

土 木 研 究 所 資 料

振動ローラによる盛土の締固めに関する調査

昭和60年 3 月

建設省土木研究所
機械施工部施工研究室

「 Copyright © (1985) by P. W. R. I

All right 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。

振動ローラによる盛土の締固めに関する調査

施工研究室 嶋津晃臣*1
見波 潔*2
中田公基*3
嶋田 功*3
足立賢一*4

要 旨

振動ローラを用いて盛土を締固める場合の締固め特性について調査し、振動ローラの重量、起振力、振動数等が締固め効果に及ぼす影響について基礎的な資料を得た。さらに振動輪の振動特性の変化に着目して振動加速度のひずみ率によって締固め管理が可能なることを明らかにした。

キーワード：振動ローラ，盛土，締固め，振動特性，締固め管理，ひずみ率

- *1 施工研究室長
- *2 施工研究室研究員
- *3 施工研究室
- *4 現関東地方建設局首都国道工事事務所

まえがき

土を材料として盛土を構築する場合、構造物の強度を高め、変形を小さくしたり、透水性を低下させるために必ず締固めが行われる。締固めは盛土の安定性を確保する上できわめて重要な作業であり、その際には盛土の目的に応じてどのような土をどのような方法でどの程度締固めるかが常に問題となる。これらの問題については現状では現場技術者の判断に負うところが多く、体系立った整理はなされていない。

盛土の締固めの現状をみると、多種多様な締固め機械が開発されており、施工条件に適した機種を選択できる自由度が高まっているが、その一方では建設工事をとりまく諸条件から施工の経済性や迅速性に対する要求も強まっている。このような状況下において盛土の品質確保の問題が改めて重要視されている。すなわち、施工の効率性と盛土の品質確保の両面でバランスのとれた施工法の選択が重要である。そのためには、上述したような締固めの問題に対して現場技術者の主観的判断に頼るのみではなく、できるだけ客観的な情報に基づいて工学的判断を下すことが盛土施工の信頼性を高める上で必要である。

施工研究室ではこれまでに締固めに関する一連の調査研究を行ってきた。具体的には各種密度測定法の精度、盛土の密度のばらつき、各種締固め機械の締固め特性について調査を行い、「礫混り土の盛土施工管理」(土木研究所資料第 1040 号, 昭和 50 年 6 月), 「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)として成果をとりまとめた。本報告はこれらの調査を継続・発展させたもので、締固め機械として近年使用例が著しく増加している振動ローラをとりあげ、各種施工条件(振動ローラの種類、土の種類、締固め厚など)と締固め特性との関連性について実験を通じて得られた成果をとりまとめたものである。さらに、締固め管理の簡便な方法として振動輪の振動特性に着目する方法をとりあげ、加速度波形の高調波含有率によって締固めの程度を把握することが可能なことを確めたので、その成果についても報告する。

昭和 60 年 3 月

施工研究室	嶋	津	晃	臣
	見	波		潔
	中	田	公	基
	嶋	田		功
	足	立	賢	一

目 次

まえがき	1
1. 調査目的	1
2. 振動ローラによる盛土の締固めについて	2
3. 調査方法	5
4. 振動ローラの締固め特性	6
4.1 土質別の締固め特性（実験Ⅰ）	6
4.2 振動数、起振力の影響（実験Ⅱ）	15
4.3 振動輪重量、起振力の影響（実験Ⅲ）	25
4.4 締固め厚の影響（実験Ⅳ）	31
5. 振動輪の振動特性と締固め管理への応用	37
5.1 締固めにもなう振動特性の変化	37
5.2 シミュレーションの方法および結果	47
5.3 締固め管理への応用	67
6. 結 論	74
参考文献	76

1. 調査目的

本調査では盛土の締固め機械として振動ローラを取りあげ、次の2項目を明らかにすることを目的として調査を実施した。

(1) 振動ローラの締固め特性の調査

近年、盛土の締固め機械として振動ローラがかなり使用されるようになってきたが、①どのような振動ローラを用いて、②どのような土を、③どの程度締固めれば、④どれ位の密度が得られるか、といういわゆる振動ローラの締固め特性について十分に解明されておらず、試験施工によって機種や締固め回数を決定したり、現場技術者の経験に基づいて判断したりしているのが現状である。本調査は上述の①～④の関連性に関して基礎的な資料を得ることを目的とする。

(2) 振動輪の振動特性の把握と締固め管理への適用性の検討

盛土の締固めにともなって振動輪の振動特性が変化することが知られている。本調査は、振動特性の変化の過程をいくつかの条件のもとで明らかにするとともに締固めの程度を表す指標（平板載荷試験より求まる地盤係数および密度）との関連を明らかにし、新しい締固め管理手法としての適用可能性を調べることを目的とするものである。

従来の締固め管理は密度によるものが主体であるが、これと異なる新しい管理手法の必要性について述べておく。すなわち、従来の密度管理手法の欠点を補うために次の2つの観点から新しい管理手法の開発が望まれている。

- ① 従来の密度管理手法では点としてのデータしか得られないが、連続的に締固めの程度を知ることができれば、締固めムラの少ない施工が可能になる。
- ② 従来の密度管理手法ではデータが得られるまでかなりの時間を要し、本来の施工管理の機能を果たしていない。そこで、締固めの程度をリアルタイムにオペレータが知ることができ、締固め不足の箇所を直ちに明らかにすることができれば、本来の意味での施工管理が可能となって所定の品質確保に役立たせることができる。

本調査でとりあげた振動輪の振動特性に着目した締固め管理手法は上記の2つの要件を満足しており、従来の密度管理手法を補完する手法の1つといえる。そこで、本調査ではこのような管理手法の適用可能性を調べた。

2. 振動ローラによる盛土の締固めについて

盛土の締固めにあたっては、盛土材の土質や盛土に要求される性質に応じた適切な締固め機械が選定される必要がある。ここでは、まず各種締固め機械について一般的にいわれている特徴を簡単にまとめておく。¹⁾

(1) タイヤローラ

我が国で多く使用されている締固め機械の一つで、細粒土から礫まじり土に至るまで適用範囲が広い。締固め効果に影響を及ぼす機械条件としては輪荷重とタイヤの空気圧があり、これらの組合せによって締固め効果が異なるとされている。すなわち、タイヤ本数が多くて輪荷重が小さく、タイヤ圧の高いタイヤローラは転圧面付近を特によく締固める傾向があり、路床、路盤、舗装材料などの薄層転圧に適している。一方、輪荷重の大きい大型一軸タイヤローラは敷ならし厚の大きい場合にも有効とされており、大規模な盛土を迅速に締固める場合に適している。

(2) タンピング(シープスフート)ローラ

土が締固まるにつれてタンピングフート(脚)に支えられてドラムが浮き上がるようになると脚によって高い接地圧が得られ、高度な締固めが可能となる。また、転圧面で脚のめり込みがあると次の転圧層との間のなじみがよくなり、遮水性を高める必要のあるフィルダムのコア材の転圧などによく使用されている。対象土質としては、細粒土および細粒分を含んだ粗粒土に適しているとされている。なお、高含水比粘性土に対して用いると、こね返し現象の生じる恐れがある。

(3) ロードローラ

最も古くから一般的に使用されてきた締固め機械で、粒土のよい礫まじり土などを路床、路盤用に薄層転圧するのに適している。仕上り面が均一にできあがるという特長をもつ反面、盛土材によっては転圧面付近のみがよく締固まるために転圧層の境界がはつきりしてしまう可能性がある。特に、タンデム形は高い平坦度を要求される締固め作業に適しており、アスファルト舗装の転圧にも使用されている。

(4) 振動ローラ

振動ローラは鉄輪を起振機で振動させながら走行するもので、土粒子を適度に移動させて密な配列に移行させるための振動力とローラの自重によって締固められ、従来の締固め機械に比べると効率よく締固めることが可能である。一般には細粒分をあまり含まない粗粒土に適しているといわれている。

以上、各種締固め機械の特徴を簡単に示したが、特に対象を道路盛土に限ると道路土工要綱²⁾では締固め機械の選定の目安を表2-1のように示している。この表をみると、各種締固め機械のなかでも振動ローラはかなり適用範囲の広い機種であることがわかる。また、アスファルト加熱合材の締固めにも一般的に使用されており、利用範囲の広さからみて将来の締固め機械の主流になるとさえ推測されている。³⁾

このような背景のもとで本調査では振動ローラを調査対象に選んだわけであるが、その締固め特性についてはいまだ十分に解明されてはいない。ここで、振動ローラにより土を締固める場合に締固め効果に影響を及ぼすと考えられる要因を列挙すると表2-2のようになる。この表では要因を便宜的

表 2 - 1 盛土の構成部分と土質に応じた締固め機械の選定

盛土の 構成部分	土質区分	締固め機械							備 考
		ロードローラ	タイヤローラ	振動ローラ	タッピングローラ	ブルドーザ		振動コンパクタ	
						普通型	湿地型		
盛土 路 体	岩塊などで、掘削・締固めによっても容易に細粒化しない岩			○				大●	大● 硬岩塊
	風化した岩や土丹などで、掘削・締固めにより部分的に細粒化する岩		大○	○	○			大●	大● 軟岩塊
	単粒度の砂、細粒分の欠けた切込砂利、砂丘の砂など			○	○			●	● 砂 礫まじり砂
	細粒分を適度に含んだ粒度分布のよい締固め容易な土、まさ、山砂利など		大○	○	○			●	● 砂質土 礫まじり砂質土
	細粒分が多いが親水性の低い土、低含水比の粘性土、軟質の土丹など		大○	○	○			●	● 粘性土 礫まじり粘性土
	含水比調節が困難でトラフィカビリティが容易に得られない土、シルト質土など					●			水分を過剰に含んだ砂質土、シルト質土
	高含水比で親水性の高い粘性土、関東ロームなど					●	●		親水性粘性土
路 床	粒度分布の良いもの	○	大○	○				●	● 粒調材料
	単粒度の砂、粒度分布の悪い礫まじり砂や切込砂利など	○	大○	○				●	● 砂 礫まじり砂
裏 込 め			○	小○		●		●	● 礫質土
の り 面	砂 質 土			小○				○	●
	粘 性 土			小○		○		○	●
	親水性粘土、粘性土						●		
○：有効なもの ○：使用できるもの ●：トラフィカビリティの関係で、他の機種が使用できないので止むを得ず使用するもの ●：施工現場の規模の関係で、他の機種が使用できない場所でのみ使用するもの									
大：大型機種 小：小型機種									

注：文献2)より引用。

注：斜線部は本調査の対象となった土質を示す。

表 2-2 締固め効果に影響を及ぼす要因

分 類	要 因
機 械 条 件	振動ローラの重量, 振動数, 起振力, 振動輪の直径と幅, 駆動方式(前輪, 後輪, 両輪駆動), ばね上荷重とばね下荷重の比, など
土 質 条 件	粒度, 含水比, 粒形, その他物理的・力学的性質
施 工 条 件	敷ならし厚, 敷ならし状態, 転圧回数, 転圧速度, 路盤状態, など

に振動ローラの機械条件, 盛土材の土質条件, 施工条件に分類している。表からも明らかなように, 締固め効果に影響を及ぼすと考えられる要因は非常に多く, しかもそれらが複雑に関係し合っているものと考えられるため, 振動締固めの機構を解明するのは容易なことではないように思われる。しかしながら, これまでになされてきたいくつかの研究や施工上の経験から一般的にいわれていることをまとめると次のようになる。

- ① 振動ローラは粘着性のない砂や礫の締固めに適している。
- ② 礫やロックフィルなどの転圧には重い機械で低振動数のものが, 砂には比較的軽い機械で高振動数のものがよい。
- ③ 締固め効果が大きく, 少ない転圧回数ですむ。
- ④ 振動による締固め効果が深部にまで及ぶため盛土材の敷ならし厚を厚くできる。

最後に, 現在普及している振動ローラについて若干触れておく。機械の重量でみると, 1 t 未満の小形のものから 10 t 以上の大形ローラまであり, 最近では 20 t 程度のものまで使用されている。起振力は自重の 1 ~ 2 倍程度のものが多く, 振動数は 2,000 ~ 3,000 rpm 程度のものが多い。このように振動ローラの種類は数多いため, 現場条件に適した機種を選定が非常に重要である。この点からも振動ローラによる締固めに関する研究の発展とデータの蓄積が必要である。

3. 調査方法

1章に述べた調査目的(1)(2)に対し、以下の方法により調査を行った。

(1) 振動ローラの締固め特性の調査

振動ローラの締固め特性を調べるときに考慮すべき要因としては、表2-2に挙げたような数多くの要因が考えられるが、本調査では特に影響度が大きいと考えられる要因として振動ローラの重量、起振力、振動数、盛土材の粒度、敷ならし厚をとりあげ、これらが締固め効果に及ぼす影響を実験により調べた。実験は土木研究所土工実験施設内の転圧ピットを用いて行った。表3-1は各実験シリーズの実験目的、実験に使用した振動ローラ、土質、敷ならし厚をまとめたものである。いずれの実験においても締固め効果の計測は現場密度試験、平板載荷試験などによった。実験条件の詳細および実験結果については4章に述べている。

表3-1 実験目的と実験概要

実験名	実 験 目 的	実 験 概 要		
		振 動 ロ ー ラ	土 質	敷ならし厚
実験Ⅰ	土質による締固め効果の違いを調べる。	8 tf クラス (タイヤローラと比較)	礫～粘土の 9種類	35 cm
実験Ⅱ	起振力、振動数の違いが締固め効果に及ぼす影響を調べる。	5 tf クラス (起振力、振動数可変)	礫、砂質土 の2種類	35 cm
実験Ⅲ	振動ローラの重量、起振力と締固め効果の関連を調べる。	5, 6 (起振力2種類), 8 tf クラス	シルト質砂 (SM)	50 cm
実験Ⅳ	敷ならし厚が締固め効果に及ぼす影響を調べる。	6 tf クラス (起振力2種類)	シルト質砂 (SM)	50 cm 100 cm 150 cm

(2) 振動輪の振動特性の把握と締固め管理への適用性の検討

振動輪の振動特性は振動軸の軸中央に取付けた加速度計により計測した。この計測は上記の実験ⅢおよびⅣについて実施した。本調査では計測された加速度波形を分析し、土の締固め程度を示す指標（平板載荷試験による地盤係数 K_{30} 、密度）との相関を調べて締固め管理手法としての適用性を検討した。また、2自由度系の振動モデルを用いてシミュレーションを行い、盛土の締固めにもなる振動特性の変化の解析手法を明らかにした。これらの検討結果については5章に述べている。

4. 振動ローラの締固め特性

4.1 土質別の締固め特性（実験Ⅰ）

4.1.1 実験目的

一般に振動ローラは細粒分の少ない盛土材に適しているといわれているが、粘性分がある程度多い盛土材に対して必ずしも不適とされているわけではない。本実験では土質条件の異なる盛土材に対する振動ローラの締固め効果を調べ、細粒分の多い盛土材に対する適用性を検討することを目的とした。

なお、比較の対象としてタイヤローラによる締固めを同一条件のもとで実施した。

4.1.2 実験方法

(1) 盛土材

礫（粒径2～30mmの材料が約80％）、砂（粒径74 μ ～2mmの材料が約94％）、粘土（粒径74 μ 以下の材料が約79％）を種々の比率で混合して作成した9種類の盛土材を使用した。各材料の最大乾燥密度、最適含水比、土粒子の比重、均等係数を表4-1に、粒度試験（JIS A 1204）により求めた粒径加積曲線を図4-1に、突固めによる締固め試験（JIS A 1210）により求めた締固め曲線を図4-2に示す。実験時の含水比は各材料とも最適含水比となるよう調整した。

表4-1 材 料 条 件

試料番号 (No)	配 合 比 (%)			最大乾燥密度 $\rho_{d, max}$ (g/cm ³)	最適含水比 w_{opt} (%)	土粒子の 比 重 (Gs)	均等係数 Uc
	礫	砂	粘 土				
1	100	0	—	2.301	5.8	2.702	77.5
2	75	25	—	2.225	6.5	2.752	12.9
3	50	50	—	2.063	8.3	2.772	9.8
4	25	75	—	1.828	13.0	2.791	3.5
5	0	100	0	1.629	18.3	2.811	2.9
6	—	75	25	1.717	18.6	2.799	100以上
7	—	50	50	1.590	22.1	2.787	"
8	—	25	75	1.407	26.5	2.776	"
9	—	0	100	1.281	30.8	2.764	"

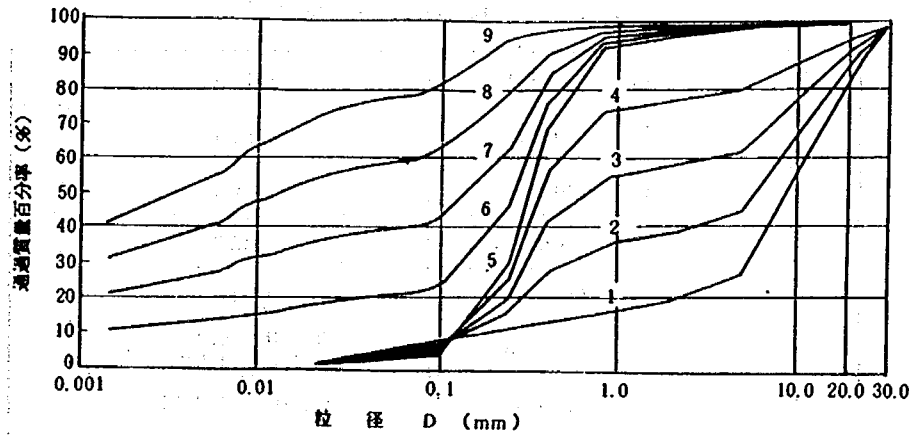


図4-1 粒径加積曲線

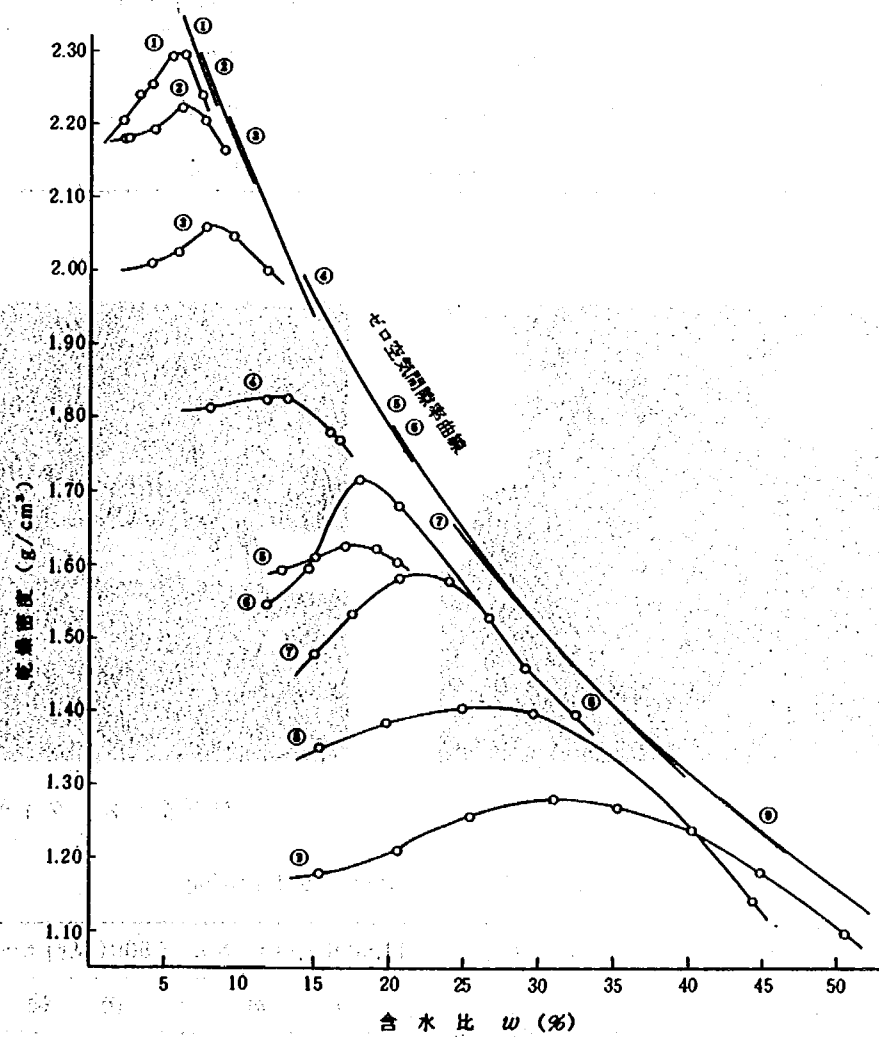


図4-2 突固めによる締固め試験

(2) 締固め機械

使用した振動ローラ（写真4-1）の主な諸元を表4-2に示す。また、この実験では締固め効果を比較するために同一条件のもとでタイヤローラ（写真4-2）による締固めも合わせて行った。使用したタイヤローラの主な諸元を表4-3に示す。なお、締固め時のタイヤローラの重量は試料1～5に対しては11.5 tf，試料6～9に対しては8.5 tfとした。

表 4-2 振動ローラ主要諸元

総重量 (kgf)	8,448
転圧幅 (mm)	2,134
全長 (mm)	5,563
全幅 (mm)	2,357
全高 (mm)	2,210
走行速度 (km/h)	1速: 0~6.4 2速: 0~12.2
ドラム径幅 (mm)	1,499 × 2,134
起振力 (kgf)	18,014
振動数 (vpm)	1,400 ~ 1,850
振幅 (mm)	1.35
静線圧 (kgf/cm)	23.0
動線圧 (kgf/cm)	108.4

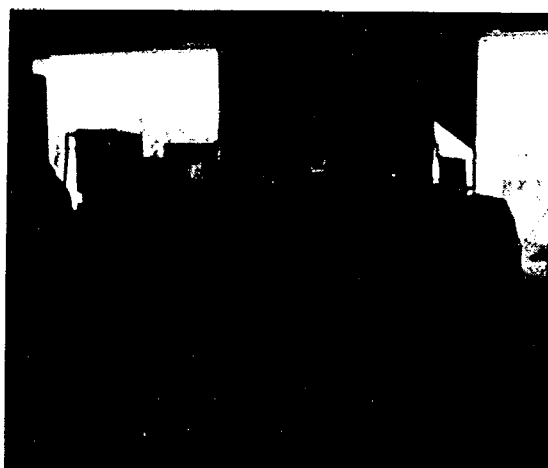


写真 4-1 振動ローラ

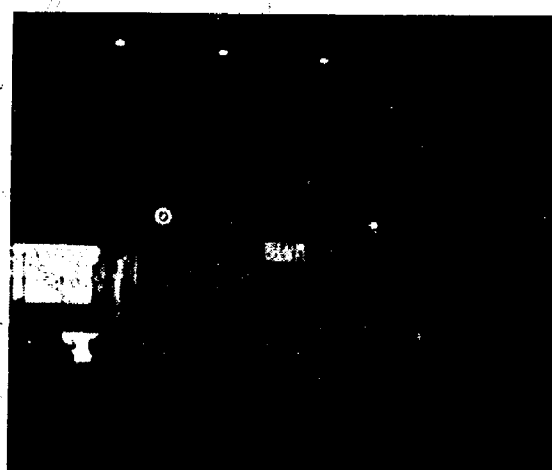


写真 4-2 タイヤローラ

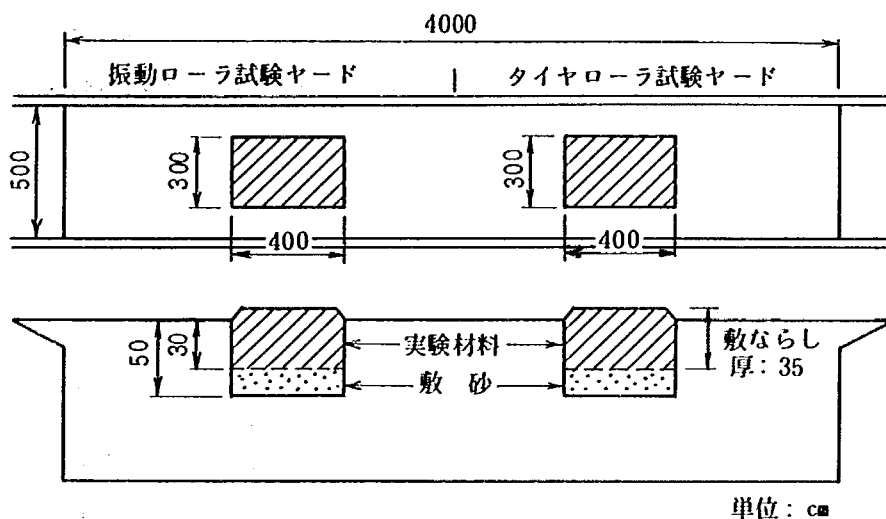
表 4-3 タイヤローラ主要諸元

重 量 (kgf)		11,500(試料1~5), 8,500(試料6~9)	
車 輪	車 輪 数 (本)	前 輪	後 輪
		5	6
	タ イ ヤ 寸 法	8.25-20-12PR 平滑	
	タイヤ空気圧 (kgf/cm ²)	標準 5.75 (実験時 5.0)	
締 固 め 幅 (m)		2.134	
走 行 速 度 (km/h)		前後進各4段 3.4 ~ 21.8	

(3) 実験条件

各ケースの試験ヤードの広さは4 m × 3 mとし、盛土材の敷ならし厚は35 cmとした(図4-3参照)。なお、転圧層下の地盤は良質の砂を20 cm厚に締固めて作成した。敷ならしは人力によるものとし、できるだけ均一になるよう配慮した。

転圧速度は振動ローラについてはおよそ2 km/h、タイヤローラについてはおよそ4 km/hに設定した。また、転圧は最大8回まで行った。

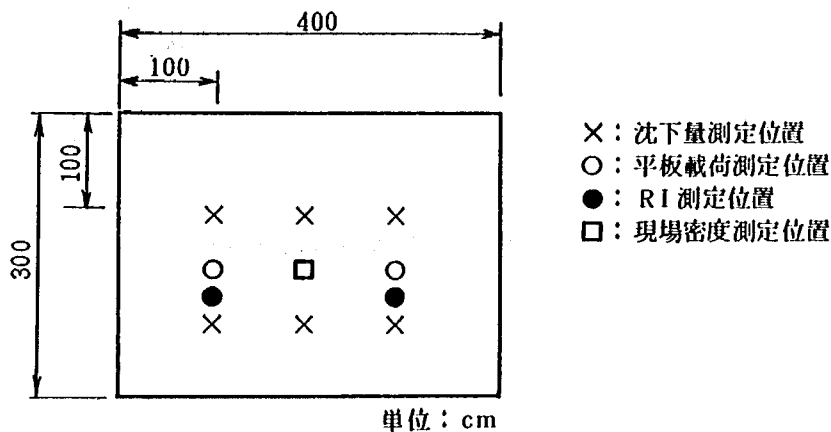


単位: cm

図4-3 実験ピット構成

(4) 計 測

締固め効果を確認するために、敷ならし後および転圧回数2, 4, 6, 8回終了後に密度の計測を行った。計測はラジオアイソトープ(以下, RIと記す)計器によるものを主体とし, データのチェックを目的として砂置換法による密度試験(JIS A1214)を敷ならし後と締固め終了後に実施した。その他, 表面沈下量の測定, 平板載荷試験などを行った。各試験ヤードでの計測位置を図4-4に示す。



単位: cm

図4-4 計測位置

4.1.3 実験結果

図4-5は振動ローラを用いて9種類の材料を締固めたときの締固め効果を締固め度（締固めた土の乾燥密度と締固め試験による最大乾燥密度 ρ_{dmax} の比）で表示したものである。礫から砂にかけての材料（試料1～5）については、転圧回数6～8回でこの実験条件における締固め度の限界にほぼ達しているようである。これに対して粘土まじりの材料（試料6～9）については8回以上の転圧を行っても締固め度が上昇する余地が残されているようである。このような傾向は、タイヤローラによる締固め度～転圧回数関係を示した図4-6にもみられることから、締固め機械の種類に起因しているのではなく、盛土材の性質によるものと考えられる。

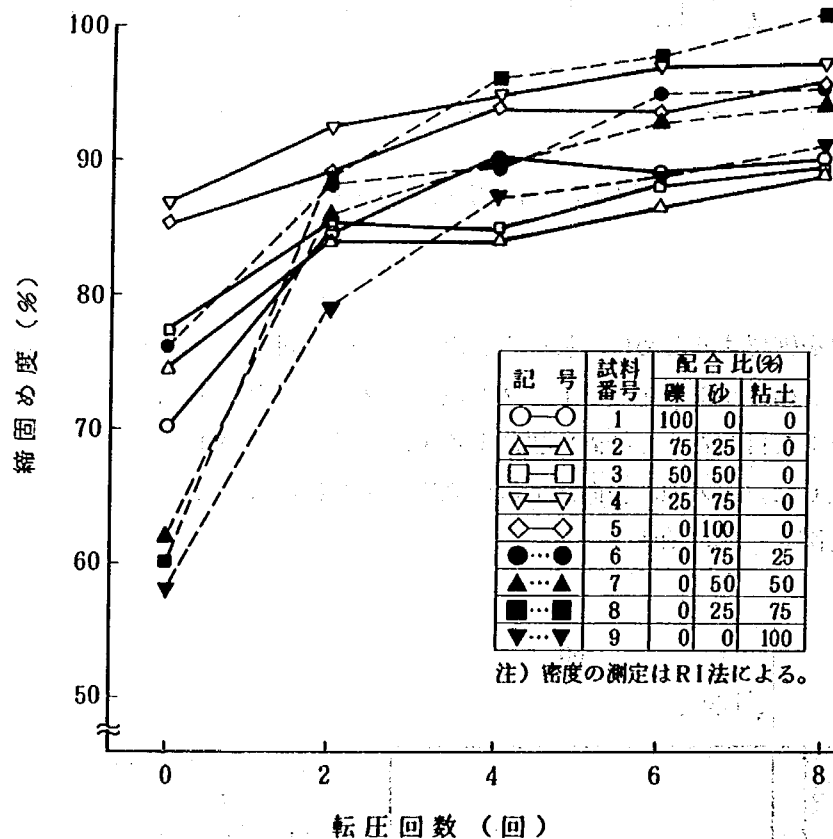


図4-6 振動ローラによる締固め効果

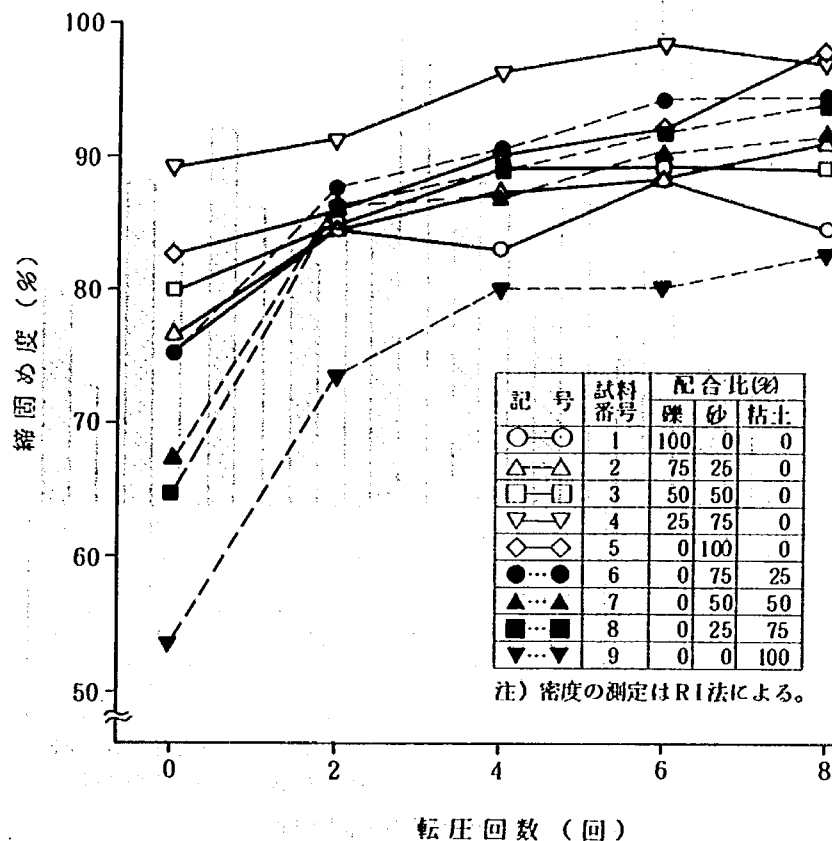
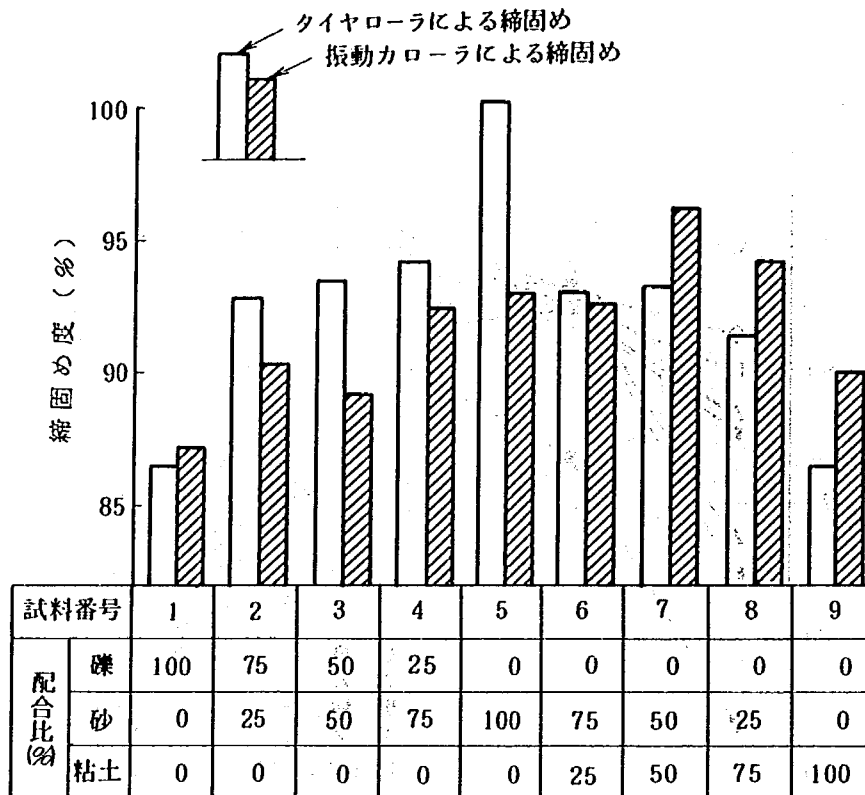


図4-6 タイヤローラによる締固め効果

図4-7は8回の転圧が終了した後の締固め度を盛土材の種類別に比較したものである。振動ローラとタイヤローラでは締固めの機構が異なる上、本実験に使用した機械は重量等の諸元が異なるため、それぞれの締固め度を単純に比較して両者の優劣を論じることができないが、この図から以下に述べるような特徴を知ることができる。

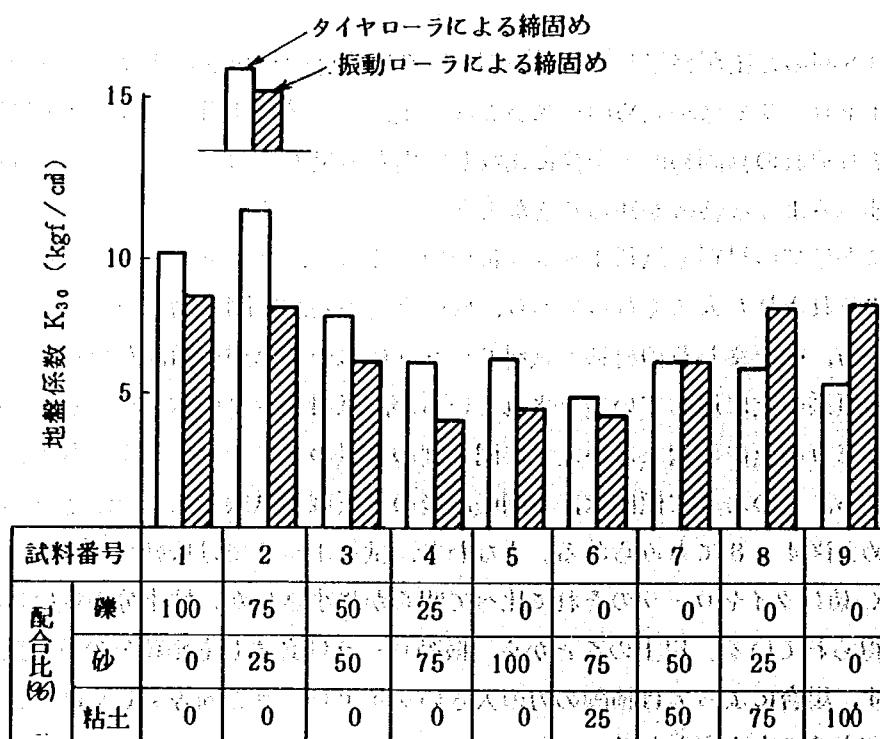
礫から砂にかけての材料(試料1~5)についてみると、タイヤローラによる締固め度の方が振動ローラのそれよりも大きくなっており、機械重量の差が締固め効果の差となって表れているといえる。一方、粘土まじりの材料(試料6~9)については逆の傾向が得られた。一般に、振動ローラは砂質系の土に適しているとされているが、試料6~9の結果をみると、振動ローラは決して粘土まじりの土に不適とはいえず、同程度の重量のタイヤローラよりも大きな締固め効果が得られている。このような傾向は、8回転圧後の平板載荷試験による地盤係数 K_{30} を盛土材の種類別にまとめた図4-8にもみられる。すなわち、試料1~5では振動ローラによって締固められた地盤の K_{30} 値はタイヤローラのそれに比べて明らかに小さいが、粘土分の多い試料8、9では逆の結果が得られている。以上のことから、振動ローラは必ずしも細粒分の多い盛土材に適さないとはいえず、場合によっては締固め力の大きいタイヤローラと同等もしくはそれ以上の締固め効果が期待できることと思われる。



注) 各ケースとも転圧回数は8回。

注) 密度の測定は砂置換法による。

図4-7 土質別の締固め度



注) 各ケースとも転圧回数は8回。

図4-8 締固められた地盤の土質別地盤係数

次に、図4-9は転圧回数と転圧層の圧縮率（表面沈下量/敷ならし厚の関係を示したもので、振動ローラとタイヤローラによる圧縮率の違いを土質別にみれば、試料6～9については振動ローラによる圧縮率の方が大きいことなどがわかり、図4-7に示された結果と十分に対応付けられる。

最後に、土質条件として含水比をとりあげ、試料2を用いて4種類の含水比を設定して締固めを行った。設定した含水比は室内締固め試験により得られた最適含水比 w_{opt} 、 $w_{opt} \pm 2\%$ 、 $w_{opt} - 3.5\%$ の4種類である。これまでの実験と同様に8回の転圧を行ったのちに乾燥密度を測定した結果が図4-10である。この図をみると、締固め曲線は突固めによる室内試験と締固め機械を用いた実験とでかなり異なることがわかる。特に、実際に締固めに最適と思われる含水比は室内試験による最適含水比 w_{opt} より小さいことがはっきりわかる。なお、振動ローラとタイヤローラとでは締固め曲線に大きな差のないことも確かめられた。

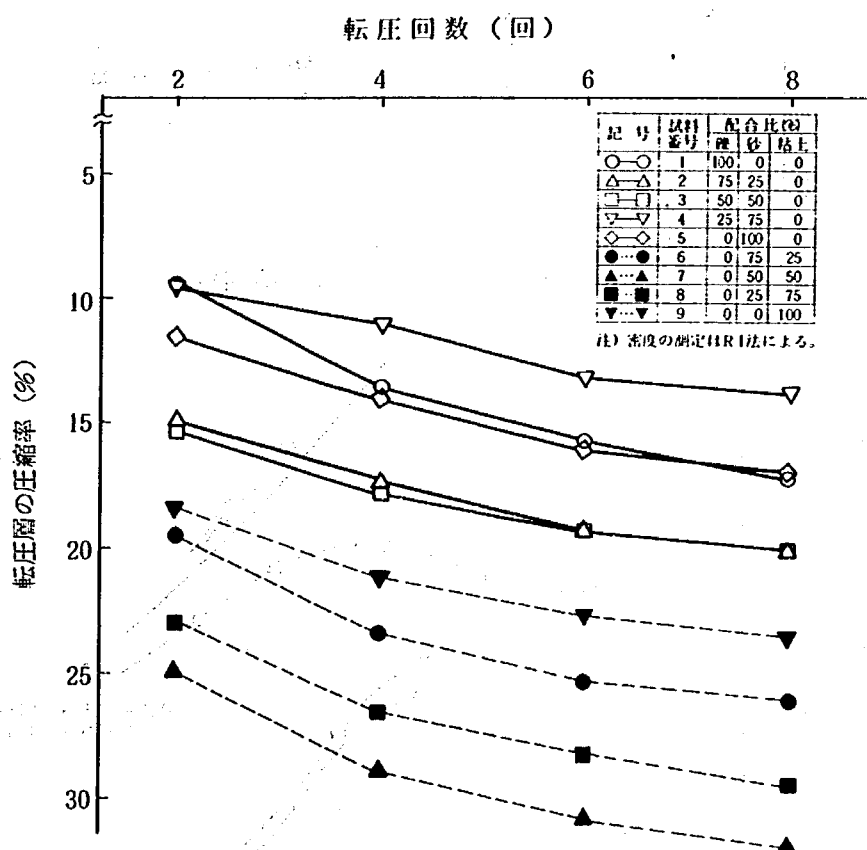


図4-9 転圧層の圧縮率
(a)振動ローラによる締固め

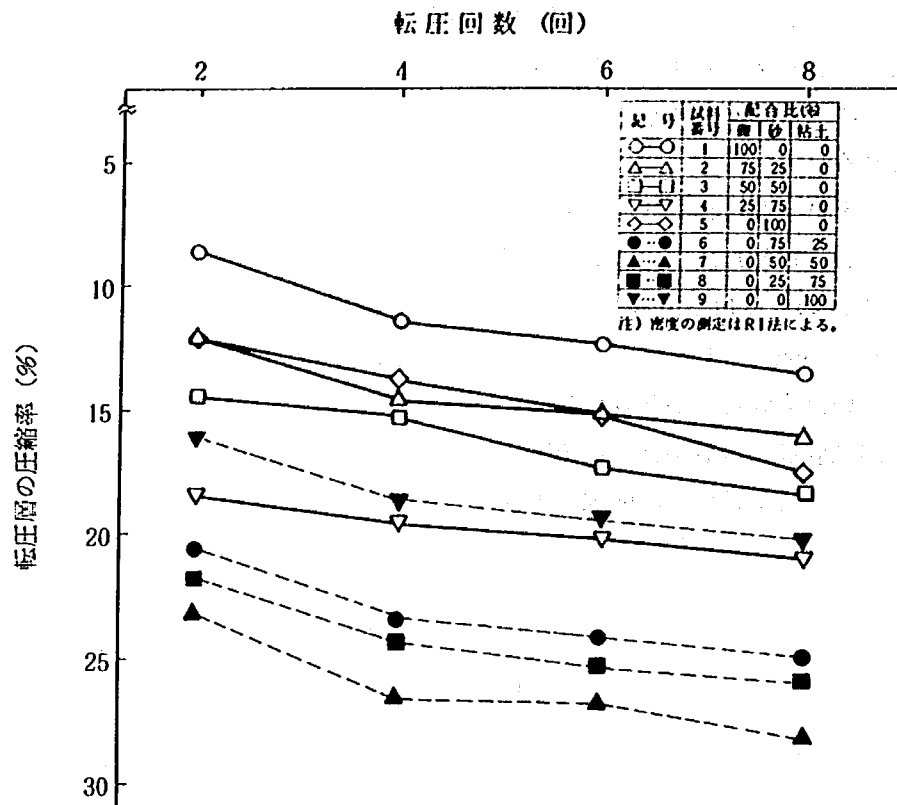


図 4 - 9 転圧層の圧縮率
(b)タイヤローラによる締固め

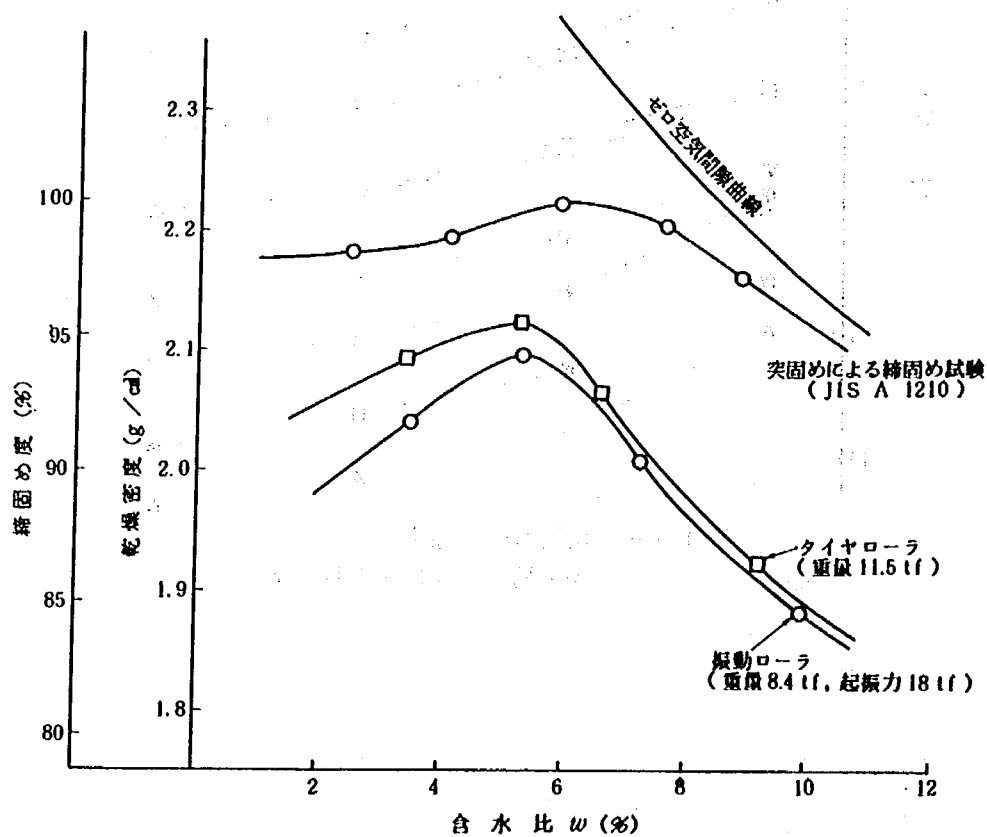


図 4 - 10 振動ローラ, タイヤローラの締固め曲線

4.2 振動数・起振力の影響（実験Ⅱ）

4.2.1 実験目的

振動ローラによって土を締固める場合、振動数や起振力の異なる種々の振動ローラが使用されているにもかかわらず、これらが締固め効果にどのような影響を及ぼすかについては十分に明らかにされているわけではない。このような問題を検討するためには土質条件等のパラメータを変えた豊富なデータが必要と思われるが、本実験ではその基礎資料を得ることを目的として振動ローラの起振力、振動数を変えて締固めを行い、密度、強度との関連性を調べた。

4.2.2 実験方法

(1) 盛土材

実験には砂、礫の2種類の盛土材を使用した。各材料の最大乾燥密度、最適含水比、土粒子の比重、均等係数を表4-4に、粒径加積曲線を図4-11に締固め曲線を図4-12に示す。実験時の含水比は各材料とも最適含水比となるよう調整した。

表4-4 材料条件

材 料 名	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	最適含水比 w_{opt} (%)	土粒子の比重 Gs	均等係数 Uc
砂	1.670	17.0	2.706	11.1
礫	2.259	5.5	2.732	94.4

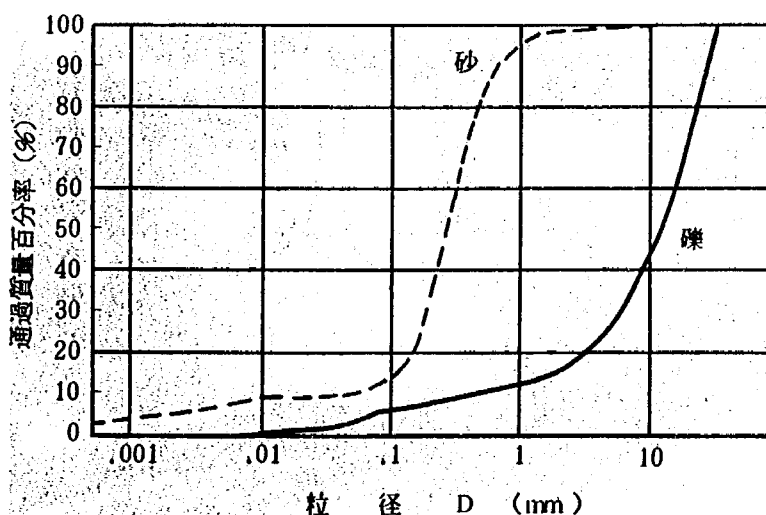


図4-11 粒径加積曲線

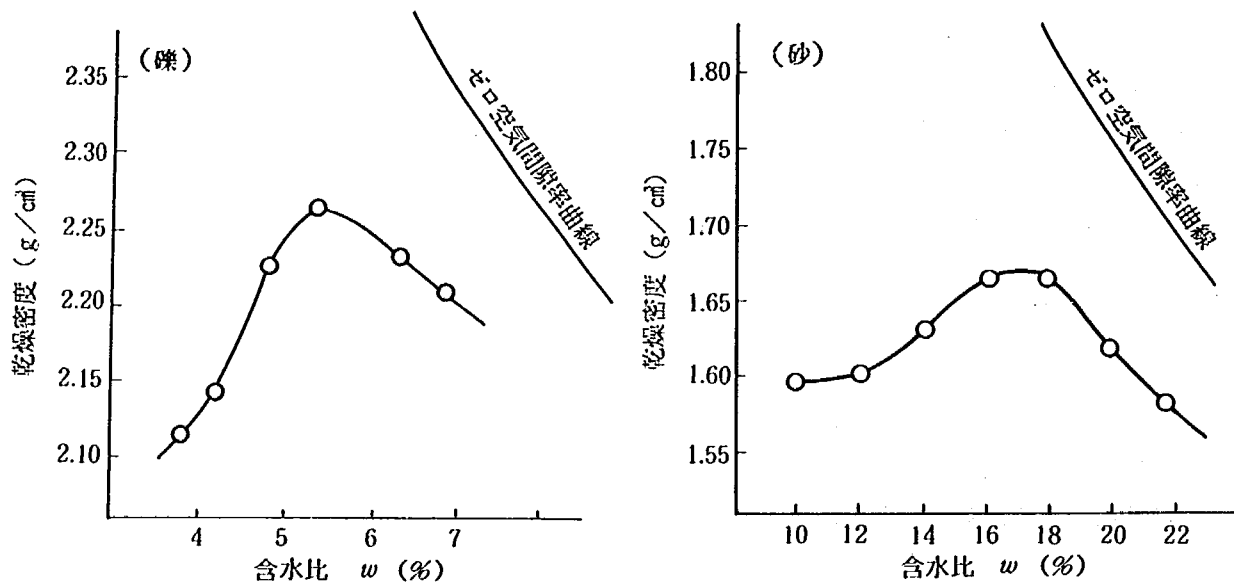


図 4-12 突固めによる締固め試験

(2) 締固め機械

使用した振動ローラ (写真 4-3) の主な諸元を表 4-5 に示す。

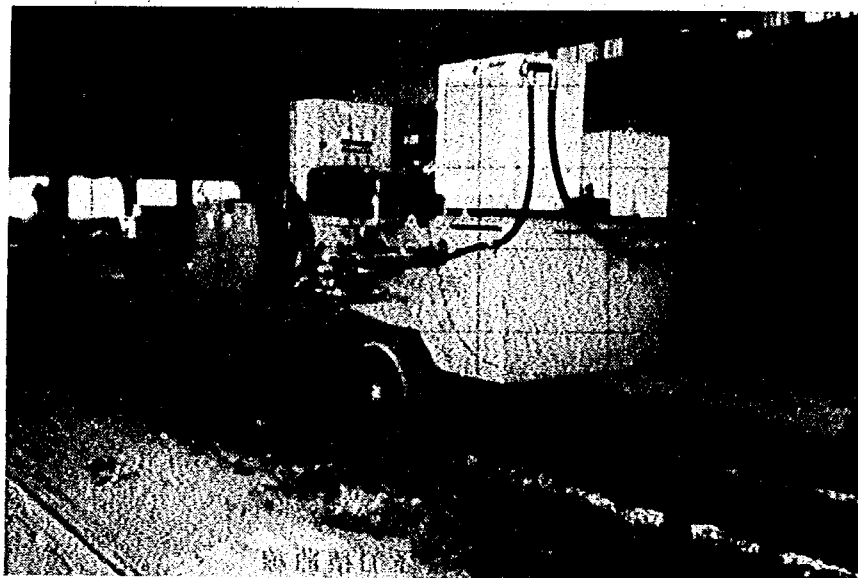


写真 4-3 振動ローラ

表 4-5 振動ローラ主要諸元

総重量 (kgf)	5350 (前: 2,470 後: 2,880)
自重 (kgf)	4880 (前: 2,000 後: 2,880)
前輪 (mm)	鉄輪: 案内輪, 振動輪 1000φ × 800 × 1個
後輪 (mm)	タイヤ: 駆動輪 730φ × 200 × 2個
走行速度 (km/h)	前後進無段変速 0 ~ 8
起振力 (kgf)	0 ~ 4,500
振動数 (vpm)	0 ~ 3,000
静線圧 (kgf/cm)	25 ~ 30
動線圧 (kgf/cm)	0 ~ 60
走行用機関	3相モータ, 200V, 20 kw, 4 P
起振力機関	3相モータ, 200V, 15 kw, 2 P

(3) 実験条件

実験ピットは石灰処理した堅固な地盤の上に砂を 65 cm 厚に締固めて作成した (図 4-13 参照)。実験用の盛土材料は厚さ 35 cm で敷ならした。敷ならしは、人力によるものとし、できるだけ均一になるよう配慮した。締固め条件として振動ローラの振動数、起振力の異なる 8 ケースを設定した。各ケースの締固め条件を表 4-6 に示す。表中の振動数は実験時に計測したものであり、起振力は実測された振動数と起振装置の諸元から計算して求めたものである。本実験では振動ローラの走行速度をおよそ 3 km/h に設定し、締固めは最大 12 回まで行った。

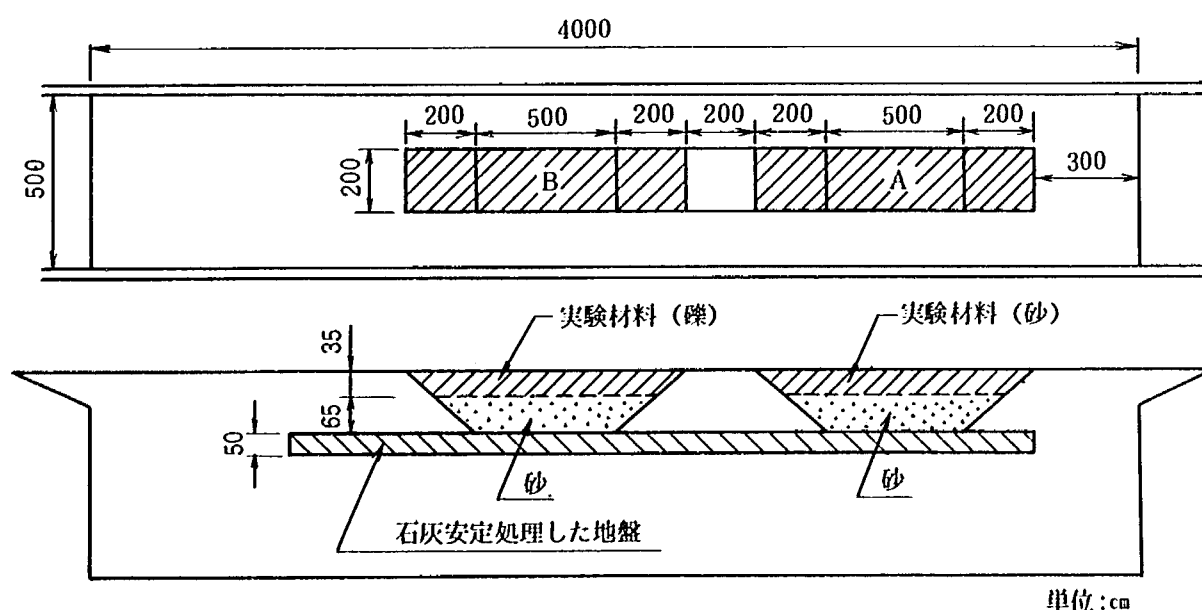


図 4-13 実験ピット構成

表 4-6 実験時の振動数と起振力

ケース	1	2	3	4	5	6	7	8
振動数 (vpm)	2,220	2,280	2,220	2,160	3,300	1,260	1,590	1,800
起振力 (kgf)	2,400	1,850	1,260	670	540	800	900	830

(4) 計 測

締固め効果を確認するためには敷ならし後および転圧回数 2, 4, 6, 8, 12 回終了後に密度の計測を行った。計測は RI 計器によるものを主体とし、チェックを目的として砂置換法による密度試験を実験 I と同じ様に敷ならし後と締固め終了後に実施した。

その他、沈下量の測定、平板載荷試験、現場 CBR 試験などを行った。計測位置を図 4-14 に示す。

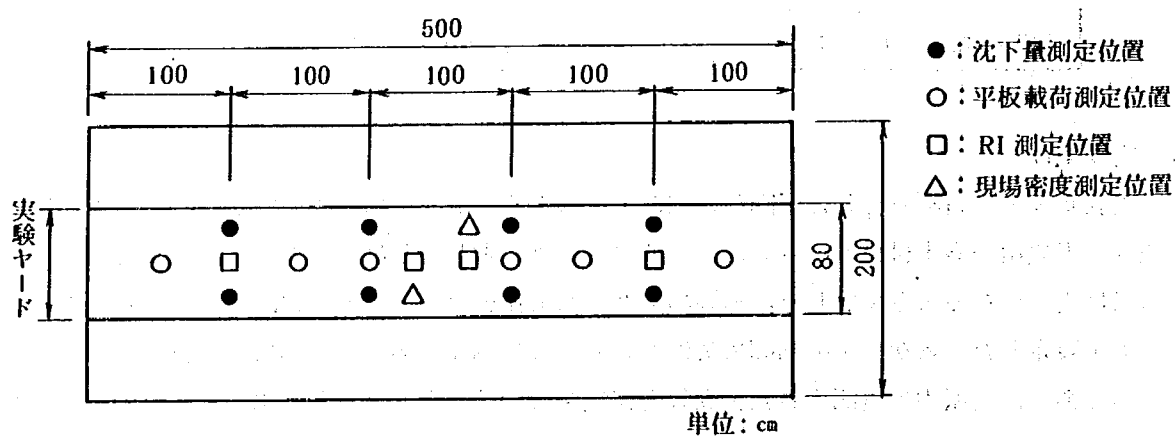


図 4-14 測定位置

4.2.3 実験結果

(1) 転圧回数と締固め効果

砂と礫を対象にそれぞれ8ケースの実験条件のもとで締固めを行った結果を図4-15、図4-16に示す。これらの図は所定の転圧回数が終了した直後の乾燥密度、締固め度を表示したもので、現場密度の測定はRI法によった。

通常、この種の実験を行えば転圧回数の増加に伴って乾燥密度（締固め度）が増加するが、本実験の一部のケースではこのような単調増加の傾向が得られなかった。実際には転圧回数の増加に伴って乾燥密度が減少することはあり得ず、図のような結果となったのは締固めによる密度の増分よりも盛土の密度のばらつきの方が大きかったことに他ならない。すなわち、所定の転圧回数が終了した直後の密度の測定点は厳密には毎回ポイントが異なり、ポイント間の密度のばらつきが大きいと乾燥密度と転圧回数の関係は必ずしも単調増加とはならない可能性がある。本実験で用いた振動ローラは重量、起振力ともかなり小さい機種であるため、盛土を均一に締固めるという目的に対しては十分でなく、締固めムラがかなりあったものと思われる。

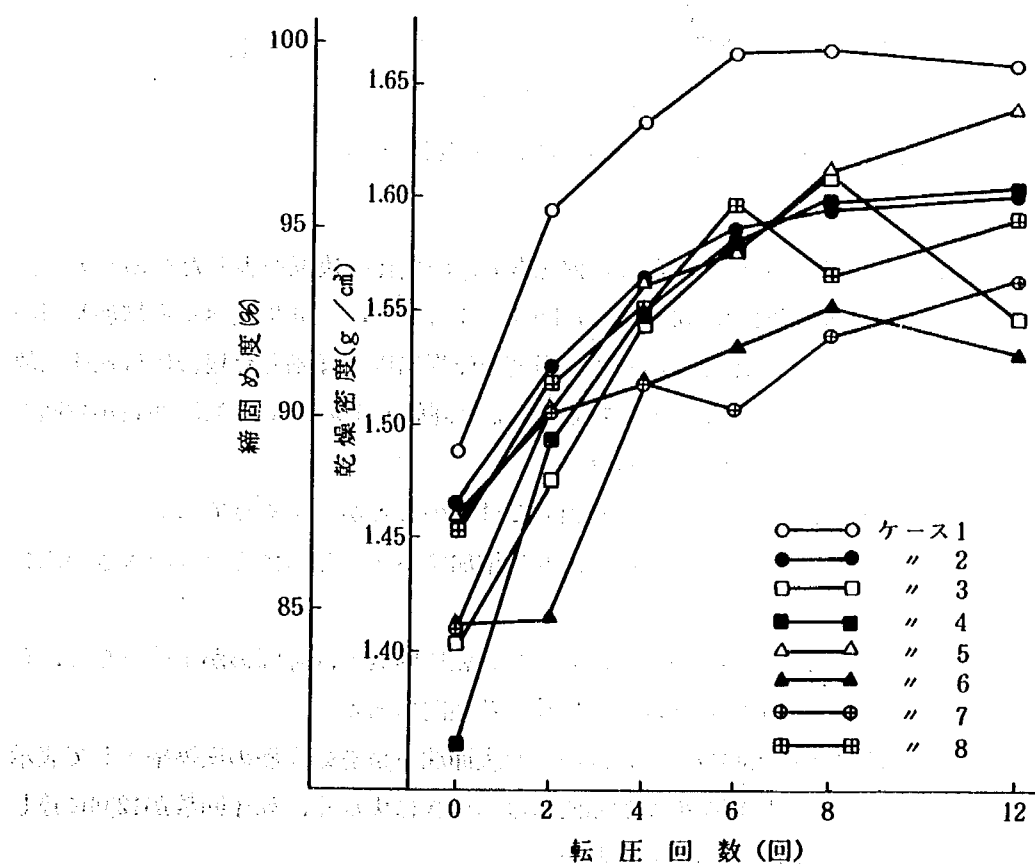


図4-15 締固めによる乾燥密度の変化(砂)

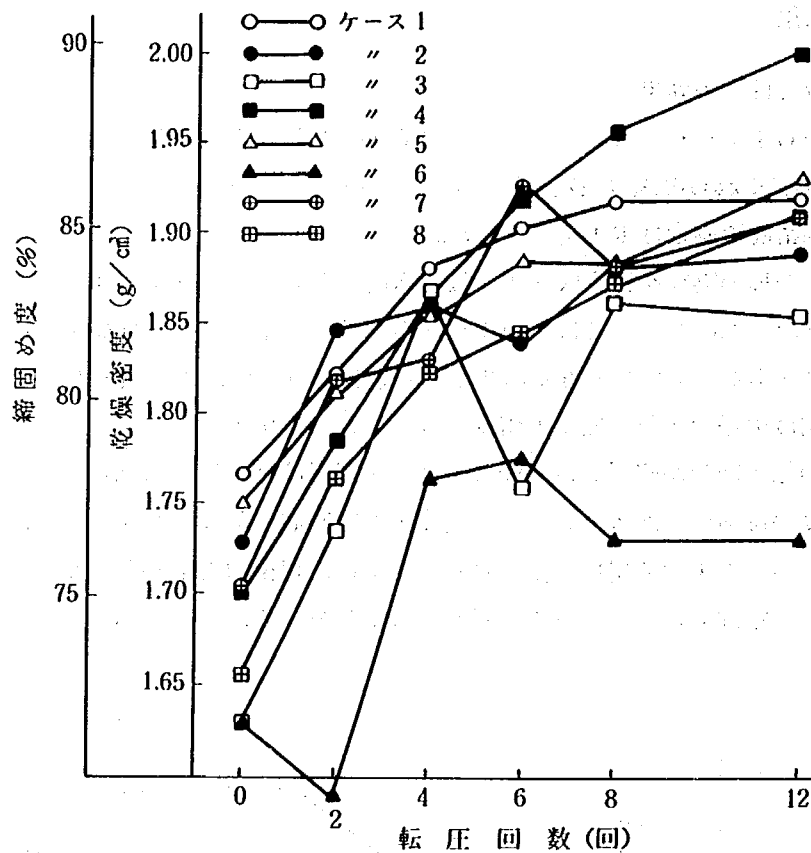


図4-16 締固めによる乾燥密度の変化(礫)

図4-17, 図4-18は締固めにもなう地盤係数 K_{30} の変化の状況を表したものである。図からもわかるように、乾燥密度の変化を示した図4-15, 図4-16に比べると増加傾向のばらつきはかなり小さい。また、地盤の締固めの程度を乾燥密度で評価した場合には転圧回数8回程度でピークに達するケースが多いのに対し、 K_{30} で評価する場合には転圧回数が12回となっても地盤強度がまだ増加する傾向がみられる。

以上のことから、小型の振動ローラによる締固めでは次のことがいえそうである。

- ① 転圧をくり返すことによって地表面付近の密度は増加するが、そのばらつきが大きい恐れがある。
- ② 締固め力(重量, 起振力)が小さいために数少ない転圧回数では締固めが十分でなく、転圧回数を増やすにしたがって地盤強度はさらに高まる傾向にある。

図4-19, 図4-20は各転圧回数ごとに計測した表面沈下量を転圧層の圧縮率として表示したものである。 K_{30} と同様、圧縮率の増加傾向にばらつきは少なく、転圧回数が12回に達してもまだ圧縮率は増加する傾向にあることがわかる。

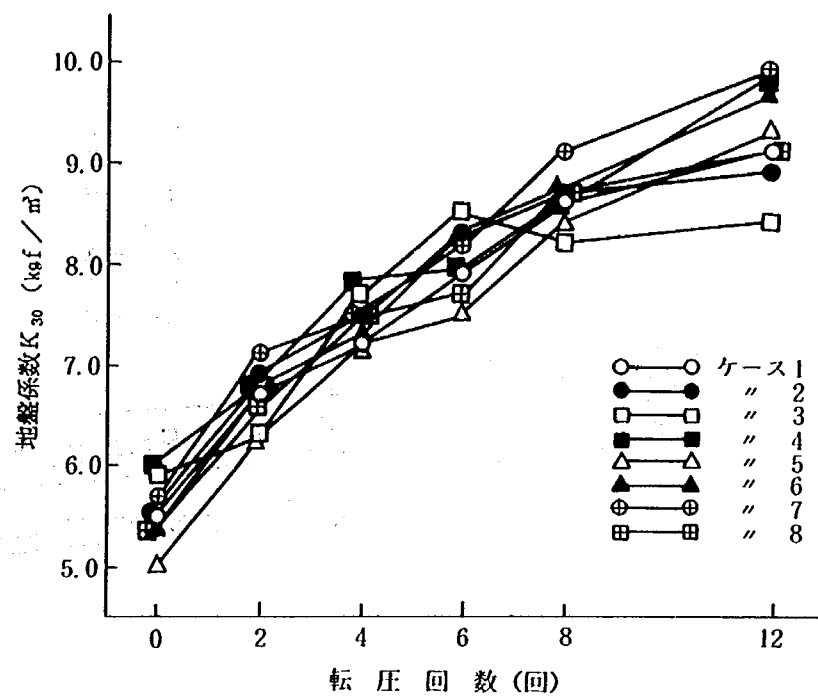


図4-17 締固めによる地盤係数の変化(砂)

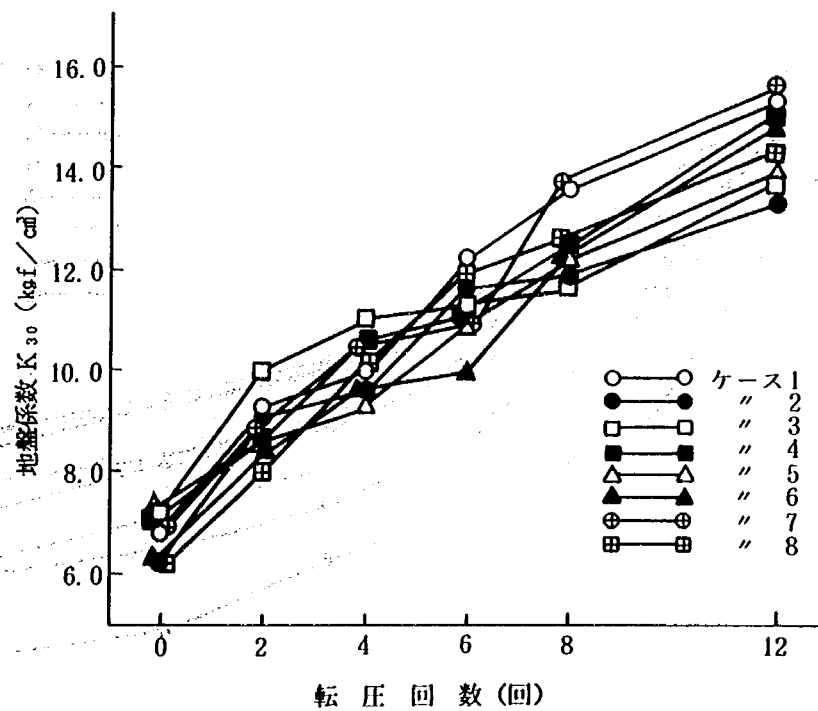


図4-18 締固めによる地盤係数の変化(礫)

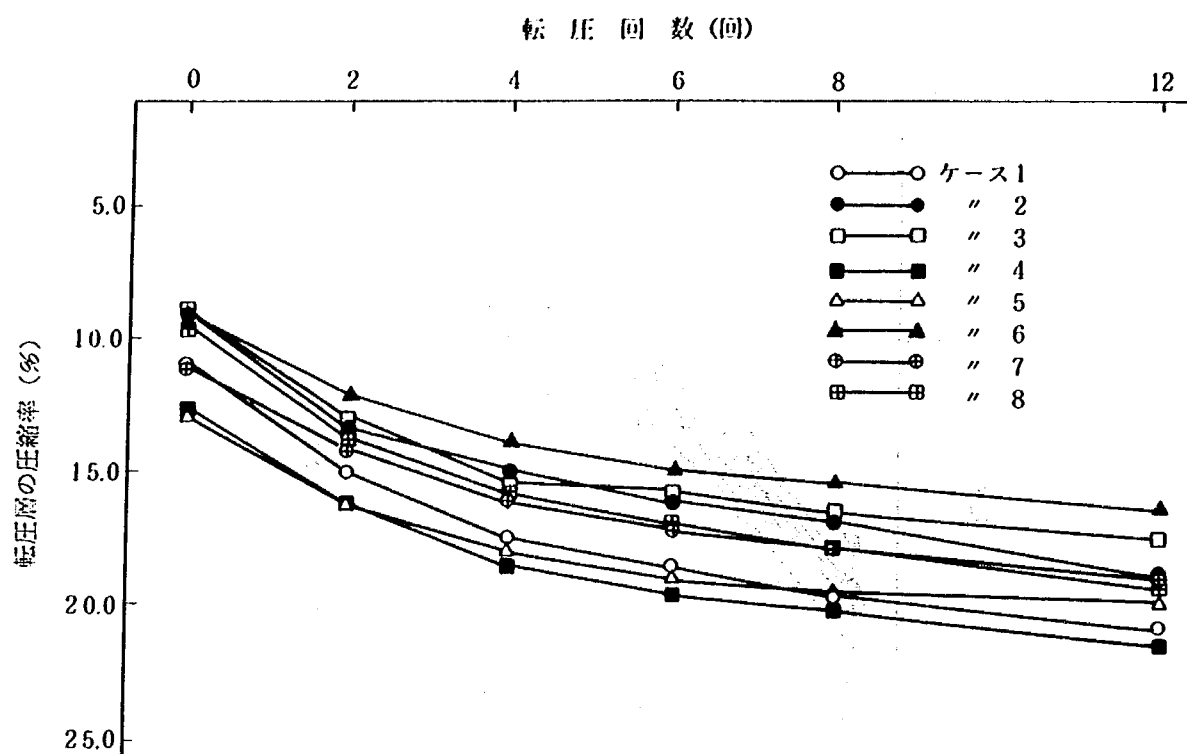


図 4 - 19 締固めによる転圧層の圧縮率(砂)

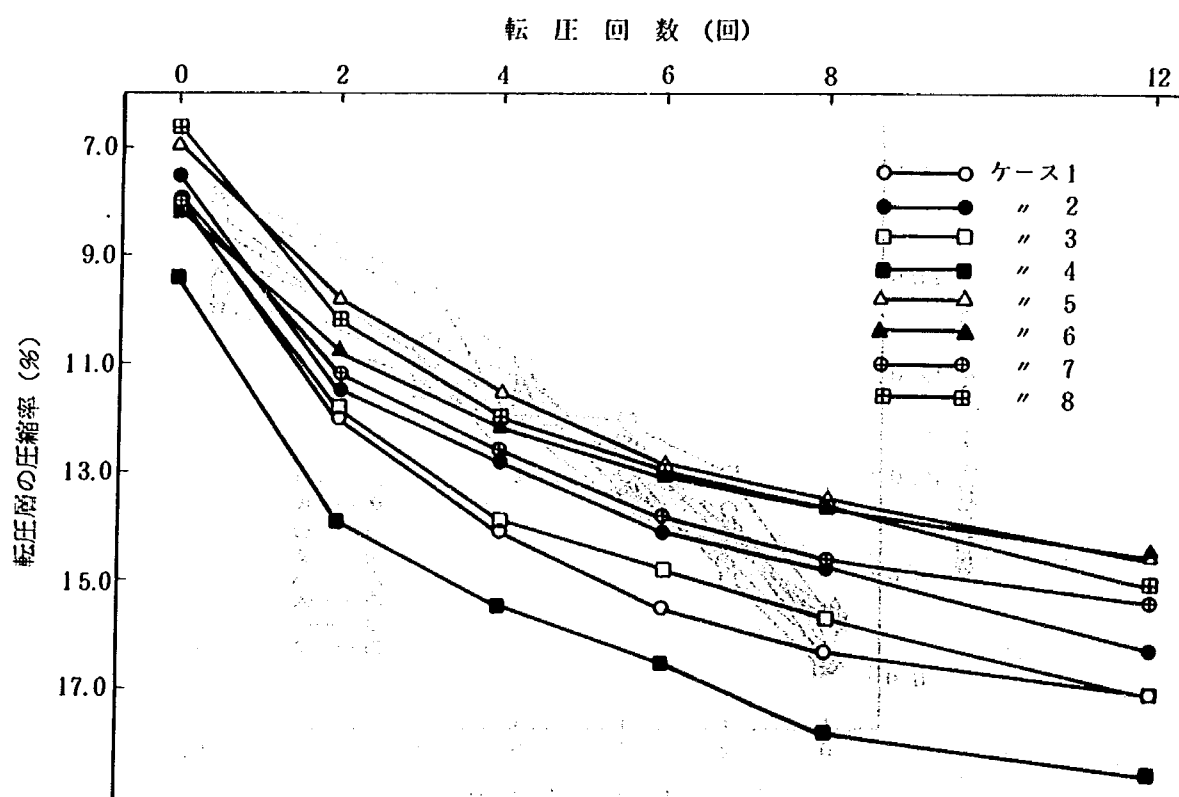


図 4 - 20 締固めによる転圧層の圧縮率(礫)

(2) 実験ケース別の締固め効果の比較

次に、転圧回数12回終了後の締固めの程度を実験ケース別に締固め度、地盤係数、現場C B Rで比較したのが図4-21～23である。これから次のような特徴を見出すことができる。

- ① 締固め度を比較した図4-21をみると、全般的に礫の締固め度が砂に比べて低いことがわかる。これより、本実験で使用した程度の小型振動ローラでは、砂に対してはある程度の締固め度が得られるものの、礫に対してはより大きな締固め力をもつ振動ローラが適するのではないかと推察される。

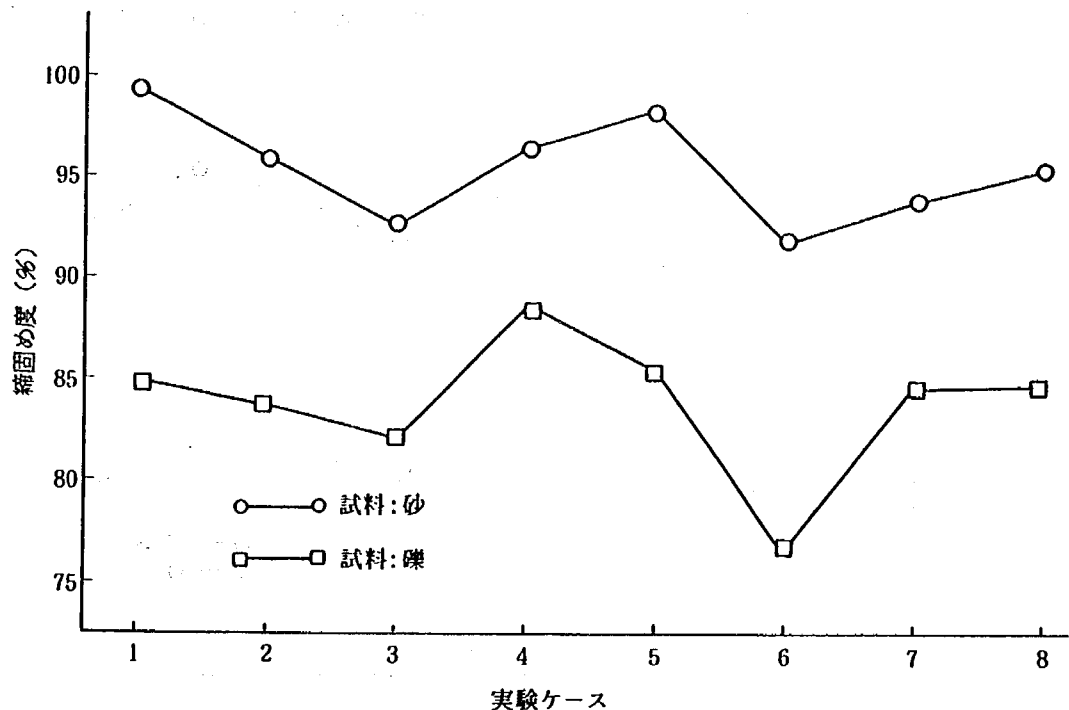


図4-21 実験条件別の締固め度の比較（転圧回数：12回）

- ② 締固め度、地盤係数、現場C B Rは三者三様の傾向を示しており、三者間の相関は見出しにくい。同じ材料を締固めて密度を増加させれば強度も増加するのは当然のことであるにもかかわらず、このような結果が得られたということは盛土材料のばらつき、締固め施工の不均一さ、試験者のばらつきが現実にかに大きいかを物語るものといえよう。3つの指標はそれぞれの特徴をもっており、締固め度は地表面下20cm程度までの密度を直接測るものであるし、地盤係数や現場C B Rは直径30cmの載荷板あるいは直径5cmの貫入ピストンによって地盤の荷重強さを測るものであるから、本来どの程度の相関があるのかははっきりしていない。いずれにせよ、締固めの程度を表す指標としてどれを選ぶかによって導かれる結論が異なることになる。3つの指標のうちどれが最も締固めの程度を表しうるかという点については本調査の目的を逸脱するものであるためここでは言及せず、現状で最もよく用いられている締固め度を指標とした場合について以下の考察を行うことにする。

- ③ 一般に振動ローラの起振力が大きいほど締固め効果が大きいと考えられる。図4-21に示した結果のうち、振動数がほぼ等しいケース1～3を比べると、砂、礫ともに起振力の大きさ

の順に締固め度が大きくなっており、上述の事柄が実証された。この結果をみるかぎりにおいては、さらに起振力が大きければより締固め効果があると想像される。

- ④ 振動数と締固め効果との関連については、振動数が大きいほど締固めの仕事量が増えるので締固め効果が大きいと考えるのが一般的である。図4-21に示した結果のうち、起振力のほぼ等しいケース6～8を比較すると、振動数が大きいほど締固め度が大きくなっている。さらに特徴的なことは、振動数の量も大きいケース5の場合には起振力が小さいにもかかわらずケース6～8よりも大きな締固め度が得られていることである。振動数と起振力のいずれが締固め度により大きな影響を与えるかについては今回の実験データだけでは不十分で断言できないが、いずれにせよ両者とも締固め効果に及ぼす影響がかなりあることが明らかとなった。

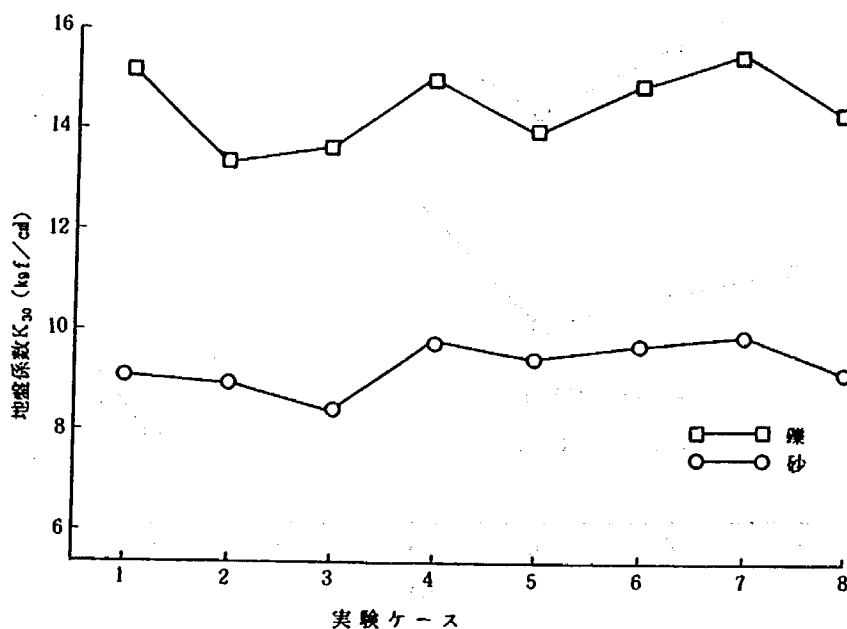


図4-22 実験条件別の地盤係数の比較（転圧回数：12回）

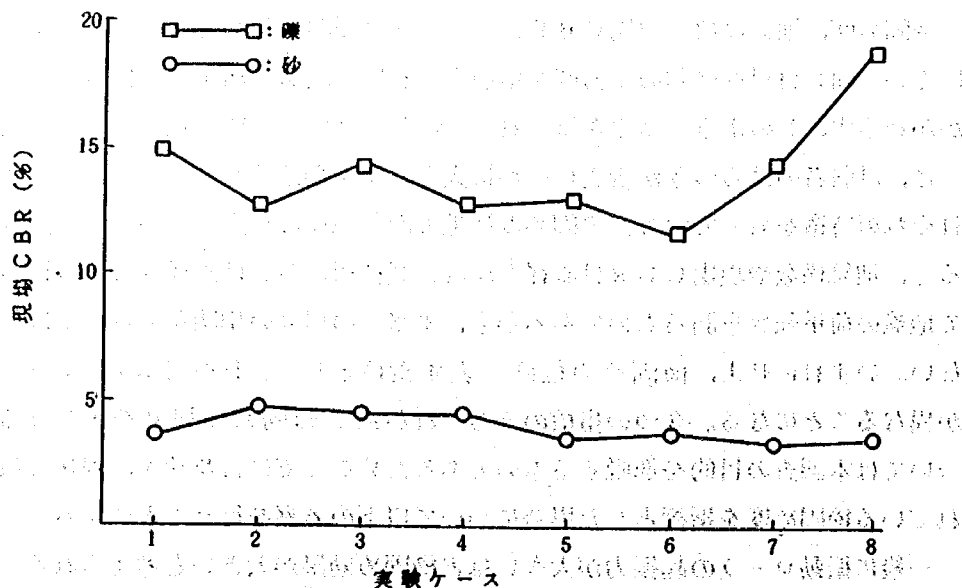


図4-23 実験条件別の現場CBRの比較（転圧回数：12回）

4.3 振動輪重量、起振力の影響（実験Ⅲ）

4.3.1 実験目的

本実験は振動輪の重量及び起振力が締固め効果にどの程度の影響を及ぼすかを調べることを目的として実施したものである。ここでは4種類の振動ローラを用いて同一条件の地盤を締固め、締固め度および地盤係数によって締固め効果を比較した。なお、本実験では振動輪の振動特性などについても計測を行ったが、その結果については第5章で述べることにし、ここでは締固め効果に限って結果を述べる。

4.3.2 実験方法

(1) 盛土材

実験用の盛土材としてシルト質砂（SM）を使用した。材料の最大乾燥密度、最適含水比、土粒子の比重、均等係数を表4-7に、粒径加積曲線を図4-24に、締固め曲線を図4-25に示す。含水比は最適含水比より若干低く設定した。（4.6%）

表4-7 材料条件

最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ (g/cm^3)	最適含水比 w_{opt} (%)	土粒子の比重 Gs	均等係数 Uc
2.177	8.6	2.75	87.5

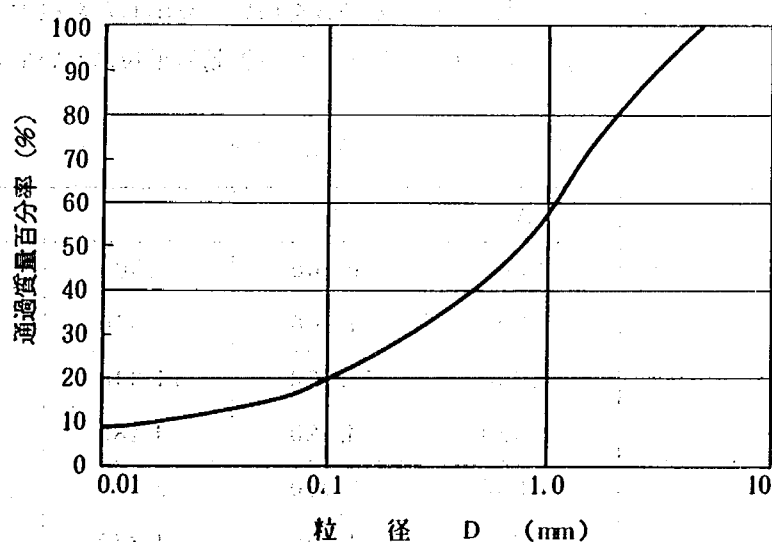


図4-24 粒径加積曲線

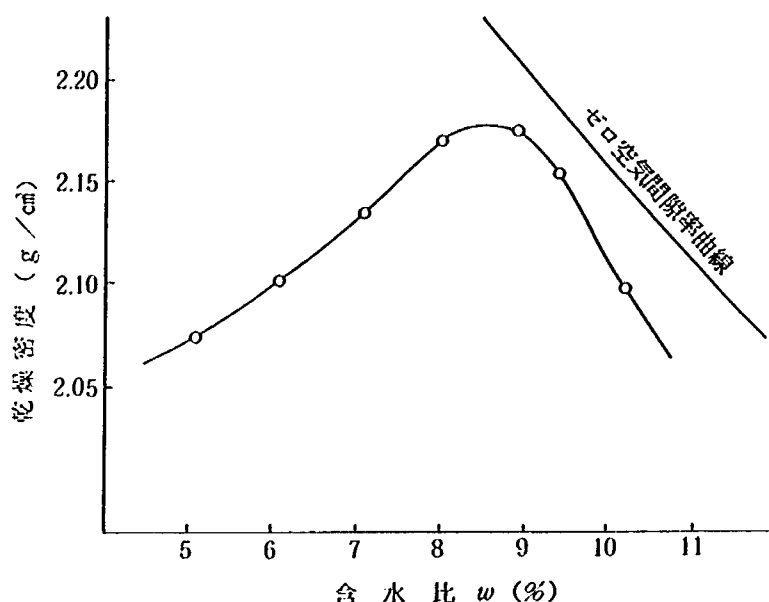


図4-25 突固めによる締固め試験

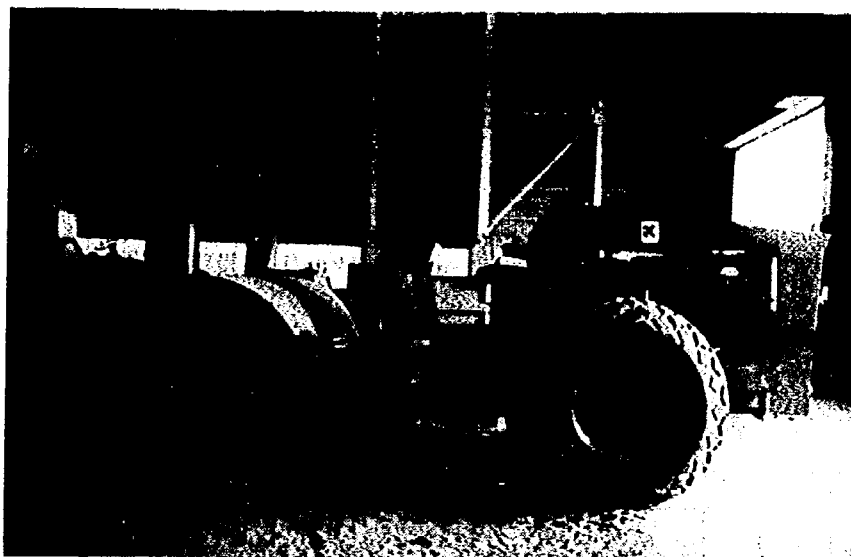
(2) 締固め機械

使用した振動ローラの主要諸元を表4-8に示す。機種A、Bについては実際には同一機種の起振力を変えて実験を行ったもので、ここでは便宜的に機種A、Bと区別してよぶことにする。なお、後述する実験Ⅳにおいて使用した機種を本調査では機種Dとしているので、ここでは使用した振動ローラを機種A、B、C、Eとよんでいる。写真4-4に機種A(B)、機種Eを示す。

本実験では、同一の地盤条件に対して上述の各機種を使用する4ケースを設定した。実験に際しては振動輪の軸に加速度計を取付け、加速度記録より振動数を求めた。計測された振動数は振動ローラの規格値とは若干異なっていたため、その計測結果を表4-9に示す。振動数が異なると起振力も異なるので、表には計測された振動数を用いて算出した起振力も併記している。また、各機種の諸元のうち特に本実験で比較の対象となる振動輪重量についても同表に示した。

表4-8 振動ローラ主要諸元

機 種	A	B	C	E
総 重 量 (kgf)	6,600	6,600	5,300	8,200
振 動 数 (vpm)	1,800	1,800	1,850	1,850
起 振 力 (kgf)	6,000	11,000	11,340	18,200
全 長 (mm)	4,520	4,520	4,483	5,232
全 高 (mm)	2,050	2,050	2,070	2,210
全 幅 (mm)	1,880	1,880	1,842	2,362
振 動 輪 の 径 (mm)	1,250	1,250	1,264	1,550
振 動 輪 の 幅 (mm)	1,700	1,700	1,676	2,134



(a) 機種 A(B)



(b) 機種 E

写真 4-4 振動ローラ

表 4-9 実験条件

実験 ケース	1	2	3	4
使用 機種	A	B	C	E
総 重 量 (kgf)	6,600	6,600	5,300	8,200
振 動 数 (vpm)	1,770	1,770	1,680	1,850*
起 振 力 (kgf)	5,802	10,636	9,352	18,200*
前 輪 荷 重 (kgf)	3,200	3,200	2,700	4,800
振動輪の重量 (kgf)	2,340	2,340	1,750	3,600

* 機種 E の振動数は測定不能のため定格値を示した。

(3) 実験条件

図4-26に示すように、安定処理された堅固な地盤 ($K_{30} = 50 \text{ kgf/cm}^2$ 以上) の上に実験用の盛土材を十分に締固めた厚さ 50 cm の基礎地盤 ($K_{30} = 45 \text{ kgf/cm}^2$ 程度) を作成し、その上に盛土材を厚さ 50 cm に敷ならした。敷ならしは人力で行い、できるだけ均一になるようにした。実験ヤードの広さは幅 3 m、長さ 16 m とした。

振動ローラの走行速度は各ケースともおよそ 1.8 km/h に設定し、転圧は最大 12 回まで行った。

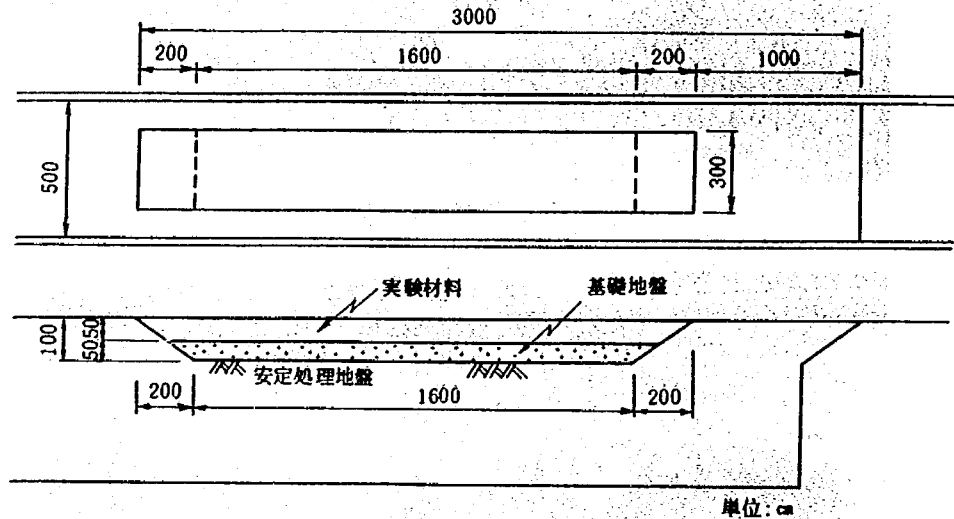


図4-26 実験ピット構成

(4) 計 測

締固め効果を確認するために、実験Ⅱと同様敷ならし後および転圧回数 2, 4, 6, 8, 12 回終了後にラジオアイソトープによる密度試験および平板載荷試験を行った。なお、密度試験については敷ならし後と転圧回数 12 回終了後に砂置換法による試験も実施し、R-I 法によるデータのチェックを行った。その他、表面の沈下量の計測も行った。これらの計測位置を図4-27に示す。

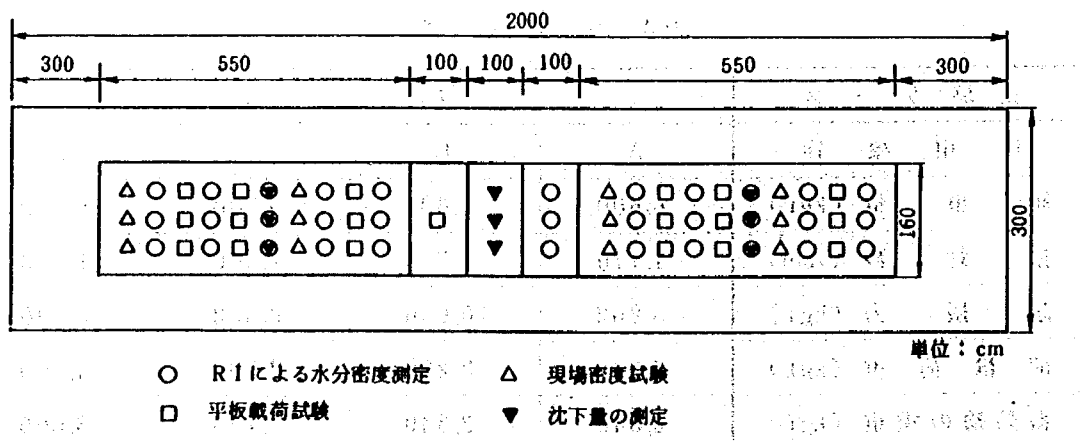


図4-27 測定位置

4.3.3 実験結果

締固めによる乾燥密度（締固め度）および地盤係数の変化の状況を図4-28、図4-29に示す。なお、ここでの乾燥密度および地盤係数は所定の転圧回数ごとに数ヶ所（密度試験は6ヶ所、平板載荷試験は3ヶ所）で計測された値の平均値である。

まず、これらの図の一般的な傾向として、図4-28では転圧回数が6回を越えると乾燥密度の増加が小さくなるのに対し、図4-29では転圧回数が6回を越えても地盤係数が増え続けていることがわかる。このような違いについては次のように考えられよう。

本実験では盛土材の敷ならし厚を50 cmとしており、12回の転圧が終了した後も転圧層の厚さは40 cm近くある。このような条件のもとでの密度測定は転圧層上部のみの密度を測定したもので、転圧層全体の密度を代表しているわけではない（転圧層下部の密度は小さいものと想像される）。一方、平板載荷試験の場合には載荷重による地盤内応力は転圧層下部にまで発生していると思われ、この意味においては地盤係数の方が転圧層全体の締固め効果を代表しうのではないかとと思われる。このような点をふまえて、あらためて図4-28、図4-29をみると、転圧層上部の密度は6回程度の転圧ではほぼ飽和点近くまで増え、以後の転圧ではその増加量が少ないのに対し、6回以降の転圧で転圧層下部がさらに締固められるために地盤係数が増え続けるのではないかと想像される。いいかえれば、振動ローラの締固め力を直接受ける転圧層上部では締固めの進行が速いのに対し、転圧層下部では締固め力が弱いために徐々に締固めが進行するものと思われる。したがって転圧層下部を締固めるにはある程度の転圧回数が必要となろう。

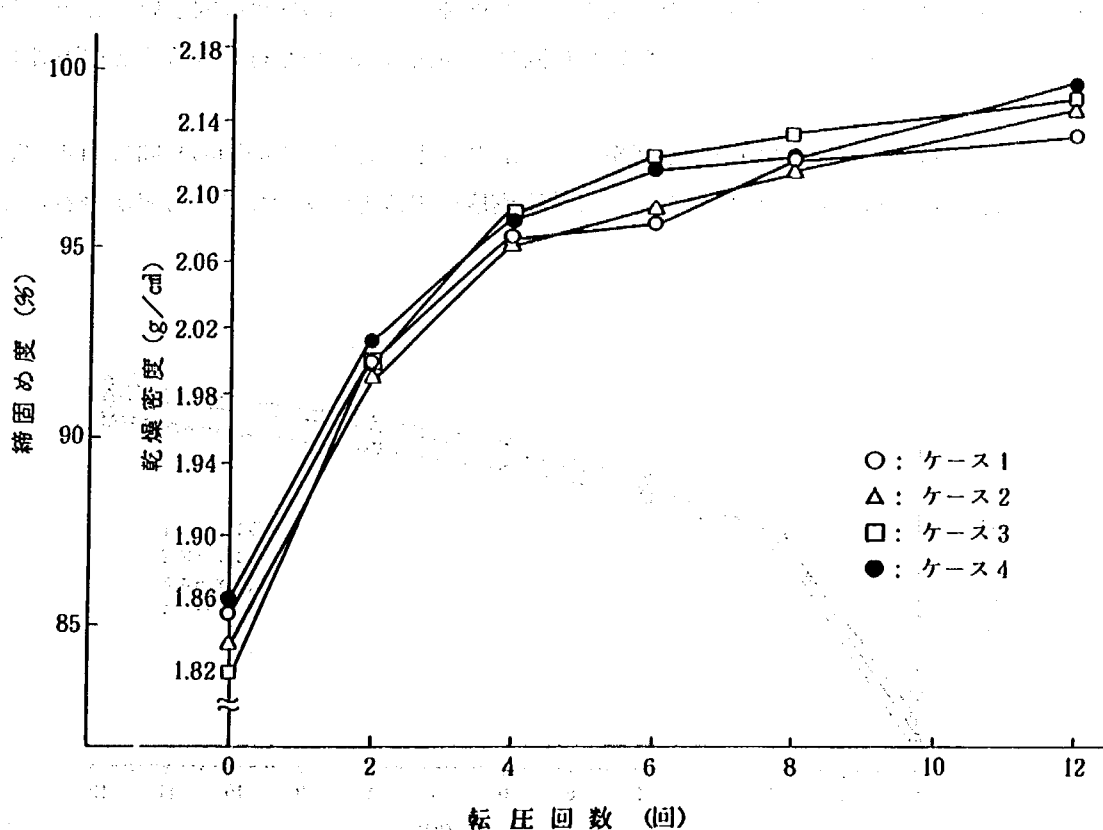


図4-28 締固めによる乾燥密度の変化

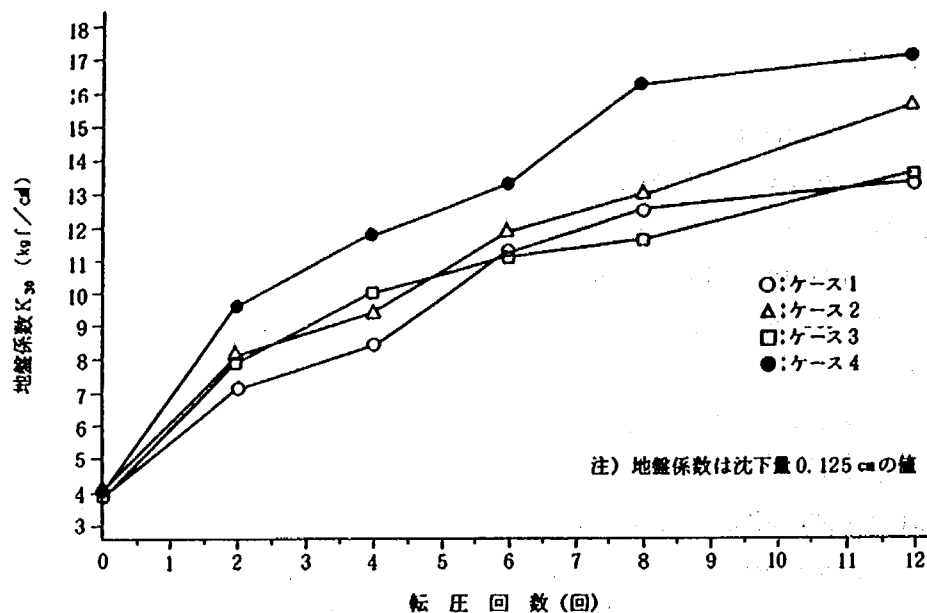


図 4-29 締固めによる地盤係数の変化

以上の考察から、本実験においては乾燥密度よりも地盤係数の方が転圧層全体の締固め効果を代表しうると考えた。そこで、次に実験ケースごとの締固め効果の違いをみると、乾燥密度で表した図 4-28 では各ケースの差がほとんど認められないのに対し、地盤係数を比較した図 4-29 では実験ケースによって締固め効果に明らかな差がみられる。締固め効果の大きい順に機種を並べると、①機種 E、②機種 B、③機種 A および C、の順になっている。当然のことながら、表 4-9 に示した総重量および起振力の大きい大型機種ほど締固め効果の大きいことがわかる。いいかえれば、大型機種を用いれば少ない転圧回数で所定の締固めを行いうることを実証したことになる。

最後に、締固めによる転圧層の圧縮率を図 4-30 に示しておく。この図の傾向は図 4-28 とよく似ており、締固め効果を示す指標としては乾燥密度の場合と同様機種による差が表れにくいことがわかる。

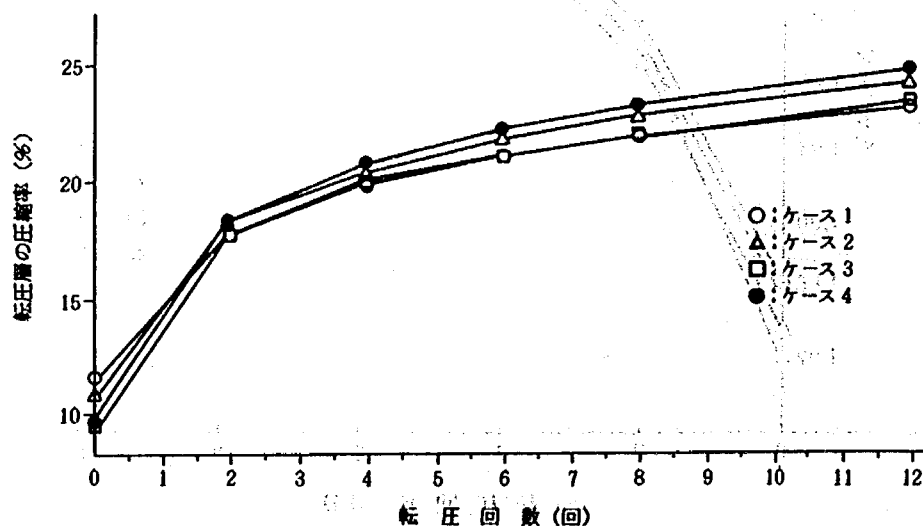


図 4-30 締固めによる転圧層の圧縮率

4.4 締固め厚の影響（実験Ⅳ）

4.4.1 実験目的

振動ローラで土を締固める場合、締固め厚を従来の機械に比べて大きくとることが可能かどうかは、施工能率の面からも重要な問題である。そこで、本実験では締固め厚を変化させたときの振動ローラの締固め効果を調べることを目的として、敷ならし厚を3種類設定して締固め実験を行った。

4.4.2 実験方法

(1) 盛土材

実験用の盛土材としてシルト質砂（SM）を使用した。材料の最大乾燥密度、最適含水比、土粒子の比重、均等係数を表4-10に、粒径加積曲線を図4-31に、締固め曲線を図4-32に示す。実験時の含水比は最適含水比となるよう調整した。

表4-10 材料条件

最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	最適含水比 w_{opt} (%)	土粒子の比重 G_s	均等係数 U_c
2.076	10.0	2.847	133.3

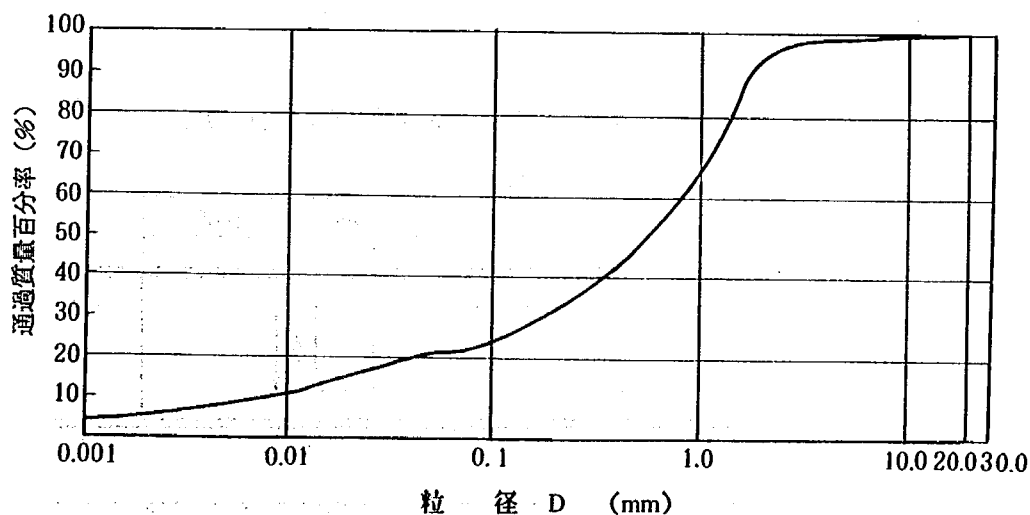


図4-31 粒径加積曲線

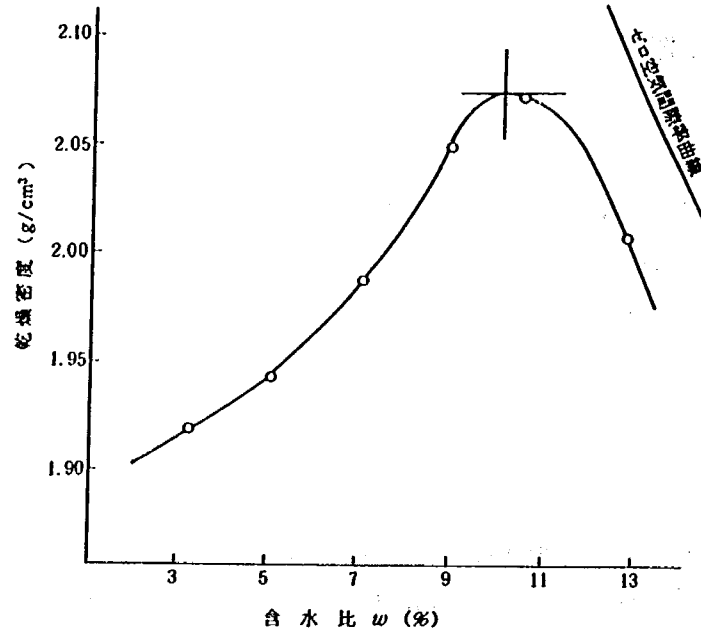


図 4-32 突固めによる締固め試験

(2) 締固め機械

使用した振動ローラは実験Ⅲケース 2 で用いた機種 B であり、その主要諸元は表 4-8 に示したとおりである。なお、実験時に計測された振動数は実験Ⅲのときと異なり、1680 rpm であった。したがって、これから計算される起振力は 9582 (kgf) である。

(3) 実験条件

幅 3 m、長さ 16 m の実験ピットを設け (図 4-33 参照)、安定処理した堅固な地盤上実験用の盛土材を人力で均一に敷ならした。敷ならし厚は次のように設定した。

- ・ケース 1 : 敷ならし厚 50 cm
- ・ケース 2 : 敷ならし厚 100 cm
- ・ケース 3 : 敷ならし厚 150 cm

なお、振動ローラの転圧速度 1 km/h とし、転圧は最大 20 回まで行った。

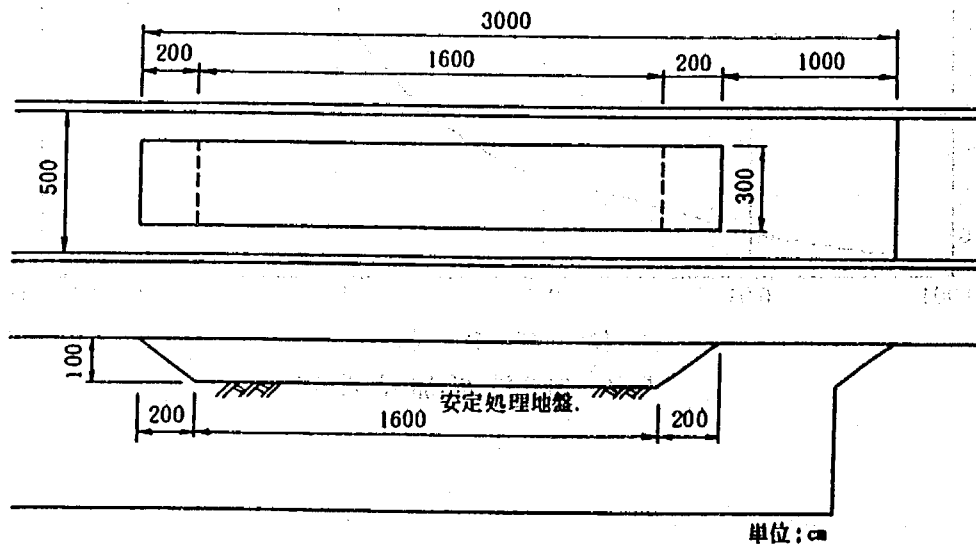
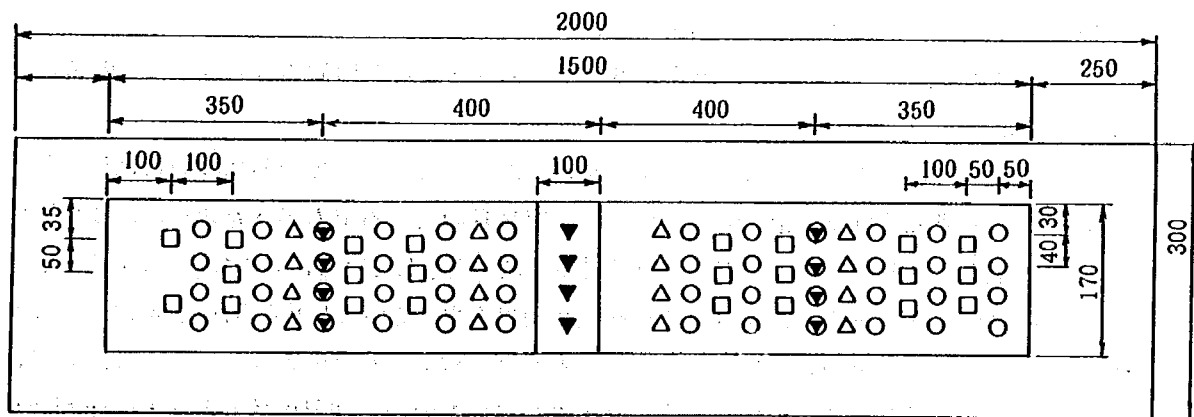


図 4-33 実験ピット構成

(4) 計 測

締固め効果を確認するために、敷ならし後および転圧回数 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20 回終了後に密度の計測を行った。計測は R I 計器によるものを主体とし、チェックを目的として砂置換法による密度試験を敷ならし後と締固め終了後に実施した。その他、平板載荷試験、曲板載荷試験、沈下量の測定などを行った。試験ヤードでの計測位置を図 4-34 に示す。



単位：cm

○：R I による水分密度測定

□：平板載荷試験

△：現場密度試験

▼：沈下量の測定

図 4-34 測 定 位 置

4.4.3 実験結果

締固めによる乾燥密度（締固め度）の変化を図4-35に、地盤係数の変化を図4-36に示す。また、各転圧回数後の転圧層の圧縮率を図4-37に示す。これらはいずれも図4-34に示した計測位置で計測された値の平均値である。

まず、図4-35、図4-36から次のような特徴を見出すことができる。

- ① 敷ならし厚が小さいほどよく締固まっている。
- ② 各ケースの締固め効果の差は、乾燥密度（締固め度）よりも地盤係数でみる方が顕著に表れている。

上記①については、本実験で得られたデータは一般的に考えられている締固め特性に合致したものであると考えられる。上記②については、実験Ⅲのところでも述べたように、乾燥密度は転圧層の上部（地表から20 cm程度）の締固め効果を表示しているにすぎないのに対し、地盤係数はその試験方法からみて転圧層全体の締固め効果を表していると考えられるために、このような差が生じたものと思われる。これをいいかえると、敷ならし厚の大きいケース2、3では転圧層上部の密度はケース1に比べてそれほど差がないものの、地盤係数でみると転圧回数が増えるにしたがってケース1との差が大きくなっており、転圧層下部が十分に締固まっていなかったのではないかと推察される。

次に、転圧層の圧縮率を示した図4-37について述べる。転圧層の圧縮率は累積の表面沈下量を敷ならし厚で除して求めたものであるが、この図から敷ならし厚が大きいほど転圧層の圧縮率の小さいことがわかる。このことは、敷ならし厚が大きい場合には転圧層下部の締固めが不十分であることを裏付けていると考えられる。

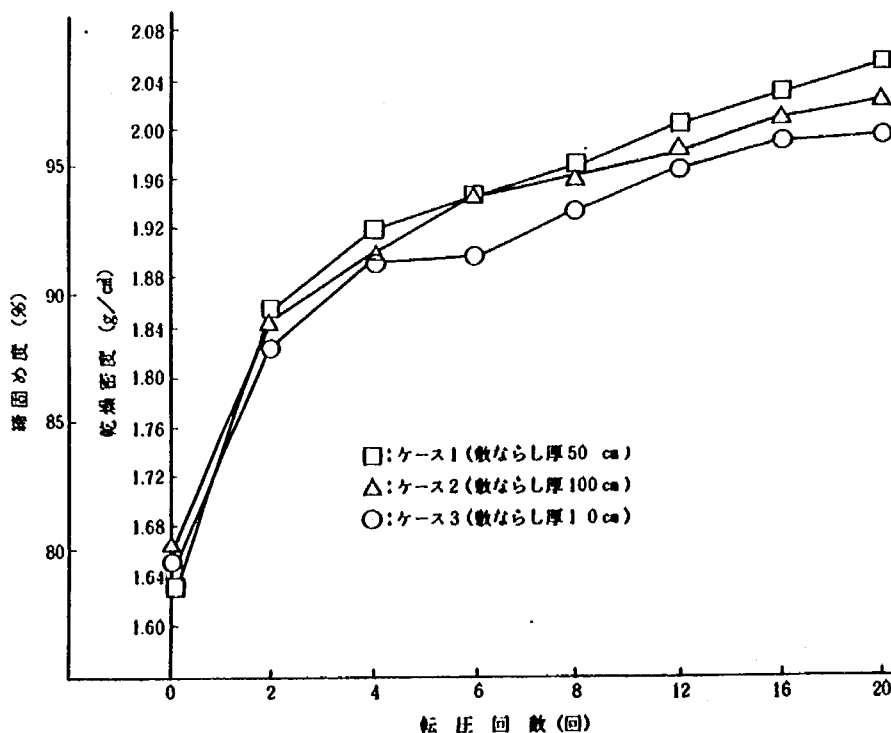


図4-35 締固めによる乾燥密度の変化

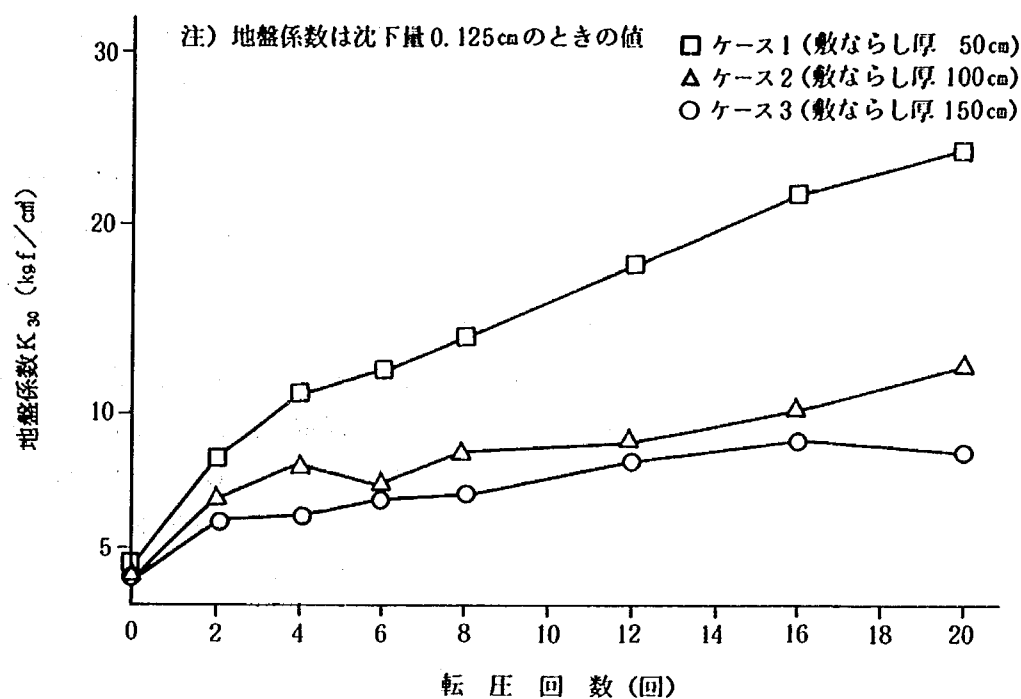


図 4-36 締固めによる地盤係数の変化

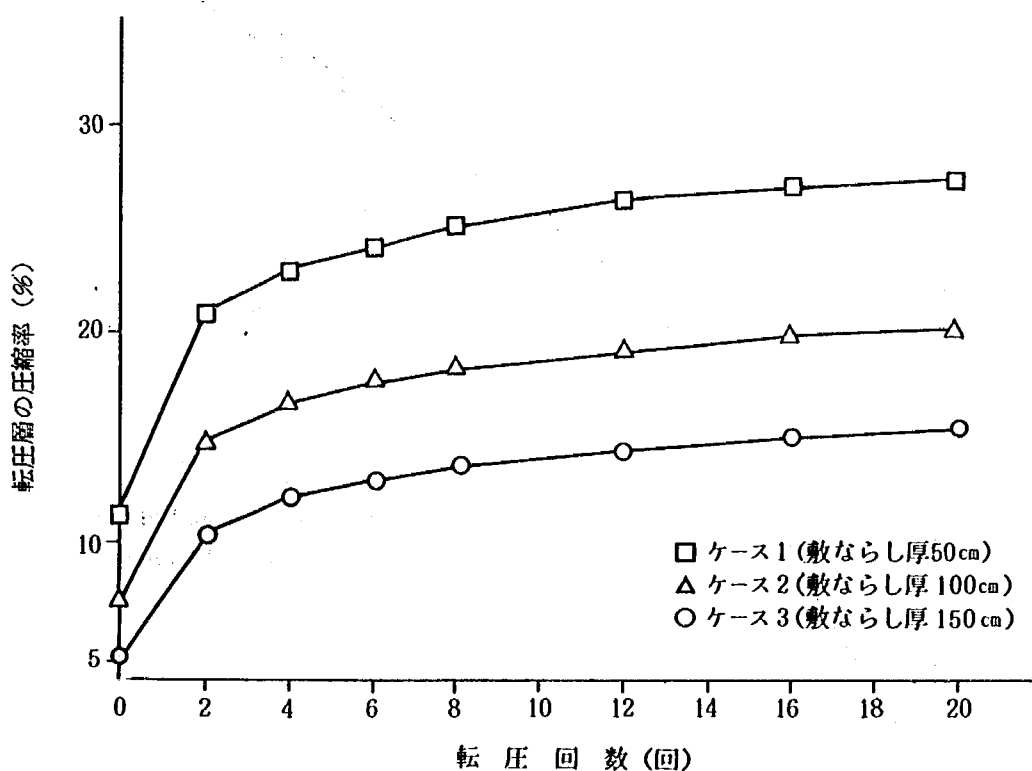


図 4-37 転圧層の圧縮率

そこで、ケース 2, 3 について転圧回数 20 回終了後に深さ方向の密度分布を調べた。その結果を図 4-38 に示す。図の縦軸は締固め後の地表面からの深さを表しており、敷ならした時の深さとは圧縮された量だけ異なる。この図をみると深さ方向にかなりの密度差のあることがわかる。しかも、ケース 2 とケース 3 とではほぼ同じ密度分布になっている。この図から締固め厚には自ら限界のあることが想像される。たとえば、実際の工事で盛土全体にわたって締固め度が 85% 以上となることが要求されるとすれば、この実験データをみるかぎりにおいては締固め厚は 40 cm 程度以下（敷ならし厚では 50 cm 程度以下）でなければならないことになる。

振動ローラは静的荷重に加えて動的荷重を作用させるため、従来の締固め機械に比べて締固め厚を大きくすることができるのではないかという議論がある。この問題に関し、本実験で用いた 6 t クラスの振動ローラについては、上述したように通常の敷ならし厚（30 cm 程度）をそれほど極端に増やすことはできないのではないと思われる。これ以上の大型機種については実験を行っていないので締固め厚に関する一般的な結論を得ることができないが、今後データの蓄積を図って合理的な締固め厚について検討する必要がある。

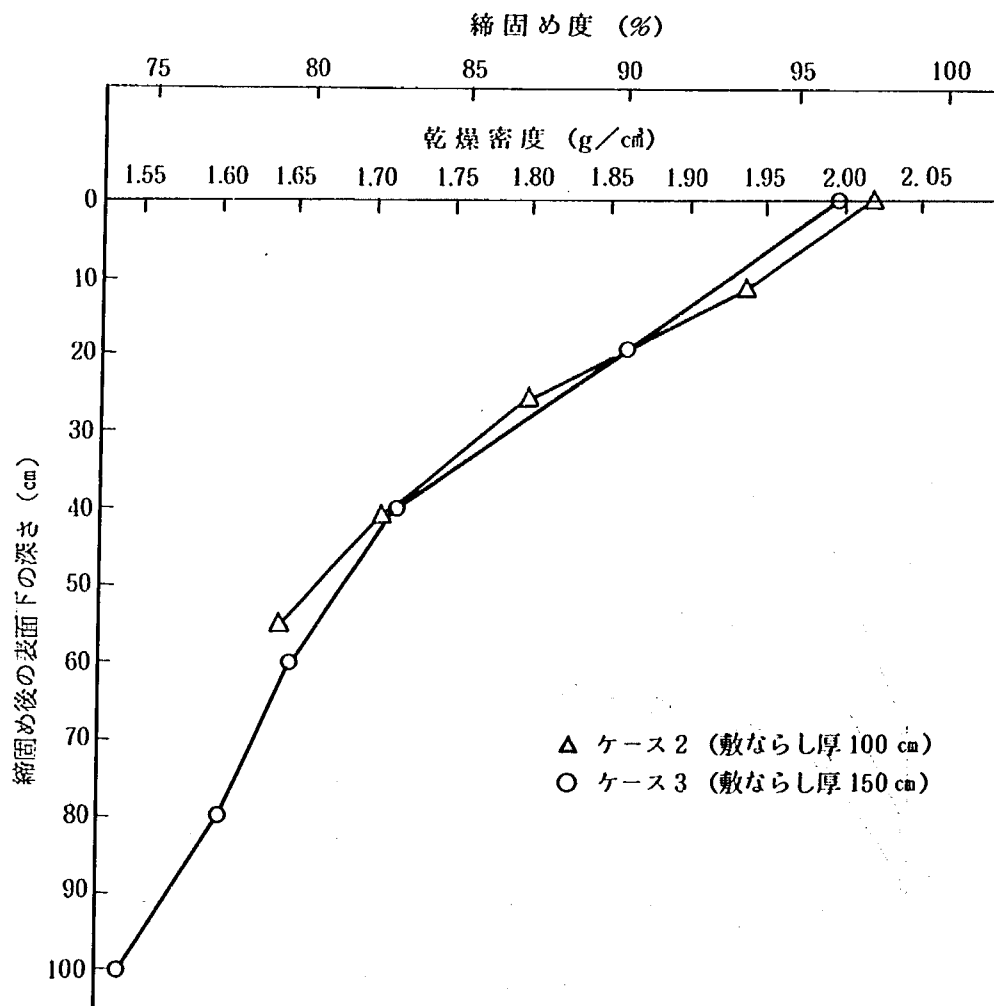


図 4-38 深さ方向の密度分布

5. 振動輪の振動特性と締固め管理への応用

5.1 締固めにともなう振動特性の変化

振動ローラによって土を締固める場合、通常、ある層厚で水平に敷ならされた盛土材の上を5～10回程度走行させる。このとき、振動輪は起振装置によって強制振動しているが、その振動特性は地盤の締固まり具合に影響を受ける。すなわち、締固めの初期に地盤がまだ柔らかいときと、締固めが進んで地盤がある程度締固まったときとは振動輪の振動特性が異なることが知られている。本節ではこのような締固めにともなう振動特性の変化について述べる。

振動輪の振動特性を調べるために、本調査では写真5-1に示すように振動輪の軸に加速度計を取付け、締固め時の振動加速度を計測した。計測は4章に述べた実験ⅢおよびⅣについて行った。このときの振動ローラの諸元、実験条件については4.3.2、4.4.2を参照されたい。

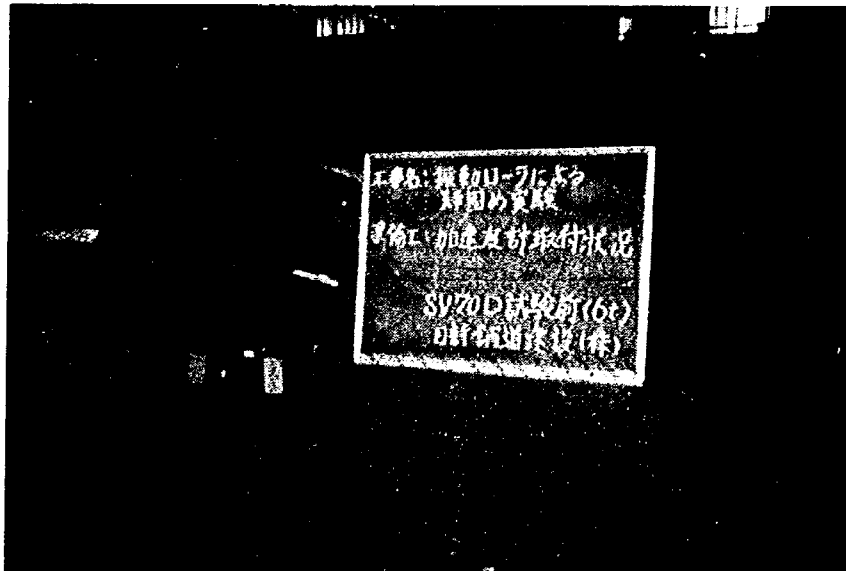


写真5-1 加速度計の取付け状況

ここではまず、振動加速度の代表的な計測例を示し、振動特性の変化の様子を説明することにする。図5-1は実験Ⅲのケース2(6tf級振動ローラ、起振力11tf、振動数1,800vpm)での計測結果のうち、2、6、12回目の締固め時の計測結果を示したものである。図には振動輪の加速度のほか、盛土材を敷ならす時に地表面からの深さ50cmのところに埋設した加速度計、土圧計(図5-2参照)により計測した土中加速度、土圧も併記している。なお、この図は、振動輪の基本周期(振動輪内の偏心荷重の回転周期)を T としたときの時間 $2T$ に相当する部分を取出している(ここでは $T = 33.3 \text{ msec}$)。

まず振動輪の加速度波形についてみると、締固め回数が2回目のときはほぼ正弦波に近い形を示しているのに対し、締固め回数が6回、12回目となると波形がかなり乱れてくることがわかる。なお、(b)(c)図の波形は周期 $2T$ で繰返される。このような波形の変化が5.3に述べる締固め管理への応用の重要なポイントになる。加速度波形の変化の現象は、図5-1に示した土圧の発生状況と関連

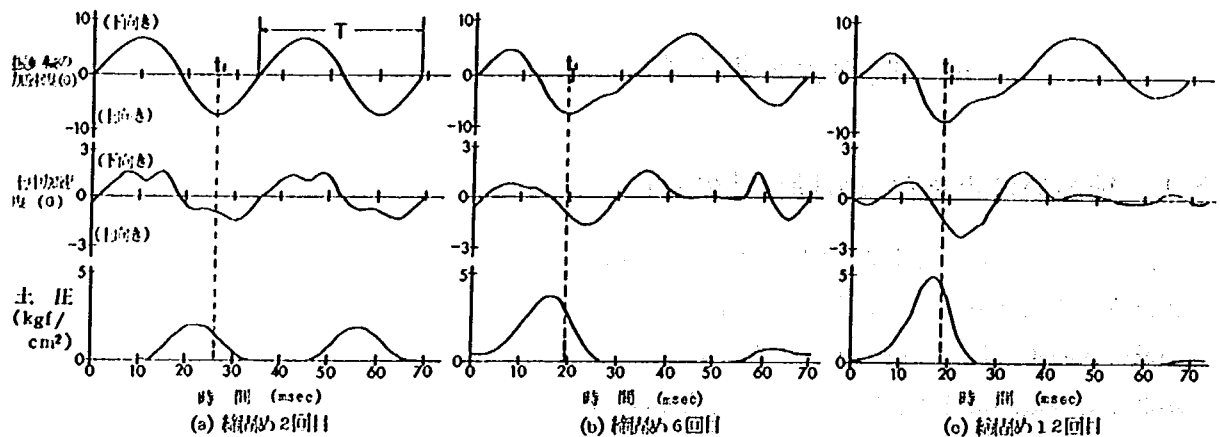


図 5 - 1 振動輪の加速度および土中の加速度，土圧

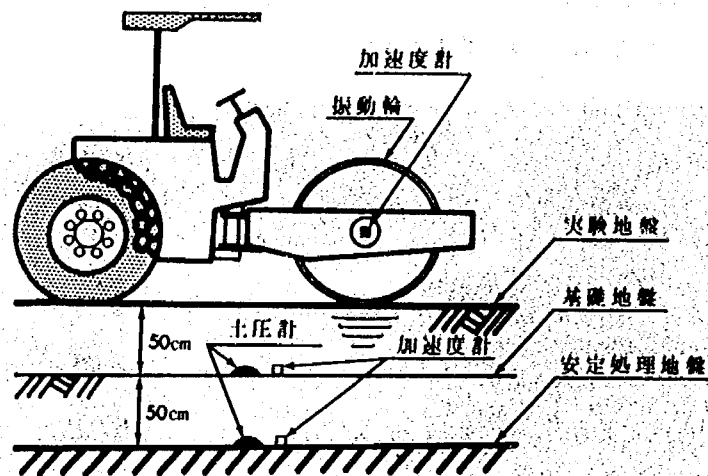


図 5 - 2 実験ピット断面

付けると次のように考えることができる。締固め回数が2回目のとき土圧は時間 T ごとに発生しているが、締固め回数が12回目のとき土圧は時間 $2T$ ごとに発生していることが図から読みとれる。このことから、地盤が締固められて固くなるにしたがって振動輪が地盤から受ける反発力が大きくなり、振動輪が跳ね上がるようになると考えられる。すなわち、締固め回数が2回目のときは地盤の反発力が小さいのに対し、締固め回数が12回目のときは地盤の反発力が大きいため振動輪の跳ね上がり量が大きくなり、再び地面に接するまでに時間 $2T$ を要するようになると考えられる。この結果、締固めの初期には1サイクル（振動輪の偏心荷重の1回転）に1ストローク（振動輪の地盤への1打撃）の現象であるが、締固めが進むにつれて2サイクルに1ストロークの現象に移行することになる。したがって、図5-1の(b)図は(a)図から(c)図への過渡期の現象を示すものと考えられる。以上の現象については土中加速度の波形からも推察が可能である。また、振動輪加速度のピーク値が生じる時刻 t_1 は締固めにともなって徐々に変化していることもわかる。

図5-3は、図5-1に示した振動輪の加速度を周波数分析した結果を示したものである。この図は上述したような振動特性の変化の過程を如実に表しており、締固め回数が少ないと振動数30 cps（偏心荷重の回転数）のみが卓越しているが、締固め回数が増えて2サイクルに1ストロークの現象に移行し始めると振動数15 cpsの成分が大きくなっていくことがわかる。

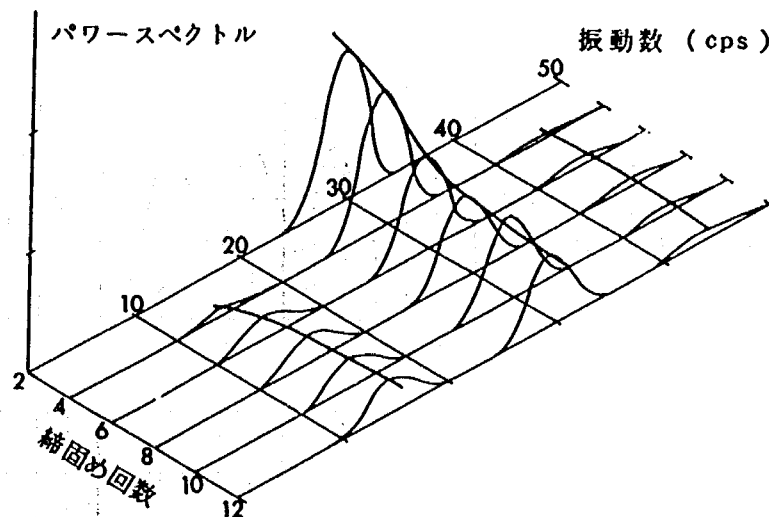


図 5 - 3 締固めにもなうパワースペクトル
の変化

以上、振動輪の振動特性の変化について述べたが、振動輪の跳ね上りを正確に把えるためには振動輪の変位を直接計測するのが最も望ましい。しかしながら、①振動ローラの走行時に振動輪の変位を計測するのはかなりむずかしいこと、②本章で述べるような振動特性の変化の把握には加速度を用いることが可能なこと、などの理由から、本調査では計測の比較的容易な振動輪の加速度によって振動特性をとらえることにした。

次に、振動輪の加速度等の計測結果の一部を図 5 - 4 ~ 図 5 - 9 に示す。これらの図は表 5 - 1 に示す実験ケースで計測されたもので、振動輪の加速度の他に振動輪を支えるフレームの振動加速度、地表面下 50 cm の位置の土中加速度、土圧を図示している。

表 5 - 1 計測結果を例示した実験ケース

図	実験ケース	振 動 ロ ー ラ の 主 要 諸 元				敷ならし厚 (cm)
		総重量(tf)	振動輪重量 (tf)	** 起振力(tf)	* 振動数(vpm)	
図 5 - 4	実験Ⅲ ケース 1	6.6	2.34	5.8	1770	50
図 5 - 5	実験Ⅲ ケース 2	6.6	2.34	10.6	1770	50
図 5 - 6	実験Ⅲ ケース 3	5.3	1.75	9.4	1680	50
図 5 - 7	実験Ⅳ ケース 1	6.6	2.34	9.6	1680	50
図 5 - 8	実験Ⅳ ケース 2	6.6	2.34	9.6	1680	100
図 5 - 9	実験Ⅳ ケース 3	6.6	2.34	9.6	1680	150

*) 振動数は実測値

**) 実測の振動数より計算した値

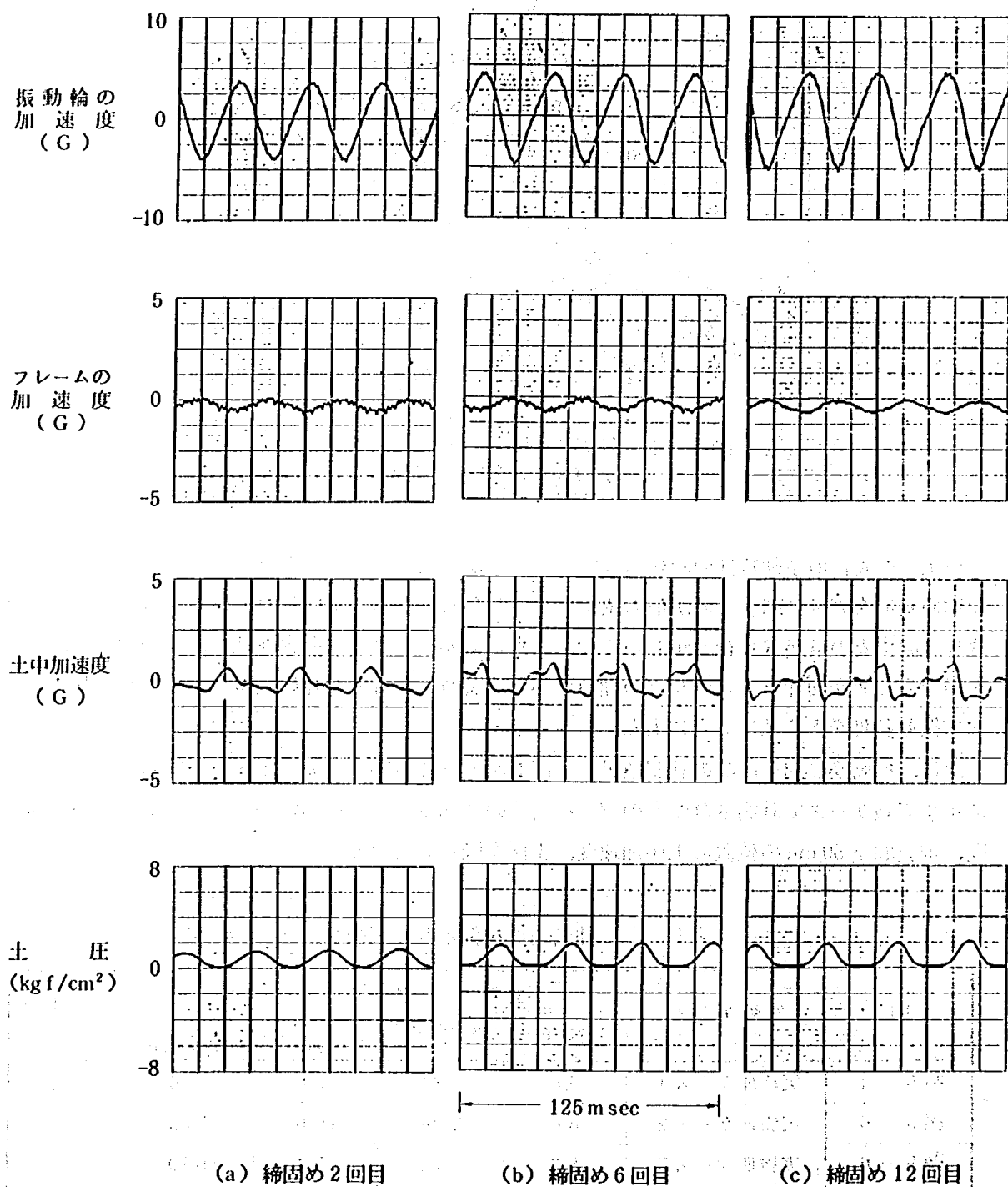
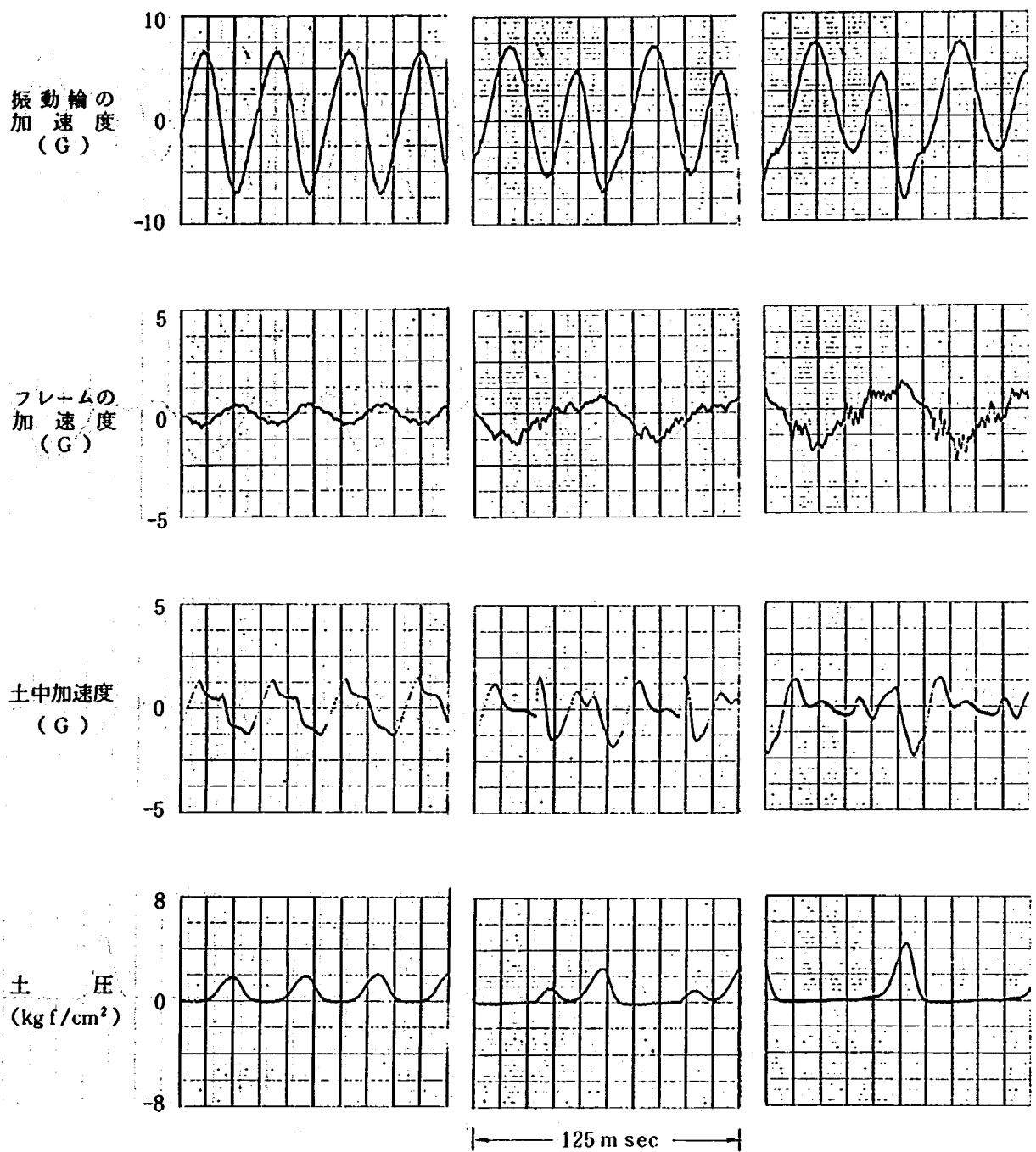


図5-4 実験Ⅲケース1の計測結果



(a) 締固め2回目

(b) 締固め6回目

(c) 締固め12回目

図5-5 実験Ⅲケース2の計測結果

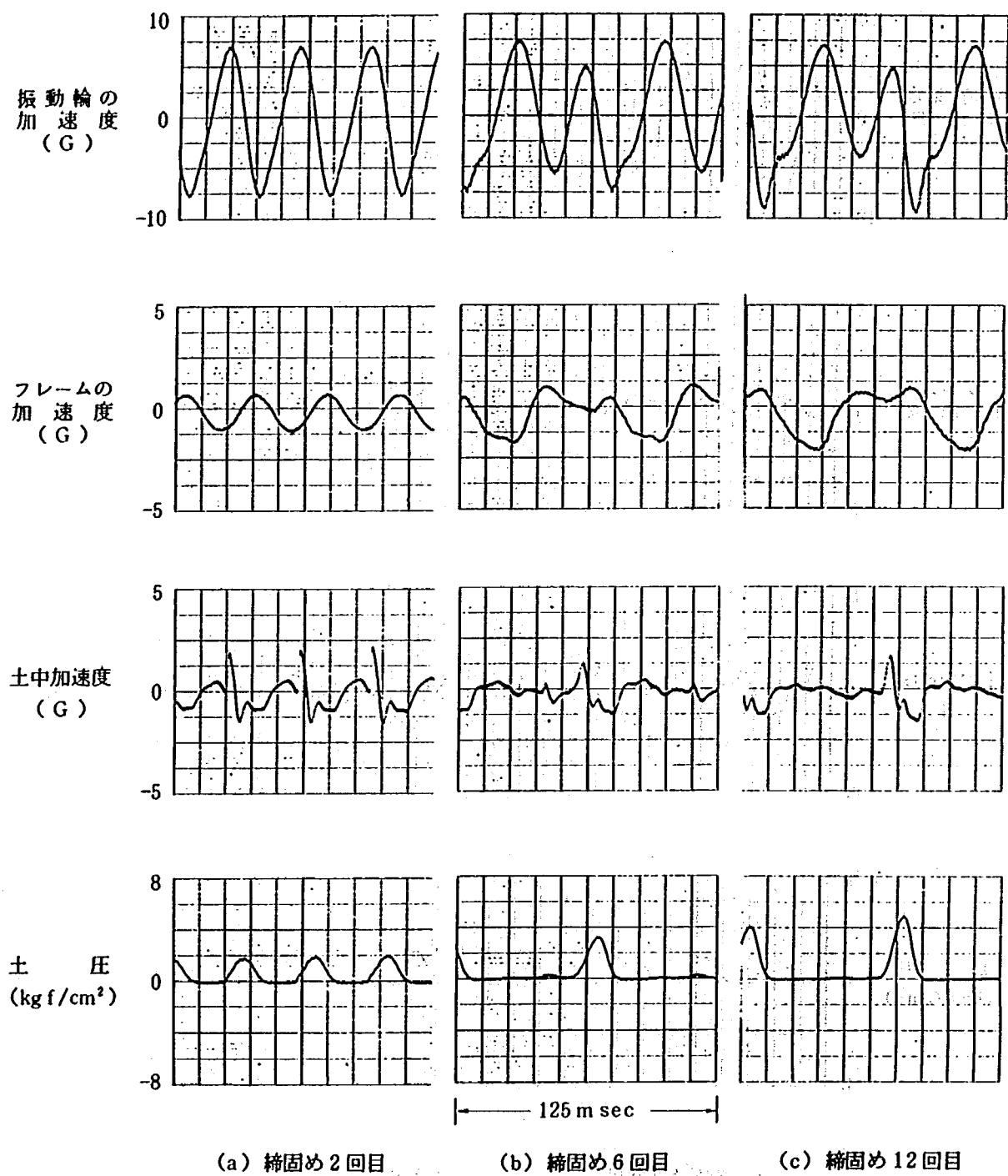
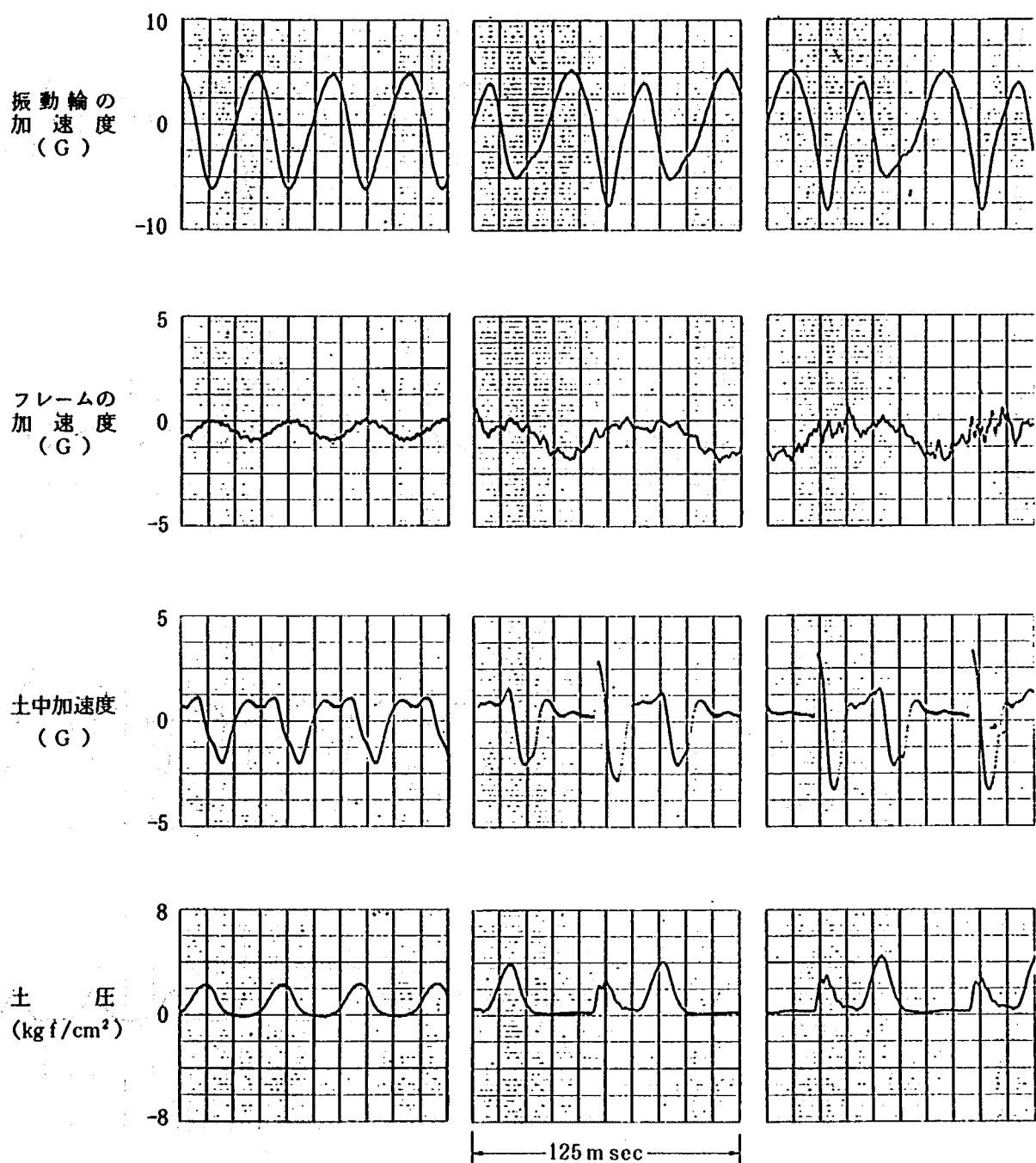


図 5 - 6 実験Ⅲケース 3 の計測結果



(a) 締固め2回目

(b) 締固め10回目

(c) 締固め20回目

図 5 - 7 実験Ⅳケース1の計測結果

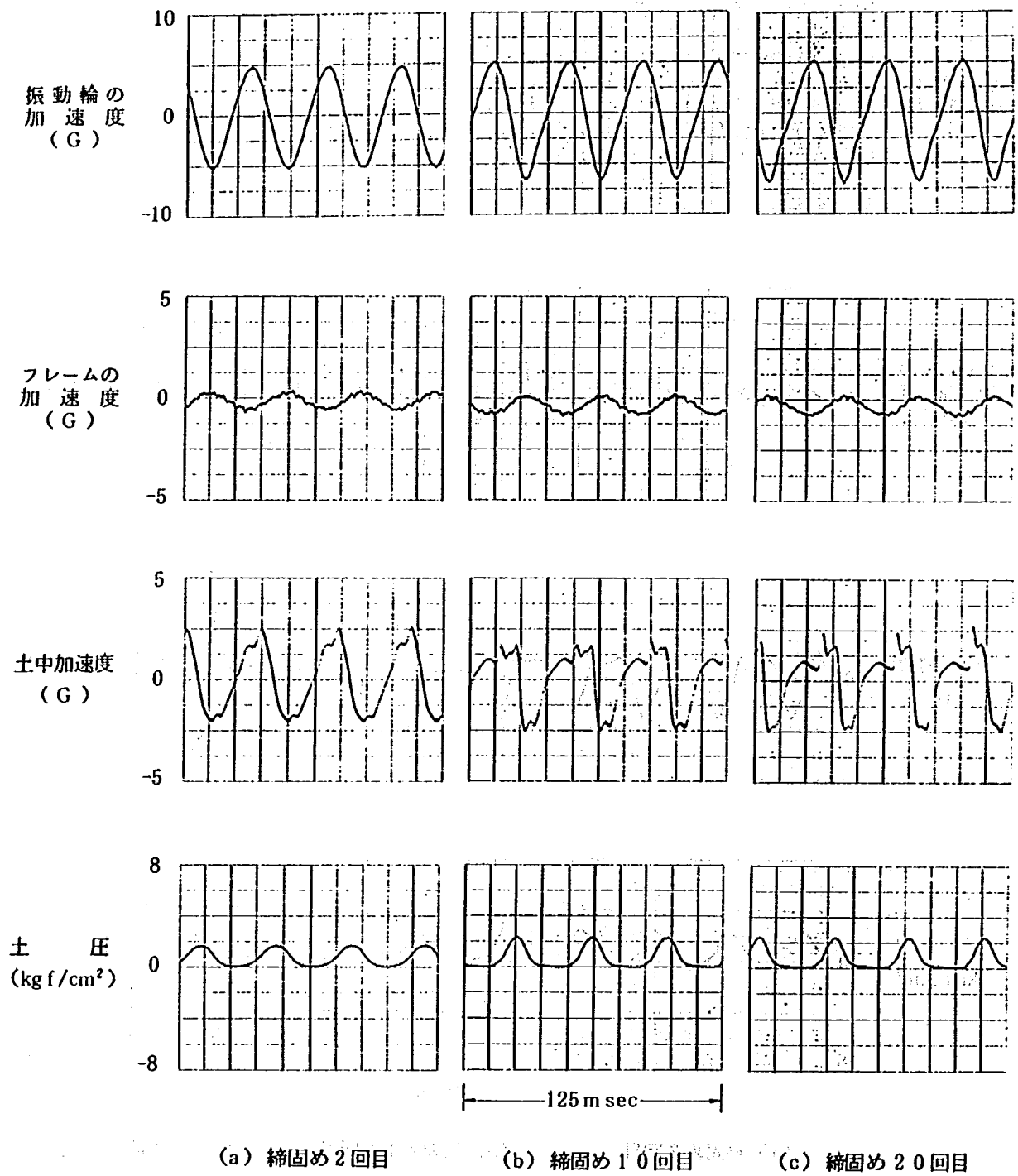


図5-8 実験IVケース2の計測結果

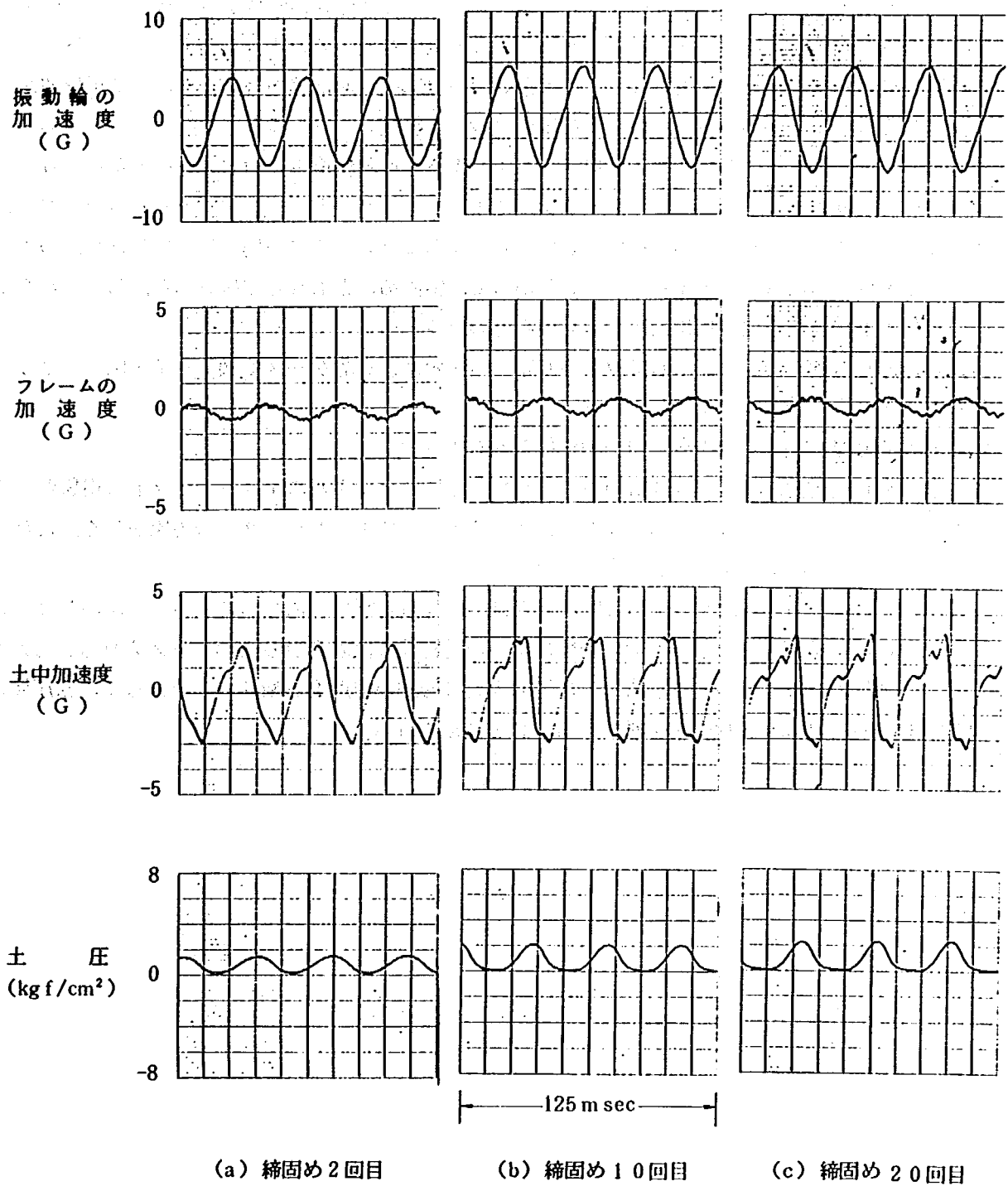


図5-9 実験Ⅳケース3の計測結果

まず、敷ならし厚の等しい実験ケース（図5-4～図5-7）を比較すると、図5-5、図5-6、図5-7にみられる振動特性はよく似ており、締固めの進行にともなって「2サイクルに1ストローク」の現象がみられるようになる。一方、図5-4では締固め回数が増えてもこのような現象がみられず、「1サイクルに1ストローク」の現象が続いている（この場合でも地盤は十分に締固まっている）。ただし、後者については振動輪の加速度波形は締固めにともなって正弦波から徐々に歪んでいるのがわかる。このような現象の違いは振動ローラの条件に起因すると考えられる。すなわち、実験Ⅲケース2、3や実験Ⅳケース1のように振動輪重量に対して起振力がかなり大きいケースでは締固めにともなって「2サイクルに1ストローク」という現象がみられるのに対し、実験Ⅲケース1のように振動輪重量に対して振動力があまり大きくない場合には振動輪が跳ね上るという現象はみられないと考えられる。したがって、締固めにともなって振動輪が跳ね上るか否かは、起振力と振動輪重量の比に依存するものと思われる。

次に、同じ振動ローラを使用して敷ならし厚のみを変えた実験ケース（図5-7～図5-9）を比較すると、以下のようなことがわかる。

- ① 敷ならし厚が小さいほど振動輪の加速度振幅が大きい。
- ② 敷ならし厚が50cmのときは締固めにともなって「2サイクルに1ストローク」の現象がみられるようになるが、敷ならし厚が大きいと「1サイクルに1ストローク」の現象が続く。ただし、後者については波形は正弦波から徐々に歪んでくる。

これらのことから、振動輪の振動特性は盛土材の敷ならし厚にも依存していることがわかり、いかにいえば、ある程度深い部分までの地盤性状が振動特性に反映されるものと考えられる。したがって、5.3に述べる締固め管理手法は単に地盤表層の締固め程度を判断するのではなく、転圧層の全般にわたって締固めの程度を判断できるものと考えられる。

5.2 シミュレーションの方法および結果

5.1 に述べたような振動特性の変化を解析するために 2 自由度系の振動モデルを用いてシミュレーションを行った。以下、シミュレーションの方法およびその結果について述べる。

5.2.1 シミュレーション方法

振動輪が強制振動しているときの振動輪～地盤系を図 5-10 に示す。2 自由度の振動モデルとして表した。

2 自由度系の振動モデルの運動方程式は式(1)のように表現される。

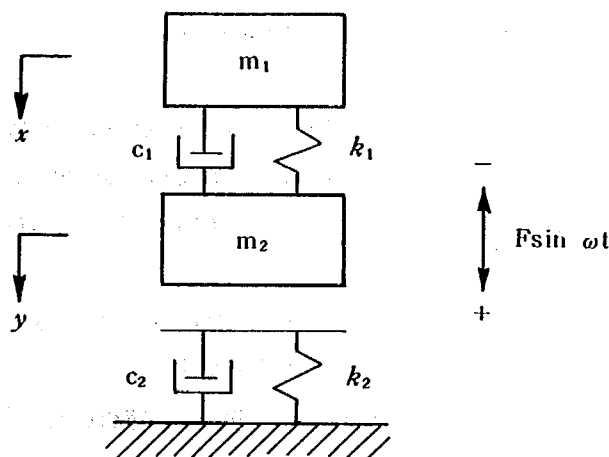


図 5-10 解析モデル

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x} + c_1 (\dot{x} - \dot{y}) + k_1 (x - y) &= m_1 g \\ m_2 \ddot{y} + c_2 \dot{y} - c_1 (\dot{x} - \dot{y}) + k_2 y - k_1 (x - y) &= m_2 g + F \sin \omega t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 2\zeta_1 \sqrt{m_1 k_1}, \quad \zeta_1 = \sqrt{\frac{m_1}{2m_2(1+m_1/m_2)}} \\ y \leq 0, \text{ or } -c_2 \dot{y} \geq k_2 y \\ c_2 &= 0, \quad k_2 = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} y > 0, \text{ or } -c_2 \dot{y} < k_2 y \\ c_2 &= 2\zeta_2 k_2 \\ k_2 &= \alpha \frac{BK_{30}}{y} \left[r^2 \sin^{-1} \frac{\sqrt{2ry-y^2}}{r} - (r-y) \sqrt{2ry-y^2} + 2\beta y \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

- ここに、 x : 車体 (バネ上) の変位 (cm)
 y : 振動輪 (バネ下) の変位 (cm)
 m_1 : 車体 (バネ上) の質量 (kg)
 m^2 : 振動輪 (バネ下) の質量 (kg)
 c_1 : 車体と振動輪の間の減衰係数 (kgf・sec/cm)
 c_2 : 土の減衰係数 (kgf・sec/cm)

- ζ_1 : 車体と振動輪の間の減衰定数
- ζ_2 : 土の減衰定数
- k_1 : 車体と振動輪の間のバネ定数 (kgf/cm)
- k_2 : 土のバネ定数 (kgf/cm)
- K_{30} : 直径 30 cm の平板を使用した平板載荷試験より求められた地盤係数 (kgf/cm²)
- r : 振動輪の半径 (cm)
- B : 振動輪の幅 (cm)
- α : 補正係数
- β : 振動輪の曲率補正係数 (cm)
- F : 振動ローラの起振力 (kgf)
- ω : 振動輪の偏心荷重の角速度 (rad/sec)

である。

この振動系では振動輪と地盤を接続していないので非線形振動となり、振動輪が地盤と接するときと離れたときでは異なる条件が必要となる。ここでは、式(2)に示すように地盤の復元力がマイナスになるとき、または地盤の復元力と減衰力の和がマイナスになるときに振動輪と地盤が離れるようにしてある。

k_2 については、現場で比較的容易に実施される平板載荷試験により求まる地盤係数 K_{30} から推定することを考えた。推定にあたっては次の点を考慮している。

- ① 振動輪が地盤に接続する面は曲面であるのに対し、平板載荷試験では平面であることから、別途に曲板載荷試験を実施し、等価沈下体積の考え方を用いて接触面の形状に関する補正係数 β を求めた。
- ② 平板載荷試験は静的載荷試験であるのに対し、振動締固めにおいては動的な力が作用すると考えられるので、上述①の補正だけでは不十分なところがある。ここでは、このような観点からの補正係数 α を設定した。

k_2 の算定方法については後に詳述する。

また、振動ローラの減衰定数 ζ_1 (粘性減衰)については、土の締固めにもなうバネ定数の変化に対して振幅が安定するように設定し、地盤の減衰定数 ζ_2 (非粘性減衰)は定常解が得られる範囲でなるべく小さく設定した (0.002 程度)。

図 5-11 はシミュレーションの手順をブロック図で表したものであり、振動輪が静止した状態から開始して、安定した解が得られるまでシミュレーションを実行した。各ケースとも、振動輪の振動数の 15 ～ 30 サイクルに相当する時間についてシミュレーションを行うと安定した解が得られた。

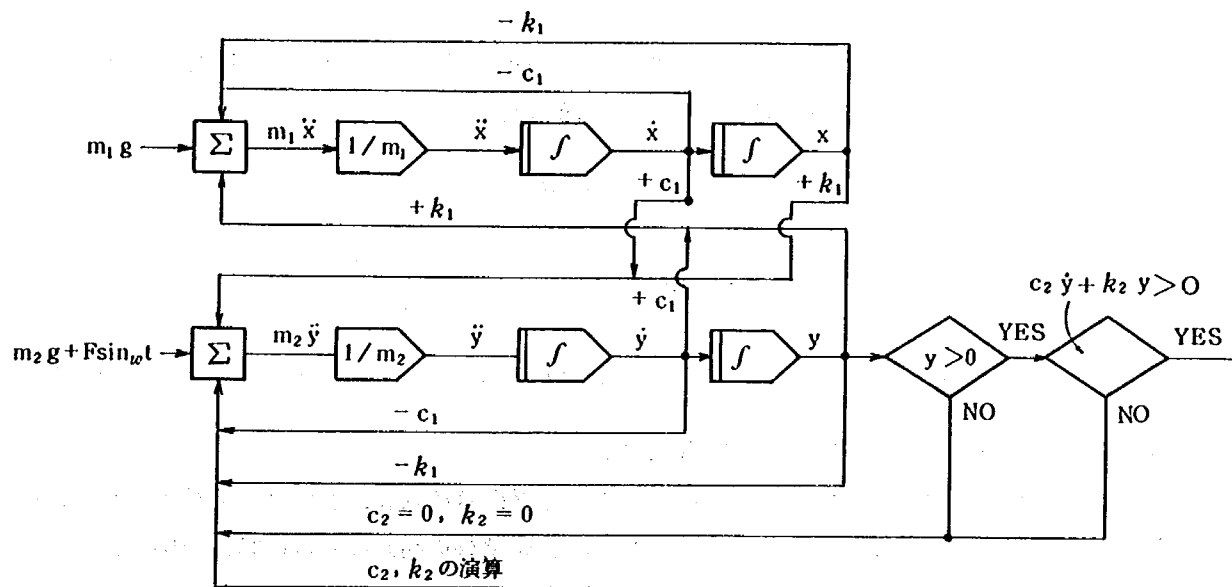


図5-11 ブロック図

次に、式(3)で表される k_2 の推定方法について説明する。ここでは K_{30} から k_2 を推定することを考えており、平板と振動輪とでは地盤との接触面が異なることを考慮して曲板载荷試験を実施した。以下、手順を追って説明していく。

(1) 曲板载荷試験

曲板载荷試験とは、平板载荷試験における平板のかわりに曲率半径 40 cm、幅 50 cm の曲板を用いて平板载荷試験と同じ要領で载荷試験を行うもので、その要領図を図5-12に示す。この試験は振動輪と地盤の接触面が曲面であることを配慮した载荷試験である。

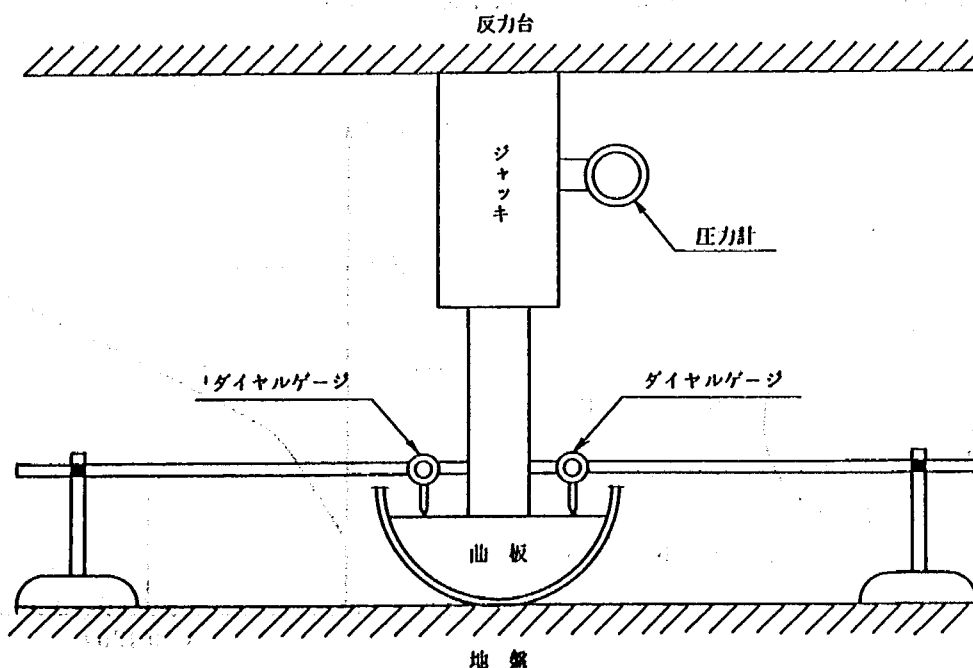


図5-12 曲板载荷試験要領図

(2) 振動輪の沈下部分の体積の求め方

地盤係数は振動輪の沈下した部分の体積と、その時に载荷した荷重により求められる。ここでは図5-13をもとに式(4)を使用して体積を求めた。

$$\begin{aligned}
 V &= 2B \int_0^{\sqrt{2ry-y^2}} [\sqrt{r^2-x^2} - (r-x)] dx \\
 &= 2B \left\{ \frac{1}{2} \left(x\sqrt{r^2-x^2} + r^2 \sin^{-1} \frac{x}{r} \right) - (r-y)x \right\}_0^{\sqrt{2ry-y^2}} \\
 &= B \left\{ r^2 \sin^{-1} \frac{\sqrt{2ry-y^2}}{r} - (r-y)\sqrt{2ry-y^2} \right\} \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

(3) 地盤係数の求め方(平板载荷, 曲板载荷)

2つの载荷試験を関連付けるために、ここでは平板载荷試験, 曲板载荷試験とも沈下体積と荷重の関係から地盤係数を求めるものとした。载荷試験の初期段階は振動輪の接触状態によるバラツキがあると考えられるので、ここでは図5-14に示すような荷重～沈下体積関係の線形部分を考え、平板载荷試験, 曲板载荷試験とも式(5)により地盤係数を求めることにした。その結果を表5-2(平板载荷), 表5-3(曲板载荷)に示す。

$$K = \frac{P(0.250) - P(0.125)}{V(0.250) - V(0.125)} \dots\dots\dots (5)$$

K : 地盤係数 (kgf/cm³)

(ただし、平板载荷の場合には K_{30} , 曲板载荷の場合は K_{rl} と表示)

$P(0.250)$: 沈下量 0.250 cm のときの荷重 (kgf)

$P(0.125)$: 沈下量 0.125 cm のときの荷重 (kgf)

$V(0.250)$: 沈下量 0.250 cm のときの沈下体積 (cm³)

$V(0.125)$: 沈下量 0.125 cm のときの沈下体積 (cm³)

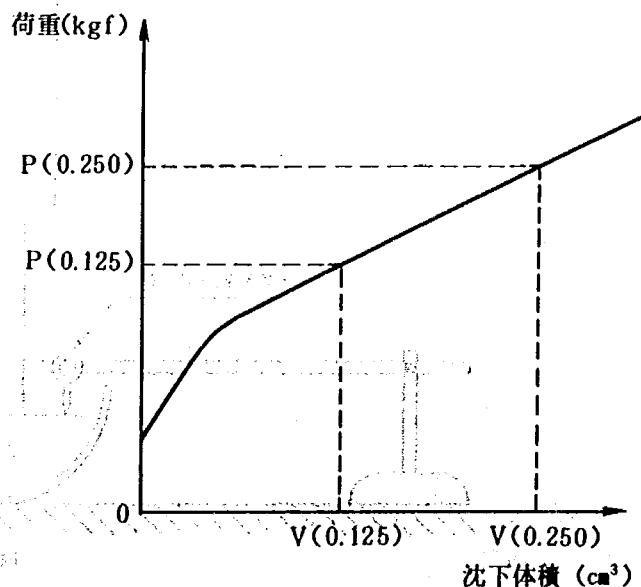
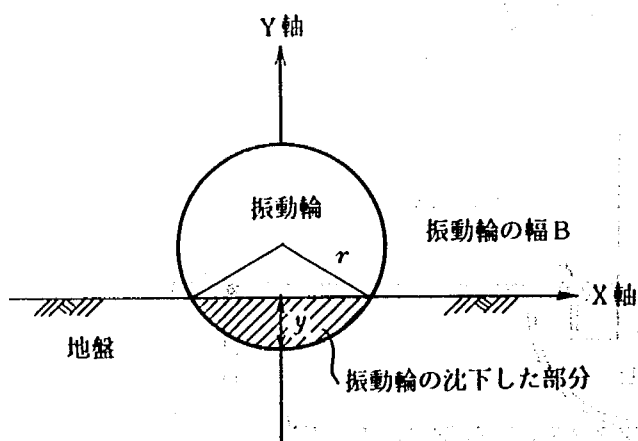


図5-13 振動輪が沈下した状態 図5-14 荷重～沈下体積の関係

表 5 - 2 平板載荷試驗實測值 K_{30} (kgf/cm³)

實 驗	實 驗 Ⅲ			實 驗 Ⅳ		
機 種 名	A	B	C	D	D	D
地 盤 條 件	1	1	1	2	3	4
轉 壓 回 數						
0	1.5	1.5	1.2	1.1	0.9	0.9
1	—	—	—	—	—	—
2	5.1	6.6	6.6	7.1	5.5	4.0
3	—	—	—	—	—	—
4	8.7	9.9	10.9	13.4	7.5	4.8
5	—	—	—	—	—	—
6	13.8	14.6	14.3	18.5	8.6	7.2
7	—	—	—	—	—	—
8	16.8	17.6	15.8	21.5	11.2	7.5
9	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—
12	20.7	23.9	20.2	29.5	12.3	8.7
13	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	29.4	16.8	10.4
17	—	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	34.8	21.8	11.3

表 5 - 3 曲板載荷試驗實測值 $Kr\ell$ (kgf/cm²)

實 驗	實 驗 Ⅲ			實 驗 Ⅳ		
機 種 名	A	B	C	D	D	D
地 盤 條 件	1	1	1	2	3	4
轉 壓 回 數						
0	2.0	2.0	1.5	2.6	1.5	1.6
1	—	—	—	—	—	—
2	7.7	9.7	8.0	10.0	5.8	5.9
3	—	—	—	—	—	—
4	10.1	15.6	14.5	17.4	10.5	7.8
5	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	16.0	10.9	10.1
7	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	28.1	11.9	7.5
9	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—
12	25.5	30.1	27.5	35.9	19.5	15.2
13	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	31.8	19.5	16.4
17	—	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	51.4	24.7	15.6

(4) 地盤係数推定値の求め方（近似方法）

前項目により求められた地盤係数は転圧回数ごとに試験位置が異なっているために必ずしも転圧回数に対して一様に増加する傾向にはなっていない。このような点を補正するために、ここでは式(6)により値の平滑化を行った。その結果を表5-4（平板載荷試験）、表5-5（曲板載荷試験）に示す。

$$K = aN^b + K(0) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 K : 地盤係数（近似値）

$K(0)$: 振動転圧する前の地盤係数

N : 振動転圧回数

a, b : 近似式の係数

である。

表5-4 平板載荷試験推定値 K_{30} (kgf/cm³)

実 験	実 験 Ⅲ			実 験 Ⅳ		
機 種 名	A	B	C	D	D	D
地 盤 条 件	1	1	1	2	3	4
転 圧 回 数						
0	1.5	1.5	1.2	1.1	0.9	0.9
1	3.4	4.3	4.7	5.3	3.6	3.0
2	5.2	6.5	6.9	8.0	5.1	4.0
3	7.0	8.5	8.7	10.4	6.4	4.7
4	8.8	10.4	10.4	12.6	7.5	5.3
5	10.6	12.3	12.0	14.6	8.5	5.9
6	12.4	14.1	13.4	16.5	9.4	6.4
7	14.2	15.8	14.8	18.4	10.2	6.9
8	15.9	17.5	16.2	20.2	11.1	7.4
9	17.7	19.2	17.4	21.9	11.9	7.8
10	19.5	20.8	18.7	23.5	12.6	8.2
11	21.2	22.5	19.9	25.1	13.3	8.6
12	23.0	24.1	21.1	26.7	14.0	9.0
13	—	—	—	28.3	14.7	9.3
14	—	—	—	29.8	15.4	9.7
15	—	—	—	31.2	16.0	10.0
16	—	—	—	32.7	16.7	10.3
17	—	—	—	34.1	17.3	10.6
18	—	—	—	35.5	17.9	10.9
19	—	—	—	36.9	18.5	11.2
20	—	—	—	38.3	19.0	11.5

表 5 - 5 曲板載荷試驗推定值 Kr_l (kgf/cm³)

實 驗	實 驗 Ⅲ			實 驗 Ⅳ		
機 種 名	A	B	C	D	D	D
地 盤 條 件	1	1	1	2	3	4
轉 壓 回 數						
0	2.0	2.0	1.5	2.6	1.5	1.6
1	5.0	6.8	5.6	7.0	4.4	4.4
2	7.3	9.9	8.4	10.1	6.1	5.7
3	9.3	12.6	10.9	12.9	7.6	6.8
4	11.2	15.0	13.3	15.4	9.0	7.7
5	13.0	17.2	15.4	17.8	10.2	8.5
6	14.8	19.4	17.5	20.1	11.4	9.2
7	16.4	21.4	19.5	22.2	12.5	9.9
8	18.1	23.4	21.4	24.3	13.6	10.5
9	19.7	25.3	23.3	26.4	14.6	11.1
10	21.3	27.1	25.1	28.4	15.6	11.7
11	22.8	28.9	26.9	30.3	16.5	12.3
12	24.3	30.6	28.6	32.2	17.4	12.8
13	—	—	—	34.1	18.3	13.3
14	—	—	—	35.9	19.2	13.8
15	—	—	—	37.7	20.1	14.3
16	—	—	—	39.5	21.0	14.7
17	—	—	—	41.3	21.8	15.2
18	—	—	—	43.0	22.6	15.6
19	—	—	—	44.7	23.4	16.1
20	—	—	—	46.4	24.2	16.5

(5) 振動輪断面形状補正係数 β の求め方

平板載荷試験により求められる地盤係数 K_{30} と曲板載荷試験より求められる地盤係数 K_{rL} の間には相関係数 0.993 で式(7)の関係がある。

$$K_{rL} = 1.180 \times K_{30} + 1.196 \quad \text{..... (7)}$$

しかし、ここでは原点を通る線形関係ということを前提として式(8)のように仮定した。

$$K_{rL} = 1.180 \times K_{30} \quad \text{..... (8)}$$

一方、図 5-15 より K_{30} と K_{rL} の間には式(9)の関係が成立するものとする。

$$K_{rL} \times B \times A = K_{30} \times B \times (A + 2\beta y) \quad \text{..... (9)}$$

ここに、 A ：曲板の沈下部分の断面積 (cm²)

である。

式(9)を整理すると式(10)になる。

$$K_{rL} = K_{30} \times \left(1 + \frac{2\beta y}{A}\right) \quad \text{..... (10)}$$

式(10)に式(8)を代入すると

$$\frac{2\beta y}{A} = 0.180 \quad \text{..... (11)}$$

という関係が得られる。

いま、 A と y は図 5-16 に示すような関係にあるが、沈下量が 0.125 cm ～ 0.250 cm の範囲では線形関係とみなし、次式で β を求めた。

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{0.180 \times A}{2y} \\ &= \frac{0.180 \times (A(0.250) - A(0.125))}{2 \times (y(0.250) - y(0.125))} \\ &= \frac{0.180 \times (1.489 - 0.527)}{2 \times (0.250 - 0.125)} \\ &= 0.693 \\ &\approx 0.7 \text{ cm} \quad \text{..... (12)} \end{aligned}$$

ここに、 β ：断面形状補正係数 (cm)

$A(0.250)$ ：曲板載荷試験における沈下量 0.250 cm のときの沈下断面積 (cm²)

$A(0.125)$ ：曲板載荷試験における沈下量 0.125 cm のときの沈下断面積 (cm²)

$y(0.250)$ ：沈下量 0.250 cm

$y(0.125)$ ：沈下量 0.125 cm

である。



図 5-15 曲板載荷試験参考図

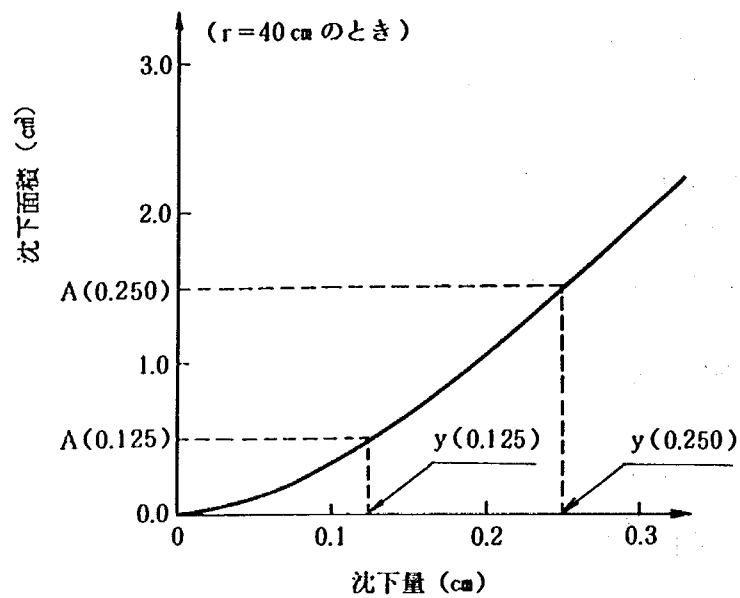


図 5-16 曲板の沈下面積～沈下量の関係

(6) α の設定方法

α は層厚の影響や地盤の動的特性を含む係数であると考えられ、今のところこれらは明らかにされていないので、ここではシミュレーションの結果が実測値に合うように α を試行錯誤的に変化させて適合値を求めた。

5.2.2 シミュレーション結果

シミュレーションは表5-6に示した実験ケースについて実施した。計算に用いた振動ローラの諸元を表5-7に、地盤条件を表5-8に示す。

シミュレーション結果の一例を図5-17に示す。この図は実験Ⅲケース1、実験ケース2の締固め回数1回目、12回目についてのシミュレーションより得られた振動輪の加速度波形を実測値と対比させて示したものである。シミュレーションでは各締固め回数ごとに測定された K_{30} 値を入力し、式(3)により K_2 を求めて計算を行っている。すなわち、各ケースの地盤条件は実測された K_{30} 値によって代表させている。

図5-17をみるとシミュレーション結果は実測結果と非常によく合致していることがわかる。実験Ⅳケース1では締固め回数が増えても「1サイクルに1ストローク」の現象は変わらずに波形がひずむことが実測により明らかにされているが、シミュレーションにおいてもこのような現象が現れていることがわかる。また、実験Ⅳケース2では締固め回数が増えると「2サイクルに1ストローク」の現象が生じ、加速度波形はかなり複雑になるが、シミュレーションにおいてもこのような現象がみられる。

表5-6 シミュレーションを行った実験ケース

実験ケース	振動ローラの機種	地盤条件
実験Ⅲケース1	A	1
実験Ⅲケース2	B	1
実験Ⅲケース3	C	1
実験Ⅳケース1	D	2
実験Ⅳケース2	D	3
実験Ⅳケース3	D	4

表5-7 振動ローラの諸元

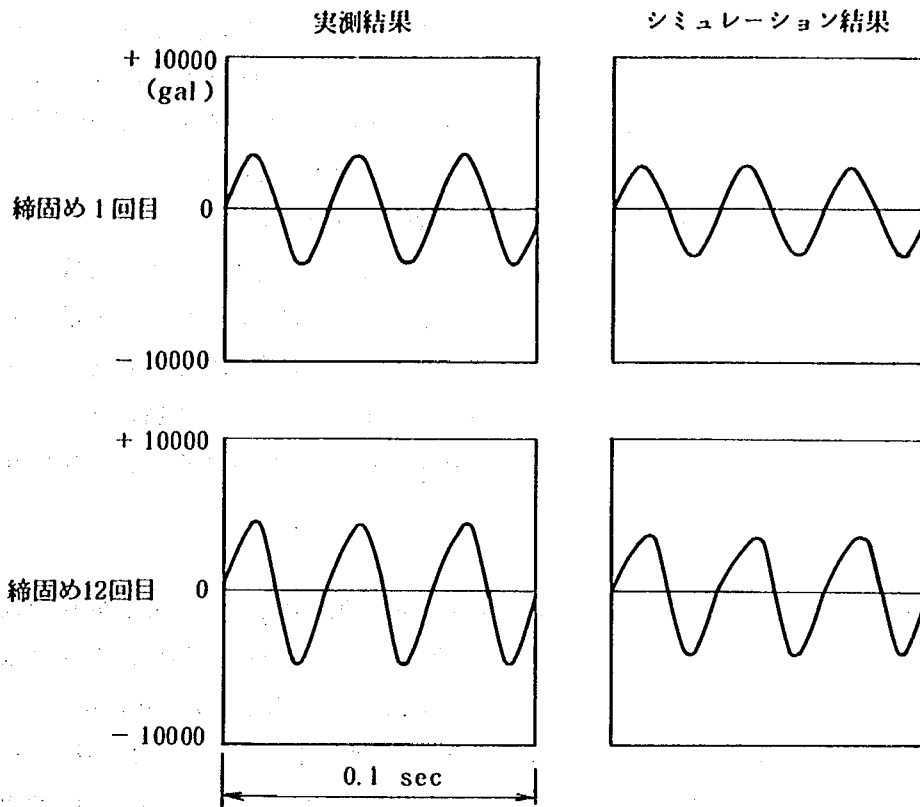
機種	A	B	C	D
振動数 (vpm)	1,770	1,770	1,680	1,680
起振力 (kgf)	5,802	10,636	9,352	9,582
バネ定数 (kgf/cm)	1,640	1,640	2,000	1,640
バネ上重量 (kgf)	860	860	950	860
バネ下重量 (kgf)	2,340	2,340	1,750	2,340
輪幅 (mm)	1,700	1,700	1,676	1,700
輪半径 (mm)	625	625	632	625

表5-8 地盤条件

地 盤	1	2	3	4
礫 分 (%)	21.10	5.50	5.50	5.50
砂 分 (%)	61.80	72.00	72.00	72.00
シルト分 (%)	11.00	13.50	13.50	13.50
粘土分 (%)	6.10	9.00	9.00	9.00
最大粒径 (mm)	9.52	20.00	20.00	20.00
均等係数 (U_c)	87.50	133.30	133.30	133.30
曲率係数 (U_c')	4.57	6.02	6.02	6.02
日本統一分類	シルト質砂 (SM)	シルト質砂 (SM)	シルト質砂 (SM)	シルト質砂 (SM)
比 重	2.75	2.85	2.85	2.85
最適含水比 (%)	8.60	10.00	10.00	10.00
最大乾燥密度 (g/cm^3)	2.18	2.08	2.08	2.08
地 盤 形 状				実験地盤
基礎地盤	実験地盤		実験地盤	
$K_{30} = 45 \text{ kgf/cm}^2$ 程度	50 cm		100 cm	150 cm
安定処理地盤	基礎地盤	実験地盤		
$K_{30} = 50 \text{ kgf/cm}^2$ 以上	50 cm	50 cm		
	安定処理地盤	安定処理地盤	安定処理地盤	安定処理地盤

以上のことから、地盤の締固めの程度を K_{30} 値で代表させることによって振動特性をかなりの精度で説明できることが明らかになったので、次に、振動輪加速度の周波数分析を行った。シミュレーションにより得られた振動輪軸中央の加速度のフーリエスペクトルを、実測結果とあわせて図5-18～図5-23に示す。このフーリエスペクトルは最大値を1に基準化しており、その座標系は縦軸に実効値、横軸に周波数、奥行方向の軸に平板載荷試験から求められる地盤係数 K_{30} をとっている。実測のフーリエスペクトル作成にあたってのデータはサンプリング周波数256Hzでハニング窓を通して計測したもので、2秒間のデータをFFTシグナルプロセッサの許す範囲でオーバーラップさせ16回のアベレージングしたものである。また、図化するにあたってはハニング関数の2乗でスムージングを行った。以下、実測とシミュレーションの結果をスペクトル図によって実験別に説明していく。

実験Ⅳケース 1 (機種 A, 地盤条件 1)



実験Ⅳケース 2 (機種 B, 地盤条件 2)

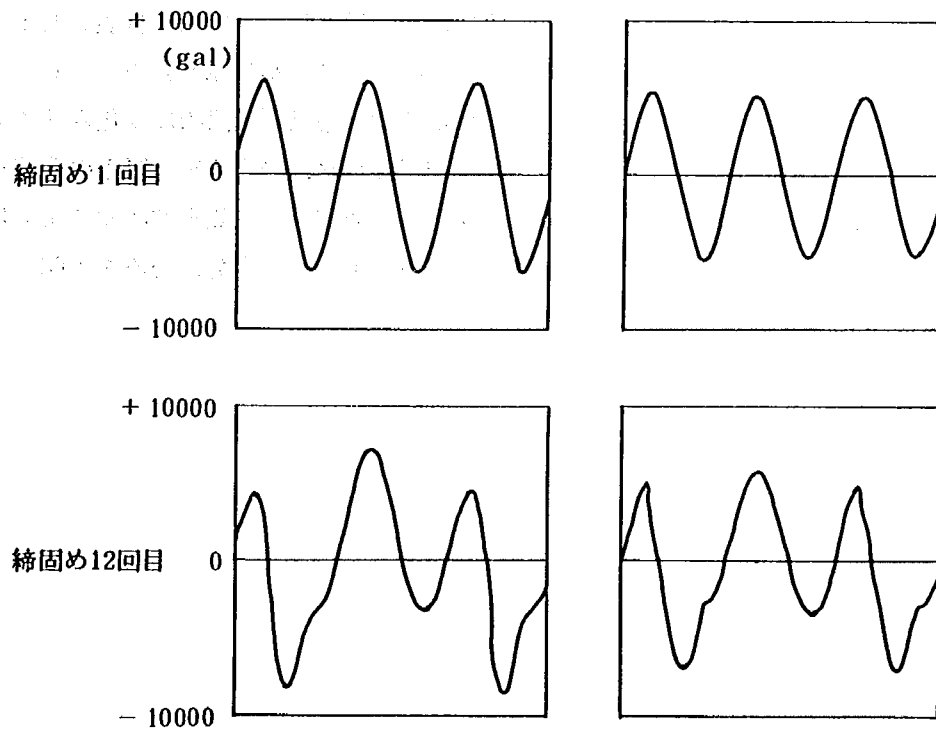


図 5 - 17 実測とシミュレーションの加速度の比較

(1) 実験Ⅲ

この実験は地盤条件を地盤1に統一して、機種種の諸元の違いによる影響を調査したものである。図5-18に機種A、図5-19に機種B、図5-20に機種Cの振動輪軸中央の加速度のフーリエスペクトルを示す。全機種とも毎秒30サイクルで強制加振力が作用しているために30Hzのスペクトル成分が卓越しているが、締固めが進行するにつれて基本周波数以外のスペクトル成分が成長してくる。しかし、機種Aと機種B、機種Cでは波形の乱れの性質が異なり、機種Aは締固めが進行しても1サイクル（振動輪の偏心荷重の1回転）に1ストローク（振動輪の地盤への1打撃）を保つので基本周波数の整数倍の位置のスペクトル成分しか成長しないが、機種B、機種Cは2サイクルに1ストロークに移行していくため基本周波数の1/2とその整数倍の位置のスペクトル成分が成長してくる。この性質の違いは振動輪の重量と起振力の関係から生じるものと考えられる。シミュレーションについては実測結果よりもひずみは小さいながらもその傾向と現象はうまく表現できている。式(1)~(3)中の定数（特に α について）の設定法について今後検討の余地はあるものの、地盤係数 K_{30} を変化させることで振動輪の振動特性を表現できることが明らかになった。

(2) 実験Ⅳ

この実験は機種種の諸元を機種Dに統一して、地盤条件の違いによる影響を調査したものである。図5-21に地盤2、図5-22に地盤3、図5-23に地盤4を用いたときの振動輪軸中央の加速度のフーリエスペクトルを示す。全ての地盤に対して同じ機種を使用しているにもかかわらず「1サイクルに1ストローク」から「2サイクルに1ストローク」に移行するときの転圧回数が異なり、転圧回数に対する地盤係数 K_{30} も異なっている。すなわち、同じ機種、盛土材を用いても締固め層の厚さによって振動特性の異なることがわかる。

一方、シミュレーションにおいては地盤特性を地盤係数 K_{30} によって代表させており、層厚の影響については直接考慮することはできない。図5-21~23に示したシミュレーション結果は実測結果によく合致しているが、これらは補正係数 α を試行錯誤的に変化させて実測結果に合うようにしたものである。したがって、この補正係数 α は締固め層の厚さの要因を含んだ係数であるといえる。今回の調査では補正係数 α と締固め層厚の関係を解明するまでには至らなかったが、 α が適切に設定されれば、前述したようなモデルで十分に現象を説明できるものと思われる。

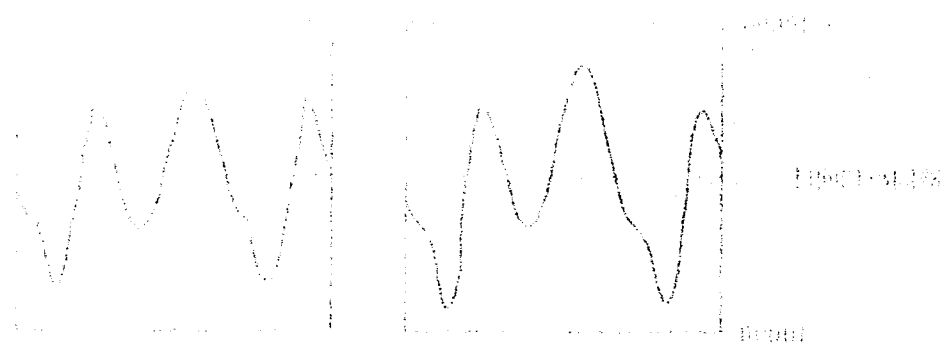
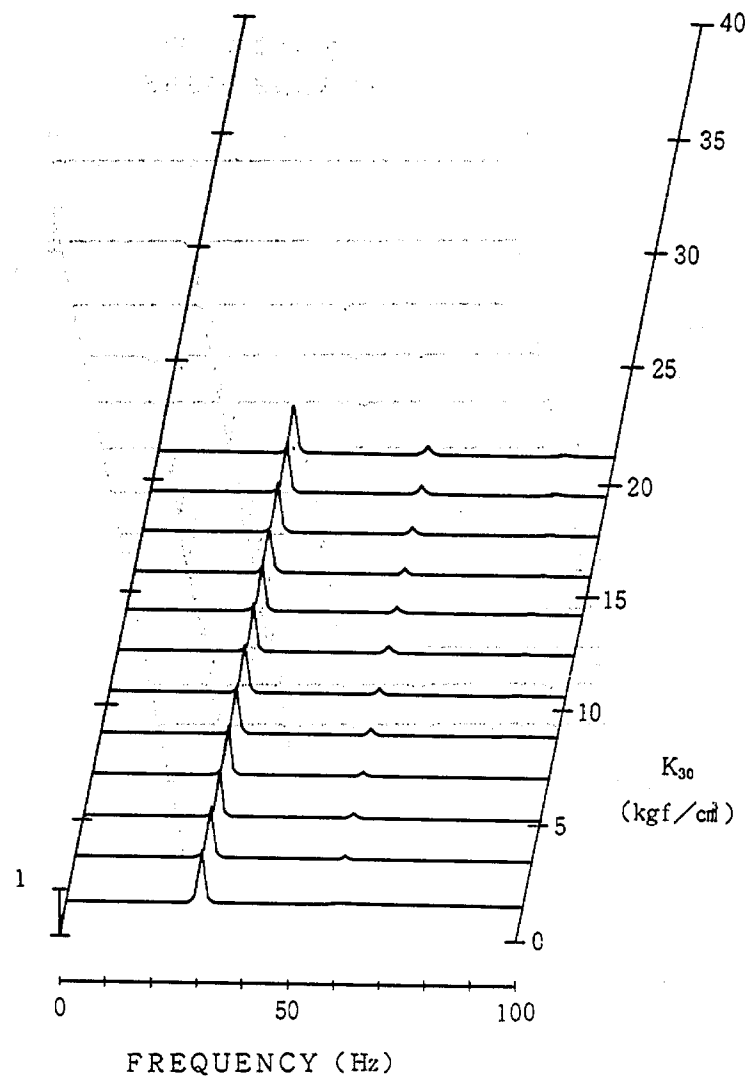
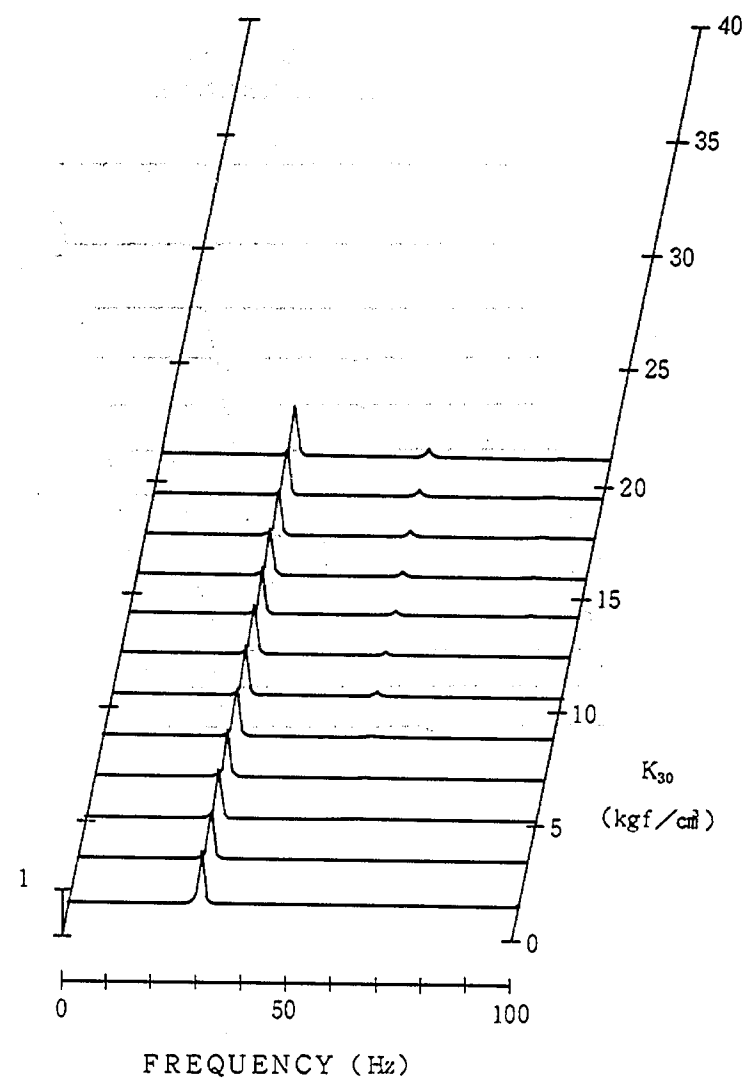


図5-21 機種Aの振動輪軸中央の加速度の波形（地盤1）



(a) 実測結果



(b) 計算結果

図 5-18 実験Ⅲ（機種A，地盤1）のフーリエスペクトル

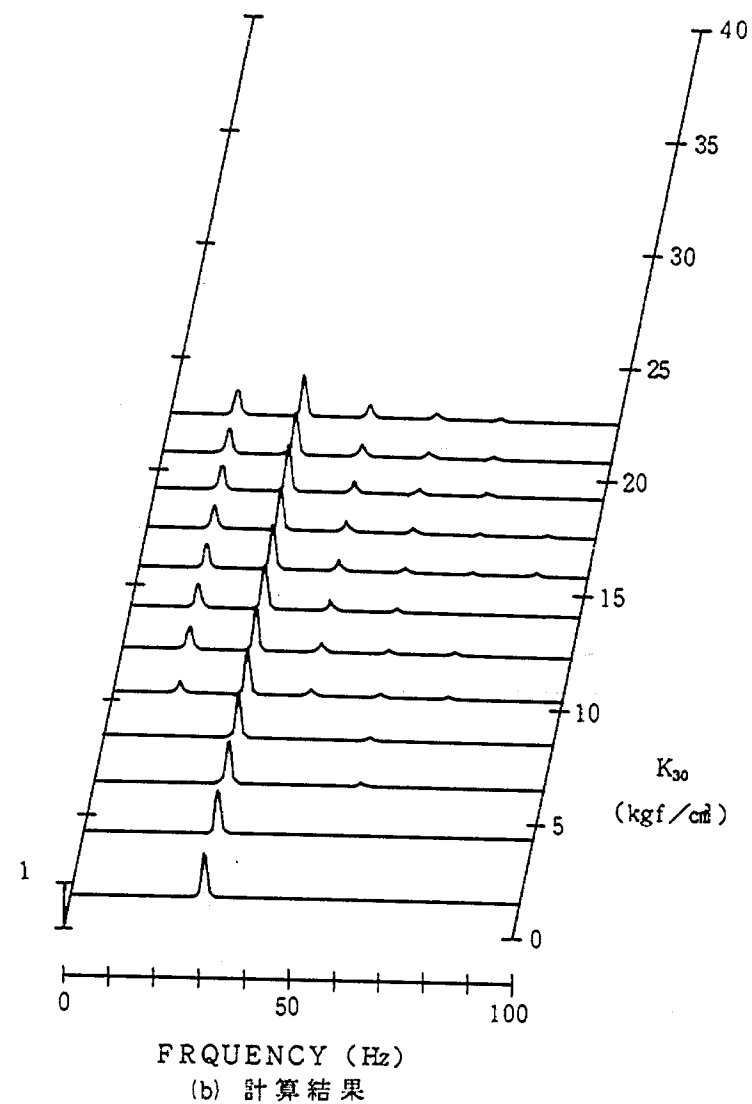
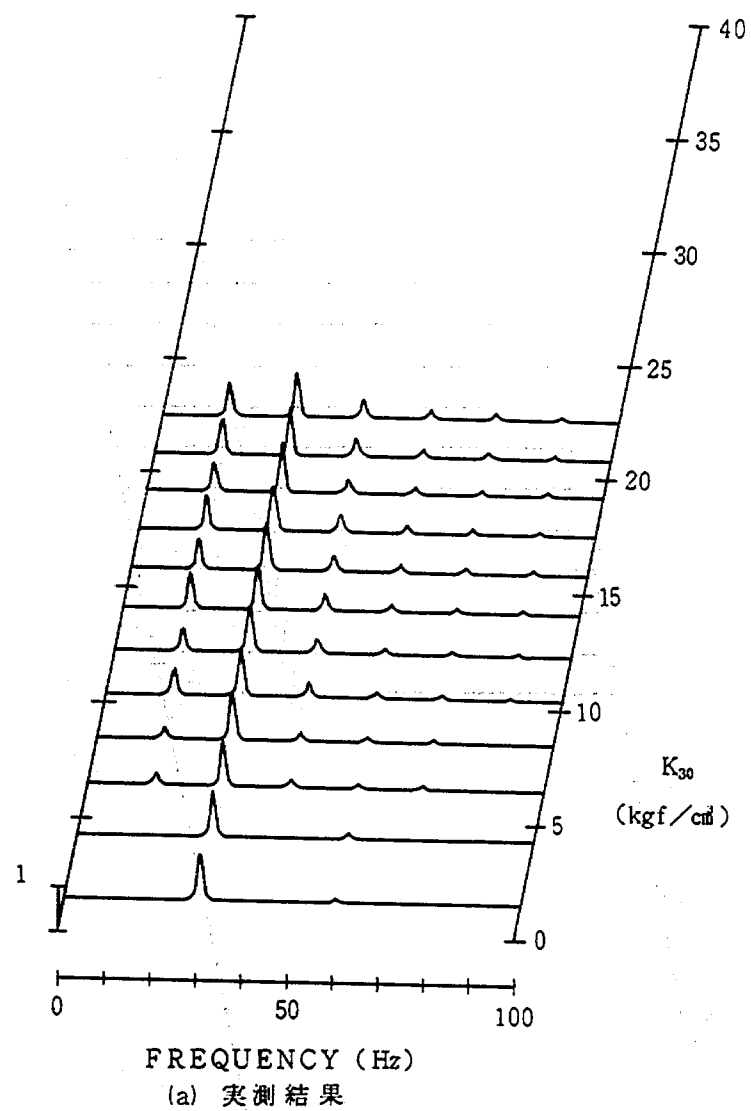


図5-19 実験Ⅲ(機種B, 地盤1)のフーリエスペクトル

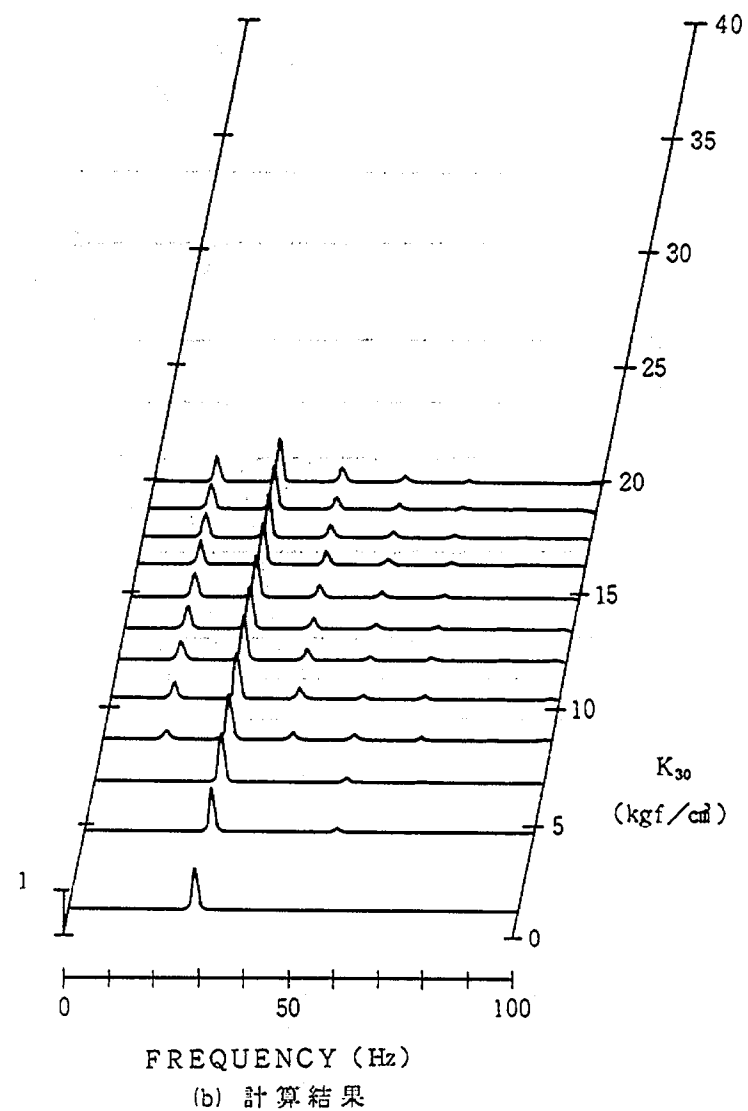
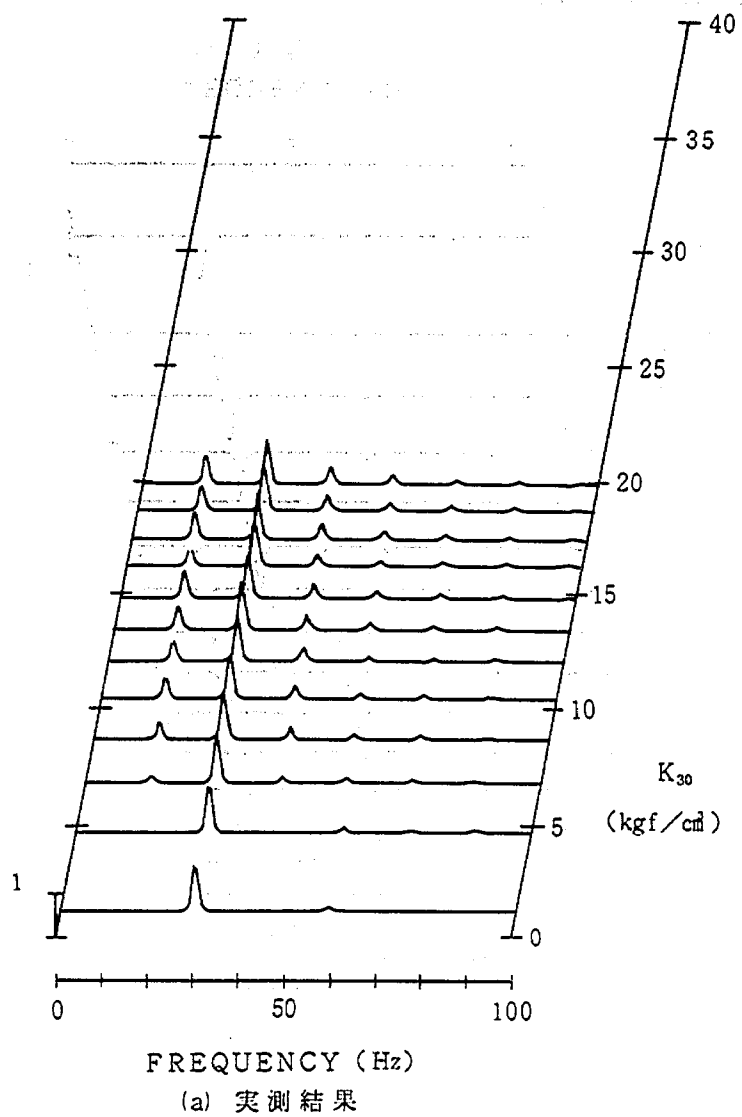
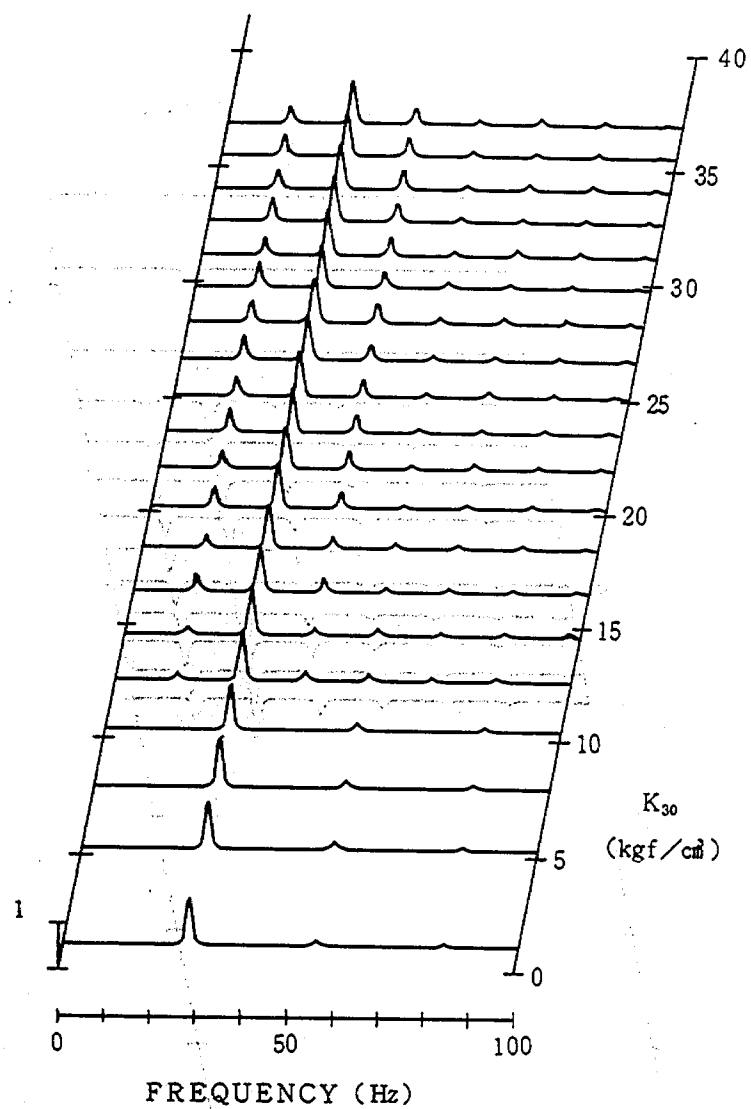
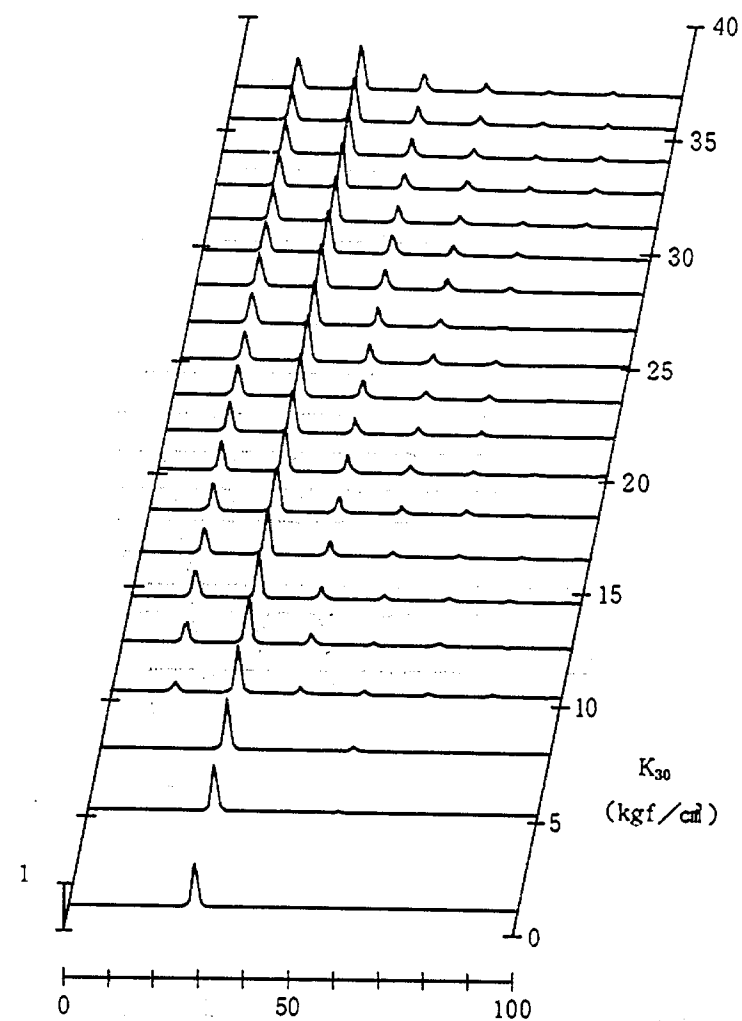


図 5-20 実験Ⅲ（機種 C，地盤 1）のフーリエスペクトル



(a) 実測結果



(b) 計算結果

図 5-21 実験Ⅳ(機種D, 地盤2)のフーリエスペクトル

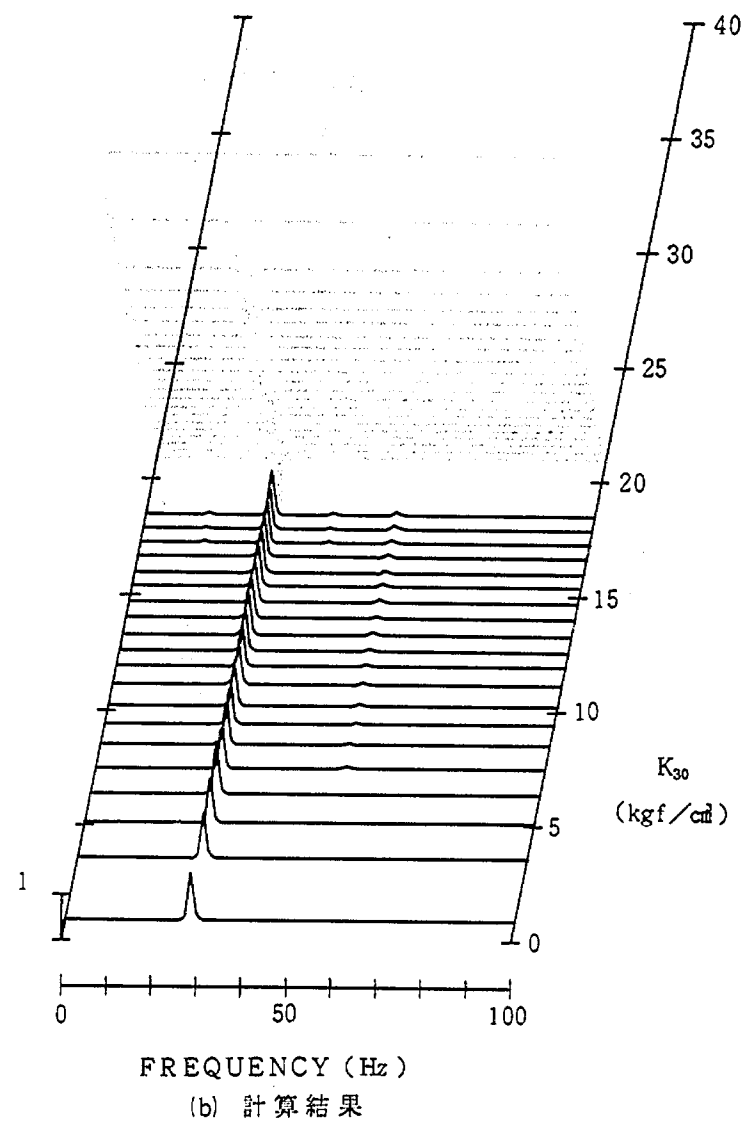
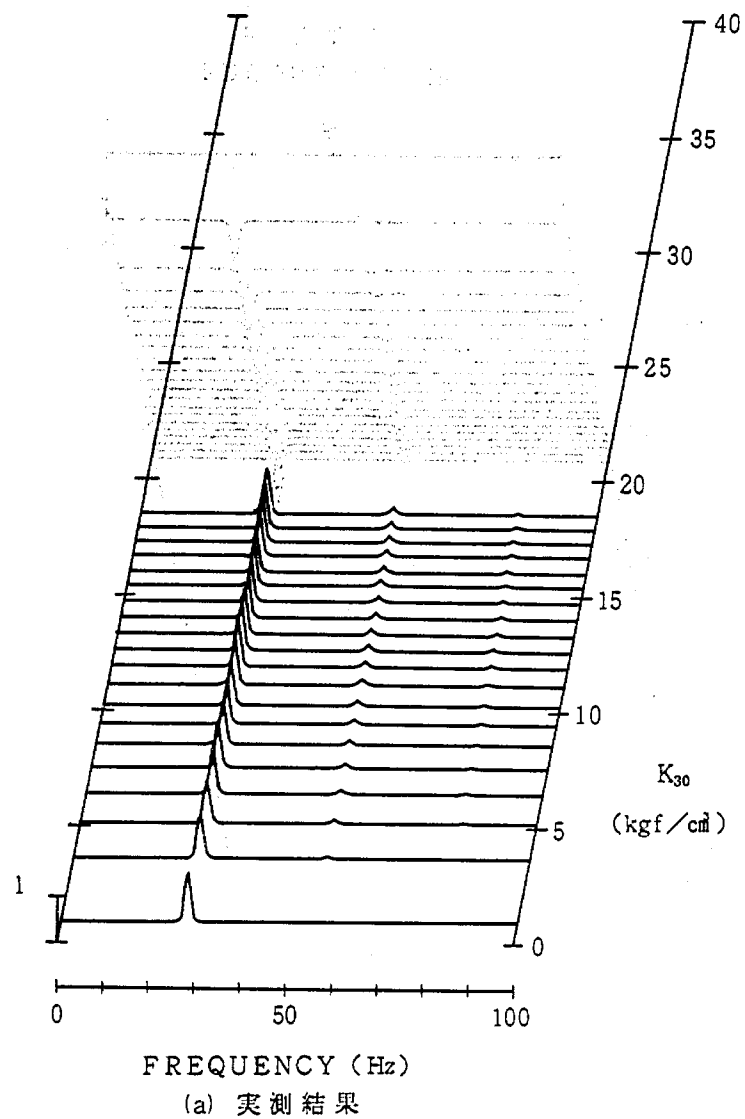


図 5-22 実験Ⅳ(機種D, 地盤3)のフーリエスペクトル

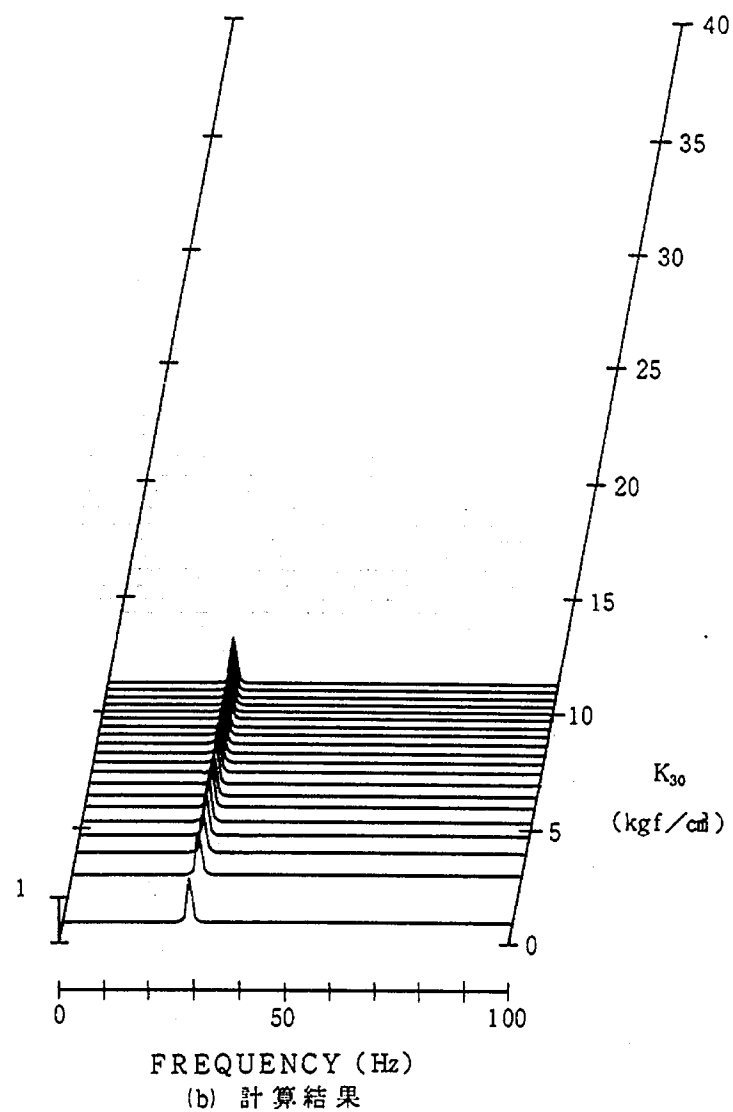
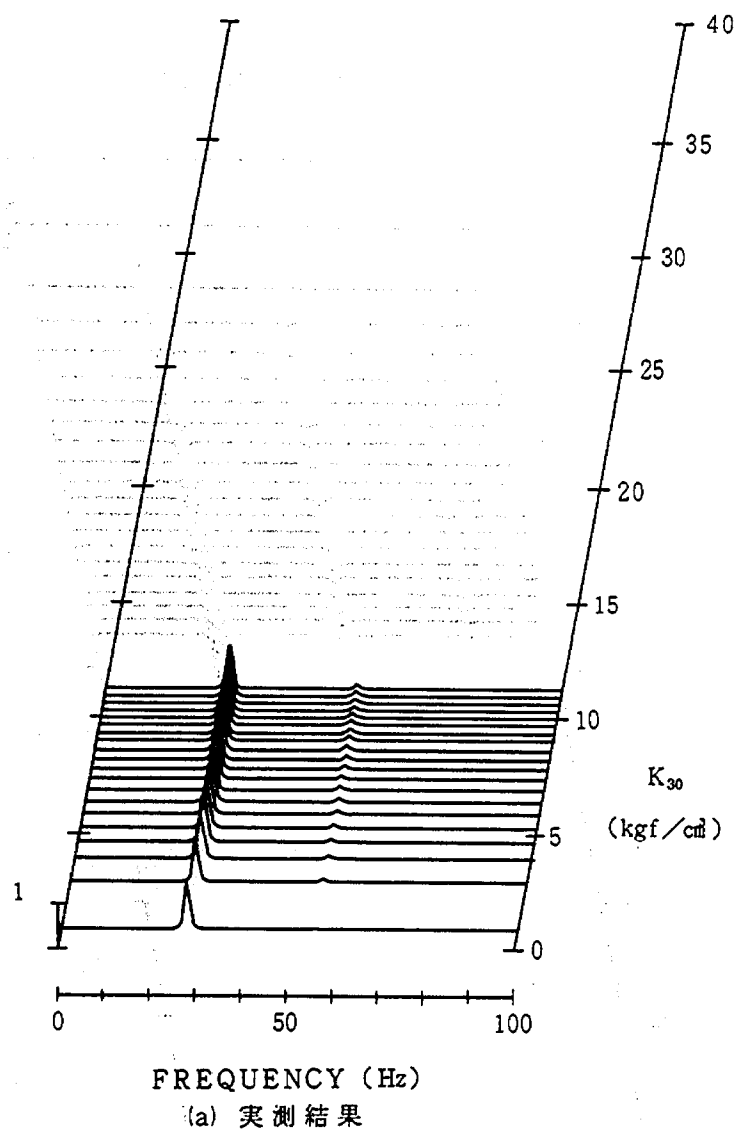


図 5-23 実験Ⅳ（機種D，地盤4）のフーリエスペクトル

5.3 締固め管理への応用

5.1 では締固めの進行にともなって振動輪の加速度の波形が変化することを述べた。ここでは、このような性質を締固め管理に利用する方法について述べる。

先に述べたように、締固めの初期の段階においては加速度の波形は正弦波に近いが、締固めにもなると徐々に波形が変化する。このような波形の変化を表す指標として、ここではひずみ率を考えた。ひずみ率は基本波の実効値と2次以上の高調波の実効値の比の逆数で、式(12)のように定義される。ひずみ率の値が小さいほど正弦波に近い波形を表す。

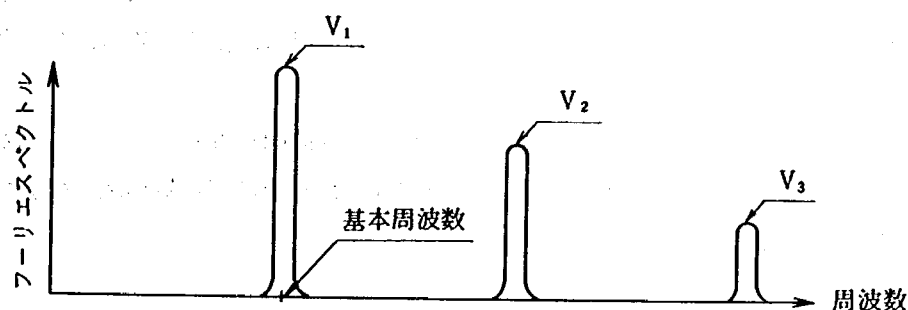
$$\text{ひずみ率}(\%) = \frac{\text{高周波の実効値}}{\text{基本波の実効値}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (12)$$

振動輪が地表面から跳ね上がらない場合には式(12)は次のように表される。(図5-24(a)参照)

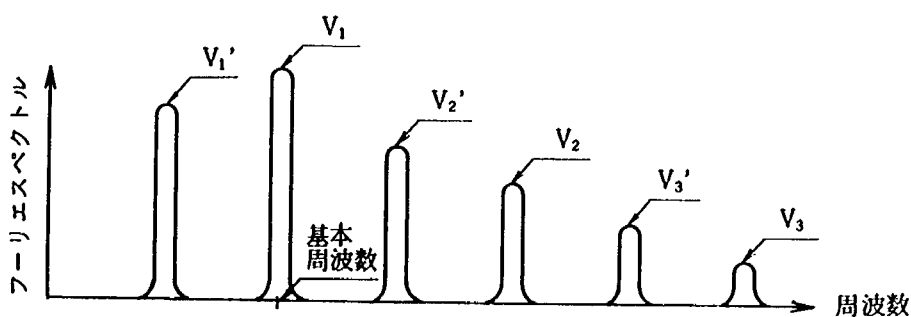
$$\text{ひずみ率}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots (13)$$

一方、5.1 に述べたように振動輪が地表面から跳ね上がる現象がみられる場合には基本周波数(振動輪の振動数)の1/2の周波数およびその整数倍の周波数が成長してくる。図5-24(b)はこの状態を表したものである。このときのひずみ率を式(14)で表す。

$$\text{ひずみ率}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 + \sum_{n=2}^{\infty} V_n'^2}}{\sqrt{V_1^2 + V_1'^2}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (14)$$



(a) 振動輪が地表面から跳ね上がらない場合



(b) 振動輪が地表面から跳ね上がる場合

図5-24 ひずみ率説明図 (V₁は基本波の成分を示す。)

次に、盛土の締固めの程度を表す指標として本調査では地盤係数 K_{30} と締固め度を取りあげている。各実験ケースにおける K_{30} についてはすでに表 5-4 に示したとおりであるが、締固め度について転圧回数ごとにまとめたものを表 5-10 に表す。表 5-9 および表 5-4、表 5-10 を用いてひずみ率 $\sim K_{30}$ 、ひずみ率 $\sim$ 締固め度の関係をまとめたのが図 5-25 $\sim$ 図 5-28 である。

- ・図 5-25……実験Ⅲにおけるひずみ率 $\sim K_{30}$ の関係
- ・図 5-26……実験Ⅲにおけるひずみ率 $\sim$ 締固め度の関係
- ・図 5-27……実験Ⅳにおけるひずみ率 $\sim K_{30}$ の関係
- ・図 5-28……実験Ⅳにおけるひずみ率 $\sim$ 締固め度の関係

これらの図から次のような事項を見出すことができる。

- ① 実験Ⅳケース 1（機種 D，地盤条件 2）を除いてはひずみ率と K_{30} あるいは締固め度との間には相関関係がみられる。したがって、式(2)で定義されるひずみ率を用いると地盤の締固めの程度を推定することが可能と思われる。
- ② 締固めにとまなうひずみ率の増加現象は、締固め度との関係でみるよりも地盤係数 K_{30} との関係でみた方がスムーズな増加傾向にある。
その理由としては次のことが考えられる。
 - ④ 地盤係数 K_{30} は地盤の力学的性状を表す指標であり、5.2 で説明したように振動輪の振動特性との関連を直接説明することができる。
 - ⑤ 地盤係数 K_{30} はある程度の深さまでの地表面下わずかの部分の密度で地盤の性状を表している。一方、振動ローラの振動は地盤の深い部分まで伝わり、振動輪の振動特性がその影響を受けると考えられることから、ひずみと K_{30} との相関の方が大きくなると考えられる。このことから、ひずみ率によって締固め管理を行う場合、密度の管理よりも強度の管理と考える方がよいと思われる。
- ③ 実験Ⅳケース 1 については例外的に上述したような傾向をみることができなかった。これは固い安定処理地盤上に直接薄層の実験地盤を作成したために安定処理地盤の影響を大きく受けたのではないかとと思われる。

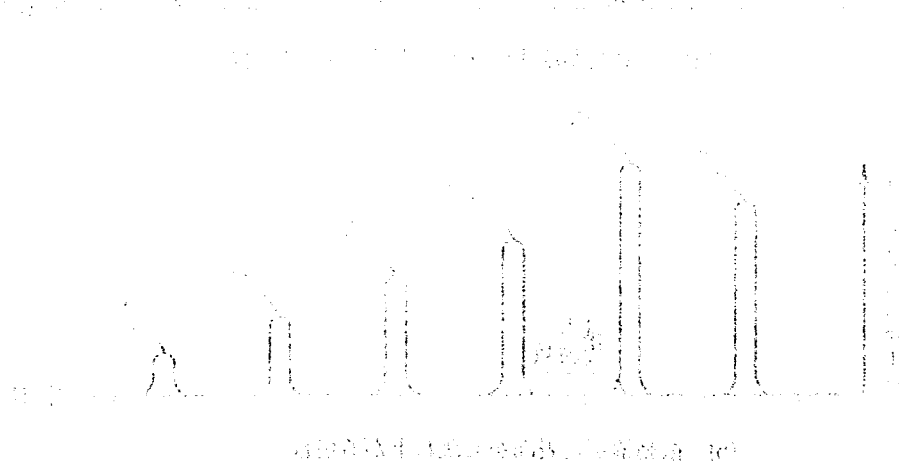


図 5-25 実験Ⅲにおけるひずみ率 $\sim K_{30}$ の関係 (AS-818)

表5-9 実測波形のひずみ率(%)

実 験	実 験 III			実 験 IV		
機 種 名	A	B	C	D	D	D
地 盤 条 件	1	1	1	2	3	4
転 圧 回 数						
0	—	—	—	—	—	—
1	3.0	7.4	5.6	8.6	1.1	2.5
2	6.0	11.3	12.7	16.7	4.6	3.0
3	8.6	19.7	15.7	18.0	7.4	4.4
4	9.6	22.0	22.2	22.1	9.6	5.1
5	13.1	27.4	27.1	24.9	11.8	7.1
6	12.9	27.3	26.3	26.0	12.7	6.8
7	14.9	33.1	28.5	30.7	14.6	8.5
8	14.8	32.8	30.4	33.2	15.4	7.2
9	16.7	36.4	21.9	32.9	14.6	8.2
10	16.2	30.4	35.5	35.6	16.5	10.1
11	20.2	36.7	31.1	33.2	18.4	10.9
12	18.6	39.6	38.3	42.5	15.6	9.1
13	—	—	—	33.3	18.5	12.1
14	—	—	—	40.4	16.6	10.2
15	—	—	—	34.6	16.3	10.9
16	—	—	—	44.1	16.6	10.5
17	—	—	—	41.0	17.4	11.7
18	—	—	—	43.9	17.3	10.8
19	—	—	—	39.7	18.2	12.1
20	—	—	—	39.2	18.6	12.3

表 5-10 締固め度実測値 $\rho_d / \rho_{d \max}$ (%)

実 験	実 験 Ⅲ			実 験 Ⅳ		
機 種 名	A	B	C	D	D	D
地 盤 条 件	1	1	1	2	3	4
転 圧 回 数						
0	85.3	84.5	83.7	78.2	80.3	79.2
1	—	—	—	—	—	—
2	92.2	91.5	92.1	89.2	89.0	88.4
3	—	—	—	—	—	—
4	95.2	95.0	95.9	92.4	91.6	91.3
5	—	—	—	—	—	—
6	95.6	96.0	97.3	93.7	93.8	91.5
7	—	—	—	—	—	—
8	97.1	97.0	97.9	94.8	94.5	93.2
9	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—
12	97.9	98.5	98.9	96.5	95.4	94.8
13	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	97.7	96.9	95.9
17	—	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	98.9	97.4	96.2

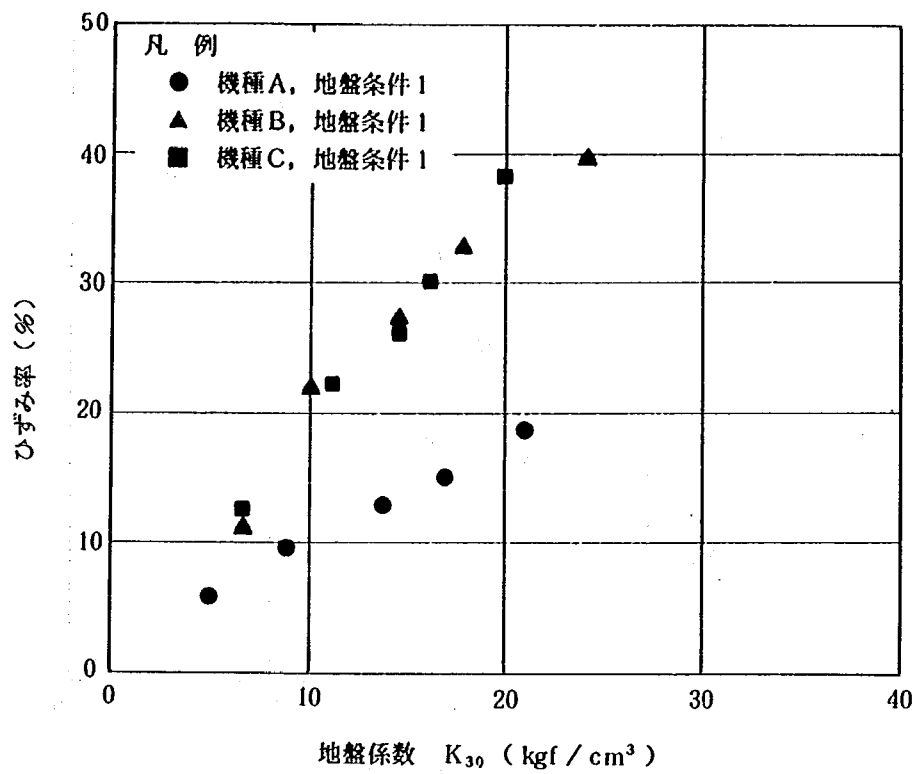


図 5-25 ひずみ率～ K_{30} の関係 (実験Ⅲ)

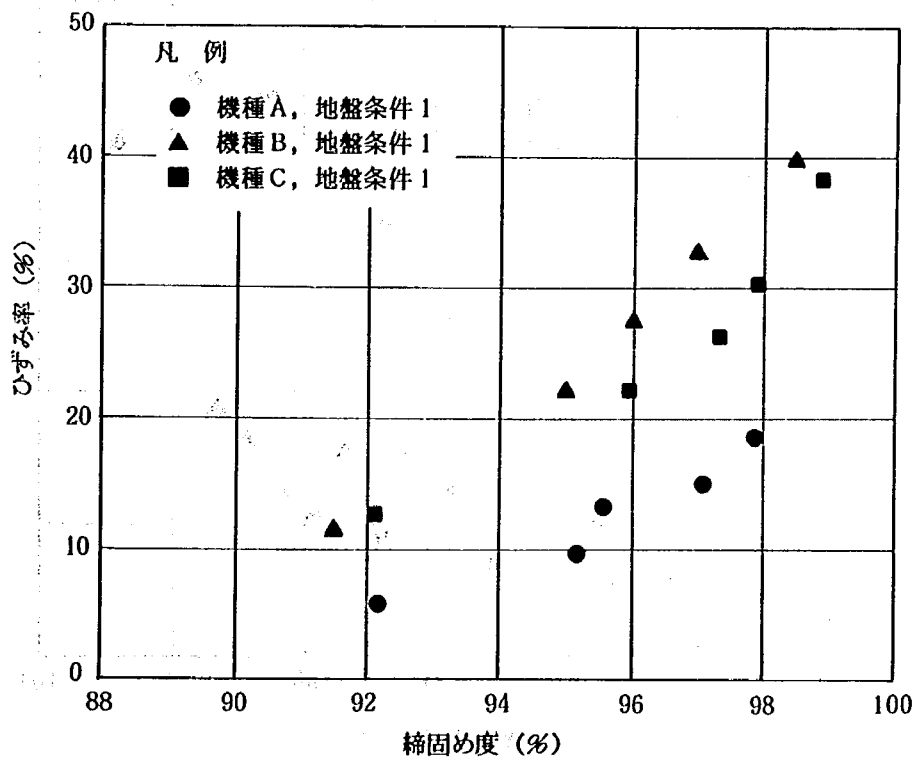


図 5-26 ひずみ率～締固め度の関係 (実験Ⅲ)

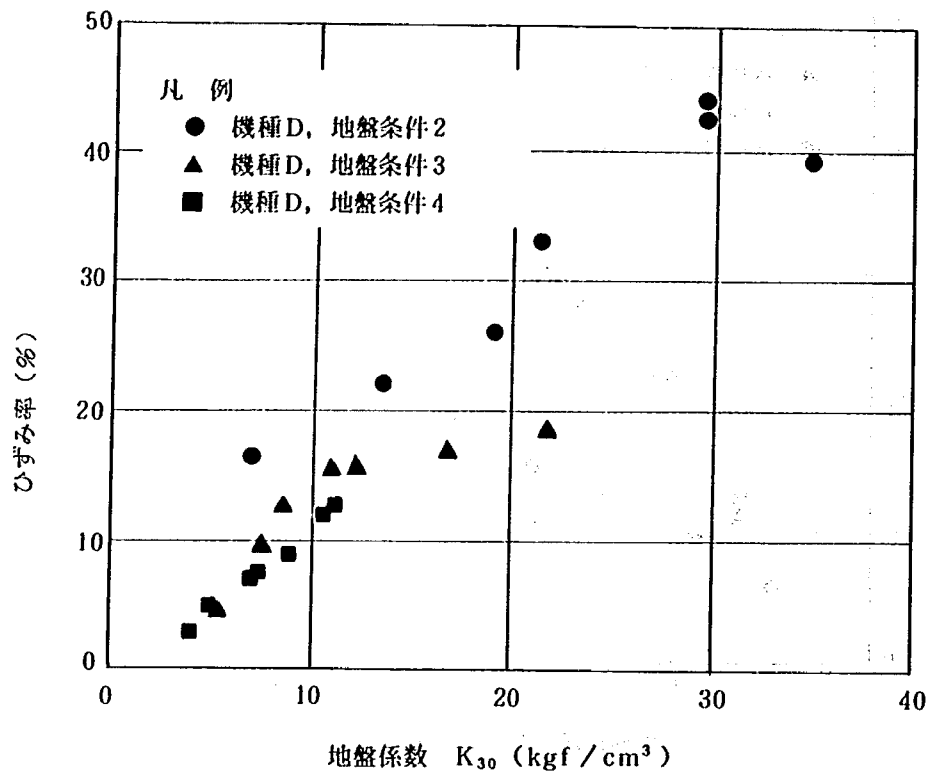


図 5-27 ひずみ率～ K_{30} の関係 (実験Ⅳ)

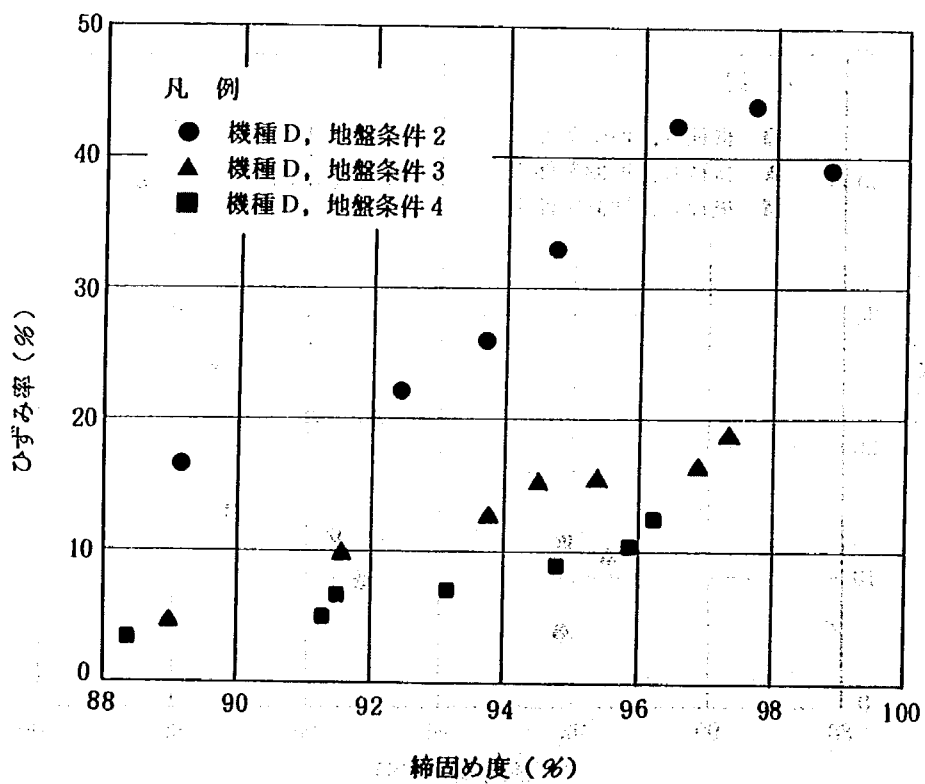


図 5-28 ひずみ率～締固め度の関係 (実験Ⅳ)

以上に述べた点を総括した結果、振動輪の加速度波形のひずみ率によって地盤の締固め程度を判定することが可能と考えられる。ひずみ率は大がかりなデータ処理装置を用いることなくリアルタイムに計算することが可能なので、現場での締固め管理に有望な手法と思われるが、その適用にあたっては以下の点を考慮しておく必要がある。

- ④ 同じ地盤条件で行った実験Ⅲの結果を比較すると、振動ローラの機種が異なれば同じ K_{30} や締固め度に対するひずみ率が異なる。したがって、ひずみ率から K_{30} や締固め度を推定する際には個々の振動ローラの特性が考慮される必要がある。このような問題に対しては、5.2 に述べたシミュレーションにより振動ローラの諸元を変化させるだけで実験Ⅲの各ケースの実測値に近い加速度波形が得られることが確かめられている。このことから、どのような機種に対してもそれに応じたひずみ率～ K_{30} （締固め度）関係の設定が可能と考える。
- ⑤ 同じ機種を用い、地盤条件（ここでは締固め厚）の異なる実験Ⅳの各ケースを比較すると、ひずみ率の増加傾向はかなり異なる。地盤条件とひずみ率の関連性を解明するのは現在のデータだけでは不十分であり、さらにいろいろなケースでの実験をくり返す必要がある。したがって現時点では事前の縮験施工によってひずみ率～ K_{30} （締固め度）の校正曲線を得ておく必要がある。

6. 結 論

本調査を通じて以下の成果が得られた。

(1) 振動ローラの締固め特性について

- ① 土質別の締固め効果をタイヤローラと比較したところ、細粒分の多い土に対して振動ローラは必ずしも不適とはいえない。
- ② 5 t クラスの振動ローラを用いて砂と礫の締固めを行った結果、砂の場合にはある程度の締固め度が得られたが、礫については締固め度が低く、さらに大型の機種でなければ締固め効果が得られないと思われる。
- ③ 振動ローラによる締固め効果は振動ローラの振動数、起振力、重量のいずれにも依存することが確められた。
- ④ 振動ローラによる締固め効果を判定する指標としては乾燥密度（締固め度）よりも平板載荷試験による地盤係数 K_{30} の方が振動ローラの締固め特性と対応付けやすいと思われる。
- ⑤ 振動ローラを用いる場合の有効な締固め厚について 6 t クラスの振動ローラを対象に検討を行った結果、地表面から 50 cm 程度以深では実用的な範囲の締固め度を得ることが困難なことが明らかとなった。このクラスの振動ローラを用いる場合には締固め厚は 30 cm 程度が望ましいと思われる。

(2) 振動輪の振動特性と締固め管理への応用について

- ① 振動輪の振動特性を加速度計を用いて計測したところ、加速度波形は締固めの当初は正弦波に近いものの、締固めが進んで地盤が堅くなるにつれて波形がひずむことが明らかとなった。
- ② 振動輪の重量に対して起振力の大きい振動ローラでは、締固めにもなって振動輪が地表面から跳ね上がるようになり、2 サイクル（1 サイクルは起振装置の回転周期）に 1 回地盤を打撃する現象がみられるようになることが明らかとなった。
- ③ 振動輪の振動特性を 2 自由度系の振動モデルによってシミュレートできることを示した。特に、土のバネ定数を増加させることによって締固めにもなう加速度波形の変化を説明できることをいくつかのシミュレーションによって明らかにした。
- ④ 上記モデルにおける土のバネ定数を地盤係数 K_{30} より推定する方法を示した。
- ⑤ 締固めにもなう加速度波形の変化をひずみ率で表し、締固め度や地盤係数と相関のあることを示した。その結果、加速度波形のひずみ率によって締固め管理が可能ながことが明らかとなった。

最後に、今後に残された課題について触れておく。

- ① 本調査では、振動ローラの締固め特性についていくつかの基礎的資料を得たものの、締固め特性に影響を及ぼす要因は数多く存在するため、それらの因果関係を解明するためにはいろいろな条件下でのデータを広く収集・解析する必要がある。特に、経済的かつ迅速な締固め施工を行うための最適な条件を見出すことが望まれる。
- ② 本調査では、加速度波形のひずみ率によって地盤の締固めの程度を判定することが可能なこ

とを明らかにしたが、今後はひずみ率から地盤係数や締固め度を推定することが可能なことを明らかにしたが、今後はひずみ率から地盤係数や締固め度を推定する際の精度や土質別の適用性について検討する必要があるだろう。

参考文献

1. 久野悟郎；盛土の締固めと安定処理（講座：施工機械と土質工学），土と基礎，Vol. 29, No 12, PP. 83～89, 1981.
2. 日本道路協会；道路土工要綱，PP. 216～218, 1983.
3. 日本建設機械化協会；日本建設機械要覧，PP. 700～701, 1983.
4. 最上武雄，河上房義，柳澤栄司；土の締固め，鹿島出版会，1975.
5. 畠昭治郎，谷本親伯，建山和由；振動締固めに関する一考察，第17回土質工学研究発表会，PP. 1397～1400, 1982.
6. 田島清瀬；振動の工学，産業図書，1980.
7. 石原研而；土質動力学の基礎，鹿島出版会，1978.
8. 電子計測器ハンドブック，東京電機大学出版局，1980.
9. 嶋津晃臣，見波潔，足立賢一；振動ローラによる盛土締固めの施工管理，第37回土木学会講演集
10. 足立賢一，嶋津晃臣，見波潔；振動ローラによる盛土締固めの施工管理（第2報），第39回土木学会講演集
11. T. William Lambe, Robert V. Whitman ; Soil Mechanics SI Version (Page 232-235)

振動ローラによる盛土の
締固めに関する調査

I S S N 0386-5878
土木研究所資料第2184号
昭和60年3月(1985)

施工研究室

嶋津 晃臣・見波 潔
中田 公基・嶋田 功
足立 賢一

要 旨 振動ローラを用いて盛土を締固める場合の締固め特性につ
いて調査し、振動ローラの重量、起振力、振動数等が締固め効果に
及ぼす影響について基礎的な資料を得た。さらに振動輪の振動特性
の変化に着目して振動加速度のひずみ率によって締固め管理が可能
なことを明らかにした。

キーワード：振動ローラ、盛土、締固め、振動特性、締固め管理、
ひずみ率

郵便はがき

四十円切手
を貼って
さい

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町
大字旭一番地
建設省土木研究所
施工研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2184号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印