

くい基礎を有する建造物の地震応答

中川 恭次 安井 讓
渡辺 清治 瀬尾 和 大
角田 智彦

Seismic Response of a Structure with Pile Foundation

Kyoji Nakagawa Yuzuru Yasui
Seiji Watanabe Kazuo Seo
Tomohiko Tsunoda

Abstract

In order to obtain information about the interaction between superstructure and pile foundation including a soil surface layer, the authors conducted a series of on-site tests. These tests consisted of soil tests, vibration tests of a pile foundation model and observation of seismic responses of the actual pile foundation and ground. In this report, the authors have summarized the results of the tests and determined a dynamical model simulating the structure-pile foundation-surface soil layer system. It was found that seismic response of the model showed good correlation with observed response.

概 要

くい基礎を有する建造物の耐震設計に関連して、くいの地震時応力まで求めようとすると、地表層、くい基礎を含めたモデル系を考える必要がある。この様なモデル化を行なうために必要な資料を得るために、次の様な一連の実験および観測を行なって来た。すなわち、くい基礎の起振機実験および発破による人工地震実験、常時微動観測、弾性波探査、自然地震観測等である。本報告は、これらの一連の実験結果のまとめである。また、これらの資料をもとに弾性理論（田治見理論）¹⁾によってくい基礎を有する建造物の地震応答計算を行ない自然地震観測結果と比較した。

1. まえがき

くいおよびくい基礎を有する建造物の地震時の挙動を明らかにするための資料を得るために、玉島火力発電所敷地内において一連の実験を行ってきた。特に連成系が弾性理論¹⁾によってどの程度説明できるかということを念頭において実験を行ってきた。一連の実験は、主として地盤の弾性定数を求めるためのものとくい基礎の簡単な連成系に関する実験とに分かれる。前者には弾性波試験および常時微動測定が相当する。後者にはくい基礎の起振機実験および発破実験が相当する。これらの基礎的な実験から得られる連成系

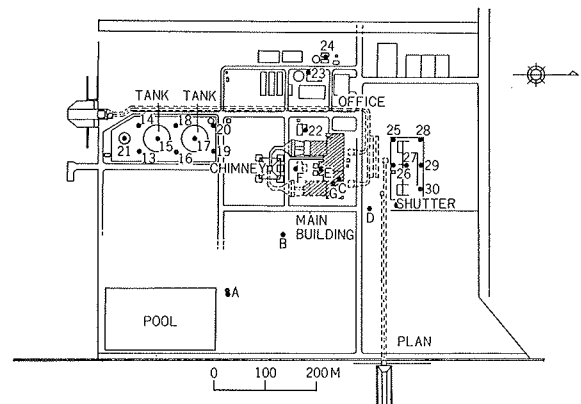


図-1

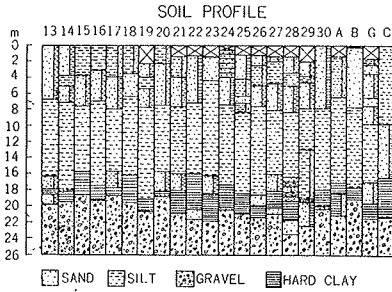


図-2

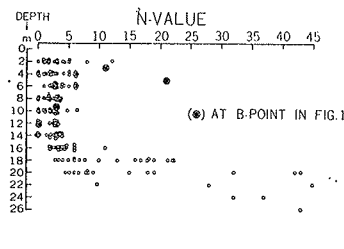


図-3

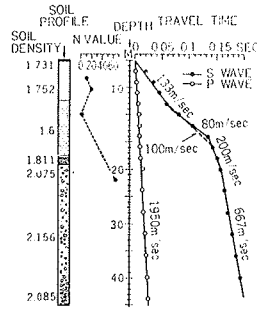


図-4

地盤の種類	S波の速度 (m/SEC)	土の単位体積重量 (ton/m³)
細砂	133	1.74
シルト	80-100	1.6
硬質粘土	200	1.81
砂	667	2.1

表-1

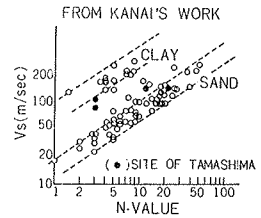


図-5

モデルを検討するために、くいおよびくに支持された基礎と構造物、地盤で自然地震観測を行なった。

本報告書では、これまで行なわれて来た各実験についての簡潔なまとめを行ない、これらの結果を用いて大胆な仮定のもとに弾性理論によって地震応答計算を試みた。

2. 地盤状況

玉島火力発電所は岡山県倉敷市乙島地内に位置している。現地で行なわれた地盤調査の報告書から当地盤の地盤状況を知ることができる。図-1中のNo.,あるいは記号の位置で行なわれた地盤調査結果のうち、土質とN値についての資料をそれぞれ図-2と図-3に示した。図-3から、まず次の様に言える。すなわち、当敷地全体にわたって一般的に深度18~21mまでは軟弱な表層でその下層はN値50以上の堅い砂礫層である。また図-2から、軟弱な表層については一般的に次の様な構成になっている。深度7~8mまではシルトと細砂の種々の組み合わせから成っていて、深度7~8mから深度17~18mまでがシルト層、その下に硬質粘土を挟んで砂礫層がある。なお図-1のB点におけるボーリング結果では、深度50mまで砂礫であった。

3. 弾性波試験

表層地盤を考慮した、くい基礎を構造物との連成系

を弾性理論でモデル化するためには地盤の弾性波速度を知る必要がある。そこで、ボーリング孔Bを用いて、板たたき法によってS波の速度を求めた。また同じボーリング孔を用いて、地表面でダイナマイトを爆破させ、生じた波動を記録することによってP波の速度を求めた。図-4に弾性波速度の測定結果を示した。図-4の走時曲線から得られた弾性波速度を表-1に示した。参考のため、土の単位体積重量も添付した。ところで、図-3をみると、B地点の地表面下7~8mの細砂のN値は当地盤の平均的なN値に比して大きいことが判る。一般的に当地盤の表層のN値は5以下であること、また、N値とS波の速度の関係を示す図-5から考えて、細砂のS波の速度としては常識的に60m/secをとるのが妥当であろう。

4. くい基礎の起振機実験および発破実験

マットベースのコンクリート打設に先立って、図-1のE地点の根伐底において、図-6に示した様なくい基礎を作成して起振機実験を行なった。くいは表-2に示した様な諸元をもつ鋼管ぐいである。また、発破爆破によって生じたくい基礎の振動測定も行なった。起振機はくいの頭に打設した直方体(3.72×1.5×1.1)のコンクリート基礎の天端圆心位置に据え付け、X方向に加振した。基礎の底面と地盤が接している場合

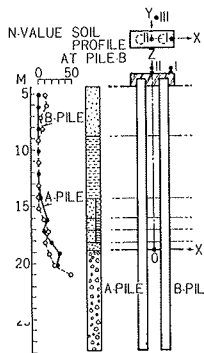


図-6

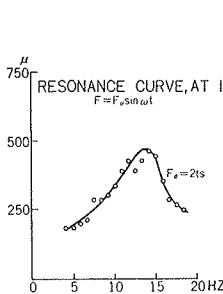


図-7

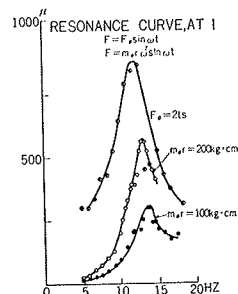


図-8

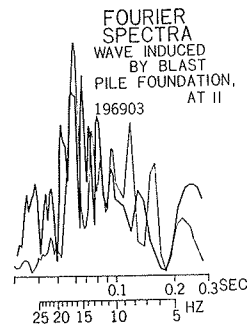


図-9

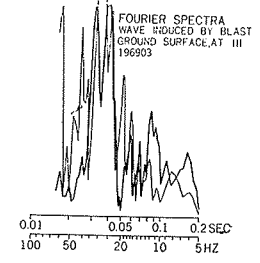


図-10

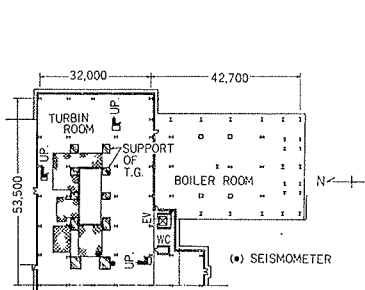
くい径 (mm)	肉厚 (mm)	くい長 (m)	重量 (ton/m)	断面二次 モーメント (cm ⁴)
812.8	12.7	21.5~25.5	0.251	3.84×10 ⁵

表一 2

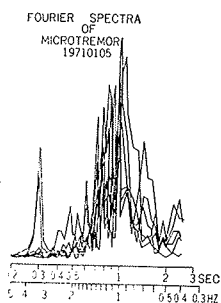
と、基礎の底面の土を掘削して縁を切った場合の2つの場合について実験を行った。

	くい基礎の起振機実験結果				動的ばね定数	
	加振力	共振々動数 Hz	共振周期 SEC	共振時振巾 H	減衰定数 %	動的ばね定数 kg/cm ³
基礎底面土を除去しない場合	2 ton	14.2	0.0704	470	26.9	kn 2.2 kv 9.2
	100kg·cm	13.8	0.0725	300	9.5	kn 2.0 kv 9.9
基礎底面土を除去した場合	200kg·cm	13.2	0.0758	565	10.7	kn 1.8 kv 8.3
	2 ton	12.5	0.08	870	16.7	kn 1.6 kv 7.1

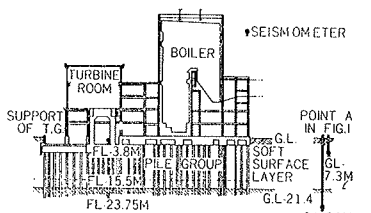
表一 3



図一 11



図一 13



図一 12

構造概要	
基礎	鋼管ぐい、長さ505本 ただし基礎底面は1451本
マット ベース	鉄筋コンクリート造 長さ2.5m、スラブ厚0.5m
躯体	鉄骨鉄筋コンクリート造
壁体	タービン室 (下部鉄筋コンクリート造 (上部)アスファルト被覆 カク・鉄筋造)
窓	ボイラー室 壁体大鉄骨造
床	鉄筋コンクリート造 一部フロアプレート、グレーチング
屋根	タービン室 鉄骨鉄筋コンクリート造 ボイラー室 鋼骨鉄筋コンクリート造 7ス・7アルミ板 ボイラー室 なし

表一 4

得られた加速度波形のフーリエスペクトラムを図一9と図一10に示した。図一9はくい基礎上のII測点で記録された波形のものであり、図一10はくい基礎の近傍の地表面のIII測点で記録された波形のフーリエスペクトラムである。図一9をみると、15Hz付近に顕著なピークが認められる。一方、図一10においては15Hz付近は相対的に谷間になっている。これらの事実と、起振機実験によって得られた共振々動数が12~14Hzであったことから考えて、微小振動時のくい基礎の固有振動が励起されたものと考えられる。

5. 建物構造概要

6章の常時微動観測および7章の自然地震観測について述べる前に、中国電力玉島火力発電所本館の建物構造概要についての一般的な事項を記しておく。

当敷地における建物の配置は図一1に示してある。当火力発電所工事は、既に一期工事、二期工事が完了し、現在、三期工事が進んでいる。一期工事分および二期工事分は図一1の配置図において、斜線を施した部分である。

基礎は、一期および二期工事については鋼管ぐいを、三期工事についてはP.Cぐいを用いている。上部構造については、各期工事とも同じパターンの繰り返しであって、それぞれタービン建屋とボイラー建屋とが一对となっている。タービン建屋についてはSRC造、ボイラー建屋についてはS造である。

自然地震観測の対象とした二期工事分の建物概要を表一4に示した。また、平面図および断面図をそれぞれ図一11と図一12に示した。また建物各部の総重量を表一5に示した。

6. 常時微動観測

2, 3章で検討した地盤の弾性波速度、層構成の確認のためと、タービン台およびタービン建屋の固有周期を求めるために常時微動測定を行なった。

タービン台および建屋は表層地盤と同様な周波数特性で振動していて、特にこれらの固有周期を取り出すことはできなかった。

マット・スラブ天端 (FL-3.8)、タービン台上、地盤 (図一1のD地点) のそれぞれの測点のNS方向およびEW方向についての微動変位記録波形のフーリエ・スペクトラムを図一13に示した。この図から表層の固有周期は0.8~1secであることが推察される。

このとき、表層を層厚 H=20m の軟弱な単一層と仮定した場合、S波の速度は80~100m/sec となって3章で得た実験結果とよく符合する。

図一7と図一8に図一6のI測点のX方向の水平変位の共振曲線を示した。図

建物各部の重量 (二期工事分)										
建 物 名	ボイラー側建屋			タービン側建屋			タービン台		マットベース	
	鉄骨	ボイラー	1階鉄骨	鉄骨	屋根鉄骨	コンクリート	発電機	鉄水機	コンクリート	
重 (ton)	2,050	4,980	100	1,110	500	8,800	1,330	1,570	5,350	19,200

表一 5

一7は基礎の底面と地盤とが接している場合で、図一8は縁を切った場合のものである。起振機実験から得られた共振々動数、動的K値および減衰定数を示すと表一3のようになる。基礎底面に接した地盤の影響で共振々動数、減衰定数ともに増大していることがわかる。くい基礎の底面と地盤とが接触している状態で、図一1のF地点のポーリング孔でダイナマイトを爆破させて人工地震を起し、くい基礎およびその近傍の地表面で振動を記録した。爆破深さはGL-22~25mであり、用いた薬量は1kgである。2回の実験によって

7. 自然地震観測

くいおよびくいで支持された構造物の耐震設計資料を得るために前節までに報告してきたような基礎的な実験を行ってきたが、これらの実験の総まとめとして、自然地震の観測を行ってきた。今回の観測では上部構造として特にタービン台に注目している。地震計は、既に図-11および図-12に示してあるように、くい(FL-23.75m, FL-15.5m)とマットベース(FL-3.8m)、タービン台および地盤(GL-7.3m, GL-30m)に設置している。

図-14に地震観測システムの概略を示した。

表-6に解析を行なった地震波記録に関する資料を示した。

図-15に観測記録の一例を示した。

図-16~図-21に記録波形のフーリエ・スペクトラムを示した。2つの地震ともよく似た周波数特性をもっていることがわかる。

図-22~図-24に、くい基礎と構造物の連成系の固有周期をみるためのスペクトラム比を示した。これらの図をみると、0.7secと1.5sec付近に顕著なピークが認められる。前者のピークはマットベース下の表層の固有周期に対応するピークと思われる。後者のピークは、表層の3次の固有周期かあるいは連成系の固有周期に対応するか定かでない。

なお、興味あることは、(FL-15.5m)/(FL-23.75m)のスペクトラム比をみると、FL-15.5はChangの式によれば不動点であるにもかかわらず0.7secと0.15secで大きい増巾率を示していることである。

図-25は表層の増巾特性をみるためのスペクトラム比である。0.8sec, 0.24sec, 0.16secと顕著なピークが認められる。これらのピークを生ずる周期はそれぞれ表層の1次, 2次, 3次の固有周期に対応している。さらに、表層の周波数特性を確認するために、重複反射によって、GL-7.3mの増巾率を計算した結果を図-26に示した。用いた諸定数および仮定は図-26に示してある。増巾率については、特に一次固有周期付近で一致しないが、周波数特性についてはよい一致を示している。

8. 弾性理論による若干の考察

弾性理論(田治見理論)によって、これまでの実験結果について若干の考察を試みる。より詳細な解析は後日に譲ることとする。

8.1. 4章のくい基礎の固有振動数について

田治見によれば、層厚Hの表層を貫いて下層の基盤に支持された剛体-くい系の固有振動数は次式で与えられている。

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{EI \left(\frac{\pi}{2H} \right)^4 \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{1}{F(H, O) m_0}} \quad (1)$$

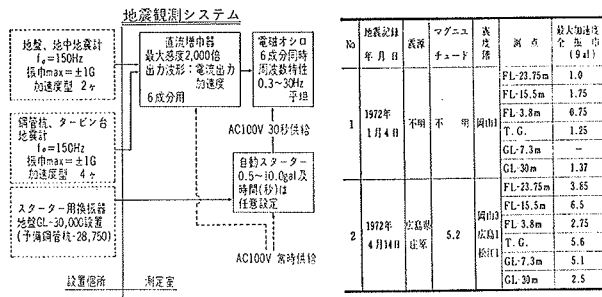


図-14

No	地震記録年月日	震源	マグニチュード	震度	測点	最大増加率全振幅(9d)
1	1972年1月4日	不明	不明	弱	FL-23.75m	1.0
					FL-15.5m	1.75
					FL-3.8m	0.75
					T.G.	1.25
					GL-7.3m	-
					GL-30m	1.37
2	1972年4月14日	広島県	5.2	弱	FL-23.75m	3.65
					FL-15.5m	6.5
					FL-3.8m	2.75
					T.G.	5.6
					GL-7.3m	5.1
					GL-30m	2.5

表-6

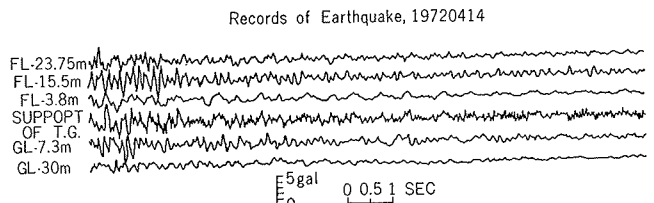


図-15

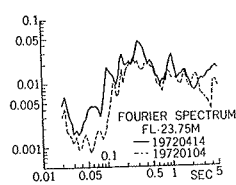


図-16

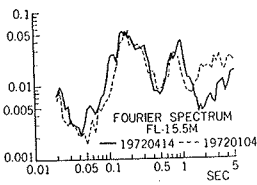


図-17

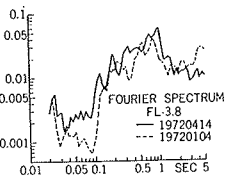


図-18

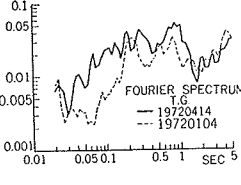


図-19

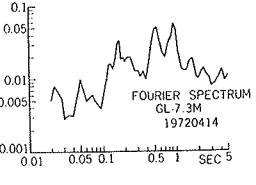


図-20

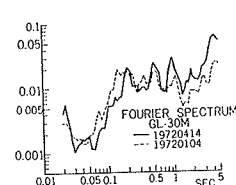


図-21

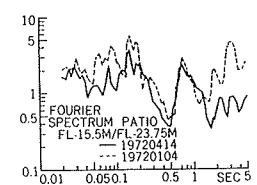


図-22

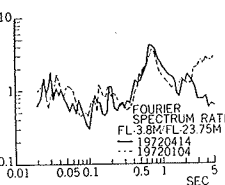


図-23

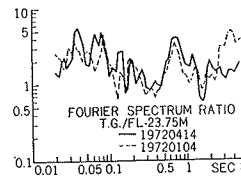


図-24

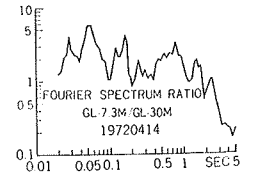


図-25

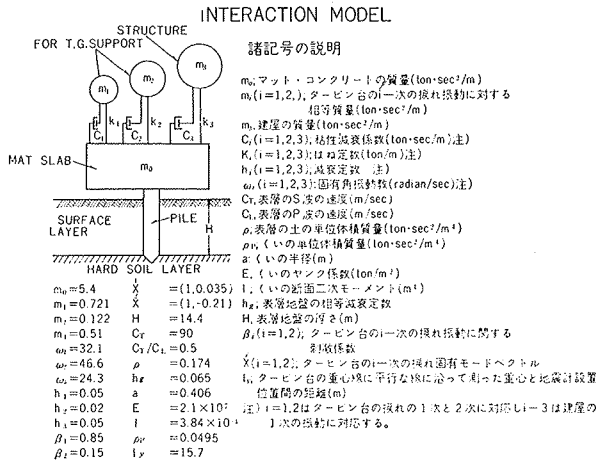


図-27

ここにEI; くいの曲げ剛性, m_0 ; 剛体の質量, F(H, O); くい頭に水平力が加わった場合のくい頭の変位に関する量で, 表層のポアソン比と, くいの半径と表層の厚さとの比の関数。

(1)式に含まれているせん断剛性 μ を1/2とした。 m_0 を直方体質量の1/2として, くい1本あたり質量に直して単ぐいとして計算すると, $f_s=16\text{Hz}$ と得られる。発破実験により得られた固有振動数に近い。このとき使用した諸数値は以下の通りである。

$H=14.4\text{m/sec}$, $m_0=0.752\text{ton-sec}^2/\text{m}$, C_T (S波の速度) $=90\text{m/sec}$, C_L (P波の速度) $=180\text{m/sec}$, くいについての諸元は表-2のものを用いた。

8.2 7章の自然地震観測について

くい基礎を有する建造物をモデル化した一例を図-27に示す。ここに m_0, m_1, m_2, m_3 , はそれぞれマットベース, タービンの振れの一次の等価質量, タービンの振れの2次の等価質量, 建屋の質量 (但しボイラーの重量は除いた) をくい1本あたりの質量に直したものである。タービン台, 建屋の固有振動数は仮定であり, 今後, より現実に近い振動数を求める必要がある。

このようなモデルについては, 田治見理論を少々変形することによって地震応答計算をすることができる。

田治見理論について若干の説明をしておく。詳しくは文献(1)を参照せられたい。田治見は, 表層の軟弱な地盤を貫いてその尖端が硬い基盤でピン支持されている場合の単ぐい基礎の振動について, 表層地盤に3次元の波動理論を適用して, 理論解を求めた。このように地盤を3次元弾性体として扱えば, 表層地盤の波動的な影響, くい側面からの波動逸散減衰等を同時に含

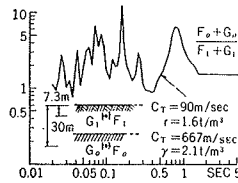
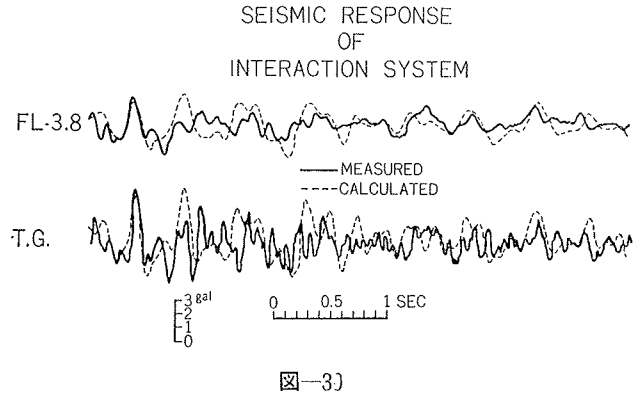


図-26

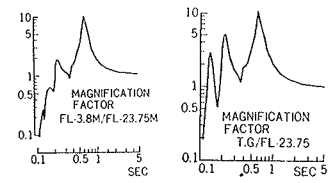


図-28

図-29

めることができ, くい基礎の振動についての解析を行なうにあたって非常に有用な理論解となる。

田治見が対象としたくい基礎は, くい頭に剛な基礎が固定されている場合のものである。今回, 我々が扱ったモデルは, くい基礎の上部に上部構造を表わす質点がばねで連結されている場合のものである。このようとき上部構造からくい頭に伝えられるくい頭水平力を $Ve^{i\omega t}$ として求めた田治見による解と, 上部構造の運動方程式とを, くい頭水平力 $Ve^{i\omega t}$ を仲介として連成させて解くことにより上部質点, くい体の基盤に正弦波が入射した場合の応答を求めることができる。地震応答は, 正弦波応答を周波数領域で重ね合わせることによって求めることができる。

図-27に示したモデルについて, 1972年4月14日に採取されたくい尖端での地震波を入力として, 地震応答し計算した結果が図-30に示してある。なお, 使用した諸定数は図-27に列挙してある。観測結果と比較的良好一致を示している。これは, スペクトル比, 図-23, 図-24と, このモデルの理論的な応答倍率である図-28と図-29とが良く近似していることから予想されることである。

なお, このモデル化にあたって, マットベース底面での土の抵抗を無視したこと, マットベース側面の土の効果を無視したこと, くいどうしの干渉を無視したことなど大胆な仮定を設けている。また, 田治見による解では, くい尖端はピン支持となっているが, 当く

い基礎のような鋼管ぐいでは固定支持に近く、この点についても問題があろう。

9. まとめ

くい基礎を有する構造物の地震時の挙動を明らかにするために行なって来た一連の実験を相互に関連させながらまとめ、弾性理論（田治見理論）によって若干の考察を試みた。弾性理論による解析は充分でないが、地震時におけるくい基礎を有する構造物の挙動を弾性理論によってある程度説明できるのではないかという目安を得た。

最後に本実験を行なうにあたって種々御配慮を頂いた中国電力株式会社の関係各位、ならびに実験にあたり御援助頂いた京都大学小堀研究室の皆様には謝意を表します。また、実験にあたって協力して下さった大林組玉島工事事務所の方々、当技術研究所の島口職員に謝意を表します。

参考文献

- (1) H. Tajimi; Dynamic Analysis of a structure Embedded in an Elastic Stratum, IV-W, C. E. E.