

1994年ノースリッジ地震

1994 NORTHRIDGE EARTHQUAKE

調査報告書

(社内技術資料)

営業所一覽表

事業所	TEL	FAX
本社	03-3263-3611	03-3262-7737
技術センター	03-3727-6158	03-3727-6247
関西技術センター	0745-32-6486	0745-32-5616
関東支社	03-5632-6800	03-5632-6815
埼玉支店	048-653-7291	048-653-7293
横浜支店	045-671-5466	045-671-5477
川口事務所	0482-54-9121	048-653-7293
川崎事務所	044-752-8171	045-671-5477
相模原事務所	0427-40-2535	045-671-5477
栃木事務所	0286-45-8341	0286-45-5569
群馬事務所	0273-24-7681	0273-24-7819
千葉事務所	043-254-5571	043-254-5651
水戸事務所	0292-27-3423	0292-27-3422
新潟事務所	025-243-2711	025-243-2712
関西支社	06-536-1591	06-536-1503
兵庫事務所	078-811-7916	078-811-7919
滋賀事務所	0775-26-0755	0775-26-3507
奈良事務所	0745-31-0540	0745-32-5616
京都事務所	075-361-7831	075-361-7832
九州支社	092-831-2511	092-822-2393
長崎支店	0958-21-7150	0958-21-7180
鹿児島事務所	0992-57-1522	0992-57-1396
宮崎事務所	0985-25-3267	0985-25-3024
熊本事務所	096-382-5158	096-382-2936
北海道支社	011-822-4171	011-822-4727
釧路事務所	0154-22-8356	0154-22-8357
函館事務所	0138-43-1154	0138-43-1154
苫小牧事務所	0144-57-5956	0144-57-5956
東北支社	022-291-4191	022-291-4195
山形支店	0236-32-3979	0236-32-3929
青森事務所	0177-22-5861	0177-22-5876
秋田事務所	0188-64-4770	0188-65-4259
盛岡事務所	0196-22-6577	022-291-4195
福島事務所	0245-45-1176	0245-45-1322
中部支社	052-522-3171	052-524-2729
金沢事務所	0762-49-4492	0762-49-4495
静岡事務所	054-284-2010	054-284-2091
三重事務所	0592-29-0880	0592-29-0877
中国支社	082-238-7227	082-238-7949
四国支店	0899-72-6554	0899-72-6616
岡山事務所	086-244-8161	086-244-6165
高知事務所	0888-23-5210	0888-23-5219
山口事務所	0839-25-2080	0839-25-2081
海外事業部	03-3239-4451	03-3239-4597
シカゴ・ホル支社	65-7473233	65-7482325
ワシントン・ホル支社	60-3-7826327	60-3-7815719
ジャカルタ事務所	62-21-5200909	62-21-5253077

1994年ノースリッジ地震

1994 NORTHRIDGE EARTHQUAKE

調査報告書

基礎地盤コンサルタンツ株式会社

はじめに

1994年1月17日未明、ロサンゼルス北部のノースリッジを震源とするマグニチュード6.7の地震が発生した。この地震による死者は57人、負傷者1万人以上、被害額は200億ドルにのぼった。この地震の有感範囲は、カリフォルニア州南部、ネバダ州南西部、アリゾナ州西部、メキシコ北西部までの地域に及んだ。

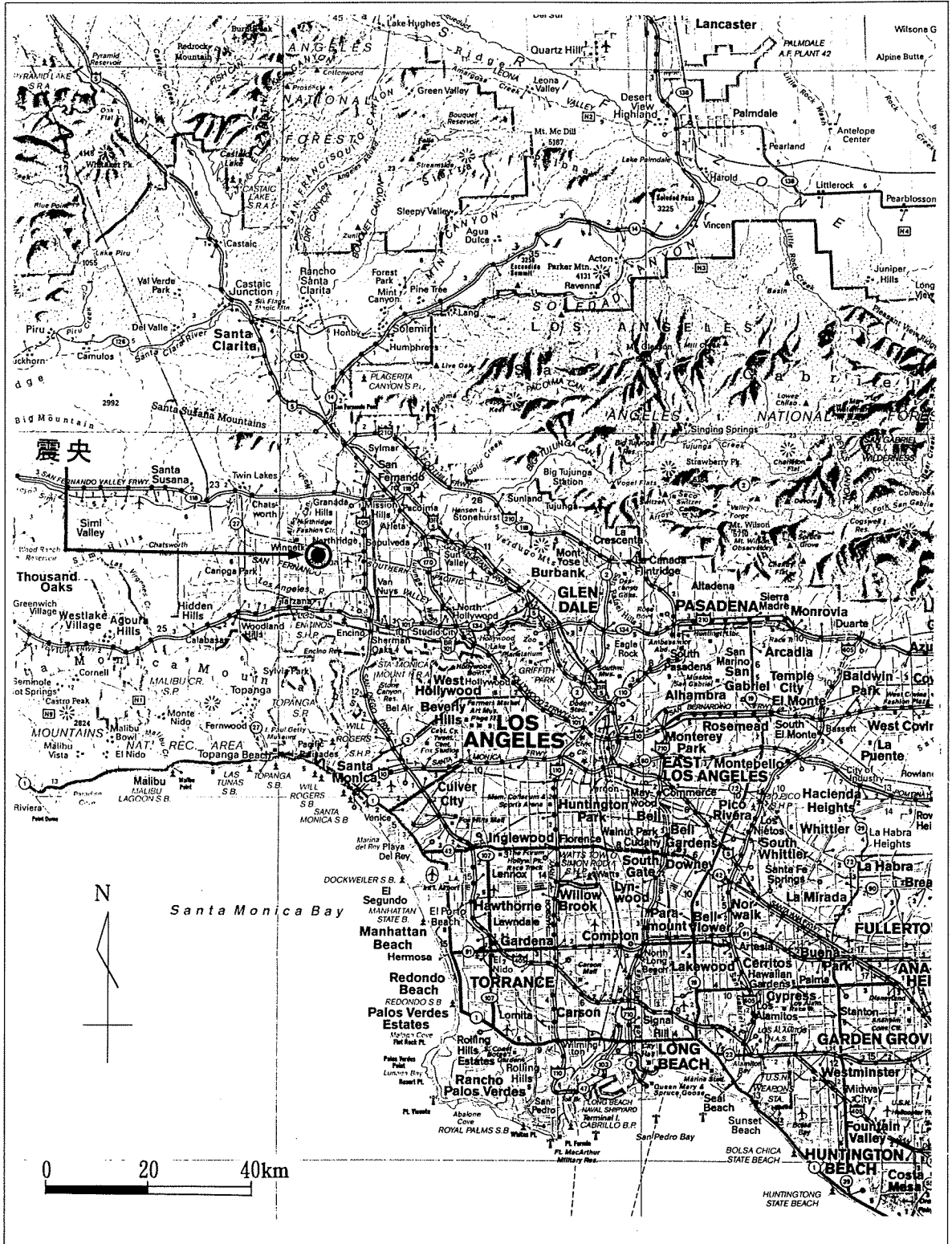
地震規模の割に大きな被害が生じたのは、震源がロサンゼルス郊外の住宅地域の直下であったため局所的に大きな地震動が生じたことや地震断層の影響と考えられる。今回の地震は、将来、南カリフォルニア地域で多数の死傷者と莫大な被害がでることが懸念されているM8級の巨大地震よりは小規模であったが、サンフランシスコ市南東方を震源とするロマプリエタ地震(1989年, M7.1, 死者62人)以来の大きな被害地震となった。

この報告書は、当社が地震から3ヶ月半ほど後の5月初旬に行った現地調査に基づいて作成されたものである。地震後かなりの時間が経過していたので、大きな被害を受けた構造物は、ほとんど取り壊されたり復旧の最中であったりして、地震直後の状況がそのまま残っているのは極く小数であったが、地震被害の生々しさをかいま見ることができた。また復旧途上の構造物については復旧工法などを学ぶことができた。現地調査の目的は地盤に関する災害の形態・程度を目で確かめるとともに、その災害と地形・地盤条件の関係を把握することである。そのために現地でのヒアリングや資料収集等に重点を置いた調査計画を立案したが、得られた資料はあまり多くなかった。しかしながら時間が経った割には地盤災害の痕跡が残っており、地盤のコンサルタントとして興味深い現象が少なからず観察できたことは、予想外の収穫であった。このような事情から、当報告書は現地調査の時点で観察することができた地盤及び構造物の被害を紹介することが主な内容となっているが、その他の被害についても既往資料を利用して、出来るだけ紹介するようにした。

報告書の作成に際して、現地調査結果と合わせて既往の各種調査報告書を参考にさせていただいた。今後、個々の被害を分析した報告書が内外から出てくると思われるが、それらと併せて利用していただければ幸いである。

1994年8月

被害地域案内図



目 次

	頁
1. 地震の概要	
1.1 地震の諸元	1
1.2 南カリフォルニアの地震活動	5
1.3 過去の被害地震	7
1.4 強震記録	13
2. 地形・地質概要	
2.1 サンフェルナンドバレー地域	19
2.2 ロサンゼルス盆地地域	23
2.3 ロサンゼルス地域の表層地質	25
3. 被害の概要	
3.1 概要	27
3.2 1971年サンフェルナンド地震との比較	29
4. 地盤被害	
4.1 被害地点	31
4.2 地盤の液状化と地盤変状	32
4.3 斜面及び盛土崩壊	53
5. 道路橋の被害と復旧	
5.1 概要	59
5.2 被害の復旧	63
6. ライフライン関連施設の被害	69
7. 建築物の被害	
7.1 概要	71
7.2 被害事例	75
おわりに	79
引用・参考文献リスト	81

1. 地震の概要

1.1 地震の諸元

1994年1月17日未明、カリフォルニア州ロサンゼルス市の北西約32kmを震源とするM6.7の地震が発生した。地震の諸元は次のとおりである。

発生日月日 : 1994年1月17日4時31分(太平洋標準時間 PST)
マグニチュード : 6.4 (M_L : ローカルマグニチュード)
6.8 (M_s : 表面波マグニチュード)
6.7 (M_w : モーメントマグニチュード)
震央位置 : 北緯34度12.68分, 西経118度32.25分 深さ18km

本震の震央位置は当初ノースリッジ (*Northridge*) とされていたが、後日、やや南のレセダ (*Reseda*) に変更された。上記の震央位置は変更後の値である。この地震は1971年に同地域で起こったサンフェルナンド地震 (M_w 6.7, M_L 6.6) とマグニチュードは同じであるが、1989年にサンフランシスコ湾岸地域を襲ったロマプリエタ地震 (M_s 7.1) より小さい。わが国で最近起こった同規模の被害地震としては1987年千葉県東方沖地震 (M_b 6.7 : M_b は気象庁マグニチュード), 1984年長野県西部地震 (M_b 6.8) がある。わが国の典型的な大地震である1923年関東地震 (M_b 7.9) や1964年新潟地震 (M_b 7.5) 及び1983年日本海中部地震 (M_b 7.7) などに比べると今回の地震の規模はかなり小さい。

地震後、数週間に約3000回 (M1.5以上) の余震が発生した。本震及び主な余震の分布を図1.1に示す。地震発生後5日間でM5.0以上の余震が3回、M4.0～4.9の余震が36回発生している。最大の余震は17日午後3時33分に発生したM_w 5.3の地震である。余震の数は多いが、その経過時間による減少傾向は、カリフォルニアで発生する他の大きな地震と一致している。

図1.2は震源付近から北北東方向の断面 (測線位置は図1.1参照) を示したものである。余震は南南西方向に約45°の勾配の傾斜面に沿って5～18kmの深さの範囲に分布している。

各地の震度 (MM震度階) は図1.3に示すとおりである。震源地であるノースリッジ付近の震度は最大9に達しており、震度8の地域も震央から半径20km程度の範囲に広がっている。しかし南東に約60km離れたロサンゼルス市中心部の震度は5程度である。MM震度階とわが国で使われている気象庁震度階の定義は表1.1に示すとおりである。気象庁震度階およびMM震度階と対応する加速度の関係は、

それぞれ河角(1943)及び *Gutenberg and Richter*(1942)によって提案されているが、それらの関係式から気象庁震度階 I_{MA} と MM 震度階 I_{MM} の関係を求めると次のようになる。

$$I_{MA} = \frac{2}{3} I_{MM} - 0.3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式によれば、この地震での最大震度 9 は気象庁震度階で表すと約 6 弱に相当し、MM 震度の 5 は気象庁震度 3 に相当することになる。すなわちこの地震の震央付近の半径 20km 程度の狭い範囲における震度は、気象庁震度階で 5(強震)程度となり、その一部では震度 6(烈震)になったということである。しかし震央から約 60km 離れたロサンゼルス市中心部では震度は 3(弱震)程度と小さくなっている。

わが国で 1993 年 1 月に起こった釧路沖地震 (M7.8) の際には、震源付近の釧路市の震度が 6 となり、震央から 700km 以上離れた小名浜でも震度 4 が記録された。また同年 7 月の北海道南西沖地震 (M7.8) では震源地付近に気象官署がないため震度 6 は記録されていないが、最大震度 5 を記録し、200km 以上離れた青森で震度 4 であった。これらの地震に比べると、今回の地震は震源のごく近傍では地震動が大きかったが、その範囲は極めて狭かったことが特徴である。

日本付近の M が 5.5 ～ 8 程度の浅発地震については、余震域の直径 L(km) と地震のマグニチュード M の間に次式に示す関係⁷⁾ が得られている。

$$\log L = 0.5M - 1.8 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式によれば、ノースリッジ地震の余震域の直径は 35km、釧路沖、北海道南西沖の両地震は 126km となり、余震域の大きさを比較してもかなり異なる。すなわちノースリッジ地震は、中程度の地震規模の割に大きな被害が生じたのは、典型的な都市直下型地震であったためといえよう。

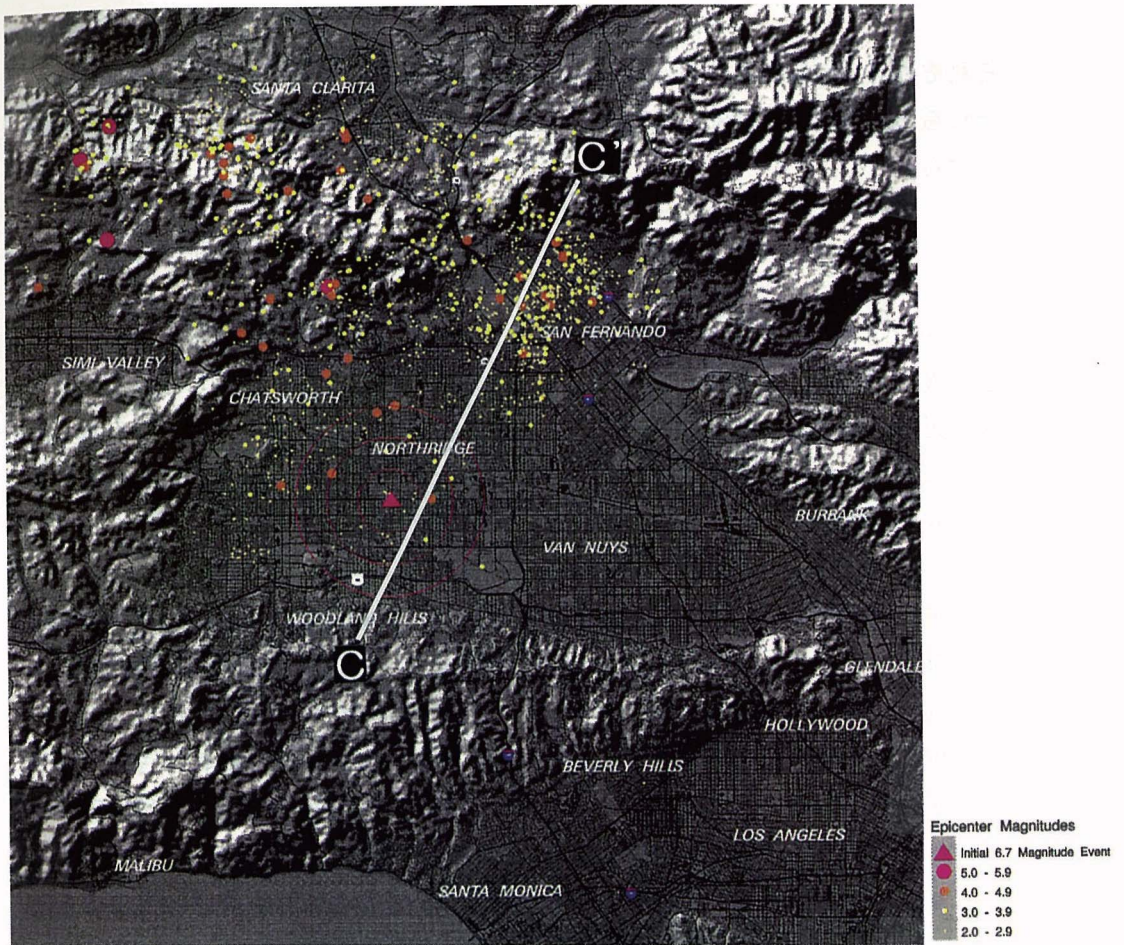


図 1.1 本震及び余震の平面分布²⁾

Map of Northridge earthquake and its aftershocks

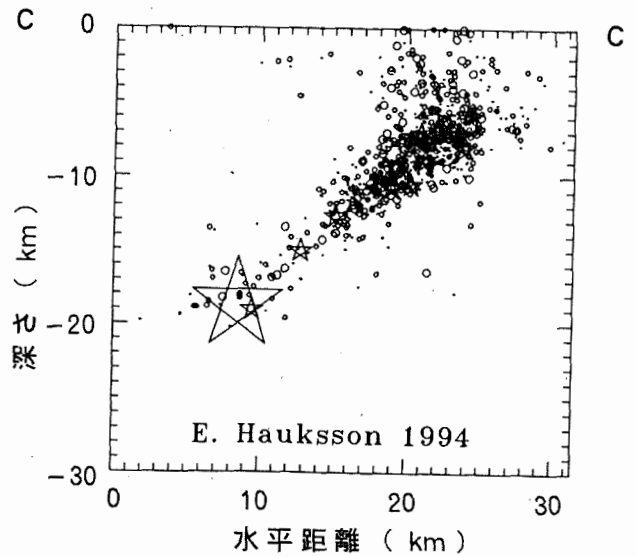


図 1.2 本震及び余震の深度分布³⁾

Main Shock and aftershock locations with respect to depth

表 1. 1 気象庁震度階と改正メルカリ震度階の比較⁷⁾

Comparison between the Modified Mercalli (MM) Scale and the Japan Meteorological Agency (JMA) Scale

気象庁震度階級 (1949)	改正メルカリ震度階 (1931)
0: 無感 人体に感じないで地震計に記録される程度	1: 地震計にのみ感ずる程度の地震。特に感じやすい状態にあるごく少数の人に感ずる程度。
1: 微震 静止している人や、特に地震に注意深い人だけに感ずる程度の地震 (0.8~2.5gal)。	2: ビルの上層に静止しているような少数の人にのみ感ずる。動きやすく作られた物体は揺らぐ。
2: 軽震 大勢の人に感ずる程度のもので、戸障子がわずかに動くのがわかるぐらいの地震 (2.5~8gal)。	3: 特にビル上層の屋内で、著しく感じ、止まっている自動車がわずかに揺らぐが、多くの方は地震とは思わない。
3: 弱震 家屋が揺れ、戸障子がガタガタと鳴動し、電灯のようなつり下げ物は相当揺れ、器内の水面の動くのがわかるぐらいの地震 (8~25gal)。	4: 日中家内の多数の人に感じ、皿、窓ガラス、扉などが揺れ、止まっている自動車はかなり揺らぐ。
4: 中震 家屋の動揺が激しく、すわりの悪い花瓶などは倒れ、器内の水は溢れ出る。また歩いている人にも感じられ、多くの人は戸外に飛び出す程度の地震 (25~80gal)。	5: ほとんど全部の人に感じ、多くの方は目が覚める。すわりの悪い物は倒れ、振り子時計が止まる。
5: 強震 壁に割れ目が入り、墓石、石灯籠が倒れたり、煙突、石垣などが破損する程度の地震 (80~250gal)。	6: 全ての人に感じ、多くの方は驚いて戸外に飛び出す。
6: 烈震 家屋の倒壊は30%以下で、山崩れが起き、地割れを生じ、多くの人は立っていることが出来ない程度の地震 (250~400gal)。	7: ほとんど全ての方が戸外に飛び出し、すわりの悪い物や、設計の良くない物にはかなりの損害がある。
7: 激震 家屋の倒壊が30%以上に及び、山崩れ、地割れ、断層等を生ずる程度の地震 (400gal以上)。	8: 堅ろうな建物にもかなりの損害があり、煙突、記念碑、壁などが墜落し、家具が横倒る。また砂や泥などを多少吹きだし、井戸水に変化がある。
	9: 堅ろうな建物にも損害があり、一部つぶれ、地面に亀裂が著しく現れる。
	10: 石工物の大部分破損。地面に亀裂多大。鉄道線の湾曲。
	11: 残存建物少なく、橋梁破損、大亀裂。
	12: あらゆる物が破壊。地表に波形が見られ、あらゆる物は空中に投げ出される。

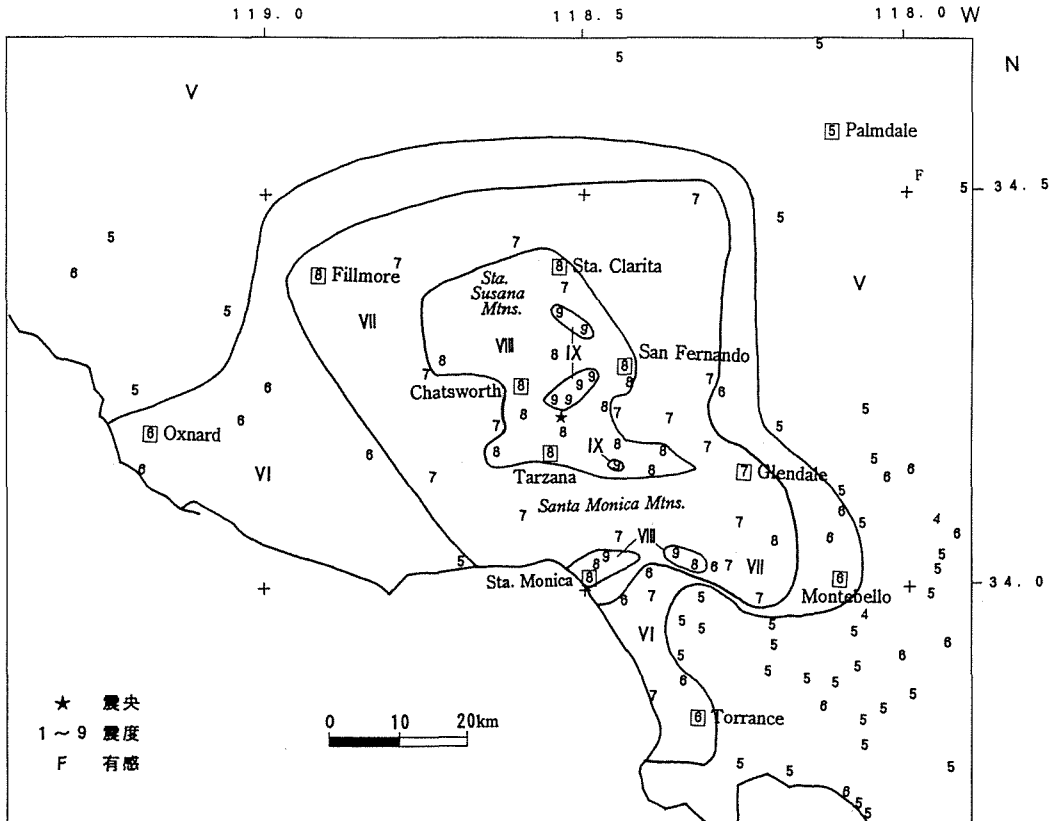


図 1. 3 改正メルカリ震度階による震度分布⁴⁾
Distribution of earthquake intensity based on MM scale

1.2 南カリフォルニアの地震活動

図 1.4 に米国（アラスカを除く）における既往の地震分布を示す。地震活動のほぼ 90 % がカリフォルニア州とネバダ州西部地域に集中している。地震は既存の断層沿いの地域で起こり、震源の深さは 15 ~ 25km と浅い。震源が浅いということは、地震が起こると大きな被害を生じる可能性が高いということの意味する。

カリフォルニア地域の主要な断層は、太平洋プレートと北アメリカプレートの境界にあるサンアンドレアス (*San Andreas*) 断層で、その長さは 1,000km 以上にも及ぶ。この断層の運動により過去に大きな地震が幾つも発生している。既往の研究によれば、南カリフォルニア地域では平均して 4 年に 1 度、最低 M6.4 の地震が発生すると言われている。1920 年代以降、ロサンゼルス周辺地域で M4.8 ~ 6.7 の中規模地震が 17 回起こった。これらの地震は南カリフォルニア地域に広く分布する第四紀後期の断層の運動によって引き起こされたものである。

サンフェルナンドバレー (*San Fernando Valley*) の構造は、交差する 2 つの断層系に支配されている。北西方向のサンガブリエル (*San Gabriel*) 断層を含むサンアンドレアス断層系は右横ずれ断層であるのに対して、東西方向の断層系は山脈の隆起帯に沿って分布する北に傾斜する逆断層である。後者の断層系であるサントスザーナ (*Santa Susana*) - シェラマドレ (*Sierra Madre*) 構造線はサンフェルナンドバレーの中にある。図 1.5 にはロサンゼルス盆地 (*Greater Los Angeles Basin*) で発生した主な地震の震央と主要な断層の位置を示す。1970 年代初期から、地震はロサンゼルス盆地の北縁に集中して起こっている。1920 年代以降、サンフェルナンド地域で発生した地震のうち、断層が地表に現れた事例は 1971 年サンフェルナンド地震のみである。多くの場合、断層は地表に現れず、地震と近傍の断層との関連は本震の発震機構と余震の分布より推定されるが、今回の地震も例外ではない。今回の地震はサンアンドレアス断層系の走向方向の大きな屈曲に伴って圧縮力を受けている地域で起こった。本震の際の岩盤の破壊は、南に傾斜する逆断層の深さ 18km の地点で始まった。この断層は今まで知られていなかったものであるが、今回の地震でも地表に達しなかったため、いわゆる伏在衝上断層 (*blind thrust fault*) に分類されるものである。この地域は他にも存在が知られていない断層が多くあると推定されるので、カリフォルニア州沿岸地域は地震危険度が相対的に高いといえる。ノースリッジ地震は被害の面では大きな地震であったが、この地震の発生によって今後 30 年間にロサンゼルス地域でより大きな地震が発生する可能性が減少したわけではない。依然として 5 ~ 10 % の確率で大地震が南カリフォルニアを襲う可能性は消えていない。

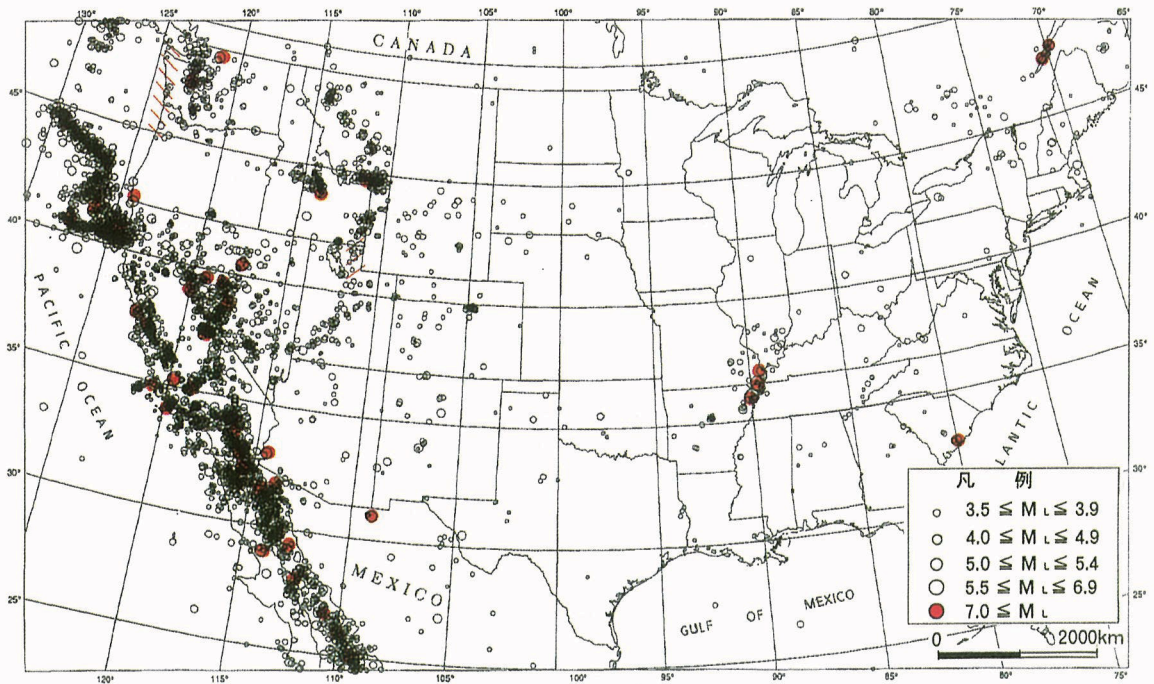


図 1. 4 北アメリカ大陸の地震活動⁹⁾
Seismic activity in the United States

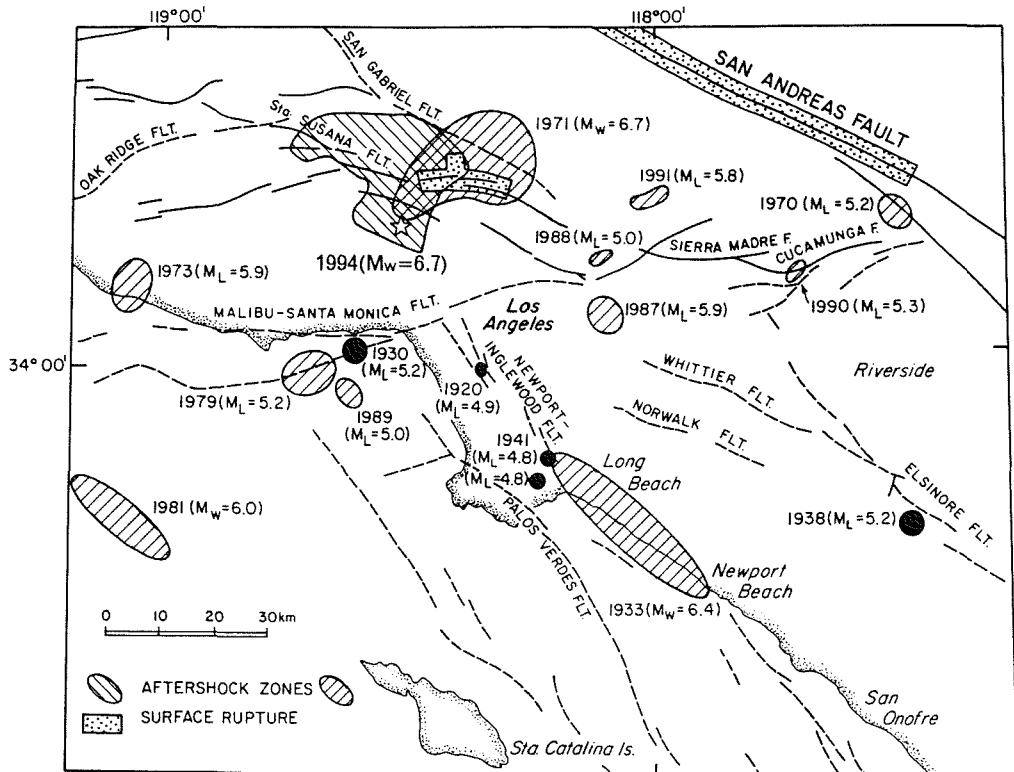


図 1. 5 主要な断層と周辺地域に発生した地震 ($M \geq 4.8$, 1920年以降)³⁾
Location of major faults, as well as the epicenters of significant earthquakes that have occurred the Greater Los Angeles Basin

1.3 過去の被害地震

(1) 概要

南カリフォルニア地域では、過去に多くの被害地震が発生している。1769年以降に発生した主な被害地震をまとめると表 1.2 になる。これらの地震の概要を次頁以降に示す。同表の地震の震央は図 1.5 を参照されたい（一部の地震は図の範囲外である）。

表 1.2 南カリフォルニアで発生した被害地震 (M 6.0以上)^{1) 2) 13) 14)}

List of past disastrous earthquake (M>6.0) which occurred in southern California

	発 生 日 時	地震名または地域名	マグニチュード
1	1812年12月21日	カリフォルニア CALIFORNIA	—
2	1857年1月9日	南カリフォルニア SOUTHERN CALIFORNIA	8.3
3	1872年3月26日	オーエンスバレー OWENS VALLEY	—
4	1927年11月4日	ポイント・アルゲロ西方沖 WEST OF POINT ARGUELLO	7.5
5	1933年3月10日	ロングビーチ LONG BEACH	6.4
6	1940年5月18日	インペリアルバレー IMPERIAL VALLEY	7.0
7	1952年7月21日	カーンカウンティ KERN COUNTY	7.7
8	1971年2月9日	サンフェルナンド SAN FERNANDO	6.6
9	1987年10月1日	ホイットティア・ナローズ WHITTIER NARROWS	6.1

(2) 1812年のカリフォルニア地震

発生日時 1812年12月21日 午前11時頃

震央位置 34° N, 120° W トランスバース(Transverse)地方の沖合

推定最大震度 X

この地震では、サンタバーバラ (*Santa Barbara*), ベンチュラ (*Ventura*), ロサンゼルス各郡で被害があった。地震の30分程前に大きな前震があったため、人々は建物から飛び出しており、このため本震が来たときに多くの人命が救われたといわれている。数人が負傷したが死者はなかった。プリシマ (*Purisima*) ミッション教会と多くのミッションの建物が壊れた。サンタイネツ (*Santa Ynez*) ミッションでは、教会の建物の角が崩壊し、屋根が壊れるとともに壁に亀裂が入った。また多くの新しい家が壊れた。サンタバーバラでは全てのミッションの建物が著しい被害を受け、教会は後に再建された。また中心の広場では幾つかの建物が倒壊し、残りも被害を受けた。サンブエナベンチュラ (*San Buenaventura*) ミッションでは、教会の塔が壊れ、正面の大部分も建て直さなければならなかった。サンフェルナンド ミッションでは、壁が倒壊するのを防ぐために30本の柱材が使用された。翌年2月まで強い余震が発生し、弱い余震は4月まで続いた。

この地震では過去の地震の中で最も大きな津波が発生した。津波の遡上高は、ガビオタ (*Gaviota*) で15m, サンタバーバラで9~10m, ベンチュラで4.5m以上であった。この津波はサンフランシスコ港にも影響を与えた。

(3) 南カリフォルニア地震

発生日時 1857年1月9日 午前8時頃

震源位置 35° N, 119° W フォートテホン沖

推定最大震度 X-XI

地震は激しい揺れを引き起こし、ロサンゼルスとサンフランシスコの間の陸軍基地であるフォートテホン (*Fort Tejon*) の近くから長さ約64kmにわたって地盤の亀裂が生じた。柵は地盤の水平移動のためS字型に変形した。基地では建物や樹木が転倒した。ベンチュラの教会の屋根が壊れ、ベンチュラ近傍のサンタクララバレー (*Santa Clara Valley*) を始めとする多くの場所で井戸の水が枯れてしまった。逆にサンタバーバラでは新しい泉ができた。多くの場所で地盤に大きな裂け目ができた。この地震は白人が入植して以来、海岸地方では最も激しい地震であった。

(4) オーエンスバレー地震

発生日時 1872年3月26日 午前2時30分頃

震源位置 36°1/2N, 118°W オーエンスバレー, ローンパイン付近

推定最大震度 X-XI

カリフォルニア州のほとんど全域とネバダ, アリゾナの両州で感じられた。数千回の余震が起こったが、そのうち幾つかは大きなものであった。この地震は1857年のカリフォルニア地震や1906年のサンフランシスコ地震より大きなものであった。地震動はオーエンスバレー (*Owens Valley*) で最も激しく、シエラネバダ (*Sierra Nevada*) 山脈の西麓沿いやモハーベ (*Mojave*) 砂漠及びグレートバレー (*Great Valley*) の東部でも大きかった。最も被害の大きかったのはローンパイン (*Lone Pine*) である。250～300人の住民のうち27人が死亡し、56人が負傷した。また59棟の家屋(多くは日干しレンガ)のうち52棟が壊れた。ローンパインから14kmほど北のインデペンデンス (*Independence*) にも同じような家屋があったが、死亡者はほとんどなかった。ローンパインの107km南のインディアン居住地では家屋に亀裂が入った。オーエンス湖の近くの地盤に多くの亀裂や陥没が生じた。ある地区では60～90mの幅で、深さ6～9m陥没し、幾つかの細長い池ができた。ハイウィー (*Haiwee*) の近くからビショップ (*Bishop*) に至る地域で地形の変状が生じた。アラバマヒル (*Alabama Hill*) の東で断層に沿って高さ7mの北に続く断層崖が形成された。断層の水平方向のずれは最大6m程度と考えられる。

(5) 1927年の地震

発生日時 1927年11月4日 午前5時50分

震源位置 34°1/2N, 121°1/2W, ポイント・アルゲロの西

推定最大震度 IX-X

この地震で、ロンポック (*Lompoc*) からホンダ (*Honda*) とサーフ (*Surf*) の海岸までの範囲で急斜面の崩壊・落石があった。ロンポックでは煙突が倒壊し、アロヨグランデ (*Arroyo Grande*) とサンタマリア (*Santa Maria*) では一部被害があった。ロベルト (*Roberd*) 牧場では家屋の基礎が移動した。地震は、モーガンヒル (*Morgan Hill*) からレドンドビーチ (*Redondo Beach*), サンガー (*Sanger*) に至る地域で感じられた。ポイント・アルゲロ (*Point Arguello*) から27及び14マイル沖の船でも地震動が感じられた。サーフの検潮儀で約1.8mの津波が観測された。1925年のサンタバーバラ地震よりも大きかったが、震源が居住地域から離れていたため被害は小さかった。

(6) ロングビーチ地震

発生日時 1933年3月10日 午後5時54分
震源位置 33.6°N, 118.0°W, ロングビーチ
推定最大震度 IX

この地震の規模は大きくなかったが、震源地域内に脆弱な建物が多い地区があったため大きな被害がでた。115人が死亡し、数百人が負傷したこの地震は米国史上、2番目に被害が大きかった地震といわれている。損害額は4000万ドルにのぼった。1906年のサンフランシスコ地震と異なり、地震動による被害が多く火災は少なかった。震央はニューポートビーチ (*Newport Beach*) 沖であるが、最も被害が大きかったのはロングビーチ (*Long Beach*) から工業地区である南ロサンゼルスにかけての地下水位の高い沖積地盤上の密集地域であった。それに加えて脆弱な建物が多いことが被害を大きくした。最も地震動が大きかったのは、サウスロサンゼルスの南西からマンハッタンビーチ (*Manhattan Beach*) にかけての線、サウスロサンゼルスからアナハイム (*Anaheim*)、ラグナビーチ (*Laguna Beach*) までの線で区分される地域である。コンプトン (*Compton*) では、局所的に悪い地盤上に立つ建物に大規模な破壊が生じた。ロングビーチでは建物が倒壊し、タンクの屋根が壊れ、家屋は基礎からはずれた。倒壊をまぬがれた建物も重大な損傷を被った。

地震による地盤移動の痕跡はほとんどなく、断層変位も見られなかった。コンプトンからロングビーチにかけての埋立地盤や軟弱地盤で、僅かな陥没や地盤のゆがみが見られた。被害が非常に大きかった地域は、コンプトン、ロングビーチ、ハンティントンパーク (*Huntington Park*) などである。水タンクなどの多くの構造物が被害を受けた。学校の建物はその典型で、主に耐震設計が不適切なことが原因とされている。また地震は授業中に起きたので、多くの人命が失われた。

(7) インペリアルバレー地震

発生日時 1940年5月18日 午後8時36分
震源位置 32.7°N, 115.5°W, エルセントロの南東
推定最大震度 X
マグニチュード 7.1

震央はエルセントロ (*El Centro*) の南東部で、長さ60km以上にわたり破壊を伴う地面のずれが生じた。このずれはカレキシコ (*Calxico*) の約13km東で米国・メキシコ国境を通過している。国境付近におけるずれの量は水平4.5m、鉛直1.2mに

達した。灌漑水路の被害によって作物が打撃を受けた。直接損害額は600万ドルであるが、灌漑機能の支障による作物の損失などの間接被害やメキシコにおける灌漑システム、電話線、鉄道等の被害を含めると相当な額になる。死者は9人である。

この地震によってインペリアルバレーの町は大きな被害を受けた。インペリアルでは建物の80%が被害を受け、市の給水タンクが壊れた。ブローリー (*Brawley*) の中心の建物の40%が被害を受けたが、オフィスビルの割合が大きかった。ホルトビル (*Holtville*) では被害はそれほど大きくなかったが、給水タンクが壊れた。カレキシコとメキシカリ (*Mexicali*) では、被害は予想されたほど大きくなかったが、メキシカリのホテルが電気のショートによる火災で焼失した。

(8) カーンカウンティ地震

発生日時 1952年7月21日 午前3時52分

震源位置 35.0° N, 119.0° W, ベイカーズフィールドの南

推定最大震度 X I

マグニチュード 7.7

この地震は1906年サンフランシスコ地震以来の大きな地震である。7月21日から9月26日の間にM4以上の余震が180回発生した。7月21日に発生した47回の余震(M \geq 4)のうちM5以上は6回であった。震央付近のビールビル (*Bealville*) 近くのサウザンパシフィック (*Southern Pacific*) 鉄道の沿線で厚さ45cmの壁をもつRCトンネルに亀裂・ねじれ・陥没などが生じた。しかし都市部での震度はⅧを超えることはなかった。12人が死亡し、そのうち9人はタハチャピ (*Tehachapi*) の煉瓦造建物の壁の崩壊による犠牲者である。18人が入院した他、数百人が治療を受けた。地震による被害は5000万ドルにのぼる。ベア (*Bear*) 山々麓部に沿ってのびるホワイトウォルフ (*White Wolf*) 断層の近くでは多くの地盤亀裂が生じ、カリエンテ (*Caliente*) の近くではRC造のトンネルが壊れた。アービン (*Arvin*) の南ではコンクリート製の灌漑用パイプが破壊したり、多くの電柱のトランスが落下した。ウイラーリッジ (*Wheeler Ridge*) の近くでは、口径25cmの鉄管が引き抜けたり、あるケースでは105cm圧縮されたりした。ベイカーズフィールド (*Bakersfield*) とタハチャピでは、耐震性を考慮して設計・施工された建物の被害は少なかった反面、古い脆弱な煉瓦造や日干し煉瓦の建物は亀裂が入ったり、倒壊したりした。ロサンゼルス地区では長周期波動の影響でプールの水が溢流した。震央から160km離れたオーエンスレイク (*Owens Lake*) では、塩田が移動したため塩水を輸送する管がS字形に曲がった。

(9) サンフェルナンド地震

発生日時 1971年2月9日 午前6時0分
震源位置 34.440°N, 118.327°W, 深さ10km サンフェルナンド北西15km
推定最大震度 IX~X
マグニチュード M_L6.6 (M_w6.7)

地震はサンガブリエル (*San Gabriel*) 山脈の北側のソールダッド (*Soledad*) 断層の下にある断層で起こった。サンフェルナンドバレー北部に衝上断層となって現れたこの断層の変位量は、水平ずれ2m, 段差1.5mに及んでいる。この地震による死者は64人, 負傷者は1,000人以上で、また被害額は約10億ドルとされている。

この地震では建物の全壊が1,100棟余りに及び、約22,000棟の家屋が被害を受けた。土木構造物では5つのダムが被害を受けたが、これらのダムのうち下流サンフェルナンド (*Lower San Fernando*) ダムでは堤体が崩壊し、ダムが決壊の瀬戸際までいくという著しい被害を受けた。この他、高速道路や病院などが大きな被害を受けた。この地震では、震源近傍のパコイマ (*Pacoima*) ダム堤体上で1Gを越える加速度記録が得られた。

(10) ホイッティア・ナローズ地震

発生日時 1987年10月1日 午前7時42分
震源位置 34.058°N, 118.075°W, 深さ9km ロサンゼルス東方約15km
マグニチュード M_L6.1

この地震は、サンアンドレアス断層の周辺断層群の中で最も地震活動度が高いものの一つとして知られているエルシノーレ (*Elsinore*) 断層帯の北端に位置するホイッティア (*Whittier*) 断層近傍で生じた。10月4日にはM5.5の最大余震が起こり被害がでた。この地震による死者は6人, 負傷者は187人以上にのぼった。また建築物の被害は205件で、そのうち半分以上はロサンゼルスで起こった。被害額は1~2億ドル程度と見られている。構造物の被害は、耐震設計のされていない古い石造あるいは煉瓦造などに多かった。最も大きな構造物の被害は、ホイッティア市内にあった2階建てRC造の駐車場ビルの2階部分がほとんど倒壊したものである。この地震で得られた地震記録のうち最大のものは、震央距離45kmにあるターザナ (*Tarzana*) の記録で、水平最大加速度が0.62Gであった。

1.4 強震記録

ノースリッジ地震ではロサンゼルス周辺地域で多くの地震記録が得られた。同地域にはカリフォルニア地質鉱山局 (CDMG) の強震観測網 (CSMIP) をはじめ、米国地質調査所 (USGS), カリフォルニア工科大学 (Caltech), 南カリフォルニア大学 (USC) などの観測網がある。表 1.3 には震央距離が 40km 以内の地盤上の観測地点の最大加速度及び地盤条件をまとめたものを示す。また図 1.6 は最大加速度の平面分布を示したものである。これによると最も大きな加速度を記録した地点は、震央から約 5km のターザナで水平最大加速度が 1.82G であった。また鉛直最大加速度も 1.18G と重力加速度 (=0.98G) を上回っている。昨年わが国で起きた釧路沖地震の際に 0.9G を超す最大加速度が観測されて話題になったが、ターザナの記録はこの 2 倍の大きさである。同地点ではホイットティア・ナローズ地震 (1987年, M6.1) の際にも 0.62G という水平最大加速度 (震央距離 45km) を記録している。地盤情報がないので何とも言えないが、系統的に揺れやすい地点なのかもしれない。

この他に水平最大加速度が 0.9G を超える値を記録した地点は 5 地点あり、ほとんどサンフェルナンドバレーの中の震央付近の観測地点であるが、最も遠い地点は、震央からサンタモニカ (*Santa Monica*) 山地を挟んで 23km 南方にあるサンタモニカ市庁舎地盤上で、水平最大加速度 0.93G が記録されている。震央からやや離れた地点でこのような大きな加速度が観測されたのは、地盤条件のみではなく地形条件の影響も考えられる。また震央から 10km の地点にあるアーレタ (*Arleta*) では、水平最大加速度よりも鉛直最大加速度の方が大きくなっており、ターザナの記録も合わせて考えると、震央付近では鉛直地震動がかなり大きかったようである。

図 1.7 は、地盤条件として岩盤とそれ以外の地盤を区分した水平最大加速度の距離減衰を示したものである。地盤条件による加速度の差異については震央距離 100 km 以内の範囲ではあまり明確な傾向は見られないが、それ以上の距離では明らかに岩盤地域の加速度が小さい。図中には「道路橋示方書」2 種地盤の加速度予測式の距離減衰曲線を示している。これによると観測値の距離減衰は予測式よりも大きく、震央距離 50km 付近で観測値と予測値が交差するような形になっている。

図 1.8 は最大水平加速度と最大鉛直加速度の関係を表したもので、鉛直動は水平動の半分程度の値となっていることが分かる。図 1.9～図 1.10 は強震記録の一例を示したもので、シルマー (*Sylmar*) の郡病院駐車場とサンタモニカ市庁舎の地盤で記録された加速度波形と周波数特性を表したものである。両地点ともに大きな振幅の波形の継続時間は 10 秒程度で極めて短い。水平成分の周波数特性では、シルマーの EW 成分がやや周期が長い点を除くと短周期成分が卓越する波形であった。

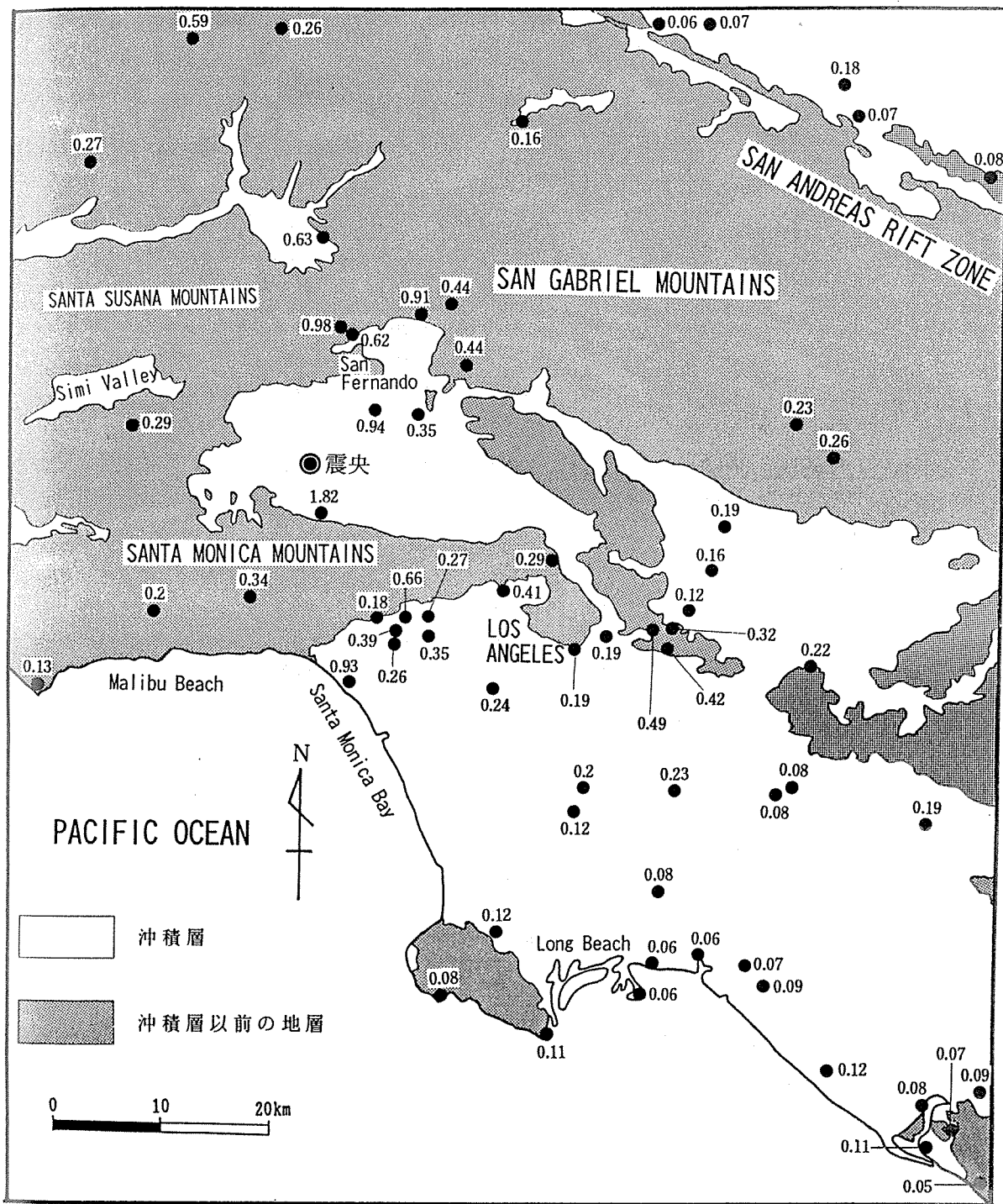


図 1. 6 水平最大加速度の分布^{15) 16)}

Location of ground response stations within 40km from the epicenter including the values of peak horizontal accelerations

表 1. 3 強震観測地点（地盤上）の最大加速度一覧表（震央距離40km以内）^{15) 16)}
 Peak ground accelerations recorded at ground response stations within 40km from the epicenter

観測地点	震央距離 (km)	最大加速度(G)		地盤条件
		水平	鉛直	
Tarzana	5	1.82	1.18	沖積層(薄い), シルト岩
Sepulveda VA 病院	7	0.94	0.48	
Arleta	10	0.35	0.59	沖積層
Jensen浄水場	12	0.62	0.40	埋土8~20m
Jensen (Gen. Bldg.)	12	0.98	0.52	埋土8~20m
Topanga	15	0.34	0.19	
Sylmar	16	0.91	0.60	沖積層
Santa Susana;ETEC	16	0.29	0.16	
Pacoima (Kagel)	18	0.44	0.19	堆積岩
Brentwood VA 病院	18	0.18	0.14	
Los Angeles (UCLA)	18	0.66	0.29	沖積層
Wadsworth VA 病院(N)	19	0.26	0.17	
Pacoima (下流側)	19	0.44	0.20	閃緑片麻岩
Wadsworth VA 病院(S)	19	0.39	0.14	
Century City (North)	20	0.27	0.15	沖積層
Century City (South)	20	0.35	0.10	沖積層
Newhall	20	0.63	0.62	沖積層
Monte Nido	21	0.20	0.13	
Santa Monica	23	0.93	0.25	沖積層(厚い)
Los Angeles(H. Stor.)	23	0.41	0.19	沖積層
Griffith Park Obs.	24	0.29	0.15	
LA (Bldw. Hills)	28	0.24	0.10	埋土, 沖積層, 堆積岩
LA (Pico)	31	0.19	0.07	沖積層
LA (Temple)	32	0.19	0.10	堆積岩
Malibu	32	0.13	0.10	沖積層(薄い), 堆積岩
Moorpark	33	0.30	0.15	沖積層
Lake Piru	34	0.27	0.13	堆積岩
LA (Univ. 病院)	36	0.49	0.12	シルト岩
Vasquez Rock Park	37	0.16	0.09	沖積層, 硬質砂岩
LA (City Terrace)	38	0.32	0.13	堆積岩
LA (Obregon Park)	39	0.42	0.11	沖積層
Pasadena	39	0.19	0.11	沖積層
Alhambra	39	0.12	0.07	沖積層
San Marino	39	0.16	0.09	沖積層

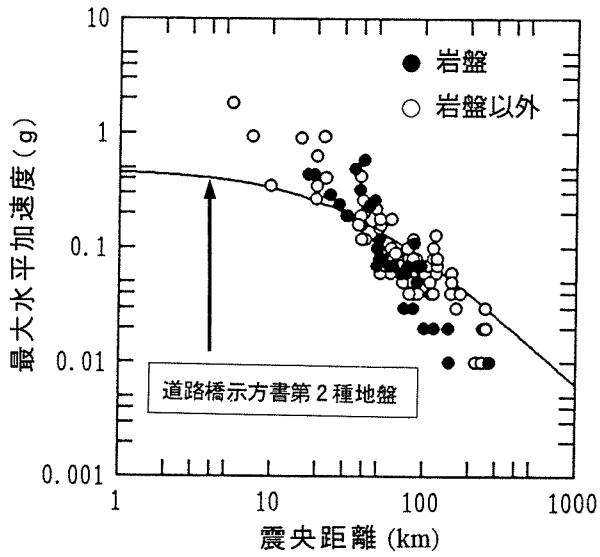


図 1. 7 震央距離と地盤最大加速度の関係
Relation between epicentral distance and peak ground accelerations

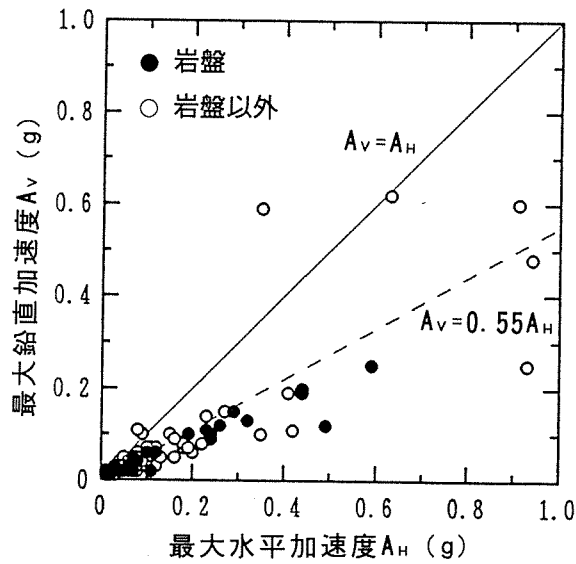
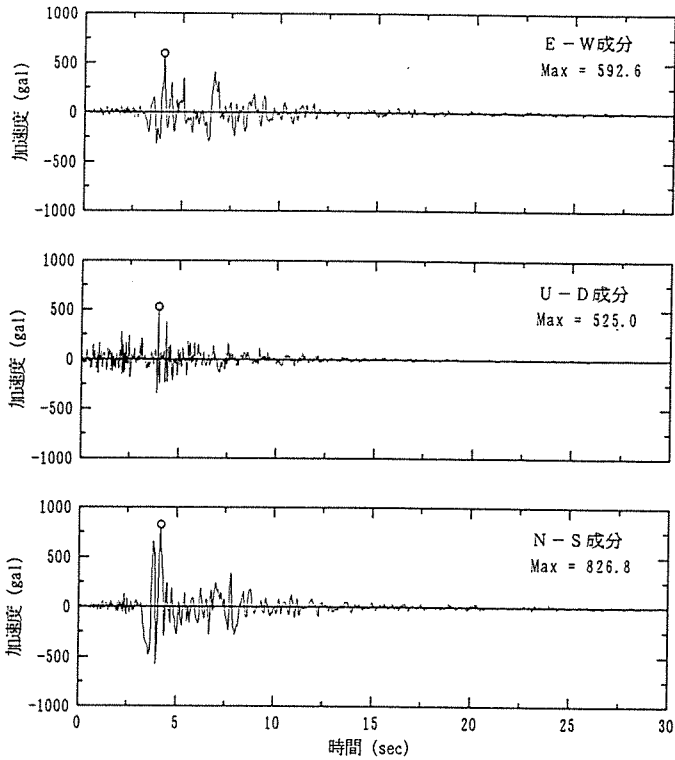
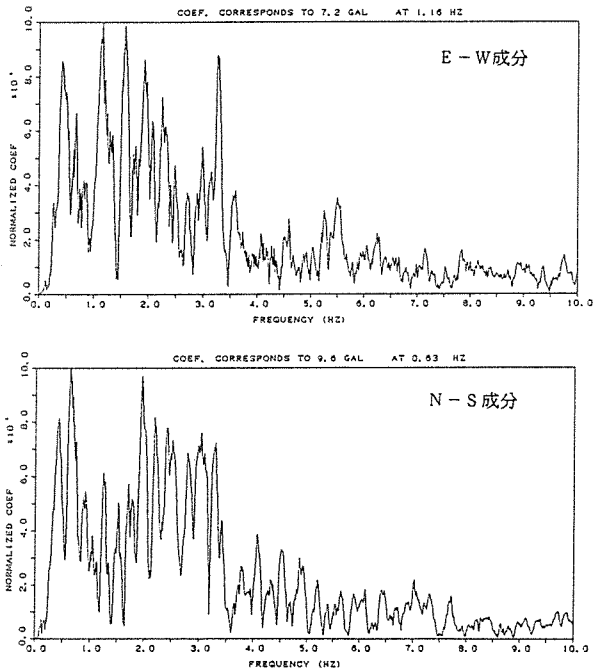


図 1. 8 最大水平加速度最と最大鉛直加速度の関係
Relation between peak horizontal accelerations and peak vertical accelerations

加速度時刻歴



フーリエスペクトル



加速度応答スペクトル

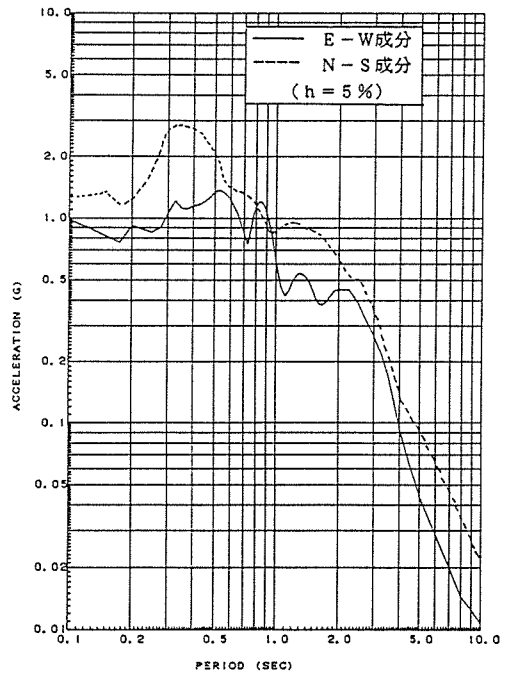
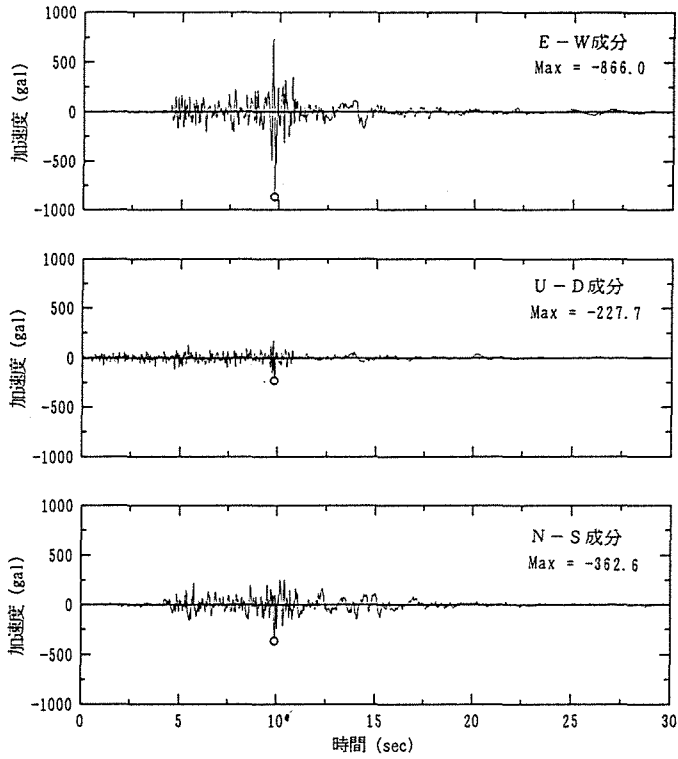
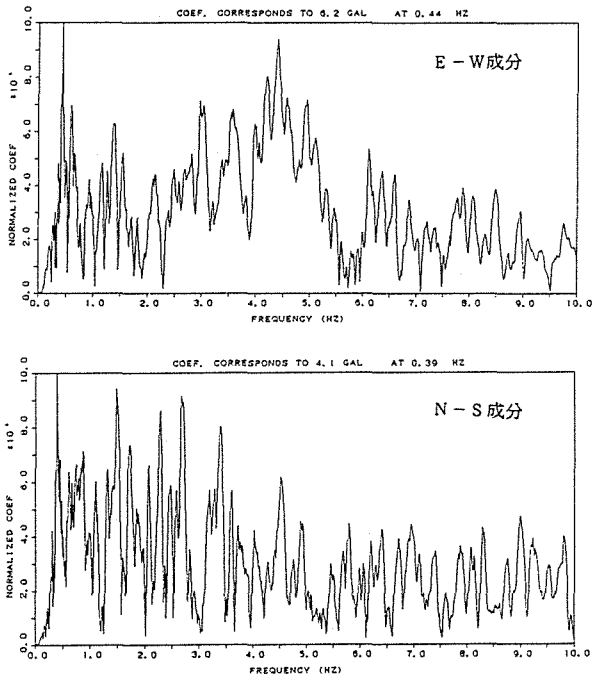


図 1.9 地震波形・スペクトルの一例 (シルマー郡病院)¹⁸⁾
Acceleration time histories and spectra obtained at Sylmar station

加速度時刻歴



フーリエスペクトル



加速度応答スペクトル

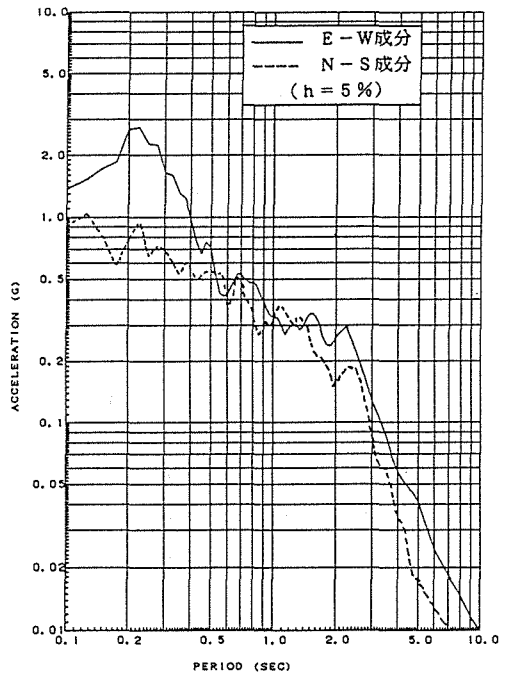


図 1.10 地震波形・スペクトルの一例 (サンタモニカ市庁舎)¹⁸⁾
Acceleration time histories and spectra obtained at Santa Monica station

2. 地形・地質概要

2.1 サンフェルナンドバレー地域

サンフェルナンドバレーは図 2.1 に示すように北をサンガブリエル山地とサントスザーナ山地、西をシミ (*Simi*) 丘陵、南をサンタモニカ山地、東を *Verdugo* 山地に挟まれた東西約 30km、南北約 15km の平坦な土地である。

この谷は断層が発達した褶曲構造となっており、東側に広がるとともに深くなる。谷の東縁は *Verdugo* 山地の南西斜面で区切られている。*Tujunga* 背斜として知られる北方のより小規模な褶曲は、サンガブリエル山地の南縁に沿ってのびている。谷の南縁はサンタモニカ山地であり、この山地を形成している堆積層が北側に向かって谷の下に潜り込む形となっている。基盤岩の上には、褶曲し断層が発達した新生代や中世代の岩が堆積しており、その厚さは最も厚い所で 4500 m 程度とされている。最上部には河川堆積物、扇状地、複合扇状地、段丘堆積物などの形で第四紀層が堆積している（図 2.2 参照）。

サンフェルナンドバレーの北縁を形成するサンガブリエル山地の周囲は主要な断層で区切られている。山地南縁には北側に傾斜する衝上断層群があり、これらの断層の中には 1971 年サンフェルナンド地震の際に地表面に現れたものもある。

サンガブリエル山地を構成する岩は中世代の深成岩及び中世代前期の深成岩、変成作用を受けた堆積岩・火山岩体である（表 2.1 参照）。

シミ丘陵の基盤は、白亜紀後期の砂岩や頁岩からなる断層が発達した隆起岩体である。この岩体は第三紀始新世及び中新世の海成の砂岩・礫岩で覆われている。シミ丘陵の東及び北側のサントスザーナ山地は、褶曲し、断層で切られた第三紀中新世の海成砂岩・礫岩・珪藻頁岩からなっている。またサンフェルナンドバレーの東縁を形成する *Verdugo* 山地は変成岩及び花崗岩の隆起岩体で構成され、山地と谷は *Verdugo* 断層で区切られている。

サンフェルナンドバレーの沖積層の土質は場所によって異なっており、その特性は母体の岩の特性に依存している。谷の西部及び南部（ロサンゼルス川の南側）における沖積土は粘土、シルト及びシミ丘陵、サントスザーナ山地、サンタモニカ山地を形成する堆積岩が風化した砂程度の粒径をもつ土からなる。一方、サンフェルナンドバレーの北部地域（シルマー～サンフェルナンド地区）とロサンゼルス川南側の東部地域の地盤は、サンガブリエル山地の付近では巨礫が分布し、ロサンゼルス川の近くでは、砂、シルト、礫が分布する。

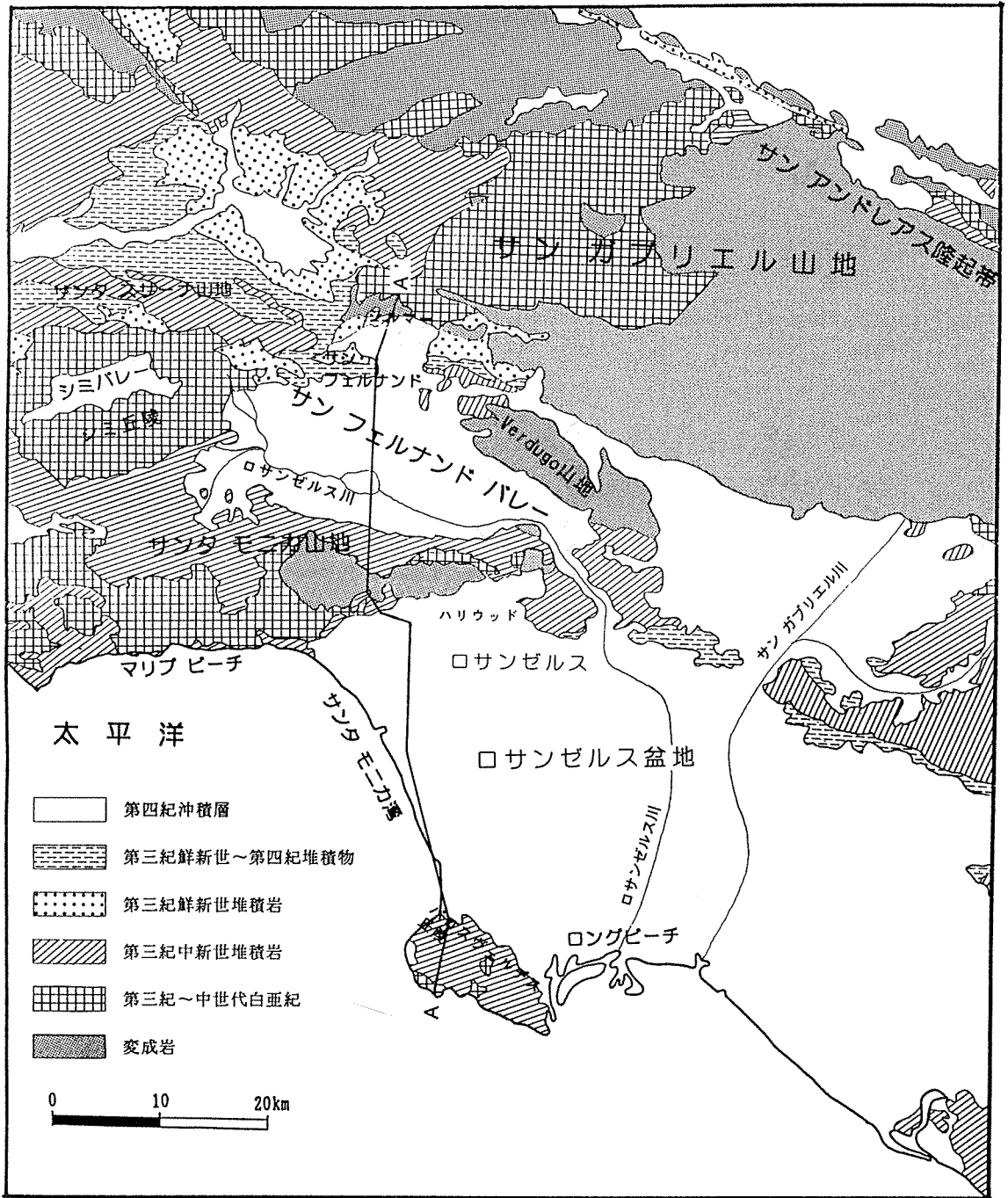


図2.1 サンフェルナンドバレー及びロサンゼルス盆地の概略地質図²⁰⁾
 Geologic map of San Fernando Valley and Los Angeles Basin

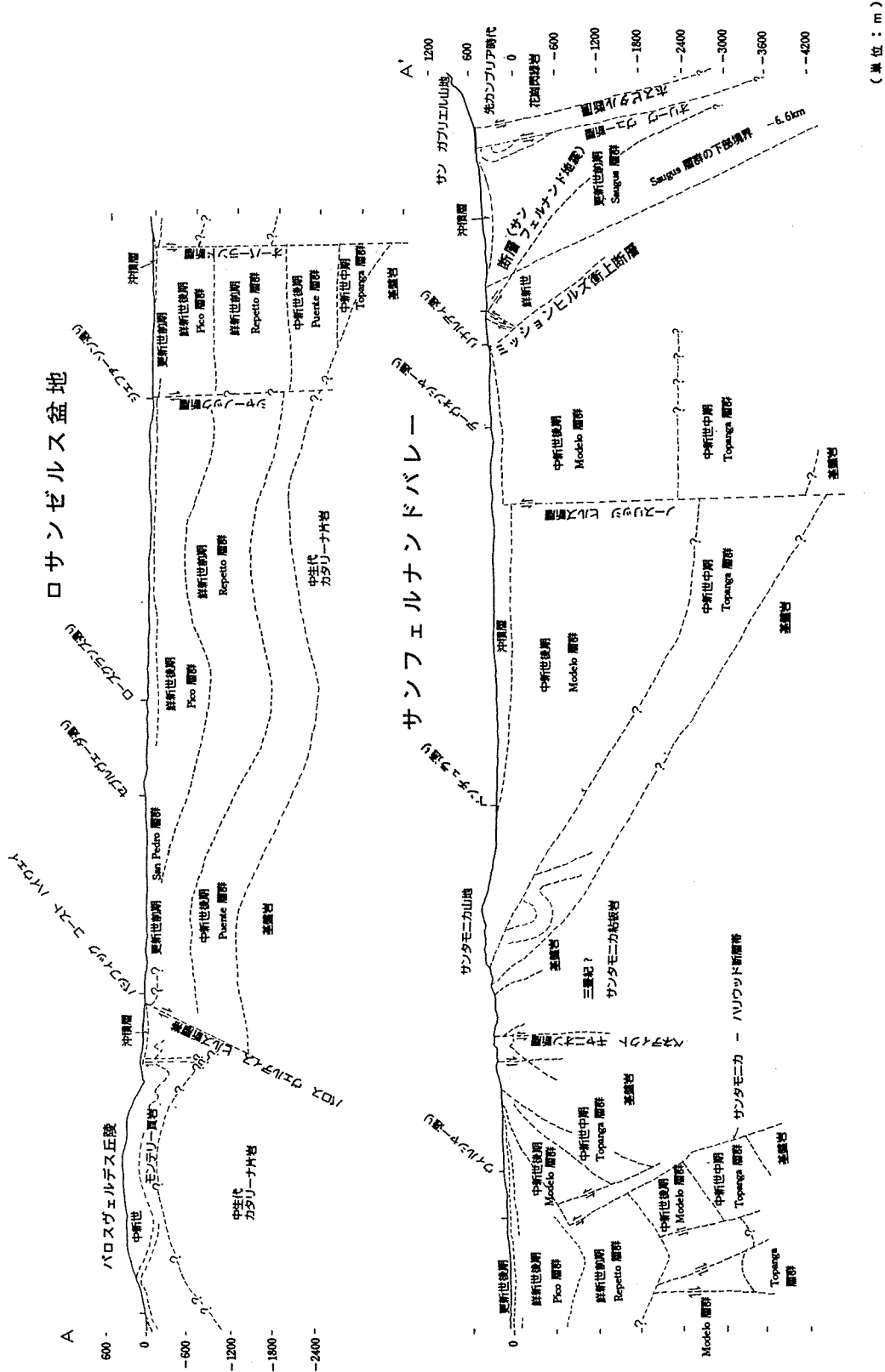


図 2. 2 ロサンゼルス地域の地層断面図¹⁹⁾
 Geologic cross section of San Fernando Valley and Los Angeles Basin

表 2.1 サンフェルナンドバレーの地質層序表¹⁹⁾
Generalized geologic column of San Fernando Valley

地質時代		地層名		地層を構成する岩石・土質名	
第 四 紀	完新世	沖積層		谷の西部は粘土, シルト, 砂で東側にいくほど粒子が粗くなる(砂, 礫, 巨礫)	
	更新世	後期	洪積層 段丘堆積物	分級度が高く固結度の低い礫または半角礫状の扇状地礫岩や段丘礫	
		中期	Pacoima層		分級度が高く、赤褐色のやや褶曲した礫岩または扇状地礫岩
		前期	Saugus層		分級度が高く固結度が低い陸成の礫岩と粗粒砂岩, 西端では細粒の海成堆積物を挟在する
第 三 紀	鮮新世	後期中期	Fernando層	Pico層 上部は陸生の砂岩・泥岩・礫岩 下部は海成の砂岩・シルト岩・礫岩	
		前期	(?)	Repetto層 海成の砂岩・礫岩・シルト岩・頁岩	
		中新世後期	Modelo層		海成の中～粗粒砂岩・礫岩, 珪藻頁岩を挟在する
	中新世中期 ～前期	Topanga層		粗粒の陸生及び海成砂岩・礫岩, 玄武岩質の溶岩流を挟在する	
	始新世中期	Domengine層		塊状の砂岩・礫岩	
	始新世前期～ 暁新世	Martinez層		粗粒砂岩, 暗色の頁岩と円礫岩を挟在する	
	白亜紀後期	Chico層		頁岩を挟在する塊状の砂岩・粗粒礫岩	
白亜紀前期～先カンブリア時代	基盤岩	Santa Monica 粘板岩ジュラ紀(?)	花崗岩・変成岩 劈開面をもつ黒色粘板岩		
Mendenhall片麻岩		はんれい岩類を挟在する石英・長石片麻岩			

2.2 ロサンゼルス盆地地域

ロサンゼルス盆地は、北をサンタモニカ山地、エリジャン (*Elysian*)、レペット (*Repetto*)、プンテ (*Puente*) の各丘陵に囲まれ、南をパロスヴェルデス (*Palos Verdes*) 丘陵と太平洋に境された複雑な構造の地域である。この盆地は太平洋沖合いまで広がっているが、ここでは陸上部についてのみ記述する。

盆地の地形は、ニューポート (*Newport*) - イングルウッド (*Inglewood*) 隆起帯に沿った丘陵とパロスヴェルデス丘陵を除いて太平洋方向に緩く傾斜した低地である。盆地の地質も地形と同様に単純ではなく、岩石の種類 (表 2.2 参照) や主要な断層等によって幾つかの小盆地やブロックに分割されている。Yerkes ら (1965) によればこの盆地は、南西ブロック地域、中央ブロック、北東ブロックの3つの地域に分けられる。南西ブロックは、サンタモニカ-ハリウッド (*Hollywood*) 断層帯 (図 2.2 参照) の南からロングビーチまでの地域を指し、パロスヴェルデス丘陵を除くと、ほとんど起伏のない地形である。このブロックの東はニューポート-イングルウッド断層帯で区切られている。露頭や石油井の資料によれば、南西ブロックの基盤構造はカタリナ片岩 (*Catalina schist*) で構成されている。基盤岩の上部には、部分的に中新世の貫入岩を含む中新世 (第三紀) 中期から新しい海成堆積物までの厚い地層が堆積する。

中央及び北東ブロックは、北側をハリウッドとレイモンドヒル (*Raymond Hill*) 断層帯、西側をニューポート-イングルウッド隆起帯、東側をサンガブリエル川で囲まれた地域である。この地域の地形には、エリジャン、レペットの両丘陵と南に広がる平野及びビバリーヒルズ (*Beverly Hills*) からニューポート-イングルウッド断層帯に沿って南にのびる北西向きの丘陵がある。中央ブロックと北東ブロックの基盤は中世代の変成作用を受けた堆積岩からなり、上部には第三紀中新世中期の火山岩を挟在する白亜紀後期から第四紀更新世の海成・陸成の地層が堆積する。局地的には薄い沖積層及び洪積層 (*older alluvial material*) で覆われている。

最上部では、バロナクリーク (*Ballona Creek*) や海岸線の付近に砂丘砂があり、河川や氾濫平野には砂、礫、シルトからなる沖積土が堆積する。

表 2.2 ロサンゼルス盆地の地質層序表¹⁹⁾
Generalized geologic column of Los Angeles Basin

地質時代		地層名		地層を構成する岩石・土質名
第 四 紀	完新世	沖積層		砂・シルト・礫・砂丘砂
	更新世	後期	洪積層 段丘堆積物	海成及び陸成のシルト・砂・段丘礫層
		前期	San Pedro層	
第 三 紀	鮮新世	後期	Fernando層	黄褐色～褐色の礫岩・砂岩・シルト岩
		前期	(?)	
	中新世後期	Pico層		シルト岩・頁岩・粗粒砂岩・礫岩 パロス ヴェルデス丘陵 - シルト岩・砂岩・石灰岩・礫岩を挟在する泥岩・珪藻頁岩
		Monterey層 (Palos Verdes 丘陵) Modelo層		
	中新世中期 ～前期(?)	Topanga層		粗粒で層構造が鮮明な砂岩・砂岩を挟在する塊状の礫岩・シルト岩
漸新世 始新世 暁新世	Vaqueros層, Sespe層, Santiago層, Silverado層		対象地域には存在しない	
		西部	Catalina片岩, ジュラ紀(?)	細粒の緑泥石石英片岩・青色藍閃石片岩
白亜紀後期	基盤岩	東部		花崗岩質貫入岩
ジュラ紀前期				火山岩
三疊紀				堆積岩起源の片岩

2.3 ロサンゼルス地域の表層地質

§ 2.1 及び § 2.2 では、地震の影響を強く受けたサンフェルナンドバレー及びロサンゼルス盆地の地形・地質の一般的な特徴を記述した。しかし、§ 1.4 に示した最大加速度分布に見られるように、同じ地形・地質区分に属する地域でも、地点によって加速度がかなり異なっていることが分かる。これらの最大加速度は、地表から数 10m 程度の表層地盤の影響を強く反映したものと考えられる。本節では表層地盤の動力学的特性について記述する。

サンフェルナンドバレーとロサンゼルス盆地において、深さ 30m 程度までの地盤の動的性質を知るために浅層反射法による地盤探査が Duke ら²²⁾ によって行われている。測定地点及び測定の結果得られた S 波速度 V_s の深度分布図を図 2.3 に示す。①地点を除いて、当該地域の表層地盤の V_s は 180～400m/sec の範囲にある。表層 5m に限ると、 V_s は 180～200m/sec である。弾性波探査なので対象地点の地層構成は明らかではないが、30m 以浅の地層の一般的な構成土質は沖積世の砂、砂礫、大礫、シルト、粘土である。①地点はサンフェルナンドバレー北方のオールドリッジルート (Old Ridge Route) にあり、表層地盤は V_s が 200～800m/sec のキャストリック (Castaic) 層群と呼ばれる第三紀中新世の砂岩及び頁岩から構成されている。この地層は、その下の基盤岩まで約 1.5km の厚さで堆積している。ごく表層地盤の土質及び弾性波速度は表 2.3 に示すとおりである。

表 2.3 表層地盤の S 波、P 波速度
Wave velocities in near-surface soils

表層の土質	年代		弾性波速度 (m/sec)					
			S 波速度 V_s			P 波速度 V_p		
			平均値	範囲	個数	平均値	範囲	個数
盛土(締め固め無し)	第	現代	160	152～167	2	301	299～303	2
盛土(締め固め)		現代	226	197～245	4	396	390～402	3
河川堆積物	四	完新世	154	145～170	3	250	250	1
沖積層		完新世	189	171～212	9	405	396～415	2
洪積層, 段丘堆積物	紀	更新世	261	222～332	8	424	274～626	5
砂岩	靛	中新世後期	195	195	1	378	378	1
シルト岩, 頁岩	三	鮮新世～中新世	368	317～448	7	776	571～1013	3
風化花崗岩		中生代	393	326～460	2	586	570～602	2
割れ目の多い花崗岩		中生代以前	1270	990～1650	3	2201	1631～3084	3

文献22から抜粋

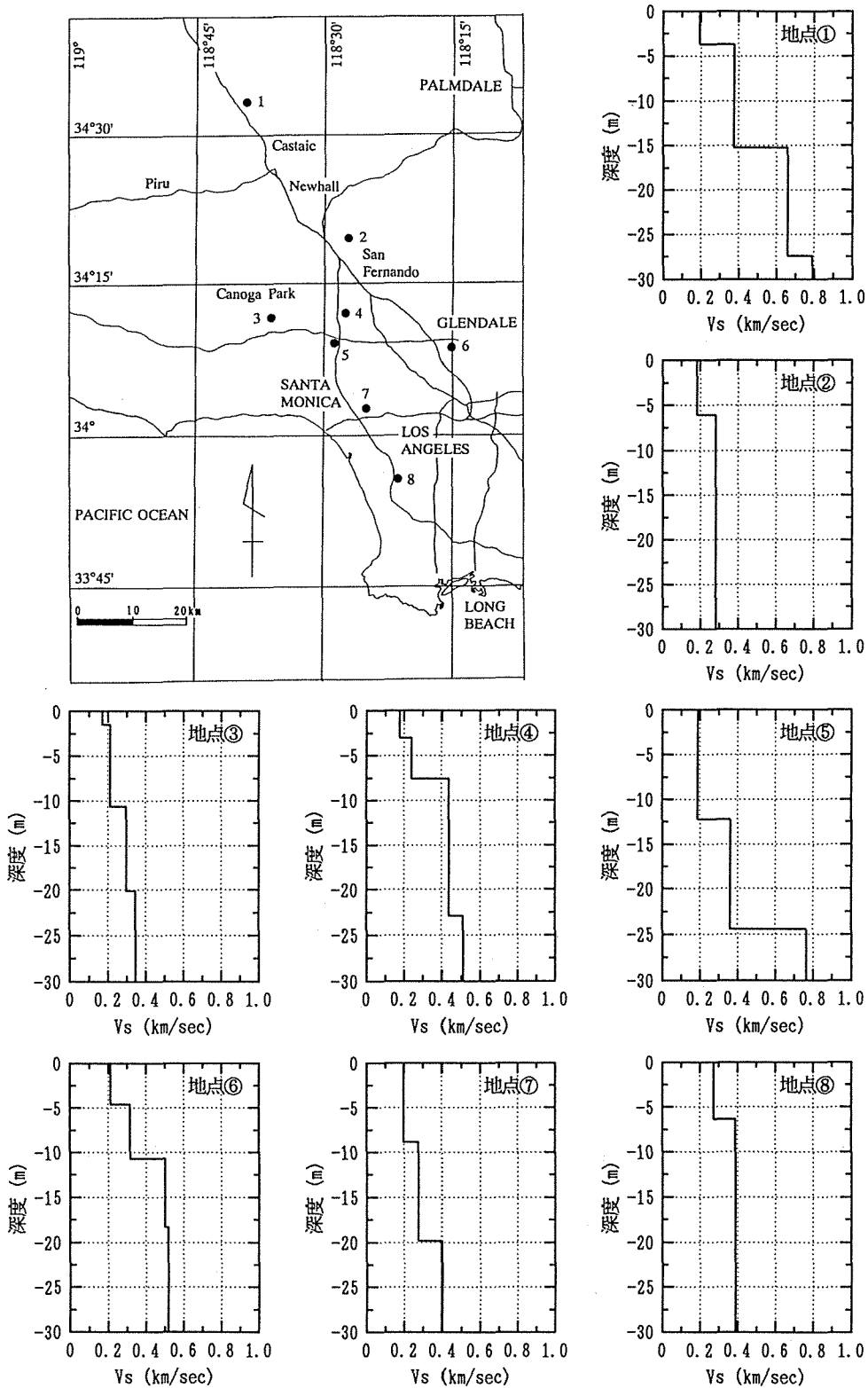


図 2.3 ロサンゼルス地域のS波速度構造²²⁾

Shear wave velocity profiles in Los Angeles area

3. 被害の概要

3.1 概要

(1) 被害全般

1994年ノースリッジ地震は、現代の都市環境に大きな衝撃を与えた。米国の保険業界にとって、この地震は1992年にフロリダを襲ったハリケーン「アンドリュー」に次いで、2番目に多い保険金支払額となった自然災害である。概算の被害額を表3.1にまとめた。また同表には比較の意味で最近カリフォルニアを襲った2つ被害地震、すなわち1971年サンフェルナンド地震と1989年ロマプリエタ地震の被害に関するデータをまとめた。これによるとノースリッジ地震の被害は、死者数では他の2地震よりもやや少ない程度であるが、負傷者は数倍以上多くなっている。また住宅被害(全壊数)や被害額においても過去の2つの地震に比べてかなり上回っていることが分かる。

表3.1 過去の地震との被害規模の比較
Comparison of damage with past earthquakes

		ノースリッジ 地震 ^{1) 2 3)}	サンフェルナンド 地震 ^{1 3) 2 4)}	ロマプリエタ 地震 ^{2 5) 2 6)}
発生年		1994	1971	1989
マグニチュード		6.7	6.7	7.1
被害額		200億ドル	5億5300万ドル	60億ドル
人的被害	死者	57人	64人	62人
	負傷者	10800人	1000人以上	3757人
住宅被害	全半壊	2789棟	936棟	1382棟
	損壊	10971棟	21700棟	26953棟
土木被害額		8億ドル以下	2億900万ドル	1億8000万ドル

(2) 死傷者

57人の死者の内訳は、サンフェルナンドバレーで42人、ロサンゼルス市街地以外の地域で9人(ハリウッド2名を含む)、サンタモニカで2人、ピコリベラ(Pico Rivera)、イングルウッド、トーランス(Torrance)、マリナデルレイ(Marina del Rey)でそれぞれ1人づつとなっている。死亡原因としては、地震による直接の犠牲者は29人で、そのうち16人は共同住宅建物の崩壊によるものである。他に心臓麻痺により22人が死亡している。負傷者は合計1万800人となり、最初の数週間で被災援助の要請は約23万人にのぼった。

(3) 被害額

被害額は米国の自然災害史上最大の最高 200 億ドルに及ぶものと推定される。内訳は、ライフライン 24 %、公共施設 4 %、住宅施設 37 %、商業施設 25 %、工業施設 10 %とされている。これらの損害額には産業活動の中断による損害は含まれていない。ロサンゼルス市の被害額が最大で、約 18 億 5000 万ドルに達する。

(4) 建築物

約 1 万 3700 棟の建物が中～大被害を受けた。地震後に 11 万棟余の建物の安全点検を行い、約 3 %が "危険 (立入禁止)"、約 10 %が、"立入制限"となった。

(5) 道路

震央から 32km の範囲の地域でフリーウェイ高架橋の大きな被害があった。8 地点、11 箇所の道路構造物が崩壊し、14 箇所で通行止めとなった。

(6) 電力

ロサンゼルス市の停電で、およそ 200 万戸の利用者が影響を受けた。さらにモンテベロ (Montebello) からサンタバーバラに至る地域で、約 60 万戸が停電した。

(7) 都市ガス

地震後 15 万件がガス供給停止となった。1377 箇所でガス漏れがあった。

(8) 上下水道

上水道では、利用者の総数 66 万戸のうち 10 万戸に影響がでた。水道管に 1500 ヶ所を超える漏水があった。下水道では、2つの3次処理場に小さな被害があった。

(9) 通信施設

構造物に大きな被害はなかったが、電話設備の支持が適切でなかったため、幾つかの機器が転倒するという被害があった。

(10) 空港

この地域に 9 つある空港の滑走路や誘導路に被害は認められなかった。しかし、ターミナル施設には小さな被害が認められた。

(11) 鉄道

地震時にノースリッジを通過中の 64 貨物列車が脱線し、積荷が散乱した。

(12) 火災

地震に原因した火災がサンタモニカで 16 件、バーバンク (Burbank) で 1 件、ベンチュラ (Ventura) 郡で 20 件報告されている。

3.2 1971年サンフェルナンド地震との比較

1971年2月9日、サンフェルナンド地方はマグニチュードMw6.7の地震に襲われた。この地震の震央はノースリッジ地震の約25km北東になる。この地震で64人の生命が失われ、損害額は5億5300万ドル(当時)に及んだ。

サンフェルナンド地震とノースリッジ地震を比較して、異なる点の一つは地震の起こった地域である。1971年の地震はサンガブリエル山地の中央部で起こったのに対して、今回の地震は高度に都市化され、約300万人が居住するサンフェルナンドバレーで起こった。しかし地震が起こったのが種々の活動がほとんど行われていない休日の早朝であったため、災害の発生は平日の昼間と比べるとかなり少なかったと想像される。

両地震の余震域を重ねてみると、地表に近い余震の幾つかは同じ断層系で起こっていることが分かる。両地震とも衝上断層であるが、1971年の地震は北に傾斜した断層面をもっているのに対して、今回の地震は南に傾斜した断層面をもっている。また震源の深さについてみると、1971年の地震は13km、今回の地震は18kmであり、両地震ともに浅いところで起こっている。

加速度を比較してみると、1971年の地震で記録された最大地震動は、震央から8kmの位置にある堤高120mのパコイマ(*Pacoima*)ダム左岸において記録された水平1.25Gと鉛直0.72Gである。これに対して今回の地震では、同ダムは震央から18km離れているのにも関わらず、水平2.0Gと鉛直1.3Gの記録が得られている。加速度記録や付近の落石などの状況からすると、同ダムにおいては今回の地震の方が大きな地震力が作用したように思われる。

どちらの地震が大きな被害を与えたかという点については、地域によって地震動の大きさが異なることや構造物の耐震性の違い等が多くあるため、比較は非常に難しい。しかし両地震の被害形態を比較することによって、相対的な被害程度を評価でき、また地震対策の効果等がどの程度あったのかを推定することができる。

1971年サンフェルナンド地震は、液状化に伴う地盤の側方流動と土構造物の崩壊によって深刻な打撃を被った。その影響はヴァン・ノーマン(*Van Norman*)貯水池周辺で顕著であった。サンフェルナンド上・下流ダムでは堤体の上流側のり面がすべり破壊を起こし、ダムが危うく決壊しそうになった。ジェンセン浄水場とジュヴェニールホール(*Juvenile Hall*)では大規模に発生した液状化とそれに伴う地盤の側方流動で大きな被害を被った。今回の地震でも広い範囲で液状化は発生しているものの、構造物への影響はそれほど大きくなかったと考えられる。しかしながらMWP ジェンセン浄水場、DWP ヴァン・ノーマンコンプレックスやジュヴェニー

ルホールでの液状化被害は、程度こそ小さいけれども同じ形態の被害が再び発生したといえる。斜面崩壊に関しては、1971年の地震で被災した斜面のうち何ヶ所かが今回の地震でも被害が発生している。

1971年の地震では、上・下流ヴァンノーマンダム、パコイマダム、ロペス(Lopez)ダム、ハンセン(Hansen)ダムの5ヶ所のダムが被災したが、今回の地震では震源がより近くにあったにも関わらず、数ヶ所で小規模な亀裂程度の被害が発生するにとどまった。

両地震ともサンフェルナンドバレー北部のハイウェイで被害が多く発生している。I5/SR210とI5/SR14の両インターチェンジのように両方の地震で被害を受けた構造物もある。主要な被害の多くは約1.5km離れた両インターチェンジの間の5号線区間で起こっており、3ヶ所の構造物が完全に倒壊、2ヶ所で甚大な被害を被っている。カリフォルニア州では1980年代に入ってから多くの道路構造物の補強が実施されてきており、今回の地震でも耐震補強が終了した構造物に被害はなかった。

1971年の地震では建物の被害が甚大であった。コンクリート造、ティルトアップ(Tilt-up)造、無筋の煉瓦造等の1920～1930年代につくられた建築物が大きな被害を受けた。1971年の地震で甚大な被害を受けた建築物として、45人が亡くなったシルマーの在郷軍人(Veterans)病院、新築のオリーブビュー(Olive View)病院、ホリークロス(Holy Cross)病院、ジュヴェニールホール等があげられる。一般家屋やアパートの被害は、むしろ新しい建築物で顕著であった。今回の地震では、古い建物(1973年以前)の被害が大きく、新しい建物(1976年以降)は組立式の構造物を別にすると予想通り被害が小さかった。1971年の地震で甚大な被害を受け、新しく立て直されたオリーブビュー病院は、今回の地震では、建物の屋上で最大加速度2.03Gが記録されたのにも関わらず、重大な損傷は受けなかった。

1971年の地震被害のうち最も顕著な特徴はライフラインの被害であった。ロサンゼルスDWPと南カリフォルニア・エジソン(Southern California Edison)社の管内のほぼ90万世帯が停電した。電話設備では、ゼネラル(General)電話会社が所有するシルマー中央電話局の設備が被害を受け、ほぼ10,000回線が不通になった。特に上下水道、ガス、石油類等の埋設管に被害が多かった。ガス輸送管は主にサンフェルナンド、シルマーの両地域で100ヶ所以上の被害があった。これに対して今回の地震では、ガス輸送管の被害は少なかった。この理由は、1971年の地震で被害を受けた古いガス導管を取り替えたり破棄したりして、管が強度の大きい新しいものになった結果と考えられる。

4. 地盤被害

4.1 被害地点

ノースリッジ地震では広い地域で地盤被害が発生したが、構造物への影響は小さかったようである。今回の地震で発生した主要な地盤被害地点を図 4.1 に示す。今回実施した被害調査は短期間であったため、行動範囲に限度があったことと、地震から数ヶ月経過していたために被害構造物のほとんどが復旧中かあるいは既に復旧を終了していたこともあり、調査期間中には図に示した地盤被害のうち数例を確かめるにとどまった。

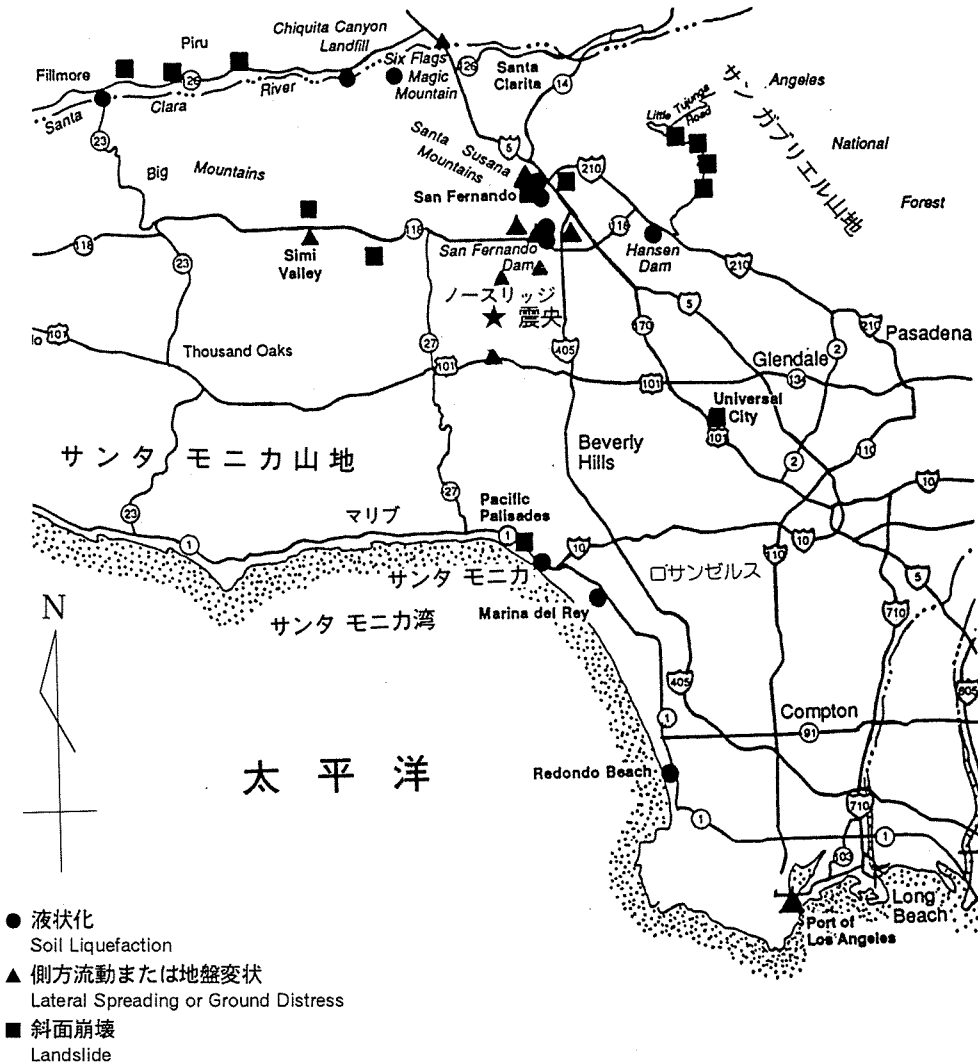


図 4.1 地盤被害の発生位置図¹¹⁾

Map showing locations of ground failures

4.2 地盤の液状化と地盤変状

地盤の液状化とそれに伴って引き起こされた地盤変状の痕跡は、震源から50kmの範囲の至るところで認められた。しかし今回の地震における構造物の被害原因の多くは地震動の大きな慣性力の作用によるものと考えられ、液状化に伴う地盤変状は幾つかの事例を除くと構造物被害の主要原因とはなっていないようである。

以下に液状化によって地盤被害が生じた事例をいくつか紹介する。

(1) ジョセフ・ジェンセン浄水場

ジョセフ・ジェンセン (*Joseph Jensen*) 浄水場は、カリフォルニア州南部の諸都市に生活・工業用水を供給するMWD(*Metropolitan Water District of Southern California*)によって管理されている。この浄水場は震央からおおよそ10km離れたI5とI210ハイウェイの合流点付近のグラナダヒルズ (*Granada Hills*)にある。

図4.2はジェンセン浄水場の構内見取図である。この浄水場は約1200m×460mの面積を占めており、その処理能力は1日当たり150万トンである。処理される水は浄水場北側から入り、バルボア (*Balboa*) 導水トンネルと支管を通った後、混和池、沈澱池、濾過池の順に通過する。処理された水は導水管を通過して浄水池に運ばれるか、バイパスを通過して南側の送水管に運ばれる。

ジョセフ・ジェンセン浄水場の地盤は、盛土、沖積層及びソーガス (*Saugus*) 層の砂岩 (上部は風化) より構成されている。敷地の東側は盛土されており、材料はシルト質砂、砂質シルト、礫混じり砂の混合されたもので、局所的にシルトと粘土質シルトの領域がある。盛土の層厚は図4.3の縦横断図に示すように、敷地の西側では0mで、東側に行くほど厚くなり最大17mに達する。

1971年サンフェルナンド地震当時、同浄水場は建設中であり、地震とそれによって引き起こされた地盤変状により広範囲にわたって被害を被った。

ノースリッジ地震では、盛土の下のゆるい地層の液状化によって、再び地盤の被害が発生した。制御棟の前面の高さ12mの盛土上にある駐車場に幅10cmの亀裂が長さ80mにわたって生じたが、調査に訪れた時点では、亀裂は既に修復されていた (写真4.1)。また制御棟建屋周辺地盤で10cm程度の地盤沈下がみられた。写真4.2は地盤沈下により地表に突出したマンホールである。

現在使用されている浄水池と建設中の浄水池で亀裂が見つかった。現在の浄水池は、内法寸法が159m×150mの鉄筋コンクリート造の地下構造物であるが、構造物と地盤との間に約15cmの段差が生じたと報告されている。地震発生時にはあらかじめ工事が終わっていた新しい浄水池では、厚さ32cmのアスファルトライニン

に小規模な亀裂が認められた（写真 4.3 ～写真 4.4）。この浄水池はソーガス層まで掘削した後に、底面に土を盛って造られている。さらに建設工事のため地下水位を下げており、地震発生時点の地下水位はサンフェルナンド地震の時よりも 6m 程低かった。

管路施設では、直径 210cm の溶接鋼管の導水管が地盤の破壊によって被害を受けた。修復された水道管の状況を写真 4.5 に示す。この被害は敷地の北東端の盛土内で発生したが、近傍の盛土のり面上端部では、写真 4.6 に示すようにのり面に対して直角方向に、幅が最大 2m の亀裂が長さ約 100m にわたって生じた。この他、直径 15cm の塩素溶液用の塩化ビニル管と電線管数本に被害が生じたことが報告されている。

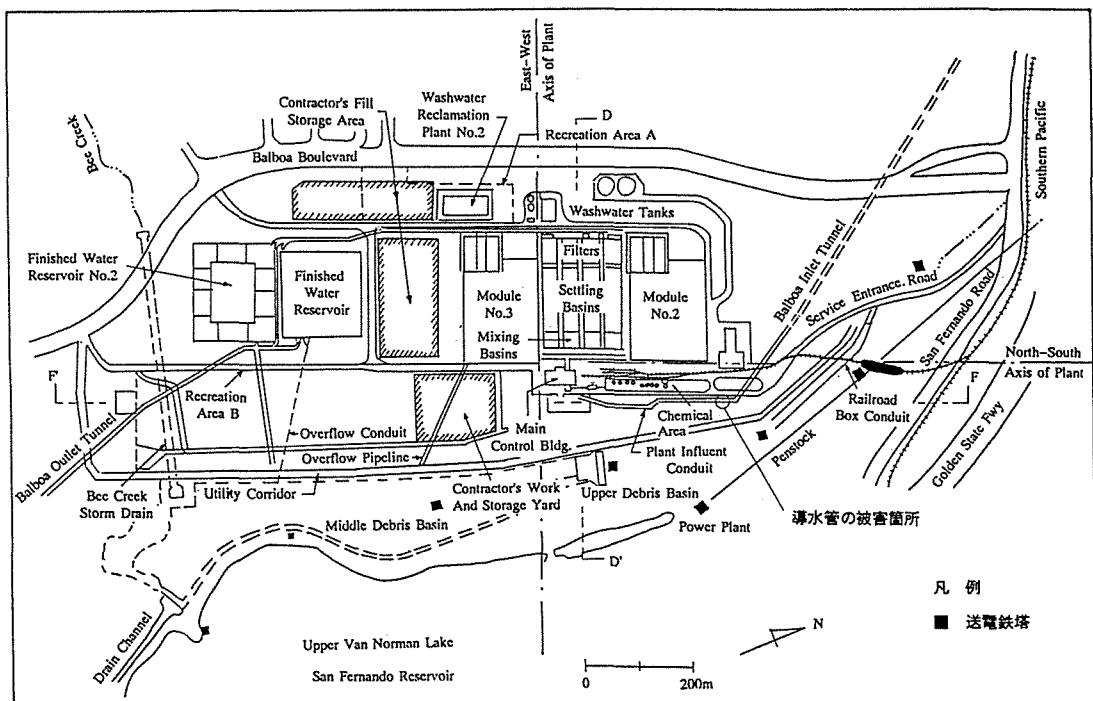


図 4. 2 ジェンセン浄水場の施設配置図
Plan-View of Joseph Jensen Filtration Plant

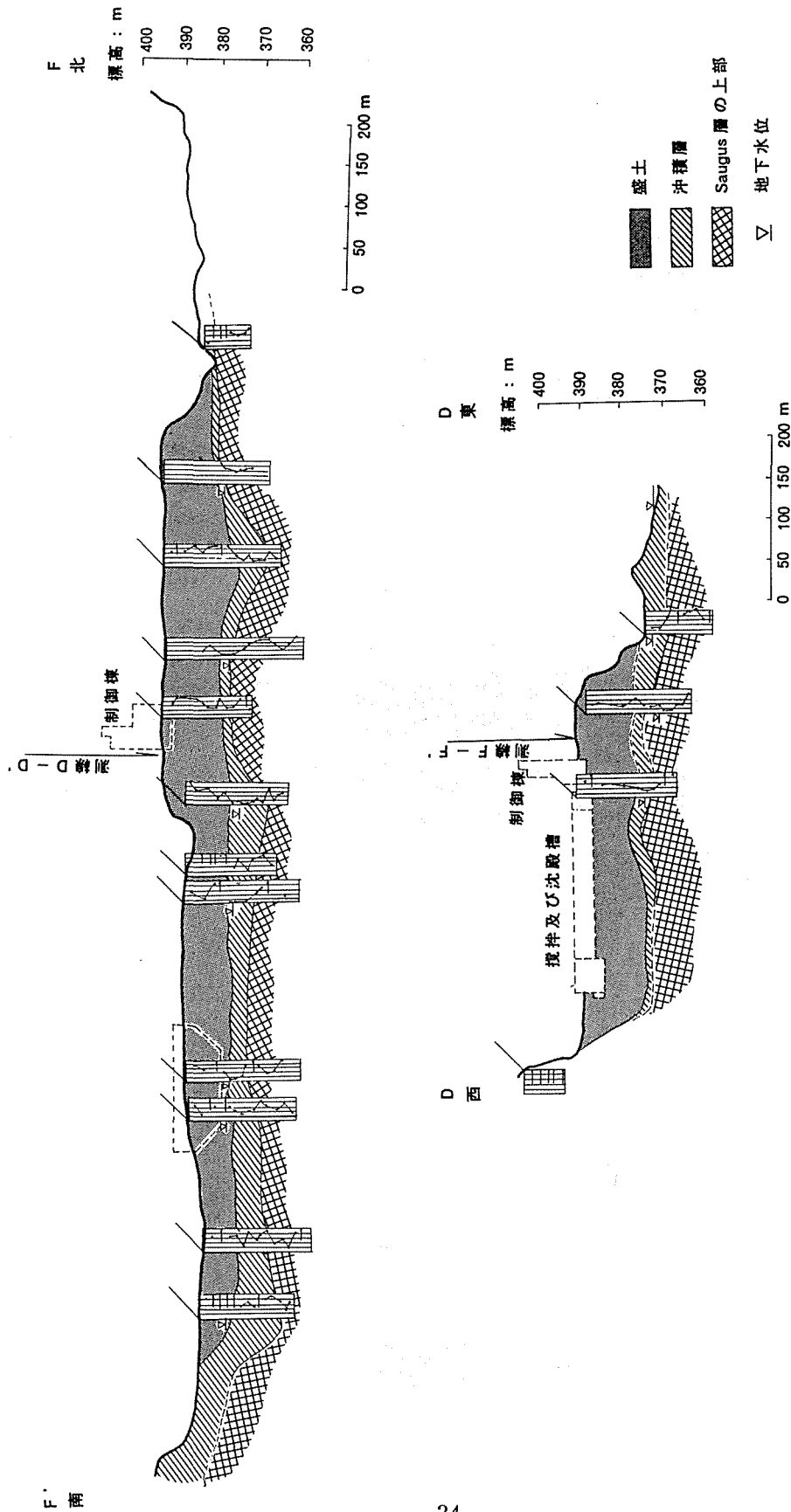


図 4.3 代表的な地層断面図 (Joseph Jensen 浄水場 30)
 Typical soil profiles in Joseph Jensen Filtration Plant



写真 4. 1

修復された駐車場の亀裂
(ジェンセン浄水場)

Repaired cracks in Jensen Filtration
Plant



写真 4. 2

同上 地盤沈下によるマンホールの突出

Protrusion of manhole due to
settlement of ground



写真 4. 3

同上 建設中の浄水池

View of the new Finished Water
Reservoir



写真 4. 4

浄水池のアスファルトライニングの亀裂(ジェンセン浄水場)

Cracks in the asphalt lining of the new FWR



写真 4. 5

同上 修復後の水道管 (左側)

Repaired influent conduit (left side of photo)



写真 4. 6

同上 盛土のり面の崩壊

Cracks in the slope

(2) ヴァン・ノーマン コンプレックス

ジェンセン浄水場の東隣にあるロサンゼルス水道・電力公社 *DWP* (*Los Angeles Department of Water and Power*) のヴァン・ノーマン (*Van Norman*) コンプレックスは震源から約 10km のところに位置している。ヴァン・ノーマン コンプレックスには、*DWP* ロサンゼルス浄水場、ロサンゼルスダム、発電所、変電所等の施設がある。1971 年サンフェルナンド地震で大きな被害を受けた上・下流ヴァン・ノーマン貯水池は現在使われておらず、洪水調整池となっている。サンフェルナンド地震後、上・下流ヴァン・ノーマン貯水池の間に建設されたロサンゼルス貯水池が現在使用されている。この貯水池は周囲をすべて堤防で囲まれる構造となっている。これらの施設の位置を図 4.4 に示す。

ロサンゼルス浄水場では小規模な亀裂が数地点で見られたが、被害は全般的に軽微であった。また建物と地盤の間に 5～20cm の段差が生じた。貯水池では、堤体が約 9cm 沈下したが、他には写真 4.7 に示すように南東角の堤防のり面のアスファルトフェイスングに亀裂が生じた程度であった。

現在使われていないサンフェルナンド下流ダムでは天端にダム軸と平行に 2.5～4.5cm 幅の亀裂が生じたが、上流側のり面には亀裂は見られなかった。また堤体の上流側地盤で幅 20～30cm の地割れが生じ、周辺には多くの噴砂が見られた。この地割れの方向はダム軸と平行であり、深さ 20cm の段差を伴っていた。下流ダムは写真 4.8 に示すように、1971 年サンフェルナンド地震の際に大崩壊を起こした。

写真 4.9 は、ロサンゼルス貯水池の北にあるサンフェルナンド上流ダムの堤体を示したものである。サンフェルナンド上流ダムの天端にはかなりの亀裂が生じ、さらに堤防内・外両側の法面に新しいはらみ出しの跡が発見されたことが報告されているが、現地調査を行った時点では、そのような被害の痕跡は発見できなかった。

写真 4.10 は発電所及び変電所近くのコンクリート造導水路の被害を示したもので、側壁に約 2～3cm 幅の亀裂が生じた。また被害があった導水路に隣接したアスファルト道路面にも写真 4.11～写真 4.12 に示すように縦・横断亀裂が発生した。これらの被害は、地盤の側方流動によって発生したものと推定される。

写真 4.13 は、サンフェルナンド上流ダムの近くの直径約 90cm の送水管が波打っている様子を示したものである。送水管の支台が数 10cm 移動・傾斜したことによって、管のサポートが引きちぎられて生じた被害である(写真 4.14～写真 4.16)。周辺に噴砂跡は発見できなかったが、隣接するアスファルト道路や道路盛土脇の亀裂等の状況(写真 4.17～写真 4.18)から支台の移動・傾斜の原因は、周辺地盤の液状化による側方流動と考えられる。

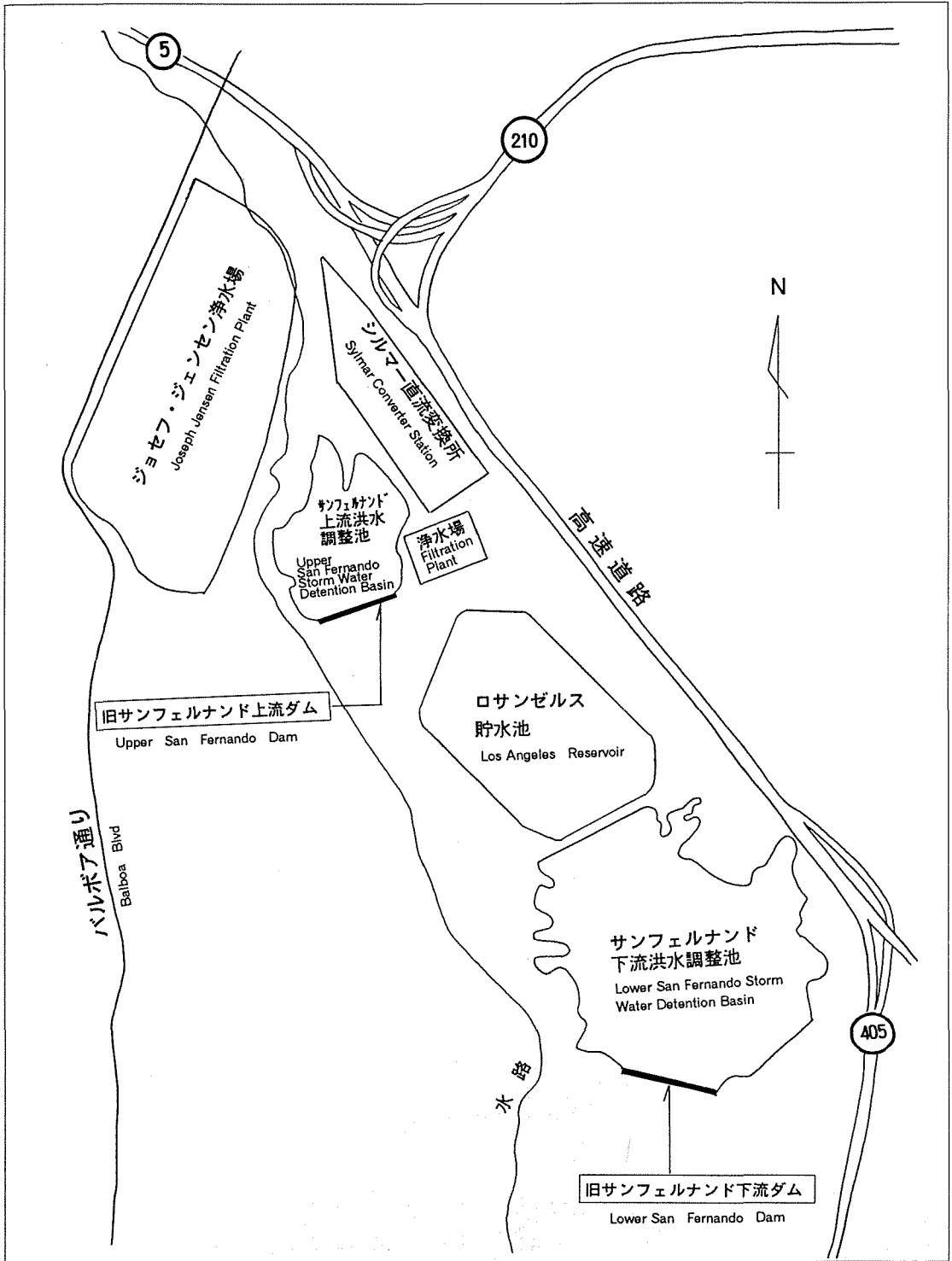


図 4. 4 ヴァン・ノーマン コМПレックスの位置図
Map showing the DWP Van Norman Complex



写真 4. 7

ロサンゼルス貯水池フェーシングの亀裂

Cracks in Los Angeles Reservoir

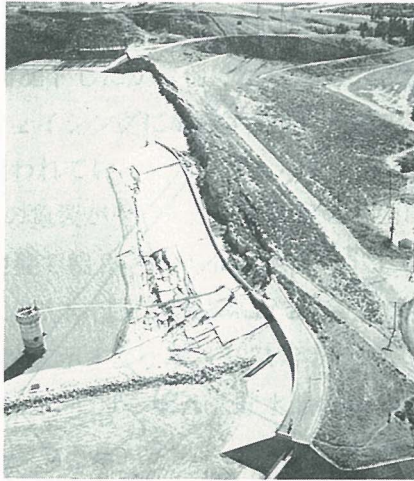


写真 4. 8

1971年サンフェルナンド地震で大きな被害を受けたサンフェルナンド下流ダム²⁴⁾

The Lower San Fernando Dam which was seriously damaged during the 1971 San Fernando Earthquake



写真 4. 9 サンフェルナンド上流ダムの堤体

A view of a portion of the Upper San Fernando Dam

1971年 San Fernando 地震で堤体が崩壊したが、今回の地震では被害は軽微であった。現在貯水池としては使われていない。



写真 4.10

導水路の亀裂
(シルマー変換所付近)

Cracks in the concrete canal



写真 4.11

同上 導水路脇のアスファルト
舗装の横断亀裂

Cracks in the asphalt pavement



写真 4.12

同上 道路脇の亀裂とコンクリ
ートブロックの移動

Cracks in the adjacent drainage
canal and movement of concrete
block



写真 4.13

送水管の変形（ロサンゼルス貯水池付近）

Deformed pipe supported above ground



写真 4.14

同上 コンクリート支柱の傾斜

Tilted concrete pier



写真 4.15

同上 支柱の傾斜のためにできた隙間

Gap between the ground and the pier



写真 4.16

支柱の傾斜によって引きちぎられた送水管のストラップ
(ロサンゼルス貯水池付近)

Damaged steel strap



写真 4.17

同上 送水管に隣接したアスファルト道路の横断亀裂

Cracks in the asphalt pavement



写真 4.18

同上 送水管に隣接した道路盛土側面の亀裂

Fissures on the side of the road embankment

(3) キングハーバー（レドンドビーチ）

震央から約 45km 南方に位置するレドンドビーチ (*Redondo Beach*) のキングハーバー (*King Harbor*) は太平洋に面したマリナーである (図 4.5 参照)。この埠頭で、砂地盤の液状化によって埋立地盤に側方流動と沈下が生じ、同地点にあった 2 棟の平屋建物が不同沈下した。被害を受けた建物の一つを写真 4.19 に示す。埠頭の南側岸壁 (W. L. +1.2m) では 100 ~ 150m の距離にわたって側方流動が起こり、写真 4.20 に示すように、コンクリート護岸がはらみ出し、背後の盛土が 0.6 ~ 0.9m 沈下した。はらみ出した護岸の一部に亀裂が生じ、背後地盤の砂がそこから溢れだした (写真 4.21)。護岸の最大移動量は約 6m であったといわれている。噴砂の跡は調査時にもまだ広く残されていた。

このような地盤の側方流動によって直径 20cm の水道本管が破断した。また被害地点の 1 ブロック南に位置する屋外プール周辺で直径 1.5m ほどの大きさの噴砂が多数生じたことが報告されている。

既往の被害調査資料には、同地点よりもさらに遠い場所 (例えばロサンゼルス港) の液状化が報告されているが、調査期間中に液状化の痕跡を確認することはできなかった。従って、キングハーバーを震源から最も遠くにある液状化地点と考え、図 4.6 に示すように最大震央距離とマグニチュードとの関係をプロットすると、今回の地震は栗林・龍岡らによって提案された線の僅かに下に位置していることが分かる。従って、今回の地震による液状化の範囲は、既往の地震の傾向と大体一致していることを示している。

この地域は 1960 年代初期に約 1.5km 離れた砂丘からの砂と、港の北東端の海岸背後地を掘削した材料で埋立造成された。盛土材は撒いてブルドーザーで転圧されたが、埋土材に含まれていたシルト・粘土分は、埋土材が港に投入されたときに流失してしまった。このような埋立造成過程から、埋土の転圧が海面より上の部分だけに制限され、海面以下の材料は緩いままの状態に埋め立てられた。

図 4.7 および図 4.8 に同地付近の柱状図と埋立土の粒度分布の一例を示す。約 6 m の厚さの埋立土層は、N 値 2 ~ 3 と非常に緩く、平均粒径が 0.15 ~ 0.45mm の細粒分の少ない砂である。さらに、この地域の地下水位が平均 1m 以浅と浅いことから、この埋立土層が地震によって液状化したことは確実である。しかし 1971 年サンフェルナンド地震では、震源がやや北にあったせい、キングハーバーでの液状化被害は記録されていない。

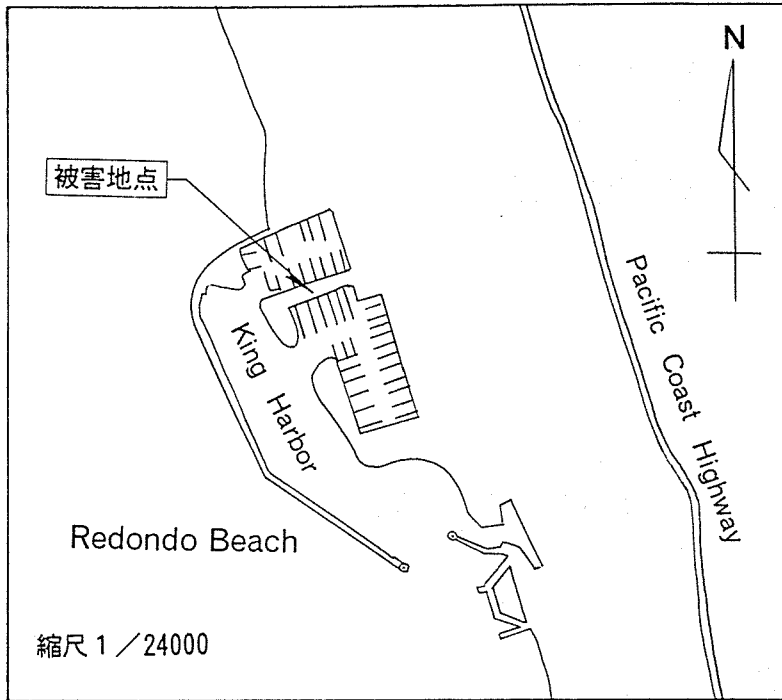


図4.5 キングハーバー（レドンドビーチ）の被害地点
Map showing location of damage in Redondo Beach

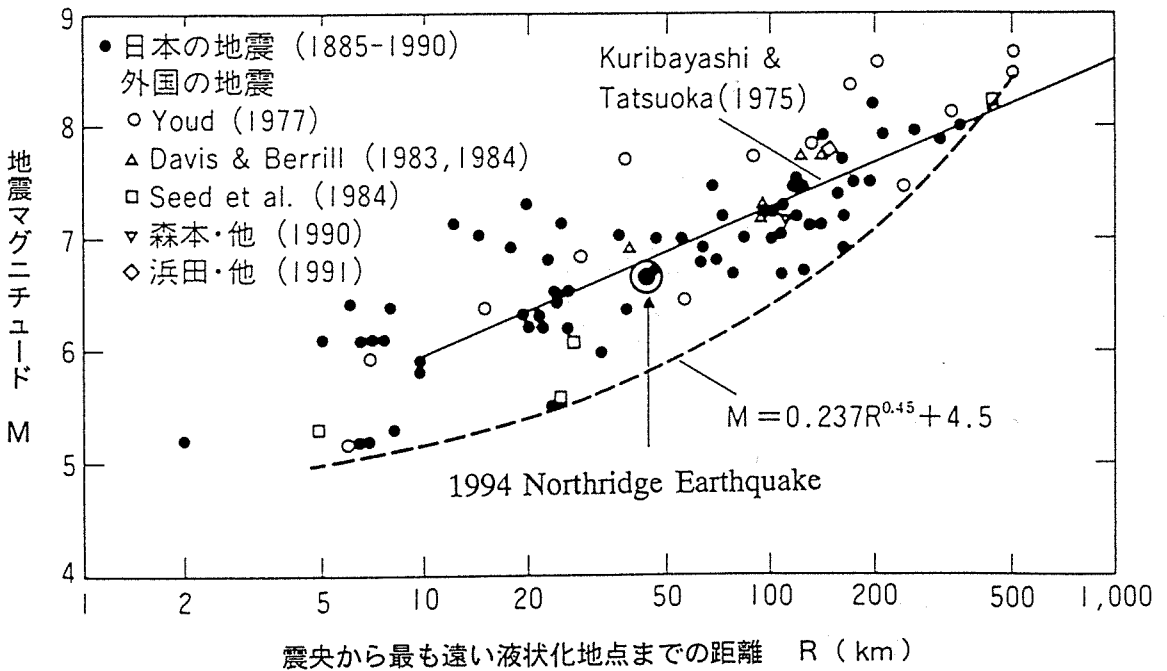


図4.6 液状化地点の最大震央距離とマグニチュードとの関係 (文献31に加筆)
Relation between maximum epicentral distance of liquefied sites and earthquake magnitude



写真 4.19

液状化に伴う地盤沈下による建物の傾斜と変形
(キングハーバー)

Settlement distortion of a building in King Harbor



写真 4.20

同上 護岸のはらみ出し

Lateral movement of retaining wall



写真 4.21

同上 護岸の亀裂より流出して
たまった砂

Sand fill flowing out of the wall crack

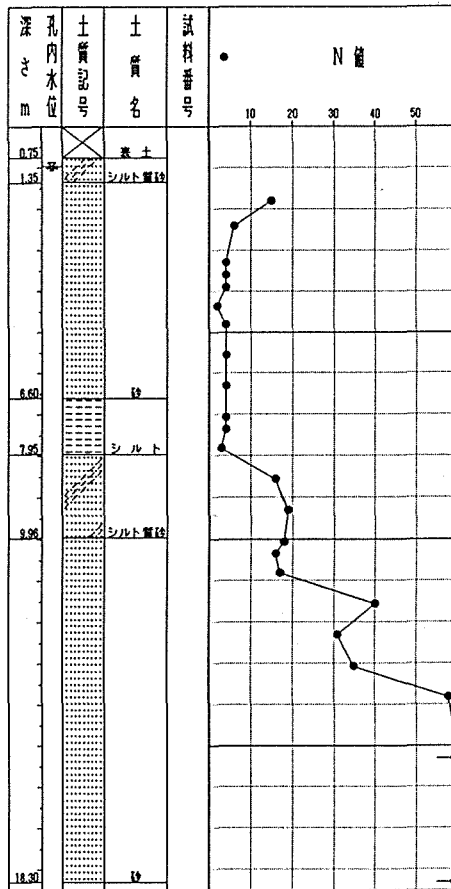


図4.7 キングハーバー（レドンドビーチ）の土質柱状図の一例³⁷⁾
 Typical soil profile of King Harbor in Redondo Beach

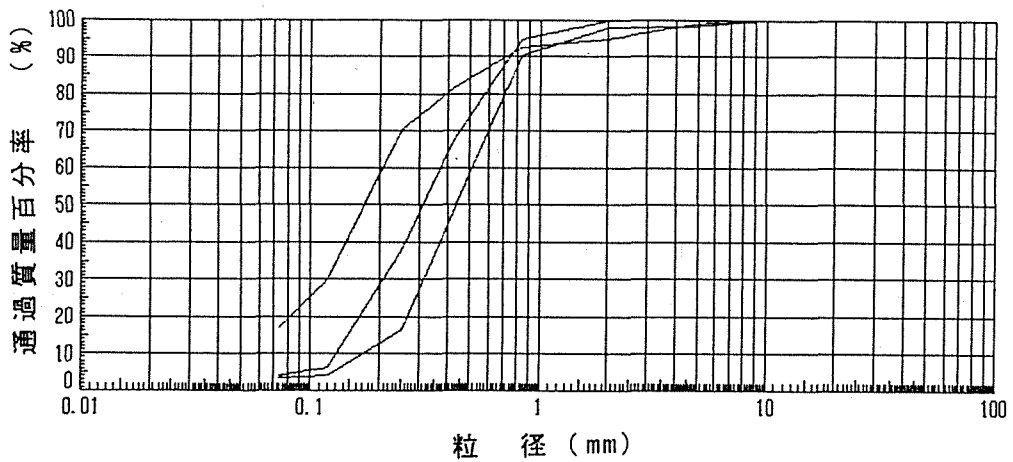


図4.8 同上 粒度分布³⁷⁾
 Grain size distribution

(4) マリナ・デル・レイ

サンタモニカフリーウェイ (I10) とロサンゼルス国際空港の間に位置するマリナ・デル・レイ (*Marina del Rey*) は、幾つもの埠頭を抱える大きなヨットハーバーである。ここではパラワン (*Palawan*) 道路とパナイ (*Panay*) 道路の間の D 埠頭にある人工砂浜の西端で大きな地盤の亀裂が生じたことが報告されている。砂浜には液状化が発生したことを示すと考えられる黒色の砂が散らばっていたが、液状化のはっきりした痕跡は確認できなかった。この他、パナイ道路沿いの道路表面に小さな亀裂が見られた。

(5) サンタモニカ市営埠頭

太平洋に面したサンタモニカ市営埠頭 (*Santa Monica Municipal Pier*) の駐車場で噴砂や地割れといった液状化の痕跡が見られた。厚さ 15cm のアスファルト舗装に、広範囲にわたり海岸線に平行な亀裂が生じた。駐車場の亀裂は、調査時にはすでに補修されていた。また木製のピアでつくられている埠頭には大きな変状は見あたらなかった。

(6) グラナダ丘陵及びノースリッジ地区

グラナダ丘陵と北・中央ノースリッジでは、おびただしい数の道路の亀裂が生じ、大規模な地盤変状が発生したことが明らかとなった。幅 5cm 程度のアスファルト舗装の亀裂は多くの報告書に記載されているが、大きなものでは住宅基礎と隣接する地盤との間に約 15cm の隙間が生じたことが報告されている。

この地域は水道管とガス管に多くの被害があったところである。サンフェルナンドバレーの北端にあるバルボア (*Balboa*) 通り沿いに埋設されていた ϕ 173cm 及び ϕ 124cm の水道管と ϕ 55cm のガス輸送管 (圧力 15kgf/cm²) が、約 330m 離れた 2 地点において地盤の伸張及び圧縮により破壊した。被害を受けた埋設管の一例を写真 4.22 に示す。この破壊によって漏れたガスにトラックのスパークが引火して火災となり、5 戸の家屋が焼失した。

これらの埋設管被害は地盤の側方移動によって引き起こされたものと考えられる。被害地点は、扇状地の末端部といわれているが、近隣のボーリング資料では地表から 9～12m まで緩いシルト質砂層が堆積しており、地下水はそれ以深にあるようである。このような埋設管の大きな被害を引き起こした地盤の側方移動が、どのようなメカニズムで起こったのか、今後の調査・研究が待たれるところである。

(7) ロサンゼルス港

震源からおよそ 60km 南方のロサンゼルス港では、港の西側のナゴヤ (*Nagoya*) 道路に沿って地盤の側方移動があったことが報告されている。さらに幅約 5cm、長さ 15m にわたって生じた道路の亀裂から約 10 m³ の細砂及びシルト質砂が噴き出し、それに伴って道路が約 20cm 沈下した。これらの地盤変状は地震後 2 週間以内に補修されたため、被害調査時には確認できなかった。この他、ロサンゼルス海洋博物館 (*Los Angeles Maritime Museum*) に隣接した地点で舗装の亀裂と沈下があったことが報告されているが、調査時には修復されていたため、被害の程度は確認できなかった。

(8) テキサス牧場 (シミバレー)

サンフェルナンドバレーの北方にあるシミバレーのデントン (*Denton*) 通り近傍にあるテキサス牧場では、丘陵地帯に 2 つの平行する大きな地割れが発生した。互いに 10m 程離れたこれらの地割れは、それぞれ幅が 50cm、長さが 20m 程度であった (写真 4.23 ~ 写真 4.24)。この地割れの発生原因は明らかではないが、割れ目周辺の陥没孔の状況から判断すると、地震以前から当地点には地中に多くの穴が存在しており、地震によって穴の地表部が陥没し、その後の余震及び降雨による流水によって陥没孔が拡大し、相互に繋がって地割れのような格好になったのではないと思われる。地中の穴ができた原因も明らかではないが、調査時に穴から野兎が顔を出していたことから推測して、これらの穴は兎の巣となっていたようである。ちなみに同地点には構造物は何もなかったため、地割れによる被害は無かった。

(9) シミバレー駅近傍の河川護岸

ロサンゼルス市と近郊を結ぶ鉄道であるメトロリンク (*Metrolink*) のシミバレー駅 (*Simi Valley*) 南方約 50m の地点にある河川の背後地盤に大きな亀裂・段差が生じた。約 100m にわたって河川と平行な数条の亀裂が発生した。亀裂の幅・段差とも最大で 50cm 程度であった (写真 4.25 ~ 写真 4.27)。これらの亀裂は、高さ約 3m の護岸のはらみ出し・沈下によって発生したと推測されるが、石積にモルタルを吹き付けただけの簡単な構造の護岸には、小さな亀裂が生じているのみで川底にも地盤の盛り上がりなどの変状は見られなかった。背後地盤や川底には噴砂・噴水の痕跡は見られず、液状化が発生したという証拠は認められなかったが、わが国における河川堤防等の被害形態と比較して、これらの地盤被害は液状化に起因するものであろうと考えられる。



写真 4.22

被害を受けた埋設管
(バルボア通り, EERC提供)

Ruptured utility pipe along Balboa
Boulevard (courtesy of EERC)



写真 4.23

丘陵に生じた大きな割れ目
(テキサス牧場)

Earth fissures on a hill in
Texas Ranch



写真 4.24

同上 亀裂付近のすり鉢状の穴

Sinkholes adjacent to the cracks



写真 4. 25

メトロリンク シミバレー駅近くの
水路壁の亀裂

A view of the river channel near the
Metrolink railroad
Note the cracks on the concrete
facing of the wall channel



写真 4. 26

同上 水路背後地盤の大きな
亀裂

Fissures adjacent to the canal



写真 4. 27

同上

Same as above

(10) シミバレー東部

液状化に伴う噴砂はシミバレー東部の住宅地に多く見られた。地盤の亀裂・噴砂、地表面の変形及び家屋基礎の破壊等が、カーテン (Kirten)、ロリーリン (Rory Lyn)、サビナサークル (Sabina Circle) 通りの周辺で確認された (写真 4.28 ~ 写真 4.30)。これらの液状化によって生じた地盤破壊とそれに伴う側方流動が、周辺の住宅に広範な被害をもたらした。シミバレーの地盤亀裂・破壊地点の位置を図 4.9 に示す。これらの地盤破壊が市の南部を東南方向に横切る細長く狭い地域に集中しているようにみられることから、こうした地域が液状化しやすい旧河道であった可能性もあり、今後の調査・研究が期待される。

(11) その他

液状化は震源近傍を中心として各所で発生したが、時間の関係で前述の地点しか調査できなかった。既往資料等に報告されている液状化地点をいくつか挙げると、1971年サンフェルナンド地震でも被害があったジュヴェニールホール、ハンセンダム上流の干上がった湖床、高速道路 23 号線がサンタクララ川を横断する箇所、ポトレロ (Potrero) 峡谷等がある。

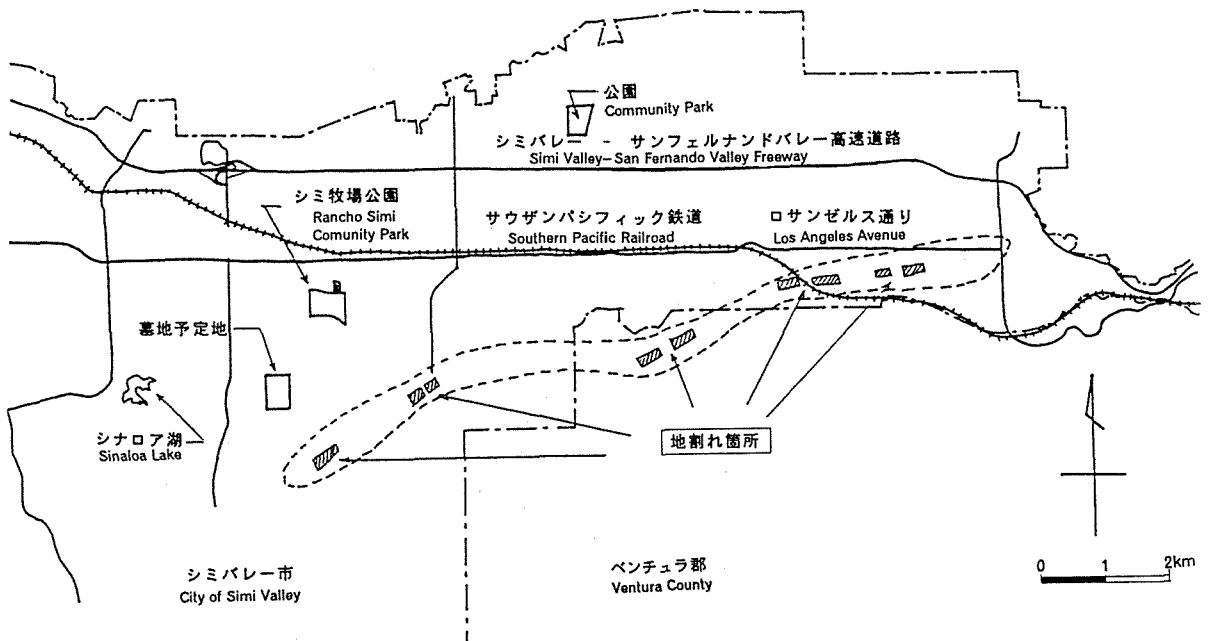


図 4.9 シミバレー市の地盤亀裂位置図
Pattern of ground failures in Simi Valley



写真 4. 28

住宅の庭先で見られた噴砂
(シミバレー)

Sand boil in the vicinity of a house



写真 4. 29

同上 舗装道路の変形とブロッ
ク塀の崩壊

Deformation of concrete pavement
and collapsed fence



写真 4. 30

同上 液状化による住宅の床の
亀裂

Cracks in the flooring of the house

4.3 斜面及び盛土崩壊

ノースリッジ地震では、震源近傍のロサンゼルス郡及びベンチュラ郡の多くの地点で落石、斜面崩壊等が発生した。斜面崩壊は一般に地震動の大きな場所で起こると考えられるが、その場所の地質の影響も無視できない要因である。本節では地震によって引き起こされた幾つかの斜面崩壊事例を紹介する。

(1) パシフィック・パリセーズ

サンタモニカにあるパシフィック・パリセーズ (*Pacific Palisades*) では、太平洋に面した海岸沿いの崖の斜面が崩壊し、崖の上に建てられていた家屋が崩土と共に滑り落ちた。この地区では、少なくとも4カ所の大規模な崩壊と幾つかの小規模な崩壊が発生した。崩壊した斜面の高さは40～60m、斜面勾配は45～60°であり、崩壊した土砂は、第四紀及び第三紀更新世の固結度の低い砂であった。崩壊の幅はおよそ100mであったが、崩壊土の厚さは高々数mであったと推測されている。

被害が最も大きかった斜面崩壊の一つは、パシフィック・コースト ハイウェイ (*Pacific Coast Highway*) 上のチョウトウカ (*Chautauqua*) 通りの北側で発生した崩壊である。写真4.31～写真4.33に示すように、崩壊は崖の頂上から起こり、崩壊とともに家屋も一緒に落下してしまった。同じような被害は1993年釧路沖地震の際に釧路市緑ヶ岡でも見られたが、この時は造成盛土が崩壊したのに対して、今回の地震では自然斜面が崩壊したようである。崩壊土砂はパシフィック・コースト ハイウェイの山側車線にまで達し、数日間通行止めになった。

(2) その他の斜面崩壊

サンフェルナンドバレーの北と西に広がるサンタスザーナ山地の急斜面で多数の斜面崩壊が発生した。その一例を写真4.34～4.35に示す。これらの山地は新第三紀層からなり、急速に隆起している地域である。岩質は、砂岩、頁岩、礫岩であり、いずれも固結度が極端に低く、引っ張り強度はほとんどない。

斜面崩壊・落石の多くは小規模ではあったが、発生箇所数は多かった。斜面崩壊・落石によってサンガブリエル山地及びサンタスザーナ山地を通過する道路が多数寸断された。シャーマンオークス (*Sherman Oaks*) のマルホランド (*Mulholland*) 通りで発生した斜面崩壊では、崩土によって道路は寸断されなかったが、新たな斜面崩壊の予兆があったため、一時的に通行止めになった。



写真 4.31

斜面の崩壊により落下した家屋
(パシフィック パリセーズ,
EERC提供)

Slope failure in Pacific Palisades
(Courtesy of EERC)



写真 4.32

斜面の崩壊により落下した家屋
(パシフィック パリセーズ)

Slope failure in Pacific Palisades



写真 4.33

同上

Same as above

大規模な斜面崩壊が起こったことが報告されている地域は次のとおりである。

- (a) ディロンデバイド (*Dillon Divide*) の *Little Tujunga* 通りでは 2 ヶ所で大きな斜面崩壊が発生した (写真 4.36 参照)
- (b) パコイマダム周辺では、アプローチ道路が落石や崩壊のために数ヶ所で寸断された
- (c) ユニバーサル (*Universal*) 市のカフエンガ (*Cahuenga*) 通り沿いの斜面
- (d) ピル (*Piru*) 市近郊の 126 号ハイウェイ沿いの斜面

図 4.10 は、地震後の調査に基づいて推定された斜面崩壊の起こった範囲を示したものである。崩壊の範囲は震央から約 75km 北西に離れたロスパドレス国有林 (*Los Padres National Forest*) 地区まで及んでいるが、崩壊範囲のほとんどが居住地域ではなかったため、斜面崩壊による被害は小さかった。図 4.11 は、震央または断層から最も遠い斜面崩壊地点の距離と地震のマグニチュードの関係を示したものである。これによれば今回の地震による斜面崩壊の限界距離は、安田等によるわが国の斜面崩壊事例の分析結果に近い結果を与えている。

(3) タポ溪谷たい積場の盛土崩壊

シミバレー北部のタポ溪谷 (*Tapo Canyon*) にあるたい積場の堤体が崩壊し、内容物が流れ出した (写真 4.37 ~ 写真 4.39)。このたい積場はコンクリート骨材となる碎石を採取した後の細粒の残土を貯蔵していたもので、堤体は礫やコンクリート塊が混じったきれいな砂で構成されている。付近には液状化の痕跡は見られなかったが、被害の原因は堤体のり尻付近の液状化ではないかと考えられる。たい積物は局部的には乾燥している状態にあったが、それにも関わらず堤体の裂け目を突き破って内容物が流出した。被害は本震のみで生じたのではなく、引き続いて起こった大きな余震によって徐々に破壊が進行したということである。

この地域には幾つかのたい積場があったが、被害を受けたのはこの 1 ヶ所だけである。



写真 4.34

15/SR14インターチェンジ付近の
斜面崩壊 (EERC提供)

Bedding-plane landslide west of 5/14
Interchange (courtesy of EERC)



写真 4.35

サントスザーナ山地の落石
(EERC提供)

Rock fall in Santa Susana Mountains
(courtesy of EERC)

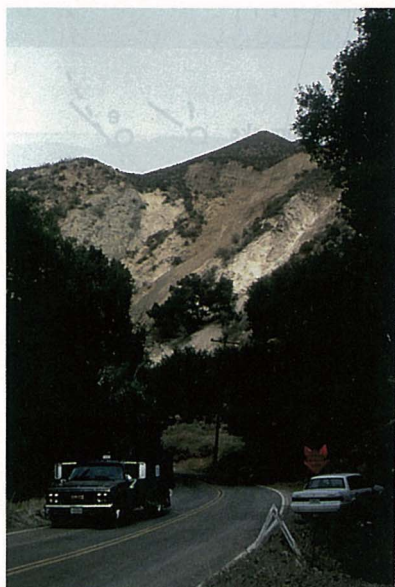


写真 4.36

ディロン・デバイドにおける斜
面崩壊 (Little Tujunga通り,
EERC提供)

Landslide at Dillon Divide, Little
Tujunga Road (courtesy of EERC)

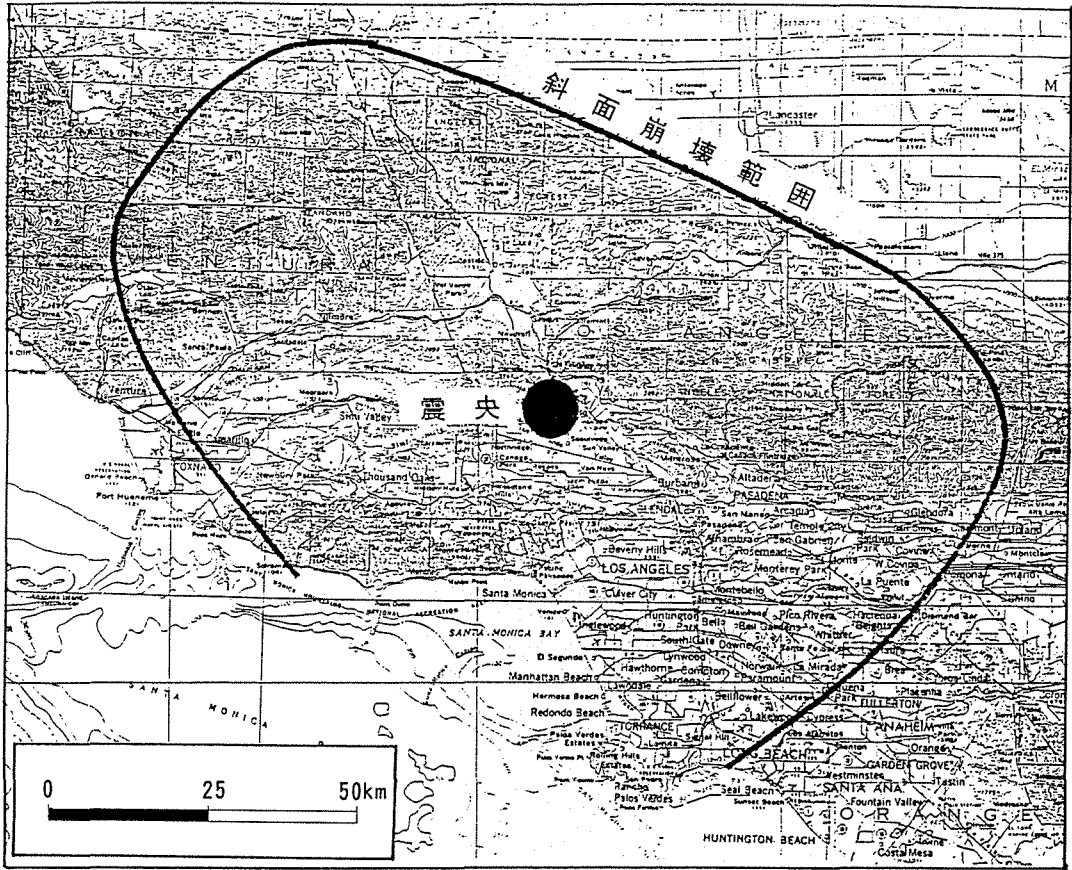


図 4.10 斜面崩壊の限界線³²⁾
Approximate limit of landslides

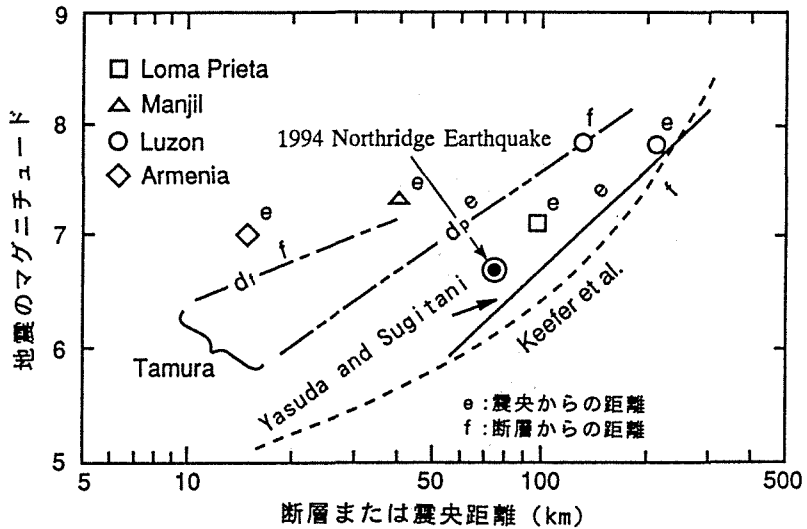


図 4.11 斜面崩壊が生じる限界の断層または震央距離とマグニチュードの関係³³⁾
Comparison of relationships between magnitude and maximum distance from a fault or an epicenter



写真 4.37

たい積場の崩壊（タホ°峡谷）

Collapsed quarry debris basin in Tapo Canyon



写真 4.38

同上

Same as above



写真 4.39

同上 堤体の崩壊により流出したたい積物

Debris which flowed down the canyon

5. 道路橋の被害と復旧

5.1 概要

今回の地震で最も顕著な被害として道路高架橋の被害が挙げられる。ノースリッジ地震は、延長 1,000km 弱にも及ぶロサンゼルス都市圏のフリーウェイを直撃した。崩壊や甚大な損害を被った道路高架橋は 8 地点、11 ヶ所であり、14 ヶ所で通行止めとなった。軽微な被害箇所まで含めると 176 ヶ所で被害があった。路線毎の被害箇所数をまとめると表 5.1 になる。

主要な被害箇所は次の通りである。これらの被害地点を図 5.1 に示す。写真 5.1 ~ 写真 5.3 には高架橋の被害事例を示す。

- ①. 州間高速道路 5 号線と州道 14 号線の北側インターチェンジ (I5/SR14)
- ②. 州間高速道路 5 号線と州道 14 号線の南側インターチェンジ (I5/SR14)
- ③. 州間高速道路 5 号線のギャビン (Gavin) 渓谷橋梁
- ④. 州間高速道路 10 号線フェアファックス (Fairfax) - ワシントン (Washington) 交差部
- ⑤. 州間高速道路 10 号線ラ・シェネガ (La Cienega) - ヴェニス (Venice) 交差部
- ⑥. 州道 118 号線ミッション (Mission) - ゴシック (Gothic) 交差部
- ⑦. 州道 118 号線ブルクリーク (Bull Creek) 渓谷橋梁

これらの被害のほとんどは、せん断に対する耐力の不足に起因した橋脚の破壊であるが、橋軸直角方向の地震動によって、斜橋の橋桁の接続部がはずれ、桁の一部が破壊して下の道路に落下した事例が報告されている。

カリフォルニア州交通局 (CALTRANS) では高速道路に対する耐震補強の実施途上であり、地震発生当時には 122 箇所の高架橋の補強が終了し、43 箇所の補強作業が進行中であった。今回の被害を受けた 11 ヶ所の高架橋においても、⑥を除いて順次補強が実施される計画であった。補強が終わった高架橋の中では、地震による被害を受けたものは全く無かった。このことは高架橋が現行基準に基づいて設計されていれば、地震による被害は起こらなかったことを示している。

I5/SR14 のインターチェンジで被害を受けたランプは、1971 年サンフェルナンド地震当時はまだ建設中であり、その当時の耐震基準に基づいて建設されたものである。サンフェルナンド地震でも同インターチェンジで高架橋の被害があった。被害を受けたのは別なランプであったが、そのランプは今回の地震では被害を受けなかった。

その他の高架橋の被害原因として、橋脚と橋桁が斜交する構造が指摘されている。斜交する橋梁が橋軸直角方向に振動すると、橋桁の接合部が閉じたり開いたりする振動成分が出てくるので、橋桁の掛け違い部の幅が狭いと落橋する可能性がある。今回の地震で被害を受けた高架橋の大多数は斜交構造であった。③の被害事例である州間高速道路5号線がギャビン溪谷を横断する地点の橋梁では、図5.2に示すように橋桁と下の道路の交差角度が 67° であった。また橋桁の掛け違い部の幅が狭いことも被害原因の一つとして挙げられている。

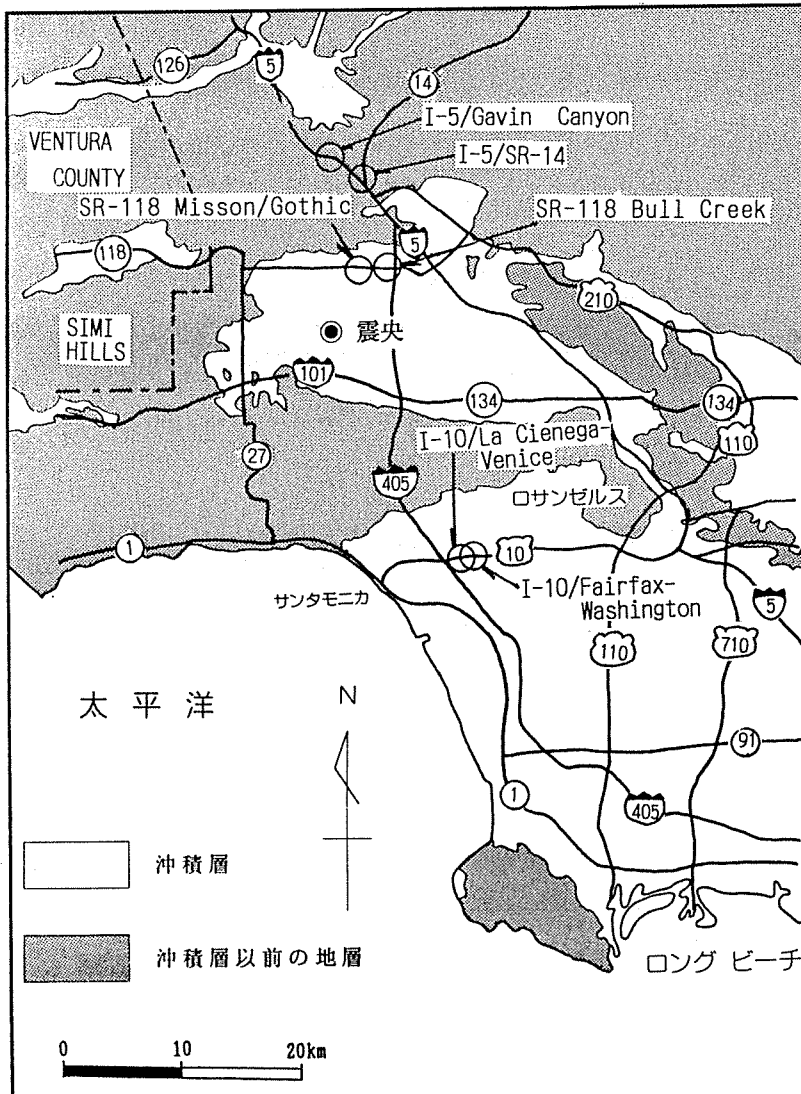


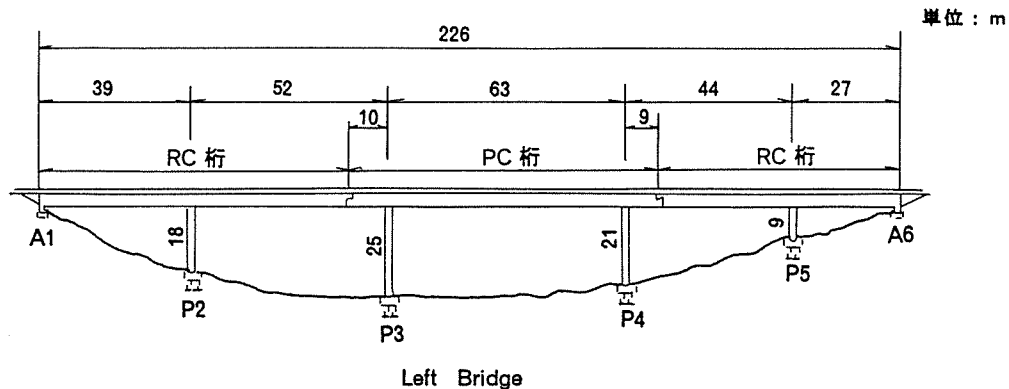
図5.1 主な道路橋被害地点位置図
Location of collapsed freeways

表 5. 1 道路橋被害箇所の内訳 (2/1現在)^{3.6)}
Number of damaged bridges

路線番号	箇所数	路線番号	箇所数	路線番号	箇所数
1	1	71	1	138	1
2	1	90	4	170	4
5	4 5	101	8	210	4
10	2 8	105	1	405	1 8
14	1 6	118	2 9	101*	1
22	1	126	2	118*	1
60	1	134	9	全体	1 7 6

※ベンチュラ郡, その他はロサンゼルス郡

(側面図)



(平面図)

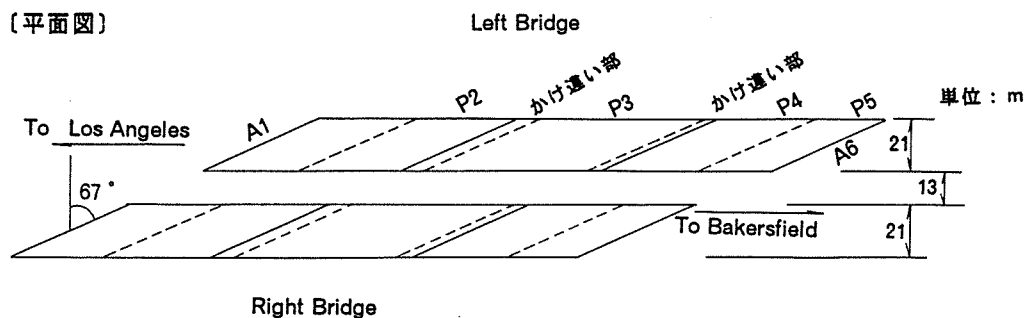


図 5. 2 落橋地点の略図 (I5 Gavin Canyon 通過部)^{3.4)}
Lay-out of the I5/Gavin Canyon Undercrossing



写真 5. 1

I5/SR14北側合流地点の高架橋の崩壊 (EERC提供)

I5/SR14 Interchange, North Connector.
Collapsed span between bent 2
(crushed) and bent 3(standing).
(courtesy of EERC)



写真 5. 2

同上 I5/SR14南側合流地点の高
架橋の崩壊 (EERC提供)

View of bent 3 of the South Overhead
at the I5/SR14 Interchange
(courtesy of EERC)



写真 5. 3

橋脚の主鉄筋の座屈 (118号線ブ
ルクリーク溪谷橋, EERC提供)

Buckling of longitudinal
reinforcement below the spiral-
confined zone at the Bull Creek
Canyon Channel Bridge
(courtesy of EERC)

5.2 被害の復旧

(1) 復旧技術

現地調査が実施されたのは地震からほぼ4ヶ月が経過しようという時期であったため、被害を受けた高架橋の復旧は終了しているか復旧中であった。

高架橋の被害原因が橋脚の耐力不足であることが指摘され、復旧にあたっては現行基準に基づいて設計の修正が行われた。すなわち、より高強度の鉄筋コンクリートの使用と重要な接合点における主筋と帯筋の強化である。

幾つかの高架橋では橋桁を支持する短柱の破壊が生じている（写真5.3参照）。図5.3は短柱及び長柱の地震時の変形特性を模式的に表したものであるが、長柱は変形することによって破壊を免れるが、短柱はたわみ難いので、隣接の長柱によって生み出された水平地震力のエネルギーを吸収し、破壊しやすい。このような被害を防止する一つ的手段としてコンクリート橋脚を鋼製ジャケットで保護する方法がある。柱のせん断破壊によるコンクリートの剥離を防止するとともに、短柱をよりフレキシブルにすることができる。

この他、復旧にあたって採用された技術として、短柱の周囲に鋼製のケーシングを設置する方法がある。これは各橋脚の変形特性を同一にするための方法で、丘の上等に設置された短い橋脚の周りの地盤を隣接する長い橋脚と同じ深度まで掘削し、鋼製のケーシングを橋脚の周りに設置する（図5.4参照）。これによって橋脚が同じ長さになり、橋脚の異なる振動挙動によって生じる被害を防止することができる。また短柱が長柱に変わることによって、前述のような被害を防止することもできる。

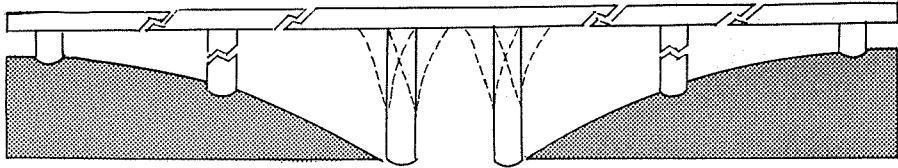
写真5.4～写真5.6は、I5/SR14のインターチェンジで採用されたケーシング工法の様子を示している。

1971年以前は、橋脚の配筋は主鉄筋に比べて帯鉄筋は少なかった。従って、主鉄筋周囲のコンクリートが剥落すると鉄筋は拘束力を失い座屈する。帯鉄筋による拘束力によって柱の強度が増加することになる。写真5.7には、I5/SR14インターチェンジの復旧工事で用いられている鉄筋カゴを示す。

復旧にあたっての耐震補強の方法の一つとして、写真5.8に示す二重鉄筋カゴ形式がある。このような形式の配筋によって橋脚の耐力はより大きくなる。

5号線がギャビン溪谷を横断する地点では、橋梁の復旧にあたって橋桁と下の道路の交差角度が67°から45°に修正された。

その他、今回の地震被害の復旧にあたっては、掛け違い部の拡張、橋脚との接合部におけるヒンジジョイントの採用、橋桁の端部を鋼線で結合した落橋防止装置等の採用等によって、耐震補強を行っている。



長い橋脚は曲げ変形しやすいので、
大きな被害は被らない

短い橋脚は曲げ変形しにくいので、
隣接する長い橋脚の変形によって生
み出された水平方向の地震エネルギー
を吸収して破壊する

図 5.3 高架橋の破壊のメカニズム¹⁾
Failure mechanism in short columns

アイソレーション ケーシング - 短い橋脚をケーシングで囲むことによって隣接する長い
橋脚と同じ振動特性にできるので、すべての橋脚が同一の挙動をすることによって被害を防止できる

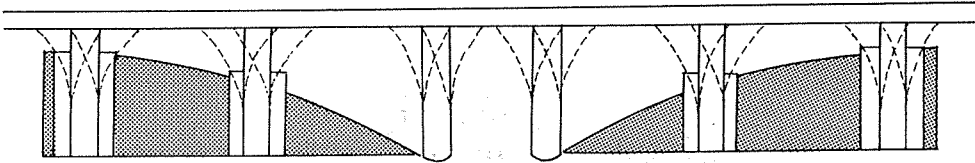


図 5.4 アイソレーション (橋脚の長周期化) の原理
Principle of isolation casing



写真 5. 4

15/SR14合流地点におけるフリー
ウェイの復旧状況
～橋脚のアイソレーション～

Use of isolation casing as
a retrofitting technique



写真 5. 5

同上 アイソレーションケースで
囲われた橋脚

A column encased with an isolation
casing



写真 5. 6

同上 設置前のアイソレーショ
ンケース

A view of an isolation casing before
installation



写真 5. 7

同上 スパイラル鉄筋で補強した橋台

Column with spiral reinforcement



写真 5. 8

橋脚用の二重鉄筋カゴ

A double-loop (left) and single-loop (right) reinforcements for bridge columns

(2) 復旧状況と地震後の交通事情

今回の地震で高速道路網が大きな被害を受けたにも関わらず、カリフォルニア州交通局 (CALTRANS) では年内に復旧を終える計画である。実際、被害を受けた高架橋の取り壊しは地震発生後数時間で開始された。被害調査を実施した時点では、主要な道路橋の復旧作業は進行中であり、中でも交通量が多いサンタモニカ高速道路 (I10) の復旧は9月までに終了する予定である。写真 5.9 ~ 写真 5.11 は I5/SR14 及び I5 のギャビン溪谷橋梁の復旧状況を示したものである。現場担当者によれば、復旧にあたっては 24 時間体制で無休で工事が進行しているとのことである。また復旧に要する費用はおよそ 14 億ドルに達するといわれている。復旧される構造物の形状は地震前と基本的に変わらないが、CALTRANS では復旧にあたって採用したいくつかの新しい対策が、構造物を耐震的に強化できるかどうかを検討している。

地震後、新しい技術が都市部における交通渋滞を緩和するのに大きな役割を演じている。最も効果的な技術の一つとして、主要高速道路に交通量モニターセンサーを設置したことである。各所の交通の流れに関する情報はロサンゼルス市のダウンタウンにある CALTRANS の事務所でモニターされ、この情報に基づいて道路管理者は、運転者に道路の電光掲示板または TV・ラジオを通じて交通状況を知らせることができる。従って各所の道路閉鎖にも関わらず、このようなモニタリングシステムを活用して、地震後の交通の混乱を防止することができた。

地震後に変化したもう一つの点は、車の相乗りや車以外の移動手段の利用に関する CALTRANS の要請がかなり浸透してきた点である。ロサンゼルス市の幾つかの高速道路では、2 人以上の乗客が乗る車の専用レーンを指定しており、そのレーンは他のレーンより高速で走行できる。さらに地震以後マイカー通勤から鉄道などの公共交通手段に切り替える人の数が増加した。例えばロサンゼルス市と郊外を結ぶ鉄道 (METROLINK) の 1 路線の乗客が地震前は 1,000 人/日以下であったのに対して、地震直後は最高 21,000 人/日と激増し、現在は 9,000 人/日で安定している。

ロサンゼルス地域の事情は北部カリフォルニアとはかなり異なる。北部カリフォルニアでは 1989 年ロマ・プリエタ地震で被害を受けた 4 つの主要高速道路のうち 1 つの復旧がまだ終わっておらず、サンフランシスコ市及び周辺地域にとって深刻な交通問題となっている。サンフランシスコの心臓部ともいえる州間高速道路 280 号線 (I280) の開通は 1995 年末の予定であるが、数 10 人の死者が出たサイプレス (Cypress) 道路の開通はさらに後の 1998 年である。101 号線においては 3 年間の補修作業がまもなく始まる計画となっている。また同様に大きな被害を受けたエンバーカーデロ (Embarcadero-I480) 道路については、取り壊されて地図から抹消された。



写真 5. 9

I/5/SR14 合流部南側復旧状況

Repair works at the I5/SR14 South Connector



写真 5. 10

5号線ギャビン峡谷にかかる橋梁の復旧状況

Work in progress in I5/Gavin Canyon Undercrossing

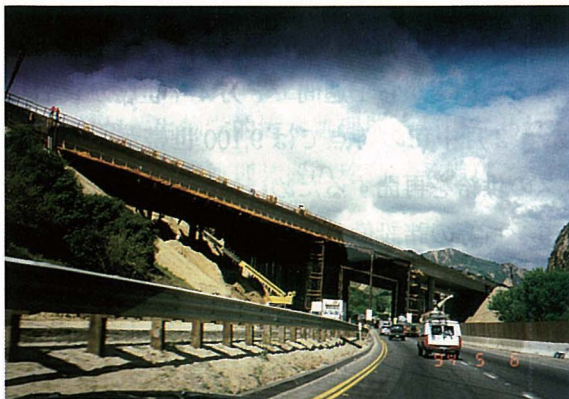


写真 5. 11

同上

Same as above

6. ライフライン関連施設の被害

ノースリッジ地震は電気・ガス・水道などのライフライン施設に深刻な打撃を与えた。この章ではライフライン設備の被害の概要を紹介する。現地調査の時点では、被害を受けたライフラインの復旧はすでに終了していたため、ここで紹介する被害は既往文献や資料に基づいてまとめたものである。

(1) 電力

地震直後（17日早朝）にはロサンゼルス地域の大部分が停電し、およそ200万世帯が影響を受けた。すなわちロサンゼルス市に加えて、モンテベロ (*Montebello*) からサンタバーバラ (*Santa Barbara*) にかけての近郊都市60万世帯が停電した。しかし同日夕方までには90万世帯が復旧し、翌18日まで停電が続いたのは72,500世帯だけであった。さらに20日には7,500世帯に減少し、完全に復旧したのは9日後であった。

ロサンゼルス盆地以外で最も大きな影響を被ったのは15万世帯が3時間停電したアイダホ州の農村地帯であった。

停電の原因は変電所の碍子の被害や送電鉄塔の被害（一部は倒壊）によると言われている。震央から数km以内の地域に幾つかの主要高圧変電所があったが、震源域における強い地震動のために、これらの変電所は大きな被害を受けた。

一方、壊れた送電鉄塔は66kVと230kVであった。送電鉄塔の被害原因は現在調査中であるが、鉄塔の基礎に被害が生じていること、鉄塔が地形による地震動増幅が起りやすい峰の頂上近くに位置していることが影響しているのではないかと考えられている。

(2) 都市ガス

地震によって15万世帯のガス供給が停止したが、このうち13万3千世帯は需要家が自らガス栓を閉めたものである。地震から1週間で8万4千世帯が復旧し、1ヶ月でほぼ12万世帯が復旧した。2月中旬の時点では9,100世帯がまだ復旧されていない。都市ガスの場合、ガスの供給を再開するためには、ガス会社の職員が各家庭を回って、ガス導管とガスコンロ等の諸設備のチェックが必要なので、復旧にはかなりの時間を要する。

地震によって1,377ヶ所のガス導管の破壊または漏洩が発生した（2/2現在）。配給管 (*Distribution*) で489ヶ所、輸送管 (*Transmission*) で35ヶ所の被害が発生し、

残りの 853 ヶ所は供給管であった。輸送管は口径 250 ～ 350mm の鋼管が多く、圧力は 10kgf/cm² 以上である。配給管は口径 50 ～ 300mm の鋼管またはポリエチレン管で、圧力は 4.2kgf/cm² 以下である。輸送管の被害の 3/4 は 1932 年以前に敷設された管体の亀裂またはアセチレンガス溶接部の被害であった。またポリエチレン管では接合部での被害が大部分である。

バルボア通りでは、同一地点で水道管破裂とガス漏洩による火災が発生した。被災箇所では 8 種類のライフライン設備があった。すなわち 3 本のガス導管、3 本の上水道管、2 本の下水道管、1 本の石油輸送管、34.5kV と 4.8kV の電力ケーブル、電話線、ケーブル TV 線、道路照明用電線である。地震による地盤移動で、地下埋設管の幾つかが破壊し、火災によって架空線と 5 戸のモバイルホームが焼失した。

(3) 上水道

南カリフォルニア地域の上水道は、地下水とコロラド川及び北カリフォルニア地域からの輸送によって供給されている。地震によって北カリフォルニア地域からサンタクラリタ (*Santa Clarita*) 地域とサンフェルナンド地域に水を供給する 4 本のパイプライン（口径 135 ～ 300cm の鋼管）が被害を受けたが、2 ～ 10 日で復旧した。また同地域の 3 ヶ所の浄水場でも、周辺地盤の沈下、施工継手における漏水、塩素溶液用のポリエチレンパイプの漏れ等の軽微な被害があった。

これらの被害にも関わらず、貯水池や他の浄水場からの供給によって、多くの地域への上水の供給は可能であったが、配水システムが被害を被ったため、需要家への配水は不可能となった。サンフェルナンドバレーで 1,200 ヶ所以上、サンタクラリタバレーでおよそ 300 ヶ所の配水管に漏水が発生した。

(4) 下水道

当地には汚水を再利用するための 3 次処理用の 2 ヶ所の下水処理場があった（処理能力は 1 日当たり 7.6 万トンと 30 万トン）。地震によって 7 ～ 8 時間、稼働が停止したが、生物学的汚水処理機能が損なわれることはなかった。汚水処理場は地震によって、汚泥処理装置の移動、予備パイプの破損、天井タイルの破損等の軽微な被害を受けた。

7. 建築物の被害

今回の地震では、平屋の家屋や駐車場ビルから高層の商業ビルや工場施設まで様々な建築物に被害があった。木造、プレキャストコンクリート造、現場打ちコンクリート造或いは鉄骨造等の各種の構造の建築物が程度の差こそあれ被害を被った。

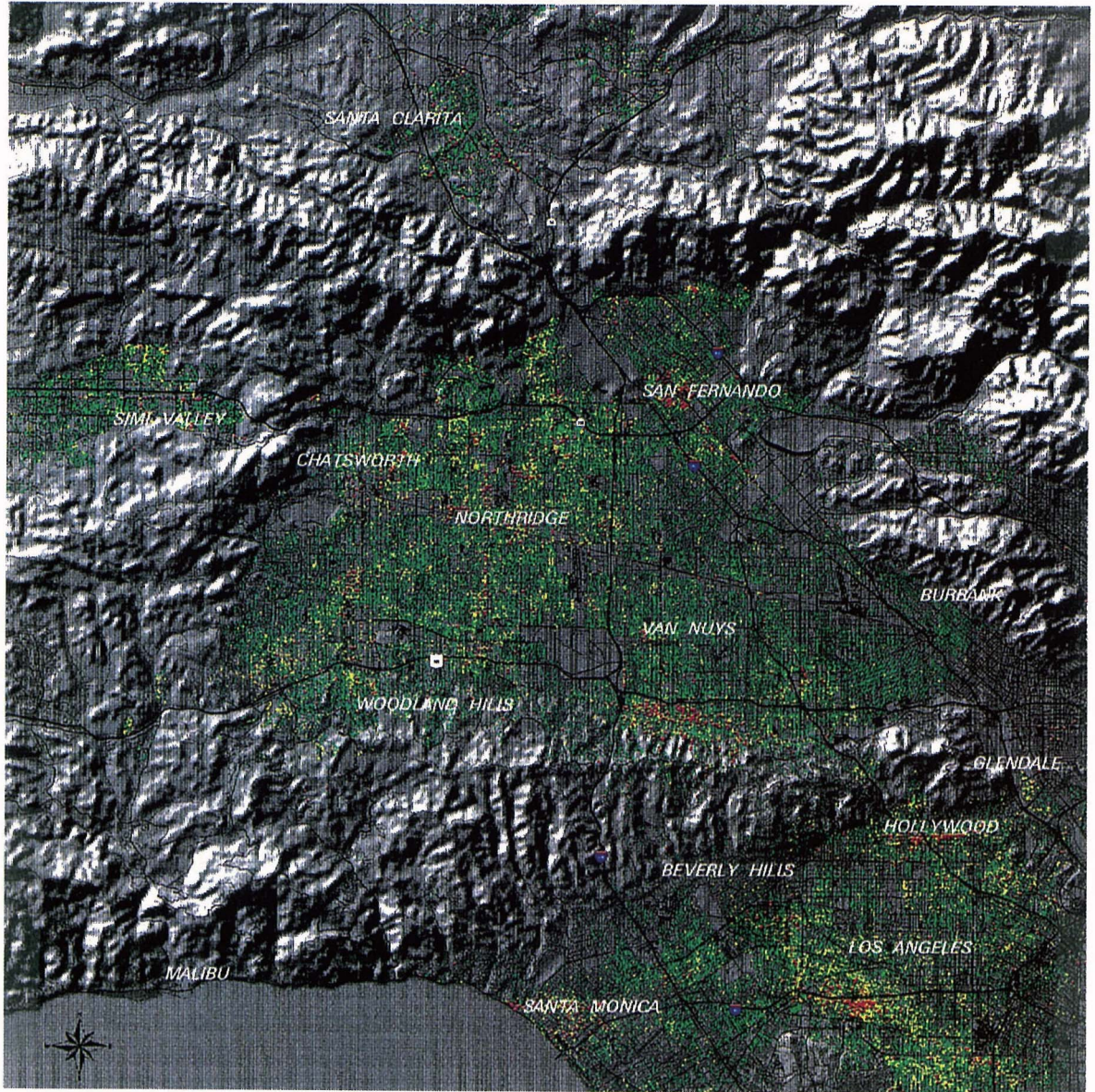
7.1 概要

建築物の被害は甚大であり、広い地域に不規則に分布している。地震後、カリフォルニア州緊急対策事務所 (*California State Office of Emergency Service - OES -*) と連邦政府緊急管理庁 (*Federal Emergency Management Agency - FEMA -*) によって建築物の一斉被害調査が実施された。地震被害程度は次の3レベルで評価され、評価ランクによって立ち入り等の制限などの措置が取られた。

- (a) 危険……………建築物への立ち入りと居住の禁止
(*Unsafe - Red tag*, 写真 7.1)
- (b) 制限付き立ち入り可……………許可を受けた者のみが立ち入り可能
(*Limited Entry - Yellow tag*, 写真 7.2)
- (c) 検査済み……………立ち入りや居住に支障なし
(*Inspected - Green tag*)

図 7.1 は、危険度評価を実施した建築物の地理的分布を示している。図中には、"*Unsafe*" は赤色、"*Limited Entry*" は黄色、"*Inspected*" は緑色で表示されている。また黒色は、"*Insufficient*" データである。この図によれば危険と判定された赤色の建築物が集中しているのはノースリッジを中心とした震源地域に多いが、震源から数 10km 離れたロサンゼルス市のハリウッドや I10 沿線、サンタモニカ市北部でも見られる。またサンフェルナンドバレーでも北部のサンフェルナンドや南部のサンタモニカ山地北麓の地区に被害の集中地域が見られる。また表 7.1 は地区別に建築物の地震被害評価を行った結果をまとめたものである (4/8 現在)。同表によれば調査された約 11 万 2 千棟の建築物のうち、"*Unsafe*" と "*Limited Entry*" を合わせた数のおよそ 80 % はロサンゼルス市に集中していることがわかる。図 7.2 はロサンゼルス市の各被害危険度ランクに該当する建物の割合を表したものである。

震源地周辺部以外に被害の集中地区が見られるのは、何らかの原因で地震動が他所より大きかったためと考えられる。被害集中地区の多くが山麓に近接していることから、地形的な要因で地震動が局地的に大きく増幅した可能性がある。もちろん今まで言われてきた地盤条件の差異が大きな影響を及ぼしていることは想像に難くない。



- ◆ UNSAFE - No Entry or Occupancy Allowed
- ◆ LIMITED ENTRY - Off Limits to Unauthorized Personnel
- ◆ INSPECTED - No Restriction on Use or Occupancy
- ◆ INSUFFICIENT DATA

図 7.1 建築物被害程度の分布図²⁷⁾

Map showing the distribution of structures and corresponding damage assessment

表 7. 1 建築物地震被害查定結果一覽表^{2 7)}

Distribution of structures based on damage assessment according to jurisdiction

Jurisdiction	Unsafe	Limited Entry	Inspected	Insufficient Data	Total
Agoura Hills	0	1	108	85	194
Alhambra	0	0	0	116	116
Anaheim	1	0	3	8	12
Arcadia	0	0	30	0	30
Azusa	0	0	0	1	1
Beverly Hills	34	91	726	437	1288
Burbank	3	22	55	3257	3337
Calabasos	3	315	694	12	1024
Culver City	0	0	0	608	608
Downey	0	0	3	0	3
Fillmore	186	297	1	0	484
Glendale	29	3	0	1069	1101
Hermosa	0	0	0	15	15
Hidden Hills	1	49	38	4	92
Huntington Park	0	0	0	6	6
Inglewood	0	0	56	0	56
La Canada	0	0	40	0	40
La Mirada	0	0	0	10	10
Lakewood	0	0	12	0	12
Los Angeles City	1995	8887	77634	232	88748
Los Angeles County	55	110	857	0	1022
Manhattan Beach	2	125	6	0	133
Moorpark	3	47	0	0	50
Orange County	3	0	0	0	3
Oxnard	0	0	14	0	14
Paramount	0	0	0	8	8
Pasadena	0	0	0	375	375
San Fernando	138	148	1314	0	1600
Santa Clarita	130	241	4716	216	5303
Santa Monica	129	358	1786	25	2298
Santa Paula	0	22	4	5	31
Simi Valley	34	152	629	1900	2715
South Gate	2	1	46	5	54
Thousand Oaks	2	29	150	187	368
Torrance	0	6	0	0	6
Ventura County	24	53	176	0	253
Vernon	10	0	0	0	10
West Hollywood	4	8	2	450	464
Westlake Village	0	0	12	0	12
Whittier	1	6	169	5	181
Total	2789	10971	89281	9036	112077

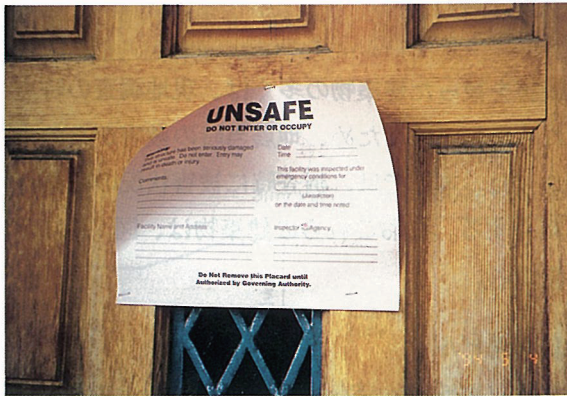


写真 7. 1

地震後の安全点検によって貼られた"UNSAFE"の紙 (Red tag)

Placard indicating "Unsafe" building damage classification (Red tag)

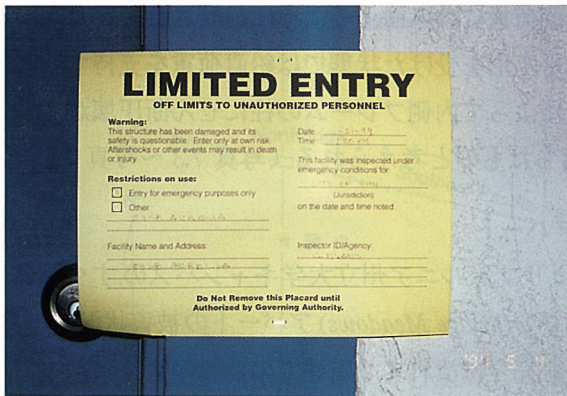


写真 7. 2

同上 地震後の安全点検によって貼られた"LIMITED ENTRY"の紙 (Yellow tag)

Placard indicating "Limited Entry" building damage classification (yellow tag)

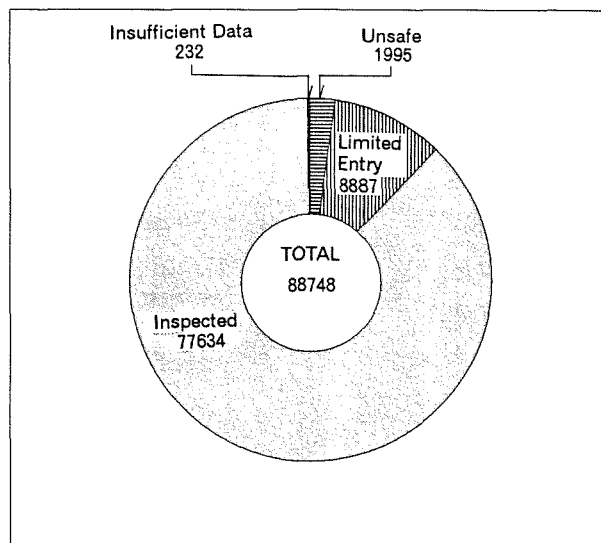


図 7. 2 ロサンゼルス市内の建物の被害危険度ランクの割合 (文献27を基に作成)
Pie graph showing the damage level of structures in Los Angeles City

7.2 被害事例

地震によって破壊または甚大な損害を被った建築物の多くは、現地調査の時点では取り壊されるか、または修理されるかしていたため、地震当時の被害がそのままの形で残されている建築物は少なかった。本節では、調査時に被害状況の観察が可能であった3つの建築物の被害を紹介する。なおこれらの建築物は、図 7.3 に示すようにいずれも震源地の周辺に位置する。

(1) カリフォルニア州立大学の駐車場ビル

震央付近のカリフォルニア州立大学 (*California State University*) ノースリッジ校にある2年半前に建設されたプレキャストコンクリート造4階建て駐車場の一部が倒壊した。この建物は構造物の外側のフレームは水平力に抵抗できるように設計されていたが、内側のフレームは鉛直荷重にのみ耐えるように設計されていた。おそらく内側のフレームは、大きな水平変形を受けた状態では鉛直荷重を支持する能力が小さかったのであろう。地震動によって内側フレームの柱にせん断圧壊が生じ、建物の重量を支えきれずに崩れ落ちたものと考えられる(写真 7.3 ~写真 7.5)。

(2) ノースリッジ・メドウズ アパート

写真 7.6 ~写真 7.7 は、前述のカリフォルニア州立大学キャンパスのすぐ西側に位置するノースリッジ・メドウズ (*Northridge Meadows*) アパートの被害状況である。木造3階建てアパートの1階部分が完全に潰れて2階建ての建物のようにになっている。アパートの1階部分は住居と駐車場になっており、スタッコ仕上げの建物の壁が脆性破壊を起こした。また1Fの駐車場は水平耐力が小さい細い鉄骨の柱で構成されており、地震によって地表部に塑性ヒンジができた。建物の崩壊によって、今回の地震において同一の場所で発生した死者数としては最大の16人が死亡した。

(3) ホリークロス病院

サンフェルナンドバレー北東部のリナルディー (*Rinaldi*) 通りにあるホリークロス (*Holy Cross*) メディカルセンターのRC3階建て管理棟 (*North Wing*) が大きな被害を受けた(写真 7.8 ~写真 7.9)。建物の被害程度は、"限定使用 (*for restricted use*)" の評価となっている。被害評価にあっていた技術者によれば、被害の原因は耐震壁の位置が間違っていたため、地震による水平力が作用することによって建物をより偏心させる結果になったということである。病院の本館では、屋上階の壁に吊り下げられていたファンが振られ、それが壁にぶつかって被害を受けた。

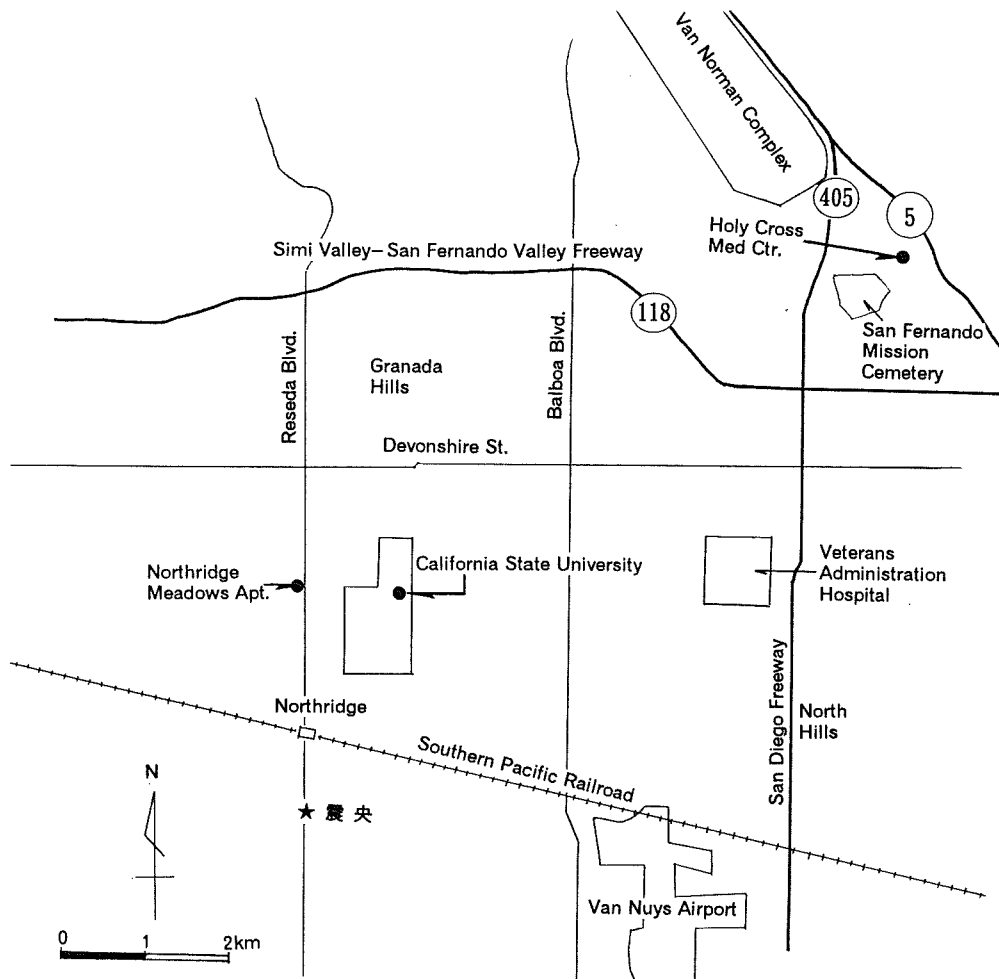


図 7. 3 被害を受けた建物の位置図

Map showing location of damaged structures



写真 7. 3

カリフォルニア州立大学ノース
リッジ校の駐車場建物の崩壊

Collapsed parking structure in
CalState, Northridge



写真 7. 4

カリフォルニア州立大学ノース
リッジ校の駐車場建物の崩壊

Collapsed parking structure in
CalState, Northridge



写真 7. 5

同上

Same as above



写真 7. 6

崩壊したノースリッジ・メドウズ
共同住宅
3階建ての建物の1階部分が崩
壊して2階建ての様な恰好にな
っている

The collapsed Northridge Meadows
apartment complex.
Note that the 3-story portion on the
left side lost one of the floors when
the ground floor collapsed.

写真 7. 7



崩壊したノースリッジ・メドウズ共同住宅

The collapsed Northridge Meadows apartment complex.

写真 7. 8



被害を受けたホーリークロス病院の北翼建物

Damaged North Wing of the Holy Cross Medical Center

写真 7. 9



同上 せん断亀裂が生じた建物の壁

Shear cracks on the wall of the building

おわりに

地震に対して最も整備された都市の一つを襲った 1994 年ノースリッジ地震は、自然災害に対する都市の脆弱性を如実に示した。この地震から得られた知見をまとめると次のようになる。

- (a) 今回の地震は、将来首都圏で起こることが懸念されている中規模の都市直下型地震であり、都市部における地震災害の形態を示してくれた。
- (b) ロサンゼルス地区で多くの強震記録が得られた。これらの記録は今後の耐震設計の進歩に寄与すると思われる。
- (c) 高速道路の補強や建物の強化等のように、地震に対する補強や地震危険性の低減対策が有効に働いた。
- (d) 地盤の液状化とそれに伴う側方流動が構造物に及ぼす影響は、振動被害と比べて小さかった。

1971 年に起こったサンフェルナンド地震は、幾つかの理由で工学的、地震学的に重要な出来事であった。この地震では地盤及び構造物の強震記録が多数得られ、構造物の挙動の解析に用いられてきた。構造物の地震時挙動に関して得られた研究成果は、設計指針の改訂などに取り入れられてきた。さらにサンフェルナンドダムの崩壊メカニズムや動的安定性に関する研究によって、地盤の液状化に関する新しい知見が得られ、土構造物の安全性評価に貢献することとなった。またこの地震を契機に、ライフラインと建築物設備（非構造部材）の耐震性に関する研究が始められた。

サンフェルナンド地震から 23 年後に同規模の地震に襲われ、程度の差こそあれ、ほとんど同じような被害が発生した。我々はこの事実から何を学び、将来必ず起こるであろう地震に対してどのように身を守っていけばよいのだろうか。

サンフェルナンド地震以来、地震に関する知見は飛躍的に増加し、それらの知識は各種施設の耐震設計に生かされてきていることは間違いない。しかし今回の地震の被害を見る限り、このような経験・知識が一部のエンジニアや設計者にとどまり、各種施設の所有者・開発者・行政機関等にうまく伝達されていないのではないと思われる。23 年間という期間は地質スケールからすると瞬き程度の短い時間であるが、都市の進展というスピードの物差しで見ると、かなり長い時間である。その間に新しい構造物は古くかつ弱くなり、その反面、大地震の洗礼を受けていない新しい形式の構造物が数多く造られていく。また湾岸部では、海が埋め立てられて人工地盤がどんどん増えていく。このように都市の地震防災は、地震という自然現象

から身を守ると同時に、都市を果てしなく改造していく人間との戦いでもある。

今から 23 年後に再び地震が起きても、また同じような災害が繰り返されることは容易に予想できる。しかし我々は、過去の地震の経験を生かすだけでなく、都市の発展を冷静に見つめて、その内包する危険性を予測し、災害をすこしでも軽減する技術を開発していくという努力が大切である。我々は、"歴史は繰り返す"という言葉を中心に刻みつけ、このような災害が再び起こらないよう技術の研鑽に努めていかなければならない。

今回の地震では 57 人という多くの貴重な人命が失われ、約 1 万人の負傷者がでた。被災地の一日も早い復興と亡くなられた方々のご冥福を心より願うものである。

今回の調査は東京大学の石原研而教授にお誘い頂いて実現したものである。現地で構造物被害と地盤条件との関係について学問的見地から色々教えて頂いた。また FEMA の *Mr. Samuel Sapuay* には、調査の案内や訪問先の交渉等において大変お世話になった。*Lockwood-Singh & Associates* の *Dr. Singh* 及び *Dr. Daniel Pradel* には、現地の案内や資料収集などでお世話になった。さらに *Ms. June Guerrero* にも市内の案内などお世話をかけた。心からお礼を申し上げる。

最後に、今回の被害調査に際して、お世話になった人々と組織の名を記して感謝の意を表したい。

【訪問先】

- Federal Emergency Management Agency (FEMA) ; *Mr. James Calacal, Mr. Robert Perrin, Dr. Ali Bijan Abtahi, Mr. William Olson, Mr. Joel Nimoy, Mr. Michael Scheiberl*
- Metropolitan Water District of Southern California ; *Mr. Ezzel Culver*
- California Department of Transportation (CALTRANS) ; *Mr. Wayne Peirce*
- Simi Valley City Public Works ; *Mr. George Berg*
- Department of Water and Power (DWP) ; *Mr. Roger Roux*
- University of California Los Angeles ; *Dr. Mladen Vucetic*

この他、*Dr. William Tanzo* (埼玉大学)、*Mr. Edwin Harp* (USGS) には貴重な資料を提供していただいた。Earthquake Engineering Research Center(EERC) には貴重な被害写真を本報告書に掲載することを快諾していただいた。

現地調査及び報告書の作成は、技術部地震防災室 森本巖と *Dr. Rolando Orense* が担当した。同室の高橋めぐみさんには、図面作成などの編集作業で多大な苦勞をかけた。お礼を申し上げる。

引用・参考文献リスト

- 1) Los Angeles Times : 1月18日～1月30日までの記事
- 2) California State Office of Emergency Services : *Earthquake Epicenters as of February 5, 1994, Northridge Earthquake Disaster DR-1008*, 1994.
- 3) Hall, John, ed. : *Northridge Earthquake January 17, 1994 - Preliminary Reconnaissance Report* -, Earthquake Engineering Research Institute, 1994.
- 4) Borchardt, R.D. : Strong Ground Motions Generated by the Northridge Earthquake of January 17, 1994 - Preliminary Implications for Site-Dependent Design Spectra, 建築学会 ノースリッジ地震被害日米共同速報会資料, 1994.
- 5) Civil Engineering : Northridge Earthquake, Vol.64, No.3, 1994.
- 6) California Institute of Technology, U.S.Geological Survey, Southern California Earthquake Center and Jet Propulsion Laboratory : *The Magnitude 6.6 Northridge, California Earthquake of January 17, 1994 and its Aftershocks*, 1994.
- 7) 宇津徳治 : 地震学, 共立全書, 1977.
- 8) Wood, H.O. and Neumann, F. : Modified Mercalli Intensity Scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 21, No. 4, 1931.
- 9) U.S.Geological Survey : *The Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989*, 1989.
- 10) EQE International : *The January 17, 1994 Northridge, California Earthquake, An EQE Summary Report*, 1994.
- 11) Moehle, Jack, ed. : *Preliminary Report on the Seismological and Engineering Aspects of the January 17, 1994 Northridge Earthquake*, UCB/EERC 94/01, 1994.
- 12) Eppley, R.A. : *Earthquake History of the United States -Part II* (revised ed.), Washington D.C., U.S.Government Printing Office, 1963.
- 13) 土木学会耐震工学委員会 : サンフェルナンド地震(1971年2月9日)の震害について, 土木学会論文報告集 第195号, 1971.
- 14) 松尾修 : ホイッティア地震速報, 土木技術資料 30-1, 1988.
- 15) Shakal, A., Huang, M., Darragh, R., Cao, T., et al : CSMIP Strong Motion Records from the Northridge, California Earthquake of 17 January, 1994, *California Strong Motion Instrumentation Program Report No.OSMS 94-07*, 1994.
- 16) Porcella, R., Etheridge, E.C., Maley, R.P. and Acosta, A.V. : Accelerograms Recorded at USGS National Strong Motion Network Stations During the Ms=6.6 Northridge, California Earthquake of January 17, 1994, *U.S. Geological Survey Open File Report 94-141*, 1994.

- 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説－V 耐震設計編，1990.
- 18) Darragh, R., Huang, M., Cao, T., Cramer, C., Shakal, A. : Processed CSMIP Strong-Motion Records from the Northridge, California Earthquake of January 17, 1994, Release No.1-3, *California Strong Motion Instrumentation Program Reports No. OSMS 94-06B, 94-08, 94-09*, 1994.
- 19) Johnson, J.A. and Duke, C.M. : Subsurface Geology of Portions of San Fernando Valley and Los Angeles Basin-*San Fernando California Earthquake of February 9, 1971-*, U.S. Department of Commerce, N.O.A.A., Washington, D.C., Vol.1, pp.155-164, 1973.
- 20) Yerkes, R.F. : Effects of San Fernando Earthquake as Related to Geology- *San Fernando California Earthquake of February 9, 1971-*, U.S. Department of Commerce, N.O.A.A. Washington, D.C. Vol.1, pp. 137-154, 1973.
- 21) Division of Mines and Geology, State of California. : *Geologic Map of California*, Scale 1:750,000, 1969.
- 22) Duke, C.M., Johnson, J.A., Kharraz, Y., Campbell, K.W., and Malpiede, N.A. : Subsurface Site Conditions in the San Fernando Earthquake Area- *San Fernando California Earthquake of February 9, 1971-*, U.S. Department of Commerce, N.O.A.A. Washington, D.C. Vol.1, pp.785-799, 1973.
- 23) Yanev, P. : Microzonation and Building Performance, 建築学会 ノースリッジ地震被害日米共同速報会資料，1994.
- 24) U.S. Geological Survey : *The San Fernando California Earthquake of February 9, 1971*, Geological Survey Professional Paper 733, 1971.
- 25) 日本建築学会：1989年ロマプリエタ地震災害調査報告書，1991.
- 26) 基礎地盤コンサルタンツ(株)：1989年10月17日 ロマ プリータ (LOMA PRIETA) 地震調査報告書，1990.
- 27) California State Office of Emergency Services : *Building and Safety Structure Damage Assessment, Northridge Earthquake Disaster DR-1008*, 1994.
- 28) O'Rourke, T.D. and Palmer, M.C. : Earthquake Performance of Gas Transmission Pipelines During the Northridge Earthquake, *NCEER Bulletin* Vol.8, No.2, 1994.
- 29) Lund, L.V. : Northridge Earthquake of January 17, 1994 - Lifeline Performance, *ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering* (Draft), 1994.
- 30) O'Rourke, T.D., Roth, B.L. and Hamada, M. : Large Ground Deformations and their Effects on Lifeline Facilities, 1971 San Fernando Earthquake - *Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes*, NCEER-92-0002, 1992.

- 31) 若松加寿江：日本の地盤液状化履歴図，東海大学出版会，1991.
- 32) Harp, E. : Personal Communication, 1994.
- 33) Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMFE :
Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards, 1993.
- 34) Priestley, M.J.N. : The 1994 Northridge Earthquake Damage Analysis of
Selected Freeway Bridges, 建築学会 ノースリッジ地震被害日米共同速報
会資料, 1994.
- 35) Jabez, A. : High Magnitude Reconstruction, *World Highways* ,April ed.,pp.25-28,
1994.
- 36) Buckle, I.G.,ed. : *The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994*
-Performance of Highway Bridges- , NCEER-94-0008, 1994.
- 37) M&T AGRA Inc. : *Geotechnical Report - Earthquake Reconstruction Mole B, King*
Harbor, Redondo Beach, California, 1994.

