

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 7 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686053

研究課題名(和文) 周期特性を考慮した表層地盤増幅率全国マップの構築とその利用法の提案

研究課題名(英文) Evaluation of site response characteristics considering periodic contents of ground motion

研究代表者

丸山 喜久 (MARUYAMA, Yoshihisa)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70397024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、地盤の増幅特性を周期ごとに評価し、地盤増幅率マップを構築することである。東北地方太平洋沖地震を含む32地震の観測記録をもとに応答スペクトルの距離減衰式を構築した。距離減衰式の地点補正項と深さ30mまでの平均S波速度の関係式を周期ごとに評価し、日本全国を対象として周期ごとの地盤増幅度を推定した。さらに、地震動の周期特性と過去の地震における構造物被害の関係性を検討した。東北地方太平洋沖地震の際の宮城県仙台市における上水道管路の被害については、丘陵を平坦化した造成地にとくに被害が集中していた。地震動の周期特性と被害率の相関性はやや不明瞭な点もあり今後の検討課題である。

研究成果の概要(英文)：In this study, the characteristics of site amplification in Japan were estimated using the attenuation relationship of each station's response spectrum. Ground motion records observed during 32 earthquakes were employed to construct the attenuation relationship. The station correction factors were evaluated with respect to the average shear wave velocities averaged over the upper 30 m (AVS30) using a geographic information system dataset. Then, the site amplifications for specific periods were estimated throughout Japan. This study also focused on the seismically induced damage to water distribution pipeline in Sendai City. The inventory of water distribution pipeline and the locations of pipe breaks compiled by the Sendai City Waterworks Bureau were employed in this study. The seismically induced damage to water distribution pipelines concentrated in the hilly residential areas developed with cutting and leveling the hills and then filling the valleys for the past several ten years.

研究分野：都市安全工学

キーワード：地盤増幅特性 地震応答スペクトル 地点補正項 伝達関数 埋設管被害

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月に発生したM9の超巨大地震である東北地方太平洋沖地震では、主に津波によって東日本の広範囲に甚大な被害をもたらした。一方で、震源に近い東北地方では宮城県栗原市で震度7の非常に強い揺れを観測したが、地震動による被害は懸念されたほど多くはなく、津波による広域な被害と比べると極めて限定的であった。この理由の一つとして指摘されるのは、東北地方で観測された地震動の周期特性である。東北地方で観測された地震記録の多くは、周期約0.5秒以下の成分が卓越する特徴を持っている。このような地震動は、工場やプラントの生産設備および配管系統、一部の土木構造物などに影響を与えることがある。しかし、例えば木造住宅は倒壊などの深刻な被害に遭うことはほとんどない。

一方、1995年兵庫県南部地震(最大震度7)では、震動によって多数の建物が倒壊し甚大な被害をもたらした。この際に観測された地震動は周期1~2秒の成分が卓越しており、木造住宅に影響を与えやすい揺れ方であったことが分かっている。このように、同じ震度7であっても、地震動の周期特性によって建物が倒壊する場合とそうでない場合がある。したがって、構造物の入力地震動を詳細に評価するには、地震動の周期特性を明らかにすることが重要である。

## 2. 研究の目的

本研究は、地震観測記録に基づいて地盤増幅率の周期特性を明らかにし、周期ごとに地盤増幅率マップを整備することを目的とする。さらに、過去の地震の際の地中埋設管、木造建物などの構造物被害データと、増幅率マップを用いて推定される地震動強さの相関性を周期帯別に検討し、地震動の周期特性と構造物被害の関係性を評価する。本研究の最終的な目標は、地盤増幅率マップの全国版を提案し、地震動の周期特性を地震発生直後に把握できる地震情報システムのプロトタイプを構築することである。

## 3. 研究の方法

地震観測点における地盤増幅率の周期特性を地震記録を用いて明らかにする。地震記録から推定する地盤増幅率の周期特性の妥当性は、防災科学技術研究所が配備している基盤強震観測網(KiK-net)や東京大学地震研究所が中心となり構築を進めている首都圏地震観測網(MeSO-net)による地中地震記録を用いて検証する。地震動の周期特性は、周期または振動数の関数であるスペクトルとして表現する必要があるが、本研究では構造物の設計によく使われる地震応答スペクトルを用いる。

地震観測点を対象として推定した地盤増幅率の周期特性を面的に展開し、地盤増幅率マップを整備する。点情報を面的に拡張する

手法としては、均質な精度で広範囲を網羅できるデータを説明変数として回帰分析を行うことが挙げられる。本研究では、全国を均質に網羅することのできる、標高および傾斜角、微地形区分、深さ30mまでの平均S波速度(AVS30)などをパラメータとした周期ごとの地盤増幅率の予測式を構築し、地盤増幅率マップを作成する。

さらに、地盤増幅率マップを用いて既往の被害地震の地震動分布を周期ごとに推定し、構造物被害との相関分析を行う。これによって、地震動強さの周期特性と構造物被害率の関係を定量化し、増幅率マップの有用性を検証する。

## 4. 研究成果

## (1) 地盤増幅率の周期特性の面的評価

地震観測点における地震動の周期ごとの地盤増幅率を評価するために、応答スペクトルの距離減衰式を構築し、その地点補正項を利用することを検討する。応答スペクトルの距離減衰式には、式(1)のような関数形を仮定した。また、国内の32地震の観測記録を使用した。

$$\log_{10} y(T) = b_0(T) + b_1(T)Mw + b_2(T)r + b_3(T)\log_{10}(r + k(T)) + b_4(T)H + c_i(T) \quad (1)$$

ここで、 $y(T)$ は減衰定数5%の速度応答スペクトルの水平2成分の合成値(cm/s)、 $r$ は断層最短距離(km)、 $H$ は震源深さ(km)、 $b_i(T)$ は周期 $T$ ごとの回帰係数である。 $k(T)$ は、震源付近で地震動強さが飽和することを表現するための回帰定数である<sup>1)</sup>。 $c_i(T)$ は観測点 $i$ の地点補正項であり、その観測点における地盤条件、地形効果、地震計の設置条件などの影響が重なったものと考えられる<sup>2)</sup>。なお、地点補正の平均値は0となる。

本研究では、地点補正項 $c_i(T)$ が各地点の震動特性を表わすものとして妥当であるか、KiK-net観測点における地中-地表間の地震動伝達関数と比較することで検討を行う。なお、本研究の地点補正スペクトルは速度応答スペクトルに関するものであるが、速度応答スペクトル比と平滑化したフーリエスペクトルの振幅比が似た形状を示す<sup>3)</sup>ため、ここでは伝達関数と比較した。伝達関数 $H(f)$ は、式(2)のように表され、 $S_{xx}(f)$ は地中における加速度波形のパワースペクトル、 $S_{yy}(f)$ は地中と地表加速度のクロススペクトルである。

$$H(f) = S_{yy}(f)/S_{xx}(f) \quad (2)$$

図1に、結果の一例を示す。なお、地点補正項の基準となる層を明確化することが難しいため、ここでは岩盤サイト10箇所における地点補正項の平均値を用いて、各地震観測点の地点補正項を基準化した。地点補正項と伝達関数の周期ごとの変動を比較したところ、いずれの地点でも地点補正項と伝達関数の周期特性は概ね一致していた。このこと

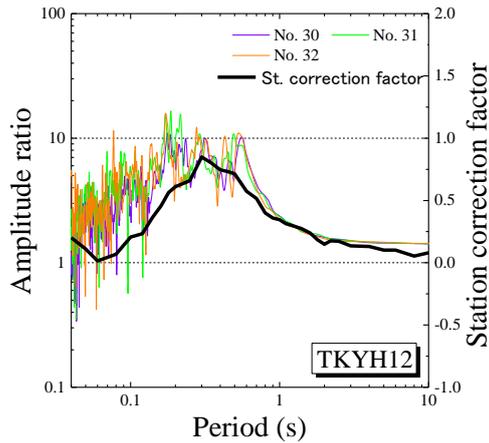


図1 地点補正項と伝達関数の比較 (KiK-net 八王子: TKYH12)

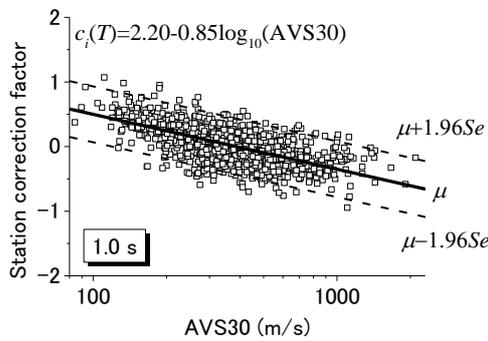


図2 地点補正項と AVS30 の関係 (周期 1.0 秒)

から、周期特性を考慮した地盤増幅特性の推定には、地点補正を適切な層で基準化し利用すれば、有効であると考えられる。しかしながら、一部の観測点における東北地方太平洋沖地震の本震など、地盤の非線形性の程度が高い場合の適用性については議論の余地が残る。

地点補正項と地震観測点の深さ 30m までの平均 S 波速度 (AVS30) の関係性を評価した。AVS30 は、公開されている K-NET, KiK-net のボーリングデータを用いて、松岡ら<sup>4)</sup>の算出方法に従い算出した。図 2 に周期 1.0 秒のときの結果を示す。AVS30 と地点補正項の相関係数、標準誤差を周期ごとに評価したところ、地点補正項が適用可能と考えられるのは周期約 0.5 秒以上の震動成分であることが分かった。

以上のことをふまえると、地点補正項はその地点の周期ごとの地盤増幅特性を表すのに有効であり、さらに周期約 0.5 秒以上に関しては AVS30 とも相関が高いことが分かった。我が国では、全国を均質な精度で網羅している微地形区分<sup>5)</sup>をもとに AVS30 分布<sup>4)</sup>が整備されている。この AVS30 分布と本研究で構築した地点補正項と AVS30 の関係式を用いれば、増幅率 (=  $10^{c_i(T)}$ ) を周期ごとに評価することができる。図 3 に本研究で推定した全国の周期 1.0 秒の増幅率の分布を、図 4 に一都三県 (東京, 神奈川, 埼玉, 千葉) の周

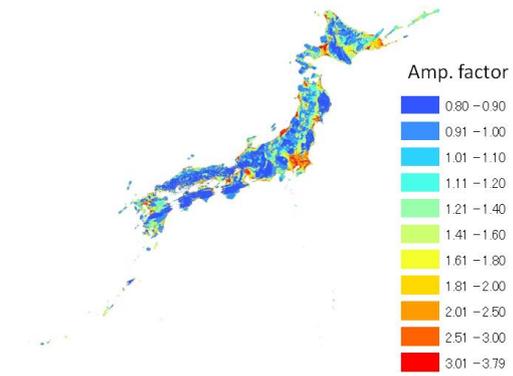


図3 日本全国の周期 1.0 秒の震動成分の増幅率

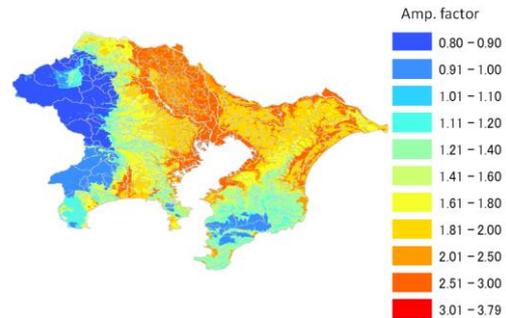


図4 一都三県の周期 1.0 秒の震動成分の増幅率

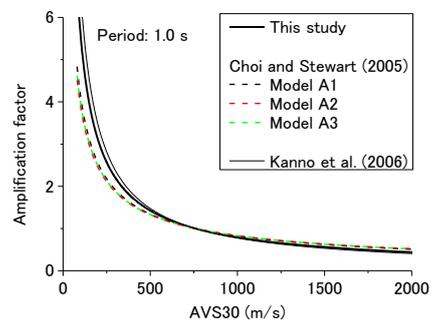
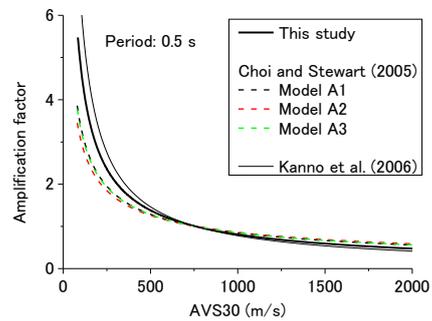


図5 本研究で推定した増幅率と既往研究の比較

期 1.0 秒の増幅率を示す。なお、これらの結果は S 波速度 600m/s の層の増幅率が 1.0 となるように基準化したものである。とくに首都圏では、周期 1.0 秒程度の震動成分が増幅されやすいことが確認できた。



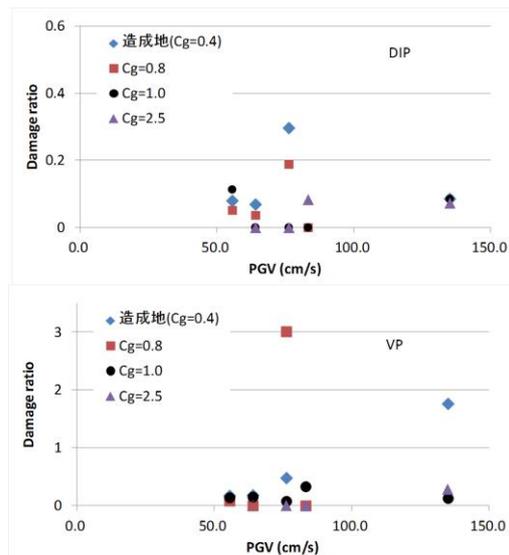


図 9 仙台市における地震動強さと水道管被害率の関係 (管径 100-150 mm)

度 (PGV) の平均値は 73.4 cm/s であり, 100 cm/s 以上の PGV を 3 観測点で示した. 強震記録と上水道管路の被害率を対応付けるために, 深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度 (AVS30) の分布<sup>9)</sup>にもとづき, 地震観測点 (29 地点) とほぼ同程度の地震動強さと考えられる範囲を選定した. また, 地震観測点周りの範囲ごとに管路延長と被害数をまとめ, さらに PGV の大きさによってその結果を集約した.

図 9 に, 宮城県仙台市における地震動強さと水道管被害率の関係を管種別に示す (管径 100-150 mm のみ).  $C_g$  が 1.0 とされる低地における DIP の被害率は概して小さい. PGV が 60-70 cm/s, 70-80 cm/s のとき低地では被害がないが, 台地 ( $C_g = 0.8$ ) と造成地では被害が発生している. とくに造成地の被害率は高く, 補正係数を 0.4 とすることは適当ではないと考えられる. VP についても, 低地よりも造成地の方が高い被害率を示すことが分かる. このような丘陵の造成地の被害率が低地の被害率よりも高くなる現象は, 現状の被害予測式での扱いとは逆の傾向を示すものであり, 地震被害予測や水道管路の更新計画立案の際に十分な配慮が必要なものと考えられる. また, 同程度の地震動強さの下で低地よりも造成地の方が被害率が高かったことは, 地震動の特性なども影響しているものと思われるが, 今回の事例について震動の周期特性と被害率の相関性を評価することはやや困難であり, 今後の継続課題と考えている.

本研究で収集した兵庫県南部地震の建物被害データでは, 年代ごとの構造別棟数, 被災度判定棟数, 建築年代別棟数などが含まれている. ここでは, 地震により被害を受けた建物が最終的に解体に至る割合 (解体率) に着目し, 被害分析を行った. 既往研究<sup>10)</sup>では, 新潟県中越地震の際の建物解体棟数をもとに, 木造建物の解体損傷度を算出している.

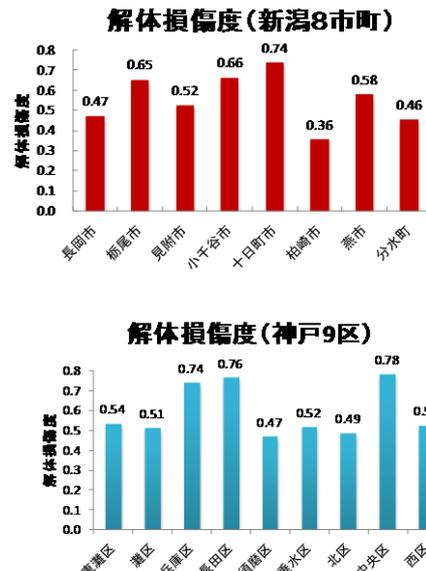


図 10 新潟県 8 市町と神戸市 9 区の木造建物の解体損傷度

兵庫県南部地震の際の建物被害データを用いて, 既往研究に従って解体損傷度を算出した. 新潟県 8 市町と神戸市 9 区で推定された解体損傷度を市町別または区別に図 10 に示し, 集計単位ごとの解体損傷度のバラツキを評価する. 新潟県中越地震の際の市町別の解体損傷度は, 柏崎市の 0.36 が最小, 十日町市の 0.74 が最大で, 標準偏差は 0.12 である. また, 対象地全域の解体損傷度は 0.59 である. 神戸市 9 区に関しては, 北区の 0.49 が最小, 中央区の 0.78 が最大で, 標準偏差は 0.12 である. 全域の解体損傷度は 0.61 である. このように全域での解体損傷度は, 2 地震とも同程度の値を示していることから普遍性は高いものと考えられる. しかし, 区ごとにバラツキがあるのも事実であり, 今後はその原因について検討を進めるとともに, 地震被害想定などに本研究の結果を適用する際には, バラツキを考慮した解体棟数予測とすることが望ましいと思われる.

#### <参考文献>

- 1) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No. 523, pp. 63-70, 1999.
- 2) Molas, G. L. and Yamazaki, F.: Attenuation of earthquake ground motion indices in Japan including deep focus event, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, pp. 1343-1358, 1995.
- 3) 村岡七重, 丸山喜久, 山崎文雄: 余震および常時微動のフーリエ振幅比を用いた本震の応答スペクトルと計測震度の推定, 日本建築学会構造系論文集, No. 603, pp. 179-186, 2006.
- 4) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国地形・地盤分類メッシュ

マップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.239-251, 2005.

- 5) 若松加寿江, 松岡昌志: 全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用, 日本地震工学会誌, No.18, pp. 35-38, 2013.
- 6) Choi, Y. and Stewart, J.P.: Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity, Earthquake Spectra, Vol. 21, No. 1, pp. 1-30, 2005.
- 7) Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y.: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp. 879-897, 2006.
- 8) 仙台市水道局: 東日本大震災 仙台市水道復旧の記録, 2012.
- 9) 水道技術研究センター: 地震による管路被害予測の確立に向けた研究報告書【概要版】, 2013.
- 10) 川口裕樹, 武田正紀, 丸山喜久: 木造建物の解体を考慮した東京都の災害廃棄物量の予測, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.59A, pp. 396-404, 2013.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. 猪股渉, 乗藤雄基, 大田肇士, 丸山喜久: 超高密度地震観測情報に基づく地盤震動特性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, pp. I\_187-I\_198, 2014 (査読有).
2. 丸山喜久, 伊藤智大, 若松加寿江, 永田茂: 東北地方太平洋沖地震における宮城県仙台市の水道管路被害状況の分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 3, pp. 377-388, 2014 (査読有).
3. Maruyama, Y. and Sakemoto, M.: Estimation of site amplification characteristics of response spectrum with respect to the average shear wave velocity, Proceedings of the 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Material Research (ACEM14), Paper No. M4B.3.GE167\_676F, 2014 (査読無).
4. 川口裕樹, 武田正紀, 丸山喜久: 木造建物の解体を考慮した東京都の災害廃棄物量の予測, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.59A, pp. 396-404, 2013 (査読有).
5. 酒本真先, 丸山喜久, 山崎文雄: 地盤増幅特性の広域的評価に向けた応答スペクトル距離減衰式の地点補正スペクトルの利用に関する基礎検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, pp. I\_405-I\_416, 2013 (査読有).
6. Sakemoto, M., Maruyama, Y., Yamazaki, F.: Evaluation of site amplifications in Japan using seismic motion records and a

geomorphologic map, Proceedings of the 33rd Asian Conference on Remote Sensing, Paper No. PS1-21, 8p, 2012 (査読無).

〔学会発表〕(計 6 件)

1. 丸山喜久, 永田茂, 若松加寿江: 東北地方太平洋沖地震における上水道管路被害の広域評価, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, 2014 年 12 月 4 日~6 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市).
2. 上原康平, 丸山喜久: 道路機能への地震による影響評価のための曝露交通量の利用, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014 年 9 月 10 日~12 日, 大阪大学 (大阪府吹田市).
3. 丸山喜久, 伊藤智大, 若松加寿江, 永田茂: 仙台市における地震動強さと配水管被害率に関する分析, 平成二十五年度全国会議 (水道研究発表会), 2013 年 10 月 23 日~25 日, ビックパレットふくしま (福島県郡山市).
4. 猪股渉, 乗藤雄基, 大田肇士, 丸山喜久: 高密度な地震観測記録を用いた地盤震動特性の評価, 第 33 回地震工学研究発表会, 土木学会, 2013 年 10 月 24 日~25 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区).
5. 酒本真先, 丸山喜久, 山崎文雄: 東北地方太平洋沖地震における応答スペクトルの距離減衰特性による地盤増幅特性の評価, 第 32 回地震工学研究発表会, 土木学会, 2012 年 10 月 25 日~27 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区).
6. 大田肇士, 丸山喜久, 乗藤雄基, 猪股渉: 首都圏における高密度な地震記録を用いた広域地盤データの評価, 第 4 回相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム, 土木学会, 2012 年 12 月 7 日, 神戸市水道局 たちばな職員研修センター (兵庫県神戸市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://ares.tu.chiba-u.jp/marulab/index.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸山 喜久 (MARUYAMA, Yoshihisa)  
千葉大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70397024