

改正建築基準法の解放工学的基盤波を想定した表層地盤増幅特性の簡便評価法

SIMPLIFIED METHOD TO EVALUATE GROUND SURFACE AMPLIFICATION ASSUMING THE INPUT MOTIONS ON THE ENGINEERING BEDROCK IN THE REVISED ENFORCEMENT ORDER OF THE BUILDING STANDARD LAW

境有紀^{*}, 津野靖士^{**}, 工藤一嘉^{***}, 壁谷澤寿海^{****}

Yuki SAKAI, Seiji TSUNO, Kazuyoshi KUDO and Toshimi KABEYASAWA

We proposed a simplified method to evaluate strong ground motions response spectra at ground surface considering the inelastic amplification characteristics of surface layers. We assume that input motions on the engineering bedrock are given by the revised Enforcement Order of the Building Standard Law of Japan. This method is far simple and easy to calculate compared to the limit strength method in the revised Building Standard Law of Japan, because this method requires only the 30m depth soil layer data from the surface and substitution from these data to several equations. Despite of simplicity, this method predicts the results of equivalent elastic earthquake response analyses more adequately than the limit strength method in the revised Building Standard Law of Japan.

Keywords : *inelastic amplification characteristics of surface layers, the revised Enforcement Order of the Building Standard Law of Japan, free engineering bedrock, limit strength method, equivalent elastic earthquake response analysis*

表層地盤の非線形増幅特性、改正建築基準法、解放工学的基盤、限界耐力計算、等価線形時刻歴地震応答解析

1. はじめに

平成 10 年 6 月に建築基準法が改正され、平成 12 年 6 月より告示が施行されて、建設地の表層地盤特性を取り入れた入力地震動を設定できる、いわゆる限界耐力計算が導入された。具体的には、せん断波速度 400m/s 程度の解放工学的基盤における加速度応答スペクトル（告示によって規定されているので、以下、告示スペクトルと呼ぶ）に表層地盤の非線形増幅特性を考慮し、地表面での加速度応答スペクトル（以下、地表スペクトル）を算定する。

限界耐力計算における表層地盤の増幅特性は、地盤を表層地盤と工学的基盤の等価な 2 層地盤に置換し、等価線形モデルを用いて歪の収束計算を行うことにより、表層地盤による加速度の増幅率 G_s を算定する（以下、告示法と呼ぶ）。この方法は明解かつ簡便な方法で、建物と地盤の相互作用も考慮できるものであるが、収束計算を必要とするため手計算でこれを行うことは難しく、十分に普及していない一因ともなっている。

基盤あるいは工学的基盤におけるスペクトルから表層地盤の増幅特性を考慮して地表における加速度応答スペクトルを求める方法は、これまで様々な検討がなされてきたが、最も多用されてきたのは SHAKE¹⁾に代表される表層地盤を 1 次元成層構造に置換した、等価線形時刻歴地震応答解析（以下、地震応答解析）を行うものである。しかし、この方法は当然のことながらコンピュータとプログラムが必要となる。

地震応答解析を行わずに、表層地盤の非線形増幅特性を簡便に評価する方法には、応答スペクトルによるモーダルアナリシス（応答スペクトル法）があり、これも様々な解析方法が提案されてきた²⁾。しかし、表層地盤の非線形増幅特性の、非線形性の進行による剛性と減衰の変化および工学的基盤と表層地盤間のインピーダンス比の影響を考慮して具体的な評価式を示したものは、告示法の基となった三浦らによる方法²⁾³⁾のみである。しかし前述のように、この方法も収束計算が必要となるため、手計算でこれを行うことは難しい。

非線形性を考慮して表層地盤の増幅特性を簡便に評価することは、基盤あるいは工学的基盤における地震動レベルによって表層地盤の非線形性の進行度合が著しく異なってくるため困難なものとなるが、告示スペクトルというある一定のレベルを想定するのであれば、非線形性の進行度合も大きくばらつくことはないと推定され、簡便な方法で地表スペクトルを求めることが可能になると考えられる。

そこで本論文では、工学的基盤における応答スペクトルとして告示スペクトルを想定し、表層地盤をいくつかのパラメタで表して、地表スペクトルをこれらの表層地盤のパラメタで表現することにより、手計算で簡便に求める方法について検討する。

コンピュータが普及し、また、告示法のプログラムも公開され、手計算で算定できるということに固執する必要もないという考えもあるだろうが、簡単な式で表現することは、説明変数と目的変数の対応関係も明確となり、ブラックボックスになりがちなコンピュー

* 筑波大学機能工学系 助教授・工博

Assoc. Prof., Inst. of Eng. Mechanics and Systems, University of Tsukuba, Dr. Eng.

** 東京大学大学院工学系研究科

Graduate Student, Graduate School, The University of Tokyo

*** 東京大学地震研究所 助教授・理博

Assoc. Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Sci.

**** 東京大学地震研究所 教授・工博

Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Eng.

タブログラムの確認を行うことができ、目安にもなるという点からも意義があると考えている。

2. 解析方法

基本的な解析方針は、三浦らによる方法²⁾³⁾と同じく、地震応答解析結果と整合することを目標とする。解放工学的基盤のレベルは、稀に発生する地震動（以下、中地震動）と極めて稀に発生する地震動（以下、大地震動）の2レベルを対象とする。具体的な解析手順を以下に示す。

(1) 告示スペクトルにフィットするように位相ランダムで解放工学的基盤波を10波作成する。大地震動の場合を例として、波形の例を図1に、基盤動の弾性加速度応答スペクトルを図2に示す。時刻歴包絡関数は、中地震動が文献⁴⁾のレベル1、大地震動がレベル2のものを用いた。

(2) 日本全国の様々な表層地盤をもつ50地点の1次元成層構造を用いて地震応答解析を行い⁵⁾、地表動を各表層地盤について10波作成する。工学的基盤が複数設定できる場合は、その数の表層地盤モデルを設定する。従って、設定した表層地盤モデルは全部で63となる。このように多数の表層地盤を選定したのは、後述するように、帰帰

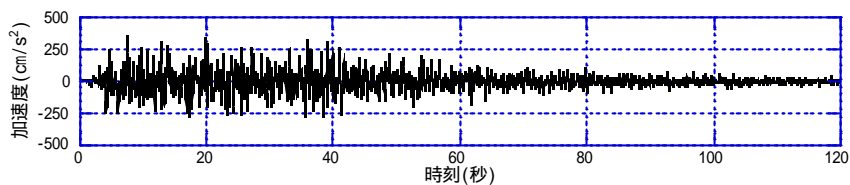


図1 解放工学的基盤波の波形例（大地震動）

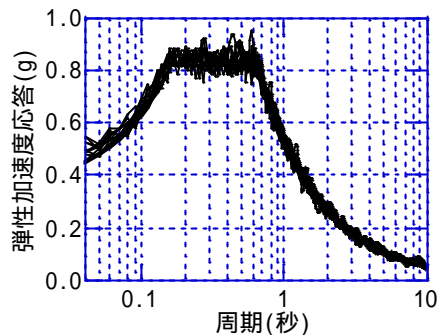


図2 告示の解放工学的基盤スペクトルとこれにフィットするように作成した基盤動の弾性加速度応答スペクトル（減衰定数5%、大地震動）

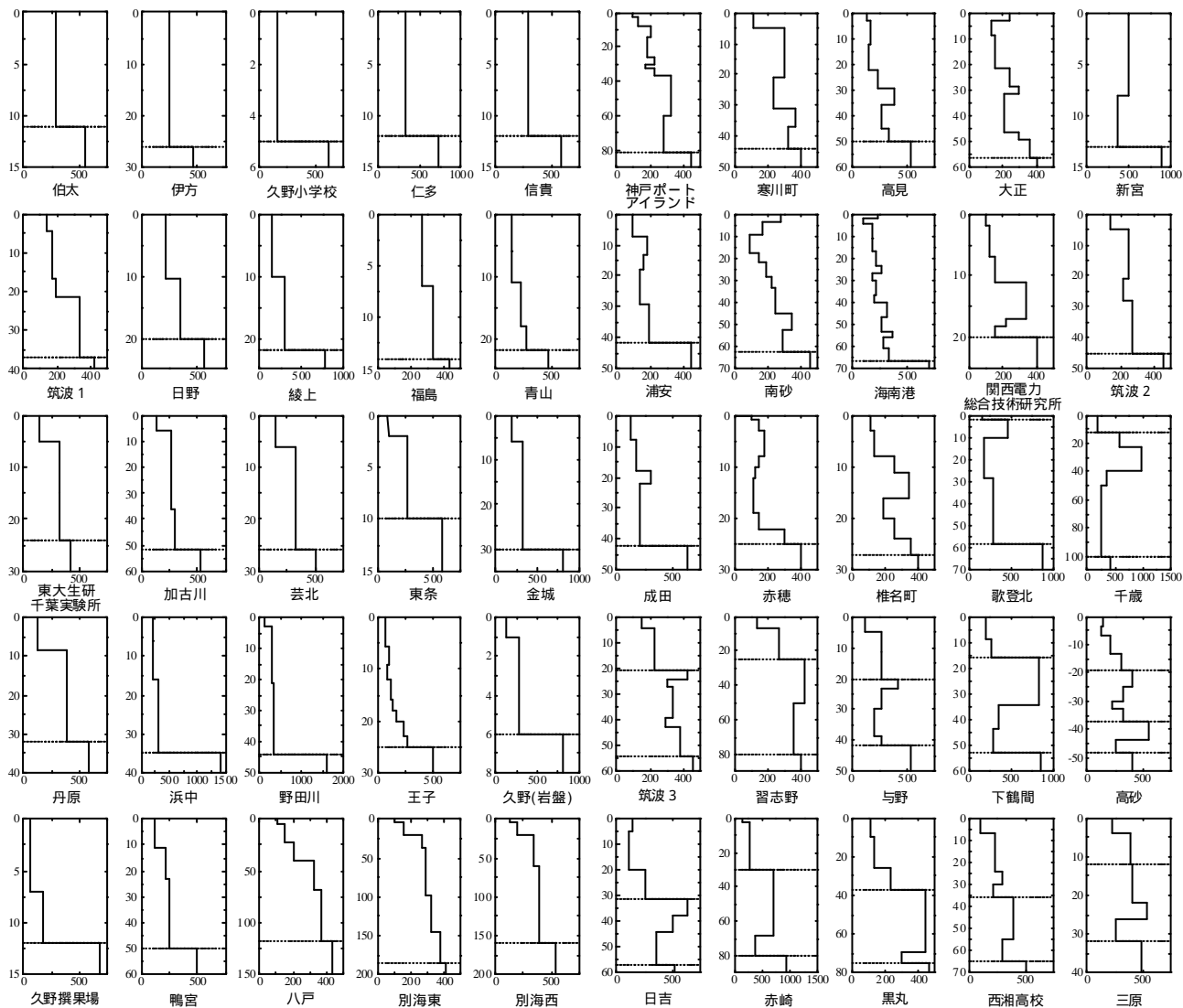


図3 表層地盤のせん断波速度分布図（縦軸：深さ(m)、横軸：せん断波速度(m/s)、点線：工学的基盤面の位置）

解析によって算定式を決定するため、日本全国の様々なタイプの表層地盤をできる限り網羅する必要があると考えたからである。用いた表層地盤のせん断波速度分布図を図3に示す。せん断波速度 V_s が400m/s以上の場合を工学的基盤とした。点線が設定した工学的基盤面の位置である。地盤の非線形性については、工学的基盤は弾性、表層は等価線形とし、告示に示された等価剛性、等価減衰を用いた。単位体積重量は、粘性土が1.6(tf/m³)、砂質土が1.9(tf/m³)、岩盤はせん断波速度 V_s が400～800(m/s)の場合が2.0(tf/m³)、800(m/s)以上の場合が2.2(tf/m³)⁶⁾とした。

基盤動が10波あるので、地表スペクトルも、各表層地盤モデルについて10本となる。よって10本の平均を求め、その表層地盤モデ

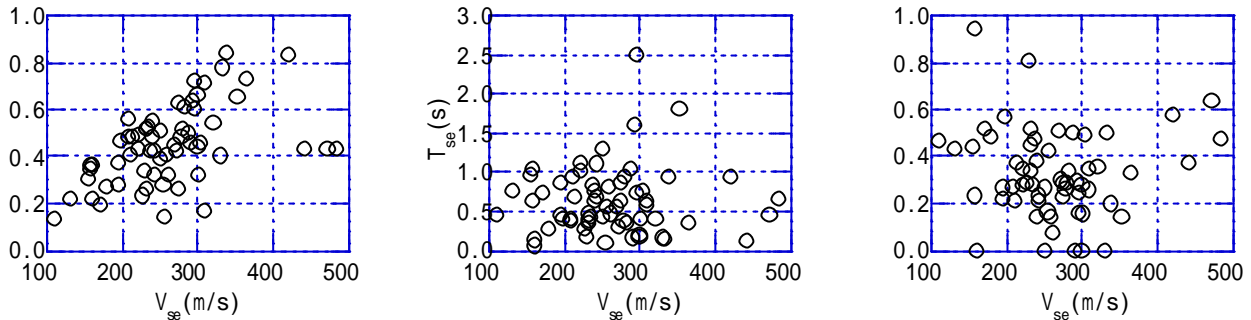


図5 表層地盤モデルのパラメタの分布

ルの地表スペクトルとした(図4)。

(3) 地盤を工学的基盤と表層地盤の2層に置換し、式(1)～(3)に示すインピーダンス比、等価1次周期 T_1 (秒)、表層地盤の不均質性を表現するパラメタ⁴⁾の3つで表現する。表層地盤の縮約は、告示と同じく表層全体を1層に置換する場合と、表層30m(ただし工学的基盤まで30m以下の場合は表層全体とした)を1層に置換する場合の2ケースを考える。表層30mの場合を検討に加えたのは、表層地盤の増幅特性は、より表層に近い部分の影響が大きいため⁷⁾こと、および、表層地盤の増幅率を予測するのに表層30mの平均せん断波速度が有効である⁸⁾⁹⁾ことが指摘されているからである。

$$= \frac{e V_{se}}{b V_{sb}} \quad (1)$$

$$T_1 = 4 H / V_{se} \quad (2)$$

$$= \left(\frac{|V_{si} - V_{se}| d_i}{V_{se} H} \right) \quad (3)$$

$$V_{se} = \left(\frac{V_{si} d_i}{H} \right) \quad (4)$$

$$e = \left(\frac{d_i}{H} \right) \quad (5)$$

ここで、 i : 表層地盤の各層の単位体積重量(tf/m³)、 b : 工学的基盤の単位体積重量(tf/m³)、 V_{sb} : 工学的基盤のせん断波速度(m/s)、 H : 表層地盤全体の厚さ(m)、 V_{si} : 表層地盤各層のせん断波速度(m/s)、 d_i : 表層地盤の各層の層厚(m)である。

表層全体を1層に置換する場合について、インピーダンス比、等価1次周期 T_1 、表層地盤の不均質性を表現するパラメタと等価せん断波速度 V_{se} の関係を図5に示す。等価せん断波速度 V_{se} は100～500m/s、等価1次周期 T_1 は、0.1秒程度から長いものでは2秒以上、不均質性を表すパラメタも均質(=0)から不均質なもので、様々な表層地盤を含んでいることがわかる。

(4) それぞれの表層地盤モデルによる地表スペクトル(図4)に式(6)による当てはめを行い、地表スペクトルをパラメタ A 、 T_c 、 d 、 f_A 、 b で表現する。式(6)は荷重指針¹⁰⁾の式を基にしているが、長周期にお

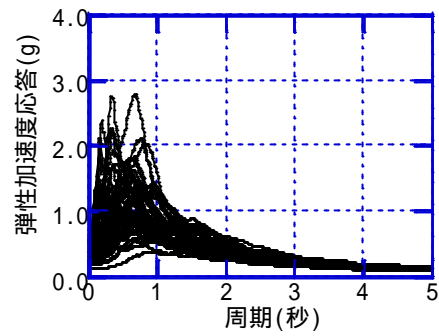


図4 地震応答解析で求めた地表の弾性加速度応答スペクトル(減衰定数5%、大地震動)

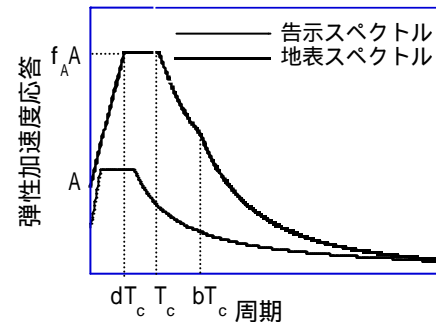


図6 各パラメタとスペクトルの関係

ける当てはめの精度を上げるため、これに変位一定領域(bT_c 、 T)を加えたものである。

$$S_A = \begin{cases} \left(1 + \frac{f_A - 1}{d} \frac{T}{T_c}\right) A & , T \leq dT_c \\ f_A A & , dT_c \leq T \leq T_c \\ f_A \frac{T_c}{T} A & , T_c \leq T \leq bT_c \\ f_A \frac{bT_c^2}{T^2} A & , bT_c \leq T \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 S_A : 弾性加速度応答スペクトル(減衰定数5%、 G)、 T : 周期(秒)、 A : 地動最大加速度(G)、 T_c : コーナー周期(秒)、 d 、 f_A 、 b : スペクトルの形状を表現するパラメタである。

各パラメタとスペクトルの関係を図6に示す。告示スペクトルは式(6)で $A=320$ 、 $64(\text{cm/s}^2)$ (それぞれ大、中地震動)、 $T_c=0.64(\text{秒})$ 、 $d=0.25$ 、 $f_A=2.5$ 、 $b=$ とおいた場合に相当する。

当てはめは、パラメタ A 、 T_c 、 d 、 f_A 、 b を変化させて、地震応答解析による地表スペクトル(図4)との誤差率(式(7))の周期0.5～3秒における平均値を求め、それが最小になるように行った。周期0.5秒

以上を対象としたのは、限界耐力計算において地表スペクトルは、構造物の塑性化を考慮した等価周期に対して用いられるからである。

$$d_r = \frac{|S_A - S_e|}{S_e} \quad (7)$$

ここで、 S_A ：式(6)によるスペクトル、 S_e ：地震応答解析による地表スペクトル（図4）である。

(5) 重回帰解析を行い、地表スペクトルを表現するパラメタ A 、 T_c 、 d 、 f_A 、 b と表層地盤のパラメタ T_I との相関性について調べる。そして、地表スペクトルを表現するパラメタ A 、 T_c 、 d 、 f_A 、 b を表層地盤のパラメタ T_I の式として表現する。

3. 解析結果

重回帰解析の結果、地表スペクトルを表現するパラメタのうち A 、 T_c は、表層地盤のパラメタ T_I と強い相関性が見られた。その一方で、パラメタ d とは明確な相関性が見られなかった。よって、まず A 、 T_c をそれぞれ T_I の回帰式として表現した。得られた回帰式を式(8)-(15)に、大地震動の場合を例として、回帰式による値と地震応答解析の値の対応を(1) 表層全体を1層に置換した場合、(2) 表層30mを1層に置換した場合を比較して図7に示す。

(1) 表層全体を1層に縮約した場合

・大地震動

$$A = -0.24 - 0.22T_I + 0.67 \quad (8)$$

$$T_c = 0.64 + 0.81T_I + 0.69 \quad (9)$$

・中地震動

$$A = -0.065 - 0.022T_I + 0.15 \quad (10)$$

$$T_c = -0.35 + 0.32T_I + 0.61 \quad (11)$$

(2) 表層30mを1層に縮約した場合

・大地震動

$$A = -0.43 - 0.60T_I + 0.87 \quad (12)$$

$$T_c = 0.016 + 1.86T_I + 0.065 \quad (13)$$

・中地震動

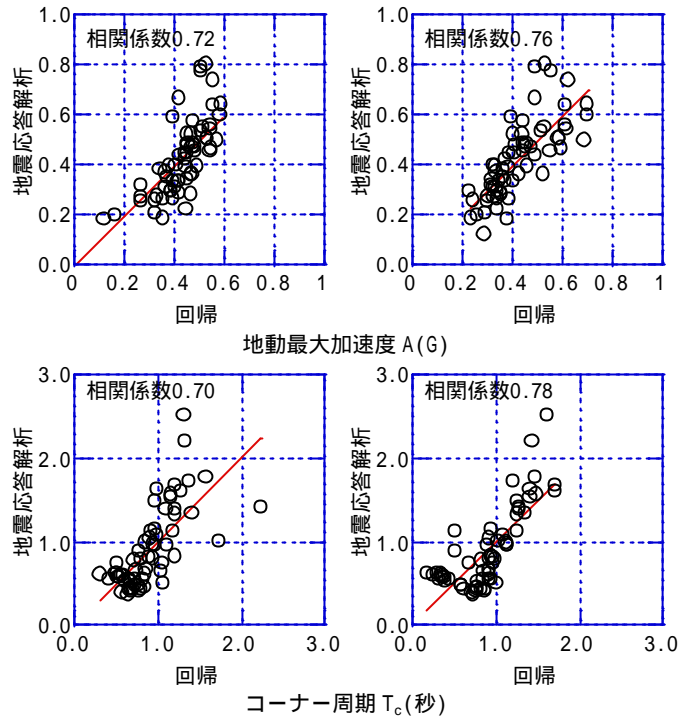
$$A = -0.080 - 0.062T_I + 0.17 \quad (14)$$

$$T_c = -0.025 + 0.73T_I + 0.33 \quad (15)$$

図7を見ると、表層全体を1層に縮約するより、表層30mを1層に縮約する方が、情報量が少ないにも拘わらず精度が高いことがわかり、文献⁷⁾⁸⁾⁹⁾の指摘とも対応する。よって表層30mを1層に置換する方法を採用する。ただしコーナー周期 T_c が回帰式で0.5秒以下となっても、地震応答解析では0.5秒となる傾向があるので、回帰式で $T_c < 0.5$ 秒となった場合は $T_c = 0.5$ 秒とする。

ここで式(12)(14)を見ると、インピーダンス比 T_I が小さく（基盤と表層地盤のコントラストが大きくなる）と地動最大加速度 A が大きくなるのは直観的に理解できるが、等価1次周期 T_I が長く（表層地盤が軟らかく）なると地動最大加速度 A が小さくなるのは直観的には理解できない。これは表層地盤が軟らかくなると非線形化が進み、減衰が大きくなって、加速度応答が小さくなるためと考えられる。

一方、式(13)(15)を見ると、等価1次周期 T_I が長く（表層地盤が軟らかく）なるとコーナー周期 T_c が長く（表層地盤の塑性化が進む）なるのは直観的に理解できるが、インピーダンス比 T_I の係数はコーナー周期 T_c の係数に比べて小さく、コーナー周期 T_c は、主として等



(1) 表層全体を1層 (2) 表層から30mを1層
図7 地動最大加速度 A 、コーナー周期 T_c の地震応答解析と回帰解析結果の対応（大地震動）

価1次周期 T_I で決まることがわかる。

以上のように式(12)-(15)は、直観的にはやや理解しにくい複雑な表層地盤の非線形特性を反映したものとなっている。

一方、地表スペクトルを表現するパラメタのうち d 、 f_A 、 b は、表層地盤のパラメタとは強い相関性は見られなかった。よってパラメタ d 、 f_A 、 b は表層地盤によらず一定値とした。その値については、まず d 、 f_A は、式(6)によって当てはめた値の平均値（ $d=0.5$ 、 $f_A=2.6$ （大地震動）、 $d=0.6$ 、 $f_A=2.4$ （中地震動））とした。これらの値は、荷重指針¹⁰⁾に示された値（ $d=0.5$ 、 $f_A=2.5$ ）とほぼ対応する。次に b の値は、 A 、 T_c の値を式(12)-(15)により算定、 d 、 f_A の値を上で示した値とし、 b の値を仮定して、式(6)から地表スペクトルを求め、式(7)で示された誤差率を全ての表層地盤、周期0.5～3秒について計算して、その平均値が最小となる $b=1.6$ （大地震動）、2.2（中地震動）とした。

そして最終的には、評価式が設計に用いられることを勘案し、地表スペクトルをできるだけ包絡するように、 f_A の値を平均値からやや割り増し、最終的なパラメタ d 、 f_A 、 b の値を次のように設定した。

$$d=0.5, f_A=3.0, b=1.6 \quad (\text{大地震動}) \quad (16,17,18)$$

$$d=0.6, f_A=2.8, b=2.2 \quad (\text{中地震動}) \quad (19,20,21)$$

また、告示法の最小規定（地表スペクトル S_A が式(22)(23)で示される S_N を下回る場合は $S_A=S_N$ とする）をやや簡略化してここでも適用した。即ち、 S_A が式(24)で示される告示スペクトル S_K の1.2倍（大地震動）あるいは1.5倍（中地震動）を下回る場合はこの値とした。

・告示法の最小規定

$$S_N = \begin{cases} 1.2S_K & , T \leq 1.2T_I \quad (\text{大地震動}) \\ 1.0S_K & , 1.2T_I < T \end{cases} \quad (22)$$

$$S_N = \begin{cases} 1.5S_K & , T \leq 1.2T_I \quad (\text{中地震動}) \\ 1.35S_K & , 1.2T_I < T \end{cases} \quad (23)$$

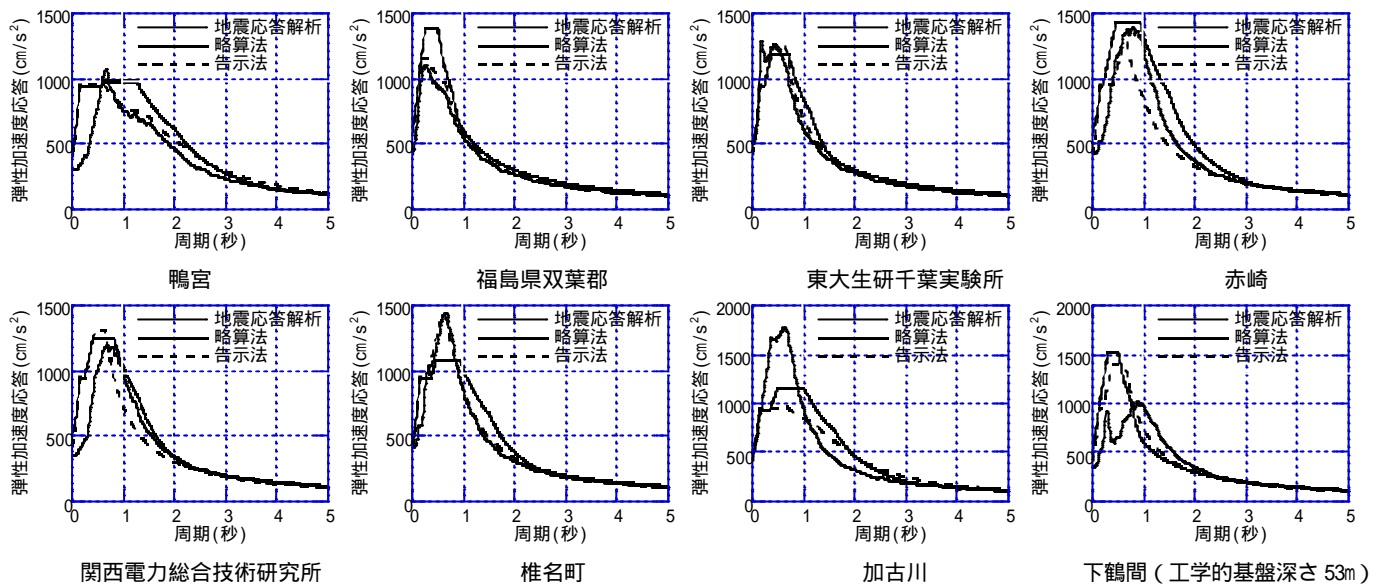


図 8 地震応答解析、略算法と告示法による地表における加速度応答スペクトルの例（大地震動）

・告示スペクトル

$$S_K = \begin{cases} (0.64 + 6T)F & T < 0.16 \\ 1.6F & 0.16 \leq T < 0.64 \\ \frac{1.024F}{T} & 0.64 \leq T \end{cases} \quad (24)$$

ここで、 S_K ：告示に示された解放工学的基盤上面の加速度応答スペクトル(G)、 T ：周期（秒） T_1 ：表層地盤の等価1次周期（秒） $F=1/g$ （中地震動） $5/g$ （大地震動） g ：重力加速度(m/s^2)である。

よって、地表スペクトル S_A を得るには、表層30mのデータから式(1)(2)(4)(5)により T_1 を求め、大地震動の場合は、これを式(12)(13)に、中地震動の場合は、式(14)(15)に代入して A 、 T_c を求め、これらと式(16,17,18)、あるいは式(19,20,21)の d 、 f_A 、 b の値を式(6)に代入すればよい(ただし、 S_K が式(24)で示される告示スペクトル S_K の1.2倍(大地震動)あるいは1.5倍(中地震動)を下回る場合はこの値とする)。これらの手順をまとめて付録に示している(以下、略算法と呼ぶ)。

表層30mのみで工学的基盤の情報がない場合は、の係数が負である式(12)(14)(15)では、例えば地震基盤を想定した安全側の値を用いれば、表層30mのみのデータから求めることも可能となろう。地震基盤のせん断波速度は、例えば文献¹¹⁾では、川崎市を対象として700m/sという値を提案している。逆に、式(13)ではの係数が正なので、400m/sという値が安全側のものとなる。

大地震動の場合を例として、いくつかの表層地盤モデルについて、地震応答解析とここで提案する略算法、告示法による地表スペクトルを比較して図8に示す。

全体的に略算法は、告示法とほぼ同じか、むしろよりの確に地震応答解析の結果を包絡する結果となった。即ち、略算法の方が地震応答解析結果を下回るケースが少なく、全体的な値も告示法と比べても地震応答解析結果を大きく上回ることはない。略算法による結果の地震応答解析結果に対する比は、全ての表層地盤モデル、地表スペクトルの周期(0.1~5秒)で平均すると、大地震動、中地震動の場合それぞれ1.22、1.25となり、告示法のそれぞれ1.15、1.18をやや上回る程度である。

個別に見てみると、全63ケース中、半数以上の36ケースは、図8の鴨宮、福島県双葉郡、東大生研千葉実験所のように略算法、告示法ともに地震応答解析をほぼ包絡する結果となった。

次に多かったのが、略算法では地震応答解析結果を包絡しているが、告示法ではそれを下回ることがある、図8の赤崎、関西電力総合技術研究所のような場合で13ケースあった。即ち、告示法では地表スペクトルが過小評価になってしまう多くのケースについて、略算法ではこれを的確に評価できていることになる。これらのケースはいずれも不均質性が高く、かつ等価1次周期が長いものであった。

逆に、告示法では地震応答解析結果を的確に包絡しているが、略算法では地震応答解析結果を下回ることがある、図8の椎名町のケースが6あったが、略算法が地震応答解析結果を下回るのは、いずれも1秒以下の周期帯であった。限界耐力計算において建物の塑性化を考慮に入れた等価周期は1秒以上となることが多いと予想されるため、このことは大きな問題とはならないと考えられる。

また略算法、告示法ともに地震応答解析結果を下回ることがある、図8の加古川、下鶴間(工学的基盤深さ53m)のケースが8あった。これらのケースもそのほとんどが、地震応答解析を下回るのが1秒以下の周期帯においてであった。しかし、唯一深さ53mを工学的基盤上面とした時の下鶴間の1ケースだけは1秒以上でも告示法、略算法ともに地震応答解析を下回っており、注意が必要である。ただしこれは、深さ34mでせん断波速度840m/sの層が現れるにもかかわらず、あえて深さ53mを工学的基盤上面とした場合なのでやや特殊なケースと言える。

これらの結果は、中地震動の場合もほぼ同様だった。ただし、周期1秒以上で略算法が地震応答解析結果を下回るケースはなかった。

以上のように、告示法では周期1秒以上の周期帯で地震応答解析結果を下回るケースがかなり見られるのに対し、略算法は地震応答解析結果をほぼ包絡し、求め方も表層30mのデータから式に代入するだけで、告示法より遙かに簡便であり、表層地盤の非線形増幅特性を考慮して地表における加速度応答スペクトルを求める方法として有効なものであると考えられる。

4. まとめ

工学的基盤における応答スペクトルとして建築基準法の告示で示されたスペクトルを想定し、地盤を工学的基盤と表層地盤の等価 2 層地盤に単純化して、表層地盤をいくつかのパラメタで表し、地表における応答スペクトルをこれらの表層地盤のパラメタで表現することにより簡便に求める方法について検討した。

表層地盤を工学的基盤と表層地盤の等価 2 層地盤に単純化する方法として、表層全体を 1 層に縮約する場合と、表層 30m を 1 層に縮約する場合の 2 ケースを検討したが、表層全体を 1 層に縮約するより、表層 30m を 1 層に縮約する方が情報量が少ないにも拘わらず精度が高いという結果になった。

よって表層 30m のデータを基に、1 次元等価線形時刻歴地震応答解析による結果をほぼ包絡するように、地表における応答スペクトルを簡便に求める方法を提案した。その結果を、告示で示された方法と比較すると、告示による方法では地震応答解析結果を下回るケースが多数見られる一方で、提案する方法は地震応答解析結果をほぼ包絡する結果となった。この方法は、表層 30m のデータから式に代入するだけで、告示に示された方法より遙かに簡便であり、表層地盤の非線形増幅特性を考慮して地表における加速度応答スペクトルを求める方法として有効なものであると考えられる。その具体的な手順を付録に示している。

謝辞

本研究は、日本建築学会 RC 建物の限界状態と性能評価小委員会の検討結果の一部を報告したもので、田村和夫（清水建設）、岡野創（鹿島）両氏はじめ、多くの委員の方々にご意見をいただきました。日本建築学会地盤震動小委員会の委員の方々にもご意見をいただきました。また、表層地盤データは文献^{12)~18)}および、防災科学技術研究所の KIK-NET のものを使用させていただきました。1 次元地盤の地震応答解析プログラムは、佐藤工業吉田望氏、末富岩雄氏作成の DYNEQ⁵⁾を使用させていただきました。各位に深く感謝の意を表します。

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.EERC72-12, EERC, 1972.
- 2) 三浦賢治, 古山田耕司, 飯場正紀, 応答スペクトル法による表層地盤の非線形増幅特性解析法, 日本建築学会構造系論文集, 第 539 号, 57-62, 2001.1.
- 3) 三浦賢治, 古山田耕司, 飯場正紀, 地盤の非線形増幅率の評価法 (その 1) (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 構造, 59-62, 1999.9.
- 4) 建設省建築研究所, 日本建築センター, 設計用入力地震動作成手法技術指針 (案) 本文解説編, 設計用入力地震動研究委員会平成 3 年度成果報告書, 1992.
- 5) 吉田望, 末富岩雄, 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, 61-70, 1996.
- 6) 土田肇, 井合進, 建築技術者のための耐震工学, 山海堂, 1991.5.
- 7) 伯野元彦, 井上涼介, 地震継続時間ならびに最大加速度に対する軟弱地表層の影響, 第 4 回日本地震工学シンポジウム講演集, 1975.11.
- 8) Borchardt R., Wentworth, C. M., Janssen, A., Fumal, T.E. and Gibbs, J., Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground shaking in the San Francisco Bay region, CA, Procs. Fourth Int. Conf. Seismic Zonation, Vol.3, 545-552, 1991.
- 9) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一, 1987 年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 442 号, 71-78, 1992.12.
- 10) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 1993.6.
- 11) 太田裕, 嶋悦三, 地震基盤について(1), 災害科学論文集, 4, 133-135, 1967.
- 12) 震災予防協議会, 強震動アレー観測, No.1, 1993.12.
- 13) 震災予防協議会, 強震動アレー観測, No.2, 1995.3.
- 14) 震災予防協議会, 強震動アレー観測, No.3, 1998.3.
- 15) 太田外氣晴, 地震記録に基づく表層地盤の挙動に関する研究, 東京大学博士論文, 1981.3.
- 16) 応用地質株式会社, 足柄平野地盤調査報告書, 1990.3.
- 17) 応用地質株式会社, 久野小学校地盤調査報告書, 1991.3.
- 18) 応用地質株式会社, 久野観測点付近地盤調査報告書, 1991.3.

付録 表層 30m の層構造データから地表における
加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を求める手順

1. 式(付 1) - (付 4)を用いて表層 30m の層構造データから工学的基盤とのインピーダンス比、等価 1 次周期 T_l を求める。

$$= \frac{e V_{se}}{b V_{sb}} \quad (\text{付 1})$$

$$T_l = 4 H / V_{se} \quad (\text{付 2})$$

$$V_{se} = (V_{si} d_i) / H \quad (\text{付 3})$$

$$e = (i d_i) / H \quad (\text{付 4})$$

ここで、 V_{si} : 表層地盤各層のせん断波速度(m/s)、 d_i : 表層地盤の各層の層厚(m)、 i : 表層地盤の各層の単位体積重量(tf/m³)、 b : 工学的基盤の単位体積重量(tf/m³)、 H : 表層地盤の厚さ(m) (30m、ただし工学的基盤の深さが 30m 以浅の場合は工学的基盤までの厚さ)、 V_{sb} : 工学的基盤のせん断波速度(m/s)である。

2. 1. で求めた T_l を式(付 5)~(付 8)に代入し、地表における加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) の地動最大加速度 A (G)、コーナー周期 T_c (秒) を求める。

・極めて稀に発生する地震動

$$A = -0.43 - 0.60 T_l + 0.87 \quad (\text{付 5})$$

$$T_c = 0.016 + 1.86 T_l + 0.065 \quad \text{ただし } T_c < 0.5 \text{ の場合は } T_c = 0.5 \quad (\text{付 6})$$

・稀に発生する地震動

$$A = -0.080 - 0.062 T_l + 0.17 \quad (\text{付 7})$$

$$T_c = -0.025 + 0.73 T_l + 0.33 \quad \text{ただし } T_c < 0.5 \text{ の場合は } T_c = 0.5 \quad (\text{付 8})$$

3. 2. で求めた地動最大加速度 A (G)、コーナー周期 T_c (秒) を式(付 9)に代入し、地表における加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を求める。ただし、 S_A が式(付 16)で示される告示スペクトル S_K の 1.2 倍 (極めて稀に発生する地震動) あるいは、1.5 倍 (稀に発生する地震動) を下回る場合はこの値とする。

$$S_A = \begin{cases} \left(1 + \frac{f_A - 1}{d} \frac{T}{T_c}\right) A & , T \leq d T_c \\ f_A A & , d T_c \leq T \leq T_c \\ f_A \frac{T_c}{T} A & , T_c \leq T \leq b T_c \\ f_A \frac{b T_c^2}{T^2} A & , b T_c \leq T \end{cases} \quad (\text{付 9})$$

ここで、 S_A : 弾性加速度応答スペクトル (減衰定数 5%、 G)、 T : 周期 (秒)、 A : 地動最大加速度 (G)、 T_c : コーナー周期 (秒)、 d 、 f_A 、 b : スペクトルの形状を表現するパラメタで、次の値を用いる。

$$d=0.5, f_A=3.0, b=1.6 \quad (\text{極めて稀に発生する地震動}) \quad (\text{付 10, 11, 12})$$

$$d=0.6, f_A=2.8, b=2.2 \quad (\text{稀に発生する地震動}) \quad (\text{付 13, 14, 15})$$

$$S_K = \begin{cases} (0.64 + 6T) F & T < 0.16 \\ 1.6 F & 0.16 \leq T < 0.64 \\ \frac{1.024 F}{T} & 0.64 \leq T \end{cases} \quad (\text{付 16})$$

ここで、 S_K : 告示に示された解放工学的基盤上面の加速度応答スペクトル (G)、 T : 周期 (秒)、 $F=1/g$ (稀に発生する地震動)、 $5/g$ (極めて稀に発生する地震動)、 g : 重力加速度 (m/s²) である。