2021.11.20

大飯原発の PS 検層結果による地盤震動特性

－細かなばらつきの不均質の影響について－

赤松 純平

本稿は「大飯発電所の敷地地下構造の不整形性について －関西電力の準備書面(27)の内容に関連して－」[1] の「2. 寸法効果について」の内容を補充するものである。

大飯原発の O1-3 孔および O1-11 孔の PS 検層結果で明らかになった速度の低下について、関電は「**一般的に，不均質性のスケールが地震波の波長の大きさよりも十分に小さい場合には，不均質性を含む媒質全体を等価な均質媒質とみなすことができると考えられているため，地震波の波長の大きさと比較すれば，サスペンション法で把握される細かなばらつきが地震波の増幅に大きな影響を与えないことは明らかである** [[2]、24 頁]」と定性的な主張をして、PS 検層結果を無視している。本稿では、低速度の地層による増幅効果をモデル計算で例示し、次いで、PS 検層結果による速度構造の増幅特性を示して、上記の主張が誤りであることを証し、関電の基準地震動計算用の地盤モデルでは基準地震動が過小に評価されることを明らかにする。なお、図・表、註は末尾に纏めて掲載する（図：8 頁～、表：17 頁～、註：19 頁～）。

1. 低速度の地層による地盤震動特性

S 波（鉛直入射）に対する震動特性を、半無限の基盤に低速度の層が 1 層、表面にある場合と内部にある場合、および両方にある場合についてモデル計算をする。関電の地盤モデル[[3]、57 頁]は第 1 層の S 波速度（Vs）を 2.2km/s としているので、モデルの速度値は、基盤は 2.2km/s、低速度層は 1.6、1.8、2.0km/s とする。振幅の増減はインピーダンス（速度×密度 ρ）の比による。密度は、基盤は関電地盤モデルの 2.7g/cm^3、低速度層は関電が用いている下記の換算式[[4]、31 頁]によって与えた。地盤による増幅率は自由表面の効果により全ての周波数で入射波の 2 倍になるが、結果の表示は層がない場合との比較で示す。

$$Vp\ (km/s) = 1.29 + 1.11 \times Vs\ (km/s)$$
$$\rho\ (g/cm^3) = 1.2475 + 0.399 \times Vp - 0.026 \times Vp^2\ (km/s)$$

1.1 低速度層が表面にある場合

層の厚さ（H）が 10m、20m、60m の場合の増幅の周波数特性を、図 1～3（8 頁）に示す。また表 1（17 頁）にピークの周波数とピークにおける増幅倍率を示す。

表 1 に示されるように、S 波速度が 1.6、1.8、2.0km/s の層による増幅のピークの周波数は、厚さ 10m では 40、45、50Hz、厚さ 20m では 20，22.5，25Hz、厚さ 60m では 6.67、7.5、8.33Hz であり、1/4 波長則[[5]、98 頁]で推定される値に等しい。厚さ 60m の場合は、高次の重複反射によるピークが 1 次のピークの周波数の 3、5、7 倍の周波数に現われている。ピークでの増幅倍率はそれぞれ 1.66、1.45、1.27 倍であり、基盤と低速度層のインピーダンス比の逆数である。ピーク位置だけでなく、周波数特性については 1.4 節で詳述する。

1.2 低速度層が地中にある場合

図 4（9 頁）～図 8（10 頁）に、厚さ 10m の低速度層が、次の深さにある場合の増幅特性を示す：図 4：深さ 10～20m、図 5：深さ 20～30m、図 6：深さ 50～60m、図 7：深さ 75～85m、図 8：深さ 100～110m。いずれの場合も数 Hz～十数 Hz に増幅の山があり、高周波数域に向かって増減をくり返して高次のピークが現われる。高次のピークの方が増幅は大きい。表 2（18 頁）にピークの周波数と増幅倍率を纏めた。

1.3 低速度層が表面と地中とにある場合

図 9（11 頁）に、厚さ 10m の低速度層が、表面と深さ 20～30m にある場合の増幅特性を示す。図 1 と図 5 に示した構造が重なったモデルである。表 3（17 頁）にピークの周波数とピークにおける増幅倍率を示す。低速度層が表面と地中にある場合のそれぞれの増幅特性が重なり、地中にある場合の 20～40Hz に見られた大きな谷（図 5）が消滅し、40～50Hz の高次のピークが大幅に増大している。

1.4 低速度層による地盤震動特性についての考察

(1) 表層が低速度である場合

各モデルについての計算結果は、弾性波動論に基づく厳密解である。表面に低速度層がある場合、増幅特性はよく知られた多重反射による 1/4 波長則で近似できる。

低速度層の厚さと波長の関係を、ピークの位置だけではなく、ピークに至る周波数特性によって検討する。図 1（8 頁）に示された厚さ 10m、Vs=1.6km/s の低速度層が表面にある場合を例に挙げると、周波数 40Hz すなわち波長が 40m（1.6km÷40Hz）で多重反射が生じて、振幅は 66%増加する（表 1、1.66 倍）。この半分の 33%の増加は周波数が 24.7Hz、すなわち波長が約 65m で生じる。また 10%の増加は 14.0Hz、波長約 114m で生じる。波長が、低速度層の厚さの 6.5 倍で 33%増加、11.4 倍で 10%の増加である。地表面にある低速度層は、厚さが波長の 1/10 程度であっても、10%以上の看過出来ない増幅作用を有するのである。

さらに、低速度層による増幅効果は広い周波数範囲に及ぶことに注意する必要がある。例えば、表層 20m が Vs=1.6km/s の低速度である場合（図 2）、ピーク（20Hz）では 1.66 倍であるが、10～30Hz の範囲で 1.2 倍を超える。

図 3 に示されるように、低速度層の厚さが増加すると、高次の重複反射による増幅のピークが、基準地震動の評価対象である 50Hz 未満の周波数帯域に多数現われてくるにも注意する必要がある。

(2) 低速度層が地中にある場合

低速度層が地中にある場合、低速度層内での多重反射と表面からの反射波とが干渉するため、震動特性はやや複雑である。低速度の層が深くなるほど、ピークは低周波数に移行する。図 10（11 頁）に低速度層の下面の深さとピークを生じる波の波長との関係を示す。波長は基盤の速度 2200m/s をピークの周波数で除した値である。ピークの周波数は Vs=1.6km/s の場合を用いた。図から、ピーク周波数の波長と低速度層下面の深さは比例関係にあることが分る。図 10 左図の点線はデータの回帰直線であり、

$$[\text{波長(m)}] = (0.026 \pm 2.142) + (6.212 \pm 0.031) \times [\text{低速度層下面深さ(m)}]$$

で表される。このようなモデルでは、第 1 のピークは、表面から下面深さまでの長さの約 6.2 倍の波長で生じる。

次に、増幅特性について検討する。第 1 のピークの増幅は低速度層が深くなるほど、減少する。低速度層下面の深さが 20，30，60，85，110m の場合の増幅は、1.38，1.25，1.12，1.06，1.06 倍である。しかし、深くなるほど高次のピークが現われ、それによる増幅が顕著になる。図 11（11 頁）に、25Hz 未満と 25Hz 以上の周波数域に分けて、それぞれの増幅率を増加割合（%）で示した。25Hz 未満の周波数帯域では、20～50%の増加率、また 25Hz 以上の帯域では 40～60%の増加率である。低速度層が深部にある場合、高周波域の増幅が特に大きくなることに注意する必要がある。

2. 関電の地盤モデルに低速度層がある場合の地盤震動特性

関電の地盤モデルは深さ 3km に地震基盤を想定し、11 層の速度層からなる。その第 1 層（厚さ 180m、Vs=2.2km/s）の上部に、厚さ 10m、Vs=1.6km/s の低速度層を挿入し、地震基盤から S 波が鉛直に入射する場合の地盤震動特性を検討する。減衰定数は関電が用いている 3%とする[[3]、57 頁]。低速度層の深さは、図 12（12 頁）: 0～10m（地表）、図 13 : 10～20m、図 14 : 20～30m、図 15 : 50～60m であり、それぞれ図 1、図 4、図 5、図 6 のモデルに対応する。各図の左図は関電モデルと低速度層モデルの増幅特性、右図は関電モデルに対する低速度層モデルの増幅倍率である。低速度層の深さによって異なるが、10Hz 程度より高い周波数域で、関電モデルに比べ 20～50%増加している。当然のことであるが、これらの特性は、図 1 、図 4～6 で示される対応する基盤+ 1 低速度層モデルの増幅特性によく似ている。

低速度層による増幅効果は層の厚さによって変化する。関電は、岩盤等級の区分において、標高 0～-50m は 3m、-50～-150m は 5m、-150m 以深は 10m を基準として

支配的な岩級区分を設定している[[6]、9 頁]。CH 級に比べて脆弱な CM 級が基準の厚さ以上であればその領域を CM 級と考えているようである。速度の小さい CM 級の地層が 3m あるいは 5m である場合を想定して、①厚さ 3m の層が深さ 10～13m、②同じく 3m の層が 20～23m にある場合の震動特性を図 16、17（14 頁）に、また③厚さ 5m の層が深さ 50m にある場合の結果を図 18 に示す。

①の場合（図 16)、18～34Hz で 11%以上、最大 15%の増加、
②の場合（図 17)、10～20Hz で 6%以上、最大 8%の増加、
③の場合（図 18)、第 1 のピークでは 5～8Hz で 5%程度であり、20～30Hz と 40Hz 以上の帯域で、高次のピークにより最大 20%の増加である。

厚さの薄い低速度層であっても、それの深さによってはその増幅特性は無視できないことが分る。

3. PS 検層結果に基づいた速度構造の地盤震動特性

図 19（15 頁）は関電が実施した PS 検層の S 波速度の分析結果である[[7]、3 頁、図 2]。フローティング法で測定されており、原図では深さ 1m 間隔の値が点で示されている[[3]、12 頁]。図の点線は標高 0～-150m の全体のトレンドである。全体の傾向は、O1-3 孔では深さと共に増加し、O1-11 孔は殆ど一定である。曲線(緑および茶色)は、深さ 6m 幅(測定値 7 点)の移動平均値である。凹凸があって速度が深さ方向に変化する様子が明瞭である。この曲線と全体のトレンド（点線）の交差する深さを境界とする区間の算術平均値を折れ線(黒)で示し、速度値を付した。この折れ線は、全体の傾向より速度の大きい区間、小さい区間を示す。両孔とも、測定値では速度の増減が明瞭ではないが、平均値では数 m～数十m区間で深部の速度が低下していることが分る。関電の地盤モデルに PS 検層の実測値を追加し、速度の低下が震動特性に及ぼす影響を検討する。

2 章で述べたように、関電の第 1 層は厚さ 180m、Vs=2.2km/s である。その上部約 150m を、PS 検層の S 波速度を有する厚さ 1m の約 150 枚の速度層に置き換える。各層の減衰定数は関電モデルと同じ 3%、また密度は関電の換算式（1 頁）によって与えた。計算結果の地盤増幅特性を図 20（15 頁）に、関電地盤モデルに対する増幅倍率を図 21 に示す。

O1-3 孔では、関電モデルに対して、8Hz を中心に約 1.7 倍以上、20～25Hz で 2.3 倍に達する増加率である。図 3 に示したモデル計算から明らかなように、O1-3 孔モデルの増幅特性は、標高 0～-60m が低速度であることの影響と考えられる。8Hz のピークが厚さ 60m の層の重複反射によるとすると、層の平均速度は 1,920m（1/4 波長則より、8Hz×4×60m）となる。また 20～25Hz の第 2 のピークは、第 1 のピーク 8Hz の 3 倍であるので、60m 層による高次の重複反射の影響と考えられる。

O1-11 孔では、3～4Hz で約 1.1 倍、12Hz 付近で約 1.2 倍、さらに 20Hz 以上の周波数域で 1.5～2.6 倍の増加率である。低周波数域での増加が小さく、高周波数域に向かって大きく増減する傾向は、図 6～8 や図 15 の地中に低速度層のあるモデルの計算結果に類似しており、標高-60m 以深の低速度区間の影響を反映したと考えられる。

関電は、調査結果を評価する際の一般的留意事項として寸法効果（スケール・ファクター）を挙げ[2、19 頁]、「**S 波速度 2.2km/s 程度の岩盤の中で弾性波速度の数値に若干のばらつきが認められるが，当該地盤を周波数 10Hz の地震波が通過する場合には，地震波の 1 波長は約 220m となる（丙 339，10 頁）。仮に当該地盤の中に数m程度の規模で低速度部分が存在したとしても 1 波長約 220m に対して僅かな規模の低速度部分に過ぎないため，かかる低速度部分が地震波の増幅に与える影響は極めて小さいものとなる**[[2]、20 頁]」と述べて、一般的な留意事項から大飯サイトの PS 検層結果を否定しようとしている。しかし、これは物理現象を正しく理解していない意見である。1.4 節に詳述したように、定量的な評価では、不均質の影響は最も影響を与える波長のみに限られるのではなく、それよりも 10 倍程度長い波長にも影響を及ぼす。さらに、低速度層が地中にある場合、低速度層自体の厚さだけでなく、その深さが高次のピーク形成に影響し、大きい増幅作用を持つ。このような波動現象により図 21 に示されるように、地表付近と地中に混在する「**僅かな規模の低速度部分**」の影響が重畳して広い周波数範囲で増幅されるのである。

4. 不整形地盤の震動特性

関電は新たに弾性波トモグラフィー解析[8]を実施し、不整形な地盤構造を明らかにしている。この不整形地盤の震動特性への影響を検討する。

図 22（16 頁）にトモグラフィー解析が実施された D 測線と、O1-3 孔、O1-11 孔の位置を示す[[8]、17 頁]。O1-3 孔の位置は D 測線の 400m 付近である。図 23 にトモグラフィー解析の P 波速度断面図に、O1-3 孔と原子炉の位置を追記して示す[[8]、8 頁]。また、図には基盤の深さを読み取ったプロファイルを示す[1]。基盤は D 測線の概ね 150～550m 区間で標高-25m 程度以深に沈降しており、沈降域の幅は約 400m 以上である。基盤は 3 号炉付近と 1、2 号炉付近で、さらに深く標高-50m 以深にまで沈降している。O1-3 孔は 2 号炉付近の沈降域に掘削されており、PS 検層結果（図 19）は沈降域の S 波速度の不均質を表したものと考えられる。

基盤の沈降域は不整形地盤となって地盤震動特性に影響を及ぼす。文献[9]によれば、不整形の深さがその幅の 1/10 より深い場合、波長が不整形の幅より短い波は大きく増幅される[註 1]。図 23 に示される地盤の不整形は、どの程度の波長（周波数）の波に影響するか、引用文献[9]のモデルにより検討する。図 23 下図に、3 号炉付近の基盤の沈降域に引用文献のモデル（model B）を当てはめ、赤線で示した。このモデルでは、3 号炉付近の基盤が深く沈み込む沈降域の幅は約 150m、深さは約 50m である

ので、形状を表すパラメーター (b) は b = 50/75（=0.67）となる。従って、註 1 の付図 2 の b = 0.5 と b = 1.0 の増幅特性が該当する。b = 0.5 の model B（一点鎖線）の結果によると、波長が幅の 2 倍の 300m の波（約 6Hz に相当）では増幅率は約 2.5 倍、また幅と同じ波長（150m）の波（約 12Hz）では約 2.7 倍である。ただし、引用したモデルのインピーダンス比は 3.0 であるが、ここでは 1.47（*1）であるので、増幅率は約半分の 1.2 倍程度と推定される。基盤の不整形な沈降は、約 6Hz 以上の周波数域に影響を及ぼすと考えられる。

大飯原発の基準地震動は、関電地盤モデルの震動特性を用いて計算されているが、PS 検層結果を考慮したモデルは、8 Hz 以上の周波数域で関電モデルの 1.7 倍以上、2.5 倍に達する大きい増幅特性を示し、さらに基盤の不整形な沈降による増幅が 6Hz 以上の周波数域で重畳される。このことは基準地震動が過小評価されていることを意味する。

*1：O1-3 孔の PS 検層結果の標高 0～-60m の平均値は、Vs = 1.78 km/s、ρ = 2.27 g/cm³（関電の式による換算値）であり、基盤は Vs=2.2km/s、ρ = 2.7 g/cm³ であるので、インピーダンス（速度×密度）の比は 1.47 となる。

5. まとめ

本稿の内容は次にように纏められる。

(1) 地表の低速度層による影響は、層の厚さに固有の周波数のみならず、その十分の一の低周波数においても看過できない増幅特性を有する。また、層の厚さが増加すると高次の重複反射の影響が大きくなる。

(2) 地中の低速度層は、それ自体は薄くても、その深さに関係する低い周波数で増幅効果を有し、さらに高い周波数域で高次のピークを生じ大きい増幅効果を有する。

(3) O1-3 孔における標高-60m までの S 波が低速度であることは、トモグラフィー解析で明らかになった基盤の標高-50m 以深に及ぶ沈降域の速度異常を表している。

(4) O1-3 孔の PS 検層結果による地盤構造モデルは、8 Hz 以上の周波数域で関電地盤モデルより 1.7 倍以上、2.5 倍に達する大きい増幅特性を有する。この増幅特性は主に標高-60m までの表層部の低速度層の影響と考えられる。

(5)トモグラフィー解析で明らかになった基盤の不整形は、概ね 6 Hz 以上の周波数の波を 1.2 倍程度増幅し、(4)の増幅作用に重畳する。

(6) O1-11 孔の PS 検層結果による地盤構造モデルの増幅特性は、10 数 Hz 以下の低周波数域では 1.1～1.2 倍程度であるが、10 数 Hz 以上の周波数域では周波数の増加と共に増加し 2.6 倍を越える。この増幅特性は主に標高-60m 以深の低速度区間の影響と考えられる。

(7) 基準地震動は 0.1～50Hz の周波数域で評価される。規模の大小に拘わらず不均質による広い周波数範囲の増幅効果を正しく評価すべきである。

(8) 大飯原発の基準地震動は、速度が深さと共に短調に増加する堅硬で均質な水平成層構造を仮定した地盤モデルで計算されている。(4)(5)(6)の結果は基準地震動が過小評価であることを示している。

参考文献

[1] 赤松純平、大飯発電所の敷地地下構造の不整形性について－関西電力の準備書面(27)の内容に関連して－、2021 年 9 月.
[2] 関電、準備書面(27) 令和 3 年 5 月 17 日.
[3] 関電、大飯発電所地震動評価について、第 206 回審査会合資料 3-4、H.27.3.13.
[4] 関電、大飯発電所地盤モデルの評価について、第 89 回審査会合資料 3、H26.3.5、丙第 196 号証。
[5] 斎藤正徳、地震波動論、２層構造を伝わる SH 波、東京大学出版会、2009.
[6] 準備書面(28) 令和 3 年 5 月 17 日.
[7] 赤松純平、大飯発電所基準地震動策定における問題点－地盤構造モデルについて－、2018 年 1 月、甲第 422 号証.
[8] 関電、大飯発電所 弾性波トモグラフィー解析および反射法地震探査結果について、2020 年 10 月、丙第 347 号証.
[9] 小堀鐸二・篠崎祐三、不整形地盤の振動特性、地震第 2 輯第 30 巻 127-142 頁、1977.

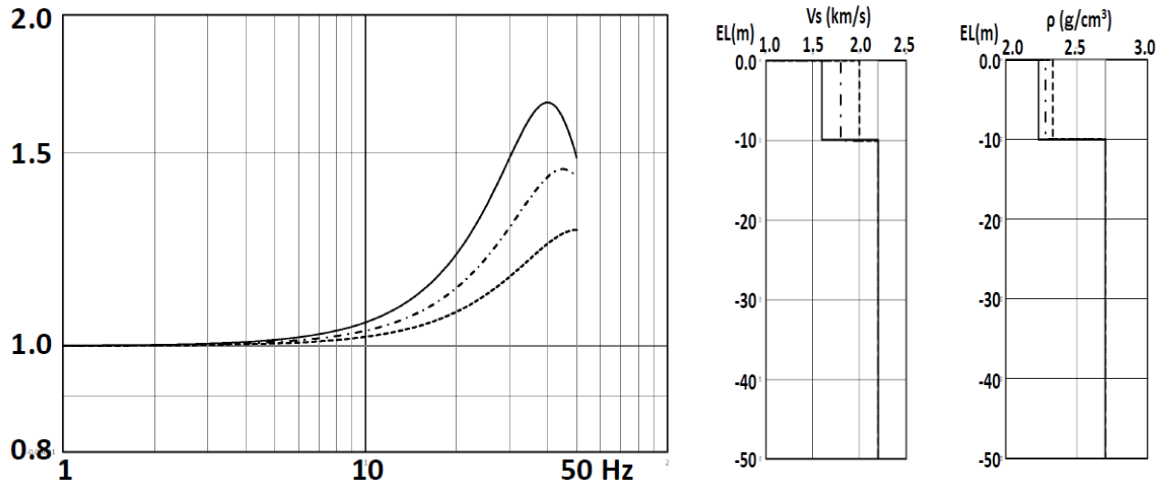


図 1. 厚さ 10m の低速度層が表面にある場合の増幅特性.　S 波速度と密度の分布.
S 波速度 実線：1.6km/s、鎖線：1.8km/s、点線：2.0km/s. (以下同様)

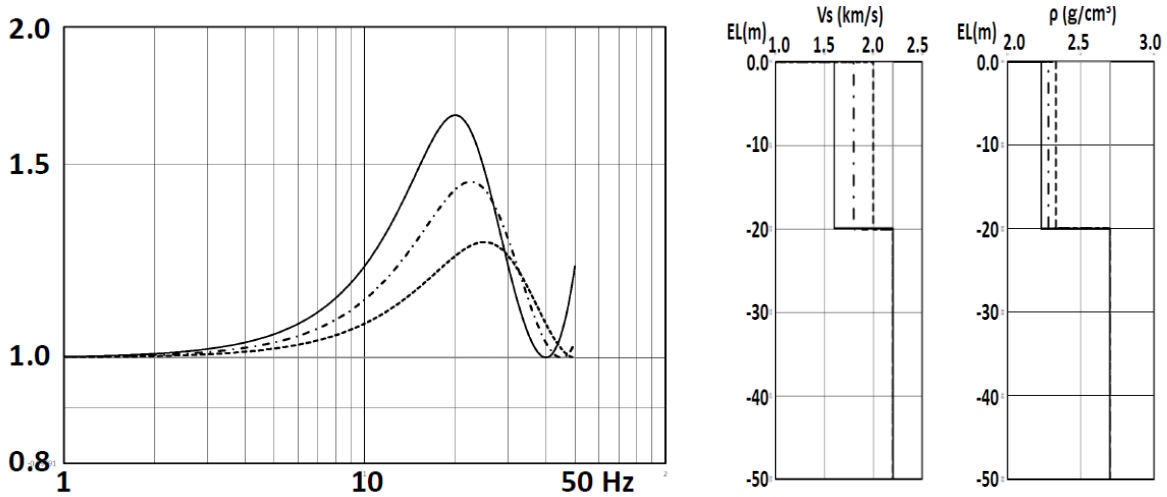


図 2. 厚さ 20m の低速度層が表面にある場合の増幅特性.　S 波速度と密度の分布.

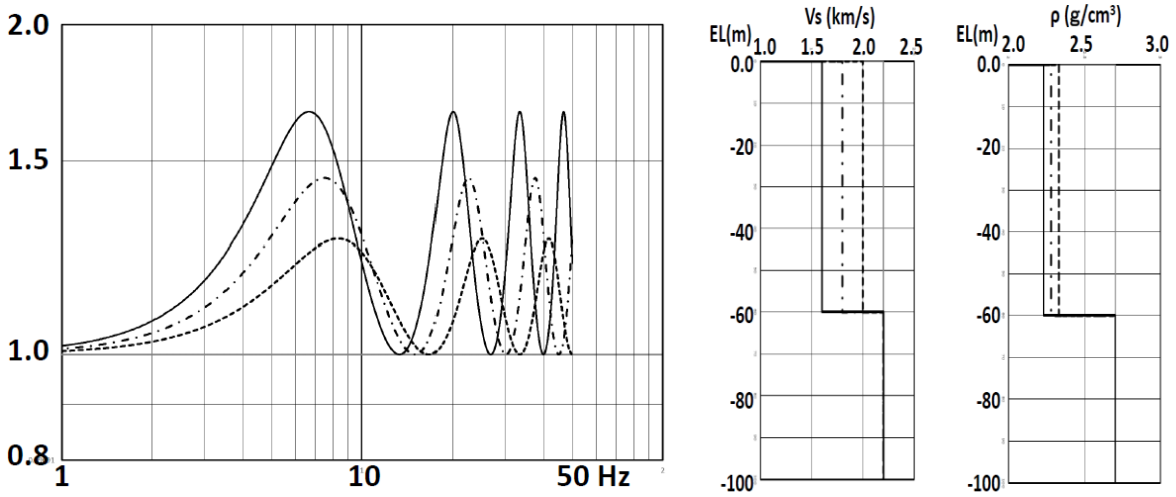


図 3. 厚さ 60m の低速度層が表面にある場合の増幅特性.　S 波速度と密度の分布.

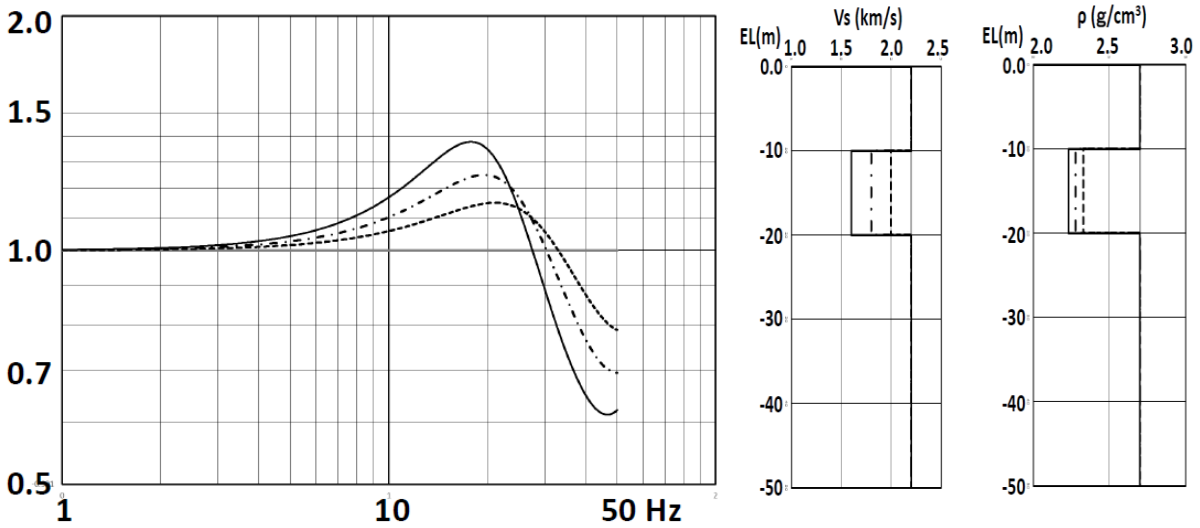


図 4. 厚さ 10m の低速度層が深さ 10～20m にある場合の増幅特性.

S 波速度と密度の分布.

S 波速度 実線：1.6km/s、鎖線：1.8km/s、点線：2.0km/s.

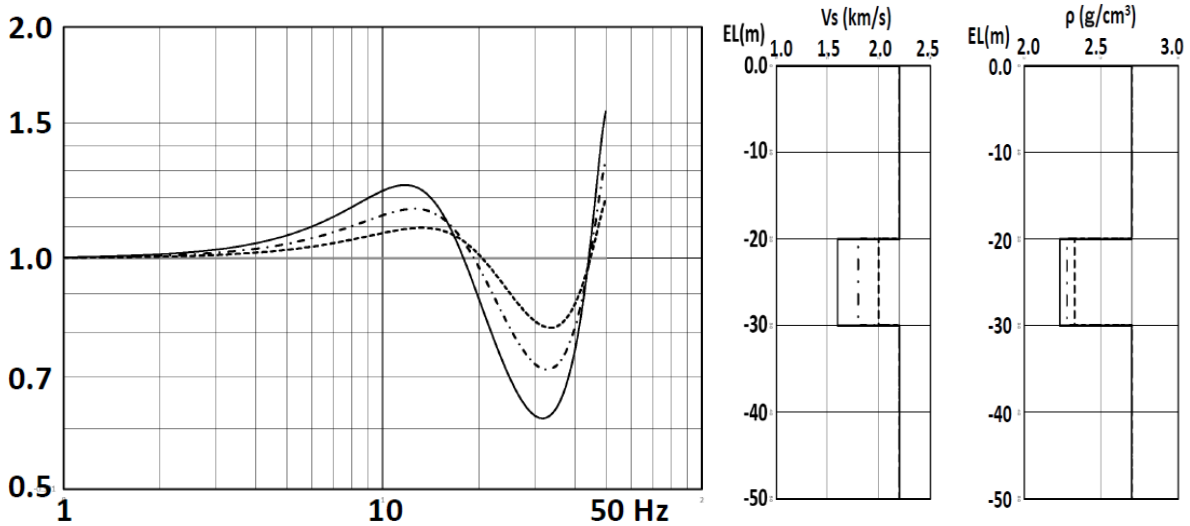


図 5. 厚さ 10m の低速度層が深さ 20～30m にある場合の増幅特性.

S 波速度と密度の分布.

S 波速度 実線：1.6km/s、鎖線：1.8km/s、点線：2.0km/s.

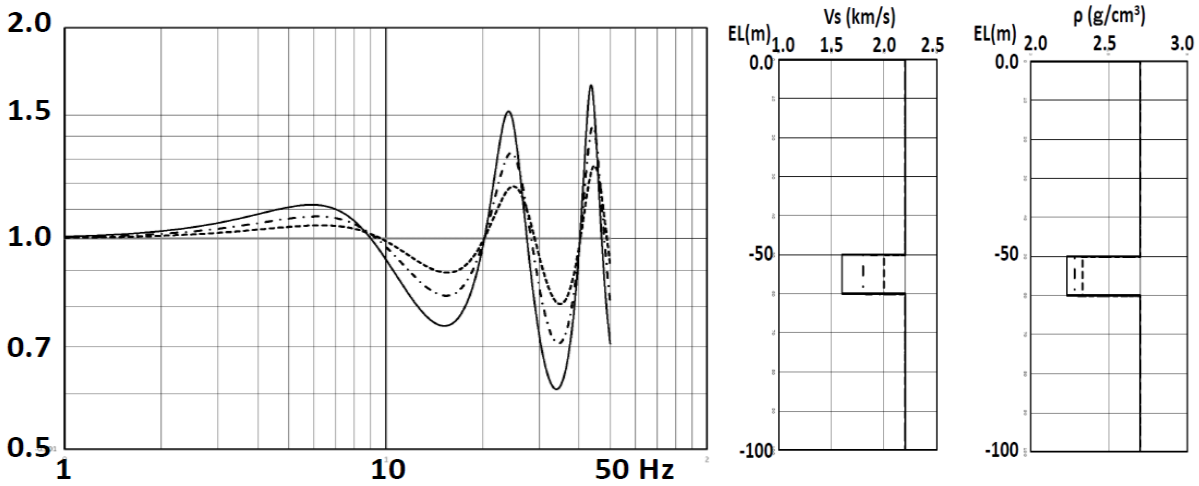


図 6. 厚さ 10m の低速度層が深さ 50～60m にある場合の増幅特性.
S 波速度 実線：1.6km/s、鎖線：1.8km/s、点線：2.0km/s.

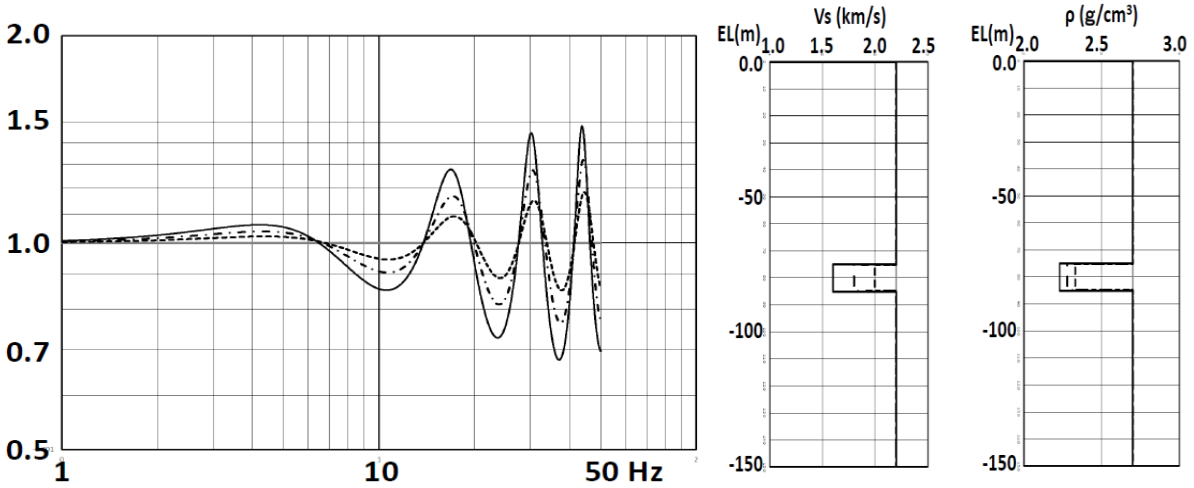


図 7. 厚さ 10m の低速度層が深さ 75～85m にある場合の増幅特性.
S 波速度 実線：1.6km/s、鎖線：1.8km/s、点線：2.0km/s.

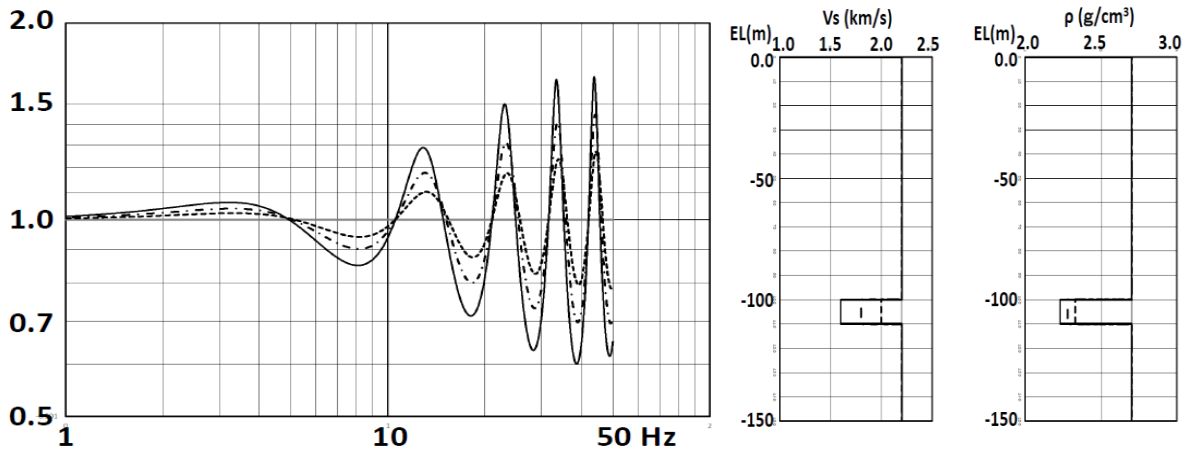


図 8. 厚さ 10m の低速度層が深さ 100～110m にある場合の増幅特性. S 波速度 実線：1.6km/s、鎖線：1.8km/s、点線：2.0km/s.

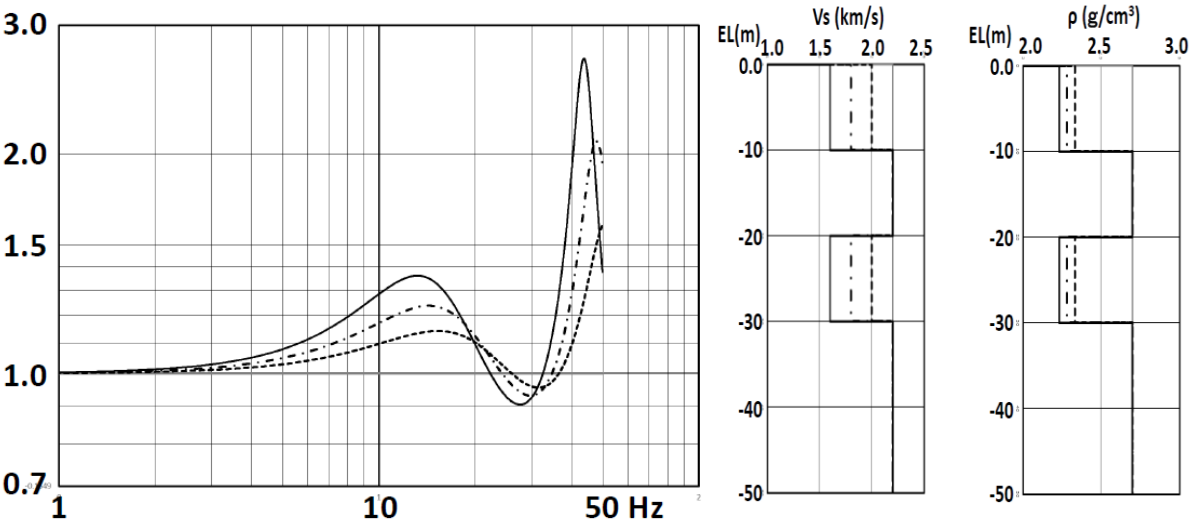


図 9. 厚さ 10m の低速度層が、表面と深さ 20～30m にある場合の増幅特性.
S 波速度 実線：1.6km/s、鎖線：1.8km/s、点線：2.0km/s.

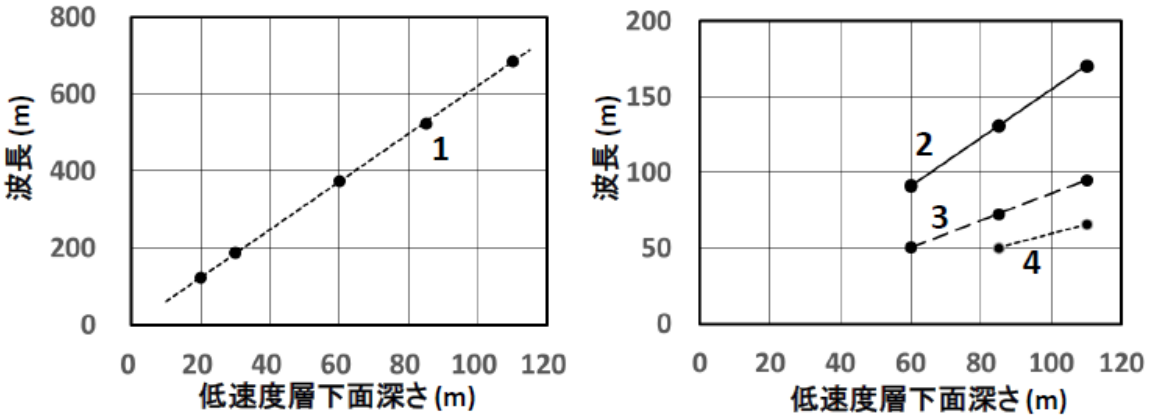


図 10. 増幅のピークを生じる波長と低速度層下面の深さとの関係.
図中の数字はピーク番号.

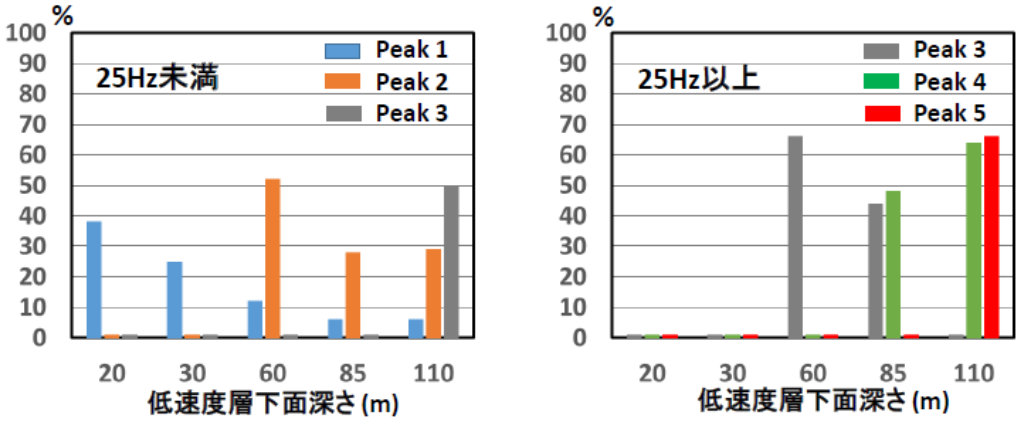


図 11. 地中の低速度層による振幅増加率（表 2 の倍率の%表示）.
左図：25Hz 未満、右図：25Hz 以上. 第 1 ～ 5 のピークを色別に示す。

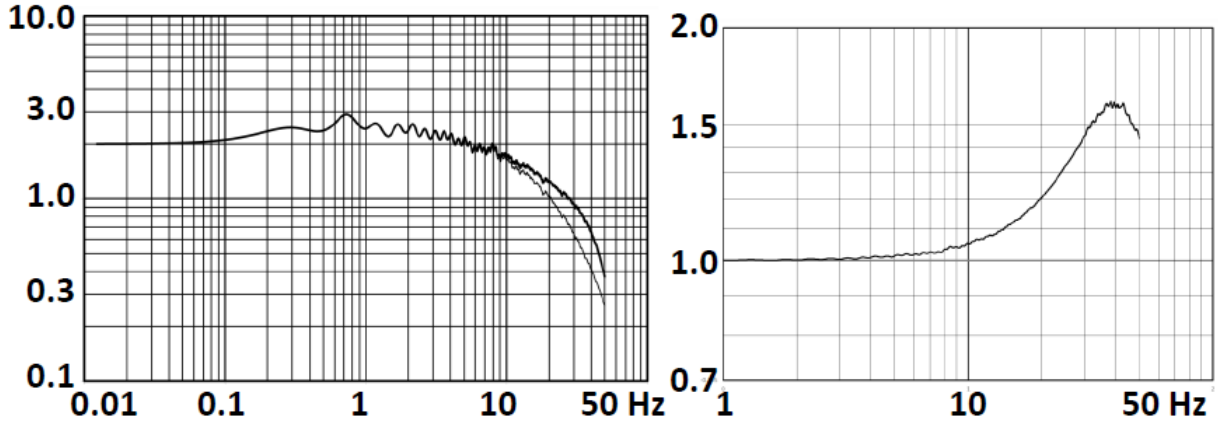


図 12. 厚さ 10m、Vs=1.6km/s の低速度層が地表にある場合の震動特性（左図：太線）.
左図の細線は関電地盤モデル、右図：関電モデルに対する増幅倍率.
図 1 のモデルに対応.

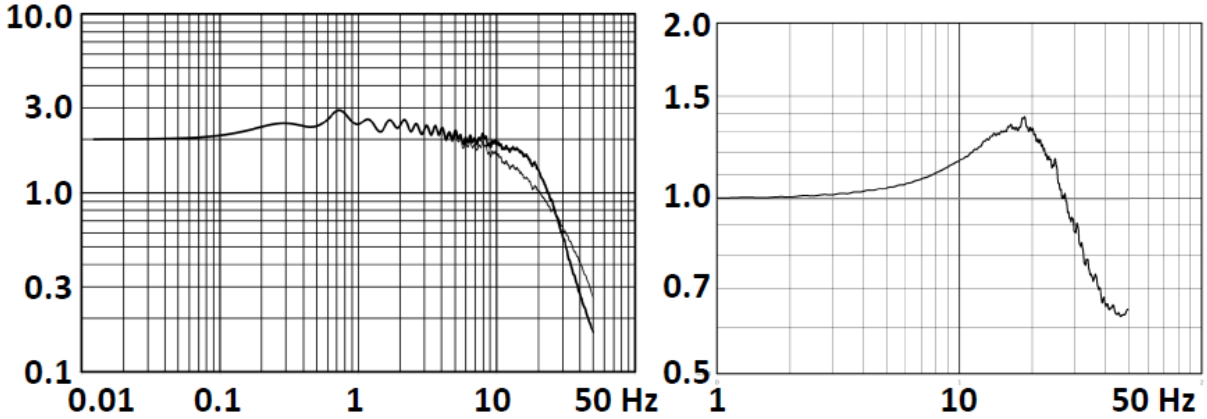


図 13. 厚さ 10m、Vs=1.6km/s の低速度層が深さ 10～20m にある場合の震動特性
左図：太線、左図の細線は関電地盤モデル、
右図：関電モデルに対する増幅倍率.
図 3 のモデルに対応.

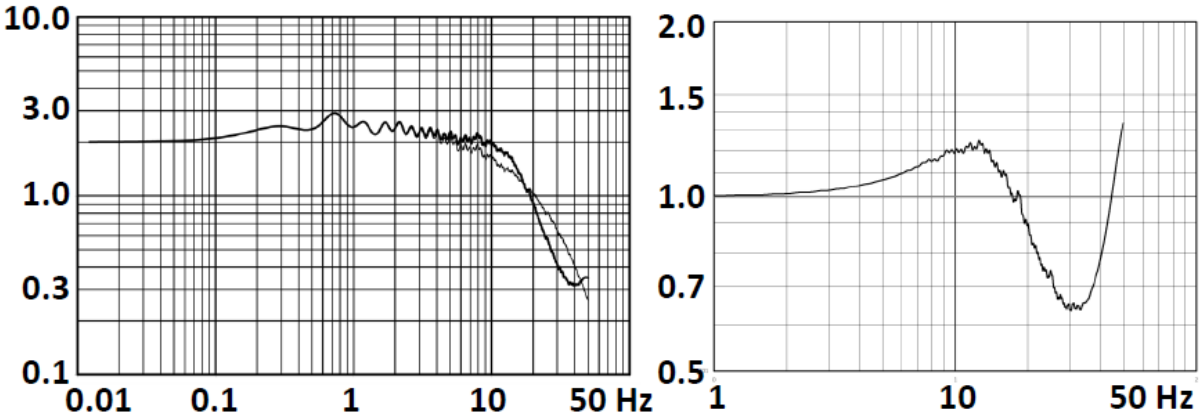


図 14. 厚さ 10m、Vs=1.6km/s の低速度層が深さ 20～30m にある場合の震動特性
左図：太線、左図の細線は関電地盤モデル、
右図：関電モデルに対する増幅倍率.
図 4 のモデルに対応.

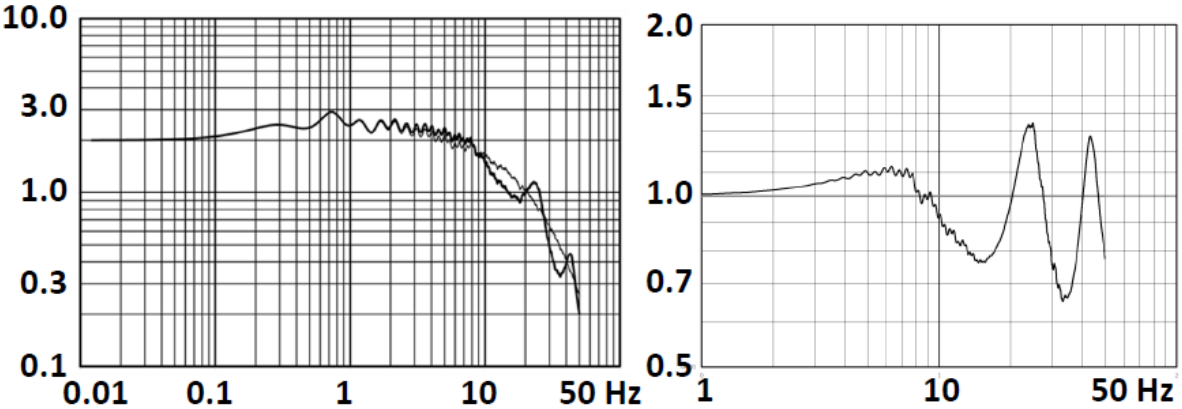


図 15. 厚さ 10m、Vs=1.6km/s の低速度層が深さ 50～60m にある場合の震動特性
左図：太線、左図の細線は関電地盤モデル、
右図：関電モデルに対する増幅倍率.
図 5 のモデルに対応.

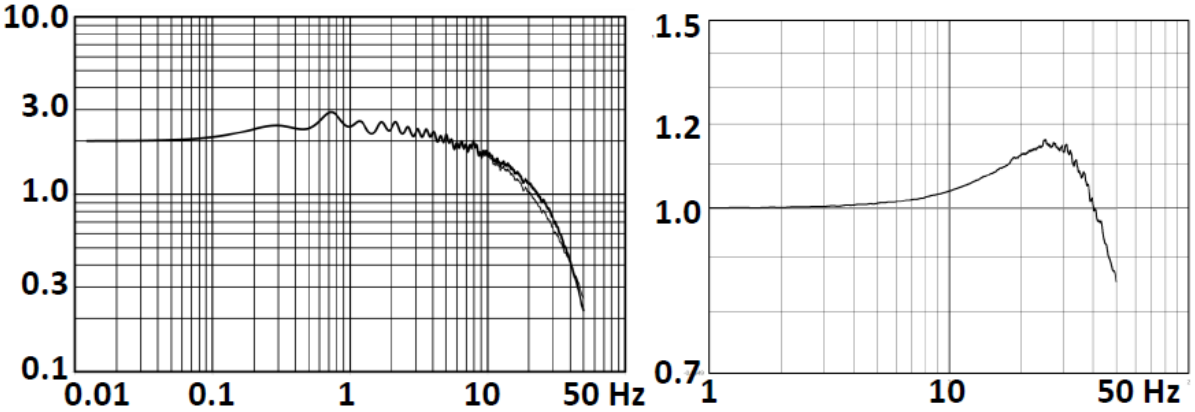


図 16. 厚さ 3m の低速度層が深さ 10～13m にある場合の震動特性（左図：太線）.
左図の細線は関電地盤モデル、右図：関電モデルに対する増幅倍率.

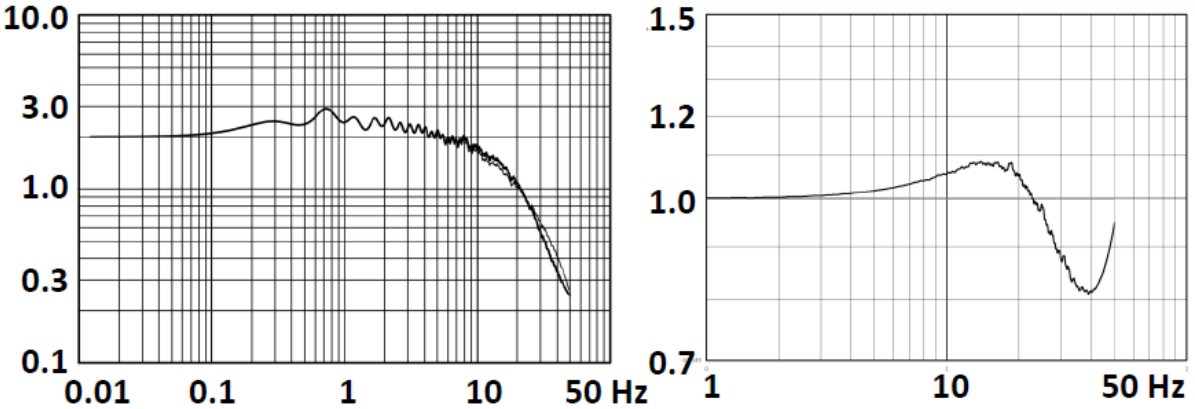


図 17. 厚さ 3m の低速度層が深さ 20～23m にある場合の震動特性（左図：太線）.
左図の細線は関電地盤モデル、右図：関電モデルに対する増幅倍率.

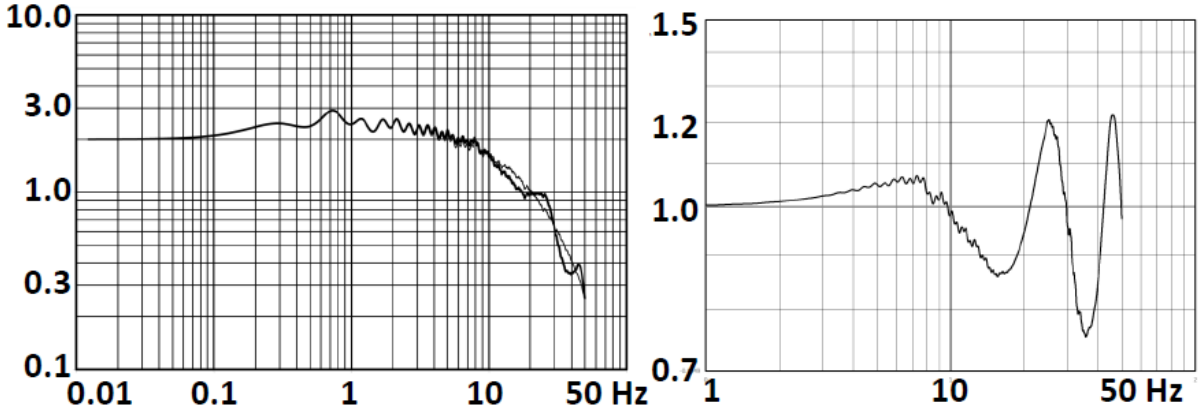


図 18. 厚さ 5m の低速度層が深さ 50～55m にある場合の震動特性（左図：太線）.
左図の細線は関電地盤モデル、右図：関電モデルに対する増幅倍率.

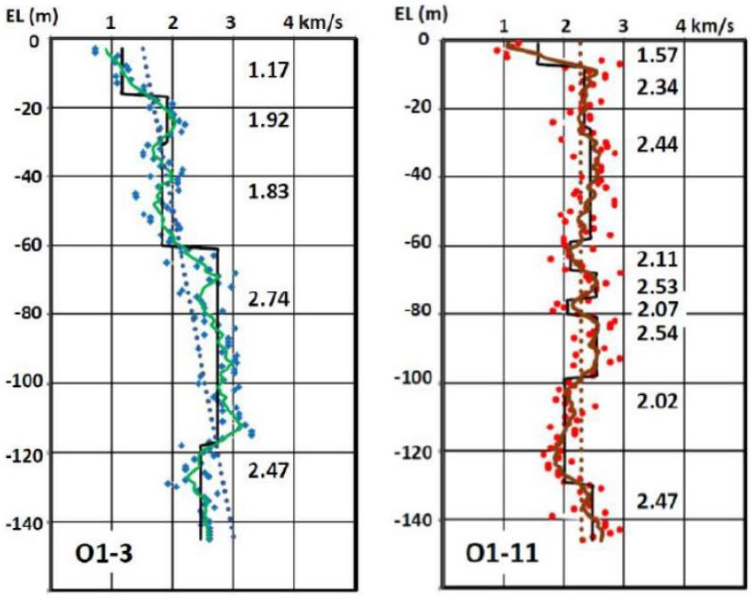


図 19. PS 検層による S 波速度分布．緑、赤の点：測定実測値で 1m 間隔．
点線：全体の傾向、黒折れ線：全体の傾向より速度の大きい（小さい）区間．

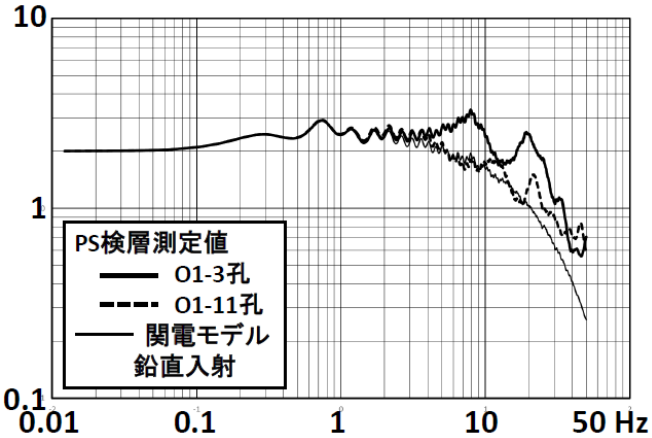


図 20. 関電地盤モデルの上部を PS 検層結果の速度層で置き換えたモデルの震動特性.

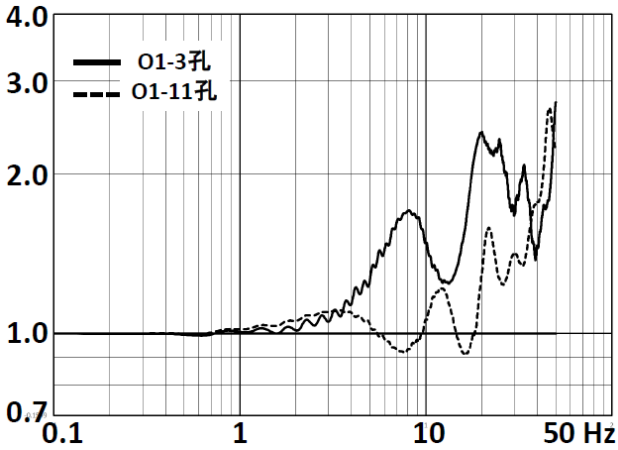


図 21. 関電地盤モデルに対する PS 検層結果モデルの増幅倍率.

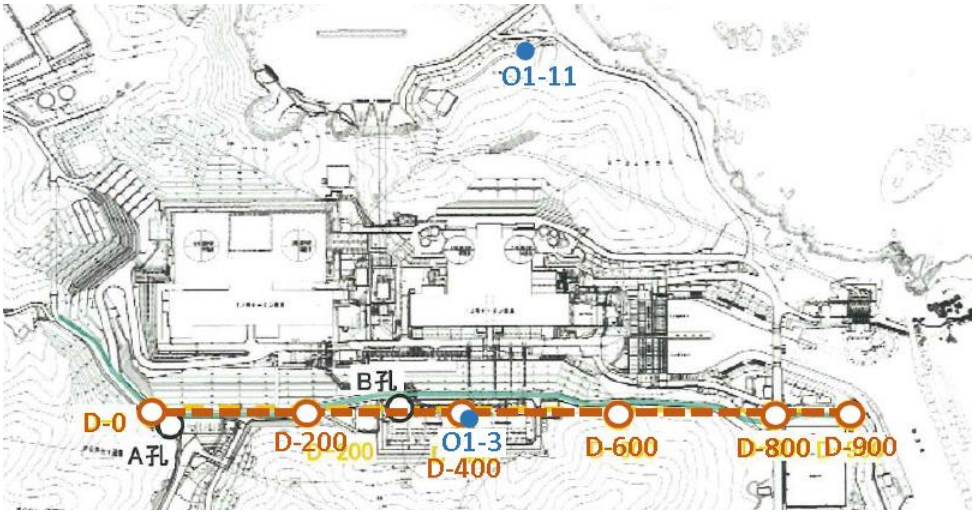
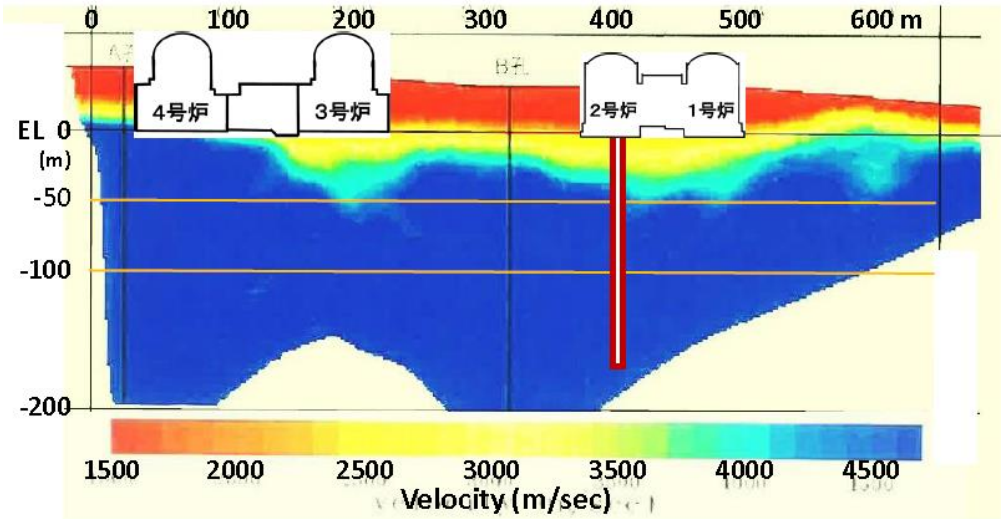


図 22. トモグラフィー解析の D 測線、および O1-3 孔、O1-11 孔の位置.
[8]、17 頁に加筆.



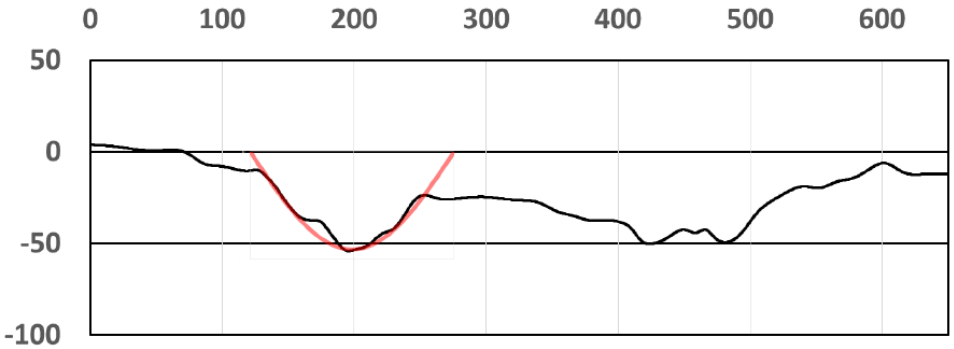


図 23. 上図 トモグラフィー解析による速度断面と O1-3 孔（400m 付近）の位置.
[8]、8 頁に加筆.

下図 黒線：基盤の沈降プロファイル
赤線：註 1 の不整形地盤モデル（model B 半余弦）

表１低速度層が表面にある場合に生じるピークの周波数と増幅倍率（図 1～3）

	Vs = 1.6 km/s		Vs = 1.8 km/s		Vs = 2.0 km/s	
層の厚さ	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率
10 m	40.0	1.66	45.0	1.45	50.0	1.27
20 m	20.0	1.66	22.5	1.45	25.0	1.27
60 m P1	6.67	1.66	7.50	1.45	8.33	1.27
60 m P2	20.0	1.66	22.5	1.45	25.0	1.27
60 m P3	33.4	1.66	37.5	1.45	41.7	1.27
60 m P4	46.7	1.66	―	―	―	―

(P1～P4：ピークの番号)

Vs (km/s)	1.6	1.8	2.0	2.2
ρ (g/cm^3)	2.23	2.28	2.33	2.7
インピーダンス	3.56	4.10	4.66	5.94

表 2. 次頁に掲載.

表 3 低速度層が表面と地中にある場合のピークの周波数と増幅倍率 (図 8)

複 合	Vs = 1.6 km/s		Vs = 1.8 km/s		Vs = 2.0 km/s	
ピーク	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率
1	13.2	1.36	14.3	1.24	15.3	1.14
2	43.7	2.71	47.8	2.08	(50)	1.60

()：ピークでない値.

表 2 厚さ 10m の低速度層が地中にある場合のピークの周波数と増幅倍率

10-20m	Vs = 1.6 km/s		Vs = 1.8 km/s		Vs = 2.0 km/s	
ピーク	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率
1	17.8	1.38	19.5	1.25	21.1	1.15

低速度層の深さ：10～20m（図 3）

20-30m	Vs = 1.6 km/s		Vs = 1.8 km/s		Vs = 2.0 km/s	
ピーク	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率
1	11.7	1.25	12.6	1.16	13.3	1.10
2	(50)	1.55	(50)	1.35	(50)	1.20

低速度層の深さ：20～30m（図 4）　（）：ピークでない値.

50-60m	Vs = 1.6 km/s		Vs = 1.8 km/s		Vs = 2.0 km/s	
ピーク	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率
1	5.8	1.12	6.1	1.08	6.3	1.04
2	24.1	1.52	24.6	1.33	25.0	1.19
3	43.6	1.66	44.1	1.45	44.6	1.27

低速度層の深さ：50～60m（図 5）

75-85m	Vs = 1.6 km/s		Vs = 1.8 km/s		Vs = 2.0 km/s	
ピーク	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率
1	4.2	1.06	4.3	1.04	4.4	1.02
2	16.8	1.28	17.1	1.17	17.3	1.09
3	30.2	1.44	30.5	1.28	30.8	1.15
4	43.7	1.48	44.1	1.32	44.4	1.19

低速度層の深さ：75～85m（図 6）

100-110m	Vs = 1.6 km/s		Vs = 1.8 km/s		Vs = 2.0 km/s	
ピーク	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率	f_peak(Hz)	倍 率
1	3.2	1.06	3.3	1.04	3.3	1.02
2	12.9	1.29	13.0	1.18	13.2	1.10
3	23.1	1.50	23.3	1.31	23.5	1.17
4	33.4	1.64	33.7	1.41	33.9	1.24
5	43.8	1.66	44.1	1.45	44.3	1.27

低速度層の深さ：100～110m（図 7）.

註 1．不整形地盤の震動特性

小堀・篠崎(1977)[9]は論文「不整形地盤の振動特性」において、不整形の規模と波長との関係を論じている。計算に用いたモデルとその結果を引用する。

付図 1 に地盤モデルを引用する（Fig.3 にコメントを追記）。基盤 ＋1 層の地盤モデルであり、形状は、(A) 半楕円、(B) 半余弦（cosine）、(C) 丸角の三角、(D) 隆起表面である（ここでは model D は対象外）。不整形の幅は 2a、深さは ba である。基盤と地盤の速度比は 2.0、密度比は 1.5 とし、異なる波長の SH 波が下から垂直に入射する場合の表面での振幅分布を計算している。

付図 2 に model B を例に、モデルの縦横比（b）によるモデルの形の変化、および波長とモデルの幅の関係を示す。縦横比は、深さが幅の 1/10、1/4、1/2 である。それぞれのモデルに、幅の 2 倍、1 倍、2/3 倍の波長の波が入射する 9 ケースが計算されている。

付図 3 に結果の図を引用する（Fig.4 に拡大文字を追記）。異なる縦横比（b=0.2、0.5、1.0）について、波長が不整形の幅の 2 倍（η=0.5））、1 倍（η=1.0）、2/3 倍（η=1.5）の振幅分布が描かれている。図の横軸（x/a）は中央からの距離で、x/a = 1.0 がモデルの縁である。縦軸（u/u_0）は増幅率であり、不整形の有無に拘わらず表面効果のため入射波の 2.0 倍となる。なお、点線は横軸の位置での層の厚さのみを考えた平行層モデルの計算結果であるので議論しない。

モデルの縦横比、波長、増幅率（縦軸の値の 1/2 の値）の関係は次のようである。
（倍率は表面効果を除外し、図の縦軸の値の 1/2 を記す）

◎ b=0.2（深さが全幅の 1/10）の場合：
- η=0.5（波長が幅の 2 倍）：中央付近で僅かな増幅（約 1.1 倍）
- η=1.0（波長と幅が同じ）：中央付近で増幅（約 2 倍）
- η=1.5（波長が幅の 2/3）：モデルにより縁寄りまたは中央付近で増幅（3～3.5 倍）

◎ b=0.5 および 1.0（深さが全幅の 1/4 および 1/2）の場合：
- η=0.5 (波長が幅の 2 倍)：中央付近で増幅（2～3.7 倍）
- η=1.0 (波長と幅が同じ)：主に縁寄り(b=0.5)または中央(b=1.0)で増幅（2～3.5 倍）
- η=1.5 (波長が幅の 2/3)：中央付近と縁寄りで増幅（2～5.5 倍）

上記 9 ケースの計算結果は、次のように纏めることができる。

・2 倍以上の増幅の無いのは、深さが幅の 1/10（b=0.2）で波長が幅の 2 倍（η=0.5）のケースだけである。
・b=0.2 の浅い構造でも、波長が幅と同程度以上であれば 2 倍以上増幅する。
・モデルの形が同じであれば、波長の短い方（η が大きい方）が増幅率は大きい。
・同じ波長では、構造が深い方（b が大きい方）が増幅率は大きい。

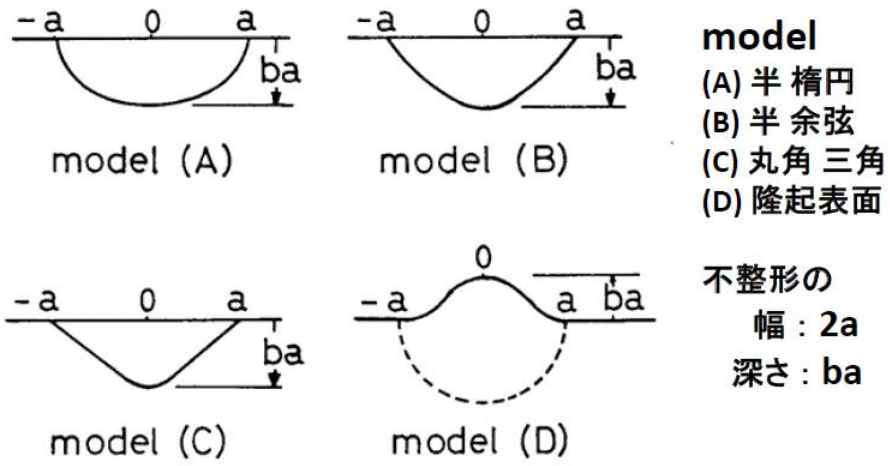
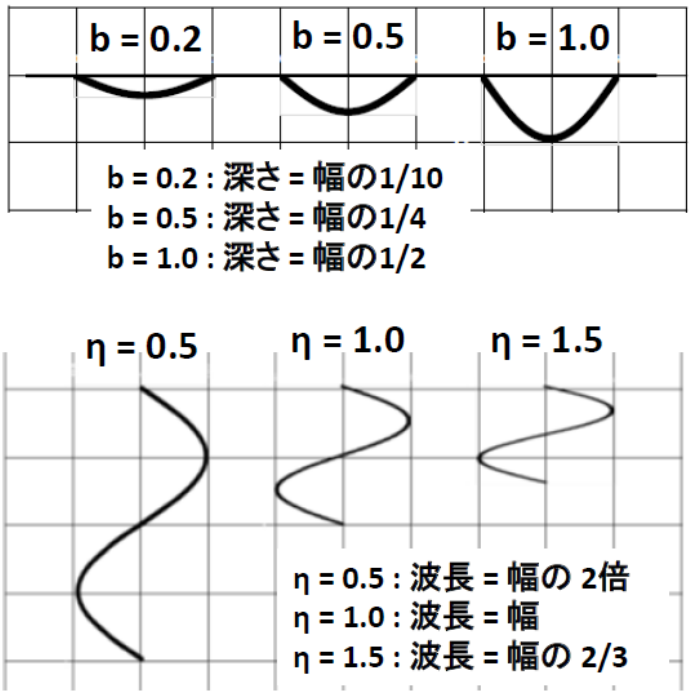


Fig. 3. Four types of the models considered in Fig. la.
Model (A): Boundary Γ is a semi-ellipse.
Model (B): Boundary Γ is a cosine-shape.
Model (C): Boundary Γ is a triangle with a rounded corner.
Model (D): The surface is a cosine-shaped ridge.

付図 1．不整形地盤のモデル.



付図 2．上図：モデル（model B）の形状．縦横 1 目盛り=モデル幅の 1/2.
下図：モデルの幅と波長の関係．縦方向 1 目盛り=モデル幅の 1/2.

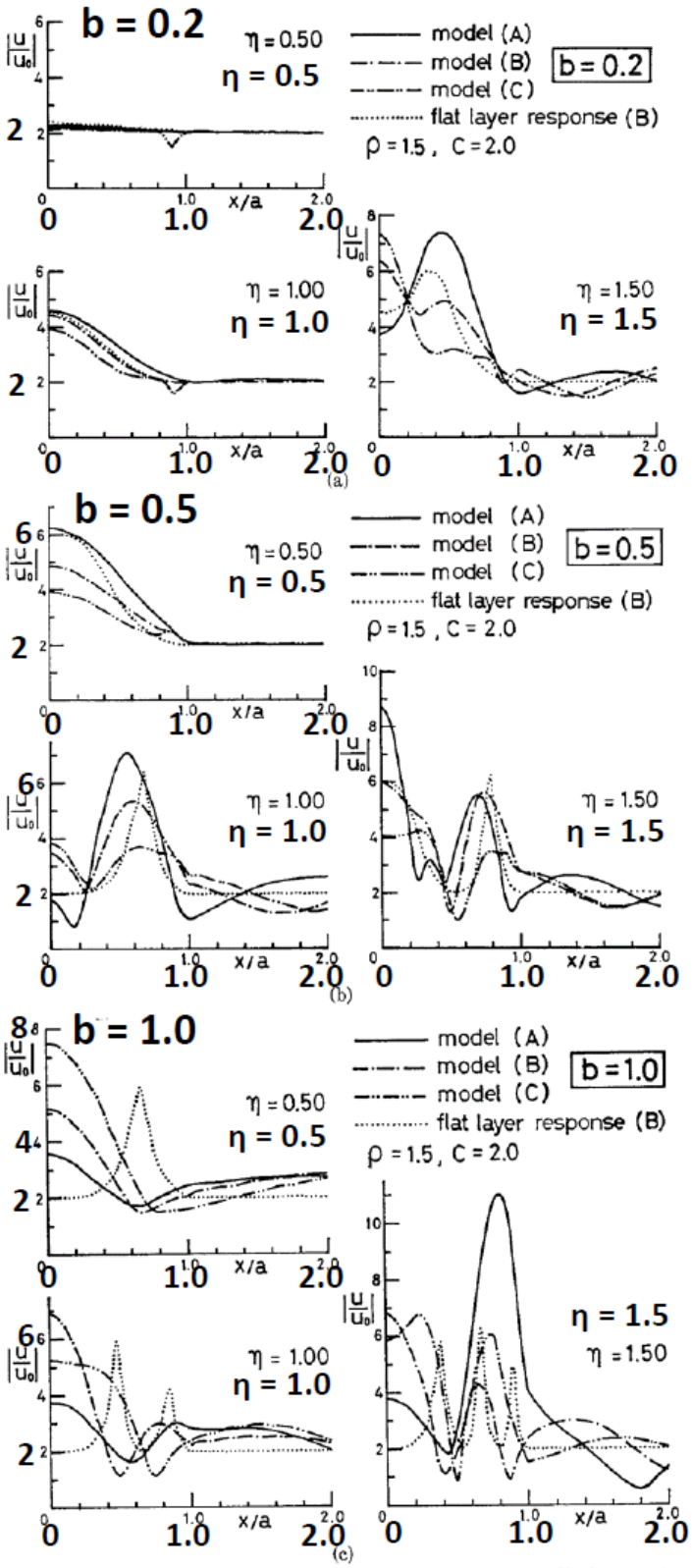


Fig. 4. Effect of cross section of an alluvial valley on the surface displacement amplitude to vertically incident SH waves. The dots are amplitudes computed by the flat-layer theory using local layer parameters based on the Model (B). The comments on the parameters η, c and ρ are the same as those described in Fig. 2.

付図 3. 不整形地盤の振動特性.