

2010年チリ地震 現地調査報告（速報）

独立行政法人建築研究所構造研究グループ 加藤 博人
構造研究グループ 田尻 清太郎**
国際地震工学センター 向井 智久

2010年2月27日（土）午後3時34分（現地時間午前3時34分）、南米チリの太平洋沿岸部でマグニチュード(Mw)8.8の巨大地震が発生し、チリ国内の広い範囲で地震と津波による甚大な被害が発生した。

地震発生後、チリ国政府住宅・都市計画省より日本に対し、被災建物の診断に関する優れた技術と経験を持つ専門家を派遣してほしいという要請があり、それに応える形で日本政府は国際協力機構（JICA）を通じて専門家チームの派遣^{#1}を決定した。建築研究所からは上記3名の研究職員が専門家チームに参加し（以下、JICA 専門家チームと略記）、2010年3月13日～23日の日程で建物の被害を中心に被災状況調査を行ったので、以下に報告する。

目 次

1. 地震諸元と地震被害概要	2
2. 各地の被害状況	3
3. 建築物の被害の特徴	24
参考文献	33

#1 調査団名称： チリ国地震被災建築物診断専門家チーム

調査団派遣の主目的は、以下のとおり。

- 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。

** 2010年4月から国土交通省住宅局建築指導課

1. 地震諸元と地震被害概要

米国地質調査所 (USGS) による 2010 年チリ地震の諸元は、以下のとおりである^[1]。

発生日時： 2010年2月27日06時34分14秒 (UTC)、03時34分14秒 (現地時間)

震源： 南緯 35.9°、西経 72.7°、深さ 35km

Chillan (チジャン) の北西約 95km

Talca (タルカ) の西南西約 115km

Concepcion (コンセプション) の北北東約 105km

Santiago (サンティアゴ) の南西約 335km

マグニチュード：Mw = 8.8

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、特に地震動の大きかった次の 4 州で大きな被害が報告されている。

Libertador 州 (リベルタドル州)、Maule 州 (マウレ州)、Biobio 州 (ビオビオ州)

Metropolitana (サンティアゴ首都圏)

OCHA や USAID の報告に基づく本地震による被害の概要は、以下のとおりである。

死者：432 人 (チリ政府、3月27日時点)

行方不明者：98 人 (OCHA)^[2]

被災者数：約 180 万人以上 (OCHA、3月29日時点)^[2]

被災住宅：約 81 万戸 (内訳：大破および倒壊 16 万戸以上、要診断建物 9.3 万戸以上)^[2]

被害総額：約 US\$30 billion

本報告の中で使用している略称を下記にまとめて示す。

USGS	U.S. Geological Survey (米国地質調査所)
OCHA	United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (国際連合人道問題調整事務所)
USAID	United States Agency for International Development (米国国際開発庁)
MINVU	住宅・都市計画省
SERVIU ^{#2}	住宅・都市計画省住宅計画局
IDIEM	チリ大学工学部 構造・材料研究・開発・革新センター
DICTUC	カトリカ大学工学部 科学・技術研究局

#2 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。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 ビオビオ州局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。今のところ、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歩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 DICTUC や IDIEM に依頼して行っている。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 専門家チームがヒアリングした段階では (3月19日時点)、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、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。

2. 各地の被害状況

JICA 専門家チームが調査した場所を、OCHA が作成した地震被災地の地図に追記して示す (図1)。調査地点は、サンティアゴ、コンスティトゥション、タルカ、カウケネス、ペジェウエ、ディチャト、ペンコ、コンセプションの8都市である (チジャンについては、参考情報)。

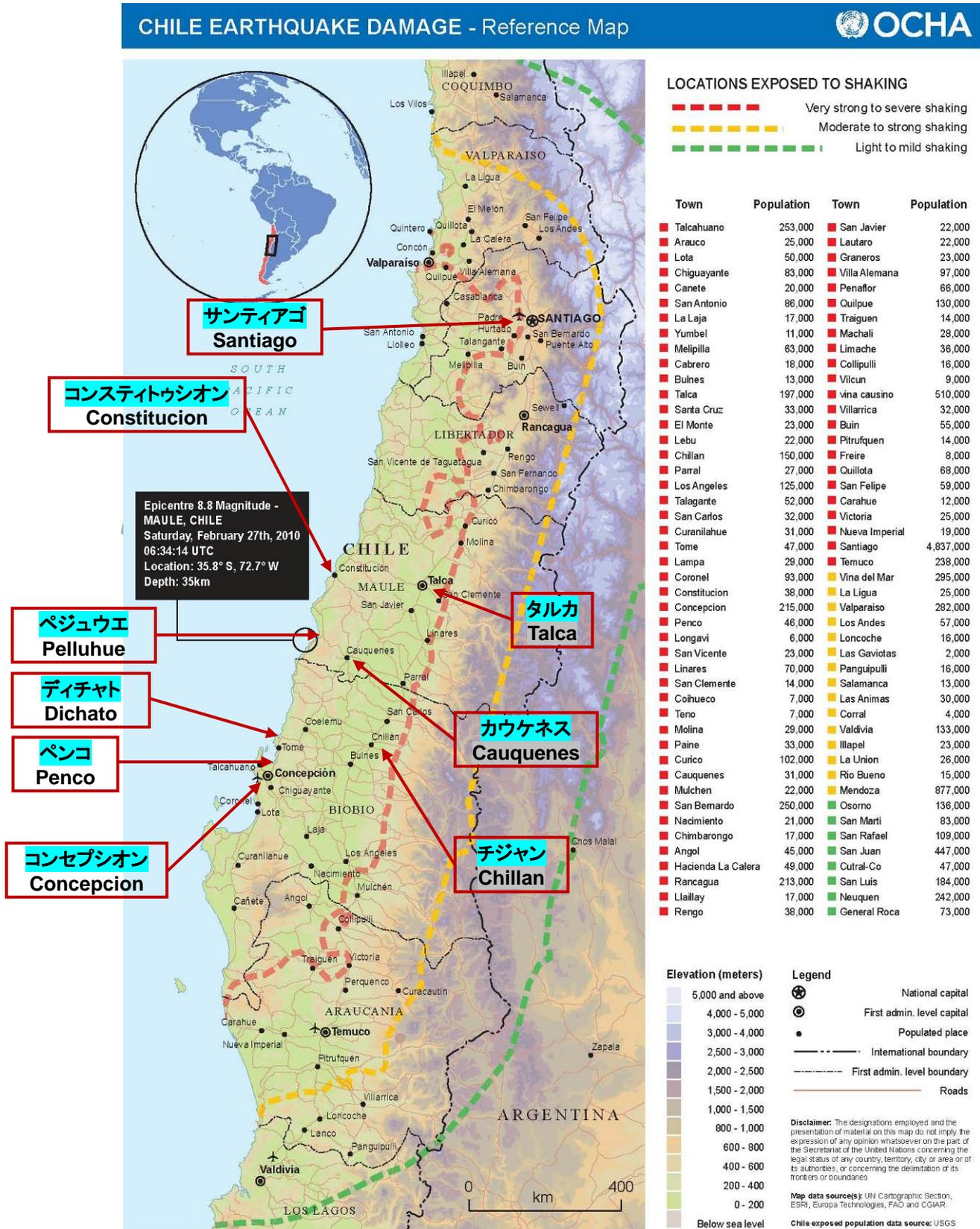


図1 JICA 専門家チーム調査地点 (OCHA の被害地図に追記)

2. 1 サンティアゴ (Santiago) 市

サンティアゴ市では、図2に示す建物について被害状況の調査を行った。内訳は、比較的新しい民間建物（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。

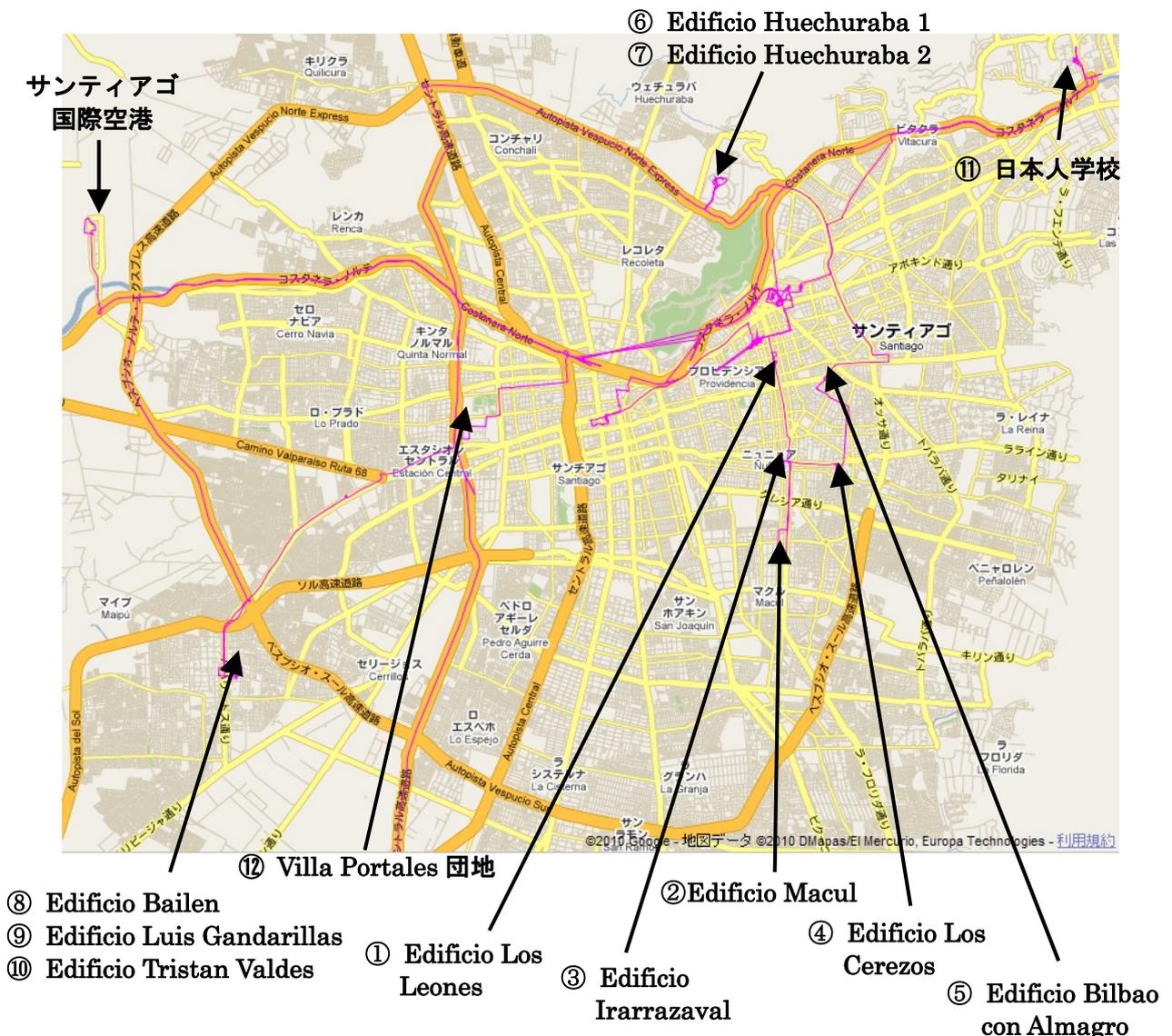


図2 サンティアゴ市での調査建物（○印は建物番号、Google Map に追記）

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1-1）。地下2層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1-2のように大破し、軸方向に縮んでいた。壁厚さは、15cmであった。



写真1-1 建物外観



写真1-2 大破したRC造壁

② Edificio Macul

地上18階（地下2階）建てのRC造壁式構造の集合住宅である。写真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棟の建物にまたがる形で地下2層が自走式の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の高さで大破していた（写真2-2、写真2-3）。壁柱主筋はD25、帯筋はD8相当である^{#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外光が見えていた（写真2-4）。



写真 2-1 建物外観



写真 2-2 大破した RC 造壁



写真 2-3 壁柱部分



写真 2-4 RC 造柱の破壊

③ Edificio Irrarrazaval

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ったが、許可が得られず内部は調査できなかった。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3-1、3-2）。



写真 3-1 建物外観



写真 3-2 市の判定結果の表示

#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。

④ Edificio Los Cerezos

地上26階（地下1階）建てのRC造壁式構造の高層集合住宅である（写真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4-2のように脚部で圧壊している。写真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 4-1 建物外観



写真 4-2 1階柱脚の圧壊



写真 4-3 写真 4-2 の内部の様子



写真 4-4 写真 4-2 の地下部分

⑤ Edificio Bilbao con Almagro

地上22階建てのRC造高層集合住宅で築38年程経過している。外壁の方立壁はれんがが積みの非構造壁であり、ほぼ全フロアで写真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 5-1 建物外観



写真 5-2 れんがが積み外壁の損傷

⑥ Edificio Hauchuraba 1

地上12階建て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 6-1 建物外観



写真 6-2 壁梁の損傷

⑦ Edificio Hauchuraba 2

地上5階建て建物、他4棟からなる商業ビルである(写真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7-2)。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7-3)。敷地には、地盤の変状も見られた(写真7-4)。

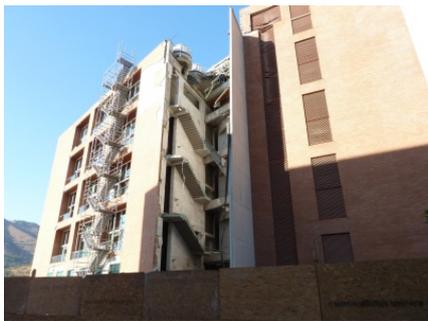


写真 7-1 建物外観
(外部階段の壁が崩落)



写真 7-2 梁のと柱梁接合部破壊



写真 7-3 ペントハウス階の落床

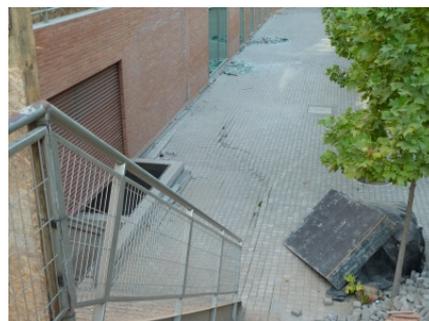


写真 7-4 地盤の変状

⑧ Edificio Bailen

地上5階建てのRC造集合住宅である(写真8-1、写真8-2)。建物の短辺方向に敷地が傾斜しており(写真8-2の右方向)、建物長辺方向に連なる壁柱が大きく破壊し、1層の層崩壊が確認された。



写真 8-1 建物外観（長辺方向）



写真 8-2 建物外観（短辺方向）

⑨ Edificio Luis Gandarillas

地上5階建てピロティ形式のRC造集合住宅である（写真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9-2）。1階壁柱の柱頭、柱脚部では引張軸力と曲げによる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9-4）。

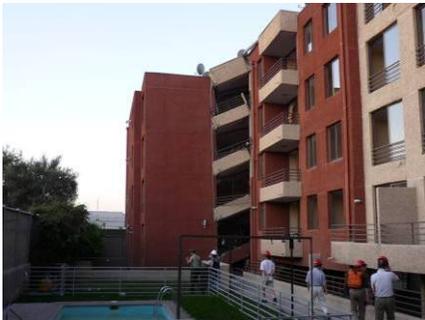


写真 9-1 建物外観



写真 9-2 1階駐車場（ピロティ）



写真 9-3 曲げヒンジが生じた壁柱



写真 9-4 せん断破壊した壁

⑩ Edificio Tristan Valdes

地上4階建てピロティ形式のRC造集合住宅である（写真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10-2のように高さ500～600mm付近で大きく損傷し、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、外周部の耐力壁は地震力に有効に働いていないと推測される。



写真 10-1 建物外観



写真 10-2 T形壁柱と耐力壁の破壊



写真 10-3 壁上端の充填物

⑪ 日本人学校

チリ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 11-1)。ブロック壁の目地部と躯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 11-2)。その他、天井材の一部にずれが生じていたが(写真 11-3)、全体的には軽微な被害である。



写真 11-1 建物外観



写真 11-2 片持ち壁のひび割れ



写真 11-3 天井材のずれ

⑫ Villa Portales 団地 (BLOCK-4)

SERVIU 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集合住宅(分譲)で、築54年程度経過している(写真 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^{#4})である。

#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、3. に示す。

SERVIU が IDIEM 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 12-2）。中廊下と戸塚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 12-3）。本建物は、これまでにチリで起こった 1960 年の地震（Mw9.5）や 85 年の地震（Mw7.8）などの大地震も経験していることになるが、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 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の影響で脱落する被害も見られており（写真 12-5）、補強工事を行う際にはこれらに対する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。駐チリ日本国大使 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^{#5}。



写真 12-1 建物外観



写真 12-2 診断結果の表示



写真 12-3 非構造内壁の損傷



写真 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 12-5 屋上部分の飾り梁が脱落（左は落下した梁）



⑬ その他

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、被害は殆ど見られなかった。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は起きていたようであるが、外観上、殆ど被害は見られなかった。^{#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 13-1 サンティアゴ市内の組積造建物（無被害）



写真 13-2 サンティアゴ市内の一般建物（無被害）

#5



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

#6

公表されている強震観測記録^[3]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れば震度 5 強~6 弱程度の揺れであったものと推測される。なお、本稿執筆時点では、震源近くの強震観測記録は発表されていない。

2. 2 コンステイトゥシオン (Constitucion、マウレ州)

コンステイトゥシオンは、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 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 に示す。なお、津波被害については 2. 9 でまとめて記述する。



図 3 コンステイトゥシオンでの調査建物 (○印は建物番号、Google Map に追記)

① 丘の上の集合住宅

枠組み組積造 (Confined Masonry、以降、CM 造と略記) 3 階建て SERVIU の低所得者向け集合住宅で、丘の斜面に建つ築 10~15 年程度の建物である (写真 14-1)。柱寸法は 200x300mm、主筋は D10 相当で $\phi 4$ 程度の帯筋が約 150mm 間隔で入っている。壁には穴あきレンガを使用し、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 14-2)。



写真 14-1 建物外観



写真 14-2 CM 造の柱と壁部分





写真 14-3 1層部分で層崩壊した建物



写真 14-4 柱梁接合部

敷地の一番高い場所（崖近く）に建つ住棟が1層部分で層崩壊し（写真 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、盛り土の可能性もある。柱梁接合部には、帯筋は入っていない（写真 14-4）。

② 河口近くの集合住宅

河口近くに建つSERVIUの集合住宅で、れんがを使ったCM造4階建て築20年程度である（写真 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る（写真 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 15-3、写真 15-4）。



写真 15-1 建物外観



写真 15-2 妻壁のせん断破壊



写真 15-3 妻壁頂部の梁の崩落



写真 15-4 落下した梁

③ 古いれんが造やアドベ造建物の被害

コンスティトゥションでは、古いれんが造やアドベ造建物の被害が各所で見られた。一方、山の斜面に建つ新しい低層住宅には、大きな被害は見られなかった。



写真 16-1 れんが造やアドベ造建物の被害

2. 3 カウケネス (Cauquenes、マウレ州)

カウケネスでは、SERVIU の集合住宅の被害状況を調査した。調査建物位置を図 4 に示す。



図 4 カウケネスでの調査建物 (○印は建物番号、Google Map に追記)

① 集合住宅

CM 造 3 階建て SERVIU の集合住宅で、緩やかな傾斜地に 4 棟の住棟が建っている。築 16 年程度。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い。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る (写真 17-1)。他の 2 棟では、エキスパンションジョイント (ただし、殆ど隙間がない。以降、EXPJ と略記) で区切られた片側の建物にせん断ひび割れが入っているが、小破程度であった (写真 17-2)。

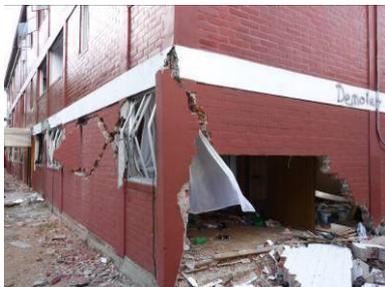


写真 17-1 妻壁と桁行方向壁の崩壊



写真 17-2 桁行方向壁のせん断ひび割れ (別棟)

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 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 5 に示す。



図 5 タルカ市での調査建物 (○印は建物番号、Google Map に追記)

① 低層住宅建設現場

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 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、壁部分には穴あきレンガが積まれる。壁部分には水平筋も入れられ、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。柱の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 (40d) で重ねられていた (写真 18-2)。柱帯筋は 200mm 間隔で配筋されているが、帯筋端部のフック角度は 90° であった。



写真 18-1 CM 造住宅建設風景



写真 18-2 基礎梁の配筋とコーナー鉄筋



写真 18-3 スラブ（見上げ）



写真 18-4 転倒した組積造壁

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ツラブである（写真 18-3）。今回の地震では、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 18-4）。

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 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 19-2）。



写真 19-1 建物外観



写真 19-2 発泡スチロール粒が混入された
コンクリート

③ SERVIU 庁舎

SERVIU のタルカ市庁舎で、築 30 年程度の RC 造地上 6 階建ての建物（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 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 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 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 20-4）。



写真 20-1 建物外観



写真 20-2 桁行方向鉄骨柱と窓ガラスの飛散



写真 20-3 せん断破壊した耐力壁と短スパン梁



写真 20-4 柱脚部の配筋状況

④ 公営住宅

築約 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 階建ての RC 造建物 (Infilled Wall 造) である (写真 21-1)。写真 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る。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 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 21-1 建物外観



写真 21-2 組積造壁の損傷



写真 21-3 隅柱の損傷

⑤ その他

古いれんが造やアドベ造建物の被害は、市内の各所で見られた (写真 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い (写真 22-2)。



写真 22-1 れんが造やアドベ造建物の被害



写真 22-2 新しい建物や住宅の様子

2. 5 コンセプション市 (Concepcion、ビオビオ州)

コンセプション市は、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 6 に示す。



図 6 コンセプション市での調査建物 (○印は建物番号、Google Map に追記)

① 高層オフィスビル

市街地に建つ地上約 20 階建ての高層 RC 造オフィスビルである (写真 23-1)。建物正面側の 12 階付近の中間層で層崩壊し (写真 23-2)、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、顕著な損壊は起きていない。SERVIU 関係者の話によると、崩壊層より上部の階を取り壊し継続使用することを考えているとのことであった。



写真 23-1 建物外観



写真 23-2 層崩壊している 12 階付近

② 事務所ビル

SERVIU が所有する事務所ビルで、RC 造地上 4 階建てである（写真 24-1）。室内や階段室部分の組積造壁が大破しており（写真 24-2）、書類等が散乱している。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る（写真 24-3）。損傷は非構造壁に集中しており、修復を行えば建物を使用することは十分に可能と考えられる。



写真 24-1 建物外観



写真 24-2 組積造壁の破壊



写真 24-3 円柱の曲げせん断ひび割れ

③ 集合住宅

約 1 年前に建設された地上 15 階、地下 2 階（駐車場）建ての RC 造の民間集合住宅で、1 階の足元から、完全に転倒している（写真 25-1）。写真に見られる壁の破壊は、救助作業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、転倒し始めた」とのことである。写真 25-2 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、ほとんど損傷は見られなかった（写真 25-3）。



救助作業で開けられた穴

写真 25-1 建物外観



写真 25-2 引きちぎられた 1 階壁柱および耐力壁



写真 25-3 建物地下壁

④ その他

コンセプション市内では、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印象である。市内の被災状況を写真 26-1 に示す。



写真 26-1 コンセプション市内の様子

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漁村である。SERVIU が手掛ける低層住宅群の被害状況を調査した。次に示すペンコでの調査と併せて、建物位置を図 7 に示す。



図 7 ディチャトおよびペンコでの調査建物 (○印は建物番号、Google Map に追記)

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 27-1、写真 27-2)。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。



写真 27-1 建物外観



写真 27-2 プレキャスト RC 造壁

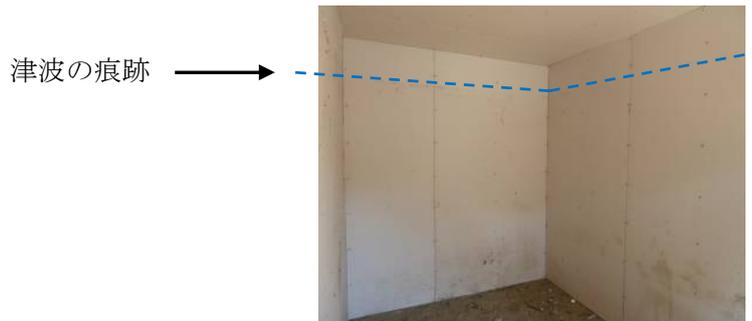


写真 27-3 津波の痕跡 (2階の壁)

写真 27-3 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約 9m 程度と推測することができる。

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 28-1)。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 28-2)。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 28-3)。



写真 28-1 建物外観



写真 28-2 津波により2階が流された住宅



写真 28-3 壁の縦筋

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漁村で、SERVIU が建設した集合住宅を調査した。調査建物位置は、図7に示している。

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 29-1)。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 29-2 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 29-1 建物外観



写真 29-2 折板の一部が変形

2. 8 チジャン (Chillan、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 30-1)。建物躯体は RC 構造であるが、屋上の尖塔が屋根を突き抜けて崩落している。また、礼拝堂の列柱上部や壁にも損傷が見られた (写真 30-2、写真 30-3)。



写真 30-1 被災した教会



写真 30-2 教会内部



写真 30-3 落下した尖塔

2. 9 津波の被害状況

(1) コンスティトゥシオン (Constitucion、マウレ州)

コンスティトゥシオン市街に見られる津波の痕跡 (写真 31-1、写真 31-2)。



写真 31-1 河口近くの SERVIU 集合住宅の津波跡
(高さ 40cm 程度)



写真 31-2 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、全て破壊されている。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 程度まで津波が達したものと推測される。(写真 31-3)

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) に倒されている。また、

海岸近くの木材チップ製造工場も被害を受けている。(写真 31-4)



写真 31-3 津波の被害跡



写真 31-4 津波による海岸部の被害

(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る(写真 32-1)。住民の話によると、地震の直後、車で自主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る。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 32-1 津波による海岸部の被害

(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る(写真 33-1)。一方、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る。地元住民は、地震の後、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、津波の犠牲者が出ている模様である。この地区は、調査時点では軍の管理下に置かれていた(写真 33-2)。



写真 33-1 津波による海岸部の被害



写真 33-2 避難民のテントと軍のテント

3. 建築物の被害の特徴

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^{#7}なども含めた組積造系の建物に多大な被害が発生している。これら組積造系の建物は、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が、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、高層建物にも多用されている (日本の壁式ラーメン構造に似た構造形式、日本では地上 15 階、高さ 45m 以下)。その他、ピロティ構造におけるピロティ層の崩壊、高層建物の中間階の層崩壊など、都市型建物に共通する被害事例も見られている。これら被害建物の数は限定的ではあるが、比較的新しい建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^[4])、 $M_w=8.8$ 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理解される。ここでは、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示す。

#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した構造。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) されている。

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。

3. 1 建築物全体の被害

(1) RC造高層建物の転倒

15階建てのRC造集合住宅が転倒した事例である(写真34-1。2.で示した写真を再掲載する。以下同様)。建物の地下階が自走式の駐車場となっており(3.3(1)に示す事例も同様)、上階に比べて耐力壁長さが短くなっている(壁量の減少)ため当該部分で破壊が発生し(写真39-1、写真39-2参照)、転倒の原因となったことが推測される。地下階に大きな開口部を設けた連層耐力壁のイメージを、図8に示す。転倒原因については、今後、詳しく検討する必要がある。



写真34-1 転倒による被害(写真25-1を再掲)

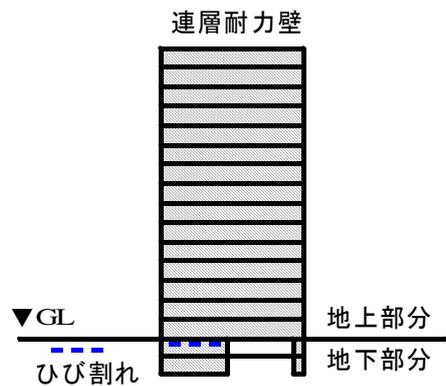


図8 地下階で一部壁抜けした連層耐力壁のイメージ図

(2) RC造高層建物の中間層崩壊

RC造高層建物の中間層が崩壊した事例である(写真35-1、写真35-2)。建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。外観的には、層崩壊はセットバックしている階で生じている。詳細な調査結果や建物の構造に関する情報は得られていないので、被害原因については今後の検討によらなければならない。



写真35-1 中間層崩壊による被害(写真23-1を再掲)



写真35-2 層崩壊した12階付近(写真23-2を再掲)

1995年の阪神・淡路大震災でも、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 35-3）。これらについては、鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）造から RC 造への構造形式の切り替え等が、被害原因として指摘されている。



写真 35-3 中間層で崩壊した建物（阪神・淡路大震災）

(3) RC 造中層建物の 1 層崩壊

RC 造中層建物（集合住宅）の 1 層部分が崩壊した事例である（写真 36-1、写真 36-2）。特に写真 36-2 の建物は、下階壁抜け（ピロティ）構造となっていて、地震時の変形が 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。

ピロティ層の崩壊は、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 36-3 は 1995 年阪神・淡路大震災での事例、写真 36-4 は 2009 年ラクイラ地震（イタリア）で見られた事例である。

日本においては、阪神・淡路大震災以降、剛性率（高さ方向の剛性の分布に対する評価）に関する規定が強化されている。また、ピロティ構造に対する耐震設計の留意点が技術解説書に掲載されている^{[5]、[6]}。



写真 36-1 1 層部分の層崩壊
（写真 8-1 を再掲）



写真 36-2 ピロティ層の崩壊
（写真 9-1 を再掲）



写真 36-3 ピロティ建物の崩壊
（阪神・淡路大震災）



写真 36-4 ピロティ建物の崩壊
（ラクイラ地震）

(4) CM 造低層建物の層崩壊

写真 37-1 は、CM 造 3 階建ての集合住宅で、1 階が崩壊し 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。建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 造建物の被害は、これまでも数多くの地震で報告されており、2007 年ピスコ地震（ペルー）の被害事例を示す（写真 37-2）。



写真 37-1 1 階部分で層崩壊した CM 造（写真 14-3 を再掲）



写真 37-3 崩壊した CM 造建物（ピスコ地震）

(5) 組積造建物の被害

写真 38-1 や写真 38-2 は、アドベ(Adobe)造建物やれんが造建物など組積造建物の被害事例である。最近の地震での被害事例として、例えば、2008 年四川大地震のれんが造建物の被害（写真 38-3）、2009 年ラクイラ地震（イタリア）の組積造建物被害（写真 38-4）など多数報告されている。

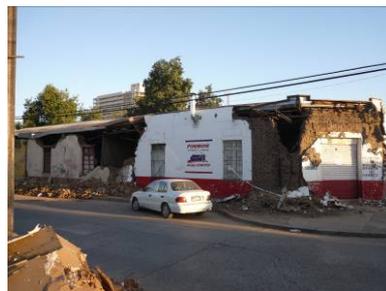


写真 38-1 アドベ造建物の被害（写真 16-1、写真 22-1 を再掲）



写真 38-2 れんが造建物の被害（写真 22-1、写真 26-1 を再掲）



写真 38-3 1階が崩壊したれんが造建物
（四川大地震）



写真 38-4 組積造建物の被害
（ラクイラ地震）

3. 2 構造部材の被害

(1) RC 造耐力壁の破壊

写真 39-1 は、地上 12 階・地下 2 階建て建物の RC 造連層耐力壁が、地下 1 階部分で大破した事例である。写真 39-2 も、地上 18 階・地下 2 階建て建物の地下 1 階部分で、RC 造連層耐力壁が同様に大破している。このような事例は、過去の地震被害では報告されておらず、チリの建物に特有な破壊形式と言えるかもしれない（RC 造耐力壁の破壊形式としては、斜め方向にひび割れが入るせん断破壊が一般的）。



写真 39-1 大破した RC 造壁
（写真 1-2 を再掲）



写真 39-2 大破した RC 造壁
（写真 2-3 を再掲）

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 8 を参照）。写真 39-1 は、図 8 に示すイメージ図の地下部分左側の壁に相当する。写真に見られる破壊は、該当部分の壁に大きな引張軸力とせん断力が作用したことによって発生したものと推測される。

(2) RC 造柱（壁柱）部材の曲げ破壊

写真 40-1 は、中層 RC 造建物の崩壊層の壁柱（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、弱軸方向に曲げ降伏した後、柱頭部分に変形が集中し、その後、水平耐力の喪失により鉛直荷重を支えられなくなったものと推測される。

2008 年四川大地震においても柱に同様な損傷が確認されているが（写真 40-2）、壁柱の損傷は

チリの建物に特有の破壊形式であると考えられる。



写真 40-1 曲げヒンジが生じた壁柱
(写真 9-3 を再掲)



写真 40-2 柱頭の曲げ破壊
(四川大地震)

(3) RC 造梁部材の破壊

a. 梁のせん断破壊

写真 41-1 は、中層 RC 造建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。

2005 年新潟県中越地震においても、病院建物の階段室部分の短スパン梁に同様な損傷が確認されている (写真 41-2)。



写真 41-1 せん断破壊した短スパン梁
(写真 9-3 を再掲)



写真 41-2 せん断ひび割れが
発生した短スパン梁 (新潟県中越地震)

b. 梁の定着部破壊

写真 42-1 は、CM 造建物の最上層の梁が鉄筋の重ね継手位置で破壊し、面外に脱落した事例である。当該建物は、20 年以上前に建設されたものであり、設計・施工に関するチリの基準類がどのようなものであったのかは現時点で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ぎ手長さは、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ぎ手長さや位置が必ずしも適切とは言えず、応力伝達が十分に為されなかったことが原因として推測される (写真 42-2 参照)。



写真 42-1 妻壁頂部の梁の崩落
(写真 15-3 を再掲)



写真 42-2 継ぎ手位置が揃った梁主筋
(写真 15-4 を再掲)

(4) RC造柱梁接合部、その他の接合部破壊

a. 柱梁接合部の破壊

写真 43-1 は中層 RC 造の柱梁接合部の破壊、写真 43-2 は CM 造 3 階建ての柱梁接合部が破壊した事例である。いずれも接合部に帯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。

2008 年四川大地震（写真 43-3）や 2009 年ラクイラ地震（イタリア）（写真 43-4）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 43-1 柱梁接合部の破壊



写真 43-2 柱梁接合部の破壊（写真 14-4 を再掲）



写真 43-3 柱梁接合部の破壊
（四川大地震）



写真 43-4 柱梁接合部の破壊
（ラクイラ地震）

b. 建物間の接合部の破壊

写真 44-1 は、地上 12 階建て建物と地上 2 階建て建物の接合部分が破損した事例である。建物の地震時揺れは固有周期に依存するため、高さの異なる建物が接していると周期の違いにより衝突し、このような破壊の原因となる。通常、日本においては、このような建物間にはエクステンションジョイントを設けている。



写真 44-1 2 棟の建物の接合部分
（写真 6-2 を再掲）

3. 3 非構造部材

(1) れんが造壁（非耐力壁）の被害

写真 45-1 は、高層 RC 造建物（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ので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後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、これまでも多くの地震で報告されており、写真 45-2 は 2008 年四川大地震で見られた事例、写真 45-3 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 45-1 れんが壁の破壊
(写真 5-2 を再掲)



写真 45-2 方立て壁の破壊
(四川大地震)



写真 45-3 れんが造壁の破壊
(ラクイラ地震)

(2) RC 造非構造部材の被害

写真 46-1 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、7~8m 離れた場所に落下した事例である。また、写真 46-2 や写真 46-3 は、RC 造オフィス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。今回の調査では、建物外壁面にこのような装飾部材を取り付けている建物が多数見られた。今後、設計または施工において注意が必要であろう。



接続部の配筋状況

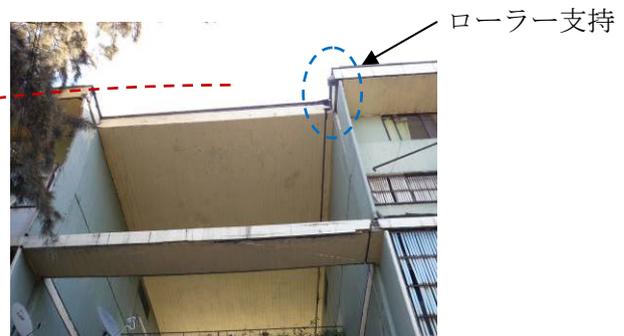


写真 46-1 飾り梁の脱落 (写真 12-5 を再掲)

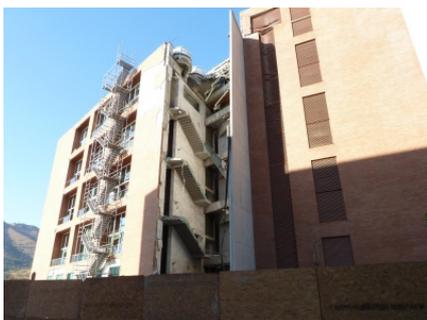


写真 46-2 外壁の脱落 (写真 7-1 を再掲)



写真 46-3 外壁の脱落 (写真 19-1 を再掲)

(3) ガラスや天井の被害

写真 47-1 は、中層建物外周部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 47-2)。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。

大規模建物の天井材の落下は、国内でも 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 47-3) 等が報告されている。



写真 47-1 窓ガラスの飛散(写真 20-2 を再掲)



写真 47-2 サンティアゴ国際空港天井パネルの脱落



写真 47-3 釧路空港天井パネルの脱落(釧路空港ビル株式会社提供)^[7]

謝辞:

専門家派遣に際して、後方支援をいただいた国際協力機構(JICA)の関係諸氏、並びにチリ国内で関係機関との調整や調査活動への便宜を図っていただいた JICA チリ事務所の関係諸氏に謝意を表します。

現地調査では、被災建物に関する情報提供や現場への同行など、チリ大学やカトリカ大学の構造関係者の多大な協力を得ました。建築研究所(国際地震工学センター)では、JICA の協力の下、1960 年から 50 年間に渡り開発途上国の若手研究者、並びに技術者を対象にした地震学と地震工学研修を実施しています。これまでに、チリからは 42 名が研修に参加し、帰国後はそれぞれの専門分野で先導的な役割を担って活動しています。今回調査を行うに当たって、研修生 OB との予てからの繋がりが大変有効に機能しました。関係諸氏に、心から感謝申し上げます。

参考文献：

1. USGS Homepage: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010tfan/>
2. USAID/OFDA : Fact Sheet #16, USAID/OFDA bulletins appear on the USAID web site at http://www.usaid.gov/our_work/humanitarian_assistance/disaster_assistance/
3. R. BOROSCHEK, P. SOTO, R. LEON, D. COMTE: INFORME PRELIMINAR, RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS, 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>
4. 齊藤大樹: チリの耐震基準 NCh433 (1996)、(独)建築研究所ホームページ、http://iisee.kenken.go.jp/special/20100227chile/seismic_code_chile.pdf
5. 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 Bbuilding, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004, Paper No. 2224
6. 2007年版建築物の構造関係技術基準解説書 付録 1-6、2007年8月
7. 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>