

地表面地震動評価のための動的変形特性試験を実施する土層の定量的評価法

坂井 公俊¹・上田 恭平²・石川 太郎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 京都大学防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.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: ishikawa.taro.28@rtri.or.jp

本検討では、地表面地震動の評価という観点から、動的変形特性試験を実施する土層を定量的に評価する手法を構築することを目的として、規準変位指数 L^0 という指標の提案を行った。これは、一般的な地盤の非線形構成則と標準パラメータを組み合わせた静的非線形解析を繰り返し実施することで、地盤全体系の荷重－変位関係に影響の大きな層を特定するものである。

提案手法の妥当性を確認するために、多様な層構成を有する地盤を対象に規準変位指数 L^0 の評価を行った。その結果、 L^0 の大きな土層における非線形特性が変化した場合、地盤応答解析によって得られる地表面地震動が大きく変化することが確認でき、提案手法の妥当性が確認された。本手法は入力地震動に依存せず一意に安定した解を求めることができるとともに、地盤のN値、土質区分といった簡易な情報のみから評価可能であるため、現場における繰り返し三軸試験の実施要否を定量的に評価する指標として有効である。

Key Words : test of dynamic soil properties, strength of a whole ground, reference displacement, reference displacement index

1. はじめに

橋梁や高架橋への地震作用を設定するためには、表層地盤の挙動を適切に評価することが重要である。こうした中で、工学的基盤位置の地震動波形を用いて地表面位置の地震動を評価する手法として、等価線形解析^(例えば1)や逐次非線形解析などの各種地盤応答解析法とそれに用いる非線形構成則^(例えば2)が多数提案され、近年では実務設計においても頻繁に用いられるようになってきた。この時に、解析精度を保障するためには解析手法や構成則を適切に選択するだけでなく、地盤の特性値を適切に設定する必要があり、土木構造物の設計を行う際には事前にボーリングに代表される地盤調査を実施している。

地盤の弾性挙動を把握するためには、層構成、速度構造が重要なパラメータであり、これを得るために標準貫入試験やPS検層が実施されている。さらに大規模地震時の地盤挙動を適切に評価するためには地盤の非線形挙動を把握する必要があり、これを得るために繰り返し三

軸試験³や中空ねじり試験⁴といった動的変形特性試験が実施されている。ただし、この変形特性試験を全ての層で実施することは現実的ではなく、何らかの判断に基づいて試験を実施する層を選択し、その他の地層においてはこの結果を準用するか、過去に実施された試験結果を取りまとめた標準的なパラメータ^(例えば5)を用いているものと考えられる。変形特性試験を実施する層の選択方法としては、高有機質土や火山灰質細粒土、液状化層などの特殊な非線形挙動をする可能性の高い地層の存在が予めわかっている場合には、この土層で試料採取、試験を実施することで、地震動の予測精度は飛躍的に向上すると考えられる。一方で、例えば粘性土や砂質土といった一般的な土質の互層が連続するような地盤においては、試験を実施する個所を適切に選択する方法は存在せず、現状は熟練した技術者の判断等によって対象層を選択しているものと思われる。

そこで本検討では、このような通常地盤が堆積する地点において、大規模地震時の地表面地震動の評価という

観点から、動的変形特性を実施する土層を定量的に評価する手法について検討を行う。提案する手法は、一般的な地盤の非線形構成則と標準パラメータを組み合わせた静的非線形解析⁹⁾を繰り返し実施することで、地盤全体系の荷重－変位関係に影響の大きな層を特定するものである。

2. 試験を実施する土層の定量的評価法

地盤全体系を対象とした静的非線形解析⁹⁾を実施することで、地盤全体系の剛性低下率 G/G_0 ～地表面変位 δ 関係、減衰 h ～地表面変位 δ 関係が得られる。さらにこの G/G_0 ～ δ 関係、 h ～ δ 関係を満足する等価1自由度モデルによる動的解析を実施することで、地表面地震動が適切に評価できることを確認している。また、地盤全体系の剛性 G が初期剛性 G_0 の半分になる時の地表面変位（これを規準変位 δ^0 と定義する）で G ～ δ 曲線を正規化すると、地盤の層構成や土質区分、周期特性によらず、 G/G_0 ～ δ/δ^0 関係、 h ～ δ/δ^0 関係は概ね同一の特性を示すことも指摘されている。

これより、規準変位 δ^0 を適切に評価できれば、地盤全体系の荷重－変位関係が適切に評価できることになり、この結果を用いることで、地表面位置の地震動を精度よく推定できると言える。そのため、通常の砂質土や粘性土が互層になっているような地盤においても、この規準変位 δ^0 に大きな影響を与える土層を特定することができれば、この層を対象に動的変形特性試験を実施すればよいと考えられる。そこで、以下の手順に従って、動的変形特性試験を実施する土層を定量的に抽出する手法を提案する。

- (1) 現地で標準貫入試験やPS検層を実施し、対象地点の深度、せん断弾性波速度 V_s 、土質区分（砂質土や粘性土など）、N値等の情報を整理する。これと同時に、一定間隔（ex. 1m間隔）で要素のサンプリングを実施しておく。
- (2) 各層に与える非線形の構成則^{例えは7)}を決定するとともに、標準的な非線形パラメータ^{例えは10)}を設定する。
- (3) 上記(2)の地盤に対して静的非線形解析を実施し、標準的なパラメータを使用した場合の規準変位 δ^0 を算定する。
- (4) 上記(2)の地盤の第 i 層目の土層に設定している規準ひずみ $\gamma_r^{(i)}$ に微小な値（ $d\gamma_r^{(i)}$ ）を加える。
- (5) 上記(4)の地盤に対して静的非線形解析を実施し、規準変位 δ^0 を算定する。この時の規準変位の増分（ $d\delta^0 = \delta^0 - \delta^0$ ）を算定し、次式により第 i 層が規準変位に与える影響 L^0 （これを規準変位指数と定義す

る）を評価する。

$$L^{(i)} = \alpha^{(i)} \cdot \frac{d\delta_r^{(i)}}{d\gamma_r^{(i)}} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha^{(i)}$ は各地盤の非線形特性のバラツキの大きさを表しており、既往の土質試験結果を統計的に整理した結果^{例えは10)～11)}に基づいて設定することができる。ただし今回の試算では、この $\alpha^{(i)}$ は土質区分によらず全て1.0として検討を行う。

- (6) 規準ひずみに微小な値を加える対象層 i を変更し、上記(4)～(5)を繰り返し実施する。最終的に規準変位指数 L^0 が相対的に大きな土層を抽出し、この土層が動的変形特性試験を実施する箇所として選定される。

なお上記(1)において、各深さ位置でサンプリングを行うとしているのは、試料採取を多数実施することが、室内試験の実施に要するコストと比較して大幅に小さいと考え、予め全層で試料採取を実施している。ただし現地での作業工程として、まず標準貫入試験を実施し、その後サンプリングを行うような場合には、標準貫入試験で得られたデータを基に上記(6)までの作業を行った後にサンプリング箇所を選択することにより、さらなるコスト低減も可能となる。

またこの方法は前述したように、地盤全体系の荷重－変位関係に大きな影響を与える土層を特定し、この土層に対して変形特性試験を実施することで、より精度の高い荷重－変位関係の評価することを目的としたものである。仮に特殊地盤においても標準的な非線形特性と、そのバラツキが評価できていれば、 $\alpha^{(i)}$ を適切に設定することで、提案法により特殊な土層において試験を実施する重要性を定量的に評価できると考えられる。そのため、本手法の適用範囲は、一般的な地盤だけに限らず、特殊土層を含む地盤に対しても適用可能であると考えられる。また提案手法は、入力地震動に依存せず安定して得られる指標であるという特徴も有している。

3. 提案法の妥当性確認

(1) 対象地盤、計算条件

提案した手法を多数の実地盤に対して適用することで、各層の規準変位指数 L^0 を算定するとともに、 L^0 の大きな土層を抽出する。続いて、各層の非線形特性を変化させた地盤応答解析を実施することで、地表面応答の変化を整理し、提案した指標を用いて試験実施層を決定することの妥当性を確認する。

検討対象とした地盤は、多様な地層構成を有する60地盤とする。これらの地盤¹²⁾は、鉄道構造物の地表面設計

地震動¹³⁾を評価する際などにも用いられている地盤であり、固有周期は0.1～1.7秒と幅広い条件を有している。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⁶⁾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非線形パラメータは変化している⁷⁾。また今回は、液状化の影響は無視することとし、全地盤において全応力解析を実施する。

L^0 を式(1)に基づいて算定する際の各層の規準ひずみの変動 $d\gamma^0$ は、初期条件として設定した規準ひずみ γ^0 の1%とした。なお、この値を例えば0.1%などと変化させた場合においても、最終的な結果に変化がないことは確認済である。この全60地盤に対して提案手法を適用し、各層の規準変位指数 L^0 を算定することで、動的変形特性試験を実施すべき土層の抽出を行う。

(2) 規準変位指数 L^0 の評価結果

上記(1)で得られた結果のうち、5地盤による L^0 の算定結果を図-1～図-5の各図(b)に示す。なお、各地盤の速度、

土質構成は、図-1～図-5の各図(a)に示している。

これらの結果を見ると、例えば図-1の地盤Aでは深さ8m位置、図-3の地盤Cでは深さ14m位置で規準変位指数 L^0 が最大となっている。そのため、この位置の非線形特性の変化が地盤全体系の荷重－変位関係、地表面位置の地震動に与える影響が大きいと考えられるため、動的変形特性試験によって適切な非線形特性を把握する箇所であると判定することができる。

抽出された土層の位置づけをもう少し詳細に見ると、まず図-2の地盤Bなどでは速度構成、土質区分が急激に変化する位置において L^0 が大きくなっており、土層構成のみから直感的に試験を実施すべきと判断できる層が抽出されている。一方で地盤Aや図-4の地盤Dでは、速度構成、土質分類が変化する箇所は L^0 が大きくなる土層以外にも存在している。特に地盤Cでは、速度構成がなだらかに変化しているとともに、砂質土、粘性土の互層になっており、 L^0 が大きな層で試験を実施するという判断を土層構成のみから行うことは困難であると考えられる。

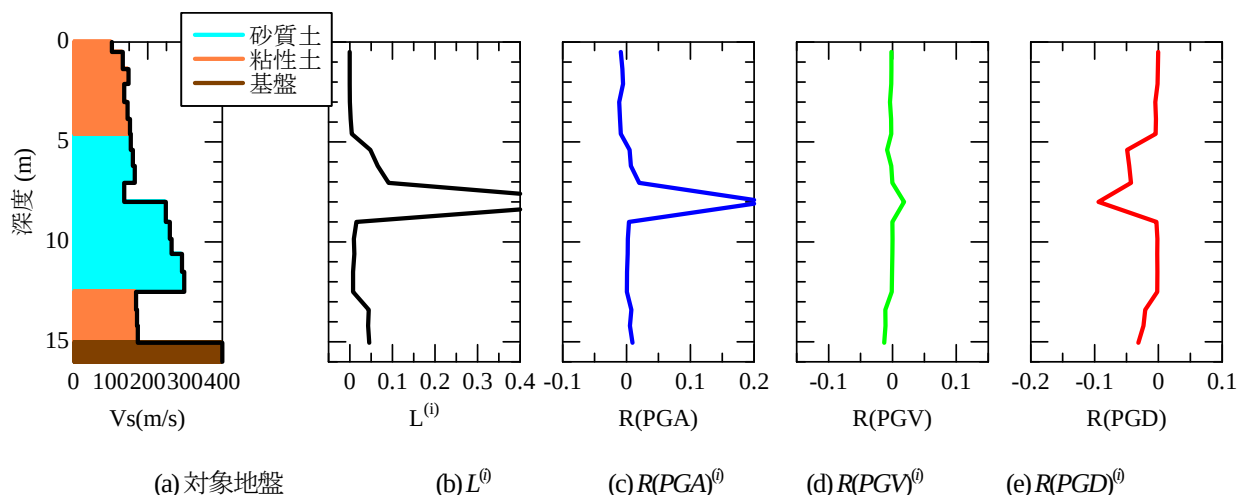


図-1 L^0 の評価結果 (地盤 A($T_g=0.32s$))

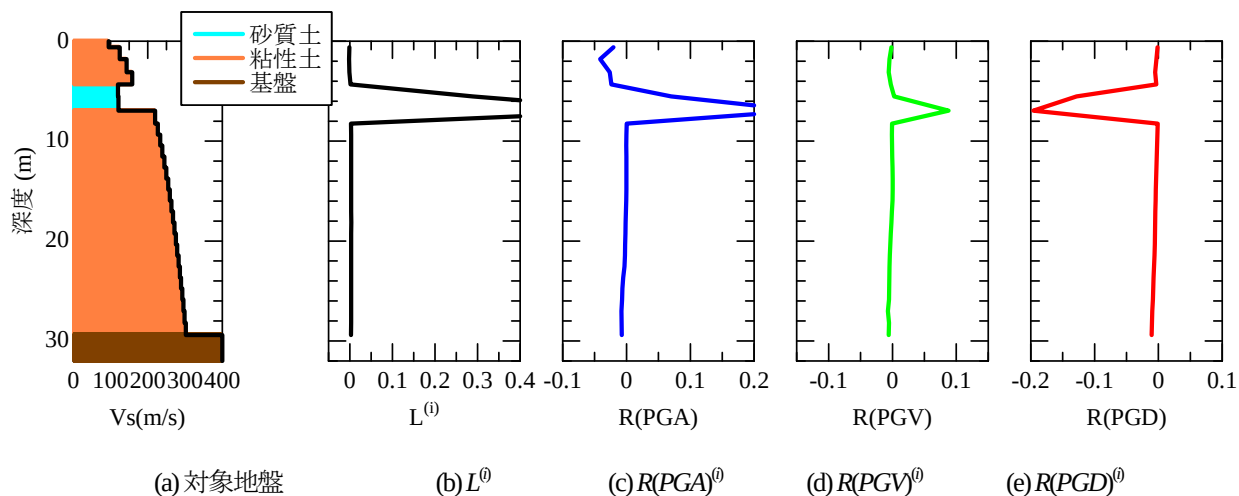


図-2 L^0 の評価結果 (地盤 B($T_g=0.44s$))

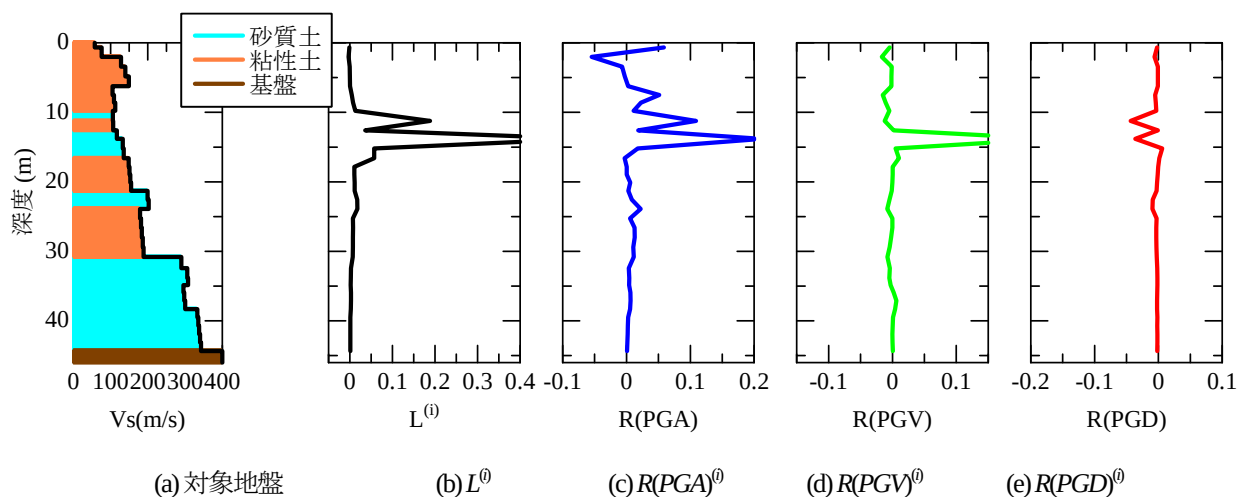


図-3 L^0 の評価結果 (地盤 C($T_g=0.86s$))

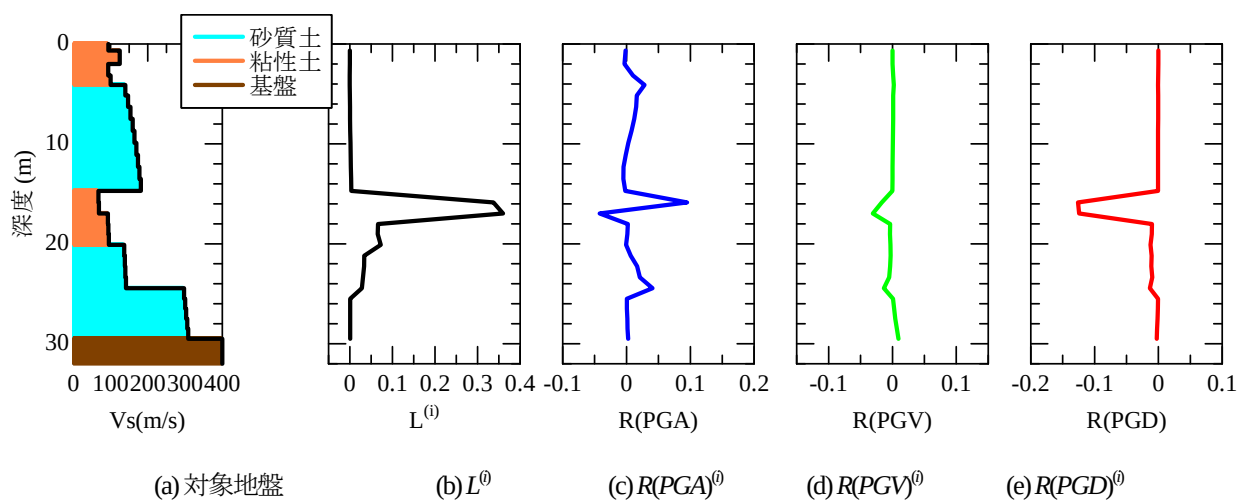


図-4 L^0 の評価結果 (地盤 D($T_g=0.97s$))

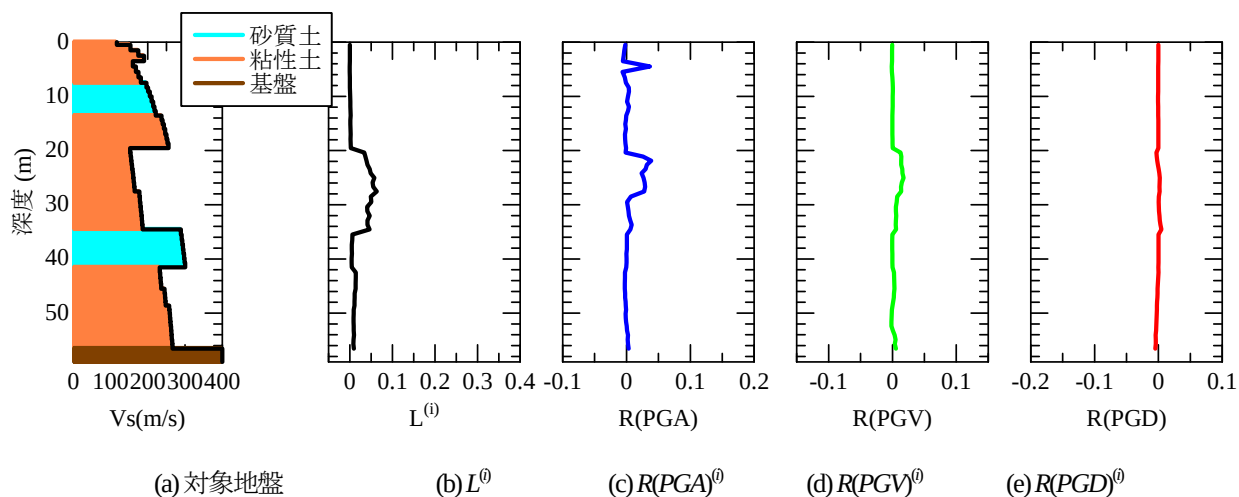


図-5 L^0 の評価結果 (地盤 E($T_g=1.02s$))

また図-5の地盤Eでは、 L^0 が特徴的に大きくなる土層は存在せず、深度20~40m程度において連続して L^0 が多少増加する程度である。一方で図-5の土層構成を見ると、深度20~40m程度の地盤は同一層とみなすことができる

ため、例えば深度30m位置で試験を実施し、この結果を20~40mの範囲の土層において適用できると考えられ、この位置で試験を実施することで地盤全体系の荷重-変位関係の信頼性を効率的に高めることができると期待さ

れる。そのため、 L^0 が局所的に大きくなる地層が存在しない場合においても、土層構成等を組み合わせることで、試験を実施する層を選択する際の大きな手掛かりとして今回の結果を活用することができる。

(3) 地盤応答解析に基づく検証

提案法によって抽出した土層で試験を実施することの妥当性を、地盤応答解析に基づいて検証する。検討の方法としては、全層に標準的なパラメータを設定した場合と各層の地盤を線形弾性体 ($\gamma^0=\infty$) に変更した場合に対してそれぞれ地盤応答解析を実施し、両者での地表面地震動の変化を評価することで、 L^0 の大きな層の非線形特性を変化させた場合に地表面地震動が大きく変動することを確認する。

検討に用いる入力地震動は鉄道構造物の耐震設計に用いられるL2地震動スペクトルII (G1地盤)¹³⁾とした。なお、地盤は1次元の多層モデルで表現することとし、最下層には基盤条件 ($V_s=400\text{m/s}$, $\gamma=20\text{kN/m}^3$) を表現する粘性境界を設置した。また、各層の非線形特性を変化させた場合の地表面地震動の変化を次式で評価した。

$$\begin{aligned} R(PGA)^{(i)} &= \frac{PGA^{(i)} - PGA^0}{PGA^0} \\ R(PGV)^{(i)} &= \frac{PGV^{(i)} - PGV^0}{PGV^0} \\ R(PGD)^{(i)} &= \frac{PGD^{(i)} - PGD^0}{PGD^0} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 PGA , PGV , PGD はそれぞれ地表面地震動の絶対加速度、相対速度、相対変位の最大値をあらわし、上付きの0は全層に標準的な非線形特性を設定した場合の結果、上付きの(i)は第i層を線形弾性体とした場合の結果を示している。

以上の条件に基づき、各層を線形とした場合の地表面応答の変化を評価した結果を図-1～図-5の各図(c)～(e)に示す。これらの結果より、規準変位指数 L^0 の大きな層の非線形特性の変化が地表面位置の最大値、特に加速度と変位に与える影響が大きいことが分かる。具体的には、 L^0 の大きな層を線形弾性体とすることで、最大加速度が大きく、最大変位が小さくなっている。前述したように、地盤Aや地盤D、特に地盤Cでは土層構成のみから地表面応答に影響の大きな層を決定することは困難であると考えられるが、提案手法によって抽出された L^0 の大きな層が、地表面応答に大きな影響を及ぼしていることが確認できる。一方で L^0 が特徴的に大きくなる層が存在しなかった地盤Eでは、各層の非線形特性が局所的に変化した場合にも R^0 はそれほど変化しておらず、規準変位指数の評価結果と調和的な結果となっている。

さらに地盤Aにおいて、 L^0 の小さな層 (GL-3m) と L^0 の大きな層 (GL-8m) をそれぞれ線形弾性体とした場合の地表面地震動波形、応答スペクトルを全層で非線形とした場合と比較した結果を図-6に示す。これより、GL-3m位置の物性の変化は地表面地震動にほとんど影響がなく、時刻歴波形、応答スペクトルとも全層非線形とした場合とほぼ同一の値を示している。一方で、GL-8mの要素を線形とすると、地表面波形、応答スペクトルに大きな変化が表れており、この箇所の非線形特性の設定が地表面地震動を適切に評価する上で重要であることが確認できる。

以上の結果より、本手法によって評価された L^0 の大きな箇所で動的変形特性試験を実施することで、信頼性の高い地表面地震動を効率的に評価可能となることが確認された。

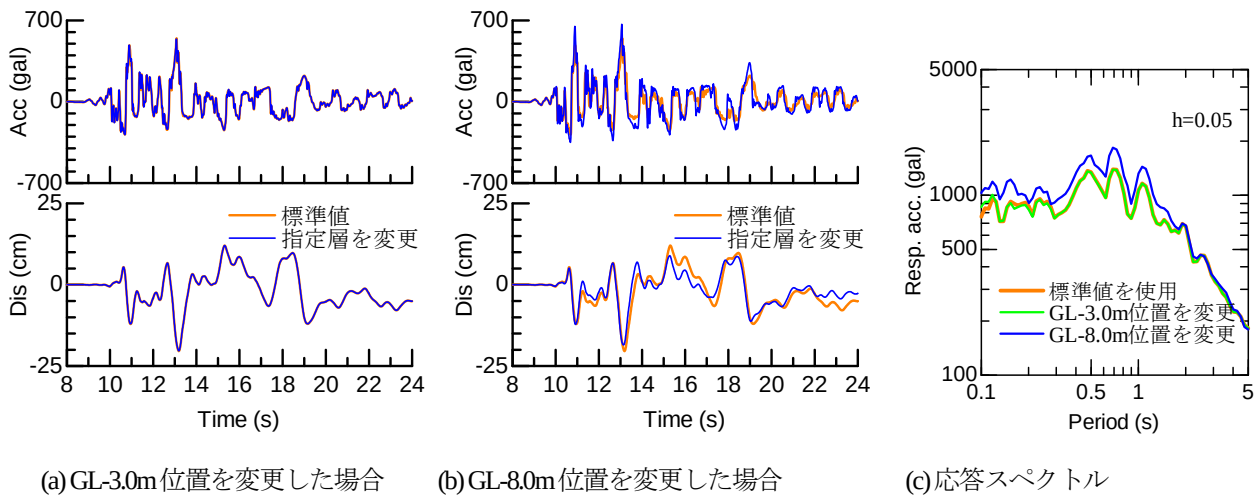


図-6 地表面地震動の評価結果 (地盤 A)

(4) 規準変位指数 L^0 と地表面地震動の関係

続いて、規準変位指数 L^0 と式(2)によって得られる R^0 の関係をまとめて図-7 (図-1～図-5で示した5地盤の結果)、図-8 (全60地盤の結果の重ね書き)に示す。この結果からも、 L^0 の大きな地層、地盤で地表面地震動の変化が大きくなっていることが確認でき、提案した手法によって試験実施層を抽出することの妥当性が確認できる。また、 L^0 とPGAは正の相関、 L^0 とPGDは負の相関がみられ、 L^0 の大きな層を線形 ($\gamma^0=\infty$) とした場合に、地盤全体系の強度が顕著に大きくなり、非線形挙動の程度が小さくなった影響が反映された結果となっていることも確認で

きる。またPGVについては L^0 の大きさとの相関がそれほど見られず、最大速度については地盤の非線形挙動の影響が小さいという過去の知見(例えば14)と調和的な傾向を示している。

また今回対象とした地震動においては、 L^0 が0.3程度より大きくなると地表面地震動に与える影響も比較的大きくなっていることが分かる。そのため、現場において規準変位指数 L^0 を算出し、ある値(例えば $L^0=0.3$)を上回っているかどうかを判定することにより、室内試験実施の必要性、有効性について判断する、という活用も可能であると考えられる。

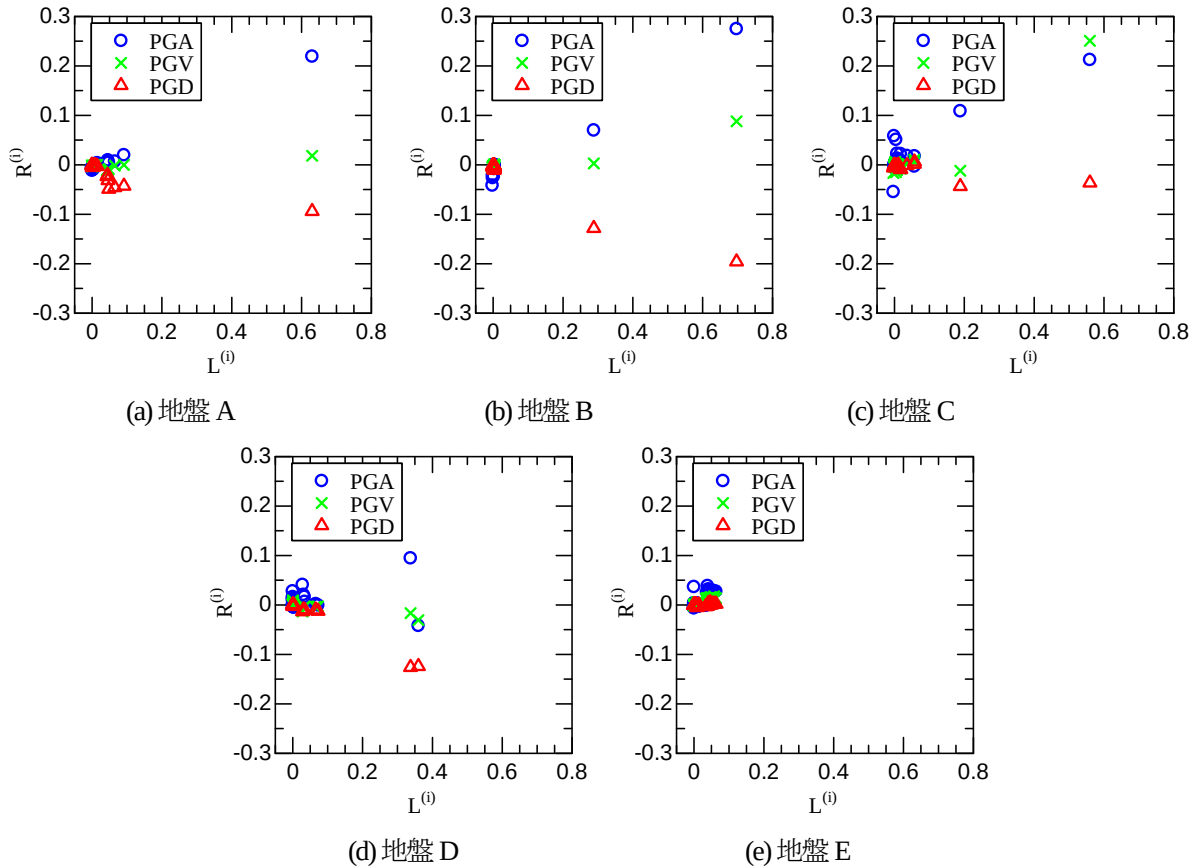


図-7 L^0 と R^0 の関係 (図-1～図-5で示した5地盤の結果)

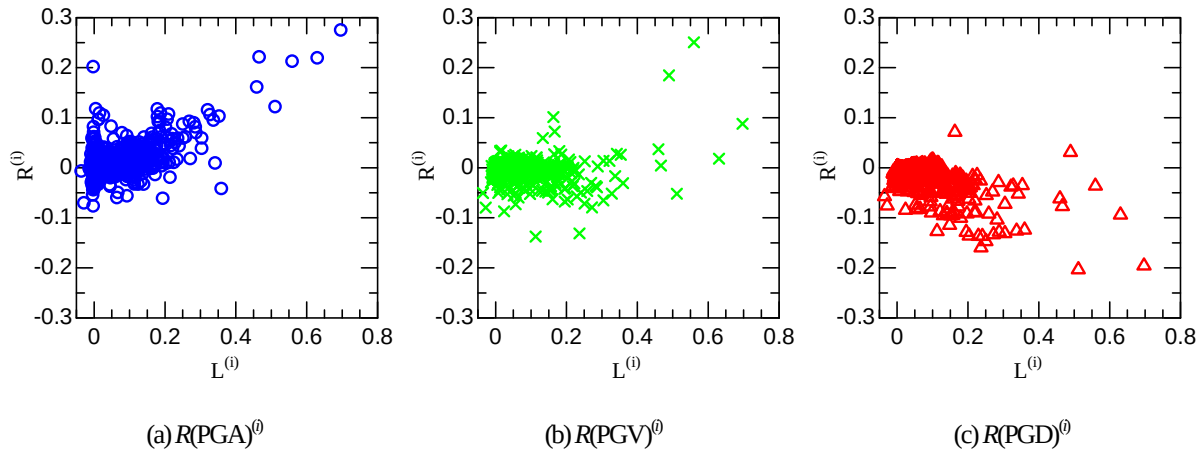


図-8 L^0 と R^0 の関係 (全60地盤の総括)

4. まとめ

本検討では、粘性土と砂質土の互層が連続するような一般的な地盤において、地表面地震動の評価という観点から、動的変形特性試験を実施する土層を適切に評価する手法を構築することを目的として、規準変位指数 L^0 の提案を行った。これは、一般的な地盤の非線形構成則と標準パラメータを組み合わせた静的非線形解析を繰り返し実施することで、地盤全体系の荷重-変位関係に影響の大きな層を特定するものである。

提案手法の有効性を確認するために、多様な層構成を有する地盤に対する試算を実施した。その結果、土層構成のみでは試験実施の必要性を判定することが困難な地盤においても規準変位指数 L^0 が大きくなる場合があること、このような地盤においても L^0 の大きな土層における非線形特性が変化した場合に地盤応答解析によって得られる地表面地震動が大きく変化することを確認した。

本手法は入力地震動に依存せず一意に安定した解を求めることができる。また規準変位指数 L^0 の評価に必要なパラメータは、速度構造と土質区分程度であるため、試験実施層を現場において定量的に特定する一つの指標として有効であると考えられる。

参考文献

- 1) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE-A computer program for response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12. Univ. of California at Berkeley, 1972.
- 2) Hardin, B. O., and Dmievich, V. P.: Shear modulus and damping in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.98, SM7, pp.667-692, 1972.
- 3) 地盤工学会編：地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法(JGS 0542-2009), 土質試験の方法と解説, pp.751-766, 2009.
- 4) 地盤工学会編：土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法(JGS 0543-2009), 土質試験の方法と解説, pp.767-777, 2009.
- 5) 今津雅紀, 福武毅芳：砂礫材料の動的変形特性, 第 21 回土質工学研究発表会, pp.509-512, 1986.
- 6) 坂井公俊, 室野剛隆：地盤の等価 1 自由度モデルを用いた動的解析法の提案, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, pp.1819-1828, 2014.
- 7) 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.
- 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) 西村伸一, 渡部要一：地盤構造物の設計コードと信頼性設計法 (3.地盤データのばらつきと特性値・設計値の決定), 地盤工学会誌, 第 58 巻, 第 11 号, pp.54-61, 2010.
- 10) Kok-Kwang Phoon and Fred H Kulhawy: Characterization of geotechnical variability, *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(4): 612-624, 10.1139/t99-038
- 11) 松尾稔：地盤工学 (信頼性設計の理念と実際), 技報堂出版, 1984.
- 12) 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.
- 13) (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.
- 14) 藤本一雄, 翠川三郎：2001 年芸予地震の強震記録に基づく地盤増幅度に対する地盤の非線形性の影響, 日本地震工学会論文集, Vol.3, No.1, pp.47-58, 2003.

QUANTITATIVE EVALUATION TO DETERMINE THE LAYER TO CONDUCT DYNAMIC SOIL PROPERTIES TEST FOR SEISMIC DESIGN

Kimitoshi SAKAI, Kyohei UEDA and Taro ISHIKAWA

In this research, reference displacement index $L^{(i)}$ is proposed to determine the layer quantitatively where the dynamic soil properties test is needed for seismic design. In the proposed method, the nonlinear static analysis was conducted repeatedly by using a general non-linear constitutive law and standard parameters of soils. The index $L^{(i)}$ was calculated for each stratum that represents the contribution of the layer to the total force-displacement behavior of the soil deposit. The dominant soil layer will be then determined by comparing the indices each other, and it is actually a location where the soil properties should be carefully investigated. In order to evaluate the efficacy of the method, the index $L^{(i)}$ were evaluated for many soil deposits with various stratum properties. It was confirmed that the surface ground motion was significantly affected by the properties of a soil layer whose index $L^{(i)}$ was relatively higher. The proposed method is advantageous over traditional methods in the aspect that it gives the stable results independent of the earthquake motion. In addition, $L^{(i)}$ could be calculated even if only a limited information is available, such as N-value and soil classification. It follows that this method provides the quantitative measure to select the layer that in-situ dynamic soil properties test is required