

直接基礎滑りを考慮した木造住宅の地震時被害推定手法の
高度化に関する研究
DEVELOPMENT FOR SEISMIC DAMAGE PREDICTION OF WOODEN
HOUSES ON SPREAD FOUNDATION COSIDERING
THE EFFECT OF BASE SLIP

松川和人¹⁾、三辻和弥²⁾、前田匡樹³⁾

Kazuto MATSUKAWA¹, Kazuya MITSUJI², Masaki MAEDA³

1) 東北大学大学院工学研究科、大学院生

¹ Graduate Student, Graduate school of Engeneering, Tohoku University.

e-mail : matsukawa@sally.str.archi.tohoku.ac.jp

2) 山形大学 地域教育文化学部 生活総合学科、准教授 博士 (工学)

² Associate Professor, Yamagata University, Dr. Eng.

e-mail : mitu@e.yamagata-u.ac.jp

3) 東北大学大学院工学研究科 都市建築学専攻、准教授 博士 (工学)

³ Associate Professor, Tohoku University, Dr. Eng.

e-mail : maeda@archi.tohoku.ac.jp

ABSTRACT: A seismic damage prediction system for wooden houses based on capacity spectrum method was developed by considering response reduction effect due to slip between base and ground. Dynamic response analysis of spread foundation with a rigid-plastic lateral resistance was conducted to derive the “Response reduction factor”. “Response reduction factor” was defined as a ratio of response spectrum considering base slip to response spectrum calculated as fixed base. A simple function evaluating “Response reduction factor” by “Input losses by base slip” was proposed. “Input losses by base slip” were determined by strength of earthquake and static friction factor between base of spread foundation and ground. Applying this method to the prediction system, prediction accuracy was improved for the earthquake such as Ojiya of 2004 Chuetsu Eq. and the applicable range of this function was revealed.

キーワード： 限界耐力計算、基礎滑り、被害推定、直接基礎

1. はじめに

2003年宮城県北部連続地震や2004年新潟県中越地震などでは、余震による二次被害の防止を目的とした応急危険度判定が行われており、一定の成果が挙げられている。しかしながら、地震情報や被害情報の収集などで判定活動着手までに時間が掛かり、二次被害が発生しやすい余震の活発なうちに判定を終了させることが出来なかった事例が発生しており、問題となっている。

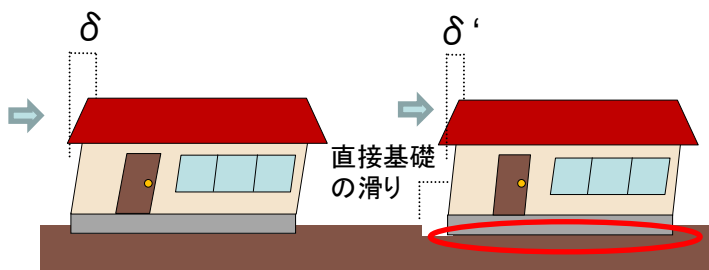
こうした現状を踏まえ、菅原¹⁾、著者ら²⁾は、被害状況の早期把握を目的として、地震発生直後にK-NETなどの観測点から得られる地震情報を用いて即時被害推定を行い、応急危険度判定士への情報発信及び、

判定進捗情報の集約を行うシステムの開発を行った。本システムの被害推定には、各地点の震度と被害率曲線に基づく一次推定、限界耐力計算を用いて行う二次推定があり、過去の被害地震における地震波データを用いた被害推定シミュレーションの結果、一次推定と比較して精度の良い推定手法となっている二次推定で、実被害より推定被害が過大評価される傾向が示された。

こうしたことの原因の一つとして、壁谷沢ら³⁾による実大振動実験などでも確認された、直接基礎の地表面での滑りによる応答低減(図1)が考えられている。著者ら⁴⁾は既往の研究で、直接基礎の滑りによる応答低減には、「基礎滑りが発生するような大きな加速度入力、どの程度繰り返されるか」という、入力地震動の大小と、地震動特性が影響を与えることを指摘した。

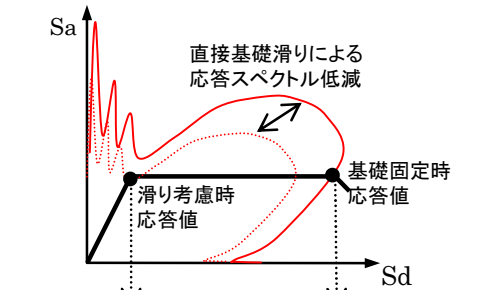
また、著者ら⁵⁾は、後述する基礎滑りを考慮した二次推定手法をRC造学校建築物に適用し、被害推定シミュレーションを行った結果、推定精度が最大で25%程度向上することを確認している。

本論文では、木造住宅を対象とした二次推定の精度向上を目的として、RC造学校建築物に適用した被害推定手法を木造住宅の被害推定に適用し、直接基礎の地表面での滑りを考慮することによって、推定精度がどの程度向上するかについての検討および推定精度が向上しやすいケースの整理を行う。また、直接基礎滑りによる建物応答への影響を簡便に評価する関数の提案を行う。尚、本論文では、「基礎滑り」の影響因子として静止摩擦係数を用いているが、これは基礎と地表面の間の静止摩擦係数及び、基礎直下の地盤の $\tan \phi$ (ϕ は内部摩擦角)に相当する静止摩擦係数も含んだ概念となっている。



$\delta > \delta'$
直接基礎の滑りによって応答が低減される

図1 直接基礎の滑りによる上部構造の応答低減



滑り考慮時住家全壊率 例え5% < 基礎固定時住家全壊率 例え15%

図2 基礎滑りを考慮した二次推定概念図

2. 直接基礎の滑りを考慮した応答スペクトル評価法の提案

2.1 評価法の概要

直接基礎の滑りを考慮した地震応答解析を行う場合、通常、基礎の水平地盤バネに、bi-liner型で初期剛性を剛、第二勾配をほぼ0とし、降伏強度を基礎と地盤の静止摩擦係数×建物全質量×重力加速度とした剛塑性の復元力特性を設定する。この剛塑性の水平地盤バネは、降伏強度を超えるような大きな加速度入力を建物に伝達せずカットするような性質がある。このため、剛塑性バネによってカットされる加速度入力を評価することによって、直接基礎の滑りによる上部構造入力への影響を評価することが可能である。今回はこの剛塑性の水平地盤バネでカットされる加速度時刻歴波形上の面積と、加速度時刻歴波形全体の面積の比を、「滑りによる入力損失」と定義する(図3)。

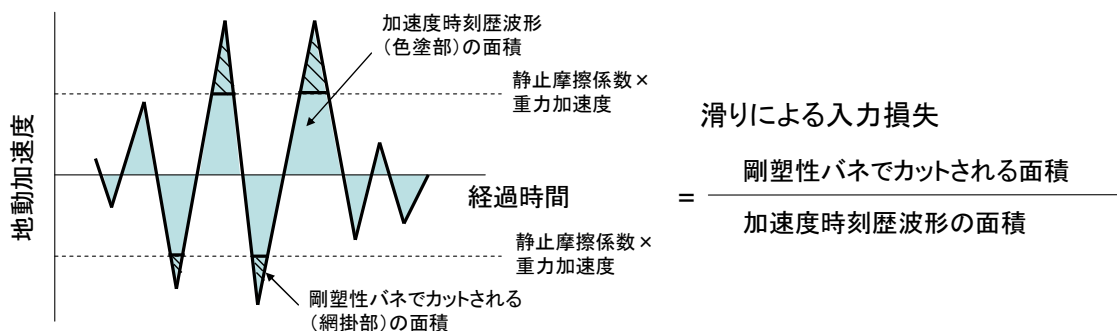


図3 滑りによる入力損失の概念図及び算出方法

また、上部構造の地震応答低減については、限界耐力計算を用いた迅速な被害推定を行う都合上、直接基礎の滑りを考慮して算出した応答スペクトルの、基礎固定時の応答スペクトルに対する比率(以下、応答低減係数)で簡便に評価する。この応答低減係数と滑りによる入力損失の関係は、図4に示した手順で複数の地震応答解析から統計的に求め、関数の形で表現する。

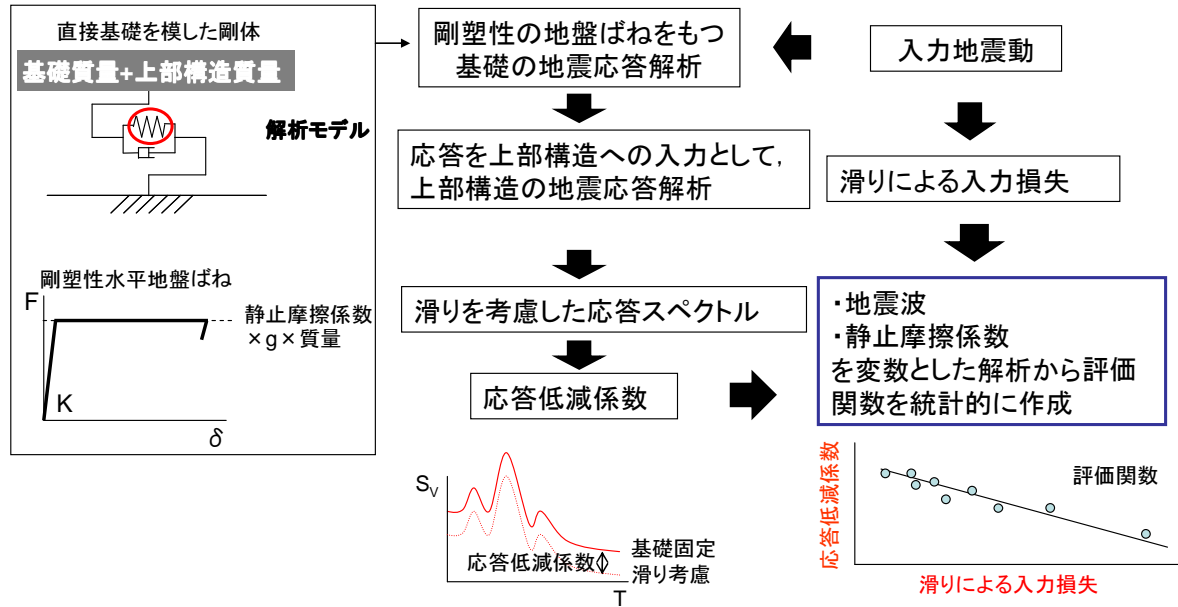


図4 基礎滑り評価関数の導出方法

2.2 評価関数の構築

以下、図4に示した手順で応答低減係数と滑りによる入力損失の関係である基礎滑り評価関数を求める。解析に用いる地震動は、近年の被害地震で震度6強以上を観測した地震動から、1995年の兵庫県南部地震からJMA神戸、2004年新潟県中越地震からK-NET小千谷、十日町、2007年能登半島地震からK-NET穴水、同新潟県中越地震からK-NET柏崎、2008年岩手・宮城内陸地震からJMA栗駒で、それぞれEW成分を用いている。

(1) 滑りによる入力損失の算出

滑りによる入力損失は、図3で示したように、入力地震動と、図4における剛塑性の水平地盤バネの降伏強度に相当する静止摩擦係数で決定される。各地震動について、入力地震動と静止摩擦係数より求めた、滑りによる入力損失を表1に示す。尚、滑りによる入力損失の算出に用いる加速度時刻歴波形全体の面積は、観測点ごとの継続時間のばらつきを考慮してK-NET及びJMA等で公開されている時刻歴加速度全体から算出される面積の95%としている。表1より、静止摩擦係数0.3のJMA神戸波、0.3、0.5のK-NET小千谷波、0.3のK-NET十日町波などで滑りによる入力損失が比較的大きくなっていることが分かる。

表1 滑りによる入力損失の算出

	地動最大 加速度 (gal)	滑りによる入力損失 [$\times 10^{-2}$]		
		静止摩擦 係数:0.3	静止摩擦 係数:0.5	静止摩擦 係数:0.7
JMA神戸	619.2	6.7	0.7	0.0
K-NET小千谷	1307.9	15.5	6.8	2.5
K-NET十日町	849.5	8.3	2.1	0.3
K-NET穴水	781.7	4.7	0.7	0.0
K-NET柏崎	513.6	2.5	0.0	0.0
JMA栗駒	689.3	4.6	0.4	0.0

(2) 応答低減係数の算出と評価関数の構築

図4に示した手順で応答低減係数を求めるために、まず、基礎滑りを考慮した場合の応答スペクトルを求めるが、これには剛塑性の水平地盤バネを持つ直接基礎を模した剛体の、一質点の地震応答解析を行い、直接基礎を模した剛体の応答加速度を上部構造への入力加速度であると見なして、上部構造の応答スペクトルを算出するという手法で求める。そして、この滑りを考慮した応答スペクトルと基礎固定時の応答スペクトルの比率を求め、応答低減係数とする。直接基礎を模した剛体の質量は、梁間方向6m、桁行方向10mの2階建て木造住宅を想定し、「木造住宅の耐震診断と補強方法」⁶⁾の床均し荷重を用いて4.53tonと求めた。同じく初期剛性は、充分大きい値として1000kN/mmを用い、代表高さは基礎の重心を考慮して150mmとした。解析のパラメータは先に述べた入力地震動、剛塑性バネの降伏強度に相当する直接基礎の静止摩擦係数(0.3、0.5、0.7)とする。

解析結果として、速度応答スペクトル算出結果を図5に示す。図5によると、K-NET小千谷波やK-NET十日町波、JMA神戸波、JMA栗駒波などでは、静止摩擦係数が小さいケースほど応答低減が大きくなっている事が分かる。逆に、K-NET穴水やK-NET柏崎波を用いたケースでは、応答の低減がほとんど見られなかった。また、これらの地震波による応答低減の大小は、先に表1にて示した滑りによる入力損失の大小関係と概ね対応していることが分かる。さらに、応答低減が見られたケースでは、例えばK-NET小千谷のケースでは応答スペクトルがピークとなる固有周期が0.7secであるのに対して概ね0.4sec~1.1secのピーク周辺で応答が低減されている。同じくK-NET十日町では0.32secのピークに対して概ね0.2~0.5sec、JMA神戸では0.78secのピークに対して概ね0.6~1.0secで、ピークとなる固有周期周辺、概ね±0.2~0.3secの間で応答が低減され、それ以外の固有周期では、応答があまり低減されないといった傾向が見られた。

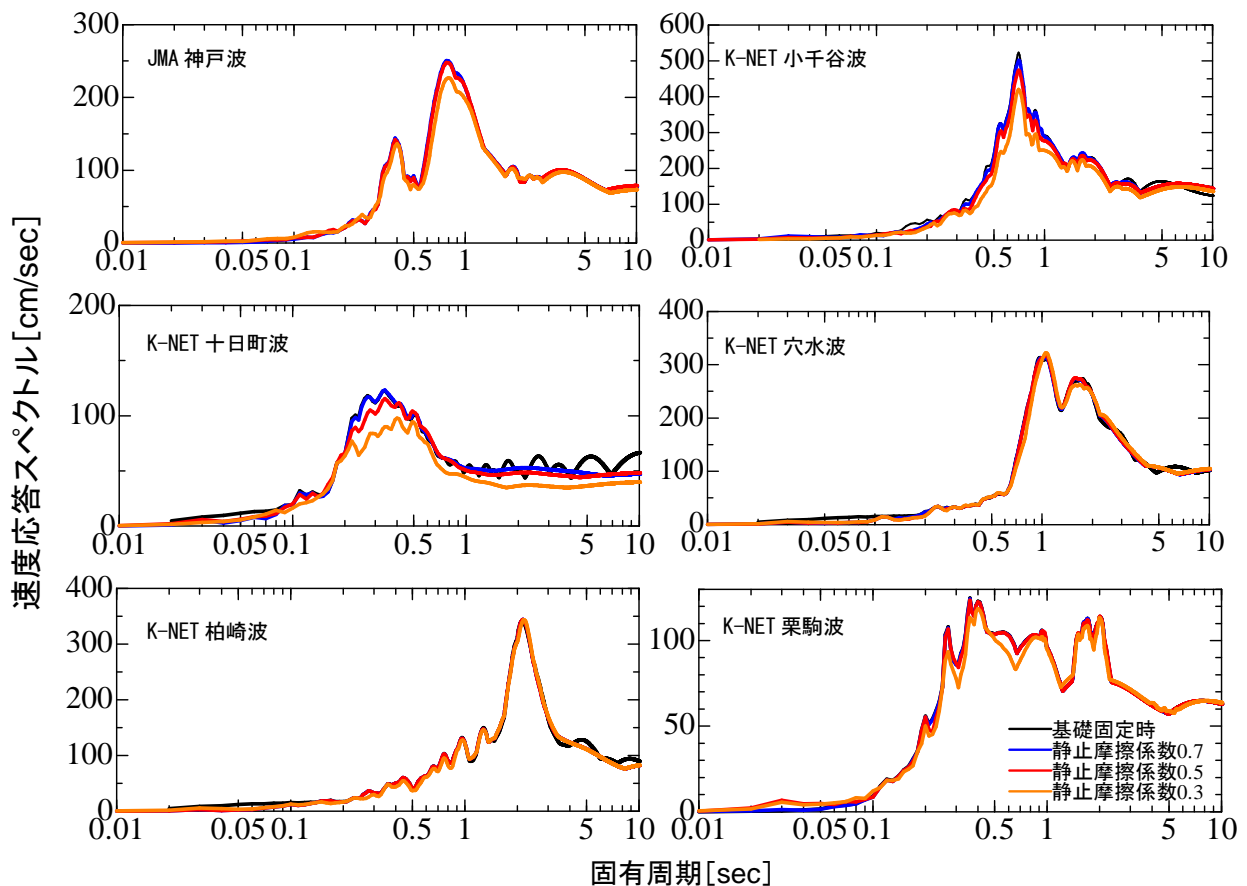


図5 基礎滑りを考慮した応答スペクトル (h=5%)

このことから、応答低減係数は、ピークとなる固有周期 T_{peak} を基準に±0.3secの範囲で、図6のように与えることとした。応答低減係数の最大値 y_{peak} は、基礎滑りを考慮して求めた図5の応答スペクトルの、

$T_{peak} \pm 0.2\text{sec}$ の範囲での基礎固定時の応答スペクトルとの比率とする。これを、先に表1にて示した滑りによる入力損失を用いると、図7に示すように、応答低減係数の最大値 y_{peak} と、滑りによる入力損失 x との関係がほぼ線形の関係となる。このことから応答低減係数 y と、滑りによる入力損失 x の関係は、図7における最小二乗法より求めた

$$y = 1.0 - 1.45 \times x \quad T_{peak} - 0.2 < T < T_{peak} + 0.2 \quad (1)$$

と、その他の固有周期では、

$$y = 1.0 \quad T_{peak} + 0.3 < T, \quad T < T_{peak} - 0.3 \quad (2)$$

と求めることができる（中間は線形補完する）。ここまでで示した滑りによる入力損失と応答低減係数の関係を、以下で説明する被害推定手法に導入していく。

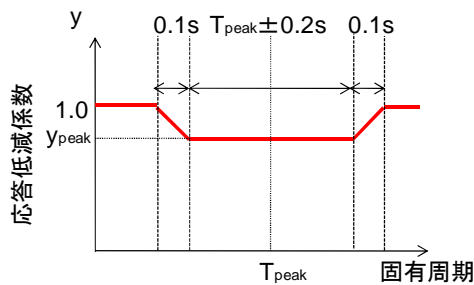


図6 固有周期による重み付け

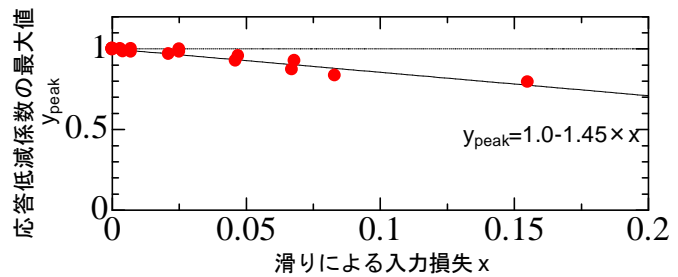


図7 基礎滑りによる応答の評価関数

(3) 基礎滑り評価関数の検証

図8に、(2)に示した手法で求めた応答低減係数を基礎固定時の応答スペクトルに掛け合わせて算出した、被害推定に用いる応答スペクトルと、同じく応答解析により算出した、基礎滑りを考慮した場合の応答スペクトルの比較をK-NET小千谷波及び十日町波、静止摩擦係数0.3のケースを例に示す。図8によると、応答低減係数を掛け合わせて算出した応答スペクトルは、小千谷波では良く対応していることが分かる。一方、十日町波では特に0.6sec以降の比較的長周期の領域でやや精度が落ちるものの、ピーク固有周期周辺でスペクトルが低減される傾向は概ね捉えることが出来ており、(2)で提案した応答低減係数を算出するための関数が、ある程度の誤差を許容できれば、基礎滑りを考慮した応答スペクトルの算出に有効であると言える。

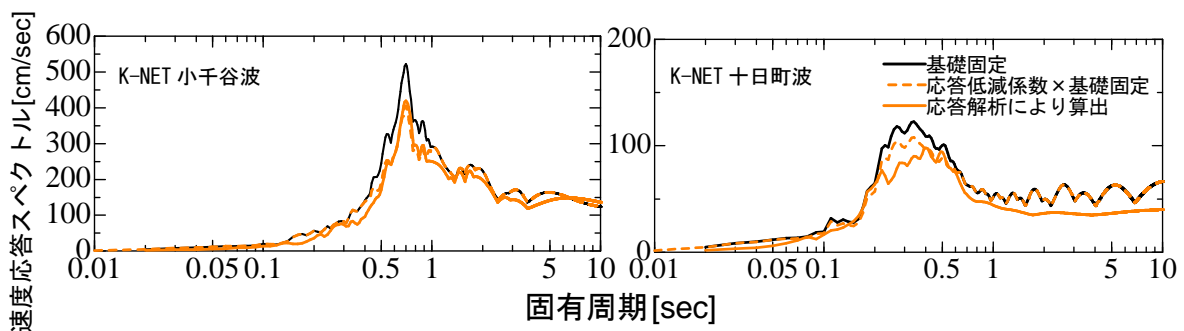


図8 評価関数の検証 (h=5%)

3. 直接基礎の滑りを考慮した被害推定

3.1 被害推定手法

被害推定フローを図9に示す。被害推定ではまず、3章で求めた応答低減係数の評価関数を用いて応答スペクトルを低減させた後、変動係数20%のばらつきを考慮した応答スペクトルを用いて、限界耐力計算によって応答値を推定する。その後、その応答値が安全限界変形角（変形角1/10rad）を超えるかどうか

を信頼性理論⁷⁾に基づいて確率的に推定し、耐震診断における建築年代別の上部構造評点データ（耐震診断データ）、被害推定を行う地区の年代別棟数データによって重み付けし、全壊率を推定する。ここで、建物耐力曲線は木造建物の五十田⁸⁾による実大振動実験を参考に著者ら²⁾が上部構造評点の定義に基づいて設定したものを、耐震診断データは中村ら⁹⁾によって纏められた平成17年度宮城県の耐震診断データ760件を用いた。

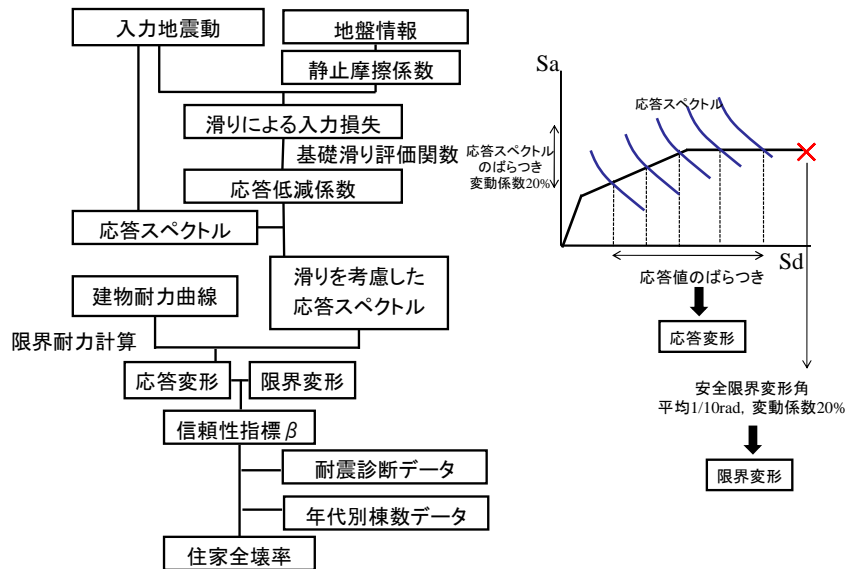


図9 被害推定フロー

3.2 被害推定シミュレーション

今回は、先の解析に用いた地震波から、観測点周辺の地盤情報が得られているK-NET小千谷、十日町、穴水、柏崎、JMA栗駒に加えて、能登半島地震におけるJMA輪島について観測点周辺での被害推定シミュレーションを行った。尚、それぞれの観測点の地盤情報はK-NET¹⁰⁾で公開されている表層地盤の地質分類、年代別棟数データは、被害調査結果に関する文献^{（例えば11）、12）、13)}を参考にしている。図10に、各観測点で想定した表層地盤の土質と、推定に用いた静止摩擦係数を示す。土質と静止摩擦係数の関係は二木¹⁴⁾による擁壁の地盤上での加力実験を参考に、砂質地盤の平均値として0.5、砂質粘土の地盤の平均値として0.7とした。また、推定では静止摩擦係数のばらつきも考慮しており、平均値±0.2の範囲で変動させている。

3.3 被害推定シミュレーション結果

図11に、被害推定結果として、基礎固定時の被害推定結果と、基礎の滑りを考慮した場合の被害推定結果、ならびに被害調査結果^{（例えば11）、12）、13)}に基づいた実全壊率を示す。図11より、全体的な傾向としては、推定被害が実被害に比べて過大評価されているものの、被害の大小関係という意味では概ね良好な対応関係が見られる。しかし、K-NET小千谷では実全壊率が1%であるのに対して、推定全壊率は15%前後と、非常に大きな乖離が見られている。そのK-NET小千谷では、直接基礎の滑りを考慮すると、0.5%程度推定被害が低減され、わずかではあるが推定精度が向上する結果となった。

図12に、推定に用いた直接基礎の滑りを考慮した応答スペクトル（静止摩擦係数平均値±0.2、0.1刻み）、及び基礎固定時応答スペクトル、さらに推定に用いた耐力曲線の一部（上部構造評点0.5、1.0、1.5）を、K-NET穴水、小千谷、柏崎、十日町を例に示す。図12によると、推定被害が低減されたK-NET小千谷波は、h=5%の応答スペクトルが、建物耐力曲線の弾性固有周期から2.0sec程度まで耐力曲線と比較して全体的に大きくなっており、応答スペクトルが低減された領域で耐力曲線と交点（応答点）を持ちやすい応答スペクトルの形状になっていることが分かる。また、K-NET小千谷波では、先に表1にて示した滑りによる入力損失も大きくなっており、これらのことが影響して推定被害が低減されたと考えられる。また、同じく滑りによる入力損失が比較的大きかったK-NET十日町波は、変位応答スペクトルが

全体的に小さかったことから、推定全壊率が基礎固定時で 0%だったため推定全壊率は低減されなかった。しかし、このとき上部構造評点 1.5 の耐力曲線は、応答スペクトルが低減された周期帯で応答していることから、推定応答についてはある程度低減されていると考えられる。一方、基礎滑りを考慮することで推定被害が低減されなかった K-NET 穴水・柏崎では、建物の弾性固有周期周辺では小さく、それ以降の固有周期帯で大きくなるような応答スペクトルの形状を示しており、基礎滑りによって応答スペクトルが低減された周期帯で応答せずに、弾性固有周期周辺で応答するケースが多かったと考えられる。

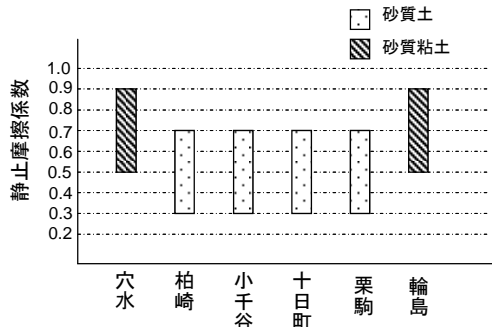


図10 各推定観測点の摩擦係数分布

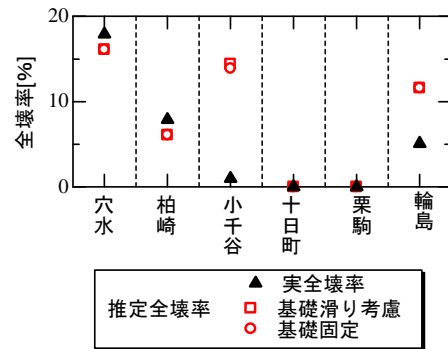


図11 被害推定結果

以上の結果と、図6に示したようにピークとなる固有周期周辺で応答低減係数を仮定していること、建物の弾性固有周期が概ね0.3sec、安全限界変形角 (1/10rad=45cm) では概ね1.0~2.0secであることなどの条件を考慮すると、今回提案した被害推定手法で基礎滑りによって推定被害が低減されるためには、入力地震動の応答スペクトルが固有周期0.3sec前後で耐力曲線と比較してある程度大きく、かつ固有周期0.3sec~2.0secの間でピークとなることが条件であると考えられる。

また、冒頭で述べたように著者ら⁴⁾がRC建物を対象に同様の手法で被害推定シミュレーションを行った結果、シミュレーションに用いた地震動は異なるものの、木造建物よりも顕著に推定被害が低減される傾向が示された。このことの原因としては、壁谷沢ら³⁾の研究で検討されている基礎と上部構造の質量比による影響のほか、上記で述べた建物の耐力曲線と応答スペクトルの関係による影響があると考えており、本論文では地震動データが少なく検討出来なかったが、今後発生する地震動によっては、RC建物と同様に大きく推定精度が向上する可能性があると考えている。

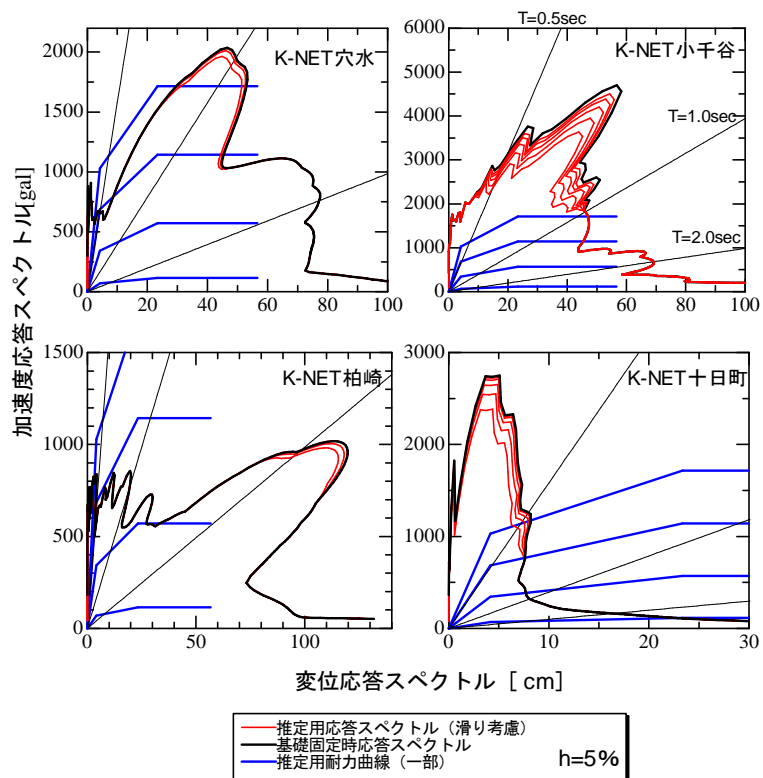


図12 推定用応答スペクトルと耐力曲線

4. 結論

本論文の結びとして、本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 直接基礎の滑りによる建物応答の低減効果を簡便に評価する関数を、「滑りによる入力損失」「応答低減係数」という概念を用いて提案した。
- 2) 上記の関数を、地震時被害推定手法への導入を行った。その結果、基礎滑りを考慮することによって、K-NET小千谷波のような地震動で推定精度がわずかではあるが向上した。
- 3) 本論文で示したシミュレーションの範囲内では、応答スペクトルと耐力曲線の関係から、基礎滑りによって推定被害の低減が発生するための条件として、入力地震動の応答スペクトルが固有周期0.3秒前後で耐力曲線と比較してある程度大きく、かつ固有周期0.3秒～2.0秒の間でピークとなることが挙げられる。

謝辞

本研究では、独立行政法人防災科学研究所K-NETより、地震波データと表層地盤の地質データを使用させて頂いた。ここに謝意を記します。

参考文献

- 1) 菅原裕太、前田匡樹、三辻和弥：耐震診断結果に基づく宮城県のRC造学校建築物の被害推定、コンクリート工学年次論文報告集、Vo29、No. 3、pp. 1261-1266、2007年6月
- 2) 松川和人、菅原裕太、前田匡樹、三辻和弥、地震応答スペクトルに基づいた既存木造住宅の地震時における被害推定手法の開発、日本建築学会東北支部研究報告集、第71号、pp. 49-52、日本建築学会東北支部、2008年6月
- 3) 壁谷澤寿一、壁谷澤寿海：基礎滑り挙動を伴う直接基礎建物の地震応答推定手法、日本建築学会構造系論文集、Vol. 73、No. 634、pp. 2151-2158、2008年12月
- 4) 松川和人、三辻和弥、前田匡樹、直接基礎の地表面での滑りを考慮した鉄筋コンクリート造学校建築物の地震時被害推定に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 32、No. 2、pp. 931-936、2010年7月
- 5) 松川和人、三辻和弥、前田匡樹：直接基礎の滑りが木造住宅の地震応答に与える影響、日本地震工学会大会－2009梗概集、日本地震工学会、pp. 314-315、2009年11月
- 6) (財)日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法、pp255-264、2006年9月
- 7) 神田順：限界状態設計法のすすめ、建築技術発行、pp64-90、1993年6月
- 8) 五十田博、佐藤智彦ら：大型3次元振動台を活用した既存木造住宅の耐震性能向上に関する研究 その2 耐震診断法の検証一、第十二回日本地震工学シンポジウム発表論文集、pp. 1082-1085、2006年
- 9) 中村匠ら：宮城県の耐震診断結果に基づく木造住宅被害関数の構築、日本建築学会東北支部研究報告集、pp115-118、2007年
- 10) K-NET観測点一覧：<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/db/>
- 11) 日本建築学会：2004年10月23日新潟県中越地震災害調査報告、丸善株式会社、p23、2006年
- 12) 前田匡樹、三辻和弥、菅原裕太、中村匠、五十嵐さやか：2007年3月25日能登半島地震による建築物の被害と強震観測記録、建築防災、pp17-24、2007年8月
- 13) 松川和人、三辻和弥、菅原裕太、前田匡樹、2007年新潟県中越沖地震における木造建物の地震被害調査 その1 調査概要と建物被害の特徴、日本地震工学会大会2007梗概集、第30巻、pp. 474-475、日本地震工学会、2007年11月
- 14) 二木幹夫：擁壁の滑動抵抗に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第364号、pp. 91-98、1986年6月