

8. 建築物の被害

8.1 建物の被害ならびに調査の概要

1994年1月17日のノースリッジ地震で得られた強震記録によると、各地でかなり大きな最大加速度が観測されている^{1)~5)}。地表面(free-field)で最も大きな加速度を記録したのは震源から南へ7kmの地点であるタルザナ(Tarzana)で水平1.82g、鉛直1.18gである。建物応答では、震源から北東へ15kmの距離にあるシルマー(Sylmar)の6階建て病院の頂部で水平加速度2.31gを記録したものが最大である。1994年のノースリッジ地震の規模は、1971年に同地近くで起こったサン・フェルナンド(San Fernando)地震($M_w=6.7$)とほぼ同じであるが、今回はその規模の割には震源近くにおいて、きわめて大きな被害を引き起こした。サン・フェルナンド・ヴァレイは現在120万人が住んでおり、ロサンジェルス市の1/3を越える人口をかかえている。今回の地震による死者は約60名、重傷者は1500人を越える。また主要な高速道路が数か所で落橋し、8万棟を越す建物が応急診断を受け、その約1/6が立ち入り禁止もしくは立ち入り制限の被害と判定された。またライフラインなどの都市施設にも多大な被害を受け、地震に伴う火災も発生した。しかし、ロサンジェルス市のダウンタウンや他の街区にある高層建物は、ある程度の揺れはあったものの大した被害は受けなかったとされている。この地震による建築物の被害は、耐震研究の先進国であるアメリカ合衆国の都市で起こったという点で、特に注目すべきものと考えられる。

今回のノースリッジ地震による建物被害は広い範囲にわたっており、また種々の構造タイプについて観察されている。建物被害の主たる特徴として、次の4点を挙げるができる。それは、(1)1階に駐車場スペースを有する2~3階建て木造住宅の下層部崩壊、(2)鉄筋コンクリート壁ないし鉄筋コンクリート柱のせん断破壊、(3)プレキャスト鉄筋コンクリート駐車場の床スラブないしはりの脱落による崩壊、(4)鉄骨造建物の柱-はり接合部の亀裂と破断、である。これらのうち、(1)の破壊形態は、先の1989年ロマ・プリエータ(Loma Prieta)地震の際に、サンフランシスコ市のマリーナ(Marina)地区などにおいて見られた木造アパートの被害と類似している。わが国においても、1978年宮城県沖地震で1層部分に大きな開口をもつ鉄筋コンクリート造の店舗あるいは店舗付き住宅で多くの被災経験をもつ。これらは、特に1981年に施行された日本の新しい建築基準法施行令(いわゆる新耐震設計法)において、架構の特定層に剛性のアンバランスを生じさせないという条項が取り入れられる直接の契機となったものである。(2)の破壊は特に鉄筋コンクリート建物の被害としては典型的なものであり、わが国や世界各国で多く見られてきたものである。今回も、主要構造壁や柱の平面的あるいは立体的な配置における構造上の不具合から、せん断耐力ならびに変形能力の弱点となることで被害を受けたものと見られる。これら(1)ならびに(2)の被害は、今回は、建設年代的には20年~30年以上前の古い建物ほど多く被害を受けている。しかし、(3)ないし(4)の被害は1980年~90

年代の比較的新しい年代のものに多く見られる。今回、大きな加速度記録が採られており、建物の設計レベルを越える大きな地震入力が作用した可能性は十分考えられる。またノースリッジ地区は、震源の直上にあり、非常に強い鉛直動が作用して、構造的な弱点を襲ったと説明される被害もある。また現行の設計規準と施工手順に則って建設されたと考えられる新しい建物に受けた被害は、設計・施工法そのものに問題を投げかけているようでもある。

筆者は土木学会調査団の団員として、震後約10日後の1月28日に現地に着し、2月5日まで調査のために滞在した。調査日程の前半の2月1日までは、主要な建築物と高速道路橋などの土木構造物の被害を中心に見て回った。2月1日に文部省科学研究費突発災害調査団ならびに日本建築学会調査団が現地到着し、調査日程の後半の2月2日から4日までは、日本建築学会を中心とするこれらの調査グループと同行し共同で、中破以上の建物被害の個別記録を取り、またサン・フェルナンド・ヴァレイの震源付近の2つの通りに沿った建物被災度の全数調査を行った^{9)~8)}。現場は個人所有の住宅とビルの被害がほとんどで、建物内に立ち入ることは基本的に大変困難であった。したがって、被害が軽微であったシルマーの病院と、2,3のショッピング・センターの内部を視察した以外は、内部状況は確認できていない。いずれにしても国外で起こった地震被害でもあり、調査方法や内容に限界があったことは否めない。また、地震被災直後の調査で情報も十分ではなかったため、当時、全体を把握することも無理であった。今後、被害の詳細と原因が明らかにされる可能性もあるが、一方で、逆に(国内でも同様であるが)、経営上の理由などから被害が隠されて表に出てこないことも考えられる。現時点でも新たには、あまり詳しい原因究明の報告は見られていない。しかし、我々の調査で、被害の概要はある程度押さえることができたと考えている。ここでは、直接、現地で見聞したことを中心に建物被害についてまとめる。

本報告の8.2節では、現地で視察した個別の建物外観状況と入手した資料とから、撮影した写真をまじえ被害の概要の説明を行う。続いて8.3節で、震源付近の沿道建物被害の分布状況に関する調査の結果をまとめている。8.4節では、設計法に関する考察を行い、最後に8.5節で、今回の被害による教訓と今後の課題をまとめている。なお、後日明らかとなってきた鋼構建造物の被害や、ロサンジェルス在住の日本人への地震被災に関するアンケートなど、現在も各学会や研究組織等による調査活動は続けられており、建物被害調査については日本建築学会で更に詳しい報告がまとめられる予定である。

8.2 建物被害事例

本節では顕著な被害のあった建物について、建物用途別あるいは構造別に概要を述べる。なお図8.2.1に震源近傍の高速道路網ならびに調査建物位置を示した。図中の数字は以下の説明文中の〔 〕付き番号と対応させている。建設年(代)は、O.E.S.(Office of Emergency Services)の発表によるものだが、必ずしも正確なものではなさそうであるので目安程度に考えていただきたい。

8.2.1 駐車場施設

一部崩壊または全体崩壊を生じた駐車場のうち、6件はプレキャストコンクリート構造であり、少なくともその3件にはプレキャスト床を接合するタイ(tie)がなかった。そのため耐震要素であるせん断壁にはほとんど損傷を受けないまま、駐車場自体は重大な被害を受けた場合がある。

カリフォルニア州立大学ノースリッジ校(California State University at Northridge)〔1〕の駐車場施設は、震源近傍に位置する3層プレキャストコンクリート構造で、1991年に建造された新しい構造物で

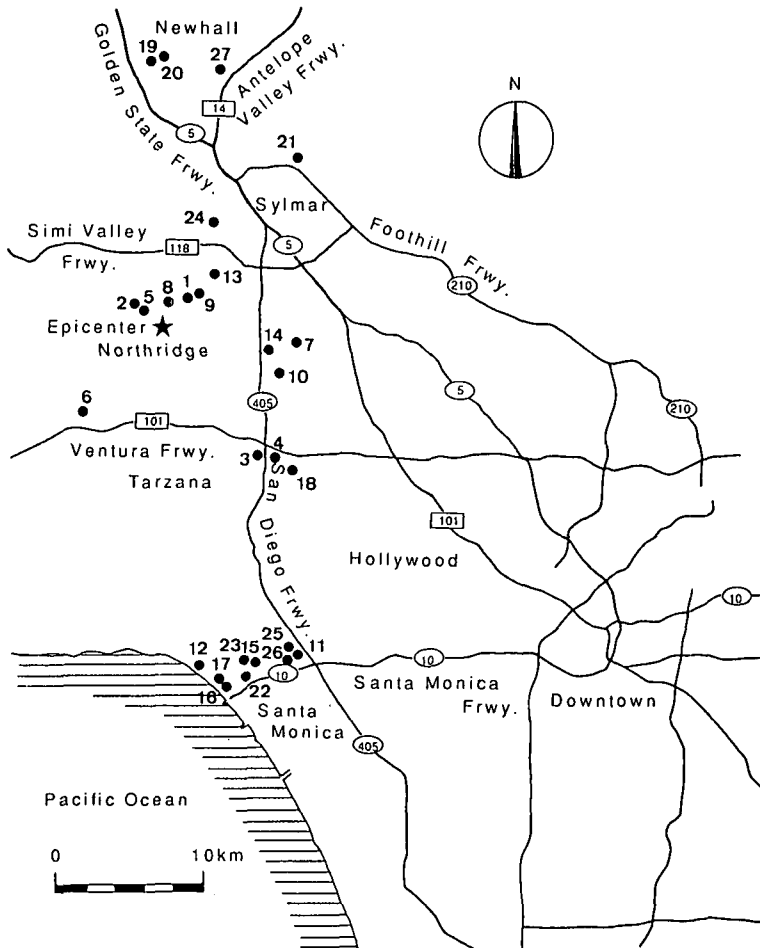


図8.2.1 震源ならびに被害調査建物の分布(黒丸は建物位置、数字は本文参照番号、実線は高速道路を表す。)

ある(写真 8.2.1). プレキャスト・ガーダーが架けられていた柱の持ち出し受け部(corbel)から落ち(写真 8.2.2), 全体崩壊を引き起こした. 外周は靱性骨組(ductile frame)と呼ばれる地震時水平力に抵抗できる構造となっているが, 内部は非靱性骨組(nonductile frame)で鉛直荷重に対してのみ設計されている. 外柱は内部スラブの崩壊で引っ張られて, 大きな湾曲変形を生じた(写真 8.2.3). 地震時水平力に抵抗する構造要素が不十分だったこと, ならびにはりと柱との接合方法に難点があったと見られる.

震源近傍のノースリッジ・ファッション・センター(Northridge Fashion Center) [2] と呼ばれるショッピング・センターの2層のプレキャストコンクリート造駐車場(写真 8.2.4 ; 1976年以降建造)ではプレキャストデッキがはりとともに柱から滑落した. 現場打ちの1層鉄筋コンクリート造柱にはスパイラル筋が密に巻かれており, 上下に曲げによるヒンジができ, 残留変形が出ているのが見受けられた(写真 8.2.5).

ラディソン・ホテルの駐車場施設(Raddison/Parking Structure) [3] は, 3層の鉄筋コンクリート造(写真 8.2.6)で, 1層でせん断圧縮破壊を生じていた内柱は帯筋間隔がかなり広がった(写真 8.2.7).

1層のプレキャストコンクリート造駐車場(Trans World Bank; 写真 8.2.8) [4] では, 外周柱がせん断破壊を生じ, 主筋が付着割裂破壊によって露出していた(写真 8.2.9). この柱は, 主筋が 32 mm 異形鉄筋で, 10 mm 径の横補強筋が柱の中央部で 30 cm 間隔で配されており, 軸力のみを負担する非靱性柱として設計されたものが地震時水平力を負担して破壊に到ったと考えられる. 内部柱は, 柱の両脇



写真 8.2.1 3層プレキャストコンクリート構造駐車場の側面 (California State University Northridge / Parking)

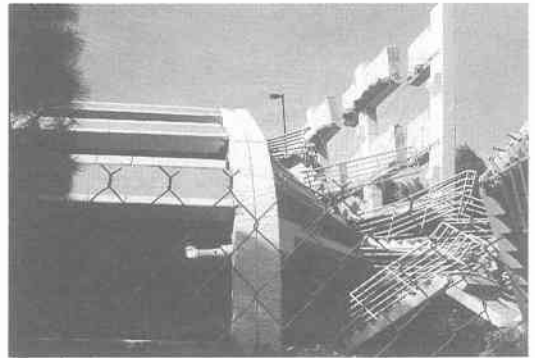


写真 8.2.2 外周ならびに階段室の崩壊 (写真 8.2.1 と同じ駐車場)



写真 8.2.3 外側柱の湾曲変形 (写真 8.2.1 と同じ駐車場)



写真 8.2.4 2層プレキャストコンクリート造駐車場の崩壊 (Northridge Fashion Center / Parking)



写真 8.2.5 鉄筋コンクリート造 1 層駐車場の柱の曲げ
ヒンジ形成 (Northridge Fashion Center / Parking)



写真 8.2.6 鉄筋コンクリート造 3 層駐車場
(Raddison / Parking)



写真 8.2.7 1 層内柱のせん断破壊
(写真 8.2.6 と同じ駐車場)



写真 8.2.8 プレキャストコンクリート造 1 層駐車場
(Trans World Bank)



写真 8.2.9 せん断破壊した外周柱と無被害の内柱
(写真 8.2.8 と同じ駐車場)

に相当な補強がなされており被害はほとんど見られなかった。

8.2.2 ショッピング・センター

ノースリッジ・ファッション・センターでは、4つのショッピング・センターがいずれも被害を受けていた。被害を受けた数棟の中でも最も崩壊の著しいのは鉄筋コンクリート造3階建てのデパート(Bullocks, 写真 8.2.10,11; 1972年頃建造) [5] で、ワッフルスラブの屋根と3階床が柱のパンチング・シアー(punching shear)によって落ち、大破した。またトパンガ・ファッション・モール(Topanga Fashion Mall)の3層鉄筋コンクリート造デパート(The Broadway; 写真 8.2.12,13) [6] は外周の耐震壁に地震

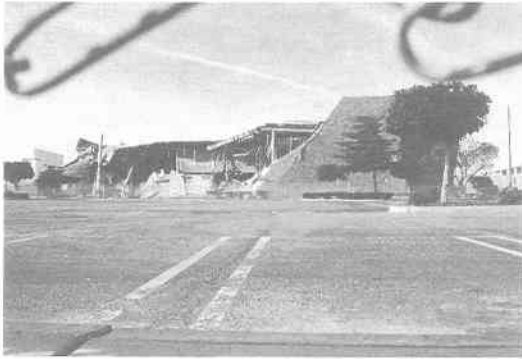


写真 8.2.10 鉄筋コンクリート造3階建てデパートの崩壊 (Bullocks)



写真 8.2.11 デパートの内部被害状況 (写真 8.2.10 と同じ建物)



写真 8.2.12 3層鉄筋コンクリート造デパート (The Broadway; Topanga Fashion Mall)

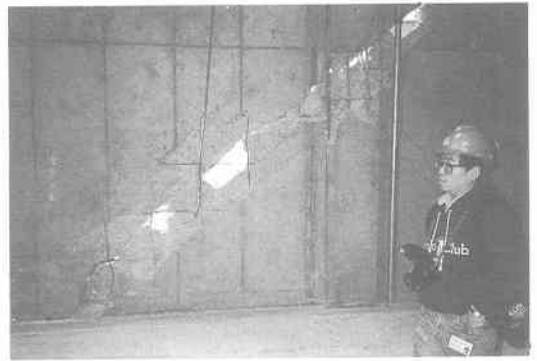


写真 8.2.13 デパート外側耐震壁のせん断破壊 (写真 8.2.12 と同じ建物)

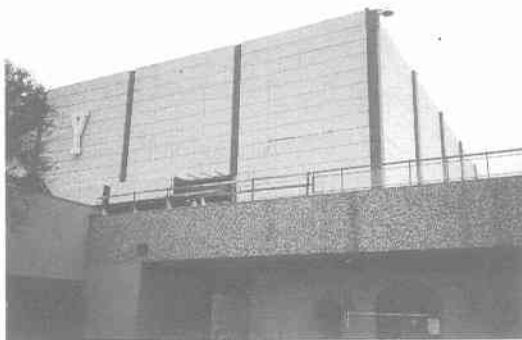


写真 8.2.14 2層鉄筋コンクリート造デパート (The Broadway; Panorama Mall)



写真 8.2.15 デパートの外壁と2階外柱の被害 (写真 8.2.14 と同じ建物)

時水平力を負担させ、内部柱は軸力のみを負担する非靱性柱として設計されていた。耐震壁は設計どおり地震力に抵抗したが、せん断破壊して、壁を貫通する大きな亀裂を生じた。壁厚は25 cm、壁筋は13 mm 径で45 cm 間隔にダブルで配されていた。パノラマ・モール(Panorama Mall)の2層鉄筋コンクリート造デパート(The Broadway; 写真 8.2.14-16) [7] においても外周の壁や柱に被害を受け、営業を停止していた。ここでも横補強筋などから靱性柱と非靱性柱を明確に区別した設計意図が見受けられるが、現実の地震時水平力負担の具合は設計どおりにいかなかったのではないかとも思われる。地震が午前4時半頃に発生したため、これらのショッピング・センターや駐車場における構造被害が人的被害につながらなかったのは、まことに不幸中の幸いであった。

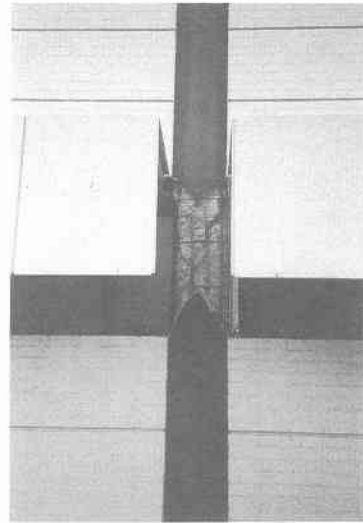


写真 8.2.16 デパートの2階外柱の被害
(写真 8.2.14 と同じ建物)

8.2.3 木造住宅

震源の直上に位置する十数棟の2階～3階建ての木造アパート群(Northridge Meadows, 写真 8.2.17,18; 1965-75年建造) [8] では約180名の住人が避難したが、16名の死者が出た。今回被害の多かった2～4層アパートの構造形式は、1階部分を駐車場としているものが多く、これらの中には上部を木造の住宅としながら1階部分を鉄骨造や鉄筋コンクリート造としている場合もある(写真 8.2.19,20) [9,10]。被害を受けたものはいずれも壁などの水平抵抗要素の少ない脆弱な1階(soft first story)をもつ構造形態による典型的な崩壊性状を示す。これらに比べると、地震による被害は、煉瓦造の煙突や無筋の組積造の塀の被害を除いて、他の平屋の木造住宅ではそれほど多くはなかったと考えられる。

一方1920-1930年代からの古い形式の木造住宅(写真 8.2.21) [11] では、クリップル・ウォール(cripple wall あるいは pony wall; 写真 8.2.22) と称される基礎から1階床までの間の壁部分における典型的なせん断ずれ破壊が多い。この部分を合板で釘打ちし補強すれば被害軽減に非常に効果のあることもよく



写真 8.2.17 3階建ての木造アパートの被害
(Northridge Meadows)



写真 8.2.18 3階建ての木造アパートの被害
(Northridge Meadows)

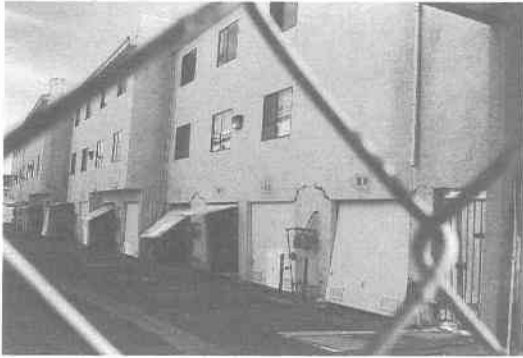


写真 8.2.19 3階建てアパートの脆弱な1層の被害

写真 8.2.20 3階建てアパートの脆弱な1層の被害
(1層鉄筋コンクリート造, 2~3層木造)

写真 8.2.21 木造住宅被害

写真 8.2.22 木造住宅のクリップル・ウォール被害
(写真 8.2.21 と同じ建物)写真 8.2.23 サンタ・モニカの崖崩れ
(Pacific Palisades)写真 8.2.24 サンタ・モニカの崖崩れ
(Pacific Palisades)

知られており、1971年サン・フェルナンド地震以降で耐震補強対策として推奨されている。

震源北部のニューホール(Newhall)の木造住宅においても中破程度の被害はかなり見られた。サンタ・モニカの崖沿い(Pacific Palisades; 写真 8.2.23,24) [12] のいくつかの高級住宅が崖崩れに伴う被害を受けた。これらは地盤自体の崩壊によって家屋が損壊した例である。

8.2.4 鉄筋コンクリート造建物

鉄筋コンクリート系建物の被害形態は、(1) 1970 年以前に建設された非靱性構造物の被害、(2) 短柱破壊によるもの、(3) 接合部破壊によるもの、(4) 床スラブへの柱のパンチング・シアー(punching shear)によるものなどが挙げられる。

鉄筋コンクリート造 5 階建ての病院診療施設(Keiser Permanente ; 写真 8.2.25 ; 1970 年代建造) [13] は、2 階部分がパンケーキ状に鉛直方向に落階して崩れた。また建物両側部分の壁構造もそれぞれ崩壊した。現場の骨組の状況からは、柱もはりも部材としては比較的健全で、柱-はり接合部のせん断補強が不十分なため、接合部が弱点となって崩れたように見受けられた(写真 8.2.26)。

鉄筋コンクリート造 7 階建てのホテル(Holiday Inn ; 写真 8.2.27 ; 1971 年以前建造) [14] は、震源から 6 km 東に位置し、最大加速度が、基礎部で水平 0.47 g、屋階で 0.59 g を記録した。南面の 4 階部分の柱がほぼ全部、短柱のせん断破壊の様相を示している(写真 8.2.28)。この建物は 1971 年のサン・フェルナンド地震以前の建設で、その地震の際は非構造部材の損傷を受けたと説明されている。



写真 8.2.25 鉄筋コンクリート造 5 階建て診療施設の被害
(Keiser Permanente)



写真 8.2.26 5 階建て診療施設の妻壁部分の被害詳細
(写真 8.2.25 と同じ建物)



写真 8.2.27 鉄筋コンクリート造 7 階建てホテル
(Holiday Inn)



写真 8.2.28 ホテル南面 4 階部分の柱のせん断破壊
(写真 8.2.27 と同じ建物)

サンタ・モニカ通り(Santa Monica Blvd.)沿いに位置する医療センター(Saint John's Medical Center)はいくつかの建物が大小の被害を受けた。それらの中で最も大きな被害が見られたのは、鉄筋コンクリート造7階建ての病院施設(写真 8.2.29) [15] である。建設年代は古いらしく、1950年代とも報告されている。2階部分の柱を含む窓間壁に典型的なせん断破壊を生じた(写真 8.2.30)。

サンタ・モニカの海岸に面した10~15mの高台に位置する鉄筋コンクリート造16階建ての共同住宅(Champagne Towers; 写真 8.2.31) [16] は、海岸に面する側の柱には特に顕著な被害は認められなかったが、その反対側では中層以下の階の柱にX形の典型的なせん断破壊を生じた(写真 8.2.32)。これはバルコニーの腰壁が柱に取り付いているせいで、海岸側に比べ、せん断スパン比が小さくなり、短柱化したための破壊と考えられる。また南北側面は連層壁となっており、連層壁をつなぐ短いはり(coupling beams)にも典型的なせん断破壊を生じていた(写真 8.2.33)。北隣にある22階建てのビル(Wilshire Building) [17] の下層部の柱や壁にも亀裂剥落の被害が見られた(写真 8.2.34,35)。この建物は基礎部の土が掘り返されており、パイプの破損等があったのかもしれないが、被害状況は明らかで



写真 8.2.29 鉄筋コンクリート造7階建て病院
(Saint John's Medical Center)

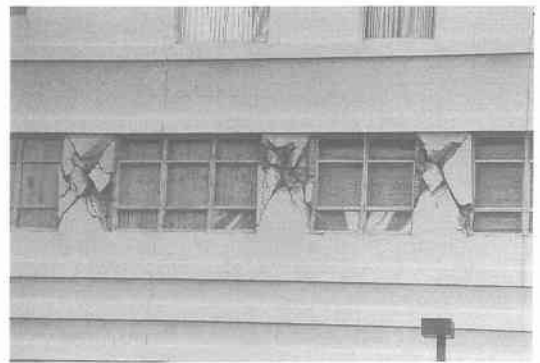


写真 8.2.30 2階窓間壁のせん断破壊
(写真 8.2.29 と同じ建物)



写真 8.2.31 鉄筋コンクリート造16階建て共同住宅
(Champagne Towers)



写真 8.2.32 中層以下の階の柱のせん断破壊
(写真 8.2.31 と同じ建物)



写真 8.2.33 連層壁をつなぐ短いはりのせん断破壊
(写真 8.2.31 と同じ建物)



写真 8.2.34 22 階建てのビル(Wilshire Building)
と Champagne Towers (手前)



写真 8.2.35 高層ビル下層部の柱・壁の亀裂剥落
(写真 8.2.34 の奥の建物)



写真 8.2.36 13 層鉄筋コンクリート造銀行
(First Interstate Bank) の亀裂状況

はない。

13 層鉄筋コンクリート造の銀行(First Interstate Bank; 写真 8.2.36) [18] では、側壁下部を中心に曲げならびにせん断亀裂を数多く生じていた。このビルでは、地震時に基礎で 0.46 G, 屋階で 0.90 G の最大水平加速度を記録していた。

8.2.5 鉄骨造建物

当初、鉄骨造建物には被害がほとんど報告されていなかった。鉄骨造建物が崩壊したという情報は少なくとも今もない。しかし内外装を取り外して調べられた中で、部材の局部座屈箇所、柱脚や柱一はり接合部の溶接部周りで、破断が発見されたり、亀裂の発生がかなり厳しい状況であることがわか

り、相当深刻な問題となっている。鉄骨造建物の被害は少しずつ報告されてきているが、実態はまだよくつかめていない。報告⁹⁾によると、地震後5か月を経た時点でも、情報が錯綜している状況が続き、例えば、鉄骨造建物の被害件数についても人によって数字が違うようである。日本建築学会大会のパネルディスカッション「1994年ノースリッジ地震」(1994年9月11日)における口頭報告では、7月段階で90~100棟に亀裂被害があったと示されていた。

筆者が現地で視察した鉄骨造建物は3件である。震源から北へ20km離れたニューホールの地表面において、水平0.63g、鉛直0.62gの最大加速度が記録されている。ニューホールにあるサンタ・クラリタ(Santa Clarita)市役所(写真8.2.37) [19]は3階建ての鉄骨造建物で、我々の調査時にも外壁の柱一はり接合部あたりが剥がされていた(写真8.2.38)が、フランジを貫通するような大きな亀裂が発見されたようである。すぐ近くに建つ鉄骨造の2階建ての建物(AAA/Auto Club; 写真8.2.39) [20]は、1層部が各構面で傾斜し、残留変形を生じていた(写真8.2.40)。またシルマーにあるオリーブ・ビュー医療センター(Olive View Medical Center: 写真8.2.41) [21]は、1971年の地震で大被害を受けた



写真 8.2.37 3階建ての鉄骨造サンタ・クラリタ市役所



写真 8.2.38 外壁の柱一はり接合部補修検査状況
(写真 8.2.37 と同じ建物)



写真 8.2.39 鉄骨造2階建ての1層破壊
(AAA / Auto Club)



写真 8.2.40 1階柱の水平残留変形
(写真 8.2.39 と同じ建物)



写真 8.2.41 鉄骨造 6 階建て病院の外観
(Olive View Medical Center)



写真 8.2.42 スプリンクラーと天井との間で破損
(写真 8.2.41 と同じ建物)



写真 8.2.43 病院下階での資料棚からの散乱状況
(写真 8.2.41 と同じ建物)

鉄筋コンクリート造病院を取り壊し、鉄骨造 6 階建てに再建したものである。観測された最大加速度は、地表面で水平 0.91 g、鉛直 0.60 g と大きく、屋階部では水平 2.31 g を記録した。それにもかかわらず構造的には無被害であったが、スプリンクラーが天井との間で破損を生じ(写真 8.2.42)、6 階から下の全階を水浸しにしたり、ダクトに損傷を受けるなどの施設被害を生じ(写真 8.2.43)、入院患者らはよそへ避難した。

先の報告⁹⁾によると鉄骨造建物被害の概要は次のとおりである。

(1) 鉄骨建物の被害は、ロサンゼルス市からサン・フェルナンド・ヴァレイ地区にわたって広く報告されており、局所的な被害ではない。

(2) 筋かい材の座屈と破断、筋かい端部ガセットプレートの座屈と溶接部での破断、柱一はり接合部の亀裂と破断などが被害形態として挙げられるが、その中で柱一はり接合部の亀裂と破断が圧倒的に多く、したがって大きな問題となっている。接合形式は、はりフランジ部を柱フランジに突き合わせ溶接し、一方、はりウェブは柱フランジに溶接されたシェアプレートと、高力ボルト接合するというのが、最も一般的である。

(3) 被害を受けた筋かい材は、いずれも冷間成形角型鋼管である。この種の鋼管を、座屈を伴う筋かい材に用いることが不適切であることは、米国でもすでに認識されていた。

(4) 被害を受けた建物の多くは最近の 10 年以内に建設されたものであり、その中には新築や建設

中の建物も含まれている。

(5) 5層以下の低層鉄骨建物に被害が多く、この場合、柱一はり接合部被害は低層部に多い。中層建物に被害が見られる場合は、中層部から高層部の柱一はり接合部に被害が顕著である。

以上のように、最も多く、大きな問題となっているのは、柱一はり接合部の亀裂と破断である。その柱一はり接合部の破断形態はいくつかに分かれるが、最も多いのが、はりフランジ部を柱フランジに突き合わせ溶接した溶接ルート部から亀裂が始まり、溶接部と柱フランジの界面に沿って進展する被害である。また破断のほとんどがはり下フランジに生じたことが特徴的であるとされている。現在、日本からも日本建築学会鋼構造運営委員会ならびに日本鋼構造協会で、原因究明ならびに補修法の調査が進められている。

また鉄骨建物の被害の状況がなかなか表面化しなかった主な理由として、同報告では

- (1) 鉄骨は地震に強いという先入観にとらわれ、内装材の破損や建物の残留たわみを鉄骨躯体の被害と結びつけにくかったこと。
- (2) 外装材や内装材などの非構造部材の多くは、地震直後軽微な被害を受けたに過ぎなかったこと。
- (3) 鉄骨躯体は耐火被覆に覆われ、また各種非構造部材によって隠蔽されているので、躯体被害を観察することが難しいこと。
- (4) 建物のオーナーは経営上の理由などから、被害を隠し密かに補修してしまおうという意識が働いたこと。

と説明されている。

いずれにしても、このように見つけにくかった鉄骨被害が、現時点では、今回の建物被害の最も深刻なものとして捉えられているようである。米国における設計法の合理化は、先ほどのプレキャスト構造駐車場や鉄骨造建物の被害のように、結果として架構の不静定次数を減少させ、靱性（余力・塑性変形能力）の欠如をもたらせるに到ったとも考えられる。設計の合理化は、わが国におけるコンピュータによる設計作業においても、重ね合わせて考慮すべき問題点を含むと見て良い。また現場溶接技術ならびに管理の信頼性の問題は、わが国においても課題とするべきと考える。

8.2.6 組積造構造物

サンタ・モニカ通り沿いでは比較的古いと見られる煉瓦造建物に相当な被害が出ていた。それらの中では無補強煉瓦造(URM; Un-Reinforced Masonry)だけでなく、耐震補強を施した煉瓦造建物(写真 8.2.44) [22] においても外壁や屋根部の被害が散見された。ハリウッド通り(Hollywood Blvd.)や10号フリーウェイ沿いの南側のカルヴァーシティ(Culver City)辺りなどでも同様の古い煉瓦造建物の被害が多く見られた。



写真 8.2.44 サンタ・モニカ通り沿いの耐震補強された煉瓦造建物の被害



写真 8.2.45 鉄筋コンクリート補強された煉瓦造建物
(Saint John's Medical Center)



写真 8.2.46 補強煉瓦造建物の壁被害
(写真 8.2.45 と同じ建物)

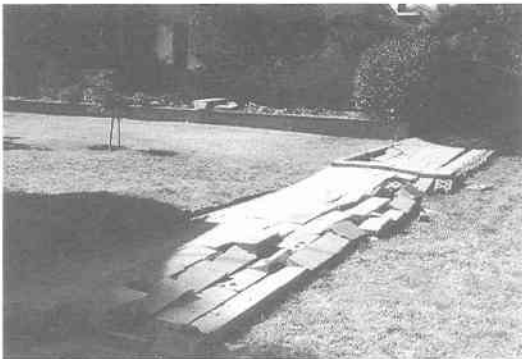


写真 8.2.47 無筋コンクリートブロック造塀の倒壊 写真 8.2.48 鉄筋のあるコンクリートブロック造塀の倒壊

ロサンゼルス市には 6 400 棟の無補強煉瓦造があり、そのうち約 6 000 棟がすでに耐震補強されているとの報告がある。補強されたものの耐震性能は、耐震補強されていないものに比べてかなり良く、顕著な差が出たようである。震源から西へ 25 km 離れたフィルモア(Fillmore)では、大半が耐震補強されていない無補強煉瓦造で、被害率がかなり高かったようである。補強されたものでも、パラペットや壁には損傷を受けている多くの例がある。サンタ・モニカにある医療センターの病院関連施設のうちの 1 棟で、5 階建ての鉄筋コンクリートで補強された煉瓦造建物(写真 8.2.45,46) [23] が、壁および壁柱部分に中破程度の被害が見られたが、崩壊には至っていない。

住宅の周りには、コンクリートブロックや煉瓦を用いた組積造の塀が意外と多く、また震源域のサン・フェルナンド・ヴァレイでは相当数が、一部または全体倒壊した(写真 8.2.47) [24]。倒壊したものを観察すると、鉄筋のないものが多く、鉄筋のあった場合でも縦筋が 80 cm~1 m くらいの広い間隔で入っている。また縦筋が設けられていても横筋が架けられていないため、塀が部分崩壊しているものが見られた(写真 8.2.48)。控え壁のあるものは比較的倒壊を免れていたように見受けられた。

8.2.7 免震構造建物

ロサンゼルスには、5件の免震構造建物があると報告されている。これらはいずれも震源域近くにはなかったが、近年、実施設計されてきたいくつかの免震構造建物については地震による揺れを記録している。構造ならびに今回の地震応答の詳細については日本建築学会の報告を見られたい。筆者が見たサンタ・モニカにある鉄骨造3階建ての免震構造住宅(写真8.2.49,50) [25] では、2棟が隣合って建てられており、構造上は特に損傷はなかったが、内部の床などに被害があった様子である。この建物は表玄関に、免震構造であることが記されているが、その構造そのものは十分な機能を有していないとの指摘もある。この建物の近くで鉄筋コンクリート造6階建てビルが柱のせん断破壊による大被害を受けて撤去されていた(写真8.2.51) [26]。



写真 8.2.49 鉄骨造3階建て免震構造住宅



写真 8.2.50 免震構造住宅玄関部
(写真8.2.49と同じ建物)



写真 8.2.51 撤去された鉄筋コンクリート造6階建てビル跡

8.2.8 その他構造物

モービル・ホーム(mobile homeあるいは trailer house)と称される住宅(写真8.2.52,53) [27] には、基



写真 8.2.52 モービル・ホームの被害

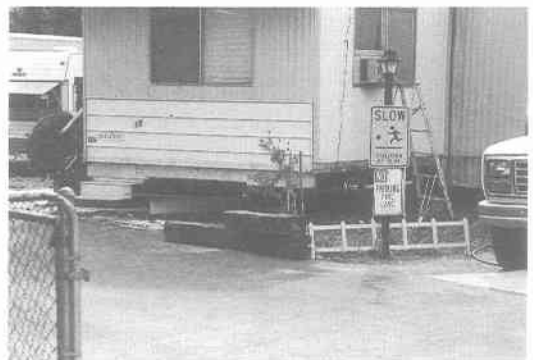


写真 8.2.53 モービル・ホームの被害
(写真8.2.52と同じ建物)

本的に水平力に対する抵抗要素が欠けている。安いため、一時的な住居として使用されるこれらの住宅は、床下部分の破損や水平移動などの被害も多そうであった。またシルマー地区ではこれらの住居群施設に、ガス引き込み管の破損による火災が発生し、延焼があった。

公立の小中学校建築には崩壊したものはなく、構造被害も大したものはなく、被害の多くは非構造材にあったようである。

8.3 震源付近の建物被害分布調査

8.3.1 調査方法

震源に近く被害が最も大きかったノースリッジ地区を南北に抜ける2つの通りについて建物全戸調査を行った。この調査は、日本建築学会ノースリッジ地震被害調査団(団長：南忠夫(東京大学教授))のメンバー、ならびに文部省科学研究費による同地震の調査研究班(研究代表者：大町達夫(東京工業大学教授))で建物被害を担当した芳村学助教授(東京都立大学)との共同作業によるものである。本節では調査の概要と結果を示し、震源域を中心とした、建物被害の分布状況を検討する。

ロサンゼルス市の建築安全局(Building and Safety Department)では、建物の地震後安全性の評価マニュアルATC(Applied Technology Council)-20¹⁰⁾に基づく応急被災度判定に迅速な対応を取っている。このATC-20マニュアルの作成は、1987年から進められたが、1989年10月18日に発生したロマ・プリエータ地震の直後では、きわめて有効に機能したことは記憶に新しい。建物の診断は建物の所有者からの依頼("Request")による方式と、被害の多い地域一帯を全戸調査("Sweep")する方式の2通りの方法で実施される。建物安全性の判定評価は、赤・黄・緑の3色のプラカードを各々の建物に貼付することで示される。ここで、赤色は"危険"(Unsafe = 立ち入り禁止)を、黄色は"立ち入り制限"(Limited Entry)を、緑色は"診断済み"(Inspected)で一応は安全に中に入れることを、それぞれ意味する。1994年2月23日付けでまとめられた集計では、ロサンゼルス全域で8万3097棟が診断を受けている。診断結果は、データ不十分で判定のなかった1万2617件を除く7万480件のうち、赤色が2486棟(3.5%)、黄色が9301棟(13.2%)、緑色が5万8693棟(83.3%)となっている。

ここでは、震源を中心とするサン・フェルナンド・ヴァレイの盆地上における建物被害分布から、地震動の地域性の有無、振動による建物の応答・被害性状の差異などを把握するための基礎資料を揃える目的で、震後2週間余り経った2月初めに、震源付近のノースリッジ地区を南北に走る2本の通りについて行った独自の建物全数調査の結果を報告する。このあたりは住宅地域であること、ならびに我々調査団が多数の建物内部調査を行うことが実質的に不可能であることにより、調査は外観から判定できる項目を選び、日本建築学会調査団メンバーの2名が1組で、通りの片側にある建物を、原則として徒歩により全戸チェックしたものである。調査の対象に選んだ通りは、レシーダ通り(Reseda Blvd.)の東側とバルボア通り(Balboa Blvd.)の西側である。前者は、3階建て木造アパートの倒壊で死者の出たノースリッジ・メドウズの対面側を含む通りである。後者はサン・フェルナンド・ヴァレイの北方でガスや水道などのライフラインの破壊を生じ、フリーウェイの落橋が生じた場所に近い通りであり、当該調査箇所には5階建て鉄筋コンクリート造で2階部分が大破したカイザー診療施設を含む。調査範囲は、北は118号シミ・ヴァレイ・フリーウェイ(Simi Valley Freeway)から、南はヴェンチ

ユラ通り(Ventura Blvd.)に至るまでのおよそ 12~13 km である。これを図 8.3.1 に示すようにほぼ 800 m 程度に等間隔で区切られた東西方向に走る通りで、16 のブロックに分割し、各データを処理した。調査した建物数は、レシーダ通り 279 件、バルボア通り 231 件の、合計 510 件である。

8.3.2 調査項目

調査で記入した項目は以下のとおりである。

- (A) 通り名 [1. Reseda, 2. Balboa]
- (B) ブロック番号 [北から 1~16]
- (C) 番地 [番号をそのまま入力]
- (D) 構造種別 [1. RC (鉄筋コンクリート造), 2. W (木造), 3. CB (コンクリートブロック造・組積造), 4. S (鉄骨造), 5. W/CB (木造あるいはコンクリートブロック造・組積造のどちらか), 6. その他]
- (E) 構造形式 [1. ラーメン, 2. 壁式, 3. ラーメンあるいは壁式, 4. 不明]
- (F) 用途別 [1. 住宅, 2. 商店, 3. 事務所, 4. 工場, 5. その他]
- (G) 階数 [1. 1階建て, 2. 2階建て, 3. 3階建て, n. n階建て]
- (H) 外観による被害状況 [1. 無被害(None), 2. 小破(Slight), 3. 中破(Moderate), 4. 大破(Severe; 崩壊含む), 5. 不明]
- (I) 屋根被害 [1. 無し, 2. 有り, 3. 不明]
- (J) 煙突の有無 [1. 煙突無し, 2. 煙突有り]
- (K) 煙突被害 [1. 無し, 2. 有り]
- (L) 3階壁被害 [1. 無し, 2. 有り]
- (M) 3階窓ガラス被害 [1. 無し, 2. 有り]
- (N) 2階壁被害 [1. 無し, 2. 有り]
- (O) 2階窓ガラス被害 [1. 無し, 2. 有り]
- (P) 1階壁被害 [1. 無し, 2. 有り]
- (Q) 1階窓ガラス・出入口被害 [1. 無し, 2. 有り]
- (R) 基礎被害 [1. 無し, 2. 有り]
- (S) 塀の有無 [1. 塀無し, 2. 塀有り, 3. 不明]
- (T) 塀被害 [1. 無し, 2. 有り]

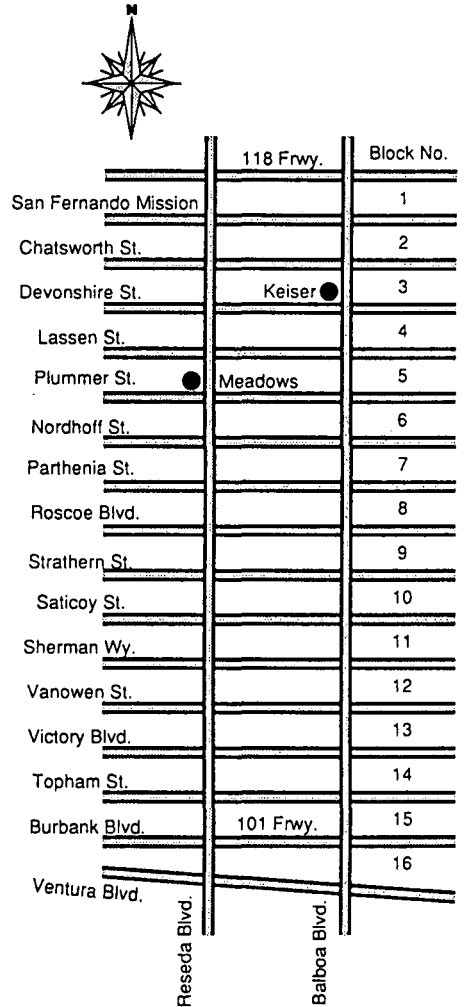


図 8.3.1 建物全数調査地域とブロック番号の定義

(U) 塀構造種別 [1. コンクリートブロック塀, 2. 煉瓦塀, 3. その他]

(V) 鉄筋の有無 [1. 鉄筋無し, 2. 鉄筋有り, 3. 不明]

(W) 被災度診断結果 [1. 診断せず, 2. 緑 (診断済み), 3. 黄 (制限), 4. 赤 (危険)]

調査は建物単位とし、5～10 軒が同一建物に並ぶ集合住宅・店舗建物も 1 件として、被害率などを算定した。調査員の個々の判断に若干の差異が出るのが考えられたため、破壊状況はあまり細かく分けずに「大破」・「中破」・「小破」の 3 段階とした。「大破」には崩壊も含む。「小破」には軽微なものを含めるが、外的に損傷の認められない「無被害」と区別するものとした。

8.3.3 調査建物の構造特性分類

全調査建物の構造ならびに階数種別による集計結果を表 8.3.1 に示す。調査建物の全体では、木造平屋が全 510 棟中 251 棟(49%)と約半数を占めている。調査建物構造別の比率では、木造が 67%、コンクリートブロック造・組積造 (CB) が 11%、木造あるいはコンクリートブロック造・組積造のどちらか不明なもの (W/CB) が 11%で、これらを併せるとおよそ 9 割となる。鉄筋コンクリート造 (RC) と鉄骨造 (S) はそれぞれ 5%、3%程度とわずかである。また建物階数別では、平屋が全体の 74%を占め、2 階建てが 19%、3 階建てが 6%となっている。通り別詳細を表 8.3.2 に示す。レシーダ通りでは木造 56%、コンクリートブロック造・組積造 17%、木造かコンクリートブロック造・組積造のどちらか不明なもの 19%で、これらを併せると 92%に達する。レシーダ通りの建物の階数内訳では、平屋建物が 72%、2 階建てが 20%、3 階建てが 7% (17 棟) で、4 階建ては 1 棟あるのみである。鉄骨造は 10 棟、鉄筋コンクリート造は 6 棟でわずか 2%となる。一方、バルボア通りでは木造 80%、コンクリートブロック造・組積造 3%で、鉄筋コンクリート造が 21 棟で 9%である。木造かコンクリートブロック造・組積造のどちらかに含まれる建物の中では、平屋が 80%、2 階建てが 19%、3 階建てが 3 棟あるのみである。

データの分析のため便宜上分けた 16 のブロックごとで、木造とコンクリートブロック造・組積造ならびにそれらのどちらかに属する建物の階数の、各通りに沿った分布は、図 8.3.2 のようになる。特に傾向が現れているわけではないが、平屋、2 階建て、3 階建てがそれぞれあるブロックに集中して建てられていることがわかる。

建物用途を全調査建物について構造別に示すと、表 8.3.3 のようになっている。建物用途は、通りごとで傾向が異なっている。レシーダ通りでは、商用が多く 48%、住宅 36%、事務所 9%である。バルボア通りでは、住宅が 72%と圧倒的に多く、商用が 17%、事務所が 2%となっている。

表 8.3.1 調査建物の構造・階数別内訳

	1-story	2-story	3-story	4-story	5-story	Total	
W	251	70	20	1	0	342	67.1 %
CB	47	7	0	0	0	54	10.6 %
W/CB	43	11	0	0	0	54	10.6 %
RC	9	7	7	2	2	27	5.3 %
S	14	1	2	0	0	17	3.3 %
Others	6	1	0	0	0	7	1.4 %
Not clear	9	0	0	0	0	9	1.8 %
Total	379	97	29	3	2	510	100.0 %
	74.3 %	19.0 %	5.7 %	0.6 %	0.4 %	100.0 %	

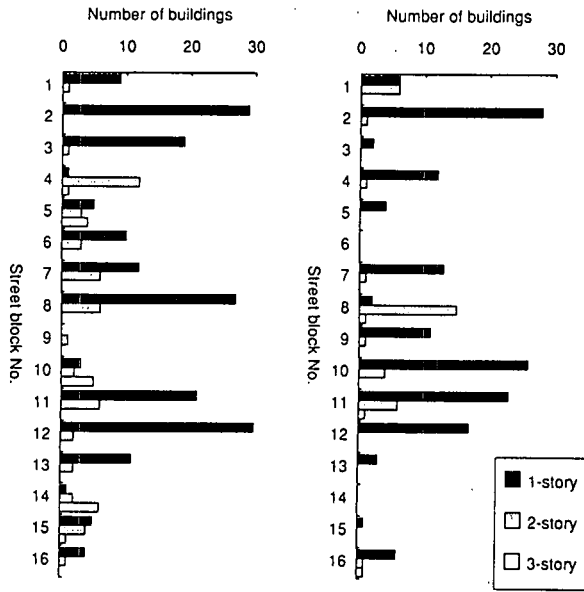
表 8.3.2 ブロックごとの調査建物の構造・階数別内訳

(a) レシードダ通り

Block	W			CB			W/CB			RC			S			Others			Total			
	1-story	2-story	3-story	4-story	1-story	2-story	Subtotal	1-story	2-story	Subtotal	1-story	2-story	5-story	Subtotal	1-story	2-story	3-story	Subtotal		1-story	2-story	Subtotal
1	9	1	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
2	29	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29
3	15	1	0	0	16	4	0	4	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	21
4	0	12	1	0	13	1	0	1	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	16
5	5	3	4	0	12	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	13
6	8	2	0	0	10	2	1	3	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	14
7	10	5	0	0	15	2	1	3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	1	1	2	22
8	1	0	0	0	1	17	1	18	9	5	14	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	34
9	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	3
10	0	2	5	1	8	2	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
11	0	0	0	0	0	7	3	10	14	3	17	0	0	0	2	0	0	2	2	0	2	31
12	10	0	0	0	10	6	0	6	14	2	16	0	0	0	3	0	0	3	1	0	1	36
13	7	2	0	0	9	0	0	0	4	0	4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	14
14	0	2	6	0	8	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
15	5	4	1	0	10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	11
16	4	0	0	0	4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Total	103	35	17	1	156	42	6	48	42	11	53	3	2	1	6	8	1	1	10	5	1	279
	36.9%	12.5%	6.1%	0.4%	55.9%	15.1%	2.2%	17.2%	15.1%	3.9%	19.0%	1.1%	0.7%	0.4%	2.2%	2.9%	0.4%	3.6%	1.8%	0.4%	2.2%	100.0%

(b) ハルボア通り

Block	W			CB			W/CB			RC			S			Others Unknown			Total			
	1-story	2-story	3-story	1-story	2-story	Subtotal	1-story	2-story	Subtotal	1-story	2-story	3-story	4-story	5-story	Subtotal	1-story	3-story	Subtotal		1-story	1-story	Subtotal
1	6	6	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	14
2	28	1	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29
3	2	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	3	1	1	2	0	0	0	7
4	10	1	0	11	2	0	0	2	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	4	0	20
5	4	0	0	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	7
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
7	13	1	0	14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	16
8	2	15	1	18	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	2	2	22
9	11	1	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	13
10	26	4	0	30	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	31
11	23	6	1	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
12	16	0	0	16	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	18
13	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2
15	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
16	4	0	1	5	1	1	1	2	1	2	2	5	0	0	9	0	0	0	0	0	0	17
Total	148	35	3	186	5	1	6	1	6	5	7	2	1	21	6	1	7	1	9	1	9	231
	64.1%	15.2%	1.3%	80.5%	2.2%	0.4%	2.6%	0.4%	2.6%	2.2%	3.0%	0.9%	0.4%	9.1%	2.6%	0.4%	3.0%	0.4%	3.9%	0.4%	3.9%	100.0%



(a) レシーダ通り

(b) バルボア通り

図 8.3.2 ブロック別の建物階数分布

表 8.3.3 調査建物の構造・用途別内訳

(a) 全建物集計

	Residential	Commercial	Office	Factory	Others	Total	
W	253	72	9	0	8	342	67.1 %
CB	6	28	6	7	7	54	10.6 %
W/CB	0	43	8	0	3	54	10.6 %
RC	6	9	5	0	7	27	5.3 %
S	0	13	2	0	2	17	3.3 %
Others	0	5	0	2	0	7	1.4 %
Not clear	0	5	0	3	1	9	1.8 %
Total	265	175	30	12	28	510	100.0 %
	52.0 %	34.3 %	5.9 %	2.4 %	5.5 %		100.0 %

(b) レシーダ通り

	Residential	Commercial	Office	Factory	Others	Total	
W	95	53	8	0	0	156	55.9 %
CB	4	25	6	7	6	48	17.2 %
W/CB	0	43	8	0	2	53	19.0 %
RC	0	2	2	0	2	6	2.2 %
S	0	8	1	0	1	10	3.6 %
Others	0	4	0	2	0	6	2.2 %
Total	99	135	25	9	11	279	100.0 %
	35.5 %	48.4 %	9.0 %	3.2 %	3.9 %		100.0 %

(c) バルボア通り

	Residential	Commercial	Office	Factory	Others	Not clear	Total	
W	158	19	1	0	8	0	186	80.5 %
CB	2	3	0	0	1	0	6	2.6 %
W/CB	0	0	0	0	1	0	1	0.4 %
RC	6	7	3	0	5	0	21	9.1 %
S	0	5	1	0	1	0	7	3.0 %
Others	0	1	0	0	0	0	1	0.4 %
Not clear	0	5	0	3	0	1	9	3.9 %
Total	166	40	5	3	16	1	231	100.0 %
	71.9 %	17.3 %	2.2 %	1.3 %	6.9 %	0.4 %		100.0 %

8.3.4 被害状況分析結果

通りごとの被害状況について調べると、外観調査による被害は、図 8.3.3、表 8.3.4 のように分布している。レシーダ通りの場合、大破 1.4%、中破 3%、小破 43%で、約 48%に何らかの被害があった。バルボア通りでは、大破 0.9%、中破 2%、小破 30%で、被害を認めたのはやや少なく約 33%となっている。一方、建物の地震後応急危険度診断の結果は、図 8.3.4、表 8.3.5 のように分布している。レシーダ通りでは全体の 33%に当たる 91 件が診断を受けていた。判定の結果の内訳は全調査建物に対して赤 2%、黄 7%、緑 24%である。これらを診断を受けた 91 件の中での被災度判定の比率で求めると、赤 7%、黄 20%、緑 74%となり、ロサンジェルス市の 2 月 23 日時点での全体集計結果（赤 4%、黄 13%、緑 83%）と比べると、被害はやや厳しい方に高く出ていることがわかる。バルボア通りでは、診断結果による被害率は建物全体について赤 0.9%、黄 1.3%、緑 9.5%で、診断を受けた建物数は 27 件（11%）とレシーダ通りに比べかなり少ない。バルボア通りで被災度診断を受けた中での比率は、赤 7%、黄 11%、緑 82%となっている。

通りの南北方向の被害分布は、レシーダ通りとバルボア通りで様子が異なっており、共通する明らかな特徴は特に見られない。レシーダ通りでは、第 5 ブロックに大きな被害が集中している。ここは通りをはさんだ向かい側が、16 人の死者を出した木造アパート群のある地域である。建物外観状況から中破以上の被害が見られたのは、第 5 ブロックから第 12 ブロックでちょうどサン・フェルナンド・ヴァレイのまん中辺りとなっており、被災度診断結果も同様の傾向を示している。バルボア通りについては、第 6 ブロックと、第 13～第 15 ブロックの間はほとんど建物がないため、この間のデータを無視する必要があるが、被害は北側ブロックにやや多い。第 3 ブロックは、鉄筋コンクリート造 5 階建ての 2 階部分が崩壊したビルのあったところである。データ数が少ないため確かとは言い難い面もあるが、いずれも大きな被害の出た建物の付近で、全体に被害率が高く被害の集中していることが認

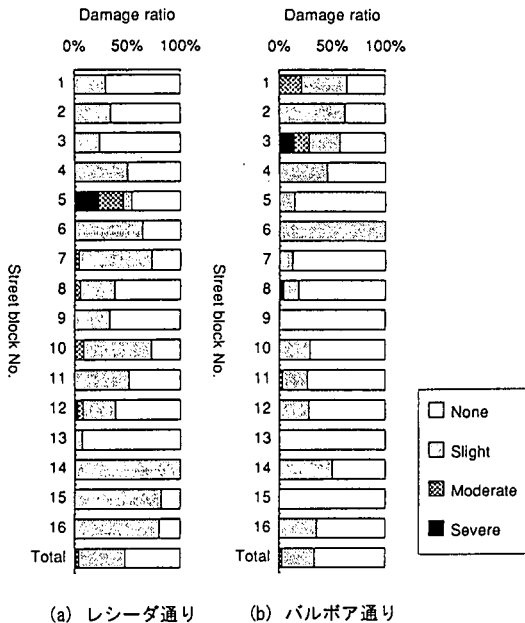


図 8.3.3 ブロック別の建物外観被害状況

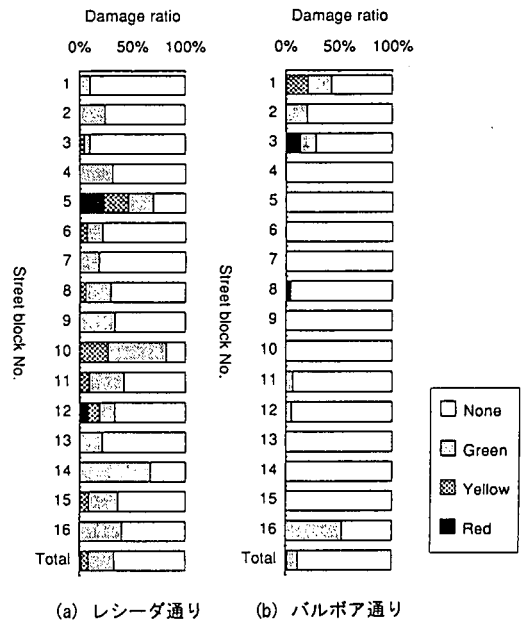


図 8.3.4 ブロック別の建物被災度状況

表 8.3.4 ブロックごとの調査建物外観被害判定結果

(a) レシーダ通り

Block	Severe	Moderate	Slight	None	Total	
1	0	0	3	7	10	3.6%
2	0	0	10	19	29	10.4%
3	0	0	5	16	21	7.5%
4	0	0	8	8	16	5.7%
5	3	3	1	6	13	4.7%
6	0	0	9	5	14	5.0%
7	0	1	15	6	22	7.9%
8	0	2	11	21	34	12.2%
9	0	0	1	2	3	1.1%
10	0	1	7	3	11	3.9%
11	0	0	16	15	31	11.1%
12	1	2	11	22	36	12.9%
13	0	0	1	13	14	5.0%
14	0	0	9	0	9	3.2%
15	0	0	9	2	11	3.9%
16	0	0	4	1	5	1.8%
Total	4	9	120	146	279	100.0%
	1.4%	3.2%	43.0%	52.3%		

(b) バルボア通り

Block	Severe	Moderate	Slight	None	Total	
1	0	3	6	5	14	6.1%
2	0	0	18	11	29	12.6%
3	1	1	2	3	7	3.0%
4	0	0	9	11	20	8.7%
5	0	0	1	6	7	3.0%
6	0	0	1	0	1	0.4%
7	0	0	2	14	16	6.9%
8	1	0	3	18	22	9.5%
9	0	0	0	13	13	5.6%
10	0	0	9	22	31	13.4%
11	0	1	7	22	30	13.0%
12	0	0	5	13	18	7.8%
13	0	0	0	3	3	1.3%
14	0	0	1	1	2	0.9%
15	0	0	0	1	1	0.4%
16	0	0	6	11	17	7.4%
Total	2	5	70	154	231	100.0%
	0.9%	2.2%	30.3%	66.7%		

表 8.3.5 ブロックごとの調査建物被災度判定結果

(a) レシーダ通り

Block	Red	Yellow	Green	None	Total	
1	0	0	1	9	10	3.6%
2	0	0	7	22	29	10.4%
3	0	1	1	19	21	7.5%
4	0	0	5	11	16	5.7%
5	3	3	3	4	13	4.7%
6	0	1	2	11	14	5.0%
7	0	0	4	18	22	7.9%
8	0	2	8	24	34	12.2%
9	0	0	1	2	3	1.1%
10	0	3	6	2	11	3.9%
11	0	3	10	18	31	11.1%
12	3	4	5	24	36	12.9%
13	0	0	3	11	14	5.0%
14	0	0	6	3	9	3.2%
15	0	1	3	7	11	3.9%
16	0	0	2	3	5	1.8%
Total	6	18	67	188	279	100.0%
	2.2%	6.5%	24.0%	67.4%		

(b) バルボア通り

Block	Red	Yellow	Green	None	Total	
1	0	3	3	8	14	6.1%
2	0	0	6	23	29	12.6%
3	1	0	1	5	7	3.0%
4	0	0	0	20	20	8.7%
5	0	0	0	7	7	3.0%
6	0	0	0	1	1	0.4%
7	0	0	0	16	16	6.9%
8	1	0	0	21	22	9.5%
9	0	0	0	13	13	5.6%
10	0	0	0	31	31	13.4%
11	0	0	2	28	30	13.0%
12	0	0	1	17	18	7.8%
13	0	0	0	3	3	1.3%
14	0	0	0	2	2	0.9%
15	0	0	0	1	1	0.4%
16	0	0	9	8	17	7.4%
Total	2	3	22	204	231	100.0%
	0.9%	1.3%	9.5%	88.3%		

められる。

建物構造部位別の損傷を、外観被災状況ならびに診断結果と対応させたのが表 8.3.6 である。また構造別の被害状況を、表 8.3.7 ならびに図 8.3.5 に示す。木造建物が圧倒的に多いため、十分なデータ数による比較はできないが、大破・中破・小破の比率は構造別で特に大差はない。建物の階数と被害との関係では、表 8.3.8 ならびに図 8.3.6 に示すように顕著な傾向が認められた。外観調査による我々の被害判定 (図(a)) においても、被災度診断結果による市の判定 (図(b)) においても、階数の高い建物に被害率が増大する傾向が明らかに出ている。平屋建物よりも 2 階建て建物が、更に 2 階建て建物に比べて 3 階建て建物は、被害率が増え、被害レベルが一段と高くなっている。平屋建物、2 階建て建物の数が多いのに比べて、3 階建て建物は 29 棟しかなく、定量的評価を行うには母数が少ないが、この結果は現地調査での我々の印象とかなり一致するものである。また大破・中破・小破 (図(a))

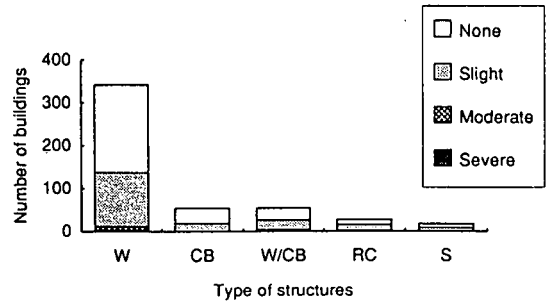
表 8.3.6 構造部位別被害と建物被害状況との相関

		Severe	Moderate	Slight	None	Total	Red	Yellow	Green	None	Total	
Roof	Damaged	1	3	14	1	19	1	3	3	12	19	3.7%
	Not damaged	5	11	174	299	489	7	18	86	378	489	95.9%
	Not clear	0	0	2	0	2	0	0	0	2	2	0.4%
Third story-wall	Damaged	5	1	1	0	7	5	0	0	2	7	1.4%
	Not damaged	0	1	22	4	27	0	4	16	7	27	5.3%
	None	1	12	167	296	476	3	17	73	383	476	93.3%
Third story-window	Damaged	3	2	2	0	7	3	1	1	2	7	1.4%
	Not damaged	2	0	21	4	27	2	3	15	7	27	5.3%
	None	1	12	167	296	476	3	17	73	383	476	93.3%
Second story-wall	Damaged	5	6	21	0	32	5	6	9	12	32	6.3%
	Not damaged	0	6	44	49	99	2	9	28	60	99	19.4%
	None	1	2	124	251	378	1	6	52	319	378	74.1%
Second story-window	Damaged	4	3	8	0	15	4	3	3	5	15	2.9%
	Not damaged	1	9	57	49	116	3	12	34	67	116	22.7%
	None	1	2	124	251	378	1	6	52	319	378	74.1%
First story-wall	Damaged	5	10	72	2	89	7	10	28	44	89	17.5%
	Not damaged	1	4	118	298	421	1	11	61	348	421	82.5%
First story-window	Damaged	3	10	77	1	91	5	11	20	55	91	17.8%
	Not damaged	3	4	113	299	419	3	10	69	337	419	82.2%
Foundation	Damaged	1	3	36	0	40	1	7	11	21	40	7.8%
	Not damaged	4	11	154	300	469	6	14	78	371	469	92.0%
	Not clear	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0.2%
Total		6	14	190	300	510	8	21	89	392	510	100.0%

表 8.3.7 構造別の建物被害状況

(a) 建物外観被害判定との相関

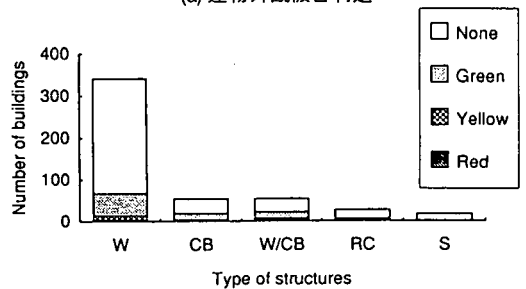
	Severe	Moderate	Slight	None	Total
W	4	8	126	204	342
CB	0	0	19	35	54
W/CB	0	4	22	28	54
RC	1	1	14	11	27
S	0	1	7	9	17
Others	1	0	2	4	7
Not clear	0	0	0	9	9
Total	6	14	190	300	510
	1.2%	2.7%	37.3%	58.8%	100.0%



(a) 建物外観被害判定

(b) 建物被災度判定との相関

	Red	Yellow	Green	None	Total
W	4	11	53	274	342
CB	0	4	15	35	54
W/CB	2	5	15	32	54
RC	1	0	5	21	27
S	0	1	0	16	17
Others	1	0	1	5	7
Not clear	0	0	0	9	9
Total	8	21	89	392	510
	1.6%	4.1%	17.5%	76.9%	100.0%



(b) 建物被災度判定

図 8.3.5 構造別の建物被害状況

表 8.3.8 建物階数別の被災率

(a) 建物外観被害判定との相関

	Severe	Moderate	Slight	None	Total
1-story	1	2	125	251	379
2-story	0	10	42	45	97
3-story	4	1	21	3	29
4-story	0	1	1	1	3
5-story	1	0	1	0	2
Total	6	14	190	300	510
	1.2 %	2.7 %	37.3 %	58.8 %	100.0 %

(b) 建物被災度判定との相関

	Red	Yellow	Green	None	Total
1-story	1	6	52	320	379
2-story	2	11	21	63	97
3-story	4	4	15	6	29
4-story	0	0	1	2	3
5-story	1	0	0	1	2
Total	8	21	89	392	510
	1.6 %	4.1 %	17.5 %	76.9 %	100.0 %

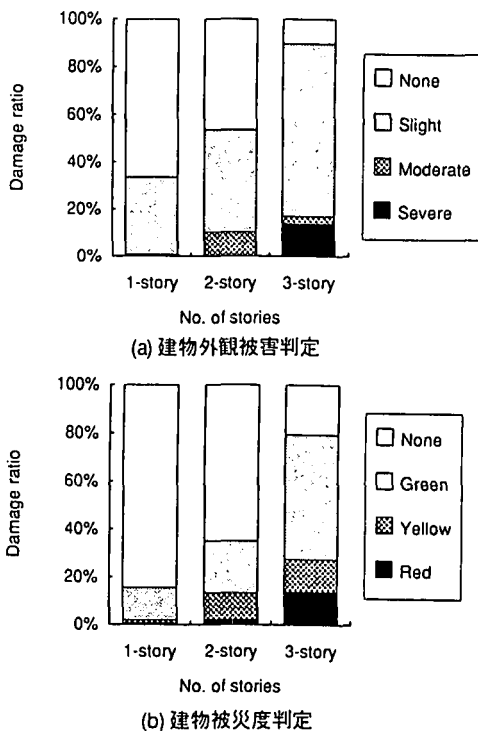


図 8.3.6 建物階数別の被災率

と、診断結果の赤・黄・緑 (図(b)) との関係もある程度対応がつくと見られる。今回の我々の調査の判定では、小破にかなり軽微な被害も含めたため、緑に比して小破の数が多いことを考慮すれば、赤は大破に、黄は中破に、それぞれ相当する被害と見て取れる。

今回の2つの通りに対する全数調査では、建物に付随する煙突と塀の被害データを同時に収集している。これらは、建物とはそれぞれ異なった被害判定尺度となることが、可能性として考えられたからである。ただし、両者の調査で、特に煙突の有無は、必ずしも全建物について確かめられていないため、ここでは煙突や塀の存在を確認したものの中で、被害のあったものを被害率として算定している。

図 8.3.7 と表 8.3.9 に各通りでの頻度分布を示す。これによると、煙突の被害率は、レシーダ通りで

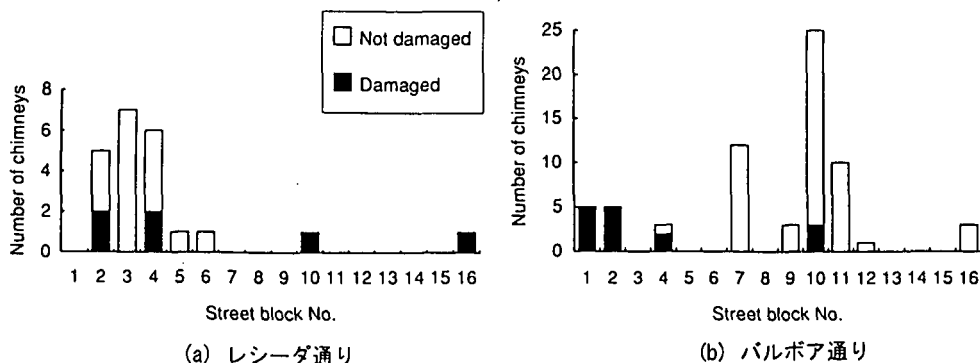


図 8.3.7 ブロック別の煙突被害状況

表 8.3.9 ブロックごとの煙突被害状況

(a) レシーダ通り				(b) バルボア通り				
Block	Damaged	Not damaged	Subtotal	Block	Damaged	Not damaged	Not observed	Subtotal
1	0	0	0	1	5	0	0	5
2	2	3	5	2	5	0	16	21
3	0	7	7	3	0	0	1	1
4	2	4	6	4	2	1	0	3
5	0	1	1	5	0	0	0	0
6	0	1	1	6	0	0	0	0
7	0	0	0	7	0	12	0	12
8	0	0	0	8	0	0	0	0
9	0	0	0	9	0	3	0	3
10	1	0	1	10	3	22	0	25
11	0	0	0	11	0	10	0	10
12	0	0	0	12	0	1	0	1
13	0	0	0	13	0	0	0	0
14	0	0	0	14	0	0	0	0
15	0	0	0	15	0	0	0	0
16	1	0	1	16	0	3	0	3
Total	6	16	22	Total	15	52	17	84
	27.3 %	72.7 %	100.0 %		17.9 %	61.9 %	20.2 %	100.0 %

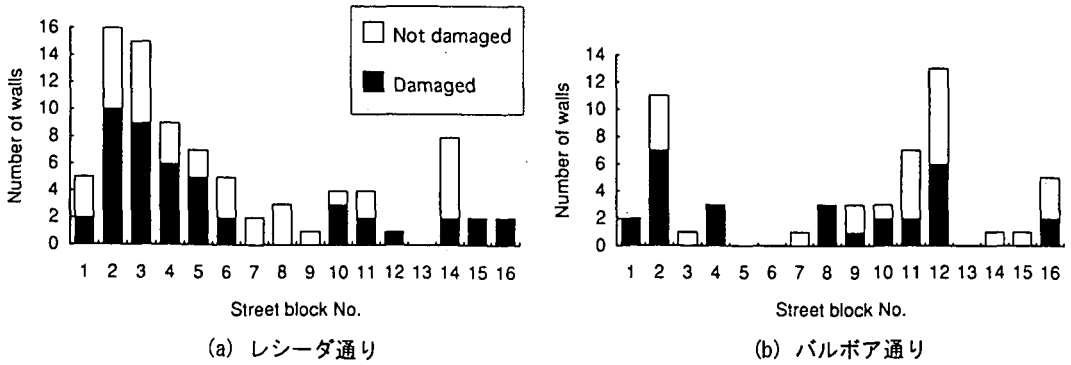


図 8.3.8 ブロック別の塀被害状況

表 8.3.10 ブロックごとの塀被害状況

(a) レシーダ通り				(b) バルボア通り			
Block	Damaged	Not damaged	Subtotal	Block	Damaged	Not damaged	Subtotal
1	2	3	5	1	2	0	2
2	10	6	16	2	7	4	11
3	9	6	15	3	0	1	1
4	6	3	9	4	3	0	3
5	5	2	7	5	0	0	0
6	2	3	5	6	0	0	0
7	0	2	2	7	0	1	1
8	0	3	3	8	3	0	3
9	0	1	1	9	1	2	3
10	3	1	4	10	2	1	3
11	2	2	4	11	2	5	7
12	1	0	1	12	6	7	13
13	0	0	0	13	0	0	0
14	2	6	8	14	0	1	1
15	2	0	2	15	0	1	1
16	2	0	2	16	2	3	5
Total	46	38	84	Total	28	26	54
	54.8 %	45.2 %	100.0 %		51.9 %	48.1 %	100.0 %

27%，バルボア通りで18%である。レシーダ通りでは第2～第4ブロック以外では、数が1個ずつであるため傾向を見て取ることは無理であるが、バルボア通りでは北側地区に被害率が高く、この通りにおける建物被害状況と似ている。

塀は建物全体の27%に付属しており、材料としてはコンクリートブロック（CB）で造られたものが、8割を越えている。被害率は塀全数の54%と、過半数に何らかの損傷が出ており非常に高い。このことも今回の現地調査における、問題点として挙げられたことと符合する。倒壊した塀などによって、中に鉄筋の有無を確かめられたものでは、鉄筋の入っていない塀の被害が圧倒的に多いことも知ることができた。煉瓦塀は、この調査では15件で、そのうち被害のあったのは1件とコンクリートブロック塀に比べて少ない結果となっている。図8.3.8と表8.3.10に示す、通りに沿う塀被害の分布からは、通り全体として平均的に約半数が被害を受けたと読み取れる。建物被害分布との相関性についてはあまり明確な傾向は見い出せない。

8.3.5 建物被害分布調査のまとめ

サン・フェルナンド・ヴァレイを南北に横断するレシーダ通りとバルボア通りの2つの通りに沿う建物全数の被災度調査を行った結果は次のとおりである。

(1) 調査建物の分布では、木造平屋が約半数を占めている。構造別での比率は、木造が67%、コンクリートブロック造が11%で、木造あるいはコンクリートブロック造のどちらか不明なもの11%を含めると、併せて木造とコンクリートブロック造でおよそ9割を占める。鉄筋コンクリート造と鉄骨造は、それぞれ5%、3%程度とわずかである。また建物階数別では、平屋が全体の74%を占め、2階建てが19%、3階建てが6%となっている。

(2) 建物の外観調査による被害判定においても、市の被災度診断による判定結果においても、階数の多い建物に被害率が増大する傾向が示された。平屋建物よりも2階建て建物に、更に2階建て建物よりも3階建て建物に、一段と高い被害率と被害レベルが示された。

(3) データ数は十分ではないが、2つの通りのいずれも大きな被害の出た建物の付近で、全体に被害率が高く、被害の集中する傾向が認められた。

(4) 建物全体の数の27%に塀が付随しており、コンクリートブロックで造られたものが、そのうちの8割を越えている。塀全数の半分以上に何らかの被害が出ており、倒壊した塀は鉄筋の入っていない場合が圧倒的に多いことが数量的に確かめられた。

8.4 米国カリフォルニアの建築耐震設計の概要

本節で説明する米国カリフォルニアの建築耐震設計法に関しては、耐震設計規準のワールド・リスト(A World List)¹¹⁾ならびに日本建築学会の調査団が入手した情報や資料を基にしている。

カリフォルニア州、特にロサンゼルスおよびその周辺の建築物の耐震設計の構造規定はほぼUBC (Uniform Building Code) を基本としている。1991年版のUBCによると、設計用ベース・シア (base shear) V は、

$$V=(ZIC)/R_w \cdot W$$

で与えられる。

ここに、 Z ：地域係数で、0.075～0.40の値をとる。ロサンジェルスは地震危険度の最も高いZONE-4に属し、 $Z=0.40$ である。

I ：重要度係数で、地震に対して1.00～1.25の値をとる。通常の建物では $I=1.00$ となる。

C ：地盤種別と建物の1次固有周期 T に関係し、

$$C=1.25S/T^{2/3}$$

で与えられる。 S は地盤係数で1.0～2.0の値をとる。ただし、 $C \leq 2.75$ で、上限値が与えられており、低層建物では S の値に関係なく、ほとんどの場合 $C=2.75$ となる。

R_w ：構造骨組の靱性に関する係数で、4～12の数値が規定される。これは日本の建築耐震設計規準の構造特性係数(D_s)の逆数に相当し、靱性が大きいほど R_w は大きい値をとる。構造骨組の種別は、水平力・鉛直力とも耐震壁が負担する耐震壁システム(Bearing Wall System)、水平力は耐震壁が、軸力は柱がそれぞれ負担する建物骨組システム(Building Frame System)、水平力・軸力とも柱が負担する剛節(モーメント抵抗型)骨組システム(Moment-resisting Frame System)に大別される。鉄筋コンクリート系で、かつカリフォルニア州で許される構造に限定した場合、 R_w は耐震壁システムで6、建物骨組システムで8、剛節骨組システムで12となる。

W ：建物全重量。

以上より、 $Z=0.40$ 、 $I=1.00$ 、 $C=2.75$ の各値を仮定し、地震荷重に対する荷重係数1.4を考慮すると、設計用ベース・シア係数 $C_B=V/W$ は、鉄筋コンクリート建物では、 $R_w=6\sim 12$ の靱性の低い場合から、靱性設計されたラーメン構造の場合までに対して

$$C_B=0.40 \times 1.00 \times 2.75/R_w \times 1.4=0.257\sim 0.128$$

となる。更に、計算によって求められた強度には、強度低減係数($f=0.9\sim 0.5$)を乗じて評価することから、実質的な設計用地震力レベルの違いは、米国は日本の1/3～1/2程度かと見られる。ただし、日米の設計手法には大きな相違があり、この結果をそのまま建物の耐震性評価に結びつけるわけにはいかない。更に、一方で米国の建物の耐震性能の偏差は大きいという指摘もある。現に、今回の地震では、地表面で1gを越える水平加速度がいくつも記録されており、最大で設計地震力の2.5倍以上という地震力を受けたのに対して、大破以上の被害を受けた鉄筋コンクリート建物は数十棟であったし、また鉄骨建物においては後に深刻な亀裂や破断が露見してはいるものの、倒壊した建物は皆無であり、損傷を受けたそれらの建物はいずれも、その後の余震にも十分耐えてきたことから窺える。

8.5 まとめ — 被害による教訓と今後の課題

調査結果をまとめると次のように言える。

今回の地震の規模は中程度ながら、建物被害は広い範囲にわたっており、また種々の構造タイプについて観察されている。この地震による建築物の特徴的な被害としては、

(1) 駐車場構造物、ショッピング・センターや病院などの、公共性が高く、人の出入りの多い建物の被害が目立った。

(2) 1920-1930年代からの煉瓦組積造や木造の古い住宅に多数の被害が現れた。耐震補強を十分に行うことの重要性が確認できた。

(3) 住宅周辺に煉瓦造やコンクリートブロック造などの塀が意外と多く、また倒壊している率が高かった。

(4) 構造的には、プレキャストコンクリート造、鉄筋コンクリート造や、鋼構造において、いずれも特に接合部に関わる被害が目立った。接合部における弱点は、構造全体の水平抵抗力の流れに関する設計上の計画と現実とが対応していなかったと考えられる節がある。

なお、1994年4月13日に開催された日本建築学会構造委員会・地震災害委員会主催の「ノースリッジ地震被害日米共同速報会」において、発表者らによって今回の地震で非常に特徴的だったこと、得られた教訓、今後の耐震施策などについて意見が述べられた。その中では特に、大きな地震の記録が大量に採られ、今後デジタルデータの利用が期待されること；大きな加速度・速度の記録に対して被害がそれほど大きくはなかったのはなぜかという疑問があること；地震動記録や地盤の増幅に関する大量のデータを、今後の設計や設計規準にどのように生かせるかといった問題点など、様々な指摘がなされた。

今回の建物の被害は、接合部と非靱性部材に破壊が集中したと考えられる。逆に、無補強煉瓦造の耐震補強は特に効果が見られた点、建物被災度の判定では、前回のロマ・プリエータ地震の経験を生かされ、避難や2次災害を防いだといった面で、それぞれ成功したと言われている。また被災建物データも公開されており、被災場所・構造種別等の分析が進めば、入力地動との関連も明らかにされるかもしれない。今回行った全数調査は労力の負担が大きく、地域も限られた範囲しかできなかった面もあり、十分な成果が得られたとは言い難いが、我々の調査意図が今後生かされ、研究が展開される可能性も大きい。

今回、大きな地動加速度が記録された割には、建物被害はそれほど大きくなかったという問題意識に対して、現時点でいくつかの捉え方がある。一つには、最大加速度だけでは被害の予測は無理だということがかなり言われるようになってきたこと。今一つは、被害は相応にあったわけであるが、今回の地震力はそれほど大きくなかったのではないか、という意見である。被害は限定的であり、耐震性の低かったものが倒れたという見方もある。入力側に、なぜ、大きな加速度震動が生成されたかという問題の解明のための研究が進められるとして、一方で、建物構造の研究側には、いずれにしても建物がまさに壊れるときの耐力や変形性能というものはまだ評価できる状況にはない。これらを検討するための事例を積み重ねるとともに、地震被害調査だけに限らず、実験や解析的な日常の研究を通じて、問題の解明に寄与することが重要であると考え。

謝辞：今回の調査において海外ならびに国内の多数の方々の御協力と御援助を受けた。中でも、京都大学防災研究所都市施設耐震システム研究センターの亀田弘行教授には、筆者の調査の全行程にわたる研究的・経済的支援に御配慮いただいた。芳村学助教授（東京都立大学）ならびに澤田純男助手（京都大学）には、現地での調査期間中ずっと同行していただくと同時に、まことに適切な御助言をいただいた。更に伯野元彦教授（東洋大学）、南忠夫教授（東京大学）の各位には、土木学会および日本建築学会調査団の団長として御教示いただくとともに、格別の御鞭撻をいただいた。また本報告

の調査データの計算機への入力等に関して京都大学大学院生の荻野宏之君の御協力を得た。ここに記し、深甚なる謝意を表します。

日本建築学会では、本報告の作成と併行して調査報告書がまとめられている。本来、こうした地震被害調査の最終報告書には、多数名の調査者を募って意見を重ね、より包括的な方向へまとめられるべきかとも思われたが、建物被害の詳細報告はすでに日本建築学会が中心となってまとめる段階にあり、同じ著者を募ってほとんど同じ内容の記述が複数の報告書に同時掲載されることは避け、本稿は筆者単独でまとめることにしたことをお断りする。このような形で受け入れて頂きました土木学会耐震工学委員会に感謝いたします。

参考文献

- 1) Earthquake Engineering Research Center: Preliminary Report on the Seismological and Engineering Aspects of the January 17, 1994 Northridge Earthquake, College of Engineering, University of California at Berkeley, Report No. UCB/EERC-94/01, Jan. 1994
- 2) 関西ライフライン研究会：1994年1月17日ノースリッジ地震現地調査報告会資料，1994年2月
- 3) Earthquake Engineering Research Institute: Northridge Earthquake January 17, 1994, Preliminary Reconnaissance Report, Mar. 1994
- 4) EQE: The January 17, 1994 Northridge, California Earthquake, An EQE Summary Report, Mar. 1994
- 5) 日本建築主事会議・日本建築センター：1994ノースリッジ地震調査報告書，1994年3月
- 6) 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会：1994.1.17 ノースリッジ地震／講演会資料，1994年3月
- 7) 文部省科学研究費(No.05306020)突発災害調査研究成果 自然災害総合研究班：1994年ロスアンジェルス地震と都市機能障害の調査研究，1994年3月
- 8) 日本建築学会ノースリッジ地震災害調査団：1994年ノースリッジ地震災害調査速報，1994年3，4月
- 9) 中島正愛：ノースリッジ地震に見る鉄骨接合部の被害，建築技術，pp.66-73，1994年9月
- 10) Applied Technology Council (ATC 20): Procedures for Postearthquake Safety Evaluation of Buildings.
- 11) International Association for Earthquake Engineering: Earthquake Resistant Regulations - A World List - 1992