

2001年ペルー南部地震津波における家屋被害の分析  
**DAMAGE ASSESSMENT OF HOUSES DUE TO THE 2001  
 SOUTHERN PERU EARTHQUAKE TSUNAMI**

谷裕典<sup>1)</sup>、庄司学<sup>2)</sup>、越村俊一<sup>3)</sup>、Miguel Estrada<sup>4)</sup>

Yusuke TANI<sup>1</sup>, Gaku SHOJI<sup>2</sup>,  
 Shunichi KOSHIMURA<sup>3</sup>, Miguel ESTRADA<sup>4</sup>

1) 筑波大学大学院システム情報工学研究科

<sup>1</sup>Graduate Student, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba  
 e-mail : rugby@edu.esys.tsukuba.ac.jp

2) 筑波大学大学院システム情報工学研究科、准教授 博(工)

<sup>2</sup> Associate Professor, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Dr. Eng.  
 e-mail : gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

3) 東北大学大学院工学研究科、准教授 博(工)

<sup>3</sup> Associate Professor, Tohoku University, Dr. Eng.  
 e-mail : koshimura@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp;

4) ペルー国立工科大学日本—ペルー地震防災研究センター(CISMID)、Ph.D.

<sup>4</sup> Japan-Peru Center for Earthquake Engineering and Disaster Mitigation,  
 National University of Engineering, Ph.D.  
 e-mail : estrada@uni.edu.pe

**ABSTRACT:** The paper describes the damage assessment of houses due to the 2001 Southern Peru earthquake tsunami, which occurred on 23 June, 2001. The authors analyzed 7 damage data, focusing on the evaluation of strength of a house subjected to a tsunami wave load. Concrete-block type houses are analyzed, which are one-story ones, and are located at Camana town along the coastline from La Punta to Los Cerrillos. After applying the theory of previous research, we identify the strength of a wall by computing the distribution of the tsunami wave pressure on the wall exposed to an inundation height.

**キーワード:** 2001年ペルー南部地震津波、家屋被害、津波波圧算定式、Camana

### 1. はじめに

2001年6月23日20時30分(GMT)にリマ南東595kmを震源とした $M_w = 8.4$ の地震津波が発生し、これにより26人の死者および64人の行方不明者が発生した<sup>1)</sup>。その大きな原因としては、海岸線近傍に位置する家屋の甚大な津波被害が挙げられる。このような家屋に対する津波荷重評価に関しては解析ならびに実験を通して多くの研究知見が得られている。津波に晒された家屋群の津波被害率に関して羽鳥<sup>2)</sup>は1983年日本海中部地震津波によって大きな被害を受けた秋田県八森町滝ノ間・浜田地区における木造家屋被害を3段階の被害形態に分け、それらと浸水深との関係を示しており、本分野における先駆的な知見を与えている。更に、首藤<sup>3)</sup>は、既往の地震津波被害データを用いて構造別の家屋被害の分類と浸水深の関係を示しており、松富・首藤<sup>4)</sup>は1993年に発生した北海道南西沖地震津波で得られた家屋被害データを基に、その構造種別ごとの被害の程度と浸水深の関係を示している。松富・他<sup>5)</sup>はタイのKhao Lak

とPhuket島において発生した2004年インド洋大津波における鉄筋コンクリート造の建物の津波被害と浸水深の関係を示している。松富・他<sup>6)</sup>は2004年インド洋大津波においてBanda Aceh周辺で発生した津波氾濫流の流速と浸水深の関係を示している。越村・他<sup>7)</sup>は2004年インド洋においてBanda Aceh周辺で発生した家屋被害を対象とし、リモートセンシングデータを活用した家屋の津波被害関数の構築手法や適用性について提案している。庄司・谷<sup>8)</sup>は2006年ジャワ島南西沖地震津波における家屋の被害規模と浸水深の関係を実被害データを用いて検証している。

このような家屋被害を踏まえ、家屋に作用する津波波圧を実被害から検証することは極めて重要である。その一例として、庄司・他<sup>9)</sup>は2006年ジャワ島南西沖地震津波を対象とし、インドネシアのPangandaran西海岸およびCilacap東部を中心とした海岸沿いの5つの被害家屋に対して朝倉・他<sup>10)</sup>による津波波圧の算定式の妥当性を検証している。このような流れを踏まえ、本研究では2001年ペルー南部地震津波を対象として、中埜・朴<sup>11), 12)</sup>の方法論にのっとり、家屋の損傷状況から津波波圧を逆同定し、既往の研究において示されている津波波圧の算定式の妥当性を検討する。

## 2. 分析対象データ

本研究では図1に示すような2001年ペルー南部地震津波を対象として、Camana市内のLa PuntaならびにLos Cerrillosの海岸沿いにおいて特徴的な被害が発生した7棟の家屋の被害データに対する分析を行った。その際には、構造形式としてコンクリートブロック造を対象とし、1戸建てかつ1階建てである家屋、ならびに入りの開口部が海岸線に向いている家屋のみを対象とした。対象家屋の位置と津波浸水深を示すと図2のようになる。また、実際に精査した家屋の被害を図3にそれぞれ示す。

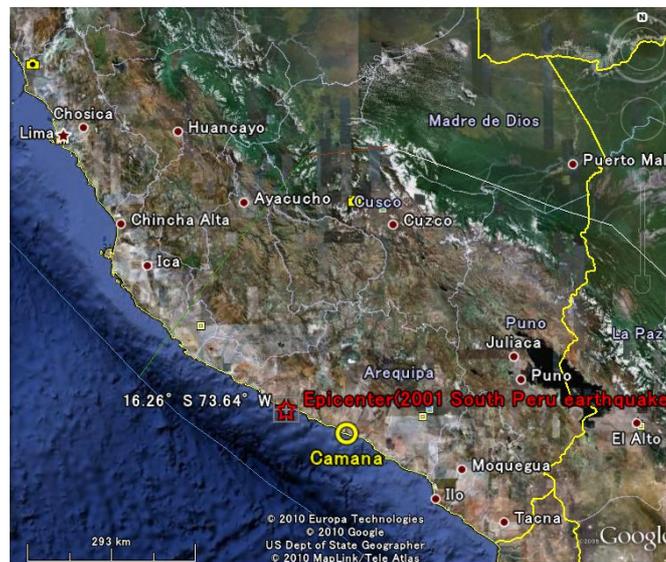


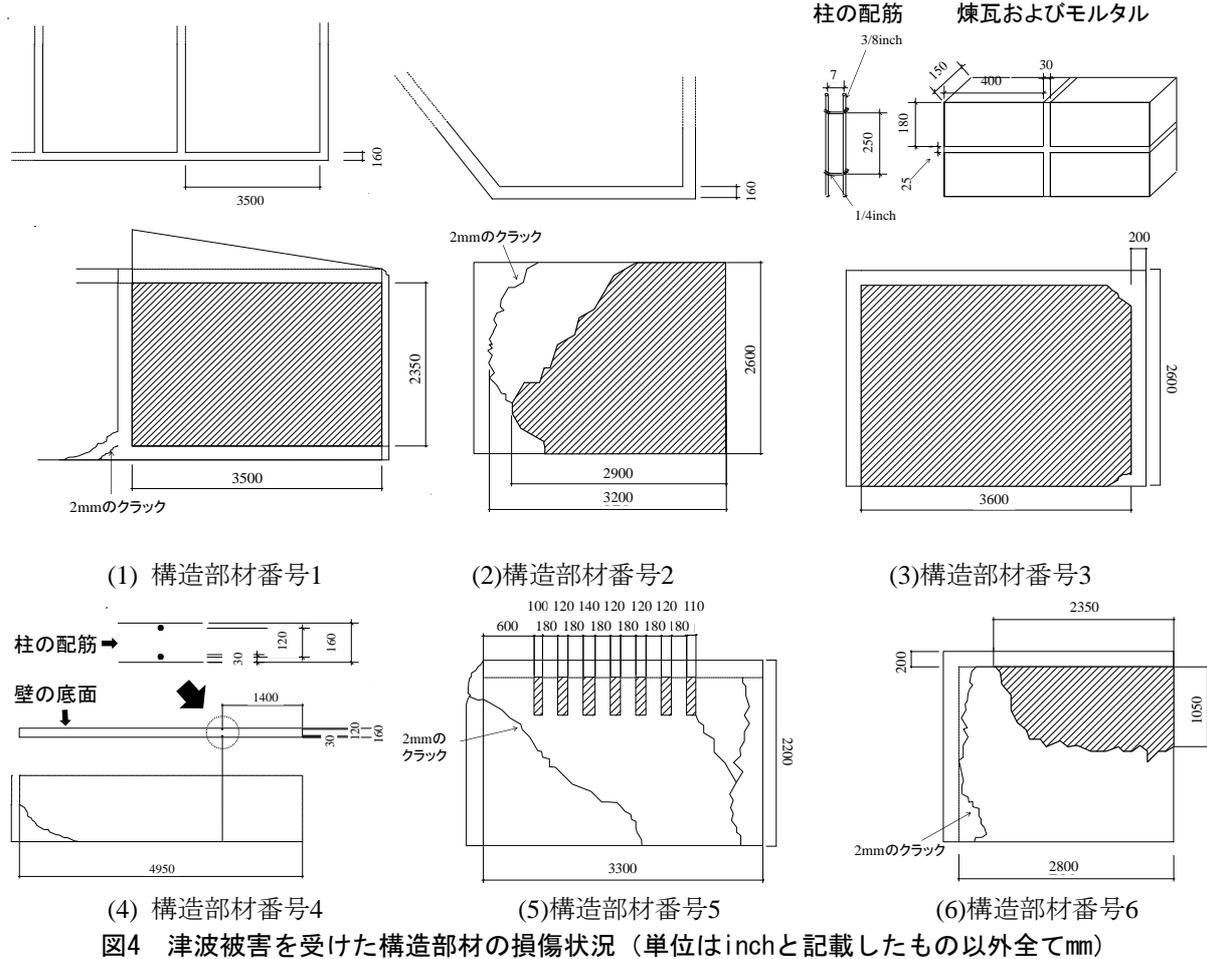
図1 ペルー南部地震の震源および被災地



図2 対象家屋の位置及び浸水深 (m)



図3 被災家屋の事例



### 3. 津波耐力の算定方法

本章では、調査を行った7つの家屋の中から表1および図4に示す通り、合計6つの構造部材を取り上げ、それらの構造部材の寸法、材料から津波耐力の推定を行った。その際には、漂流物の影響を受けていないと推察され、さらに損傷時の耐力が容易に推定できる単純な構造部材を選定し、それらを以下に示す2つの損傷モードの観点から分析した。

表1 分析対象とする構造部材の構造諸表

構造部材番号	部材高(m)	部材幅(m)	浸水深(m)	部材厚(m)	その他データ
1	2.35	3.50	2.60	0.16	-
2	2.60	3.20	2.60	0.16	-
3	2.60	3.60	2.60	0.15	-
4	0.65	4.95	2.81	0.16	浸水深は2001年調査時のデータ(越村・他)
5	2.20	3.30	2.28	0.16	壁厚は写真より仮定
6	2.50	2.80	2.28	0.16	壁厚は写真より仮定

#### 3.1.1 タイプ1の損傷モード

海岸線と直行方向の壁に津波作用によりせん断ひび割れが生じ、それらが部材全体に貫通した結果壁に損傷・崩壊が生じる場合のせん断耐力 $V_u$ を次式より求めた。

$$V_u = \tau_u A \quad (1)$$

$A$ は津波作用を受けた構造部材の断面積であり、せん断応力度 $\tau_u$ に関しては一律に $0.4\text{N/mm}^2$ と仮定した。この仮定は中墊<sup>11)</sup>が適用した仮定と同様の数値である。

#### 3.2 タイプ2の損傷モード

海岸線と平行で向かい合っている壁に損傷が生じた場合には、レンガと目地モルタル間の引張により曲げ損傷が生じるメカニズム(損傷メカニズム1)と、レンガと目地モルタル間のせん断によりせん断損傷が生じるメカニズム(損傷メカニズム2)の2通りが考えられる。

損傷メカニズム1の場合には、引張耐力 $T_b$ を次式で求めた。

$$T_b = 2(B + H)w\sigma_g \quad (2)$$

ここで、 $w$ は部材厚、 $B$ は部材幅、 $H$ は部材高さを示す。また、レンガと目地モルタル間の引張に関する接着強度は日本建築学会「補強コンクリートブロック造設計基準・同解説1997」<sup>13)</sup>に基づき $\sigma_g = 0.24\text{N/mm}^2$ と仮定した。

損傷メカニズム2の場合には、せん断耐力 $V_b$ を次式で求めた。

$$V_b = 2(B + H)w\tau_b^s \quad (3)$$

ここで、真田・他<sup>14)</sup>によるレンガと目地モルタル間のせん断強度測定実験による結果から、せん断に関する接着強度は $\tau_b^s = 0.09\text{N/mm}^2$ と仮定した。

### 3.3 耐力算定結果

#### a) 構造部材1

分析対象とする構造部材はCamana、La Puntaの海岸沿いに位置するコンクリートブロック造であり、津波作用により壁が抜けている。この構造部材の損傷形態はタイプ2と考えることができる。損傷メカニズム1に基づく、引張耐力 $T_b$ は $T_b = 2 \times (2350\text{mm} + 3500\text{mm}) \times 160\text{mm} \times 0.24\text{N/mm}^2 = 449.28\text{kN}$ と求められる。

また、損傷メカニズム2に基づく、せん断耐力 $V_b$ は $V_b = 2 \times (2350\text{mm} + 3500\text{mm}) \times 160\text{mm} \times 0.09\text{N/mm}^2 = 168.48\text{kN}$ と求められる。

b) 構造部材2

分析対象とする構造部材はCamana、La Puntaの海岸沿いに位置するコンクリートブロック造であり、壁の一部を残して崩壊している。この構造物の損傷モードはタイプ2と考えることができる。損傷メカニズム1に基づく引張耐力 $T_b$ は、 $T_b=2 \times (2600\text{mm}+3200\text{mm}) \times 160\text{mm} \times 0.24\text{N/mm}^2=445.44\text{kN}$ と求められる。また、損傷メカニズム2に基づくせん断耐力 $V_b$ は $V_b=2 \times (2600\text{mm}+3200\text{mm}) \times 160\text{mm} \times 0.09\text{N/mm}^2=167.04\text{kN}$ と求められる。

c) 構造部材3

分析対象とする構造部材はCamana、La Puntaの海岸沿いに位置するコンクリートブロック造であり、津波作用で壁が抜けている。この構造物の損傷モードはタイプ1と考えることができる。この壁のせん断耐力 $V_u$ は式(1)を用いて、 $V_u=0.4\text{N/mm}^2 \times 3600\text{mm} \times 150\text{mm}=216.00\text{kN}$ と求められる。

この構造物の損傷モードはタイプ2とも考えることができる。損傷メカニズム1に基づく引張耐力 $T_b$ は、 $T_b=2 \times (2600\text{mm}+3600\text{mm}) \times 150\text{mm} \times 0.24\text{N/mm}^2=446.40\text{kN}$ と求められる。また、損傷メカニズム2に基づくせん断耐力 $V_b$ は $V_b=2 \times (2600\text{mm}+3600\text{mm}) \times 150\text{mm} \times 0.09\text{N/mm}^2=167.40\text{kN}$ と求められる。

d) 構造部材4

分析対象とする構造部材はCamana、Los Cerrillosの海岸沿いに位置するコンクリートブロック造であり、壁の一部を残して崩壊している。この構造物の損傷形態はタイプ2と考えることができる。ただし、壁の上面および片面が拘束されていないため、以下の引張耐力 $T_b$ およびせん断耐力 $V_b$ の算定に当たっては式(2)および式(3)を修正して適用する。ここで、損傷メカニズム1に基づく引張耐力 $T_b$ は $T_b=(650\text{mm}+4950\text{mm}) \times 160\text{mm} \times 0.24\text{N/mm}^2=215.04\text{kN}$ と求められる。また、損傷メカニズム2に基づくせん断耐力 $V_b$ は $V_b=(650\text{mm}+4950\text{mm}) \times 160\text{mm} \times 0.09\text{N/mm}^2=80.64\text{kN}$ と求められる。

e) 構造部材5

分析対象とする構造部材はCamana、Los Cerrillosの海岸沿いに位置するコンクリートブロック造であり、壁にひび割れが生じている。この構造物の損傷モードはタイプ1と考えることができる。この壁のせん断耐力 $V_b$ は $V_b=0.4\text{N/mm}^2 \times 3300\text{mm} \times 160\text{mm}=211.20\text{kN}$ と求められる。

f) 構造部材6

分析対象とする構造部材はCamana、Los Cerrillosの海岸沿いに位置するコンクリートブロック造であり、壁の一部が損傷している。この構造物の損傷モードはタイプ2と考えることができる。損傷メカニズム1に基づく引張耐力 $T_b$ は、 $T_b=2 \times (2500\text{mm}+2800\text{mm}) \times 160\text{mm} \times 0.24\text{N/mm}^2=407.04\text{kN}$ と求められる。また、損傷メカニズム2に基づくせん断耐力 $V_b$ は $V_b=2 \times (2500\text{mm}+2800\text{mm}) \times 160\text{mm} \times 0.09\text{N/mm}^2=152.64\text{kN}$ と求められる。

表2 津波被害より逆算されたせん断耐力

構造部材番号	仮定した損傷モード(損傷モード番号)	せん断耐力 (kN)	浸水深 $\eta (m)$	逆算された波圧分布	$\eta' (=a\eta)$	パラメータ $a$
1	タイプ2、損傷メカニズム1(崩壊)(1-1)	449.28	2.60	台形	6.75	2.59
	タイプ2、損傷メカニズム2(崩壊)(1-2)	168.48		台形	3.26	1.26
2	タイプ2、損傷メカニズム1(崩壊)(2-1)	445.44	2.60	台形	6.76	2.60
	タイプ2、損傷メカニズム2(崩壊)(2-2)	167.04		台形	3.35	1.29
3	タイプ1(崩壊)(3-1)	216.00	2.60	台形	4.24	1.63
	タイプ2、損傷メカニズム1(崩壊)(3-2)	446.40		台形	6.16	2.39
	タイプ2、損傷メカニズム2(崩壊)(3-3)	167.40		台形	3.12	1.20
4	タイプ2、損傷メカニズム1(崩壊)(4-1)	215.04	2.81	台形	7.14	2.54
	タイプ2、損傷メカニズム2(崩壊)(4-2)	80.64		台形	2.88	1.02
5	タイプ1(損傷)(5)	211.20	2.28	台形	4.22	1.85
6	タイプ2、損傷メカニズム1(損傷)(6-1)	407.04	2.28	台形	7.18	3.15
	タイプ2、損傷メカニズム2(損傷)(6-2)	152.64		台形	3.48	1.52

以上、a)~f)の合計6つの構造部材に対して、逆算された津波耐力をまとめると表2になる。なお、この表には当該構造部材の立地地点における最大浸水深またはそれらから最近傍において計測された最大浸水深、および後述する津波荷重評価の結果を併せて示している。

#### 4. 津波荷重評価と考察

構造部材に作用する津波の水平波圧は、朝倉・他<sup>10)</sup>によって次式が提案されている。

$$p_x(z) = \rho g(a\eta_{max} - z) \quad (4)$$

ここで、 $p_x$ は最大遡上水深 $\eta_{max}$ の場合の進行方向の津波の波圧(N/m<sup>2</sup>)、 $\rho$ は海水の単位体積質量(t/m<sup>3</sup>)、 $z$ は当該地盤面からの高さ(m)である。 $a$ は水平波圧指標と呼ばれ、非分裂波の周期が短い場合 $a = 3$ となることが朝倉らにより提案されている。本研究では、構造部材の仮定した損傷モードより求められた津波耐力と津波による水平波力が等しくなった場合に、構造部材に損傷・崩壊が生じたと仮定する。式(4)を次式のように変形し、最大遡上水深 $\eta_{max}$ を計測した浸水深とみなすことにより水平波圧指標(以下係数 $a$ と呼ぶ)を逆算する。

$$a = \frac{1}{\eta_{max}} \left( \frac{p_x}{\rho g} + z \right) \quad (5)$$

表2に示した構造部材のせん断耐力相当時における浸水深 $\hat{\eta} = a\eta_{max}$ を式(5)ならびに図5の波圧分布に基づき求める。ただし、 $\hat{\eta}$ が構造物の高さ $H$ を越える場合は、 $\hat{\eta}$ の上限を $H$ とし、図5(2)のように台形の波圧分布を仮定する。

以上より、表2には逆算された $\hat{\eta}$ ならびに係数 $a$ を示す。図6には本研究により得られた結果と庄司・他<sup>9)</sup>の2006年ジャワ島南西沖地震津波の際の家屋等構造物の被害を示す。更に、図7にはスリランカならびにタイの家屋等構造物の津波被害データに基づいて中塾<sup>11)</sup>が算出した結果を示す。また、本研究においては、壁が一部損傷しているものを損傷、壁の大部分あるいはすべて崩壊しているものを崩壊と定義し図中に示す。

朝倉・他<sup>10)</sup>の算定式における $a=3$ は構造物の部材の被害・無被害を分ける境界値であることを示しており、この算定式は内閣府による津波避難ビル等に係るガイドライン<sup>15)</sup>で採用されている。

本研究で新たに算出した係数 $a$ の値を見てみると、図6(1)のように部材番号6-1が係数 $a=3$ よりやや大きい数値を示しているが壁に損傷が生じている。しかし、部材番号6-1以外は $a=3$ 以下で損傷または崩壊が生じている。すなわち、津波耐力が乏しいと推定される構造部材が実際に損傷・崩壊しており、式(4)による部材に作用する津波波圧算定は本調査データに基づくと妥当であると考えられる。

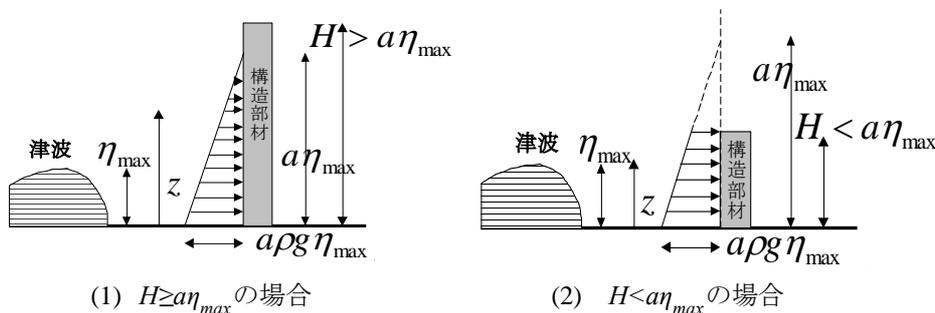
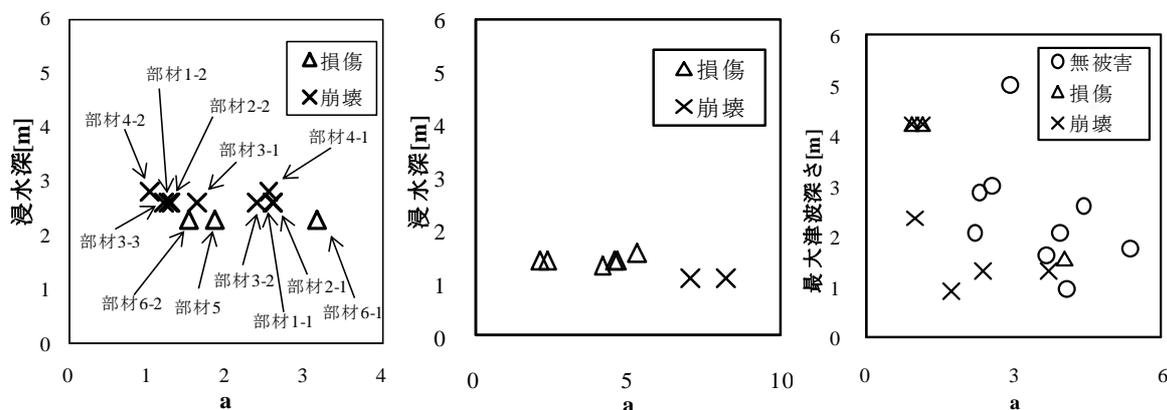


図5 最大遡上水深  $\eta_{max}$  と構造部材の高さ  $H$ 、波圧分布  $p_x$  の関係



(1)ペルーの場合

(2)ジャワの場合<sup>9)</sup>

図6 壁部材の係数 $\alpha$ と浸水深の関係

図7 スリランカ・タイにおける壁部材の係数 $\alpha$ と最大津波深さの関係<sup>11), 12)</sup>

## 5. 結論

本研究では、2001年ペルー南部地震津波による7か所の家屋被害データを用いて、家屋等構造物の壁部材の津波耐力を求め、朝倉・他<sup>10)</sup>による津波波圧の算定式の妥当性を検討した。その結果、1つの部材以外、津波耐力が乏しい部材に関しては算定式による津波波圧の評価通り、実際に損傷・崩壊が生じていることが明らかになった。

## 謝辞

本研究は、平成21年度採択・地球規模課題対応国際科学技術協力事業 (SATREPS) 「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」(研究代表者：山崎文雄・千葉大学教授、越村俊一・東北大学准教授) の助成を得て実施されました。また、本論文第3章以降の分析には筑波大学・工学システム学類・清水裕文氏のご助力を得ました。ここに記して関係者各位に謝意を表し、深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) USGS: Magnitude 8.4 - NEAR COAST OF PERU, [http://neic.usgs.gov/neis/eq\\_depot/2001/eq\\_010623/](http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2001/eq_010623/), 2006年, 参照 2009-9-22.
- 2) 羽鳥徳太郎: 津波による家屋の破壊率、地震研究所彙報、Vol.59、1984年、pp. 433-439.
- 3) 首藤伸夫: 津波強度と被害、津波工学研究報告、第9号、1992年、pp. 101-118.
- 4) 松富英夫、首藤伸夫: 津波の浸水深、流速と家屋被害、海岸工学論文集、第41巻、1994年、pp. 246-250.
- 5) 松富英夫、高橋智幸、松山昌史、原田賢治、平石哲也、Supartid, S., Naksuksaku, S.: タイの Khao Lak と Phuket 島における 2004 年スマトラ島沖津波とその被害、海岸工学論文集、第52巻、2005年、pp. 1356-1360.
- 6) 松富英夫、榊山勉、Nugroho, S., 都司嘉宜、谷岡勇市郎、西村裕一、鎌滝孝信、村上嘉謙、松山昌史、栗塚一範: Banda Ache と周囲における 2004 年インド洋津波と被害想定から見た課題、海岸工学論文集、第52巻、2005年、pp. 1366-1370.
- 7) 越村俊一、行谷佑一、柳沢英明: 津波被害関数の構築、土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, 2009年、pp. 320-331.
- 8) 谷裕典、庄司学: 2006年ジャワ島南西沖地震津波における家屋被害の検証、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.66, No.1, 2010年.

- 9) 庄司学、森山哲雄、幸左賢二、松富英夫、嶋原良典、村嶋陽一：2006年ジャワ島南西沖地震による家屋等構造物の被災分析、海岸工学論文集、第54巻、2007年、pp.861-865.
- 10) 朝倉良介、岩瀬浩二、池谷毅、高尾誠、金戸俊道、藤井直樹、大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究、海岸工学論文集、第47巻、2000年、pp.911-915.
- 11) 中埜良昭、朴珍和：構造耐力との比較に基づく2004年スマトラ島沖地震津波による津波荷重の評価(その1) 調査方針および調査概要、日本建築学会学術講演梗概集(近畿)、2005年、pp.723-724.
- 12) 中埜良昭、朴珍和：構造耐力との比較に基づく2004年スマトラ島沖地震津波による津波荷重の評価(その2) 津波荷重と構造耐力の比較検討、日本建築学会学術講演梗概集(近畿)、2005年、pp.725-726.
- 13) 日本建築学会：補強コンクリートブロック造設計基準・同解説、1997年.
- 14) 真田靖士、中村友紀子、山内成人、崔琬、中埜良昭：枠組組積造の水平力抵抗機構から推察される無補強組積造建築の高耐震化技術、日本建築学会構造系論文集、No.605、2006年、pp.159-166.
- 15) 内閣府・津波避難ビル等に係るガイドライン検討会：津波避難ビル等に係るガイドライン、<http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/050610/guideline.pdf>、2005年、参照 2009-10-28.