

2010年2月27日チリ・マウレ地震 建築物被害調査報告

Chile, Maule Earthquake of February 27, 2010
Reconnaissance Report on the Damage to Buildings

緑川光正¹, 加藤博人², 向井智久³, 田尻清太郎⁴, 斎藤大樹⁵

- 1 北海道大学大学院工学研究院
- 2 (独)建築研究所構造研究グループ
- 3 (独)建築研究所国際地震工学センター
- 4 国土交通省住宅局建築指導課（前(独)建築研究所構造研究グループ）
- 5 (独)建築研究所国際地震工学センター

Mitsumasa MIDORIKAWA¹, Hiroto KATO², Tomohisa MUKAI³,
Seitaro TAJIRI⁴ and Taiki SAITO⁵

- 1 Faculty of Engineering, Hokkaido University
- 2 Department of Structural Engineering, Building Research Institute (BRI)
- 3 International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, BRI
- 4 Building Guidance Division, Housing Bureau, MLIT (Former BRI)
- 5 International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, BRI

1. はじめに

2010年2月27日（土）午前3時34分頃（現地時間），南米チリ（Chile）国の太平洋沿岸部でモーメント・マグニチュード（Mw）8.8の巨大地震が発生し，チリ国沿岸には津波が襲来した。地震と津波によって多数の死者，行方不明者が出ていたほか，チリ国内の広い範囲で建築物や土木構造物にも甚大な被害が発生した。また，津波は翌日2月28日午後から3月1日未明にかけて日本にも襲来し，太平洋沿岸の広い範囲に避難指示や警報が発令され，各地で最大1m程度の津波が観測された。

地震直後，日本政府は独立行政法人国際協力機構（JICA）の調査団2名を現地に派遣し，復興支援ニーズ調査のために関係機関との協議および現地調査を実施した。その中で，チリ国住宅・都市計画省住宅計画局長から日本に対して，被災建築物の診断に関する優れた技術と経験を持つ専門家チームの派遣要請があった。また，被災建築物の診断作業を行っているカトリカ大学の担当者からも，診断と調査に関する助言を得るために，日本人専門家チームの派遣を強く要望された。これらの要請に応える形で日本政府はJICAを通じた専門家チーム（以下，JICA専門家チームと略記）の派遣を決定した（注1）。JICA専門家チームは，2010年3月13日～23日の日程で建築物の被害を中心に被災状況調査を行った。

本報告は，JICA専門家チームが現地調査活動で収集した情報等に基づき，建築物の被害状況を中心に2010年チリ・マウレ地震の被害概要についてまとめたものである。2章では，チリ国政府や国際機関の公表資料を引用して地震被害の全体像について記述している。3章では，各地で観察された建築物の被害状況について概説し，4章では今回の地震被害の特徴について分析した結果を述べている。なお，本報告には，後日派遣された他の調査団（注2）による調査結果が一部含まれている。

-
- 注 1) 調査団名称：チリ国地震被災建築物診断専門家チーム（2010年3月13日～23日）
調査団派遣の主目的は、以下の通りである。
- 1) チリ国住宅・都市計画省住宅計画局がカトリカ大学及びチリ大学等と合同で実施する被災建築物診断の実施を支援し、技術的な助言を行う。
 - 2) 被災状況の調査を通じて、被災建築物診断および地震被害軽減に関する課題、今後のさらなる協力ニーズを確認する。
- 調査団メンバーは、次の通りである（所属は派遣時点）。
- 江塚 利幸 (独)国際協力機構国際協力人材部次長（団長）
緑川 光正 北海道大学大学院工学研究科教授
吉田 弘 国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課施設評価室長
加藤 博人 (独)建築研究所構造研究グループ
向井 智久 (独)建築研究所国際地震工学センター
田尻 清太郎 (独)建築研究所構造研究グループ
(通訳：菅野喜巳、見坊セゲール (財)日本国際協力センター)
- 注 2) (独)科学技術振興機構（JST）と(独)国際協力機構（JICA）の地球規模課題対応国際科学技術協力事業「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究（2009～2014年）」による被害調査
(2010年4月26日～5月3日、本報告の著者の一人である斎藤大樹が参加)
調査の主旨・目的：研究対象地域はペルー国であるが、隣国チリ国とはテクトニクスの環境や自然・社会環境が類似しており、チリ国の巨大地震を研究した結果はペルー国にも適用できる部分が多く、さらに中南米諸国への波及効果も大きい。このため、ペルー国の共同研究者およびチリ国の研究者と合同で、以下の項目に関する被害調査を行う。
- 1) 津波の週上範囲・浸水高の計測、津波被害の観測（G2）
 - 2) 建物被害、道路・インフラ被害の現地確認データの収集（G4, G5）
 - 3) 地震動評価と建物被害の詳細把握（G1, G3）
- () 内は、調査担当グループ。G1：地震動・地盤、G2：津波、G3：建物、G4：被害予測、G5：減災計画

2. 地震諸元と地震被害概要

2010年2月27日06時34分頃(UTC), 03時34分頃(現地時間)にチリ国中部で発生したMw8.8の巨大地震は、チリ国内の広い範囲で甚大な被害をもたらした。

米国地質調査所(USGS)によるチリ・マウレ地震の諸元²⁻¹⁾は、以下の通りである。

- ・発震時：2010年2月27日03時34分12秒（現地時間），06時34分12秒（UTC），15時34分12秒（JST）
- ・マグニチュード：8.8 (Mw)
- ・震央：南緯 36.122°，西経 72.898°
- ・深さ：22 km

USGSの発表データによると、震源はチリ国マウレ(Maule)州西方の太平洋沿岸部で、主要な都市とのおよその震央距離は以下の通りである。

チジャン(Chillán) の北西約 95km
 タルカ(Talca) の西南西約 115km
 コンセプシオン(Concepción) の北北東約 105km
 サンティアゴ(Santiago) の南西約 335km
 ビニヤ・デル・マール(Viña del Mar) の南南西約 350km

米国国際開発庁(USAID)が発表した各地の震度分布を、図2.1に示す²⁻²⁾。震源を中心にチリ国中央部の広い範囲が強震(very strong)域となっており、コンセプシオンやコンスティトゥシオンなど所々で激震(severe)となっている。震源から半径100km以内の人口は約50万人、200km以内では約300万人であり、特に地震動が強かったリベルタドール(Libertador)州、マウレ(Maule)州、ビオビオ(Biobio)州、サンティアゴ首都圏(Metropolitana)の4州で大きな被害が報告された。チリ大学の公表資料²⁻³⁾によると各地の震度(修正メルカリ震度)は、震度IXがコンセプシオン、震度VIIIがランカグア、サンティアゴ、タルカ、テムコ、震度VIがバルディビア、バルパライソ、ビニヤ・デル・マール等となっており、図2.1の情報とほぼ整合している。また、チリ大学が行っていた強震観測で得られた最大加速度が公表されており^{2-4), 2-5)}、各地の最大水平加速度はサンティアゴ市内では0.17～0.3g(マイプ地区では0.56g)、ビニヤ・デル・マール0.33～0.35g、クリコ0.47g、コンセプシオン南部のサン・ペドロで0.65gとなっている。図2.1に、強震観測記録を追記して示す。

USAIDおよび国際連合人道問題調整事務所(OCHA)の公表資料²⁻²⁾に基づく本地震による被害の概要是、以下の通りである。

- ・死者： 486人(4月7日チリ国政府発表)
- ・行方不明者： 79人(同上)
- ・被災者数： 約180万人以上(OCHA, 3月29日時点)²⁻²⁾
- ・被災住宅： 約81万戸(内訳：大破および倒壊16万戸以上、要診断9.3万戸以上)²⁻²⁾
- ・被害総額： 約US\$300億

また、他の公表資料²⁻⁶⁾によると、3階以上の建築物の被害の概要是以下の通りである。

- ・1985年チリ地震以降に建築された3階以上の建築物約10,000棟(9階以上の建物約2,000棟)の内、取壊される棟数は1%以下
- ・倒壊建物数 約5棟
- ・倒壊以外の取壊される棟数 約50棟

住宅・都市計画省住宅計画局（SERVIU）は、チリ国内に多数の低所得者向け集合住宅を建設している。JICA 専門家チームの調査時（2010 年 3 月 15 日）には、全体の被災状況（建物棟数や被害程度）に関する情報は得られなかったが、SERVIU ビオビオ州長へのヒアリングによると、ビオビオ州内で SERVIU が管轄する建物約 26,000 棟について初期診断を済ませ、その内約 7,000 棟について詳細調査を実施している。約 1,800 棟は取り壊すことになるだろうとの見通しであった。

地震の後、SERVIU や自治体の職員が初步的な調査を行って危険な建物については住民に退去指示を出しているが、詳細調査はカトリカ大学工学部 科学・技術研究局（DICTUC）やチリ大学工学部 構造・材料研究・開発・革新センター（IDIEM）に依頼して行われている。詳細調査に従事しているのは、大学の教員や専門技術者、学生など総勢 30~40 人程度で、SERVIU のほか民間からの調査依頼も受けている。JICA 専門家チームの調査時点（3 月 19 日）では、SERVIU の建物約 50 棟、高層ビル約 50 棟、住宅約 200 棟程度の診断が実施されていた。

チリでは、被災建物の診断に関する統一した方法や調査シートは整備されておらず、応急的にコロンビアから診断方法を取り寄せて修正して使っている機関や、独自の方法によって建物の診断を実施している機関などまちまちである。

JICA 専門家チームは、住宅・都市計画省（MINVU）の依頼により SERVIU が建設した低所得者向け集合住宅の被災建物調査に関して技術的な助言を行った。

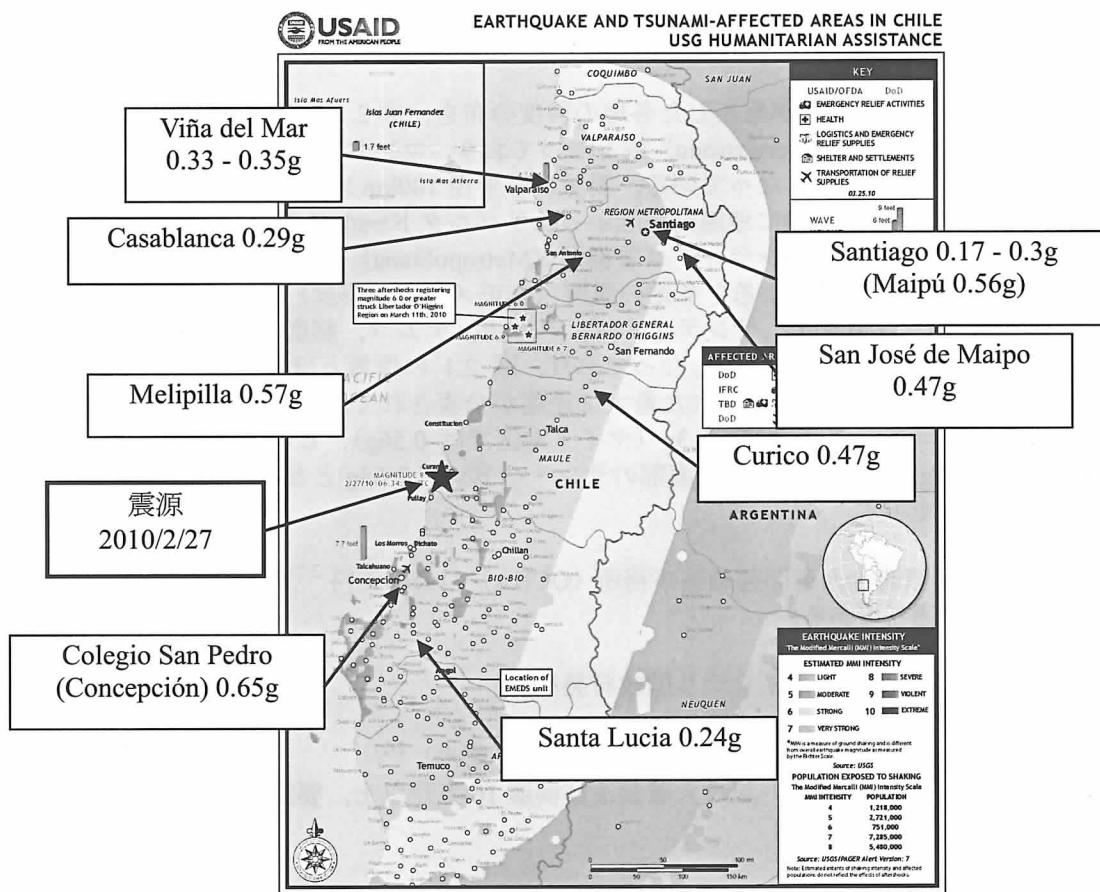


図 2.1 各地の震度と最大水平加速度（USAID の資料²⁻²⁾に追記した）

参考文献・参考サイト：

2-1) USGS Global Earthquake Search :

http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php

2-2) USAID Homepage: http://www.usaid.gov/our_work/humanitarian_assistance/disaster_assistance/co

- untries/chile/template/reports.html
- 2-3) <http://www.sismologia.cl/informe.php?id=20100227063428>
- 2-4) http://www.sismologia.cl/informes/INFORME_TECNICO.pdf
- 2-5) R. Boroschek, P. Soto, R. Leon, D. Comte: Informe Preliminar, Red Nacional de Acelerografo s, Terremoto Centro Sur Chile, 27 de Febrero de 2010, Informe Preliminar N° 4, Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas, Universidad de Chile, 5 de Marzo 2010, <http://www.terremotosuchile.cl>
- 2-6) http://enr.ecnext.com/comsite5/bin/enr_description_docview_save.p...,
<http://enr.construction.com/infrastructure/environment/2010/0331-chileconcretecode.asp>

3. 各地の建築物被害状況

3.1 調査地域

本報告書で収録している被害状況の調査地点を、OCHA が作成した地震被災地の地図に追記して図 3.1 に示す。調査地点は、サンティアゴ、コンスティトゥシオン、タルカ、カウケネス、ペジュエウエ、ディチャト、ペンコ、コンセプシオン、タルカワノ、ビニヤ・デル・マールの 10 都市である。なお、チジャンについては、参考情報として掲載している。

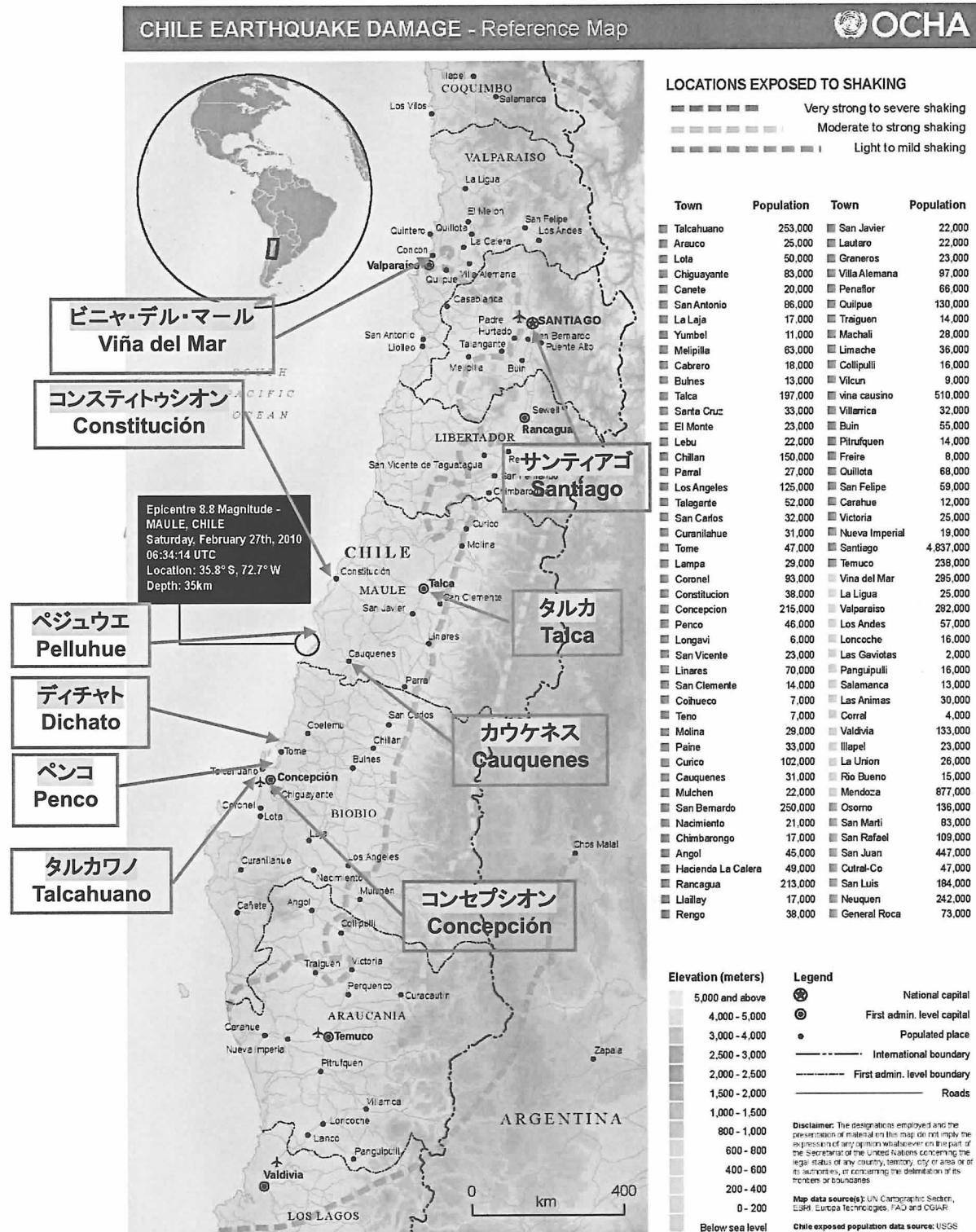


図 3.1 被害調査実施地点（OCHA の被害地図に追記）

3.2 各地の被害状況

3.2.1 サンティアゴ市 (Santiago)

サンティアゴ市では、図 3.2 に示す建物について被害状況の調査を行った。内訳は、比較的新しい建物（民間マンション）と SERVIU の集合住宅等である。以下に、調査結果を示す。

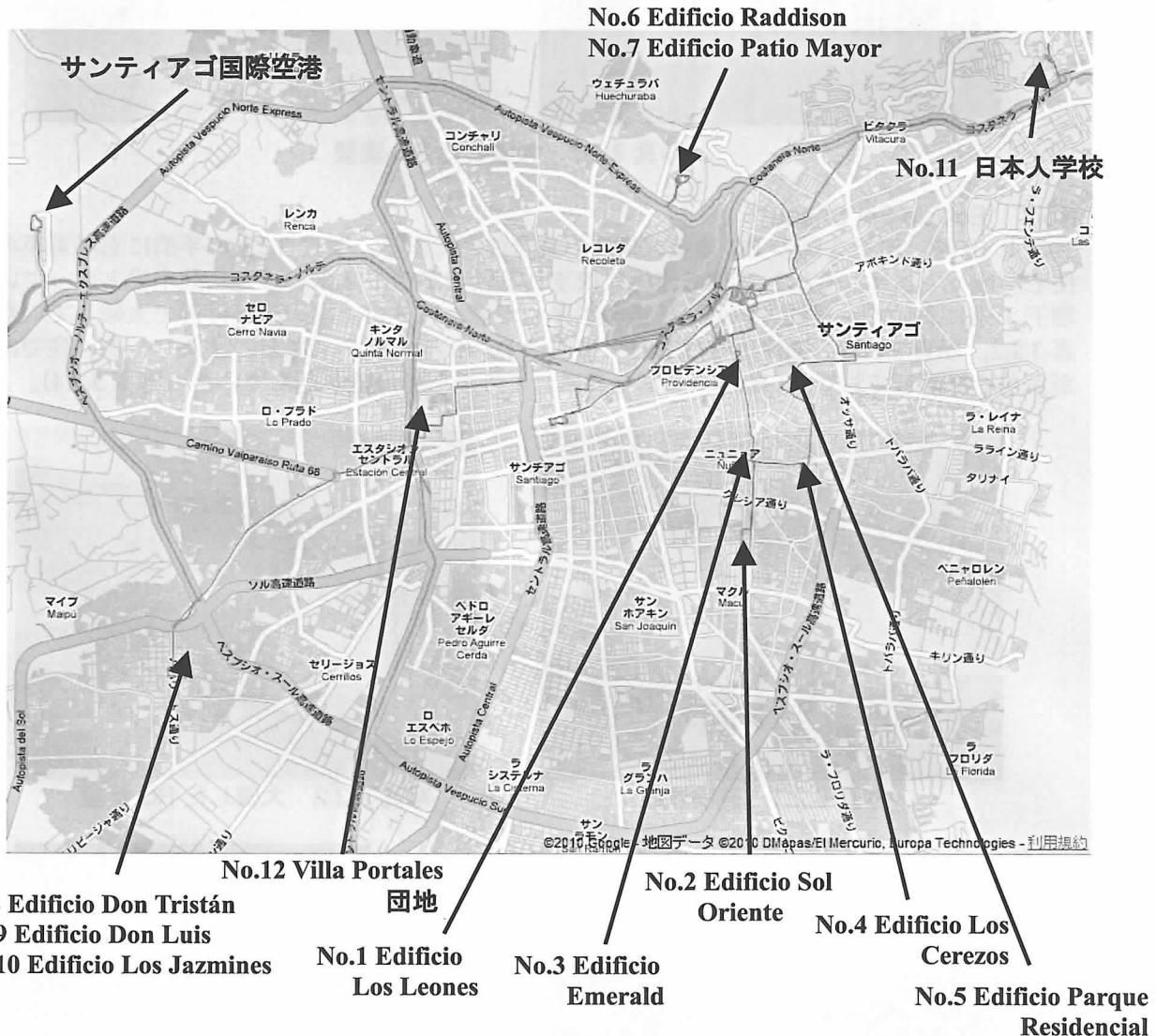


図 3.2 サンティアゴ市での調査建物（調査建物番号を Google Map に追記）

No.1 Edificio Los Leones

2009 年に建設された地上 12 階建て、地下 2 階の鉄筋コンクリート（以下、RC と略記）造壁式構造の集合住宅である（写真 3.1.1）。地下 2 階が自走式の駐車場となっており、地下 1 階の梁間方向の壁が写真 3.1.2 のように大破し、高さ方向に縮んでいた。壁厚さは、150mm であった。また、柱形のない壁柱の帶筋端部が 90° フックになっていた。



写真 3.1.1 建物外観

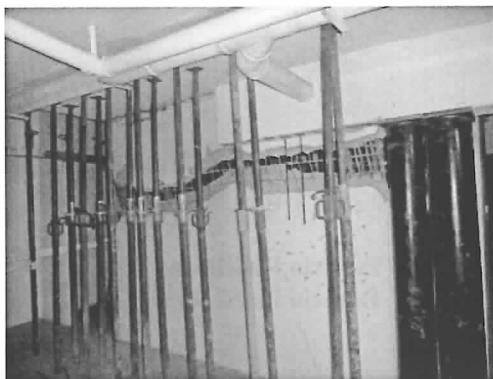


写真 3.1.2 大破した RC 造壁

No.2 Edificio Sol Oriente

地上 18 階、地下 2 階の RC 造壁式構造の集合住宅である。写真 3.2.1 の手前にも同規模の集合住宅が建っており、それら 2 棟の建物に挟まれる敷地が地下 2 階の自走式駐車場となっている。地下 1 階において、梁間方向の RC 造壁の多くが壁に取り付く梁の下端付近で大破していた（写真 3.2.2、写真 3.2.3）。壁柱主筋は D25、帯筋は D8 相当である（注 3）。また、一部の柱では柱頭が大きく損傷しており、1 階床スラブを貫通して外から光が差し込んでいた（写真 3.2.4）。



写真 3.2.1 建物外観



写真 3.2.2 大破した RC 造壁

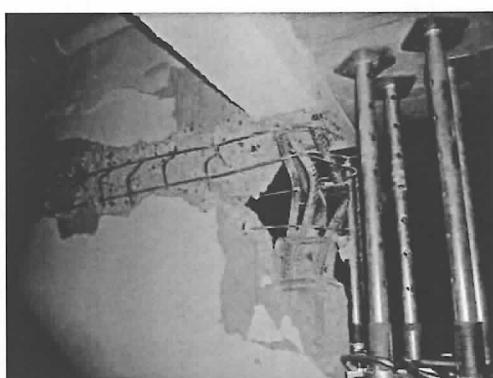


写真 3.2.3 壁柱部分



写真 3.2.4 RC 造柱の破壊

注 3) 日本の JIS 規格に定める異形鉄筋を指しているものではなく、記載した直径相当の異形鉄筋という意味で使用している。以下同様。

No.3 Edificio Emerald

細長い平面形の 20 階建て高層集合住宅である。建物全体が少し傾斜しているという情報があつたが、許可が得られず内部は調査できなかつた。本建物は、市当局によって居住不可と判定されていた（写真 3.3.1、写真 3.3.2）。



写真 3.3.1 建物外観



写真 3.3.2 市の判定結果の表示

No.4 Edificio Los Cerezos

地上 26 階、地下 1 階の RC 造壁式構造の高層集合住宅である（写真 3.4.1）。玄関脇の RC 造耐力壁の付帯柱（主筋 D35、帯筋 D13 相当）は、写真 3.4.2 のように脚部で圧壊している。写真 3.4.3 は、付帯柱を建物内部から見た様子である。また、当該壁の地下 1 階部分では、柱梁接合部が大きく損傷していた（写真 3.4.4）。これは、連層耐力壁の地下部分で壁が無くなっていること（下階壁抜け柱）が原因していると考えられる。



写真 3.4.1 建物外観



写真 3.4.2 1階柱脚の圧壊



写真 3.4.3 写真 4.4.2 の内部の様子



写真 3.4.4 写真 3.4.2 の地下部分

No.5 Edificio Parque Residencial

地上 22 階の RC 造高層集合住宅で、築 38 年程経過している（写真 3.5.1）。外壁の方立壁はれんが積みの非構造壁であり、ほぼ全フロアで写真 3.5.2 のような損傷が発生している。構造体の損傷は、ほとんど見られないとのことであった。



写真 3.5.1 建物外観



写真 3.5.2 れんが積み外壁の損傷

No.6 Edificio Raddison

地上 12 階の宿泊施設であるが、建物内に立ち入れないため外観のみの調査である（写真 3.6.1）。低層部の梁端、高層棟と接する部分と柱頭接合部に損傷が見られた（写真 3.6.2）。建物内部を調査した人の話によると、地下の RC 造隅柱が圧壊していたとのことである。



写真 3.6.1 建物外観



写真 3.6.2 壁梁の損傷

No.7 Edificio Patio Mayor

地上 5 階建て、他 4 棟からなる商業ビルである（写真 3.7.1）。外階段の目隠し壁が崩落していた。方立壁により短スパン化した壁梁端部が大きく破損しているほか、一部には柱梁接合部の破壊が見られた（写真 3.7.2、写真 3.7.3）。また、ペントハウス階は、下階の床が抜けて傾いていた（写真 3.7.4）。敷地には、地盤の変状も見られた（写真 3.7.5）。

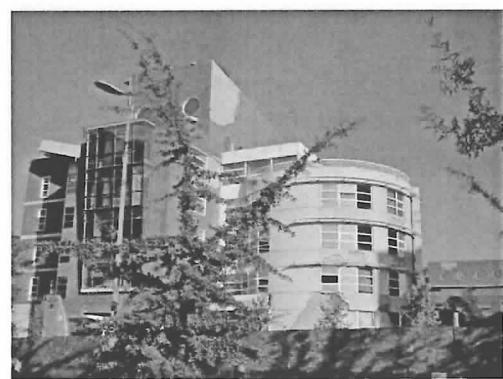


写真 3.7.1 建物外観



写真 3.7.2 外部階段壁の崩落, 階段室鉄骨梁の落下

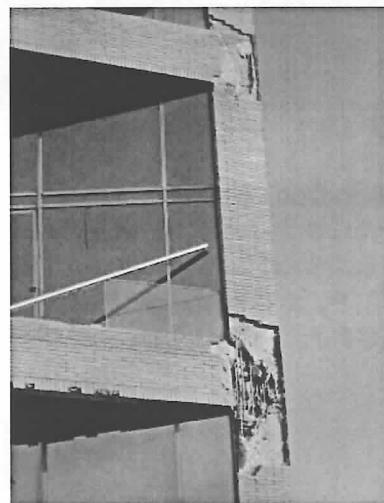


写真 3.7.3 梁と柱梁接合部の破壊

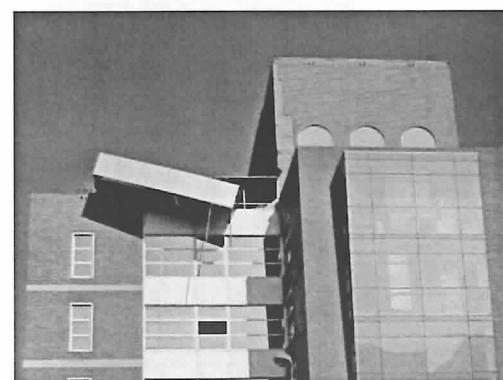


写真 3.7.4 ペントハウス階の落床と屋根非構造材の被害



写真 3.7.5 周辺地盤の変状

No.8 Edificio Don Tristán

地上 5 階の RC 造集合住宅である（写真 3.8.1, 写真 3.8.2）。建物の短辺方向に敷地が傾斜しており（写真 3.8.2 の右方向），建物の長辺方向に連なる壁柱が大きく破壊し，1 層での層崩壊が確認された。



写真 3.8.1 建物外観（長辺方向）



写真 3.8.2 建物外観（短辺方向）

No.9 Edificio Don Luis

地上 5 階のピロティ形式 RC 造集合住宅である（写真 3.9.1）。ピロティ階となる 1 階駐車場では，耐力壁の枚数が少ない（写真 3.9.2）。1 階壁柱の柱頭，柱脚部では軸力と曲げによる塑性ヒンジが形成されており，1 層の層崩壊が確認された（写真 3.9.3）。また，側柱のない耐力壁にも，せん断破壊が確認された（写真 3.9.4）。



写真 3.9.1 建物外観



写真 3.9.2 ピロティの 1 階駐車場



写真 3.9.3 曲げヒンジが生じた壁柱



写真 3.9.4 せん断破壊した壁

No.10 Edificio Los Jazmines

地上 4 階のピロティ形式の RC 造集合住宅である（写真 3.10.1）。建物 1 階外周部は T 字形の壁柱で構成され、中央部分は連層耐力壁構造となっている。T 字形の壁柱は、写真 3.10.2 のように高さ 500~600mm 付近で損傷が大きく、部材全域のコンクリートが脱落して軸力を負担できない状態であった。また、1 階耐力壁でもコンクリートが剥落しており、損傷程度は大きい。エントランス左側にある壁上端にスタイロフォーム状の充填物があり（写真 3.10.3），外周部の耐力壁は地震力に対して有効に働いていないと推測される。



写真 3.10.1 建物外観

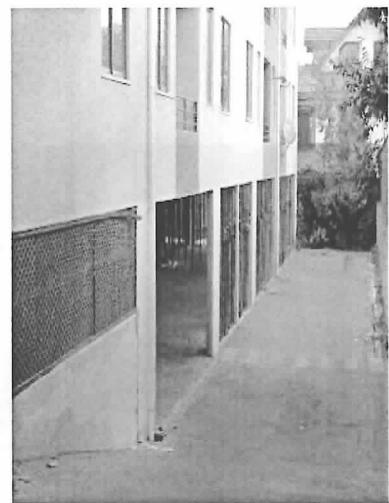


写真 3.10.2 T 形壁柱と耐力壁の破壊

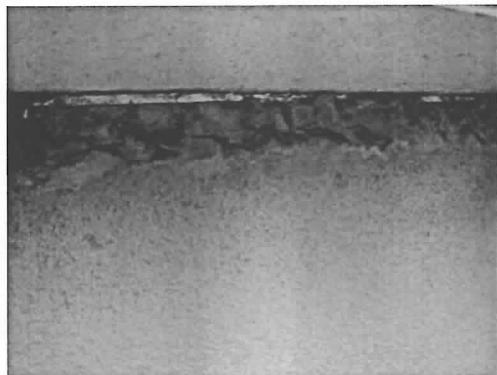


写真 3.10.3 壁上端の充填物

No.11 Instituto de Enseñanza Japonesa (日本人学校)

チリ国日本人学校の講堂で、コンクリートブロック造の2階建て建物である（写真3.11.1）。ブロック壁の目地部と軸体から張り出した片持ち壁の一部に、ごく軽微なひび割れが見られた（写真3.11.2）。その他、天井材の一部にずれが生じていたが（写真3.11.3），全体的には軽微な被害であった。



写真 3.11.1 建物外観

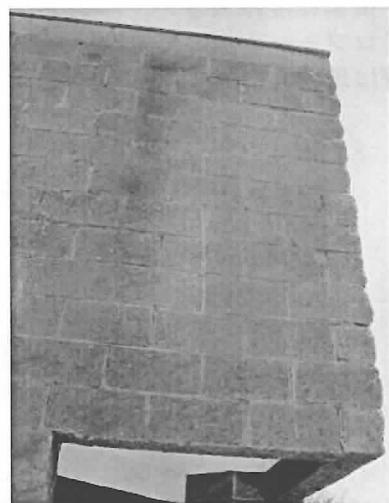


写真 3.11.2 片持ち壁のひび割れ

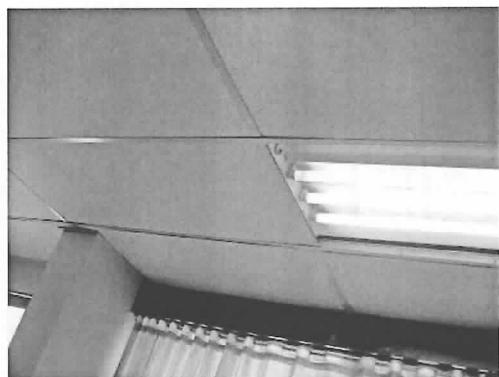


写真 3.11.3 天井材のずれ

No.12 Villa Portales 団地 (BLOCK-4)

SERVIU（住宅・都市計画省住宅計画局）によって建設された地上4階、中廊下形式の低所得者向け分譲集合住宅で、築54年程度経過している（写真3.12.1）。RC造耐力壁付きラーメン構造で、架構内の壁はれんが積みの非構造壁（Infilled Wall造（注4））である。

SERVIUがIDIEM（チリ大学工学部 構造・材料研究・開発・革新センター）に依頼して既に被

災度調査を終えており、その診断結果と注意事項が掲示されていた（写真 3.12.2）。中廊下と戸塀壁部分の組積造壁にひび割れが見られ、完全に脱落している部分もあった（写真 3.12.3）。本建物は、これまでにチリ国で起こった 1960 年の地震（Mw9.5）や 85 年の地震（Mw7.8）などの大地震動を経験しながらも、現在まで継続使用されてきた。組積造壁には、ひび割れの修復跡も散見された。一方、外部階段の踊り場部分を支える梁部材に、長期荷重によるひび割れやたわみが生じていた（写真 3.12.4）。また、別棟では一端をローラー支持された飾り梁が地震動の影響で脱落する被害も見られており（写真 3.12.5），補強工事を行う際にはこれらに対する補強措置も必要と考えられる。

なお、JICA 専門家チームの調査に合わせて、住宅・都市計画大臣が就任後初めて被災した本団地を視察し、記者会見を行った。在チリ日本大使館 林渉大使と共に JICA 専門家チームも同席し、その様子はテレビや新聞で報道された（注 5）。



写真 3.12.1 建物外観

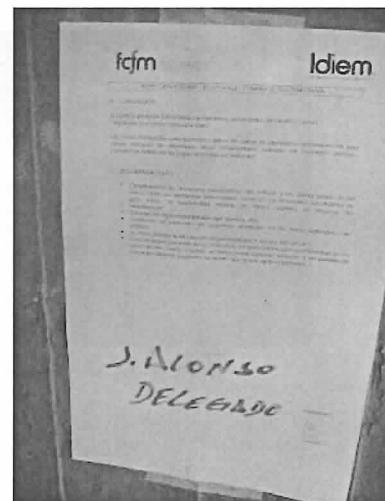


写真 3.12.2 診断結果の表示

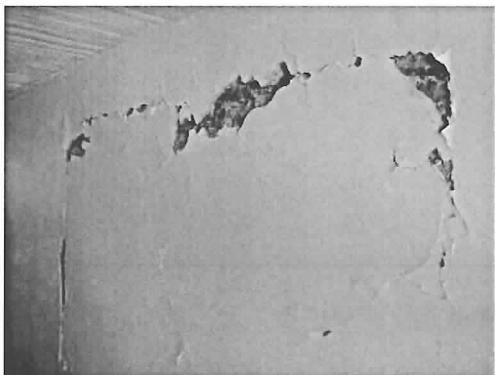


写真 3.12.3 非構造内壁の損傷



写真 3.12.4 外部階段踊り場を支える梁のたわみとひび割れ



写真 3.12.5 屋上部分の飾り梁が脱落 (左は落下した梁)

注4) このような構造を、特に区別して、Infilled Wall 造と表現することもある。詳しくは、4章で述べる。

注5)



Ms. Magdalena Matte Lecaros 住宅・都市計画大臣の現地視察と記者会見

No.13 サンティアゴ (Santiago) 市内の情況

今回調査した範囲では、サンティアゴ市内の古い組積造（石積みやれんが造）建物には、大きな被害は殆ど発生していないようであった。また、市内の多くの一般建物では、地震後出入り口のドアが開かない等の不具合が起きていたようであるが、外観上の被害は殆ど見られなかった（注6）。

なお、サンティアゴ市内にはアドベ（Adobe, 日干しれんが）造建物は既に存在していない。さらに、今後は地方においてもアドベ造の建設は認めない方針であるとの説明を受けた。



写真 3.13.1 サンティアゴ市内の組積造建物（外見上無被害）



写真 3.13.2 サンティアゴ市内の一般建物（外見上無被害）

3.2.2 コンスティトゥシオン (Constitución, マウレ州)

コンスティトゥシオンは、マウレ川の河口に位置する人口約 3.8 万人の海に面した小都市で、町の背後には山が迫っており平坦な土地は少ない。ここでは、SERVIU（住宅・都市計画省住宅計画局）の集合住宅と市内の被害状況調査、および海岸近くの津波跡を視察した。調査建物の位置を図 3.3 に示す。なお、津波被害については 3.3 でまとめて記述する。

注6) 公表されている強震観測記録（参考文献 2-4, 2-5）によると、サンティアゴ市内での地表面の加速度は一部の観測点を除き 0.2G～0.3G 程度であり、日本の気象庁震度階に当てはめると震度 5 強～6 弱程度の揺れであったものと推測される。

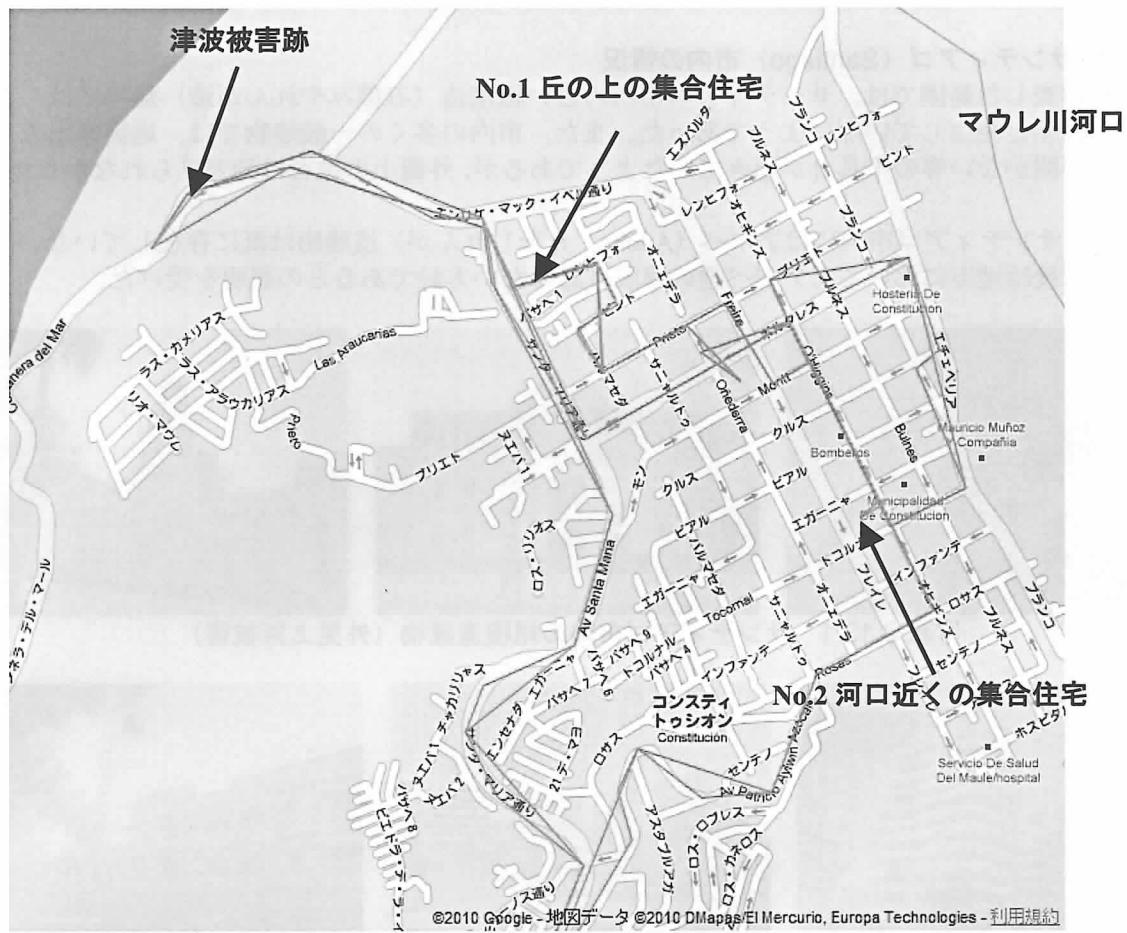


図 3.3 コンステイトゥシオンでの調査建物（調査建物番号を Google Map に追記）

No.1 丘の上の集合住宅

SERVIU が建設した枠組み組積造 (Confined Masonry, 以降, CM 造と略記) 3 階建て低所得者向け集合住宅で、丘の斜面に建つ築後 10~15 年程度の建物である (写真 3.14.1)。柱寸法は 200x300mm, 主筋は D10 相当で $\phi 4$ 程度の帶筋が約 150mm 間隔で入っている。壁には穴あきれんがを使用し、4~5 段おきに目地部に水平鉄筋 (はしご筋) が壁全幅に渡って入っているが、鉛直鉄筋は入っていない (写真 3.14.2)。



写真 3.14.1 建物外観



写真 3.14.2 CM 造の柱と壁部分



写真 3.14.3 1階部分で層崩壊した建物



写真 3.14.4 柱梁接合部

敷地の崖近くの一番高い場所に建つ住棟が 1 階部分で層崩壊し（写真 3.14.3），2 家族 8 名が死亡している。崖の上部に少し亀裂が入っており，盛り土された可能性もある。柱梁接合部には，帯筋は入っていない（写真 3.14.4）。

No.2 河口近くの集合住宅

SERVIU が建設した河口近くに建つれんがを使った CM 造 4 階建て集合住宅で、築後 20 年程度である（写真 3.15.1）。高さ 40cm 程度の津波の痕跡が見られた。

4 棟の内 1 棟は、1 階妻壁がせん断破壊し階高が少し下がっていた（写真 3.15.2）。破壊した部分にはジャンカが見られ、鉄筋に錆が出ていた。別棟では、妻壁頂部の梁が崩落している（写真 3.15.3、写真 3.15.4）。



写真 3.15.1 建物外観



写真 3.15.2 妻壁のせん断破壊

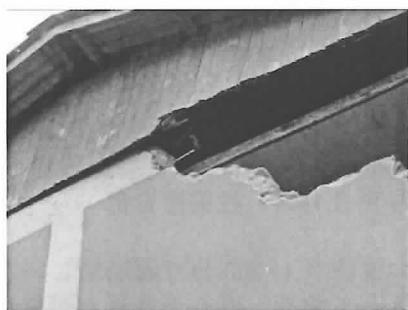


写真 3.15.3 妻壁頂部の梁の崩落



写真 3.15.4 落下した梁

No.3 古いれんが造やアドベ造建物の被害

コンスティトゥシオンでは、古いれんが造やアドベ造建物の被害が各所で見られた（写真 3.16.1）。一方、山の斜面に建つ木造住宅や新しい低層住宅には、大きな被害は発生していないようであった（写真 3.16.2）。



写真 3.16.1 れんが造やアドベ造建物の被害

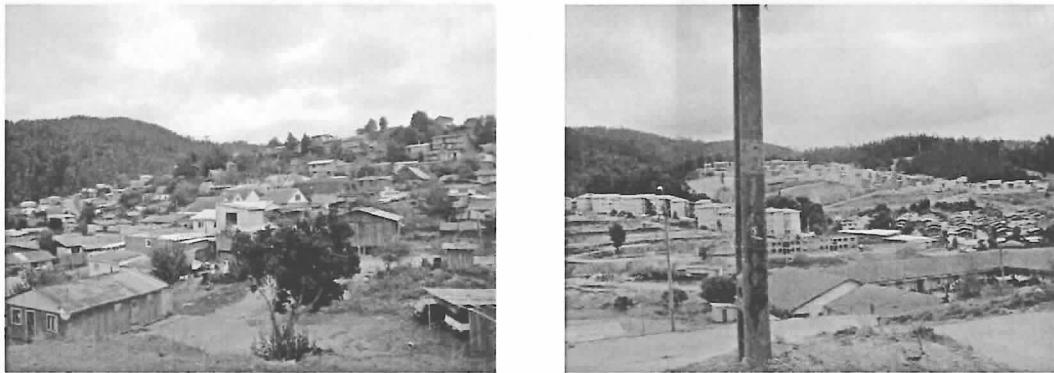


写真 3.16.2 傾斜地の新しい建物（外観上大きな被害は見られない）

3.2.3 カウケネス (Cauquenes, マウレ州)

カウケネスでは、SERVIU（住宅・都市計画省住宅計画局）が建設した集合住宅の被害状況を調査した。調査建物位置を図 3.4 に示す。



図 3.4 カウケネスでの調査建物（調査建物番号を Google Map に追記）

No.1 集合住宅

SERVIU が建設した CM 造 3 階建て集合住宅で、緩やかな傾斜地に 4 棟の住棟が建っている。築後 16 年程度とのことである。穴あきれんがを使用し、桁行方向の壁にはれんが 4~5 段おきに目地部に水平鉄筋が入っているが、梁間方向の壁には入っていなかった。敷地の一番高い場所にある住棟では 1 階部分の壁がせん断破壊し、ほぼ全ての柱部材が激しく損傷しており、被害程度は大破であった（写真 3.17.1, 写真 3.17.2）。

同じ敷地の少し離れた場所に建つ別棟では、殆ど隙間がないエキスパンションジョイント（以

降, EXP.J と略記。) で区切られた片側の建物にせん断ひび割れが発生していたが, 全体的には軽微な被害に留まっていた (写真 3.17.3)。



写真 3.17.1 被害建物全景と妻壁の被害



写真 3.17.2 大破した桁行方向壁

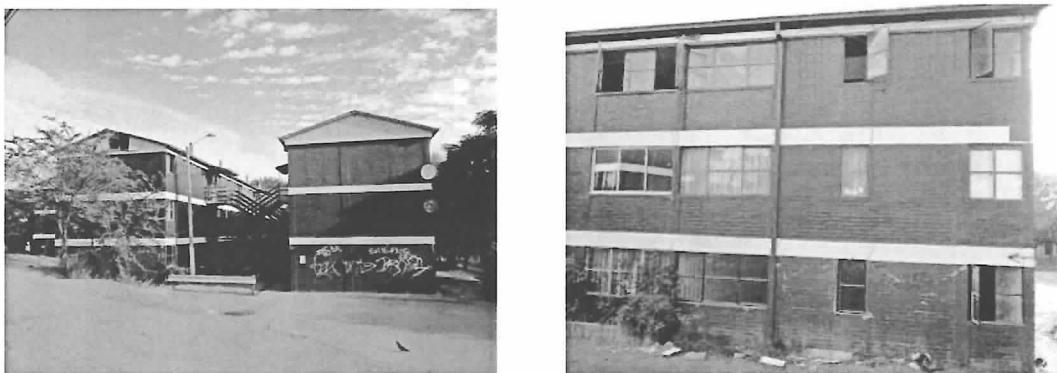


写真 3.17.3 別棟の軽微なせん断ひび割れ

3.2.4 タルカ市 (Talca, マウレ州)

タルカ市は, 震源から約 115km に位置する人口約 20 万人の中規模都市である。ここでは, CM 造の集合住宅や SERVIU (住宅・都市計画省住宅計画局) 庁舎の被害状況のほか, CM 造低層住宅の建設現場を調査した。調査建物位置を図 3.5 に示す。



図 3.5 タルカ市での調査建物（調査建物番号を Google Map に追記）

No.1 低層住宅建設現場

SERVIUによる2階建て低層住宅の建設現場で、1階部分はCM造、2階は木造である（写真3.18.1）。コンクリート基礎上に柱と壁の縦筋（500mm間隔）が配筋され、壁部分には穴あきれんがを組積する。壁の縦筋は最近の仕様であり、旧仕様では無かったとのことであった。組積造壁の水平目地部には数段毎に鉄筋を配筋し、壁と柱の頂部は場所打ちコンクリート梁で一体化される。柱主筋および基礎梁主筋は接合部内で直線定着され、90°に折り曲げられたコーナー筋が主筋上に長さ400mm(4d)程度重ねて配筋されていた（写真3.18.2）。柱帶筋は200mm間隔で配筋されていたが、帯筋端部のフック角度は90°であった。

スラブは、コンクリートブロックを用いた一方向ジョイストスラブであった（写真3.18.3）。今回の地震により、柱部分のコンクリートを打設する前の組積造壁が面外方向に転倒した（写真3.18.4）。



写真 3.18.1 建設中の CM 造住宅



写真 3.18.2 基礎梁の配筋とコーナー鉄筋



写真 3.18.3 スラブ（見上げ）



写真 3.18.4 転倒した組積造壁

No.2 高層オフィスビル

RC 造のオフィスビルで、非構造壁部分が崩落している（写真 3.19.1）。崩落したコンクリート部材には、日本の軽量骨材程度の大きさの発泡スチロール粒が混入されていた（写真 3.19.2）。



写真 3.19.1 建物外観



写真 3.19.2 発泡スチロール粒が混入されたコンクリート

No.3 SERVIU（住宅・都市計画省住宅計画局）庁舎

タルカ市にある SERVIU の庁舎で、築後 30 年程度の地上 6 階建て RC 造建物（上部 3 階はアパート）で、桁行方向外周部には鉄骨柱が用いられていた（写真 3.20.1）。1 階屋外通路では、窓ガラスが割れて飛散している様子も見られた（写真 3.20.2）。1 階正面の組積造壁がせん断破壊しているほか、屋内の RC 造耐力壁、並びにドア開口上部の短スパン梁の多くがせん断破壊している（写真 3.20.3）。耐力壁の端部の柱に相当する部分には 4 本の軸方向鉄筋が配筋されているが、鉄筋の間隔が非常に狭い（写真 3.20.4）。



写真 3.20.1 建物外観



写真 3.20.2 桁行方向鉄骨柱と窓ガラスの飛散



写真 3.20.3 せん断破壊した耐力壁と開口上部の短スパン梁



写真 3.20.4 壁柱脚部の配筋状況

No.4 公営住宅

築後約 50 年の低所得者向け公営住宅で、長辺約 47.4m × 短辺約 7.7m、地上 5 階建て RC 造建物 (Infilled Wall 造) である (写真 3.21.1)。写真 3.21.2 の正面壁の裏側は隣接住棟で、空隙のない EXP.J で接しているため衝突と振動によって組積造壁が損傷し、RC 造架構から脱落しかけていた。その他、非構造れんが壁の損傷、1 階妻壁の隅柱や開口部脇に鉄筋の露出が見られた (写真 3.21.3)。中破程度の被害と考えられるが、SERVIU 関係者によると本建物は取り壊し予定とのことであった。



写真 3.21.1 建物外観



写真 3.21.2 組積造壁の損傷



写真 3.21.3 隅柱の損傷

No.5 市内の情況

古いれんが造やアドベ造建物の被害が、市内の各所で見られた（写真 3.22.1）。一方、比較的新しい建物や住宅では、それほど被害を受けていないものも多かった（写真 3.22.2）。



写真 3.22.1 アドベ造やれんが造建物の被害



写真 3.22.2 新しい建物や住宅（外見上無被害）

3.2.5 コンセプシオン市 (Concepción, ビオビオ州)

コンセプシオン市は、震源から約 105km に位置する人口約 22 万人の都市である。ここでは、新築のオフィスビルや転倒した集合住宅の被害状況を調査した。調査建物位置を図 3.6 に示す。

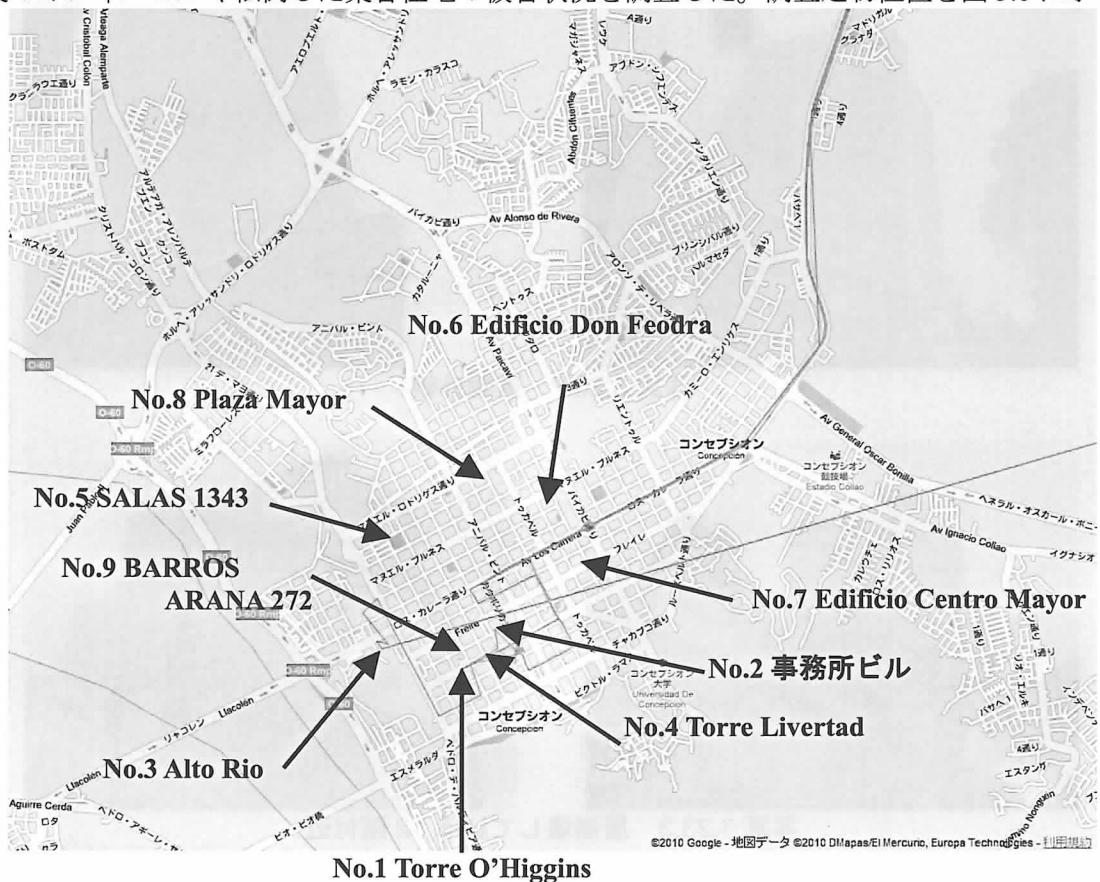


図 3.6 コンセプシオン市での調査建物（調査建物番号を Google Map に追記）

No.1 Torre O'Higgins

2008年に竣工した地上21階、地下2階の高層RC造オフィスビルである(写真3.23.1, 写真3.23.2)。建物正面側の12階の中間層で層崩壊し(写真3.23.3), 上層部が道路側に傾いており, 前面道路は車両通行禁止となっていた。層崩壊している階付近でセットバックしている。建物背面側には開口の少ない連層耐力壁があり, 頗著な損壊は起きていないかった。SERVIU関係者の話によると, 崩壊層より上部の階を取り壊して継続使用しようとしているとのことだったが, その後の情報では取り壊されることになりそうである。



写真 3.23.1 地震前の建物外観 (Web Page から引用)



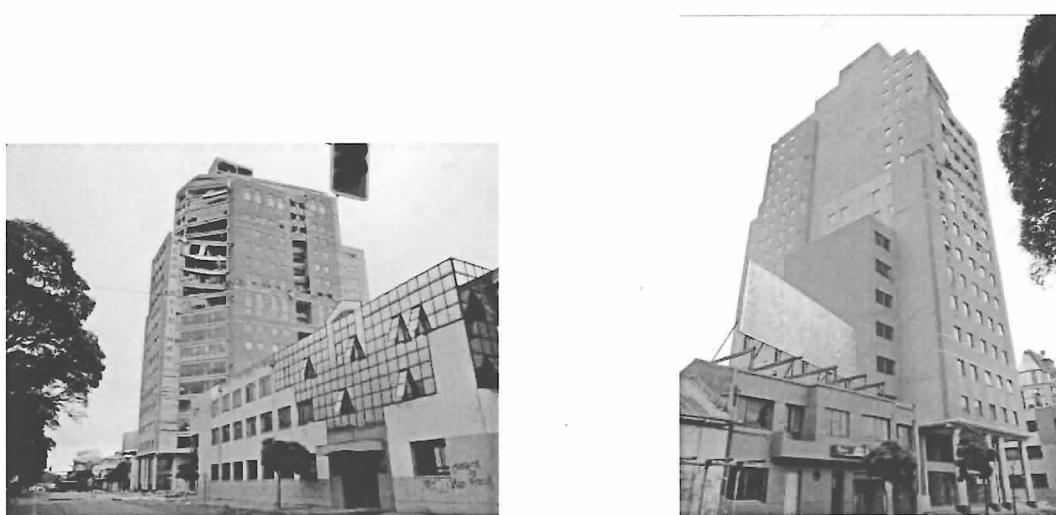


写真 3.23.2 建物外観



写真 3.23.3 層崩壊している 12 階付近

No.2 事務所ビル

SERVIU（住宅・都市計画省住宅計画局）が所有する事務所ビルで、RC 造地上 4 階建てである（写真 3.24.1）。室内や階段室部分の組積造壁が大破しており（写真 3.24.2），書類等が散乱していた。また，3, 4 階の円形 RC 造柱の柱頭部に，曲げせん断ひび割れが一定間隔に発生していた（写真 3.24.3）。損傷は非構造壁に集中しており，修復すれば建物を使用することは十分に可能と考えられる。



写真 3.24.1 建物外観



写真 3.24.2 組積造壁の破壊



写真 3.24.3 円柱の曲げせん断ひび割れ

No.3 Alto Rio

2008 年に建設された地上 15 階、地下 2 階（駐車場）の RC 造の民間集合住宅で（写真 3.25.1），1 階の足元から完全に転倒した（写真 3.25.2）。写真 3.25.2 に見られる破壊された壁の開口は、住民の救助活動で開けられたものである。地震時に建物 5 階に住んでいた住民からのヒアリングによると、「地震が起きて 1 分程経ったところで建物が下に沈み込み、その後、転倒し始めて気を失った」とのことであった。写真 3.25.3 は、1 階の壁柱および耐力壁で、転倒時に 1 階部分の全ての鉄筋が引き抜き、あるいは切断された様子が確認できる。一方、妻構面の地下壁には、損傷は殆ど見られなかった（写真 3.25.4）。なお、計 132 世帯の住民のうち死者は 8 名であった。



写真 3.25.1 地震前の建物全景 (Web Page から引用)



救助活動で開けられた穴



写真 3.25.2 転倒した建物全景

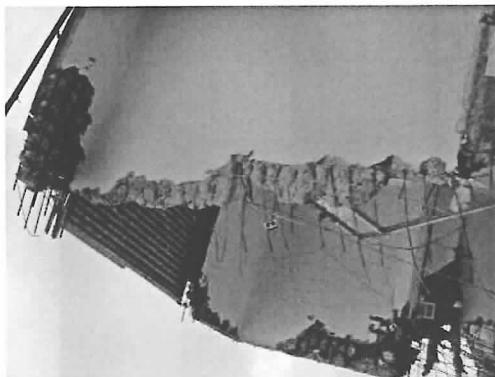


写真 3.25.3 引きちぎられた 1 階壁柱および
耐力壁



写真 3.25.4 建物地下壁

No.4 Torre Libertad

RC 造壁式フラットスラブ構造で、1973 年に建設された。地上 17 階、地下 1 階（地下駐車場なし）で、下部 3 階にはテナントが入居し、4 階から上は住宅として使われていた（写真 3.26.1）。地下 1 階の機械室には、損傷は殆どなかった。上層に行くほど非構造れんが壁の崩落が激しい（写真 3.26.2）。1 階、2 階の壁が曲げ引張破壊し、壁端部の主筋が破断もしくは座屈している（写真 3.26.3、写真 3.26.4）。北東、南西方向の壁に被害が集中しており、直交する方向の壁には損傷は殆ど見られなかった。



写真 3.26.1 建物外観



写真 3.26.2 非構造壁の損傷

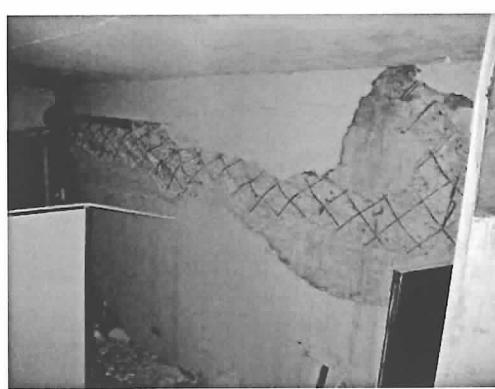


写真 3.26.3 1 隅の壁の損傷



写真 3.26.4 2 階の壁の損傷

No.5 Plaza del Rio-Torre A

2007年に建設された地上13階の集合住宅で、地下駐車場は建物の横に設けられている。2棟の建物がL字型に配置され、EXP.Jでつながっている（写真3.27.1、写真3.27.2）。平面形上は中廊下式で、壁量は桁行き方向の方が多い。写真3.27.1の左側の棟は大破していたが（写真3.27.3、写真3.27.4）、右側の棟は小破であった。



写真3.27.1 建物外観



写真3.27.2 エレベータ部の損傷



写真3.27.3 大破した棟の南妻壁



写真3.27.4 大破した棟の1階部分

No.6 Edificio Don Feodra

CM造の5階建て集合住宅である。元々あった1階部分に、2006年に2階以上が増築された建物である（写真3.28.1）。1階部分で層崩壊を起こしている（写真3.28.2～写真3.28.4）。



写真3.28.1 建物外観



写真3.28.2 1階部分に被害が集中



写真 3.28.3 短柱の被害



写真 3.28.4 建物裏側の被害

No.7 Edificio Centro Mayor

建物内には入ることができず、外観調査のみ行った。被害程度は、大破と判断された（写真 3.29.1～写真 3.29.4）。



写真 3.29.1 建物外観



写真 3.29.2 建物入口部の壁脚が損傷



写真 3.29.3 桁行側の構面にも被害



写真 3.29.4 前面の花壇が 1m ほど沈下

No.8 Plaza Mayor

高層集合住宅が立ち並ぶ団地である。建物内に入れなかったため、外見のみの調査であったが、被害程度は軽微であると感じられた（写真 3.30.1、写真 3.30.2）。ただし、中の柱が大きく損傷しているとの情報があった。



写真 3.30.1 建物外観



写真 3.30.2 外から確認できる損傷

No.9 BARROS ARANA 272

鉄骨造の3階建て診療所である（写真 3.31.1）。1948年に建設された。3階れんが壁の一部が損傷しており、隣が学校のため、れんが壁を撤去する工事が行われていた（写真 3.31.2）。屋根は、鉄骨造トラスであった。



写真 3.31.1 建物外観



写真 3.31.2 撤去中のれんが壁

No.10 市内の情況

コンセプシオン市内では、多数の古いれんが造やアドベ造建物が被害を受けている。一方、建物の一部損傷やガラスの破損等によって修復作業中の建物も多く見られたが、RC造と推測される中低層建物でも、致命的な損傷を受けている建物はそれほど多くないという印象を受けた。市内の被災状況を写真 3.32.1、写真 3.32.2 に示す。



写真 3.32.1 コンセプシオン市内の様子



写真 3.32.2 組積造建物（2階部分が崩壊）

3.2.6 ディチャト (Dichato, ビオビオ州)

ディチャトは、コンセプション市の北方 30km 程に位置する海に面した小さな村である。SERVIU (住宅・都市計画省住宅計画局) が手掛ける低層住宅群の被害状況を調査した。3.2.7 に示すペンコでの調査と併せて、建物位置を図 3.7 に示す。

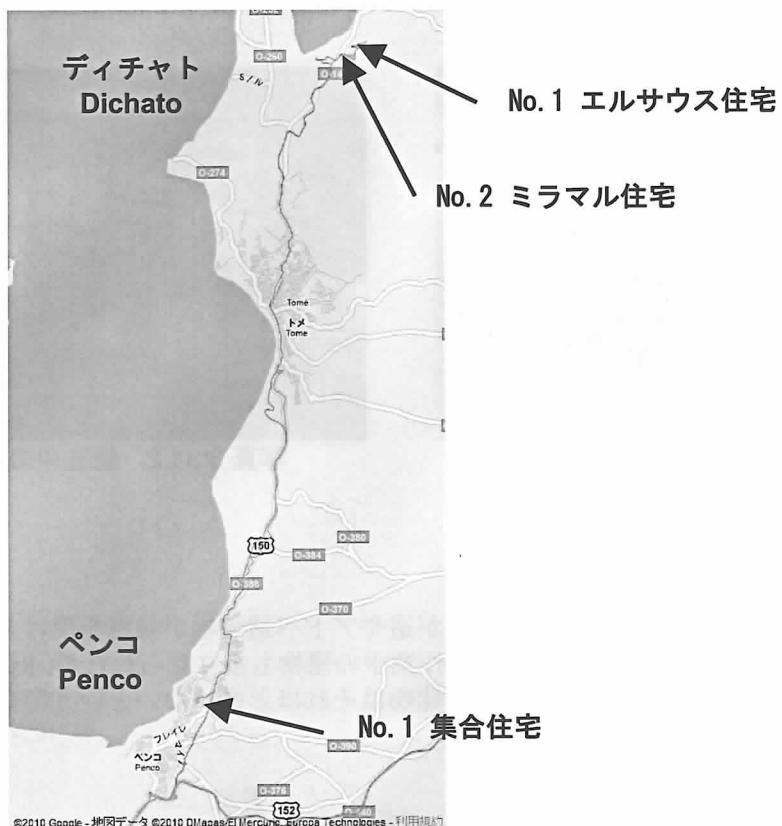


図 3.7 ディチャトおよびペンコでの調査建物 (調査建物番号を Google Map に追記)

No.1 エルサウス住宅

SERVIU が手がける住宅群で、鉄骨フレームにプレキャスト RC 造壁を組み合わせた住宅で（軒高さ 4.8m），2008 年に建設された（写真 3.33.1, 写真 3.33.2）。建物の被害は、津波によるもので、地震による大きな損傷は見受けられなかった。また、地震後の避難が迅速に行われたため、この地域の住民の津波による犠牲者は無かったとのことであった。



写真 3.33.1 建物外観

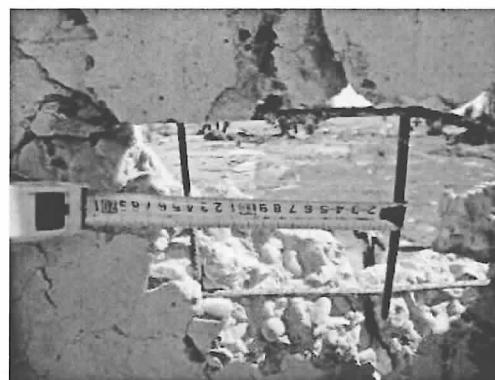


写真 3.33.2 プレキャスト RC 造壁

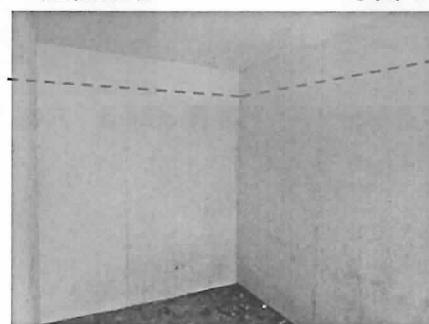


写真 3.33.3 津波の痕跡 (2階の壁と窓)

写真 3.33.3 は、2 階の壁に残る津波の跡である。海岸に最も近い住宅の標高が約 5m、津波の痕跡が 2 階の天井に近い位置に残っていることから、ここでの津波高さは 9m 程度と推測することができる。

No.2 ミラマル住宅

SERVIU が手がける住宅群で、2008 年に建設された。1 階はれんがを使った組積造で、2 階は木造となっている（写真 3.34.1）。地震による大きな被害は見受けられず、津波によって 2 階の木造部分が流される被害が多く見られた（写真 3.34.2）。北側にある住宅の被害が大きく、かつ 2 階の木造部分が南側に片寄って変形していることから、津波は北側から押し寄せたものと推測される。

1 階では基礎と臥梁はあるが柱はなく、壁には縦筋・横筋が配筋されているとのことであった。壁の縦筋（D10 相当）が確認できた（写真 3.34.3）。



写真 3.34.1 建物外観 (1階れんが組積造, 2階木造)



写真 3.34.2 津波により2階の木造部分が流された住宅



写真 3.34.3 穴あきれんが壁と立て補強筋

3.2.7 ペンコ (Penco, ビオビオ州)

ペンコは、ディチャトと同様海に面した小さな村で、SERVIU が建設した集合住宅を調査した。調査建物位置は、図 3.7 に示している。

No.1 集合住宅

SERVIU が提供する地上 4 階建ての集合住宅である（写真 3.35.1）。軽量鉄骨とブレースからなる構造であり、鋼製の折板で外壁を構成している。一部の住戸では、以前から住民がブレースや柱を取り外していたとのことであったが、今回の地震による大きな被害は見られなかった。外壁の折板には、写真 3.35.2 のように一部変形が見られ、耐震要素として有効に働いてことが推測される。



写真 3.35.1 建物外観

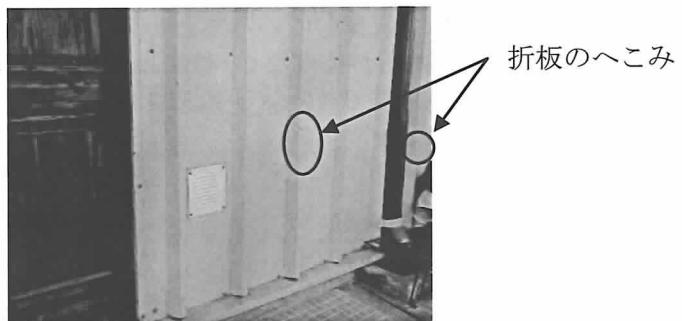


写真 3.35.2 鋼製折板の一部が変形

3.2.8 タルカワノ市 (Talcahuano, ビオビオ州)

タルカワノ市は、コンセプシオン市の北西 10km 程に位置する、太平洋に面した人口約 25 万人の中規模都市である。調査建物の位置を図 3.8 に示す。

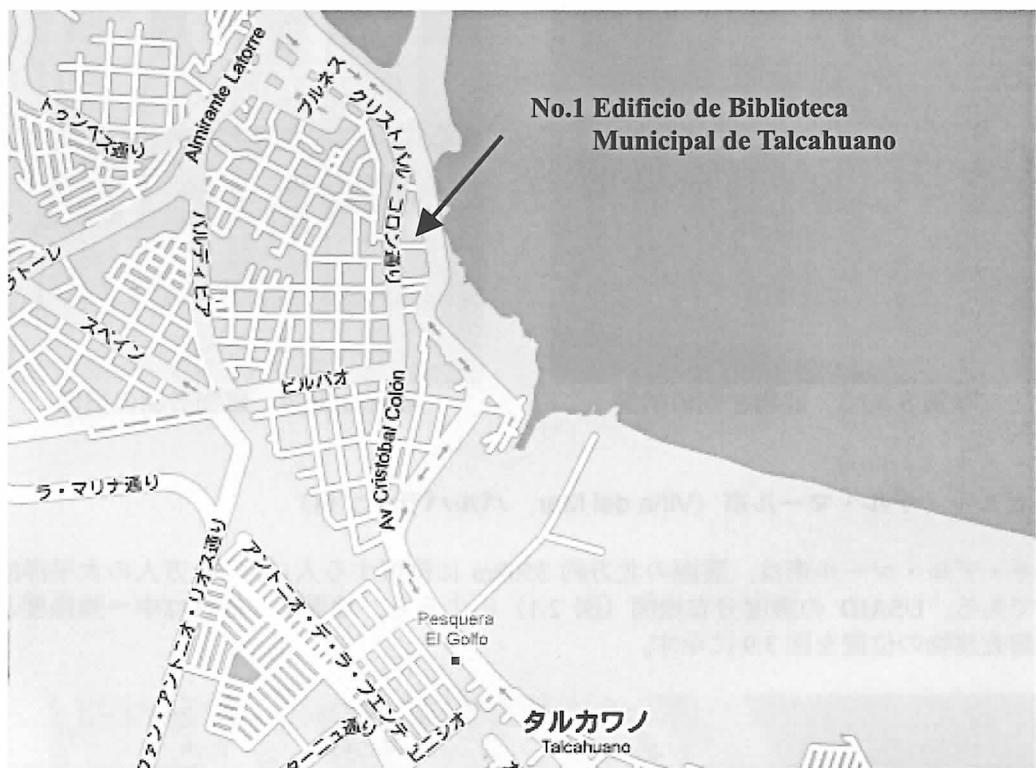


図 3.8 タルカワノでの調査建物（調査建物番号を Google Map に追記）

No.1 Edificio Municipal de Deportes

RC 造 4 階建てのスポーツ施設であり（写真 3.36.1），2 階のおよそ半分程で柱頭が曲げ破壊を起こして大破していた。大破した部分の梁間方向には，壁が入っていなかった（写真 3.36.2～写真 3.36.4）。



写真 3.36.1 建物外観



写真 3.36.2 建物の右側が沈下



写真 3.36.3 建物左側の損傷

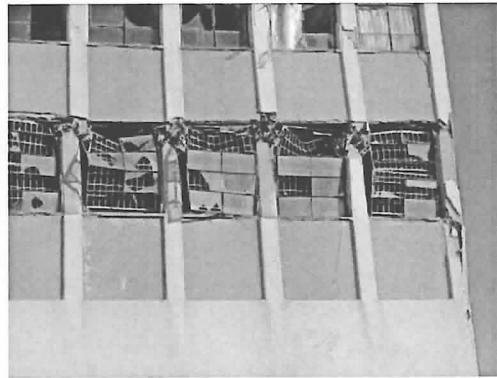


写真 3.36.4 建物右側の損傷

3.2.9 ビニヤ・デル・マール市 (Viña del Mar, バルパライソ州)

ビニヤ・デル・マール市は、震源の北方約 350km に位置する人口約 30 万人の太平洋沿岸の観光都市である。USAID の震度分布地図（図 2.1）によると、地震動の揺れは中～強程度とされている。調査建物の位置を図 3.9 に示す。

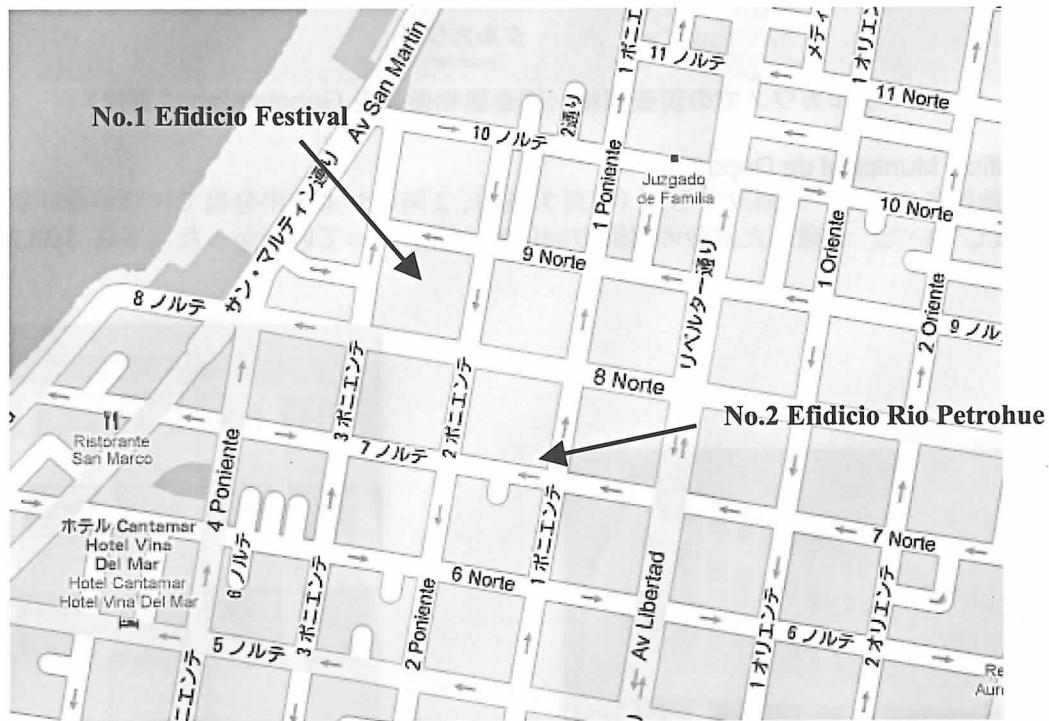


図 3.9 ビニヤ・デル・マールでの調査建物 (調査建物番号を Google Map に追記)

No.1 Edificio Festival

地上 14 階、地下 1 階の集合住宅（壁式フラットスラブ構造）で、大破していた（写真 3.37.1）。1985 年の地震を受けて、壁や梁の増し打ちや壁の増設などの耐震補強が行われていたが、今回の地震では、壁脚部の曲げ引張破壊や増し打ちした壁が剥がれるなどの被害が見られた。



写真 3.37.1 建物外観

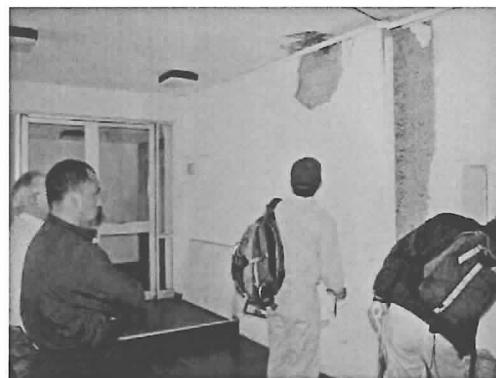


写真 3.37.2 玄関部増し打ち壁の損傷



写真 3.37.3 階段部の損傷



写真 3.37.4 階段部の損傷



写真 3.37.5 南東の壁脚部の被害



写真 3.37.6 配筋が過多

No.2 Edificio Rio Petrohue

17階建てRC造の集合住宅である（写真3.38.1）。建物の長辺が東西方向に位置し、北側から北西側の地下1階に駐車場がある。駐車スペースを設けるために地下階の壁の長さが上階よりも一部短い箇所がある。被害は地下階の壁に集中し、水平のひび割れが生じて曲げ降伏する被害が見られた。



写真 3.38.1 建物外観



写真 3.38.2 1階南西部の柱の損傷



写真 3.38.3 地下駐車場の壁の損傷

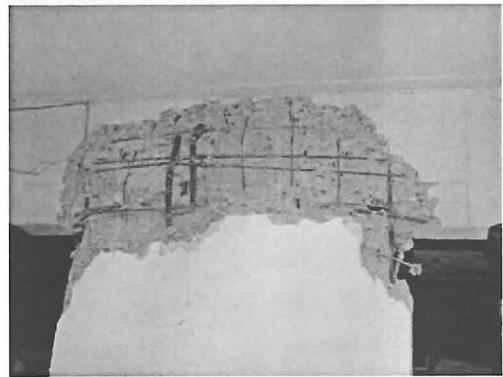


写真 3.38.4 地下駐車場の壁の損傷

3.2.10 チジャン (Chillán, ビオビオ州)

チジャンでは調査は行っていないが、宿泊したホテルの近くにあった教会に大きな被害が見られた（写真 3.39.1）。建物躯体は RC 構造であるが、屋上の尖塔の一部が屋根を突き抜けて落下していた。また、礼拝堂の列柱上部や壁にも損傷が見られた（写真 3.39.2、写真 3.39.3）。



写真 3.39.1 被災した教会とその内部





写真 3.39.2 教会の内部



写真 3.39.3 落下した尖塔

3.3 津波の被害状況

3.3.1 コンスティトゥシオン (Constitución, マウレ州)

コンスティトゥシオン市街に見られた津波の痕跡を写真 3.40.1, 写真 3.40.2 に示す。

津波の痕跡

写真 3.40.1 河口近くの SERVIU 集合住宅の津波跡
(高さ 400mm 程度)

写真 3.40.2 市街地の津波跡

海岸部には数軒のレストランが建っていたということであるが、全て破壊されていた。崖の中腹まで海水によって植物が変色しており、目測でおよそ 20~30m の高さまで津波が達したものと推測される（写真 3.40.3）。

海岸沿いの道路に立っていた街灯は、全て根本から同じ方向（南方向）に倒されていた。また、海岸近くの木材チップ製造工場も被害を受けていた（写真 3.40.4）。



写真 3.40.3 津波の被害跡



写真 3.40.4 津波による海岸部の被害

3.3.2 ペジュウエ (Pelluhue, マウレ州)

ペジュウエは、震源に最も近い位置にある太平洋に面した小さな集落である。津波による被害が大きく、海岸にあった建物は殆ど流されていてコンクリートの基礎や一部の壁が残っている程度であった（写真 3.41.1）。住民の話によると、地震の直後、車で自動的に高台に避難したので人的被害は出ていない模様であった。普段から避難訓練を行っており、津波に対する防災意識は高かったことが分かる。なお、1960 年の地震では、津波は大きくなかったということである。

この地区に限らず、道路には津波からの避難方向を示す標識と、津波に対して安全な場所であることを示す標識が設置されていた。



写真 3.41.1 津波による海岸部集落の被害

3.3.3 ディチャト (Dichato, ビオビオ州)

木造等の建物は津波によって破壊され、甚大な被害が発生しており、海岸近くには瓦礫が積み重なっていた（写真 3.42.1）。一方、3.2.6 で記述したように、RC 造やれんが造の建物では津波の痕跡は見られるものの、構造躯体は大きな損傷を受けずに残っていた。地震の後、地元住民は高台に避難し無事だったようであるが、津波の第一波が引いた後、荷物を取りに自宅に戻った人や海岸近くの別荘などに滞在していた観光客の中には、津波による犠牲者が出ていた模様であった。なお、この地区は、調査時点には軍の管理下に置かれていた（写真 3.42.2）。

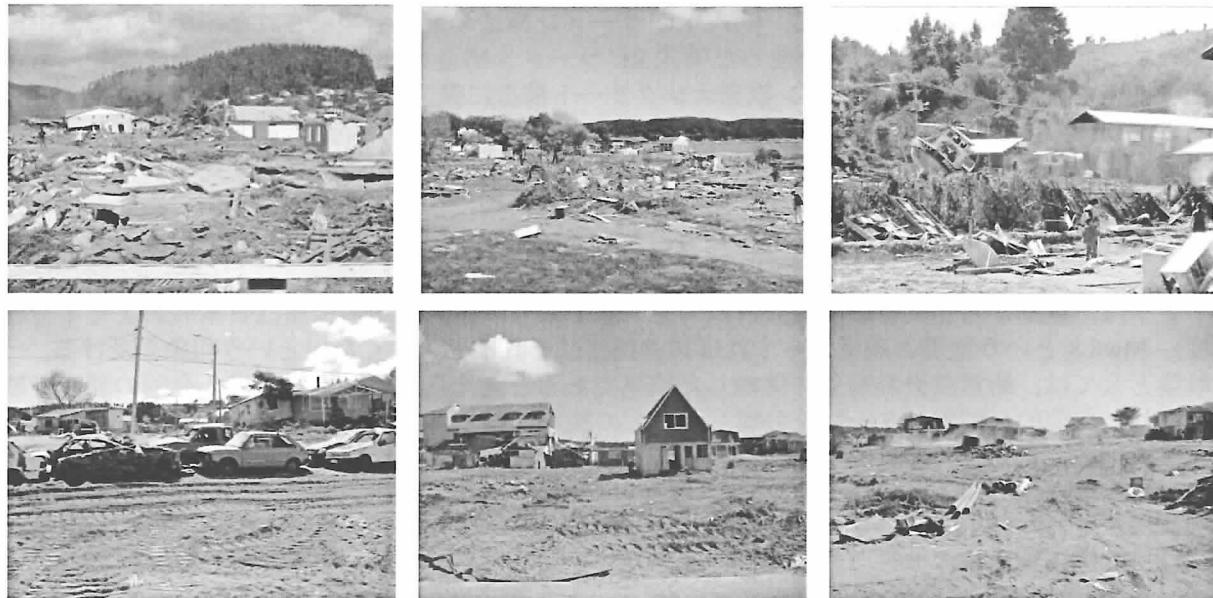


写真 3.42.1 津波による海岸部の被害

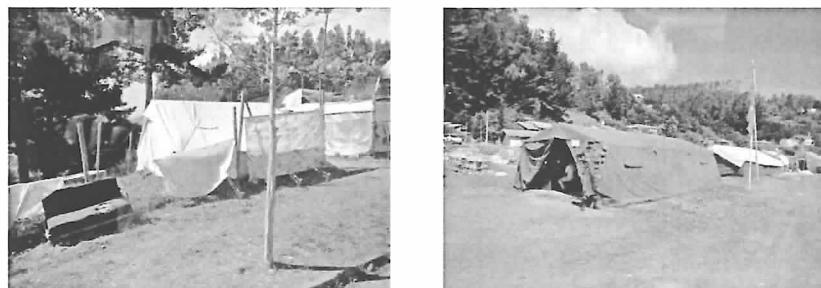


写真 3.42.2 避難民のテントと軍のテント

4. 建築物の被害の特徴

4.1 被災地域の一般的な構造形式と被害パターンの分類

今回の地震では、れんが造やアドベ（Adobe）造、さらに枠組み組積（CM）造や Infilled Wall 造（注 7）なども含めた組積造の建築物に多大な被害が発生している。これら組積造の建築物は、中南米ばかりでなく、アジアやヨーロッパなど世界各地で最も普及している構造形式である。しかし、必ずしも耐震性能に優れているわけではないため、過去の地震でも多くの被害が報告されている。

一方、今回特徴的な事例として、壁式 RC ラーメン構造の被害も観察された。チリでは、中南米地域では珍しく RC 造耐力壁を使った壁式 RC ラーメン構造が普及しており、高層建築物にも多用されている（日本の壁式ラーメン鉄筋コンクリート構造に類似の構造形式。日本では地上 15 階、高さ 45m 以下とする適用範囲が設けられている）。その他、ピロティ形式におけるピロティ層の崩壊、高層建築物の中間階の層崩壊など、都市型建築物に共通する被害事例も見られた。これら被害建築物の数は限定的ではあるが、比較的新しい建築物で起きている被害事例であり、現行の耐震設計基準（1996 年版）に則って建設されているはずなので、今後、詳しい原因解明が求められる。

チリは、以前から建築物の耐震設計に力を入れており（設計用地震荷重は日本のおよそ半分程度）、Mw8.8 という地震の規模からすれば被害程度はそれほど大きくないという印象を受ける。一般論としては、耐震設計が有効に機能した結果であると考えられる。本章では、今回の調査で観察された典型的な被害パターンを分類し、過去の被害事例と対比させながらその特徴を示す。

被災地域で見られた典型的な建築物の被害パターンは、建築物全体レベルと各部材レベルで分けて見た場合、以下のように分類できる。次節以降では、被害パターン毎にその特徴を記載する。

a. 建築物全体の被害

- a-1 RC 造高層建築物の転倒
- a-2 RC 造高層建築物の中間層崩壊
- a-3 RC 造中層建築物の 1 層崩壊
- a-4 CM 造低層建築物の層崩壊
- a-5 組積造建築物の被害

b. 構造部材の被害

- b-1 RC 造耐力壁の破壊
- b-2 RC 造柱（壁柱）部材の曲げ破壊
- b-3 RC 造梁部材の破壊
- b-4 RC 造柱梁接合部、その他の接合部破壊

c. 非構造部材の被害

- c-1 れんが造壁（非耐力壁）の被害
- c-2 RC 造非構造部材の被害
- c-3 ガラスや天井の被害

注 7) 枠組み組積（Confined Masonry, CM）造

柱の鉄筋を組んだ後に、れんが等を積んで壁を造り、型枠を付けて柱部分のコンクリートを打設する。その後、梁を構築して組積造壁の周りを RC 造の柱と梁で囲んで一体化する構造。組積造壁に鉄筋を入れる場合と無筋の場合の両方あるが、いずれの場合も組積造壁は、鉛直荷重や地震力などの外力に対する抵抗要素として期待（設計）される。

Infilled Wall 造

RC 造の柱と梁を造ってから、架構内にれんが等の組積造壁（鉄筋を入れない例が多い）を積む構造。ラーメン構造が荷重や外力に対する抵抗要素で、組積造壁は非構造要素である。

4.2 建築物全体の被害

a-1 RC 造高層建築物の転倒

写真 4.1 は、15 階建て RC 造集合住宅が転倒した事例である（3.2.5 で示した写真を再掲載する。以下同様。）。建築物の地下階が自走式の駐車場となっており、図 4.1 に示すように上階に比べて耐力壁の長さが短くなっているため当該部分で損傷が発生し、転倒の原因となったことが推測されている。連層耐力壁の作用せん断力が、1 階床スラブを介し周辺の地下外壁に伝達されるとすると、図 4.1 の右側のように地下階の耐力壁に作用する曲げモーメント分布は減少する。しかし、同時に地下階の耐力壁量が減ることで曲げ耐力も上階と比べ小さくなるため、図 4.1 の左側に示す位置で写真 4.16 や写真 4.17 と類似、またはそれより顕著な損傷が生じたものと推測される。ここで述べた耐力壁の損傷と建築物の転倒挙動については、今後、詳しく検討する必要がある。

一方、1995 年兵庫県南部地震でも、本震で傾いていた 9 階建ての RC 造建築物が余震によって転倒し、前面道路を塞いだ被害事例が報告されている（写真 4.2）⁴⁻¹⁾。なお、この建築物はすぐに取り壊されたこともあり、倒壊の原因については不明である。



写真 4.1 転倒した 15 階建て RC 造集合住宅（写真 3.25.2 を再掲）



写真 4.2 転倒した建築物
(1995 年兵庫県南部地震)⁴⁻¹⁾

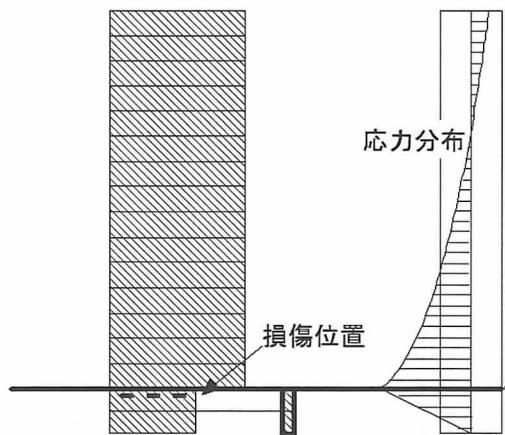


図 4.1 地下階で一部壁抜けした連層耐力壁の
イメージとそれに作用するモーメント分布

a-2 RC 造高層建築物の中間層崩壊

高層 RC 造建築物の中間層が崩壊した事例である（写真 4.3、写真 4.4）。建築物正面の外周部構面で完全に層崩壊しているが、反対側の構面は開口の少ない連層耐力壁であり損傷の程度は小さい。外観上は、層崩壊はセットバックしている階などで生じている。



写真 4.3 中間層崩壊による被害（左は写真 3.23.2 を再掲）



写真 4.4 層崩壊した階（左は写真 3.23.3 を再掲）

1995 年兵庫県南部地震でも、同じように中間層が崩壊した被害事例が報告されている（写真 4.5）⁴⁻²⁾。これらについては、旧基準で設計された建築物は現行基準に比べて中層や上層で必要層せん断力が小さかったこと、被害を生じた層の付近で鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）造から RC 造へ構造形式が切り替えられたこと等によって高さ方向の剛性や耐力分布の急変が被害原因として指摘されている。このように、層崩壊する建築物では、崩壊層が他の層に比べて損傷が集中しがちな耐力・剛性分布となっている場合が多い。今回被災した建築物はセットバックした層を有しており、不連続な構造特性に着目した検討を行って、原因究明を行う必要がある。



写真 4.5 中間層で崩壊した建築物（1995 年兵庫県南部地震）⁴⁻²⁾

a-3 RC 造中層建築物の1層崩壊

RC 造中層建築物（集合住宅）の1層部分が崩壊した事例である（写真4.6、写真4.7）。特に写真4.7の建築物は、ピロティ部分が下階壁抜け構造となっていて、水平力に対する抵抗要素が少ないために、地震時の水平変形が1層に集中することによって引き起こされた破壊事例である。

このようなピロティ層の崩壊の事例は、これまでに多くの地震被害で報告されている破壊形式であり、写真4.8は1995年兵庫県南部地震での事例、写真4.9は2009年ラクイラ地震（イタリア）で見られた事例である。これらの被害も、1層が他の層に比べて低い耐力や剛性となっていたため、損傷がその部分に集中したことが指摘されている。

日本においては、1995年兵庫県南部地震の後、建築基準法施行令において必要保有水平耐力 Q_{un} を計算する場合の各階の形状係数 F_{es} のうち、剛性率に係わる係数 F_s が強化された経緯がある。また、ピロティ形式に対する耐震設計上の留意点が、技術解説書に掲載されている^{4-3), 4-4)}。



写真4.6 1層部分の層崩壊
(写真3.8.1を再掲)



写真4.7 ピロティ層の崩壊
(写真3.9.1を再掲)



写真4.8 ピロティ建築物の崩壊
(1995年兵庫県南部地震)



写真4.9 ピロティ建築物の崩壊
(2009年ラクイラ地震)

a-4 CM 造低層建築物の層崩壊

写真4.10は、CM造3階建ての集合住宅で、1層が崩壊し2階以上の部分が落階した事例である。このような構造では、全層で同じ部材断面や配筋とすることが多く、一方、1階には出入り口等の大きな開口が設けられるため上層に比べ相対的に壁量が少なくなる傾向がある。さらに、建築物に作用する地震力は一般に1階が最も大きいため、相対的に1階が最も壊れやすくなる。

CM造建築物の被害は、これまでに数多くの地震で報告されており、例えば2007年ピスコ地震（ペルー）においても同様の被害事例が確認されている（写真4.11）。写真4.11の左側では、写っている建物の手前側が完全に崩壊し、右側では、組積造壁が脱落し2階の天井スラブが落下した様子が見られる。



写真 4.10 1階部分で層崩壊した CM 造（写真 3.14.3 を再掲）



写真 4.11 崩壊した CM 造建物（2007 年ピスコ地震）

a-5 組積造建物の被害

写真 4.12 や写真 4.13 は、アドベ(Adobe)造建物やれんが造建物などの組積造建物の被害事例である。最近の地震での同様な被害事例として、例えば、2008 年四川大地震のれんが造建物の被害（写真 4.14）、2009 年ラクイラ地震（イタリア）の組積造建物被害（写真 4.15）など多数報告されている。

古いアドベ造やれんが造建物では、一般に壁の中に鉄筋等の補強がなく、激しい振動によって壁がばらばらになったり、面外方向に転倒したりして容易に崩壊する。また、床は木造で造られていることも多く、剛床効果が期待できないため、建物が一体として地震力に抵抗することが難しいとされている。

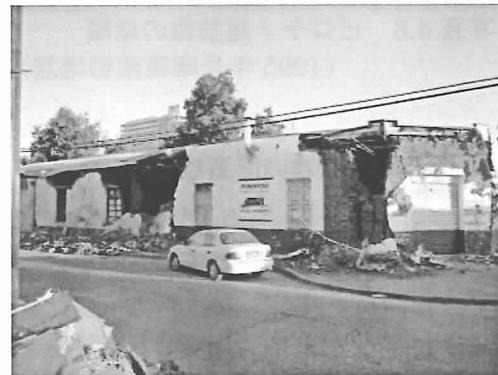


写真 4.12 アドベ造建物の被害（写真 3.16.1、写真 3.22.1 を再掲）



写真 4.13 れんが造建築物の被害（写真 3.22.1、写真 3.32.1 を再掲）



写真 4.14 1階が崩壊したれんが造建築物
(2008 年四川大地震)



写真 4.15 組積造建築物の被害
(2009 年ラクイラ地震)



4.3 構造部材の被害

b-1 RC 造耐力壁の破壊

写真 4.16 は、地上 12 階、地下 2 階の建築物の RC 造連層耐力壁（柱形および直交壁のない壁柱）が、地下 1 階部分で大破した事例である。写真 4.17 も、地上 18 隅、地下 2 階の建築物の地下 1 階部分で RC 造連層耐力壁が同様に大破している。このように地下階にある柱形のない耐力壁が被災する事例は、過去の地震被害では報告されておらず、今回の特徴的な破壊形式と言える。都市部に建設される新しい集合住宅では、駐車場となる地下階で車の通行スペースを確保するため、連層耐力壁の一部に大きな開口を設ける設計が行われている模様である（図 4.1 を参照）。写真 4.16 は、図 4.1 の左側に示すイメージ図の地下部分の壁に相当する。この破壊は、該当部分の壁に転倒モーメントによる繰り返し圧縮・引張軸力が作用したことによって発生したものと推測される。壁柱の帶筋端部が 90° フックになっていることなど鉄筋の拘束不足も一因として考えられる。



写真 4.16 大破した RC 造壁
(写真 3.1.2 を再掲)

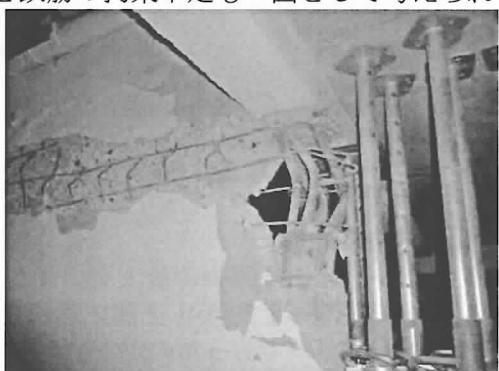


写真 4.17 大破した RC 造壁
(写真 3.2.3 を再掲)

b-2 RC 造柱（壁柱）部材の曲げ破壊

写真 4.18 は、中層 RC 造建築物の崩壊層の壁柱（扁平な形状の柱）であり、柱頭部に大きな損傷が発生している。この壁柱は、弱軸回りに曲げ降伏した後、柱頭部分に変形が集中し、その後、水平耐力の喪失に伴って鉛直荷重を支えられなくなったと推測される。弱軸方向に対しても直交壁などを設けるなどして、過度の変形を防止することが重要であろう。

2008 年四川大地震においても、写真 4.19 に示すように柱頭部で曲げ破壊を生じた事例が確認されているが、壁柱の損傷という点では、チリの建築物に特有の破壊形式であると考えられる。



写真 4.18 曲げヒンジが生じた壁柱
(写真 3.9.3 を再掲)



写真 4.19 柱頭の曲げ破壊
(2008 年四川大地震)

b-3 RC 造梁部材の破壊

b-3-1 梁のせん断破壊

写真 4.20 は、中層 RC 造建築物のドア開口上部の梁がせん断破壊している事例である。短スパン梁では地震時の応力が集中しやすいこと、曲げ耐力が大きくなることなどの原因によって、このような破壊が発生すると考えられている。このような破壊が起きると、ドアが開かず避難が困難となるので、非構造部材の損傷を防止するためにも短スパン梁の設計では注意が必要である。

これまでにも数多くの地震で同様の被害が報告されており、例えば 2004 年新潟県中越地震においても、病院建築物の階段室部分の短スパン梁に同様な損傷が確認された事例がある（写真 4.21）。



写真 4.20 せん断破壊した短スパン梁
(写真 3.20.3 を再掲)

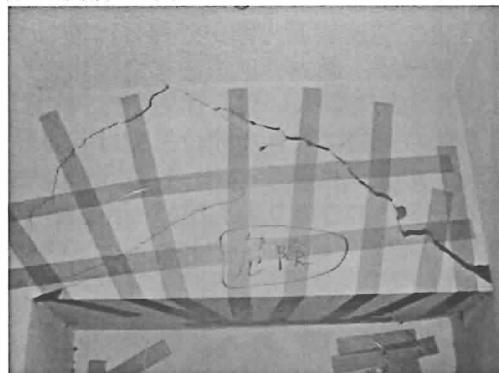


写真 4.21 せん断ひび割れが発生した
短スパン梁（2004 年新潟県中越地震）

b-3-2 梁の定着部破壊

写真 4.22 は、CM 造建築物の最上層の梁が鉄筋の重ね継手位置で破壊し、構面外に脱落した事例である。当該建築物は 20 年以上前に建設されたものであり、設計・施工に関する当時のチリの規定がどのようなものであったのか十分に把握できていないので、一般論ではあるが、通常、重ね継ぎ手の位置や継手長さは、主筋が負担する引張応力を確実に伝達できるように設計するはずである。落下した部材断面を見ると継手長さや位置が必ずしも適切とは言えず、応力伝達が十分に成されなかつたことが原因として推測される（写真 4.23 参照）。

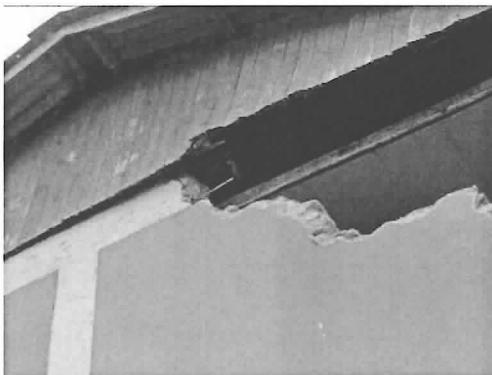


写真 4.22 妻壁頂部の梁の脱落
(写真 3.15.3 を再掲)

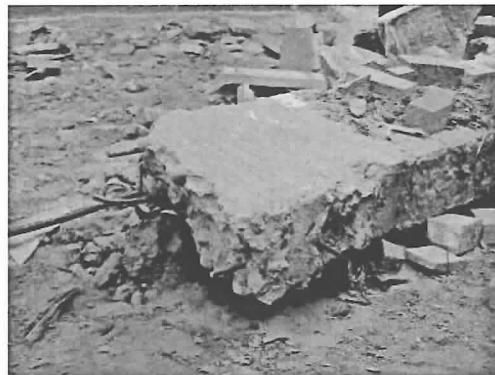


写真 4.23 繰ぎ手位置が揃った梁主筋
(写真 3.15.4 を再掲)

b-4 RC 造柱梁接合部、その他の接合部破壊

b-4-1 柱梁接合部の破壊

写真 4.24 は中層 RC 造の柱梁接合部の破壊、写真 4.25 は CM 造 3 階建ての柱梁接合部が破壊した事例である。いずれも接合部に帶筋が入っていなかったことや、接合部の断面が小さかったことなどが、このような破壊の理由として考えられる。架構のじん性を確保するためには、接合部を破壊させないことが重要な要件であり、ひとたび接合部が脆的に破壊すれば、軸力を負担することができなくなり、構造物が局部崩壊を起こす危険性もある。

2008 年四川大地震（写真 4.26）や 2009 年ラクイラ地震（イタリア）（写真 4.27）においても、同様な柱梁接合部の被害が観察されている。

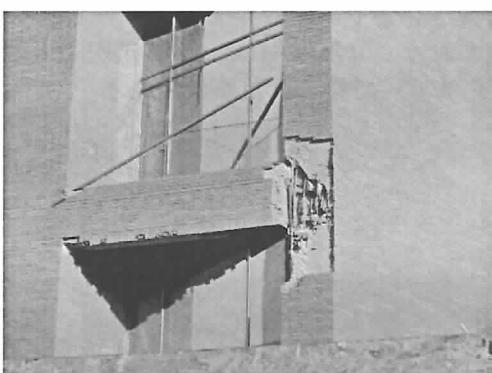


写真 4.24 RC 造柱梁接合部の破壊



写真 4.25 CM 造柱梁接合部の破壊
(写真 3.14.4 を再掲)



写真 4.26 柱梁接合部の破壊
(2008 年四川大地震)



写真 4.27 柱梁接合部の破壊
(2009 年ラクイラ地震)

b-4-2 建築物間の接合部の破壊

写真 4.28 は、地上 12 階建て建築物と地上 2 階建て建築物の接合部分が破損した事例である。建築物の地震時の揺れは固有周期に依存するため、高さの異なる建築物が接していると周期の違いにより建物同士が衝突し、写真のような破壊の原因となる。通常、日本の構造設計では、建築物が接する部分にはエキスパンションジョイントを設け、このような破壊を防止するための対策が講じられている。



写真 4.28 2 棟の建築物間の接続部分 (写真 3.6.2 を再掲)

4.4 非構造部材

c-1 れんが造壁（非耐力壁）の被害

写真 4.29、写真 30 は、高層 RC 造建築物 (Infilled Wall 造) のれんが壁の破壊である。このような壁は、設計上は非構造壁として扱われる所以多少の損傷は許容せざるを得ないが、地震によって破損した場合にも面外方向に脱落しないような対策が必要である。

同様の被害は、これまで多くの地震で報告されており、写真 4.31 は 2008 年四川大地震で見られた事例、写真 4.32 は 2009 年ラクイラ地震（イタリア）で見られた事例である。



写真 4.29 れんが壁が破壊した
高層 RC 建築物



写真 4.30 れんが壁の破壊
(写真 3.5.2 を再掲)

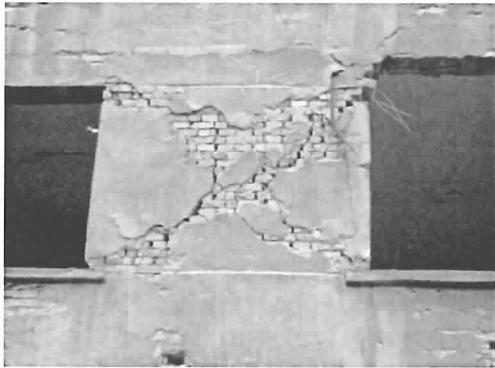


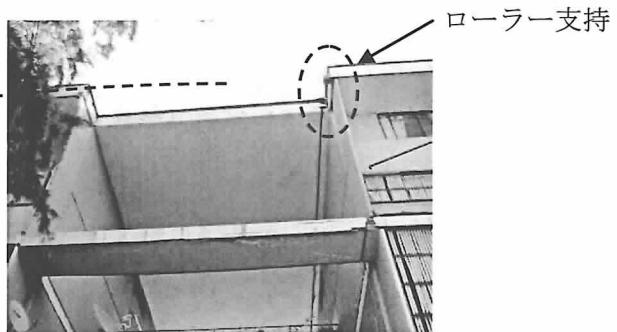
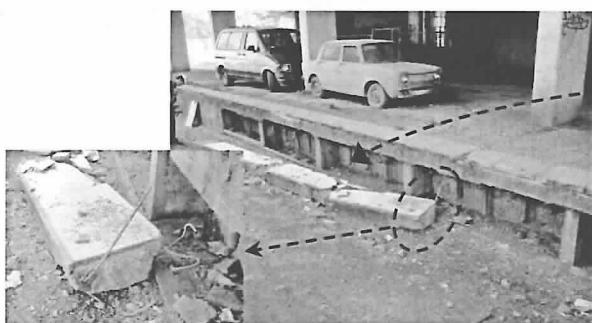
写真 4.31 方立て壁の破壊
(2008 年四川大地震)



写真 4.32 れんが造壁の破壊
(2009 年ラクイラ地震)

c-2 RC 造非構造部材の被害

写真 4.33 は、一端をローラー支持された飾り梁が地震の影響で脱落し、水平方向に 7~8m 離れた場所に落下した事例である。また、写真 4.34 や写真 4.35 は、RC 造事務所ビルの非構造壁が崩落した事例である。いずれも、重量のある RC 造部材であり、通行人や車両を巻き込んで大事故に至る危険性がある。



接続部の配筋状況

写真 4.33 飾り梁の脱落 (写真 3.12.5 を再掲)



写真 4.34 外壁の脱落 (写真 3.7.2 を再掲)



写真 4.35 外壁の脱落
(写真 3.19.1 を再掲)

今回の調査では、建築物外壁面にこのような装飾部材を取り付けている建築物が多数散見された。今後の設計または施工において注意が必要であろう。

c-3 ガラスや天井の被害

写真 4.36 は中層建築物外周部の窓ガラスの損傷、写真 4.37 は高層建築物の窓ガラスが割れて飛散した事例である。

サンティアゴ国際空港ターミナルビルでは、天井部材が脱落する被害が起きていた（写真 4.38）。調査時点では、本被害と設備関係の被害によってターミナルビルが使用できなくなり、一部の業務が屋外の仮設テントで行われていた。大規模建築物の天井材が落下した事例としては、日本でも 2003 年十勝沖地震による釧路空港ターミナルビルの被害（写真 4.39）等が報告されている⁴⁻⁵⁾。

このような非構造部材の損傷は、飛散したガラスや落下する天井によって負傷する危険性があるばかりでなく、地震後に建築物を継続使用できるかどうか、あるいは機能維持という観点から問題となる場合がある。性能設計においては、これら非構造部材の損傷についても適切に評価することが求められている。



写真 4.36 窓ガラスの飛散（写真 3.20.2 を再掲）



写真 4.37 窓ガラスの飛散



写真 4.38 サンティアゴ国際空港天井パネルの脱落



写真 4.39 釧路空港天井パネルの脱落（釧路空港ビル株式会社提供）⁴⁻⁵⁾

4.5 まとめ

ここでは、被災地域で多く用いられている壁式 RC ラーメン構造や枠組み組積造建築物等について、被害パターンを分類し、過去の類似の被害事例を対比させながらそれぞれの特徴を述べた。その多くは日本国内外の過去の地震被害でも同様に見られたものであり、日本がこれまでに蓄積してきた耐震設計に係わる技術や知見が、今後のチリ国の建築物の耐震性能向上に貢献できる可能性は大きいと考えられる。

一方、今回の地震に特有な被害事例は、わが国における建築物の耐震設計を考える上で、貴重な情報を提供しているとも言える。例えば、壁式 RC ラーメン構造の連層耐力壁の下部が、大きな転倒モーメントによる繰り返し圧縮・引張軸力を受けて壁幅全長に渡って破壊した被害事例は、日本国内ばかりでなく諸外国においても過去の地震では報告されたことのない破壊現象である。耐力壁の端部に柱型を設けない構造形式は、室内空間を効率的に利用する上で利点が大きく、社会的な需要は高い。日本においても、耐力壁端部の柱型を省略することを目指した研究が実施されているが、当該被害事例は、そのような構造の実現には慎重な配慮と検討が必要であることを示唆している。今後、詳細な調査や検討を行って、被害原因を明らかにすることが望まれる。また、高層建築物の中間層の崩壊は、高次モードの影響や高さ方向の構造的不連続性の影響（構造形式の切り替えや剛性率など）をどのように耐震設計に反映させるかといった課題について、現在の耐震設計法の妥当性を検証するためにも役立つと考えられる。

現在の耐震設計技術は、過去の地震被害を契機として発展してきた。国内の地震に限らず、被害調査や分析、さらに関連研究によって得られる成果は、技術情報として広く一般に提供されるものである。これらの有益な知見は、将来的には建築物の耐震規定にも反映され、わが国ばかりでなく諸外国の建築物の耐震性能向上や耐震設計の合理化に寄与することが期待される。

参考文献・参考サイト：

- 4-1) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編－1 鉄筋コンクリート造建築物, 1997.7
- 4-2) 日本建築学会、土木学会：1995 年 阪神・淡路大震災スライド集, 1995.7
- 4-3) 2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書 付録 1-6, 2007.8
- 4-4) Kheir-Eddine Ramdane, Koichi Kusunoki, Masaomi Teshigawara and Hiroto Kato: Non-Linear Numerical Analyses To Improve The Seismic Design Method for Soft First Story RC Building, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004, Paper No. 2224
- 4-5) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：2003 年十勝沖地震における空港ターミナルビル等の天井の被害に関する現地調査報告, 国土技術政策総合研究所ホームページ <http://www.nilim.go.jp/engineer/index.html>

5. おわりに

2010年2月27日(土)現地時間午前3時34分頃、南米チリ国で発生したマグニチュード(Mw)8.8の巨大地震とそれに伴う津波によって多数の死者、行方不明者が出ていたほか、チリ国内の広い範囲で建築物や土木構造物に甚大な被害が発生した。地震後、日本政府が派遣したチリ国地震被災建築物診断JICA(国際協力機構)専門家チームによる調査や、JST(科学技術振興機構)とJICAによる国際科学技術協力事業の一貫として被害建物の詳細調査が行われた。本報告は、これらの現地調査活動で収集した情報等に基づき、建築物を中心としたチリ・マウレ地震の被害概要についてまとめたものである。

第2章では、チリ国政府や国際機関が公表したデータに基づき地震被害の全体像を述べた。2010年4月7日時点で死者486人、行方不明者79人、被災者数約180万人以上、被災住宅約81万戸、被害総額約300億ドルという被害規模であった。なお、チリ大学が公表している強震観測記録をUSAIDが作成した震度分布図に重ね合わせ、被害調査を行った地域との対応を示した。

第3章では、各地の建築物の被害状況についてまとめた。調査地点は、サンティアゴ、コンスティトゥシオン、タルカ、カウケネス、ペジェウエ、ディチャト、ペンコ、コンセプシオン、タルカワノ、ビニヤ・デル・マールの10都市である。

第4章では、建築物被害の特徴について分析を行った。被害は、れんが造やAdobe造、枠組み組積造などの組積造系の建築物に多く発生しており、過去に中南米やアジア、ヨーロッパなどで発生した地震において報告された被害との類似点が多い。

今回の地震による犠牲者数及び被害は、大規模地震であった割には比較的少なかったと言える。すなわち、1985年チリ地震以降に建築された3階以上の建築物約10,000棟(9階以上の建物約2,000棟)の内、取壊される棟数は1%以下で、倒壊した建築物が約5棟、倒壊以外の取壊される建築物が約50棟とされている。これは、チリ国内の建築物の耐震性能が中南米地域の中では比較的高く、そして地震に対する意識が高いいためであると考えられる。因みに、チリ国の最初の建築物耐震基準は1930年(日本は1924年、米国カリフォルニア州は1927年)に暫定的に制定されたと言われ、地震に対する意識の高さの一端を示している。また、チリ国の設計用地震力は日本の耐震基準の50-60%程度だが、世界の中では高い水準にある。

チリ国では、中南米地域では珍しくRC造耐力壁を使った壁式RCラーメン構造が普及しており、高層建築物にも多用されている。このことにより建築物の構造耐力と一体性が確保され、建築物被害が比較的少ない大きな要因となったものと考えられる。また、今回の地震の特徴的な被害として、壁式RCラーメン構造の柱形のない耐力壁が大破する事例が複数棟で観察された。このような被害は、これまでに報告されたことのない破壊現象である。日本においても、耐力壁端部の柱型を省略することを目的とした研究が実施されているが、当該被害事例は、そのような構造の実現には慎重な検討が必要であることを示唆している。今後の耐震設計を考える上で、大いに参考になる貴重な情報である。その他、高層建築物の転倒、ピロティ形式におけるピロティ層の崩壊、高層建築物の中間階の層崩壊など、1995年兵庫県南部地震に共通する被害事例も見られた。また、1995年兵庫県南部地震における被害との共通点として、古い木造住宅の被害と古いAdobe造の被害が挙げられる点にも注目する必要がある。これらの建築物被害については、詳しい原因解明を行って、将来の耐震設計技術向上に反映することが求められる。

今般の地震被害から建築物の耐震性能改善に係わる課題が幾つか挙げられるが、それらは耐震技術上の課題と技術者・技能者に向けた耐震技術の教育・普及の課題に大別される。以下に、教育・普及の課題について述べる。

2008年汶川(四川)地震の甚大な被害は未だ記憶に新しいが、2010年には、ハイチ地震、チリ地震と大地震による被害が相次いだ。特に、ハイチ地震では犠牲者が25万人にも達し、その主な原因として、建築物の構造耐力不足と一体性の欠如が挙げられている。具体的には、細い柱、過少な鉄筋量(細い主筋と疎らな拘束筋)、粗悪なコンクリート品質などが指摘されている。これらの要因は過去の地震被害の度に指摘されるが、遡って考えると無知という問題に突き当たる。す

なわち、構造設計技術者や現場技能者の無知という問題であり、建築現場の RC 造の主筋が何故そのように配筋されているのか、柱の帶筋端部が何故 135 度フックになっているのか、鉄骨造の梁端部溶接部が何故完全突合せ溶接になっているのかなど、それらの理由を構造設計者が知らずに設計し、現場技能者が知らずに作業を行っているということである。このことは、耐震技術が未発達の国に限ったことではなく、1994 年米国ノースリッジ地震の被害調査報告書でも指摘されているように、耐震技術が最先端水準にある国でも程度の差こそあれ同じ問題を抱えている。チリ国においても同様な問題を抱えており、今般の地震被害を受けて、技術者や技能者に対する耐震技術の教育と普及の方法を再検討することが肝要である。

最後に、現地調査の実施や資料収集に当たっては、JICA 関係者並びにチリ国の関係者をはじめ、多くの方々のご支援、ご協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。