

(22) 油圧制御起振機を用いた不整形地盤の振動実験

京大・工 小堀鐸二 同 篠崎祐三 関西電力 瀬戸川 葵
京大・工 尾崎昌彦 ○同 神田克久

1. まえがき

構造物の建設される地盤には、地形あるいは地表近傍の地層構成が局所的に複雑なものが多く、このような場合、入射してくる地震波は反射、屈折を繰り返すのに伴い地表面に近づくにつれて、複雑な挙動を示すことが充分予想される。事実、過去の震害例を仔細に検討するならば、構造物の被害は単に平行な層構造を仮定したときの沖積層の厚さや、あるいは、構造物と地盤の剛性の相対的硬軟によってのみ説明できるとは限らない。むしろ、構造物周辺の局所的地形、基盤を含む地質構造の急激な変化が、震害に大きな影響を及ぼしていると判断される場合が多いのである。

したがって、このような、所謂「不整形」な地盤の振動特性を詳しく知ることは、建設地点に構造物を配置する上で、また、それらの構造物の安全性を考慮する上で、構造工学上重要な基礎的資料を提供するものである^{1)~4)}。

本研究では、不整形地盤の振動特性を実験的に研究するために、従来用いられてきた偏心重量方式の起振機の代りに電気油圧制御の起振機を開発した。そして、不整形地盤として山間部の尾根を削りとり、その土砂を尾根と尾根の谷間に盛土して得られた平坦な敷地を実験用に選んだ。振動実験に先立ち、弾性波探査によって、地盤のS波及びP波の速度構造の推定を行った。原地形図と造成施工図を参照して、4ヶ所の地点に大きさ、重量の同じ鉄筋コンクリート基礎を作成し、その上に電気油圧制御の起振機を据え付けて、強制加振実験を行い、基礎と地表面の速度応答を計測した。

2. 電気油圧制御の起振機の開発及び計測システム

我々は、過去10数年来、地盤地表上に鉄筋コンクリート基礎を作成し、その上に偏心重量方式の起振機を設置して基礎を強制加振し、主として Dynamical Ground Complianceに代表される地盤の動特性を検出、検証する研究を精力的に行ってきたが、偏心重量方式の起振機には、

- 1) 加振力は加振振動数の2乗に比例すること、即ち地盤を加振力一定の状態で加振することが難しいこと。
- 2) 加振振動数ごとに定常状態になるのを待って諸応答を計測するため、計測時間がかかること。
- 3) 地盤を伝播する波動（立ち上がり）を把握するために必要なゼロ・スタートが困難なこと。

などの欠点があった。従って、我々は不整形地盤の振動特性を任意の周波数特性をもった起振機を用いて実験研究するために、新たに電気油圧制御の起振機を開発した。この起振機の概要をFig.1に示す。試作した起振機は電気油圧方式で駆動されるもので、芯棒の平衡点を中心に慣性マスが油圧により振動することから加振力が得られる。その主な特徴を列挙すれば、

- 1) 固定振動数で加振するばかりでなく、ゼロ・スタートで任意の振動数範囲で上下の線形及び対数掃引の再現性を確立したこと。従って、波形の重合が容易に行え、S/N比の飛躍的改善が計られた。

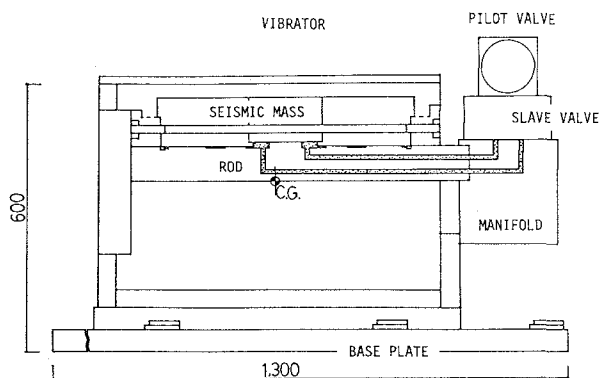


Fig. 1. Side schematic of the servocontrolled vibrator.

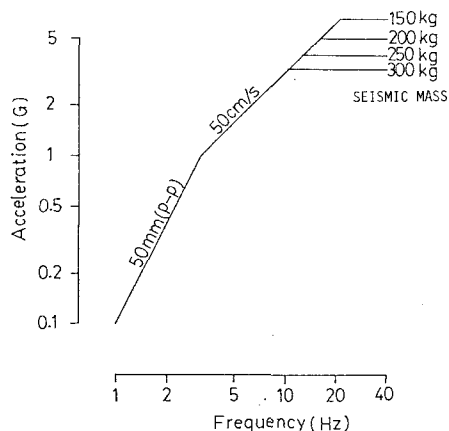


Fig. 2. Performance of the servocontrolled vibrator.

2) 電気油圧方式のため、比較的低振動数で大きな加振力が得られること。

3) 偏心重量方式の起振機に比べ、油圧ユニット等の設備を必要とするため装置は大きくなりがちであるが、空冷方式の油圧ユニットとしたため可搬性に富むこと。

Fig. 2 には、この起振機の最大能力線図を示してある。また、主な性能を列挙すれば以下の通りである。

最大励振力：1000 kg

慣性マスストローク：50 mm

(ピーク・ピーク)

速度：50 cm/sec

マス重量及び加速度：150 kg 時、

6.6 G, 300 kg 時、3.3 G

(重量は4段に切換え可能)

振動数範囲：自動掃引時、1～40 Hz、

定振動制御時、5～40 Hz

振動波形：正弦波及び外部入力
の任意波形

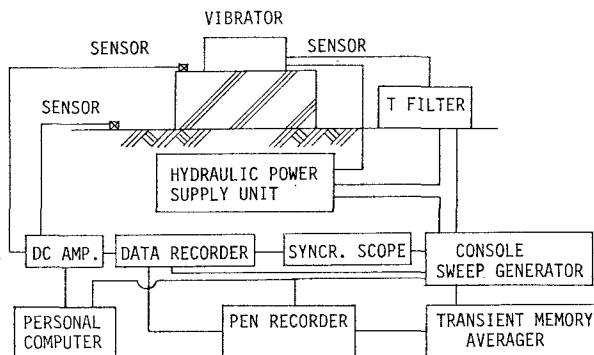


Fig. 3. Block diagram of the servocontrolled vibrator and the measurement system.

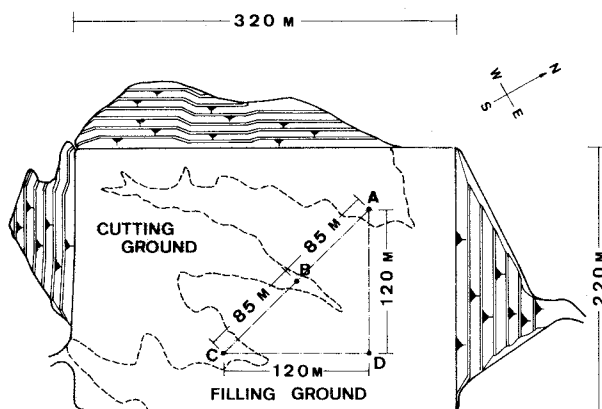


Fig. 4. The measurement site and the situations of excited footings.

次に計測システムの概要を Fig. 3 に示す。本起振機ならびに計測装置の性能を確認するため、3 M×3 M×1 M の鉄筋コンクリート基礎を作製し、本起振機を設置して、10

～20Hzの線形掃引で水平加振し、基礎より120M離れた地点での基礎の加振方向と同一方向の速度応答を10回重合加算した結果をFig. 5に示す。この結果によれば波動が伝播するまでの測定点での雑微動が完全に除去されていることがわかり、本起振機の加振波形の再現性及び重合加算の有効性が確認できた。

3. 実験の概要

3.1 実験地の選定及

び加振基礎の設置

本実験は昭和57年6月

下旬から7月下旬にかけて行った。実験を行った敷地は、大阪府河内長野市にある変電所用地である。小高い丘の尾根を削り取って、その谷間を埋め立てて造成されており、敷地の南西部の三本の尾根を削り取った切土地盤と北東部の盛土地盤が複雑に入り組んでいる。Fig. 4に示す通り、320M×220Mの広さを持つ、地表面を平坦にした造成地である。旧地形図を参照して、地盤の構成が、切土地盤から盛土地盤、さらに切土地盤へと急変する、ほぼ南北に沿う測線を選び、切土地盤上のA、B、Cの地点及びABCを底辺とする直角二等辺三角形の頂点をなす盛土地盤上のD地点に、合計4つの基礎を設置した。旧地形の盛土が、AB間では最深18M、BC間では最深14M、D地点直下では深さ24Mにも達する不整形地盤である。A、B、C及びDの各基礎は、直径3.5M、高さ1Mの円形の鉄筋コンクリート基礎である。

3.2 地盤調査

起振機による振動実験に先立ち、ABC、AD、及びCDの各測線の地盤の調査を次の2項目について行った。

1) 地盤の速度層構造(P波、SH波)を把握する。

2) 波動の距離減衰を求める。

1)の速度層構造の測定に関しては、慣用の方法で行い、2)の波動の距離減衰測定に関しては、地震計の設置方法及び、発振方法は、1)の弾性波探査の場合と同一であり、測定記録は地震計間隔2M7測点を同時に測定し、隣接する展開とは、各々の両端の測点を重複させ、相対的な波動の振幅の変化が連続的に測定できるようにした。

Fig. 6はABC、AD、及びCDの各測線の速度構造を示したものである。旧地山と盛土との境界

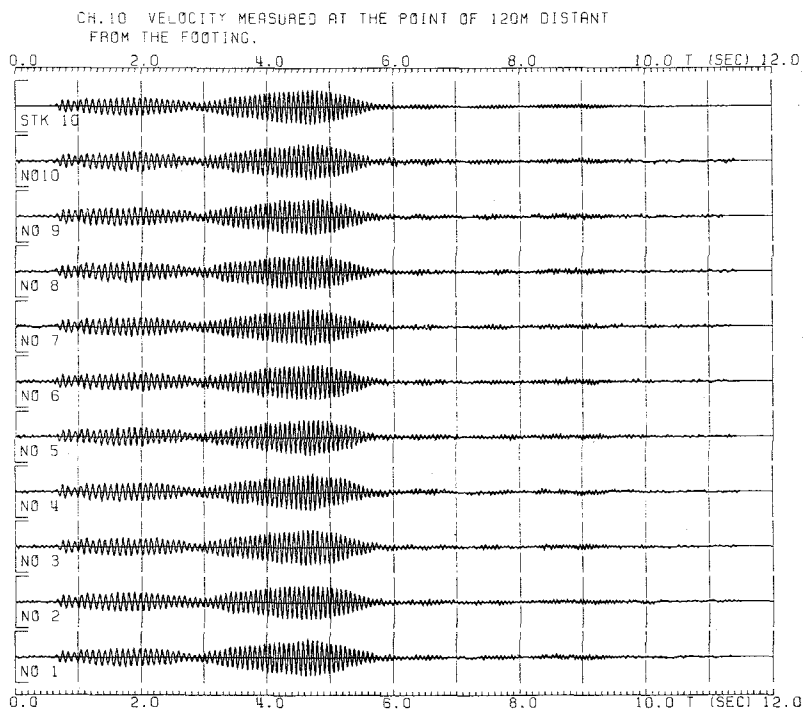


Fig. 5. Example of stacked wavelets. STK 10 indicated in the figure represent the wavelets stacked together from No.1 to No.10.

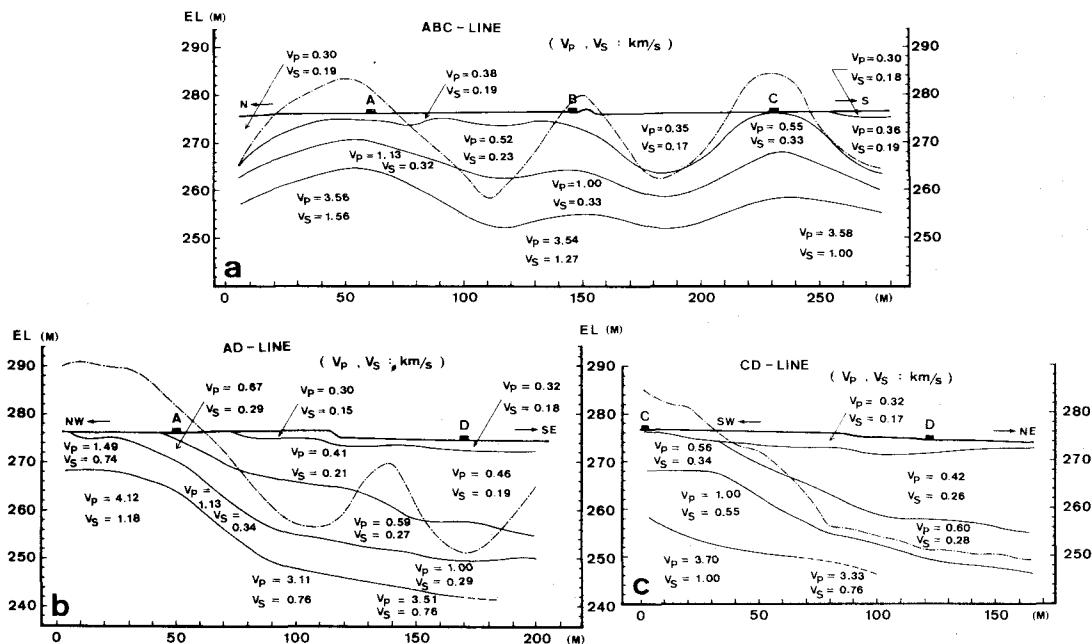


Fig. 6. Wave velocity structure derived by seismic exploration. The solid-dot line curves indicate cross-sections of the former surface topography.

線については、A B C測線のB C間及びC D測線で第1速度層と第2速度層の境界が比較的对应しているものの、他の盛土部においては殆んど相関は見られない。

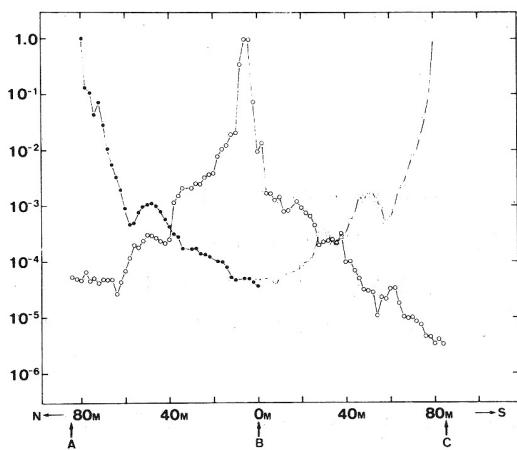
Fig. 7はA, B, C, Dの各基礎近傍での測点を基準にして測定した距離減衰をプロットしたものである。Fig. 7a, 7b, 7cは、それぞれA B C, A D, C D測線のP波の距離減衰を示し、Fig. 7d, 7e, 7fはS H波の距離減衰を示している。これらの図から次のようなことが言える。

- 1) P波については明瞭な増幅が見られるが、いずれも、旧地形との相関は見られない。
- 2) S H波については地山・盛土境界部の盛土側測点において明瞭な増幅がみられる。
- 3) A D測線のS H波については当敷地のほぼ中央に位置するノリ面（高さ1.5 M）の肩部において明瞭な増幅が見られる。

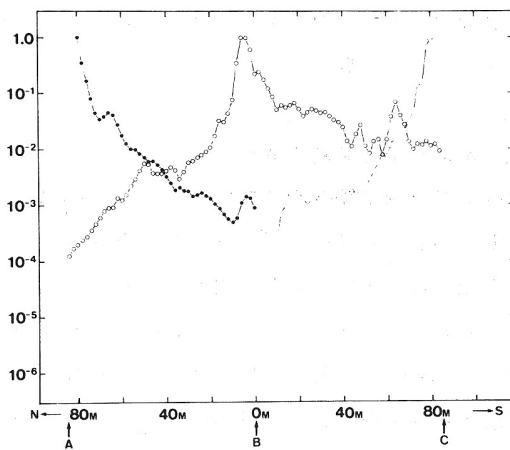
3.3 実験計測 計測に際しては、地盤構成の急変するA B C測線を重視して加振実験したが、A～Dの各基礎を上下加振及び、E W方向、それに直交するN S方向の水平加振実験を30 Hz～5 Hzの9秒間及び300秒間の線形掃引を基準として、加振力レベルを変えて、10～3 Hz, 15～5 Hz, 20～10 Hz, 28～18 Hzの9秒間の線形掃引を含めて、計5種類の線形掃引を繰り返して実験した。

加振基礎上には水平2成分、上下1成分のサーボ型加速度計を設置し、加振基礎より40 M以遠の測線上の10 M間隔の地点に、地震計の設置を安定させるため、表土を5 cm程鋤き取って、U字管の蓋（30 cm×50 cm×5 cm）をプラスターで固定して、その上に速度地震計（固有振動数1 Hz）水平2成分、上下1成分の計3個を一組として設置して、加振基礎、及び測線上各地点の応答を計測した。

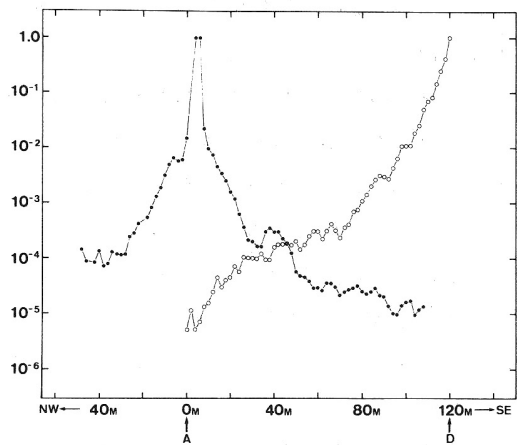
計測中に、各地点の速度応答の波形及び、パーソナル・コンピュータでオンライン処理したパワースペクトラムの結果を参照して、加振基礎からの距離による増幅あるいは減衰の激しいことが判った地点近傍では、測定点間隔を2 M間隔にして同様の計測を続行した。なお、本実験地は、Fig. 8に示さ



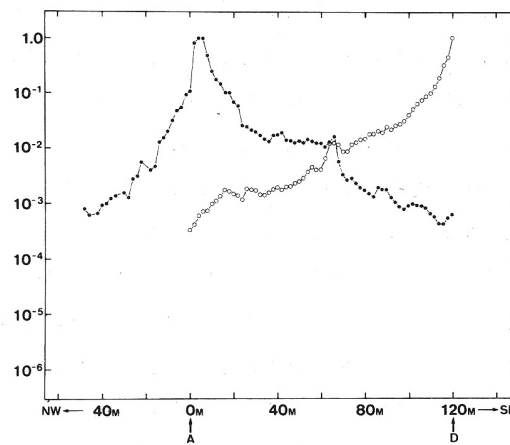
a : P-WAVE



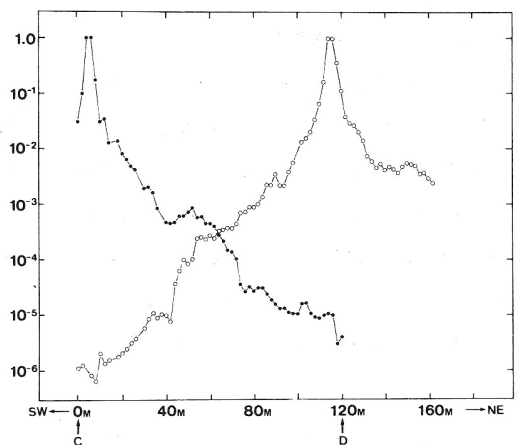
d : SH-WAVE



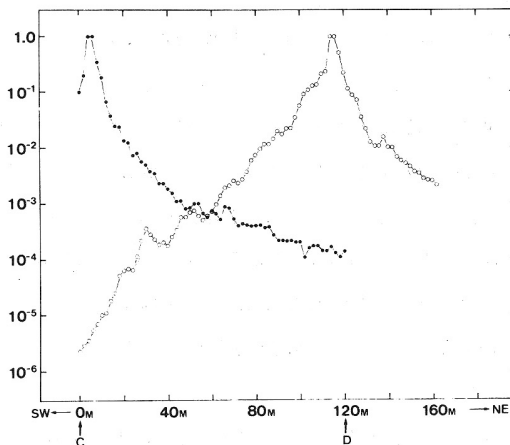
b : P-WAVE



e : SH-WAVE



c : P-WAVE



f : SH-WAVE

Fig. 7. Relative amplitude of surface ground motion derived by seismic exploration.

れる通り、常時微動がほとんど計測されない程の静穏な山深い土地であるため、スタッキング装置を使う必要がなく、原記録をシンクロ・スコープあるいはペン・レコーダでモニターして、デジタルデータ・レコーダに収録した。

4. 実験結果の解析と考察

Fig. 8 は計測記録の一例であるが、B 基礎を振動数 30 ~ 5 Hz の 9 秒間の線形掃引して、上下方向に加振した場合の B 基礎より A 基礎側の測定点の速度応答をプロットしたものである。

これ以後の図中でしばしば現われる略号、例えば BN 72 は、B 基礎より A 基礎へ 72 M 離れた地点を意味する。また UD, RA, TR 等はそれぞれ、その地点の上下方向、加振基礎に対して Radial (緯線) 方向、Transverse (経線) 方向の速度応答であることを意味する。

Fig. 9 は各基礎を 30 ~ 5 Hz の 300 秒間線形掃引した場合の速度応答を、横軸に加振振動数をとって示したものである。慣性マスの加速度がほぼ一定である 15 Hz より高振動数域では、そのまま加振力一定とした場合の共振曲線を意味する。Fig. 9a は A, B, C 基礎の EW 方向加振時の、EW 成分と基礎上端の UD 成分の速度応答を示したものであるが、C 基礎に関しては、A, B 基礎より加振力レベルが高いため応答が大きくなっている。この図から、B, A, C 基礎の EW 方向の共振振動数はそれぞれ 21.3 Hz, 26.5 Hz, 30.2 Hz であること、さらに、共振時の EW 成分に対する UD 成分の応答の比は B, A, C 各基礎それぞれ 54 %, 52 %, 36 % であることが読みとられ、基礎直下の地盤は B, A, C の地点の順に硬くなっていくことが推測される。このことは、Fig. 6a の速度構造図からもある程度裏付けされることである。Fig. 9b は A 及び B 基礎を NS 方向加振した場合の、NS 成分と UD 成分の速度応答を示したものであり、それぞれ、EW 方向加振時より共振振動数が若干低くなっている。Fig. 9c は A, B, C 基礎を上下加振した場合の UD 成分の速度応答を示すが、これより、B 基礎の共振振動数は 25 Hz で、A, C 基礎の共振振動数は 30 Hz 以上と思われる。

Fig. 10 は B 基礎を EW 方向加振した場合の、B 基礎より 40 M の地点から 10 M 間隔の地点の TR 成分の速度応答を、B 基礎の EW 成分の速度応答で規準化した相対振幅を示す。すなわち、SH 波あるいは Love 波の伝播が卓越する地動を示す。Fig. 10a, 10b はそれぞれ測線の方向が、A 基礎方向、C 基礎方向に対応している。いずれの結果においても、5 ~ 15 Hz に大きなピークが生じ、全体に高振動数域で距離減衰が大きくなる傾向にある。BC 測線 (Fig. 10b) に関しては、振動数による強い増幅あるいは減衰効果が生じていて、例えば、BS 60 (一点鎖線) の 8 Hz 近傍では僅か 10 M 離れた BS 50 (破線) に比べ約 2.5 倍増幅すること、逆に 10.5 Hz 近傍では、BS 40 (実線) に比べ、BS 50 及び BS 60 は約 1/3 に減衰している。盛土地盤から切土地盤に移行している B 基礎より 70 M 以遠の測定点では、低振動数域を除き、距離減衰が大きいくことが判る。BN 方向 (Fig. 10a) は BS 方向に比べ、振動数による応答の振動性状が比較的小さく、特に高振動数域で穏やかな右下りの曲線になっている。

Fig. 11 は B 基礎を上下加振した場合の各測定点の UD 成分速度応答を、B 基礎の UD 成分速度応答で規準化した相対振幅を示す。Fig. 11a, b はそれぞれ Fig. 10a, b に対応しているが、基礎の加振方向及び地動の測定成分が異なっており、P 波、SV 波あるいは Rayleigh 波の卓越する地動を示す。

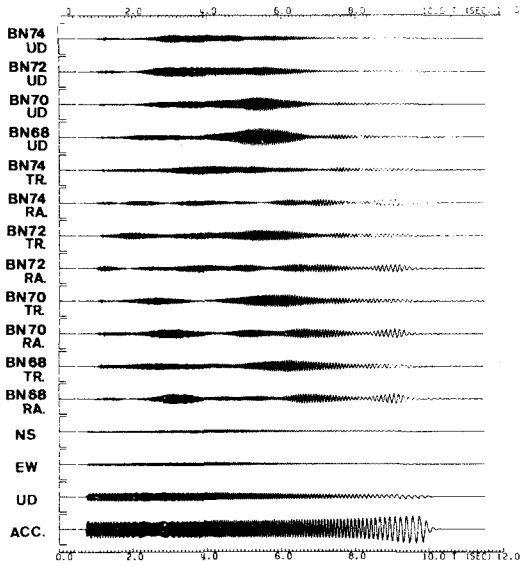


Fig. 8. Example of recorded wavelets.

Fig. 10 に比べ全般的には振動数による変化が緩やかであり、10 Hz 以下の低振動数域で減衰が大きい。Fig. 11b の BS 60 (一点鎖線) は BS 40 (実線) より 10 Hz 近傍で 3 倍近く増幅して、Fig. 10b の増幅地点 BS 60 と振動数は異なるものの、良い調和を示している。Fig. 11a の BN 70 (点線) は 18 Hz 近傍で他の地点より大きく増幅するため、測定点間隔を短くして示した図が Fig. 12 である。5~14 Hz の間では、距離と共にほぼ一様に減衰しているが、15~18 Hz では、BN 60 から BN 68 まで次第に増幅して、切土地盤に近づく BN 70 以遠では減衰していることが明瞭に読みとれる。

Fig. 13 は、Fig. 10b と同じく B 基礎を EW 方向加振した場合の地動の TR 成分の相対振幅をさらに測定点間隔を短くした場合で、BS 42 の地点から 2M 間隔で BS 80 の地点まで示したものである。BS 42~BS 50 では、振動数によって増幅や減衰を繰り返しているが、一定した傾向は読み取りにくい。BS 52~BS 60 では、BS 50 で生じた 6.5 Hz 近傍のピークが距離と共に急激に大きくなる。この場合の 1 次のピーク値及び、共振振動数は 6.5 Hz から 8 Hz 近傍まで、距離と共に高い方へ移動していることが読み取れる。ピーク振動数の高振動数側への移動は 2 次のピークに於いても明瞭に生じているが、ピーク値そのものの増減は小さい。BS 64 までは、1 次のピークは増大するが、

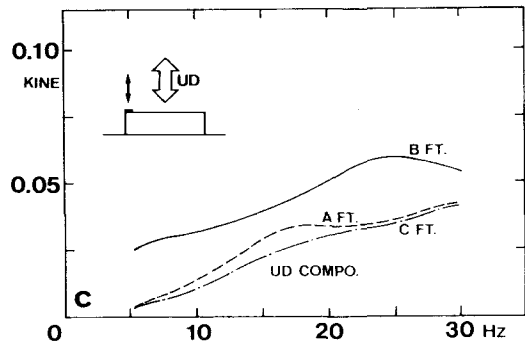
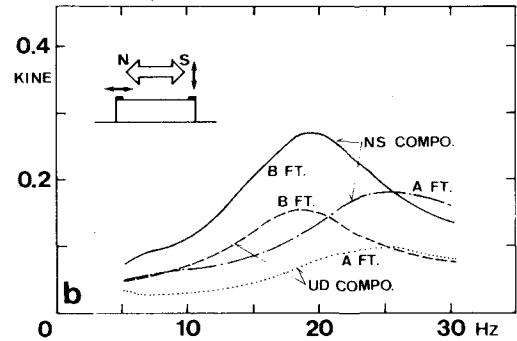
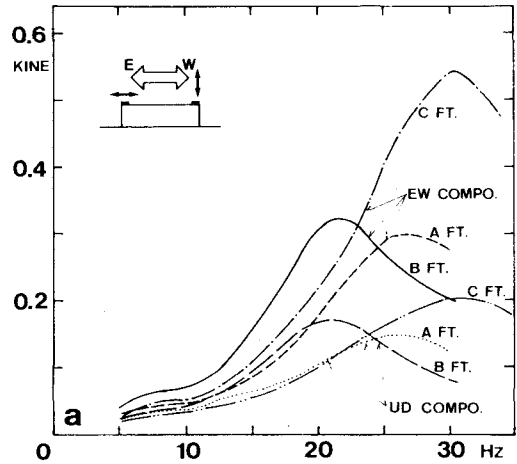


Fig. 9. Velocity amplitude of footing.

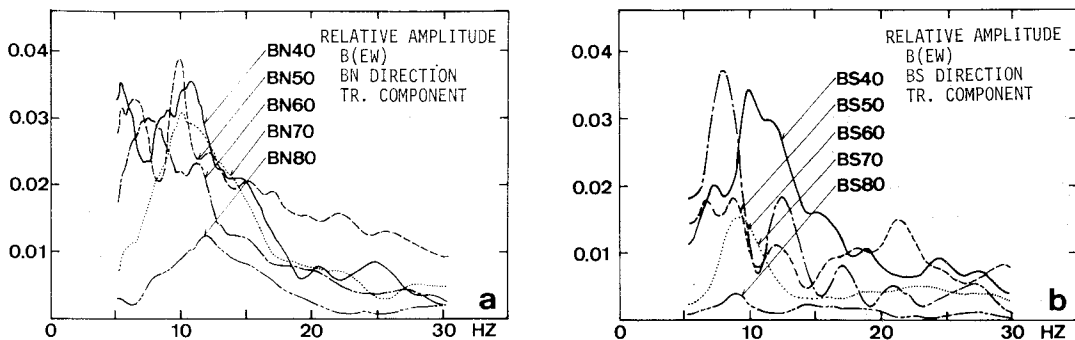


Fig. 10. Relative amplitude of TR. component of surface ground motion excited by B-footing in EW direction.

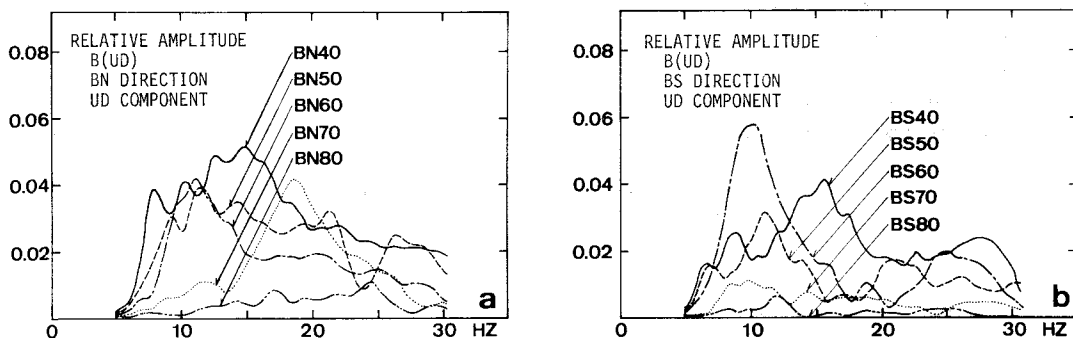


Fig. 11. Relative amplitude of UD component of surface ground motion excited by B-footing in the vertical direction.

BS 68 の地点から急激な減衰が生じていること、振動数が若干異なるが、BS 58～68 のどこかの地点で地動のピークがあり、それ以遠では急激に減衰していることが推察される。Fig. 13 d の BS 72～BS 80 では 16 Hz 近傍で一部交叉しているが、総じて基礎から離れるに従い、測定点での応答は一樣に減衰する。

Fig. 14 は Fig. 13 の結果を、横軸に B 基礎から S 方向の測定点までの距離をパラメータとして、加振振動数を、縦軸に相対振幅をとって整理した図である。板たたきによる距離減衰を示す Fig. 7 d の BC 間の○印のグラフに対応している。盛土地盤上である BS 40 から BS 68 の 28 M の距離の間に、11 Hz 以上では、ピークの位置が約 9 M 置きに 3 つ存在し、基礎から一番遠い測定点でのピークに着目すると、高い振動数ほど遠方になっている。例えば、8 Hz では BS 60 にあるが 24 Hz では BS 68 の地点まで移動している。また、低振動数域では、僅か数 M 異なる測定点での応答間には 3～5 倍の異常増幅・減衰の激しい振動性状を示すものもあり、切土地盤上である BS 68 以遠では急激に減衰する。この現象は、Fig. 6 a の BC 間の速度構造の急変する地帯で、波動の反射、屈折、透過の相互干渉あるいは Love 波等の表面波の生成によって生ずるものと判断され、沖積地盤とそれを取り囲む硬質地盤からなる地層構成の急変する不整形地盤特有の振動特性を示唆するに足るものと考えられる。

Fig. 15 は、Fig. 14 で得た実験結果の一部を理論的に説明するために、加振基礎と地盤の相互作用を考慮した不整形地盤上の相対振幅である。すなわち、BC 間の第 1 層の速度層を $V_s = 0.2 \text{ km/sec}$ の短長軸比 0.5 の半楕円形の沖積地盤として想定し、それを取り囲む硬質地盤として $V_s = 0.3 \text{ km/sec}$

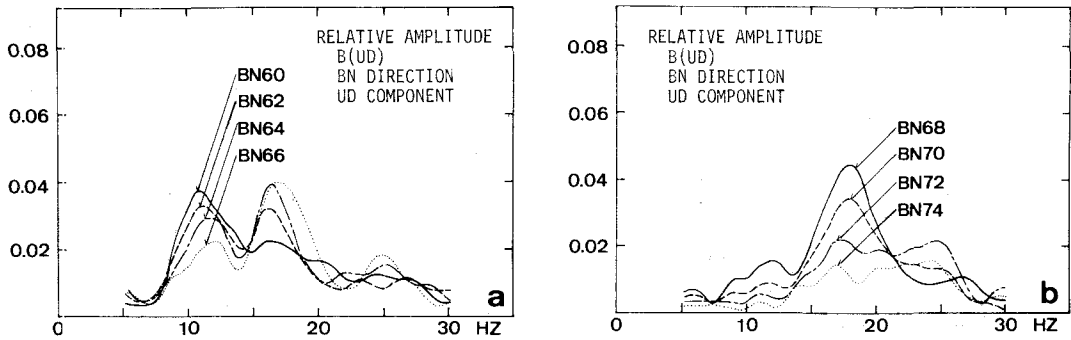


Fig. 12. Relative amplitude of UD component of surface ground motion excited by B-footing in the vertical direction.

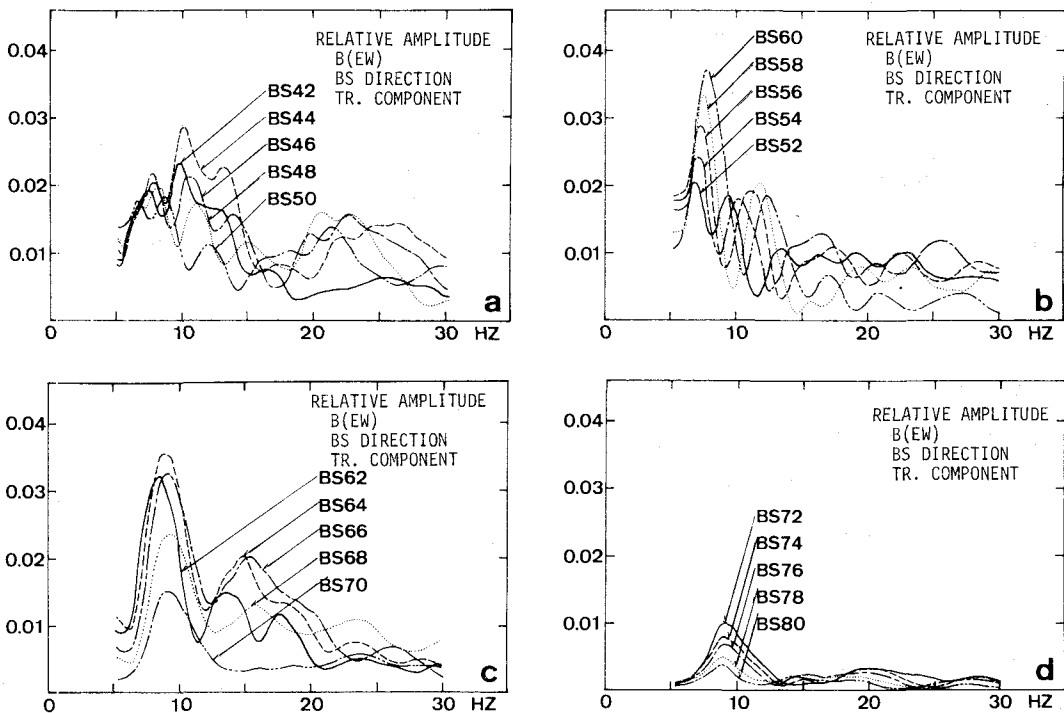


Fig. 13. Relative amplitude of TR. component of surface ground motion excited by B-footing in EW direction.

を想定して、2次元のアンチ・プレーンの振動問題を、境界積分方程式の方法により解析したものである。応答の振動数依存性は実験結果と異なるが、定性的傾向は実験結果を説明していると思われる。

Fig. 16はB基礎を15～5 Hzの振動数で9秒間上下加振した場合のB基礎、及びBN 50～80までの各測定点での粒子軌跡を描いたものである。BN 70及びBN 80ではUD成分よりRA成分が卓越していることが多いが、BN 50及びBN 60では、UD軸がRA軸より長い楕円形の軌跡を描くところから盛土地盤でのRayleigh波の生成が推測されるのである。

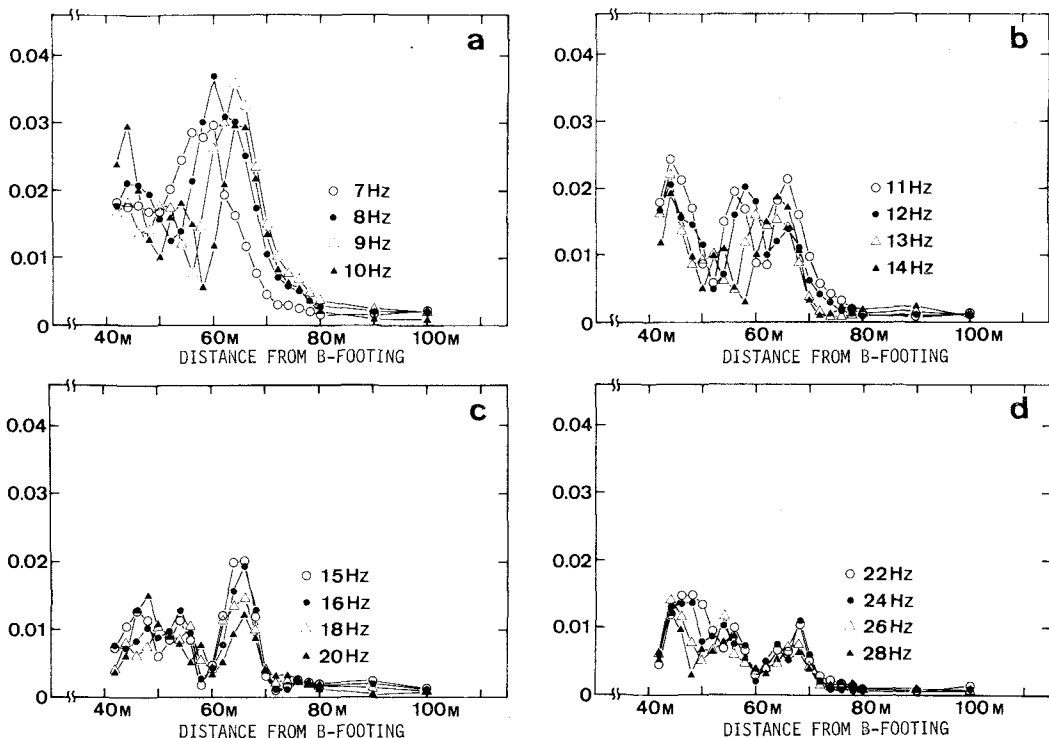


Fig. 14. Relative amplitude of TR component of surface ground motion along BS direction excited by B-footing in EW direction.

5. まとめ

不整形地盤の振動特性を実験的に研究するために、従来から用いられてきた偏心重量方式の起振機の代わりに、電気油圧制御起振機を開発して、小高い丘の尾根を削り取って造成した、主として切土地盤と盛土地盤から構成される変電所用地を、不整形地盤の実験地として選定し、振動実験を行った。その結果を要約すると、以下の通りである。

- 1) 開発した電気油圧制御起振機は、ゼロ・スタート加振、及び加振波形の再現性が十分に確保され、スタッピングすることによりS/N比の飛躍的向上が達成できた。

偏心重量方式の起振機に比べ、低振動数域で大きな加振力を出せるため、不整形地盤の振動特性を5 Hz程度の低振動数領域まで精度よく調べることができた。

- 2) 基礎を切土地盤上に設置して、その断面が切土地盤→半楕円形状の盛土地盤→切土地盤と続く地盤構成の急変する不整形地盤上に測線を設定して得た速度応答分布は、非常に強く加振振動

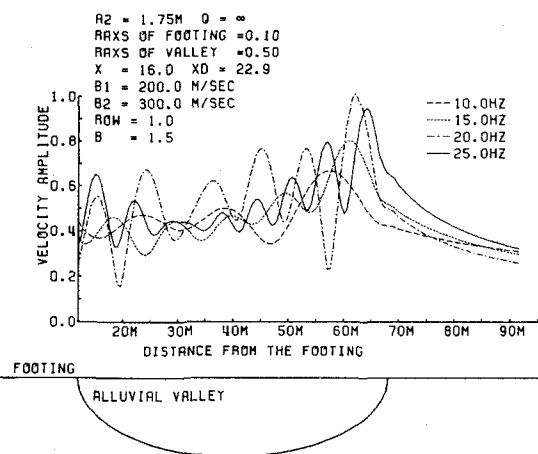


Fig. 15. Computed surface velocity amplitudes in perfectly elastic media.

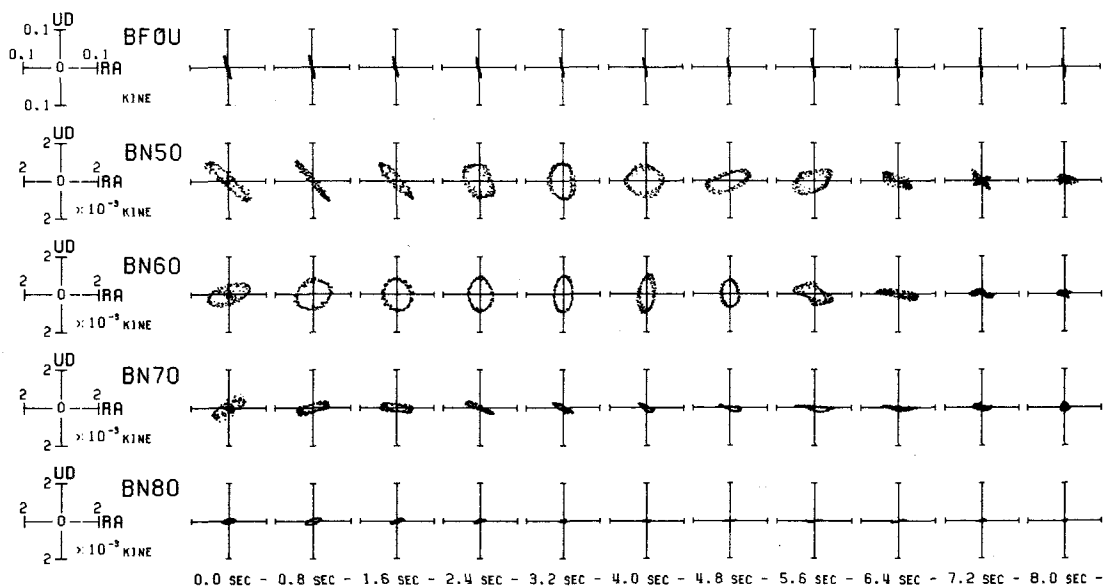


Fig. 16. Particle orbits of surface ground motions excited by B-footing in the vertical direction linearly swept for the range of frequency ; 15 - 5 Hz.

数に依存する。また、基礎より遠地点での盛土地盤→切土地盤の境界近傍での速度応答分布は加振振動数によっては、測定点に応じて、激しく振動しながら、近地点での応答に比べ3～5倍程度増幅して、切土地盤側では急激に減衰する不整形地盤特有の異常増幅地帯・波動の焦点効果などの現象が明瞭に検出できた。

謝 辞

実験に際しては、京大小堀研究室諸兄の全面的な御協力を得たことを記して感謝します。また実験を行う上で多大な便宜をはかっていただいた関西電力株式会社中央送変電建設事務所などの関係諸氏に深く感謝の意を表わします。なお本実験の費用の一部は、昭和57年度文部省科学研究費自然災害特別研究に依ったことを記します。

参考文献

- 1) HUDSON, D. E., 1972, Local distribution of strong earthquake ground motion, Bull. Seism. Soc. Amer., 62, 1765 - 1786.
- 2) HANKS, T. C., 1975, Strong ground motion of the San Fernando, California, Earthquake : Ground displacements, Bull. Seism. Soc. Amer., 65, 193 - 225.
- 3) WCNG, H. L., M. D. TRIFUNAC and B. WESTERMO, 1977, Effects of surface and subsurface irregularities on the amplitudes of monochromatic waves, Bull. Seism. Soc. Amer., 67, 353 - 368.
- 4) 小堀鐸二・篠崎祐三, 1982, 起振機実験による不整形地盤の振動特性, 地震 2, 35, 259 - 281.

SURFACE MOTION OF TOPOGRAPHIC IRREGULAR GROUND
EXCITED BY SERVOCONTROLLED VIBRATOR

Takuji Kobori^{*}, Yuzo Shinozaki^{*}, Shigeru Setogawa^{**},
Masahiko Ozaki^{*} and Katsuhisa Kanda^{*}

It has been recognized that the dynamic behavior of a building structure during an earthquake is considerably affected by the geologic formation and the property of the soil medium. In particular, the geologic and topographic irregularities in the soil medium seem to have a tremendous effect on the characteristics of the earthquake ground motion, together with the associated structural damage of the building. There have been many theoretical investigations about the elastic wave propagation in or around such geologic and topographic irregularities of the soil medium, but only a few experimental investigations about the effects of the amplification and focussing properties of elastic wave motions resulting from the local geologic and subsurface soil conditions on the surface motion of topographic irregular site.

This paper deals with full-scale measurements of surface ground motion generated by forcing to vibrate a footing, which was made of reinforced concrete and 3.5m in diameter and 1m high, resting on the surface of subsurface irregular ground which was turned out to the flat surface ground from a hill composed of a steep ridge and canyon geometry. We selected four kinds of lines as full-scale measurements of surface ground motion considering the velocity structures derived by seismic exploration. Then, four pieces of footings, which were the same size each other, were placed at the different points, that is, three of them were placed at the surface of the cutting ground and one of them was placed at the surface of the filling ground. In order to vibrate those footings, we used the servocontrolled vibrator built as a trial.

Observations indicate that the surface variations of SH wave motion are highly frequency dependent and do not necessarily decay monotonously according as the source-receiver distance increases. It is the measured point of the filling ground nearest the edge between the cutting ground and the filling ground that the surface velocity of the subsurface irregular ground is most amplified.

In order to predict the amplification and focussing effect of the subsurface irregular site condition on the surface velocity amplitude variation, we assume two-dimensional arbitrarily-shaped alluvial valley model considering the footing-soil interaction effect. We compare the measured results with the theoretical results based on the method of boundary integral equation and get the good agreement between them.

^{*} Kyoto University.

^{**} The Kansai Electric Power Co., Inc.