

土 木 研 究 所 資 料

フィルダム模型の正弦波による振動実験報告

昭和57年2月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © 1981年度 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 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、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

正誤表

ページ	誤	正
5 (表-2の位置の項)	2.644	2.644
7 (表-3の加振,制御 データ処理の項)	CR MD X-Yplotter	CDR 削除 X-Yplotter
8 (写真-1のa)	アクチュエーター	アクチュエーター
10 (ソーン型ダム模型の図)	ソーン型ダム模型のコア敷 巾 34	巾 84
17 (7行目)	加速度計バ	加速度計を
21 (2行目)	約25galの加速度のもとで	削除
25 (6行目)	合法勾配	合勾配
26 (図-23a)	70→5Hz	5→70Hz
27 (図-24)	70→5Hz	5→70Hz
30 (図-28)	入力加速度 100gal	入力加速度 25gal
30 (図-29)	入力加速度 25gal	入力加速度 100gal
32 (16行目)	崩壊する	崩壊するが

フィルダム模型の正弦波による振動実験報告

土木研究所フィルダム研究室

松 本 徳 久

*近 藤 悟

豊 田 光 雄

志 賀 三 智

* 中部地方建設局長島ダム工事事務所

目 次

1. はじめに	1
2. 実験目的	3
3. 実験方法	4
3.1 実験ケース	4
3.2 実験材料	5
3.3 実験装置	7
3.4 模型製作	9
3.5 加速度計の検定	16
4. 実験結果および考察	17
4.1 標準砂模型の振動実験	17
4.2 フィルダム模型の振動実験	25
5. まとめと今後の問題点	40

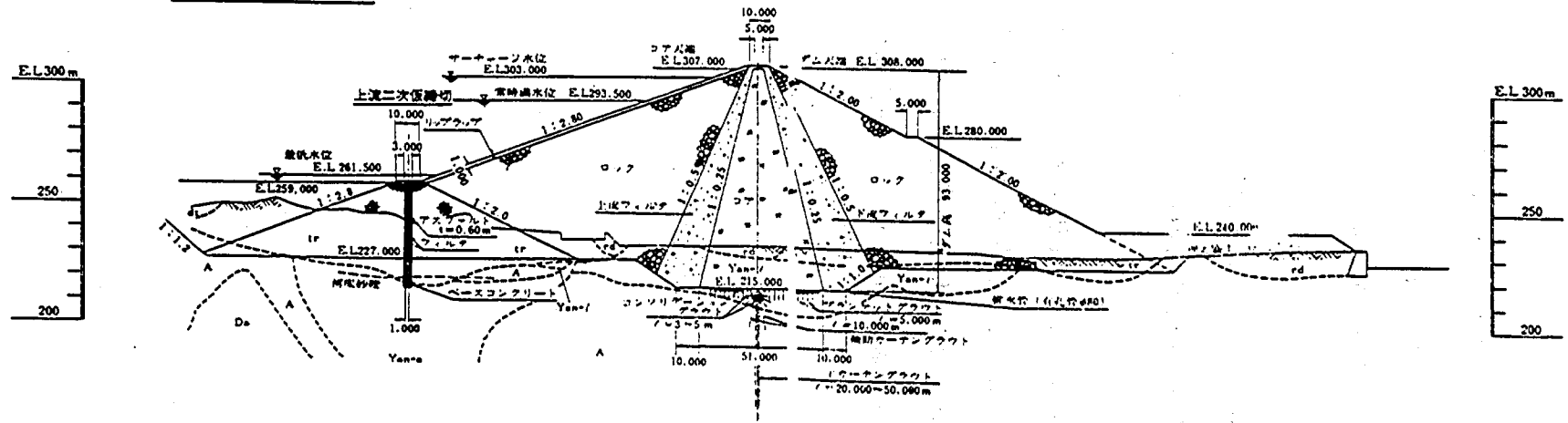
1. は じ め に

ダムの耐震設計は、現行の設計基準（河川法にもとづく河川管理施設等構造令など）では震度法によることとなっており、これによって設計されたダムが過去において地震に対して安全であったことから、この設計方法がダムの地震時安定性の確保に大きな役割を果たしてきたことは言うまでもない。

しかし、地震時のフィルダムの挙動を忠実に再現する手段としては、動的解析手段や実験があり震度法によるだけでなくこれらの手段によってもダムの地震時の安定性を検討することは好ましいことである。

七ヶ宿ダムは東北地方建設局が建設中のロックフィルダムであり、土研フィルダム研究室では動的解析および実験により検討する依頼を受けた。ここでの安定性の検討では、動的解析を主とし、実験により物性の理解、解析手法の検証、および解析では得られぬ現象の解明をすることとした。図-1に七ヶ宿ダムの現在のところの標準断面および縦断面を示す。

標準断面図



縦断面図

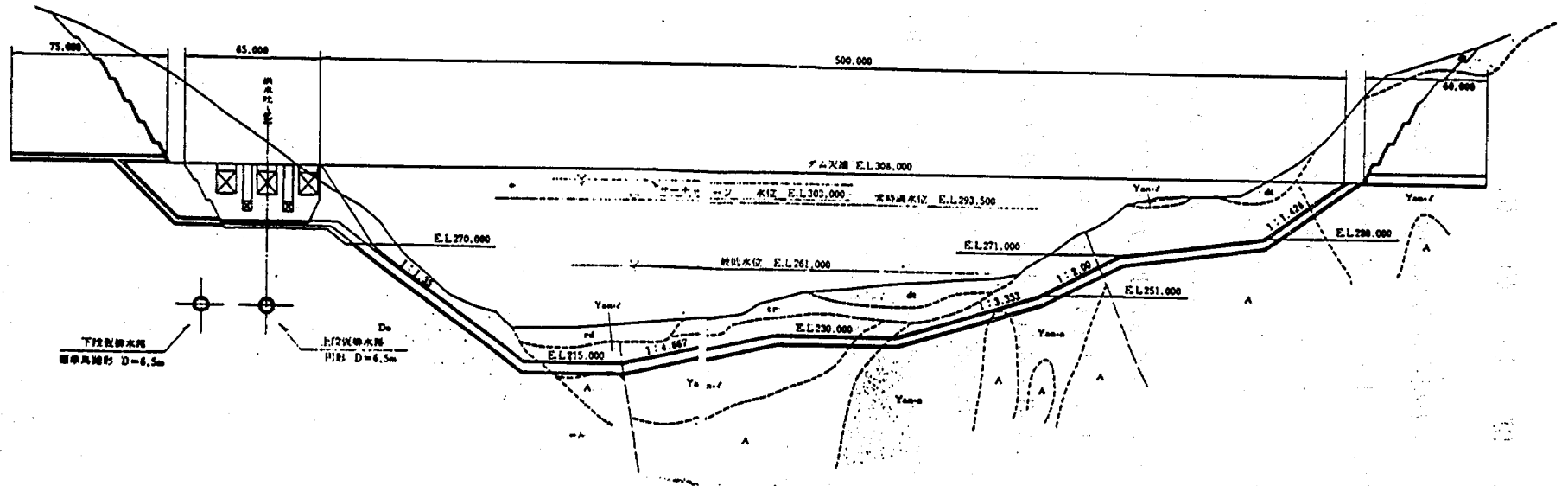


図-1 セケ宿ダムの標準横断面および縦断面

2 実 験 目 的

本実験の目的は次の2点である。

1. 共振周波数・応答倍率より模型の非線型特性を求める。
2. 模型の破壊現象を知る。

3. 実験方法

3.1 実験ケース

実験は表-1に示すように5ケース実施した。

表-1 実験ケース

ケース番号	模型材料	模型寸法				加振方式	貯水
		高さ	天端幅	上流勾配	下流勾配		
1	豊浦標準砂による均一型ダム	100 cm	10 cm	1:2.5	1:2.5	周波数スイープ	貯水なし
2						加速度スイープ	貯水なし
3	実材料によるゾーン型ダム	74 cm	5 cm	1:2.8	1:2.0	周波数スイープ	貯水なし
4				1:2.7	1:2.3	周波数スイープ	貯水なし
5				1:2.8	1:2.0	周波数スイープ	貯水あり

ケース1,2は豊浦標準砂による均一型ダム模型である。標準砂についてはせん断弾性定数および減衰定数がすでに試験で求められているから後の解析が容易である。フィルダム研究室が実施する初めての振動実験としてはまず基礎的な標準砂模型を2ケース実施したわけである。ケース3,4,5はコア、フィルター、ロックの3ゾーンをもつゾーン型ダムである。ケース3~5では上下流法面勾配および貯水の有無の影響をみようとしている。

表-1における加振方式のうち周波数スイープとは加速度振巾を一定にしたまま周波数を5.0Hzより50Hzまで1Hzステップで変化させる加振方式である。ケース2の加速度スイープとは周波数を25Hz,30Hzと一定にしたまま、加速度振幅を漸増漸減させた加振方式である。(図-2)

また加振方向は水平一軸方向である。

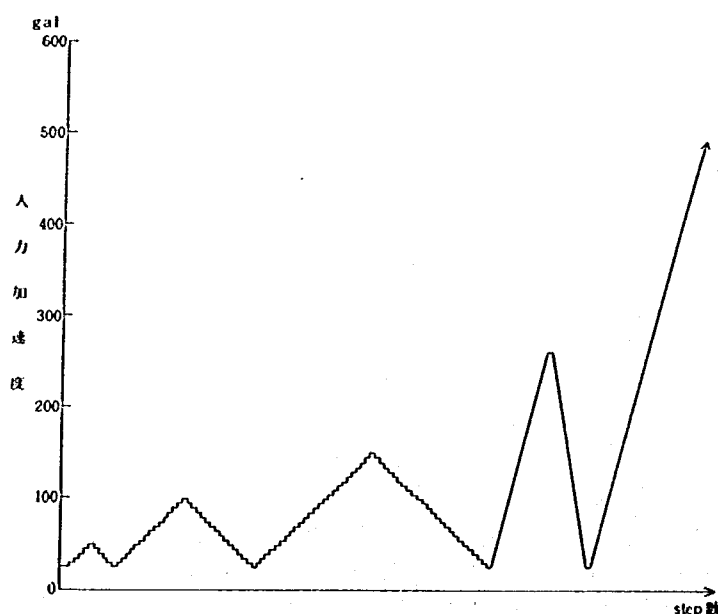


図-2 加速度レベルのスweepパターン

3.2 実験材料

模型に使用した材料の特性を表-2に示す。図-3には使用材料の粒径加積曲線を示す。

表-2 模型材料に用いた試料およびその物理的、力学的性質

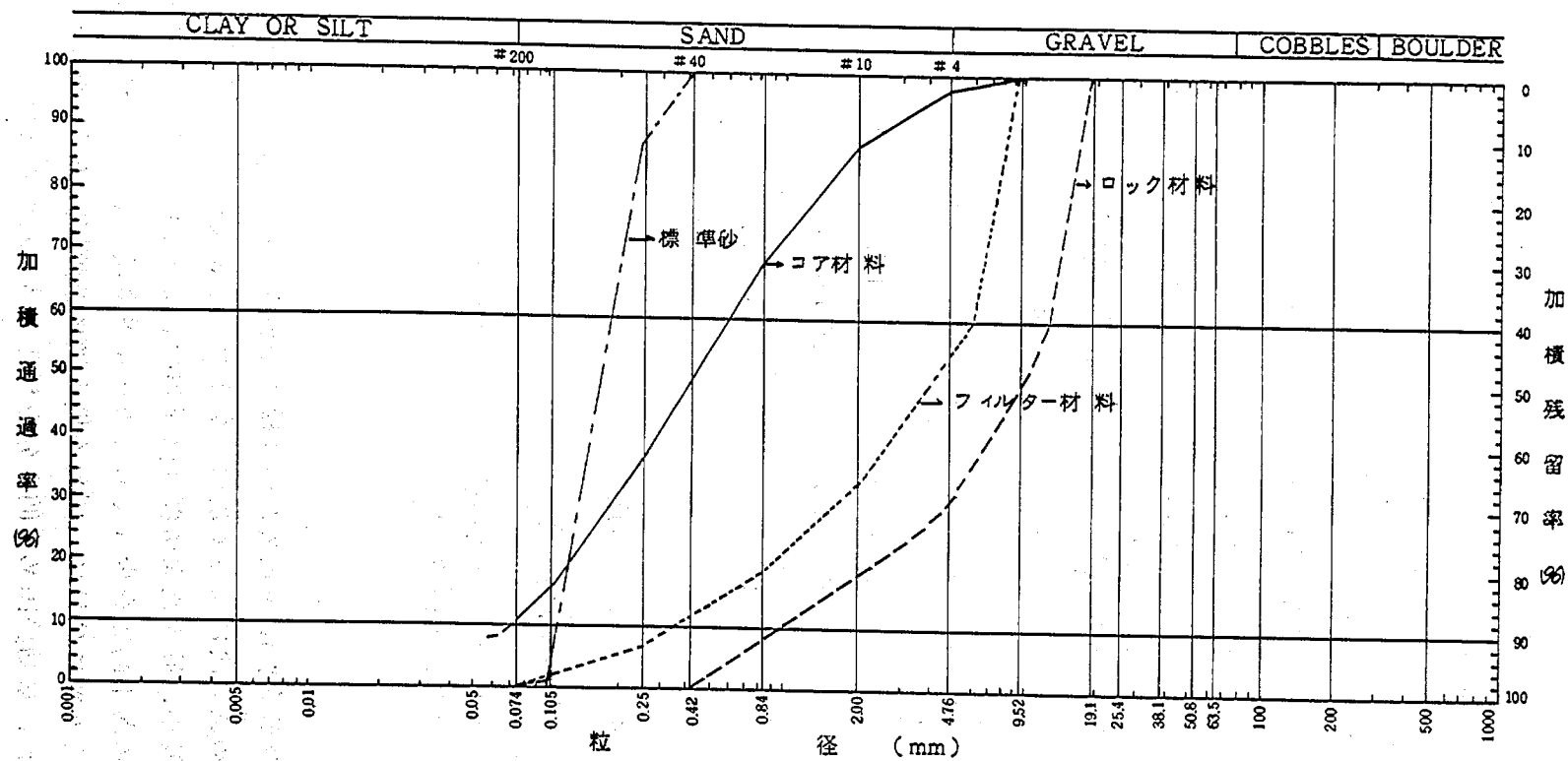
呼び名	標準砂模型	ゾーン型ダム模型		
		ロック材料	フィルター材料	コア材料
岩質	豊浦標準砂	流紋岩	安山岩とカコウ岩の混	安山岩とカコウ岩の混
粒径	0.42~0.074 mm	19.1~0.42 mm	9.52~0.074 mm	4.76 mm 以下
均等係数	1.6	12	12	9
4.76 mm 粒径以下の通過率	100%	18%	32%	100%
*1 比重 *2 (50%粒径の比重)	2.644	2.641~2.694 *2(2.428)	2.673~2.675 (2.641)	2.661
吸水量	—	3.2~3.6	4.2	—
最適含水比	15.0%	—	—	22.6%
最適密度	1.560 g/cm ³	—	—	1.520 g/cm ³
最小乾燥密度(ρ_{dmin})	—	1.534 g/cm ³	1.591 g/cm ³	—
最大乾燥密度(ρ_{dmin})	—	1.901 g/cm ³	1.946 g/cm ³	—
ハンドバイブレーターによる締固め密度(ρ_d)	—	1.680 g/cm ³	1.830 g/cm ³	1.110 g/cm ³

*1 土粒子の比重試験法による比重

*2 絶乾比重 (19.1~4.76 mm まで)

*3 50%粒径の比重とは、粒径加積曲線において50%通過率における比重の値をいう。

標準砂模型で最適含水比および最大密度を求めたのは模型の製作上適当な含水比がある方が施工しやすいので土の突き固め試験法によって最適含水比および最大密度を求めた。ロック材料およびフィルター材料の最小、最大乾燥密度は直径 30 cm、高さ 60 cm のモールドを用いて、最小乾燥密度は試料投入時に落下高さを少なくしてモールドに投入する方法を用い、最大乾燥密度は、全体の試料投入を 6 層に分けて一層毎を投入後に振動締固め試験機を利用して振動加速度 5 G、振動数 60 Hz、振動締固め時間 8 分を与えて締め固めて求めた。ハンドバイブレーターによる締固め密度試験は 50 cm × 50 cm × 20 cm の試料を作りその上面にハンドバイブレーターによって振動締固め時間を 8 分間与えて求めたものである。



	最大粒径(mm)	最小粒径(mm)	均等係数	4.76mm 通過率
標準砂	0.42	0.074	1.6	100%
ロック材料	19.1	0.42	12	30%
フィルター"	9.52	0.074	12	54%
コア"	9.52	-	9	97%

図-3 模型材料の粒径加積曲線

3.3 振動実験装置の概要

振動実験装置は振動台、油圧供給装置、制御装置、データー計測装置、コンピュータシステムより構成されており、振動台の加振制御およびデータ処理はすべてコンピューターによって行なわれる。

図-4 および写真-1 は振動台の概観を示したものである。この振動台の仕様をまとめると表-3 のようになる。テーブルの大きさ $4 \times 4 \text{ m}$ 、加振は電気油圧サーボ方式により正弦波、三角波、矩形波、任意波を用いて最大加速度 $\pm 980 \text{ gal}$ まで水平単独、鉛直単独および水平鉛直同時に最大載荷重量 40 ton まで振動させることが可能である。起振可能周波数は 100 Hz までと範囲が広い。

表 - 3 振動台の仕様

テーブルの大きさ	$4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 、自重 13.5 t 溶接箱構造 1次固有振動数 100 Hz 以上	
最大載荷重量	40 ton	
最大加速度	水平方向 $\pm 980 \text{ gal}$ 鉛直方向 $\pm 980 \text{ gal}$	
最大振巾	水平方向 $\pm 100 \text{ mm}$ 鉛直方向 $\pm 50 \text{ mm}$	
周波数範囲	起振可能周波数 100 Hz	
	P S D コントロール	$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水 平} & 0.1 \sim 20 \text{ Hz} \\ \text{鉛 直} & 0.1 \sim 25 \text{ Hz} \end{array} \right.$
	正弦波制御可能周波数範囲	$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水 平} & 0.1 \sim 35 \text{ Hz} \\ \text{鉛 直} & 0.1 \sim 50 \text{ Hz} \end{array} \right.$
加振方式	電気油圧サーボ方式	
加振波形	正弦波、三角波、矩形波、任意波形	
加振方向	水平一軸、鉛直一軸、水平・鉛直二軸	
最大転倒モーメント	ピッチング	$70 \text{ t} \cdot \text{m}$ (18 t 載荷時)
	ローリング	$20 \text{ t} \cdot \text{m}$ (23 t ")
最大回転モーメント	ヨーイング	$20 \text{ t} \cdot \text{m}$ (23 t 載荷時)
油 圧 ポンプ	加振機用主ポンプ 440 l/min , 210 kg/cm^2 2 台	
	静圧継手、バランスシリンダー用副ポンプ 160 l/min , 210 kg/cm^2 ... 1 台	
加 振 機	水平方向 29.5 t 2 台	鉛直方向 27.3 t 4 台
支 持 方 式	バランスシリンダー (鉛直加振機に内蔵) 方式	
加 振 . 制 御 デ ー タ - 処 理	C P U ECLIPSE S/130 64KW	
	磁気ディスク 5 MW	
	FFTプロセッサー	
	入力チャンネル数 40 チャンネル	
	モ ニ タ - オシロスコープ	
デ ー タ - 処 理	入力, 出力アクセサリ PTP, PTR, CR, MD, MT, Printer	
	X-Yplotter グラフィックディスプレイ	
	ハードコピー	

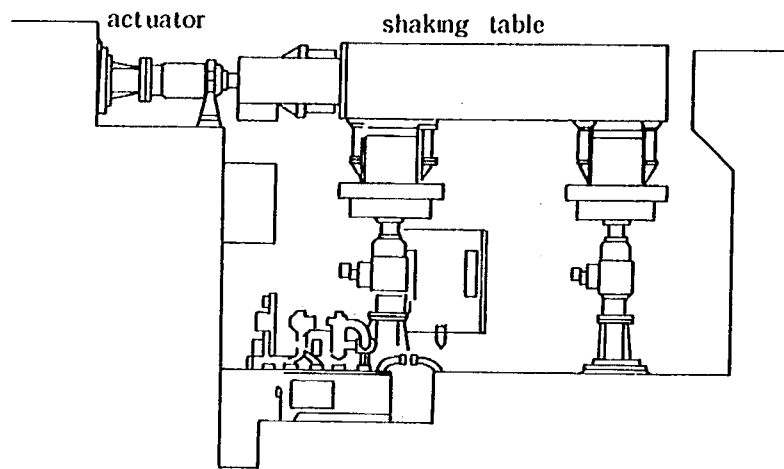
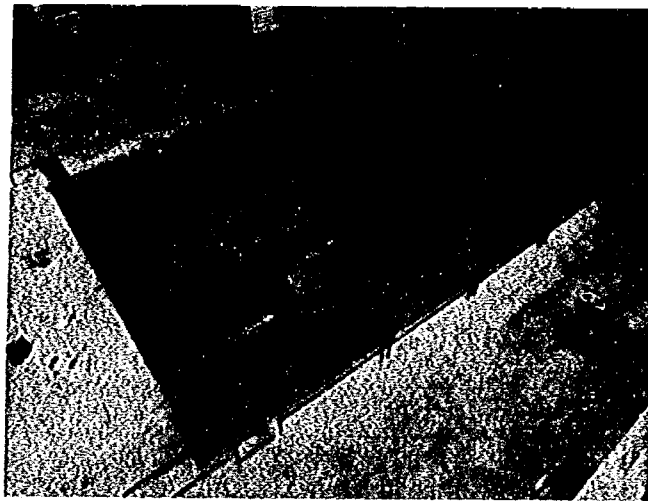
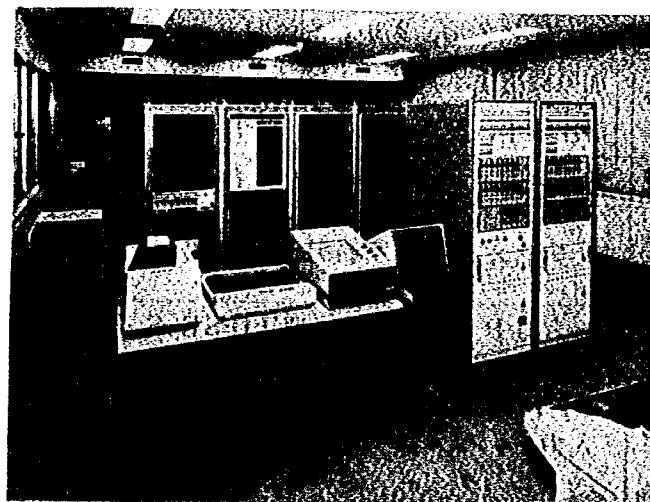


図 - 4 振動台の概略図



a. 振動台テーブル, アクチュエーター



b. データ処理装置

写真 - 1 振動台の概観

3.4 模型製作

模型は前述のように標準砂による均一ダム模型と七ヶ宿ダムの 1/125モデルのゾーン型ダム模型の2種類を製作した。

3.4.1 均一型ダム模型の製作

模型は図-5に示すように堤高 100 cm, 上流および下流法勾配がともに 1 : 2.5, 天端巾 10 cm, ダム軸左右岸方向に 280 cmの大きさである。施工方法は堤高の 1/5 (約 20 cm) ずつ盛立を行ない, これをハンドバイブレータによって良く締め固め 5 層まで繰り返した後, 上下流法面の整形を行ない完了とした。使用した標準砂の粒度は図-3に示してある。施工にあたっては最適含水比が 15% になるように含水量調整を行なった。

なお, 模型の密度管理を行なうために 1 層毎に円筒のモールド (直径 10 cm × 高さ 10 cm) を用いて密度を測定した。また, 堤体の応答を把握するために加速度計を要所毎に配置した。この加速度計の埋設方法並びに配置については 3.4.3 項で述べる。

模型製作後の湿潤密度 (ρ_t), 乾燥密度 (ρ_d), 含水比 (w) は次の様な値であった。

	ρ_t g/cm ³	ρ_d g/cm ³	w %
CASE-1	1.610	1.490	8.0
CASE-2	1.621	1.501	8.0

試験時には, 施工に 2 ~ 3 日費やしたことにより天端付近が乾燥し, 堤体下部はかなり含水量の高い状態であった。

3.4.2 ゾーン型ダム模型の製作

模型は実ダムの 1/125 とし図-6に示すように高さ 74 cm, 天端巾 10 cm, ダム軸左右岸方向に 280 cm とし法勾配の差による応答特性を検討するために上流法勾配を 1 : 2.8 と 1 : 2.7 に下流法勾配を 1 : 2.0 と 1 : 2.3 の2種類変えた模型とした。

模型に使用したロック材料, フィルター材料, コア材料の粒径加積曲線は図-3に示した通りである。ロック材料の最大粒径は 9.52 mm, 最小粒径は 0.42 mm, フィルター材料の最大粒径は 9.52 mm, 最小粒径は 0.074 mm で均等係数はいずれも 12 である。コア材については粒度調整が不可能であったので最大粒径が 9.52 mm, 0.074 mm 粒径の通過率が 10% 程度のものを使用した。

施工方法は図-7に示すように 4 層に分けて施工することとし 1 層毎にコア, フィルター, ロックの順に施工した。それぞれの締め固めは均一型ダム模型で使用したものと同一のハンドバイブレータによって十分締め固めた。なお, 湛水を行なう場合には堤体の止水性を高めるために図-8に示すように側面のコア部を最適含水比より高い含水量で施工した。

均一型ダム模型と同様に各層毎に密度測定を行ない加速度計を配置した。加速度計の埋設方法および配置については 3.4.3 項でのべる。

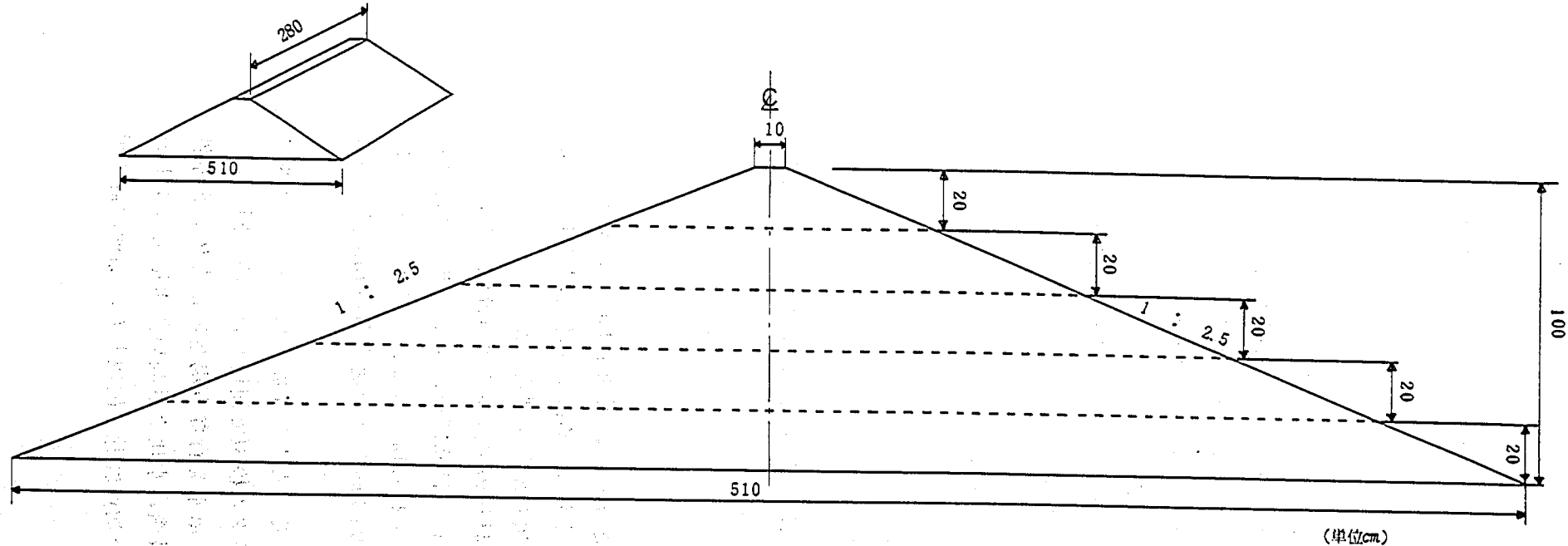


図-5 均一型ダム模型

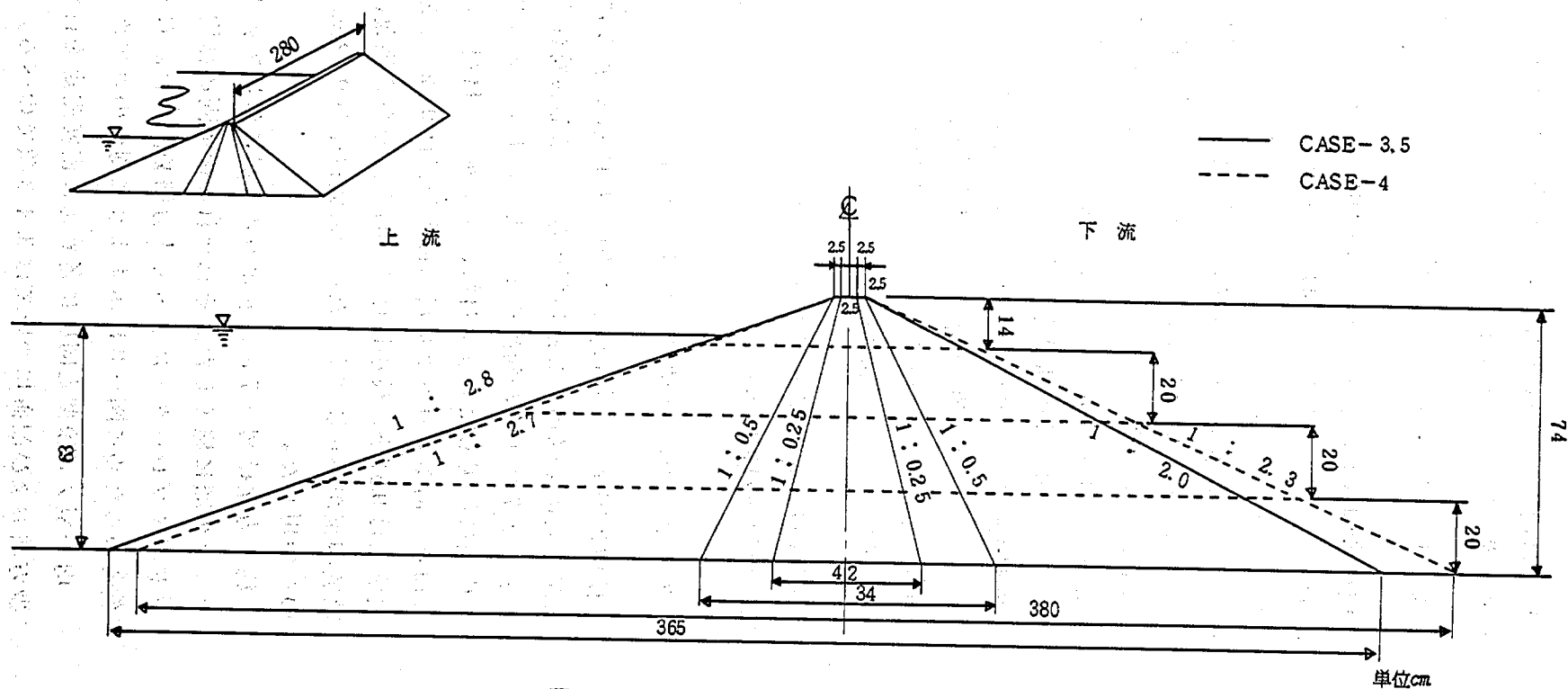
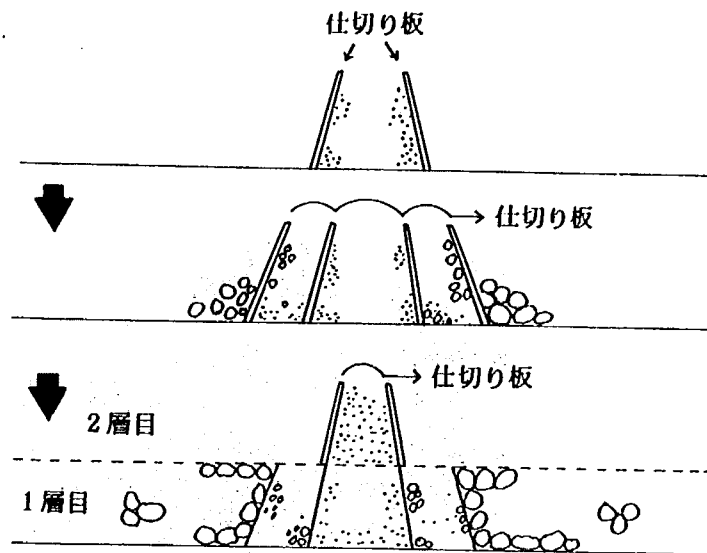


図-6 ゾーン型ダム模型



① コア部を仕切り板を用いて施工。



② フィルター部に材料投入。



③ ロック部に材料を投入後、仕切り板を抜きとり、ハンドバイブレーターで締固め。

1層目施工後、計測器の埋設。



④ ①から③を4層まで繰り返す。



⑤ 法面の締固めをハンドバイブレーターで行いながら整形する。

図-7 ゾーン型ダム模型の製作方法

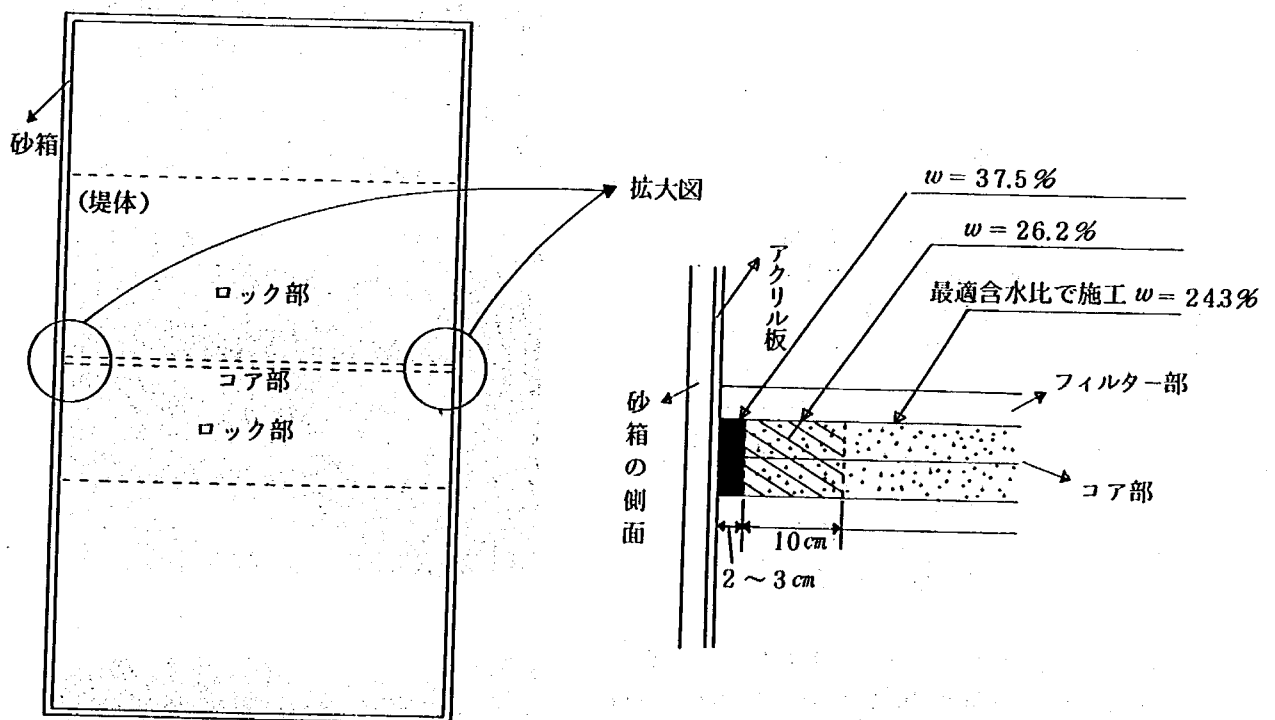


図-8 コア部側面の施工

出来上った模型のコア部だけの密度を以下に示す。

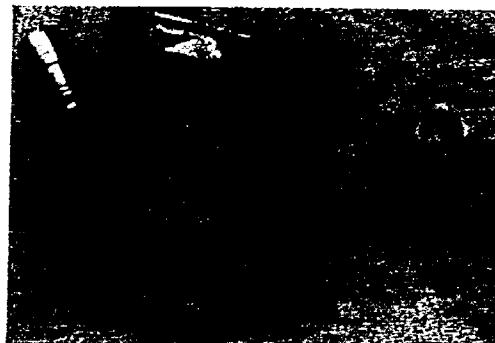
CASE 3	$w = 24 \sim 26 \%$	$\rho_t = 1411 \sim 1629 \text{ g/cm}^3$	$\rho_d = 1.126 \sim 1.292 \text{ g/cm}^3$
CASE 4	$w = 24 \sim 26 \%$	$\rho_t = 1.573 \sim 1.612 \text{ g/cm}^3$	$\rho_d = 1.249 \sim 1.275 \text{ g/cm}^3$
CASE 5	$w = 23 \%$	$\rho_t = 1.607 \text{ g/cm}^3$	$\rho_d = 1.283 \text{ g/cm}^3$

3. 4. 3 加速度計の埋設と配置

模型に用いた加速度計の仕様および写真をそれぞれ表-4, 写真-2に示す。

a 型 表-4 加速度計の仕様

型 式	ひずみゲージ型
感 度	$394 \sim 545 \times 10^{-6}/G$
定格出力	$0.394 \sim 0.545 mV/V$
非直線性	1% FS
応答周波数	$\sim 70 Hz$
定格加速度	2 G
許容 "	6 G
重 量	2454g
形状寸法	$22 \times 22 \times 22 mm$
製造所	(株) 東京測器



b 型

型 式	ひずみゲージ型
感 度	$870 \sim 1086 \times 10^{-6}/G$
定格出力	$0.870 \sim 1.086 mV/V$
非直線性	1% FS
応答周波数	$\sim 30 Hz$
定格加速度	2 G
許容 "	3 G
重 量	13148g
形状寸法	$46 \times 41 \times 23 mm$
製造所	(株) 東京測器



c 型

型 式	ひずみゲージ型
感 度	$825 \sim 917 \times 10^{-6}/G$
定格出力	$0.825 \sim 0.917 mV/V$
非直線性	1% FS
応答周波数	$\sim 30 Hz$
定格加速度	2 G
許容 "	3 G
重 量	23283g
形状寸法	$\phi 54 \times h 37 mm$
製造所	(株) 東京測器



d 型

型 式	ひずみゲージ型	ひずみゲージ型
感 度	$1046 \sim 1308 \times 10^{-6}/G$	$1303 \sim 1398 \times 10^{-6}/G$
定格出力	$4.925 \sim 6.54 \mu V/V$	$6.515 \sim 6.99 \mu V/V$
非直線性	1% FS	1% FS
応答周波数	$50 \sim 60 Hz$	$\sim 75 Hz$
定格加速度	1 G	2 G
許容 "	3 G	6 G
重 量	5982g	59.82g
形状寸法	$215 \times 398 \times 22.7 mm$	$215 \times 398 \times 22.7 mm$
製造所	(株) 共和電業	(株) 共和電業



写真-2 各種の加速度計写真

加速度計はいずれもひずみゲージ型で、加速度計の容量および非直線性はそれぞれ2G、1%FSである。表-4のa型の加速度計は模型密度と同一の密度となるように図-9に示すような $a_1 \sim a_3$ の容器を利用して埋設した。標準砂模型に加速度計を埋設するには簡単であり位置を正確に設定出来たが、ゾーン型ダム模型では位置を1センチメートル単位まで決めるのは困難であった。

ケース1からケース5までの加速度計の配置を図-10～図-14に示す。

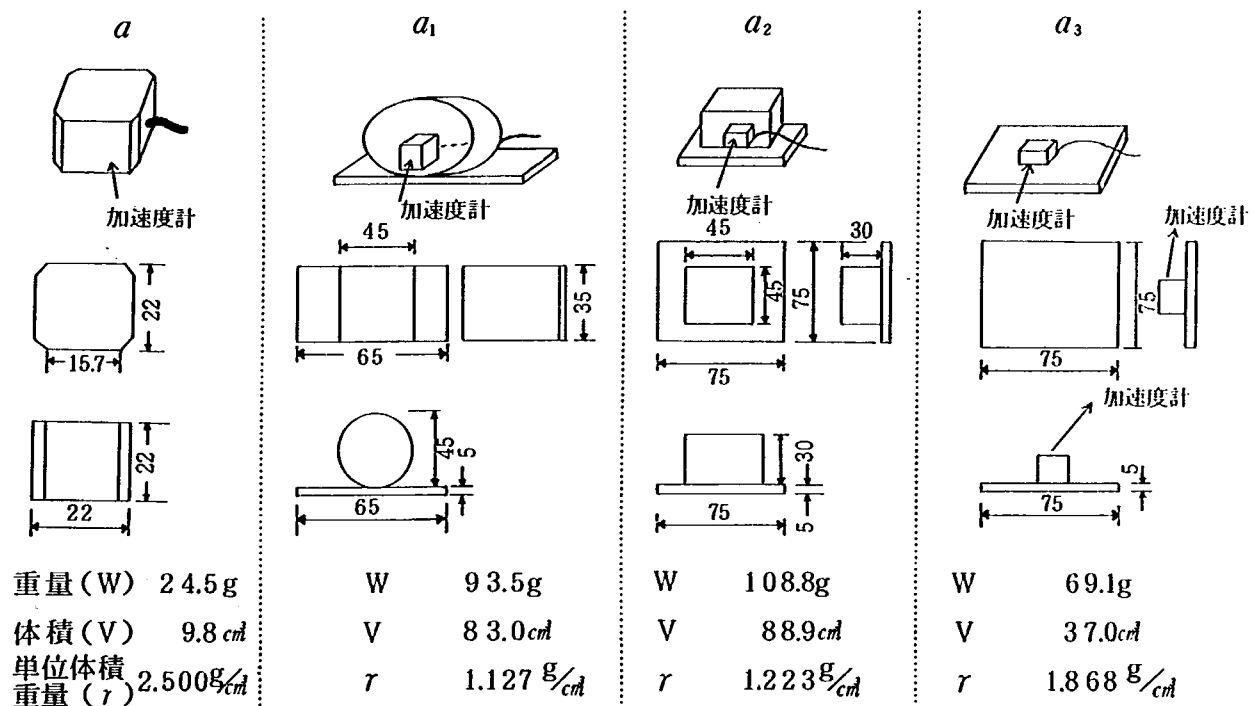


図-9 加速度計の埋設容器

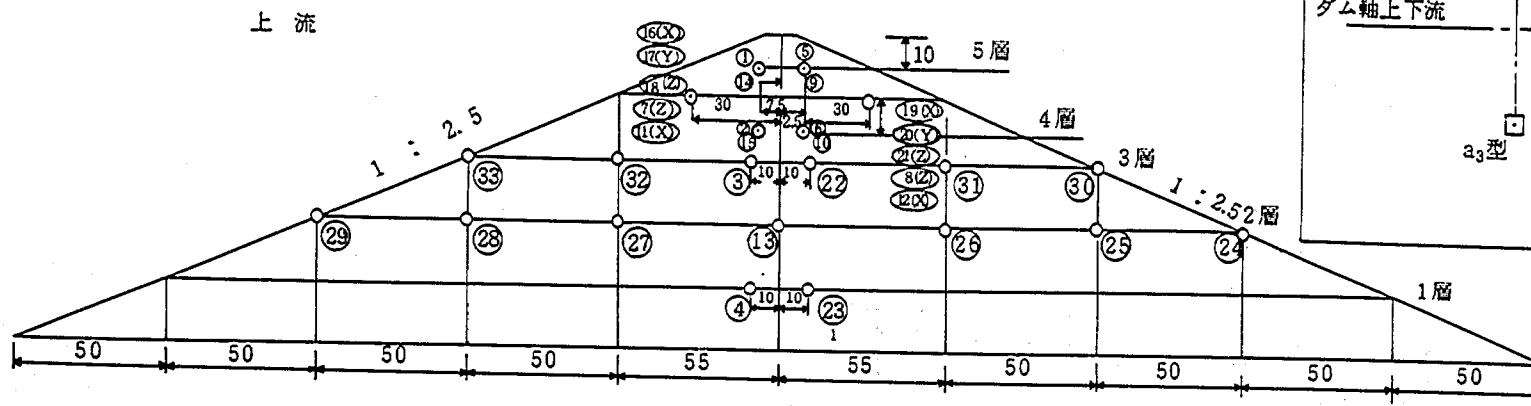


図-10 ケース 1 の加速度計配置図

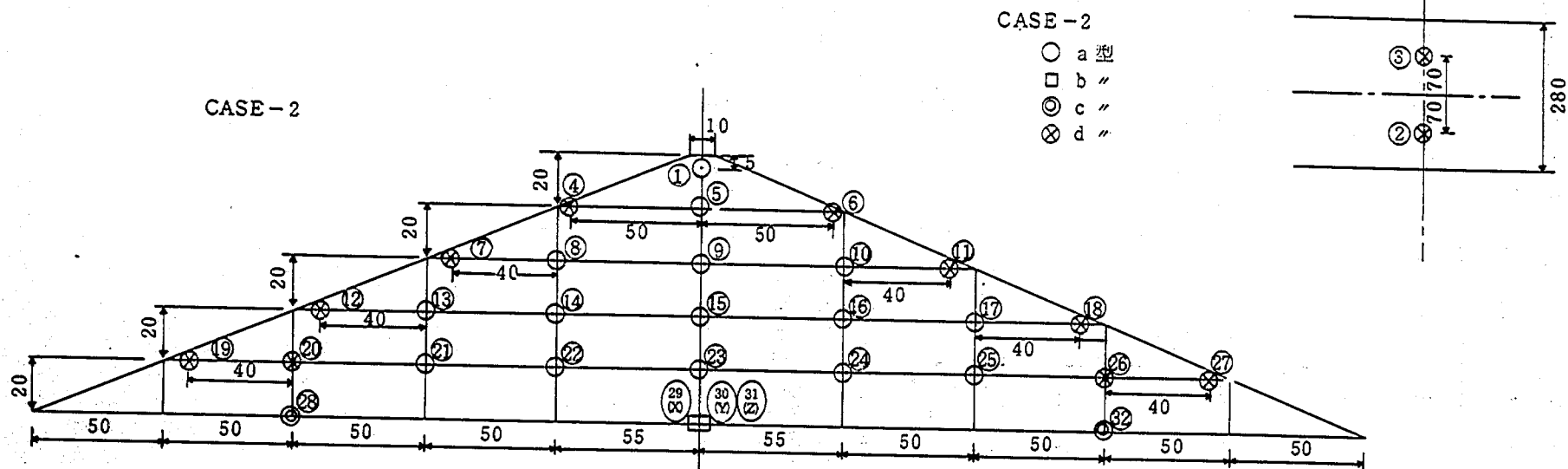
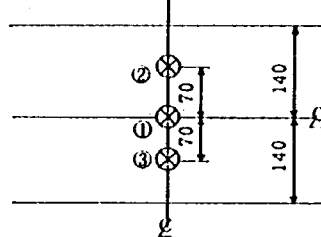


図-11 ケース 2 の加速度計配置図

ケース 3, 4, 5
に共通の記号

- a 型
- ⊙ c 型
- ⊗ d 型

ケース 3, 4, 5 に共通



ダム軸左右岸

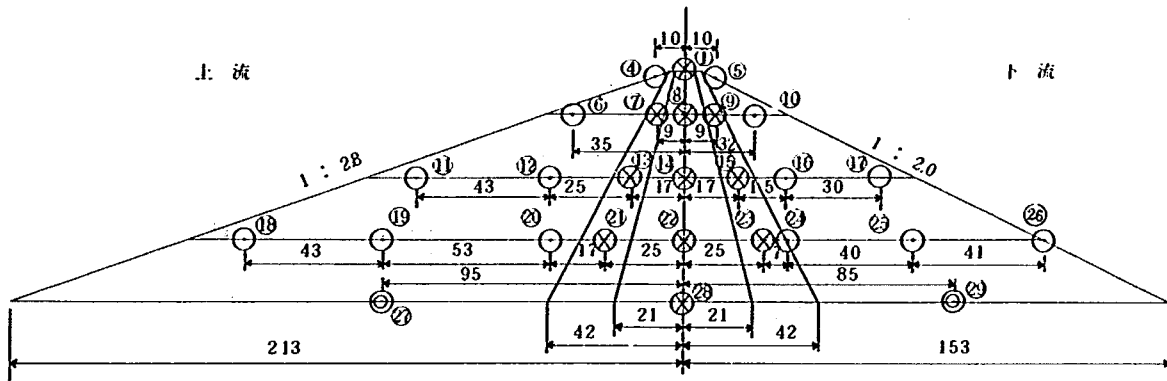


図-12 ケース 3 の加速度計配置図

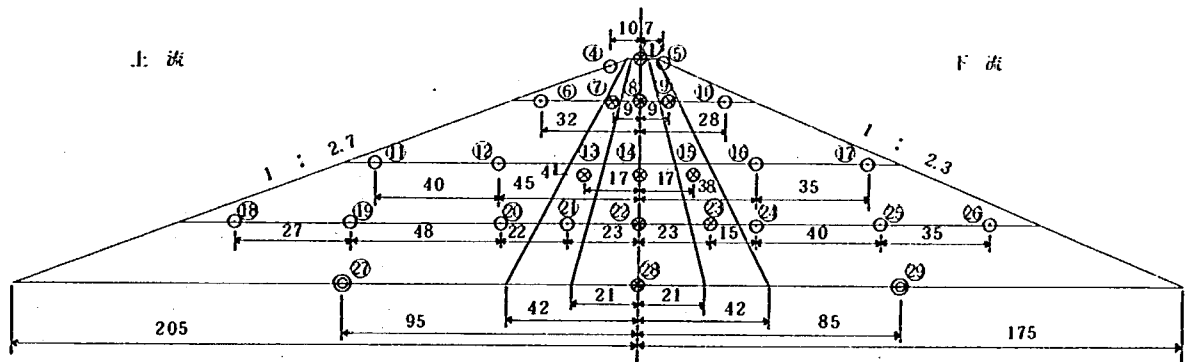


図-13 ケース 4 の加速度計配置図

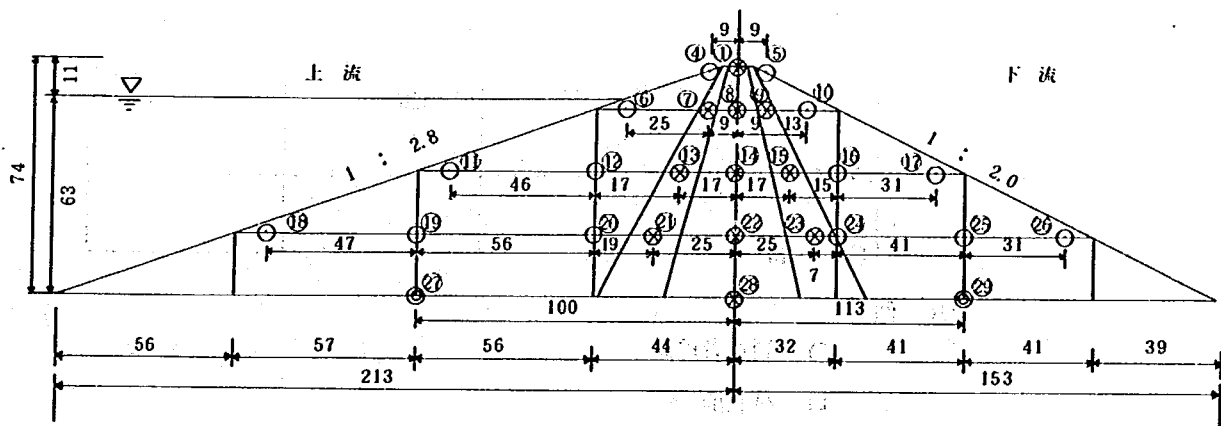
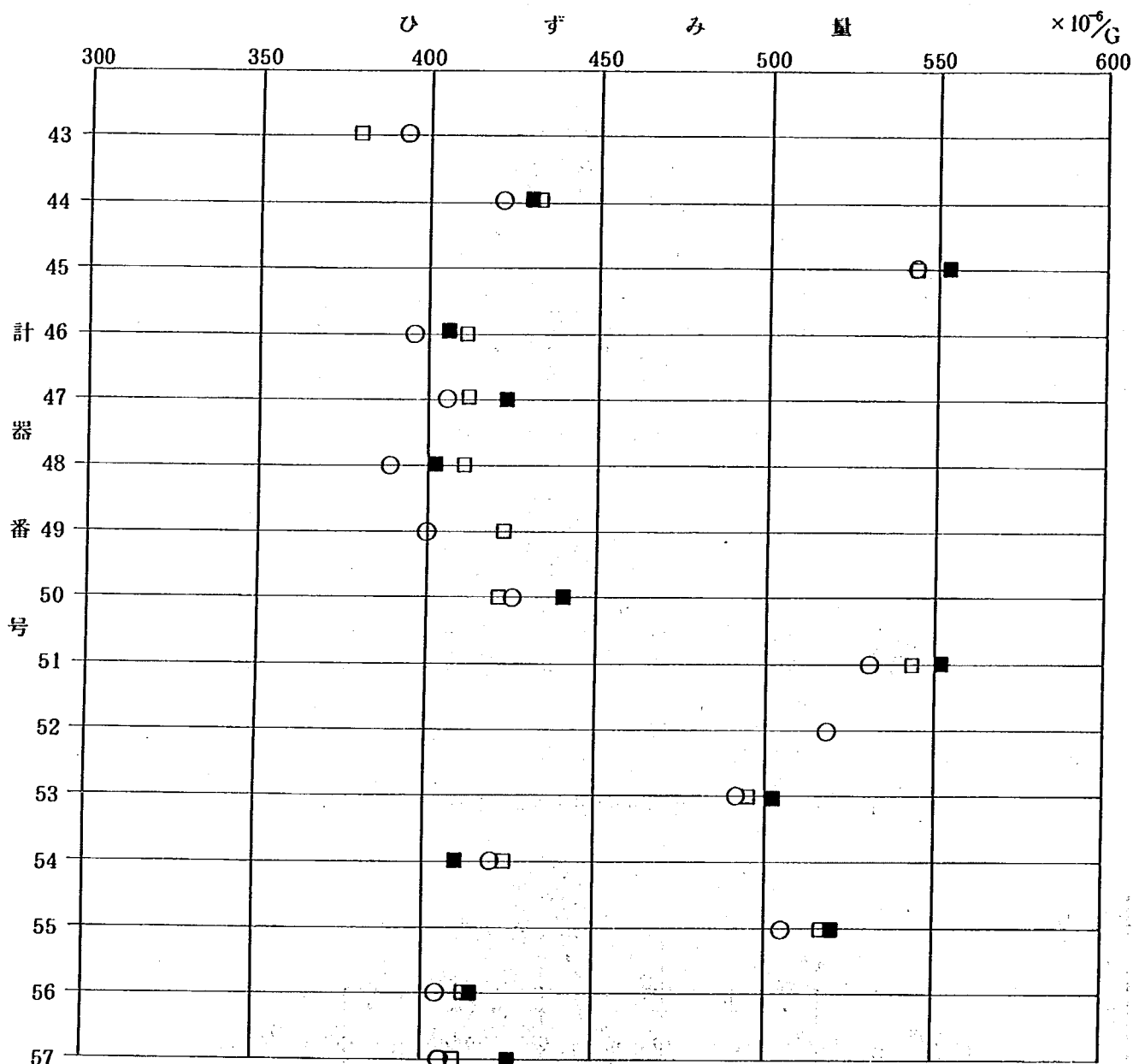


図-14 ケース 5 の加速度計配置図

3.5 加速度計の検定

加速度計の検定を a 型について行なった。検定方法は加速度計を正常な位置から 90° 傾けた時の値を 1 G として測定したものである。

図 - 15 は各計器毎に試験前後の検定値と製造者検定によるひずみ量を示したものである。試験前後の値は製造者検定に比べ小さな値を示したり、大きめの値を示したりしてはばらである。試験前、試験後の値を製造者検定と比べると最大 6 % 程度の差がある。



凡 例

○ 製造者検定

□ 試験前 "

■ 試験後 "

図 - 15 試験前後および製造者検定時の 1 G 当りのひずみ量

4 実験結果および考察

4.1 標準砂模型

4.1.1 加速度計埋設方法の検討

加速度計の適切な埋設方法を検討するために加速度計を各種の容器に入れて試験した。図-16は図-10に示すように天端近くの同一標高(90cm)で15cm四方の4隅に各種の容器を用いて加速度計を設置したものを入力加速度25galで5~50Hzにかけてスウィープ試験を行なった時の結果を示したものである。この図では加速度計がa₂型の容器に入れた時の応答に対して各種の加速度計の応答を比較したものである。入力加速度によって容器の有無、容器の形状の差がわずかに生じているが、±5%の範囲内にある。入力加速度を100galにすると図-17に示すように周波数40Hz以上では、a₁型の容器を除いて±5%の範囲に納まるようである。この結果、容器形状にあまり問題はないと考えられる。ただ、模型材料の密度との整合性およびロック材料に埋設するために必要な安定性を考慮するとa₂型の容器に入れた方が最もよい埋設方法であると考えられる。

4.1.2 堤体の応答特性

天端近くの応答加速度曲線を図-18に示す。縦軸は堤体基礎に加速度計を設置していないので応答加速度で示した。応答加速度曲線には主に2つのピークが認められる。第1のピークは15~20Hzの間に第2のピークは30Hz~40Hzの間にある。周波数の低い方から第1次、第2次共振周波数を示している。この図から第2次共振周波数は入力加速度が大きくなるにつれて小さくなっていくことが認められる。第1次共振周波数もわずかではあるがこの傾向が認められる。図-19は、同じ箇所での入力加速度毎の位相差曲線を示す。

次に第2次共振周波数時の応答加速度分布を図-20に示す。入力加速度が25galおよび100galではダム軸中央が法面に比べかなり大きい応答加速度を示している。この大きさは同一標高(堤高の $\frac{2}{5}$ 付近で)で比べると中央の応答は法面の3倍程度の大きさを示している。しかし、入力加速度が200galでは入力加速度100galまでの大きさではなくなり天端近くではほぼ同一の応答加速度となっている。また、模型はダム軸を中心に左右対象であるため上流法面側と下流法面側の応答加速度は同一になるはずでありこの結果はほぼ満足した値となった。ダム軸天端の左右岸方向で中央とそれより離れた地点の応答加速度を比較すると次の様になる。つまり中央よりはずれたところでは中央に比べ約5~6割の応答加速度となり砂箱側面の拘束の影響が認められる。

入力加速度 100 gal	天端中央	約 1000 gal
	中央よりはずれたところ	約 520 ~ 610 gal

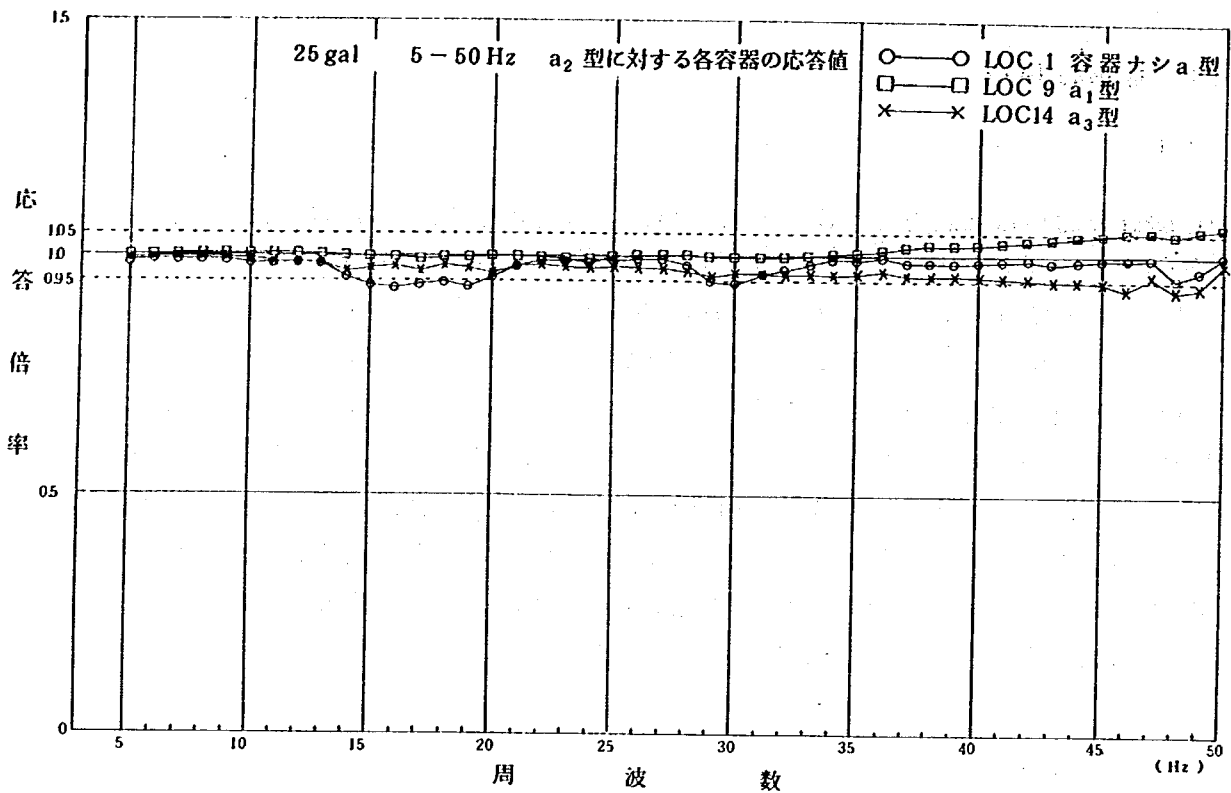


図-16 各種容器による応答倍率の比較 (入力加速度 25 gal)

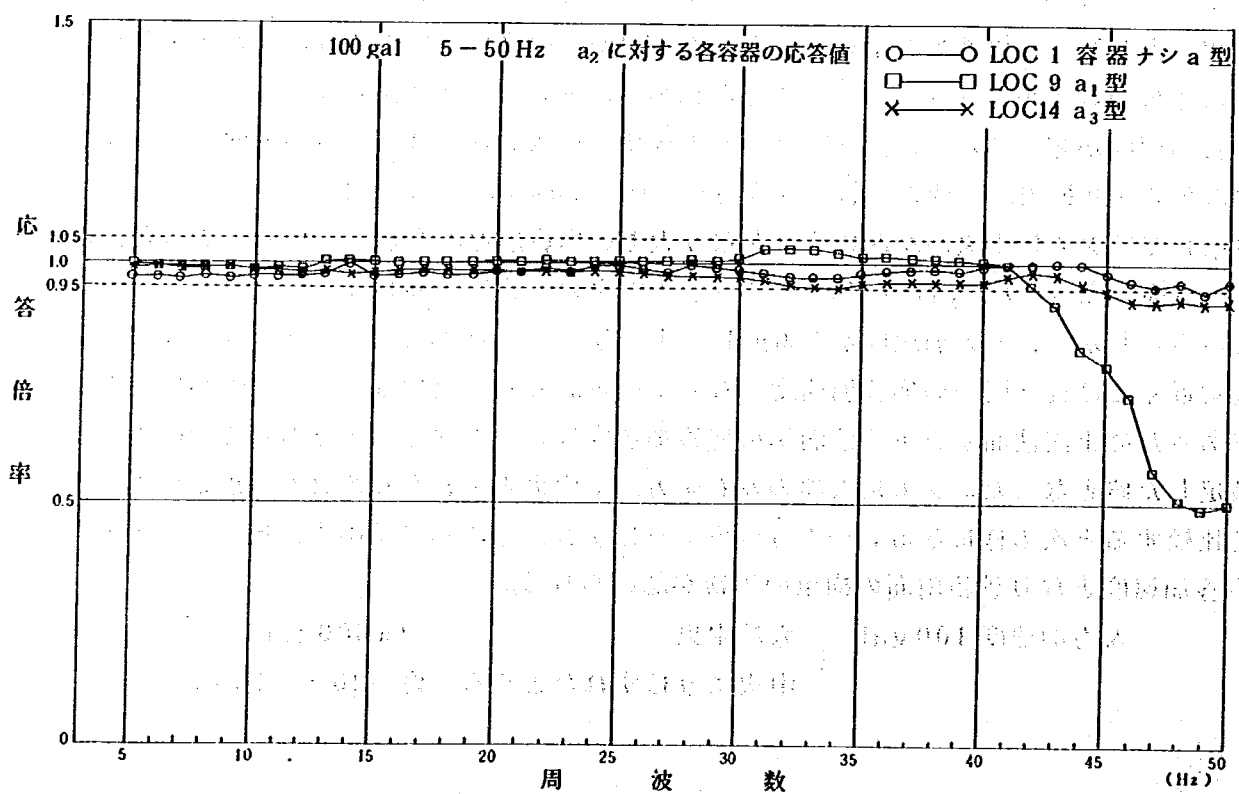


図-17 各種容器による応答倍率の比較 (入力加速度 100 gal)

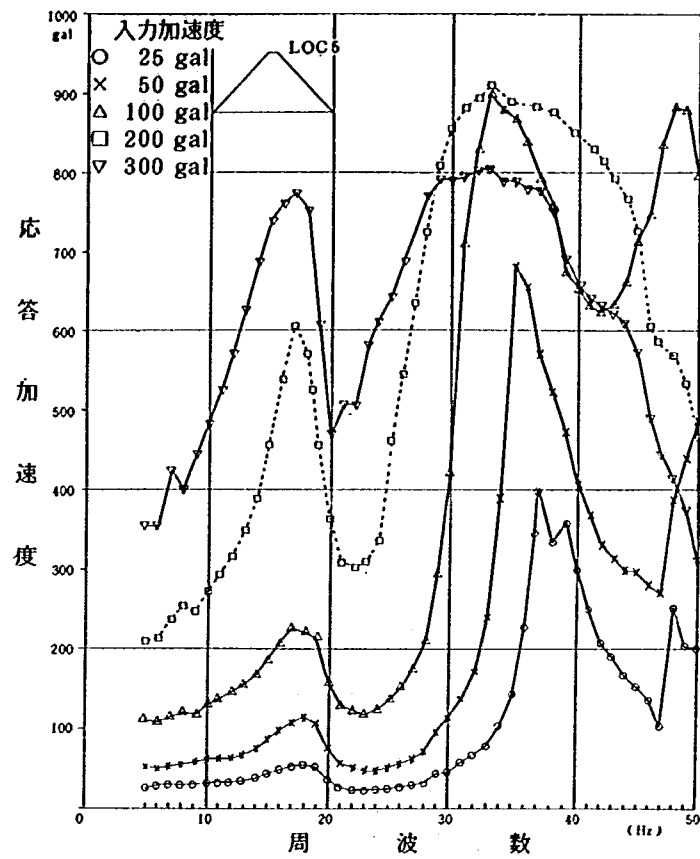


図-18 ケース1の応答加速度曲線

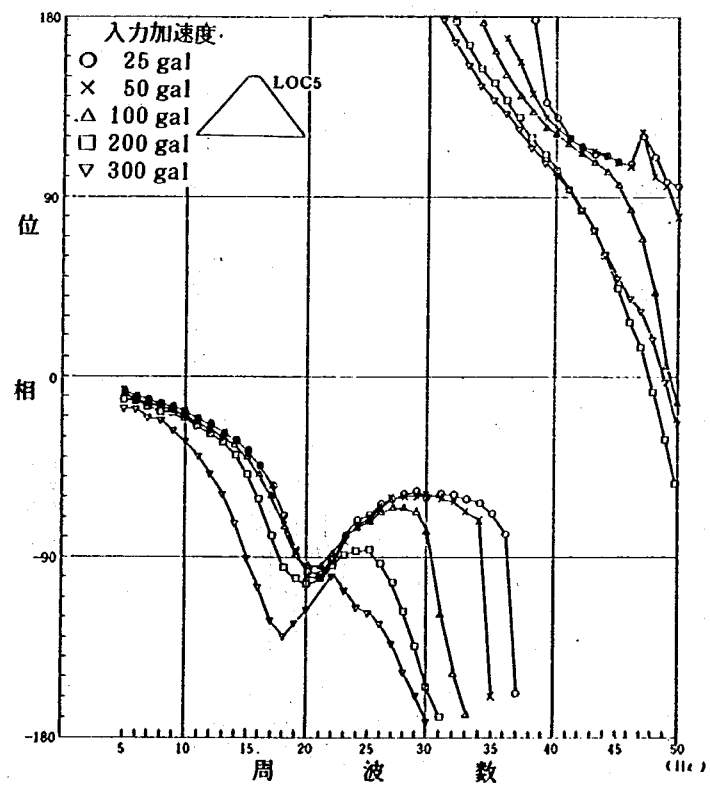


図-19 ケース1の位相曲線

入力加速度 25 gal
周波数 37 Hz

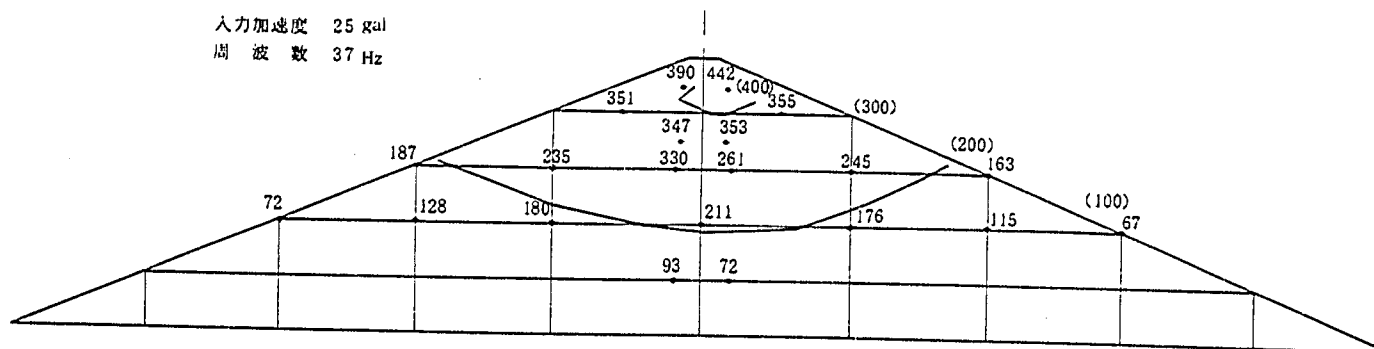


図-20a 応答加速度分布

入力加速度 100 gal
周波数 33 Hz

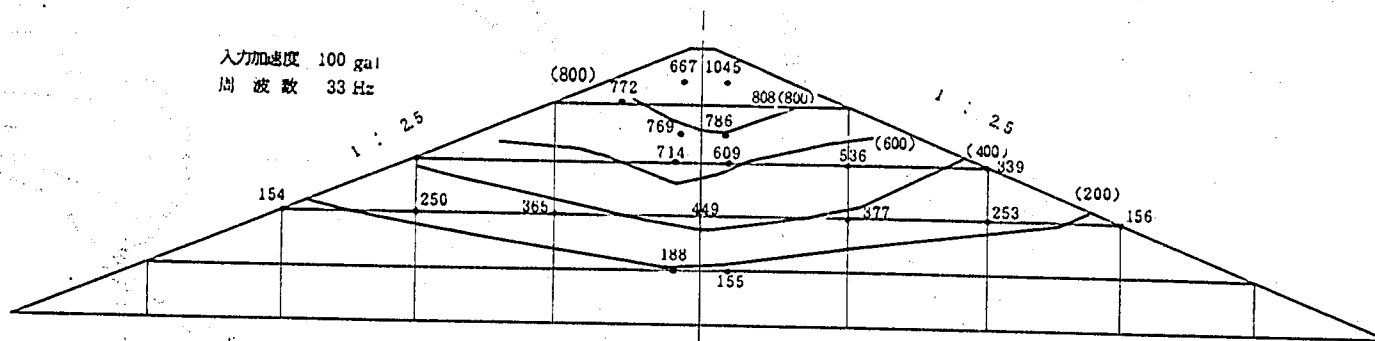


図-20b 応答加速度分布

入力加速度 200 gal
周波数 33 Hz

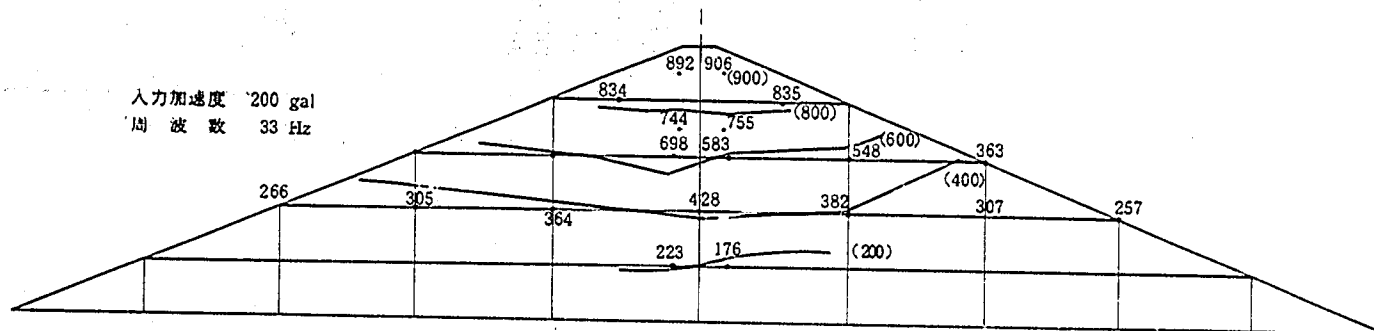


図-20c 応答加速度分布

図-20 標準砂模型の応答加速度分布（天端が共振時の周波数とする）

4. 1. 3 周波数スイープによる堤体の崩壊形態

図-21は約25galの加速度のもとで周波数スイープ時において加速度を増加させていった時の堤体の崩壊の状況を示したものである。堤体の崩壊は入力加速度150galより始まる。150galでは天端中央近くに無数の小さなキレツが生じ乾いた砂がくずれ始める。入力加速度が段々大きくなるにつれて崩壊区域が広がる。入力加速度300galでは天端付近だけでなく、法尻にもクラックがダム軸左右岸方向と平行に生じる。このクラックの口の開きは1.5cm程度である。入力加速度500galでは堤体の形が試験前と全く異なり、天端が約30cm程度の沈下を生じる。

4. 1. 4 周波数を一定とした加速度レベルのスイープ試験

ケース1と異なり周波数を一定にして加速度レベルのスイープ試験を行なった時の堤体の応答について検討を行なう。

図-22aは周波数を25Hz、図-22b～図-22cは周波数を30Hzにして天端および堤高の $\frac{4}{5}$ の標高における応答加速度の履歴を示したものである。縦軸を応答倍率で示しているがこの応答倍率は次の様にして求めたものである。

$$\text{応答倍率} = \frac{\text{任意点の応答加速度}}{\text{基礎の応答加速度}}$$

図-22aと図-22bを比較すると応答倍率の履歴が全く異なる形状を示していることがわかる。図-22aは共振周波数とかけ離れている周波数で加振したものであり、入力加速度を150galまで繰り返し与えても応答倍率はほぼ1.5倍と変わらない。

一方、図-22bはほぼ共振周波数に近いところで加速度の繰り返しを与えている。この結果は、天端に着目すると入力加速度100galまでの応答倍率の履歴では往路の応答倍率はほぼ一定であり、復路の応答倍率は往路に比べ応答倍率がより小さくなり、25Hzの応答加速度の履歴とは全く異なる。さらに150gal、200gal、265gal、400galの応答倍率の履歴は、ほぼ入力加速度の約80galまでは入力加速度とともに応答倍率は増えていくが、それ以上では応答倍率は除々に減少していく。しかも、復路の応答倍率は往路に比べかなり小さい。

天端より低いLOC9でも図-22bのようにほぼ同じ傾向を示しているが、当然のことながらピークの応答倍率は小さくなるだけである。

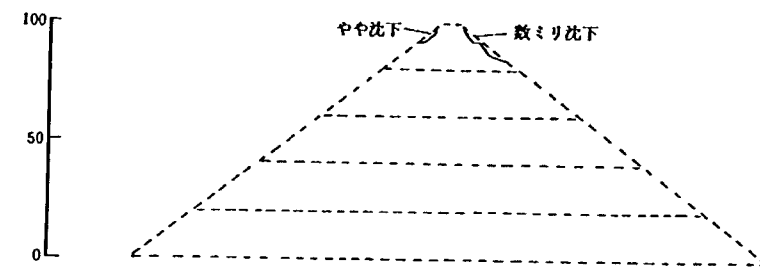
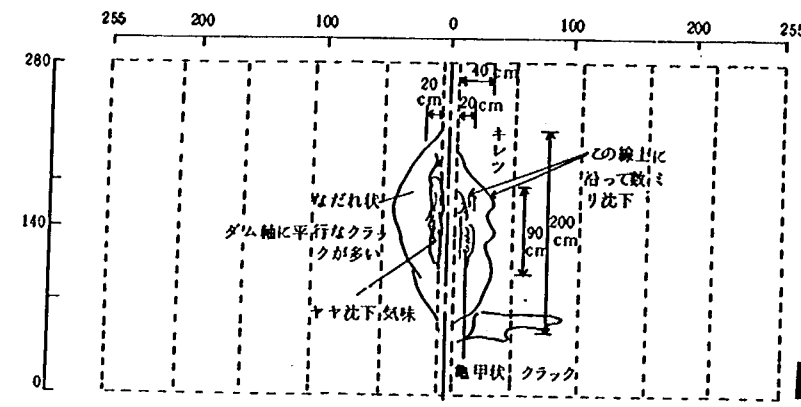


図-21 a 入力加速度 約 150 gal

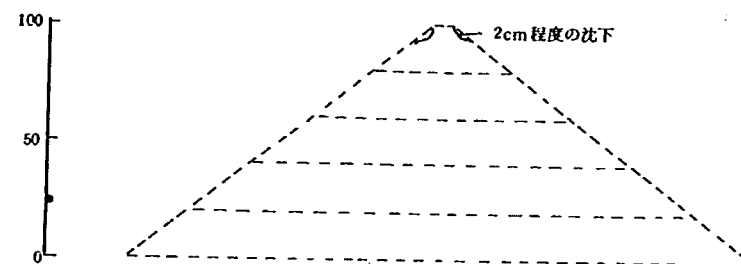
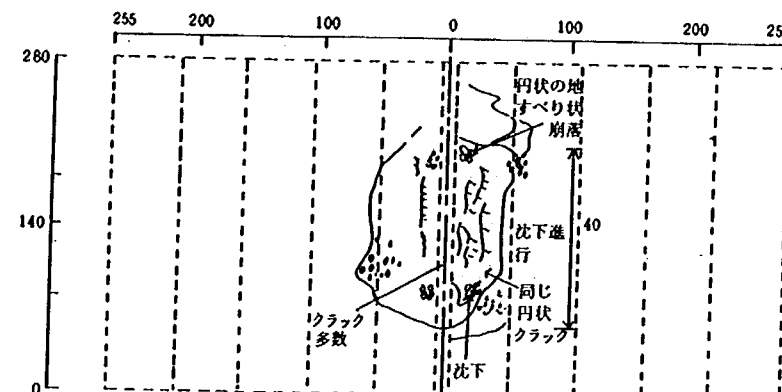


図-21 b 入力加速度 約 175 gal

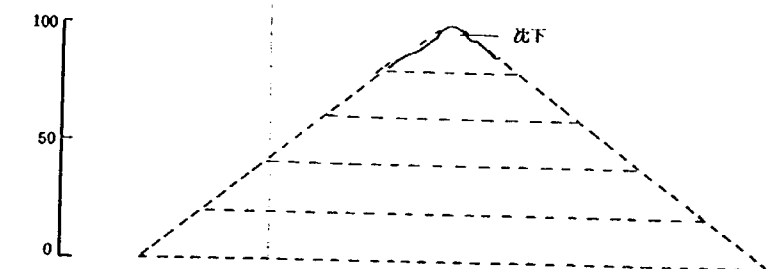
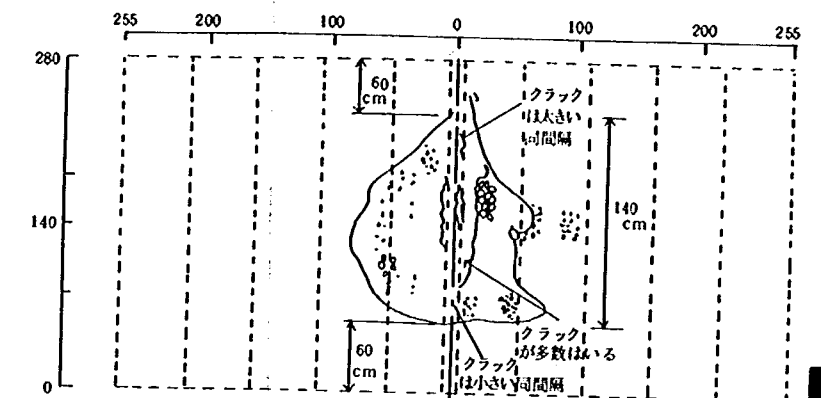


図-21 c 入力加速度 約 200 gal

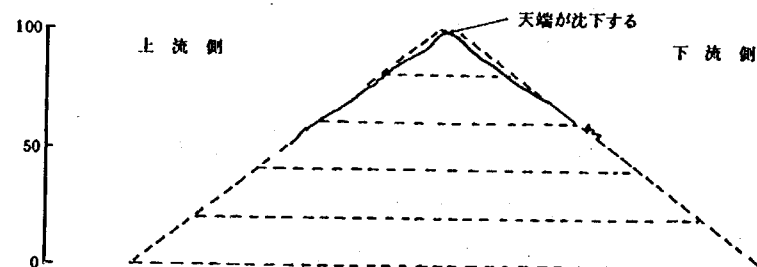
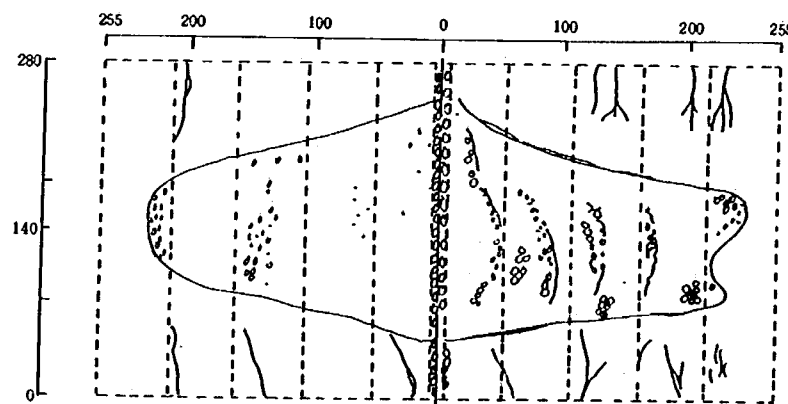


図-21 d 入力加速度 約 300 gal

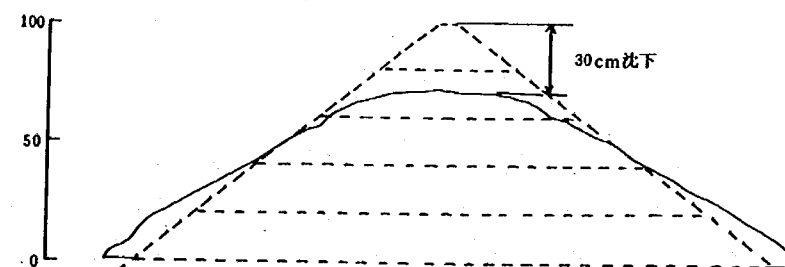
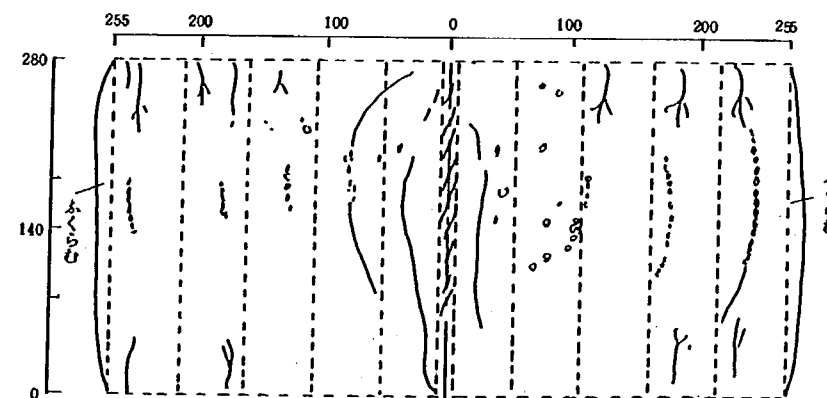


図-21 e 入力加速度 約 500 gal

図-21 標準砂模型の崩壊状況 (ケース1)

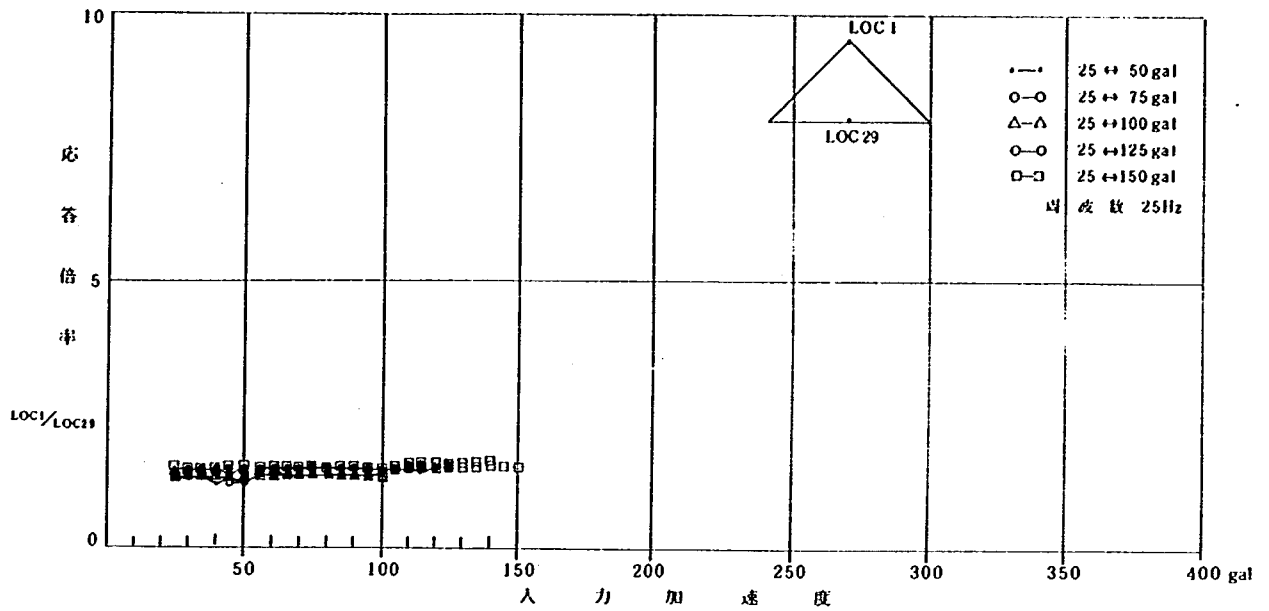


図-22a 応答倍率の履歴曲線 (LOC1/LOC29)

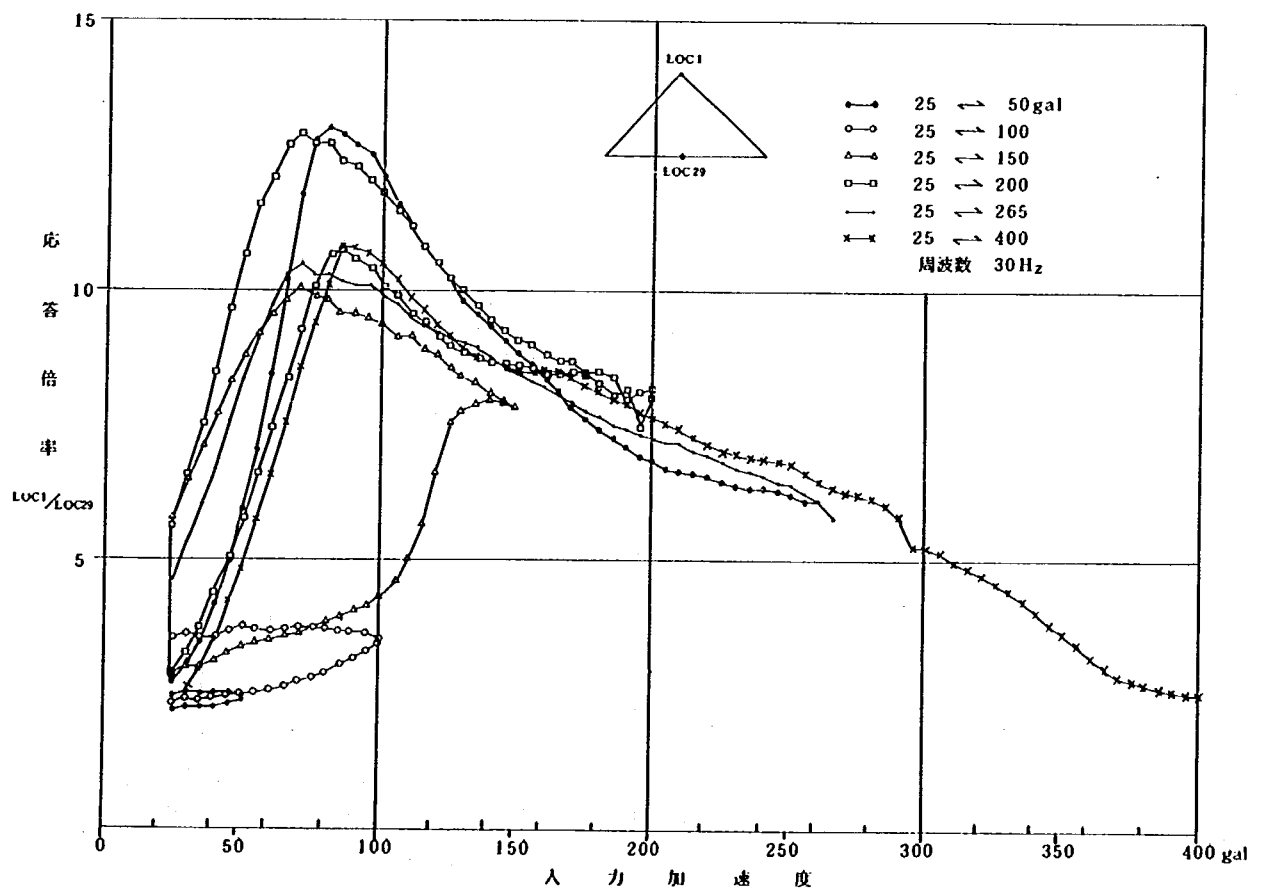


図-22b 応答倍率の履歴曲線 (LOC1/LOC29)

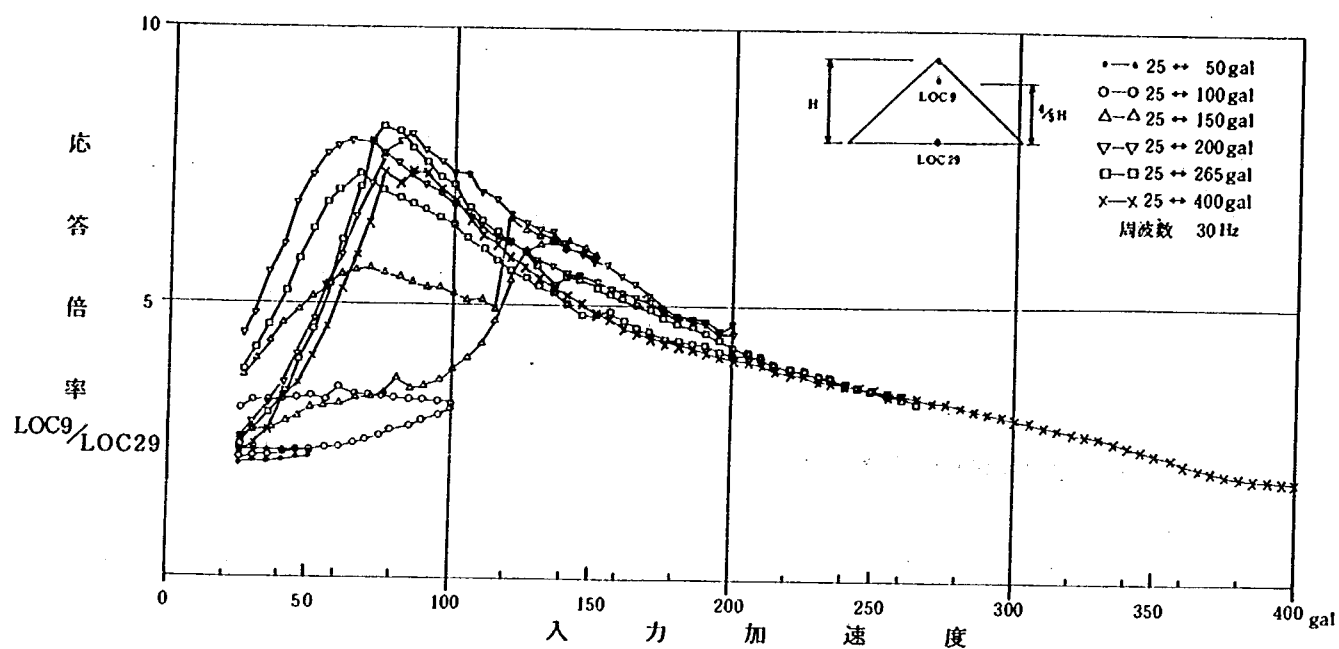


図-22c 応答倍率の履歴曲線 ($\frac{LOC9}{LOC29}$)

図-22 応答倍率の履歴曲線

4.2 ゾーン型ダム模型実験

4.2.1 法勾配の差による堤体の応答

比較したケースの法勾配が上流と下流が異なるので上流法勾配と下流法勾配をたし合わせた合勾配として取扱う。ケース 3 が合勾配 4.8, ケース 4 が合勾配 5.0 である。

1) 応答倍率

図-23 および図-24 は合法勾配がそれぞれ 4.8 および 5.0 の応答倍率曲線を示したものである。応答倍率曲線には 10gal においてはふたつのピークが, 25gal 以上においてはひとつのピークが認められる。ピークを周波数の低い方から第 1 次共振周波数および第 2 次共振周波数とする。この結果, 入力加速度が大きくなるに従い応答倍率は小さくなり, 共振周波数は低くなることが認められた。つまり堤体は非線型性を示していると言える。

図-25 はコア部天端の第 1 次共振周波数およびそのときの応答倍率の変化を入力加速度毎に表わしたものである。合勾配が 4.8, 5.0 に関係なく第 1 次共振周波数は入力加速度とともに減少しており合勾配が 4.8 の方がどの入力加速度でも小さい。応答倍率は入力加速度 100~150gal までは急激に減少するがそれ以上の入力加速度では減少の度合いがあまりない。合勾配による比較は入力加速度 50gal から 175gal の間で合勾配の小さい方が応答倍率は大きい。

また, 図-26 はコア部においてダム軸鉛直方向の名標高毎の応答倍率の変化を入力加速度をパラメーターとして示したものである。入力加速度 10gal および 25gal では応答倍率は標高が高くなるに従いほぼ直線的に増加するものの, 100gal, 200gal では堤高の 0.8H まで応答倍率の増加率は小さいが, 0.8H から天端にかけて急激に増加する曲線となる。従って入力加速度の大小によって標高毎の増巾率が一様でないと言える。

2) 往路と復路の応答倍率

周波数スウィープ試験を低い周波数から高い周波数にスウィープしたもの(往路)と高い周波数から低い周波数にスウィープしたもの(復路)の比較を行なう。図-27 は, 合勾配 4.8 におけるコア天端の入力加速度 100gal の応答倍率曲線の比較である。共振周波数は往路と復路ではほとんど変わらないが応答倍率は第 1 次共振周波数のときに約 1 割程度増える。

3) ダム軸左右岸方向および上下流方向の応答倍率

図-28 は合勾配 4.8 におけるダム軸天端の左右岸方向における入力加速度 25gal のときの応答倍率曲線を示したものである。ダム軸中央とそれより離れた地点の応答倍率曲線は異なる。ダム軸中央では共振周波数が主にひとつだけしかないが中央よりはずれた地点では 2 つの共振周波数がある。中央よりはずれたところの応答倍率は中央の約 $1/2$ になる。図-29 は合勾配 4.8 におけるダム軸中央の堤高 (H) の 0.8H の高さでの上流側, 下流側中央部の応答倍率曲線を示す。ただし入力加速度は 100gal である。応答倍率曲線全体にはあまり変化が認められないものの応答倍率の大きさが異なり, コア中央部ほどよく振動していることを示している。

(88.00.1 MCO.1) 堤高中央部 0.8H - 101

堤高中央部 0.8H のときの応答倍率の比較 (合勾配 4.8)

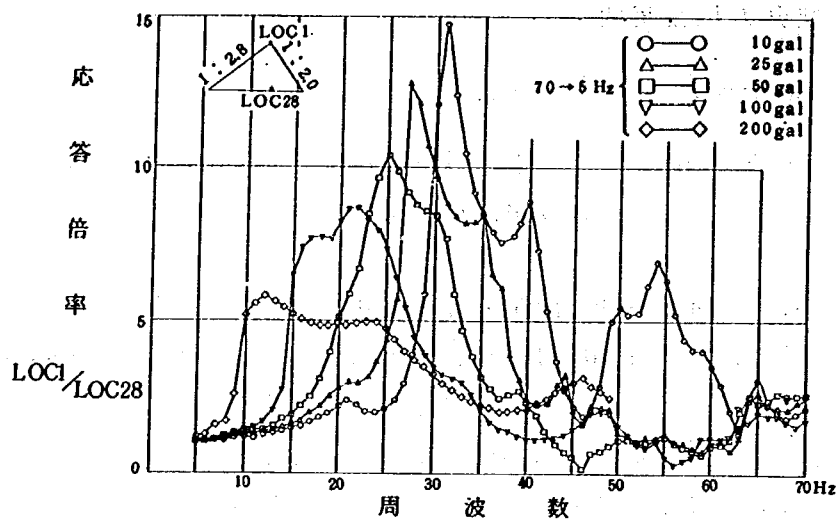


図-23 a 応答倍率曲線 ($LOC1/LOC28$)

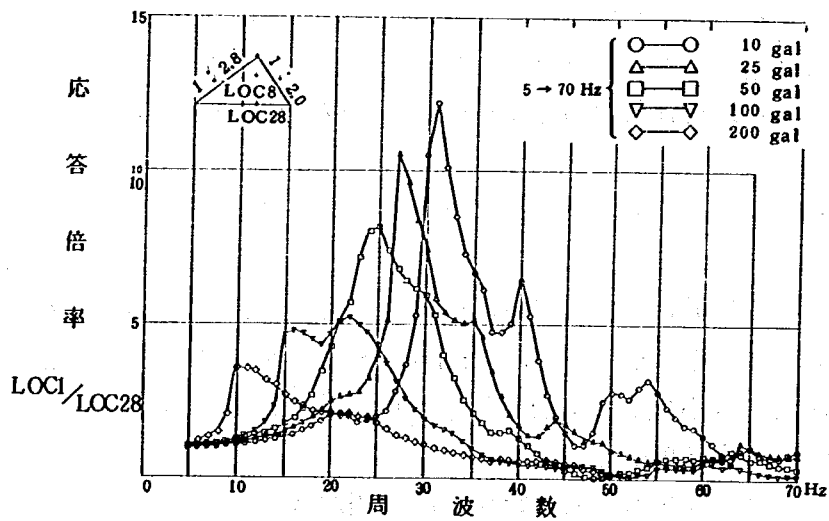


図-23 b 応答倍率曲線 ($LOC8/LOC28$)

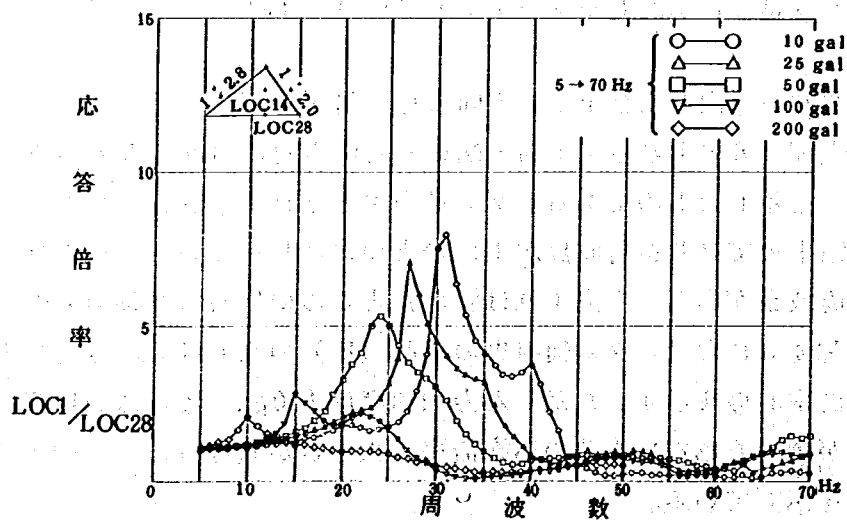


図-23 c 応答倍率曲線 ($LOC14/LOC28$)

図-23 合勾配 4.8 における各ロケーションの応答倍率曲線

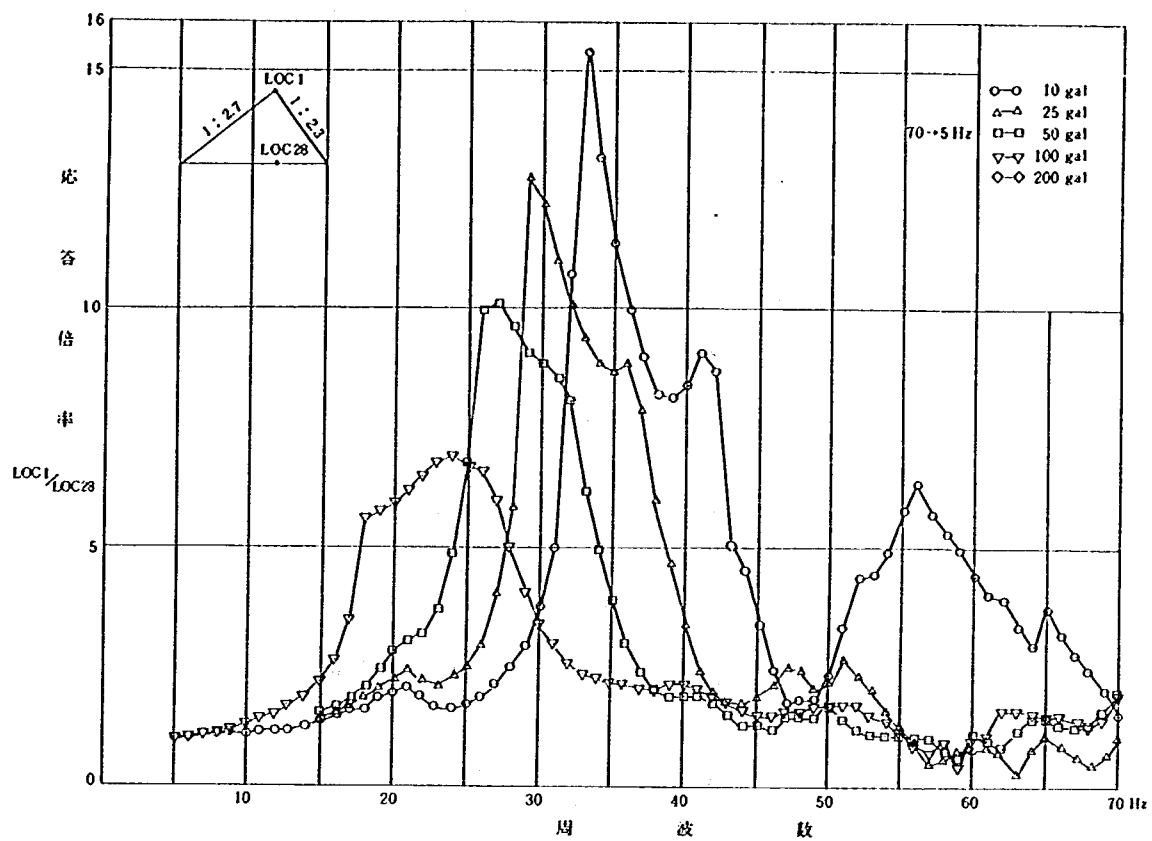


図-24 合勾配 5.0 における天端の応答倍率曲線(LOC1/LOC28)

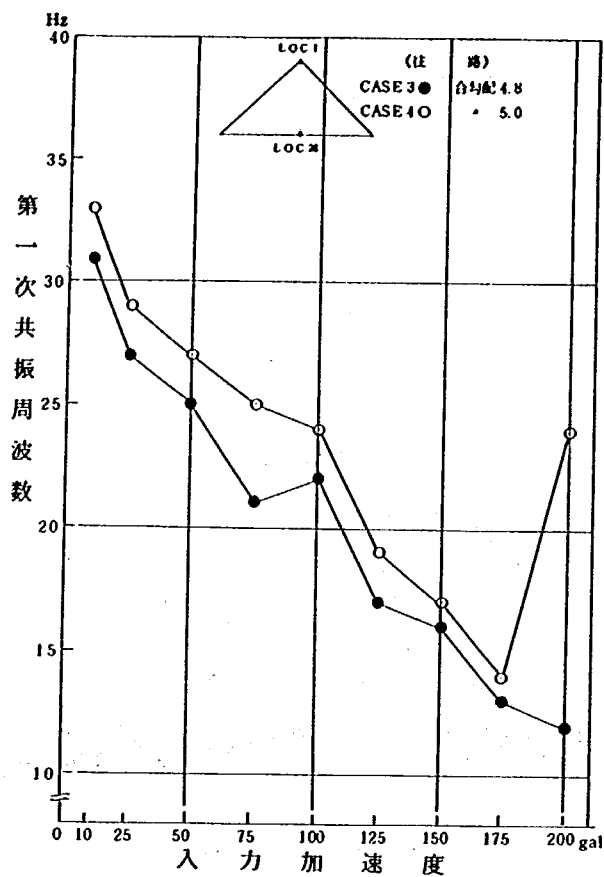


図-25 a 第1次共振周波数と入力加速度

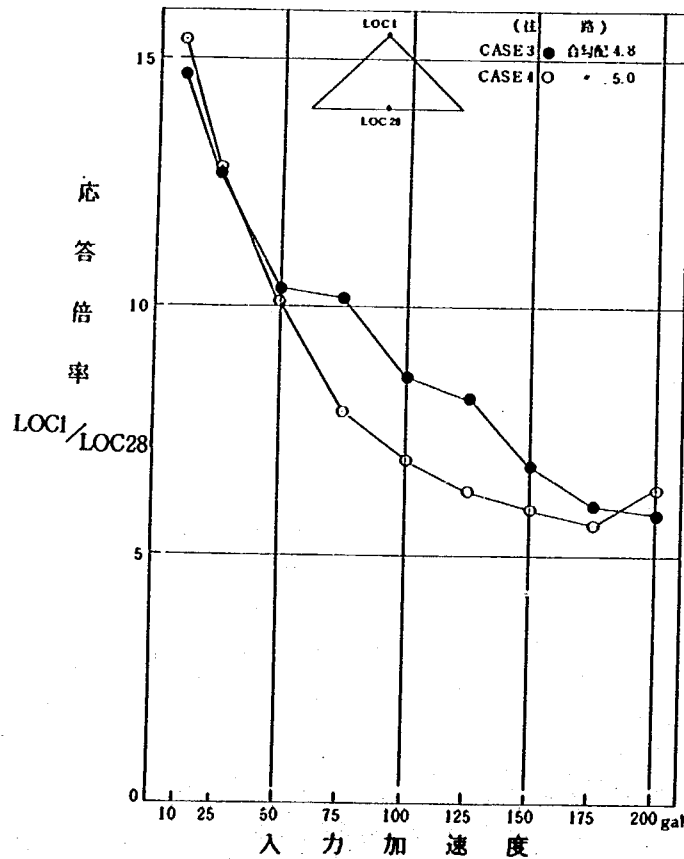


図-25 b 応答倍率と入力加速度

図-25 第1次共振周波数, 応答倍率と入力加速度
(ケース3とケース4の比較)

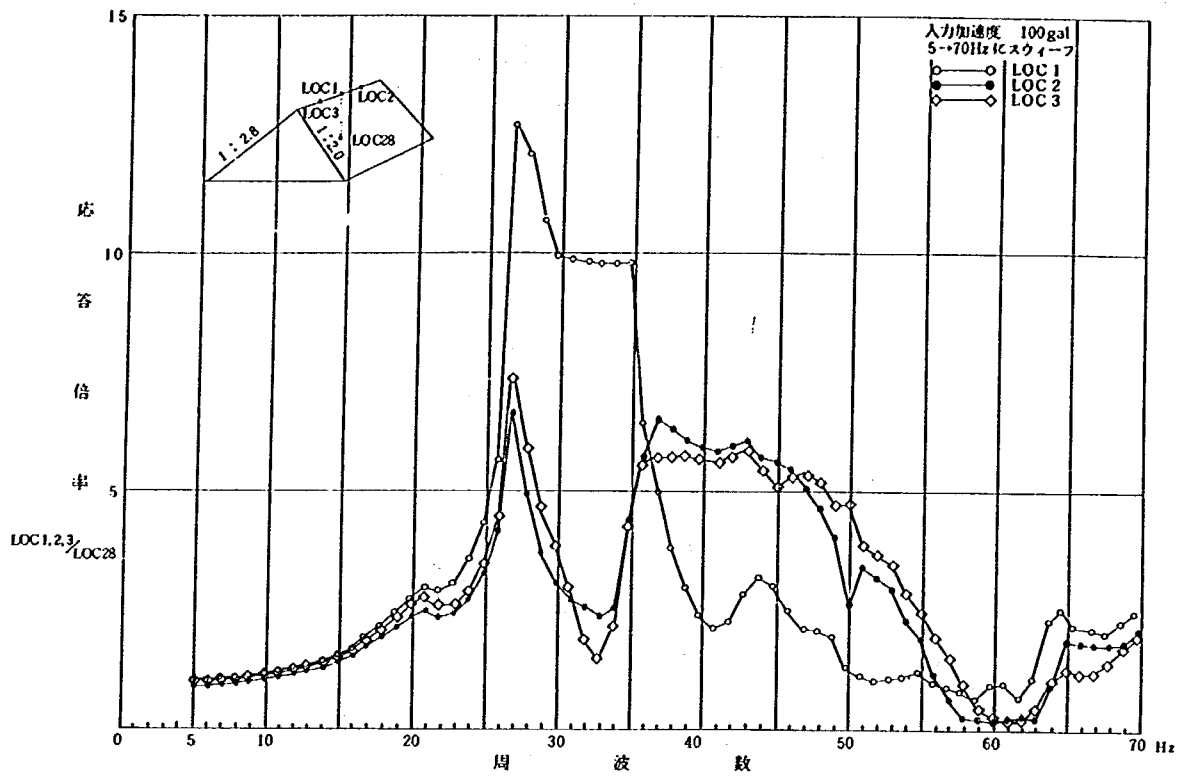


図-28 応答倍率と周波数 (ケース3の堤軸左右岸方向)

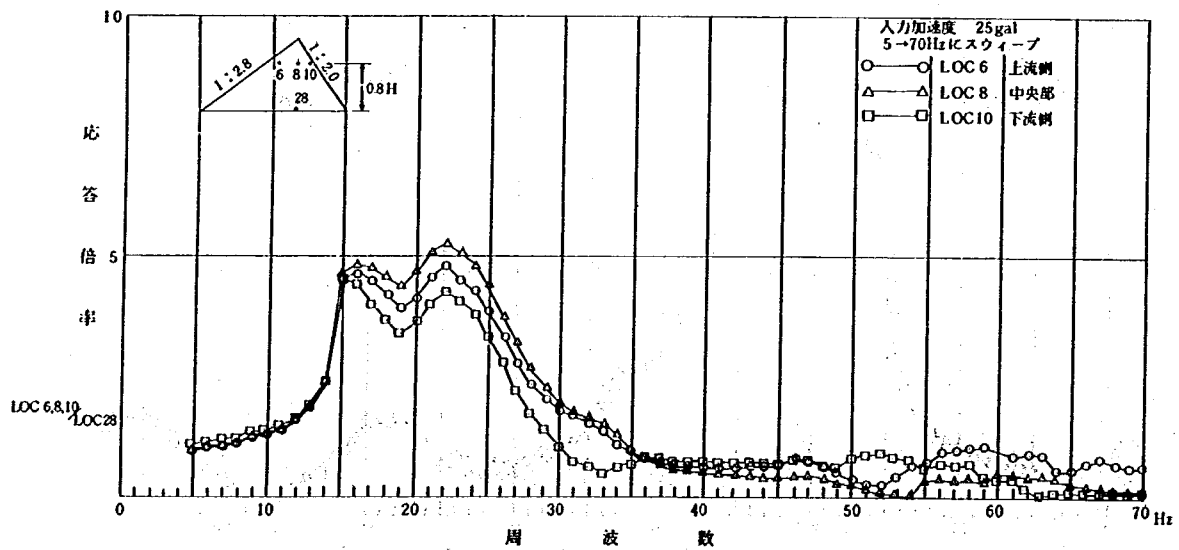


図-29 応答倍率と周波数 (ケース3の上下流方向)

4) 減衰定数

減衰定数を応答倍率の逆数としてコア天端で崩壊加速度に至るまで求めると図-30に示すような関係が求められる。入力加速度の増加に伴い減衰定数は除々に増えていく傾向にある。合勾配 4.8 に着目すると 10gal のとき減衰定数が 6 %程度にあったものが、100gal では10数パーセントとなる。また、合勾配の小さい方の減衰定数が小さくなり、往路と復路では復路の方の減衰定数が小さい。なお、減衰定数を応答倍率の逆数として求めた理由は動的解析から減衰定数を h とするとロックフィル天端の応答倍率はおおよそ $1/h$ となることがわかっていることによる。

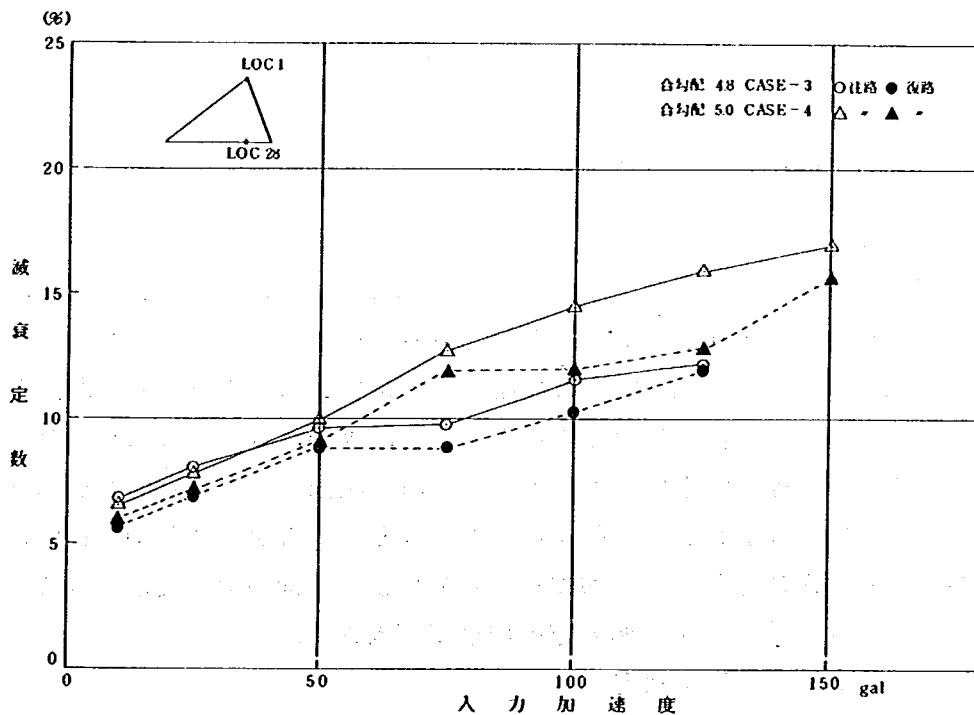


図-30 減衰定数と入力加速度 (ケース 3 とケース 4 の比較)

5) 位相差

コア天端について合勾配 4.8 の位相差曲線を入力加速度 10, 25, 100gal の場合について図-31に示す。この位相差はコア天端と基礎の位相差で表わしたものである。合勾配が 5.0 になってもこの位相差曲線には大差がないようである。

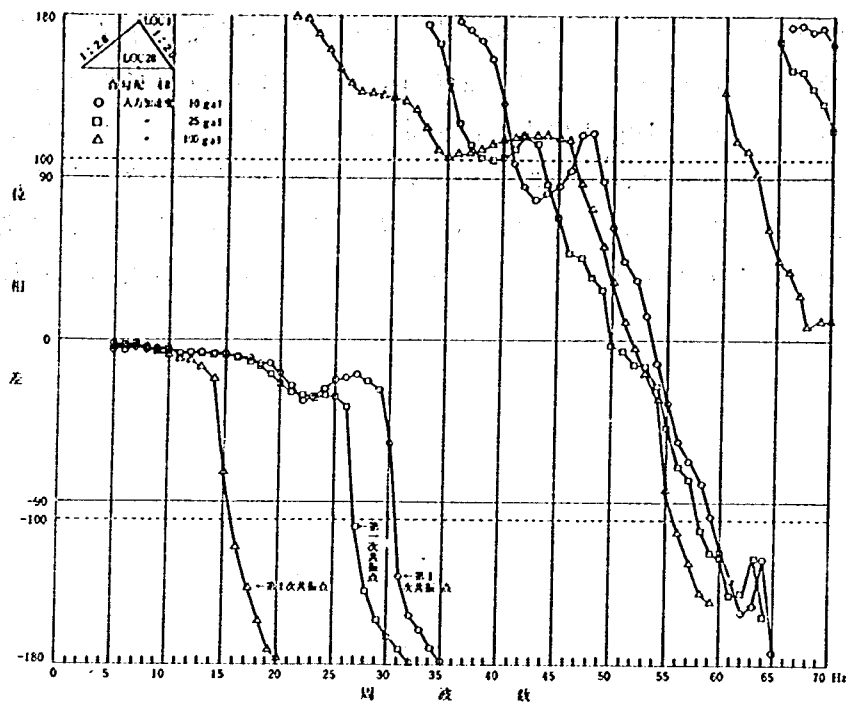


図-31 位相差と周波数（ケース3 合勾配4.8）

6) 応答加速度分布

図-32は合勾配が4.8の入力加速度25galおよび100galについて天端が共振時における周波数で各測点の応答加速度分布を示したものである。また図-33は合勾配が5.0のときの入力加速度25galおよび100galの応答加速度の分布である。これも天端が共振時のときの応答を示したものである。合勾配の差によって特にきわだった差は認められない。入力加速度が25galのときは堤体下部においてはコア部が法面より大きい応答加速度を示すが堤体上部ないし天端では法面がコア部より大きくなる。入力加速度が100galになると合勾配のちがいがわずかに生じる。合勾配が4.8では上流法面の加速度が大きくなる。しかし、合勾配5.0では天端だけ下流側の方の加速度が大きい。

7) 加速度スウィープによる崩壊状況

写真-3は25galの加速度より周波数スウィープ試験を行ないながら250～300galの加速度まで振動させたときの堤体の崩壊状況について示したものである。なお、法面崩壊の観察は下流法面に着目した。ケース3が2.0の勾配、ケース4が2.3の勾配である。勾配の緩急に関係なく崩壊は天端中央の不安定な粒子より始まる。崩壊の拡大は堤軸方向に半月状に拡大していきコア部が徐々に突き出してくる。写真からわかるように斜面のゆるい方が深層にわたって崩壊する崩壊区域は狭い。しかし、急な勾配は崩壊範囲が法面全体にわたって急激に拡大していくようである。

崩壊加速度を天端中央のロック部の下流側に設置した加速度計が下流法面に滑り出した時と考えて比較すると、次のような値が得られる。

CASE 3 (下流法勾配 1:2.0) 125gal

CASE 4 (" 1:2.3) 150gal

つまり、下流法勾配の急な場合の崩壊加速度はゆるい方の約80%となる。

天端 (LOC1) が共振周波数 (27 Hz) における
各測点の応答加速度

5 → 70 Hz にスイープ

入力加速度 25 gal

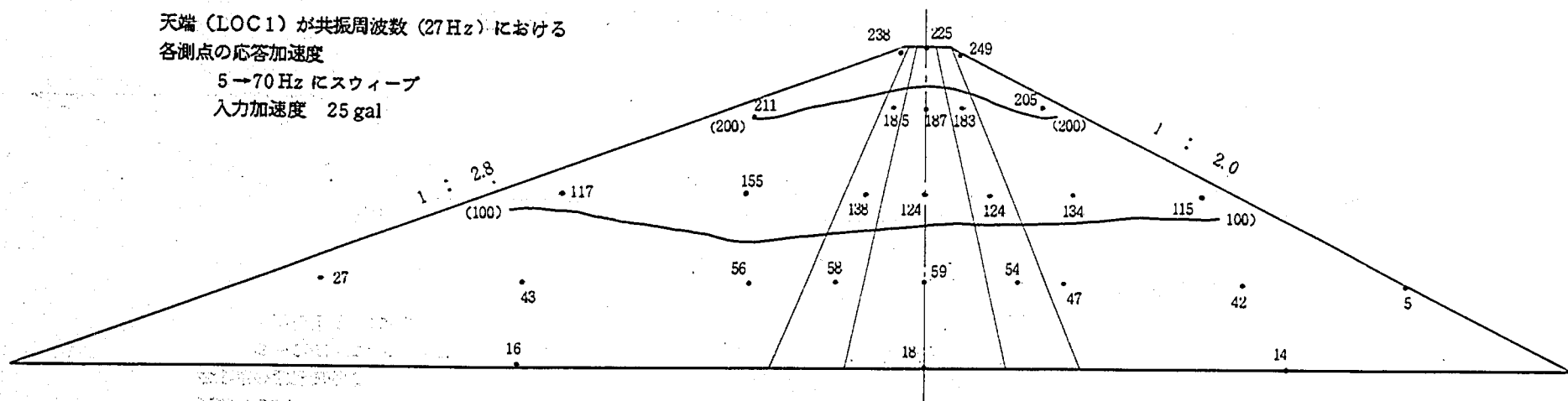


図-32a 応答加速度分布 (入力加速度 約 25 gal)

天端 (LOC1) が共振周波数 (22 Hz) における
各測点の応答加速度

5 → 70 Hz にスイープ

入力加速度 100 gal

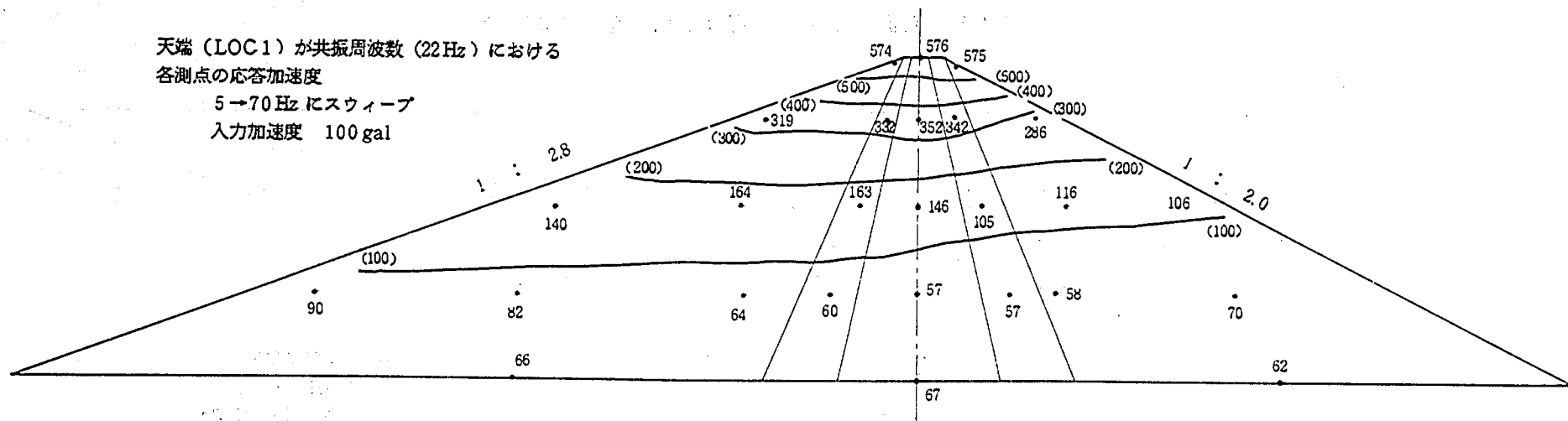


図-32b 応答加速度分布 (入力加速度 約 100 gal)

図-32 応答加速度分布 (ケース 3)

天端 (LOC1) が共振周波数 (29 Hz) における
各測点の応答加速度
5 → 70 Hz にスイープ
入力加速度 25 gal

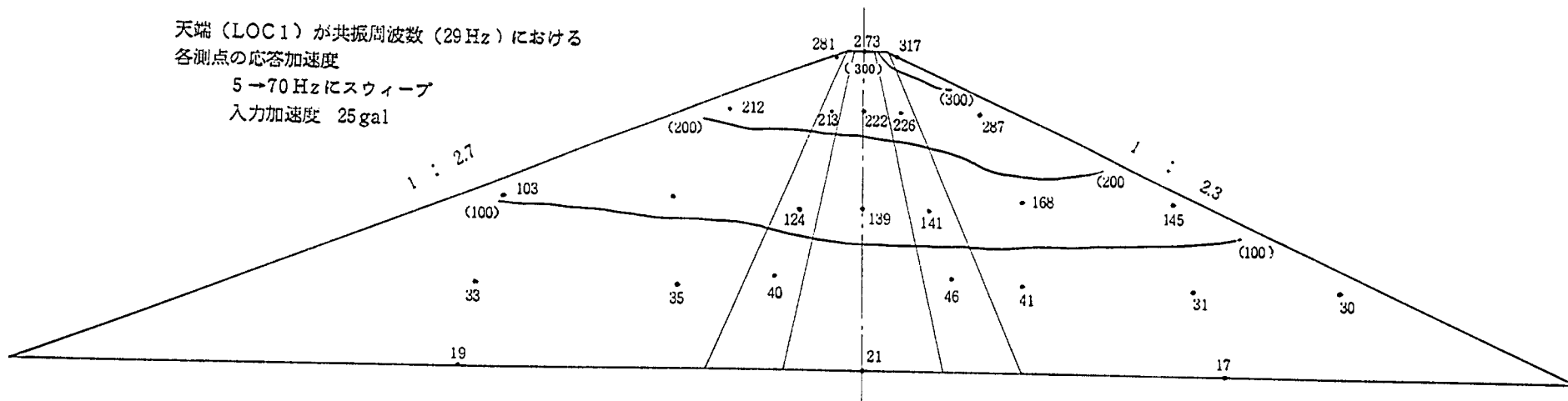


図-33a 応答加速度分布 (入力加速度 25gal)

天端 (LOC1) が共振周波数 (24 Hz) における
各測点の応答加速度
5 → 70 Hz にスイープ
入力加速度 100 gal

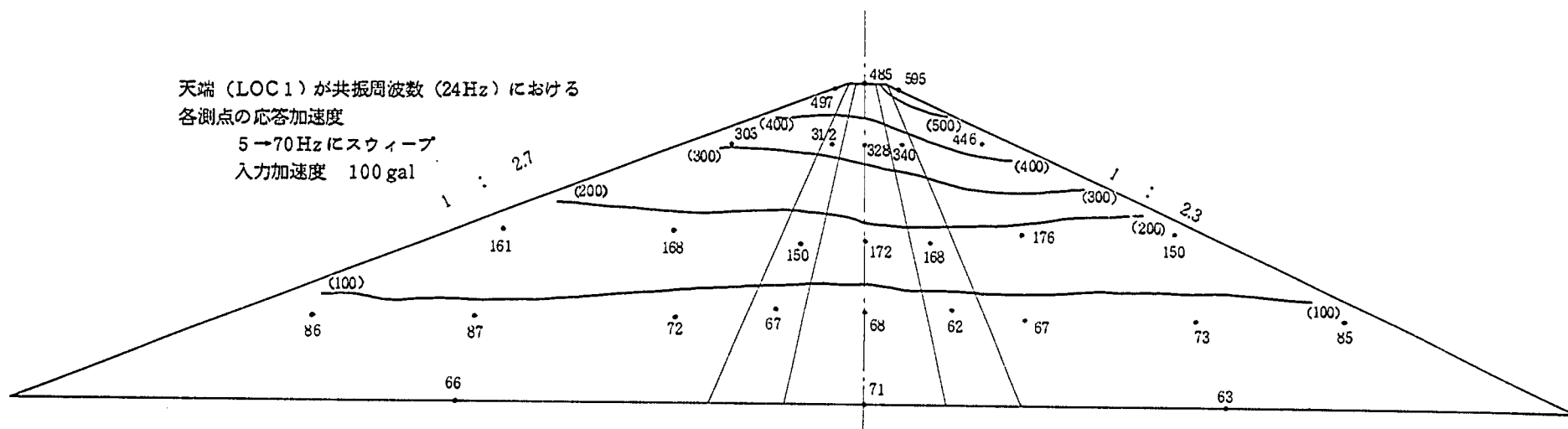
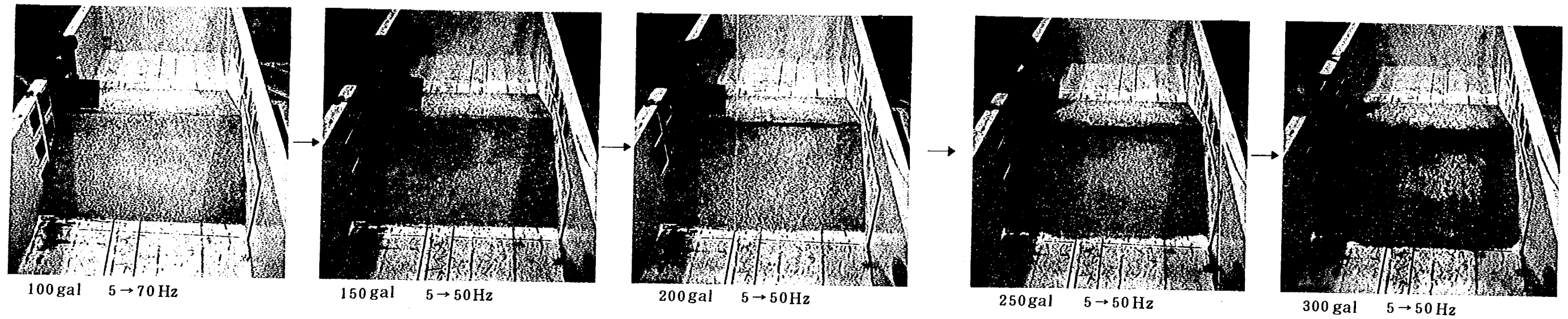


図-33b 応答加速度分布 (入力加速度 100gal)

図-33 応答加速度分布 (ケース 4)

合勾配 4.8



合勾配 5.0

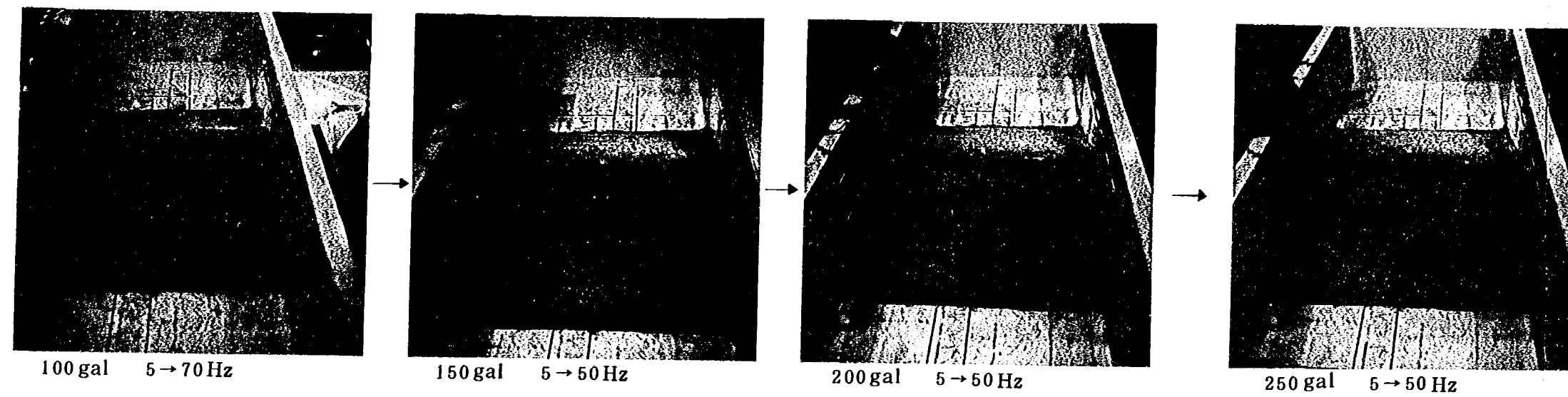


写真-3 ゾーン型ダム模型の崩壊状況（ケース3とケース4の比較）

4.2.2 湛水の有無による堤体の応答

ケース5の実験をケース3の実験と比較して湛水の有無についてまとめると次の様になる。

1) 応答倍率

図-34は湛水時と空虚時のコア天端の応答倍率を入力加速度 100gal で比較したものである。さらに図-35は入力加速度によって第1次の共振周波数およびそのときの応答倍率がどう変化するかを示したものである。第1次共振周波数は湛水時にどの入力加速度でも6Hzほど異なる。第1次共振周波数時の応答倍率も空虚時の6~7割程度となる。

低い周波数から高い周波数にスイープしたもの（往路）と高い周波数から低い周波数にスイープしたもの（復路）の比較は図-36に示すように共振周波数にはほとんど変化がないが応答倍率では空虚の場合とは異なり往路の方が復路に比べ広い周波数範囲内においてわずかに大きくなるようである。

図-37は堤高(H)の0.8Hのところでの上流側と下流側の共振周波数と応答倍率を比較したものである。湛水することによって共振周波数には差が出ないものの応答倍率に影響が生じる。湛水した場合が上流側、下流側に関係なく小さな応答を示すことがどの入力加速度でも言える。

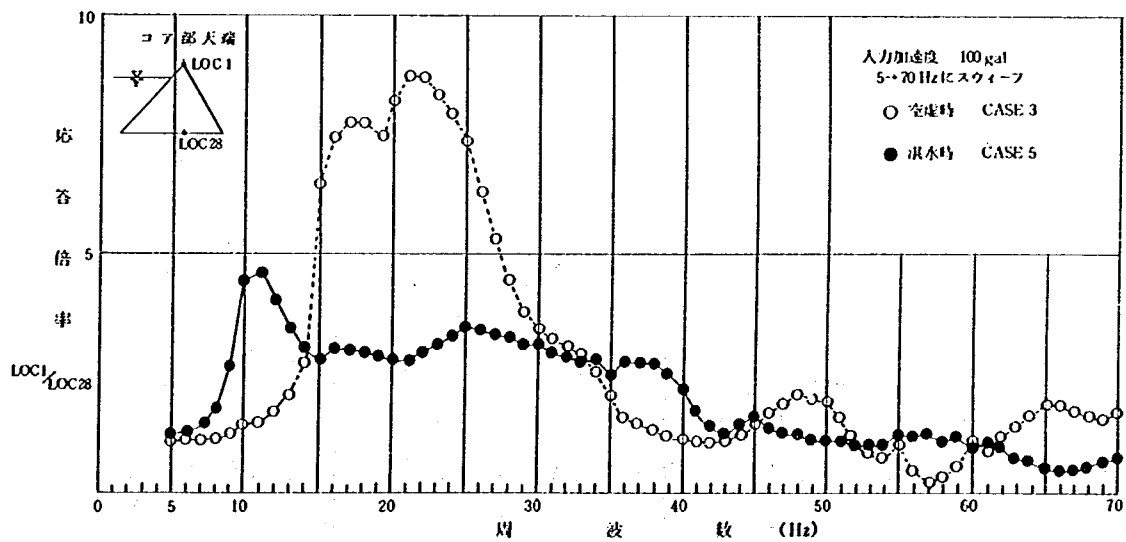


図-34 応答倍率曲線（ケース3とケース5の比較）

図-35は入力加速度によって第1次の共振周波数およびそのときの応答倍率がどう変化するかを示したものである。第1次共振周波数は湛水時にどの入力加速度でも6Hzほど異なる。第1次共振周波数時の応答倍率も空虚時の6~7割程度となる。

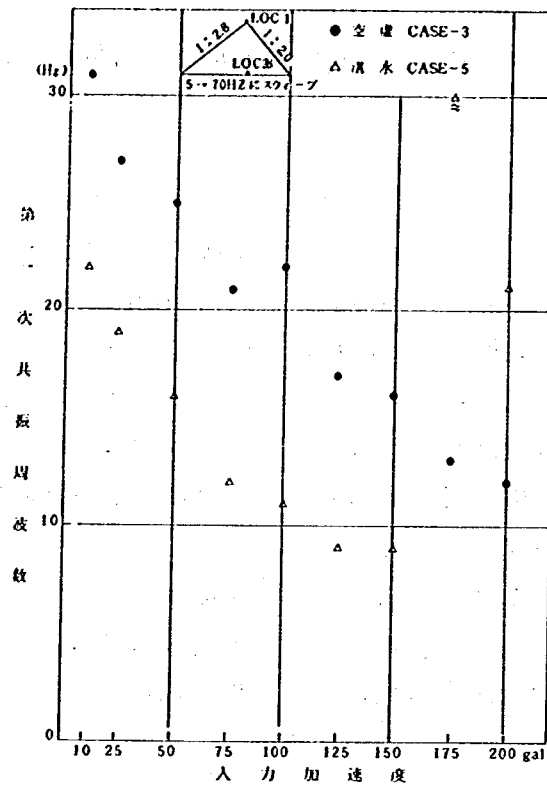


図-35a 第1次共振周波数と入力加速度

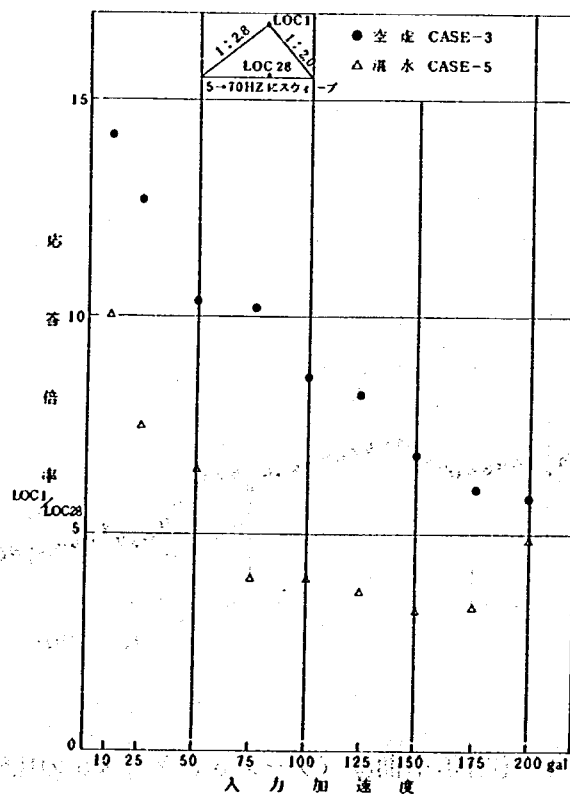


図-35b 応答倍率と入力加速度

図-35 第1次共振周波数，応答倍率と入力加速度
(ケース3とケース5の比較)

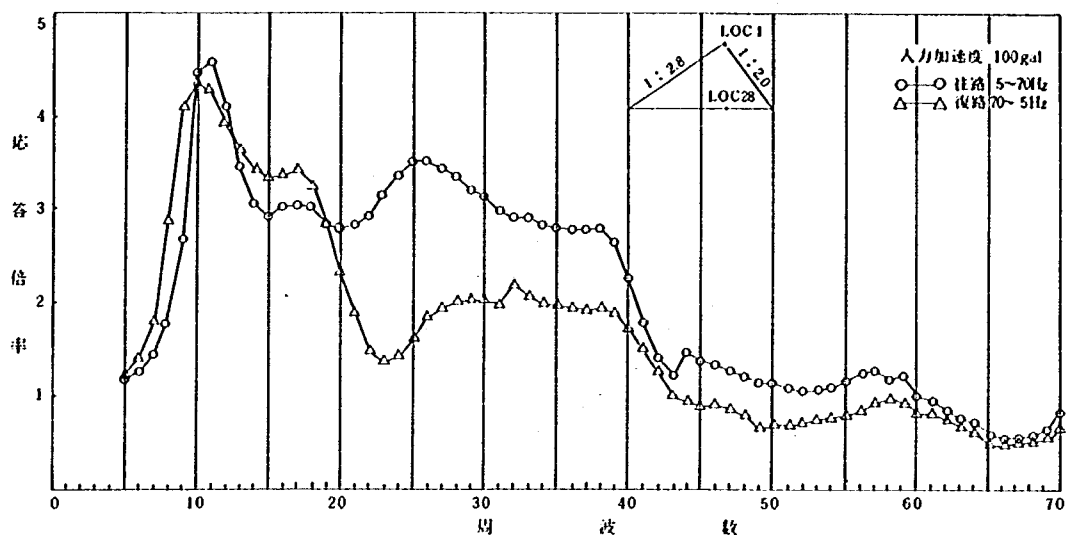


図-36 応答倍率と周波数 (ケース5の往路と復路の比較)

2) 減衰定数

図-38は減衰定数と入力加速度の関係をコア天端で検討したものである。空虚時に比べ減衰定数は大きい。湛水時には、入力加速時10galにおいて10%あったものが入力加速度125galでは約30%近くまで達する。

3) 位相差

図-39は湛水時の位相差を入力加速度10gal, 25galおよび100galの場合を示したものである。

4) 応答加速度分布

図-40は入力加速度が25galおよび100galにおいて天端の共振周波数における堤体の応答加速度の分布である。空虚時に比べ応答加速度が異なり湛水時の応答が小さいことを示している。

5) 堤体の崩壊状況

写真-4に100gal以上の堤体の崩壊状況を示す。堤体は100galまで変化せず100gal以上で上流側の波うち際より始まる。そのあとに下流側加速度計が動き始める。200gal以上になると上流側のマーキングがくずれると同時に下流側ではコア部とフィルター部およびロック部が分離する。この状況がさらに進行し、350galではコア部が上流側に倒れる。

崩壊加速度は法勾配の影響の場合と同様に下流側加速度計がずれた時とすれば125galとなり空虚時とあまり変わらない結果となった。

資料提供人：国土交通省 河川・港湾局

資料提供人：国土交通省 河川・港湾局 河川技術開発部 河川工学課
(河川工学課 河川工学第一室)

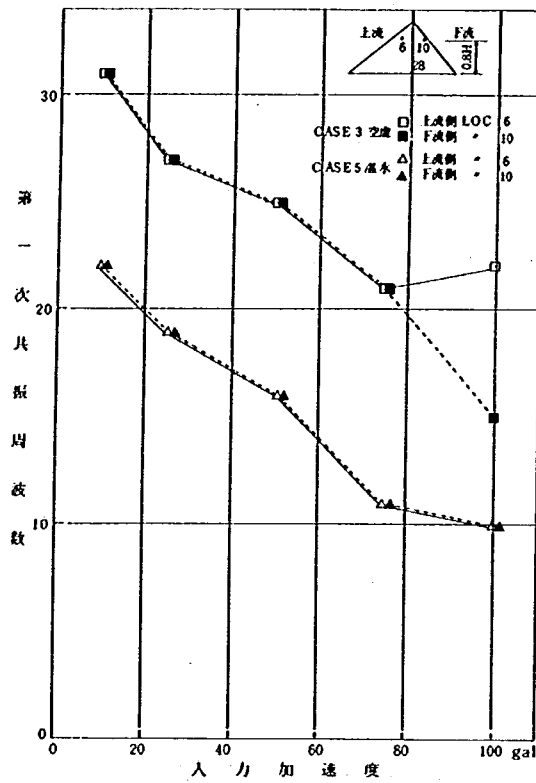


図-37a 第1次共振周波数と入力加速度

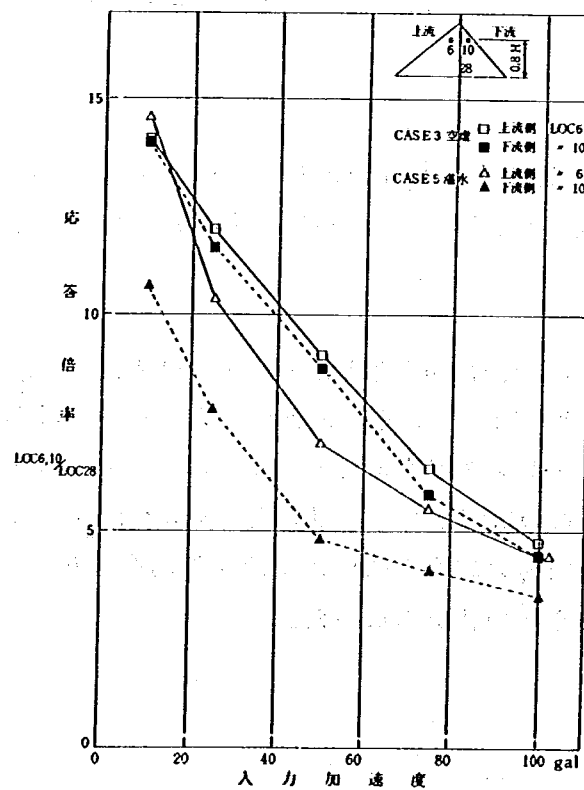


図-37b 応答倍率と入力加速度

図-37 第1次共振周波数、応答倍率と入力加速度
(ケース3とケース5の比較)

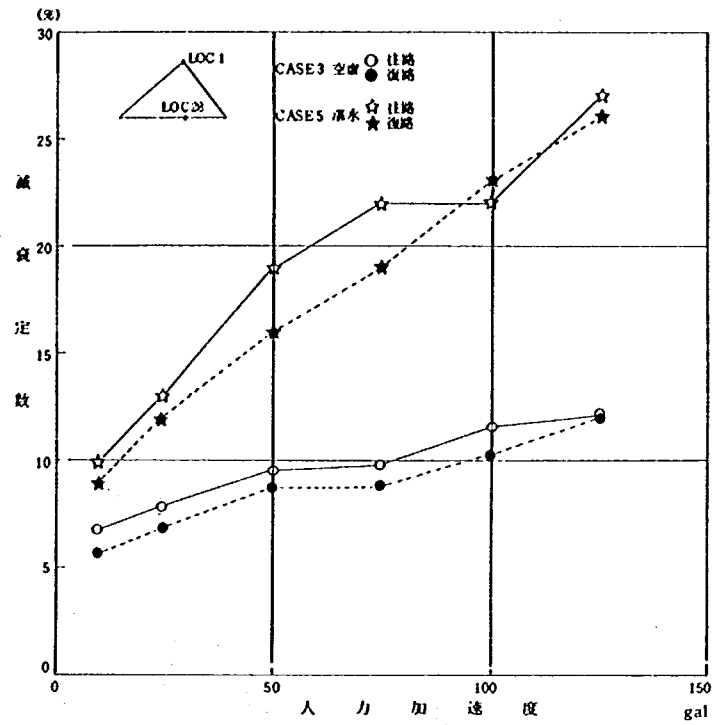


図-38 減衰定数と入力加速度 (ケース 3 とケース 5 の比較)

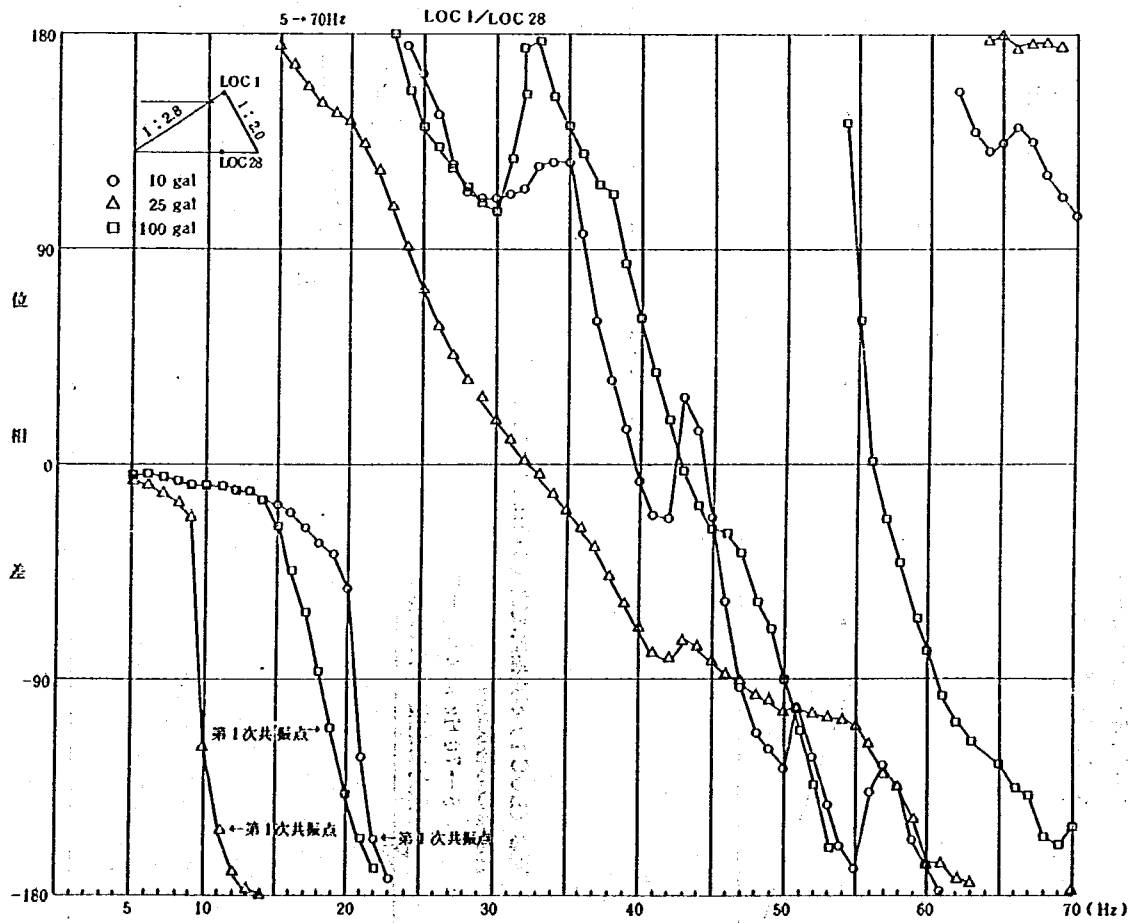


図-39 位相差と周波数 (ケース 5)

天端 (LOC1) が共振周波数 (19 Hz) における
各測点の応答加速度

5 → 70 Hz にスイープ

入力加速度 約 25 gal

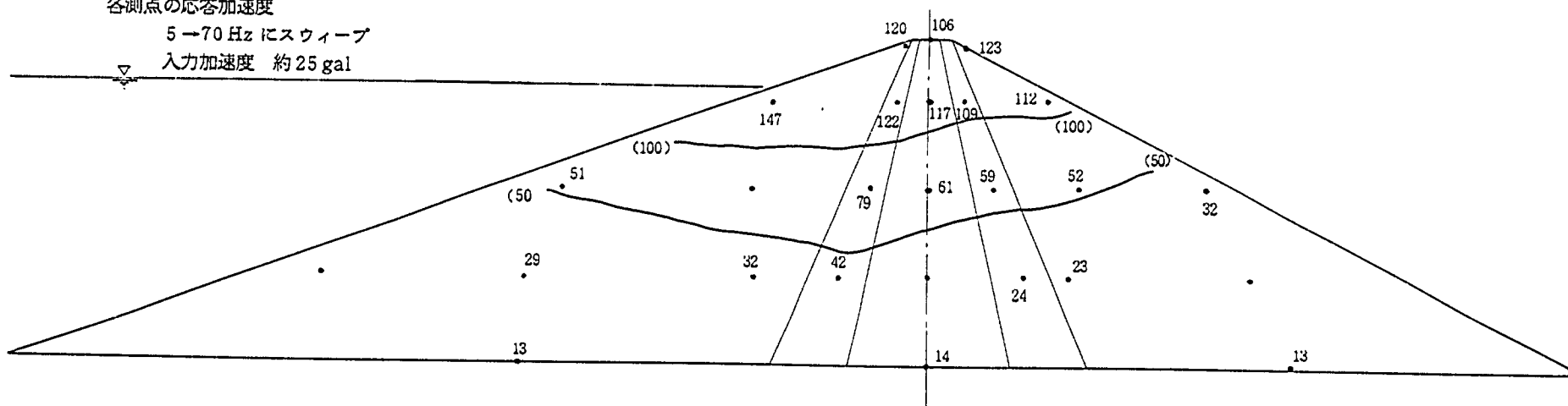


図-40a 応答加速度分布 (入力加速度 25gal)

天端 (LOC1) が共振周波数 (11 Hz) における
各測点の応答加速度

5 → 70 Hz にスイープ

入力加速度 約 100 gal

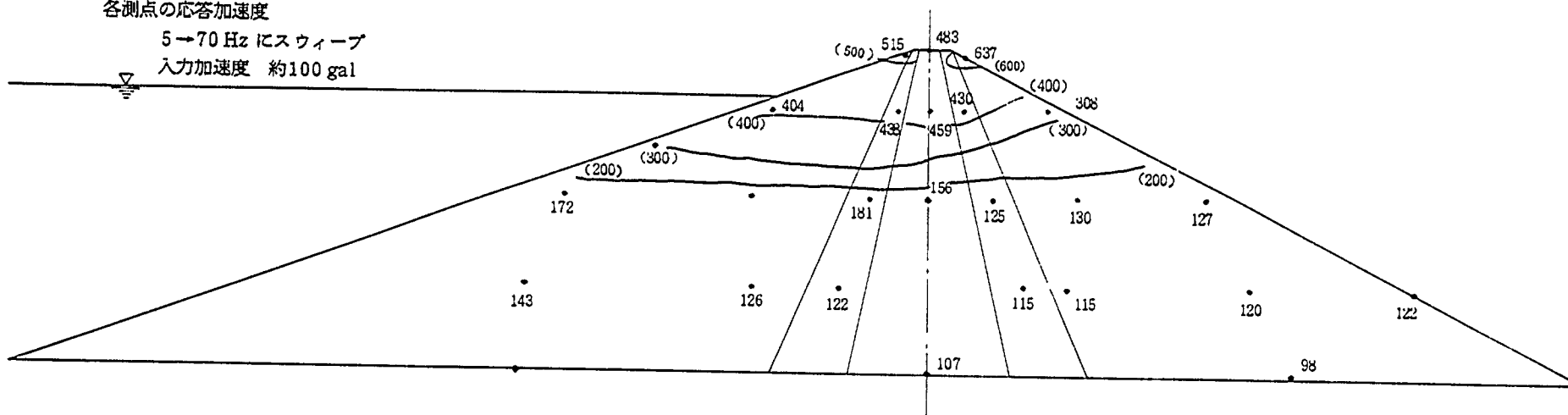
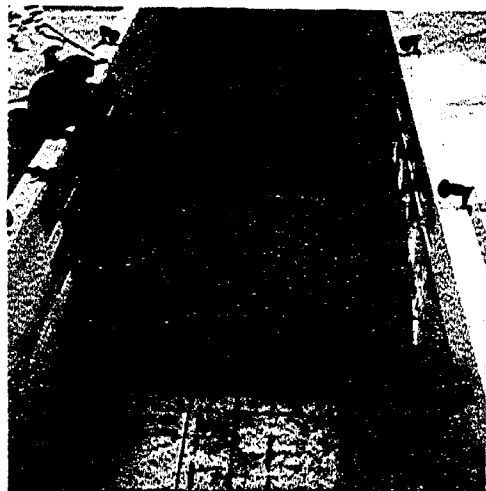
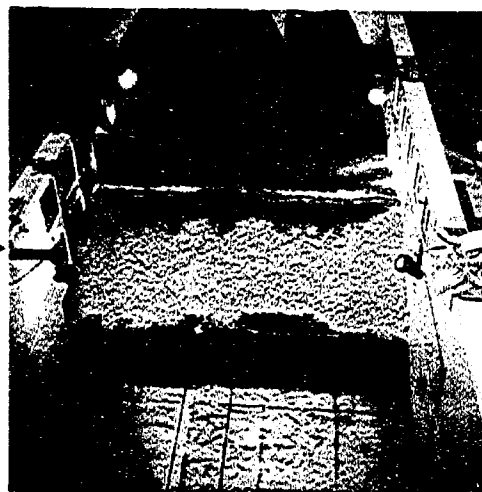


図-40b 応答加速度分布 (入力加速度 100gal)

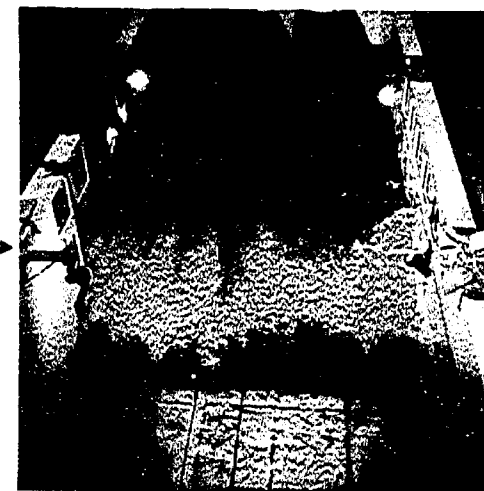
図-40 応答加速度分布 (ケース 5)



100 gal 5→70 Hz



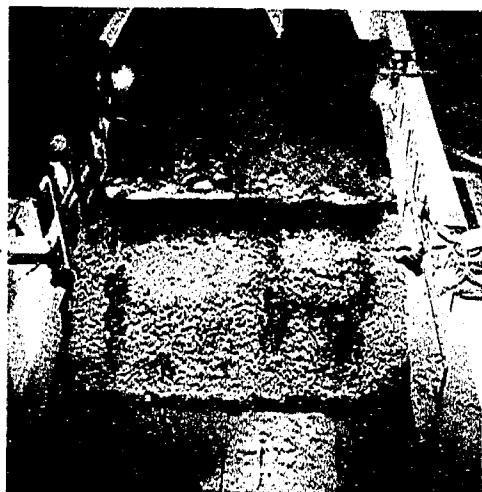
200 gal 5→50 Hz



250 gal 5→50 Hz



300 gal 5→50 Hz



350 gal 5→50 Hz

写真 - 4 ゾーン型ダム模型の崩壊状況 (ケース 5)

5. ま と め と 今 後 の 問 題 点

均一型ダム模型およびゾーン型ダム模型の振動模型実験を通じて次の様なことがわかった。

A. 均一型ダム模型実験

- 1) 加速度計の埋設容器の検討を行なったがさほど容器の影響は認められない。ただ、模型との整合性、埋設時の安定性を考えれば四角のプラスチック容器に入れた方が望ましい。
- 2) 周波数と応答加速度の関係より標準砂模型は非線型性を示している。また、天端が共振した時の周波数において応答加速度をプロットすると法面よりも模型の中央部の応答が大きい。
- 3) 周波数スイープによる堤体の崩壊は、入力加速度 150 gal において天端中央より始まり、それと同時に砂箱と堤体との境界部にダム軸左右岸方向にキレツが生じていくようである。
- 4) ある一定の周波数のもとで加速度レベルのスイープを行なうと応答倍率の履歴は共振周波数より離れたところではほぼ変化ないが、共振周波数に近いところでは入力加速度によって随時応答倍率の履歴が変化していくようである。

B. ゾーン型ダム模型実験

- 1) 応答倍率曲線よりフィルダム模型は非線型性を示している。つまり第1次共振周波数、応答倍率は入力加速度が大きくなるにつれて減少する傾向にある。
- 2) 応答倍率は天端に行くに従い増巾率は大きくなる。天端のダム軸方向の応答倍率は中央が最も大きく中央からはずれると応答倍率が小さくなり、側面拘束の影響が大きい。
- 3) 周波数スイープ試験において低い周波数から高い周波数にかけスイープした場合と、高い周波数から低い周波数にかけてスイープした場合では、後者の方が共振周波数は低くなり応答倍率は増える。ただし、これは試験順序の影響があり、模型性状の変化を示していることが推定される。
- 4) 減衰定数を応答倍率より逆算して求めると入力加速度が 10 gal ~ 125 gal の範囲ではほぼ入力加速度に比例して減衰定数は増加するようである。
- 5) 崩壊は天端中央の法肩の不安定な粒子より始まりダム軸方向に半月状に広がる。
- 6) 法勾配の影響については次のようにまとめられよう。
 - イ. 上流、下流法勾配をたし合わせて合勾配として表わすと合勾配の大きい方が、入力加速度 100 gal では第1次共振周波数が高くなり、応答倍率は小さいようである。
 - ロ. 応答加速度の分布でみるとこの2つの比較では大きなちがいが認められないものの、下流側法面に着目すると法勾配のゆるい方の加速度の増巾率が大きい。
 - ハ. 崩壊加速度を下流側ロック部の最上端にある加速度計が大ききずれた時とすると、合勾配の大きい方は崩壊加速度は 150 gal を示し、合勾配の小さい方は 125 gal を示

し、合勾配の小さい方が崩壊加速度は小さい。

7) 湛水の有無については次のようにまとめられよう。

イ、湛水することによって第1次共振周波数は低くなる。応答倍率も空虚時の50%程度となり、減衰定数は空虚時の2倍近くなり堤体があまりゆれないことを示している。

ロ、応答加速度の分布は天端が共振時には上流側が大きくなる。

ハ、崩壊は波により上流側法面より始まる。湛水することで粒子間の摩擦が小さくなり崩壊加速度は小さくなると考えられたが、空虚時と同じ125galであった。

以上、従来から数多く行なわれてきた正弦波による振動実験結果とほぼ同じ傾向が得られた。今後は水平動だけではなく鉛直を加え、さらには水平および鉛直の同時加振に位相差を設けてフィルダム堤体の振動性状を検討していきたい。

フィルダム模型の正弦
波による振動実験報告

ISSN 0386-5878
土研資料第 1790 号
昭和 57 年 2 月

松本徳久
近藤悟
豊田光雄
志賀三智

キーワード 振動模型実験・正弦波

要 旨

本報告は、フィルダムの動的挙動を把握するために、振動台にフィルダム模型を製作し正弦波による振動実験を行ない、次のことを報告したものである。

- ・標準砂模型による振動実験
- ・ $1/125$ ゾーン型ダム模型の振動実験

郵便はがき

3 0 5 - □ □

40円切手
をはって
下さい

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

ダム部フィルダム研究室御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第 1790 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印