



大規模特殊事業計画調査	
トンネルに関する試験調査	
耐震調査	資料 No. 2

土木研究所資料 第七四七号 沈埋トンネルの耐震性に関する調査報告

土木研究所資料 第747号

沈埋トンネルの耐震性に関する調査報告

— 沈埋トンネルの模型振動実験 —



昭和47年3月

建設省土木研究所
構造橋梁部 振動研究室

昭和四十七年三月

建設省土木研究所

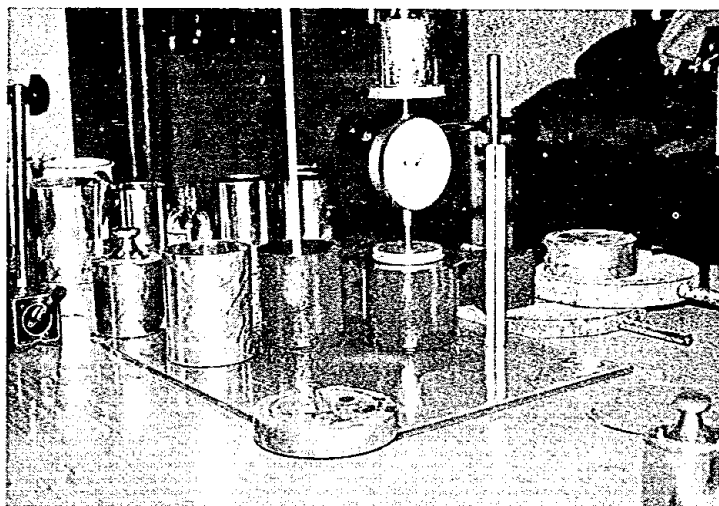


写真-1 ゼラチン材料の静的試験（圧縮試験）

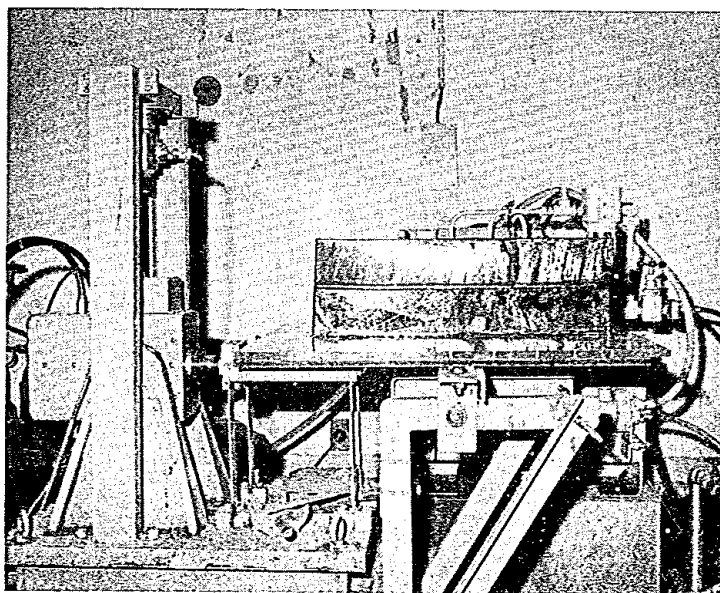


写真-2 ゼラチン材料の動的試験（共振試験）

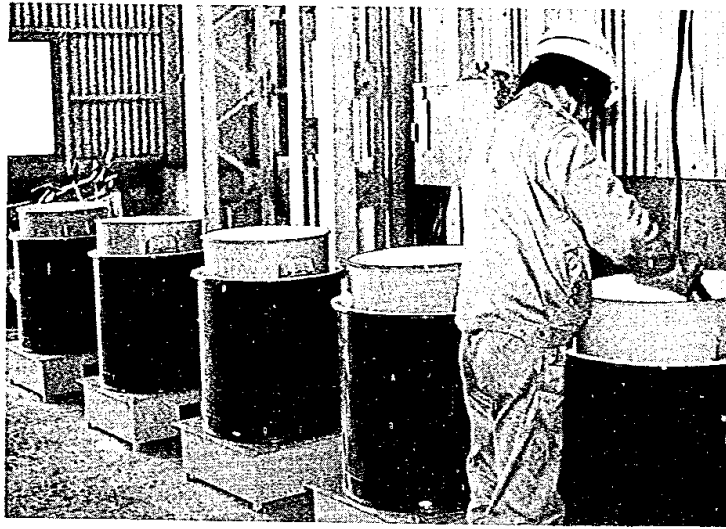


写真-3 ゼラチンの溶解（湯煎）

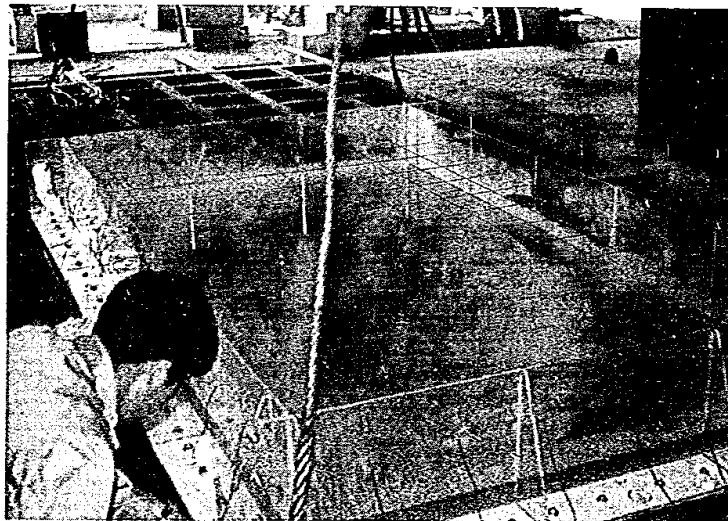


写真-4 模型型枠

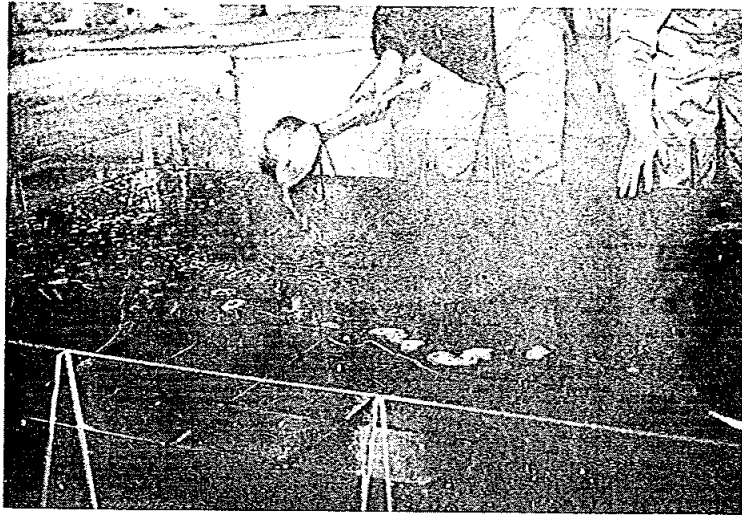


写真-5 模型製作（二層地盤）

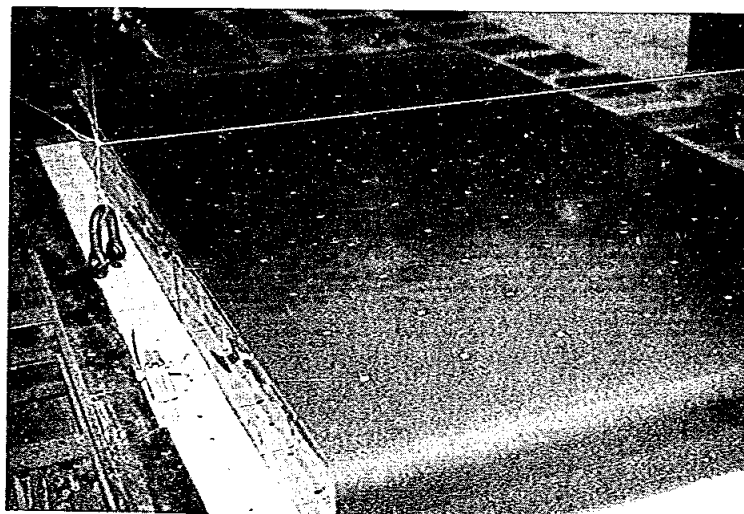


写真-6 地盤模型と標的

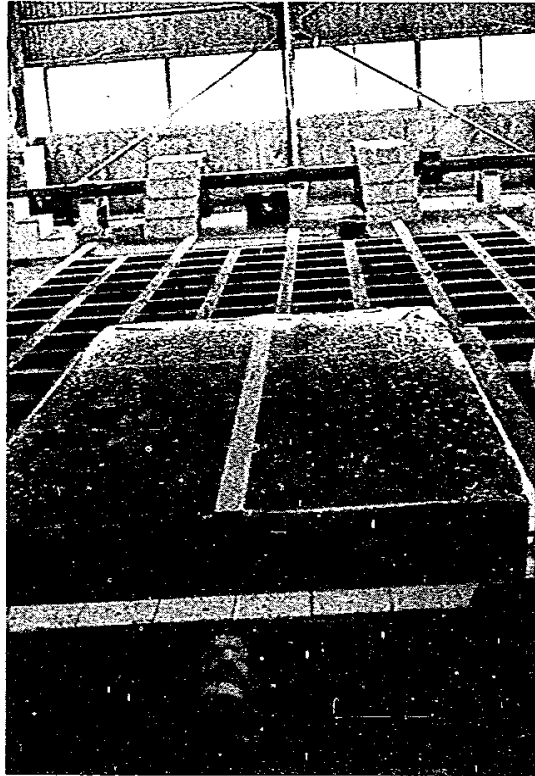


写真-7 沈埋トンネルの入った模型

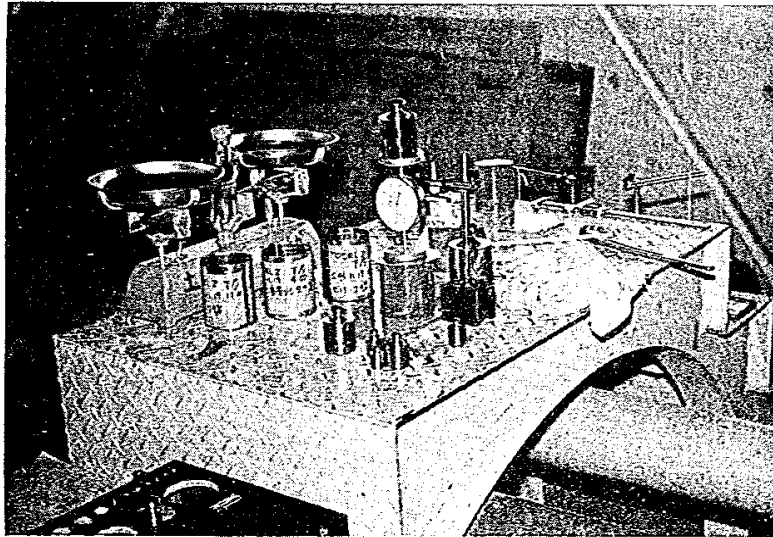


写真-8 ゼラチン材料の静的試験

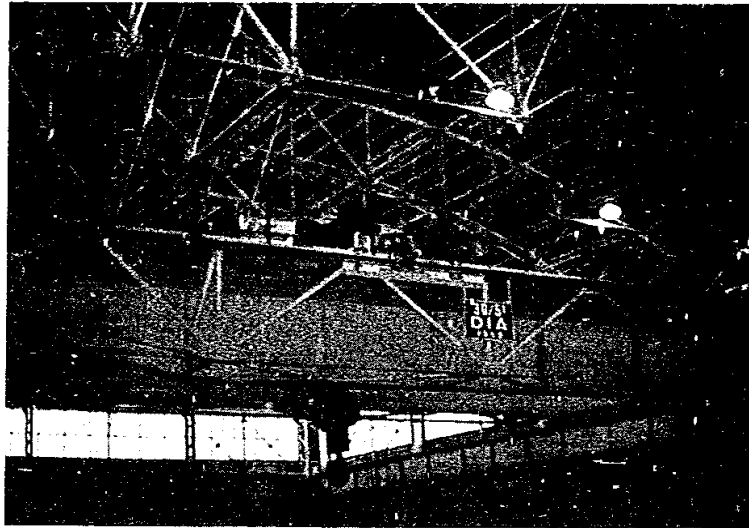


写真-9 16mm 撮影機 (クレーン上に設置)

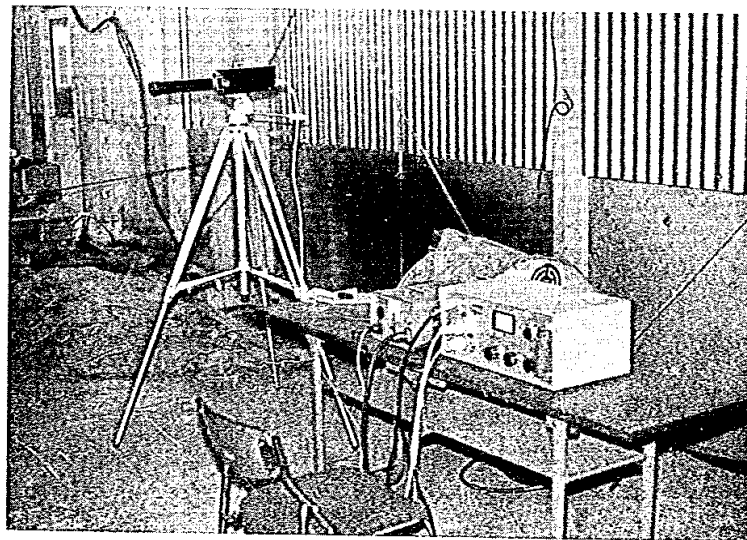


写真-10 光学式変位計

目

次

ま え が き	1
1. 実 験 の 目 的	2
2. 実 験 の 概 要	2
3. ゼラチンの力学特性	2
4. 模 型 製 作	10
5. 模 型 振 動 実 験	16
6. 実 験 結 果 の 検 討	41
あ と が き	53

沈埋トンネルの耐震性に関する調査報告

ー 沈埋トンネルの模型振動実験 ー

ま え が き

本報告書は東京湾岸道路沈埋トンネルを対象とした模型振動実験の結果をとりまとめたものである。

沈埋トンネルは軟質な地盤に沈設されることより、その地震時の挙動は、地盤の挙動によって大きく左右されることが予想され、今度の実験においても特に地盤の挙動を再現させるべく考慮をはらった。

本報告の内容は土木研究所千葉支所において行なった模型材料試験と筑波にある防災科学技術センターの大型振動台による模型振動実験から得られた。

1) 地盤模型材料としてのゼラチンの材料特性

2) ゼラチン模型による振動特性

の2点を中心としている。

昭和47年3月

振動研究室	室 長	栗 林 栄 一
	主任研究員	岩 崎 敏 男
	研 究 員	辻 勝 成

1. 実験の目的

将来東京湾を横断して敷設される3,000m級の長大な道路トンネルの沈埋工法による実施区間約2,000mの沈埋トンネルの地震時の安定性を求めることが必要になる。

本実験では東京湾岸に敷設する予定の中規模の道路トンネルの地盤とトンネル構造の三次元模型によって、加振時の両者の運動の相違を調べることにしている。明年度以降はこの実験技術を東京湾横断道路トンネルの耐震性判定に適用していく予定である。

この実験技術に代わる電子計算機による演算解析は将来演算コストが低廉化し、演算精度の向上を図り得れば可能なことになるであろうが、現在は実験による方法が低廉かつ確実な方法である。

2. 実験の概要

図-1に示す東京湾岸道路沈埋トンネルを対象とした模型振動実験を行なった。

沈埋トンネルは軟質な地盤に沈設されることにより、その地震時の挙動は、地盤の挙動によって大きく左右されることが予想される。一般に地盤の動的性状は歪の大きさによって大きく変化するような非線型の性質を持ったものであるが、ここでは地盤を弾性体として考えている、また実際の地盤は成層構造も複雑であるが、巨視的に土丹とその上の軟質な層の二層構造と考えている。

地盤の挙動を再現するには十分広い範囲を対象とする必要があるが模型の幾何学的な縮尺と模型の大きさとのかね合いによって制限される。

沈埋トンネル全体の構造をみるとアプローチ、換気塔などがあり、地震時の挙動に影響を及ぼすことが予想されるが、今回は一応水平部のみを対象とした。

図-2に実験全体のフローチャートを示し、表-1に実験の工程を示す。

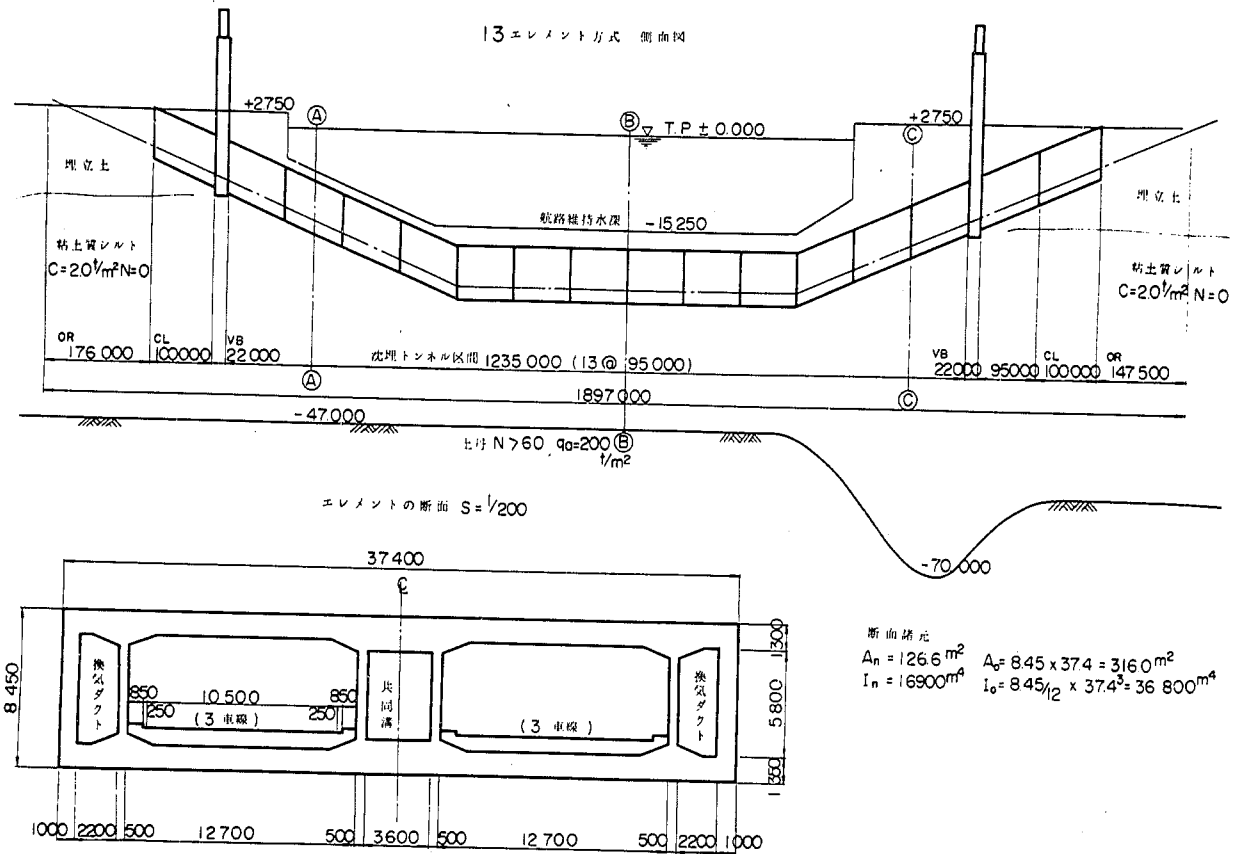
3. ゼラチンの力学特性

3.1 模型材料の選定

地盤模型材料として考えられるものの一例をあげると、例えばゼラチン、合成ゴム、通気性ゴム（スポンジ）、発泡ポリエチレン、ステレオコポリマーなどがある。

表-2に各材料の比較表を示す。表よりわかるようにどの材料も長所、欠点があり、全体的にわたって条件のいい材料はなく何か一つの点を取りあげて、時にその点に優れている材料を用いるというのが現在の時点で考えられる選定基準である。

今回の実験に際しては弾性係数を数 $10\text{ g/cm}^2 \sim 1,000\text{ g/cm}^2$ の間で任意に選らべることを第1の条件として考えた、これは模型の縮尺率によってきまる条件で、もっと縮尺



図一 東京湾岸道路沈埋トンネルの概要

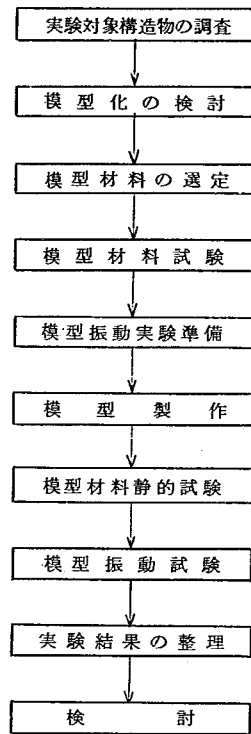


図-2 実験のフローチャート

表-1 実験工程

年 月 日	項 目	場 所
S 46. 10. 11 ~ 30	模型材料試験	建設省 土木研究所 千葉支所
S 46. 11. 1 ~ 15	模型振動実験 準備	科学技術庁 防災科学 技術センター (筑波)
S 46. 11. 16 ~ 30	模型振動実験	

表-2 地盤模型材料の選定

材 料	1 6 m ³ の価格	長 所	短 所	(注)
	1 2 3 4 5 6 7 8 9 (百万)			
ゼ ラ チ ン	1 0 0 0 円/Kg $\rho \approx 1$  5% 濃度  20% 濃度	○ 価格が比較的安い ○ 透明に近く内部の観察可能 (実験後下取りがきく)	○ 取り扱いが困難 ○ 長期の試験期間中の安定性に問題がある ○ 模型製作に熟練を要する ○ 弾性定数が密度の割に小さい	「4 m×4 m×1 mのブロックを作る場合、数cmごとに凝固させながら1 m深さのものを作ってもほぼ均一なものが得られる」(業者の説) $E = \text{数} 10^8 / \text{cm}^2 \sim 1000$ g / cm^3
ゴ ム	5 0 0 円/Kg $\rho \approx 1$ 	○ 工場製作で扱い易い ○ 安定性良し	○ 価格は高い ○ 1 6 m³のものを作るには、小さなブロックを数10コ接着する必要があり、全体的に均一性が落ちるおそれあり	
通気性ゴム (スポンジ)	 2 m×1 m×0.5 m ブロック 45000円 $\rho \approx 0.3$ 上記ブロック16コ	○ 価格が安い ○ 安定性は良い	○ 質量が小さい ○ 弾性を期待できるかどうか問題 ○ 均一性がおちる	
発泡ポリエチレン (旭ダウ エサフォーム)	 50 cm×5 cm×2 m 2000円 $\rho \approx 0.035$ 上記ブロック32コ	○ 価格安い	○ 質量が小さい ○ 塑性変形を生じる	○ 緩衝材である
ステレオコポリマー (合成ゴム) (旭ダウ タフデン)	3 0 0 円/Kg 50% $\rho \approx 1$ 1 0 円/Kg 50% 	○ 価格が比較的安い ○ 取扱い易い ○ 安定性も良い (実験後下取りきく)	○ 透明でない	○ 4 m×4 m×1 mのブロック形成も可能だが運搬等の問題から小さなブロックを数コ結合する必要がある $E = \text{数} 10 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \sim$ $\text{数} 100 \text{ Kg} / \text{cm}^2$

が大きく出来れば数 $10 \text{ Kg/cm}^2 \sim 100 \text{ Kg/cm}^2$ のオーダーにとることができ、このような場合はゴム材料が有力となる。

3.2 セラチンの材料試験

セラチンの弾性係数はその濃度と供試体の温度によって大きく変化するとされている、この点に関して所要のデータがなかったので模型振動実験に先だち、材料試験を行なった。

材料試験としては静的な試験と動的な試験が考えられ、静的な試験では写真-1に示すような圧縮試験装置を用いて、荷重と供試体の変形から弾性係数を定めた、なお供試体の大きさは $\phi 7.5 \text{ mm}$ 、高さ 80 mm 程度で、荷重はセラチン濃度に合わせて $0 \sim 3 \text{ Kg}$ 程度の範囲であった、このような条件のもとで供試体は歪が 10% 程度までは弾性的性質を持っていることがわかった。

動的試験では写真-2に示すような小型の振動台を用いて共振法による動的弾性係数を求めることを試みたが、十分な検討が行えなかったので、今回は前記の静的試験によってセラチンの力学特性を検討した。

3.3 セラチン濃度と弾性係数 (E)

まずセラチン濃度と弾性係数 (E) との関係調べるため、セラチン濃度を 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 30% に変化させ、室温の状態で試験した。その結果を図-3に示す。この時の供試体温度は $25^\circ\text{C} \sim 26.5^\circ\text{C}$ の範囲であった。

3.4 供試体温度と弾性係数 (E)

ついでセラチン濃度を 6, 14, 20% の3種類とし、恒温室において室温を 5, 10, 15°C と変化させた。供試体温度もほぼ室温と同じであった。

この結果を図-4に示す、これよりセラチン濃度一定の場合、セラチンの弾性係数はほぼ供試体温度に比例する傾向がわかった、図中の○印の実測値より実験式をあてはめたのが図中の実線である。この実験式

$$E = aK + b \quad (1)$$

E : セラチンの弾性係数 (gr/cm^2)

K : 供試体の温度 ($^\circ\text{C}$)

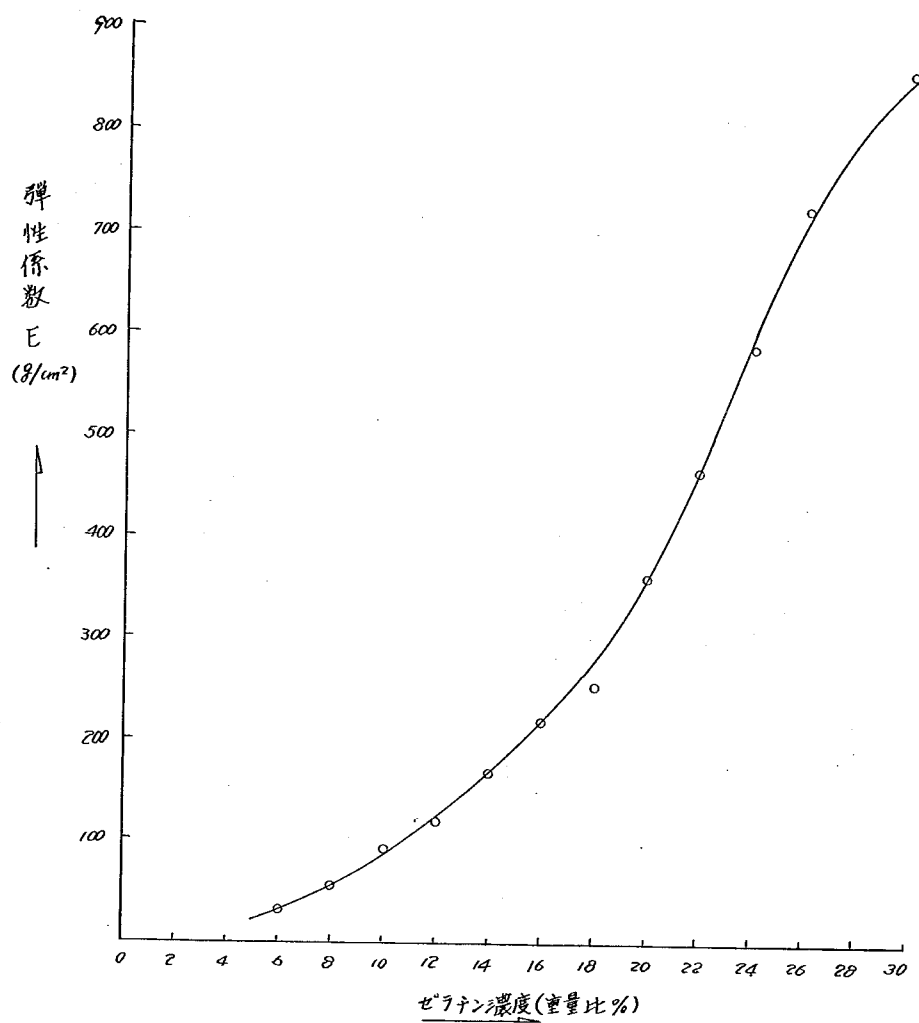
の a, b をセラチン濃度に対してまとめると図-5に示すように

$$a = -3.4n + 11 \quad (2)$$

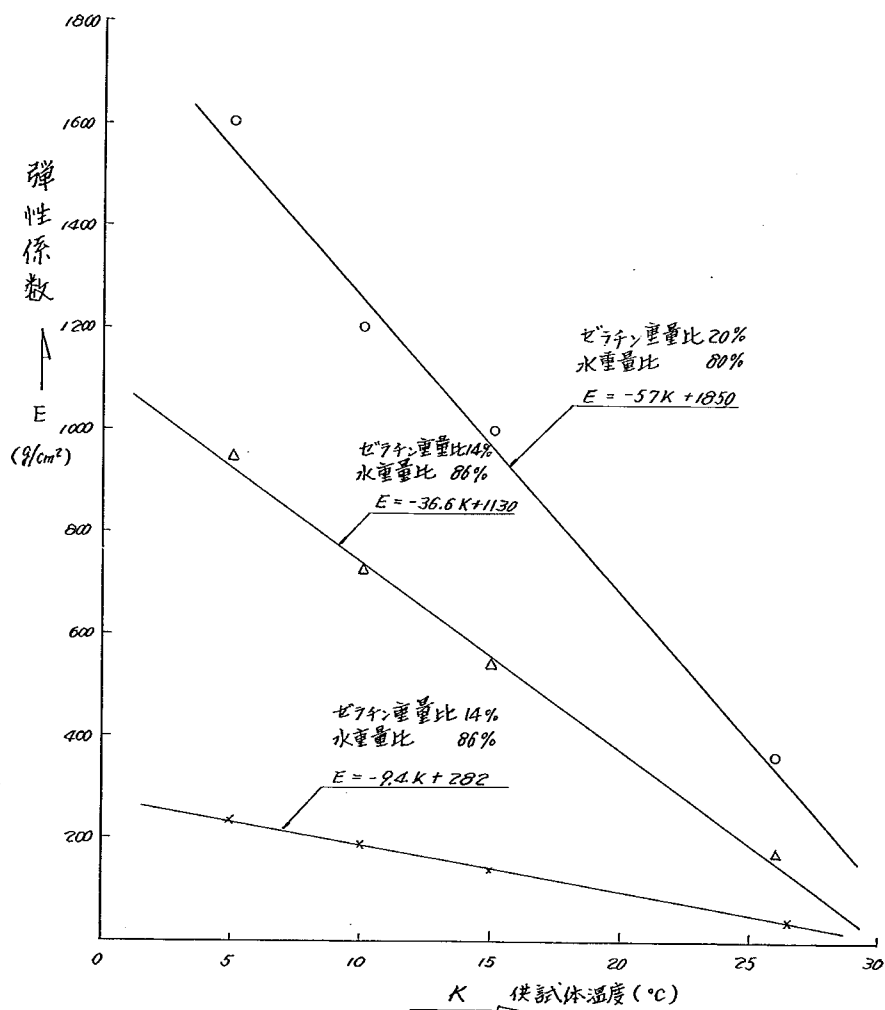
$$b = n^2 + 86n - 270 \quad (3)$$

n : セラチン濃度 (%)

なる関係が見い出される。



図一 3 ゼラチン重量比と弾性係数



図一 4 供試体温度と弾性係数

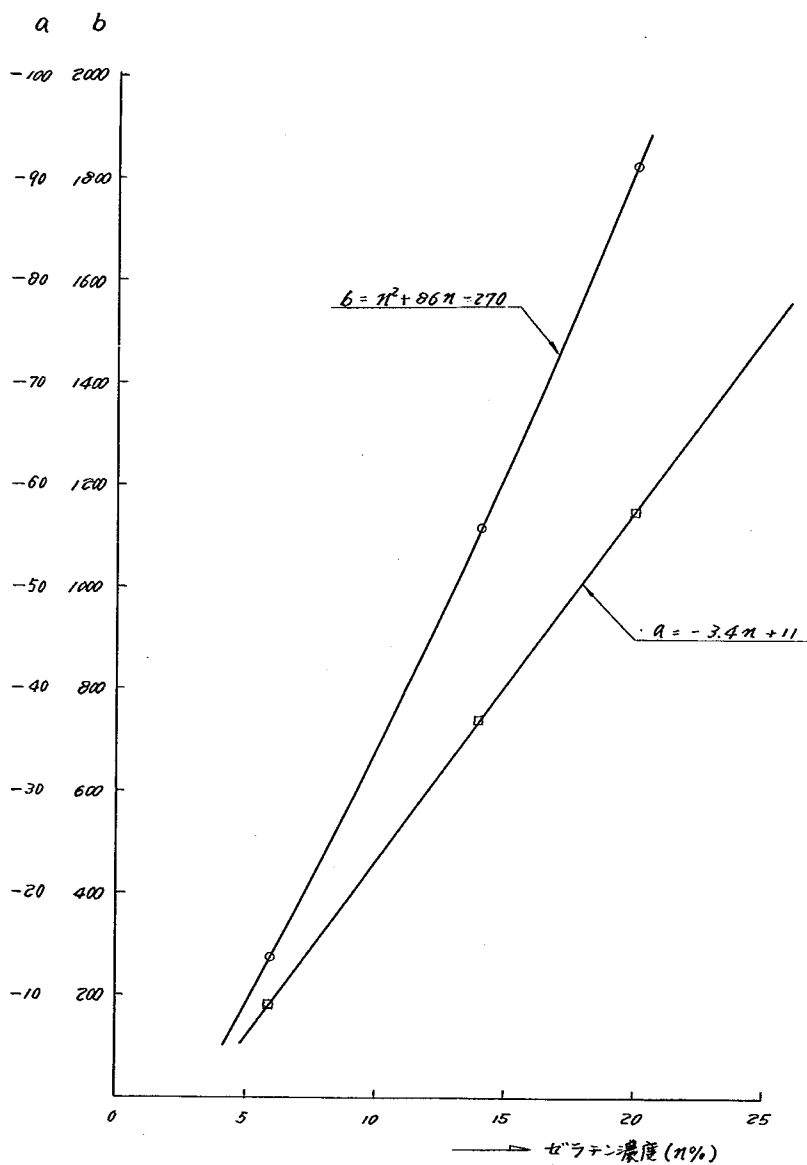


図-5 $E = aK + b$ における a , b の関数

ただし式(2), (3)はゼラチン濃度が小さい場合(3%程度以下)には適用出来ない。

3.5 ゼラチンの力学特性

式(1), (2), (3)の関係をまとめると

$$E = (11 - 3.4n)K + n^2 + 86n - 270 \quad (4)$$

E : ゼラチン供試体の弾性係数 (gr/cm^2)

K : " 温度 (°C)

n : " ゼラチン濃度(%)

なる実験式が見出された。

図-6に式(4)による弾性係数を、横軸に供試体温度、パラメーターとしてゼラチン濃度をとって示している。この式による弾性係数と実測値を比較すると図-7に見られるようにゼラチン濃度が高くなると離れてくる、この差を ΔE として、式(4)による計算値を補正したものが図-8に示したもので、最終的にはこの関係グラフを用いて実験用模型を製作した。

3.6 その他

ゼラチンの他にグリセリンを混入すると供試体の弾性係数は増加する。ゼラチン濃度10, 14, 18% に対して、それぞれグリセリンに濃度を0, 5, 10, 15% として試験した結果を図-9に示す。グリセリンを混入する目的はゼラチン濃度を高くしないで(ゼラチン濃度が低い方が透明度がよい)弾性係数を上げることにある、しかし実験結果より低いゼラチン濃度ではそれ程強度の増加は期待できないことが分かったので模型実験には採用しなかった。

図-10に供試体のゼラチン濃度を一定として冷却時間(作成してから測定までの時間)を23時間から117時間と変化させ供試体の弾性係数の経日変化を調べたが、供試体温度による違いの方が大きくほとんど一定か、僅か乾燥収縮による強度上昇が見られる程度で、供試体温度が略一定であれば少なくとも5日間ぐらいは安定していることがわかった。

4. 模型製作

4.1 模型と実物の相似

基本となる縮尺として長さ、密度、時間の3つを選ぶと

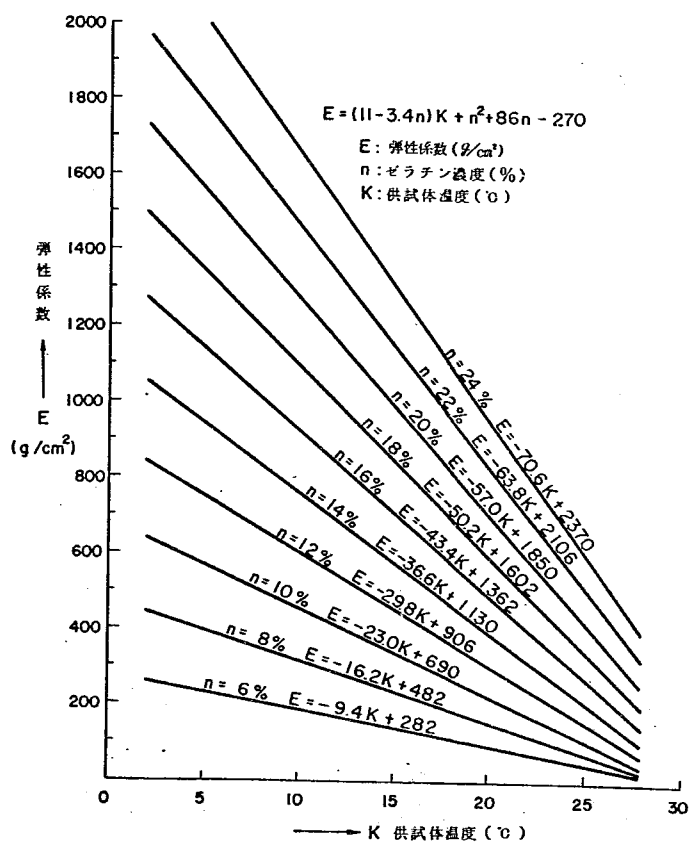
$$\text{長さの縮尺} \quad L_p / L_m = n$$

$$\text{密度の縮尺} \quad \rho_p / \rho_m = m$$

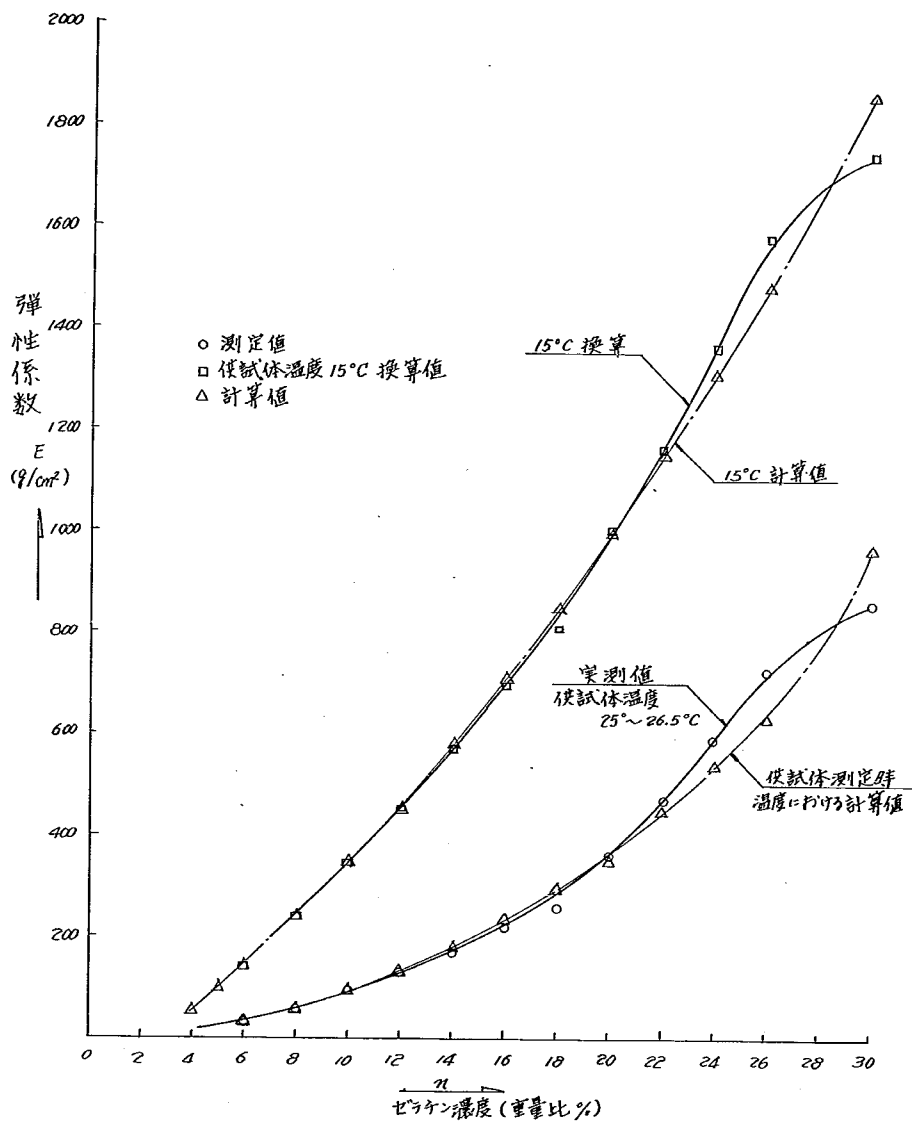
$$\text{時間の縮尺} \quad T_p / T_m = t$$

ここでサフィックス p, m はそれぞれ実物、模型を表わす。

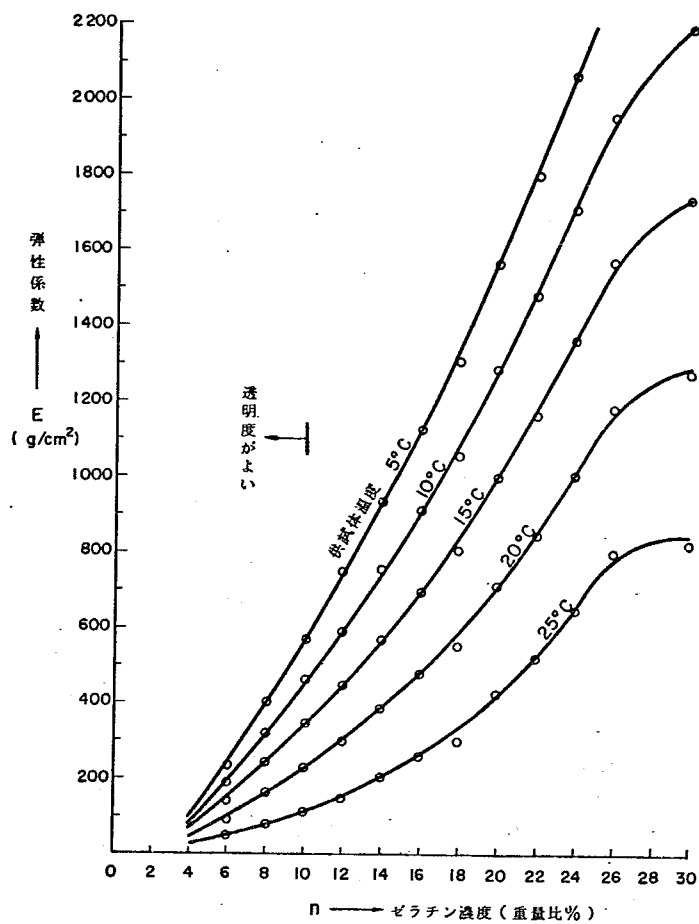
弾性係数、速度、加速度、振動数はそれぞれ以下のようになる。



図— 6 各ゼラチン濃度における供試体温度と弾性係数の関係



図一七 ゼラチン重量比と弾性係数



図—8 各温度におけるゼラチン濃度と弾性係数の関係

(供試体温度15°Cに換算)

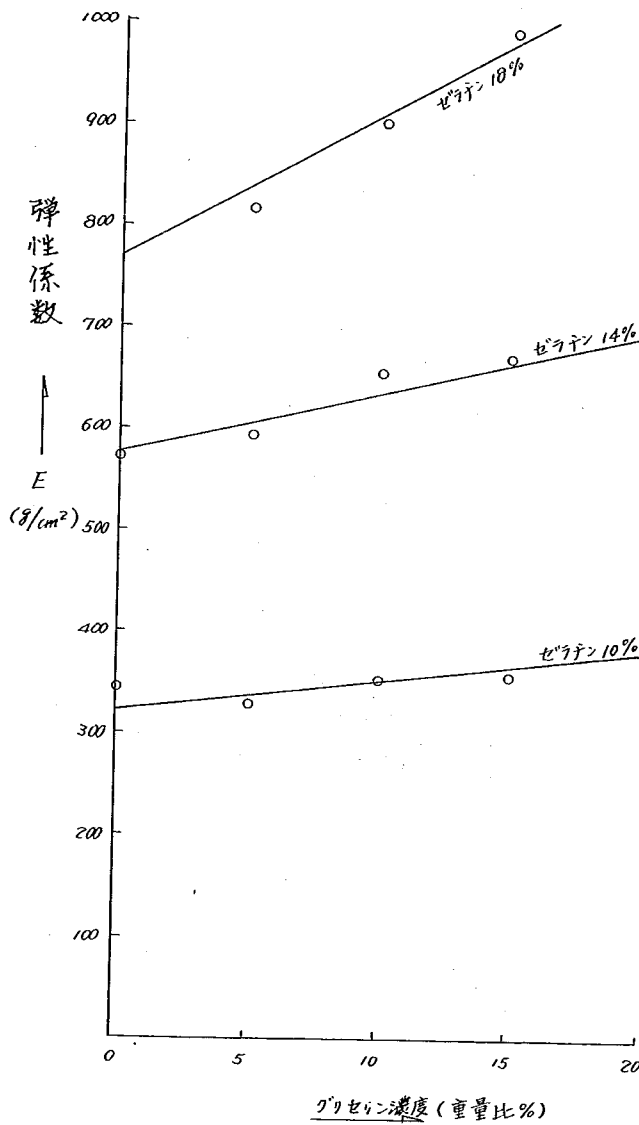
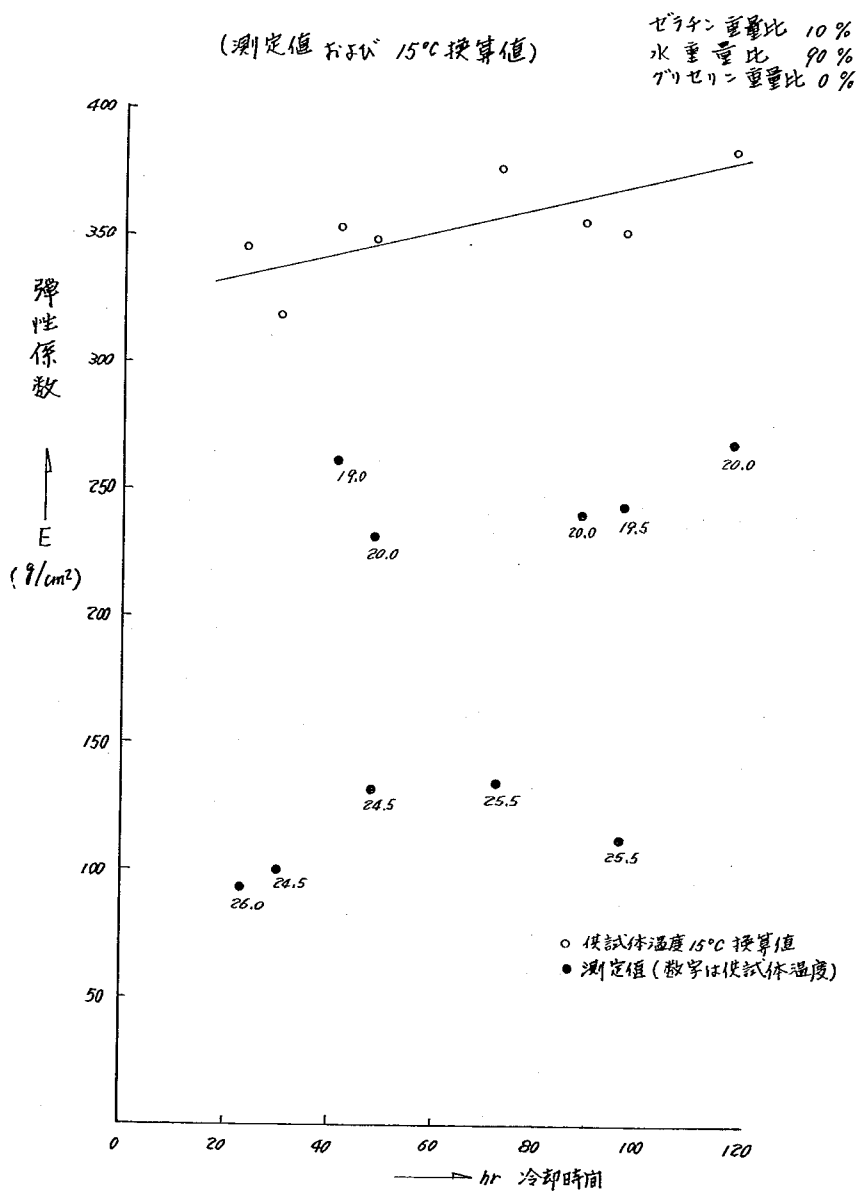


図-9 グリセリン重量比と弾性係数



図一 10 冷却時間と弾性係数

弾性係数の縮尺 $G_p / G_m = e = mn^2 / t^2$

速度の縮尺 $V_p / V_m = v = n / t$

加速度の縮尺 $A_p / A_m = a = n / t^2$

振動数の縮尺 $C_p / C_m = c = \frac{1}{t}$

今回の模型振動実験においては、 $n = 500$ 、 $t = 5$ とした。 m は実地盤の密度とゼラチン、ゴムなどの模型材料より一意的に定まる。

表-3に実物と模型の諸元を示す。

4.2 模型製作

今回の模型振動実験においては図-11に示す3種類の模型を考えた。

モデル1は水平な二層地盤で、モデル2は表面の軟らかい層の厚さが変化しているモデルで、モデル3はモデル2に沈埋トンネルを埋設したものである。

模型の製作は所要のゼラチンと水の混合液をホーローなべで湯煎し（写真3参照）、溶解したものを、アクリル製の型枠で成型した（写真-4参照）。二層の地盤模型を作る際には、上記のようにして作った下層の上に、温度が30℃前後まで下がってから流し込み成型した（写真-5参照）。

また模型には変位観測用として、上層と下層の境界には20mm間隔で黒いゴム糸が張りめぐらし、表面にはゴム糸の交点の真上に白い標的をとりつけた（写真-6参照）。

写真-7に沈埋トンネルを埋設したモデル3を示す。

模型の弾性係数をチェックするために、前述の方法によって静的試験も並行して行なった（写真-8参照）。

5. 模型振動実験

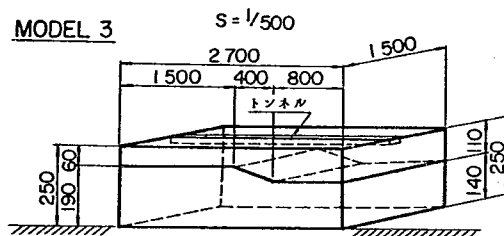
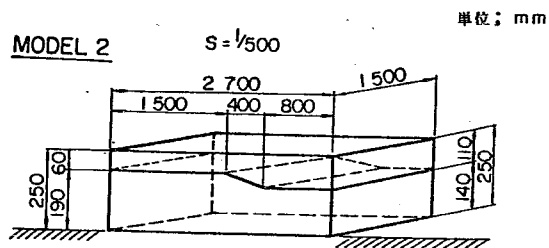
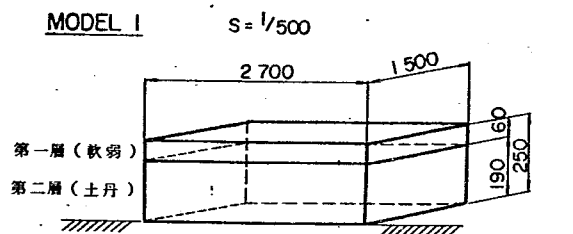
模型振動実験は科学技術庁防災科学技術センターの大型振動台を使用して行なった。図-12に振動台の性能と仕様を示す。なおこの振動台では入力は全て変位で制御している。

5.1 実験の種類と計測システム

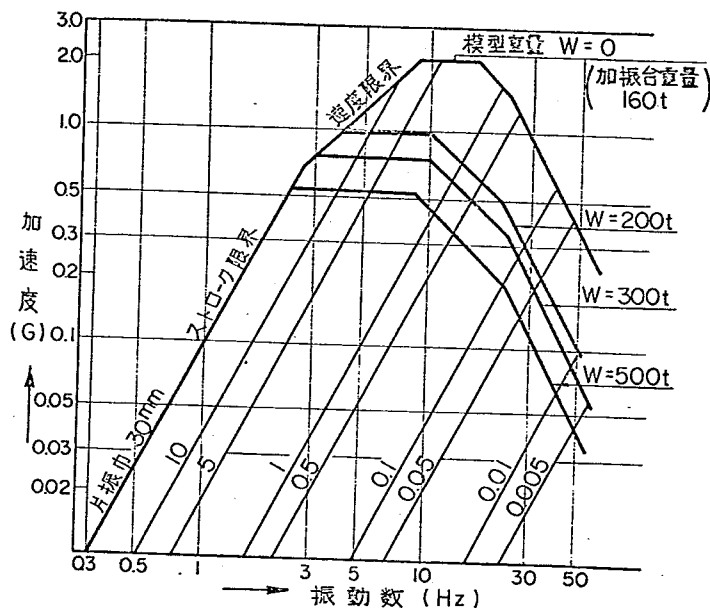
振動実験としては振動数特性及び振動モードを調べるための正弦波振動実験、減衰特性を調べるための自由振動実験、実際の地震波による挙動を調べるための地震波振動実験の三種類を行なった。個々についてはその実験結果と合わせて後節に詳しく述べる。

計測システムは図-13にその概要を示すように、模型の動きは、16mm高低速撮影機、（写真-9参照）、光学式変位計（写真-10参照）によりとらえ、振動台の加速度を加速度計で計測した。

なお16mm撮影機はクレーン上にとりつけ、模型全体の挙動を計測し、光学式変位計は



図一 11 地盤および沈埋トンネルのモデル



加振台性能図

加振台の仕様

加振台の大きさ	15m×15m { (12m+2×1.5m) × (12m+2×1.5m) }
最大塔載量	水平 500t 垂直 200t
加振機最大出力	360t
加振方式	水平, 垂直切換方式 (水平4台, 垂直4台)
最大振巾	±30mm
最大速度	37cm/sec
加振波形	正弦波, 不規則波
周波数範囲	0.1~50 cps
駆動方式	電気油圧式
加振台重量・固有振動数	160t 40 cps
天井クレーン	主 30t 副 5t

図-12 防災センター大型振動台の性能と仕様

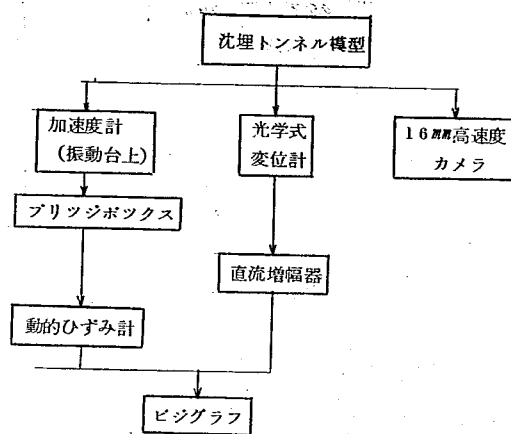


図-13 模型振動実験計測システム

特定の位置の挙動を計測した。図-14に各モデルの変位観測位置図を示す。

5.2 正弦波振動実験

正弦波振動実験は各モデルの共振振動数およびその振動数における振動モードを調べるためのもので振動数を1.0%~10%前後まで変化させた、入力変位の大きさは最大2.5mm、共振振動数付近では0.1~0.2mm程度とした。図-15~22にその結果を示す。図の縦軸は計測点の実変位を入力変位で割った無次元量で、云わば変位の応答倍率を表わす量である。図-23~25に各モデルの共振時における振動モードを示す。また表-4には共振時における変位を一覧表にして示す。

5.3 自由振動実験

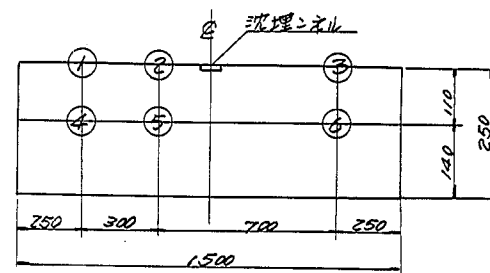
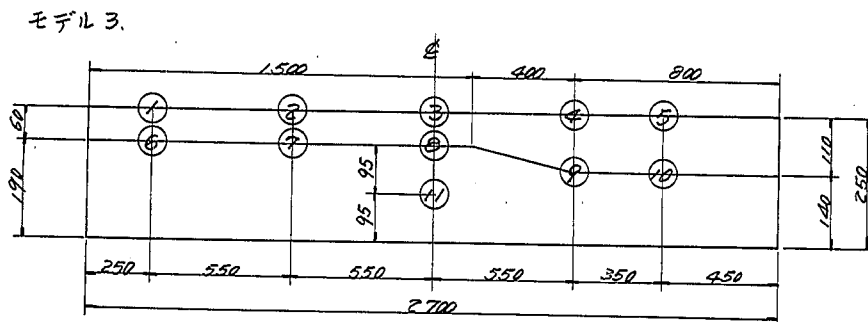
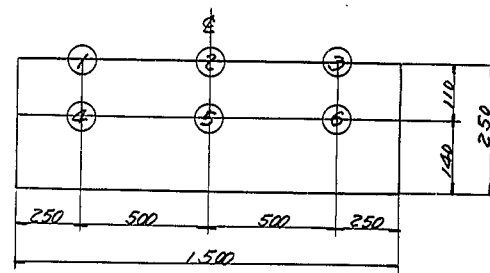
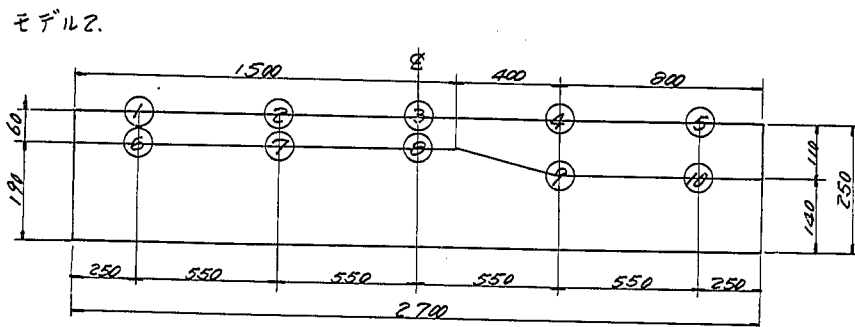
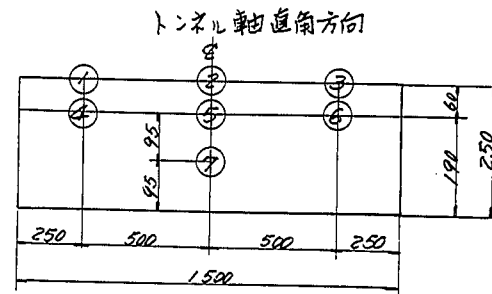
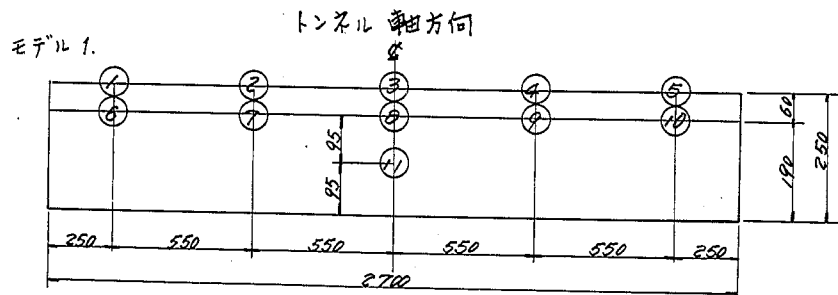
自由振動実験は共振振動数付近で加振し、定常状態になった時点で加振を急速に止め自由振動を発生させる。図-26~28に自由振動による減衰の様子を示し、表-5に各モデルの減衰定数を示す。

5.4 地震波振動実験

地震波振動実験は、実地震に対する模型の挙動を調べることを目的としている。

用いた地震はEL-CENTRO地震1940(N-S)、十勝沖地震(八戸)、ランダム波で時間は全て $\frac{1}{2}$ に縮尺した変位記録である。実験に際しては最大加速度(倍振幅)が100gal、と200galとになるように振幅を変えて入力とした。

図-29~33に実験結果を示す。応答は各測点の変位を表わしている。



(単位 mm)

図-14 変位計測定点番号

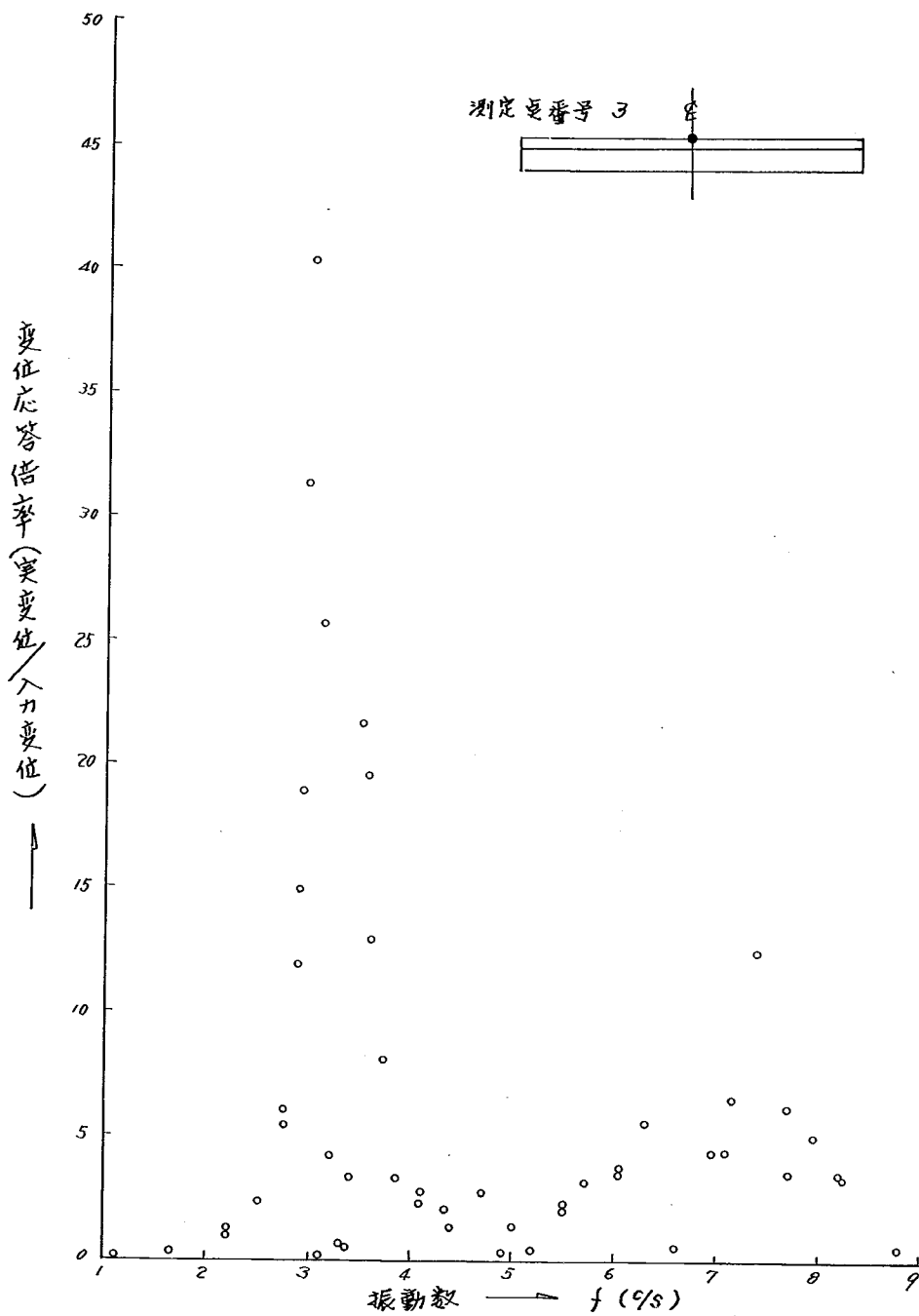
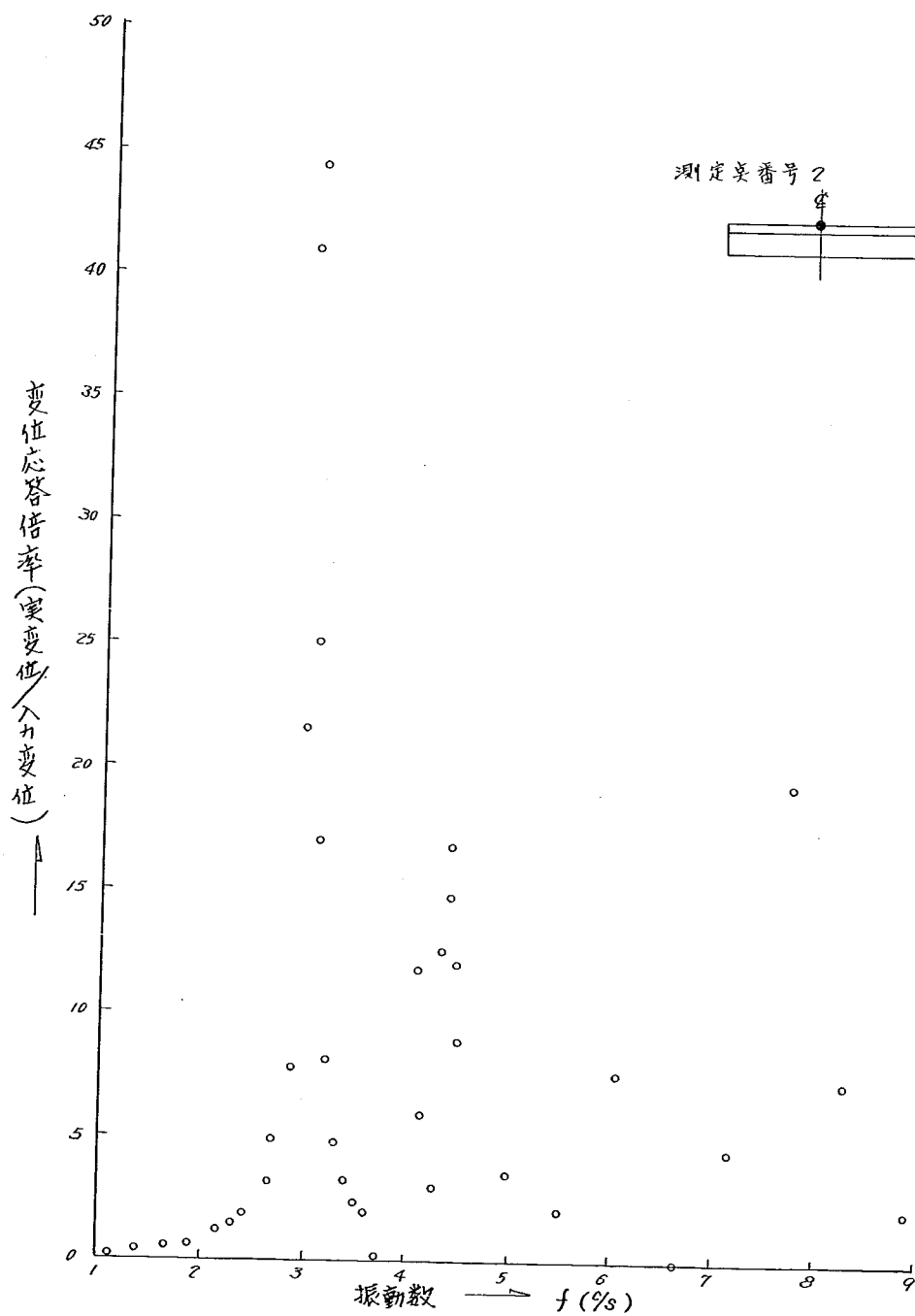
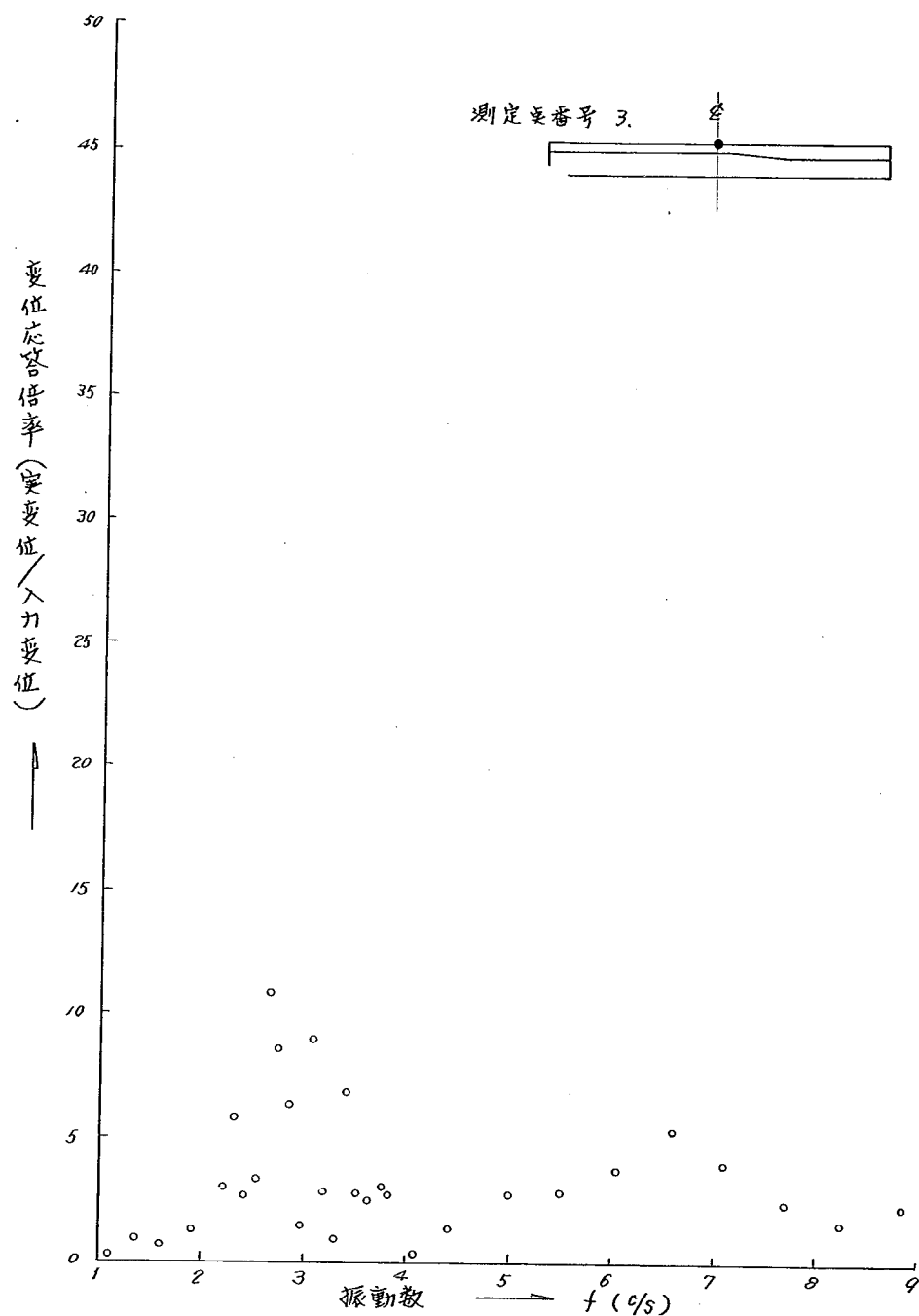


図-15 共振曲線 (モデル1, トンネル軸方向)



図一 16 共振曲線 (モデル 1, トンネル軸直角方向)



図一 17 共振曲線 (モデル 2, トンネル軸方向)

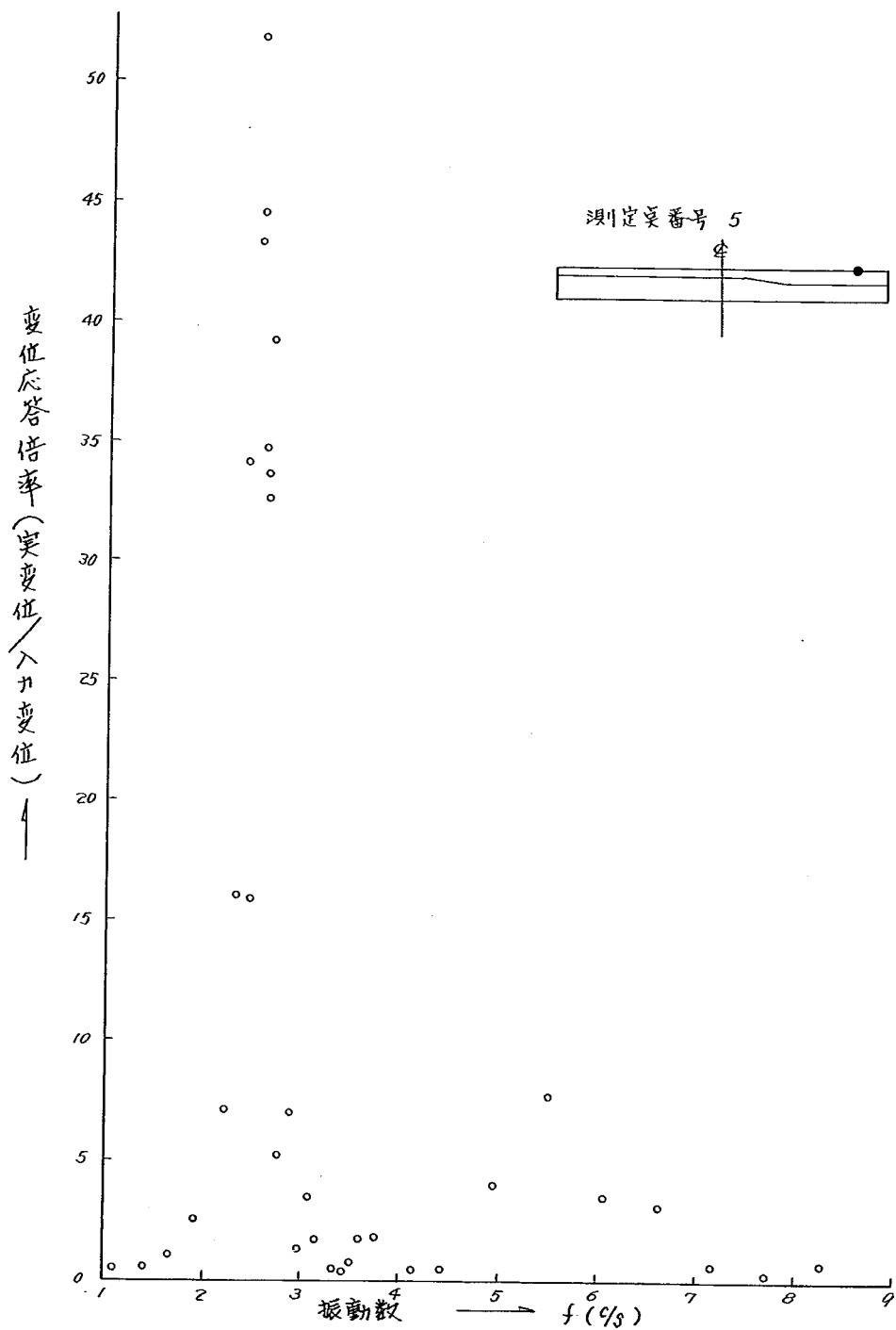


図-18 共振曲線 (モデル 2, トンネル軸方向)

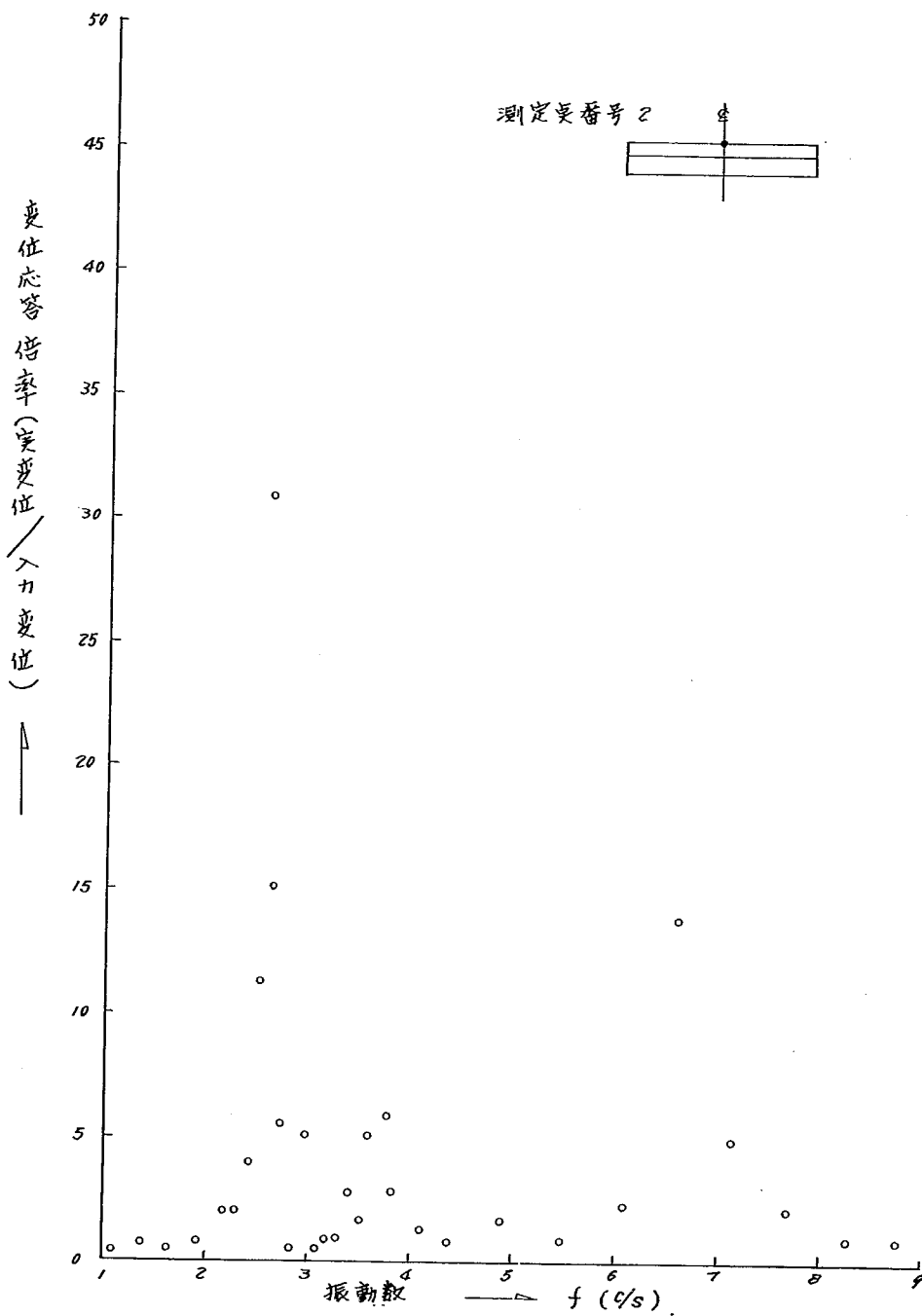


図-19 共振曲線 (モデル 2, トンネル軸直角方向)

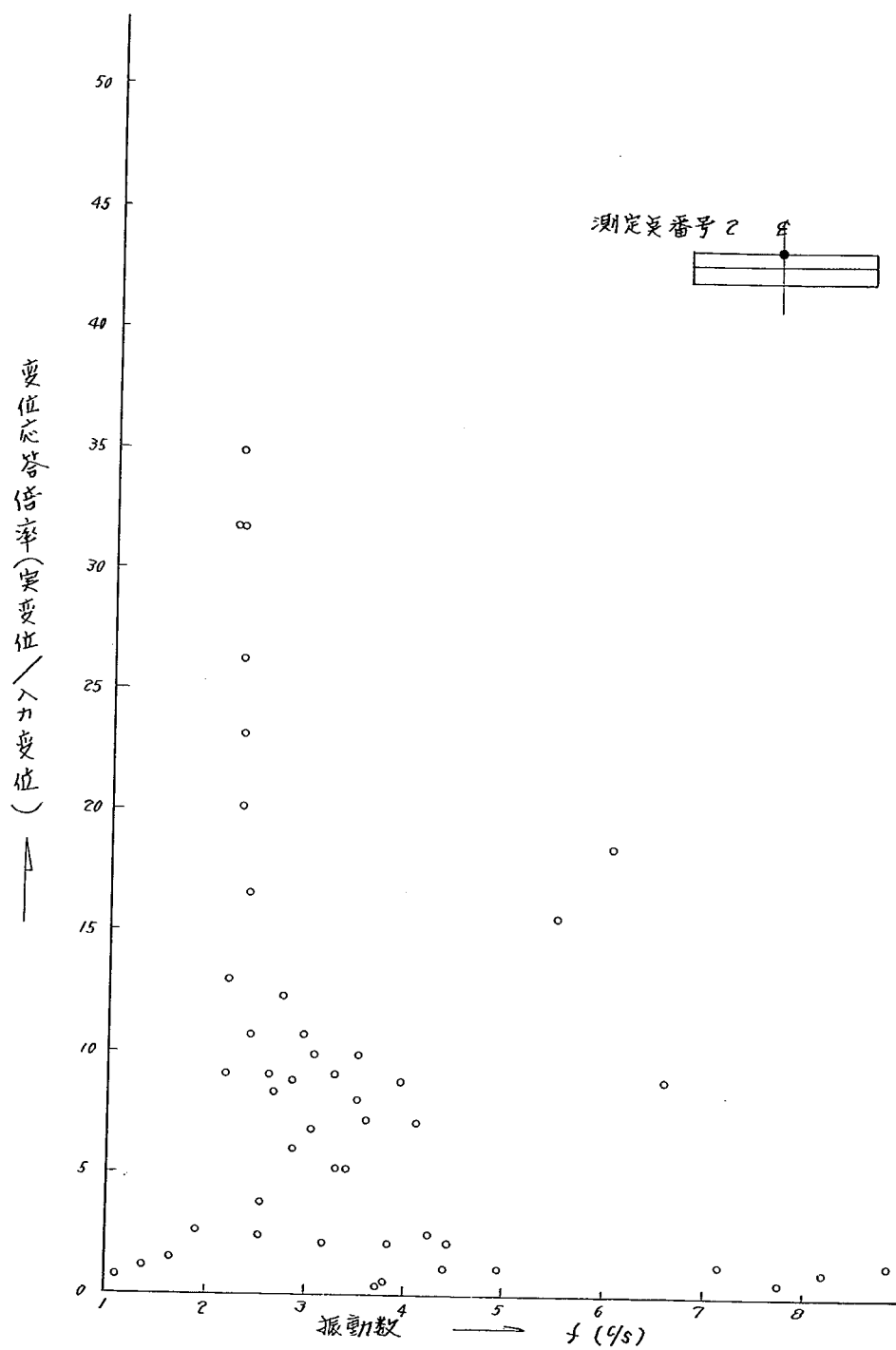


図-20 共振曲線(モデル3, トンネル軸直角方向)

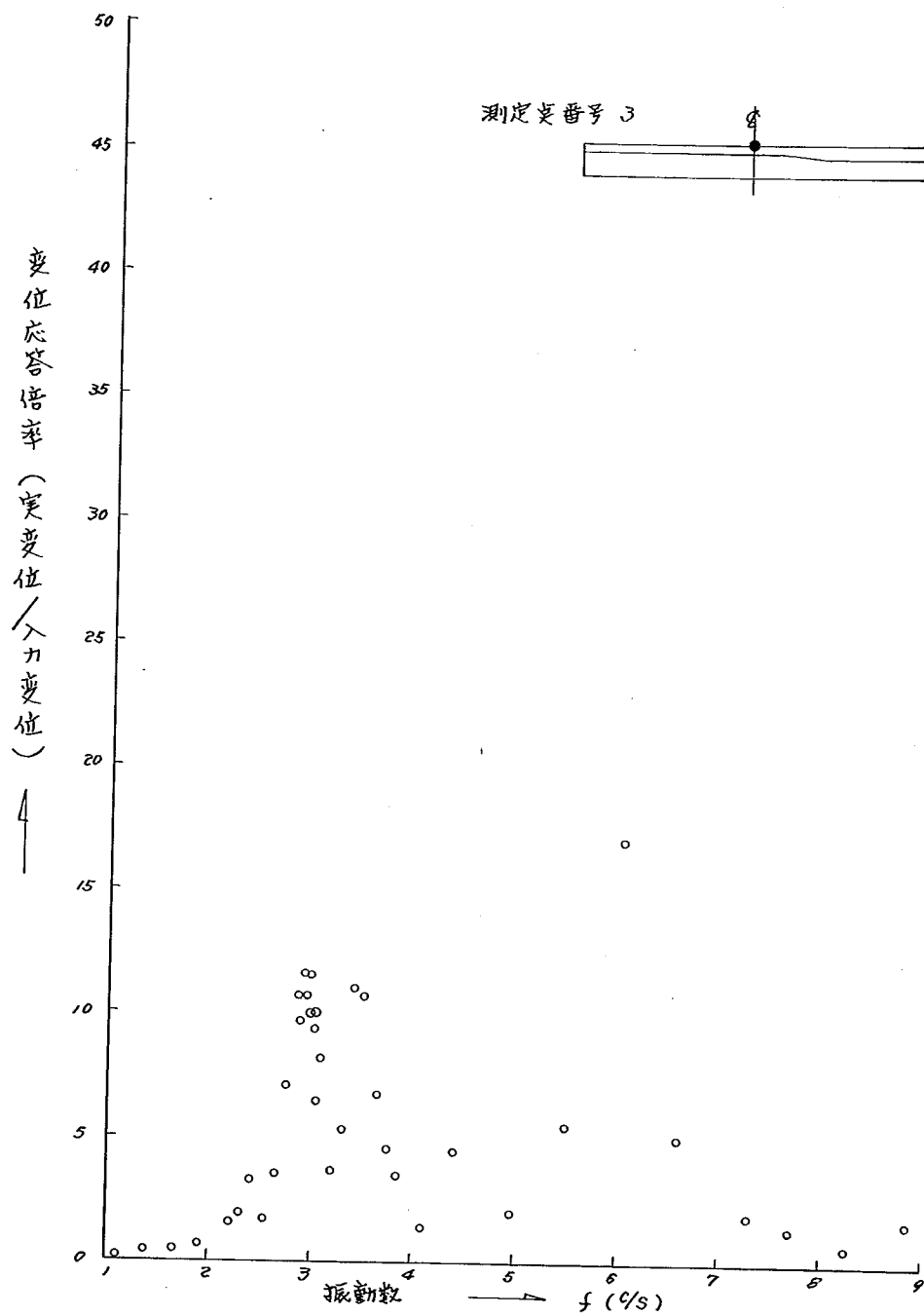


図-21 共振曲管 (モデル3, トンネル軸方向)

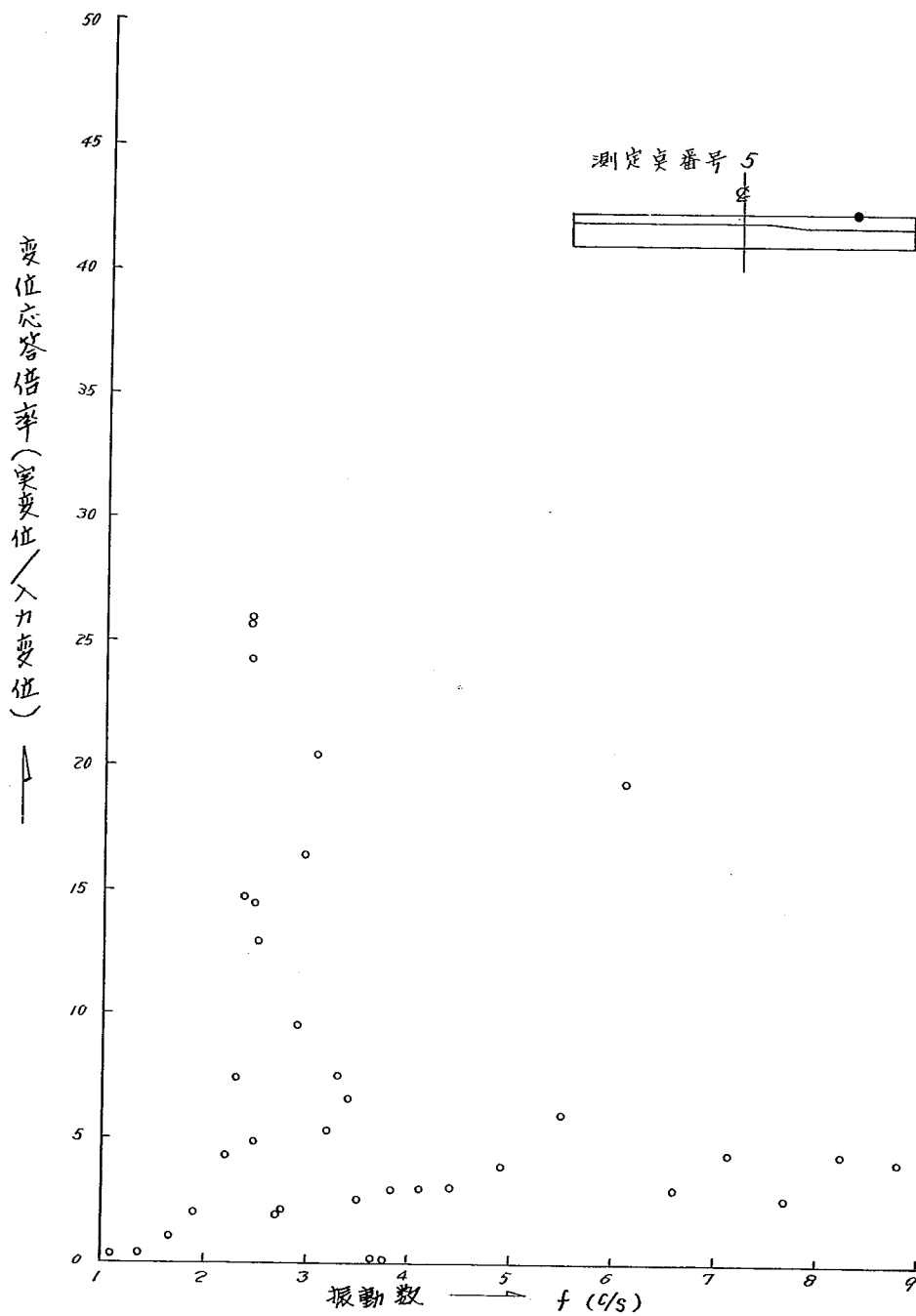
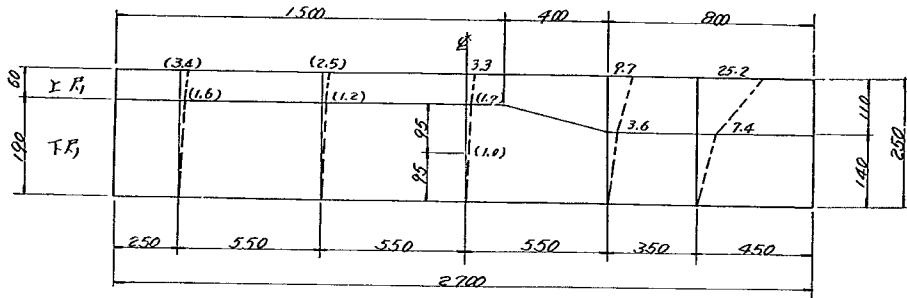
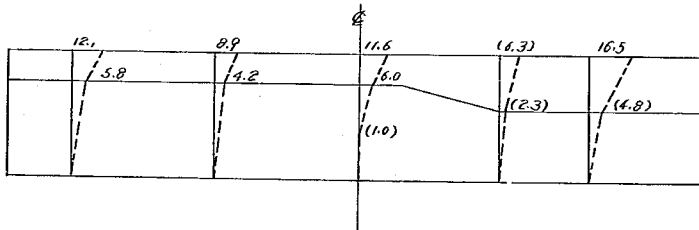


図-22 共振曲線(モデル3, トンネル軸方向)

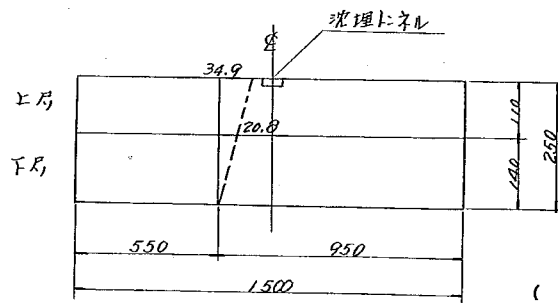
トンネル軸方向 周期 $T = 0.420 \text{ sec}$ 振動数 $f = 2.38 \text{ c/s}$



トンネル軸方向 周期 $T = 0.336 \text{ sec}$ 振動数 $f = 2.98 \text{ c/s}$



トンネル軸垂直方向 周期 $T = 0.440 \text{ sec}$ 振動数 $f = 2.27 \text{ c/s}$



() は推定値

入力変位 1.0 mm

縮尺 横 $1:20$

縦 $1:10$

寸法単位 mm

図-25 1次振動モード (モデル3)

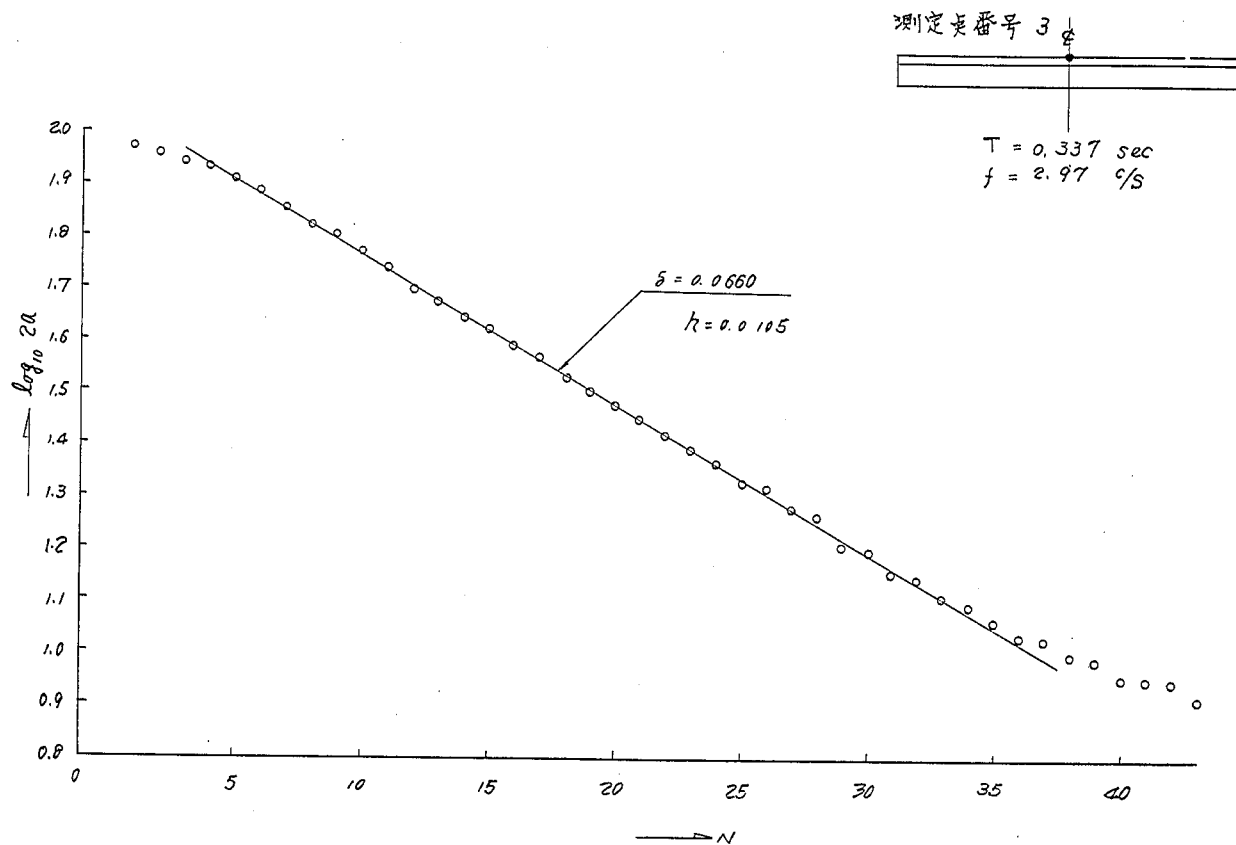
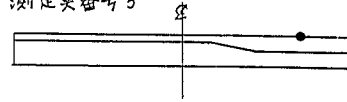


図-26 自由振動による減衰特性 (モデル1, トンネル軸方向)

測定装置番号 5



$$T = 0.413 \text{ sec}$$

$$f = 2.42 \text{ \%}$$

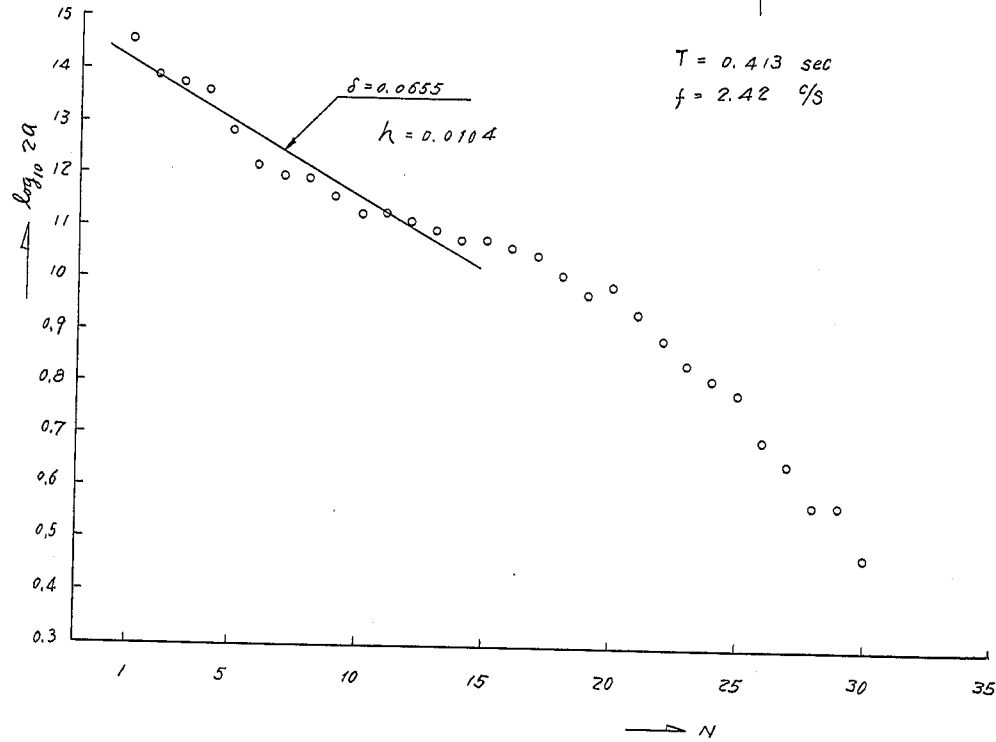


図-27 自由振動による減衰特性 (モデル 3, トンネル軸方向)

測定実番号 3 号



$T = 0.337 \text{ sec}$

$f = 3.01 \text{ 1/s}$

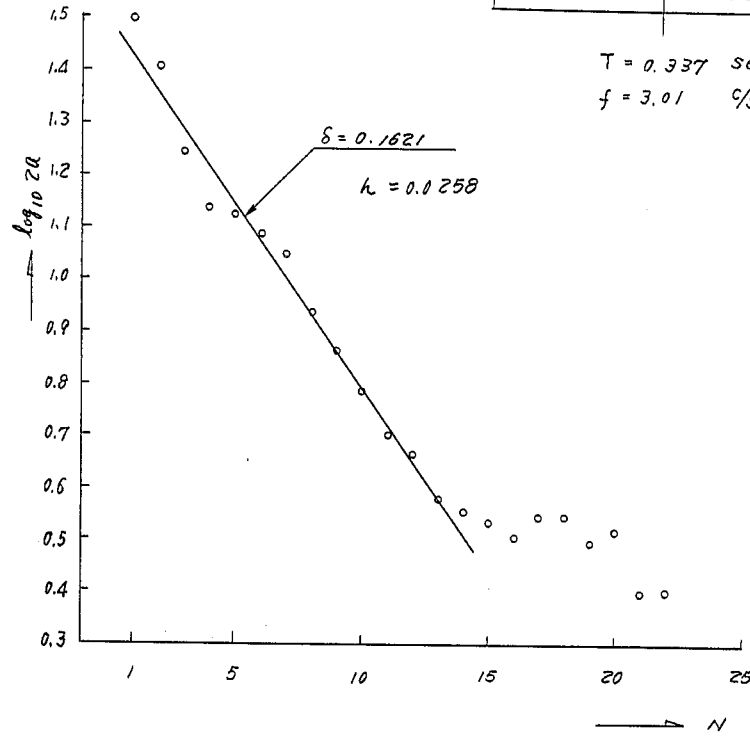


図-28 自由振動による減衰特性 (モデル3, トンネル軸方向)

モデル1 トンネル軸直角方向



PAGE 07

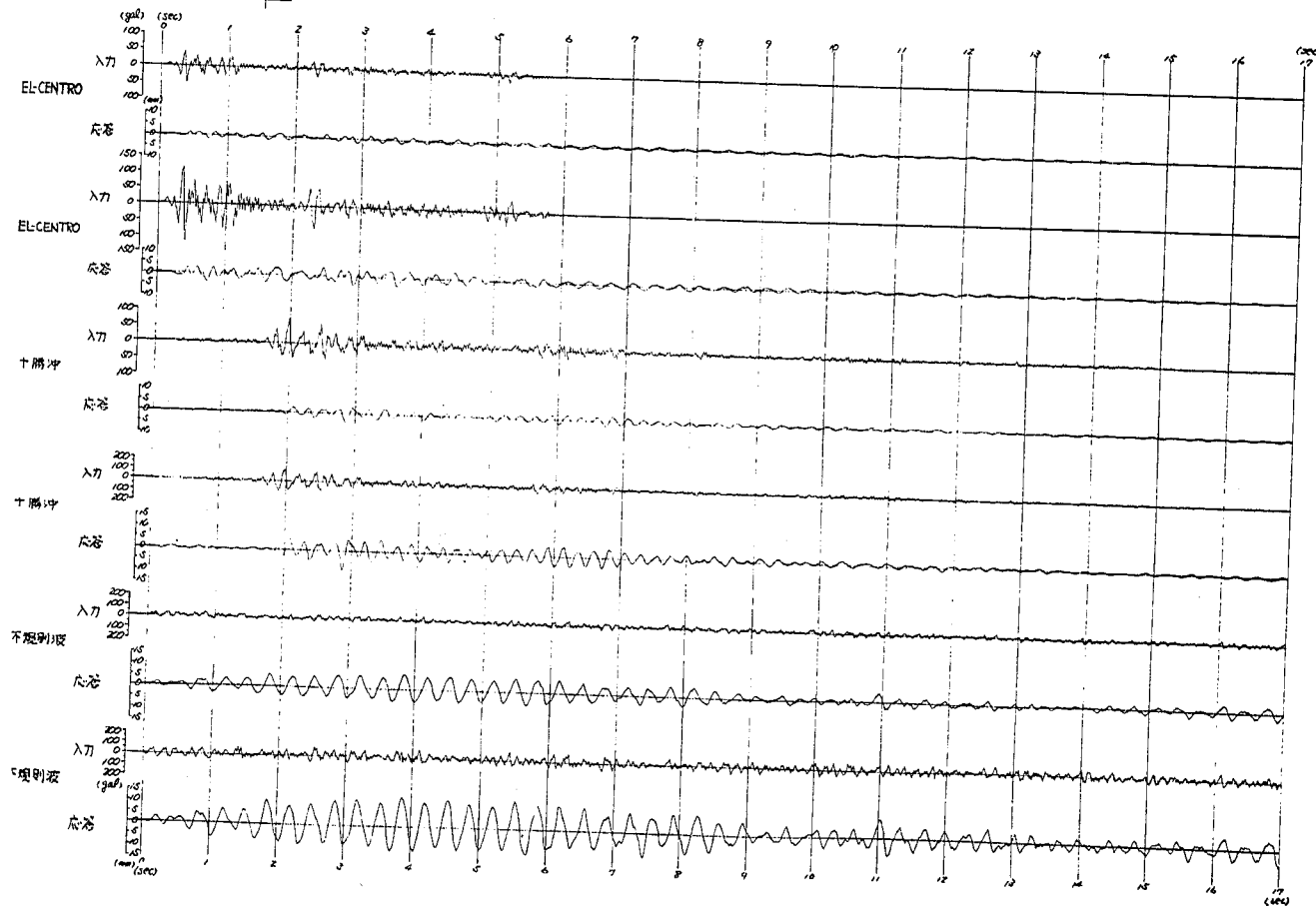


図-29 地震波によるモデルの応答変位 (モデル1, トンネル軸直角方向 測点番号2)

モデル2 トンネル軸方向

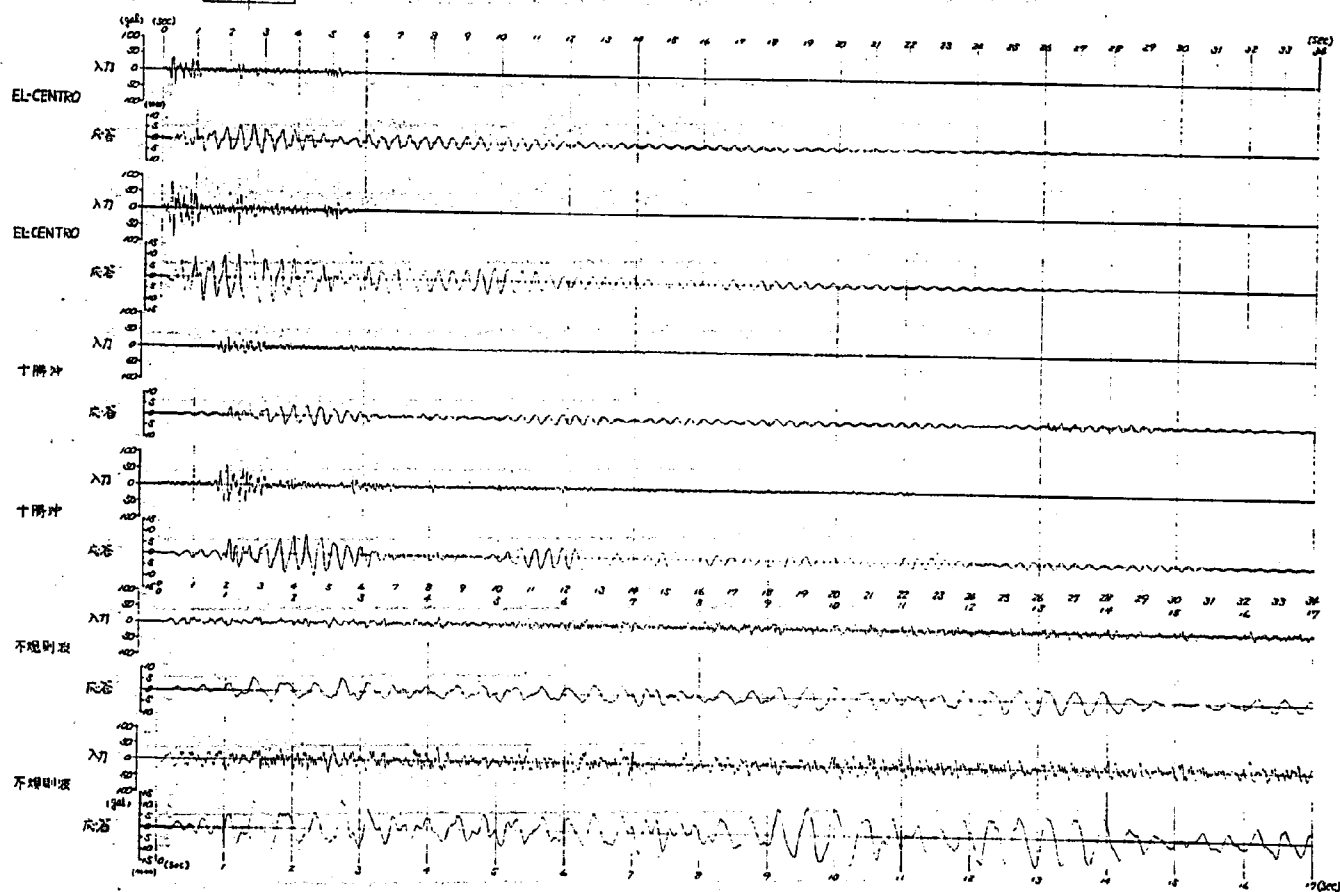


図-30 地震波によるモデルの応答変位(モデル2, トンネル軸方向 測点番号5)

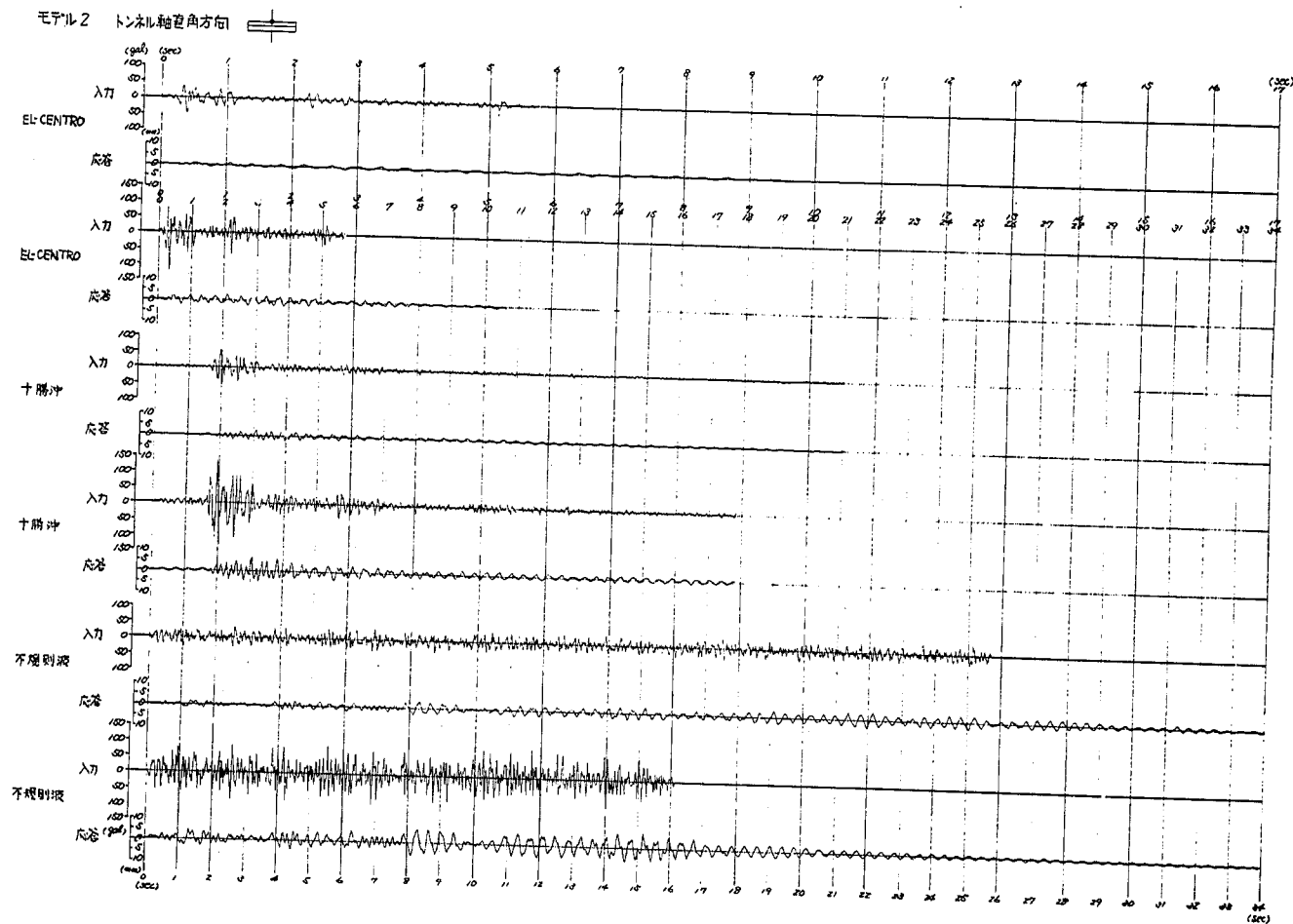


図-31 地震波によるモデルの応答変位 (モデル2, トンネル軸直角方向 測点番号2)

モデル 3 トンネル軸方向

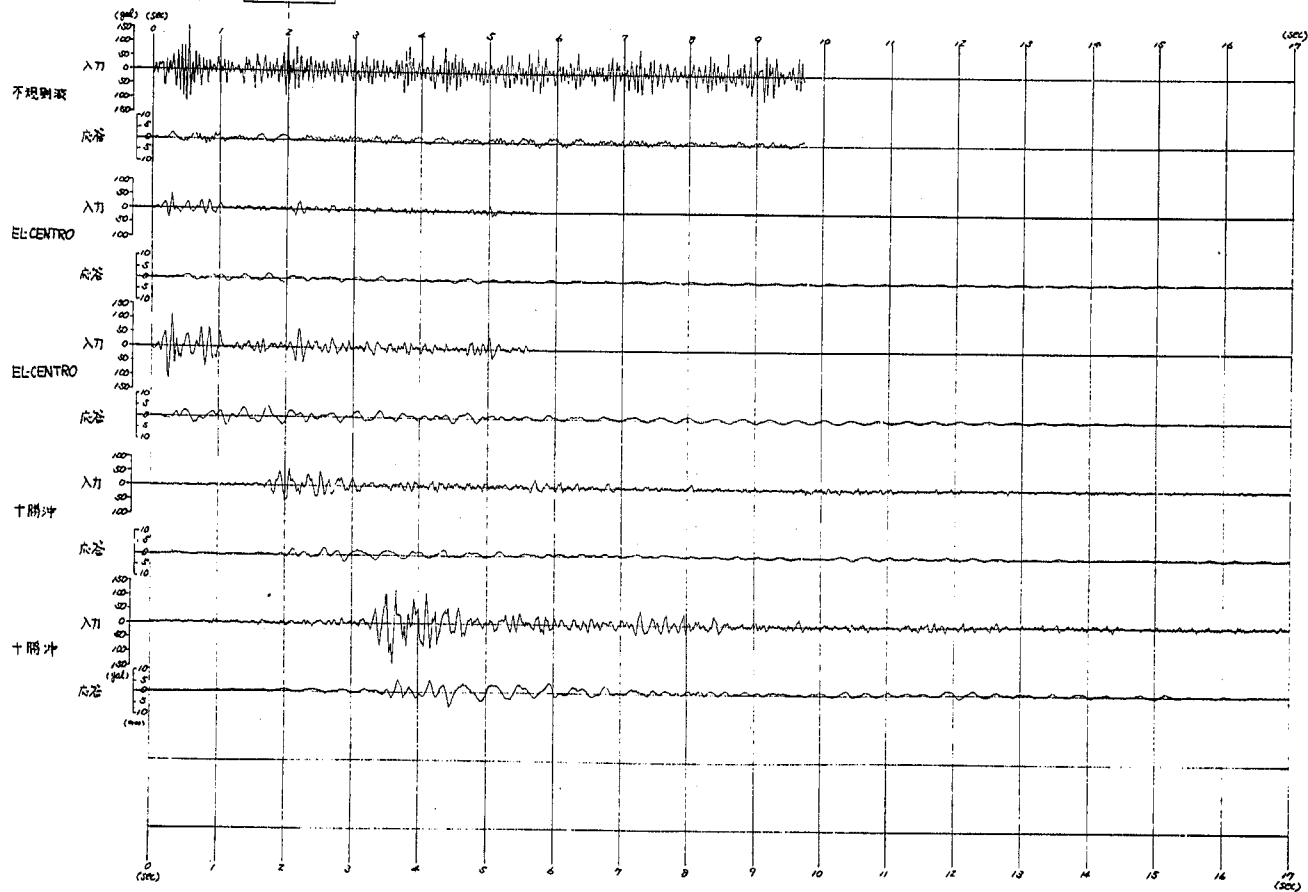


図-32 地震波によるモデルの応答変位 (モデル3, トンネル軸方向 測点番号5)

モデル 3 トンネル軸直角方向

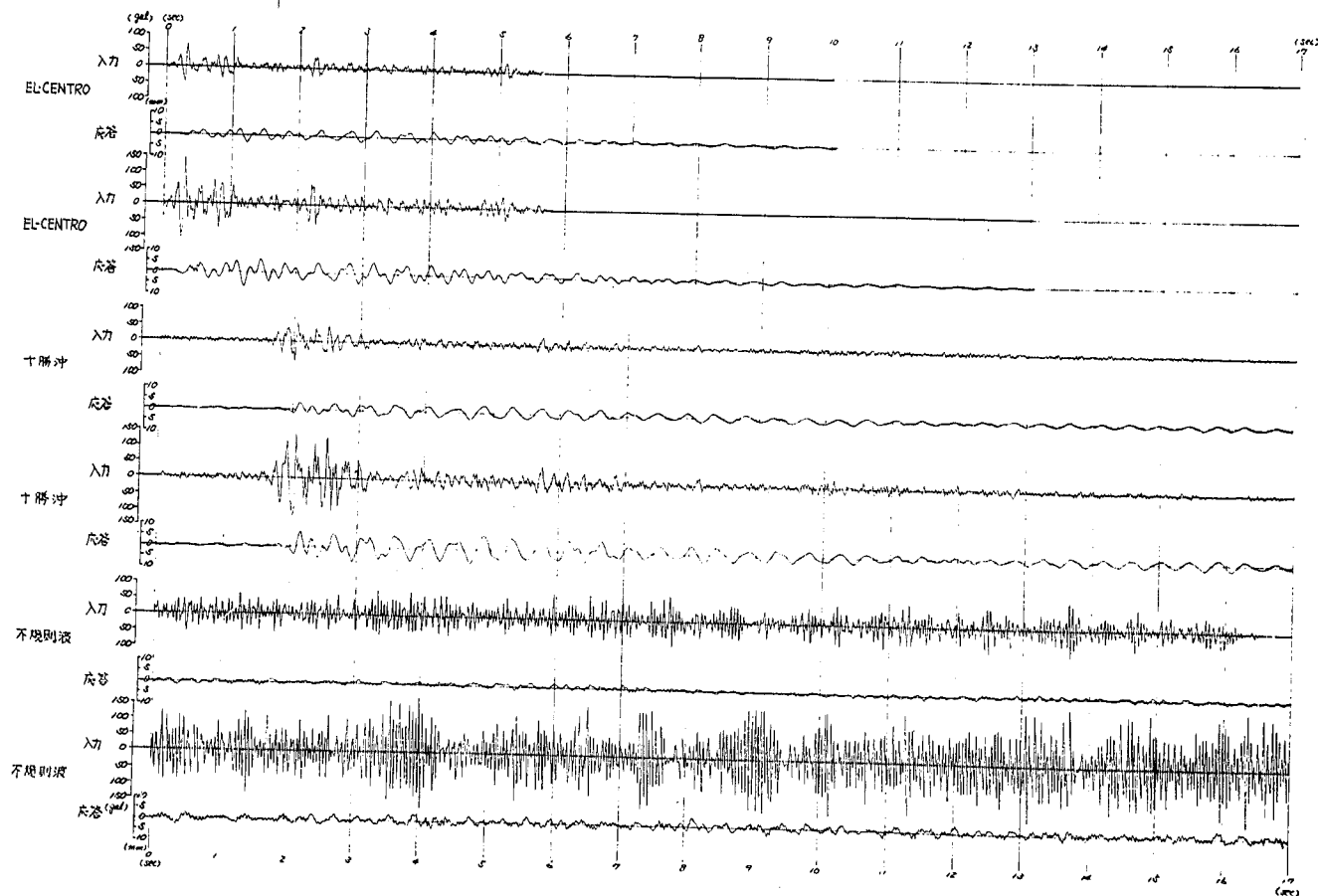


図-33 地震波によるモデルの応答変位 (モデル3, トンネル軸直角方向 測点番号2)

表— 3 原型と模型の諸定数

		原 型		模 型 (相似律から)		模 型 (実際の値)	
		第一層	第二層	第一層	第二層	第一層	第二層
地盤部	材 料	粘土質シルト	土 丹	ゼラチン	ゼラチン	同 左	
	平面寸法	750m×1,350m		1.50m×2.70m		同 左	
	層 厚	30~55m	95~70m	0.06~0.11m	0.19~0.14m	同 左	
	せん断速度	100m/sec	300m/sec	1 m/sec	3 m/sec	1.1m/sec	3.0m/sec
	せん断弾性係数	153Kg/cm ²	1,830Kg/cm ²	0.0102Kg/cm ²	0.0917Kg/cm ²	0.013Kg/cm ²	0.09Kg/cm ²
	ヤング率	459Kg/cm ²	5,320Kg/cm ²	0.0306Kg/cm ²	0.266Kg/cm ²	0.070Kg/cm ²	0.27Kg/cm ²
	単位重量	1.5 t/m ³	2.0 t/m ³	1.0 t/m ³	1.0 t/m ³	1.0 t/m ³	1.0 t/m ³
	ポアソン比	0.5	0.45	0.5	0.45	0.495	0.495
	基本周期	2 sec		0.4 sec		0.37 sec	
トンネル部	材 料	鉄筋コンクリート		ブ ム		ブ ム	
	平面寸法	37.4m×1,350m		0.075m×2.7m		0.075m/2.7m	
	厚 さ	8.45m		0.017m		0.017m	
	ヤング率	270,000Kg/cm ²		15Kg/cm ²		12Kg/cm ²	
	単位重量	2.5 t/m ³ (純1.0 t/m ³)		1.25 t/m ³ (純1.0 t/m ³)		1.35 t/m ³ (純1.0 t/m ³)	

縮 尺 率

長 さ $n = L_r/L_m = 500$

密 度 $m = \rho_r/\rho_m = 1.53$ (地盤第一層), 2.04 (地盤第二層)

時 間 $t = T_r/T_m = 5$

速 度 $v = V_r/V_m = n/t = 100$

加 速 度 $\alpha = A_r/A_m = n/t^2 = 20$

弾 性 係 数 $e = G_r/G_m = mn^2/t^2 = 1.5 \times 10^4$ (地盤第一層).
 2.0×10^4 (地盤第二層)

ポアソン比 $\nu = \nu_r/\nu_m = 1$

表-4 共振時変位応答倍率（実変位／入力変位）の比較

(a) トンネル軸方向

モデル 固有周期 格点	モデル 1	モデル 2	モデル 3	
	0.338秒	0.395秒	0.420秒	0.336秒
1	54.3	9.5	3.4	12.1
2	53.1	6.3	2.5	8.9
3	39.4	3.6	3.3	11.6
4	44.1	11.2	9.7	6.3
5	58.6	53.9	25.2	16.5
6	41.6	7.4	1.6	5.8
7	31.4	5.2	1.2	4.2
8	31.8	3.0	1.7	6.0
9	33.1	1.6	3.6	2.3
10	36.9	28.2	7.4	4.8
11	18.6	—	1.0	1.0

(b) トンネル軸直角方向

モデル 固有周期 格点	モデル 1	モデル 2	モデル 3
	0.332秒	0.388秒	0.440秒
2	77.3	37.4	34.9
5	64.2	19.3	20.8
7	36.2	—	—

表-5 各モデルの減衰定数

(a) トンネル軸方向

モデル 測点番号	1	2	3
1	0.0098	—	0.0241
2	0.0112	—	0.0266
3	0.0105	—	0.0258
4	0.0106	—	0.0092
5	0.0097	0.0099	0.0104
6	0.0096	—	0.0202
7	0.0103	—	0.0249
8	0.0107	—	0.0243
9	0.0099	—	0.0094
10	0.0105	—	0.0076
11	0.0101	—	0.0049

(b) トンネル軸直角方向

モデル 測点番号	1	2	3
2	0.0084	0.0097	0.0155
	0.0082	0.0079	—
	0.0083	0.0091	—
5	0.0086	—	—
7	0.0086	—	—

6. 実験結果の検討

この節では模型振動実験より得られた結果をとりまとめるとともに簡単な考察を加える。

6.1 模型共振振動数

図-15～22に示す共振曲線から各モデルの一番卓越する振動数を読みとると、モデル1に関してはトンネル軸方向の振動では2.96%、軸直角では3.0%とほぼ同一の値である。モデル2に関してはトンネル軸方向の振動の場合、表面の軟らかい層が厚い部分が共振する振動では2.53%、薄い部分が共振する振動では2.65%と地盤の変化による違いが見られる。軸直角方向では2.58%とほぼ両者の中間値を示している。モデル3に関しては、モデル2と同じ傾向で、軸方向では、表面層の厚さの違い部分で、2.38%と2.98%で共振しており、軸直角方向では2.27%で共振している。ただ、モデル3はモデル2に沈埋トンネルを埋設したものであるが、その差は軸方向振動では表面の軟らかい層の厚い部分では沈埋管の入った方が長周期となっているのに対し、薄い部分では短周期となっている、一方軸直角方向振動では長周期となっており、沈埋トンネルが入った事による影響はこの共振振動数の結果からは単純には評価できない。

6.2 振動モード

図-23～25に各モデルの共振振動数付近の振動モードを示しているが、いずれも、せん断型の振動をしている、前節に述べたように表面の軟らかい層が厚い部分がよく振動しているモードと、薄い部分がよく振動している様子が良くわかる、沈埋トンネルが埋設された事による影響は振動モードから検討すると全体の変形に対する拘束が大きくなっている様子が見られる。

なお16mm撮影機で記録されたフィルムを解析した結果を図-34～43に示す。これによるとモデル1では割合きれいなせん断振動をしているが、地層の変化するモデル2や沈埋トンネルの入ったモデル3では、特に軸方向の振動は必ずしもきれいなせん断振動をしているとは見なし難い。

6.3 減衰定数

図-26～28に自由振動による減衰の様子を示しているが、均一な地層構造のモデル1ではきれいに減衰しているが、地層が変化したり、沈埋トンネルが入ると減衰の様子が波うち、変位の大きさによって減衰も変化しているように考えられる。表-5に各モデルに対して得られた減衰定数を示しているが、モデル1のトンネル軸方向では $h=0.01$ 、トンネル軸直角方向では $h=0.0085$ 、モデル3の軸方向では表面の軟らかい層の厚い部分では $h=0.01$ で、薄い部分では $h=0.025$ となっており沈埋トンネルによる拘束がここでも見られる。

6.4 地震波による模型の挙動

図-29～33に各モデルに対する、EL CENTRO 地震、十勝沖地震、不規則波に対する測点の変位記録を示している、これより入力波の振動台上の最大加速度と測点の最大応答変位を読み取ると表-6のようになる。

入力地震波は実地震の加速度記録から長周期成分を取り除いて変位記録にしたものである。なので目標とした最大加速度と振動台上での実測値は±40%程度の値となっている。

表-6より、モデル全体を通して、EL CENTRO 地震波と比べて、より長周期成分を持つ十勝沖地震波に対する応答変位が大きく出ているように思われる。

またモデル2とモデル3を比較すると、トンネル軸方向の振動に関しては沈埋トンネルが埋設されたことによって拘束され応答変位は小さくなっている。

地震波による模型の挙動については、さらに波形解析を行ない周期特性などについても検討する必要があると考えられる。

表-6 地震波による最大応答変位

振動 方向	測点 番号		地震波		EL CENTRO (1940) NS		十勝沖 (1968) 八戸	
	モデル	番号	1	2	1	2	1	2
トンネル軸 直角方向	1	2	1.4 mm	3.5 mm	47.4 gal	118 gal	3.9 mm	8.7 mm
	2	2	1.0 mm	2.5 mm	50.5 gal	125 gal	2.4 mm	5.9 mm
	3	2	3.1 mm	6.2 mm	71.5 gal	142 gal	3.0 mm	6.7 mm
トンネル 軸方向	2	5	6.5 mm	12.5 mm	47.4 gal	94 gal	4.6 mm	9.3 mm
	3	5	2.1 mm	4.6 mm	52.5 gal	115 gal	2.6 mm	6.2 mm
							6.0 gal	142 gal

注) 測点の最大変位/入力の最大加速度 (振動台上)

モデル 1. トンネル軸方向 表面

$f = 2.96\%$ 入力変位 0.35mm

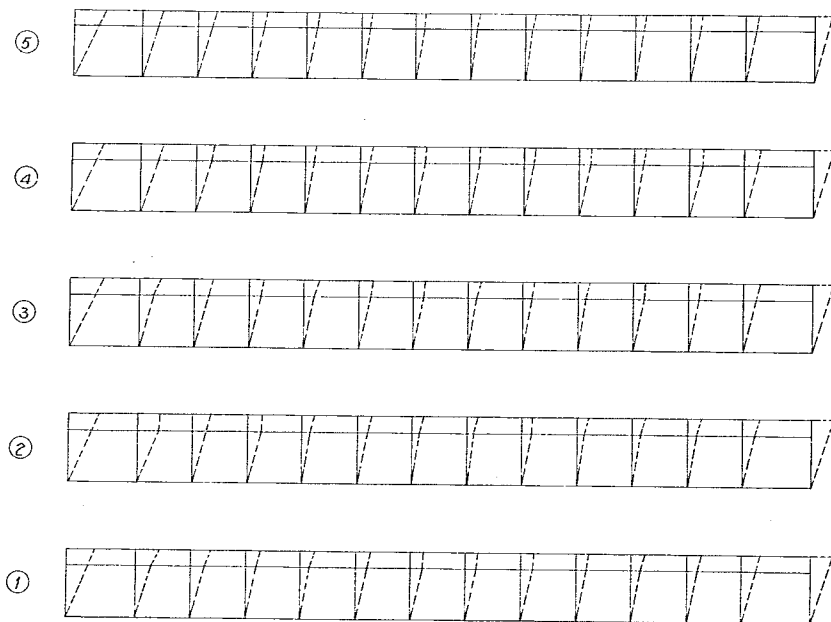
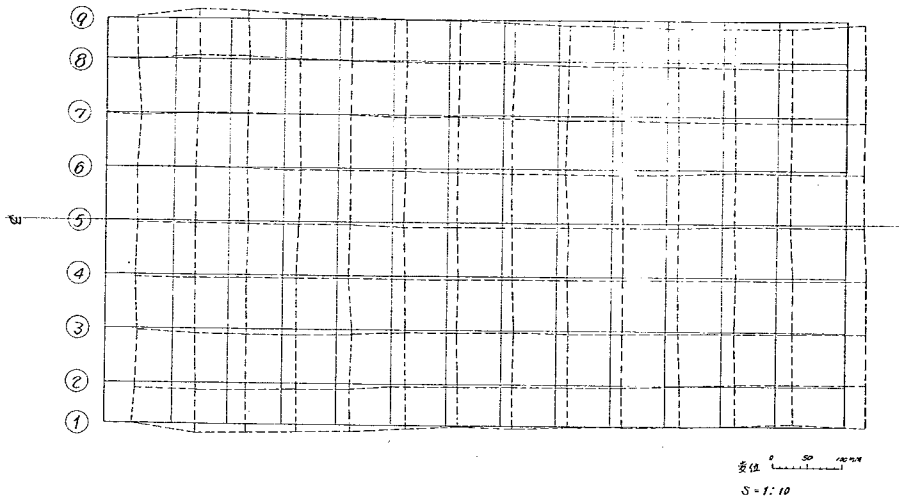


図-34 振動モード図 (モデル 1, トンネル軸方向)

モデル 1. トンネル軸直角方向 表面

$f = 3.0 \text{ 2 } \%$

入力変位 0.10 mm

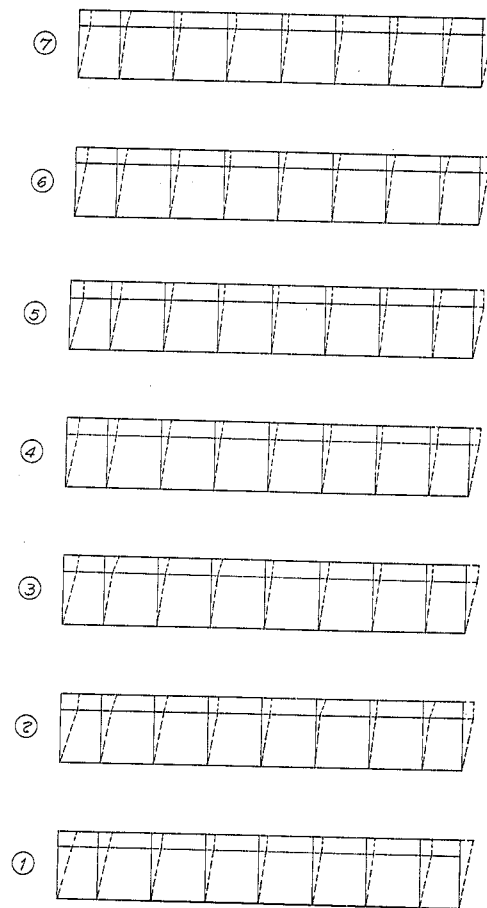
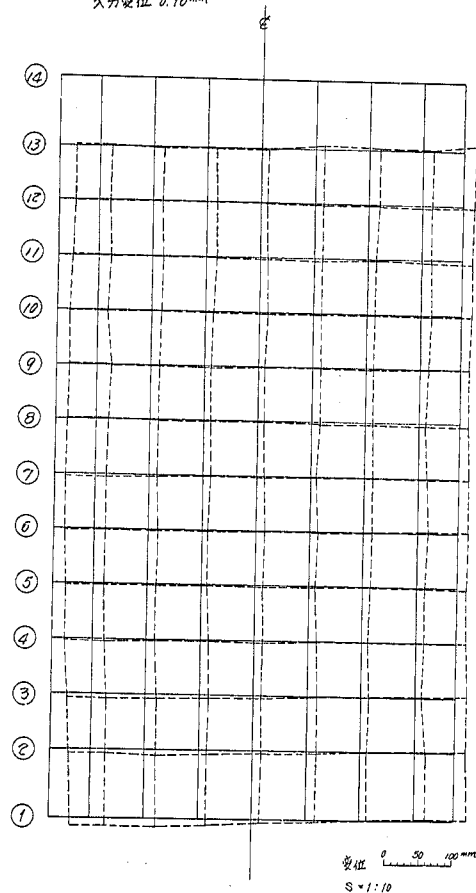


図-35 振動モード図 (モデル 1, トンネル軸直角方向)

モデル 2. トンネル軸方向表面
2.53% 入力変位 0.09mm

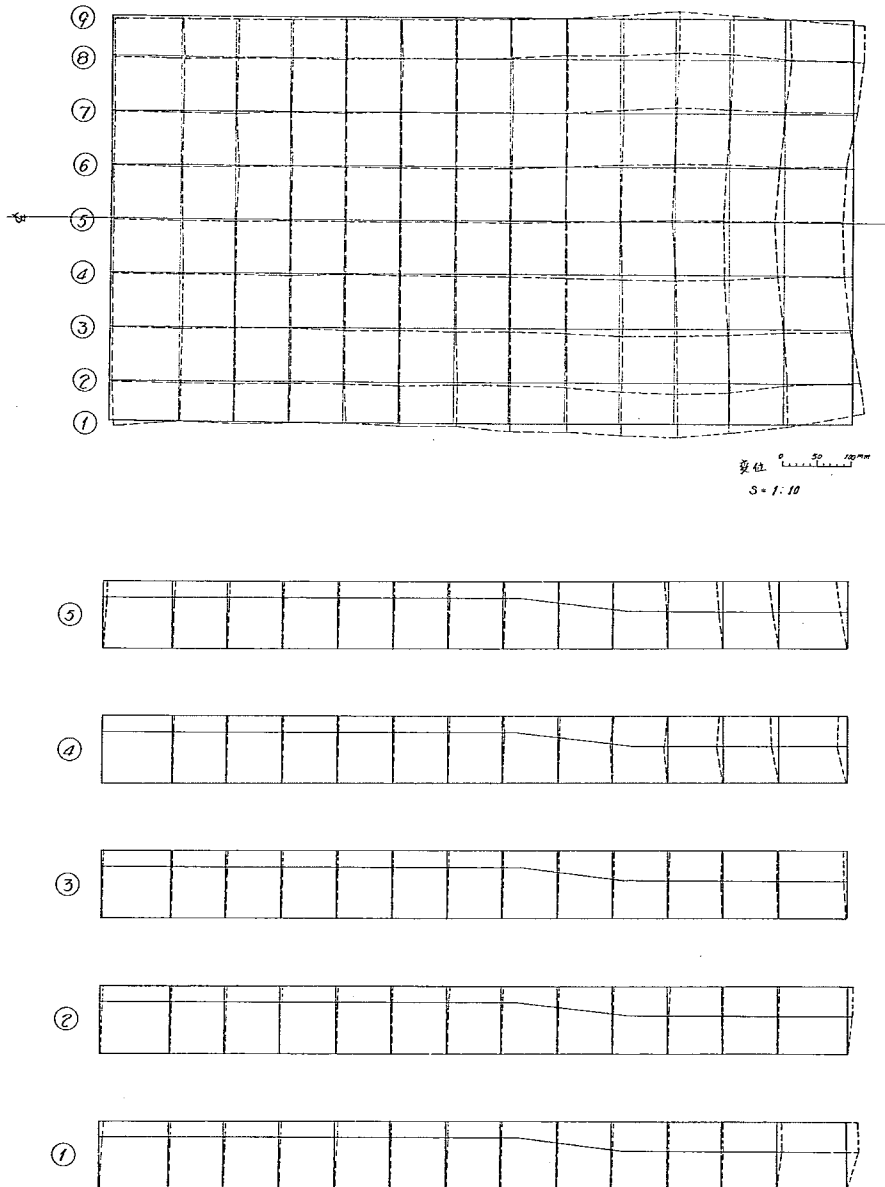


図-36 振動モード図 (モデル 2, トンネル軸方向)

モデル2. トンネル軸方向 表面

2.65% 入力変位 2.00mm

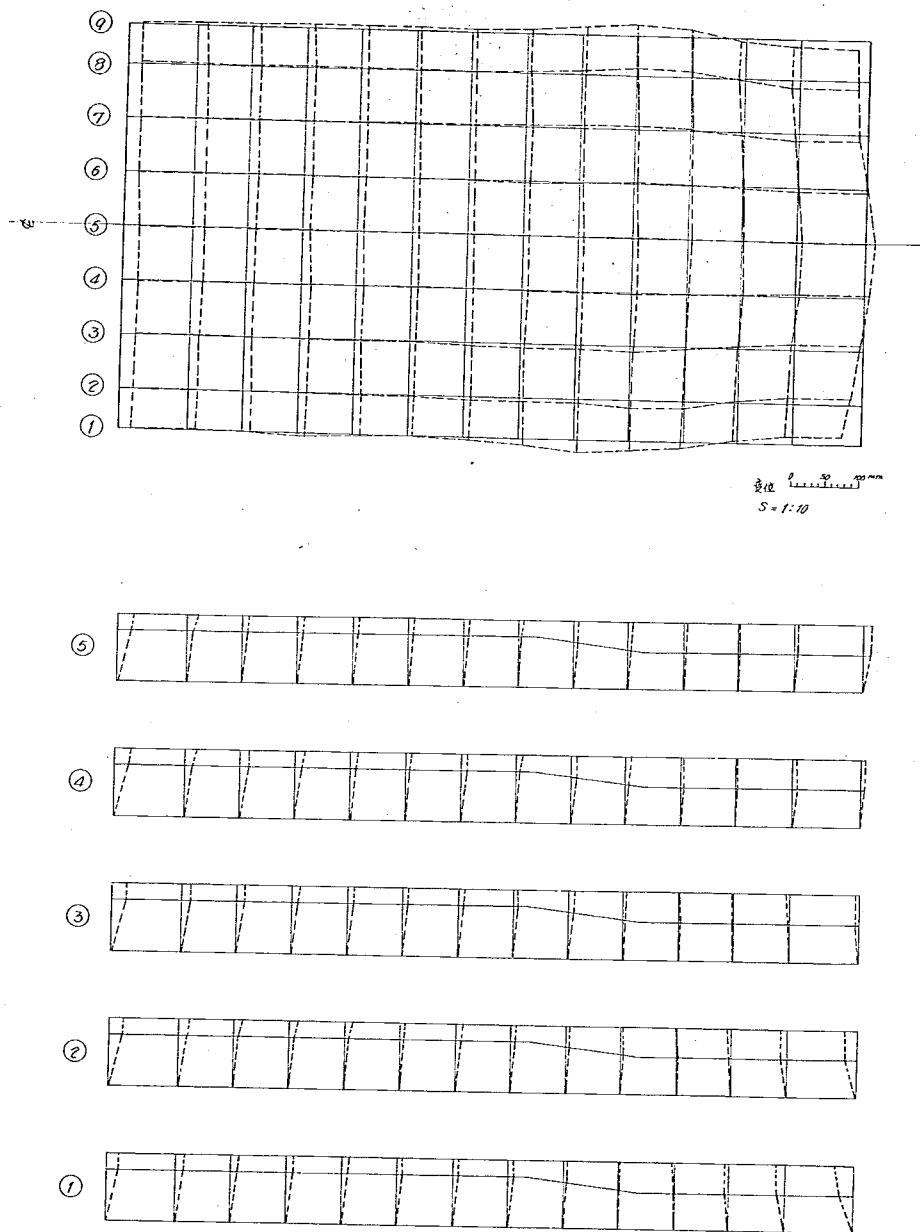


図-37 振動モード図 (モデル2, トンネル軸方向)

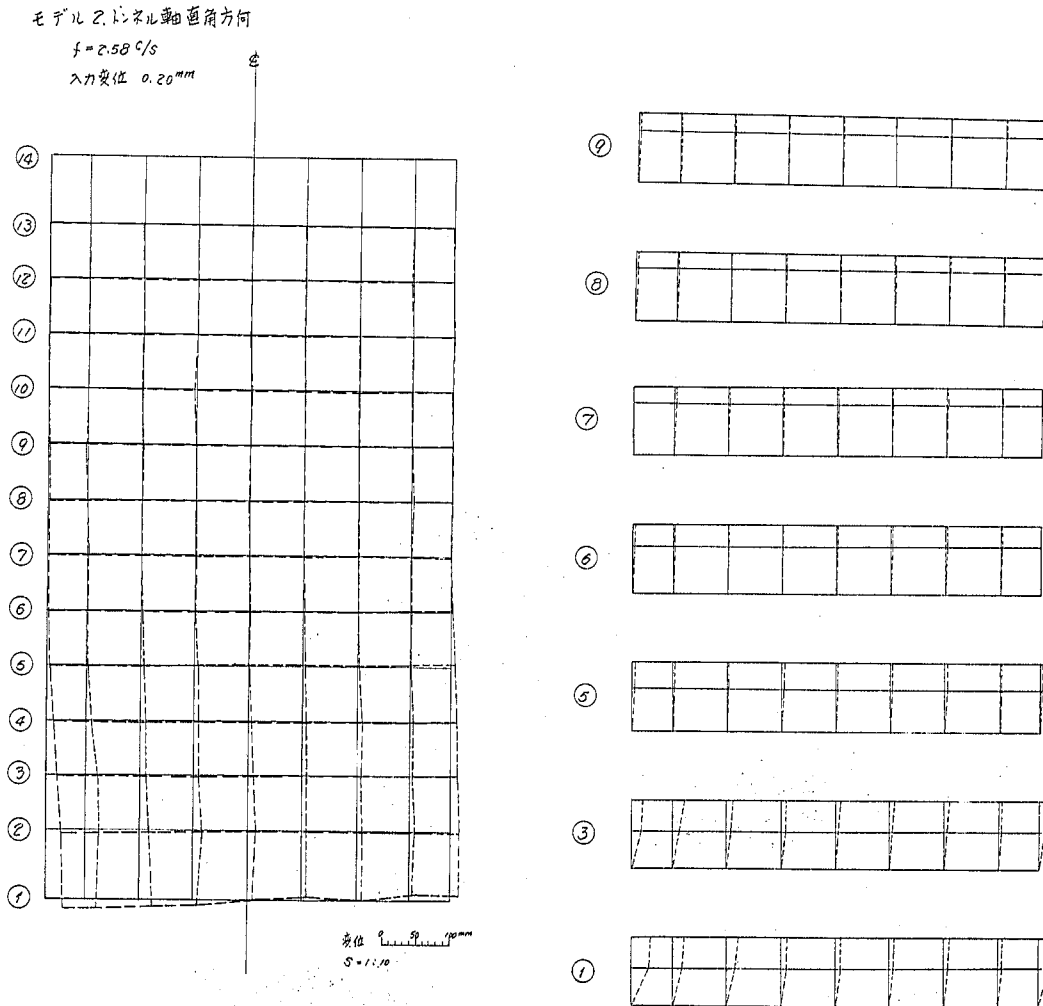


図-38 振動モード図 (モデル2, トンネル軸直角方向)

モデル2 トンネル軸直角方向表面

$f = 2.63 \text{ 1/s}$

λ 変位 0.20 mm

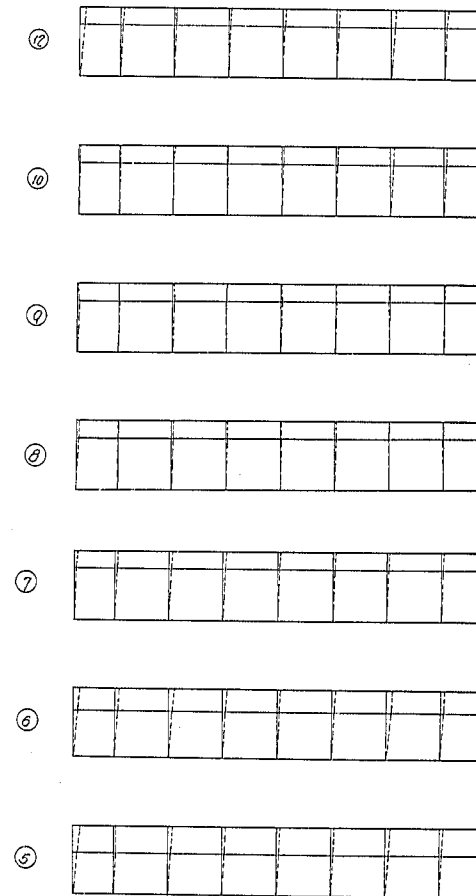
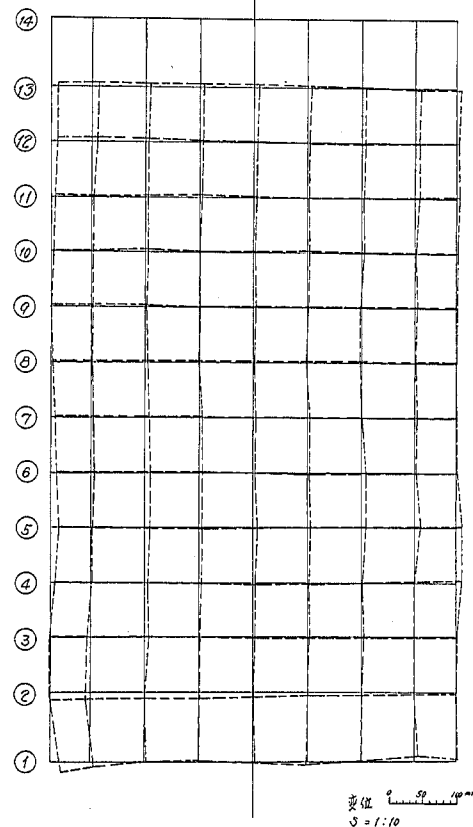
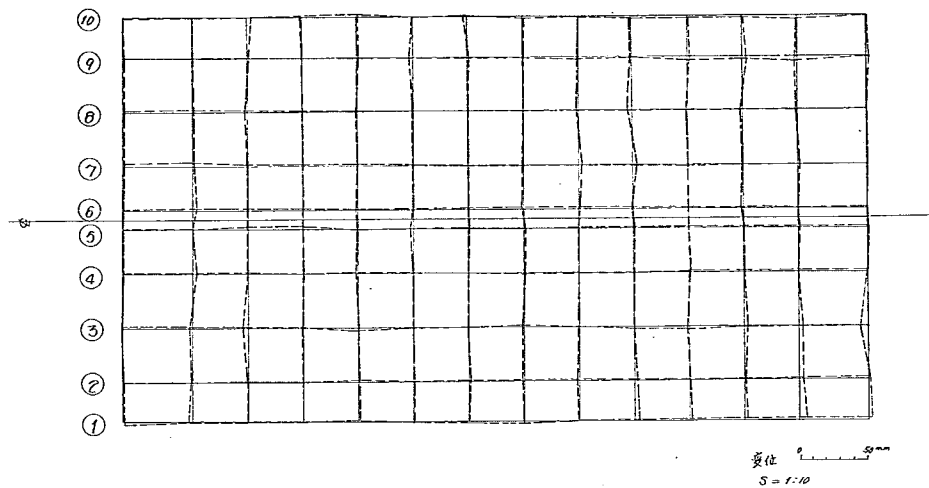


図-39 振動モード図 (モデル2, トンネル軸直角方向)

モデル 3. トンネル軸方向 表面

2.00 % λ 変位 0.10 mm



モデル 3 トンネル軸方向

2.00 % λ 変位 0.10 mm

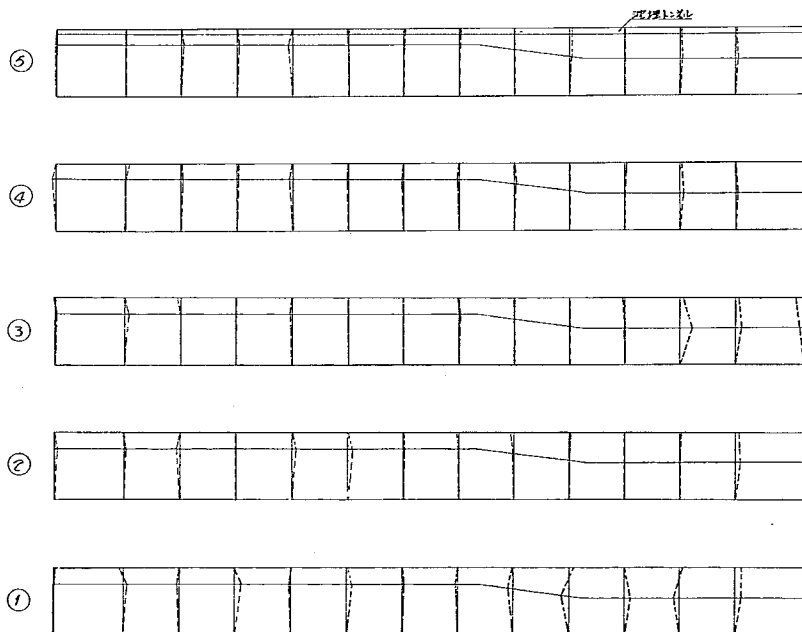


図-40 振動モード図 (モデル 3, トンネル軸方向)

モデル 3. トンネル軸方向 表面
2.96% 入力歪度 0.10mm

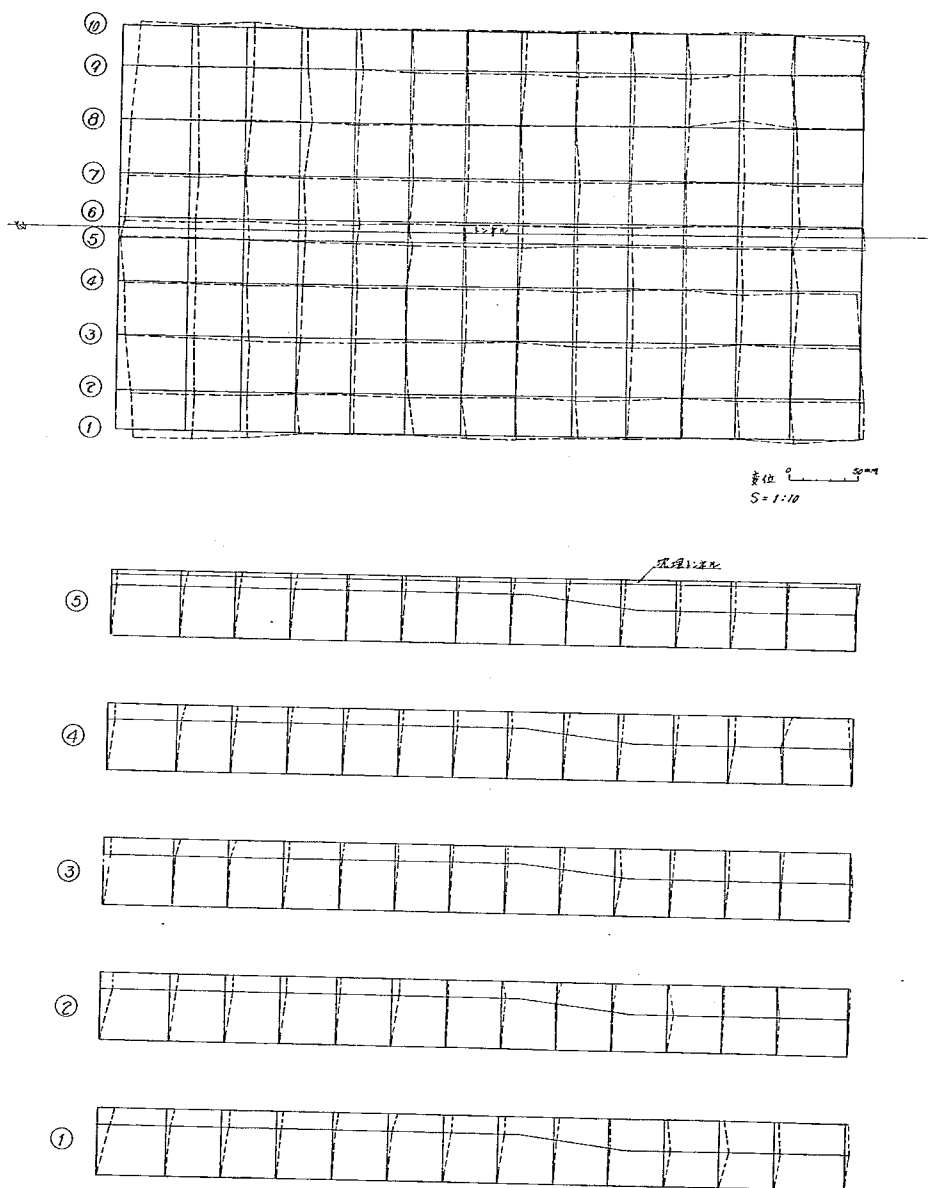


図-41 振動モード図 (モデル 3, トンネル軸方向)

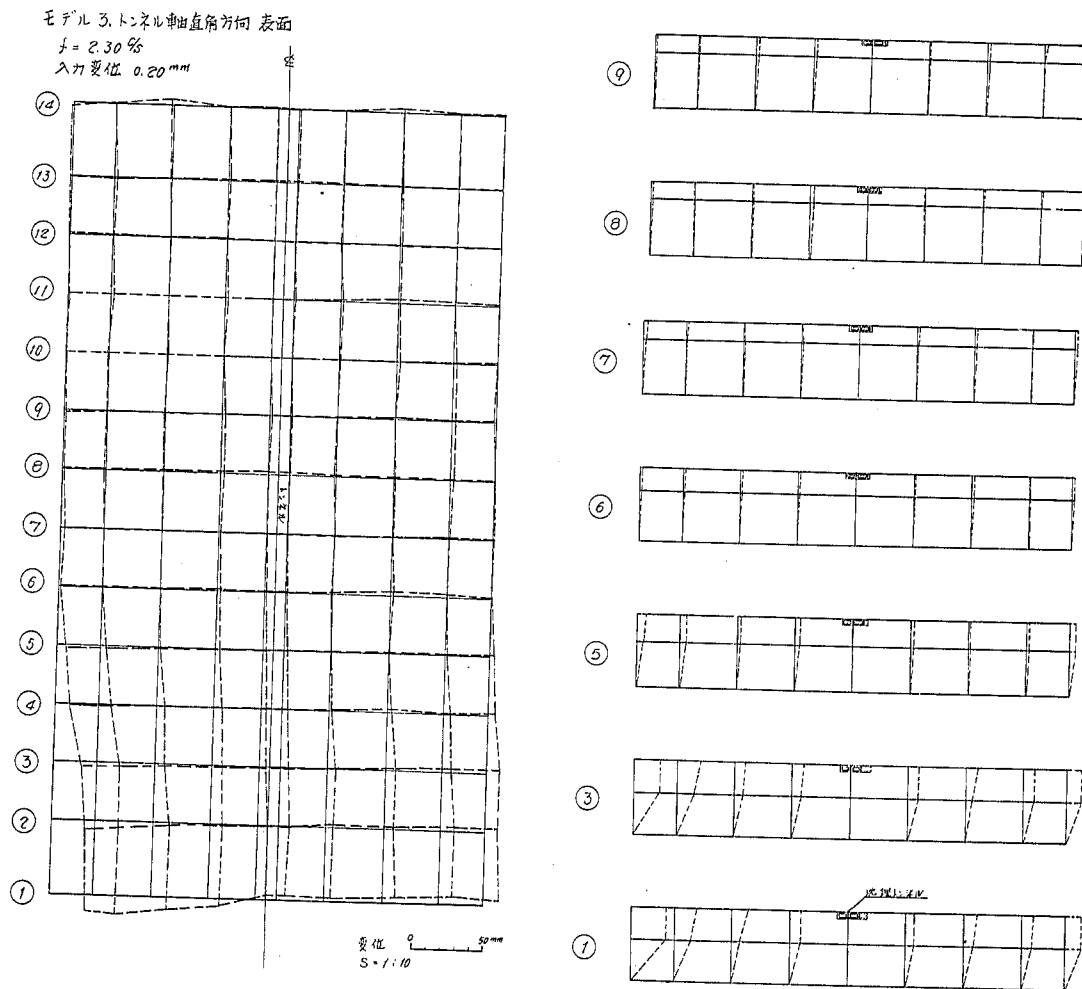


図-4.2 振動モード図 (モデル 3, トンネル軸直角方向)

モデル 3, トンネル軸直角方向 表面

$f = 2.74 \text{ 9/s}$

λ 77 変位 0.20 mm

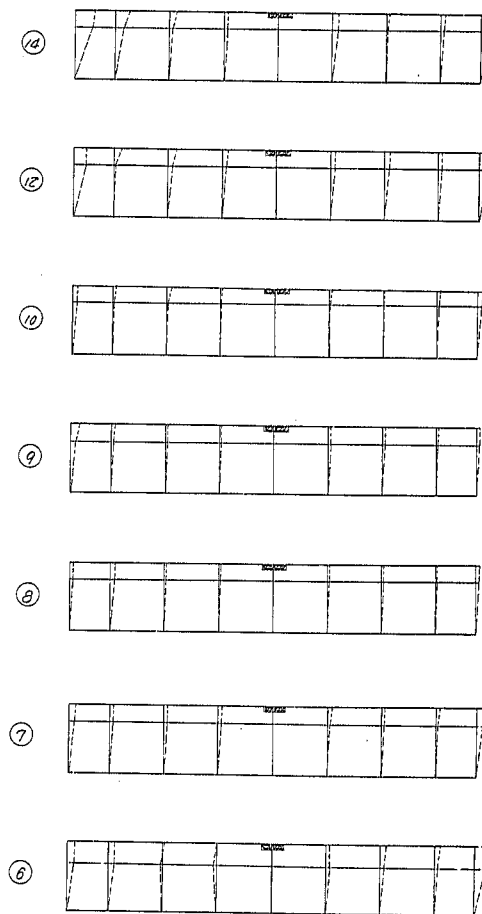
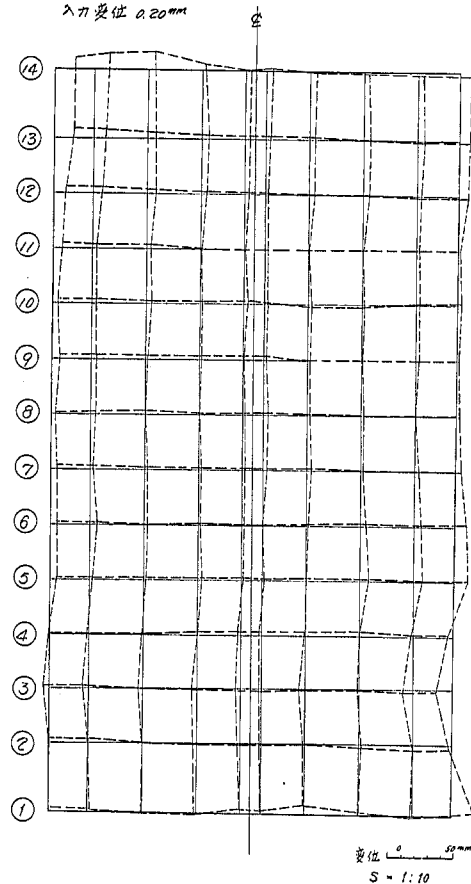


図-48 振動モード図 (モデル 3, トンネル軸直角方向)

あ と が き

前節までに今回実施した沈埋トンネル模型振動実験の概要を示した。

この実験を通して次のような事項を指摘することが出来る。

- (1) 地盤模型材料としてのゼラチンは所要の弾性定数が得られる点では優れた材料である。ただし特に温度による影響が著しいので、温度をコントロールできる実験室がない場合、実験の時期が11月以降の秋冬期に限定される事を考える必要がある。
- (2) 今回の実験では変位の計測が中心であったが、トンネル内での応力関係の計測も今後の重要な課題であろう。
- (3) 模型の振動状態を観察すると、境界を自由としているので、時に隅角部において、その部分のみが共振するという様な振動がみられた、これは実際の地盤の振動状態とは別な、模型としての振動で、このような振動をなくするような処置、例えば隅角部を切り取るという工夫が必要と考えられる。
- (4) 模型の変位は光学式変位計、16mm撮影機によって行なったが、光学式変位計は一測点のみの振動を観測するものであり、16mm撮影機は模型の全体的な振動を観測できる、両者を効果的に用いることが必要である。
- (5) モデル2のように表面の軟らかい層の厚さが変化する場合、表面に沿って波が伝わってゆく現象が観察された。この問題も今後の実験において十分検討する必要がある課題の一つであると思われる。

本実験にあたり、建設省関東地方建設局ならびに東京湾岸道路調査事務所、科学技術庁防災科学技術センターの方々の御協力を得たことに感謝致します。

沈埋トンネルの耐震性に関する調査報告
——沈埋トンネルの模型振動実験——

土研資料第747号
昭473(1971)

栗林栄一、岩崎敏男、辻 勝成

キーワード

沈埋トンネル・模型振動実験・大型振動台・ゼラチン

要 旨 この報告書は東京湾岸道路沈埋トンネルを対象として、防災
科学技術センター(筑波)の大型振動台によつて行なつた模型振動実験につ
いてとりまとめたものである。模型は $1/500$ のスケールのもので、地盤を
ゼラチンで、沈埋トンネルを合成ゴムで作っている。

郵便はがき

七円切手
はって下さ
い

2 8 0 - □ □

建設省土木研究所
振動研究室
御中

千葉県千葉市穴川
四丁目十二番五二号

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第747号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印

