

土 木 研 究 所 資 料

第 3 9 0 号

地 盤 の 振 動 試 験 (2)

(小型模型による予備試験)

昭和 4 3 年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所

目 次

1. ま え が き	2
2. 試 験 の 方 法	4
2.1 試験の概要	4
2.2 試験に用いた砂槽	4
2.3 試験対象地盤	5
2.4 小型起振機	5
2.5 試験模型	8
2.6 測定計器の精度	10
3. 試 験 結 果	11
3.1 試験結果の概要	11
3.2 共 振 曲 線	13
3.3 減 衰 定 数	18
3.4 振 動 モ ー ド	19
3.5 地盤反力係数	22
3.6 測定値相互間の定性的関係	26
4. 試験結果に対する考察	32
5. あ と が き	35

1. ま え が き

本四連絡橋基礎工法調査の調査過程において、地震時の剛体の性状と地盤との関係を調べる必要となった。昭和41年度後半に $1.5 \times 1.5 \times 1.0$ m の大きさの剛体基礎模型で振動試験を行なったが（土木研究所資料第286号に報告）、本報告書はそれに先立ち、昭和41年度前半に剛体基礎模型の振動試験の可否を調べるために、予備的に行なった小型模型の試験結果を収録し、資料の逸散を防ぐ意味で印刷したものである。したがって、試験結果は測定の可否に重点をおいたため、極めて定性的な概略のものでしかないで、そのような内容しか含んでいないものと考えていただきたい。

模型試験を行なう場合、普通相似性が問題となり、土を取扱う場合にも、本来ならばこの条件は満足されねばならない。しかし、土を取扱う場合に相似則を考えていることはほとんどないと言っても過言ではない。特に、土と構造物との関係においては、接触面での性状が明確でないから、相似則を考えることがむずかしい。

したがって、土と構造物を取扱って試験を行なうときには、なるべく模型の規模を大きくして、その模型において性状が説明できるようにする方法が一方法と考えられる。しかし、模型の規模を大きくすることは、多大の労力と費用を要するので、応々にして一発勝負的な試験になり易い。この意味から、予備的段階として、同じような小型の模型実験を行なう必要が生じてくる。

以上のことを考えて、本試験では次のような点を目的とした。

- 1) 模型基礎の上になんか大きな起振機をのせて強制振動させたとき、どのような振動性状を示すか。
- 2) その振動性状から共振振動数、減衰定数を求めることができ、またその傾向を把握できるかどうか。
- 3) 模型基礎に埋め込んだ土圧計が作動するかどうか。

4) 以上の結果より、振動時の地盤反力係数がどのようになるのか。

5) 模型の根入れ長さを変えるとどのようになるか。

模型を小さくしたため、土圧計の取付けなど模型の内部構造が複雑となり、また土圧計のコードの影響が入ったことなどもあったが、このような小型模型試験の意義、限界がはっきりしたと考えられる。今後この種の試験をされる方の参考ともなれば幸である。

昭和43年3月

基 礎 研 究 室

吉 田 巖

足 立 義 雄

草 山 晃

2. 試験の方法

2.1 試験の概要

砂槽に自然乾燥状態の砂を締め固めて、人工の砂地盤を作成し、その上に銅板で組立てた $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ の寸法の模型を置き、その頂部に小型起振機を取付けて水平方向に振動荷重を与え、模型に取付けた加速度計、土圧計にて、加速度および土圧を測定したものである。模型は根入れしない場合、 10 、 20 、 30 cm 根入れした場合の4種類について試験を行なった。試験状態の全体を写真-1に示す。

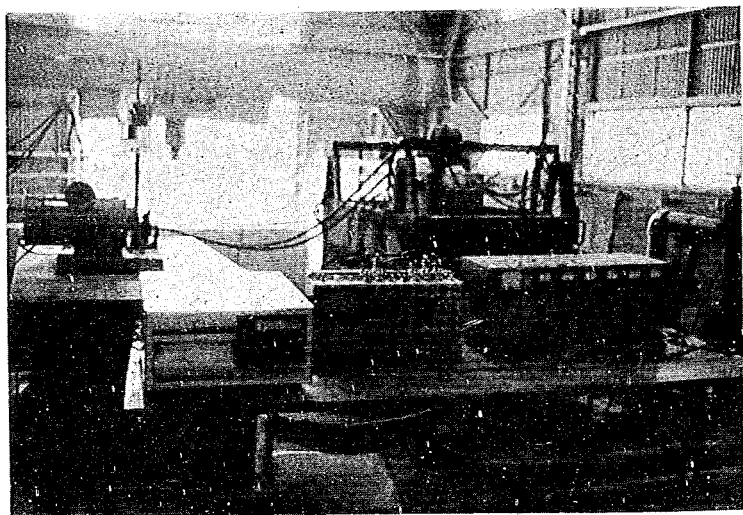


写真-1 試験状況

2.2 試験に用いた砂槽

試験に使用した砂槽は長さ 95 cm 、幅 80 cm 、高さ 80 cm の寸法のもので、内面の三方はステンレス板で張っており、一方だけがアクリル板で透明となったものである。振動方向に直角な壁には両側に4個ずつのスプリングバネ

3
が取り付けられ、振動方向の壁との接合部にはゴム板が取りついて、振動方向に直角な壁は可動なようになっている。これは振動時において、壁からの振動波の反射、干渉を緩和させることを目的としたもので、境界条件の影響が少ないように工夫したものである。

ただし、本試験に使用した砂槽は昭和39年度に砂振動実験槽として、砂の振動性状を調べることを目的として製作したものを、そのまま使用したため、スプリングがかなり強く、また砂槽の寸法が模型寸法に比べて小さいため、必ずしも緩和の目的が十分に達せられたかどうかは明確でない。

2.3 試験対象地盤

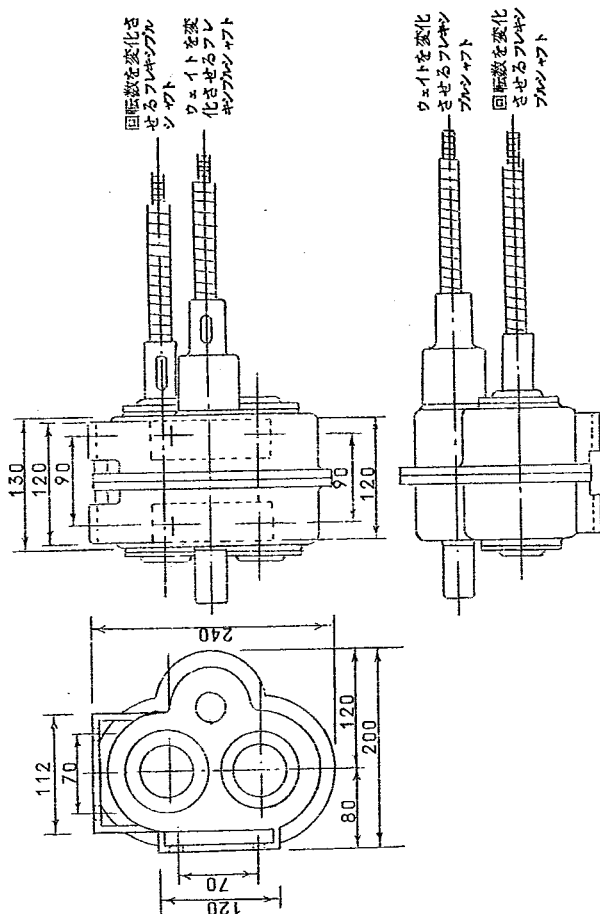
前述の砂槽に、一層が約20cmになるように砂を入れ、均一にランマを用いて人工的に締め固め、この操作をくり返すことによって均一な自然乾燥状態の砂質地盤を作成した。

試験に使用した砂は利根川の取手付近にて採取した中砂で、粒度試験の結果、最大径が2.0mm、60%径が0.245mm、10%径が0.12mmで均等係数2.04と、かなり均一な粒径の砂である。また比重は2.70である。

締め固め完了後に密度を測定すると、乾燥密度で1.41~1.51g/cm³であった。砂の含水比は7.6~13.6%であり、試験中にも含水比が変わらないように注意して試験を行った。

2.4 小型起振機

小型起振機は不平衡マスの回転により加振力を生ずるものであるが、振動数が増え、振動荷重が増え、振動荷重を一定とすることができるような機構にもなるように、特別に製作したもので、振動数の増加とともに、荷重が増大する通常の機構のものとは異っている(図一1)。したがって、振動数が増加しても振動荷重が一定となるような試験を行なうことができる。



図一-1 小型起振機本体

しかし、これにつづいて行なう大型模型試験に用いる起振機の性能を考えて、不平衡マスを一定として、振動数とともに荷重を増大させ、試験結果から計算により一定荷重に対する変位に換算して結果を整理する方法で試験を実施した。

起振機は模型試験に用いる小型のもので次のような諸元を有している（写真-2）。

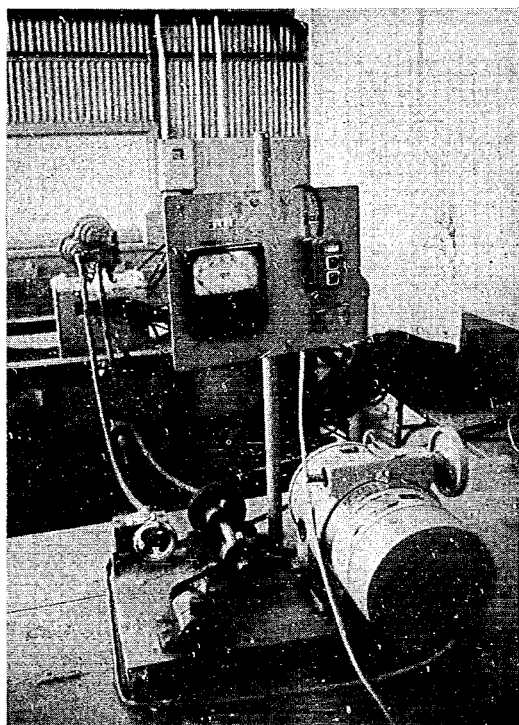


写真-2 小型起振機

最大起振力	50Kg
最大振動数	15%
加振力向	水平及び鉛直
起振力段階	10段階
概略寸法	15×24×20cm
概略重量	21Kg
使用モーター	リングコーン無段変速モーター
起振力図	図-2に示す

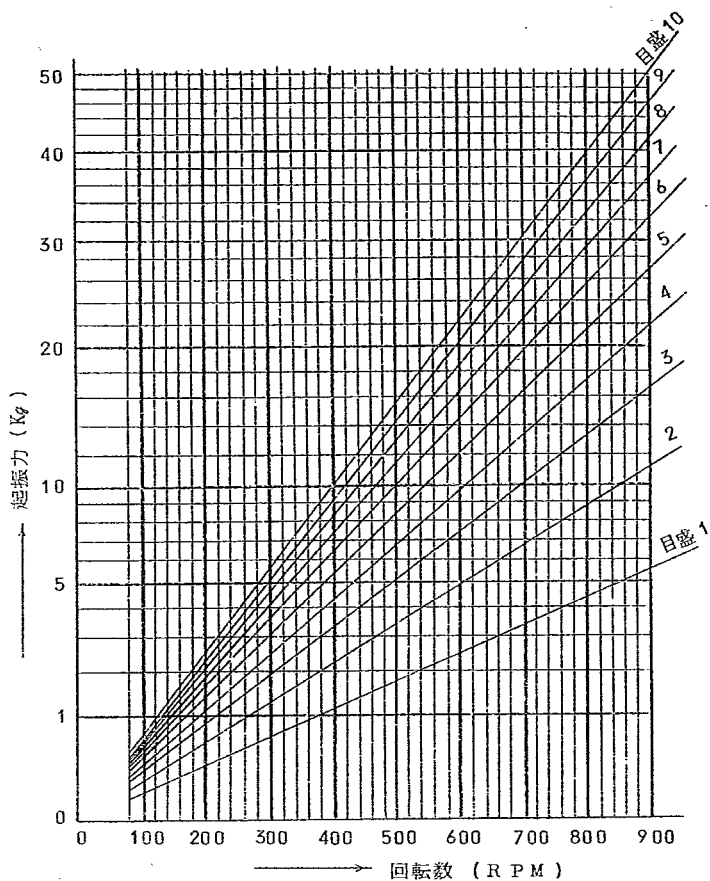
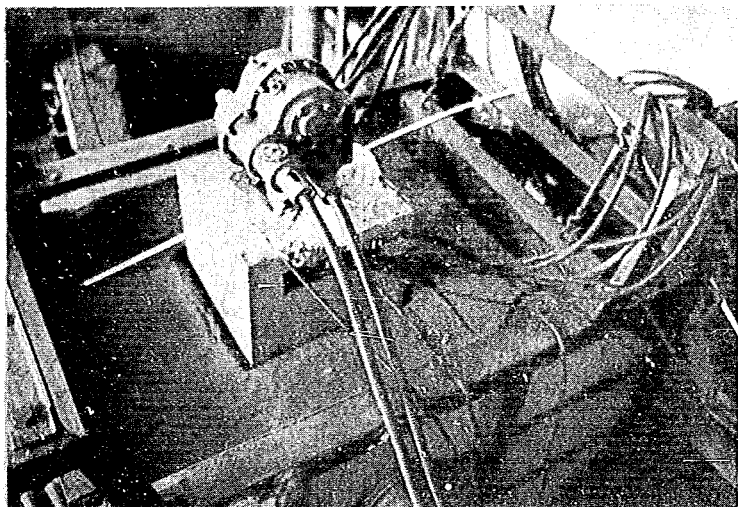


図-2 起振力図

2.5 試験模型

試験に用いた模型は、図-3に示すような $30 \times 30 \times 40 \text{ cm}$ の大きさのもので、鋼材で製作されている。この模型の上に起振機を載せて強制振動できるようにした(写真-3)。



写真—3 試験模型

この模型に変位を測定するために加速度計を4個，土圧を測定するために土圧計を6個，図—3のように取りつけた。加速度計のA—1，A—3は水平方向加速度を，A—2，A—4は鉛直方向加速度を測定するためのもので，土圧計のうち，E—1，E—2，E—3，E—4は底面土圧を，E—5，E—6は模型を砂地盤中に根入れしたときの側面土圧を測定するためのものである。砂地盤中への根入れ長さは0，10，20，30cmの4種類とした。根入れ長さを考えるときに，砂地盤の乱れ，不均一性を避けるために，根入れ長さは始めに30cm根入れしておき，順次根入れ長さを浅くするように工夫した。

A—1，A—3とE—5，E—6は同一平面内に取りつけてあるが，A—2，A—4とE—1～E—4は模型の上面と下面に取りつけられているので，回転中心が模型の中心にない限り，変位は全く同一ではない。しかし，回転角が微小であり，模型自身は変形しないので，模型の上下面の変位は同一と考えてよい。

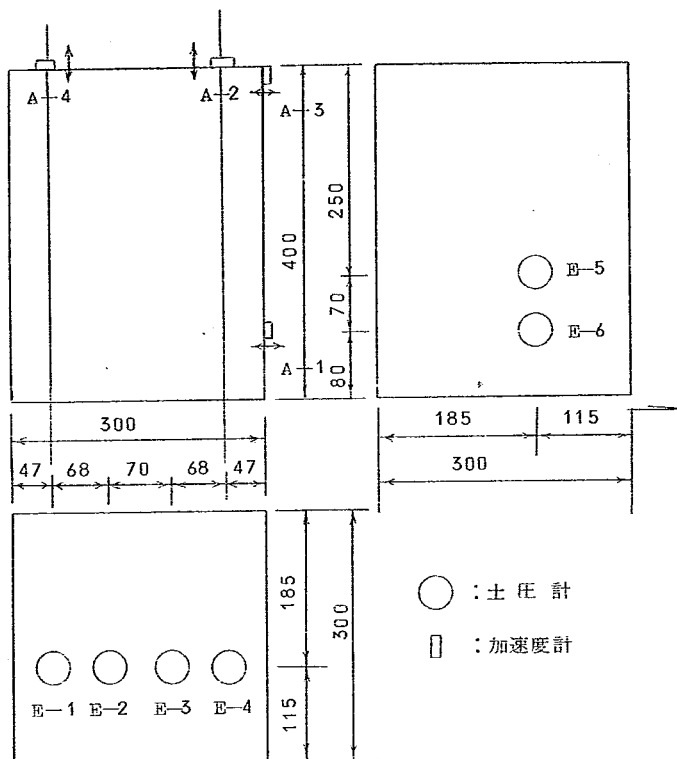


図-3 剛体基礎模型

2.6 測定計器の精度

測定計器の精度が、このような模型試験の場合、必ず問題となる。この試験でも、同様に問題となった。加速度計は容量 $2g$ のもので、土圧計は容量 $10\text{Kg}/\text{cm}^2$ のものである。

これらの計器は本試験の目的に合わせて製作したものではなく、以前に他の試験で使用したものをそのまま用いたものである。したがって、計器の精度が悪く、ほとんど誤差を測定しているに等しい。しかし、本試験は予備試験で簡単に行なったものであるため、その範囲内での実験を行った。

3. 試 験 結 果

3.1 試験結果の概要

実施した試験結果の一覧を表一に示す。試験は全部で24回行なったが、すべてを図示することは厖大になるので、代表的なものについて以下に示した。

表一 試 験 一 覧 表

試 験 番 号	根入れ長さ (cm)	起振機の荷重目盛
1-1-1	30	4
1-1-2	30	4
1-2-1	30	6
1-2-2	30	6
1-3-1	30	8
1-3-2	30	8
2-1-1	20	4
2-1-2	20	4
2-2-1	20	6
2-2-2	20	6
2-3-1	20	8
2-3-2	20	8
3-1-1	10	4
3-1-2	10	4
3-2-1	10	6
3-2-2	10	6
3-3-1	10	8
3-3-2	10	8
4-1-1	0	4
4-1-2	0	4
4-2-1	0	6
4-2-2	0	6
4-3-1	0	8
4-3-2	0	8

試験番号については、第1番目の数字が根入れ長さの種類を、第2番目の数字が荷重の種類を、第3番目の数字はその条件における試験の回数を示している。したがって、試験番号により、試験の条件がすべて判明するようになっている。

各計器からの試験結果の整理は次に示すように行なった。

変位の計算は次の式により、一定の振動荷重に対する変位に換算した。

$$y' = \frac{A \epsilon}{(2 \pi f)^2}$$

$$y = \left(\frac{f'}{f}\right)^2 \cdot y'$$

ここに、

y : 換算変位 (cm)

y' : 実変位 (cm)

f : 試験時の振動数 (%)

f' : 規定の荷重となるように換算した振動数 (%)

ϵ : 計器のひずみ (10^{-6})

A : 較正值 ($\text{cm/sec}^2/10^{-6}$)

なお、変位は20, 30, 40Kgの荷重が模型天端に作用するように換算した。

土圧については、

$$p = A \epsilon$$

ここに、

p : 土圧 (Kg/cm^2)

A : 較正值 ($\text{Kg/cm}^2/10^{-6}$)

ϵ : 計器のひずみ (10^{-6})

この変位と土圧を用いて地盤のバネ定数は次のように求めた。

$$K = \frac{p}{y'}$$

ここに、

K : 地盤のバネ定数 (Kg/cm^2)

3.2 共振曲線

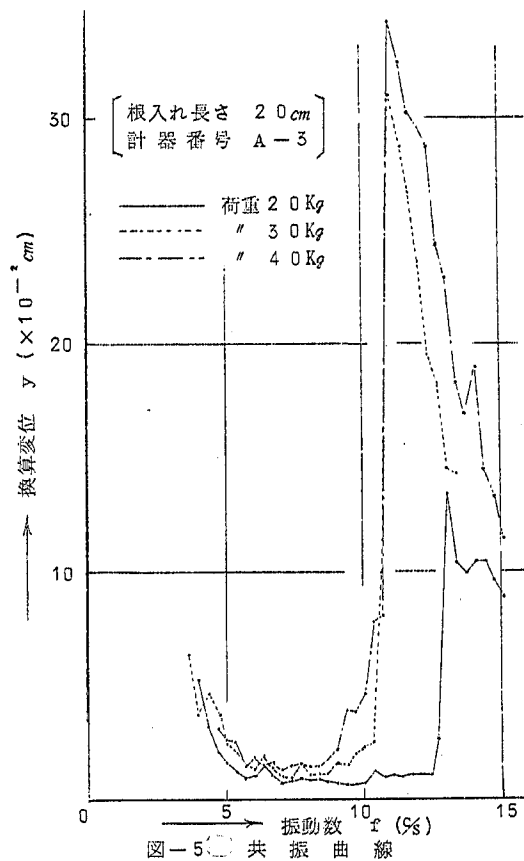
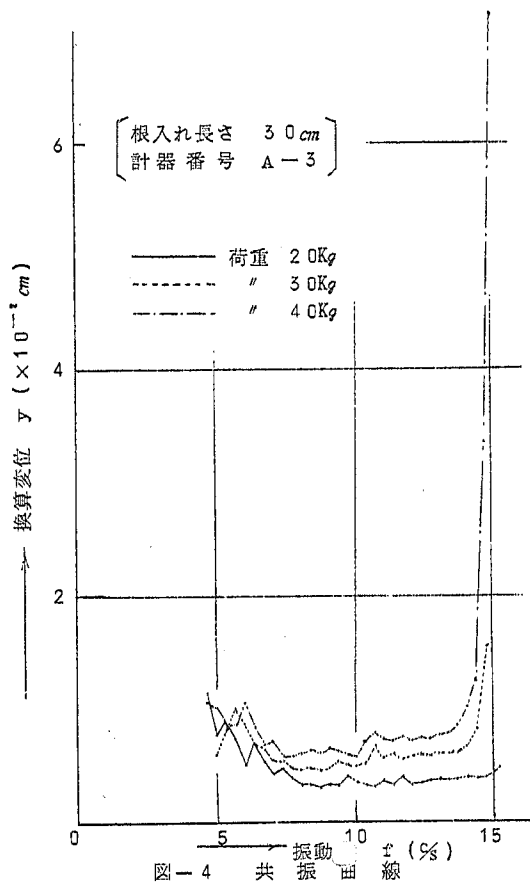
換算変位による共振曲線を図-4~11に示す。一例として、各根入れ長さに対するA-1とA-3の共振曲線を図示したものである。

これをみると、共振振動数は大略次のようになる。

根入れ長さ	30 cm	15%以上
"	20 cm	12%
"	10 cm	10%
"	0 cm	6%

共振振動数はかなり明確に表われており、根入れ長さの違いによりはっきりと異なっている。根入れ長さの大きいものほど、共振振動数も大きくなり、現在までに一般的に言われている傾向とも一致している。

試験の中には、共振振動数近くで、側面地盤が破壊して、地盤と模型が離れて、側面地盤の効果が消滅するような場合もあった。これは側面地盤の締め固めがゆるい状態にあって、振動時の土圧に耐えることができなくなり、すべり破壊を生じたものと考えられる。この点はこのような模型試験での注意すべき点であると考えられる。



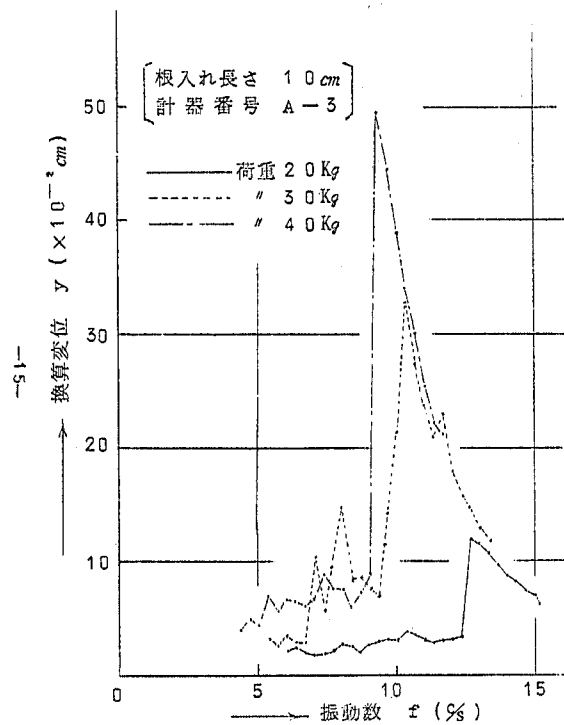


図-6 共振曲線

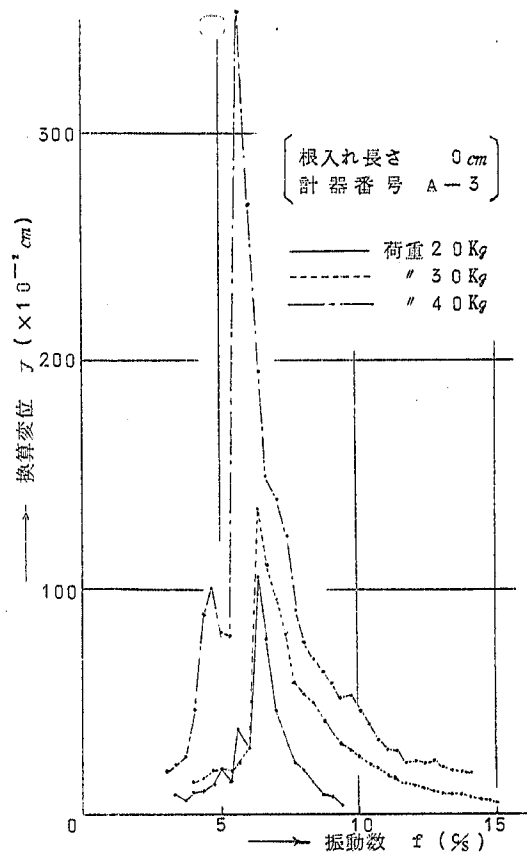


図-7 共振曲線

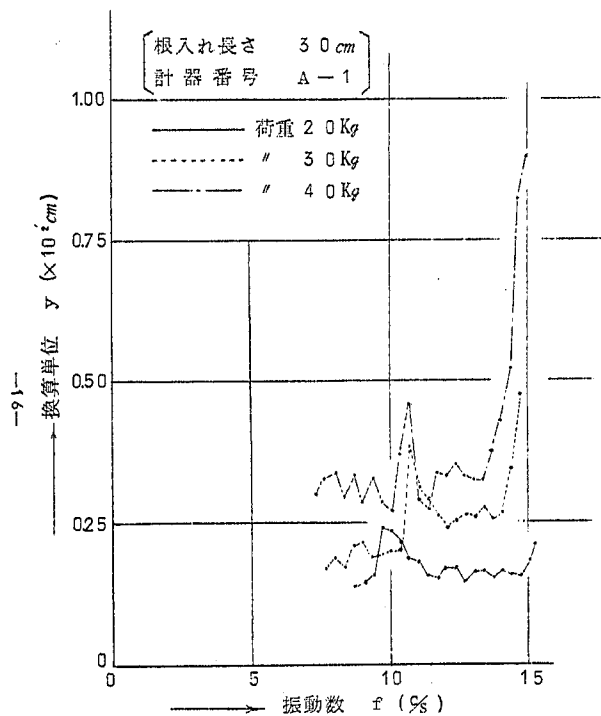


図-8 共振曲線

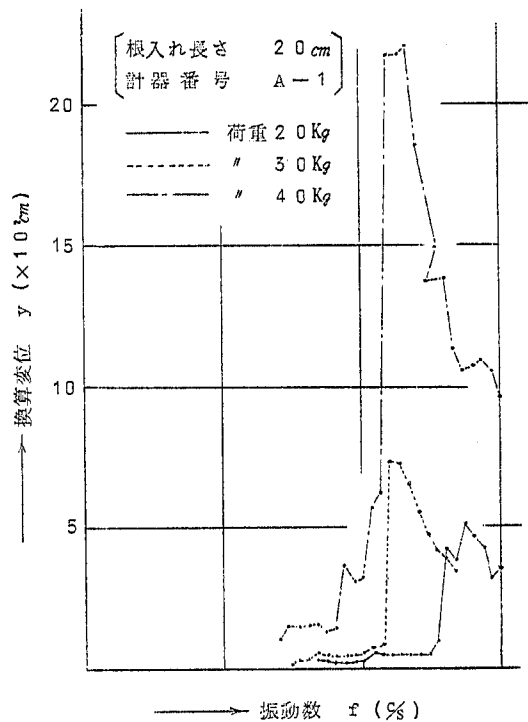


図-9 共振曲線

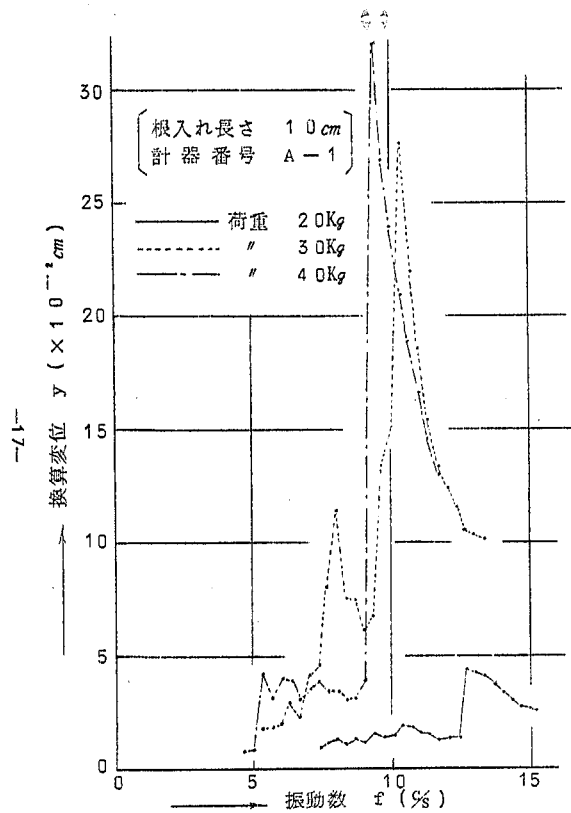


図-10 共振曲線

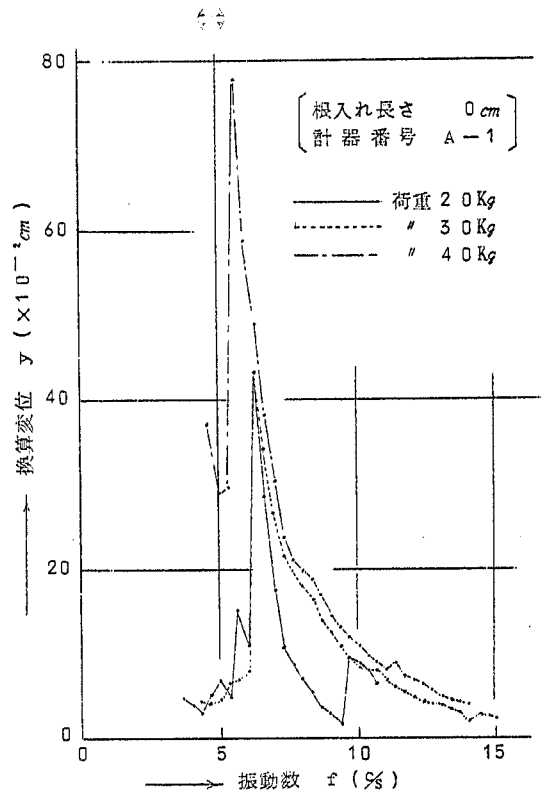


図-11 共振曲線

3.3 減衰定数

換算変位で描いた共振曲線より減衰定数を求めると、表—2のようになる。
表—2において、根入れ長さ30cmの場合における減衰定数は、起振機の性能上、完全な共振曲線が求まらなかったため、減衰定数は求まらなかった。

減衰定数もやはり、整った形で求まっており、根入れ長さの浅い程、減衰性が悪くなる一般的傾向と一致している。共振振動数、減衰定数を明瞭に求めることができることはこのような試験の可能性を裏づけている。

表—2 減 衰 定 数

実 験 番 号	減 衰 定 数	平 均 減 衰 定 数
2—1—1	0.078	0.073
2—1—2	0.072	
2—2—1	0.057	
2—2—2	0.077	
2—3—1	0.082	
2—3—2	—	
3—1—1	0.061	0.063
3—1—2	0.061	
3—2—1	0.086	
3—2—2	0.050	
3—3—1	—	
3—3—2	0.057	
4—1—1	0.051	0.054
4—1—2	0.041	
4—2—1	0.056	
4—2—2	0.062	
4—3—1	0.059	
4—3—2	—	

3.4 振動モード

各根入れ長さに対する共振時の振動モードの一例を示すと、図-12～15のようになる。この図において、実線は変位を、点線は土圧を示している。土圧計の値に負の土圧が生じているが、これは模型を設置したときに、初期の土圧が作用しているためである。

また、側面土圧は計器の故障から、1点だけしか測定できなかったので、図示しなかった。

振動はかなり1自由度に近い状態を示している。このような模型試験で、天端に荷重をかけたとき、側面の効果はかなり大きく、底面の水平移動量の少ないことを示している。

土圧計は容量のかなり大きいものを用いたが、測定値として観測されている。しかし、それがどのような意味を示しているかは疑問のあるところである。

また、変位についても同様のことが言える。

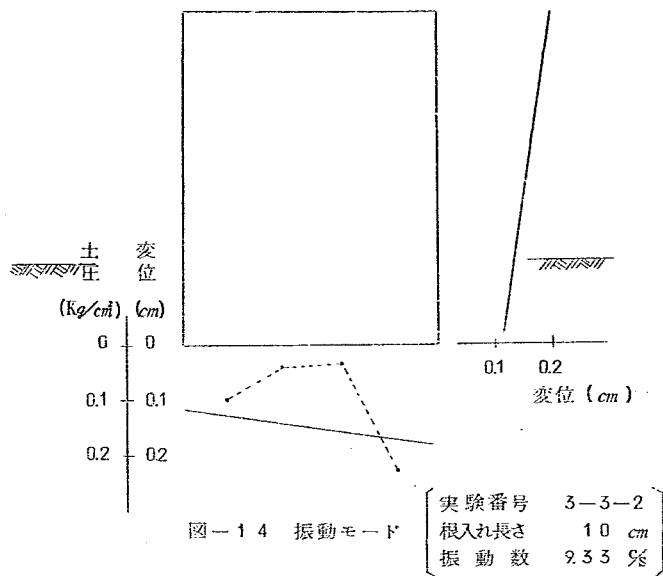


図-1 4 振動モード

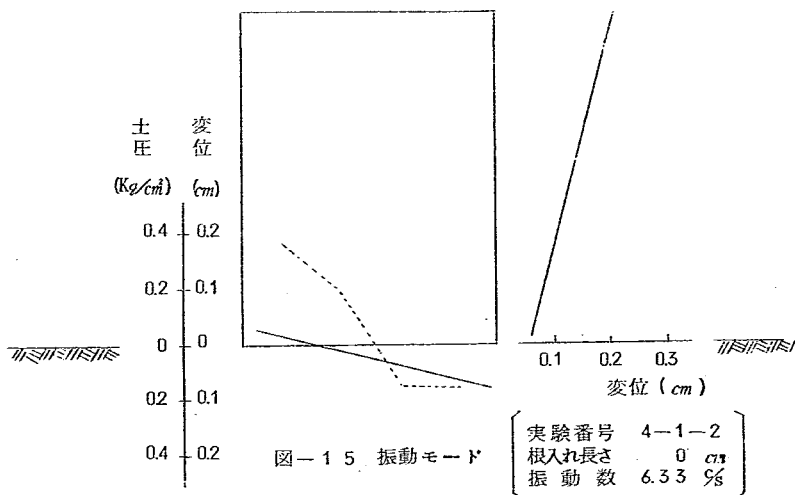


図-1 5 振動モード

3.5 地盤反力係数

加速度計から求めた変位，土圧計から求めた土圧は，いずれも非常に小さな値でしかなかった。したがって，それらの値の信頼性を確かめるために，変位と土圧の値により地盤反力係数に換算してみた。地盤反力係数は現在まで種々の静的な試験などより，地盤種別毎に凡そ検討がつくためである。図-16，17に水平方向地盤反力係数を，図-18～21に鉛直方向地盤反力係数の代表例を示す。

図-16～21に示した地盤反力係数は明らかに，人工的に締固めた砂地盤に対する値に対して，起振力の小さいところ，すなわち，変位の小さいところでは大変大きい値を示し，全体的にかなりオーバーな係数となっている。しかし，共振点附近ではかなり妥当な値に近づいている。

そこで，計器の示す絶対値は，信頼できないとして，計器の示す値の比に注目して，共振振動数より，変形係数を換算してみた。共振振動数の計算には，1自由度系と仮定するものと，2自由度系と仮定するものが考えられるが，両者について計算した結果を表-3に示す。

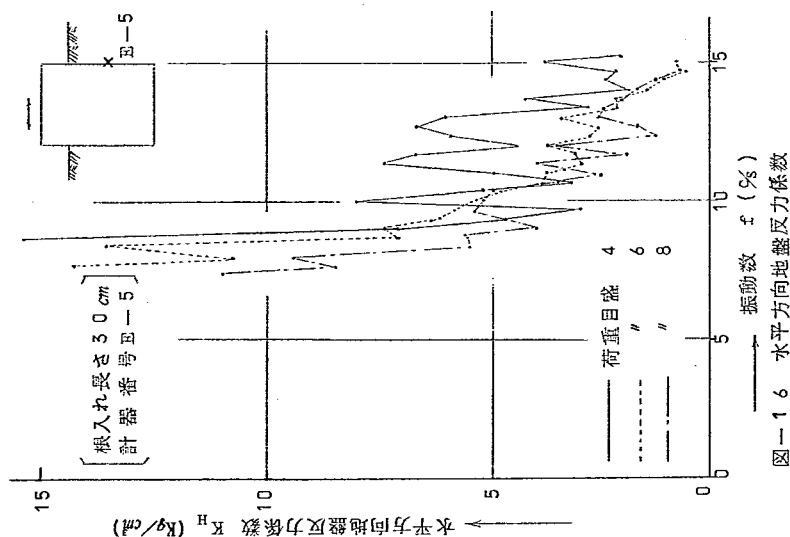
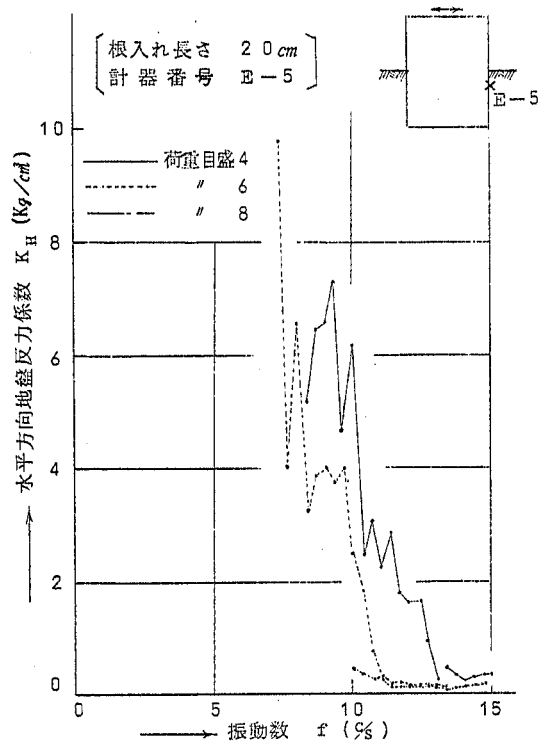
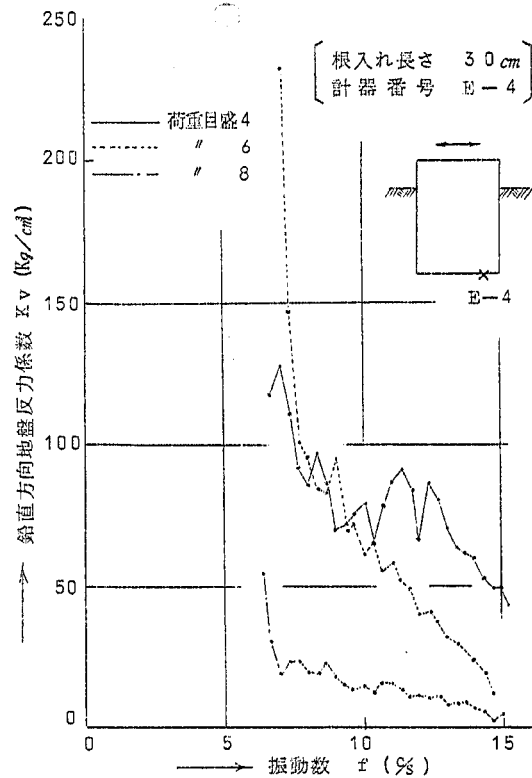


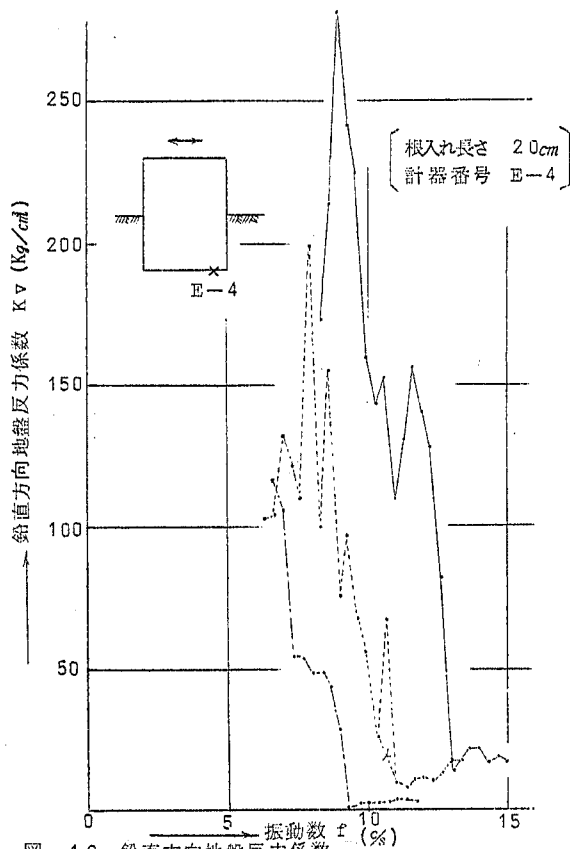
図-16 水平方向地盤反力係数



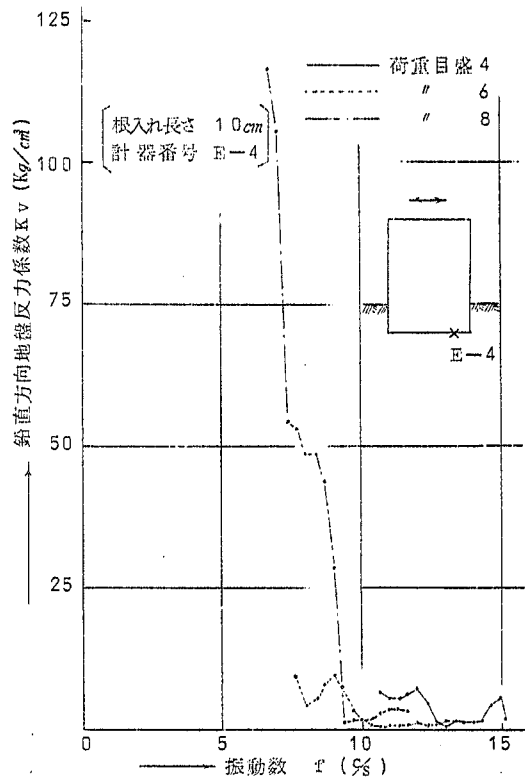
図一 17 水平方向地盤反力係数



図一 18 鉛直方向地盤反力係数



図一 19 鉛直方向地盤反力係数



図一 20 鉛直方向地盤反力係数

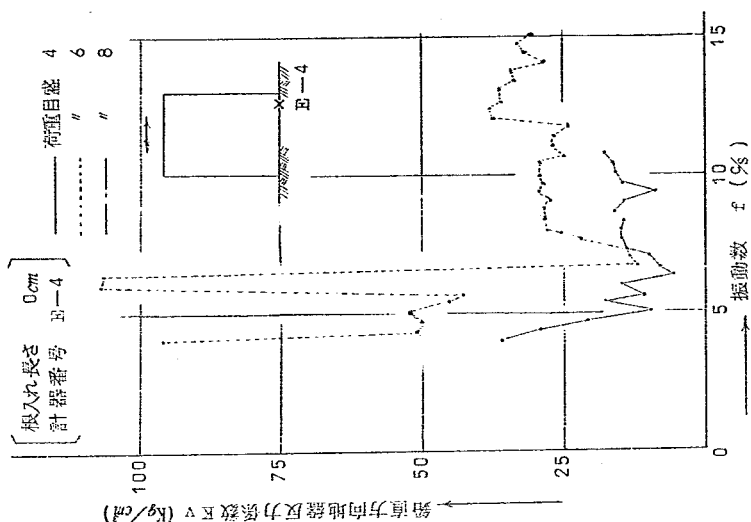


図-2 1 鉛直方向地震反力係数

表-3 共振振動数より換算した変形係数

根入れ長さ (cm)	共振振動数 の 平均 値 (%)	1 自由度系の 振動としての 換算 (Kg/cm^2)	2 自由度系の振動としての換算	
			模型底面より回転 中心までの距離(cm)	変形係数 (Kg/cm^2)
0	6.33	17.5	6.9	18.0
10	10.33	32.5	3.1	19.8
20	12.00	22.8	2.8	22.6

表-3の値をみると、人工的に作成した砂地盤の変形係数は20～30 Kg/cm^2 と考えられる。他の方法で変形係数を測定していないので、比較対象がないが、我々の常識と一致する数字である。

このように、共振振動数や前述の減衰定数のように各測定値の比はかなり精度が高いと考えてもよい。

3.6 測定値相互間の定性的関係

以上で、このような模型の上にかなり大きな起振機をのせて振動させたときの振動性状がどのようになり、試験の可否を述べてきたが、最後に簡単に測定結果からの定性的な関係を図示する。

(1) 共振振動数と変位量の関係

共振振動数とその時の天端変位量の関係を図に示すと図-22のように

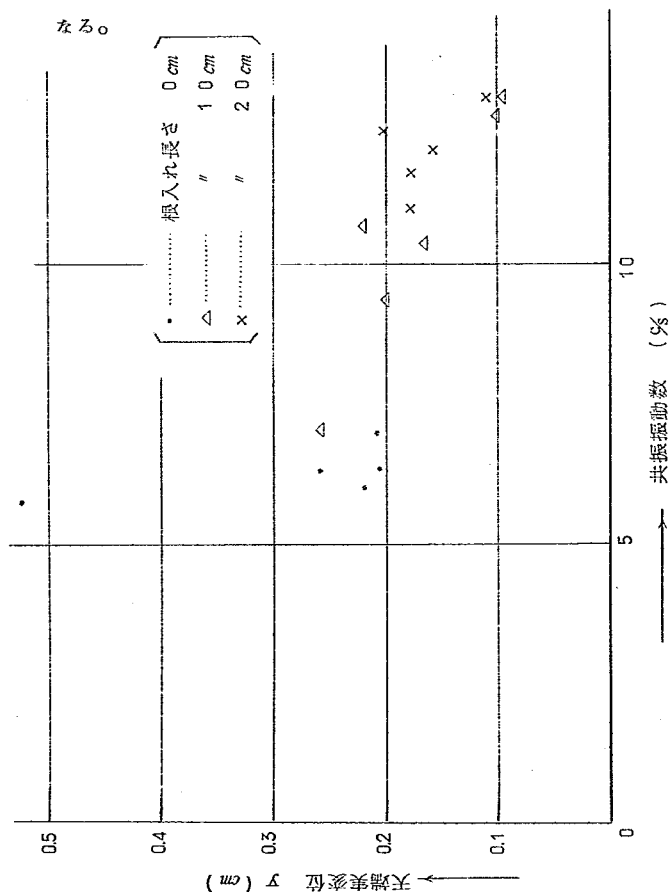


図-22 共振振動数と天端変位の関係

(2) 減衰定数と根入れ長さの関係

減衰定数と根入れ長さとの関係を図-23に示す。

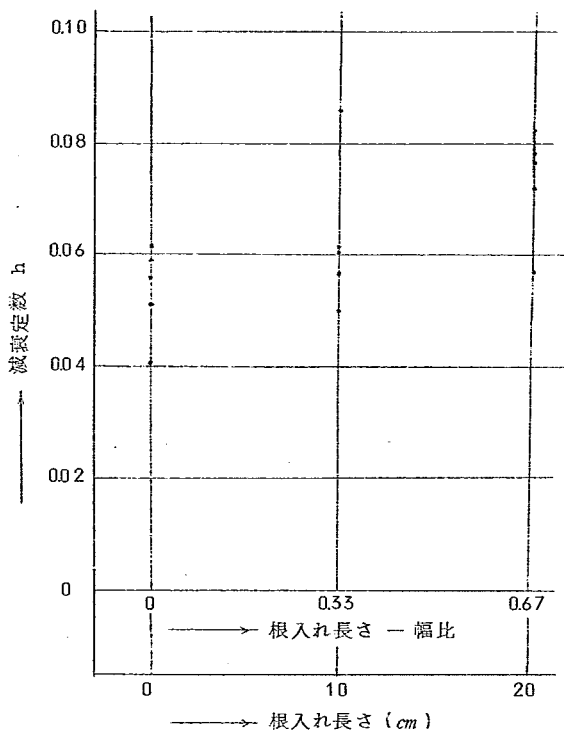


図-23 減衰定数と根入れ長さの関係

(3) 根入れ長さと天端変位の関係

共振時の根入れ長さと天端変位の関係を図-24に，根入れ長さが 0 cm の試験が共振を生じた 6% に対する関係を図-25に示す。

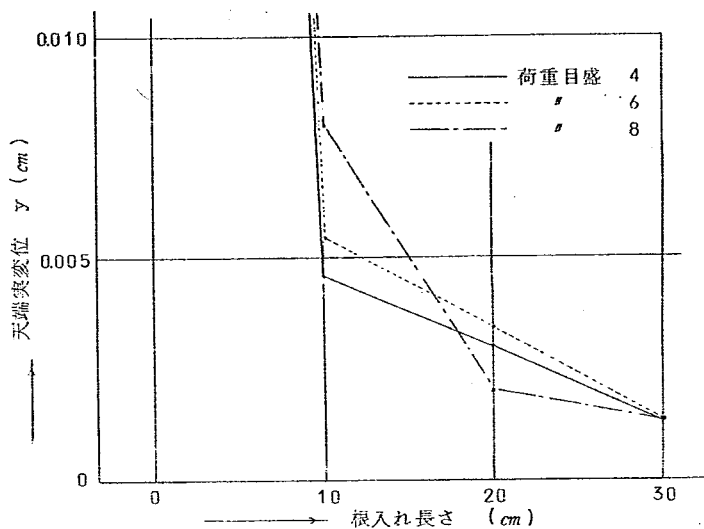


図-2 4 根入れ長さと天端変位の関係

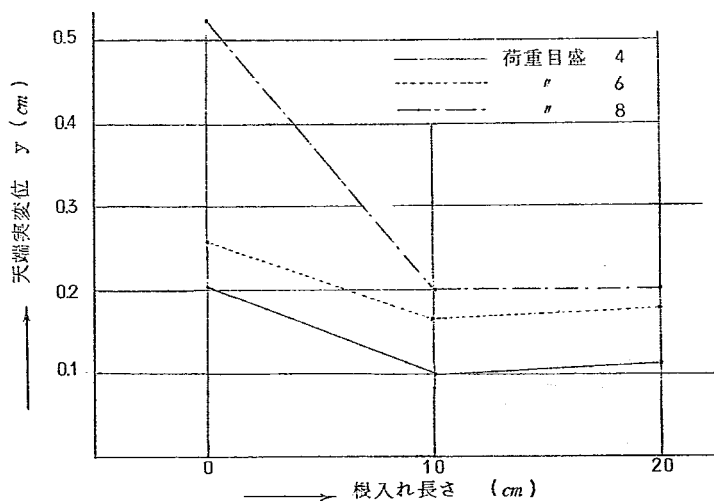


図-2 5 根入れ長さと天端変位の関係

(4) バネ定数と地表面水平変位の関係

バネ定数と地表面水平変位の関係を図示すると図-26, 27のようになる。

この場合、根入れ長さ30cmの場合については最高回転数900rpmの時の値を用いた。

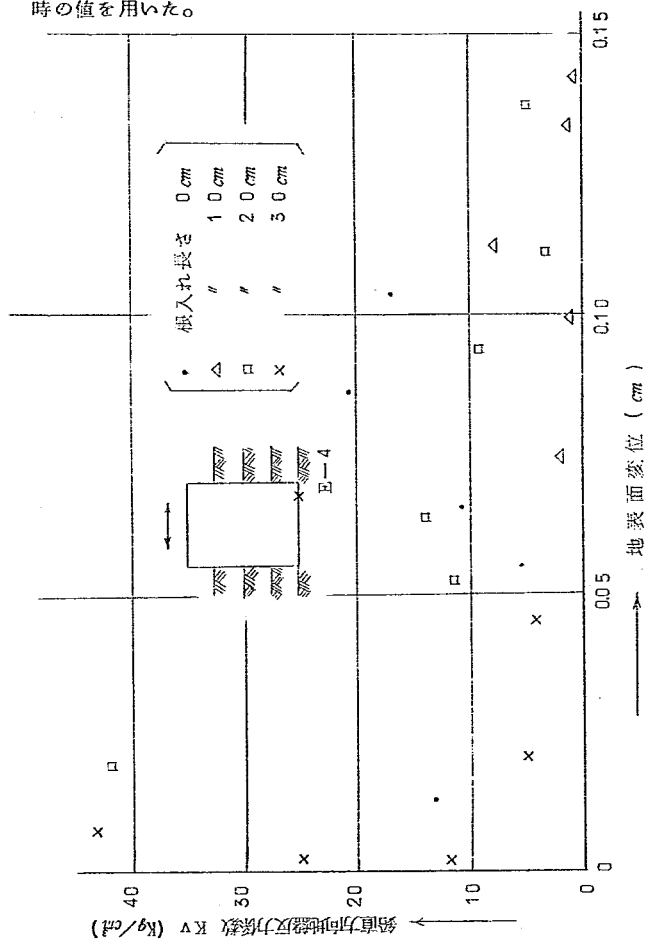
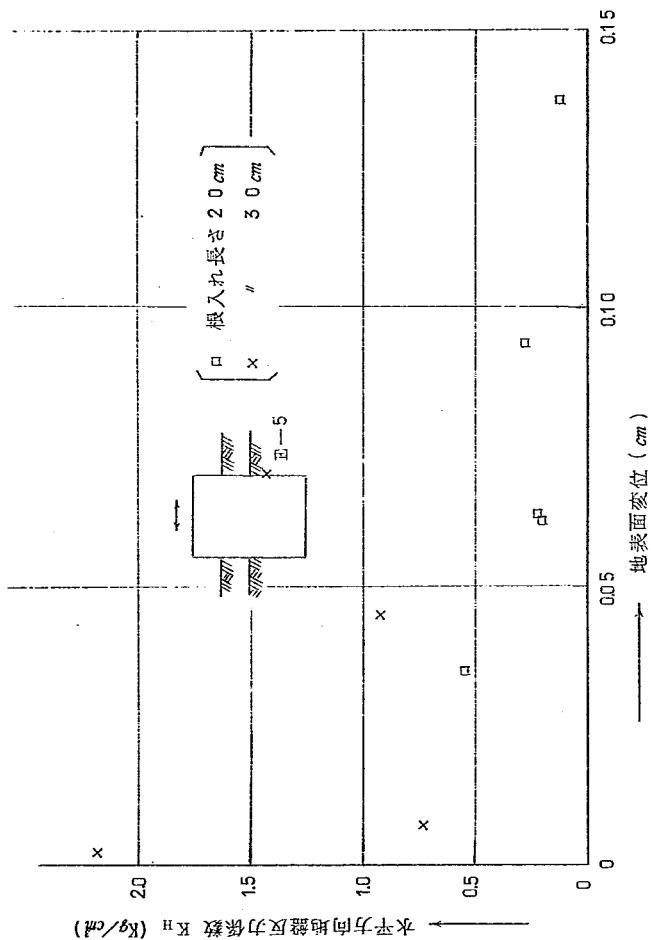


図-26 鉛直方向地盤反力係数と変位の関係



図一 27 水平方向地盤反力係数と変位の関係

(5) 鉛直方向地盤反力係数と水平方向地盤反力係数の関係

共振時における水平方向地盤反力係数と鉛直方向地盤反力係数の比と根入れ長さとの関係を図示すると図一 28, 29 のようになる。

ただし、根入れ長さ 30 cm の場合には、最大振動数の値を用いた。

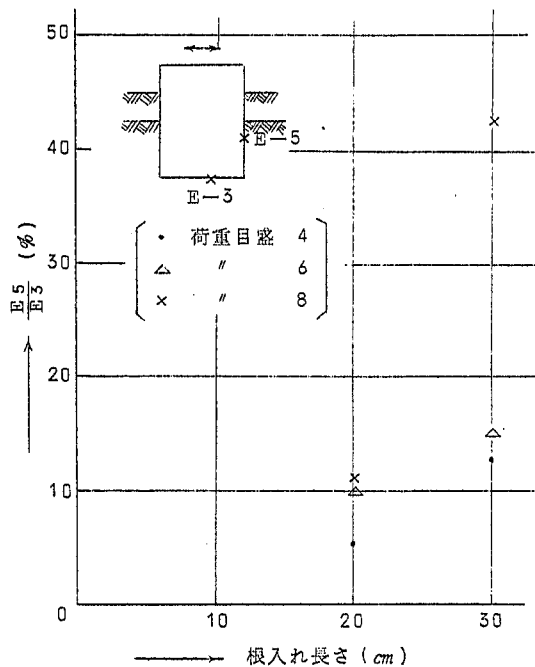


図-28 鉛直方向地盤反力係数と
水平方向地盤反力係数の関係

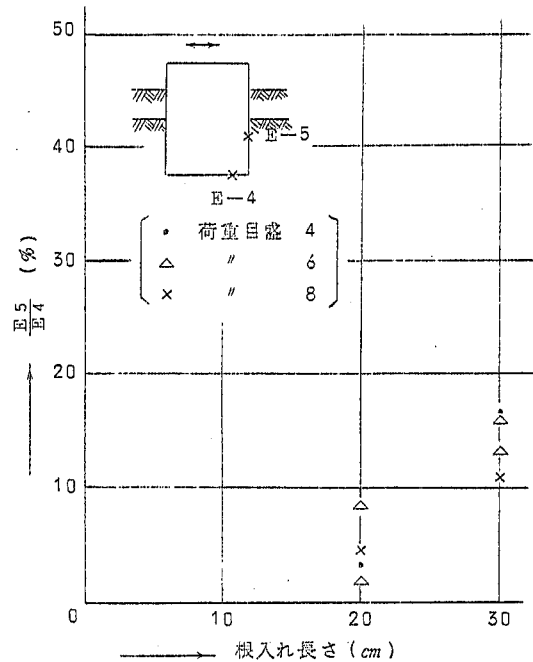


図-29 鉛直方向地盤反力係数と、
水平方向地盤反力係数の関係

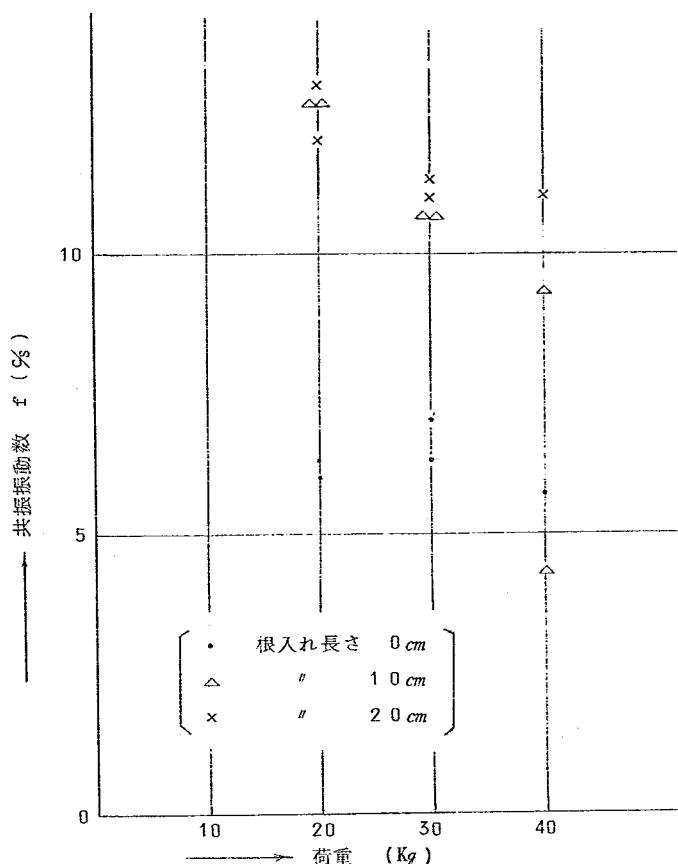
4. 試験結果に対する考察

予備試験として、小型模型試験を実施したが、本試験から得られた大型の模型試験を行なう上での注意事項を列挙すると次の通りである。

- 1) 模型基礎の上はかなり大きな寸法の起振機をのせて強制振動をさせると、厳密には2自由度系の振動を行ない、模型の底面より下に回転中心が来るような振動性状を示し、ロッキング振動をこのような試験により生ぜしめることがわかった。しかし、回転中心は底面のすぐ下にくるため、近似的に1自由度のロッキング振動に近い性状を示すと考えてもよいことがわかった。
- 2) 計器の絶対値に対しては、測定値が小さいので、かなり疑問な点がある。本試験では特に手持ちの計器をそのまま用いたため、信頼性に欠ける点が多々あったが、各測定値の比は同一の計器における限り、当然妥当な値を示し、共振振動数、減衰定数は明確に把握できる。
- 3) 土圧計を用いる場合には、その目的に適した容量のものをを用いなければならない。しかし、土圧計の作動については、今回の実験の範囲でも、加速度計による変位変化と一致しており、動的な現象に十分追隨していると見ることができる。
- 4) 土と構造物に関する試験を行なう場合、地盤の取扱いにかなり注意しなければならない。人工的に作成する地盤は均一に、同一強度を有するように作るとはかなりむずかしい。密度測定により、管理はするものの、やはりばらつきはさけえない。したがって、地盤の作成方法を考える必要がある。模型が大規模になると、バイブレーターなどを用いても模型に対する影響が小さいのでかなり一律な地盤が作成できると考えられる。

以上の他に、次のような点が本試験の測定結果の傾向として定性的に指摘できた。

- 1) 共振曲線より荷重と共振振動数の関係を示すと図-30のようになる。これより荷重の大きさにより共振振動数が少しずつ異なっていて、明らかに地盤は非線型であることを示している。もし、地盤が完全な弾性体であるならば、当然同一の共振振動数を示さねばならない。



図— 3 0 荷重と共振振動数の関係

- 2) 振動時の側面地盤の崩壊は2種類に区別でき、根入れ長さが浅いときは模型と地盤との間にすきまが生じて、土が圧縮されたことを示し、根入れ長さが深くなると一種のすべり面を生じていることがわかる。
これは動的荷重に対する土の破壊形式の一つと考えてよい。
- 3) 共振振動数が大きくなると、その時の変位量が小さくなる。
このことは、人工的に作成したゆるい地盤でも、側面地盤の影響はかなり

大きいことを示している（図—22参照）。

- 4) 共振時の根入れ長さと変位の関係より，根入れ長さが大きくなるにつれて，変位量が小さくなっている。特にある一定の振動数での変位量を比べてみると，根入れ効果ははっきりと現われており，側面効果がよく表われている（図—24，25参照）。

- 5) 地盤反力係数にかなり問題があり，これは計器の精度にやゝ問題があるためと考えてよい。

しかし，水平方向と鉛直方向との地盤反力係数の比は，1:10位の値を示しており，相対的な値ではあまり問題ない（図—28，29参照）。

- 6) 根入れ長さが深くなると，減衰定数が大きくなっているが，これは側面地盤からのエネルギーの逸散があることを示し，減衰定数は根入れ長さが大きくなると増大する傾向にある（図—23参照）。

- 7) 変形係数の値としては，1自由度系の振動と仮定するものと2自由度系の振動と仮定するものと，仮定の仕方によって，多少換算結果に差があるが，回転中心が試験結果も，計算結果もかなり模型底面に近いことから，1自由度系の振動と仮定してもよい。また，このような人工的に締固めた非常にゆい砂の場合には，振動周期を求める変形係数にはおよそ20~30Kg/cm²であると考えてよく，一般的に言われている値と一致していると考えてよい（表—3参照）。

5. あ と が き

地盤と構造物の相互関係は、理論的取扱いが未だ明白でなく、模型試験により確かめているが、模型試験自身にもまだまだむずかしい点がある。模型試験の規模が大きくなるとかなり明瞭に結論づけられる点が判明すると考えられるが、それには多大の労力と費用を要し、また数多く試験を実施することが困難である。逆に、小さな模型で試験を行なうと、計器の精度など種々な問題点に左右されて満足な結果が得られない。

本試験は土木研究所資料第286号に報告した大型の模型振動試験に先立って行なった予備試験としては、十分に役割を果たし、試験の目安を立てえたものと考えてよい。

また、今後小型の模型試験を行なう時の限界点をも示していると考えられる。尚、本文は筆者の一人が日本大学理工学部（第2部）の卒業論文としてとりまとめたものを要約したものである。

参 考 文 献

1. 松平 精： 基礎振動学，共立出版株式会社，昭和25年8月
2. 土木学会： 土木技術者のための振動便覧，昭和41年8月
3. 土質工学会： 土の動的性質とその応用，昭和39年11月
4. M.A.Biot： Analytical and Experimental Methods
in Engineering Seismology, Trans. of A.S.C.E.,
1943
5. 建設省土木研究所： 吊橋下部構造の地震荷重について，土木研究所資料 第142号，昭和41年2月