

I S S N 0386-5878

土木研究所資料 第1426号

マイクロフィルム 第 号

土 木 研 究 所 資 料

クイ基礎の動的特性に関する模型実験

昭和53年10月

建設省土木研究所
耐震研究室

ま え が き

地震時における構造物の挙動はそれを支持している基礎と地盤の動的特性に支配されやすい。
本資料はクイ基礎と地盤の地震時の動的特性を調査するために実施した模型実験の結果をとりまとめたものである。

昭和53年10月

耐震研究室

室長 栗 林 栄 一

担 当 者 一 覧

年度	内 容	担 当 者 (現所属)
49	予備実験： 単クイを対象とした実験 ¹⁾	研究員 川島一彦 木本正則(施設課) 宮田忠明
51	実験1： 群クイ(クイ頭重量変化)と単クイを対象とした実験	研究員 川島一彦(振動研究室) 宮田忠明
52	実験2： 地盤に対する相対的な剛性度の異なるクイを対象とした実験	研究員 萩原良二 宮田忠明 干場良信(耐震研究室)
53	解析およびまとめ	研究員 萩原良二(耐震研究室) 宮田忠明(耐震研究室)

目 次

1. 実験の概要	1
2. 模型の概要	2
2.1 地盤模型	2
2.2 クイ基礎模型	2
(1) 実験 1	2
(2) 実験 2	2
2.3 計測器	2
3. 予備検討	5
3.1 地盤模型	5
3.2 クイ基礎模型	5
(1) 実験 1	5
(2) 実験 2	5
3.3 入 力	6
4. 物性試験	10
4.1 地盤の弾性定数の測定	10
4.2 クイ模型の曲げ剛性の測定	11
(1) 実験 1	11
(2) 実験 2	11
5. 静的載荷試験	12
5.1 実験 1	12
5.2 実験 2	15
6. 振動実験	24
6.1 正弦波加振試験	24
(1) 実験 1	24
(2) 実験 2	28
6.2 自由振動試験	31
(1) 実験 1	31
(2) 実験 2	31
7. 解析モデルによるシミュレーション	57
7.1 実験 1	57
7.2 実験 2	58
8. ま と め	72
参考文献	73

1. 実験の概要

基礎構造物の地震応答は支持体である地盤の挙動に支配されやすい。そこで、以下のようなクイ基礎を対象とした模型実験を行い、クイ基礎と地盤の動的特性を調査した。

(i) 実験1： 群クイ（クイ頭重量変化）と単クイを対象とした実験

a. 群クイモデル（クイ頭重量変化）

b. 単クイモデル

(ii) 実験2： 地盤に対する相対的な剛性度の異なるクイを対象とした実験

a. $3 < \beta \ell$ モデル： 無限長の柔な基礎（地表部での載荷に対して基礎は先端の境界条件には無関係の弾性変形をする。）

b. $1 < \beta \ell \leq 3$ モデル： 有限長の柔な基礎（地表部での載荷に対して基礎は先端の境界条件の影響を受けた弾性変形をする。）

c. $\beta \ell \leq 1$ モデル： 剛な基礎（地表部での載荷に対して基礎は剛体変形を行う。）

ここで、

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kD}{4EI}}: \text{クイの特性値} (m^{-1})$$

ℓ : クイの根入れ長さ (m)

k : 横方向地盤反力係数 (t/m^3)

D : クイ径 (m)

EI : クイの曲げ剛性 ($t \cdot m^2$)

以上の各クイ基礎モデルを対象に次のよう項目を実施した。

1) 物性試験

地盤の弾性定数およびクイの曲げ剛性を測定する。

2) 静的載荷試験

クイ基礎の静的バネ係数を求め、復元力特性を調べる。

3) 振動試験

a. 正弦波加振試験

加振台から入力振動数を段階的に変えて正弦波加振し、地盤—クイ基礎系の応答を測定してその動的特性を調べる。

b. 自由振動試験

クイ頭打撃もしくは加振台からの衝撃力入力による地盤—クイ基礎系の自由振動から自由振動数と減衰定数を測定する。

4) 解析モデルによるシミュレーション

模型実験での地盤—クイ基礎系の振動を解析モデルで表現し、模型実験における模型の挙動を解析的にシミュレーションして地盤—クイ基礎系の振動のモデル化について調査する。

2. 模型の概要

模型の概要は、図2-1、表2-1、図2-2、表2-2に示すとおりである。なお、模型の材料、諸元については3章で示す予備検討で検討した結果に従って決定した。

2.1 地盤模型

地盤模型はアクリルアミド系グラウト剤（日東SS-結晶）を主材として、補強剤（ベントナイト）、促進剤（ジメチルアミノ）、開始剤（過硫酸カリウム）を表2-1(a)、表2-2(a)のような配合比で加えて製作した。このような材料を使用したのは以下の理由によるものである。

- a. ほぼ弾性体的な性質を有しており、明確な地盤条件のもとで実験が行える。
- b. 実験期間中、力学的性質が安定している。
- c. 配合比を変えることによって、ある範囲内で任意の弾性定数の地盤模型をつくることができる。

なお、模型地盤の周辺は鋼製の型枠で固定して実験を行った。

2.2 クイ基礎模型

(1) 実験 1

実験1におけるクイ基礎模型は、直径3cmの円形断面のアクリライト棒（ $\gamma = 1.2 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$ ）で4本のクイから成る群クイと単クイを製作した。クイ頭重量は、群クイに対しては3.9Kg（呼称0Kg）、17.7Kg（呼称15Kg）、31.6Kg（呼称30Kg）の3種類とし、単クイに対しては2.2Kg（呼称15Kg）を載荷して振動実験を行った。ここで、単クイのクイ頭重量2.2Kgを呼称15Kgとしたのは、1次共振振動数が群クイのクイ頭重量17.7Kg（呼称15Kg）の場合に近似しているために便宜的に名付けたものである。クイ下端は群クイ、単クイともに型枠底板に固定して実験を行った。

(2) 実験 2

実験2におけるクイ基礎模型は、矩形断面のアクリライト板（ $\gamma = 1.2 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$ ）で無限長の柔な基礎（ $3 < \beta l$ ）、有限長の柔な基礎（ $1 < \beta l \leq 3$ ）、剛な基礎（ $\beta l \leq 1$ ）に相当する3種類の単クイを製作した。ここで、3種類のクイ模型は幅を同一（10cm）として厚さを0.8cm（ $3 < \beta l$ ）、1.6cm（ $1 < \beta l \leq 3$ ）、8cm（ $\beta l \leq 1$ ）の3段階に変えて製作している。クイ下端は型枠に固定しないで自由端の条件で実験を行った。

2.3 計測器

振動実験における応答加速度の測定のため、加速度計を図2-1、図2-2のように配置した。

表 2-1(a) 地盤模型の諸元(実験1)

大 き さ		1.5m×1.1m×0.5m
配 合	主 剤 (日東SS-結晶)	23.8%
	補強剤 (ベントナイト)	5.0%
	促進剤 (ジメチルアミノ)	0.5%
	開始剤 (過硫酸カリウム)	0.3%
	水	70.4%
単位体積重量		$1.0 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$
弾 性 定 数 E		7.31 Kg/cm^2
ポアソン比 ν		0.5

(注) 地盤模型周辺は型枠(1.5m×1.1m×0.8m)で固定している。

表 2-1(b) クイ模型の諸元(実験1)

諸 元	模 型	群 ク イ	単 ク イ
ク イ 長 (cm)		75	75
根 入 れ 長 さ ℓ (cm)		50	50
突 出 長 h (cm)		25	25
ク イ 径 D (cm)		3	3
単位長さ当り重量(Kg/cm)		8.5×10^{-3}	8.5×10^{-3}
断面2次モーメント I (cm ⁴)		3.98	3.98
弾 性 定 数 E (Kg/cm ²)		3.12×10^4	3.12×10^4
曲 げ 剛 性 EI (Kg·cm ²)		1.24×10^5	1.24×10^5
横方向バネ係数 kD (Kg/cm ²)		10.6	10.6
特性値 $\beta = \sqrt[4]{\frac{kD}{4EI}}$ (1/cm)		0.068	0.068
$\beta \ell$		3.40	3.40
ク イ 頭 重 量 (Kg)		3.9(呼称0) 17.7(呼称15) 31.6(呼称30)	2.2(呼称15)
ク イ 本 数 (本)		4	1

(注) クイ模型材料は円形断面のアクリライト棒($\gamma = 1.2 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$)を使用しており、クイ下端は固定している。

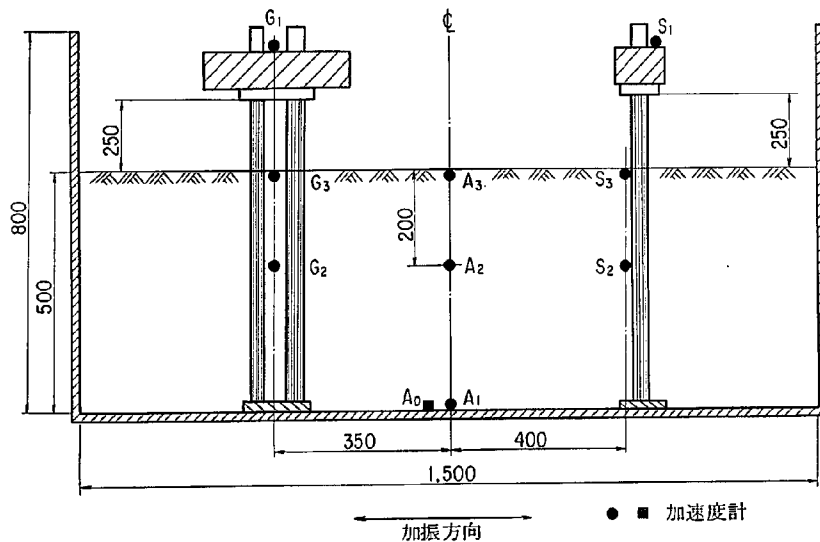


図 2-1 模 型 一 般 図 (実験1)

大 き さ		1.5m×1.1m×0.6m
配 合	主 剤 (日東SS-結晶)	25.0%
	補強剤 (ベントナイト)	5.0%
	促進剤 (ジメチルアミノ)	0.4%
	開始剤 (過硫酸カリウム)	0.3%
	水	69.3%
単 位 体 積 重 量		$1.0 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$
弾 性 定 数 E'		67.6 Kg/cm^2
ポアソン比 ν		0.5

諸 元 \ 模 型	$3 < \beta \ell$	$1 < \beta \ell \leq 3$	$\beta \ell \leq 1$
ク イ 長 (cm)	35	35	35
根 入 れ 長 さ ℓ (cm)	30	30	30
突 出 長 (cm)	5	5	5
ク イ 幅 D (cm)	10	10	10
ク イ 厚 さ d (cm)	0.8	1.6	8.0
単位長さ当り重量(Kg/cm)	9.6×10^{-3}	1.92×10^{-2}	9.6×10^{-2}
断面 2 次モーメント I (cm ⁴)	0.427	3.41	4.27×10^4
弾 性 定 数 E (Kg/cm ²)	3.39×10^4	2.76×10^4	2.76×10^4 *
曲 げ 剛 性 EI (Kg·cm ²)	1.45×10^4	9.41×10^4	1.18×10^5
横方向バネ係数 kD (Kg/cm ²)	223	223	223
特性値 $\beta = \sqrt{\frac{kD}{4EI}}$ (1/cm)	0.140	0.088	0.026
$\beta \ell$	4.20	2.64	0.78
ク イ 頭 重 量 (Kg)	3.4	3.4	3.4

- 4 -

3. 予 備 検 討

加振台からの入力振動数は5～25Hzとするため、地盤—クイ基礎系の動的特性を把握するためには地盤およびクイ基礎の1次共振振動数がこの範囲内に入っている必要がある。そこで以下のような予備検討を行った。

3.1 地 盤 模 型

地盤材料の配合比と弾性定数 E 、地盤の弾性定数 E とせん断1次固有振動数(共振振動数)の間には図3-1および図3-2に示すような関係がある。これらの関係から、地盤模型の特性として弾性定数 $E=7\text{Kg/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.5$ 、密度 $\gamma=1.0\times 10^{-3}\text{Kg/cm}^3$ 、せん断弾性定数 $G=E/2(1+\nu)=2.3\text{Kg/cm}^2$ 、せん断弾性波速度 $V_s=15\text{m/sec}$ を目標として地盤を製作すれば、地盤が無限に続いている場合のせん断1次固有振動数 $f=V_s/4H=6\sim 8\text{Hz}$ 程度となる。しかしながら、模型実験では地盤の広がりには有限であり、地盤周辺の境界条件によって f の値は変化する。本実験では地盤周辺を型枠で固定しており、このような境界条件のもとでのせん断1次固有振動数の移行状況を2次元F.E.M.モデルによって求めたものを図3-3に示している。この図からわかるように、地盤の周辺が型枠で固定されている場合、地盤が無限に続いている場合に比べてせん断1次固有振動数は高くなる傾向がある。

以上のような検討の結果、地盤模型の諸元、材料の配合比を表2-1(a)、表2-2(a)のように定めた。

3.2 クイ基礎模型

(1) 実 験 1

クイ模型はアクリライト棒の規格から、クイ径 $\phi=2\text{cm}$ もしくは 3cm が適当であるが、地盤との連成関係に着目するためにはなるべくクイ径の大きな模型が望ましい。また、クイ模型の固有振動数が入力振動数の範囲(4～25Hz)に入るように突出長とクイ頭重量を決定しなければならない。図3-4はクイ径が 3cm と 2cm のものについて突出長とクイ頭水平ばね係数(クイ頭を単位長さ水平方向に変位させるのに必要な力)の関係を示しており、図3-5はクイ頭水平ばね係数、クイ頭重量とクイ頭部の固有振動数の関係を示したものである。本実験では、これらの関係から群グイについてはその固有振動数が地盤模型の1次固有振動数の前後で3段階に変化するように突出長とクイ頭重量(3段階)を決定した。ただし、単グイについては1段階とした。

以上のような検討の結果、クイ模型の諸元を表2-1(b)のように定めた。

(2) 実 験 2

実験2では、基礎と地盤の相対的な剛性度と動的特性の関係に着目しており、クイ模型としては無限長の柔な基礎($3<\beta l$)、有限長の柔な基礎($1<\beta l\leq 3$)、および剛な基礎($\beta l\leq 1$)のそれぞれに相当する模型を製作する必要がある。そこで模型断面を矩形とし、クイの幅を一定として厚さを変えて3種類のクイに相当するようにした。図3-6はアクリライト、アルミニウム、銅の

それぞれの材料を使用した場合のクイ模形の幅、厚さと $\beta\ell$ の値の関係を示したものである。この図から検討した結果、材料はアクリライトを使用し、根入れ長さ30cm、突出長5cm、幅10cmとし、厚さが0.8cm ($3 < \beta\ell$)、1.6cm ($1 < \beta\ell \leq 3$)、8cm ($\beta\ell \leq 1$)の3種類のクイ模型を実験の対象とした。さらに、これらのクイ模型の固有振動数が入力振動数の範囲(5~25Hz)に入っている必要がある。図3-7は $3 < \beta\ell$ 、 $1 < \beta\ell \leq 3$ のそれぞれのクイ模型についてのクイ頭重量と固有振動数の関係を示したものであり、図3-8は基礎頭部に重量を付加しない場合の基礎の根入れ長さと固有振動数の関係を示したものであるが、クイ頭重量がない場合はいずれも固有振動数が高くなるため、5~25Hzの範囲に固有振動数が入るようにクイ頭部に重量を付加する必要がある。

以上のような検討の結果、クイ模型の諸元を表2-2(b)のように定めた。

3.3 入 力

本実験において振動実験を行う場合、加振台から加速度制御の正弦波を入力するが、その入力レベルは模型の振動特性がはっきり現われるとともに応答レベルが加速度計の測定可能範囲(1960ガル以内)であり、模型の安全性が確保されるようなレベルでなければならない。また、クイ基礎および地盤の共振点付近ではかなり大きな応答が予想されるため、入力加速度は共振点付近では20ガル程度、それ以外では100~300ガル程度とする。

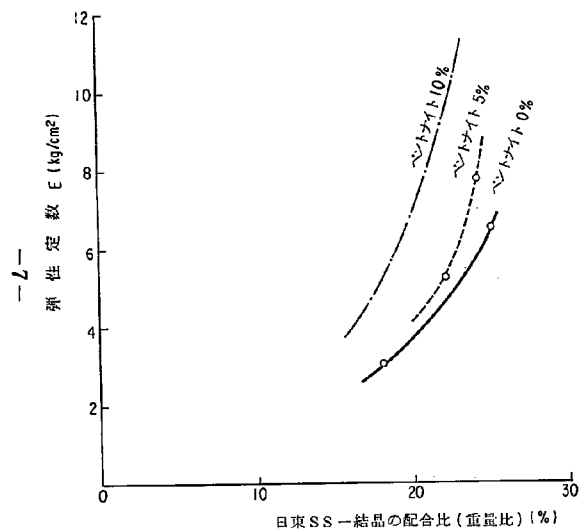


図3-1 日東SS—結晶の配合比と弾性定数 E の関係

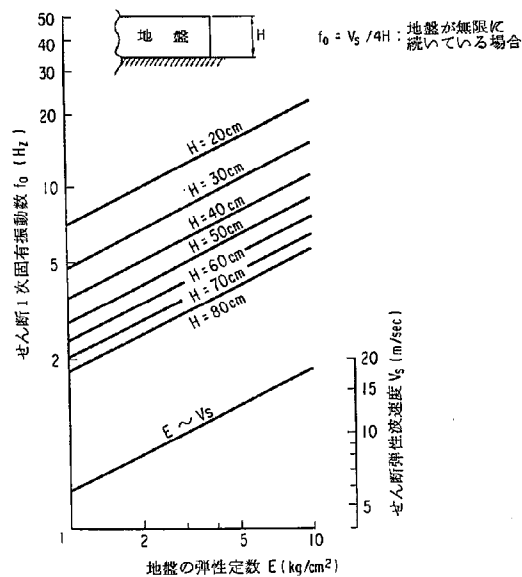


図3-2 地盤 ($\gamma = 1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\nu = 0.5$) の弾性定数 E , 厚さ H とせん断1次固有振動数 f の関係

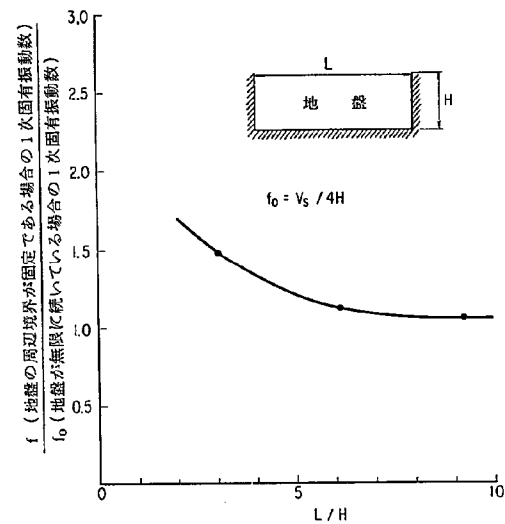
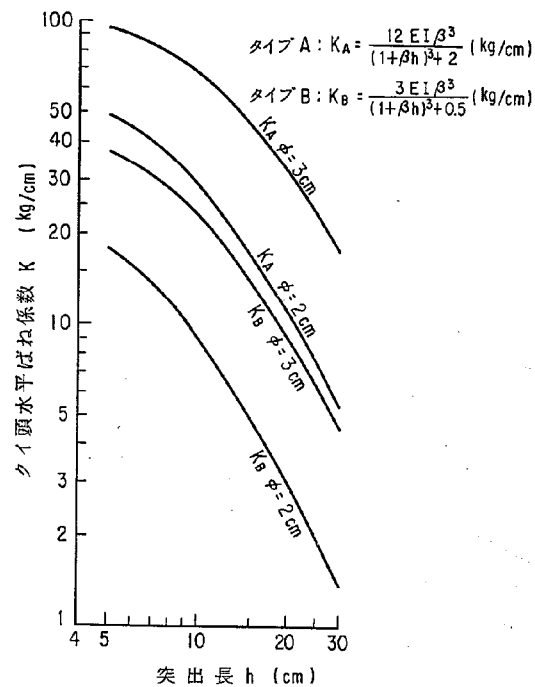


図3-3 地盤の周辺境界が固定されている場合のせん断1次固有振動数の変化 (2次元 F.E.M.による)



(注) 群グイはタイプA, 単グイはタイプBを用いる。

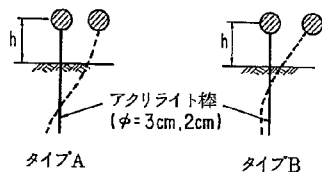
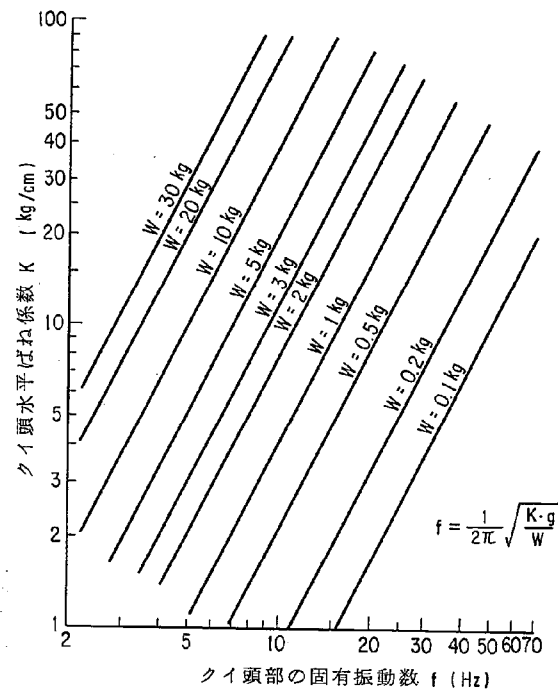


図3-4 クイの突出長 h とクイ頭水平ばね係数 K の関係



(注) クイ頭重量 W は群グイの場合, クイ1本当りの値を示している。

図3-5 クイ頭水平ばね係数 K , クイ頭重量 W とクイ頭部の固有振動数 f の関係

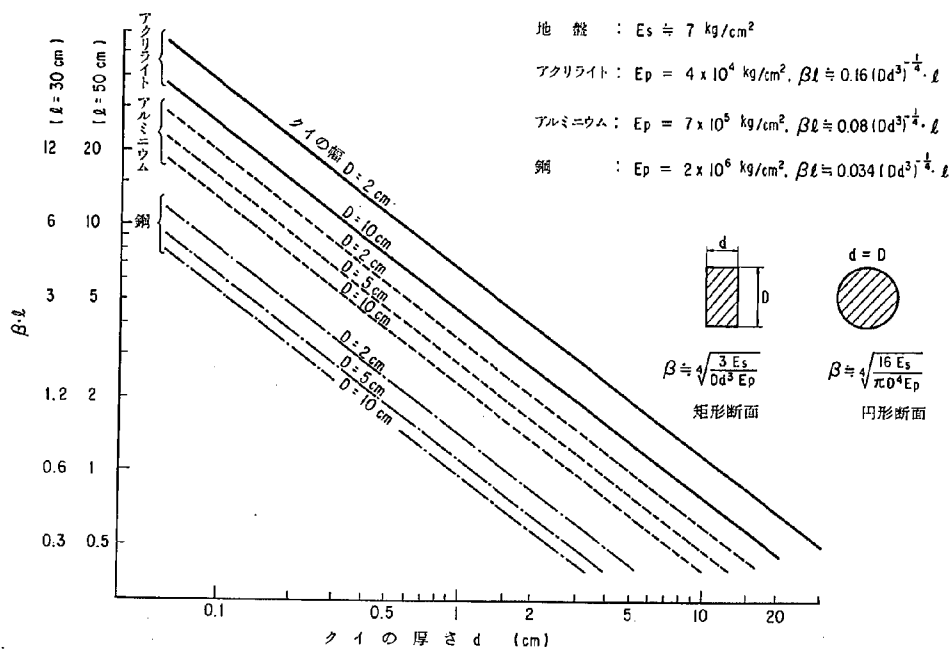


図 3-6 クイの幅 D , 厚さ d と $\beta \cdot l$ の値の関係 (根入れ長さ $l = 30 \text{ cm}$, 50 cm)

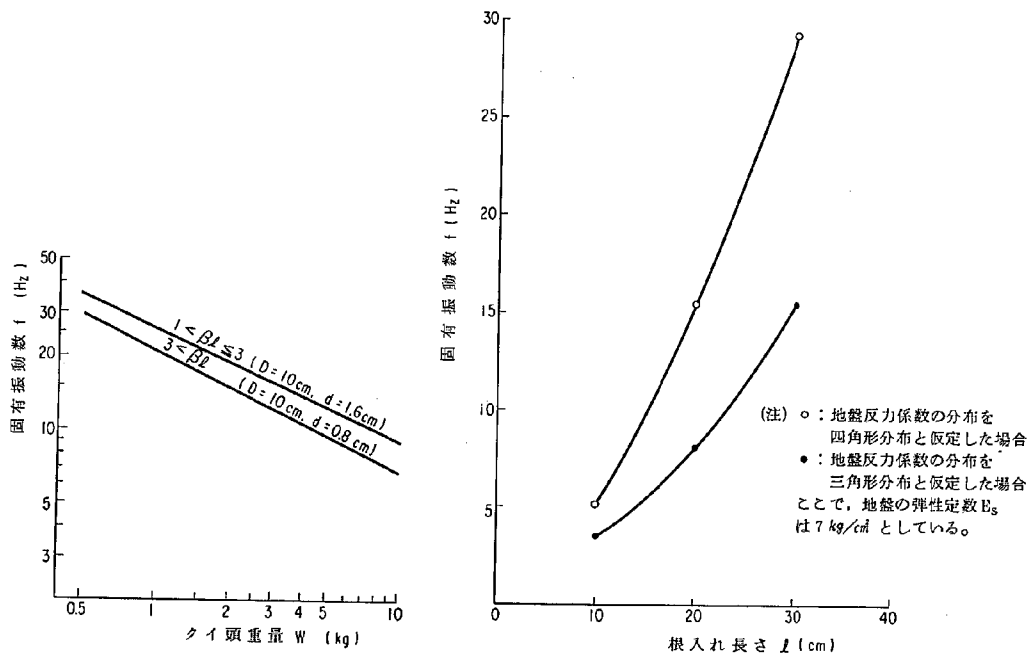


図 3-7 クイ頭重量 W と固有振動数 f の関係 ($3 < \beta l$, $1 < \beta l \leq 3$)

図 3-8 基礎の根入れ長さ l と固有振動数 f の関係 ($\beta l \leq 1$, 基礎頭部重量 $W = 0 \text{ kg}$)

4. 物 性 試 験

模型の物性（地盤の弾性定数，タイの曲げ剛性）を調べるために次のような試験を行った。その結果実測された物性値は表4-1に示すとおりである。

4.1 地盤の弾性定数の測定

地盤の弾性定数は地盤材料の配合，打込み時に採取した供試体のねじれ共振試験により測定する。測定方法は供試体を3体採取し，供試体上面に検定板（アルミニウム円板）を乗せて微少のねじれ振動を与え，10回振動するのに要する時間をストップウォッチで測定し，5回の計測の平均をとって供試体のねじれ振動数を求める。このねじれ振動数を用いて次式から供試体のせん断弾性定数およびヤング率を求め，供試体3体の平均値を模型地盤の弾性定数とした。

$$G = (2\pi f)^2 \cdot I_p \cdot H / J \quad (g/cm^2)$$

$$E = 2(1 + \nu) \cdot G \quad (g/cm^2)$$

ここで， G ： 供試体のせん断弾性定数（ g/cm^2 ）

E ： 供試体のヤング率（ g/cm^2 ）

ν ： 供試体のポアソン比（0.5）

f ： 供試体のねじれ振動数（Hz）

H ： 供試体の高さ（cm）

I_p ： 検定板の回転慣性（ $g \cdot cm \cdot sec^2$ ）

$$\text{円板の場合, } I_p = \frac{W r^2}{2g}$$

ただし， W ： 検定板の重量（g）

r ： 検定板の半径（cm）

g ： 重力加速度（ $980 cm/sec^2$ ）

J ： 供試体の断面極2次モーメント（ cm^4 ）

$$\text{円形断面の場合, } J = \frac{\pi D^4}{32}$$

ただし， D ： 供試体の直径

以上の方法により測定された模型地盤の弾性定数は，実験1では $E = 7.31 Kg/cm^2$ ，実験2では $E = 6.76 Kg/cm^2$ であった。

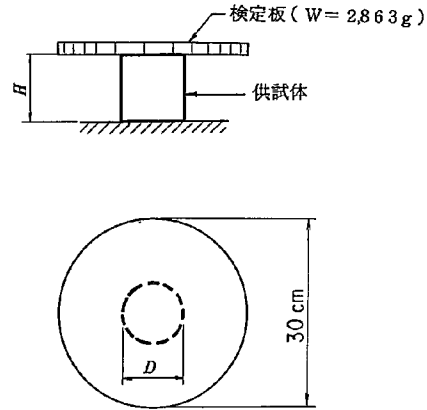


図4-1 地盤の弾性定数の測定

4.2 クイ模型の曲げ剛性の測定

(1) 実験 1

実験 1 ではクイ模型（アクリライト棒）を図 4-2 のような単純梁として荷重 P を載荷し、その時のたわみ量 δ を測定して次式により曲げ剛性 EI を求めた。

$$EI = \frac{P\ell^3}{48\delta} \quad (\text{Kg} \cdot \text{cm}^3) \quad (4.2)$$

ここで、 P : 載荷荷重 (Kg)

δ : たわみ量 (cm)

ℓ : クイ模型長 (cm)

以上の方法により測定された実験 1 でのクイ模型の実測曲げ剛性は $EI = 1.24 \times 10^5 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^3$ であった。

(2) 実験 2

実験 2 では $3 < \beta\ell$ ($d = 0.8 \text{ cm}$) および $1 < \beta\ell \leq 3$ ($d = 1.6 \text{ cm}$) のクイ模型（アクリライト板）を図 4-3 に示すように片持梁としてセットし、自由振動させてその加速度記録から固有振動数を読みとり、次式によりクイ模型の曲げ剛性 EI を逆算して求めた。

$$n_s = \frac{1}{\ell^2} \cdot \sqrt{\frac{EIg}{wA}} \cdot (\lambda_s \ell)^2 \quad (4.3)$$

ここで、 n_s : 片持梁の固有円振動数 ($2\pi \times$ 固有振動数) (rad/sec)

ℓ : クイ模型の片持部分の長さ (cm)

EI : クイ模型の曲げ剛性 ($\text{Kg} \cdot \text{cm}^3$)

w : クイ模型の単位体積重量 (Kg/cm^3)

A : クイ模型の断面積 (cm^2)

g : 重力加速度 (980 cm/sec^2)

$\lambda_s \ell$: 片持梁の曲げ振動の固有値 (1 次) ($\lambda_s \ell = 1.8751$)

以上の方法により測定された実験 2 でのクイ模型の実測曲げ剛性は、 $3 < \beta\ell$ の場合は $EI = 1.45 \times 10^4 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^3$ 、 $1 < \beta\ell \leq 3$ の場合は $EI = 9.41 \times 10^4 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^3$ であった。なお、 $\beta\ell \leq 1$ ($d = 8 \text{ cm}$) のクイ模型は剛体と考えた。

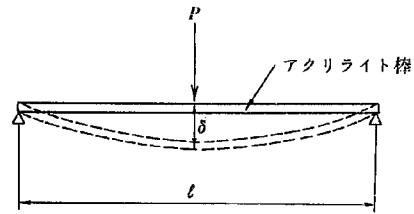


図4-2 クイ模型の EI の測定 (実験 1)

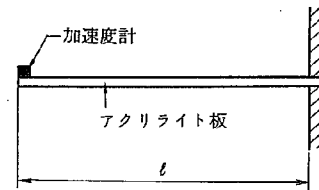


図4-3 クイ模型の EI の測定 (実験 2)

表 4 - 1 模型の物性値の実測値

物 性 値		実 験 1	実 験 2	
			$3 < \beta\ell$	$1 < \beta\ell \leq 3$
ク イ	弾 性 定 数 E (Kg/cm^2)	7.31	6.76	6.76
	弾 性 定 数 E (Kg/cm^2)	3.12×10^4	3.39×10^4	2.76×10^4
	断面2次モーメント I (cm^4)	3.98	0.427	3.41
	曲 げ 剛 性 ($\text{Kg} \cdot \text{cm}^3$)	1.24×10^5	1.45×10^4	9.41×10^4
	$\beta\ell$	3.40	4.20	2.64

注 実験 2 における $\beta\ell \leq 1$ のクイ模型は剛体と考えた。

5. 静的載荷試験

クイ基礎模型の静的バネ係数を決定し、復元力特性を調べるために次のような静的載荷試験を行った。ここで、静的バネ係数とは次式で定義されるものである。

$$K = \frac{P}{\delta} \text{ (Kg/cm) もしくは } \frac{M}{\theta} \text{ (Kg}\cdot\text{cm/rad)} \quad (5.1)$$

ただし、 K ：静的バネ係数 (Kg/cm もしくは Kg·cm/rad)

P ：水平力 (Kg)

M ：曲げモーメント (Kg·cm)

δ ：水平変位 (cm)

θ ：回転変位

(rad)

P と δ の関係を図5-5、図5-6に示したが、これらの図からわかるようにクイ基礎模型の復元力特性は線形性を十分満足しているものと考えられる。また、静的載荷試験によって求めた K 値は表5-1および表5-2に示すとおりである。

5.1 実験 1

実験1では図5-1(A)

のような方法でクイ頭に水平力 P を載荷し、クイ頭の水平変位 δ を測定して(5.1)式より K 値を求めた。その時の P と δ の関係を図5-5、 K 値を表5-1に示している。なお、群グイについては図5-1(B)および(C)で示したように、各々のクイの単グイとしての K 値と4本のクイのクイ頭を固定金具(フーチング)で結合した場合の K 値を求めている。ここで、群グイ

の各クイの K 値が単グイの K 値より10%程度大きくなっているのは、他のクイの影響で地盤の剛性が高くなっているためと考えられる。

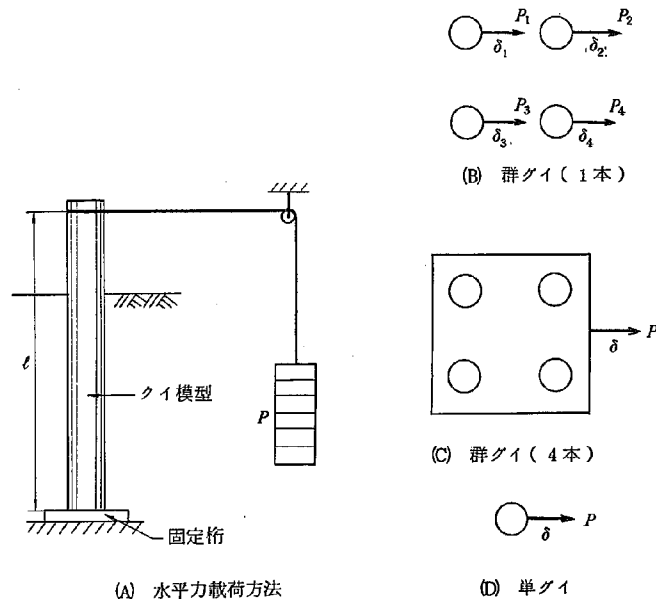


図5-1 静的クイ頭バネ係数の測定(実験1)

表 5-1 静的載荷試験より求めた静的クイ
頭バネ係数 (実験 1)

群 グ イ	P_1 グ イ	$K_1 = 6.57 \text{ Kg/cm}$
	P_2 グ イ	$K_2 = 6.62 \text{ Kg/cm}$
	P_3 グ イ	$K_3 = 6.57 \text{ Kg/cm}$
	P_4 グ イ	$K_4 = 6.53 \text{ Kg/cm}$
	4 本グイ	$K_G = 52.2 \text{ Kg/cm}$
単 グ イ		$K_S = 6.02 \text{ Kg/cm}$

次に、この静的載荷試験の結果から β および横方向地盤反力係数 k を次式で示す Chang の方法の
実用計算式から導いた。

$$\delta = \frac{(1 + \beta h)^3 + 0.5}{3EI\beta^3} H + \frac{(1 + \beta h)^2}{2EI\beta^2} M_t \quad (5.2)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kD}{4EI}} \quad (5.3)$$

ここで、 δ : クイ頭のクイ軸直角方向変位 (cm)

H : クイ軸直角方向力 (Kg)

M_t : クイ頭の外力モーメント (Kg・cm)

E : クイの弾性定数 (Kg/cm²)

I : クイの断面 2 次モーメント (cm⁴)

k : 横方向地盤反力係数 (Kg/cm³)

h : H , M_t の作用する地上高 (cm)

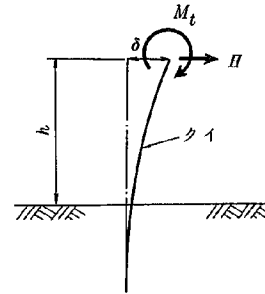


図 5-2 実用計算式のクイモデル

これら、(5.2)式、(5.3)式に本実験での測定値を代入して β および k の値を算出すると、 $\beta = 0.068 \text{ cm}^{-1}$ 、 $k = 3.53 \text{ Kg/cm}^3$ となる。ここで、クイ模型の地中部分の長さ ℓ は 50 cm であるから、 $\beta \ell = 3.4 > 3$ となり、本実験でのクイ模型は無限長の柔な基礎の条件を満足しているものと考えられる。また、 $k \cdot D$ (D はクイ径 = 3 cm) の値と地盤の弾性定数 E ($= 7.3 \text{ Kg/cm}^2$) の比をとれば、 $k \cdot D / E = 1.5$ となる。

群グイの場合のバネ係数は、複数のクイが近接していることによる影響 (群グイ効果) によって単グイの場合のバネ係数を本数倍した値とは異なっている。

単グイの場合の荷重と変位の関係は次のように表わされる。

$$\delta = aP \quad (5.4)$$

または、

$$P = K\delta \quad (5.5)$$

ここで、 δ : 変位 (cm)

P : 荷重 (Kg)

a : 変位影響係数 (cm/Kg)

K : バネ係数 (Kg/cm)

$$K = a^{-1}$$

一方、群グイの場合の荷重と変位の関係は次のように表わされる。

(a) フーチングの無い状態の荷重と変位の関係

$$\{ \delta \} = [A] \{ P \} \quad (5.6)$$

または、

$$\{ P \} = [K] \{ \delta \} \quad (5.7)$$

ここで、 $\{ \delta \}$: 変位ベクトル

$\{ P \}$: 荷重ベクトル

$[A]$: 変位影響係数マトリックス

$[K]$: バネ係数マトリックス (剛性マトリックス)

$$[K] = [A]^{-1} \quad (5.8)$$

(b) フーチングによるクイ頭の拘束条件

$$\delta_1 = \dots = \delta_i = \dots = \delta_n = \delta^* \quad (5.9)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P^* \quad (5.10)$$

ここで、 δ_i : 変位ベクトル $\{ \delta \}$ の i 要素 (cm)

P_i : 荷重ベクトル $\{ P \}$ の i 要素 (Kg)

δ^* : 群グイの変位 (cm)

P^* : 群グイに作用する荷重 (Kg)

(5.7) 式, (5.9) 式より,

$$P_i = \left(\sum_{j=1}^n K_{ij} \right) \cdot \delta^* \quad (5.11)$$

$$P^* = \sum_{i=1}^n P_i = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n K_{ij} \right) \cdot \delta^* = K^* \cdot \delta^* \quad (5.12)$$

ここで、 K_{ij} : 剛性マトリックス $[K]$ の (i, j) 要素 (Kg/cm)

(5.12) 式より、群グイバネ係数 K^* は次式で表わされる。

$$K^* = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n K_{ij} \quad (5.13)$$

また、 i グイの反力分担率 β_i は次のようになる。

$$\beta_i = \frac{P_i}{P^*} = \frac{\sum_{j=1}^n K_{ij}}{K^*} \quad (5.14)$$

群グイ効果を、群グイ全体としてのバネ係数の低下率 α_0 で定義すると次のようになる。

$$\alpha_0 = \frac{K^*}{n K_s} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n K_{ij}}{n K_s} \quad (5.15)$$

ここで、 K_s : 単グイとしてのバネ係数 (Kg/cm)

n : クイ本数

また、各グイのバネ係数の低下率 α_i は (5.11) 式から次のようになる。

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n K_{ij}}{K_s} \quad (5.16)$$

フーチングでクイ頭を固定した本実験での群グイバネ係数の実測値は $K^* = K_G = 5.22 \text{ Kg/cm}$ であり、一方クイ頭固定状態の単グイのバネ係数は、(5.3)式より求めた β の値 (0.068 cm^{-1}) を Chang の方法の実用計算式 $K = (12EI\beta^3) / \{(1+\beta h)^3 + 2\}$ に代入して求めると $K_g = 2.26 \text{ Kg/cm}$ となる。よって本実験で実測された群グイ効果は次のようになる。

$$\alpha_0 = \frac{K^*}{n K_g} = \frac{5.22}{4 \times 2.26} = 0.58 \quad (5.17)$$

すなわち、群グイ効果によって単グイのバネ係数に本数を掛けた値に比べて群グイの全体としてのバネ係数は 0.58 倍と小さな値となっている。

次に、クイ頭を固定しない状態で行った静的載荷試験の測定値から群グイ効果について考察すると次のようになる。まず、荷重 P と変位 δ の実測値から変位影響係数マトリックス $[A]$ と剛性マトリックス $[K]$ を求めると、

$$A = \begin{bmatrix} 0.149 & 0.020 & 0.008 & 0.011 \\ 0.021 & 0.148 & 0.010 & 0.009 \\ 0.009 & 0.010 & 0.149 & 0.021 \\ 0.010 & 0.008 & 0.020 & 0.150 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$K = A^{-1} = \begin{bmatrix} 6.9 & -0.9 & -0.3 & -0.4 \\ -0.9 & 6.9 & -0.4 & -0.3 \\ -0.3 & -0.4 & 6.9 & -0.9 \\ -0.4 & -0.3 & -0.9 & 6.8 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

となり、次のようなクイ頭の変位拘束条件と外力条件を考えて群グイバネ係数を算出すると、

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta^* \quad (5.20)$$

$$\sum_{i=1}^4 P_i = P^* \quad (5.21)$$

$$K^* = \frac{P^*}{\delta^*} = \sum_{i=1}^4 K_{ii} = 21 \text{ (Kg/cm)} \quad (5.22)$$

となる。(5.22)式の K^* の値は、クイ頭において(5.20)のような変位の拘束条件を満足しているが回転に対しては自由であるような状態、すなわちクイ頭がフーチングにヒンジ結合されている場合の値である。このような場合の群グイ効果は次のようになる。

$$\alpha_0 = \frac{K^*}{n K_g} = \frac{21}{4 \times 6.0} = 0.88 \quad (5.23)$$

クイ頭がフーチングにヒンジ結合されている場合を想定した場合も、群グイ効果によって単グイのバネ係数に本数を掛けた値に比べて群グイ全体としてのバネ係数は 0.88 倍と小さな値となっているが、その低下の度合いはクイ頭がフーチングに固定結合されている場合に比べると小さくなっている。

5.2 実験 2

実験 2 では図 5-3 のような方法でクイ頭に水平力 P を載荷し、クイ頭の水平変位 δ を測定した。その時の P と δ の関係を図 5-6 に示している。

$3 < \beta \ell$, $1 < \beta \ell \leq 3$ のクイ模型の K 値は P_2 と δ_2 の値を用いて (5.1) 式より求め、その結果を表 5

-2に示しているが、 $\beta\theta \leq 1$ のクイ模型については剛的に変形するものと考えて次のようにして静的バネ係数を求めた。

模型地盤中に設置された剛体基礎模型の復元力特性を基礎底面中央に想定したバネ K_B で表わすと、 K_B は一般に4要素バネとなり次の関係式を満足する。

$$\begin{Bmatrix} P_B \\ M_B \end{Bmatrix} = K_B \begin{Bmatrix} \delta_B \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (5.24)$$

$$K_B = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

ここで、 P_B ：基礎底面での水平力(Kg)

M_B ：基礎底面での曲げモーメント(Kg・cm)

δ_B ：基礎底面の水平変位(cm)

θ ：基礎の回転角(rad)

荷重 P が高さ h_1 、 h_2 に作用したときの変形を (δ_{B1}, θ_1) 、 (δ_{B2}, θ_2) とすると、(5.25)式の K_B の各要素は次式で求まる。

$$\left. \begin{aligned} K_{11} &= \kappa (\theta_2 - \theta_1) \\ K_{12} &= \kappa (\delta_{B1} - \delta_{B2}) \\ K_{21} &= \kappa (\theta_2 h_1 - \theta_1 h_2) \\ K_{22} &= \kappa (\delta_{B1} h_2 - \delta_{B2} h_1) \\ \kappa &= \frac{P}{\delta_{B1} \theta_2 - \delta_{B2} \theta_1} \end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

ここで、4要素バネ K_B はバネ作用点Oを適当にとることによって2要素バネ K_O に変換できる。そこで(5.24)式を点Oでの関係式に変換すると、

$$\begin{Bmatrix} P_O \\ M_O \end{Bmatrix} = K_O \begin{Bmatrix} \delta_O \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (5.27)$$

$$K_O = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} - K_{11} h_O \\ K_{21} - K_{11} h_O & K_{22} - (K_{12} + K_{21}) h_O + K_{11} h_O^2 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

ここで、 P_O ：O点での水平力(Kg)

M_O ：O点での曲げモーメント(Kg・cm)

δ_O ：O点の水平変位(cm)

θ ：基礎の回転角(rad)

h_O ：基礎底面からO点までの高さ(cm)

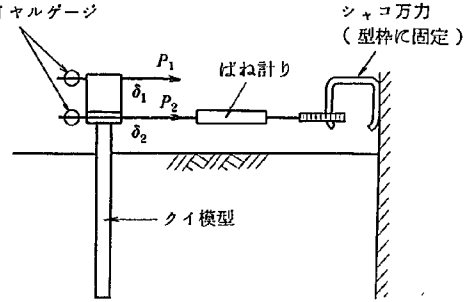


図5-3 静的バネ係数の測定 (実験2)

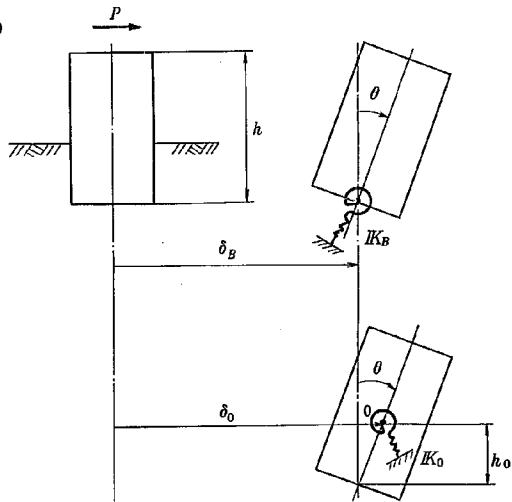


図5-4 剛性基礎の復元力特性モデル

(5.20)式において，対角要素以外の要素が0となるような h_0 を求めると，

$$h_0 = \frac{K_{12}}{K_{11}} = \frac{K_{21}}{K_{11}} \quad (5.29)$$

となり，(5.29)式を満足するような点Oでは(5.28)式は次のように表わすることができる。

$$K_0 = \begin{bmatrix} K_h & 0 \\ 0 & K_r \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

ここで， $K_h = K_{11}$

$$K_r = K_{22} - (K_{12} + K_{21})h_0 + K_{11}h_0^2$$

以上の式に実験測定値を代入して求めたバネ係数を表5-2に示している。

表5-2 静的載荷試験より求めた静的バネ係数(実験2)

クイ模型	静 的 バ ネ 係 数
$3 < \beta \ell$	$K = 1.25 \text{ Kg/cm}$
$1 < \beta \ell \leq 3$	$K = 3.33 \text{ Kg/cm}$
$\beta \ell \leq 1$	$K_h = 2.69 \times 10^2 \text{ Kg/cm} \quad K_r = 3.08 \times 10^4 \text{ Kg} \cdot \text{cm/rad} \quad h_0 = 2.07 \text{ cm}$

次に，(5.2)式，(5.3)式を用いて $3 < \beta \ell$ および $1 < \beta \ell \leq 3$ のクイ模型の β および横方向地盤反力係数 k を求めると表5-3のようになる。

表5-3 クイ模型の β と k の値(実験2)

クイ模型	β ($1/\text{cm}$)	$\beta \ell$	k (Kg/cm^2)	$k \cdot D$ (Kg/cm^2)
$3 < \beta \ell$	0.140	4.20	2.23	2.23
$1 < \beta \ell \leq 3$	0.088	2.64		

ここで， $3 < \beta \ell$ のクイ模型は $\beta \ell = 4.20$ ， $1 < \beta \ell \leq 3$ のクイ模型は $\beta \ell = 2.64$ と当初の予測より大きめの値となっているが，それぞれ無限長の柔な基礎の条件($3 < \beta \ell$)，有限長の柔な基礎の条件($1 < \beta \ell \leq 3$)を満足している。また， $k \cdot D$ (D はクイ幅 $= 10 \text{ cm}$)の値と地盤の弾性定数 E ($= 6.8 \text{ Kg/cm}^2$)の比をとれば， $k \cdot D/E = 3.3$ となる。本実験ではクイと地盤の付着が強いために地盤反力がクイの両面に作用し， $k \cdot D/E$ の値が大きくなっているものと考えられる。

実験1 群グイ P_1 载荷 (フーチング無)

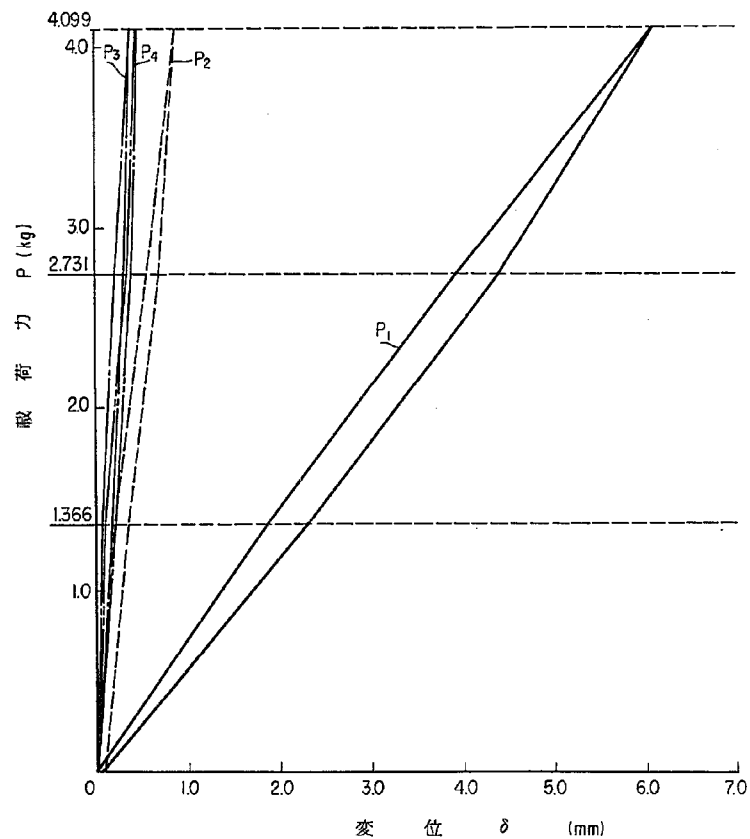
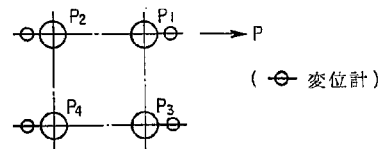


図5-5-1 静的载荷試験による P と δ の関係 (R_1 グイ)

実験1 群グイ P_2 载荷 (フーチング無)

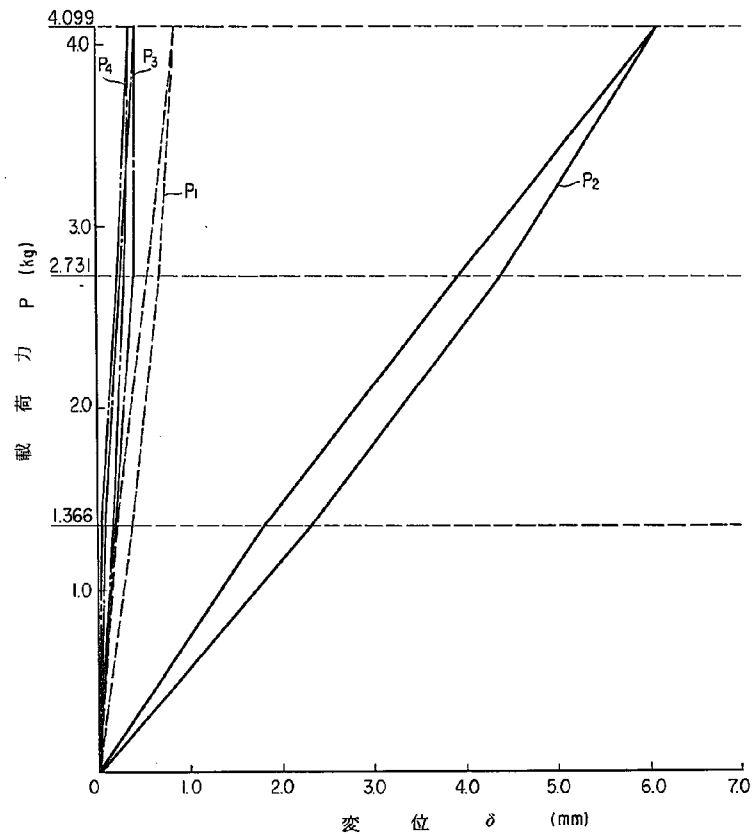
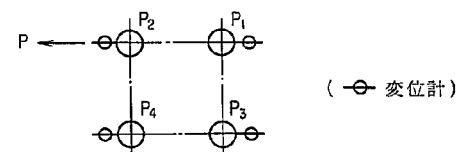


図5-5-2 静的载荷試験による P と δ の関係 (R_2 グイ)

実験 1 群グイ P_3 载荷 (フーチング無)

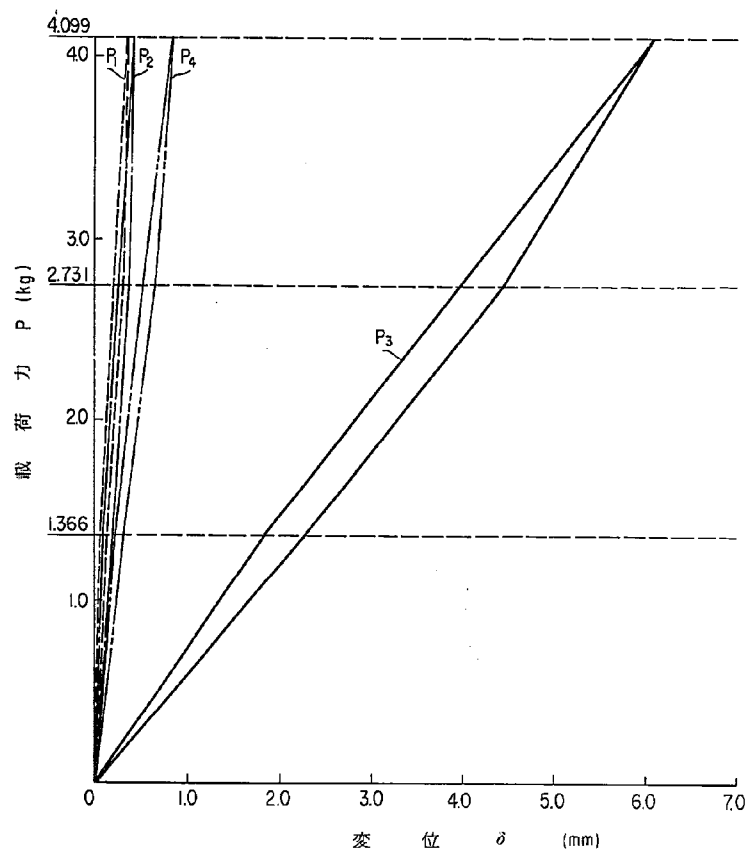
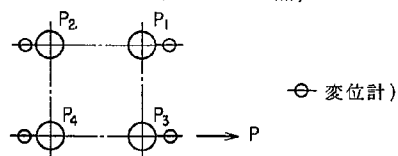


図 5-5-3 静的载荷試験による P と δ の関係 (P_3 グイ)

実験 1 群グイ P_4 载荷 (フーチング無)

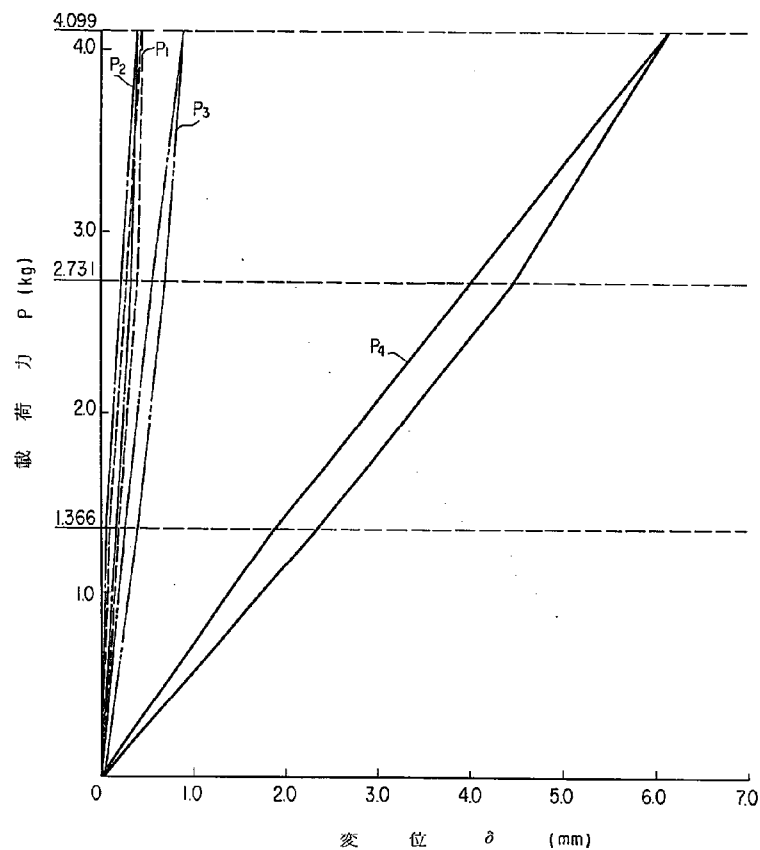
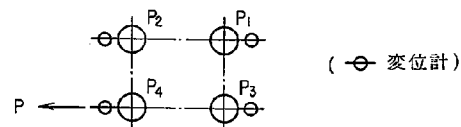


図 5-5-4 静的载荷試験による P と δ の関係 (P_4 グイ)

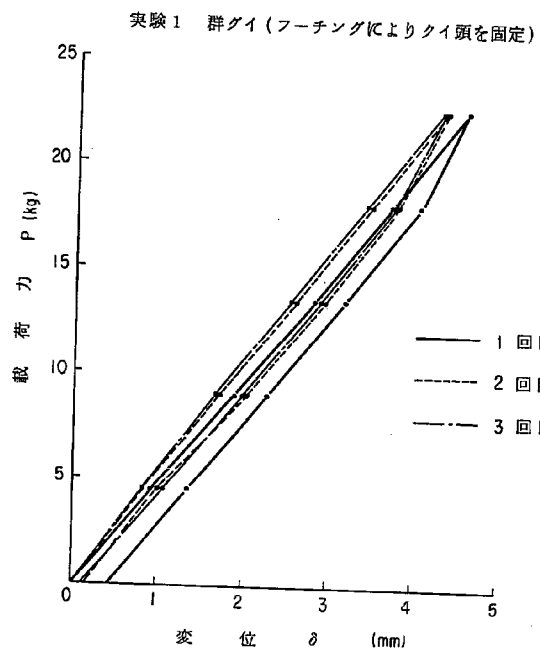


図 5-5-5 静的載荷試験による P と δ の関係 (4 本グイ)

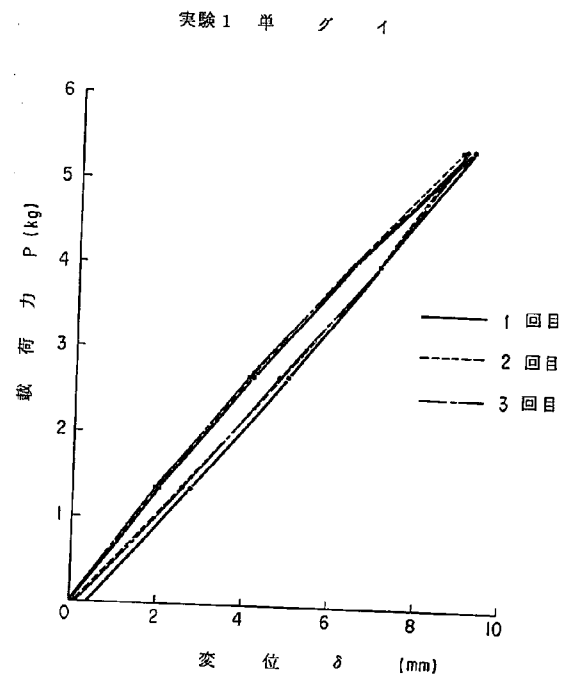


図 5-5-6 静的載荷試験による P と δ の関係 (単グイ)

実験 2 $3 < \beta l$ モデル (P_1 載荷)

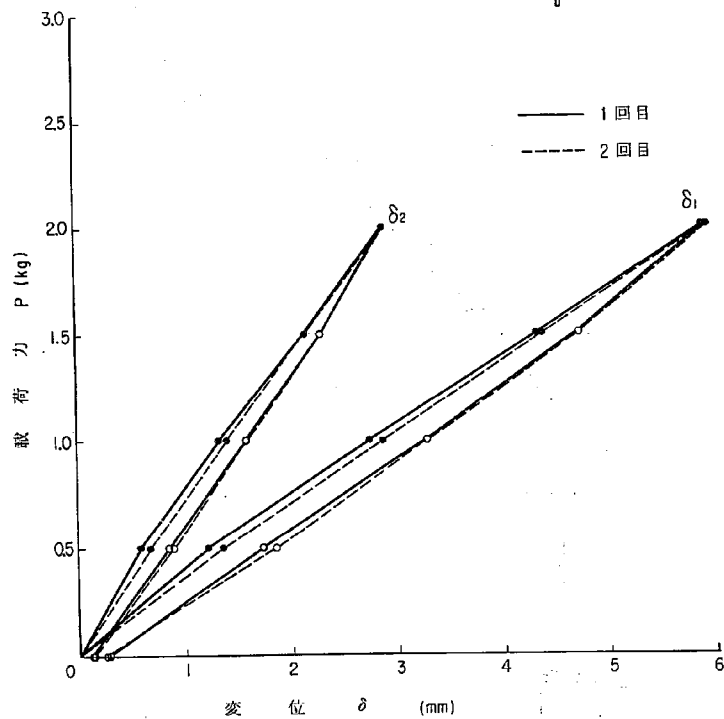
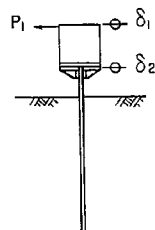


図 5-6-1 静的載荷試験による P と δ の関係 ($3 < \beta l$)

実験 2 $3 < \beta l$ モデル (P_2 載荷)

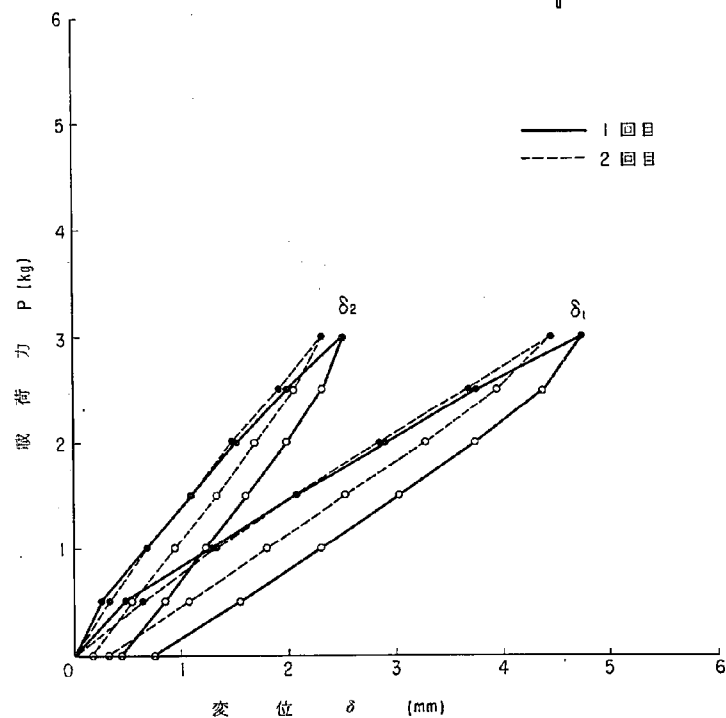
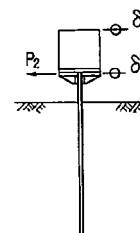


図 5-6-2 静的載荷試験による P と δ の関係 ($3 < \beta l$)

実験 2 $1 < \beta L \leq 3$ モデル (P_1 载荷)

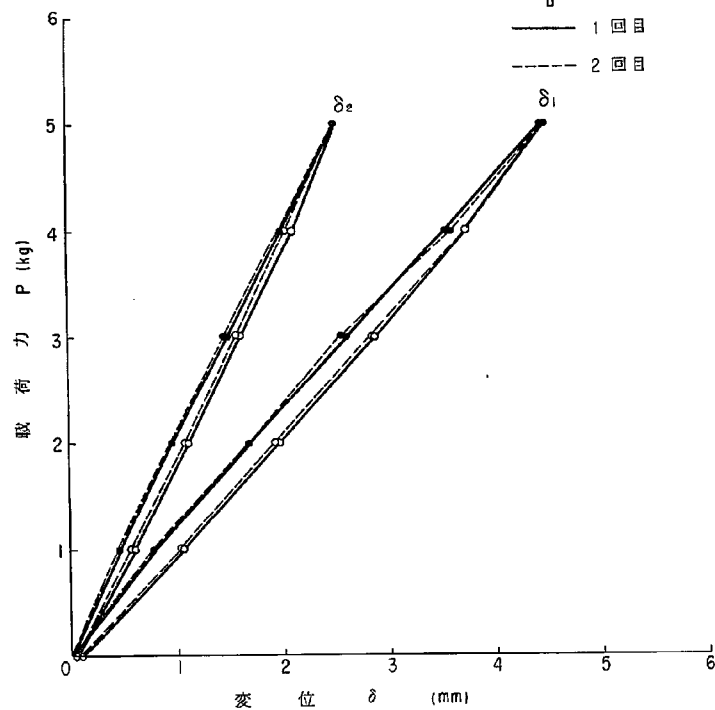
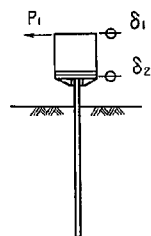


図 5-6-3 静的载荷試験による P と δ の関係 ($1 < \beta L \leq 3$)

実験 2 $1 < \beta L \leq 3$ モデル (P_2 载荷)

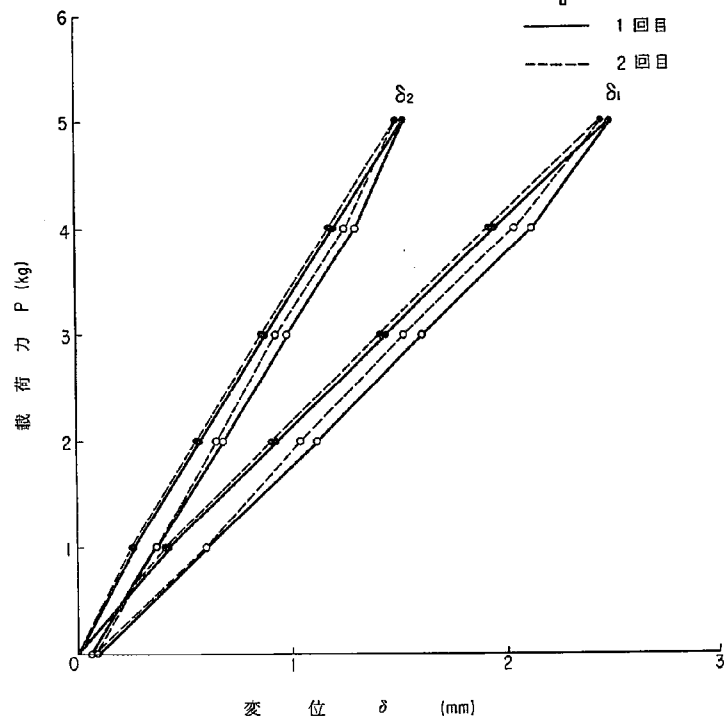
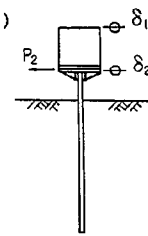


図 5-6-4 静的载荷試験による P と δ の関係 ($1 < \beta L \leq 3$)

実験2 $\beta l \leq 1$ モデル (P_1 载荷)

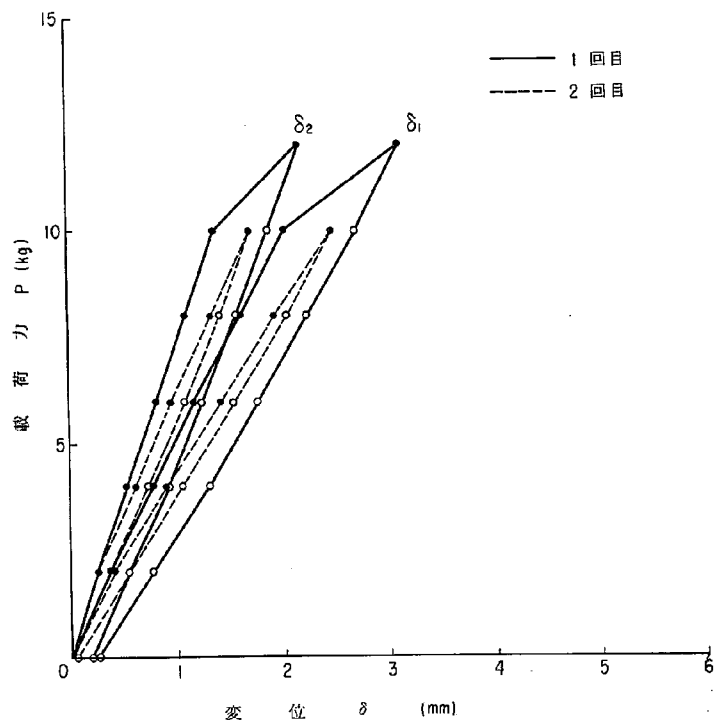
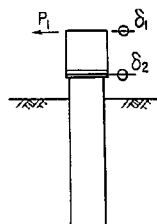


図5-6-5 静的载荷試験による P と δ の関係 ($\beta l \leq 1$)

実験2 $\beta l \leq 1$ モデル (P_2 载荷)

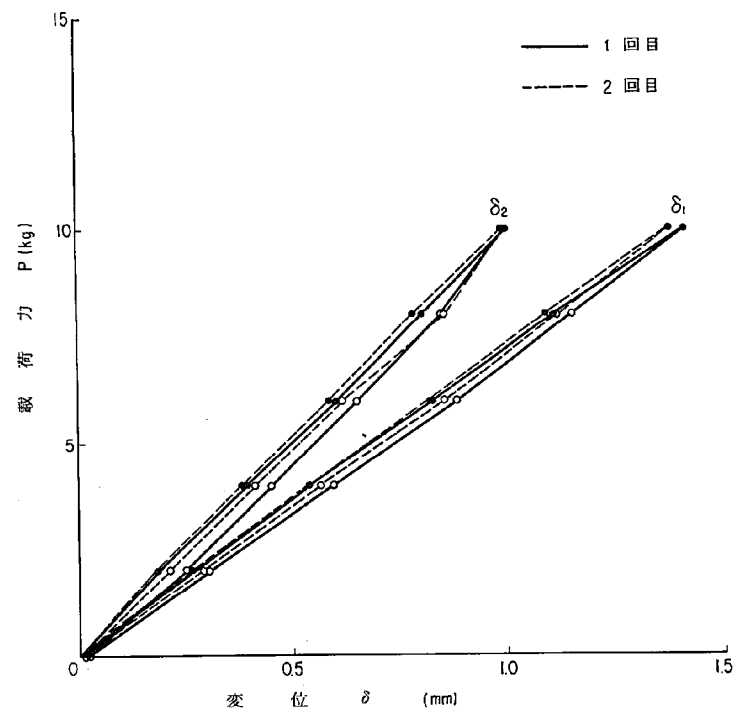
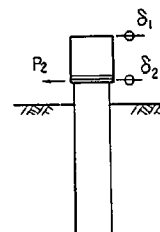


図5-6-6 静的载荷試験による P と δ の関係 ($\beta l \leq 1$)

6. 振 動 実 験

地盤—クイ基礎系の動的特性を調べるために、加振台からの正弦波加振試験および加振台からの衝撃力入力もしくはクイ頭打撃による自由振動試験を行った。正弦波加振試験では入力振動数を段階的に変化させて地盤—クイ基礎系の応答を測定し、地盤の振動がクイ基礎の振動に与える影響、また逆にクイ基礎の振動が地盤の振動に与える影響、いわゆる地盤とクイ基礎の動的相互作用について調査した。また、自由振動試験では自由振動数と減衰定数を測定し、地盤—クイ基礎系の振動減衰特性等を調査した。

6.1 正弦波加振試験

(1) 実験 1

実験 1 では入力振動数の範囲を $4 \sim 25\text{Hz}$ とし、 0.5Hz きざみ（共振点付近は 0.25Hz きざみ）で入力振動数を変えて図 6-1 に示した各測点の応答加速度を測定した。なお、群グイ実験時には単グイの載荷重を取り去り、単グイ実験時には群グイの載荷重を取り去って実験を行っている。その結果得られた加速度応答波形の例としてクイ頭重量が 15Kg （呼称）の群グイのクイ基礎の 1 次共振点付近と地盤の 1 次共振点付近の波形を図 6-2 に示しており、応答加速度の測定値にもとづいて各測点の加速度と加振台の加速度の振幅の比で表わした共振曲線と各測点の加速度の加振台の加速度に対する位相遅れで表わした位相曲線を図 6-3 に示している。なお、本実験では地盤模型の振動減衰が非常に小さく共振点で共振曲線が鋭く立ち上がり、正確な応答倍率を捉えることは困難であるため共振曲線の応答の大きな共振点付近は無限大表示をしている。また、地盤の振動とクイ基礎の振動の連成関係を調べるためにクイの応答加速度と地盤の応答加速度の振幅の比と位相差を求めて図 6-4 に示しており、クイ基礎が地盤の振動に与える影響を調べるためにクイ基礎がある場合の地盤の応答加速度と地盤のみの場合の地盤の応答加速度の振幅の比と位相差を求めて図 6-5 に示している。

本実験では、クイ頭の共振曲線（ $5 \sim 20\text{Hz}$ ）に地盤の共振点とクイの共振点でピークがはっきりと現われている。しかしながら、 20Hz よりも高振動数側にはせん断振動系としての地盤の共振以外の型枠の影響によるピークが現われているため、 $5 \sim 20\text{Hz}$ の範囲に着目して地盤—クイ基礎系の振動特性を検討することにした。群グイ 0Kg （クイ頭重量）モデルは地盤の共振点よりも約 5Hz 高い所にクイ基礎の共振点があり、固有振動数が地盤よりも高いクイ基礎に相当するモデルであり、他のモデルは群グイ 15Kg モデルが約 5Hz 、群グイ 30Kg モデルが約 6Hz 、単グイ 15Kg モデルが約 5Hz それぞれ地盤の共振点よりも低い所にクイ基礎の共振点のあるモデルである。各々のモデルについて、図 6-3 に示した共振曲線と位相曲線から次のようなことが言える。

ia. 地盤のみのモデル（図 6-3-5）

実験の対象とした $4 \sim 25\text{Hz}$ の振動数範囲内で、 12Hz と 20Hz に共振状態のピークが現われている。地盤模型の弾性定数 E は $7.3\text{Kg}/\text{cm}^2$ であり、層厚 50cm の場合のせん断振動の 1 次共振振動数は

地盤が水平方向に無限に連続している場合は $f_0 = 7.7 \text{ Hz}$ となるが、本実験では地盤模型は四方の側面を型枠で固定しているため 1 次共振振動数が高くなっているものと考えられる。地盤模型の加振方向の長さ L と層厚 H の比は $L/H = 150 \text{ cm} / 50 \text{ cm} = 3$ であり、周辺境界が固定されている場合の 1 次共振振動数 f は 2 次元 F.E.M. で推定すると図 3-3 に示したように $f/f_0 = 1.5$ であるから $f = 12 \text{ Hz}$ となる。したがって、共振曲線に現われる 12 Hz のピークは型枠の影響を受けた地盤のせん断 1 次共振振動と考えられる。一方、せん断振動系としての 2 次共振振動数は $12 \text{ Hz} \times 3 = 36 \text{ Hz}$ であり、 20 Hz に見られるピークはせん断振動系以外の型枠の影響による共振振動と考えられるため、 20 Hz の共振振動については検討の対象から除外した。

5 ～ 20 Hz の範囲では各測点間で位相のずれは見られず、この範囲では地盤全体がほぼ一様なせん断振動をしているものと考えられる。

b. 群グイ 0 Kg モデル (図 6-3-1)

共振曲線には $12 \sim 13 \text{ Hz}$ と $17 \sim 18 \text{ Hz}$ にピークが現われており、前者は地盤の共振振動、後者はクイ基礎の共振振動にもついたものと考えられる。 $12 \sim 13 \text{ Hz}$ の地盤の共振点前後で地盤およびクイ基礎の各測点の位相は入力に対して一様に $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$ の遅れをたどり、この共振点付近では地盤の共振振動によってクイ基礎が強制的に変形を受けているものと推察できる。一方、 $17 \sim 18 \text{ Hz}$ のクイ基礎の共振点付近では地盤の測点 A_2 、 A_3 はクイ基礎の共振振動の影響を受けてピークを示しているがその振動振幅はクイ基礎の測点 G_1 、 G_2 、 G_3 に比べて小さく、また位相を見るとクイ基礎の各測点は入力に対して一様に $-180^\circ \rightarrow -90^\circ \rightarrow 0^\circ$ (または $180^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 360^\circ$) の位相遅れをたどっているが、地盤の地中部 A_2 は地盤のみの場合の位相変化と大差はなく、地表部 A_3 はクイ基礎の影響を受けた位相変化を示している。すなわち、クイ基礎の共振点付近ではクイ基礎は深さ方向にほぼ同位相の共振を行い、地盤は地表面付近がクイ基礎の影響を受けた振動を行うものと考えられる。

c. 群グイ 15 Kg (図 6-3-2)

共振曲線には 9 Hz 付近と $13 \sim 14 \text{ Hz}$ にピークが現われており、前者はクイ基礎の共振振動、後者は地盤の共振振動にもついたものと考えられる。 9 Hz 付近のクイ基礎の共振点前後でクイ基礎の各測点の位相は入力に対して一様に $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$ の遅れをたどるが、地盤の測点は地表面 A_3 で $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$ の位相遅れをたどった後 10 Hz 付近で再び 0° にもどり、地中部の A_2 の位相変化は小さい。このことから地盤の地表面付近でクイの共振振動の影響を受けた振動が生じ、地盤の地中部はその影響が小さいものと考えられる。一方、 $13 \sim 14 \text{ Hz}$ の地盤の共振点の前後ではクイ基礎の地中部 G_2 は地盤と同様に入力に対して $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$ の位相遅れをたどっているが、クイ頭 G_1 は地盤地表面に対して 180° の位相遅れを示し地盤とは異なった独自の振動をしているものと考えられる。

クイ基礎の各測点の位相の変化を見ると、クイ頭 G_1 は 9 Hz 付近のクイ基礎の共振点より高振動数側において地盤に対して常に 180° の位相遅れを示しているが、クイ地表部 G_3 は $13 \sim 14 \text{ Hz}$ の地盤の共振点より高振動数側、クイ地中部 G_2 は 10 Hz より高振動数側で地盤と同じ位相となっている。これらのことから、クイ基礎の地中部は地盤振動に支配された振動系、クイ頭は地盤とは独立な振動系となっているものと考えられる。

d. 群グイ 30Kg モデル (図 6-3-3)

共振曲線には 6~7 Hz と 13~14 Hz にピークが現われており、前者はクイ基礎の共振振動、後者は地盤の共振振動にもつづいたものと考えられる。このモデルは群グイ 15Kg モデルと同様に、クイ頭 G_1 は 6~7 Hz のクイ基礎の共振点より高振動数側において地盤に対して 180° の位相遅れを示し、クイの地中部 G_2 および地表部 G_3 は 11~12 Hz より高振動数側で地盤と同じ位相となっている。すなわち、クイ基礎の地中部は地盤振動に支配された振動系、クイ頭は地盤とは独立な振動系となっているものと考えられ、その傾向は群グイ 15Kg モデルよりも顕著である。

e. 単グイ 15Kg モデル (図 6-3-4)

共振曲線には 8 Hz 付近と 13 Hz 付近にピークが現われており、前者はクイ基礎の共振振動、後者は地盤の共振振動にもつづいたものと考えられる。このモデルは群グイ 15Kg モデルおよび群グイ 30Kg モデルと同様の傾向が最も顕著に現われている。また、地盤はクイ基礎の共振点付近においても共振曲線、位相曲線にほとんど変化が見られず、クイ基礎の共振振動が地盤の振動に与える影響は小さいものと考えられる。

図 6-4 はクイ基礎の応答加速度 G_i (もしくは S_i) と地盤の応答加速度 A_i の振幅比 G_i/A_i (もしくは A_i/A_i) と位相差 $\delta_{G_i} - \delta_{A_i}$ (もしくは $\delta_{S_i} - \delta_{A_i}$) を図示したものであるが、位相のずれがない (位相差 = 0°) 場合は地盤とクイが一体となって運動しており、振幅比 = 1 では両者の応答振幅が等しいことを示している。逆に、位相のずれが大きいほど、また振幅比が 1 から離れるほどクイ基礎は地盤に対して独立した運動をしていることになる。群グイ 0 Kg モデル (図 6-4-1) を見ると、17~18 Hz のクイ基礎の共振点より低振動数側ではクイ基礎 G_1 , G_2 , G_3 と地盤 A_2 , A_3 の位相差はほぼ 0 で同位相の運動をしており、振幅比も $1/2 \sim 3$ 程度の範囲にあり、クイ基礎は地中部、地上部ともに地盤の動きに支配された挙動を示している。しかしながら、クイ基礎の共振点ではクイ基礎の地中部、地上部はともに地盤に対する応答加速度の振幅比が大きくなり、位相差も大きくなってクイ基礎全体が地盤とは異なった運動をしている。一方、群グイ 15Kg (図 6-4-2)、群グイ 30Kg (図 6-4-3)、単グイ 15Kg (図 6-4-4) の各モデルでは、クイ頭 G_1 はクイ基礎の共振点より高振動数側で地盤地表部 A_3 に対して常に 180° の位相遅れを生じているが、クイ地中部 G_2 および地表部 G_3 はクイ基礎の共振点付近で地盤 A_2 , A_3 と位相のずれを生じるがより高振動数側では地盤と同位相の運動をしており、クイ頭部だけが独立した 1 自由度系力学モデルに近い挙動を示している。この傾向は単グイ 15Kg モデル、群グイ 30Kg、群グイ 15Kg の順に強い。これらのことから、地盤とクイ基礎頭部の連成関係は群グイよりも単グイの方が弱く、またクイ頭重量が大きいほど弱くなるものと考えられる。

図 6-5 は地盤地表部の応答加速度 (A_3 , A_3^*) とクイ基礎地表部の応答加速度 (G_3 , G_3^*) のクイ基礎がある場合 (A_3 , G_3) と地盤のみの場合 (A_3^* , G_3^*) の振幅比 (A_3/A_3^* , G_3/G_3^*) と位相差 $\delta_{A_3} - \delta_{A_3^*}$, $\delta_{G_3} - \delta_{G_3^*}$) を図示し、クイ基礎が地盤の振動に与える影響を示したものである。この図で振幅比 A_3/A_3^* もしくは G_3/G_3^* が 1 から離れるほど、また位相差 $\delta_{A_3} - \delta_{A_3^*}$ もしくは $\delta_{G_3} - \delta_{G_3^*}$ が大きくなるほどクイ基礎が地盤の振動に与える影響が大きい。この影響の度合いを地盤地表部 A_3 については A_3/A_3^* 、クイ基礎地表部 G_3 については図中の斜線部分の面積で表わしたものを表 6-1

に示している。この表からわかるように、 A_3 に対する影響度は単グイよりも群グイの方が大きく、またクイ頭重量が大きいほど影響度が大きい。一方、 G_3 に対する影響度は単グイよりも群グイの方が大きく、またクイ頭重量が小さくクイ基礎と地盤の連成関係が強いほど影響度が大きくなっている。

表 6-1 クイ基礎の共振振動が地盤の振動に与える影響(実験 1)

模 型		A_3 への影響度 (A_3/A_3^*)	G_3 への影響度 (図 6-5 の斜線部分の面積)
群 グ イ	0 Kg	2.2	6.5
	1.5 Kg	3.5	5.1
	3.0 Kg	6.0	3.9
単 グ イ	1.5 Kg	1.5	2.3

注 A_3 、 G_3 はクイ基礎がある場合の応答加速度、 A_3^* 、 G_3^* はクイ基礎のない地盤のみの場合の応答加速度を示している。

表 6-2 は静的載荷試験、正弦波加振試験および自由振動試験の各試験結果から推定されるクイ基礎の共振振動数の比較と、物性試験および正弦波加振試験から推定される地盤の共振振動数の比較を示したものであるが、各値は 10% 以内で一致している。また、図 6-6 は静的載荷試験から求めたクイ頭の静的バネ係数とクイ頭重量で決定される 1 自由度系としてのクイ基礎の固有振動数、物性試験から求めた地盤の弾性定数から算定した固有振動数を地盤周辺の境界条件を考慮した 2 次元 F.E.M. によって補正した地盤の固有振動数、正弦波加振試験でのクイ基礎および地盤の共振振動数をクイ頭重量との対応で図示したものであるが、正弦波加振試験での各クイ基礎の共振振動数は 1 自由度系としての固有振動数にはほぼ一致しており、また地盤の共振振動数はクイ基礎のクイ頭の変化にも拘らずその変動は 10% 以内となっている。これらのことから、本実験では地盤の共振振動数を変化させてしまうほどの地盤とクイ基礎の連成状態は生じていなかったものと考えられる。

以上、正弦波加振試験の結果をまとめると次のようになる。

- (i) 地盤の 1 次共振振動数 (1.20 Hz) は型枠の影響を受けて 1 次元せん断振動としての共振振動数 (7.7 Hz) よりも 1.5 倍程度の高振動数側に現われたが、周辺固定の境界条件を考えた 2 次元 F.E.M. によって推定される共振振動数 (11.5 Hz) とほぼ一致する。また、地盤の各測点間の位相のずれは少なく地盤全体がほぼ一様な振動をしているものと考えられる。
- (ii) クイ頭の共振曲線は、地盤とクイ基礎のそれぞれの共振点でピークを示した。また、クイ基礎の共振振動数は静的載荷試験で求めたクイ頭の静的バネ定数とクイ頭重量から決定される 1 自由度系としての固有振動数、および自由振動試験から求めた自由振動数によく一致している。
- (iii) 地盤の共振振動数はクイ基礎の存在により多少変化した、その変動は 10% 以内であった。
- (iv) クイ基礎の共振点が地盤の共振点よりも低振動数側にある模型 (群グイ 1.5 Kg モデル、群グイ 3.0 Kg モデル、単グイ 1.5 Kg モデル) では、クイ基礎の共振点よりも高振動数側においてクイ頭のみが地盤と位相のずれを生じた独立した運動を示し、クイ地中部は地盤と同位相の挙動をする傾向にあった。この傾向は、群グイよりも単グイの方が強く、またクイ頭重量が大きいほど強く

現われている。一方、地盤の共振点よりも高振動数側に共振点のある群グイ 0 Kg モデルではクイ基礎の共振点よりも低振動数側においてクイ全体が地盤と同位相の運動をし、クイ基礎の共振点よりも高振動数側では地盤とは異なる位相を示すが、この場合のクイ頭およびクイ地中部はともに同一の位相特性を示している。すなわち、単グイ 15 Kg モデル、群グイ 30 Kg モデル、群グイ 15 Kg モデルのクイ頭の挙動は地表面に仮想境界を持ち、地盤の運動を入力と考えた 1 自由度系モデルの挙動に近いものと考えられるが、群グイ 0 Kg モデルの挙動はこのような 1 自由度系モデルでは表現しにくいものと考えられる。

- (V) クイ基礎が地盤の振動に与える影響は単グイよりも群グイが強く、またクイ頭重量が大きいほど強いものと考えられる。

(2) 実験 2

実験 2 では入力振動数の範囲を 5～25 Hz とし、0.2 Hz きざみで入力振動数を変えて図 6-7 に示した各測点の応答加速度を測定した。その結果から、応答加速度の測定値にもとづいて各測点の加速度と加振台の加速度の振幅の比で表わした共振曲線と各測点の加速度の加振台の加速度に対する位相遅れで表わした位相曲線を図 6-8 に示している。なお、本実験では実験 1 と同様に地盤模型の振動減衰が非常に小さく共振点で共振曲線が鋭く立ち上り、正確な応答倍率を捉えることは困難であるため共振曲線の応答の大きな共振点付近は無限大表示をしている。また、地盤の振動とクイ基礎の振動の連成関係を調べるために、クイの応答加速度と地盤の応答加速度の振幅の比と位相差を求めて図 6-9 に示している。

本実験では、実験 1 と同様にクイ頭の共振曲線 (5～20 Hz) に地盤の共振点とクイ基礎の共振点でピークが現われている。しかしながら、20 Hz よりも高振動数側にせん断振動系としての地盤の共振以外の型枠の影響によるピークが現われているため、5～20 Hz の範囲に着目して地盤—クイ基礎系の振動特性を検討することにした。 $3 < \beta\theta$ モデルは地盤の共振点よりも約 3 Hz 低い所にクイの共振点があり、 $1 < \beta\theta \leq 3$ モデルは約 2 Hz、 $\beta\theta \leq 1$ モデルは約 3 Hz それぞれ地盤の共振点よりも高い所にクイの共振点のあるモデルである。各々のモデルについて、図 6-8 に示した共振曲線と位相曲線から次のようなことが言える。

a. 地盤のみのモデル (図 6-8-4)

実験の対象とした 5～25 Hz の振動数範囲内で、12～13 Hz と 20～21 Hz に共振状態のピークが現われている。地盤模型の弾性定数 E は 6.8 Kg/cm であり、層厚 60 cm の場合のせん断振動の 1 次共振振動数は地盤が水平方向に無限に連続している場合は $f_0 = 6.2 \text{ Hz}$ となるが、本実験では実験 1 と同様に地盤模型の四方の側面を型枠で固定しているため、1 次共振振動数が高くなっているものと考えられる。地盤模型の側面境界条件を考慮した 2 次元 F.E.M. によって推定される 1 次共振振動数は 9.9 Hz であり、多少の差はあるが 12～13 Hz のピークは型枠の影響を受けた地盤のせん断 1 次共振振動と考えられる。一方、20～21 Hz に見られるピークはせん断振動系以外の型枠の影響による共振振動と考えられるため、20～21 Hz の共振振動については検討の対象から除外した。

5～19 Hz の範囲では各測点間で位相のずれは見られず、この範囲では地盤全体がほぼ一様な

せん断振動をしているものと考えられるが、19Hzよりも高振動数側では位相のずれが見られ、型枠の影響を受けた複雑な振動をしているものと考えられる。

b. $3 < \beta \ell$ モデル (図6-8-1)

共振曲線には9Hz、12Hz、17Hzにピークが現われており、9Hzのピークはクイ基礎の共振振動、12Hzのピークは地盤の共振振動にもとづいたものであり、17Hzのピークは型枠の影響を受けた振動によるものと考えられる。9Hzのクイ基礎の共振点の前後では、地盤の各測点(A_2, A_3, A_4)およびクイの地中部の測点(A_5, A_6)は入力と同位相であるのに対して、クイ頭 A_8 の位相は入力に対して $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$ 、クイ地表部 A_7 の位相は入力に対して $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 0^\circ$ の遅れをたどり、クイ基礎の地中部分は地盤と同じ動きをし、クイ頭部分のみが独自の動きをしている。一方、12Hzの地盤の共振点付近では地盤の各測点(A_2, A_3, A_4)およびクイの地中部、地表部の各測点(A_5, A_6, A_7)の位相は入力に対して $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$ 、クイ頭 A_8 は $180^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 360^\circ$ の遅れをたどり、地盤の共振振動によってクイ基礎が強制的に変形を受けているものと推察できる。

c. $1 < \beta \ell \leq 3$ モデル (図6-8-2)

共振曲線には11~12Hz、13~14Hz、17~18Hzにピークが現われており、11~12Hzのピークは地盤の共振振動、13~14Hzのピークはクイ基礎の共振振動にもとづいたものであり、17~18Hzのピークは型枠の影響を受けた振動によるものと考えられる。11~12Hzの地盤の共振点の前後では、地盤およびクイ基礎の各測点の位相は入力に対して一様に $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$ の遅れをたどり、地盤の共振点付近では地盤の共振振動によってクイ基礎が強制的に変形を受けているものと考えられる。一方、13~14Hzのクイ基礎の共振点付近では、地盤の各測点(A_2, A_3, A_4)およびクイの地中部の測点(A_5, A_6)の位相は入力に対してほぼ 180° 遅れたままであるのに対して、クイ頭 A_8 およびクイ地表部 A_7 の位相は入力に対して $180^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 360^\circ$ の遅れをたどり、クイの共振点付近ではクイの地中部分は地盤と同じ動きをし、クイ頭部分は地盤とは異なった独自の動きをしているものと考えられる。

d. $\beta \ell \leq 1$ モデル (図6-8-3)

共振曲線には11~12Hz、15Hz、19~20Hzにピークが現われており、11~12Hzのピークは地盤の共振振動、15Hzのピークはクイ基礎の共振振動にもとづいたものであり、19~20Hzのピークは型枠の影響を受けた振動によるものと考えられる。11~12Hzの地盤の共振点の前後では、地盤およびクイ基礎の各測点の位相は入力に対して一様に $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$ の遅れをたどり、地盤の共振点付近では地盤の共振振動によってクイ基礎も同様の振動を強制されているものと考えられる。一方、15Hzのクイ基礎の共振点付近では、地盤の各測点(A_2, A_3, A_4)およびクイの地中部 A_7 の位相は入力に対してほぼ 180° 遅れたままなのに対して、クイ頭 A_8 の位相は $180^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 180^\circ$ の遅れをたどり、クイ基礎は回転の卓越した振動モードを示している。

図6-9はクイ基礎の応答加速度と地盤の応答加速度の振幅比と位相差を図示したものである。3< $\beta \ell$ モデル(図6-9-1)を見ると、9Hzのクイ基礎の共振点付近でクイ頭 A_8 の地盤地表部 A_4 に対する振幅比は大きくなり、位相もそれより高振動数側で 180° の遅れとなり、地盤とは異なった

運動を示しているが、クイ地表部 A_7 は地盤地表部 A_4 に対して一度 90° の位相遅れが生じた後再び A_4 と同位相となり、地盤の動きに支配された挙動を示している。一方、クイ地中部 (A_5, A_6) の同じ深さの地盤地中部 (A_2, A_3) に対する振幅比はほぼ 1 でほとんど同位相となっており、5 ~ 15 Hz の範囲では地盤の動きに支配された運動を示している。なお、15 Hz より高振動数側では型枠の影響が現われているものと考えられ、振幅比および位相差は安定していない。 $1 < \beta \ell \leq 3$ モデル (図 6-9-2) では、13 ~ 14 Hz のクイ基礎の共振点付近まではクイ基礎全体が地盤と同位相の運動を示し、クイ基礎の共振点付近でクイ頭 A_8 およびクイ地表部 A_7 は地盤地表部 A_4 に対して振幅比が大きくなり、位相も 180° 近い遅れとなって地盤とは異なった独自の運動を示しているが、クイ地中部 (A_2, A_3) は同じ深さの地盤地中部 (A_2, A_3) と同位相で地盤と同様な運動を示している。また、 $\beta \ell \leq 1$ モデル (図 6-9-3) では、15 Hz のクイ基礎の共振点付近でクイ頭 A_8 は地盤 (A_2, A_3, A_4) に対して振幅比が大きくなり、 90° の位相遅れが生じているが、クイ地中部 A_7 は同じ深さの地盤地中部 A_2 よりも位相が進む傾向にあり、クイ基礎は回転の卓越した振動モードを示していると考えられる。なお、15 Hz よりも高振動数になると振幅比および位相差は不安定で型枠の影響で複雑な運動を示しているものと考えられる。これらのことから、 $3 < \beta \ell$ モデル、 $1 < \beta \ell \leq 3$ モデルではクイ基礎の地中部分の挙動は地盤の振動に支配され、クイ頭部分は地盤とは独立した 1 自由度系力学モデルに近い挙動を示し、 $\beta \ell \leq 1$ モデルではクイ基礎の共振点付近では回転の卓越した振動モードを示し、それより高振動数側では型枠の影響で複雑な挙動を示しているものと考えられる。

表 6-3 は静的載荷試験、正弦波加振試験および自由振動試験の各試験結果から推定されるクイ基礎の共振振動数の比較と、物性試験および正弦波加振試験から推定される地盤の共振振動数の比較を示したものである。正弦波加振試験でのクイ基礎の共振振動数は $\beta \ell \leq 1$ モデルを除いて、他の試験による推定値とほぼ 10 % 以内の差で一致している。 $\beta \ell \leq 1$ モデルでは、正弦波加振試験でのクイ基礎の共振振動数 (15.2 Hz) と自由振動試験での自由振動数 (15.7 Hz) は一致しているが、静的載荷試験から推定される共振振動数 (20 Hz) は一致していない。一方、正弦波加振試験での地盤の共振振動数は物性試験から推定される共振振動数よりもやや大きめの値となっている。また、クイ基礎がある場合の地盤の共振振動数は地盤のみの場合に比べてやや小さな値となっているが、クイ基礎の変化による変動は 10 % 以内となっている。

以上、正弦波加振試験の結果をまとめると次のようになる。

- (i) 地盤の 1 次共振振動数 (12.8 Hz) は型枠の影響を受けて 1 次元せん断振動としての共振振動数 (6.2 Hz) よりも 2.1 倍程度の高振動数側に現われており、周辺固定の境界条件を考えた 2 次元 F.E.M. によって推定される共振振動数 (9.9 Hz) よりもやや高振動数側に現われている。一方、地盤の各測点間の位相のずれは少なく地盤全体がほぼ一様な振動をしているものと考えられる。
- (ii) クイ頭の共振曲線は、地盤とクイ基礎のそれぞれの共振点でピークを示した。また、 $3 < \beta \ell$ モデル、 $1 < \beta \ell \leq 3$ モデルの弾性体的なクイ基礎の共振振動数は静的載荷試験で求めたクイ頭の静的バネ定数とクイ頭重量から決定される 1 自由度系としての固有振動数、および自由振動試験から求めた自由振動数によく一致している。しかしながら、 $\beta \ell \leq 1$ モデルの剛体的なクイ基礎では、自由振動試験から求めたクイ基礎の自由振動数は共振振動数と一致しているが、静的載荷試験に

もとづいて求めた剛体2自由度系としての固有振動数は共振振動数と一致していない。

(iii) 地盤の共振振動数はクイ基礎の存在によりやや小さな値となり多少変化したがる、その変動はほぼ10%以内であった。

(iv) $3 < \beta \ell$, $1 < \beta \ell \leq 3$ の弾性体的なクイ基礎では、地中部は地盤と同位相の地盤の挙動に支配された運動をし、クイ頭部は地盤とは異なった独自の運動をしており、クイ頭の挙動は地表面に仮想境界を持ち、地盤の運動を入力と考えた1自由度系モデルの挙動に近いものと考えられる。一方、 $\beta \ell \leq 1$ の剛体的なクイ基礎はその共振点付近で回転の卓越した振動モードを示している。

6.2 自由振動試験

(1) 実験 1

実験1ではクイ頭打撃もしくは加振台からの衝撃力入力による自由振動試験を行い、クイ基礎の固有振動数とクイ基礎および地盤の減衰定数を測定した。例として図6-10に群グイ15Kg(クイ頭重量)モデルの応答波形と振幅の減衰状況を示しており、各モデルに対する試験結果を表6-4に示している。

自由振動試験で観測された各クイ基礎の自由振動数(固有振動数)は正弦波加振試験での共振振動数と4%以内の差でよく一致している。また表6-4からわかるように、クイ基礎の減衰定数はクイ頭重量の増加に伴って増加する傾向があり、クイ頭(G_1, S_1)とクイ地表部(G_3, S_3)の減衰定数はほぼ等しい値となっている。なお、地盤の減衰定数は応答波形から読み取することは困難であったがクイ基礎の減衰定数と大差はないものと思われる。

(2) 実験 2

実験2では実験1と同様にクイ頭打撃もしくは加振台からの衝撃力入力による自由振動試験を行い、クイ基礎の固有振動数とクイ基礎および地盤の減衰定数を測定した。例として図6-11に $3 < \beta \ell$ モデル(クイ頭重量342Kg)の応答波形と振幅の減衰状況を示しており、各モデルに対する試験結果を表6-5に示している。

自由振動試験で観測された各クイ基礎の自由振動数(固有振動数)は、正弦波加振試験での共振振動数と3%以内の差でよく一致している。また実験1と同様に表6-5を見ると、クイ基礎の減衰定数はクイ頭重量の増加に伴って一般に増加する傾向があり、クイ頭 A_8 と地盤地表部 A_4 の減衰定数はほぼ等しい値となっている。

- A_0 : サーボ型加速度計 (入力方向)
 A_1, A_2, A_3 : ヒズミ型加速度計 (入力方向)
 G_0, G_1, G_2, G_3 : ヒズミ型加速度計 (入力方向)
 S_1, S_2, S_3 : ヒズミ型加速度計 (入力方向)
 G_4, S_4 : ヒズミ型加速度計 (鉛直方向)
 D_1, D_2 : 変位計 (入力方向)

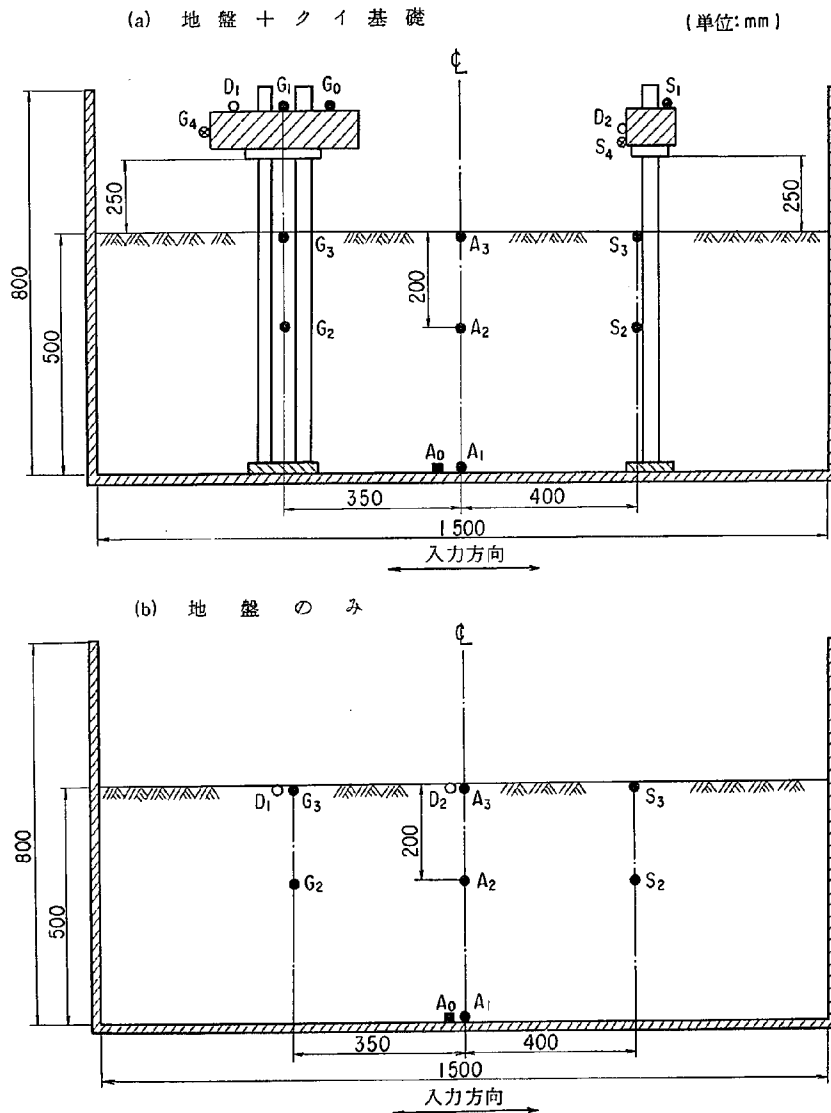


図 6-1 計測器の配置 (実験 1)

入力振動数 8.5Hz (タイの1次共振点付近)

入力振動数 13.0Hz (地盤の1次共振点付近)

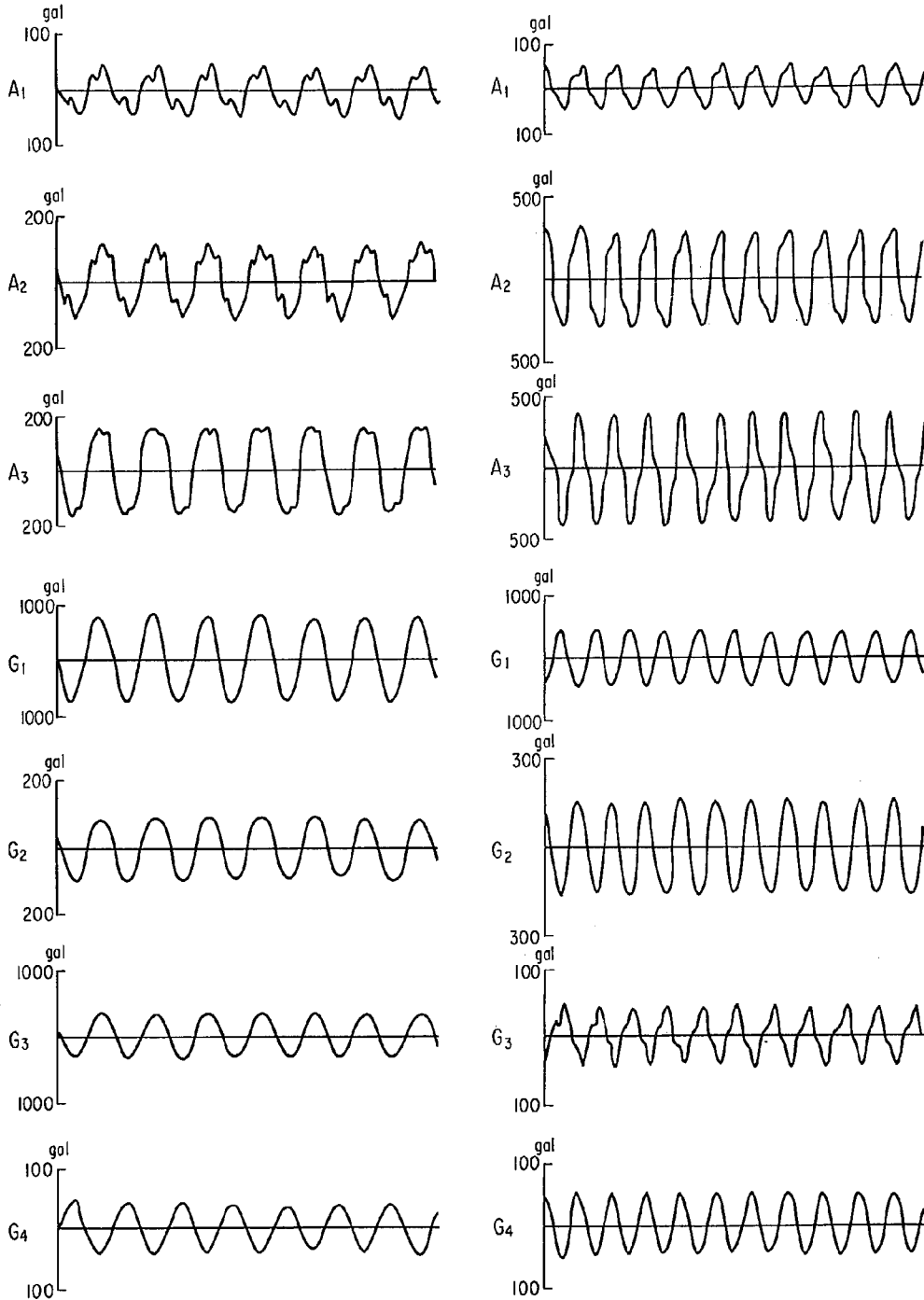


図 6 - 2 加速度応答波形の例(実験 1. 群タイ 15 Kg)

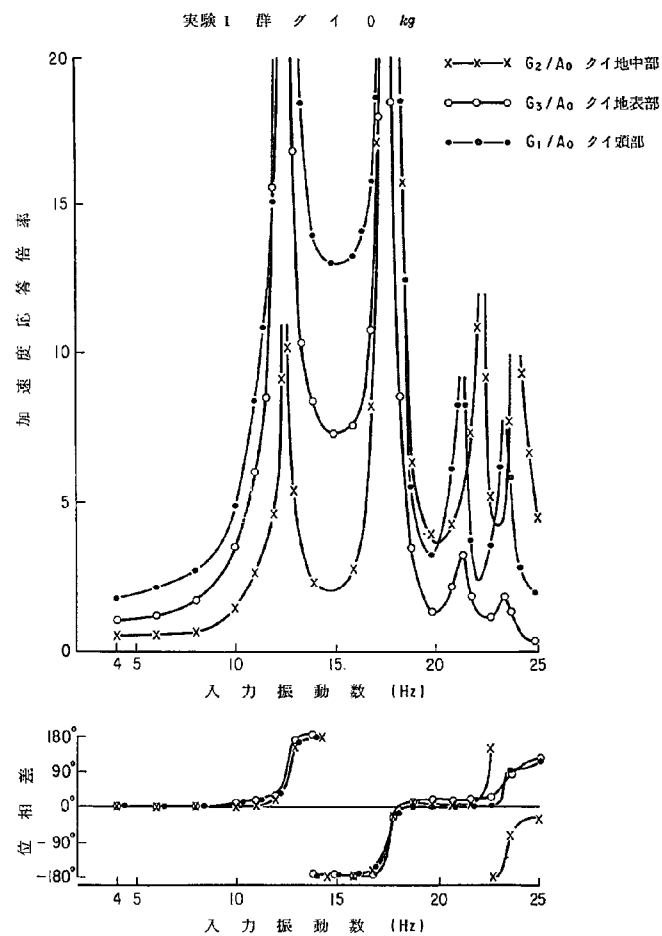
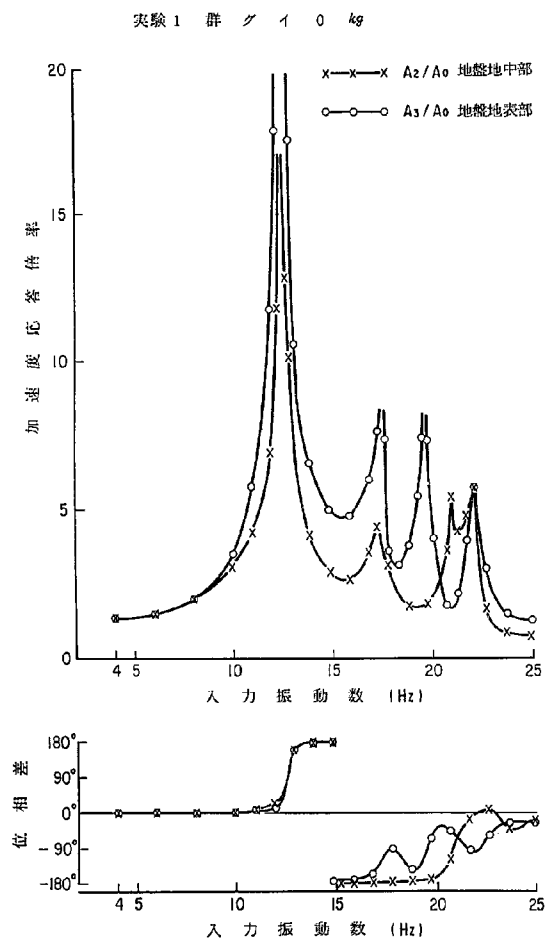


図6-3-1 共振曲線と位相曲線 (群グイ0Kg)

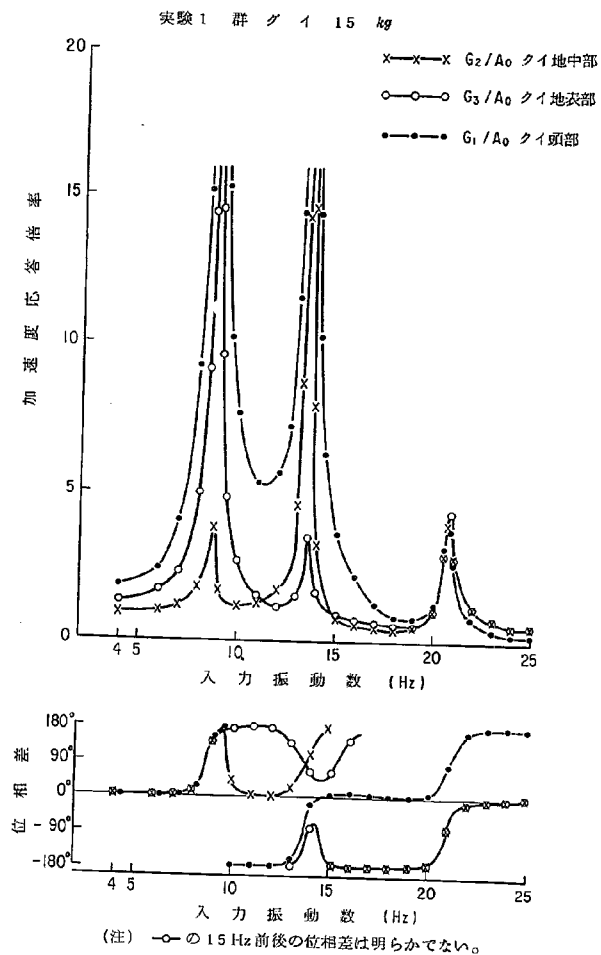
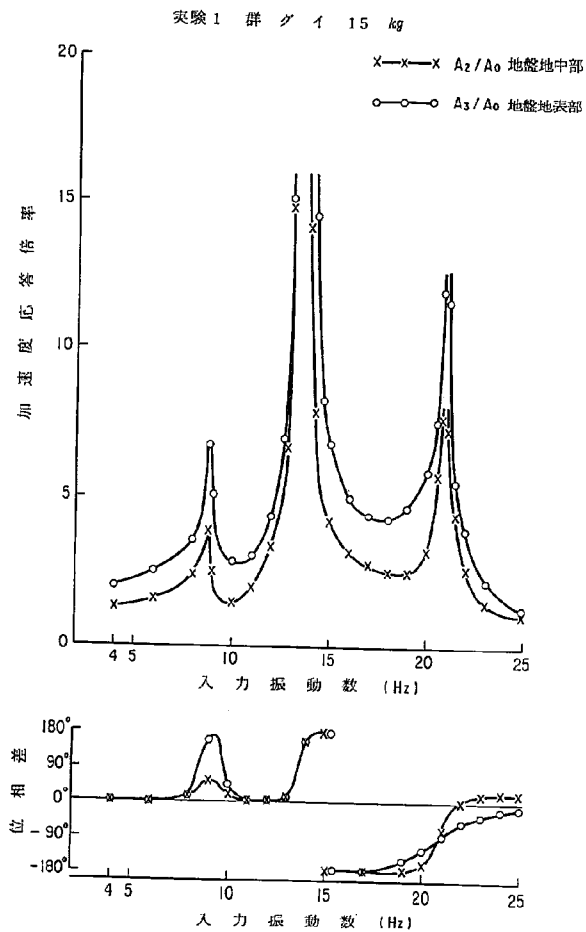


図 6-3-2 共振曲線と位相曲線 (群グイ 15 Kg)

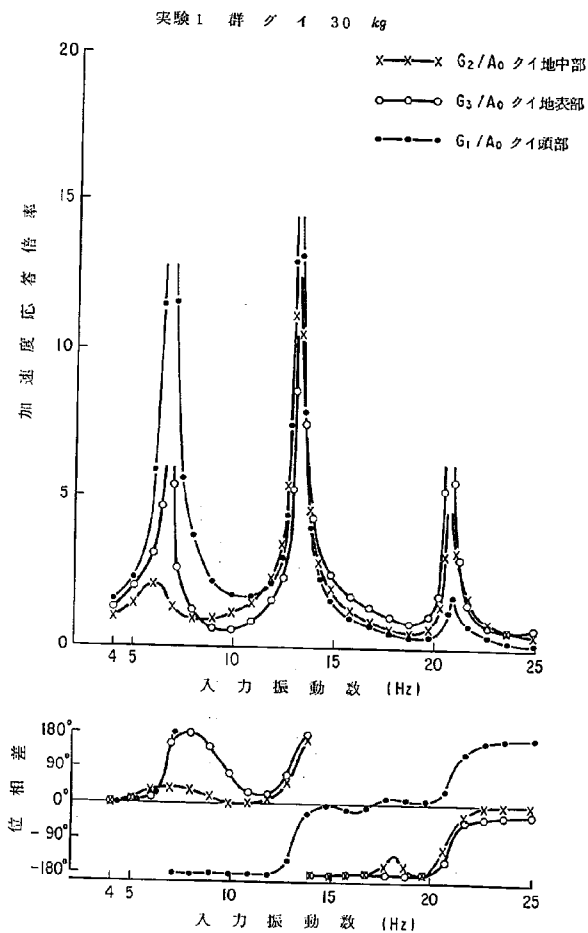
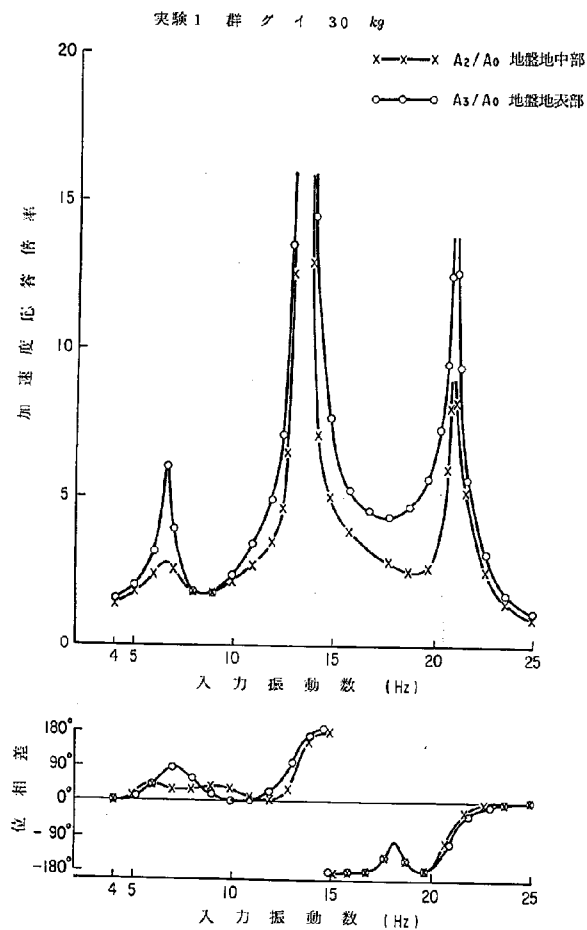


図6-3-3 共振曲線と位相曲線 (群グイ30Kg)

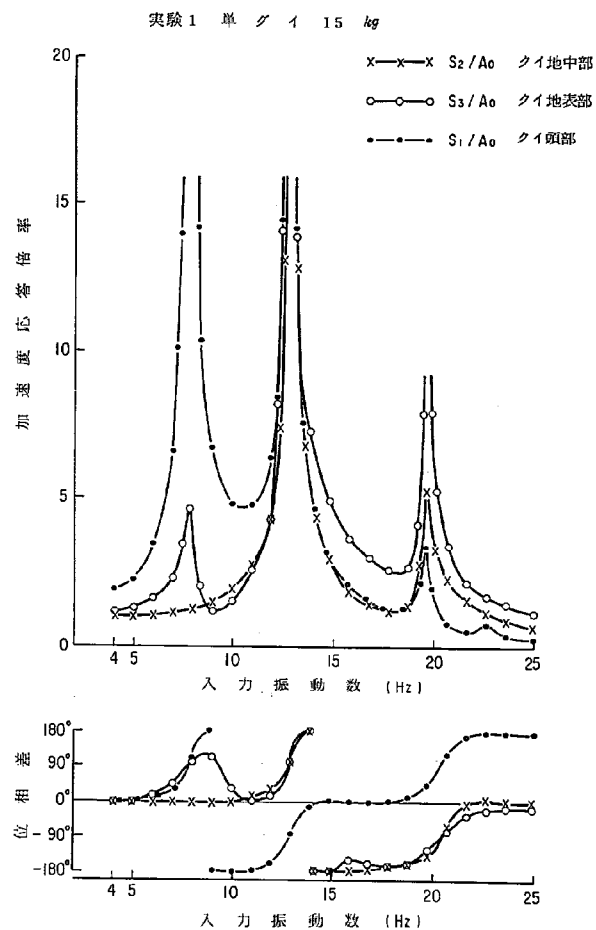
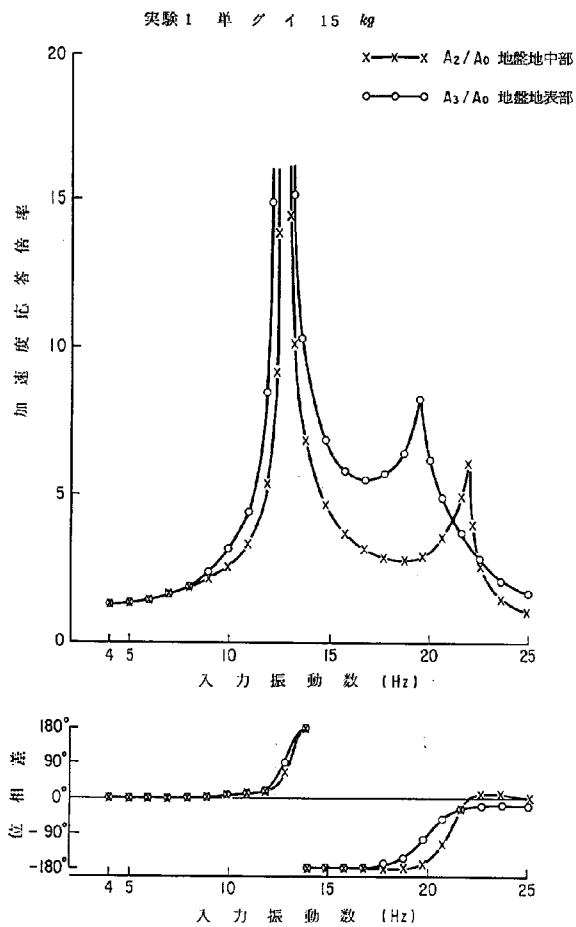


図 6-3-4 共振曲線と位相曲線 (単グイ 15 kg)

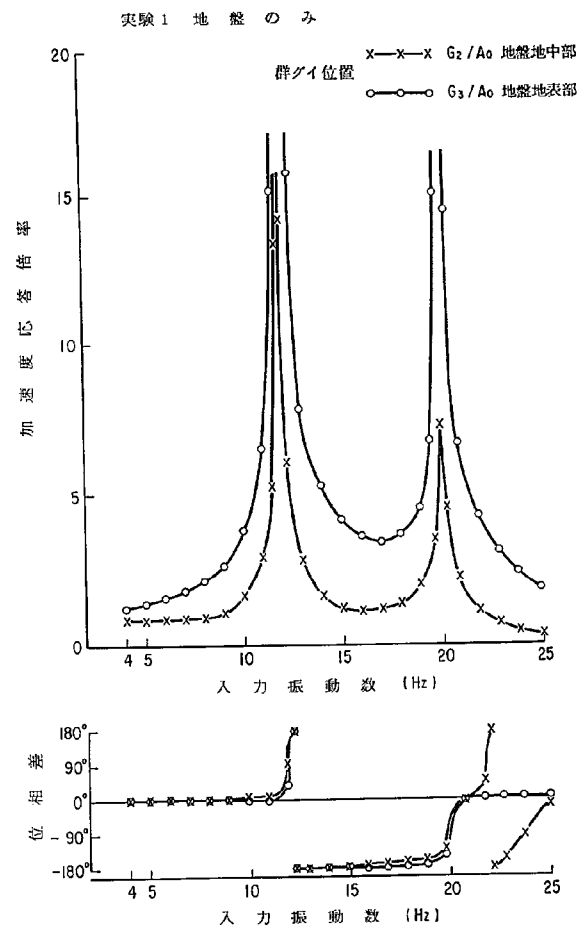
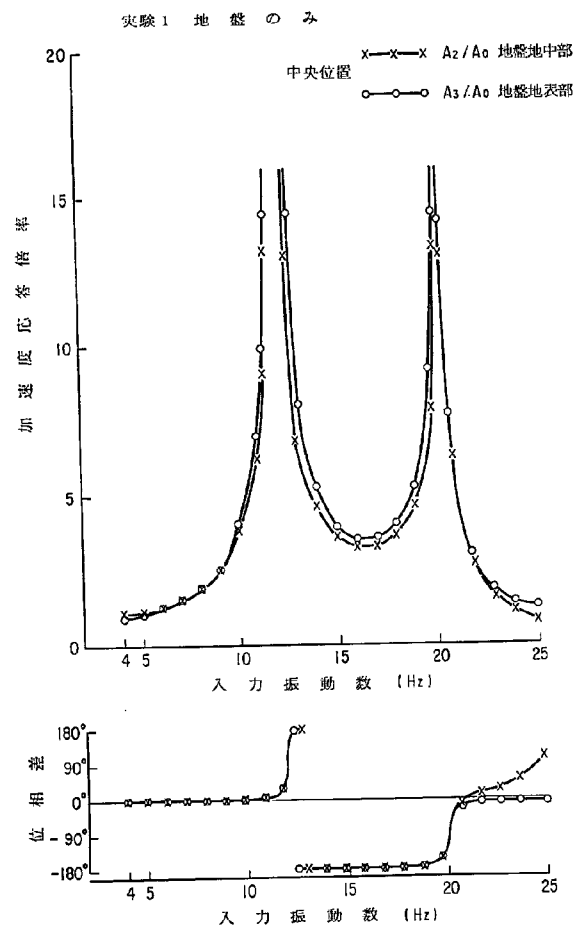


図 6-3-5 共振曲線と位相曲線 (地盤のみ)

実験 1. 群グイ 0 Kg

実験 1 群グイ 0 kg

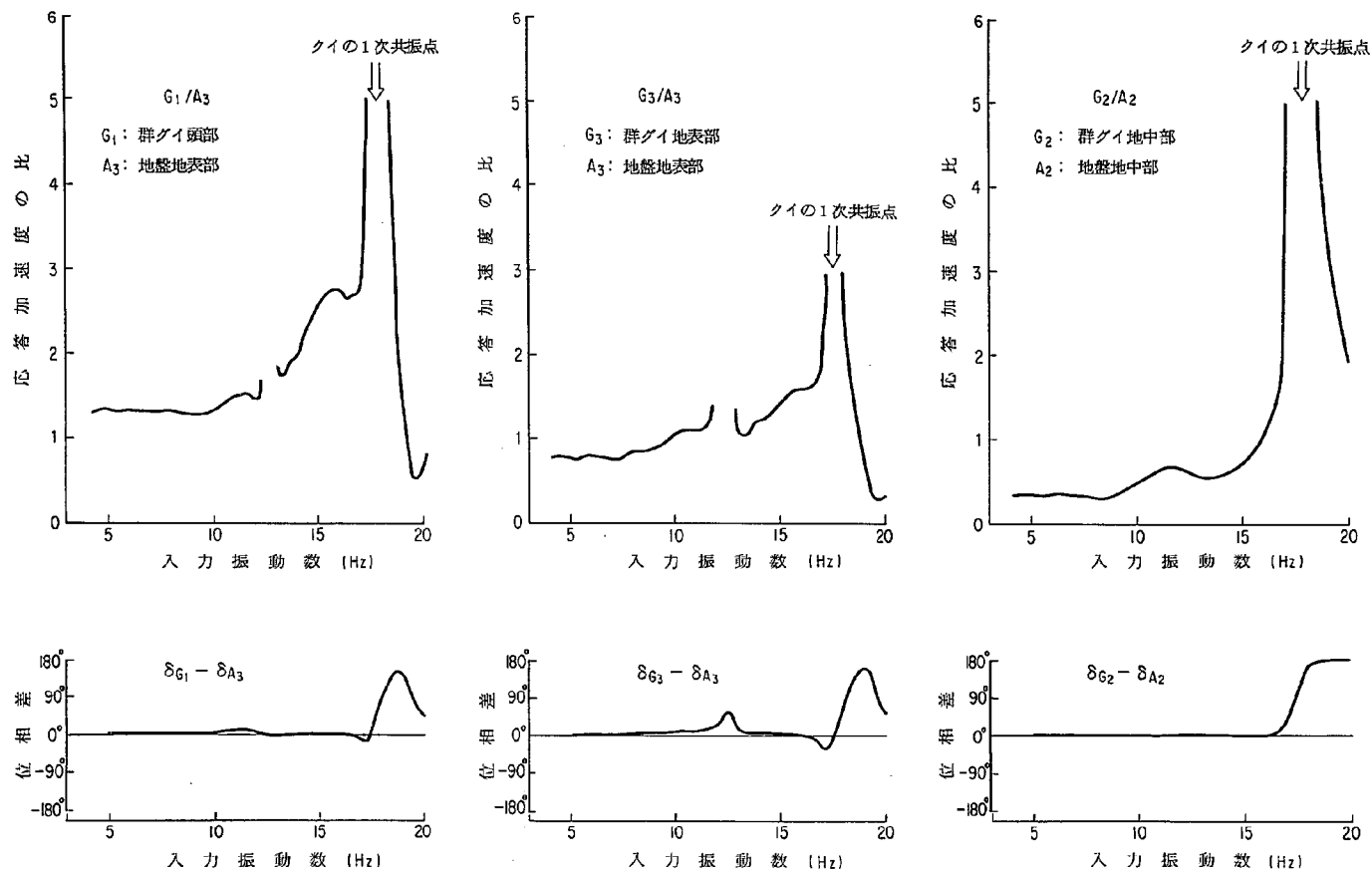


図 6-4-1 地盤の振動とクイ基礎の振動の連成関係 (群グイ 0 Kg)

実験1 群グイ 15 kg

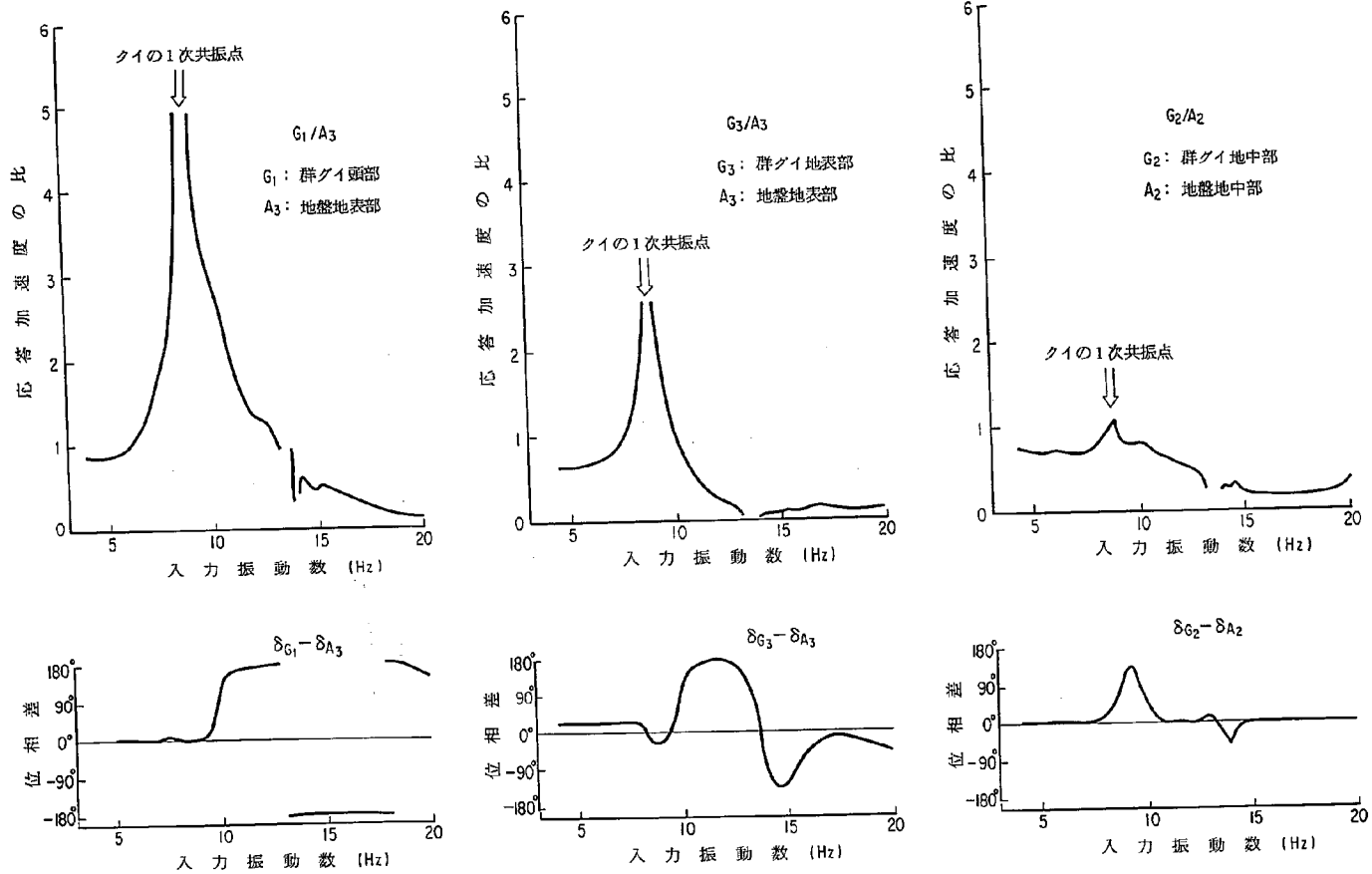


図6-4-2

地盤の振動とクイ基礎の振動の連成関係(群グイ15 Kg)

実験1 群グイ 30 kg

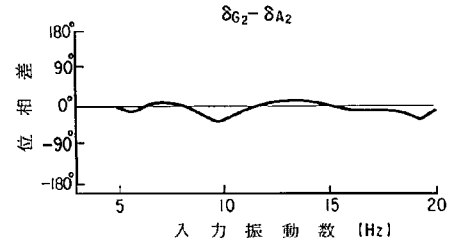
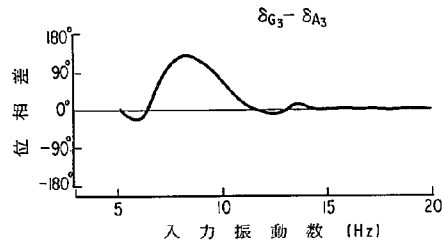
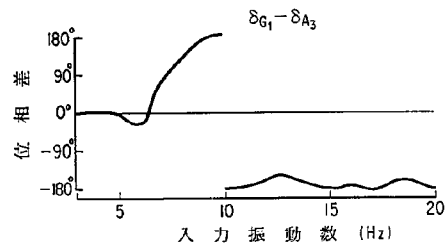
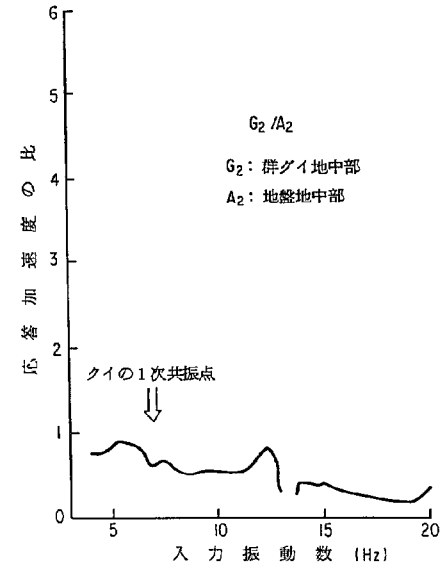
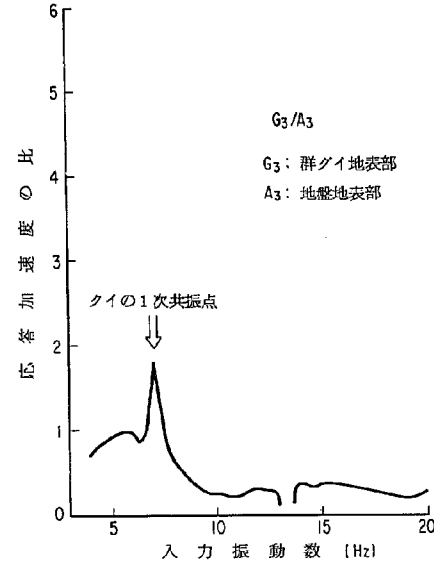
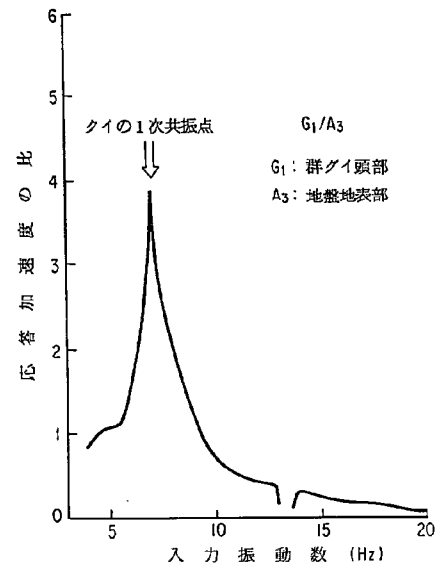


図6-4-3

地盤の振動とクイ基礎の振動の連成関係 (群グイ 30 Kg)

実験1 単グイ 15 kg

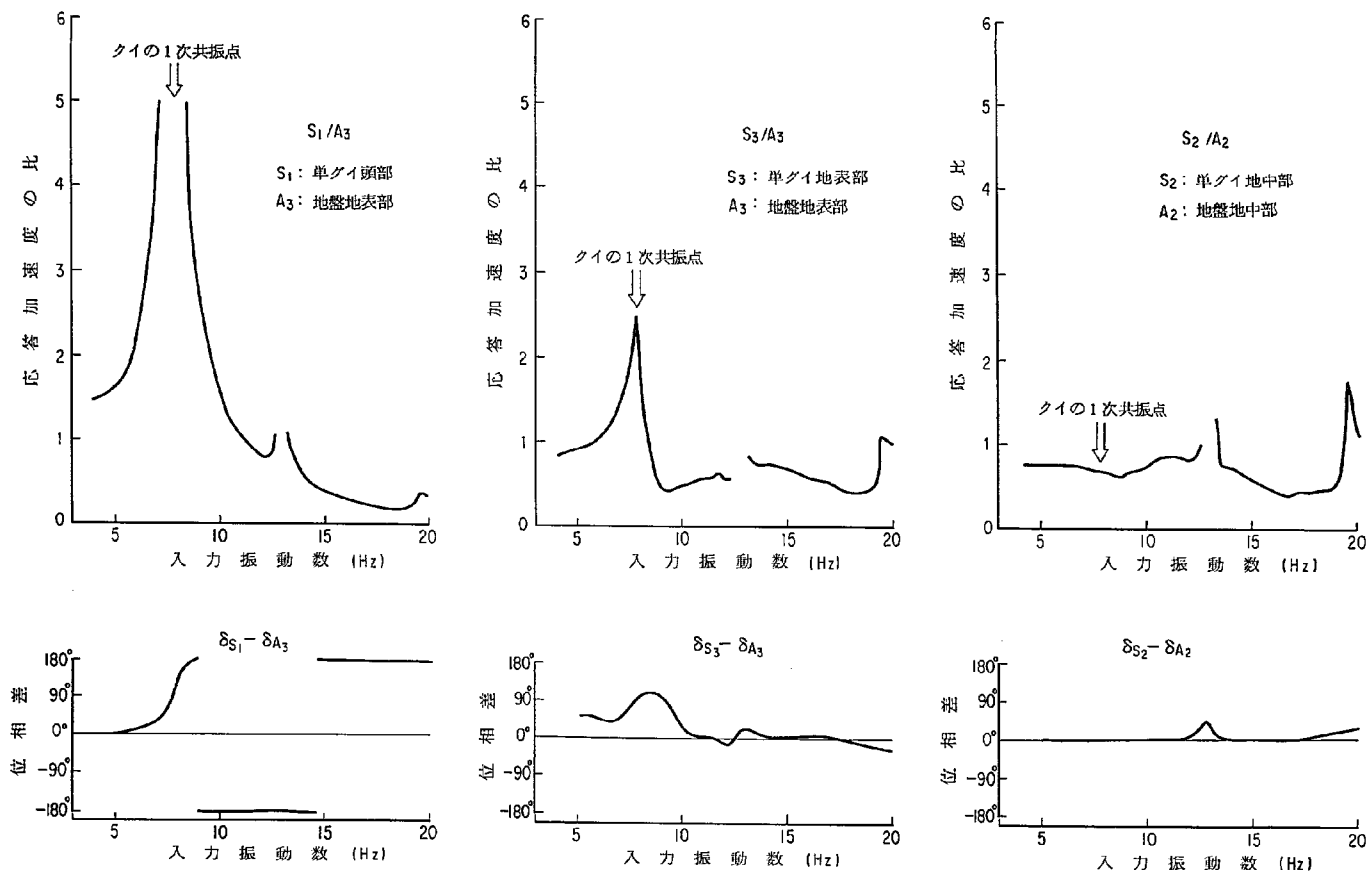


図6-4-4

地盤の振動とクイ基礎の振動の連成関係(単グイ 15 Kg)

実験1 地盤のみ

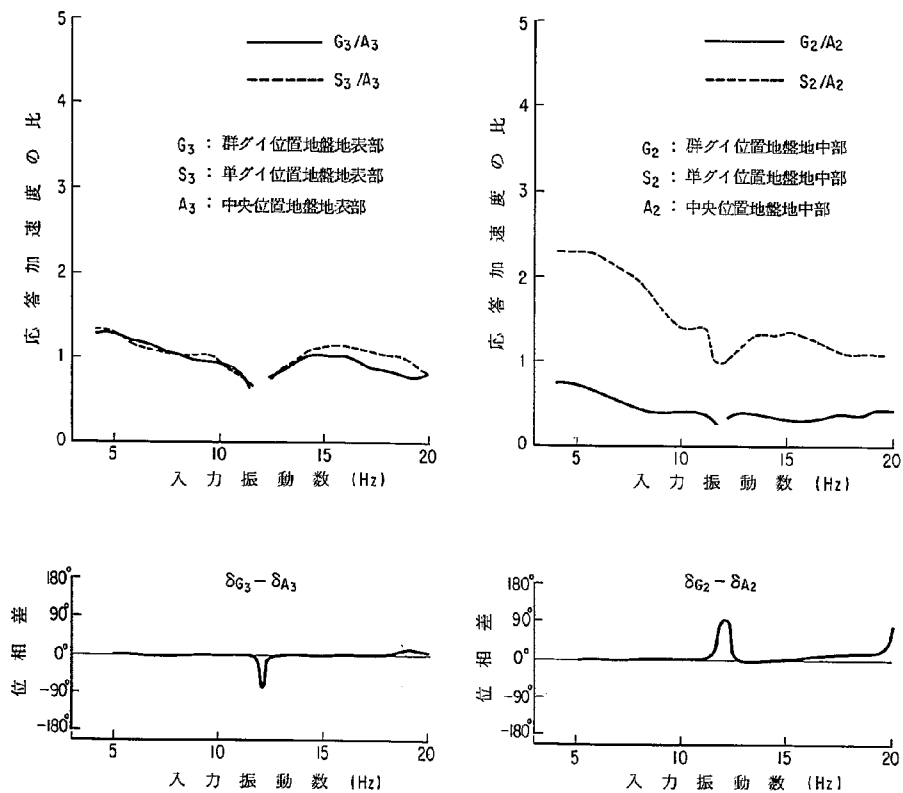


図 6-4-5 地盤の振動とクイ基礎の振動の連成関係(地盤のみ)

(注) A_3, G_3 はクイ基礎がある場合の応答加速度, A_3^*, G_3^* はクイ基礎のない地盤のみの場合の応答加速度を示している。

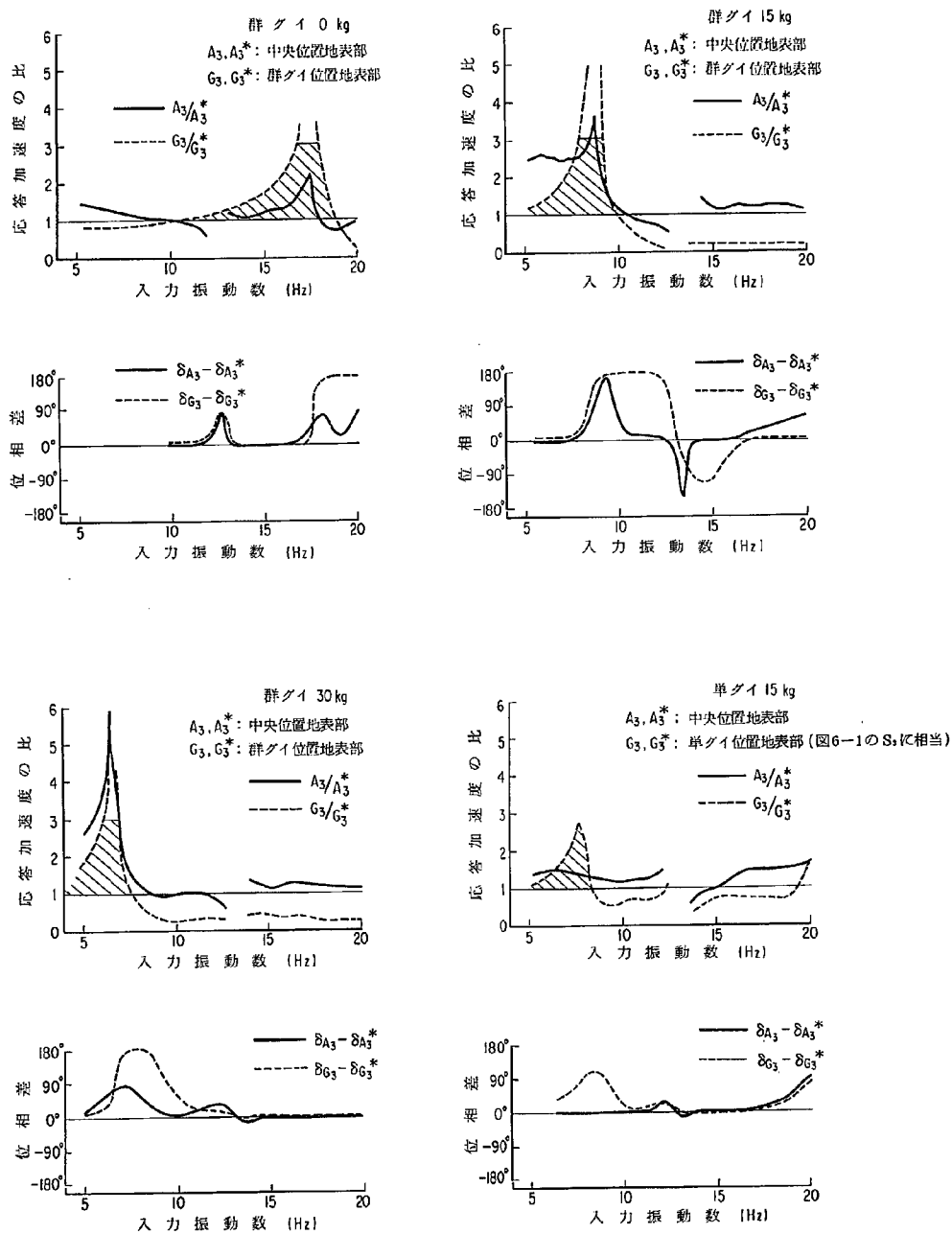


図 6-5 クイ基礎が地盤の振動に与える影響 (実験 1)

表 6-2 各試験による共振振動数の比較 (実験 1)

モ デ ル		群グイ 0Kg	群グイ 1 5 Kg	群グイ 3 0 Kg	群グイ 6 0 Kg	単グイ 1 5 Kg	単グイ 3 0 Kg	地 盤 の み
ク イ 頭 実 重 量 (Kg)		3.93	17.7	31.6	58.9	2.19	3.56	—
ク イ 頭 バ ネ 係 数 K (Kg/cm ²)		5 2.2				6.02		—
地盤のせん断弾性定数 G_s (Kg/cm ²)		2.4						
ク イ 基 礎 の 共 振 振 動 数 (Hz)	静 的 載 荷 試 験	18.2	8.6	6.4	4.7	8.3	6.5	—
	正 弦 波 加 振 試 験	17.5	8.8	6.7	4.5	7.8	6.0	—
	自 由 振 動 試 験	16.8	8.6	7.1	4.4	7.9	6.2	—
地 盤 の 共 振 振 動 数 (Hz)	物 性 試 験	—						11.5
	正 弦 波 加 振 試 験	12.5	13.5	13.0	—	12.8	—	12.0

f : 共振振動数 (Hz)

G_s : 地盤のせん断弾性定数 (2.4 Kg/cm²)

K : 静的載荷試験によるクイ頭バネ係数 (Kg/cm)

γ_s : 地盤の単位体積重量 (1.0×10^{-3} Kg/cm³)

W : クイ頭実重量 (Kg)

H : 地盤の層厚 (50 cm)

V_s : 地盤のせん断弾性波速度 (cm/sec)

g : 重力加速度 (980 cm/sec²)

α_s : 地盤周辺の境界条件による補正係数 (1.5)

$$V_s = \sqrt{\frac{g G_s}{\gamma_s}}$$

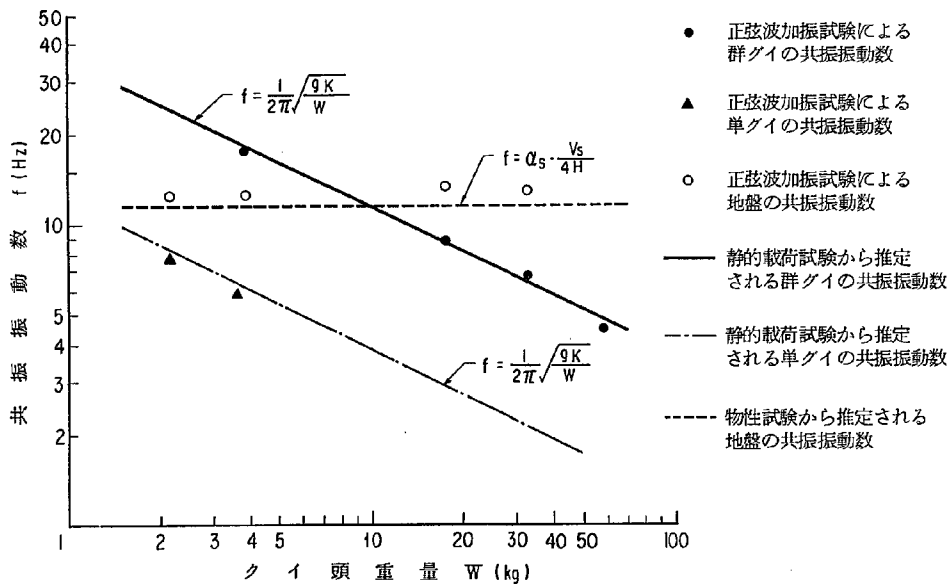


図 6-6 クイ頭重量と共振振動数の関係 (実験 1)

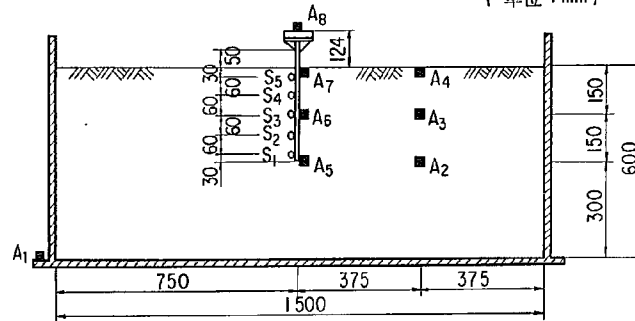
A_1 : サーボ型加速度計 (入力方向)

$A_2 \sim A_8$: ヒズミ型加速度計 (入力方向)

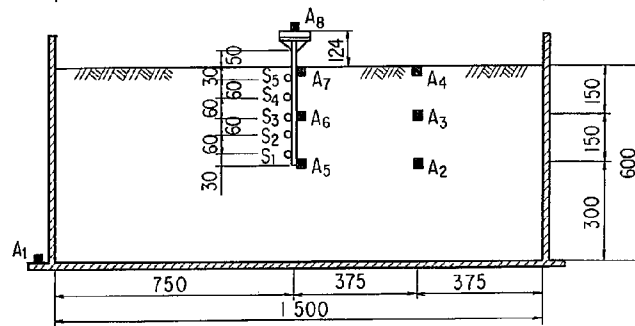
$S_1 \sim S_5$: 歪ゲージ

(単位: mm)

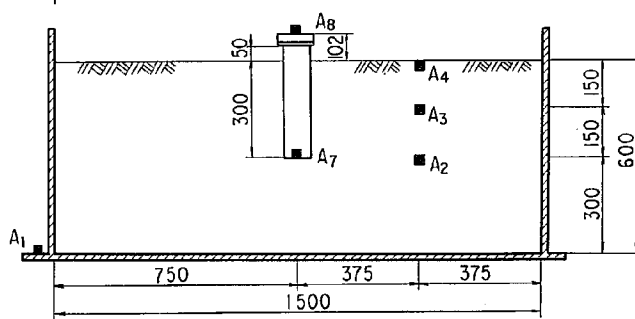
① $3 < \beta l$



② $1 < \beta l \leq 3$



③ $\beta l \leq 1$



④ 地盤のみ

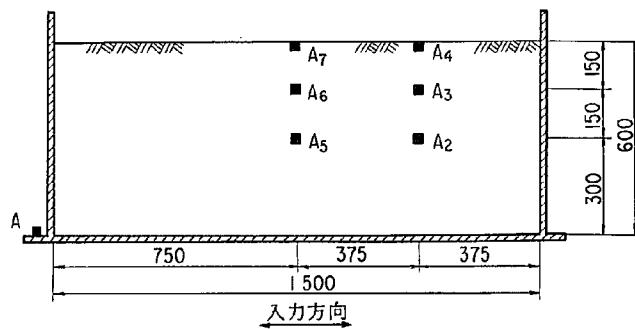


図 6-7 計測器の配置 (実験 2)

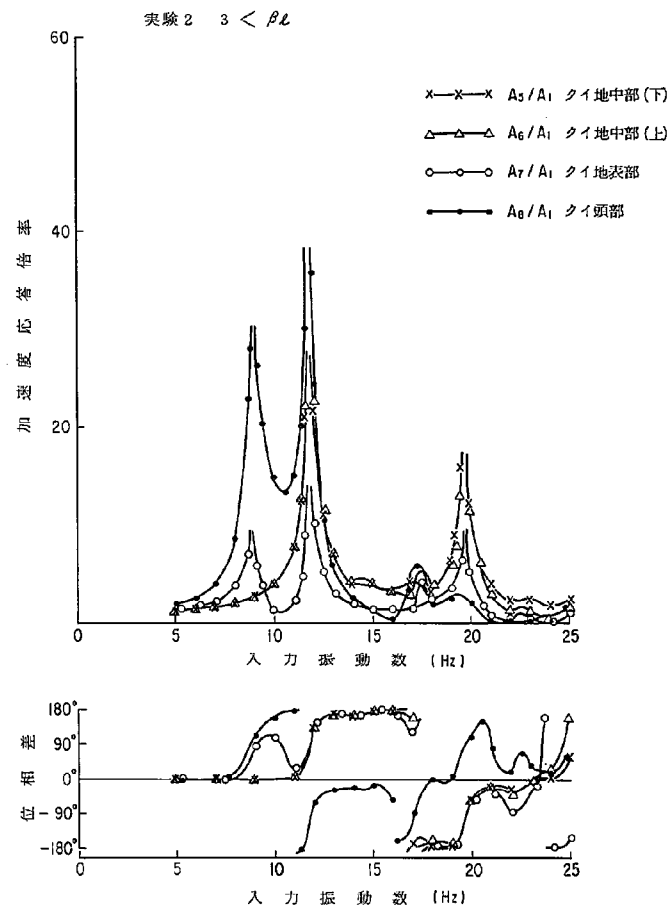
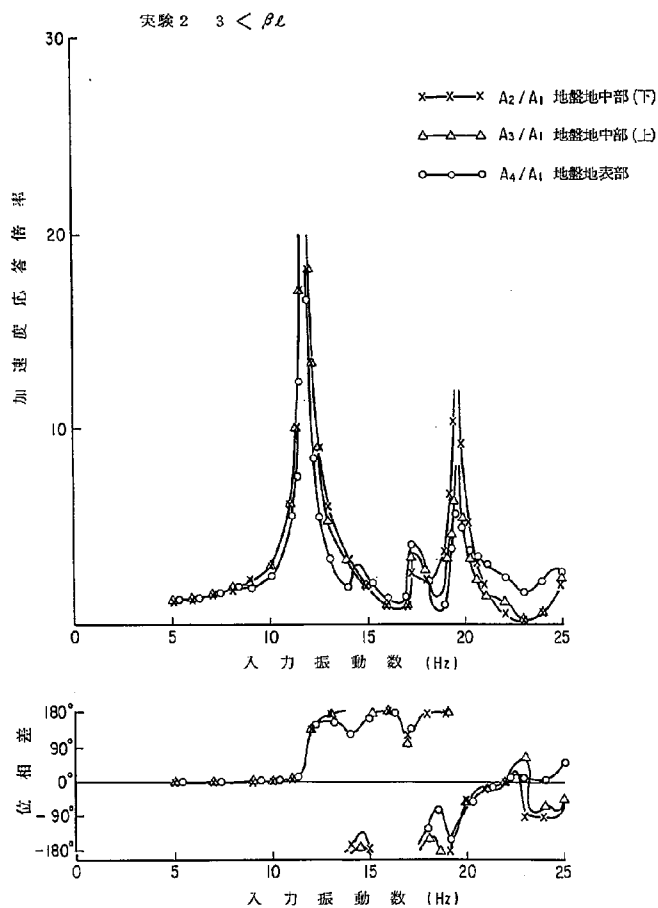


図 6-8-1 共振曲線と位相曲線 ($3 < \beta l$)

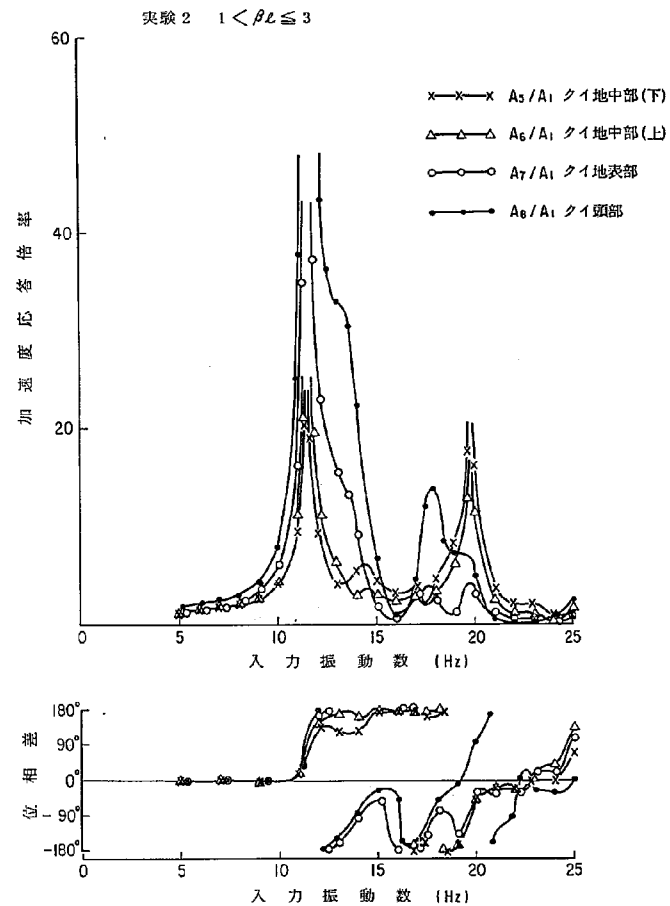
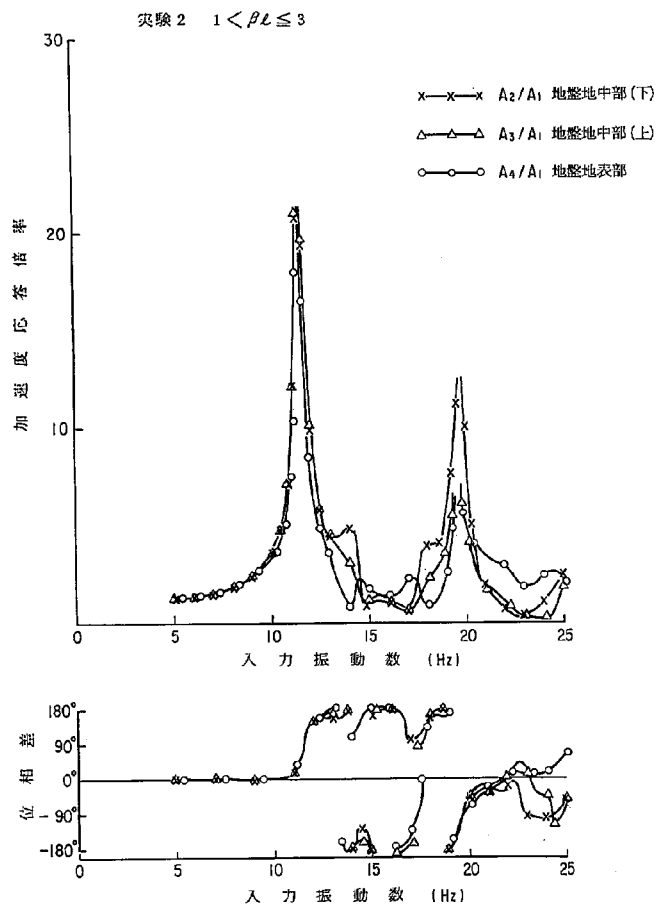


図 6-8-2 共振曲線と位相曲線 ($1 < \beta L \leq 3$)

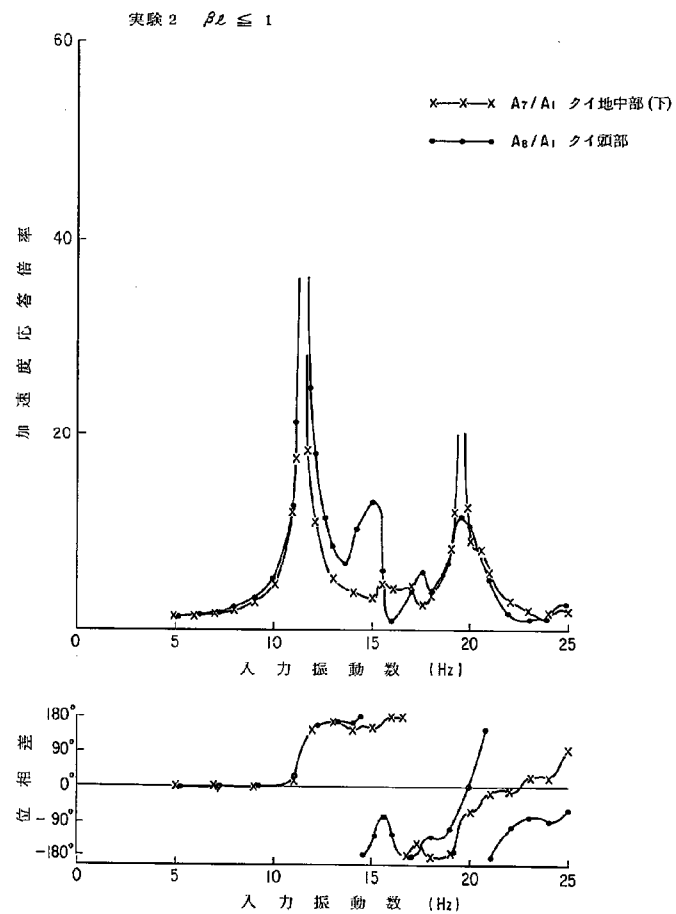
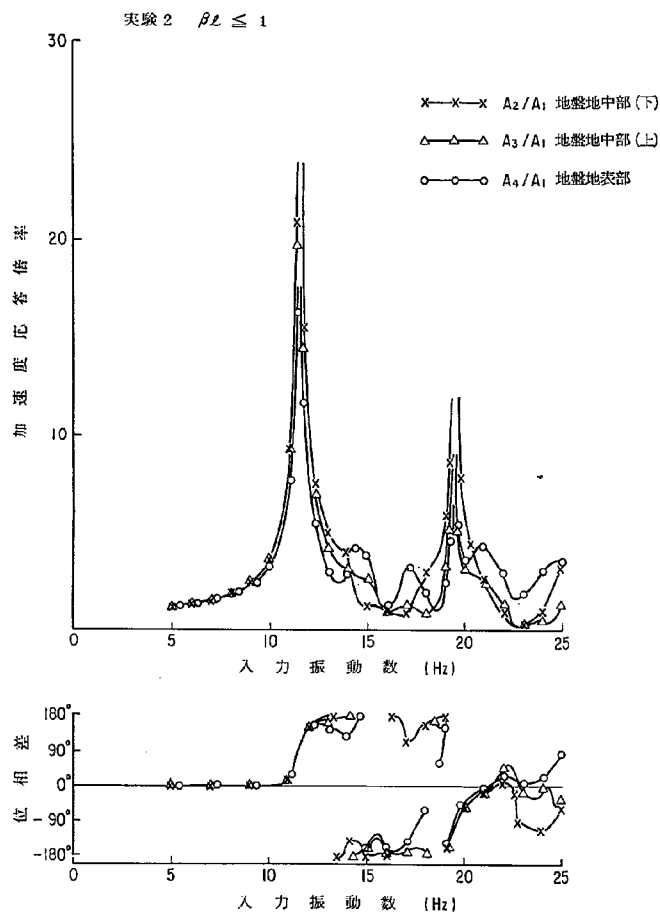


図6-8-3 共振曲線と位相曲線 ($\beta l \leq 1$)

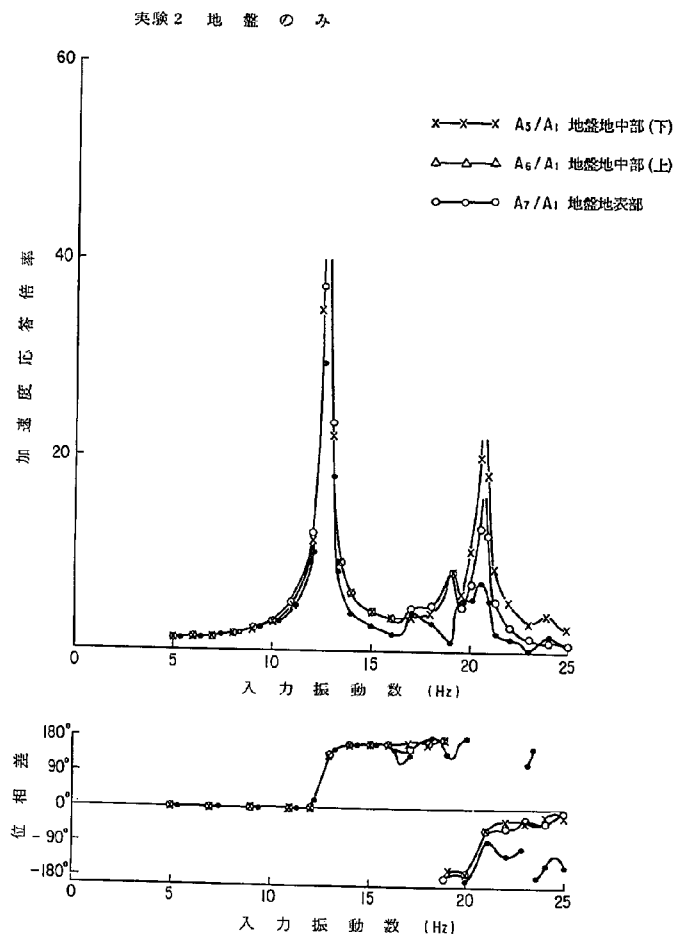
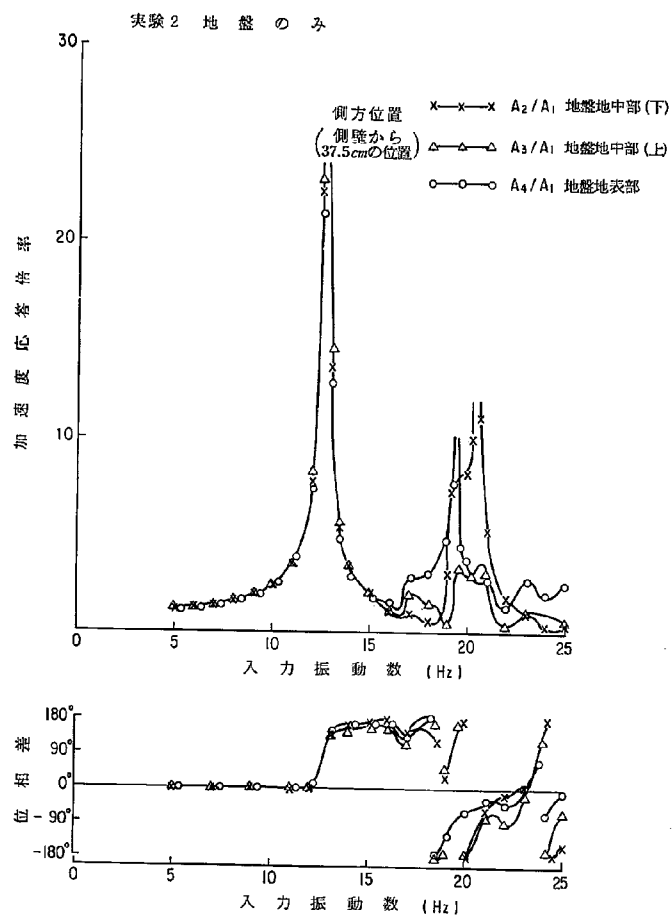


図6-8-4 共振曲線と位相曲線(地盤のみ)

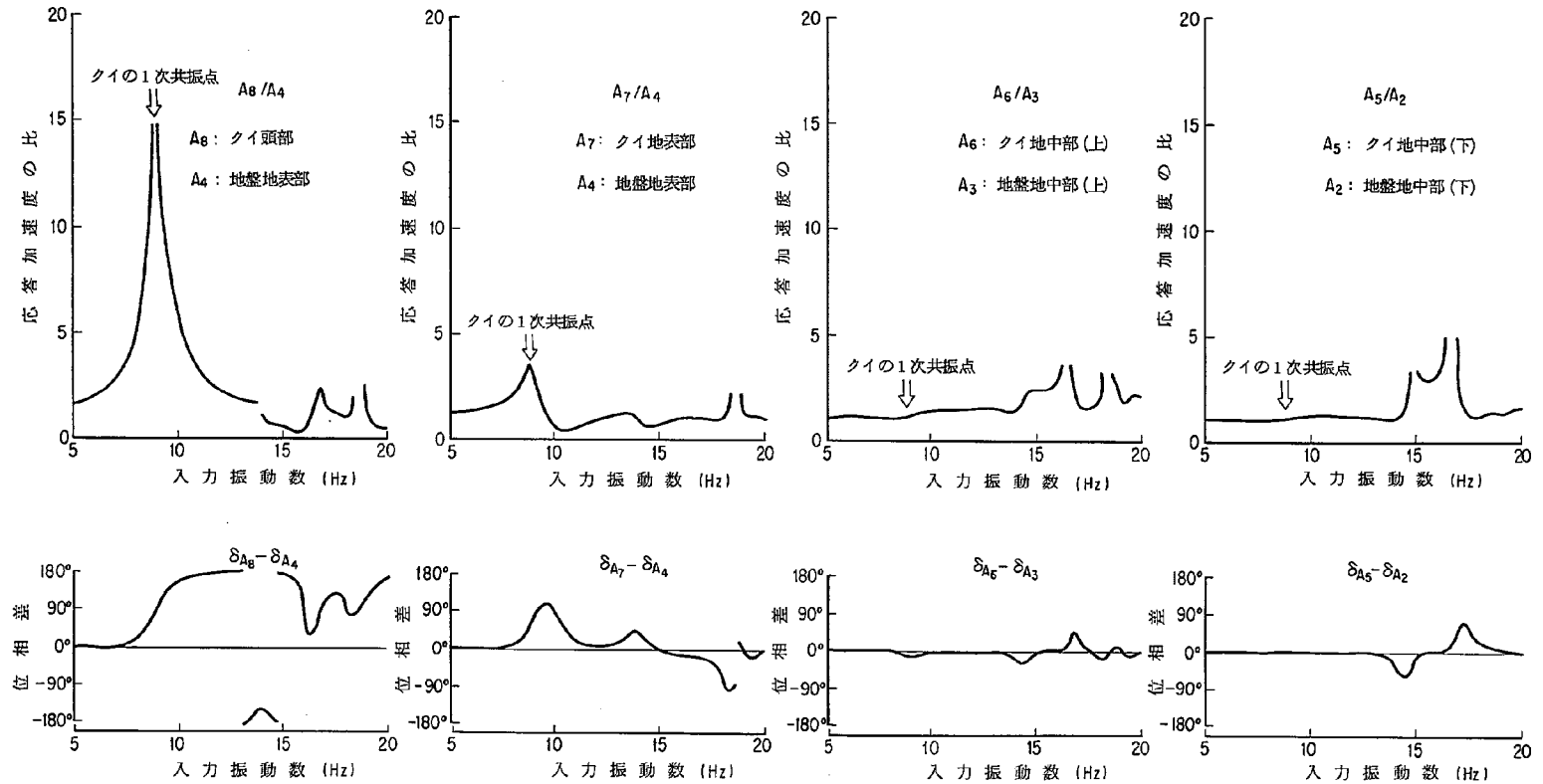


図 6-9-1 地盤の振動とクイ基礎の振動の連成関係 ($3 < \beta L$)

実験2 $1 < \beta l \leq 3$

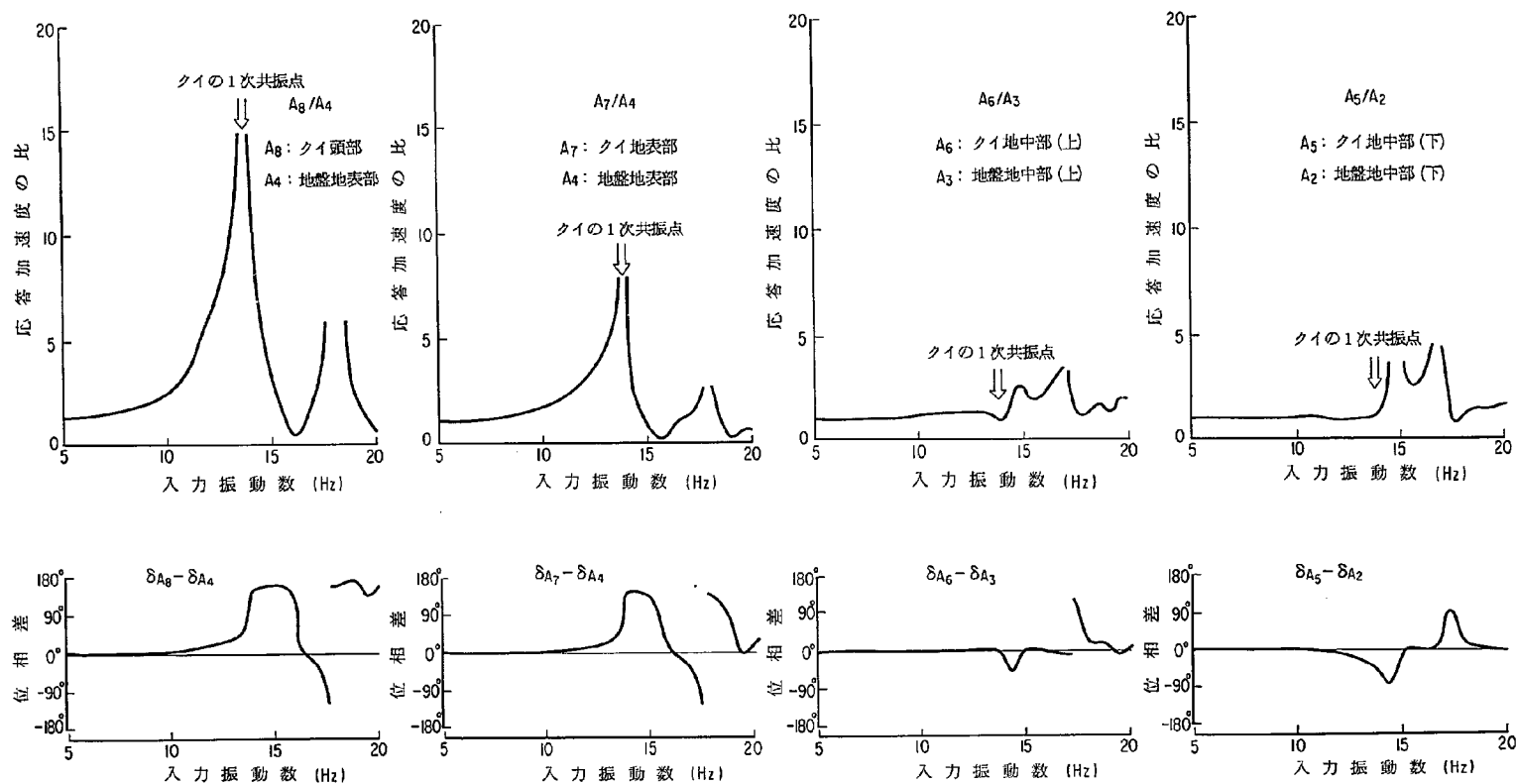


図6-9-2 地盤の振動とクイ基礎の振動の連成関係 ($1 < \beta l \leq 3$)

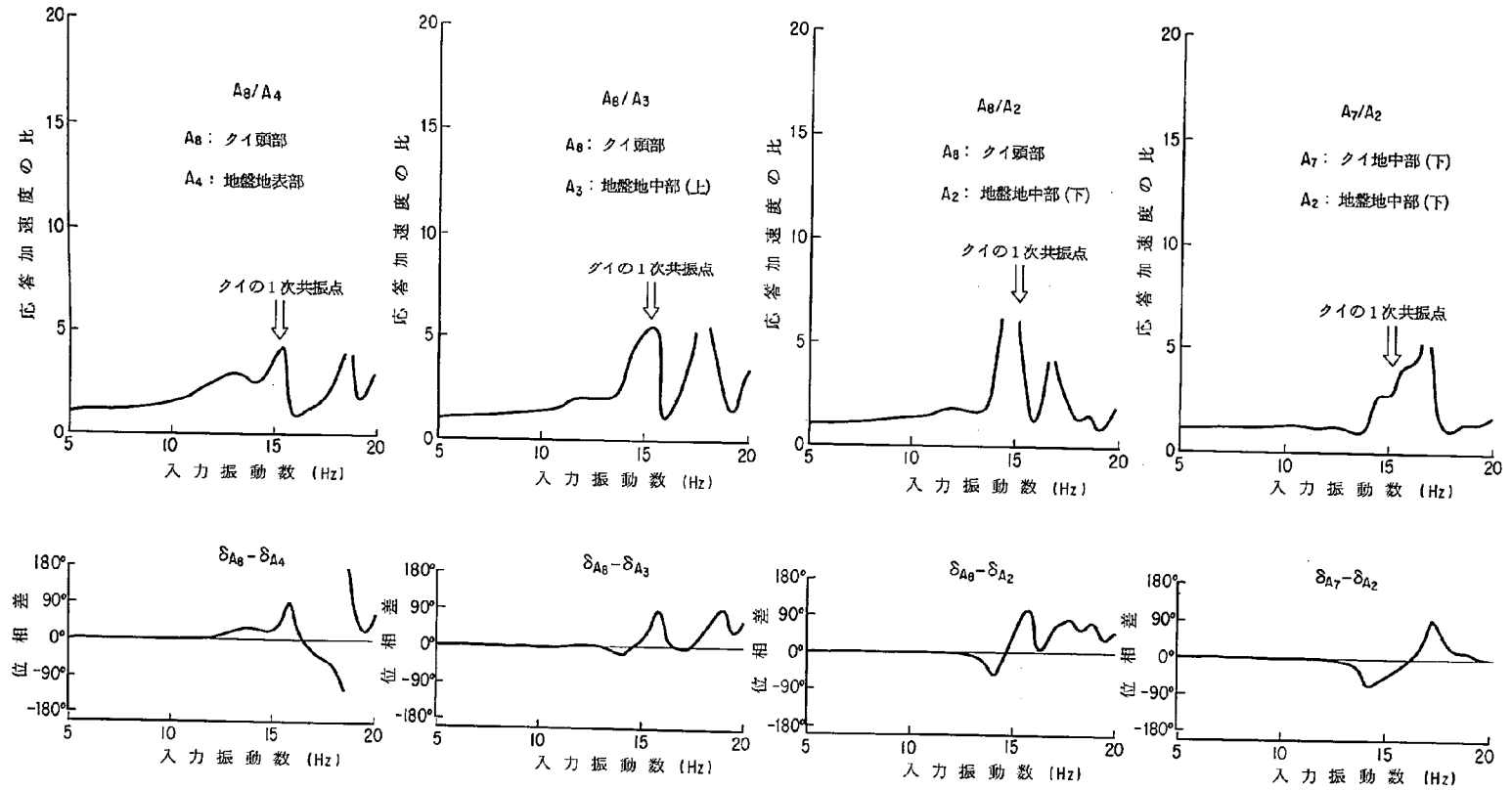


図6-9-3 地盤の振動とクイ基礎の振動の遅成関係 ($\beta l \leq 1$)

表 6 - 3 各試験による共振振動数の比較 (実験 2)

モ デ ル		$3 < \beta \ell$ ($\beta \ell = 4.20$)	$1 < \beta \ell \leq 3$ ($\beta \ell = 2.64$)	$\beta \ell \leq 1$ ($\beta \ell = 0.78$)	地 盤 の み
ク イ 頭 実 重 量 (Kg)		3.42	3.42	3.42	—
バ ネ 係 数		$K = 12.5 \text{ Kg/cm}$	$K = 33.3 \text{ Kg/cm}$	$K_h = 2.69 \times 10^3 \text{ Kg/cm}$ $K_r = 3.08 \times 10^4 \text{ Kg-cm/rad}$	—
地盤のせん断弾性定数 G_s (Kg/cm ²)		2.3			
ク イ 基 礎 の 共 振 振 動 数 (Hz)	静 的 載 荷 試 験	9.5	15.5	20.0	—
	正 弦 波 加 振 試 験	8.9	13.8	15.2	—
	自 由 振 動 試 験	9.0	13.8	15.7	—
地 盤 の 共 振 振 動 数 (Hz)	物 性 試 験	—			9.9
	正 弦 波 加 振 試 験	11.8	11.3	11.4	12.8

註 $3 < \beta \ell$ モデル, $1 < \beta \ell \leq 3$ モデルのバネ係数 K はクイ頭の 1 自由度系としてのバネ係数を示し, $\beta \ell \leq 1$ モデルのバネ係数 K_h , K_r はそれぞれクイ底面からの高さが $h_0 = 20.7 \text{ cm}$ の位置における 2 自由度系としての並進および回転バネ係数を示している。

表 6-4 自由振動試験による固有振動数と減衰定数 (実験 1)

モ デ ル			群グイ 0 Kg	群グイ 15 Kg	群グイ 30 Kg	群グイ 60 Kg	単グイ 15 Kg	単グイ 30 Kg
ク イ 頭 実 重 量 (kg)			3.9	17.7	31.6	58.9	2.2	3.6
クイ基礎の固有振動数 (Hz)			16.8	8.6	7.1	4.4	7.9	6.1
減 衰 定 数 h	ク イ 頭 (G_1, S_1)	クイ頭打撃	0.014	0.016	0.017	0.024	0.023	—
		加振台衝撃力	—	—	0.023	0.026	—	—
	クイ地表部 (G_3, S_3)	クイ頭打撃	0.014	0.021	0.017	0.028	0.024	—
		加振台衝撃力	—	—	0.027	0.023	—	—

実 験 1.

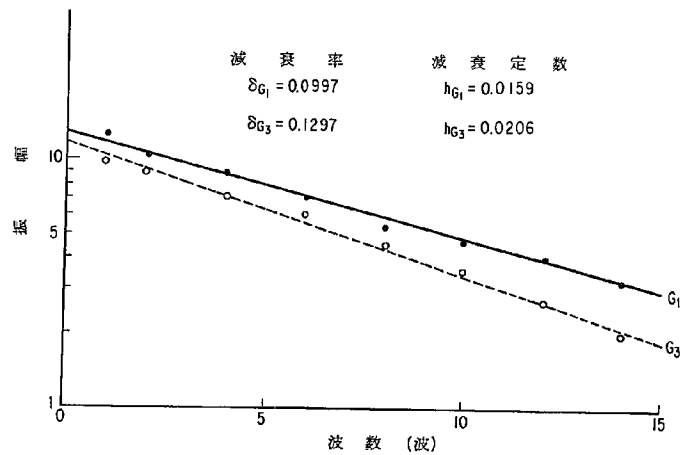
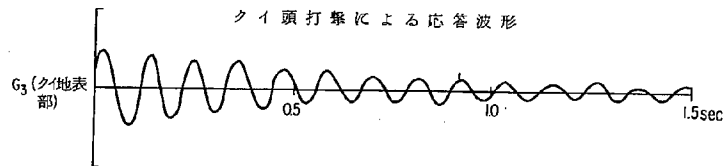
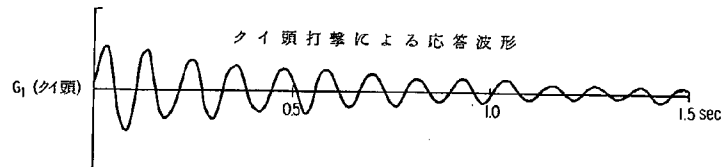


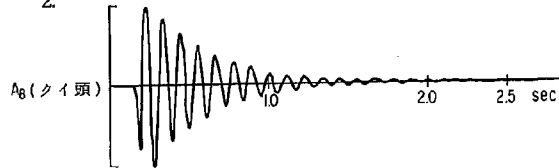
図 6-10 自由振動試験による固有振動数と減衰定数の測定 (群グイ 15 Kg)

表 6-5 自由振動試験による固有振動数と減衰定数 (実験 2)

モ デ ル	ク イ 頭 実 重 量 (Kg)			0.00	1.71	3.42	5.98	8.53	11.07
3<βℓ (βℓ=4.20)	クイ基礎の固有振動数 (Hz)			16.8	13.5	9.0	6.0	4.4	3.5
	減 衰 定 数 h	クイ頭 A ₈	クイ頭打撃	—	0.034	0.046	0.046	0.049	0.048
			加振台衝撃力	—	0.030	0.039	0.049	0.049	0.047
		地盤地表部 A ₄	加振台衝撃力	0.031	0.039	0.031	0.040	0.037	0.032
1<βℓ≤3 (βℓ=2.64)	クイ基礎の固有振動数 (Hz)			17.0	16.3	13.8	9.9	7.8	6.4
	減 衰 定 数 h	クイ頭 A ₈	クイ頭打撃	0.029	0.025	0.029	0.035	0.043	0.051
			加振台衝撃力	0.037	0.039	0.032	0.036	0.044	0.053
		地盤地表部 A ₄	加振台衝撃力	0.036	0.041	0.038	0.035	0.028	0.030
βℓ≤1 (βℓ=0.78)	クイ基礎の固有振動数 (Hz)			16.7	16.3	15.7	13.5	11.6	10.3
	減 衰 定 数 h	クイ頭 A ₈	クイ頭打撃	0.018	0.026	0.018	0.029	0.024	0.038
			加振台衝撃力	0.025	0.023	0.032	0.032	0.037	0.051
		地盤地表部 A ₄	加振台衝撃力	0.025	0.042	0.039	0.039	0.035	0.037

実験 2

クイ頭打撃による応答波形



加振台からの衝撃力入力による応答波形

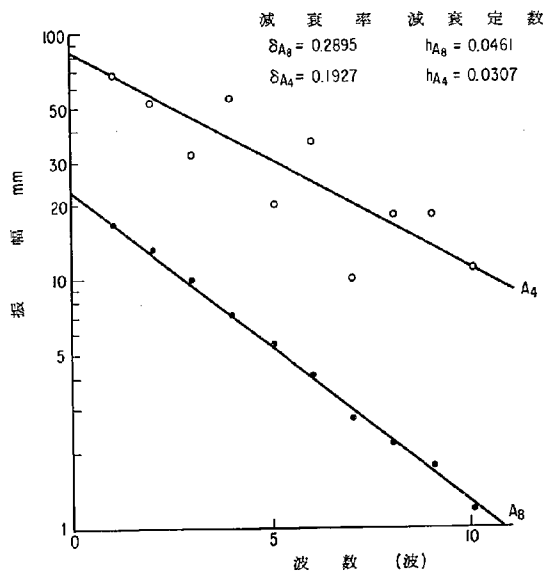
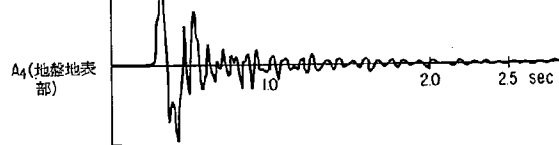


図 6-11 自由振動試験による固有振動数と減衰定数の測定 ($3 < \beta \ell$, クイ頭重量 3.42Kg)

7. 解析モデルによるシミュレーション

模型実験での地盤—クイ基礎系の振動を解析モデルで表現し、模型実験における模型の挙動を解析的にシミュレーションして地盤—クイ基礎系の振動のモデル化について検討した。

7.1 実験 1

解析モデルとしては図7-1に示すようなモデルを考え、解析結果を表7-5および図7-2に示している。

モデル1は静的載荷試験で実測した静的バネ係数(群グイ効果による低減を考慮)を用いた1自由度系モデルであり、この場合の仮想入力面は未定となる。モデル2は、モデル1の仮想入力面を地盤の地表面と考え、さらに地盤の挙動も考慮したモデルである。モデル3は地盤とクイ基礎をバネ—マス系に置き換えたモデルであり、モデル3'はモデル3と同じモデルであるが、地盤とクイ基礎の間の水平方向バネ係数の群グイ効果による低減を考慮したモデルである。なお、解析に用いた各モデルの諸元を表7-1～表7-4に示している。

クイ基礎の共振振動数が地盤の1次共振振動数よりも低振動数側にある模型(群グイ15Kg, 群グイ30Kg, 単グイ15Kg)では、クイの地中部は地盤と同様の位相特性を示し、クイ頭部は地盤とは異なった独自の運動をする傾向があった。このような模型のクイ頭部の挙動は地表面に仮想境界を持ち、地盤の運動を入力と考えた1自由度系の単純なモデルで次のように表わすことができる。

$$m\ddot{X} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (7.1)$$

ここで、 X : クイ頭の絶対変位 (cm)

$$X = x + x_0$$

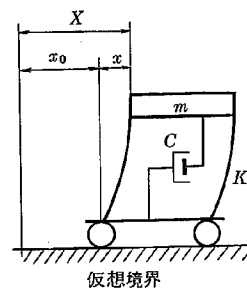
x : クイ頭の相対変位 (cm)

x_0 : 仮想境界面(地表面)での地動変位 (cm)

m : クイ頭質量 ($\text{Kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$)

C : 減衰係数 ($\text{Kg} \cdot \text{sec}/\text{cm}$)

K : バネ係数 (Kg/cm)



1自由度系モデル図

$X = A e^{i\omega t}$, $x_0 = a_0 e^{i\omega t}$ として(7.1)式に代入して整理すると次式が導かれる。

$$K + i\omega C = \frac{m\omega^2 A}{A - a_0} \quad (7.2)$$

ここで、(7.2)式の実部がバネ係数であり、虚部が減衰項である。また、減衰定数 h は次式で表わされる。

$$h = \frac{C}{2\sqrt{mK}} \quad (7.3)$$

正弦波加振試験での測定値を(7.2)式に代入して、動的バネ係数および減衰定数を逆算して求めたものを図7-3に示している。この図からわかるように、群グイ15Kgモデル、群グイ30Kgモデル、単グイ15Kgモデルではバネ係数および減衰定数の変動は比較的少なく、クイ頭部の動きは

1 自由度系としての挙動に近いものと考えられるが、地盤との連成の強い群タイ 0 Kg モデルではバネ係数および減衰定数の変動が大きくなっている。また、図 7-2 の共振曲線を見ると、モデル 1 では地盤の共振点付近の挙動を表現できないが、他の解析モデルによる計算値は実測値と比較的によく一致している。

しかしながら、タイ基礎の共振振動数が地盤の共振振動数よりも高振動数側にある場合（群タイ 0 Kg モデル）は、両者の共振振動数の間の振動数領域での計算値は実測値と多少異なる傾向があり、この領域では減衰定数、バネ係数等の値によって応答量が微妙に変化するため、解析モデルによる応答特性の予測が難しい領域と考えられる。これに対し、タイ基礎の共振振動数が地盤の共振振動数よりも低振動数側にある場合は計算値と実測値はよく一致しており、解析モデルによる応答特性の予測は比較的容易であると考えられる。

タイ基礎の地中部が地盤の動きに支配され、地盤と同位相の挙動を示す場合、タイ頭の応答量は静的載荷試験でのバネ係数を用いて、地盤の地表面の挙動をタイ基礎に輸入するモデル（モデル 2）で十分精度良く算出できる。しかし、タイの断面力等を求めようとする場合はモデル 3、モデル 3' のような解析モデルを考える必要がある。

7.2 実験 2

解析モデルとしては図 7-4 に示すようなモデルを考え、解析結果を表 7-8 および図 7-5 に示している。

モデル 1 は、タイ頭バネ係数（実験 2 では動的バネ係数の値を用いている）を用いた 1 自由度系モデルであり、タイ頭部の動きが 1 自由度系としての挙動に近い弾性体的なタイ基礎模型（ $3 < \beta l$ モデル、 $1 < \beta l \leq 3$ モデル）に適用した。モデル 2 は回転と並進を考慮した 2 自由度系モデルであり、モデル 2' はさらに地盤の挙動も考慮したバネ-マス系モデルで、これらは剛体的なタイ基礎模型（ $\beta l \leq 1$ モデル）に適用した。なお、実験 2 では図 7-5 に示したように解析モデルによる計算値と実測値の比較は、タイ頭の応答加速度と地盤（入力位置と考えられる測点）の応答加速度の比で検討している。図 7-5 を見ると $3 < \beta l$ モデル、 $1 < \beta l \leq 3$ モデルでは実測値と 1 自由度系解析モデルによる計算値は比較的よく一致している。一方、 $\beta l \leq 1$ モデルでは静的載荷試験から求めた静的バネ定数を用いた場合の固有振動数と正弦波加振試験での共振振動数が異なっていることなどから、剛体 2 自由度系モデルによる計算値と実測値は一致していないが、地盤の挙動も考慮したバネ-マス系モデルによれば解析精度は良くなっている。また、 $3 < \beta l$ モデル、 $1 < \beta l \leq 3$ モデルの正弦波加振試験での測定値を (7.2) 式に代入して、動的バネ係数および減衰定数を逆算して求めたものを図 7-6 に示しているが、入力振動数に対する動的バネ係数の変動は小さく、このような場合にはタイ頭部の挙動を 1 自由度系の簡単な解析モデルで表現することが可能である。

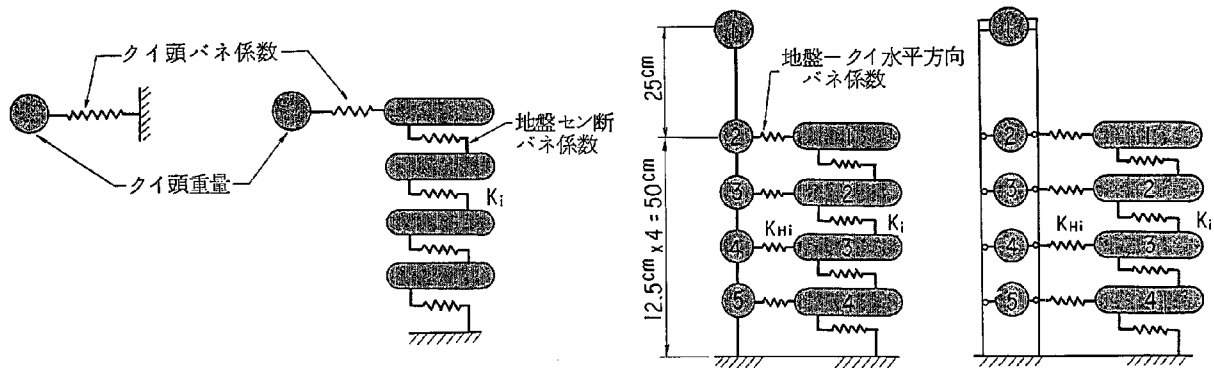
モデル 1

モデル 2

モデル 3, 3'

単グイモデル

群グイモデル



註 モデル 3' はモデル 3 と同じモデルであるが、群グイ効果によるバネ係数の低減を考慮している。

図 7-1 解析モデル (実験 1)

表 7-1 解析に用いたクイ 1 本当りの諸元 (実験 1)

ク イ 径 D	3.03cm
断 面 積 A	7.26cm ²
断面 2 次モーメント I	4.15cm ⁴
弾 性 定 数 E	$3.12 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$
単 位 体 積 重 量 γ	$1.20 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$
単 位 長 さ 当 り の 重 量 w	$8.67 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}$

表 7-2 解析に用いたクイの格点重量 (単位: Kg) (実験 1)

モデル	群グイ 0 Kg	群グイ 1.5 Kg	群グイ 3.0 Kg	単グイ 1.5 Kg
1	3.9	17.7	31.6	2.2
2 ~ 5	0.43	0.43	0.43	0.11

表 7-3 解析に用いた地盤—クイ水平方向バネ係数 (単位: Kg/cm) (実験 1)

モデル	群グイ	単グイ
1	351.6 (202.5)	87.9
2 ~ 4	703.2 (405.0)	175.8

注 () 内はモデル 3' の値を示す。

表 7-4 解析に用いた地盤重量およびせん断バネ係数 K_i (実験 1)

i	層 厚 (cm)	重 量 (Kg)	K_i (Kg/cm)
1	12.5	108	9654
2 ~ 4	12.5	217	9654

表 7-5 共振振動数の実測値と解析モデルによる計算値の比較 (実験 1)

モ デ ル		群グイ 0 Kg	群グイ 1.5 Kg	群グイ 3.0 Kg	単グイ 1.5 Kg	地盤のみ
クイ頭実重量 (Kg)		3.93	17.73	31.56	2.19	—
クイの共振振動数 (Hz)	実 測 値	17.5	8.8	6.7	7.8	—
	計 算 値	モデル 1	18.2	8.6	8.3	—
		モデル 2	18.3	8.4	8.3	—
		モデル 3	19.6	8.9	9.3	—
		モデル 3'	17.8	8.1	—	—
地盤の共振振動数 (Hz)	実 測 値	12.5	13.5	13.0	12.8	12.0
	計 算 値	モデル 1	—	—	—	—
		モデル 2	12.9	13.2	13.1	—
		モデル 3	12.9	13.4	13.3	—
		モデル 3'	12.8	13.7	13.3	—

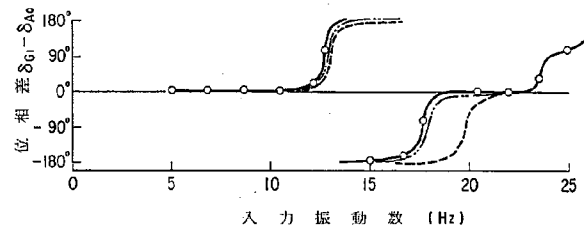
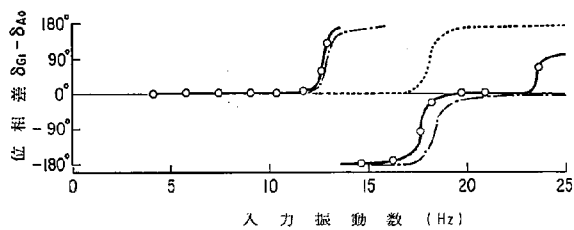
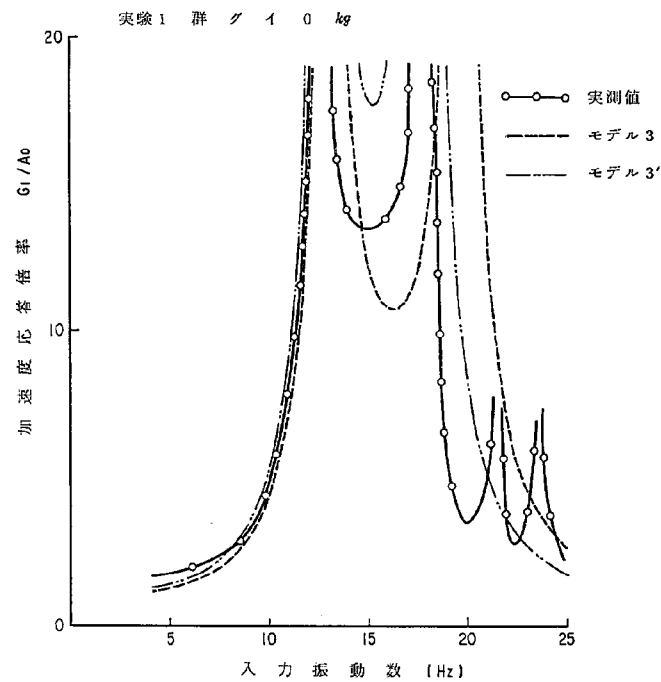
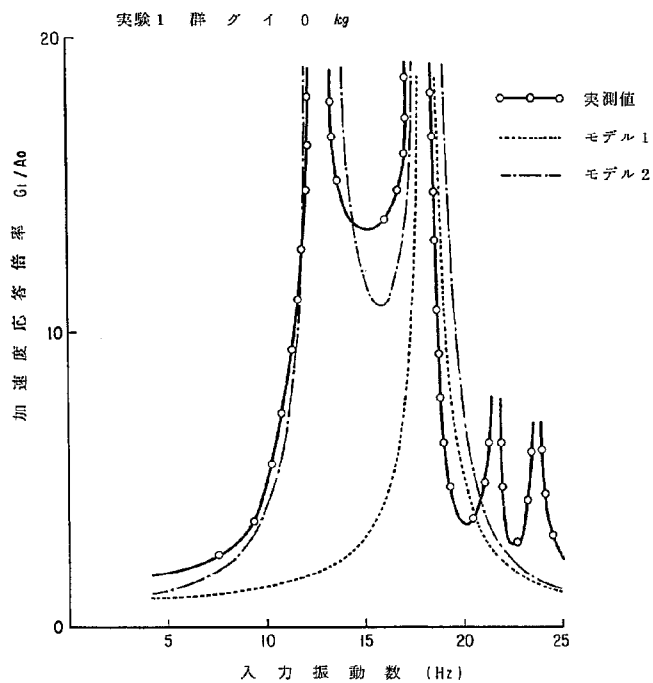


図 7-2-1 解析モデルによる計算値と実測値の比較 (群グイ 0 kg)

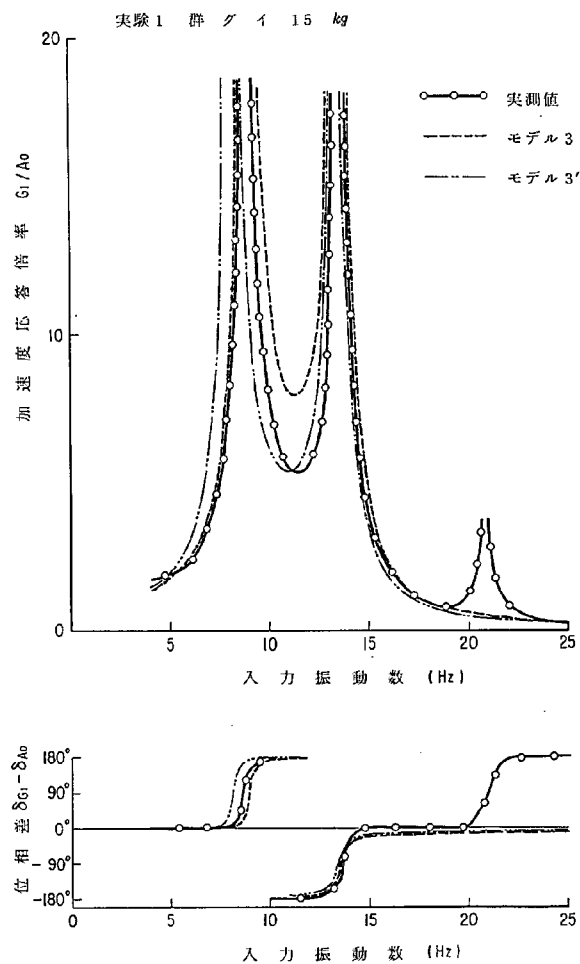
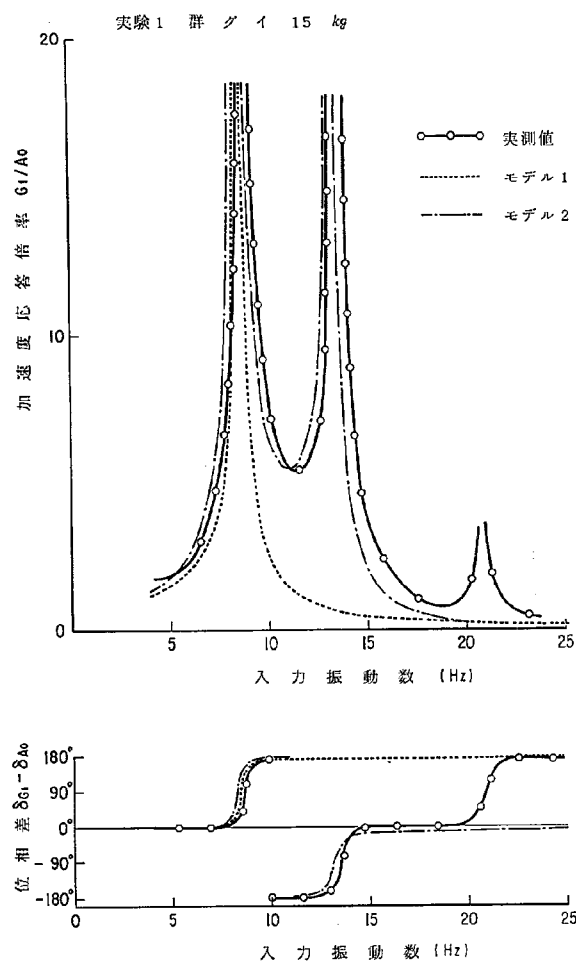


図 7-2-2 解析モデルによる計算値と実測値の比較 (群グイ 15Kg)

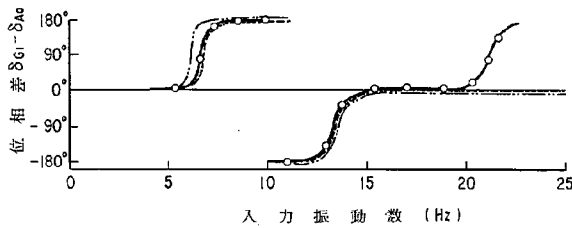
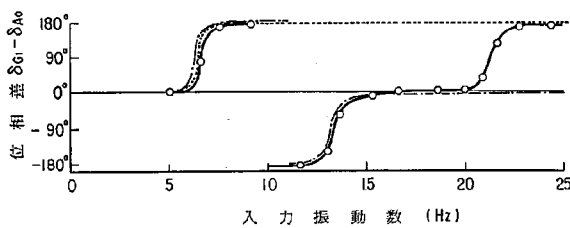
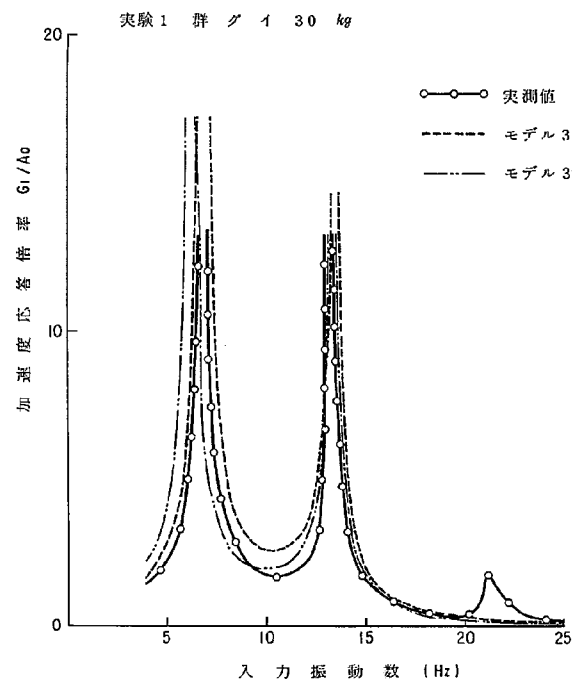
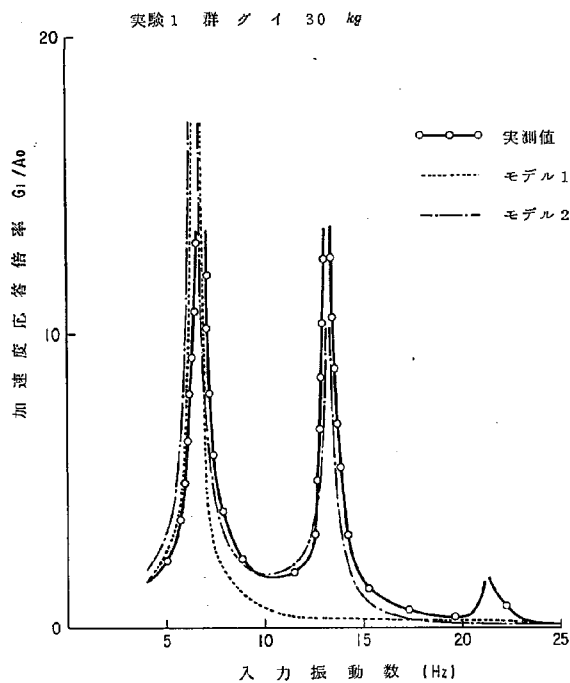
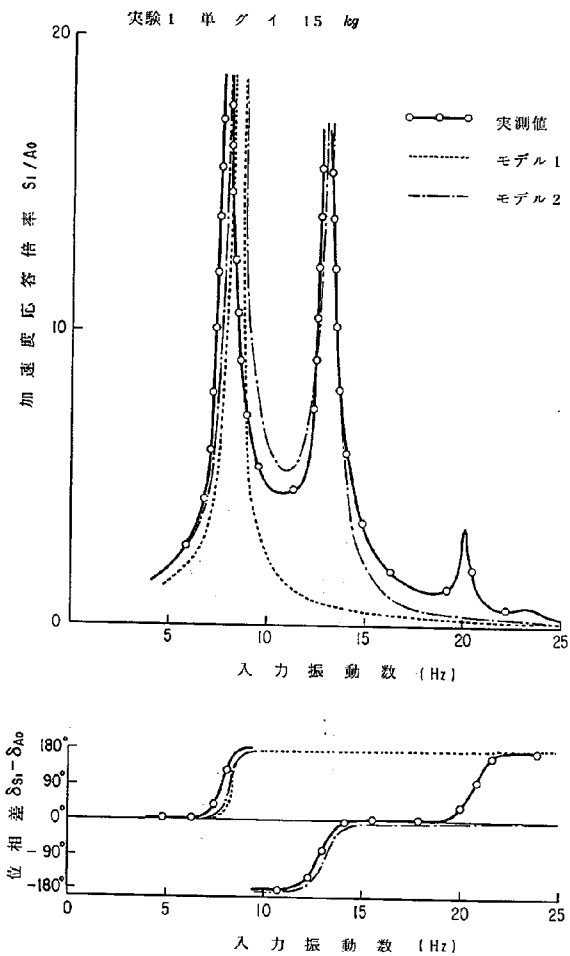


図7-2-3 解析モデルによる計算値と実測値の比較(群グイ30Kg)



(注) モデル3による検討は省略している。

図7-2-4 解析モデルによる計算値と実測値の比較(単グイ15Kg)

実験1 群グイ 0 kg モデル

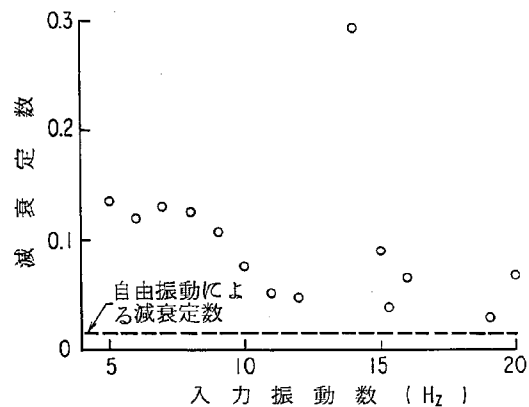
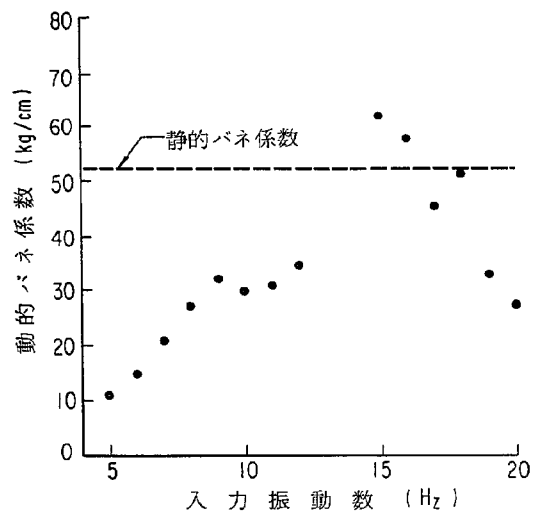


図7-3-1 入力振動数とバネ係数，減衰定数の関係
(群グイ 0 kg)

実験1 群グイ 15 kg モデル

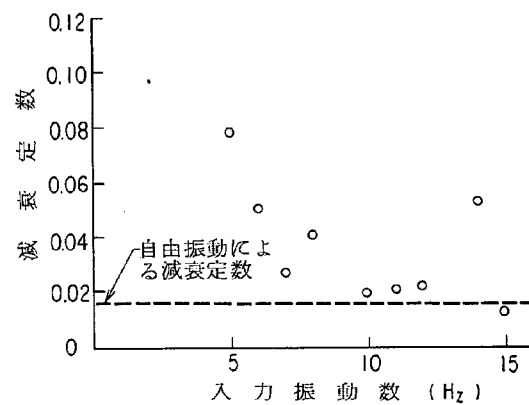
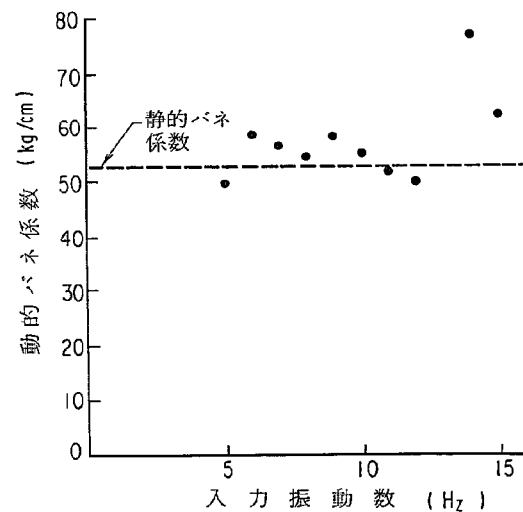


図7-3-2 入力振動数とバネ係数，減衰定数の関係
(群グイ 15 kg)

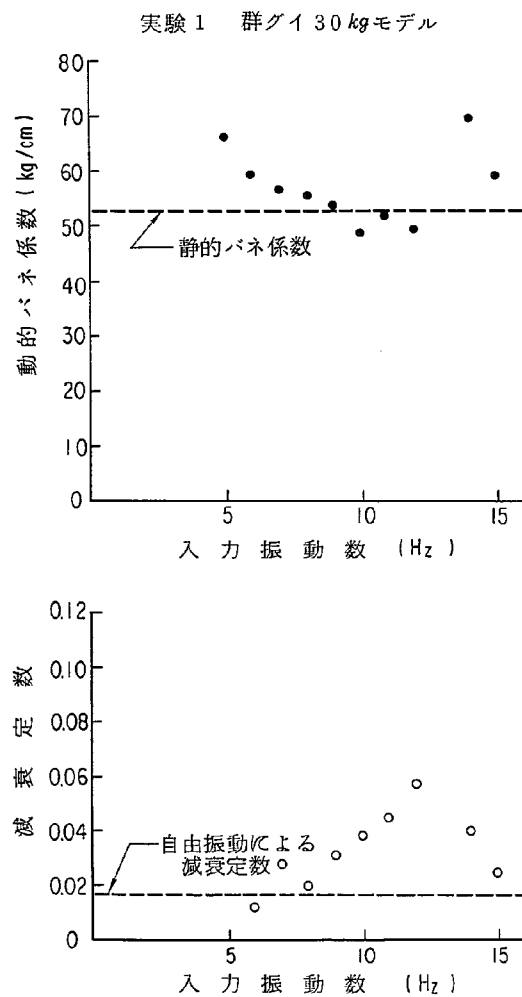


図7-3-3 入力振動数とバネ係数, 減衰定数の関係
(群グイ 30 kg)

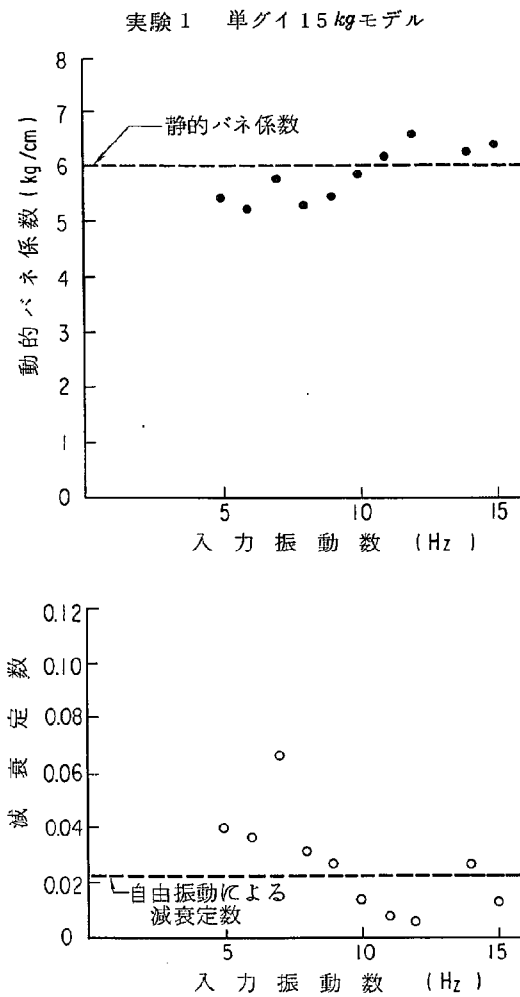
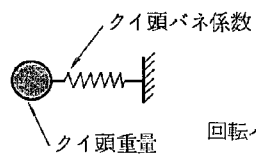
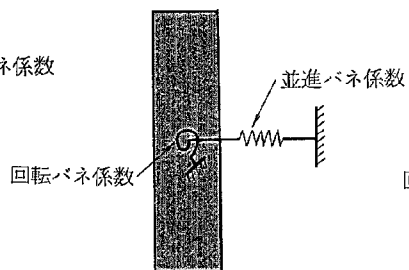


図7-3-4 入力振動数とバネ係数, 減衰定数の関係
(単グイ 15 kg)

モデル 1
(1 自由度系モデル)



モデル 2
(2 自由度係モデル)



モデル 2'
(バネマス系モデル)

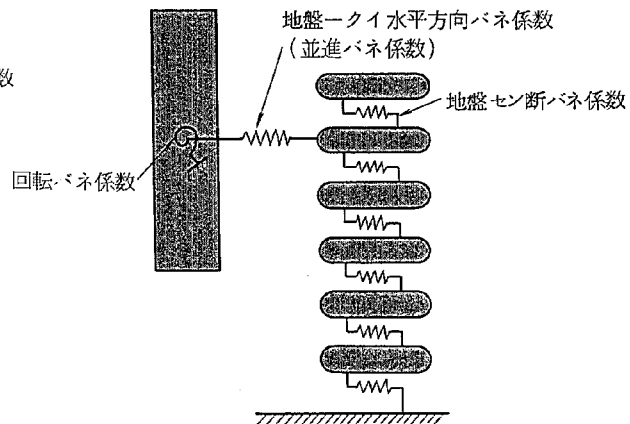


図 7 - 4 解 析 モ デ ル (実 験 2)

表 7-6 解析に用いたクイの諸元 (実験 2)

モ デ ル	$3 < \beta \ell$ ($\beta \ell = 4.20$)	$1 < \beta \ell \leq 3$ ($\beta \ell = 2.64$)	$\beta \ell \leq 1$ ($\beta \ell = 0.78$)
ク イ 厚 さ d (cm)	0.8	1.6	8.0
ク イ 幅 D (cm)	10	10	10
断 面 積 A (cm ²)	8.0	16.0	80.0
断面 2 次モーメント I (cm ⁴)	0.427	3.41	4.27×10^2
弾 性 定 数 E (Kg/cm ²)	3.39×10^4	2.76×10^4	—
単 位 体 積 重 量 γ (Kg/cm ³)	1.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}
ク イ 頭 重 量 (Kg)	3.42	3.42	3.42
ク イ 基 礎 全 重 量 (Kg)	—	—	6.79
回 転 慣 性 (Kg·cm ²)	—	—	1.10×10^3

表 7-7 解析に用いたバネ係数 (実験 2)

$3 < \beta \ell$ モデル	クイ頭バネ係数 $K = 11 \text{ Kg/cm}$
$1 < \beta \ell \leq 3$ モデル	クイ頭バネ係数 $K = 26 \text{ Kg/cm}$
$\beta \ell \leq 1$ モデル	並進バネ係数 $K_h = 2.69 \times 10^2 \text{ Kg/cm}$ 回転バネ係数 $K_r = 3.08 \times 10^4 \text{ Kg·cm/rad}$ バネ作用位置 $h_0 = 20.7 \text{ cm}$

表 7-8 共振振動数の実測値と解析モデルによる計算値の比較 (実験 2)

モ デ ル		$3 < \beta \ell$ ($\beta \ell = 4.20$)	$1 < \beta \ell \leq 3$ ($\beta \ell = 2.64$)	$\beta \ell \leq 1$ ($\beta \ell = 0.78$)	地盤のみ
クイの共振 振動数(Hz)	実 測 値	8.9	13.8	15.2	—
	計 算 値	8.9	13.8	—	—
		—	—	20.9	—
		—	—	21.0	—
地盤の共振 振動数(Hz)	実 測 値	11.8	11.3	11.4	12.8
	計 算 値	モデル 1	—		
		モデル 2	—		
		モデル 2'	—	—	12.6

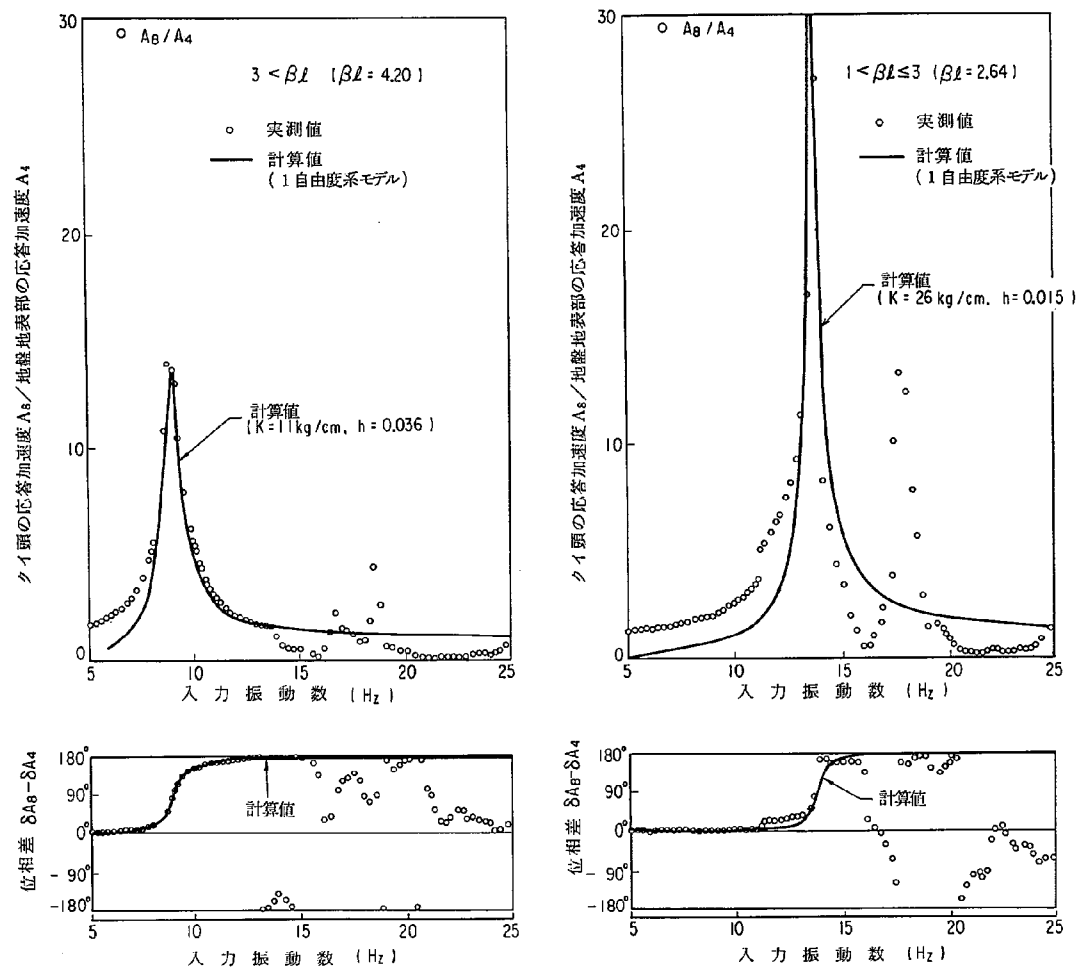


図 7-5-1 解析モデルによる計算値と実測値の比較 (実験 2)

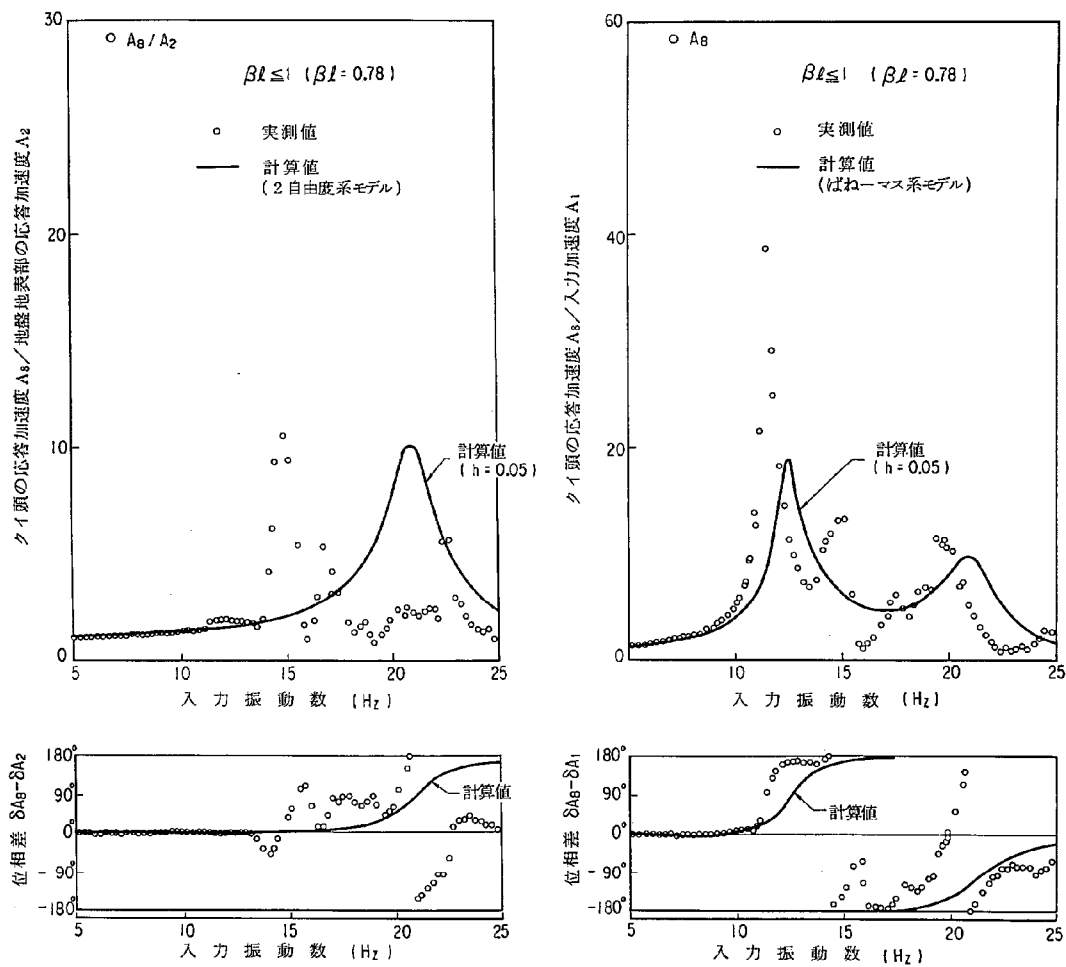


図 7-5-2 解析モデルによる計算値と実測値の比較 (実験 2)

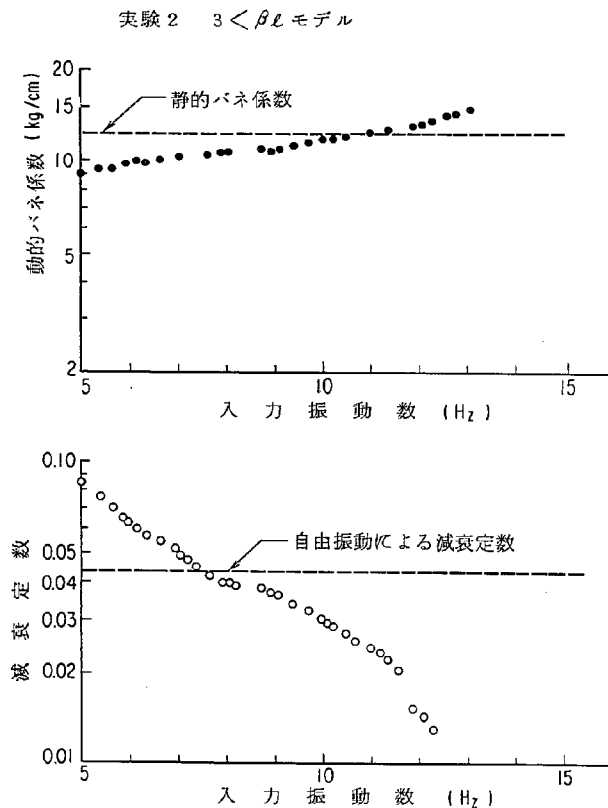


図7-6-1 入力振動数と動的バネ係数，減衰定数の関係 ($3 < \beta L$ モデル)

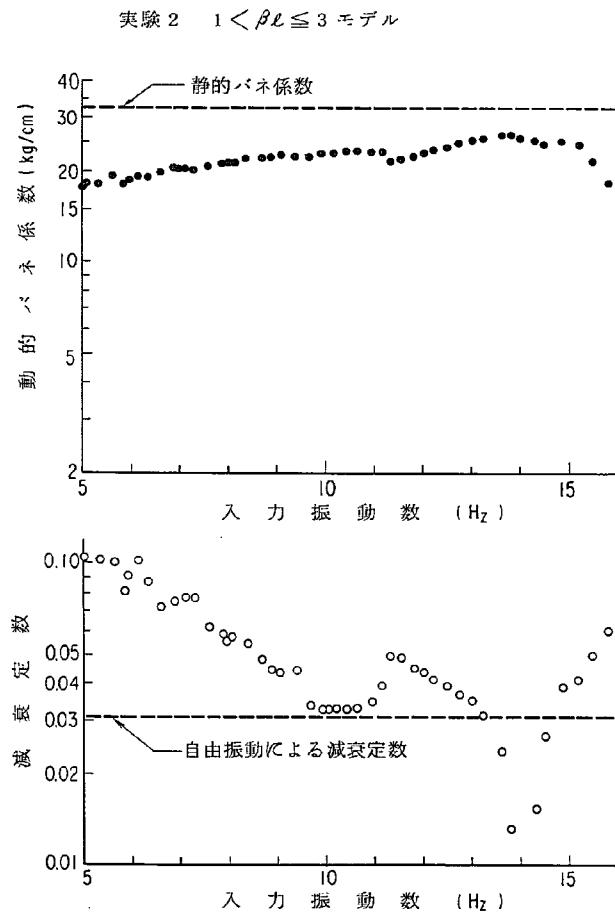


図7-6-2 入力振動数と動的バネ係数，減衰定数の関係 ($1 < \beta L \leq 3$ モデル)

8. ま と め

以上に示した実験によって、以下の結論が得られた。

- (i) クイ基礎は地盤の動きに大きく影響され、地盤の共振点では地盤の共振振動に伴いクイ基礎の応答も大きくなる。一方、クイ基礎自体の共振点ではクイの地上部分は共振して応答が大きくなるが、クイの地中部分の共振振動は地盤に拘束され、地上部分に比べて応答は小さくなり、クイの地上部分と地中部分で位相のずれが生じる傾向がある。すなわち、クイの地上部分は地盤とクイ基礎のそれぞれの共振点で大きな応答を示し、一方、クイの地中部分は地盤の共振点のみで応答が大きくなる傾向がある。この場合、クイの地中部分は地盤と同位相の運動を示し、クイの地上部分は地盤とは位相の異なる独自の運動を示している。この傾向はクイの地盤に対する相対的な剛性度を表わす βl の値が大きく (1 より大)、弾性体的で柔らかなクイ、クイ頭重量が大きなクイ、また群グイよりも単グイで強くなっており、このような場合のクイ頭の動きは地表面を入力位置として地表面での地盤の運動を入力と考えた 1 自由度系モデルで表現することが可能である。
- (ii) クイ基礎が地盤の運動に与える影響は、クイ頭重量が大きいほど、また単グイよりも群グイの方が大きく、地盤の地中部分よりも地表面付近でクイ基礎の影響が現われる傾向がある。
- (iii) クイ基礎の復元力特性をバネ係数 (水平載荷力 / 水平変位) で表現した場合、群グイのバネ係数は単グイとしてのバネ係数を本数倍したものに比べて小さな値となる傾向がある (群グイ効果)。
- (iv) 動的な外力が加わった場合にクイ基礎が共振するおそれのある共振振動数は、クイ基礎を自由振動させた場合の自由振動数にほぼ一致する。また、 βl の値が大きく (1 より大)、弾性体的で柔らかなクイで、クイ頭重量が比較的大きく、クイ頭が 1 自由度系的な挙動を示すクイ基礎では、静的載荷試験から求めるクイ頭バネ係数 (クイ頭水平載荷力 / クイ頭水平変位) とクイ頭重量から 1 自由度系として算出した固有振動数によってクイ基礎の共振振動数を推定することが可能である。
- (v) クイ基礎の減衰定数は、クイ頭重量が大きいほど大きくなる傾向がある。すなわち、クイ頭に載荷している重量が大きいほど、クイ基礎の振動の減衰が早いものと考えられる。
- (vi) 解析モデルによってクイ基礎の挙動を予測する場合、地盤の挙動も考慮に入れた多自由度バネ-マス系モデルによれば精度良く予測することができる。ただし、この場合の計算は複雑であり、 βl の値が大きく (1 より大)、弾性体的で柔らかなクイで、クイ頭重量が比較的大きな場合は、地表面を入力位置として地表面での地盤の運動を入力とした 1 自由度系モデルでクイ頭の挙動を表現することができる。また、クイ基礎の共振振動数が地盤の共振振動数よりも低振動数側にある場合は解析モデルによりクイ基礎の挙動を精度良くシミュレートしやすく、それに対してクイ基礎の共振振動数が地盤の共振振動数よりも高振動数側にある場合には解析モデルによるシミュレーションは精度が悪くなる傾向があり、特に地盤の共振点とクイ基礎の共振点の間の振動数領域は解析モデルによるクイ基礎の地震応答の予測が難しい領域となっている。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所：基礎杭と地盤の動的相互作用に関する実験，土木研究所資料 第1039号，昭和50年4月
- 2) 建設省土木研究所：地震時における地盤の変形を考慮した基礎杭の応力算定法，土木研究所資料 第972号，昭和49年10月
- 3) 栗林栄一，川島一彦，友沢武昭：基礎杭の動的性状に関する模型実験，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第1部，昭和52年10月
- 4) 栗林栄一，萩原良二，宮田忠明：地中梁と表層地盤の剛性による動的相互作用，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第1部，昭和53年9月
- 5) 駒田敬一：土木構造物のクイの水平抵抗，土と基礎 Vol.25, No.8, 1977年8月
- 6) 土質工学会：鋼グイ，土質基礎工学ライブラリー6，昭和47年8月
- 7) 土質工学会：土と構造物の動的相互作用，土質基礎工学ライブラリー9，昭和48年10月
- 8) 小堀鐸二，南井良一郎，井上 豊，鎌田輝男：Ground Complianceを考慮した弾塑性構造物の地震応答，PROCEEDINGS OF JAPAN EARTHQUAKE ENGINEERING SYMPOSIUM 1966, 1966年10月
- 9) Housner, G.W.: Effect of foundation compliance on earthquake stress in multistory buildings, BSSA, 44, 1954年
- 10) Penzien, J., C.F.Scheffey, and R.A.Parmelee: Seismic analysis of bridge on long piles, ASCE, Vol.90, EM3, 1964年6月
- 11) 小坪清真，高西照彦：鋼橋脚の耐震性におよぼす基礎地盤変形の影響，土木学会論文集 第156号，昭和43年8月
- 12) 田治見 宏：深い基礎を有する剛構造物の地震応答について，第2回日本地震工学シンポジウム論文集，1966年
- 13) 土木学会：地震応答解析と実例，昭和48年3月
- 14) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針，同解説「くい基礎の設計篇」，昭和51年8月
- 15) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針，同解説「ケーソン基礎の設計篇」，昭和46年3月