

大型振動台加振時の周辺地盤の振動性状と振動抑制に関する実験・解析的研究
EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDIES ON VIBRATION CHARACTERISTICS AND VIBRATION SUPPRESSION
OF SURROUNDING SOIL DUE TO LARGE-SCALE SHAKING TABLE

奈良岡 浩二*

福和 伸夫*

渡辺 宏一*

塩谷 清人**

箕輪 親宏***

by Koji NARAOKA, Nobuo FUKUWA, Kouichi WATANABE,
Kiyoto SHIOYA and Chikahiro MINOWA

The dynamic response characteristics of the foundation and its surrounding soil due to the excitation of the large-scale shaking table are examined in both experimental and analytical aspects. By exciting the shaking table, the response of the foundation and surrounding soil are observed for the sweep- and pulse-type excitation forces. From this observation, Fourier spectrum ratios and the time histories are obtained. First, by examining Fourier spectrum ratios, the dynamic response characteristics are studied with respect to the frequencies, directions and distances. The simulation analysis using the axi-symmetric finite element method is also conducted. Secondly, the non-stationary spectra of the time histories on the soil surface due to the pulse-type excitation are presented and compared with the arrival time evaluated from the group velocities of the surface waves. Next, the attenuation characteristics are studied for each direction. Finally, several measures to suppress the soil and foundation responses are studied using the axi-symmetric finite element method.

1. はじめに

半導体工場に代表される高度な技術を駆使した生産工場施設においては、環境振動に対する十分な対策が必要とされる。また、居住性の向上の面から交通振動等による公害振動問題が関心を集めている。このような背景から、地震動以外の人為的な地盤振動に関する研究の必要性が高まってきている。従って、機械基礎による周辺地盤の振動性状を把握することは、地盤振動問題に対処する上で重要と考えられる。

本研究は、大型振動台加振時の周辺地盤の振動性状を把握することと、地盤振動の有効な抑制方法について検討することを目的として、国立防災科学技術センターの大型振動台を用いた振動実測結果とその解析結果を報告するものである。本実測の有用性としては、次のことが挙げられる。1) 振動台が大加振力を有し、かつ大規模基礎に設置されており、実物大の実験である。2) 加振力の性状が明確であり、かつ制御が可能である。3) 基礎周辺に障害物がなく、地盤構造もほぼ成層のため、理想的な実験環境である。

本研究では、振動台基礎周辺地盤上に広い範囲で測線を張り、基礎も含めた同時多点観測を行った。振動実測方法の検討を行った上で、周辺地盤応答の振動数および距離特性を実測結果に基づいて解析し、合わせて軸対称FEMによるシミュレーションを行い、検討を加える。次に、周辺地盤の波動伝播特性を表面波解析

* 工修 清水建設(株) 大崎研究室

** 工修 清水建設(株) 技術研究所

*** 工修 科学技術庁 国立防災科学技術センター

(〒100 東京都千代田区 内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

(〒135 東京都江東区 越中島 3-4-17)

(〒305 茨城県 つくば市 天王台 3-1)

により調べ、表面波の影響が大きいことを示すと共に距離減衰についても言及する。最後に、以上の結果を基に具体的な振動抑制方法に関して、シミュレーション解析により検討を行う。

なお、当施設の振動実測は以前にも行われており1)、解析例も紹介されている2~4)。既往の研究としては、ブロック試験を用いた相互作用に関する実証研究4)~6)や交通振動問題を対象とした研究7)は多いが、機械基礎による周辺地盤振動を対象とした研究は少ない。同一の振動台を用いた基礎および周辺地盤の振動観測とその解析例として小川・箕輪ら1)の研究があり、周辺地盤への波動伝播特性を調べることが目的として、振動実測が行われている。地盤振動の振幅は振動数と距離に対して非常に敏感であり、地盤振動は基礎近傍において大きく励起されることなどが報告されている。

また、地盤振動の抑制効果に関する実験的研究の例として、シートパイル壁およびトレンチを設けた場合の地盤振動の低減率がF.E.リチャートら8)により紹介されている。トレンチについては、加振源からトレンチまでの距離とトレンチの深さおよび波長をパラメータとして、振幅低減比の等高線図が示されている。

2. 振動台基礎と周辺地盤構造の概要

2.1 振動台基礎と建屋諸元

基礎は鉄筋コンクリート造であり、地盤に8.2m埋込まれ、洪積II層の砂質層に直接支持されている。基礎形状は図-1に示すように上面16×26m、下面25×39m、高さ8.2mの台形であり、基礎体積は3,500m³、重量は8,700tonである。基礎は内部が切欠かれ、振動台取付けのためのベダスタルなどがあるために、比較的複雑な断面をしている。一方、基礎に隣接して計測制御室建屋および振動台移動用の基礎がExpansion Jointを介して接続している。また、埋戻し土重量は約4,350tonである。

なお、実験室建屋は、軽量鉄骨造であり、固有振動数は3.5Hz、減衰定数0.035、重量約200tonである。従って、基礎-地盤系の振動性状に与える影響は小さいと考えられる。

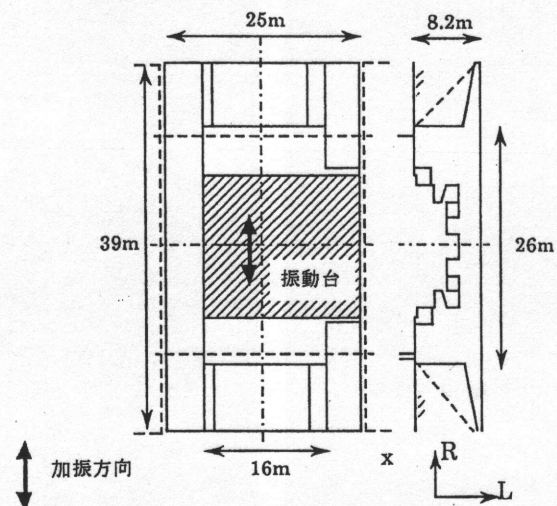
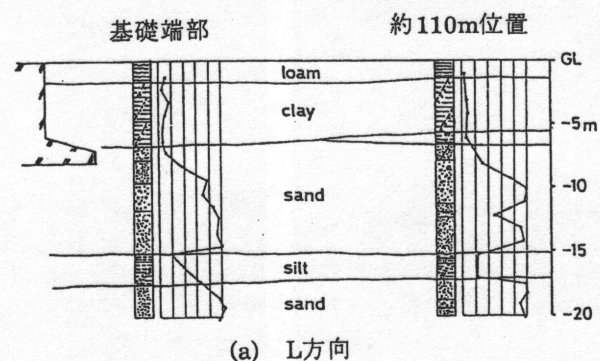
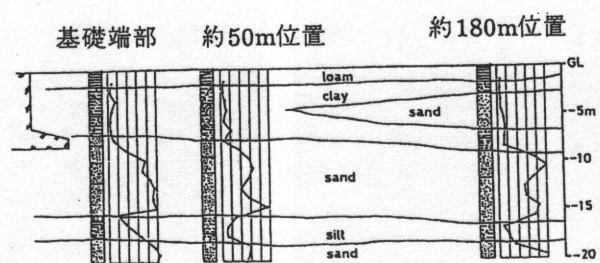


図-1 基礎・建屋平面図



(a) L方向



(b) R方向

図-2 地層構成図1)

表-1 地盤定数1)

層番	V_S (m/s)	V_P (m/s)	γ (t/m ³)	層厚 (m)
1	82	300*	1.3	3.0
2	145	1150	1.6	5.2
3	230	1800	1.7	10.0
4	400	1800	1.7	6.0
5	480	1800	1.9	7.0
6	320	1800	1.7	6.0
7	400	1800	1.9	—

* 爆薬振源を用いた屈折法による値

2.2 地盤構造

地盤構造は、建設時の地盤調査などによりかなり明らかになっており、当該地盤の地層構成およびPS検層結果は図-2のように得られている¹⁾²⁾。各層は多少の起伏はあるもののほぼ平行成層地盤と見なせる地層構成を示している。表-1にPS検層による地盤速度構造と単位体積重量を示す。なお、表層のP波速度は爆薬振源を用いた屈折法による結果に基づいて設定した。

2.3 振動台性能

水平最大加振力360ton、最大ストローク±3cm、最大速度37kine、最大積載重量500tonである。なお、振動台重量は160tonである。

3 振動実測

3.1 実測方法

基礎および周辺地盤の振動性状と波動伝播特性を調べるため、水平方向のスイープ加振とパルス加振を行った。振動計測点は、図-3に示すように基礎および周辺地盤上に設置した。一様な成層地盤の場合には、加振方向と加振直交方向にそれぞれレーリー波とラブ波が主に伝播する。本実測の敷地においては、必ずしもこれらの方向にそれぞれの表面波が主に伝播するとは限らないが、計測点数の制約から、地盤上の測線は、振動台加振方向とそれに直交する方向の2つとした。以下ではそれぞれの方向をR方向とL方向と呼ぶ。計測成分については、R方向は加振方向の水平(x)成分と上下(z)成分、L方向は加振方向の水平(x)成分のみとした。L方向・R方向ともに25m間隔に測定点を定めた。また、100mを基準点と考え、L方向・R方向および両者の中間位置においてx,y,z3成分の計測を行った。

加振力は、無載荷状態で振動台を加振することにより発生させた。スイープ加振では、加振力を約10tonと100tonとし、加振時間は1~20Hzを4分間と10分間とした。パルス加振では、振動台の強制変位を0.4mm(10ton相当)と1.0mm(100ton相当)の2種類とし、10秒間隔で連続20回の加振を行った。なお、用いた振動計は積分回路と微分回路を内蔵している速

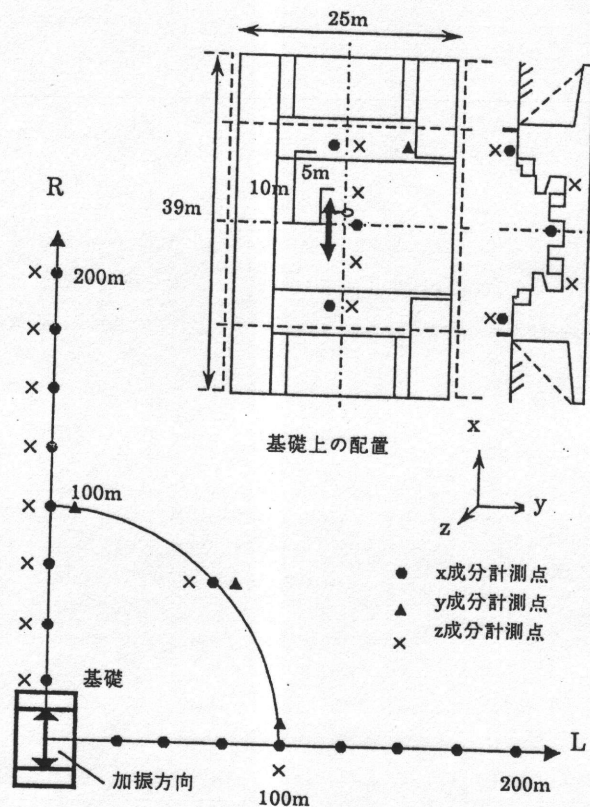


図-3 測点配置

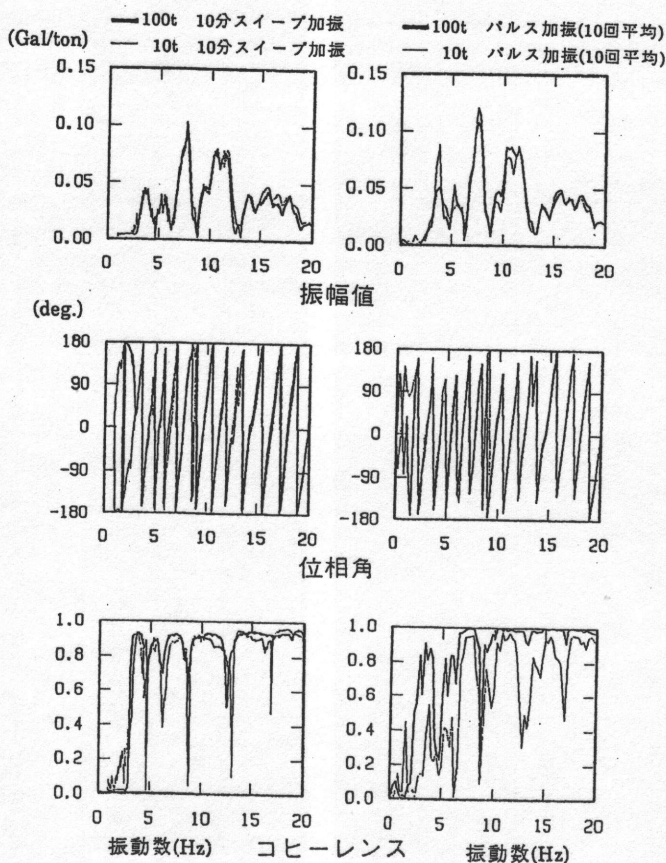


図-4 スイープ加振とパルス加振による共振曲線

度計である。

3.2 実測結果

スイープとパルスの両加振に対して、L軸測線上100m位置(x成分)で得られた共振曲線を図-4に示す。なお、パルス加振時の共振曲線は、各測点応答と加振力とのフーリエスペクトル比を10波について平均して求めたものである。

両加振による共振曲線はよく対応している。パルス加振はスイープ加振に比較して計測を短時間に効率よく行うことができ、フーリエ変換を利用することにより全ての振動数に関する情報を得ることができる。さらに、振動数特性に加えて、応答波形に基づく波動伝播特性の検討も可能となるため、有効な加振方法と考えられる。また、加振力については、大小2つの加振力に対する結果を比較すると、低振動数域で多少の差異が認められるものの概ね対応している。このため、以降では、共振曲線と応答波形については、それぞれスイープ加振と100ton相当のパルス加振の結果を用いる。

スイープ加振による各測線上の振幅の距離特性および振動数特性を図-5に示す。共振曲線の卓越振動数は距離や方向によって変動している。また、L方向のx成分の卓越振動数は、R方向のx,z成分のそれに比べ、距離および振動数に対して敏感である。応答振幅は、基礎近傍を除いてR方向に比較してL方向の方が大きく、振動数特性もL方向の方が複雑で

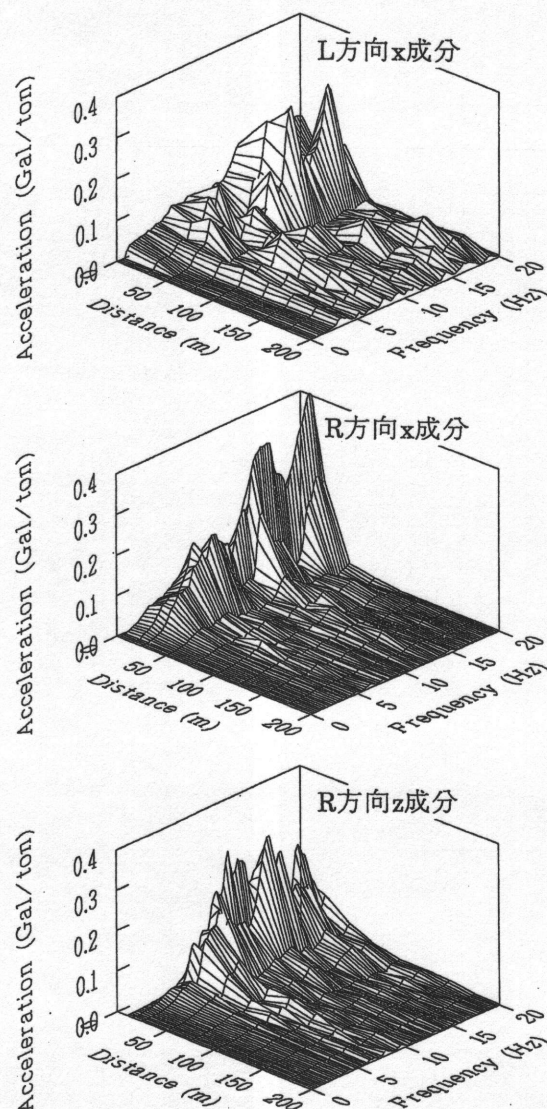


図-5 スイープ加振により得られた共振曲線

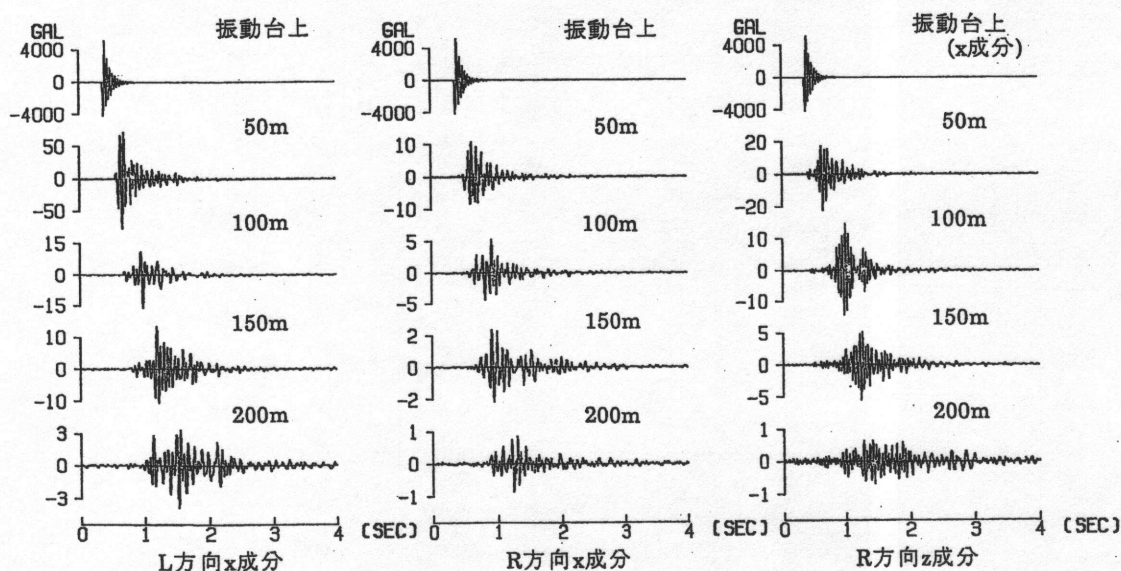


図-6 100tonパルス加振による応答加速度波形

ある。R方向では、上下応答が水平応答と同程度以上生じている。また、方向に関係なく、基礎近傍の地盤で振幅が増幅し、その後減衰していく傾向がみられる。その減衰の程度は、R方向のx成分、R方向のz成分、L方向のx成分の順に小さくなっている。

後に、波動伝播解析を行うために、100ton相当パルス加振時の各測線上の応答加速度波形を図-6に示す。なお、各応答波形は、ノイズ成分や常時微動成分を低減するために、7個のパルス加振時の応答波形を加算するとともに、1Hz以下の振動数成分を除去することにより求めた。この操作によりノイズ成分は約 $1/\sqrt{7}$ に低減されることが期待できる。ここでは、このような処理を施した波形をスタッキング波形と呼ぶことにする。

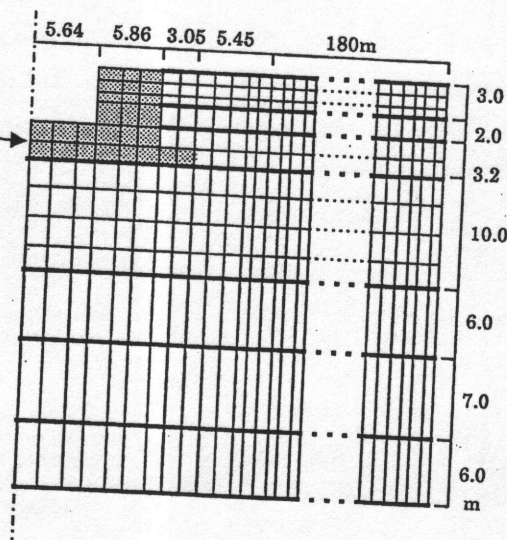


図-7 解析モデル

4. 軸対称FEMによるシミュレーション解析

実測による共振曲線(図-5)のシミュレーション解析を軸対称有限要素法を用いて行う¹¹⁾。モデル化に当たっては、当該基礎を面積等価の円形基礎に置換した。モデル化範囲は基礎中心から半径200m、深さ37.2mとし、側方にはエネルギー伝達境界を、底面には粘性境界を設けた。対象振動数は20Hzまでを考慮した。解析モデルを図-7に示す。解析には表-1の地盤諸元を用いた。なお、減衰定数 h については、弾性波探査結果から $0.01 < h < 0.03$ と推定されているので $h=0.02$ とした。

解析により得られた各測線上の共振曲線を基礎中心からの距離と振動数に対して図-8に示す。観測結果では測点数の不足により距離変動特性が十分に把握できていなかったのに対して、解析結果はその変動をよくとらえている。図-8では、距離の変化による卓越振動数の移行が明確に認められる。これは、観測点に到達する波動の位相速度が振動数によって変化することにより生じていると考えられる。このような方向や距離による振動数特性の差異は、実体波と表面波との距離減衰の差異や成層性に伴う表面波の分散性などに起因していると推察される。

実測結果と解析結果を比較すると、振動数特性と距離による変動は類似の傾向を示している。すなわち、5Hz程度までは距離と共に一様に減衰しているのに対して、5Hz以上では距離の変化により卓越振動数が移行する点などがよく示されている。また、応答の振幅レベルも概ね適合しているため、減衰定数の設定値も妥当と考えられる。

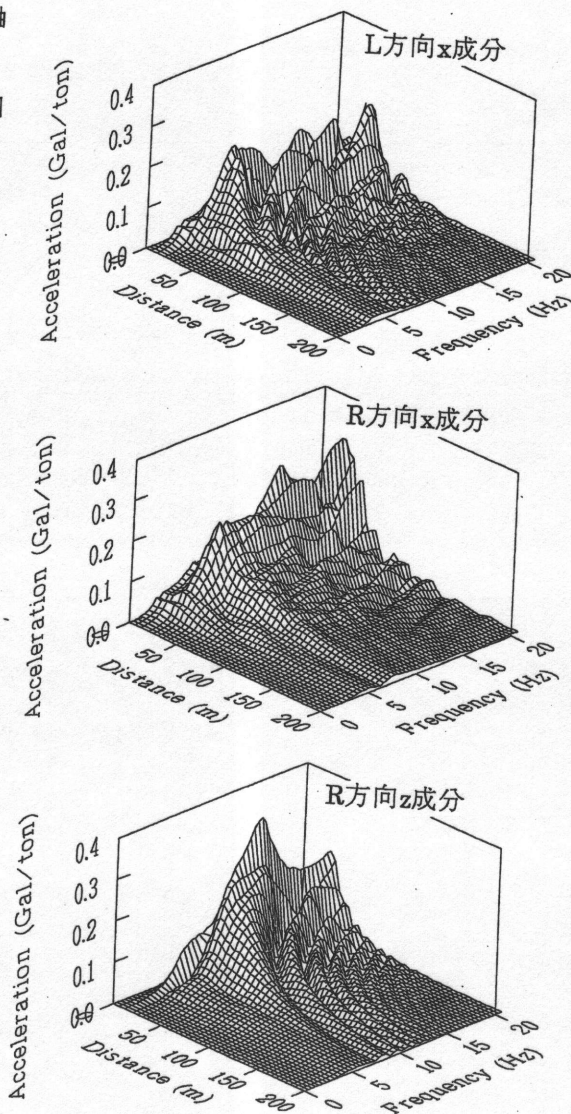


図-8 解析による共振曲線

5. 観測波形の解析

5.1 非定常スペクトルと分散曲線との比較

次に、観測波形の非定常スペクトルと分散曲線を比較し、表面波に関する検討を行う。ここでは、非定常スペクトルとして(1)式のパンドパスフィルターを通して得られる波形の包絡形(2)を用いる。

$$W(f, f_c) = \exp\left(-a(f-f_c)^2/f_c^2\right) \quad : (1-\beta)f_c \leq f \leq (1+\beta)f_c \text{ のとき} \quad (1)$$

$$W(f, f_c) = 0 \quad : f < (1-\beta)f_c, (1+\beta)f_c < f \text{ のとき}$$

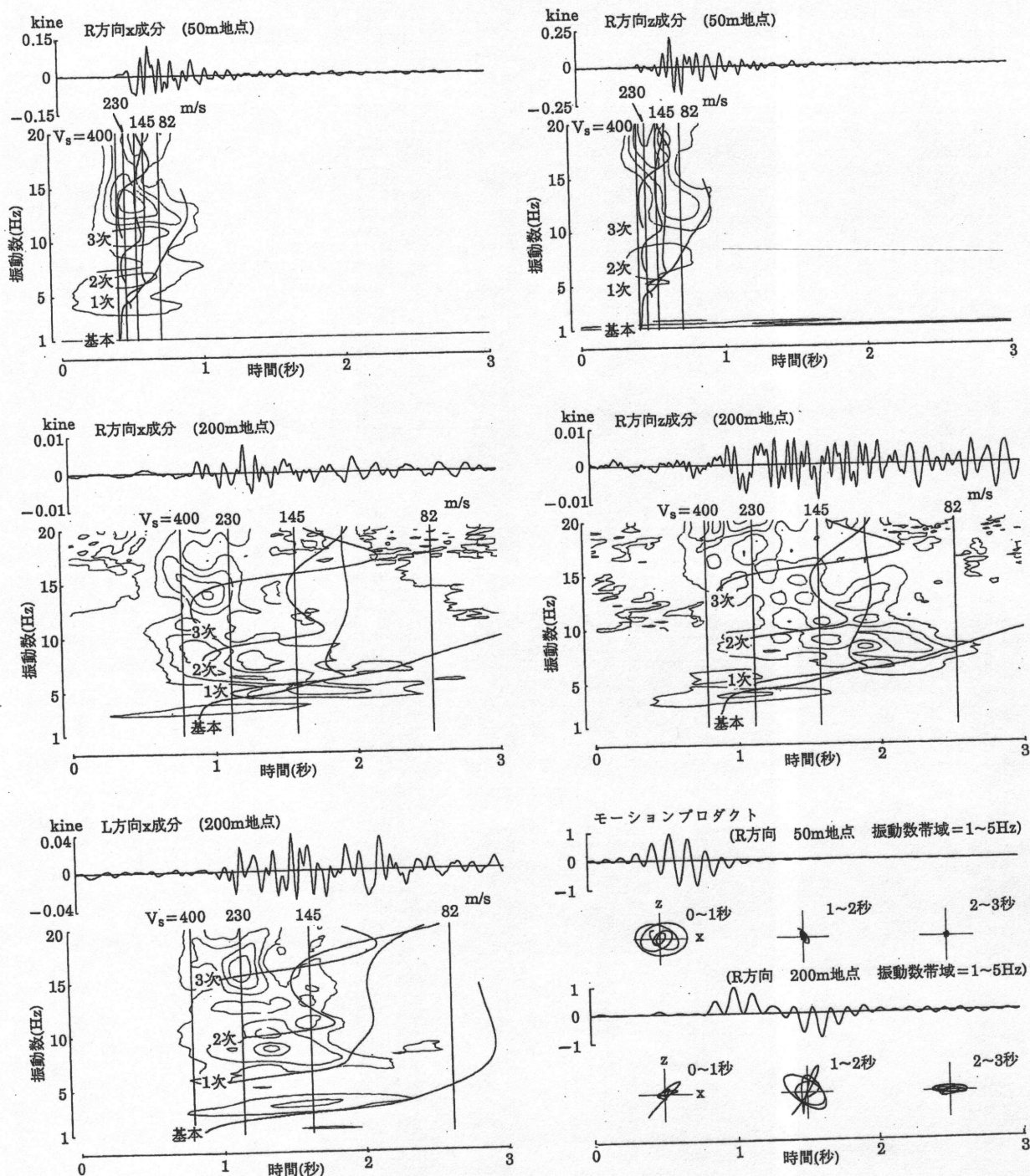


図-9 非定常スペクトルとモーションプロダクト及び速度軌跡

ここで、 f は振動数、 f_c はバンドパスフィルターの中心振動数である。バンドパスフィルターのパラメータの値は $\alpha=50$ 、 $\beta=0.15$ とした。

R方向の50m,200m位置とL方向の200m位置での実体波及び表面波の到達時刻と非定常スペクトルの等高線図及び最大値を1に規準化したモーションプロダクトと速度軌跡を図-9に示す。ここで、表面波の到達時刻は、R方向についてはレーリー波、L方向についてはラブ波のものである。表面波の群速度は、WaasとLysmer(13,14)の方法により表-1の地盤構造を用いて求め、表面波の到達時刻は、表面波の群速度と基礎端からの距離を用いて求めた。また、R方向の水平・上下成分の波形の符号は、図-3におけるR方向と上方向がそれぞれ正である。

200m位置での非定常スペクトルは、振動数によってピーク値の発生時刻が変動しており、分散性が認められる。低振動数域では、ピーク値の発生時刻は表面波の到達時刻に比較的よく対応している。一方、高振動数域ではせん断波の到達時刻および高次モードの表面波の到達時刻周囲にピーク値が集まっている。次に、表面波成分の識別を総合的に行うために、50m位置でのR方向の水平・上下成分のモーションプロダクトと速度軌跡を見ると、1~5Hzの低振動数域ではレーリー波成分が卓越していることが指摘できる。200m位置においては、いろいろな経路を伝播してくる波動が重なり合っているため、モーションプロダクトと速度軌跡からはレーリー波成分を明瞭に識別できていない。しかし、50m,200m位置での非定常スペクトルとモーションプロダクト及び速度軌跡から総合的に判断すると、R方向へはレーリー波が主に伝播していることが推察される。

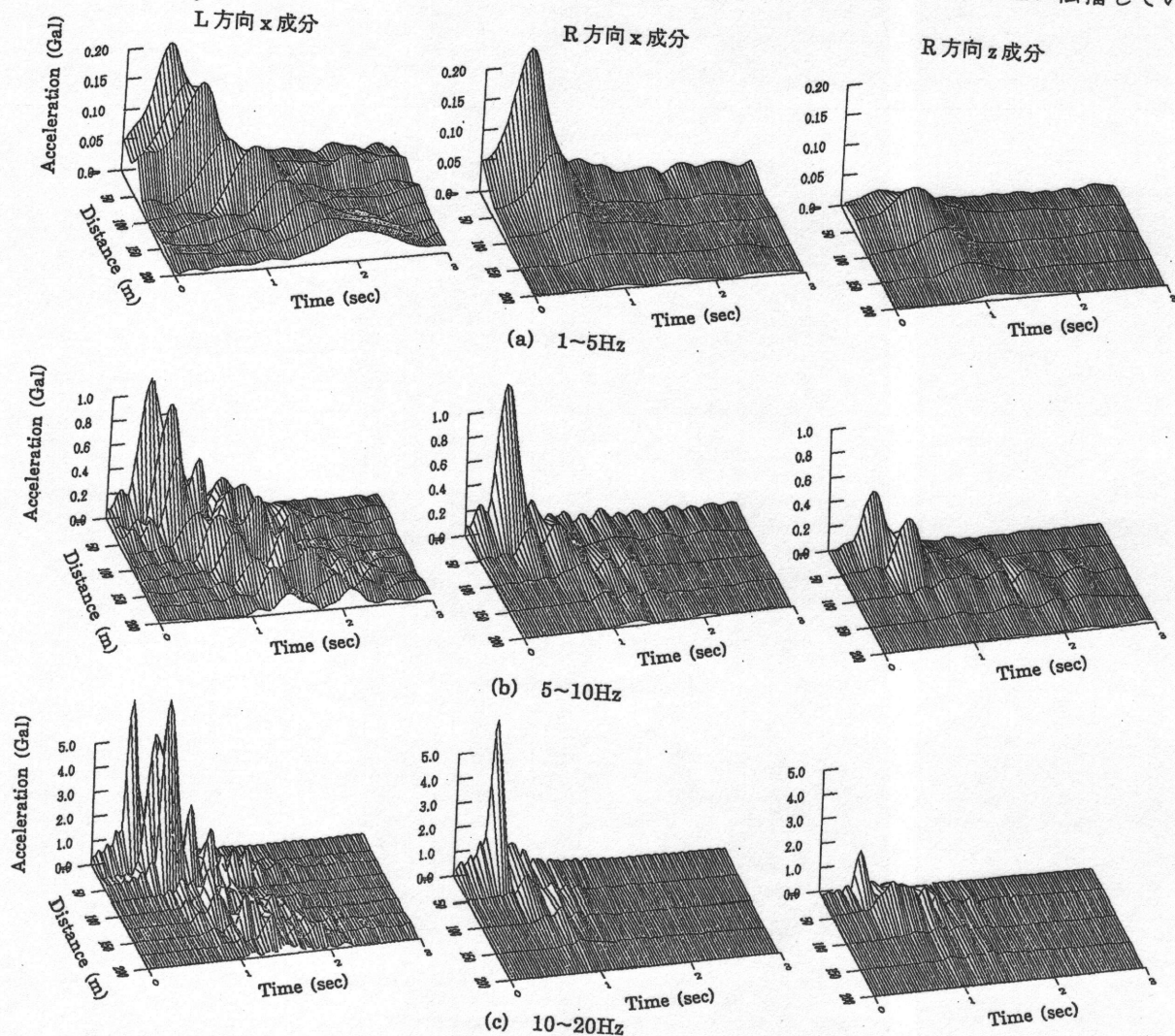


図-10 バンドパスフィルターを通した波形の距離変動特性

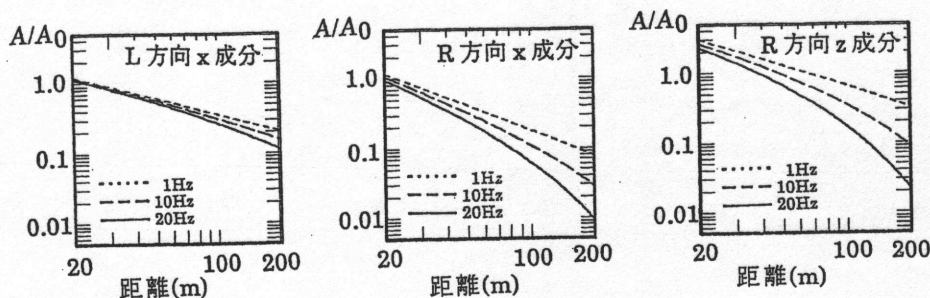


図-11 距離減衰の振動数依存性

表-2 距離減衰係数

	L方向 x成分	R方向 x成分	R方向 z成分
n	0.76	1.14	0.92
QV (m/s)	6300	1800	1400
α	1.06	1.55	1.68

5.2 距離減衰の検討

環境振動問題における基礎的資料を得るために距離減衰についての考察を行う。まず、応答波形の距離による振幅変動を観察するために、100tonパルス加振時の各測線上の応答波形について、バンドパスフィルターを通した波形の包絡線を図-10に示す。応答値は基礎近傍で比較的大きく減小し、距離が大きくなると減小度合が低減している。また、距離減衰は、振動数が高くなるにつれ大きくなり、この傾向はR方向x成分において顕著である。

距離減衰特性を定量的に把握するため、スイープ加振により得られた共振曲線を基に以下のような回帰分析を行った。距離減衰として、材料減衰と幾何減衰を考えて以下の距離減衰式を仮定した。

$$A/A_0 = \alpha \exp\left(-\frac{fr}{QV}\right) r^{-n} \quad (2)$$

ここに、 (A/A_0) は振動台基礎に対する加速度振幅比、 α は比例定数、 f は振動数(Hz)、 r は基礎中心からの距離(m)、 Q は Q 値、 V は波動伝播速度(m/s)、 n は幾何減衰の度合を示す係数である。回帰分析結果を図-11及び表-2に示す。

各結果は、距離減衰が振動数とともに増加することを示している。これは、低振動数域では表面波成分が多く含まれることや、材料減衰の影響が高振動数域に大きいことなどが原因していると推察される。また、距離減衰は測線方向や振動成分によっても異なっている。R方向x,z成分は振動数による変動が比較的大きく、振動数と共に距離減衰が増加している。R方向z成分の振幅比 A/A_0 は距離20m地点で2程度の値となっている。これは、上下成分がロッキングに伴うものであることと、上下成分に対する基準化位置を基礎中心から加振方向へ5m離れた基礎上の点としているためと考えられる。一方、L方向x成分は振動数によるばらつきが少ない。すなわち、L方向x成分や低振動数域のR方向z成分に表面波が比較的多く含まれていることを示唆している。従って、表面波と実体波との混在の仕方は、測線方向と振動成分および振動数によって異なっていることが指摘できる。

6. 振動抑制方法

既存の機械基礎の施工的な振動抑制対策として、表-3に示すように、1)基礎重量を増加させる方法、2)トレンチを基礎周囲に設置する方法、3)地中壁を基礎周囲に設置する方法、の3つを考える。また、機械基礎を免震構造とする方法も有効と考えられる。しかし、ここでは、既存の機械基礎に対する振動抑制方法を対象としているため、検討対象から除外している。

軸対称有限要素法により求めた共振曲線を距離と振動数に対して図-12に示す。また、現状の基礎に対す

表-3 振動抑制方法

振動抑制対策法	概念図	期待される効果
基礎重量を増加		重量増加により慣性抵抗を増加させ振動を抑制する
トレンチを基礎周囲に設置		トレンチにより表面波を遮断し周辺地盤の振動を抑制する
地中壁を基礎周囲に設置		地中壁の剛性により振動を抑制する

る解析結果は図-8に示されている。1)の基礎重量を約20,000ton(元の重量の約2倍)とした場合、慣性力が増加することにより、応答値は約6割に低減されている。2)の基礎中心から等価半径40mの位置に深さ18.2mのトレンチを設置した場合、トレンチ以遠では、表面波が遮断されるために応答値は大幅に低減されるが、逆にトレンチ内部では、波動が停留することにより応答値が増大する。3)の基礎中心から等価半径40mの位置に厚さ1.2m、深さ18.2mの地中壁を設置した場合、地中壁の位置でL方向x成分とR方向z成分の振動がやや低減されるが、地中壁を通して力が周辺地盤に伝達されるため、全体的にはあまり効果が認められない。以上地盤の振動抑制対策としてトレンチを設置する方法が有効である。しかし、基礎と地盤両方の振動を一様に低減するためには基礎重量を付加する方法が有効と考えられる。

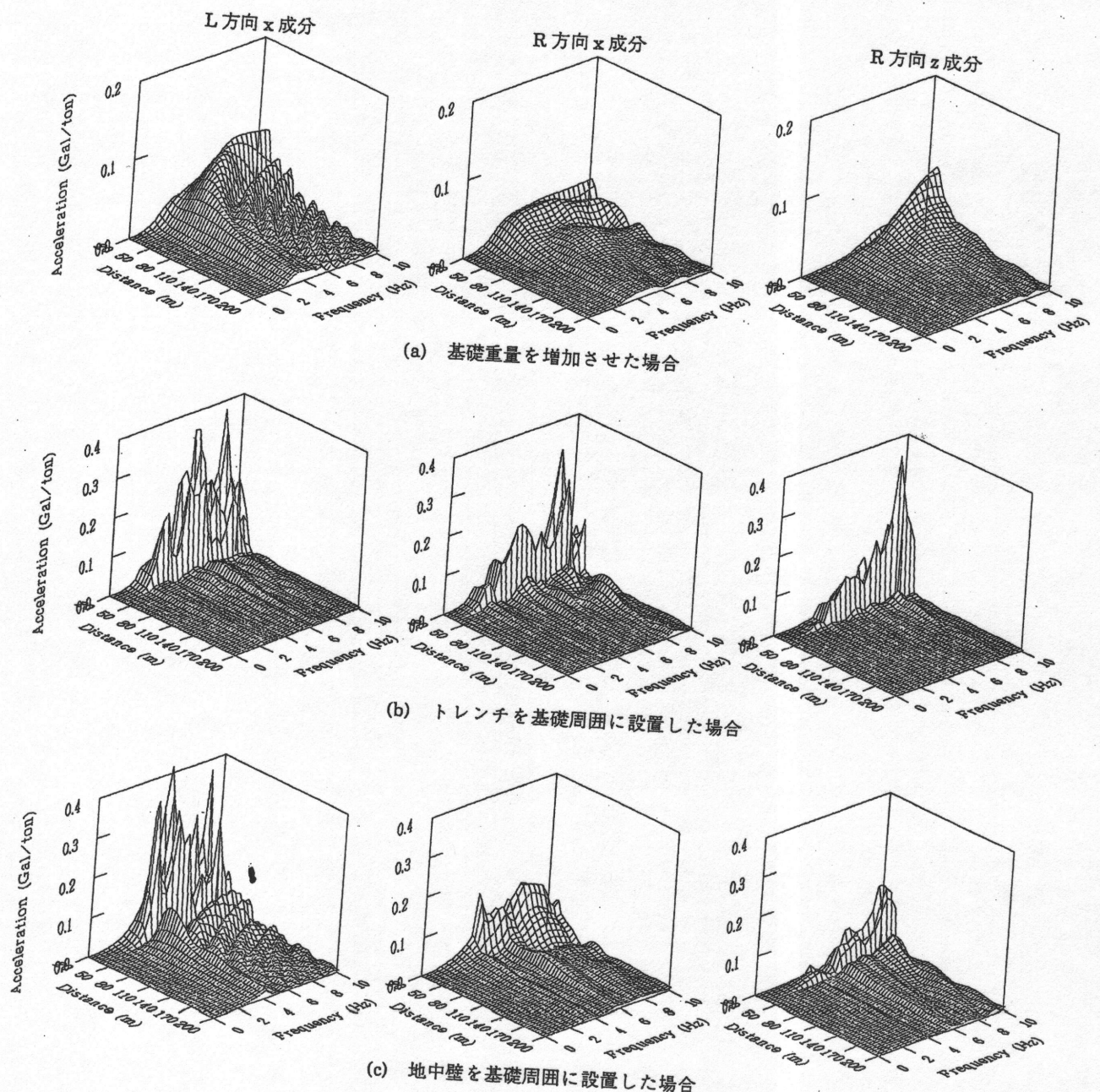


図-12 振動抑制方法の比較

7. 結論

大型振動台加振時の基礎および周辺地盤の振動実測とその解析を行い、以下のことが明らかとなった。

- 1) 振動実測方法の検討から、周辺地盤の振動特性及び波動伝播特性を把握するには、パルス加振が有効であることが確認された。
- 2) 共振曲線は振動数と距離に対して非常に敏感であり、この特性はシミュレーション解析によって表面波成分の影響であると推察された。
- 3) 実体波と表面波の到達時刻と応答波形の非定常スペクトルとの比較結果及びモーションプロダクトと速度軌跡を総合的に判断して、低振動数域では表面波成分が卓越していることが指摘された。
- 4) 距離減衰特性について検討することにより、実体波と表面波成分の混在の仕方は振動数と測線方向及び振動成分により異なっていることが指摘された。
- 5) 既存機械基礎の周辺地盤の応答値を低下させるためにはトレンチを設置する方法が有効であり、基礎と地盤両方の振動を一樣に低減するためには基礎重量を付加する方法が有効である。

今後、振動抑制効果について実証的な検討を加えていく所存である。

謝辞

本研究を行うに当たり、清水建設(株)水戸営業所の大竹弦氏、同設計本部構造開発部の斉藤豊氏と平戸達朗氏には多くの貴重な助言を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

8. 参考文献

- 1) 小川, 笑輪, 飯田, 久保田: 「大型振動台加振時の周辺地盤振動に関する調査報告」, 防災科学技術研究資料, 第28号, 昭和52年9月
- 2) H. Tajimi, N. Ogawa and C. Minowa: "Dynamic Behaviors of a Large Shaking Table Foundation," 4th JEES, 1975, pp.375~382.
- 3) M. Iguchi: "Dynamic Interaction of Soil-Structure with Elastic Rectangular Foundation," 5th JEES, 1978, pp.457~464.
- 4) H. Tajimi: "Recent Tendency of The Practice of Soil-Structure Interaction Design Analysis in Japan and its Theoretical Background," *Nuclear Eng. Des.*, Vol.80, 1984, pp.217~231.
- 5) 篠崎: 「油圧制御起振機実験による鋼構造実大試験架構—地盤連成系の振動特性」, 第7回日本地震工学シンポジウム, 1986, pp.895~900.
- 6) M. Iguchi, K. Akino and K. Noguchi: "Model tests on interaction of reactor building and soil," 9th SMIRT, K1, 1987, pp.317~322.
- 7) 吉岡: 「新幹線鉄道の振動について」, 第1回環境振動シンポジウム—交通機関と環境振動, 昭和58年2月, 日本建築学会
- 8) F.E. リチャード, Jr., J.R. ホール, Jr. and R.D. ウッズ(岩崎敏夫, 嶋津晃臣共訳): 土と基礎の振動, 鹿島出版会, 1975, pp.264~284.
- 9) 高橋, 中井, 福和, 奈良岡: 「三次元有限要素法を用いた大型振動台周辺地盤の振動特性に関する研究」, 第10回電子計算機利用シンポジウム, 1988, pp.151~156.
- 10) 福和, 渡辺, 奈良岡, 塩谷, 笑輪: 「大型振動台加振時の基礎および周辺地盤の振動性状に関する研究(その1)(その2)」 日本建築学会大会学術講演梗概集 B 構造 I, 1988, pp.757~760.
- 11) 福和, 長谷川, 高田, 佐藤, 奈良岡, 小柳: 「FEMによる構造物—地盤連成系解析システム」, 第6回電子計算機利用シンポジウム, 1984, pp.85~90.
- 12) 神山: 「強震記録の統計処理による基礎の強震動波形とその予測」, 土木学会論文集, 第374号/I-6, 1986年10月, pp.557~566.
- 13) J. Lysmer: "Lumped Mass Method for Rayleigh Waves," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.60, No.1, 1970, pp.89~104.
- 14) J. Lysmer and G. Waas: "Shear waves in plane infinite structures," *Proc. ASCE*, Vol.98, EM1, 1972, pp.85~105.
- 15) 山原: 環境保全のための防振設計, 彰国社, 1974