

第5章 建築物の被害の特徴

5.1 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^{#8}なども含めた組積造系の建築物に多大な被害が発生している。これら組積造系の建築物は、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、ピロティ構造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、詳しい原因説明が求められる。

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、第6章を参照)、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理解される。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

#8 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。

5.2 建築物全体の被害

a-1 RC 造高層建築物の転倒

写真 5.1 は、15 階建ての RC 造集合住宅が転倒した事例である（4.2.5 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 5.1 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 階のスラブを介し周辺の地下外壁に伝達されるとすると、図 5.1 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 5.1 の左側に示す位置で写真 5.16 や写真 5.17 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との因果関係については、今後、詳しく検討する必要がある。

一方、1995 年の阪神・淡路大震災でも、本震で傾いていた 9 階建ての RC 造建築物が余震にて転倒崩壊し、前面道路を塞いだ被害事例が報告されている（写真 5.2）⁵⁻¹⁾。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 5.1 転倒による被害（写真 4.25.2 を再掲）



写真 5.2 転倒崩壊した建築物
(阪神・淡路大震災)⁵⁻¹⁾

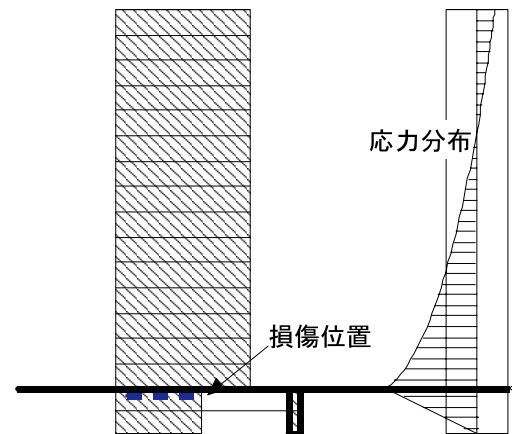


図 5.1 地下階で一部壁抜けした連層耐力壁のイメージとそれに作用するモーメント分布

a-2 RC 造高層建築物の中間層崩壊

RC 造高層建築物の中間層が崩壊した事例である（写真 5.3、写真 5.4）。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。外観的には、層崩壊はセットバックしている階で生じている。



写真 5.3 中間層崩壊による被害（写真 4.23.2 を再掲）



写真 5.4 層崩壊した 12 階付近（左は写真 4.23.3 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 5.5）⁵⁻²⁾。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・上層で要求層せん断力が小さかったこと、被害を生じた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 5.5 中間層で崩壊した建築物（阪神・淡路大震災）⁵⁻²⁾

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 5.6、写真 5.7）。特に写真 5.7 の建築物は、下階壁抜け（ピロティ）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 5.8 は 1995 年阪神・淡路大震災での事例、写真 5.9 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、損傷が集中したことが指摘されている。

日本においては、阪神・淡路大震災の後、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、ピロティ構造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^{5-3), 5-4)}。



写真 5.6 1層部分の層崩壊
(写真 4.8.1 を再掲)



写真 5.7 ピロティ層の崩壊
(写真 4.9.1 を再掲)



写真 5.8 ピロティ建築物の崩壊
(阪神・淡路大震災)



写真 5.9 ピロティ建築物の崩壊
(ラクイラ地震)

a-4 CM 造低層建築物の層崩壊

写真 5.10 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、これまでも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 5.11）。写真 5.11 の左側は、写っている建物の手前側が完全に崩壊し、右側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 5.10 1層部分で層崩壊したCM造（写真 4.14.3 を再掲）



写真 5.11 崩壊したCM造建築物（ピスコ地震）

a-5 組積造建築物の被害

写真 5.12 や写真 5.13 は、アドベ(Adobe)造建築物やれんが造建築物など組積造建築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築物の被害（写真 5.14）、2009年ラクイラ地震（イタリア）の組積造建築物被害（写真 5.15）など多数報告されている。

古いアドベ造やれんが造建築物では、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バラバラになったり、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、建築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 5.12 アドベ造建築物の被害（写真 4.16.1、写真 4.22.1 を再掲）



写真 5.13 れんが造建築物の被害（写真 4.22.1、写真 4.32.1 を再掲）



写真 5.15 組積造建築物の被害
（ラクイラ地震）



写真 5.14 1階が崩壊したれんが造建築物
（四川大地震）



5.3 構造部材の被害

b-1 RC 造耐力壁の破壊

写真 5.16 は、地上 12 階・地下 2 階建て建築物の 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 5.17 も、地上 18 階・地下 2 階建て建築物の地下 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 5.1 を参照）。写真 5.16 は、図 5.1 の左側に示すイメージ図の地下部分の壁に相当する。写真に見られる破壊は、該当部分の壁に引張軸力と曲げモーメントが作用したことによって発生したものと推測される。



写真 5.16 大破した RC 造壁
（写真 4.1.2 を再掲）



写真 5.17 大破した RC 造壁
（写真 4.2.3 を再掲）

b-2 RC 造柱（壁柱）部材の曲げ破壊

写真 5.18 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 5.19 に示すような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においては、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 5.18 曲げヒンジが生じた壁柱
(写真 4.9.3 を再掲)



写真 5.19 柱頭の曲げ破壊
(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 5.20 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。

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 5.21)。



写真 5.20 せん断破壊した短スパン梁
(写真 4.20.3 を再掲)



写真 5.21 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-3-2 梁の定着部破壊

写真 5.22 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、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、応力伝達が十分になされなかったことが原因として推測される (写真 5.23 参照)。



写真 5.22 妻壁頂部の梁の崩落
(写真 4.15.3 を再掲)



写真 5.23 継ぎ手位置が揃った梁主筋
(写真 4.15.4 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 5.24 は中層 RC 造の柱梁接合部の破壊、写真 5.25 は CM 造 3 階建ての柱梁接合部が破壊した事例である。いずれも接合部に帯筋が入っていないことや、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性的に破壊すれば、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 5.26) や 2009 年ラクイラ地震 (イタリア) (写真 5.27) 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 5.24 柱梁接合部の破壊



写真 5.25 柱梁接合部の破壊
(写真 4.14.4 を再掲)



写真 5.26 柱梁接合部の破壊
(四川大地震)



写真 5.27 柱梁接合部の破壊
(ラクイラ地震)

b-4-2 建築物間の接合部の破壊

写真 5.28 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。日本の構造設計では、通常、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を講じている。



写真 5.28 2 棟の建築物の接続部分（写真 4.6.2 を再掲）

5.4 非構造部材

c-1 れんが造壁（非耐力壁）の被害

写真 5.29、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、これまでも多くの地震で報告されており、写真 5.31 は 2008 年四川大地震で見られた事例、写真 5.32 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 5.29 れんが壁が破壊した高層 RC 建築物（写真 4.5.1 を再掲）



写真 5.30 れんが壁の破壊（写真 4.5.2 を再掲）



写真 5.31 方立て壁の破壊（四川大地震）



写真 5.32 れんが造壁の破壊（ラクイラ地震）

c-2 RC 造非構造部材の被害

写真 5.33 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 5.34 や写真 5.35 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。



接続部の配筋状況

写真 5.33 飾り梁の脱落（写真 4.12.5 を再掲）



写真 5.34 外壁の脱落（写真 4.7.2 を再掲）



写真 5.35 外壁の脱落
（写真 4.19.1 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、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 5.36 は中層建築物外周部の窓ガラスの被害、写真 5.37 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 5.38)。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、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 5.39)等が報告されている⁵⁻⁵⁾。

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 5.36 窓ガラスの飛散(写真 4.20.2 を再掲)



写真 5.37 窓ガラスの飛散



写真 5.38 サンティアゴ国際空港天井パネルの脱落



写真 5.39 釧路空港天井パネルの脱落(釧路空港ビル株式会社提供)⁵⁻⁵⁾

5.5 まとめ

本章では、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、それぞれの特徴と過去の類似の被災事例を対比させながら示した。その多くは日本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、これら建築物の耐震性向上に貢献できる可能性は大である。

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、貴重な情報を提示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の壁が、大きな引張軸力と曲げモーメントを受けて壁幅全長に渡って破断した被害事例は、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経験したことのない破壊性状である。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ことが期待される。

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供与されるものである。これらの有益な知見は、将来的には建築基準法に基づく技術基準の改正等にも反映され、わが国の建築物の耐震性向上や耐震設計の合理化に寄与するものと考えられる。

参考文献・参考サイト：

- 5-1 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年7月
- 5-2 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年7月
- 5-3 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
- 5-4 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
- 5-5 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>