

査読論文

# 八戸地域地盤情報 DB を利用した 一次元地震応答解析

野添重晃\*・橋詰豊\*\*・金子賢治\*\*\*・葛西祥男\*\*\*\*

## Dynamic Response Analyses of Ground Surface by Using Geotechnical Information Database in Hachinohe Area

Shigeaki NOZOE\*, Yutaka HASHIZUME\*\* Kenji KANEKO\*\*\* and Yoshio Kasai\*\*\*\*

### Abstract

Hachinohe is an area where earthquakes occur frequently. In order to study how to reduce the earthquake damages, detailed predictions of dynamic response of ground surfaces in earthquake with sufficient accuracy is indispensable. On the other hand, in Hachinohe area, a local geotechnical information database, which has about 2500 data, has been developed by using Web-GIS system. In this study, we carried out the one-dimensional dynamic response analyses of ground surface based on the about 2500 geotechnical informations to grasp the dynamic ground response distribution in Hachinohe area. Furthermore, the suitabilities of the ground layer modeling and the decision method of numerical parameters were examined. As the results, we could create the distribution map, whose mesh is each 250m, of ground surface acceleration by earthquake. Moreover, we were able to understand the influence of the ground modeling and the parameter determination on the numerical result.

**Keywords :** *Hachinohe Area Geotechnical Information DB, one-dimensional ground response, digital underground map, numerical parameters*

**キーワード :** 八戸地域地盤情報データベース, 一次元地震応答解析, 電子地盤図, 解析パラメータ

---

平成 25 年 1 月 7 日受理

\* 工学研究科土木工学専攻・博士前期課程 1 年

\*\* 社会連携学術推進室・研究員

\*\*\* 工学部土木建築学科・准教授

\*\*\*\* エイコウコンサルタンツ(株)・取締役技術管理部長

### 1. はじめに

独立行政法人防災科学研究所（以下、NIED）が公開している地震ハザードステーション<sup>1)</sup>は日本各地の地震に関するデータを国民の地震防災への意識向上とそれに基づく対策を進めるため、広く一般公開している。図 1 に、NIED

が発表している地震動予測地図を示す。2008年1月1日を基準とし、今後30年以内に八戸地域が震度6以上の揺れに見舞われる確率分布を表している。この図より、八戸市中心部あるいは八戸港周辺エリアについては、最大26%前後の発生確率が予測されていることがわかる。八戸地域に最大の地震被害を与えると予想されている海溝型の地震は、青森県東方沖あるいは三陸沖北部と言われる震源域の地震であり、1968年の十勝沖地震がこの震源域で発生した直近の固有地震である。1968年の十勝沖地震から約45年が経過していることも考えると、NIEDの予測のように今後数十年で震度6以上の地震が八戸地域で発生する確率は無視できないと考えられる。また、1968年十勝沖地震よりも規模は小さいものの、1994年に発生した三陸はるか沖地震においても大きな被害が発生するなど、八戸地域は地震による被害が度々発生しており、これらに対する警戒・対策を十分に検討する必要がある。

地震被害を想定し効率よく対策を施すためには、地震による地表面の振動を高精度でかつ細かい領域に分割して予測する必要がある。地震時の表層地盤の地震応答を予測する手法として、一次元地震応答解析がある。図2に地震応答の概念を示す。ここで、工学的基盤とは構造物等を支持しうる堅固な地盤をさしている。工学的基盤以浅の表層地盤の増幅特性は局所的に大きく変化するため、解析の際には個々の地点別の表層地盤条件を考慮しなければならない。地震動の伝播は断層にて発生し、工学的基盤に伝わり、表層地盤の増幅によって地表面の揺れとなる。地震応答解析は、工学的基盤から入射した地震波がどのように地表面へ伝播するかを解析するツールである。

本論文では、固有地震による八戸地域の地表面の最大加速度の空間分布マップを作成することを目的に研究を行った。八戸地域では、数年前から地盤情報DBが構築されており<sup>2)</sup>、約2500地点の地盤情報が電子化され蓄積されて

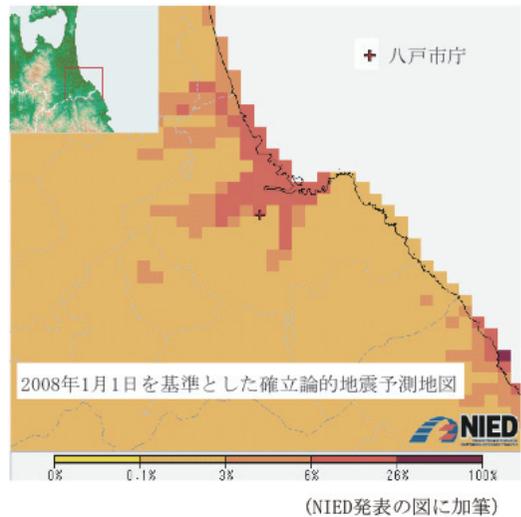


図1 30年以内に震度6以上の揺れに見舞われる確率分布

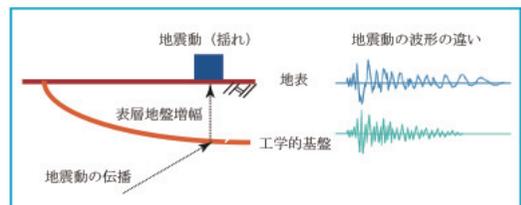


図2 地震応答の概念

いる。本研究では、八戸地域地盤情報DBを用いて、図1に示すNIEDの予測地図よりも細かい250mメッシュでの予測を行う。まず、八戸地域地盤情報DBに収録されているデータに基づき、これを電子地盤図システム<sup>3)</sup>を用いて250mメッシュの平均的地盤モデルを作成する。作成した地盤モデルを用いてDYNEQ<sup>4)</sup>により一次元地震応答解析を行い、メッシュ毎の地震応答を計算し、八戸地域の地震時の地表面最大加速度の空間的分布について検討を行う。なお、本研究では比較的広域の地震応答を検討するために2500本以上のボーリングデータを用いて解析を実施する。したがって、1地点の地震応答を詳細に検討するものとは根本的に異なり、地盤のモデル化やパラメータ設定にいくつかの仮定が含まれる。

## 2. 一次元地震応答解析

ここでは、地震応答解析の解析理論について述べる<sup>4)</sup>。解析に用いる一次元地震応答解析プログラムは DYNEQ であり、重複反射理論に基づく等価線形解析である。まず、一次元地震応答解析における運動方程式は次式のように表される。

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} + 2h\omega\tau = G \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 $\tau$  はせん断応力、 $\gamma$  はせん断ひずみ、 $h$  は等価減衰定数、 $G$  はせん断剛性、 $\omega$  は円震動数である。

地盤の応力ひずみ関係は非線形挙動を示すため、一次元地震応答解析のために多くのモデルが提案されている。本研究では、広く用いられており、比較的単純なモデルである双曲線モデルを用いることとした。双曲線モデルは次式のように表される。

$$\tau = \frac{G_{\max}\gamma}{1 + G_{\max}\gamma/\tau_{\max}} \quad (2)$$

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{\max}$  は最大せん断応力、 $G_{\max}$  は初期せん断剛性である。 $\gamma_r$  は基準ひずみと呼ばれており、双曲線モデルの場合  $G/G_{\max}=0.5$  におけるひずみである。

双曲線モデルを仮定した一次元地震応答解析において、解析結果に大きく影響を与えるパラメータは、初期せん断剛性  $G_{\max}$ 、ひずみに依存したせん断定数  $G$  と等価減衰定数  $h$  である。過去に、種々の公共事業のために行われた地盤調査結果を集積した八戸地域地盤情報 DB においては、各地盤の初期せん断剛性  $G_{\max}$ 、ひずみに依存したせん断定数  $G$  といった動的変形特性や減衰定数などのデータは含まれていない。また、せん断剛性をせん断波速度  $V_S$  から推定

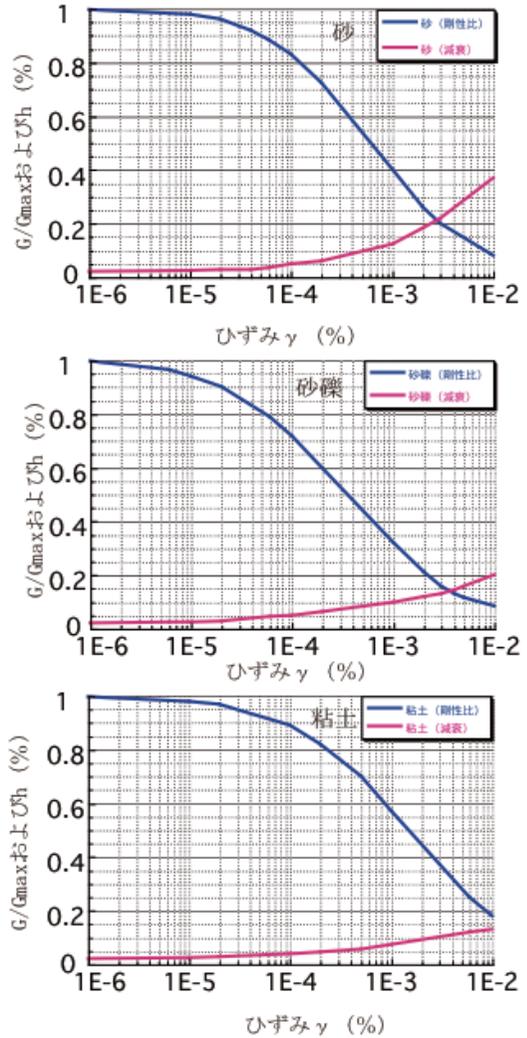


図3 今津・福武の動的変形特性の平均値

する場合もあるが、せん断波速度  $V_S$  についても通常の地盤情報 DB には含まれていない。本研究では、広域の地震動特性を解析することから、各地点でのせん断剛性やせん断波速度を調査する事は難しい。したがって、まず、地盤情報 DB に含まれている  $N$  値を用いて以下の今井らの式<sup>5)</sup>によりせん断波速度  $V_S$  を推定する。

$$\text{沖積砂質土 (A}_S\text{)} \quad V_S = 80.6 N^{0.331} \quad (4)$$

$$\text{沖積粘性土 (A}_C\text{)} \quad V_S = 102 N^{0.292} \quad (5)$$

次に、せん断波速度  $V_S$  から初期せん断剛性  $G_{\max}$  を以下の式により算出する。

$$G_{\max} = \frac{\gamma'_t}{g} V_S \quad (6)$$

ここで、 $\gamma'_t$  は地下水面下における単位体積重量、 $g$  は重力加速度である。単位体積重量は、地盤情報 DB から得られる場合もあるが、データが無い場合には、単位体積重量の決定は道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (1990)<sup>6)</sup> および道路公団の設計要項 (1982)<sup>7)</sup> を参考に求めた。

動的変形特性  $G/G_{\max}$  および等価減衰定数については、今津・福武らによる土質区分毎の平均値<sup>8) 9)</sup> を用いた。図 3 に代表的な土質区分の動的変形特性および等価減衰定数を示す。

### 3. モデル化および解析方法の検証

本研究では、八戸地域地盤情報 DB に集積されている 2500 本以上のデータを用いて、電子地盤図システム<sup>3)</sup> を用いて、250m メッシュの平均的な地盤モデルを作成する。作成した平均的地盤モデルに基づいて各メッシュの工学的基盤を推定し、地震波を入力する。平均的地盤モデルより推定した工学的基盤の深さを図 4 に示す。さらに、作成した地盤モデルを用いて地震応答解析を行って、その結果を対応する 250m 四方の領域の地表面での地震応答加速度とする。

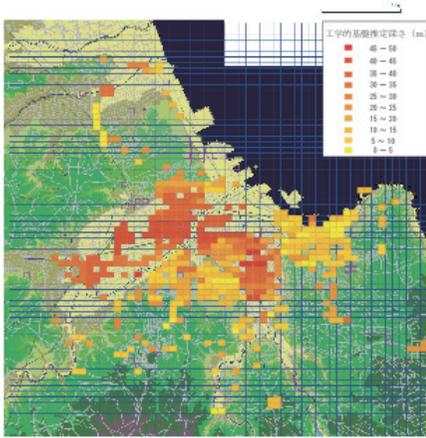
全てのメッシュにおける応答解析を実施する前に、ここではまず、地震計が設置されていて地表面の加速度応答の実測値の存在する地点において解析を行って、電子地盤図による平均的な地盤モデルの一次元地震応答解析への適用性について検討する。次に、滝田らによって行われた、ある地点で精密にパラメータを決定した解析結果<sup>10)</sup> と、本研究の方法でパラメータを定めた解析結果を比較して、その影響について検討する。

### 3.1 地盤のモデル化による影響

八戸市庁付近に設置された NIED が運営する地震計 K-net 八戸<sup>11)</sup> において、地震時の地表面地震動の実測データが得られている。ここでは、K-net 八戸の設置されている地点における地盤モデルを用いて前述に示した方法による一次元地震応答解析を実施して K-net 八戸における実測値と比較する。対象とする地震は、2011 年東北地方太平洋沖地震とした。工学的基盤に入力する地震波は 2011 年東北地方太平洋沖地震時の KiK-net 八戸<sup>12)</sup> により観測された地震波を用いる。KiK-net 八戸の設置深さは表層から 150m であり、これを工学的基盤の入力波とすることと仮定した。入力地震波の加速度時刻歴を図 5 に示す。なお、KiK-net 八戸においても、地表での実測データが得られているが八戸地盤情報 DB 内には KiK-net 位置におけるボーリングデータが存在しない。そのため、工学的基盤の波形は震央からの距離に依存するため K-net 直下の基盤においても KiK-net で計測されたデータとほぼ同様であるとする仮定を行っても、大きな誤差は無いと考えられる。地盤モデルは八戸地域地盤情報 DB に収録されているボーリングデータに基づいて全国電子地盤図により 250 m メッシュに平均化した地盤モデルと、代表的なボーリングデータを直接モデル化した地盤モデルの 2 つを用いた。用いた地盤モデルを図 6 に示す。地盤モデルの各層の数字は  $N$  値である。

解析により得られた一次元地震応答解析結果と K-net により得られた地表面加速度応答とを比較して図 7 に示す。同図より実測値と一次元応答解析結果に関してはどちらもある程度類似した波形を示しており、ある程度の精度で再現可能であることがわかる。また、ボーリングデータを直接モデル化した地盤モデルより電子地盤図による地盤モデルの方が波形は類似している。

地表面の最大加速度については、実測値が 180Gal に対して解析結果は電子地盤図による地盤モデルが 158Gal、ボーリングデータによ



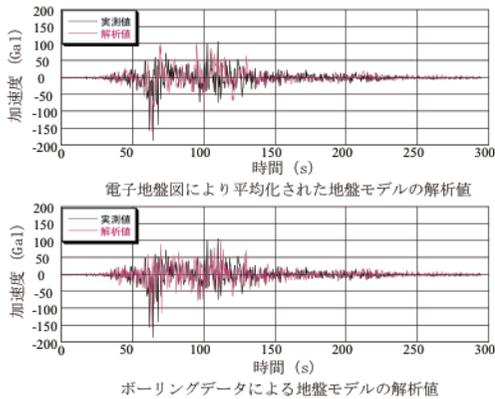


図7 K-Net 八戸の観測データと応答解析結果

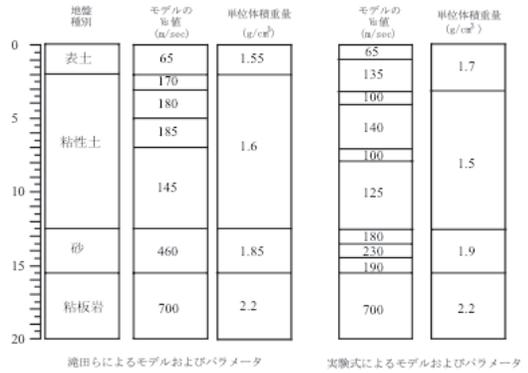


図8 八戸工業大学における地盤モデルおよびパラメータ

図8に示すように地層区分の細かさと、各層の $V_S$ の違いである。特に $N$ 値から推定した $V_S$ は、滝田らの値に比べて多くの層で小さい値となっている。

入力地震波は2011年東北地方太平洋沖地震において八戸工業大学GL-20mで観測された地震波を用いる。用いた入力地震波を図9に示す。また、地震波が約100secしかないのは、想定以上の振動時間と波形による地震計データ収録の不具合によるものである。

図10に八戸工業大学で観測された地表面加速度時刻歴と一次元応答解析結果を合わせて示す。八戸工業大学で観測された地表面最大加速度は152Galとなっている。図10より、滝田らによるモデルは最大加速度149Galとなっている。また、波形についてもほぼ類似した結果となっており、東北地方太平洋沖地震においても非常に精度良く地震動を再現できる。本研究で用いる $N$ 値に基づいて算出したパラメータを用いた解析結果については、波形はある程度類似しているものの、最大加速度が106Galとなり、過小評価している。これについても、一般的な粘性土を仮定して $V_S$ を定めている影響が大きいものと考えられる。

### 3.3 まとめ

本章での検討結果より、地盤情報DBのボー

リングデータを電子地盤図により平均化して作成した地盤モデルを用いて一次元地震応答解析を行うことで、若干の誤差は含むものの、ある程度地表面の地震動を評価できると考えられる。 $N$ 値からパラメータを決定するに際して、八戸地域特有の地盤の動的変形特性等に関する知見が不足しており、そのために本研究による方法では、地表面の地震動が過小に評価される可能性が高いことがわかった。また、せん断波速度 $V_S$ の精度向上は解析精度にかなりの影響を与えることがわかった。しかしながら、現段階では精度の高いせん断波速度 $V_S$ あるいは動的変形特性を広域的に求めることは困難であるため、多少の過小評価を前提として、本研究で行う八戸地域全体の地震応答解析は2章で示した方法により行うこととする。

## 4. 八戸地域における地震時の地表面振動分布

ここでは、八戸地域地盤情報DBに基づき、電子地盤図システムにより平均化して作成した地盤モデルを用いて地表面の最大加速度分布を八戸地域において広域的に計算する。入力波形は、全ての領域においてKiK-net 八戸 (GL-150m) で観測された2011年東北地方太平洋沖地震の地震波形を用いる。一次元地震応答解析に必要なパラメータは、2章で示した式(3)

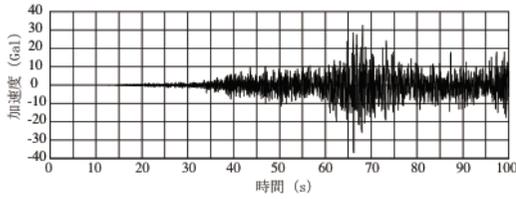


図 9 入射波 (八戸工業大学観測 N-S 成分 GL-20m)

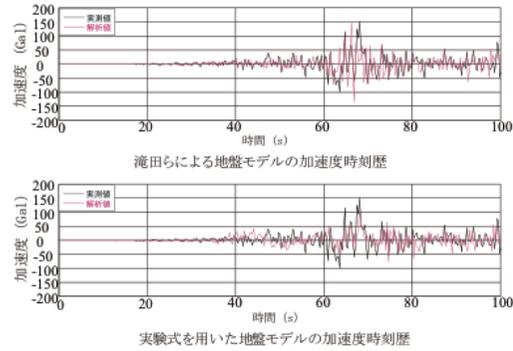


図 10 地盤モデル精度の違いによる解析結果の比較

から (7) を用いて定め、地震波を入射する工学的基盤は図 4 に示した工学的基盤深さを使用する。

図 11 にボーリングデータが存在して地盤モデルが作成された全メッシュ (約 400 以上) の解析結果を示す。解析結果はほとんどのメッシュにおいて約 80gal から 160gal 程度となっており、同図より各地区ごとにおける加速度の違いを空間的に把握することができ、加速度の低い河原木・類家地区は沖積層厚が約 40m と深く  $N$  値 3 以下の軟弱なシルト層が多く堆積している。加速度の高い長者・江陽地区は粘土層が多く堆積しており、沖積層厚が 10m 未満とかなり浅くなっている。本来軟弱な地盤程揺れやすいが、今回加速度が大きくなったのは比較的硬質な土質である粘土およびローム層が堆積している地区となった。これについては、各地盤の持つ固有周期と地震波の持つ卓越周期の関係により、地震動の伝わる大きさは異なるためと考えられる。

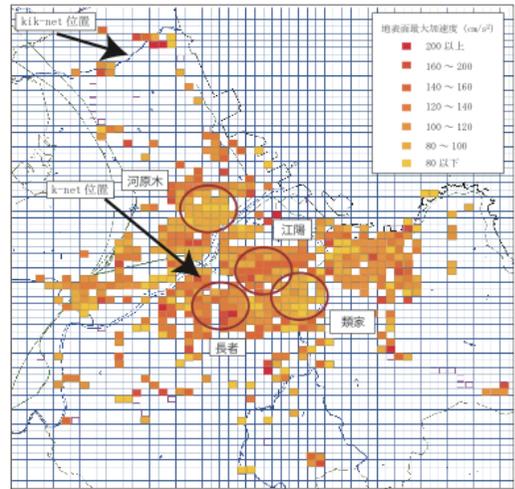


図 11 地表面最大加速度分布

図 12 に各地区の深度ごとにおける最大加速度およびせん断波速度  $V_s$  の例を示す。同図からも加速度の増幅は軟弱地盤程大きくなるとは一概には言えない。これは、地震波が周波数を変えながら伝播するため、地盤の固有周期と一致したときに大きく増幅すると考えられる。また、工学的基盤の深い地区が比較的揺れなかった要因としては、柔らかい層と硬い層が交互に堆積しているため、周期のずれによりエネルギーが伝播できなかったためと考えられる。以上のことより、今後各地盤材料の固有周期および地震波の卓越周期の違いによる地震動の挙動の検討が必要である。

## 5. 結論

本研究では、特に地震による八戸地域の地表面加速度の空間的な加速度分布を広域的かつ小さな領域で把握するために八戸地盤情報 DB に収録されている約 2500 本の地盤情報に基づいて解析を行った。また、地盤情報 DB から広域的に地震動を予測するための基本的な検討として、地盤のモデル化およびパラメータ設定方法について検討を行った。本研究においては、地

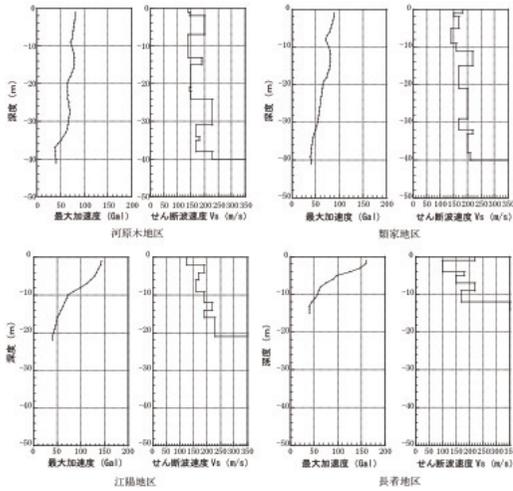


図 12 各地区の深度ごとの最大加速度およびせん断波速度

盤のモデル化は電子地盤図による 250m メッシュとし、パラメータの決定は地盤情報には必ず含まれる  $N$  値を基に行った。また、工学的基盤は、平均地盤モデルにより行った。その結果として得られた知見を以下に示す。

- 地盤のモデル化およびパラメータ設定についてはかなり大雑把なものであるが、ある程度の精度で地表面加速度分布を予測でき、八戸地域の広域的な地表面加速度分布図を作成できた。
- 本研究で行った方法によれば、地表面加速度を若干過小に評価する傾向にある。
- 特にその影響は、 $N$  値から推定されるパラメータの決定方法にあるものと考えられる。
- 電子地盤図による平均地盤モデルを作成することで、工学的基盤が推定可能であり、ある程度の精度で地震動を評価できる。解析結果に与える影響はパラメータ設定に比較して小さい。

また、より精度向上を図るために以下のことが、今後の課題としてあげられる。

- 八戸地域には、火山灰質粘性土（ローム）や火山灰質砂質土（しらす）が広域かつ厚く体積しており、これらの地震時の力学的

挙動に関する知見が不足している。実験等によりデータを蓄積する必要がある。

- 地震波の特性と各地点での地表面加速度分布との関係について検討する。
- 過去の地震被害との比較により、解析精度の検証が必要である。
- 地盤調査の担当者あるいはその経験値の差による地盤情報データのバラツキの検証が必要である。

### 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省「大学等における地域復興のためのセンター的機能整備事業：地域の創造的復興のための技術開発・支援と地域連携教育推進」により行われました。また、本研究を進めるにあたり、本学地盤工学研究室の元任期付研究員の鈴木久美子氏、博士前期課程修了生の佐藤雄太氏、市川裕一朗氏には、在籍中に本研究に関わる基本的な部分を精力的に実施して頂きました。ここに謝意を評します。

### 参考文献

- 1) (財) 防災科学技術研究所, 地盤情報検索サイト Geo-Station ([http://www. geo-station. bousai. go. jp/jps/](http://www.geo-station.bousai.go.jp/jps/))
- 2) 長谷川明, 鈴木久美子, 金子賢治, 熊谷浩二, 地域の地盤情報データベースの構築と継続性, 第 54 回地盤工学シンポジウム, pp.189-192, 東京, 2009.
- 3) 山本浩司, 三村衛, 三田村宗樹, 大島明彦, 小田和広, 大阪平野における全国電子地盤図の作成 - パイロット・スタディー, 第 43 回地盤工学研究発表会, 広島, 2008.
- 4) 吉田望, 末富岩雄, DYNEQ A computer program for DYNAMIC response analysis of level ground by Equivalent linear method, ([http://www.civil.tohoku-gakuin. ac.jp/yoshida](http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida))

/computercodes/index.html)

- 5) Imai, T, P-and S-wave velocities of the ground in Japan, Proc. 9th ISSMFE, Vol. 2, pp.257-260, Tokyo, 1997.
- 6) (社) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計, 日本道路協会, 1990.
- 7) 日本道路公団, 設計要領, 第一集, 第一編土工, pp.28-29, 道路厚生会, 1983.
- 8) 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, pp.509-512, 北海道, 1986.
- 9) 今津雅紀, 福武毅芳, 動的変形特性のデータ処理に関する一考察, 第 21 回土質工学研究発表, pp.533-536, 北海道, 1986.
- 10) 滝田貢, 飛田潤, 毛呂眞, 伊藤敬一, 八戸工業大学の地震応答特性, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.42B, pp.541-552, 1996.
- 11) (財) 防災科学技術研究所 K-net, (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>)
- 12) (財) 防災科学技術研究所 KiK-net, (<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>)

## 要 旨

八戸地域は、地震が多い地域であり、1968年十勝沖地震を始めとして過去50年間だけでも多くの地震被害を受けている。将来的に地震の被害を低減するための対策を施すためには、精度良くかつ詳細な地震動の予測が不可欠である。一方、八戸地域では、八戸地域地盤情報データベースが構築され、約2500地点の地盤情報が電子化され蓄積されている。本研究では、八戸地域における地表面加速度分布を広域的かつ詳細に把握するために、八戸地域地盤情報データベースに収録されている約2500本の地盤情報を基に一次元地震応答解析を行った。また、その前提として、限られた情報を基にした地盤のモデル化およびパラメータ決定方法について検討した。その結果、ある程度の精度で予測した250mメッシュにおける地表面加速度分布図を作成することができた。さらに、地盤のモデル化の部分とパラメータ決定の部分について、いくつかの知見を得た。

キーワード：八戸地域地盤情報データベース、一次元地震応答解析、電子地盤図、解析パラメータ

