

大型実験棟の動特性について

中川 恭次 角田 智彦
渡辺 清治 安井 護

Dynamic Properties of Testing Laboratory Structure Having Large Opposing Twin Reaction Walls

Kyoji Nakagawa Tomohiko Tsunoda
Seiji Watanabe Yuzuru Yasui

Abstract

In order to obtain information about the interaction between a relatively rigid structure with basement and the surrounding soil, the authors conducted tests on the Large Size Structure Testing Laboratory of the Company. These tests consisted of vibration tests and observation of seismic responses of the structure and the ground. Experimental results include earth pressure distributions at base and side walls of the basement as well as fundamental dynamic properties besides interesting vibration phenomena regarding the large opposing twin reaction walls. In this report the authors have summarized the results of the tests and determined a dynamical model simulating the large opposing twin reaction walls-basement-surface soil layer-subsoil layer system. It is found that calculated results based on the model show good correlation with observed test results.

概 要

本報告は、剛な実大建物と周辺地盤との相互作用に関する資料を得るために、当組の大型構造物実験棟を対象として行なった起振機実験と地震観測の結果とその結果に対する考察をまとめたものである。実験結果には、構造物の基本的な動特性のほかに、側壁土圧分布、底面土圧分布も含まれている。なお、2つの合同な反力壁が互いに影響し合う双子系の振動に関する興味ある結果も得られている。弾性波動理論を用いて作成した、半無限基礎地盤—表層地盤—剛基礎—双子質点のモデルで実験結果を考察した。その結果、実験によって得られた構造物の基本的な動特性が十分な精度で再現できた。更に、実験に現われた双子質点系に関する興味ある現象が理論的にも再現できそうであることがわかった。

1. 序

耐震設計にあたって、基礎構造の種別に対応して、建物と周辺地盤との連成効果を振動モデルに適確に取り入れることは重要な課題である。この問題に関する資料を得る目的で、模型基礎¹⁾、タイプの異なる実大建物^{2),3)}について、一連の実験を行なって来た。これら一連の実験の1つとして、剛な実大建物とその周辺地盤との相互作用に関する資料を得るために、当組技術研究所の「大型構造物実験棟」⁴⁾を対象として、起振機実験および地震観測を行なった。実験結果には、相互作用に関する基礎的なデータのほかに、2つの合同な反力壁が互いに影響し合う、双子系の振動に関する興味ある結果も得られた。

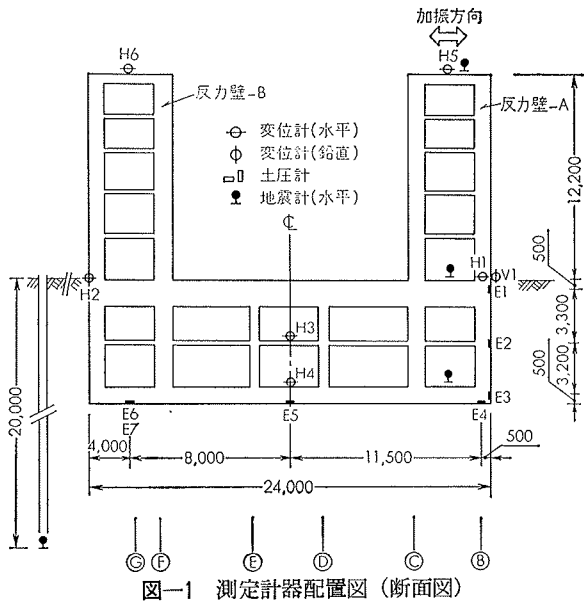
本報告では、まず、構造物の基本的な動特性について述べる。つづいて、既報の深い基礎理論⁵⁾と振動アドミッタンス⁶⁾を組み合わせ作成した、下層硬質地盤—表層地盤—剛基礎—双子質点モデルで実験結果を再現することを試みる。

2. 大型構造物実験棟の概要

大型実験棟は昭和46年7月に開設されたが、起振機実験は開設に先だつ同年4月、主体コンクリート工事が完了した時点で行なった。地震観測は実験終了後から開始し今日に至っている。この大型実験棟は、大小2組の鉄筋コンクリート造反力壁・試験床で構成される実験場とそれらを含む鉄骨造スレート貼りの上屋および付属建屋からなっている。基礎はベタ基礎で5～7mの関東ローム層を貫ぬいて下層の砂礫地盤に支持されている。なお、大型実験棟については、既に詳報⁴⁾があるので詳しくは文献(4)を参照されたい。

3. 敷地地盤の概要

敷地地盤の構成とS波速度、P波速度については、既に詳しい調査結果^{1),7)}がある。文献(1)、(7)によると敷地盤の概要は次の様である。GL-5～7mまではローム層で、そのS波速度およびP波速度はそれぞれ143m/sec、380m/secであり、地盤密度は1.2g/cm³



である。その下層にある砂礫層の弾性波速度は、それぞれ466m/sec, 2100m/secであり、地盤密度は $2.1\text{g}/\text{cm}^3$ である。詳しくは文献(1), (7)を参照されたい。

4. 起振機実験

4.1. 実験方法および実験内容

起振機は BCS-A-200 型を用いた。据付位置は一対の大反力壁のうち南側の反力壁の頂部の図心位置である。この南側の反力壁を反力壁Aとよび他方を反力壁Bとよびこととする。偏心モーメントは、 $2\text{kg}\cdot\text{m}$, $4\text{kg}\cdot\text{m}$, $10\text{kg}\cdot\text{m}$ の3種類を用いた。

測定項目は、建物の変位振巾と地下側壁および底面における土圧である。図-1にそれらの測定位置を示した。同図中、 $E_1\sim E_6$ は、加振方向に平行な大反力壁の中心線から3m東側の測線上に、 E_7 は、3m西側の測線上に埋設されてある。

4.2. 起振機実験結果

反力壁頂部の共振曲線の例を図-2に示した。まず6Hz付近の共振曲線について考察する。反力壁Aと反力壁Bとでは共振振動数、共振時振幅とも異なるようである。加振振動数に対する2つの振動振幅の変化の様子は次の様である。6Hz付近の共振点が過ぎるまでは反力壁Aの振幅の方が大きく、その共振点を過ぎると逆に反力壁Bの振幅が大きくなり、更に10Hz付近の共振点に近づくと反力壁Aの変位の方が大きくなるようである。なお、それぞれの反力壁根元の水平変位(H_1 , H_2)は、試験床が弾性変形しているため、同じ傾向を示した。また、反力壁Aの根元の上下変位(V_1)は6Hzでピークを示した。

次に、10Hz付近の共振曲線について考察する。共振振動数は両反力壁とも10.6Hzである。振幅は反力壁Aの方がやや大きい。このとき2つの反力壁は逆位相で振動している。以後この共振振動数を双子質点の共振振動数とよぶ。なお、 $H_1\sim H_4$ の共振曲線は試験床部分が撓み振動をしたため複雑な様相を呈した。

表-1に共振曲線から読み取った共振振動数と減衰定数を示した。減衰定数についても、共振振動数と同様に、測点により違いがみられるようである。

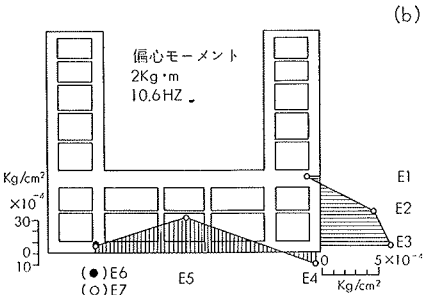
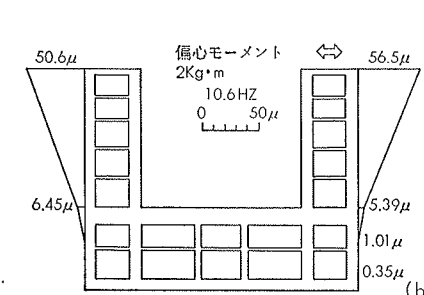
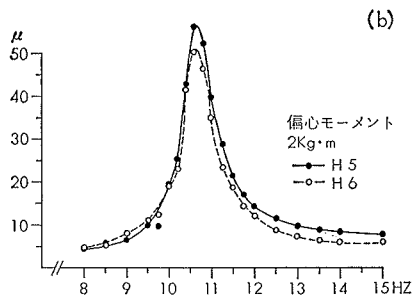
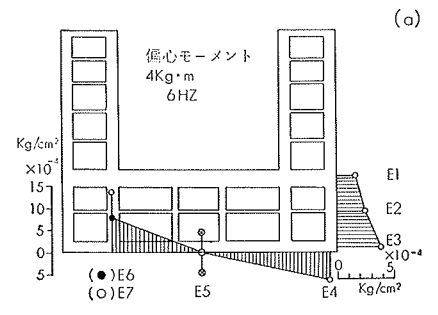
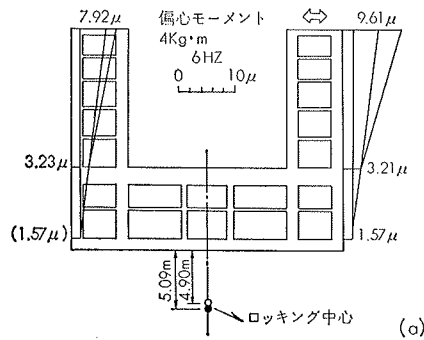
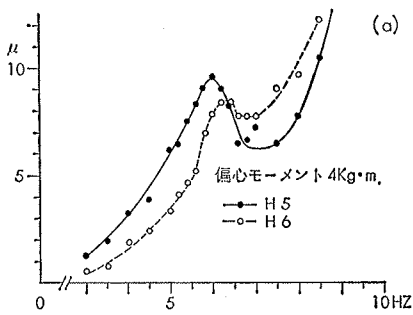


図-2 反力壁頂部の共振曲線

図-3 共振時振動モード

図-4 共振時土圧振動分布

測点	1次共振点		双子質点の共振点	
	共振々動数 (Hz)	減衰定数 (%)	共振々動数 (Hz)	減衰定数 (%)
H1	6.0	11.7~12.5	10.6	3.24~3.49
H2	6.2	—	10.8	2.36~2.59
H3	6.2	—	—	—
H4	6.2	29.6	—	—
H5	6.0	12.1~14.6	10.6	2.83
H6	6.2~6.3	—	10.6	2.59~2.83
V1	6.0	10.4~16.7	10.75	2.79~3.26

表-1 共振振動数と減衰定数

4.2.1. 振動モード 図-3に振動モードの例を示した。6Hzのときの振動モード図にはロッキング中心距離もあわせて記入してある。(●)印はV₁から求めた回転角を用いてロッキング中心距離を求めたものであり、(○)印はH₁~H₄から求めた回転角を用いてロッキング中心距離を求めたものである。6Hzのとき2つの反力壁の間には約40°の位相差が見られた。表-2には6Hzのときのスウェイ比とロッキング比を示した。弾性変形量は反力壁Aの方が大きい。図-3の下段には、双子質点の共振点でのモードも示してある。このときの2つの反力壁間の位相差は丁度180°であった。

4.2.2. 土圧分布 図-4に共振時の土圧モードの例を示した。まず6Hzのときの振動モードについてみると、側面土圧分布は、深くなるにつれてその値が大きくなっている。また底面土圧のうち回転軸上にあるE₅の土圧は他の土圧に対して90°の位相差がみら

資料 No.	発震時 年月日	震央地名 φ, λ	深さ (km)	震度 (東京)
1	47. 2.29	八丈島東方沖	40	IV
2	"	33.3°N, 141.3°E	"	"
3	48. 7.20	茨城県沖	40	II
		36.5°N, 141.0°E		
4	48. 9.29	ウラジオストック	500	III
5	"	42.5°N, 131.0°E	"	"
6	48. 9.30	千葉県銚子沖	40	III
7	"	35.7°N, 140.7°E	"	"
8	48.10. 1	千葉県銚子沖	20	III
9	"	35.7°N, 140.7°E	"	"

表-3 解析地震波一覧

	反力壁 A			反力壁 B		
	スウェイ (%)	ロッキング (%)	弾性変形 (%)	スウェイ (%)	ロッキング (%)	弾性変形 (%)
計算値	10.3	44.8	44.9	11.4	49.8	38.8
実験値	2kg・m	13.5	43.6	42.9	17.3	56
	4kg・m	15.9	59.4	24.7	15.9	59.4
	10kg・m	16.4	50.4	33.2	19.9	61.2

表-2 1次共振点でのS比とR比

れた。同図中E₅の(⊗)は最大振幅を示す。図-4には、10.6Hzのときの土圧分布の例も示してある。側面土圧、底面土圧とも試験床部分が撓み振動をしていることを示している。

5. 地震観測結果について

測点については既に図-1に示してある。加速度波形を記録した。これ迄に得られた地震波のうち、解析に用いた地震波一覧を表-3に示した。

6. 解析手法について

大型実験棟を周辺地盤を含めてモデル化するためには、表層地盤(ローム層)および下層硬質地盤(砂礫層)と建物地下部分との相互作用を考える必要がある。この2つの相互作用は本来別々に起るのではなく互いに影響し合う筈であるが、ここでは、この2つの相互作用を切り離して別々に振動モデルの中に組み込んだ。即ち、表層地盤と地下室との相互作用の効果をモデルの中に取り入れるために、既報の“深い基礎の理論”⁵⁾を用い、地下室底面での相互作用を考慮するために、振動アドミッタンス⁶⁾を用いた。また、建物地下部分は剛な円筒とし、上部構造については一對の反力壁のみを考え双子質点に置換した。この様にして定めた解析モデルを図-5示した。なお、地震入力の場合には振動アドミッタンスの使い方を更に工夫する必要がある⁸⁾。

7. 数値計算

7.1. 諸定数の決定

数値計算を行なうために必要な諸定数は次の様にして定めた。地下構造体の質量m₀は地下構造体の全質量500 ton・sec²/mを用いた。このとき、地下構造体の重心とその底面との距離Sは3.82mである。剛な円形基礎の半径aは12.5mとした。この値は、モデルと実際の構造物の基礎底面積が等しくなるように定めたものである。上部質点の質量m₁は反力壁の全質量を考えm₁=99 ton・sec²/mとした。それらの質点位置は

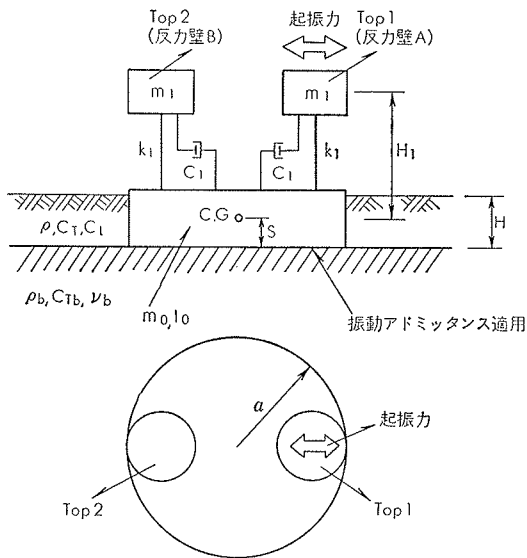


図-5 解析モデル

反力壁の重心位置にあるものとした。このとき $H_1 = 9.38\text{m}$ となる。双子質点のばね定数 k_1 は先に定めた m_1 と双子質点の共振振動数 (10.6 Hz) との関係で定めた。双子質点の減衰定数 h は実験値の 1 つである 2.83% を用いた。地下構造体の重心回りの質量慣性モーメント I_0 は地下構造体の重心回りの質量慣性モーメントと 1 対の反力壁の重心回りの質量慣性モーメントの和を考え $25,320 \text{ ton} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}$ とした。ローム層の層厚 H は 6.67m とした。表層地盤の S 波速度 C_T , P 波速度 C_L , 単位体積あたりの質量 P および下層地盤の S 波速度 C_{Tb} , 単位体積あたりの質量 P_b は既述の調査結果から定めた。下層地盤のポアソン比 ν_b は、 0.4 と仮定した。表層地盤に与える内部粘性減衰 h_g

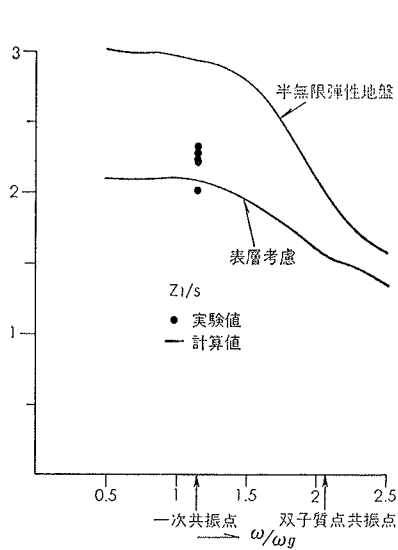


図-6 ロッキング中心距離

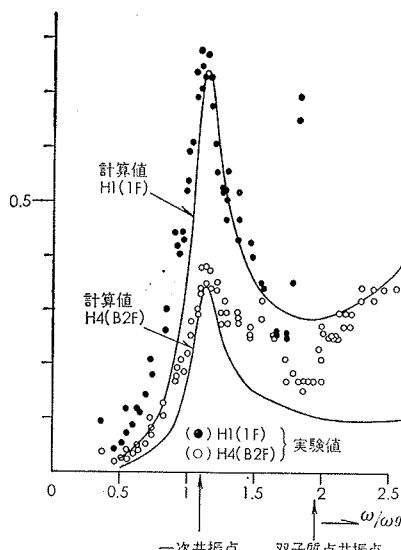


図-7 共振曲線 (地下構造体)

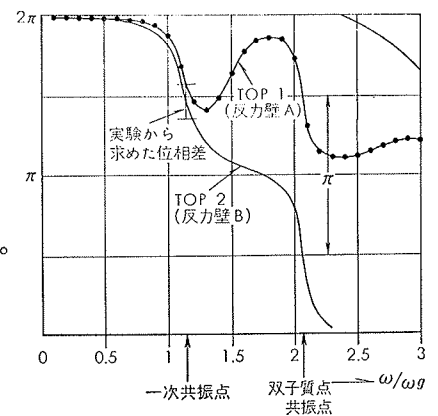


図-9 加振力に対する位相差

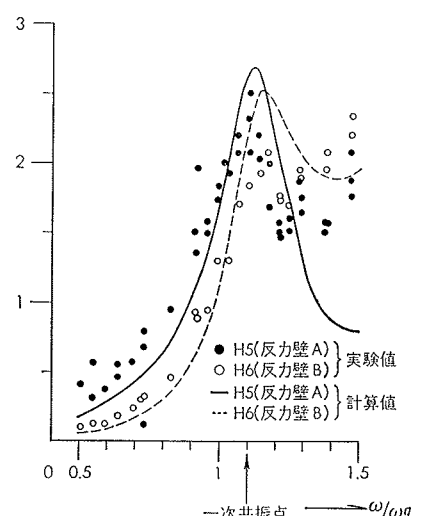


図-8 共振曲線 (反力壁頂部)

はインピーダンス比から 0.112 と定めた。

7.2 起振機実験結果と計算値との比較

図-6～図-9 に起振機実験結果と計算結果を比較するために作成した図を示した。これらの図の横軸は全て、起振機による加振円振動数 ω を表層地盤の固有円振動数で除した無次元量を用いている。なお、解析モデルは基礎を剛としているので、反力壁床の弾性変形が小さいと考えられる一次の共振点付近についての比較を行ない、双子質点の共振点付近の解析については別に機会を設けて行なうこととする。

図-6 はロッキング中心距離の比較である。表層を無視した場合の値も記入してある。縦軸は基礎の重心からロッキング中心迄の距離 Z_1 を S で除した値を用いている。表層を考慮した場合の方が実験値に近いが、実験値よりやや小さ目である。このことは、基礎の底面から逸散する減衰を実際より過小評価する傾向になるであろうことを示唆している。

図-7 は基礎部分の共振曲線について実験値と計算値とを比較したものである。縦軸は実変位を $m_e \cdot r / m_1$ ($m_e \cdot r$: 偏心モーメント) で除した値を用いている。一次共振点付近で両者とも良く一致しているようである。

図-8 は反力壁頂部の共振曲線についての比

偏心モーメント (kg・m)	反力壁 A			反力壁 B		
	スウェイ (%)	ロッキング (%)	弾性変形 (%)	スウェイ (%)	ロッキング (%)	弾性変形 (%)
2	13.5	43.6	42.9	17.3	56	26.1
4	15.9	59.4	24.7	15.9	59.4	24.7
6	16.4	50.4	33.2	19.9	61.2	18.9

表-4 1次共振点でのS比とR比

測点	共振々動数 (Hz)		減衰定数 (%)	
	実験値	計算値	実験値	計算値
H 1	6.0	6.11	11.7~12.5	10.0
H 2	6.2		-----	
H 3	6.2	6.11	-----	10.0
H 4	6.2	6.11	29.6	10.0
H 5	6.0	6.0	12.1~14.6	9.38
H 6	6.2~6.3	6.16	-----	-----
V 1	6.0	6.11	10.4~16.7	10.5

表-5 1次の共振振動数と減衰定数

較である。縦軸は図-7の場合と同様である。傾向は良く似ているが、振幅の値は計算値の方が大きい。これは、反力壁の剛性を実際より低く仮定したことに起因するようである。表-4に、1次共振点でのスウェイ比とロッキング比について比較したものを示したが、この事を裏づけているようである。また、図-9には加振力に対する位相差について比較したものを示した。1次共振点については実験から求めた位相差の方が大きいようである。

最後に、表-5に、1次の共振振動数と減衰定数について比較したものを示した。実験値、計算値とも、測点による違いがみられるようである。

7.3. 地震観測結果と計算値との比較

図-10に観測地震波のフーリエ・スペクトラム比(反力壁頂部/G L-20m)と計算による地震応答倍率を比較したものを示した。傾向については良く一致していることがわかる。なお、表層の影響があると思われるG L-20mの観測波を入力とした点については、若干問題があろう。

8. まとめ

簡潔に言って、弾性波動理論で、微小振動の範囲では、十分な精度で実験結果を説明できることがわかった。また、実験に現われた双子質点の挙動が理論的にも再現できそうであることがわかった。

今後の課題としては、微小振動の定義を具体的にす

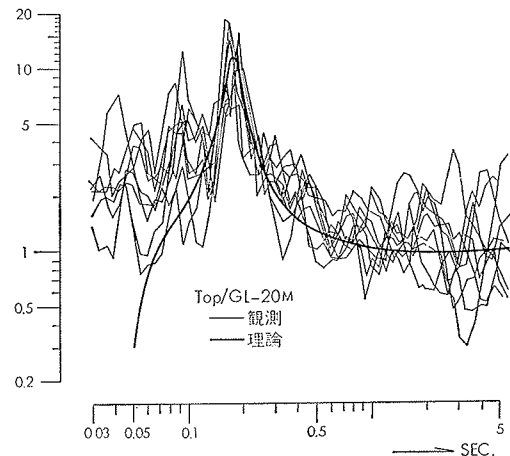


図-10 地震応答倍率

ること、側壁土圧分布についても弾性理論で検証してみることで、双子系を意識的に利用して減衰機構解明の糸口とすること等が挙げられる。

謝辞

本テーマを進めるにあたっては多くの人の協力が必要であった。地震観測機器の管理については、泉定一氏、小野寺利文氏、西原吉光氏に、また地震波の処理に関しては、瀬尾和大氏、宮地繁吉氏に、土圧計の埋設管理については島口正三郎氏に、更に起振機実験にあたっては、寺村彰氏、内田守男氏の各氏に協力を願った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川他：基礎—地盤連成系における基礎周辺地盤の地中振動分布に関する実験的研究，日本地震工学シンポジウム，1970
- 2) 中川他：くい基礎を有する構造物の振動について，その1)，その2)，建築学会東北大会，1973
- 3) 中川他：構造物—地盤連成系の振動性状に関する研究(葵ビル)，大林組技研報告書，1974
- 4) 竹本，吉岡，高橋：大型実験棟—設備と機能，大林組技報 No. 1973
- 5) K. Nakagawa, Y. Yasui; Sway-Rocking Vibration of Rigid Structure Embedded in an Elastic Stratum, V-W.C.E.E., 1973, Rome
- 6) 田治見：耐震理論に関する基礎的研究，東大生研報告書，Vol. 8, No. 4, March, 1959
- 7) 中川，角田，瀬尾：地震動特性における地盤構造上の問題点について，大林組技報 No. 6, 1972
- 8) 佐藤，山口：構造物の剪断振動と弾性地盤の相互作用，地震第2輯，第13巻，第3号