

道 路 事 業 調 査	
大規模特殊事業計画調査	
本州・四国連絡架橋調査	
耐 震 調 査	資料番号 13

土 木 研 究 所 資 料

第 3 4 2 号

鳥 井 大 橋 振 動 試 験

昭 和 4 3 年 2 月

建設省土木研究所耐震調査室

まえがき

本資料は、国道49号線の改良工事の一環として、福島県西会津町と新潟県津川町にまたがる鳥井峠に東北地方建設局が架設中の鳥井大橋(三径間連続曲線鈑桁、橋長114m)において、橋脚基礎(井筒)の施工が完了したところで、同建設局の協力のもとに昭和42年10月に土木研究所が行なったP₁ 橋脚基礎(井筒)の振動試験結果をとりまとめ、検討を施して報告し、本州四国連絡架橋耐震調査の一資料とするものである。

本振動試験においては、井筒の頂板上に設置した10t型起振機により、橋軸方向ならびに橋軸直角方向の加振を行い、構造物各点の応答を観測し、その固有振動特性ならびに周辺地盤の弾性的性質を明らかにしたものである。

本試験の実施にあたっては、東北地方建設局の黒木正輝構造係長、群山国道工事々務所の薄葉祐定建設監督官、同事務所浜野勝茂企画係長、企画係の佐藤豊技官、早川信技官および同事務所会津若松出張所大場郁雄技官の十二分の御協力を得て、別段支障も起こさずに試験を実施することができた。今回、本資料刊行にあたり、上記各位に対し深く感謝の意を表するものである。

なお本振動試験は下記の如き任務分担のもとに実施された。

試験計画及び報告	土木研究所耐震調査室研究員	岩崎敏男
	"	小山田欣裕
試験作業総括	"	小山田欣裕
試験直接担当	" 研究補助員	三牧翹
起振機制御	" "	三牧翹
計測	" "	高安栄寿
試験結果整理解析	" "	斉藤俊三
計測作業補助	土木研究所千葉支所庶務課	中村清
"	郡山国道工事々務所企画係	佐藤豊
"	"	早川信

昭和43年2月1日

建設省土木研究所耐震調査室

研究員 岩崎敏男

" 小山田欣裕

目 次

ま え が き

写 真 集	1
§ 1 鳥井大橋の概要	13
§ 2 振動試験の概要	19
2.1 試験の目的	19
2.2 固有周期の推定	19
2.3 加振方法	24
2.4 試験工程および計器の配置	25
2.5 測定方法	26
§ 3 試験結果	31
3.1 試験結果の解析法	31
3.2 固有振動特性	35
3.3 静土圧、動土圧および動的地盤係数	38
§ 4 試験結果の検討	41
4.1 橋軸方向	41
4.2 橋軸直角方向	45
結 論	52
共振曲線	55
参 考 文 献	59

鳥井大橋振動試験

I. 橋脚基礎架設時における測定計器の埋設

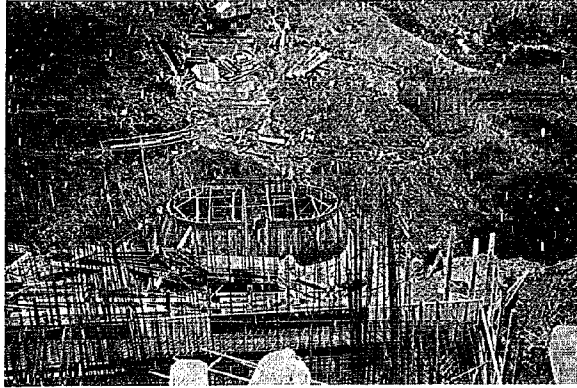


写真-1 井筒基礎の架設(遠景)

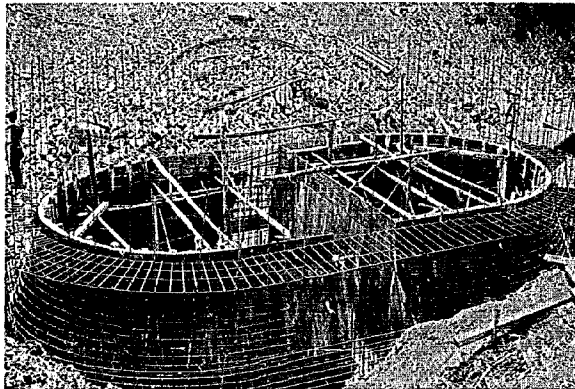


写真-2 井筒基礎の架設(近景)

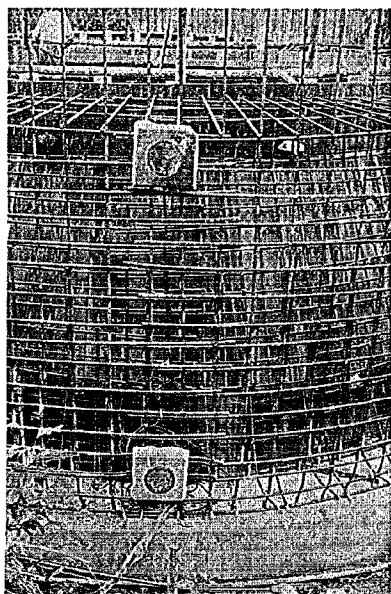


写真-3 土 圧 計

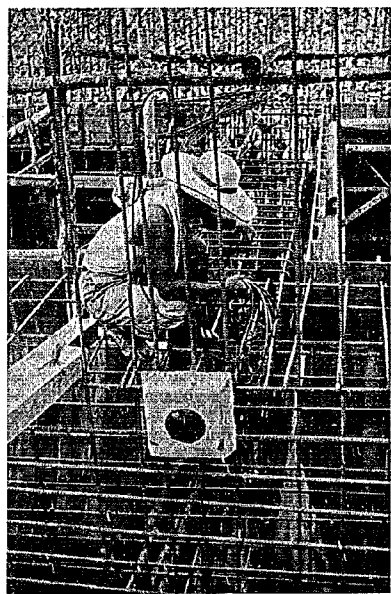


写真-4 土 圧 計

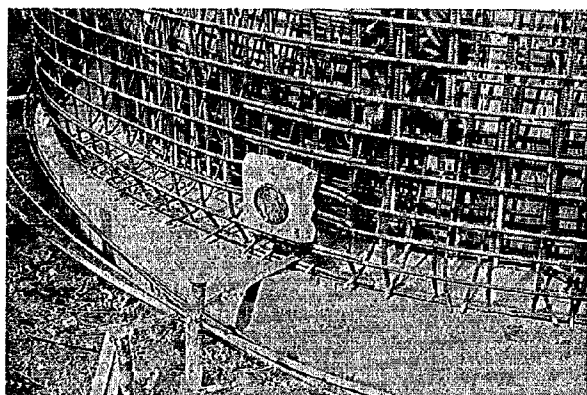


写真-5 土 圧 計

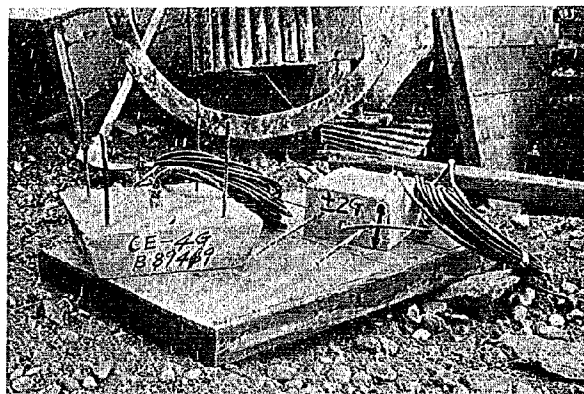


写真-6 加 速 度 計

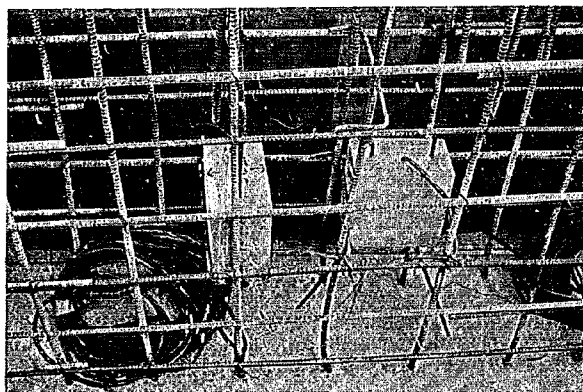


写真-7 加 速 度 計

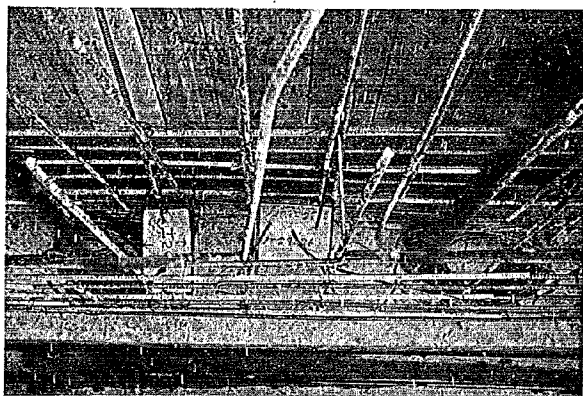


写真-8 加 速 度 計

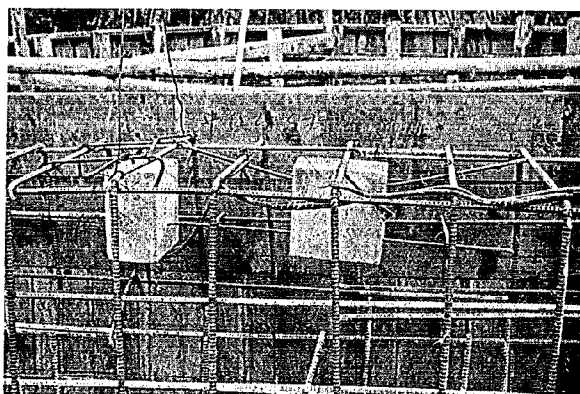


写真-9 加 速 度 計

II . 振 動 試 験

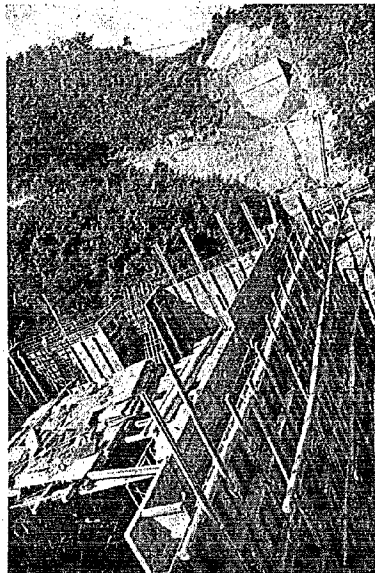


写真-10 現場一望

手前の型枠は福島側橋台、上方に
白く見えるのは新潟側橋台である。
クレーン車のあるあたりが P_1 橋脚、
それより福島よりに P_2 橋脚がくる。



写真-11 現場一望

手前のパイプ足場は P_2 橋脚架設用
足場で、その右に木のかげになって
白く見えるのが、試験用テント小屋
である。上方は新潟側橋台である。

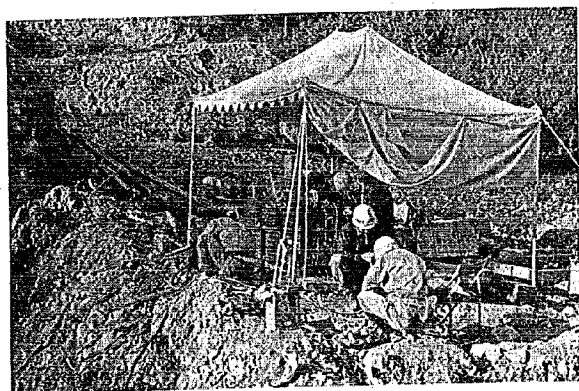
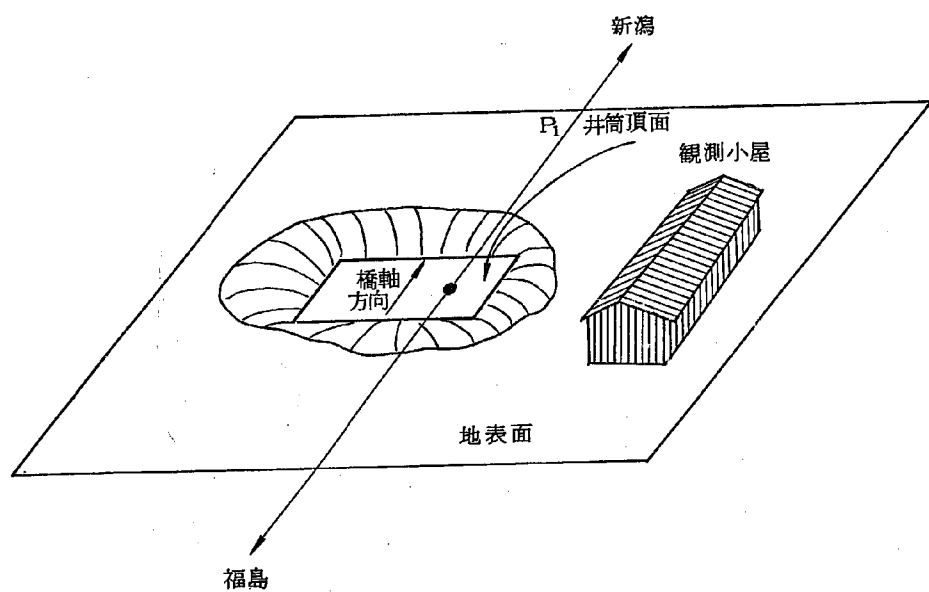


写真-12 配線中 (左方のくぼみに P_1 井筒がある)

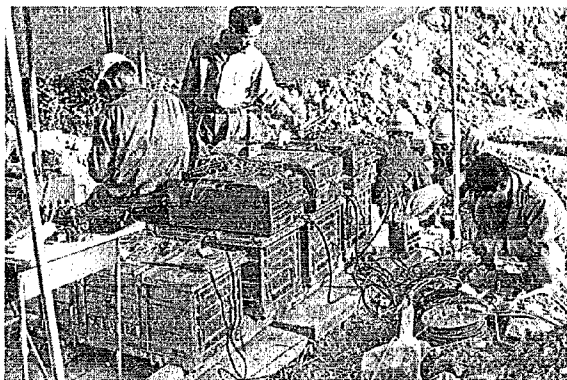


写真-13 配 線 中

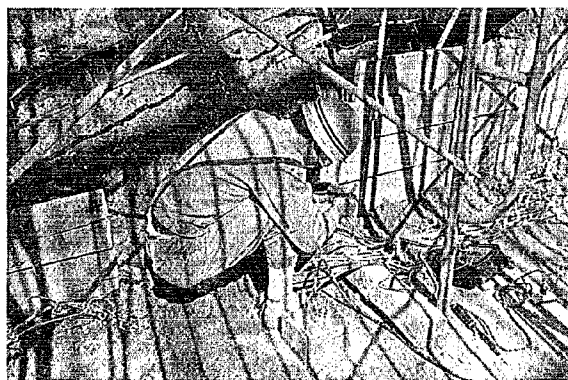


写真-14 埋設計器リード線の点検

(右側の黒い器体はテスター、手前の木枠
の中に立っているのは三成分型加速度計)

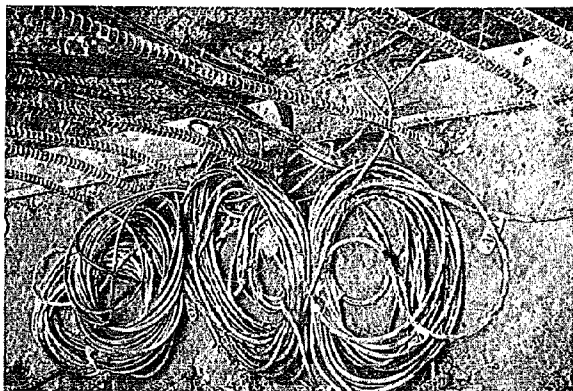


写真-16

埋設計器のリード線



写真-17

三成分型加速度計
(井筒頂面の右端)

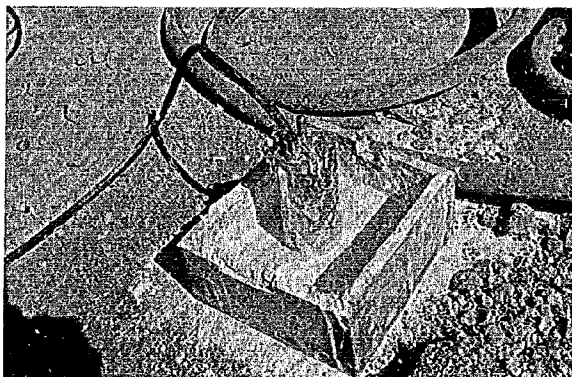


写真-18

三成分型加速度計

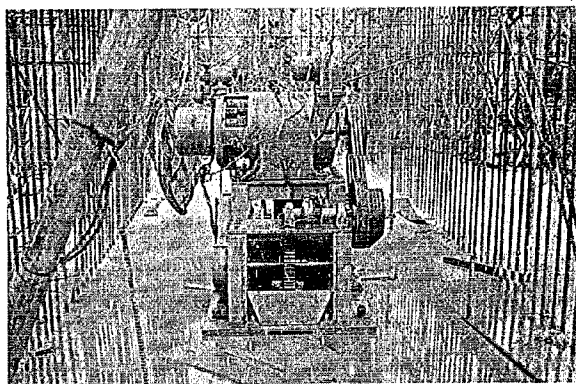


写真-20 10 t 型起振機(橋軸直角方向加振)

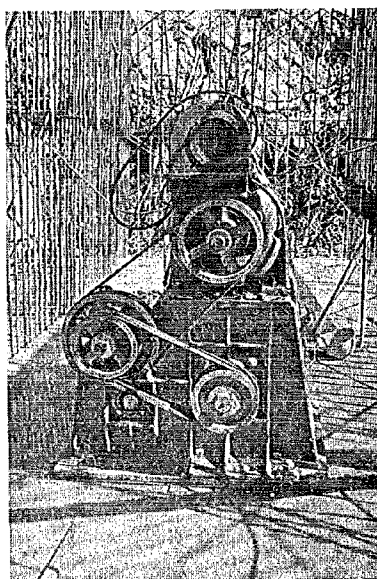


写真-21 10 t 型起振機(橋軸方向加振)

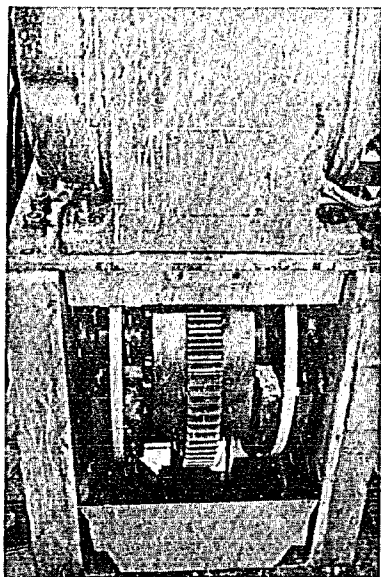


写真-22 起振機を正面より見る

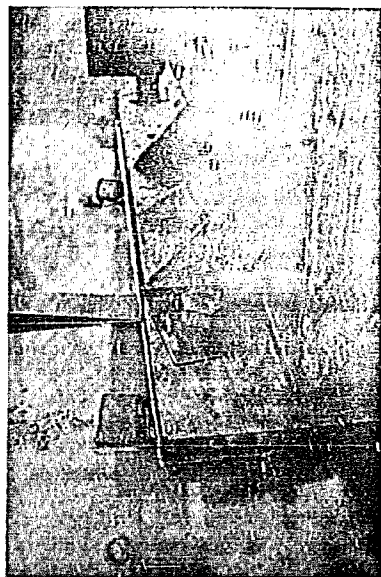


写真-23 起振機の取り付け



写真-24 実験開始(起振機制御スイッチをいつでも切れるように備えている。)

§ 1 鳥井大橋の概要

§ 1. 鳥井大橋の概要

本橋の概要は表-1.1のとおりである。また、架設地点の平面図、橋梁一般図、橋脚一般図、試験時の状況概略図をそれぞれ図-1.1～4に示す。

表-1.1 鳥井大橋の諸元

管 轄	建設省東北地方建設局 郡山国道工事々務所	
路 線 名	国道49号線	
位 置	福島県耶麻郡西会津町大字宝坂 } 間 新潟県東蒲原郡津川町大字鳥井	
橋 格	一等橋	
橋 種	3径間連続曲線鈑桁	
橋 長	114 m (36m+42m+36m)	
幅 員	7 m	
下 脚 柱	鉄筋コンクリート(小判型)	
部 基 礎	" 井筒	
工 期	昭和42年6月～43年3月	

図-1.1 架設地点平面図

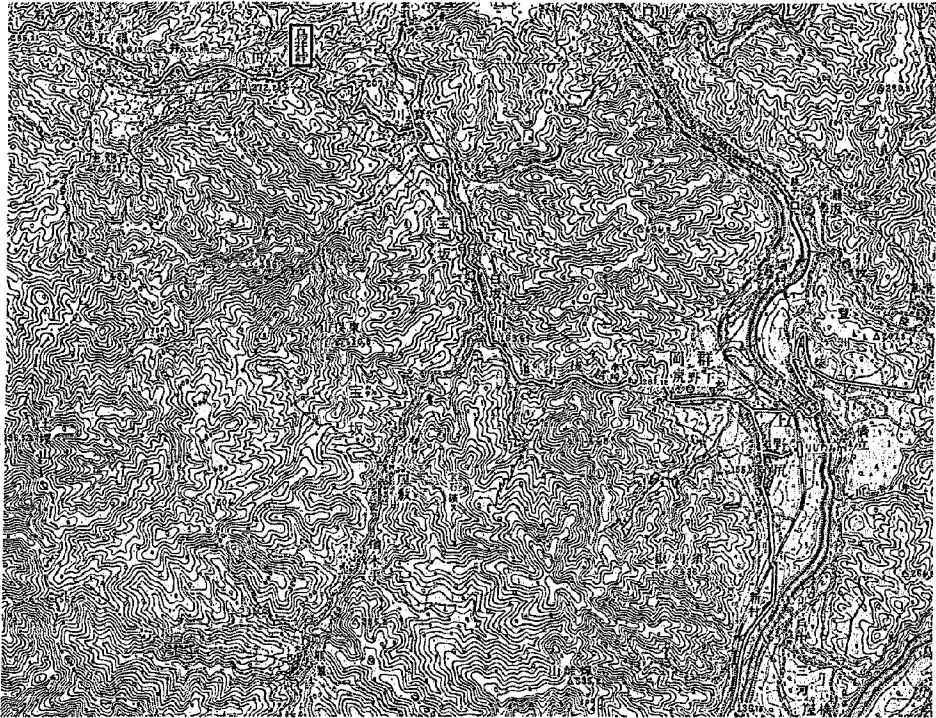


図-1.2 鳥井大橋一般図

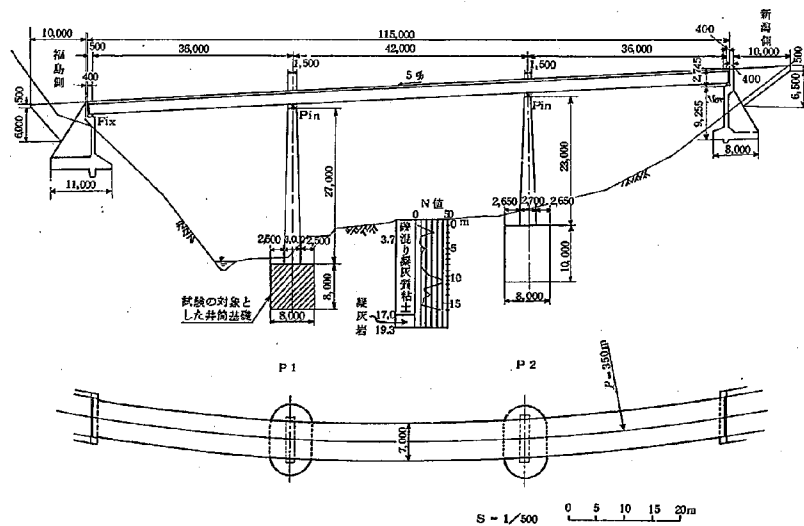


図-1.3 島井大橋 P_1 橋脚一般図

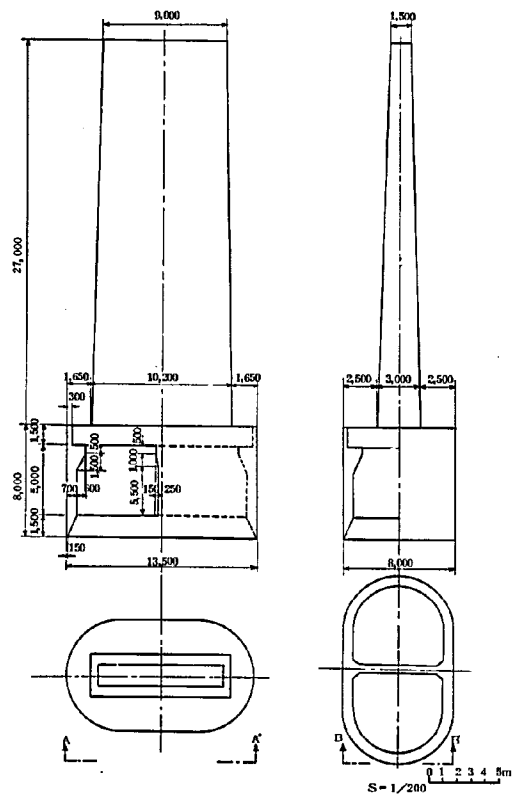
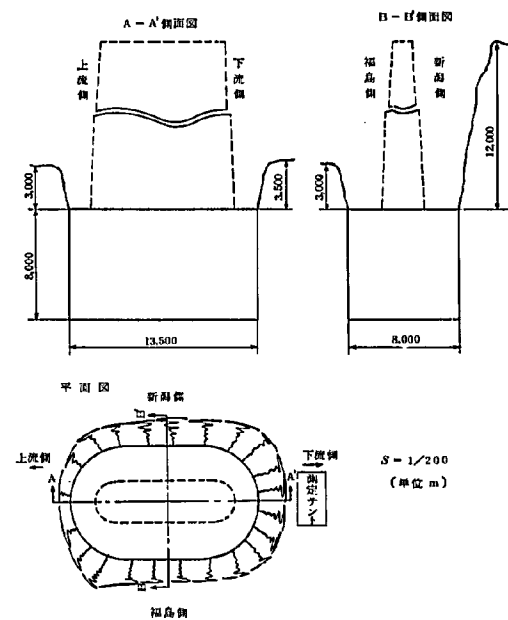


図-1.4 試験時の状況概要図



§ 2 振 動 試 験 の 概 要

2. 1 試験の目的

2. 2 固有周期の推定

2. 3 加振方法

2. 4 試験工程および計器の配置

2. 5 測定方法

§2. 振動試験の概要

2.1 試験の目的

本試験の主要な目的は、高い橋脚を有する鳥井大橋の耐震安定性を検討するための資料を得ることであり、その一環として今回はとくに地中に埋めこまれた井筒基礎(P_1)の固有振動特性を明らかにしたものである。

基礎単体に関するこの種の実験は数少く、また井筒の形がずんぐりしていて本州四国連絡橋の吊橋主塔基礎に似ていることなどの点からも、本試験は興味深いものである。

さて、上記の目的のために、井筒の天端を起振機により人工的に加振し、具体的には次の諸点について結果の検討を行なったものである。

- (1) 固有周期(1次) — 既往の固有周期算定式の妥当性
- (2) 振動モード(1次) — ロッキング中心の位置
- (3) 減衰定数
- (4) 地盤の動的性質 — 動土圧、動的地盤係数(K 値)
- (5) 地盤の弾性係数

2.2 固有周期の推定

本振動試験を行なうに先立ち、加振々動数範囲および起振機の機種を決定するため、4種類の力学モデルを設定し、地盤係数を適当に仮定して固有周期の算定を行なった。以下に固有周期の算定法の概略 — 詳細は文献(1)~(5)を参照の事 — とその計算結果を示すこととする。計算に用いられた P_1 井筒基礎の寸法は高さ8m、橋軸方向最大巾8m、橋軸直角方向最大巾13.5mで小判型断面をしている。現場の状況その他から判断し、井筒内部には単位体積重量 $\gamma_s=1.8$ 程度の中詰土砂が入っていると想定すると、振動体の重量は全重で1,650t、単位体積重量で2.188t/m³となる。また鉛直方向地盤反力係数 K_v および水平方向地盤反力係数 K_H は文献(10)によりそれぞれ10,000t/m³、3,000t/m³とする。

【1】 1自由度のロッキング振動として解く方法(Biotの方法)

図-2.1(a)のごとく剛体が弾性的支持層に取り囲まれているものとして、これを同図(b)のごとき力学モデルに置きかえ、これが底面中心のまわりにロッキング振動を行なうとした場合の固有周期はM. A. Biotにより(2.1)のごとく与えられる。

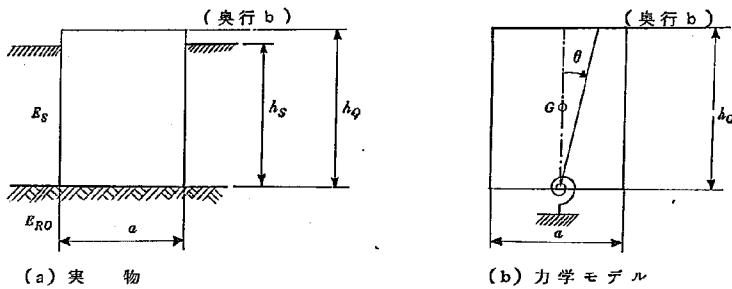
$$T = \sqrt{\frac{16\pi}{3g} (1 - \nu_R^2)} \cdot \sqrt{\alpha_1 (4\alpha_1^2 + 1)} \cdot \alpha_2 \quad (a)$$

$$\alpha_1 = h_0/a, \quad \alpha_2 = a\sqrt{w/E_R} \quad (b)$$

$$E_R = E_{RO} \left(1 + 4 \frac{h_s^2}{a^2} \cdot \frac{E_s}{E_{RO}} \right) \quad (c)$$

..... (2.1)

図-2.1 Biotの方法における力学モデル



ただし上式中の記号は

- T : 固有周期 (sec)
 a : 構造物の振動方向巾 (m)
 h_0 : " 全高 (m)
 h_s : 根入れ深さ (m)
 E_{RO} : 底面地盤の弾性係数 (t/m²)
 E_R : 側面地盤のバネ効果を考慮した弾性係数 (t/m²)
 E_s : 側面地盤の弾性係数 (t/m²)
 ν : 土のポアソン比
 w : 井筒の単位体積重量 (t/m³)
 g : 重力の加速度 (m/sec²)

こゝで、便宜的に $E_{RO} = E_s$, $\nu_R = 0$ と仮定すると

$$T = 1.307 \sqrt{\alpha_1 (4\alpha_1^2 + 1) \cdot \alpha_2} \quad (a)$$

$$E_R = E_{RO} (1 + 4h_s^2/a^2) \quad (b)$$

..... (2.2)

となり、この式に $E_{RO} = 10,000$ t/m² と仮定して代入すると、橋軸方向および橋軸直角方向の固有周期 T_{LG} , T_{TR} はそれぞれ E_{RO} の函数となるから

$$T_{LG} = \frac{15.47}{\sqrt{E_{RO}}} = 0.155 \text{ sec} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$T_{TR} = \frac{20.09}{\sqrt{E_{RO}}} = 0.201 \text{ sec} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

となり、固有振動数はそれぞれ 6.46c/s, 4.98c/s となる。

【2】 1自由度の並進運動として解く方法(1)

ケーソン側面の地盤のバネ効果のみを考慮し、深さ方向に一定の地盤係数 K と、深さ方向に等分布する自重 w を用いて、図-2.2のごとき剛体の1自由度並進運動の固有周期を求める式を示すと

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{w}{g b \cdot K}} \quad \cdots \cdots (2.4)$$

となる。ただし、 b は振動に直交する方向の寸法であり、 g は重力の加速度である。

上式に $w=1,650/8=206.25 \text{ t/m}$ および、 $K=5,000 \text{ t/m}^3$ 橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ $b=8 \text{ m}$ 、 $b=13.5 \text{ m}$ を代入すると

$$T_{LG} = \frac{10.186}{\sqrt{K}} = \frac{10.186}{\sqrt{5,000}} = 0.1441 \text{ sec} \quad (2.5)$$

$$T_{TR} = \frac{7.841}{\sqrt{K}} = \frac{7.841}{\sqrt{5,000}} = 0.1109 \text{ sec} \quad (2.6)$$

となり、両方向の固有振動数はそれぞれ 6.94 c/s 、 9.02 c/s となる。

【3】 1自由度の並進運動として解く方法(2)

図-2.3のごとき底面および側面地盤のバネ効果を考慮したバネ定数 K をもつ重量 W の系が1自由度の横方向並進運動をするとしてその固有周期を求めると

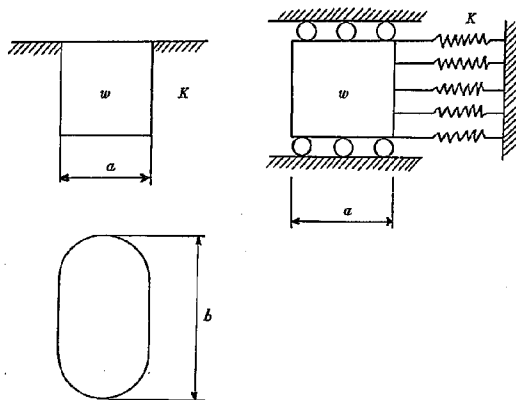
$$T = 2\pi \sqrt{W/gk} \quad (a) \quad (2.7)$$

$$k = K_{HS} \cdot A_S + K_{HB} \cdot A_B \quad (b)$$

ただし上式の記号の意味は、

- W : 総重量 (t)
- k : 水平バネ定数 (t/m)
- K_{HS} : 側面地盤の地盤係数 (t/m³)
- K_{HB} : 底面の水平方向地盤係数 (t/m³)
- A_S : 側面の接触面積 (m²)
- A_B : 底面の接触面積 (m²)

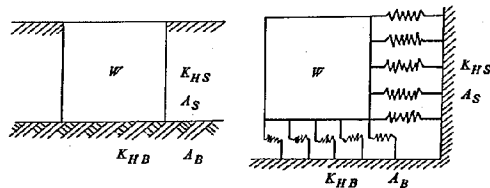
図-2.2 1自由度並進運動の力学モデル



(a) 実物

(b) 力学モデル

図-2.3 1自由度並進運動の力学モデル



(a) 実物

(b) 力学モデル

(2.7) に次の値を代入する。

$$A_B = 94.24 \text{ m}^2, A_S = 108 \text{ m}^2 \text{ (橋軸)}, 64 \text{ m}^2 \text{ (橋軸直角)}$$

$$K_{HB} = \frac{1}{2} K_{VB} = \frac{1}{2} \times 10,000 = 5,000 \text{ t/m}^3$$

$$K_{HS} = 3,000 \text{ t/m}^3$$

$$W = 1,650 \text{ t}$$

これから両方向の固有周期はそれぞれ次のごとく求まる。

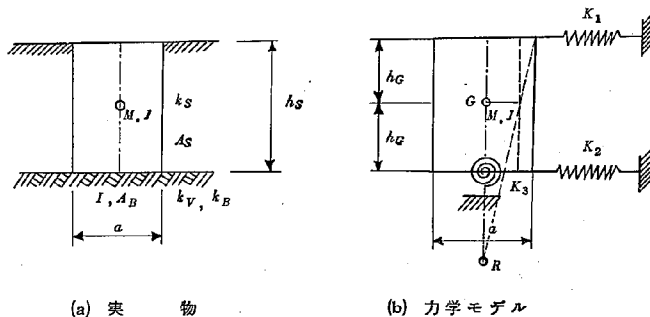
$$T_{LG} = 2\pi \sqrt{\frac{1,650}{9.8 \times 663,200}} = 0.100 \text{ sec} \dots\dots (2.8)$$

$$T_{TR} = 2\pi \sqrt{\frac{1,650}{9.8 \times 795,200}} = 0.0914 \text{ sec} \dots\dots (2.9)$$

したがって固有振動数はそれぞれ 10.0 c/s, 10.94 c/s となる。

【4】 横方向並進と回転とを考慮した 2 自由度系の剛体として解く方法

図-2.4 2 自由度系力学モデル



実際の構造物を図-2.4 のとき力学モデルに置き換え、2 自由度系として固有周期を求めると次式のごとくなる。

$$\begin{aligned} T &= 2\pi / p_{1,2} & (a) \\ p_{1,2}^2 &= \frac{1}{2} \left\{ (p_{11}^2 + p_{22}^2) \pm \sqrt{(p_{11}^2 - p_{22}^2)^2 + 4 p_{12}^4} \right\} & (b) \\ p_{11}^2 &= \frac{K_1 + K_2}{M}, \quad p_{22}^2 = \frac{(K_1 + K_2) h_G^2 + K_3}{J}, \quad p_{12}^2 = \frac{(K_1 - K_2) h_G}{N M J} & (c) \end{aligned} \dots\dots (2.10)$$

たゞし上式中で K_1, K_2, K_3, M, J は

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{2} k_s \cdot A_s & (a) \\ K_2 &= k_B A_B + \frac{1}{2} k_s A_S & (b) \\ K_3 &= k_v I & (c) \end{aligned} \right\} (2.11)$$

であり、各記号の意味は

p_1 :	1 次の固有円振動数	(rad/sec)
p_{II} :	2 次の "	(rad/sec)
M :	全質量	(tsec ² /m)
J :	重心点に関する回転慣性モーメント	(tsec ² m)
K_1 :	水平バネ定数	(t/m)
K_2 :	"	(t/m)
K_3 :	回転バネ定数	(tm/rad)
k_s :	側面の水平方向地盤係数	(t/m ³)
k_B :	底面の水平方向地盤係数	(t/m ³)
k_V :	底面の鉛直方向地盤係数	(t/m ³)
A_s :	側面の面積	(m ²)
A_B :	底面の面積	(m ²)
I :	底面の断面2次モーメント	(m ⁴)

(2.11) に、 $k_s = 3,000 \text{ t/m}^3$, $k_B = 5,000 \text{ t/m}^3$, $k_V = 10,000 \text{ t/m}^3$, $A_B = 94.24 \text{ m}^2$, $A_s = 108 \text{ m}^2$ (橋軸), 64 m^2 (橋軸直角) を代入して、 K_1 , K_2 , K_3 を求めこれを (2.10) に代入すると、各次の固有周期 T および固有振動数 f はそれぞれ次のごとく求まる。

橋軸方向には

$$\begin{aligned} T_I &= 0.1167 \text{ sec}, f_I = 8.57 \text{ c/s.} \dots\dots (2.12) \\ T_{II} &= 0.0591 \text{ sec}, f_{II} = 16.93 \text{ c/s.} \end{aligned}$$

橋軸直角方向には

$$\begin{aligned} T_I &= 0.1299 \text{ sec}, f_I = 7.70 \text{ c/s.} \dots\dots (2.13) \\ T_{II} &= 0.0713 \text{ sec}, f_{II} = 14.03 \text{ c/s.} \end{aligned}$$

【5】結果の総括

以上の計算によって得られた結果をまとめたものが、表-2.1である。同表からみると(1), (2)の計算法を比較

表-2.1 固有振動数の総括

		(単位 c/s)			
計算法 方 向		(1)	(2)	(3)	(4)
		1自由度ロッキング	1自由度並進	1自由度並進	2自由度
橋 軸		6.46	6.94	10.00	8.57
橋軸直角		4.98	9.02	10.94	7.70

した時、両方法とも橋軸直角方向の固有振動数が3割程度大きくなっており、また両方法による計算結果がかなり相違しているのに対し、(3), (4)では両方向の固有振動数が接近している。これらの異なる傾向からは妥当な固

有振動数を見出し得ないので、一応両方向とも $5 \sim 15 \text{ c/s}$ の範囲内にあるとして起振機を選定した。この結果土木研究所資料第320号に示される10 t型起振機が最も適当であると判断したわけである。

実験時の状況から、中詰土砂が井筒内に100%入っているということは正しい判断であることがわかったが、バネ定数および力学モデルについては仮定と相違した点もあるので後章で触れたい。

2.3 加振方法

地中に埋め込まれたばね剛体と見なし得る構造物を人為的に振動させる方法として、土木研究所がこれまで行なってきた一連の振動実験と同様に起振機による方法を採用した。

起振機は、偏心重錘のついた円盤3枚(図-2.5)をそれぞれ逆方向に回転させることによって一方向の振動外力を発生させる装置であり、起振力は(偏心質量) $\times$ (偏心距離) $\times$ (回転数)²に比例する。

今回使用した10 t型起振機の概略構造は、図-2.5、起振力は図-2.6に示す通りであり、最大起振力は10 t、加振々動数範囲は $0.4 \sim 20 \text{ c/s}$ である。

この起振機を井筒の天端に橋軸及び橋軸直角の方向に据え付け加振させた。2.1に示した測定項目を求めるためあらかじめ机上の計算で求めた固有振動数($5 \sim 15 \text{ c/s}$) (表-2.1参照)を念頭に置いて200 rpm から始動し、400 rpm 付近までは50 rpm ビッチ、共振点と予想される付近では20 rpm ビッチで回転数を上げて行き、各回転数における挙動を各点で測定した。記録は直記式電磁オシログラフで同時測定を行なったが、起振機取り付けのアンカーボルトが不備であったため、共振点付近において上下動によって起振機定着部のガタつきが起き危険な状態が生じたので小ビッチで上げることができなかった。

図-2.5 10 t型 起振機
(改良3 ton型)

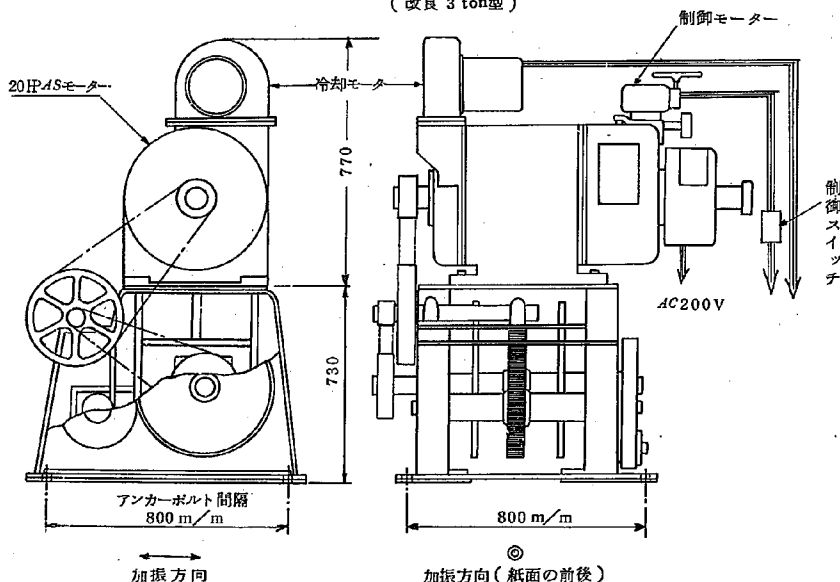
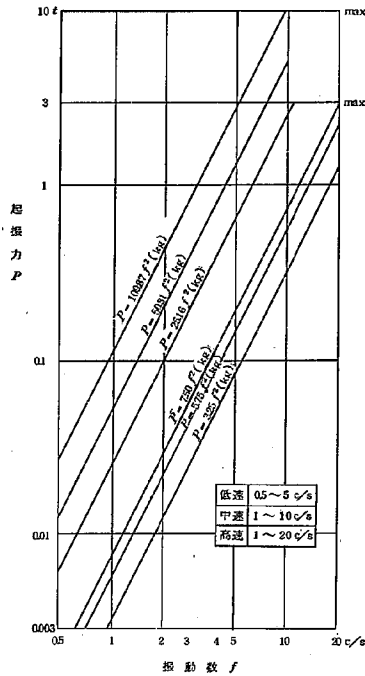


図-2.6 10 t 型起振機起振力図



2.4 試験工程および計器の配置

試験は，起振力の大きさを変え，鉄板重錘 6 枚と鉛重錘 6 枚で橋軸方向及び橋軸直角方向の 2 方向に加振しテスト I～IV まで行なった。

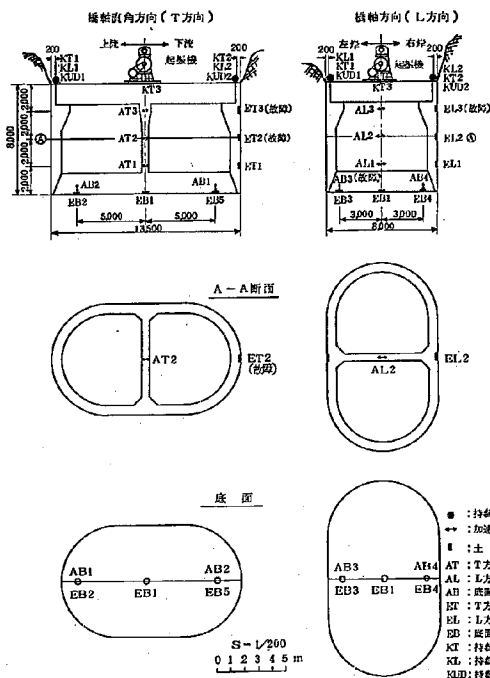
実施した各テストの測定振動数及び各テストで測定した計器の一覧を表-2.2 に，実験に使用した計器（ピックアップ）の配列を図-2.7 に示す。

表-2.2 試験工程及び測定計器一覧

Test No.	重錘	方向	回転数 (rpm) ()内はステップ数	測定計器															
I	1	鉄板 6枚	橋軸直角		AB ₁	AB ₂	KT ₃	AT ₁	AT ₂	AT ₃	KL ₁	KL ₂	KT ₁	KT ₂	EB ₁	EB ₂	EB ₃	ET ₁	
	2	"	"	200 ₍₂₆₎ ~ 860	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
	3	"	"	220 ₍₃₃₎ ~ 880	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
II	1	"	橋軸	200 ₍₂₇₎ ~ 830	AL ₂	AB ₃	AB ₄	KL ₁	KL ₂	KT ₁	KT ₂	KT ₃							
	2	"	"	360 ₍₂₁₎ ~ 870	AL ₂	AL ₃	AB ₃	AB ₄	KL ₁	KL ₂	KL ₃	KUD ₁	KUD ₂	EB ₁	EB ₂	EB ₃	EL ₁	ET ₂	EL ₃
III	1	鉛 6枚	"	210 ₍₁₅₎ ~ 505	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	2	"	"	100 ₍₂₃₎ ~ 515	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
IV	1	"	橋軸直角	150 ₍₁₈₎ ~ 490	AB ₁	AB ₂	AT ₁	AT ₂	AT ₃	KT ₁	KT ₂	KT ₃	KUD ₁	KUD ₂	EB ₁	EB ₂	EB ₃	ET ₁	

図-2.7でKは当所が試験にあたって持参した加速度計(ただしK₁, K₂は3成分型加速度計で鉛直方向, 水平2方向の3成分が同時測定できる), Aはコンクリート躯体中に埋設された加速度計, Eはコンクリート躯体中に埋設された土圧計, Lは橋軸方向, Tは橋軸直角方向, Bは底面(上下), U-Dは上下方向を表わす。

図-2.7 測定計器配置図

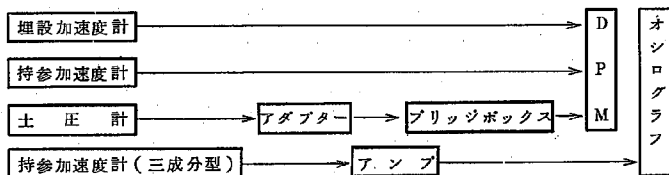


2.5 測定方法

持参加速度計, 埋設加速度計および土圧計は図-2.8の如く持続して測定した。

図中の埋設計器は共和電業製の加速度計120A-2D型(非接着抵抗線型)容量±2G, 土圧計(E-4G型(平型土圧計)容量4kg/cm², 持参計器は, 新興電器製の加速度計2G-120型(非接着型)容量±2G, 三成分型加速度計は東京振動製TM-3型(電磁式)を使用した。

図-2.8 測定ブロック図



D, P, M: 共和電業製, 動的測定器

オシログラフ: 横河電機製, 無現像式電磁オシログラフ

また使用計器の感度表を表-2.3に示す。

表-2.3 使用計器感度表

種別	配 号	製造番号	容 量	感 度	感度方向	備 考	
埋設 加速 度計	AB 1	D 9488	2 g	67.6 $\frac{\text{gal}}{100\mu}$	鉛 直	故障	
	AB 2	D 9481	"	65.4 "	"		
	AB 3	D 9476	"	58.3 "	"		
	AB 4	D 2795	"	65.6 "	"		
	AL 1	D 9490	"	65.6 "	橋 軸		
	AL 2	D 9494	"	54.9 "	"		
	AL 3	D 9480	"	64.3 "	"		
	AT 1	D 9489	"	72.9 "	直 角		
	AT 2	D 9496	"	61.0 "	"		
AT 3	D 9495	"	64.7 "	"			
埋設 土 圧 計	EB 1	C 0869	4 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	0.242 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2 \cdot 100\mu}$	鉛 直	故障 故障 故障	
	EB 2	E 9919	4 "	0.260 "	"		
	EB 3	C 0864	4 "	0.235 "	"		
	EB 4	C 0871	4 "	0.246 "	"		
	EB 5	E 9920	4 "	0.219 "	"		
	EL 1	C 0868	4 "	0.283 "	橋 軸		
	EL 2	B 8949	4 "	0.226 "	"		
	EL 3	C 0873	4 "	——	"		
	ET 1	D 3977	4 "	0.237 "	直 角		
	ET 2	D 3973	4 "	——	"		
ET 3	C 0874	4 "	——	"			
持 參 加 速 度 計	K 3	新 興 製		107 $\frac{\text{gal}}{100\mu}$	1 方向		
	KT 1			三成分型	10 gal		3 方向
	KL 1						
	KUD1						
	KT 2	"	10 gal	"			
	KL 2						
	KUD2						

§ 3 試 験 結 果

3. 1 試験結果の解析法

3. 2 固有振動特性

3. 3 静土圧、動土圧および動的地盤係数

§3 試験結果

3.1 試験結果の解析法

【1】記録の読み取り

振動試験に使用したピックアップは抵抗線式加速度計、電磁式加速度計（三成分型）およびカルソン型土圧計の3種であり、全て直記式電磁オシログラフに記録した。

これらの解析においては、得られた波形を正弦波とみなして振動数 f (c/s) および振巾 a (mm) を読みとり以下の計算を行なった。

(1) 加速度計（抵抗線型および三成分型）

実変位 y (cm) は、測定された加速度記録より次式で求められる。

$$y = a \cdot \frac{A \cdot C}{(2\pi f)^2} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに a : 記録紙上の振巾 (mm)

f : 振動数 (c/s)

A : 感度倍率

C : 較正係数 (gal/mm)

(2) 土圧計

土圧 P_E (kg/cm²) は、次式で求められる。

$$P_E = a \cdot A \cdot C \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに a : 記録紙上の振巾 (mm)

A : 感度倍率

C : 較正係数 (kg/cm²/mm)

【2】固有振動数の求め方

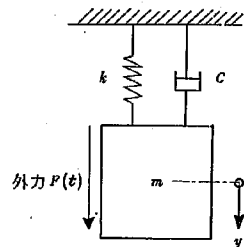
橋脚基礎の強制振動を図-3.1の如く、線型バネおよび粘性減衰をもつ1自由度系の振動とみなして共振曲線を描く。ここで図-2.3に示す各測定点の変位が y に、起振機起振力（図-2.6における P ）が $F(t)$ の振幅に相当するとすると、この振動系の方程式は次のごとく表わされる。

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + ky = F(t) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに

m : 振動体の質量 = W/g (kg・sec²/cm)

図-3.1 1自由度モデル



c : 粘性減衰係数 ($\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{cm}$)

k : バネ定数 (kg/cm)

$F(t) = J\omega^2 \cos \omega t$: 起振力 (kg)

y : 振動体の変位 (cm)

W : 振動体の重量 (kg)

g : 重力の加速度 ($= 980 \text{ cm}/\text{sec}^2$ または gal)

J : 起振機の不平衡質量のモーメント ($\text{kg} \cdot \text{sec}^2$)

$\omega = 2\pi f$: 起振機の円振動数 (rad/sec)

f : 起振機の振動数 (c/s)

(3.2) を変形すると

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + p^2y = \frac{F(t)}{m} = \frac{J\omega^2}{m} \cdot \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$$2n = \frac{c}{m}, \quad p^2 = \frac{k}{m}$$

となる。ただし、 p は振動系の固有円振動数である。

さて上式の一般解は

$$y = Ae^{-nt} \cos (p\sqrt{1-h^2}t + \delta) + \frac{(J/m)u^2}{\sqrt{(1-n^2)^2 + 4h^2u^2}} \cdot \cos(\omega t - \delta_0) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

となり、任意定数 A , δ は初期条件によって定まる。ただし δ_0 , h , u は、次式のごとくである。

$$\left. \begin{aligned} \tan \delta_0 &= 2hu/1-u^2 \quad \dots\dots\dots (a) \\ h &= n/p \text{ (減衰定数)} \quad \dots\dots\dots (b) \\ u &= \omega/p \quad \dots\dots\dots (c) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

(3.5) 式の第 1 項は、減衰自由振動をあらわし、時間の経過と共に消失して、第 2 項の強制振動だけが残る。

振動の初期の問題を取り扱う時以外は前者は必要ないから第 2 項の振巾

(y_0 とおく) だけについて考えると、

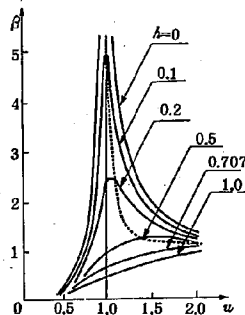
$$\left. \begin{aligned} y_0 &= \frac{J}{m} \beta \quad \dots\dots\dots (a) \\ \beta &= \frac{u^2}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4h^2 \cdot u^2}} \quad \dots\dots\dots (b) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

となる。ここで (3.7) 式の β を、 h をパラメーターにとり u を横軸にとって表わすと、図-3.2 の如くなり、これを共振曲線という。

この図からわかるように $h < 0.707$ の範囲では極大値 $\beta_{\max}$ (共振倍率) が存在し、この $\beta_{\max}$ を与える u の値 (u_r) は、

$$u_r = \frac{1}{\sqrt{1-2h^2}} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

図-3.2 共振曲線



このときの $\beta_{\max}$ は、

$$\beta_{\max} = \frac{1}{2h\sqrt{1-h^2}} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

したがって共振動数 ω_r は、

$$\omega_r = p \cdot \omega_r = \frac{p}{\sqrt{1-2h^2}} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

となる。 ω_r は、共振円振動数である。

図-3.3の如く横軸に加振振動数 f (c/s)、縦軸に実変位 y (cm)をとってプロットしたものの $\omega-\beta$ 曲線と実質的には同じ意味をもつ共振曲線であり、本報告書では、 $f-y$ 曲線によって固有振動特性を求める。

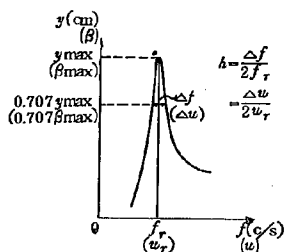
さて(3.10)式を変形すると共振動数は

$$f_r = \frac{p}{2\pi\sqrt{1-2h^2}} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

となり、これは固有振動数 $f = p/2\pi$ より大きい値をとるがしかし $h \ll 1$ と見なし得る時には、 $f_r = f$ においても大差はない。

本試験においても h は影響を与えるほど大きくなかったので共振動数を固有振動数と見なした。

図-3.3 減衰定数 h の求め方



【3】減衰定数の求め方

振動系の減衰定数を求める方法は種々あり、

- (1) 自由振動記録から求める方法
- (2) 共振時最大振巾と静的変位との比から求める方法
- (3) 共振曲線から求める方法
- (4) 高橋博士が示した、統計の概念を取り入れて求める方法

等が考えられるが、起振力が小さく振巾が読み取りにくいこと、静的変位を求めるのが困難なことなどを考慮して(3)の方法を採用した。

今回は、起振力の小さい起振機を使用したので記録紙上に表われる振巾が小さく、若干の読み取り誤差の影響があること、起振機のアンカーボルトの不完全さによる鉛直振動の危険性から共振点付近の測定が十分になされていないなどの理由から、理想的な共振曲線は得られなかったが、本試験の目的を達するには十分有効なものであった。

さて(3)の方法は文献(4)に詳しく記されているので省略し、その操作だけを述べると、共振曲線において、

$$y = \frac{1}{\sqrt{2}} y_{\max} = 0.707 y_{\max} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

の位置で f に平行に引いた直線が切る巾を Δf とすると、

$$h = \frac{\Delta f}{2 f_r} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

が求める減衰定数である。この誘導過程は、 $b \ll 1$ なる条件のもとになりかつものである。

【4】振動モード

井筒の振動形態（モード）は、各テストの共振点における変位（cm）をプロットして示す。

【5】静土圧の求め方

実験に先だち、コンクリート打設時に埋設しておいた11ヶの土圧計（うち3ヶ故障）の反応をカールソン型指示計を用いて計器の全抵抗を測定することにより求めた。

いま抵抗比の変化分 Δz に対する校正係数を f' 、温度差 Δt に対する補正係数を b とすると、求める土圧 p は次式で表わされる。

$$p = f \Delta z + b \Delta t \quad (3.14)$$

ただし、

$$\begin{aligned} f' &= f \frac{R_0}{R_t}, & (a) \\ \Delta z &= 100 (z_i - z_s), & (b) \\ \Delta t &= t_i - t_s, & (c) \\ t &= 100 \beta (R_t - R_0), & (d) \end{aligned} \quad (3.15)$$

上式の記号の意味は

R_s ：	全抵抗	(Ω)
R_t ：	計器抵抗	(Ω)
R_0 ：	0°Cにおける計器抵抗	(Ω)
f ：	抵抗比に対する補正係数	($\text{kg}/\text{cm}^2/0.01$)
f' ：	抵抗比変化分に対する校正係数	($\text{kg}/\text{cm}^2/0.01$)
z_i ：	測定抵抗比	(%)
z_s ：	基準抵抗比	(%)
t_i ：	測定時温度	(°C)
t_s ：	基準温度	(°C)
β ：	温度係数	(°C/0.01 Ω)

さて上式において、 R_0 、 β 、 z_s 、 t_s 、 b 、 f は計器製造時の値で既知の数であり、 R_s 、 t は測定値である。ただし、通常は $f' = f$ と見なして差支えない。土圧の計算例を示すと、 $R_0 = 67.39 \Omega$ 、 $\beta = 0.0521^\circ\text{C}/0.01 \Omega$ 、 $z_s = 99.21\%$ 、 $t_s = 25^\circ\text{C}$ 、 $b = 0.00790 \text{ kg}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$ 、 $f' = f = 0.0303 \text{ kg}/\text{cm}^2/0.01\%$ の計器で、 $t = 23.5^\circ\text{C}$ のとき $R_s = 71.91 \Omega$ の抵抗が得られたとすると求める土圧は表-3.1のごとくなる。

表-3.1 土 圧

④	③	②	①	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
全抵抗	計器抵抗	温 度	温度差	抵抗比	抵抗比の 変化分	見かけ の土圧	温度補 正土圧	補 正 土 圧
$R_s (\Omega)$	$R_t (\Omega)$	$t (^\circ\text{C})$	$\Delta t (^\circ\text{C})$	$z (\%)$	$\Delta z (0.01\%)$	$f \Delta z (\text{kg/cm}^2)$	$b \Delta t (\text{kg/cm}^2)$	$p (\text{kg/cm}^2)$
71.91	71.89	23.5	1.5	99.51	30	0.909	0.0135	0.923

【6】動土圧

振動時に井筒の側面および底面に加わる動土圧の分布を共振点において描き、加振力の大きい場合には低振動数においても描いた。

【7】動的K値

井筒側面および底面の動的地盤係数（動的K値）はその断面の変位 y (cm) および土圧 p_E (kg/cm²) から

$$K = \frac{p_E}{y} \dots\dots\dots (3.16)$$

なる式で計算できる。

3.2 固有振動特性

表-2.2に示す合計8ケースの試験でそれぞれ共振曲線が得られるが、I-1は予備的実験、テストII, IVは大振巾を取るために行なった実験でありI-2~II-2が本振動試験の主体である。

また井筒底面に取り付けた加速度計はバラつきが多くて満足な共振曲線を描くことができなかった。

実験を通して最も安定していた計器（橋軸方向AL2, 橋軸直角方向KT3）を選びテストI, IIの共振曲線をそれぞれ描き図-3.4, 3.5に示した。この共振曲線が今回の実験で得られた代表的な共振曲線と考えられる。なお他の測点で得られた共振曲線は附図に示す。

すべての実験から得られた共振曲線から比較的信頼のおけると考えられるものを選び、共振振動数 f_r (c/s), ならびに減衰定数 h を表-3.2に示した。

同表より共振振動数 (f_r) と減衰定数 (h) の平均値として、橋軸方向 $f_r = 12.0$ c/s, $h = 0.149$, 橋軸直角方向 $f_r = 12.95$ c/s, $h = 0.148$ の値が得られた。

また井筒の橋軸方向および橋軸直角方向の共振時の振動モード、動土圧分布および地盤の動的地盤係数 (K値) を各テストごとに表わし図-3.6~3.7に示す。

同図からわかるように振動モードは、橋軸方向には、底面中心まわりのロッキング振動に近く、橋軸直角方向には底面よりかなり下方に中心を有するロッキング振動（横方向並進に近い）と考えられる。

図-3.4 共振曲線（橋軸方向）

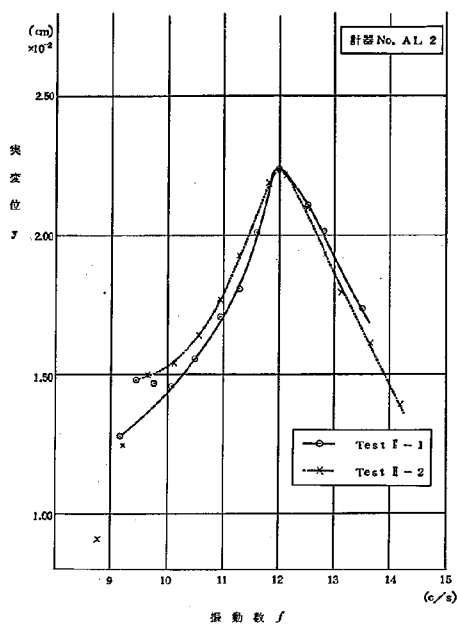


図-3.5 共振曲線（橋軸直角方向）

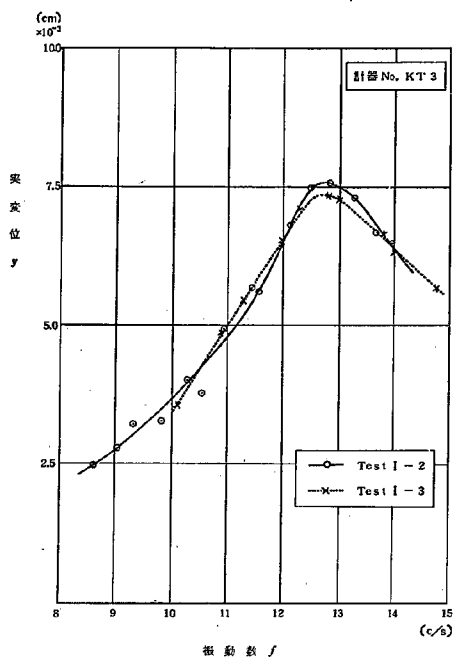


表-3.2 共振振動数および減衰定数

テスト	計器 No.	f_r (c/s)	h	テスト	計器 No.	f_r (c/s)	h	備 考
I-2	KT-1	12.65	0.168	I-3	KT-1	12.90	0.149	平均 $f_r=12.95$ $h=0.148$
	KT-2	13.15	0.152		KT-2	12.95	—	
	KT-3	12.75	0.166		KT-3	12.75	0.149	
	AT-1	13.20	0.138		AT-1	13.00	0.162	
	AT-2	—	—		AT-2	13.00	—	
	AT-3	12.80	0.127		AT-3	12.95	0.121	
II-1	KL-1	11.80	0.164	II-2	KL-1	11.80	0.148	平均 $f_r=12.00$ $h=0.149$
	KL-2	12.00	—		KL-2	11.80	0.144	
	KL-3	12.00	0.148		KL-3	12.80	—	
	AL-2	12.00	0.148		AL-2	12.00	0.137	
	AL-3	—	—		AL-3	12.00	0.154	

図-3.6 橋軸方向振動モード・土圧

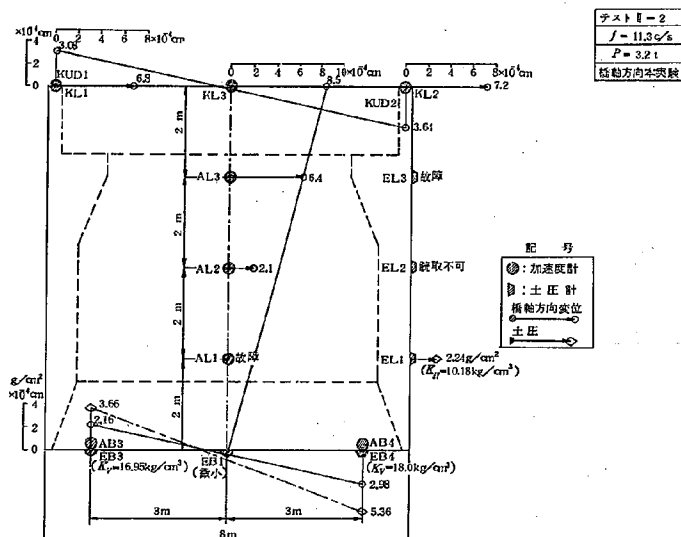
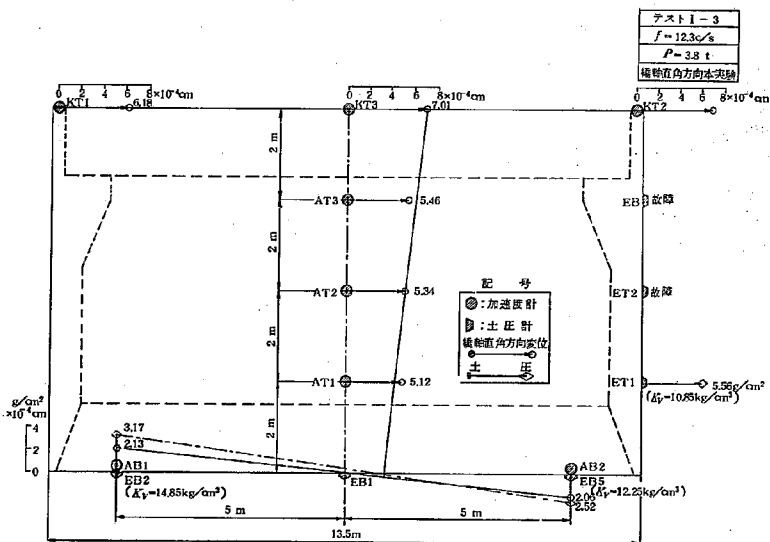


図-3.7 橋軸直角方向振動モード・土圧



3.3 静土圧・動土圧および動的地盤係数

動的地盤係数は底面の鉛直方向には $12 \sim 18 \text{ kg/cm}^2$ 、側面の水平方向にはほぼ 10 kg/cm^2 の範囲にある。動的地盤係数を表-3.3に示す。

実験の当初に測定した静土圧を図-3.8~3.9に示す。

表-3.3 動 的 K 値

加振方向		橋 軸 方 向			橋 軸 直 角 方 向		
計器 No.	加速度計	AL 1	AB 3	AB 4	AT 1	AB 1	AB 2
	土 圧 計	EL 1	AB 3	EB 4	ET 1	EB 2	EB 5
振 動 数 f_r (c/s)		11.3			12.3		
土 圧 P_E (kg/cm^2)		$\times 10^{-3}$ 2.24	$\times 10^{-3}$ 3.66	$\times 10^{-3}$ 5.36	$\times 10^{-3}$ 5.56	$\times 10^{-3}$ 3.17	$\times 10^{-3}$ 2.52
変 位 y (cm)		—	$\times 10^{-4}$ 2.16	$\times 10^{-4}$ 2.98	$\times 10^{-4}$ 5.12	$\times 10^{-4}$ 2.13	$\times 10^{-4}$ 2.06
地盤係数 K (kg/cm^2)		—	16.95	18.00	10.85	14.85	12.25

図-3.8 静土圧図 (橋軸方向に使った計器)

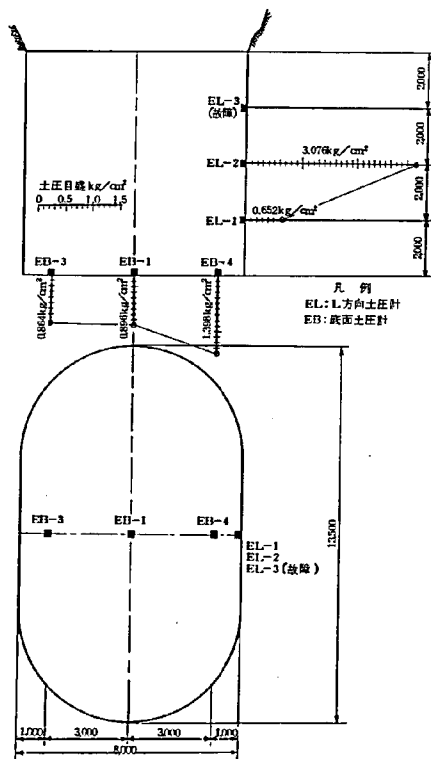
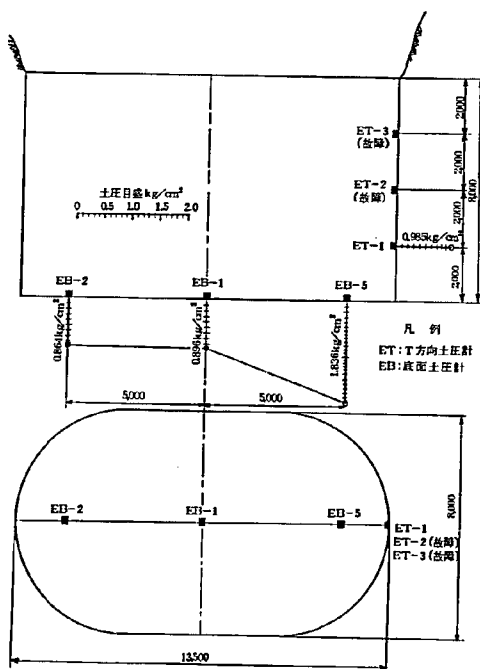


図-3.9 静土圧図 (橋軸直角方向に使った計器)



§ 4 試 験 結 果 の 検 討

4. 1 橋軸方向

4. 2 橋軸直角方向

4. 3 結 論

§ 4. 試験結果の検討

前章の3.2 固有振動特性の項で明らかにしたように、鳥井大橋 P_1 橋脚基礎の固有振動数は、橋軸方向に12 c/s、橋軸直角方向に13 c/sであり、その振動モードは、橋軸方向には底面中心のまわりのロッキング振動、橋軸直角方向はかなり深い所に回転中心を有するロッキング振動（むしろ横方向並進運動に近いともいえる）である。しかるに上記のような試験結果から見ると、表-2.1の推定固有振動数はかなりかけ離れていることがわかる。この原因は、固有振動数の推定に用いた地盤の弾性係数 E または地盤係数 K が、実際よりかなり小さく見積もられていたと判断できるのである。そこで、試験結果によく似た力学モデルを用いて地盤の弾性定数を逆算することを試みよう。

4.1 橋軸方向

【1】1自由度系としての検討

橋軸方向には、底面中心からやや下方を回転中心とするロッキング振動に近いような試験結果がでているから、M. A. Biot による方法で地盤の弾性係数 E_{RO} 、 E_S 等を逆算して見ると、 $E_{RO} = E_S$ の場合は(2.2)から

$$E_{RO} = E_S = \left(\frac{15.47}{T_{IG}} \right)^2 = \left(\frac{15.47}{1/12} \right)^2 = 34,462 \text{ t/m}^2 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

となる。 E_{RO} が E_S に等しくなければ両者の値は一意的には決まらないが、換算弾性係数 E_R は(2.1)より求めることができる。(2.1)に $\alpha_1 = 1$ 、 $\nu_R = 0.25$ 、 $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ 、 $a = 8 \text{ m}$ 、 $w = 2,188 \text{ t/m}^3$ 、 $T = \frac{1}{12} \text{ sec}$ を代入すると(a)から $E_R = 172,192 \text{ t/m}^2$ となり、(c)から

$$E_{RO} + 4 E_S = 172,192 \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

なる関係が導き出される。いま E_{RO}/E_S の比を2または3程度に仮定して(4.2)から両者の値を求めて見ると

$$E_{RO}/E_S = 2 ; \quad E_{RO} = 57,397 \text{ t/m}^2, \quad E_S = 28,699 \text{ t/m}^2$$

$$E_{RO}/E_S = 3 ; \quad E_{RO} = 73,797 \text{ t/m}^2, \quad E_S = 24,599 \text{ t/m}^2$$

となり、これらの結果を一応実際に考えられる状態であるとしてまとめて見ると下記のごとくなる。

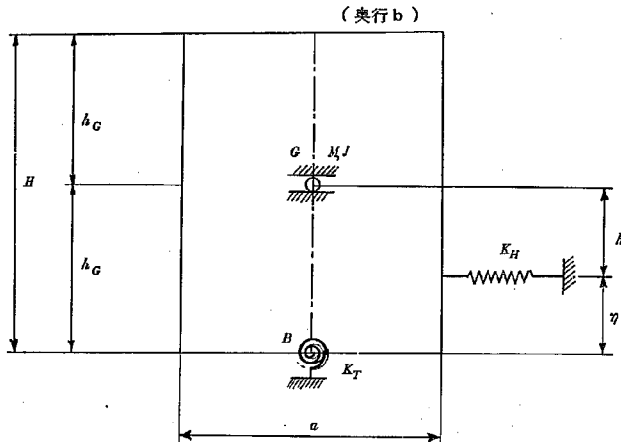
$$\begin{array}{ll} E_{RO} = 30,000 \sim 70,000 \text{ t/m}^2 & , \quad (a) \\ E_S = 20,000 \sim 40,000 \text{ t/m}^2 & , \quad (b) \end{array} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

(4.3)の結果は、試験前に予想していた弾性係数の値よりはるかに大きい値を示しているが、現場技術者の話によると井筒基礎を所定の位置まで沈下させるのに苦労して一部では発破を用いたということや、振動試験の結果変位が非常に小さくでていることなどから考えて、構造物周辺の地盤は予想より相当硬いものであると思われる、上記の結果は妥当なものといえよう。しかしながら、(4.3)の大ざっぱな表現では不十分であるので、より厳密な力学モデルの設定を試みることにする。

【2】 2自由度系としての検討

いま図-4.1のごとき2自由度系の力学モデルを考えてみる。これは水平方向並進運動と回転運動を為し得る剛体である。図中の記号の意味は以下のとおりである。

図-4.1 2自由度系力学モデル



- M : 全質量 (t sec²/m)
 J : 重心まわりの回転慣性モーメント (tm sec²)
 K_H : 水平バネ定数 (t/m)
 K_T : 回転バネ定数 (tm/rad)
 H : 全高 (m)
 h_G : 重心より上下縁端までの距離 (m)
 h : 重心より水平バネまでの距離 (m)
 η : 底面より水平バネまでの距離 (m)
 a : 巾 (m)
 b : 奥行き (m)
 G : 重心
 B : 底面中心

この力学モデルにおいて、固有振動数を求める式は以下のとおりである。

$$p_r^2 = \frac{1}{2} \left[p_{11}^2 + p_{22}^2 \pm \sqrt{(p_{11}^2 - p_{22}^2)^2 + 4 p_{12}^4} \right], \quad (a)$$

$$p_{11}^2 = K_H/M, \quad p_{22}^2 = (K_H h^2 + K_T)/J, \quad p_{12}^2 = K_H h / \sqrt{MJ}, \quad (b)$$

ただし $r = 1, 2$

..... (4.4)

上式で r は振動モードの次数, p_r は r 次の固有円振動数であり, これから固有振動数 f_r は

$$f_r = p_r / 2\pi \quad (4.5)$$

と求まる。また水平方向変位ならびに回転変位に関する固有ベクトル ϕ_{ur} , $\phi_{\theta r}$ は, $\phi_{ur}=1$ ($r=I, II$) とすると

$$\begin{aligned} \phi_{ur} &= 1 \\ \phi_{\theta r} &= \frac{1}{h} \frac{-p_r^2 + p_{11}^2}{p_{11}^2}, \quad (4.6) \\ r &= I, II \end{aligned}$$

となる。(4.4) で M , J はすでに既知の量であるから K_H , K_T , h がわかれば f_r , $\phi_{\theta r}$ は求めることができる。すでに前項 [1] に弾性係数 E_R , E_S の概略値を示してあるのでこれを念頭におきながら (4.4) ~ (4.6) を用いて実際の状態に接近することを試みるわけであるが, 他に適当な方法もないのでここでは文献(11)に示される F. Vogt の方法により弾性係数からバネ定数を算出するものとする。詳細は文献にゆづるとしてバネ定数等を算出する式を列挙すると

$$\begin{aligned} K_H &= \frac{b}{r'_{ab}} + \frac{2h_2}{r'_a} + \frac{2h_2}{\beta'_b} \quad (a) \\ K_T &= \frac{b}{a'_{ab}} + \frac{2b}{a'_b} + \frac{2a}{\delta'_a} \quad (b) \\ \eta &= \frac{h_2}{2} \cdot \frac{\frac{2h_2}{r'_a} + \frac{2h_2}{\beta'_b}}{\frac{b}{r'_{ab}} + \frac{2h_2}{r'_a} + \frac{2h_2}{r'_b}} \quad (c) \\ h &= h_G - \eta \quad (d) \end{aligned} \quad (4.7)$$

ただし

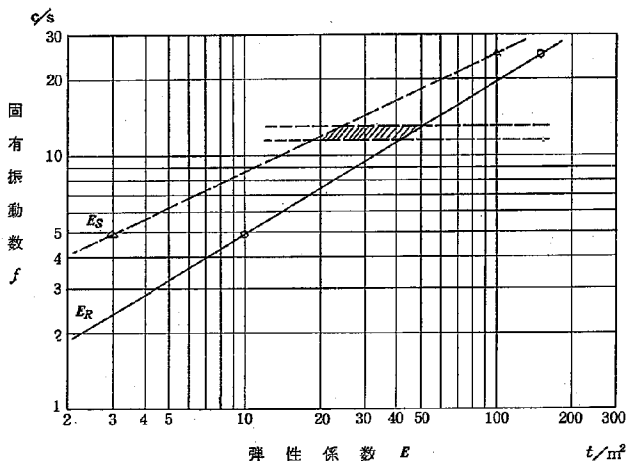
$$\left. \begin{aligned} \alpha'_{ab} &= \frac{k_1}{E_R a^2}, \quad \alpha'_b = \frac{k_1}{E_S h_s^2} \quad (a) \\ \beta'_b &= \frac{k_2}{E_S} \quad (b) \\ r'_{ab} &= \frac{k_3}{E_R}, \quad r'_a = \frac{k_3}{E_S} \quad (c) \\ \delta'_a &= \frac{k_4}{E_S h_s^2} \quad (d) \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

であり, α' , β' , r' , δ' は構造物の単位要素あたりにそれぞれ単位の曲げモーメント, 推力, 剪断力, 振りモーメントが作用したときの基礎表面の回転角, たわみ, 振れ角を表わし, k_1 , k_2 , k_3 , k_4 は構造物の寸法 (巾 a , 奥行き b , 根入れ深さ h_s) と土のポアソン比 ν_R , ν_S によって定まる数で図-4.5~8 より求まる。なお図中の縦軸には (4.8) の α'_{ab} , α'_b , β'_b , r'_{ab} , r'_a , δ'_a に対応してそれぞれ b/a , b/h_s , h_s/b , b/a , h_s/a , a/h_s をとり, 横軸にはポアソン比 $\nu_R = \nu_S$ をとるものとする。

以上の準備のもとに橋軸方向の力学モデルを設定しよう。いま極端な例として, $E_R = 10,000 \text{ t/m}^2$, $E_S = 3,000 \text{ t/m}^2$, $\nu_R = \nu_S = 0.25$ の場合と, $E_R = 150,000 \text{ t/m}^2$, $E_S = 100,000 \text{ t/m}^2$, $\nu_R = \nu_S = 0.25$ の場合の

2つについて上記の1連の式を用いて固有振動数を求めてみると、前者は4.87c/s、後者は25.13c/sとなった。両者とも計算の結果2次の振動モードは重心より上方の点を中心とする回転振動となり試験結果にそぐわないので問題の対象からはずす。さて上の結果を弾性係数を横軸にとり、固有振動数(1次)を縦軸にとって両対数グラフ上に示し、この二者を直線で結ぶと図-4.2のごとくなる。実線および点線はそれぞれ E_R 、 E_S に関する

図-4.2 弾性係数と固有振動数の関係



るものであり、上記2直線に加え横軸に平行に11.5および、13 c/s(試験値は11.5~13 c/sの間にある)の所で二本の直線を引くと、これら4直線に囲まれた領域の中に実際の E_R 、 E_S はあるように見える。そこで、かりに11.5 c/sの線で切断された点の座標を調べると、 $E_R = 45,000 \text{ t/m}^2$ 、 $E_S = 18,000 \text{ t/m}^2$ となるので、この値を使って橋軸方向の固有振動数を求めてみよう。

(4.8)から

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_{ab} &= 1.61 \times 10^{-5} \quad 1/t & (a) \\ \alpha'_b &= 4.02 \times 10^{-5} \quad " & (b) \\ \delta'_a &= 4.62 \times 10^{-5} \quad " & (c) \\ r'_{ab} &= 1.89 \times 10^{-5} \quad \text{m}^2/t & (d) \\ r'_a &= 5.72 \times 10^{-5} \quad " & (e) \\ \beta'_b &= 3.72 \times 10^{-5} \quad " & (f) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.9)$$

(4.9)からバネ定数 K_H 、 K_T ならびに η 、 h は

$$\left. \begin{aligned} K_H &= \left(\frac{13.5}{1.89} + \frac{16}{5.72} + \frac{16}{3.72} \right) \cdot 10^5 = 1.45 \times 10^6 \text{ t/m} & (a) \\ K_T &= \left(\frac{13.5}{1.61} + \frac{27}{4.02} + \frac{16}{4.62} \right) \cdot 10^5 = 1.86 \times 10^7 \text{ tm/rad} & (b) \\ \eta &= \frac{8}{2} \cdot \frac{7.3}{1.45} = 2.02 \text{ m}, \quad h = 4 - 2.02 = 1.98 \text{ m} & (c) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.10)$$

これらを(4.4)～(4.6)に代入すると

$$\begin{aligned} f_1 &= 11.57 \text{ c/s} & (a) \\ \phi_{ul} &= 1.0, \phi_{\theta l} = 0.194 \text{ 1/m} & (b) \end{aligned} \quad (4.11)$$

となり、これを図示すると図-4.3のごとくなり試験の結果に非常によく似た振動モードを示し、また固有振動数も非常によく合っている。このことから鳥井大橋 P_1 井筒基礎周辺の地盤の弾性係数は、 $E_R = 45,000 \text{ t/m}^2$ 、 $E_S = 18,000 \text{ t/m}^2$ の前後と思われるが、これは橋軸直角方向にも同様な検討を行なった後で結論づけよう。

4.2 橋軸直角方向

【1】1自由度系としての検討

試験結果からみて回転中心が相当深い所にあり、水平方向の並進運動に近似しているので、(2.6)に $T_{TR} = 1/13 \text{ sec}$ を代入して横方向 K 値を求めてみると

$$K = 10,390 \text{ t/m}^2 \quad (4.11)$$

となり、これは実験結果に非常によく一致している。ただし、これと弾性係数の関係はわからない。

【2】2自由度系としての検討

橋軸方向と同じ弾性係数を用いて2自由度系の計算を行なうと

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ab}' &= 0.469 \times 10^{-6} \text{ 1/t} & (a) \\ \alpha_b' &= 3.66 \times 10^{-6} \text{ " } & (b) \\ \delta_a' &= 5.17 \times 10^{-6} \text{ " } & (c) \\ r_{ab}' &= 1.77 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{t} & (d) \\ \beta_b' &= 4.89 \times 10^{-5} \text{ " } & (e) \\ r_a' &= 4.42 \times 10^{-5} \text{ " } & (f) \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

となり

$$\left. \begin{aligned} K_H &= 1.14 \times 10^6 \text{ t/m} & (a) \\ K_T &= 2.66 \times 10^7 \text{ t/m} & (b) \\ h &= 1.585 \text{ m} & (c) \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

が求まるから、これから固有振動数および固有ベクトルは

$$\begin{aligned} f_1 &= 11.42 \text{ c/s} & (a) \\ \phi_{ul} &= 1.0, \phi_{\theta l} = 0.154 \text{ 1/m} & (b) \end{aligned} \quad (4.13)$$

となり、固有振動数は試験結果にはよく一致しているが、図-4.4でみると回転中心の位置はかなりずれているようである。しかしながら試験結果によく合っているとはいえよう。この相違は試験の精度、力学モデルの当否、弾性係数の算定法その他の原因によるものである。

図-4.3 橋軸方向振動モード

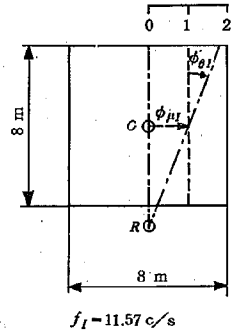
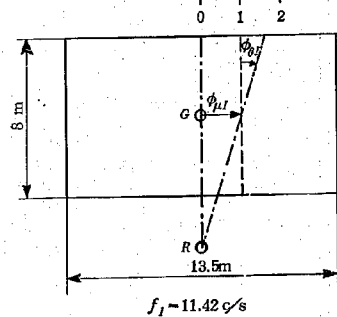


図-4.4 橋軸直角方向振動モード



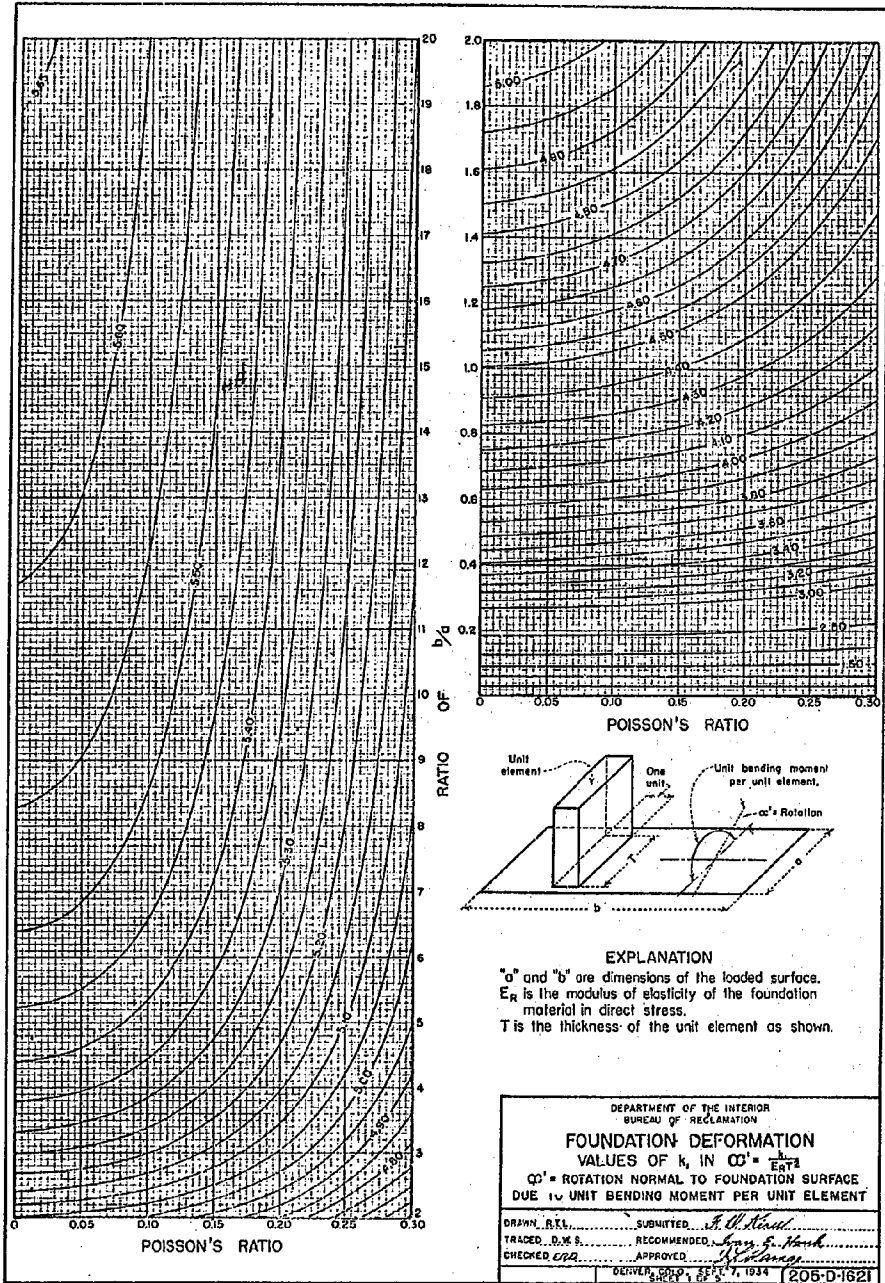


图-4.6

九
折
表

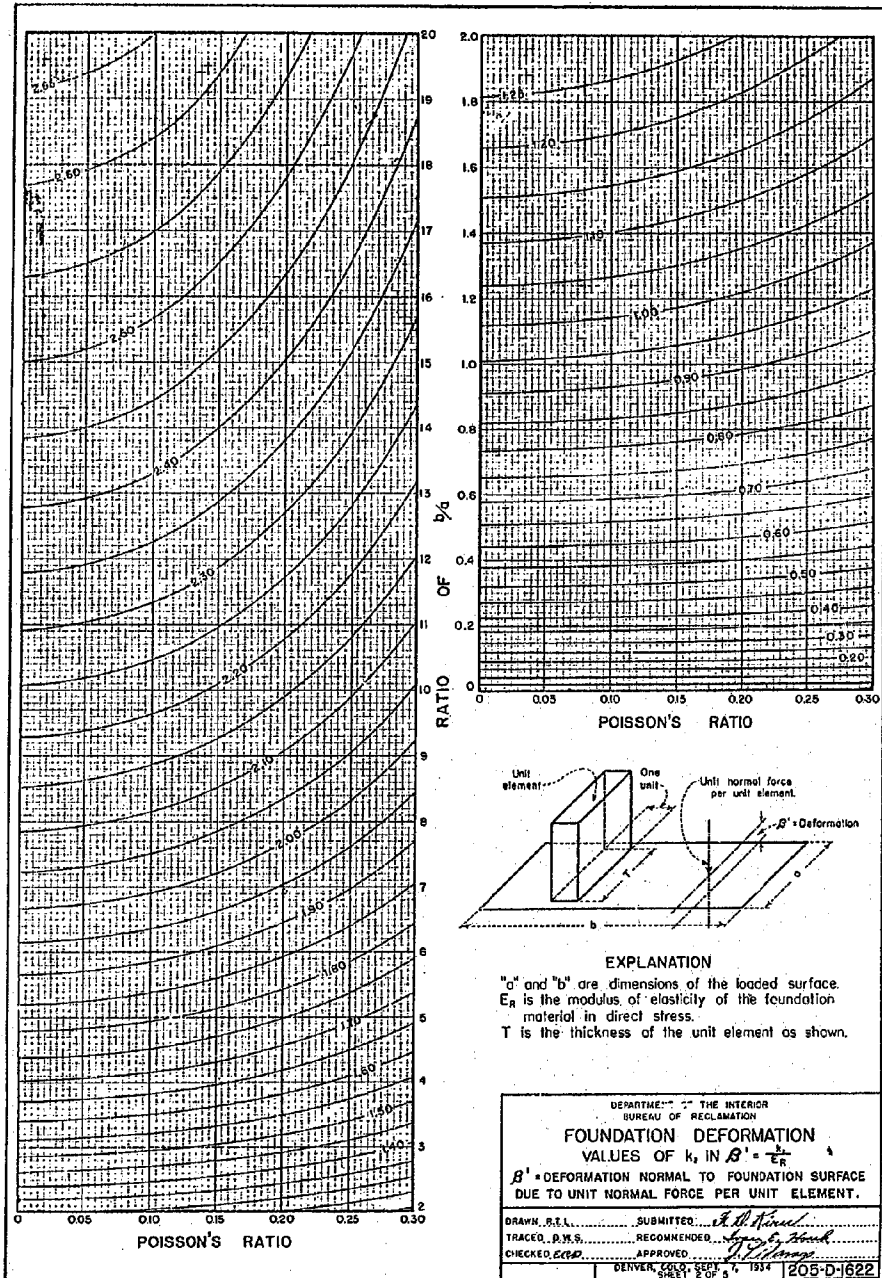
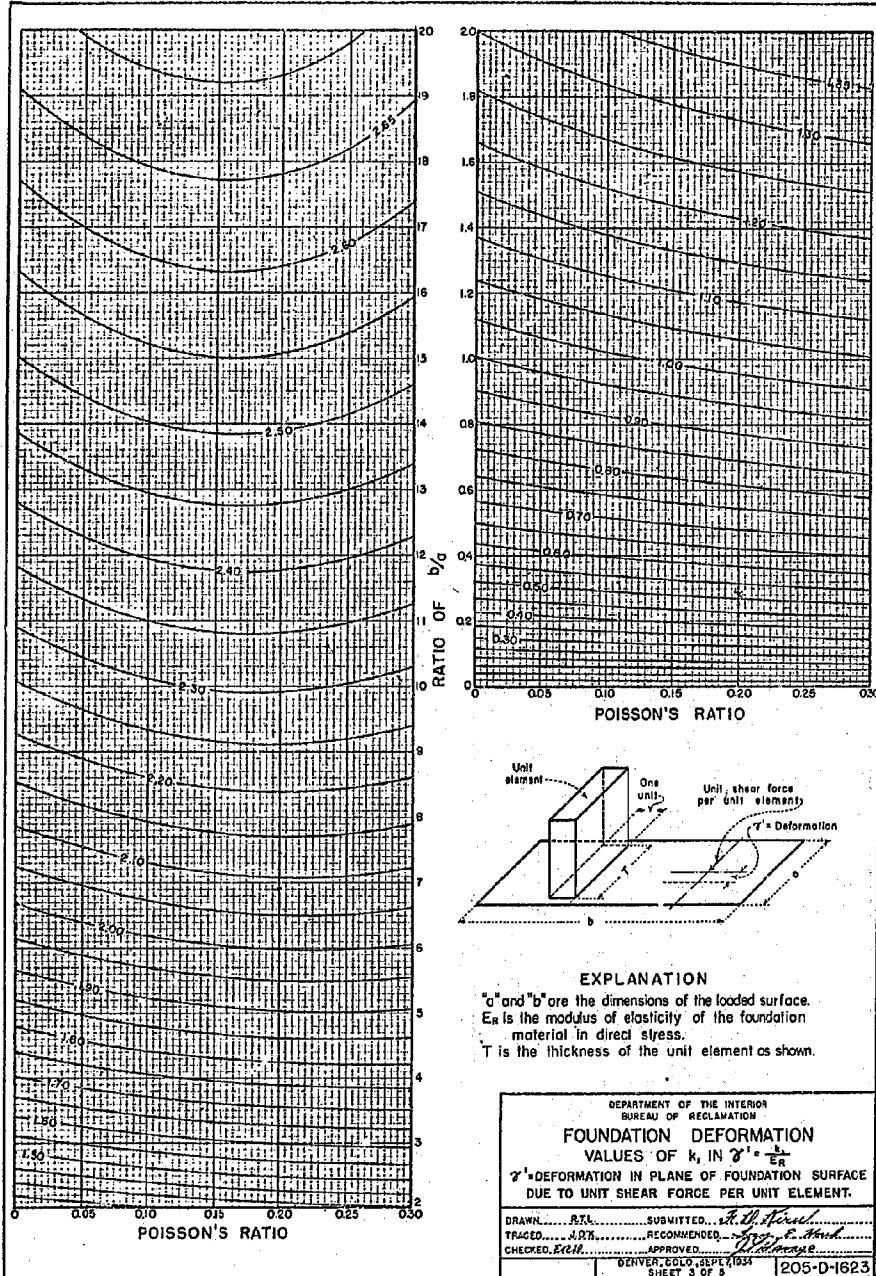
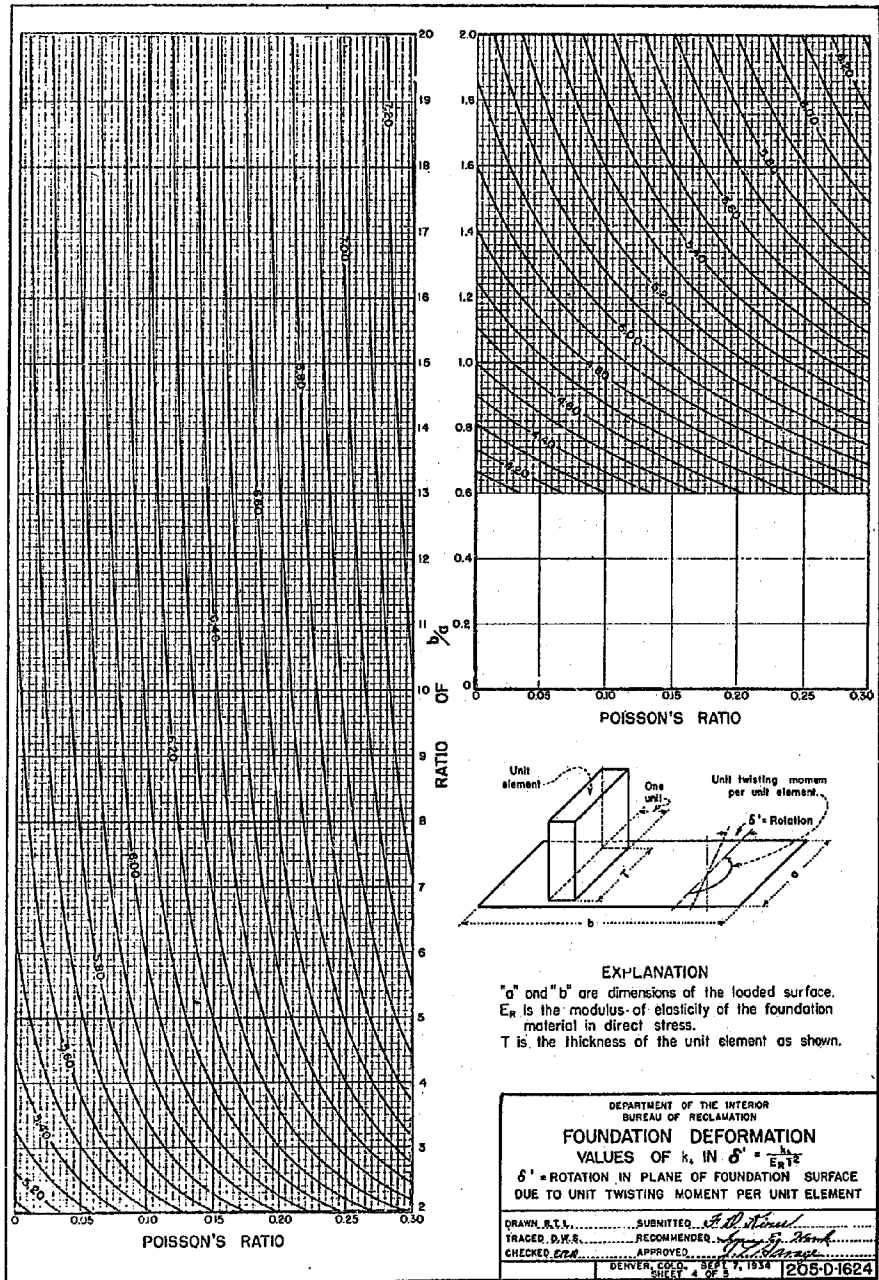


图-4.7





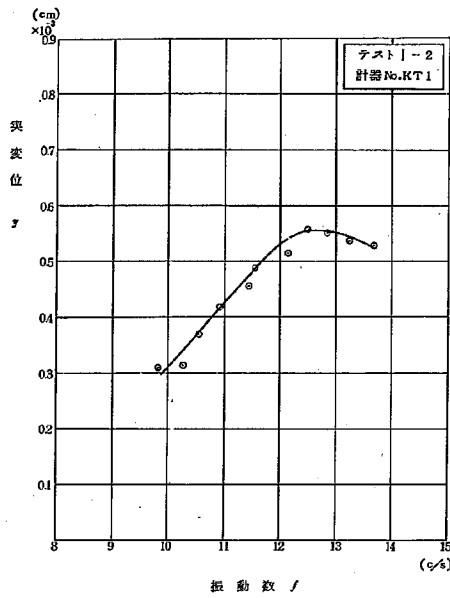
結 論

十二分に検討を尽したとはいえないが、試験の精度、力学モデル設定の不十分さを考慮しつつ、鳥井大橋 P_1 井筒基礎の振動試験結果から次のとき結論を得た。

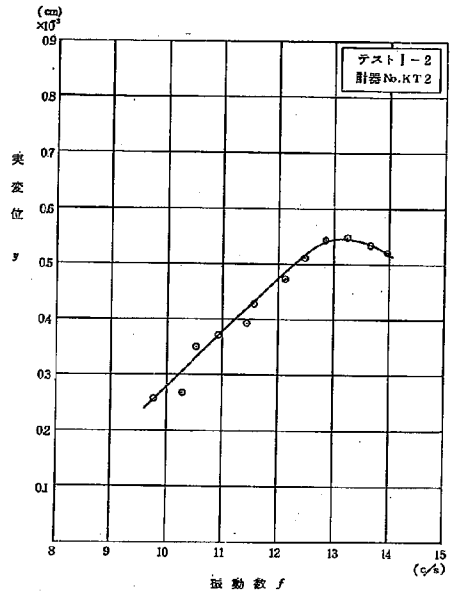
- (1) 固有振動数 f は橋軸、橋軸直角方向とも $12 \sim 13 \text{ c/s}$ である。
- (2) 減衰定数 μ は両方向とも 15% である。
- (3) 1 次の振動モードは、橋軸方向は底面よりやや下方を中心とする回転振動、橋軸直角方向は底面より相当下方を中心とする回転振動である。
- (4) 動的地盤係数 (K 値) は、底面鉛直方向には $12 \sim 18 \text{ kg/cm}^2$ 、側面水平方向には 10 kg/cm^2 である。
- (5) 弾性係数 E は、底面で $50,000 \text{ t/m}^2$ 、側面で $20,000 \text{ t/m}^2$ 前後である。 K 値との関係はつかない。
- (6) 地中に埋めこまれた井筒基礎の力学モデルの設定は、1 自由度系として取り扱うと厳密さを欠くらしいがあるので、少くとも 2 自由度系として取り扱うのが好ましい。
- (7) 地中埋設計器をより堅牢にする必要がある。
- (8) 地盤に深く根入れされた構造物の振動試験には、大きい起振力と広い加振々動数領域を有する起振機を使用すべきである。

線 曲 振 共 圖 付

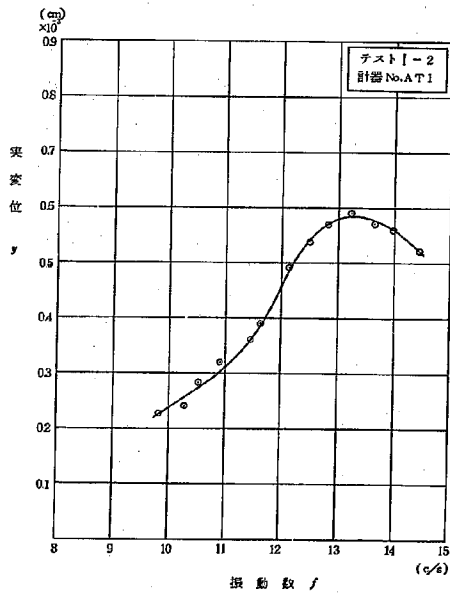
付図 - 1



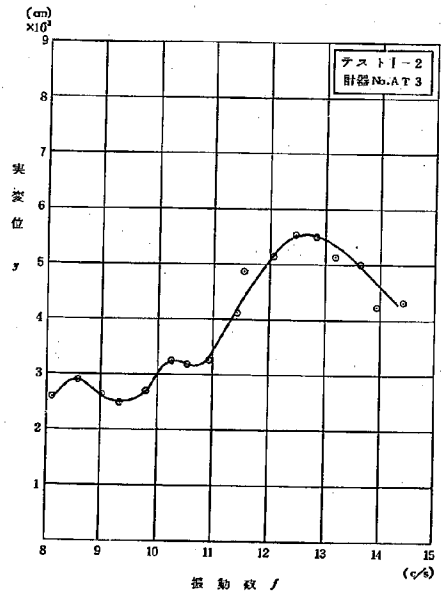
付図 - 2



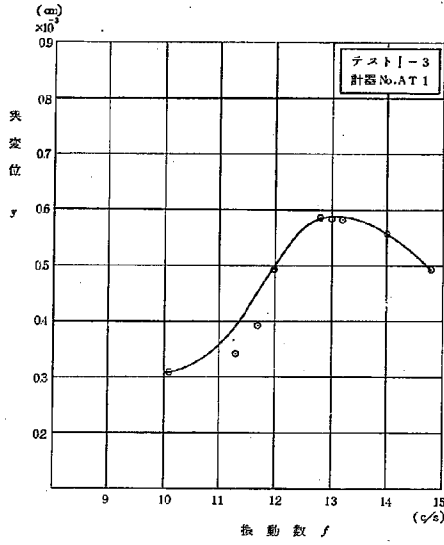
付図 - 3



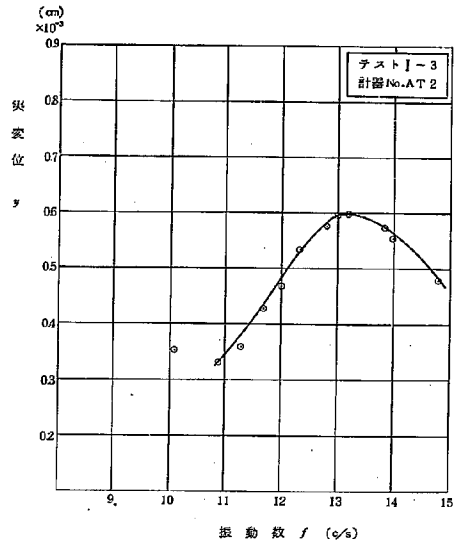
付図 - 4



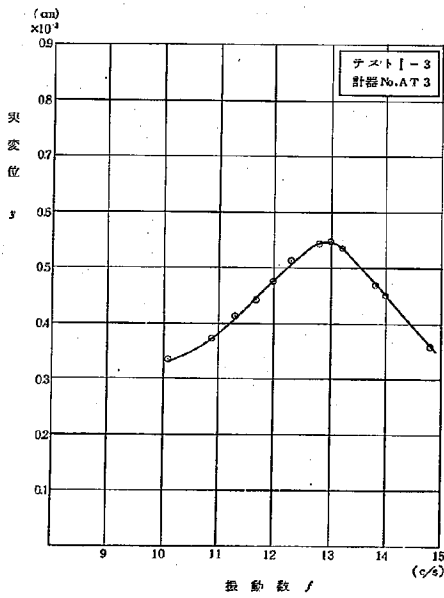
付図 - 5



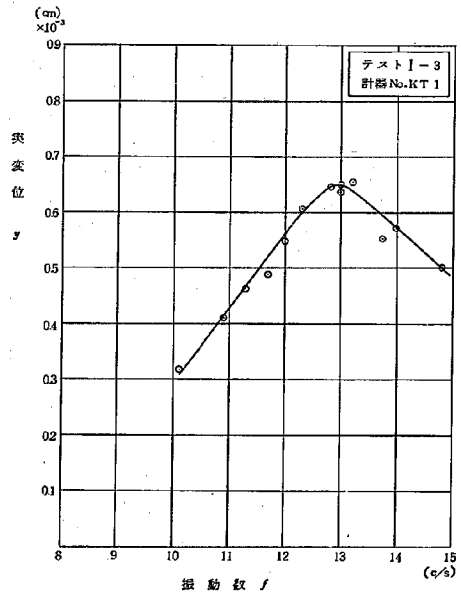
付図 - 6



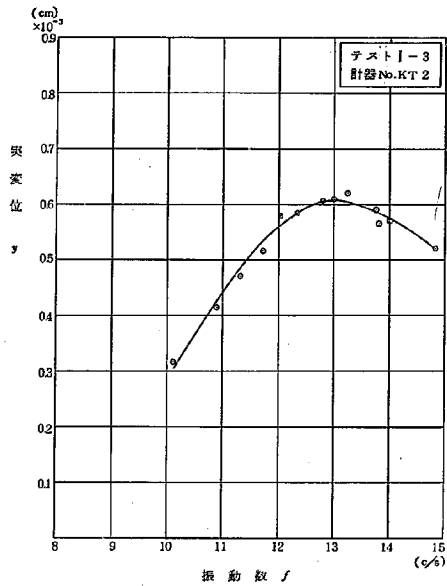
付図 - 7



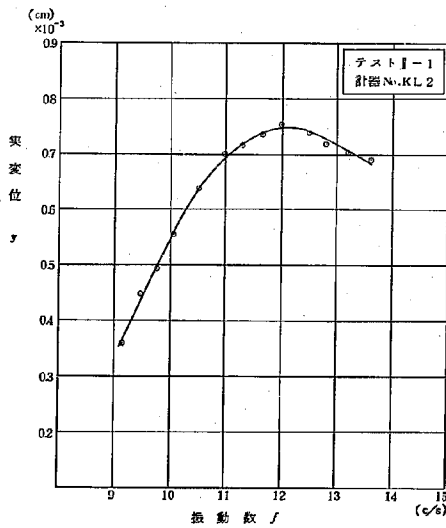
付図 - 8



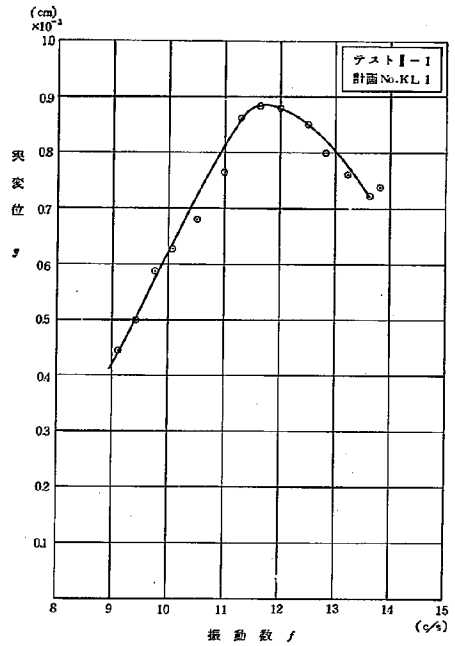
付図 - 9



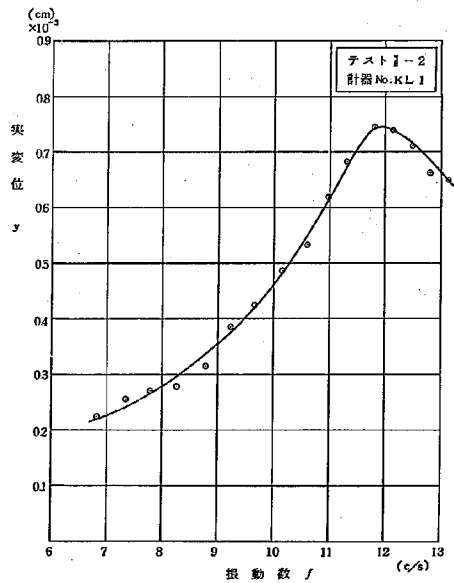
付図 - 11



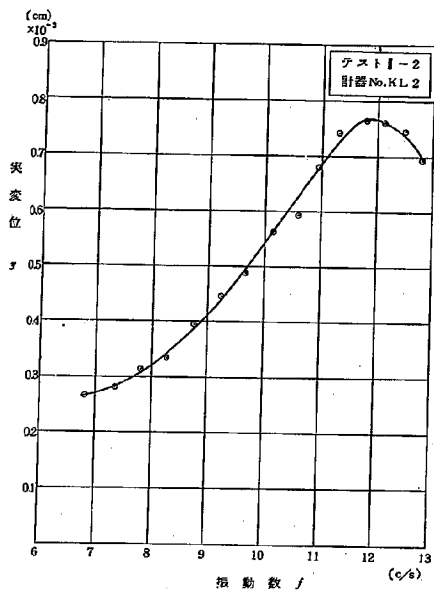
付図 - 10



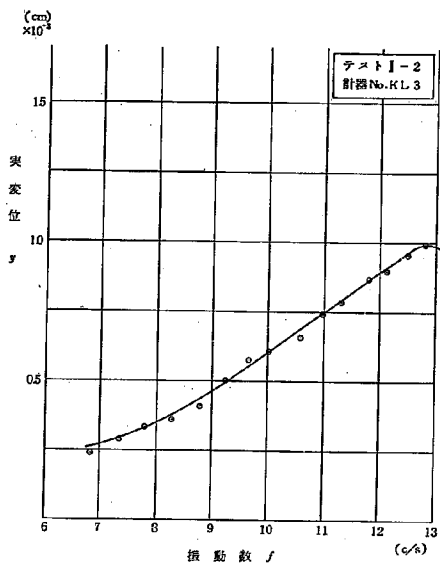
付図 - 12



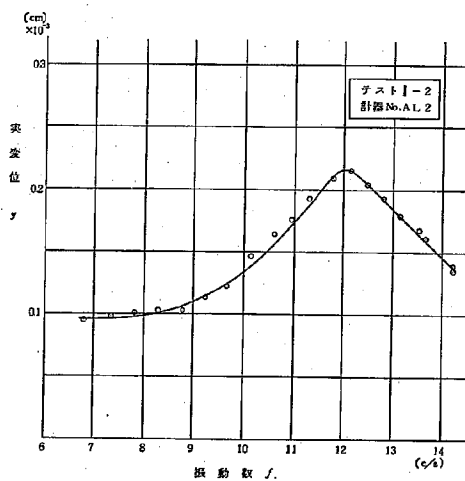
付図 - 13



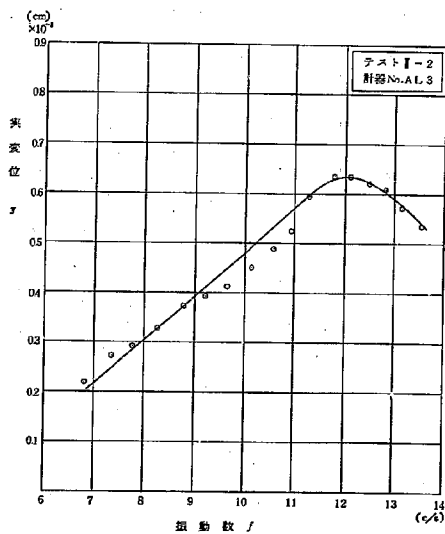
付図 - 14



付図 - 15



付図 - 16



参 考 文 献

- (1) M. A. Biot; Analytical and Experimental Methods in Engineering Seismology, Trans., ASCE, Paper No. 2183, 1943
- (2) 建設省土木研究所耐震調査室, 土木研究所資料第 152 号, 橋梁下部構造の振動実験調査結果, 昭和 41 年 3 月
- (3) 村山朔郎, 大崎順彦, 基礎工学ハンドブック, 昭和 39 年
- (4) 松平精, 基礎振動学, 昭和 25 年
- (5) 土木学会, 本州四国連絡橋技術調査報告書, 付属資料 2, 耐震設計指針 (1967) ・同解説および耐震設計詳説, 昭和 42 年 7 月
- (6) 建設省土木研究所耐震調査室, 土木研究所資料第 320 号, 実橋振動試験用各種起振機の取扱法, 昭和 42 年 11 月
- (7) S. Timoshenko; Vibration Problems in Engineering, 1955, 3rd ed., in collaboration with D. H. Young, D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton.
- (8) L. Jacobsen, R. Ayre, Engineering Vibrations with Application to Structures and Machinery, 1958, McGraw - Hill Book Co., Inc., New York.
- (9) 栗林栄一, 橋梁杭基礎の振動時の弾性および減衰性について, 地震工学国内シンポジウム, 昭和 37 年 11 月
- (10) 建設省東北地方建設局郡山国道工事々務所; 鳥井大橋下部工設計々算書, 昭和 42 年
- (11) F. Vogt, Über die Berechnung der Fundamentdeformation, Det Norske Videnskaps Akademi, Oslo, 1925
- (12) United States Department Of The Interior Bureau Of Reclamation; Treatise On Dams, Design Supplement, No. 2, Chapter 10 - Arch Dams (2) Foundation Constant, p 58

報 告 概 要

資 料 種 別	土 木 研 究 所 資 料 第 3 4 2 号			資 料 名	鳥井大橋振動試験
研 究 室	耐震調査室	担 当 研 究 員	岩 崎 敏 男 小 山 田 欣 裕	報 告 日 年 月 日	昭和43年2月1日
<u>概 要</u> 国道49号線の福島・新潟県境にあたる鳥井峠に東北地方建設局が架設中の鳥井大橋（橋長114 m）で、昭和42年10月に、同建設局の協力のもとに土木研究所が実施したP₁橋脚基礎（井筒）の振動試験の結果、同基礎の固有振動特性（固有周期・減衰定数・振動モード）を明らかにし、さらに周辺地盤の動的地盤係数（K値）ならびに弾性係数Eを求め、地中深く埋め込まれたこの種の構造物の力学モデルとしては少なくとも2自由系モデルが適当であることを確認した。					