

設計用地震動の設定における工学的基盤の意義

吉田望¹・篠原秀明²・澤田純男³・中村晋⁴

¹応用地質 地震防災センター技師長 (〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5)

E-mail:boh070949@yahoo.co.jp

²応用地質 地震防災センターGL (〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5)

shinohara-hideak@oyonet.oyo.co.jp

³京都大学防災研究所助教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁴日本大学工学部土木工学科助教授 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp

設計用の地震動は多くは工学的基盤で設定されるが、この場合、表層地盤の存在を考慮せず設定されることが多い。本論では、まず表層を考慮しないと工学的に重要な周波数領域で増幅率の評価を誤ることをケーススタディをにより示す。表層を考慮しないで設計用の地震動を定義することは、表層から工学的基盤への下降波、深い基盤からの再反射による上昇波などを無視することを意味するが、これが無視できないからである。さらに、工学的基盤より上の表層の計算用地震動を工学的基盤で設定する場合の設定法として、表層で線形の挙動を仮定して工学的基盤の波形を求める方法、地表で設計用の地震動を設定する方法を示す。ケーススタディによればこれらの方法は弾性時にはほぼ完全に地表の波形を再現でき、また、非線形挙動時でも既往の方法に比べれば格段に精度よい予測ができる。

Key Words : Engineering seismic base layer, earthquake response analysis, base layer, surface deposit

1. はじめに

地震動は断層から周辺に広がっていくので、地表の地震動を求める場合でも断層での発生機構、経路での波動の伝播特性を考慮するのが、好ましい姿の一つといえよう。しかし、実際にはこの全てを考慮することは困難であり、また、煩雑であることから、いくつかの部分に分離してそれぞれを別々に考慮することが良く行われる。

例えば、断層での地震動の発生から地表までの経路はしばしば、断層から地震基盤までの区間、地震基盤から工学的基盤までの区間および工学的基盤から上の表層地盤の応答に分けられ、それぞれの区間の応答を重ね合わせることで地表の波動を求める方法が用いられることがある。このような重ね合わせは各分離された区間で応答が独立に定義される、すなわち、各区間での相互作用がない場合には正当化される。

また、ある地震に対するサイトの地震応答を求めるのに、周辺の硬質基盤で記録された地震動を解放基盤の地震動として扱い、その半分をサイトの工学的基盤から表層地盤への入射波として表層地盤の解

析を行うことは実務でもよく行われるところである。また、サイト周辺の地表で観測された地震動から、逆増幅解析により観測地点の工学的基盤の入射波を求め、これをサイトの工学的基盤における入射波として解析することも多く行われる。

さらに、最近、多くの自治体等で大地震に対する被害想定が行われるが、多くのケースでは工学的基盤を解放基盤としてその振動波形を求め、これより表層の応答は、工学的基盤における入射波を入力として一次元の地震応答解析を行って求めることが多い。工学的基盤で分離して考えるのは、工学的基盤以深では地震動の斜め入射等も考慮されることがあるという仮定上の違いも影響していると考えられるが、一方では解析を簡単にするという目的もあると考えられる。

このような方法は、工学的基盤は地域的に広範囲に広がっている地質で、そこからの入射波が地域的に変わらないこと、表層の挙動が工学的基盤以深と独立して扱えるという仮定に基づいている。すなわち、表層と工学的基盤以深の挙動で相互作用がないという前提に立っているわけである。

工学的基盤は、表層と十分インピーダンス比があ

る基盤として定義されることもあるが、インピーダンス比が無限大でない以上、何らかの相互作用は起こるはずである。

金子¹⁾は、足柄で行われた地震動に関するブラインドテスト²⁾で、コンピュータコードによる差が余りないと考えられる等価線形解析の結果が大きくばらついていることに関して、解放基盤で記録された観測波から対象サイトの入射波を求める仮定で、想定する基盤の深さが異なると、対象サイトの地表の地震動が異なることを示している。しかし、彼らは工学的基盤を明瞭に意識していない。また、地震基盤から地表までを一体として解析した事例もある³⁾⁴⁾。しかし、これらの論文でも、表層と工学的基盤以深の相互作用という観点では地盤震動をとらえていない。

本論では、ケーススタディを通して、地盤の震動を工学的基盤で分離することが地震動予測を誤らせる可能性があることを指摘し、その改良のための方法を提案する。

2. 工学的基盤で分離した解析の妥当性

2.1 解析モデル

地震動の計算の際、工学的基盤で分離して計算することの妥当性を検証するためには、工学的基盤以深の地震基盤までの地盤情報が必要であるが、このようなサイトは必ずしも多くない。ここでは、翠川・小林が同定した八戸市のサイト⁵⁾を検討に用いるサイトとする。表1に地盤モデルを示す。ここで、 h は各層の下端の深さ、 V_s はせん断波速度、 ρ は質量密度、 Q は Q 値である。

一般に地震基盤はせん断波速度 V_s が3km/s程度の層の上面として定義されるので、ここでは、表1の13番目の $V_s=2800\text{m/s}$ の層を地震基盤と設定し、必要に応じてSBで引用する。

次に、工学的基盤としては、原子力では $V_s=700\text{m/s}$ の層を設定している⁶⁾が、多くの設計指針では N 値50に対応する層として V_s が300~400m/sの層に設定されている。本論は、工学的基盤の設定法を論じるものではないので、ここでは、これら多く用いられる設定に相当するように二つのケースを考える。すなわち、前者に対応するものとして、表1の11番目の層($V_s=690\text{m/s}$ の層)を、後者に対応するものとして、表1の9番目の層($V_s=378\text{m/s}$ の層)を工学的基盤と設定する。必要に応じて、それぞれ、EB1、EB2としてこれらの層を引用する。

2.2 増幅特性による検討

一次元の重複反射理論に基づき、地震基盤から地表までの増幅特性を求める。計算に使用したプログラムは、改良された等価線形コードDYNEQ⁷⁾である。計算は次の三つのケースについて行なう。なお、解析は線形解析であり、減衰定数は表1の Q 値より求

表1 地盤モデル⁵⁾

No.	h (m)	V_s (m/s)	ρ (t/m ³)	Q	備考
1	2.0	107	1.80	14	
2	4.0	176	1.80	13	
3	6.5	201	1.90	12	
4	9.0	193	1.90	12	
5	15.5	239	1.70	12	
6	22.0	234	1.70	9	
7	32.0	248	1.80	7	
8	40.0	309	1.80	7	
9	50.0	378	1.80	7	EB2
10	180.0	379	1.70	100	
11	360.0	690	2.00	100	EB1
12	380.0	1100	2.10	100	
13		2800	2.50	200	SB

めた。

① 表1の全部を同時に解析する

② 地震基盤から工学的基盤までを、工学的基盤より上の表層がないとしてモデル化して解析する

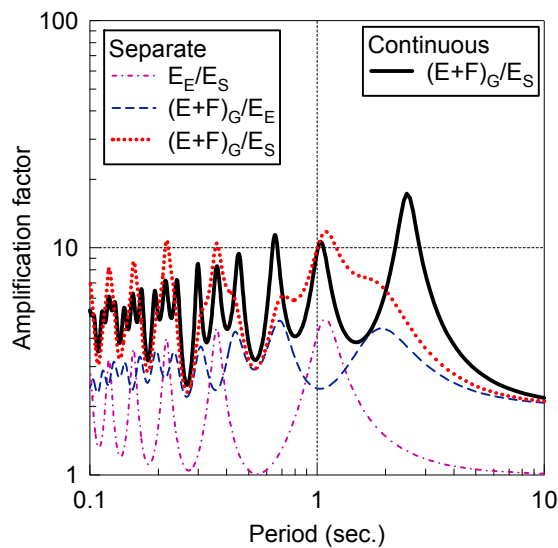
③ 工学的基盤より上の表層のみを解析する。この際、工学的基盤より深い所は、多くの解析で行われるように、工学的基盤の特性が下方に無限に続いているとした。

図1に解析の結果を示す。図でContinuousで示したのは、①のケースで、 E_s は地震基盤における入射波(上昇波)、 $(E+F)_G$ は地表における複合波を表しており、図に実線で示した $(E+F)_G/E_s$ は工学的基盤の入射波に対する地表の複合波の増幅を表している。なお、以後、このケースを一体解析と呼ぶ。

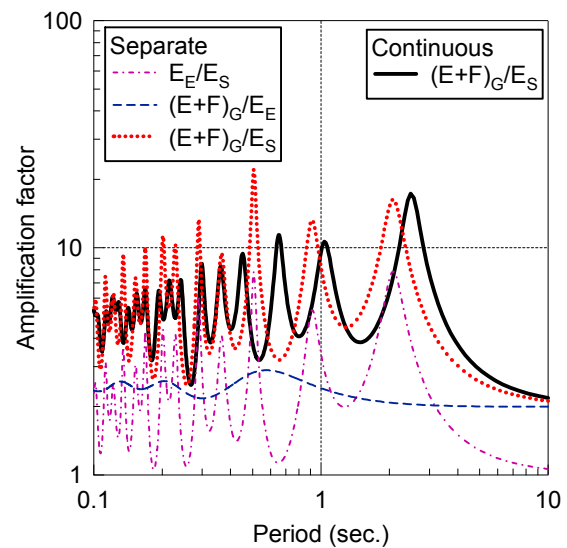
一方、図でSeparateとして示したのは、②、③の解析を合わせたものである。すなわち、図の E_E は表層地盤のない②の解析の工学的基盤における複合波の半分で③の解析に用いる入射波を表しているので、図の E_E/E_s は地震基盤から工学的基盤までの増幅を表層なしで計算した結果である。また、 $(E+F)_G/E_E$ は表層のみの解析による、地表の複合波の工学的基盤の入射波に対する増幅を表している。最後に、図で点線で示した $(E+F)_G/E_s$ はこの二つの増幅特性の積で、表1の地盤を工学的基盤で二つに分離して別々に解析したときに得られる地震基盤に対する地表の増幅である。なお、以後、このケースを分離解析と呼ぶ。

もし、表層と工学的基盤以深の地盤の相互作用がなければ、二つの方法で得られた増幅特性は同じになっているはずである。しかし、図では両者は明らかに異なっている。

まず、工学的基盤をEB1に設定したケースについて見ると、一体解析で現れている周期2.5秒の増幅のピークは分離解析では現れていない。二つ目のピークである周期1秒ではピーク強度はほぼ一致しているが、周辺の周期の増幅比にはかなりの差がある。さらに、三つ目のピークである0.65秒でも分離解析

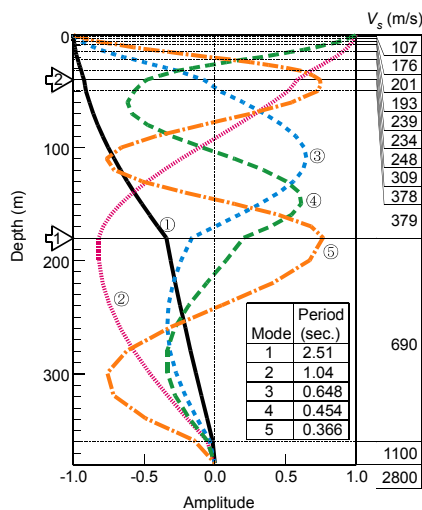


(a) 工学的基盤を EB1 に設定



(b) 工学的基盤を EB2 に設定

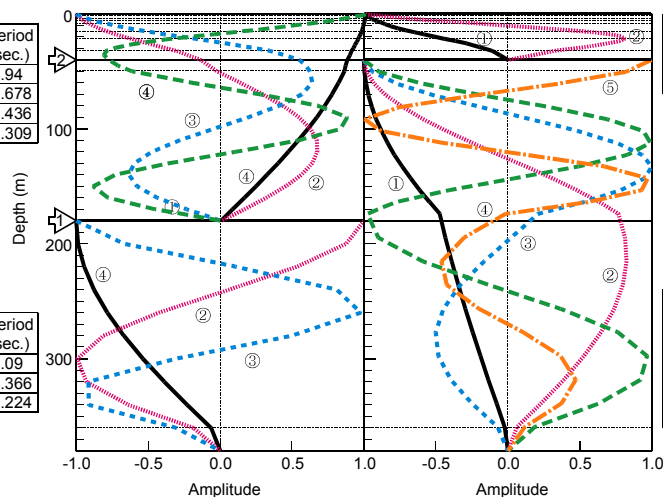
図1 増幅特性の比較



(a) 一体解析

Mode	Period (sec.)
1	1.94
2	0.678
3	0.436
4	0.309

Mode	Period (sec.)
1	1.09
2	0.366
3	0.224



(b) 分離解析 (工学的基盤 EB1, EB2)

図2 固有ベクトルと固有周期

は少し極値らしきものも見えるが、増幅比の値は非常に小さい。これより短周期成分でも、ある程度増幅比が一致しているところもあるが、差のあるところも多い。

次に、工学的基盤をEB2としたケースでは、一体解析で見られる2.5秒、1秒のピークはそれぞれ周期が短くなっているものの、増幅比の値はほぼ再現されている。しかし、三つ目のピークである0.65秒の山に相当する成分はない。また、これより短周期部分については、全体的にピーク周期は一致しているものの、増幅比の値には大きな差が見られる。

この原因を見ると、卓越周期2.5秒では、分離解析の二つの構成要素のいずれにもピークを示す部分がないことが原因であることが分かる。また、工学的基盤をEB2に設定したケースでは工学的基盤で深の増幅特性のピークが一体解析のピーク周期と近いことから分離して求めた増幅比でもそれなりに表現できている。次に、これより短周期側では、分離解

析の各地盤のピークが必ずしも一体解析のものと対応していないことが、増幅比の不一致を引き起こしている。

これらの周波数帯域は工学的にも重要な周波数帯域であることから、工学的基盤で地盤を分離して個別に計算する方法は、問題があることが分かる。

2.3 固有値解析による検討

地盤の振動特性を見るために、固有値解析を行い、固有ベクトルを求めた。図2に解析で得られた固有ベクトルの形状と卓越周期を示す。図の丸数字は固有ベクトルのモード数を表し、図2(a)は一体解析の結果で、5次のモードまでの固有ベクトルと対応する卓越周期が示されている。図2(b)は分離解析の結果で、工学的基盤をEB1に設定したケースが左側、EB2に設定したケースが右側で、それぞれの固有ベクトルが二つ上下に示されている。また、一体解析

と対応させるため、一体解析の5次の卓越周期をカバーする部分の次数の固有ベクトルと卓越周期が示されている。なお、固有値の計算では、各ケースについて、一番下の層を固定としている。また、それぞれの固有ベクトルは絶対値の最大が1になるように正規化されている。図に示した卓越周期は図1に示した増幅比がピークとなる周期とほとんど同じである。

一体解析の1次のモードは地震基盤から上が全体として振動するモデルである。一方、分離解析では、このような長周期領域で卓越するモードはないので、分離した計算ではこのモードを再現することはできない。ただし、工学的基盤をEB2としたケースでは表層部分が全体に比べてわずかであることからその存在が固有値に与える影響は小さく、また、表層の一次の卓越周期は0.665秒と短いので2.5秒という長周期ではピークは現れない。これが、全体系の1次モード付近で図1(b)の様にピーク周期がわずかにずれただけで増幅比の形状が似ていた理由である。実際、一体解析の1次モードの変位と分離解析の工学的基盤以深の1次モードの変位は非常に良く似ている。すなわち、地震基盤から工学的基盤までの厚さが表層に比べて十分に厚ければ、表層の卓越周期より長周期の領域では分離解析でもある程度の精度があると考えられる。

次に、一体系の2次の卓越周期は1.04秒であるが、一方、分離解析で工学的基盤EB1を用いた解析の工学的基盤以深の地盤の1次の卓越周期は1.09秒できわめて近い値である。これが、分離解析と一体解析で1秒付近のピーク周期がほぼ一致した理由である。従って、このピークがよくあっているのは偶然であるといえる。

2.4 波動による検討

これまで、増幅比、固有値の観点から分離解析の妥当性を検討してきた。ここでは、地震波の伝播という観点で検討する。すなわち、もし、分離解析が妥当であるのなら、工学的基盤における一体解析の入射波と分離解析の入射波は等しく、従って、工学的基盤以深へは反射波は伝わらないはずである。

検討に用いた地震波は、1983年日本海中部地震の際不老不死で得られた記録（EW成分）で、この記録は硬質地盤上で得られている。これを地震基盤に入力した地震応答解析を行った。解析には前記のDYNEQ⁷⁾を用いた。工学的基盤をEB1に設定したケースについて図4に工学的基盤の波形を示す。なお、図では差が見やすいように、主要動付近で、加速度が大きかった35～45秒のみを示している。

図4(a)では一体解析の工学的基盤における入射波と反射波を比較している。反射波は入射波よりかなり小さいとはいえ無視できない大きさであり、 $V_s=690\text{m/s}$ の層でも基盤として完全に作用していないことがわかる。また、図4(b), (c)は一体解析と分離解析の反射波、入射波を比較しているが、両者は

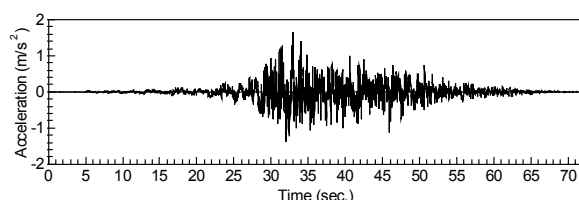
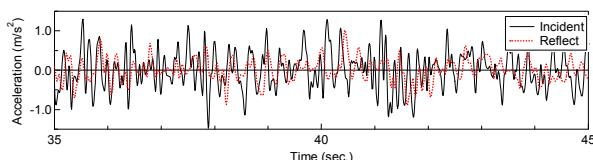
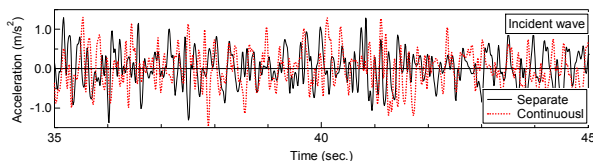


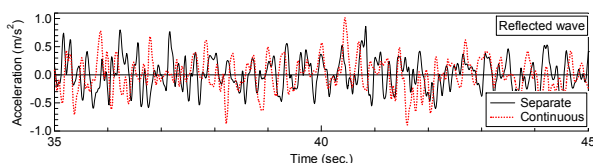
図3 計算に用いた入力波形



(a) 入射波と反射波の比較（一体解析）



(b) 反射波



(c) 入射波

図4 工学的基盤の振動（工学的基盤をEB1に設定）

一致しているとは言い難く、この差が、一体解析と分離した解析の違いになっていると考えられる。

2.5 まとめ

これまで、増幅比、固有値、および波動の三つの観点から、地震基盤から地表までの地盤を工学的基盤で分離し、別々の解析を行う方法の妥当性について検討した。これらの結果をまとめると、次のようなことがいえる。

- 1) 地盤を分離すると、それぞれの持つ振動特性は全体系の一部とは異なるため、分離したものが全体系と同じになることはない。
- 2) 分離した個々の系の卓越周期より長い全体系の卓越周期は分離系では再現されない。
- 3) 分離した一方が他方に比べて十分に小さいと、分離した影響は大きくない。例えば、表層が薄い、地震基盤が浅いなどがこのようなケースである。
- 4) $V_s=690\text{m/s}$ を工学的基盤と設定しても、表層で反射し工学的基盤以深に伝搬する下降波の影響は無視できない。

3. 設計用地震動の設定法

前章では、地震基盤から地表までの地震応答を工学的基盤で分離して、別々に解析すると、地表の応答が正しく表現されないことを示した。すなわち、

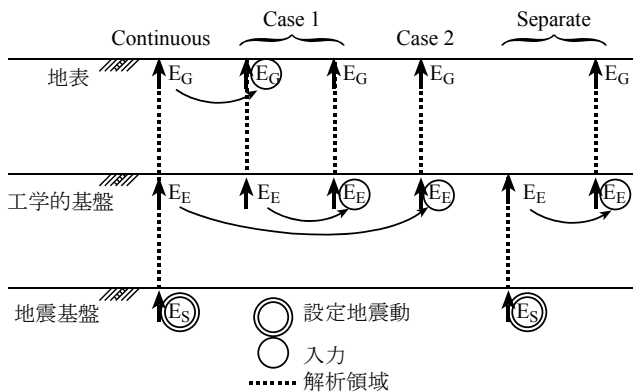


図5 波動の設定位置

工学的基盤を解放基盤として得られた地震動を表層の応答とすることは問題であるということになる。そこで、ここでは、この欠点を改良する方法を検討する。

図5は、波動の設定位置をわかりやすくするために、模式的に示したものである。ここで、Eは入射波、添え字G, E, Sは地表、工学的基盤および地震基盤を表し、点線は解析する区間を表している。また◎は波動の設定位置（地震基盤）を、○は解析における地震動の入力位置であり、Eがこれらで囲まれているものは条件として与えられることを、囲まれていないものはその区間の解析により求められることを示している。例えば、一番左のContinuousとして示したのは前章で示した一体解析に対応し、地震基盤で地震動が設定される。この解析の結果、工学的基盤と地表における入射波が求まるわけである。また、一番右のSeparateは工学的基盤を解放基盤とする解析で得られた解放基盤の入射波を表層の入力として用い、地表の応答が求まることを示している。この二つに加え、ここでは、二つのケースを想定する。

Case 1は一体解析で得られた地表の応答を表層地盤の入力として用い、工学的基盤の入射波として用いて地表の応答を求めるものである。この方法は、線形の系であれば、地表の応答は一体解析と同じになる。実務では、例えば地表で得られた小さい地震記録から工学的基盤の波形を求め、これを増幅して表層の非線形解析を行う場合や、地表で観測された小さい地震動から波形合成法などで大きい地震に対する地震動を求め、表層の地震応答解析を行う場合などに相当する。後者のケースでは波形合成法で得られたものは表層の非線形の影響を含んでいないので、逆増幅解析は弾性条件で、増幅解析を非線形で行うことになる。

次に、Case 2は一体解析で得られた工学的基盤の入射波を表層のみの解析の入射波として入力したものである。

計算は、前節同様表1に示す地盤を用い、分離解析で誤差の大きかったEB1を工学的基盤に設定する。

図6に弾性のケースに対する増幅比を比較して示す。Continuous, Case 1, Case 2の線はほとんど重なっており、図では区別することができない。すなわち、ここで設定した二つの方法は地表の振動を求め

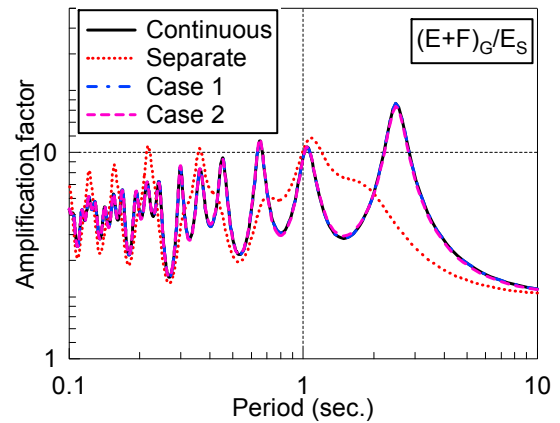


図6 増幅比の比較（弾性解析）

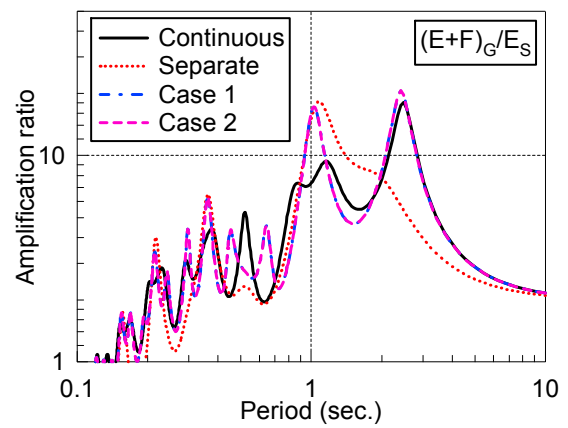


図7 増幅比の比較（非線形解析）

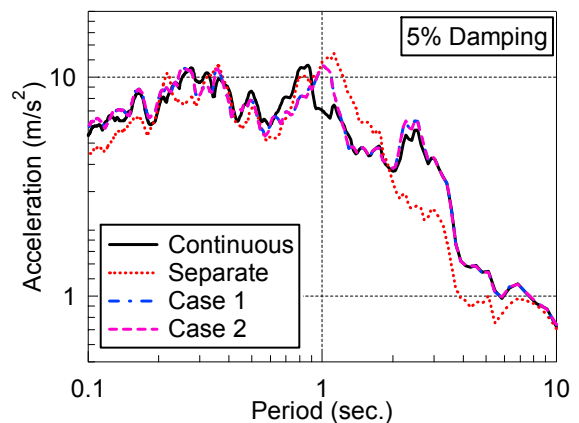


図8 応答スペクトルの比較（非線形解析）

るのに再現性がよいことが分かる。なお、前述のように、Case 1は弾性のケースでは理論的にも元の値と一致する。また、Case 2が一致しているのは工学的基盤の下部で再反射して上昇してくる波動の影響がほとんど無いことを示している。表1に示した地盤では工学的基盤以深の減衰は相当小さいが、それにも拘わらず一体解析の結果と一致していることから、多くのケースでは工学的基盤より下部で反射し

て再度上昇してくる波動の影響は無視できると考えられる。なお、地震基盤からの反射が無視できないのは前項の検討から明らかであるが、その影響は入力に用いた地震動の中に含まれていると考えられる。

次に、表層地盤が非線形挙動をする場合を考える。入力地震動には前章と同様、不老不死の波形を用いたが、非線形の影響が大きく現れるように、観測波形をそのまま地震基盤への入射波であると設定した。これは、観測のほぼ2倍の入力を設定したことに相当している。また、解析はDYNEQ⁷⁾で行ったが、等価線形化の手法はSHAKE⁸⁾と同じとした。さらに、表層の非線形性は今津らによる砂の動的変形特性⁹⁾の中間値を用いた。工学的基盤以深はこれまで同様、弾性である。

図7に増幅比を示す。一体解析では弾性のケースの1秒と0.65秒のピークが近寄り、増幅も小さくなっているほか、0.1秒までの区間のピークの数も減っている。また、短周期成分の増幅が小さくなっているのはSHAKE型の等価線形解析の特性¹⁰⁾である。

弾性解析と同様分離解析では2.5秒のピークは表現できていない。また、新しく設定した二つの方法は互いにほとんど一致している。これらを一体解析と比較すると、1秒付近のピークの減少、0.5秒付近のピーク周波数が一致していない。しかし、分離解析と比較すれば一致度は優れている。

応答に与える影響を見るために、地表の加速度波形から求めた応答スペクトルを図8に比較して示す。分離解析では1秒より長周期側で一体解析との差が見られる。一方、提案法では増幅比の一致が悪かった1秒付近で若干差が見られるとはいえ、一体解析との一致度は非常によい。

4. まとめ

表層の地震応答解析用の入力地震動を設定する方法として、表層の存在を無視し、工学的基盤を解放基盤として地震動を設定する方法の妥当性を検証した。その結果、次のようなことが分かった。

1) 工学的基盤で解析領域を分離すると、工学的に重要な周期領域でも地震基盤より上を一体として扱うのに比べて差が現れる。これは、分離した個々の領域の挙動の和が一体挙動とはならない、すなわち、両者の相互作用の影響が無視できないからである。

2) 地震動を設定する場合には、表層の存在を意識しておく必要がある。本論では、その方法として二つの方法を示した。これらはほぼ同じ結果を与え、表層地盤の非線形挙動時には完全とはいえないが、分離した解析より遙かに良い結果を得ることができる。

なお、本論では一次元解析で検討を行っている。しかし、はじめにでも述べたように地震基盤から工学的基盤までの地震動の伝播が鉛直とは限らない。また、地震基盤から表層までを1次元でモデル化で

きる地盤は特殊なケースであるという可能性もある。しかし、より複雑な地盤でも本論で示した、表層の存在を無視して設計用地震動を設定することの問題点は発生し、その意味で本論の結論は一般的であるといえる。

謝辞

本研究は「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」に基づいて実施したものである。関係各位に感謝する。

(2005. 3. 1 受付)

参考文献

- 1) 金子史夫 (1993) : 一次元モデルによる感度解析, 地震動に与える表層地質の影響に関する総合的研究, 平成4年度文部省科学研究費補助金総合研究 (A)研究成果報告書, pp. 78-90
- 2) Proc. of International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Odawara, 1992, Vol. 1
- 3) 松本正毅, 大石富彦, 嶋田隆一 (1998) : 大阪平野の深部地盤構造を考慮した入力地震動算定に関する一考察, 電力土木, No. 277, pp. 87-92
- 4) 吉田望 (2001) : レベル2地震評価における基盤の非線形挙動の影響, 第1回日本地震工学研究発表会・討論会梗概集, p. 37
- 5) 翠川三郎, 小林啓美 (1978) : 地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの性質, 日本建築学会論文報告集, No. 273, pp. 43-54
- 6) 電気技術基準調査委員会 (1987) : 原子力発電所耐震設計技術指針, 日本電気協会
- 7) 吉田望, 末富岩雄 (2004) : DYNEQ, A computer program for DYNAMIC response analysis of level ground by EQUIVALENT linear method, Version 3.25, <http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>
- 8) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972): SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley
- 9) 今津雅紀, 福武毅芳 (1986) : 砂礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp. 509-512
- 10) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222

ROLE OF ENGINEERING SEISMIC BASE LAYER ON DEFINING DESIGN EARTHQUAKE MOTION

Nozomu YOSHIDA, Hidehiro SHINOHARA, Sumio SAWADA and
Susumu NAKAMURA

Shortage of a conventional method to define input earthquake motion for the analysis of a surface ground is pointed out and improved methods are proposed. In a conventional method, rock outcrop motion or incident wave defined at the engineering seismic base layer is frequently used as design earthquake motion. A case study is firstly conducted using the Hachinohe site model in order to validate the applicability of this method, and this method is shown to miss amplifications in important frequency region through the investigation of amplification characteristics, eigen value analysis and waveform, therefore, is not relevant to evaluate ground motion at the ground surface. Then, two methods are proposed to define the design earthquake motion. The one is to define it at the ground surface and the other is to use incident wave at the engineering seismic base layer obtained in the elastic analysis of overall ground. Both method can reproduce the surface response perfectly in the elastic case, and much better evaluation compared with the conventional method.