

## 2010 年チリ地震津波の諸相

松富 英夫\*・原田 賢治\*\*・小笠原敏記\*\*・片岡 俊一\*\*\*

### 1. はじめに

「津波は高さばかりでなく、流速が重要」と言われて久しい。そこで、本研究はチリにおける津波の概要を論じた後、建物周りの津波痕跡分布の現地調査結果を示す。これにより、建物に押し寄せた津波の高さ、卓越流向、氾濫流速や流体力の推定が可能となるからである。次に、その結果と実験結果 (Matsutomi and Okamoto, 2010) の比較・検討を行う。さらに、建物前・背面の痕跡測定位置の違いによる推定氾濫流速の変動係数  $C.V.$  (松富・原田, 2010), 整然とした建物群域の津波、海岸線に平行に走る小川の影響、隆起した岩礁の白化の上端位や津波漂流物対策のヒントとなる事例も論じる。

### 2. 津波の概要

2010 年 2 月 27 日 03 時 34 分 (日本時間 27 日 15 時 34 分), チリの Maule 州沖を震源 ( $36.027^{\circ} S, 72.834^{\circ} W$ ) とする  $M_p=8.8$  の地震 (深さ 30 km, 走向  $14^{\circ}$ , 傾斜角  $19^{\circ}$ , すべり角  $104^{\circ}$ ) により大津波が発生した (USGS, 2010)。津波発生時の潮位 (潮差約 1.6 m) はほぼ干潮であった。チリ沿岸での津波の浸水高や遡上高を図-1 に示す (Fujima, 2010)。R は遡上高, I は浸水高, 高さの基準面は DL で, 単位は m である。特殊なところを除いて, 最大の津波高は 10 m 強である。2010 年 4 月 7 日現在, 地震と津波による死者は 486 人, 行方不明者は 79 人である。死者の半数は津

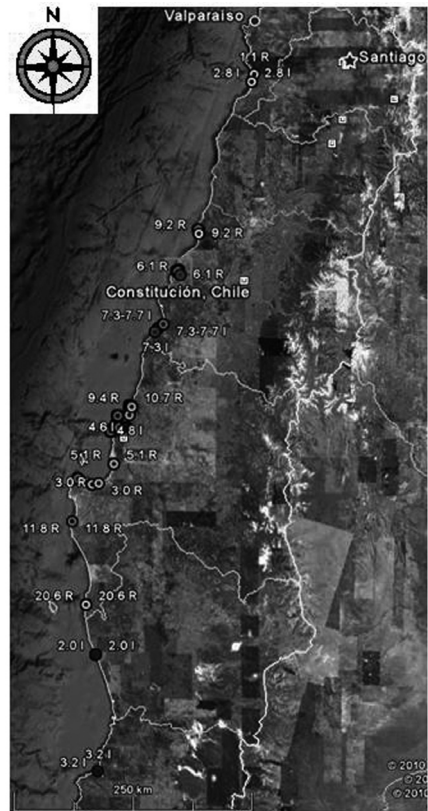


図-1 チリ沿岸での津波の浸水高や遡上高 (Google Earth)

波によると言われている。チリの人口密度は日本の約 1/15 であり, 津波規模の割に死者が少ないとは決して言えない。

### 3. 建物周りの津波痕跡分布

現地調査は 2010 年 4 月 18 ~ 23 日 (正味) に行った。調査地域は北から南に Constitución, Pelluhue, Dichato, Talcahuano, Concepcion, Arauco, Lebu である (図-2)。

図-3 と 4 に引き波や反射流の影響を受けていないと判断した建物周りの津波痕跡分布

\*秋田大学大学院工学資源学研究科

\*\*埼玉大学大学院理工学研究科

\*\*\*岩手大学大学院工学研究科

\*\*\*\*弘前大学大学院理工学研究科

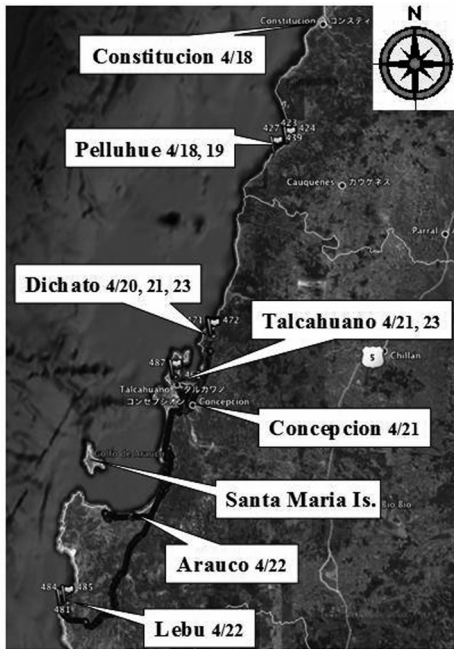


図-2 チリの現地調査地域と日程 (Google Earth)

(松富・原田, 2010) を示す。建物は写真と平面図の両方で示してある。図中の太い実線と矢印は浸水深と建物周りの痕跡分布から推定した津波の卓越氾濫方向を示す。この他に 3 つの建物で調査したが、それらの痕跡は引き波や反射流の影響を受けていた。

図-3 は Pelluhue での調査結果である。建物は、図面左側の衛星写真中の直線に沿って、高さ 8 m の砂丘、84 m の滞水域、勾配 +1/190 の緩斜面に続く高さ 0.9 m の段上であり、汀線から 357 m 地点に孤立的に建っている。建物の平面形状は非常に複雑で、8 点で痕跡の水位と浸水深を得た。建物がないとしたときの津波ピーク時の入射氾濫流速  $u$  は 4.5 m/s、入射フルード数  $F_r (=u/\sqrt{gh_r})$  は 0.88、変動係数  $C.K.$  は 0.11 と推定された (松富・原田, 2010)。ここで、 $g$  は重力加速度、 $h_f$  と  $h_r$  は建物の前・背面浸水深である。

図-4 は Talcahuano での調査結果である。鉄筋コンクリート造の建物は鉛直な岸壁に続く勾配 +1/220 の平坦地上にある。岸壁から 120 m 地点に位置し、他の建物と一っしょに

なって背後地を塞ぐように建っている。ここでも 8 点で痕跡の水位と浸水深を得た。津波ピーク時の入射氾濫流速は 2.4 m/s、入射フルード数は 0.51、変動係数は 0.04 と推定された。入射フルード数がやや小さい。これまでに現地調査で推定された入射フルード数は 0.42 ~ 1.2 である (松富・原田, 2010)。これには岸壁の存在、すなわち岸壁での津波の反射現象が一因していよう。

図-5 (a) と (b) に Pelluhue と Talcahuano での建物の前・背面痕跡浸水深 (縦棒) と孤立した正四角柱模型での実験結果 (自由曲線) (Matsutomi and Okamoto, 2010) の比較を示す。実験結果は定常流で得られたもので、凡例の  $B$  は水路幅 (cm)、 $F_{r0}$  は等流のフルード数である。また、 $h$  は水路底面から水際線までの水深、 $h_0$  は等流水深、 $y$  は模型前面 (左図) では模型左端、模型背面 (右図) では模型右端を原点とする水平距離座標で、模型幅  $W$  で無次元化されており、 $x$  は模型右側面に沿い、模型上流端を原点とする距離座標で、模型長さ  $L$  で無次元化されている。図において、実津波の無次元最大前面痕跡浸水深は、入射フルード数  $F_r$  ( $\cong F_{r0}$  と考える) を考慮しながら実験結果から線形補間して決めたもの (図面左側の太い水平直線) と一致させている。これに基づいて実津波の仮想的な等流水深と無次元背面痕跡浸水深を順次評価し、実験の無次元背面痕跡浸水深 (図面右側の太い水平直線) と比較している。図から、Pelluhue での実津波の無次元背面痕跡浸水深は実験のものより大きめであることが判る。この理由として、実際の氾濫流は非定常であり、窓や戸口を通して建物の背後へ流れ込むことが考えられる (松富・原田, 2010)。一方、Talcahuano でのように、単純な平面形状で、津波が建物に直に入射し、窓や戸口が壊れていない場合は、両者の一致度がよい。

#### 4. 建物群域の津波

Dichato の海岸線にほぼ平行に走る小川の右岸 (内陸側) 沿いの整然とした建物群域で

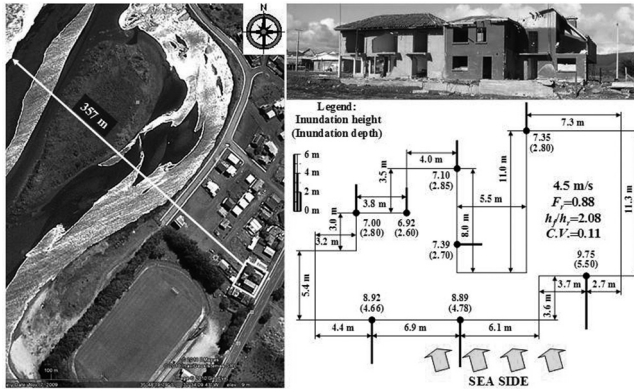


図-3 建物周りの津波痕跡分布 (Pelluhue) (左: Google Earth)

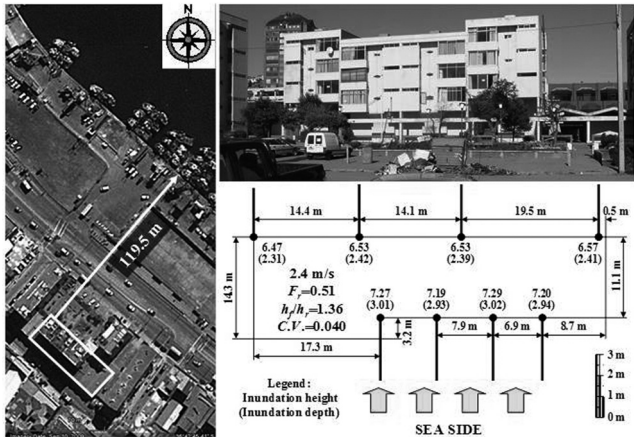


図-4 建物周りの津波痕跡分布 (Talcahuano) (左: Google Earth)

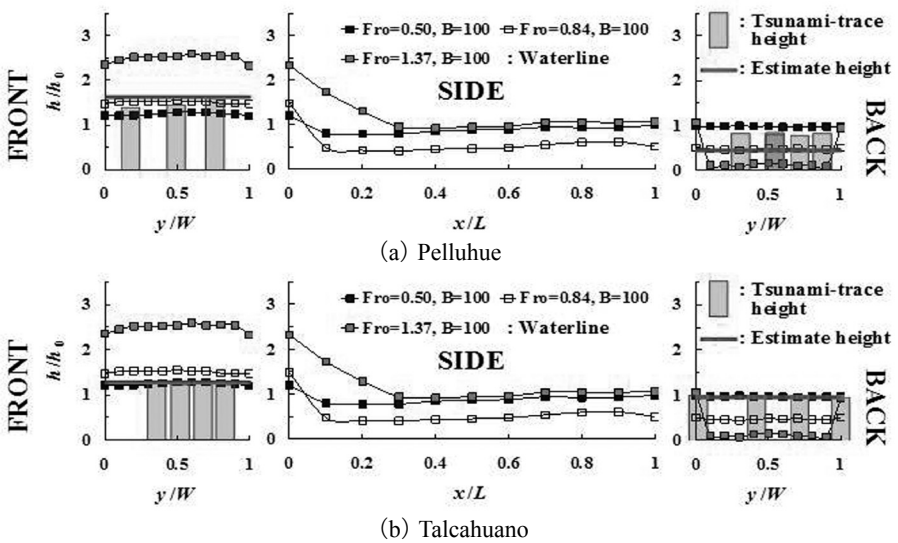


図-5 正四角柱周りの浸水深分布 (自由曲線) と現地調査データ (縦棒) の比較

津波の浸水位  $Z$  や浸水深  $h$  の平面分布を得た。整然とした建物群域でのこれらの平面分布の現地調査データの収集は、建物群の抵抗の議論において有用であるが、これまで得られていない。

Dichato の道路網と居住域の配置や小川の流路を図-6 に示す。対象の建物群域は多角形領域 CDHG である。古い衛星写真であり、この領域に建物群は写っていない。建物群の近景 (図面の上部), 海岸線から建物群域にかけての浸水位と縦断地形 (ともに基準は DL) を図-7 に示す。G 地点近くで浸水深が大きく、4.6 m に達した。各建物での地盤高  $GH$  (i, FBi), 前面 (i, Fi) と背面 (i, Bi) の浸水深の分布を図-8 に示す。ここで、 $i$  は整数、線分 GH 側が前面、線分 CD 側が背面である。G 地点近くでは建物の前・背面の浸水深に差が認められるが、他ではほとんど認められない。これは氾濫した津波が滞留したためと考えられる。G 地点から C や H 地点に向かうにつれて、浸水深は小さく、建物の被害程度は低くなる。4 方向から撮った建物の被災状況写真例を図-9 に示す。これは (1, FB5) 地点のものである。調査した 47 戸の被災状況写真は参考文献 (松富, 2010) に示してある。建物群の 1 階は鉄筋の入ったブロックの組積造、2 階は木造である。よって、1 階部分は窓や戸が壊れた程度で、建物の物理的被害は 2 階部分に集中した。2 階部分の被災程度を図-10 に示す。

以上のことから、対象の建物群域の津波は、海岸線からも来襲したが、途中の建物群や小川による減勢もあってか、小川沿いが卓越したと判断される。

## 5. 隆起と白化

Lebu (図-2) の隆起した岩礁域で白化現象が認められた。図-11 はその例である。正確な地盤の隆起量は地震前後の GPS や SAR 観測、三角測量で推定できるが、現地での簡易推定法として岩礁の白化現象の利用が考えられる。この岩礁域内の 2 地点で白化上端



図-6 Dichato の道路網, 居住域と小川 (Google Earth)

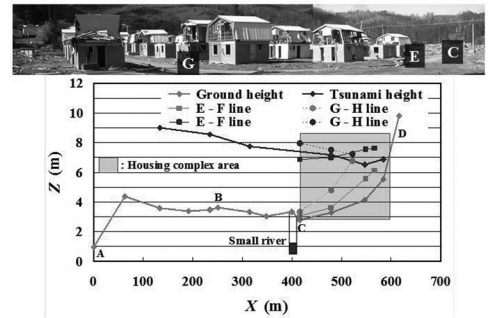


図-7 建物群域, 浸水位と縦断地形

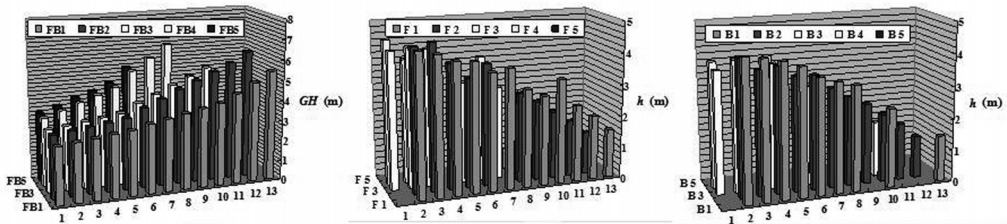


図-8 地盤高 (左), 前面浸水深 (中) と背面浸水深 (右)

位を複数個ずつ測量したところ、各々の平均値は DL 2.35 m (2.27 ~ 2.43 m) と 2.36 m (2.21 ~ 2.51 m) で、ほぼ同じであった。ここで、測量時 (2010年4月22日) の潮位は各々 DL 1.11 m と 1.18 m (図-12の太線)、この時期 (2010年4月19 ~ 30日) の干潮位、満潮位と潮差は各々 DL 0.22 m, 1.84 m と 1.62 m (図-12の細線) である。地震発生日 (2010年2月27日) の干潮位、満潮位と潮差は各々 DL 0.24 m, 1.86 m と 1.62 m (図-12の破線) であり、測量日のそれらと基本的に差はない。また、潮差はその絶対値にほぼ等しい。したがって、白化の上端位が干潮位、満潮位、平均潮位に対応すると考えると、ここでの隆起量は各々 2.14 m, 0.52 m, 1.33 m 程度と推定される。Lebu や約 65 km 北に位置する Santa Maria 島 (図-2) での隆起量は 2 m 程度と推定されており (EERI, 2010), 「Lebu の白化上端位は干潮位に対応する」と考えた場合のものに近い。これは既報 (松富ら, 2007) の判断と整合する。



図-9 建物の被災状況写真例

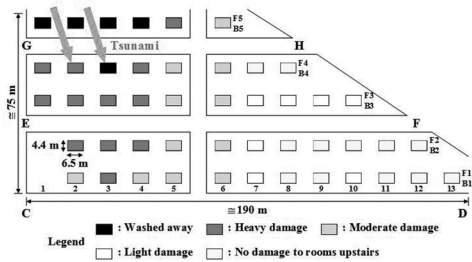


図-10 建物群の2階部分の被災程度

## 6. 陸上貯木の管理

Constitucion の Maule 川河口左岸に位置する製紙工場の敷地内には大量の丸太が積まれていた (図-13)。河口の少し上流で氾濫した津波の浸水高は 7 m 程度、河口南西側の工場敷地南西端近く (敷地外) での津波遡上高



図-11 Lebu の岩礁における白化現象 (平均の白化上端位: 左図 2.36 m, 右図 2.35 m)

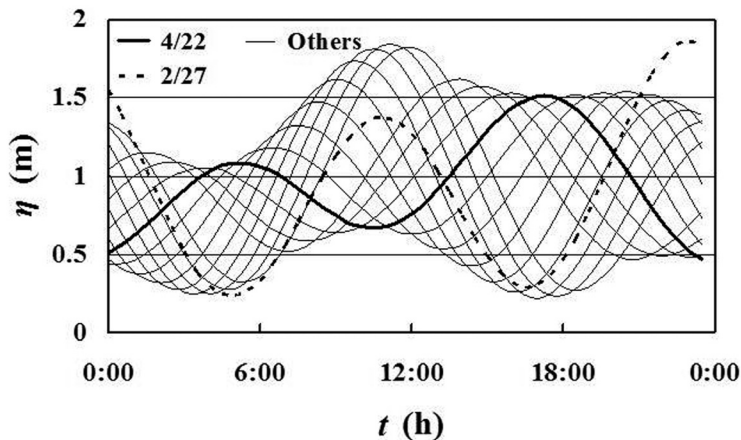


図-12 Talcahuano での推算潮位  $\eta$  (4月19-30日と2月27日)

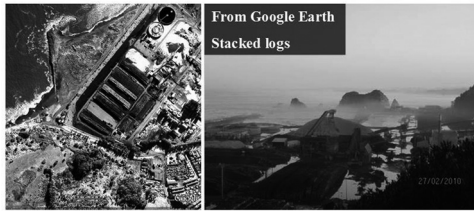


図-13 流動・流出を免れた製紙工場敷地内の貯木 (Google Earth)

は 26 m 程度に達した (Fujima, 2010)。工場の敷地内も津波で浸水したが、積まれた貯木は崩れず、流動・流出しなかった。これには工場の敷地を囲む土堤が大きく貢献したと考えられる。

## 7. おわりに

本調査研究で得られた主な結果は次の通りである。

- ①建物周りの津波痕跡分布は実験結果と調和的である (図-5)。
- ②痕跡測定位置の違いによる推定氾濫流速の変動係数は 0.04 ~ 0.11 (2009 年 Samoa 地震津波では 0.043 ~ 0.20) で、建物前面に対する津波の斜め入射度が強いほど、大きい傾向にある (図-3 と 4)。
- ③整然とした建物群域の津波浸水高や浸水深の平面分布例を初めて示した (Dichato)。
- ④海岸線にほぼ平行に走る小川沿いでも顕著な建物被害が認められた (Dichato)。
- ⑤隆起した岩礁の白化の上端位は地震前の干潮位に対応する。
- ⑥製紙工場敷地内に積まれた貯木は崩れず、流動・流出もしなかった (Constitution)。土堤で守られていたためと考えられ、本例

は貯木場等での津波対策のヒントとなる。

## 謝辞

現地調査にあたり、日本地震工学会、(財)漁港漁場漁村技術研究所、平成 22 年度北東北国立 3 大学連携推進研究プロジェクトの補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 松富英夫・藤間功司・嶋原良典：2007 年ソロモン諸島地震津波の現地調査，第 26 回日本自然災害学会講演概要集，pp.85-86，2007。
- 松富英夫・原田賢治：建物周りの津波痕跡分布とその活用 —2009 年サモア地震津波を例に一，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. B2-66, No.1, pp.271-275, 2010。
- 松富英夫：2010 年チリ地震津波，<http://www.hel.ce.akita-u.ac.jp/%7Ematsu/>。
- EERI: Preliminary report on geotechnical effects of the 2010 Chile Earthquake, <http://www.eqclearinghouse.org/20100227-chile/reports-from-the-field/geer-report-available>, 参照 2010-7-30。
- Fujima K.: Tsunami measurement data, <http://www.nda.ac.jp/~fujima/TMD/index.html>。
- Matsutomi H. and Okamoto K.: Inundation flow velocity of tsunami on land, *Island Arc*, Vol. 19, Issue 3, pp.443-457, 2010。
- USGS: Magnitude 8.8 - Offshore Maule, Chile, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eq-inthenews/2010/us2010tfan/>。