

[研究報告]

地域地震動特性解析に関する研究

白石英孝

要 旨

地域固有の地震時の地盤の揺れやすさ(地域地震動特性)の違いを明らかにするために、既存の地震被害想定調査で得られたデータを利用して新たな推計計算を実施した。

地震被害想定調査は、被害規模の定量的な推計を目的としているため、具体的な震源を想定して地表での加速度が算出されている。この計算には地盤の非線形性を考慮した等価線形化法が用いられており、推計によって得られた地盤の増幅度特性は入射強度によって異なっている。そこで、この入射強度別増幅度特性を用いて、モデル地盤ごとに、地表で1,000galの加速度を発生させる入射強度を算出し、さらに最大増幅度を求めた。

モデル地盤ごとの最大増幅度を地域地震動特性を表す指標として使用し、これを県内500mメッシュごとに地図上に表示したところ、表層地質にも調和し、地域による地震動特性の違いを明確化することができた。

キーワード: 非線形性、地震動、増幅度特性、等価線形化法

1 はじめに

本県では、これまで3回の地震被害想定調査が実施され、最新の調査は平成8～9年度に行われている。この調査は、県内に大規模地震が発生した場合の建築物や人的被害等の被害規模を定量的に推計することを目的としている¹⁾。

このように、実際に発生する可能性がある地震を想定して被害を推計することは、発災後を含めて被害を最小限にとどめるための方策を検討するうえで、非常に重要であるものと考えられる。ただし、被害の定量的な推計を主目的とする場合には、具体的な震源を設定する必要があり、そのため、地震時の揺れには震源に近いほど強く、離れるほど弱くなるという距離減衰傾向が現れる。その結果、地域ごとの地震時の揺れの違いは、震源からの距離がひとつの重要な要因となる。

しかしながら、県内の地盤は様々な地質で構成されており、地下構造の物性値も地域によって大きく異なっている。したがって、地域に適した地震防災対策やまちづくりの方策を検討し、被害の未然防止を図るといった観点からは、地域固有の地震時の地盤の揺れやすさ(以下、「地域地震動特性」という)の違いに重点を置き、これを明らかにすることも、地震被害想定調査のような定量的な検討とともに、有用な情報のひとつになるものと考えられる。

そこで本研究では、地域地震動特性を明らかにすることを目的とし、地震被害想定調査時に得られている地盤の増幅度特性のデータを利用して、新たな推計計算を実施した。その結果、地域による地震動特性の違いを明らかにすることができたため報告するものである。

2 本県の表層地質の概要

図1は本県の表層地質を示したものである。本県の地形は、県西部の山地、中央部の丘陵地と台地、東部の低地の4つに大別される。このうち山地は、主として中生代や古生代など非常に古い時代に形成された堅い岩盤で構成されている。また、丘陵地及び台地は、それよりも新しい新第三紀や第四紀更新世の地層で構成されている。東部地域の低地については、最も新しい完新世に堆積した非常に柔らかい沖積層によって構成されている。また、台地であっても、谷底低地などには沖積層が分布しており、その地質条件は地域によって複雑に相違している。地震時の地盤の揺れは、沖積層やローム層などの地表面に近い位置に分布する軟弱な堆積層の影響を強く受けて増幅されるため、地震動特性はそれぞれの地域における地盤条件によって複雑に異なるものと考えられる。

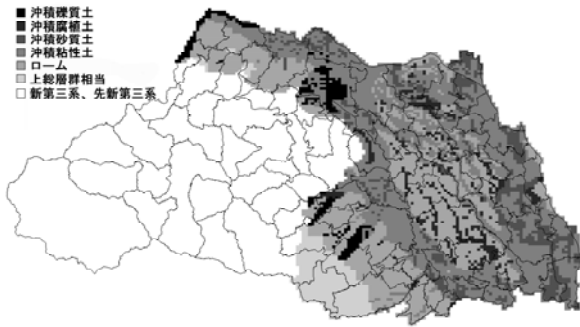


図1 表層地質図

3 地震被害想定調査における震度推定例

図2に、地震被害想定調査における震度推定例を示す。

図2(a)は荒川断層、図2(b)は綾瀬川断層をそれぞれ震源と仮定した場合の県内の震度分布を示したものである。図から全体的な傾向は、両者とも震源付近の震度を最大とし、距離が離れるほど、震度が低下する傾向がみられる。

県内には、先の表層地質図(図1)で示したように、様々な地質が複雑に分布しているが、これらの例では震源による影響が大きく、地域地盤による揺れの違いは同一震度の中に埋もれてしまい、その違いを判別することは難しい。

地震被害想定調査では、後述するように計算上は地域地震動特性が組み込まれているが、具体的な地震に対する定量的な評価を目的としているため、地域地震動特性の違いを明瞭には表現しにくいものと考えられる。

4 地域地震動特性の推計

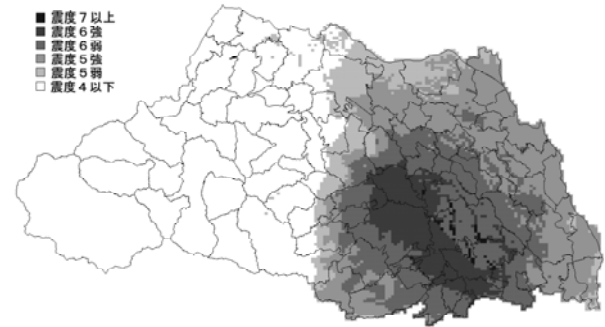
4.1 地震被害想定調査における推計方法の概要

地域地震動特性の推計方法を示すのに先立ち、まず、地震被害想定調査において、震度推計の基本となる地表加速度がどのように算出されているのかについて、その概要を示す。地表加速度推計方法の概要は図3のとおりであり、全体は、大きく次の4つに分けることができる。なお、実際の計算では、県内を約15,000メッシュ(1メッシュ500×500m)に分割し、各メッシュごとに計算が行われている。

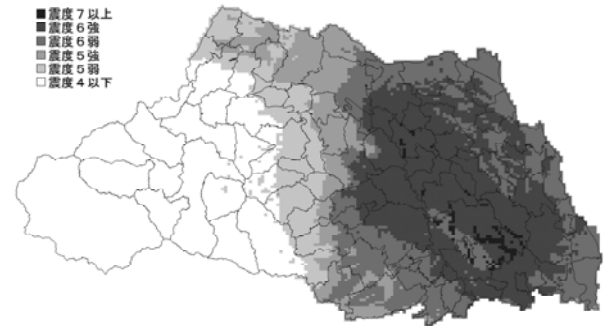
(1) 震源域の設定

歴史地震の震源や県内及び近隣に存在する複数の活断層を震源として設定している。対象とする地震は、「プレート境界型」及び「活断層型」の2つに大別され、全体では20の震源に検討が加えられている。最終的には、これらのうち4つが、本県に過去に被害を及ぼした地震の震源、あるいは地震が発生した場合に本県に対する影響が大きいと推測される震源として、物的被害想定の対象に選定されている。

(2) 入射加速度の推計



(a)荒川断層を震源とする場合



(b)綾瀬川断層を震源とする場合

図2 地震被害想定調査における震度推定例

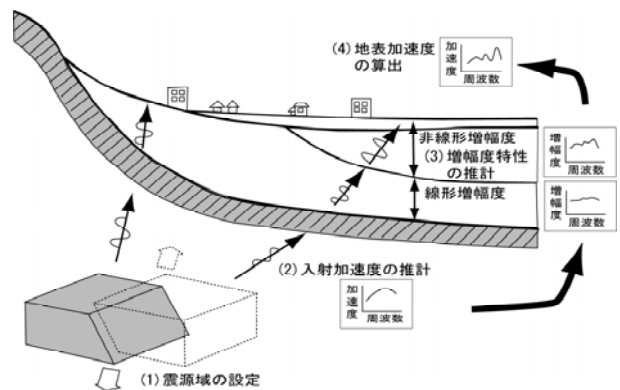


図3 地表加速度推計方法の概要

震源において発生した地震は地中を伝搬し、距離等によってその強さが減衰する。そこで、震源位置と推計対象メッシュまでの距離減衰式を用いて、メッシュ下部への入射加速度を推計する。

(3) 増幅度特性の推計

増幅度特性の推計では、地下構造を浅い構造と深い構造の2つに分けて計算が行われている。浅い構造とは、地震動の増幅に強く影響を及ぼす第四紀堆積層を主体とする部分で、深い構造とは、浅い構造よりも下部で地震地盤へ達する部分を意味する。このうち深い構造については入射地震動の影響が小さいことから、線形計算が行われている。また、浅い構造については、地震動の増幅への寄与が大きいこと

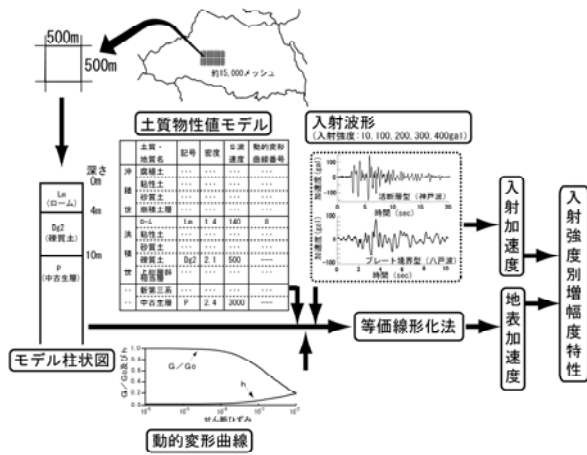


図4 増幅度特性推計方法の概要

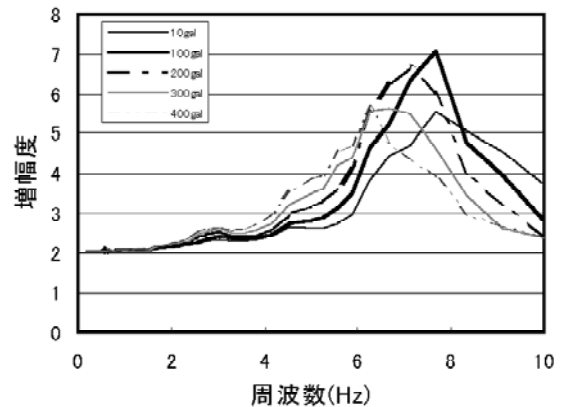


図5 入射強度別増幅度特性の例

から、県内の地盤を241種類にモデル化し、各メッシュごとにこれらのモデルをあてはめ、非線形性を考慮した増幅度特性が計算されている。その方法の概要は、図4に示すとおりである。すなわち、

・モデル柱状図の設定

推計対象とするメッシュに対し、モデル柱状図(県内地盤の地下構造を物性値別にモデル化したもの)を設定する。

・地表加速度の計算

モデル柱状図に対し、土質物性値モデル、動的変形曲線及び入射波形をあてはめ、等価線形化法²⁾によって地表加速度を算出する。ただし、ここで算出された地表加速度は、当該モデル柱状図の増幅度特性を算出するために用いられるものであり、震度の換算に直接使用されるものではない。

地表加速度は、地盤の非線形性を考慮するために、等価線形化法によって推計が行われている。これは重複反射理論を基に、地震動の時間経過に従って変化する地盤の歪と、それに対応する材料特性(剛性及び減衰。これらと歪との関係を表すものが動的変形曲線である)を反復計算によって逐次改良し、地表加速度を算出するものである。

また、地盤に非線形性が存在することから、地震波の入射強度や時間変化の違いによって増幅度特性が異なるため、2種類の地震波(プレート境界型及び活断層型)について5つの入射強度(10、100、200、300、400gal)を設定して計算が行われている。

・入射強度別増幅度特性

算出された地表加速度を入射加速度で除することにより、モデル柱状図ごとの入射強度別増幅度特性が算出される。

(4) 地表加速度の算出

「(2) 入射加速度の推計」で算出されたメッシュごとの入射

加速度を、当該メッシュのモデル柱状図に対応する入射強度別増幅度特性に乗ずることで、想定地震に対応する地表加速度が算出される。

4.2 地域地震動特性の抽出

地表地震動を決定する要因は、主として地震波の入射強度及び地域の地下構造に由来する地盤の増幅度特性である。このうち、地震波の入射強度は、震源からの距離等によって変化するため、同一の震源であれば、一般に震源に近い地域ほど強く、離れた地域ほど弱くなる。一方、地盤の増幅度特性は地域の地盤固有の性質を強く反映したものであり、地域によって異なる傾向を示すため、これが地域地震動特性を表す指標になるものと考えられる。

したがって、前述のとおり、地震被害想定調査においても、計算の過程で地域地震動特性に相当するモデル柱状図別の増幅度特性を組み込んで推計されていることになる。しかしながら、地震被害想定調査では、ひとつのモデル柱状図に対して、複数の入射強度(10、100、200、300、400gal)に対応した複数の入射強度別増幅度特性が算出されている。これは、地表加速度を推計する際に、地盤の非線形性(入射地震動に応じて地盤の材料特性が変化し、それに伴って増幅度特性が変化すること)を考慮することを目的としたものである。その結果、地震被害想定調査で得られた増幅度特性は入射強度の関数となるため、これを用いる場合には各地域に適切な入射強度を設定しなければならない(本来、そのような使用方法を前提として算出されている)。

図5は入射強度別増幅度特性に現れる非線形性の例を示したものである。この例では、最大増幅度は100gal入射時に得られ、次いで200gal入射時の増幅度が高い。一方、300gal及び400galという強い入射強度の場合には増幅度がやや低い値となっている。また、各入射強度により、最大増幅度を与える周波数が異なる傾向をもつ。このように非線形性を考慮した場合には、入射強度によって、最大増幅度及びそ

の卓越周波数が変化することになる。

本研究では震源からの距離等に依存しない地域固有の地震動特性を明らかにすることを目的としている。したがって、震源からの距離等の関数となる入射強度別の増幅度特性ではなく、震源との関数関係を断ち切った形での増幅度特性を再構成する必要がある。

その方法として、地震被害想定調査による入射強度別増幅度特性が複数の値をもつことから、平均値を使用する方法や最大値を使用する方法が考えられる。しかしながら、前者の方法については、たとえば同じ5倍という増幅度であっても、入射強度10gal時の5倍と200gal時の5倍では、地表での加速度が大きく異なるため、同列に扱うことは不適切であると考えられる。また、後者の方法については、ある地域は入射強度100gal時の増幅度を用い、別の地域では入射強度200gal時の増幅度を用いるという場合も想定されるため、統一的な解釈は困難になる可能性がある。

そこで本研究では、地域地震動特性を表現する方法として、ホワイトノイズが入射した際に地表で1,000galとなる場合の入射強度を算出し、その結果から地盤の最大増幅度を求めて地域の地震動特性を表すこととした。これは、入射地震波をホワイトノイズとすることで、入射地震波の周波数特性を消去して地域地盤の増幅度特性を強調するとともに、地表加速度を同一に設定することで、増幅度の地域間の違いを明確化しようとするものである。したがって、この方法は地表加速度を基準とした一種の正規化に相当し、揺れやすい地盤ほど弱い入射強度で地表1,000galとなりやすく、その結果、増幅度(地表加速度/入射加速度)も大きく算定され、地域間の違いを明確化できるものと考えられる。なお、ここで用いた1,000galという値については、過去の国内の地震で観測された最大地表加速度に相当する値として設定したものである。

図6に地表1,000gal時の増幅度の推計例を示す。これは、モデル柱状図の増幅度特性に、10、100、200、300、400galのホワイトノイズが入射した場合の地表加速度を並べて示したものである。なお、図中の153galについては、後述する。

この例では、地下に200gal以上の地震波が入射した場合には、地表で1,000galを超える加速度となるが、100gal以下での入射では、地表加速度は1,000gal未満となっている。したがって、100galと200galの間の入射強度で地表での最大加速度が1,000galに達するものと考えられる。そこで、100galと200galの間の入射強度で、地表1,000galとなる入射強度を算出する。この入射強度の計算においては、線形補間による内挿を基本とした。しかしながら、モデル柱状図の構成によっては、入射強度の違いにより地表加速度最大値を与える卓越周波数が移動したり、あるいは複数の卓越周波数が現れる場合などが存在する。したがって、各入射強度ごとの最大増幅度部分を追跡するだけでは、周波数軸方向での連続性が失われる場合があるため、単純な内挿では正しい

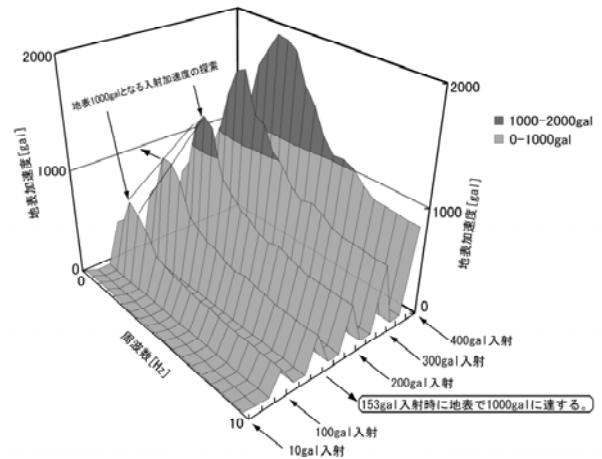


図6 地表1,000gal時の増幅度特性の推計例

結果が得られない可能性がある。そこで、周波数—入射強度—地表加速度で構成される3次元空間の中で、地表加速度が1,000galに達する入射強度を解の探索によって求めることとした。その結果、たとえば地表1,000galに達する入射強度として複数の値が得られた場合には、入射強度が小さいほうの値をとって解とした。これは増幅度を高い側に見積もることになり、結果として安全側に作用する。以上の操作によって地表1,000gal時の入射強度を算出し、その結果からさらに増幅度を求めた。図の例では、153gal入射時に地表で1,000galになるとの解が得られ、153galが1,000galに増幅されたことから、増幅度は約6倍と算定している。

なお、基盤が露出していて増幅度特性の計算ができないものについては、理論値(2倍)を増幅度として用いた。

以上の計算を全241種類のモデル柱状図に対して実施し、その結果得られた増幅度を、県内の500mメッシュ上に示して図を作成した。

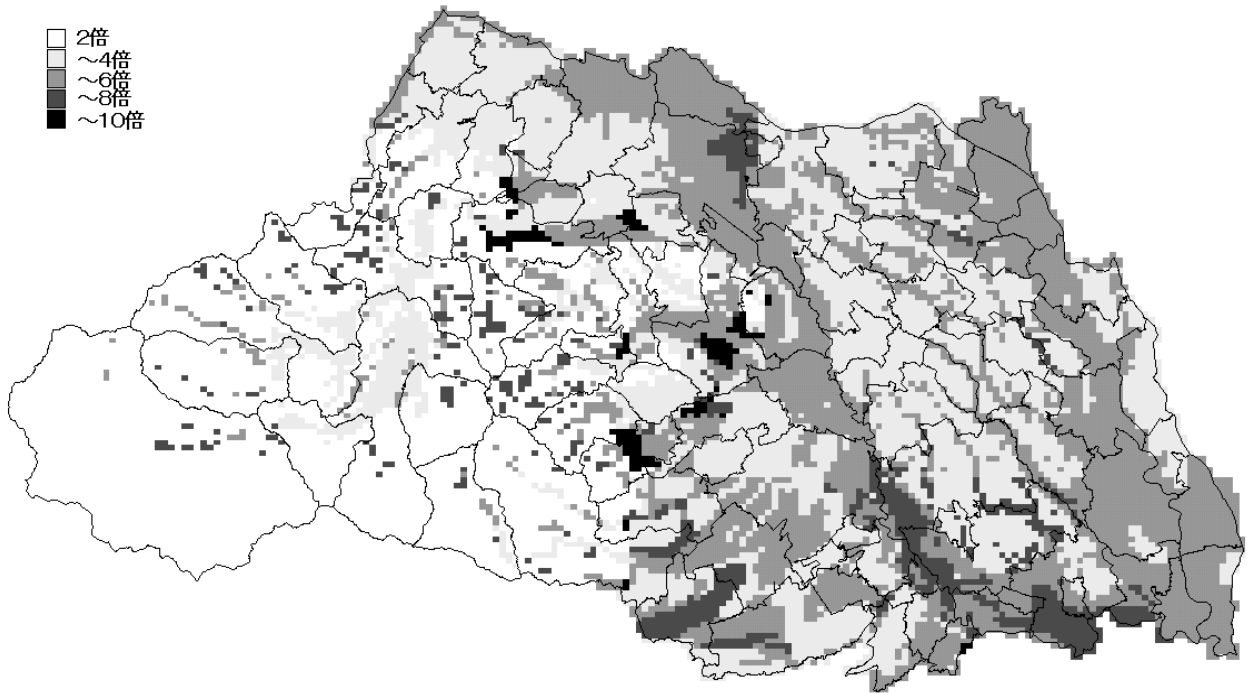
4.3 地域地震動特性の概要

図7は、計算によって得られた地表1,000gal時の最大増幅度をメッシュごとにあてはめたものである。また、図では2つの異なる震源特性(プレート境界型及び活断層型地震)について示している。

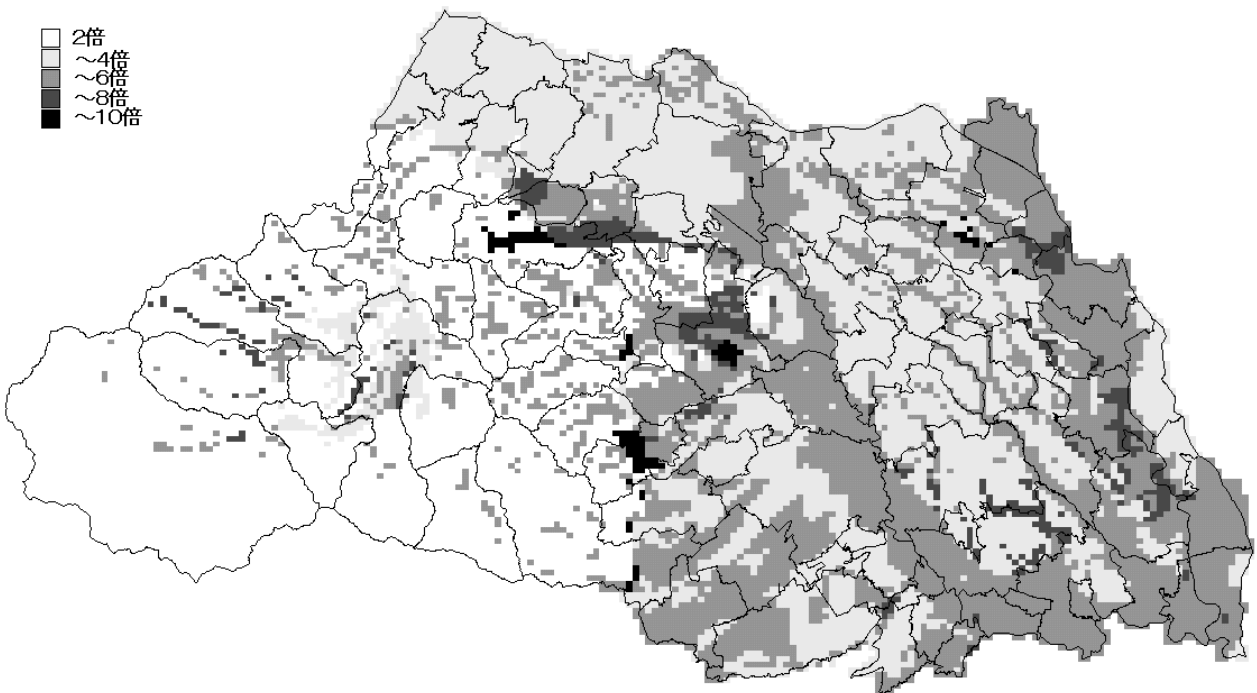
図の全体的な傾向は、前掲の地震被害想定調査における震度分布推定例とは異なり、地域による増幅度の違いが明瞭に現れている。その傾向は図1に示した県内の表層地質図とも調和的であると考えられる。

おおまかな傾向を列記すると、次のようになる。

- 県西部のいわゆる山地については、増幅度が小さい。これは、山地の多くの部分で基盤がほぼ露出した状態にあるため、地盤による増幅が小さいことによるものである。ただし、山地でも河川の流域に沿った地域などでは、増幅度が比較的高くなる場所が存在しており、特徴的な傾向が現れている。



(a)プレート境界型地震



(b)活断層型地震

図7 地域地震動特性

- ・ 県中央部の丘陵地や台地については、比較的増幅度の高い地域が複雑に混在している。
- ・ 県東部の低地及び低地に取り囲まれた台地の増幅度分

布は、やや複雑である。概して台地部分の増幅度は低く、荒川流域及び中川流域では、増幅度が比較的高くなる傾向がみられる。また大宮台地の南側部分には、台地に切

れ込むような形で、増幅度の高い地域が存在している。これは、台地を刻む谷筋に堆積した腐植土等の影響によるものと推測される。

- ・プレート境界型地震及び活断層型地震における増幅度分布を比較すると、全体的な傾向は概ね類似しているが、荒川流域南部の地域など、一部の地域については異なる傾向が現れている。

5 まとめ

地震被害想定調査で得られているモデル地盤の入射強度別増幅度特性を利用し、地域地震動特性の推計計算を実施した。

推計計算では、既存の入射強度別増幅度特性を基に、地表加速度が1,000galとなる場合のホワイトノイズ入射強度を算出して最大増幅度を求め、これをモデル地盤ごとの地域地震動特性を表す指標とした。

その結果、表層地質にも調和し、地域による相違も明らかな地域地震動特性が得られた。地域地震動特性は、地震の時間経過が異なる2種類(プレート境界型と活断層型)について求め、両者を比較すると全体的には概ね類似した傾向を示していた。ただし、一部の地域では、異なる傾向がみられた。

本研究では、既存データの使用により500mメッシュでの地域地震動特性を求めている。しかしながら、実際には同一メッシュ内であっても異なる地質の地盤が分布しており、今後は、より空間分解能を高くした解析も必要になるものと考えられる。

文 献

- 1) 埼玉県 (1998) 埼玉県地震被害想定調査報告書.
- 2) 土木学会編 (1999) 動的解析と耐震設計第2巻、動的解析の方法, 技報堂出版, 199-206.

Analysis of Regional Characteristics of Earthquake Ground Motion

Hidetaka SHIRAISHI

Abstract

A regional characteristics of earthquake ground motion is estimated by using the results of an earthquake hazard evaluation research performed by Saitama Prefectural Government. The research has computed responses of the grounds that classified into 241 types to evaluate a quantitative damage scale.

Since the response of soil deposits has nonlinearity, the amplitude characteristics of the grounds depend on the incidence acceleration into the basement of a region. To estimate the regional characteristics which is independent of the incidence acceleration, the amplification rate was recalculated, providing the surface acceleration value is 1,000gal.

As the result, two kinds of amplification-rate distribution maps are drawn for the whole region of Saitama prefecture based on the 500m mesh areas. According to these maps, the differences in the amplification-rate for the whole region were clarified.

Key words: Nonlinearity, Ground motion, Amplitude characteristics, Equivalent linear seismic response analysis