

(18) 岩盤の表層構造と地震動

建設省土木研究所 正会員 ○山辺 建二
建設省土木研究所 正会員 大久保雅彦
建設省土木研究所 正会員 松本 徳久

Structure of Subsurface Layers And Earthquake Motions

Kenji YAMABE, Masahiko OKUBO, Norihisa MATSUMOTO
(Public Works Research Institute Ministry Of Construction)

Abstract

The earthquake motions observed on the surface is affected by subsurface layers. In general these kind of studies deal with rock masses irrespective of classification and identification. However, it is important to classify rock masses in order to estimate the effects on dam foundation.

We examined the effects by using multiple reflection theory. The results obtained can be summarized as follows. 1) Peak frequency of transfer function determined from structure of subsurface layers, it independent on depth of observed point. As observed point is within 20% of layer thickness from ground level, an observational error of amplification ratio is about 5% only. 2) Response ratio of three layers-model on the surface is not smaller than that of two layers-model in all of case. 3) Fourier spectrum of observed earthquake motion to dam-axis direction in a certain dam corresponds to calculated one by dam model in frequency under 5-9Hz.

1. はじめに

地震動は、実体波の場合、当該地点において鉛直上方に進行して地表に達し、そこで反射して下降する。したがって、地表で観測される地震動は、地表付近の地盤状態によって強く影響される。このことはよく知られており、多くの研究例がある。しかし、岩盤については多くの場合厳密に規定されることがなく、一括して取り扱われてきた。岩盤は一様でかつ剛体として考えられがちであるが、地質の成因、年代でその物性は異なる。我が国は造山運動が活発で地層が複雑であり、また岩盤の表層部では様々な作用による風化も生じている。解放基盤における地震動観測記録を得ることは耐震設計上重要なことではあり、ダムサイトでは図-1に示すように観測機器はギャラリー等に設置されることが多い。ダムサイトにおける観測地点は解放基盤に近いものと考えられるが、解放基盤の定義は明確でなく、観測された地震動観測記録は载荷している上層部の岩盤の影響を受けており、解放基盤の地震動そのものとは言えない。

そこで、筆者らは岩盤の表層構造が地表で観測される地震動に与える影響を重複反射理論によって検討した。本報告は、

1) 岩盤の表層構造モデルとその地震動伝達特性

2) ダムにおける地震観測記録と数値シミュレーション
について、その結果をとりまとめたものである。

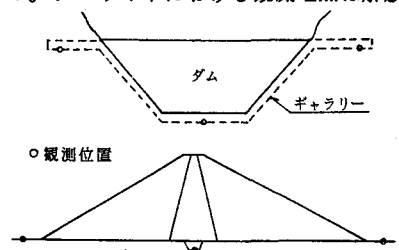


図-1 ダムサイト地震動観測位置例

2. 岩盤の地震動伝達特性

(1) 岩盤の表層構造モデル

岩盤の表層構造は図-2に示すようにモデル化した。図-1のモデルAは基盤上に一様均質な地層があるものと仮定した二層モデルで、モデルBは基盤上に2層の硬岩、軟岩あるいは上層に風化した層があるものとした三層モデルである。また、モデルCは基盤上に2種類の等厚の地層が互層状になっているものと仮定した互層モデルで、互層中の上層側を軟岩あるいは風化層、下層側を硬岩としている。なお、基盤のせん断波伝播速度、減衰定数はモデル上、2000m/s、0.01と設定した。

(2) 応答倍率とピーク周波数

① 二層モデル

基盤に対する地表面の変位の応答倍率と周波数の関係を図-3に示す。この関係は次の近似式によって表され、応答倍率は h の関数で、ピーク周波数は H と V_s の関数である。¹⁾ E , F はそれぞれ入射波、反射波の振幅であり、添字の1,2は上からの層番を表している。 V , ρ , ω , f , α , h , H はそれぞれせん断波伝播速度、単位体積重量、角振動数($=2\pi f$)、周波数、距離減衰係数($=\omega h/V_1$)、減衰定数、上層厚である。二層モデルの場合には、地表面の観測記録を次式より換算して基盤での地震動を推定することが可能である。

$$A = \left| \frac{E_1 + F_1}{E_2 + F_2} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \frac{\omega H}{V_1} + (\alpha H)^2 \sin^2 \frac{\omega H}{V_1}}}$$

$$A_{\max} = \frac{1}{\alpha H} \quad \text{at} \quad \omega = \frac{2n-1}{2} \pi \frac{V_1}{H} \quad (n=1,2,\dots) \quad \dots\dots(1), (2)$$

深度と一次モードの基盤に対する応答倍率の関係を図-4に示す。深度は基盤からの層厚 Z を表層厚 H で無次元化しており、応答倍率は基盤に対する応答倍率 $|(E_2 + F_2)/(E_2 + F_2)|$ を地表面の応答倍率 $|(E_1 + F_1)/(E_2 + F_2)|$ で無次元化している。応答倍率は上層の減衰定数に関わらず深度方向にほぼ一般的な曲線形状を示す。観測点が地表面から上層厚の20%程度の深さまでの範囲であれば、応答倍率は最大5%の差であり、ピーク周波数もかわらないことから、観測上の差は小さい。

② 三層モデル

上層のせん断波伝播速度、減衰定数は下層より小さく設定しており、一次モードに着目して、上層厚 H_1 の層厚 H に対する割合 α と基盤に対する地表面の応答倍率とピーク周波数の関係を図-5に示す。層厚 H は100mで、岩の単位体積重量は2.6g/cm³であり、上層厚の割合 α が0.0, 1.0の場合は二層モデルと同じである。上層厚の割合が増加するにつれてピーク周波数は単調に減少するが、応答倍率はある範囲で逆に増加し、上層の減衰定数が0.01の時で $0.0 < \alpha \leq 0.2$, 0.02の時で $0.0 < \alpha \leq 0.4$

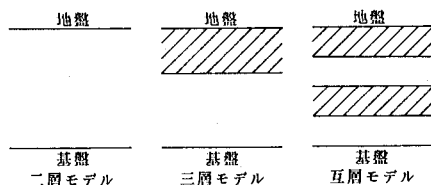


図-2 岩盤の表層構造モデル

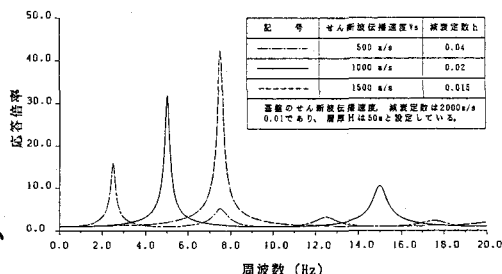


図-3 応答倍率と周波数

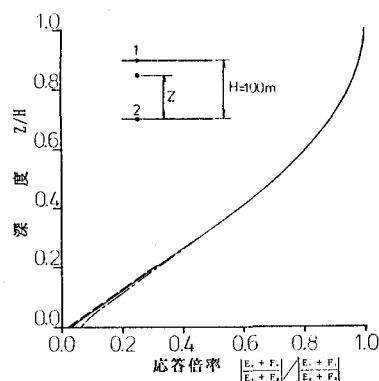


図-4 深度と応答倍率

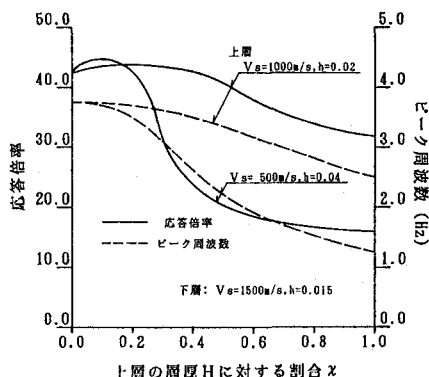


図-5 上層厚の割合と
応答倍率、ピーク周波数

の範囲において二層モデルで算定される応答倍率よりも大きくなる。また、減衰定数の小さい方がその増分が大きい。したがって、硬岩の上部に軟岩あるいは風化層等があるような場合には地表面での応答倍率が大きくなる場合があり、注意が必要である。応答倍率、ピーク周波数は次式を解くことにより、近似的に算出することができる。ここで、 κ は振動インピーダンス($=\rho_1 V_1 / \rho_2 V_2$)である。ただし、ピークの応答倍率は近似値では誤差が生じ、上層が軟弱で層厚の割合が小さいと一次モードでの誤差は大きくなる。しかし、通常の誤差は10%程度以下であり、モードが大きくなるにつれて誤差は減少する。

$$A_{\max} = \frac{1}{(\alpha_1 H_1 + \kappa \alpha_2 H_2) \sin \frac{\omega H_1}{V_1} \cos \frac{\omega H_2}{V_2} + (\kappa \alpha_1 H_1 + \alpha_2 H_2) \cos \frac{\omega H_1}{V_1} \sin \frac{\omega H_2}{V_2}}$$

$$\tan \left(\frac{2\pi f H_1}{V_1} \right) \tan \left(\frac{2\pi f H_2}{V_2} \right) = \kappa^{-1}, \quad \omega = 2\pi f \quad \dots\dots(3), (4)$$

深度と基盤に対する一次モードの応答倍率の関係を図-6に示す。図中に示す点線は二層モデルの場合の近似曲線である。三層モデルの応答倍率は、上層と下層の境界で二層モデルとの差が最も大きくなる。なお、ピーク周波数は二層モデルと同様に深度に関係なくほぼ一定である。

③ 互層モデル

ダムサイトにおいて、砂岩・泥岩等の特性の異なる地層が互層状になっているような地質は実際にしばしば見られる。

層厚を100mとし、分割数を変化させた時の分割層厚と基盤に対する地表面の一次モードの応答倍率、ピーク周波数の関係を図-7に示す。上から奇数、偶数番目の層のせん断波伝播速度、減衰定数は500m/s, 0.04, 1500m/s, 0.015で、岩の単位体積重量は2.6g/cm³である。層厚一定で分割層厚が増加するとピーク周波数は増加する傾向にあり、応答倍率は分割数が4分割以上の場合にはほぼ一定値となる。また、分割数を10とした時の層厚と基盤に対する地表面の一次モードの応答倍率、ピーク周波数の関係を図-8に示す。なお、図中に示す点線は奇数番目と偶数番目の層を入れ換えた場合の結果を示している。分割数が一定ならば層厚Hに関わらず応答倍率はほぼ一定であり、ピーク周波数は層厚Hに反比例し、二層モデルと同様の傾向を示す。応答倍率、ピーク周波数は互層の層順が入れ替わってもほとんど変わらない。次に、深度と基盤に対する一次モードの応答倍率、ピーク周波数の関係を図-9に示す。なお、層厚Hは100mで分割数は10である。三層モデルの結果から層数が増大する程二層モデルの曲線に漸近するものと考えられる。ピーク周波数は二層モデル、三層モデルと同様に深度に関わらず一定である。

以上のことから、分割数が多い場合には層全体の物性値の平均的な評価ができれば、二層モデルと同様な方法で基盤面の地震動を推定が可能と考えられる。

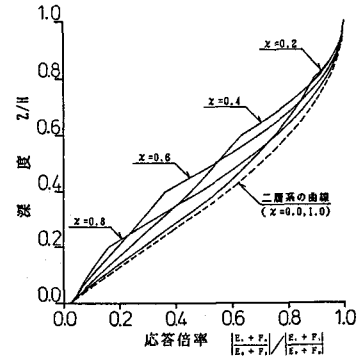


図-6 深度と応答倍率

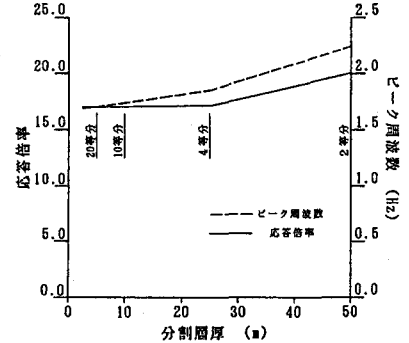


図-7 分割層厚と応答倍率、ピーク周波数

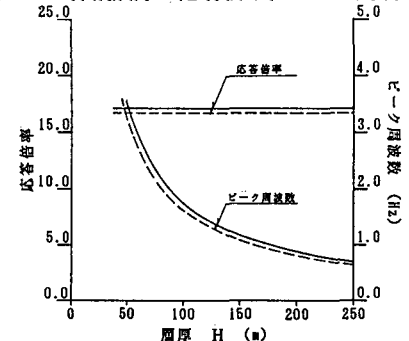


図-8 層厚と応答倍率、ピーク周波数

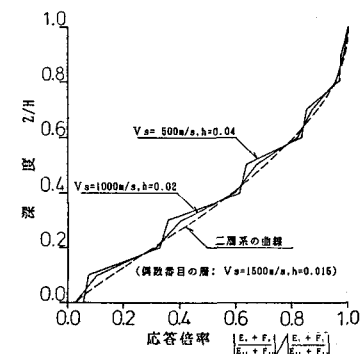


図-9 深度と応答倍率

3. 地震動観測記録と数値計算結果

(1) ダムの地震動観測記録

Aダムにおける地震時のダム天端・基礎、左岸天端の堤軸方向加速度記録を図-10に示す。Aダムはダム高さ約80m、堤頂長約440mのフィルダムであり、観測点は図-11に示す位置にある。重複反射理論を適用するにあたって、地質工学的にみてなるべく水平方向に様な性状を有するダムサイトを選んでいる。ダム基礎および左岸天端地点のダム建設前の弾性波探査による縦波伝播速度は3.5~4.5km/s程度の値を示す。

上下流、堤軸方向の加速度の最大値は、ダム天端で72.7, 52.6gal、ダム基礎で17.9, 20.6gal、左岸天端で33.5, 27.5galである。フーリエスペクトルを図-12に示す。点線は上下流方向、実線は堤軸方向の値である。上下流、堤軸方向の一次モードのピーク周波数は、ダム天端で2.2, 2.2Hz、ダム基礎で1.6, 2.0Hz、左岸天端で1.6, 2.0Hzである。ダム天端のフーリエスペクトルは上下流、堤軸方向で同周波数の一次モードが卓越し、ダム基礎の傾向とは異なる。また、解放基盤に近いと考えられるダム基礎と左岸天端のフーリエスペクトルはよく似た周期性を示し、スペクトル値も同程度の値を示すが、ダム基礎ではスペクトル値が高周波数で低減する傾向を示すのに対して、左岸天端では明瞭なピーク値を示さず低減の割合が小さい。

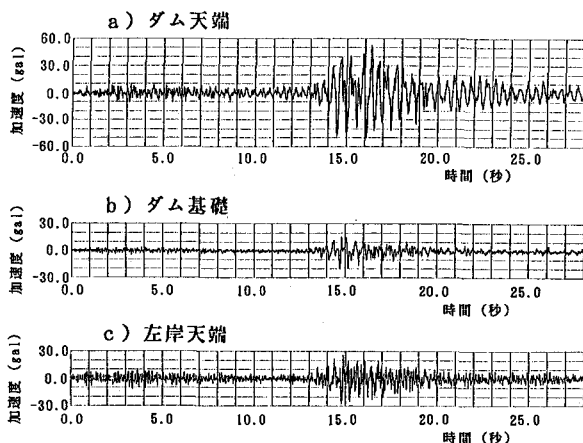


図-10 地震動加速度記録

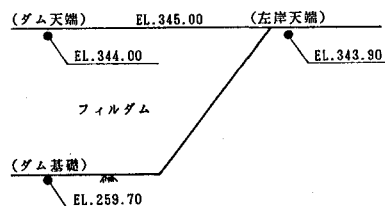


図-11 地震動観測位置

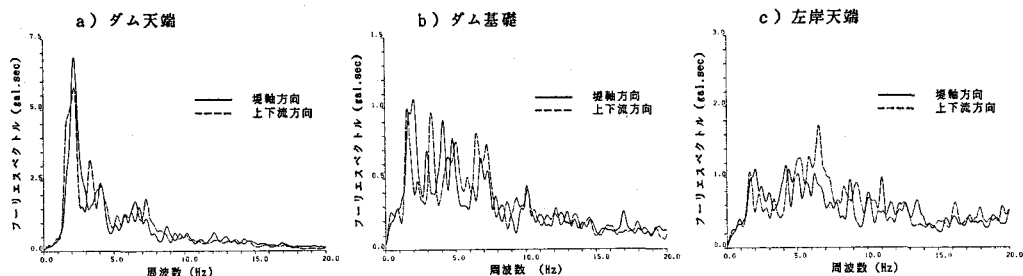


図-12 フーリエスペクトル

(2) 数値計算

任意の地点の応答は、まず観測地点との応答倍率を重複反射理論によって算出し、観測地点の加速度記録をフーリエ変換して異なる周波数と振幅を有するいくつかの正弦波形に分解して所定の応答倍率を掛けてその結果を再び加えることによって得る。ここでは、2.で検討した結果を踏まえてダムサイトをモデル化し、ダム天端の加速度記録からダム基礎、ダム基礎の加速度記録から左岸天端の応答の算定を行い、実測記録の応答と比較する。

ダムサイトの地層は図-13に示すようにモデル化した。ダム本体は6層に分割し、左岸山体については3層に分割しており、それ以下の

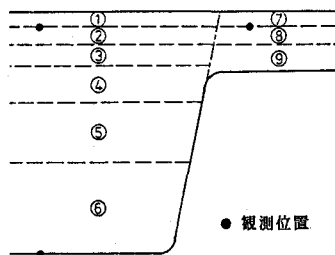


図-13 ダムサイト地層モデル

岩盤は基盤とする。各層のせん断波伝播速度、減衰定数を表-1に示す。ダム本体については築堤材料の過半を占めるのがロック材料であり、既往の研究結果を基にロック材のせん断波伝播速度、減衰定数から設定した。²⁾³⁾ 岩盤のせん断波伝播速度は、縦波伝播速度から次式の関係をもって設定した。ただし、左岸山体上層部は掘削によるゆるみ、風化等による劣化を考慮して設定した。なお、 V_s, ν_0 はせん断波伝播速度、動的ポアソン比である。

$$V_s = \left\{ \frac{1-2\nu_0}{2(1+\nu_0)} \right\}^{\frac{1}{2}} V_p \approx 0.5 V_p \quad \dots\dots(5)$$

(3) 数値計算結果

計算結果を図-13に示す。図中の実線は実測であり、点線が計算結果である。ダム本体をモデル化して得られたダム基礎のフーリエスペクトルの周波数特性は、堤軸方向については7~9Hz以下の周波数領域でほぼ良好な一致をみるのに対して、上下流方向はあまり実測結果と一致しない。左岸天端のフーリエスペクトルの周波数特性は、堤軸方向で5Hz以下の低周波数でよく一致しており、この周波数領域で計算値は実測のダム基礎のフーリエスペクトルとほぼ同じである。また、上下流方向についてはあまり一致しない。ダム基礎での結果に比べて左岸天端の結果は実測との対応性がよくない。これはダム基礎とダム左岸の応答倍率がダム天端とダム基礎の応答倍率を介して得られるための誤差、あるいはダム堤体挙動等の影響によるものと考えられる。

4. おわりに

岩盤の表層構造が地表で観測される地震動に与える影響について検討し、以下の結果が得られた。

- ① 伝達関数の周期性は表層構造によって一義的に決定され深度に無関係で、応答倍率は観測点が地表から基盤上層厚の20%までの範囲では5%程度の差にしかない。
- ② 硬岩上に軟岩あるいは風化層がある時、応答倍率は硬岩の二層モデルに比べて大きくなる場合があり、上層が軟弱化する程、応答倍率は増加する。なお、三層モデルについても近似式により、精度は劣るが地震動伝達特性を推定することが可能である。
- ③ 重複反射理論は半無限体の水平層を対象としており、履歴減衰を粘性減衰に置き換えた1次元の近似的解法ではあるが、ダムサイトの地震動観測記録を基に表層構造をモデル化して数値計算した結果、堤軸方向についてはほぼ妥当な結果が得られた。

参考文献 1) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972 2) 松本徳久、安田成夫：ロックフィルダムの動的解析における入力物性値と非線形解析, ダム技術 Vol.3-4, ダム技術センター, 1985年 3) 松本徳久、安田成夫、大久保雅彦、木下靖：大型中空供試体による粗粒材料の動的変形特性, 第24回土質工学研究発表会論文集, 土質工学会, 1989年

表-1 せん断波伝播速度と減衰定数

層番号	せん断波伝播速度	減衰定数	層厚	単位体積重量
①	250m/s	0.040	1.0m	2.80g/cm ³
②	300	0.040	4.0	2.80
③	400	0.040	10.0	2.80
④	550	0.040	15.0	2.80
⑤	800	0.030	20.0	2.80
⑥	1000	0.020	35.3	2.80
⑦	1000	0.020	1.1	2.80
⑧	1000	0.020	3.8	2.80
⑨	1000	0.015	10.0	2.80
⑩	2000	0.010	—	2.80

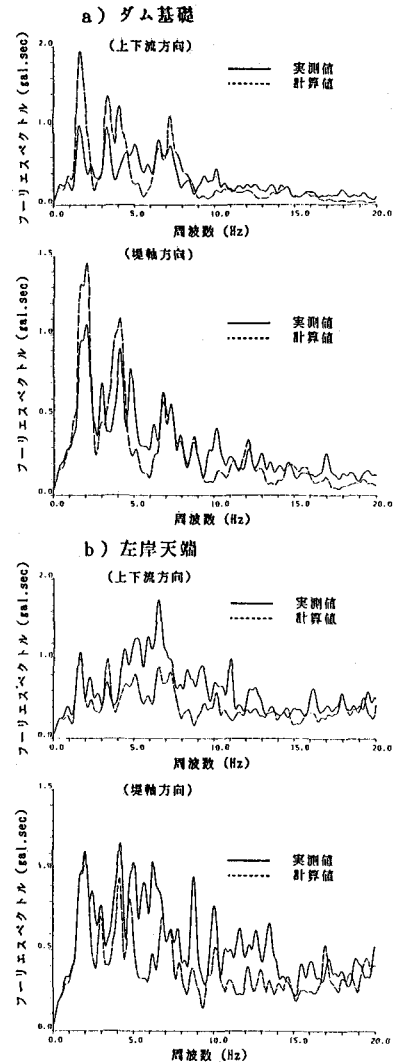


図-14 フーリエスペクトル