

# 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

川西 智浩<sup>1</sup>・室野 剛隆<sup>2</sup>・佐藤 勉<sup>3</sup>・畠中 仁<sup>4</sup>

<sup>1</sup>鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:kawa@rtri.or.jp

<sup>2</sup>鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部, 博士(工学) (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

<sup>3</sup>鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部, 博士(工学) (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:ben@rtri.or.jp

<sup>4</sup>中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町2-11イワサキ第二ビル)

E-mail: hatanaka\_h@cfk.co.jp

現行の鉄道設計標準における耐震設計上の地盤種別は、地盤の初期剛性に基づいて算定される地盤の固有周期により区分されている。入力地震波のレベルが大きくなると、地盤が非線形化して剛性が低下するが、地盤の非線形性は粘性土や砂質土などの土質区分によって異なるため、土質区分の影響を考慮して地盤種別を分類する方が合理的であると考えられる。そこで本研究では、多くの実地盤に対して逐次非線形動的解析を実施するとともに、土質区分毎の非線形性の違いを考慮した地盤の「等価周期」の算定方法について検討を行い、等価周期を用いて地盤種別を分類した場合の精度について検証を行った。

**Key Words :** type of soil, seismic design, soil classification, equivalent natural period

## 1. はじめに

構造物の耐震設計を行う場合、表層地盤の特性を考慮した地表面設計地震波を設定する必要があるが、土の動的変形特性や強度特性は地点によって異なることから、基盤位置における設計地震波を表層地盤に入力し、地盤の動的解析によって地表面位置での設計地震波を算出することが望ましい。しかし、道路や鉄道のような線状構造物の耐震設計を行う場合、構造物地点毎に地盤の動的解析を実施して別々の設計地震波を設定することは、設計コストの面から合理的ではない。したがって、耐震設計に用いる地表面設計地震波を定める際には、ある程度の設計区間で一律な地震波となるよう、耐震設計上の地盤種別を定めて、地盤種別毎に標準的な地震波を設定することが一般的である。

道路橋示方書・同解説<sup>1)</sup>では、微小ひずみ振幅領域における表層地盤の基本固有周期に対応する地盤の特性値をもとに、3種類の地盤種別を定めている。一方、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計<sup>2)</sup> (以下、耐震標準) においては、道路橋示方書と同じように初期のせん

断弾性波速度に基づいて算定した表層地盤の固有周期  $T_g$  に応じて地盤種別を定めているが、同じ地盤種別に属する地盤であっても、実際に動的解析を実施すると土層構成の違いが原因で地表面波の弾性加速度応答スペクトルが大きく異なる場合がある。また、表-1に示すように地盤種別の数が8種類と多くなっており、その結果として、きめ細かい対応が可能な半面、比較的短い設計区間内で地盤種別が変わってしまい、詳細設計を行うケース数が多くなって設計コストが増大していることも問題となっている。以上の理由から、地盤種別の設定方法については再度検討を実施する必要がある。

前述したように、現行の耐震標準では初期のせん断弾性波速度に基づいて地盤の固有周期を定めているが、入力地震波のレベルが大きくなると地盤が非線形化し、土の非線形性は粘性土や砂質土など土質区分によって異なるため、土質区分の影響を考慮して地盤の固有周期を定め、その値を地盤種別の区分の指標に用いた方が合理的であると考えられる。

そこで本研究では、土質区分毎の非線形性の影響を考慮した地盤の固有周期を「等価周期」と定義し、その算

表-1 現行の鉄道の耐震設計標準における地盤種別

地盤種別	固有周期(sec)	地盤条件
G0	—	岩盤
G1	—	基盤
G2	～0.25	洪積層
G3	0.25～0.5	普通地盤
G4	0.5～0.75	普通～軟弱地盤
G5	0.75～1.0	軟弱地盤
G6	1.0～1.5	軟弱地盤
G7	1.5～	極めて軟弱な地盤

定方法を提案するとともに、地盤の等価周期を用いた地盤種別の設定方法について検討を行う。まず、多くの実地盤に対して地盤の逐次非線形動的解析を実施し、地表面の弾性加速度応答スペクトルを算定するとともに、地盤のせん断弾性波速度の低下率を各層ごとに求め、その結果に基づいた等価周期の算定方法を示す。次に、基盤に対する地表面の応答加速度比に着目し、地盤の等価周期を指標に用いた場合の地盤種別の設定手順と、それに基づく地盤種別毎の地表面弾性加速度応答スペクトルの設定結果を示す。最後に、等価周期に基づいて設定した地盤種別と現行の耐震設計標準における地盤種別における地表面弾性加速度応答スペクトルのばらつきを比較することにより、提案手法の妥当性を検証する。

## 2. 地盤の動的解析

### (1) 解析条件

1. で述べたように、地盤種別の分類にあたっては、地盤の固有周期だけでなく、土質区分の影響も加味したほうが合理的であると考えられる。そこで本検討では、図-1に示すように、地盤の固有周期と粘性土の割合の関係が多様な実地盤計60ケースを選定した。解析結果に地域的な影響が含まれないよう、これらの実地盤には日本全国のあらゆる地域のデータを採用した。これらの実地盤に対して、耐震標準に示されているL2地震動スペクトルII地震波（G1地盤用）（図-2）を入力し、地盤の1次元逐次非線形動的解析を実施する。

ここで、それぞれの実地盤のせん断弾性波速度 $V_s$ は各層毎に一律の値であり、表層地盤全体では $V_s$ が階段状に設定されている。しかし、これらの値は各土層における平均 $V_s$ であり、地盤のせん断剛性 $G(= \rho \cdot V_s^2)$ は深さによって変化することを考えると、各土層を何層かに分割して地盤の動的解析を実施する際には、各サブ層における $V_s$ を修正する必要がある。地盤のせん断剛性 $G$ と拘束圧（あるいは上載圧）との関係については様々な

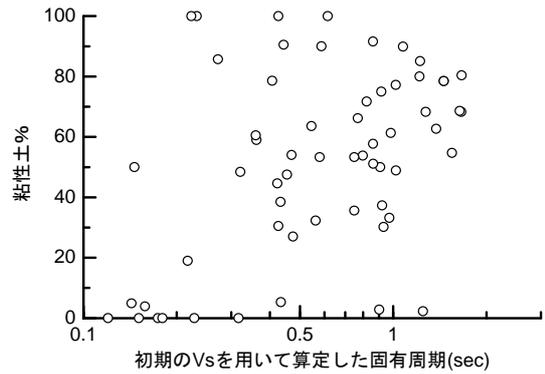


図-1 解析に用いた地盤の固有周期と粘性土の割合

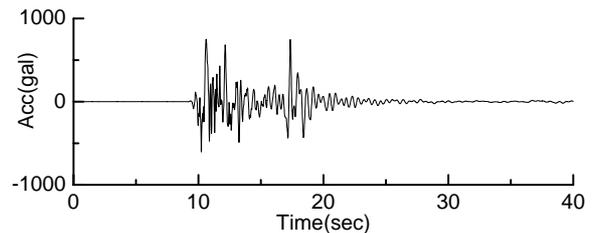


図-2 基盤入力地震波

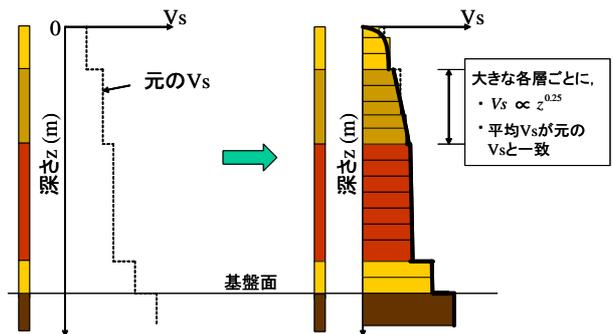


図-3 せん断弾性波速度 $V_s$ の設定方法

研究がなされているが、本検討ではHardin and Richart<sup>3)</sup>やHardin and Black<sup>4)</sup>の検討に基づき、すべての土質区分において地盤のせん断剛性 $G$ は上載圧 $\sigma_v$ の0.5乗に比例する考え、また、 $\sigma_v$ は深さ $z$ に比例することを考慮して、せん断弾性波速度 $V_s$ と深さ $z$ の間に、

$$V_s \propto z^{0.25} \quad (1)$$

という関係が成り立つものとした。したがって本検討では、各層を約1m毎のサブ層に分割し、各層毎に(1)式の関係を満たしつつ、各層の平均 $V_s$ が元の $V_s$ と一致するように、各サブ層の $V_s$ を設定する。その概念図を図-3に示す。

また、地盤の非線形構成則としてはROモデル<sup>5)</sup>を用い、土の変形特性モデルとしては、安田・山口の変形特性モデル<sup>6)</sup>を採用し、 $G/G_0 = 0.5$ となるひずみを規準ひずみ $\gamma_r$ として用いる。このとき、平均粒径 $D_{50}$ と最大減衰定数 $h_{max}$ については、表-2に示す値を用いることとした。

表-2 平均粒径  $D_{50}$  と最大減衰定数  $h_{max}$

土質区分	$D_{50}$ (mm)	$h_{max}$
粘性土	0.025	0.20
砂質土	0.15	0.30
砂礫	2.0	0.35

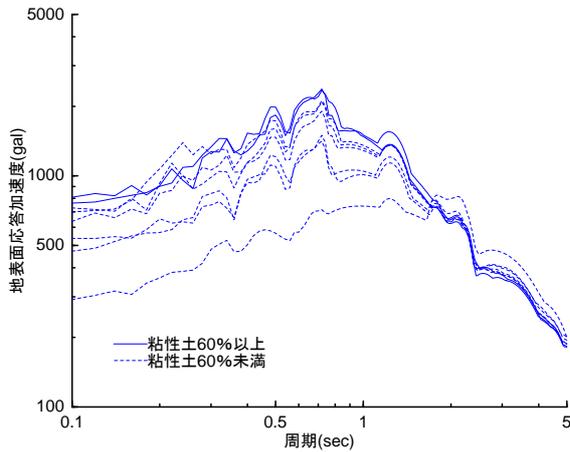


図-4 地表面弾性加速度応答スペクトル (現 G4 地盤)

また減衰としては、1次の固有振動数で3%となる剛性比例減衰を用いた。

## (2) 解析結果

一例として、現行の耐震標準におけるG4地盤に属する実地盤に対して、地表面波の弾性加速度応答スペクトルを算定した結果を図-4に示す。全層厚に占める粘性土の割合が60%以上の地盤を実線で、また粘性土の割合が60%未満の地盤を破線でそれぞれ示している。現行の地盤種別で分類すると、同じ地盤種別であっても粘性土が多い地盤とそうでない地盤では、地表面の弾性加速度応答スペクトルに大きな差があることがわかる。したがって、地盤種別の精度を向上させるためには、土質区分の影響を地盤種別の設定に反映させる必要があると言える。

## 3. 地盤の等価周期の導入

### (1) 等価周期 $T_{geq}$ の定義

現行の耐震標準では、次式で示す地盤の固有周期  $T_g$  を用いて、地盤種別の分類を行っている。

$$T_g = 4 \times \sum_{i=1}^N \left( \frac{h_i}{V_{s0di}} \right) \quad (2)$$

ここで、 $h_i$  : 各土層 (第  $i$  層) の層厚(m)、 $V_{s0di}$  : 各土層 (第  $i$  層) の設計初期せん断弾性波速度(m/s)である。このように現行の耐震標準では、想定する地震動のレベルによって地盤の剛性低下の度合いが異なるため、地盤の剛性低下を考慮しない初期のせん断弾性波速度を用いて地盤の固有周期を算定している。しかし、粘性土と砂質土では地盤の非線形性が異なるため、2. に示したように各地盤種別における弾性加速度応答スペクトルのばらつきが大きくなってしまふ。耐震標準では標準的な設計用地震波を定めることになるので、その波を入力した場合の地盤の非線形性を考慮して地盤種別を設定した方が、より合理的であると考えられる。

そこで本研究では、土質区分毎の非線形性の影響を考慮した地盤の「等価周期  $T_{geq}$ 」を(3)式で定義し、この値を地盤種別の評価指標に用いることとした。

$$T_{geq} = 4 \times \sum_{i=1}^N \left( \frac{h_i}{V_{seq\_i}} \right) = 4 \times \sum_{i=1}^N \left( \frac{h_i}{\eta_g \times V_{sodi}} \right) \quad (3)$$

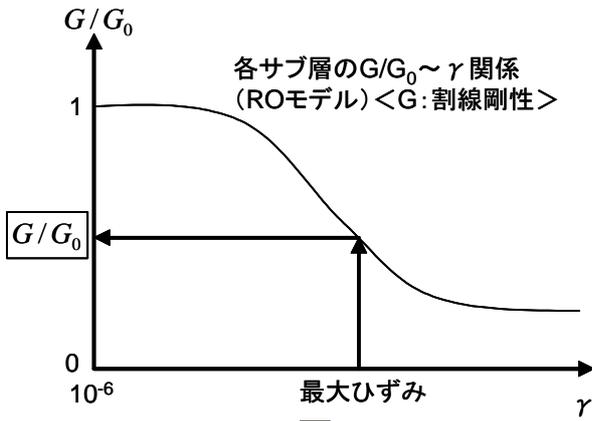
ここで、 $V_{seq\_i}$  : 各土層 (第  $i$  層) の等価せん断弾性波速度(m/s)、 $\eta_g$  : せん断弾性波速度の低下率 である。

(3)式を用いて等価周期  $T_{geq}$  を算定するためには、せん断弾性波速度の低下率  $\eta_g$  の値を適切に設定する必要がある。 $\eta_g$  は地盤の剛性低下の度合い、すなわち土の  $G-\gamma$  関係と密接に関連している。土の  $G-\gamma$  関係は土質区分や拘束圧に依存するが、拘束圧は深さに比例し、また(1)式で示したように深さがせん断弾性波速度と密接に関連していることを考慮すると、せん断弾性波速度の値も  $\eta_g$  に影響を及ぼしていると言える。

以上のことを踏まえて、土質区分及び初期のせん断弾性波速度に応じて各土層を複数のグループに分け、グループ毎に  $\eta_g$  の値を定めることにする。本検討では、土質区分については粘性土・砂質土・砂礫の3種類に分ける。次に、初期のせん断弾性波速度については、ここでは一例として  $V_s=200$ (m/s)を境界値として2グループに分けることにした。以上より、本検討では表-3に示す6つのグループに分けて  $\eta_g$  の値を定める。

表-3  $\eta_g$  の値を定めるグループ

初期 $V_s$ 土質区分	200(m/s)未満	200(m/s)以上
粘性土	グループ 1	グループ 4
砂質土	グループ 2	グループ 5
砂礫	グループ 3	グループ 6



$$Vs \text{低下率 } \eta = \sqrt{G/G_0}$$

- ・各グループ毎に  $\eta$  の平均値  $\mu$  を算出し、その値に基づき  $\eta_g$  を設定
- ・平均値  $\mu$  から大きくかけ離れた  $\eta$  が存在する場合には、平均値  $\mu$  と中央値  $m$  の両方の値を考慮して  $\eta_g$  を設定

図-5  $\eta_g$  の算定手順

表-4  $\eta$  の平均値  $\mu$ 、変動係数  $\sigma/\mu$ 、中央値  $m$  及び  $\eta_g$  の設定値

グループ	土質区分	Vs	$\mu$	$\sigma/\mu$	中央値 $m$	$\eta_g$
1	粘性土	200m/s未満	0.497	0.219	0.478	0.5
2	砂質土	200m/s未満	0.382	0.429	0.339	0.35
3	砂礫	200m/s未満	0.243	0.569	0.223	0.2
4	粘性土	200m/s以上	0.582	0.108	0.570	0.6
5	砂質土	200m/s以上	0.423	0.259	0.420	0.4
6	砂礫	200m/s以上	0.406	0.240	0.421	0.4

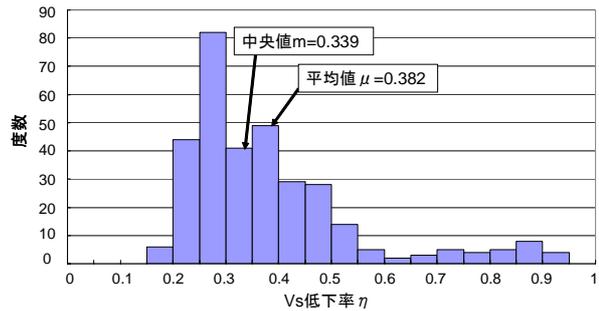


図-6  $\eta$  の分布 (グループ2)

## (2) $\eta_g$ の設定

### a) 検討方法

本検討では、以下の手順にしたがって  $\eta_g$  の値を設定する。その概念図を図-5に示す。

- ・実地盤60ケースの動的解析結果から最大せん断ひずみを抽出し、ROモデルにおける最大せん断ひずみ時の剛性低下率  $G/G_0$  をサブ層毎に算出する。このとき、 $G$  は割線剛性を指す。
- ・地盤の剛性  $G$  とせん断弾性波速度  $V_s$  との間には  $G = \rho \cdot V_s^2$  の関係があるので、 $\sqrt{G/G_0}$  が  $V_s$  の低下率 (以下、 $\eta$  と表記する) となる。この値  $\eta$  をサブ層毎に算出する。
- ・グループ毎に  $\eta$  の平均値  $\mu$  を算定し、 $\mu$  の値に基づいて各グループの  $\eta_g$  を設定する。ただし、 $\eta$  の変動係数  $\sigma/\mu$  や分布形状も考慮し、平均値  $\mu$  から大きくかけ離れた  $\eta$  が存在する場合には、平均値  $\mu$  と中央値  $m$  の両方の値を考慮して  $\eta_g$  を設定する。

### b) 検討結果

a) に示した手順にしたがって算定した  $\eta$  の平均値  $\mu$ 、変動係数  $\sigma/\mu$  及び中央値  $m$  の値を表-4に示す。平均値  $\mu$  に着目すると、 $V_s$  が200(m/s)未満、200(m/s)以上のいずれの場合においても、砂質土や砂礫の方が粘性土に比べて値が小さくなっている。一般的に砂質土や砂礫は粘性土よりも非線形化が進む傾向があり、今回の計算結果はそ

の傾向と調和的である。また、 $V_s$  が200(m/s)以上における  $\mu$  の値は、 $V_s$  が200(m/s)未満の場合に比べて全体的に大きくなっている。 $V_s$  200(m/s)以上の地盤は深い位置にあって拘束圧が高くなっている場合が多く、地盤の剛性低下の度合いが  $V_s$  が200(m/s)未満の地盤に比べて小さいことが原因であると考えられる。

グループ1及びグループ4~6については、変動係数  $\sigma/\mu$  の値が0.1~0.26と小さくなっており、 $\eta$  の分布形状も正規分布に近いので、 $\eta$  の代表値としては平均値  $\mu$  が適切であると考えられる。これに対し、グループ2及びグループ3においては、 $\sigma/\mu$  の値が0.4以上と大きくなっている。一例としてグループ2における  $\eta$  の分布を図-6に示す。平均値  $\mu$  から大きく離れた  $\eta$  が存在しており、平均値のみから  $\eta_g$  の値を設定することは好ましくない。

したがって本検討では、グループ1及びグループ4~6については  $\mu$  の値を参考に、またグループ2及びグループ3については、平均値  $\mu$  と中央値  $m$  の両方の値を勘案して、各グループの  $\eta_g$  の値を設定することとする。 $\eta_g$  の値は0.05刻みの値で設定し、表-4の右側に示した値として定めることとした。

### c) $T_g$ と $T_{geq}$ の関係

60ケースの実地盤に対して、(2)式により算定した地盤の固有周期  $T_g$  と、(3)式と表-4で設定した  $\eta_g$  を基づいて算定した地盤の等価周期  $T_{geq}$  の関係を図-7に示す。両者の値は概ね比例関係にあるが、 $T_g$  がほぼ同じ地盤であ

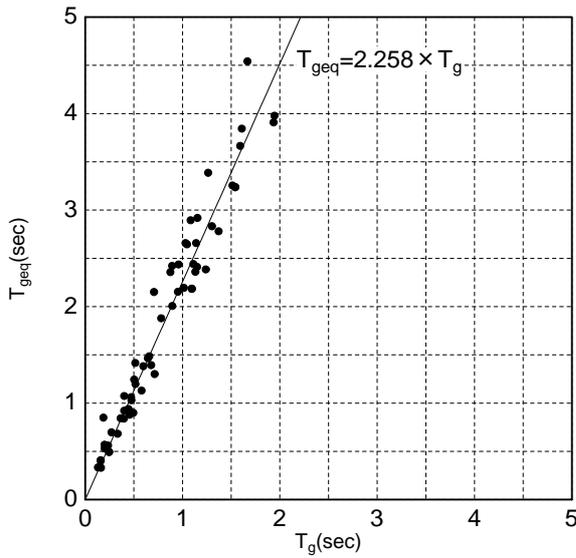


図-7  $T_g$  と  $T_{geq}$  の関係

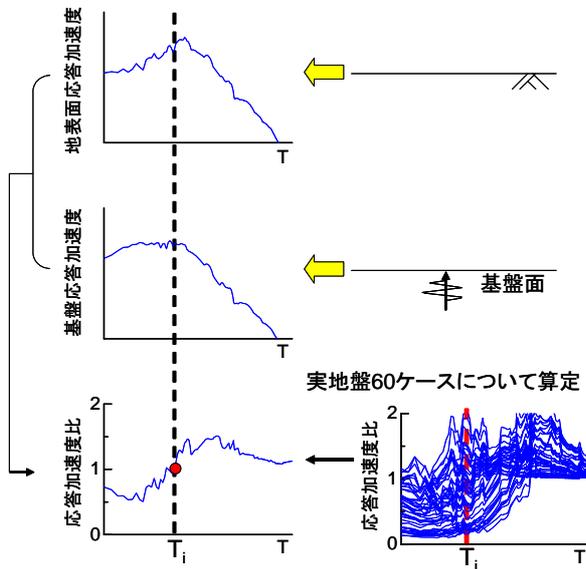
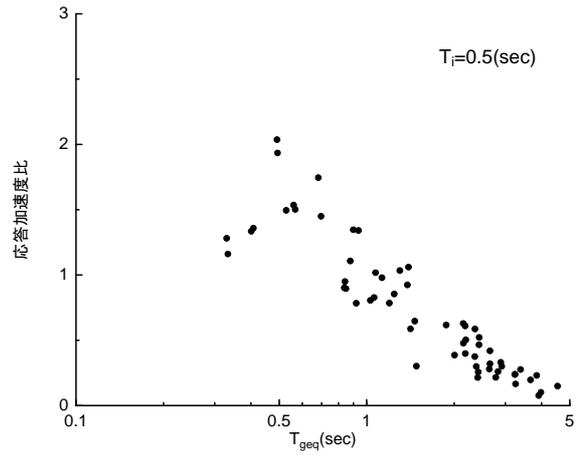


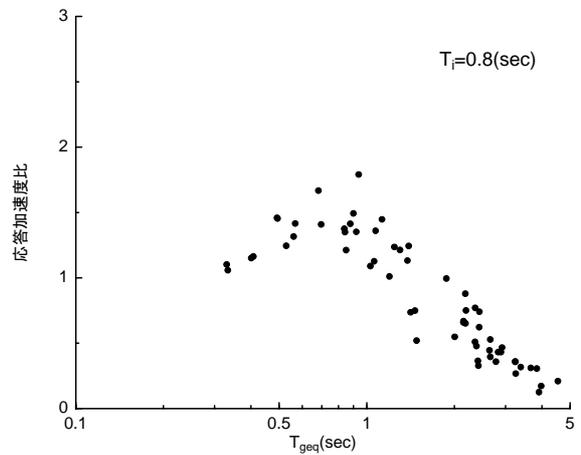
図-8 応答加速度比の算定

っても  $T_{geq}$  の値に最大1.0(秒)程度のばらつきが生じている。したがって、 $T_g$  を用いた場合と  $T_{geq}$  を用いた場合では、地盤種別の設定結果が異なると思われる。

なお、等価周期  $T_{geq}$  は全てのサブ層において  $V_s$  の値を低下させて算定しているため、全層が一様に強い非線形性を示した場合の周期を算定していることになるが、特に表層地盤が厚い地盤については、全層が同時に強い非線形化を示すことはないと思われる。したがって、周期が非常に長い地盤については、実際に地盤が非線形化した場合の周期と  $T_{geq}$  の値に差が生じると考えられるため、 $T_{geq}$  の適用範囲については今後検討する必要がある。



(a)  $T_i = 0.5(\text{sec})$



(b)  $T_i = 0.8(\text{sec})$

図-9  $T_{geq}$  と応答加速度比の関係

#### 4. 地盤の分類方法

##### (1) 応答加速度比の定義

地盤種別の分類にあたっては、各周期における地盤応答の増幅度が重要なポイントとなる。耐震標準では、各地盤種別における地表面波の特性を弾性加速度応答スペクトルで示しているため、本検討ではその点との整合性を考慮して、地表面波の弾性応答加速度を基礎波の弾性応答加速度で割った「応答加速度比」を定義し、これを応答の増幅度を表す指標として用いることとする。図-8に示すように、ある周期  $T_i$  における応答加速度比を実地盤60ケースについて読み取り、その値と地盤の等価周期  $T_{geq}$  の関係を整理することで、地盤種別の区分に用いる指標として  $T_{geq}$  が適切かどうかを検討する。

表-5 試算に用いた地盤種別の区分

$T_{geq}$ (sec)	$T_{geq}$ による地盤種別	現行の地盤種別
— (岩盤)	G0 地盤 <従来通り>	G0 地盤
— (基盤)	G1 地盤 <従来通り>	G1 地盤
～0.8	Gn2 地盤	G2 地盤
		G3 地盤
0.8～1.4	Gn3 地盤	G4 地盤
1.4～2.2	Gn4 地盤	G5 地盤
2.2～3.0	Gn5 地盤	G6 地盤
3.0～	Gn6 地盤	G7 地盤

(2)  $T_{geq}$  と応答加速度比の関係

周期 $T_i=0.5$ (秒)および $0.8$ (秒)の場合について、実地盤60ケースの $T_{geq}$ と応答加速度比の関係を図-9に示す。まず、応答スペクトルの周期 $T_i$ と $T_{geq}$ が一致すると、応答加速度比がピーク値をとる傾向にある。つまり、地盤の等価周期 $T_{geq}$ は地盤が共振して応答が増幅する周期と概ね一致している。また、同じ $T_{geq}$ に対する応答加速度比の値には多少ばらつきが見られるが、 $T_{geq} < T_i$ の領域では応答加速度比は単調増加の傾向を示しており、逆に $T_{geq} > T_i$ の領域では単調減少の関係にあることから、 $T_{geq}$ は応答の増幅度に大きく影響していることがわかる。以上より、 $T_{geq}$ を地盤種別の区分に用いることで、合理的な地盤種別を設定できるものと考えられる。

(3) 試算

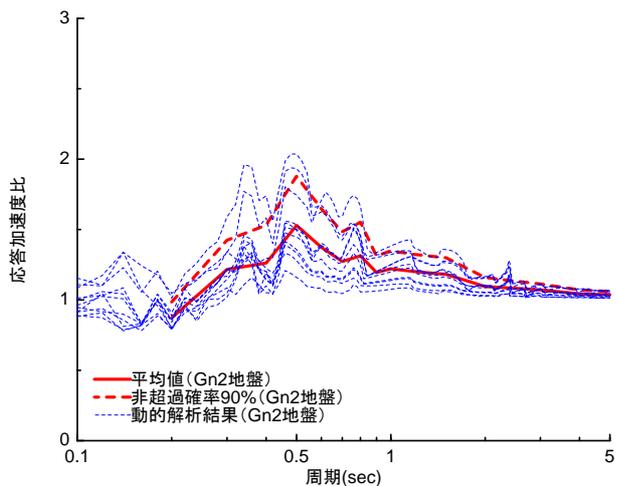
(2)の検討結果に基づき、 $T_{geq}$ の値に基づいて地盤種別の分類を行う。 $T_{geq}$ の境界値の設定には議論の余地があるが、ここでは一例として表-5のように地盤種別を設定することとした。表には参考のため、概ね対応する現行の耐震標準における地盤種別の区分も対比して示している。提案する地盤種別は、現行に比べて1種類少ない計7種類に設定した。

表-5で示したGn2～Gn6地盤の地盤種別毎に実地盤を分類するとともに、地盤種別毎に代表的な周期 $T_i$ に対して応答加速度比の平均値および非超過確率90%の値(以

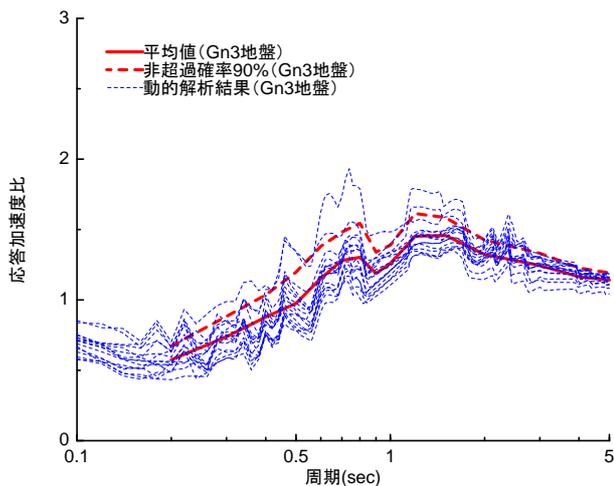
下、応答加速度比の代表値)を算定した。その結果を図-10に示す。次に、基盤波の弾性応答加速度に、応答加速度比の代表値を乗ずることにより、地表面波の弾性加速度応答スペクトルの代表値を算定した結果を図-11に示す。加速度応答スペクトルの形状が概ね似ている地盤が同じ地盤種別に集約されており、今回提案した地盤種別の分類方法を用いることで、合理的な設計用スペクトルが設定できる可能性があることがわかる。

5. 地盤種別の精度の比較

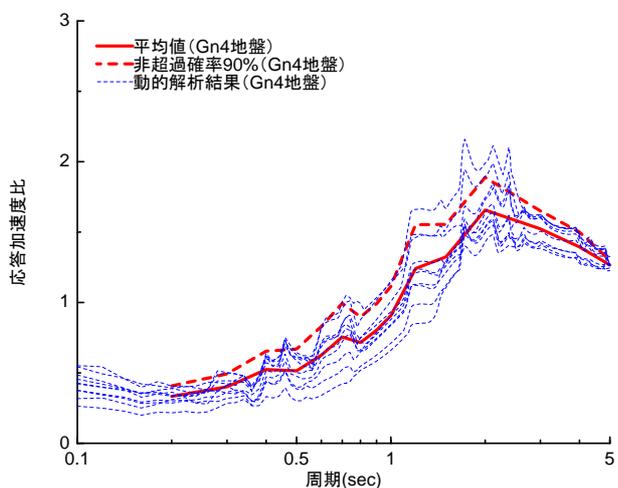
$T_{geq}$ の値に基づいて設定した地盤種別と現行の地盤種別の精度を比較するため、各地盤種別に属する実地盤の地表面弾性加速度応答スペクトルに対して平均値 $\mu_{rsp}$ と標準偏差 $\sigma_{rsp}$ を算出し、変動係数 $\sigma_{rsp}/\mu_{rsp}$ を求めた。その結果を図-12に示す。地盤種別の数を1種類少なくして周期範囲を粗く設定したにもかかわらず、 $T_{geq}$ の値による地盤種別の方が変動係数が小さくなる傾向にあり、地盤の等価周期 $T_{geq}$ を用いることでよりばらつきの少ない地盤種別を設定することが可能であることがわかる。しかし、地盤の周期が比較的長いGn5地盤、Gn6地盤においては、 $T_{geq}$ の値による地盤種別においても変動係数が比較的大きくなっており、 $T_{geq}$ の区分や地盤種別による方法を適用する周期範囲の検討を別途行う必要がある。



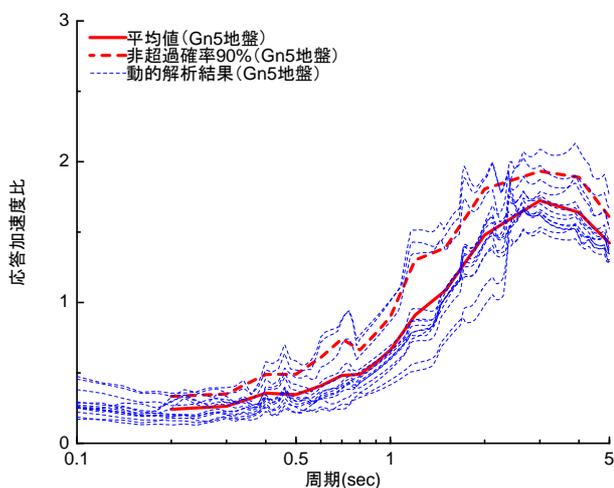
(a) Gn2 地盤



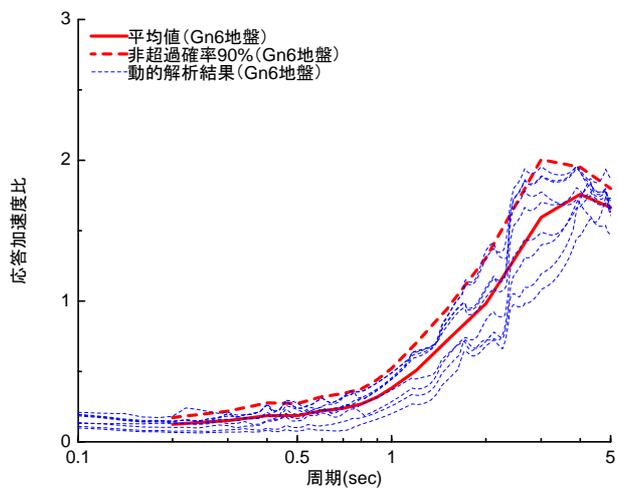
(b) Gn3 地盤



(c) Gn4 地盤

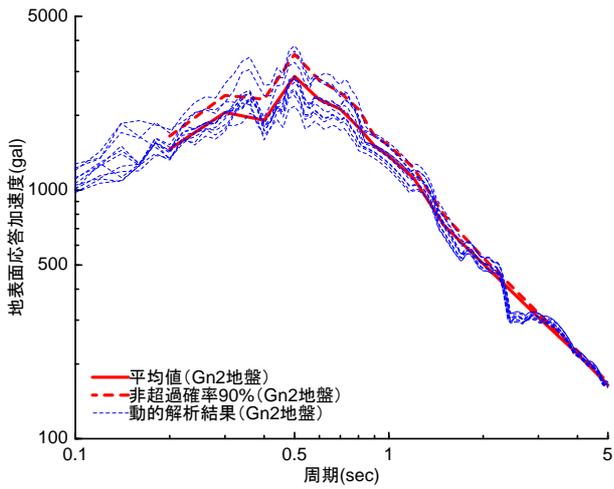


(d) Gn5 地盤

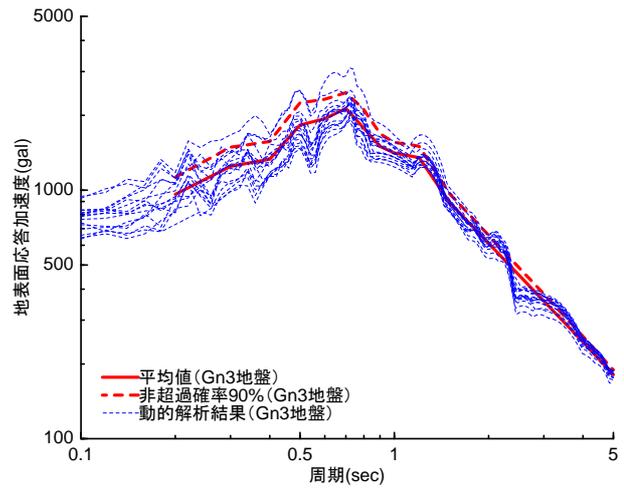


(e) Gn6 地盤

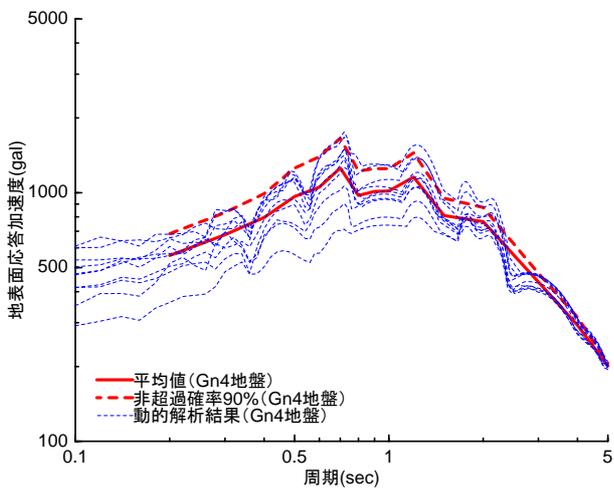
図-10 応答加速度比の算定結果



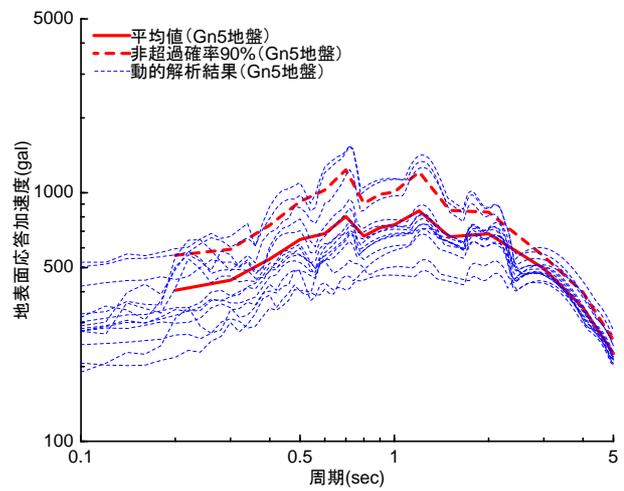
(a) Gn2 地盤



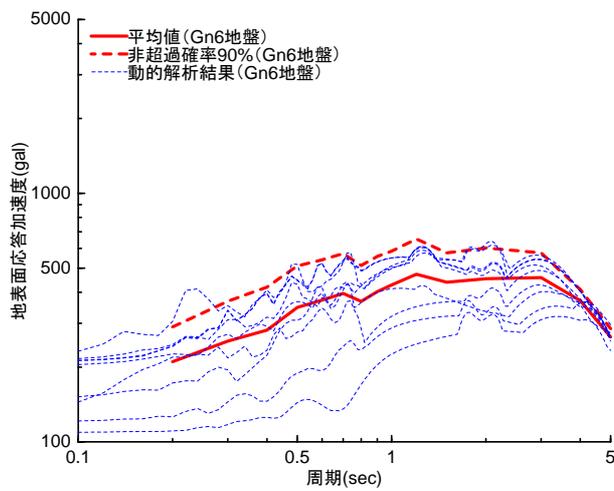
(b) Gn3 地盤



(c) Gn4 地盤



(d) Gn5 地盤



(e) Gn6 地盤

図-11 地表面弾性加速度応答スペクトルの算定結果

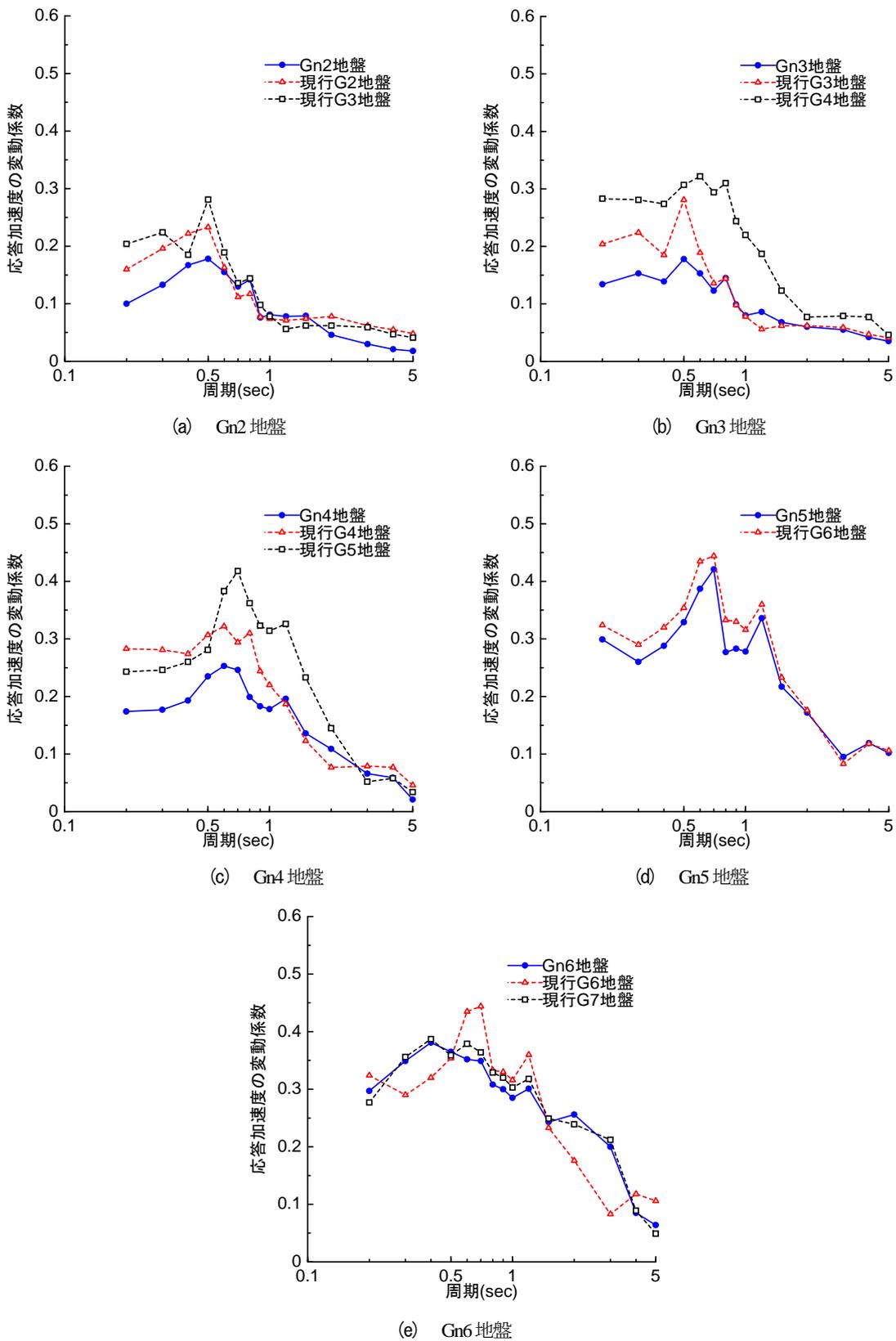


図-12 地表面弾性加速度応答スペクトルの変動係数

## 6. まとめ

本研究では、土質区分毎の非線形性の影響を考慮した地盤の等価周期 $T_{geq}$ を用いた地盤種別の設定手順を示すとともに、提案手法の妥当性の検証を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 大きなレベルの地震動が入力された場合に地盤の剛性が低下することを考慮し、せん断弾性波速度の低下率 $\eta_g$ を用いた地盤の等価周期 $T_{geq}$ を定義した。土質区分及び初期の $V_s$ に応じて $\eta_g$ の値を設定することで、粘性土と砂質土で地盤の非線形性が異なる影響を考慮することとした。
- 地表面波の弾性応答加速度を基盤波の弾性応答加速度で割った「応答加速度比」を定義し、この値と地盤の等価周期 $T_{geq}$ との関係を整理した。その結果、地盤の等価周期 $T_{geq}$ は地盤が共振して応答が増幅する周期と概ね一致しており、 $T_{geq}$ が地盤種別の分類に用いる指標として適切であることがわかった。
- $T_{geq}$ の値に基づいて新たに地盤種別の分類を行った結果、加速度応答スペクトルの形状が概ね似ている地盤が同じ地盤種別を集約できることがわかった。
- $T_{geq}$ の値に基づいて設定した地盤種別は、現行の地盤種別に比べて地表面弾性加速度応答スペクトルのばらつきが小さくなっており、 $T_{geq}$ を用いる

ことで現行の耐震標準よりも合理的に地盤種別を設定できることがわかった。

今後は、地盤の非線形構成則や入力地震波の見直しを行い、提案手法の妥当性についてさらに検証を進める。また、耐震標準では設計用の基盤波が複数存在しており、地震波によって地盤の剛性低下の度合いが異なることから、 $T_{geq}$ の値による地盤種別の精度にも影響を及ぼす可能性がある。これらの点も踏まえて、できるだけ合理的な地盤種別の設定方法について再検討を行う予定である。

### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2002.
- 2) (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，1999.
- 3) Hardin, B. O. and F. E. Richart Jr. : Elastic Wave Velocities in Granular Soils, ASCE, Vol.89, No. SM1, pp.33-65, 1963.
- 4) Hardin, B. O. and W. L. Black : Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay, ASCE, Vol.94, No. SM2, pp.353-369, 1968.
- 5) 龍岡文夫, 福島伸二: 砂のランダム繰り返し入力に対する応力～歪関係のモデル化について(1), 生産研究30巻9号, pp.356-359, 1978.
- 6) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会, pp.539-542, 1985.

(2007.4.6 受付)

## STUDY ON TYPE OF SOIL CONSIDERING EFFECT OF SOIL CLASSIFICATION

Tomohiro KAWANISHI, Yoshitaka MURONO, Tsutomu SATO  
and Hitoshi HATANAKA

In Japanese seismic design for railway structures, the surface ground is classified into eight types by its natural period, which is computed based on the initial rigidity of each soil layer. If the level of the input earthquake motion is larger, however, the rigidity of the surface ground becomes smaller. The accuracy of type of soil is, therefore, affected by the nonlinear characteristic of each soil classification. In this paper, we propose the method to calculate the equivalent natural period of surface ground taking into account the soil classification and try to classify the ground based on the period. We verify the efficiency of our proposed method by comparing with the results obtained using the type of soil shown in the current design standard for railway structures.