

地盤の地震時挙動を等価な 1 自由度系で評価する際の刺激係数考慮に関する一考察

坂井 公俊¹

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: sakai.kimitoshi.36@rtri.or.jp

地震時の地盤挙動を等価 1 自由度モデルによって表現する際の刺激関数の考慮方法について検討した。地盤の 1 次モード刺激係数は変位レベルに応じて変化するため、これを時間領域の非線形動的解析に反映させる際には、何らかの工夫が必要である。本検討では、刺激関数の設定方法として複数の考え方を提案し、多様な地盤、入力レベルに対して各手法による地表面地震動の比較を行った。その結果、等価 1 自由度モデルによって得られた最大変位から刺激関数を算出し、これを全時刻で考慮することで、適切な地表面地震動が得られることを確認した。この方法では、地震動の入力レベルによって使用する刺激関数を変化させる必要はあるものの、時々刻々変化させるような作業は不要であるため、簡便な地盤挙動評価手法として有効な手法の一つになり得る。

Key Words : participation factor, equivalent single degree of freedom method, nonlinear dynamic response

1. はじめに

地震時の地盤挙動を適切に評価する重要性については論を俟たないが、各種施設の耐震性能評価、耐震設計を考える場合には、性能評価に重要な指標を適切に表現した中での評価手法の簡便さも重要な要素となる(例えば¹⁾。こうした中で筆者らは過去に、工学的基盤面よりも上層の表層地盤を等価な 1 自由度系に置換する手法²⁾を提案している。そして、これによって得られる地盤全体系の強度を指標³⁾とすることで、地表面地震動の応答スペクトル⁴⁾や地盤変位量⁵⁾を適切に表現できること、さらには液状化地盤の挙動⁶⁾も良好な精度で再現できることを確認している。そのため、地盤挙動を等価な 1 自由度モデルによって表現するという考え方は、構造物の挙動評価を行う際の簡易なモデル化手法として、有効な手法の一つになり得ると考えられる。

ここで当然のように、ある系を等価な 1 自由度に置換して挙動評価を行う場合、これにより得られる結果は、ある一点の応答であり、他の箇所の挙動を把握する場合には、刺激係数やモード形状を考慮する必要がある。そのため、地盤の等価 1 自由度モデルにおいては、得られた応答波形に対して 1 次モードの刺激関数を乗じることによって地表面位置での波形に換算する。この刺激関数は地盤の塑性化の程度によって変化することが分かっている²⁾。

これに対して、既往の検討では 1 自由度系の逐次非線形解析を実施した結果の最大変位を用いて刺激関数を算出し、これを全時刻において考慮する方法を採用しているが、この手法の妥当性については検討の余地が残されている⁷⁾。

そこで本検討では、地盤の地震時挙動を等価 1 自由度モデルによって評価する際の、刺激関数の適切な設定手法について整理を行うことを目的とする。この時には、一般的な地盤応答解析において用いられる 1 次元の土柱モデルによる多自由度系の逐次非線形解析を用いた地表面応答波形を正解値として取り扱うこととし、この正解値を適切に再現できることと、実務的な簡便さも考慮した上で有効な手法の整理を行う。2 章では今回検討を行う刺激関数の考慮方法を整理するとともに、3 章において対象とした地盤条件、入力地震動の条件等について述べる。これらを踏まえて 4 章では地盤応答解析の結果を考察することで、適切な刺激関数の設定方法を提示する。

2. 検討を行う刺激関数の設定方法

地盤の静的非線形解析を実施することで、表層地盤全体を一つの系として捉えた時の変位に対する剛性低下率、減衰を算定することができる²⁾。これとともに、各変位

状態での1次モードを対象とした地表位置の刺激関数も算出されるが、この刺激関数は、変位 δ に対して図-1のように徐々に変化することが確認されている。そのため、地盤の静的非線形解析によって得られた剛性低下率、減衰の関係を再現可能な等価1自由度モデルによって非線形動的解析を実施して得られる応答波形を地表面位置に置換する場合、時々刻々変化する変位 $\delta(t)$ に依存する刺激関数 PF を何らかの方法で考慮する必要がある。この時の方法としては、大きく分けて時々刻々変化する刺激関数 PF を考慮する方法と、何らかの代表値を全時刻で共通して用いる方法の2種類が考えられる。これは次式であらわされる。

$$PF^d(\delta(t)) = PF^s(|\delta(t)|) \quad (1)$$

$$PF^d(\delta(t)) = \alpha \cdot PF^s(\max|\delta(t)|) \quad (2)$$

ここで、 $PF(\delta)$: 変位 δ 時の刺激関数、 $\delta(t)$: 1自由度系によって得られる時刻 t の応答変位、 α : 変位の換算係数、上付きの d は動的解析によるもの、 s は静的非線形解析によるものを示している。この変位の換算係数 α は、例えば地盤の等価線形化法⁸⁾による有効せん断ひずみ換算係数と類似した意味を有する係数である。この刺激関数 $PF(t)$ を1自由度モデルによって得られた相対変位波形、相対速度波形、相対加速度波形に乗じることで、地表位置の各波形に換算することができる。

以降では実際の地盤応答解析に基づいて刺激関数 $PF(t)$ の適切な設定方法について検討を行うが、この時の検討ケースを表-1に示す。ケース1~3は式(2)に示されるように、等価1自由度モデルによる変位の代表値から一つの刺激関数を算出する方法であり、ケース1は変位 $\delta=0$ の状態、つまり弾性時の固有値解析による結果から、ケース2は最大変位に等価線形化法において用いられることの多い0.65^{例えぼり}を乗じた値から、ケース3は最大変位から算定する。ケース4は式(1)によって1自由度モデルによる変位 $\delta(t)$ から時々刻々の刺激関数 $PF(t)$ を算出して考慮するものである。

3. 検討を行う地盤、地震動、解析条件

検討を行う地盤は、多様な地層構成、周期特性を有する実際の60地盤を対象とした。これら各地盤では、PS検層や室内試験が実施されており、地盤の非線形動的解析を実施するだけの情報が揃っている。そして現在の鉄道構造物の地表面設計地震動を設定する際の基本として用いられた地盤である¹⁰⁾。対象とした地盤の固有周期 T_g の分布を図-2に示すが、周期0.1秒程度の比較的良好な地盤から周期1.7秒程度の軟弱地盤まで幅広い周期で分布していることが分かる。これら地盤の各層には室内試

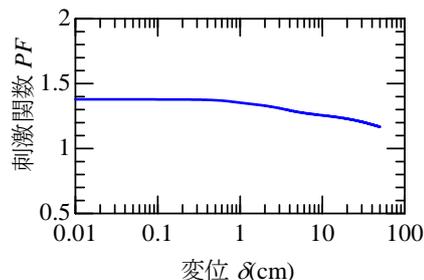


図-1 地盤の静的非線形解析に基づく刺激関数 PF の算出結果の例

表-1 検討ケースの概要

ケース	PF 考慮の方法	備考
1	式(2) ($\alpha=0$)	初期の値
2	式(2) ($\alpha=0.65$)	等価線形化法の代表値
3	式(2) ($\alpha=1$)	最大変位時の値
4	式(1)	時々刻々の変位で変化

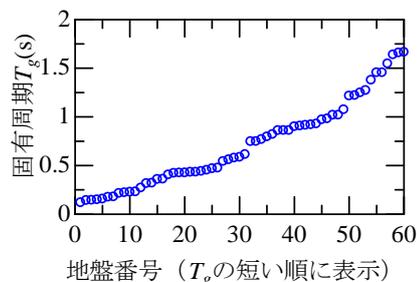


図-2 検討に用いた地盤の固有周期 T_g

験結果や、土質区分等の情報をもとに GHE-S モデル¹¹⁾に基づく非線形特性を設定しているとともに、地盤の静的非線形解析²⁾に基づいて各地盤の変位増加に伴う剛性の低下、履歴減衰の増大、刺激関数の変化の傾向も評価している。これらの結果をまとめて図-3に示すが、各地盤の層厚や地層構成、非線形特性は多様であるため、変位の増大に伴う各指標の変化の傾向も大きく異なっている。

続いて基盤位置に入力する地震動については、鉄道構造物の耐震設計¹²⁾で一般に用いられている標準 L2 地震動スペクトル II (図-4) を用いることとした。この地震動波形の最大加速度は 944gal であるが、入力レベルが変化した場合の適切な刺激関数設定法の変化についても検討を行うために、振幅を 10gal~1000gal まで変化させた複数波を用意した。

解析の方法としては、まず上述した全 60 地盤の多層モデルに対して逐次非線形解析を実施することで、各地盤、各入力地震動に対する地表面応答波形を算出する。この時の減衰定数は、地盤のせん断弾性波速度、土質分類をパラメータとして周波数依存性を考慮した Q 値の提案式¹³⁾に出来る限り一致するようなレーリー減衰を設定

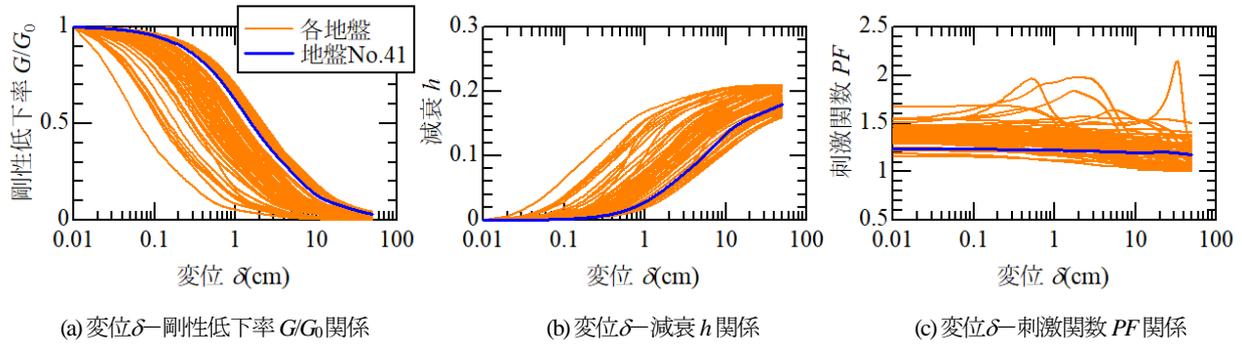


図-3 検討に用いる全地盤の静的非線形解析結果

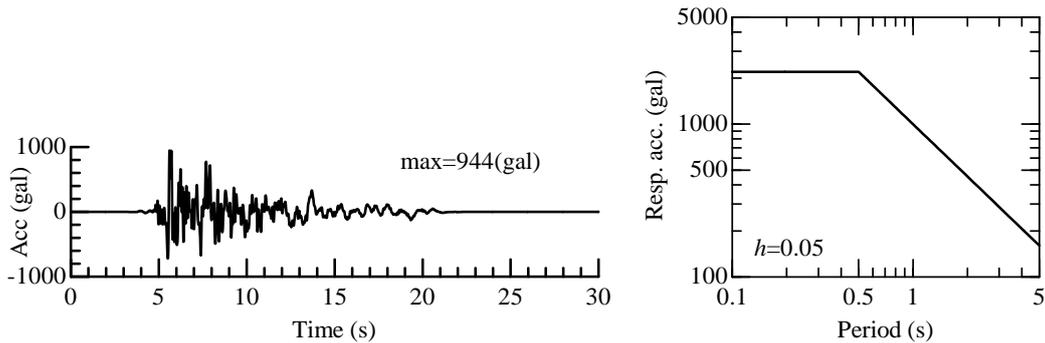


図-4 入力地震動の時刻歴波形，弾性加速度応答スペクトル（振幅調整前）

した³⁾。この結果を正解値の位置づけとする。

続いて，図-3 (a), (b)に示す関係をもとに，GHE-S モデルを用いた各地盤の等価 1 自由度モデルを設定し，これを用いた非線形動的解析を実施する。この時の地震動，減衰等の設定方法は全て多層モデルの場合と同一とし，各地盤，各入力地震動に対する応答波形を算出した。これに対して，表-1 で示した関係に従って図-3(c)の結果から各ケースに対する刺激関数 PF を評価するとともに，これを応答波形に乗じることで，各ケースの地表面波形に換算を行う。これらの結果を正解値と比較することで，刺激関数の設定方法の違いによる結果の差異を議論する。

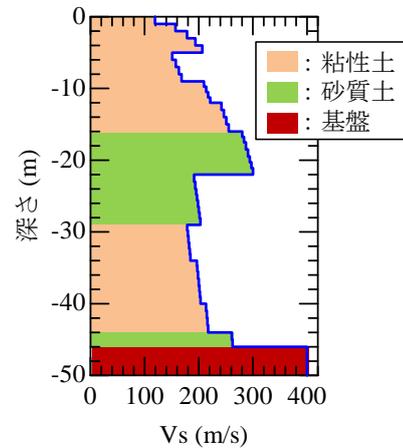


図-5 試算を行った地盤条件

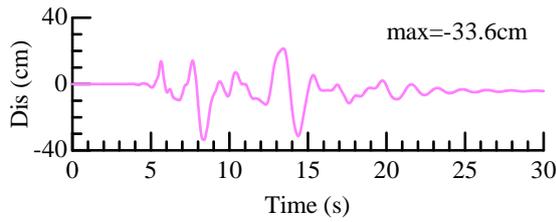
4. 地表面地震動の評価結果

(1) 刺激関数の設定方法の違いによる地表面地震動の変化

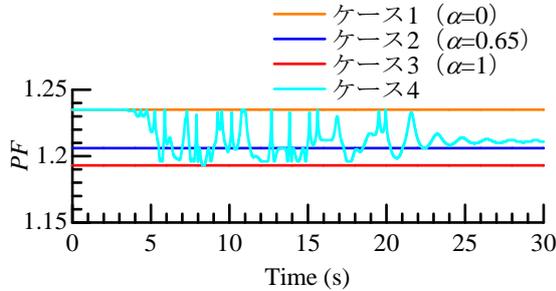
まず，表-1に示したケースごとに刺激関数 $PF(t)$ を算出するとともに，地表面地震動を算出する流れを示すことを目的として，図-5 に示す地盤 ($T_g=0.91s$ ，図-3 の地盤 No.41) を対象に一連の評価を実施する。この時の入力地震動は，振幅調整を行う前の図-4の時刻歴波形をそのまま用いた。

図-3に青線で示した静的非線形解析結果に基づいて等

価 1 自由度モデルを用いて応答解析を実施した結果，地表面の最大変位は図-6 (a)に示すように 33.6cm となった。これと図-3 (c)の結果から，各ケースの刺激関数 $PF(t)$ を算出した結果を図-6 (b)に示す。まず図-3 (c)を見ると，対象とした地盤では大まかな傾向として変位が大きくなるにしたがって刺激関数 PF が小さくなっている。そのため，ケース 1, 2, 3 と参照する変位が順に大きくなるにしたがって，全時刻で考慮する刺激関数 PF が小さくなることが確認できる。これに対して，時々刻々の変位に



(a) 等価 1 自由度モデルの応答変位波形



(b) 刺激関数 $PF(t)$ の算定結果

図-6 等価 1 自由度モデルを用いた刺激関数の評価 (地盤 No.41, 入力加速度 944gal の場合)

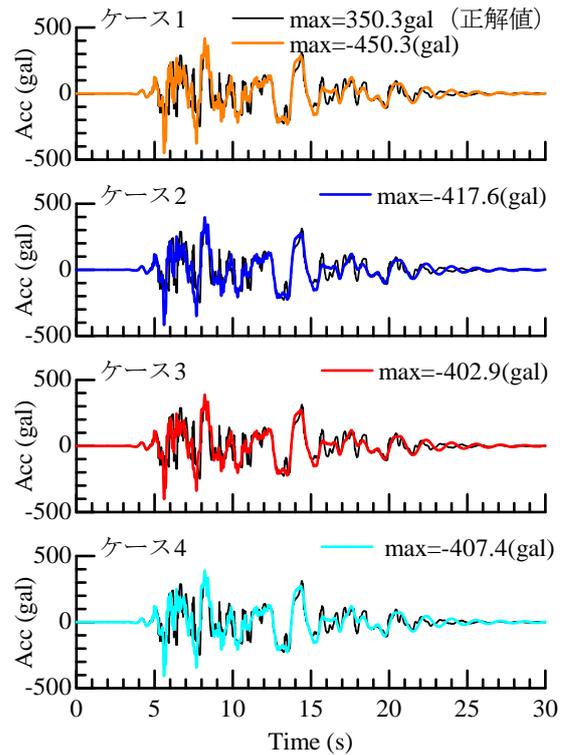


図-7 地表面加速度波形の比較

対して刺激関数 PF を評価するケース 5 では、初期状態ではケース 1 ($\alpha=0$) の結果と、変形最大の時刻ではケース 3 ($\alpha=1$) の結果と一致しているとともに、それ以外の時刻では両者の中間的な値となっている。

最終的にこの刺激関数 $PF(t)$ を等価 1 自由度モデルによる応答波形に乗じて得られる地表面応答波形を比較した結果を図-7 (加速度波形), 図-8 (変位波形) に示す。これを見るといずれの結果においても最大加速度, 最大変位が正解値よりも多少大きな値となっているが、これは多自由度系の土柱モデルを等価な 1 自由度系に置換しているために生じる誤差であると考えられる。また、各ケースでの最大値の差はそれほど大きくないものの、ケース 1 からケース 3 となるに従って最大加速度, 最大変位が小さくなり、正解値に徐々に近づいていることも確認できる。しかしながら、時刻歴波形の傾向としてはいずれのケースにおいても大きな違いは見られず、正解とした多自由度モデルによる応答結果と大まかな傾向で一致している。

続いて、これらの地表面地震動が地上構造物の応答に与える影響を確認するために、地表面加速度波形から得られる弾性加速度応答スペクトルをまとめて図-9 に示す。この結果を見ても、ケースごとの応答の違いはそれほど大きくないが、初期状態での刺激関数 PF を使用したケース 1 の方が短周期側で正解値よりも多少大きな傾向を示している。それに対してケース 2, 3 となるにしたがって短周期側の応答が低減されるとともに、正解値に近づいていることが確認される。さらにケース 4 では、時々

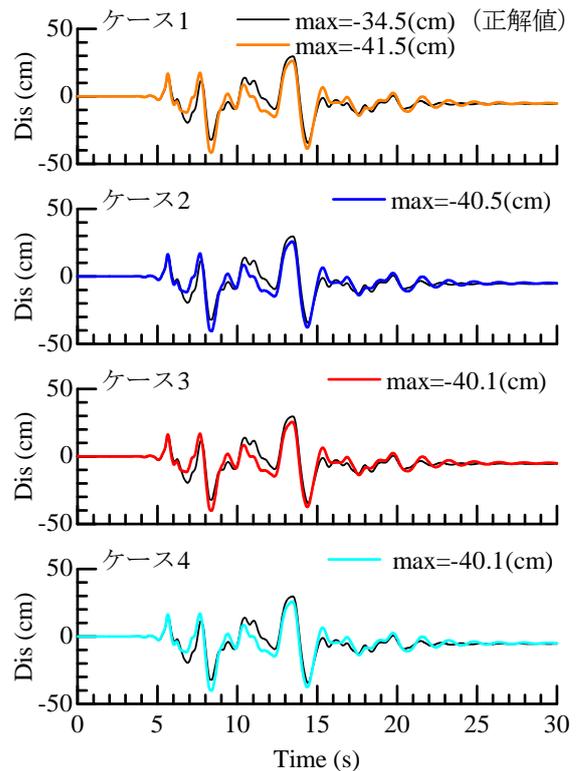


図-8 地表面変位波形の比較

刻々の刺激関数を考慮しているにもかかわらず、正解値に最も近づいているわけではないこともわかる。また、この図には参考として、刺激関数を考慮せずに、等価 1 自由度モデルによる応答波形をそのまま用いた結果も示

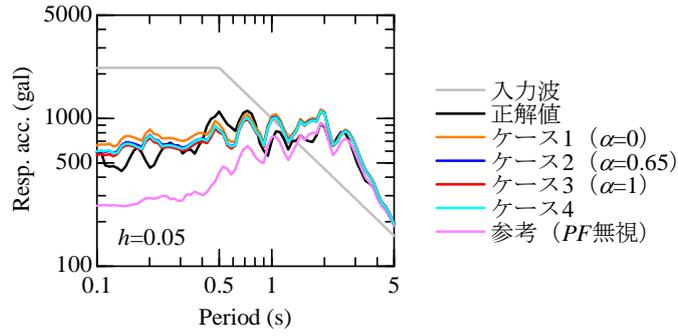


図-9 弾性加速度応答スペクトルの比較

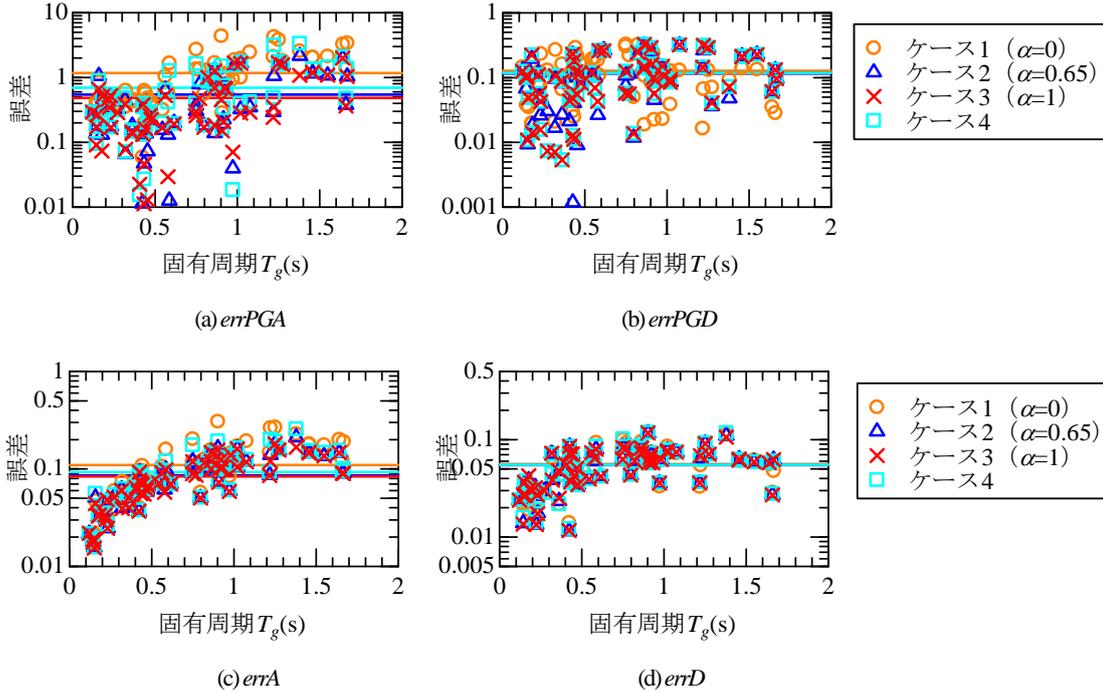


図-10 時刻歴波形の適合度評価結果 (実線：全地盤の平均値)

している。鉄道橋梁・高架橋などでは頂部の重量が比較的大きく、変形が柱基部に集中する 경우가多く、振動が単純な1自由度系に近いために、等価1自由度モデルを用いた応答波形に対して刺激関数の影響を考慮していない²⁾が、地盤に対してはこの考え方では誤差が大きくなっており、刺激関数を考慮することの重要性が示された。

(2) 地盤条件を変化させた場合の刺激関数の影響

続いて、上記(1)と同様の検討を今回用意した全60地盤に対して実施することで、図-4の時刻歴波形を用いる場合の適切な刺激関数の設定方法について整理を行う。ここで、各ケースによって刺激関数を設定した場合の正解値との誤差を定量的に評価するために、次式によって最大加速度の誤差 $errPGA$ 、最大変位の誤差 $errPGD$ 、時刻歴波形における加速度の誤差 $errA$ 、変位の誤差 $errD$ の評価を行った。

$$errPGA = (PGA^{cal} - PGA^{cor}) / PGA^{cor} \quad (3)$$

$$errPGD = (PGD^{cal} - PGD^{cor}) / PGD^{cor} \quad (4)$$

$$errA = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A^{cal}(t) - A^{cor}(t)) \right\} / PGA^{cor} \quad (5)$$

$$errD = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D^{cal}(t) - D^{cor}(t)) \right\} / PGD^{cor} \quad (6)$$

ここで、 PGA ：時刻歴加速度波形 $A(t)$ の最大値、 PGD ：時刻歴変位波形 $D(t)$ の最大値、 N ：データ数、上付きの cor は多自由度系の動的解析によるもので正解値の位置づけ、 cal は等価1自由度モデルによる動的解析の結果にケース毎の刺激関数を考慮したものを示している。

全60地盤に対して等価1自由度モデルによる応答解析を実施して得られた応答波形を用いて、表-1に示したそれぞれの手法で刺激関数 PF を考慮した時刻歴波形を算出した。これら地表面波形に対して式(3)~(6)によって正解値との誤差を算定した結果をまとめて図-10に示す。

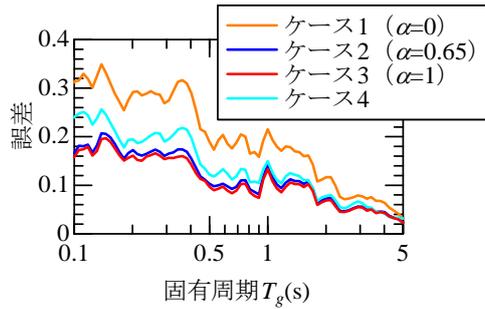


図-11 加速度応答スペクトルの適合度 $errRA(t)$ の評価結果 (全地盤の平均値)

これらの結果を見ると、全体的な傾向として、地盤の固有周期 T_g が長くなるほど、誤差が大きくなっていることが分かる。この要因としては、同一の地震動レベルを考えた場合、地盤が軟弱なほど非線形化の程度が顕著になることや、固有周期が長い地盤ほど2次モード以上の高次の周期帯になっていること等が考えられる。そのため、等価1自由度モデルによって応答を評価する際に、地盤の塑性化が顕著となるような大きな地震動レベルや軟弱地盤を対象とした場合にはその結果の取扱いに注意が必要であると言える。

続いて、刺激関数の算定方法の違いによる誤差の変化を確認する。最大変位の誤差 $errPGD$ や全時刻に渡る変位波形 $errD$ の誤差には、各ケースの違いはほとんど見られないことが分かる。一方で最大加速度の誤差 $errPGA$ や全時刻に渡る加速度波形 $errA$ の誤差では、ケース毎に多少違いがみられる。平均的な傾向を見ると誤差の小さい順に、ケース3 ($\alpha=1$) < ケース2 ($\alpha=0.65$) < ケース4 (時々刻々変化) < ケース1 ($\alpha=0$) となっている。

続いて、刺激関数の設定方法の違いが構造物応答に与える影響を確認するために、地表面地震動の応答スペクトルを算出し、次式によって正解値との誤差 $errRA(t)$ の評価を行った。

$$errRA(t) = |\log RA^{cal}(t) - \log RA^{cor}(t)| \quad (7)$$

ここで、 $RA(t)$: 周期 t (s) の1質点系の最大応答加速度 ($h=0.05$) であり、上付きの cor は多自由度系の動的解析によって得られた地表面加速度波形による構造物応答、 cal は等価1自由度系を用いて得られる地表面加速度波形による構造物応答を示している。ケース毎に全60地盤に対して $errRA(t)$ を算出するとともに、周期ごとに全地盤の平均値を算定した結果を図-11に示す。大まかな傾向としては地表面波形の誤差算出結果と概ね同様の傾向を示しており、すべての周期帯域において、誤差の小さい順にケース3 ($\alpha=1$) < ケース2 ($\alpha=0.65$) < ケース4

(時々刻々変化) < ケース1 ($\alpha=0$) となっている。ケース4では時々刻々の変位応答の変化に対応して刺激関数を評価しているものの、最大変位から算出した刺激関数を用いた場合と比較して、応答の誤差はほとんど変わらないか多少大きくなっていることが分かる。そのため、図-4の時刻歴波形をそのまま用いた場合の刺激関数の適切な設定方法としては、手法の簡便さと精度の観点から、最大変位時の刺激関数 PF を全時刻に渡って用いるケース3が適切であると言える。

(3) 地震動の入力レベルの違いによる刺激関数の影響

続いて、上記(2)と同様の検討を入力レベルを変化させた複数ケースで実施することで、入力レベルが変化した場合に刺激関数の設定方法が与える影響について整理を行う。検討の方法としては、まず各入力レベルに対してこれまでと同様の手順によって地表面地震動を算定した後、式(3)-(6)を用いて、各入力レベル、各ケース、各地盤の地表面地震動の正解値との誤差を算定する。続いて各入力レベル、各ケースにおける全60地盤の地表面地震動の誤差の平均値を算出し、整理した。最終的に得られた結果をまとめて図-12に示す。

これらの結果を見ると、全体的な傾向として入力レベルが大きいかほど各指標の誤差が大きくなっている。これは上記(2)において簡単に考察を行ったが、地盤の塑性化の程度が大きくなった影響であると考えられる。また、入力レベルの小さい範囲では、刺激関数の設定法によらず概ね誤差が同一であるが、これは地盤が概ね弾性挙動をしているため、各ケースで用いる刺激関数 PF がほぼ同一の値となっているためである。

また、入力レベルが大きくなると徐々にケース1の誤差が大きくなっている。これは図-3(c)を見てもわかる通り、変位レベルが大きくなるほど刺激関数 PF が小さくなっているにもかかわらず、ケース1では初期状態の刺激関数を用いているために応答を過大評価してしまっていることが理由として考えられる。これに対してケース

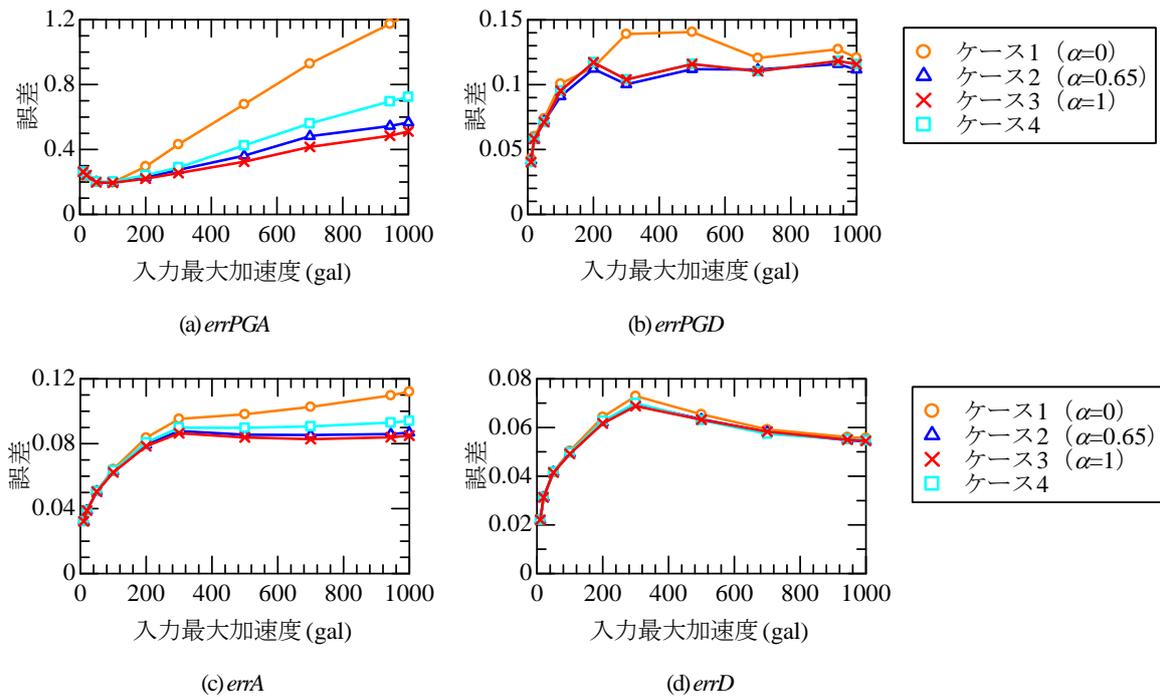


図-12 入力レベルが変化した場合の適合度の変化（全地盤の平均値）

2~4では地盤の塑性化に伴って徐々に刺激関数 PF が小さくなる傾向を表現できているために、誤差の増大を抑制できている。これらケース2~4における誤差の程度にはそれほど差が見られないが、最大加速度の誤差 $errPGA$ 、加速度波形の誤差 $errA$ では誤差の小さい順にケース3 ($\alpha=1$) < ケース2 ($\alpha=0.65$) < ケース4 (時々刻々変化) となっている。そのためこれらの結果からは、刺激関数 PF の設定方法として最大変位時の刺激関数をそのまま用いるケース3に基づくことが適切であると言える。

刺激関数の設定方法としてケース3による手法を用いる場合、時々刻々の変位を算定する手間や、最大変位から係数を乗じるといった作業が不要になる。そのため、簡便な地表面地震動算定手法としての位置づけである等価1自由度モデルによる動的解析を用いる際の刺激関数設定手法として、本手法は有効であると考えられる。

5. まとめ

本検討では、地盤の地震時挙動を等価1自由度モデルによって評価した場合に、得られた応答波形を地表面地震動に置換する刺激関数の設定方法について整理を行った。具体的には、刺激関数の設定方法として複数の手法を提示するとともに、多様な地盤に対して多自由度モデルを用いて得られる地表面応答波形（これを正解値とする）と、等価1自由度モデルによって得られる応答波形に各手法に基づいて刺激関数を考慮した地表面波形を比

較することで、有効な刺激関数の設定手法を整理した。

その結果、上端位置の重量が比較的大きな橋梁・高架橋においては刺激関数の影響を無視しているが、地盤においては刺激関数を考慮する必要があること、この時に用いる刺激関数としては、弾性時の固有値解析によって得られるものではなく、地盤の塑性化を考慮した状態で得られる刺激関数を用いることで、地表面地震動の再現性が向上することを確認した。さらに、等価1自由度モデルによる変位最大時の刺激関数を全時刻に渡って考慮する手法を用いることで、複雑な手続きを必要とせずに適切な地表面地震動を推定することが可能となることも分かった。そのためこの手法は、簡易な地表面地震動算定手法の位置づけである等価1自由度モデルによる応答評価法における刺激関数の設定手法として有効であると考えられる。

参考文献

- 1) (公社) 土木学会：実務に役立つ耐震設計入門，第2章，2011。
- 2) 坂井公俊，室野剛隆：地盤の等価1自由度モデルを用いた非線形動的解析法の提案，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 71, No. 3, pp. 341-351, 2015。
- 3) 坂井公俊，井澤淳，室野剛隆，日野篤志：地盤全体系の強度指標の提案とその簡易推定法に関する検討，日本地震工学会論文集，Vol. 15, No. 7, pp. 22-33, 2015。
- 4) 坂井公俊，井澤淳，室野剛隆：地盤全体系の強度と固有周期を用いた耐震設計のための地盤分類法，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 73, No. 2, pp. 433-442, 2017。
- 5) 坂井公俊，井澤淳，石橋利倫：地盤全体系の強度を

- 考慮した地震時地盤変位量の簡易推定法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 74, No. 4, pp. I-361-I-368, 2018.
- 6) 坂井公俊, 小島謙一: 等価 1 自由度モデルを用いた液状化地盤の簡易挙動評価法の開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 74, No. 4, pp. I-329-I-340, 2018.
 - 7) 坂井公俊, 井澤淳: 観測記録から地盤全体系の非線形特性を同定する手法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. I-12-I-21, 2016.
 - 8) 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, University of California, Berkeley, 1972.
 - 9) 末富岩雄, 吉田望: 周波数依存型地盤応答解析におけるパラメータの最適化のための一検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. I-177-I-187, 2016.
 - 10) 川西智浩, 室野剛隆, 佐藤勉, 畠中仁: 土質区分の影響を考慮した地盤種別の分類に関する検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.187-196, 2007.
 - 11) 室野剛隆, 野上雄太: S 字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力~ひずみ関係, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 494-497, 2006.
 - 12) (公財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善出版, 2012.
 - 13) 福島美光, 翠川三郎: 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, 1994.

CALCULATION METHOD OF PARTICIPATION FACTOR FOR EVALUATING SEISMIC BEHAVIOR OF GROUND USING EQUIVALENT SDOF MODEL

Kimitoshi SAKAI

In this study, the method of obtaining the participation factor for evaluating the ground behavior during earthquakes was investigated. The author has proposed that the equivalent SDOF model was applicable for estimating the response of the surface ground. The method requires a participation factor of the primary mode of the surface ground. However, proposed method was not directly used for evaluating a nonlinear behavior of soil since the factor varies according to the soil displacement. In this study, several methods of setting the participation factor of ground were proposed. The ground behavior was then evaluated for various ground condition and input motions using the proposed methods. As a result, it was confirmed that the most precise method was to first obtain a constant participation factor at the moment of maximum displacement and apply it throughout the analysis. Despite the participation factor depends on the amplitude of the input motion, one can keep it constant in an individual analysis and no iteration is required. It follows that the proposed SDOF method was extended to the nonlinear evaluation of the ground behavior.