

地震時地盤挙動を効率的に処理するための 標準地盤データの提案 ～地表面位置の標準設計地震動の観点から～

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

全国の地盤調査結果をもとに、地表面地震動の特性を効率的かつ適切に表現可能な標準地盤データに関する検討を行った。この時には、膨大な地盤調査の結果を用いて、地盤の固有周期 T_g と地盤上限震度 K_f' を指標としたクラスタリングにより各地盤を分類するとともに、各分類を代表する地盤情報を抽出する。その結果、今回抽出した 50 地点の地盤データを用いて地表面地震動を算定することで、全国の地盤データを網羅的に用いることで得られる地表面地震動の確率特性を適切に表現できることを確認した。さらに、今回構築した全国の地盤応答解析データを有効に活用することで、新たな解析モデル構築を行わずに地表面地震動を効率的かつ適切に評価可能であることも確認した。

Key Words : *database for geotechnical information, soil classification, design ground motion, natural period, strength of ground*

1. はじめに

土木構造物の耐震設計、耐震診断を行う際には、ほとんどの場合で想定した地震作用に対して構造物の地震応答値を算定するとともに、この応答値において構造物に要求される性能を満足するか否かを確認している^{例えぼ1)5)}。橋りょうや高架橋のような地上構造物における地震作用は、地表面位置の設計地震動を入力として用いることが一般的であるが、この設計地震動は様々な方法によって設定されている。例えば、地点毎の地盤調査結果に基づく地盤応答解析を実施して個別の設計地震動を評価する場合^{例えぼ2)4)5)} (手法 1) や、地表面位置の地震観測記録を統計処理して評価する場合^{例えぼ1)3)} (手法 2)、工学的基盤位置において標準的な地震動が規定され、これを用いて予め多数の地盤応答解析を実施し、その結果を統計処理して評価する場合^{例えぼ2)} (手法 3) 等がある。

ここで、一般的な箇所における鉄道橋りょう・高架橋に対する耐震設計時の地盤挙動、地表面設計地震動の評価には「手法 3」が用いられることが大半である。その一方で、活断層近傍に位置する構造物の設計や、極めて軟弱な表層地盤を有する箇所における設計、複雑な形状を有する構造物の設計を行う場合などのように、特殊な

条件下では「手法 3」を用いると適切な地震応答値が求められない可能性があるため、このような状況では地点毎の地盤応答解析 (手法 1) が実施されている。さらに、工学的基盤位置の設計地震動の評価を行う際に、震源・伝播経路・サイトの各特性を考慮した強震動予測が実施される場合があるが、地域固有の地震動評価を行った場合にも、設計の対象とする延長が長く、地盤条件がこの区間で多様に変化する場合には、「手法 3」によって地表面地震動を分類、評価するような事例^{例えぼ6)}も存在する。また鉄道盛土の耐震設計時には、「手法 3」によって評価された地表面設計地震動をもとにした土構造物用の照査波⁷⁾⁸⁾が用いられることが一般的である。そのため、鉄道構造物の耐震設計における表層地盤の挙動、地表面設計地震動の評価を行う際には、多数の地盤を用いた地盤応答解析の統計処理結果が用いられるケースが多くを占めている。

鉄道構造物の耐震設計等を実施する際の「手法 3」で活用される多数の地盤情報としては、全国の各地点で実施された 60 箇所の地盤調査の結果⁹⁾が用いられることが多い^{例えぼ2)}。さらに筆者らはこの 60 地点の地盤データを用いて、地盤の強度指標を提案する検討¹⁰⁾¹¹⁾や新たな地盤分類法の提案¹²⁾¹³⁾等、地盤の地震時挙動の一般的な特

性把握に関する各種取り組みを行っている。ただし当然ながらこの 60 箇所の地盤データはあるサンプルデータでしかなく、これにより得られる統計的な性質が全国の地震時地盤挙動の統計的な性質を表しているとは限らない。その一方で、最終的に設定される設計地震動の信頼性を保証するためには、選択される地盤情報やこれにより得られる地表面地震動は統計的にある程度の妥当性を有するものであることが望まれる。

こうした中で、近年我が国では多数の地盤調査結果を集約、公開する試みが積極的に行われている^{例えば 14)18)}。これらの膨大な地盤情報を用いることで、上述した地震時地盤挙動の統計的な性質を把握できると考えられる。その一方で、工学的基盤位置である地震動が設定される度に全ての地盤情報を用いた地盤応答解析を実施すると計算コストが膨大となるため、何らかの手法によってこの中から代表的な地盤を抽出し、これを標準的な地盤のデータベースとして整理しておくことが有効であると考えられる。

以上を踏まえて本検討では、全国の地盤情報を整理するとともに、地表面位置の地震動評価という観点でこれらを代表する地盤情報を抽出し、これを標準地盤データとして整備する。さらに抽出した地盤情報を用いた地盤応答解析の結果を分析することで、抽出した地盤によって地震時地盤挙動の統計的な性質を適切に表現可能であることを示すとともに、従来の 60 箇所の地盤データ⁹⁾からの優位性を確認する。ここで、今回対象とする地震動レベルは、鉄道構造物の耐震設計における L2 地震動のように、表層地盤の非線形挙動の影響が無視できない比較的大きな振幅レベルとする。また地盤情報の抽出を行うための指標としては、地盤の弾性挙動を表現する指標の一つである固有周期 T_g と、筆者らが提案している地盤の強度に関連する指標の一つである地盤上限震度 $K_i^{11)}$ の 2 つを情報として用いることとし、この 2 指標を用いた地盤分類の有効性の確認を行う。

2 章では、検討に用いる全国の地盤調査結果を概説するとともに、これらの地盤情報を用いて地盤応答解析を実施可能な解析モデルを構築する。さらにこの地盤解析モデルを用いた固有値解析、静的非線形解析¹⁹⁾を実施することで、各地盤が有する基本的な特性を把握する。続いて 3 章では、膨大な地盤調査結果の中からクラスタリング^{例えば 20)}によって類似した情報を有するグループに分類するとともに、各グループを代表する地盤情報の抽出を行う。4 章では、抽出した地盤情報を用いた地盤応答解析を実施することで、今回の地盤情報の抽出によって従来の 60 箇所の地盤データ⁹⁾を用いた場合よりも地表面位置の地震動が有する統計的な性質を適切に表現できることを示すと同時に、地表面位置の地震動を評価する際の効率化に関する議論を行う。最後に 5 章では本検討で

得られた結果をまとめる。

2. 全国を対象とした地盤情報の整理

(1) 検討に用いる地盤情報

検討に用いる地盤情報の収集、整理を行う。具体的には、地盤調査結果が公開されている情報¹⁴⁾¹⁸⁾²¹⁾に新幹線建設時の地盤調査情報²²⁾²³⁾等を加えて分析を行うこととした。検討に用いる地盤情報のうち、緯度・経度情報が揃っているものを図-1に、調査実施深度の頻度分布を図-2に示すが、本検討では約 180,000 地点の地盤調査の結果を用いることとした。

(2) 地盤応答解析モデルの構築

前節で整備した各地点の地盤調査結果の情報を用いて、地震応答解析が実施可能な解析モデルの構築を行う。ここで用いる地盤応答解析の手法としては、時間領域の逐次非線形動的解析法を念頭においているため、解析モデルとしても逐次非線形動的解析が実施可能な情報を整理する必要がある。また大量の地盤調査結果をもとに解析モデルを構築する必要があるため、目視等による個別の判断が不要となる手順を設定した。地盤の解析モデルを

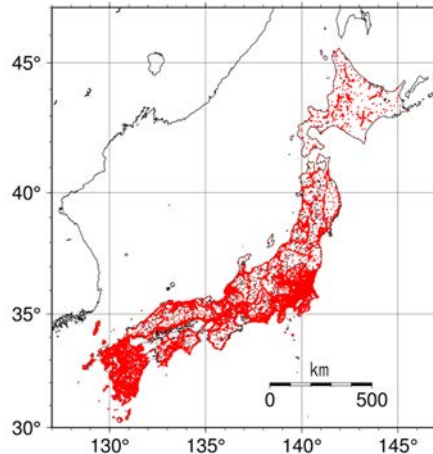


図-1 検討に用いる地盤データの調査地点
(緯度経度情報を含む地点のみ)

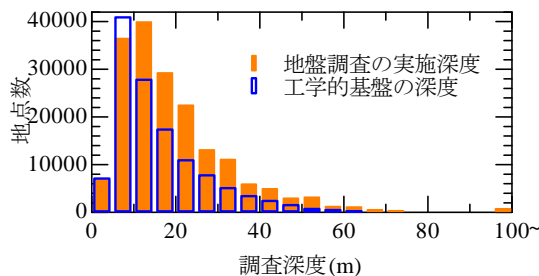


図-2 地盤の調査深度、工学的基盤深度の分布

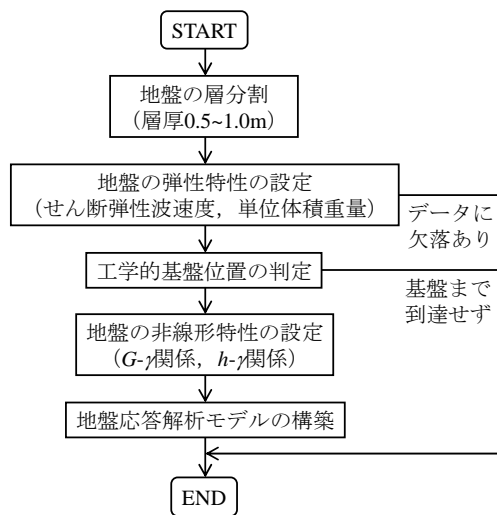


図-3 各地点の地盤応答解析モデルの構築手順

構築する手順を図-3に示す。

まず地盤を層分割するとともに、各地点の深度毎の地盤の弾性特性、具体的にはせん断弾性波速度と単位体積重量を設定する。PS 検層や密度検層、室内試験等によりこれらの情報が具体的に整理されている場合には、それをそのまま用いることとし、これが無い場合には標準貫入試験の結果と土質区分を用いて鉄道構造物の設計標準²⁾に従って推定を行った。ただし、標準貫入試験のデータが存在しない場合や、土質区分が明記されていない地点の情報は以降の検討に用いないこととした。また地盤の層分割は、解析精度を保證することと、極端に薄い層が存在することによるひずみの局所化を防ぐ観点で、0.5m 以上 1m 以下となるように配慮を行った。水位位置については、地盤調査結果に記載がある場合にはこの情報を用いるが、記載がない場合には地表に設定した。

続いて、地盤の弾性特性を用いて工学的基盤位置の判定を行う。これは、一般的な地盤応答解析は工学的基盤位置における地震動を入力として実施されることが多いためである。工学的基盤の判定は、筆者らが過去に提案した自動判定アルゴリズム²⁴⁾を用いることとした。この

判定によって、工学的基盤まで到達していないと判定されたデータ、基盤が露頭していると判定されたデータは以降の検討には用いない。工学的基盤まで到達していると判定されたデータは、これ以浅の情報を用いて地盤のモデル化を行う。ただし極端に基盤深度が浅く実務的には基盤露頭と取り扱われるような地点を除外するため、後述する地盤の固有周期の算定結果が 0.05s よりも短い地盤データも検討対象から除外した。各地盤に対して工学的基盤位置の自動判定を実施した結果の例を図-4に示すが、このうち(d), (e)はこの段階で処理を終了し、(a)-(c)の基盤以浅の情報を用いてこの後の処理を行う。図-4の結果より、基盤深度の自動判定手法によって、目視による判定と概ね同様の位置に基盤深度を設定できていることが確認できる。

最後に、地盤の非線形特性の設定を行う。非線形構成則は全て GHE-S モデル²⁵⁾を用いることとし、水圧上昇の影響は考慮しないこととした。非線形パラメータを設定する際には、弾性特性の設定時と同様に各地点の地盤調査結果として動的変形特性試験の結果が残されている場合には、その情報を用いることとした。しかしながら多くの地盤データには試験結果が存在しないため、このような地盤に対しては、過去の多数の地盤調査結果をもとにして拘束圧や土質分類に応じて提案されている標準的なパラメータ^{26), 27)}を設定した。

この手順に従って全地点の地盤調査結果を整理した結果、地盤応答解析モデルとして全 125,800 データを構築した。構築した解析モデルの深度（工学的基盤までの深度）の頻度分布も図-2に示しているが、工学的基盤の判定を行っているために極端に深い地点のデータが存在しなくなっていること、各種情報の不足によって全体的に地点数が少なくなっていることが分かる。

(3) 全国の地盤情報の基本的性質の把握

前節で構築した全地点の地盤応答解析モデルを用いて、検討に用いる地盤条件の基本的な性質を整理する。この

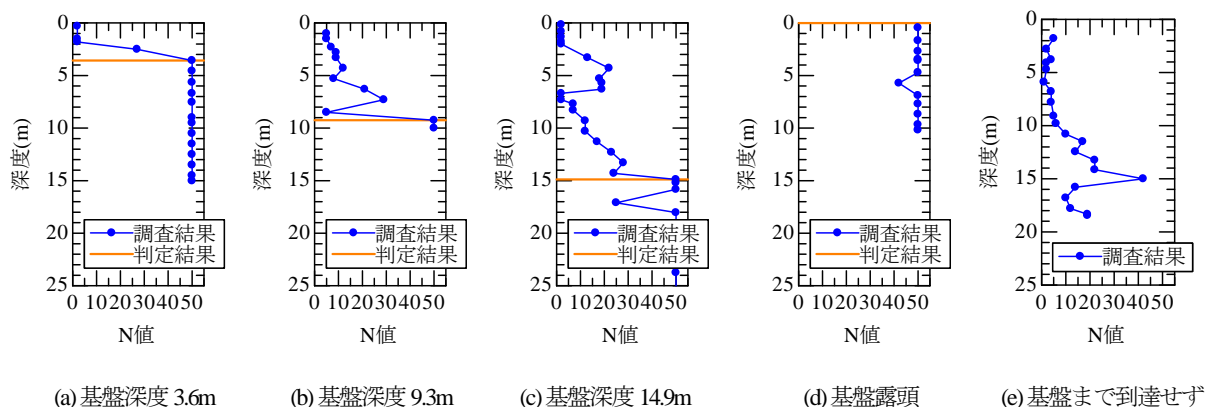


図-4 工学的基盤位置の自動判定結果の例

時には、地震時挙動を表現する際に有効であると考えられる地盤の固有周期 T_g と地盤上限震度 $K_f^{11)}$ の2つの指標を整理することとした。

このうち固有周期 T_g は、弾性挙動時の基本的な性質を表す指標であり、道路橋、鉄道構造物等の耐震設計時に設計地震動を使い分ける際などに使用されている¹²⁾。また当然のように地盤の弾性挙動を考える場合にはこの固有周期 T_g における地震増幅が大きくなるため、これを指標とした地震増幅率の評価法なども提案されている^(例えば 28, 29)。各地点の固有周期 T_g を算定する際には、いわゆる1/4波長則のような簡易評価法も存在するが、本検討では前節で構築した地盤応答解析モデルを用いた固有値解析を実施することとした。

続いて地盤上限震度 K_f は、近年筆者らが提案している指標¹¹⁾であり、表層地盤の強度と関連した指標の一つである。この地盤上限震度 K_f は、単位系が橋梁・高架橋の降伏震度 K_{fy} と同一の次元で表される。そのため、地盤の応答と構造物の応答という違いはあるものの、それぞれの強度が地震応答の上限に関連すると考えられるため、両者の結果を同じ視点で捉えることが可能であるという利点がある。またこの地盤上限震度 K_f を一定数倍することで、地盤強度比 $K_f^{10)}$ という指標を求めることもできるが、これも地盤の強度という観点で実質的には同一の指標を意味している。この地盤強度比 $K_f^{10)}$ を用いた検討の結果、前述した地盤増幅率²⁹⁾のさらなる高精度化^{30, 31)}や、大規模地震時の地盤分類の高度化^{12, 15)}等が可能であることを確認している。そのため、今回対象とす

るような大規模地震時の地盤挙動、地表面地震動を表現するための指標として、表層地盤の強度に関する地盤上限震度 K_f は有用であると考えられる。

地盤上限震度 K_f を算定する際には、各地点の地盤応答解析モデルを用いた静的非線形解析¹⁹⁾を実施し、変位の増大に伴う表層地盤の剛性低下の関係を把握する必要がある。静的非線形解析を実施する際の基本的な条件は既往の検討¹⁹⁾と同様とするが、今回は多様な地盤を含むため、最終ステップの変形量は100cmと大きく設定するとともに、これを10,000ステップに分割 ($\Delta\delta=0.01\text{cm}$) して実施した。これによって得られる剛性低下率 G/G_0 -変位 δ 関係、減衰 h -変位 δ 関係、地表面位置の刺激関数 PF -変位 δ 関係をまとめて図-5に示す。今回はケース数が膨大であるため、この図には各変位レベルにおける各指標の全結果の最大値、最小値のみを表示している。これらの結果を見ると、地盤毎の変化は大きいものの、全体的な傾向として変位が大きくなるほど地盤全体系の剛性変化を表す G/G_0 は小さくなる一方で、履歴減衰を表す h は大きくなっている。また刺激関数 PF は変位の大きさによらず1~2.5程度の範囲でばらついており、変位に対する全体的な傾向は特に見られない。続いて地盤上限震度 K_f を算定するために必要な、 $G/G_0=0.5$ となる時の変位 (これを規準変位 δ_f と定義¹⁹⁾) で各結果を正規化したものを図-6に示すが、このように処理することで、図-5で見られた地盤毎の変動が大幅に小さくなっていることが分かる。これらの図には正規化変位 δ/δ_f 毎の全地盤の平均値も記載しているが、刺激関数 PF の平均的な特

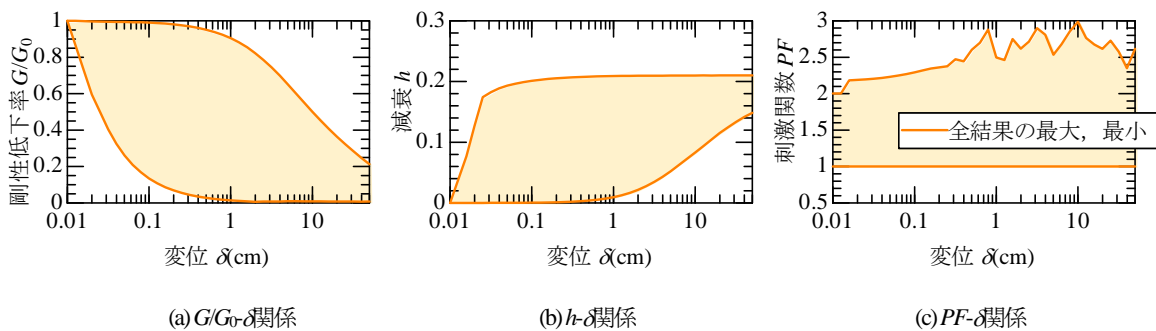


図-5 地盤の静的非線形解析結果 (全ケースの最大値, 最小値)

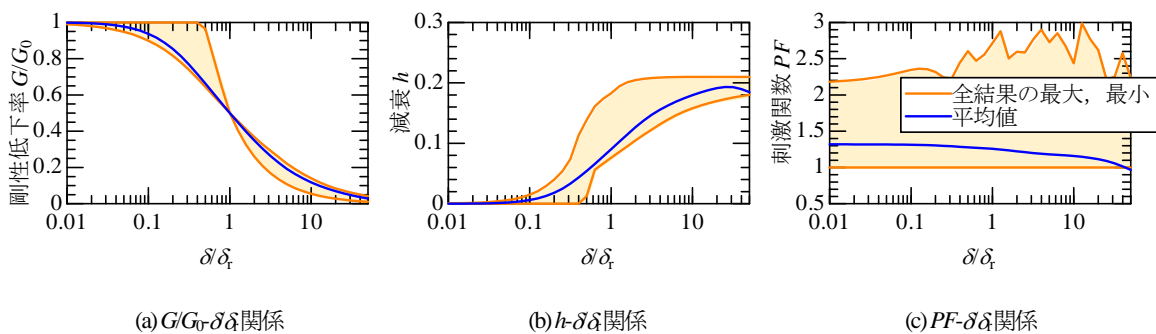


図-6 地盤の静的非線形解析結果 (規準変位 δ_f で正規化した結果)

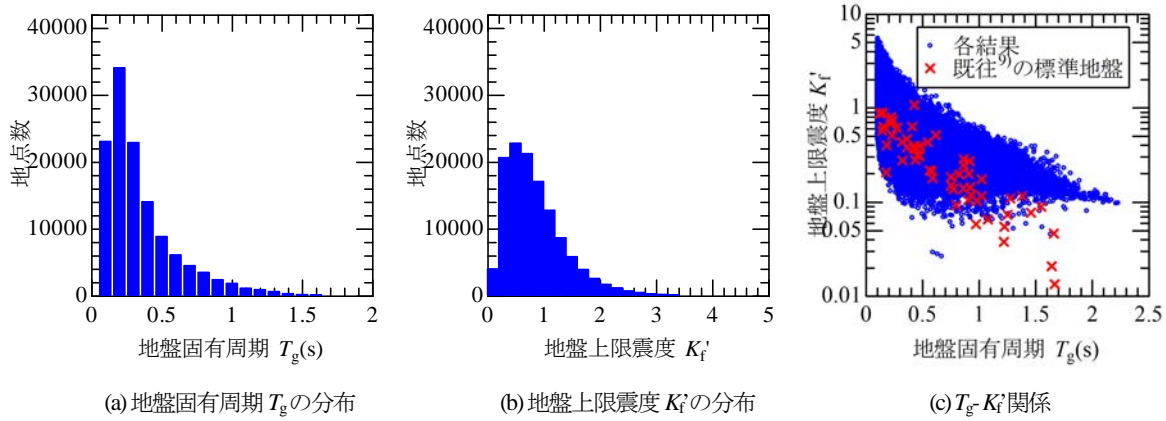


図-7 地盤固有周期 T_g 、地盤上限震度 K_f の分布

性として、変位の増大に伴って刺激関数 PF が徐々に小さくなることも確認できる。これは、ひずみレベルの比較的小さい段階においては地表から基盤までの幅広い深度に変形が分散している一方で、ひずみが大きくなるに従って限られた層に変形が集中すること起因するものであると推察される。

以上の膨大な固有値解析、静的非線形解析によって得られる固有周期 T_g 、地盤上限震度 K_f の頻度分布、各地盤の固有周期 T_g と地盤上限震度 K_f の関係を整理したものを図-7 に示す。図-7 (a), (b) を見ると T_g 、 K_f ともそれぞれの数値が大きくなるに従って全体に占める割合が小さくなっており、全国的には T_g 、 K_f が小さな地盤が相対的に多く存在していることが分かる。また、固有周期 T_g - 地盤上限震度 K_f の結果 (図-7 (c)) を見ると、全体的な傾向としては T_g が小さいほど K_f の値が大きくなっていることが分かる。これは硬質な地盤ほどより大きな力を地表に伝えることができることを示している。しかしながら同一の固有周期 T_g を有する地盤であっても K_f は大きくばらついており、弾性固有周期が同一でも各地盤の強度には差があることも確認できる。これは大規模地震時の表面地震動を簡易に表現する際の地盤特性を示す指標として、固有周期 T_g のみでは不十分であることを示唆する結果である。また図-7 (c) には、鉄道構造物の耐震設計における標準的な地盤情報として用いられることの多い 60 箇所の地盤データ⁹⁾による T_g と K_f の関係もプロットしている (以降ではこの 60 地盤を既往の標準地盤と呼ぶ)。この図より、固有周期 T_g が 0.5 秒程度までの範囲では全国の地盤データと既往の標準地盤の傾向は一致していることが確認できる。その一方で固有周期 T_g が 1 秒程度よりも長い領域では、今回構築した地盤データの方が全体的に K_f が大きくなっている。つまり、既往の標準地盤を用いて表面地震動を評価した場合には、軟弱地盤において全国の地盤よりも強度を極端に小さく評価していることになる。その結果、大規模地震時の地

表面地震動という観点からは、既往の標準地盤を用いると、地盤変位を大きく、慣性力を小さく評価してしまう可能性がある。よって、今回構築した地盤データを用いて標準地盤を見直すことが望ましいと言える。

3. 全国の地盤情報の分類

(1) 分類の方法

前章で整理を行った全 125,800 地点の地盤をクラスタリングによって分類することで、効率的な地表面地震動の評価を行う際の基本情報を整理する。この分類を行う際の指標、手法としては様々なものが考えられるが、今回は図-7 (c) で示した各地盤の固有周期 T_g と地盤上限震度 K_f を指標として用いるとともに、分類法としては比較的簡易に実施可能な k-means 法³²⁾を用いることとした。この k-means 法は、非階層型クラスタリングの一種であり、二乗ユークリッド距離を用いて各データの非類似度を判定、分類するものである²⁰⁾。この k-means 法は処理速度が遅い場合もあるが、アルゴリズムが非常に単純でありかつ効率的なデータ分類が可能であるため、地震学、地震工学、構造物の維持管理等の分野においても様々な検討が実施されている^{例えば 33), 38)}。この k-means 法によって各地盤データの距離を計算する際の情報として、固有周期 T_g と地盤上限震度 K_f の 2 指標を用いる。また本検討におけるクラスター数 n は、 $n=10\sim 2000$ まで幅広く設定することとし、各クラスターの重心に最も近い地盤を分類ごとの代表地盤として選択する。この複数設定したクラスター数の中から、より少ない地盤数で地表面地震動の特性を適切に表現するものを最終的な標準地盤データとして選択する。

(2) 地盤情報の分類結果

地盤分類を実施した結果の一例として、クラスター数

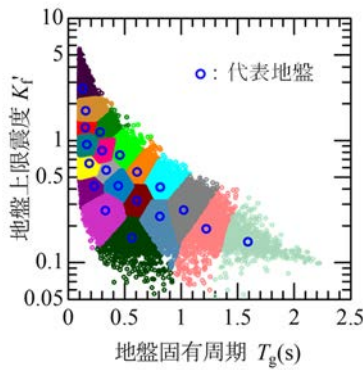
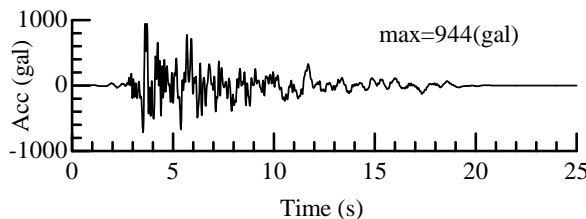


図-8 地盤分類の実施例 ($n=20$ の場合)

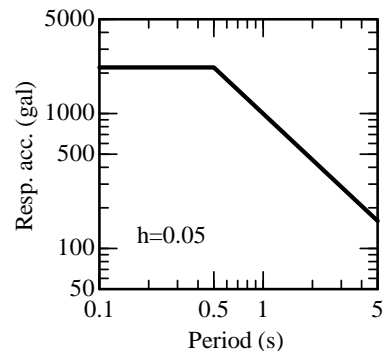
$n=20$ とした場合の結果を図-8に示す。同一色で表示したデータが同一の地盤分類として評価されている。また青丸で表示したデータが各分類で代表として抽出された地盤である。この図より、k-means 法によって固有周期 T_g と地盤上限震度 K_f を指標とした分類が適切に実施されていることが分かる。また図-7からも分かる通り、構築した地盤データベースは固有周期 T_g が短いほど数が多くなっているとともに地盤上限震度 K_f の変動範囲も広い。結果として T_g が 1.5 秒程度以上の範囲では、 K_f の大小に関係なく全ての地盤が同一の区分に分類されている。

また、各分類にふり分けられた地盤数を比較すると、 $n=20$ の条件下では 730 地点~13,043 地点の範囲で大きくばらついている。そのため、これら代表地盤を用いて地盤挙動の確率特性を考える場合には、この地盤数の違いを重みとして考慮することも重要であると言える。

4. 分類した地盤情報を用いた地表面地震動の効率的な評価



(a) 時刻歴加速度波形



(b) 弾性加速度応答スペクトル

図-9 基盤位置の入力地震動

(1) 解析条件、整理の条件

前章で構築した全国の地盤応答解析モデルを使用した非線形動的解析を網羅的に実施することで、各地盤の地表面地震動を算定するとともに、この地表面地震動の確率特性を把握する。これと同様の作業を前章で分類を行った各クラスター数 n における代表地盤において実施することで、全国の結果を効率的かつ適切に表現可能な代表地盤を抽出し、この地盤を標準的な地盤データベースとして整備する。

ここではまず、地盤応答解析の条件について整理を行う。まず解析手法は、時間領域の逐次非線形動的解析法を用いる。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 値の提案式³⁹⁾に可能な限り一致するようなレーリー減衰を地盤毎に設定した。入力地震動は、鉄道構造物の耐震設計²⁾で一般的に使用されている標準 L2 地震動スペクトル II (G1 地盤) (図-9) を露頭基盤波として使用する。また基盤の条件としては、工学的基盤相当 ($V_s=400\text{m/s}$, $\gamma=20\text{kN/m}^3$) が半無限に連続していると考え、各地盤モデル下端にダッシュポットを設けた。

以上の条件に基づいて、全 125,800 ケースの地盤応答解析を実施し、各地盤の地表面地震動を算出した。この地表面地震動を地盤の特性毎に区分することで、統計的な性質を把握するとともに、前章で抽出した代表地盤、既往の標準地盤により得られる統計的な性質との比較を行う。地盤の区分は、現在の鉄道構造物の耐震設計における地盤種別²⁾を使用することとした。具体的には、地盤の固有周期を指標として、図-10、表-1 に示したように岩盤 (G0 地盤)、基盤 (G1 地盤) 以外の 6 種類 (G2 地盤~G7 地盤) に区分する。

区分毎の地表面地震動の特性を表現する地震動指標としては、地上構造物の地震時挙動に影響が大きいと考えられる地表面位置の最大加速度 $PGA(\text{gal})$ 、表層地盤の相対変位 $D(\text{cm})$ 、周期 $t_1(\text{s})$ から $t_2(\text{s})$ の弾性加速度応答スペク

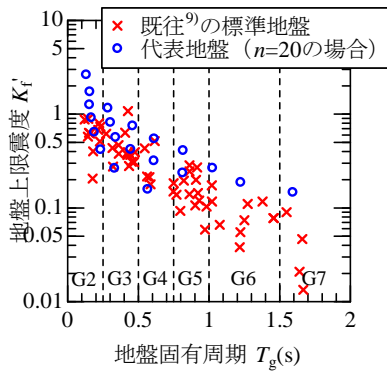


図-10 本検討で実施する地盤区分 (G2地盤～G7地盤)

表-1 耐震設計における地盤区分²⁾ (G2地盤～G7地盤)

地盤種別	固有周期 T_g (s)	備考
G2地盤	~0.25	洪積地盤など
G3地盤	0.25~0.5	普通地盤
G4地盤	0.5~0.75	普通～軟弱地盤
G5地盤	0.75~1.0	軟弱地盤
G6地盤	1.0~1.5	軟弱地盤
G7地盤	1.5~	極めて軟弱な地盤

トル ($h=0.05$) の平均値 $RA(h, b)$ を用いる。応答スペクトルを平均する周期は、 $(h, b)=(0.1, 0.2), (0.2, 0.5), (0.5, 1.0), (1.0, 2.0), (2.0, 5.0)$ の5区間とした。これら各指標に対して、区分ごとの各指標の平均値と、設計で用いる場合の一つの目安である非超過確率 90% の値⁴⁰⁾ を整理するとともに、次式によって全地盤データを用いた場合とクラスター数 n における代表地盤データを用いた場合、既往の 60 個の標準地盤⁹⁾ を用いた場合の結果を比較する。

$$\varepsilon(x)_{Gi}^{conv} = \left| \log(x_{Gi}^{conv}) - \log(x_{Gi}^{all}) \right| \quad (1)$$

$$\varepsilon(x)_{Gi}^{prop(n)} = \left| \log(x_{Gi}^{prop(n)}) - \log(x_{Gi}^{all}) \right| \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon(x)$: 地震動指標 x の誤差 ($x=PGA, D, RA(0.1, 0.2), RA(0.2, 0.5), RA(0.5, 1.0), RA(1.0, 2.0), RA(2.0, 5.0)$) , 下付きの G_i : 地盤種別 ($i=2\sim7$) , 上付きの all : 本検討で構築した全地盤データを用いた結果, $conv$: 既往の 60 個の標準地盤データを用いた結果, $prop(n)$: 3 章で抽出した代表地盤データを用いた結果 (n はクラスター数で $n=10\sim2000$) である。なお、クラスター数 $n=10$ のケースでは G7 地盤 ($T_g > 1.5s$) に該当する地盤が存在しなかったため、この場合のみ比較を行う地盤種別を G2 地盤～G6 地盤の 5 区分としている。また k-means 法による代表地盤を用いて得られる地震動指標の平均値、標準偏差を算定する際には、代表地盤が所属するクラスターに含まれる地盤モデルの個数を重みとして取り扱うこととした。

(2) 地表面位置の地震動評価結果

前節で整理を行った解析条件に従って地表面地震動を

算出するとともに、式(1)、式(2)に従って全地盤を用いた場合と既往の 60 個の標準地盤⁹⁾、今回抽出を行った代表地盤の結果を比較した。最終的に得られた全地盤との誤差 ε を評価した結果をまとめて図-11 (平均値)、図-12 (非超過確率 90%) に示す。

まず地盤種別毎の平均値の誤差をまとめた図-11を見ると、指標毎、地盤種別毎に多少の変動は見られるものの、提案手法による全地盤種別の平均値の結果 (青実線) は、全体的な傾向として右下がりとなっている。これは、クラスター数 n を多くすることで、全地盤を用いた地表面地震動の平均的な特性をより適切に表現できることを示している。また既往の標準 60 地盤を用いた結果 (橙点線) と比較すると、相対変位 D を除くすべての指標においてクラスター数 $n=20$ において既に既往の結果よりも誤差が小さくなっている。また相対変位 D については、 $n \geq 50$ において既往の結果よりも誤差が小さくなる。そのため今回の手法によって代表地盤を抽出し、これを用いた地盤応答解析を実施することで、従来の標準地盤で用いている地盤数である 60 地盤よりも少ない数で全結果の平均的な特性を表現可能であることが分かる。

続いて、各指標の非超過確率 90% の誤差をまとめた図-12の結果についても、基本的には図-11の結果と同様の傾向となっている。ただし、最大加速度 PGA や弾性加速度応答 $RA(0.2, 0.5)$ などのように、クラスター数が 10~20 程度では既往の標準 60 地盤を用いた場合よりも誤差が大きくなる指標も散見される。これは図-11 から分かるように、既往の標準地盤を用いた場合には平均的な特性の誤差が大きいのもの、これと同様に標準偏差も全地盤を用いた結果とは異なる結果となり、これらの結果を組み合わせた非超過確率 90% の指標のみが適切な結果となったものと考えられる。そのためこの結果のみから、既往の標準 60 地盤による地表面地震動の評価が有効であるという結論には結びつかない。またクラスター数 $n=50$ の地盤情報を用いることで、全ての地震動指標において既往の標準地盤よりも誤差が小さくなっていることが分かる。

以上の結果より、今回採用した地盤特性を表現する指標 (固有周期 T_g 、地盤上限震度 K_f) と分類手法によって、各クラスターを代表する地盤を抽出することで、大規模地震時の全国を対象とした地表面地震動の分布特性を効率的かつ適切に表現できることが確認され、今回の地盤抽出手順の妥当性が確認できたと言える。

(3) 標準地盤データの整備

前節の検討より、提案手法によって抽出した地盤データを用いて地表面地震動を算出することで、地震動指標の確率特性として既往の 60 個の標準地盤を用いた場合と比較して、全国の地盤データを用いた地表面地震動の

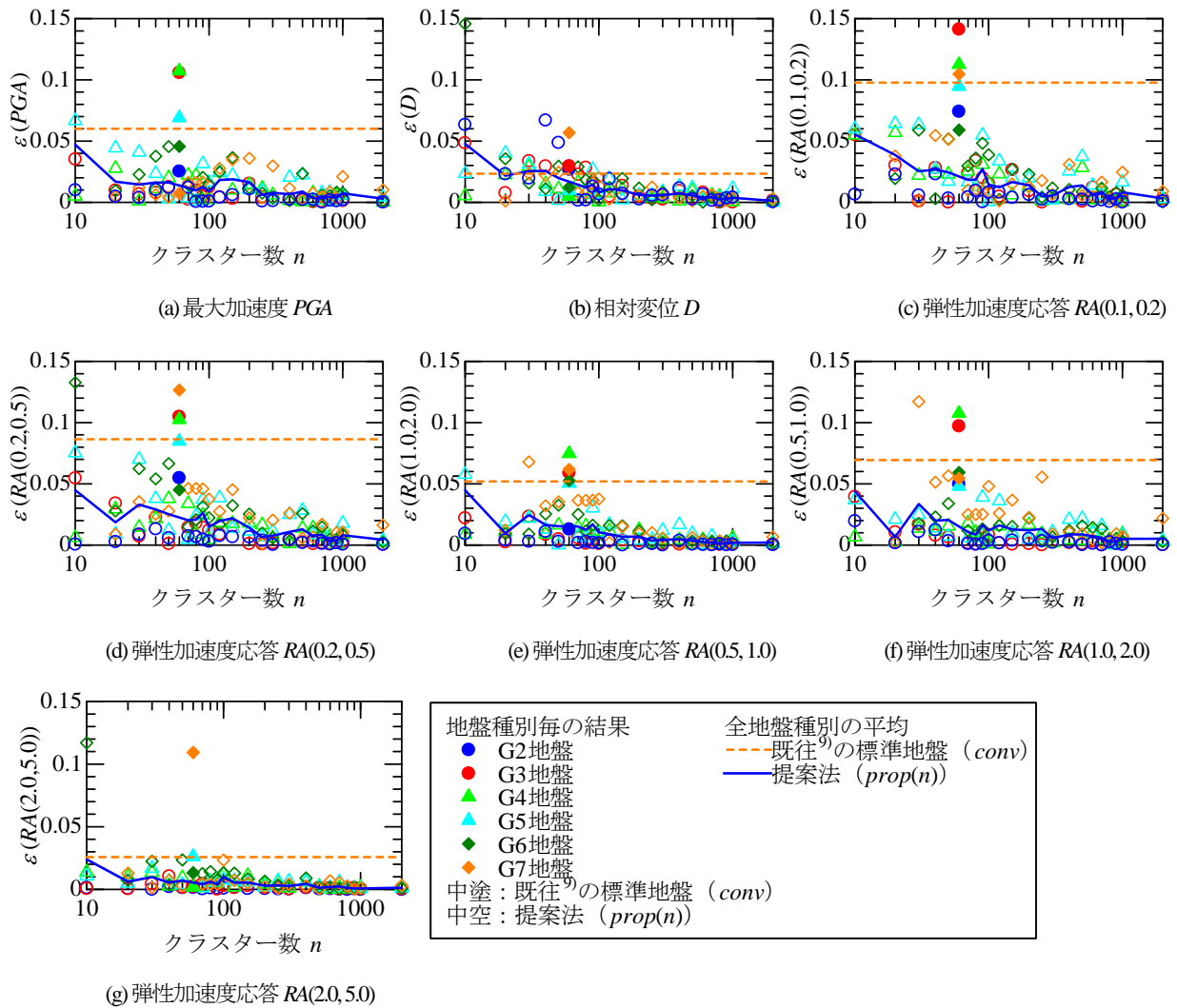


図-11 各指標の誤差 $\epsilon(x)$ の評価結果 (平均値)

特性をより適切に表現可能であることを確認した。ただし当然のように、クラスター数 n が大きくなるほど全地盤の結果との誤差が小さくなるため、何かしらの指標を用いて最終的に用いる標準地盤の数を設定する必要がある。この時に適切なクラスター数を探索する手法としてエルボー法やシルエット分析、AIC に基づく分析法等が存在するが、今回は既往の標準地盤である 60 地盤よりも少なく、かつ今回評価を行った全ての指標 (図-11, 図-12) において既往の結果よりも誤差が小さくなる $n=50$ を標準地盤のデータ数として選択した。

この 50 地盤の固有周期 T_g —地盤上限震度 K_f 関係を図-13 に示すが、当然ながら今回構築した全地盤データの分布を適切に再現した分布となっている。特に地盤の固有周期 T_g が 1 秒よりも長い領域では、既往の標準 60 地盤よりも全ての地盤において地盤上限震度 K_f が大きなデータとなっており、固有周期 T_g —地盤上限震度 K_f という観点では従来の 60 地盤よりも全国の地盤情報をより適切に表現した結果であることが分かる。

本検討によって抽出した 50 地盤 (以降ではこれを提

案手法による標準地盤と呼ぶ) を用いて得られる地表面地震動のうち、最大加速度 PGA 、最大変位 D の平均値、非超過確率 90% の値を地盤種別ごとに整理した結果を図-14 に示す。この図には全地盤を用いた結果、既往の標準 60 地盤⁹⁾を用いた結果も示している。全体的な傾向としては、地盤種別が大きくなるほど最大加速度 PGA は小さく、最大変位 D は大きくなっており、これは地盤が軟弱なほど非線形挙動の影響が顕著になる傾向を示したものである。また提案手法に基づく 50 地盤の結果では、 PGA, D の両指標とも全地盤による傾向を適切に表現できていることが分かる。その一方で既往の 60 地盤を用いた場合には、G3~G5 地盤付近で最大加速度 PGA の平均値、非超過確率 90% の値とも相対的に大きな値となっている。また G7 地盤の地盤変位 D も既往の 60 地盤の結果のみ大きめの値となっているが、これは図-13 から分かる通り、既往の 60 地盤では相対的に地盤上限震度 K_f が小さな地盤が多く含まれているために、地盤の非線形挙動の影響がより顕著に表れたことによると考えられる。そのため全国の地盤情報を用いた最大加速度 PGA 、最大

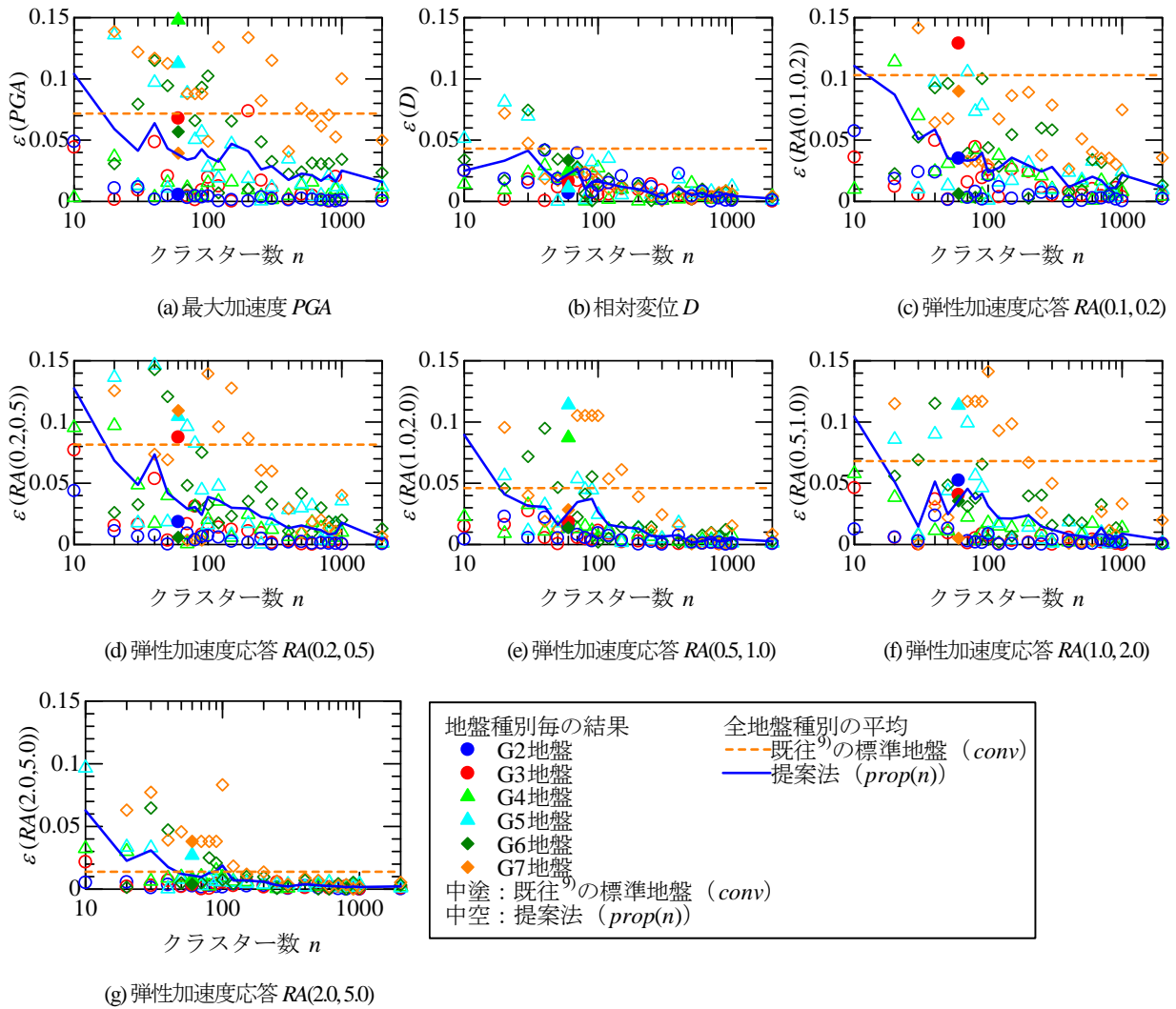


図-12 各指標の誤差 $\varepsilon(x)$ の評価結果（非超過確率90%）

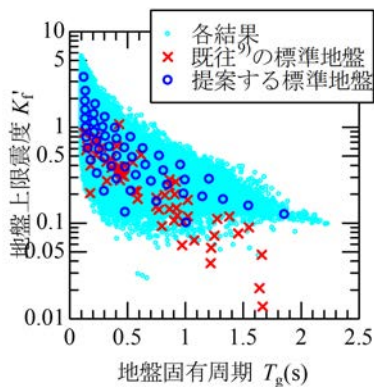


図-13 抽出した50地盤の T_g - K_i 関係

変位 D を適切に表現するためには、従来の 60 地盤を用いた場合よりも、今回抽出した 50 地盤を用いた方が適切であると言える。

続いて、各地盤種別における弾性加速度応答スペクトル RA の平均値、非超過確率 90% を評価した結果を図-15（提案手法による 50 地盤）、図-16（既往の 60 地盤）に

示す。なおこれらの図には全地盤データを用いた結果も示しているが、これを見ても提案手法による 50 地盤を用いた方が全地盤の結果を良好に再現できていることが分かる。例えば提案手法による結果は G2~G5 地盤の間では全結果の平均値、非超過確率 90% の応答をほぼ再現できている。これに対して既往の 60 地盤を用いた場合には、全体的に大きな応答となっている。また G7 地盤においては、既往の 60 地盤では全体的な応答が小さくなっているが、これは PGA 、 D の考察においても述べた通り、既往の 60 地盤では全体的な傾向として地盤上限震度 K_i が小さな地盤となっているためである。その一方で、提案手法による G7 地盤には 2 か所のみが抽出されたにもかかわらず、全結果の傾向をより適切に表現できていることが分かる。

以上より、今回抽出を行った 50 地盤によって地表面地震動を算定し、この地震動群に基づく統計処理を行うことで、全国の地盤データを用いた地表面地震動の分布を適切に表現できることが確認された。そのため、ある

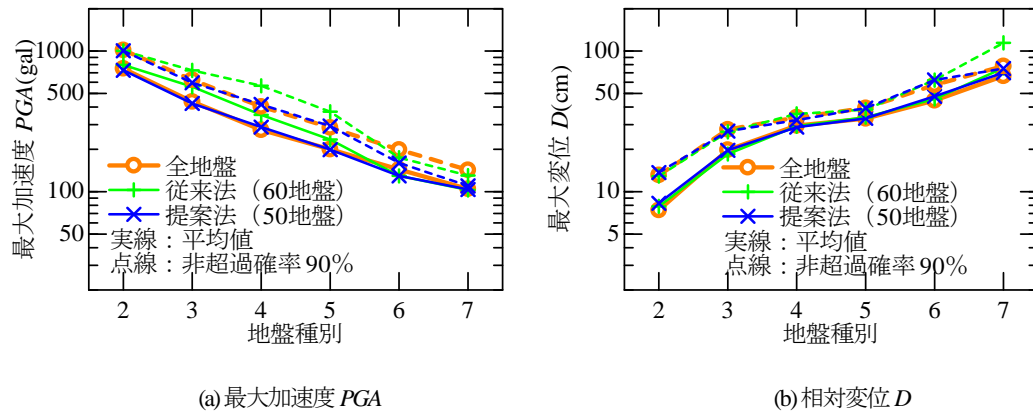


図-14 地表面地震動の比較結果（最大加速度，最大変位）

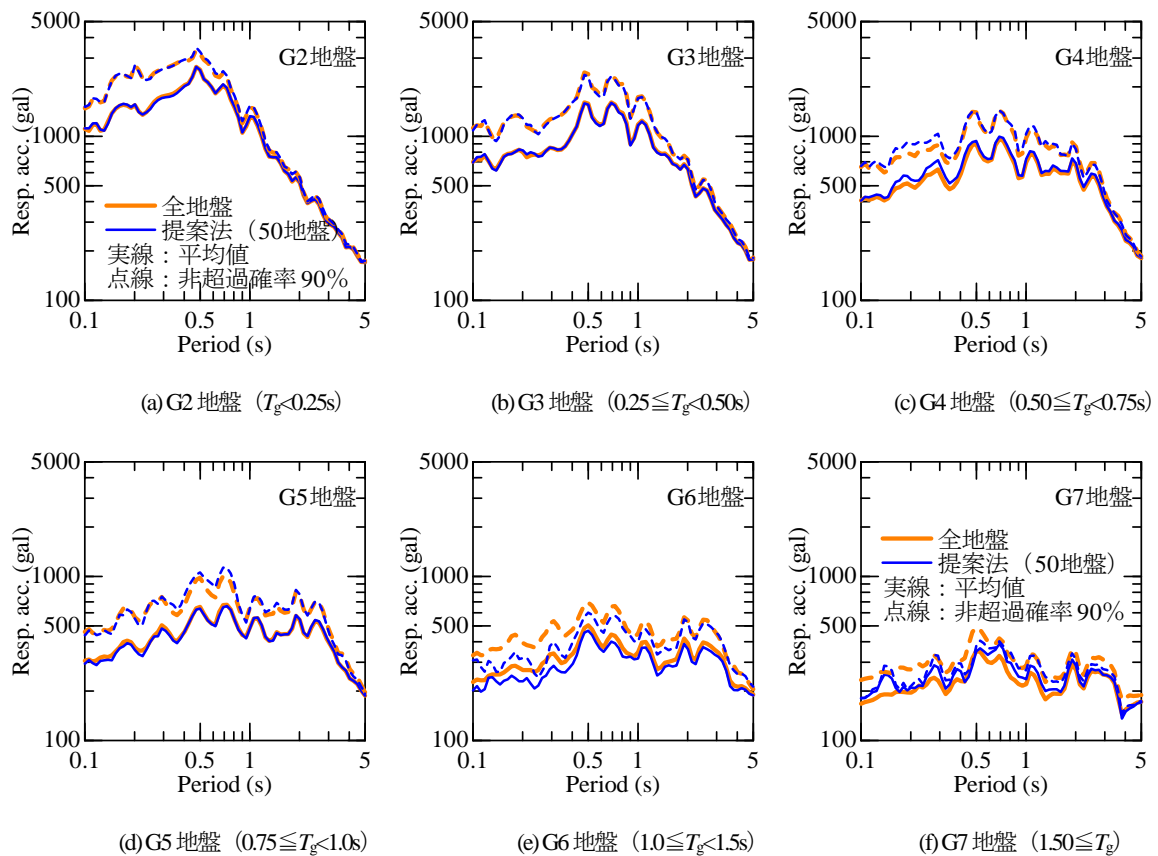


図-15 提案手法（50地盤）による地表面地震動の弾性加速度応答スペクトル

基礎地震動を固定した場合の地盤種別毎の地表面設計地震動を選定する場合等においては、今回の手法に基づく結果を用いることで、既往の60地盤を用いた場合よりも検討ケース数を合理化した中でより適切な設計地震動の評価が可能となる。

(4) 全国の地盤情報データベースを用いた地震応答解析の効率化

前節までの検討では、地表面地震動の確率分布を適切に表現可能な標準地盤データを構築することを主眼にお

いて整理を行ってきた。この中で、大規模地震時の地表面位置の地震動を表現するための地盤特性を表す指標として、固有周期 T_g 、地盤上限震度 K_f を用いることが有効であることも確認している。そのため同一の固有周期 T_g 、地盤上限震度 K_f を有する地盤であれば、大規模地震時の地表面地震動は類似する可能性があり、この性質と今回構築した全国の地盤応答解析モデルを活用することで、各地点での地盤応答解析モデルを新たに構築せずに適切な地表面地震動を推定可能となることも期待される。本節ではこれに関する基礎的な検討を行う。

ここでは図-17、表-2、図-18に示したような5つの地盤を抽出する。このうち地盤Aが主に着目する地盤であり、ある基盤地震動が得られている状態において、この地盤Aに対する地表面地震動を把握することを目標とする。ただし地盤A箇所における固有周期 T_g 、地盤上限震度 K_f は把握しているものの、地盤の応答解析が実施可能な解析モデルは所有していないと仮定する。これに対して地盤B-Fは、地盤Aと固有周期 T_g や地盤上限震度 K_f が概ね同一の特性を有する地盤であり、これが全国の地盤情報データベースに登録されていると考える。特

に地盤Aと地盤Bは、地層構成や基盤深度が異なるものの、 T_g, K_f ともに非常に類似していることが分かる。

この地盤A-Eの5つの地盤データを用いて地盤応答解析を実施し、地表面地震動を算出、比較する。この時の解析条件、入力地震動等は全て前節までの検討と同様とした。これによって得られた地表面地震動の絶対加速度波形を図-19に、相対変位波形を図-20に、弾性加速度応答スペクトルを図-21に示す。なお時刻歴加速度、変位波形の図は、地盤Aによる地表面地震動を基準として、地盤B-Eによる地表面地震動をそれぞれ比較している。

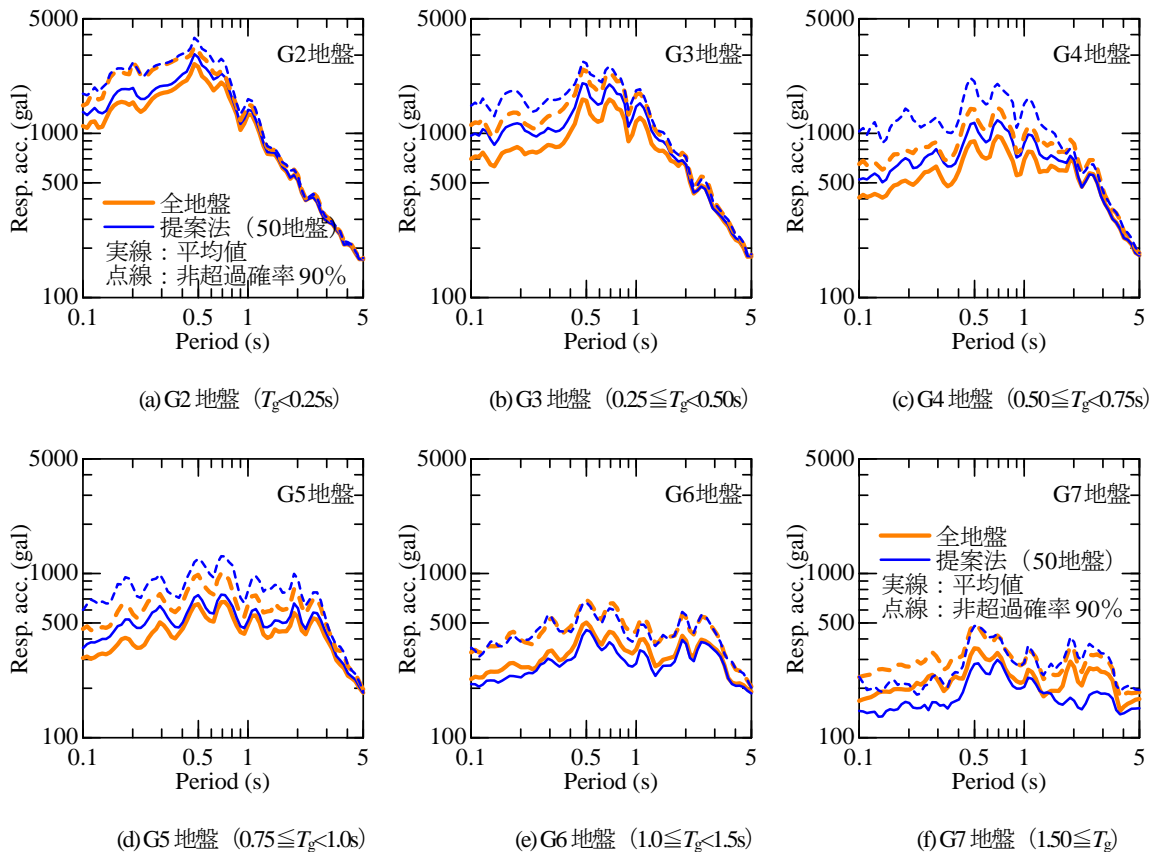


図-16 従来手法 (60地盤) による地表面地震動の弾性加速度応答スペクトル

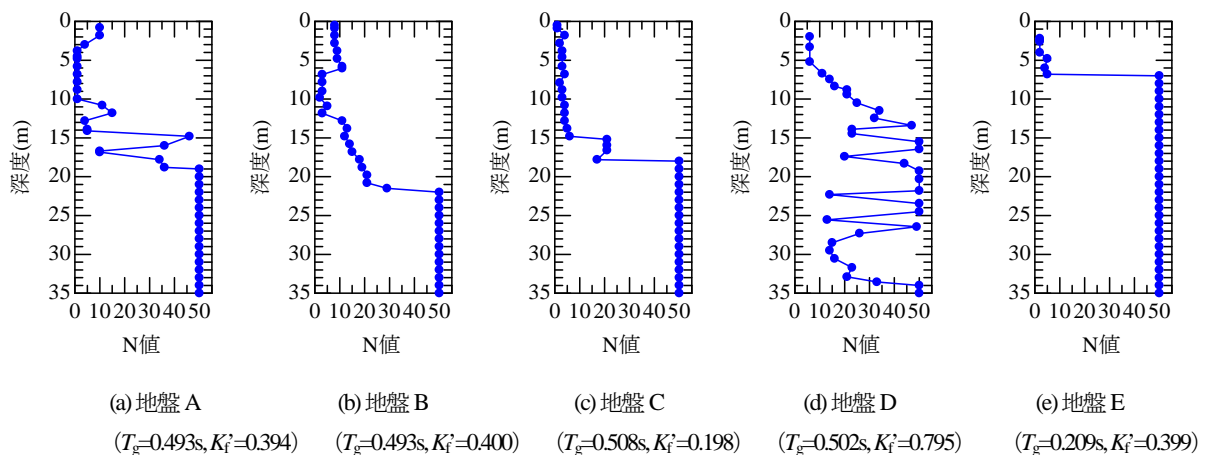


図-17 抽出した5地盤のN値分布

表-2 抽出した5地盤の T_g, K_f の整理

名称	固有周期 T_g (s)	地盤上限震度 K_f	備考 (地盤 A との関係)
地盤 A	0.493	0.394	基準
地盤 B	0.493	0.400	T_g, K_f とも同等
地盤 C	0.508	0.198	T_g は同等, K_f は小
地盤 D	0.502	0.795	T_g は同等, K_f は大
地盤 E	0.209	0.399	T_g は小, K_f は同等

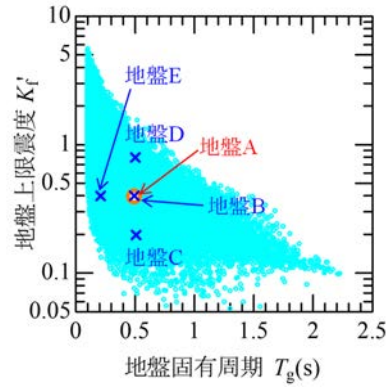
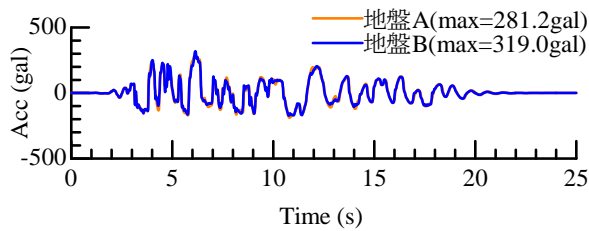
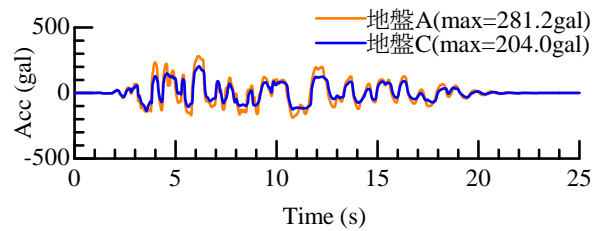


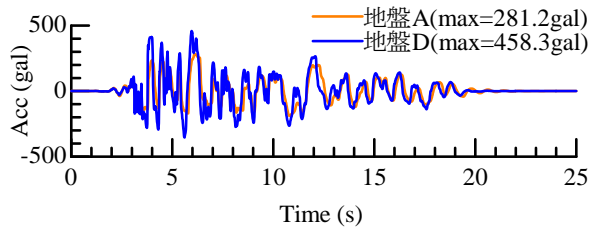
図-18 抽出した5地盤の T_g-K_f 関係



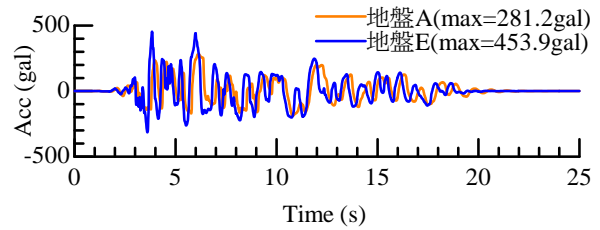
(a) 地盤 B ($T_g=0.493s, K_f=0.400$)



(b) 地盤 C ($T_g=0.508s, K_f=0.198$)

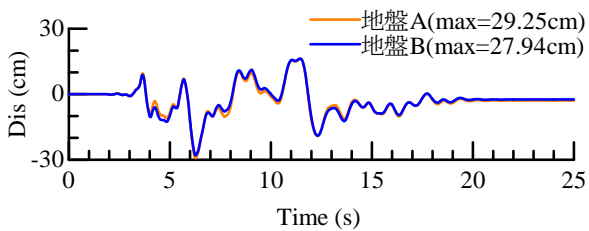


(c) 地盤 D ($T_g=0.502s, K_f=0.795$)

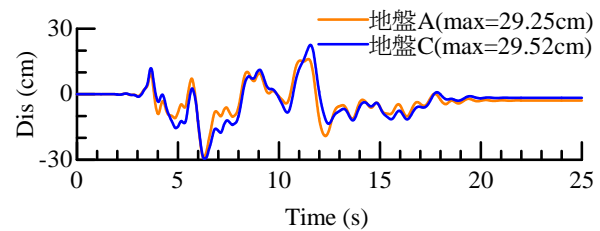


(d) 地盤 E ($T_g=0.209s, K_f=0.399$)

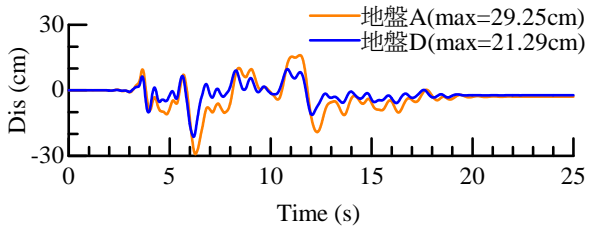
図-19 地表面位置の絶対加速度波形の比較



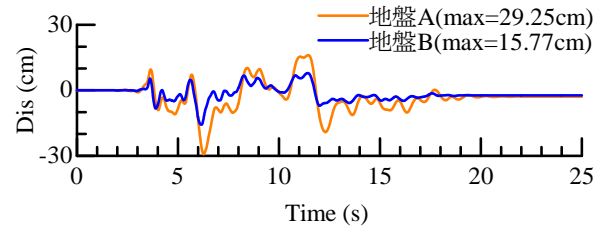
(a) 地盤 B ($T_g=0.493s, K_f=0.400$)



(b) 地盤 C ($T_g=0.508s, K_f=0.198$)



(c) 地盤 D ($T_g=0.502s, K_f=0.795$)



(d) 地盤 E ($T_g=0.209s, K_f=0.399$)

図-20 地表面位置の相対変位波形の比較

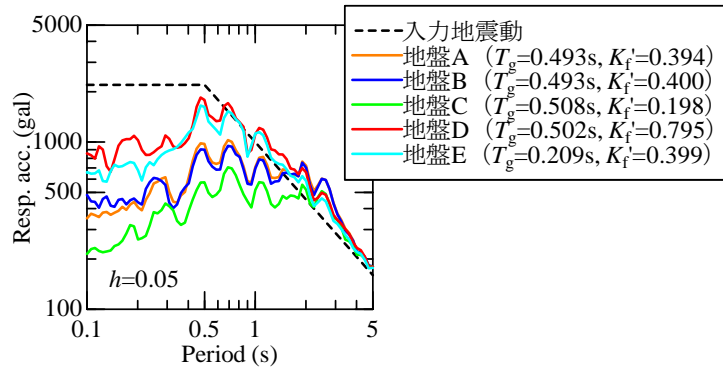


図-21 地表面位置の弾性加速度応答スペクトルの比較

まず地盤 B による地表面地震動 (各図(a)) は、地盤 A の結果と良好に一致している。これは図-19 の加速度波形だけでなく、図-20 の変位波形、図-21 の弾性加速度応答スペクトル全てに共通している。そのため上述したように、地盤固有周期 T_g と地盤上限震度 K_f' が類似している地盤の地表面地震動はほぼ同一となっていることが確認できる。

これに対して地盤 C は、基準とした地盤 A と固有周期 T_g はほぼ同一である一方で、地盤上限震度 K_f' が小さくなっている。この地盤 C の絶対加速度波形 (図-19 (b)) の位相は地盤 A と概ね同一である一方で、加速度振幅レベルは地盤 A よりも全体的に小さくなっている。その結果、図-21 の加速度応答スペクトルも全体的に応答レベルが小さい。これは、地盤全体系としての強度が地盤 A よりも地盤 C の方が小さいため、地盤の非線形挙動の影響が顕著になっているものと考えられる。

この地盤 C とは逆に、周期 T_g が同一で強度の大きな地盤 D では、加速度振幅 (図-19 (c)) や応答加速度が全体的に大きくなっていることが分かる。また地盤 E は、地盤 A と比較して固有周期 T_g が短く、地盤上限震度 K_f' が同程度の特性を有している。この地盤 E は固有周期が異なるため地表面地震動の位相特性が異なっているが、弾性加速度応答スペクトルを見ると地盤 D と概ね同程度の応答を示している。

以上のように、大規模地震時の地表面地震動を適切に表現するための地盤の指標としては固有周期 T_g のみでは不十分であり、今回使用したような表層地盤の強度に関する指標も重要であることが分かる。さらに今回示した地盤 A と地盤 B のように T_g , K_f' がほぼ同一の地盤では地表面地震動が良好に一致する。そのため例えば、ある箇所の地盤の T_g と K_f' が把握できている場合には、当該箇所の地盤応答解析のモデルを一から作成することなく、2章で構築した全国の地盤データから T_g と K_f' の類似した地盤の応答解析モデルを抽出し、これを代用することも考えられる。

この時、対象地点の地盤の指標 (T_g , K_f') を適切に推定する必要があるが、まず地盤固有周期 T_g についてはボーリング情報から算出する方法や、常時微動観測から簡易に推定する方法も存在する。一方で、地盤全体系の強度 K_f' を算定するためには、現時点ではボーリング情報が必要であるが、既往の検討¹⁰⁾において地盤の重量と土質区分のみから比較的簡易に推定する手法も提案しており、この手法によって詳細な計算を省略した算定も可能である。そのため、地震動を評価したい地点において T_g と K_f' を簡易に推定するとともに、これと類似する地盤をデータベースから抽出し、この地盤モデルを用いた地盤応答解析を実施することで、解析モデル作成の手間を省力化した上で、適切な地表面地震動の推定も期待される。

5. まとめ

本検討では、地表面位置の標準設計地震動を評価するという観点で、標準地盤データの整備に関する検討を行った。具体的には、全国の地盤調査結果を統一的に整理することで多数の地盤応答解析モデルを構築するとともに、各地盤の固有周期 T_g と地盤上限震度 K_f' を算定した。さらに、この T_g と K_f' を指標として k-means 法によって地盤情報を分類するとともに、各分類を代表する地盤を抽出した。この地盤を用いて地表面地震動を算定するとともに地盤分類ごとの地表面地震動の特性を評価することで、全国の膨大な地盤情報を用いた地表面地震動の確率分布を適切かつ効率的に表現可能であることを確認した。

そのため、工学的基盤位置の地震動が統一的に設定された場合には、今回選択した 50 個の地盤情報を用いて地盤挙動を算定するとともに地表面地震動の確率分布を評価し、これをもとに地表面位置の設計地震動を設定することで、全国の地盤情報を用いた地表面地震動の確率分布を評価した結果を良好に表現可能である。以上より、

今回選択した地盤応答解析モデルのデータは、設計地震動を設定する際の有効な地盤情報として活用できると考えられる。

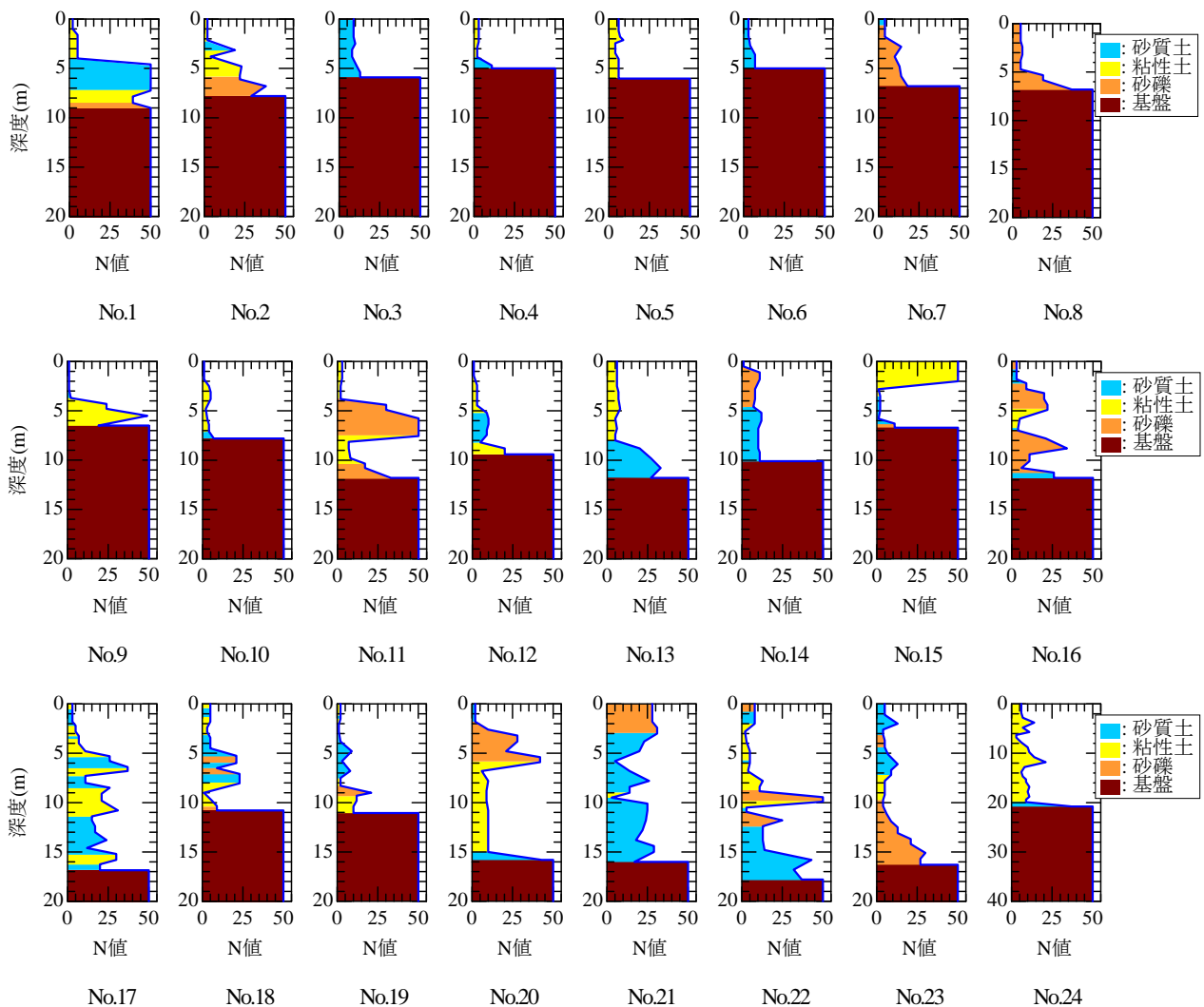
また今回構築した膨大な地盤応答解析データを用いた考察の結果、 T_g と K_f が同一の地盤では地表面地震動が良好に一致することも確認した。そのため地表面地震動を評価したい地点と同様の T_g と K_f を有する地盤の動的解析モデルデータを今回構築した全国の地盤データから抽出し、これを用いた地盤応答解析を行うことで、解析モデル構築を省力化した上で適切な地表面地震動の評価が可能であることを示した。

今後は今回構築した 50 地盤の情報を活用することで、鉄道構造物の耐震設計に用いる地表面設計地震動等の見直しや地盤分類の高度化等を実施する予定である。これと共に、今回得られた知見では T_g , K_f を適切に把握する重要性が確認されたが、これら各指標の簡易かつ適切な推定手法についても検討を行う必要がある。また本検討における地盤応答解析の効率化 (4. (4)) に関して、ある 1

地盤、1 地震動を対象としたものであり、この手法が有する信頼性等を定量的に把握するためには、より多くの地盤、地震動を対象として検討を実施する必要がある。これらについては今後さらに検討を行う予定である。

付録

本検討において最終的に抽出した 50 個の標準地盤データの N 値分布を付図-1 (地盤 No.1~No.24)、付図-2 (地盤 No.25~No.50) に示す。また各地盤の一次固有周期 T_g (s)、地盤上限震度 K_f 、各地盤の相対度数をまとめて付表-1 に示す。なお付図-1、付図-2 に示す N 値分布は、地盤応答解析を実施するための解析モデル上の N 値を示しているため、基盤以深の N 値を全て 50 として表示している。また付表-1 における相対度数は、各地盤が抽出された分類に含まれる地盤数を全地盤数 (125,800 地盤) で正規化して表示したものであり、これを地盤種別毎の地表面応答の確率分布を算定する際に使用することで、

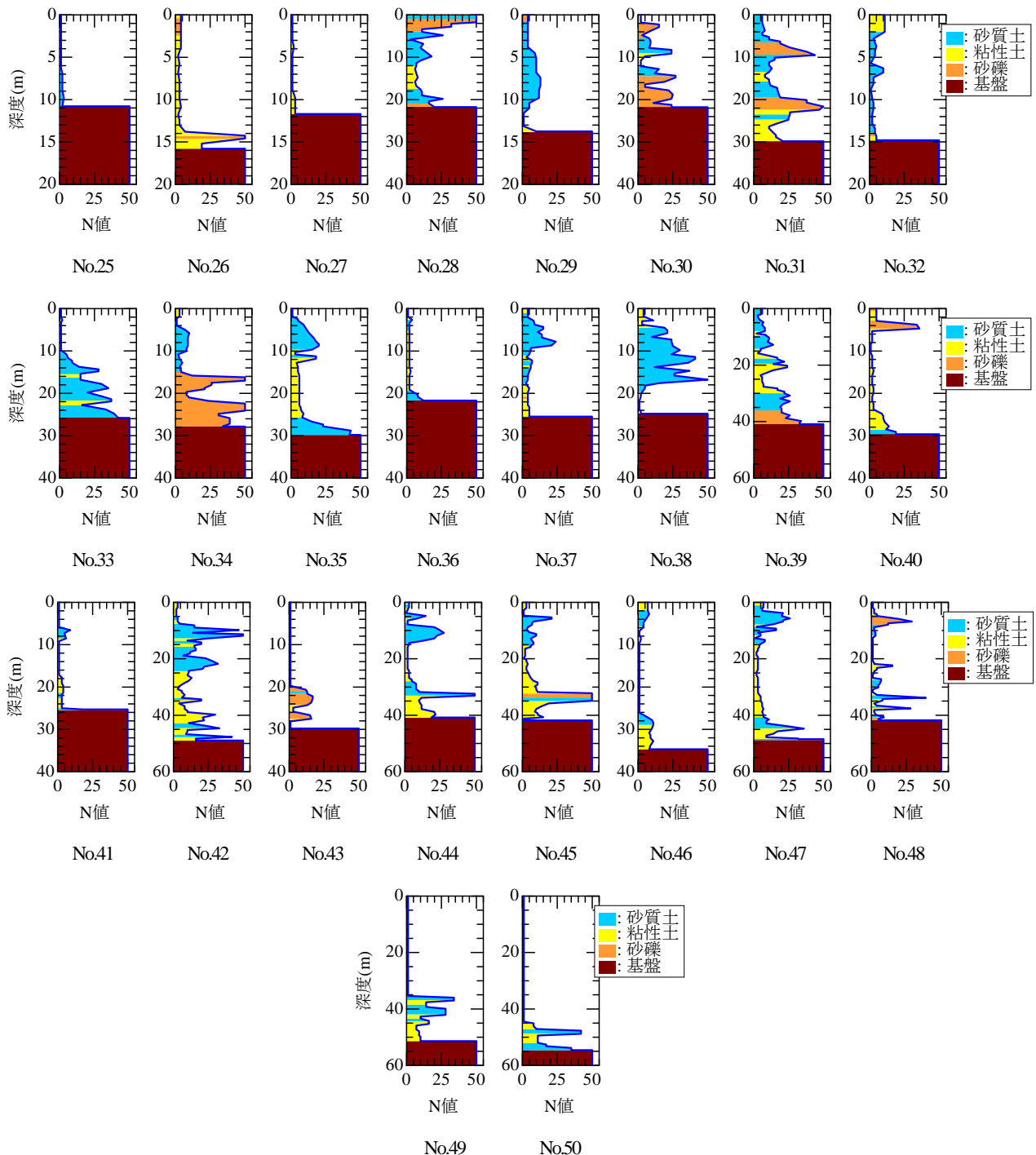


付図-1 最終的に選定した標準地盤データベースの N 値分布 (その 1 : No.1~24)

より適切な地表面地震動の確率分布の評価が期待される。

REFERENCES

- 1) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），2012．[Japan Road Association: Specifications for Highway Bridges Part V Seismic Design, 2012.]
- 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），丸善出版，2012．[Railway Technical Research Institute: Design standards for railway structures and commentary (Seismic Design), Maruzen, 2012.]
- 3) 高圧ガス保安協会：高圧ガス設備等耐震設計指針，2012．
- 4) (公社)日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説，2014．
- 5) (公社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018．
- 6) 西恭彦，朝長光，石川太郎，青柳広樹，田中浩平，神澤拓，坂井公俊：地震規模・震源距離およびサイト増幅特性を考慮した標準地震動の補正，土木学会鉄道工学論文集，Vol.22，pp.49-56，2020．[Nishi, T., Tomonaga, H., Ishikawa, T., Aoyagi, H., Tanaka, K.,



付図-2 最終的に選定した標準地盤データベースのN値分布（その2：No.25~50）

- Kanzawa, T. and Sakai, K. : Design Ground Motion Corrected by Earthquake Magnitude, Source Distance and Site Amplification, *Proceedings of the JSCE Railway Engineering Symposium*, Vol. 22, pp.49-56, 2020.]
- 7) (公財) 鉄道総合技術研究所 : 鉄道構造物等設計標準・同解説 (土構造物) 平成 25 年改編, 丸善出版, 2013. [Railway Technical Research Institute: Design standards for railway structures and commentary (Earth Structure), Maruzen, 2013.]
- 8) 田上和也, 坂井公俊, 室野剛隆, 松丸貴樹, 渡辺健治, 神田政幸 : 盛土の滑動変位量算定のための設計地震動に関する検討, 土木学会鉄道工学論文集, Vol.15, pp.170-174, 2011. [Tanoue, K, Sakai, K., Murono, Y., Matsumaru, T., Watanabe, K. and Koda, M. : Study on Design Earthquake Ground Motion for Calculation of Sliding Deformation of Embankment, *Proceedings of the JSCE Railway Engineering Symposium*, Vol. 15, pp.170-174, 2011.]
- 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. [Kawanishi, T., Murono, Y., Sato, T. and Hatanaka, H. : Study on Type of Soil Considering Effect of Soil Classification, *Proceedings of the JSCE Earthquake Engineering Symposium*, Vol. 29, pp.187-196, 2007.]
- 10) 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. [Sakai, K., Izawa, J., Murono, Y. and Hino, A. : A Study on Method for Evaluation of the Ground Strength Index and its Simple Estimation, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 15, No.7, pp.22-33, 2015.]
- 11) 坂井公俊, 井澤淳 : 表層地盤の強度に関する指標を橋梁・高架橋の降伏震度と同一次元で表現する方法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.4, pp.I_290-I_300, 2020. [Sakai, K. and Izawa, J. : Proposal of a Method to Express the Strength of Surface Ground by the Yield Seismic Intensity of Bridges and Viaducts, *Proceedings of JSCE A1*, Vol. 76, No.4, pp.I_290-I_300, 2020.]
- 12) 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. [Sakai, K., Izawa, J. and Murono, Y. : Soil Classification for Response Estimation Under Large-Scale Earthquake by Using Strength and Natural Period of Whole Ground, *Proceedings of JSCE A1*, Vol. 73, No.2, pp.433-442, 2017.]
- 13) 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. [Sakai, K., Izawa, J. and Ishibashi, T. : The Simplified Method of Evaluating Ground Displacement During Earthquake Considering the Shear Strength of Surface Ground, *Proceedings of JSCE A1*, Vol. 74, No.4, pp. I_361-I_368, 2018.]
- 14) 地盤工学会九州支部 : 九州地盤共有データベース, CD-ROM.
- 15) 大井昌弘, 藤原広行, 河合伸一 : 地震防災のための統合化地下構造データベースの構築, 日本地震工学会論文集, Vol.13, No.1, pp.1-16, 2013. [Ooi, M., Fujiwara, H. and Kawai, S. : Development of Integrated Geophysical and Geological Information Databases for

付表-1 最終的に選定した標準地盤データベースの固有周期 T_g (s), 地盤上限震度 K_f' , 相対度数

No.	固有周期 T_g (s)	地盤上限震度 K_f'	相対度数	No.	固有周期 T_g (s)	地盤上限震度 K_f'	相対度数
1	0.122	13.304	9.825E-03	26	0.406	3.031	2.414E-02
2	0.133	7.515	3.459E-02	27	0.406	1.992	2.490E-02
3	0.133	4.907	4.620E-02	28	0.474	2.442	2.191E-02
4	0.135	6.064	4.440E-02	29	0.479	0.518	3.060E-03
5	0.136	9.553	2.492E-02	30	0.480	1.532	2.005E-02
6	0.139	3.954	4.367E-02	31	0.526	3.160	1.370E-02
7	0.144	3.124	3.528E-02	32	0.527	0.865	8.068E-03
8	0.158	2.414	2.732E-02	33	0.540	1.937	1.891E-02
9	0.183	1.817	2.014E-02	34	0.572	1.262	1.775E-02
10	0.210	4.458	3.877E-02	35	0.632	2.398	1.587E-02
11	0.210	5.495	3.082E-02	36	0.655	1.613	1.863E-02
12	0.212	3.542	3.897E-02	37	0.704	1.091	1.620E-02
13	0.221	6.960	1.825E-02	38	0.750	0.670	5.413E-03
14	0.233	2.870	3.607E-02	39	0.773	2.011	1.229E-02
15	0.236	1.317	1.679E-02	40	0.810	1.410	1.370E-02
16	0.254	2.344	2.800E-02	41	0.842	0.999	1.316E-02
17	0.287	4.015	3.084E-02	42	0.957	1.615	7.671E-03
18	0.297	0.860	7.353E-03	43	0.984	0.807	8.760E-03
19	0.299	1.904	2.502E-02	44	0.996	1.124	1.083E-02
20	0.304	5.107	2.083E-02	45	1.006	0.401	1.693E-03
21	0.308	3.212	3.522E-02	46	1.147	0.751	7.973E-03
22	0.342	2.505	3.227E-02	47	1.205	1.150	6.534E-03
23	0.362	1.552	1.782E-02	48	1.326	0.704	7.067E-03
24	0.392	3.925	2.095E-02	49	1.545	0.604	4.165E-03
25	0.406	1.155	1.211E-02	50	1.855	0.492	1.089E-03

- Earthquake Disaster Prevention, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 13, No.1, pp. 1-16, 2013.]
- 16) 地盤工学会：新・関東の地盤 増補地盤情報データベースと地盤モデル付き（2014年版），2014.
 - 17) 東京都土木技術支援・人材育成センター：東京の地盤（GIS版），<https://doboku.metro.tokyo.lg.jp/start/03-jyouthou/geo-web/geo-webmap.aspx>，2022年3月17日参照
 - 18) 国土交通省：国土地盤情報検索サイト Kunijiban，<https://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>，2022年3月17日参照
 - 19) 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. [Sakai, K. and Muroho, Y.: Equivalent Single Degree of Freedom Method for Soil Dynamic Analysis of the Multi-layered Ground, *Proceedings of JSCE A1*, Vol. 71, No.3, pp. 341-351, 2015.]
 - 20) Bishop, C.M.: パターン認識と機械学習（上），丸善，2012.
 - 21) (独) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET, KiK-net）：<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>，2022年3月17日参照
 - 22) 太田岳洋：鉄道の建設と維持管理における地質情報の整備状況と利活用，地質ニュース，No.675, pp.25-28, 2010.
 - 23) 篠田昌弘：鉄道施設の維持管理における地盤情報の収集と活用，基礎工，Vol.40, No.2, pp.34-36, 2012.
 - 24) 田中浩平，坂井公俊，坂元一雄，庄司正弘：地盤調査結果における工学的基盤位置の自動抽出アルゴリズムの構築，第52回地盤工学研究発表会，pp.269-270, 2017. [Tanaka, K., Sakai, K., Sakamoto, K., Shoji, M.: Automated extraction algorithm of engineering bedrock from soil investigation data, *Proceedings of the Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, Vol. 52, pp. 269-270, 2017.]
 - 25) 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. [Muroho, Y. and Nogami, Y.: Shear stress-shear strain relationship taking into account S-shape hysteresis loop, *Proceedings of the Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol. 12, pp. 494-497, 2006.]
 - 26) 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. [Yasuda, S. and Yamaguchi, I.: Dynamic Soil Properties for Various Undisturbed Soil Samples, *20th Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, pp. 539-542, 1985.]
 - 27) 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. [Nogami Y. and Muroho Y.: Nonlinear Hysteresis Model Taking into Account S-Shape Hysteresis Loop and Its Standard Parameters, *Proceedings of the JSCE Earthquake Engineering Symposium*, Vol.30, No.2-0014, 2009.]
 - 28) 末富岩雄：強震時における地動分布特性の即時推定に関する研究，佐藤工業技術研究所報，別冊，No.1, 2000.
 - 29) 野上雄太，坂井公俊，室野剛隆，盛川仁：表層地盤と入力波の周期特性を考慮した表層地盤での地震増幅率の評価，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.68, No.1, pp.191-202, 2012. [Nogami, Y., Sakai, K., Muroho, Y. and Morikawa, H.: Evaluation Method of Seismic Site Amplification Considering Predominant Periods of Subsurface Soil and Bedrock Motion, *Proceedings of JSCE A1*, Vol. 68, No.1, pp. 191-202, 2012.]
 - 30) 坂井公俊，野上雄太：地盤全体系の強度と入力地震動の最大値を考慮した表層地盤の地震増幅率の高精度化，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.73, No.4, pp.170-179, 2017. [Nogami, Y. and Sakai, K.: Evaluation of Ground Motion Amplification Factor Considering the Shear Strength of Surface Ground and the Peak Value of Earthquake Motion on the Basement, *Proceedings of JSCE A1*, Vol. 73, No.4, pp. 170-179, 2017.]
 - 31) 杉浦翔太，野上雄太，丹羽健友，田中浩平，坂井公俊：表層地盤の強度と入力地震動最大値を考慮した各種地震動指標の地震増幅率の高度化，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.77, No.4, pp.154-163, 2021. [Sugiura, S., Nogami, Y., Niwa, K., Tanaka, K. and Sakai, K.: Evaluation of Amplification Factor of Surface Ground for Various Seismic Intensities Based on Strength of Surface Ground and Peak Value of Input Ground Motion, *Proceedings of JSCE A1*, Vol. 77, No.4, pp. 154-163, 2021.]
 - 32) MacQueen J. : Some methods for classification and analysis of multivariate observations, *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Vol. 1, pp.281-297, 1967.
 - 33) Jayaram, N. and Baker, J. W.: Efficient sampling and data reduction techniques for probabilistic seismic lifeline risk assessment, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 39, Issue 10, pp. 1109-1131, 2010.
 - 34) Han, Y. and Davidson, R. A.: Probabilistic seismic hazard analysis for spatially distributed infrastructure, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 41, Issue 15, pp. 2141-2158, 2012.
 - 35) Ullah, S., Bindi, D., Pittore, M., Pilz, M., Orunbaev, S., Moldobekov, B. and Parolai, S.: Improving the spatial resolution of ground motion variability using earthquake and seismic noise data: the example of Bishkek (Kyrgyzstan), *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 11, pp. 385-399, 2013.
 - 36) Gharehbaghi, S. and Khatibinia, M.: Optimal seismic design of reinforced concrete structures under time-history earthquake loads using an intelligent hybrid algorithm, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 14, No. 1, pp. 97-109, 2015.
 - 37) Galvan-Nunez, S. and Attoh-Okine, N.: Hybrid particle swarm optimization and k-means analysis for bridge clustering based on national bridge inventory data, *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, Vol. 3, Issue 2, F4016001, 2017.

- 38) Perol, T., Gharbi, M. and Denolle, M.: Convolutional neural network for earthquake detection and location, *Science Advances*, Vol. 4, No. 2, e1700578, 2018.
- 39) 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. [Fukushima, Y. and Midorikawa, S.: Evaluation of Site Amplification Factors Based on Average Characteristics of Frequency Dependent Q-1 of Sedimentary Strata, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, No.460, pp. 37-46, 1994.]
- 40) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉, 澤田純男: 深部地下構造を考慮した内陸活断層型地震の経験的評価, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.98-103, 2007. [Sakai, K., Muroho, Y., Sato, T. and Sawada, S.: Evaluation of the Level 2 Earthquake Considering the Effects of Seismic Bedrock, *Proceedings of the JSCE Earthquake Engineering Symposium*, Vol. 29, pp.98-103, 2007.]

DEVELOPMENT OF STANDARD GEOTECHNICAL INFORMATION DATABASE
FOR EFFICIENT PROCESSING OF GROUND MOTION
~ IN TERMS OF STANDARD DESIGN GROUND MOTIONS AT SURFACE ~

Kimitoshi SAKAI

Based on the results of numerous geotechnical investigations, we have developed standard geotechnical information database that can efficiently and adequately represent the characteristics of ground motion at surface. Specifically, using the results of a large number of geotechnical surveys, we classify the ground by clustering using the natural period T_g and the strength of ground K_f' as indices, and extract ground information that is representative of these classifications. As a result, it was confirmed that the ground motions calculated using the ground information for the 50 sites selected in this study were in good agreement with the probability distribution of ground motions calculated using all of the ground information in Japan. Furthermore, it was shown that by effectively utilizing the large number of dynamic analysis data constructed in this study, the ground motion can be efficiently and appropriately evaluated without constructing a new analysis model.