

## 谷状地盤における地震動増幅特性の評価

片岡正次郎\* 田村敬一\*\* 松本俊輔\*\*\*

### 1. はじめに

地表面地形の影響によって地震動の増幅特性が変化することはよく知られている。ダムサイトにおいても、1971年のSan Fernando地震(マグニチュード6.6)の際にPacoimaダムの左岸アバットメント上の加速度強震計が水平最大加速度1.25g、鉛直最大加速度0.70gをもつ当時観測史上最大の強震動を記録した<sup>1)</sup>が、強震計が尾根に設置されていたことから地形による影響が注目された。Bouchon<sup>2)</sup>はこのPacoimaダムにおける地形の影響を考慮した地震動の数値シミュレーションを行い、地形の影響がない場合と比較して地震動が30~50%増幅されたと指摘している。また、一般的な谷地形や丘地形の影響についても検討を行っており、地震波の波長が地形変化部の大きさと同じオーダーの場合には地表面における地震動が大きく変化し、谷地形では谷底で特に増幅率が小さくなること、丘地形では頂部で特に増幅率が大きくなることなどを示している。

このように、比較的古くから地震動に対する地形の影響は指摘されているが、構造物の設計地震力を設定する際、一般には地形の影響は考慮されていない。この理由の一つとしては、地震動の増幅特性が場所ごとの地形あるいは地震動の到来方向によって複雑に変化するために、設計地震力の設定に反映できるような簡便な形で地形の影響評価がなされていないことが考えられる。

本研究では以上のような背景から、複雑な地形の上に建設されるダムなど大規模構造物の設計地震力設定手法の合理化・高度化に資するために、特に谷状の地形を有する地盤(谷状地盤)を対象として、地形が地震動増幅特性に及ぼす影響に関する検討を行い、その影響を簡便に評価することを目的としている。

谷状地盤における地震動増幅特性は、地震動の到来方向によって異なるが、実際には到来方向が

精度良く予測されていることはほとんどないと考えられる。そこで本研究では、谷状地盤における地震動増幅を表す指標として、平面波の入射角と振動数に関する平均増幅率を提案する。さらに、形状の異なる様々な谷状地盤のモデルについて平均増幅率を計算することにより、谷状地盤の形状が平均増幅率に及ぼす影響を明らかにするとともに、平均増幅率の簡単な評価式を提示する。

### 2. 解析手法と地盤モデル

#### 2.1 解析手法

地盤を地表面が水平な半無限等方均質線形弾性体とし、平面波が入射する場合を仮定すると、入射波と地表面における反射波の2つの平面波を重ね合わせることにより、任意の地点での応答を解析的に容易に求めることができる<sup>3)</sup>。ここで、平面波とは、波面が平面で波面の法線方向に伝播する波である。しかし、地表面が水平という仮定が成り立たないような、急峻な地形を有する地盤を対象とする場合には、入射波が直接到達しない地点や、複数の反射波が到達する地点が存在するようになり、上記のような単純な取り扱いができなくなる。

このような場合にも、有限要素法や境界要素法などを用いて数値的に計算することにより、急峻な地形を有する地盤における複雑な地震動増幅特性を考慮した応答を求めることができる。本研究ではこれらのうち、入射波の取り扱いや地盤のモデル化が容易であることなどから、境界要素法を用いて谷状地盤の振動解析を行うことにした。

また、ダムの耐震設計あるいは耐震安全性の照査を行う観点からは、一般には上下流方向(ダム軸直交方向)の地盤振動が最も重要であると考えられるので、本研究ではダム軸方向に切断した二次元の谷状地盤を考え、その上下流方向、すなわち面外方向の地盤振動を対象とした解析を行うこととした。

#### 2.2 地盤モデル

地盤振動解析に用いる谷状地盤モデルを図-1に

示す。谷底の幅を 100m として、その中心に  $x$  座標の原点をおく。谷の深さを  $H$ 、谷の左側と右側の斜面の傾斜角をそれぞれ  $\theta_1, \theta_2$  として、これらのパラメータを変化させることにより、形状の異なる種々の谷状地盤モデルを設定した。谷の斜面以外では地表面は水平になっている。

境界要素法は有限要素法とは異なり、解析対象とする媒体の境界（ここでは地表面）のみを要素分割すればよい。厳密には地表面を水平方向に無限に要素分割する必要があるが、通常境界要素を用いる場合は、対象領域より十分遠方で要素分割を打ち切ることにより解析精度の低下を防ぐ。ここでは谷から 2,000m 及び 1,000m 離れた地点で境界要素によるモデル化を打ち切った場合の解析結果がほぼ一致していたことから、図-1 のように打ち切り長さを 1,000m とした。境界要素は一定要素を用いるが、一つの要素の長さをおよそ 20m とし、振動数 10Hz 程度までの解析に十分な精度をもたせるようにした。

以下の計算で用いる谷状地盤モデルでは S 波速度を 2.5km/s とし、減衰定数 0.02 の内部減衰を考慮することとした。なお、平面波を入射する場合には、その入射角  $\lambda$  を図-1 のように定義する。

解析に用いた谷状地盤モデルのパラメータを表-1 にまとめて示す。これらのパラメータは、実際のダムサイト周辺の地形を調査した結果に基づいて定めたものである。モデル 1~10 は谷の深さを 300m に固定し、斜面の傾斜角の影響を検討するために設定したものであり、モデル 11~13 は斜面の傾斜角をモデル 6 と同一にし、谷の深さの影響を検討するために設定したものである。

### 3. 地盤の形状が地震動増幅特性に及ぼす影響

#### 3.1 分布入射波平均増幅率と平均増幅率

まず、一つの平面波を入射した場合の増幅率が入射角によってどのように変化するかを確認する。

図-2 は、地盤モデル 6 ( $H = 300\text{m}$ ,  $\theta_1 = 30^\circ$ ,  $\theta_2 = 20^\circ$ ) に対して、平面波を鉛直下方から入射した場合及び入射角  $\lambda$  を  $30^\circ$  として入射した場合の増幅率について、横軸を図-1 の  $x$  座標、縦軸を振動数にして等値線で示したものである。図には、斜面の頂上と下端の位置も示してある。これによると、平面波に対する増幅率は入射角によって大きく異なっていることが分かる。これは、谷状地盤に入射する地震動の入射角が不明の場合に

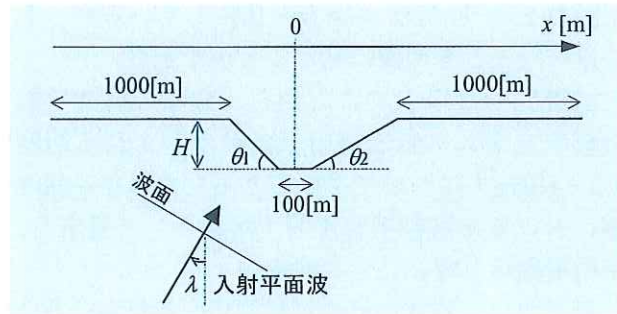


図-1 谷状地盤のモデル

表-1 解析に用いた谷状地盤モデルのパラメータ

モデル	$H$ [m]	$\theta_1$ [°]	$\theta_2$ [°]
1	300	10	10
2	300	20	10
3	300	30	10
4	300	40	10
5	300	20	20
6	300	30	20
7	300	40	20
8	300	30	30
9	300	40	30
10	300	40	40
11	150	30	20
12	450	30	20
13	600	30	20

は、一つの平面波（例えば鉛直入射した平面波）に対する増幅率によって谷状地盤の増幅特性を代表させることはできないことを示している。

このように入射波が特定できない場合における地盤の地震動増幅特性を表す指標として、分布入射波平均増幅率が提案されている<sup>4)</sup>。分布入射波平均増幅率は、入射角  $\lambda$  を  $-90^\circ$  から  $90^\circ$  まで変化させた多数の平面波を重ね合わせた入射波を想定し、この入射波に対する地表面での増幅率を表したものである。文献 4) には、境界要素法により入射波と地表面での応答波の変位スペクトルの比として分布入射波平均増幅率を計算するための定式化が示されている。

図-2 と同様に地盤モデル 6 について、分布入射波平均増幅率を示したものが図-3 である。図-2 と比較すると、分布入射波平均増幅率は一つの平面波に対する増幅率よりも、 $x$  座標すなわち地盤上の位置と振動数による変動が小さいことが分かる。振動数による変動は特に小さく、同じ  $x$  座標では振動数によらずほぼ一定の値をとっている。図-4 では、図-2、図-3 に示した増幅率について

振動数 2Hz と 5Hz の場合を比較しているが、上に述べたことを明瞭に見ることができる。

本研究では以上のことから、分布入射波平均増幅率をダムの低次固有振動数が含まれる範囲  $0.2 \sim 10\text{Hz}^5$  ) について平均をとったものを谷状地盤における地震動増幅を表す指標として提案し、平均増幅率と呼ぶことにする。

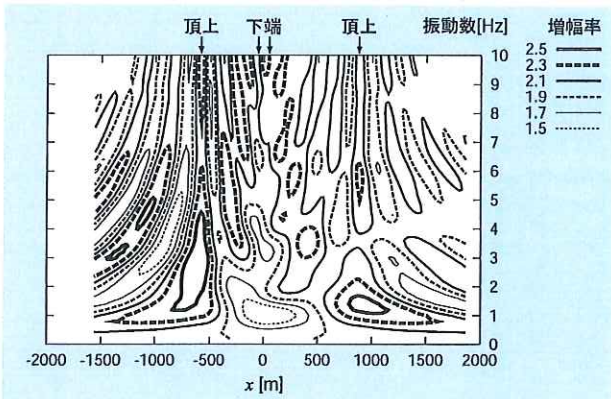
以下では、谷状地盤の形状が平均増幅率に及ぼす影響や平均増幅率の特性について検討する。

### 3.2 傾斜角の影響

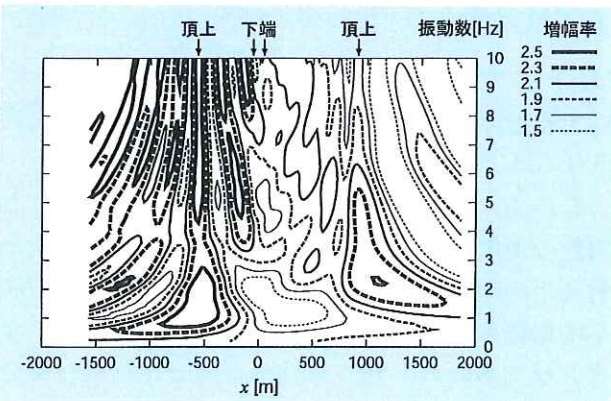
図-5 (a) には  $\theta_2$  を  $10^\circ$  で固定し、 $\theta_1$  を  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$  と変化させた場合 (表-1 のモデル 1, 2, 3, 4)、図-5 (b) には  $\theta_1$  を  $40^\circ$  で固定し、 $\theta_2$  を  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$  と変化させた場合 (表-1 のモデル 4, 7, 9, 10) の平均増幅率を比較して示す。これらの図によると、平均増幅率は反対側の谷の形状に影響を受けないこと、平均増幅率は斜面の頂上で凸部をもち、傾斜角が大きいほどその凸部は大きくなるのが分かる。この凸部での平均増幅率  $a_p$  は、斜面の傾斜角  $\theta_1, \theta_2$  を  $\theta$  で代表させると次式で近似することができる。

$$a_p = 2.00 + 0.0060\theta \quad (1)$$

ここで、右边第 1 項は地表面が平坦な場合の平均



(a) 入射角  $0^\circ$  の平面波に対する増幅率



(b) 入射角  $30^\circ$  の平面波に対する増幅率  
図-2 平面波に対する増幅率 (地盤モデル 6)

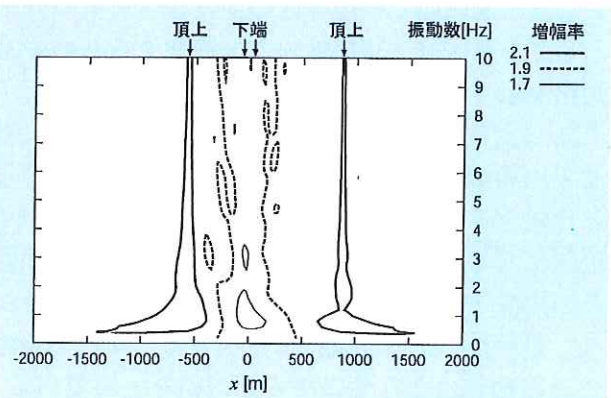
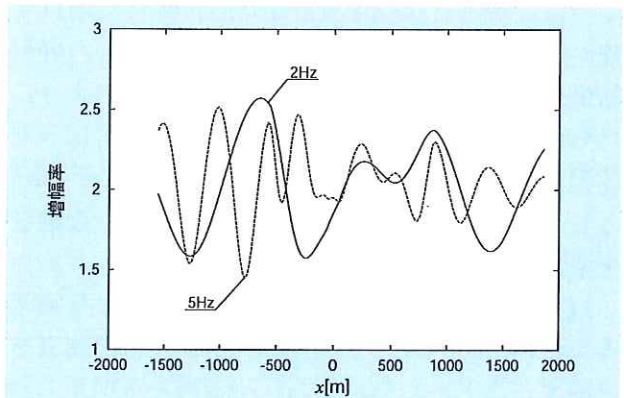
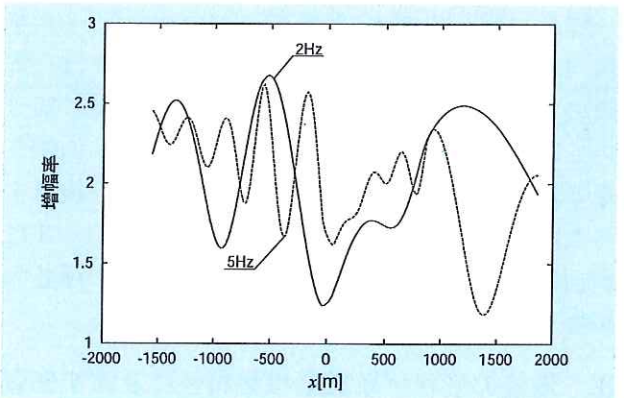


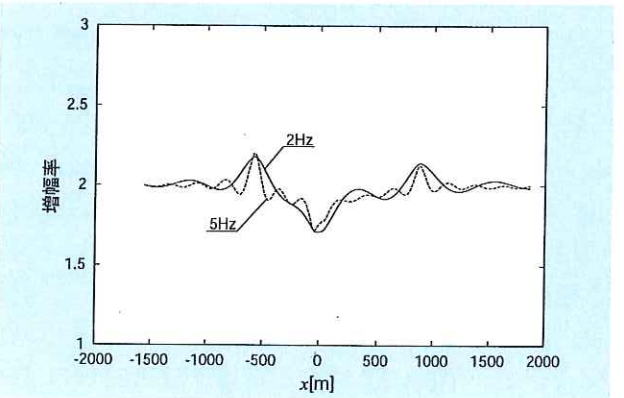
図-3 分布入射波平均増幅率 (地盤モデル 6)



(a) 入射角  $0^\circ$  の平面波に対する増幅率



(b) 入射角  $30^\circ$  の平面波に対する増幅率



(c) 分布入射波平均増幅率

図-4 振動数 2Hz と 5Hz での増幅率の比較

増幅率であり、第2項は平均増幅率 2.00 を基準とした凸部の大きさを表している。

また、平均増幅率は斜面下端で凹部をもち、傾斜角が大きいほどその凹部での増幅率は小さくなっている。この凹部での平均増幅率  $a_t$  は、次式で近似することができる。

$$a_t = 1.90 + 0.0060\theta \quad (2)$$

ここで、右辺第1項は谷底での平均増幅率であるが、図-5では明瞭ではない。ここでは、谷底の幅を大きくした地盤モデルを用いて計算し、谷の深さ  $H$  を 300m、450m、600m とした3ケースでは、平均的に谷底の平坦部での平均増幅率が 1.90 となった結果を反映させている。第2項はこの平均増幅率 1.90 を基準とした凹部の大きさを表している。

式(1)と式(2)において、 $\theta$ の係数の絶対値が等しくなっているが、これは傾斜角が同じならば、2.00を基準とした凸部の大きさと、1.90を基準とした凹部の大きさが等しいことを示している。

### 3.3 谷の深さの影響

$\theta_1$ と $\theta_2$ をそれぞれ $30^\circ$ と $20^\circ$ で固定し、谷の深さ $H$ を150m、300m、450m、600mと変化させた場合の平均増幅率を図-6に示す。これによると、凸部での平均増幅率は谷の深さ $H$ には影響を受けておらず、3.2と同様に式(1)で表せることが分かる。 $\theta_1$ と $\theta_2$ を変化させても同様の結果であった。一方、凹部での平均増幅率 $a_t$ は谷が深いほど小さくなっており、ここで検討した範囲では最大で0.1程度の変化が見られる。ただし、 $H=150$ mのケースを除外すると変化の幅は0.05より小さく、その影響は比較的小さいと考えられる。したがって、谷の深さが300mよりも大きい場合には、凹部での平均増幅率も3.2と同様に式(2)で近似することができる。

### 3.4 斜面の傾斜が変化する影響

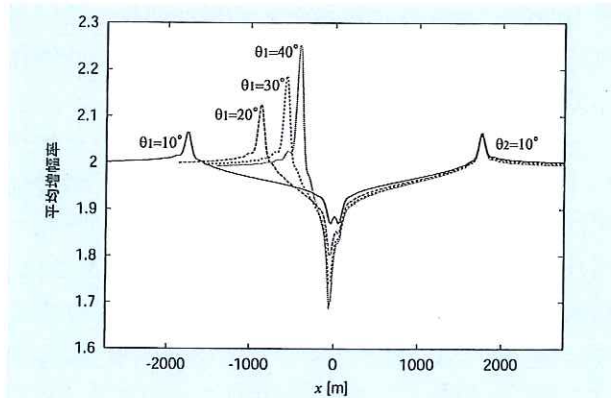
図-7のように斜面の傾斜が深さ150[m]で変化する2つのモデルを考える。図に示すように、モデル14とモデル15は谷底から深さ150mまでは同じ地形を有しているが、いずれも深さ150mで傾斜が変化し、モデル14では斜面が上に凸になるのに対し、モデル15では斜面が下に凸になっている。

これらのモデルについて平均増幅率を計算したものが図-8である。図-8には傾斜が変化しない

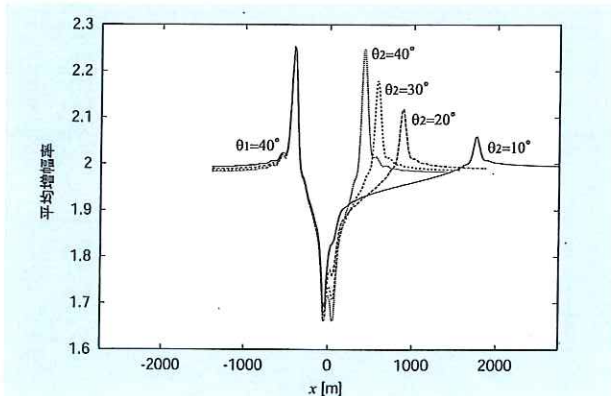
モデル6 ( $H=300$ m,  $\theta_1=30^\circ$ ,  $\theta_2=20^\circ$ )の平均増幅率も併せて示した。

これによると、谷底から深さ150mまで3つのモデルの平均増幅率はほぼ一致しており、それ以後の地形の違いにあまり影響を受けていないことが分かる。ただし、深さ150m及び0mの斜面の傾斜が変化する部分では、その傾斜の変化に応じた大きさの凸部あるいは凹部が平均増幅率に見られる。

モデル14の点B, E, Fでは $10^\circ$ 、モデル14の点Aでは $20^\circ$ 、モデル15の点A, Fでは $40^\circ$ 地



(a) モデル 1, 2, 3, 4 の比較



(b) モデル 4, 7, 9, 10 の比較

図-5 平均増幅率に対する傾斜角の影響

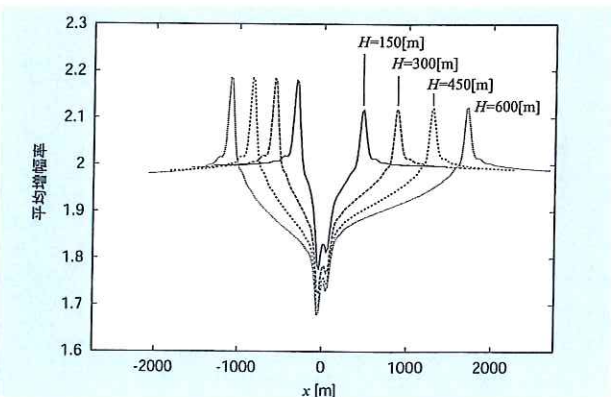
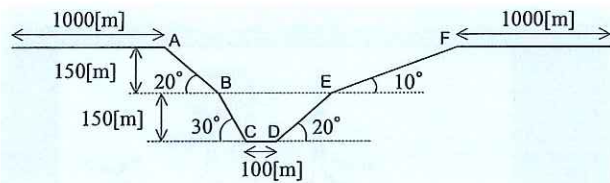


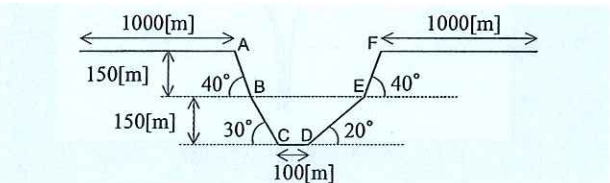
図-6 平均増幅率に対する谷の深さの影響 (モデル 6, 11, 12, 13 の比較)

形が上に凸になっているが、それぞれの地点における平均増幅率には、傾斜の変化が大きいほど大きな凸部がある。これらの凸部の大きさは、斜面が  $\alpha_p[^\circ]$  の角度で上に凸になっているとすると、場所によらず  $0.0060\alpha_p$  で近似することができる。ただし、点 A, F における凸部の大きさは平均増幅率 2.00 を基準としたものであり、点 B, E における凸部の大きさは傾斜の変化がない場合の平均増幅率 (ここでは 1.95) を基準としたものである。式 (1) でも斜面の頂上における凸部の大きさは  $0.0060\alpha_p$  で表されていることから、平均増幅率の凸部の大きさは傾斜がどの程度変化しているかによって決まっており、斜面上の位置には依存していないことが分かる。

一方、モデル 15 の点 B, E では斜面がそれぞれ  $10^\circ, 20^\circ$  下に凸になっているため、平均増幅率にはその傾斜の変化に応じた大きさの局所的な凹部がある。これらの局所的な凹部の大きさは、斜面が  $\alpha_t[^\circ]$  の角度で下に凸になっているとすると、傾斜の変化がない場合の平均増幅率 (ここでは 1.95) を基準として  $0.0060\alpha_t$  で近似することが



(a) モデル 14



(b) モデル 15

図-7 斜面の傾斜が変化する谷状地盤モデル

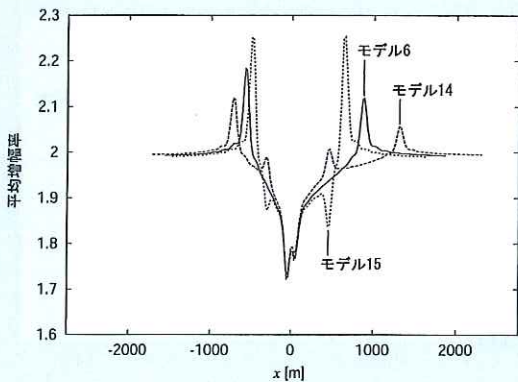


図-8 平均増幅率に対する斜面の傾斜が変化する影響 (モデル 6, 14, 15 の比較)

できる。式 (2) でも斜面下端における凹部の大きさは  $0.0060\alpha_t$  で表されていることから、平均増幅率の凹部の大きさは傾斜がどの程度変化しているかのみに影響され、斜面上の位置には依存していないと考えられる。

### 3.5 平均増幅率の評価式

以上のように、谷状地盤の形状が平均増幅率に与える影響を検討した結果、次のことが明らかになった。

- ① 平均増幅率の凸部や凹部は斜面の傾斜が変化する地点に発生し、地形が上に凸になる地点では凸部に、下に凸になる地点では凹部になる。
- ② 平均増幅率には、傾斜の変化の程度に比例した大きさの凸部あるいは凹部が発生する。
- ③ 傾斜の変化の程度が同じならば、平均増幅率の凸部と凹部の大きさは同じである。
- ④ 平均増幅率の凸部や凹部の大きさは斜面上の位置には依存しない。
- ⑤ 斜面の傾斜が変化しない地点での平均増幅率は谷底から斜面の頂上まで単調に増加する。
- ⑥ 平均増幅率の凸部や凹部での値は、傾斜が変化しない場合の平均増幅率に凸部の大きさを足すあるいは凹部の大きさを引くことによって得られる。

上記の結果から、谷状地盤における平均増幅率の簡便な評価式を提案する。斜面の傾斜が変化し、 $\alpha[^\circ]$  の角度で上に凸になっている (下に凸になっている場合  $\alpha$  は負の値をとる) 地点での平均増幅率  $a$  は次式で近似することができる。

$$a = 2.00 - 0.10 \frac{D}{H} + 0.0060\alpha \quad (3)$$

ここで、 $D$  は地表面の平坦部からのその地点の深さ (m)、 $H$  は谷の深さ (m) である。右辺第 2 項の係数 0.10 は、傾斜が変化しない地点の平均増幅率が斜面の頂上で 2.00、谷底で 1.90 となるよう設定したものである。なお、これまでの議論から、式 (3) の適用範囲はおおよそ  $H \geq 300, |\alpha| \leq 40$  である。

式 (3) によれば、斜面の傾斜が  $40^\circ$  変化する場合、平均増幅率の最大値は  $a = 2.00 + 0.24 = 2.24$ 、最小値は  $a = 2.00 - 0.10 - 0.24 = 1.66$  であり、その差は 0.58 と 30% 程度の大きさになるため、ダムの耐震設計を行う際には、このような斜面上における増幅率の差異を考慮する必要がある。また、尾根を含め、斜面の傾斜が変化する箇所に設置さ

れた強震計によって得られる強震記録は、地形による地震動増幅の影響を受けるため、強震記録をもとに入力地震動を設定するような場合には、その影響を取り除くべきであると考えられる。

例えば図-8 から、特に地表面の傾斜が大きく変化する場合には平均増幅率に鋭い凸部や凹部が現れ、平均増幅率が大きく変化していることが分かるが、これは傾斜が変化する地点の周辺では、構造物に入力される地震動が急激に変化することを意味している。そのため、傾斜が大きく変化する地点では、構造物に局所的に大きな歪や応力が発生する可能性があり、特に注意が必要であると考えられる。ただし、3.1 で述べたように、平均増幅率は分布入射波平均増幅率を振動数に関して平均したものであるから、ある一つの方向からだけでなく、あらゆる方向から均等に地震動が入射している場合を想定していることに留意しなければならない。

#### 4. まとめ

本研究では、設計地震力設定手法の合理化・高度化に資することを目的として、谷状の地形を有する地盤における地震動増幅特性に関する検討を行った。本研究の内容をまとめると以下のようになる。

- (1) 二次元境界要素法を用いて谷状地盤の振動解析を行い、平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率を計算した。
- (2) 平面波に対する増幅率は入射角によって大きく異なり、一つの平面波に対する増幅率によって谷状地盤の増幅特性を代表させることはできないことを示した。
- (3) 分布入射波平均増幅率は振動数による変動が小さいことから、分布入射波平均増幅率をダ

ムの低次固有振動数が含まれる範囲 0.2~10Hz について平均をとったものを平均増幅率とし、谷状地盤における地震動増幅を表す指標として提案した。

- (4) 形状の異なる種々の谷状地盤のモデルについて平均増幅率を計算することにより、斜面の傾斜や深さ及び傾斜の変化が平均増幅率に及ぼす影響を明らかにした。
- (5) (4) の結果から、谷状地盤において斜面の傾斜が変化する地点での平均増幅率を、傾斜の変化と谷の深さ及びその地点の深さから簡便に評価する式 (3) を提示した。
- (6) 傾斜が大きく変化する地点の周辺では構造物に入力される地震動が急激に変化するため、構造物に局所的に大きな歪や応力が発生する可能性を指摘した。

#### 謝辞

埼玉大学工学部建設工学科 茂木秀則講師には、境界要素法の数値解析プログラムをご提供いただいた。ここに記して、深甚なる謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 土木学会編：エネルギー施設、動的解析と耐震設計第3巻, 1989.
- 2) Bouchon, M. : Effect of topography on surface motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 63, No. 3, pp. 615-632, 1973.
- 3) 例えば, 佐藤泰夫：弾性波動論, 岩波書店, 454p, 1978.
- 4) 茂木秀則, 川上英二：不整形地盤における SH 波の入射境界増幅率と分布入射波平均増幅率, 土木学会論文集, No.605/I-45, pp.91-103, 1998.
- 5) Hall, J. F. : The dynamic and earthquake behavior of concrete dams: review of experimental behavior and observational evidence, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 7, pp.58-121, 1988.

片岡正次郎\*



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター  
地震防災研究室研究官, 工博  
Dr. Shojiro KATAOKA

田村敬一\*\*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム上席研究員, 工博  
Dr. Keiichi TAMURA

松本俊輔\*\*\*



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター  
地震防災研究室研究員  
Shunsuke MATSUMOTO