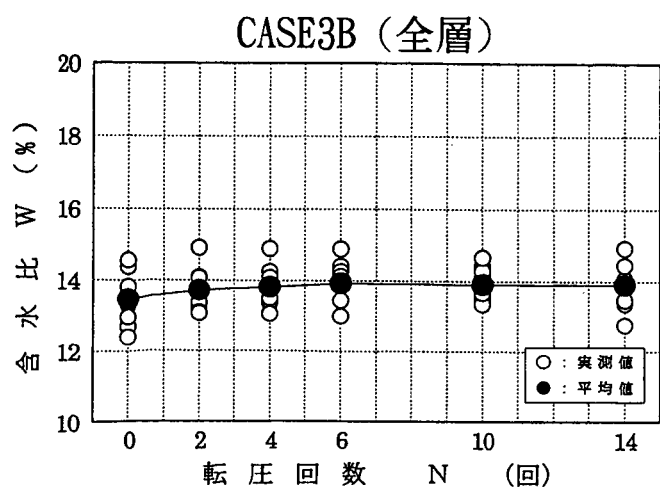
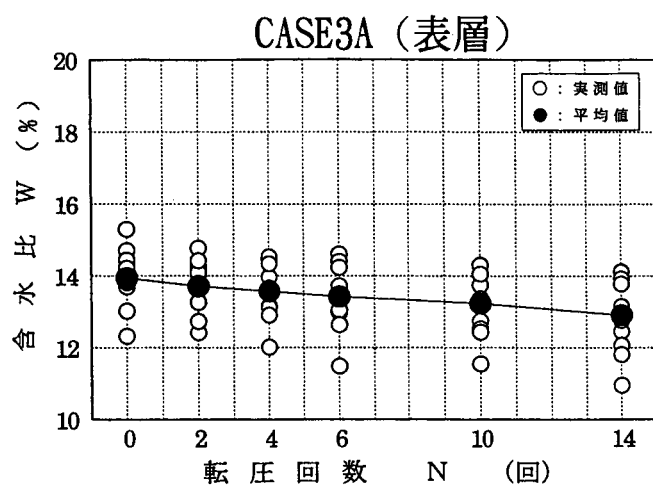
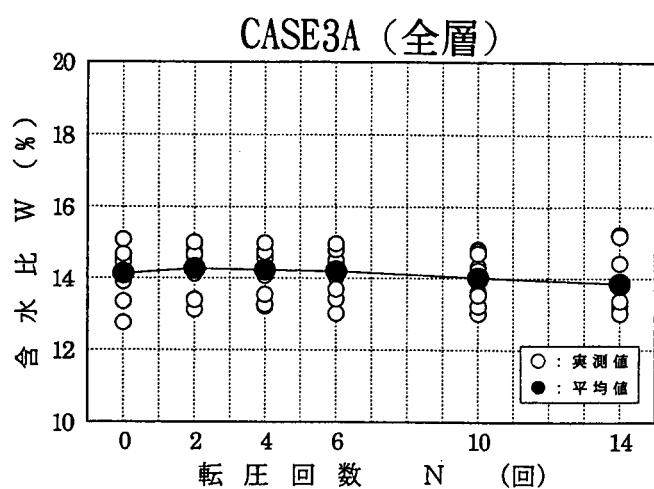
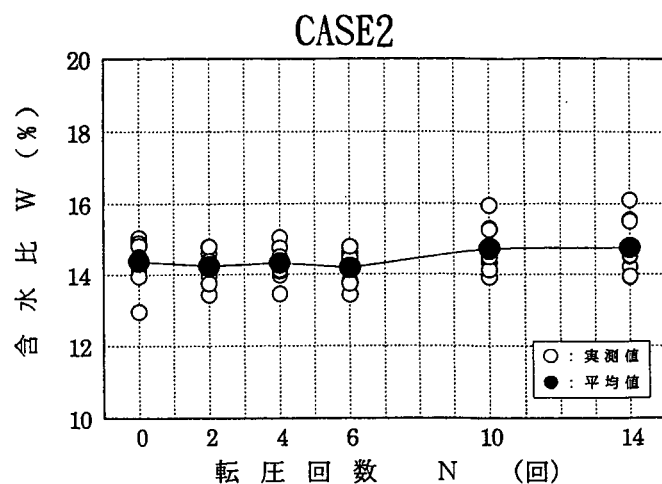
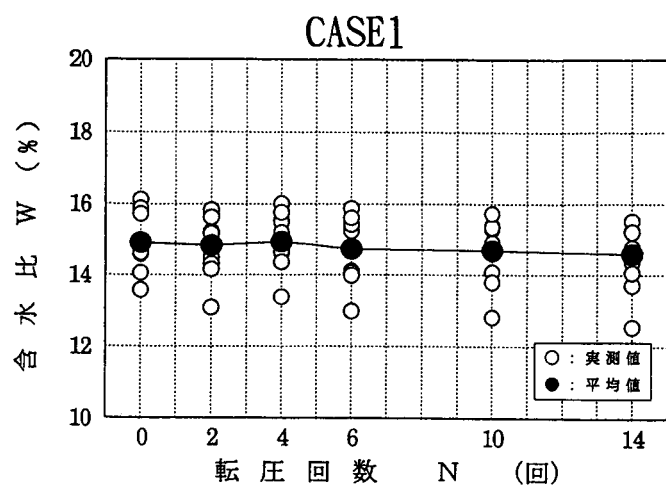


図-14 転圧回数と含水比の関係 (最終転圧層)

4.1.3 粒度分布のばらつき

図-15はCASE 1～3Bの粒度分布を比較したものである。粒度分布は最終転圧層の転圧終了後の置換法による密度試験を行った置換孔から採取したものである。当然のことながら粒度分布は全く同じにならずある範囲を持っている。今回のR I密度の測定容積を単位とした場合には、各測点におけるこの程度の粒度のばらつきは無視できず、粒度のばらつきは締固め密度のばらつきに影響を与えると考えられる。

以上のように、含水比のばらつき、粒度のばらつきが密度のばらつきに影響していると推察できるが、定量的な把握は今のところできない。

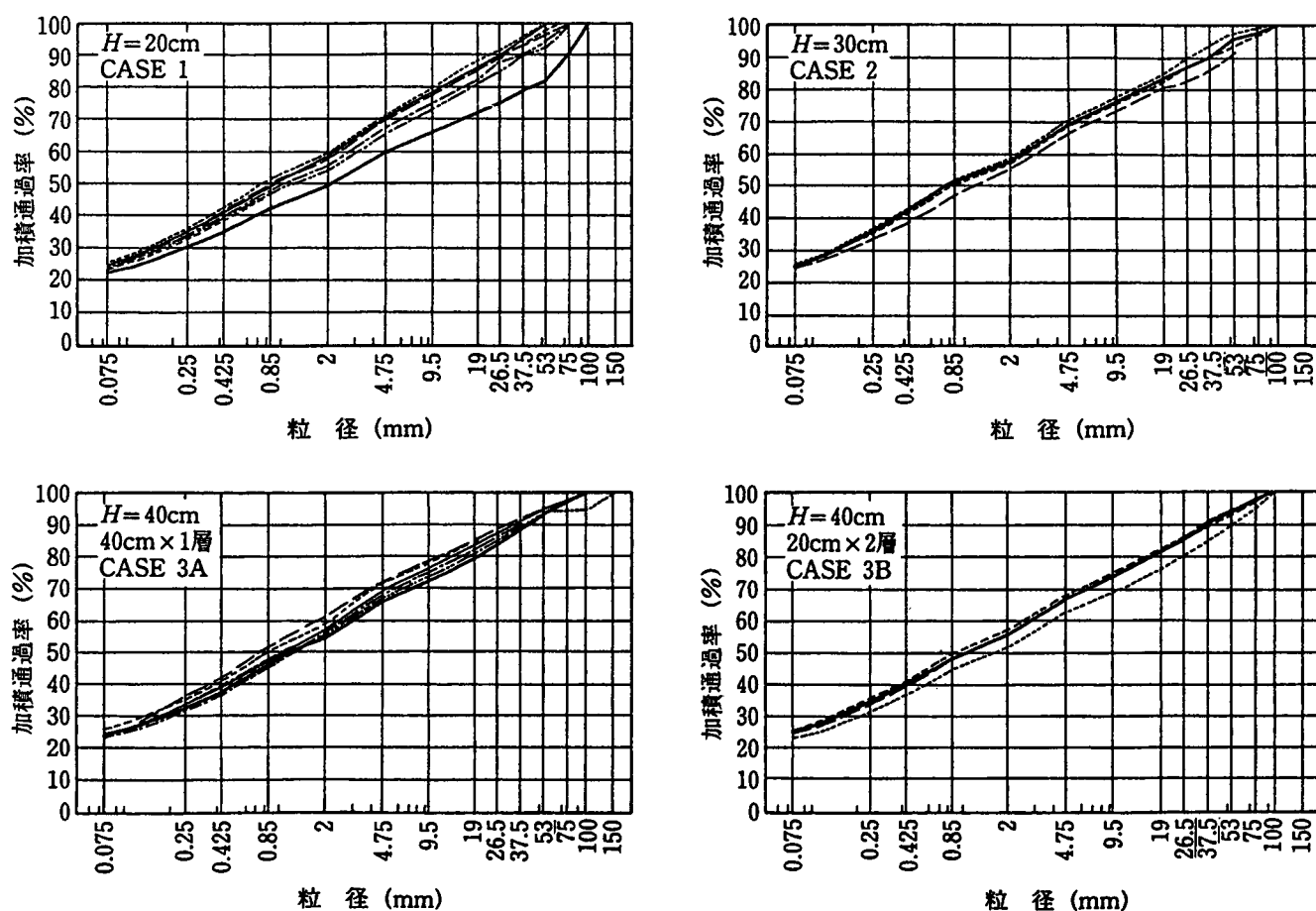


図-15 粒度分布曲線のばらつき (最終転圧終了後)

4.2 転圧回数と密度の関係

図-16は各試験ケースについて各試験層の転圧回数と密度の関係を示したものである。各試験層における各転圧回数毎のプロットは10測点の平均値である。ただし、1測点は4方向の測定を行って求めたものである。図中の実線は次に示す双曲線近似式で転圧効果を表したものである。表-8に各試験ケースの各転圧回数における密度を平均し双曲線近似したときに得られる回帰係数と相関係数を示す。いずれの場合においても回帰性は良好であり、相関係数は0.99以上の値を得た。

$$\rho_{dN} = \rho_o + \frac{N}{a + b \cdot N}$$

N：転圧回数、 ρ_o ：初期乾燥密度、 ρ_{dN} ：N回の転圧後の乾燥密度、a、b：回帰係数

表-8 各ケース毎の回帰係数と相関係数

		a	b	r^2
CASE 1		3.3467	5.0210	0.99417
CASE 2		4.7325	15.2888	0.99847
CASE3A	全 層	3.6639	27.4116	0.99489
	表 層	3.2986	10.6767	0.99501
CASE3B	全 層	4.9967	17.5783	0.99897
	表 層	3.9759	10.1653	0.99057

図-16より次のことがいえる。

(イ)各ケースとも ρ_{dN} は転圧回数Nが増すごとに滑らかに上昇しており、 ρ_{dN} とNの関係は双曲線近似で表すことができる。ここでは双曲線近似したものを転圧効果曲線と呼ぶことにする。

(ロ)CASE2では試験層間の初期密度にほとんど差がなく、3本の転圧効果曲線も結果的にほぼ一致しており再現性がよい。これは各層間の材料や初期状態のばらつきが小さかったことを示している。

(ハ)CASE3Bでは初期密度には差があったが、転圧がすすむにつれて3本の曲線の差が小さくなっていることから、材料のばらつきはほとんどなかったものと推察される。他方、CASE3A（全層、表層）ではN=14回転圧後においても若干、層間に密度差が認められることから初期密度の差のほかに粒度に少し差があったものと考えられる。

以上、述べたように盛立試験ではいろいろな原因によって試験結果にばらつきが出るため、何回かのくり返しを行って試験値を評価することが必要であることを示している。

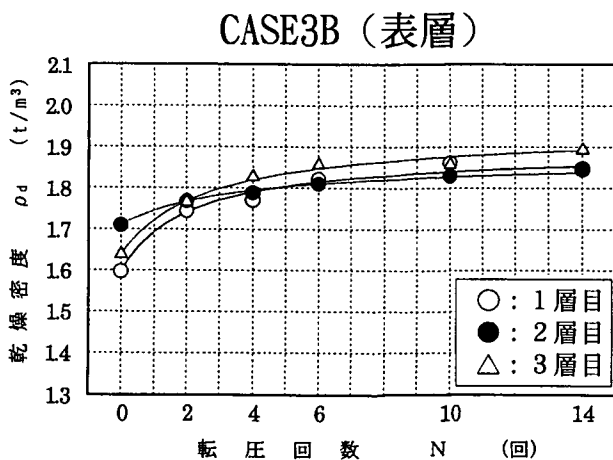
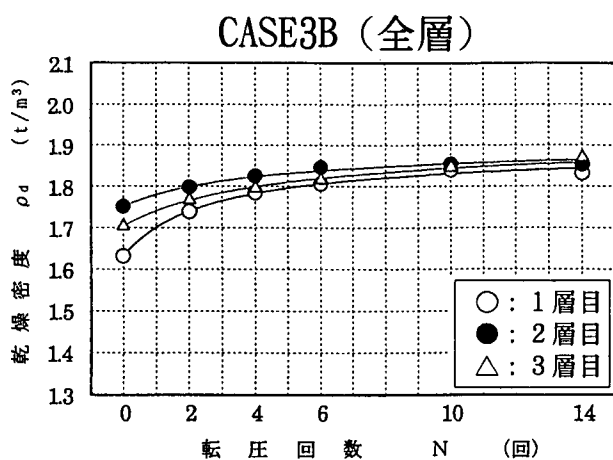
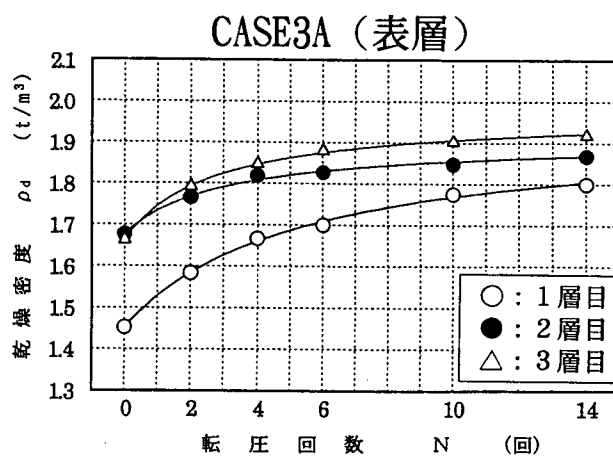
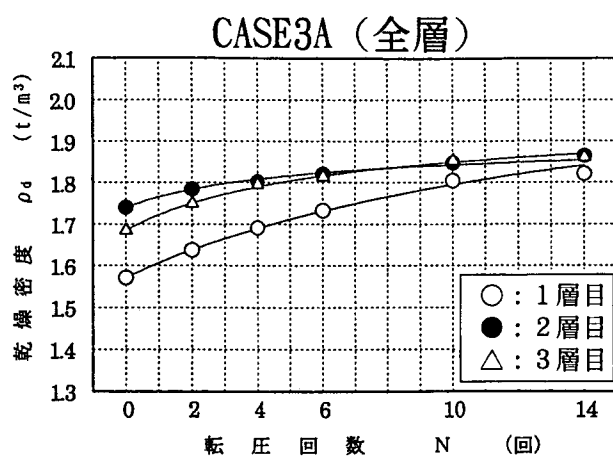
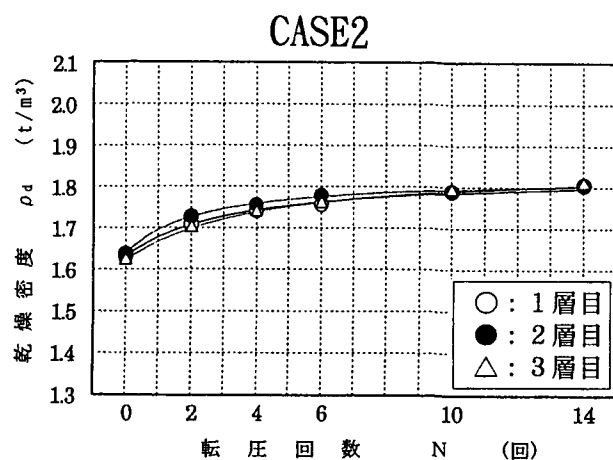
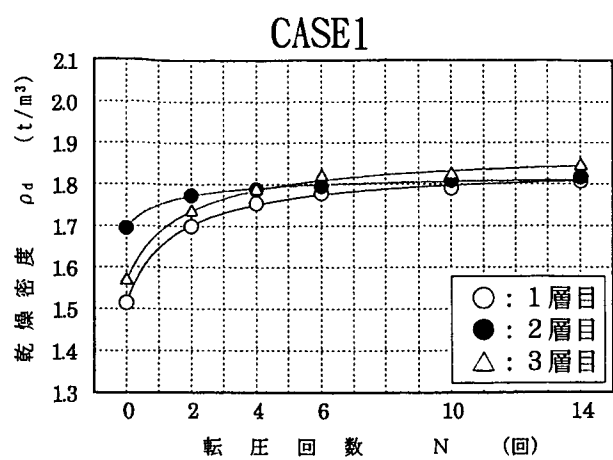


図-16 各層毎の転圧回数と乾燥密度の関係

4.3 ブルドーザの敷均しの時の影響と振動ローラの起振力の違いによる影響

4.3.1 ブルドーザによる敷均し時の影響

図-17にほぐし状態（ブルドーザによる転圧効果を排除するために敷均し後、バックホーでほぐした状態）での試験と通常（ブルドーザによる敷均しを行った状態）の試験の転圧効果曲線を示す。試験はCASE1（ $H=20\text{cm}$ ）のサイドレーンにおいて行った（写真-14）。ほぐし状態より転圧を実施しても転圧が進むにつれ初期状態での差は次第に減少していき、 $N=6$ 回以降においてほぼ同等の密度になっている。しかし、今回行った試験は転圧厚さ 20cm に対してのみであったため、転圧厚さが厚くなった場合については別途確認する必要がある。

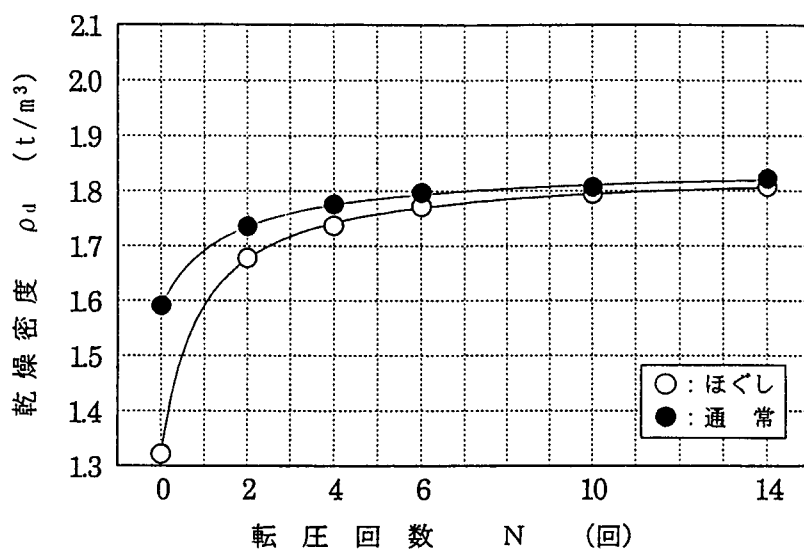


図-17 転圧効果曲線（ケース1：ブル転圧の影響）



写真-14 サイドレーンほぐし状況（CASE1）

4.3.2 起振力の違いによる影響

図-18は振動ローラの起振力が17tonと23tonの場合の転圧効果を比較するために行った試験結果である。試験はCASE2（ $H=30\text{cm}$ ）とCASE3A（ $H=40\text{cm}$ ）の最終転圧層を起振力17tonで2回転圧した後、2つの転圧レーンを各起振力に分けて行った。図は $N=2$ 回からの密度増分と転圧回数との関係を示したものである。CASE3A（表層）での密度増分の差は、転圧が進につれて小さくなる。CASE2、CASE3A（全層）では、転圧が進んでも密度増分の差は変わらず今回の実験においては顕著な差が見られなかった。

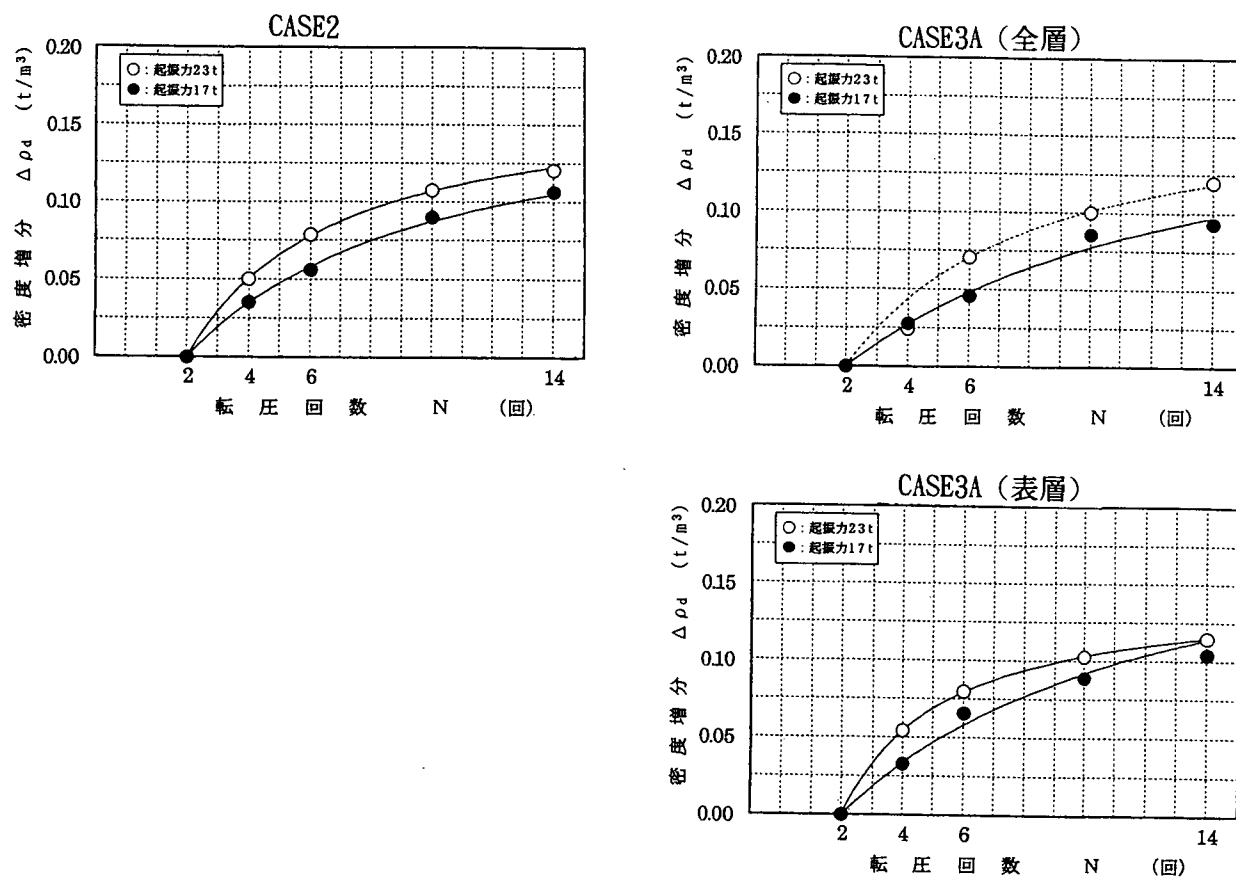


図-18 起振力の違いによる転圧効果の比較

4.4 転圧回数と沈下率の関係

各試験ケースにおける転圧回数と沈下量、沈下率との関係を図-19に示す。ここで沈下量とは、各試験層の転圧回数毎の沈下量の平均値であり、沈下率は沈下量の平均値を初期のまき出し厚さの平均値で除した値である。

沈下量は、転圧層の厚さが厚いものほど大きく、沈下率は、薄層転圧の方が転圧効果は大きいという結果が得られた。転圧厚さ40cmに関する比較では、まき出し方法の違いが転圧効果に与える影響は少なかった。

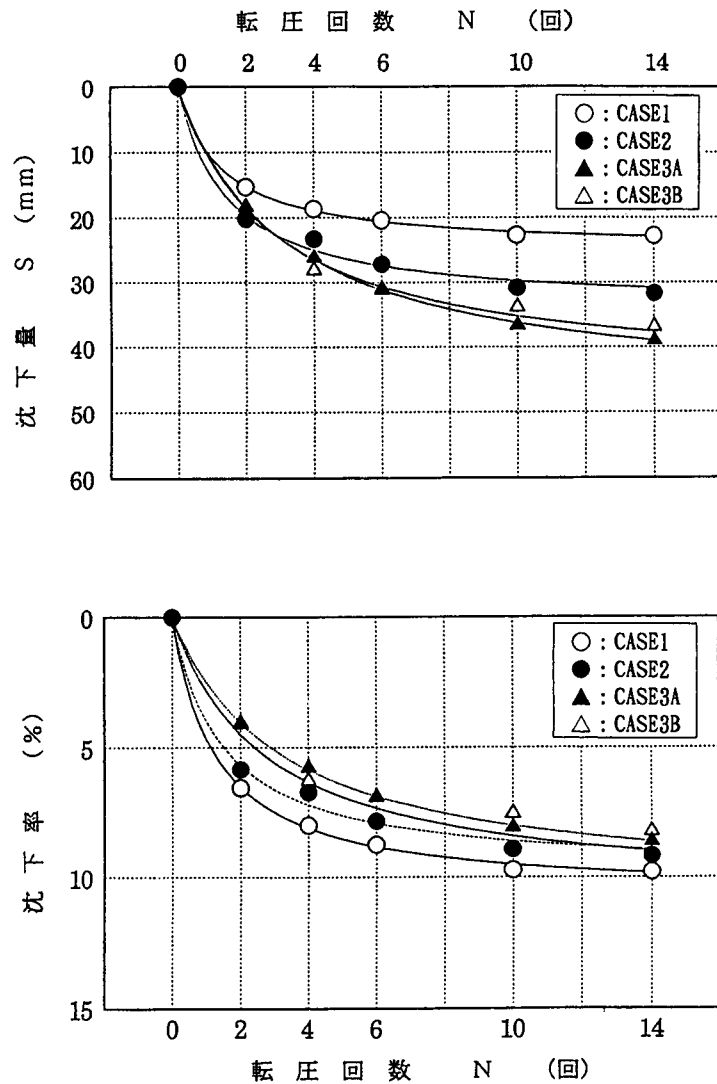


図-19 転圧回数と沈下量および沈下率との関係 (3層平均)

表－9に実測沈下率と推定沈下率を表す。表中の湿潤密度、層厚、沈下量は各試験層の平均値であり、実測沈下率は各ケースで測定された30測点（1転圧ケースあたり10測点を3層分）の沈下率の平均値である。また、推定沈下率はR I密度計で求めた湿潤密度増分から横方向に変位しないという一次元圧縮を仮定して、湿潤密度の関係より算出したものであり、その仮定の式を以下に示す。

$$\frac{H_0 - H}{H_0} = \frac{\rho_{t0} - \rho_t}{\rho_t} \quad \left\{ \begin{array}{l} H_0, \rho_{t0} : \text{初期の層厚および湿潤密度} \\ H, \rho_t : \text{転圧後の層厚および湿潤密度} \end{array} \right.$$

表－9 沈下率と推定沈下率

試験 ケース	転 圧 回 数 (回)	湿 潤 密 度 $\rho_t(t/m^3)$	層 厚 (cm)	沈下量 S (cm)	実 測 沈下率 (%)	推 定 沈下率 (%)
CASE 1	0	1.834	23.3	—	—	—
	2	2.001	21.8	1.5	6.5	8.3
	4	2.051	21.4	1.9	8.0	10.6
	6	2.074	21.3	2.0	8.7	11.6
	10	2.084	21.0	2.3	9.7	12.0
	14	2.102	21.0	2.3	9.8	12.7
CASE 2	0	1.866	34.6	—	—	—
	2	1.958	32.6	2.0	5.8	4.7
	4	1.997	32.3	2.3	6.7	6.6
	6	2.030	31.9	2.7	7.8	8.1
	10	2.057	31.5	3.1	8.9	9.3
	14	2.075	31.4	3.2	9.1	10.1
CASE3A	0	1.894	45.3	—	—	—
	2	1.968	43.5	1.8	4.0	3.8
	4	2.004	42.7	2.6	5.8	5.5
	6	2.042	42.2	3.1	6.9	7.2
	10	2.096	41.6	3.7	8.1	9.6
	14	2.112	41.4	3.9	8.6	10.3
CASE3B	0	1.935	44.8	—	—	—
	2	2.026	43.0	1.8	4.1	4.5
	4	2.064	42.0	2.8	6.3	6.3
	6	2.087	41.7	3.1	6.9	7.3
	10	2.116	41.4	3.4	7.5	8.6
	14	2.124	41.1	3.7	8.2	8.9

図－20は沈下率の実測値と推定値を比較したものである。各ケースとも転圧回数が増えるに伴い沈下率は増加するが、転圧回数6回以上の増加率は少ない。実測値と推定値においてCASE 1（H＝20 cm）では両者の差が目立つが、その他のケースでは比較的良好に整合していると考えられる。すなわち、沈下はほぼ一次元の圧縮状態となっており、このときには沈下率からも各ケース間の締固め度の評価の推定がある程度可能であるといえる。なお、まき出し厚さ20cmにおいて一次元圧縮にならなかった原因については不明である。

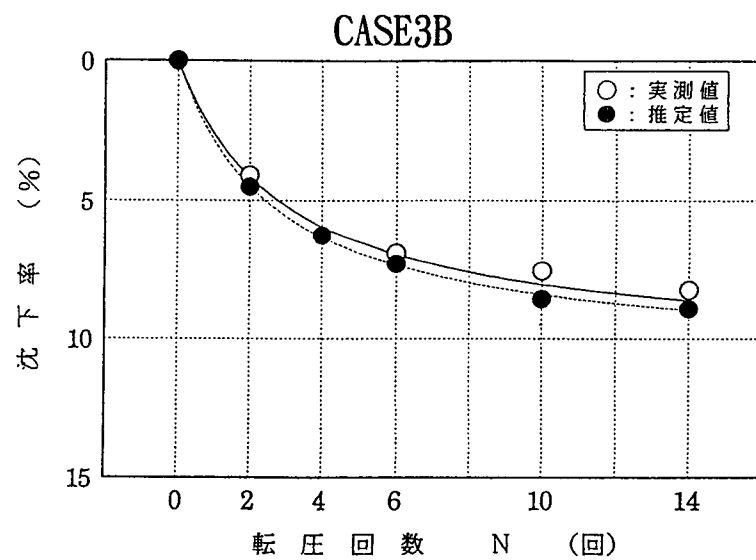
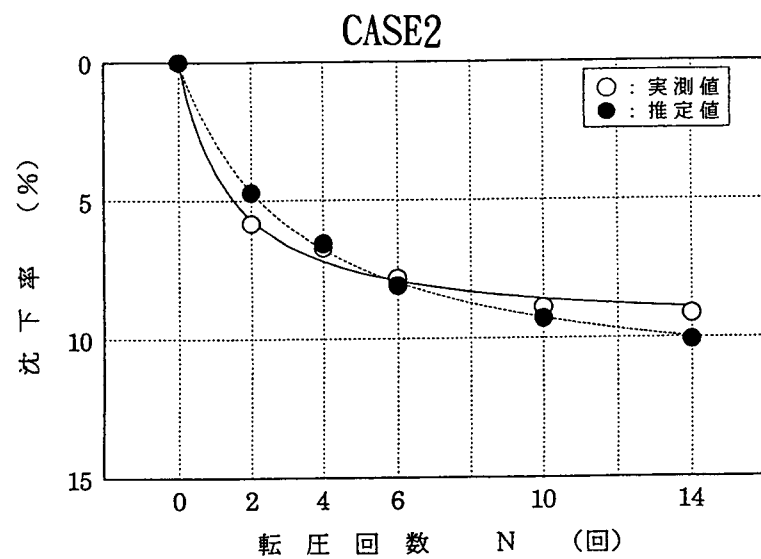
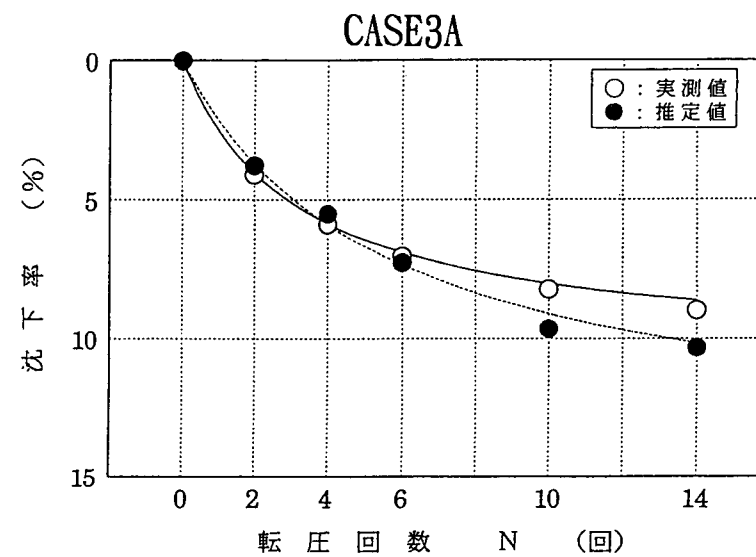
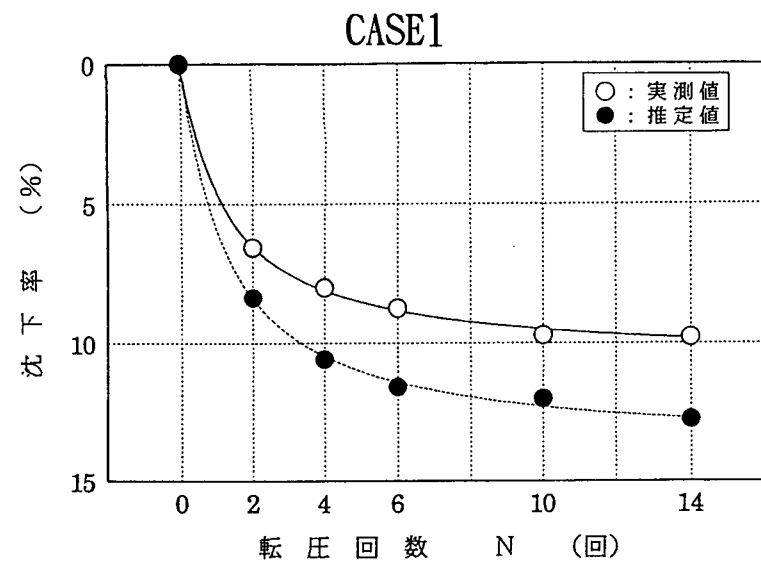


図-20 転圧回数と沈下率の関係 (3層平均)

5. 転圧厚さとまき出し方法の違いによる締固め密度と透水係数

5.1 転圧厚さの比較

5.1.1 締固め密度

表-10にR I法による密度、含水比の測定結果を示す。測定値は全試験層の平均値である。図-21に転圧厚さを20cm、30cm、40cmと変えたときの転圧回数と乾燥密度の関係を示す。ここで示した乾燥密度は図-16に示した試験3層の平均値である。すなわち1プロット値は30測点または25測点の平均値である。まき出し時の密度が異なっており(1.6~1.7t/m³の範囲にある)、単純な比較ができないが、2回以上の転圧を与えると密度は転圧厚さにかかわらず0.05t/m³の幅の中に収まっている。また、転圧効果曲線も極めて類似している。1層まき出しの6回転圧時の密度を比較すると転圧厚さH=20cm、40cm、30cmの順で小さくなっている。14回転圧時ではH=40cm、20cm、30cmの順で小さくなっており、転圧厚さが薄いほど常に密度が大きいという関係は認められなかった。また、転圧厚40cmの表層部に関しても全層と同様な傾向を示している。

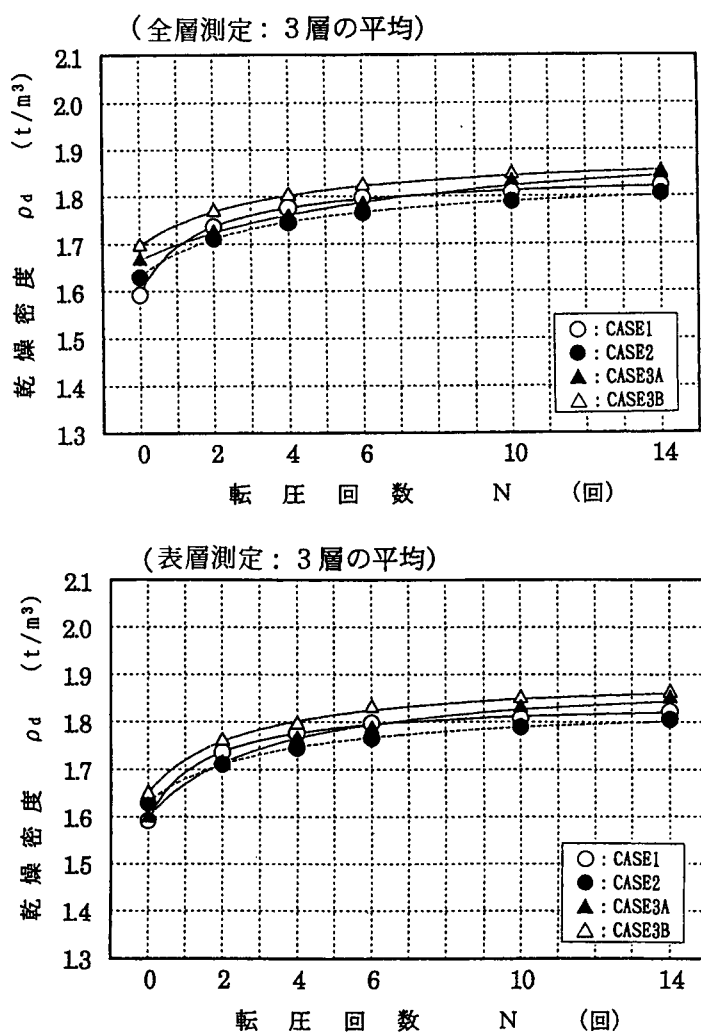


図-21 各ケース毎の転圧回数と乾燥密度の関係

表-10 R I 法による密度・含水比（全層の平均値）

試験条件		転 圧 回 数 N (回)					
		0	2	4	6	10	14
CASE 1	ρ_t	1.834	2.001	2.051	2.074	2.084	2.102
	ρ_d	1.591	1.736	1.776	1.797	1.807	1.822
	w	15.2	15.3	15.5	15.5	15.4	15.4
CASE 2	ρ_t	1.866	1.958	1.997	2.030	2.057	2.075
	ρ_d	1.629	1.710	1.745	1.765	1.789	1.809
	w	14.5	14.5	14.5	15.0	15.1	14.9
CASE3A (全層厚)	ρ_t	1.894	1.968	2.004	2.042	2.096	2.112
	ρ_d	1.665	1.723	1.756	1.783	1.831	1.846
	w	13.8	14.2	14.1	14.5	14.5	14.4
CASE3A (表層部)	ρ_t	1.824	1.957	2.010	2.045	2.093	2.110
	ρ_d	1.597	1.713	1.763	1.786	1.830	1.850
	w	14.3	14.3	14.0	14.6	14.4	14.0
CASE3B (全層厚)	ρ_t	1.935	2.026	2.064	2.087	2.116	2.124
	ρ_d	1.695	1.768	1.801	1.822	1.845	1.851
	w	14.2	14.6	14.6	14.5	14.7	14.7
CASE3B (表層部)	ρ_t	1.886	2.015	2.055	2.093	2.114	2.128
	ρ_d	1.648	1.759	1.795	1.829	1.849	1.862
	w	14.5	14.6	14.5	14.4	14.4	14.4

ρ_t : 湿潤密度 (t/m³)

ρ_d : 乾燥密度 (t/m³)

w : 含水比 (%)

表-11に各転圧回数における乾燥密度の一覧を示す。平均値とは全試験層の平均である。締固め密度がほぼ収束している転圧回数 $N=6$ 回、 $N=10$ 回で試験値の最大値、最小値、平均値、平均値 $\pm$ 標準偏差値を転圧厚さ毎に比較したものを図-22に示す。図中には1ECの乾燥密度である $\gamma_d=1.747\text{t/m}^3$ の大きさを記載している。

$N=6$ 回において密度の最大値は転圧厚さが40cmの場合でも $H=20\text{cm}$ とほぼ同等の密度を示すが、密度の最小値に着目すれば、転圧厚さが厚くなるにつれて密度は小さくなる。ただし、同一の転圧厚さで($H=40\text{cm}$)2層まき出しの方法をとれば密度は最大値、最小値とも $H=20\text{cm}$ と同等の値を得る。 $N=10$ 回になると $H=40\text{cm}$ (一層まき出し)の密度の最小値も $H=20\text{cm}$ と同程度となり、転圧厚さの影響が少なくなる。 $H=30\text{cm}$ 、 $H=40\text{cm}$ とも D 値は95%を越えている。

以上、転圧厚さの影響について密度の平均値、最小値等の比較を行った結果によると、転圧厚さの違いによるこれらの差は比較的少なく、粒度や含水比のばらつきの影響が大きいと考えるのが自然である。

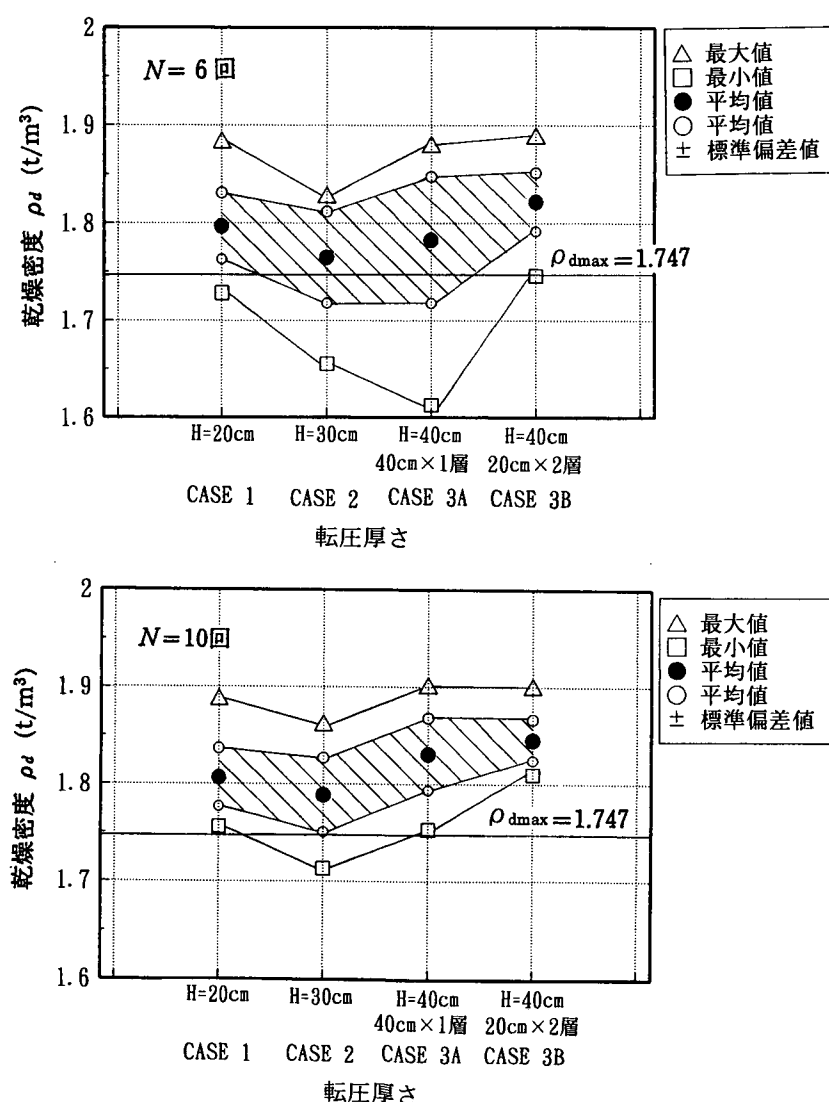


図-22 転圧厚さと乾燥密度のばらつきの比較

表-11 各転圧厚さの乾燥密度

(t/m³)

転 圧 回 数	C A S E	平 均 値	標準偏差	最 大 値	最 小 値
N = 0	CASE 1	1.591	0.100	1.767	1.408
	CASE 2	1.629	0.074	1.758	1.443
	CASE3A	1.665	0.111	1.820	1.425
	CASE3B	1.695	0.062	1.788	1.519
N = 2	CASE 1	1.736	0.047	1.843	1.648
	CASE 2	1.710	0.059	1.820	1.577
	CASE3A	1.723	0.091	1.845	1.493
	CASE3B	1.768	0.034	1.832	1.676
N = 4	CASE 1	1.776	0.034	1.858	1.714
	CASE 2	1.745	0.056	1.835	1.622
	CASE3A	1.756	0.079	1.868	1.572
	CASE3B	1.801	0.029	1.861	1.722
N = 6	CASE 1	1.797	0.034	1.882	1.728
	CASE 2	1.765	0.047	1.826	1.655
	CASE3A	1.783	0.065	1.878	1.613
	CASE3B	1.822	0.030	1.887	1.746
N = 10	CASE 1	1.807	0.030	1.886	1.756
	CASE 2	1.789	0.038	1.860	1.713
	CASE3A	1.831	0.037	1.899	1.753
	CASE3B	1.846	0.021	1.898	1.810
N = 14	CASE 1	1.822	0.028	1.907	1.778
	CASE 2	1.805	0.035	1.861	1.724
	CASE3A	1.846	0.037	1.904	1.762
	CASE3B	1.851	0.024	1.892	1.797

表-12には最終試験層の最終転圧回数におけるR I法と置換法による乾燥密度の比較を表す。
 図-23にR I法と置換法による乾燥密度の関係を示す。R I密度と置換法密度はほぼ一対一の相関がある。

転圧厚さの比較を置換法の値の最小値で比較した場合でも $H=20\text{cm}$ と $H=40\text{cm}$ の密度は 1.8t/m^3 以上ではほぼ同じ値を示していることより、転圧厚さの影響は少ないと考えられる。

表-12 R I法と置換法による乾燥密度 (t/m³)

CASE 1		CASE 2		CASE 3 A		CASE 3 B	
R I 法	置換法	R I 法	置換法	R I 法	置換法	R I 法	置換法
1.819	1.819	1.812	1.855	1.796	1.862	1.899	1.945
1.828	1.853	1.829	1.876	1.856	1.869	1.880	1.840
1.838	1.810	1.824	1.862	1.845	1.864	1.874	1.901
1.843	1.812	1.783	1.872	1.836	1.829	1.883	1.843
1.824	1.799			1.851	1.878	1.948	1.917
1.847	1.872			1.836	1.819	1.871	1.815
1.907	1.842			1.845	1.841	1.942	1.920
1.862	1.804			1.872	1.894	1.911	1.929

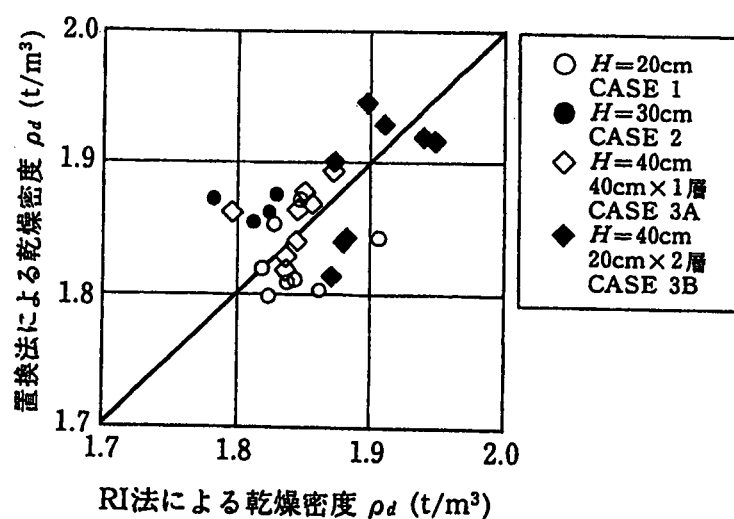


図-23 R I法と置換法の乾燥密度の関係

一方、転圧厚さを変えたときの沈下率を比較をしたものを図-24に示す。ここで示した沈下率は図-19に示した $N=6$ 、10回の値である。沈下率は、転圧厚さが厚くなるにつれて転圧回数の多少によらず小さくなる傾向を示している。また、 $H=30\text{cm}$ と $H=40\text{cm}$ での沈下率の差は少ない。なお、4.4で述べたように、 $H=20\text{cm}$ のケースについては沈下率と密度増分の関係が単純な一次元圧縮状態を示していないので、沈下率から転圧厚さの違いを比較することは難しいと考えられる。

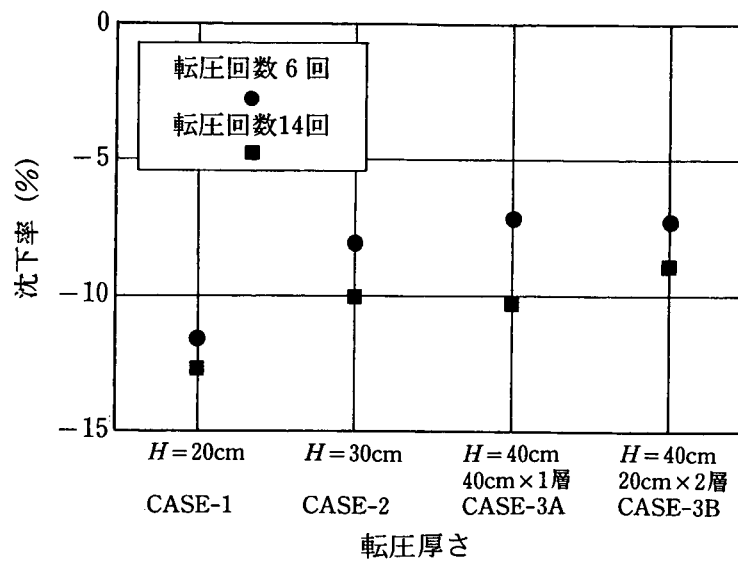


図-24 転圧厚さと沈下率の関係 (3層平均)

5.1.2 転圧厚さと透水係数

最終転圧層の最終転圧回数（N=14回）終了後に行った各ゾーンの置換孔を利用し、現場透水試験（変水位法）を行った結果を表-13に示す。透水試験は試験概要でも述べたように試験層の転圧厚さを対象としている。

図-25に転圧厚さと透水係数の関係を示す。各ケースの透水係数は平均値で 10^{-6} cm/sオーダーであり、平均値の透水係数はCASE3A、CASE1、CASE2、CASE3Bの順に小さくなっている。次に試験値のばらつきについて検討すると、転圧厚さ30cm（CASE2）と転圧厚さ40cm（CASE3A）が試験値のレンジが大きい。CASE3Aについては 1×10^{-5} cm/sを確保できない場合がある。また、CASE2、CASE3Aは最終転圧層で起振力を変えた試験を行っており、図-26に起振力の違いによる透水係数の関係を示す。この図より、今回の試験では起振力の違いが透水係数に与える影響は少ないという結果が得られた。

図-27に転圧完了時に置換法で得られた密度と透水係数の関係を示す。全データでみると乾燥密度が大きくなれば透水係数は小さくなる傾向を示している。ただし、転圧厚さ毎には乾燥密度と透水係数の相関はない。さらには同一密度においても試験値の幅（ $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/s）があり、透水係数は単に密度だけで評価できない側面を持っていると考えられる。

表-13 乾燥密度と透水係数の関係

CASE 1		CASE 2		CASE 3 A		CASE 3 B	
乾燥密度 $\rho d(t/m^3)$	透水係数 $k(cm/s)$	乾燥密度 $\rho d(t/m^3)$	透水係数 $k(cm/s)$	乾燥密度 $\rho d(t/m^3)$	透水係数 $k(cm/s)$	乾燥密度 $\rho d(t/m^3)$	透水係数 $k(cm/s)$
1.819	3.9×10^{-6}	1.855	* 1.5×10^{-6}	1.862	* 11.8×10^{-6}	1.900	2.8×10^{-6}
1.853	3.9×10^{-6}	1.876	* 3.0×10^{-6}	1.869	* 4.1×10^{-6}	1.852	2.4×10^{-6}
1.810	5.4×10^{-6}	1.862	3.7×10^{-6}	1.864	* 3.5×10^{-6}	1.910	2.8×10^{-6}
1.812	5.1×10^{-6}	1.872	3.1×10^{-6}	1.829	* 9.3×10^{-6}	1.876	3.1×10^{-6}
1.799	4.6×10^{-6}			1.878	8.6×10^{-6}		
1.872	4.4×10^{-6}			1.819	3.3×10^{-6}		
1.842	3.8×10^{-6}			1.841	4.6×10^{-6}		
1.804	5.9×10^{-6}			1.894	4.8×10^{-6}		

*は振動ローラの起振力23tを示し、それ以外は起振力17tである。

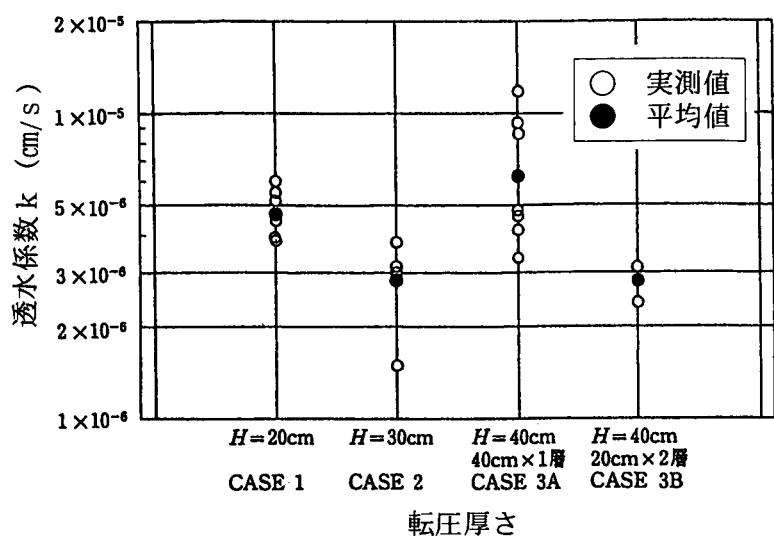


図-25 転圧厚さと透水係数の関係

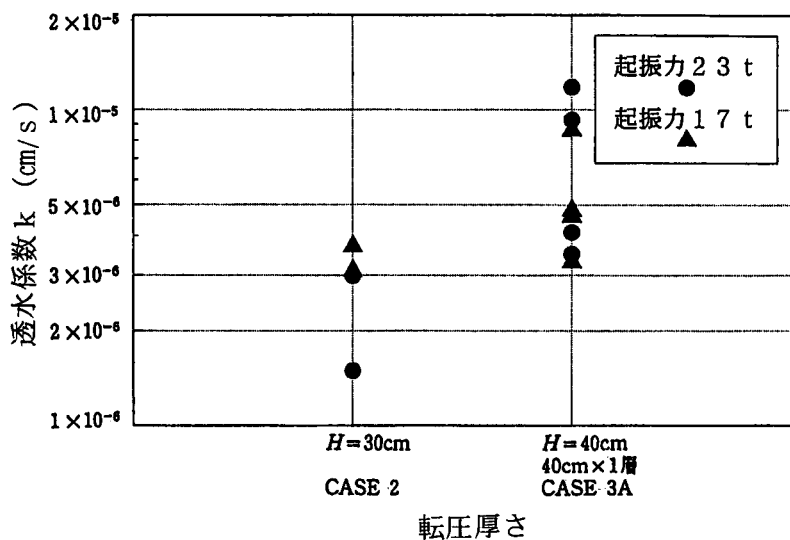


図-26 起振力の違いによる透水係数の関係

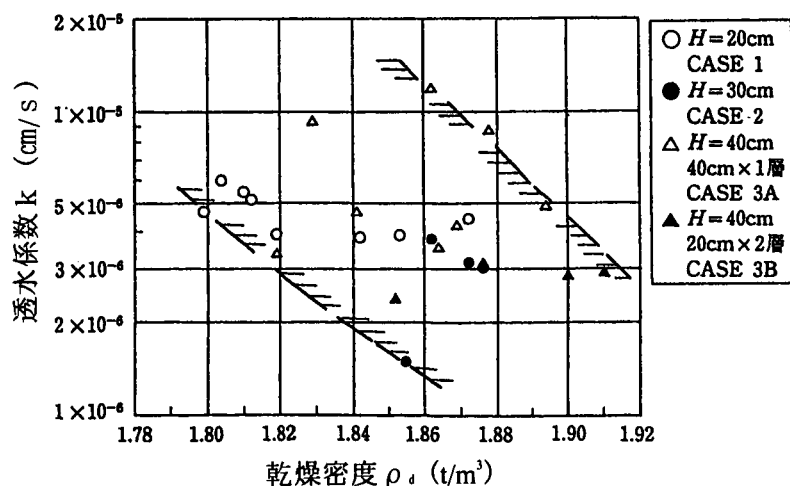


図-27 乾燥密度と透水係数の関係

5.2 まき出し方法の比較

転圧厚さを大きくとる場合、平均密度とともに転圧層内部の締固め効果の違い、すなわち、転圧層の下部まで十分な締固めができるかどうかを確認することが重要である。今回の試験ではすでに述べたように、 $H=40\text{cm}$ のCASE3AとCASE3Bの試験においては測定深さの異なるR I 計器を用いてすべての測点で上半層と下半層の密度を求めた。図-28に示した3層の平均値を用いた上半層と下半層の転圧効果曲線を比べれば、初期状態では、下半層の密度が上半層よりも大きかったが、 $N=2$ 回以降では、上半層と下半層の密度はほぼ同じ値を示し、締固め度が増すことにより転圧厚さ40cm程度では密度の差がなくなっている。

透水係数については、前述したように $H=40\text{cm}$ の一層まき出し (CASE3A) の方が2層まき出し (CASE3B) に比べて透水係数のばらつきが大きかった。

このように、転圧厚さ40cmの場合は、粒度のばらつきをできるだけ少なくして遮水性、均質性を高めるという立場から、2層まき出しの方が望ましいと考えられる。

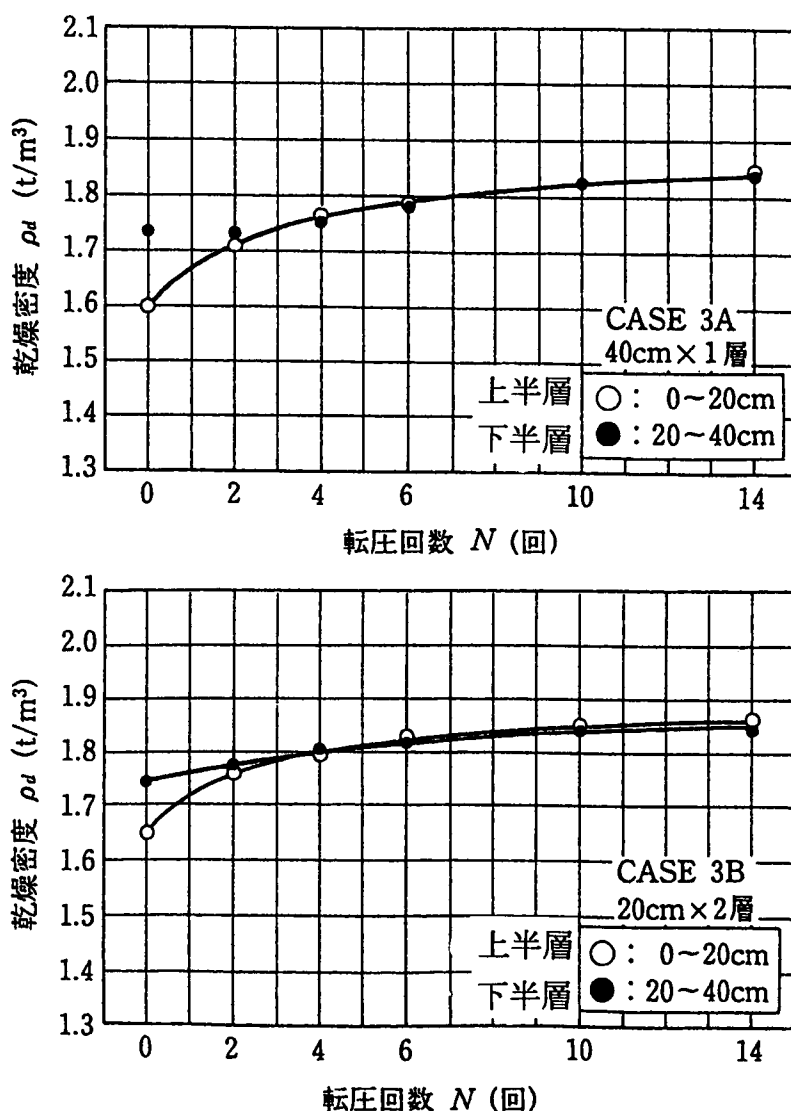


図-28 転圧回数と転圧厚さ層内の乾燥密度の関係

6. まとめ

転圧厚さおよびまき出し方法の影響に着目して、風化花崗岩にロームを混合したコア材料を振動ローラで締固めた盛立試験より得られた結論をまとめると次のとおりである。

(1) 転圧回数と乾燥密度の関係(転圧効果曲線)は双曲線近似が可能であり、試験値のばらつきは、転圧回数が増加するにつれて少なくなる傾向にある。試験値のばらつきには、粒度、含水比等の要因が影響していると考えられる。

(2) 転圧厚さの違いにおいて平均値を用いた転圧効果曲線で比較すると転圧効果曲線の形状はほぼ似ており、約 0.05t/m^3 の範囲内に収まっており顕著な差は認められない。また、いずれの転圧厚さでもD値は95%を越えている。

(3) 締固め密度が飽和状態に達した時の転圧回数 $N=6$ 回および10回において、40cmの1層転圧の $N=6$ 回が最低値となるが、転圧回数を増した $N=10$ 回では最低値とならず、転圧回数を多くすることによって転圧厚さの影響は少なくなる。

(4) ブルドーザによる敷均しや振動ローラ起振力の違いによる転圧効果は、十分な転圧を行えばほとんど影響しないという結果が得られた。

(5) 沈下率は薄層転圧($H=20\text{cm}$)の方が大きく、転圧効果は良好であるが、転圧厚 $H=20\text{cm}$ については沈下率と密度増分の関係が単純な一次元圧縮状態を示さないので、沈下率から転圧厚さの違いによる密度を推定することは難しい。

(6) $H=40\text{cm}$ の転圧層内の密度の違いは、十分な転圧を行えば転圧層内で上半層と下半層での密度差がなくなる。深さ方向に均質な締固めがなされることがわかった。

(7) 転圧厚さの違いによる透水係数 k は平均値でみるとその差は比較的少ないが、全試験値およびレンジで比較すると $H=40\text{cm}$ (一層まき出し)においてはレンジ幅が大きく、 $1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ より大きい値も認められる。また、同一密度でも透水係数は幅をもっており密度および透水係数の両方で評価する必要があることを示している。

(8) まき出し方法が2層まき出しの場合、1層まき出しと比べ密度および透水係数のばらつきが少なくなる。また、転圧厚さ $H=20\text{cm}$ と比べると密度および透水係数ともほぼ同等の値が得られる。

これまでの施工実績では、フィルダムのコアゾーンの最大転圧厚さは30cmである。今回の盛立試験の結果からみれば、材料に適した機種を選択し、まき出し方法を工夫すれば転圧厚さを厚くできる可能性を示した。もちろん、コア材料の性質によって、現場締固め特性も変わるので、個々の材料と締固め機種の組合せに対して盛立試験による確認を行うとともに、今後施工実績を積み上げていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 北海道開発局 旭川開発建設部：大雪ダム工事記録，S. 52. 12
- 2) 水資源開発公団 中部電力株式会社：岩屋ダム工事誌，S. 53. 3
- 3) 北海道開発局 石狩川開発建設部：漁川ダム工事記録，S. 56. 3
- 4) 建設省東北地方建設局 白川ダム工事事務所：白川ダム工事誌，S. 56. 11
- 5) 宮城県土木部 水資源開発課：七北田ダム工事誌，S. 60. 3
- 6) 北海道開発局 帯広開発建設部：十勝ダム工事誌，S. 62. 2
- 7) 静岡県土木部 河川課：奥野ダム工事誌，H. 2. 3
- 8) 建設省東北地方建設局 寒河江ダム工事事務所：寒河江ダム工事誌，H. 3. 3
- 9) 水資源開発公団 奈良俣ダム建設所：奈良俣ダム工事誌，H. 3. 3
- 10) 水資源開発公団 阿木川ダム建設所：阿木川ダム工事誌，H. 3. 3
- 11) 建設省東北地方建設局 七ヶ宿工事事務所：七ヶ宿ダム工事誌，H. 4. 3
- 12) 秋田県土木部河川課：山瀬ダム工事誌，H. 4. 3