

1994年ノースリッジ地震によるライフラインの被害

Performance of Lifeline Systems in the 1994 Northridge Earthquake

山崎文雄 (やまざき ふみお)

東京大学助教授 生産技術研究所

能島暢呂 (のじま のぶおと)

広島工業大学講師 工学部土木工学科

1. はじめに

ライフラインという言葉とライフライン地震工学という研究分野が生まれるきっかけとなったのが、1971年2月9日のサンフェルナンド地震である。それから23年後、ほぼ同じサンフェルナンドバレー地域を襲った1994年1月17日のノースリッジ地震(マグニチュード6.8)は、再び、ライフライン施設の地震被害とその機能損失による影響について、社会の注目を集める結果となった。この間、日本では1978年宮城県沖地震や1993年釧路沖地震など幾つもの地震があり、米国でも1989年ロマプリエタ地震などの都市型地震があった。電力、都市ガス、上水道、交通網などの都市ライフライン系は、そのたびに被害を受け、いろいろな問題点が明らかになり、地震対策も進められてきた。

しかし、問題がすべて解決されたわけではなく、ノースリッジ地震でも、変電施設、ガス導管、配水管、高速道路高架橋など、システムの弱点が、これまでの地震と同様に被害を被った。これらの耐震化は、この間にかかなり進められてきたが、市街地はざっと広がり、社会のライフライン依存度はますます高まっていた。さらに今回観測された地震動は、1971年のものよりずっと大きかった。このような状況を考慮しながら、本文では都市ライフライン系のノースリッジ地震に対するパフォーマンスについて論ずる。なお筆者らは、文部省突発災害調査団(大町達夫団長)のメンバーとして、2月初旬に現地調査を行っており、詳細は別途報告書¹⁾を参照された

2. 電力システム

ロサンゼルス周辺の電力供給は、市域をロサンゼ

ルス水道電力局(DWP)が、また市近郊を南カリフォルニア・エジソン社(SCE)が行っている。震源近傍で被害の集中したサンフェルナンドバレーは、主にDWPの管轄区域である。DWPとSCEの電力系統は、数箇所の変電所で結ばれており、また両者の共同所有であるシルマー交流直流変換所を通して、北のオレゴン州などと季節に応じた電力の融通を行っている。

2.1 電力施設被害

DWPでは、シルマー変換所、リナルディ変電所、およびその他の震源に近い変電所に被害が集中し、被害総額は約5320万ドルである。またSCEでは、パーディ変電所およびヴィンセント変電所が大きな被害を受け、被害総額は約3000万ドルである。

最も被害の大きかったシルマー変換所では、碍子を有する機器が数多く損傷した(写真-1)。避雷器は碍管と支持部の接合部で上部が倒壊し、高調波フィルターを支持する碍子部、屋外に設置されていた変圧器のブッシング部分、コンデンサー、開閉器なども強い揺れのため損傷した。同変換所の被害は1971年の地震の際も甚大で、今回の被害はそれと比べると小さく1/3程度であった。またリナルディ変

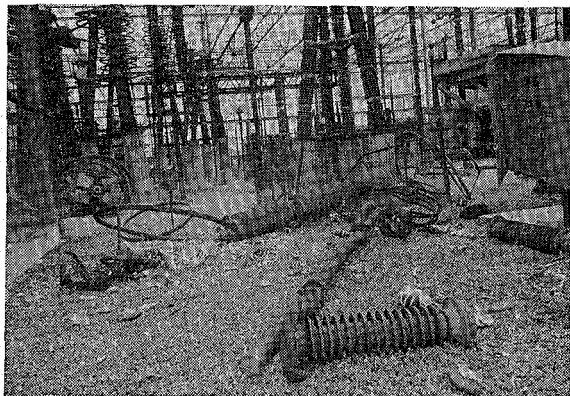
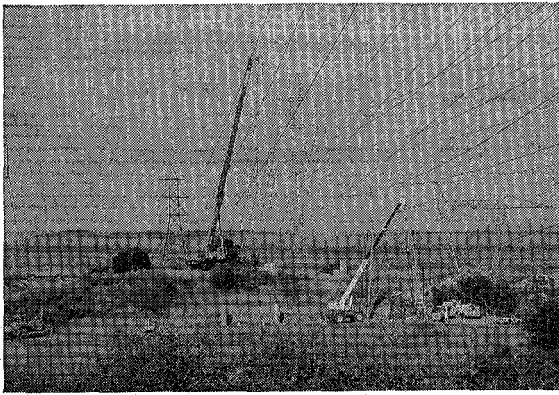


写真-1 シルマー交流直流変換所の被害状況



写真—2 地盤変状で倒壊した送電鉄塔の仮復旧

電所においても、被害は碍子系の機器に集中した。母線を支持する碍子が損壊して母線が落下し、変圧器ブッシングの碍管部が損傷した。

これらの変電施設の被害は、通常よく見られる被害パターンと一致している。変電機器は近年、耐震性がかなり向上しているが、今回の地震では設計地震力の0.5Gを大幅に上回る0.8Gがシルマーで記録されており、被害につながったものと思われる。

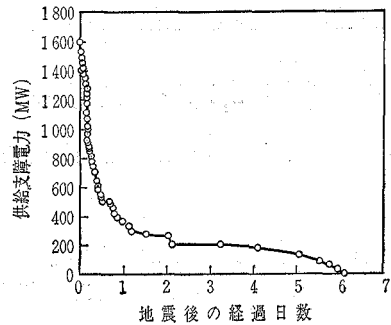
送電施設では、数基の送電鉄塔が倒壊した。シルマー北方の山中の鉄塔は、地震で鉄塔基礎部の土砂が崩れ、4脚の独立基礎が変位をしたために倒壊した(写真—2)。このほかの倒れたり傾いたりした鉄塔も、基礎地盤が原因と報告されている。

配電設備の被害は全体的に軽微であった。これは米国の場合、変圧器や開閉器などの地中化が進んでおり、電柱上に設置されている重量の重い機器が少ないためと考えられる。

2.2 停電とその復旧

DWPの供給区域では、地震発生後、ほとんどのバンク(変圧器)からの電力供給が不能となり、ロサンゼルス市全域にあたる約150万戸の需要家が、史上初めて全面停電した。停電は約8時間後には50%が解消し、3日後には約90%が解消したが、すべてが解消したのは地震9日後であった。図—1には、DWPの供給支障電力の変化を示す。

SCEの供給区域では、地震発生直後、保護リレー動作により約110万戸の需要家が停電した。しかし30秒後、自動再通電機能が働き、このうちの約47.5万戸の停電が解消した。停電が長期化した地域は、ヴェンチュラ郡とサンタバーバラ郡であり、そのう



図—1 DWPの電力供給支障量の変化

ち約10万件は断続的な停電であった。地震発生から約11.5時間後までに85%の停電が解消し、2日後にはすべての停電が解消した。

地震後、ロサンゼルス地域の電力系統が分断されたために、全米各地に電力動揺が広がった。例えば、ヴィンセント—ミッドウェイ間の500kV送電線が分断されたため、345kVや230kVの送電線にその分の電力が流れ、多くの発電所が自動停止した。ワイオミング州では、2箇所の火力発電所が停止し、約15万戸の需要家が3時間停電した。またアリゾナ州ナバホ火力発電所やニューメキシコ州フォーコーナズ火力発電所のユニットをはじめとして、西部各地の発電所が、ロサンゼルス地域の電力動揺が原因となって停止した。

また、シルマー変換所を経由して、冬の間南カリフォルニアから電力を送られていた北西部の州やカナダでは、電力不足による停電も発生している。このように、電力系統が連係するようになった今日、1地域の停電は広域に影響を及ぼすようになった。

3. 都市ガス供給システム

ロサンゼルスを中心とする南カリフォルニア一帯の天然ガス供給は、南カリフォルニアガス会社(SCG)によって行われている。同社は、需要家数において米国最大のガス会社で、ガスメーターの設置数は約466万を数える。

3.1 都市ガス施設被害と火災

SCGのガス貯蔵施設としては四つの地下貯蔵フィールドがあるが、そのうちのアリソキャニオン貯蔵施設は、使用が終わった油田を利用した、米国最大の貯蔵容量を持つもので、震央から北へ約5マイルの山中にある。同施設では、すべての設備が地震



写真-3 パルボア通りの埋設管引張り破断現場

により自動停止した。電気設備、油関連設備、排水処理設備、計器類、道路などが被害を受けたが、地下のガス貯蔵設備には被害はなく、ガスが洩れることはなかった。復旧作業によって、ガス貯蔵量は2週間で通常状態までに回復した。

輸送幹線の被害は37箇所あった。その被害形態の主なもの、1) 1932年以前に敷設された管の酸素アセチレン溶接による円周溶接部の亀裂または破損によるもの27箇所、2) 地上配管部のフランジ部分からの漏洩によるもの5箇所、3) 山岳地帯での地すべりによるもの1箇所、などに分類できる。全体として輸送幹線システムはよく機能し、被害箇所は設計以上の外力が働いたところか、今日の材料や設計基準によらない古い導管に限られていた。

代表的な破損事例としては、フィルモアとニューホール間の輸送幹線1001(1926年建設)では、酸素アセチレン溶接部に25箇所の溶接部亀裂が発生した。パルボア通りの輸送幹線120(1930年建設)では、本誌4月号の速報²⁾でも紹介されたように、輸送幹線の大きな破損が、地盤が引張り変形を受けた区域(写真-3)と圧縮変形を受けた区域の2箇所が発生した。この幹線は口径550mm、圧力約15.4kgf/cm²で、非シールドの電気アーク溶接により施工されたものである。この場所には、このほかにも多くのガス管、水道幹線、石油管等が平行して埋設されている。このガス輸送幹線とともに、ガス配給管および水道幹線も同じ箇所破断している。しかし、石油管やガス高圧幹線2本はいずれも破損していない。なお、引張り破断した導管から漏洩したガスに、この場所での水道幹線の破損による水のため

トップしたトラックが、地震発生30~40分後にエンジンをかけようとした際、イグニッションスパークが原因で着火し、道路の両側の住宅が計5軒焼失した。

輸送幹線と需要家とを繋ぐ配給管には、小規模の漏洩が数多く起こった。漏洩は地震直後にも幾つも判明したが、その多くは4~5日後に行われた集中漏洩検査によって発見された。本管およびサービス管(供給管、灯外管)の漏洩は、約1140箇所にものぼる。これらの漏洩の多くは、地震前より腐食のあったパイプ等で発生しているため、これらを除くと被害は197箇所であった。

今回の地震では、ガス漏洩が原因と考えられる需要家での火災が数多く発生した。特に、モービルホームと呼ばれる簡易住宅で火災が多発し、数箇所延焼している。モービルホームは、車で移動できることを前提とし、非常に簡単な金属製の支点到に支えられている。ガスや水道の配管も、地上から建物に取り入れられている。地震による揺れで、建物が支点から落下し、ガス管なども引きずられて破断したことが多いと考えられる。また米国のガス温水器は、常に種火がついているものが大半で、漏洩したガスに種火から着火したものと思われる。

3.2 ガス供給の停止と復旧

今回の地震によって、需要家の約3%の15万件のガス供給が停止した。しかし、そのうち13万3千件は、需要家が自らの判断で元栓を締めたものであった。ちなみに1989年にロマブリエタ地震でも、多数の需要家が自分で元栓を締めている³⁾。このような場合、米国ではガス会社に復帰作業をしてもらわねばならず、復旧に時間がかかる。

SCG社では、過去の地震による経験により、緊急時の供給停止の方法として、輸送幹線については、急激な圧力降下で自動遮断するバルブの設置、配給管については、需要家約3万件単位でのブロック化対策を事前に準備していた。今回の地震に際して、配給管については、ブロック化による面的な供給停止を行わず、漏洩している管の両側を絞り潰して漏洩を止め、部分ごとに修理し対応している。

復旧作業は、まず最初にガス導管の漏洩調査を行い、次にガスメーターの個別点検を経て、復旧部隊による修理作業を行った。被害の大きかったロサン

ゼルス郡北西部に、可能な限りの人員を動員した。SCG社関係の2980人に加えて、要請に応じて駆けつけた近隣の4ガス事業者からの420名を含め、ピーク時で1日3400人の復旧要員が投入された。この結果、地震から1週間以内に約8万4千件、12日以内に約12万件の復旧が完了し、最終的には15日後に、すべての需要家の復旧を完了した。

4. 上水道システム

ロサンゼルス周辺の上水道事業は、市域をDWPが、また市近郊を南カリフォルニア水道事業団(MWP)が行っている。サンフェルナンドバレー周辺に井戸もあるが、水の大部分は導水路(アクアダクト)によりはるか遠方より運ばれてくる。

4.1 浄水場・導水施設の被害

全米最大規模のDWPロサンゼルス・アクアダクト浄水場では、汙濁施設の建物目地のずれ、構造物周辺地盤の沈下に伴う配管・電気ケーブルの破損、塩素配管の破損などの被害が見られたが、浄水機能に大きな影響を及ぼすことはなかった。第1、第2導水路には計6箇所の被害が発生し、6日間にわたって導水不能となったが、貯水池の大量備蓄により断水の直接的原因とはならなかった。

MWP ジェンセン浄水場においても、構造物および設備の被害は軽微であったが、場内のモルタルライニング鉄製の導水管が斜面崩壊により折損した。

4.2 配水施設・管路網の被害

配水タンクは、数箇所において、屋根や接続パイプ部が破損したり、側板が挫屈する被害を受けた。

配水幹線の被害は、サンフェルナンドバレー周辺に多発した。埋設管の被害が集中したバルボア通りでは、南に向かう緩斜面の下方に向かって地盤の永久変位が発生した。173cm径のリナルディ幹線および122cm径のグラナダ幹線のモルタルライニング鉄管が、北側の引張りと同側の圧縮とみられる地盤変位の周辺で、管体亀裂、継手離脱・押し込みなどの被害を受けた。この配水幹線は水圧が非常に高いため大規模な地上漏水が発生し、バルボア通り一帯で交通障害が生じるとともに、高速道路S-118と立体交差する橋梁の裏込め土を浸食し、両道路ともに通行不能となる事態に発展した。

ロサンゼルス貯水池南側の塩素添加所付近では、

径183cmの鑄鉄幹線が被害を受け、市中心部などへの配水に支障が出ると同時に、隣接するリナルディ変電所に浸水した。またロサンゼルス貯水池北部では、配水幹線の支柱数基が傾斜し、管路支持部が損傷した。

配水管路網には、約1200箇所の被害がサンフェルナンドバレーで発生した。このうち、鉛継手の鑄鉄管(敷設割合75%)と鋼管(同15%)の被害が、多くの割合を占めると考えられる。市の供給区域全域の配水本管延長から求めた被害率は0.11(箇所/km)であるが、被害が集中した西バレー地区に限定するとこれが0.28(箇所/km)となる。東バレー地区を中心に1977年頃から布設されているタイトン継手のダクタイル鑄鉄管には、被害が発生していない。また北部のサンタクラリタバレーでは、約300箇所の被害が報告されている。

4.3 断水とその対応

断水は、サンフェルナンドバレーおよび周辺の高台を中心に広い地域で発生しており、地震当日の断水人口は約5万人に及んだ。その後、図-2に示すような復旧過程をたどり、1週間後には約5千人に減少した。この間、応急給水を行うため80台の給水車が出動し、高等学校など10箇所を拠点とした応急給水を行った。なおこのうち40台は、ビール会社や飲料水会社などが提供したものであった。

高台の地区では、ロサンゼルス市消防局の消防車が水のポンプアップに協力するとともに、漏水箇所発見のために配水本管に水を圧送した。また断水中のバレー地区の消防用水の確保のため、南カリフォルニア一帯からタンク車30台が緊急配備された。

水圧が低下した配水管の亀裂に、下水管から漏出した汚水が浸入する恐れがあるため、飲用には十分

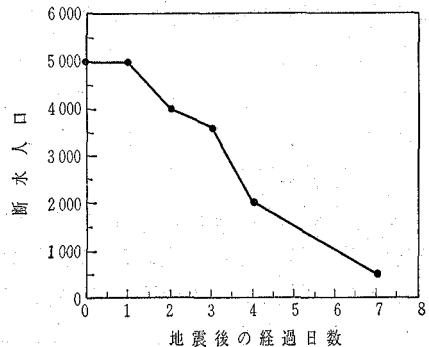


図-2 断水人口の変化

注意するよう警告が出された。ロサンゼルス・タイムズ紙には、煮沸や殺菌剤使用に関する解説記事や、1人1日7.6リットルの水が必要であることなど、被災状況下での生活情報が掲載された。

5. 交通システム

自動車王国アメリカを象徴する都市ロサンゼルスの高速道路の3地域、7箇所における落橋は、市一帯の交通機能を大幅に低下させ、交通体系に大きな変化を及ぼした。高架橋の構造被害状況はすでに報告²⁾されているので、ここでは平面街路を利用した迂回ルートおよび迂回交通の状況、鉄道システムとの相互連関などについて述べる。

1989年ロマプリエタ地震においては、ベイブリッジの1か月間の通行不能によって、サンフランシスコ湾を横断するほかの橋への迂回交通の発生やBART（湾岸地域高速鉄道）の利用客増がみられるなど、湾岸一帯の交通事情が大きく変化した³⁾。今回の地震では、周辺の平面街路に代替ルートを設定でき、迂回距離が短いという点で有利な反面、交通機能の正常化までの時間が長期に及ぶ点では、より深刻な状況にあるといえよう。

5.1 ゴールデンステート・フリーウェイ(I-5)およびアンテロープ・フリーウェイ(S-14)

I-5は片側4車線、日平均交通量約20万台の西海岸の南北幹線であり、S-14は北方へ通じる日平均交通量約4万台の州道である。

I-5はガビンキャニオンでの落橋、およびS-14とのインターチェンジでの落橋により、通行不能となった。冗長性の乏しいネットワークの弱点での落橋のため、瓦礫撤去前は大規模な迂回ルートが設定された。その後、I-5に沿った旧道を片側2車線の迂回ルートとする措置がとられた。

I-5の通行不能と交通容量の低下により、ロサンゼルス市中心部への通勤者が居住する、サンタクラリタ方面との疎通性が悪化した。このため代替交通手段として、I-5にほぼ並行した通勤者鉄道のメトロリンク（南カリフォルニア地域鉄道公社の軌道を利用）の4路線のうち、1路線であるサンタクラリタ線の利用者が急増した。メトロリンクでは、1日7便を10~11便に増便、車両1便3両を8~12両に増結、新駅の追加、運行区域の拡大、接続バス

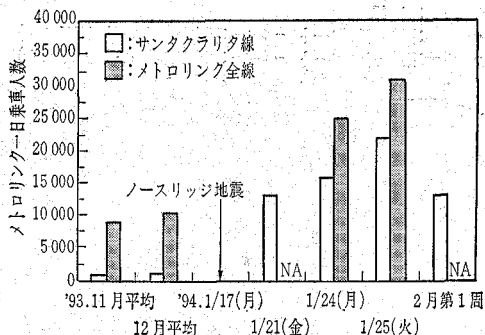


図-3 メトロリンクの1日乗客数の変化

の増便などのサービス向上によって利用促進を図り、市民の交通手段の確保と道路の混雑緩和に寄与した。メトロリンクの利用者数は、図-3に示すように、地震前の平均（1993年11月）で9003人（うちサンタクラリタ線949人）であったが、1月25日には最高乗車人数31276人（同21952人）を記録した。しかし道路の機能的復旧に伴って、2月に入ると減少傾向に転じている。

5.2 サンフェルナンドバレー・フリーウェイ(S-118)

S-118は、ゴシック通り付近での2箇所の落橋などにより通行不能となったため、西向・東向ともにタンパ通りとデボンシャー通りを経由する迂回ルートが設定された（図-4）。大量の迂回交通が流入したデボンシャー通りを信号制御により優先し、交通の円滑化が図られている。迂回ルートの一部である地点1では、S-118とI-5、I-405、I-210との接続が不能となった交通により、1日交通量が地震前の

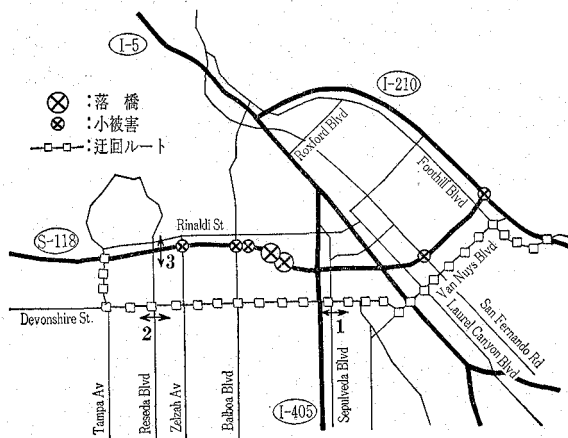


図-4 高速道路S-118の被害と迂回ルート

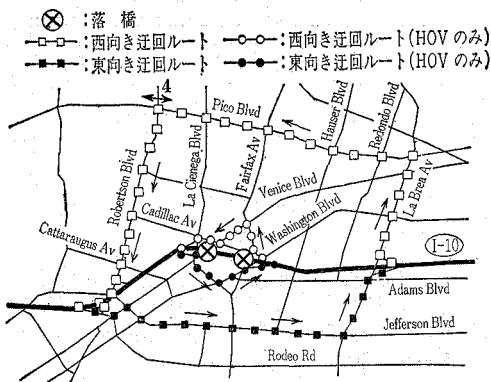


図-5 高速道路 I-10 の被害と迂回ルート

2.4万台から6.0万台に増加した。また、地点2では2.5万台が4.7万台に、地点3では1.5万台が3.8万台となった。

5.3 サンタモニカ・フリーウェイ (I-10)

アメリカで最も混雑する道路といわれる I-10 (1日平均交通量約33万台) は、ラシエネガ通りおよびフェアファックス通り付近の2箇所での落橋のため、ラシエネガ通りからワシントン通りまでの区間が通行不能となった。迂回ルートは、災害復旧の状況と交通事情の変化に応じて段階的に変更されたが、最終的に図-5に示すようになっており、HOV(多人数乗車車両)が優遇されている。迂回ルートの一部である地点4では、地震前の1日交通量3.3万台が、5.6万台へと増加した。

ロサンゼルス市交通局では、交通量、オキュパンシー、走行速度のモニタリングおよびビデオカメラ等による交通監視により、信号や可変交通標識のコンピューター制御を行うスマート・コリドー・システムを I-10 沿線地域に適用している。今回の地震では、迂回交通を優先した信号制御や迂回ルートの変更・追加の際に、これが役立っている。

6. ま と め

ノースリッジ地震により都市ライフライン系は少

なからぬ被害を被り、その機能損失によって、大都市ロサンゼルス市の北部一帯は大きな影響を受けた。電力システムでは、主要変電所が被害を受け、ロサンゼルス市内一帯が数時間から3日間程度、停電した。またこの停電は、米国の西部各地の停電を引き起こすとともに、オレゴン州やカナダの電力供給にも影響した。都市ガス供給網は、貯蔵施設や導管網に被害を受け、一部地域で火災の原因となったり、供給障害を引き起こしたりした。しかし供給停止の大半は、需要家が自らの判断でガスの元栓を締めたためであった。水道システムも、導水路、配水タンク、配水管などにかかりの被害を受け、一部地域で道路の浸水や断水が発生した。しかし貯水量に余裕があり、管路網の修復とともに断水の復旧は比較的早かった。交通システムは、高速道路高架橋の落橋により、都市機能のなかで最も大きな影響を被った。しかし、迂回路の設定や鉄道サービスの緊急強化などの対策が迅速にとられた。

これらの被害を受けた箇所は、これまでの地震と同様に、それぞれのシステムの弱点を突かれた形である。しかし近年、耐震対策が着実に進められており、地震動の大きさや市街地の拡大を考慮すると、被害は少なかったといえよう。また緊急対応などのソフト面でも、明らかに進歩が見られる。我が国と比較して、状況の違いや耐震対策で遅れた面もあるが、大都市の直下型地震が懸念される今日、我が国にとっても、この地震から学ぶ点が多いと思われる。

参 考 文 献

- 1) 大町達夫代表：1994年ロスアンゼルス地震と都市機能障害の調査研究，文部省科学研究費突発災害研究成果，1994。
- 2) 川島一彦：米国ノースリッジ地震被害速報，土と基礎，Vol.42, No.4, pp.75~78, 1994。
- 3) 亀田弘行代表：1989年ロマブリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域等の被害に関する調査研究，文部省科学研究費突発災害研究成果，1990。

(原稿受理 1994.5.12)