

応答変位法に用いる地盤変位量の 簡易かつ精度の高い算定法

坂井 公俊¹・井澤 淳¹

¹正会員 博士（工学） 鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

構造物の地震時安全性評価、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。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を用いる場合が多い¹⁾。この時に、各深さ位置での地盤の最大変位量が必要となる。この地盤変位は、詳細な地盤応答解析を実施することで求めることができるが、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 $a_g(m)$ を簡易に算定するとともに、モード解析に基づく分布形状を評価する手法も存在しており、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。

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

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

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

一方で近年の検討では、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 2)}。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³⁾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⁴⁾。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⁵⁾。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、上記と同様の考え方に基づいて、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. 地盤の等価1自由度モデルを用いた地盤変位量の網羅的な評価

(1) 網羅的な地盤応答解析の実施

ここでは、地盤の等価1自由度モデル³⁾を用いた多数の地盤応答解析を実施するとともに、この中の代表的な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 と地表面応答の関係を整理する。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⁴⁾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

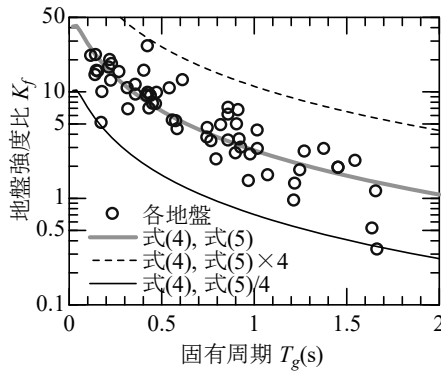


図-1 各地盤の K_f と簡易評価法（式(4), 式(5)）の比較

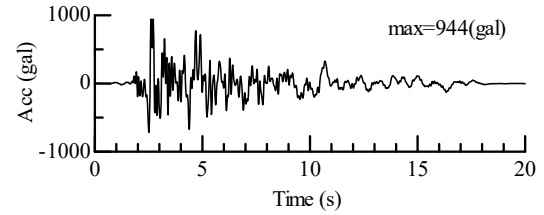
有値解析と静的非線形解析を実施し、詳細に T_g と K_f を評価した結果を図-1 に示す。これより、実際の地盤 K_f は、上式で得られた値と比較して概ね 0.25～4.0 倍の範囲でばらつく可能性があることが分かる。そこで今回は、地盤の固有周期 T_g を 0.05～2.0 秒まで 0.05 秒刻みで 40 タイプ、地盤強度比 K_f は各固有周期 T_g 毎に式(4), 式(5)により推定される結果に対して 0.25～4.0 倍までばらつかせた 10 タイプの計 400 個の地盤を作成した。なお、各地盤は等価 1 自由度モデルで表現するとともに、非線形特性は GHE-S モデル⁶⁾で設定した。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³⁾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。ここで解釈を容易とするため、波形の形状は全て同一とし、振幅のみを任意の値に調整することとした。元となる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) とする (図-2 (a))。これを最大加速度 $PBA=50\text{gal}$, 300gal , 2000gal 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、4 種類を用意した。各波形の弾性加速度応答スペクトルを図-2 (b) に示す。

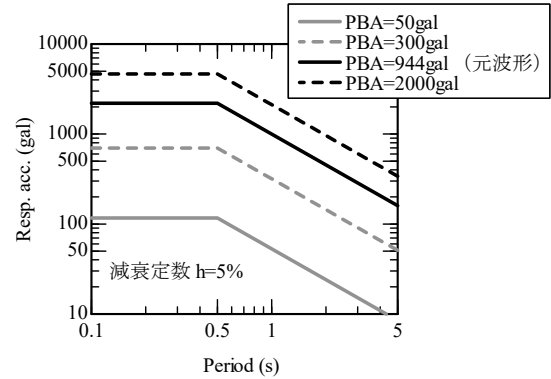
また、等価 1 自由度モデルを用いる場合の前提条件として、基盤の境界条件は固定としている。なお動的解析時の減衰は地盤条件によらず一律 3% を設定した。最終的に等価 1 自由度モデルを用いて得られた時刻歴波形を地表面位置に換算するための刺激関数 PF は、最大変位 $\delta_{\max}$ (cm) から次式³⁾により簡易的に評価した。

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

以上の条件に従って、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 (4



(a) 時刻歴波形 (元波形)



(b) 応答スペクトル

図-2 入力した地震動波形の概要

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。各条件での地表面最大変位をまとめて図-3 に示す。各図の色分けは、鉄道構造物の地盤種別が地盤の固有周期に応じて 6 種類に分類されている⁷⁾ことを勘案し、各条件の応答の最大と最小を概ね 6 分割するように実施している。

これより、入力地震動の振幅レベルによって着色の傾向が大きく異なっていることが分かる。まず $PBA=50\text{gal}$ とした場合においては、色の変化が固有周期 T_g に対して明瞭に表れており、 T_g が長い地盤ほど地盤変位量 a_g が大きくなっている。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、入力が大きくなるにしたがって、色が変化する領域の勾配が緩くなっている。特に $PBA=2000\text{gal}$ とした場合の $T_g > 0.5\text{s}$ の範囲では、色の変化は固有周期 T_g ではなく、地盤強度比 K_f と密接に関連し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し、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系の強度も重要な指標となってくることが確認できた。

(2) 地盤変位の簡易推定法の検討

前節で得られた図-3 の結果をそのまま用いることで、地盤変位を精度よく推定することが可能である。

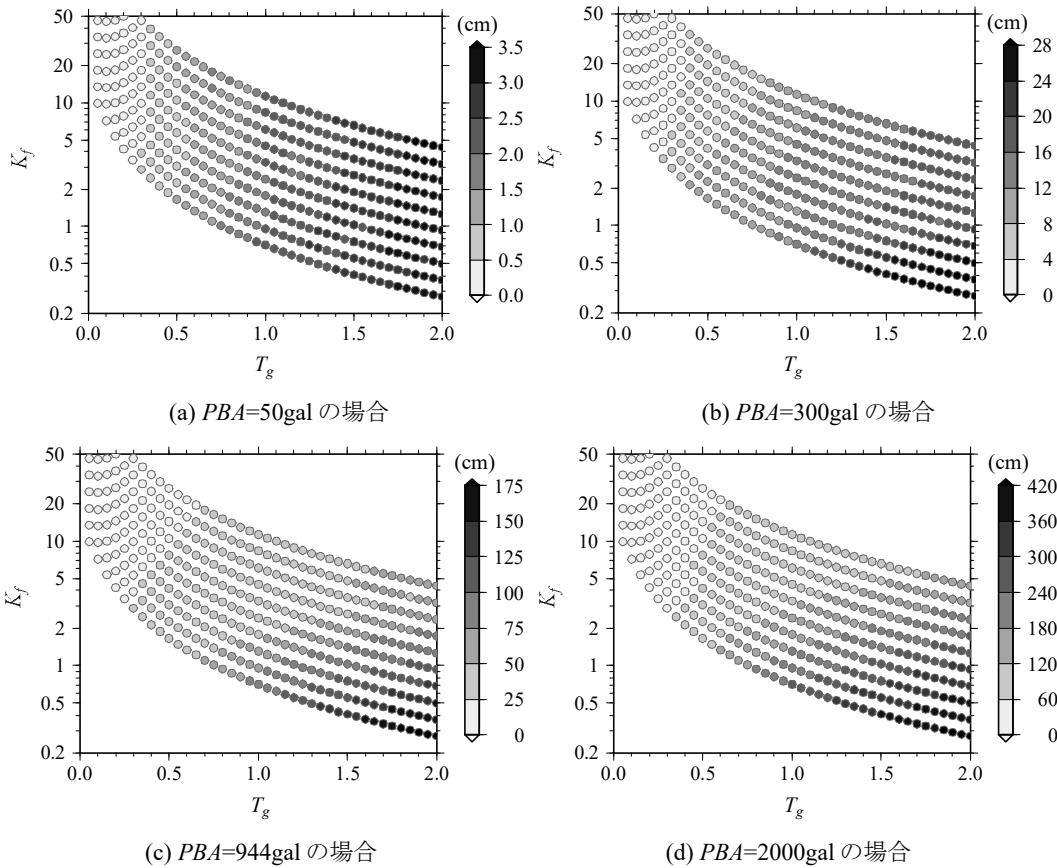


図-3 地盤の固有周期 T_g 、地盤強度比 K_f と最大地盤変位 a_g の関係

しかしながら、実務的な取り扱いを考えると固有周期 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。そこで本節ではまず図-3 の結果に基づいて、地盤変位の簡易推定の表現方法について検討を行う。

今回提案を行う手法としては、図-4 に示すように、ある基準点 (T_g^0, K_f^0) からの勾配 R が同一の領域では地盤変位が等しいという仮定を設けることとする。こうすると、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、図-3(c)の結果に対して $T_g^0=0.3(\text{s})$, $K_f^0=0.1(\text{cm})$ とした場合の勾配 R と地表面最大変位 a_g の関係を図-5 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ことが分かり、簡易的に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手法の有効性が確認できる。

そこで、続いて図-5 の結果を参考に、地盤変位量 a_g を勾配 R に対して次式のように簡易的に表現することを試みる。

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

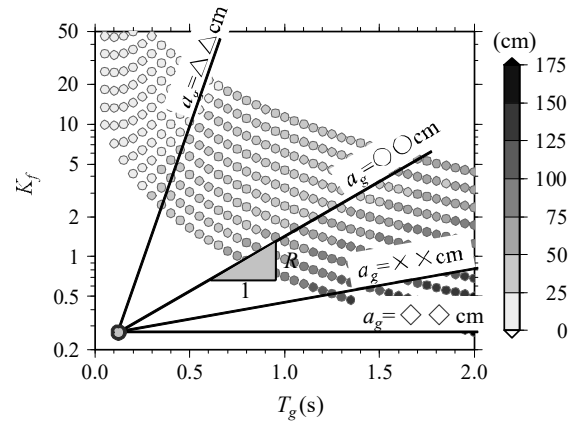


図-4 地盤変位の簡易な表現法のイメージ

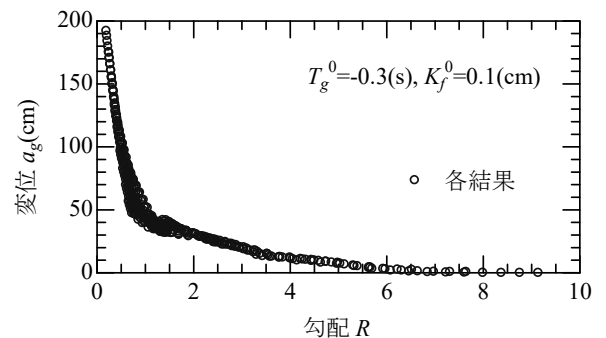


図-5 勾配 R と地盤変位 a_g の関係の例
($K_f^0=0.1\text{cm}$, $T_g^0=0.3\text{s}$ の場合)

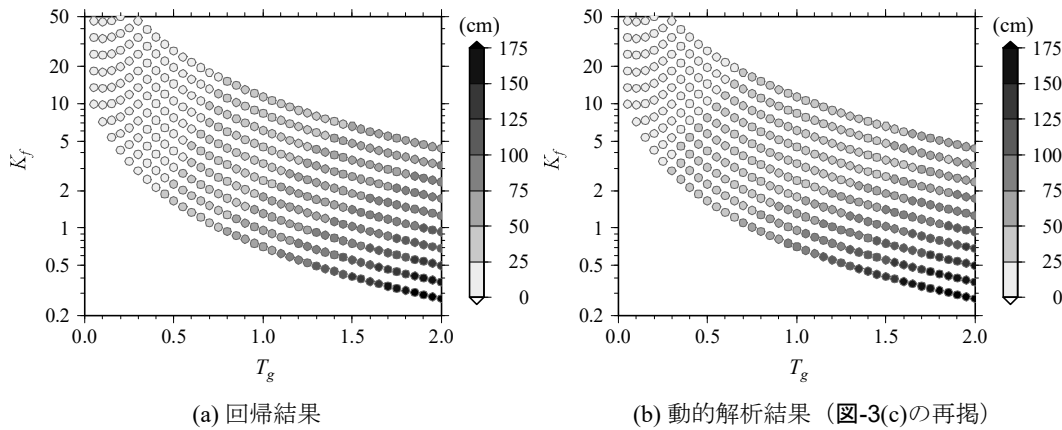


図-6 地盤変位 a_g の簡易評価結果 (等価 1 自由度モデルによる結果を対象)

ここで、 α , β , γ は回帰係数である。この式(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、図-3(c)の結果に対して各係数 (T_g^0 , K_f^0 , α , β , γ) を求めるとともに、式(9)によって地盤変位を適切に推定可能であることを示す。ここで、5 つの係数を求める際には、非線形の最小二乗法を用いている。最終的に得られた各係数を表-1 に、この各パラメータを用いて求められる地盤変位を図-6 (a)、図-7 に示す。これを見ると、本手法によって全体の傾向は適切に表現できていることが分かる。また、従来の固有周期 T_g のみをパラメータとして式(1)～式(3)と同様の表現形式で全解析結果を回帰した結果を図-8 に示すが、従来の表現方法では、地盤の固有周期が長い部分での地盤変位の大きな変動を適切に表現することが困難であることが分かる。これは、今回のような比較的大きな振幅を有する地震動を対象とした場合には、相対的に地盤全体系の強度の大小が地盤変位量に大きな影響を与えると考えられ、比較的大きな非線形挙動を対象とする場合には、地盤の固有周期だけでなく、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結果といえる。

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した。ただし前章に

表-1 係数の評価結果
(等価 1 自由度モデルによる結果を対象)

K_f^0	T_g^0	α	β	γ
0.10	-0.02	63.0	-0.80	-3.0

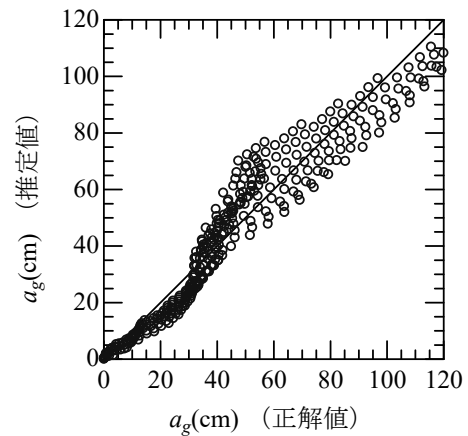
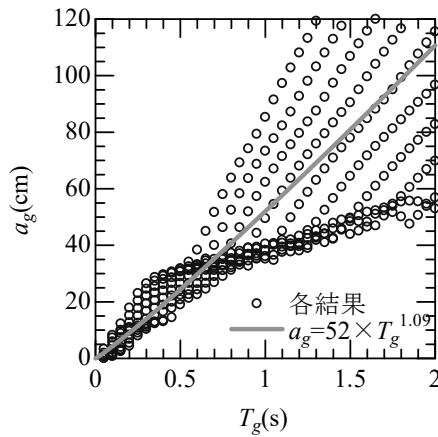


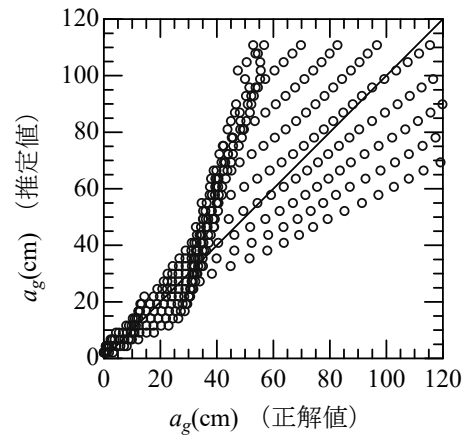
図-7 地盤変位 a_g の簡易評価結果
(等価 1 自由度モデルによる結果を対象)

おける動的解析時の基盤条件は、固定境界となっている。一般的に工学的基盤位置で評価される設計地震動は 2E 波として与えられる場合が多く、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が必ずしも耐震設計時に適切な評価となっている保証はない。そこで本章では、多様な地盤に対して下端を粘性境界とした条件下での多自由度の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⁷⁾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¹⁾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



(a) 固有周期 T_g と地盤変位 a_g の関係



(b) 地盤応答解析による結果との比較

図-8 地盤変位 a_g の簡易評価結果 (固有周期 T_g のみをパラメータとした場合)

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⁸⁾. 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. これは $M_w7.0$ 程度の地震が直下で発生した場合の工学的基盤位置の地震動を想定したもの⁹⁾である. 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値の提案式¹⁰⁾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¹¹⁾. 具体的には, 提案式より得られるQ値に対して, 最小二乗法によってレーリー減衰のパラメータ α, β を地盤毎に算定した.

以上の条件に基づいて60地盤の詳細な動的解析を実施し, 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-9, 図-10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. また従来の地盤の固有周期 T_g のみをパラメータとした場合の結果も各図に重ねているが, 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.

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_f^0	T_g^0	α	β	γ
0.06	0.00	73.0	-0.50	-9.0

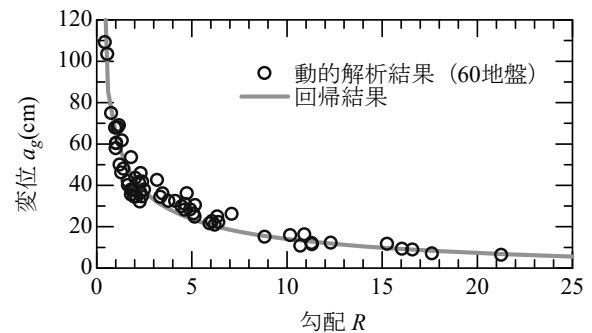


図-9 勾配 R と地盤変位 a_g の関係の例

(詳細な動的解析の結果を対象とした場合)

4. まとめ

本検討では, 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_f) 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小を簡易的に考慮した評価を可能とした.

提案法を用いることにより, 大規模地震時の地盤変位量を従来よりも高精度に推定することが可能となり, 応答変位法を実施する際の構造物のより合理的な設計が期待される.

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標

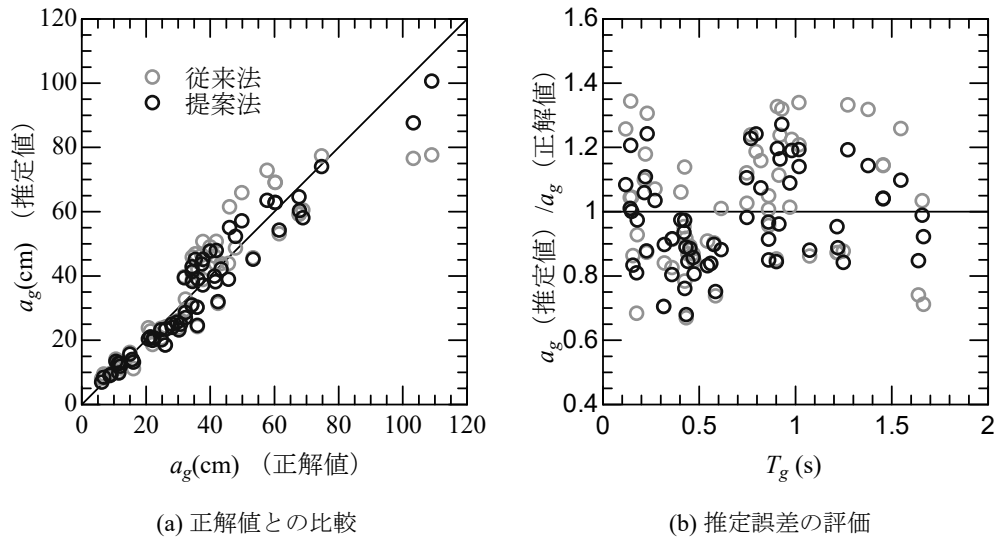


図-10 地盤変位 a_g の簡易評価結果（等価 1 自由度モデルによる結果を対象）

準・同解説 耐震設計, 2012.

- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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), 2017 (投稿中).
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 坂井公俊, 室野剛隆: 位相特性の変化が構造物の非線形応答に与える影響把握のための基礎的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp. I_67-I_78, 2012.
- 10) 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.
- 11) 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.