

直接基礎および杭基礎上振動源による地盤振動比較実験

TESTS OF GROUND VIBRATION CAUSED BY VIBRATION GENERATORS
ON SURFACE FOUNDATION AND PILE FOUNDATION

鈴木 操* 榊 信昭** 岡本 隆** 長岡 弘明***

By Misao SUZUKI, Nobuaki SAKAKI, Takashi OKAMOTO and Hiroaki NAGAOKA

Ground vibration tests were carried out, where vibration generators were set on a surface foundation and a pile foundation. The foundations were constructed in the same site and the ground conditions were the same.

The foundations were enforced to vibrate vertically and horizontally.

From the tests results, following conclusions are obtained.

- a. The ground vibrations in case of the surface foundation are nearly equal to or less than those in case of the pile foundation on almost all of the ground surface, and the ground vibrations in case of the pile foundation are greater on the rest which is a small part of the ground surface.
- b. The upper limit of ground surface vibration can be estimated as twice the calculated value using analytical solution of vibration of foundation on semi-infinite elastic ground.

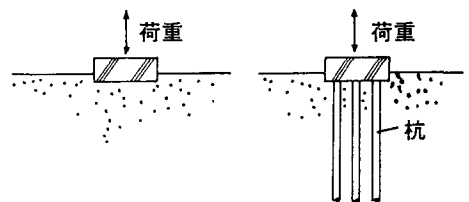
The conclusions are obtained from only one vibration test and further examinations are necessary to decide whether the conclusions are valid or not in general cases.

1. はじめに

機械基礎や高架道路橋基礎のように、図-1に示す直接基礎や杭基礎上に振動源がある場合の地盤振動の評価方法として、次の3つがあげられる。

- ①実測値に基づいた経験的評価方法¹⁾
- ②半無限弾性地盤上の直接基礎を加振した時の弾性解を用いる方法²⁾
- ③有限要素法等、電算機の使用を前提とした数値計算による方法^{3,4)}

方法①は比較的簡便に使用できる方法であるが、地盤振動は地盤の性状が大きく異なるのが一般であり、評価値と実際の振動の値が大きく異なる場合も少なくない。方法②では計算図表が準備されており、方法①と同様比較的簡便に使用できる方法であるが、実地盤での振動実験等との比較を行った研究は見当らず、評価精度の検討が行われていない方法である。



(a)地表面を直接加振 (b)深い基礎を加振

図-1 振動源の状態

* 工修 日本鋼管(株)鉄鋼研究所 都市工学研究部部員 (〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)

** 工修 同鉄鋼研究所 都市工学研究部主任部員 (同)

*** 工博 同商品技術センター 建築・土木商品開発プロジェクトチーム主任部員 (同)

また、基礎は直接基礎に限定される。③の内有限要素法による評価については、鉛直加振された時の直接基礎および杭基礎の場合について実地盤の振動実験との比較がなされており、良好なシミュレーション精度の得られる事が、文献⁴⁾で示されている。しかし、この方法では大型電算機の使用が前提であり、常時簡便に使用できる方法とは言い難い。

本論文では、文献⁴⁾で例題として取り上げた直接基礎および杭基礎を鉛直加振した時の地盤振動実験結果に、水平加振した時の地盤振動実験結果を加え次の検討を行う。

- ①鉛直加振および水平加振した時の、地盤振動に与える杭基礎の影響
- ②直接基礎を対象にした半無限弾性地盤の振動弾性解²⁾の直接基礎および杭基礎への適用性

尚、鉛直振動実験を取り上げた文献⁴⁾ではシミュレーション精度の検討を目的にしており、鉛直振動実験に対し上記の2検討は行っていない。

本論文の第2章では、地盤条件、加振方法、計測方法等、実験の概要について述べる。第3章では鉛直振動実験結果について、第4章では水平振動実験結果について考察する。第5章でこれらのまとめを行う。

2. 振動実験の内容

地盤は図-2の土質柱状図に示すように、深さ約10mまでが埋立砂層、30mまでが軟弱な沖積粘性土、それ以深は粘性土、砂質土が互層を成しており、約38m以深が洪積砂層およびシルト層となっている。同図にN値、沖積粘性土の単位体積重量 γ_t およびPS検層によるP波、S波速度を示す。PS検層は2カ所で行っており、1カ所では約10m深さまで行った。また、埋立砂の単位体積重量は最大および最小乾燥単位体積重量の測定値と測定N値より、飽和状態の湿潤単位体積重量を 1.8tf/m^3 とした⁴⁾。地下水位は地表面より約1.3m下であった。

直接基礎は図-3(a)に示すように、長さ2.2m、幅2.2m、厚さ0.7mの鉄筋コンクリート製であり、これを埋立砂地盤を掘削して設置し、まわりをランマーで締め固めながら埋め戻した。杭基礎は、直径40cm、厚さ6mmの鋼管杭4本を用い、杭間隔は1.4mとした。杭を地表より42mまで打ち込み、38m以深の砂質土を支持層とした。杭打設後、深さ0.7mまで砂層を掘削し、直接基礎と同じ形状のフーチングを杭上に作成後、直接基礎の場合と同様ランマーで締め固めながら、砂を埋め戻した。杭頭部とフーチングの接合は杭頭部に溶接したひげ鉄筋による方法とした。杭基礎は直接基礎より、10m離れた位置に設置した。

地盤への加振はフーチング上の中心に据え付けた起振機(VE-10-70、(株)早坂機械製作所製)により行い、鉛直z-方向には振動数5~15Hz、水平x-方向には5~19.5Hzで加振した。加振力はできるだけ一定となるように起振機を調節し、5~15Hzおよび5~19.5Hzにおいて3.5~4.3tfおよび2.0~4.0tfとした。振動数 5、

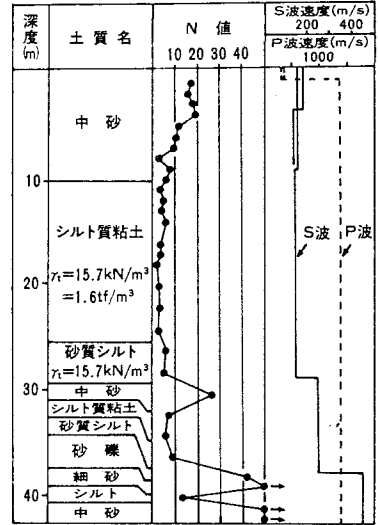


図-2 土質柱状図

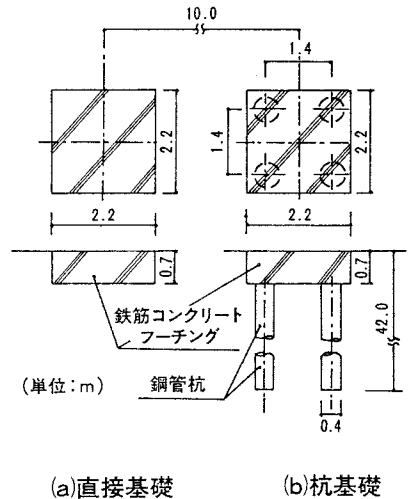


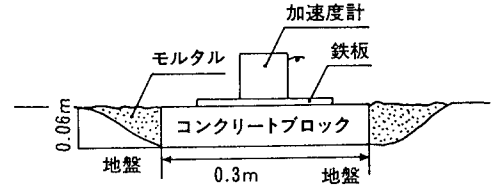
図-3 実験用基礎

10, 15, 19.5Hzにおける振動数と加振力の関係を表-1に示す。起振機とフーチングの全重量は10.4tfであった。

加速度計は東京測振(株)サーボ型加速度計(SA-151, 152)を使用した。加速度計の大きさは縦27mm×横27mm×高さ30mm、重量は1.8kgである。加速度計の設置のため、図-4(a)に示すように30cm×30cm×6cmのコンクリートブロックを上面が地表面と等しくなるように地中に埋め込み、ブロックのまわりをモルタルで固めた。加速度計はブロックに接着剤で固定した。測定位置は同図(b)に示すように、水平x-方向にフーチング外縁から31.0mまでは1m間隔、31.0mから63.0mまでは2m間隔とした。加速度計は合計16台を使用し、測定は測定位置をずらしながら数回に分けて行った。この時加速度計の移動前後で基礎の応答および地表面上の共通位置の応答が等しい事を確かめている。

表-1 振動数と加振力の関係

振動数	鉛直加振	水平加振
5Hz	4.162tf	4.028tf
10Hz	4.049tf	3.223tf
15Hz	4.210tf	3.626tf
19.5Hz		3.063tf

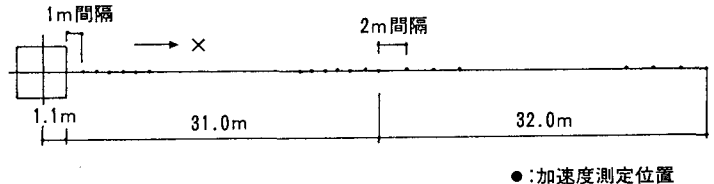


(a)加速度計の設置

3. 鉛直振動実験結果とその検討

3.1 地盤振動への杭の影響

直接基礎および杭基礎を鉛直加振した時の地表面振動分布について、鉛直z-方向および水平x-方向の加速度の振幅と加振力に対する位相差を図-5～7に示す。図-5, 6, 7は振動数5, 10, 15Hzにおける測定値であり、左にz-方向、右にx-方向の加速度を示している。また、各図の上部に位相差を、下部に振幅を示している。これらの図より鉛直および水平加速度成分について、次の結果を読取る事ができる。



(b)加速度測定位置

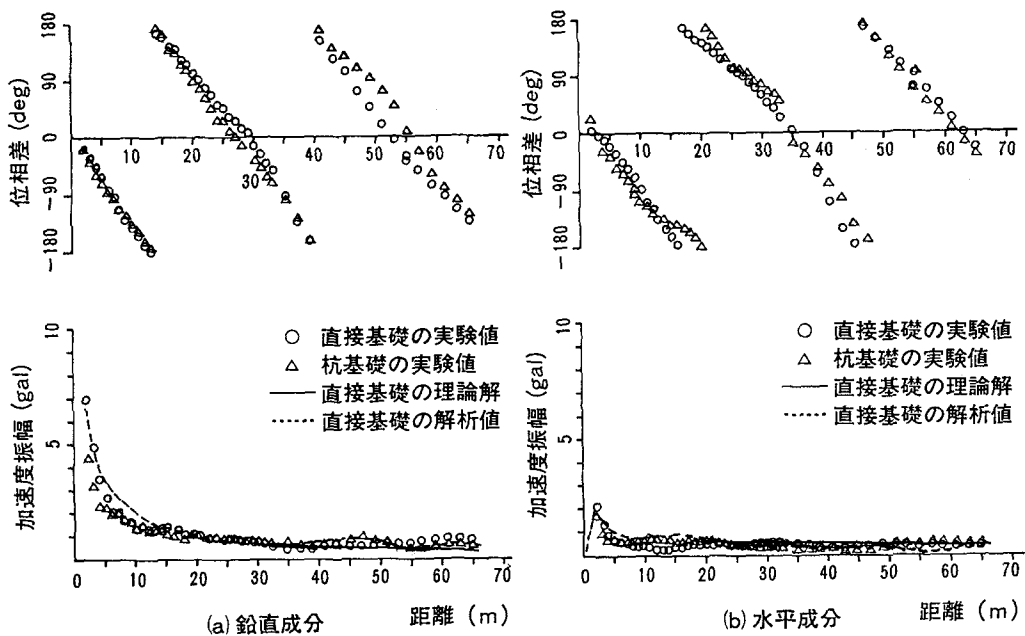
図-4 加速度測定

①加速度振幅において、杭基礎の場合の値が直接基礎の場合より大きく上回るのは、鉛直成分においては振動数5Hzの場合の48m近傍、水平成分においては5Hzの場合の14m近傍と58m以遠、10Hzの場合の56m近傍、15Hzの場合の21m近傍と限られた地表面上においてであり、地表面の大部分で杭基礎の場合の値は直接基礎の場合の値にほぼ等しいかより小さい値を示している。

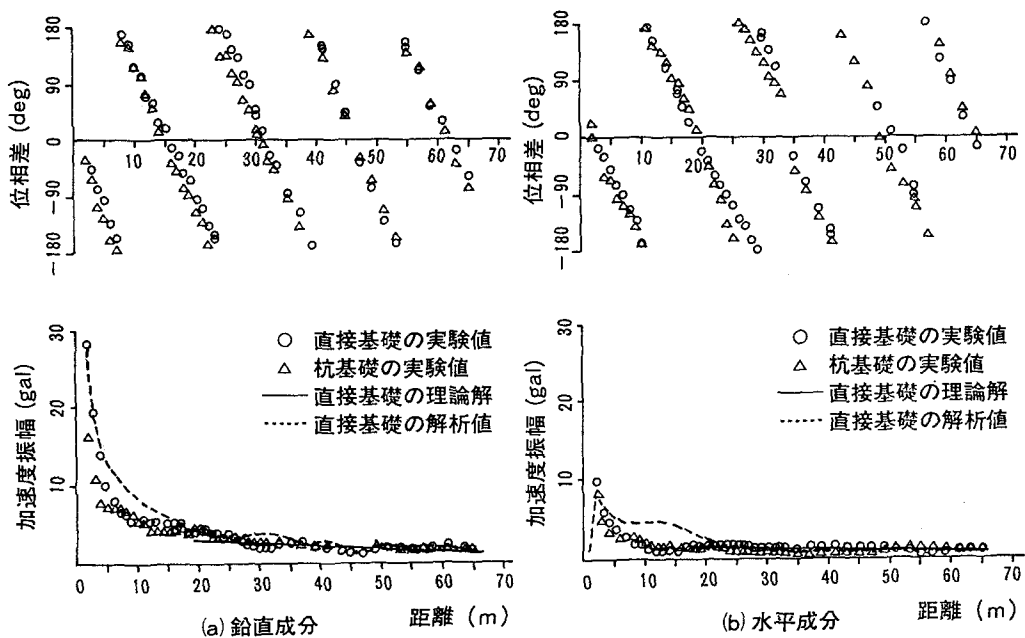
②加振力と加速度の位相差において、杭の存在による顕著な差は見られない。

文献⁴⁾で示している地盤振動の有限要素解析においても、結論①の内の「地表面の大部分で杭基礎の場合の加速度振幅は直接基礎の場合とほぼ等しいかより小さい」事および結論②については同じ結論が得られており、理論的にもこれらの成立つ事を示している。

振動数10Hzを対象とした図-6より求めた各時刻の地表面振動形を図-8に、18.10～25.10mでのx, z鉛直平面内の振動軌跡を図-9に示す。図-6より、鉛直成分の加速度振幅については杭基礎の場合と直接基礎の場合の値はほぼ一致しているが、水平成分については約22m以遠では直接基礎の値がやや大きくなっている。図-8, 9はこの状況を示している。基礎中心から5.1mおよび52.1m離れた位置における加速度の周波数応答曲線を図-10に示す。加速度は1tf当たりの値である。5.1mにおいては全振動数において、52.1mにおいては鉛直成分での6, 11Hz, 水平成分での9, 13Hzを除く大部分の振動数において、杭基礎の場合の加速度振幅は直接基礎の場合よりほぼ等しいかより小さい傾向を示している。



図—5 鉛直加振時の地表面振動分布（振動数 5 Hz）



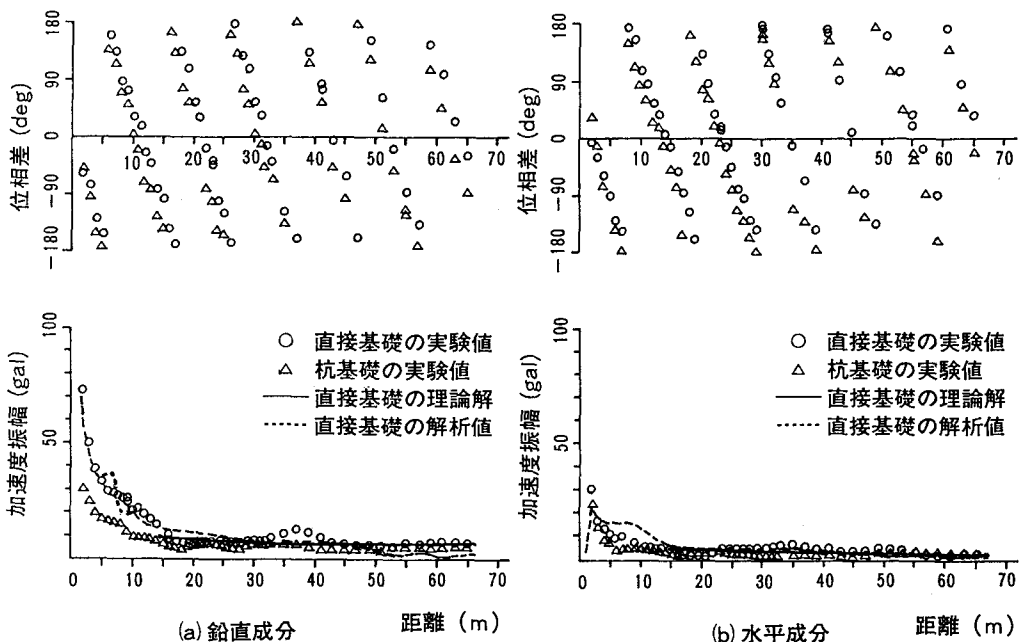
図—6 鉛直加振時の地表面振動分布（振動数 10 Hz）

3.2 弾性地盤上の直接基礎の振動理論解の適用性

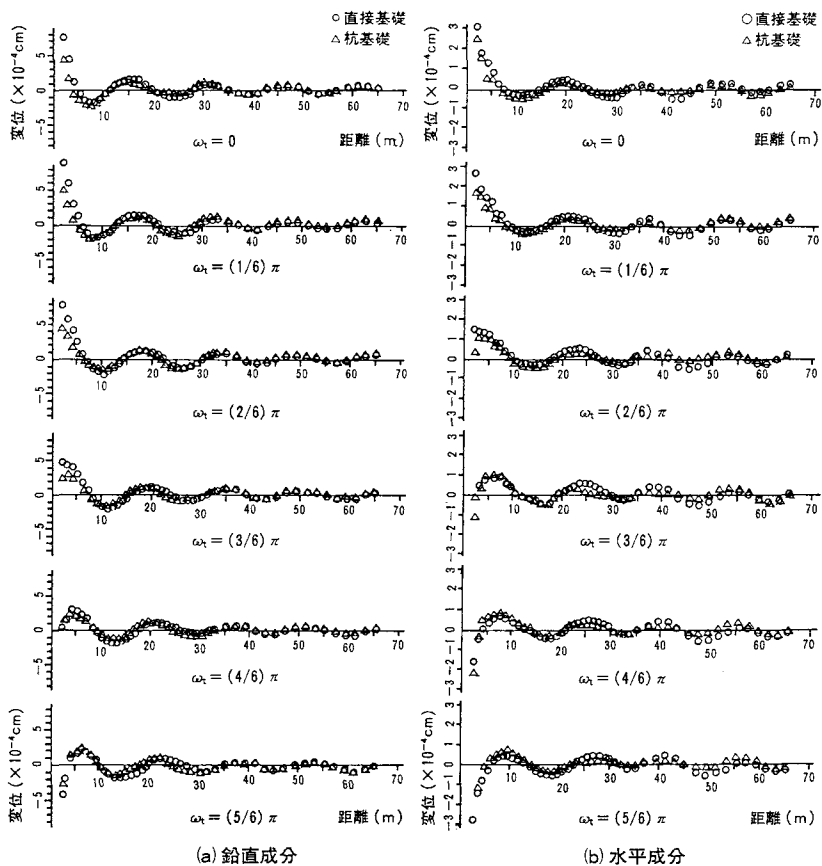
弾性地盤上の直接基礎を加振した状態について、文献²⁾でレイリー波による地表面上の振動加速度の理論解が示されている。この理論解の適用性を検討するため、一様地盤としてのS波速度、P波速度の値を、以下の手順で140m/s、1400m/sと設定する。地表から29mまでのS波速度、P波速度は約140m/s、1400m/sであり、これに対応するレイリー波速度は約130m/sである。5～15Hzでのレイリー波長は9～25mであり、レイリー波の卓越して振動する深さを大略1波長とすると、この部分の平均S波速度、平均P波速度は大略 140m/s、1400m/sであり、最初の設定値と一致する。この値を一様地盤としての値とした。

文献²⁾の理論式による加速度振幅の分布を図-5、6、7に破線で示す。同文献には、実体波に対しレイリー波が卓越し始める基礎からの距離について述べられていないため、ここでは文献⁴⁾で行われたレイリー波の卓越する距離についての検討を参考にして、この距離をレイリー波長の1.5倍とした。また、参考として文献⁴⁾で示した、直接基礎に対する有限要素法の解析値を点線で示した。

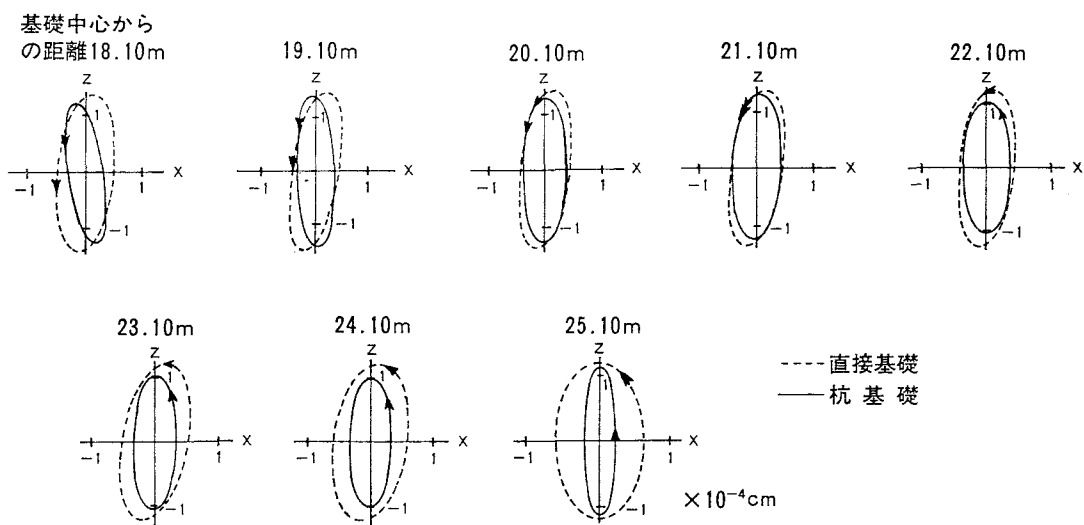
これらの図より、文献²⁾による理論値は直接基礎の実験値の約0.5～1.0倍の範囲にあるが、理論値は実験値の傾向を良く表している様子を見る事ができる。一方、有限要素法の解析値は、実体波の卓越する直接基礎近傍から実験値と良い一致が見られている。本実験では、一様地盤としての理論値は実験値に対し、50%程度小さくなる場合があり、言換えると一様地盤としての理論値を約2倍した値は実験値の上界値となっている。理論値が実験値と異なった原因としては、一様地盤の仮定からの相違である層状地盤の影響および地盤の局所的な変化が考えられる。一方、前節で述べたように、杭基礎の場合の地表面振動加速度振幅は直接基礎の場合に比べ、大部分の地表面および振動数でほぼ同じ値かより小さな値となっている。この事より、直接基礎の場合と同様に、一様地盤上の直接基礎の理論値を約2倍した値は、全般的には杭基礎を加振した時の実験値の上界値を与えると言う事ができ、この状況を図-5、6、7に見る事ができる。尚、上界値を与える倍数2はここでの実験地盤での値であり、この値については今後更に実験の積み重ねが必要である。



図一七 鉛直加振時の地表面振動分布（振動数15Hz）



図—8 地表面振動形 (振動数10Hz)



図—9 鉛直平面内の振動軌跡

4. 水平振動実験結果とその検討

4.1 地盤振動への杭の影響

直接基礎および杭基礎を水平加振した時の地表面振動分布について、鉛直 z -方向および水平 x -方向の加速度の振幅と加振力に対する位相差を図-11～13に示す。図-11, 12, 13は振動数5, 10, 15Hzにおける測定値であり、鉛直振動実験の図-5, 6, 7と同様、左に z -方向、右に x -方向の加速度を示している。また、各図の上部に位相差を、下部に振幅を示している。これらの図より次の結果を読取る事ができる。

①水平成分の加速度振幅においては、5Hzの場合の60m近傍、10Hzの場合の54m近傍、15Hzの場合の20m近傍の極く限られた一部を除いて、杭基礎の

場合の加速度振幅は直接基礎の場合とほぼ等しいかより小さな値となっている。

②鉛直成分の加速度振幅においては、5Hzの場合の15m近傍および60m近傍を除いて、杭基礎の場合の値は直接基礎の場合とほぼ等しいかより小さな値となっている。

③加振力と加速度の位相差において、杭の存在による顕著な差は見られない。

基礎中心から5.1mおよび52.1mにおける加速度の周波数応答曲線を図-14に示す。52.1mにおける水平成分での9, 10Hzを除いて、大部分の振動数において杭基礎の場合の加速度振幅が直接基礎の場合よりほぼ等しいかより小さい傾向を示している。

4.2 弾性地盤上の直接基礎の振動理論解の適用性

一様地盤上の直接基礎を対象にした、文献²⁾の理論式による加速度振幅分布を図-11, 12, 13に破線で示す。実体波に対しレイリー波が卓越する基礎からの距離は鉛直加振の場合と同様、レイリー波長の1.5倍とした。同図より、文献²⁾による理論値は、直接基礎の実験値の約0.5～2.0倍の範囲にある様子を見る事ができる。言換えると、この地盤においては理論値を約2倍した値は実験値の上界値となっている。理論値が実験値と異なった原因としては、鉛直加振の場合と同様、一様地盤の仮定からの相違である層状地盤の影響および地盤の局所的な変化が推測される。一方、杭基礎においても、基礎からレイリー波長の1.5倍以上離れた地表面で加速度は、直接基礎の理論値の約2倍以下の値となっている様子を見る事ができる。この事より、

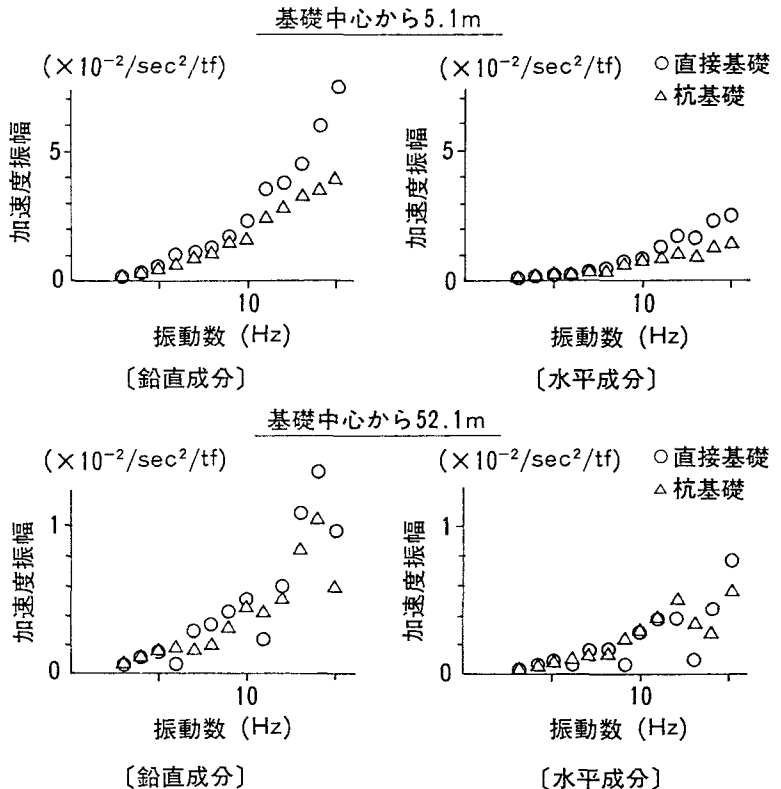
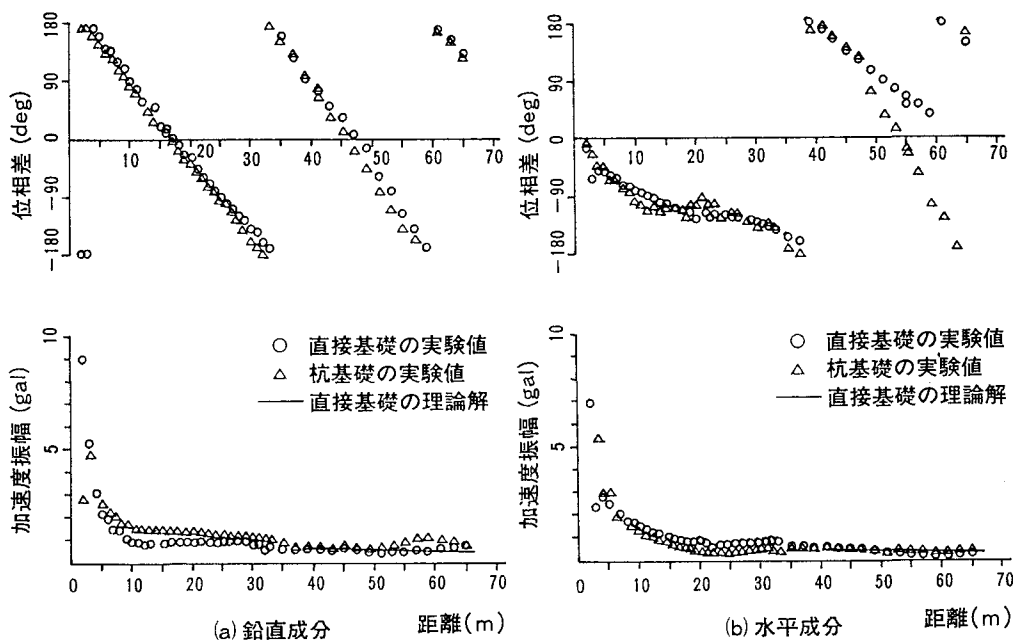
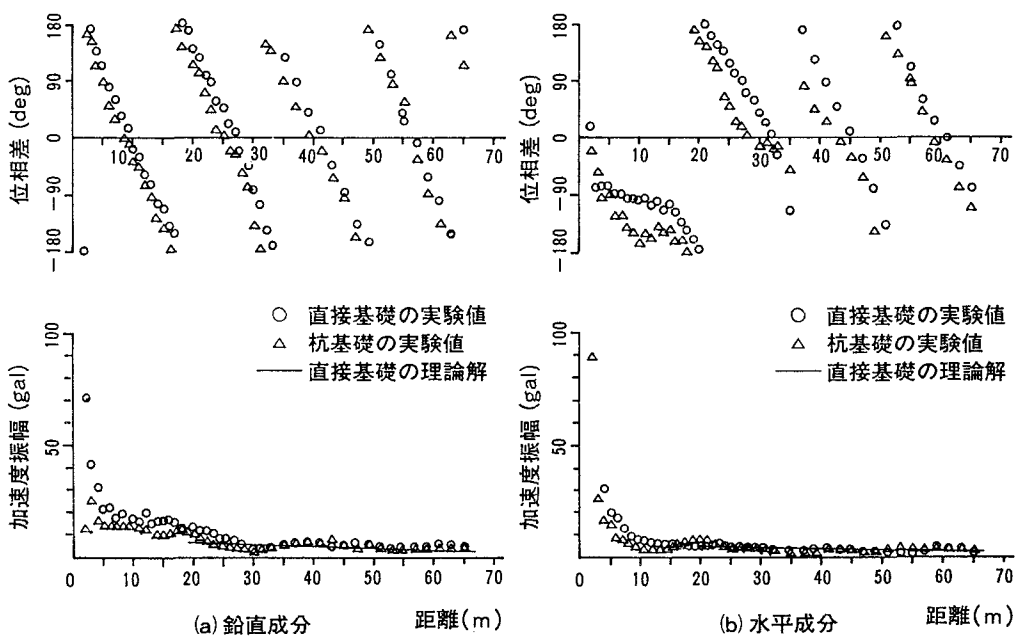


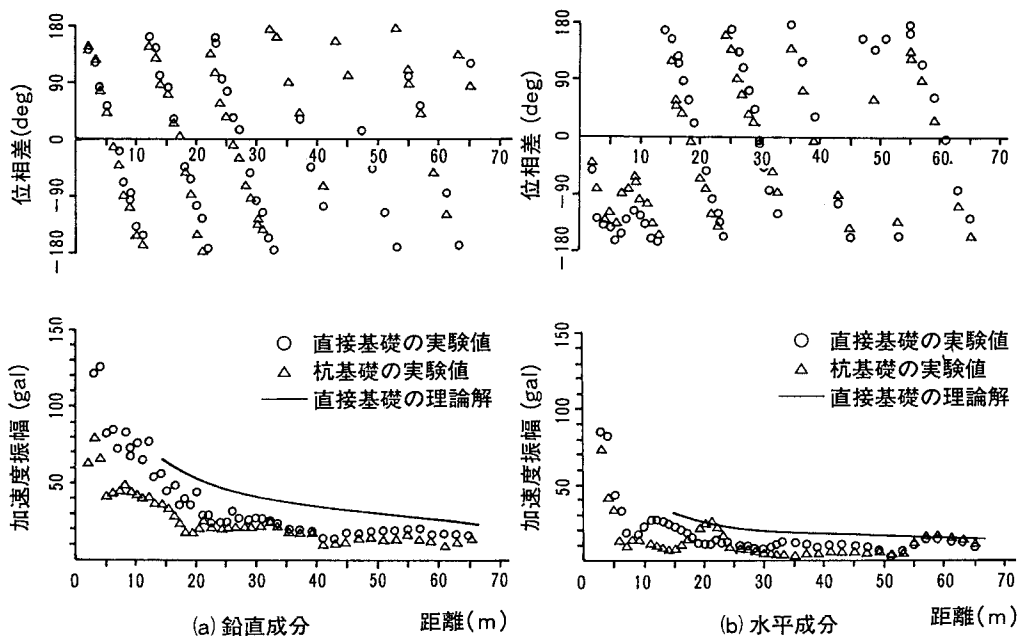
図-10 鉛直加振時の地盤加速度の振動数応答曲線



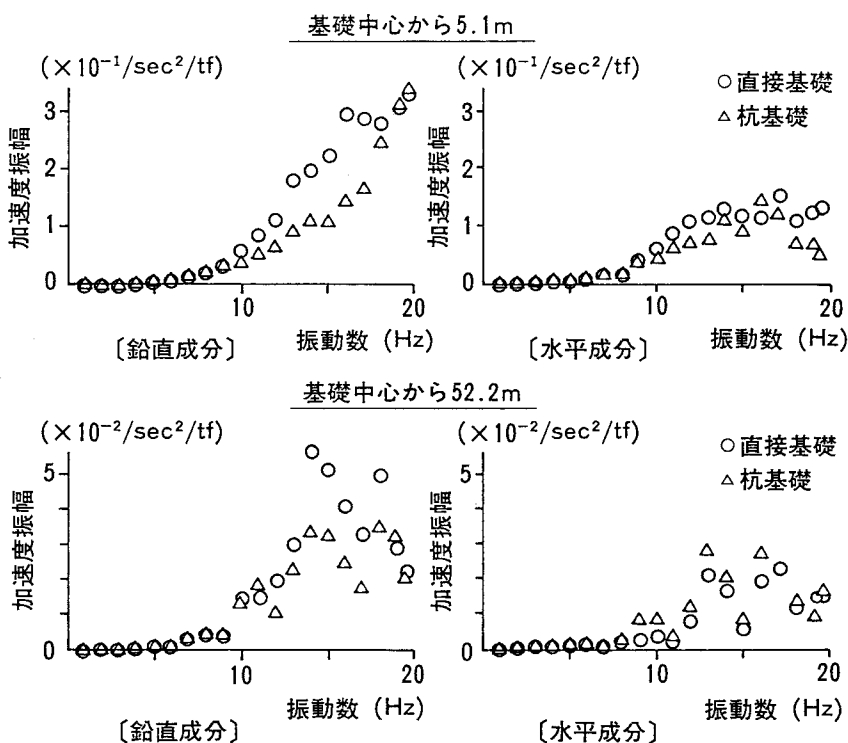
図一11 水平加振時の地表面振動分布（振動数 5 Hz）



図一12 水平加振時の地表面振動分布（振動数10Hz）



図一13 水平加振時の地表面振動分布 (振動数15Hz)



図一14 水平加振時の地盤加速度の振動数応答曲線

直接基礎の場合と同様に、一様地盤上の直接基礎の理論解を約2倍した値は、杭基礎を加振した時の実験値の上界値を与えると言う事ができる。尚、上界値を与える倍数2はここでの実験地盤での値であり、鉛直加振の場合と同様に、この値については今後更に実験の積み重ねが必要である。

5. おわりに

同一の敷地内に直接基礎と杭基礎を設置し、鉛直方向および水平方向に加振し、地盤の振動実験を行った。フーチングは長さ2.2m、幅2.2m、厚さ0.7mの鉄筋コンクリート製であり、杭基礎には直径40cmの鋼管杭4本を用いた。加振振動数は鉛直加振においては5～15Hz、水平加振においては5～19.5Hzである。実験結果の検討より得られた結論は次のとおりである。

- ①鉛直加振において、杭基礎の場合の鉛直および水平加速度振幅は、地表面の大部分で直接基礎の場合とほぼ同じかより小さい値を示している。
- ②水平加振においても、杭基礎の場合の鉛直および水平加速度振幅は、地表面の大部分で直接基礎の場合とほぼ同じかより小さい値を示している。
- ③鉛直および水平加振のいずれの場合においても、加振力と加速度の位相差に杭の存在による顕著な差は見られない。
- ④半無限弾性地盤上の直接基礎を加振した時の地盤振動弾性理論解の加速度振幅を2倍した値は、直接基礎を鉛直または水平加振した時のいずれの実験加速度振幅値に対しても上界値となっている。
- ⑤杭基礎においても、上記の弾性理論解の加速度振幅値を2倍した値が実験値の上界値となっている。

以上の結論は1実験のみで得られたものであり、特に④、⑤で述べた倍数2の検討を含めて、一般的な結論とする事ができるかどうかについて、今後更に検討を続けて行きたい。

参考文献

- 1) 例えば、成田信之、横山功一、桂樹正隆：道路交通振動の予測手法、土木技術資料、Vol.19, No.8, pp.11～16, 1977.
成田信之、桂樹正隆：道路交通振動予測式、土木技術資料、Vol.20, No.6, pp.265～269, 1978.
吉岡修：新幹線列車走行による沿線の地盤振動、鉄道技術、Vol.43, No.7, pp.265～269, 1986.
- 2) 例えば、Luco, J.E. and Westmann, R.A.:Dynamic response of circular footing, J. Eng. Mech. Div., Proc,A.S.C.E., Vol.97, No.EM5, pp.1381～1395, 1971.
- 3) 例えば、Haupt, W.M. :Surface waves in nonhomogeneous half space, Proc. Dynamic Methods in Soil and Rock Mechanics, Kaarlsruhe, Germany, Vol.1, pp.335～367, 1977.
大久保直人、片山恒雄：弾性波の発生・伝播に関する計算手法の比較、生産研究、Vol.32, No.12, pp.40～43, 1980.
- 4) 岡本隆、鈴木操、樺信昭、長岡弘明：地盤振動実験と有限要素解析の比較、土質工学会論文報告集、Vol.28, No.4, pp.183～196, 1989.

(1988年10月12日受付)