

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

坂井 公俊¹・井澤 淳²・石橋 利倫³

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: ksakai@rtri.or.jp

²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: izawa@rtri.or.jp

³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: ishibashi.toshitsugu.86@rtri.or.jp

橋梁・高架橋や地下構造物の地震応答値算定法として応答変位法が用いられることがある。この時に地盤変位を別途評価する必要があるが、これを地盤の固有周期 T_g をパラメータとして推定する手法が存在する。しかしながら、比較的大きな地震動レベルを対象とした場合、地盤の非線形程度も重要な指標となると考えられる。

そこで本検討では、地盤全体系の強度を表す指標（地盤強度比 K_f ）をパラメータとして加えた地盤変位の評価手法を提案するとともに、従来法からの精度向上を確認した。この地盤強度比 K_f は、通常的地盤調査結果から比較的容易に推定することが可能である。そのため本手法は、応答変位法を適用する際の地盤変位量の評価法として実務的に有効な方法であると考えられる。

Key Words : seismic deformation method, ground displacement, strength of whole ground, natural period, large-scale earthquake

1. はじめに

構造物の耐震設計を行う際には、当然のように地震に伴う構造物への作用を適切に設定する必要がある。この時の地震作用は、必ずしも地震動波形である必要はなく、構造物の応答値算定法、性能照査方法を勘案して何らかの適切な表示方法であれば十分である。ここで、一般的な鉄道橋梁・高架橋の地震応答値を算定する手法としては、所要降伏震度スペクトルにより算定される慣性力と地盤変位を同時に作用させる応答変位法^{例えば 1)}を用いる場合が多い²⁾。この場合の慣性力の影響は、所要降伏震度スペクトルが存在すれば簡便かつ高い精度で評価可能であることが確認されている^{例えば 3)}。一方で、地盤変位の影響を簡易に評価する場合は、地表面位置の最大変位量とモード形状等から各深さの変位の大きさを算出しており、これらを適切に評価する必要がある。

各深さ位置での地盤変位分布は、詳細な地盤応答解析を実施することで適切に算定することができる。一方で、通常の鉄道高架橋を設計する場合には、動的解析を実施することは稀であり、何らかの簡易な手法によっている。

このうち地盤変位の形状については、地盤の非線形化の影響を簡易に考慮することで、従来の固有値解析による変位分布評価よりも高精度化が可能な手法が提案されている⁴⁾。一方で、地表面位置の地盤変位量については、標準的な設計地震動（L1 地震動、L2 地震動）を用いる場合は、次式のような地盤の固有周期 T_g のみから地表面での最大変位量 $a_g(m)$ を簡易に算定する手法が提示²⁾されており、実務的な設計におけるほとんどの場合はこの手法が用いられている。

$$a_g = 0.064 \cdot T_g^{2.1} \quad (\text{L1 地震動}) \quad (1)$$

$$a_g = 0.320 \cdot T_g \quad (\text{L2 地震動スペクトル I}) \quad (2)$$

$$a_g = 0.413 \cdot T_g \quad (\text{L2 地震動スペクトル II}) \quad (3)$$

また近年の検討では、大規模地震時の地表面地震動を適切に評価するためには、地盤の弾性時の特性を表す固有周期 T_g だけでなく、その非線形挙動特性、特に強度特性も考慮する必要があるということが指摘されている^{例えば 4)}。そのため地盤変位についても各地盤の非線形挙

動のしやすさを指標として用いることが望ましいと言える。

このような中で筆者らは、地盤の静的非線形解析法とこれに基づく地盤全体系の荷重－変位関係を算定する手法を提案⁵⁾するとともに、この結果から地盤全体系の強度に関する指標（地盤強度比 K_f ）の提案を行っている⁶⁾。さらにこの地盤強度比 K_f の簡易算定法を提示するとともに、この地盤強度比 K_f と固有周期 T_g を指標として用いることで、大規模地震時の地表面地震動の応答スペクトルを適切に分類できることを確認している⁷⁾。そのため、大規模地震時の地表面位置の地盤変位量に対しても従来の固有周期 T_g に加えて地盤強度比 K_f をパラメータとして加えることで、推定精度が向上する可能性があると考えられる。そこで本検討では、地盤強度比 K_f と固有周期 T_g を指標とした地盤変位量の簡易推定手法を提案するとともに、従来の固有周期 T_g のみを指標とした場合との結果の差異について考察を行う。

2. 地盤変位量の評価に地盤強度比 K_f を考慮することの有効性

(1) 等価1自由度モデルを用いた網羅的な地盤応答解析

本章では、地盤変位の簡易推定を行う際のパラメータとして、地盤の固有周期 T_g だけでなく盤強度比 K_f を考慮することの妥当性の確認を行う。この時の地盤は、詳細な多層モデルを用いるのではなく、地盤の等価1自由度モデル⁵⁾を用いることで、多数の地盤応答解析を効率的に実施することとした。そしてこの網羅的な地盤応答解析の結果について考察することで、地盤の固有周期 T_g 、地盤強度比 K_f と地盤変位量の関係を整理する。まず、 T_g と K_f を網羅的に変化させた等価1自由度モデルを多数作成する。ここで、既往の検討⁶⁾によると、地盤強度比 K_f は地盤の固有周期 T_g から次式を用いることで簡易的に推定可能となっている。

$$K_f = \frac{1}{T_g^2} \times \delta_r \quad (4)$$

$$\log \delta_r = 1.45 - \left(\frac{1}{T_g} \right)^{0.3} \quad (5)$$

しかしながら実際の地盤はこの簡易推定式に対してバラツキを有している。多数の実地盤に対して固有値解析と静的非線形解析を実施し、詳細に T_g と K_f を評価した結果を図-1に示す。これより、実際の地盤 K_f は、上式で得られた値と比較して概ね 0.25～4.0 倍の範囲でばらつく可能性があることが分かる。そこで今回は、地盤の固有周期 T_g を 0.05～2.0 秒まで 0.05 秒刻みで 40 タイプ、

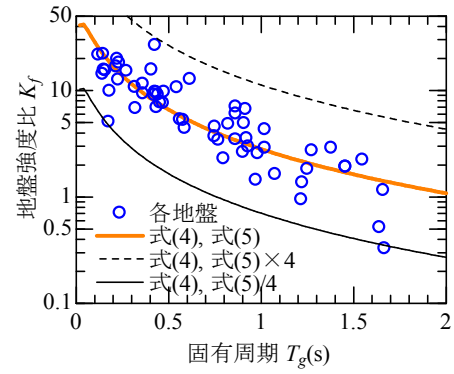
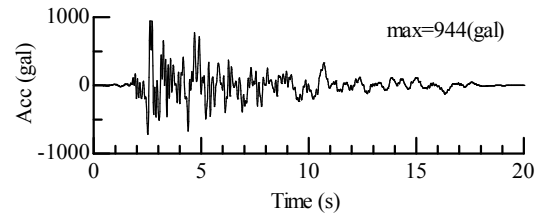
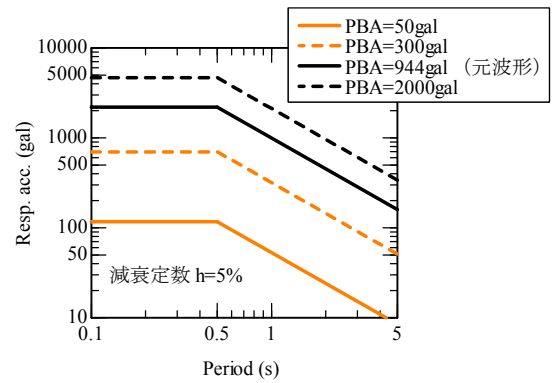


図-1 各地盤の K_f と簡易評価法（式(4),式(5)）の比較



(a)時刻歴波形（元波形）



(b)応答スペクトルの例

図-2 入力した地震動波形の概要

地盤強度比 K_f は各固有周期 T_g 毎に式(4)、式(5)により推定される結果に対して 0.25～4.0 倍までばらつかせた 10 タイプの計 400 個の地盤を作成した。これは全て既往の地盤分類の高度化において設定した地盤条件⁷⁾と同様である。なお、各地盤は等価1自由度モデルで表現するとともに、非線形特性は GHE-S モデル⁸⁾で設定した。この GHE-S モデルを設定する際に必要なパラメータは、多数地盤の静的非線形解析に基づき設定された標準値⁵⁾を用いた。

続いて入力地震動としては、振幅レベルを変化させた複数波を用意することで、地震動レベルの変化に伴う適切な指標の変化の有無についても考察を行う。この時の元波形は鉄道構造物の耐震設計で用いられている L2 地震動スペクトル II (G1 地盤)²⁾とする（図-2）。これを最

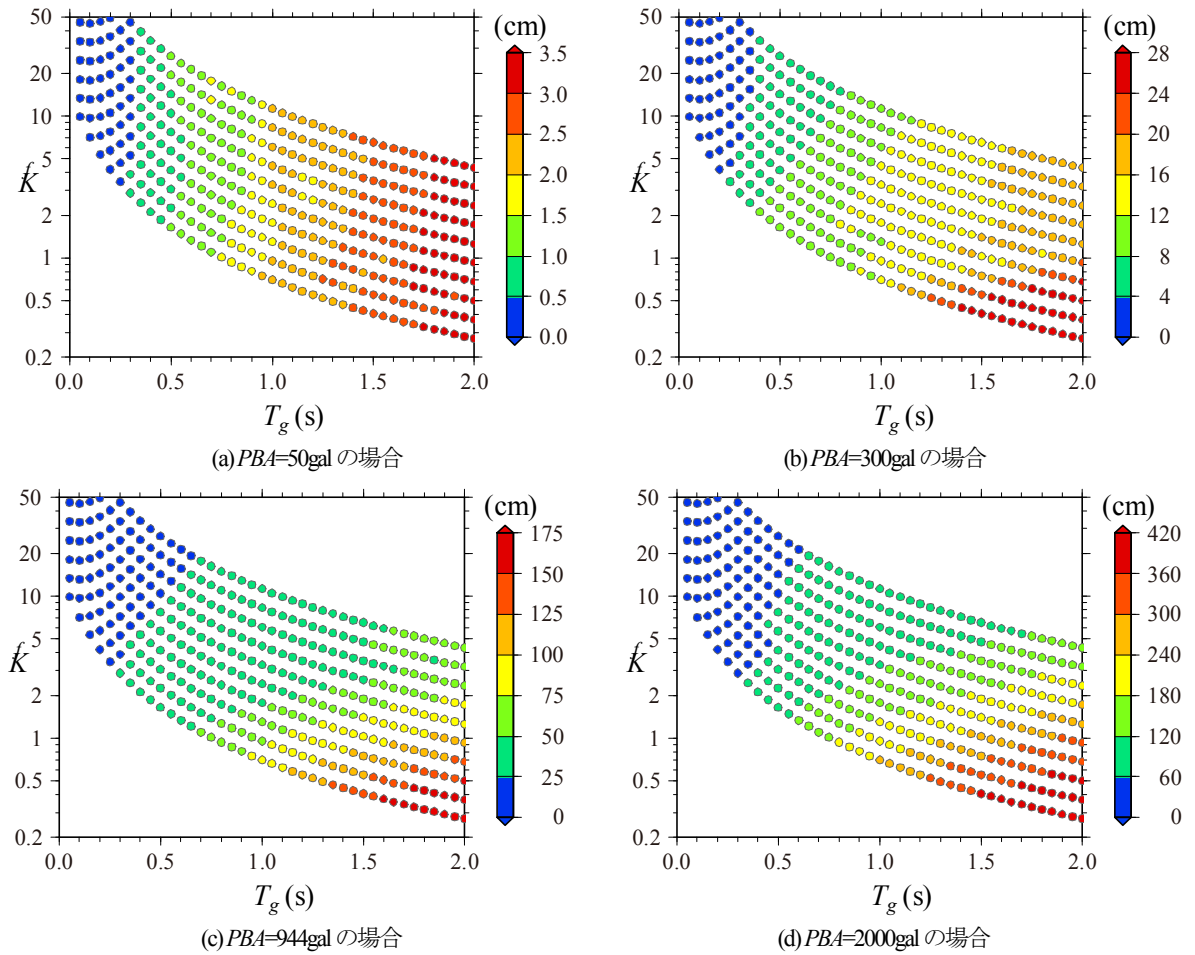


図-3 地盤の固有周期 T_g 、地盤強度比 K_f と最大地盤変位 a_g の関係

大加速度 PBA が 50~3000gal まで 8 段階に調整するとともに、元波をそのまま用いる場合 ($PBA=944\text{gal}$) を含め、9 種類を用意した。

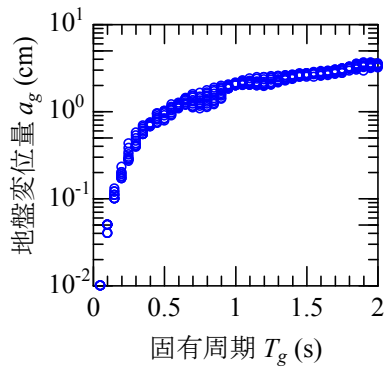
また、等価 1 自由度モデルを用いる場合の前提条件として、基盤の境界条件は固定としている。解析時の減衰は地盤条件によらず一律 3% を設定した。最終的に等価 1 自由度モデルを用いて得られた時刻歴波形を地表面位置に換算するための刺激関数 PF は、最大変位 $\delta_{\max}(\text{cm})$ から次式⁹⁾により簡易的に評価した。

$$PF = 1.4 - 0.07 \cdot \left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_r} \right)^{0.38} \quad (6)$$

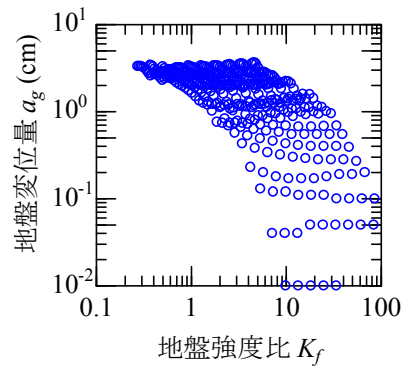
以上の条件にしたがって、多数の固有周期 T_g 、地盤強度比 K_f を有する地盤 (400 種類) と入力地震動 (8 波) を網羅的に組み合わせた地盤応答解析を実施し、地表面の応答波形を算定した。このうち、入力地震動の最大加速度 $PBA=50, 300, 944, 2000\text{gal}$ とした条件での地表変位最大値 a_g を横軸に固有周期 T_g 、縦軸に地盤強度比 K_f のグラフ上にプロットした結果を図-3 に示す。また、 $PBA=50, 2000\text{gal}$ における T_g と a_g の関係、 K_f と a_g の関係をそれぞれ表示した結果をそれぞれ図-4、図-5 に示す。

これらの結果を見ると、当然のように地震動レベルが大きくなるにしたがって変位量が大きくなっているが、固有周期 T_g 、地盤強度比 K_f に対する地盤変位量 a_g の関係が徐々に変化していることも分かる。図-3 を見ると、地震動レベルの小さな範囲では、色塗りの変化が概ね T_g の変化に依存している。これは、従来から用いられていた地盤変位の大きさを T_g によって簡易的に推定する手法を支持する結果であると言える。一方で、地震動レベルが大きくなると、地盤の固有周期が長い範囲では K_f の違いにも大きく影響を受けている。これは図-4、図-5 の結果からも明らかであり、 $PBA=50\text{gal}$ の結果 (図-4) では固有周期 T_g が同一であれば、地盤変位量 a_g は概ね同じ値を示している。これに対して、 $PBA=2000\text{gal}$ の結果ではまず図-5(a) から、 T_g が 0.5 秒程度よりも大きな範囲では仮に固有周期が同一であっても地盤変位には大きな変動が見られる。逆に図-5(b) を見ると、 K_f が小さな領域では概ね同一の変位量となっていることが分かる。

以上の結果から、地表面の応答を分類するのに適切な指標は、入力地震動の振幅レベルによって変化することが確認された。振幅レベルの小さな地震を対象とした場合には、従来の固有周期 T_g のみを指標として用いるこ

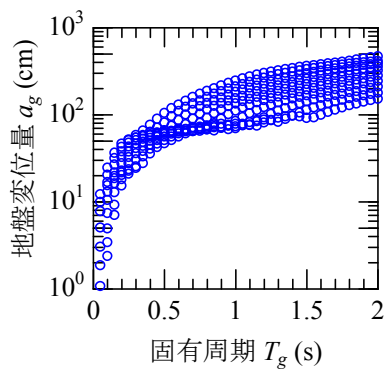


(a) 固有周期 T_g —地盤変位 a_g 関係

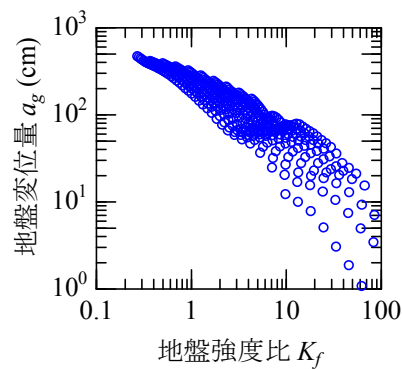


(b) 地盤強度比 K_f —地盤変位 a_g 関係

図4 地盤変位量 a_g の算定結果 (PBA=50gal の場合)



(a) 固有周期 T_g —地盤変位 a_g 関係



(b) 地盤強度比 K_f —地盤変位 a_g 関係

図5 地盤変位量 a_g の算定結果 (PBA=2000gal の場合)

とは適切であるが、大規模地震による地表面応答を評価する場合には、地盤の固有周期 T_g だけでなく地盤全体の強度も重要な指標となる。

(2) 地盤変位の簡易推定法の検討

前節で得られた結果をそのまま用いれば、地震動レベルによらず適切な地盤変位をそのまま評価することが可能である。しかしながら、実務的な取り扱いを考えると、この結果を図としてそのまま表示するのではなく、固有周期 T_g と地盤強度比 K_f をパラメータとして何らかの簡易な定式化を行うことが望ましいと言える。そこで本節ではまず、地盤変位の簡易推定の表現方法について検討を行う。

ここで図3の変位コンターを見ると、地震動レベルの増大によって変位量が増加しているものの、 T_g を線形軸、 K_f を対数軸で表現した場合の変位量コンター色は概ね直線的に変化しているように見える。そこで、図6に示すように、地震動レベル毎にある基準点 (T_g^0, K_f^0) を設定し、この基準点からの勾配 R が同一の領域では地盤変位が等くなる、という仮定を設けることで、地盤

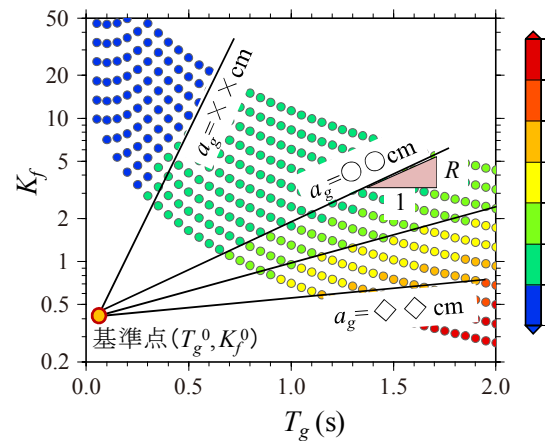


図6 地盤変位の簡易な表現法のイメージ

変位を簡易に評価することを試みる。この基準点が第4象限にあると、地盤変位は地盤の固有周期に大きく依存していることを表す。また第2象限に基準点がある場合には、地盤変位は相対的に地盤強度比に依存していることになる。このような仮定を設けると、勾配 R は次式で表現することができる。

$$R = \frac{\log K_f - \log K_f^0}{T_g - T_g^0} \quad (7)$$

このように表現した結果の一例として、 $PBA=944\text{gal}$ とした条件での結果（図-3(c)）に対して、 $T_g^0=0.3(\text{s})$ 、 $K_f^0=0.1$ と仮に設定した場合の勾配 R と地表面最大変位 a_g の関係を図-7 に示す。これを見ると、勾配 R が大きくなるにしたがって、地盤変位が小さくなっている。さらにこの変化は連続的かつ同一の勾配 R における a_g の変動は非常に小さいことが分かる。そのため、ある固定点からの勾配によって地盤変位を統一的に表現するという簡易推定法の有効性が確認できる。

続いて、続いて図-7 の結果を参考に、地盤変位量 a_g を勾配 R に対して次式のによって表現することを試みる。

$$a_g = \alpha \cdot R^\beta + \gamma \quad (8)$$

ここで、 α 、 β 、 γ は回帰係数である。式(8)と式(7)を組み合わせることで、地表面位置 a_g の地盤変位量は地盤の固有周期 T_g と地盤強度比 K_f をパラメータとして次式のように表現することができる。

$$a_g = \alpha \cdot \left(\frac{\log K_f - \log K_f^0}{T_g - T_g^0} \right)^\beta + \gamma \quad (9)$$

そこで本手法の有効性を確認するために、各入力地震動レベルに対して式(9)による地盤変位量を算出するとともに、従来の固有周期 T_g のみをパラメータとした結果との比較を行う。ここで式(9)に示す各係数は、非線形の最小二乗法を用いて推定している。最終的に得られた各係数を表-1 に示すとともに、地震動レベル毎の基準点 (T_g^0 , K_f^0) の評価結果を図-8 に示す。また、この回帰係数を用いて得られる地盤変位のうち、代表的な加速度において示した結果を図-9 に示す。なおこの図には、従来から一般的に用いられていた、地盤の固有周期 T_g のみをパラメータとした回帰結果も示している。この時の地盤変位量は次式で示される。

$$a_g = c_1 \cdot T_g^{c_2} \quad (10)$$

ここで、 c_1 、 c_2 ：回帰係数である。まず図-8 を見ると、地震動レベルの増大に伴って基準点座標 T_g^0 は単調減少、 K_f^0 は単調増加している。これはつまり、地震動レベルが増大するに従い、地盤変位量に影響を与える指標が固有周期 T_g から地盤強度比 K_f に変化していることを示している。さらに図-9 を見ると、(a)の $PBA=50\text{gal}$ の場合では従来法、提案法とも概ね 1:1 の直線上にプロットされており、両手法による精度の差はそれほどない。一方で、地震動レベルが大きくなると、従来法によるばらつきが大きくなる一方で、提案法は比較的正解値と近い結果と

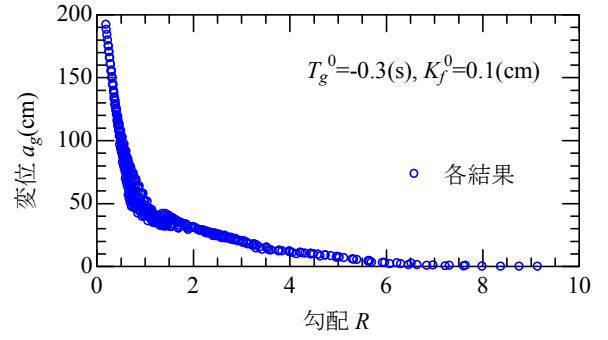


図-7 勾配 R と地盤変位 a_g の関係の例
($PBA=944\text{gal}$, $K_f^0=0.1\text{cm}$, $T_g^0=0.3\text{s}$ の場合)

表-1 回帰係数の評価結果
(等価 1 自由度モデルによる結果を対象)

$PBA(\text{gal})$	K_f^0	T_g^0	α	β	γ
50	1.60E-19	0.04	52	-1.14	-0.004
100	1.30E-18	0.04	93	-1.12	-0.009
300	1.00E-03	0.02	40	-1.01	-0.20
500	2.00E-02	0.02	42	-0.90	-0.50
944	1.56E-01	0.01	54	-0.76	-2.00
1000	1.50E-01	-0.01	59	-0.76	-3.00
1500	1.60E-01	-0.03	99	-0.73	-7.00
2000	1.60E-01	-0.08	148	-0.69	-17.00
3000	1.50E-01	-0.19	254	-0.69	-44.00

なっている。これらの結果から、地震動レベルが増大するに伴って従来の固有周期のみをパラメータとした地盤変位量評価では適切な結果が得られず、強度に関する指標も考慮することが重要であるということが改めて確認された。

3. 地盤変位量の簡易推定法の提案

前章では、固有周期 T_g と地盤強度比 K_f をパラメータとした等価 1 自由度モデルによる大規模地震時の地盤変位量の簡易推定法を提案するとともに、地震動レベルの増大に伴って K_f の影響が大きくなることを示した。ただし前章における動的解析は、地盤を等価な 1 自由度系に置換しているとともに、基盤の条件は固定境界としていた。工学的基盤位置で評価される設計地震動は、一般的に 2E 波として与えられる場合が多く、この場合の地盤応答解析を実施する際の基盤条件は粘性境界である必要がある。そのため前章で評価した地盤変位の簡易評価法が、必ずしも耐震設計時に適切な評価となっているとは限らない。そこで本章では、多様な層構成を有する地盤をそのままモデル化するとともに、下端を粘性境界とした条

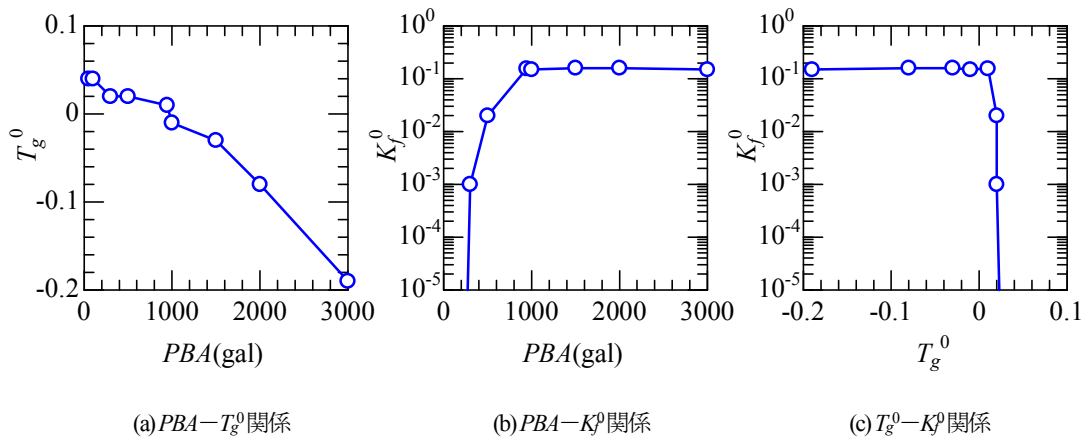


図8 地震動レベルの変化に伴う基準点(T_g^0, K_f^0)の移動状況

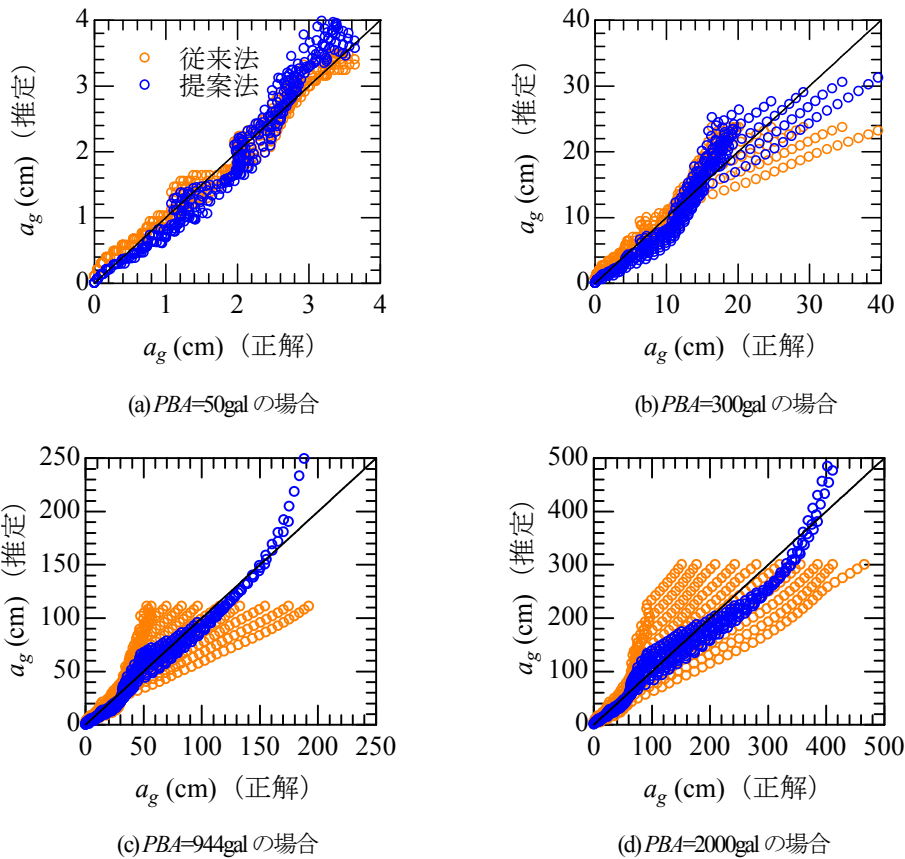


図9 地盤変位量 a_g の推定結果

件下での非線形動的解析を実施するとともに、得られた地表面波形を用いて再度地盤変位量の簡易評価法を構築する。

対象とする地盤は、多様な周期特性、地層構成を有する60地盤⁹⁾を用いることとする。この60地盤は鉄道構造物の地表面設計地震動²⁾を評価する際などにも用いられている地盤であり、実際のボーリング調査結果に基づき、工学的基盤 ($V_s=400\text{m/s}$) から地表までの各種物性を設定している。各地盤の固有周期 ($T_g=0.1\sim 1.7$ 秒) や層厚 (5.9~66.1m)、速度構成は広い範囲でばらついている。

またこの中に含まれる土質は一般的な砂質土、粘性土、砂礫等であり、高有機質土のような特殊土層は含まれていない。それぞれの地盤における各層の非線形特性は、GHE-Sモデルによって表現しており、砂質土や粘性土等の土質区分や拘束圧の違いによって各層に与えるパラメータはそれぞれ変化させている¹⁰⁾。

基盤への入力波は図-2(a)で示したL2地震動スペクトルII (G1地盤) を振幅調整などは実施せずにそのまま用いる。動的解析時の減衰は、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

表-2 係数の評価結果
(詳細な動的解析結果 (60地盤) を対象)

K_g^0	T_g^0	α	β	γ
0.06	0.00	73	-0.50	-9.0

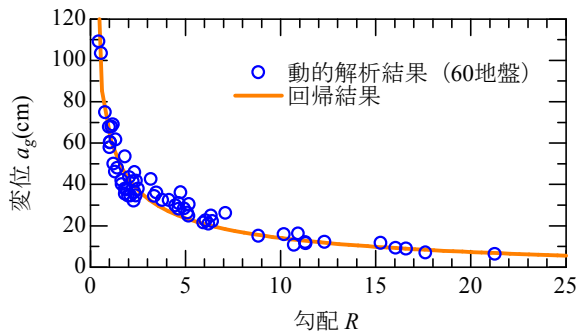


図-10 勾配 R と地盤変位 a_g の関係
(詳細な動的解析の結果を対象とした場合)

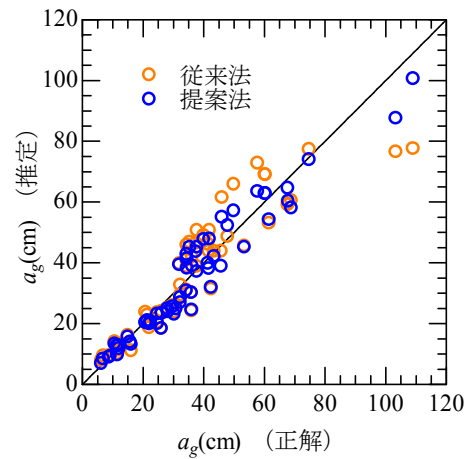
の提案式¹¹⁾に出来る限り一致するようなレーリー減衰を設定している¹²⁾。

以上の条件に基づいて、多様な層構成を有する60地盤を対象に非線形動的解析を実施し、得られた地表面応答から地盤変位量の最大値を算定した。この結果を用いて、前章と同様に式(9)の各パラメータを非線形の最小二乗法によって推定した。得られた回帰係数を表-2に、このパラメータを用いて算定される地盤変位の算出結果を図-10、図-11に示す。これを見ると、提案法によって地盤変位を適切に推定できていることが分かる。また図-11には、地盤の固有周期 T_g のみをパラメータとした従来法による回帰結果も重ねて示しているが、幅広い T_g に対して提案法が有効であることが分かる。特に固有周期の長い地盤における変位の過小評価が大幅に解消されており、提案法の有効性が確認できる結果となっている。

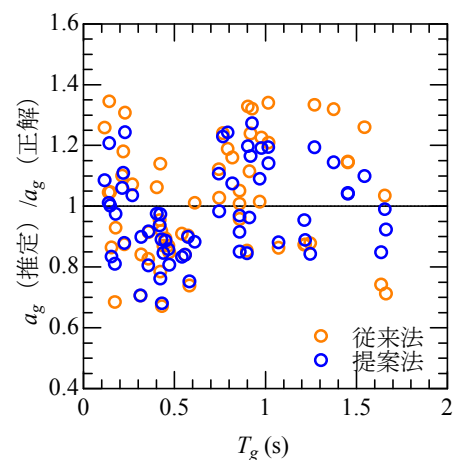
4. まとめ

本研究では、応答変位法時に用いる地震時地盤変位量の簡易推定法の精度向上を目指した検討を実施した。具体的には、従来の地盤の固有周期 T_g のみを指標とした推定手法に、地盤全体としての強度の大きさを表す指標 (地盤強度比 K_g) をパラメータとして加えることにより、大規模地震時の地盤の非線形程度の大きさを簡易的に考慮した評価を可能とした。

この地盤強度比 K_g は、地盤柱状図から簡易に推定することも可能である⁶⁾。そのため提案法を用いることにより、従来法と同様の作業量によって、大規模地震時の地盤変位量をより高精度に推定することが可能となるため、



(a) 正解値との比較



(b) 推定誤差の評価

図-11 地盤変位 a_g の簡易評価結果

応答変位法を実施する際の構造への地震作用を実務的かつ合理的に設定する手法として有効である。

参考文献

- 1) 室野剛隆・西村昭彦：地盤と構造物の動的相互作用を考慮した応答変位法，鉄道総研報告，Vol.13，No.2，1999.
- 2) (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，2012.
- 3) 室野剛隆，佐藤勉：構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用，土木学会地震工学論文集，Vol.29，pp.520-528，2007.
- 4) 末富岩雄，澤田純男，吉田望，土岐憲三：地震動の上限値と地盤のせん断強度の関係，土木学会論文集，No.654/I-52，pp.195-206，2006.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, 論文 No.2-0014, 2009.
 - 11) 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, 460, pp. 37-46, 1994.
 - 12) 坂井公俊, 室野剛隆, 桐生郷史: 地表位置の距離減衰式から工学的基盤位置の地震動を推定する簡易手法, 構造工学論文集 A, Vol.57A, pp.332-339, 2011.

SIMPLIFIED ESTIMATION METHOD OF THE GROUND DISPLACEMENT DURING EARTHQUAKE CONSIDERING THE STRENGTH OF THE WHOLE GROUND

Kimitoshi SAKAI, Jun IZAWA and Toshitsugu ISHIBASHI

Response displacement method as a method to calculate seismic response values of bridges / viaducts and subsurface structures may be used. At this time, it is necessary separately to evaluate the ground displacement, but there is a method to estimate using the natural period T_g of the ground as a parameter. However, when comparatively large ground motion level is targeted, nonlinear degree of the ground may be an important index.

Therefore, in this study, we propose an evaluation method of the ground displacement with the index showing the strength of the whole ground system (ground strength ratio K_f) as a parameter and confirmed the improvement of accuracy from the conventional method. The ground strength ratio K_f can be relatively easily estimated from the usual ground survey results. Therefore, this method is considered to be a practically effective method as an evaluation method of the ground displacement when applying the response displacement method.