

CS 122

地震応答解析法の改良：軟弱地盤はなぜよくゆれるか？

東京大学工学部 東畑郁生

1. はじめに 地盤の地震応答解析がマイクロゾーニング[®]に応用されるようになって、大きな問題が発生した。それは、軟弱地盤は固い地盤よりゆれにくい、という計算結果が得られてしまうことである。軟弱地盤地帯の方が被害がはるかに多いこと、ロマ・プリエタ地震で観測された最大加速度分布も海岸沿いの沖積地帯で大きいこと（Seedら, 1991）からみて、計算をそのまま信用することはむずかしい。ここでは、このような問題の解決法を提案する。

2. 既存の解析方法の問題点 地盤の固さは深さ方向に変化する。地盤の動的解析には、有限要素法、波動伝播法、特性曲線法などいろいろあるが、固さの変化を考慮するためにはいずれも、地盤を要素や層に分割している。これが問題である。層間で剛性が不連続なので、そこで地震波が反射され、震動エネルギーが一部しか地表に到達しない。軟弱地盤ほど上部層が軟らかく層間の不連続を大きくせざるを得ないので、波の反射も激しくなり、地表が計算上ゆれにくくなる。

洪積層と沖積層とは土質も年代も不連続な「不整合」関係にある。従って、実際も計算上も剛性は不連続である。しかし沖積層は一万余年の間連続して堆積してきたので、土質が粘土から砂に「変化」しても、それは一夜にして変わったものではない。土質は徐々に変化し、有効応力は深さ方向に連続なので、土の固さや減衰比も深さ方向に連続変化している。従って沖積層に入射した振動エネルギーは途中で反射せず、内部減衰で消散する成分以外はすべて地表に到達する。

3. 新しい解析方法 密度 ρ 、S波速度 V_s の弾性媒体の中を伝わる円振動数 ω の波が持つエネルギーは、一波長あたり $K = \pi \omega \rho V_s$ （変位振幅 E ）²に等しい。このエネルギーがすべて地表に到達するなら、 V_s が小さい地盤ほど振幅は大きくなる。

より実際に近い考え方をするために、土の減衰比を h で現す。非粘性の減衰を考慮した波動伝播方程式を解くことにより、この内部減衰によってエネルギーが失われる割合が次の式で現されることがわかる。深さ座標 z と $2\theta = \arctan 2h$ を用いて、

$$K = \frac{\pi \omega \rho V_s \cos \theta}{(\cos 2\theta)^{1/2}} E^2 \exp \left\{ \frac{2\omega z \sin \theta}{V_s} (\cos 2\theta)^{1/2} \right\}$$

$$\frac{dK}{dz} = \frac{2\omega \sin \theta}{V_s} (\cos 2\theta)^{1/2} K$$

これを積分し、振幅の自乗がエネルギー K に比例することを利用して、

$$\ln \frac{\text{地中の振幅}}{\text{地表の振幅}} = \ln \frac{K(\text{地中})}{K(\text{地表})} = 2\omega \int_0^z \frac{\sin \theta}{V_s} (\cos 2\theta)^{1/2} dz$$

こうして伝播して地表に至った地震波はそこで反射され、再び地中に戻っていく（図1）。その過程でも再び上式のように減衰が起こる。沖積層と洪積層との境では、入射波と反射波とを重複させた全振動について変位と応力の連続条件を課することにより、波の反射・透過を計算する。

4. 計算例 上に記述した方法で、露頭振幅に対する地表動の増幅率を計算してみた。図2は、浅いところほど徐々に軟らかくなる場合である。特にケース1では減衰比が大きい。特に地表の軟らかいケース1と2で増幅の著しいことがわかる。また、ケース1と2程度の減衰の差では、増幅率に大した影響がない。また、今回提案の方法は静的変位（ $\omega = 0$ ）には適用できないので、低周波数の部分は誤差が多い。従ってこの部分は破線で表現してある。

図3のケース1、2、3では、地表の固さが共通である。2と3とでは軟弱層の厚さに大差がある。その影響は増幅率曲線に、共振周波数のずれとなって現れた。共振時の増幅率の値には差がなく、地表付近の土の固さだけで増幅が決定されている。

図4は、基盤（洪積層）の浅い場合と深い場合とを比較したものである。ここでも増幅率の値自体には差がなく、周波数が地盤ごとに異なっているだけである。共振周波数と地震の卓越周波数とが一致したときに激しいゆれの起こることがわかる。

5. まとめ 波動のエネルギーの保存と消散に着目した動的解析法を提案した。それによると、地表の土が軟らかいところほど、そして沖積層の固有周波数が地震波の卓越周波数に一致する地盤ほど、地震時に激しくゆれる。既存の解析法でも、要素をきわめて細かく分割すれば同様の結果が得られると感じているが、確認はしていない。

6. 参考文献 Seed, R. B., Dickenson, S. E., and Idriss, I. M. (1991) "Principal Geotechnical Aspects of the 1989 Loma Prieta Earthquake," Soils and Foundations, 31-1, pp.1-26.

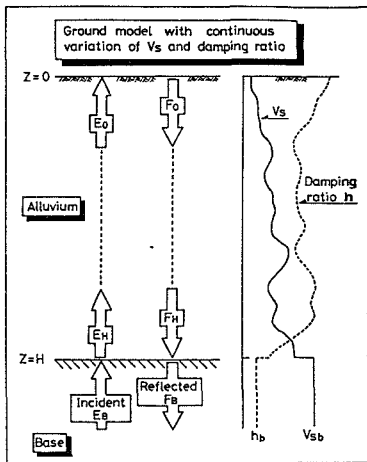


図1 波の伝播と反射

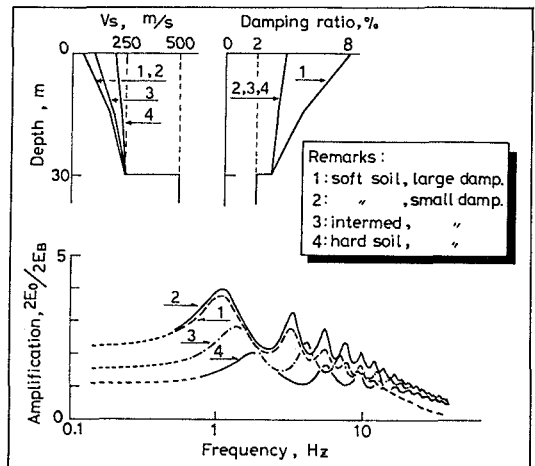


図2 計算例1

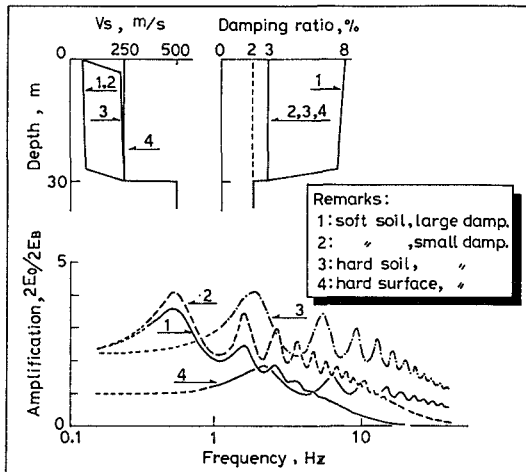


図3 計算例2

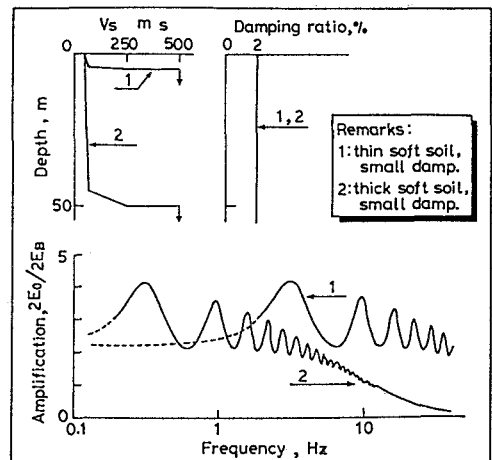


図4 計算例4