

土 木 研 究 所 資 料

アースフィル材料の現場転圧試験

昭和61年8月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright ©1986 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承認を得ずしてこれを行ってはならない。

アースフィル材料の現場転圧試験

フィルダム研究室室長 松本 徳久
弘中 義昭*
小川 優**

要旨

長沼ダムは、宮城県により計画された堤高 15.3 m, 堤頂長 1,132 m, 堤体積 572,000 m³ の均一型アースフィルダムである。盛立材料は新第三紀以降の砂質土および粘性土で、密度のバラツキが大きく、含水比も粘性土で 50 %, 砂質土で 30 ~ 40 % と高い。このため宮城県では、転圧仕様を決定する目的で昭和60年10月転圧試験を実施した。

フィルダム研究では、転圧試験において変位測定を実施する機会を得たため、長沼ダムでの最適転圧機種や締固め管理方法の検討のため、また、変位率と密度増加率の関係および層状不均一性の把握を目的に各種試験を実施した。

その結果、土質別の転圧機種能力、1層内の密度分布についてデータが得られた。また、変位率と密度増加率の相関性については、振動ローラ以外の機種に関して問題を残した。

キーワード：現場転圧試験，密度，締固め管理，アースフィル材料

* 佐藤工業㈱（元 フィルダム研究室部外研究員）

** 現在、関東地方建設局宮ヶ瀬ダム工事事務所

目 次

1. まえがき	1
2. 試験目的	2
3. 試験概要	3
3.1 試験材料の諸性質	3
3.2 転圧試験パターン	6
3.3 転圧機械の仕様	7
3.4 試験ヤードと転圧方法	9
4. 測定方法	15
4.1 測定項目	15
4.2 測定位置	15
4.3 測定機器	15
4.4 測定方法	19
5. 試験結果	30
5.1 現場転圧試験結果	30
5.2 現場密度試験	58
5.3 現場透水試験	62
6. 考 察	63
6.1 他ダムにおける軟岩の築堤材料への使用例	63
6.2 転圧機種について	63
6.3 変位量による密度変化の推定	68
6.4 層内密度分布	71
7. 結 論	72
謝 辞	73
参考文献	74

1. ま え が き

長沼ダムは、宮城県北部迫川改修事業の一環として洪水調節を目的に計画された堤高 15.3 m、堤頂長 1,132 m、堤体積 572,000 m³の均一型アースフィルダムである。

ダムの盛立材料として予定されている長沼周辺の地山は、新第三紀以降の浮石質火山灰、砂質土、火山灰質粘性土および砂礫等が複雑に互層している。したがって、採取される盛立材料の密度は、バラツキが大きく、密度による締固め管理には困難が予想される。また、盛土材料の含水比は粘性土で 50 %、砂質土でも 30 ~ 40 % と高い。このため宮城県では、同材料を築堤材料として使用するにあたり、転圧仕様を決定する目的で、昭和59年度から粘性土の盛立試験を実施し、昭和60年度も砂質土を試験材料に加え転圧試験を計画した。

一方、建設省土木研究所フィルダム研究室においても昭和59年度に七ヶ宿ダム、辺野喜ダムの2現場で非接触型変位計によるコア材転圧時の変位計測を実施し、転圧時の深さ方向の締固め効果、変位量と密度増加率の関係、密度の層状不均一性および振動ローラとタンピングローラの比較等を調査した。その結果、振動ローラの転圧効果は、4層の転圧を行った場合、転圧層より下の層ではほとんどないことや、密度の層状不均一性の存在の可能性が確認されたが、変位量と密度の関係や層状不均一性存在の確証はいま一つ不明であった。

今回、長沼ダム転圧試験において変位測定を実施する機会を得たので、長沼ダムでの最適転圧機種や締固め管理方法の検討のため、また、あわせて前回不明であった変位率と密度増加率の関係および層状不均一性の把握を目的に各種試験を実施した。以下にこれら試験結果を報告する。

2. 試 験 目 的

本試験は長沼ダム堤体材料である砂質土および粘性土の転圧試験を行う際、非接触型変位計を転圧層に埋設し、転圧時の各層変位量を測定するとともに転圧前後の密度試験を実施し、次の3項目を明確にすることとした。

- (1) 砂質土および粘性土に対する最適転圧機種、転圧回数の決定。
- (2) 転圧にともなう変位量と密度の増加との関係を求め、この関係を締固め管理に適用可能であるか否かの検討。
- (3) 1層 20 cm の転圧層を深さ方向に3等分し、1層内の変位量、密度分布の測定による1層内転圧効果の確認。

3. 試 験 概 要

長沼ダムは堤高 15.3 m, 堤頂長 1,132 m, 堤体積 572,000 m³ の均一型アースフィルダムである。
(図-1 参照)

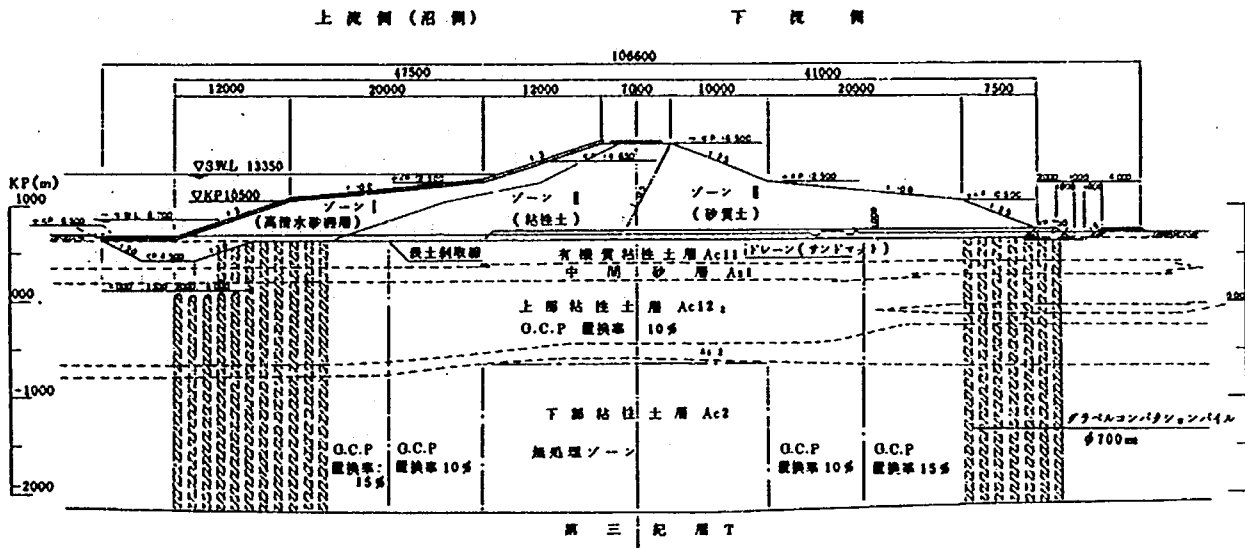


図-1 主ダム標準断面図 S・1/200

試験は昭和60年10月14日から10日間、長沼の北側にあるヘリポートヤード跡地に、転圧試験ヤードおよび同時に実施した透水試験用ヤードを設け、砂質土と粘性土の2材料で、後述する4転圧機種により転圧試験を行った。

3.1 試験材料の諸性質

今回の転圧試験に使用した材料は、川戸沼土取場より採取したもので、表-1に示されるいくつかの種類の土質から構成されている。川戸沼土取場の材料は、新第三紀鮮新世の築館層に属しているが、以下本報告書としては、表-1の土質細分類の項における築館層のうち、 T_1C_1 、 T_1C_2 、 T_1C_3 の3者を粘性土、 T_1S_3 、 T_1S_2 、 T_1S_1 の3者を砂質土と大分類して呼称することとする。図-2は、この砂質土と粘性土の粘土を三角座標により示したものであるが、この図からわかるように、統一土質分類に従えば、 T_1S_2 、 T_1S_1 が粗粒土、 T_1C_1 、 T_1C_2 、 T_1C_3 、 T_1S_3 は細粒土というべきもので、本報告での「粘性土」と「砂質土」は必ずしも実体に対応した名称ではない。しかし転圧試験当時に使われていた用語なので、本書ではそのまま使うこととした。

表-2に築館層の材料特性一覧表を示す。また、転圧試験に使用した砂質土および粘性土の平均粒度分布を図-3に示す。

表-1 土 質 構 成

大 分 類	現場判定手段		日本統一 土質分類	土 質 細 分 類		細粒分含有率 (0.074mm平均) (平均)	地山平均 含 水 比 (%)
				築館層	高清水層		
粘 性 土	目 視 及 び 触 覚	粘 性 大	細 粒 土	T ₁ C ₁	T ₂ C ₁	平均 95 %	62 %
		粘 性 中		T ₁ C ₂	T ₂ C ₂	平均 84 %	54 %
		粘 性 弱		T ₁ C ₃	T ₂ C ₃	平均 84 %	41 %
砂 質 土 I : W _n < 35 % II : W _n ≥ 35 %		粗 粒 土		T ₁ S ₃	T ₂ S ₃	50—70%(59%)	49 %
			T ₁ S ₂	T ₂ S ₂	15—50%(29%)	38 %	
			T ₁ S ₁	T ₂ S ₁	15 (10%)	30 %	
砂 礫		円 礫		—	T ₂ g	平均 23 %	16 %
浮石質火山灰		軽石・火山灰 土の密集層		T ₁ p	T ₂ p	平均 46 %	66 %

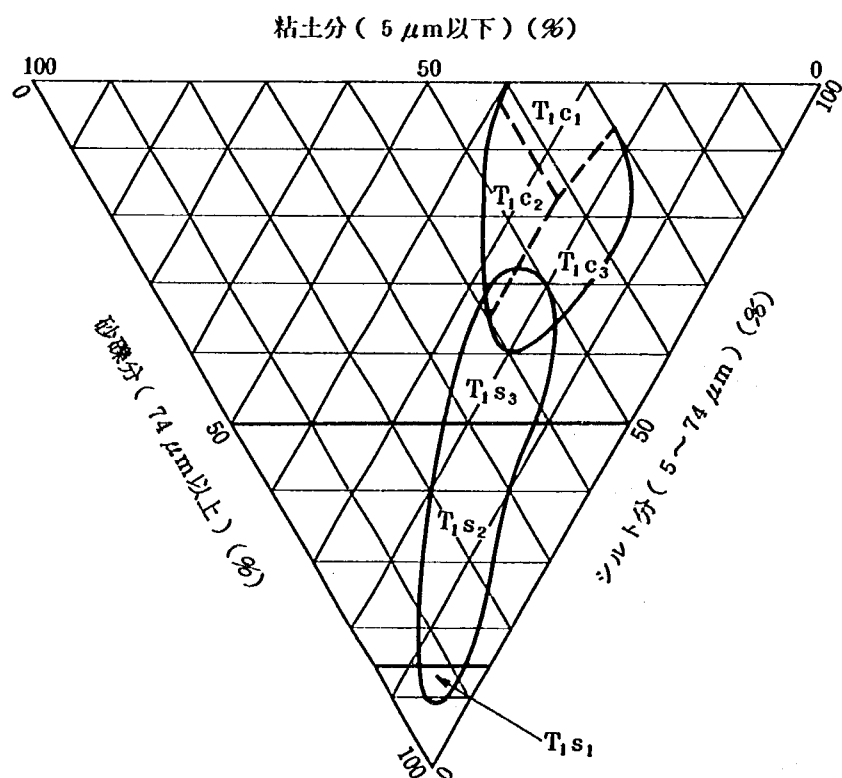


図-2 三角座標による分類

表-2 転圧材料の材料特性

地層	記号	特徴	物理的性質							締固め土の性質						
			比重 G_s	含水比 W_n (%)	細粒分率 -200 # (%)	液性限界 (%)	塑性限界 W_p (%)	塑性指数 I_p	日本標準土 分類区分	最大乾燥 密度 ρ_{dmax} (t/m^3)	最適含水比 W_{opt} (%)	自然含水比 最適含水比 $W_n - W_{opt}$ (%)	自然含水比 に対する締 固め密度 ρ_{dwn} (t/m^3)	自然含水比 での締固め 土の粘着力 C_{uu} (t/m^2)	自然含水比 での締固め 土の剪断抵抗 角 ϕ_{uu} (deg)	自然含水比 での締固め 土の透水係 数 K (cm/sec)
粘性土	T_1C_1	粘性強い	2.396 ~ 2.642	41.8 ~ 117.8	69 ~ 100	70.5 ~ 133.1	31.5 ~ 61.6	30.2 ~ 76.1	C'H CH	0.988 ~ 1.128	41.4 ~ 56.1	5.0~11.2 ($W_n =$ 52.6~63.3)	0.95 ~ 1.05	1.1 ~ 3.5	1.5 ~ 3.0	4×10^{-8} ~ 1×10^{-7}
	T_1C_2	粘性中位	2.465 ~ 2.622	39.2 ~ 81.7	65 ~ 100	65.4 ~ 89.2	32.2 ~ 46.9	29.7 ~ 44.6	C'H CH	1.114 ~ 1.162	38.2 ~ 46.0	1.9~14.0 ($W_n =$ 47.9~52.2)	1.06 ~ 1.10	3.0 ~ 4.6	2.5 ~ 6.0	4×10^{-8} ~ 2×10^{-7}
	T_1C_3	粘性弱い	2.495 ~ 2.650	32.9 ~ 77.2	66 ~ 89	47.4 ~ 85.3	28.6 ~ 44.5	18.8 ~ 42.4	C'H	1.313	28.8	6.2 $W_n =$ 35.0	1.25	1.5	3.0	8×10^{-8}
砂質土	* T_1S_3	細粒分 含有率 50%以上	2.483 ~ 2.684	21.2 ~ 73.8	50 ~ 79	49.3 ~ 88.6	23.2 ~ 43.3	20.5 ~ 50.5	C'H							
	T_1S_2	15%以上 50%未満	2.471 ~ 2.706	17.4 ~ 88.3	15 ~ 49	—	—	—	S M	1.500	23.3	1.4	1.49	2.2	36.0	9×10^{-6}
	T_1S_1	15%未満	2.620 ~ 2.713	10.3 ~ 37.2	6 ~ 12	—	—	—	S-M	1.334	29.4	-8	1.30	4	31.5	

* T_1S_3 は粒度分類では粘性土、目視判定では砂質土、

締固め土の性質は、 T_1C_3 に相当する。

設計値

遮水材料 $\rho_d = 0.94 t/m^3$, $C_{uu} = 3.0 t/m^2$, $\phi_{uu} = 0^\circ$, $K = 1 \times 10^{-8} cm/sec$
 非遮水材料 $\rho_d = 1.52 t/m^3$, $C_{uu} = 0 t/m^2$, $\phi_{uu} = 10^\circ$, $K = 5 \times 10^{-8} cm/sec$

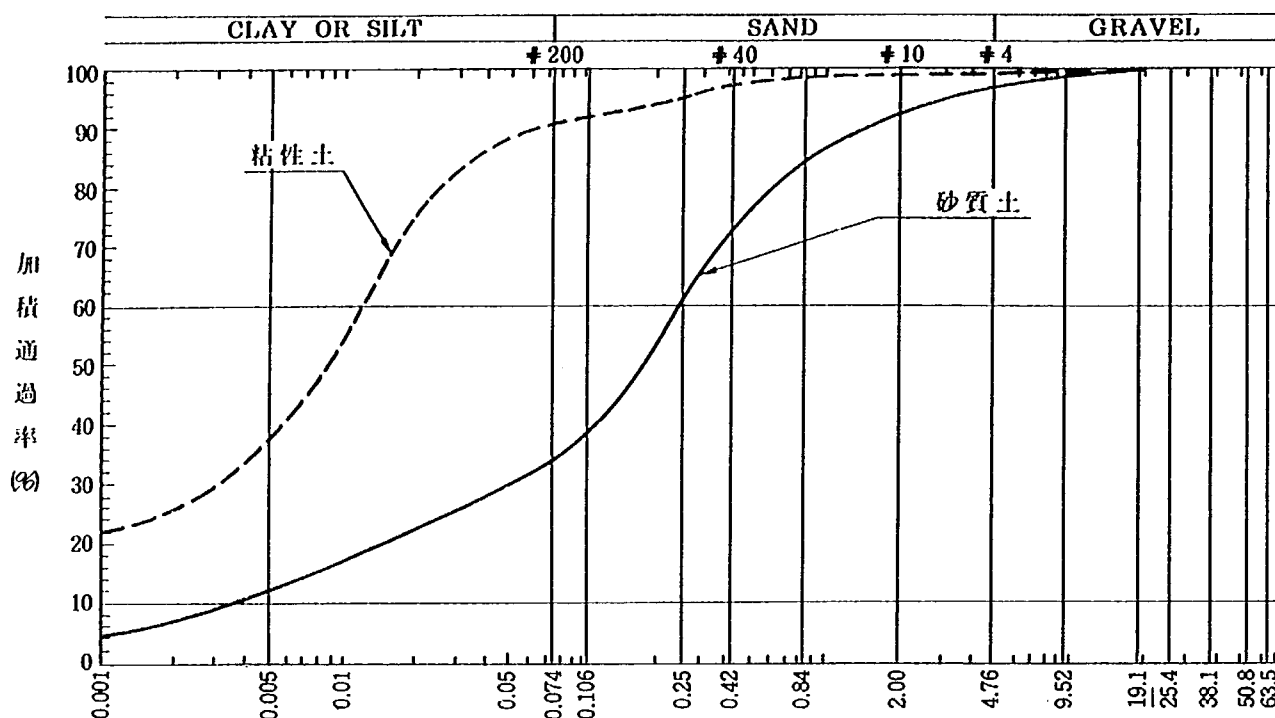


図-3 粒度分布曲線（平均値）

3.2 転圧試験パターン

転圧試験は表-3に示す7パターンを計画した。このうち、粘性土のタイヤローラによる転圧試験は事前に行った走行テストで、スリップ現象により走行不能となったため中止した。したがって、試験は砂質土で4機種、粘性土で2機種の計6パターンで実施した。

表-3 転圧試験パターン

材料	機 種	敷 均 し 層 厚 (cm)	1層当り転圧回数 (回)	走 行 速 度 (km/hr)
砂 質 土	振 動 ロ ー ラ	20	12	2
	タ イ ヤ ロ ー ラ	20	12	4
	タンピングローラ	20	12	4
	ブ ル ド ー ザ	20	12	4
粘 性 土	*1タ イ ヤ ロ ー ラ	20	12	4
	*2タンピングローラ	20	10	4
	ブ ル ド ー ザ	20	12	4

*1. 走行不能のため試験中止。

*2. 転圧回数12回では、走行不能になる恐れがあったため試験時に10回に変更した。

3.3 転圧機械の仕様

転圧試験に使用した4機種 of 仕様を表-4に示す(写真-1~4参照)。

転 圧 機 種		振 動 ロ ー ラ	タ イ ヤ ロ ー ラ	タンピングローラ	ブ ル ド ー ザ
型 式		C C 21	W P 902 B	C A T 825 B	D 85 A 18
会 社		渡 辺 機 械 工 業	渡 辺 機 械 工 業	キ ャ タ ピ ラ	小 松 製 作 所
総 重 量 (t)		7.0	16.6	29.75	23.61
接 地 圧 (kg/cm ²)		線圧 25 kg/cm	標準 5.0 実測 4.2	22.5	0.77
起 振 力 (t)		3.8 / 5	—	—	—
全 長 (m)		4.1	5.02	7.11	5.75
全 幅 (m)		1.52	2.15	4.17	2.62
車 輪	直 径 (cm)	104	サイズ 9.00-20-10	168 (フート含む)	—
	幅 (cm)	140	有効締固め 210	115 (1輪)	56
	輪 数	2	前 4, 後 5	4	履帯 2
	フート長さ (mm)	—	—	191	—
	フート数	—	—	13×5列 (1輪)	—
振 動 数 (cpm)		3,000	—	—	—
定格出力 (ps)		70	67	304	220
走行速度 (km/hr)		0 ~ 10	3.4~22.5	0~27.4	前進 0~11.2 後進 0~13.2

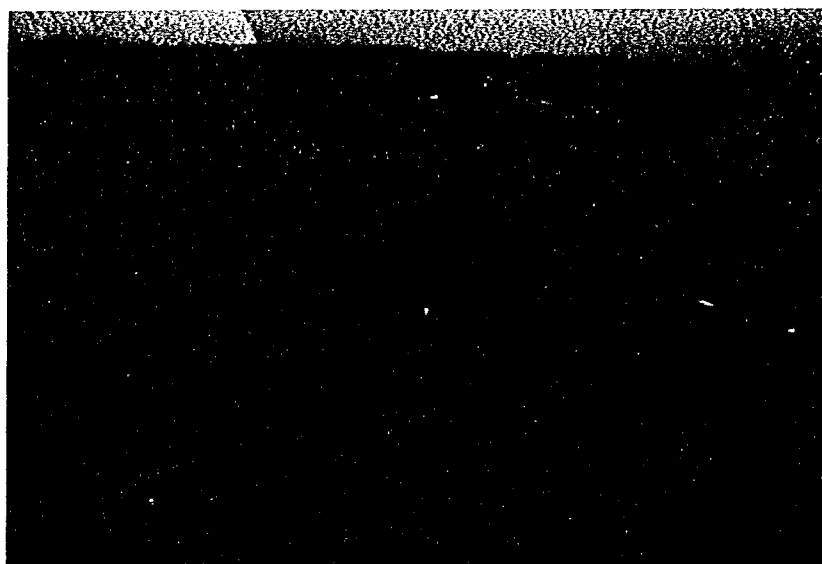


写真-1 振 動 ロ ー ラ



写真-2 タイヤローラ



写真-3 タンピングローラ

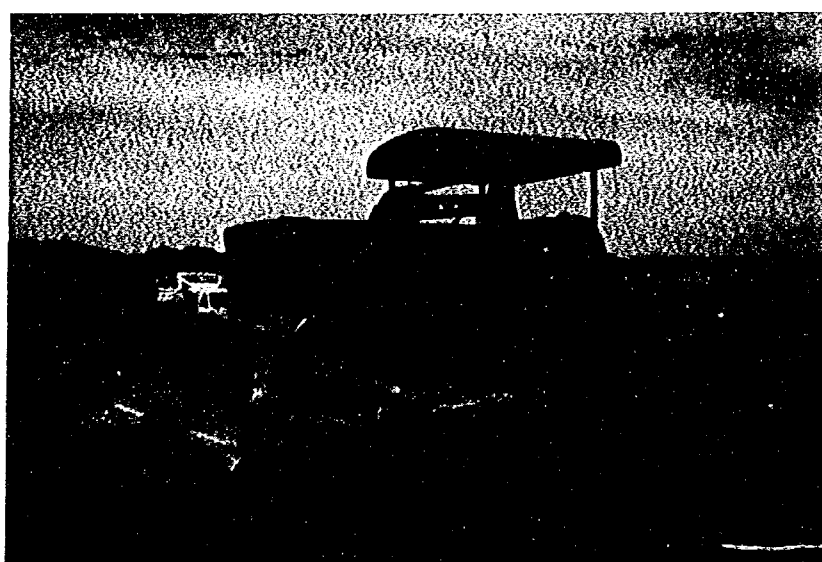


写真-4 ブルドーザ

3.4 試験ヤードと転圧方法

転圧試験ヤードは図-4, 5 (写真-5 参照) に示すように, ヘリポートヤード跡地に転圧試験専用ヤードを6ヤード, 透水試験兼用ヤードを1ヤードの計7ヤードを設定した。

転圧は, 転圧輪の中心がセンサー設置位置上を通過するよう転圧レーンを定め, 図-6 に示す順番で行った。

振動ローラ, タイヤローラおよびブルドーザの転圧順序は1レーンを1往復, すなわち2回転圧した後次レーンの転圧を行うようにした。タンピングローラでは1レーンを前進で往路転圧, すなわち1回転圧した後次レーンに移り, 順次残りのレーンの往路転圧を行う。各レーンの往路転圧が終了した後, 復路2回目の転圧を往路と同様に各レーン前進で行うようにした。これはタンピングローラのトラフィカビリティーを確保する目的で後輪のクリーナーバー(タンピングフート間の土落し)をはずして転圧を行ったため, 前後輪の転圧能力に差が生じ, 振動ローラのように1レーンを前後進で転圧すると往路と復路で転圧状況に差が生じるのを防ぐためである。



写真-5 転圧試験ヤード

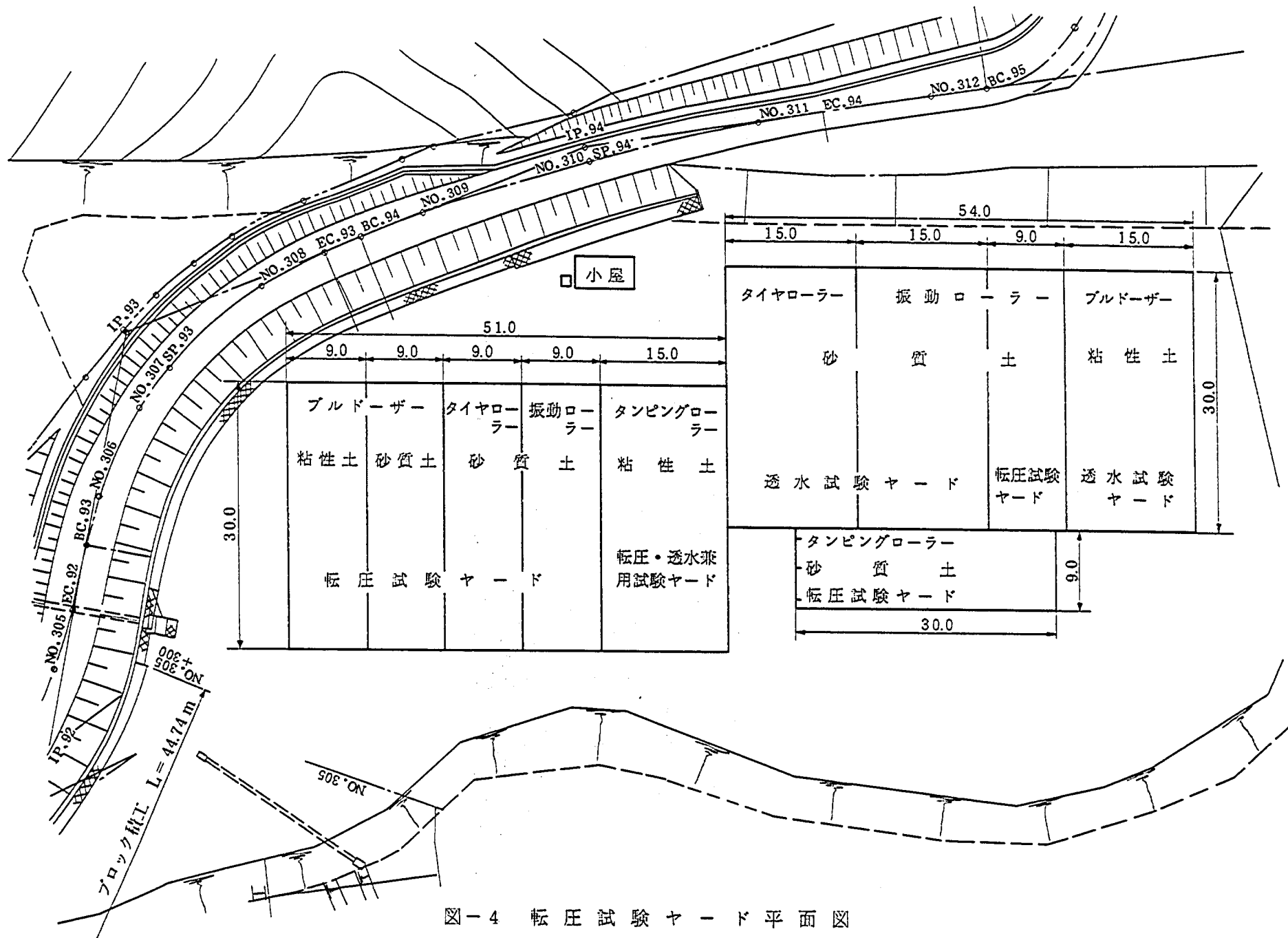


図-4 転圧試験ヤード平面図

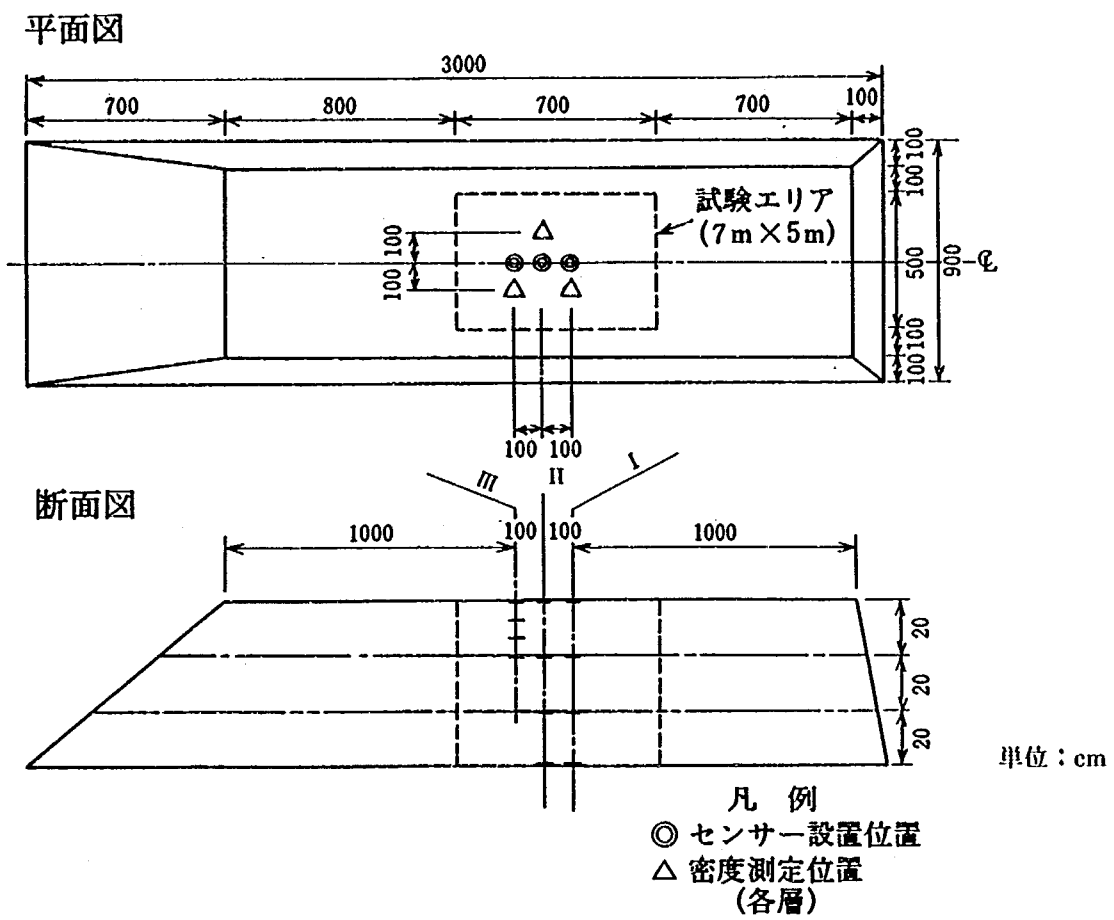
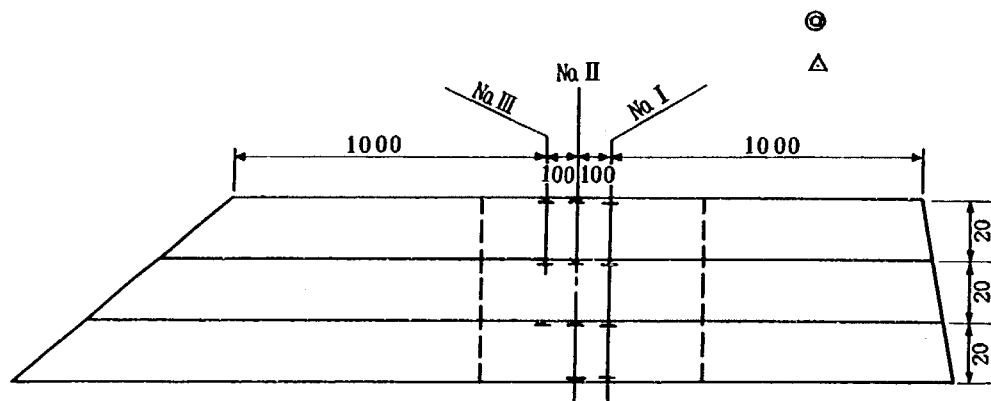
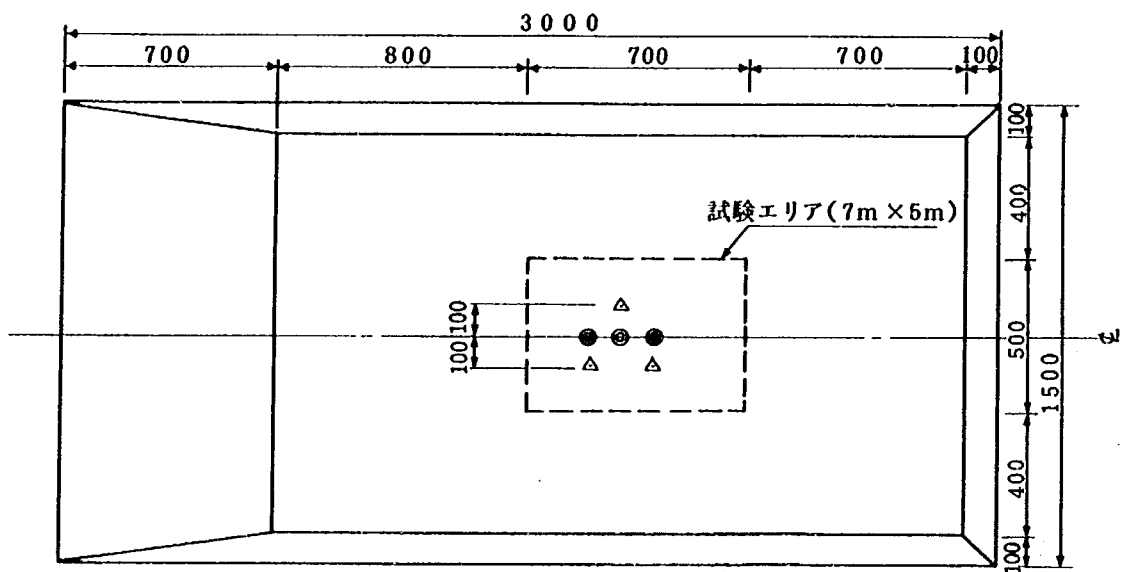


図-5 転圧試験ヤード図(1)



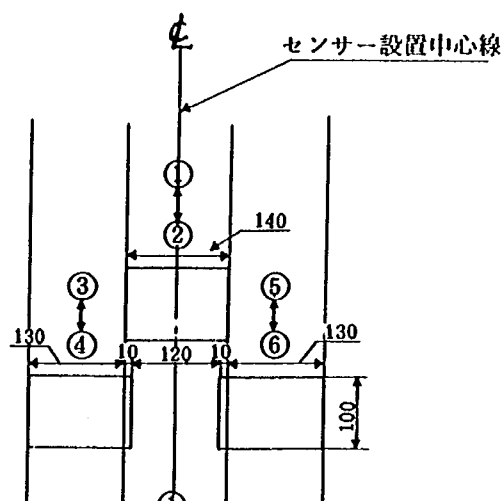
単位：cm

凡 例

- センサー設置位置
- △ 密度測定位置(各層)

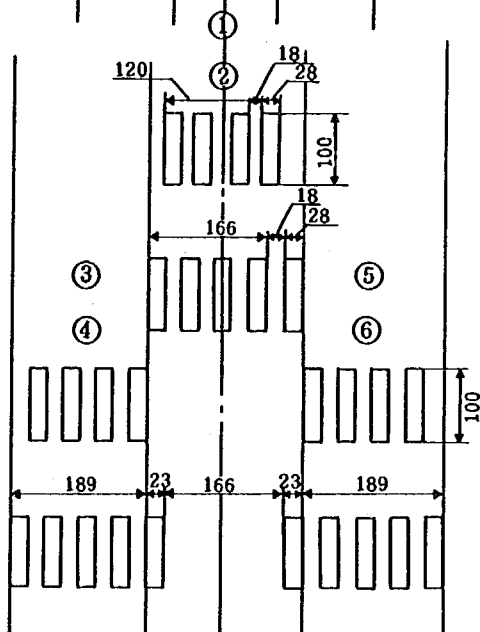
図－5 転圧試験ヤード図（透水試験兼用）(2)

振動ローラー



縮尺：1/100
単位：cm

タイヤローラー



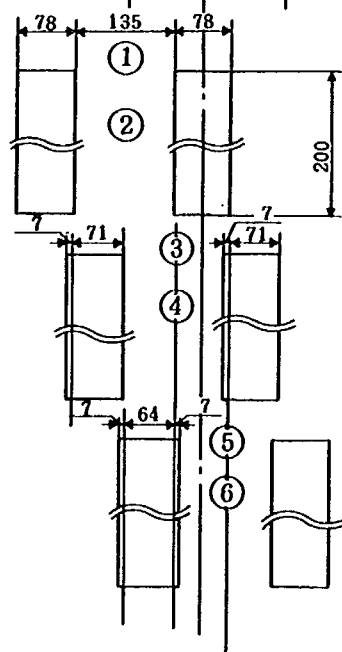
奇数回



偶数回



ブルドーザー



○内数字は転圧順序を示す

図-6 転圧レーン図(1)

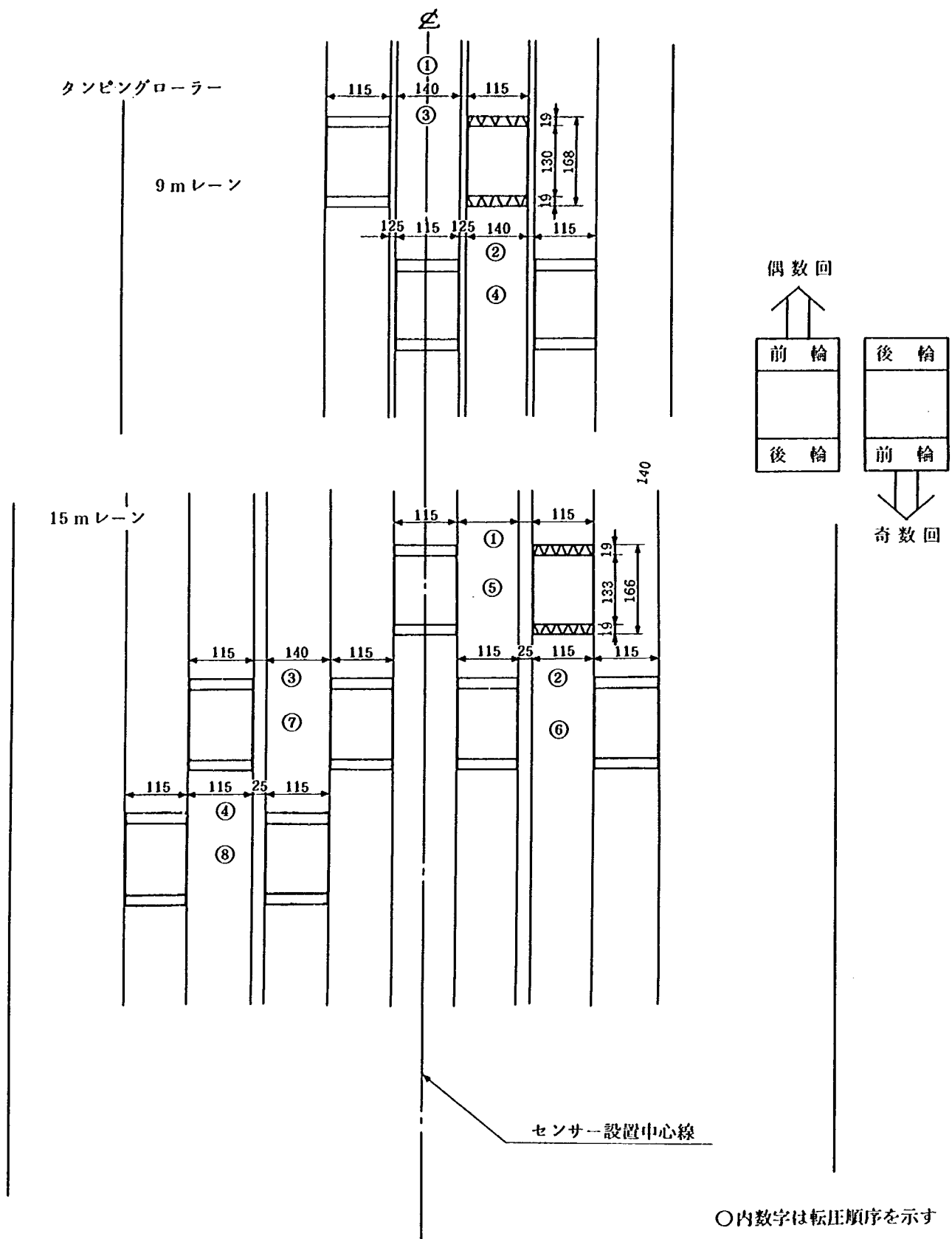


図-6 転圧レーン図(2)

4. 測 定 方 法

4.1 測 定 項 目

試験時の測定項目は次の4項目とした。

- (1) 4 inch 非接触型変位計（ソイルストレインゲージ）による層別変位量。
- (2) 2 inch 非接触型変位計による1層内層別変位量。
- (3) 転圧前後の非接触型変位計の水平移動量および傾き。

4.2 測 定 位 置

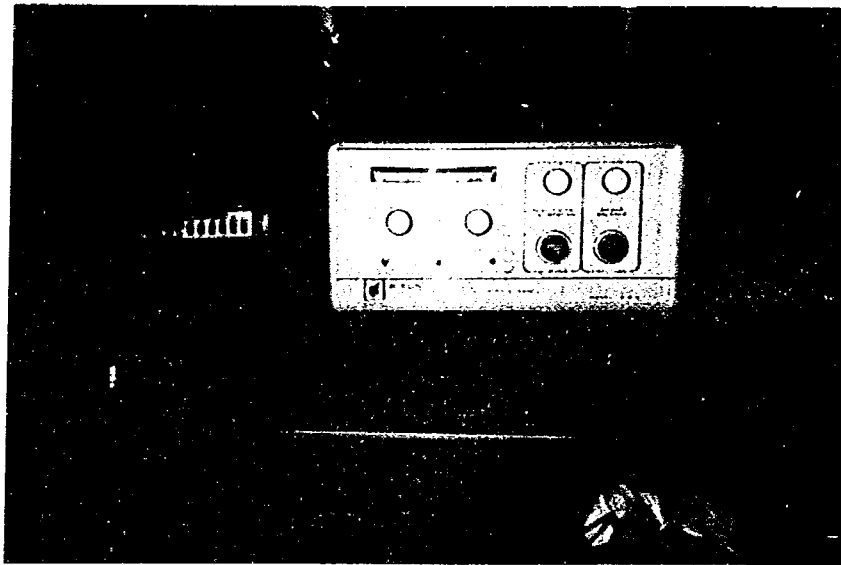
測定位置は図－7に示す位置とし、測点Ⅰおよび測点Ⅱには4 inch 非接触型変位計、測点Ⅲには2 inch 非接触型変位計を設置した。また密度測定位置は上記3測点から1 m離れた位置に千鳥に3箇所とし、各測点でRI法、砂置換法の2方法により密度を測定した。

4.3 測 定 機 器

測定に使用した計器とその仕様は表－5，6に示すとおりである。変位測定に使用したBISON社製ソイルストレインゲージは、計測アンプとセンサー（写真－6，7）から成り、測定機構は次のとおりである（図－8参照）。



写真－6 ソイルストレインゲージセンサー



写真－7 ソイルストレンゲージアンプ

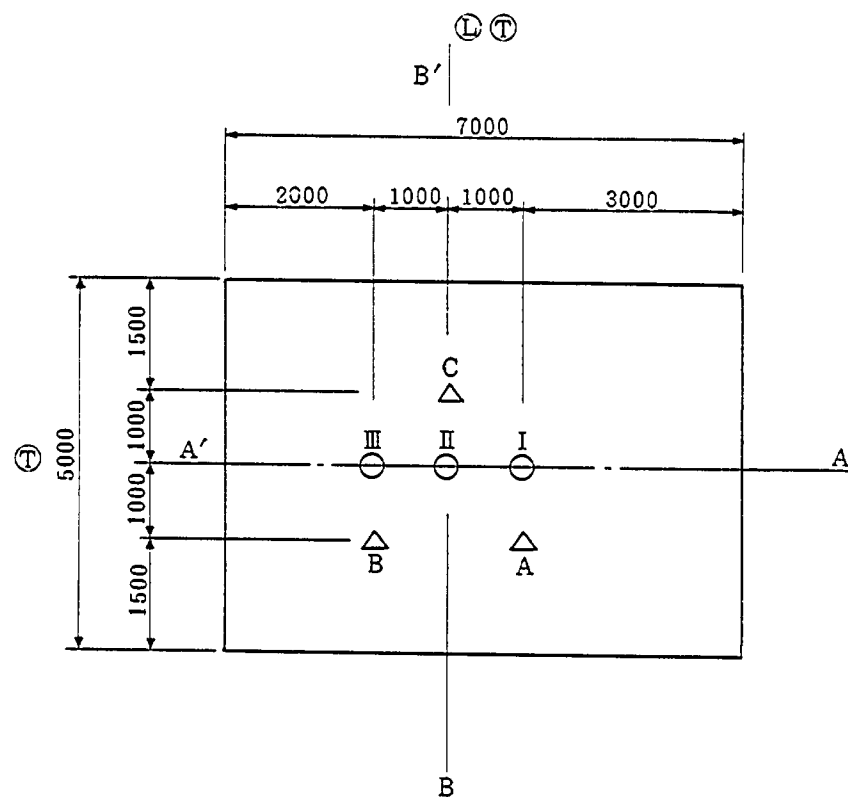
- ① 1対のセンサーの片方に 20 KHz の信号を加えて、もう一方のセンサーでこの信号を受信し
- ② アンプ回路で増幅した後、位相と出力電圧を発信用コイルの信号と打ち消し合うようにそれぞれのダイヤルで調節する。
- ③ ②で合わせた出力電圧調節用のダイヤル値（デジタル表示 0 ～ 1,000 目盛，最小読み取り目盛 0.1 ）を読むことによって
- ④ あらかじめ作成しておいた較正表からセンサー間の距離を算出する。

この変位計は，土中やコンクリート中など直接計測できない箇所の変位（ひずみ）を測定するために開発されたもので，

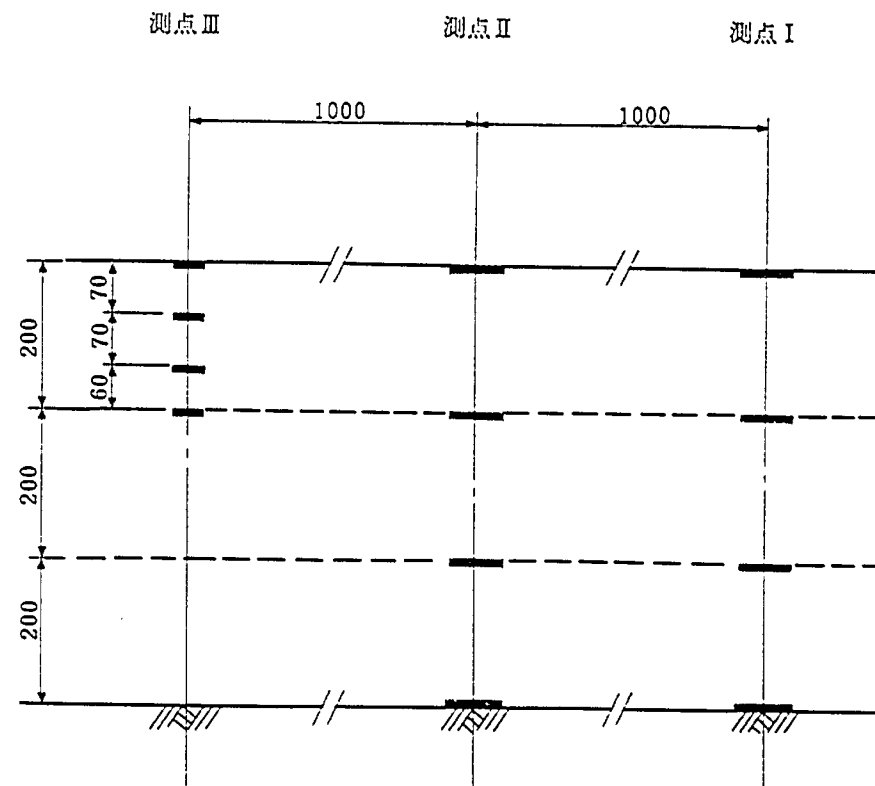
- ① センサー間にある物質が金属でなければ空気中と同じ値を示す。
- ② センサーは，円板状で非接触型のため層別沈下計のように周辺の摩擦の影響をほとんど受けない。
- ③ センサーの中心が同一線上にあり，傾きがなければ 0.1 mm の精度で計測できるが，軸がずれたりセンサーが傾くと値がずれる。ただし，軸のずれや傾きがわかっている場合は補正することができる。
- ④ ダイヤル値を離間距離に変換する際，両者の相関関係に直線性がなく，センサーにより変換値が若干異なるため，各々のセンサーについて較正表を作成する必要がある。

等の特徴を有している。

平面図 S = 1/100



断面図 S = 1/10



凡 例

- ソイルストレングージ
- △ 密度測定
- ⊕ トランシット据付位置
- Ⓛ レベル据付位置

- * 1) A-A'通りは転圧輪中心にくるように決める。従って機種により変更有り。
- * 2) タンピングローラ(ブルドーザ)の場合、第3層にはセンサーを埋設しない。従って、No I, No IIは1, 2層, No IIIは2層に設置する。

図-7 計器設置位置図

表－5 非接触型変位計仕様

型 式		B I S O N 4101 型	
呼 び 径		4 インチ	2 インチ
検 出 器 寸 法 (センサー)	径	4 1/8 (10.5 cm)	2 1/8 (5.4 cm)
	厚	13/32 (1.03 cm)	1/4 (0.64 cm)
測 定 範 囲		100 ~ 400 mm 任意	50 ~ 200 mm 任意
励 磁 特 性	周 波 数	20 KHz	
	増 巾 度	15 V (p-p)	
	全 調 和 歪 み	0.3 %	
	入力インピーダンス	2 K Ω 以上	
応 答 時 間		0.25 m sec	
出 力 電 圧		± 5 V	
最 高 感 度		0.1 %/V	
分 解 能		0.01 %	
温 度 特 性		10 mV/°C	
使 用 温 度 範 囲		0 ~ 70 °C	
ケ ー ブ ル 長		15 m 但し 300m迄可能	
電 源		内蔵バッテリー ± 12 V 外部充電器 110/220 V - 50/60 Hz	
会 社		B I S O N	

表－6 R I 仕 様

型 式		SX 11D コンパクションテスター
線 源		^{60}Co 100 μCi , ^{252}Cf 50 μCi
測 定 深 さ		20 cm
測 定 範 囲	湿 潤 密 度	1.3 ~ 2.3 g/cm ³
	含 水 比	5 ~ 50 %
出 力 表 示		4桁液晶表示
測 定 時 間	基 準 物 体	6 分
	被 測 定 物	1 分
使 用 温 度 範 囲		0 ~ 45 °C
本 体 寸 法		365×310×120 H

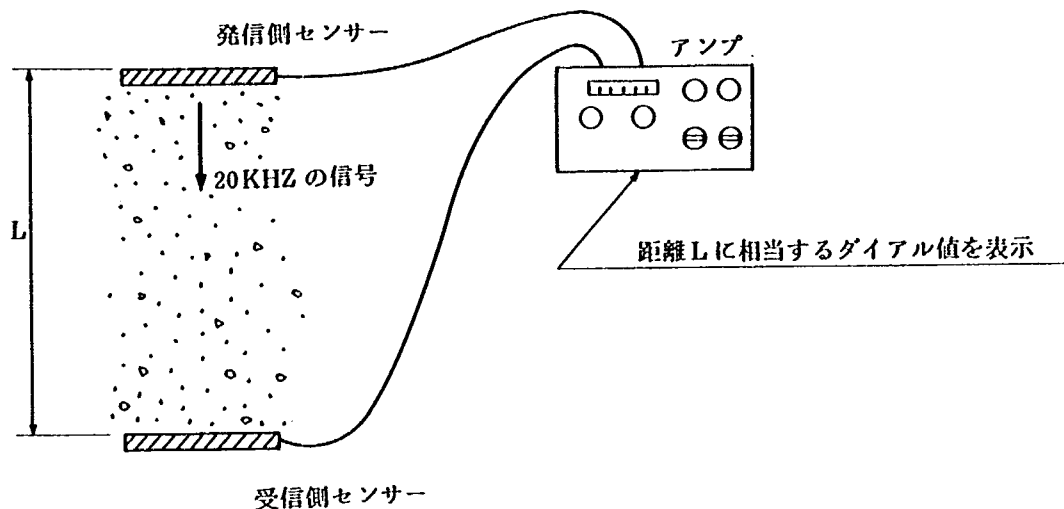


図-8 ソイルストレインゲージの測定機構

4.4 測定方法

4.4.1 センサーの設置および測定手順

非接触型変位計のセンサーの設置および計測方法は、振動ローラ、タイヤローラ、ブルドーザの3機種では図-9に示すフローチャートによる。タンピングローラは転圧層にセンサーを設置するとタンピングフット（長さ19 cm）で壊されるため、転圧層の1層下にセンサーを設置するようにした。その設置および測定手順は図-10のフローチャートによる。以下に設置および測定手順を詳述する。

(1) 振動ローラ、タイヤローラおよびブルドーザの場合

- ① 図-11(a)に示すようにトランシットをA点およびB点に設置する。この際、A-A'通りは転圧機械の転圧輪センターとなるようにする。
- ② B-B'通とA-A'通りとの交点を測点Ⅰとし、測点Ⅰを基準としてこの点から1 m ピッチでA-A'通り上に測点Ⅱおよび測点Ⅲを決定する。
- ③ 試験マットを3層敷均しても天端が見える高さにレベルを設置する。

1) 測点Ⅰおよび測点Ⅱの4 inch センサーの場合

- ① 測点Ⅰおよび測点Ⅱのベースにセンサーを設置し、石膏により固定する。センサーは下に大きな数字を置き、続き番号で設置する。（写真-8）
- ② レベルによりベースに設置したセンサーの高さを測定する。
- ③ 1層目をブルドーザにより敷均す。この時固定したセンサーを動かさぬ様注意する。また測点上をブルドーザが何回通過したかチェックしておく（写真-9）。
- ④ 1層目の敷均しが完了したらトランシットにより測点Ⅰを決定し、次に測点Ⅰを基準に測点Ⅱを決定する。両測点の位置が決まったなら、設置位置にセンサー1枚分（径10 cm × 厚1 cm）を埋設できる程度の穴を掘る。掘り返した土はそれぞれシートの上に置

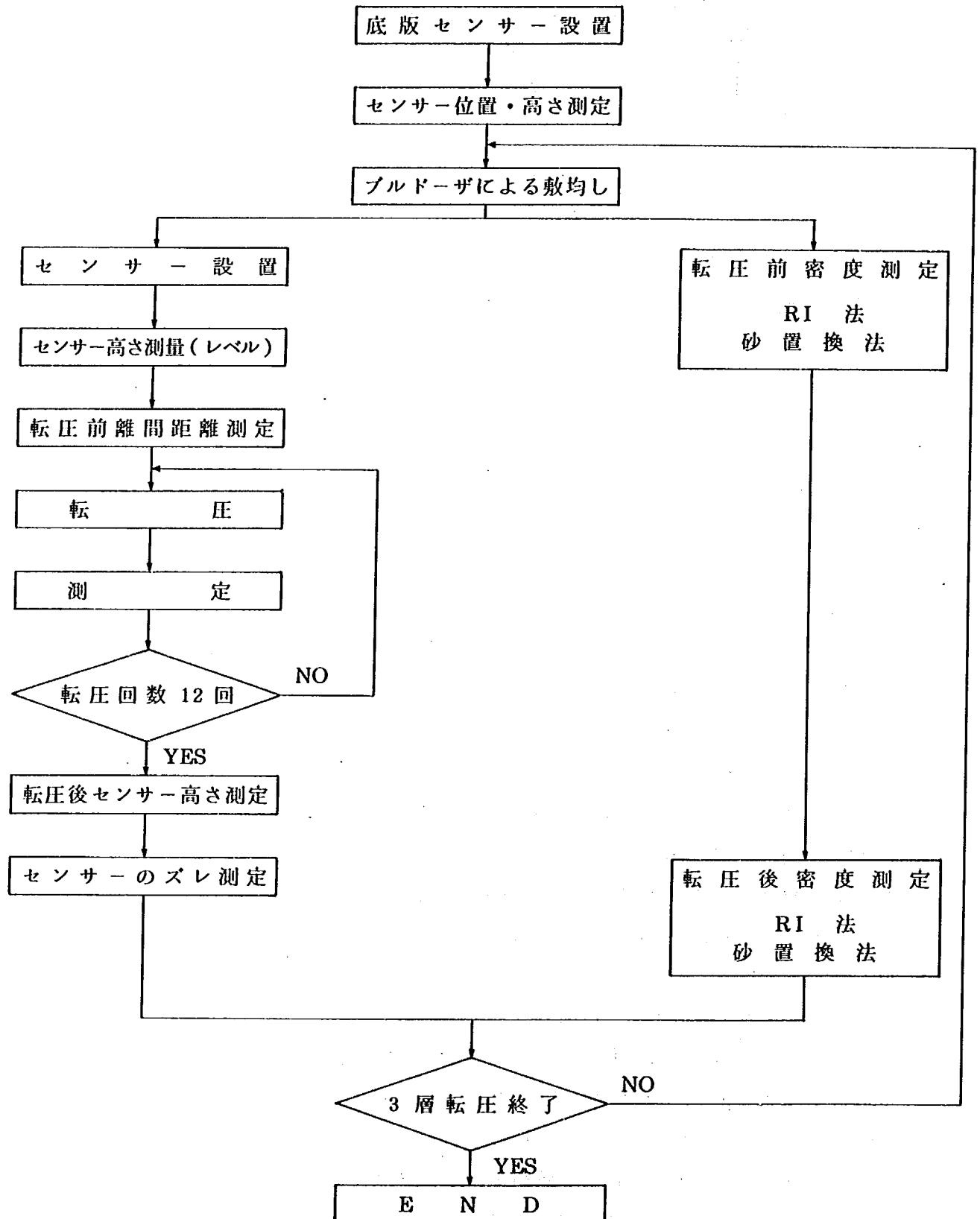


図-9 ソイルストレンゲージの設置および測定方法

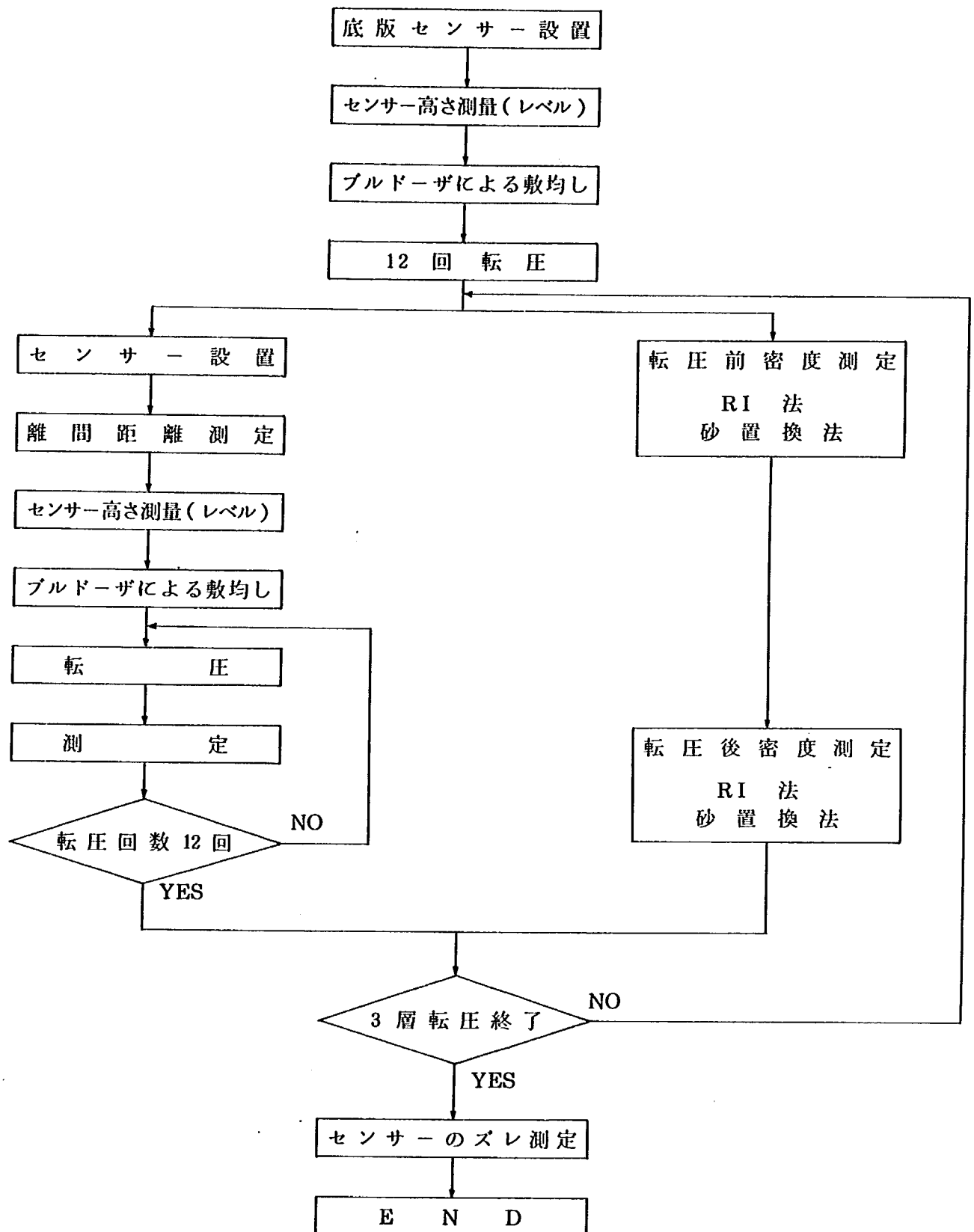
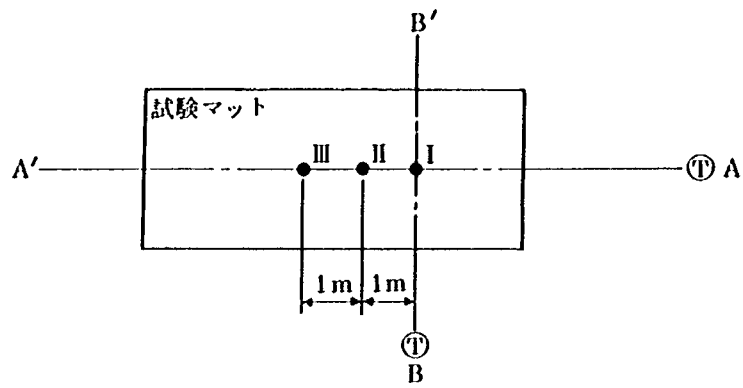
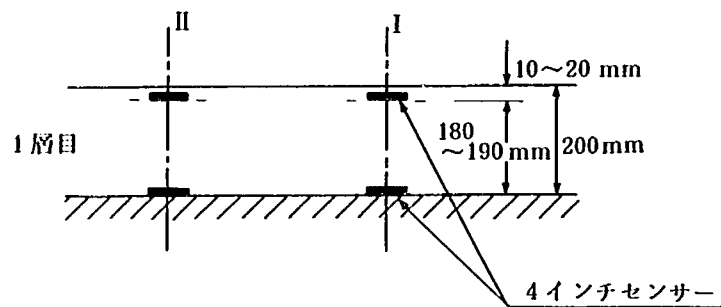


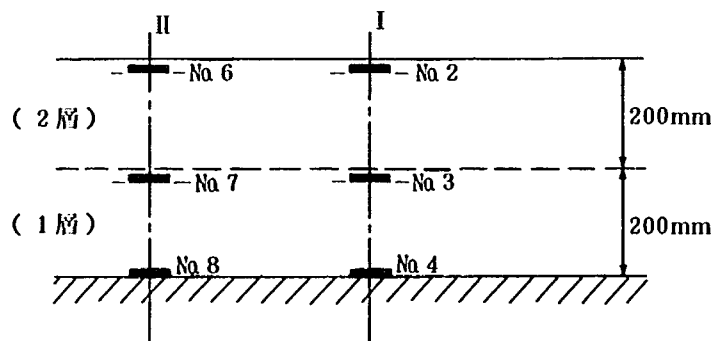
図-10 ソイルストレンゲージの設置および測定方法
(タンピングローラ)



(a) 測点の決定



(b) 1層目センサー設置時



(c) 2層目センサー設置時

図-11 センサーの設置と測定手順



写真-8 底版センサー

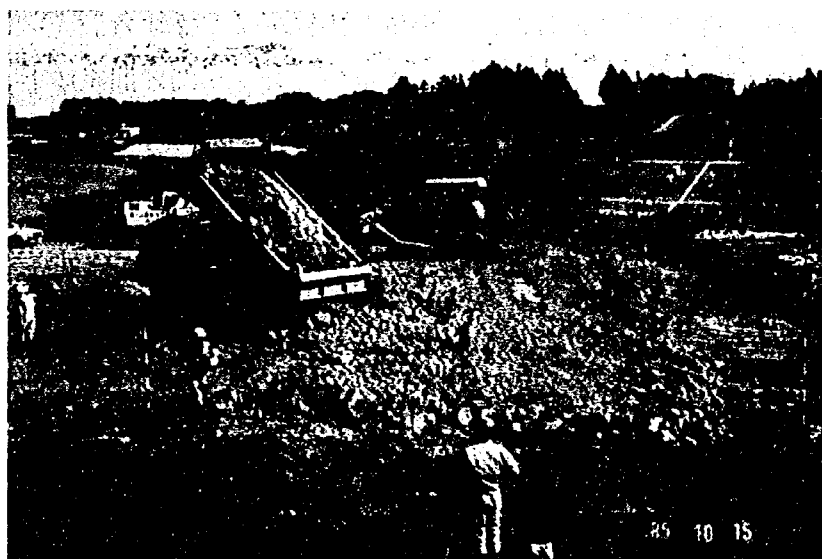


写真-9 ダンピングとブル敷均し



写真-10 センサー設置

いておく（図－11(b)）。

- ⑤ トランシットにより測点Ⅰのセンサーを水平に設置する。測点Ⅰのセンサーの設置が終了したら測点Ⅱのセンサーを設置する（写真－10）。
- ⑥ 両測点のセンサーをレベルで視準し、センサー間の離間距離が200 mm以内となるようにする。
- ⑦ センサーが動かないよう注意して⑦で掘り起こした土を埋め戻す。
- ⑧ アンプによりセンサー間の離間距離を測定する。測定値は②、⑥で測定したレベルから求めたセンサー間隔と比較チェックしておく。
- ⑨ 測点Ⅰ，測点Ⅱの周辺（図－2の測点A，B，C）でRIおよび砂置換法により初期密度を測定する。
- ⑩ 転圧機械により1回目の転圧を行う。
- ⑪ 1回目転圧終了後、アンプによりセンサー間の離間距離を測定する。またレベルによりセンサー表面の高さを測定し、両方の値を比較チェックする。
- ⑫ 以後所定の回数転圧機械で転圧し、転圧毎にセンサー間離間距離およびレベルによるセンサー高さを測定する。
- ⑬ 所定の転圧が終了したら、転圧前に密度測定を行った箇所にて転圧後の密度をRIおよび砂置換法により測定する。
- ⑭ 上部センサーの水平移動量を計測するためセンサーの上の土を掘り起こす。この時センサーを動かさない様注意する。また掘り起こした土も別々にシートの上に置いておく。
- ⑮ トランシットにより各々のセンサーの水平移動量を測定し、スラントで傾きを測定する。
- ⑯ レベルでセンサー上面の高さを測定する。
- ⑰ センサーが10 mm以上移動していれば、トランシットで視準して元の位置に戻す。
- ⑱ 掘り返した土の密度が締固められた土の密度と同じになるよう埋め戻す。
- ⑲ アンプでセンサー間の離間距離を測定する。
- ⑳ ③～⑲を3層迄くり返す。
- ㉑ 3層目敷均し及び転圧時、測点Ⅰの1層目センサー（No 3とNo 4）により動的変位量を測定する。測定データはペンレコーダーにより記録するとともにデータレコーダーにも収録する。

ii) 測点Ⅲの2 inch センサーの場合

- ① 2層目転圧後、測点Ⅲに2 inch センサーを設置し、センサーの高さを測定する（写真－11）。
- ② 3層目をブルドーザで敷均す。敷均す際、センサーが移動しないようにあらかじめ土を盛っておく。
- ③ 所定の厚さに敷均しが終了したら、測点Ⅲ上に穴を掘る。深さは2インチ底版センサ

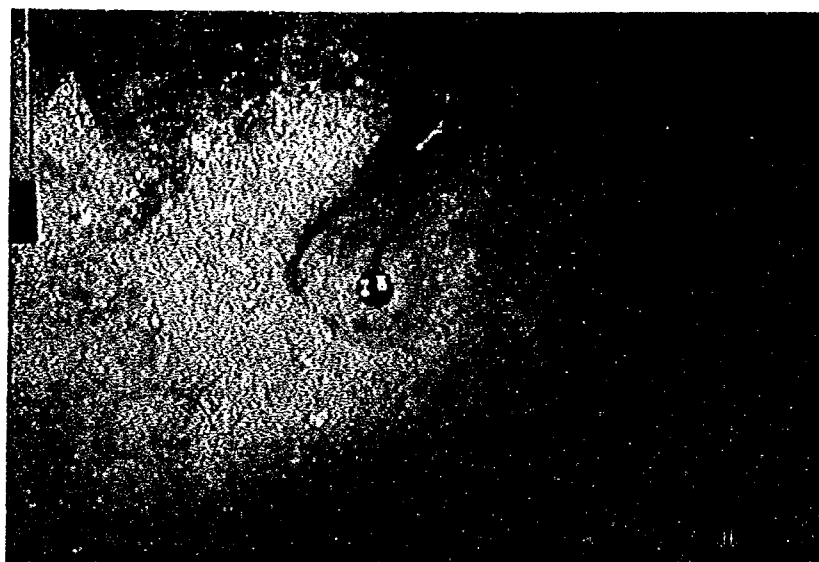


写真-11 2 ioch センサー

ーより 6 cm 程度高い位置としレベルでチェックする。穴を掘る際、掘った土はシートに残しておく。

- ④ 2 番目センサーを設置し、高さを測定する。
- ⑤ 掘り出した土を 7 cm 分埋め戻す。この際、掘り起こす前の密度と同じになるように注意する。
- ⑥ 3 番目、4 番目のセンサーについても、同様に④、⑤を繰り返し設置する。
- ⑦ 全センサーの設置が終了したら各層の離間距離を測定し初期値とする。
- ⑧ 転圧ごとにアンプで離間距離を測定する。
- ⑨ 所定の転圧が終了したら、センサー高さをチェックする。

(2) タンピングローラの場合

- ① 最下層のセンサー設置方法は振動ローラ転圧の①～⑥と同様。
- ② 1 層目の密度を測定する。測定箇所、測定方法は振動ローラの項と同様。
- ③ 1 層目をタンピングローラで転圧する。
- ④ ②と同様の箇所で密度測定を行う。
- ⑤ 測点Ⅰ、測点Ⅱにセンサーを設置し、アンプにより離間距離を測定する。
- ⑥ レベルでセンサー表面の高さを測定し、⑤で測定した離間距離とチェックする。
- ⑦ 設置したセンサー上に 2 層目の土を余盛りし、センサーが動かないように注意して、ブルドーザにより 2 層目を敷均す。
- ⑧ アンプにてセンサーの離間距離を測定し、2 層目の密度を測定する。
- ⑨ タンピングローラで 1 回目の転圧を行う。
- ⑩ 転圧終了後、アンプにてセンサーの離間距離を測定する（図-12(a)）。
- ⑪ 所定の回数タンピングローラで転圧する。1 回転圧毎に静的変位を測定する。所定の回

数転圧後，2層目の密度をRIにより測定する。

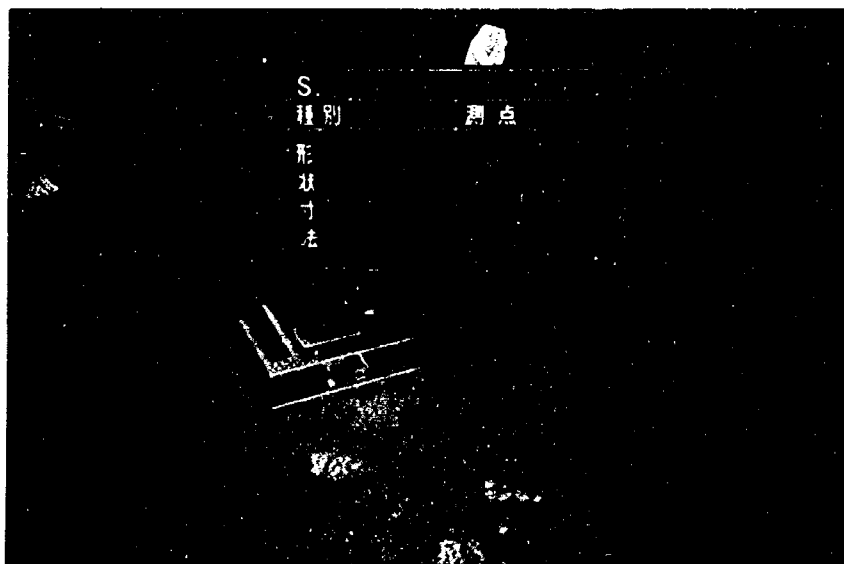
- ⑫ 測点Ⅲの位置の2層目を1層目上部まで掘り起こし，7 cm ピッチに2 inch センサーを埋設する。この時各センサーの高さをレベルで測定する（図－12(b)）。
- ⑬ 土を埋め戻す時は掘り起こす前の密度と同じになるよう注意する。
- ⑭ アンプにて2 inch センサー間の離間距離を測定する（図－12(c)）。
- ⑮ ⑤～⑪を繰り返し行う。

4.4.2 密度測定方法

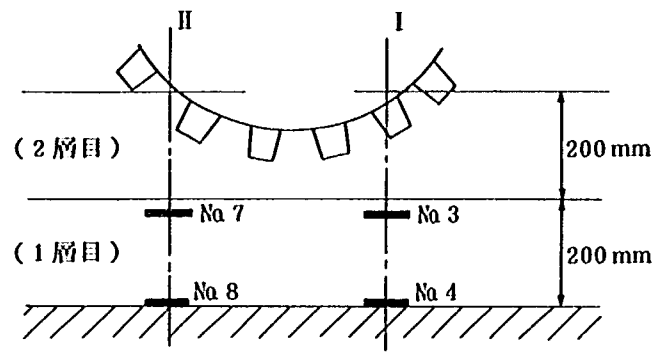
密度は各層ごとにブルドーザ敷均し後および転圧後の2回測定した。測定方法はRI法および砂置換法による（写真－12，13参照）。RI法における線源挿入深度は表面より20 cm とし，砂置換法では表面より10～15 cm の深さまで測定孔を掘った（図－13(a)，(b)）。なお，以上の密度試験のほか，1層内の鉛直方向の密度分布を詳しく調べるため，タンピングローラを除いて振動ローラ，タイヤローラおよびブルドーザの転圧では，3層目において2 inch セン



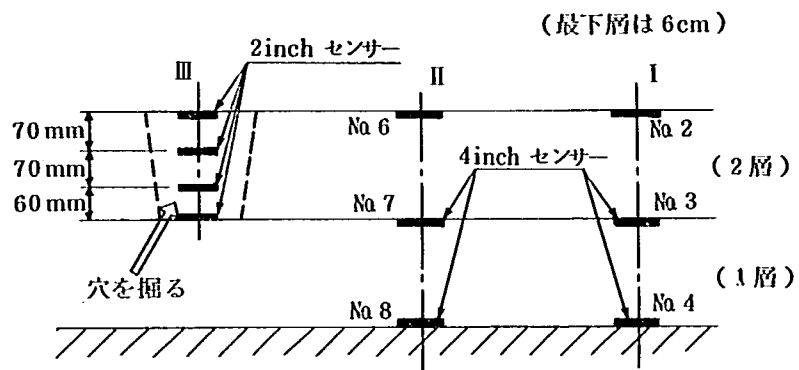
写真－12 砂置換法による密度測定



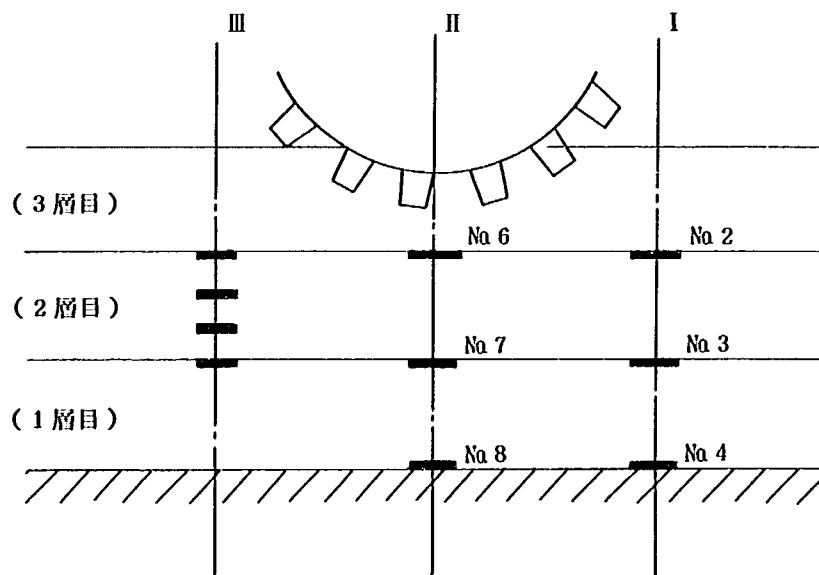
写真－13 RI法による密度測定



(a) 2層目転圧時



(b) 2層目設置時



(c) 3層目転圧時

図-12 センサーの設置と測定手順(タンピングローラの場合)

サーによる薄層沈下量測定を実施しているので、これと対比できるように、図-13(c)に示すように表面より7 cm ずつ3層の密度を砂置換法により測定した。

4.4.3 現場透水試験方法

現場透水試験は、注水法による変水位透水試験法により実施した。透水試験実施ヤードは次の4ヤードである。

砂 質 土……………振動ローラ

タイヤローラ

タンピングローラ

粘 性 土……………タンピングローラ

試験孔は図-14に示すように3層目と2層目にまたがって掘削し、孔深は30 cm，孔径は $2r = 20\text{ cm}$ とした。注水後の水深の測定頻度は表-7を原則とする。

透水係数は式(1)を用い、注水後10分と120分の水深から求めた。

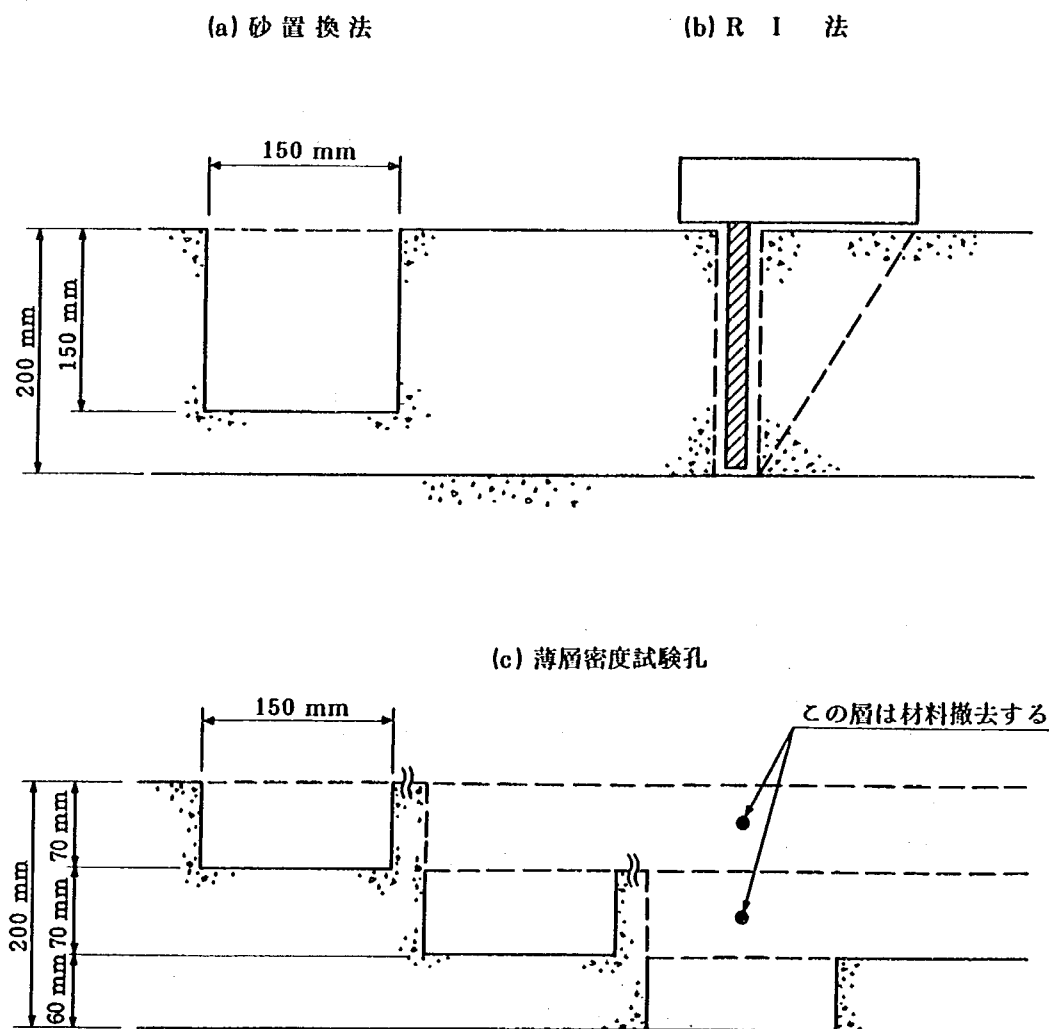


図-13 密度試験方法

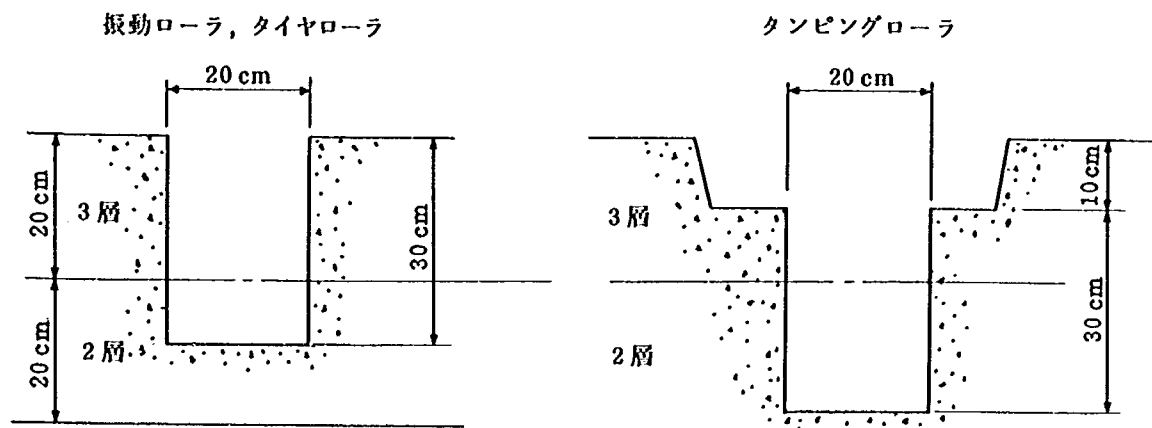


図-14 試験孔

表-7 測定頻度

注水後時間	0～10分	60分迄	120分迄	以後
測定頻度	1分/回	5分/回	15分/回	30分/回

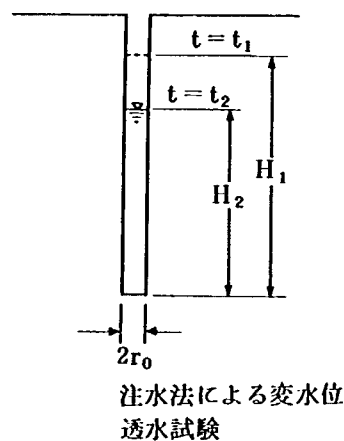
$$k = \frac{r_0^2}{2(t_2 - t_1)} \left[\frac{1}{H} \sinh^{-1} \left(\frac{H}{r_0} \right) + \frac{1}{2r_0} \operatorname{cosech}^{-1} \left(\frac{H}{r_0} \right) - \frac{1}{2H} \sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{H} \right)^2} + \frac{r_0}{2H^2} \right] \frac{H_2}{H_1} \quad (1)$$

k : 透水係数 (cm/s)

r_0 : 井戸の半径 (cm)

H_1 : 時刻 t_1 における井戸の中の水深 (cm)

H_2 : 時刻 t_2 における井戸の中の水深 (cm)



5. 試 験 結 果

5.1 現場転圧試験結果

5.1.1 沈下量測定結果

(1) 振動ローラによる転圧

表-8に沈下量測定結果の一覧表を示し、これを図-13に沈下量を転圧回数との関係で図示する。表-8に示したように各測点のレベルから求めた沈下量とソイルストレインゲージによる沈下量の差は3 mm以内で収まっており、データの信頼性は高いと考えられる。

図-15から同一転圧層での沈下量は1層目ではNa 16~17とNa 12~Na 13の間にかかなりの差があるが、これは初期密度(ブルドーザによる敷均し後の密度)の違いと考えられる。このことは、表-13に示す1層目の転圧前密度測定結果が $0.879 \text{ g/cm}^3 \sim 1.016 \text{ g/cm}^3$ と幅があることでも裏付けられる。2層目および3層目では、2個の測点は、ほぼ同様の沈下を示している。1層目のNa 16~Na 17を除いた5層の変位は12回の転圧で平均20 mmの沈下量であった。

図中、1層目と2層目の転圧12回目の沈下量が2点プロットされているのは、12回の転圧終了後、次層をブルドーザで敷均す際発生した変位である。(これは以後報告する各機種の測定結果に共通する)このブルドーザ敷均し時変位量は、2層目敷均し時で3 mm、3層目敷均し時で2 mmとなっている。転圧層より下の層での変位量は1層下で2.5 mm~5 mm、2層下では0~1 mmとなっており、2層以上離れた場合は、既に所定の回数の転圧を終了している下層にとって上層の転圧は有効でないことがわかる。

転圧回数と沈下量の落ちつき具合を見ると、各層で若干の差はあるが、概ね8回以降で沈下量に落ちつきが見られる。したがって、必要転圧回数は8回前後にあると考えられる。

図-16は3層目に設置した2 inchセンサーによって、1層内の変位を更に細く測定した結果である。上層と下層の変位量の比率は7.1 mm : 2.6 mmで、約3 : 1の割合となり変位量の70%以上が上層(表面から9 cm)で発生している。変位率((転圧前距離)/(転圧後距離))は上層1.085、下層が1.034で、後述する1層内層別密度測定結果の密度増加率((転圧後密度)/(転圧前密度))は上層1.105、中層1.065、下層1.064となり上層と下層の関係は変位・密度とも比較的似ている。

転圧層の1層内の深さ方向の締固め状態を調査した事例は少ないが、例えば、山口・大根は²⁾図-17に示す転圧層厚と乾燥密度の概念的関係を示している。これによると上層と中層の密度はほぼ同程度で、下層になると若干低下し、深さ方向の密度低下は緩やかである。これに比べ本試験結果では、後述する6.4の図-38に見られるように、2測点の平均密度では、中層の密度低下が図-17に比べ大きくなっており必ずしも同様の傾向を示していない。この原因は、2箇所で行った密度測定結果の一方の上層部密度が特別大きな値を示したためであるがこれを除外すれば、振動ローラの転圧効果は中層以下でも、余り低下しないといえる。

表-8 振動ローラ 測点I

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3	No 10 / No 11	0							204.8	0	
		1							194.0	- 0.8	
		2							192.0	- 2.0	
		3							189.1	- 2.9	
		4							188.6	- 0.5	
		5							187.8	- 0.8	
		6							188.1	+ 0.3	
		8							188.0	- 0.1	
		10							185.9	- 2.1	
		12							186.5	+ 0.6	- 18.0
2	No 11 / No 12	0				206.0	0		180.6		
		1				196.9	- 9.1		180.6	0	
		2				190.1	- 6.8		178.5	- 2.1	
		3				190.9	+ 0.8		180.0	+ 1.5	
		4				187.0	- 3.9		177.6	- 2.4	
		5				186.9	- 0.1		180.0	+ 2.4	
		6				185.9	- 1.0		177.3	- 2.7	
		8				184.7	- 1.2		177.8	+ 0.5	
		10				180.7	- 4.0		177.4	- 0.4	
		12				181.7	- 1.0	- 24.3	177.3	0.1	- 3.3
1	No 12 / No 13	0	186.2			163.3	0		160.1	0	
		1	176.1	- 10.1		162.6	- 0.7		159.9	- 0.2	
		2	173.9	- 2.2		162.5	- 0.1		160.0	+ 0.1	
		3	171.7	- 2.2		162.1	- 0.4		159.8	- 0.2	
		4	170.8	- 0.9		162.1	0		159.9	+ 0.1	
		5	169.5	- 1.3		161.7	- 0.4		159.8	- 0.1	
		6	168.5	- 1.0		161.8	+ 0.1		159.7	- 0.1	
		8	167.3	- 1.2		161.3	- 0.5		159.8	+ 0.1	
		10	166.9	- 0.4		160.9	- 0.4		159.8	0	
		12	165.2	- 1.7	- 21.0	160.9	0	- 2.4	159.8	0	- 0.3
全層累計変位量			- 21.0			26.7			21.6		
レベル測量による 変 位 量			- 20			26			19		

表-8 振動ローラ 測点II

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3	No 14 / No 15	0							210.7	0	
		1							207.3	- 3.4	
		2							203.1	- 4.2	
		3							201.7	- 1.4	
		4							199.2	- 2.5	
		5							198.6	- 0.6	
		6							198.1	- 0.5	
		8							196.9	- 1.2	
		10							196.5	- 0.4	
		12							195.6	- 0.9	-15.1
2	No 15 / No 16	0				201.7	0		177.0		
		1				192.7	- 9.0		177.5	+ 0.5	
		2				190.9	- 1.8		176.4	- 1.1	
		3				188.3	- 2.6		177.3	+ 0.9	
		4				186.9	- 1.4		175.9	- 1.4	
		5				182.8	- 4.1		176.6	+ 0.7	
		6				184.6	+ 1.8		175.9	- 0.7	
		8				181.0	- 3.6		175.4	- 0.5	
		10				179.6	- 1.4		175.0	- 0.4	
		12				178.1	- 1.5	23.6	175.0	0	- 2.0
1	No 16 / No 17	0	196.7	0		159.0	0		154.6	0	
		1	179.4 (178.8)	-17.3 (-17.9)		157.8	- 1.2		154.4	- 0.2	
		2	169.6	- 9.2		157.3	- 0.4		154.2	- 0.2	
		3	169.2	- 0.4		157.0	- 0.3		154.2	0	
		4	167.8	- 1.4		156.7	- 0.3		154.1	- 0.1	
		5	167.8	0		156.1	- 0.6		153.9	- 0.2	
		6	166.2	- 1.6		156.0	- 0.1		154.0	+ 0.1	
		8	163.3 (162.9)	- 2.9 (-3.3)		155.5	- 0.5		153.9	- 0.1	
		10	162.7	- 0.2		155.1	- 0.4		153.9	0	
		12	161.9	- 0.8	34.8	154.8	- 0.3	- 4.2	153.8	- 0.1	- 0.8
全層累計変位量			- 34.8			- 27.8			- 17.9		
レベル測量による 変 位 量			- 32			- 30			- 16		

表-8 振動ローラ 測点Ⅲ 2 inch センサー

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3 上	No 2-6 No 2-7	0							90.5		
		1							90.7	+ 0.2	
		2							88.4	- 2.3	
		3							88.1	- 0.3	
		4							85.9	- 2.2	
		5							86.9	+ 1.0	
		6							85.9	- 1.0	
		8							83.9	- 2.0	
		10							83.9	0	
		12							83.4	- 0.5	- 7.1
		0									
		1									
		2									
		3									
		4									
		5									
		6									
		8									
		10									
		12									
3 下	No 2-7 No 2-8	0							79.9		
		1							80.9	+ 1.0	
		2							79.8	- 1.1	
		3							79.4	- 0.4	
		4							78.9	- 0.5	
		5							78.8	- 0.1	
		6							78.2	- 0.6	
		8							77.5	- 0.7	
		10							77.5	0	
		12							77.3	- 0.2	- 2.6
全層累計変位量									9.7		
レベル測量による 変 位 量									8		

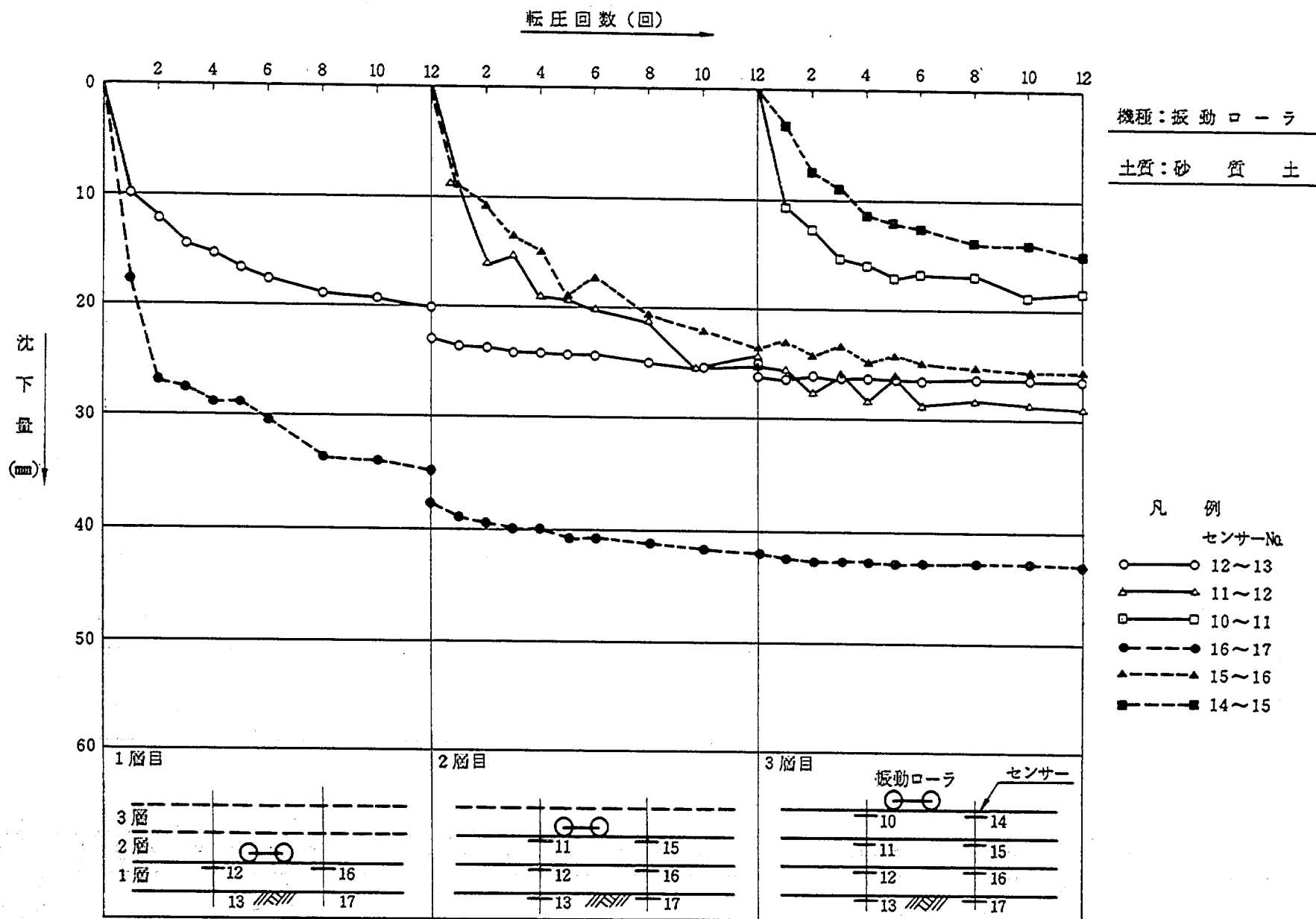


図 - 15 層別沈下量測定結果

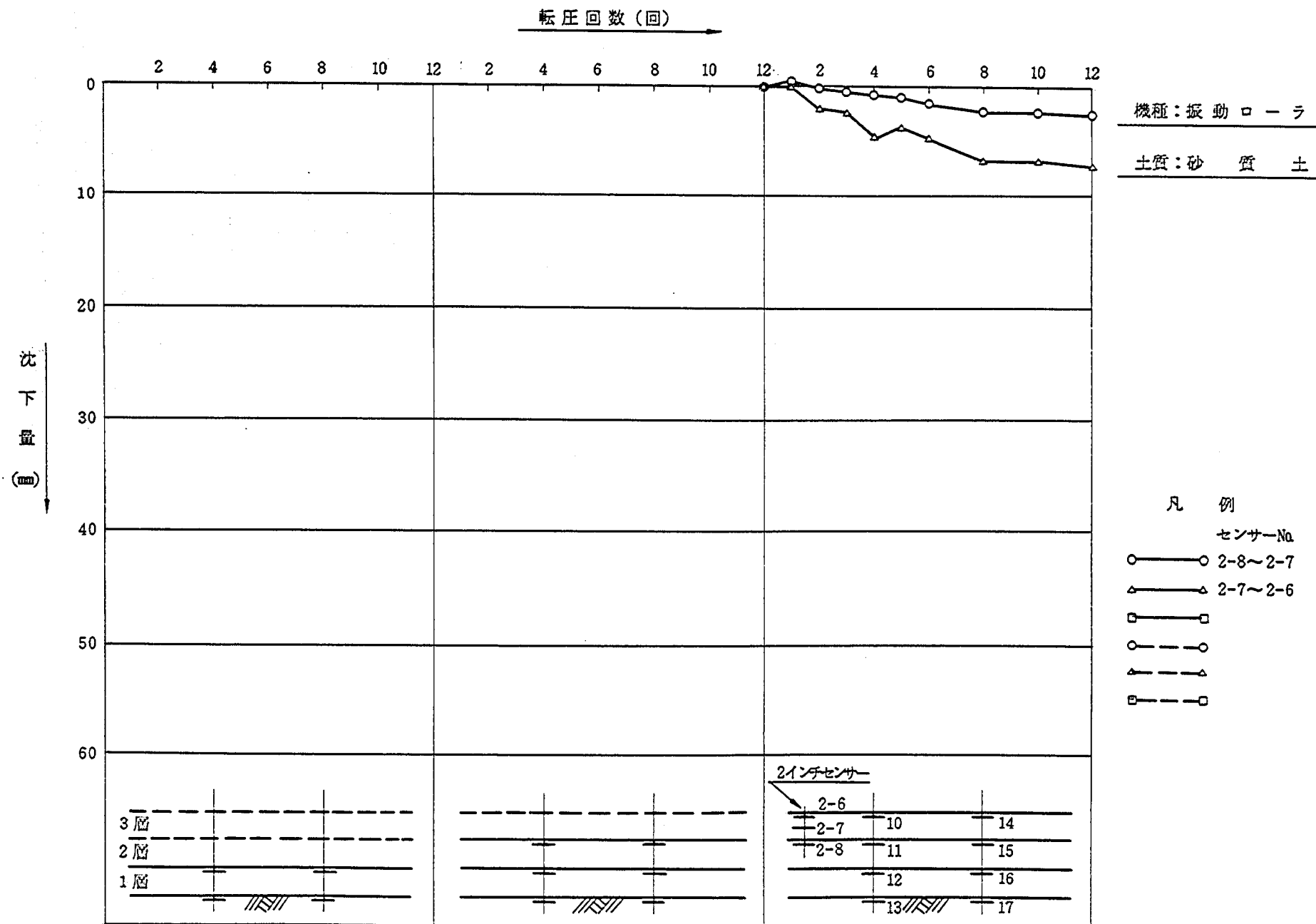


図-16 層別沈下量測定結果(2インチセンサー)

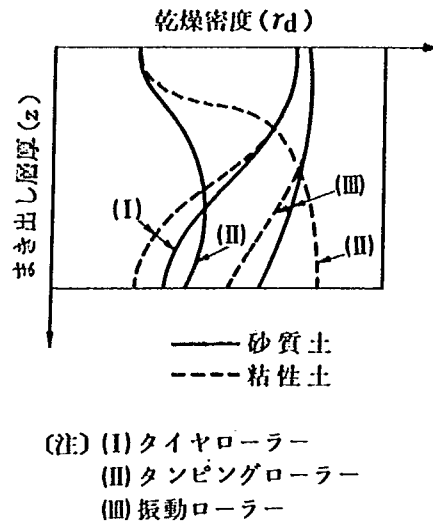


図-17 各種ローラの締固め特性

(2) タイヤローラーによる転圧

表-9に沈下量測定結果の一覧表を示し、これを図-18に沈下量を転圧回数との関係で図示する。表-9から、レベルによる沈下量とソイルストレインゲージによる沈下量の差は3mm以内で収まっている。

図-18の1, 2層目の変位量に比べ3層目の変位量が小さいのは、3層目のブルドーザによる敷均しがスムーズに行われず、初期密度が1, 2層目に比べ若干高くなった結果と考えられる。これは密度測定結果にもあらわれている。

ブルドーザによる敷均し時の変位量は、2層目敷均し時で1.5mm~2.5mm, 3層目敷均し時で1mmとなり、振動ローラーの場合に比べ若干減少している。

転圧時の転圧層より下の層での変位量は、1層下, 2層下ともにほぼ0mmで、上層の転圧効果は振動ローラーの場合よりなお小さく、ほとんどないと言える。

転圧回数ごとの沈下量の傾向は、転圧回数10回前後で一応の落ちつきが見られるが明確ではない。振動ローラーの場合には転圧回数2回までで全沈下量の50~80%, 平均60%の沈下を示したのに比べ、タイヤローラーは10~60%, 平均40%と小さく、比較的ダラダラと沈下している。これは1転圧当りのタイヤローラーの締固めエネルギーが振動ローラーに比べ小さく、同等の締固め効果を得るために多くの転圧回数を必要とすることが考えられる。

図-19に2inchセンサーによる3層目の層内沈下量測定結果を示す。図から、上層, 中層, 下層の沈下量はそれぞれ5.4mm, 8.1mm, 4.1mmとなり、中層が上層を上回っている。一般的にタイヤローラーの転圧効果は上層から順に低下すると言われているが、変位量からみるとこの傾向と異なる結果となった。1層内密度分布測定結果では、上・中・下層の変位量の傾向は2inchセンサーを埋設する際の各層の埋め戻し状態に影響された可能性がある。

表-9 タイヤローラ 測点I

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3	No 18 ? No 19	0							218.0		
		1							218.0	0	
		2							217.6	-0.4	
		3							216.9	-0.7	
		4							216.6	-0.3	
		5							216.1	-0.5	
		6							215.7	-0.4	
		8							215.1	-0.6	
		10							214.6	-0.5	
		12							213.9	-0.7	-4.1
2	No 19 ? No 20	0				201.8			179.1		
		1				193.5	-8.3		179.1	0	
		2				191.1	-2.4		179.1	0	
		3				187.8	-3.3		179.1	0	
		4				186.7	-1.1		179.1	0	
		5				184.5	-2.2		179.0	-0.1	
		6				184.3	-0.2		178.9	-0.1	
		8				182.8	-1.5		179.0	0.1	
		10				181.1	-1.7		179.0	0	
		12				180.5	-0.6	-21.3	179.0	0	-0.1
1	No 20 ? No 21	0	191.5			175.3			174.1		
		1	187.5	-4.0		175.3	0		174.2	0.1	
		2	183.4	-4.1		175.2	-0.1		174.2	0	
		3	182.4	-1.0		175.1	-0.1		174.3	0.1	
		4	181.9	-0.5		175.1	0		174.2	-0.1	
		5	180.5	-1.4		175.0	-0.1		174.3	0.1	
		6	178.8	-1.7		175.1	+0.1		174.2	-0.1	
		8	179.0	-0.2		175.0	-0.1		174.3	0.1	
		10	177.8	-1.2		174.8	-0.2		174.3	0	
		12	178.0	-0.2	-13.5	174.8	0	-0.5	174.3	0	-0.2
全層累計変位量			-13.5			-21.8			-4.0		
レベル測量による 変 位 量			-15			-22			-6		

表-9 タイヤローラ 測点Ⅱ

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3	No 22 / No 23	0							211.7		
		1							210.5	- 1.2	
		2							209.9	- 0.6	
		3							207.6	- 2.3	
		4							207.8	+ 0.2	
		5							206.4	- 1.4	
		6							205.6	- 0.8	
		8							204.6	- 1.0	
		10							203.7	- 0.9	
		12							203.5	- 0.2	- 8.2
2	No 23 / No 24	0				205.6			182.8		
		1				198.7	- 6.9		182.9	+ 0.1	
		2				193.3	- 5.4		182.9	0	
		3				191.1	- 2.2		182.9	0	
		4				189.2	- 1.9		182.9	0	
		5				188.2	- 1.0		182.7	- 0.2	
		6				189.0	+ 0.8		182.8	+ 0.1	
		8				187.5	- 1.5		182.8	0	
		10				184.8	- 2.7		182.8	0	
		12				183.8	- 1.0	- 21.8	182.8	0	0
1	No 24 / No 25	0	206.5			187.0			186.1		
		1	201.2	- 5.3		187.1	+ 0.1		186.2	+ 0.1	
		2	198.1	- 3.1		187.0	- 0.1		186.2	0	
		3	195.4	- 2.7		187.0	0		186.1	- 0.1	
		4	194.4	- 1.0		186.9	- 0.1		186.2	+ 0.1	
		5	192.9	- 1.5		186.8	- 0.1		186.3	+ 0.1	
		6	191.9	- 1.0		186.8	0		186.3	0	
		8	191.5	- 0.4		186.8	0		186.3	0	
		10	190.1	- 1.4		186.6	- 0.2		186.1	- 0.2	
		12	188.4	- 1.7	- 18.1	186.6	0	- 0.4	186.3	+ 0.2	0.2
全層累計変位量			- 18.1			- 22.2			- 8.0		
レベル測量による 変 位 量			- 17			- 22			- 8		

表-9 タイヤローラ 測点Ⅲ 2 inch センサー

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3 上	No 2-1 No 2-2	0							76.1	0	
		1							74.8	- 1.3	
		2							73.5	- 1.3	
		3							72.3	- 1.2	
		4							72.0	- 0.3	
		5							71.5	- 0.5	
		6							71.1	- 0.4	
		8							71.2	+ 0.1	
		10							71.0	- 0.2	
		12							70.7	- 0.3	- 5.4
3 中	No 2-2 No 2-3	0							66.3	0	
		1							63.3	- 3.0	
		2							61.5	- 1.8	
		3							60.4	- 1.1	
		4							59.8	- 0.6	
		5							59.5	- 0.3	
		6							59.1	- 0.4	
		8							58.9	- 0.2	
		10							58.5	- 0.4	
		12							58.2	- 0.3	- 8.1
3 下	No 2-3 No 2-4	0							79.4	0	
		1							78.6	- 0.8	
		2							77.7	- 0.9	
		3							77.1	- 0.6	
		4							76.7	- 0.4	
		5							76.4	- 0.3	
		6							76.3	- 0.1	
		8							76.0	- 0.3	
		10							75.6	- 0.4	
		12							75.3	- 0.3	- 4.1
全層累計変位量									- 17.6		
レベル測量による 変 位 量									20		

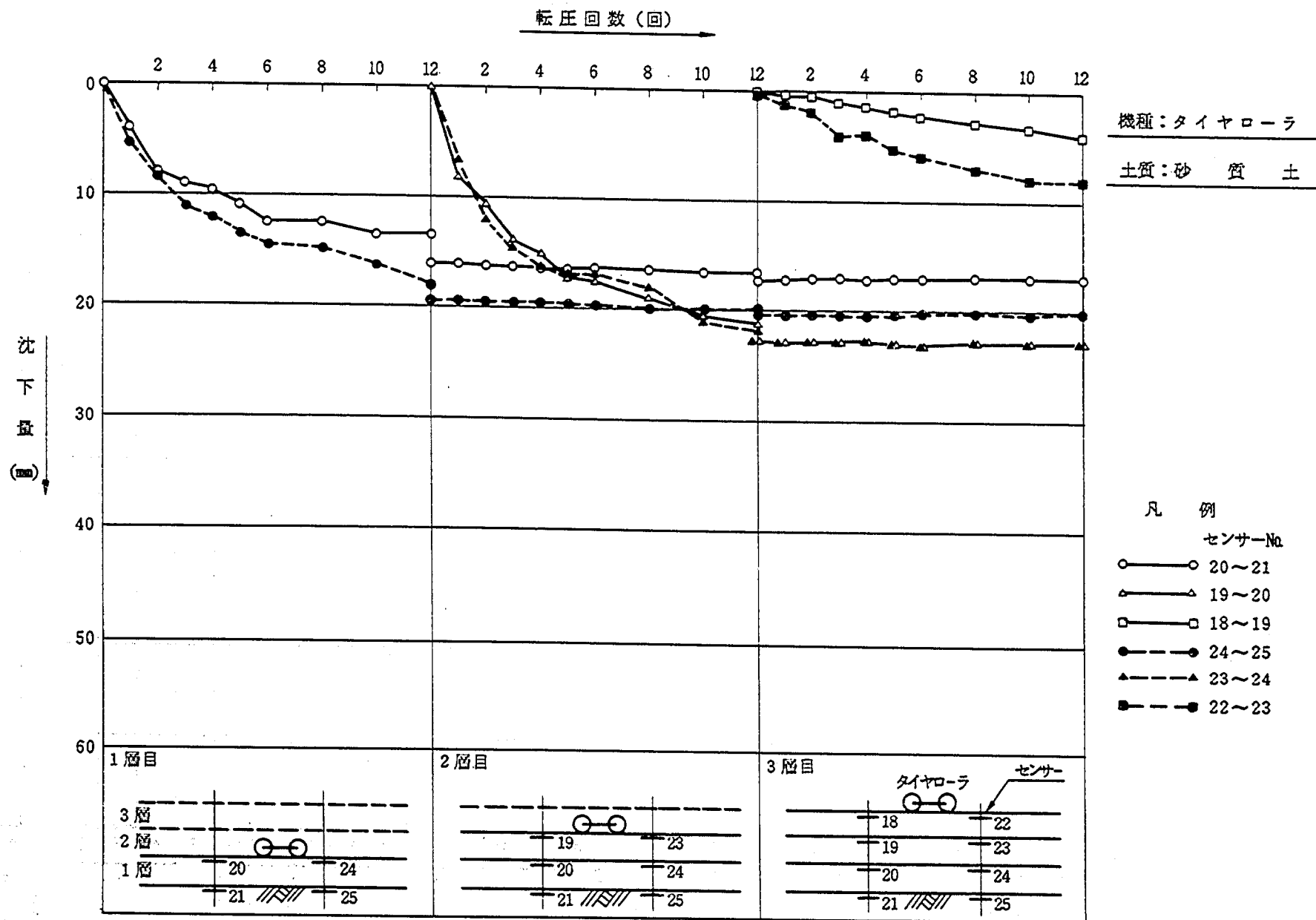


図 - 18 層別沈下量測定結果

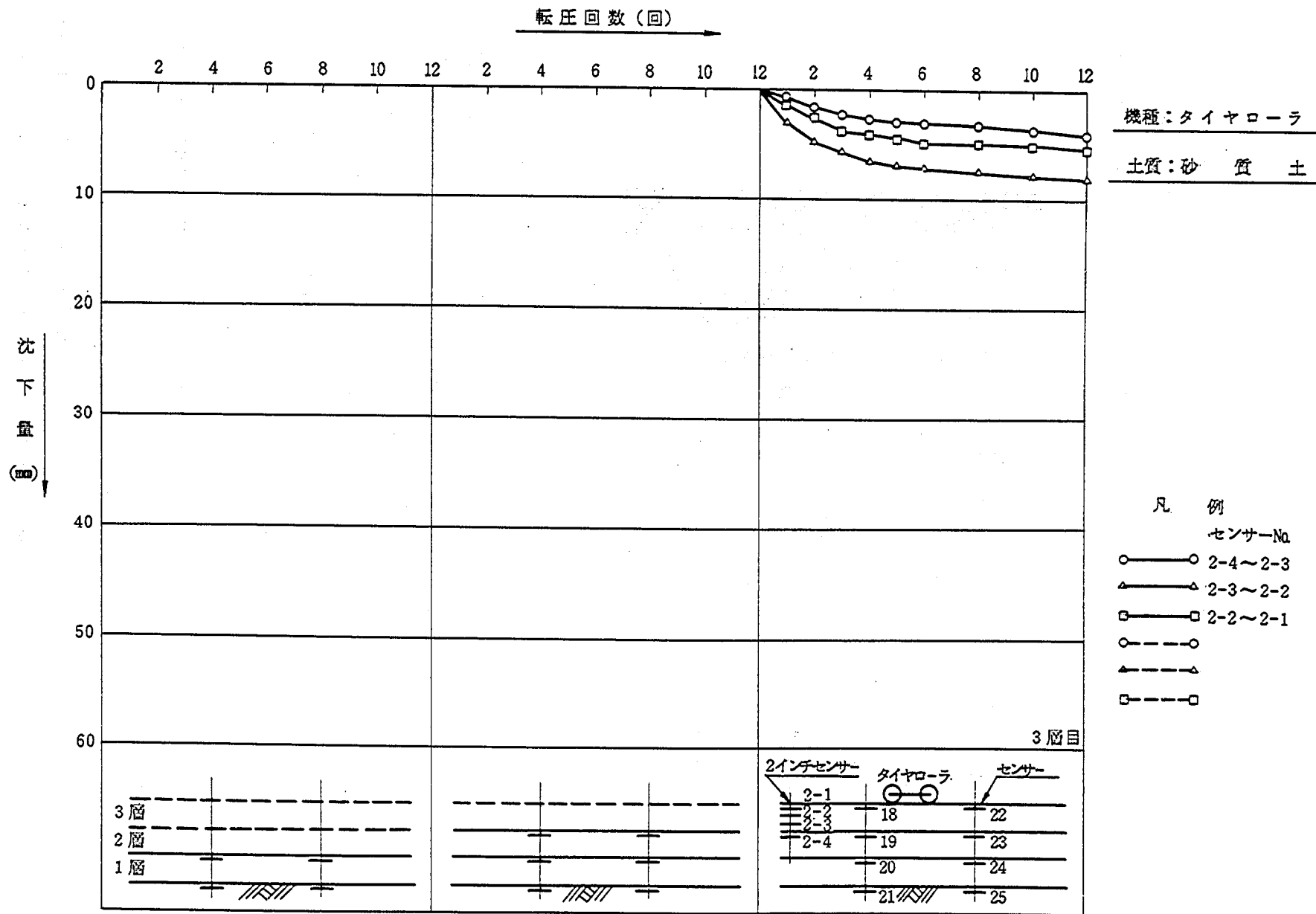
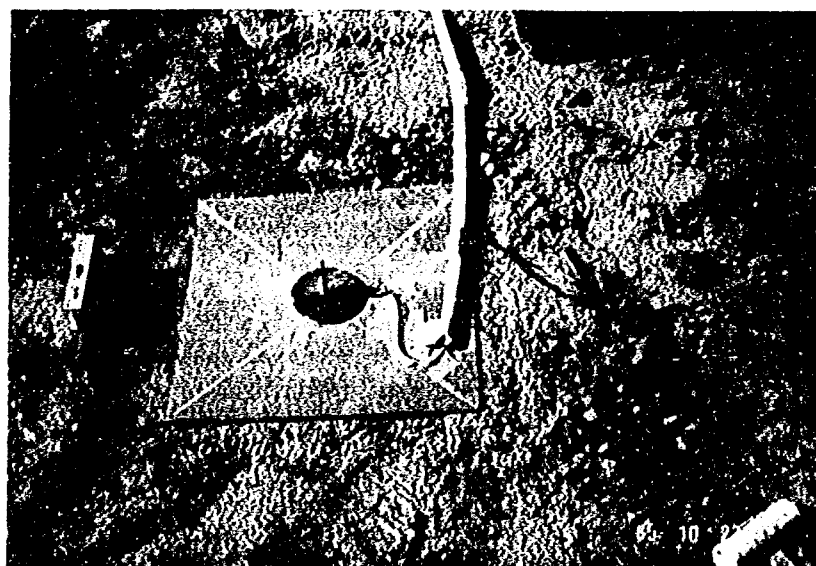


図 - 19 層別沈下量測定結果

(3) タンピングローラによる転圧

タンピングローラの測定は、センサーを転圧層に設置するとタンピングフートにより破壊されるため、4.4で述べたようにセンサーを転圧層の1層下に埋設し転圧試験を実施した。初めに実施した粘性土の転圧では、横レーンの転圧時の影響により、センサーの横方向のずれや傾きが激しく、測定不能となった。そこで、次に実施した砂質土では、センサーに45 cm × 45 cm × 0.3 cmの合板を貼り付け、傾きと横ずれの防止を計ったが、状況は改善されなかった（写真－14 参照）。



写真－14 ズレ止めを施した4 inch センサー

このため、図－20に示すように各層底部に合板を敷き、転圧ごとに表面から合板上に鋼製のピンを刺し、ピンの頭をレベル測量して各合板の沈下量を求め、1層目および2層目の層別変位量を算定した。図－21に転圧回数と沈下量の関係を示す。

図－21によれば、1層目、2層目とも転圧回数6回迄の沈下量は全沈下量の約85%に達している。一方、沈下率との関係では、図－21より8回以降、沈下率1%以下となりタンピングローラの必要転圧回数は8回前後と考えられる。図－21の1層目の2回および4回での隆起現象は、測定ピンが完全に合板に到達しなかったため、合板が隆起した様に測定されたと思われる。

3層目転圧時のNo.5およびNo.4の合板の沈下量は、それぞれ11 mmと21 mmで、3層目転圧の影響が1層目に及んでいると考えられる。

(4) ブルドーザによる転圧（砂質土の場合）

表－10に沈下量測定結果の一覧表を示し、これを図－22に沈下量を転圧回数との関係で図示する。図－22によれば、1層目のNo.13～No.12のセンサーとNo.17～No.16のセンサーの沈下量に10 mm以上の差が生じている。これは敷均し作業がスムーズに行われず、転圧材料がブルドーザの走行で転圧前に締固まり、耕転機で材料をほぐした後試験を行ったため、場所によ

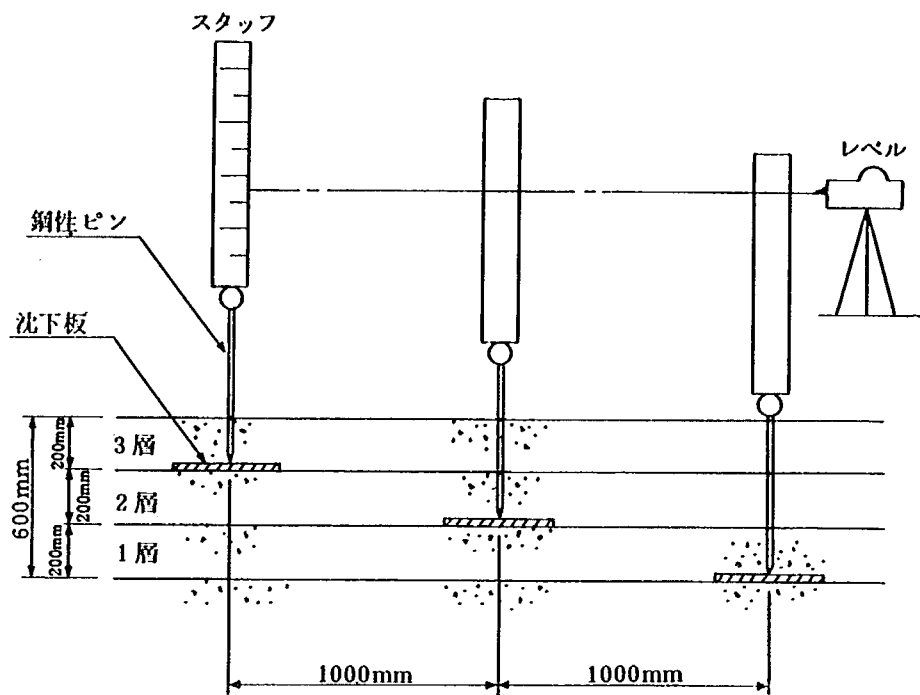


図-20 タンピングローラ変位測定方法

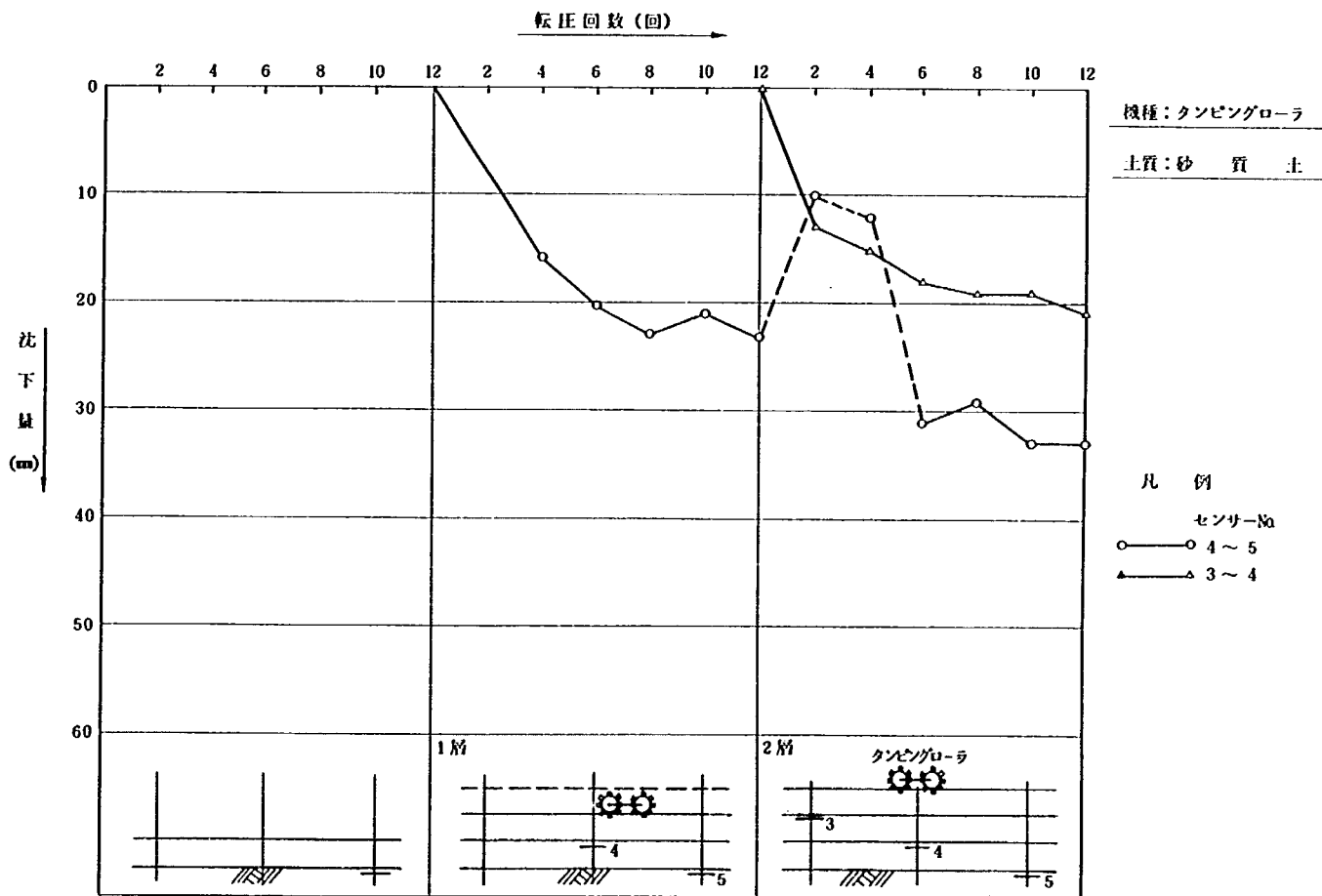


図-21 層別沈下量測定結果

表-10 ブルドーザ(砂質土)測点I

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3	No 10 / No 11	0							213.0	0	
		1							202.1	- 10.9	
		2							200.1	- 2.0	
		3							200.0	- 0.1	
		4							199.7	- 0.3	
		5							199.3	- 0.4	
		6							198.6	- 0.7	
		8							194.4	- 4.2	
		10							194.3	- 0.1	
		12							194.1	- 0.2	- 18.9
2	No 11 / No 12	0				207.7	0		201.4	0	
		1				205.0	- 2.7		200.9	- 0.5	
		2				204.1	- 0.9		200.5	- 0.4	
		3				203.1	- 1.0		200.5	0	
		4				203.1	0		200.4	- 0.1	
		5				202.6	- 0.5		200.2	- 0.2	
		6				202.3	- 0.3		200.2	0	
		8				200.5	- 1.8		199.9	- 0.3	
		10				201.0	+ 0.5		200.1	+ 0.2	
		12				200.2	- 0.8	- 7.5	200.2	+ 0.1	- 2.2
1	No 12 / No 13	0	210.4	0		177.6	0		177.3	0	
		1	202.6	- 7.8		176.8	- 0.8		176.8	- 0.5	
		2	197.7	- 4.9		176.6	- 0.2		176.8	0	
		3	190.3	- 7.4		176.7	+ 0.1		176.7	- 0.1	
		4	187.2	- 3.1		176.7	0		176.6	- 0.1	
		5	183.6	- 3.6		176.5	- 0.2		176.6	0	
		6	182.6	- 1.0		176.4	- 0.1		176.6	0	
		8	179.3	- 3.3		176.3	- 0.1		176.5	- 0.1	
		10	181.2	+ 1.9		176.4	+ 0.1		176.5	0	
		12	176.7	- 4.5	- 33.7	176.6	+ 0.2	- 1.0	176.5	0	- 0.8
全層累計変位量			- 33.7			- 8.5			- 20.9		
レベル測量による 変 位 量			- 34			- 7			- 20		

表-10 ブルドーザ(砂質土)測点II

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3	No 14 / No 15	0							210.0		
		1							190.0	-20.0	
		2							186.8	- 3.2	
		3							188.2	+ 1.4	
		4							187.5	- 0.7	
		5							187.0	- 0.5	
		6							186.7	- 0.3	
		8							184.2	- 2.5	
		10							186.8	+ 2.6	
		12							185.3	- 1.5	-24.7
2	No 15 / No 16	0				201.6			195.9		
		1				198.9	- 2.7		194.9	- 1.0	
		2				198.0	- 0.9		194.6	- 0.3	
		3				197.3	- 0.7		194.6	0	
		4				196.8	- 0.5		194.5	- 0.1	
		5				197.0	+ 0.2		194.4	- 0.1	
		6				196.5	- 0.5		194.3	- 0.1	
		8				194.5	- 2.0		194.1	- 0.2	
		10				194.9	+ 0.4		193.7	- 0.4	
		12				195.0	+ 0.1	- 6.6	193.9	+ 0.2	- 2.0
1	No 16 / No 17	0	200.4	0		182.0	0		181.8		
		1	194.1	- 6.3		180.8	- 1.2		180.6	- 1.2	
		2	191.5	- 2.6		180.5	- 0.3		180.5	- 0.1	
		3	188.2	- 3.3		180.4	- 0.1		180.3	- 0.2	
		4	186.0	- 2.2		180.3	- 0.1		180.3	0	
		5	189.9	+ 3.9		180.3	0		180.2	- 0.1	
		6	189.5	- 0.4		180.2	- 0.1		180.2	0	
		8	189.3	- 0.2		180.1	- 0.1		179.9	- 0.3	
		10	182.1	- 7.2		180.3	+ 0.2		180.1	- 0.2	
		12	181.5	- 0.6	-18.9	180.3	0	- 1.7	180.0	- 0.1	- 1.8
全層累計変位量			- 18.9			- 8.3			- 28.5		
レベル測量による 変 位 量			- 19			- 6			-		

表-10 ブルドーザ(砂質土)測点Ⅲ 2 inch センサー

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3 上	No 2-5 / No 2-6	0							82.0		
		1							61.5	- 0.5	
		2									
		3							56.2	- 5.3	
		4							56.6	+ 0.4	
		5							57.1	+ 0.5	
		6							57.5	+ 0.4	
		8							56.9	- 0.6	
		10							57.7	+ 0.8	
		12							57.7	0	- 24.3
3 中	No 2-6 / No 2-7	0							70.8		
		1							67.4	- 3.4	
		2							66.0	- 1.4	
		3							66.4	+ 0.4	
		4							65.9	- 0.5	
		5							65.6	- 0.3	
		6							65.3	- 0.3	
		8							65.4	+ 0.1	
		10							65.5	+ 0.1	
		12							65.3	- 0.2	- 5.5
3 下	No 2-7 / No 2-8	0							66.5		
		1							63.3	- 3.2	
		2							62.7	- 0.6	
		3							62.1	- 0.6	
		4							61.6	- 0.5	
		5							61.3	- 0.3	
		6							61.0	- 0.3	
		8							60.8	- 0.2	
		10							60.8	0	
		12							60.5	- 0.3	- 6.0
全層累計変位量									- 35.8		
レベル測量による 変 位 量									- 34		

転圧回数(回)

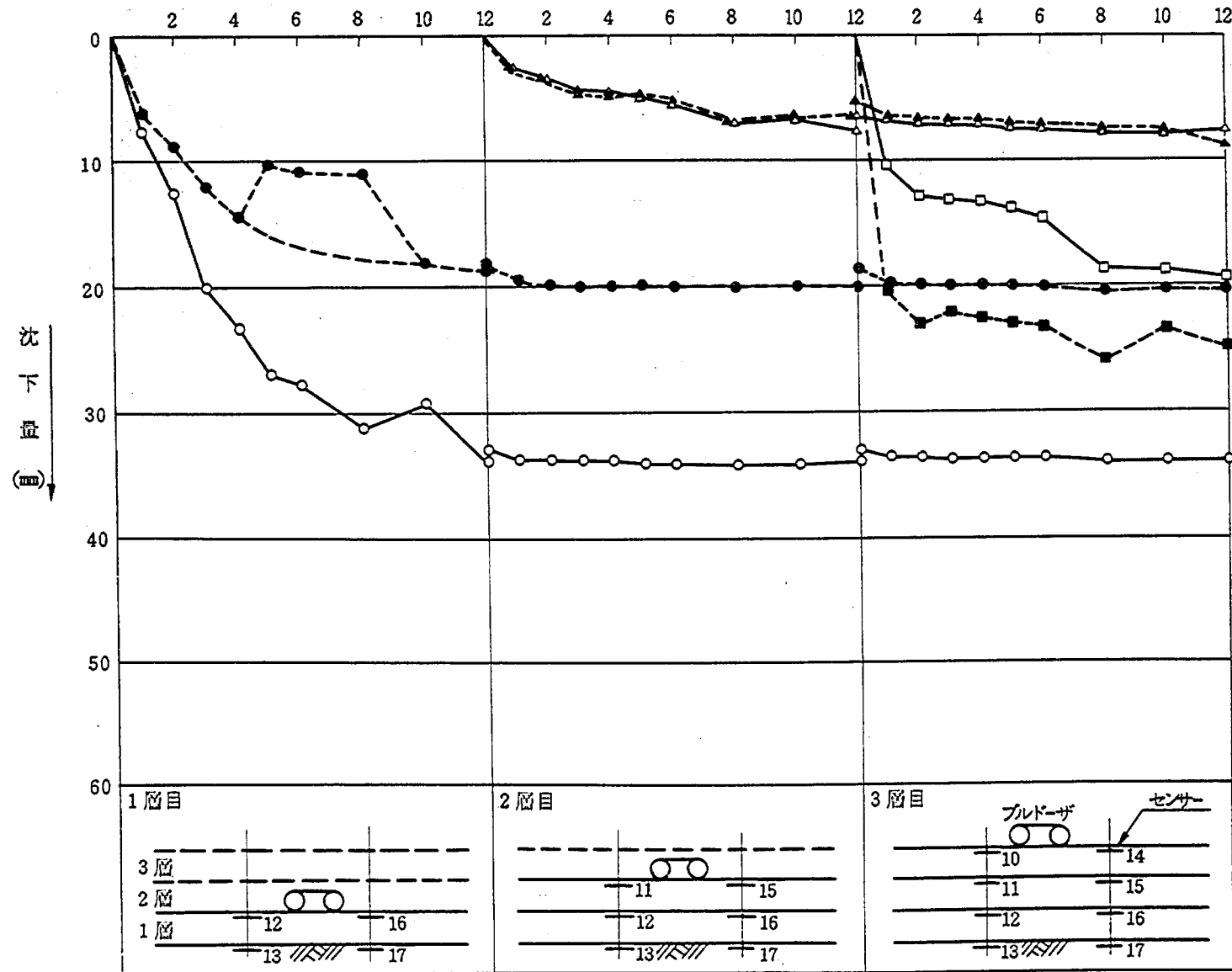


図-22 層別沈下量測定結果

るほぐし方のバラツキが出た結果と思われる。1層目を除き転圧回数8回以降、沈下量の増加は顕著でない。また、転圧層の1層および2層下での変位は最大でも1mm程度であり、下層への転圧効果はタイヤローラ同様無いと言える。

図-23は3層目2 inchセンサー測定結果である。表層(深さ80mm)のセンサーが25mm沈下したのに対し、中・下層はともに5mmで表層部に沈下量が集中している。密度測定結果では上層から順に 1.128 g/cm^3 , 1.156 g/cm^3 , 1.158 g/cm^3 で上層の密度は中・下層に比べ小さく、変位測定結果と逆の結果となった。これは表層部がブルドーザの履帯のツメにより乱され、同層の転圧材料の側方移動等が発生し、見かけの変位は増加したが、締固めの効果は変位量の割に無かったためと思われる。

(5) ブルドーザによる転圧(粘性土の場合)

表-11に沈下量測定結果の一覧表を示し、これを図-25に沈下量を転圧回数との関係で図示する。図-25によれば、各層とも転圧ごとに沈下と隆起が発生している。また、転圧層以外の下層でも沈下や隆起が現れ、転圧土が不安定な状態で締固められている。転圧時の観察でもウェービングや履帯通過時の側方への盛り上がり現象が認められた。この現象は特に転圧回数3~4回以降顕著であった。

図-26に3層目2 inchセンサー測定結果を示す。3回目の転圧までは上層8mmに対し、中・下層3mmとなり、砂質土の場合と同様に沈下は表面に集中する傾向であるが、転圧回数が増すにつれ上層転圧土が乱されるのか、中・下層の沈下量が上層に追いつく傾向となる。

一層内密度分布測定結果では、初期密度 1.008 g/cm^3 に対し、2測点の密度の平均値は上層から順に 1.038 g/cm^3 , 1.020 g/cm^3 , 1.007 g/cm^3 で上にいくにしたがい転圧効果は大きくなっているが、全体的に変位量の増加に比べ密度の増加は小さい。これは図-25に示した20cm層の傾向同様、転圧土が不安定な状態で締固められているのであろう。

5. 1. 2 振動ローラ転圧時の動的変位測定結果

振動ローラ転圧時のソイルストレインゲージによる動的変位量測定結果を図-27に示す。動的測定は測点Ⅱの第1層目に設置したNa16~Na17のセンサーで行った。

一層目転圧時の変位グラフで上に凸になっている箇所は、センサー上を振動ローラの鉄輪が通過したことによって発生したセンサーの磁界の乱れである。ソイルストレインゲージは、センサーに鉄が近づくと磁界が乱され、真の距離より長く測定する傾向がある。当研究室で行った鉄輪の影響確認試験では鉄輪との距離が5cmで誤差9.0%, 同じく30cmで誤差0.5%であった。そこで、鉄輪とセンサーの距離が30cm以上であれば鉄輪の影響は無視できるとしてセンサー上通過前1.2秒(転圧速度2 km/hrとすると鉄輪とセンサーの最小距離は33cmとなる。図-28参照)での振動波形について検討を加えることとした。

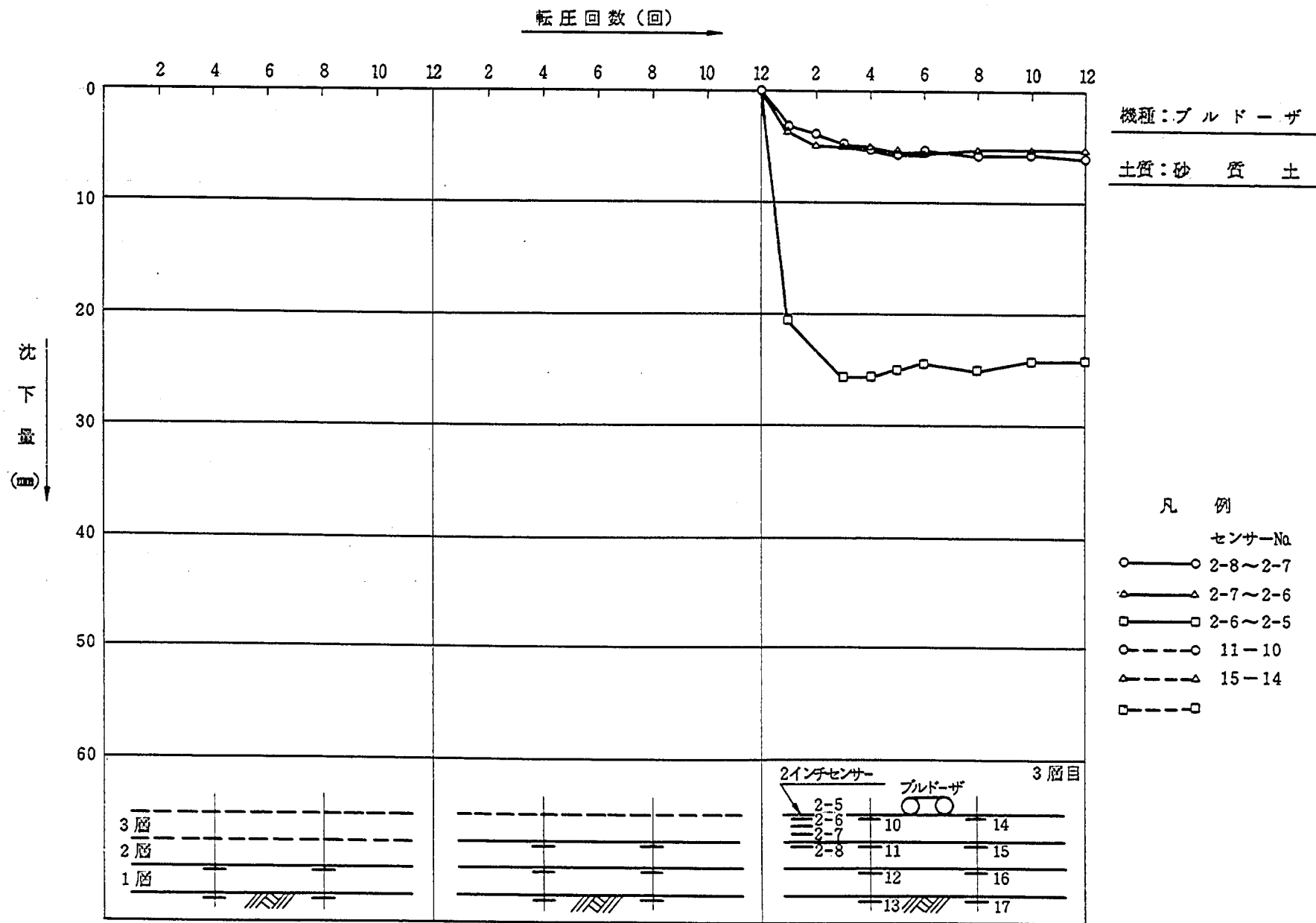


図-23 層別沈下量測定結果

表-11 ブルドーザ(粘性土)測点I

層	センサー 番号	回数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3	No 2 / No 3	0							237.6		
		1							231.0	－ 6.6	
		2							225.6	－ 5.4	
		3							223.7	－ 1.9	
		4							220.2	－ 3.5	
		5							224.3	＋ 4.1	
		6							221.4	－ 2.9	
		8							214.2	－ 7.2	
		10							213.6	－ 0.6	
		12							212.1	－ 1.5	－ 25.5
2	No 3 / No 4	0				221.9			177.5		
		1				196.5	－ 25.4		174.8	－ 2.7	
		2				190.8	－ 5.7		172.7	－ 2.1	
		3				191.2	＋ 0.4		173.2	－ 0.5	
		4				187.4	－ 3.8		170.1	－ 3.1	
		5				191.3	＋ 3.9		170.8	－ 0.7	
		6				185.2	－ 6.1		167.7	－ 3.1	
		8				198.1	＋ 12.9		167.3	－ 0.4	
		10				209.7	＋ 11.6		166.2	－ 1.1	
		12				214.2	＋ 4.5	－ 7.7	166.5	－ 0.3	－ 11.0
1	No 4 / No 5	0	184.3			147.6			141.7		
		1	162.3	－ 22.0		141.9	－ 5.7		140.4	－ 1.3	
		2	156.4	－ 5.9		140.5	－ 1.3		140.1	－ 0.3	
		3	154.8	－ 1.6		141.3	＋ 0.7		140.7	＋ 0.6	
		4	150.6	－ 4.2		140.3	－ 1.0		139.9	－ 0.8	
		5	149.6	－ 1.0		140.4	＋ 0.1		140.2	＋ 0.3	
		6	148.7	－ 0.9		139.5	－ 0.9		139.5	－ 0.7	
		8	144.8	－ 3.9		140.3	＋ 0.8		139.8	＋ 0.3	
		10	142.9	－ 1.9		144.2	＋ 3.9		139.3	－ 0.5	
		12	142.3	－ 0.6	－ 42.0	146.1	＋ 1.9	－ 1.5	140.3	＋ 1.0	－ 1.4
全層累計変位量			－ 42.0			－ 9 2			37.9		
レベル測量による 変 位 量			－ 43			－ 12			－		

表-11 ブルドーザ(粘性土)測点II

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
3	Na 6 / Na 7	0							249.8		
		1							235.5	- 14.3	
		2							232.9	- 2.6	
		3							230.9	- 2.0	
		4							228.8	- 2.1	
		5							226.0	- 2.8	
		6							223.4	- 2.6	
		8							225.0	+ 1.6	
		10							220.5	- 4.5	
		12							226.0	+ 5.5	- 23.8
2	Na 7 / Na 8	0				209.5			187.3		
		1				193.9	- 15.6		180.7	- 6.6	
		2				188.4	- 5.5		178.3	- 2.4	
		3				186.0	- 2.4		178.7	0.4	
		4				183.8	- 2.2		176.1	- 2.6	
		5				182.1	- 1.7		175.8	- 0.3	
		6				178.5	- 3.6		173.4	- 2.4	
		8				176.8	- 1.7		172.2	- 1.2	
		10				182.8	+ 6.0		171.1	- 1.1	
		12				190.0	+ 7.2	- 19.5	172.3	+ 1.2	- 15.0
1	Na 8 / Na 9	0	179.3			140.2			135.5		
		1	148.3	- 31.0		135.2	- 5.0		131.9	- 3.6	
		2	134.8	- 3.5		133.4	- 1.8		130.6	- 1.3	
		3	139.4	+ 4.6		133.9	+ 0.5		131.6	+ 1.0	
		4	132.4	- 7.0		132.5	- 1.4		129.8	- 1.8	
		5	137.4	+ 5.0		131.9	- 0.6		130.5	+ 0.7	
		6	136.1	- 1.3		130.1	- 1.8		128.8	- 1.7	
		8	135.2	- 0.9		131.1	+ 1.0		128.6	- 0.2	
		10	134.9	- 0.3		133.1	+ 2.0		128.9	+ 0.3	
		12	138.1	+ 3.2	- 41.2	136.7	+ 3.6	- 3.5	128.7	- 0.2	- 6.8
全層累計変位量			- 41.2			- 23.0			- 45.6		
レベル測量による 変 位 量			- 40			- 21			-		

表-11 ブルドーザ(粘性土)測点Ⅲ 2 inch センサー

層	センサー 番 号	回 数	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量	離間距離	変 位 量	総変位量
	No 2-1 / No 2-2	0							103.0		
		1							94.9	8.1	
		2							95.0	0.1	
		3							95.3	0.3	
		4							95.7	0.4	
		5							96.6	0.9	
		6							95.4	1.2	
		8							96.3	0.9	
		10							96.2	0.1	
		12							97.7	1.5	- 5.3
	No 2-2 / No 2-3	0							73.4		
		1							71.1	2.3	
		2							70.1	1.0	
		3							70.4	0.3	
		4							67.0	3.4	
		5							69.8	2.8	
		6							68.5	1.3	
		8							67.7	0.8	
		10							68.0	0.3	
		12							67.6	0.4	- 5.8
	No 2-3 / No 2-4	0							67.1		
		1							64.9	2.2	
		2							63.9	1.0	
		3							63.6	0.3	
		4							63.0	0.6	
		5							62.7	0.3	
		6							61.4	1.3	
		8							60.2	1.2	
		10							60.8	0.6	
		12							59.7	1.1	- 7.4
全層累計変位量								- 18.5			
レベル測量による 変 位 量											

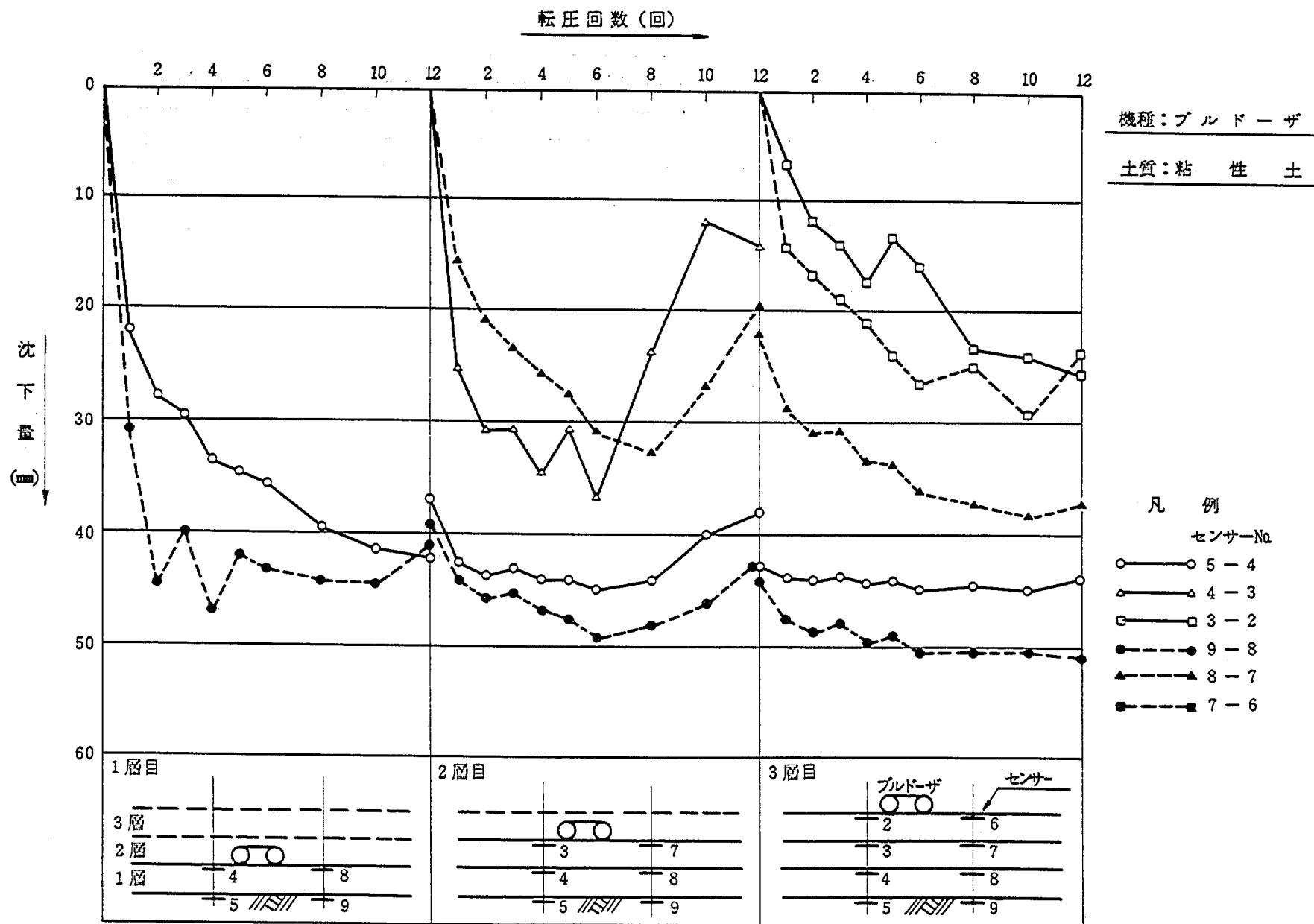


図 - 25 層別沈下量測定結果

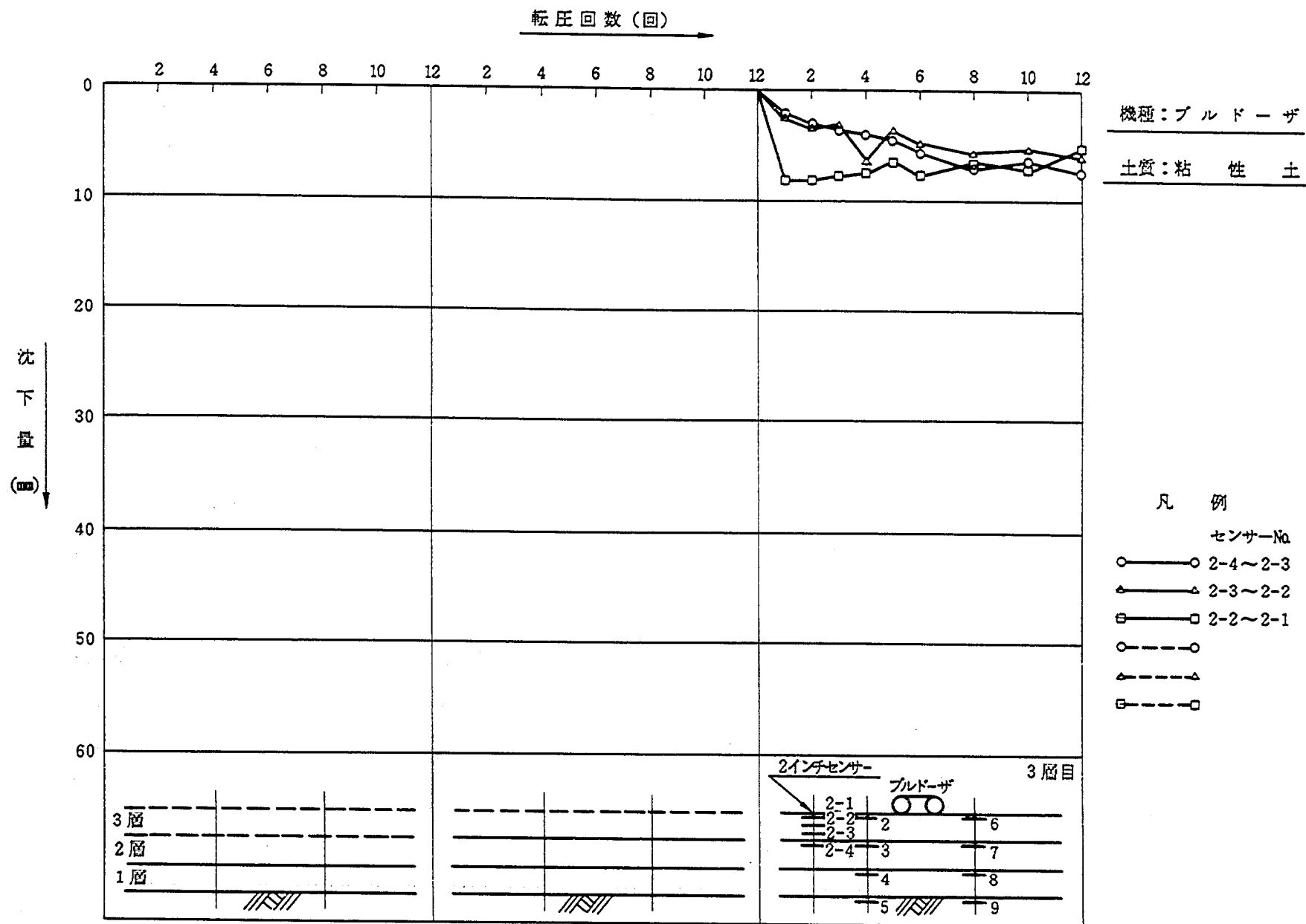


図-26 層別沈下量測定結果

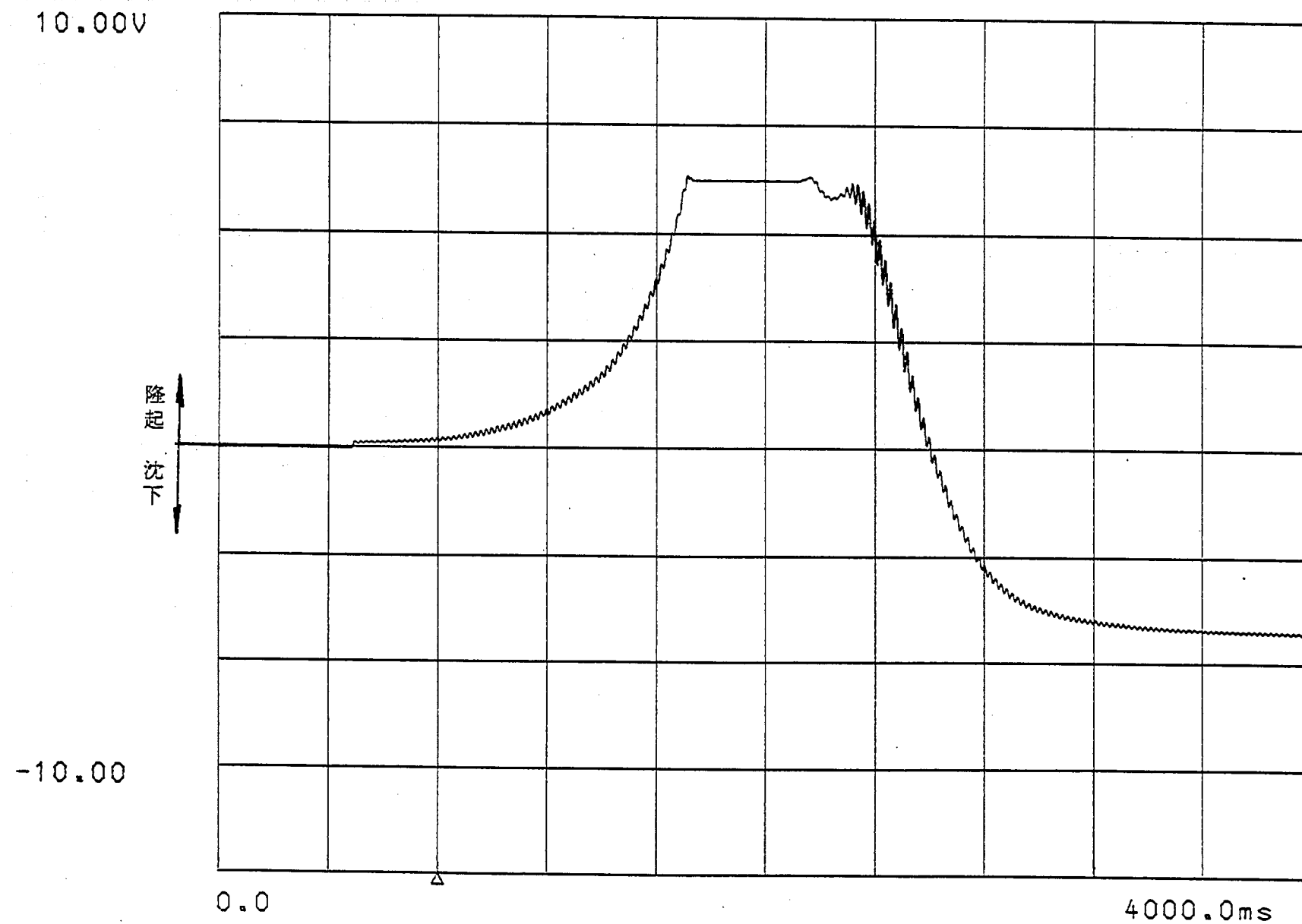
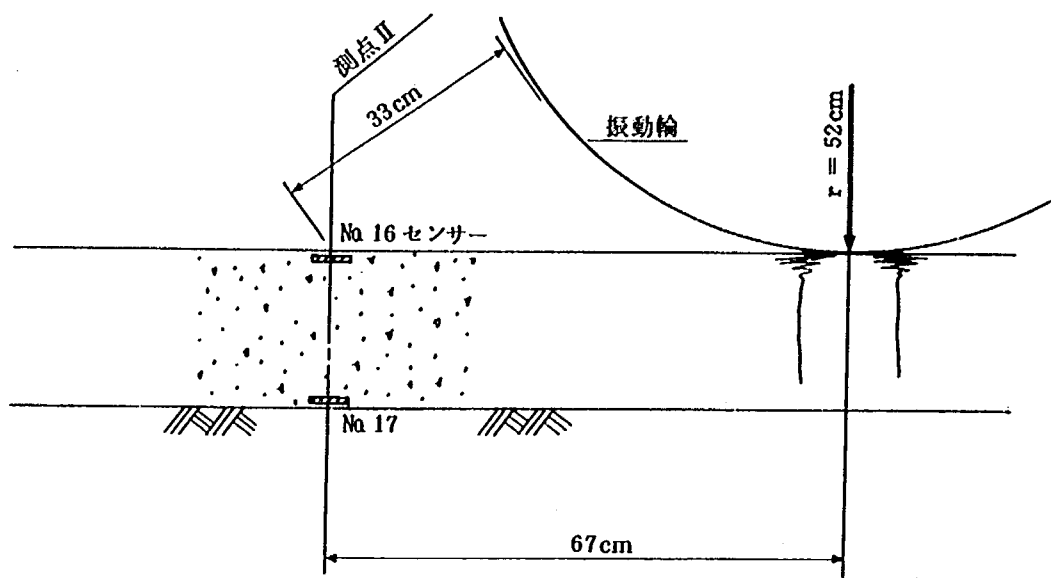


圖-27 動的変位測定結果 (1層目, 1回転圧時)



図－28 振動輪と測点の関係

図－29(a)は転圧1回目の振動ローラ通過時の振幅である。図中のカーソル位置は、振動ローラのセンサー手前1.2秒に相当する。検討した振幅は、このカーソルの前後2つのピークとの差をとり平均して求めた。以後同様に奇数回毎の振動波形を求め表－12に示す振幅を算定した。同表の振幅を転圧回数ごとにプロットし図－30に示す。図中Na 16～Na 17センサーの沈下率を併せて示した。

表－12 振動ローラ1層目振動振幅測定結果

転 圧 回 数 (転圧速度)	上側ピーク 電 圧 (V)	下側ピーク 電 圧 (V)	ピークツーピーク 電 圧 (V)	ピークツーピーク 電 圧 の平均 (V)	較 正 値 (mm/v)	振 幅 (mm)
1 (v = 1.9 km/h)	0.238 0.252	0.106	0.132 0.146	0.139	1.695	0.24
3 (v = 2.2 km/h)	0.634 0.680	0.202	0.432 0.478	0.455	1.149	0.52
5 (v = 1.9 km/h)	1.434 1.462	1.006	0.428 0.456	0.442	1.053	0.47
7 (v = 1.8 km/h)	0.718 0.758	0.210	0.508 0.548	0.528	0.980	0.52
9 (v = 2.0 km/h)	0.854 0.894	0.234	0.620 0.660	0.640	0.926	0.59
11 (v = 1.9 km/h)	0.818 0.840	0.192	0.626 0.648	0.637	0.926	0.59

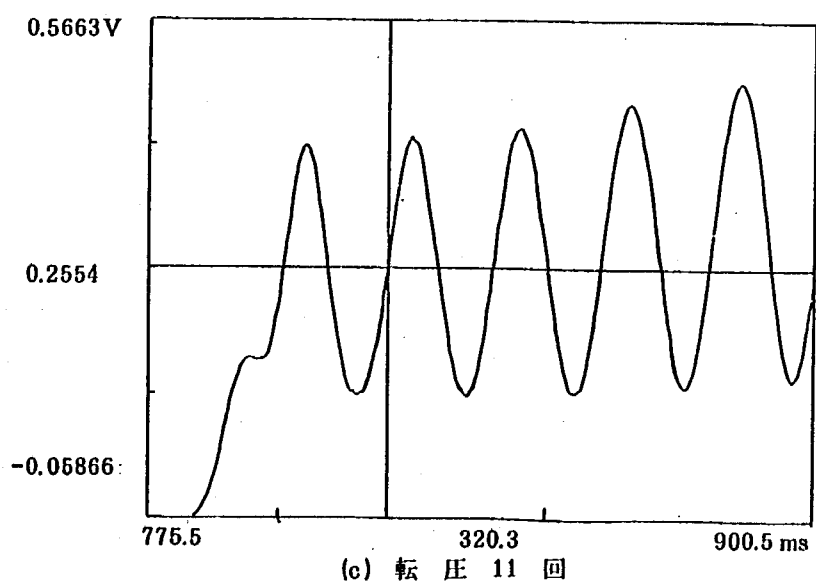
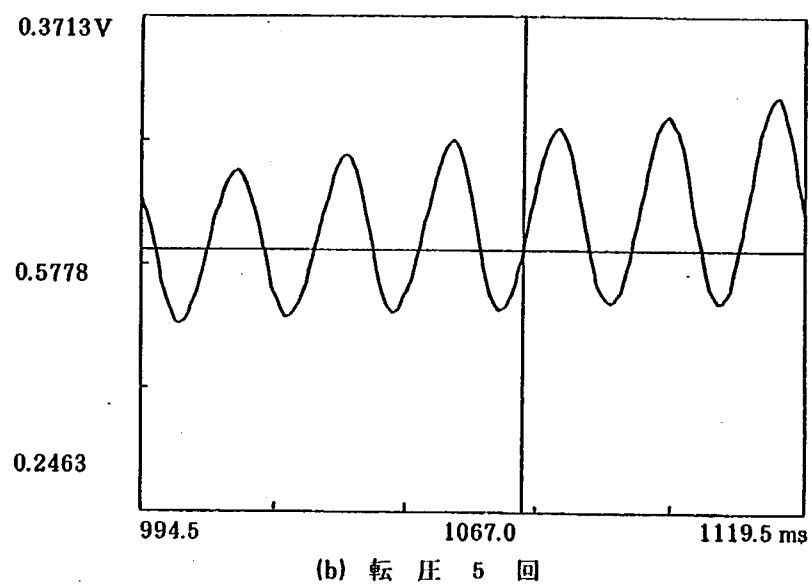
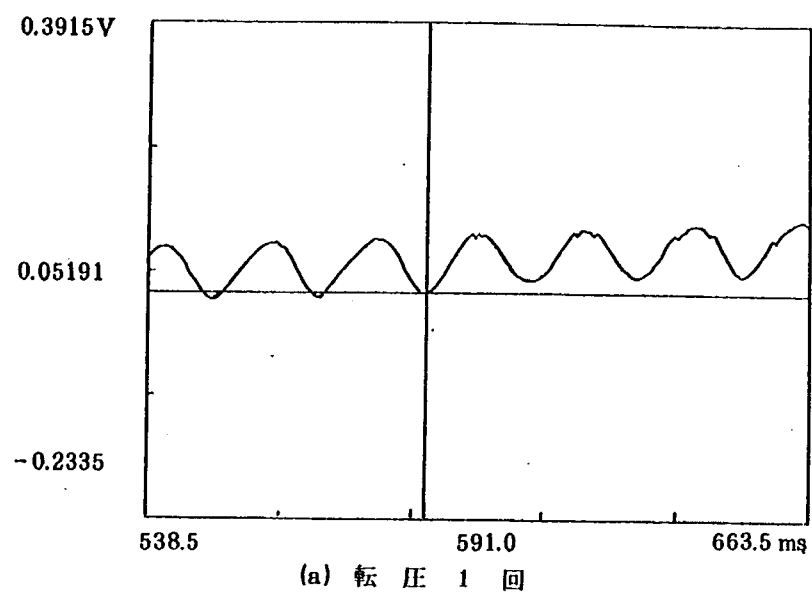


図 - 29 動的変位測定結果拡大図 (1 層目)

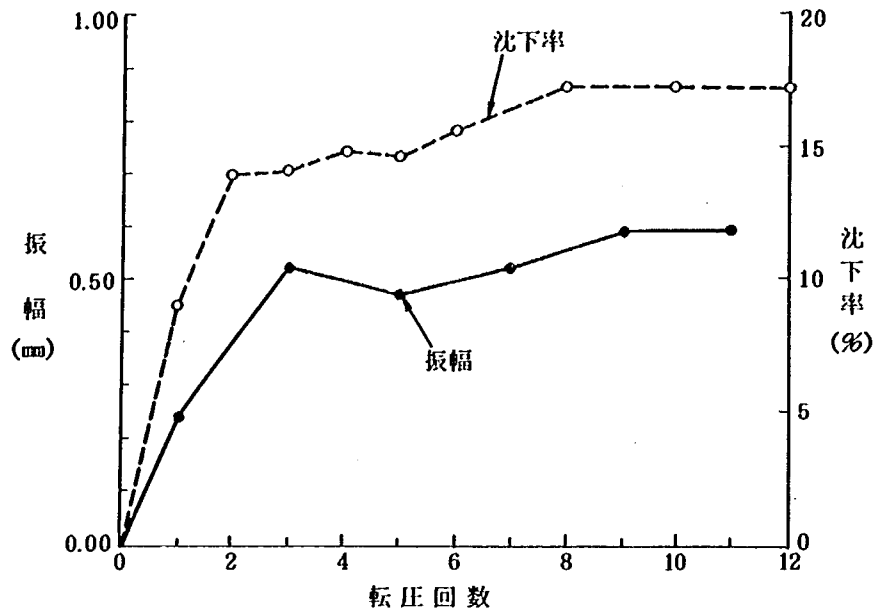


図-30 振幅と転圧回数の関係

図-30によれば、振幅は転圧回数が増すにつれ増加している。振幅の増加傾向は、沈下率の増加傾向と良く似ており、密度の増加にともない振幅も増加していると考えられる。これは、転圧材料の初期の間隙比が大きく ($e = 1.65$, $Sr = 58\%$)、転圧回数の少ない時期は振動ローラの振幅が減衰され伝わる振幅も小さいが、転圧を繰り返すことにより密度も増加するため、間隙比が減少して ($e = 1.35$, $Sr = 77\%$)、伝わる振幅も振動ローラの振幅に近づき、大きくなったためと思われる。このような密度変化と振幅の関係は、例えば振動輪直下で同様の傾向が得られるか検討を要するが、密度増加を推定する一指標となりうると思われる。

5.2 現場密度試験

表-13にRI法および砂置換法による乾燥密度測定結果と含水比測定結果を示す。

同表から、転圧前後の試験材料のバラツキを比較すると表-14に示すとおりとなった。転圧前の変動係数は、砂質土で5.2%、粘性土で4.2%となり比較的小さいと考えられる。また、転圧後の密度の変動係数は2材料とも減少している。これは、転圧によって密度が増加し、ある一定の値に近づき全体が均一化されるためであろう。図-31は初期密度と転圧後の密度増加率の関係を示したものであるが、砂質土、粘性土ともに負の相関が見られる。したがって、初期密度が低い場合増加率は高く、初期密度が高い場合増加率は低くなり、転圧によって密度が均一化することがわかる。これは表-14に示した転圧による変動係数の減少と符合する。

表-13 密度試験結果(砂質土)

機 種 試験項目 試験法 試験時期			振 動 ロ ー ラ						タ イ ヤ ロ ー ラ				タンピングローラ				ブ ル ド ー ザ			
			転 圧 前		6 回転圧後		12 回転圧前		転 圧 前		12 回転圧後		転 圧 前		12 回転圧後		転 圧 前		12 回転圧後	
乾 燥 密 度 (g/cm^3)	R 法	1	0.882 1.016 0.879	0.926	1.020 1.032 0.986	1.013	1.032 1.069 1.038	1.046	1.070 0.982 0.993	1.015	1.124 1.074 1.102	1.100	1.109 1.082 1.103	1.098	1.165 1.165 1.120	1.150	1.080 1.045 1.063	1.180 1.162 1.084	1.142	
		2	1.006 1.040 0.999	1.015	1.129 1.136 1.152	1.139	1.126 1.158 1.154	1.146	1.039 0.988 1.086	1.038	1.104 1.147 1.109	1.100	1.055 1.057 1.020	1.044	1.137 1.155 1.163	1.152	0.994 1.058 1.034	1.096 1.071 1.083	1.083	
		3	1.029 1.070 1.049	1.049	1.115 1.136 1.114	1.102	1.144 1.136 1.127	1.136	1.040 1.071 1.074	1.062	1.087 1.113 1.146	1.115					1.008 1.029 0.945	0.994 1.137 1.052	1.079	
	砂 置 換 法	1	0.824 0.939 0.853	0.872			1.016 1.005 1.124	1.048	0.973 1.020 1.047	1.013	1.127 1.167 1.175	1.156	1.107 1.099 1.045	1.084	1.121 1.172 1.139	1.144	1.024 1.084 1.084	1.056 1.017 1.095	1.056	
		2	0.995 1.004 0.963	0.987			1.183 1.163 1.212	1.186	1.074 0.972 1.072	1.039	1.107 1.113 1.082	1.089	1.131 1.012 1.086	1.076	1.142 1.034 1.155	1.110	1.071 1.065 1.076	1.178 1.170 1.044	1.131	
		3	1.088 1.065 1.077	1.077			1.286 1.157 1.141	1.195	1.068 1.065 1.057	1.063	1.137 1.137 1.166	1.447					1.096 1.088 0.989	1.134 1.143 1.115	1.131	
		3-上			注1)															
		3-中																		
		3-下																		
含 水 比 (%)	R 法	1	40.4 38.0 38.6	39.0	42.8 41.5 43.5	42.6	42.0 40.2 44.1	42.1	31.8 34.5 36.5	34.2	35.6 35.5 36.8	36.0	37.0 40.1 40.2	39.1	37.1 37.4 36.8	37.1	30.9 30.4 30.7	30.7 28.3 29.5	29.5	
		2	40.6 40.9 39.3	40.3	39.0 39.3 38.7	39.0	39.6 38.2 38.4	38.7	37.6 38.1 36.9	37.5	34.4 35.2 37.2	35.6	36.2 37.7 36.0	36.6	38.2 38.2 35.9	37.4	36.1 32.8 33.0	32.4 35.1 32.5	33.3	
		3	38.3 36.7 38.7	37.9	39.9 41.9 40.7	40.8	38.6 37.8 39.6	38.7	34.2 35.6 34.6	34.8	34.1 34.2 30.2	32.8					34.8 34.1 33.4	36.7 34.6 35.0	35.4	
	砂 置 換 法	1	45.0 45.3 48.2	46.2			51.8 47.2 43.4	47.5	37.0 37.0 38.3	37.4	35.0 37.0 37.6	36.5	41.0 39.9 38.2	39.7	38.3 39.3 37.6	43.7	35.0 36.5 36.5	35.1 35.5 33.1	34.6	
		2	44.5 44.7 42.6	43.9			45.5 42.2 43.1	43.6	38.8 39.8 39.8	39.5	39.1 37.7 39.1	38.6	40.2 43.3 47.6	43.7	41.1 39.8 40.8	40.5	37.4 35.5 36.7	35.6 35.8 34.4	35.3	
		3	40.3 42.6 42.4	41.8			39.9 38.2 40.8	39.6	36.8 37.5 36.6	37.0	37.2 36.4 32.6	35.4					38.4 36.8 37.6	37.3 37.6 39.0	38.3	
		3-上			43.1		40.5		36.7		36.9						37.5	37.8		
		3-中			42.3		41.0		36.7		36.6						37.5	37.3		
		3-下			42.3		40.2		37.1		35.2						37.3	38.2		

注1) 3層目、一層内密度測定結果は全て転圧後

表-13 密度試験結果(粘性土)

試験項目	試験法	試験時期	タンピングローラ				ブルドーザ				〈参考〉 振動ローラ 注2) (6回転シリーズ)			
			転圧前		10回転圧後		転圧前		12回転圧後		転圧前		6回転圧後	
乾燥密度 (g/cm ³)	R	1	0.985	1.019	1.066	1.037	0.991	0.980	1.056	1.034	1.008	1.030	1.120	1.116
			1.077		1.015		1.040		1.030		1.046		1.123	
			0.994		1.031		0.910		1.015		1.037		1.106	
	I	2	0.985	1.038	1.058	1.064	0.998	1.015	0.986	0.991	1.035	0.994	1.112	1.082
			1.065		1.089		1.023		0.999		0.987		1.046	
			1.063		1.044		1.025		0.989		0.961		1.087	
	砂置換法	3					0.976	0.993	1.053	1.037	1.036	1.067	1.103	1.132
							1.009		1.020		1.119		1.152	
											1.046		1.142	
		1	0.997	1.008	1.012	1.038	0.987	0.977	0.993	1.008	1.020	1.058	1.140	1.139
			0.936		1.089		0.984		1.015		1.052		1.131	
			1.091		1.012		0.959		1.015		1.101		1.145	
		2	0.788	0.926	1.051	1.057	0.965	0.990	0.907	0.953	1.019	0.988	1.210	1.141
			1.006		1.075		1.062		0.999		0.946		1.125	
			0.984		1.044		0.942		0.953		0.999		1.087	
		3					0.989	1.008	1.078	1.073	1.001	1.031	1.185	1.185
							1.027		1.067		1.008		1.180	
							注1)				1.085		1.190	
		3-上					0.998		1.062		1.167		1.198	
		3-中					1.019		1.020		1.078		1.063	
		3-下					0.967		1.047		1.040		1.060	
含水比 (%)	R	1	46.0	48.0	47.0	49.6	51.1	50.5	49.1	49.4	35.6	37.2	33.5	35.0
			45.7		50.7		46.2		49.8		36.6		35.8	
			52.4		51.1		54.1		49.3		37.2		35.6	
	I	2	48.3	48.5	47.1	47.8	54.8	52.8	55.5	55.7	36.4	36.8	36.4	37.7
			49.0		46.4		52.8		55.0		37.8		39.4	
			48.3		49.9		50.7		56.7		36.1		37.4	
	砂置換法	3					54.3	53.2	50.3	51.3	37.2	37.8	37.3	36.8
							52.1		52.3		37.2		37.0	
											36.9		36.1	
		1	52.4	55.3	52.1	54.4	52.5	55.7	53.0	55.6	38.2	37.5	37.9	37.5
			54.0		51.6		59.7		58.7		37.3		38.2	
			56.4		53.4		54.8		55.0		37.1		36.3	
		2	54.5	53.4	52.1	51.0	55.7	55.3	57.1	57.1	38.8	38.9	37.9	38.5
			52.4		50.4		53.2		55.9		38.1		38.3	
			53.3		50.5		57.0		58.4		39.8		39.2	
		3					55.7	54.7	49.5	50.6	40.1	41.7	39.4	38.0
							53.7		51.7		45.6		38.6	
											39.3		36.0	
		3-上					53.7		54.8		40.5		39.6	
		3-中					53.2		55.3		38.9		43.8	
		3-下					55.6		56.0		32.2		42.5	

注2) 〈参考〉の振動ローラは、6回で転圧を終了したもので転圧材料は砂質土

表-14 転圧前後の密度のバラツキ

土 質	時 期	平 均 値 $\bar{x}$ (g/cm ³)	標 準 偏 差 σ (g/cm ³)	変 動 係 数 σ/z (%)
砂 質 土	転 圧 前	1.029	0.053	5.2
	転 圧 後	1.114	0.042	3.8
粘 性 土	転 圧 前	1.010	0.042	4.2
	転 圧 後	1.032	0.029	2.8

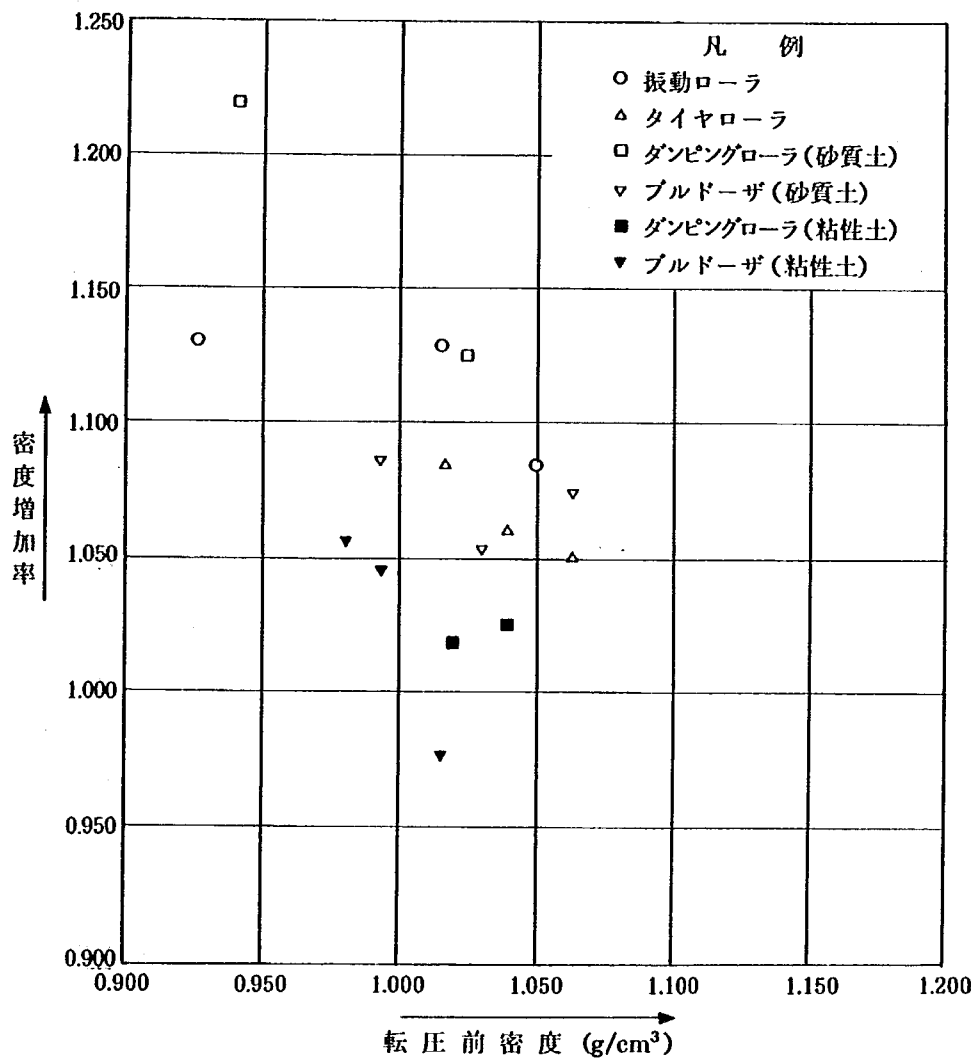


図-31 転圧前密度と密度増加率の関係

5.3 現場透水試験

表-15 に現場透水試験結果を示す。表-15 から砂質土の場合の振動ローラおよびタイヤローラの透水係数が 10^{-4} となり、タンピングローラの透水係数 10^{-6} に比べ2オーダー高い値を示した。この原因として転圧後の密度の差が考えられるが、同表に示したようにタンピングローラの密度が他の2機種に比べ若干高いものの大差は無く、密度の差とは言えない。

表-15 透水試験結果

機 種	土 質	孔 深 (cm)	孔 径 (cm)	乾燥密度 (g/cm ³)	透 水 係 数 (cm/sec)	
振 動 ロ ー ラ	砂 質 土	30.37	19.67	1.096	2.391×10^{-4}	2.621×10^{-4}
		30.17	21.10		2.850×10^{-4}	
タ イ ヤ ロ ー ラ	"	30.47	19.95	1.100	1.079×10^{-4}	1.077×10^{-4}
		30.30	19.98		1.074×10^{-4}	
タンピングローラ	"	31.43	19.77	1.151	1.480×10^{-6}	1.480×10^{-6}
		28.85	19.83			
"	粘 性 土	29.87	19.45	1.051	0.765×10^{-6}	1.133×10^{-6}
		29.48	19.63		1.500×10^{-6}	

今回の転圧試験では各転圧層のレーキングを実施しなかった。したがって、転圧面の平滑な振動ローラとタイヤローラの各層間の一体性は、タンピングフットで表面をかき起こせるタンピングローラのそれに比べ低くなり、この結果注入水が層間から抜け、高い透水係数が計測されたと考えられる。ただし、実施工においてはレーキングを実施するため、振動ローラおよびタイヤローラの透水係数は表-15のように高い値とはならないと考えられる。

一方、長沼の材料は砕かれていない土塊の混入が目立つ。振動ローラとタイヤローラは共に転圧時の土塊破碎能力でタンピングローラに劣るため、両機種の転圧後の状態はかなりの土塊が未破碎のまま残っていたと考えられる。このため、未破碎土塊周辺には密度の疎な状態が存在し、注入水がこの疎な部分からリークして、高い透水係数が計測されたと考えられる。

タンピングローラの粘性土の透水係数は 10^{-6} オーダーで妥当なものと判断される。

6. 考 察

6.1 他ダムにおける軟岩の築堤材料への使用例

長沼ダムの築堤材料は新第三紀鮮新世の砂質土、火山灰質粘性土等である。新第三紀の軟岩は、従来堤高の高いダムでの使用実績は少ない。しかし、仲野によれば、³⁾ 表-16に示すいくつかのダムにおいて軟岩を築堤材料として使用し、これまで何ら問題が生じていない。以下に表-16に示した2, 3のダムの品質管理にあたっての留意点をあげる。

山村ダムでは下流ランダムゾーンとコアゾーンで泥岩を使用しているが、品質管理の留意点として泥岩塊の細粒化を十分行うことを挙げている。コア部の最大粒径を100 mm以下とし、タンピングローラと振動ローラの併用で転圧を行った。締固め管理にはD値管理を行っている。

岩坂ダムでは最適含水比78~78%と含水比の非常に高い風化泥岩を使用している。コア部の最大粒径は山村ダム同様100 mmである。転圧に際しての留意点として、岩塊の細粒化と撒き出し厚さの管理である。特に撒き出し厚さの管理は、撒き出し厚の増加による透水異方性の発達を避けるために必要としている。

以上のように両ダムに共通する点は岩塊の細粒化を極力実施することであろう。特に撒き出し厚さが厚くなった場合、上層に細粒部、下層に粗粒部と2つのゾーンが形成され易く、透水異方性の発達が助長される。長沼ダムの材料でも土塊の混入が目立つため、上記2ダムの例から見ても転圧前の土塊の細粒化を実施するべきではないだろうか。

6.2 転圧機種について

6.2.1 沈下量による締固め効果の比較

図-32に砂質土の場合の各転圧機種別変位率($(\text{転圧前距離})/(\text{転圧後距離}) \times 100\%$)の比較図を示す。変位率は3層分の平均値で表わした。また、表-17に転圧回数12回目の変位率の幅と変動係数を示す。ここに示した変位率は、仮に転圧による沈下量が鉛直方向のみの変形で横方向への移動がないものとすれば、転圧前後の密度の増加率と等しくなり、変位率が大きく変動係数の小さい機種が効率の良い転圧機種と考えられる。

変位率の平均値が一番高い機種は図-32からわかるように、

(1)振動ローラ、(2)タンピングローラ、(3)ブルドーザ、(4)タイヤローラの順で振動ローラとタンピングローラは同等である。表-17から変動係数の小さな順はタンピングローラのサンプル数 $n=2$ に問題はあがるが一応

(1)タンピングローラ、(2)タイヤローラ、(3)振動ローラ、(4)ブルドーザの順となる。これから、変位率の平均値が高く、バラツキの小さい機種は、タンピングローラと振動ローラとなる。

6.2.2 密度測定結果からみた締固め効果の比較

図-33に機種別転圧後乾燥密度 γ_d の度数分布を示す。図-33から、砂質土に関してはタンピングローラによる転圧が平均値も一番高く、変動係数も1.74%と小さい。タンピングロー

表-16 軟岩の築堤材料への使用例

ダム名	泥(質)岩の堆積時代	泥(質)岩の 一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	泥(質)岩片 の乾燥密度 ρ_{dm} (g/cm ³)	WL (%)	w_p (%)	Activity	統一 分類	フィルム材の 最適含水比 (%)	乾燥の補正し によるスレー キングの有無 と吸水率	フィルム材(岩片を締め固めたもの) 設計値			透水係数 (cm/s)	使用された ゾ ン	転圧機 械	転圧回 数
										ρ_{sf} (t/m ³)	c or c' (tf/m ²)	ϕ or ϕ'				
厚真ダム	新第三紀中新世 (川端層群)	170~290	2.1	-	-	-	-	17.5	スレーキング する(吸水率 8%)	1.7	$Cu = 0$ または2	$\phi_u = 30$ ~25°※	2×10^{-2}	上下流側の期 土(シェルス ゾーン)	SP 22タンピング ローラー+17 ton ブルドーザー	タンピングローラー 12回+ブルドーザ ー
知多調整池 ダム ²⁹⁾ (別名 佐布里ダム)	新第三紀鮮新世 (常清層)	1~30 ($w_n = 20 \sim 38\%$)	1.2~1.7	56	30	1.25~2.0 (active)	MH	27% (岩片の 4.8mm目よ りい過水分に ついての値)	スレーキング する	1.3~1.4	$Cu = 5$	$\phi_u = 5^\circ$	1×10^{-6}	透水ゾーン	タンピングローラー (10.12cm) 接地圧32 kg/cm ² 速度4	タンピングローラー 8回 (まき出し厚さ: 20 cm)
山村ダム ³⁰⁾	新第三紀 鮮新世 (滝沢層群)	コア (風化岩)	2~15 ($w_n = 19 \sim 37\%$)	1.50 (平均値)	39~51	18~22	-	26~29	スレーキング する	1.36~1.54 0.95 D = E 値95%以上	$c' = 2.6$	$\phi' = 24^\circ 30'$	1×10^{-6} 以下	透水ゾーン	タンピングローラー (接地圧50 kg/cm ²) 7 ton 振動ローラー	タンピングローラー 4回 振動ローラー3回 (まき出し厚さ: 20 cm 以下)
		下流 ランダム (新鮮岩)	25 ($w_n = 23 \sim 31\%$)	1.57 (平均値)	39~45	NP~28	-	26	スレーキング する	1.50~1.66 0.95 D 以上	$c' = 2.9$	$\phi' = 26^\circ 30'$		下流側 ランダムゾ ン	タンピングローラー (接地圧50 kg/cm ²) 7 ton 振動ローラー	タンピングローラー 4回 振動ローラー3回 (まき出し厚さ: 25 cm 以下)
小谷作ダム	新第三紀 中新世 (水野谷層)	重転圧部 (コア)	15~20 ($w_n = 34 \sim 39\%$)	1.3	80	39	-	CH 35	スレーキング する(吸水率 38%)	1.206	$c' = 3.0$ (1.5)	$\phi' = 25^\circ$ (34°)	8×10^{-8} 設計値 1×10^{-6}	透水ゾーン (重転圧部)	振動タンピングロー ラー サカイSV 90 T 12.5 ton	8回 (まき出し厚さ: 25 cm)
		シェルス 部	15~20 ($w_n = 18\%$)	1.54~1.74	63	26	-	CH 24	スレーキング する(吸水率 28~40%)	1.32~1.34	$c' = 3.0$ (2.0)	$\phi' = 25^\circ$ (34°)	-	シェルス ゾーン (一般転圧部)	振動タンピングロー ラー サカイSV 90 T 12.5 ton	6回 (まき出し厚さ: 35 cm)
岩坂ダム	新第三紀中新世 (南志見珪藻土質泥岩)	新鮮な部分の $q_u =$ 70 kgf/cm ² 程度 ($w_n = 65 \sim 77\%$)	0.81 (平均値)	90~120	50~60	-	CH	75~78	スレーキング する	0.75	$c' = 2.8$	$\phi_u = 22^\circ$	6×10^{-7} ~ 8×10^{-7}		タイヤローラー (8 ~20 ton) および振 動タンパー (アパ ット接着部)	タイヤローラー8回 以上 (まき出し厚さ: 30 cm)
Tuttle Creek ダム (米 国)	古 生 代 二 疊 紀	不明。リッパー掘削 ができなかったこと から判断して非常に 硬い	-	-	-	-	-	-	多少スレーキ ングする	-	$c = 0$	$\phi = 24^\circ$	-	上流側の シェルス ゾーン		3回
Balderhead ダム ³¹⁾ (英 国)	古 生 代 石 炭 紀	140~420 ($w_n = 5 \sim 14\%$)	2.3	30~50	20~30	0.5~1.0 Inactive Normal	ML	12% (岩片 の2cm目よ りい過水分に ついての値)	多少スレーキ ングする	1.92 (プロク ター95%実 績は96~100 %)	$c' = 0$	$\phi' = 33^\circ$	2×10^{-8} 実績は 1×10^{-3} ~ 8×10^{-4}	上下流側の シェルス ゾーン	A-BG 8.5 ton 振動ローラー	2回 (まき出し厚さ: 76 cm)

(w_n = 岩片の自然含水比)

- 注) 1. 厚真ダムの c 、 ϕ はU-U試験により求めた全応力表示の強度定数。
 2. 知多調整池ダムのフィルム材の三軸試験は試験室土各ゾーンの転圧面に10日間貯水し、下部まで飽和させた材料をシンワールサンブ
 ラーで採取した試料について非圧密・非排水試験(U-U test)のものである。
 3. 小谷作ダムの重転圧部の括弧内の試験値の c' 、 ϕ' は径4.76mm以下の泥岩塊の破砕粒子を $\rho_d = 1.25 \text{ t/m}^3$ に締め固めた供試体
 について行ったCUテストの結果得られた c' 、 ϕ' である。同じく、シェルス部(一般転圧部)の括弧内の試験値の c 、 ϕ は径4.76mm
 以下の泥岩塊を $\rho_d = 1.47 \text{ t/m}^3$ に締め固めた供試体について行ったCUテストの結果得られた c' 、 ϕ' である。
 4. Balderhead ダムに用いたフィルム材の泥岩塊の力学特性として上記の表以外に、図 示するようなデータが発表されている。

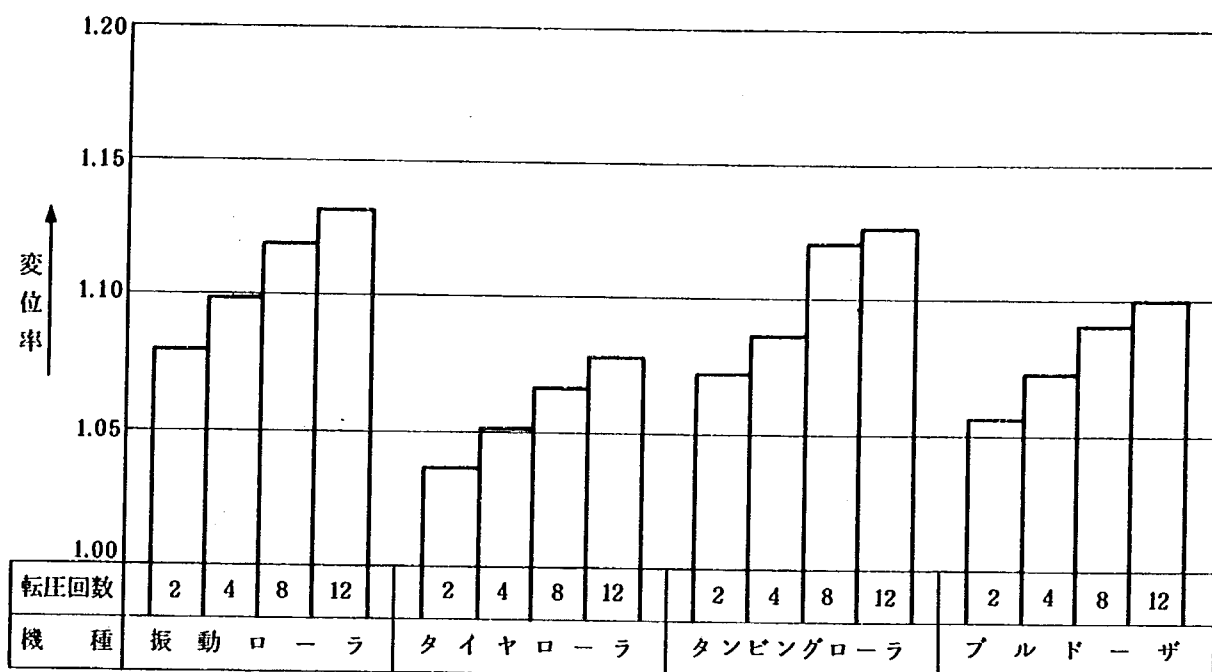


図-32 転圧機種別変位率の比較(砂質土)

表-17 変位率の比較

機 種	振 動 ロ ー ラ	タ イ ヤ ロ ー ラ	*タンピングローラ	ブ ル ド ー ザ
変位率の範囲	1.077~1.215	1.019~1.119	1.121~1.130	1.034~1.191
〃 平均	1.131	1.078	1.126	1.099
変動係数(%)	3.82%	3.50%	(0.40%)	4.94%
サンプル数	6	6	2	6

* タンピングローラはn=2で参考

ラ以外の3機種の平均乾燥密度は、 $1.101 \text{ g/cm}^3 \sim 1.109 \text{ g/cm}^3$ と差はない。ただし、振動ローラに関しては下位の3試料($1.030 \text{ g/cm}^3 \sim 1.090 \text{ g/cm}^3$ の3個)の転圧前密度に極端に小さい値(0.879 g/cm^3 と 0.882 g/cm^3)があるため、この3試料を特異値として取扱えば、タンピングローラと同程度の乾燥密度となりうる。

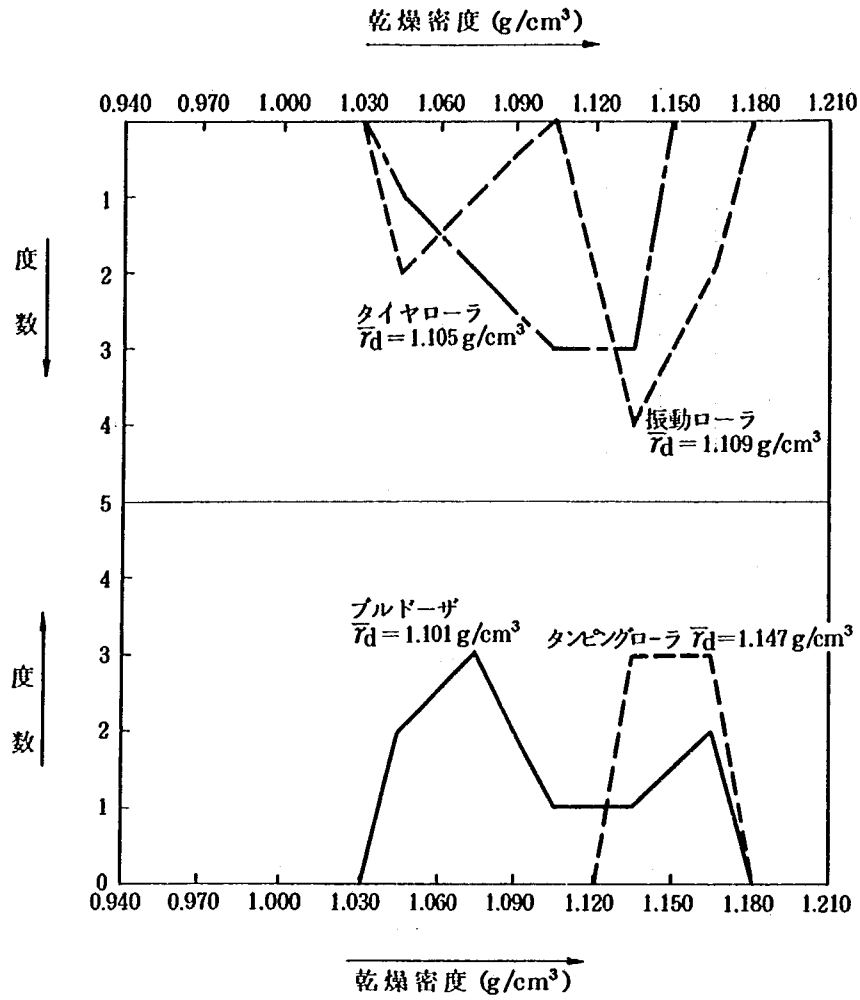
粘性土に関してはタンピングローラとブルドーザで大差はないが、若干タンピングローラによる転圧後密度の方が高い。

次に、転圧前後の乾燥密度の比(乾燥密度増加率)を機種別に比較すると図-34に示すようになる。砂質土では、

(1)タンピングローラ、(2)振動ローラ、(3)タイヤローラ、(4)ブルドーザの順となり、密度の結果と同様となった。また、粘性土ではタンピングローラ、ブルドーザに差はない。

以上から、砂質土に関してはタンピングローラ、振動ローラが締固め効果の高い機種と考え

(a) 砂質土



(b) 粘性土

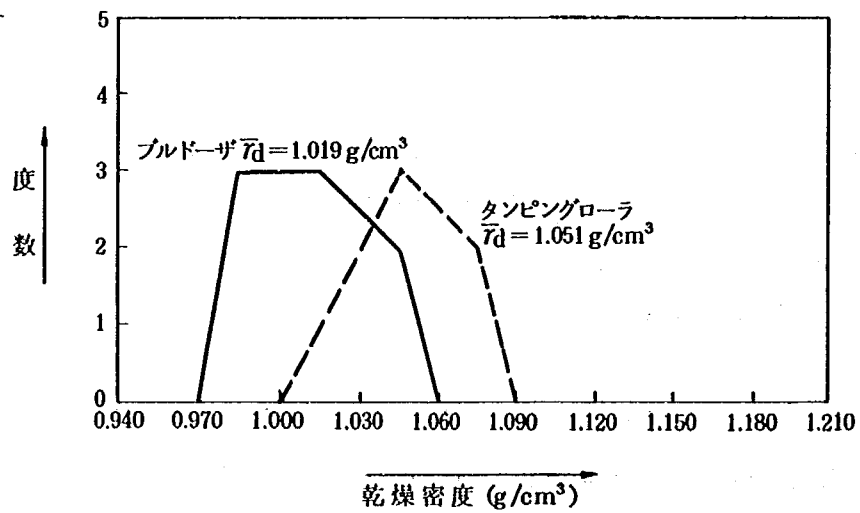


図-33 転圧後機種別乾燥密度

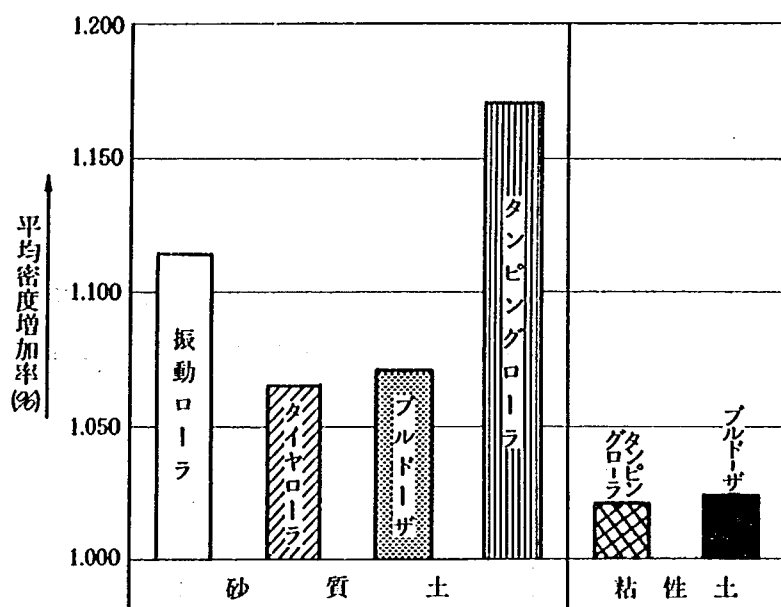


図-34 機種別密度増加率

られる。粘性土に関してはタンピングローラとブルドーザに大差はない。したがって、作業効率の点を考慮すると、トラフィカビリティーが確保される限りタンピングローラが有利と考えられる。

以上、沈下量および密度の両測定結果からは、

① 砂質土では、タンピングローラか振動ローラ。

② 粘性土では、タンピングローラ。

が締固め効果の高い機種と思われる。このうち、砂質土で振動ローラとタンピングローラのどちらを選定するかは、走向性、転圧能力も考慮しなければならない。また、長沼の材料は、土塊の混入が目立ち、土塊が砕かれないままに残れば、透水係数の増加につながることも考えられ好ましくない。したがって、土塊を転圧作業のどの段階で破碎するかによって機種も変化する。破碎効果の比較ではタンピングローラが勝っており、転圧時に土塊が混入しても破碎することは可能である。

一方、振動ローラの破碎能力はタンピングローラに劣るため、土塊が未破碎の状態に残る懸念はある。しかし振動ローラは、後述する締固め度の判定のし易さ（密度の増加と沈下量に相関性が見られ、沈下量の測定から密度増加が推定できる）で勝るため、転圧前に土塊の処理が行われていれば十分対応できる。したがって、事前に土塊を破碎することが困難であればタンピングローラ、可能であれば振動ローラあるいはタンピングローラとなる。

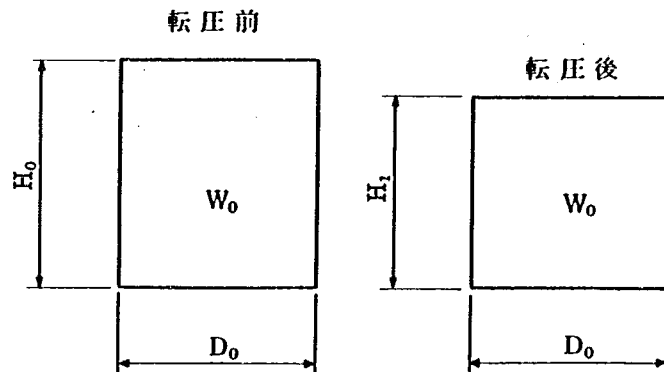
また、前記2機種に劣るとされたブルドーザは、その接地圧の低さ（ 0.77 kg/cm^2 ）のわりには⁴⁾タイヤローラの密度増加率と同程度の効果が得られている。これは千田等の報告にもあるように、転圧時の衝撃的な荷重が接地圧を増加させた（先の報告では公称の5倍）結果と思われる。含水比の高い材料を転圧しなければならない場合、ブルドーザでもある程度の効果が期待

できる。

一方、タイヤローラの転圧効果はブルドーザと大差ないものの高含水比材料での走行性に難があり、長沼の条件では不適といえる。

6.3 変位量による密度変化の推定

転圧による沈下量が鉛直方向のみの変形で横方向への移動がないものとすれば、図-35のモデルで明らかなように転圧前後の密度変化は高さの変化(変位率)と等しくなる。



W_0 : 転圧前のモデルの重量

D_0 : " 直径

H_0 : " 高さ

ρ_0 : " 密度

H_1 : 転圧後のモデルの高さ

ρ_1 : " 密度

$$\rho_0 = \frac{4 \cdot W_0}{\pi \cdot D_0^2 \cdot H_0}$$

$$\rho_1 = \frac{4 \cdot W_0}{\pi \cdot D_0^2 \cdot H_1}$$

$$\therefore \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{H_0}{H_1}$$

図-35 乾燥密度と沈下量のモデル

図-36は砂質土の全転圧機種に関する変位率と密度増加率の関係である。密度増加率を $y(\%)$ 、変位率を $x(\%)$ として x と y の回帰式を求めると(1)式を得た。

$$y = 0.36x + 4.90 \quad \dots\dots(1)$$

相関係数 r は、 $r = 0.588$ となり、 x と y の相関性はやや弱い。また、 x の定数は0.36で先に示した図-35の関係からは1.0になるべきである。したがって、(1)式により変位率から密度増加率を算定するには問題がある。そこで、図-37に示すように機種別の変位率と密度増加率の

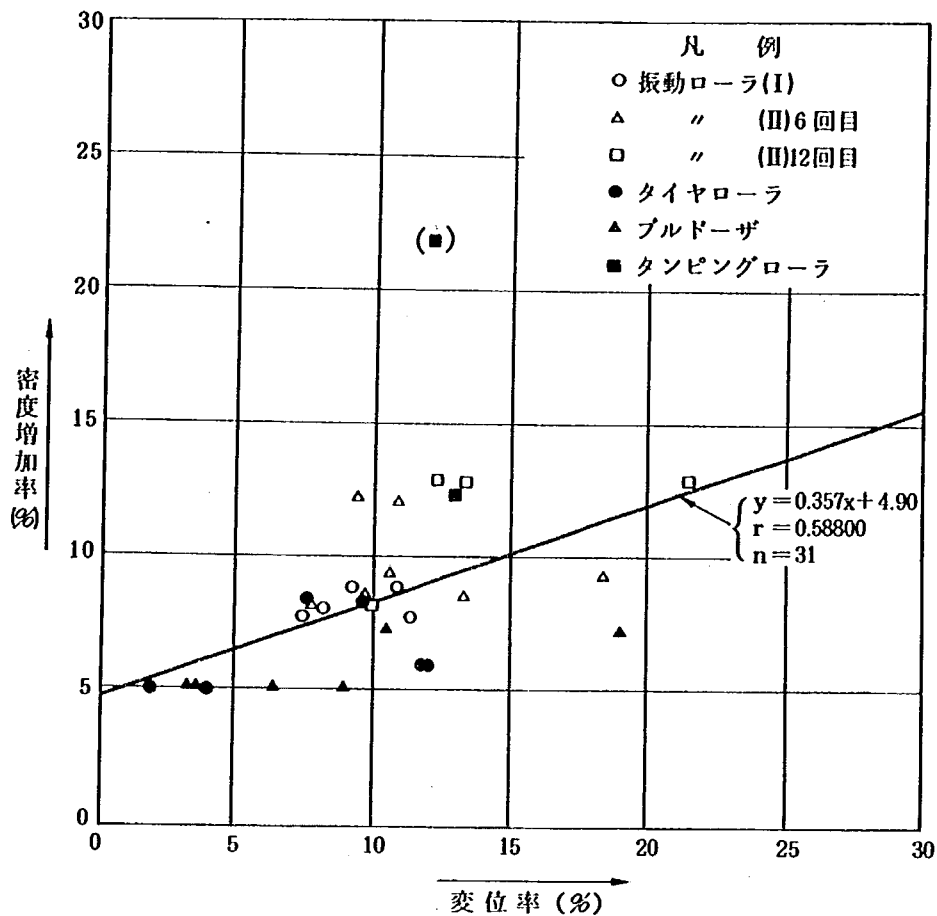


図-36 密度増加率と締固め度の関係（砂質土）

関係を求めた。図-37によれば、振動ローラの場合、(2)式に関係があり、図-35に示したモデルを良く再現している。

$$y = 0.95x - 0.07 \quad \dots\dots\dots(2)$$

しかし、その他の機種（タンピングローラの場合、サンプル数が2のため除外）については、 x と y に1:1の関係が見られず、これが(1)式の矛盾の原因となっている。この原因として、RIによる密度試験の精度、転圧材料の横方向への移動等が考えられる。特に、RIによる密度試験では転圧面の平滑度が測定精度に影響を及ぼすが、今回の試験でも土塊が混入した場合平滑度が低下する状況も認められた。このため、密度の増加を過少に評価した可能性があり、併せて振動ローラ以外の機種のサンプル数不足（ブルドーザ、タイヤローラとも6個）により誤差が大きくなったと考えられる。

また、材料の横方向の移動については、ブルドーザの場合に若干認められており、ブルドーザのケースでは、この点も誤差の原因と考えられる。

今回の試験では、振動ローラの場合についてのみ、変位率と密度増加率の対応が精度良く得られ、限られた条件下での変位と密度の関係を説明することができた。しかし、あらゆる条件のもとでこの関係を適用するには問題があり、次のような検討が必要である。

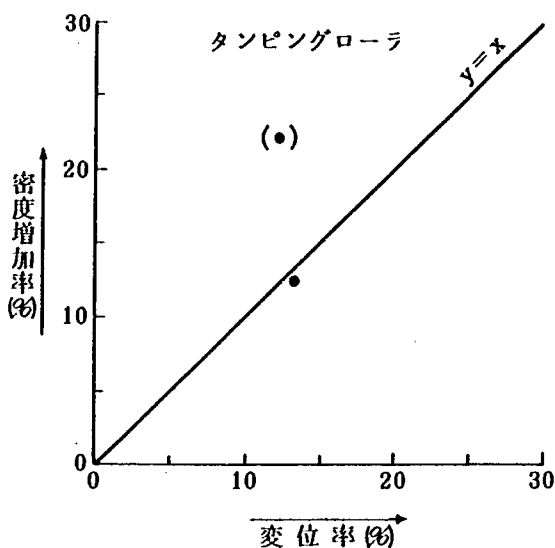
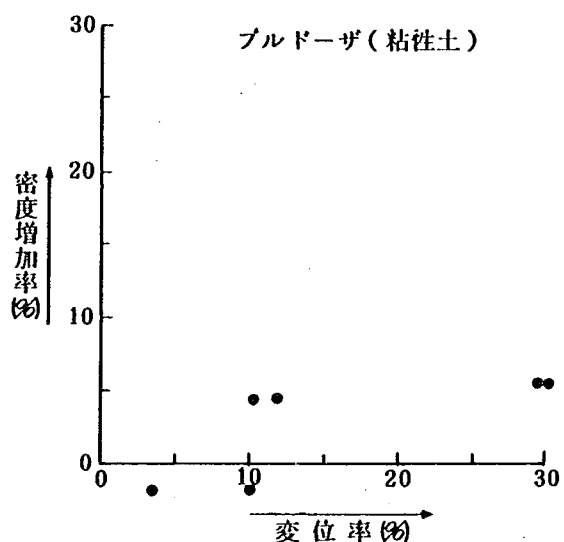
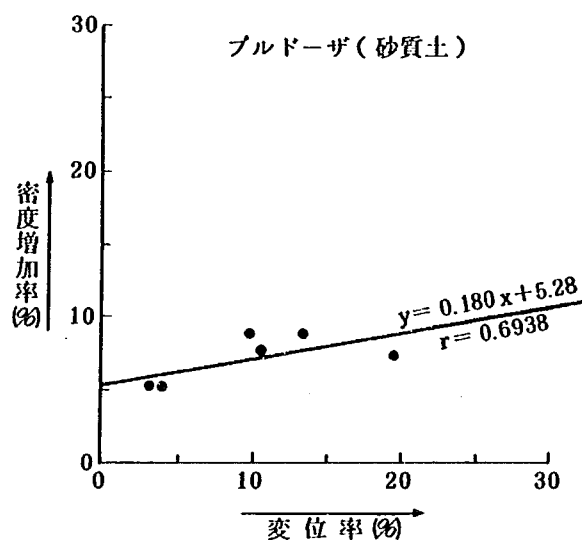
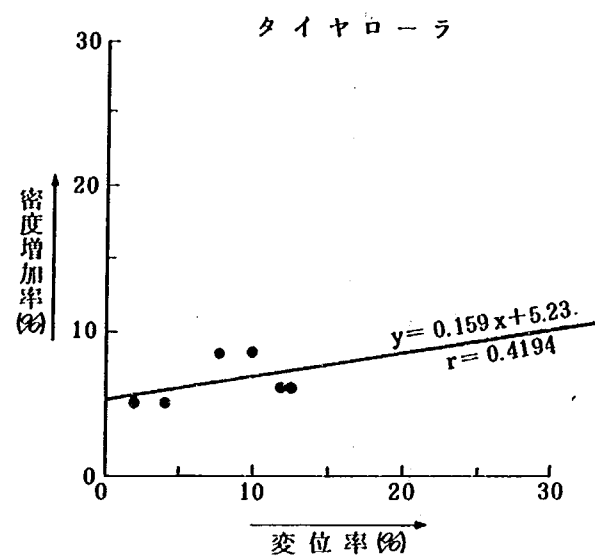
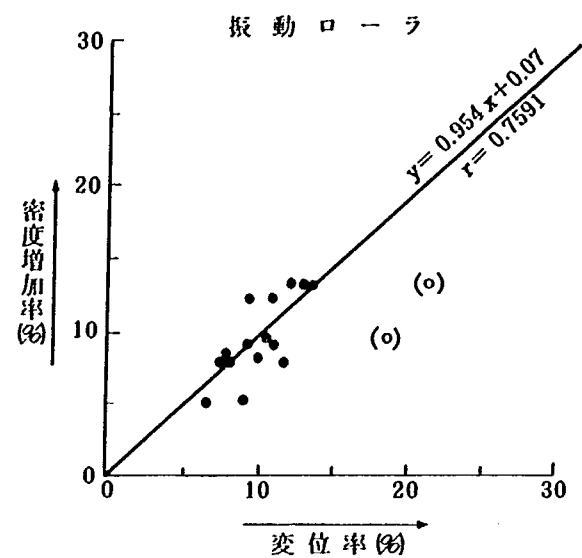


図-37 機種別密度増加率と変位率の関係

- ① 精度の高い密度試験方法の検討と測点数の増加。
- ② 材料の横方向移動量が密度変化に及ぼす影響。

6.4 層内密度分布

図-38に3層目におい測定した深さ方向の1層内密度分布図を示す。図-41には測点Ⅰ、Ⅱの平均値も示した。図-38から各機種種の全体的な傾向として、まず上層とその下の層との密度の関係は、振動ローラとタイヤローラではそれぞれ上層の密度が一番大きいかほぼ同じであるのに対し、ブルドーザの上層の密度は一番小さくなっている。この原因としては、各機種種の転圧輪の構造の違いが考えられる。振動ローラとタイヤローラは共に転圧輪が平滑であるため転圧による表面部の乱れは少ない。しかし、ブルドーザは履帯のツメにより表面部を掘り起こす現象が発生するため、特に表層部が乱され易くなり、上層の密度が中層および下層に比べ低くなるのではないだろうか。

5.3で示した透水試験結果では振動ローラとタイヤローラの透水係数は、

- ① 振動ローラの透水係数 2.621×10^{-4} cm/sec
- ② タイヤローラの透水係数 1.077×10^{-4} cm/sec

となり振動ローラがタイヤローラに比べやや大きいが両者はほぼ同じ値を得た。両者の平均密度の分布は上層ではほぼ等しく、中、下層になるとタイヤローラの密度が極端に低くなる。したがって、透水性も中、下層の密度の低いタイヤローラが高くなる可能性があるが前述のように同等であった。この原因は、4.3でも述べたように転圧材料に混入する土塊が多かったため、注入水が未破碎の土塊に沿ってリークし、密度差が透水性に反映されなかったと思われる。

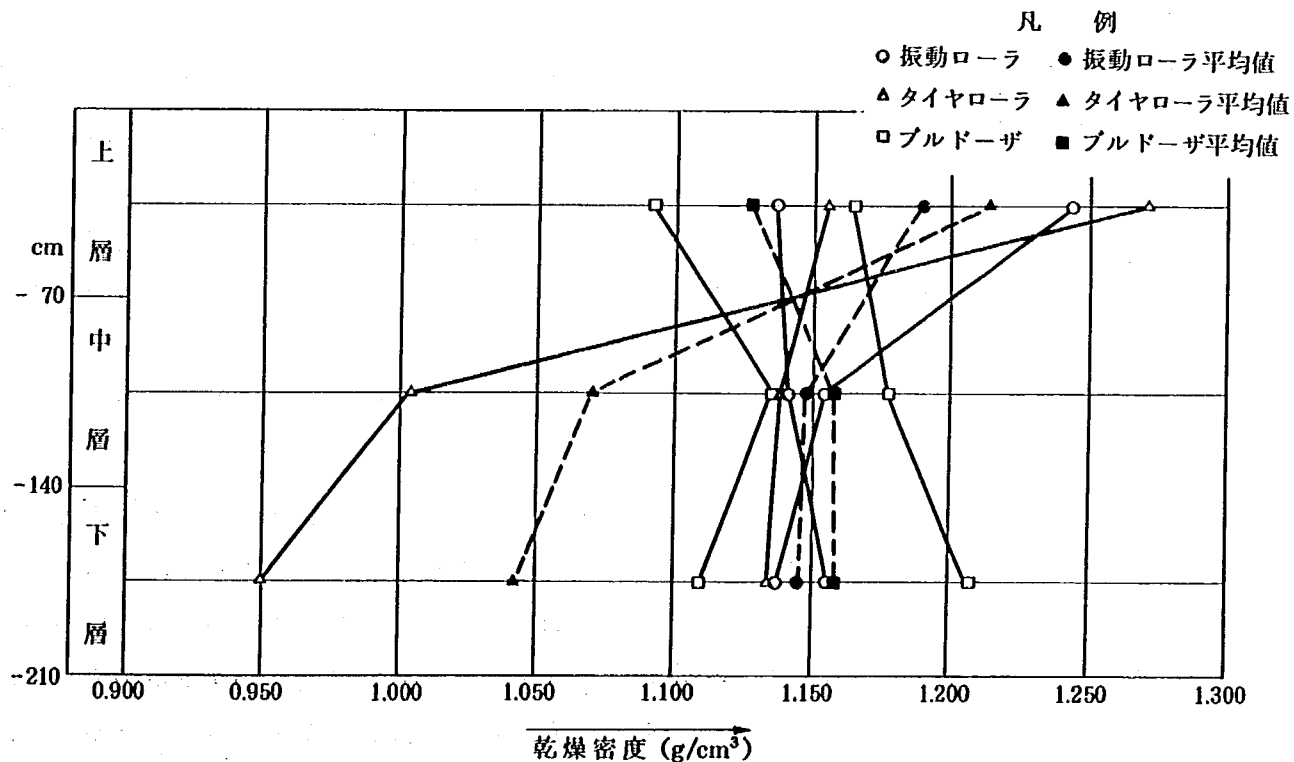


図-38 1層内密度分布(砂質土)

(1) 転圧機種

- ① 今回の試験の範囲では、砂質土の場合タンピングローラ、振動ローラが他の2機種のタイヤローラおよびブルドーザに比べ密度増加率や転圧後の乾燥密度のバラツキの小ささの点で優れている。
- ② タンピングローラと振動ローラのどちらを選択するかは測定データの上では甲乙つけ難い。土塊の破砕能力ではタンピングローラが振動ローラより優れているが、事前の土塊の細粒化の重要性を考慮し、これを実施した場合振動ローラでも土塊の処理に問題がなくなる。また変位率による密度増加率の推定も振動ローラの方が容易であるため管理はし易いであろう。
- ③ ブルドーザは公称接地圧が4機種の中で一番小さいが、他機種との接地圧の差ほど転圧効果は劣っておらず、材料の含水比をどうしても低下できない場合、転圧機種として使用可能と考える。

(2) 変位率による密度増加率の推定

- ① 振動ローラによる転圧では密度増加率を y %, 変位率を x %とした時、両者の関係は次の式で示され、初期密度がわかれば沈下量を測定することで最終密度の推定が可能である。

$$y = 0.954 x - 0.07$$

- ② 振動ローラ以外の機種については、変位率と密度増加率の關係に量的な対応が得られなかった。これは主として、密度測定箇所表面の不陸による密度測定精度の低下とサンプル数の不足によるものと考えられ、今後、より精度の高い密度測定方法の検討が必要である。

(3) 1層内密度分布

- ① 1層内密度分布にも転圧機種ごとに差があり、タイヤローラの密度は深くなるにつれ急激に低下した。ブルドーザは履帯による掘り起こし現象から表層の密度が一番低い。振動ローラの場合、深くなるにつれ密度は低下するがその差は小さく均一に締固められている。
- ② 透水係数と密度分布の關係は、今回の試験結果では明確でない。これは未破砕土塊による注入水のリークにより、密度の影響以上にリークによる透水係数への影響が出たためである。

(4) 締固め管理へのソイルストレーンゲージ適用の可能性

- ① (2)において振動ローラの場合、変位率と密度増加率の対応關係を得ることができた。その他の機種については両者の關係が1:1とならなかったが、密度測定の精度を向上させることにより十分な対応が得られると思われる。ソイルストレーンゲージは層別に設置することにより、各層の変位量が測定できる。変位量の測定はレベルにより行うこともできるが、レベルでは表面の沈下量を測定するにとどまるため、何層にもわたって変位量を求めたい場合無理がある。また、たとえ1層であっても測定したい層の下が沈下する場合は見掛けの沈下量が増し、あたかも高い変位率が得られたという判定を下し、密度の管理では危険側となる。したがって、密度測定精度の向上を計れば、各層の変位を測定できるソイルストレーンゲージにより、密度管

理を行うことが可能である。

- ② 一方、動的測定においては、センサーに鉄類が近づいた場合、磁界の乱れが発生し振動ローラ等の動的測定は不可能であった。しかし、今回センサーから一定の距離をおいた地点での振動波形を処理することにより、変位率の増加にともなう振幅の増加が認められた。今後動的計測にもソイルストレインゲージの使用が可能であり、この面からも密度変化をとらえることが可能であることが判明した。

(5) 長沼ダム締固め管理における土塊の処理

- ① 他ダムにおける軟岩使用の事例および今回の透水試験結果から、築堤材料の土塊の細粒化は、透水係数の確保、密度管理の精度の向上の面から必要であると考ええる。

謝 辞

本計測を実施するにあたり、測定の機会を与えていただき、何かと便宜をはかっていただいた宮城県長沼出張所の各位、ならびに測定に同行されたフィルダム研究室の山口嘉一氏、志賀三智氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松本徳久，渡辺和夫，岩田充弘，小川優；コア材転圧時の変位計測と機種による転圧特性の比較，土木研究所資料第 2182 号，昭和 60 年 3 月。
- 2) 山口，大根；フィルダムの設計および施工，pp. 390，技報堂，昭和 48 年。
- 3) 土木学会；軟岩－調査・設計・施工の基本と事例，pp. 60～61，昭和 59 年。
- 4) 千田昌平，中垣光弘，坂井田美晴；盛土の締固め管理に関する調査，土木研究所資料第 1472 号，昭和 54 年 1 月。

アースフィル材料の現場転圧
試験

I S S N 0 3 8 6 - 5 8 7 8
土木研究所資料第2396号
昭和 61 年 8 月 (1986)
松本徳久, 弘中義昭
小川 優

キーワード：現場転圧試験，密度，締固め管理，アースフィル材料

要 旨 振動ローラ，タンピングローラ，タイヤローラ，ブルドーザの
各機種により，アースフィル材料の転圧試験を行い，材料の密度・変位
量および透水係数を測定した。これらの試験結果をもとに機種別の転圧
効果，変位率と密度増加率の関係および1層内密度分布と透水係数の関
係について考察を加えた。



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
フィルドム研究室
御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. 058

No. 058

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2396号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印