

# 直接基礎の滑りを考慮した木造住宅の地震時被害推定に関する研究

## SEISMIC DAMAGE PREDICTION OF WOODEN HOUSES ON SPREAD FOUNDATION CONSIDERING THE EFFECT OF BASE SLIP

松川 和人 (リハビリテーション工学分野)  
Kazuto Matsukawa

### Abstract

A seismic damage prediction system for wooden houses based on capacity spectrum method was developed by considering response reduction effect by slip between base and ground. Shake table tests of spread foundation were conducted to determine the condition of base slip behavior occurring. Dynamic response analysis of spread foundation with a rigid-plastic lateral resistance was conducted to derive the "Response reduction factor". "Response reduction factor" were 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 function 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.

**Keywords :** Capacity spectrum method, Base slip, Seismic damage prediction, Spread foundation  
限界耐力計算, 基礎滑り, 地震時被害推定, 直接基礎,

### 1. はじめに

近年発生した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、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。

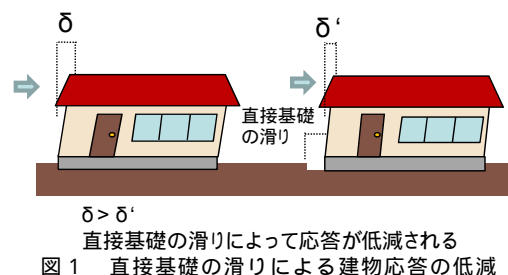
こうした現状を踏まえ、著者らは、被害状況の早期把握を目的として、地震時の被害推定手法を開発し、過去の被害地震を想定した被害推定シミュレーションを行った。その結果、各地点の震度と被害率曲線に基づく一次推定に対して、限界耐力計算を用いて行う二次推定では、地震動特性と建物の周期特性が考慮されており、精度の良い推定手法となっているはずであるが、全体的に実被害より推定結果が過大に評価される傾向が示された。

この原因の一つとして、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。本研究では、この直接基礎の滑りによって建物応答が低減される現象を被害推定に反映することを目的として、直接基礎模型の振動実験と、基礎滑りによる応答低減効果を評価する関数の提案、及び被害推定手法の開発を行った。

### 2. 直接基礎模型の振動台実験

#### 2.1 実験概要

まず、直接基礎の滑りが発生する条件を検討することを目的として、直接基礎模型の振動台実験を行った。実験は、乾燥豊浦砂を相対密度90%で充填したせん断土槽を用いて行った。加振は目標振動台加速度を400galとした正弦波加振(5.6Hz, 2.8Hz)、地震波加振(2007年穴水波75%入力, 2008年栗駒波75%入力)をそれぞれ入力した。



$\delta > \delta'$   
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建物応答の低減

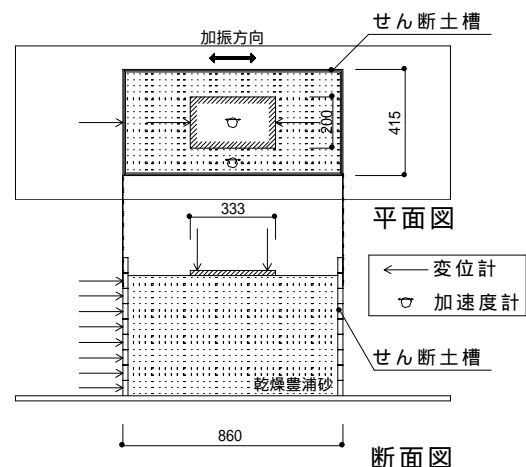


図2 試験体設置状況

試験体は、直接基礎の底面を模擬したものとし、6m x 10mの木造住宅ベタ基礎を1/30に縮小した、200mm x 300mmのモルタル板とした。これらの試験体はそれぞれ接地面の処理が異なり、乾燥豊浦砂上で試験体に静的外力を加力することによって求めた静止摩擦係数が小さい順にPI試験体(プラスチック板を貼り付け: 静止摩擦

係数 0.51), Sa 試験体 ( 2mm 程度の砂を貼り付け : 0.74 ), Sd 試験体 ( 径 10mm 程度の砂利をモルタルと共に打設 : 0.86 ) となっている . 試験体設置状況を図 2 に示す .

### 2.2 実験結果

実験結果として, 直接基礎上で観測された加速度と, 地表で観測された加速度の比較を行ったものを図 3 に示す . これによると, 静止摩擦係数が 0.51 であった PI 試験体は, すべての加振において, 地表加速度が約 0.5g を超えたところで試験体上の加速度が小さくなっていることが分かる . 一方, Sa 試験体と Sd 試験体では, 地表加速度が対応する静止摩擦係数より大きくなると計測によるばらつきが大きくなり, 基礎の加速度が地表の加速度より低減されるといった傾向は見られなかった .

続いて図 4 に, 5.6Hz 加振時における各試験体の地表面に対する相対変位を示す . これによると, 加速度が低減された PI 試験体では左右に振動しながらはじめの位置から移動していく明確なすべり挙動が見られる . 一方 Sa, Sd 試験体ではそのような挙動は見られなかった .

### 3. 直接基礎の滑りを考慮した応答スペクトルの評価法の提案

#### 3.1 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, 基礎の水平地盤パネに, bi-liner 型で初期剛性を剛, 第二勾配をほぼ 0 とした復元力特性を設定する . 今回はこの剛塑性の水平地盤パネの降伏強度を, 前述した振動実験結果を反映し, 基礎と地盤の間の静止摩擦係数  $\times$  重力加速度  $\times$  建物総重量とした .

さて, 剛塑性パネにはその降伏点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 . 本研究では, この剛塑性パネによってカットされる加速度入力に着目し, 剛塑性水平地盤パ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 5 ) .

直接基礎の滑りに起因する上部構造の応答低減については, 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 ) で評価する . 応答低減係数と滑りによる入力損失の関係は, 過去の被害地震の震度 6 強を越える地震動を記録した観測点の応答低減係数と, これらの地震動での滑りによる入力損失の関係から求め, 関数の形で表現する .

#### 3.2 評価関数の構築

滑りによる入力損失, 応答低減係数を求めるための解析フロー, 応答低減係数を求めるための解析モデル, また評価関数を導出するまでの手順を図 6 に示す . 解析に用いる地震動は, 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

対象地震動の, 静止摩擦係数毎の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, 観測点ごとの記録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 .

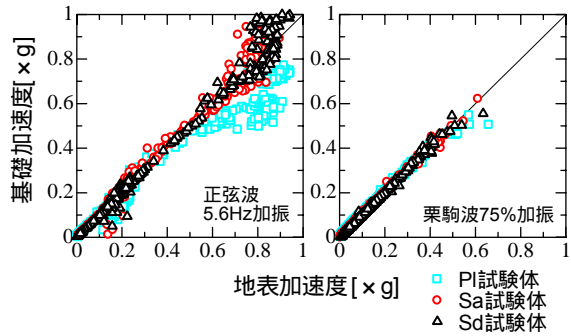


図 3 地表加速度と基礎加速度の比較

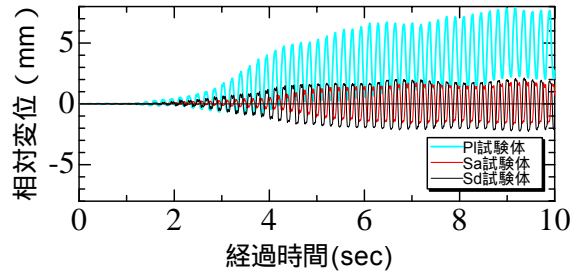


図 4 基礎と地表の相対変位の推移

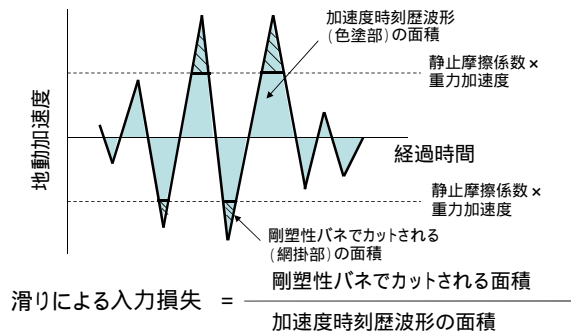


図 5 滑りによる入力損失の評価法

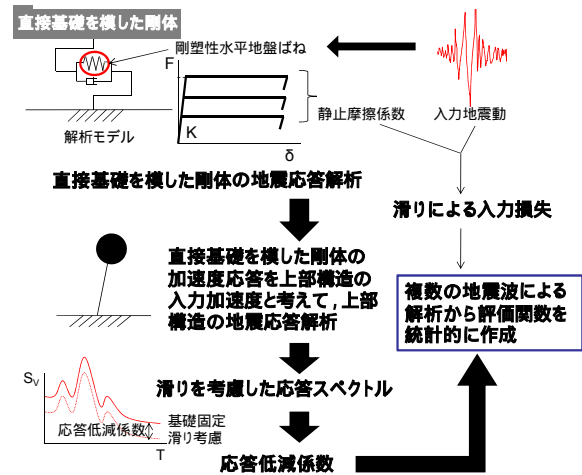


図 6 応答低減係数の導出手順

##### (2) 応答低減係数の算出と評価関数の構築

図 6 に示した手順で応答低減係数を求めるために, まず, 滑りを考慮した場合の応答スペクトルを求めるが, これは剛塑性の水平地盤パネを持つ直接基礎を模した剛体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, 応答スペクトルを算出することによって求める . 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

表1 滑りによる入力損失

	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

求め、応答低減係数とする。解析のパラメータは入力地震動と静止摩擦係数(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K-NET小千谷波やK-NET十日町波を例に図7に示す。これによると、静止摩擦係数が小さいケースほど応答スペクトルが小さく、応答が大きく低減されている事が分かる。また、応答低減が見られたケースでは、ピークとなる固有周期周辺、概ね $\pm 0.2 \sim 0.3\text{sec}$ 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。

このことから、応答低減係数は、ピークとなる上部構造固有周期  $T_{\text{peak}}$  を基準に $\pm 0.3\text{sec}$ の範囲で、図8のように与えることとした。応答低減係数の最大値  $y_{\text{peak}}$  は、滑りを考慮して求めた図7の応答スペクトルの、 $T_{\text{peak}} \pm 0.2\text{sec}$ 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8に示すように、応答低減係数の最大値  $y_{\text{peak}}$  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9における最小二乗法より求めた

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

と、その他の固有周期では、

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

と求めることができる(中間は線形補完する)。

図10に、ここ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、基礎滑りを考慮した場合の応答スペクトルと、(2)で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十日町、小千谷波を例に示す。尚、それぞれのケースで、応答低減係数を用いて求めた応答スペクトルの、応答解析によって求めた応答スペクトルに対する変動係数も算出した。これによると、小千谷のケースの変動係数はピークとなる固有周期 $\pm 0.2\text{sec}$ で4%程度と小さく、それぞれよく対応している事が分かる。一方、十日町のケースでは小千谷のケースに比べてばらつきが大きい、ピーク周辺で応答スペクトルが低減される傾向を概ね捉える事ができている。このことから、本章で提案した応答低減係数を算出する関数が、滑りを考慮した応答スペクトルの算出に有効であることが示された

#### 4. 直接基礎の滑りを考慮した地震時被害推定

##### 4.1 被害推定手法

推定フローを図11に示す。ここまでで求めた「滑りによる入力損失」と「応答低減係数」の関数を用いて応答スペクトルを低減し、限界耐力計算によって応答値を推定、その応答値が安全限界変形角を超えるかどうかを信頼性理論に基づいて確率的に推定する。詳細な手法は文献<sup>1)</sup>に示している。

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を行った。尚、それぞれの観測点の地盤情報、年代別棟数データ等は、文献<sup>例えは2), 3)</sup>を参考にしている。図12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文献<sup>4)</sup>を参考に求めた。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 $\pm 0.2$ の範囲で変動させている。

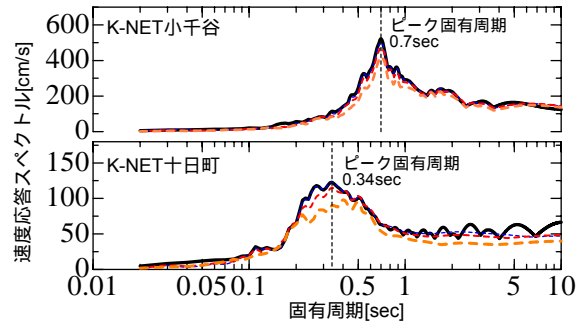


図7 基礎の滑りを考慮した応答スペクトル

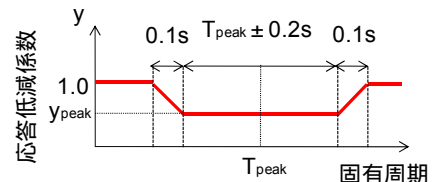


図8 応答低減係数と固有周期

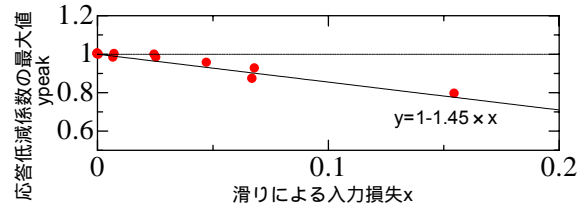


図9 滑りによる入力損失と応答低減係数の関係

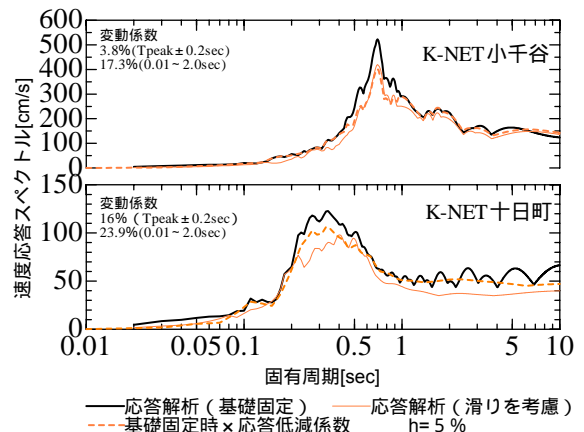


図10 応答低減係数の精度検証

##### 4.2 被害推定結果

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<sup>例えは2)</sup>に基づいた実全壊率を図13に示す。図13より、基礎の滑りを考慮することによって、K-NET小千谷では3%程度、K-NET穴水では1%程度推定全壊率が低減された。一方、K-NET柏崎、K-NET輪島では推定全壊率の低減が見られなかった。全体的には、推定被害は実

全壊率よりも過大評価される傾向が見られる。

4.3 滑りの影響を受けやすい地震動タイプの整理

図14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, 5種類）,及び基礎固定時応答スペクトル,さらに耐力曲線の一部を, K-NET 穴水, 小千谷, 柏崎, 十日町を例に示す。これによると, K-NET 小千谷のように基礎滑りを考慮することによって推定被害が低減された地震動では, 推定に用いた耐力曲線と交点を持つような固有周期帯で応答スペクトルが低減されていることが分かる。特に, K-NET 小千谷波は, 図15に示すように, 大きな加速度が繰り返し入力されており, 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いることから, 応答スペクトルの低減自体も大きくなっている。また, K-NET 十日町は変位応答スペクトルが全体的に小さく, 推定全壊率が0%だったが, 応答値は基礎固定時に比べて小さくなっており, 小千谷波と同タイプの地震動であると言える。一方, K-NET 穴水, 柏崎のように推定被害が低減されなかった観測点では, 応答スペクトルが低減された固有周期帯では耐力曲線と交点を持たず, 滑りの影響をほとんど受けなかったことが分かる。これらの地震動では建物の弾性固有周期周辺での応答スペクトルが比較的小さいため, 滑りによってスペクトルが低減された周期帯で応答せず, 弾性固有周期周辺か, スペクトルが低減された周期帯よりもさらに長周期の周期帯で応答しやすいスペクトル形状となっている。

以上の結果より, 直接基礎の滑りによって, 被害や応答が低減されるタイプの地震動の特徴を整理すると, 大きな加速度が繰り返し発生する(滑りによる入力損失が大きくなる)

建物の弾性固有周期周辺の周期帯の応答スペクトルも大きい(滑りによって低減される周期帯で応答する)となる。

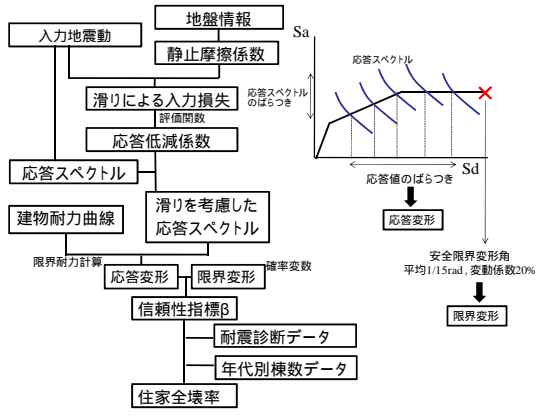


図1 被害推定フロー

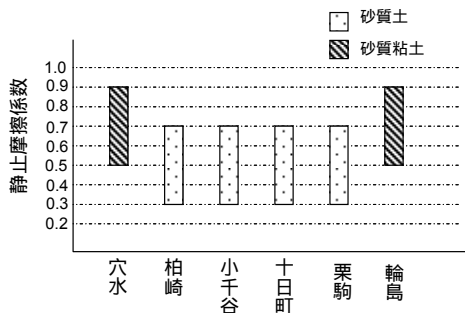


図12 各観測点の表層地盤土質と静止摩擦係数

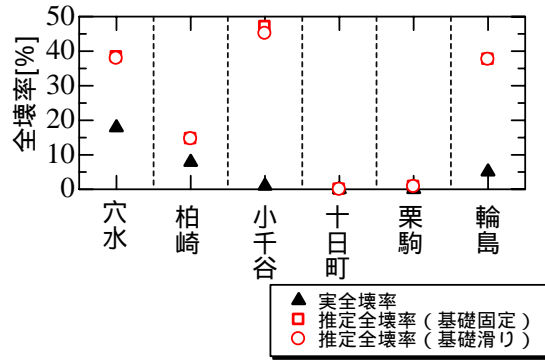


図13 各観測点の被害推定結果

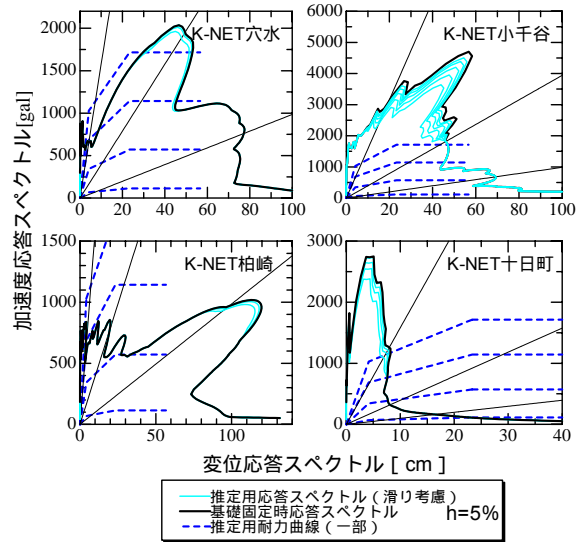


図14 推定用スペクトルと耐力曲線の比較

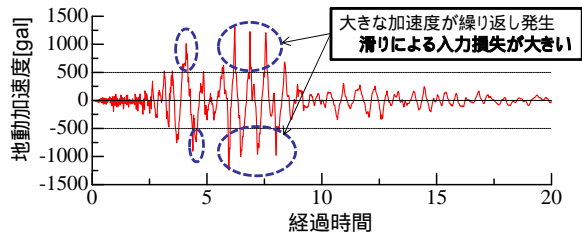


図15 K-NET 小千谷波の加速度時刻歴波形

5. まとめ

直接基礎模型の振動実験を行い, 基礎滑りが発生する条件を導いた。そしてこれを用いて直接基礎の滑りによる建物応答の低減効果を評価する関数を提案し, 地震時被害推定手法への導入を行った。その結果, K-NET 小千谷波のような 大きな加速度が繰り返し発生する, 建物の弾性固有周期周辺の応答スペクトルも大きいタイプの地震動で被害が低減され, 上記のように直接基礎の滑りによって応答や推定被害が低減される条件を整理した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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, 2007.8
- 3) K-NET <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/db/>
- 4) 二木幹夫: 擁壁の活動抵抗に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第364号, 昭和61年6月