

I-B 187 砂礫地盤における微小地震記録のシミュレーションと減衰の考察

清水建設（株） 正会員 福武毅芳, 藤川 智
 中部電力（株） 正会員 上田 稔, 近藤 寛通
 中電工事（株） 正会員 恒川和久

1 はじめに 観測記録のシミュレーション解析を行う際、均質な地盤を想定し室内要素試験から得られる土の減衰のひずみ依存性（ $h \sim \gamma$ 関係）をそのまま用いることが多い。しかし、ひずみ振幅の小さな地震の解析を行う場合には、不具合が生じることが既往の研究で指摘されている。すなわち、このような理想化した解析では減衰を過小評価し、観測値よりも大きな応答結果が得られる傾向がある。これは、室内試験で得られる減衰は土の内部減衰（履歴減衰）を表すものであるが、地震記録が観測される原地盤においては、内部減衰に加えて「見かけの減衰」が含まれるためである¹⁾。この見かけの減衰には、地盤の不均一性による散乱減衰や、不整形性、波の斜め入射、伝播経路等に起因する減衰が含まれる。見かけの減衰が応答結果に与える影響は履歴減衰が大きくなるに従い小さくなる²⁾が、入力波の振幅が数Gal程度で履歴減衰が小さい場合には見かけの減衰の影響が大きく、これを考慮する必要がある。また、このような地盤の減衰は周波数依存性を示す¹⁾ことが指摘されており、観測記録を適切に再現するためには周波数依存型の減衰を考慮した解析が必要である。本研究では、不整形砂礫地盤で得られた微小地震記録に対して、上述の見かけの減衰を考慮した一次元のシミュレーション解析を実施する。さらに、最適化手法により周波数依存型の減衰を同定し³⁾、これを用いた解析により観測記録の再現を行う。これらの解析により、観測記録に見られる減衰の影響とその周波数依存性の考察を行う。

2 解析条件 解析対象とする地盤の土質とS波速度構造を図1に示す。A1とA2で観測記録（ $\Delta=78\text{km}, M=3.7$ ）が得られており、図3にA1,A2の加速度波形を示す。最大値は地表面に近いA1で11.6Gal、岩盤内のA2で4.7Galである。解析に用いる継続時間は5秒間とする。砂礫のひずみ依存性を表す $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係は文献4)を参考に図2に示すように設定するが、 $h \sim \gamma$ 関係は後述するように各ケースで異なる。解析は表1に示す3ケースを実施した。ケース1は、内部減衰のみを考慮して室内試験から得られる $h \sim \gamma$ 関係をそのまま適用し、見かけの減衰は考えない。ケース2では、見かけの減衰を考慮して、図2に示すように砂礫地盤および岩盤の小ひずみ領域の減衰を周波数に依らず $h=11\%$ とする。この値は理論的に導かれたものではなく、観測記録と解析結果が比較的良好に一致するように設定したものである。ケース1, 2の解析は等価線形解析を用いる。ケース3では周波数依存型減衰を考慮し、これを佐藤ら³⁾による最適化手法により同定する。減衰は周波数 f の関数として $h=h_0 \cdot f^{-\alpha}$ で表し、パラメータ h_0 と α を同定する。図4に示す記録と解析のスペクトル比（A1/A2）の残差二乗和が最小となるように最適化を行う。S波速度構造はPS検層結果に従い最適化を行わない。ここで、スペクトルはバンド幅1 Hzのウィンドウで平滑化した。このようにして得られた周波数依存型減衰は、最適化によりひずみレベルに対応した等価な減衰となっているため、ケース3は線形解析とした。このため、剛性に関してはケース1と2に対応していないが、ひずみレベルが小さいためこの影響はほとんどないと考えられる。なお、図5にケース2およびケース3で適用する減衰を示すが、既往の研究結果¹⁾との対応は悪くないものと思われる。

3 解析結果 図3には加速度波形の観測記録と解析結果の比較を示す。図4には各ケースのスペクトル比を示す。ケース1では、解析結果は観測記録に比べて2倍程度大きな加速度振幅を示している。地盤に生じるせん断ひずみは高々0.001%のオーダー（ $G/G_0 \approx 0.9 \sim 0.95$ ）であり、それに対する減衰は2%程度で過小評価している。ケース2では、加速度波形の最大値は比較的良好に対応している。スペクトル比では、高周波数領域（10～20Hzの二次モード）で解析結果は観測記録より小さい。これは、減衰の周波数依存性を考慮していないためであると考えられる。ケース3は、ケース2に比べると加速度波形で見ると改善の度合いははっきりとは見られない。しかし、スペクトル比で比べると、記録との差が小さくなり高周波数側でよく合っており、改善された結果が得られている。本研究で対象とした地点は、文献5)に示す不整形切土・盛土地盤である。従って、図5に示す同定された減衰には、散乱減衰の他に地盤の不整形性、伝播経路、斜め入射等の影響が含まれていることに留意する必要がある。なお、スペクトル比で見ると、一次のピークを示す周波数は各ケースとも観測値に対応しており、PS検層結果から設定したS波速度構造は適切であったものと考えられる。

4 まとめ 見かけの減衰を考慮して地盤の微小ひずみ領域の減衰を周波数に依らず $h=11\%$ とすれば、観測記録とよく対応する解析結果が得られたが、スペクトル比の高周波数側では応答値が過小評価された。そこで、減衰の周波数依存性を考慮し、最適化手法により同定した結果を用いて解析を行ったところ、記録との差が小さくなり改善された結果が得られた。本研究で対象とした地盤と観測記録において、見かけの減衰の影響とその周波数依存性が確かめられ、それは既往の研究とも対応するものであった。

謝辞 本研究の遂行にあたり、有益な御助言を戴いた清水建設(株)和泉研究室の佐藤智美博士に謝意を表します。

参考文献 1) Kobayashi et al. : Attenuation characteristics of soil deposits and its formulation, Proc. of the International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Vol. I, 1992. 2) Joyner, W.B., A method for calculating nonlinear response in two dimensions, Bul. Seismological Society of America, Vol. 65, No. 5, pp. 1337-1357, Oct., 1975. 3) 佐藤, 川瀬, 佐藤「ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性」, 日本建築学会論文報告集, 第461号, pp. 19-28, 1994.7. 4) 今津, 福武「砂礫材料の動的変形特性」, 第21回土質工学研究発表会, pp. 509-512, 昭和61年6月. 5) 藤川, 福武, 上田, 依田, 恒川「等価線形および非線形解析による不整形盛土地盤の地震応答比較」, 第51回土木学会年次学術講演会, I, 1996. (投稿中)

表1 解析ケース

ケース	見かけの減衰	減衰の周波数依存性	解析方法
1	×	×	等価線形
2	○	×	等価線形
3	○	○	線形

○：考慮する，×：考慮しない

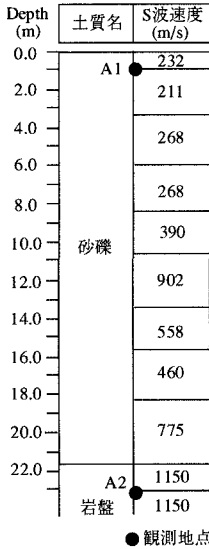


図1 土質とS波速度構造

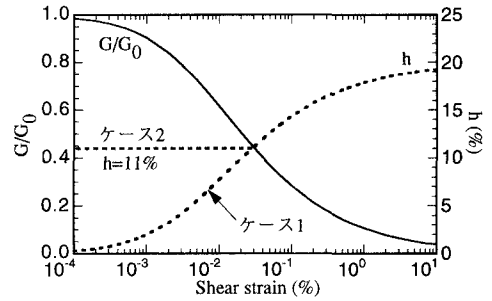


図2 砂礫の剛性比と減衰のひずみ依存曲線

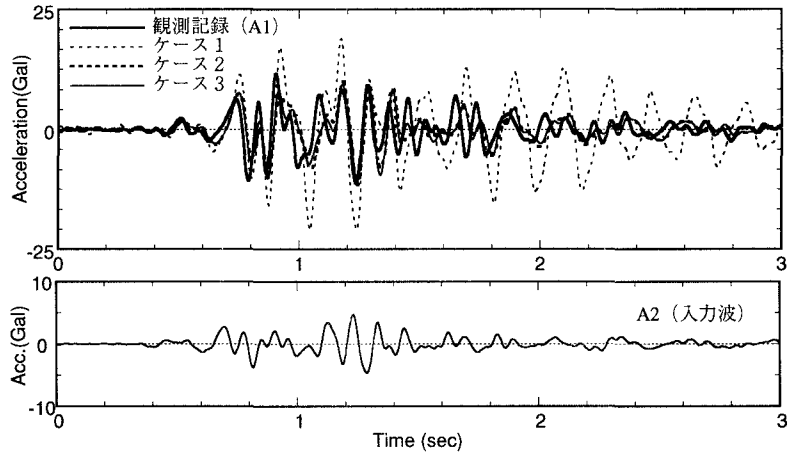


図3 加速度時刻歴

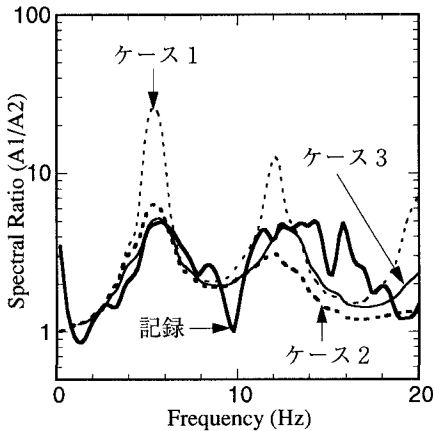


図4 スペクトル比

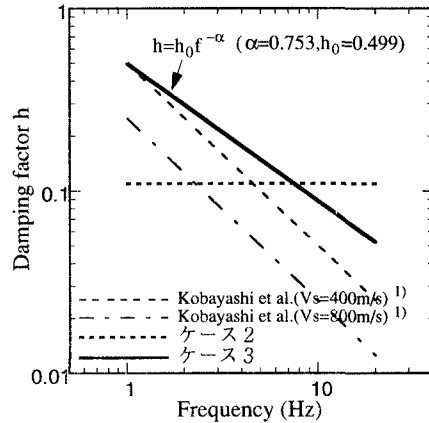


図5 周波数依存型減衰