

1987年 Whittier Narrows 地震による都市型震害とその分析

亀田 弘行・高田 至郎・森田 環

URBAN SEISMIC DAMAGE CAUSED BY THE 1987 WHITTIER NARROWS EARTHQUAKE

By *Hiroyuki KAMEDA, Shirou TAKADA, and Tamaki MORITA*

Synopsis

Seismic damage in Los Angeles and its east suburban region caused by the 1987 Whittier Narrows Earthquake is reported. After describing the general picture of the earthquake and the damage caused by it, the main body of the paper puts emphasis on the nature of the earthquake that took place in the midst of a metropolitan urban region. Details of damage to lifeline systems are described, including water supply systems, gas supply systems, and electric power systems. On the basis of the dispatch record as the Los Angeles County Fire Department, the seismic damage is analyzed from the point of view of physical process of damage and human response.

1. 緒 言

本報告は、1987年10月に発生した Whittier Narrows 地震に関する被害調査に基づき、同地震による都市型震害に的を絞って考察を加えたものである。この地震は米国カリフォルニア州 Los Angeles 市東郊の、Whittier Narrows と呼ばれるゆるやかな丘陵地帯に震央を持つもので、10月1日午前7時42分にマグニチュード (M_L) 5.9の本震、さらに10月4日午前3時59分には $M_L = 5.3$ の最大余震が発生した。これら2度の揺れにより、Los Angeles 市東部を含む直径20 km程度の地域に被害が発生した。

本地震の被害に関して、文部省科学研究費(突発災害)による研究班(研究代表者:東京大学地震研究所:南 忠夫助教授)が編成され、11月3日から13日まで現地で同地震および地震被害に関する調査を行った。本報告の著者のうち高田は同調査団のメンバーとして、亀田は調査期間の前半のみ同調査団と同行して調査活動に当たった。さらに森田は、得られた資料(主としてLACFD活動記録)の分析を行った。同調査団による総合報告書は別途刊行されるが¹⁾、ここでは、亀田・高田が調査を行ったライフライン系の震害と、Los Angeles 郡消防局の活動記録から浮き彫りにされる都市型震害に焦点を絞って、Whittier Narrows 地震の特徴を報告しようとするものである。

Whittier Narrows 地震は、大地震とは呼べない中規模程度の地震であるが、次に述べる2つの点で同地震は都市の地震防災上重要と考えられる。

(1) はじめに、Whittier Narrows 地震は、 $M = 5.9$ という規模の地震が大都市圏の直下で発生した点に特色がある。これまで、 $M = 6$ は、耐震工学の対象とすべき地震の規模としては下限に近いとされてきた。確かに Whittier Narrows 地震においても、入念な耐震設計・施行が行われているはずの構造物(いわゆる well-engineered structure) の被害は、I-605 の跨道橋などごく小数に限られていた。しか

しながら、都市には耐震的でない構造物や施設も多く、それらが多様な都市震害を引き起こすことが、この地震でも認められた。この様な側面は、より大規模で激しい地震の際には、well-engineered structuresの被害に隠されて十分に議論できないことが多い。この観点からすれば、「被害が出現し始める程度」の地震という意味で、Whittier Narrows地震は、都市地震防災対策上のベンチマーク的な意義を持つ地震と考えられる。

(2) 次に、今回の地震は強震観測網が世界でも最も整備された地域の一つで起ったため、膨大な強震波形記録が得られたことが挙げられる。United States Geological Survey (USGS) では震央距離3~107 kmの52カ所から、California Division of Mines and Geology (CDMG) では震央距離7~114 kmの128カ所から、さらにUniversity of Southern California (USC) では震央を囲む半径約40 kmの範囲内の68カ所の地表観測点から記録を得ている²⁾。これらの250点に及ぶ膨大な強震記録がもたらすであろう地震学ならびに地震工学上の知見は巨大なものとなるであろうが、今回の調査で入手した最大加速度のコンター図のみをもってしても、後に述べるように震害の定量的分析に大きな力を発揮した。この意味で、Whittier Narrows地震は“best recorded earthquake”としても特筆されるものと言えよう。

以下本文では、2. で地震の概要を、3. で地震被害全般の概要を述べた後、4. ではライフラインシステムの被害とその都市地震防災上の留意点を述べる。さらに5. では、消防・救助活動の記録に現れた地震被害の特性を、活動状況の空間的広がり与时系列特性の両面から分析するとともに、このような形で現れた震害の被害率と地震動強度との関係に言及する。

本報告の執筆は、1., 2., 3., 5. を亀田・森田が、4. を高田が主として分担した。

2. 地震の概要³⁾

1987年 Whittier Narrows地震は1987年10月1日現地時間午前7時42分に発生した。マグニチュードは地震発生当初は6.1とされていたが後に5.9に修正された。震央はロサンゼルス中心部(シビックセンター)の東方13.4 km、北緯34度06分、西経118度08分のローズミード市で、震源の深さは約14 kmであった。なおTrifunac²⁾による本震の最大地動加速度のコンター図をFig. 1に示す。10月4日現地時間午前3時59分には $M_L=5.3$ の最大余震が発生した。このマグニチュードも最初は5.5と発表されたが今は5.3に修正されている。震央は本震のその北西約2.5 kmの位置であった。

発生メカニズムは、本震の走行が東西方向、傾斜角27度の衝上断層型であるのに対し、最大余震は走行が北西方向、傾斜角90度の混合型右横ずれ断層と発表されている。

3. 被害の概要⁴⁾

3.1 人的被害

人的被害は本震で死者6人、負傷者数百人、最大余震によっては死者1人、負傷者数人を教えている。死因の内訳は心臓マヒ(2件以上)、駐車場の化粧版落下による圧死(1件)などである。死者が少なかった原因としては、地震の規模が小さかったために顕著な被害を受けた建物がそれほど多くなかったこと、火災が延焼しなかったこと、ブロック塀や看板などが少なくかつ住家が密集していないことなどが考えられる。

3.2 物的被害

(1) 住家

住家(ほとんどが木造である)の被害が最も目立ったのは、Whittier市北部の丘陵地であった。この

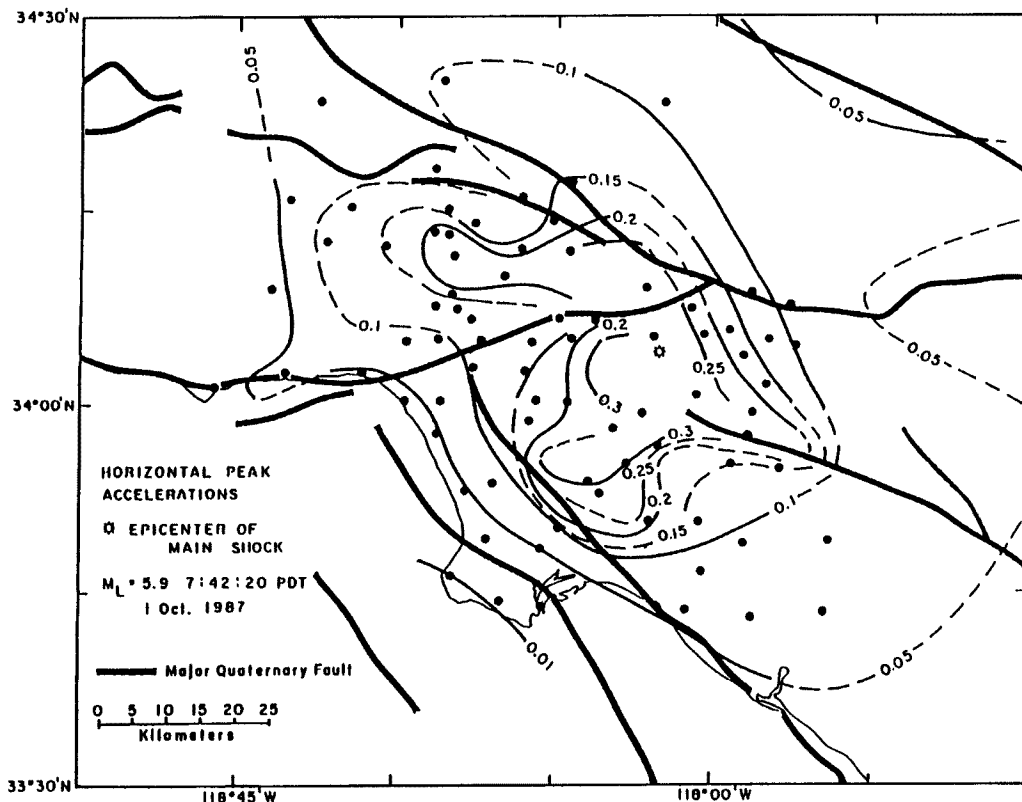


Fig. 1 Contour of Peak Ground Accelerations of 1 Oct. 1987 Whittier Narrows Earthquake

地区の住家の建築年代は広範囲にわたっているが、概して最近の建物の被害は少なかった。1933年ロングビーチ地震 ($M=6.3$), 1971年サンフェルナンド地震 ($M=6.5$) による被害から、基礎の定着、壁の被覆、煙突の補強などの必要性が明らかになり建築形式が改善されてきたからである。しかし十分な補強がなされていない住家に対しては多くの被害がみられた。

その代表的なものが煙突の破損、土台の破壊、壁のひび割れである。煙突については補強のなされていたものに対しても被害があった。ほとんど全ての煙突が倒壊した地域もあった。土台は煉瓦の土台の被害が大きかった。土台に十分定着されていなかった建物は土台に対してずれを生じた。また化粧しっくい施された壁にはひび割れが多くみられた。

(2) 無補強組積造建物

建物の中で最も厳しい被害を受けたのが無補強組積造建物であった。代表的な被害は窓ガラスの破損、控え壁のひび割れ、屋根や壁の倒壊などであった。今回の地震による揺れが激しかったことや無補強組積造建物の地震耐力が非常に低いことを考えると、さらに多くの被害が起っていても不思議ではないと言われているが、これは地動継続時間が短かったためであろう。

ロサンゼルス市には7千棟を超える組積造建物があり、たいへん危険であるので、数年前から市を挙げて改善が施されていた。Pasadena市の完全に倒壊した組積造建物の隣にあった改装中の組積造建物は、多少被害を受けたものの重大な被害ではなく、改装の効果は顕著であった。

(3) 鉄筋コンクリート造建物

Whittier市では2棟の鉄筋コンクリート造の駐車場にかなりの被害があった。そのうち痛烈な被害を受けた駐車場は、スパンドレルが深く、外部の柱が実質的に短くなり、短柱効果で地震時に箭断力が集中し、そのために外部の柱が破壊された。

また、同じ Whittier 市で道路橋の被害があった。場所は 5 号線の上を 605 号線が跨いでいるところで、605 号線の橋脚のうち、5 号線の北行きと南行きの車線の間立っている橋脚の支柱にせん断ひび割れがみられた。他の橋脚にはほとんど被害はなかった。5 号線と 605 号線の交差部は、木材でつかいをするまでの 1 日間閉鎖された。

(4) 鉄骨鉄筋コンクリート造建物

概して構造的な被害は少なかった。しかし上部階では、加速度も揺れ幅も大きく様々な非構造的被害を被っている。代表的なものは天井板の落下、窓ガラスの損傷、エクспанジョン・ジョイントでの変形、器物の転倒などである。

(5) ライフライン系

ライフライン系では、電力施設、水道施設、ガス供給施設に被害があった。このうちガス供給施設は住民が各家庭の元栓を閉じたために地震後 1 カ月以上も供給が停止した地域もありライフライン系の被害の中では最も目立っている。これらの詳細については 4 章を参照されたい。

(6) 火災

Table 1 Causes of Fire Breakouts

causes	no.
*Power lines on grass	1
*Wires down (grass)	1
*Wires down on roof	1
*Electrical short	1
*Flammable gases in smoker unit ignited by electrical failure	1
*Food on stove	1
*Broken gas connection	1
*Lamp fell onto couch	1
Total	8

10 月 1 日には、ロサンゼルス市で約 60 件、ロサンゼルス郡で約 20 件の火災が発生した。最も大きかったのは、ロサンゼルス市中心部のショッピング・センターの火災で約 100 万ドルの損害があった。ロサンゼルス郡消防局は、1 件の構造物火災に差し向ける消防車の数を 4 台から 2 台に減らしたが、それでも対応にかなりの遅れをみた。

余震によるものも含めるとロサンゼルス郡では 28 件の火災が発生したが、ロサンゼルス郡消防局の活動資料によりそのうち 8 件の出火原因をつかめた。その内訳を Table 1 に示す。電力関係の原因が 8 件中 5 件を占めており注目される。日本のように電線が密に張り巡らされている地域では特に注意すべきであろう。

4. ライフラインシステムの被害

4.1 水道施設の被害⁵⁾

(1) 施設の概要

San Gabriel 峡谷と Los Angeles County の海岸平地に囲まれた地域 (Whittier Narrows と呼ばれる) の水道施設に被害が見られた。この地域では、Whittier 市の水道局を含む 20 数個の私設あるいは公共の事業者によって水供給が行われている。主な水源は San Gabriel 峡谷の地下水を汲み上げたものである。補助的に、Metropolitan Water District of Southern California (MWD) から水供給を受けている。MWD の水源は Colorado River と California 州の Water Project である。

(2) 被害の概要

主要水道施設には全く被害が見られなかった。1971 年 San Fernando 地震の際の教訓が生かされ、その後の水道施設に対する地震対策の成果が今回の地震に表れた様である。

(a) 電力供給が一時的に停止したために、深井戸からの汲み上げ用ポンプが停止したが、ガスピストンエンジンで作動する予備ポンプを使用したため基本的には給水停止は生じなかった。しかし、電力関係機関への連絡がスムーズにいかず、混乱を生じた様である。

(b) 150万ガロンPCタンク（1962年建設）、RCタンク（1921年建設）にクラックが入ったが、機能に支障はなかった。タンク流出入部のパイプに破損が生じ、漏水が見られた。また、アンカーボルトが延びてタンク本体が基礎部からずれたものもある。地上貯水タンク（6.5万ガロン、1924年建設）では2本のTension Barが破壊した。

(c) 今回の地震の教訓として水道施設担当事業者（L. V. Lund氏）は次の点を指摘している。

- ・井戸やポンプ場では予備電源として自家発電装置や燃焼ポンプを準備すること。
- ・井戸やポンプ場では停電時に電力関係機関との直通連絡ができるシステムを設置すること。
- ・今回の地震では関係者が勤務時間中であつたので緊急作業が比較的スムーズに進んだが、そうでない場合も十分有り得るので、関係者との連絡手段を確保しておくこと。特に、電話が使用出来ない場合は重要である。
- ・緊急時の復旧作業の訓練をしておくこと。
- ・電話の代わりに、移動無線車との連絡がとれるようにウオーキイ・トーキイを準備しておくこと。
- ・水道関係の建屋や敷地の耐震安全性を点検して、そうでない場合は耐震補強をする必要がある。
- ・特に復旧人員や資材を持っている業者も含めて緊急時の最新の呼び出しリストを準備しておくこと。

(3) Whittier市の水道施設被害⁶⁾

(a) 概要

Whittier市の西部地域にあるSan Gabriel Riverならびに北部の狭谷でのポンプ場から市域に水が供給されている。Fig. 2にはポンプ場、配水池の位置と配水区分を示している。8箇所の配水池で人口約7万人の飲料水、工業用水をまかなっている。これらのポンプ場、配水池は隣接する市域も含めて12マイル四方への水供給施設となっている。Whittier市の水道配水管の総延長は120マイルで、現在さらに10マイルの延長工事がなされている。水道配水管が損傷を受けた付近の詳細な地盤情報は入手していないが、San Gabriel峡谷がすぐ近くに迫ってきており決して軟弱な地盤地帯とは考えられない。なお、Whittier市におけるMMI震度階はVIIIであった。

地震によってWhittier市の水道局事務所のある建物の天井が落下したり、壁にクラックが入ったために使用不可能となり、事務所敷地内にある資材置き場にテントを張って管路施設の復旧作業が続けられた。破損・漏水箇所への復旧には地震発生の日10月1日から10月7日まで要した。その間には10月4日に最大余震のマグニチュード5.3が記録されている。最終的な復旧は10月20日に終了したことが報告されている。復旧作業は一日約20人の作業員を投入して行われ、作業の大半は掘り返しと埋めもどしに費やされたとのことである。

(b) 地中管路の被害

Table 2に損傷を受けた地中配水管の一覧を示している。同表には場所、口径、破損形態、建設年代を示している。損傷箇所が発見された日毎に記しているが、必ずしもその日に破損を受けたとは限らない。従って10月4日以降の破損も10月1日の地震によるものか、あるいは10月4日の余震によるものか明確ではない。Fig. 3は管種別の被害割合

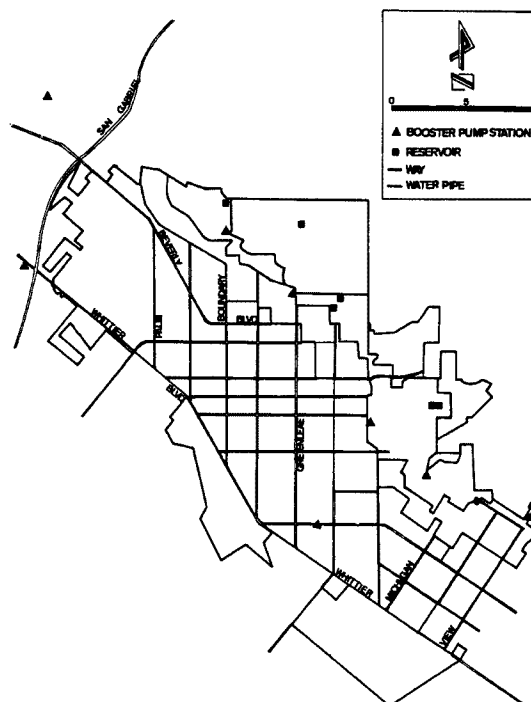


Fig. 2 Locations of Pumpstaions and Reservoirs in the City of Whittier

Table 2 Water Main Breaks in the City of Whittier

10/1/87

1. LA CUARTA @ WHITTIER BLVD. 4inch C.I. Main, Piece blew out, installed 1920.
2. CITRUS @ BEVERLY DR. 6inch C.I. Main, Cylindrical crack, installed 1932.
3. 11741 S. CIRCLE DR. 4inch C.I. Main, Cylindrical crack, installed 1929.
4. BRONTE @ BACON, 6inch C.I. Main, Ruptured, installed 1956.
5. BEVERLY BVD./BTW CIRTUS & PICKERING , 24inch R.C.P. Main, Beam crack, installed 1930.
6. PAINTER @ BROADWAY, Water surfacing from Painter & Beverly Blvd.

10/2/87

7. DORLAND @ MAGNOLIA, 6inch C.I. Main, Cylindrical crack, installed 1938.
8. PAINTER @ SUNSET, 3/4inch Steel, Service leak, Customer side.
9. GREENLEAF @ ORANGE DR., Water surfacing from Orange & Friends.
10. ORANGE @ FRIENDS, 16inch R.C.P. Main, Cylindrical crack, installed 1930.

10/4/87

11. 13502 BEVERLY BLV. (NEAR ALTA) Service, Pulled out of 6inch C.I. Main, installed 1927.
12. 8041 MICHIGAN, Hole in 4inch steel main.
13. 12101 RIDEOUT WAY, 2inch steel service, Section blew out.
14. SOUTH CIRCLE @ NORTH CIRCLE, 6inch C.I. Main, Cylindrical crack, installed 1929.
15. PANORAMA ABOVE ORANGE DR., 24inch R.C.P Main, 2 collars leaking, installed 1967.

10/5/87

16. 11630 WHITTIER BL. (UNIVERSAL AUTO) 8inch x 6inch C.I.
17. 8053 MICHIGAN, Hole in 4inch steel main.
18. NEAR 8053 MICHIGAN, Hole in 4inch steel main.
19. 5630 OMELIA RD., 8inch C.I. Bell cracked, installed 1938.

10/6/87

20. PAINTER & BEVERLY BL. 6inch x 8inch C.I. Tee sheared at flange, installed 1935.
21. 14245 BRONTE, service cock pulled out off main, installed 1948.
22. GREENLEAF BOOSTER STATION 16inch C.I. Bell caulking leak, installed 1930.
23. NEAR 14245 BRONTE, 6inch C.I. Blew out, installed 1948.

10/7/87

24. 11630 WHITTIER BL. (2nd.leak) 8inch x 6inch C.I. Tee sheared at flange.
25. 12906 ORANGE DR. 1 inch Steel service split.

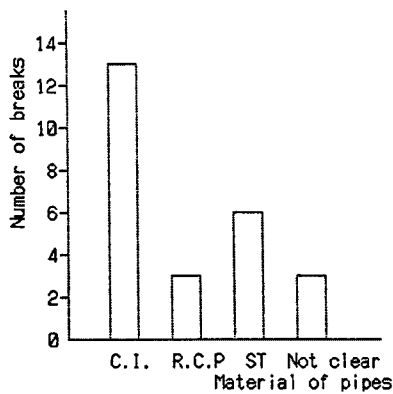


Fig. 3 Number of Pipe Breaks Classified by Materials of Pipe

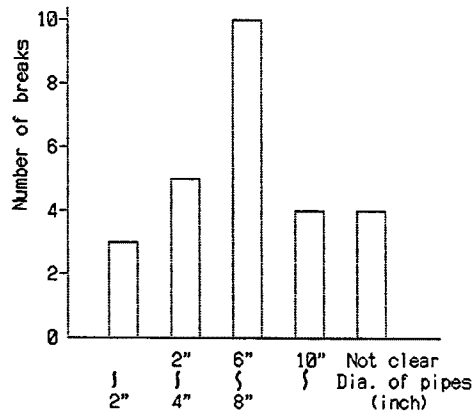


Fig. 4 Number of Pipe Breaks Classified by Pipe Diameter

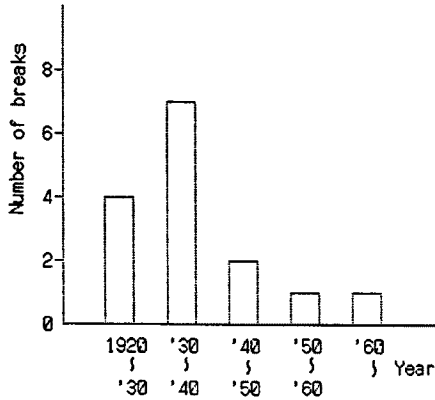


Fig. 5 Number of Pipe Breaks Classified by Construction Year

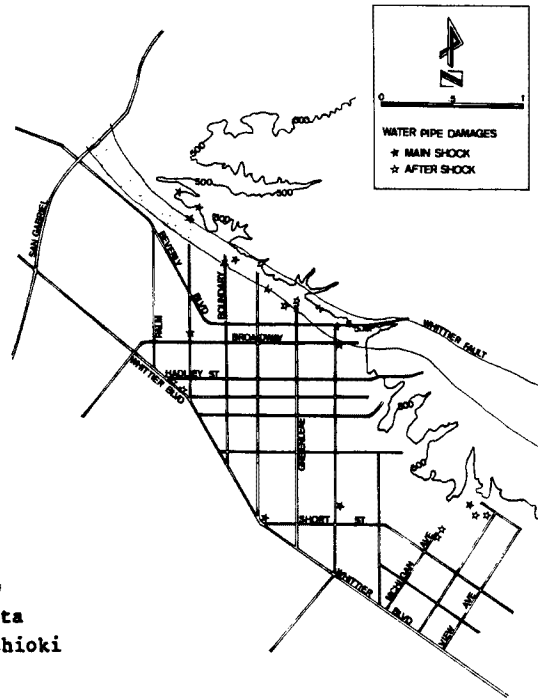


Fig. 6 Location of Pipe Breaks in the City of Whittier

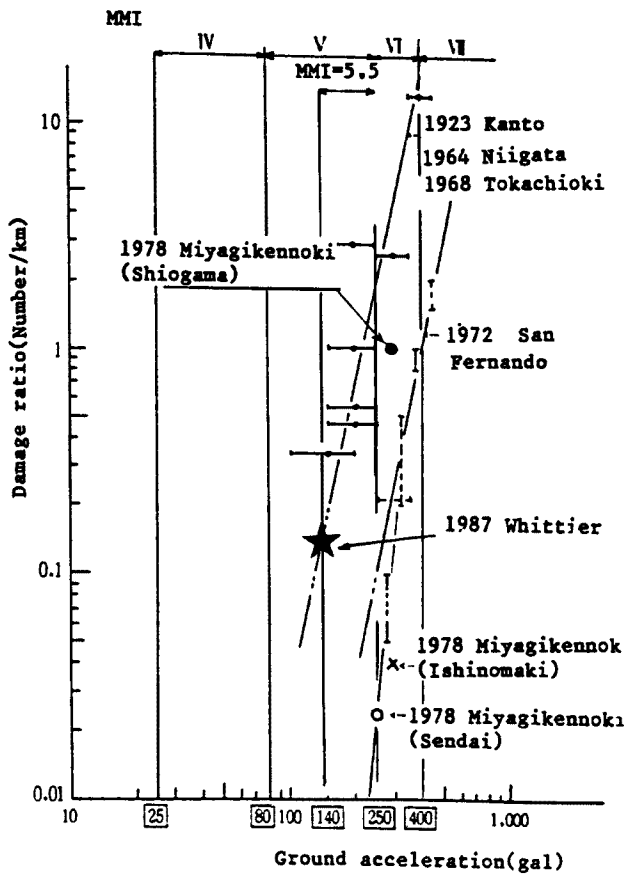


Fig. 7 Damage Ratio of Pipes per 1 km related with Ground Acceleration

を見たものである。鑄鉄管の被害が目立っている。また、Fig. 4 は口径別の被害を示しているが小さい口径の管が壊れ易いという一般的傾向と一致している。また、Fig. 5 は建設年代と破損割合の関係を示しているが古い管路になるほど破損率は増大する。腐食の影響があると考えて良いであろう。

Fig. 6 に Table 2 で示した管路被害の場所を全て示した。今回の地震に関する発震機構の調査・研究からは図中に示す Whittier Fault が直接に運動したものでない事が確認されている。従ってこれらの管路被害は断層運動によるものではなく、断層付近の地質構造の複雑さの要因によって地盤震動による被害が引き起こされたものと考えられる。

配水管の総被害箇所数を Whittier 市における配水管の総延長 120 マイルで除すと 1 km 当りの破損数は 0.12 となる。MMI 震度階の VIII は日本気象庁震度階の V 程度に相当する。気象庁震度階と過去の被害地震における管路の被害率を示したものが Fig. 7 であるが、今回の地震による Whittier 市の被害率も同図の傾向に良く一致している事が知られる。

4.2 ガス施設の被害

(1) 被害の概要

Southern California Gas 会社が地域一帯のガス供給を受け持っている。ガス製造・貯蔵施設は勿論のこと、地中管路の被害も殆ど見られず、4 inch 鋳鉄管の損傷1箇所のみが報告されている。家屋倒壊に伴う屋内サービス管の破損は幾つか見られた。また、Water-heaterがこの地域で使用されているが、腐食を受けた古い機器が震動により損傷を受けてガス漏れを生じたケースも見られた。Los Angeles County の Fire Department の統計によれば地震直後の10月1日から10月5日までにガス漏れ通報によって消防車が出動した回数は101件であった。この間における総出動回数は423件であり、出動理由では圧倒的に大きい割合を占めている。

(2) 誤情報によるガス供給の停止

前述のようにガス主要施設の構造的な被害は全く見られなかったと言って良いが、Whittier市、El Monte市を含むCounty一帯では約16000世帯で比較的長期に亘るガス供給停止の事態が発生した。地震直後、テレビ・ラジオで直ちにガスの元栓を閉じるように報道されたため、多くの家庭ではその指示にしたがって供給管から屋内に入る所のガスコックの閉栓を行った。ガス会社によれば閉栓を行うのはガス漏れの臭いがするか、または管からガスの噴出の音を聞いた場合のみで、地震だからといって直ちに閉栓を行うのは好ましくないとのことである。ガス管路の場合には一度閉栓を行うと、開栓に先立って、ガス器具の栓が閉じているか、屋内配管に損傷がないかを点検して更に管路内の空気抜き作業を行う必要があり、会社の作業員が戸別に訪問して復旧作業に取り掛かる。管路損傷によってガス供給停止が発生したのではなく、点検作業に時間を費やして機能停止をもたらしたものである。

テレビ局のKNBCチャンネル4とKABCチャンネル7ではガス栓を閉じるように放送してほしいとの要請に応じたものであるとの事だが、Southern California Gas会社ではそのような要請をした覚えはないとのことである。緊急時における情報の混乱がガスライフライン機能の停止をもたらしたと言える。勿論、元栓を閉じていなければガス漏れによる火災、爆発を引き起こしていた可能性があることも考えられるが、今回の地震規模では管路被害がほとんどなかった事を考え合わせると、閉栓を行わないのが正しい判断と思われる。緊急時にはガス会社とマスメディアとの緊密な連携によって正しい判断の情報を住民に与えることが必要であった。復旧作業も含めて会社の損失は250万ドルと言われている。

4.3 電力施設の被害⁴⁾

(1) 施設と被害の概要

地震が襲った地域ではSouthern California Edison Company (SCE) と Los Angeles Department of Water and Power (LADWP) によって電力供給がなされている。両システムとも地震直後2-3分から数時間にわたって供給停止が発生し、約50万世帯に影響が生じた。機能被害は少ないといえるが、他のライフライン施設と比較すると構造損傷が一番大きかった。ロス・アンゼルス市の一部3万世帯では地震発生日の10月1日の夜間遅くまで停電状態となった。停電の主な原因は、変電所における保護リレーの切り替えを手動操作で行わなければならなかった事、一次変電所における高圧機器類の損傷、配電線の垂れ下がりや柱上変圧器の落下・延焼などである。損失額は200万ドルと推定されている。

(2) 電力施設の被害

(a) SCE と LADWP における発電施設にはいずれも被害は生じなかった。また、震央から10-20 km 離れた場所にPasadena市とGlendale市によって操業されている発電所があったが被害は生じなかった。

(b) SCE では地震で影響を受けた地域には220 kv で高圧送電を行い、一次変電所で66 kv に、二次変電所で12 kv あるいは16 kv に低電している。鉄塔により送電されている220 kv あるいは66 kv には全く損傷は生じなかったが、12 kv あるいは16 kv の配電線システムには幾つかの被害が報告されている。

(c) SCE に所属するMesa, Center, Del Amo, Lighthype の4つの一次変電所 (Fig. 8) で軽微な被

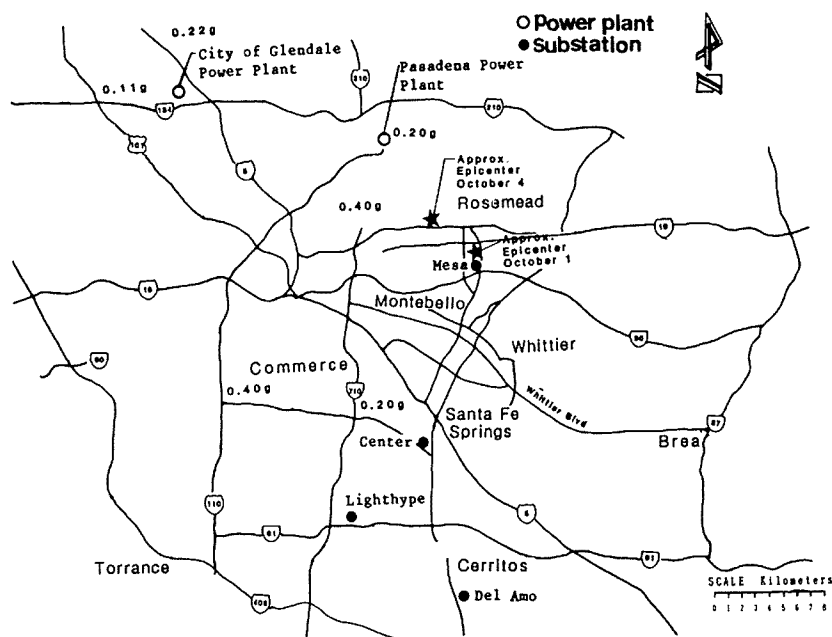


Fig. 8 Location of Power Plants and Power Substations in the Epicentral Area

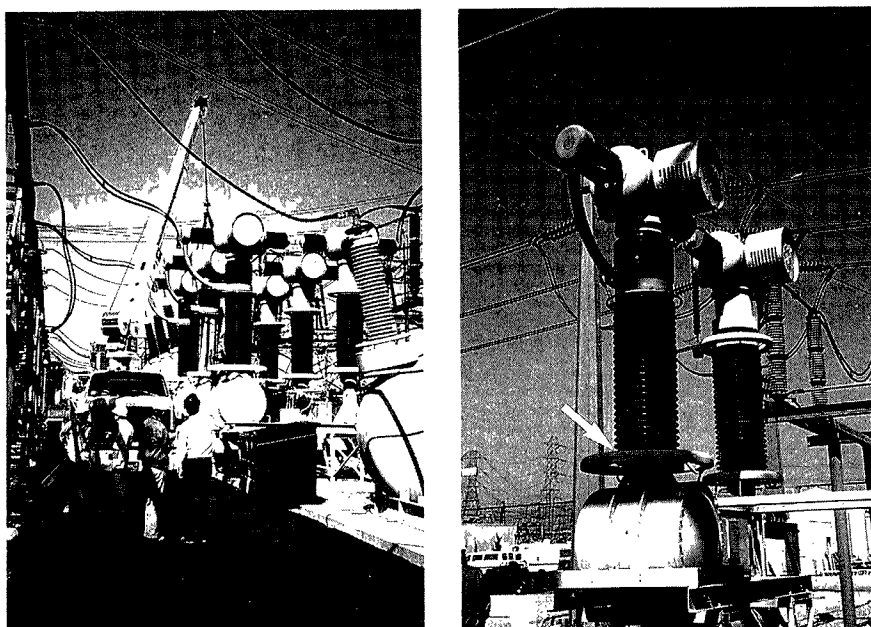


Fig. 9 Damage of Air-Tempered Blast (ATB) Circuit Breakers

害が生じた。何れも Fig. 9 に示すような ATB (Air-Tempered Blast) サーキットブレーカーでのガス漏れ損傷である。また、Mesa 変電所では変圧器の照明の陶器の止め具が落下したり、Center 変電所では ATB サーキットブレーカーの陶器筒所に破損が生じた。いずれの高圧線でも 10 月 1 日の正午までには完全に回復している。

(d) Rosemead にある SCE 本部の局舎の基礎部にせん断クラックが入ったり、天井板の落下、棚の転倒によって SCE では最大の被害を受けた。しかし、緊急時指示等の復旧作業は支障なく行われた。Rosemead は震源に極めて近く、局舎のすぐ南側の地盤上に置かれていた地震計では 0.4 g を記録している。

4.4 電気通信（電話）施設の被害⁷⁾

(1) Pacific Bell 会社の幾つかの中心局 (Central office) と General Telephone 会社の2つの中継局では施設には殆ど被害がなかった。しかし、10月1日、中間欠的に不通状態が発生した。Pacific Bell では時々生じる不通状態に対応するために、トレーラー型の公衆電話を設置したり、Los Angeles のあちこちに設けられた赤十字の救援場所に公衆電話を設けた。General Telephone の Long Beach 中継局ではトラブルが発生したため、移動式の中継局車を出動させた。

(2) 集中局 (Tandem Switching Office) に被害はなかった。エアコンとクーラーが一時的に停止したが予備電源によってすぐに回復した。集中局では時には通常の5倍の通話量に達し、平素より50万以上多い通話が処理されたと推定されている。この影響は端局 (Local End Office) にも及んでダイヤルの呼び出し時間が増加した。回線と交換器のオーバーロードのため、例えダイヤル音が鳴っても実際に通話できない場合が発生した。

(3) AT & T, Independent Carrier, General Telephone, Pacific Bell の各会社では全ての通話が途絶しない様に通話回線のコントロールを実施した。正午までにはそのコントロールも解かれて正常状態となった。全ての局では予め定められた緊急連絡回線を確保した。

(4) 通話量が極端に多くなった理由として担当者 (Pacific Bell: D. J. Stief 氏) は次のような事項を指摘し、今後の対策として配慮すべきことを挙げている。

a) 知人、友人、親戚の安否を気遣う電話が多くなったのと、逆に被災者が様子を知らせる電話が極端に多くなった。

b) ラジオ、テレビ局が現地の情報を得るのに視聴者からの通報を要請したため通話量が増えた。

c) 直ぐに電話がかからなかったら切ってしまうひとが多かった。その場合、又かけ直すと順番が最後にまわってしまって結局通話量の増加となった。更に、途中で切ると局舎のコンピュータが故障と見なし、原因を捜すのに時間を要した。少なくとも話し中の状態であっても30秒は切らずに待つ必要がある。

4.5 ライフラインの停止と復旧に関するアンケート調査

電気・ガス・水道・電話の機能停止と復旧の時刻についてのアンケート調査の結果を示して若干の考察を加える。Fig. 10 はライフライン機能の停止時刻に関するものである。また、Fig. 11 は機能復旧までの日時を公表している。7:42に地震が発生したが電力停止の影響は全て3時間後までに現れ、10月1日中には99%まで復旧した事が分かる。逆に、ガスと電話については10月1日夜中まで機能停止の影響が現れ続け、10月1日中に復旧したのは電話で全体の80%、ガスで60-70%で、10月2日には電話は90%まで回復しているが、ガスの100%の復旧には10月8日まで要している。水道の機能停止の影響は3時間位で全体に及んでいるが、その復旧にはガスと同程度要している。これらの結果は Whittier 市と El Monte 市における調査に基づくものであるが、個々のライフラインの持つ特徴を良く表していると言

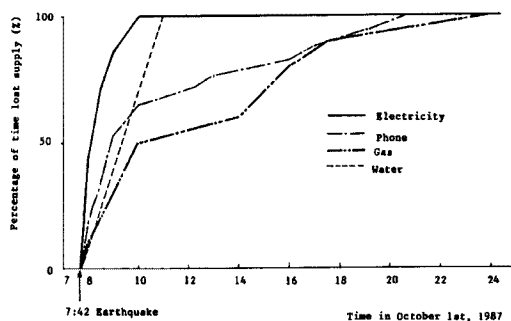


Fig. 10 Percentage of Time Lost Supply of Lifelines

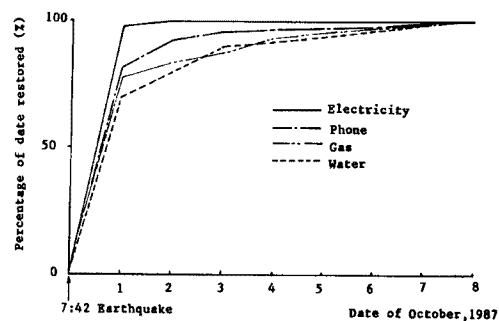


Fig. 11 Percentage of Data restored of Lifelines

える。即ち、電力は極めて冗長性に富むシステムであり、例え構造的な損傷があってもその回復は速い。逆にガスシステムは一旦停止の状態になれば点検に時間を要して復旧作業は難航する。漏水現象がじわじわと現れる水道システムも同様である。電話システムは緊急時こそ、その機能を最大限に発揮してほしい施設であり、通話制限は勿論大事であるが、オーバーロードにシステム的に対応できることが望まれる。

5. 消防・救助活動からみた震害の様相

5.1 概要

ここでは、ロサンゼルス郡消防局 (Los Angeles County Fire Department; 以下 LACFD と略称) の活動記録をもとに、Whittier Narrows 地震による被害の特徴を分析する。LACFD は、Fig. 12 に示したように、主としてロサンゼルス市の東側に広がる 41 の行政区域に出動している。この中には、特に被害が多かった Rosemead (本震の震央がある)、East Los Angeles, Whittier などの郊外都市を含む。

Fig. 13 に、本章での被害分析の基礎となる LACFD の活動の日時、場所、および活動内容の一例が示されている。

以下、この活動記録に現れた震害の特徴を論ずる。

5.2 地域特性と震度階・加速度

Fig. 12 中の各市域における人口、総面積、市街地面積および建物の床面積を Table 3 に示した。同表のデータは主として Scawthorn⁸⁾ による。同表中の Los Angeles 市は LACFD の管轄ではないが、地理的位置関係から LACFD で出動した事実がある。また、これらの地域における最大加速度と震度階 (MMI) を Table 4 に示した。同表の加速度は、Trifunac²⁾ によるコンター図を内挿して、各地域の平均的な値を求めたものである。

5.3 LACFD の出動対象となった被害項目とその分布

ここで対象とする LACFD の記録では、10月1日の本震および10月4日の余震によると見られる被害の通報と出動要請を逐一見ることができる。大部分の通報は各々の地震が発生した日に集中しているが、場合により10月7日まで及んでいるものもある。

出動記録に現れる被害を分類すると以下の通りである。() 内は被害件数である。

- (1) FIRE (28)
 - (2) BUILDING COLLAPSE (6)
 - (3) MAJOR STRUCTURAL DAMAGE (26)
 - (4) MINOR STRUCTURAL DAMAGE (11)
- (2), (3), (4) の3つは資料中の分類そのままである。ただしこの3つをどういう基準で分類しているかについての記述はなかった。しかしほぼ全壊、半壊、一部壊に相当すると思われる。
- (5) NON-STRUCTURAL DAMAGE (5); ガラス、天井、間仕切り壁など非構造部材の被害
 - (6) DAMAGE OF STREET FACILITIES (9); 電柱、レンガ塀など路上施設の被害
 - (7) DAMAGE OF CHIMNEY (12); レンガ造建物の煙突の被害
 - (8) BROKEN SPRINKLER (19); このうち浸水を生じたものは(9)にも含めた。
 - (9) FLOODING, WATER LEAK (32); 主として屋内での浸水、水漏れ
 - (10) BROKEN WATER LINE, MAIN PIPE (11); 送水管、配水管、給水管の損傷
 - (11) GAS LEAK (96); 主として屋内でのガス漏れ
 - (12) BROKEN GAS PIPE, LINE (6)
 - (13) WIRES DOWN etc. (43); 配電線、送電線などの被害

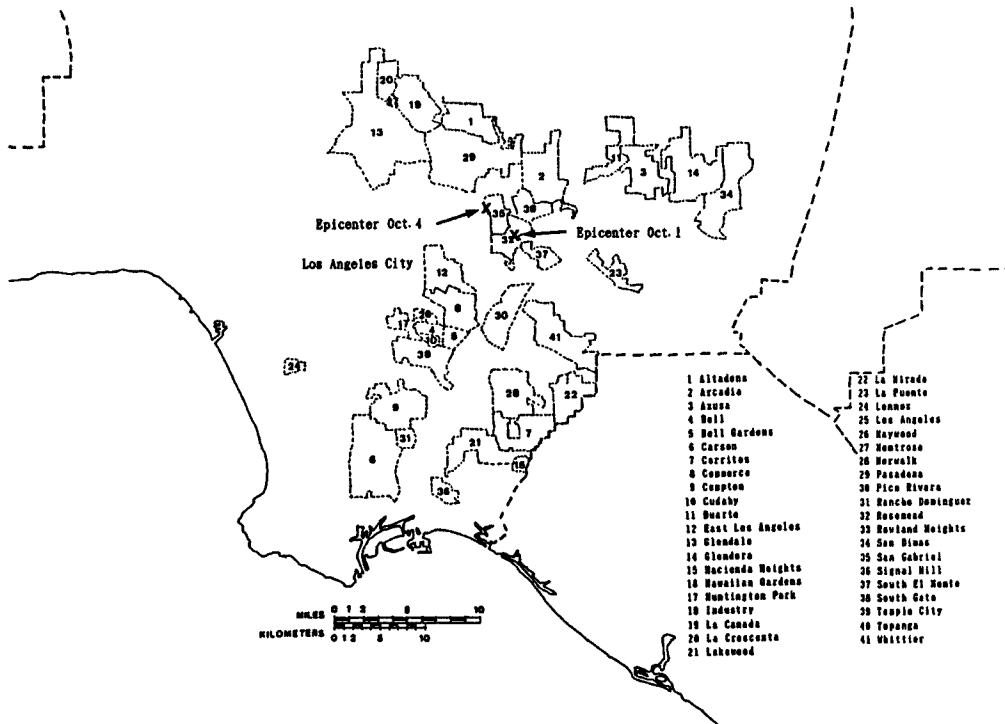


Fig.12 Service Area of the Los Angeles County Fire Department

EARTHQUAKE RELATED INCIDENTS
October 1, through October 5, 1987

STA.	DATE	TIME	ADDRESS	DESCRIPTION
1	10/1	1040	125 N. Nevada, East L.A.	RESCUE - #9066276 & 9065313 (Emotional)
1	10/4	0440	3515 E. City Terrace, East L.A.	MISC. - Chimney down across wires
1	10/4	0445	1115 1/2 N. Ditman, East L.A.	MISC. - Wires down
1	10/4	0723	827 N. Rowan, East L.A.	MISC. - Wires down
2			NO EARTHQUAKE RELATED INCIDENTS	
3	10/1	0740	800 S. Ditman, East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4953 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	912 S. Duncan, East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4736-40 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4718 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4709 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4711 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4534 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4532 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4518 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4153 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	4000 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage
3	10/1	0740	3984 Whittier Bl., East L.A.	MISC. - Major structural damage

Fig.13 Data Output from the LACFD Activities

Table 3 Regional Characteristics of Los Angeles County

	POPULATION	TOTAL AREA	URBAN AREA	BUILDING AREA
Altadena	39.4			
Arcadia	47.5	11.2	7.0	49.3
Azusa	34.5	8.0	2.7	29.5
Bell	27.1	2.8	2.5	17.1
Bell Gardens	36.2	2.4	1.9	32.0
Carson	85.3	19.0	6.7	59.6
Cerritos	55.6	8.8	6.2	49.2
Commerce	11.9	6.6	1.0	10.5
Compton	87.4	9.8	6.9	46.9
Cudahy	19.5	1.1	1.0	17.3
Duarte	19.7	7.4	5.6	20.5
East Los Angeles	100.8			
Glendale	148.8	30.6	15.3	80.4
Glendora	40.3	14.9	7.5	38.1
Hacienda Heights	43.0			
Hawaiian Gardens	11.4	1.0	0.6	8.0
Huntington Park	49.7	3.0	2.7	31.4
Industry				
La Canada	20.1	8.6	4.3	20.9
La Crescenta	14.9			

	POPULATION	TOTAL AREA	URBAN AREA	BUILDING AREA
Lakewood	75.0	9.6	8.6	26.8
La Mirada	41.2	7.8	3.9	32.7
La Puente	32.3	3.5	2.5	62.3
Lennox				
Los Angeles	2966.8			
Maywood	23.5	1.2	1.1	14.8
Montrose				
Norwalk	86.3	8.6	6.0	37.9
Pasadena	126.6	23.1	13.9	74.5
Pico Rivera	56.9	8.2	4.9	45.2
Rancho Dominguez				
Rosemead	45.4	5.5	2.8	29.2
Rowland Heights	23.2			
San Dimas	27.4	15.9	4.0	23.4
San Gabriel	31.7	4.0	3.2	28.5
Signal Hill	7.6	2.1	1.3	6.7
South El Monte	18.3	3.0	1.8	16.2
South Gate	74.8	7.5	5.3	33.3
Temple City	30.7	3.8	3.2	23.4
Topanga	1.8			
Whittier	70.5	12.8	9.6	56.1

Popul.(Thous); Area(sq. mi); Bldg Area(mill. sq. ft)

Table 4 Peak Ground Acceleration (in g) and MM Intensity

	MAINSHOCK	AFTERSHOCK	MMI
Altadena	0.25	0.25	7
Arcadia	0.25	0.20	7
Azusa	0.10	0.05	6
Bell	0.30	0.20	7
Bell Gardens	0.30	0.20	7
Carson	0.10	0.05	6
Cerritos	0.20	0.15	6
Commerce	0.30	0.30	7
Compton	0.30	0.10	6
Cudahy	0.30	0.20	7
Duarte	0.15	0.10	6
East Los Angeles	0.35	0.30	7
Glendale	0.25	0.15	6
Glendora	0.05	0.05	5
Hacienda Heights	0.25	0.15	6
Hawaiian Gardens	0.15	0.15	6
Huntington Park	0.25	0.15	7
Industry	0.20	0.10	6
La Canada	0.25	0.20	6
La Crescenta	0.20	0.15	6

	MAINSHOCK	AFTERSHOCK	MMI
Lakewood	0.25	0.10	6
La Mirada	0.15	0.15	7
La Puente	0.20	0.10	6
Lennox	0.10	0.05	6
Los Angeles	0.20	0.15	7
Maywood	0.25	0.20	7
Montrose	0.20	0.15	6
Norwalk	0.20	0.20	7
Pasadena	0.25	0.25	7
Pico Rivera	0.35	0.35	7
Rancho Dominguez	0.20	0.05	6
Rosemead	0.35	0.30	7
Rowland Heights	0.20	0.10	6
San Dimas	0.05	0.05	5
San Gabriel	0.30	0.25	7
Signal Hill	0.10	0.05	6
South El Monte	0.30	0.30	7
South Gate	0.30	0.15	7
Temple City	0.25	0.25	7
Topanga	0.05	0.05	5
Whittier	0.35	0.30	8

- (14) ELECTRICAL SHORT (5)
 - (15) RESCUE (INJURY) (23); 負傷
 - (16) RESCUE (OTHERS) (63); 負傷を除く救助
 - (17) FALSE ALARM (17); 人による誤報と警報機の誤報
 - (18) PUBLIC ASSIST (3); 住民に対する援助
 - (19) HAZARDOUS MATERIAL (19); GAS LEAK を除く危険物漏洩
 - (20) OTHERS (10); 廃屋の点検, 煙突の調査など他の項目に入れられないもの
- 以上(1)~(20)を合計すると444件となる。

全体の中で、火災(1)が占める割合はあまり高くなく、構造物被害(2,3,4)、屋内水道管の破壊による浸水(9)、屋内のガス漏れ(11)、電線のたれ下がり(13)、救助(15,16)などが同等以上の件数を示している。これらのうち、FLOODING, WATER LEAK, および GAS LEAK の多くは、家庭用ボイラーへの取付配管が熱疲労と腐食で劣化していたところに地震動を受けて破損したことによるとされており、米国の居住環境をも反映した都市型震害の特徴を示すと考えられる。FIRE (1), MAJOR STRUCTURAL DAMAGE (3) および GAS LEAK (11) の出動地点を、本震による地動加速度のコンター図²⁾とともに示したのが Figs. 14~16 である。大部分の被害が加速度が0.25 g以上の地域内で発生していることがわかる。

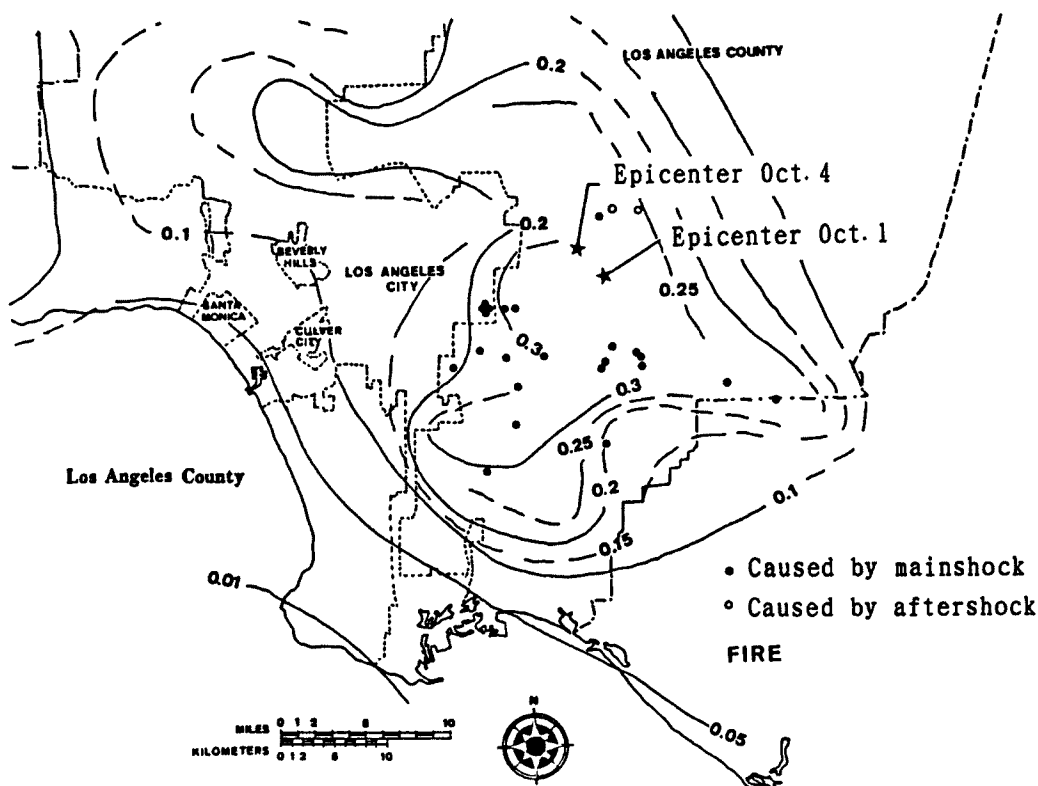


Fig. 14 Locations of Fire Breakouts

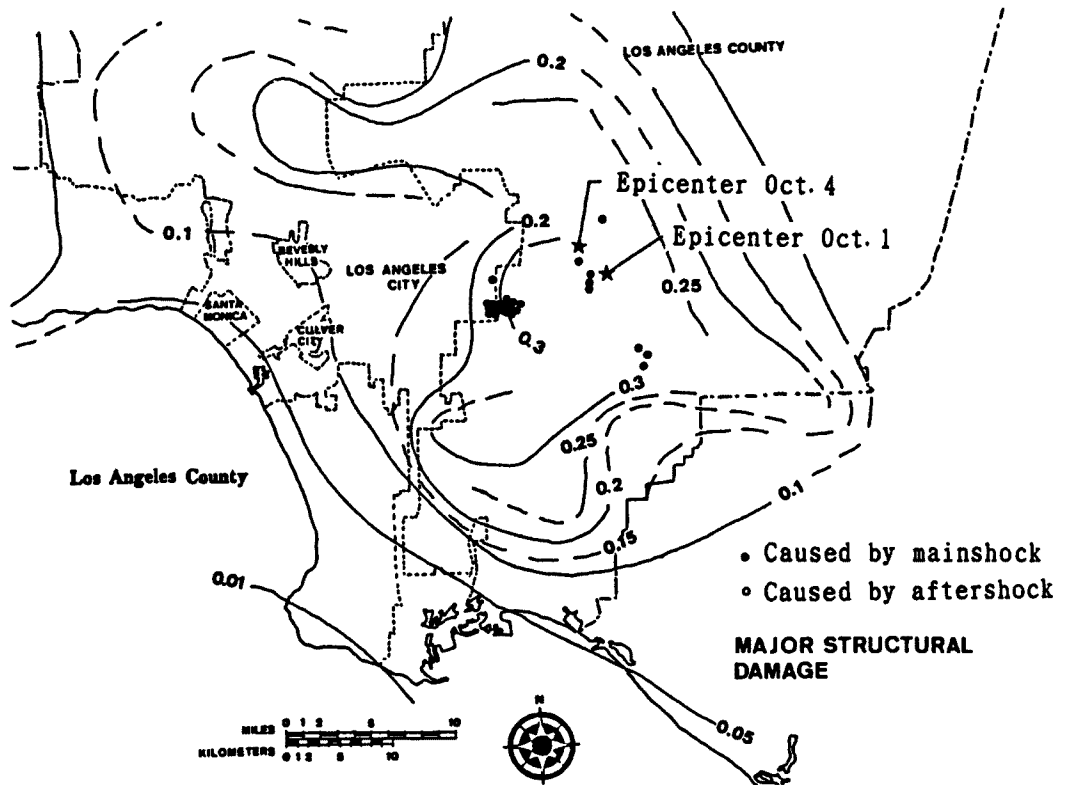


Fig. 15 Locations of Major Structural Damage

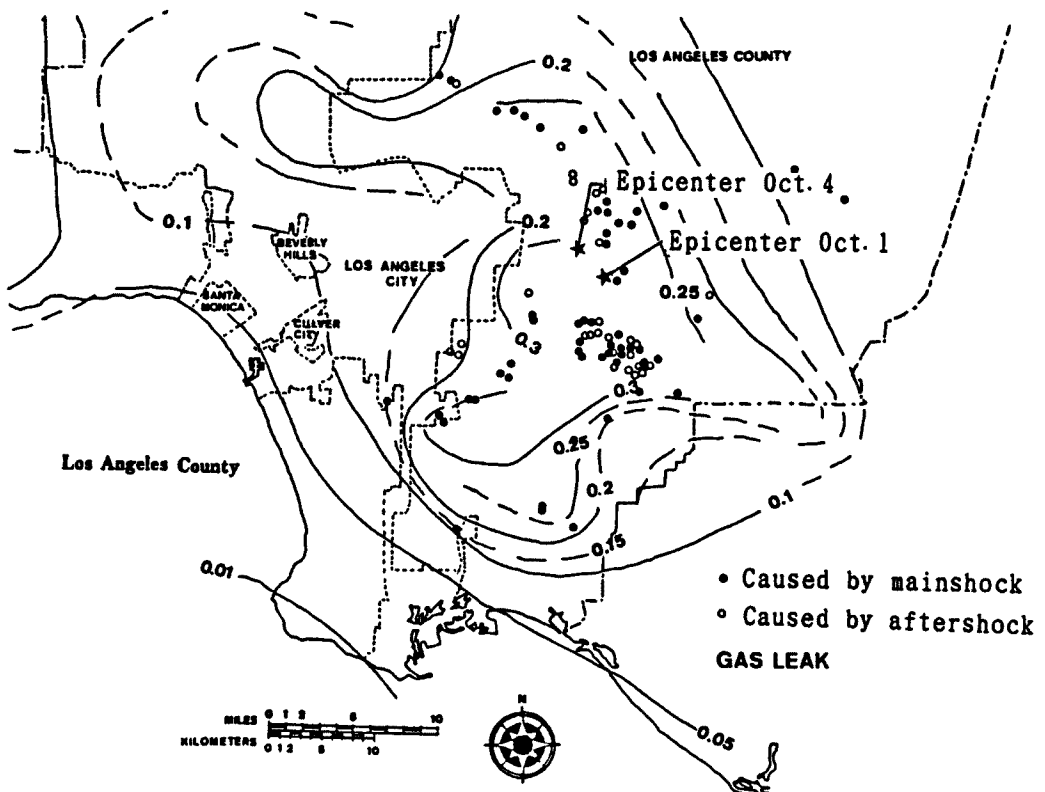


Fig. 16 Locations of Gas Leaks

5.4 LACFDの活動からみた震害の特徴

上述のデータに基づき、Whittier Narrows地震による震害の分析を試みる。ここでは、①出動の時系列的な経過と②地震動強度と被害発生との関連、の2つの側面から分析を行うこととする。本節では以下の被害項目を中心に取り上げる。(カッコ内は5.3の被害項目番号)。

- a. FIRE (1)
- b. MAJOR STRUCTURAL DAMAGE (3)
- c. FLOODING, WATER LEAK (9)
- d. GAS LEAK (11)
- e. RESCUE (INJURY と OTHERS を合併; 15,16)

(1) 時系列的経過

Fig. 17 に、各被害項目に関するLACFDの出動の時系列的経過を示した。同図の(a)~(e)は、上記の被害項目a~e.と対応している。また、同図中には、全出動回数と、そのうちの最大余震後の回数と割合が示されている。この結果より、被害項目によっていくつかの特徴がみられる。

まず、FIRE (Fig. 17 (a)) や MAJOR STRUCTURAL DAMAGE (Fig. 17 (b)) のように、地震直後に発見され易く、かつ緊急の対応を要する被害項目では、出動は地震の直後に集中している。これに対し、FLOODING, WATER LEAK (Fig. 17 (c)), GAS LEAK (Fig. 17 (d)) のように、地震後ある程度時間を経て影響が現れたり発見されることも多い被害項目については、本震の後、終日出動が続いている。RESCUE (Fig. 17 (e)) はこれら2つのグループの中間的な傾向を示しているが、この中には救助の緊急度の差異に関する要請側、出動側双方での判断が含まれると考えられ、個々のケースに立ち入った考察が必要と考えられる。

(2) 被害率と地震動強度の関係

震害の激しさは同じ地震動強度でも被害項目によって異なる。また、地震動強度が高くなると、当然被害は増大するが、その様相も被害項目によって異なる。こうした観点から、ここでは主として被害率と最大地動加速度の関係を調べる。そのため、はじめに被害率を次のように定義する。

○建物・設備関係

$$\text{被害率} = (\text{被害件数}) / (\text{推定建物棟数: SFED})$$

○救助関係

$$\text{被害率} = (\text{救助件数}) / (\text{人口})$$

ただし、推定建物棟数を示すSFEDはSingle Family Equivalent Dwellingsの略で、Scawthorn⁸⁾により、建物延べ床面積1500 sq. ft (約140 m²) を1棟の個人住宅とみて次のように定義されたものである。

$$\text{推定建物棟数 (SFED)} = (\text{建物延べ床面積 (sq. ft)}) / 1500$$

Fig. 18 に被害率と最大地動加速度の関係の中から典型的な3例を示した。同図(a)のFIREは、0.1 g以上で発生し始め、0.3 gを超えると急に発生率が高くなる。(b)のFLOODING, WATER LEAKは0.25 g以上で発生するが、同図の加速度の範囲では発生率が加速度とともに上昇する傾向がみられない。また(c)のMAJOR STRUCTURAL DAMAGEは0.3 g以下では全く発生しないが、このレベルを超えると被害率が急に高くなる。

以上の特性を類型化すると、それぞれFig. 19のような3つのタイプに分けられよう。このうち、Type-Iは、より大きな加速度範囲までを考えればType-Iに移行する可能性があると考えられる。精密な定量的議論を行うのではなく、被害の大まかな全体像を把握することを目的とするのであれば、他の被害項目についてもFig. 19のいずれかのタイプに分類できる。

Fig. 19において、 a_1 は被害が出現し始める加速度レベル、 a_2 は被害が顕著になる加速度レベルを示すと解釈される。これらの加速度レベルと最大被害率を各被害項目毎にTable 5に示した。これらの値は

Whittier Narrows 地震における経験として、今後の都市震害を論ずる際の一つの目安になりうるであろう。このデータの範囲からは、 a_1 は被害項目によって異なり 0.1 ~ 0.25 g、 a_2 は 0.3 g 以上という値が示されている。

上の考察では、被害率と最大地動加速度の間に Fig. 19 のような非線形な関係があることを論じてきた。こうした特性が物理的にみて妥当であるか否かを最終的に判断するには、より現象の細部に踏み込んだ検討が必要であろう。さらに、ここで用いたデータは、LACFD の出動の対象となった被害であって、この地域で生じた被害が網羅されているとは限らないことにも注意しておく必要がある。

地震動強度として最大地動加速度の代わりに震度階 (MMI) を用いると、かなり異なる結果が得られる。例えば、Fig. 18 (b) の横軸を MMI にしてデータをプロットし直すと Fig. 20 が得られる。この例では被害率と MMI の関係はかなり線形的なものになっている。震度階が元来被害の程度に基づいて決められているという観点からは、これは当然の結果と言えよう。しかしながら、この事は地震動強度の指標として震度階が優れていることを必ずしも意味しない。地震危険度予測やマイクロゾーニングなど、都市地震防災に不可欠の解析や資料作成を行うためには、物理的意味の明確な地動パラメータを媒介とすることが重要で、この点に本節で行った分析の意義があると考えられる。今後、強震記録の解析が進むのを待って、最大加速度以外の地動パラメータ (速度、全パワーなど) と被害率の関係を調べることも重要であろう。

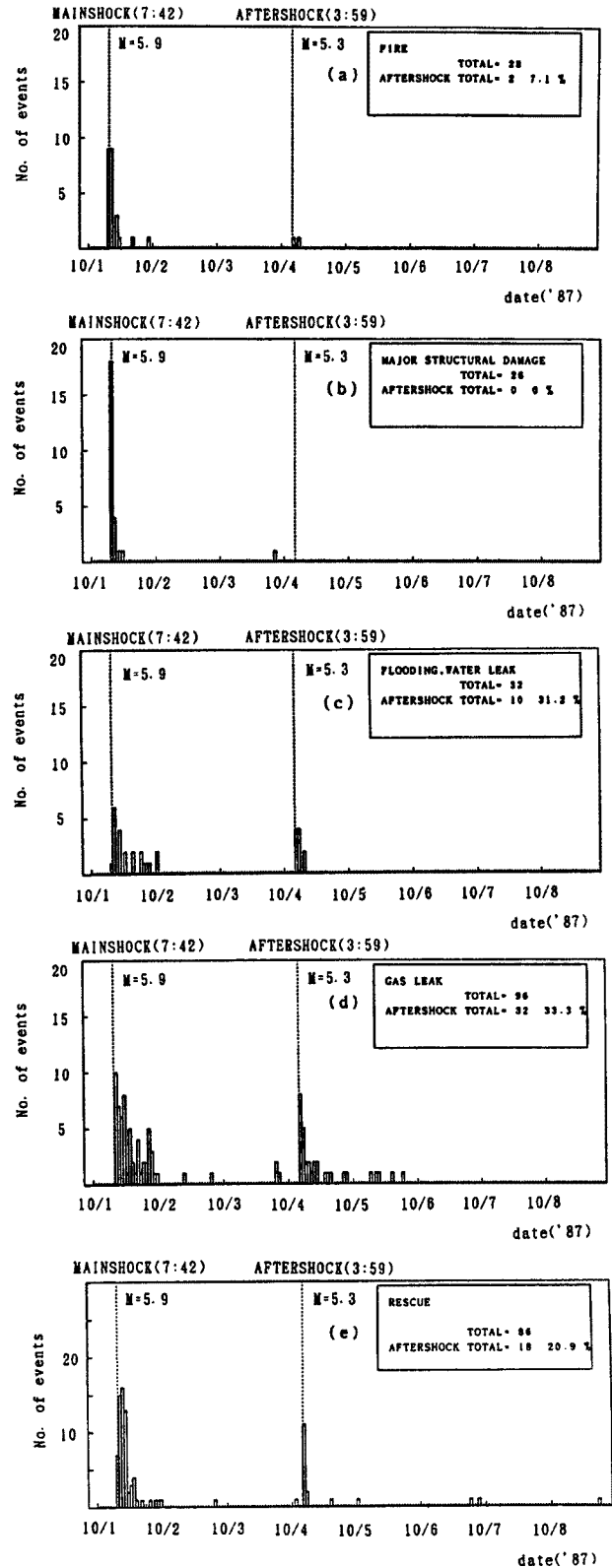


Fig. 17 Time Series Plots of LACFD Activities

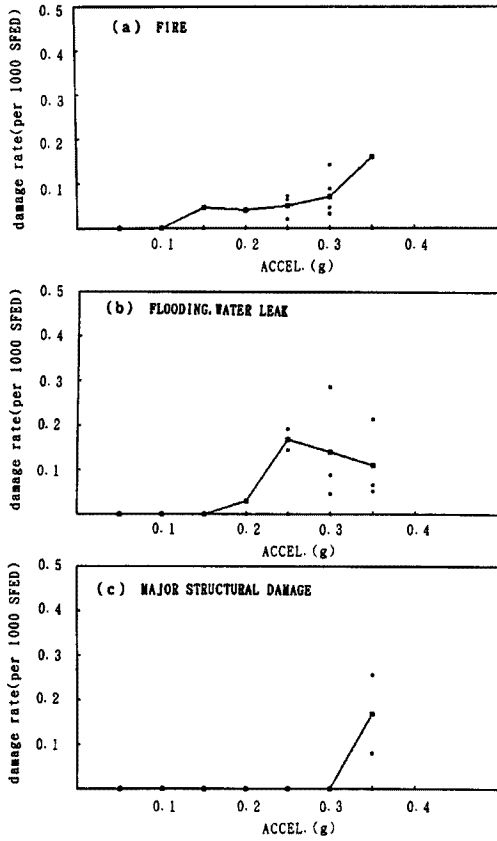


Fig. 18 Damage Rate vs. Peak Ground Acceleration

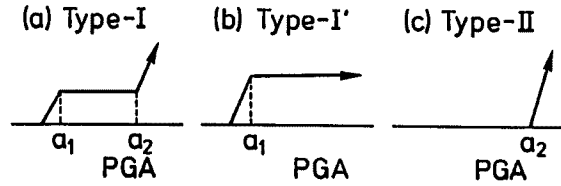


Fig. 19 Typical Relation between Damage Rate and PGA

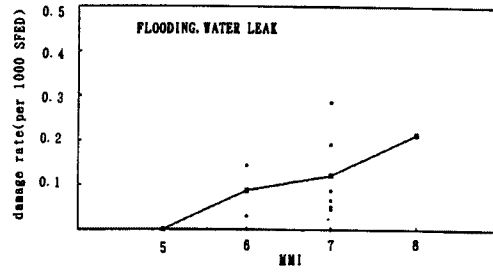


Fig. 20 Damage Rate vs. MM Intensity (flooding, water leak)

Table 5 Dependence of Damage Rate on Ground Acceleration

damage category	type of dependence (See Fig. 19)	critical level of ground acceleration(g)		maximum observed damage rate	max value of conditional mean for damage rate
		a_1	a_2		
a.(FIRE)	I	0.15	0.3	0.160 *	0.160 *
b.(MAJOR)	II	—	0.3	0.257 *	0.169 *
c.(MINOR)	I'	0.1	→	0.241 *	0.137 *
d.(FLOODING)	I'	0.25	→	0.286 *	0.168 *
e.(GAS)	I	0.2	0.3	0.401 *	0.262 *
f.(WIRE)	I'	0.25	→	0.714 *	0.714 *
g.(RESCUE)	I'	0.1	→	0.198 **	0.139 **

(* : per 1000 SFED ; ** : per 1000 persons)

6. 謝 辞

本地震の調査では、文部省調査団の南 忠夫団長をはじめ団員の方々に一方ならぬ御世話になった。また、短期間で多くの知見を得ることができたのは、ひとえに米国で長らく活躍する友人の御助力の御陰である。特に、わざわざサンフランシスコから飛来して、LACFD の調査を設定して頂いた EQE の C. Scawthorn 博士、ロサンゼルス地域における強震観測の現状を詳しく御教示頂いた南カリフォルニア大学の M. D. Trifunac 教授に厚く御礼申し上げる。さらに、調査に快く御協力下さった Whittier 市、Los Angeles 市水道・電力局、Los Angeles 郡消防局 (LACFD) の関係各位に深謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 文部省重点領域研究班；1987年ロスアンゼルス地震と都市機能障害の調査研究（研究代表者：南忠夫）報告書，昭和63年3月
- 2) Trifunac, M. D., "A Note on Peak Accelerations during 1 and 4 October, 1987, Earthquakes in Los Angeles, California," personal communication, Jan. 1988.
- 3) United States Geological Survey, "Preliminary Evaluation of Structures: Whittier Narrows Earthquake of October 1, 1987," Oct. 1987.
- 4) EQE, "Summary of the October 1, 1987 Whittier, California Earthquake: An EQE Quick Look Report," Oct. 1987.
- 5) L. V. Lund, "Whittier Narrows Earthquake—October 1, 1987 Performance of Water Life-line Systems," Nov. 1987.
- 6) City of Whittier, "Master Plan Update Facility and Vicinity Map,"
- 7) D. J. Stief, "Critique of Telephone System Performance October 1, 1987—During and After 6.1 Earthquake," 1987.
- 8) Scawthorn, C., "Fire Following Earthquake," All-Industry Research Advisory Council, March 1987.