

不整形性を有する沖積地盤の地震観測シミュレーション
— BEMとFEMの結合解法による解析 —

Effects of Surface Irregularities on Strong Ground Motion

福和 伸夫* 佐藤 俊明* 川瀬 博* 中井 正一**

by Nobuo Fukuwa, Toshiaki Satoh, Hiroshi Kawase and Shoichi Nakai

Amplification of ground motion due to diffraction and scattering of plane harmonic body waves by layered soft soils of Hikichi River alluvial valley, at which a series of earthquake observation tests have been conducted, is investigated by using a combined method of finite and boundary elements. The alluvial valley is modeled as a set of irregular dipping layers embedded into an elastic half-space. Amplification functions, accelerograms and Fourier spectra at the ground surface are evaluated for vertically incident SH, SV and P waves and comparisons are made with the observed data. It is found that the calculated results show a fairly good agreement with the observed ones. Numerical results also demonstrate that the presence of the alluvial valley may cause very large amplification of the surface ground motion and that the amplification function becomes more complicated compared with the result of simple one-dimensional analysis. It is worthy of note that a considerable vertical ground motion is induced by a vertically incident SV wave by the presence of the alluvial valley.

1. はじめに

構造物の設計に際して考慮すべき入力地震動を求めるうえで、構造物近傍地盤の増幅特性の把握は非常に重要である。従来、その増幅特性の理論モデルは一次元成層地盤を仮定したものがほとんどであった。しかし、現実の地盤が理想的な成層構造をなしていることはむしろ少なく、何らかの地形的あるいは地質的不整形性を有している場合が一般的と考えられる。また、地震被害調査からも、単純な沖積層の厚さのみを考慮した解析では説明のつかない、被害の集中があることが指摘されている。

それ故、ここ十数年来、地形的・地質的不整形性を有する地盤の動特性を把握しようとする試みが数多くの研究者によって行われてきた。解析対象を、構造物が多くまた被害の集中しやすい沖積谷に限っても、Trifunac の半円筒沖積谷に対するSH波入射時の地盤の増幅特性についての先駆的論文¹⁾をはじめとして、Wong et al. ²⁾ 小堀ら³⁾ Sanchez-Sesma et

al.⁴⁾ 等の論文が様々な形状の沖積谷の地震動増幅特性について解析結果を報告している。その結論として、波長が不整形性のサイズと同程度以下の周波数領域において地盤の増幅特性は顕著な影響を受けること、不整形性の形状および入射波の角度の影響が大きいことが明らかにされている。

これらの沖積谷についての論文は、数学的取扱いの容易さから、当初SH波場(面外変位場)に限られていたが、最近になって小堀ら⁵⁾ Dravinski⁶⁾ 篠崎⁷⁾ はこれを P-SV波場(面内変位場)に拡張し、沖積谷のP波およびSV波入射時の増幅特性を求めた。P-SV波場の場合、鉛直SV波入射であっても不整形境界によってP波およびRayleigh波が発生するので、その増幅特性はかなり複雑なものになる。しかし、SH波の場合に指摘された傾向はP-SV波についても同様に見られることが報告されている。

一方、これらの閉じた形状をもつ沖積谷のみなら

* 工修 清水建設(株)大崎研究室 (〒100 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル)

** 工博 同上

ず、沖積層と洪積層が分岐する部分の、いわゆる傾斜層地盤についても解析例がいくつか報告されている⁸⁾⁹⁾。それらの論文は、傾斜角の増大に従いその影響が無視できなくなることを指摘している。

しかし、これら数多くの理論的研究の進展にもかかわらず、実測結果と解析結果を対比した例は数少ない。Pacoima Damでの強震記録のシミュレーションを試みたWong et al.¹⁰⁾や、起振機による強制振動実験の結果と対比させた小堀ら¹¹⁾、切盛地盤の動特性を常時微動測定結果と比較して論じた富樫ら¹²⁾等を数えるのみである。

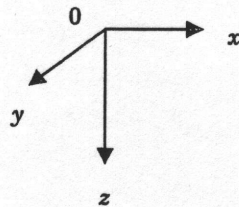
そこで本論文では、薄い半楕円状の不整形性を有する沖積谷において得られた地震観測結果を、鉛直入射するSH波、SV波およびP波を仮定することによりシミュレーションしようと試みた。用いた解析手法は境界要素法(BEM)と有限要素法(FEM)を結合させた、いわゆるハイブリッド法である。筆者らは既にBEMによる不整形地盤解析⁸⁾やFEMを用いた解析例¹³⁾を報告してきたが、本論文で用いた手法は、両者の利点を生かし欠点を補ったもので、特に不整形地盤解析に適しているといえよう¹⁴⁾。

なお、ここで用いた地震観測データは、神奈川県藤沢市に建設された道路橋地点において得られたものである¹⁵⁾。解析結果は、基盤に対する地表面の周波数伝達関数・時刻歴波形およびフーリエスペクトルの形で実測値と比較される。それらの結果をもとに解析手法の有効性について考察する。

2. 解析手法とその検証

2.1 解析手法

直交カルテシアン座標系を右図の如く採用し、 (x, z) 平面を対象として、2次元平面歪面内問題、面外問題を考える。この時、定常動弾



図一 解析模式図

$$u_1 = u(x, z) \quad u_2 = 0 \quad u_3 = w(x, z) \quad \dots (2)$$

であり、面外問題の場合には、

$$u_1 = 0 \quad u_2 = v(x, z) \quad u_3 = 0 \quad \dots (3)$$

であるので、 Δ^* は面内問題では、

$$\Delta^* = (c_p^2 - c_s^2) \nabla \cdot \nabla + c_s^2 \nabla^2 \quad \dots (4)$$

面外問題では、

$$\Delta^* = c_s^2 \nabla^2 \quad \dots (5)$$

と表現される。ここに ∇ は微分演算子

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k} \quad \dots (6)$$

である。但し、 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{k}$ は各々 x 、 z 方向の単位ベクトルである。また、P波速度 c_p 、S波速度 c_s は、複素ラメの定数 λ 、 μ を用いて

$$c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} \quad c_s = \sqrt{\mu/\rho} \quad \dots (7)$$

と表される。なお、本解析では、物体力 $\mathbf{b}$ が 0 の場合のみを考える。

(1)式にガラーキン法を適用して離散化することによって、FEM領域の剛性方程式が以下のようなマトリックス表示で得られる。

$$\mathbf{K}^F \mathbf{u}^F = \mathbf{f}^F \quad \dots (8)$$

ここに、 $\mathbf{K}^F$ 、 $\mathbf{f}^F$ は各々動的剛性マトリックス、外力ベクトルであり、上添字 F はFEM領域を示す。

一方、(1)式にグリーンの公式を適用し、離散化することによって、BEM領域の基礎式は、

$$(\Delta^* + \omega^2) \mathbf{u} = -\mathbf{b}/\rho \quad \dots (1)$$

と表される。ここに、 ω 、 ρ は各々円振動数、質量密度であり、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{b}$ は各々変位、物体力ベクトルである。変位 $\mathbf{u}$ は、面内問題の場合には、

$$Hu = Gp + u^i \quad \dots (9)$$

のように表現される。ここに、 H 、 G は各々表面力、変位の基本解によって構成されるマトリックスであり、 u 、 p 、 u^i は各々節点変位、表面力、入反射波場変位ベクトルである。(9)式を p について解き、さらに表面力から等価節点力への変換マトリックス D を乗ずることによって、BEM領域の剛性方程式は次式となる。

$$K^B u^B = f^B + f^{iB} \quad \dots (10)$$

ここに

$$K^B = DG^{-1}H \quad f^B = Dp \quad f^{iB} = DG^{-1}u^i \quad \dots (11)$$

であり、 K^B はBEM部分の動的剛性マトリックス、 f^B 、 f^{iB} は各々表面力、入反射波場変位による等価節点力ベクトルである。また、上添字 B はBEM領域を示す。FEM領域とBEM領域の連続条件

$$u_C^F = u_C^B \quad f_C^F + f_C^B = 0 \quad \dots (12)$$

を用いて、(8)、(10)式を結合することにより、以下のようなFEM形式の全体系方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} K_{FF}^F & K_{FC}^F & 0 \\ K_{CF}^F & K_{CC}^F + K_{CC}^B & K_{CB}^B \\ 0 & K_{BC}^B & K_{BB}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_F \\ u_C \\ u_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_F \\ f_C \\ f_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ f_C^{iB} \\ f_B^{iB} \end{bmatrix} \quad (13)$$

上式において、下添字 F 、 C 、 B は各々FEM領域、FEMとBEMとの境界、BEM領域を示す。

なお、本論では(9)式中の H 、 G を求めるのに必要となる基本解として2次元半無限地盤のグリーン関数を用いている。これらをAppendixに示す。

2.2 既往の解との検証

図-2に示す半円筒谷モデルに各々SH、SV、P波が鉛直下方から入射した場合の地表面変位分布を既往の解と比較する。解析モデルは、FEM領域を160要素、BEM境界を40線形要素に分割している。なお、無次元振動数を $\eta = 2a/L$ (a : 半円筒谷の半径、 L : S波波長)とし、 $\eta = 0.5$ における変位分布を入射波の変位振幅で基準化して示す。図-3(a)にSH波入射時の結果を固有関数展開法によるTrifunacの解¹⁶⁾と共に示す。また、図-3(b)、(c)に各々、ポアソン比 $1/3$ とした場合のSV、P波入射時の変位分布を積分方程式法によるWongの解¹⁷⁾と比較して示す。これらの結果は既往の解と良く一致しており、本解析法の解の妥当性が確かめられた。

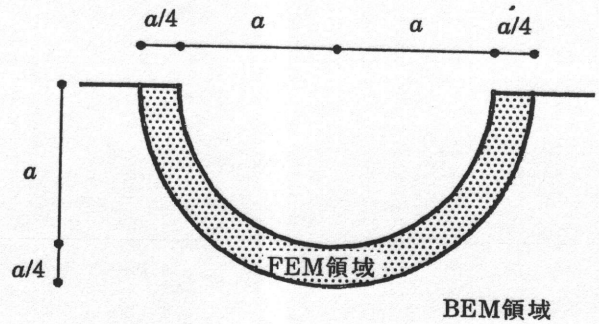
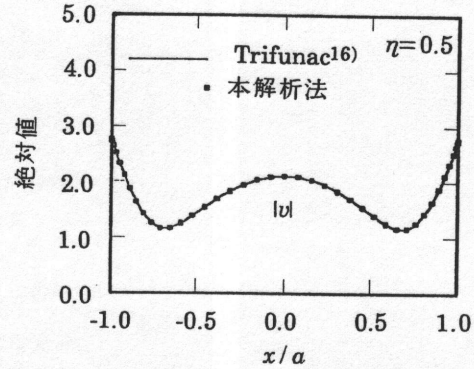
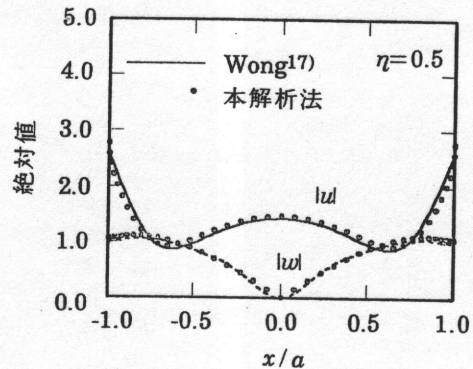


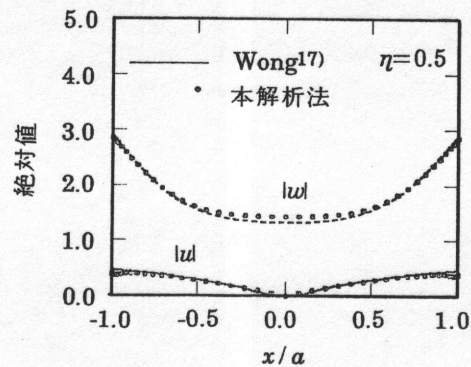
図-2 検証モデル



(a) SH波



(b) SV波



(c) P波

図-3 既往の解との検証

3. 地震観測

地震観測¹⁵⁾が実施されたのは、神奈川県藤沢市の海岸砂州による溺れ谷閉塞の典型的な軟弱地盤であり、河川による後背湿地である。当該地盤の地盤概要ならびに地震計配置を図-4に示す。図中、▼位置における土質調査試験結果を図-5に示す。表層は層厚約22m、N値0の非常に軟弱な腐食土およびシルトの互層で、S波速度40~65m/secの沖積層である。一方、基盤はN値50以上の粘土および細砂からなるS波速度400m/secの洪積層である。

設置された地震計はサーボ型加速度計であり、図-4(●印)に示すように、地表に1台(GS-1)、基盤に4台(GB-1~GB-4)配置されている。GS-1とGB-1とは同一鉛直線上に位置しており、GB-1~GB-3は平面上の3点で構成されるアレーとなっている。各観測点では、水平2方向(図-4の断面に沿う方向およびこれに直交する方向の2方向であり、以後各々面内、面外方向とよぶ)および上下方向の3成分の加速度記録が得られる。

今回解析に用いた地震記録は1983年8月8日に発生した神奈川県西部地震であり、マグニチュード6.0、震央距離42km、震源深さ20kmである。なお、本地震は観測地震中最大加速度を示したものである。図-6に震源位置と観測地点の位置関係を示す。

以後の解析で用いるGB-1とGS-1の加速度記録を各々図-7、図-8に、両記録の最大加速度値を表-1に示す。

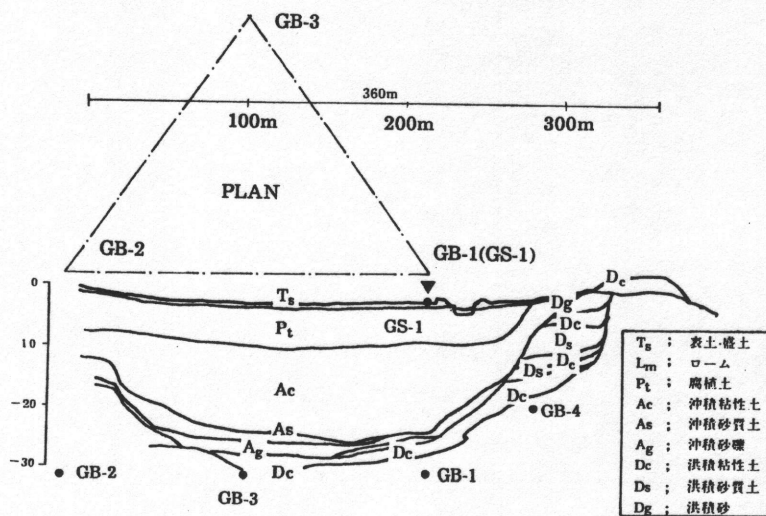


図-4 観測地盤の断面図と地震計設置位置 (A-A' 断面)

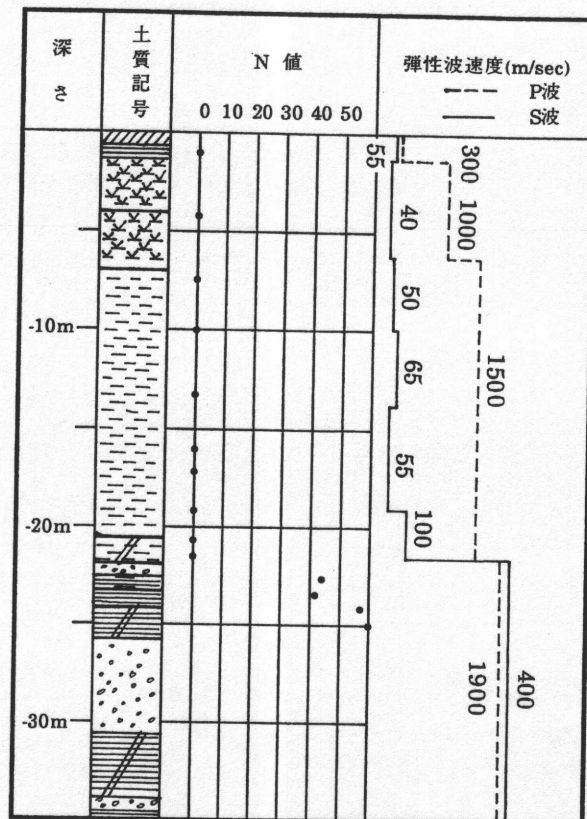


図-5 土質調査試験結果

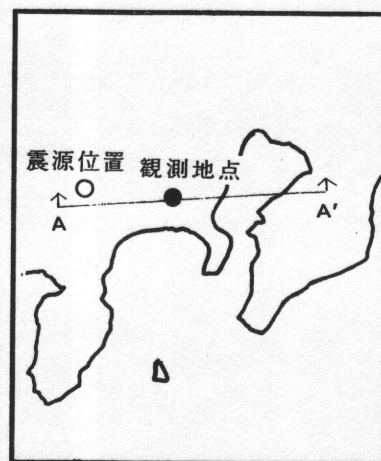


図-6 震源位置と観測地点

表-1 最大加速度(Gal.)

方向成分	GB-1	GS-1
面内水平	33.1	113.5
面外水平	38.5	91.6
上下	14.1	29.1

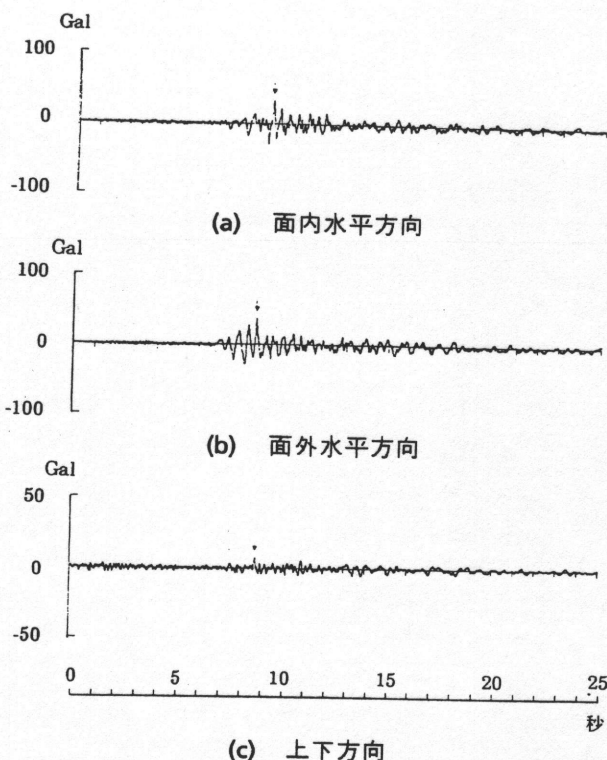


図-7 基盤位置(GB-1)の加速度記録

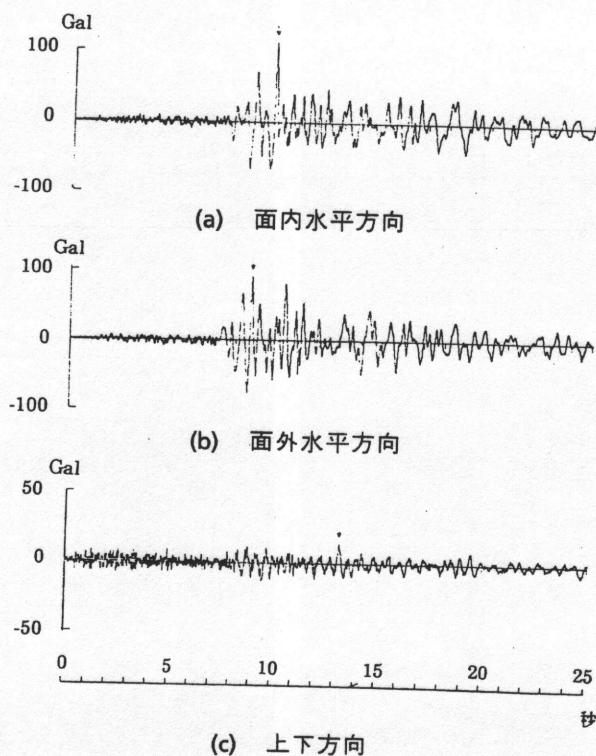


図-8 地表面上(GS-1)の加速度記録

4. シミュレーション結果と考察

4.1 解析条件

解析には図-9に示すようなモデルを用いる。沖積谷部分はFEMにより、周囲の洪積地盤はBEMによりモデル化する。沖積谷部分は地盤定数の若干異なる数層より構成されているが、S波速度 c_s に着目して2層構造を仮定する。また、洪積地盤は半無限一様地盤とする。これら3種類の地盤定数は、図-5に示したボーリングの結果を参考にして設定した。その地盤定数を表-2にまとめておく。

沖積谷の境界は地盤調査結果にできるだけ忠実に

モデル化した。ほぼ左右対称と考えられるため対称性を仮定した。メッシュサイズは解析精度に影響するが、今回は対象とする振動数範囲を0~3Hzとして最小波長の1/4を目安にメッシュ分割を行った。

本来、実記録の面外水平、面内水平、上下各成分は、地震波動伝播の3次元挙動の集積としてとらえなければならない。しかし、当該地盤は面外方向にはほぼ同一性状と見なし得るので、面外水平成分は2次元面外問題における鉛直SH波入射によるものと考え、面内水平、上下各成分は2次元面内問題における鉛直P+SV波入射に対応するものとして、以後の解析を行った。

表-2 地盤定数

	I	II	III
c_s (m/s)	43	65	400
c_p (m/s)	1000	1500	1900
γ (t/m ³)	1.13	1.40	1.80
h (%)	7	5	3

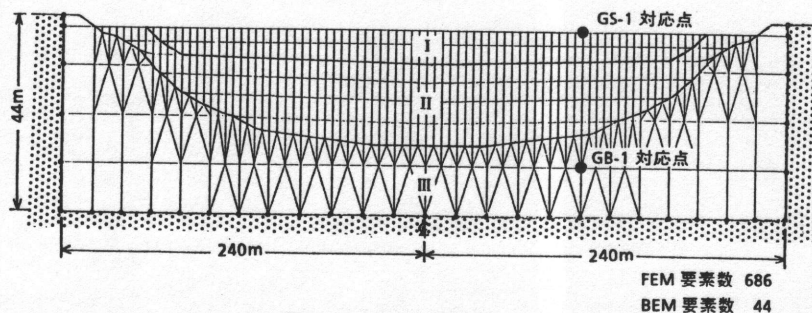


図-9 解析モデル

4.2 伝達特性と地表面変位分布

(i) 伝達特性

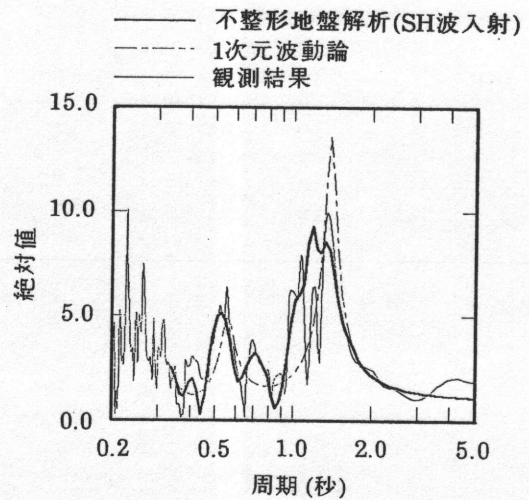
図-7、8に示した観測波形から求めた基盤GB-1と地表GS-1間の伝達関数(ハミングウィンドウによりフーリエスペクトルを平滑化)と、不整形地盤解析によって得られた伝達関数の比較を、各成分ごとに図-10に示す。その際、観測点直下の沖積層の厚さを用いた1次元成層仮定による結果も併せて示す。なお、以後の解析では、GB-1の観測波形の面外水平、面内水平、上下各成分はそれぞれSH波、SV波、P波によるものと仮定した。

図-10 (a) に面外水平成分の伝達関数を示す。観測波形の伝達関数を見ると、1.4秒、0.55秒付近は観測点直下の成層性を仮定した場合の各々1次、3次の卓越周期に対応している。これは、基盤の傾斜が緩やかであることによる。しかし、その他の1.0秒、0.7秒、0.4秒付近のピークは、地盤の不整形性に起因するものと考えられる。不整形地盤解析による結果は、周期特性、振幅レベルともにこのような観測記録を良く表現している。

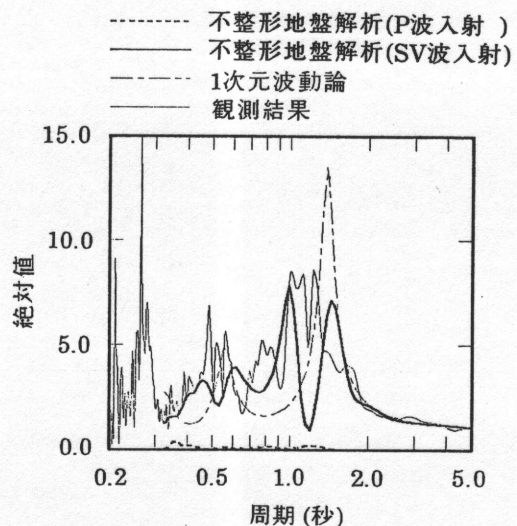
図-10 (b) は、面内水平成分の伝達関数である。観測記録による結果は、面外水平成分と異なり、1.0秒から2.0秒にかけてピークが広がっており、特に1.1秒付近のピークは、地盤の不整形性のために生じたものと考えられる。不整形地盤解析の結果は、1次元成層仮定では表現できないこのピークを良くとらえている。また、不整形地盤解析ではP波入射による水平成分はほとんど生じないことがわかる。

図-10 (c) は、上下成分の伝達関数である。P波入射の場合、1次の卓越周期がかなり短周期(約0.1秒)であるために、1次元成層仮定と不整形地盤解析による結果は一致しており、ほぼ1の値である。また、不整形地盤解析ではSV波により上下動がかなり大きく励起されることがわかる。従って、観測記録における増幅特性にはSV波による寄与も大きく影響しているものと考えられる。

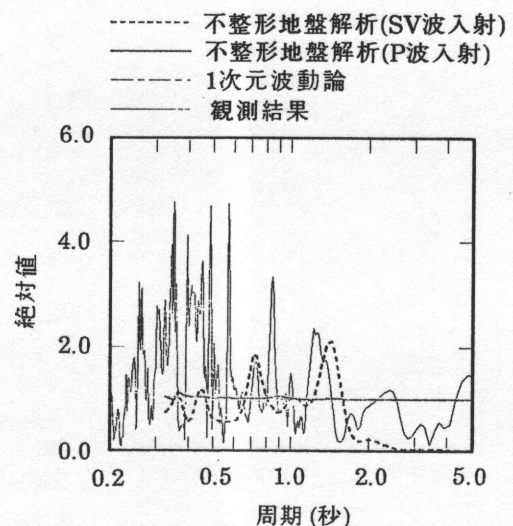
面内水平、上下成分が面外水平成分に比べて観測記録との整合性において若干差がみられるのは、SH波に比べてかなり複雑な反射、屈折を伴うSV、P波の挙動を、一断面内における鉛直下方入射のみで表現したためであると考えられる。



(a) 面外水平成分



(b) 面内水平成分



(c) 上下成分

図-10 GS-1とGB-1との伝達関数

(ii) 地表面変位分布

伝達関数に表れている不整形性の影響をより明確に把握するため、特定の周期における地表面変位分布について考察する。

図-11にSH波入射時の地表面変位分布(入射振幅に対する応答振幅倍率)を示す。周期は1.0秒と0.5秒とした。また、観測点直下の地盤構成による1次元成層仮定の結果も併せて示す。図より、地表面上で変位は激しく変動しており、わずかな位置の差が大きな増幅率の差となって表れてくることがわかる。この沖積谷地盤の重要な性質は、反射・屈折を繰り返す波が相互に干渉して生ずるものと考えられ^{1)・7)}、1次元成層仮定では全く表現できていない。

図-12にはP波およびSV波入射時の地表面変位分布を水平動・上下動について示した。周期はSH波の場合と同じく1.0秒と0.5秒である。P波入射時には不整形性の影響はほとんど表れていない。一方、SV波入射時にはSH波と同様大きな変動が生じており、かなりの量の上下動が発生することがわかる。1次元成層仮定の結果とはやはり大きく異なっている。

SH波入射とSV波入射とを比較すると、SH波の方が変動が激しく、応答倍率も大きい傾向にある。これは、SV波入射時には反射・屈折の時にP波・SV波に波動エネルギーが分散されるためと考えられる。

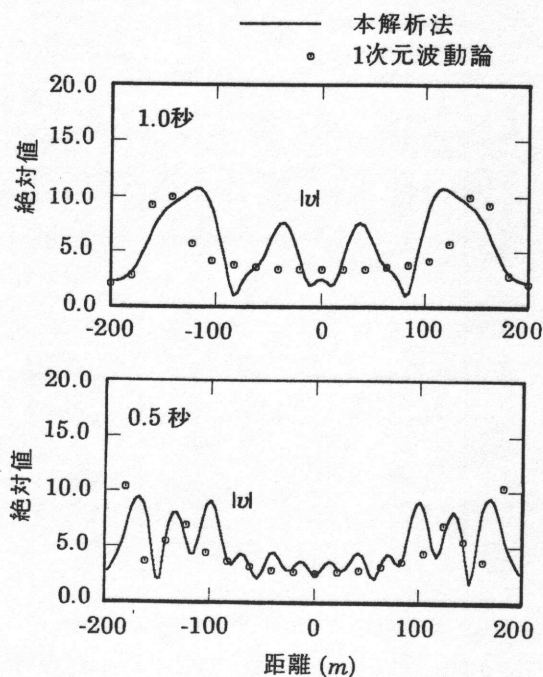
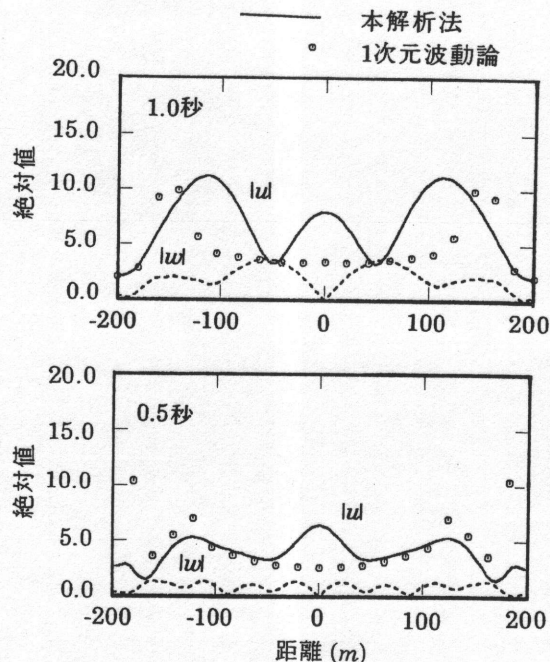
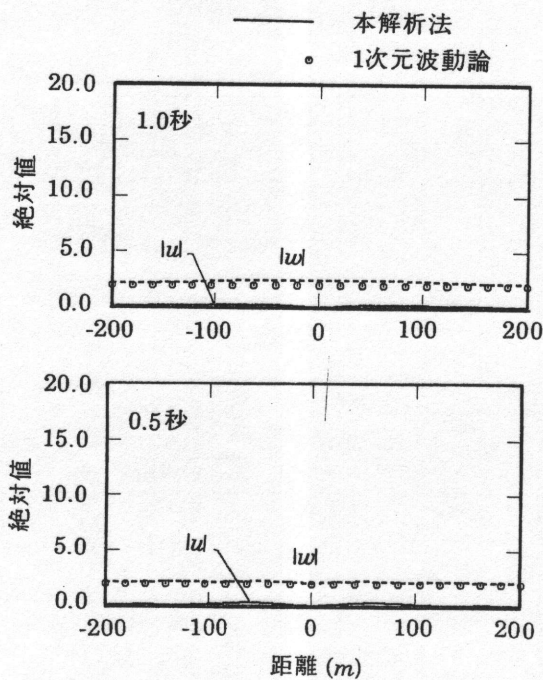


図-11 SH波入射時の地表面変位分布



(a) SV波入射



(b) P波入射

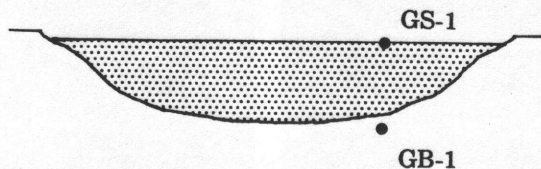


図-12 SV、P波入射時の地表面変位分布

4.3 地震応答解析

前節で求められたGS-1とGB-1間の伝達関数およびGB-1の加速度記録を用いて、GS-1の応答波形を求め、観測記録と比較する。3Hzまでの伝達関数を用いているので、比較する観測記録も0~3Hzのフィルターを通した結果を示す。

(i) SH波が入射する場合

図-13に面外水平成分の加速度波形を示す。(a)は観測点位置の地盤定数を用いたSH波入射時の1次元波動論による結果、(b)は不整形地盤解析による結果である。両者は概ね対応しているものの、主要動部分で不整形地盤解析による応答値の方が観測記録に近く、主要動以降の位相もよく対応していることが認められる。これは、図-10(a)において0.4~0.5秒、1.0~1.5秒部分の観測記録の伝達関数との対応が良いことによる。

図-14にフーリエスペクトルを示す。不整形地盤解析と観測結果とは非常によく一致している。

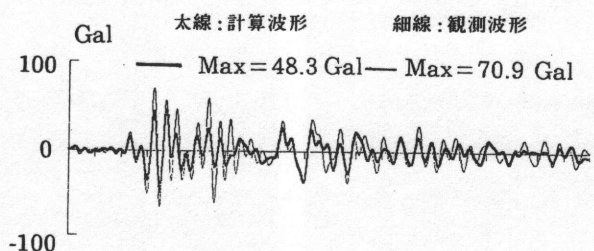
(ii) P+SV波が入射する場合

図-15、図-16に面内水平、上下成分の加速度波形を示す。(a)はSV波、P波入射時の1次元波動論による結果、(b)~(d)は不整形地盤解析による結果である。(b)はSV波が、(c)はP波が入射した時、(d)は両者を合成したものである。面内水平動については、SV波入射による成分がほとんどであり、P波入射によるものは非常に少ない。その結果、1次元波動論も比較的よく対応している。しかし、最大加速度が小さく、主要動以降で位相が観測記録とずれており、不整形地盤解析の方が観測結果によく一致している。一方、上下動では、P波のみならずSV波入射による成分も大きいので、1次元波動論でこの現象を表現することは不可能であり、沖積谷を考慮した解析が必要となる。不整形地盤解析では位相のずれはあるものの振幅レベルをよく再現している。以上のような結果は、沖積谷に伴う波の反射、屈折、Rayleigh波の発生等に起因するものと考えられる。

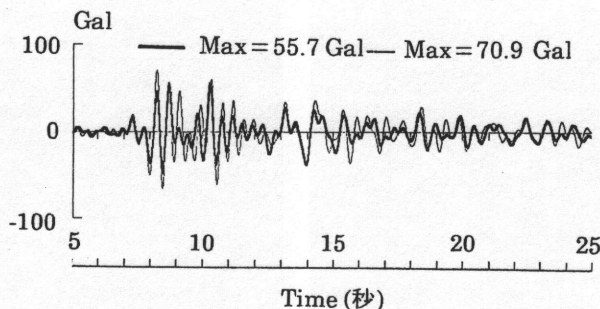
図-17、図-18に面内水平、上下成分の加速度波形のフーリエスペクトルを示す。いずれもP波入射時とSV波入射時との応答波形を合成した結果を用いている。水平成分については観測値の定性的傾向をよく表している。

5. 結論

以上、地震観測データをもとにBEMとFEMの結合解法によって半橋岡沖積谷地盤のシミュレーションを試み、観測記録と良く一致した結果が得られた。そして、SV波入射時に上下動がかなり励起されること等、地盤の不整形性に起因して生ずる現象が認められた。また、このような不整形性があまり強くない地盤の伝達特性は、1次元波動理論によりその基本的性状は模擬できるが、詳細な性状の把握には本解析で用いたような地盤の不整形性を考慮した解析が必要であることが確かめられた。



(a) SH波入射時の応答波形 (1次元波動論)



(b) SH波入射時の応答波形 (不整形地盤解析)

図-13 GS-1面外水平成分応答波形

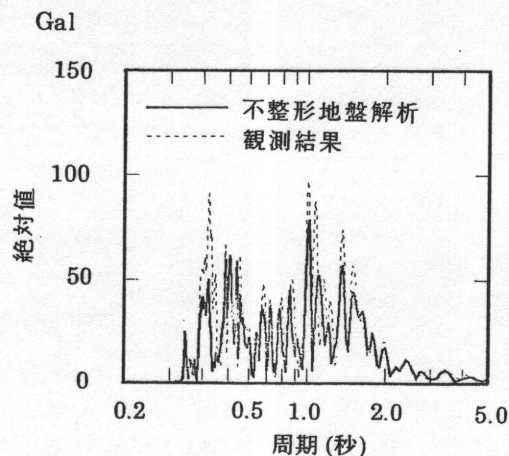
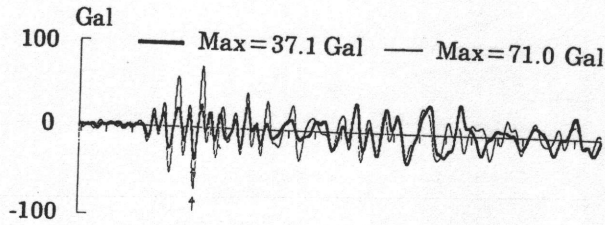


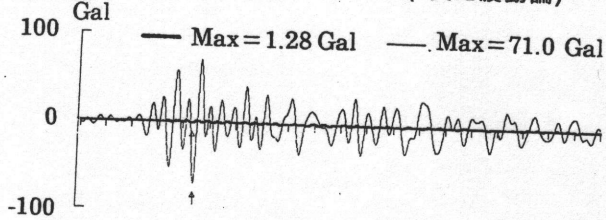
図-14 面外水平応答波形のフーリエスペクトル

太線：計算波形

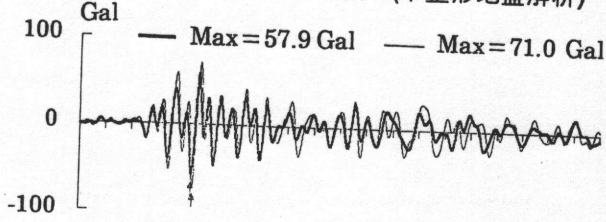
細線：観測波形



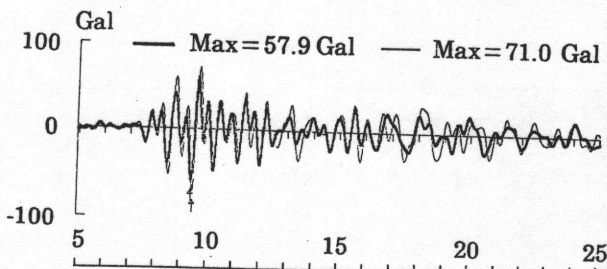
(a) SV波入射時の応答波形 (1次元波動論)



(b) SV波入射時の応答波形 (不整形地盤解析)



(c) P波入射時の応答波形 (不整形地盤解析)

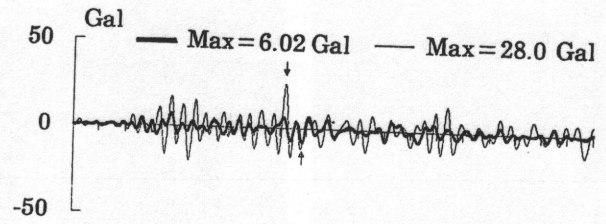


(d) P+SV波入射時の応答波形 (不整形地盤解析)

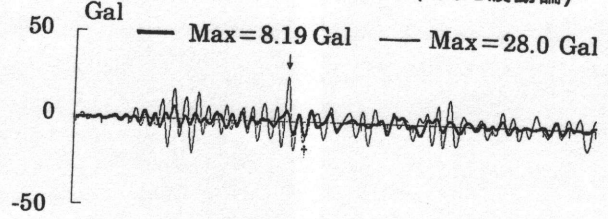
図-15 GS-1面内水平成分応答波形

太線：計算波形

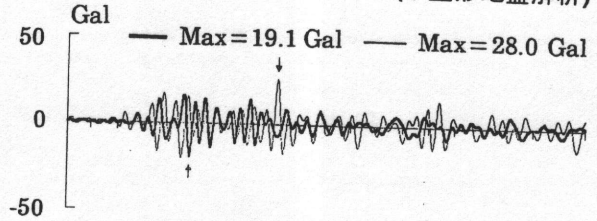
細線：観測波形



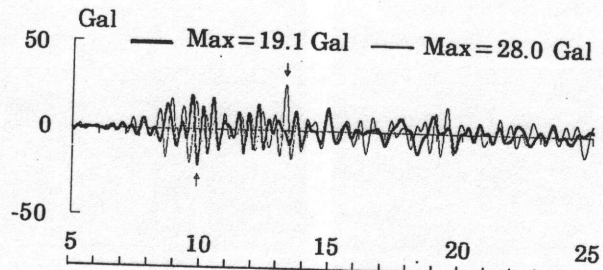
(a) P波入射時の応答波形 (1次元波動論)



(b) SV波入射時の応答波形 (不整形地盤解析)



(c) P波入射時の応答波形 (不整形地盤解析)



(d) P+SV波入射時の応答波形 (不整形地盤解析)

図-16 GS-1上下成分応答波形

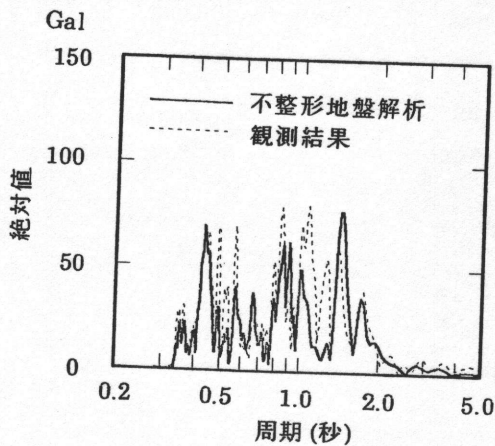


図-17 面内水平応答波形のフーリエスペクトル

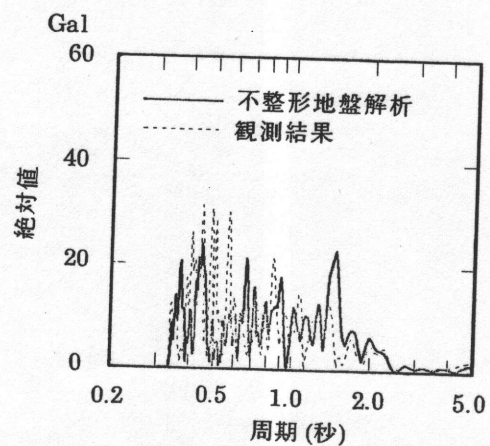


図-18 上下応答波形のフーリエスペクトル

謝 辞

本研究に当たり、観測資料の御協力を頂いた藤沢市建設局 西野康雄氏をはじめ、清水建設(株) 田蔵隆・清水勝美・大槻明の各氏に感謝の意を表します。

APPENDIX 2次元半無限地盤のグリーン関数

鉛直下方を z の正方向とし、地表面を $z=0$ 、加振位置を $(x,z)=(0,f)$ とする。平面歪面内問題の半無限地盤のグリーン関数は、

$$u = \frac{1}{\mu k^2} \left[\int_0^\infty \frac{1}{\pi F_H(\xi)} \left[-P \frac{\xi^2}{a} \left\{ (2\xi^2 - k^2)e^{-a\xi} - 2\alpha\beta e^{-\beta\xi} \right\} \right. \right. \\ \left. \left\{ (2\xi^2 - k^2)e^{-a\xi} - 2\alpha\beta e^{-\beta\xi} \right\} \cos \xi x + Q \xi \left\{ -2\xi^2 e^{-a\xi} + \right. \right. \\ \left. \left. (2\xi^2 - k^2)e^{-\beta\xi} \right\} \left\{ 2\alpha\beta e^{-a\xi} - (2\xi^2 - k^2)e^{-\beta\xi} \right\} \sin \xi x \right] d\xi \\ + \frac{i}{4} \left[\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(H_0^{(2)}(hr_1) + H_0^{(2)}(hr_2) \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(H_0^{(2)}(kr_1) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. H_0^{(2)}(kr_2) \right) \right\} P + \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left\{ \left(H_0^{(2)}(hr_1) + H_0^{(2)}(hr_2) \right) \right. \\ \left. \left. - \left(H_0^{(2)}(kr_1) + H_0^{(2)}(kr_2) \right) \right\} Q \right] \right] \quad (\text{付.1})$$

$$w = \frac{1}{\mu k^2} \left[\int_0^\infty \frac{1}{\pi F_H(\xi)} \left[P \frac{\xi^2}{a} \left\{ (2\xi^2 - k^2)e^{-a\xi} - 2\xi^2 e^{-\beta\xi} \right\} \right. \right. \\ \left. \left\{ (2\xi^2 - k^2)e^{-a\xi} - 2\alpha\beta e^{-\beta\xi} \right\} \sin \xi x + Q \left\{ 2\alpha\beta e^{-a\xi} + \right. \right. \\ \left. \left. (2\xi^2 - k^2)e^{-\beta\xi} \right\} \left\{ 2\alpha\beta e^{-a\xi} - (2\xi^2 - k^2)e^{-\beta\xi} \right\} \cos \xi x \right] d\xi \\ + \frac{i}{4} \left[\frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left\{ \left(H_0^{(2)}(hr_1) + H_0^{(2)}(hr_2) \right) - \left(H_0^{(2)}(kr_1) \right. \right. \right. \\ \left. \left. + H_0^{(2)}(kr_2) \right) \right\} P + \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(H_0^{(2)}(hr_1) + H_0^{(2)}(hr_2) \right) \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(H_0^{(2)}(kr_1) + H_0^{(2)}(kr_2) \right) \right\} Q \right] \right] \quad (\text{付.2})$$

となる。ここに、 (P,Q) は (x,z) 方向加振力である。

一方、平面歪面外問題の半無限地盤のグリーン関数は、 y 方向加振力を R とすると

$$v = -\frac{i}{4\mu} \left(H_0^{(2)}(kr_1) + H_0^{(2)}(kr_2) \right) R \quad (\text{付.3})$$

と表される。ここに、

$$h = \omega/c_p \quad k = \omega/c_s \\ \alpha = \sqrt{\xi^2 - h^2} \quad \beta = \sqrt{\xi^2 - k^2} \\ r_1 = \sqrt{x^2 + (z-f)^2} \quad r_2 = \sqrt{x^2 + (z+f)^2} \\ F_H(\xi) = (2\xi^2 - \beta^2)^2 - 4\alpha\beta\xi^2 \quad (\text{付.4})$$

参考文献

- 1) Trifunac, M.D. (1971), " Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves ", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.61, 1955-1970
- 2) Wong, H. L. and M. D. Trifunac (1974), " Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves ", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.64, 1389-1403
- 3) 小堀鐸二・篠崎祐三 (1977), " 不整形地盤の振動特性 ", 地震, 第2輯, 第30巻, 127-142
- 4) Sanchez-Sesma, F. J. and J. A. Esquivel (1974), " Ground motion on alluvial valley under the incident plane SH waves ", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.69, 1107-1120
- 5) 小堀鐸二他 (1981), " P波およびSV波入射による不整形地盤一構造物系の振動特性 ", 日本建築学会大会梗概集, 681-682
- 6) Dravinski, M. (1982), " Scattering of elastic waves by an alluvial valley ", J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.EM108, 19-31
- 7) 篠崎祐三 (1983), " 不整形地盤域にある構造物の振動性状に関する研究 ", 京都大学博士論文
- 8) Kawase, H. et al. (1982), " Dynamic Response of a structure on a layered medium ", 6th Japan Earth.Eng.Sympo., 1641-1648
- 9) Ohtsuki, A. and K. Harumi (1983), " Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves ", Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.11, 441-462
- 10) Wong, H. L. and P.C. Jennings (1975), " Effects of canyon topography on strong ground motion ", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.65, 1239-1257
- 11) 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, 第2輯, 第35巻, 259-281
- 12) 富樫豊・横井薫 (1982), " 不整形地盤の振動特性 ", 第6回日本地震工学シンポジウム, 673-680
- 13) 須原淳二他 (1983), " 複雑な地盤構造を考慮した原子炉建屋の応答性状に関する検討 ", 日本建築学会大会梗概集, 1577-1582
- 14) 佐藤俊明他 (1984), " BEMとFEMの結合解法による不整形地盤の動特性に関する検討 ", 日本建築学会大会梗概集, 665-668
- 15) 田蔵隆他 (1983), " 基盤の深さが大きく変化する地盤の震動特性について ", 第18回土質工学研究発表会, 657-660
- 16) Trifunac, M.D. (1973), " Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon ", Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.1, 267-281
- 17) Wong, H. L. (1979), " Diffraction of P,SV, and Rayleigh waves by surface topographies ", Report No.CE79-05, USC