

2007年能登半島地震における 建物被災地区を対象とした地震動評価

榎波 智仁¹・村田 晶²・宮島昌克³・池本敏和⁴

Tomohito ENAMI¹, Akira MURATA², Masakatsu MIYAJIMA³, and Toshikazu IKEMOTO⁴

¹学生会員 金沢大学大学院学生 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: enami@pbousa9.ce.t.kanazawa.jp

²正会員 金沢大学大学院助教 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: murata@t.kanazawa.jp

³正会員 金沢大学大学院教授 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: miyajima@t.kanazawa.jp

⁴正会員 金沢大学大学院助教 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: ikemoto@t.kanazawa.jp

建物の地震被害に大きな影響を与える要素のひとつである、地震動については、近年飛躍的に発展を遂げた国内各種の強震観測網により、多くの情報が得られるようになった。しかし、2007年能登半島地震のように地方では震度情報しか得られない事例も見られ、被害を推定するためにはより正確な地震動の推定が求められる。そこで本研究では、このように情報の少ない地区を対象として、強震記録を用いて地震動を推定し、建物被害との関係について検討を行った。

キーワード: 2007年能登半島地震, 強震記録, 応答スペクトル, 平均S波速度, 建物被害率, 被害関数

1. はじめに

2007年3月25日午前9時41分58秒、能登半島西岸からやや沖合の深さ約11kmを震源とした気象庁マグニチュード6.9の2007年能登半島地震が発生した。図-1に震源位置を示す。この地震により石川県能登地方を中心として最大震度6強の強い揺れが観測された。今後の地震対策のために、地震動と被害率との関係性を知ることは重要なことである。2007年能登半島地震では、大きな被害を受けた地域の中に地震情報が得られていない地域もある。このような地域で地震動と被害率との関係性を調べるには地震動の推定が必要になる。

地震動の支配要因には震源特性と伝播経路特性および地盤の増幅特性があるといわれている。ここで簡易的な地震動推定方法では、震源特性としてマグニチュードおよび震源深さ、伝播経路特性として震源距離あるいは断層最短距離が用いられている。一方、地盤の増幅特性に関しては、地盤の物性値が種々あることから一意的に推定することが難しい。本来ならば評価には詳細な地盤データが必要であるが、一方では詳細に地盤データが揃えられている地

域は限られている。そのため、限られた地盤データを用い、かつ地震動の増幅と相関の高いものについての研究がなされてきた。翠川、作川(1993)¹⁾は1987年千葉県東方沖地震の強震記録を用いて、地表からある深さまでの地盤の平均S波速度によって地盤の増幅特性を評価した。アメリカでは1997年



図-1 2007年能登半島地震の震央位置²⁾

に地盤の増幅特性の評価方法として NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) が示され、地表 30m の平均 S 波速度によって地盤をクラス分けして増幅率 (地表加速度応答スペクトルと基盤加速度応答スペクトルの比) を評価している。内山、翠川 (2003)³⁾ は NEHRP における地盤のクラス分けをさらに細かくし、地盤の非線形化により対応する評価方法を提案している。わが国の地震動予測地図⁴⁾ は 2004 年から公開されており、確率的地震動予測地図とシナリオ地震による強震動予測地図から成る。確率的地震動予測地図では経験式を用いて、地盤の増幅度 (地表最大速度と基盤最大速度の比) および地表での地震動 (最大速度) の推定を行っている。基盤最大速度の評価には司・翠川 (1999)⁵⁾ の距離減衰式、増幅度の評価には松岡・翠川 (1994)⁶⁾ 式を用いている。ここで用いられる増幅度の評価式では、地表 30m の平均 S 波速度がパラメタとなっている。松岡・翠川 (1994) は地表 30m の平均 S 波速度を国土数値情報の微地形分類から簡易的に推定する方法を提案している。これによって、全国データベースである国土数値情報から広域で増幅度を推定することが可能になった。

以上より、本研究では伝播経路特性を表すパラメタとして震源距離、地盤の増幅特性を表すパラメタとして地表 30m の S 波平均速度を用いて地震動の推定を行う。

次に、被害率と関連のある地震動の推定に関する既往の研究について述べる。前述した地震動予測地図で用いられている方法によって、広域で地震動を推定する手法が確立されたが、当法で推定できるのは最大速度のみであり、それは地震動の周期特性を反映したものではない。したがって、周期特性を考慮した建物被害の推定を行えないという問題点がある。そこで境ら⁸⁾ は、建物の塑性化による固有周期の伸びを考慮して、特定の周期帯の平均応答スペクトルを破壊力指標とすることを提案している。また、西川ら⁹⁾ は 2007 年能登半島地震において、自治体で観測された最大加速度と計測震度から平均応答スペクトルを推定し、0.7 秒から 1.2 秒の平均応答速度と木造家屋の被害率とが高い相関を示すことを確認している。以上より、本研究では推定する地震動として、能登半島地震において被害率と相関が高いといわれている周期帯 (周期 0.7 秒, 0.8 秒, 0.9 秒, 1.0 秒, 1.1 秒, 1.2 秒) の速度応答スペクトル (減衰定数 5%) の平均値を対象とする。

2. 解析手法

2007 年能登半島地震の強震記録は防災科学技術研究所 K-net の観測点 386 箇所観測された。本研究ではこれらの強震記録 386 個のうち、観測点での地表 30m の平均 S 波速度が算定できた 168 個の強震記録を用いる。

地表 30m の平均 S 波速度については K-net で公開されている PS 検層データを用いて算定した。なお、

これらのデータでは深度 20m より深い地盤の S 波速度は把握できないので、内閣府の地震防災マップ作成技術資料¹⁰⁾ に記されている方法に基づいて算定する。

速度応答スペクトルの算定方法および重回帰分析について述べる。各強震記録に対して加速度時刻歴の水平二成分の主要動部分 5.12 秒間をそれぞれ抽出し、ノイズを除去するために周期 0.1 秒から 3.5 秒まで平坦で、周期 0.06 秒以下と 7 秒以上を完全に遮断するバンドパスフィルターを周波数領域でかける。その後、周期 0.7 秒, 0.8 秒, 0.9 秒, 1.0 秒, 1.1 秒, 1.2 秒それぞれにおける減衰定数 5% の速度応答スペクトルを、地震動の方向性を考慮した 2 次元応答スペクトルの形で計算する¹⁰⁾。前述のように、地震動特性の支配要因としては震源特性、伝播経路特性、および地盤の増幅特性がある。同一震源の地震動の場合、伝播経路特性および地盤の増幅特性が主な支配要因であると考えられる。そこで、回帰モデルは参考文献 1) および 10) を参考にして以下のように定式化する。

$$\log S_V(t) = a(t) \log X + b(t) \log AVS30 + c(t)$$

ここで、 $S_V(t)$ は周期 t 秒における減衰定数 5% の速度応答スペクトル (cm/s), X は震源距離 (km), $AVS30$ は地表 30m の平均 S 波速度 (m/s), $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$ はともに周期 t 秒における回帰係数である。

3. 解析結果

本章では、まず 2 章の方法により作成した回帰式の精度について述べる。次に被害関数の定式化の方法とその結果について述べる。

(1) 重回帰分析の結果

2007 年能登半島地震本震における各観測点の強震記録から作成した周期 0.7 秒, 0.8 秒, 0.9 秒, 1.0 秒, 1.1 秒, 1.2 秒それぞれの速度応答スペクトル (減衰定数 5%) の回帰式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \log S_V(t = 0.7s) &= -1.88 \log X \\ &\quad - 0.891 \log AVS 30 + 6.75 \\ \log S_V(t = 0.8s) &= -1.89 \log X \\ &\quad - 0.903 \log AVS 30 + 6.81 \\ \log S_V(t = 0.9s) &= -1.88 \log X \\ &\quad - 0.898 \log AVS 30 + 6.81 \\ \log S_V(t = 1.0s) &= -1.88 \log X \\ &\quad - 0.912 \log AVS 30 + 6.86 \\ \log S_V(t = 1.1s) &= -1.90 \log X \\ &\quad - 0.902 \log AVS 30 + 6.88 \\ \log S_V(t = 1.2s) &= -1.91 \log X \\ &\quad - 0.876 \log AVS 30 + 6.86 \end{aligned}$$

決定係数は周期 0.7 秒, 0.8 秒, 0.9 秒, 1.0 秒, 1.1 秒, 1.2 秒それぞれで 0.843, 0.846, 0.843, 0.837,

0.836, 0.840 であり、いずれも同程度で、かつ、よい精度で応答速度を推定できている。回帰式によって推定した値と実際の値の比較を図-2 に示す（図中には勾配が 1, 切片が 0 の直線も示す）。図-2 より、回帰式を用いることによって、2007 年能登半島地震の強震記録が得られていない地域における地震動を、伝播経路特性および地盤の増幅特性を考慮して推定できると考えられる。

(2) 被害関数の定式化

被害関数には参考文献 9) に記されているものように汎用的に使われることを目的としたものが既にある。しかしながら、建物、特に古い木造家屋などは地域ごとに特性が異なるといわれ、被害関数は各地域で独自に作られるべきだという考えもある。そこで、2007 年能登半島地震で被災した地域の中で被害率がわかっているが強震記録が得られていない地域において回帰式によって地震動推定を行い、実

際に得られている被害率との相関を見ることで被害関数の定式化を行う。

被害率は、被害率がわかっている地域において木造家屋が集まった地点を基準点として定め、それを中心とした半径 100m 以内の全建物を対象に以下の式で算定した。

$$D = D5 + \frac{D4}{2} + \frac{D3}{4} + \frac{D2}{8} + \frac{D1}{16}$$

ここで、 D は被害率、 $D5, D4, D3, D2, D1$ はそれぞれ被害レベル¹¹⁾が倒壊、大破、中破、小破、軽微である建物の割合を表す。なお、各地の被害率は悉皆調査により得られたデータを用いる。また、地震動推定に必要な地表 30m の平均 S 波速度は、参考資料 5 で公開されているメッシュデータを用いて各基準点に割り振る。

2007 年能登半島地震による被害率と地震動回帰式より推定した地震動の関係から被害関数の定式化

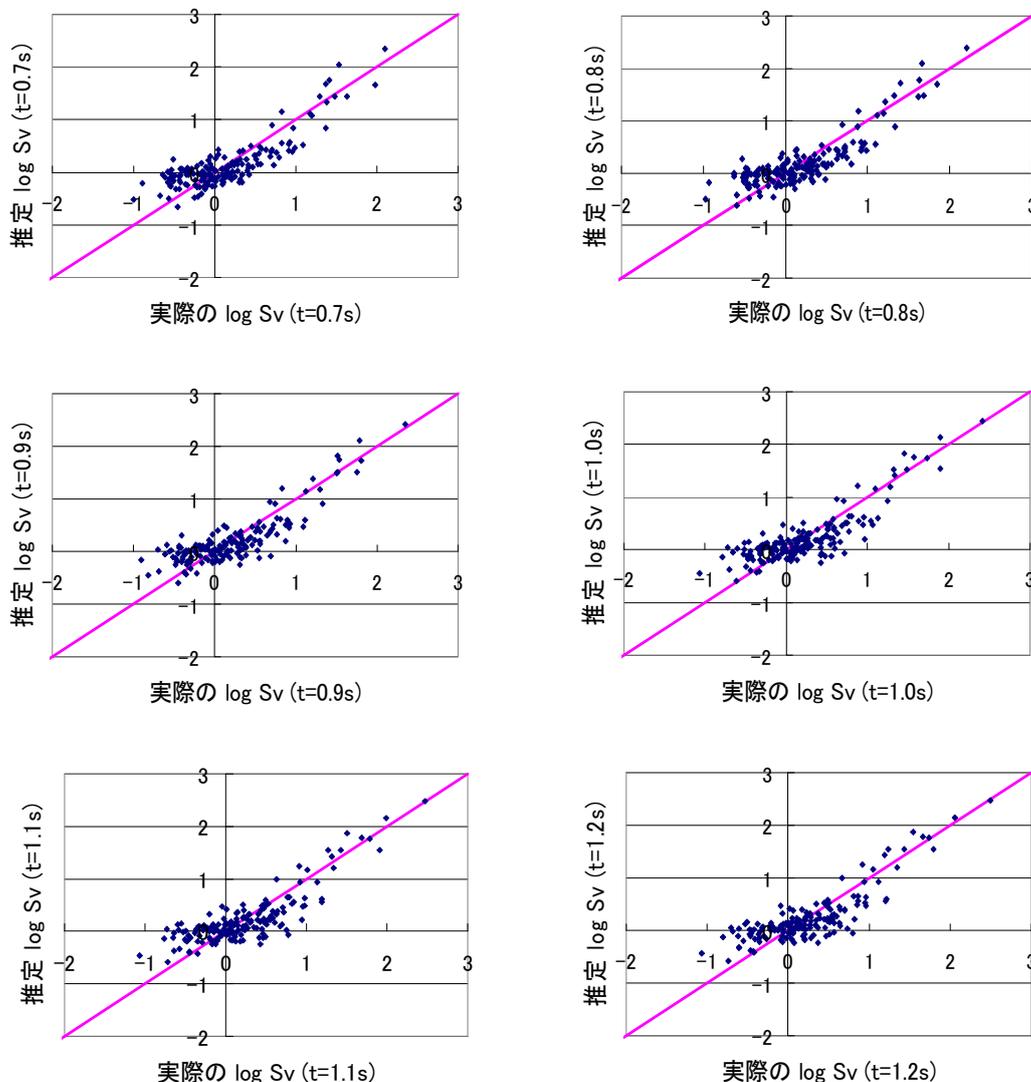


図-2 推定値と実際の値の比較

を行う。平均応答速度を対数正規分布に従う確率変数、被害率を確率分布関数の値として、対数正規分布のパラメタである平均値および標準偏差を求めた。被害率から算定した標準変量と平均応答速度の関係図を図-3として示す。なお、縦軸は地震動の回帰式6個より求まる応答速度の平均値の自然対数をとった値である。図-3の近似直線において切片は5.57、勾配は0.203、相関係数は0.899となった。これより被害率が平均応答速度を確率変数とした対数正規分布として表されることがわかる。以下に定式化した被害関数の式および図-4にグラフを示す。

$$D = \Phi \left[\frac{\ln Sv - \lambda}{\xi} \right]$$

$$\lambda = 5.57$$

$$\xi = 0.203$$

ここで、 D は被害率、 Φ は標準正規分布関数、 Sv は周期0.7秒、0.8秒、0.9秒、1.0秒、1.1秒、1.2秒の応答速度の平均値(cm/s)、 λ 、 ξ はそれぞれ対数正規分布の平均値、標準偏差にあたる。図-3より2007年能登半島地震の被災地区における被害率を周期0.7秒から1.2秒までの平均応答速度によってよい精度で推定できることがわかる。

4. まとめ

2007年能登半島地震の強震記録およびK-netのPS検層データのS波速度を用いて、特定の周期帯の速度応答スペクトルを推定する式を求めた。回帰式により推定した平均応答速度は実際の被害率と高い相関を示した。その相関を利用して、能登半島における建物の被害関数の定式化を行った。今後、他の地震においても特定の周期帯における平均応答速度と被害率の関係を検証する。本研究では地震ハザードステーションにおいて全国データベースとして公開されている地表30mの平均S波速度を用いて地震動予測を行った。また、強震記録に関しては防災科学技術研究所のK-net、悉皆調査は日本建築学会のものを用いた。関係者各位に感謝の意を表す。

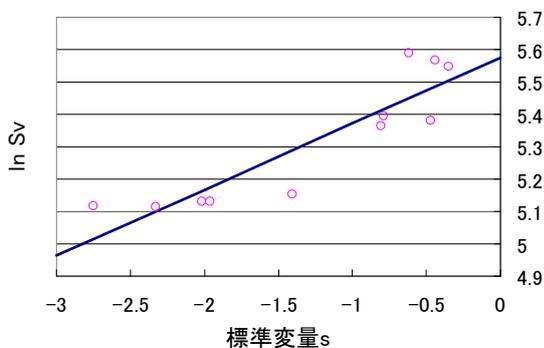


図-3 対数正規分布のパラメタ推定

参考文献

- 1) 翠川三郎, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の地震動応答スペクトルにみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第477号, pp.31-37, 1993年5月.
- 2) 国土交通省国土地理院, 「電子国土」: <http://zgate.gsi.go.jp/notojishin/notojishin.html>, 2009年9月アクセス.
- 3) 内山泰生, 翠川三郎: 地震記録および非線形応答解析を用いた地盤分類別の地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第571号, pp.87-93, 2003年9月.
- 4) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bousai.go.jp/>
- 5) 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報告集, 第523号, pp.63-70, 1999年.
- 6) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第22回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.23-24, 1994年.
- 7) 境有紀, 綾瀬一起, 神野達夫: 建物被害率の推定を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.85-91, 2002年.
- 8) 西川隼人, 宮島昌克: 2007年能登半島地震における自治体観測点を対象とした周期1秒前後の速度応答スペクトルの推定, 日本地震工学会論文集, 第8巻, 第2号, pp.11-21, 2008年.
- 9) 内閣府, 地震防災マップ作成のすすめについて: <http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/050513zisinmap.html>, 2009年9月アクセス.
- 10) 小林啓美, 長橋純男: 地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の増幅特性と地震基盤における地震動の特性, 日本建築学会論文報告集, 第240号, pp.79-92, 1976年.
- 11) 岡田成幸, 高井伸雄: 地震被害調査のための建物分類と破壊パターン, 日本建築学会構造系論文報告集, 第524号, pp.65-72, 1999年.

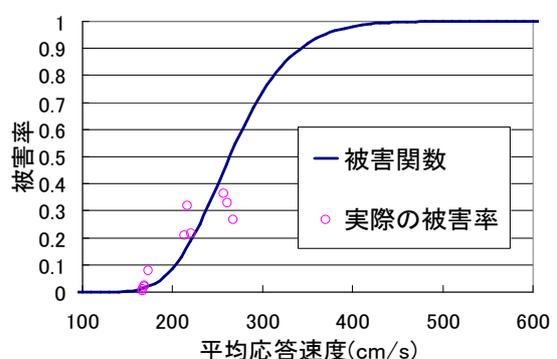


図-4 定式化した被害関数と実際の被害率