

(46) 剛体タワーの起振実験による地盤剛性評価

日本鋼管株式会社 正員 大羽 宏和
東京大学生産技術研究所 正員 片山 恒雄

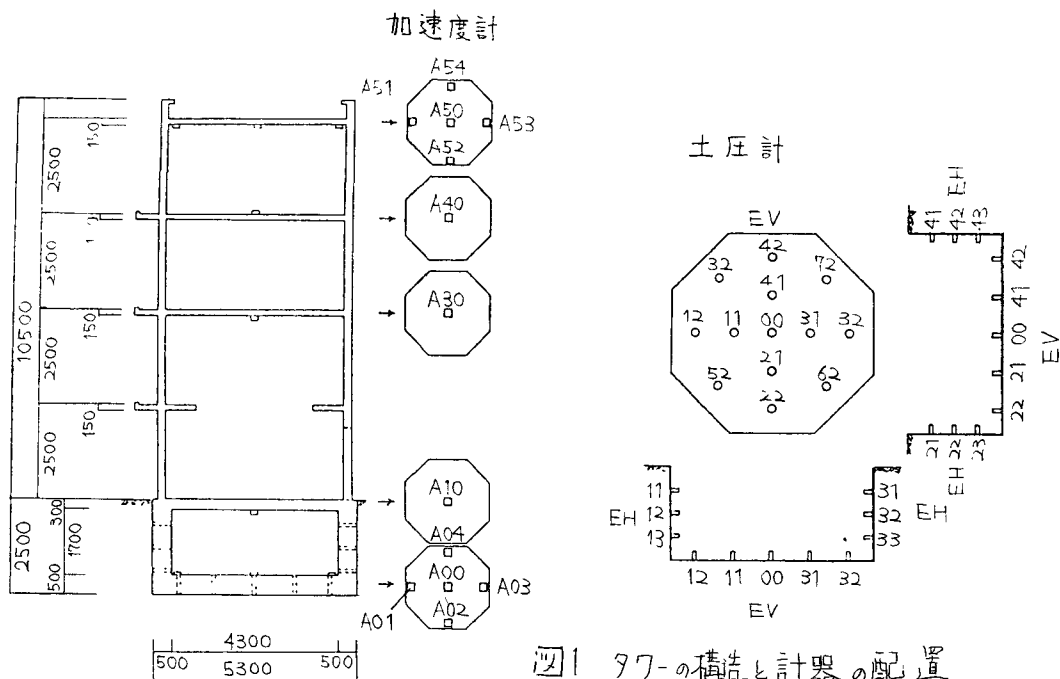
1. まえがき

地震と基礎の動的相互作用の問題は、構造物の地震時挙動を評価する上で重要な課題となっている。その中で特に重要となるのは地中に埋設された基礎に対する現象把握である。埋設基礎に対しても各種の解析手法により地盤-基礎間の復元力特性に関していくつかのモデル等も提案されてきている。しかしこれらに対する実験的検証例は比較的少なく、またそれらの多くは加速度計測による復元力特性の検討のみにあつた。こうした点から今回、土圧と直接計測することから地中基礎の復元力特性とその分布の特性を知ることと目的として、既存の地震観測設備を用いて実験を行った。本稿においてこの設備の概要を示すとともに、実験結果について報告する。

2. 設備及び実験概要

実験は東京大学生産技術研究所千葉実験所内にあるモデル応答観測塔にて実施した。この塔には、地震応答計測から地盤との相互作用を検討することと目的として、加速度計及び土圧計が数多く配置してある。塔は正八角形断面をもち地上10m、地下2.5mの鉄筋コンクリート造でありその構造を図1に示す。図に示すように地下を含む各階には合計13個の加速度計が配置してあり、特に基礎底板及び塔頂部には5個ずつが設置されている。加速度計はそれぞれ3方向の記録を行い、全体で39成分の加速度記録が得られる。

土圧計は基礎と地盤との接触部に、底板部3個、側壁部2個、計5箇所に設置されており、分布を図1に示してある。ここで使用された土圧計は一方向の土圧計であつて、剪断成分の計測はできない。従つて図で土圧計EVは鉛直方向力、EHは水平方向力を計測できるものである。これらの加速度計・土圧計の記録は、オンラインの集録システムによつて自動的に集録・デジタル化がなされ、磁気テープに保存される。このシステムは



地震動が発生して入力があるレベル以上になると記録を開始し、地震観測記録が得られるようにしている。

今回の実験は、上記設備においてタワー4階床板上に1トン起振機を据えつけて実施した。加振開始後、上記集録システムと手動でスタートさせ、加速度 上座を記録する。用いた起振機は偏心質量回転型（最大偏心モーメント248 kg.cm）であり 正弦波発生器と連動させることにより起振力と同位相の正弦波が記録され、応答との位相差を検出することが出来る。加振方向は水平の場合のみとした。

3. 実験結果

図2は、塔頂部の水平加速度応答（計器A50）の振幅特性及び位相特性を示したものである。応答振幅は加振力1 kgfに相当するものに正規化してある。振幅曲線、位相曲線とも自由震系の振動と類似した形状を示しており、ほぼ共振時において入力と応答の位相差が90°

となっている。また、共振点の付近はかなり鋭いピークとなっており、この振動系の減衰が小さいことがわかる。振動形を確認するため、周波数0.28 Hz（共振点）の場合について、各計測位置と振幅の関係を示したものが図3である。各階の振動の間に位相差はほとんどなかった。図3においてプロットした点はほぼ一直線上にある。これらのことから、タワーは剛体的挙動をしており曲げ振動や剪断振動は無視し得ること、振動はロッキングが支配的であり、おおむね基礎底面付近とその中心にしていることがわかる。この振動形は0.28 Hzの場合に限らず、他の場合についても同様である。

次に土圧計測結果について示す。図4は上記周波数の場合の土圧振幅の分布を示したものである。土圧の引張り側応力がカットされる現象は特になかった。底面の土圧分布は、ロッキング中心軸からの距離にはほぼ比例した形になっている。特徴的な点は側面の土圧分布であり、地表から最も浅いEH11、EH31の振幅が際立って大きいことである。この傾向は左右両側と

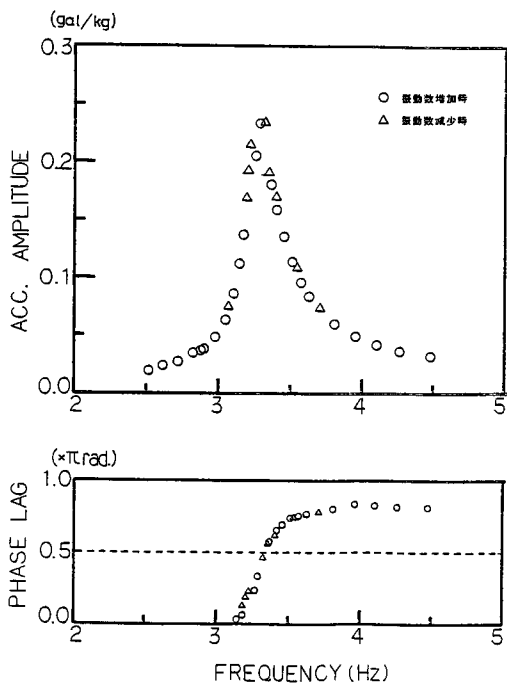


図2. 振幅及び位相曲線

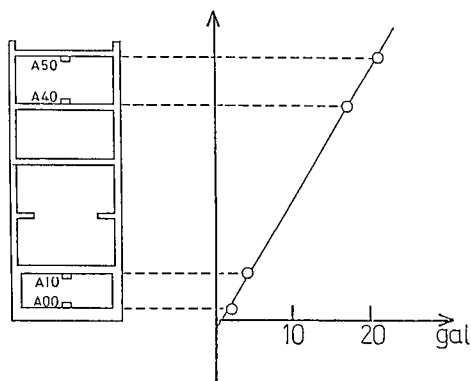


図3. 塔の振動形

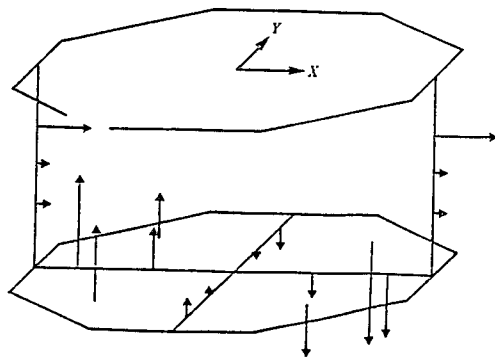


図4. 土圧分布

かに現れている。

4. 地盤の動的ばね係数

実験により得られた土圧振幅とその地点の変位振幅から、各土圧計測箇所における局所的な地盤の動的ばね係数と得ることが出来る。土圧と変位で割った値は厳密には複素剛性の絶対値と等しいわけだが、本実験における土圧と変位の間に位相差はほとんどなく、つまり複素剛性の虚部は非常に小さいことになり、得られた値は地盤のばね係数と考えるべき。これは本実験の周波数帯2～5Hzのこの地盤の一次固有振動数よりも小さいため、遅延現象がほとんど起きていないことによると思われる。

図5には側壁部の土圧計測から得られた各部のばね係数を示す。EH11(地表より深さ0.74m)、EH12(同1.2m)、EH13(同1.7m)である。各地点とも、この周波数帯ではばね係数の周波数依存性がほとんどないことがわかる。しかし、図5の持たせた土圧分布から予想される通り、ばね係数は深さによって値が異なる。図6は、共振時の28Hzの場合につき、計測箇所、地表からの深さとばね係数の関係をプロットしたものである。図中の破線は基礎底面位置であり、 $z=5m$ はこの地盤の表層圧である。このように表示したものは、当該地盤の表層が図7のように表されるためである。図6からばね係数の深さによる変動がより明らかになる。

5. 理論値との比較

埋設円筒剛体基礎側壁の動的ばね係数に関して弾性波動論による田治見の解析ともとに原田らで理論解を与えている。原田らは側壁のばね係数について深さの関数とするとばね係数を得た後、この関数の深さ方向に大きな変化がなければ一定であるとして、深さに依存しない一定値で近似値で表すようにした。前者と厳密解、後者と近似解を表すことにして本実験結果との比較検討を行う。2みる。

図5・図6には、原田らの厳密解及び理論解を合わせて示してある。図5によると、この周波数帯で周波数依存性があまりない点では理論と実験はほぼ傾向を合わせ、値については特に下部の2計測箇所のみ若干差があり、実験値は理論値を大きく下回る。深さ方向

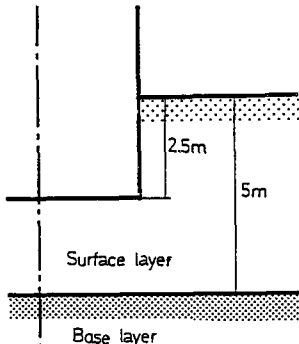


図7. 地盤モデル

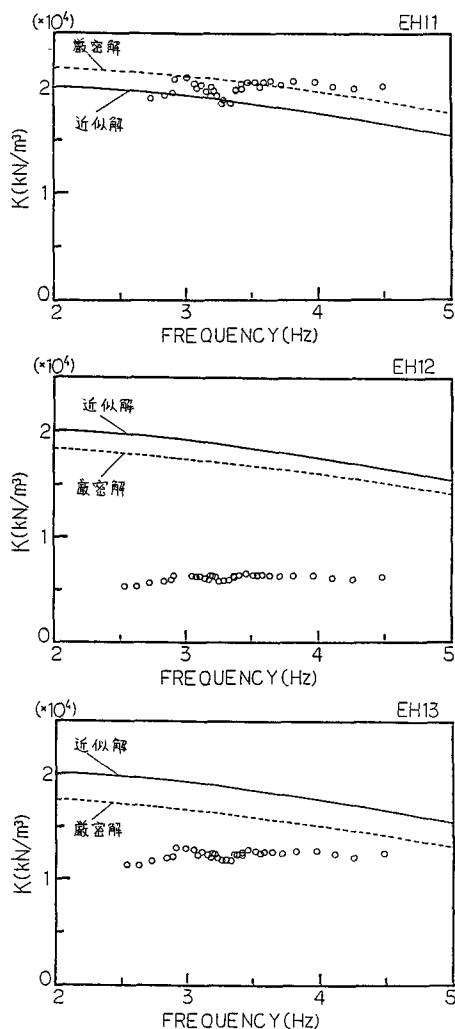


図5. 側壁の動的ばね係数

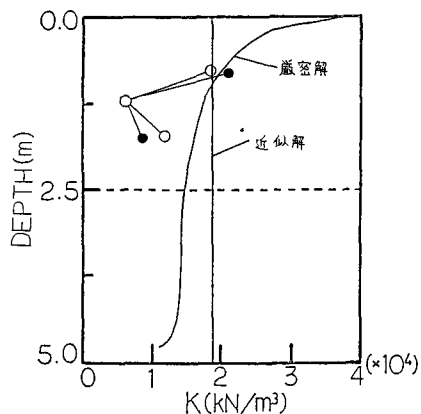


図6. 深さ方向の分布

の分布を示した図6にするとその差はよくわかる。厳密解は深さ方向の分布を多少説明するが、それでも差は大きい。従って、原田らと与えた一定の近似値は、本実験に与えらる前に検討する必要がある。

次に理論解の修正を試みしてみる。本実験のように基礎が表層の途中まで埋設されている場合、原田らは基礎下の土柱も基礎とみなし、ロッキング中心が基礎面上にあると仮定して理論解を適用することと提案している。この仮定を修正し、図8のようにロッキング中心を基礎底面から基礎面までの間の任意の位置に仮定して境界条件を与えて、理論解は得ることになる。原田らの仮定は、図9で $\gamma = 0$ の場合に相当するわけである。このように境界条件により得られる基礎側面ばねの理論解を図9に示す。図の $\gamma = 0$ とは、図6における厳密解と同じである。ロッキング中心位置を基礎面より上方に仮定するに従って、ばね係数の理論解は深さ方向の変化が急激になっていくことがわかり、 $\gamma = 0$ の場合に比べると実験結果の分布と定性的には説明し易くなる。しかし観測点数が少なかったためには、よりよいことは言えず、また、理論解によりこの振動系の応答曲線と求め、実験で得られる共振周数・振幅とのずれはかなりの大きく、修正によってもこれは改善されなかった。従って、理論的アプローチでは地表面付近の評価、剪断ばねの評価等更に複雑な問題が多く、これらの解明が重要であることが認識されるとともに、現段階においては原田らが提案するように理論解を思い切り、 $2/3 \sim 1/4$ 値として適用するようは暫定的方法が適当であるとも言えよう。

6. 底面の回転ばね

底面回転ばねについては、ある土圧分布関数を仮定することによって、底面各部の土圧値から底面全体にかかるモーメントを最小2乗法により求め、得られたモーメントと底面回転角からばね係数を算出する。土圧分布関数としては、いわゆる剛板分布及び三角形分布を仮定して計算を行った。得られた結果を図10に示す。図の点線は、平板の回転ばね係数として一般的によく用いられる式 $K_R = 8Gr^3 / 3(1-\nu)$ と示したものである。底面周辺部付近の土圧計測値がないために、仮定した2つの分布によってばね係数はかなり異なった値が得られる。剛板分布仮定の場合、 K_R との差はそれほど大きくない。しかし、地表面上の平板を対象とした値 K_R と、埋設基礎の底板部にも適用するのは問題があり、更に検討することが必要であろう。

最後に本実験を行うにあたり起振機を使用させて戴いた電力中央研究所に感謝の意を表します。

参考文献 1) 田治見：日本地震工学シンポジウム講演集，PP 255-257 昭41。

2) Harada, T et al.：生産研究 31 巻9号，10号，11号，1979

3) 原田他：土木学会論文報告集，No. 339，1983 PP 79-88

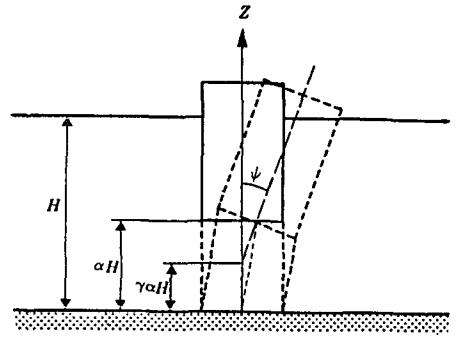


図8. 仮定した振動形

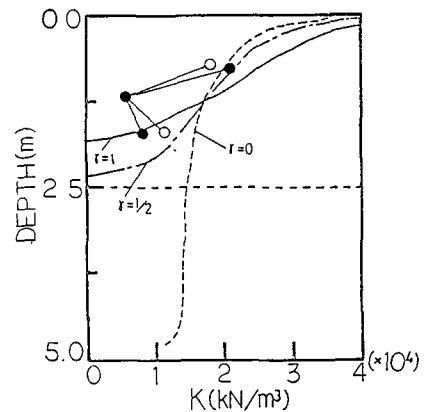


図9. 深さ方向の分布

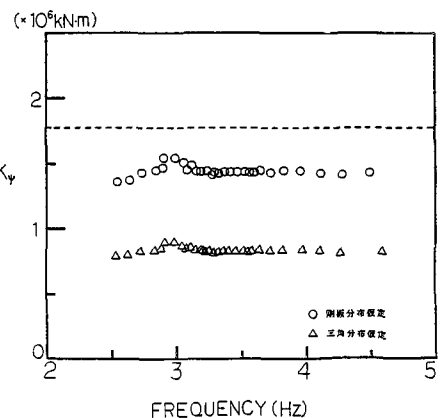


図10. 底面回転ばね係数