

招待論文
INVITED
PAPER

招待論文

1994年ノースリッジ地震をどう見るか
—地震防災と災害管理—

LESSONS LEARNED FROM THE 1994 NORTHRIDGE, CALIFORNIA EARTHQUAKE

大町達夫

Tatsuo OHMACHI

正会員 工博 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 教授
(〒227 横浜市緑区長津田町 4259)**Key Words** : Northridge earthquake, seismic damage, lifeline system, earthquake engineering, disaster management.

1. はじめに

1994年1月17日、米国ロサンゼルス市のサンフェルナンドバレーでマグニチュード(M)6.7の地震が発生した。震央付近の地名からノースリッジ地震と呼ばれるこの地震は、いわゆる都市直下地震で、ロサンゼルスの都市機能に打撃を与え、市民生活や経済活動に支障をもたらした。

今回の地震による被害額は150~300億ドルに達し、米国史上最大の災害であると言われている。たしかに公共施設や一般住宅には著しい被害が発生したが、地震後の混乱状態は一時的で、心配された社会的パニックは起きなかった。物的被害が大きかったわりには人的被害は最小限で、直下地震に見舞われた近代的大都市ロサンゼルスは翌日から落ち着きを取り戻し始めた。そして、そのまま順調な復旧過程をたどっている。

直下地震に対する都市の震災対策はわが国でも重要課題の一つとされ、各方面で被害想定や対策案が検討されているが、不明な部分も多い。このため、日本の土木学会、建築学会をはじめ、政府や自治体、企業などから多くの調査団が派遣され現地調査が行われた。米国内でも多くの調査グループによって地震被害の原因や震災の社会的影響、復旧方法などが調査され、現在なお進行中でもある。多方面からの調査結果は、今後詳細に分析され報告されると期待されている。したがって現時点で、本地震の評価や教訓を述べるのは性急な感じもするが、本文では一つのたたき台として試論を展開しようと思う。

2. 震災の背景

1994年ノースリッジ地震は、1月17日の午前4時30分に発生した。当日は月曜日であったが、M. L. キング牧師の業績を記念する休日であった。この日時が幸い

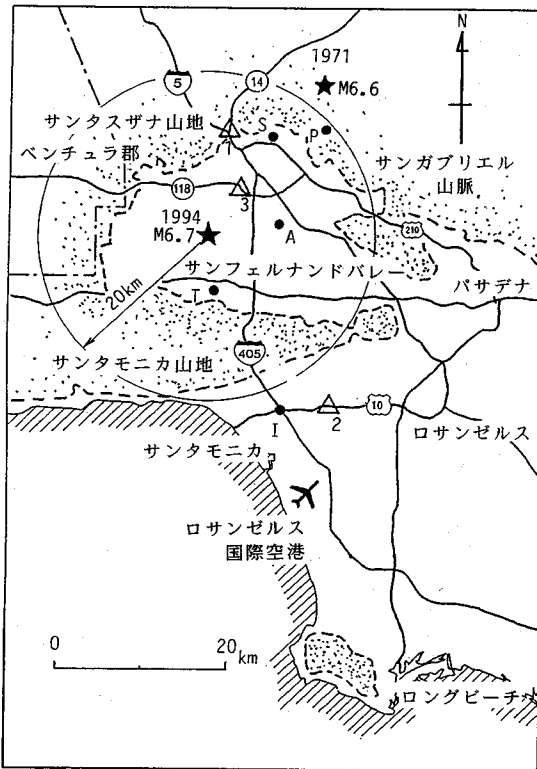
して、高速道路の落橋による犠牲者は奇跡的に1名で済んだ。死者総数61名の内訳は不明であるが、死者数がこの程度ですみ地震後の混乱が少なかったのも、奇跡的であると語られることが多い。そして、「もし地震が、平日の通勤時間帯や日中に起きたら」とか、「今回はM6.7と中規模だったが、もっと大規模な地震だったら」、あるいは「東京の直下で同じような地震が起きたら」などの仮想質問がそれに続くことが多い。以下では、これらの質問を念頭に、随所で資料1)と2)を参考にして今回の地震を概観してみたい。

(1) 被災地域の環境

地震発生後まもなく、ロサンゼルス市やアナハイム市などの4市、ロサンゼルス、ベンチュラ、オレンジの3郡が相次いで緊急事態を宣言した。引き続いて、カリフォルニア州知事さらに合衆国大統領もこれら3郡での緊急事態を宣言した。1450万人以上の人口が集中しているこれらの地域は、第二次大戦後、急速に近代的发展を遂げた大ロサンゼルス都市圏を構成し、高速道路網で結ばれた自動車社会である。

本震の震央は、サンフェルナンドバレーのほぼ中央で、ロサンゼルス市の中心街から30km余り北西へ離れている。図-1の左上隅はベンチュラ郡に属するが、それ以外の地域はロサンゼルス郡に属し、郡内にはロサンゼルス、パサデナ、ロングビーチ、サンタモニカなど74の市がある。ロサンゼルス市は郡内最大の市で人口は約350万人、面積は1041km²でその70%程度が都市部である。

サンフェルナンドバレーは、東西30km、南北15km程度の広さをもつ盆地である。この盆地の北側にサンタズガナ山地、南側にサンタモニカ山地があり、それらの麓に沿って東西方向に高速道路の118号線と101号線が走っている。盆地内の建物の大半は木造であるが、鉄筋



図一 震央(★), 強震観測点(●), 落橋地点(△)などの位置図

コンクリート造や鉄骨造の大きな建物もある。サンフェルナンドバレーの人口は約120万人で、ロサンゼルス市の人口の1/3以上に相当する。この地域の人口密度は1km²当り約3100人で、東京や大阪の約1/4の密度である。これは日本の大都市と比べ、道路や空地の占める割合が格段に大きいことを意味する。また雨量が少なく、降水量は年間319mmで東京の1/5しかないが、多くの家庭が庭のプールで水浴を楽しめる文化生活のレベルにある。

(2) 1971年サンフェルナンド地震の教訓

ロサンゼルス近郊では、23年前の1971年2月9日午前6時0分にサンフェルナンド地震(M6.6)が起きている。サンフェルナンド地震も中程度の規模で、冬の早朝に発生し、高速道路インターチェンジの落橋による犠牲者は2名と奇跡的に少なかった(死者総数は65名)。また、震源は今回の震源から25kmしか離れていない(図一参照)、電気や水道、ガスなどライフライン施設が損傷して都市機能に支障を生じたなど、二つの地震は類似性が強い。このような類似性によって、今回の地震はサンフェルナンド地震と対比されることが多い。ノースリッジ地震に対する評価にしても、

(1) サンフェルナンド地震の教訓がどれだけ生かされたか、

(2) サンフェルナンド地震の教訓とは別な新たな教訓は何か、

という2つの観点から検討されることが多い。

第一の観点に対しては過去の報告書、たとえば土木学会調査団の報告書³⁾が参考になる。それにはサンフェルナンド地震の教訓として、次の項目の必要性が高いと指摘されている。

- ① 地震観測結果の速やかな解析と伝達。
- ② 災害に対処する機構の強化と救護活動における官民協力体制の強化。
- ③ 公共建物には一般建築物より高い耐震性の付与。
- ④ 高速道路高架部および橋梁取り付け部の補強。
- ⑤ ダムの安全性の検討。
- ⑥ 通信施設の耐震性強化、通信回線の多ルート化推進。
- ⑦ 上下水道、電力施設の耐震性向上。

これらのほか同報告書には、地震予知体制の充実、都市構造の防災化、危険物取り扱いの注意、耐震工学研究の推進なども挙げられている。

上記①～⑦のうち⑥と⑦は、現在では、ライフライン地震工学分野の問題とされるが、この分野の誕生を促したのがサンフェルナンド地震であった。

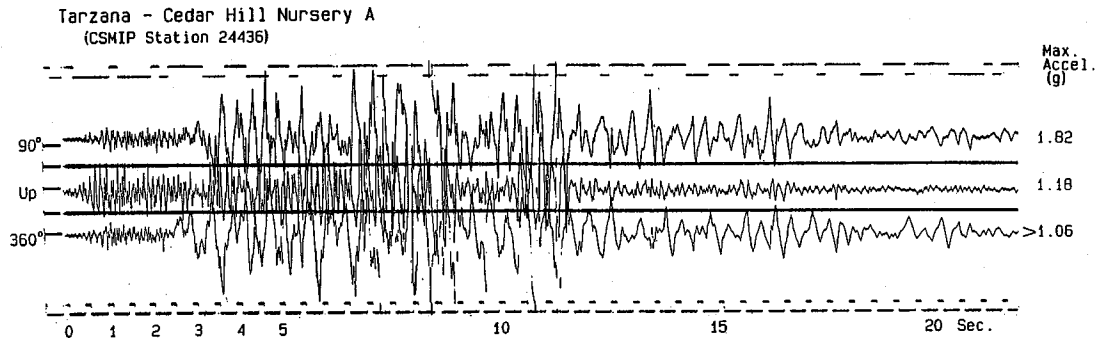
1971年の地震と1994年の地震には、類似点とともに相違点も多い。そこで、サンフェルナンド地震がライフライン地震工学という新分野誕生の契機であったように、ノースリッジ地震に都市防災上の転機となる教訓や萌芽の因子を見いだそうとするのが第二の観点である。本論文でも、これら2つの観点からの評価を最後にまとめる。

3. 地震および地震動

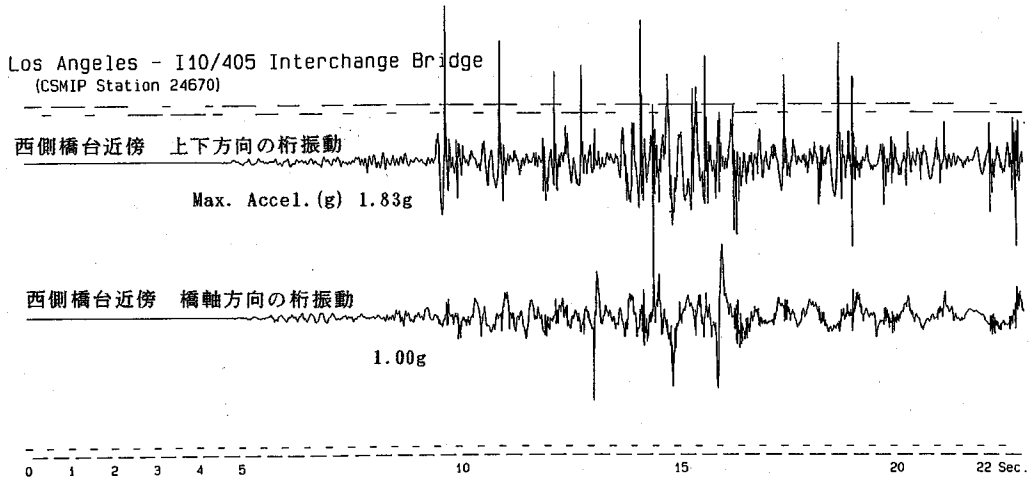
(1) 地震断層の特徴

今回の地震断層は逆断層で、サンアンドレス断層の典型的な右横ずれ運動とは異なっている。断層面は、走向N60°W、大きき8×12km程度で、破壊は地下18kmで始まり約40°の勾配で地表に向かって進展したが地表面下5kmで停止したとみられ、地表に地震断層は現れていない。1971年の地震断層面が北東に傾斜していたのに対し、今回の地震断層面は南西に傾斜していること、震源が今回の方がやや深いことなどが両地震の主な違いである。このような違いから、1971年の地震ではサンフェルナンドバレーの北東の角に位置するシルマー地区に被害が集中したのに対し、今回の地震では震央から約25kmまでの範囲に被害が広く分布した。

余震は、1月27日までの10日間で3千回以上発生しているが、それらのなかでは1月17日の15:33に起きたM5.6が最大で、1月19日の13:09に起きたM5.0がそれに次ぐ。その後、1月29日にもM5.1の余震が



(a) タルサナ地点



(b) I-10/405 インターチェンジ

図-2 強震記録の例⁵⁾

発生している。余震域は北西—南東方向に 30 km, 北東—南西方向に 15 km の長方形をしており、震源は余震域の南東の隅に位置している。

(2) 強震記録からの知見

震源近傍で多数の貴重な強震記録が得られ、それらが短時間で整理され公表されたことは、今回の地震で特筆すべきことの一つである。

カリフォルニア州鉱山地質局 (CDMG) は、地震発生の当日 (1月17日) から1月25日まで5回にわたって強震観測結果を速報した⁴⁾。カリフォルニア強震計配置計画 (CSMIP) による193地点での強震記録のうち、速報では68地点における強震計の設置位置や多成分の同時記録波形、ピーク加速度値などを図表に整理している。同局はさらに、2月18日には193地点全部の観測結果を正式報告書⁵⁾にまとめ世界中に配布した。CSMIP 以外にも、南カリフォルニア大学は約80地点で、米国地質調査所は22地点での強震観測結果を速報した。以下では、これらの資料のうち筆者の手元にあるものを使って、今回の地震による強震動の特性を検討してみる。

表-1 強震記録によるピーク加速度の例⁵⁾

観測地点	震央距離	最大加速度		
		地表	基礎	構造物
T. タルサナ	5 km	1.82 g H [*]	-	-
		1.18 g V	-	-
A. アルレタ	10 km	0.35 g H	-	-
		0.59 g V	-	-
S. シルマー: オリブビュー病院	16 km	0.91 g H	0.82 g H	2.31 g H
		0.60 g V	0.34 g V	-
P. パコイマダム:	19 km	0.44 g H	0.54 g H	2.01 g H
		0.20 g V	0.43 g V	>1.60 g V
P. パコイマダム: 左岸地山上部	19 km	1.53 g H	-	-
		1.39 g V	-	-
I. I-10/405 高架橋	22 km	-	-	1.79 g H
		-	-	1.83 g V
L. ヒューズ湖 #1	53 km	0.09 g H	-	-
		0.10 g V	-	-

*) Hは水平方向, Vは上下方向

a) 驚異的な地震動強さ

表-1 は、観測されたピーク加速度値を示している。表中、Hを付した数値は水平動2成分のうち大きい方のピーク加速度、Vを付した数値は上下動成分のピーク

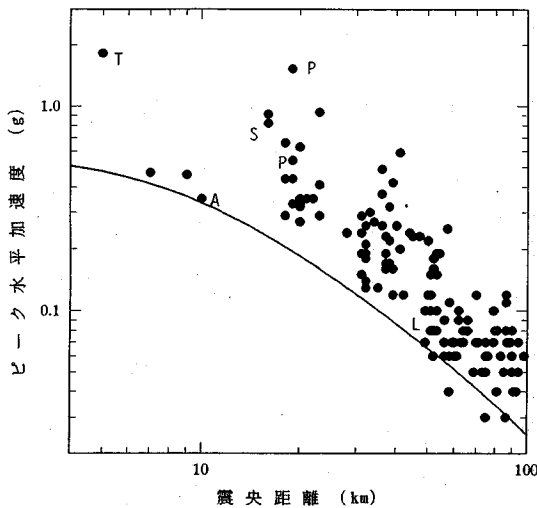


図-3 ピーク水平加速度と震央距離の関係

ク加速度であり、各観測点位置は図-1に●で示してある。

タルサナ地点(図-1中の記号T)ではピーク加速度が、水平で1.82g(gは重力加速度)、上下で1.18gに達した。図-2(a)はこの強震記録であり、ピーク加速度値だけが目立つスパイク状の波形ではなく、1g以上の加速度が断続的に7~8秒間も続く驚異的な波形をしている。従来、被災者の体験談や地震後の物体の変状から、このように強烈な地震動がありうることは推察されていたが、実際に強震記録として計器観測されたのはこれが初めてである。しかし、異例に強烈な地震動が観測されたに於いては、周辺での被害や地物の変状が軽微すぎるといふ不可解な点もある。当地点の強震計は、東西400m、南北200mほどの低い丘の上に設置されているが、強震計脇のコンテナや木造あばら屋が地震で移動や変形を生じた形跡はなく、同じ丘上にある2階建て住宅では屋根や壁に亀裂が生じたがレンガ煙突は落下しなかった。周辺での余震観測結果をもとに、この強震計設置地点では極めて局地的に地震動が増幅されることが指摘されている⁹⁾。

震央距離100km以内で観測された水平動のピーク加速度を対数目盛りでプロットすると図-3のようになる。図中の実線は、JoynerとBoorの提案⁷⁾による水平加速度の距離減衰式にM6.7を代入して得られる関係である。ただし、この式で使うべき地表面へ投影した断層からの最短距離は震央距離で代用している。ほとんどの観測値は実線よりも上にあり、今回の地震動の強さが地震規模のわりに強烈であったことが、この図からもうかがえる。

b) 直下地震と上下動強さ

直下地震は非常に強い上下動を伴うという見解が、今

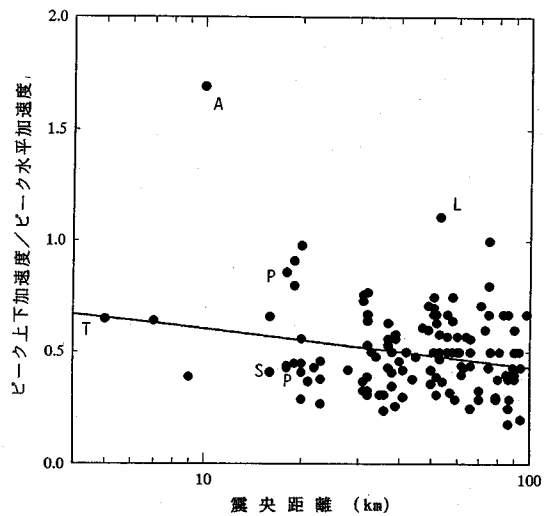


図-4 上下動と水平動の最大加速度の比(図中の記号は表-1の観測地点)

回の地震や被害に関連して何度も語られたのでその正否を検討してみる。図-4は、震央距離100kmまでの観測点における上下と水平のピーク加速度の比を示している。上下のピーク加速度が水平よりも大きい地点は表-1に示したアルレタ地点(記号A)とヒューズ湖#1(L)の2点だけで、平均的には上下のピーク加速度は水平の半分程度であることが分かる。図-4には、最近の研究⁸⁾による上下と水平のピーク加速度比の回帰曲線を、M=6.7の逆断層の場合について実線で示した。観測値のばらつきは大きい、全体的傾向は図示の回帰曲線と調和的である。

アルレタ地点ではピーク加速度が、水平0.35gに対して上下0.59gと、上下が水平の1.7倍も大きい。当地点は1987年ウィティアナロウズ地震の際にも上下と水平で同じピーク加速度値(0.09g)を記録しているので、大きな上下動加速度を示す傾向があるように思われる。これに関連し、どのような物理的条件で上下動が水平動より強くなるかは今後の研究課題である。

c) 建造物の地震応答

パコイマダム(P)の左岸地山上部では、水平に1.5g、上下に1.4gのピーク加速度が観測された(表-1参照)。この地点では、1971年の地震でそれぞれ1.25gと0.7gのピーク加速度が記録され、観測史上初めて1gを越す強震記録として注目された。今回、この地点から約130m下流で観測された強震記録は、それぞれ0.4gと0.2gのピーク加速度を示したことから、左岸地山の観測記録には風化性尾根の影響が強く含まれているという従来の指摘が実証されたものと言える。なお、1971年の地震でダム本体に損傷はなかったが、左岸取り付け部のスラストブロックに亀裂が生じた。今回の地震でも

同じ場所に亀裂が発生したが、ダム本体は2.3gという大きな応答加速度を示したにもかかわらず損傷しなかった。

落橋した高架橋での強震観測記録は得られていないが、類似の高架橋で地震応答が観測されている(図-2(b)).これが観測されたI-10/405 インターチェンジ(図-1の●1)は震央の南方22kmにあり、曲線桁の端面側に強震計が設置してある。図-2(b)の強震記録で針のように尖った鋭い波形は、地震で桁と橋台とが何回も衝突したことを示唆している。地震後の調査では、この桁や橋台に目立った被害は認められていないが、他の桁では軽微な損傷が生じたと報告されている。このような応答特性とI-5/SR-14 インターチェンジでの2ヶ所の落橋との関連性は、まだ解明されていない。

4. 構造物の被害

(1) 高架道路橋の被害

a) 被害の概要

今回の地震では、高速道路網を構成する多数の高架橋に被害が発生した。地震後に通行止めとなったのは55橋に及ぶ。被害内容は重大なものから軽微なものまで様々であるが、次のように大別できる。

- 1) 落橋：橋桁が支持を失って落下した。
- 2) 橋脚の崩壊：上部または下部が極度のせん断破壊に至った。
- 3) 橋脚のひび割れ：斜めせん断ひび割れが発生した。
- 4) 桁端部の破損：橋台や桁間の接合部が衝突により欠損した。
- 5) 被りコンクリートの剝落：橋脚の表皮部がはがれ、鉄筋が外部に現れた。

落橋は4地点で発生したが、いずれも曲線橋か斜橋であった。以下、落橋した3地点の高架橋について、破壊の状況や原因などを記述する。

b) インターチェンジでの落橋(図-1の△1)

1971年の地震では、高速道路5号線と210号線のインターチェンジI-5/I-210、および5号線と14号線のインターチェンジI-5/SR-14で落橋している。前者は、7スパン全長約233mの曲線桁が橋脚もろとも横倒しとなった。後者は当時建設工事中であったが、既に完成していた渡り線の中央で橋脚とその両側の2スパン、長さ約100mのPC箱桁が倒壊した。

今回の地震では、I-5/I-210のインターチェンジは落橋を免れたが、I-5/SR-14のインターチェンジは再び落橋した。ここでは、各分岐線が4層に立体交差し、さらにその下に鉄道軌道が走っている。落橋したのは、14号線の西向線がY字形に分岐して5号線の南向線と北向線に合流する間の2ヶ所で、ともに多径間曲線高架橋

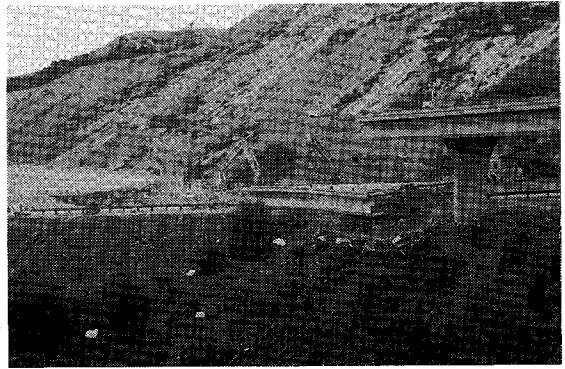


写真-1 I-5/SR-14 インターチェンジの南向線落橋部(村上處直氏撮影)



写真-2 I-5/SR-14 インターチェンジの北向線落橋部(村上處直氏撮影)

端部のPC箱桁である。

南向線部は、西側の橋台からベント3~4間のヒンジまでの3スパンに架かる連続桁が落下した(写真-1)。ベント2の橋脚は桁下で完全に崩壊したが、ベント3の橋脚は桁を突き破る形で残った。そのため、この落橋は地震による激しい上下動の仕業ではないかとの憶測が流れたが、それを全面的に否定する試算結果⁹⁾もある。その試算によれば、加速度0.5g程度の地震力による橋桁の橋軸方向水平変位でベント2がせん断破壊し、支持を失った桁がそこで曲げ破壊して塑性ヒンジとなる一方、ベント3での曲げモーメントが急増しPC鋼のひずみが限界を越すことによって、最終的にベント3の両側で桁が爆発的に曲げ破壊して落下するという過程をたどった。

写真-2は、北向線の落橋部を示している。この部分のベント2も、南向線落橋部と同様に、他に比べて脚長が短くせん断剛性が高かったため、ベント2に地震力が集中して橋脚がせん断破壊し、それに続いて両側の桁が落下したと考えられている⁹⁾。これらの落橋部分の撤去は、地震の翌日(1月18日)午前開始され、異例の急ピッチで進められた。

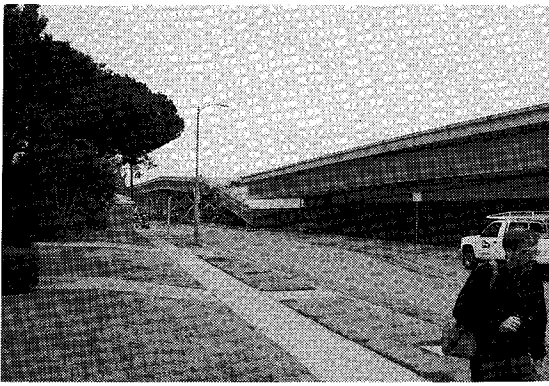


写真-3 高速道路10号線の落橋部（ラシエネガ通り地点）（中井康博氏撮影）

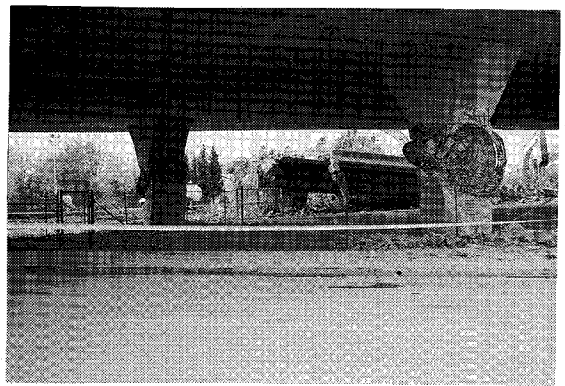


写真-4 高速道路118号線の落橋部（ミッション/ゴシック交差点）（中井康博氏撮影）

b) 高速道路10号線（I-10）での落橋（図-1の△2）

ラシエネガ通りからヴェニス通りにかけての約230mの高架部分が落橋した。この間は上下8車線の幅員をもつが、構造的には道路中央で分離された2つの斜橋で、RC箱桁の下面に円形断面のRC橋脚が剛結されていた。この高架橋は、全7スパンの途中2スパンで桁間ヒンジによって架け継ぐ方式であったが、ヒンジは桁がかり長が15cmと短く桁間連結ケーブルが設置されていなかった。落橋は、橋脚頭部にせん断破壊と圧壊が併発したため、橋桁が高架橋下の倉庫の上に軟着陸する形で生じた（写真-3）。この部分は1963年ごろに架設された旧耐震設計基準時代の高架橋で、耐震補強工事が近々予定されていた矢先の被災とされている。ラシエネガ通りから東へ約1km離れたワシントン通りの高架部分も落橋した。この高架橋はラシエネガ通りの高架橋と類似の構造であったが、桁間連結ケーブルが設置されていたため、橋脚頭部が圧壊しヒンジ部がはずれても完全に落下することはなかった。

震央から25km離れたこれらの高架橋が落橋した原因として、上部構造の欠陥や橋脚の強度不足が指摘されているが、この地点では周辺よりも地震動が強かったことも考える必要がある（図-5参照）。ラシエネガ通りとワシントン通りの中間を小河川が流れていることやシエネガ（Cienega）という地名はスペイン語で湿地やぬかるみを意味することなどが、不利な地盤条件を暗示している。

c) 高速道路118号線（SR-118）での落橋（図-1の△3）

この道路では、ミッション通りとゴシック通りの交差点を東西に跨ぐ高架部分が落橋した。ここでは橋長がそれぞれ134m、193mの斜橋が併設され、30×2.3mのPC箱桁を西向車線は4本、東向車線は6本の橋脚が支持していた。

地震によって、東向線の橋桁は東側橋台から外れて落

橋したが、西側橋脚は亀裂が入っただけで西側橋台とともに桁の西端を支持していた。西向線でも東側2本の橋脚が著しくせん断破壊され、主鉄筋が外側にはみ出した（写真-4）。両橋梁ともに東側橋脚で破壊が顕著なことは、これらが西側を中心に過大な面内回転変位を繰り返したことを暗示している。なお写真-4のように、橋脚の上部で徐々に拡幅している部分はフレアと呼ばれ、1971年後の設計によく採用されている。

d) 旧式橋梁の耐震補強¹⁰⁾

米国では1971年のサンフェルナンド地震以降、橋梁の耐震設計が大きな変革をとげた。その主な点は、設計地震力を高め、落橋防止装置を施したことである。今回の地震で大被害を受けた橋は、ほとんどが1971年以前の旧耐震設計基準によるもので、橋脚と支承に欠陥があることが認識されていた。例えば、ヒンジの桁がかりが15~35cmと短く落橋の危険性が高いため、現在の基準ではヒンジには60cmの桁がかりと落下防止装置が必要と改められている。

カリフォルニア州交通局（Caltrans）は旧基準による既存橋梁の耐震補強を実施していたが、今回落橋したのは補強が間に合わなかったか、補強が十分でなかった橋梁と言われている。この耐震補強の基本方針は、第一に人命にかかわる落橋や全面的崩壊を避け、被災時に緊急車両の通行路として供用することであり、経済性の観点から新設橋梁と同程度の強度を付与することまでは意図されていない。このため、崩壊によって歩行者に危害が及ぶ橋梁や児童生徒の通学路に関連する橋梁などが優先的に補強対象とされている。補強の大半は桁の落下防止で、補強後の外観を損ねない桁間連結ケーブルの設置が一般に好まれている。

(2) 建築物の被害

a) 応急被災度点検と被害分布

1989年ロマブリエタ地震の際と同様に、今回の地震の後にも応用技術協会方式（ATC-20）による建物の応急

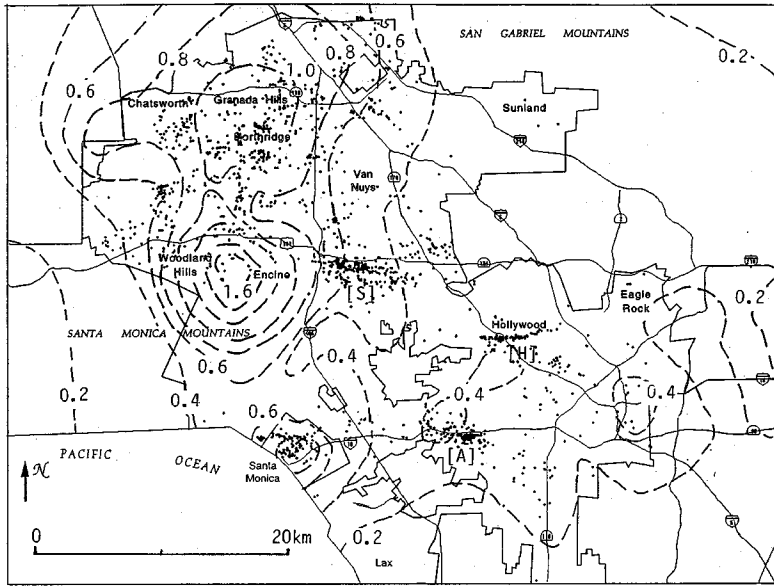


図-5 ロサンゼルス市とサンタモニカ市で「危険」と診断された建物位置¹⁾とピーク水平加速度の分布²⁾

被災度点検が実施された。これは市建築安全局の職員やボランティア専門家が組になり、1棟あたり10～20分で被災建物の安全度を診断し、診断結果に応じて赤（危険）、黄（立入制限）、緑（検査済）のポスターを建物に貼る方式である。ロサンゼルスにはヒスパニック系や中国系の住民も多いため、今回は片面が英語とスペイン語、裏面は英語と中国語で記述したポスターが使用された。2月2日までの集計では、ロサンゼルス市で約54,384棟が診断を受け、そのうち45,415棟に被害があったとされている。診断結果は、「赤」が1,946棟（4%）、「黄」が7,442棟（16%）、「緑」が31,256棟（69%）となっている。図-5は、ロサンゼルス市とサンタモニカ市で2月10日までに「赤」と診断された建物の位置を黒点で示している。また破線は、地震動強さの平面分布を示すピーク水平加速度の等値線²⁾（単位はg）である。ノースリッジやサンタモニカでの被害分布はピーク加速度値と比較的よく対応しているが、ハリウッド（図中の[H]）やシャーマンオークス（[S]）、西アダムス（[A]）などの地区ではピーク加速度のわりに被害の集中度が高い。このことは、これらの地区に低強度の建物が集中していることの反映と思われる。

b) 被害の様相

今回の地震による建物被害の特徴は、立体駐車場、ショッピングモールおよび木造住宅に大きな被害がでたことである。無補強レンガ造やティルトアップ(Tilt-up)方式と呼ばれる簡易プレキャスト工法による建物も被害を受けたが、これらは以前から耐震性の低い建物として指摘されていた。また、多数のブロック塀が倒壊したこ

とも特筆される。

立体駐車場の崩壊は、プレキャストの梁や床と柱との接合強度の不足が原因と考えられている。3～4階建てで1階部分を駐車場にしている木造集合住宅では、剛性の弱い1階部分に変形が集中し倒壊に至った建物が目立った。

現在、大半の建物被害は起きて当然であったと理解されている。むしろ震源域での地震動の強さを考慮すれば、全般的被害は意外に小規模ですんだとの評価もある。その端的な例が、建物6階で2.3gという大きな応答が観測されたオリーブビュー病院である（表-1参照）。この病院は1971年の地震で鉄筋コンクリート造の病棟が崩壊し45名の犠牲者を出した後、鉄骨造として再建され1987年に再開された。今回の地震では構造的被害は報告されていないが、スプリンクラーや内装の被害が著しく、病院機能が果たせないため患者を他の病院へ避難させた。

構造被害はなくても非構造部材や内装の被害によって、建物が本来の機能を失い多数の負傷者をだす例が、今回の地震で多数発生した。構造被害の軽減に重点をおいてきた従来の地震防災対策は、新局面を迎えているように思われる。

5. ライフラインの機能障害と復旧

(1) 電力施設の被害と復旧

ロサンゼルス市の電力は、カリフォルニア州北部やアリゾナ州、ネバダ州の発電所に依存する割合が多いため、その供給能力は送電、配電施設の能力に大きく依存する。

今回の地震で、ロサンゼルス全域（約260万件）が史上初めて全停電したのはこのような事情によっている。電力施設の主な被害は、変電所やAC/DC変換所、送電鉄塔などの損傷であった。いわゆるトップヘビーな碍子系の変電機器の損傷が目立ったのは1971年の地震被害と同様であるが、1971年の地震を契機に機器や設置方法を改善した効果があられて、地震動強さのわりに今回の被害件数は少なかったと言われている。

域内への電力供給は市水道電力局と南加エジソン社（SCE）の2つの機関が実施しているが、平常から相互融通体制がとられているので、非常時に系統が分断されても系統切り替えによって迅速に供給支障が解消できる。今回の地震でも復旧は比較的早く、停電は17日中に52万件、18日夕刻には6万件に減少し、1月26日まではすべての停電が解消した。供給支障は迅速に解消したが、シルマー変換所が完全に復旧するのは約1年後とみられている。

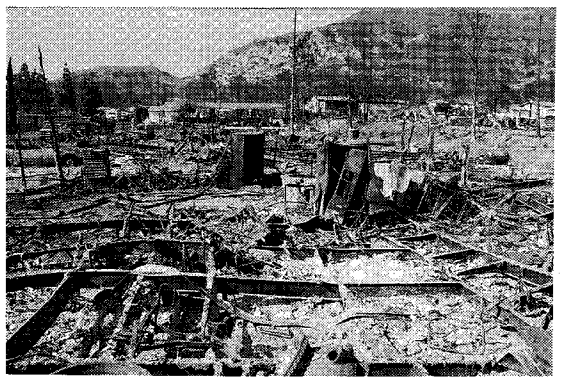
（2）水道施設の被害と復旧

ロサンゼルス市域への水供給は、全体量の75%（168万 m^3 ）が市水道電力局のロサンゼルス導水系、10%（23万 m^3 ）が水道公団（MWD）からの受水、15%（34万 m^3 ）が井戸からの揚水によってまかなわれている。ロサンゼルス導水系は、シエラネバダから全長544kmのオーエンス導水路（1913年完成）と第二ロサンゼルス導水路（1970年完成）を経由して自然流下で導水するシステムである。1986年から稼働しているアキダクト浄水場は全米最大で、一日227万 m^3 の処理能力と1249 m^3 の貯水容量をもっている。また、ロサンゼルス貯水池をはじめとする105の貯水施設は全体で4億5045万 m^3 の容量をもち、配水本管は延長11400kmに及ぶ。需要家の総数は約66万件、340万人で、一日平均212万 m^3 の水が配水されている。

今回の地震で、2本の導水路に亀裂等の被害が生じたためアキダクト浄水場への導水は一時的に不能となったが、ロサンゼルス貯水池に処理水が大量に貯水されていたので断水の直接的原因とはならなかった。断水の主な原因は、配水管路網の被害による水圧低下と停電による揚水不能であった。

サンフェルナンドバレーでは、1100カ所で配水管路網に被害が生じた。なかでも、ガスや水道の管路が埋設されていたバルボア通りでは、これらの管路が破断し、周辺に浸水と火災を同時にもたらす原因となった。ここで破断した配水管は水圧が高かったため、大量に噴出した水が付近一帯の交通障害を誘発するとともに、高速道路118号線の高架橋の橋台を洗掘した。断水は、地震当日は約5万人に及んだが、一週間後には5千人に減少した。

断水しなかった地域では、漏水や消防活動のための水



写真—5 モービルホームの火災跡（村上處直氏撮影）

需要などによって減圧した配水管へ汚水が流入し水質が汚染される恐れが出たため、市民に煮沸か塩素殺菌して飲用することを勧める忠告がマスコミなどを通じて広報された。

（3）都市ガスの供給支障と火災

ロサンゼルスへの天然ガス供給は南加ガス会社（SCG）が行っている。同社は、サンタズザナ山地に米国最大規模の地下貯蔵施設をもっている。今回の地震では、震央から約20kmの範囲で供給に問題が生じた。

輸送幹線は延長6348kmのうち37ヶ所で被害があったが、被害は古い導管部に限られ全体的には地震によく耐えた。前述のバルボア通りの地下にはガスの輸送幹線や供給管、配水管、石油管など多種多様な管路が埋設されているが、地震でこの道路を横断する地割れが発生したため、水道管とガス管が破断した。破断したガス輸送導管は大口径（550mm）で高圧力（約15 kgf/cm^2 ）であったため、大量にガスが噴出し、これに自動車エンジンの始動火花が引火して火災となり、道路の両側の住宅5棟と木製電柱が焼失した。

輸送幹線と需要家を結ぶ配給管には、小規模な漏洩が多数発生し火災の原因となった。ガス漏洩による出火件数は全体で48ヶ所、サンフェルナンドバレーで42ヶ所と言われている。これらの火災のうちで、モービルホームからの出火は特に注目を集めた（写真—5）。モービルホームは、3×8m程度のトレーラー1台か2台を簡単な支持台に固定し、電源や水道管、ガス管を接続して居住する低所得者向けの住宅で、自動車として扱われ建築基準の適用をうけない。これが地震で支持台から外れる拍子に、ガス管やバルブを損傷し、漏洩したガスに点火中の種火が引火して火災になったものと推察されている。

今回の地震で、需要家470万件のうち約15万件へのガス供給が停止したが、その大部分（約13万件）は需要家自身が元栓を閉じたため、残りがガスの漏洩によるものであった。復旧作業の結果、地震から1週間以

内に約8万4千件, 12日以内に約12万件が復旧し, 1月31日までにはほとんどの復旧が完了した。1971年の地震と比較すると, 今回の地震では輸送導管の被害数は格段に少ない。一方, 配給管の被害数は増加したが, 被害の多くは旧式工法による溶接部の亀裂や破断, 老朽管の腐食などが主な原因であった。

(4) 道路交通の支障と処置

2ヶ所で落橋したI-5/SR-14のインターチェンジは, ロサンゼルス市と北部郊外を結ぶ交通の要衝であるが, 狭い谷間に位置するため代替道路が少ない。そのため落橋後の交通支障を緩和するため, 併走する鉄道の運行区間の延長, 停車駅の新設, 料金体系の変更, 駅前駐車場の確保などによって代替輸送がはかられた。その結果, 高速道路5号線の代替となるメトロリンクのサンタクラリタ線では, 地震前に1日900人程度であった乗客数が22000人まで急増した。

高速道路10号線はサンタモニカハイウェイと呼ばれ, 上下8車線で1日33万台の自動車を利用する大動脈である。地震による落橋の発生が休日の未明であったため当日は交通量が比較的少なく市街道路への迂回あまり問題にならなかったが, 翌朝は迂回路で大渋滞が発生した。しかし幸運にも, この地域には最近完成したばかりのスマート回廊(SMART CORRIDOR)システムがあった。これは交通信号をコンピュータ制御するシステムで, 多数のカメラとヘリコプターから提供される時々刻々の交通状況をもとに, 管制センターで全信号機の監視と制御ができ, 文字掲示板の表示変更によってドライバーに交通状況を知らせることもできる。このシステムを使って複数の迂回路の設定や信号調整がきめ細かく実施された結果, 周辺の交通渋滞は早期にかなり解消された。

6. 市民や行政の対応

(1) 被災者の救出救援

「ロサンゼルスには4つの季節がある。火災, 洪水, 地震, 干ばつである」。時には暴動が干ばつと入れ替わることもあるが, このような冗談が流行するほど近年, ロサンゼルスには災害が多い。

地震に限らず, ハリケーン, 洪水, テロ活動などで建物内に閉じ込められた犠牲者を探索し救助するためには高度技能が必要であるという認識が, 1989年ロマプリア地震での高速道路の崩壊を契機として急速に高まった。そして1991年には, そのための探索救出チーム(USAR)が結成され始めた。このチームは現在, 全米で25チーム, カリフォルニア州にはロサンゼルス市や郡などの消防局が支援して8チームが結成されている。各チームは, 探索, 救出, 医療, 構造技術の技能をもつ専門家56人で構成され, 建設資材の切断機, 破壊器具,

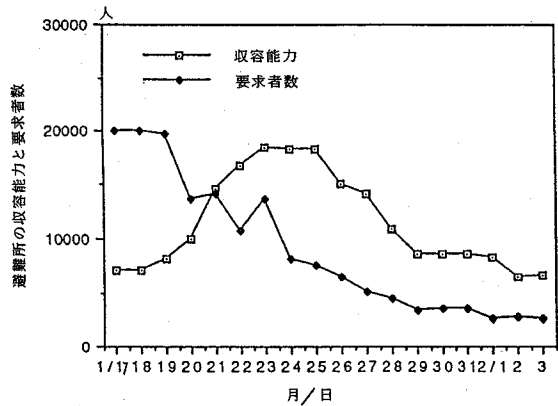


図-6 避難所の収容能力と要求者数の日変化

救出具, 医療用品, 安全服, ファイバーカメラなどを装備し, 1日2交代で72時間は完全に自立活動できるよう意図されている。

今回の地震で, 震央に近い木造3階建て集合住宅のノースリッジメドーズでは, 1階部分が崩壊し60~90cmの隙間に多数の住民が押し込められた。この現場では, 消防隊やUSARチームなどの救出活動により25~30人が救出され, 16名の遺体が収容された。また, ファッションセンターでは3階建て立体駐車場が倒壊し, 清掃車を運転中の作業員1名が閉じこめられたが, 6~7時間後に重体で救出され病院へ運ばれた。ここでもUSARチームや消防隊が活躍した。

(2) 避難所と救援センターの設営

赤十字や救世軍および市公園レクリエーション局は, 学校や公園に合計47ヶ所の避難所を設営した。避難所の需要と供給の日変化を図-6に示す。学校を主体とする避難所の収容能力は当初, 需要に満たなかったが, その後テントの避難所が設営され収容能力が増加する一方, 4日目からは需要も減少したため, 5日目には両者がバランスし, 以後は収容能力が需要を上回った。避難所として学校などの既設建物が優先されたのは, シャワーやトイレなどの設備がそろっていることや1月が雨期にあたり天候が不順なためである。

余震による建物崩壊を恐れ, 戸外で夜を明かす被災者も多かった。図-6において避難所の収容人数が, 1月21日と23日に一時的増加を示しているのは, この両日にM4.0以上の余震が各4回ずつたて続きに起きたことと無関係ではなからう。

避難所では食事や寝具の提供, 外傷の手当や医薬品の供与のほか, 精神的不安を軽減するためのカウンセリングも行われた。2月2日午前の赤十字の集計では, 移動給食用に使用された自動車は124台, 支給した食事は延べ79万2千食程度, カウンセリングを受けた人数は約1万人に及び, 29ヶ所の避難所が開設中であった。

救援センター (DAC) は、市と連邦緊急管理局とが共同で被災者の救援をする場所で約 20 カ所に開設された。被災者がここで被災状況の届け出をすると、どのような救援措置が受けられるかが説明され、必要な手続きがその場で行える。救援センターが扱う内容は、生鮮食品の産直売場の紹介や幼児扶養資金の支給から職業紹介、住宅相談、個人や企業への災害融資、税制上の援助など多岐にわたる。住宅貸付や税制優遇措置などを含む多数の救援プログラムが短時間で実施できたのは、市長や州知事あるいは大統領の非常事態宣言が出た後の救援や復旧の手順が周到に準備されていたためと思われる。

(3) ボランティアと救援物資

市人事局は、平常時には警察官や消防隊員の募集を行っているが、災害時にはボランティアの募集を行い、人数、技能、配属の時期や場所などについて希望部局の要望と応募者の都合とを調整して配属する。人事局のこの調整機能は、行政の応急体制だけでなく一般市民に対するボランティア活動にも向けられている。たとえば、独り住まいの高齢者が食事や被害の後片づけなどで援助を必要としていれば、ボランティアの登録名簿から適切な人材を選出して派遣する。何人かのボランティアをチームにして被災者の家に一軒ずつ派遣し後片付けや引越しなどを手伝う企画は好評だったようである。

人事局の調整機能はさらに物資にも及び、必要度の高い救援物資を企業やマスメディアを利用して効率的に回収することも行った。今回の地震では、乳児用の粉ミルクや紙おむつ、後片付けや引越しに使う段ボール箱などの需要が多かった。救援物資の提供を申し出る個人には義援金を奨励し、ぜひとも物資を提供したい場合には現地本部へ直接届けるよう広報された。これらが奏功して、個人の善意にまつわる混乱は、ボランティアに関しても救援物資に関してもあまり問題にならなかった。

(4) 行政の応急体制¹⁾

応急体制 (EOO) の統括者は市長であり、応急評議会 (EOB) によって支援される。応急評議会は市役所の警察、消防・救出、交通、公共施設、建物安全、福利厚生など 13 部門の局長級幹部で構成され、警察署長が議長をつとめる。応急評議会の作業部会として緊急管理委員会 (EMC) があり、その活動には市の 25 部局のほか公的・私的機関が参加する。応急評議会は定期的開催され、災害時には各部局からの状況報告をもとに対策の立案や調整を行う。この応急体制のもとで、これまでに「応急体制基本計画」や「予知地震対応」、「復旧復興計画」(後述) が作成されている。

市内広域にわたる災害が発生すると、中央応急センター (EOC) が活動を開始する。このセンターは市庁舎の地下 4 階にあり、非常用通信機、自家発電機、食糧などの 2 週間分の備蓄を保有している。災害が市の平常

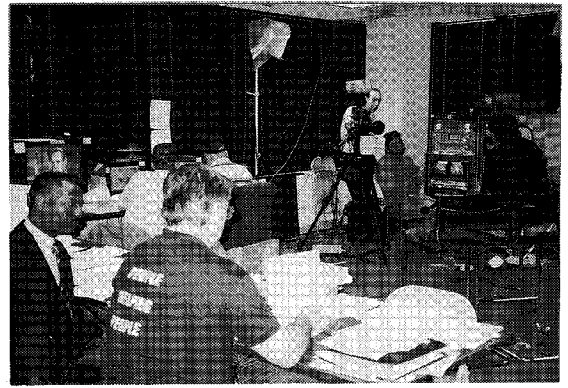


写真-6 災害現地事務所 (DFO) のテレビ番組制作室

機能で処理できない規模であると判断すると、市長は非常事態を宣言する。災害規模が大きければ、市長→州知事→大統領の順に非常事態宣言の発令を要請する。大統領の宣言が出れば、州や市は連邦緊急管理局 (FEMA) などの支援を受けることができる。今回の地震では、この段階までの支援が 1 月 17 日中に開始されている。

州政府の緊急業務室 (OES) は、連邦緊急管理局と共同で 1992 年 2 月の洪水時以来バサデナに災害現地事務所 (DFO) を開設している。今回の地震でも、この事務所が種々の重要な役割を果たした。ここは州政府や連邦政府関係者の詰所であるとともに、地理情報システムの開発やテレビ番組制作などの機能を備え、地震の発生状況や被災状況のマッピングをしたり災害関連情報番組を制作してマスメディアに流すなど、良質の情報提供を積極的に行った (写真-6)。

(5) 災害管理の手法

ロサンゼルス市の「復旧復興計画」¹²⁾ は、緊急時における市当局の政策と実施手順を明記したもので、1994 年 1 月に完成したばかりである。これは、1987 年に終了した「震災復興のための事前計画」(PEPPER)¹³⁾ 調査の成果を継承し、「災害対策を事前に計画し実践すれば、復旧復興に要する経費や時間を大幅に削減でき、しかも都市の改善が可能である」という基本理念を確実に達成するための指針として位置づけられる。本計画書には 8 分野 63 本の政策が列記されている。その政策例を 2, 3 あげれば、最初の「A. 居住地区、商業地区、工業地区の再建」の分野では、

- A-1 緊急事態宣言後なるべく早く一時的住まいを避難を必要とする市民に、できれば家族単位で用意し、長期住宅の使用が可能となり次第そのような避難所を閉鎖するのが、市の政策である。
- A-4 取り壊しが必要な際は、可能なかぎり迅速に実施するのが、市の政策である。
- A-5 必要な際は、住宅被災度評価に相互援助の人材を使うのが、市の政策である。

などがある。次章では、各政策に対する実践プログラムが、事前、応急復旧期、復興期の3つの時期別に列記されている。上記の分野A. では

事前

- A. 1. 1 予測される世帯数をもとに、市の種々の区画について3ヶ所の代替地点を決定し、各地点に“テント村”計画を用意せよ（公園レク局）。
- A. 1. 2 空地や学校など避難場所と各地点の収容能力、特色等の電算データベースを完成せよ（公園レク局、市計画局）。
-

応急復旧期

- A. 1. 10 発災後“テント村設定の手順と方法”を実施せよ（公園レク局、警察）。
- A. 1. 11 食料や他の必要物資の効率的で有効な配給システムを作れ（公園レク局、総務局、赤十字）。
-

などとなっている。終章では、主管25部局ごとの実践プログラムと協力部局名が優先度順に列記されている。

本計画書では、「F. 心理的回復」が8分野の中に独立に取入れられている。本分野の政策の骨子は、大災害は市民と市職員の両方に精神的ストレスを及ぼすことを認め、発災後の業務に従事する職員の精神的負担を事前の準備によって軽減すること、メディアによる情報提供を通じて市民の精神的打撃を早く回復することである。

このように実務者が迷わずの確な行動がしやすいように、行政側の方針と実践項目を具体的に明示しているのが本計画書である。そして全体に一貫しているのは、実災害では予期できない緊急事態が発生することを前提としながらも、上述の理念のもとに災害時の悲惨な状況をうまく切り抜け早く立ち直るためのマネージメント手法、すなわち災害管理の手法を確立しようとする姿勢である。この手法が地震災害に実際に適用されたのは今回の地震が初めてであったが、市当局が近年発生した暴動や洪水での経験を通じて災害管理能力を高めつつ本計画書を作成してきた成果が、今回の地震で見事に発揮されたと言える。

7. ま と め

以上の概観をもとに、ノースリッジ地震に対する筆者の所見をまとめてみる。

第一の観点、すなわち（1）サンフェルナンド地震の教訓がどれだけ生かされたかという点に関しては、高い評価を与えてよいように思われる。高速道路高架橋の落橋被害は反省材料であるが、耐震補強の基本方針が被害の防止よりも人命を守ることであったことを思えば情状酌量の余地もある。強震記録の速やかな整理と公開、救援復旧活動における官民協力体制の強化、ライフライン

施設の耐震性向上などは、特に過去の教訓の達成度が高い。ただし、公共建物に一般建物よりも高い耐震性を付与する点に関しては、病院、立体駐車場、ショッピングセンターの被害が大きかったことから、過去の教訓が十分生かされたとは評価できない。

今回の地震による構造物の被害は、構造的欠陥が明白な部分で発生したものが多く、これらの被害が震央から25 km以内に集中し、なかには異様な破壊形態を示した高架橋や駐車ビルがあったため、直下地震による強い上下動で被害が生じたとも言われた。しかし、強震観測結果は全般に水平動の方が強いことを示し、異様な破壊も水平動で容易に生じることが解明された。これらのことから専門家の中には、今回の地震で不思議なことは何も起こらなかったという意見がある。しかし筆者には、不思議でしかも教訓に満ちていると思えることがある。それは、米国災害史上最大と言われたこの震災が、大した混乱もないまま静かに終息に向っていることである。

第二の観点に立ち、（2）サンフェルナンド地震の教訓とは別な新たな教訓は何か、と問われれば筆者は迷わずこの点をあげたい。サンフェルナンド地震ではライフラインの特質に気づき、この分野の学問が誕生した。広大なネットワークを構成し都市機能を支えるライフラインの地震対策は、地震被害の発生を前提として、迅速に復旧するための事前の準備と、発災時の緊急対応能力の向上に向けられている¹⁴⁾。これと同様なことが、都市の地震対策にも適用できると考えられる。

人間のさまざまな生産活動や文化活動が営まれる都市には、上は行政機構から下は家族関係に至るまで種々の複雑なネットワークが構成されている。ライフラインが目に見えるモノで構成されるネットワークであるとすれば、都市には目に見えない情報で構成されるネットワークもあり、大地震時には両方のネットワークが被害を受け、両方の復旧復興がはかられる。都市機能の内容を、人間と同じように、生命機能と知的機能に分けてみると一層明快になる。前者は文字どおりライフライン施設に依存し、その地震対策は近年ようやく確立されてきた。一方、後者に対する地震対策は、現在は萌芽的ではあるが、その具体例を今回の地震におけるロサンゼルス市民や行政の対応に、具体的には災害管理の手法に見た思いがする。

都市の震災は、重要な問題ではあるが多種多様な都市災害の一つに過ぎない。さまざまな災害に強い都市は、地震にも強いので、都市の総合的な防災力を確実に高めることを、災害管理の目標としている。実際には、まず災害の発生を前提とし、災害による非常事態を想定する。想定は高精度であることが望ましいが、重要なのは想定精度を高めることよりも想定された非常事態をうまく処理するための事前の準備と、発災時の緊急対応能力の

向上である。すなわち災害管理は、基本的にはライフラインの地震対策と違いはないが、対象がモノだけでなく組織や人間で構成されるネットワークも含んでいる点が違っている。したがってライフラインを含めて従来の地震対策で用いられてきた手法、これを地震防災の手法と呼べば、地震防災の手法も必要であるが、災害管理の手法としてはモノよりも情報を主な対象とする手法として確立する必要がある。ロサンゼルスでは、これまでに開発してきた災害管理手法のテストランによってノースリッジ地震を、言わば静かな大災害として制圧することに成功したと筆者は考える。わが国でも、早急に本手法の開発に着手しないと、今回程度の直下地震でも未曾有の大混乱になりかねないと懸念される。

謝辞：筆者は文部省突発災害調査団長として2月1日から1週間、土木学会チームと共同で現地調査を行った。本調査に際しては、文部省学術国際局をはじめ「自然災害」総合研究班、土木学会、建築学会の関係各位に種々のご助力を賜った。またロサンゼルスでは、同市および州政府、連邦政府の関連部局や大学、被災地などを訪問し、多くの資料の提供や懇切丁寧な説明を受けた。さらに民間会社の多くの方々にも様々の便宜をはかって頂いた。調査団を代表し、末筆ながら厚くお礼申し上げる。

補遺：ABBREVIATION LIST

ATC	Applied Technical Council
CALTRANS	California Department of Transportation
CDMG	California Division of Mines and Geology
CSMIP	California Strong Motion Instrumentation Program
DAC	Disaster Application Center
DFO	Disaster Field Office
EMC	Emergency Management Committee
EOB	Emergency Operations Board
EOC	Emergency Operations Center
EOO	Emergency Operations Organization
I-5	Interstate Highway 5
MWD	Metropolitan Water District
OES	Office of Emergency Services

PEPPER	Pre-Earthquake Planning for Post-Earthquake Rebuilding
SCE	Southern California Edison Co.
SR-14	State Route 14
USAR	Urban Search and Rescue

引用文献・参考文献

- 1) Earthquake Engineering Research Institute : Northridge Earthquake of January 17, 1994 Preliminary Reconnaissance Report.
- 2) 大町ほか：1994年ロサンゼルス地震と都市機能障害の調査研究，文部省突発災害調査団報告，1994。（印刷中）
- 3) 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）の震害について，土木学会論文報告集，第195号，pp.117～148，1971年。
- 4) CDMG : Quick Report on SCMIP Strong-Motion Data from the Northridge/San Fernando Valley Earthquake of January 17, 1994.
- 5) CDMG : CSMIP Strong-motion Records from the Northridge, California Earthquake of January 17, Report OSMS 94-07, 1994.
- 6) Borchardt, R. D. : Strong ground motions generated by the Northridge earthquake of January 17, 1994, 日本建築学会ノースリッジ地震災害調査速報，pp.83～114 1994.
- 7) Joyner, W. B. and D. M. Boore : Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California earthquake, BSSA Vol.71, No.6, pp.2011～2038, 1981.
- 8) Abrahamson N. A. and J. J. Lithewiser : Attenuation of vertical peak acceleration, BSSA Vol.79, No.3, pp.549～567, 1989.
- 9) Priestley, M. J. N. : The 1994 Northridge earthquake damage analysis of selected freeway bridges, 日本建築学会ノースリッジ地震災害調査速報，1994.
- 10) Division of Structures, Caltrans : Seismic Design References, 1990.
- 11) City of Los Angeles : Emergency Operations Organization.
- 12) EOO City of Los Angeles : Recovery and Reconstruction Plan, 1994.
- 13) Spangle, W. E. et al. : Pre-Earthquake Planning for Post-Earthquake Rebuilding, Southern California Earthquake Preparedness Project, 1987.
- 14) 片山恒雄：ライフラインの安全性，直下地震対策は万全か，地震ジャーナル No.10, pp.46～50, 1990.
(1994.5.9 受付)