

1994年ノースリッジ地震による建築物の被害と 強震記録による地震応答解析

境 有紀¹⁾・南 忠夫¹⁾・中埜良昭²⁾・大網浩一³⁾・前田匡樹⁴⁾・塩原 等⁵⁾

¹⁾東京大学地震研究所

²⁾東京大学生産技術研究所

³⁾千葉大学工学部

⁴⁾横浜国立大学工学部

⁵⁾建設省建築研究所

(1994年9月30日受理)

Damage to Buildings Coused by the 1994 Northridge Earthquake and Earthquake Response Analysis by Recorded Strong Ground Motions

Yuuki SAKAI¹⁾, Tadao MINAMI¹⁾, Yoshiaki NAKANO²⁾, Kohichi OHAMI³⁾
Masaki MAEDA⁴⁾ and Hitoshi SHIOHARA⁵⁾

¹⁾Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan

²⁾Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Japan

³⁾Faculty of Engineering, Chiba University, Japan

⁴⁾Faculty of Engineering, Yokohama National University, Japan

⁵⁾Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan

(Received September 30, 1994)

Abstract

The 1994 Northridge Earthquake with the magnitude 6.7 occurred on January 17, 1994 at 4:31 a.m. U.S. Pacific Standard Time (9:31 p.m. Japan Time). Its hypocenter was below the San Fernando Valley about 30km north-west of the Los Angeles downtown area and at a depth of 18km. The magnitude was not so large, but the focal depth was shallow and the epicenter was close to the Los Angeles area, therefore this earthquake caused considerable damage there. We investigated the damage, especially to buildings in the Los Angeles area from January 22 to 26.

The damage to buildings was found in and around the San Fernando Valley, Santa Monica and the West Los Angeles area 20km west of downtown. The damage was concentrated to some special kind of buildings, e.g., parking structures, wood apartments and shopping mall buildings.

Most of the damaged parking structures were pre-cast concrete structures, and the damage was mainly caused by insufficient connection of separate units. A large number of wood apartments were damaged on the first floor, and some of them collapsed completely, because the first floor was

used as a parking garage so that the building did not have sufficient stiffness. In the meantime, the damages of large shopping mall buildings were found in their surrounding earthquake resisting walls.

During this earthquake, strong ground motions were recorded at many sites, and some of their peak accelerations were quite high. The horizontal peak ground acceleration reached 1.82g at Tarzana, 5km south of the epicenter, while three other stations observed over 0.9g.

We performed response analyses using two of these strong ground motion records obtained at Sylmar and Santa Monica for investigating the destructive power of these motions. The result of analyses showed that the Santa Monica ground motion had very high peak acceleration but small destructive power. On the other hand, the Sylmar motion had not only high peak acceleration but also very strong destructive power.

The destructive power of the Sylmar motion is far beyond the magnitude that can be explained by the actual building damage. This record needs more detailed analysis.

1. はじめに

1994年1月17日午前4時31分(日本時間午後9時31分)にLos Angelesの中心地であるダウンタウンから北西30kmのNorthridgeの深さ18kmを震源とし、マグニチュード6.7のいわゆる直下型地震の1994年Northridge地震が発生した。この地震はマグニチュード6.7と地震の規模としては中規模であるが、震源深さが約18kmと比較的浅く、都市の直下で起きたためにLos Angeles各地に、人的、物的被害をもたらした。筆者等は、震央に近いNorthridgeを中心とした地域の、主として建築物の被害調査を行ったので、その概要について報告する。

また今回の地震は、地震活動が高い地域で都市直下に起こったため、緻密な観測網が張りめぐらされており、総計360以上の観測点で強震記録が観測された。そして、特筆すべきことの1つに、震央から南へ約5kmのTarzanaにおいて1.82gの水平地動最大加速度が観測され、0.9g以上の水平地動最大加速度もこの他に3地点で観測されたことが挙げられる。そこで、最大加速度0.9g以上の強震記録のうちの2つについて、弾塑性地震応答解析を行なって、その強震記録の破壊力の大きさと建築物の被害の関係について検討した。

2. 地震と地震動

2.1 地震諸元

地震の諸元を以下に示す(EERI, 1994)。

発生時刻：1994年1月17日 現地時間 午前4時31分(日本時間 午後9時31分)

震央：Northridge(北緯34°13', 西経118°32')

震源深さ：約18km

マグニチュード：6.7

今回の地震は、California州を1000kmに渡って縦断するSan Andreas断層が、北から南へ向かうにつれて東へ大きく屈曲する、Transverse Rangeと呼ばれる地域に発生した。San Andreas断層が右ずれの性質をもつため、ここでは大きな圧縮力が働くこと

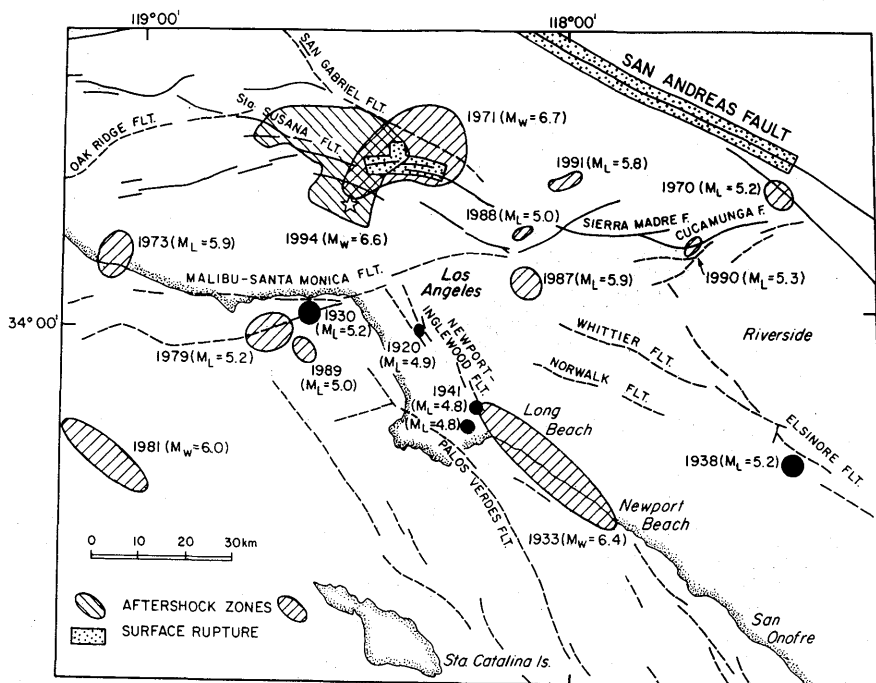


図1 Los Angeles 盆地地域に 1920 年以降 1994 年 3 月までに発生したマグニチュード 4.8 以上の地震 (斜線は Northridge 地震の余震域) (EERI, 1994)

になり、逆断層が生じる。近年この地域に発生した主な地震を示した図 1 (EERI, 1994) を見ると、この地域の地震活動度が高いことがわかる。また今回の地震の震央は、1971 年 San Fernando 地震の震央から南西に約 25km の地点に位置し、余震域が一部重なっている。

余震分布を図 2 に示す (EERI, 1994)。余震域は、深さ約 18km の本震の震源から北西に向って上に約 45°の勾配で約 30km に渡り分布していることがわかる。

2.2 強震記録

今回の地震は、地震活動が高い地域に、かつ都市直下で起こったため、緻密な観測網が張りめぐらされており、総計 360 以上の観測点で強震記録が観測された。

各地で観測された強震記録について、California Strong Motion Instrumentation Program (CIMIP) と U.S. Geological Survey (USGS) による各観測地点の位置を図 3 に、最大加速度等を表 1 に示す (EERI, 1994)。

震央から南へ約 7km の Tarzana において水平動で 1.82g、上下動で 1.2g の地動最大加速度が観測され、震央から約 15km の Sylmar、約 8km の Sequelveda、約 24km の Santa Monica でもそれぞれ水平動で 0.9g 以上の地動最大加速度を記録した。

3. 建築物の被害

地震によって被害のあった主な地域は、震源のある San Fernando valley という、Los Angeles の中心地であるダウンタウンから北西に約 30km の盆地の内部および周辺の一部、そしてダウンタウンから西へ約 20km の海岸に近い Santa Monica 地区、West

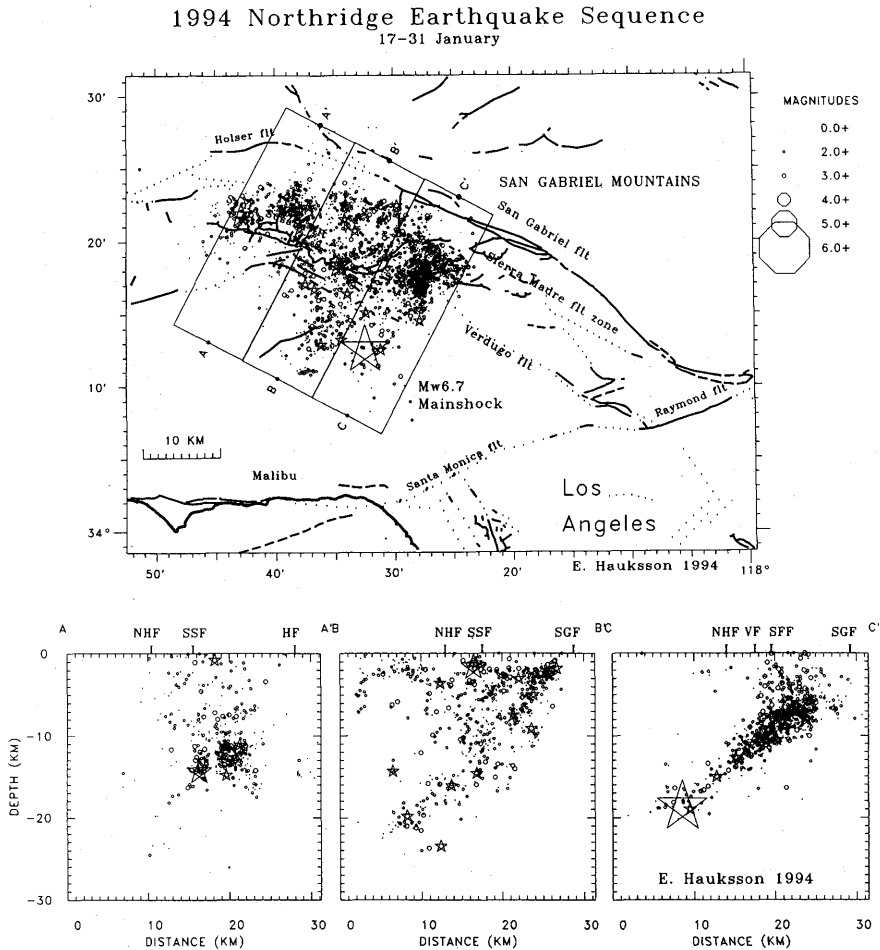


図2 余震分布 (上: 平面図, 下: 上図で長方形で囲まれた領域の断面図) (EERI, 1994)

Los Angeles 地区である。表層地盤はいずれも沖積層である。地形の様子と建物の被害のあった地域的位置関係を図4に示す。

今回の地震による建築物の被害は、木造 (以下 W 造), 補強組積造 (以下 RM 造), 無補強組積造 (以下 URM 造), 鉄筋コンクリート造 (以下 RC 造), プレキャスト鉄筋コンクリート造 (以下 PCa 造), 鉄骨造 (以下 S 造) などあらゆる構造種別に見られた。被害形態も既往の被害地震で見られた様々なものが観察されたが, 中でもアメリカ社会に根ざした, いわばあめりか特有とも言える特定の利用目的をもった数種類の構造物に被害が集中した。

そこで, 3.1 被害概要で各地域毎に被害の概要について全般的に述べ, 3.2 被害詳細では, 被害が集中した特定の利用目的をもった数種類の構造物に限定して述べることにする。

3.1 被害概要

震源のほぼ真上に位置する Northridge 地区では, 最も大きな被害が見られた。W 造集合住宅に Meadows Apartment に代表されるように倒壊した建物をはじめ, ガラスの

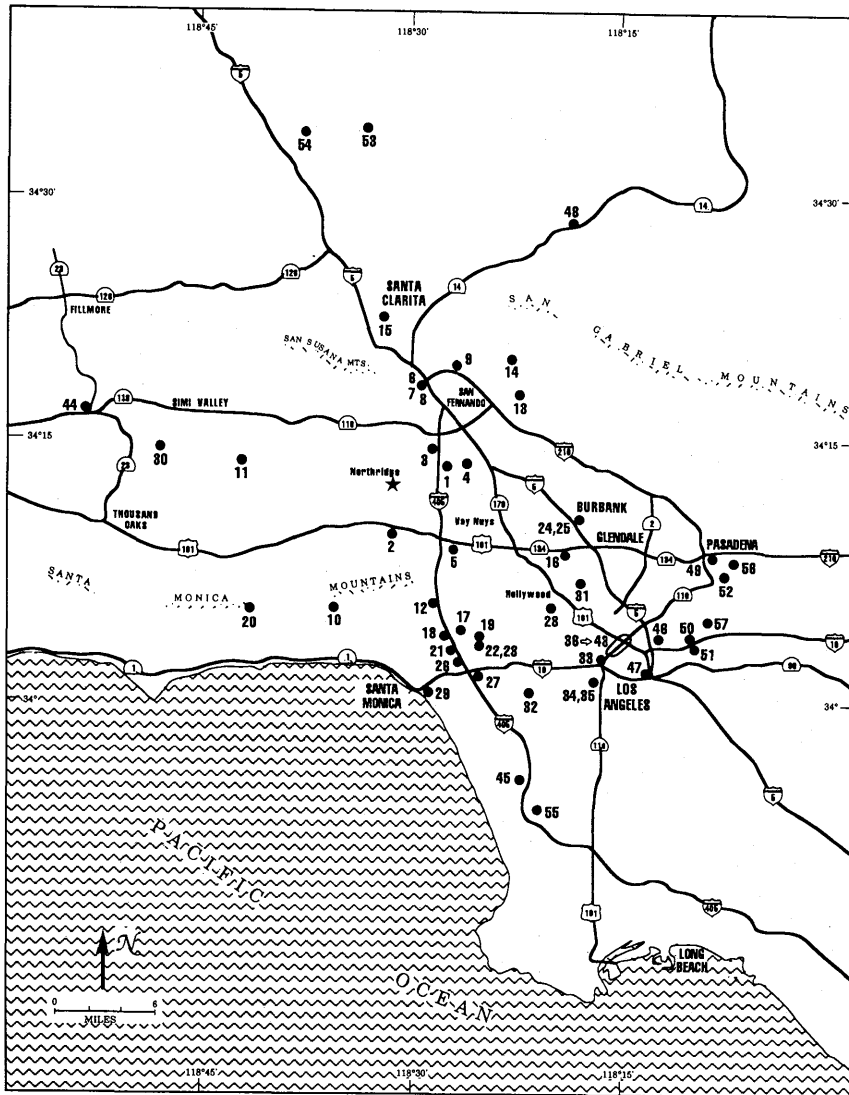


図3 CIMIP と USGS による各観測地点の位置 (EERI, 1994)

被害、壁のひび割れなどの被害が多数見られた。また、住宅のレンガ造煙突、ブロック塀の転倒崩壊も多数見られ、半数以上のブロック塀に被害の見られる地域もあった。

Northridge Fashion Center では、3つの全ての駐車場建物に被害が生じた。即ち、南部に位置する PCa 造 3 階建ての駐車場建物は崩壊、北部に位置する PCa 造 2 階建ての駐車場建物では北東部のスラブが落花して崩壊、中央部に位置する RC 造 1 階建ての駐車場建物では柱頭のコンクリートの圧壊が見られた。

また、RC 造フラットスラブ構造 3 階建てデパートの Bullock's は、2, 3 階床スラブがパンチングシアで崩落し、崩壊した。

California State University at Northridge では、PCa 造 3 階建ての駐車場建物が崩壊した他、図書館のひさしの落下、化学棟の火災など、多くの建物が被害を受けた。

表1 CIMIP と USGS による各観測地点で記録された強震記録の最大加速度 (EERI, 1994)

| Ref. No. | Station Name | Agency [Owner] | Epicentral Distance ⁽¹⁾ | Maximum Acceleration | | |
|----------|---|---------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | | | | Free-field | Base | Struct. |
| 1 | Van Nuys 7-story Hotel | CSMIP | 4 mi | — | 0.47g H 0.30g V | 0.59g H |
| 2 | Tarzana Cedar Hill Nursery | CSMIP | 4 mi | 1.82g H 1.18g V | — | — |
| 3 | Sepulveda VA Hospital | USGS [VA] ⁽²⁾ | 5 mi | — | 0.94g H 0.48g V | — |
| 4 | Arleta Nordhoff Avenue Fire Station | CSMIP | 6 mi | 0.35g H 0.59g V | — | — |
| 5 | Sherman Oaks 13-story Commercial Bldg. | CSMIP | 6 mi | — | 0.46g H 0.18g V | 0.90g H |
| 6 | Granada Hills Jensen Filtration Plant, Admin. Bldg. | USGS [MWD] ⁽³⁾ | 7 mi | — | 0.62g H 0.40g V | — |
| 7 | Granada Hills Jensen Filtration Plant, Generator Bldg. | USGS [MWD] | 7 mi | — | 0.98g H 0.52g V | — |
| 8 | Granada Hills Jensen Filtration Plant, Reservoir Roof | USGS [MWD] | 7 mi | — | — | 0.84g H 0.51g V |
| 9 | Sylmar 6-story County Hospital | CSMIP | 9 mi | 0.91g H 0.60g V | 0.82g H 0.34g V | 2.31g H |
| 10 | Sepulveda Sepulveda Canyon Control Facility | USGS [MWD] | 9 mi | — | 0.43g H 0.16g V | — |
| 11 | Santa Susana Building 462 | USGS [DOE] ⁽⁴⁾ | 9 mi | 0.29g H 0.16g V | 0.34g H 0.23g V | 0.60g H 0.40g V |
| 12 | Topanga Topanga Fire Station | USGS | 9 mi | — | 0.34g H 0.19g V | — |
| 13 | Pacoima Kagel Canyon Fire Sta. #74 | CSMIP | 11 mi | 0.44g H 0.19g V | — | — |
| 14 | Pacoima Reservoir Pacoima Dam | CSMIP | 11 mi | 0.44g H 0.20g V | 0.54g H 0.43g V | >2.3g H >1.7g V |
| 15 | Newhall LA County Fire Station | CSMIP | 12 mi | 0.63g H 0.62g V | — | — |
| 16 | North Hollywood 20-story Hotel | CSMIP | 12 mi | — | 0.33g H 0.15g V | 0.66g H |
| 17 | Los Angeles 7-story UCLA Math-Science Bldg | CSMIP | 12 mi | — | 0.29g H 0.25g V | 0.77g H |
| 18 | Brentwood VA Hospital | USGS [VA] | 12 mi | — | 0.18g H 0.14g V | — |
| 19 | Century City LACC North | CSMIP | 12 mi | 0.27g H 0.15g V | — | — |
| 20 | Monte Nido Monte Nido Fire Station | USGS | 12 mi | — | 0.20g H 0.13g V | — |
| 21 | Wadsworth VA Hospital | USGS [VA] | 12 mi | 0.39g H 0.17g V | — | 0.56g H 0.09g V |
| 22 | Los Angeles 19-story Office Bldg | CSMIP | 13 mi | — | 0.32g H 0.13g V | 0.65g H |
| 23 | Los Angeles 3-story Commercial Bldg. | CSMIP | 13 mi | — | 0.33g H 0.15g V | 0.97g H 0.26g V |
| 24 | Burbank 10-story Residential Bldg. | CSMIP | 13 mi | — | 0.30g H 0.13g V | 0.79g H |
| 25 | Burbank 6-story Commercial Bldg | CSMIP | 14 mi | — | 0.35g H 0.15g V | 0.49g H |
| 26 | Los Angeles 1955½ Purdue Avenue | USGS | 14 mi | — | 0.44g H 0.16g V | 0.63g H 0.48g V |
| 27 | Los Angeles 110/1405 Interchange Bridge | CSMIP | 14 mi | — | — | 1.00g H 1.83g V |
| 28 | Los Angeles Hollywood Storage Bldg. | CSMIP | 14 mi | 0.41g H 0.19g V | 0.29g H 0.11g V | 1.61g H |
| 29 | Santa Monica - City Hall Grounds | CSMIP | 15 mi | 0.93g H 0.25g V | — | — |
| 30 | Wood Ranch Reservoir Main Dam & Dikes | CSMIP | 16 mi | — | — | 0.39g H 0.18g V |
| 31 | Los Angeles Griffith Observatory | USGS | 16 mi | — | 0.29g H 0.15g V | — |

Table 1 (Continued)

| | | | | | | |
|----|---|------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 32 | Los Angeles Baldwin Hills | CSMIP | 17 mi | 0.24g H 0.10g V | — | — |
| 33 | Los Angeles Pico and Sentous | CSMIP | 19 mi | 0.19g H 0.07g V | — | — |
| 34 | Los Angeles 6-story Parking Structure. | CSMIP | 20 mi | — | 0.29g H 0.22g V | 1.21g H 0.52g V |
| 35 | Los Angeles 6-story Office Building | CSMIP | 20 mi | — | 0.24g H 0.08g V | 0.59g H 0.18g V |
| 36 | Los Angeles 52-story Office Bldg. | CSMIP | 20 mi | — | 0.15g H 0.11g V | 0.41g H |
| 37 | Los Angeles Temple and Hope | CSMIP | 20 mi | 0.19g H 0.10g V | — | — |
| 38 | Los Angeles 54-story Office Bldg. | CSMIP | 20 mi | — | 0.14g H 0.08g V | 0.19g H |
| 39 | Los Angeles 15-story Govt. Office Bldg. | CSMIP | 20 mi | — | 0.21g H 0.07g V | 0.29g H |
| 40 | Los Angeles 9-story Office Bldg. | CSMIP | 20 mi | — | 0.18g H 0.12g V | 0.34g H |
| 41 | Los Angeles 1100 Wilshire Boulevard | USGS | 20 mi | — | 0.15g H 0.09g V | 0.35g H |
| 42 | Los Angeles 1111 Sunset Boulevard | USGS [MWD] | 20 mi | — | 0.13g H 0.06g V | 0.23g H 0.16g V |
| 43 | Los Angeles 17-story Residential Bldg | CSMIP | 21 mi | — | 0.26g H 0.08g V | 0.58g H |
| 44 | Moorpark | CSMIP | 21 mi | 0.30g H 0.15g V | — | — |
| 45 | El Segundo 14-story Office Building | CSMIP | 22 mi | — | 0.13g H 0.04g V | 0.25g H 0.17g V |
| 46 | Los Angeles 7-story University Hospital (Base Isolated) | CSMIP | 22 mi | 0.49g H 0.12g V | 0.37g H 0.09g V | 0.21g H 0.13g V |
| 47 | Los Angeles 5-story Warehouse | CSMIP | 22 mi | — | 0.26g H 0.08g V | 0.29g H |
| 48 | Vasquez Rocks Park | CDMG | 22 mi | 0.16g H 0.09g V | — | — |
| 49 | Pasadena 6-story Office Building | CDMG | 23 mi | — | 0.17g H 0.09g V | 0.21g H |
| 50 | Los Angeles 8-story CSULA Admin. Bldg. | CSMIP | 24 mi | — | 0.17g H 0.06g V | 0.25g H 0.17g V |
| 51 | Los Angeles Fire Command Control Bldg. (Base Isolated) | CSMIP | 24 mi | 0.32g H 0.13g V | 0.22g H 0.11g V | 0.35g H 0.30g V |
| 52 | San Marino Southwestern Academy | CSMIP | 24 mi | 0.16g H 0.09g V | — | — |
| 53 | Lake Hughes 12A | CSMIP | 24 mi | 0.26g H 0.12g V | — | — |
| 54 | Castaic Old Ridge Route | CSMIP | 24 mi | 0.59g H 0.25g V | — | — |
| 55 | Lawndale 15000 Aviation Boulevard | USGS | 24 mi | — | 0.18g H 0.09g V | — |
| 56 | Pasadena 535 S. Wilson Avenue | USGS | 25 mi | — | 0.16g H 0.10g V | — |
| 57 | Alhambra 900 S. Fremont | USGS | 25 mi | — | 0.19g H 0.10g V | 0.60g H |

(1) Epicentral distances are approximate.

(2) VA = Veterans Administration

(3) MWD = Metropolitan Water District

(4) DOE = Department of Energy

San Fernando valley 北西部の Granada Hill 地区では、低層 W 造住宅に被害が見られた他、RC 造 5 階建ての Kaiser Permanente Hospital の事務所棟の 2 階が層崩壊した。また、PCa 造 3 階建ての Cingna Healthplan は、駐車場建物に大きな被害が生じた。

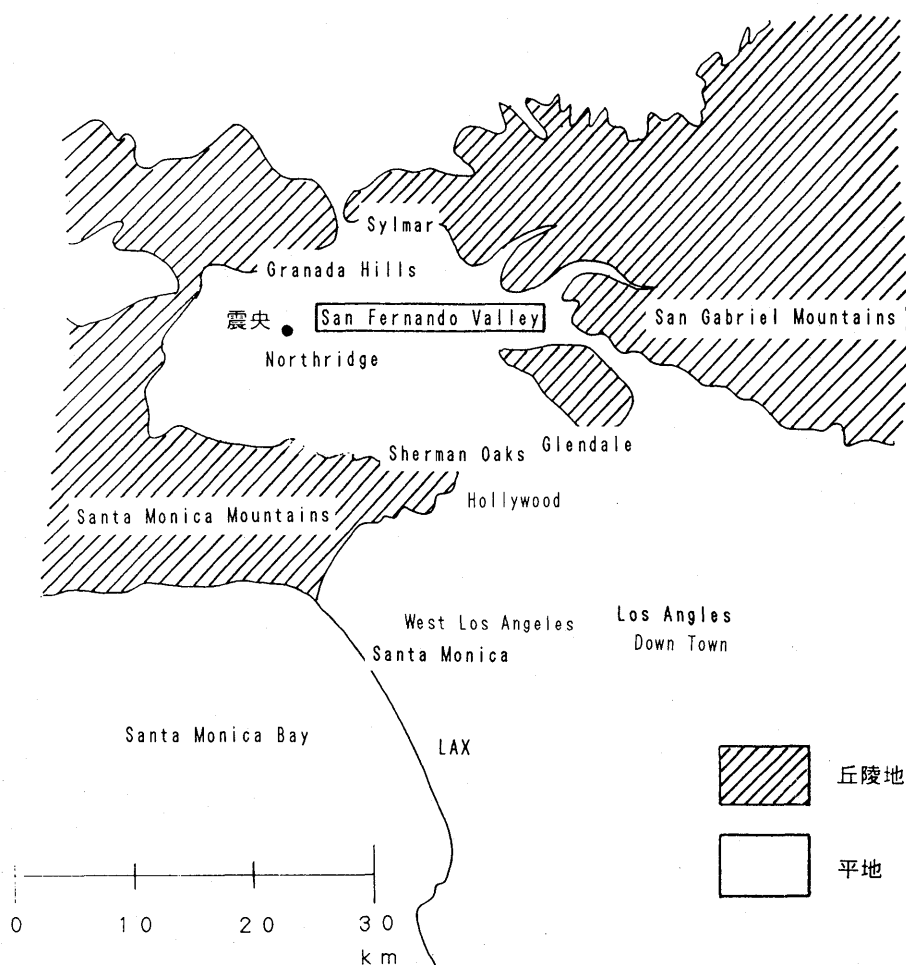


図4 地形の様子と建物の被害のあった地域的位置関係

San Fernando valley の北東部の Sylmar 地区では、低層 W 造住宅の被害、およびガラス、煙突、ブロック塀の被害がかなり見られた。

San Fernando valley の南端を形作る丘陵地のすぐ南側に位置する Hollywood 地区では、古い W 造住宅、URM 造建物が多く、かなり被害が生じた。

Santa Monica 地区および West Los Angeles 地区は、震源から南へ約 30km と比較的離れている割に大きな被害があった。

Santa Monica 地区では、W 造の商店建物のガラスの被害、低層 W 造集合住宅の壁のひび割れなどの被害、一戸建て住宅のブロック造煙突、ブロック塀の転倒崩壊も多数みられた。

RC 造 6 階建ての St. John's Hospital に柱のせん断破壊、RC 造 2 階建ての同病院の駐車場建物に耐震壁のせん断破壊、柱、梁接合部のせん断ひび割れの被害、6 階建ての事務所建物の連層耐震壁および柱にせん断ひび割れが見られた。また、4 階建ての補強ブロック造建物には、柱の圧壊、壁のせん断ひび割れなどの被害が生じた。

West Los Angeles 地区では、RC 造 6 階建ての事務所建物の柱がせん断破壊した。

San Fernando valley の南の縁の Glendale 地区および Sherman Oaks 地区では、Glendale Fashion Center, Glendale Civic Center および Glendale Galleria の駐車場建物で、それぞれ柱のせん断破壊、スラブの落下崩壊および柱脚のコンクリート圧壊などの被害があった。W 造低層住宅や商店のガラスの被害、内装天井の落下、壁のせん断ひび割れなども見られた。

3.2 被害詳細

(1) 駐車場建物

アメリカ社会においては、駐車場建物は受注競争が激しく、経済的でかつ、短期間に竣工可能な施工法が採用されることが多く、一般の建築物とは、やや異なった構造形式のことが多い。今回の地震では、これらの構造物に大きな被害が生じた。

Los Angeles 周辺の駐車場建物は、2～5 階建て程度のものが多く、建築現場で鉄筋を組み、型枠を配してコンクリートを打つ一般の RC 造と、工場で鉄筋を組みコンクリートを打ってユニット化した部材を現場に運び、これを現場で組み立てるという PCa 造のものがある。

まず PCa 造の駐車場建物は、各ユニット間の接合が不十分であったために、その接合部分の被害が多く、中にはそれが建物全体の被害をもたらしたものもあった。

California State University at Northridge の 3 階建て PCa 造の駐車場建物では、東部および北西部の床スラブが崩落し、外構面を内側に引きずる形で崩壊した。平面図および被害状況を図 5 に、全景を (Engineering News Record, 1994) より転載して写真 1 に示す。この建築物は、スパンの長さは 5m 程度で南北方向 18 スパン、東西方向 24 スパンもある巨大なものである。外構面は、3 層キの字型ユニットが梁中央部で隣のユニット (写真 2) とスラブを介して間接的に接合された構造となっている。地震力に対しては、外構面に靱性を持たせることで抵抗し、中構面は鉛直力のみを支える設定がなされていた。

北外構面の柱に支持された梁がコーベルから脱落し (写真 2)、スラブが脱落した。これにより、内部のスラブ落下に引きずられるように東外構面が内面に円弧状に転倒した (写真 3)。

Northridge Fashion Center の南部に位置する PCa 造 3 階建ての駐車場建物は、外構面に耐震壁を配して、これによって地震力に抵抗するように設計されていたが、この耐震壁に力が伝わらず、この耐震壁を残して崩壊した (写真 4, (L.A. Times 1/18, 1994) より転載)。

また、同じ Northridge Fashion Center の北部に位置する PCa 造 2 階建ての駐車場建物も、南部の駐車場と同じく、外構面に耐震壁を配して (写真 5)、地震力に抵抗するように設計されていたが、スラブ落下して崩壊した (写真 6)。

Glendale 地区の Civic Center Visitors Parking (写真 7) は、PCa 造 3 階建てで、数階分のコーベル付きの柱のコーベルに逆 T 字形の梁を載せ、更に、その上にダブル T 形のスラブを載せ (写真 8)、その上に 5cm 程度のコンクリートを打設して全体を一体化したものである。ダブル T のスラブと逆 T 字形の梁は接合されておらず、現場打ちのコンクリートスラブと逆 T 字形の梁は、1m 間隔の鉄筋で接続されているのみで、2、3 層の梁およびダブル T のスラブが 1 スパン分落下した (写真 9)。

同じく Glendale 地区の Glendale Galleria Parking (写真 10) は、コンラッドシステ

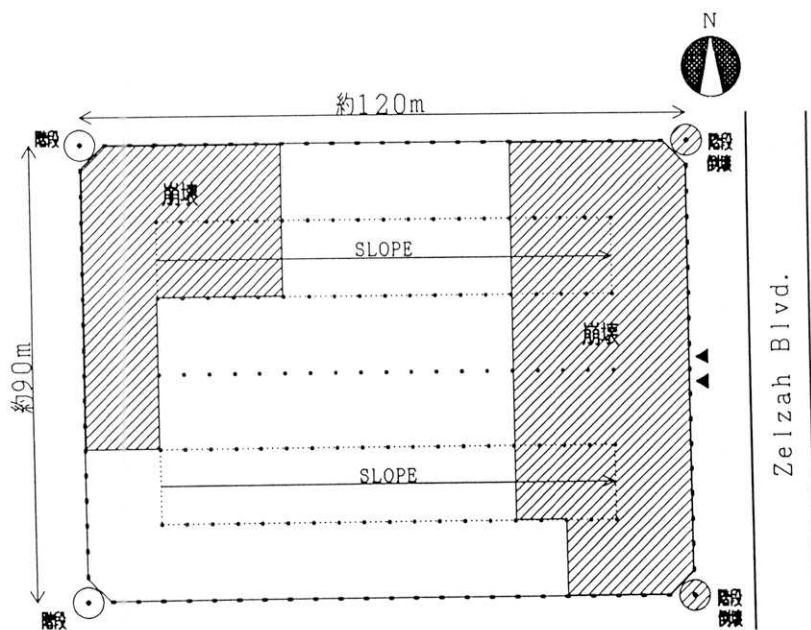


図5 California State University at Northridge の駐車場建物の平面図および被害

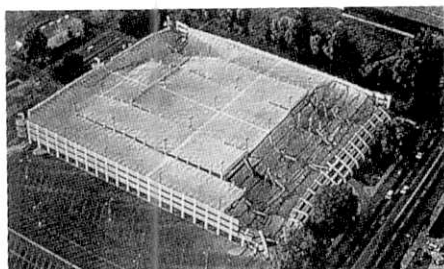


写真1 California State University at Northridge の駐車場建物全景 ((Engineering News Record, 1994)より転載)



写真2 北外構面柱コーベルから梁が脱落

ムと呼ばれる4本足のテーブル状のフレームを1ユニット(写真11)としたPCa部材を高さ50cm程度のRC造土台上に並べて配置した2階建て駐車場で、各ユニットはスパン長それぞれ10m×5m程度である。柱脚および土台の破壊多数みられ、土台と柱脚の間には、たば筋、コッター等は見られなかった(写真12)。

Granada Hills地区にあるCigna Healthplan(写真13)は、S造の3階建て事務所棟と3階建てのPCa造駐車場建物からなっていて、事務所棟と駐車場建物の間には、エキスパンション・ジョイントが設けられているが、駐車場建物に大きな被害が生じた。即ち、梁を支持する柱のコーベルが破損し落下の危険性があるために木の角柱でサポートされていた。また、外壁のジョイントが外れ、傾斜していた(写真14)。

次に、現場打ちRC造の駐車場建物は、柱と梁を現場で打設し、床スラブにプレキャ



写真3 西側に円弧状に転倒した東外構面フレーム



写真4 Northridge Fashion Centerの南面に位置する駐車場全景 ((L.A. Times 1/18, 1994)より転載)



写真5 Northridge Fashion Centerの北部に位置する駐車場

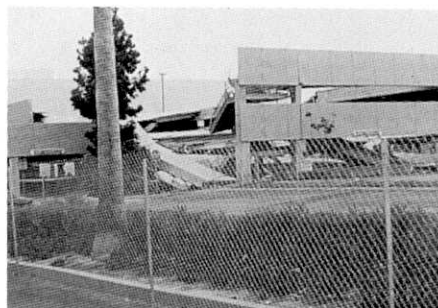


写真6 Northridge Fashion Centerの北部に位置する駐車場のスラブの落下崩壊



写真7 Civic Center Visitors Parking (Glendale地区)

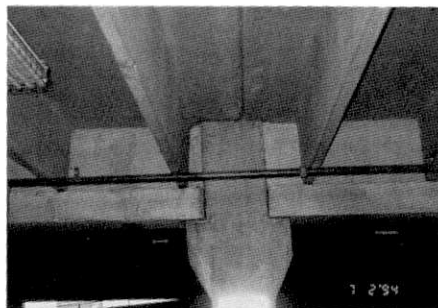


写真8 Civic Center Visitors Parkingの各ユニットの接合の様子

スト部材を用いるものが多い。内部は、見通しのよい長柱が用いられるが、外構面は、防犯上の理由から腰壁を設けるために柱が短柱化して、これがせん断破壊したのものが多く見られた。

Glendale地区のGlendale Fashion Center Parking (写真15)は、3階(一部2階)建て現場打ちRCフレーム構造で、腰壁により柱が短柱となっていて(写真16)、北の2階(写真17)、南および西構面は全階にわたりほとんどの柱がせん断破壊していた

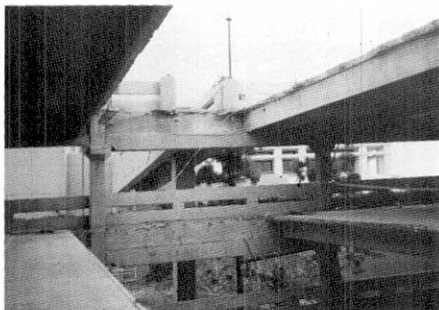


写真9 梁およびスラブの落下

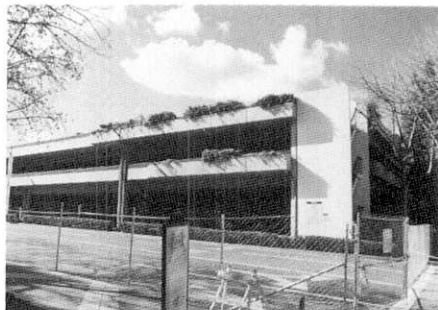
写真10 Glendale Galleria Parking
(Glendale 地区)

写真11 コンラッドシステムの1ユニット



写真12 コンラッドシステムの柱脚および土台の破壊状況



写真13 Cigna Healthplan (Granada Hills 地区)



写真14 柱のコーベルの破損および外壁のジョイントが外れて傾斜

(写真18, 19)。特に南構面では被害が激しく2階が落階した。これは、北東部に壁がはいっているために、ねじれの影響を受け、剛心より最も遠い南構面で崩壊したのではないかと推察される。

Northridge Fashion Centerの中央部に位置するRC造1階建ての駐車場建物(写真20)では、短柱はなかったが、柱頭のコンクリートの曲げ破壊が見られ(写真21)、エキスパンション・ジョイントでのスラブの衝突の跡が見られた(写真22)。



写真 15

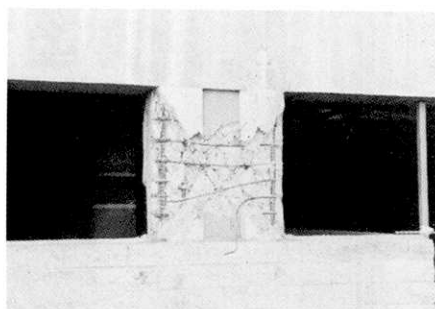


写真 16 腰壁による柱の短柱化

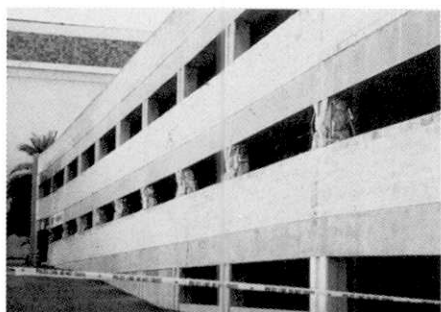


写真 17 北構面の2階柱のせん断破壊

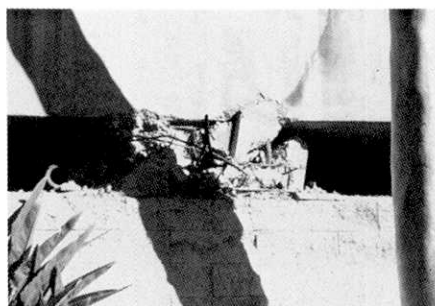


写真 18 南構面の柱の破壊状況

Santa Monica 地区にある St. John's Medical Center の駐車場建物 (写真 23) は、RC 造 2 階建てで、北側の耐震壁にせん断ひび割れがはいり (写真 24)、ト形接合部にもせん断ひび割れが見られた (写真 25)。

(2) 木造集合住宅

Los Angeles 周辺は、アメリカの中でも特に車社会が発達しており、一世帯当たりの車の所有台数が多い。特に集合住宅では 1 階の殆どのスペースを駐車場に当てざるを得ず、そのため 1 階は大スパンのオープンスペースとなり、1 階が極端に剛性の低い構造となる。

写真 26 は、Sylmar 地区にある 3 階建の W 造集合住宅の 1 階部分であるが、1 階にいかにも水平抵抗部材が少ないかがわかる。このような大スパンを支えるために、コンクリート・ブロック壁または RC の柱の上にせいが 70~80cm もある鉄骨の梁を渡しており (写真 27)、中央部分に梁の垂れ下がりを防ぐために、直径 10cm 程度の鋼管で支えているだけである。

Northridge 地区にある W 造 3 階建ての Northridge Meadows Apartment も、全体のほぼ半分に当たる 1 階駐車場部分が潰れ、2 階建てのようになった (写真 28)。この建物は、10 棟以上の建物からなる大規模なコンプレックスで、1 階部分に一部居住空間があったために、16 名という多くの犠牲者を出した。平面図および被害状況を (L.A. times 1/18, 1/24, 1994) を基に図 6 に示す。また、被災後の南面立面を (L.A. times 1/24, 1994) より転載し、図 7 に示す。竣工は 1991 年と比較的新しい。1 階を駐車場と

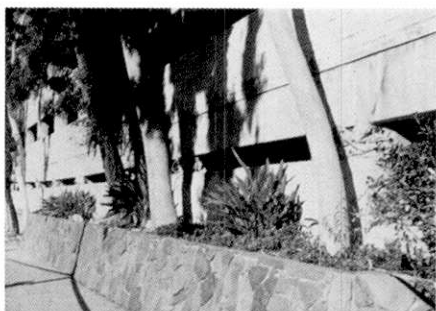


写真19 南構面の1階柱がせん断破壊し崩壊



写真20 Northridge Fashion Centerの南部に位置する駐車場

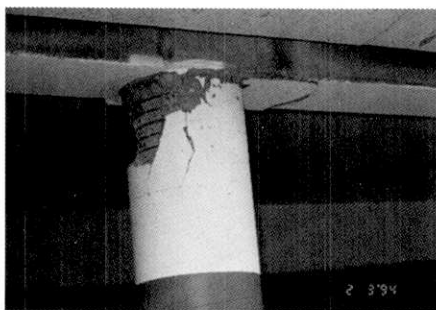


写真21 柱頭の曲げ破壊

写真22 エキスパンション・ジョイントでのスラブの衝突の跡

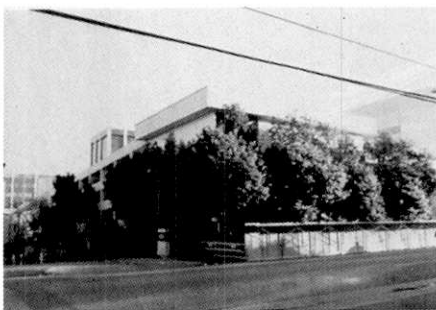
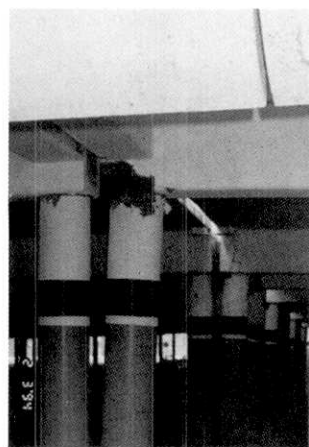
写真23 St. John's Medical Centerの駐車場建物
(Santa Monica 地区)

写真24 耐震壁のせん断ひび割れ

して使用していた部分と、1階が潰れた部分を図6に示しているが、これらはほぼ対応していることがわかる。

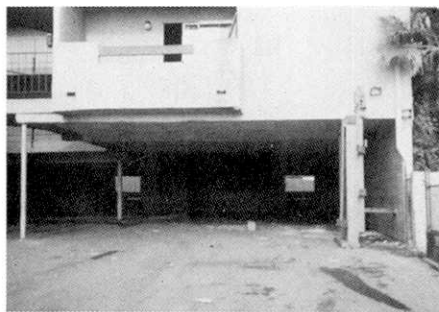
1階の水平鋼性が極端に小さく、1階が損傷を受けた住宅は、この他にも数多く見られた（写真29）。

(3) ショッピング・モールの建物

震源の真上の San Fernando valley は新興住宅地で、多数のデパートが集まる大規模なショッピング・モールが点在している。これらの建物のいくつかに大きな被害が生じ



写真 25 ト形接合部にせん断ひび割れ

写真 26 3階建て W 造集合住宅の 1 階部分
(Sylmar 地区)写真 27 大スパンを支えるためのせいが 70~80cm もある鉄骨の梁
(木材は、梁の落下を防ぐために地震後補強されたものである)写真 28 Northridge Meadows Apartment
(Northridge 地区)

た。ショッピング・モールの建物は、一辺が 100m を越えるものもあるような非常に大きなボックス構造で、外構面は開口が殆どない巨大な耐震壁で構成されており、これを屋組や床組（ダイヤフラム）で緊結して、地震力に抵抗する。内部は、鉛直力のみを支える 30~40cm の角の細い柱のフラットスラブ構造となっているのが一般的である。被害としては、外構面の耐震壁にせん断ひび割れがはいる、変形が増大すると、内部の柱が床スラブからはずれて、屋根や床組が落下する。

Northridge 地区の Topanga Plaza の 3 階建 RC 造の The Broadway というデパート（写真 30）では、外構面の厚さ 25cm の耐震壁に大きなせん断ひび割れが生じた（写真 31）。しかしながらその内部は、何の異常も見られなかった（写真 32）。

同じく Northridge 地区の Panorama Mall の中にある 2 階建て RC 造の The Broadway（写真 33）でも、外構面の耐震壁にせん断ひび割れが生じ（写真 34）、開口部の側柱が短柱化してせん断破壊を生じた（写真 35）。

(4) その他の被害

(1)~(3)で述べた特徴的な被害の他にも、大きな被害を受けた建築物、既往の被害地震

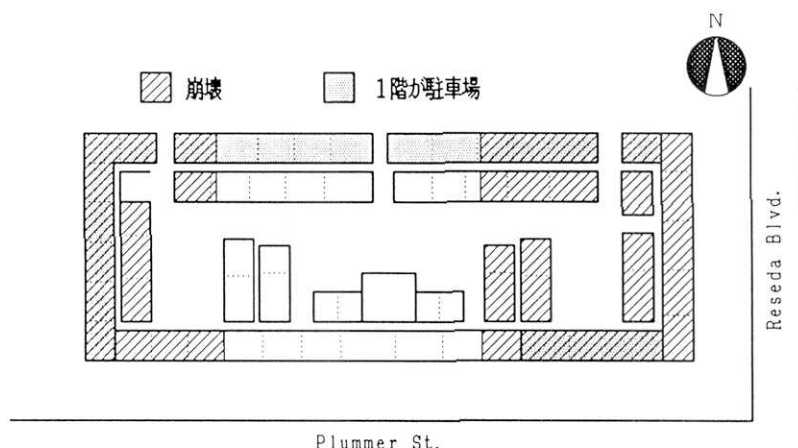


図6 Northridge Meadows Apartmentの平面図および被害状況

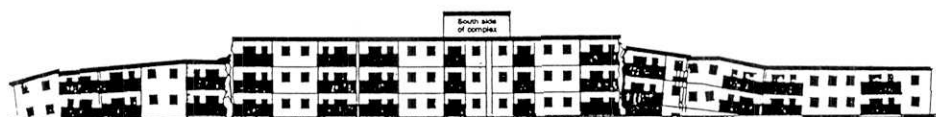


図7 被災後の南面立面 (L.A. times 1/24より転載)



写真29 The Matador Apartment (Northridge地区)



写真30 Topanga PlazaのThe Broadwayというデパート (Northridge地区)

でも見られた典型的な被害も多く見られた。

Granada Hills 地区にある5階建てRC造のKaiser Permanente Hospital事務所棟(写真36)は、2階の側柱が圧壊し(写真37)、2階が層崩壊した(写真38)。1階西側に耐震壁があるため、相対的に強度が低くなった2階が壊れたものと考えられる。また、隅柱の接合部が破壊し、南北のれんが造の妻壁が落下折損した(写真39)。長手方向(南北方向)の柱・梁接合部の梁下端主筋が通し配筋になっておらず、柱・梁接合部にはせん断補強筋がない(写真40)。

West Los Angeles 地区にある6階建てRC造フレーム構造の事務所建物(写真41)は、1階から4階の柱にX形ひび割れ、せん断破壊が見られた(写真42)。特に、南西面の2、3階の被害が著しく、連層耐震壁のない南東側にはらみ出していた(写真43)。

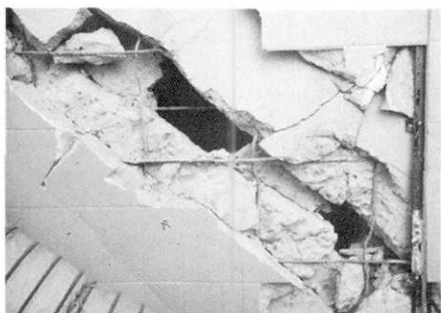


写真 31 外構面の厚さ 25cm の耐震壁の大きなせん断ひび割れ



写真 32 Topanga Plaza の The Broadway の内部



写真 33 Panorama Mall の中にある The Broadway (Northridge 地区)

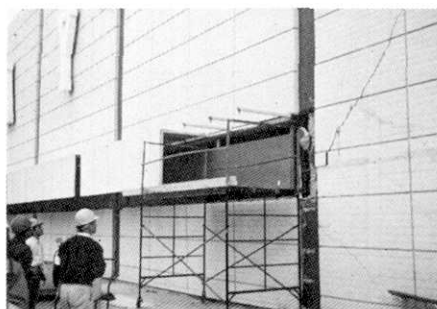


写真 34 外構面の耐震壁のせん断ひび割れ

Santa Monica 地区にある RC 造 6 階建て (地下 1 階 (ドライエリア) + 搭屋をもつ) の St. John's Medical Center (写真 44) は、2 階の北西面 (写真 44 の左半分) 外周壁面に X 形ひび割れが多数生じ、せん断破壊したが (写真 45)、それ以外の階および南東面 (写真 46、(写真 44 の右半分)) のひび割れは軽微であった。これは、北西面の 2 階が柱のクリアスパンが小さくなっていてシアスパン比が小さくなっていることと、南東面には直交する建物が接続しており、これが地震力の抵抗に寄与した可能性があること、などが原因として考えられる。

同じく、Santa Monica 地区にある RC 造 16 階建て集合住宅 (写真 47) では、短柱のせん断破壊 (写真 48)、妻面のつなぎ梁にせん断ひび割れが見られた (写真 49)。

この他、低層住宅および商店のガラスの被害 (ガラスが割れた所をベニヤ板や応急処置をしている) (写真 50, 51, 52)、外壁の被害 (写真 53)、屋根の被害 (写真 54, 55, 56) が多数見られた。また、住宅のレンガ造煙突の倒壊 (写真 57)、無筋のブロック塀の転倒崩壊も多数見られた (写真 58)。

また、建物には構造的な被害はないが、内装に被害があったため、大きなダメージを被った建物も数多くあった (写真 59)。

1971 年 San Fernando 地震で大きな被害を受け、建て直された RC 造 6 階建ての Olive View Medical Center (写真 60) は、強震記録の水平動最大加速度が地動で 0.92g、屋上階で 2.3g を記録したにもかかわらず構造的な被害はなかったが、配水管から

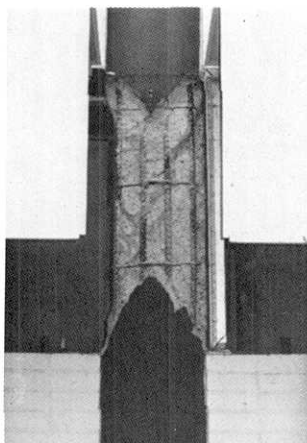


写真 35 開口部の側柱が短柱化してせん断破壊

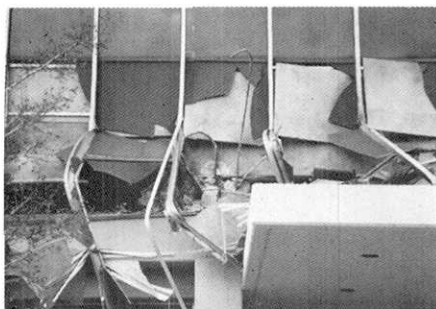
写真 36 Kaiser Permanente Hospital 事務所棟
(Granada Hills 地区)

写真 37 2階の側柱が圧壊



写真 38 2階が層崩壊



写真 39 隅柱の接合部が破壊し、南のれんが造の妻壁が落下折損



写真 40 長手方向(南北方向)の柱・梁接合部の梁下端主筋が通し配筋になっておらず、柱・梁接合部にはせん断補強筋がない

の水もれが生じ、業務に支障をきたした。

3.3 建築物の被害のまとめ

今回の Northridge 地震による建築物の被害は、Los Angeles の中心地である Down Town から北西に約 30km の、震源のある San Fernando valley の内部および周辺の一



写真41 6階建てRC造フレーム構造の事務所建物（West Los Angeles地区、三谷氏提供）

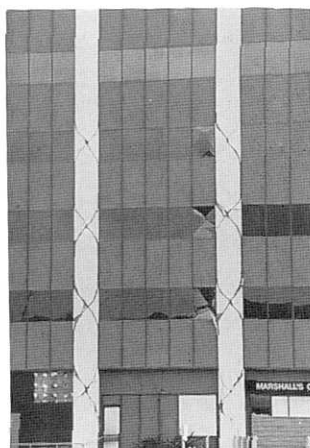


写真42 1階から4階の柱にX形ひび割れ、せん断破壊（三谷氏提供）



写真43 南西面の2、3階が連層耐震壁のない南東側にはらみ出す（三谷氏提供）



写真44 RC造6階建てのSt. John's Medical Center（Santa Monica地区）



写真45 2階北西面の外周壁面にX形ひび割れが多数生じ、せん断破壊



写真46 南東面のひび割れは軽微

部、そしてダウンタウンから西へ約20kmの海岸に近いSanta Monica地区、West Los Angeles地区であった。

被害のあった構造種別は、木造、補強組および無補強組積造、鉄筋コンクリート造、プレキャスト鉄筋コンクリート造、鉄骨造と多岐に渡り、被害形態も既往の被害地震で見られた様々なものが観察されたが、中でもアメリカ社会に根ざした、いわばアメリカ特有とも言える特定の利用目的をもった数種類の構造物に被害が集中した。



写真 47 16 階建 RC 造の集合住宅 Champagne Towers (Santa Monica 地区)



写真 48 短柱のせん断破壊



写真 49 妻面のつなぎ梁にせん断ひび割れ



写真 50 W 造低層住宅のガラスの被害 (Northridge 地区)



写真 51 W 造低層商店のガラスの被害 (Sherman Oaks 地区)

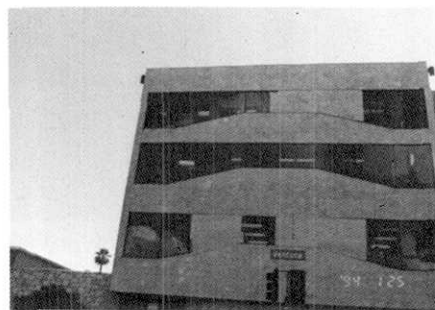


写真 52 4 階建事務所のガラスの被害 (Sherman Oaks 地区)

駐車場建物は、特に PCa 造で、各ユニット間の接合が不十分であったために、その接合部分の被害が多く、中にはそれが建物全体の被害をもたらしたものもあった。

木造集合住宅では、1 階を駐車場スペースとするために、極端に剛性の低い構造となり、中には、1 階が潰れて甚大な被害となった建物もあった。

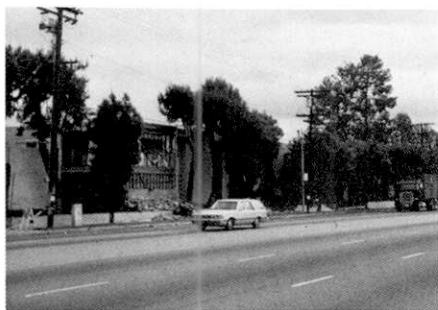


写真 53 住宅のれんが造外壁の崩落
(Northridge 地区)

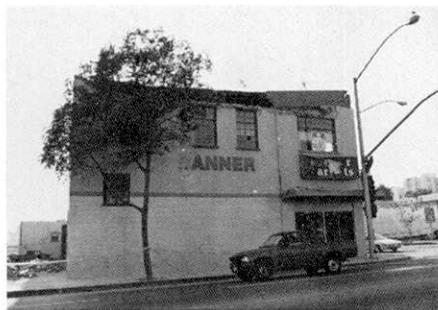


写真 54 2階建てブロック造商店の屋根の被害
(Santa Monica 地区)



写真 55 1階建てショールームの屋根が落下
(Santa Monica 地区)



写真 56 住宅の屋根の被害
(Northridge 地区)



写真 57 住宅のレンガ造煙突の倒壊
(Northridge 地区)



写真 58 無筋のブロック塀の転倒崩壊
(Northridge 地区)

四方を耐震壁で囲まれた巨大なショッピング・モールの建物には、耐震壁にせん断ひび割れの被害が多く見られた。

4. 地震応答解析

2.2 で述べたように、今回の地震では、非常に多くの強震記録が得られ、中でもいくつかの観測点では、ほぼ $1g$ あるいは、これをはるかに越える非常に大きな地動最大加速度が記録された。これに対して建築物の被害は、3. で述べたように、ある特定の利用



写真 59 ショッピングセンターの商店の内装天井の落下 (Glendale 地区)



写真 60 Olive View Medical Center

目的をもった数種類の構造物に被害が集中したが、非常に大きな最大加速度の割には、全体の被害の大きさはそれほどでもないという印象が否めない。

そこで、今回の地震で得られた強震記録のうち、非常に大きな最大加速度を記録した Tarzana, Sylmar および Santa Monica の強震記録 (CSMIP, 1994) と地震応答解析でよく用いられる既往の大地震の強震記録を用いた一自由度系による弾塑性地震応答解析を行ない、両者の比較を行なうことによって、大加速度を記録した Northridge 地震の強震記録の性質について検討した。

4.1 比較を行なう既往の強震記録

Tarzana, Sylmar および Santa Monica の強震記録 (以下 Northridge 強震記録と略す) の加速度波形を図 8 に示す。また、これと比較を行なう地震応答解析によく用いられる既往の強震記録の概要を Northridge 強震記録と比較して表 2 に示す。Northridge 強震記録の最大加速度は、既往の強震記録のそれより、はるかに大きいことがわかる。

これらの強震記録を用い、一自由度系の弾性および弾塑性応答解析を行なって、弾性加速度スペクトル、塑性率スペクトルを求め、比較を行なった。

4.2 弾性加速度スペクトル

まず、弾性加速度スペクトルを減衰定数 5% の場合について、Northridge 強震記録と既往の強震記録と比較して図 9 に示す。Northridge 強震記録は、いずれも短周期に非常に大きなピークをもち、長周期になるに従って応答加速度は小さくなっていくが、その小さくなり方は、かなり異なる。即ち Tarzana と Santa Monica の強震記録は、長周期になるに従い、応答加速度は急速に小さくなり、長周期では既往の強震記録よりその値は小さいが、Sylmar の強震記録は、長周期領域でも応答加速度はなかなか小さくならず、全ての周期帯において既往の強震記録よりその値は大きい。

4.3 復元力特性のモデル化

次に、振動系の復元力特性を弾塑性とした地震応答解析を行ない、Northridge 強震記録と既往の強震記録の地震応答を比較する。復元力特性モデルは、鉄筋コンクリート造を想定した D-Tri モデルとした。そのスケルトンカーブを図 10 に示す。図 10 を見ると、復元力特性モデルは様々なパラメータ、即ち、初期弾性剛性 k 、降伏せん断から Q_y 、ひび割れせん断から Q_c 、降伏変形 d_y 、降伏時の剛性低下率 α_y ($=$ 降伏点剛性/初期弾性剛性 $=Q_y/kd_y$)、降伏後の剛性低下率 β ($=$ 降伏後の剛性/初期弾性剛性) によって変化するが、これらのパラメータはそれぞれ独立なものではなく、次の関係を満

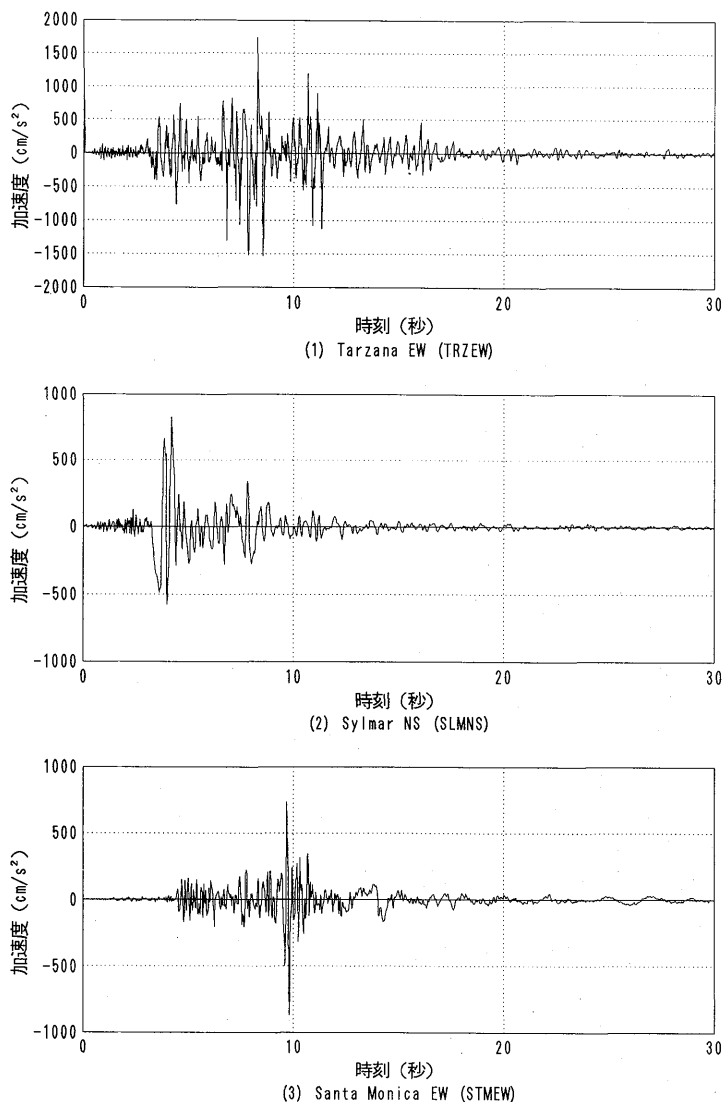


図8 Sylmar および Santa Monica の強震記録の加速度波形

たさなければならない。

$$Q_y = \alpha_y k \, dy$$

(1)

ここで、 Q_y ：降伏せん断力、 α_y ：降伏時の剛性低下率、 k ：初期弾性剛性

dy ：降伏変形

また、これらのパラメータはできるだけ実際の建物の復元力特性に近い形で設定する必要がある。特に、降伏点剛性 ($=\alpha_y k$) と降伏せん断力係数 $C_y (=Q_y/mg$, m ：質量, g ：重力加速度) は、地震応答に大きな影響を与える。そこで本論文では、降伏変形角 R_y を建物の頂部位置で $1/150$ と一定と仮定した。式(1)を式(2)の形に書き換え、簡単のため、降伏時の剛性低下率 α_y を $1/3$ 、ひび割れせん断力 $Q_c = 1/3 Q_y$ 、降伏後の剛性低下率 $\beta = 0.01$ 、階高 $h = 3.0\text{m}$ とすると、建物のパラメータは建物の層数 N と降伏せ

表2 比較を行なう既往の強震記録

| 名称 | 記録地名 | 方向 | 地震名 | 発生年 | 最大加速度 (cm/s ²) |
|-------|--------------|----|-----------------|-------|-------------------------------|
| ELCNS | El-Centro | NS | Imperial Valley | 1940年 | 342 |
| HACEW | 八戸港湾 | EW | 十勝沖 | 1968年 | 183 |
| THKNS | 東北大学 | NS | 宮城県沖 | 1978年 | 259 |
| TRZEW | Tarzana | EW | Northridge | 1994年 | 1744 |
| SLMNS | Sylmar | NS | Northridge | 1994年 | 827 |
| STMEW | Santa Monica | EW | Northridge | 1994年 | 866 |

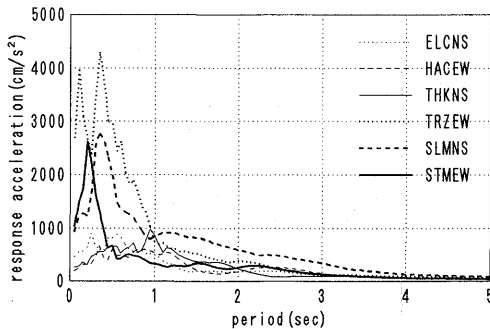


図9 弾性加速度スペクトル

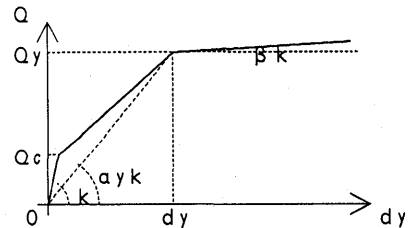


図10 復元力特性モデル

ん断力係数 C_y となる。

$$C_y m g = \alpha y k R_y N h \quad (2)$$

ここで、 C_y : 降伏せん断力係数、 m : 質量、 g : 重力加速度、

R_y : 降伏変形角、 N : 建物の層数、 h : 階高

4.4 塑性率スペクトル

降伏せん断力係数 C_y を 0.2, 0.3, 0.4 と変化させ、応答塑性率のスペクトルを Northridge Tarzana, 強震記録と既往の強震記録を比較して図 11 に示す。

Santa Monica の強震記録と既往の強震記録を比較すると、降伏せん断力係数 C_y が大きくなるほど建物の塑性変形が小さく、図 9 の弾性スペクトルと似た傾向を示すため、図 9 の弾性加速度スペクトルと同様に、短周期 (低層) の時は Tarzana, Santa Monica の強震記録が既往の強震記録より応答塑性率が大きいという傾向を示している。しかしながら、降伏せん断力係数が小さくなると建物の塑性化が進み、Tarzana, Santa Monica の強震記録の応答塑性率は、既往の強震記録より逆に小さくなっている。これは、降伏せん断力係数が小さくなると、応答塑性率が大きくなって振動系の周期が伸び、Tarzana, Santa Monica の強震記録のパワーが急激に落ちる周期領域に移行するためと考えられる。

しかしながら、Sylmar の強震記録と既往の強震記録を比較すると、あらゆるケースにおいて、Sylmar の強震記録は、既往の強震記録より応答塑性率ははるかに大きくなっている。

4.5 建物の層数による建物の耐力の変化を考慮した塑性率スペクトル

4.5 の塑性率スペクトルでは、建物の層数 N によらず降伏せん断力係数 C_y を一定としたが、建物の降伏せん断力係数 C_y は、低層のものほど大きいのが実情である。そこ

で、建物の層数 N によって降伏せん断力係数 C_y を変化させて、地震応答を比較する。建物の層数 N に対する降伏せん断力係数 C_y の分布としては、Los Angeles 近郊の建物のデータがないので、ここでは、(中埜, 1988; 三菱総合研究所, 1989) による静岡県下 1615 棟の RC 造建物の調査研究に基づいて作成した、昭和 47 年以降の RC 造建物の I_s 値分布を降伏せん断力係数 C_y の分布として用いることとする。これを表 3 に示す。

地震が起こった時、被害が生じる建物は、降伏せん断力係数 C_y が平均値より小さい建物と考えられるので、 C_y の平均値の分布および平均値 $-\sigma$ (σ : 標準偏差), 平均値 -2σ の分布について検討を行なった。

3つの降伏せん断力分布について、計算した応答塑性率スペクトルを図 12 に示す。

まず Tarzana, Santa Monica の強震記録についてだが、いずれの場合も Tarzana, Santa Monica の強震記録の応答塑性率は、既往の強震記録より低層側で大きく、高層側で小さくなっているが、 C_y が小さく、被害が生じるようなレベルになるに従って、その大小関係が逆転する層数は小さくなり、 C_y が平均値 -2σ の場合には、ほとんどの層数で Tarzana, Santa Monica の強震記録の応答塑性率は、既往の強震記録より小さくなっていることがわかる。

地震動の破壊力は、建物等の構造物にどれだけ被害を与えるかによって計られるべきであり、そういう意味では、Tarzana, Santa Monica の強震記録の破壊力は、既往の強震記録に比べてむしろ小さいといえる。

次に Sylmar の強震記録についてだが、これも 4.4 の塑性率スペクトルと同様あらゆるケースにおいて既往の強震記録より応答塑性率は大きくなっており、Sylmar の強震記録が単に地動最大加速度が大きいだけでなく、非常に破壊力のある地震動であることがわかる。

4.6 地震応答解析のまとめ

Northridge 地震で記録された非常に大きな地動最大加速度を記録した強震記録の中から、Tarzana, Sylmar と Santa Monica の強震記録と地震応答解析によく使用されるいくつかの既往の強震記録を用いた。一自由度系の弾性および弾塑性地震応答解析を行ない、その地震応答の比較を行なうことによって、破壊力について検討した。

その結果、Tarzana, Santa Monica の強震記録は、地動最大加速度は大きいがその破壊力は既往の強震記録に比べてむしろ小さいものであった。しかしながら、Sylmar の強震記録は、単に地動最大加速度が大きいだけでなく、非常に破壊力のある地震動であることがわかった。

Sylmar の強震記録の破壊力の大きさは、実際の建築物の被害で説明できる量をはるかに越えており、この記録の詳細な検討が今後必要となろう。

5. まとめ

1994 年 1 月 17 日午前 4 時 31 分 (日本時間午後 9 時 31 分) に Los Angeles の中心地であるダウンタウンから北西 30km の Northridge の深さ 18km を震源とし、マグニチュード 6.7 のいわゆる直下型地震の 1994 年 Northridge 地震が発生した。この地震は、マグニチュード 6.7 と地震の規模としては中規模であるが、震源深さが約 18km と比較的浅く、都市の直下で起きたために Los Angeles 各地に、人的、物的被害をもたらした。筆者等は、震央に近い Northridge を中心とした地域の、主として建築物の被害調査を行なった。

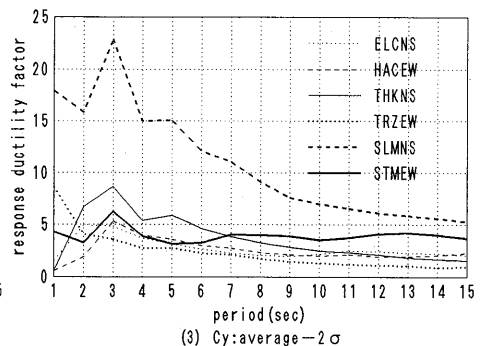
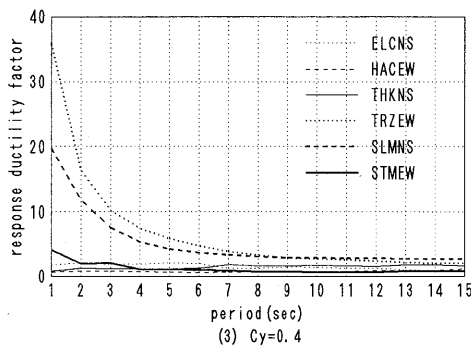
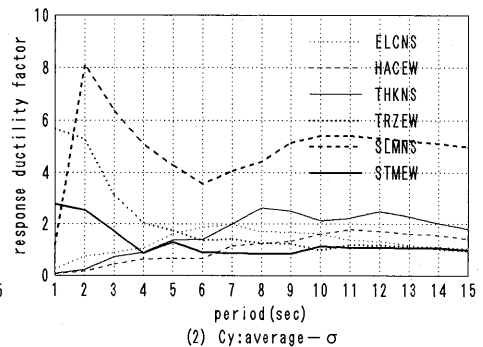
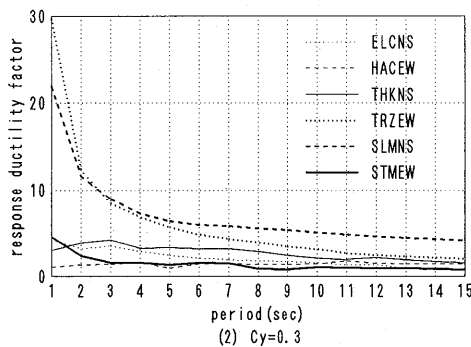
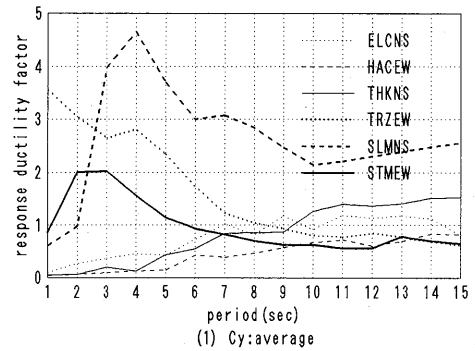
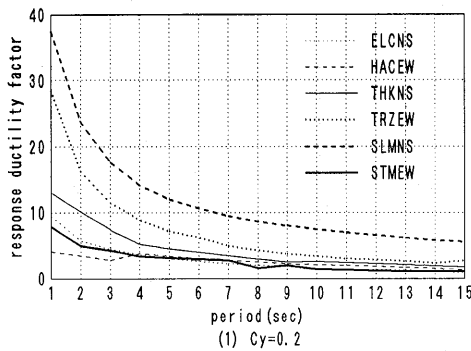


図 11 応答塑性率スペクトル

図 12 建物の層数による建物の耐力の変化を考慮した塑性率スペクトル

地震によって被害のあった主な地域は、震源のある San Fernando valley という、Los Angeles の中心地であるダウンタウンから北西に約 30km の盆地の内部および周辺の一部、そしてダウンタウンから西へ約 20km の海岸に近い Santa Monica 地区、West Los Angeles 地区である。

今回の地震による建築物の被害は、木造、補強および無補強組積造、鉄筋コンクリート造、プレキャスト鉄筋コンクリート造、鉄骨造と多岐に渡り、被害形態も既往の被害地震で見られた様々なものが観察されたが、中でもアメリカ社会に根ざした、いわばアメリカ特有とも言える特定の利用目的をもった数種類の構造物に被害が集中した。

駐車場建物は、特に PCa 造で、各ユニット間の接合が不充分であったために、その

表3 静岡県下で昭和47年以降に設計されたRC造建物の I_s 値分布(中埜, 1988;
三菱総合研究所, 1989)

| 層数 | I_s の平均 | 標準偏差 |
|----|-----------|-------|
| 1 | 1.531 | 0.528 |
| 2 | 1.272 | 0.510 |
| 3 | 0.983 | 0.421 |
| 4 | 0.868 | 0.341 |
| 5 | 0.739 | 0.295 |
| 6 | 0.661 | 0.247 |
| 7 | 0.599 | 0.247 |
| 8 | 0.556 | 0.229 |
| 9 | 0.519 | 0.214 |
| 10 | 0.488 | 0.201 |
| 11 | 0.463 | 0.191 |
| 12 | 0.445 | 0.183 |
| 13 | 0.432 | 0.178 |
| 14 | 0.422 | 0.174 |
| 15 | 0.414 | 0.170 |

接合部分の被害が多く、中にはそれが建物全体の被害をもたらしたものもあった。木造集合住宅では、1階を駐車場スペースとするために、極端に剛性の低い構造となり、中には1階が潰れて甚大な被害となった建物もあった。四方を耐震壁で囲まれた巨大なショッピング・モールの建物は、耐震壁にせん断ひび割れの被害が多く見られた。

今回の地震は、地震活動が高い地域で都市直下に起こったため、緻密な観測網が張りめぐらされており、総計360以上の観測点で強震記録が観測された。そして、特筆すべきことの1つに、震央から南へ約5kmのTarzanaにおいて1.82gの水平地動最大加速度が観測され、0.9g以上の水平地動最大加速度もこの他に3地点で観測されたことが挙げられる。そこで、最大加速度0.9g以上の強震記録のうちの3つについて、弾性塑性地震応答解析を行なって、その強震記録の破壊力の大きさについて検討した。

その結果、Tarzana, Santa Monicaの強震記録は、地動最大加速度は大きいが破壊力は既往の強震記録に比べてむしろ小さいものであった。しかしながら、Sylmarの強震記録は、単に地動最大加速度が大きいだけでなく、非常に破壊力のある地震動であることがわかった。

Sylmarの強震記録の破壊力の大きさは、実際の建築物の被害で説明できる量をはるかに越えており、この記録の詳細な検討が今後必要となろう。

謝 辞

この調査に関しては、日本建築学会地震災害委員会耐震連絡小委員会、EERI (Earth-quake Engineering Research Institute) および Englekirk & Sabol Consulting Engineers, Inc.の Mrs. Nakaki から地震被害に関する情報、資料の提供を受けた。調査の実施にあたっては、東京大学岡田恒男教授、同小谷俊介教授および千葉大学村上雅也教授のご助言を頂いた。また、本速報に掲載した写真の一部は、アールエム建築推進協議会三谷洋氏を通じて、米国留学中のご子息より提供いただいたものを使わせていただいた。関係各位に深く謝意を表する次第である。

参考文献

- Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 1994, Northridge Earthquake January 17, 1994 Preliminary Reconnaissance Report.
- 中埜良昭, 1988, 信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 東京大学学位論文.
- 三菱総合研究所, 1989, 東京における地震被害の想定に関する調査研究, 建築物分科学報告書.
- California Strong Motion Instrumentation Program, 1994, Processed CSMIP Strong-Motion Records from the Northridge, California Earthquake of January 17 1994, Release No. 1.

要 旨

1994年1月17日午前4時31分(日本時間午後9時31分)にLos Angelesの中心地であるダウンタウンから北西30kmのNorthridgeの深さ18kmを震源とし、マグニチュード6.7のいわゆる直下型地震の1994年Northridge地震が発生した。この地震は、マグニチュード6.7と地震の規模としては中規模であるが、震源深さが約18kmと比較的浅く、都市の直下で起きたためにLos Angeles各地に、人的、物的被害をもたらした。筆者等は、震央に近いNorthridgeを中心とした地域の、主として建築物の被害調査を行なった。

地震によって被害のあった主な地域は、震源のあるSan Fernando valleyという、Los Angelesの中心地であるダウンタウンから北西に約30kmの盆地の内部および周辺の一部、そしてダウンタウンから西へ約20kmの海岸に近いSanta Monica地区、West Los Angeles地区である。

今回の地震による建築物の被害は、駐車場建物、木造集合住宅、ショッピング・モールといった、特定の利用目的をもった数種類の構造物に被害が集中した。

駐車場建物は、特にPCa造で、各ユニット間の接合が不充分であったために、その接合部分の被害が多く、中にはそれが建物全体の被害をたらしたのもあった。木造集合住宅では、1階を駐車場スペースとするために、極端に剛性の低い構造となり、中には1階が潰れて甚大な被害となった建物もあった。四方を耐震壁で囲まれた巨大なショッピング・モールの建物は、耐震壁にせん断ひび割れの被害が多く見られた。

また今回の地震は、地震活動が高い地域で都市直下に起こったため、緻密な観測網が張りめぐらされており、非常に多くの観測点で強震記録が観測された。そして、震央から南へ約5kmのTarzanaにおいて1.82gの水平地動最大加速度が観測され、0.9g以上の水平地動最大加速度もこの他に3地点で観測された。そこで、最大加速度0.9g以上の強震記録のうちの2つについて、弾塑性地震応答解析を行なって、その強震記録の破壊力の大きさについて検討した。

その結果、Tarzana, Santa Monicaの強震記録は、地動最大加速度は大きいとその破壊力は既往の強震記録に比べてむしろ小さいものであった。しかしながら、Sylmarの強震記録は、単に地動最大加速度が大きいだけでなく、非常に破壊力のある地震動であることがわかった。

Sylmarの強震記録の破壊力の大きさは、実際の建築物の被害で説明できる量をはるかに越えており、この記録の詳細な検討が今後必要となろう。