

散乱の減衰が強震動予測に与える影響

吉田 望¹・末富 岩雄¹

¹正会員 工博 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 (〒243-0211 厚木市三田 47-3)

小地震合成法で大地震の地震波を作成する場合のように、地盤が弾性であるとの条件で地表で設計用地震動が与えられた場合には、構造物の設計用地震動を計算するためには、一旦基盤の入射波を作成した後、入射波を作用させた非線形解析を行う必要があるが、前者の過程では履歴減衰はないので、散乱減衰が重要となる。そこで、散乱減衰を考慮するか否かで、後者の非線形地震応答がどの程度変化するかをケーススタディにより検討した。その結果、その影響は最大加速度で10%、応答スペクトルの最大誤差で15%となっていることがわかった。

Key Words: 小地震合成法, 散乱減衰, 重複反射, 地震応答解析, 非線形

1. はじめに

地盤の地震応答解析を行う場合には、適切な地震動を設定する必要がある。ここで、地震動の設定方法には大きく三つの方法がある。すなわち、得られた地震記録を用いる場合、地表で設定する場合、(工学的) 基盤で設定する場合である。このうち、二つ目の方法は特に1995年兵庫県南部地震以降よく行われるようになった小地震合成法による地震動作成の様な設定方法である。また、地盤の弾性挙動時における地震動が設計用地震動のケースもある¹⁾。

これらは、その誘導の性質から、地盤が弾性的に挙動し

ている時の地表の地震動が与えられているので、実用に際しては、まず基盤の地震動を求める必要がある。ここで、いくつかの問題が発生する。すなわち、弾性の応答であるから散乱の減衰の影響が大きい可能性があること、基盤をどこに設定するかという問題である。二つ目の問題に関しては別途報告する²⁾ので、ここでは最初の問題に対して考察する。

2. 解析モデル

大阪の大深度シールド建設時に行われたGL-75mまでの地盤調査に基づき、表-1の様な地盤を検討する。材料の非線形性は、安田・山口による提案式³⁾を用いる。ただし、減衰特性については、この提案式によるのではなく、Hardin-Dmievichの提案に基づく以下の式を用いる。

$$h = h_{\max} (1 - G/G_{\max}) \quad (1)$$

ここで、 h および $h_{\max}$ は減衰定数とその最大値、 $G/G_{\max}$ はせん断定数比である。もとの実験式を用いなかった理由は、最近の動的変形特性に関する研究から、ひずみの小さいところでは非線形に起因する履歴減衰はほとんどないことがわかっていることを考慮したものである。なお、 $h_{\max}$ の値は、5%のひずみで実験式の減衰と式(1)の減衰が同じになるように決めた。図-1に後に示す計算で最大ひずみが大きかったGL-9~11mの層についてオリジナルの式との比較を示すが、両者は中ひずみではかなり一致しているものの、小ひずみ域ではオリジナルの式は減衰が大きい。

次に、地震動は、文献1)に示されている模擬地震波4S-03NSを用いる。図-2にこの波形を示すが、このうち、

表-1 表層地盤のモデル

番号	深さ (m)	土 質	記号	V_s (m/s)	γ (tf/m ³)
1	1	埋土 (シルト)	B	120	1.6
2	7	シルト質砂	As1	150	1.7
3	9	砂混じりシルト	Ac1	130	1.7
4	19	シルト質粘土	Ac1	130	1.65
5	25	シルト質砂	As2	200	1.75
6	29	シルト混じり砂	Ds1(Dg1)	280	1.9
7	32	砂質シルト	Dc1	240	1.9
8	34	シルト混じり砂	Ds1	240	2.0
9	42	砂混じり粘土	Dc1	240	1.9
10	46	シルト混じり砂	Ds1	280	1.95
11	56	砂礫	Dg2	400	2.1
12	58	シルト質粘土	Dc3	270	1.75
13	60	砂	Ds2 ¹⁾	400	1.95
14	65	粘土	Dc3	300	1.75
15	66	シルト質砂	Ds3	350	2.0
16	71	粘土	Dc4	350	1.75
17	73	砂	Ds3	350	2.0
18	75	粘土	Dc4	380	1.75
19	基盤	砂	Ds3	450	2.0

主要動を含む0～50秒を解析対象とした。

解析には、重複反射理論と等価線形法に基づく周波数領域の解析で、基本的にはSHAKEと同じであるが、散乱の減衰を考慮する、周波数依存性を考慮できるなどの機能を有しているDYNEQ⁴⁾に必要な機能を付け加えて用いた。

3. 入射波の作成

減衰の与え方を次の三つ想定する。

- ①減衰を考慮しない。
- ②3%の周波数に依存しない減衰を与える。
- ③減衰に関する経験式を用いる。

ここで、①は地盤が弾性とすれば必然的な減衰である。②は散乱の減衰を一定減衰として与えるとき、清田⁹⁾が推奨している値である。最後の③が本研究の目的であるが、散乱の減衰については多くの実験式がある。ここでは、散乱の減衰に対する経験式として福島・翠川⁹⁾が多くの経験式をまとめて整理した次式を用いる。

$$\log Q^{-1} = -A \log f - B \tag{2}$$

ここで、 $Q^{-1}=2h$ 、 A 、 B は係数である。原論文では A 、 B の値は材料ごとに定義されているが、ここでは、簡単化のため、全層に対して砂の値、すなわち、 $A=0.73$ 、 $B=0.87$ を用いる。また、式(2)は0.5～5Hzで設定されているので、これをはずれる周波数帯域については端部の値を一定と

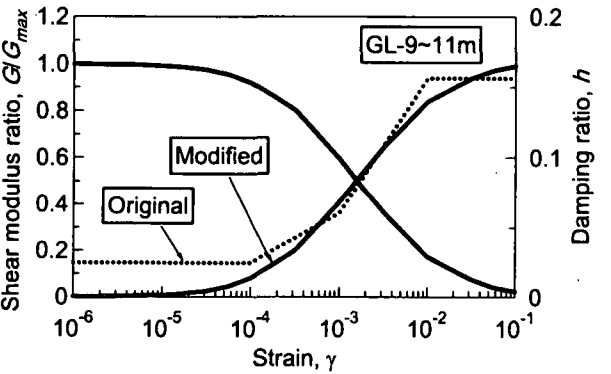


図-1 第9層 (GL-9～11m) の動的変形特性

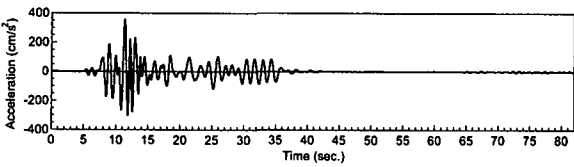


図-2 解析に用いた地表の加速度時刻歴

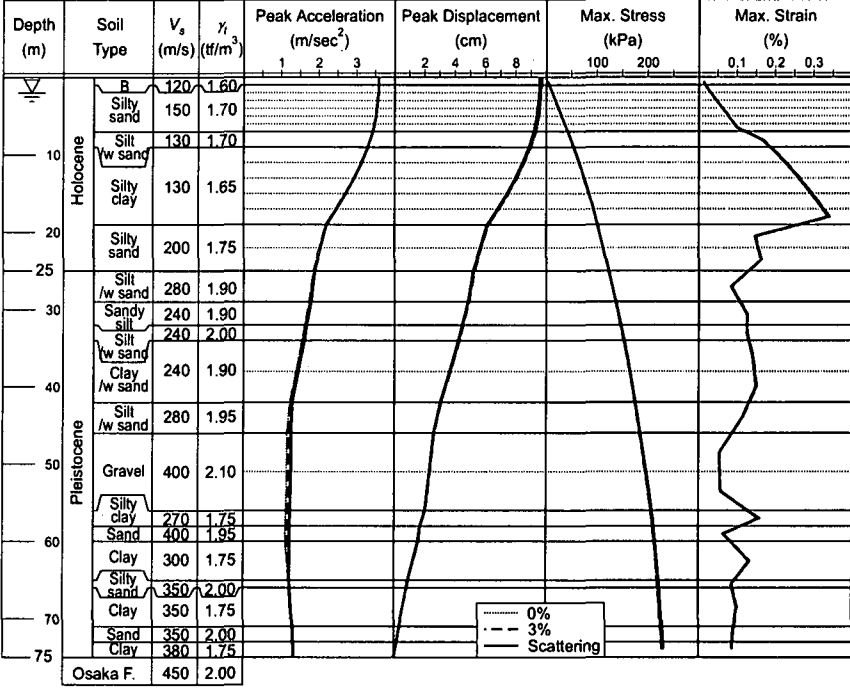
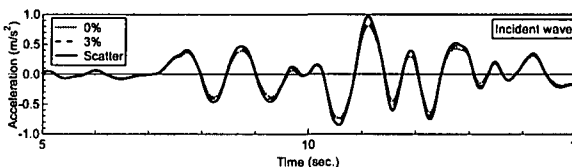


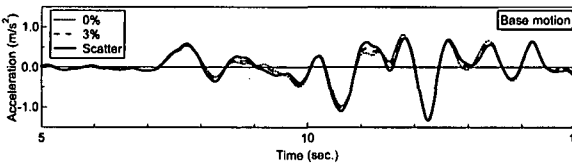
図-3 入射波計算時の最大応答値

して延長した。なお、式(2)に基づき減衰を計算すると、0.5Hzと5Hzでそれぞれ11.2、2.1%となる。

図-3に加速度、相対変位、せん断応力および最大ひずみの最大応答値を比較して示す。いずれのケースでも最大応答値で見るとほとんど差がなく、図ではあまり区別できない。しかし、他の応答を見ると、差も見えてくる。



(a) 入射波の比較



(b) 複合波の比較

図-4 基盤の波形の比較

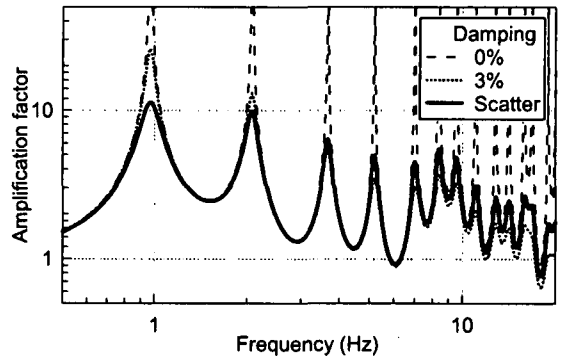


図-5 増幅比の比較

図4は基盤位置の加速度時刻歴で、差が見やすいように最大値付近の5～15秒までと時間軸を拡大したものである。(a)は入射波を比較しているが、波形もそれほど差がないように見える。しかし、11秒付近の最大値の値は、減衰0%のケースで 0.81m/s^2 、一方散乱の減衰を考慮した方は 0.98m/s^2 であり、散乱減衰を考慮した方が21%大きくなっている。しかし(b)に示した複合波では最大値はそれぞれ $1.32, 1.34\text{m/s}^2$ であり、その差は1.5%とほとんどない。このことは最大応答値のみを見ていると差がわかりにくいこともあることを示している。

図5には地表の基盤に対する増幅比を示している。減衰0%のケースでは、各卓越周期付近で非常に鋭いピークを示し、最大値は1000を越えている（図では50までの部分しか示されていない）。これに対して、残りの二つのケースでは増幅比は最大でも10程度であり、大きな差が見られる。次に、減衰が3%のケースと散乱減衰の応答を縛れると、周波数が低い領域では3%減衰の方が増幅が大きく、周波数が高い領域では3%減衰の方が増幅が大きい。

式(2)より減衰3%に対応する周波数を計算すると、およそ3Hzである。図5でもこの付近で増幅比の逆転が起こっている。

最後に、図6に入射波の応答スペクトルを示す。短周期（高振動数）部分では三つのケースに明瞭に差があることがわかる。

弾性の応答を考えると当然のことであるが、減衰比が小さいほど表層地盤の増幅が大きくなる。したがって、減衰が小さいほど求められる入射波は小さくなる。このことは、設計にとって危険側の評価となる可能性があることから、入射波の算定においては適切な減衰を考慮することが必要であることがわかる。

4. 非線形解析

前項で得られた入射波を用いて、地盤の非線形性を考慮して地表の応答を求める。本計算で用いたDYNEQの様な周波数特性を考慮できるプログラムは一般的でないことから、ここでは、通常の等価線形手法で応答を求めることにする。すなわち、非線形化に伴う材料特性の変化は最大ひずみの0.65倍で定義される有効ひずみより求める。また、散乱の減衰は考慮しない。

図7に最大応答値を比較して示す。入射波計算の時とは異なり、各ケースで差が見られる。

まず、最大加速度を見ると、散乱減衰を考慮して作った波形の応答に対し、

減衰0%のケースは92%、減衰3%のケースでは94%と小さめに評価している。図8には地表の加速度時刻歴を三つのケースについて比較しているが、ほとんど差がないように見えるが、実際には相当な差があるわけである。

図7ではGL-16mで最大加速度がほぼ同じになっている。これは、GL-16～18mの層で非線形性が著しく、図9に示す応力-ひずみ関係からわかるように、せん断応力がひずみの増加に対してほとんど変化しない領域に入っている。したがって、加速度の値も変わらない値となっていると考えられる。従って、ケースによっては、その差はもっと大きくなる可能性がある。

図10には増幅比の比較を示している。前項で示したように、入射波の大きさとしてみると、散乱減衰、減衰3%、

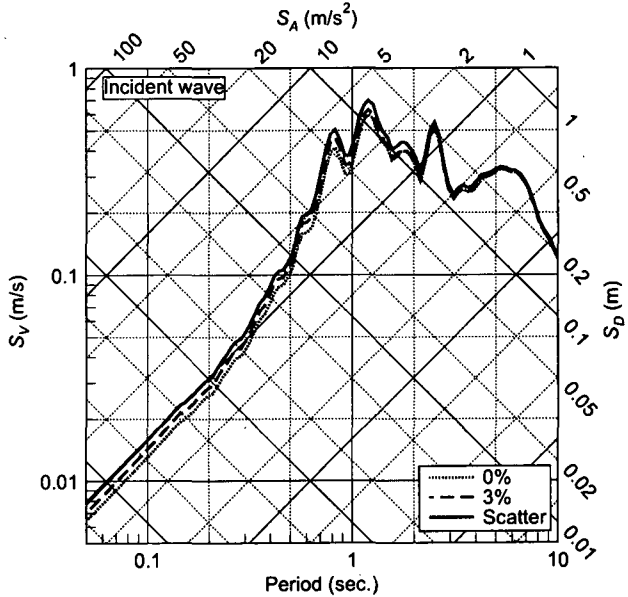


図6 入射波の応答スペクトル

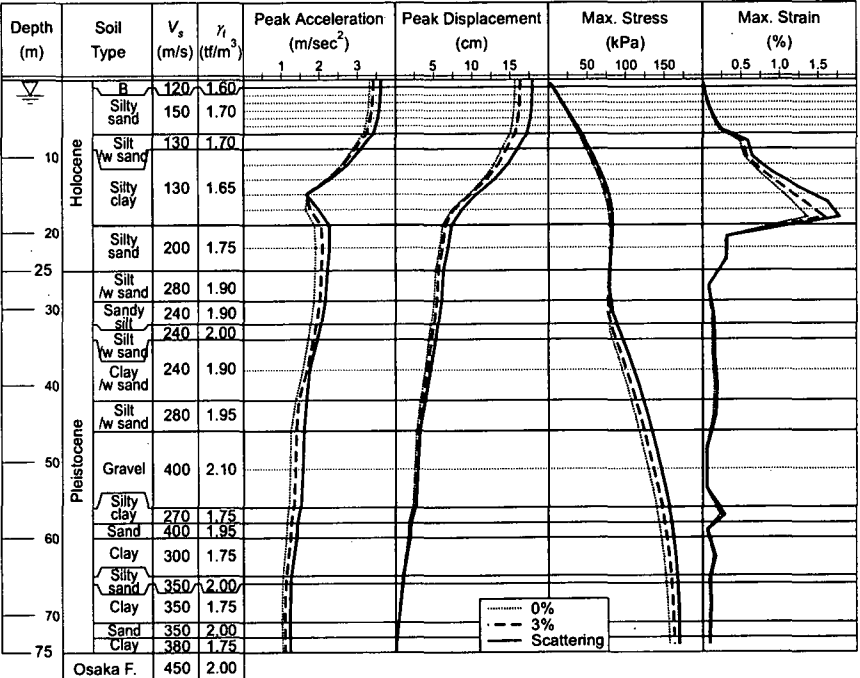


図7 最大応答値の比較

0%順番に大きくなっている。この結果、増幅比で見ると、散乱の減衰を考慮した解析が一番卓越振動数が小さく（卓越周期が長く）非線形性が著しいことがわかる。しかし、卓越振動数は減衰 0%のケースで 0.65Hz、散乱減衰考慮のケースで 0.62Hz と差は小さいが、増幅比は 7.5 と 6.7 で 11% の差がある。

図-11 は応答スペクトルを比較している。図-6 に示した入射波に比べると差は小さくなったが、入射波では長周期成分では差が見られなかったのに対して、全体的に差が発生しているのが特徴である。図上では差は小さい様に見えるが、散乱減衰を考慮したケースに比べ、減衰 0%のケースでは最大 85%、減衰 3%のケースでは 89%の値となっている。ただし、図-9 で示したように、大きな非線形挙動が起こっていることから、地表では挙動が均質化された可能性もある。

5. おわりに

一つのケーススタディではあるが、地盤が弾性的に挙動するという条件で設定された地表の地震動から入射波を求める際に散乱の減衰の考慮の有無が応答結果に与える影響を調べた。その差は最大加速度で 10%、応答スペクトルの最大誤差で 15%程度であった。この値をどのように評価するかは設計者の判断による訳であるが、必ずしも無視できる値とは考えられない。散乱の減衰を考慮できないプログラムでも一定減衰等を考慮する方が好ましい。この場合、地盤の卓越周期における散乱減衰の値を用いるのが好ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 大阪府土木部 (1997) : 大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書
- 2) 吉田望 (2001) : 地震応答解析における基盤の設定に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集
- 3) 安田進, 山口勇 (1985) : 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会講演集, pp. 539-542
- 4) 吉田望, 末富岩雄 (1996) : DYNEQ : 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株) 技術研究所報, pp. 61-70
- 5) 清田芳治, 萩原庸嘉, 青柳隆之 (1993) : 地盤のひずみ依存性を考慮したモード別等価線形地震応答解析手法その 3 微小加速度レベルにおける地盤の減衰性の検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), 構造 I, pp. 217-218
- 6) 福島美光, 翠川三郎 (1994) : 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^1 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 460 号, pp.37-46

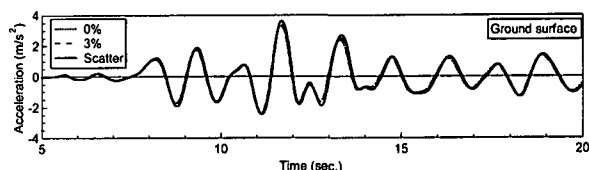


図-8 地表の加速度時刻歴の比較

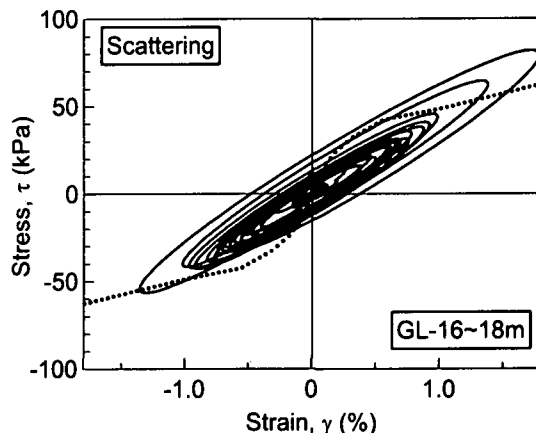


図-9 第 13 層の応力-ひずみ関係

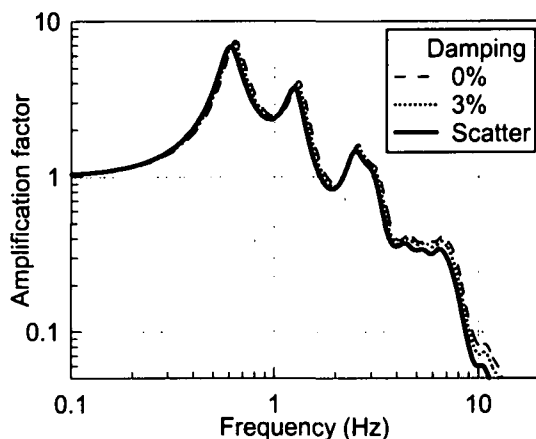


図-10 増幅比の比較

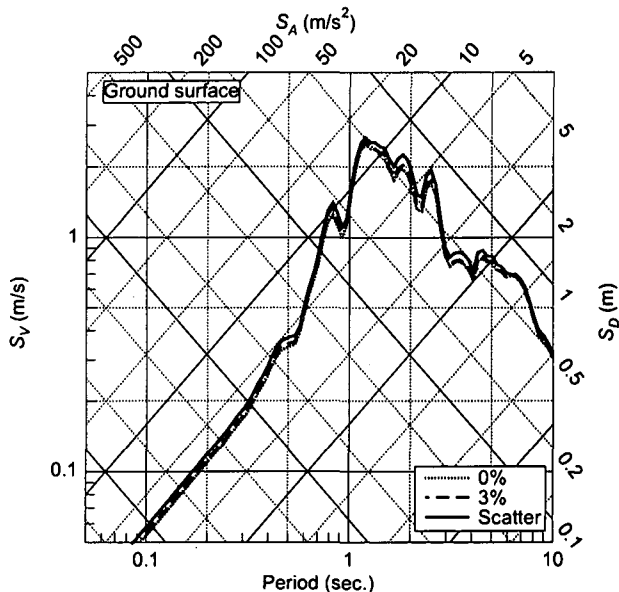


図-11 応答スペクトルの比較