

095



大規模特殊事業調査	
トンネルに関する調査	
耐震調査	資料No. 4
盛土に関する調査	
耐震調査	資料No. 1

土木研究所資料

第852号

沈埋トンネルおよび盛土の耐震性に関する調査報告

——沈埋トンネルおよび盛土の模型振動実験——

昭和48年12月

建設省土木研究所
振動研究室

目 次

ま え が き	1
1 実 験 計 画	1
§ 1 実 験 の 目 的	1
§ 2 実 験 の 対 象	1
§ 3 模 型 設 計	1
3-1 模型相似率の決定	1
3-2 模型材料の選定	1
3-3 地盤、盛土のモデル化	2
3-4 沈埋トンネル、換気塔のモデル化	2
3-5 計測器の種類と設置点	3
2 模型地盤材料試験	13
§ 1 概 説	13
§ 2 実 験 方 法	14
§ 3 実 験 内 容	14
3-1 硬化後の時間経過の影響	14
3-2 ケミカル・グラウト剤（主剤）濃度の影響	14
3-3 硬化後の温度変化の影響	15
3-4 供試体作成時の溶液温度の影響	15
3-5 ペントナイト濃度の影響	15
3-6 触媒（促進剤・開始剤）濃度の影響	15
§ 4 試験結果およびゼラチンとの比較	15
4-1 試験結果の検討	15
4-2 ゼラチンとの比較	16
3 予 備 試 験	19
§ 1 概 説	19
§ 2 模型端面における境界条件の影響	19
4 模 型 製 作	20
§ 1 模 型 製 作	20
§ 2 模型寸法および弾性係数	20
5 振 動 実 験	22
§ 1 概 説	22
§ 2 実験の種類と方法	22
2-1 正 弦 波 試 験	22
2-2 自由振動試験	22
2-3 振動モード測定実験	22
2-4 地震波振動試験	22
§ 3 実 験 結 果	23
3-1 モデルー1、トンネル軸直角方向加振（実験1）	23

3-2 モデル-1, トンネル軸方向加振 (実験2)	24
3-3 モデル-2, トンネル軸方向加振 (実験3)	25
3-4 モデル-2, トンネル直角方向加振 (実験4)	28
6 実験結果の検討	61
§1 応答倍率	61
1-1 減衰定数	61
1-2 正弦波振動実験による応答倍率	61
1-3 地震波振動実験による応答倍率	61
§2 振動特性	61
2-1 盛土	61
2-2 沈埋トンネルと換気塔	62
§3 模型実験法	62
3-1 模型境界の影響	62
3-2 計測	62
あとがき	67

沈埋トンネルおよび盛土の耐震性に関する調査報告

—— 沈埋トンネルおよび盛土の模型振動実験 ——

ま え が き

本報告書は東京湾横断道路沈埋トンネルおよび盛土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。

昭和46年度には東京湾岸道路沈埋トンネルを対象とし、地盤を上下二層にモデル化した実験を行い、その中に沈設された沈埋トンネルの振動性状をある程度把握することができた。今回の実験は地盤構成をさらに忠実に再現するとともに、盛土等が建設され、その中に沈埋トンネルが敷設される場合の地盤 — 盛土 — 沈埋トンネル系の振動性状を調査することを目的としたものである。

本実験は科学技術庁防災科学技術センター大型振動実験台を用いて実施したもので、同耐震実験室との共同研究である。

昭和 48 年 12 月

振動研究室	栗 林 栄 一
	岩 崎 敏 男
	川 島 一 彦
	若 林 進
	木 本 正 則
	若 月 高 晴
	高 木 義 和

1 実験計画

§1 実験の目的

本実験は建設省関東地方建設局において調査が進められている川崎～木更津を結ぶ東京湾横断道路の主要部に建設が検討されている沈埋トンネルと盛土（人工島）の振動性状を調査する目的で行なったものである。

横断道路が計画されている湾央部では、表層にヘドロ、粘土層、軟弱砂層等より成るN値10以下のきわめて軟質な層があり、この様な軟弱地盤上に盛土を建設し、沈埋トンネルを敷設した場合には、表層地盤および盛土の動的な挙動が沈埋トンネルの振動特性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。昭和46年度に行なった実験では、上下二層から成る模型を製作し、その中に埋め込まれた沈埋トンネルの振動性状をある程度把握することができたので、今回の実験は地盤構成や盛土部、換気塔などをできるだけ実際に近い形にモデル化することを基本にして、次の点に検討の重点を置いて実施した。

- (1) 沈埋トンネルと盛土の振動性状の違いによる沈埋トンネル終端部（接続部）付近の挙動の検討
- (2) 沈埋トンネル軸方向の振動の検討
- (3) 換気塔と沈埋トンネル接合部の挙動の検討

§2 実験の対象

関東地方建設局湾岸工事事務所が計画していた図1-1に示すように中央人工島の両側に沈埋トンネルを接続するという案を基本にして、これを一般化するため、図1-2および1-3に示す沈埋トンネルを中心にしたモデル1と盛土を中心にしたモデル2の2種類のモデル化を行なった。

海底地盤は図1-4の東京湾湾央部の計画路線に沿ったボーリング結果及び図1-5のせん断波速度試験結果に示されている様に、最上部軟弱粘土層のへ層、上部砂泥互層のロ層、中部砂礫層のニ-1層およびニ-2層、下部砂泥互層のホ-1層、下部泥層のホ-2層、下部砂層のト層、最下部層のト層およびそれ以下の第三紀層より成っており、支持層と見なされるホ層、へ層、ト層までの平均深さは海水面下50～60mである。各層の種別及び力学定数等の一覧を表1-1に示す。

沈埋トンネルの断面構成は図1-6に示すように幅42.4m、高さ12.65mの長方形断面を持ち往復6車線で設計されている。

換気塔は図1-7に示す構造を対象とした。図では示されていないが換気塔底面からは鋼管杭が4m間隔でニ-1層に達するまで打たれている。

§3 模型設計

3-1 模型相似率の決定

模型相似率は地盤部は弾性係数比を、沈埋トンネル部はトンネル軸直角方向の曲げ剛性比を合わせることにし、振動台の大きさ、模型材料、模型地盤の最小弾性係数、測定法、模型製作法、コスト等を種々検討した結果、長さの縮尺比 n 、密度の縮尺 m 、時間の縮尺 t を次の様に選定した。

$$n = L_p / L_m = 550$$

$$m = P_p / P_m = 1.45 \sim 1.90$$

$$t = T_p / T_m = 5$$

これらを基本縮尺として選ぶと、他の諸縮尺比はバッキンガムの π 定理から表1-2の様に求められる。このうち、代表的な加速度、弾性係数について縮尺比を求めると次の様になる。

$$\text{加速度比} \quad \alpha_p / \alpha_m = n / t^2 = 22$$

$$\text{弾性係数比} \quad E_p / E_m = m \cdot n^2 / t^2 = (1.75 \sim 2.36) \times 10^4$$

3-2 地盤模型材料の選定

地盤模型の弾性係数は60～1,300 g/cm²と非常に範囲が広い。昨年度はゼラチンにより模型を製作したが、ゼラチンに

よるモデル化は、コストや製作に要する時間、腐敗しやすいことなどを考慮すると困難であるので、今回は土質安定剤として用いられるアクリルアミド系のケミカルグラウト剤のゲルを使用した。

この材料はゼラチンに比較すると、次の様な性質をもっている。

- (1) 外観、手ざわりともゼラチンとほとんど同一である。
- (2) 弾性係数は $100 \text{ g/cm}^2 \sim 1,000 \text{ g/cm}^2$ の範囲内ならば自由に作り出せる。
- (3) 変形能はゼラチンに比べて悪く、一度破断面が生ずると、この面から非常にこわれやすい。こうした性質は濃度を上げて弾性係数を高くする程著しい。
- (4) 補強材としてベントナイトを加えると、強度、弾性係数とも増大し、変形能も増すが、透明度は失われる。
- (5) 溶解する際ゼラチンのように加熱する必要がなく、硬化時間もかなり自由に調節できるため、ゼラチンに比べ、製作に要する労力は少なくてすむ。
- (6) 価格はゼラチンの約 $1/3$ である。

3-3 地盤、盛土のモデル化

地盤を模型化する際には基盤面をどこに選ぶかが重要な問題である。基盤は岩盤などの様にその中を地震波が伝播する間に波形の著しい変化の生じない層をとるのが望ましい。今回の実験ではせん断波速度が 720 m/sec 、N値 100 以上の非常に硬い層が水面下 160 m 付近から存在するので、これを基盤とみなして、水面下 200 m までの地盤をモデル化することにした。

模型縮尺によりイ層～ト層の各層および盛土のモデル化した弾性係数を求めると表 1-3 の様になる。ここで、各層の実地盤の弾性係数は図 1-5 に示されているせん断弾性波速度より、ポアソン比 $\nu=0.5$ と仮定して求めたものである。盛土の弾性係数は盛土が単位体積重量 1.8 t/m^3 の材料で N 値 18 程度に均一に締め固めて施工が行なわれると仮定し、N 値とせん断弾性波速度の関係式を用いて求めたものである。さらに盛土の下にイ層およびロ層は適当地盤改良等を施すことにより、盛土と同程度の地盤となるものと考え、盛土と同じ弾性係数とした。ホ層については、せん断弾性波速度の実測値がないため、表 1-1 の一軸圧縮強度を参考にして $V_s=500 \text{ m/sec}$ と仮定した。以上のように、弾性係数はいずれも、せん断弾性波速度から求めた値であり、 10^{-6} 程度の微小なひずみに対応する弾性係数である。

各層の地盤の厚さはわずかずつ変化しているが、模型製作上の理由から、盛土付近の地盤構成を基本にした一様な厚さの水平な地盤にモデル化した。また、ニ-1 層とニ-2 層およびホ-1 層とホ-2 層は模型化した場合の弾性係数の差が非常に小さいという理由で模型地盤上は同一の地盤と見なすことにした。

3-4 沈埋トンネル、換気塔のモデル化

図 1-6 に示す沈埋トンネル断面を図 1-8 に示す断面にモデル化した。トンネルのモデル化に際しては次の点を考慮している。

- (1) 水平面内のトンネル軸直角方向の曲げ剛性比を模型相似率と合わせる。
- (2) 完成時の沈埋トンネルの平均単位体積重量と周辺の地盤の単位体積重量の比が実物と模型でほぼ同じ値になるようにする。

しかし図 1-8 に示すトンネル模型断面の軸方向の伸び剛性は模型相似率から決まる値の約 6 倍となっており、相似則を満足していない。

換気塔は長さの縮尺を中心にしてモデル化した。換気塔の基礎にはニ層まで達する杭が打たれることになっているので、これを表わすため、適当な大きさの杭模型を取付けた。沈埋トンネルおよび換気塔模型には硬度 70 のネオプレンゴムを、杭模型には直径 7 mm の 2 心ビニール被覆ケーブルを使用した。

3-5 計測器の種類と配置

(1) 変位測定

(i) 非接触式光学式変位計 (3台)

模型表面の応答変位を測定するため、3台の非接触式光学式変位計を使用した。変位計のターゲットは盛土中央点、換気塔、沈埋トンネル中央点、地盤中央点などの基本的な場所に設置した。

(ii) 16 m/m 撮映機 (3台)

模型の振動状態を全体的に把握するために3台の16 m/m 撮映機を使用し、模型表面に25 cmの間隔で格子状に置いた標点の振動を撮映した。3台の撮映機は模型の右半分、中央部、左半分に分担を分けて使用した。

(2) 加速度測定

(i) 小型加速度計 (26台)

沈埋トンネルの内部、換気塔内および地盤内部のいろいろな深さの点に多数の小型加速度計を設置し、応答加速度を測定した。加速度計の設置位置および感振方向は図1-9 (モデル1)、図1-10 (モデル2)に示す。

(ii) サーボ型加速度計 (1台)

模型基盤面への入力加速度を側定するため、サーボ型加速度計を模型台座に取付け、加速度記録の基準とした。

以上の計測システムを図1-11に、また、各計測器の特性を表1-4に示す。

この他に、沈埋トンネル模型の曲げひずみおよび軸ひずみを測定するため、トンネル内部にひずみゲージを取付けたが、満足な記録を得ることができなかった。この原因はトンネル模型を埋設する際に生じた変形によりひずみゲージの許容伸び率を超過してしまったこと、合成ゴムとひずみゲージのベースの弾性係数が著しく異なることなどが挙げられる。

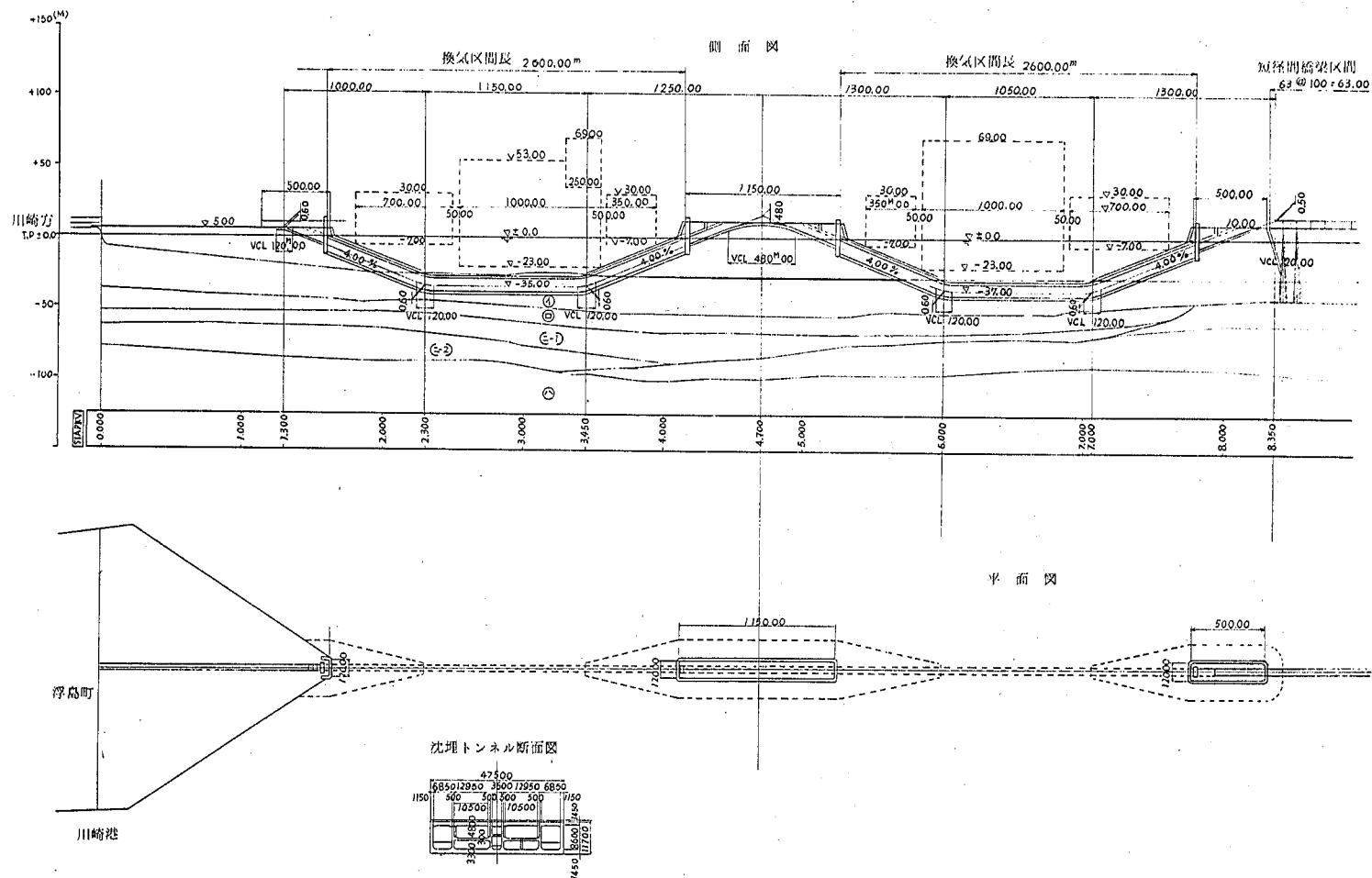


図 1-1 東京湾横断道路モデルプラン一般図

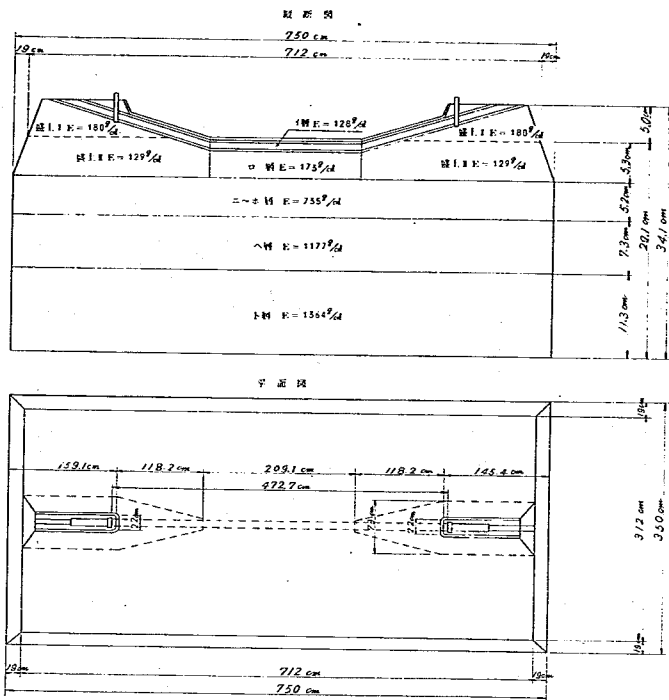


図1-2 沈埋トンネル中心モデル (モデル1)

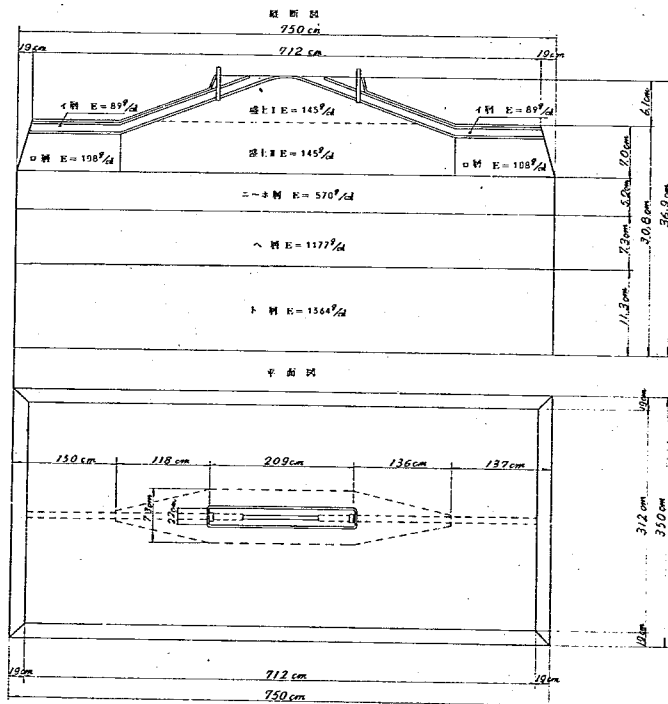


図1-3 盛土中心モデル (モデル2)

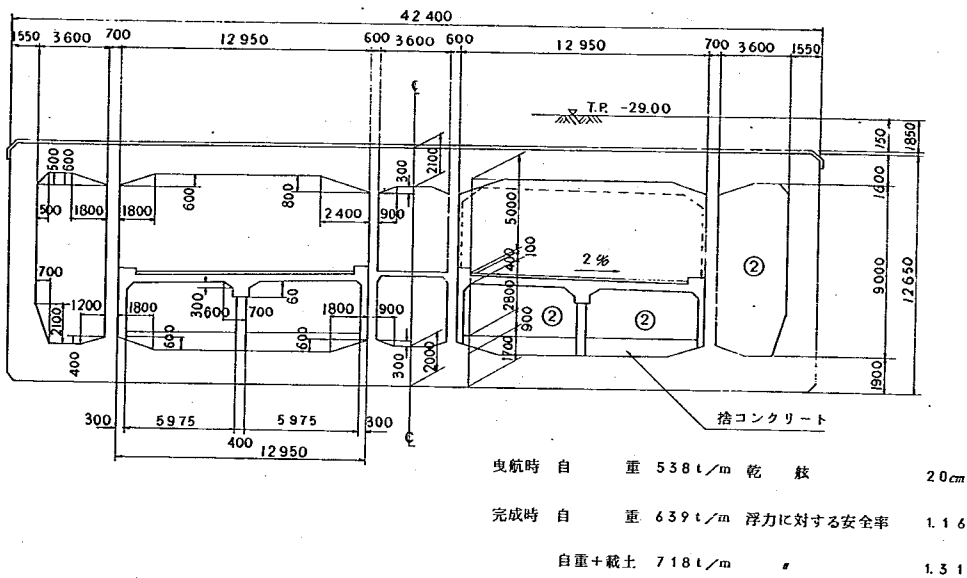


図 1-6 沈埋トンネル断面

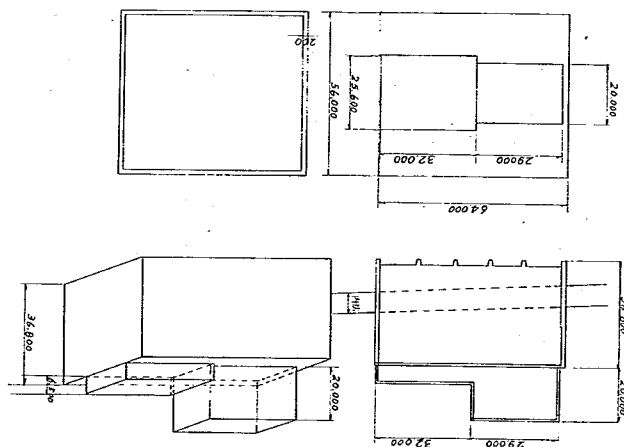


図 1-7 換気塔概略図

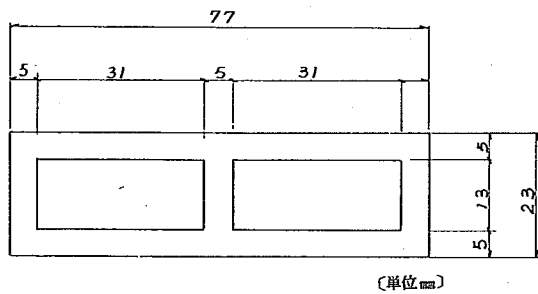


図 1-8 沈埋トンネル模型断面

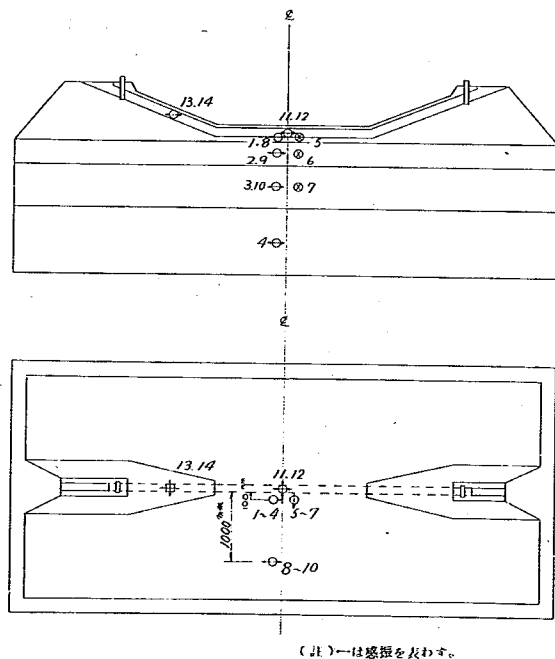


図 1-9 加速度計設置位置 (モデル 1)

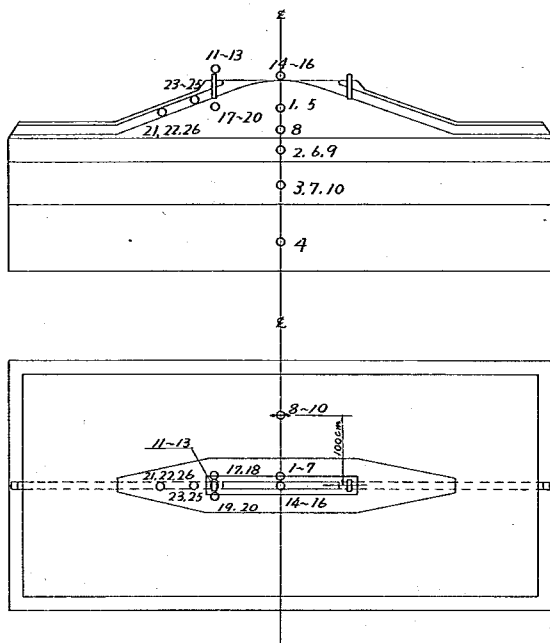


図 1-10 加速度計設置位置 (モデル 2)

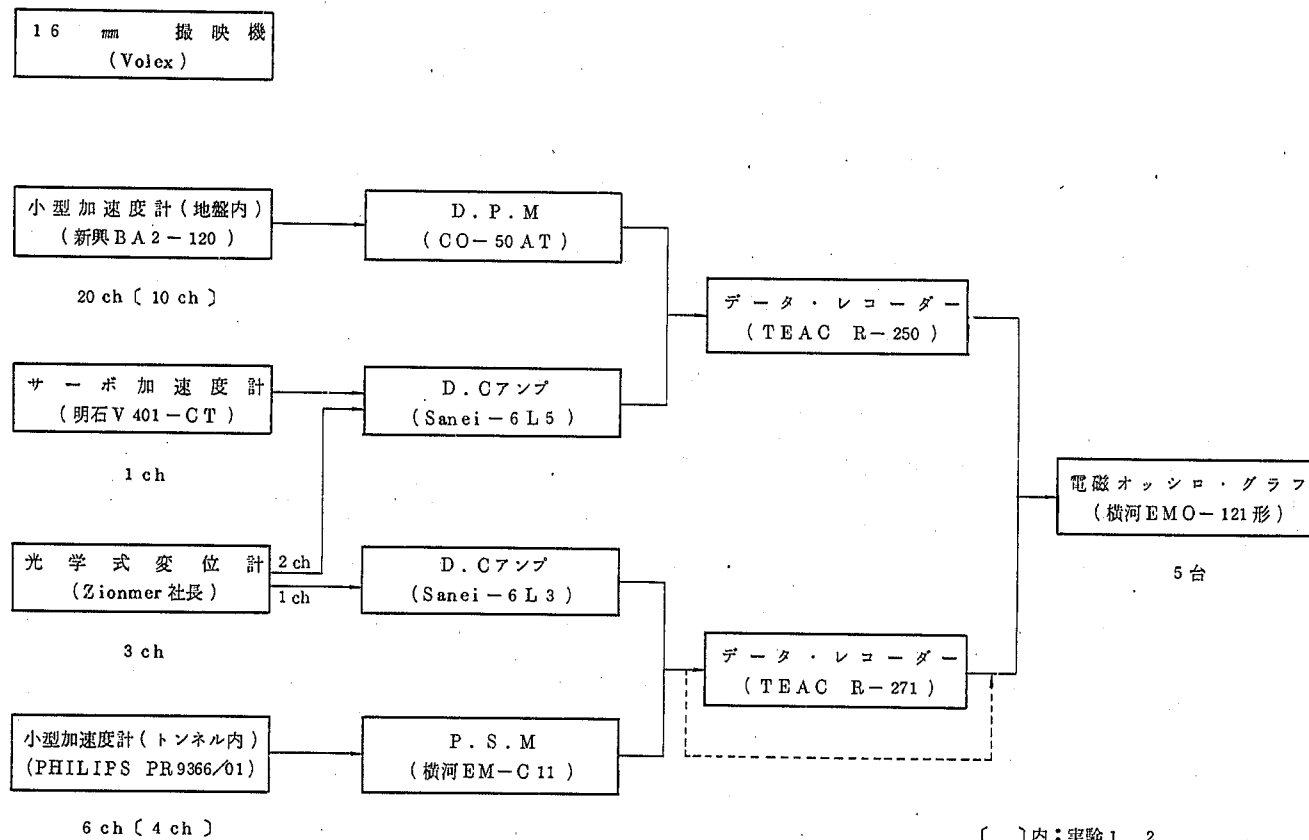


図1-11 計測システム

表1-1 層別の物理、力学定数一覧表

地質時代	岩相	地層区分	粒度	N	E 値 kg/cm ²	比 重	間 隙 比	単 位 体 積 重量 g/cm ³	一軸圧縮強 度 kg/cm ²	粘着力 kg/cm ²		内部摩擦角度		先 行 荷 重 kg/cm ²	圧 縮 指 数		
										三	軸 せん断	三	軸 せん断				
第四紀	沖積世	泥質砂	イ層	泥	0 ~ 4 (2)	11 ~ 64 (23)	(2.67)	1.3 ~ 3.6 (1.7)	1.35 ~ 1.70 (1.45)	0.1 ~ 0.8 (0.4)	0.05 ~ 0.6 (0.20)	0.1 ~ 0.5 (0.25)	10 ~ 30 (15)	20 ~ 35 (30)	0.4 ~ 1.5 (0.8)	0.3 ~ 1.2 (0.6)	
				砂	5 ~ 20 (8)	45 ~ 223 (125)	(2.72)	0.6 ~ 1.3 (0.9)	1.75 ~ 2.05 (1.9)	—	0.15	0.25	37	45	—	—	
		砂質泥	ロ層	泥	3 ~ 14 (10)	22 ~ 116 (55)	(2.68)	0.8 ~ 7.0 (1.3)	1.60 ~ 1.85 (1.75)	0.3 ~ 1.1 (0.4)	0.05 ~ 0.5 (0.3)	0.1 ~ 0.4 (0.3)	10 ~ 25 (20)	30 ~ 45 (40)	1.7 ~ 3.0 (2.1)	0.2 ~ 0.5 (0.3)	
				砂	15 ~ 30 (22)	—	(2.71)	0.6 ~ 1.1 (0.8)	1.80 ~ 2.10 (1.9)	0.3	0. ~ 0.05 (0.05)	0.2 ~ 0.5 (0.4)	30 ~ 45 (40)	35 ~ 50 (45)	—	—	
	洪積世	砂礫	一一層	泥	—	32 ~ 58 (45)	(2.69)	—	—	—	1.1	—	—	—	—	—	
				砂	49 ~ 100 +	—	(2.69)	0.4 ~ 0.8 (0.7)	1.05 ~ 2.10 (2.0)	0.2	0 ~ 0.6 (0.3)	0.15 ~ 0.4 (0.2)	30 ~ 40 (35)	35 ~ 50 (45)	—	—	
		砂質泥 砂質礫	一一二層	泥	15 ~ 16 (15)	194	(2.65)	0.9 ~ 1.6 (1.1)	1.60 ~ 1.90 (1.75)	0.4 ~ 3.1 (1.5)	0.3 ~ 0.65 (0.5)	—	15 ~ 30 (25)	—	—	—	
				砂	47 ~ 100 +	112 ~ 468 (310)	(2.69)	0.5 ~ 0.8 (0.7)	1.90 ~ 2.10 (1.95)	—	0.15	0.5 ~ 0.35 (0.2)	40	35 ~ 55 (45)	—	—	
		泥質砂 砂質泥	ホ一層	泥	4 ~ 40 (20)	20 ~ 296 (135)	(2.67)	0.9 ~ 1.4 (1.1)	1.7 ~ 1.8 (1.75)	0.9 ~ 1.8 (1.1)	0.15 ~ 0.5 (0.4)	0.4 ~ 1.8 (1.0)	25 ~ 35 (30)	15 ~ 55 (35)	7.5 ~ 7.9 (7.7)	0.3 ~ 0.6 (0.5)	
				砂	30 ~ 100 +	195 ~ 450 (240)	(2.74)	0.7 ~ 0.9 (0.8)	1.80 ~ 2.05 (1.95)	0.2	—	0.1 ~ 0.3 (0.15)	—	35 ~ 50 (45)	6.1	—	
		泥	ホ二層	泥	10 ~ 100 (25)	170 ~ 500 (280)	(2.66)	1.0 ~ 2.0 (1.5)	1.50 ~ 1.80 (1.7)	0.6 ~ 4.8 (1.7)	0.3 ~ 1.8 (0.6)	1.05 ~ 2.35 (1.7)	15 ~ 35 (30)	—	10.6 ~ 14.2 (12.0)	0.3 ~ 1.4 (0.7)	
				砂	50 ~ 65	—	(2.69)	0.9 ~ 1.1 (1.0)	1.80 ~ 1.90 (1.85)	0.4 ~ 0.5 (0.5)	0.25 ~ 1.55 (0.5)	0.2 ~ 0.35 (0.3)	20 ~ 35 (30)	40 ~ 50 (45)	—	—	
		新第三紀	砂	へ層	泥	36	167 ~ 335 (245)	(2.67)	0.8 ~ 1.4 (0.9)	1.70 ~ 1.95 (1.85)	0.9 ~ 3.6 (1.5)	0.3 ~ 1.0 (0.7)	0.2 ~ 0.7 (0.4)	15 ~ 35 (30)	35 ~ 50 (45)	—	—
					砂	50 ~ 100 + (100 <)	90 ~ 728 (390)	(2.72)	0.5 ~ 1.5 (0.8)	1.85 ~ 2.05 (1.95)	0.2 ~ 0.8 (0.4)	0.1 ~ 0.5 (0.3)	0.05 ~ 0.4 (0.2)	30 ~ 45 (35)	30 ~ 55 (45)	—	—
			砂、泥質砂	ト層	泥	19 ~ 100	—	(2.68)	0.7 ~ 1.3 (0.9)	1.70 ~ 1.90 (1.85)	0.9 ~ 1.4 (1.1)	0.2 ~ 0.7 (0.6)	0.2 ~ 0.75 (0.4)	30 ~ 40 (35)	—	—	—
					砂	100 <	545	(2.75)	0.6 ~ 1.0 (0.8)	1.85 ~ 2.05 (1.95)	0.3 ~ 2.0 (0.8)	0.3 ~ 1.1 (0.7)	0.05 ~ 0.75 (0.2)	30 ~ 40 (35)	40 ~ 55 (45)	—	—

2 模型地盤材料試験

§1 概 説

一般に地盤をモデル化する場合、その材料の必要条件としては、①弾性係数を広い範囲で、任意に作り出せる、②製作作業が容易である、③実験期間中に安定した状態を保持できること等が考えられる。従来この種の実験には、地盤模型材料としてゼラチンがよく用いられてきた。しかしゼラチンは、 $100 \text{ g/cm}^3 \sim 2,000 \text{ g/cm}^3$ の範囲内なら自由に弾性係数を変化させることができ、任意な形状の模型を製作できる反面、その主成分がタンパク質であるため、①腐敗しやすい。②溶解する際に加熱せねばならず、大量に使用する場合には大がかりな溶解装置を必要とする。③温度変化によって弾性係数が相当変化する。④硬化するのに数時間かかる、といった欠点があった。

今回の実験においては、地盤模型が $750 \times 350 \times 38.2 \text{ cm}$ と非常に大きく、製作日数は一週間程度しかとれないため、ゼラチンで製作することは非常に困難が予想されることから新しい材料の選定が必要となり、アクリルアミド系ケミカルグラウト剤のゲルに着目した。

使用したケミカルグラウト剤の成分とホモゲルの製作方法について述べると下記の様である。

ホモゲルを製作する場合は図 2-1 に示すように A 液、B 液の 2 種類の液を別々に作成しておき、それらを混合する。

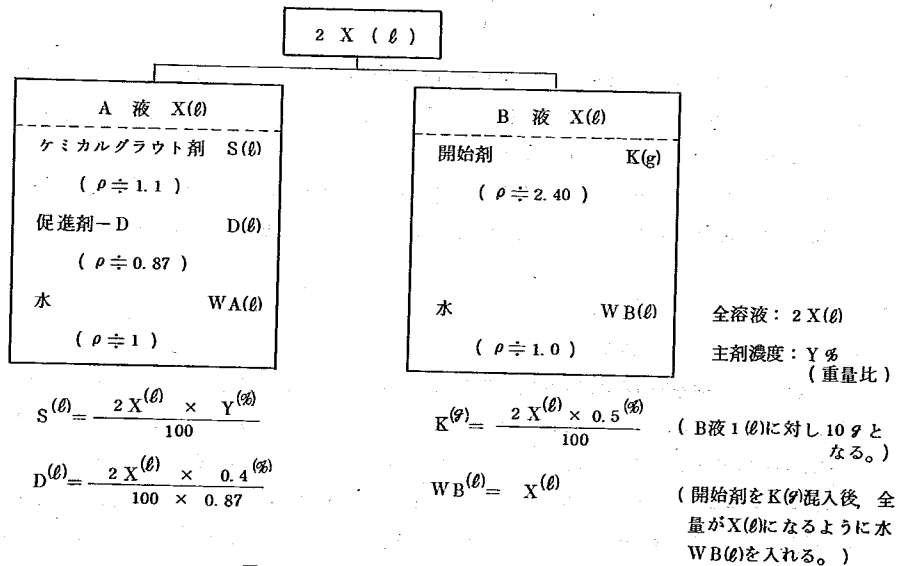


図 2-1 グラウト剤製作図

触媒の添加量は重量パーセントで、モデル 1 では促進剤-D が 0.4 %、開始剤は 0.5 %、モデル 2 では促進剤-D が 0.2 %、開始剤は 0.25 % とした。

各成分の性質と形態は次のようである。

a) ケミカルグラウト剤 (主剤)

アクリルアミドと加橋剤等との混合物からなり、外観は淡黄褐色液体で比重は約 1.1 である。

b) 促進剤-D

促進剤は主剤の触媒として重要なものでこれがレドックス反応 (酸化還元反応) による重合反応でその還元剤として必要な触媒である。

液体であり比重は 0.87 でアンモニア臭に似た臭いがする。

c) 開始 剤

開始剤も促進剤と同様に主剤の触媒として重要なもので、レドックス反応の酸化剤の役をするものである。過硫酸カリウムで外観は白色粉末であり比重は 2.4 で無臭である。

この材料は、模型材料として使用されたことはあまりなかったため、その物理的な性質に関しては不明な点が多かった。そこで今回の実験に先立ち、有効な物理的基礎データを得るべく、弾性係数に影響を与えられると思われる下記項目について試験を行った。

- 1 硬化後の時間経過の影響
- 2 ケミカルグラウト剤(主剤)濃度の影響
- 3 硬化後の温度変化の影響
- 4 供試体作成時の溶液温度の影響
- 5 ベントナイト濃度の影響
- 6 触媒(促進剤、開始剤)濃度の影響

材料試験は、本実験に先立ち予備実験として行なった他に、実験中及び実験終了後にも若干の追加試験を実施した。

§ 2 実験 方法

本実験に先立って行なった予備試験では、万能型引張試験機を使用したのが、最大荷重が 2~4 kg と大きいため弾性係数の低い領域を測定するのは困難であった。模型製作中および追加実験で行なった試験は図 2-2 に示すような分銅とダイヤルゲージを組合せた測定器を製作しこれで使用した。

テストピースは鉛化ビニールパイプを利用して作り、供試体の大きさは $\phi 5.20 \times h 4.72 \text{ cm}$ 体積 100 cc 一定とした。圧縮試験に用いる供試体の個数は 3 個とし、弾性係数は 3 個の平均値をとることとした。

§ 3 試 験 内 容

3-1 硬化後の時間経過の影響

硬化後、どの程度の時間が経過すれば、安定した状態となり物性的に安定するのかを調べるために、主剤濃度が 10%, 14% の 2 種について 2, 5, 10, 24, 48, 72 時間経過後の弾性係数を求めた。その間供試体の養生温度および圧縮試験時の温度は 15℃ 一定とし表面乾燥による影響を防ぐためビニール袋で包んで保存した。

試験結果は図 2-3 に示すとおりである。結果は多少ばらついているが弾性係数は 2 時間後にほぼ安定し、その後の時間経過に対して大きな変化は示さず安定した性質を保っている。従って乾燥に対して十分注意を払えば時間的な変化はほとんど影響がないと思われる。

3-2 ケミカルグラウト剤(主剤)濃度の影響

主剤の濃度を重量比で 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20% と変化させて試験を行ない、主剤の濃度と弾性係数の関係を調べた。このときの養生温度は 15℃ 一定とし表面乾燥の影響を防ぐためにビニール袋で包んで保存し 24 時間後に測定を行なった。

弾性係数はひずみ量により変化し、ひずみが大きくなるにしたがって弾性係数も大きくなる傾向にあるが、0~7% 程度のひずみが比較的小さい間は、ほとんど線形弾性体と見なしでも差つかえないほどであった。このようにして求めた測定値を図 2-4 に示す。主剤の濃度が低くなると反応時間が長くなり、7% 以下の濃度 ($E \approx 40 \text{ g/cm}^3$) ではほとんど硬化せず、自立できる供試験体を作成することはできなかった。主剤濃度が高くなるとしだいに変形性能が悪くなり、一度破断面が生ずると、その断面からクラックが入り、非常にこわれやすくなるという性質が認められた。さらに、硬化後に生じた破断面に、補修のため同じ液を注入しても接着が悪くあまり効果はなかった。また硬化反応中に熱が生ずるが、こうした反応熱は主剤濃度が高くなるにしたがって高くなり 50% 濃度の場合には 75℃ もの反応熱が発生した。以上の

ようなことから、濃度が高くなる程変形性能が悪くなり反応熱も高くなること、濃度が7%以下では実用性に欠けること、等が問題点として上げられることがわかった。

3-3 硬化後の温度変化の影響

模型製作の際、硬化反応後数時間の温度が弾性係数に及ぼす影響を調べるため、次のような実験を行った。

主剤濃度を10%、14%とし、養生濃度を、10、15、20、25℃の4種類と変えそれぞれ弾性係数を求めた。乾燥による影響はテストピースから取り出さずにおくことで除去し保温室で養生した。この結果を図2-5に示す。この結果から、硬化反応後の温度変化は、10～25℃の範囲内では弾性係数に大きな影響を及ぼさないと考えよう。

3-4 供試体作成時の溶液温度の影響

溶液温度が硬化反応後の供試体弾性係数に及ぼす影響を調べるため、主剤濃度10、14%に対し、作成時溶液温度を5、10、15、20、25、30℃の6種類に変化させ、それぞれ弾性係数を求めた。

この結果は図2-6に示すとおりであり、作成時の溶液温度が高いほど、弾性係数は低くなる傾向にあることがわかった。これは溶液温度が高いほど反応時間が短くなってくることに関係していると思われる。

3-5 ペントナイト濃度の影響

高い弾性係数を示す供試体になるほど、変形性能が悪く、もろくなるという欠点を補い、かつ、より高い弾性係数を出す目的で補強剤としてペントナイトを使用するため、その影響を試験した。

試験は主剤濃度10、14%に対しペントナイト濃度を2.5、5.0、7.5%と変化させてその弾性係数を求めた。

この結果は図2-7に示すとおりであり、ペントナイト混合濃度が高くなる程弾性係数は高くなり、又変形性能も良くなることが確認された。しかし難点として、10%以上を混合する場合には溶解する必要がある。

3-6 触媒（促進剤、開始剤）濃度の影響

当初、触媒（促進剤、開始剤）の濃度は、硬化時間に影響を与えるのみで、弾性係数には影響を与えないと考えていたが、実際にモデルを作成してみると影響を与えていることが分かったため、促進剤-Dを0.4から0.2%、開始剤を0.5から0.25%といずれも標準配合の半分にした場合について、主剤濃度を7～11%まで変化させて試験を行なった。

その結果、図2-8に示すように、触媒の量をそれぞれ半分にした場合と、そうでない場合とを比較すると弾性係数が60～100 g/cm²程高くなることがわかった。反応時間の長さが弾性係数に影響を与えているためであると思われる。

§4 試験結果の検討およびゼラチンとの比較

4-1 試験結果の検討

1. 弾性係数は同一主剤濃度の場合であっても、反応時の諸条件によって変わり、一般に、反応時間が長くなる程弾性係数は高くなり、短い程低くなる傾向にある。すなわち、開始剤、促進剤の量を減らしたり、反応時の溶液温度を低くしたりして反応時間を長くすると、弾性係数は高くなる。

しかし、硬化反応を起こした後は、弾性係数は時間的にほとんど変化せず、また温度変化による影響を受けにくい。ただ、乾燥には注意しなければならない。

2. 主剤濃度の増加とともに弾性係数は高くなるが、同時にもろくなり、クラック等が入りやすく、反応熱も高くなる。

変形性能を高めたり、主剤濃度を抑えながら弾性係数を上げるためにはペントナイト等の補強材を混入するとよいが、この場合には、ペントナイトを溶解するのにかなりの時間を必要とし、透明性も失なわれる。また一度クラックが生じると、同一材料を用いても補修はしにくい。

3. 弾性係数はひずみ量の増大とともに大きくなる性質をもっているが、7%程度までのひずみが比較的小さい間は、ほとんど線形弾性体と見なしても差つかない。

4. 無理なく製作可能な弾性定数域は、40～1200 g/cm²であり、ペントナイト等の補強材を混入すると、さらに1500 g/cm²まで可能となる。

5. 硬化は化学反応によるため、主剤・開始剤・促進剤の各濃度、ペントナイト量、反応時の溶液温度などのわずかな変

化が弾性係数に大きく影響し、目標とした弾性係数で均一な模型を作るためには、細心の注意が必要である。

4-2 ゼラチンとの比較

アクリル・アミド系グラウト剤のゲルを地盤模型材料として使用した場合の性質をゼラチンと比較して示すと以下のようになる。

ゼラチン	アクリルアミド系ケミカルグラウト剤
○ 弾性係数は $40 \text{ g/cm}^2 \sim 1000 \text{ g/cm}^2$ の範囲内で自由に出せる。 ○ 粘性が大きく割合変形性能は良い。 ○ 透明度が比較的良好、地盤内部の挙動を観察することが出来る。 ○ 主成分がタンパク質であるため腐敗しやすく長期の実験には使用できない。 ○ 弾性係数が温度に左右されやすい。 ○ ゼラチンの溶解には、加熱する必要がある、また硬化までに 10 時間程おかねばならない。 ○ 比較的価格が高い。	○ 弾性係数は $40 \text{ g/cm}^2 \sim 1000 \text{ g/cm}^2$ の範囲内で自由に出せる。補強剤を用いれば、さらに kg/cm^2 の範囲まで出さう。 ○ 粘性が低く変形性能はあまり良くない。主剤濃度を上げて高い弾性係数をもたせる程、この傾向は著るしくなる。 ベントナイト等の補強剤を使用するとかなり、変形性能は良くなる。 ○ 透明度は一般にゼラチンと同程度である。しかし、ベントナイト等の補強剤を使用すると、透明度は全く失われる。 ○ ゲル体は化学的に安定しており、しかもアクリルアミド系樹脂を主剤としているのでバクテリア、酸、アルカリに全く侵されず、耐久性が良い。 ○ 弾性係数は硬化後の温度変化に対しては、影響されない。しかし、反応時の溶液温度は弾性係数にかなりの影響を与える。 ○ 主剤と触媒の配合に注意を払えば模型製作も比較的容易であり、硬化時間は、開始剤等の量を調節すれば数分～数時間の範囲で自由に変え得るため作業能率がよい。 ○ 価格はゼラチンと比較して約 1/3 程度である。 ○ 主剤濃度を高くすると、反応熱も高くなり、計測器等の設置に注意しなければならない。 ○ クラック等が生じると、その補修は困難である。(補修する側、される側とも反応中であるなら完全に接着できるが、いずれかが反応してしまった後では、補修しても完全に接着しない。)

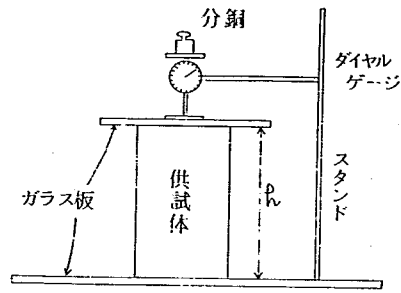


図 2-2 簡易弾性係数測定装置

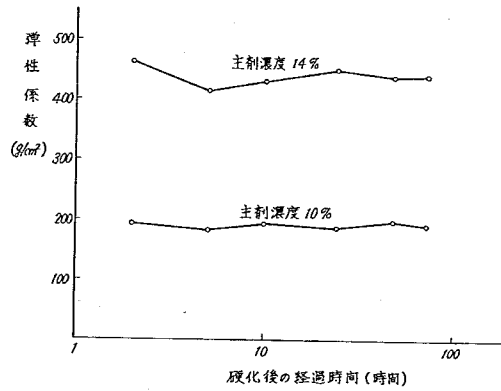


図 2-3 硬化後の経過時間-弾性係数

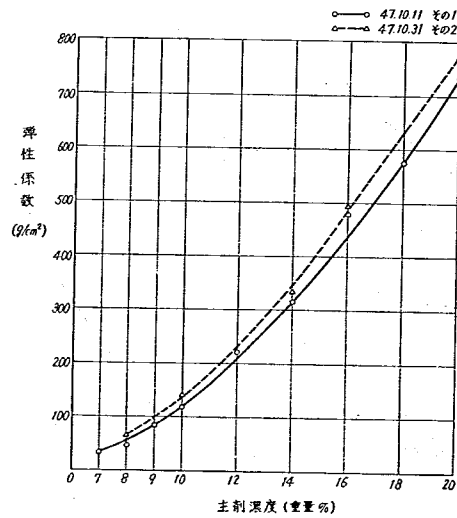


図 2-4 主剤濃度-弾性係数

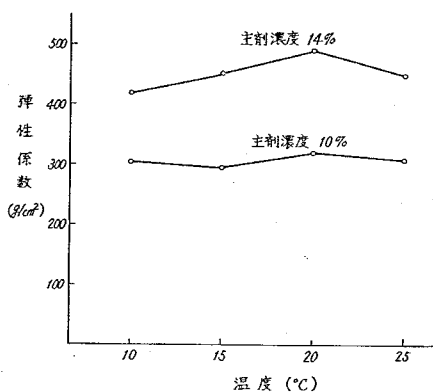


図 2-5 硬化後の温度変化—弾性係数

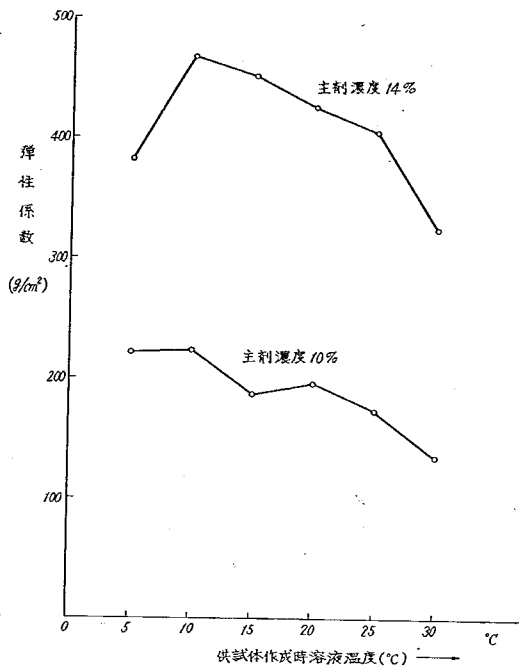


図 2-6 供試体作製時の溶液温度—弾性係数

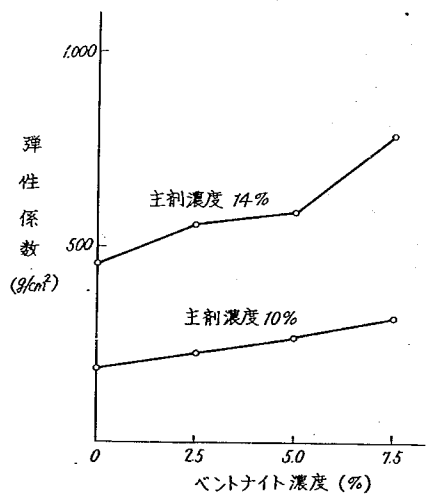


図 2-7 ベントナイト濃度—弾性係数

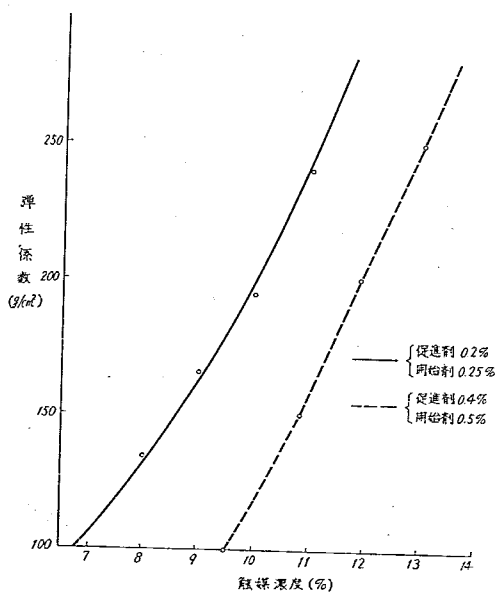


図 2-8 触媒濃度—弾性係数

3 予 備 実 験

§ 1 概 説

模型境界側面の影響を調べるため、本実験に先立ち、土木研究所振動研究室所有の振動台を使用して次のような予備実験を行なった。これは昭和46年度の実験において模型境界面、特に隅角部において、その部分のみが独立に振動し、この様な模型周辺の振動が模型内部にまで影響を与えることが観察されたためである。

模型は縦横90cm、厚さ15cmとし、そのうち、下部の10cmはアクリル-アマイド系グラウト剤で、上部の5cmはゼラチンを用いて製作した。模型はゼラチン層中に高さ1.7cm、幅7.5cm（肉厚0.5cm）の合成ゴムで作った沈埋トンネルを埋設したモデルAと沈埋トンネルを埋設しないモデルBの2種類を作成した。それぞれのモデルに対し、以下に示すように模型側面の条件を変えて75 galの一定加速度で5～13Hzの正弦波により加振し、モデル中央点の変位応答を計測した。

- モデルA A-1 4側面とも型枠をつけたままで拘束。
 A-2 4側面とも型枠をはずし、完全にフリー。
モデルB B-1 4側面とも型枠をつけたままで拘束。
 B-2 加振方向に平行な2側面は型枠で拘束、他の2側面はフリー。
 B-3 4側面とも型枠をはずし、完全フリー。
 B-4 4側面とも型枠をはずし、かつ側面を1:1の勾配で切取る。
 B-5 4側面とも型枠をはずし、かつ、側面を1:3の勾配で切取る。

§ 2 端面における境界条件の影響

沈埋トンネルが埋設されているモデルAの模型中央点の応答変位を表3-1に示す。ここで、表中の数値は変位を表わしているが較正值がかかっていないため、相対的な関係だけを示している。側面に型枠をつけた場合に比較し、側面に型枠をつけない場合には共振振動数は下がっており、側面拘束の影響が模型の高さと長さの比を1:6にとっても、共振振動数に現われているが認められる。

沈埋トンネルが埋設されていないモデルBでは、モデルAのようなはっきりした共振振動数の違いを測定することができなかったが、模型側面を斜めに切取っておくと、この付近の独立した振動を減少させ得ることが確かめられた。また、ゼラチンとアクリル-アマイド系グラウト剤のゲルの密着性は比較的良好で加振中に簡単にはずれないことも確かめられた。

表3-1 単位加速度あたりの変位量—モデルA
(較正值はかかっていない)

公 称 振 動 数	A - 1	A - 2
5.0	0.0352	0.0218
5.5	0.0238	0.0206
6.0	0.0228	0.0298
6.5	0.0228	0.0306
7.0	0.0346	0.0706
7.5	0.0376	0.0364
8.0	0.0762	0.0214
9.0	—	0.0302
10.0	0.0120	0.0113
11.0	0.0160	0.0080
12.0	0.0122	0.0024
13.0	0.0011	—

4 模型製作

§ 1 模型製作

模型地盤を製作するためには25～40分の硬化時間が必要であるので、アクリルアミド系グラウト剤の触媒濃度を標準濃度の半分にし、促進剤D 0.4 ㉯、開始剤0.5 ㉯とした。

地盤内に埋設する小型加速度計は地盤の製作に際し、逐次所定の位置に設置した。

沈埋トンネルおよび換気塔は所定の寸法に裁断したネオプレンゴムをボンドで接着し、加速度計を設置して地盤中に埋設した。

§ 2 模型寸法および弾性係数

モデルー1およびモデルー2の地盤模型の弾性係数を表4-1に示す。これらの値は地盤製作の際、数個のサンプルを取り出して測定した弾性係数の平均値である。低い弾性係数の地盤模型を正確に製作することはなかなかむつかしく、表中の軟質地盤の弾性係数は目標値よりもいくらか高くなっている。また、模型の寸法は図1-2、図1-3に示した通りである。これらは実験終了後の模型解体の際、各所で測定した寸法の平均値である。

このようにしてでき上った模型の写真を4-1、4-2に示す。

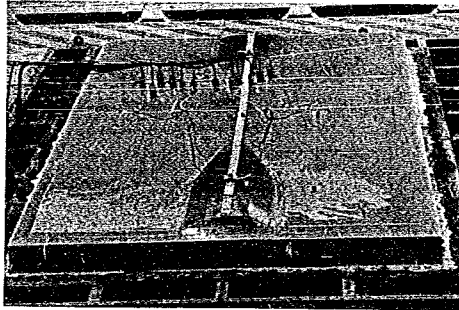


写真4-1 沈埋トンネル中心模型(モデル1)

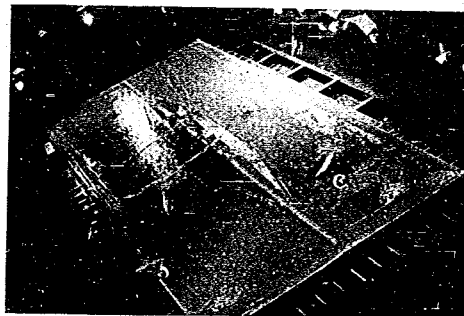


写真4-2 盛土中心模型(モデル2)

表 4-1 完成模型地盤の弾性係数

地 層 区 分		モ デ ル 1	モ デ ル 2	目 標 値
盛 土	上 部	180	145	134
	下 部	129	145	
イ 層		128	89	60
ロ 層		173	108	100
ニ ～ ホ 層		735	570	570
ヘ 層		1, 177	1, 170	1, 000
ト 層		1, 364	1, 364	1, 300

5 振 動 実 験

§ 1 概 説

科学技術庁国立防災科学技術センター耐震実験室大型振動台を用いて、模型を沈埋トンネルの軸方向および軸直角方向に加振した。実験はモデルと加振方向により次の4種類に大分した。

実験名	モ デ ル	加 振 方 向
実 験 1	モ デ ル 1	軸 直 角 方 向
実 験 2	モ デ ル 1	軸 方 向
実 験 3	モ デ ル 2	軸 方 向
実 験 4	モ デ ル 2	軸 直 角 方 向

§ 2 実験の種類と方法

2-1 正弦波振動実験

模型の共振振動数、各所の振動モード、応答倍率などを調べるために、 $1 \sim 20^\circ/\text{s}$ の正弦波によって加振した。振動数は共振点付近では $0.2^\circ/\text{s}$ 程度の細かいピッチで、共振点以外では $0.5 \sim 1^\circ/\text{s}$ のピッチで変化させた。

記録は電磁オシログラフから読取り、各地点の変位、および加速度の応答値、基盤に対する応答倍率、共振振動数を求めた。

2-2 自由振動実験

模型の固有周期および減衰定数を求めるために、正弦波振動実験で1次共振状態になった時に加速を急に止め、自由振動を発生させて変位の減衰性を測定した。

記録は電磁オシログラフから読取り、対数減衰率、減衰定数を求めた。

2-3 振動モード測定実験

実験3および実験4では共振点近傍での振動モードを測定するために、正弦波振動実験に引き続き1台の変位計のターゲットを模型上の基準点に固定し、もう1台の変位計のターゲットの設置位置を逐次変えて、両ターゲット設置点の振動振幅と位相の差を測定した。

また、 16 m/m 撮映機で撮映した模型表面の標点の振動量からも共振振動数近傍での振動モードを求めた。

2-4 地震波振動実験

実地震波に対する模型の振動特性を調べるために、時間の縮尺比に合わせて時間軸を $1/5$ に縮めた地震動の波形を模型に作用させた。

使用した地震動波形は、次の4種類である。

- (1) E1 Centro NS (1940年5月18日, IMPERIAL VALLEY, 最大加速度 326 gal)
- (2) 東京湾浮島の地中地震記録 (1970年9月30日多摩川下流地震, 浮島-127 m NS, 最大加速度 5.8 gal)
- (3) San Fernando (1971年2月9日, OLD RIDGE ROUTE, N21E, 最大加速度 307.2 gal)
- (4) Random波 ($0 \sim 20^\circ/\text{s}$)

模型に作用させる際には、最大加速度を50 gal と100 gal の2種類に統一して用いた。

上記のうち、E1 Centro NSとRandom波を作用させた場合の変位および加速度の応答値はデジタル化し、パワーベクトルを計算した。

§ 3 実験結果

3-1 モデル 1, トンネル軸直角方向加振 (実験 1)

(1) 正弦波振動実験

変位計のターゲット設置点を図 5-1 に示す。

変位および加速度の共振振動数, 共振時の応答値および基盤に対する増幅倍率 (以下増幅倍率と呼ぶ) を表 5-1 に示す。ここで, 増幅倍率は以下のようにして求めた値である。

変位増幅倍率 = 応答変位振幅 / 基盤の変位振幅

加速度増幅倍率 = 応答加速度振幅 / 基盤の加速度振幅

共振曲線 (増幅倍率 — 周波数) を図 5-2 ~ 5-11 に示す。

地盤部が共振状態となった時の地盤内部の加速度増幅倍率の分布を示すと図 5-12 のようになる。加速度増幅倍率は基盤から表層になるにつれて大きくなり, 1 次のせん断振動モード形を示している。

16m/m 撮映機で撮映した露点の振動から盛土が共振した場合 ($5.06 \text{ }^{\circ}/\text{s}$) と地盤部が共振した場合 ($5.95 \text{ }^{\circ}/\text{s}$) の模型の平面的な振動モードを求めると図 5-13 のようになる。

(2) 自由振動実験

地盤中央部表面および盛土頂面での減衰性を図 5-14 に示す。これより減衰定数を求めると, それぞれ, 1.5%, 1.3% となる。

(3) 地震波振動実験

模型に作用させた E1 Centro NS 成分地震波およびランダム波のパワースペクトルを図 5-15 に示す。これらの地震波形は加振台上で記録されたもので, 直接模型に作用した加速度波形である。この時の模型の各所での変位と加速度の応答波形のパワースペクトルを図 5-16 に, 最大応答値 (入力最大加速度 1 gal 当りの最大応答変位あるいは最大応答加速度で表示) を表 5-2 に示す。

模型に作用させた E1 Centro NS 成分地震波は時間軸が 1/5 になっているため, 卓越振動数は 5 ~ 6 C/S と高くなっているが, 原波形の性質は比較的良好に現われている。ランダム波は $16 \text{ }^{\circ}/\text{s}$ 以上の高い振動数域が卓越しており, ピンクノイズ的な性質はあまり現われていない。

応答変位および応答加速度はいずれの場合も共振振動数付近が卓越しており, 他の周期成分はほとんど含まれていない。

換気塔と沈埋トンネルの間には, 最大加速度 100 gal の地震波による加振中に, 最大 4 ~ 5 mm 程度の軸直角方向の相対変位が観察された。

表 5-1 1 次共振振動数および共振変位, 共振加速度 (実験 1)

計器名および 計器番号	測定位置	測定方向	共振振動数 $f \text{ (}^{\circ}/\text{s)}$	共振加速度 (gal) or 共振変位 (mm)	共振倍率
変位形	1 地盤中央部	軸直角	5.95	5.2 mm	73.5
	2 盛土上トンネル	"	5.06	27.4 mm	278.1
	3 地盤部トンネル 中央	"	5.95	5.7 mm	80.3
加速度計	1 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	5.95	189.9	36.4
	2 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	"	"	"
	3 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	"	"	"
	4 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	"	"	"
	5 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	5.95	265.8	56.7
	6 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	5.95	157.3	33.1
	7 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	5.95	121.8	25.6
	8 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	"	"	"
	9 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	"	"	"
	10 トンネル 中央部	イ→ロ層 ニ→ハ層	"	"	"
	11 地盤部トンネル 中央	軸直角	5.95	358.7	75.4
	12 地盤部トンネル 中央	軸直角	5.95	53.7	10.9
	13 地盤部トンネル 中央	軸直角	5.95	139.8	29.4
	14 地盤部トンネル 中央	軸直角	"	"	"

表5-2 地震波振動実験による変位および加速度の最大応答値(実験1)
(最大入力加速度1gal当りの最大応答変位、加速度)

計器番号		位 置		方 向	地 震 波	
					El-Centro	Random
変位応答 (mm/gal)	1	地 盤 中 央 部		軸 直 角	0.037	0.027
	2	盛 土 上 ト ン ネ ル		〃	0.219	0.073
加 速 度 応 答 倍 率 (gal/gal)	1	ト ン ネ ル 中 央 横 地 盤	イ ～ ロ 層	軸 方 向	3.91 (3.71)	6.99 (4.06)
	2		ニ ～ ホ 層	〃	(0.59)	1.29 (1.08)
	3		ヘ 層	〃	(0.39)	0.72 (0.64)
	4		ト 層	〃		
	5	地 盤 中 央 部	イ ～ ロ 層	軸 直 角	5.16 (4.51)	6.53 (8.83)
	6		ニ ～ ホ 層	〃	3.24 (2.72)	3.83 (3.68)
	7		ヘ 層	〃	2.72 (2.40)	2.94 (2.57)
	8		イ ～ ロ 層	軸 方 向	3.25 (2.34)	4.94 (4.65)
	9	地 盤 中 央 部	ニ ～ ホ 層	〃	1.54 (1.12)	2.10 (1.70)
	10		ヘ 層	〃	(0.47)	0.77 (0.70)
	11	沈 埋 ト ン ネ ル	地 盤 部	軸 直 角	5.47	6.37
	12		中 央	軸 方 向		
	13		斜 路 部	軸 直 角	2.12	4.18
	14		中 央	軸 方 向		1.31

(注) ()内は公称最大加速度50galで加振した場合の応答値

3-2 モデル-1, トンネル軸方向加振(実験2)

(1) 正弦波振動実験

変位計のターゲット設置点を図-17に示す。

変位および加速度の共振振動数, 共振時の応答値および基盤に対する増幅倍率を表5-3に示す。また, 図5-18～5-31にこれらの共振曲線を示す。

地盤部が共振状態となった時の地盤内部の加速度増幅倍率の分布を沈埋トンネル中央付近と地盤中央部の2カ所について示すと図5-32のようになる。

(2) 自由振動実験

トンネル中央部での両軸方向自由振動の減衰性を図5-33に示す。これより減衰定数を求めると2.3%となる。

表5-3 1次共振振動数, 共振時の応答値および増幅倍率(実験2)

計器名および計器番号	測定位置	測定方向	共振振動数 f (c/s)	共振変位(mm) or 共振加速度(gal)	共振倍率
変位計	1	地盤部トンネル中央	軸方向	5.95	20.0
	2	地盤部トンネル中央	鉛直方向	6.11	33.7
	3	盛土上トンネル	軸方向	4.76	212.0
加速度計	1	ト横中	イ～ロ層 軸方向	6.05	87.0
	2	ン地	ニ～ホ層 "	6.10	24.5
	3	ネ	ヘ層 "	6.05	16.0
	4	ル盤中央	ト層 "	6.11	14.2
	5	ト横中	イ～ロ層 軸直角	6.05	10.6
	6	ン地	ニ～ホ層 "		
	7	ネ盤中央	ヘ層 "		
	8	地中	イ～ロ層 軸方向	6.05	70.5
	9	中央	ニ～ホ層 "	6.10	33.9
	10	盤部	ヘ層 "	6.11	19.6
	11	地盤部トンネル中央	軸直角	6.05	10.4
	12	地盤部トンネル中央	軸方向	6.05	35.5
	13	斜路部トンネル中央	軸直角		
	14	斜路部トンネル中央	軸方向	6.05	13.8

(3) 地震波振動実験

模型に作用させた El Centro N S 成分地震波およびランダム波のパワースペクトルを図 5-34 に示す。また、応答波形のパワースペクトルを図 5-35 に、最大応答値（入力最大加速度 1gal 当りの最大応答変位、あるいは最大応答加速度で表示）を表 5-4 に示す。

換気塔と沈埋トンネルの間には、最大加速度 100gal の地震波による加振中に、最大 4～5mm 程度の軸方向の相対変位が観察された。

表 5-4 地震波振動実験による変位および加速度の最大応答値（実験 2）

（最大入力加速度 1 gal 当りの最大応答変位、加速度）

計器番号		位置		方向	地震波	
変位応答倍率 (mm/gal)					El-Centro	Random
1		トンネル中央部		軸方向	0.012	0.025
加 速 度 応 答 倍 率 (gal/gal)	1	トンネル中央横地盤	イ～ロ層	軸方向	17.20 (9.33)	15.40 (13.45)
	2		ニ～ホ層	"	2.81 (3.81)	3.91 (4.17)
	3		ヘ層	"	(2.59)	1.50
	4		ト層	"	4.15 (2.38)	4.36 (2.98)
	5	トンネル中央縦地盤	イ～ロ層	軸直角	2.51 (1.01)	2.97 (2.83)
	6		ニ～ホ層	"	(0.47)	(0.89)
	7		ヘ層	"	(0.33)	0.56 (0.56)
	8	地盤中央部	イ～ロ層	軸方向	5.38 (9.26)	10.24 (11.39)
	9		ニ～ホ層	"	3.09 (3.90)	4.45 (4.00)
	10		ヘ層	"	(2.56)	2.21
	11	沈埋トンネル	地盤中央部	軸直角		1.66
	12		中央部	軸方向		3.31
	13		斜路部	軸直角		0.57
	14		中央部	軸方向		1.09

(注) () 内は公称最大加速度 50gal で加振した場合の応答値

3-3 モデル 2, トンネル軸方向加振（実験 3）

(1) 正弦波振動実験

変位計のターゲット設置位置を図 5-36 に示す。

変位および加速度の共振振動数、共振時の応答値および基盤に対する増幅倍率を表 5-5 に示す。また、図 5-37、～5-52 にこれらの共振曲線を示す。

盛土が共振状態となった時の盛土-盛土下地盤内部の加速度増幅倍率の分布を示すと図 5-53 のようになる。

表 5-5 1 次共振振動数、共振時の応答値および増幅倍率（実験 3）

計器名および 計器番号	測定位置	測定方向	共振振動数 (c/s)	共振変位 (mm) 共振加速度 (gal)	共振倍率
変位計	1 換気塔横盛土	軸方向	4.59	18.0	137.5
	2 盛土中央部	"	3.86	28.9	162.9
	3 地盤中央部	"	4.72	10.2	91.7

計器名および 計器番号		測 定 位 置		測定方向	共振振動数 (c/s)	共振変位(mm) 共振加速度(gal)	共振倍率
加速度計	1	盛土中央 土び下 中盛地 中央土 お中盤	盛土中	軸方向	3.86	430.7	83.0
	2		ニ～ホ層	〃	3.86	106.8	20.7
	3		へ層	〃	3.86	44.5	8.6
	4		ト層	〃			
	5	盛土盛下 土よ土地 中び中 央 央盤	盛土中	軸直角	3.78	22.6	5.3
	6		ニ～ホ層	〃			
	7		へ層	〃			
	8	地中央 盤中部	イ～ロ層	軸方向	4.49	670.7	129.4
	9		ニ～ホ層	〃	4.63	472.3	34.2
	10		へ層	〃	4.63	112.6	8.2
	11	換気塔中		軸直角			
	12			軸方向	3.85	284.7	54.2
	13			上下			
	14	盛土上トンネル中央		軸直角	3.78	237.6	56.3
	15			軸方向	3.86	299.6	58.2
	16			上下	4.39	104.6	20.3
	17	換気塔 横盛土		軸直角			
	18			軸方向	4.39	760.0	147.2
	19	換気塔 横盛土		軸直角			
	20			軸方向			
	21	斜路部沈埋トンネル (中央部)		軸直角	4.59	123.2	22.8
	22			軸方向	4.39	168.4	32.6
	23			上下	4.39	49.0	9.5
	24	斜路部沈埋トンネル (換気塔下)		軸直角			
	25			軸方向	4.39	29.8	5.8
	26			上下			

(2) 自由振動実験

変位の減衰性を図5-54～図5-63に示す。これらの結果から、盛土が模型中央に存在するモデル-2では、盛土独自の振動と地盤の振動が重なり合い複雑な減衰特性を示していることがわかる。減衰定数は、場所ごとに少しずつ異なっているが、1多程度である。

(3) 振動モード測定実験

盛土の共振点近傍の4.54c/sにおける振動モード測定結果を表5-6に示す。地盤および盛土は全体が一度に共振するのではなく、詳細にみるとある時は地盤の右半分が、更にわずかに振動数を変えると中央部付近が共振状態に入るといったように場所ごとに共振点が少しずつ異なっているのが認められた。表5-6の結果でも盛土の振動は中央部(ターゲット3)より1/4点(ターゲット4)の方が大きくなっており、位相も約60°ずれていること、同一地盤でも中央部と周辺部では振動量が約2倍異なっていることが認められる。また、振動は加振方向のみに生じるわけではなく、加振方向とは直交方向に振動している場所もあった。これらの原因は、沈埋トンネル、換気塔などの振動性状や固有振動数の異なる構造物の存在の影響、模型のちょっとした弾性係数、形状等の不均一性、境界端面の影響、加振台の特性などいろいろ考えられるが、こうした原因によって生じた不規則な振動が、地盤材料の非常に小さい減衰特性のため大きく拡大されて表われてくるためと思われる。

表5-6 共振点(地盤)近傍における振動モード測定結果(実験3)

振動数 $f = 4.54 \text{ c/s}$

基準ターゲット		測定ターゲット		位 相 差	測定ターゲット変位量 基準ターゲット変位量
ターゲット番号	変 位 量 (mm)	ターゲット番号	変 位 量 (mm)		
1	6.55	2	3.02	$61^\circ 54'$	0.46
1	5.03	3	8.35	$121^\circ 38'$	1.66
1	5.93	4	12.32	$57^\circ 10'$	2.08
1	5.85	5	6.04	$40^\circ 37'$	1.03
1	7.68	6	6.75	$32^\circ 35'$	0.88
1	6.28	7	12.26	0°	1.95

表5-6の結果では斜路部のトンネルの振動は基準点の地盤部の振動よりも小さくなっているが、 4.54 c/s に限らず、他の振動数でも、一般に、斜路部の振動量は小さく、斜路部が全体として大きく共振するという現象は認められなかった。

沈埋トンネルと換気塔の接続はその構造上、トンネル軸方向にはほとんどフリー、トンネル軸直角方向にはわずかに抵抗するようになっていた。そのため、沈埋トンネルと換気塔はほぼ独立に振動するのが認められた。

(4) 地震波振動実験

模型に作用させた El Centro NS 成分地震波およびランダム波のパワースペクトルを図5-64に示す。また、応答波形のパワースペクトルを図5-65に、最大応答値(入力最大加速度 1 gal 当りの最大応答変位あるいは最大応答加速度で表示)を表5-7に示す。

表5-7 地震波振動実験による変位および加速度の最大応答値(実験3)

(最大入力加速度 1 gal 当りの最大応答変位, 加速度)

器 号 計 番		位 置	方 向	地 震 波		
				El-Centro	Random	
変 位 応 答 倍 率 (mm/gal)	1	換 気 塔 横 盛 土	軸 方 向	0.052	0.027	
	2	盛 土 中 央 部	〃	0.123	0.054	
	3	地 盤 中 央 部	〃	0.054	0.031	
加 速 度 応 答 倍 率 (gal/gal)	1	盛 土 中 央 下 地 盤	盛 土 中 軸 方 向	6.97	4.81	
	2		ニ〜ホ層	〃	5.61	4.18
	3		ヘ層	〃	4.21	2.21
	4		ト層	〃		
	5	盛 土 中 央 下 地 盤	盛 土 中 軸 直 角	2.89	2.23	
	6		ニ〜ホ層	〃		
	7		ヘ層	〃	0.55	0.69
	8	地 盤 中 央	イ〜ロ層 軸 方 向	5.75	5.41	
	9		ニ〜ホ層	〃	2.68	2.00
	10		ヘ層	〃	2.54	1.79
	11	換 気 塔 中	軸 直 角	1.37	1.13	
	12		軸 方 向	3.86	2.69	
	13		鉛 直			
	14	盛 土 中 央 部	軸 直 角	1.72	1.89	
	15		軸 方 向	6.37	4.40	
	16		鉛 直	2.78	2.56	
21	沈 埋 トンネル	斜 路 部 中 央	軸 直 角	0.69	0.48	
22			軸 方 向	1.25	0.58	
23			鉛 直	0.15	0.12	
24		換 気 塔 下	軸 直 角			
25			軸 方 向	0.57	0.42	
26			鉛 直			

3-4 モデル-2, トンネル軸直角方向 (実験4)

(1) 正弦波振動実験

変位計のターゲット設置点を図5-66に示す。

変位および加速度の共振振動数, 共振時の応答値および基盤に対する増幅倍率を表5-8に示す。また, 図5-67～5-77にこれらの共振曲線を示す。

表5-8 一次共振振動数, 共振時の応答値および増幅率 (実験4)

計器および計器番号		測定位置	測定方向	共振振動数 ($^{\circ}/s$)	共振変位(mm) 共振加速度(gal)	共振倍率
変位計	1	地盤中央局	上 下	4.85	42.	61.2
	2	盛土上トンネル中央	直 直 角	3.70	42.6	217.5
	3	換気塔上	"	4.39	13.7	97.0
加速度計	1	盛び地 土盛盤 中土 中央中 お央 よ下	盛土中 軸 方 向	3.70	129.1	92.2
	2		ニ～ホ層 "			
	3		へ 層 "			
	4		ト 層 "			
	5	盛お土 土よ中 中び央 央盛下	盛土中 軸 直 角	3.81	1,406.1	252.3
	6		ニ～ホ層 "	3.81	333.2	59.8
	7		へ 層 "	3.81	232.8	41.8
	8	地央 盤 中部	イ～ロ層 軸 方 向	4.63	146.1	27.4
	9		ニ～ホ層 "	4.63	77.4	14.5
	10		へ 層 "	4.63	64.3	12.1
	11	換気塔中	軸 直 角	4.50	273.7	51.0
	12		軸 方 向	4.50	240.4	44.8
	13		上 下			
	14	盛土上トンネル中央	軸 直 角	3.81	2,045.7	367.1
	15		軸 方 向	3.81	296.8	53.3
	16		上 下	3.81	440.5	79.0
	17	換気塔	軸 直 角			
	18	横盛土	軸 方 向			
	19	換気塔	軸 直 角			
	20	横盛土	軸 方 向			
	21	斜路部沈理トンネル 中央部	軸 直 角	4.39	433.4	81.5
	22		軸 方 向	4.50	101.6	18.8
	23		上 下	4.59	182.7	34.7
	24	斜路部沈図トンネル 中央部	軸 直 角			
	25		軸 方 向	4.50	83.4	15.5
	26		上 下			

(2) 自由振動実験

地盤部トンネルの応答変位の減衰性を図5-78に示す。

減衰定数を求めると0.37%となる。

(3) 振動モード測定実験

盛土共振点近傍の $3.76^{\circ}/s$ および地盤共振点近傍の $4.37^{\circ}/s$ での振動モード測定結果を表5-9に示す。

3.76 c/s 場合、換気塔とその両側のトンネルの間で4~9mm程度の相対変位が測定されており、位相も互いに異なっているのが認められる。

地盤の変位量が場所によって大きく変化することは、4.37 c/s における地盤の中央部(ターゲット4)と、(ターゲット1)の変位量が17倍以上も異なることから明らかで、地盤部の両端では共振振動数に1c/s 近くの差があることが観察されている。4.37 c/s の場合には換気塔付近以外では地盤中央部の基準点に対する位相の差は認められなかった。

盛土の斜路部は盛土中央部と比較して振動量は一般に小さく、斜路部全体の著しい共振現象は認められなかった。

盛土の共振(3.7 c/s)および地盤の共振(4.84 c/s)時の16mm撮映による標的の動きから求められた振動モードを図5-79、図5-80に示す。

(4) 地震波動実験

E1 Centro NS 成分地震波およびランダム波による応答のパワースペクトルを図5-81に、最大応答(入力最大加速度1 gal 当りの最大応答変位あるいは最大応答加速度で表示)を表5-10に示す。

表5-9 共振点近傍における振動モード測定結果(実験4)

(a) 振動数 $f = 3.76 \text{ c/s}$ (盛土共振点近傍)

基準 ターゲット		測定 ターゲット		位 相 差	測定ターゲット変位量 基準ターゲット変位量
ターゲット番号	変位量(mm)	ターゲット番号	変位量(mm)		
9	7.97	2	3.25	-25°45'	0.41
9	8.85	3	2.62	-27°08'	0.30
9	8.52	4	2.24	-54°08'	0.26
9	6.64	5	4.45	-20°20'	0.67
9	6.53	6	8.53	-13°32'	1.31
9	6.09	7	19.70	4°04'	3.23
9	8.85	8	125.66	9°29'	14.20
9	9.08	10	83.03	6°47'	9.14
9	9.34	11	28.18	4°04'	3.02

(b) 振動数 $f = 4.37 \text{ c/s}$ (地盤共振点近傍)

基準 ターゲット		測定 ターゲット		位 相 差	測定ターゲット変位量 基準ターゲット変位量
ターゲット番号	変位量(mm)	ターゲット番号	変位量(mm)		
9	1.77	1	30.92	0°	17.47
9	2.10	2	24.31	0°	11.58
9	1.66	3	31.29	0°	18.85
9	1.99	4	08.45	0°	9.27
9	1.55	5	9.72	12°34'	6.27
9	2.21	6	5.09	51°42'	2.30
9	2.21	7	9.35	90°	4.23
9	2.21	8	5.35	0°	2.42
9	2.21	10	7.48	0°	3.38
9	1.99	11	2.81	0°	1.41

表 5-10 地震波振動実験による変位および加速度の最大応答値 (実験 4)
(最大入力加速度 1 gal 当りの最大応答変位, 加速度)

	計 器 番 号	位 置		方 向	地 震 波	
					E1-Centro	Random
変位 応 答 倍 率 (mm/gal)	1	地 盤 中 央 部		軸 直 角	0.082	0.030
	2	換気塔前面盛土		〃	0.137	0.075
	3	盛土トンネル中央		〃	0.073	0.021
加 速 度 応 答 倍 率 (gal/gal)	1	盛 中 土 央 地 下 盤	盛 土 中	軸 方 向		
	2		ニ - ホ 層	〃		
	3		へ 層	〃		
	4		ト 層	〃		
	5		盛 土 中	軸 直 角		
	6		ニ - ホ 層			
	7		へ 層	軸 直 角	5.18	3.84
	8	地 中	イ - ロ 層	軸 方 向	3.79	2.83
	9		ニ - ホ 層	〃	1.56	1.74
	10		へ 層	〃	0.94	0.76
	11	換 塔		軸 直 角	6.94	4.05
	12			軸 方 向	2.13	2.12
	13	気 中		鉛 直		
	14	盛ト中 土ン央 上ル部		軸 直 角	11.73	12.94
	15			軸 方 向	1.87	1.54
	16			鉛 直	7.97	5.42
	21	沈 ト ン ネ ル 埋	斜 路 部	軸 直 角	6.77	4.04
	22			中 央	軸 方 向	1.65
	23		鉛 直		2.95	1.36
	24		換 気 塔 下	軸 直 角		
	25			軸 方 向	2.95	1.72
	26			鉛 直		

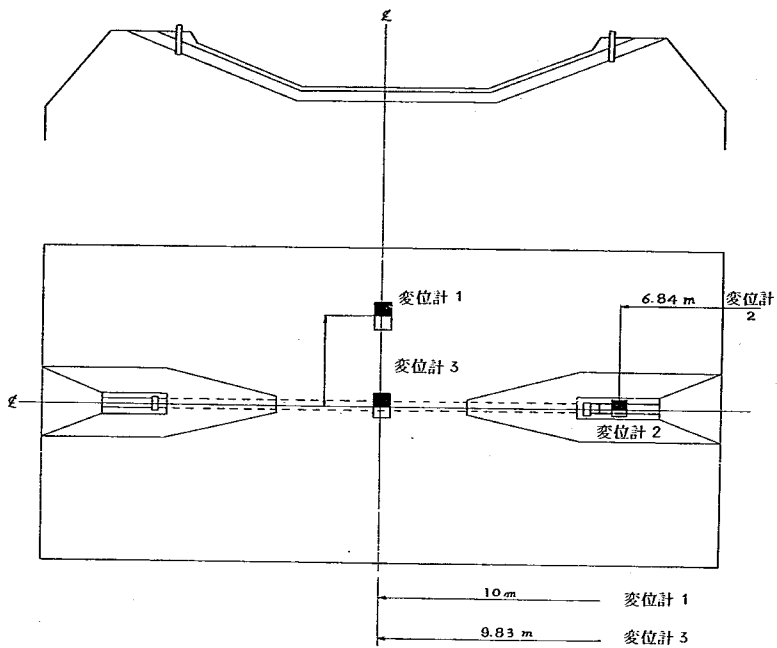


図 5-1 変位計ターゲット位置 (実験 1)

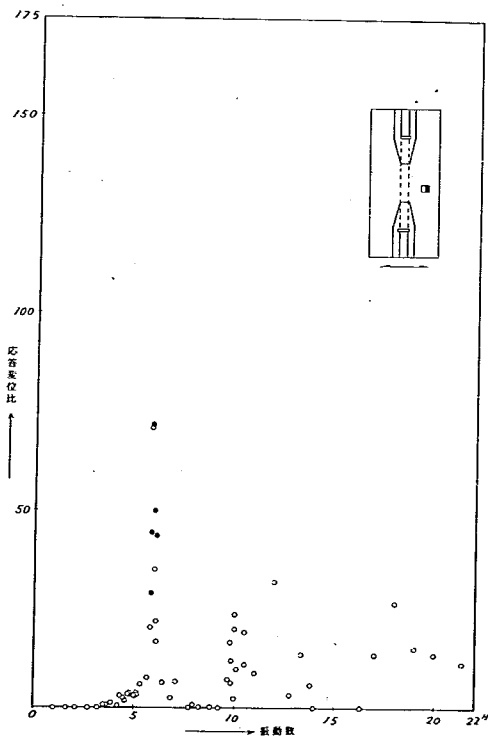


図 5-2 変位共振曲線 (地盤中央部, 軸直角方向) 実験 1

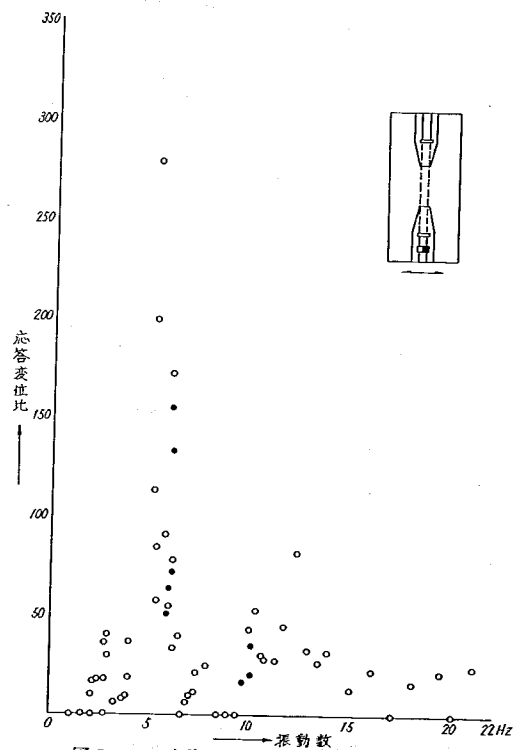


図 5-3 変位共振曲線 (盛土上トンネル, 軸直角方向) 実験 1

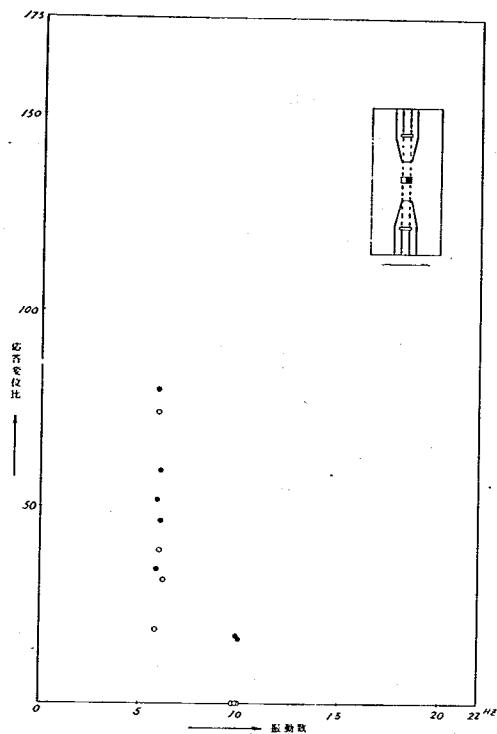


図 5-4 変位曲線 (トンネル中央, 軸直角方向) 実験 1

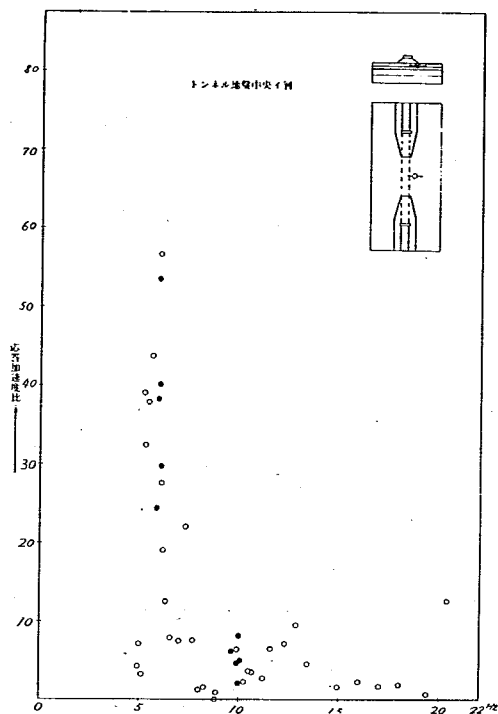


図 5-5 加速度共振曲線 (トンネル中央横地盤イ層, 直角方向) 実験 1

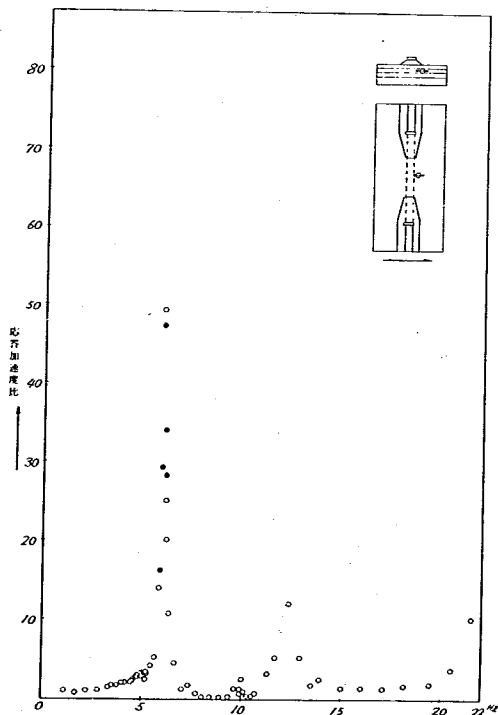


図 5-6 加速度共振曲線 (トンネル中央横地盤イ層, 軸直角方向) 実験 1

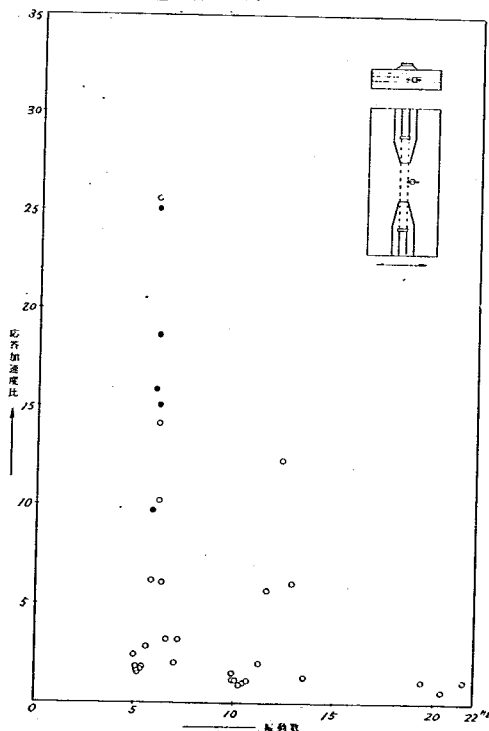


図 5-7 加速度共振曲線 (トンネル中央横地盤イ層, 軸直角方向) 実験 1

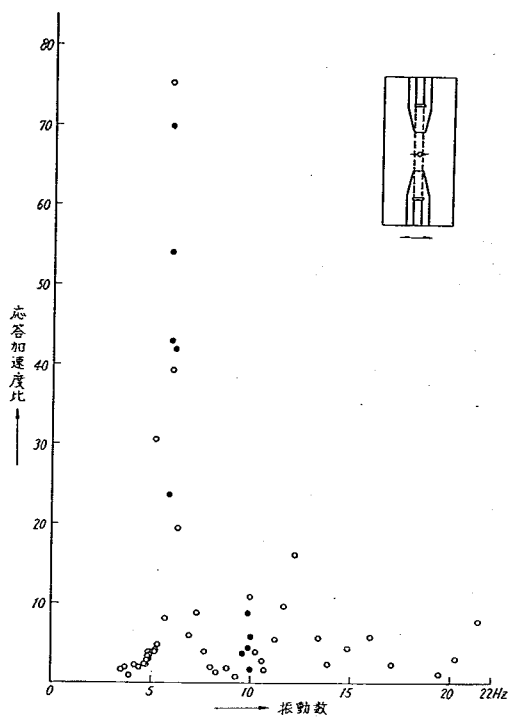


図 5-8 加速度共振曲線 (トンネル中央, 直角方向) 実験 1

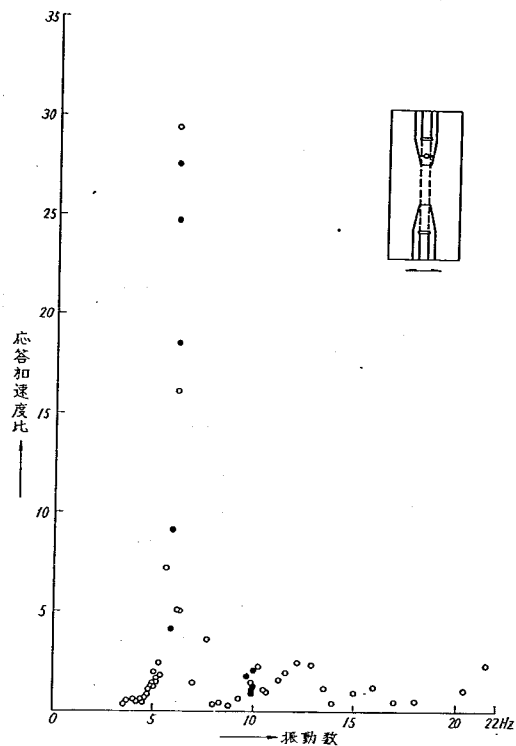


図 5-9 加速度共振曲線 (斜路部トンネル) 実験 1

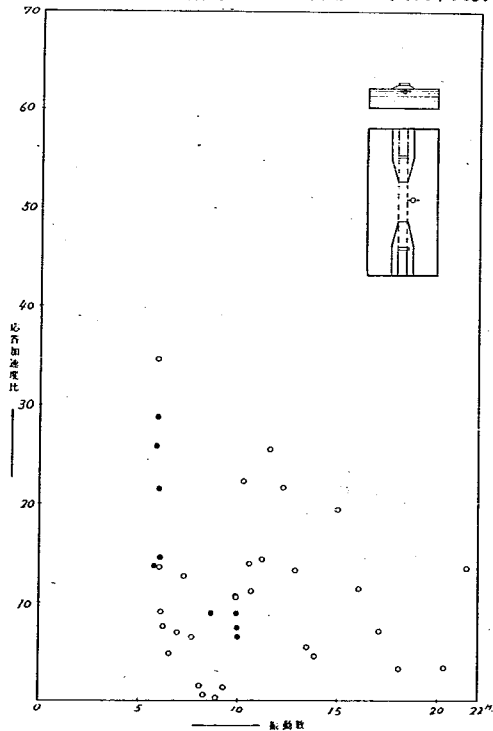


図 5-10 加速度共振曲線 (トンネル中央横地盤1層, 軸方向) 実験 1

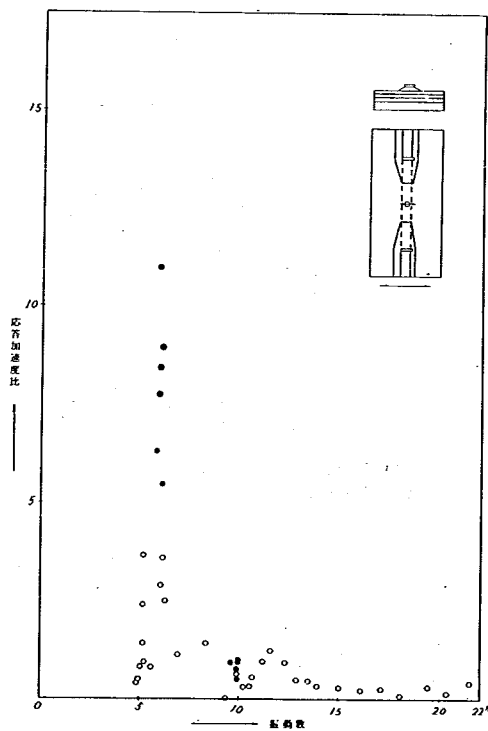


図 5-11 加速度共振曲線 (トンネル中央, 軸方向) 実験 1

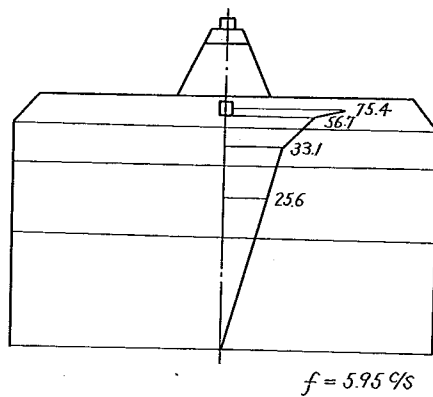
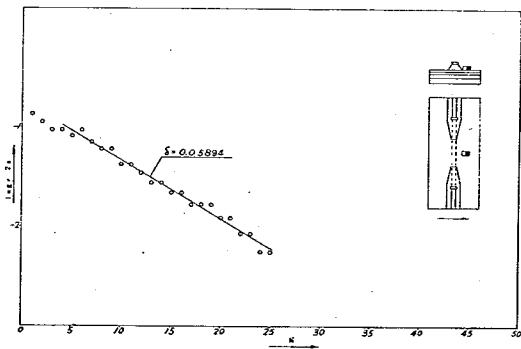
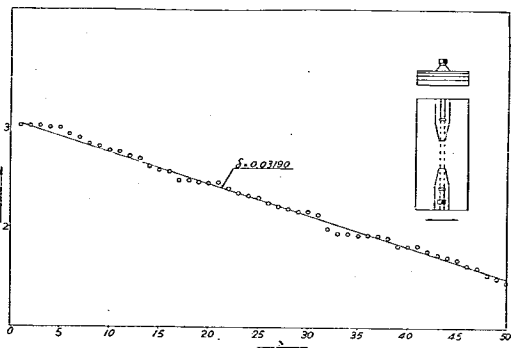


図 5-12 基盤に対する地盤内部の加速度増幅倍率 (実験 1)

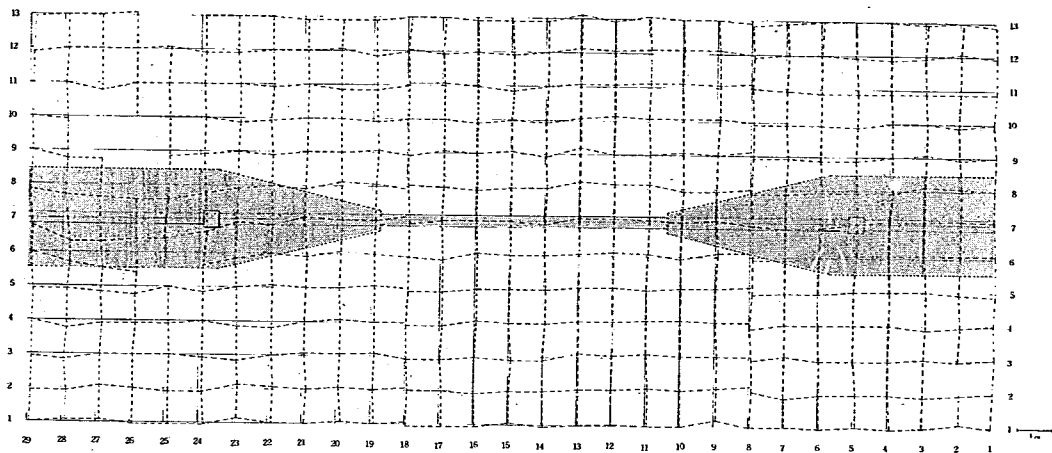


(a) 自由振動による減衰特性 (地盤中央, 軸直
角方向) 実験 1

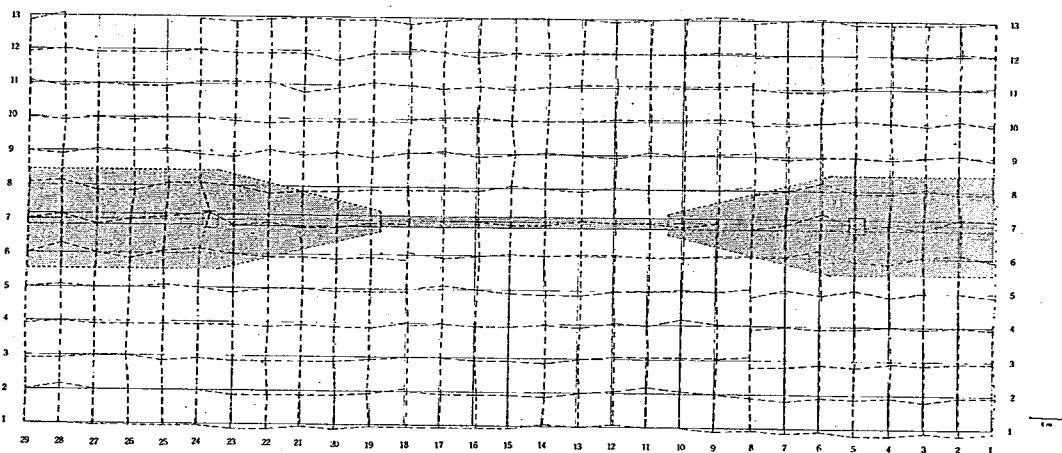


(b) 自由振動による減衰 (盛土上トンネル,
軸直角方向) 実験 1

図 5-14 自由振動による減衰特性



(a) 盛土共振点付近の振動モード



(b) 地盤共振点付近の振動モード

図5-13 振動モード図(実験1)

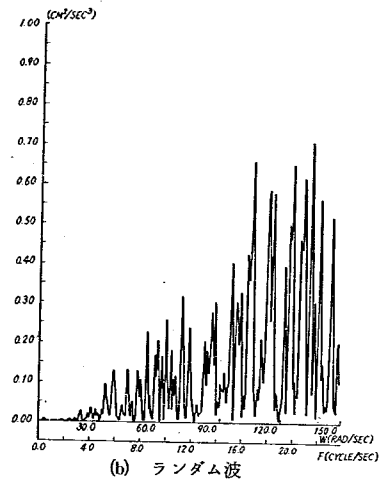
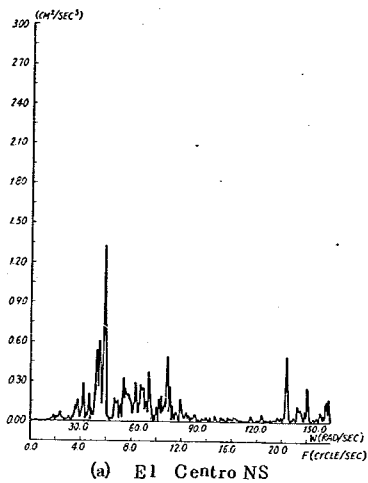


図 5-15 入力波のパワースペクトル (加振台上の加速度記録)

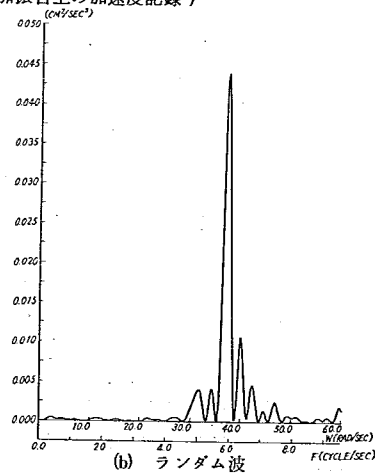
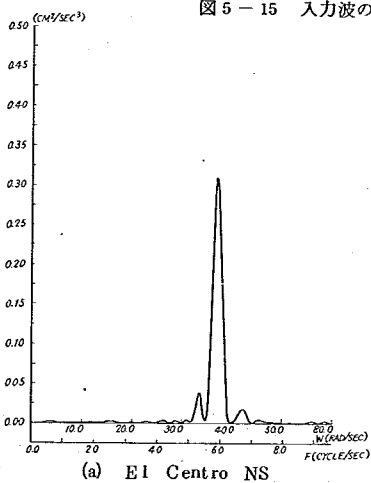


図 5-16-1(1) 変位 (地盤中央部表面) パワースペクトル

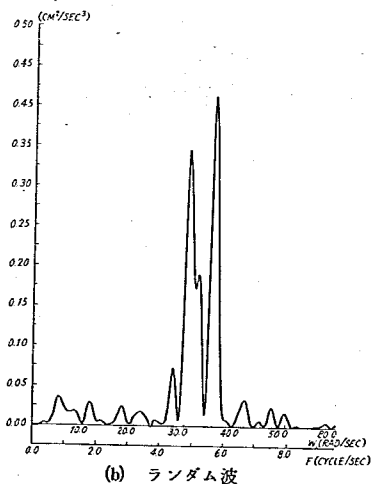
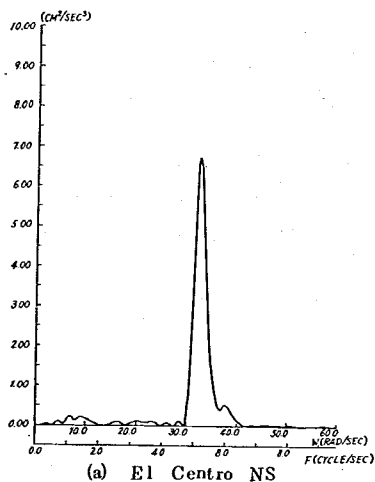


図 5-16-2(2) 変位 (盛土上トンネル) パワースペクトル

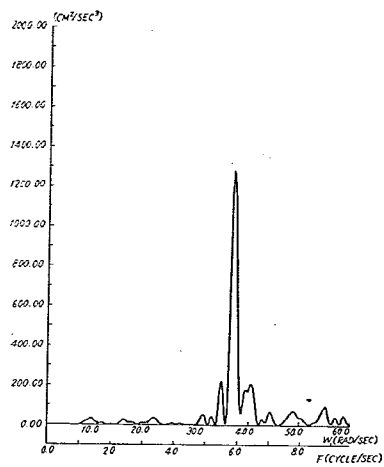
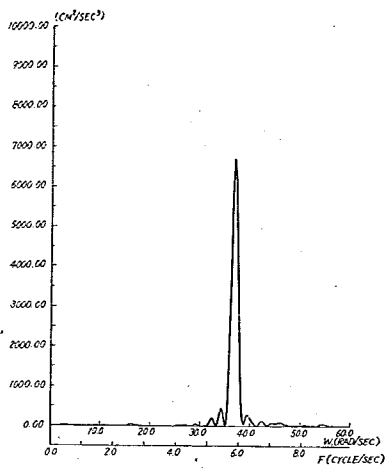


図 5-16-(3) 加速度 (地盤部沈埋トンネル中央) パワースペクトル

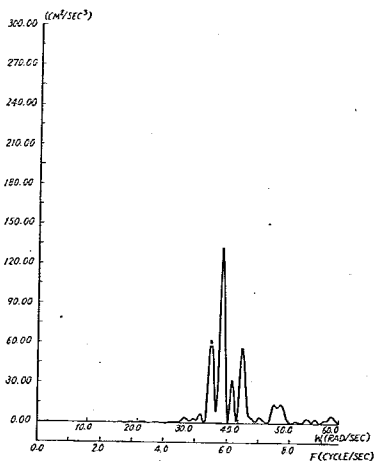
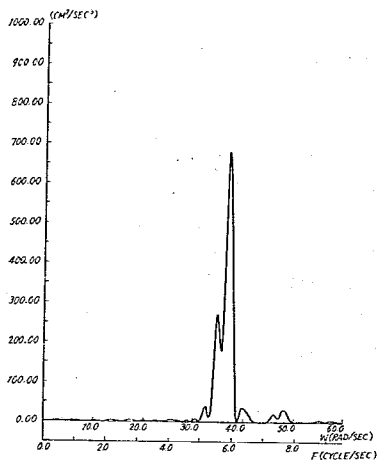


図 5-16-(4) 加速度 (斜路部沈埋トンネル中央) パワースペクトル

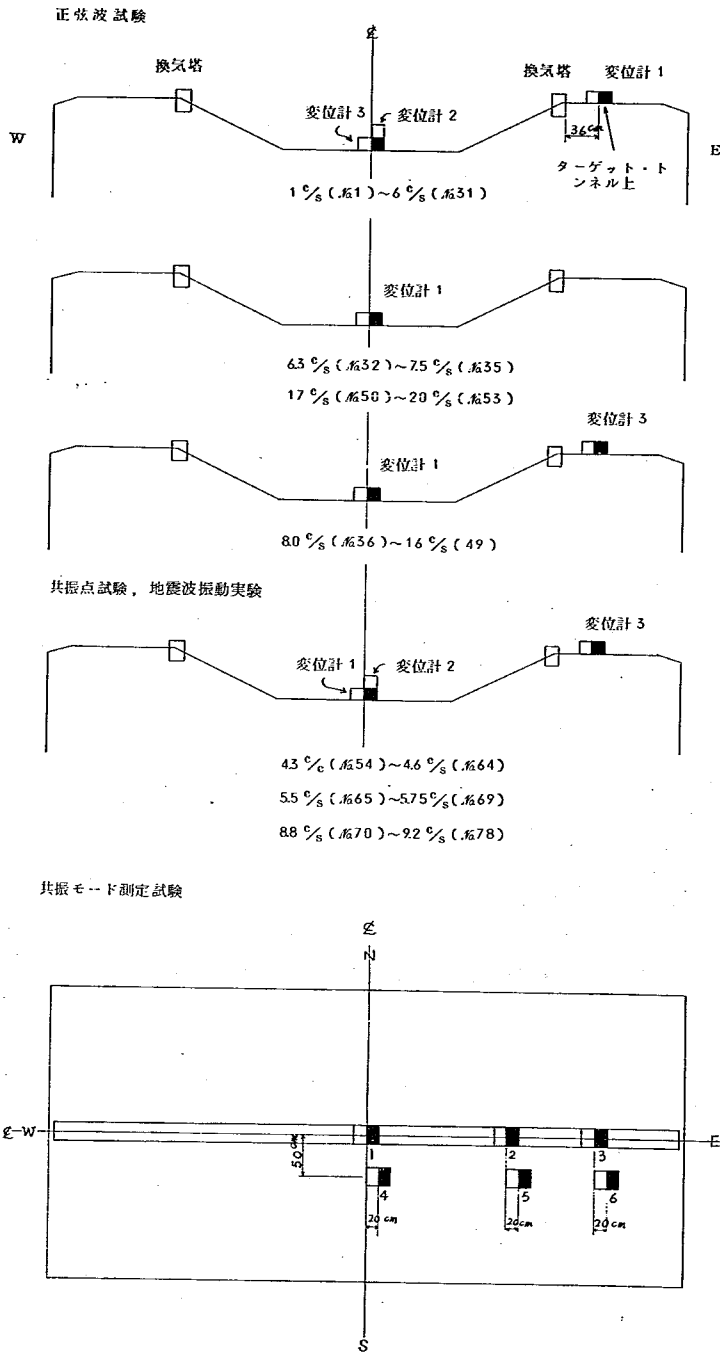


図 5-17 変位計ターゲット位置 (実験 2)

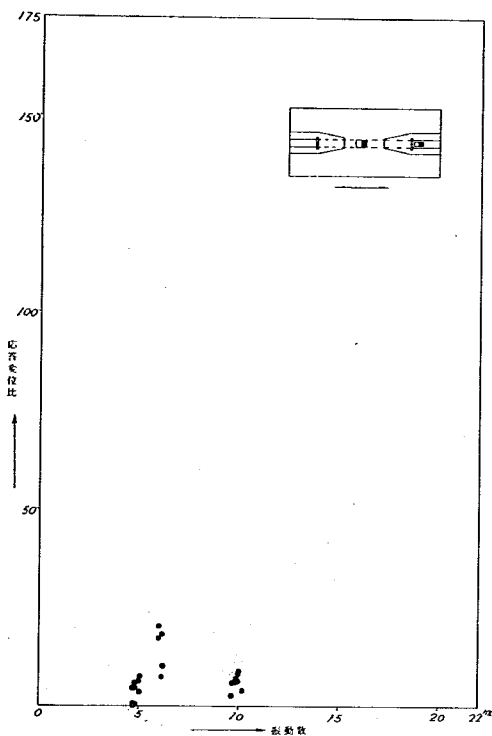


図 5-18 変位共振曲線 (トンネル中央、軸方向) 実験 2

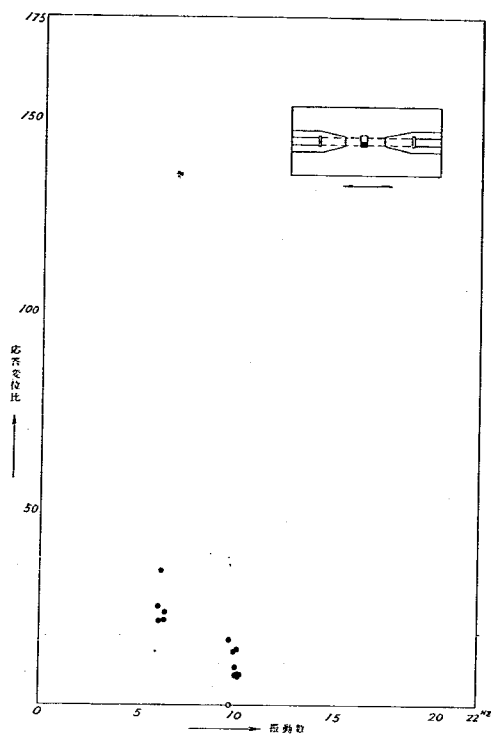


図 5-19 変位共振曲線 (トンネル中央、上下方向) 実験 2

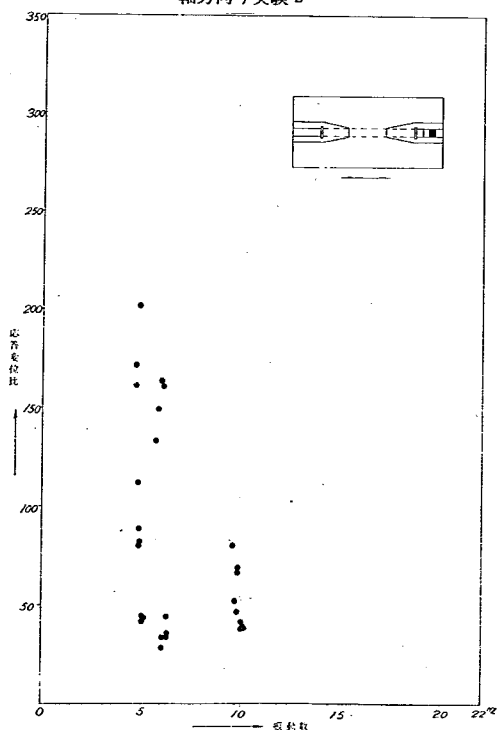


図 5-20 変位共振曲線 (盛土上トンネル、軸方向) 実験 2

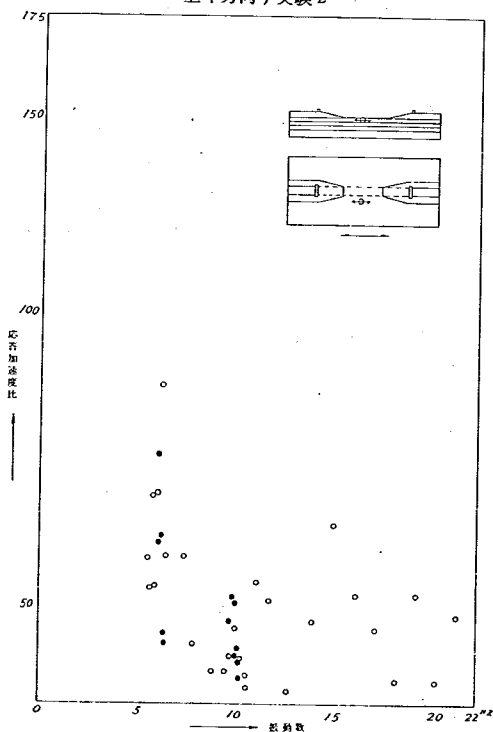


図 5-21 加速度共振曲線 (トンネル中央横地盤イ〜ロ層、軸方向)

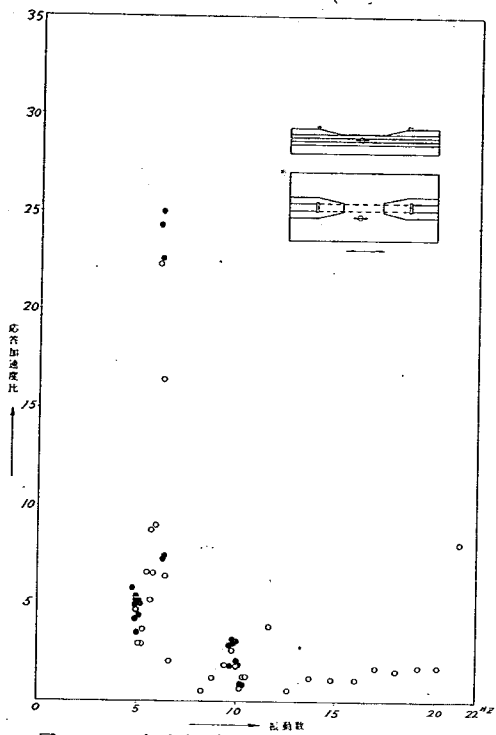


図 5-22 加速度共振曲線 (トンネル中央横地盤下層, 軸方向) 実験 2

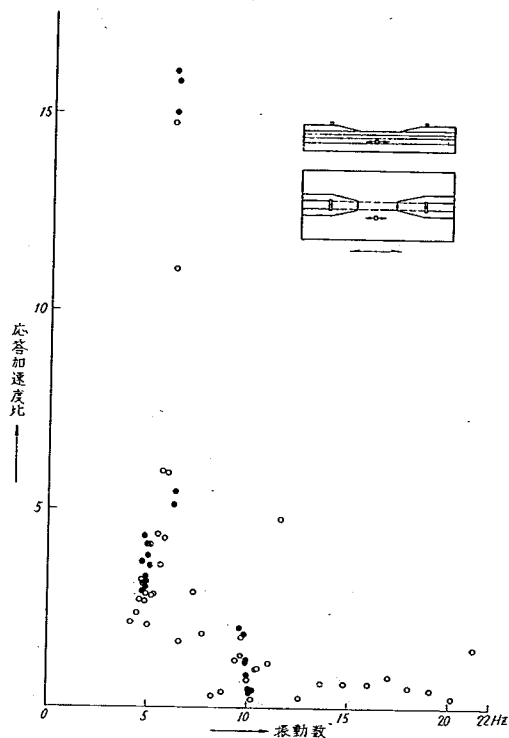


図 5-23 加速度共振曲線 (トンネル中央横地盤へ層, 軸方向) 実験 2

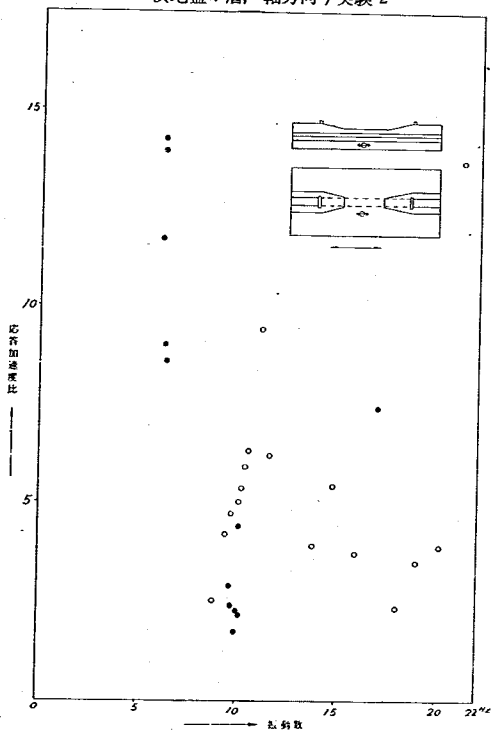


図 5-24 加速度共振曲線 (トンネル中央横地盤下層, 軸方向) 実験 2

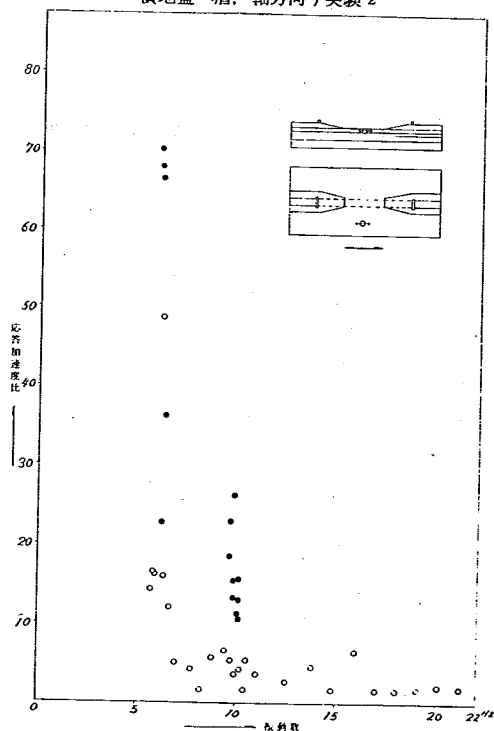


図 5-25 加速度共振曲線 (地盤中央イ〜ロ層, 軸方向) 実験 2

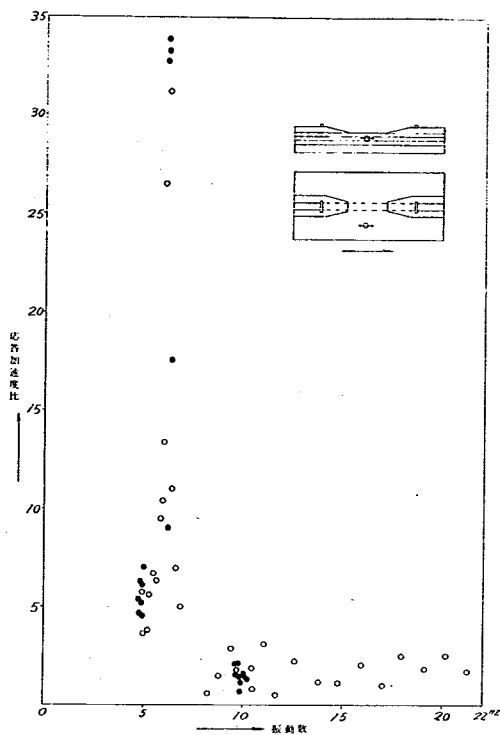


図 5-26 加速度共振曲線 (地盤中央へ層, 軸方向) 実験 2

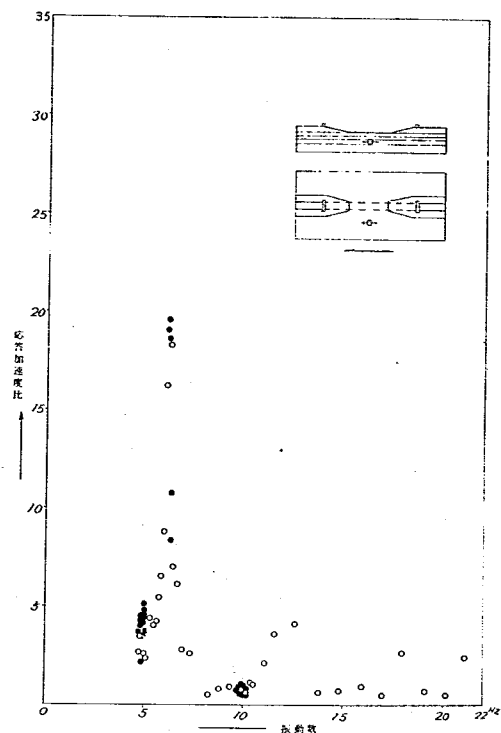


図 5-27 加速度共振曲線 (地盤中央へ層, 軸方向) 実験 2

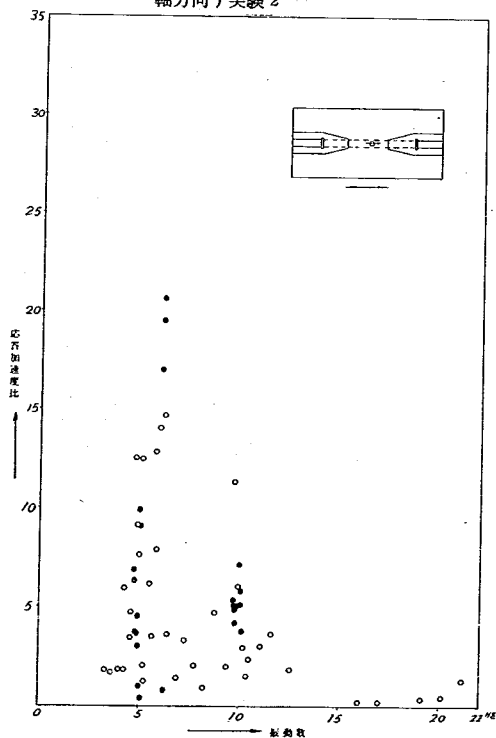


図 5-28 加速度共振曲線 (トンネル中央, 軸方向) 実験 2

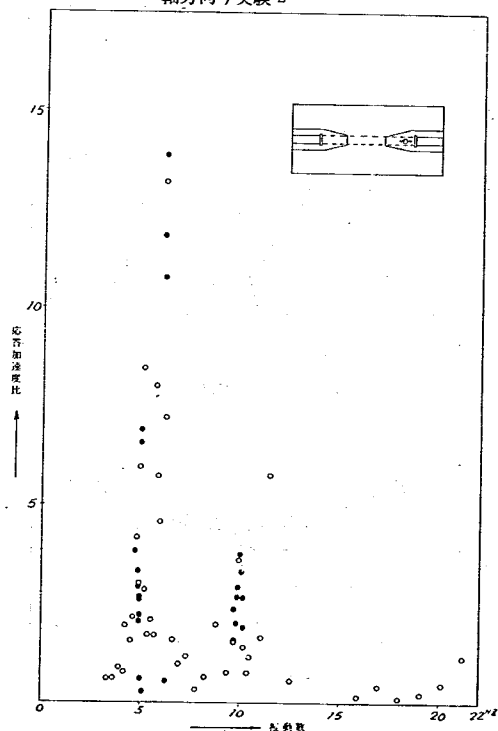


図 5-29 加速度共振曲線 (斜路部トンネル中央, 軸方向) 実験 2

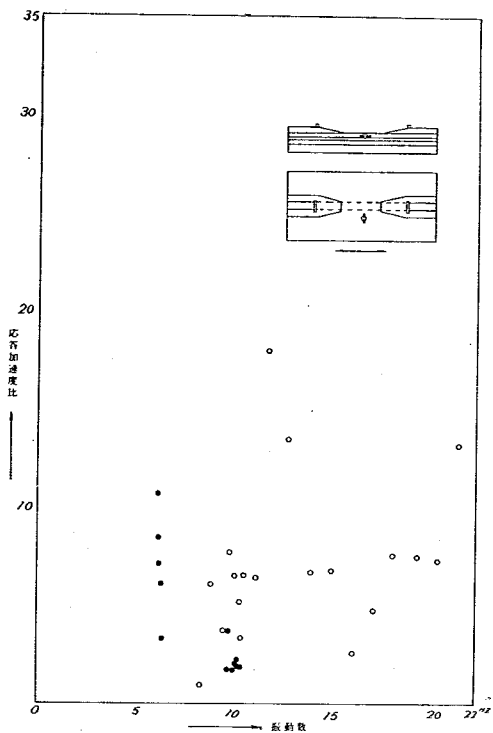


図 5-30 加速度共振曲線 (トンネル中央横
地盤イ～ロ層, 軸直角方向) 実験 2

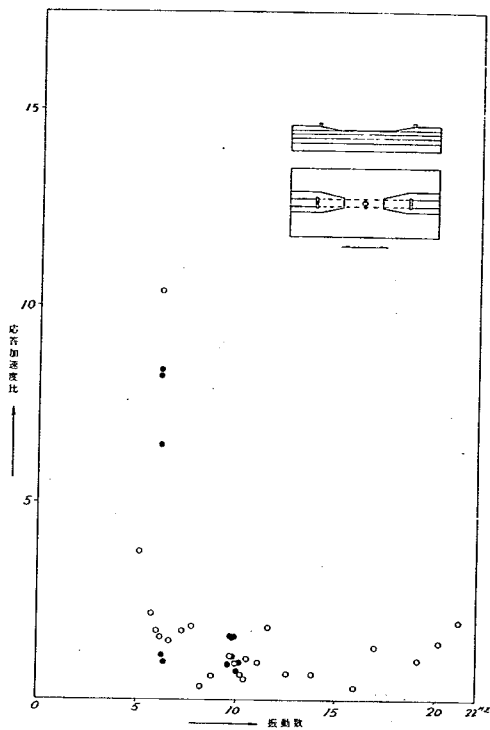
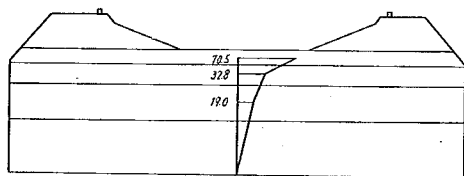
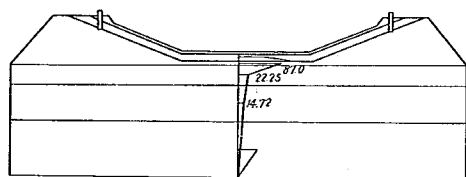


図 5-31 加速度共振曲線 (トンネル中央
軸直角方向) 実験 2



$f = 6.05 \text{ Hz}$

(a) トンネル中央横地盤



$f = 6.05 \text{ Hz}$

(b) 地盤中央部

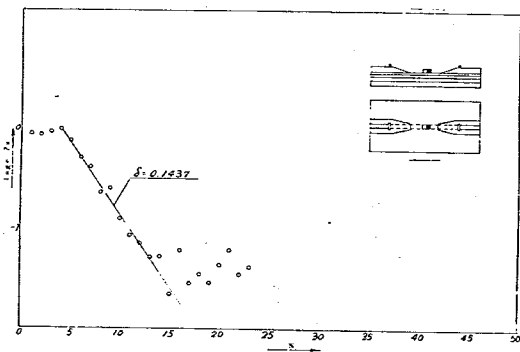


図 5-23 自由振動による減衰特性 (トンネ
ル中央, 軸方向) 実験 2

図 5-32 基盤に対する地盤内部の加速度増幅倍率 (実験 2)

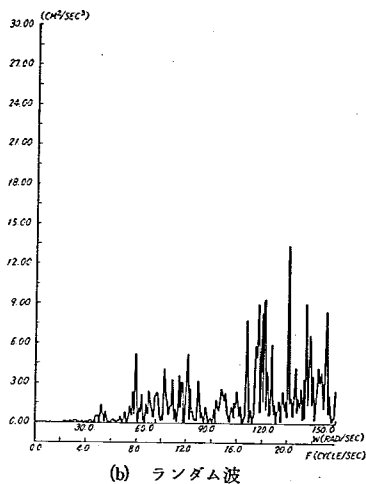
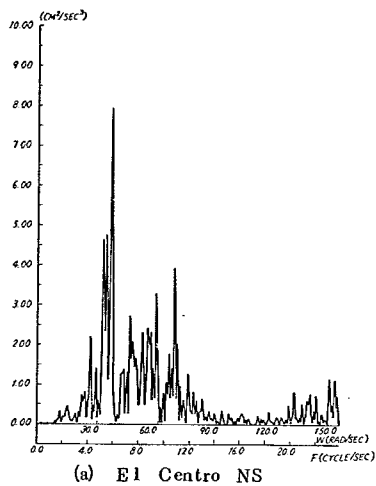


図-34 入力波のパワースペクトル(加振台上の加速度記録)

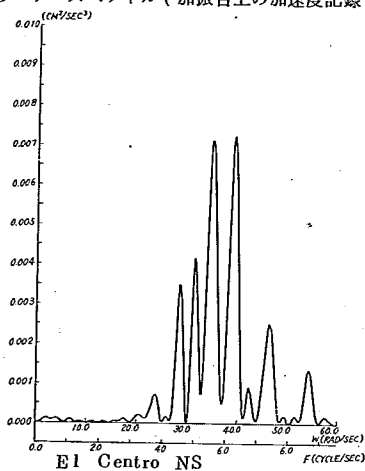


図5-35-(1) 変位(地盤中央部表面)パワースペクトル

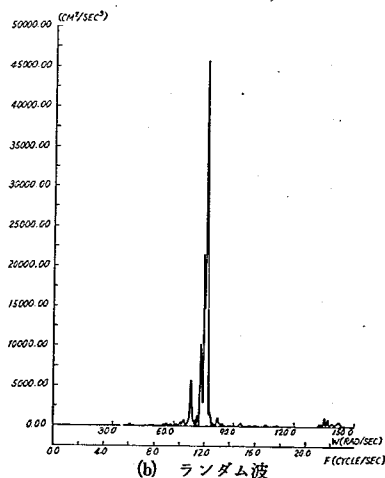
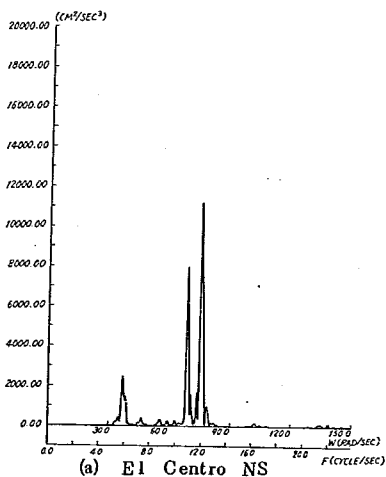


図5-35-(2) 加速度(トンネル中央横地盤イ〜ロ層)パワースペクトル

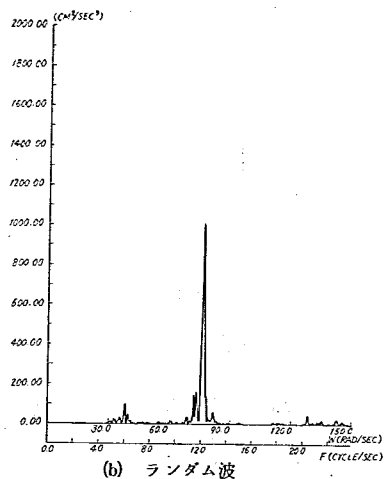
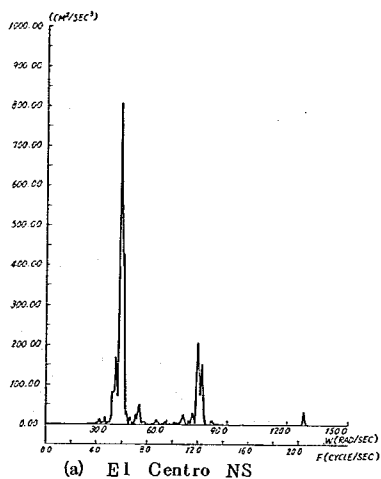


図 5 - 35 - (3) 加速度 (トンネル中央横へ層) パワースペクトル

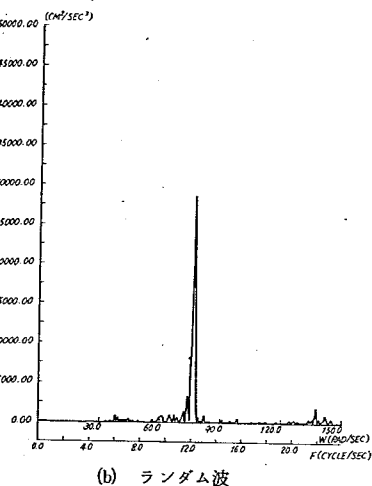
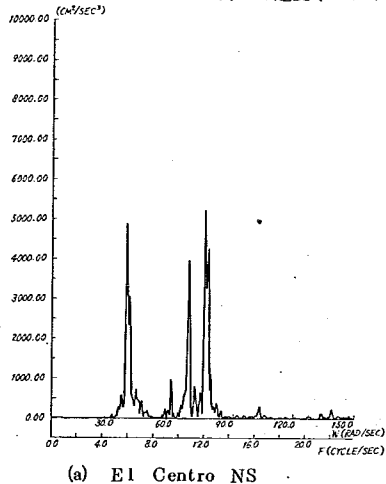


図 5 - 35 - (4) 加速度 (トンネル中央部イ〜ロ層) パワースペクトル

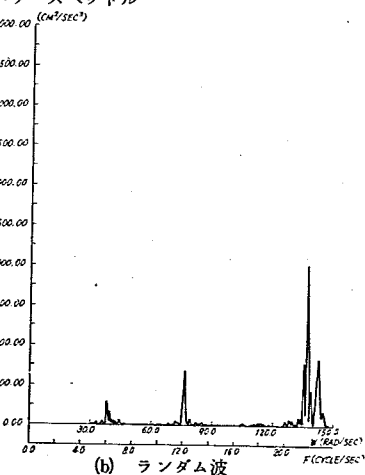
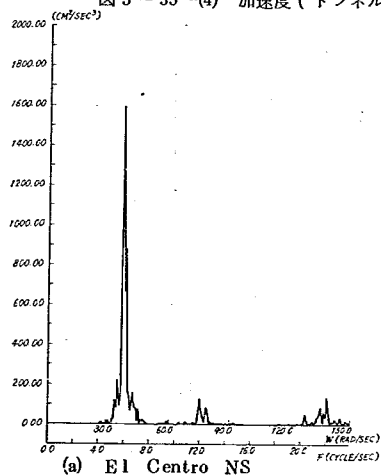
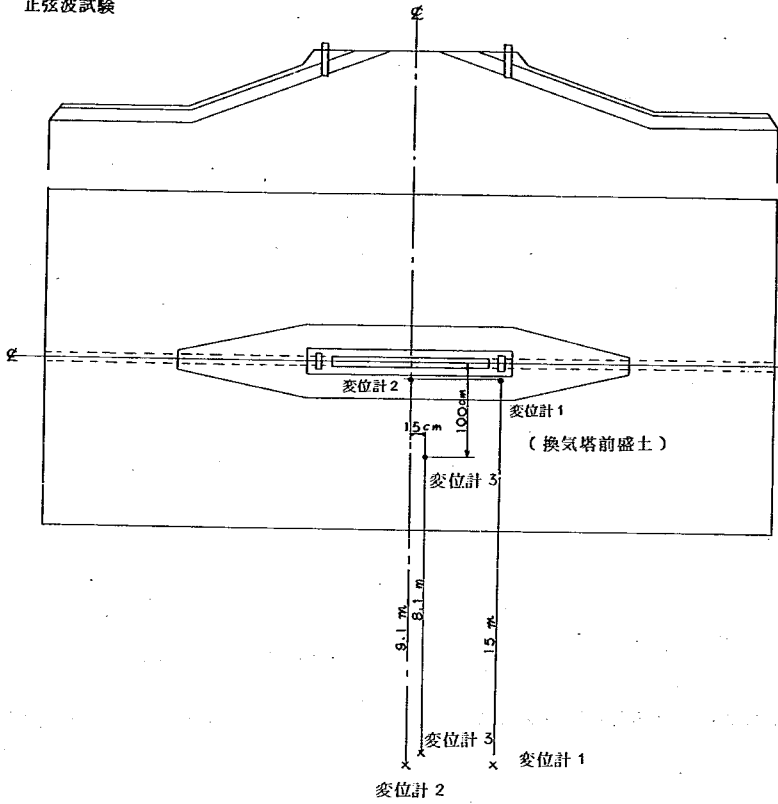


図 5 - 35 - (5) 加速度 (地盤中央部ニ〜ホ層) パワースペクトル

正弦波試験



振動モード測定試験

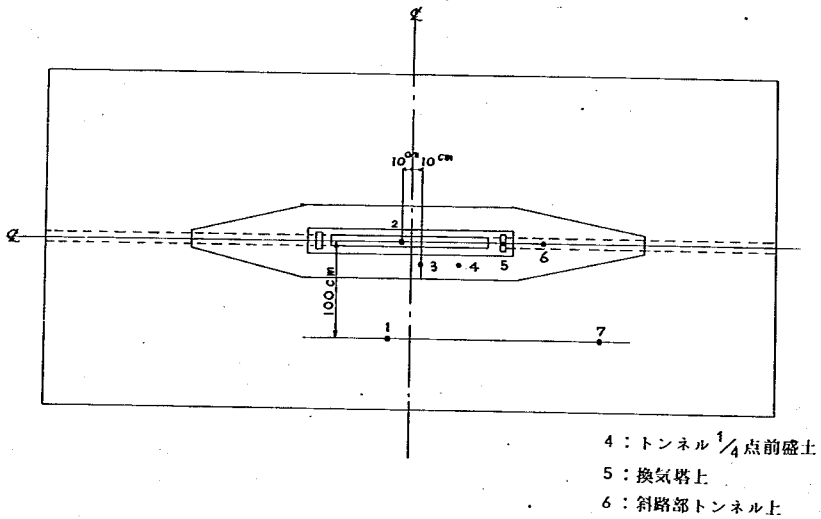


図 5-36 変位計ターゲット設置位置 (実験 3)

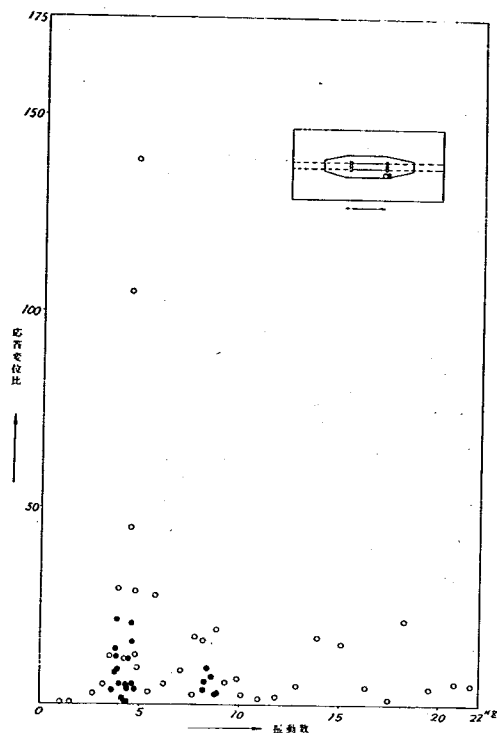


図 5-37 変位共振曲線(換気塔前盛土, 軸方向)実験 3

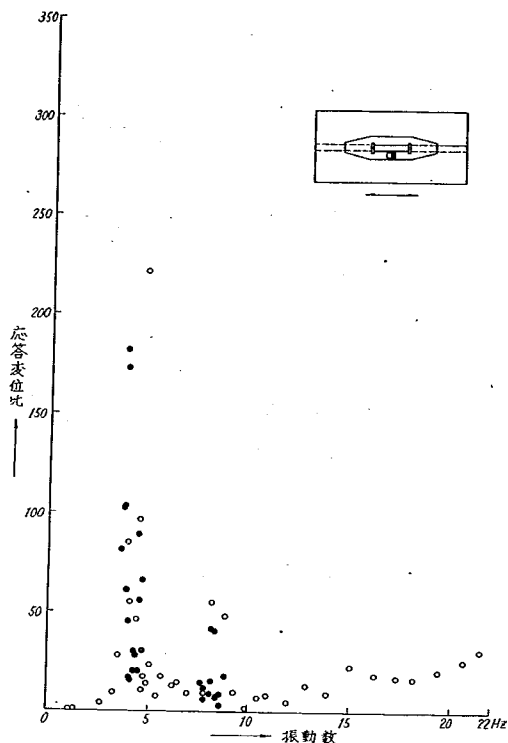


図 5-38 変位共振(盛土中央法面, 軸方向)実験 3

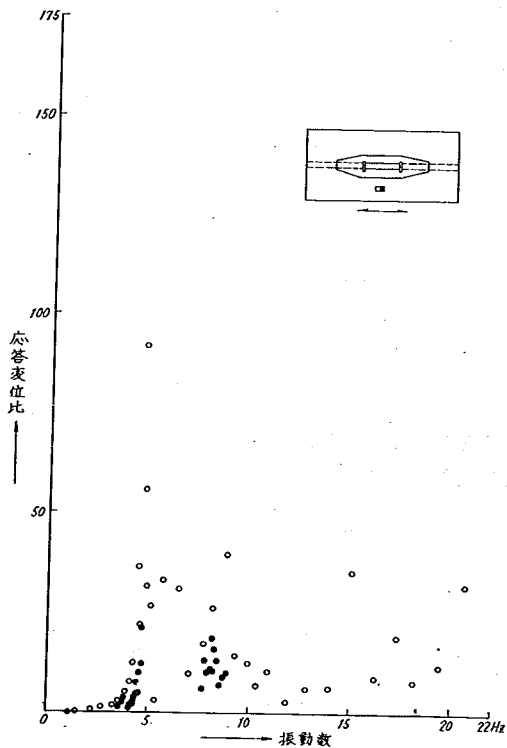


図 5-39 変位共振曲線(地盤中央部表面, 軸方向)実験 3

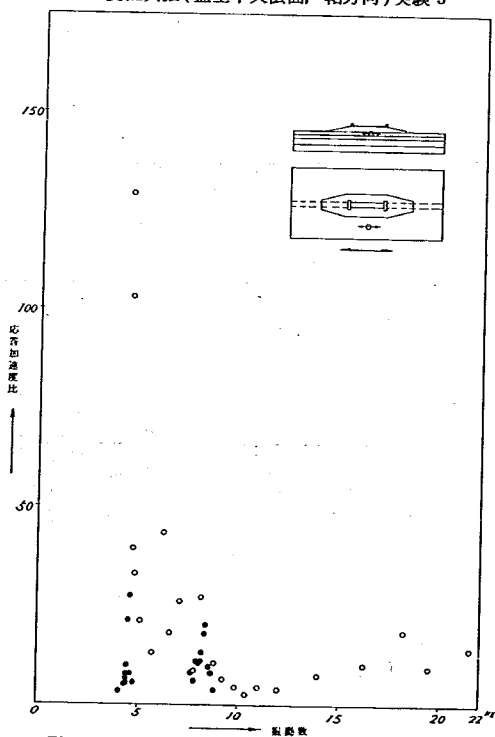


図 5-40 加速度曲線(地盤中央イ〜ロ層, 軸方向)実験 3

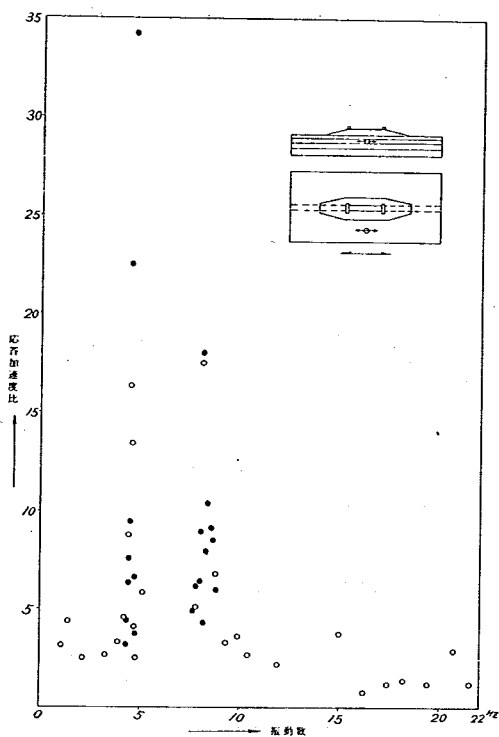


図 5-41 加速度共振曲線 (地盤中央へ層, 軸方向) 実験 3

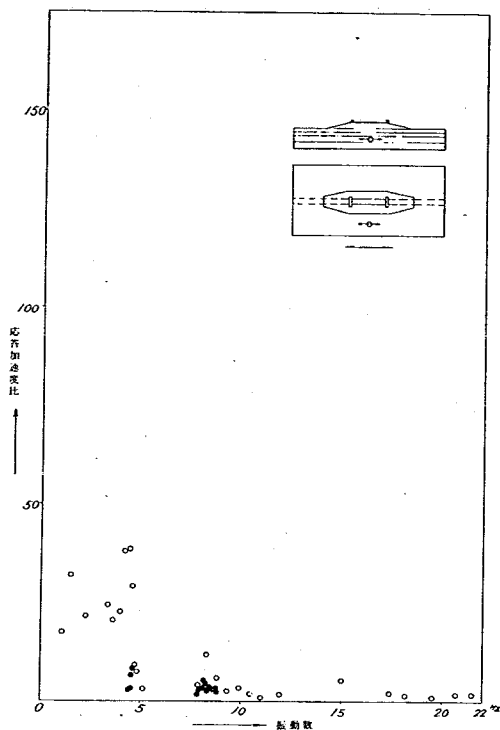


図 5-42 加速度共振曲線 (地盤中央へ層, 軸方向) 実験 3

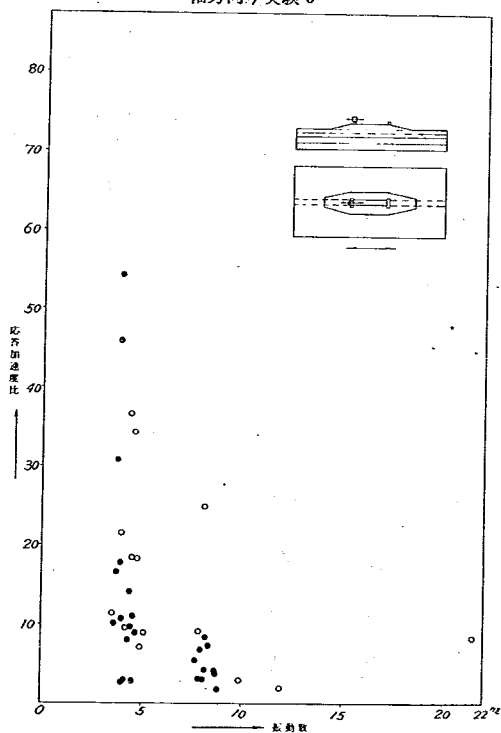


図 5-43 加速度共振曲線 (換気塔内, 軸方向) 実験 3

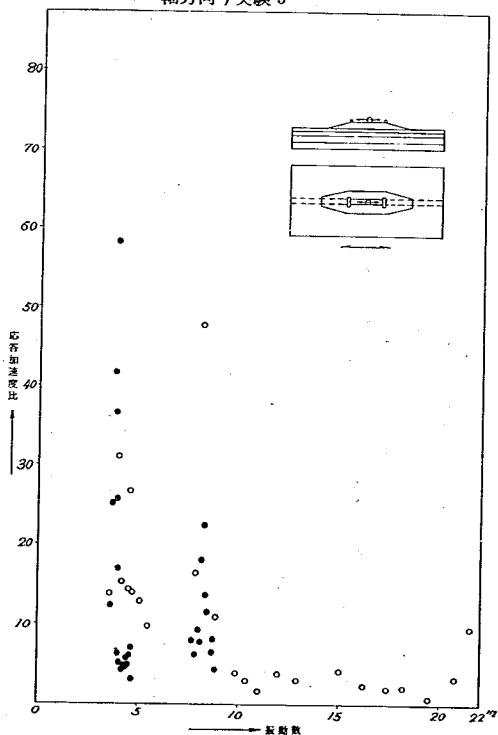


図 5-44 加速度共振曲線 (盛土上トンネル中央, 軸方向) 実験 3

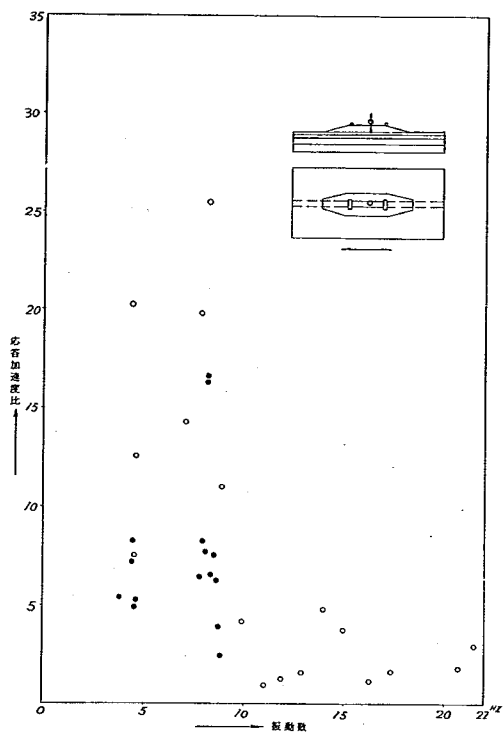


図 5-45 加速度共振曲線 (盛土上トンネル中央, 上下方向) 実験 3

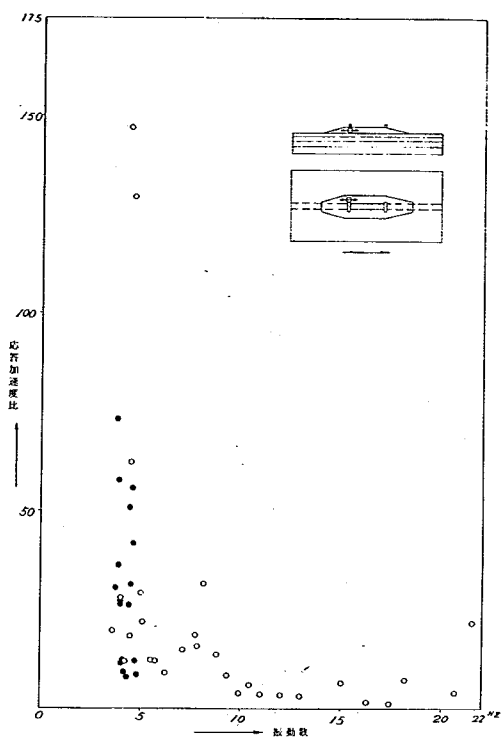


図 5-46 加速度共振曲線 (換気塔横盛土軸方向) 実験 3

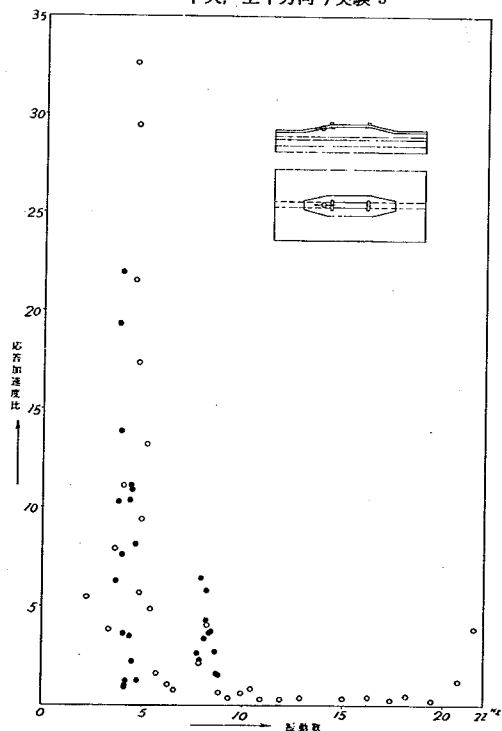


図 5-47 加速度共振曲線 (斜路部トンネル中央, 軸方向) 実験 3

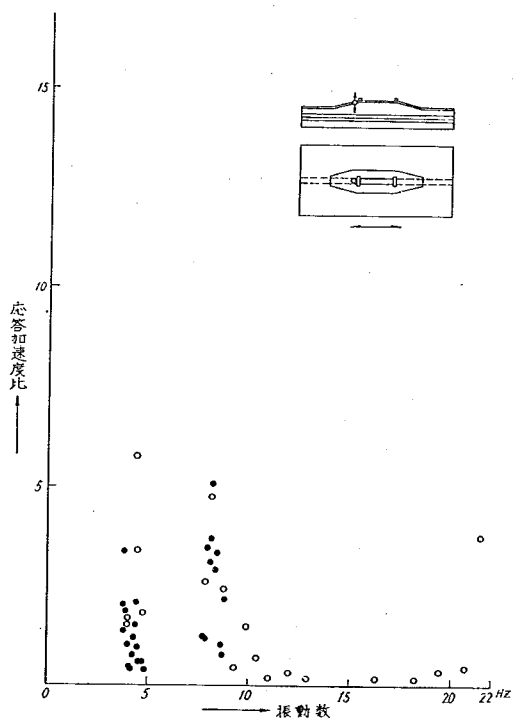


図 5-48 加速度共振曲線 (斜路部トンネル換気塔横, 上下方向) 実験 3

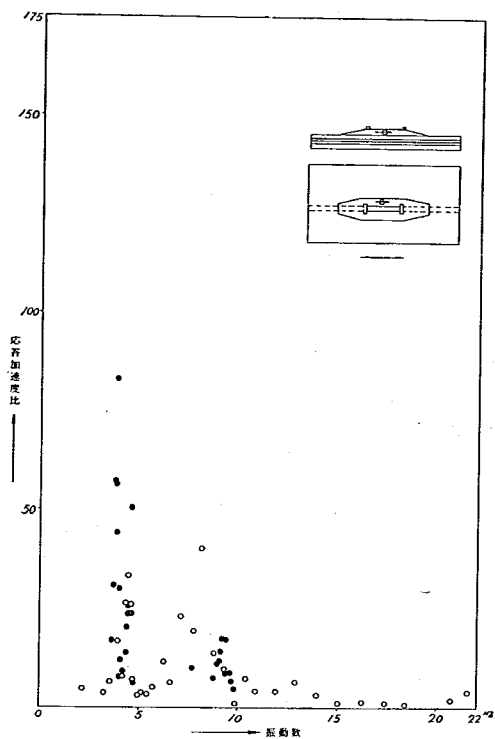


図 5-49 加速度共振曲線 (盛土中央, 軸直角方向) 実験 3

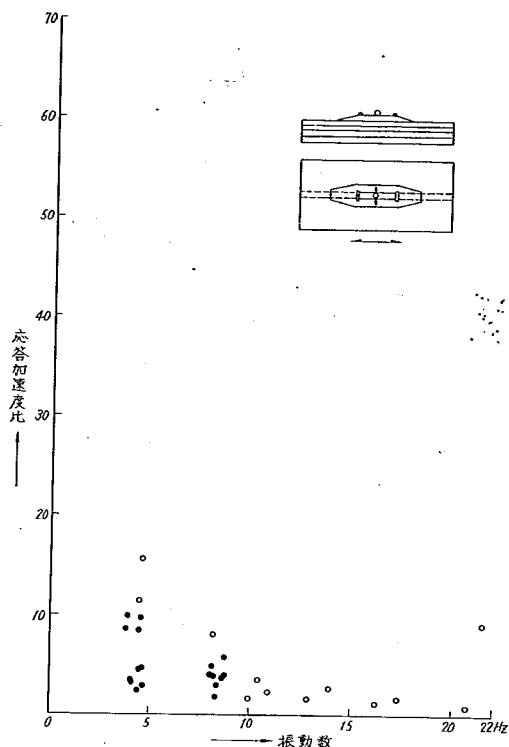


図 5-50 加速度共振曲線 (盛土上トンネル中央, 軸直角方向) 実験 3

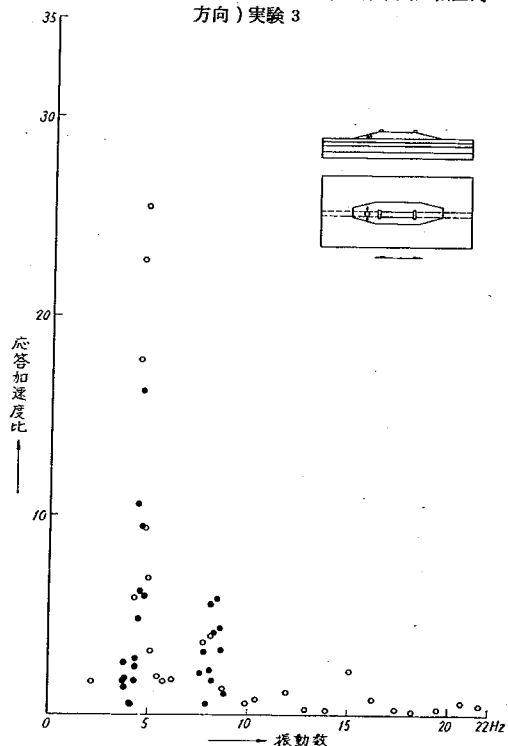


図 5-51 加速度共振曲線 (斜路部トンネル中央, 軸直角方向) 実験 3

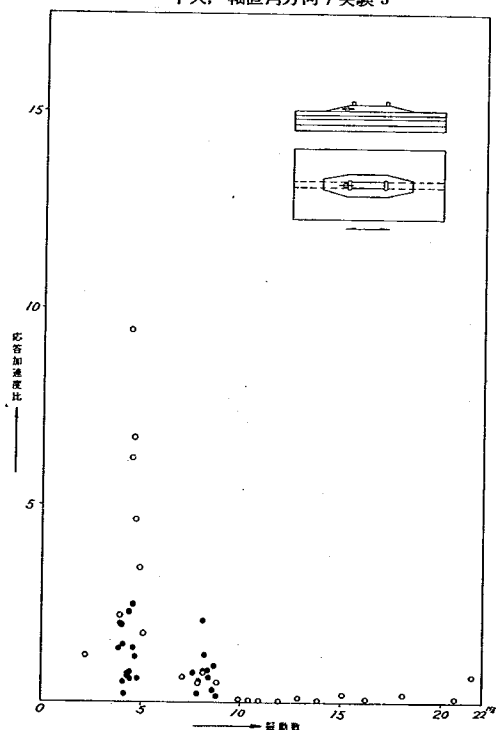


図 5-52 加速度共振曲線 (斜路部トンネル換気塔横, 軸直角方向) 実験 3

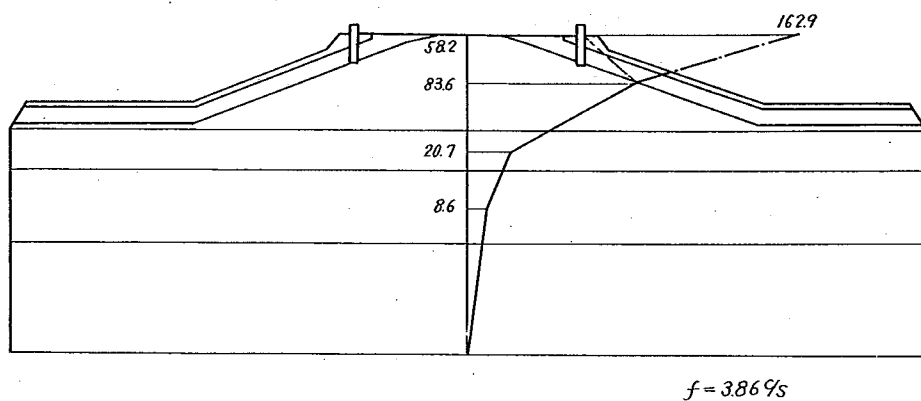


図 5-53 基礎に対する地盤内部の加速度増幅倍率 (実験 3)

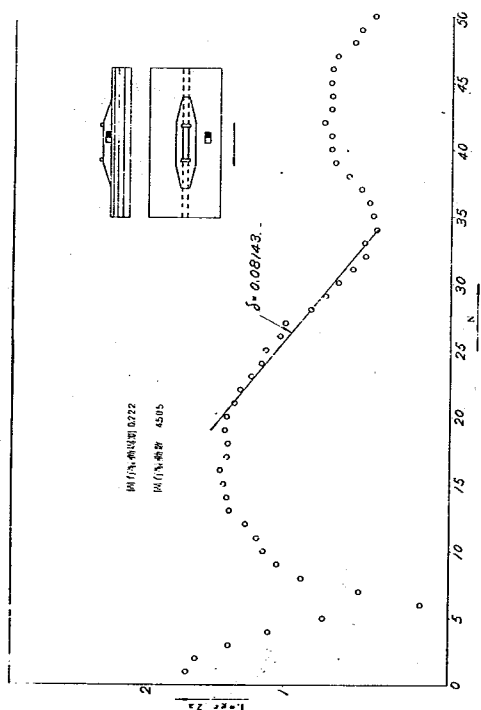


図 5-54 自由振動による減衰特性 (地盤中央表面, 軸方向) 実験 3

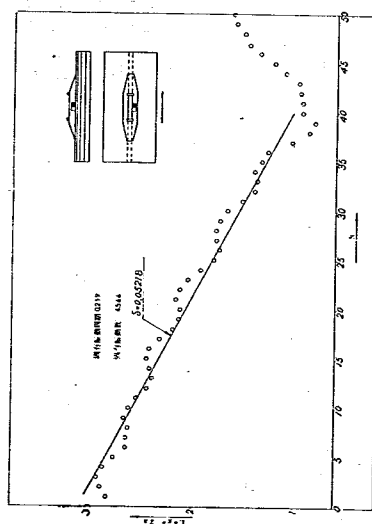
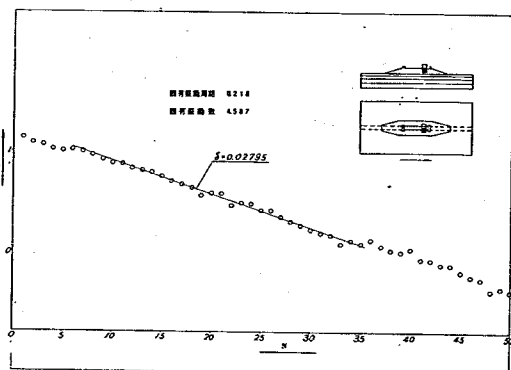
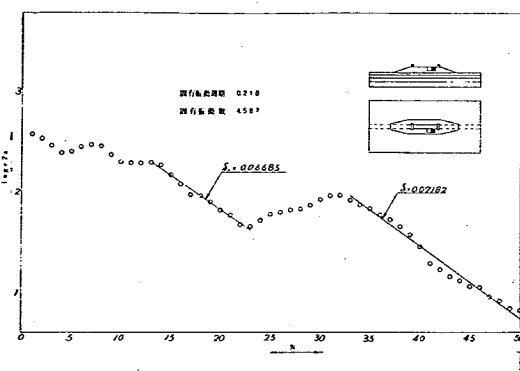
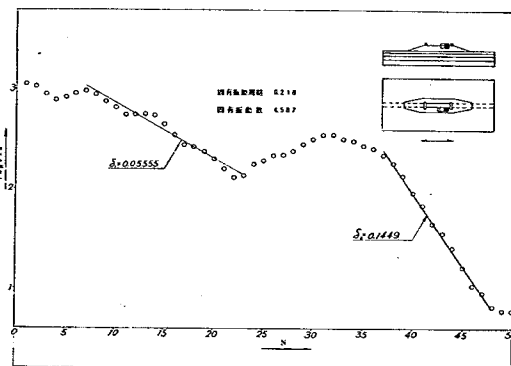
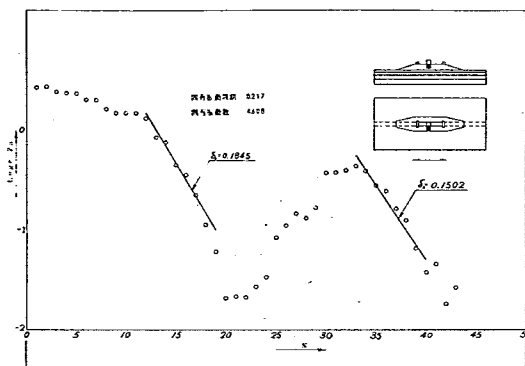


図 5-55 自由振動による減衰特性 (盛土中央頂面, 軸方向) 実験 3



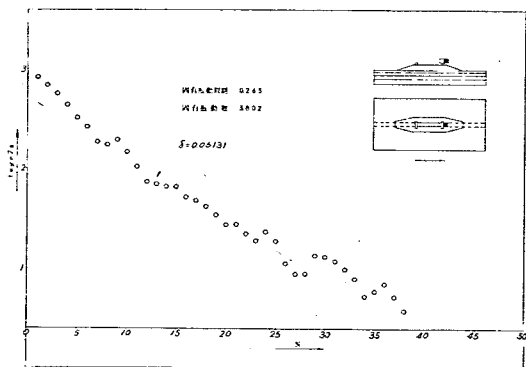


図 5-60 自由振動による減衰特性 (換気
塔上, 軸方向) 実験 3

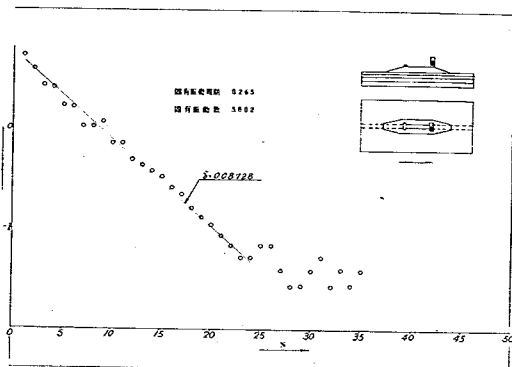


図 5-61 自由振動による減衰特性 (換気
塔上, 上下) 実験 3

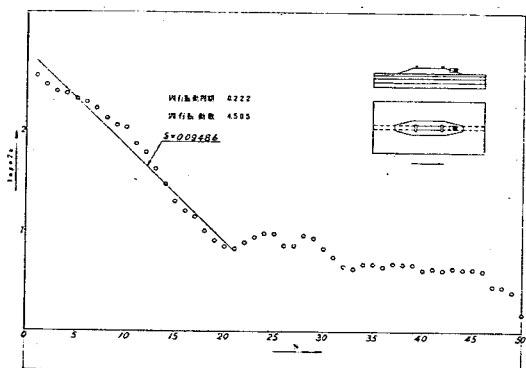


図 5-62 自由振動による減衰特性 (斜路部
トンネル中央, 軸方向) 実験 3

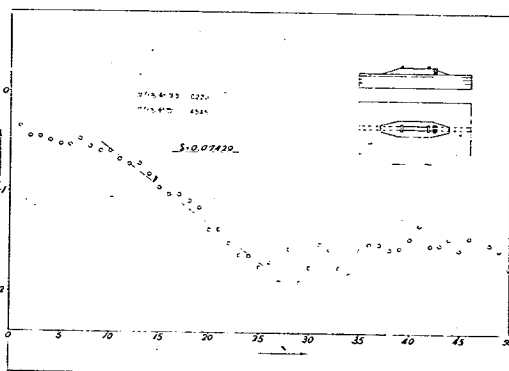


図 5-63 自由振動による減衰特性 (斜路部
トンネル中央, 上下) 実験 3

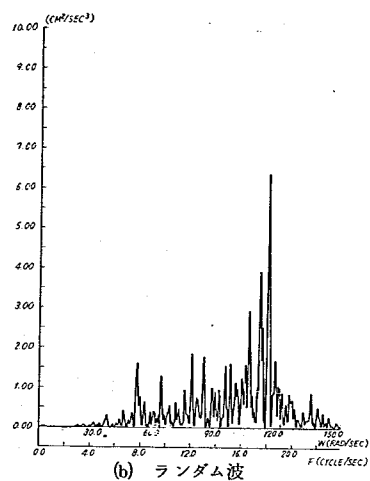
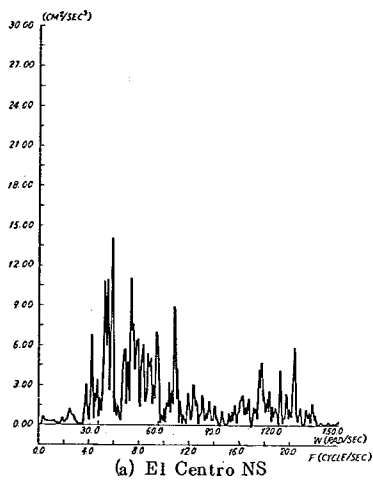


図 5-64 入力波のパワースペクトル (加振台上の加速度記録)

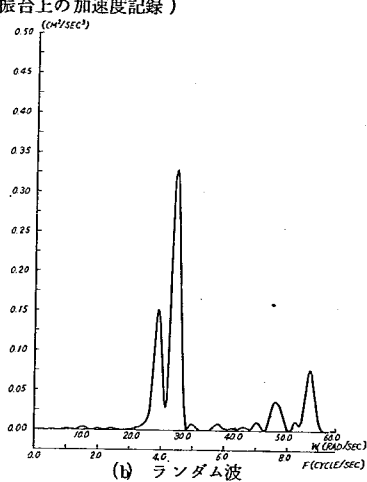
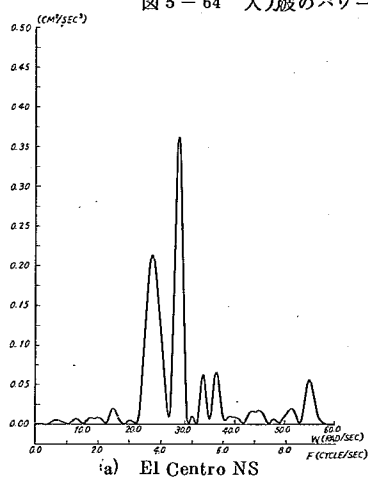


図 5-65-(1) 変位 (換気塔横盛土上) パワースペクトル

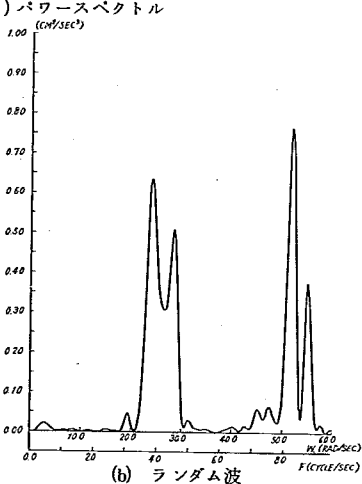
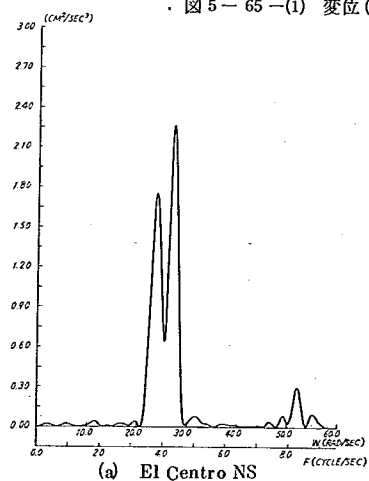


図 5-65(2) 変位 (盛土・頂面中央) パワースペクトル

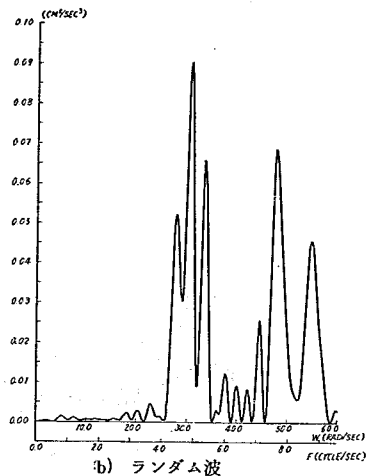
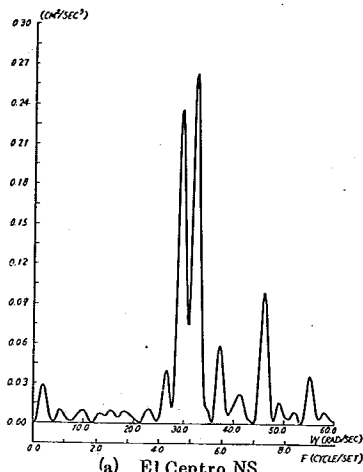
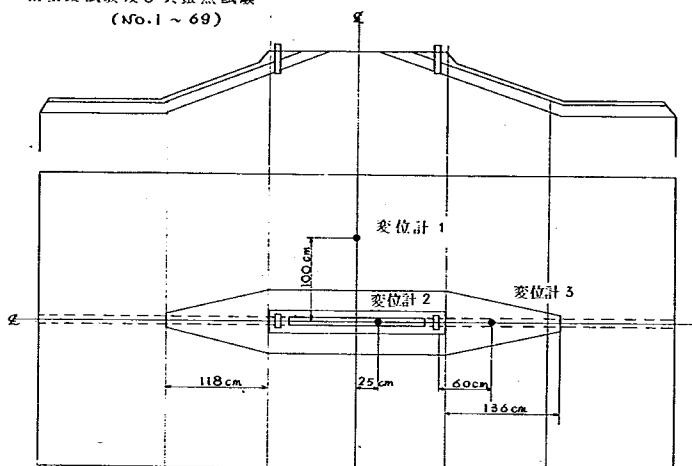


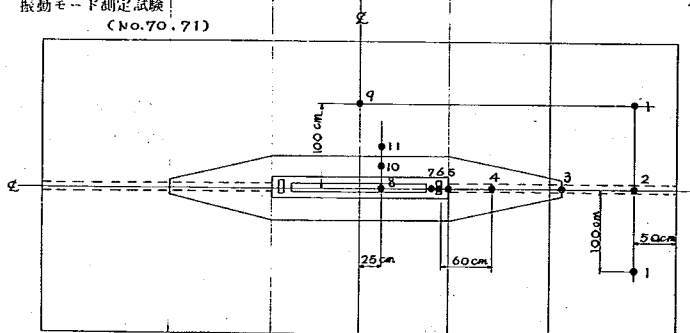
図 5-65 (3) 変位 (地盤中央部表面) パワースペクトル

正弦波試験及び共振点試験
(No.1 ~ 69)



	ターゲット間距離	Objective Lenses Selector	Low Pass
変位計 1	15.0 m	2	50
変位計 2	8.9 m	10 m	50
変位計 3	8.0 m	10 m	50

振動モード測定試験
(No.70,71)



正弦波試験及び実地震波試験
(No.72 ~ 93)

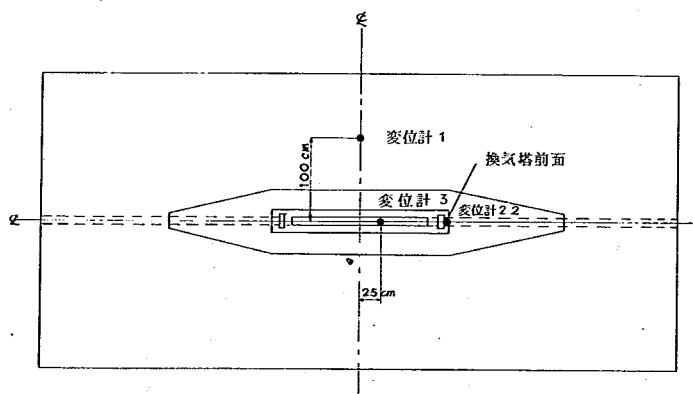


図5-66 変位計ターゲット設置位置(実験4)

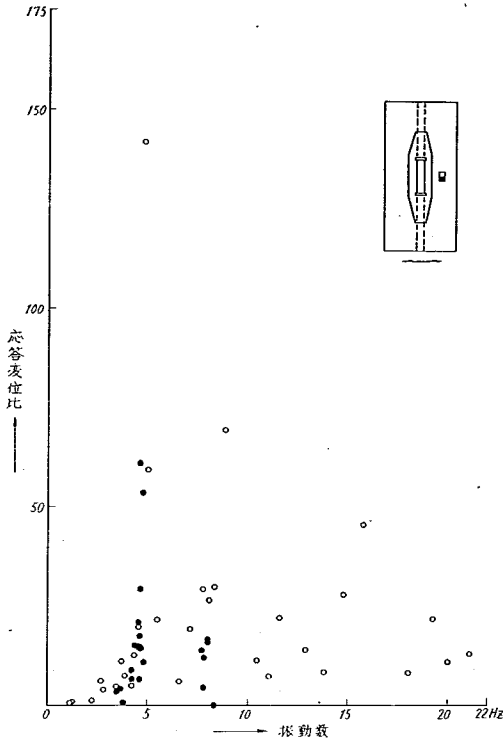


図 5-67 変位共振曲線 (地盤中央表面, 上下方向) 実験 4

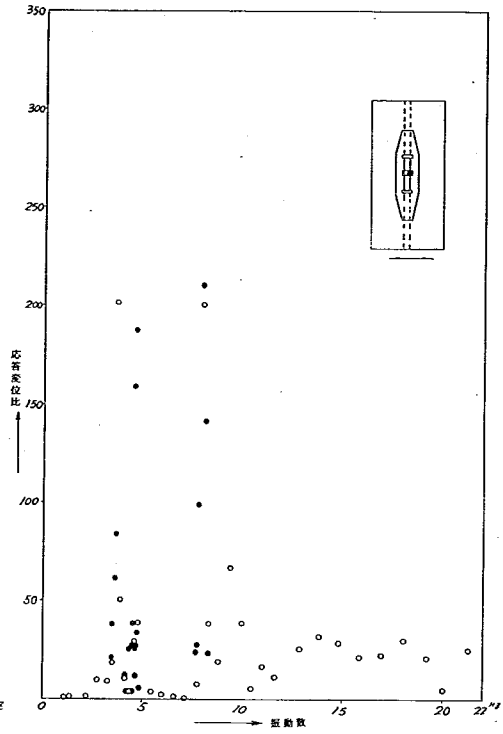


図 5-68 変位共振曲線 (盛土上トンネル中央, 軸直角方向) 実験 4

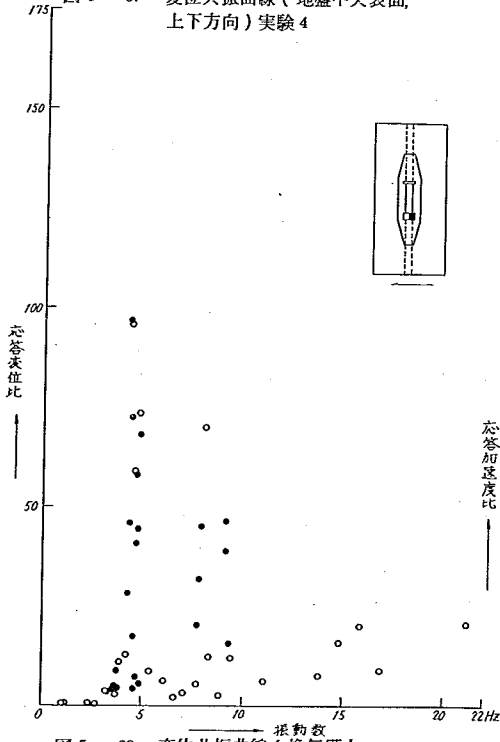


図 5-69 変位共振曲線 (換気路上, 軸直角方向) 実験 4

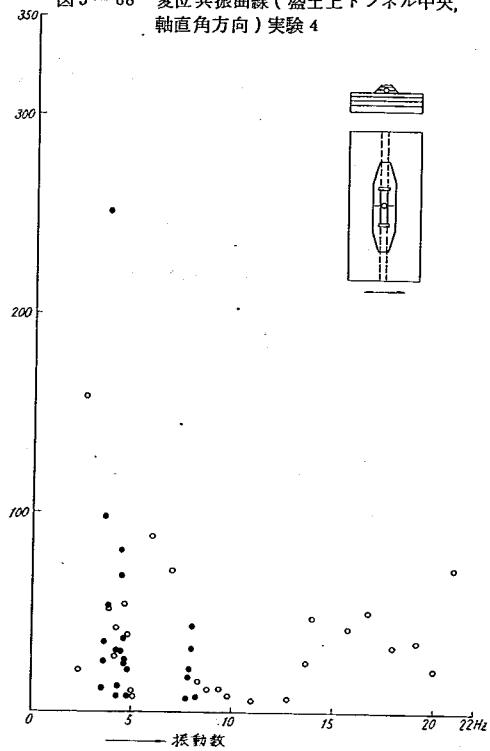


図 5-70 加速度共振曲線 (盛土中央, 軸直角方向)

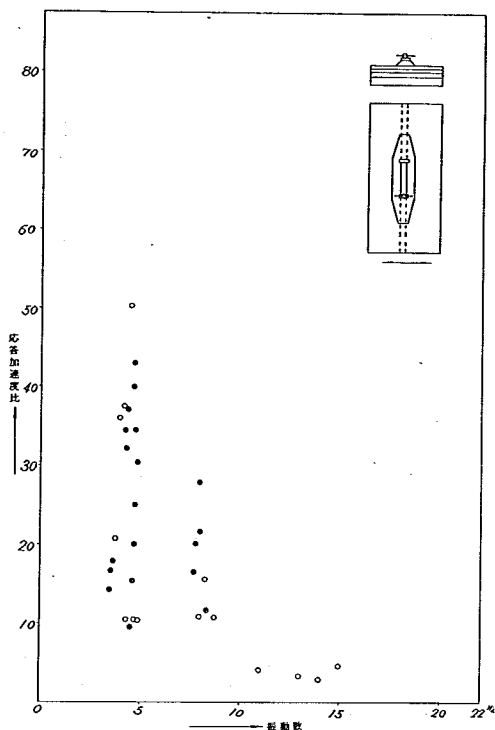


図 5-71 加速度共振曲線 (換気塔内、軸直角方向) 実験 4

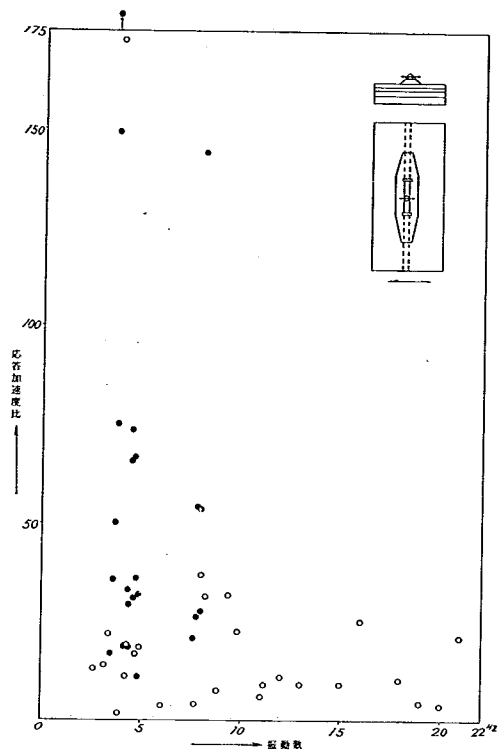


図 5-72 加速度共振曲線 (盛土上トンネル中央、軸直角方向) 実験 4

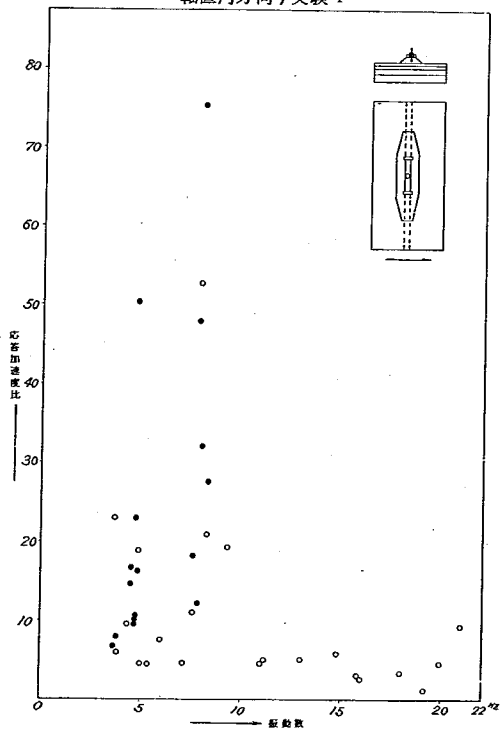


図 5-73 加速度共振曲線 (盛土上トンネル中央、上下方向) 実験 4

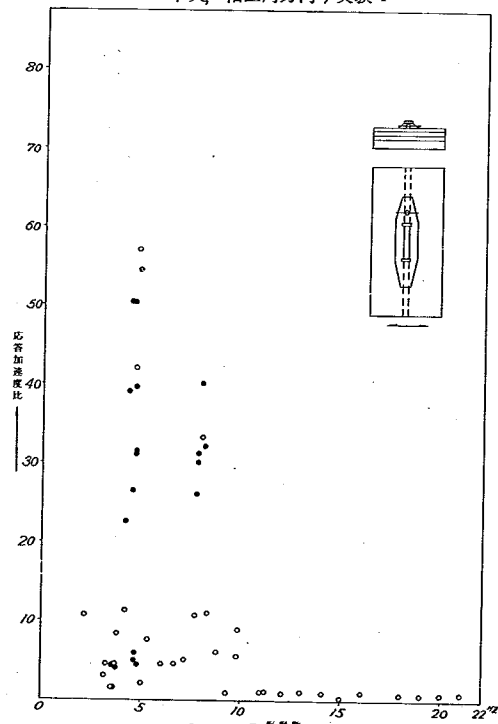


図 5-74 加速度共振曲線 (斜路部トンネル中央、軸直角方向) 実験 4

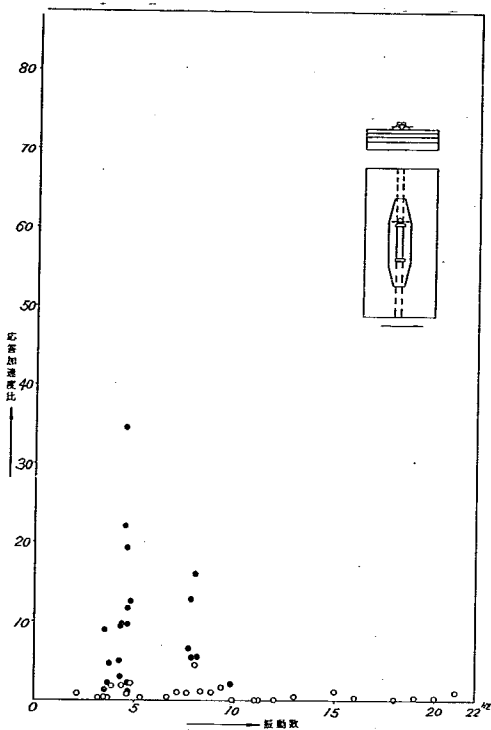


図 5-75 加速度共振曲線 (斜路部トンネル
換気塔横、軸直角方向) 実験 4

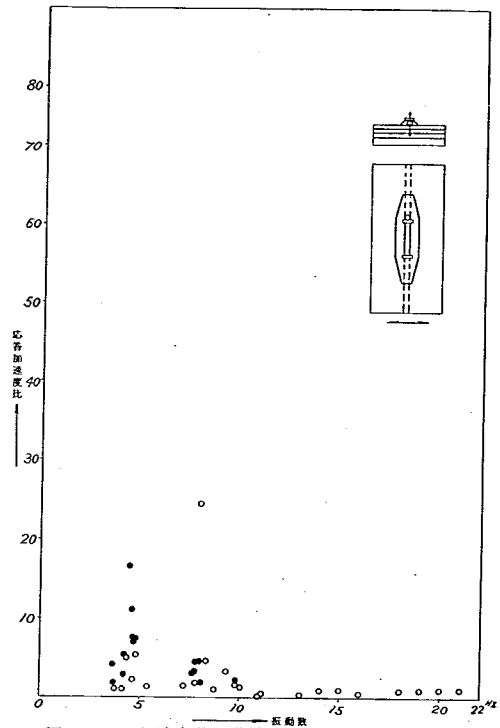


図 5-76 加速度共振曲線 (斜路部トンネル
換気塔横、上下方向) 実験 4

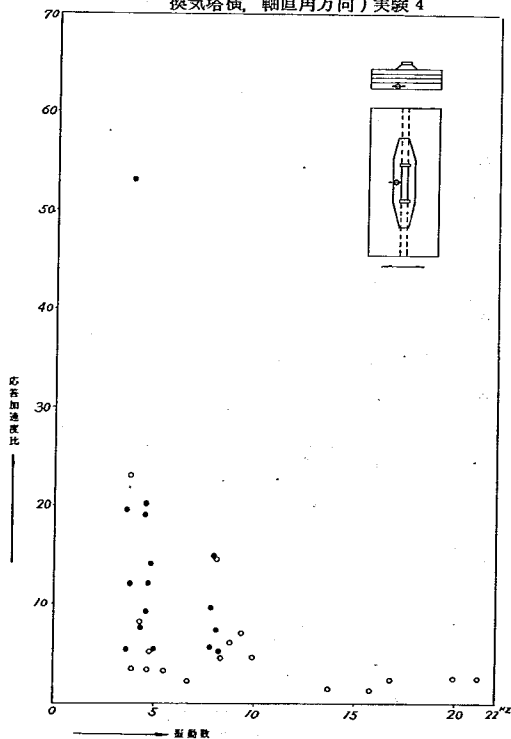


図 5-77 加速度共振曲線 (盛土下地盤
軸方向), 実験 4

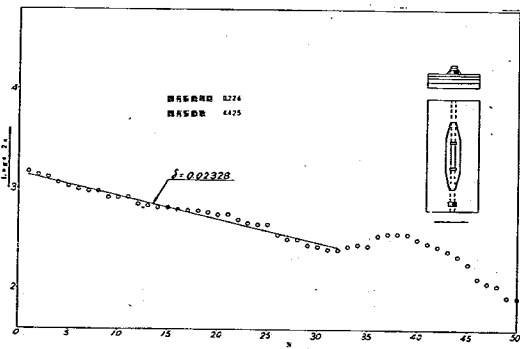
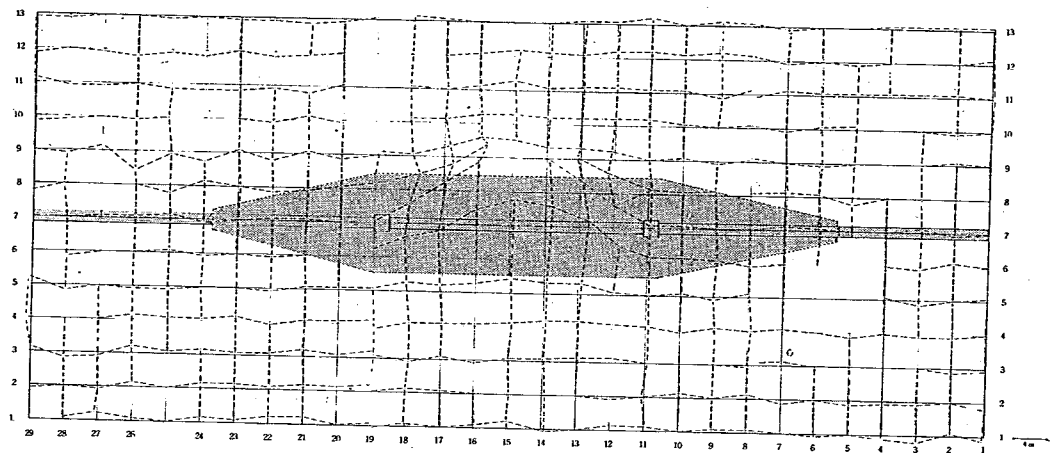
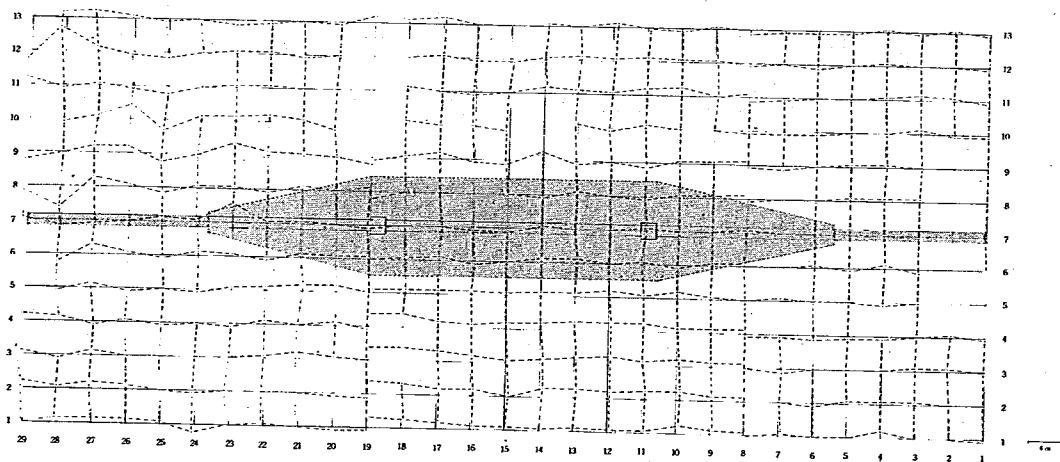


図 5-78 自由振動による減衰特性 (地盤部
トンネル、軸直角方向), 実験 4

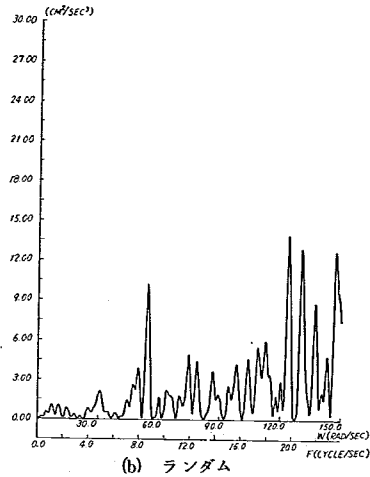
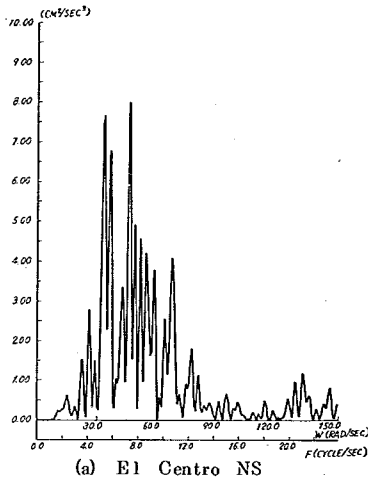


(a) 盛土共振点付近の振動モード



(b) 地盤共振点付近の振動モード

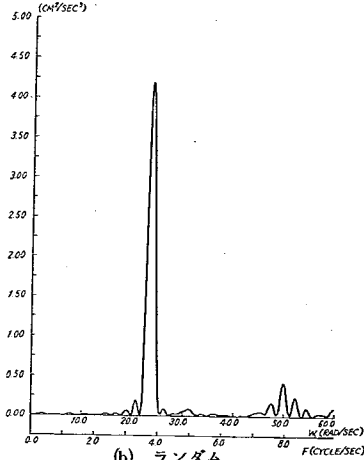
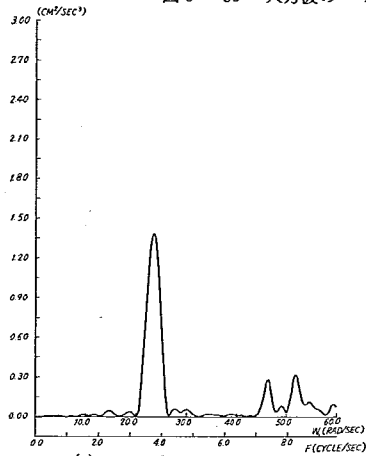
図5-79 振動モード図(実験4)



(a) E1 Centro NS

(b) ランダム

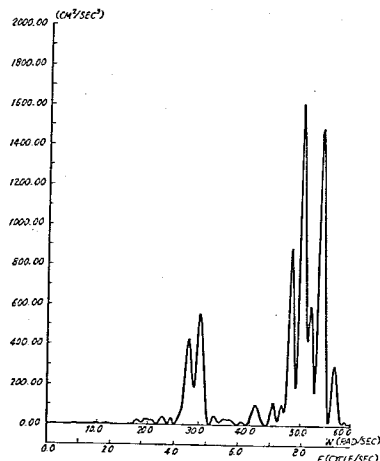
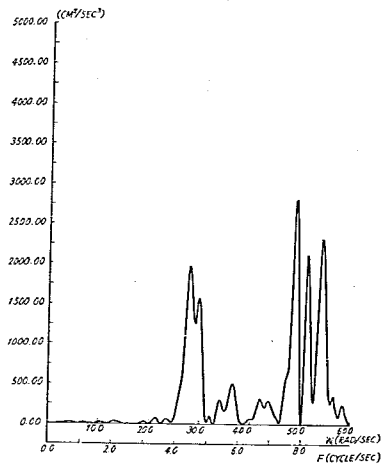
図 5-80 入力波のパワースペクトル (加振台上の加速度記録)



(a) E1 Centro NS

(b) ランダム

図 5-81-(1) 変位 (盛土上トンネル中央) パワースペクトル



(a) E1 Centro NS

(b) ランダム

図 5-81-(2) 加速度 (斜路部トンネル中央) パワースペクトル

6 実験結果の検討

§1 応答倍率

1-1 減衰定数

実験の結果求められる減衰定数の一覧を示すと表6-1のようになり、実験によりあるいは場所により少しずつ異なっているが、平均すると1%前後の非常に小さな値である。

したがって、以下に述べる応答特性は、このような点を考慮して実際の構造物の振動性状を推定する材料としなければならない。

1-2 正弦波振動実験による基礎に対する増幅倍率

正弦波振動実験によって得られた変位の増幅倍率の一覧を表6-2に示す。モデル-1およびモデル-2では、表層の弾性係数がわずかに異なるほか、盛土の位置や沈埋トンネルの長さ等が同一ではないため、正確には単純な比較はできないのであるが、ここではこれらに対する厳密な検討は加えないで、各部の概略の増幅特性を示したものである。

表6-2から、おおよその変位の増幅倍率は、地盤部の表面で60~90倍、盛土頂面中央では軸直角方向には210~280倍、軸方向には160~210倍であり、換気塔付近はこれより低い。また、地盤中に設置された沈埋トンネルは軸直角方向には80倍、軸方向には20倍である。

したがって、盛土はおおよそ地盤表層の2~4倍の変位増幅倍率となっており、沈埋トンネルは軸直角方向には地盤とほとんど同一の、また軸方向には地盤の1/4程度の変位増幅倍率となっている。

沈埋トンネルが地盤中で独自の振動はせず、地盤の動きに従って変形するということは従来の実験や解析結果から指摘されていたことであり、軸直角方向振動に関しては、今回の実験結果もこれを裏付けるものとなる。軸方向振動の増幅倍率が軸直角方向の約1/4という結果は、トンネルの軸方向の剛性が相似則から決定される値の約6倍の剛性を有していることと、トンネルと地盤との間の付着強度等に対する検討が十分でないため、単純には評価できない。

次に加速度の増幅倍率の一覧を示すと表6-3のようになる。表6-3も表6-2同様モデル-1とモデル-2の間の細かい相違点に対する考慮は払われていない。

これより、おおよそ加速度増幅倍率は、地盤部表層では60~90倍、換気塔内では50倍、沈埋トンネルは斜路部、地盤部とも軸直角方向には70~80倍、軸方向には20~30倍である。

1-3 地震波振動実験による応答倍率

E1 Centro NS成分地震波およびランダム波による最大応答変位の一覧を表6-4に、最大応答加速度の一覧を表6-5に示す。これらの値はかなりバラツキが認められるが、相互に比較し、妥当と思われる値の平均値で概略の最大応答値（最大入力加速度1 gal 当りの最大応答変位あるいは最大応答加速度で表示）を推定すると以下ようになる。

- ① 最大応答変位倍率は、自然地盤表面で約0.06 mm/gal (E1 Centro NS), 0.03 mm/gal (ランダム波)、盛土中央の頂面で約0.07 mm/gal (E1 Centro NS), 0.05 mm/gal (ランダム波)である。
- ② 最大応答加速度倍率は、自然地盤部の1~10層で約5 gal/gal (E1 Centro NS), 6 gal/gal (ランダム波)、盛土中で約7 gal/gal (E1 Centro NS), 5 gal/gal (ランダム波)である。

盛土の軸方向と軸直角方向の応答倍率の差は、今回の実験結果でははっきり求められなかった。

応答値は基盤から表面になるに従い増加しており、さらに自然地盤部の表層よりも盛土の方が大きくなっている。また、一般に、変位、加速度の応答とも、卓越振動数が地盤の固有振動数に近いE1 Centro NS地震波を作用させた場合の方が、ランダム波を作用させた場合よりも大きくなっている。

§2 振動特性

2-1 盛土

盛土の斜路部は盛土中央部のような著しい共振現象は認められない。これは、盛土の高さが漸変しているため特定断

面で共振しても、斜路部全体としての共振現象は現われにくいと考えられる。

2-2 沈埋トンネルおよび換気塔

沈埋トンネルを函軸直角方向に加振した場合には、共振実験においても、地震波振動実験においても、沈埋トンネルと周辺地盤との相対変位ははっきり検知できなかった。すなわち、

- ① 沈埋トンネルと周辺地盤の共振振動数は同じである。また、共振時の基盤に対する変位の増幅倍率は地盤表面が73.5倍、沈埋トンネルが80.3倍（実験-1）であり、実験の精度を考えに入れると明確な相対変位が生じているとは考えられない。
- ② 地震波振動実験でE1 Centro NS成分地震波および、ランダム波を作用させた場合の地盤中央部表面の応答変位と沈埋トンネル中央部の応答加速度のパワースペクトルから求められる周期特性（実験-1）はほとんど一致している。
- ③ 16mm撮映機による共振点近傍の振動モード図において、沈埋トンネルとその周辺の地盤の振動モードには、はっきりした差異は認められない。

以上の点から、沈埋トンネルは函軸直角方向には周辺の地盤とほとんど同一の振動をすると考えられる。

トンネル軸方向に加振した場合には、トンネルが周辺の地盤の変形を拘束する現象や、自然地盤部の共振時には地盤の振動がトンネルを伝わって盛土まで伝わったり、あるいは、その反対の現象が観察された。

しかし、函軸方向のトンネルの剛性は模型相似則から決定される値の約6倍となっており、函軸方向の振動特性については今回の実験結果だけでは簡単な評価はできない。

沈埋トンネルと換気塔とは簡単に接続した構造となっていたため、トンネルと換気塔は互いにほとんど独立して振動しており、地震波振動実験ではトンネルと換気塔の間に函軸方向、函軸直角方向とも4~5mm程度の相対変位が観察された。トンネルの函軸方向の剛性は、上述のように模型相似則を満足していないので、函軸方向に加振した場合のトンネルと地盤の振動特性の違い、トンネルと換気塔の相対変位等については、今後検討する必要があると考えられる。

§ 3 模型実験法

3-1 模型境界の影響

実験模型の境界は以下の点で実験結果に影響を与える。

- (1) 固有振動数、振動モードが変化する。予備実験の結果によれば、模型の幅を高さの6倍にとっても模型中央部の狭い範囲内を除き、振動モードは境界の影響を受ける。
- (2) 境界面での波動の反射が生じる。
- (3) 境界面付近が独自に著しく振動し、この影響が模型中央部に及ぶ。

このような影響を少なくするためには、模型の幅に適当な余裕を見込んでおく必要があると考えられる。今回の実験では境界側面の部分を斜めに切り取ったが、このようにすると(3)の影響はかなり減少することが確かめられた。

3-2 計測

今回の実験においては変位の計測の他に、多数の小型加速度計をトンネル内および地盤中に設置し、トンネルと地中の応答加速度の増幅度を記録することができた。今後はトンネルの振動性状をより明確に把握するために、ひずみ、応力等の計測が重要な課題であろう。

表 6-1 減衰定数および固有振動数一覧（変位記録による）

実 験	加振方向	位 置	方 向	対数減衰率	減 衰 定 数	固有振動数
1	軸 直 角	地盤部中央点	水 平	0.05894	0.0094	5.99
		盛土上トンネル	"	0.03190	0.0051	5.10
2	軸 方 向	トンネル中央部	"	0.1431	0.0229	6.17
3	軸 方 向	地盤部中央点	"	0.08143	0.0130	4.51
		盛土中央点	"	0.05218	0.0083	4.57
			鉛 直	0.1845	0.0294	4.61
				0.1502	0.0239	
		盛土1/4点	水 平	0.0555	0.0088	4.59
				0.1449	0.0231	
				0.06685	0.0106	
				0.07182	0.0114	
			鉛 直	0.02795	0.0045	
		換 気 塔	水 平	0.06131	0.0098	3.80
			鉛 直	0.08728	0.0139	
		斜路部トンネル中央	水 平	0.09486	0.0151	4.51
			鉛 直	0.07429	0.0118	4.55
4	軸 直 角	地盤部トンネル	水 平	0.02328	0.0037	4.43

表 6-2 正弦法による変位増幅倍率一覧

実 験 番 号		1	2	3	4
位 置	加 振 方 向	軸 直 角	軸 方 向	軸 方 向	軸 直 角
地 盤 部 中 央	軸 直 角	73.5			61.2
	軸 方 向			91.7	
盛 土 中 央 部 (盛土上トンネルを含む)	軸 直 角	278.1			217.5
	軸 方 向		212.0	162.9	
換 気 塔 横 盛 上	軸 直 角				
	軸 方 向			137.5	
地 盤 部 ト ン ネ ル 上	軸 直 角	80.3			
	軸 方 向		20		
換 気 塔 上	軸 直 角				97.0
	軸 方 向				

表 6-3 正弦波による加速度増幅倍率一覧表

実 験 番 号			1	2	3	4
位 置		加振方向	軸 直 角	軸 方 向	軸 直 角	軸 直 角
盛 土 中		軸 直 角				252.3
		軸 方 向			83.6	
盛 土 下 (モデル2)	ホ 層	軸 直 角				
		軸 方 向			20.7	
	へ 層	軸 直 角				53.0
		軸 方 向			8.6	
	ト 層	軸 直 角				
		軸 方 向				
トンネル中央 横 地 盤 (モデル1)	イヘロ 層	軸 直 角	56.7	10.6		
		軸 方 向	36.4	8.7		
	ホ 層	軸 直 角	33.1			
		軸 方 向		24.5		
	へ 層	軸 直 角	25.6			
		軸 方 向		16.0		
	ト 層	軸 直 角				
		軸 方 向		14.2		
地 盤 中 央 部	イヘロ 層	軸 直 角				
		軸 方 向		70.5	129.4	
	ホ 層	軸 直 角				14.5
		軸 方 向		33.9	34.2	
	へ 層	軸 直 角				12.1
		軸 方 向		19.6	8.2	
換 気 塔 横 盛 土 中		軸 直 角				
		軸 方 向			147.2	
換 気 塔 中		軸 直 角				51.0
		軸 方 向			54.2	
沈埋トンネル中 (モデル1)	トンネル 中 央	軸 直 角	75.4			
		軸 方 向		35.5		
	斜 路 部中央	軸 直 角	29.4			
		軸 方 向		13.8		
沈埋トンネル中 (モデル2)	斜 路 部中央	軸 直 角				81.5
		軸 方 向			32.6	
	鉛 直 換 気 塔下ト ンネル	鉛 直				
		軸 直 角				34.7
		軸 方 向				
		鉛 直			5.8	15.5
盛土上トンネル		軸 直 角				367.1
		軸 方 向			58.2	
		鉛 直			25.5	79.0

表 6-4 地震波振動実験による変位の最大応答 (mm/gal)

実 験 番 号		1		2		3		4	
加 振 方 向		軸 直 角		軸 方 向		軸 方 向		軸 直 角	
		El-Centro	Random	El-Centro	Random	El-Centro	Random	El-Centro	Random
地 盤 中 央 部	軸 直 角	0.84	0.61					1.86	0.68
	軸 方 向					1.23	0.70		
盛 土 中 央 部	軸 直 角								
	軸 方 向					2.79	1.23		
換気塔横盛土	軸 直 角							3.11	1.70
	軸 方 向					1.18	0.61		
地盤部トンネル 中央	軸 直 角								
	軸 方 向			0.27	0.61				
盛土上トンネル 中央	軸 直 角	4.97	1.66					4.24	1.88
	軸 方 向								
換 気 塔 上	軸 直 角								
	軸 方 向								

表6-5 地震波振動実験による最大加速度増幅倍率一覧 (gal/gal)

実験番号		1		2		3		4		
加振方向		軸直角		軸方向		軸方向		軸直角		
位置	地震波	El-Centro	Random	El-Centro	Random	El-Centro	Random	El-Centro	Random	
盛土	軸直角									
	軸方向					6.97	4.81			
盛土下地盤 (モデル2)	ニヘホ層	軸直角								
		軸方向				5.61	4.18			
	ヘ層	軸直角						5.18	3.84	
		軸方向				4.21	2.71			
	ト層	軸直角								
		軸方向								
トンネル中央 横地盤 (モデル1)	イヘロ層	軸直角	5.16	6.53						
		軸方向			17.20	15.40				
	コヘオ層	軸直角	3.24	3.83						
		軸方向			2.81	3.91				
	ヘ層	軸直角	2.72	2.94						
		軸方向				1.50				
	ト層	軸直角								
		軸方向			4.15	4.36				
地盤中央部	イヘロ層	軸直角								
		軸方向			5.38	10.24	5.75	5.41		
	ニヘホ層	軸直角								
		軸方向			3.09	4.45	2.68	2.00		
	ヘ層	軸直角								
		軸方向				2.11	2.54	1.79		
換気塔中	軸直角							6.94	4.05	
	軸方向					3.86	2.69			
沈埋 トンネル中 (モデル1)	トンネル中央	軸直角	5.47	6.37						
		軸方向				3.31				
	斜路部	軸直角	2.12	4.18						
		軸方向				1.09				
沈埋 トンネル中 (モデル2)	斜路部	軸直角								
		軸方向								
	中央	軸直角					1.25	0.58		
		軸方向								
	換気塔 下トンネル	軸直角								
		軸方向								
盛土上トンネル	軸直角							11.73	12.94	
	軸方向					6.37	4.40			
	鉛直方向					2.78	2.56	7.97	5.42	

あ と が き

前節までに述べてきた実験結果から次の事項が指摘できる。

- (1) 自然地盤中に埋設された沈埋トンネルは函軸直角方向には地盤とほとんど同じように振動し、地盤とトンネルとの間にはつきりした相対変位は検知できない。函軸方向に振動する場合については、今後検討する必要がある。
- (2) 盛土は自然地盤よりもよく振動する。しかし、盛土の斜路部には中央部の様な著しい共振現象は認められない。
- (3) 盛土中央部、盛土斜路部および自然地盤部における固有振動数はそれぞれ異なり、また、応答倍率にもかなりの違いがある。したがって、このような地盤条件が変化する位置に埋設される沈埋トンネルは一樣な地盤中に埋設されている場合よりも大きな変形が周辺地盤から伝達されることが予想される。
- (4) 地盤模型材料としてのアクリル・アマイド系グラウト剤のゲルは、弾性的な性質をもっていること、弾性係数の調整が比較的広い範囲内（100～1300 g/cm²程度）で可能であること、減衰定数は1%程度であることなど、ゼラチンのゲルと良く似た性質をもっている。また、腐敗しないこと、硬化時間の長さを調整することが可能であることなど、ゼラチンに比較して便利な性質をもっている。しかし、変形性能が低いため破断しやすい点には注意を払う必要がある。
- (5) 固有振動数および固有振動モードに対する模型の境界の影響は、模型の幅を高さの6倍程度にとっても現われてくる。模型境界側面を斜めに切取することは、境界付近の独自の振動を減少させるのに効果がある。

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

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852号
昭48.12(1973)
栗林栄一、岩崎敏男

キーワード

沈埋トンネル・模型振動実験・大型振動台

この報告書は東京湾横断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)の大型振動台によっ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1/550のスケールのもので、地盤をアクリル・アマイド系グラウト剤のゲルで、沈埋トンネルを合成ゴムで作っている。

