



土 木 研 究 所 資 料

第 7 2 1 号

サンフェルナンド地震と地質

昭 和 4 7 年 2 月

建 設 省 土 木 研 究 所
地 質 研 究 室

ま え が き

1971年2月9日、アメリカ合衆国カリフォルニア州サンフェルナンド地区に発生した地震と、その被害のニュースは、地震国である我が国の人々を非常に驚かせた。

なかでも、地震に関するさまざまな関連分野の研究や業務にたずさわる人々、および地震による被害をできるだけ少くするように努力している都市・建築・土木構造物、あるいは山地防災関係者にとっては、これらのニュースは大きなショックを与えると同時に多くの関心を呼びおこした。

地質研究室においても、地質・地質構造と地震およびそれによる災害との関連について、でき得るかぎり資料を集めるよう努力してきた。

今回、U.S. Geological Survey と National Oceanic and Atmospheric Administration の編によるサンフェルナンド地震の調査速報 (Geological Survey Professional Paper 733) が発表された。

この報告は、これまでの調査の速報的なまとめであり、我が国の地震関連の研究にも非常に役にたつと考えられるので、上記のなかから、その一部を訳出した。

速報的な報告にもかかわらず、徹底した綿密な現地踏査と結論の導き方には教えられるものがあると共に、このような突発的災害に対して、直ちに、多数の専門家が動員されて、短期間に精力的な調査が行なわれ、数ヶ月後に、250ページ以上の報告書 (2525c) が発行されたという点にも学ぶべきものがある。

ここに訳出したものは、53の短報のうち、主として地質、地盤変状、地すべりおよび山崩れに関連する9編 (原文ページ数77) である。これらはたんに地質研究室として関心が大きいというだけでなく、この報告書の重要な部分の一つであるといえる。

訳出を急いだあまり、不十分な翻訳となっているかもしれないがお許しを願いたい。

なお、報告書 (原文) の総目次と協力機関を付記しておく。

昭和47年2月

建設省土木研究所

地質研究室長

岡 本 隆 一

THE SAN FERNANDO, CALIFORNIA, EARTHQUAKE OF FEBRUARY 9, 1971

- ✱ Introduction, by Arthur Grantz, U.S. Geological Survey
- An estimate of the damage, by Reuben Kachadoorian, U.S. Geological Survey
- ✱ Geologic setting and activity of faults in the San Fernando area, California, by Carl M. Wentworth and R.F. Yerkes, U.S. Geological Survey
- Main shock and larger aftershocks of the San Fernando earthquake, February 9 through March 1, 1971, by C.R. Allen, G.R. Engen, T.C. Hanks, J.M. Nordquist, and W.R. Thatcher, Seismological Laboratory, California Institute of Technology
- Precise locations of aftershocks of the San Fernando earthquake 2300 (GMT) February 10 — 1700 February 11, 1971, by Thomas C. Hanks, Thomas H. Jordan, and J. Bernard Minster, Seismological Laboratory, California Institute of Technology
- Aftershocks of the earthquake, by R.L. Wesson, W.H.K. Lee, and J.F. Gibbs, U.S. Geological Survey
- Fault-plane solutions of the February 9, 1971, San Fernando earthquake and some aftershocks, by James H. Whitcomb, Seismological Laboratory, California Institute of Technology
- Microearthquakes on the San Andreas fault and aftershocks of the San Fernando earthquake, by Christopher H. Scholz, Lamont-Doherty Geological Observatory of Columbia University
- Preliminary source parameter determination of the San Fernando earthquake, by Max Wyss, Lamont-Doherty Geological Observatory of Columbia University
- ✱ Pattern of faulting and nature of fault movement in the San Fernando earthquake, by Barclay Kamb, L.T. Silver, M.J. Abrams, B.A. Carter, T.H. Jordan, and J.B. Minster, Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology
- ✱ Surface faulting, by U.S. Geological Survey staff
- Strains and tilts associated with the San Fernando earthquake, by Pierre Jungels and Don L. Anderson, Seismological Laboratory, California Institute of Technology
- Preliminary measurements of tectonic movement, by R.O. Burford, R.O. Castle, J.P. Church, W.T. Kinoshita, S.H. Kirby, R.T. Ruthven, and J.C. Savage, U.S. Geological Survey
- Repeated surveys of small scale figures established across surface fault ruptures following the earthquake, by John C. Lahr and Max Wyss, Lamont-Doherty Geological Observatory of Columbia University, and James A. Hileman, Seismological Laboratory, California Institute of Technology
- Instrumental monitoring of post-earthquake fault movements (afterslip), by Robert D. Nason, Earthquake Mechanism Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration
- Preliminary results from recording aftershock ground motion on alluvial deposits, by Richard E. Warrick and William B. Joyner, U.S. Geological Survey
- Shattered earth at Wallaby Street, Sylmar, by Robert D. Nason, Earthquake Mechanism Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration
- ✱ Seismically triggered landslides in the area above the San Fernando Valley, by Douglas M. Morton, California Division of Mines and Geology
- ✱ Landsliding in the vicinity of the Van Norman Lakes, by T.L. Youd, U.S. Geological Survey
- ✱ Ground failure on the San Fernando surface away from obviously tectonic rupture zones, by Robert V. Sharp, U.S. Geological Survey
- Methane seep off Malibu Point following the San Fernando earthquake, by H. Edward Clifton, H. Gary Greene, George W. Moore, and R. Lawrence Phillips, U.S. Geological Survey
- Oil and gas seepages and damage to oil field facilities related to the earthquake, by California Division of Oil and Gas
- Water-resources aspects, by A.O. Waananen and W.R. Moyle, Jr., U.S. Geological Survey
- ✱ Damage to constructed works associated with soil movements and foundation failures, by T.L. Youd and H.W. Olsen, U.S. Geological Survey
- Preliminary structural lessons from the earthquake, by Henry J. Degenkolb, H.J. Degenkolb and Associates, Engineer

THE FOLLOWING TECHNICAL REPORTS ARE FROM THE NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC
ADMINISTRATION, EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE

- A preliminary report of near-field seismic monitoring of the San Fernando earthquake, aftershock series, by A.F. Espinosa, E.R. Engdahl, A.C. Tarr, and S. Brockman, National Ocean Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration
- Preliminary fault-plane solution for the San Fernando earthquake, by W. Dillinger and A.F. Espinosa, National Ocean Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration
- Some observations of the San Fernando, California, earthquake with a laser strain meter, by Jon Berger, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, San Diego
- Preliminary report on felt area and intensity, by Nina H. Scott, National Ocean Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration
- Ground motion amplification and vibration measurements, by Kenneth King, National Ocean Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration
- Magnetic field survey of the San Fernando earthquake epicentral area, by J.E. O'Donnell and H.E. Kaufman, National Ocean Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration
- Crustal-movement surveys and preearthquake strain analysis, by C.A. Whitten, National Ocean Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration
- Preliminary strong-motion results from the San Fernando earthquake of February 9, 1971, by R.P. Maley and W.K. Cloud, National Ocean Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration
- Evidence of record vertical accelerations at Kagel Canyon during the earthquake, by B.J. Morrill, National Ocean Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration
- Introduction to the engineering study, by the Earthquake Engineering Research Institute Committee
- Soils and foundations, by L. LeRoy Crandall, L. LeRoy Crandall and Associates
- Damage to the Olive View Hospital buildings, by the Earthquake Engineering Research Institute Committee
- Damage to the Los Angeles County Juvenile Facilities, Sylmar, by James H. Thompson, Wilson and Thompson, Consulting Structural Engineers
- Damage to the Pacoima Memorial Lutheran Hospital, by William F. Ropp, Daniel, Mann, Johnson, and Mendenhall, Architects and Engineers
- Damage to the Holy Cross Hospital, by S.B. Barnes, S.B. Barnes and Associates
- Damage to the Indian Hills Medical Building, by James H. Thompson, Wilson and Thompson, Consulting Structural Engineers, and James J. Kesler, Karotis and Kesler
- Damage to the Union Bank building, by Paul Greenfield, Erkel-Greenfield and Associates
- Damage to the San Fernando Industrial Tract, by Earthquake Engineering Research Institute Committee
- Damage to the Sylmar Industrial Tract, by Earthquake Engineering Research Institute Committee
- Damage to a market, Glenoaks and Hubbard, San Fernando, by Walter Dickey, Consulting Structural Engineer
- Damage to a market, 13570 Eldridge, Los Angeles, by Earthquake Engineering Research Institute Committee
- Damage to two store buildings in the North Oaks Shopping Center, and one building in the Valencia Shopping Center, by James J. Kesler, Karotis and Kesler
- Damage to public school buildings, by J.F. Meehan, California Office of Architecture and Construction
- Damage to other buildings, by Walter Brugger, Research Engineer, Los Angeles City Division of Buildings and Safety
- Damage to building equipment and contents, by J. Marx Ayres, Ayres, Cohen, and Hayakawa
- Damage to water supply systems, by C. Martin Duke, University of California at Los Angeles

Damage to transportation systems, by J. F. Meehan, California Office of Architecture and Construction

Damage to energy and communications systems, by D. F. Moran, Consulting Structural Engineer

Sociological aspects of the earthquake, by Earthquake Engineering Research Institute Committee

※ Preliminary conclusions and recommendations based on engineering studies, by Earthquake Engineering Research Institute Committee

Cooperating organizations

※印 訳出報告

COOPERATING ORGANIZATIONS

American Society of Civil Engineers — Los Angeles Section
California Department of Aeronautics
California Department of Navigation and Ocean Development
California Department of Water Resources
California Division of Highways
California Division of Mines and Geology
California Institute of Technology
General Telephone Company
International Conference of Building Officials
Lamont-Doherty Geological Observatory of Columbia University
Long Beach Harbor Department
Los Angeles City Building Department
Los Angeles City Engineer
Los Angeles City Fire Department
Los Angeles City Police Department
Los Angeles County Engineers Office
Los Angeles County Flood Control District
Los Angeles County Road Department
Los Angeles Department of Airports
Los Angeles Department of Water and Power
Los Angeles Harbor Department
Metropolitan Water District of Southern California
Pacific Telephone Company
Southern California Edison Company
Southern California Gas Company
Southern Pacific Railroad
Structural Engineers Association of California
U. S. Army Corps of Engineers
U. S. Atomic Energy Commission
U. S. Bureau of Public Roads
U. S. Office of Emergency Preparedness
University of California, Los Angeles, Berkeley, and Davis

目 次

緒 言	1
1. カリフォルニア州サンフェルナンド地区の地質と断層運動	6
2. サンフェルナンド地震における断層の形態と運動	18
3. 地 表 断 層 運 動	36
4. 地震に誘発されたサンフェルナンド周辺山地の山崩れ	54
5. バンノーマン湖付近の斜面崩壊	58
6. サンフェルナンド地区の地震断層地帯から離れたところの崩壊	62
7. 地塊の移動と基礎の破壊に関連して施設等に生じた被害	64
8. 構造物調査にもとづく予備的な結論と勧告	76

緒 言

Introduction

合衆国地質調査所

Arthur Grantz

1971年2月9日午前6時頃、サン・フェルナンド地区(第1図参照)に激震があった。そのことは、アメリカのかなり広い範囲でも地震や地震に伴って生じた地表の強烈なゆがみやズレがごくあたりまえで、何時でもおこる現象であることを示す手きびしい警告である。この地震は同時に、こうした破壊的な地表のゆがみや転位が生じ易い地区に新しい都市を計画したり、建物や構造物を設計したりする前に、こうした地区を識別する能力を高める必要性を吾々に警告している。又、こうした地震の発生し易い地域にある古い建物や構造物の安全性と、ある種の新しい建物や構造物の設計を判断する基準を再点検する必要性を吾々に警告している。が、この警告は64人の生命と5億ドル以上と推定される物質的損害を犠牲にして行なわれた。損害総額は直接、間接のコストを合計すれば10億ドルに達するかも知れない。もし、この地震が公共の建物や商店、ハイウェイ等が混雑する日中に襲っていたとすれば、犠牲者の数と物質的損害はもっと大きかったであろう。地震が終った時、ほとんど決壊の危機に瀕していた LOWER VAN NORMAN LAKE DAM が実際に決壊していたら、このサン・フェルナンド地震はアメリカの歴史上、最も致命的なものとして記録されたであろう。

サン・フェルナンド、およびその近郊での犠牲は、ほんの中規模の地震…※ Richter のマグニチュード測定法ではM-6.6と判断された…によってもたらされたものである点を強調しなければならない。これに比較すれば、1906年に発生したあのサンフランシスコの大地震はM-8.3であり、恐らく数百倍のエネルギーを放出し、よりずっと広域に亘って手痛い打撃を与えている。もし1906年に発生した規模の地震がカリフォルニア州の海岸沿いの主要都市か、その周辺を襲ったとすればサン・フェルナンドでの犠牲者の数と物質的損害を何倍か上回るであろう。※※

他方、多くの地球物理学者や技術者達は、地震とその影響についての知識が今や充分に豊富、かつ高度のものになったことを確信し、この地震から或種の重要かつ非常に実用的な教訓を学びとることができ、これにより、ある種の地震が必然的に引起す損害を軽減し、かつ、多分それを予知することすらできるようになるものとの念をいだいた。このため、地球および工学上の諸科学に従事する驚く

〔訳注〕※ Richter Magnitude Scale: Richter が定め、後に Gutenberg が改良した地震の大きさ、又は規模を表す尺度。震央から100Kmの地点で固有周期0.8秒、倍率2,800の地震計に記録された地震の振幅をマイクロンで表示し、その常用対数をとったもの。

M-8からM-3までである。

※※ 1906年4月18日午前5時12分カリフォルニア州で起った大地震、SAN ANDREAS の断層が Benito 郡の San Juan から Humbolt 郡の Mottole までの270マイルにわたり陥没し、発生した。死者約700名、損害約4億ドルといわれる。

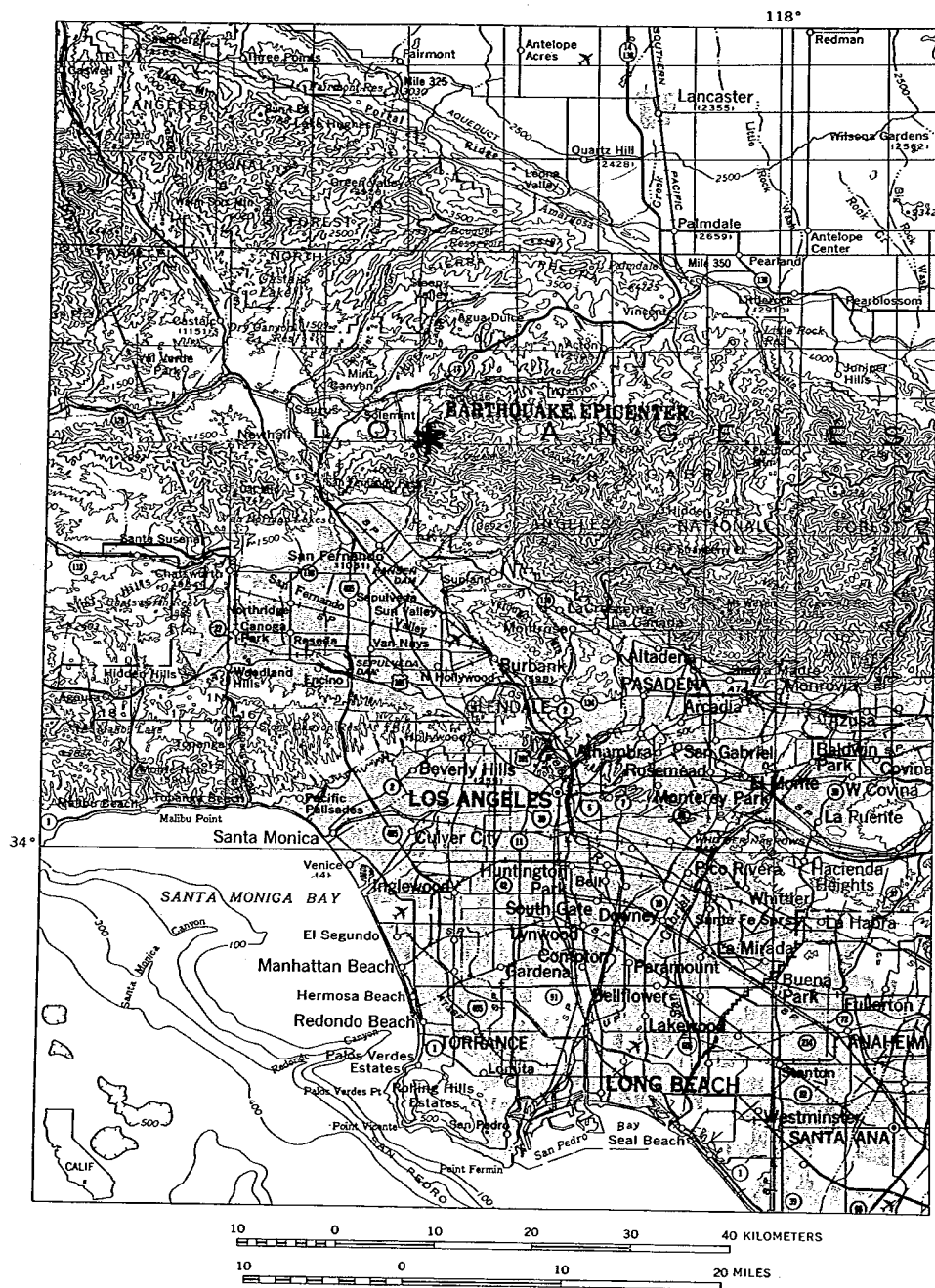


図-1 サン・フェルナンド地震位置図

べき多数の研究員と技術者がこのサン・フェルナンド地震、ならびにその地質学的、地震学的、および工学的影響に直ちに関心を示した。この破壊に対処し、この地震とその影響に関する信頼できる情報を非常に、かつ迅速に必要とする公務員および民間人の両方にとってこの地震への迅速な反応は不可欠のものであった。更に、これまでの経験によれば、(1)余震と引続き起る地表のゆがみの監視は、こうした現象が速やかに消失することからして迅速に行なう必要があり、(2)地震とその破壊的な地質学的影響の性質を推論すべき現場証拠は緊急修復工事又は激しい降雨によっても速やかに失われること、そして(3)危険な地質学的・工学的状況を速やかに確認し、これを政府および民間の関係者に通知しなければならない。かくて、このサン・フェルナンド地震は現地時間の午前6.00時に発生したにも拘らず、カリフォルニア州全体からの調査員はその日の午前中に被害地区に集り、翌日までには数十人の調査員が工学的欠陥箇所を分析し、サン・フェルナンド地区に被害をもたらした地表断層の破断、地表の垂直的・水平的移動、山崩れ、土壌と基盤の破壊等を地図に表わし、記載していた。余震と余震が各種の地質学的素材(岩や土)に及ぼす影響を研究し、地震後の断層の動きと引続いて起る地表のゆがみを監視するために何十箇所という鋭敏な地震計が速やかに配置された。地震学者にとって幸いなことに、震央はカリフォルニア工科大学の地震学研究所の恒常的地震計の測定範囲内であったこと、更に主要震動と初期の余震の性質と発生地が、他地区からの携帯型地震計を設置する前にカリフォルニア工科大学の地震計で十分確められたことである。

ロスアンゼルス郡のサン・フェルナンドおよびシルマー-SYLMARの両地区における被害は震央がサン・フェルナンドの中心から北方僅か約14キロ(9マイル)に位置していたこと、更に今回の地震を引き起した断層が震央からこれらの地区の下方に延び、ここで地表と交り、押しあげて大きな隆起を作っている衝上断層であることからして甚大であった。カリフォルニア州におけるこれまでの地震はSAN ANDREAS型の走向断層が原因となるより、むしろ衝上断層によるものが多かった。従ってこれら2つの型の地震の地震学的、地質学的性質、二次的地質学的影響および被害のパターンを注意深く比較・検討する必要がある。こうした比較の例としては、この二つの型の断層の破壊による地面の破壊された地区の比較幅とか、この二つの型の地震に対するRichter マグニチュードと※改良MERCALLI強度表示法との関係などがある。

北側に傾斜する衝上断層の上に横たわるくさび形岩石の上の地表が相対的に隆起し、ゆがみが生じていたのが今回の地震の著しい特徴であり、これは過去にもしばしば起きてきたことが地質学上の記録で証明されている。このことからすれば、サン・フェルナンド地震は決して“偶発的な”事件ではなく、今後も再発を予期せねばならぬ出来事であることが判る。従ってこの再発間隔と隆起のパターンと被害のパターンとの間に存在するかも知れない関係がこの地震の研究を続けていく上で重要な要素となることが期待されている。

〔訳注〕※改良MERCALLI強度表示

地震の強度を表示するため、最初M.D.DEROSSIとF.A.FORELがROSSI-FORELスケールを案出し、これを後にG.MERCALLIが修正し、更にH.O.WOODとFRANK NEWMANが改良した。これが改良MERCALLI強度表示法である。強度は(1)から(12)に区分され、(1)の無感状態から(12)の激震に至るまで、夫々の強度について、具体的に規定してある。

この報告書では、地表に突出した衝上断層地帯により引起された破壊箇所の場所が予想できたものであったか否かが、かなりの注目を集めるであろう。サン・フェルナンド地区を市街地化する前にこれらの地区を危険地区として区轄し、空地、又は公園に指定すれば今回の被害の内の多くは明らかに防止できたであろう。多くの調査員がサン・フェルナンドで得た知識をもとに、この地域およびアメリカ西部の他地域で同じような活動中の衝上断層を確認し、危険地区として区轄できることに自信を得たことは将来にとって頼りになることである。

今回の地震中に記録された恐らく最も重要かつ、確実に最も驚くべきデータは本報告書中でMALEYとCLOUDが報告している激震の加速度記録紙のユニークな収集であろう。この両者の報告によれば、このマグニチュード6.6という中程度の地震により引起された地中加速度は、「これ迄の最高を記録し、0.5gから0.75gで時には1gのピークに達することもあった」。

こうした記録は耐震設計基準の細心な再評価を確かにうながすものであり、何故なら地震区域に対する建築基準として一般に仮定されている数倍大きい地中加速度を示しているからである。これらの記録は同時に、この地震とそれに関連した衝上断層運動の特性のみならず、記録地点での局所的な地質的又は地形的状況に対する驚くほど高い加速度の関係を徹底的に研究することを促すであろう。

この地震の現場および実験室における調査で特徴的であったのは、参加した科学者および技術者間での情報の交換が最初から、これまでになく自由に行なわれた点である。その結果、この地震とその地質学的、工学的結果に対する予備的な理解は極めて迅速に発展し、その普及が可能となった。この地震とその影響の科学的、若しくは工学的意味を真に充分、かつ有益に理解するためには各方面からの洞察の集大成を必要とすることは明白なことである点からしても、この意見の交換は参加した調査者にとり特に満足すべきものであった。

本報告書は地震発生後、最初の3週間に多くの調査団が集収した資料の予備的評価といえるものである。調査に協力した諸機関の一覧表は本報告書の末尾に掲げてある。記載論文の多くは専門家を対象に書かれたものであるが、この地震とその影響等につき学びたい一般読者、および役所関係者にとっても、そのほとんどの論文は非常に有益であろう。

本報告書はアメリカ合衆国内務省地質調査所および合衆国商務省の海洋大気庁の共同出版によるものであり、予備的な調査結果を早期に出版することは次に記す重要、かつ緊急必要性を満たすものに違いないとの確信をもって出版されたものである。

- 一本報告書は被災地で再建作業に従事している一般市民および役所に対する初期の地質学的、工学的指導を行なうことになる。
- 一本報告書はこの地震によって作りだされた危険を伴うかも知れない地質学的、工学的情况…例えば地すべり等の危険を一般市民、ならびに役所に知らせるのに役立つ。
- 一本報告書は、社会にとって最も具体的な価値をもつ知識を得るために、地震を研究する多くの調査者、特に異なった訓練を受けてきた作業員および科学者と技術者同志あるいはその間で予備的資料と思考法を初期の段階で交換することを促進させることになる。
- 一本報告書は科学および工学関係者にこの地震の調査に関する予備的結果を伝え、検討中の調査事項に関する情報を提供するのを助けるためである。これは今回の地震とその影響に関する吾々の理解を改め、今後の地震によってさらされる危険を減少するために採られ得る追加手段を教えてくれる新しい調査者の参加を奨励するものである。
- 一本報告書は何十万人という人口に直接的に影響を与えた事件を広く一般に知らせ、将来数百

の人々に影響を与えるかも知れない事件の予告とするものである。

一本報告書はまたこの地震の記憶が新鮮な中に役所および計画担当者の注意を、地震が人間の造った種々の土木工事を破壊することができるという多様性に注がせ、又、将来の地震による被害を少なくする方法に注意をさせるものである。

予備的調査結果を迅速に出版するということは一方では多くの当面の必要性を満たすものではあるが同時に若干の重複、資料の一部の欠除、更には種々の参加調査者間での意見の不一致も避けられない。事実、本報告書は参加した調査者とその他の人達に通常可能である以上に初期の段階でこうしたギャップとか意見の相違の存在に気付かせるのに役立つであろうし、この地震に関する最終的な結論は本報告書の発行により早められ、大いに改善されるのではないかと思っている。本報告書に予備的な形式で報告されている各種の調査のほとんどは現在も調査が続けられているものであり、現在の論文のほとんどは数ヶ月後、又は数年後に、より完全な論文として発表されることであろう。本報告書の読者は、次に掲げるアメリカ合衆国地質調査所発行の7-1/2'の地形図がサン・フェルナンド地区、即ちOat Mountain, San Fernando, およびSunlandの地形上の詳細について知るのに役立つであろう。

更に既に発行されている地質図には次の如きものがある。その他のものは参考として引用されている。

California Division of Mines and Geology, 1969, Geologic map
of California, Los Angeles sheet: scale 1:250,000.
Oakeshott, G. B., 1958, Geology and mineral deposits of San
Fernando quadrangle, Los Angeles County, California:
Calif. Div. Mines and Geology Bull. 172.

本報告書中では測量単位として単一のもの、できればメートル法の体系を採用するのが望ましかった、が、本報告書をタイムリーに出版させるためには単一の測量体系に変換することは不可能であり、特にかなり多くの図表を組み変える必要があったため、なおさら困難であった。比較をするのを助けるため、長さに関するメートル法とヤード・ポンド法との変換表を次に記す。

$$1 \text{ mm} = 0.039''$$

$$1 \text{ cm} = 0.39''$$

$$1 \text{ m} = 3.28'$$

$$1 \text{ Km} = 0.62 \text{ mile}$$

$$1'' = 25.4 \text{ mm} \text{ 又は } 2.54 \text{ cm}$$

$$1' = 0.305 \text{ m}$$

$$1 \text{ mile} = 1.609 \text{ Km}$$

1. カリフォルニア州サン・フェルナンド 地区の地質と断層運動

Geologic Setting and Activity of Faults
in the San Fernando Area, California

合衆国地質調査所

Carl M. Wentworth, R. F. Yerkes

地震学的環境

SEISMOLOGICAL ENVIRONMENT

カリフォルニア工科大学地震研究所

Clarence R. Allen

1971年2月9日のサン・フェルナンド地震に関連した断層運動は Transverse Ranges 地区で発生した。この地域はその激しくて比較的新しい地殻構造運動で有名である。が、今回の地震はこの地区内で発生した有史時代の地震断層の最初の例である。

この Transverse Ranges の構造帯は南部カリフォルニアを横切って東方にのびており（第2図の中央を横切って）、優勢な San Andreas 断層系の西北にのびた地区を斜めに横切って新生代末期の南北の短縮地区を構成している。過去3千万年の間に、この山系の主要断層である San Andreas 断層は南部カリフォルニアで約200キロに亘る右走向断層（right lateral strike fault）を受けてきた（Crowell, 1962年）。有史時代においては南部カリフォルニアにおける表面断層は主としてこの箇所と San Andreas 系の右走向断層だけであった。主な例外としては有史時代における東北東にのびる White Wolf と多分 Big Pine 断層、そして今回の1971年のフン・フェルナンド断層の破壊であり、そのいずれもが少くとも、ある程度の左走向断層の要素を示している（第2図参照）。

この Transverse Ranges 地区は新生代末期の構造運動で象徴される東方にのびる多数の山脈、谷、そして同じ傾向の走向断層、逆断層および衝上断層から構成されている（Bailey Jahns, 1954, Jennings Strand, 1969年）。当地区のこの構造の最も壮観な発達例は Ventura Basin にみられ、ここには厚さ1500mの洪積世海成の堆積物を含む巨大な新生代の向斜が両翼が衝上で、逆転し、またスラストアップしている（Bailey Jahns, 1954年p-92~96）。しかしながら Transverse Ranges における極く新しい変形は Ventura Basin にとどまらず、第四紀末期の断層運動が Point Conception 辺から東方に San Andreas 断層にかけて発達することが知られている。

1971年2月9日、断層運動は San Joaquin Valley の南方、San Andreas 断層の“曲り目”に対する San Fernando Valley の北端部近くの地表を破壊した（第2図）。この地域の地殻ブロックの形状は前述の如きものであるため、San Andreas 断層の南西の Transverse Ranges の構造ブロックは、この断層にそってブロックが西北方向に運動するにつれてわん曲部におしつけられ、圧縮されることになる。過去500万年から1,000万年の間に、この圧縮による変形のため、山脈のブロックを南側の隣接する底盤の上に押しあげてきた。この運動は山脈のブロックの南端に沿って西北西にのびる

Sierra Madre とか Santa Susana といった北側に傾斜する逆断層、又は衝上断層系にそって発生してきた。この隆起で最も著しいのは San Gabriel Mountains の切り立った南面であり、これは南方のサン・フェルナンドおよびロスアンゼルス地区に対して約 1,500 m 高い。このブロックの1つの他の水平面で短縮と隆起はサンフェルナンド地震に伴う破壊の際に生じた。

多くの Transverse Ranges の断層の地表のこの跡部分については、この地区の構造史上、地図が描かれ、解釈されてきたが、その最近における地質学的活動に基づく、豊富ではあるが比較的目的のない証拠については広く理解又は評価されなかった。1971 年のサン・フェルナンドの断層運動を研究することにより、これら断層の将来の活動を評価するためにこの地質学的データを使用することに、より確信をいだかせるに違いない。

地震学的環境

1971 年以前にはこのサン・フェルナンド地震の起った地区はカリフォルニアの多くの箇所と同じく、地震活動は低調から中程度の地区の1つであった。事実 1934~63 年のひずみの放出度を表わす地図 (Allen その他による、1965 年) によれば San Fernando Valley 北部は大ロスアンゼルス地区のほとんどの地区よりも地震学的には活動力が弱かった。勿論ごく最近の地震の歴史からして、他地域よりもこの地区がマグニチュード 6.6 の地震を特に経験し易いと示すものは何もなかった。しかしながら忘れてはならない事実として、少なくともこのマグニチュード程度の地震は、大体 4 年に 1 回の割合で南部カリフォルニアのどこかで発生している (Allen その他による、1965 年) のであり、この意味では今回の地震自体はたいして驚ろくに足りない。大体これと同じマグニチュードの地

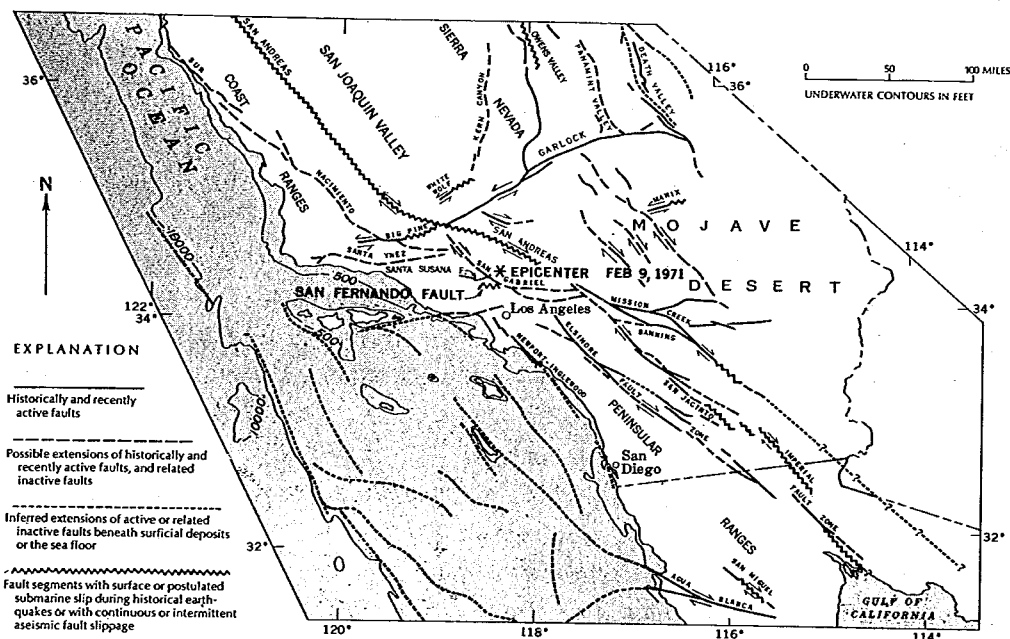


図-2 南カリフォルニアにおける主要な活断層

震が1968年にロスアンゼルス以南東220キロのBorrego Mountainで発生したが、1971年の場合と異なり遠隔地で発生したため被害は僅少であった。

1934年から1971年にかけては南カリフォルニアに発生した地震の震央点が全てカリフォルニア工科大学により記録されているが、今回のサン・フェルナンド地震の震央に相当する地区内ではマグニチュード3.0以上の地震は約10回しか発生していない。これらの地震はいずれも大規模なものではなく、1964年8月30日、サン・フェルナンド南部で発生したマグニチュード4.0のショック等、2〜3のものが局部的に感じられたにすぎない。1934年以前には2つの地震が特に注意をひく。1930年8月30日に起ったマグニチュード5.2の地震は、最初に震央として推定されたSanta Monica Bayよりももっとサン・フェルナンドに近いところで発生したものと思われ、Chatsworth DamとLower Van Norman Damの両方に若干の被害をもたらした点で特に注目する必要がある。先日のサン・フェルナンド地震との類似性といった点からみて、はるかに意味が深いのが1893年に発生したいわゆるピコ・キャニオン地震である。Pico CanyonはNewhallの西方、僅か5kmの所にあり1893年の時と1971年の時と2度に亘り非常に激しくゆれた。TownleyとAllenの報告(1939年)によればマグニチュード約6のショックがMojave Ventura,そしてSan Bernardinoで感じられ、San Diegoでも感じられた。Newhall地区では多くの地じりとき裂が報告されており、暫くの間、余震が続いた。この時代の報告によれば、「目に入る全ての山頂から山崩れが巨礫と共にころろ落ちてきた。山々はあたかも無数の噴火山が噴火しているように見えた」とあるが、これは1971年の地震の際にもいえることであったろう。1893年の地震は1971年の地震の震央より、僅かに西方で発生したと思われるが、この程度の中地震はこの地区では決してめずらしくないことを示している。

層 序

San Fernando ValleyはVentura Basin地区の南東部に位置し、その堆積岩はWintererとDurhamが記載している(1962年)西北部の堆積岩に類似したものである。Oakeshott(1958年)は、今回の地震に付随して生じた主要震動、余震、それに地表の断層等がみられたSan Fernando Valleyの北側の層位についての叙述を行なっている。

中心部のTransverse Rangesにおいては、結晶岩の基岩の上には数千メートルの厚さの白亜紀とそれより新しい時代の堆積岩が不整合で横たわっている。San Fernando Valley自体(第3図)は中新世およびそれより新しい岩石から主として成る非対称の複向斜であり、新世代末期の褶曲および断層運動により、特にSanta Susana断層とその東方への断層に沿った衝上により北部地方では変形が行なわれた。Corbatoの重力・密度モデル(1963年)による推定によれば、約4,500メートルの厚さの堆積岩がこの谷間の中央部に存在している。

新生代末期の堆積岩はいずれも特に硬くはなく、特にSaugus Formationはほんの部分的に硬化しているだけでボーリングだけでは堆積層と区別することは難かしい。

基盤を構成する先カンブリアン紀から白亜紀の結晶岩は、San Gabriel Mountainsの地図上で東北部とVerdugo Mountainsの南東部の地区で地表に露出している。これらの変成度の高い変成岩と火成岩は段丘を構成し、その上に堆積岩が堆積している。白亜紀の堆積層とその下にある第三紀の堆積岩はSanta Susana断層とSan Gabriel断層にそって局部的に露出しているにすぎないが、第2図の西方および南方においては広範囲に亘り露出している。この地図上のSan Gabriel断層の

南方には基盤の上に横たわる最も古い堆積岩である中新世中期のToponga Formationがあり、これは厚さ約300メートルに及ぶ礫石、海成の砂岩、そして火山岩から構成されている。

1,500メートルに及ぶ中新世のModelo FormationがSan GabrielとVerdugo Mountainsの山麓、Mission Hill およびSanta Susana Mountains中で露出している。このModelo Formationは中新世末期から鮮新世初期にかけてのTowsley Formationが上になっていたり、局部的にはこれらと混ざり合っている。このTowsley Formationの厚さはSan Gabriel断層地帯の丁度南方のPico Formationと重なりあっている所の全く厚みが“0”の箇所から、地図上の東部および西部の中心地区のように750メートルの厚さにまで変化している。

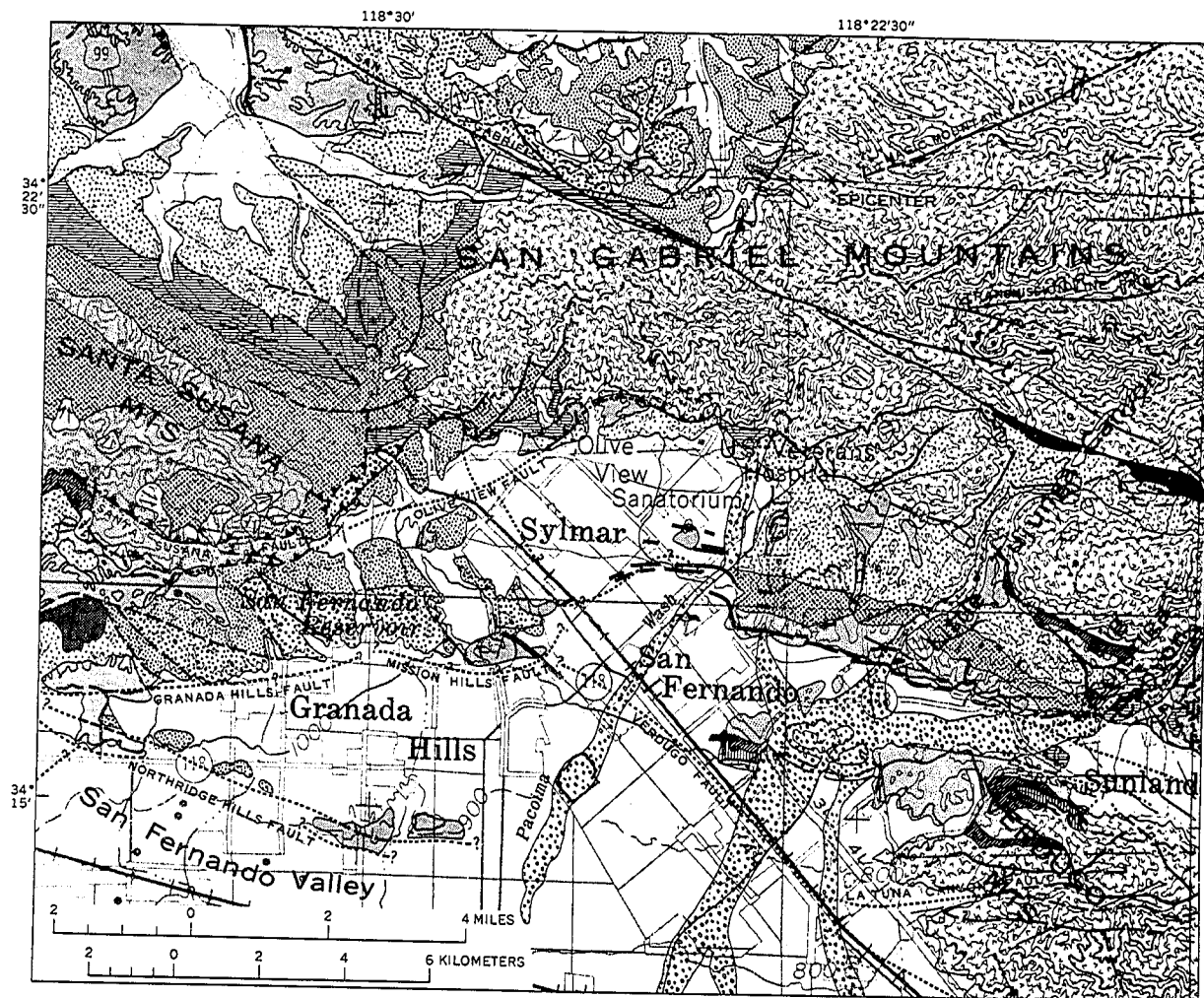
このPico Formationは、San Fernando Valleyの北端に接する浅海成乃至は半海成の鮮新世末期から更新世初期のSaugus Formationに向って上方及び左右に漸移している。このSaugus FormationはBig Tujunga Canyonでは厚さは“0”であるが西に行くにつれ厚くなり、Pacoima Washの東方のLopez Canyonでは約1,950メートルの厚さになっている。Olive View断層の北方でOlive View Sanatoriumの西、約1.2Kmの地点で堀削した実験用井戸によるとSaugus Formationの地層学的厚さは1,200メートルであり、カリフォルニア州用水権委員会の報告書(1962年, v. I., page-52)ではこのFormationはSylmar 近辺の向斜では厚さ1,800メートルを超えていると述べている。

Oakeshott(1958年)による“中期更新世”のPacoima Formationは地質図(第3図)上でSaugus Formationと合している。この変成した、扇状地で水の作用で摩滅した角礫岩から成る層はSylmarの北部で地表に露出しており、そこではSaugus Formationの上に不整合の形で横たわり、河岸段丘と沖積層によって不整合に切られている。砂利と砂の河岸段丘で隆起侵食に残ったものはサン・フェルナンド地区に散在しているが、地質図にはこの内、2~3しか示されていない。これらの堆積物の層位学的位置、変動が認められないこと、そしてその下に横たわるSaugus Formationとの不整合関係からして、これらが更新世の末期のものと推論されるものの、これらの堆積物の時代を示す直接的証拠は何もない。Oakeshott(1958年)はPacoima Washに沿った段丘の形成地で5つの段階と、サン・フェルナンドの西北6.2Kmの地点のLopez Kagel Canyonで2つの段階を識別することができた。山脈のブロックの第四紀末期の歴史のいくつかは、こうした地表面の特徴から得ることができる。

末固結堆積物

比較的平坦なSan Fernando Valleyの地下には固結している砂、砂利、そして更に細かい堆積岩があり、その層の厚さは谷の端の部分の“0”から第3図の南端近くの谷間の東・中央部では200メートル以上とさまざまである。Sylmar 地区では、Pacoima Wash ぞいを除き、沖積層の厚さは多分6m程度であろう(カリフォルニア州、用水権委員会、1962年)。

Van Norman Lakesの西側とSan Fernando Valleyの南部に沿った地区の堆積物は、堆積岩の地区を流れる河川により運ばれたものであり、その結果これらの地区の沖積層は主として粘土から構成されている。これに対し、Van Norman Lakesの東方の、谷間の北端にある、より大きな河川はどつどつした結晶岩を流し、このため砂利の多い、より粗い岩石の堆積物を作った。San Fernando Valleyの沖積層に関する更に詳しい資料はカリフォルニア州、用水権委員会(1962年)から得ることができる。同委員会の報告書はこの谷間の基盤、即ち滞水層の等高線を示しており、同時



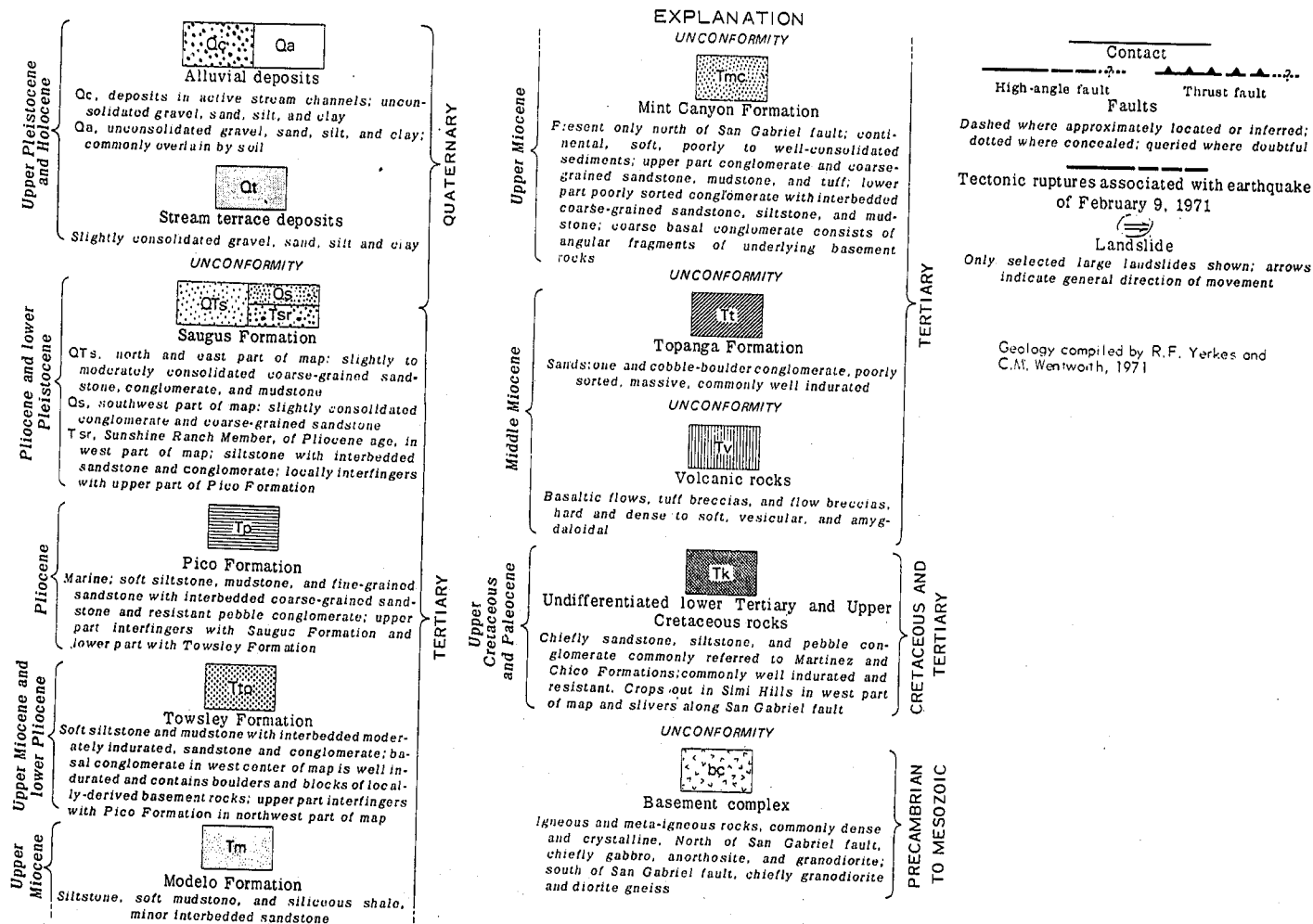


図 - 3 - サン・フェルナンド地区の地質

に1958年の時点における地下水の等高線を示している。Holmes の農業用地地図(1919年)も同様に有益である。

第四紀末期の断層運動の形跡

サン・フェルナンド地区にある多くの断層は、堆積物が集った谷間と、隣接する丘、そして山との境界線できわ立った地形上の分岐点を伴っている。この関係は層位学的な形跡と相まって、こうした断層が第四紀の末期に活動していたこと、そして第三紀の末期に確立された一般的な構造パターンに従ったものであることを示している。これらの断層の第四紀の末期の歴史に関し、直ちに利用し得る形跡は次の「構造」に関する節で述べられている。

この形跡はこれらの断層に関して、今後起るかもしれない運動を考慮する際、極めて重要なものとなる。

不幸にして第四紀末期…これは地球の歴史上数十万年前の時代であるが…の地質学的記録は不完全で理解し難い。サン・フェルナンド地区の第四紀末期の層位学的記録を構成する堆積層の内で大体の年代が判断できるものすらほとんどなく、それらの層位学的関連性はごく僅かしか示られていず、かつ解読し難い。地表の断層運動により作りだされた地形的特徴は第四紀末期の断層運動の直接的記録を構成するものであるが、これらもしばしば理解し難いものがある。ほとんどは種々の形状を呈し、種々の地質学的・気象的条件のもとでのこれらの永続性については、比較的短いものにも拘らずほとんど理解されていない。

第四紀の断層が沖積層により埋められたり、おおいかくされた箇所にあつては、その歴史を調べる際には地下の情報が必要となる。特に有益な資料は、これらの断層が地下水の運動に及ぼした影響に関するデータである。これらの影響は基本的には次の2種類となる。即ち(1)こうした断層に沿って沖積層の内部においても粘土質の薄層が形成され、これが地下水の透過を部分的、乃至は全面的に遮ぎる。又は(2)断層によって沖積層の下の方の床岩の表面にステップが形成され、もし地下水の流れの方向がずれたブロックに向っている場合には流れの障害物となり、もし流れの方向が反対であれば地下水の淹の発達を促す。こうしたステップは沖積層によって埋まる前の浸食、又は断層によっても形成され得るものではあるが、かなりの長さを持つ本当の意味でのステップは沖積層の形成後の断層によって一層形成され易くなる。断層粘土の障害を通じての通路の浸食によっても地下水の淹を形成する原因となり得る。これまでに引用した一切の水文学的証拠はカリフォルニア州用水権委員会の行った San Fernando Valley における地下水に関する貴重な研究(1962年)に基づくものである。断層に関係した San Fernando Valley の沖積層の年代については詳細は明らかでない。が、これらの堆積物はかなり新しいものであり、従って San Fernando Valley で浅い地下水の運動に観察し得る程度の影響をもつ断層を第四紀の末期に活動していたと考えるのが賢明である。

構 造

San Fernando 地区の構造は2つの斜めに交又する断層系によって支配されている。その1つは San Gabriel 断層をも含めた右走向断層である北西にのびる San Andreas 系であり、もう1つは北側に傾斜した逆断層および衝上断層を持つ東方へのびる断層系であり、これに沿って個々の山脈の隆起のほとんどが形成されてきた。後者に属するものとしては San Fernando Valley 内にある Santa Susana-Sierra Madre 断層がある。

San Fernando Valley 地区の古い地質学的歴史は San Gabriel 断層地帯により支配されているが、この谷間の北端の現在における構造は北側に傾斜した逆断層の上の衝上断層により大幅に修整されたものとなっている。これらの断層に沿った隆起は Corbato が地図に表わした巨大な重力傾斜面を作りだし、この模様は本報告書に示されている。こうした断層による傾斜の全ては第四紀末期の運動の形跡を表わしている。

SAN GABRIEL 断層

San Gabriel 断層は多くの点で San Andreas 断層に類似している。この断層は重なり合った険しく北側に傾斜した断層の地帯から構成されており、ゆがめられた水路、走向溪谷、切込みのある尾根、そして反対側が大幅に異なる地質を有している点が特徴になっている (Oakeshott 1958 年)。

Crowell の著作によると (1950 年, 1952 年および 1962 年), この断層は鮮新世時代に約 30 km に亘る右走向断層と局部的には 4.3 km に及ぶ傾斜断層 (dip slip fault) からなる。Oakeshott (1958 年) は鮮新世から第四紀にかけての時代にこの断層地帯に沿っての 2.5 km から 6.5 km の右側への地層のずれを記録しており, “中期更新世” の Pacoima Formation が第 3 図の西北部でオフセットされるように示している。

第四紀末期の河岸段丘堆積層は San Gabriel 断層によって影響を受けたようにはみられないが、この断層地帯を完全に横切る堆積層は存在しない。更新世の堆積層の転位と断層沿いのゆがめられた水路があることは、この断層に沿って新しい運動の可能性への関心を必要としている。

SANTA SUSANA 断層

Santa Susana 断層は長く東方にのびる断層地帯であり、低い角度の衝上、屈曲の多い線、そして僅かに北側に傾斜している点が特徴である。この断層の水平の短縮と垂直の分離の推定値は 2.4 km 以上に亘っている (Hazzard, 1944 年; Oakeshott, 1958 年)。

第 3 図の西端における Santa Susana Mountains では、断層は約 0.5 km 離れた 2 つの平行する断層系から構成されている。北側の断層系は完全に第三紀の岩石から成っているが、南側の断層は衝上接触をなし、この上に北側の中新世の地層が南側の第四紀の段丘堆積層の上に重なっている (Bishop, 1950 年 p. 93-94)。

Bishop の指摘した地区の東部に関する R.B. Saul のより最近の調査によると、地よりは Bishop の観察を証明するものであるかも知れないことを示唆している。いずれにせよ、第四紀末の断層運動が Santa Susana Mountains の南面に発生した。何故なら西へのびる Bishop の Devonshire 断層が段丘の堆積層の堆積が行なわれている間も、又、その後も移動したからである (1950 年)。

Santa Susana 断層の西部の 2 つの痕跡は Sylmar の西北部で合流しそのまま東方にのび、一連の東北にのびた断層を形成し、これらの断層にそって基盤を構成する岩石が鮮新世から更新世の Saugus Formation とか “中期更新世” の Pacoima Formation のように新しい堆積層の上に押しあげられてきた。が、段丘の堆積層は影響を受けた形跡がない (Oakeshott, 1958 年)。

GRANADA HILLS-MISSION HILLS の傾向

これらの断層の傾向としては、東方にのびる断層で大部分が埋積された断層群であり、これらの断層に沿って東南部の Santa Susana Mountains と Mission Hills が押し上げられた形になっている。

Granada Hills の断層の存在は、隣接する山脈の南端が一直線をなしている事実に基づいているものであり、これはその存在が推定される断層が第四紀末期の変動を受けたことを示唆している。

Mission Hills の断層の存在は、その地形、試験井内の地質学的構成および Sylmar 北部の山脈中の断層との類似性に基づき、Oakeshott (1958 年, page 94, pls 1 および 2) により仮定が行なわれた。

本報告書で用いられているサン・フェルナンド断層地帯とは、1971 年のサン・フェルナンド地震により構造的な地表破断が行なわれた地帯と定義されている。これは Mission Wells, Sylmar, および Tujunga 断層地区とその他の散在する群少の断層から構成されている。

この Mission Wells と Sylmar の断層系は Granada Hills-Mission Hills の方向線から東方にのび、地下水の南方への運動の障害物として知られている地表の形跡と完全に一致する。この地下水の異常性は第 3 図中で Sylmar の南方の沖積層の地峡部分を横断する。未確認の東北東にのびる断層として示されている。これは地下水のレベルが南北差で 15 m あり、北側に高く、地下水の流が東西の端にある、堆積し浸食した切りこみを通じて南側に流れている。この異常点の北側の地下水は陰しく北側に傾斜した Saugus 地層で先端が切取られ、薄い沖積層で被われた地層内の一定の地域の滞水層中に発生する。これに対し異常点の南側の地下水は場所が一定せず、荒い沖積層の砂利内で発生する。

カリフォルニア州用水権委員会の報告書 (1962) では、北側に傾斜した Towsley Formation (Repetto の報告) と Saugus Formation 中の難透水層への Sylmar の地中の異常性について述べている。しかしながらこの地下水の異常箇所の方角は Saugus-Towsley Formation の方角に対して斜角をなしており、この角度は断層のような構造的な不連続性とその主因をより合理的に説明し得るように思われる。

この地下水の異常性は本報告書においては、Little Tujunga 向斜中の北方に傾斜した Saugus Formation を南側の沖積性の砂礫の方に押し上げ、上昇する北側の断層ブロック中の Saugus Formation の上に薄い沖積層だけを保ちつつ、侵食による平坦化活動をした逆断層の作用によるものであると結論づける。こうした断層に沿った粘土は地下水の流れを阻害する事実を説明できるものであり、断層に沿った垂直方向の転位はこの地下水の異常点の南北の沖積層の厚さが異なっていることを説明し得るものである。

更にこれらの要素は異常点の両側の地下水の模様の相違を作りだし得るものである。M. M. クラークは 1952 年に撮影した空中写真により、微妙な南向きの地形的断層崖を認めた…これはこの地下水の異常の大体の線に沿ってほとんど連続しており、この異常をもたらしたと推定される断層の最近の運動の結果と考えられるものである。(本報告書の合衆国地質調査所スタッフによる“地表断層”に関する節を参照)

San Fernando から Tujunga Valley の北側に沿って東方に San Gabriel Mountains の西部の基盤へと大体続く断層運動の地帯を本報告書ではサン・フェルナンド断層地帯の Tujunga 区と呼んでいる。Kamb とその他の調査員 (本報告書中の) は、このように定義された Tujunga 断層区は Tujunga Valley の中央部の沖積部中の断層として Hill が推定 (1930 年) したものと異なっ

ており、Hill が昔行なった古い定義を放棄するよう提案している。今回の1971年の地表の破壊前にも、このTujunga 断層区に沿った多数の断層が地図に描かれてきた。Oliver Canyonのすぐ西のこれらの断層の1つは北方に60度傾斜し、中新世の地層を南方に更新世の段丘堆積層の上に押しあげている(Oakeshott, 1958年)。Little Tujunga Canyonの入口では第四紀末期の転位を示唆する恐らく30mに達する地下水の滝があり、これは1971年の地震の際の場所とほぼ一致する。

VERDUGO 断層

Verdugo断層はVerdugo Mountains (第3図, JenningsおよびStrand, 1969年)の南西の麓に位置し、山頂と南方の沖積層の基盤との間の1,000mに及ぶ高低の差の原因を作りだしている。この結論はCorbatoが発見した急な残留重力傾斜の存在によっても支持されており、この傾向はBurbankからPacoima Hillsの西部にまで広がっている。この山脈の険しい南面とかBurbankの北方に断層を生じた河川の段丘の堆積層があること(カリフォルニア州用水権委員会報告書v. II, page A-23), そしてVerdugo Washの地峡に地下水の滝が存在すること等により, Ventworth, ZionyそしてBuchanan (1970年pl. 1)は、Verdugo断層の東南端は第四紀末期の転位を受けたものと結論づけた。Verdugo MountainsとPacoima Hillsの間では、Verdugo断層の方向に沿って堆積層の基盤中に薄い粘土の層が断層によって形成され、その結果としての地下水の阻害現象が第3図の断層を追跡する際に利用された。Verdugo断層の地形的証拠と重力的証拠はPacoima HillsとMission Hillsの間で消失している。しかしながら2~3の情報によればこの断層のかなり広い範囲の東北部の地下水のレベルは東西部に比べて60m以上高く、このためそこで大きな地下水の滝を生じている。

NORTHRIDGE HILLS 断層

Northridge Hills断層は東南部のSanta Susana Mountainsから谷間を横切ってNorthridge Hillsの南側に沿って東南部にのびている。その東南部の地形的特徴は谷間をほとんど半分まで超えているようにみうけられるが、この断層の東端は不明である。この断層はこの谷間で地質図に描かれた長さに沿って不連続ではあるが明確な地形上の特徴を形成しており、古い第四紀末期の堆積層(第3図のQt)を転位し、Saugus Formationをその中心の部分に沿って低い丘の方に押しあげているものと推測される。カリフォルニア州用水権委員会の断面図(1962年)に堆積層の基盤がその東南側で落差が約300mにも亘る断層が生じたことを示していることからしても、このNorthridge Hills断層上の第四紀末期の転位は考えられる。

CHATSWORTH 断層

CorbatoはSan Fernando Valleyの西端を横切って東北方向にのびる急重力傾斜地を示しており、これはその位置がChatsworth Reservoirの東南部の白亜紀の岩石に対して並行的に存在する中新世のModelo Formationと一致する(JenningsとStrand, 1969)。谷間の堆積層の下基岩の表面は東南側でずり落ち、その堆積層中で25mの高さの地下水の滝を形成している。第四紀末期の転位に関するこれ以外の証拠としては、Chatsworth Reservoirの東北端での断層を起した段丘の堆積層の形で存在している。

断層活動

ある断層がその現在の構造的背景からして、地質学的な近い将来に変動を受けることができる場合、その断層は活動しているものとみなされる。この活動的な状態は地質学者がそれを認識する能力とは関係なく存在するものである。活動中の断層を確認するための多くの特徴がこれまで利用されてきた、例えば歴史的な地震現象、又は地表の断層、地殻の緊張、地形、若しくは層位学から推論される地質学的に最近行なった転位、或は実際に活動中の断層との地理的関連等々がある。が、こうした種々の特徴により、一切の活動中の断層を確実に区別するための断層の活動については充分知られていない。

これまで検討を行ってきた断層の中で San Andreas 断層と San Fernando 断層だけが地震とか、これまでの地表の断層運動の形で活動中であると知られたに過ぎず、San Fernando 断層の場合には 1971 年 2 月 9 日に地表が破壊されて初めてそれが活動中の断層であることが発見された。しかしながら、San Fernando Valley 内で現在認められている以上の多くの断層が活動中であることは明白である。これらの断層のこれまでの歴史上の地形的、および層位学的研究に併せて地震活動と地殻の緊張度の研究を行なうことにより、これらの断層の活動に対する重要な洞察を得ることができよう。

断層の将来の活動を評価する際に使用すべき断層の歴史の長さに関する合意は現在の所、存在しない。一般に使用されている 1 万年毎の区切（現世統から起算して）は、1952 年に発生した White Wolf 断層の地表断層運動の場合からみてもあまりに短かすぎる。この White Wolf 断層の場合には険しい山の前面 (Oakeshott, 1955, Dibblee, 1955 年) 以外には特にこれといって第四紀末期の活動を示すものではなく、従ってこの断層はそれ以前には活動中と考えられなかった。

この White Wolf の経験の他、断層のこれまでの運動のほんの一部しか実際には地質学的記録に記されない可能性があることを考慮に入れ、Wentworth, Ziony および Buchanan (1970) は、ほとんどの目的の場合、現世統の転位の証拠を有する断層は恐らく、ほとんどの目的に対して、その断層が活動中のものであると考慮すべきであると提案し、第四紀末期の転移を有する断層は、少くとも比較的高度の安全性を必要とする土地の使用目的に対しては、活動中の断層であると考えるのが望ましいと提案している。

1952 年の White Wolf の場合の経験に 1971 年の San Fernando の場合を加味することにより、第四紀末期の運動が示された場合、その反対の証拠がない限り、その断層は多分活動中であるとする証拠に考えられるべきだという結論を確かなものに行っている。かくて吾々は、第四紀末期の転位を有する前記の全ての断層は多分活動中であると暫定的に結論を下すものである。

第四紀末期の転位と結論するための調査と確証、およびこれらの断層の運動の割合と性質を調査するためには今後一層の研究が必要となろう。

こうした点を考慮すれば 1971 年のサン・フェルナンド断層運動の場所は驚くべきことではなかった筈である。何故なら、1971 年 2 月の地震の主要破壊地点に沿って、或はその周辺には第四紀末期の転位を有する断層の存在を暗示する多くの地震前の情報があったからである。が、現在の知識からすれば、南部カリフォルニア、又はサン・フェルナンド地区ですら、次の地表の断層運動が実際にそれが起った場所、もしくは日時 of のいずれかを予告することは不可能であったであろう。

結 論

San Fernando Valley 地区は中新世以後の堆積層の上に横たわっており、先新世代の結晶岩によって区切られている。この基盤岩の上には南北方向からの圧縮によって変形を受けた後期白亜紀-新世代の碎屑岩が不整合の形で横たわり、東西方向の褶曲を形成し、新世代の時代に亘ってこの山脈の南端に沿って衝上断層運動をもたらした。この衝上断層運動…そして1971年2月の破壊…は Transverse Ranges の山岳地方の隆起をもたらした、長い時間をかけた地殻変動の過程の続きである。

サン・フェルナンド近郊の1971年2月9日の断層運動は、第四紀末期の時代にはこの周辺で運動が行なわれたことを示す十分な証拠はあったものの、それまで活動中であると認識されていなかった断層上に発生した。第四紀末期の断層運動の地形的・層位学的記録、並びにその地下水に及ぼす影響等をも含め、今後は更に詳しく検討することを要する。何故ならこの地区にあっては、第四紀末期の転位はその断層が多分活動中であるとする十分な基準になると思われるからである。San Fernando Valleyにある多数の断層は幾らかの第四紀末期の転位の証拠を示しており、San Fernando の事件を鑑みて、断層運動は地質学的・地球物理学的両面に亘って詳細に調査が行なわれるまでは多分活動中のものと考えられるべきである。

2. サンフェルナンド地震における断層の形態と運動

Pattern of Faulting and Nature of Fault Movement in the San Fernando Earthquake

カリフォルニア工科大学

Barclay Kamb, L. T. Silver, M. J. Abrams, B. A.
Carter, T. H. Jordan, J. B. Minster

目的および調査の範囲

1971年2月9日のサンフェルナンド地震のメカニズムの地震観測および地域的な地質との関係を理解するための研究で、我々は表面断層作用による地表変位の発生とその量に関する情報を収集した。我々はこの断層の影響を、可能な限りその初期の状態で解読することをのぞいていたため、現地データの大部分を地震発生後4日以内に集めることができた。組織的な観察は、概して Sylmar および Olive View Hospital の東方に当る地域、すなわち、表面断層が十分に現われていた、この地震によって強い影響を受けた地域の東方に位置した地域に関してのみ実施した。この様に、我々の断層運動に関する解読がこの地域に限られ、そして疑いもなく調査した地域で我々が見落した多くの断層の特徴があるにもかかわらず、地震に関する全般的な知識の本体に寄与するものとして、ここに我々の調査結果を発表する次第である。

調査した地域

図1は、詳細に調査した地域で、かつ詳細な結果を要約したものである。この地域の地質は、Oak-shott (1958年) がすでに解説している。調査地域の北限を画する急崖をなす San Gabriel 山地は、北傾斜の Hospital 断層に沿って、サンフェルナンド方、南側へスラストし、結晶岩類の上にのっている。Hospital 断層は略々東西にのびており、Veterans Hospital の北方約 0.7 km の急崖の麓の近くを走っている。南側の沖積期に生じたサン・フェルナンド溪谷は、第三紀の堆積岩の上に横たわっている。これらは山脈の正面に近い離ればなれの地点で僅かに露出しているのみで、他の部分は第四紀沖積層によって深くおおわれている。しかし、Pacoima Wash の東にある山のふもとの小丘地域が、この山脈の正面（この部分は、はっきりと東方へ向って続いている Hospital 断層である Lopez 断層によって特徴づけられる）と、Big Tujunga Wash の注ぎ込んでいるこの沖積溪谷との間に介在している。90~180 m の起伏のあるこの山のふもとの小丘群は、この小丘の南の部分で約 65 度の角度で北方に様に傾斜した、第三紀堆積層の上に横たわっている。我々は、踏査の形で、図1の地域から北方、主震央の近くである Soledad Canyon へ向った、San Gabriel 山脈内での地表断層運動の調査を実施した。

断層の形態

この地震で発生した地表面の断層の変位は、使った地図の縮尺で出来るだけ詳細に示した（図-4）。

断層作用は、少くとも2 Kmだけさらに東へ続いている断続的な現われと共に、Sylmarの南から Little Tujunga Canyon の入口まで、10 Kmの距離に亘って殆んど連続して延びている。この断層運動地帯は、ここではサン・フェルナンド断層地帯と呼ぶことにする。調査地域における一般走向は $N 72^{\circ} W$ である。図4の最も東にある断層の約2 Km東の、Oro Vista 通りがBig Tujunga Wash と交差している部分で、1.0m だけこの通りの左側への水平移動が発生している。これが孤立した地殻構造上の偏移によって生じた特徴でないことは、この介在地域の数多くの地表断層運動と徴候によって示されている (Perry-Ehling, 私信) が、我々はこれらの調査は行っていない。この様に、サン・フェルナンド断層地帯は、図4の東のはしを超えて約2 Km続いている。こうして限定した断層運動地帯の全長は少くとも12 Kmで、また、この地表破断部から、Lopez Canyon の入口の北約13 Kmの位置にある、主震央までの距離に匹敵するものである (C.R.Allen私信)。

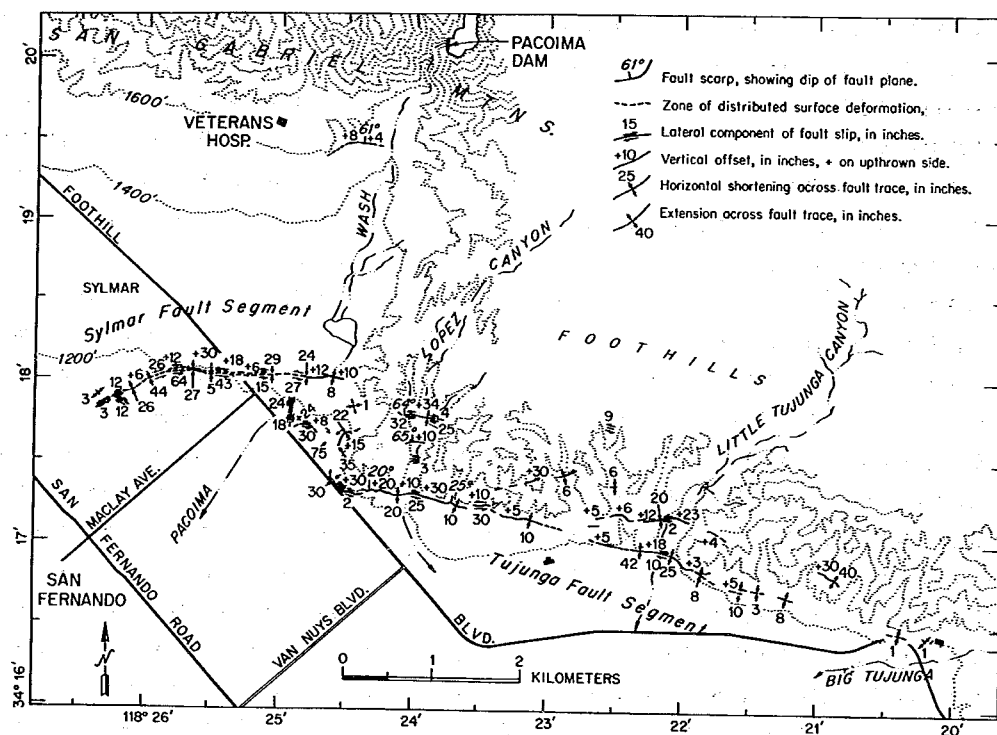


図-4 サン・フェルナンド地震によって生じた地表変動

我々が調査した断層破断部は、図4で示した様に西方へ向って消滅しているが、すでに報道された Mission Wellsの断層部分を含む、他の孤立した地殻構造上の偏移によって生じた断層運動は、図4の地域の西側にも十分存在するものと考えられる。すなわち、(1)Pacoima Wash から Sylmar に向って概ね西へ伸び、かつここでSylmar断層地区と呼ばれる破断地帯、(2)Pacoima Wash から

Little Tujunga canyon まで殆んど連続的に東へ伸び、そしてさらに Big Tujunga へ向って東へ断続的に伸びている、Tujunga 断層地区と呼ばれる、山のふもとの小丘の南側のはしに沿った断層線。(3)Tujunga の北約 0.3~0.9Km の山のふもとの小丘内にあり、かつこれとはほぼ並行した方向に向っている、短い断層グループ、(4)tujunga 地区の西のはしと Sylmar 地区の東のはしとの間の地域に存在する、短い複雑な破断部のグループ、ならびに、(5)Veterans Hospital (図-4) の約 1 Km 東にあるため、ここで Veterans 断層と呼ぶことにする、Pacoima Canyon の入口のすぐ西にある短い断層がそれである。このレポートおよびアメリカ地質調査所(この報告書の)で用いた術語のうち、Sylmar および Tujunga 地区は、さらに西方に位置した Mission Wells を含む、サンフェルナンド断層地帯の一部である。断層グループ(3)および(4)もこの地帯の一部であるが、しかしグループ(5)の断層は、別の特徴をそなえた断層である。各種グループの断層(グループ(5)を除く)は、共通して、一般に東-西の走向で、北へ傾斜しており、さらに衝上と左方向への水平変位を持っている。これらの断層は、その下に横たわっている基盤との関係、生じた表面の破断の種類、そのかたちや変位の細かい特徴は異なっている。Sylmar 断層地区に沿った変位は、一般に他のグループのそれに比べて大である。この Sylmar 地区は沖積層の表面に達しており、そしてこれに沿った変位は、少数の scarp (急崖)、mole tracks (モグラの通り路)、あるいは数百メートルの距離に亘って連続的にその跡をたどることができる、断層破断部の分離を可能にしたと思われる地表の断層の直線的な傾向と共に、約 50 m 巾の地帯に亘って幾分散した状態で分布している傾向がある。断層の形を直接観察することは不可能であった。Tujunga 断層地区は、その大部分がきれいな単一破断を示し、山のふもとの小丘の基盤上にある地形上の破断と相接して走っている、はっきりと見分けられる断層 scarp を形成している。この scarp は、恐らくその全長に亘って基盤を通過していると思われるが、しかし、きれいな基盤は、これが基盤と沖積層との接触部に近いことおよびその上の傾斜部の多量の破断によって厚い土壌の外壁が生じたため、この部分で露出していることはまれである。Canyon の入口を横切っている部分のこん跡から判断すると(図4を観察すること)、この断層は北へ 20~25 度で傾斜した、1 種の衝上である。グループ(3)の各断層は、あきらかに山のふもとの小丘の沖積層を貫通し、かつこれによって規制されている。露出しているところでは、これらの断層は沖積層内の成層と並行して走り、かつ北へ約 65 度傾斜していることがわかる。このグループ(3)の断層の横方向への連続性は、Tujunga 地区のそれに比べて明らかに少ない。Veterans 断層(グループ(5))も同様に横方向への伸びが短かく、そしてこれを取り囲む第三紀層内(Sugus)の成層方向と並行している。これは北へ約 60 度で傾斜している。これは小さな断層ではあるが、これまで認められた最大の地面の収縮が発生した、San Gabriel 山地断層崖のふもとに沿った地域で発見された、唯一のはっきりした構造的変位であるため特に重要な断層である。グループ(4)は、各種の破断の複雑な集団から成っているが、これらは単純な形をした他のグループのいずれとも一致していない。

断層運動の確認

図4に描いた各線は、実際の断層崖、または、もしそうでなければ、断層運動による地面の変位の結果であると考えられる、はっきりしたかつ十分連続した地表の断層地帯のいずれかである。特に Tujunga 地区に沿った幾つかの例で、例えば、別々になっている scarp がびったりと一線を成しているので、ある深さでは1つの連続する断層面に沿った運動が生じたことが明らかに示されている。我々は、地表面の断層運動の観察された特徴から仮説的な内挿法または外挿法を用いることを避けた。

我々は、人工的な盛土や沖積土の沈下、地這り地塊によって生じた scarp または裂け目を、図4から省くよう努力した。SyImar 断層地区では、その起伏が低いので、地すべり運動の可能性は殆んどないがしかし、東の山のふもと地域（山麓地域）ならびに北の San Gabriel 山地地帯では、今回の地震で広範囲にわたる地すべりが発生した。その広がり数百米に達する各地すべり地塊には、その形状及び影響を受けた斜面上での位置から判断して、多数の谷頭裂け目が存在すると考えられる。図4の山麓地域に描かれている scarp の幾つかは、これらの裂け目の特徴を示しているが、しかし、これらの裂け目で囲まれた地すべり地塊が予期に反してこの様に大規模であるとは考えられないので、図4はそのままにしてある。緯度 $34^{\circ}16.8'$ 、経度 $118^{\circ}20.9'$ の位置にある、約1mの高さの目立った

scarp は、その1つの例である。これから伸びた1.2 m巾の地割れを伴ったこの scarp が、もし大規模な地すべり地塊の頂上にあったならば、この斜面上の何処か低い部分にはっきりした下端があるべきであるが、しかしそれらしいものは発見されていない。これらの scarp は、部分的にはその起源が構造運動によるもので、そして下向き方向の運動によってはっきりしたり、ぼんやりしたりするということはあることで、これらは地すべりによる裂け目の特徴をそなえている。

Tujunga地区の scarp は、地すべり末端部にふさわしい、変位の大きさと“感じ”を与える。そしてこれらの下端部は正に山麓の前面の基底近くに位置しており、そこでは山麓の南に面した急斜面上の地すべり末端部があると考えられる。しかし、この地域では地層面の一般的な北方向の傾斜は、これらの斜面上での地すべり運動を抑制する傾向を示している。認められるような地すべりは、南に面した斜面上ではまれであるが、これに反して、これらの山麓部を南へ向かって貫通する峡谷部の東に面した斜面および特に西に面した斜面上では、これらの地這りは豊富である。もしこれらの丘の南側のふもとに沿った scarp が、地すべりをした地塊の最期の地すべり下端部であるならば、谷頭の裂け目は、ふもと部の scarp が最大となる位置より上にある、丘の斜面上で最も著しかったものと考えることができる。実際には、その逆の関係が観察されている。（図4の経度 $118^{\circ}20.9'$ の位置での）最も可能性のある著しい谷頭の裂け目は、これらの丘のふもと部の scarp のない部分で、しかもこの部分での地面の断裂の徴候はほんの僅かである。Tujunga 断層地区の scarp は起源が明らかに構造的のものであることを示している。そこではこの scarp は Little Tujunga Canyon の0.5 Kmの中、峡谷の出口を横切っているこの位置では、この scarp の北方0.5 Kmの範囲内には高いところは存在せず、このため、かなりの規模の地すべり地塊の発生源となるところは見当らない。

他の場所では、Tujunga 断層地区の scarp 面が、ある程度これらの丘の前縁にそった地すべりまたは一般的な崩落によるものを含んでいることはありうるが、しかし上に述べた理由から、これらの scarp で見られる変位は、その起源が主として構造的変位によるものであると我々は見ている。

断層による変位

図4は、観察した断層線を横切って発生した地層のずれをインチ単位で示したものである。これらの変位測定は、異なった日にある一定の位置で繰り返し実施したが、何等変化が見られなかったので、これらは事実上今回の地震の最中に発生したものと我々は見ている。

図4の地層のずれは、その垂直軸、側方軸および横軸方向への分力で示されている。断層による中斷が数米巾の普通の“ramp”の形を取っているところ、および地表面が粗くて不規則なところでは、その正確度は±5インチまたはこれ以下という不正確さである。側方分力（断層の走向に並行した水平分力）は、断層線を横切るフェンスまたは縁石等の特徴が前もって存在していたところで

は測定することができる。有利な状況の下では、測定値は数分の1インチまで正確であるが、しかしズレが数米に亘って分布しているところでは、その値は5インチまたはこれ以上不正確である。大きな誤差は、前もって存在していた道路上またはフェンスの線の不ぞろいを計算に入れられない場合に生じる。地層のずれの横軸方向の分力（断層の走向と直角をなす水平分力）は、これが断層地帯を横切る伸長または圧縮であるかを自ら明らかにする。道路または舗装した歩道の縦方向の収縮は、今回のサンフェルナンド地震の極めて共通した特徴である。この圧縮の一般的な形は、街路または歩道と直角をなす破断にそって舗装がばらばらに碎ける状態、および一方の側の舗装（もし片方が持上っているところではこの側が）が他の側の舗装に乗り上げる形を取っている。この状態の下では、圧縮は1インチ程度まで正確に測定することができる。舗装していない地面の断層 scarp にそった圧縮衝上断層運動もまた極めて一般的なもので、その圧縮の量は、場合によっては、特に芝生が芝生の上に乗り上げている場合、5インチ程度の正確さで測定することができる。全体として、図4で示した地層のずれの値は±5インチであるが、これら以上に信頼できる他の多くの値があることは言うまでもない。

サンフェルナンド地震における地層のずれの最大分力は左側方向のもので、これは Sylmar 地区の近くで発生し、そこでの値は約 1.6 m (64 インチ) である。0.8 m (32 インチ) までの左方への地層のズレは、グループ(2)および(3)の断層で発生しているが、しかし Sylmar 地区の場合ほど堅実に存在しているわけではない。北側が持ち上った垂直変位は、ほとんどすべての断層で見ることができる。その最大隆起は、グループ(1)から(3)までの断層のそれに匹敵するもので、その値は 0.8~0.9 m (30~34 インチ) に達している。全般的に東へ向かっている断層を横切る北から南への収縮も共通した特徴である。0.8 m (32 インチ) までの横方向の圧縮は、グループ(1)および(2)の断層の典型的なもので、その最大値は Little Tujunga 峡谷で記録された 1.1 m (42 インチ) である。変位は、グループ(4)および(5)のものが、グループ(1)から(3)のものに比べて全般的に小さい。

図4のデータは、サンフェルナンド地震における断層による変位が、殆んど等しい量の北から南への圧縮、(北側が持ち上った)垂直隆起、および左側方への地層のずれを伴ったことを示しており、このため、約45度の傾斜をした断層面にそって、南のほうの地塊の上に南西方向に作用した、北のほうの地塊の衝上運動として説明することができよう。

断層運動のさらに詳しい調査結果は表1の通りであるが、これは、地層のずれの分力を比較的正確に決定できた、グループ(1)から(3)までの断層の13の地点での変位ベクトルを示すものである。表1のベクトル値は、図4の地層のずれの分力から得たもので、北側の地塊に対する南側の地塊の運動によって表わされている。これらのベクトル値の方向は、図5のステレオネットに投影されている。図5の各点のグループ分けは、経度 $118^{\circ}23'$ から $25.8'$ までのサンフェルナンド断層地帯の中心部では、変位ベクトルは方位 $N 60^{\circ}E$ でプランジが 35° に集中する傾向があり、一方これに反して、この地帯のはしの方へかけてこのプランジの方向が北の方へ振れていることを表わしている。この傾向は、力学的な拘束力によって、地層のずれの側方方向分力のこの断層帯のはしに近づくにつれて消滅する現象が、横方向分力が消滅する現象よりも速やかに起ったことを示唆している。この断層帯の一般的なのび $S 72^{\circ}E$ に対して、このプランジの方位 $N 60^{\circ}E$ は約45度の角度をこなし、これは側方方向の地層のずれと横方向の圧縮が等しいことを意味している。

表1で示したすべての断層変位は、0.8~1.9 m (31~74 インチ) に亘っている。最大変位は、Sylmar 断層地区の中央近くである。もし Lopez 峡谷または Little Tujunga 峡谷のグループ(2)および(3)の断層を横切る変位を合計した場合、この Sylmar-Tujunga 断層地区を横切る合計変位は、

Foothill 地域で、さらに西の方のそれとほぼ同じかあるいは幾分大きいことがわかり、その値は約 2 m になる。Lopez 峡谷を横断する線に沿って計算した、この地帯を横切る北側が持ち上った隆起の最大合計量は約 1.9 m (7.4 インチ) である。

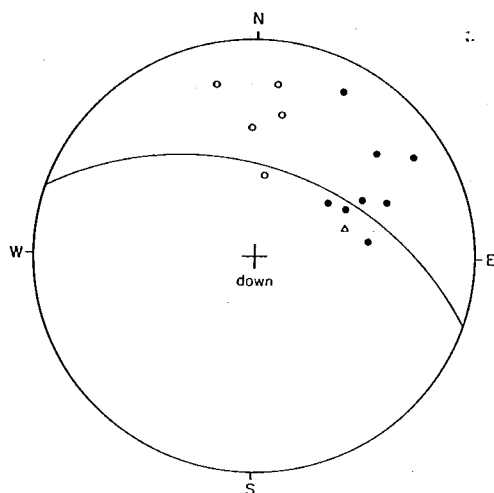


図-5 地震断層のズレ・ベクトルのステレオ投影

地層のズレの垂直および横方向分力の相対的な大きさは、断層面の傾斜の程度を与えるものである。この基準による推定傾斜は表 1 に示され、また、これに対する比較値として、可能な場所で 2 つの位置で断層面を直接測定した傾斜もこの表に示してある。これらの比較値はあまり一致していないが、しかし個々の傾斜推定値が ± 20 度の範囲内で信頼できることを示唆している。また、もしこの地帯の実際の断層面がほぼ一定した傾斜を持つものであるならば、表 1 に示した傾斜の値がばらばらであることは、上記同様これらが信頼性が低いことを意味することになる。表 1 の推定傾斜値の正確度の水準から見て、グループ(1)および(2)に対する全体的な断層面の傾斜の間には

No.	Fault group	Location Street(s)	Long 118°	Fault slip vector (motion of south side relative to north side)				Dip of fault plane	
				Length in.	Length m	Azimuth	Plunge	Inferred	Observed
1	1	Glenoaks-Lucas	26.2'	30	0.8	N. 13° W.	12° N.	13° NW.	-----
2	1	Phillippi-Chivers	25.9'	52	1.3	N. 7° E.	13° N.	15° NW.	-----
3	1	Gridley	25.8'	72	1.8	N. 57° E.	9° NE.	?	-----
4	1	Fernmont-Cometa	25.6'	74	1.9	N. 67° E.	24° NE.	48° N.	-----
5	1	Adelphia-Harding	25.4'	53	1.3	N. 82° E.	35° E.	79° N.	-----
6	1	Freeway 210	25.1'	34	.9	N. 27° E.	9° NE.	12° N.	-----
7	1	Chippewa-Newton	24.8'	38	1.0	N. 49° E.	18° NE.	27° N.	-----
8	2	Foothill (hospital)	24.5'	42	1.1	N. 53° E.	45° NE.	45° NE.	-----
9	2	Lopez Canyon	24.0'	38	1.0	N. 61° E.	32° NE.	45° N.	25° N.
10	2	Little Tujunga (lower)	22.2'	46	1.2	N. 10° E.	23° N.	23° N.	-----
11	2	0.25 km east of No. 10	22.1'	31	.8	N. 2° W.	29° N.	31° NE.	-----
12	3	Little Tujunga (upper)	22.1'	31	.8	N. 6° E.	49° N.	49° N.	-----
13	3	Lopez Canyon-Bailey	24.0'	53	1.3	N. 62° E.	40° NE.	53° N.	64° N.

表-1 地震断層のズレの走向傾斜

っきりした差があるとは認められないが、しかしグループ(3)の断層の傾斜がグループ(2)のそれよりもより急であることが暗に示されており、このことは利用できる断層の地表上での観察結果と一致している。

表 1 の傾斜値の平均 (No. 1 と 2 を除く) は 42°N で、この値は、ある深さでの主要な断層面の一般的な傾斜の程度を与えるものである。この傾斜は、今回の地表断層帯の約 1.3 km 北に位置した震央に対して、観測で得た主地震の中心点深さ 1.3 km と一致している。(C.R.Allen 私話)。

Sylmar 断層地区の特徴の詳細

図4で示したSylmar断層地区に関する描写は、図6で示した地表面の変位の詳細な観察に基づくものである。断層帯は、街路、歩道、および車道の舗装の破断によってその輪郭が描かれている。図6の太い直線で示したように、ごく少数の除外例を除き、これらの破断は、そのふちに沿って街路を横切る方向またはこれらに並行のいずれかの方向に走っている。街路の様式に従ってこれらの破断の方位づけを統制したため、個々の破断は、通常、このSylmar地区での断層変位を直接表現しているものではない。変位が広く分布した性質のものであるため、舗装していない地面に対する影響は、通常、連続的に追跡するには余りにも分散しすぎている。しかし、建物に対する主な構造の被害は、建物に近い舗装していない地面の変位が極めて分散しているため、断層変位の結果であるとはっきり認められない場所の場合でも、街路の破断の分布によって輪郭を描いた、地表面が直接変位した地域に限られている。図6の細い線で示した変位帯は、中間に介在した舗装していない地域での建物への主な構造上の被害の跡の位置を定めた後、1つの街路から次の街路へと横断して追跡したものである。

図6に示した変位の数字の大部分は、個々の街路を横切る方向のズレの量を表わしている。すべ

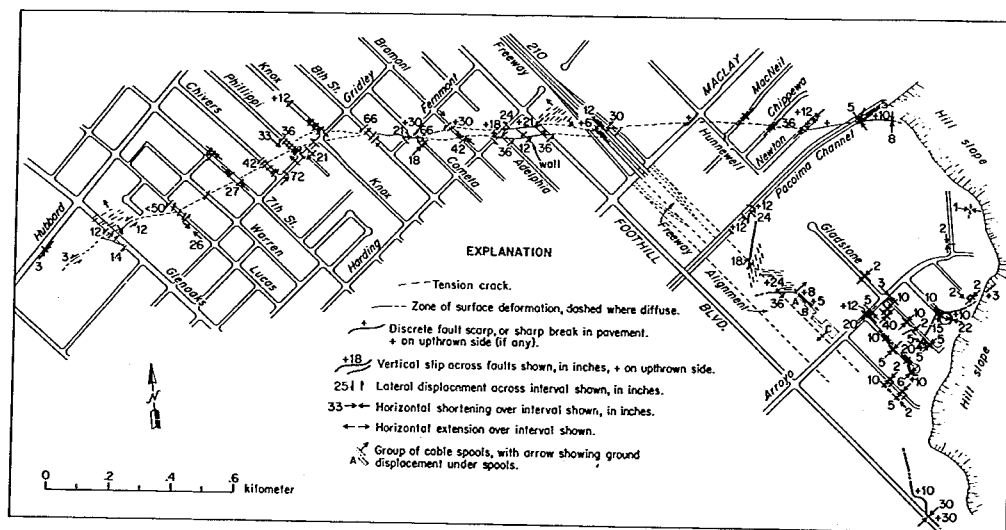


図-6 地震断層による街路のズレ

てこれらのケースでは、側方軸方向の分力は街路の線と直角方向で測定し、そして縦方向分力（水平圧縮または伸張）は街路の線に並行した方向で測定した。側方方向または垂直方向の変位は、概して50 m以上の間隔で分散した状態で分布しており、そしてここに示した数字は、矢印でマークした間隔を横切る累積ズレに相当する。殆んどきまって圧縮的なものであるが、縦方向の変位は、個々の破断上（衝上断層）、または街路の圧縮によって盛り上ったところに局限され、その代表的な幾つ

かの変位は、この断層変位帯内で街路を横切っている。地震中に生じた、大規模で堅固な舗装スラブの動的な見掛けのずれ運動が原因で、この同じ街路を横断した圧縮性の衝上断層の近くに、伸長性の割れ目が時折発見されている。この最も良い例は、Chivers と Phillippi の 両通りの間の Gridley 通りで見ることができる。図 6 で示した縦方向の変位は、補正のための伸びを計算に入れた、矢印で示した各間隔の間での正味累積量である。図 6 の街路のズレに関するデータから Sylmar 断層地区を横切る変位を引き出すには、ある種の解釈が必要である。原則的には、1つの街路を横切るズレの3つの直角分力（垂直、縦、横分力）が完全に地層のズレのベクトルを決定し、これはこれらの分力のベクトル的な加算によって得られる。もし断層の変位が、この地帯が横切っている各街路に関して、誠実に記録され、そして、もし南側が1つの堅固な地塊として北側に対して動いていたとするならば、この場合、1つの互に直角をなす街路網の中での、1つの街路を横切る側方軸方向のズレは、原則的には、すぐそばにあるこれとは直角をなす街路に沿った縦方向のズレと等しくなければならない、そしてこの縦方向のズレは、側方方向のズレの向き及び街路に対する断層の傾斜に応じて、圧縮または伸長性のものとなる。

この法則を、図 6 の街路のズレのデータに対して試みたとき、これは殆んど満足されない法則であることが判明した。この法則に背反する例は、次の各街路の交差部で発見されている。Chippewa と Gladstone, Harding と Adelphia, Cometa と Fernmont, Knox と Gridley, Gridley と Phillippi。これらのうち、最後のものは特に著しいもので、Knox と Phillippi との間の Gridley 側の左側方向の 21 インチに及ぶズレは、この断層帯が横切っている Phillippi 側で 21 インチの縦方向の継ぎ足しを必要としたが、しかしその代りとして、33 インチの縦方向の圧縮が観察されている。

一部の街路に対して、直角をなす街路上の縦方向の圧縮に相当する、側方軸方向のズレに対するデータが不足していることは、たとえ元の街路が、分散した側方方向の観察を可能にするだけの、十分な直線性を備えていなかったとしても、これは単に発見が困難であったためであろう。縦方向の変位に関する矛盾だらけの観察は、その発見を不可能にするほど広い範囲にわたって縦方向のズレを分散させた、あるいはこれを見出だすのに不適切な位置に移動させた、その時起った舗装のズレ運動のメカニズムが原因である。この様に、Gridley で生じた 72 インチの縦方向の圧縮は、その観察された位置である Phillippi と Chivers の間よりも、Knox に近い位置で発生するのがより適切である。Fernmont または Cometa の 2 つの街路で明白な側方方向のズレが発生しているにもかかわらず、これらの街路のいずれかで、その交差部の近くに縦方向のズレが欠けていることは、あるメカニズムが生じ、そしてこれによって予期された縦方向の変位が再び他の場所に分散したか、あるいはこれが隠れてしまったことを示している。

上に論じた各問題に直面した状況の下で、Sylmar 断層地区を横切る変位に到達するため、我々は幾分勝手気ままな方法を採用した。表 1 にリストした各位置に対して、我々は図 6 から代表的と思われる街路のズレ観察値を選定したが、これに際しては、互に隣接した街路を選ぶことを制限し、かつ上に論じた方向と相反するすべてのズレを無視した。観察値が隣り合った街路のそれと互に相容れるところではこれらを平均した。これらの選定したものは、各位置でどんなズレの観察値を無視したかが一見してわかるようにした。

前述の論議に一致するように、この選定は、これらの観察値がこれに隣接した街路での確認的なズレの観察値が欠けていること以上に重要である、との見解の下に行ったものである。それゆえ、選

定値は、この断層帯が横切るすべての街路上でのズレ観察値を単に平均した場合に得られる値に比べて、大きな断層の変位値が与えられている。

Sylmar 断層地区に対して、この方法で得た断層ベクトルは、表 1 に示されている。図 1 の Sylmar 地区に沿って示した地層のずれの水平分力は、表 1 のベクトルを断層の走向 および傾斜の各線上に投影して得たものである。

図 6 の Sylmar 断層地区に沿った街路のズレに関するデータは、表 1 に引き出した断層の変位に関係のある幾つかの規則正しさを示している。側方向のズレに確実に左寄りであり、そして北西に向った街路に関するこれらの値は、北東に向った街路に対してそれより確実に大である。そのこと自体によって、これは、一般に東に向った断層地帯を横切って、左へ向った側方向の地層のずれに加えてある種の北から南へ向った圧縮作用が生じたが、しかしこの側方向の地層のズレが横方向の圧縮よりまさっていたことを意味している。これは、(3)から(5)および(7)の各位置で得た変位ベクトルと一致する。もしそれが概して真実であった場合、この断層を横切った北西に向った街路での縦方向の伸長を予期できたが、しかしその代りとして、これらの街路は縦方向の圧縮のみを示している。しかし、伸張による地割れが生じた 2 つの地域（1 つは Foothill 通りと 210 フリーウェイとの間の地域、および他の 1 つは Glenoaks 通りと Lucas との間の地域）では、北西へ向かって伸張した徴候がある（図 6）。これらの 2 つの地域は、街路の舗装の破壊によって示された、断層変位帯の少し北東にある。北西に向った街路に沿った圧縮の徴候は、一般に Gridley の東の断層線に沿った部分が弱く、そしてこの部分に対して我々は、街路の側方向および縦方向の各々ズレから得た徴候の釣合いを保たせることに基づいて、全体としての断層変位が、南側部分を北側部分に対しては北東の方向に運んでいなければならないこと、並びに西に向かった断層に対する地層のずれの側方向および横断方向の分力がはる等しくなければならないこと、の 2 つの結論を出すことができよう。

Gridley（経度 $118^{\circ}25.8'$ ）近くで、Sylmar 断層地区の向きはやや急激に西から南西に振れている。この湾曲部の西で、北西に向かう街路上に著しい縦方向の圧縮が発見され、これが表に示した変位の向きを北のほうへ変えている（表 1 の位置 1 および 2）。この断層を横切る、はる等しい量の縦方向および横方向の両変位は、こうしてこの湾曲部の西で保持されているが、しかしこのために、断層の北および南にある巨大な岩盤が、極めて異常な方法で堅固な地塊から移動することが必要となった。

Tujunga 断層地区

この断層は一般に scarp を特徴とするため、換言すると地面の変位がくっきりと局部的に集中した地帯であるため、Sylmar 地区に関して上に論議したような複雑性を伴うことなく、これを横切る地層のズレの分力を直接測定することができる。しかし、scarp はその全長の殆んど部分が、舗装されていない不規則な地面を横切っているため、個々の地層のずれの測定は、概して Sylmar 地区で得たほど正確に行うことは不可能である。

この断層崖は、その西端および Little Tujunga 溪谷に近い部分が最もけわしい。詳しい調査によると、その連続性は Lopez と Little Tujunga 溪谷との間で数ヶ所に亘って中断している。この中断の最大のものは、経度 $118^{\circ}22.8'$ の位置にある。西から始まったこの scarp は、この地区で高さが低くなって幾つかの並行した小さな scarp、あるいは地割れとなり、そしてこれらは次第に分散した状態となって進み、約 15m の広さの地域で並行した“モール・トラック”がこれにとって代わり

そして最後にこの地域はすきで耕した耕地となって消えている。

Little Tujunga Wash の東 0.5 Km の位置で、この scarp は居住地域の一区画へと進み、そしてぼんやりしたものとなっている。しかし、断層運動の線は、街路の舗装面および給水本管での一線にそろった破断部が示すように、さらに東へ明らかに 1 Km 伸びている。ここでの変位は一般に小さくて (約 0.2 m の北から南へ向った圧縮、および認め得る程度の垂直運動で、側方への動きはない)、また、この断層線に沿った建物に与えた主な構造上の被害も比較的小さなものである。ここからさらに東へよった地域では、給水本管の 2ヶ所の破損および経度 $118^{\circ}20.4'$ に近い車道での小規模な北から南への圧縮を除き、この断層運動の影響は完全に消滅している。

Tujunga 断層地区での変位は図 4 の東端へ向って消滅しているが、さきに述べたように、さらに東へ向った Big Tujunga Wash の断層地区に沿って相当量の変位が再び現われており、この地域では 1.0 m という大きな左側方方向への地層のズレが観測されている。断層のこの部分は真東に向かい、そして Oro Vista 通りを横切るその東端近くで北東に向きを変えているようである。

Tujunga 断層地区を横切る左側方方向の変位は、Lopez 峡谷ではっきりと現われており、また、同様な変位ベクトルは、断層が Foothill に達して向きを北西に転じている、位置 68 (図 4) にも示されている。他の場所での記録にこの左側方方向のズレが一般に欠けていることは、部分的には断層線を横断する直線の特徴がまれであるためである。とは言うものの、Little Tujunga が道路には、明らかに側方方向のズレが存在せず、そして東へ 250 m 離れたオレンジの森には、25 cm の右側方方向のズレがはっきりと現われている。5。

グループ(3)の断層

Tujunga 断層地区の北へ 0.9 Km、経度 $34^{\circ}17.8'$ の位置にある Lopez 溪谷の 0.8 m の高さの scarp は、今回の地震で生じた極めて目立った特徴の断層の 1 つである。この scarp は Oak Hill 学校の近くを通過しているので、こゝでは Oak Hill 断層と呼ぶことにする。この scarp は、溪谷で基盤 (第 3 紀堆積岩) を通過する部分で、溪谷の西の壁に現われたこの scarp のこん跡によって示された傾斜と一致する、64 度北に傾斜した、鏡はだをした断層面を露出している。断層の走向と並行した垂直面の上に突き出たこの鏡はだのプランジは、東へ 40 度から 55 度の範囲内である。このことは、平均では $\pm$ 等しい量の垂直軸および左側方方向のずれがこの断層を横切っていることを示している。鏡はだのプランジの平均ベクトルは、図 5 で三角形として記入されている。

この断層 scarp で露出している粘土のみぞは、以前に Oak Hill 断層で動きが発生したことを示すが、しかしその時代が明らかでない。

Oak Hill 断層は溪谷の底の沖積層を通過する部分で、その scarp が分散し始めている。この scarp は峡谷の基盤のなかで再び現われているが、その高さは東および西の両方向へ進むに従って急激に低くなり、そして溪谷の底から両側へ 250 m と離れない位置で消えている。この断層 scarp の性質は、その最初の形状が特徴的であったこと、およびその側方方向の連続性をばかしてしまうおそれのある沖積層が概して存在していないことから考えて、一風変わったことである。このグループ (3) の他の scarp も、同様にその側方軸方向の伸びが限定されている。地すべりが多くの場所で多くの断層を不明瞭にしているとも思われ、また、我々の調査は、Foot Hill 地域のさらに奥まった一部の場所にある他の断層地区を省くことができるほど完全なものではないかも知れないが、これまで述べたことは実際に起こった影響であると我々は確信している。

Oak Hill断層の位置、直線性、および変位（表1、位置613）は、この断層がSylmar断層地区の東へ伸びるその連続の1部に相当することを暗示しているのかも知れないが、しかしこれら2つの地区の間には、このサンフェルナンド地震によって生じたscarp または他の認められる地表の断裂の徴候でこれらを結ぶものは、明らかに存在していない。

グループ(3)のscarpの側方方向の運動は、グループ(2)のそれと同様に不ぞろいであることを示している。Lopez Canyon Road から西へ100 m離れたOak Hill Scarpは0.8mの左側方方向の変位を示しているが、しかし道路自身は、同じ線に沿って0.1 mだけ右側方へ変位している。小さな左側方への変位は、Little Tujunga 峡谷内のハイウェイを通過する北側の急傾斜を含む、グループ(3)地帯内の幾つかの互に離れた場所で現われているが、しかし、Oak Hill scarpから南へ300 m離れたLopez 峡谷内の断層による破壊のような、側方へのズレが生じていない断層による破壊の例もある。

Little Tujunga 峡谷内の北側の断層による破壊は、東の方向へ連続的に追跡することはできず、そしてその東への連続性を示す唯一の証拠は、経度 $118^{\circ}21.8'$ の位置にある逆方向の垂直変位（南側が持上った）と幾つかの小さな急傾斜が一線上にあることだけである。経度 $118^{\circ}20.9'$ にある著しい急傾斜は、さきにはのめかした南 70° 東の方向へ向った連続線の上に横たわっているが、しかし我々は、この間に介在する1 Kmの距離に亘って断層の連続性を示す証拠が何も存在しないことを発見した。

Little Tujunga Washの西側には、J.L.Smith(私信)が発見した、古い段丘砂利層の基盤が、北側の断層による破断部に沿って、北側を上にして上下に2.5 mズレているという証拠がある。サンフェルナンド地震中に生じた変位は、わずか0.6 m程度であったので、このことは、第四紀時代にこの断層に変位が生じたことを示している。

Little Tujunga 峡谷内の北側にある破断部は、西へ向かってこれを追跡して行くと、はるかに離れた経度 $118^{\circ}22.7'$ の地点まで数多くの断続した小さなscarpが続いている。この距離内でのその方向は真西に向っているが、このことは、これがはるか西にあるTujunga断層地区と接続するかも知れない、ということを示唆している。同様な傾向は、経度 $118^{\circ}22.9'$ 緯度 $34^{\circ}17.4'$ の位置にある断裂部に対しても示唆されている。

もしグループ(3)の断層に関して観察した傾斜が、地表面の下まで続いているならば、これらの断層は、もっと緩い傾斜のTujunga断層地区とある深さで交叉することになる。地表面で65度の傾斜をしている断層は地層の構造に規制されているため、全体として断層ゾーンと仮定できるように、ある深さで地層構造に規制された約45度の傾斜に変わるように思われる。こうして、グループ(3)の断層は、ある深さでTujunga断層と合体する傾向がある。

その限定された側方方向の範囲およびそのTujunga断層地区との関係から見て、グループ(3)の断層は、主要衝上断層から外へ広がってこれから分離し、それから持上がって上をおおっている地塊へ分かれて、2次的に生じたものである。上部地塊に影響を及ぼす2次的な断層の枝分れの傾向は、主震に比べて余震の局部的な深さが比較的浅いことにも表われている(C. R. Allen, 私信)。しかし、グループ(3)の断層のいずれかが、余震の1つによって形成されたという証拠はない。この解釈はTujunga断層地区が地表面に表われた支配的な衝上のあとであることを確証するものであるが、しかし、グループ(3)断層地帯を横切る変位が、Tujunga断層地区自体のそれに匹敵するものであるということは特に心にとめるべきである。Pacoima Washの西で生じた支配的な断裂運動の主役は

Sylmar 断層地区が引受けているが、しかし Veterans断層が2次断層作用による型のものであることは別として、この地域の上部地塊には2次断層は存在していない。

グループ(4)の断層

図6で詳細に示したこれらの断層は、Sylmar断層地区の東端(図6の北東隅)と、Tujunga 断層の西端(図6の南東隅)との間の地域を占めている。これらの断層は、地震中のこれら2つの主要断層地区間の機械的な接点を表わしている。一般的な表現で述べると、Tujunga 断層地区に沿った地表面の変位の線は、Foothill地域の南西隅のあたりで北へ向きを変え、そしてSylmar断層地区のこん跡の北、Foothillの西端に沿って進んでいるが、ここで変位を西へ進めている。しかし、詳細に調べると、この北方への延長は複雑なもので、1つの明瞭な破断の代りに、小さな破断でできた迷路が存在している。

図6で示したように、Tujunga 断層地区の scarpは、Foot Hill Boulevard で北へ向きを変えた後、少し進んで消えている。その北へ著しく傾いた部分は、Arroyo Streetの南西に位置した市の3つの区画がある地域で、ここで生じた多くの舗装面の破断は、地面の変形を物語っている。ここで生じた破断面は殆んどが街路に直角または平行で、このことは、Sylmar 地帯と同様、舗装面が個々の破断面を大きく規制したことを物語っている。

この地域での変位の形状は特徴的で、側方または垂直方向の変位はわずかであるが、しかし北東および北西の方位に向かった破断面は、一貫した短縮を示し、これが地表面の正味損失を表わしている。しかし、全体の圧縮(図4)は、北西方向よりも北東方向の方が大で、このことは、この変形した地域の両側に横たわっている各地塊に関して他の部分で示した相対的な運動と一致している。

この地域の北の部分には、北東に向って不規則に伸びている小さな scarp(最大高さ0.4m(15インチ))があり、約200mに亘って街路をこわしている。すぐそばの西に面した丘の斜面の地すべりは、この scarpが原因であるかも知れないが、しかしその地形は明らかに地すべりのつま先部のそれではなく、そしてこれに近い地域に無数にある地殻運動による偏位による変形の他の証拠は、断層による scarp の出現をうなづかせるものがある。

さらに北の方には地表面の変位を示す幾つかの小さな徴候があるが、しかしこの変位の中心となる線は、Arroyo Streetを横断して、Gladstone Streetの南西に横たわっている最大高さ0.6m(24インチ)のはゞ西の方向に向かう断層 scarpへと進んでいるようである。この線はこの位置で Southern California Edison Co.の動力輸送線用々地を横断しているので、我々はこれを Power Line Scarp と呼ぶことにする。この scarp は、北西に向かった超高速道路の柵を0.9m(36インチ)左側方へ移動させている。Power Line Scarp から、この変位の中心は北西へ向けて Pacoima 洪水調整水路へと伸び、さらに、これが超高速道路の柵を横断した部分で明瞭な右側方への変位を見せる。北へ向かった破断部へと続いている。これがさらに北へ伸びて、Sylmar 断層地区に接しているかどうかはまだ決定されていない。

Power Line 断層に近い地域の地面の変位に関する一種のユニークな証拠として、図6の点線で描いた矩形で概略示した輸送線用地内できれいに並んで立っている、それぞれ6トンの重量の173ヶの大型ケーブル・スプールの列が設けられている。これらのスプールは、その軸を北東へ向けて、車輪のようにリムを地面に着けて直立している。リムは、上から加えた圧力によって、砂分の多い土の中に10cmほどくい込んでいる。スプールは北西から南東へところがるように置かれていたが、地震

中にころがったのは極めて僅かであった。その代り、その大部分が、土に跡を残して、10~20cm程横向きに移動した。この横向き（北東-南西）の運動は、個々のスプールの変位および列全体の中の位置の双方が図解的に示されるような方法で示されている。一部のスプールが全然動かなかったこと、一部が前後に振れたこと、および多くのスプールが一方の方向または他の方向へ着実に動いたことを示している。全体として述べると、グループAで囲んだスプールは一定して南西方向に移動し、そしてグループCのそれは北東方向へ動いているが、一方グループBのそれは運動の卓越した方向を示さず、AとCとの中間を示す。これらのグループの地表面での実際の位置は、図6に示されている。

これらのスプールを配置した地域の地面の側方への傾斜は、全然ないかまたはごく僅かで、また、グループAとCとの間には、はっきりした側方への傾きの差は認められなかった。このため、グループAからグループCへと応答が逆になっていることは、地震中の地面の動きの方向が逆になったことを表わしていると我々は信じている。この逆になったことは、断層のずれを示す重要な線が、このスプールの列を通過したという、地質学的な証拠とも一致している。Power Lines Scarpは、図解的に示したように、この列を斜めに通過し、そして北西の方向に向ってスプールの列の1つに沿って約75m進んだ後、方向を西へ転じてこの列から抜け出している。このscarp（この部分での高さは僅か10cmから20cmであったが）の上、または極めて近くに立っていたスプールは、これと言った変位を示していないが、このことは、この断層が断層帯の交叉するところであったことを暗に示すもので、変位全体の型は、地面の動きの逆転の中心がほぼ北から南へ向った線に沿ってこの列を通過し、そしてこのscarpをたどっていないことを示している。

6屯の重さのスプールの、地震による地面の動きへの応答に関する力学は、ある種の複雑な問題でこれは今後の調査を待たねばならない。可能と思われる最も単純な仮定は、すぐそばの断層がずれた結果生じた最初の大きな地面の変位運動中、これらのスプールは空間で静止の状態を保つ傾向にあったということである。この場合、変位の型は、グループAのスプールを含んだ波節を結ぶ線の西側が北東に動き、そして東側が南西に動いたことを示している。示された変位の型および断層の方位は、さきに述べたように、Power Line断層の北西に横たわっている北に向った、左側方への断層で見られるそれと同じである。スプールから推論した断層の型とこの地域の地表面で実際に発見された断層変位の型との間の食い違いは、我々は説明することができない。それにも拘らず、スプールの殆んどが北東または南西へ向けて側方へ動き、一方これに反して、機械的にこれらのスプールは容易に北西または南東にころがることができたという事実は、地面の動きが北東と南西に二分したことおよびこれに相当する断層変位の方向に対する強力な証拠である。

グループ4の断層は、総体的に、Tujunga断層地区の西端にある断層に匹敵するものであるけれども、このTujunga断層地区の破断部をSylmar地帯と結びつける詳しい地表面上の経路は、前述の論議が示すように、複雑であると同時にはっきりしていない。

Veterans 断層

その位置が、地震によってひどい被害を蒙ったVeterans病院（図4）の1Km東であるため、この断層は特に重要である。この断層は、建物への構造的な最大の被害が発生した、San Gabriel山地の断層崖の基盤に沿った地帯の東端に横たわっている。このVeterans断層は、この地帯で我々が発見できた範囲内の、直接的な地殻構造起源の唯一の地表面の断層である。また、この断層は、我々が調査している地域内の、サンフェルナンド断層地帯以外の地域で、サンフェルナンド地震によっ

て生じた唯一の地殻構造的な特徴をもっている。

このVeterans断層は、一般に東から西へ方向に沿って350mに亘って伸びた、約20cmの最大垂直変位を持つ低いscarpを形成している。目で認め得るscarp部分以外に、さらに東へ伸びていることは、破損した下水管によって示されているが、しかしこのscarpがPacoima Washを横断していないこと、およびこのWashの東にある舗装道路を通過していないことは確実である。このscarpが認めることができる範囲を超えて約250m伸びていることは、家屋に与えた構造上の大きな被害によってわかったが、しかしこの地帯は、この地震によって崩壊したVeterans病院の側方まで、あるいはこれに向って追跡することはできない。

この断層は、数ヶ所で基盤を切って露出している。断層面は約61度で一定して北へ傾斜している。断層は、その直ぐ北に横たわっているSaugus層（鮮新世—更新世）の沖積層の層理と平行している。これらの沖積層は、断層に沿って、古い（隆起した）第四紀の扇状地砂礫層と衝上接触をなしている。この扇状地砂礫層の上のSaugus層のスラストの全変位は少なくとも5mはあり、地震の変位よりもはるかに大きい。このことは、第四紀（そして恐らく現世統）の断層活動の歴史を示している。

この断層には、地震の結果としての変位の側方方向の分力は何も発見されていない。

Veterans断層の比較的急な傾斜、および下に横たわっている第三紀の堆積物との関係は、グループ(3)の断層の場合の状況と同じで、これらから類推して、Sylmar断層地区とのある関係が暗に示されている。しかし、Veterans断層が、San Gabriel山地前縁に近いことおよびこれによるスラストの生じた理由から、これらの重要な断層が力学的に関係があるということは、大いにありうることである。

震央地域の踏査結果

この地震による変位の徴候を得るため、図4の北端と、San Gabriel山地のふもとにある、Soledad溪谷との間に位置した震央地域の結晶岩部で、これまで地図に記入されていた断層の調査を行った。可能な場所では、実際の断層面に対して調査を実施した。多くの場合、断層は10mまたはそれ以上の範囲にわたってさぐり当てることができたので、存在する限りどんな小さな変位でも認めることができた。また、地震後7日間の間作成した、この調査を目的としたトラバースによって、まだ地図に記入されていない古い断層の動きの概査も行うことができた。

San Gabriel断層は、Bear Divide（西経 $118^{\circ}23.8'$ 北緯 $34^{\circ}21.5'$ ）の近くおよびDillon Divide（西経 $118^{\circ}21.1'$ 、北緯 $34^{\circ}20.8'$ ）の近くで調査したが、いずれの位置でも変位の徴候は見られなかった。Soledad溪谷に近い主震の震央地域では、古い年代順に断層を3つに区別することができ、(1)ほぼ東西に向う、落しの大きな、多分右ズレ断層（Soledad断層を含む）、(2)1組の、略 $N35^{\circ}E$ にのびる左ズレ断層および、1組の、少々新しい落しの大きな、略 $N35^{\circ}E$ にのびる左ズレ断層、(3)小さな落しと右ズレの北西にのびる断層がこれである。低い角度で北へ傾斜しているSoledad断層を除き、これらはすべて高角度の断層である。これらはすべて新生代後期の運動を経ているが、しかしいずれも現世統時代に活動した証拠はない。これらの組になった断層のうち、次の断層の調査を行ったが、変位の証拠は得られなかった。(1)Soledad断層の、Agua Dulce峡谷に近い震央が最初に位置した地点に近い、Soledad峡谷内の幾つかの部分、(2)Iron峡谷上流部（西経 $118^{\circ}23.8'$ 北緯 $34^{\circ}23.6'$ ）のSan Gabriel山地の北西部の一部と境を接している北北西ののびの断層、(3)Sond峡谷下流部（西経 $118^{\circ}23.9'$ 北緯 $34^{\circ}22.8'$ ）およびIndian

峡谷（西経 $118^{\circ}16.3'$ 北緯 $34^{\circ}25.7'$ ）にあり北西にのびる Magic Mountain 断層。(4) 恐らく Magic Mountain 断層と関係があると思われる、Bear 峡谷の北東にのびる断層。

小さな地割れ（巾 2 cm ，長さ 15 m ）が、西経 $118^{\circ}23.0'$ ，北緯 $34^{\circ}25.0'$ にある Pole 峡谷断層のあとに沿って $N55^{\circ}W$ にのびている。この地割れは、小さな山の背の頂きに沿って基盤をおおっている薄い表層を切っている。これには水平方向のズレは現われておらず、またこれは、この断層の一方の側での、土砂の沈下の差によって生じたものと思われる。Pole 峡谷断層は、この位置での動きに関する他の証拠は示していない。西経 $118^{\circ}21.4'$ 北緯 $34^{\circ}25.7'$ にある Soledad 峡谷では、未固結の沖積層内の地割れ地域が、この部分で北 75° 東にのびる Pole 峡谷断層の隠されたこん跡を横断している。この地域は、巾 $2\sim 3\text{ m}$ ，長さ約 300 m で、約 $N5^{\circ}E$ にのび、巾 4 インチ以下の幾つかの伸張性地割れから成っている。これらの地割れは、峡谷の軸に並行で、恐らく沖積層の凝固と収縮によって生じたものと思われる。

Ravenna（およそ西経 $118^{\circ}14'$ ，北緯 $34^{\circ}27'$ ）に近い、Soledad 峡谷内の幾つかの断層の調査を行ったが、ここでは破断（地割れ）の証拠は認められなかった。しかし、この地域の道路の盛土およびアスファルトには地割れが生じたが、このことは、Soledad 峡谷道路の西へ少くとも 10 哩の距離に亘ってこれに匹敵する地割れが生じていない。ということは注目に値する。

西経 $118^{\circ}23.6'$ 北緯 $34^{\circ}21.2'$ にある Pacoima 貯水池の北で、年代および変位が共に分っていない以前からある幾つかの断層にそって、地割れが観察された。これらの断層は、平均すると、 $N60^{\circ}W$ にのび、そして 40° 南西に傾斜している。 $1\sim 2\text{ cm}$ 南西落ちの傾斜断層の例が 2 つ示された。このズレは、構造運動、またはサンフェルナンドベーズンへ向う大きな地すべり運動のいづれかに相当すると考えられる。山地地域に他の地すべりの徴候が豊富にあることから見て、問題の地割れ自体は、断層運動の肯定的な証拠として取り上げることはできない。

地表面の断層運動と基盤の地質との関係

左ズレおよび地表面を横切る北傾斜の衝上運動を組合せた、サンフェルナンド地震中に発生したすべての断層運動は、地質学上および地震学上の経験（Allen 他 1965年，758頁）に基づいた、“Transverse Range” 構造の地域で予期される型の運動である。San Gabriel 山地の南端部に沿った断層は、傾斜方向へのズレが圧倒的に優勢な衝上断層として解釈されているが（Balley Tahns 1954年，103頁），しかし“Trans Range” 地域の他の場所にある断層、特に Malibu Coast 断層および Channel Islands の東西にのびる断層は、明瞭な左ズレを示している（Lamar 1961年，Barbat，1958；Kew，1927年；Rand，1931年。）

図4に示した、地震の最中に実際に動いた断層は、最近出版された地質図（Oakeshott 1958年；Jennings，Strang，1969年）に示された基盤の断層と、ぴったりとは一致していない。しかし、地表面上のこん跡が、このレポートで定義した Tujunga 断層地区と同一である名前のない1つの断層が、Miller（1934年）によって、西部 San Gabriel 山地の地質図に示された。この断層は、Foothill の南端部の鋭い地形上の不連続を基にして、確認したものと思われる。Miller は、この断層を、実質的には、サンフェルナンド地震の Tujunga 断層地区の scarp が、さきに述べたグループ(4)の複雑な断層群の方へ方向を変える地点である。Foothill 地域の南西隅で急激に北へ向けて方向を転じていると述べている。Miller は問題のこの断層について個別的には論じていないが、しかし、この種の断層を、Tujunga 断層地区に関してここで発見された比較的緩い

傾斜(約25度)を除き、我々の観察と一致する、北に傾斜した急な逆断層として解釈した(1934年、78頁)。

ここで定義したTujunga断層地区は、Hillが作成した地図(1930年)に示されたTujunga断層と同じではない。疑問線を用いてマークしたHillの断層は、ほぼ東西にのび、そして、ここでLittle Tujunga溪谷の入口として認められている、Tujunga断層地区の南1.3 Kmの位置に横たわっている。このレポートでのTujunga溪谷の定義には、Hillが紹介した(1930年)定義は用いないことにする。

西経 $118^{\circ}20.9'$ のLittle Tujunga山麓の南端に近い部分で、60度北に傾斜し、そして第四紀の段丘砂礫層の上にModelo層(中新世)がのっている短い衝上断層が、Oakeshottによって確認された(1958年、p1.10)この断層は、その痕跡が約0.8KmにわたってN85°W方向に伸びているものとして示されている。もし図4に記入するならば、この断層は、西経 $118^{\circ}20.9'$ にある観察を実施したscarpのすぐ南を通過するが、しかしその方向ははっきり異なっている。この断層は、サンフェルナンド地震による変位は認められなかった。その活動と動きの方向は、グループ(3)に属する断層に関する観測と同一で、またこれらの断層同様、Oakeshottが図示した(1958年)それに従って西にこれをたどると、Tujunga断層地区と接続することになる。これが重要な意義を持つことは、Foot hillの南端近くで以前に逆断層が発生したことを確認するためである。

顕著なOak Hill Scarpに相当するような著しい断層は、Oakeshottによっては認められていない(1958年)。Little Tujunga峡谷内の上流にある断層の裂け目は、図4に示された位置を超えてさらに東にそのあとをたどると、恐らくOakeshottが示した(1958年)、その変位と活動があまりはっきりしていない断層とほぼ接続することになろう。この基盤の断層が、Little Tujunga峡谷にscarpを作った断層と実際に接続するかどうかに関しては、さらに調査が必要である。さきにも述べたように、現在この断層およびOak Hill Scarpには、サンフェルナンド地震以前に活動を経験したことに関する証拠がある。

発表された地質図にはSylmar断層地区に沿った断層が示されていないけれども、この地区は、Oakeshottが十分なデータに基づいて認めた(1958年)Mission Hill断層の北東に向かった連続であると言うことができる。もしSylmar断層地区の南西にのびた部分を延長させるならば、Oakeshottが描いたMission Hill断層の地表面上のトレースにはほぼ接続する。この地域に描かれているこの断層のトレースは、特定の地質学的な法則に基づいたものでないため、疑問符がつけてあり、そしてこの2つの断層地区の接続は単なる仮説によるものである。それにもかかわらず、Mission Hill断層は、サンフェルナンド断層地区のトレースの下に横たわっていると思われる、地質学上および構造上の1つの理論にかなった型の1例である。

San Gabriel山地の基盤をなす結晶片岩がこれに沿って隆起し、そして新生代の沖積層の上に衝上した主要な逆断層および衝上がある地域である、Sierra Madre断層地帯は、サンフェルナンド地震の影響を受けた地域のすぐ近くにある最も目立った構造上の要素である。この地帯は、図4の北端に近い山地前縁の基盤に沿って東西に伸びている。この地域にある基礎岩盤と沖積層との間の主な衝上断層の接触部は、局部的にHospital断層と名づけられている(Oakeshott, 1958年)。Olive View およびVeteransの両病院の崩壊によって立証されたように、断層崖のふもとに沿った地面のゆれが極めてひどかった点、および発生したすべての断層の動きの衝上分力が大きいことから見て、Hospital断層、あるいはSierra Madre地帯の他の断層に関する動きを予想するのはも

ともであると考えられる。しかし我々が発見したこれらの動きの唯一の徴候は、ここでVeterans断層と呼ばれる小さな現象のみである。この断層は、基盤と沖積層との接触部から南へ0.5Kmの位置に横たわり、そして主な構造の破壊であると同時に、もしHospital断層のトレースがさらに東へ伸びる場合、恐らく達すると思われる部分に相当する。(しかし、Oakeshottはこのようには示していない1958年)。Veterans断層は、この基盤の接触部に近いその位置、その形、および動きの方向に基づいて、Sierra Madre断層の一部と見なすことができる。この様に、Veterans断層の動きは、サン・フェルナンド地震におけるSierra Madre断層の活動の明確な現われであるけれども、これに伴った断層の証拠は取るに足らないもので、またその範囲および変位の量も、サン・フェルナンド断層帯に沿って南部で発生したそれに比べて小さいものであった。しかし、広い意味では、サン・フェルナンド地震地帯は、Sierra Madre断層地帯を含む、Transverse Range断層と同じ系統と一体となった一部と考えることができ、そして事実、これら2つの地帯は、図4の東約5Kmの位置にあるSunlandの近くまでそのあとを伸ばすとき、恐らく接続すると思われる。

サン・フェルナンド峡谷からSan Gabriel山地を横切る地質断面(Oakeshott 1958年)は、全般的に60度で傾斜し、そして北側がより急になっているSierra Madre地帯の断層を示している。これらの比較的急な傾斜は、グループ(3)および(5)の断層と一致するが、しかし、断層の活動面が全体的に約45度北に傾いているという、さきに論じた一般的な傾向とは矛盾している。

結 論

サン・フェルナンド地震は、Transverse Rangeにおける断層運動に見られる一定の形態と一致する、北に傾斜した衝上断層上の運動にたつて生じた。調査した地域の殆んどすべての断層はある深さでは走向が $N 72^{\circ} W$ で約45度北に傾斜した1つの支配的な断層によって説明することができる。地表で動いた、集成的にサン・フェルナンド地震帯を構成する個々の断層は、殆んどが東西の方向にのび、推定した支配的な断層に対して梯形配置的な関係を保っている。個々の断層の変位には場所的な相違があるけれども、全体としての断層の動きは、概して等しい量の垂直隆起、北から南への圧縮、および左方向の地層のズレを伴っている。即ち北側ブロックが、南西方向へずれ南側のブロックへのった衝上運動である。この動きは、Transverse Range地域の断層の主な特徴として知られる、各種の変位の組合せである。全変位は約2mであった。

断層の活動は、主震の震央に近い地域では発生していない。この地震における断層の推論による型は、約45度北に傾斜した平面に沿って地面上を南西方向へ向かう断層の伝播を伴った、震央の下方約13Kmの深さでの断層の開始によるものである。

地面上では、この地震によって最も影響を受けた地域のすぐ近くにある地殻構造上の偏位による主要特徴であり、そして観察した種類の動きが最も明白に生じていると思われるSierra Madre断層地帯に沿った地帯では、わずかな量の局所的な断層運動が発生したのみである。殆んど断層運動は他に比べて(サン・フェルナンド地域で)あまり重要でない断層に沿って、さらに南へ約4Km離れた地表面にまで達した。それにもかかわらず、これらの断層は、主要な断層によって定められた一般的な断層運動の型に一致しており、そしてこれらは、恐らく東に少し離れた位置にあるSierra Madre断層地帯と接続すると思われる。

この地震の地殻構造的な型は、南の部分でSan Gabriel山地と接している。Sierra Madre地

帯に関連した断層が、この山地の直下を北へ通過していることを暗に示している。この様に、これらの断層は、通常見られるような、単なる境界部分の逆衝上ではない。この型は、一般的に Transverse Range における主要な衝上断層に適用できると思われる。

このサンフェルナンド地震で動いた断層で、これまで活断層として明らかに確認されていたものは全然なかった。現在、少なくともこれらの幾つかは、以前に動いた歴史を持っているという証拠がある。Tujunga 断層地区は、山麓地形と関連づけて考えれば推定できたはずである。

Sylmar 断層地区は、たとえ全体的なものでないにしても、簡単な調査によって、認めることができていたと思われる。

我々はここに、地図の作成に役立った、地震地域の大規模な航空写真を提供していただいた、米国地質調査所および Woodward - Lundgren Associates に対して、大いに感謝の意を表明する次第である。また、その氏名を最初の脚注で述べた、学生および協力者による現場データの収集への貢献に対しても感謝する次第である。このレポートに利用した資料は、その氏名をここで個々に挙げることはできないが、この地震の研究に従事している数多くの学者達と熱心に情報を交換して、大いに改良を加えたものである。

3. 地 表 断 層 運 動

Surface Faulting

合 衆 国 地 質 調 査 所

1971年2月9日のサンフェルナンド地震に伴って生じた構造運動によって、地表面が破断した地域が生じたが、その一部は、San Gabriel山地とSan Fernando-Tujunga峡谷との間の境界に沿ってのび、また他の一部はサンフェルナンド峡谷の北の突出部を横切っている。この後者の構造破断した地域は、震央区域内の各所で、この地震によって生じた最も極端な被害の幾つかと関係している。

概略東西にのびる地表面の破断した地帯は、約15 Kmの長さで、幾分南側にくぼんでいる。注目に値する不連続がこの孤状地帯の中央に近い位置で発生したが、ここでは、西側の半分が約1 Km東側の半分の北に片寄っている。この破断部に沿った動きは複雑である。ほとんどすべての scarp は、山地側の地塊が平野側の地塊に対して持ち上った形で南に面している。大きな scarp の大部分は左ズレの動きを示しているが、主な破断地帯と部分的に並行している。広い範囲にわたる小さな scarp およびキレツは、右ズレを示している。この地表の破断部の全長15 Kmの範囲内で、1 scarp 当り測定した最大垂直変位は約1 m、最大側方変位は約1 m、そして最大短縮（衝上分力）は約0.9 mである。この地震後最初の1週間内に記録したすべての余震の殆んどは、主要な地表面の構造物の破断線を結ぶ線の北側に位置していた（このレポートの図4、およびWesson等）。

これらの余震は、地表面で測定した断層面の傾斜より約15度傾斜がゆるい約40度で北に傾斜した、分散的ではあるが十分限られたゾーンを形成している。地下の震源までの深さおよび震央と地表面の破断部との間の距離を用いて計算した断層の傾斜は約45度で、これは1971年3月1日現在で入手できた情報を用いたものである。この値は、地表面で測定した最も信頼できる値よりも約10度緩いものである。

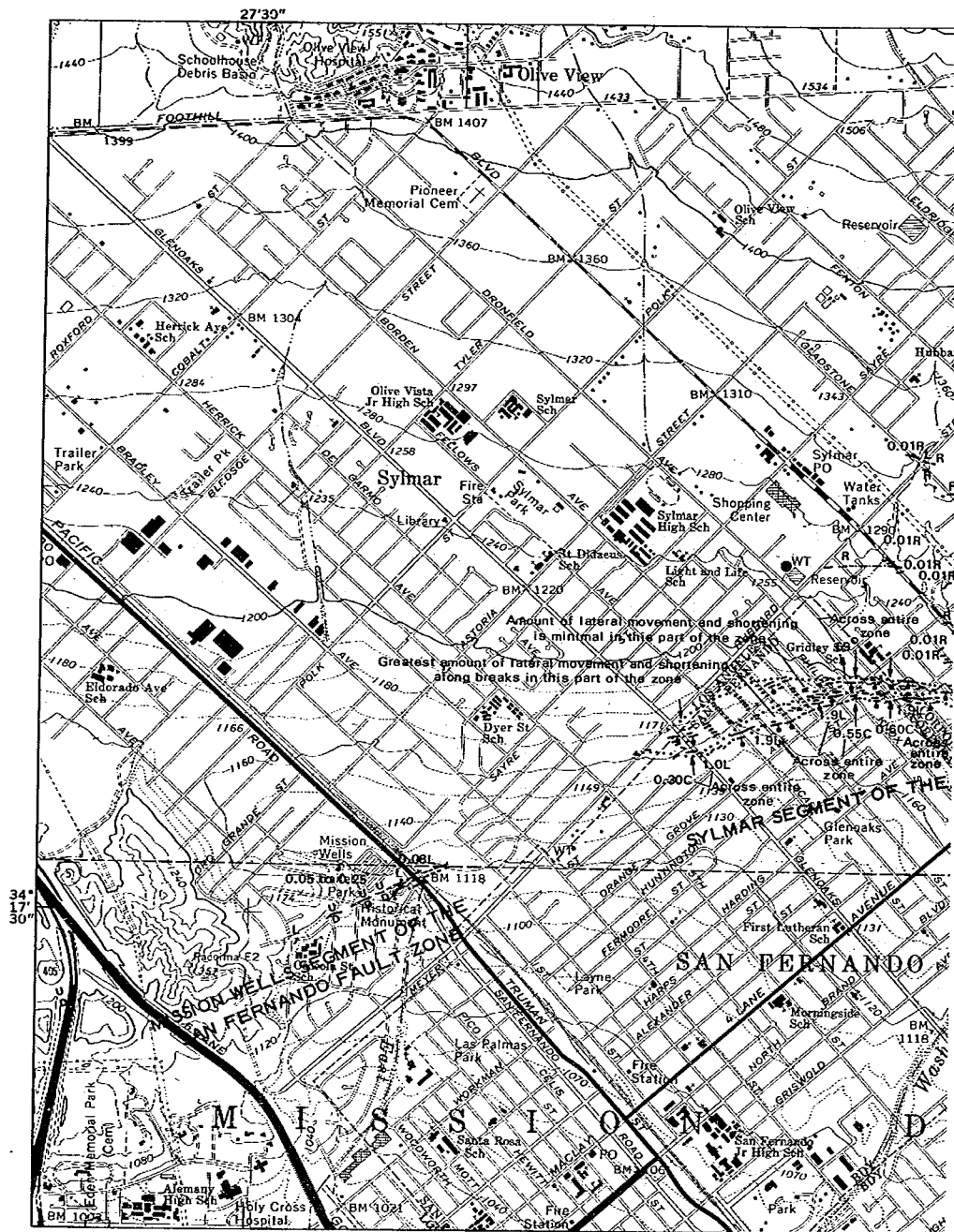
この地震の最中に発生した地表面の破断は、2つの主要なグループ、すなわち、構造的なものと非構造的なものに分けることができる。これら2つはその起源が著しく異なっているものの、これらを現場で区別することは一般に困難である。図7に示した scarp は、構造的なものと解釈されるもののみである。

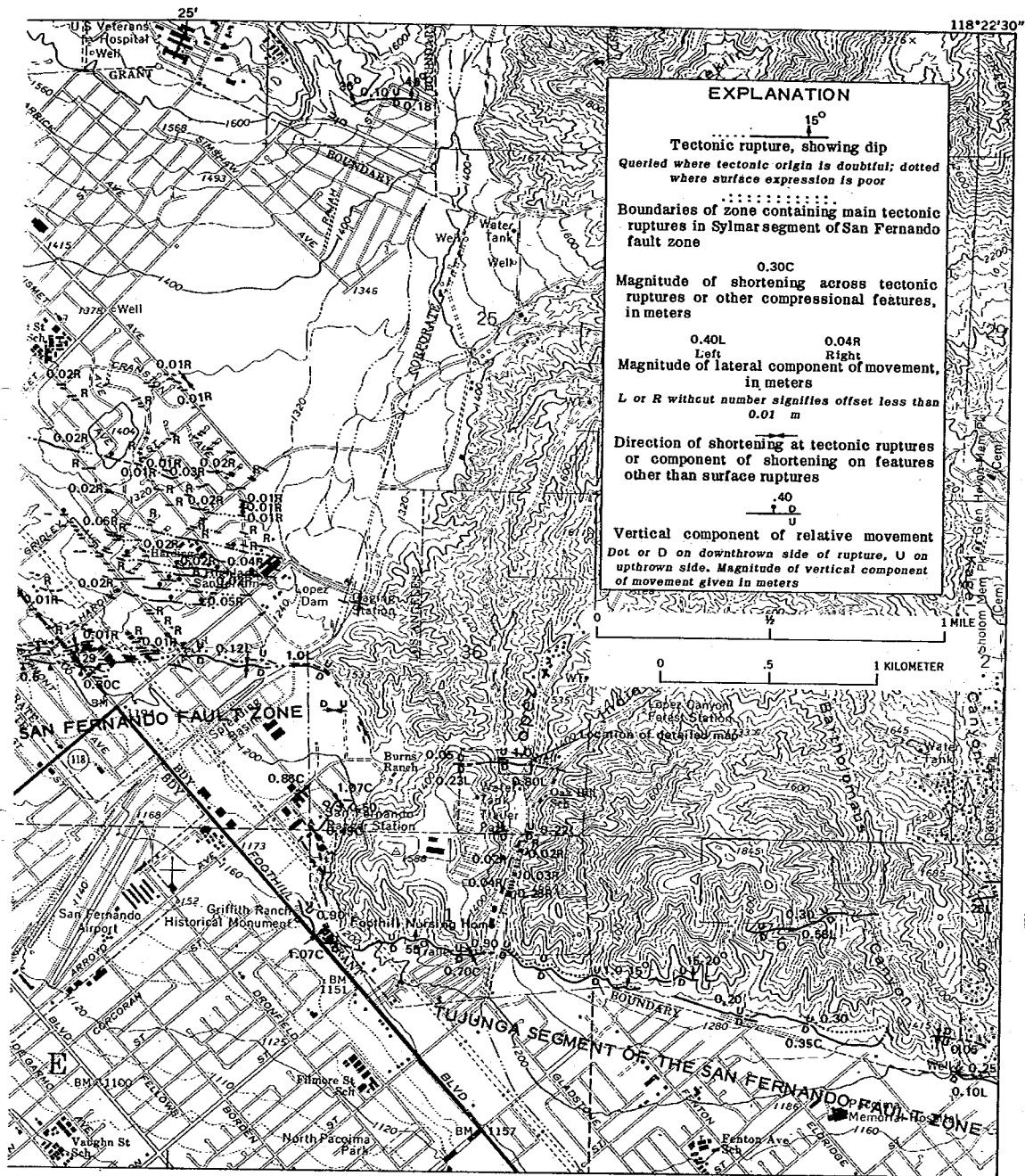
この地震によって生じたものとして既に知られている、あるいは生じたものと考えられる地表面の破断部は、Lower Van Narman湖のすぐ南のSan Diego FreewayからBig Tujunga峡谷まで断続的に伸びている。これらの破断部はSan Diego FreewayとOsceola Street Schoolとの間、またはSan Fernando Roadのすぐ東からGlenoaks BoulevardとHubbard Streetとの交差部のすぐ西までの地域には1つも発見されていない。この破断地帯は、Lopezダムの南約0.4 Kmの地点で南に曲っているが、しかし破断の一部は、低い丘の群れを通過して東のLopez峡谷へと連続している模様である。Foothill養護院から山地の前縁に沿い、そこから東の方にかけては、一般に地表断層運動を十分規定することができるが、しかし、Little Tujunga峡谷のすぐ東の地点まで部分的に断続している。この地点から東へ約2 Kmの距離にかけての、この山地の前縁に沿っては、明瞭

な地表断層運動は発見されていない。Lakeview Terrace 療養所の約 0.3 Km 東から、Big Tujunga 峡谷へ約 0.3 Km はいった地点まで、地表面の破断は、わずかに数ヶ所の中断地点を除き、再び存在している。この峡谷をさらに約 0.4 Km さかのぼった地点で、0.3 Km の scarp がこの地表破断の東の Little Tujunga 峡谷まで、断続的な、一般に小さな破断が、この山地の前縁に沿って、比較的直線的な破断の線の北で発生している。これらの破断のうち、2 つが Lopez 峡谷および Bartholomaeus 峡谷内でそれぞれ発見され、4 つの小さな破断が Kagel 峡谷を横切り、そして 1 つの破断が Little Tujunga, Oliver, および Schwartz の各峡谷を横断している。比較的短い、小さな南に面した scarp の形をした、恐らく構造的な破断と思われるものが、U. S. Veterans Hospital のすぐ東で認められたが、この破断は、南側の主要破断地帯とは明らかに連続性を示していない。

これらの破断は、ある地域では集中的に発生し、他の地域では発生せず、そしてこれらの破断が全体の中央近くで明らかに途切れているため、自然の形によって 3 つに分けることができ、便宜上、これらのうち、(1) San Diego Freeway から San Fernando Road のすぐ東までの地表面の断崖を San Fernando 断層地帯の Mission Wells 地区と呼び、(2) Hubbard Street と Glenoaks Boulevard の交差部から Foothill Nursing Home までの破断部を、San Fernando 断層帯の Sylmar 地区と呼び、(3) 一般に Nursing Home の東にある山の前面に沿って進んでいる破断の一部を、San Fernando 断層帯の Tujunga 地区と呼ぶことにする。

Oakeshott (1958 年、92 頁) は、Sierra Madre 断層帯の山地前縁にある幾つかの断層をグループに分けたが、この地帯は Santa Susana 断層の北東端から Rowley 断層帯の西端まで伸びている。1971 年 2 月 9 日の、長さ 0.3 Km の Tujunga 地区の最東端の断層運動のみが、同氏が作成した地質図に示されたどの断層とも一致するが、しかし、構造的なものとして推定された、Veterans Hospital の東に出来たこの断層は、恐らく Sierra Madre 帯の一部であると思われる。Oakeshott は、このレポートの地図に書き入れたように、Tujunga 地区の北の麓にある中新世および鮮新世の基礎に幾つかの断層を示しているが、しかし地震後のこれらの断層の動きに関する記録はない。Sierra Madre 断層帯を構成するこれまで知られている個々の断層について、たとえ動きが生じていないとしても、その重要性は決して減少するものではない。この断層帯は、これに沿って San Gabriel 山地の隆起が生じた (Oakeshott, 1958 年、105 頁) 主要地質構造上の変位が生じた断層帯の 1 つで、また 2 月 9 日の地表面の断層は、これと同じ系の一部であるかも知れない。





図一七 サン・フェルナンド地震によって生じた地表面の断裂

地表面の破断

2月9日の構造的な地表破断は、西から東へと地区毎に説明することにする。

San Fernando 断層帯のMission Wells 地区。

Lower Van Norman Lake の東1.5kmにあるMission Wellsの歴史的な遺跡に近い、小さな南に面した scarp は、高さ0.05~0.25mでN60°Wでのびている(図7)。左ズレをしている地表面のクラックは、Osceola Street School の北西隅のすぐ南西から約1ブロック東に寄ったSan Fernando Road まで伸びている。クラックは、この破断帯の走向に沿って、Golden State Freeway のコンクリート舗装にも発見されたが、しかしこれらは恐らく地すべりによって生じたものである。この地区は、San Diego Freeway と Osceola Street School との間、および San Fernando Road の約1ブロック東の地点からHubbard Street とGlenoaks Boulevardとの交差部までには地表面での徴候は現われていない。

San Fernando 断層帯のSylmar 地区

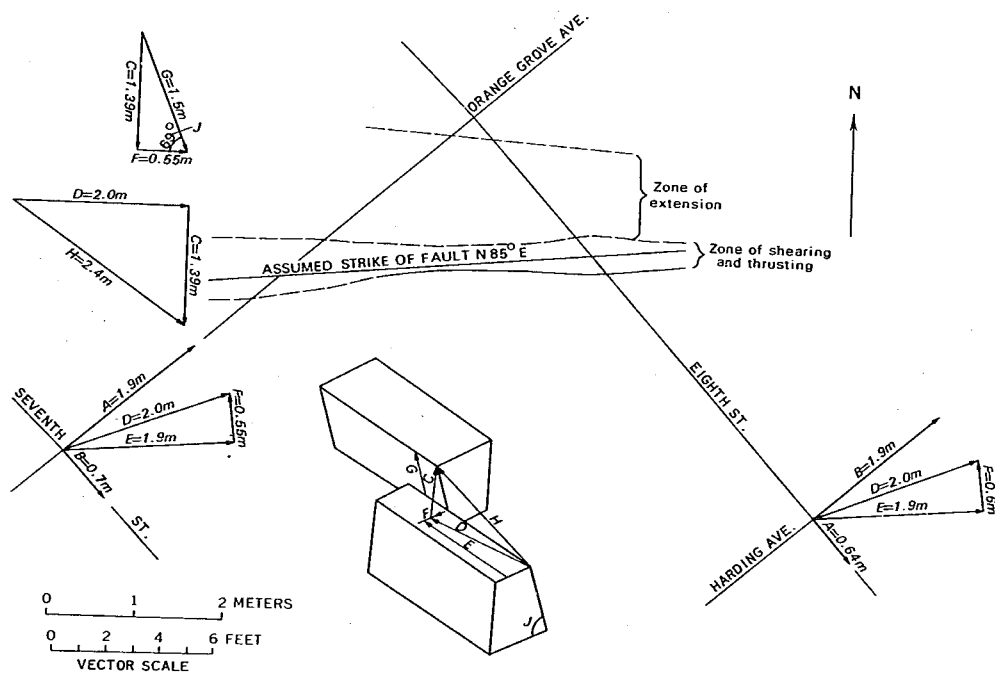
Sylmar 地区は、構造的な破断がはっきり表われている地域で、この破断は、Hubbard と Glenoaks Boulevard との交差部の南のすみにある、ひどく被害を受けたショッピング・センターから東へ向かって、Lopez Dam のすぐ南にある山地の前面まで伸びている。この地区の中央部を横切る累積変位はそれぞれ1.9m、1.39m、および0.6mという大きな延長方向、上下方向、および直角方向の各々の短縮分力から成っている(図8)。しかし、この地区の個々の破断を横切る変位の最大分力は、これらの値のは半分、そして大部分の破断を横切る値ははるかに小さい。この地区はその巾が一般に75mから200m以上の範囲内であるが、しかし衝上作用によって生じた延長方向の動きおよび短縮のすべて、ならびに垂直(上下)方向の変位の約半分は、事実上、この地区の南の境界に沿った狭い地帯に集中している(図7)。垂直方向の変位の残りの部分は、この地区の断層の残りの部分を占める、多くの小さな標準的な(伸張)断層および少数の小さな衝上断層を横切って分布し、そして小さな左または右ズレの変位を示している。この様に、破断地域は、南の狭いせん断および衝上地区および北の広い伸張地区に分かれており、これら2つの地区では垂直変位が発生している。変位がこの様に分布していることは、街路の下を走る公共施設の破壊したパイプ、ならびに破壊した歩道、縁石、および街路によって十分に示されている(図9)。

下に横たわっている地面に対して、歩道および縁石の伸びまたは圧縮は、地表面の変形を見積る基準となるものである。例えば、すべての北西から南東に向かう道路(Foothill, Eighth, Glenoaks)は、正味の伸びを示し、これに反して、北西に向かった道路は短縮した。不運にも、多量の測定を必要としたこと(通常400m長さの1ブロック当り100以上)、および各種の不確実な要素の理由で、断層帯を横切る正味の変化の測定の正確度は約±0.1mである。我々の評価作業は、裂けた部分やこわれた歩道や縁石を迅速に取り除く道路補修によってさらに妨げられた。

2・3の地表面破断は、道路、家、および構内を横切って追跡することができた。街路(縁石および歩道を含む)は剛性をそなえているため、せん断されたところで橋渡しをする傾向があり、一般にこの剛性のためで、地面の破断した場所から100mもの長い範囲にわたる街路、縁石、および歩道で、圧縮力がねじれおよび衝上断層となって伝達されている。一方これに反して、伸びは、通常、継ぎ目に最も近い位置(一般に5~6m以内)の上に横たわっている歩道および縁石、ならびに街道の縦方向に直角な引張り作用によるアスファルト舗装面の破損部分および下に横たわっている地面の伸

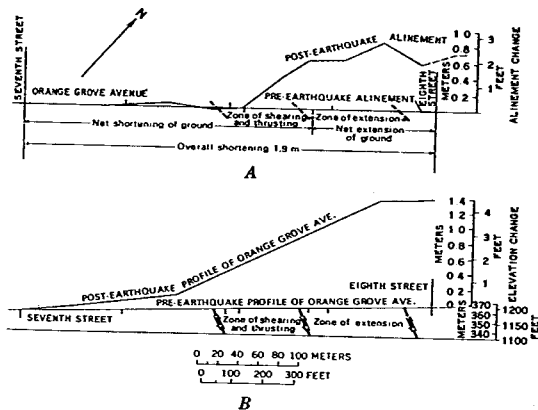
張部の明らかに数十米の範囲内のアスファルト舗装面に現われている。家屋は、変位がこれに影響を及ぼしていることが目に見えるほど十分大きくない限り（約 50 ～ 100 m），一般にこれらの下を通る破断部を隠している。むき出しの地面で明瞭に現われている多くの破断面は、農作物または植林によって完全に隠れている。しかし、Bromont Street およびそのすぐ西にある街路を横切る、0.1 m または 0.2 m を超える変位を持つ小数の破断面は、これらの構造物を横切って連続して続いている。これらの影響の正味の結果として、せん断地帯は、たとえばはっきりと境界がついていない場合でも、これが横切った個々の街路の明らかな左ズレによって現われ、一方伸張地帯は、その地帯内の個々の街路を横切る普通の破損および伸びた破断面によって特徴づけられている。

この破断面が生じた地帯の南の境界は鋭いが、これに反して北の境界はそうでない。はっきりした地面の破断面が、せん断作用および衝上作用の南側の境界を数十米超えた位置で終っており、これに



Vectors represent the movement of one end of each street with respect to the other end. Values are summarized in table 1. A, change in length of street; B, left-lateral displacement of street; C, vertical displacement of street; D, horizontal displacement of ground; E, strike slip; F, horizontal shortening; G, dip slip; H, net slip; J, dip of fault plane.

図 - 8 想定地震断層のズレベクトル



A. Changes in length and alignment (plan view). Left-lateral displacement of the street from the original alignment was measured by sighting along the northeast curb February 19, 1971. Change in length of the street was measured February 20, 1971, by R.T. Ruthven, U.S. Geological Survey. Localization of horizontal movement was determined by measuring compression and extension of curbs and sidewalks on both sides of Orange Grove Avenue. This figure shows that most of the shearing and thrusting is concentrated in the shear-thrust zone near the southern boundary of the break zone.

B. Changes in elevation relative to leveling done in January 1962. The elevation of the intersection of Orange Grove Avenue and Seventh Street is assumed to have remained unchanged. Measured February 15, 1971, by R.E. Munn, Engineering Department, City of San Fernando. This profile shows that vertical displacement is distributed across the entire zone of breakage.

図-9 地震によるある街路の変動

かし舗装、歩道、および家屋のコンクリート・スラブを破壊した部分では、その形跡は幾分複雑である。この断層の間隔は、最小の約20mから最大の約100mまでに及んでいる。この地域の居住者は破断面の多くは地震の直後にわずかなズレを示したのみで、その後数日にわたってこれらが動き続けたと述べている。

地表面の破壊が最も複雑な部分の1つは、San Fernando断層帯のSylmarおよびTujungaの両地区の間にある、明白な断続した地域であるサン・フェルナンド空港の北東部に生じている。この複雑性は、断層の成分が幾何学的に不規則であるばかりでなく、さらに断層の連続性を実証できるコン跡が少いことおよび変位の横方向分力の方向が多様に変化していることが関連している。

Maclay AvenueとPacoima Washとの間で、Sylmar地区の水平分離は左ズレから右ズレへと逆になっている。しかし、北または北東側は、一貫して、比較的ずれ上った地塊となっている。Maclay Avenueの南東にある最初の街路では、カーブが0.12m 左側方へ分離した形の破壊が現われているが、しかし1ブロックだけさらに南東へ進んだ地域では、カーブの側方への分離の現象は見られず、(この断層のあとと街路との角度的な関係から)地層のずれによる小さな左ズレの分力を暗に示して

反して伸張した地帯では、破断面の境界は広がった形をとり、破断面の数およびこれらを横切る変位が徐々に減少している特徴がある。図7に示した、伸張した地帯の北側の境界は、一般に、むき出しの地面を横切る伸びによる破断面が現われている地域を限っている。

くっきりと限られたSylmar断層地区の主要な伸びは北の方へ向きを変えて、広い地域にわたって比較的狭い間隔で数多くの断層を生じさせているが、これらの殆んどは、一定した小さな右ズレを示している。この種の破断面を示す地域の大きさは、東西の方向で、Sylmar断層地区の主要地域の長さより幾分短かい約1.8 Km、そして南北の方向が約1.3 Kmである。これらの断層は、左ズレ地帯の東西へ向かう性質も共有し、そして右ズレはもちろん、小さな伸びによるギャップを一般に示している。動きが存在した地域でのその垂直分力の方向は、通常北へ傾斜しているが、またはSylmar断層地区の地域内の明白な右への地層のずれを生じた地帯の、垂直変位の方向の反対である。この右ズレの断層は一般に単純で地面では直線に近い破断面であるが、し

いる。さらに1ブロックだけ東に進むと、カーブは右側方へ約0.3 m分離しており、垂直ズレ分力と組合わされたさらに小さな左ズレの分力、または起こり得る右側方への小さな動きの分力のいずれかを表わしている。Pacoima Wash のすぐ東で、この断層の Sylmar 地区は、普通の直線状の北から南へ走る垣根を、左側方へ約1.0m 変位させている。地面が破壊したあとがこの垣根の線に対しては正確に90°であるため、この地点でのズレの分力の方向に関するあいまいさは無い。

Pacoima Wash のすぐ隣りにある、広くひろがったベーズンの北の部分から東へかけて、この断層の Sylmar 地区のこん跡は、急激に南へ向きを変え、そしてけわしい山の前面の基盤とは一致している。この位置では、こん跡は短い距離に亘ってのみ認めることができる。しかし、Burns という牧場主の家の位置にある、凹入した峡谷の南の傾斜面の基盤にそった地表面の破壊が殆んど存在しないにも拘らず、地震のあとで破損した給水管が掘り出されたことは、この家の北の方向約0.4 kmの地点で、少くとも0.43mの東西に向かった地表面の短縮作用が起ったことを示している。山の地塊は、この地点の沖積層の面に対して、少くとも数cmだけさらに持上った。短縮した給水管の位置では明白な造山運動または地表面の地割れは現われていず、こうして、同様な目に見えない圧縮地帯が、San Fernando Ranger Station の近くを南へ向って続いている可能性を提起している。

San Fernando Ranger Station に近い、北西から南東に走る2つの袋小路の南東の端で、歩道および舗装面が破壊して北西方向に移動し、アスファルト駐車場がこなごなに砕け、そして2つの建物が1緒に押しつぶされ、少くともその1つにひどい構造上の被害を蒙らせた。これらの建物の方は、強力な北西から南東へ向かう短縮の分力が生じたことを示している。これらの袋小路の1つである Motero Avenue は、1.07m だけ北西から南東の方向へ短縮した。(2月14日にスチール・テープで測った長さとは、公式の記録であげてある長さとの差、) 中心線の突出部で、街路の端から約20 m 南東寄りに、最初建立されていた記念碑は、中心線から南西へ約0.2m だけ移動した。この短縮運動は、歩道を曲げ、街路の端にある円形部分を平らたくし、そして縁石と歩道との間に三日月形の開口ができた(図11および12.)。この街路および空地での2つの破壊の形は、恐らく小さな右方向の地層のずれ分力と組合わされた、強力な北西から南東へ向かう圧縮および南東側の隆起を示している。多くの地すべりによる高さ1 m までの Scarp が、すぐ東にある丘の側面および背の部分を通過している。これらの存在は、丘陵を構成する、成層し、キレツの多い岩の沈下や膨れ出しが丘陵の麓の沖積層をクサビ型に押し出し、圧縮の影響の大部分を生じさせ、さらに生じたと思われる構造的な変位を覆ってしまったということの可能性を暗示している。

Tujunga 断層地区の西端は、San Fernando Ranger Station の近くにある山の傾斜面の基盤に近い、隠された圧縮帯に沿った Sylmar 地区と接続しているようである。また、Sylmar 地区が分岐して、その東側の要素が、Lopez 峡谷の北の一番奥の地点で図に記入されている断層の線にそって、山脈の中へ伸びることもさらに可能なことである。しかし、Burns Ranch の東にある丘の上が非常に広い範囲に亘る地すべりでおおわれているため、このような接続を実証することは不可能である。

San Fernando 断層帯の Tujunga 地区

Tujunga 地区は、Foothill Boulevard の北東部で東の Big Tujunga 峡谷の中へ向って建っている、Foothill Nursing Home の近くから断続的な形で、Tujunga 溪谷の北の側面にある丘の前面に沿って伸びている。

ナーシング・ホームの前面で、縁石は街路の水準から約1 m 高く持上っている約0.9mの短縮によ

って示されている。この動きの横断方向の分力は、ナーシング・ホームの東側にある北 50° 西の方向に走る垣根に沿って測定された。ナーシング・ホームの東には、低いしかし十分明白な断層のあとが、わづか数ヶ所が途切れたのみで、Lopez峡谷の入口へと続いている。この地表面の破断が、ナーシング・ホームのすぐ東にある丘の低いScarpと交差する場所では、scarpは低いしかし十分はっきりしたものであった。約2~3m広さの伸びによる地割れが著しい地域は、scarpの基盤から約10mの隆起斜面を形成している。Lopez峡谷の西側にある高さ約0.85mのscarpは、上に積み重なった北側の地塊の前縁部で、小山の多い丘のようなふくらんだ形で立っている。Lopez峡谷のすぐ西にあるトレイラー・パークでは、断層が第三紀海成堆積層の浅い傾斜面に従って表われている模様である。Lopez峡谷の約0.4Km西で、走向に沿った約200mの距離にわたって、この断層面は、約 55° Nというむしろ一定した傾斜を見せている。この峡谷のすぐ東で、この断層帯は、幾分並行したうろこ模様の多くの破壊によってはっきりと示されている。

Lopez峡谷から東にかけて、この断層帯は、梯形状に位置した多くの地区によってできている。この峡谷の入口から東へ約0.8Kmの位置で、断層の傾斜は約 15° 度(北)まで小さくなっているようであるが、しかし構造的scarpは、この地域にある地すべりの麓の部分から見分けることは困難である。Bartholomaus峡谷の入口では、このscarpは、北側が約0.25mの高くそして川岸で約0.1mの左へズレているのが現れている。前面のscarpは約0.60mの高さで、そしてLittle Tujunga峡谷内でよく露出している。この峡谷の東、約1.5Kmの距離にわたって、この地帯は圧縮による曲がりの特徴とし、そして発達したscarpが欠けている。

構造的破壊が発見されていない、この山塊の前面に沿った約2.2Kmの間隙部は、Little Tujunga峡谷の近くで、これらの破壊部を、Lakeview Terrace Sanitariumの東へ約0.4Km離れた、Big Tujunga峡谷の北側にある、はっきりと示された南に面したscarpから分離している。このscarpは長さ150mで高さ0.35mであるが、しかしこの急傾斜は、このクリーク(小川)を横切って連続的に追跡することはできない。この地面の破壊部の南東端は、幾つかの途切れたscarpによって、そのあとを東へ約0.9Kmに亘って追跡することができる十分に現われた一連の地表面の破断面と接続している。この一連の破断面の殆んどは、土を動かす作用によって大規模に攪拌されて未固結の河川堆積物の中に現われたもので、そしてこの部分の断層scarpの外観と高さは、走向に沿って大きく変化している。このscarpの高さの幾つかの例が図7に示されている。Lakeview Terrace Sanitariumの東約1.5Kmの位置で、この破壊は、Big Tujunga Washの北端に露出した、薄い層をしたシルト岩と礫岩とが交互に重なり合った層を通過している。ここでの断層面は、約 $N70^{\circ}W$ を向き、そして $55\sim60^{\circ}N$ に傾斜している。最も新しい動きと関係しているか、あるいは関係していないかははっきりしないが、鏡肌は、断層のみぞの狭い地帯で現われそして断層面上真直に傾斜している。このみぞは、この地点での2月9日の動きが、以前に存在していた断層に沿って生じたことを示している。

この断層の入った基盤の東数米の位置で、再び河床堆積物の中に没しscarpは不明瞭な状態となり、そして地塊の流動によって形成された1群の小丘の背後からこれを見分けることができない。それぞれ約150~200mの長さの2つの断続したscarpが、梯形状に東へ向って続いている(図7)。これらのうち、より東に位置したscarpは、Oro Vista Avenueの延長部を約0.3m左側ふらせている。このscarpの高さは、この通りの下にある川の底で約0.5mである。この破壊部の約0.4Km東に、この構造的破壊の東端を示すscarpが横たわっている。このscarpは、0.3Kmの長さで

かつN75°Wに向かっている。その一部は、薄い地層と成ったシルト岩の中で出現しており、そしてこのシルト岩と共に62°Nに傾いている。その動きは、約0.4m北へ向って持上っている。約0.7Km東へ進んだ位置でMount Gleason Avenueを横切る4つの地割れは、0.02mに達する左側および右側への両方への変位を示しているが、これらは恐らく構造的破壊ではないと思われる。

Tujunga 地区北の山地中の地表面の断層運動

Lopez 峡谷の入口の断層のあとのほか、他の2月9日の断層のあとが、その入口から0.6Kmおよび0.9Km北に進んだ位置でこの峡谷を横断している。このうち、一番北のものは、みぞによって示されかつ隣接した岩盤内でせん断作用を起した、既に存在していた断層部で発生したが、しかしこの以前の断層運動は、明らかに、現在の地勢図に記号で表わされていないものである。このこん跡は、Lopez Canyon Road から西へ伸びている部分で、その下に基盤および沖積層がそれぞれ部分的に分布している、人工的にこう配をつけた面（切取法面）を横切っている図10は、この2つの媒体内でのこの断層の非常に異なった状態を、平面図と断面図で示したものである。約1mの高さのはっきりした断層 scarp が基盤の中で形成されたが（図11）、これに反して沖積層中にはゆるい単斜構造が出現した。この部分の基盤は、層状の砕けやすい砂岩、礫石、および薄い頁岩より成り、そして断層の両側では同じ姿勢（走向がN80°W、傾斜が70°N）をしている。この断層は、地表面でN80°Wでのび、そして65°Nで傾斜している。

エクステンソメーターを据え付けるためにドリルした、36インチ径のボアホールがこれを貫通した位置まで、少くとも10mの深さまで続いている。沖積層内でこの断層内でこの断層を特徴づけている、このゆるい単斜構造は、30~35m程度の広がりをもつ（図10の断面B-B'）。この単斜構造を横切る高さの差は、この scarp を横切るそれとは同じであるけれども、断面図のみから、この差を構造上のゆがみ（warp）として確認することは困難と思われる。断面B-B'のS36とS39との間で、この単斜構造は、東-南東にのびるかすかに現われた一連のプレッシャ・リッジ、および北-北東にのびる伸びによる破断面によって特徴づけられている。一部の破断面は小さな左側への変位を示している。S36とS38との間で、この単斜構造は、小さな垂直方向の動き（南へ向って下がった）を示す、概して東または東-北東にのびた引張り破断面によって特徴づけられている。これらの動きは、S36とS37との間の小さな左側への変位、およびS37とS38との間の小さな左側への変位を伴っている。

Lopez 峡谷での断層の変位の計算に用いた3つの直線的な特徴は、図10でI、IIおよびIIIの符号がつけてある。これらは恐らくブルドーザで造成したものであるが、2つの背（IおよびII）および浅く切り込んだエッジ（III）から成っている。現場測定を通じて得た、地層の逆ズレおよび左側への地層のずれの分力は、それぞれ、Iに対しては1.05mおよび0.80m、IIに対しては1.26mおよび0.85m、そしてIIIに対しては0.88mおよび0.70mである。これらの分力の平均値は、約1.05mの地層の逆ズレおよび0.80mの左側への地層のずれ、あるいは1.32mの斜め方向の（正味）地層のずれである。

この scarp の東端近くで、みぞのなかの鏡肌は水平から58°傾斜しているが、これは、傾斜地層のずれに対する走向地層のずれの比率（0.635）が、ブルドーザによって変位させた特徴から得た比率（0.76）より幾分低いことを示している。しかし、これらの鏡肌が、2月9日に形成されたか、またはそれ以前のこの同一断層平面での動きによって形成されたかどうかについては確かでない。これら両者は、これがBonilla およびBuchanan の分類（1970年、7~9頁）による左逆斜め方向

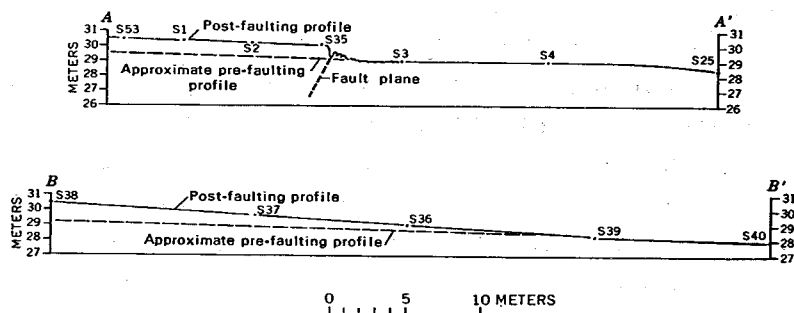
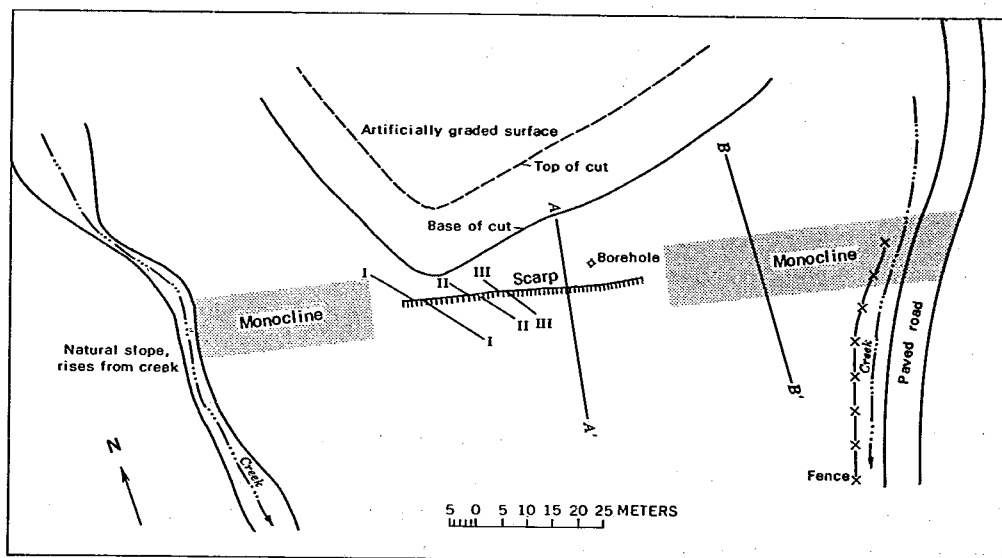


図-10 Lopez 溪谷出口北方 0.9 Km 地点の断層の平面と断面

の断層 left-reuerse oblique fault であったことを示している。

Lopez 峡谷の入口から北へ約 0.6 Km の位置で、小さな scarp が Lonyon Road の舗装面を持上げ、北側部分を約 0.2 m 高めている。破断部に沿ったロードカットは、乱されて幾分落ち込んだ砂岩およびシルト岩を露出しているが、しかし Gouge または地層の構造的截頭等が目で認められるような、確実な証拠またはこれまでの動きは無い。しかし、この scarp から真西へ約 110 m の位置で北にのびた断層面を、同様な堆積岩の中の急なカット面に見ることができる。この地震前の基準線での破断部を横切るものは存在していないが、しかし、恐らく地層のずれの小さな左側への分力を伴った、5~6 cm 程度の衝上運動が明らかに現われている。道路の切取部と対比するとき、この部分のズレは、断層のみぞおよび下位の地層の僅かな構造的不整合によって示されるように、以前から存

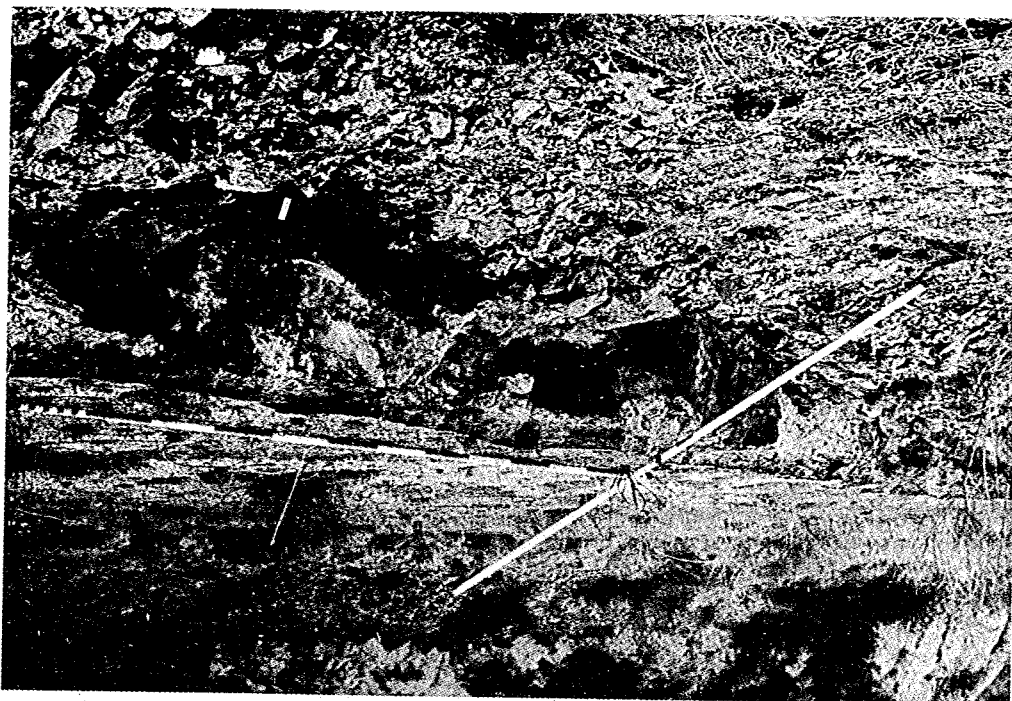


図-11 基盤の Fault scarp

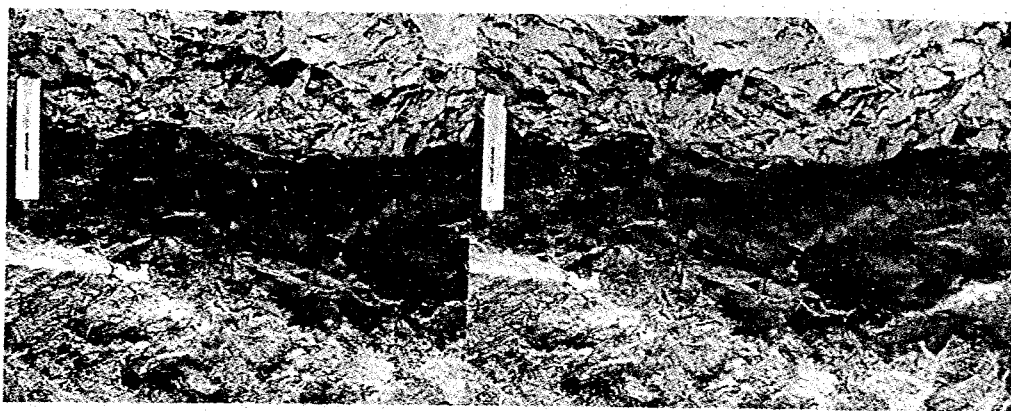


図-12 Fault scarp の詳細

在した断層と共に生じたようである。このズレは、明らかに、この切取の上方部分内で西にのびて消

滅し、そして構造的破断運動は、この丘のこれより高いどんな地点での投影線上にも発見されていない。この断層が、Lopez Canyon Road の東にある scarp と接続するかどうかは不確実である。間に介在している部分の舗装面および土壌は、盛土の上に位置しており、そしてこれらは強い力で破断されている。しかしこの破断は、恐らく非構造的性質のもので、また、これら2つのズレの連続性は疑問である。右側へのズレを示している13ヶ所の破断面が、San Fernando 断層帯のTujunga地区から北へ0.27 Kmと0.53 Kmとの間の、Lopez Canyon Road を破壊している。これらの破断部を横切る右側への正味ズレは約0.5m で、そのうち約半分は、その南側の端にある狭い地帯に集中している。これらは、Sylmar地区のすぐ北にある、右側への破断作用が発生した広い地帯内の破断部と同じであるように見受けられる。

その他の十分に現われた、南に面した scarp は、前面の scarp から Little Tujunga 峡谷を上流へ約0.4 Km進んだ位置に横たわっている。この上流の scarp は、山塊前面のそれと同じ様に小山の多い1つのふくらみである。これは Little Tujunga Road の東約0.3 Kmの位置で消滅しているが、しかし西へ向かっては、殆んどKagel 峡谷まで続いている。Little Tujunga 峡谷のすぐ西で、この Scarp の高さは0.45m である。幾つかの小さな scarp がKagel 峡谷を横切っているが、しかしこの峡谷の外側ではこれらを追跡することはできない。小さな南に面した scarp が、Bartholomaeus 峡谷の底から西へ伸びているが、しかしこれは東へ向って追跡することはできない。この scarp は、峡谷の底にあるバックルよりは少し大きいけれども、西へ0.3Km進んだ山の背の部分では、これは約0.3 Kmの高さでかつ約0.58m の左側へのズレを示している。恐らく構造性起源によるものと思われる目立った scarp が、Oliver および Schwartz の両峡谷の、それぞれ入口から0.4 Km北へ入った谷底部を横切っている。Oliver 峡谷内の scarp は約0.9m の高さで、そして Schwartz峡谷内のそれは約0.3m である。これら両者は、恐らく長い構造的要素の一部であると思われるが、しかし、峡谷の外側で、周囲の丘の側面をおおった広範囲にわたる地すべり地塊を通して、自信を持ってこれらを追跡することはできない。

Veterans Hospital の東の scarp

人工構造物への広範な被害が、Upper Van Norman Lake から Pacoimawashの水源へ伸びる地帯に沿って生じたけれども、この地帯では、構造起源によるものと解釈できる scarp は、僅かに1ヶ所存在しているに過ぎない。この scarp は、長さ約300m で、かつは東西にのびた小さな地表面上の破断として説明されている。この scarp は、U.S.Veterans Hospitalと Pacoima Wash との間にあり、そしてRajah Street に近い部分的に開発された住宅地域の切取部および盛土部で十分に露出している。切取部の土手では、地層のずれは、Pacoima 層群（このレポートの、Wentworth および Yerkes の論文にある地質図に描かれている、saugus層群に含められている）の砂岩層および礫岩層がまじった砂岩層の層理に並行して、一般に36度から48度の間で北へ傾斜している。変位は明らかに直接的な上向き傾斜で、また北の部分の地すべりの最大相対隆起は約0.18 mである。西へのびた破断の走向は、徐々に南西へと向きを変えている。一連の破断面の西側の端を Hubbard Street で観察した、垂直ズレを示す短い scarp を結ぶ線は、南西にのびる傾向を持つものと思われる。この破断は、構造性の特徴を備えているようであるけれども、思うに、これは、その上向き傾斜の限界を見究めることができなかったほど、予想を越える大規模な地すべりのつま先のふくらみであったと言える。

最後に観察した方向に沿って続いている、この断層の突出部は、Veterans Hospital のずっと南を通っている。この scarp の西では、その後の構造的破断は認められていないけれども、このことは、Juvenile Hall の西から Veterans Hospital までの地域がこの地震中に構造的に活動していたという可能性を妨げるものではない。例えば、左側への変形が Juvenile Hall に近い地域で発生していたかも知れない、と言うのは、地震後の San Fernando Road の調査によって、Juvenile Hall の真西に当るある地点で、これが Roxford Street と San Fernando Road の角のある地点に関して、左側および南へ向かって動いたことが示されているからである。(このレポートの Youd.)

地震の強度と破断の大きさとの比較

2月9日の断層運動の最大地表変位および長さを、他の逆斜交断層 (reverse-oblique slip fault) とを比較することは、これと同じ方向の歴史上の地表面の断層作用の例で、世界中の文献に記録されているのがわずか6件程度であるため、困難なことである。さらに、この種の断層に対するデータは、地震の強度と断層の変位または長さとの間の一定した関係を示していないこともその理由の1つである。1つのグループとして処理された、あらゆる種類の歴史上の地表面の断層運動に関する経験上のデータ (Bonilla および Buchanan, 1970年, セット1-140, 図7, 8.) によると、マグニチュード6.6の地震に伴う地表面の断層運動は、2月9日の断層運動の2.4mの変位および約15 Kmの長さの場合に対して0.8mの最大地表変位および約20 Kmの最大地表長さとなるようである。

San Fernando 断層地帯の地震前の地形の説明

1971年のサン・フェルナンド地震は、1952年のArvin-Tehachapi地震と、多くの地形的な類似性を共有している。(Oakeshott, 1955年,) これら2つの地震における動きは、衝上運動と左側方向の地層のずれとを組合せたもので、また、両者とも、地形的な形跡に関して、その当時活動しているとは一般に認められていなかった断層に関連している。

サン・フェルナンド断層帯に沿った、1971年の破断の大部分は、以前の断層運動によって生じた scarp をたどっている。Tujunga 地区は、以前 Miller によって認められた (1928年および1934年)、山塊の前面にそった明らかな scarp をたどっている。地震前の立体空中写真 (1952年の1:24,000縮尺、および1964年の1:90,000縮尺) を詳しく調べてみると、Mission Wells および Sylmar の両地区も、大体続いている同一急傾斜をたどっているが、しかしこの scarp は、その中央部で殆んど発見不可能な状態となっている。とは言うものの、Tujunga および Mission Wells Sylmar の両 scarp とも、層位的な裏付けがない限り、現在活動している断層の scarp として積極的に確認することはできなかったと思われる。

逆断層による破壊が生じた地帯で生じた土地の形状は、San Andreas San Jacinto, ならびに例えば、Garlock Ross. 1969年, Clark. 1970年, Sharp. 1970年 Vedder Wallance 1970年のような、断層の最も新しい活動のあとを示す形状に比べてひどく対照的である。Tujunga 地区に沿った地表面の破断を伴った scarp は、まっすぐであるけれども、詳しく調べると、この scarp は走向の連続性が欠けており、そして多くの scarp が、山塊の前面をたどる既に知られた走向活断層と組合った沖積層を横切っている。またこの scarp は、Sierra Nevada の東側

の基盤にそった scarp (例えば, Shelton, 1966 年,) のような, 地質学的に若い断層の特性を表わす広大な scarp, そして一部の場所では広大でかつ直線的な scarp が欠けている。これら“その他の活断層”の地球の形に関する基準から見て, Tujunga 地区は, 現在のその分類よりもっと以前に活動したものとして分類できると思われる。

Sylmar 地区の東の端は, 6~10m の高さの南に面した目立った scarp のあとをたどっているが, しかし, Foothill Freeway の近くで, これからそれと西へのびている。さらに西へと, この断層は, 次第に広がるにつれて限界が不明瞭となっている scarp をたどって, Orange Grove Avenue まで達し, ここでこの地域の斜面の地方色と殆んど見分けがつかなくなっている。しかし, Glenoaks Boulevard がこの断層地帯を横切る部分で, はっきりしたこう配の増加が現れており, そして九万分の一の縮尺の航空写真では, 広大ではあるがはっきりした南に面した scarp が, 西の Mission Wells まで続いていることを示している。ここで, この scarp は, 1971 年に破断が起こった Mission Wells 地区に沿って再び目立った形となっている。Mission Wells 地区は, さらに西へ進んで Lower Van Norman Lake を取り巻く丘に達するまでの行程では, 別に目立った地形的な方向はたどっていない。Sylmar および Mission Wells の両地区に沿った, かつこれらの両地区の間での, これらの scarp およびこう配の変化が構造的なものであることは殆んど確実であるが, しかしこの地震の前までは, 同様な土地の形状が他の過程によって生じているため, この説を強める他の地質学的な証拠がない限り, これらがそうであると確証することができなかった。

この様に, カリフォルニアの多くの活動的な走向断層および正断層に比べて, ひどく対照的であるサン・フェルナンドの断層の活動のあとは, 地形のみでこれらを確認することは不可能である。むしろ, これらの断層に沿った地形は, 地面の下または他の証拠による同一であるとの証明の確認に役立つものである。とは言ふものの, もしこの断層が他の証拠によって同一であると証明されるならば, 地形はこの断層を横切る変位の方向を示すことになる。scarp がはっきりしているところでは, 地形は, この断層の変位の位置と特徴をより正確に限定することに役立つものである。

もし San Fernando 断層帯が, カリフォルニア地区の正断層および走向断層の活動のそれに匹敵する活動の記録を持っているならば, その全般的に貧弱な地形的な形状は, 衝上運動と組合わされた地表面の破断と動きの性質に関係していなければならない。図 7 に示されるように, Sylmar 地区の殆んどに及ぶ変位は, 広大な地域を横切って進み, 広大でかつ緩い scarp を作っている。しかし, はと Eighth Street から西の, 1971 年の変位が徐々に狭い地帯に集中しているところでは, 古い scarp もこれに応じて狭くかつけわしくなっている。この 1971 年の破断帯の中と, この古い scarp が目立っていることとの間の関係は, この Sylmar 地区に起った以前の動きが 1971 年のそれと似ていることを暗に示している。もし現在の破断帯が, Tujunga 地区のこれまでに起った最近の動きの過程をたどるならば, この地区の狭い破断が生じた地帯に沿ったこれらの最近の動きによって生じた細かい地形的な現われの殆んどは, 恐らく個々の地震によって生じた地すべりによっておおわれるか, または破壊されていたはずである。

山塊前面の逆断層の傾斜は, まっすぐと言うよりもむしろ曲がりくねった scarp, 言いかえると地表面の破断帯を生じさせている。このため, この断層のあとは, 走向活断層によって生じた地形の認知の重要な手掛りである, 直線的な連続性に欠けている。沖積層または余りよく固まっていない堆積物のなかでの衝上運動もまた, 走向断層運動または正断層運動のいずれかが行う以上に, 上に持上がった地塊を破壊するようで, このため, 新しく形成された scarp のより急激な破壊を招くものと

思われる。

1971年 2月9日の断層 scarp の位置を予知できていたか？

上に述べた活動的な逆断層の認知は、走向活断層および正断層の認知よりも、一般により困難である。地震地帯におけるこのような断層の認知は、発展の安全という点で重要であるため、2月9日の地表面の破断が形成された地域である、この断層地帯の位置および若さが、地質学的な調査によって決定できていたかどうか、を問うことは極めて重要なことである。この解答は然りである。

Wentworth および Yerkes (このレポートで) は、事前の地下調査によって、理論的に極めて若い断層として解釈できた、San Fernando 断層の Sylmar および Mission Wells の両地区に沿った地下水の異常性が明らかになったことを示している。この解釈は、上に論じた scarp によって裏付けされたものと思われ、さらに、この断層地帯を横切るみぞが以前の断層による破断線を明らかにしていた、ということも大いにあり得ることである。同様に、Tujunga 地区に沿った重要な位置での地下の調査は、山塊の前面に沿った動きの新しさに関する地表面の特徴からの限られたデータを補強していたかも知れない。例えば、このレポートで述べた Lopez 峡谷上流に新しく露出した scarp には、これまでの動きを物語る多くのみぞが含まれ、そして峡谷内のさらに南にある地下水の流 (Wentworth および yerkes このレポート) もまた、最近の動きを暗示していた。

地表面の断層運動と、建物に与えた被害との関係

San Fernando 断層の Sylmar 地区は、建物へ与えた大きな被害が集中した地域である。この実情は図 13 に示されているが、これは、1971年2月24日から3月1日までの間に安全でない建物として公表された、San Fernando および、Los Angeles の各地域の建物の位置を示す図である。この図によると、地図に記入した断層地帯に、他のこれに匹敵する地域に比べて、より多くの被害を受けた建物が集中しているだけでなく、さらに、Seventh Street の東では、公表された建物でできた模様が、狭く限られた破壊地域の模様とぴったり一致していることがわかる。断層地帯内では、他にも多くの建物がひどい被害を蒙ったが、しかしこれらは安全でないものの部類にははいっていない。

また San Fernando の Seventh Street と Eighth Street との間の地図に記入された断層地帯内の、公表された家屋、被害を受けた家屋、および被害を受けなかった家屋の数と、この断層地帯の両側のこれとは同じ巾をした隣接地域内の、これらと同一部類に属する家屋の数との比較を行った。これによれば、例えば、断層地帯内の安全でないと公表された家屋は、その両側の各地域がわづか5%であったのに比べて、30%に達している。断層地帯内では、80%の家屋が中程度またはこれ以上の被害を受けたが、この地域のすぐ隣の地域では、僅か30%がこれらの被害を受けたのみである。

この破断した地帯で家屋の被害が増加したのは、明らかに、この地域の地面の破断部を横切る、大きな水平および垂直変位によるものである。(Youd および Olsen, このレポート。) これと対照的に、Sylmar 地区の北側地域および Foothill Boulevard の東側地域では、広範な地表面の破断が発生したが、しかしこれは僅かな変位を示したのみであった。重要なことであるが、この地域で建物への特に大きな被害が生じなかったことは、地面の変位が十分大きなものでなかったことがその理由の一つである。

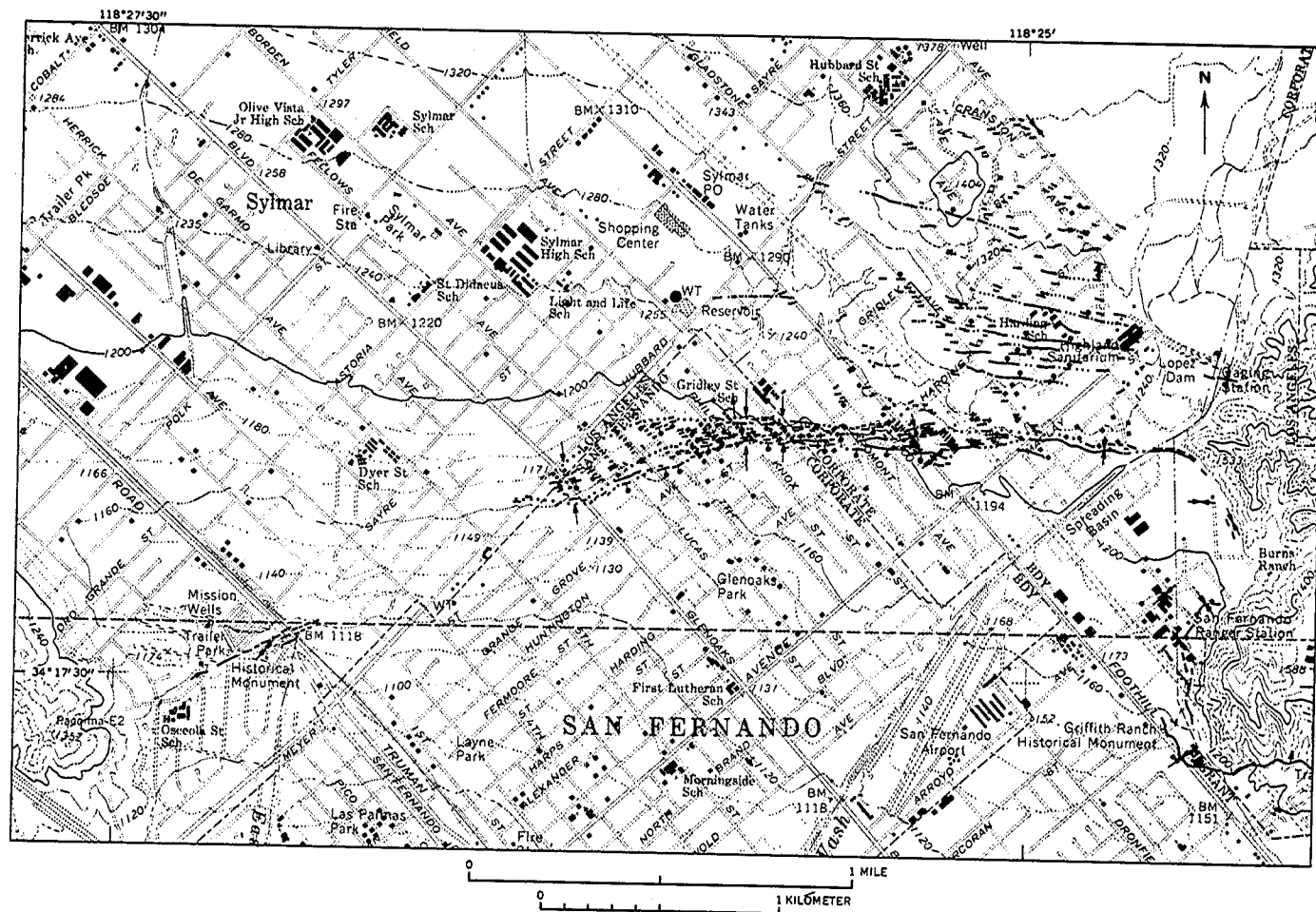


図-13 地表面の断断と破損した家屋

図 13 に示した“安全でない”建物が、大きな意義を持つ断層作用の限界を超えて集中していることは、局部的に増巾された地震の振動作用、局部的な地面の見掛けの動き、発見されなかった構造性の動き、または設計および構造等の理由によるものと思われる。

震央地域の既に知られている断層に沿った動きがなかったこと

San Fernando 地震の震央地域にある幾つかの断層については、これらに沿って動きが生じたかどうかを決定するための調査を実施した。しかし、構造性の動きに関係していると思われる動きまたは裂け目の証拠は発見されなかった。調査は次のものに対して実施した。

1. Santa Susana 衝上断層
2. Mission Hill 衝上断層の Woodly Avenue がこれを横断した部分
3. Big Tujunga 峡谷内の San Gabriel 断層
4. San Gabriel 断層の Little Tujunga Road がこれを横断した部分
5. Sunland および Tujunga の町を通る、西北西に向かう名前のない断層は、調査した部分が完全に地面の下である
6. Foothill Boulevard の南でかつ Green Verdugo 貯水池の東に当る Park 断層
7. U.S. Veterans Hospital の真北にある Hospital 断層。(このレポートの、Wentworth および Yerkes の論文の地質地図に示されている、Santa Susana 断層の東への延長部、)
8. Balboa Boulevard の Northridge Hills 断層

構造上および技術的な意義

要約すると、構造性の破断地帯の地図は、San Fernando 地震と組合わされた断層運動が、地表面で約 55° 北に傾斜した、ほぼ東にのびた断層群に沿って生じた、2.4 m の最大値を示す左側の逆ずれによって特徴づけられることを示している。地表面での測定によって決定した動きの方向は、主震に対する断層の平面解析から推論したそれとぴったりと一致している。(Whitcombを参照のこと、並びに Dillinger および Espinosa、このレポート、) また、詳しく作成した地図も、この構造性の破断地帯が、はっきりと示された主な破断地域または狭いせん断地域によって、南に限定されていることを示している。我々は、この境界の南には構造性の偏形の特徴が事実上無いことを確認している。しかし、この破断地域の北の境界では分散している。

地震の被害と地表面の断層運動との間の全般的な関係は、大きな被害が Sylmar 地区に沿った地表面の破断帯に著しく集中していることによって実証されている。被害と、地表面の破断を伴った断層の上の衝上面での変形との間の全般的な関係は、これまで述べた通りであるが、しかし上になった面に主な被害が圧倒的に集中していることは、多くの意義を持つものである。Olive View Hospital と U.S. Veterans Hospital との間の山の前面に沿って、およびこの地域を超えて主な被害が発生していることは、この地域における断層運動の可能性を示唆している。この地域では、構造性の特徴が、多くの地すべりによって極めて容易におおわれたようであるが、それにも拘らず、我々は構造性のものと解釈できる、この地域に沿った唯一の比較的短い破断の直接的な証拠を見出している。

4. 地震に誘発されたサンフェルナンド 周辺山地の山崩れ

Seismically Triggered Landslides in the
Area above the San Fernando Valley

カリフォルニア鉱山地質局

Douglas M. Morton

サンフェルナンド地震の数日後に撮られた空中写真を判読すると、サンフェルナンドの西方の丘陵地や山地の250km²で1000ヶ所以上の山崩れが地震によって誘発されたことを示している。山崩れの量の分布は主に地面の振動の強さによって規制されているが、山崩れ密度の重要な地域性は、その地域の地質の特徴や地質構造の地域性を反映している。あるところでは特に山の尾根部は地震によって同時に非常に破砕されているので、もし雨が十分あれば、多くの山崩れが容易に発生するであろう。

この報文は地震によって引き起された山崩れ又は地すべりの概査的な写真判読の結果をまとめたものである。この調査には、1971年2月9日アメリカ地質調査所によって撮られた白黒写真（撮影 American Aerial Surveys, Inc. 縮尺1:10,000）と1971年2月18日空軍によって撮られたカラー写真（縮尺約1:20,000）が使われた。写真は雲が広く覆い地上がよく見えない北東部をのぞき、調査地域全体をカバーしている（図14参照）

山崩れや地すべりは地震による振動の直接的で、瞬間的な反応であった。勿論、落石岩石崩れは急傾斜の谷壁（例えば Pacoima や Little Tujunga）では数日も続いたが、それらの落石の中には余震によって引き起こされたものもあるかも知れない。山崩れや地すべりは、主地震の震央の南・南西や、地表にキレツのできたところの周囲および主な余震地域に集中している。

長さ約15mから300m以上の山崩れが写真から約100ヶ所判読された。現地踏査で調べられたものは数例にすぎない。落石（Rock fall）、土砂崩れ（Soil fall）、土石流（Debris Slide and avalanche）およびスランプ（Slump）は地震によって引き起された山崩れの主要なタイプである。表層すべりや土石流（厚さ約0.2～1m）は多分、最も広く拡がり、極一般的崩壊のタイプであり、特に堆積岩で覆われている地域で優勢である。落石は破砕の十分進んだ岩盤に切り込まれた急傾斜の谷壁によく見られる。また同様に、特に侵食に対して抵抗力のある地層が露出してオーバーハングしている堆積岩層中に生じている。土砂崩れは主に主要河川に沿った最新の河床堆積物の自由面に起っている。スランプは大部分過去の地震で既にあったものが再発するか、その上に見られる。

山崩れや地すべりの分布は、第一義的には、地震動の強さに規制されている。大部分のものは地表にキレツの生じたところに起っている。山崩れや地すべり発生頻度の地域的な差はその地域の構成地質、キレツや断層の程度、過去の地すべり崩壊堆積物の存在を反映している。地形的には特に急傾斜のところに多い。

山崩れや地すべりと地震動の強さとの関係はサンフェルナンドの西方の西走向（Westward - striking）の Pico, Modelo, Towsley, Saugus, の各層で特にはっきりしている。ここでは、地すべりの数は、谷から走向に沿って西方へ、余震地域や地割れの激しい地域から離れるにつれて急激に減少している。

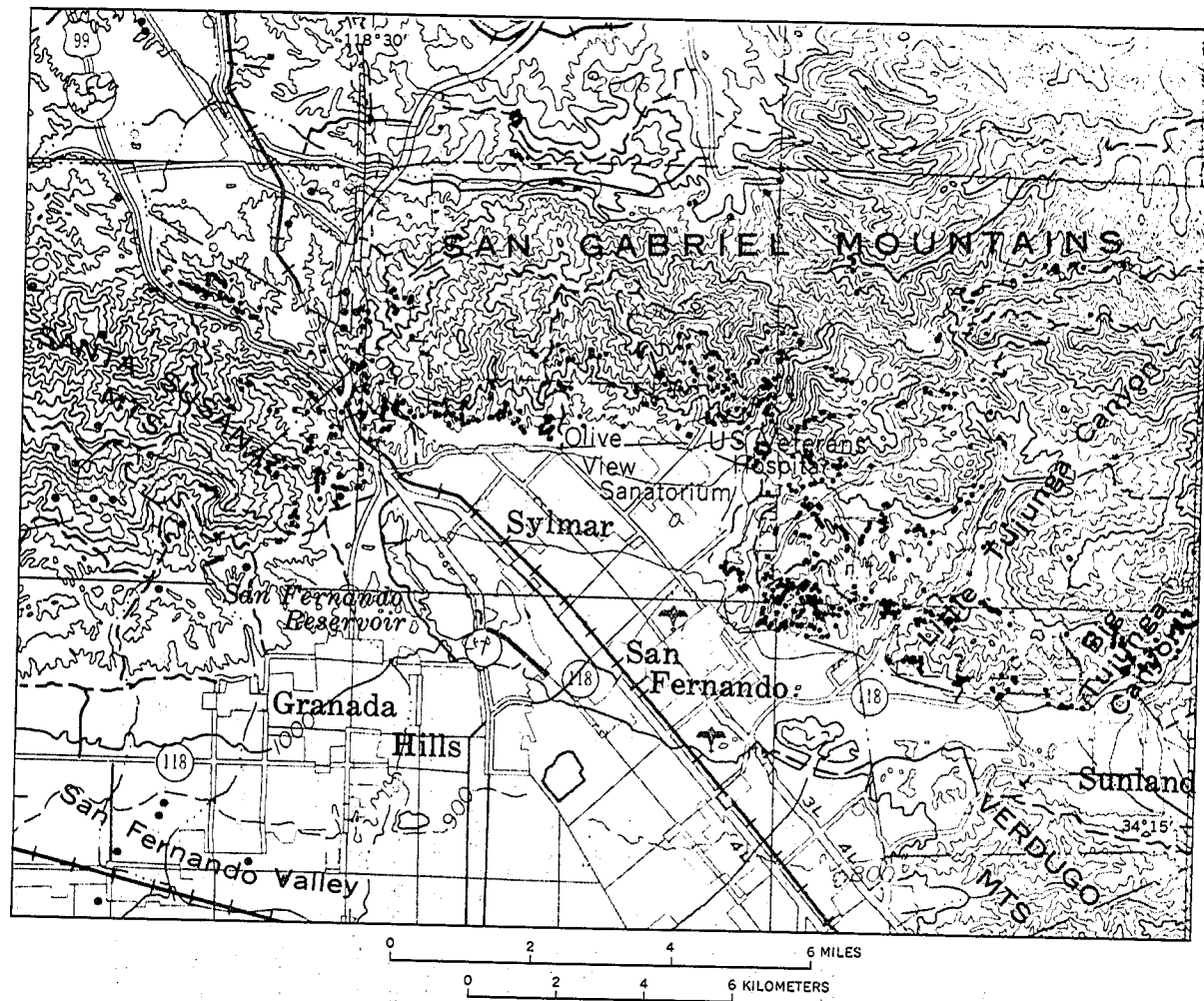


図 14 地震によって生じた山崩れと地すべり

岩種によって規制された地すべりの分布は、Lopez と Bartholomaus Canyon 地区でよく見られる（図 15 B）。ここでは無数の地すべりが Modelo や Towsley 層の露岩地域に起っている。しかしすぐ隣の Saugus 層では比較的少くしか生じていない。同様に河床堆積物の自由面は特に押しつぶしたようなすべりとなっている。これらは、図 14 よりかなり広い範囲に亘って小さな土砂崩れの原因となっている。無数の落石はモメた基盤が急傾斜の谷壁に露出しているところ、特に主要な河谷に沿って——Pacoima, Little Tujunga, Big Tujunga Canyon に起っている。Pacoima Canyon の出口（図 15 A）の落石はかなり広域に亘っているが、これは明らかに表層の堆積物のみからなる。

以前に劣化した岩は簡単に崩壊する傾向を示す。多くの古い地すべりは再活動し、高さ 0.25 ～ 約 1 m の新しい崩落崖が見られる。いくつかの小さな古い崩落崖は土石流にのみこまれている。他の大きな古崩落崖の一部は、一般に古い地すべりの末端部に集中する新しい多数の小さな別々の山崩れや地すべりとなる。いくつかの地すべりは断層帯に沿う破碎された岩のみに生じている。即ち San Gabriel 断層帯は Placerita Canyon の西における狭い帯状の山崩れおよび地すべりの集中帯となっている。

山崩れや地すべりは、切り取りのところにも多く見られ、法面の崩壊で多くの道路が止められた。無数の小落石が図 14 地域で起こり、東の方への San Gabriel 山地のほぼ全域に亘った。

大きな rotational or landslide 又は複合すべりは、San Gabriel や Santa Susana 山地では特徴的なのだが、サンフェルナンド地震中には形成されなかった。明らかにそのような山崩れや地すべりは異った条件下で形成される——例えば、事前の雨や多量の降雨で地盤が飽和している時に地震でゆすられたとか、サンフェルナンド地震より長周期、又は長時間ゆすられた地震動でおこる。おそらく、一つの初めからの大きな複合すべりは、San Fernando Ranger Station の南と東で見ることができるであろう。この地点は、サンフェルナンド断層帯の Tujunga 地区の西端と同 Sylmar 地区東端の間に位置する。ここから北方にかけてサンフェルナンドの周囲では、地表の圧縮変形は比較的大規模な山崩れや地すべりを示しているようだ。その山崩れや地すべりは Ranger Station（図 15 B）から上の丘陵地の巾 0.2 ～ 0.5 km に亘って広がっている無数の破碎に関係したものである。

図 14 の大部分の地域にかけて広範な地割れは地すべりと密接な関係がある。この地割れは尾根に沿って最も顕著に現われている。ここでは雨が十分に降れば、よく破碎された表層物が多くの土石流（debris slide や flow）をもたらすかもしれない。これらの表層物は多分目下のところ、前回の地震時に起きたと同等あるいはそれ以上の山崩れや地すべりを起こす可能性をもっている。

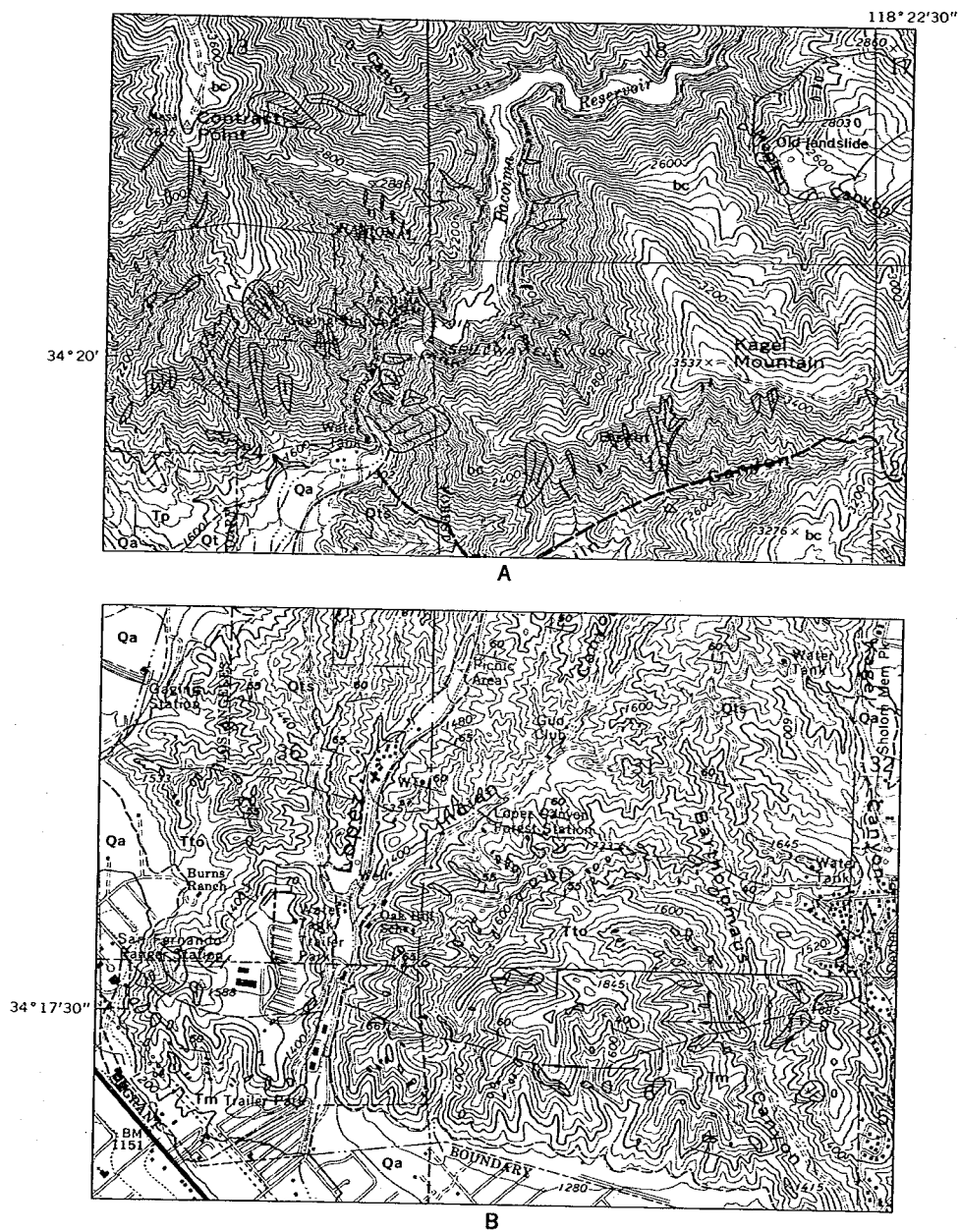


図 15 古い地すべりや地形に規制された地すべり(A)と岩質に規制された地すべり(B)

5. バンノーマン湖附近の斜面の崩壊

Landsliding in the Vicinity of the Van Norman Lakes

合衆国地質調査所

T. L. Youd

この章は1971年2月9日のロスアンゼルス地震により、多くの斜面崩壊が Van Norman Dam 附近で生じ、そのうちいくつかの崩壊は極めて緩傾斜で発生しているので、Van Norman Lakes を中心として述べる。第二の理由は、災害の大部分はその附近で生じた崩壊によるからである。

この地域の地質は Oakeshott (1958), Merifield (1958), Wentworth & Yerkes (本報告) に記載されている。次に示すことはこれらの報告によっている。Van Norman Lake は Saugus 層及び Medelo 層の北落ち傾斜の谷に位置している。湖の南端はこの谷に作られたダムによって締め切れ、アッパーダムとローダムは鮮新世と洪積世のわずかに締った砂岩及び泥岩の上に南東部と南西部は載っている。湖の周辺は沖積層で覆われている。この地域の全体的地質構造は、Mission Hills の南にある Mission Hills スラスト、上湖 (upper lake) のすぐ北を通り北東にのびている Olive View 断層、及び Olive View 断層にはほぼ平行する Mission Hills 向斜がある (図16参照)。

Little Tujunga 向斜中の滞水及び水脈のために、この地域の地下水面は相対的に高く、数地点で地表に出ている。地震時の地下水面は湖の周囲の沖積層の数箇所ではおそらく地表下数フィートにしかすぎなかったであろう。

この地域の土質については Soil Conservation Service (U.S. Dept. of Agriculture, 1915) によって調査されている。一般に細礫とシルトを含む砂質ロームが沖積層上に形成されている。粘土質ロームで凹凸の多い所は台地上の一般的な土質のタイプである。

斜面の崩壊

2月9日の地震による斜面の崩壊の大部分は Van Norman 湖周辺に生じている。これらの運動によって生じた最大規模の破壊は図. 16 に示しているが、ここでは沖積層 (recent alluvium) のみを検討している。周辺地域を含む基盤地域の崩壊については Morton (本報告書) によって述べられている；そして Lower Van Norman ダムの殆んど欠壊に近い滑動 (slump) を含む人工盛土の斜面崩壊は Youd & Olsen (本報告書) によって述べられている。

大規模な滑動 (slump) は Lower - Upper Van Norman 湖の周辺の沖積層地帯で発生し、そのいくつかはほぼ一直線の急斜面 (scarp) をなしている。下湖 (lower lake) の西岸の急斜面は 1 km 以上あり、噴砂 (sand boil) は一般にこういった急斜面の下に生じている (図. 16)。

上湖の最近盛土し、傾斜をゆるくした西側の部分は湖岸線と前の表面のコンターに一般に平行し、図. 16 のコンターに示すような数多くの割目が発生した。この地域では、凹みの形が頭巾状であるために、盛土下の沖積層の破壊はすべりに起因していると考えられる。盛土材の水平的垂直的変位は

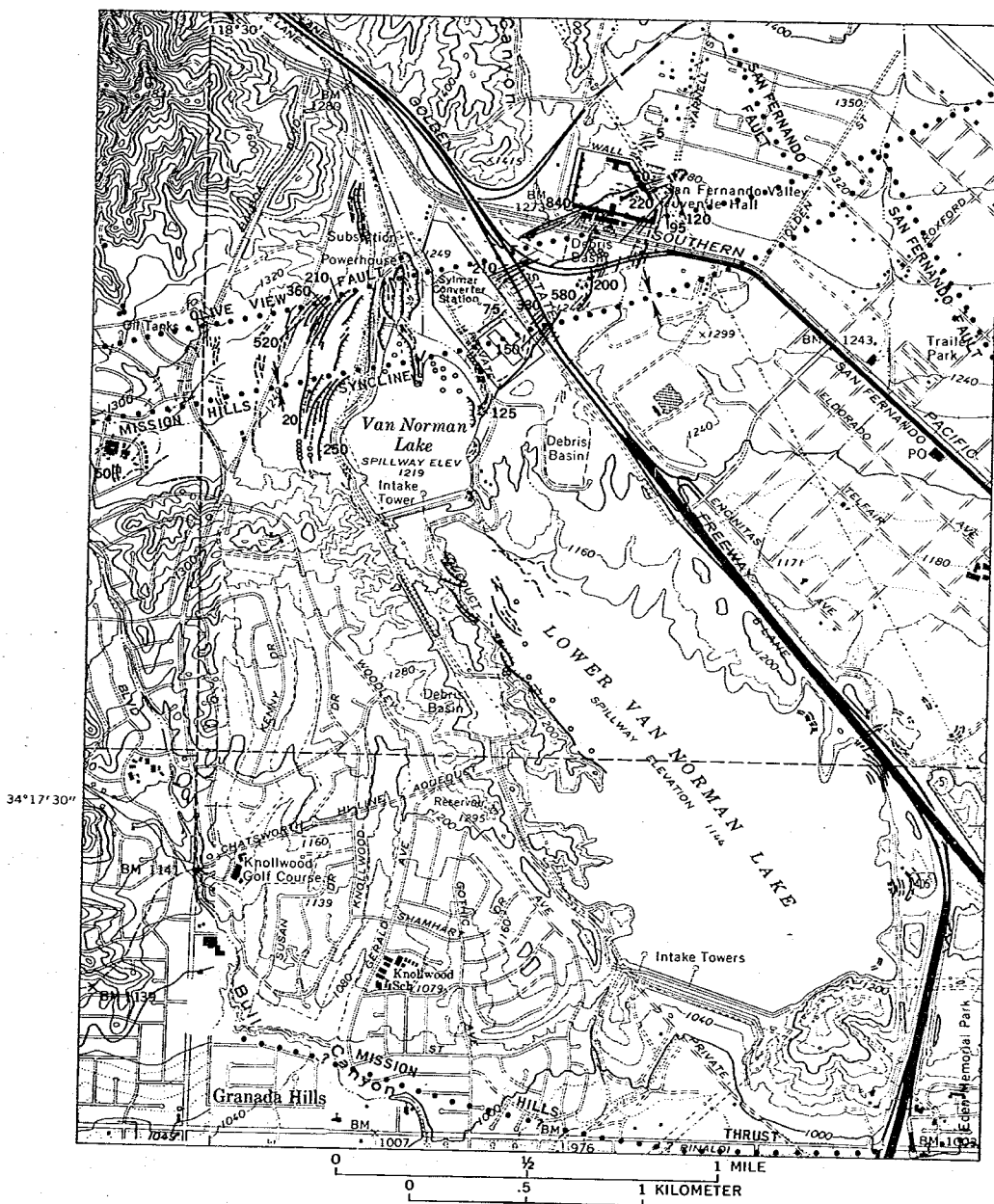


図 16 地すべりに伴って生じた地表面の断裂

ブロック_り (slide) か回転すべり (slamp) の形で貯水池に向う動きを示している。地震時に湖から約 180 m、水面より上数 m の破砕帯 (地割れ帯) の南側部分に噴砂が見られる。

地割れの多くは前節で述べた地域の西側にある。これらを観察することにより、上湖からほぼ 1 km の Bee 峡谷の出口の学校内に顕著なものがある。これらの変位は 50 mm の垂直変位と約 100 m の長さを持っている。それらは上湖に対して東側に向って非常にゆるい角度 (約 1.5 ~ 2.5 度) で動いている崩壊の頂部をなしているように見える。

湖周辺で最も被害の大きいものは長さ 1.2 km で、上湖より北東方向にのびている舌状の形をなしているものである。以後 Juvenile Hall すべりとよぶこのすべりは San Fernando Valley Juvenile Hall, Southern Pacific 鉄道の幹線, San Fernando 大通り, Interstate Highway 5 号, Sylmer 変電所, および数本のパイプラインと水路などを上にのせているか横切っている (本報告書の Youd & Olsen 参照)。これらの施設の地震による被害は 3,000 万ドルに達するだろう。

この形状を示すすべりの変位は構造 (断層) 起源というより、地すべりであるという形跡を示している。形跡は次のようなことを含んでいる: (1) すべりの舌状形と破壊パターンが形状の境界をこえてのびていない事実。 (2) 北縁にある右方向へ変位している割目、南縁にあるほぼ純粹の引張龜裂、 (3) ロスアンゼルス市 (L.D. Paulsen, ロスアンゼルス市技術局, 聞取り, 1971, 2, 26) による調査データは周辺地域に関係のある形状の動きが形状の反対側の調査地点間の相対的動きを超えるという事実を示している。

San Fernando 大通りの再調査によると、Interstate 5 号の超える所での調査地点より Olden 通りの近くの調査点まで 43 mm 短くなっていることが解った。San Fernando 大通り (すべりの南東) と交差する Roxford 通りに関して、Interstate 5 号の超える所の近くの調査点 (すべりの北西) は南に 300 mm、西に 210 mm 動いていた。これらの相対的動きは 0.5 ~ 1.0 m の範囲 (割目を横切る変位の視覚的観察と累積的測定に基づいている) にあるすべりの総運動量より少ない。このように Juvenile Hall として記されたものは構造起源のものとは思えないが、Roxford 通り交差点に関して、Interstate 5 号の超える所の南西方向への動きはすべり地域を通り北東にのびている断層又は断層破砕帯上で、左側方への構造変位によって生じた。

動きが起った所の地表は非常にゆるい傾斜である; すべりの末端が Van Norman 上湖の湖岸線にあると仮定すると、全長の平均で約 1.5 度 (2.5 %) であり、最大傾斜は頂部で 3 度 (5 %) である。さらにおどろくべきことは Juvenile Hall と転換駅間の平均傾斜は 0.9 度 (1.5 %) である。

噴砂がたぶんすべりの末端の近くの湖上に多く見られる。それらは水面が低くなった後で現われた。噴砂はまた次のような箇所に見られた。転換駅の後ろの盛土基面近く、Juvenile Hall の南地域、Juvenile Hall Administration Building の前の鉄道の斜面の北縁にそう所。

地震により、Upper Van Norman ダムの頂面は最大 0.9 m 沈下し、そのとりつけ部で最大 1.5 m 下流側に動いている (W.F. Hansen, ロスアンゼルス水道電力局, 1971, 2, 23)。このことから、上述のような低角度のすべりはダム下方の谷底を通して動いていることが明らかであろう。

低角度斜面の_りの説明

低角度斜面について、Juvenile Hall _りの_り機構の最も合理的な説明は下にある土が地震時

に部分的にか完全に液状化したことであろう。辻りの上端又は近くで噴砂が多く見られることはこれが起った証拠である。

噴砂に加えて、液状化条件と共に間隙水圧の上昇が土の剪断強度を減少するだろう。この強度は Juvenile Hall 辻りのように辻り面上で動きが生じているために静的応力の正接成分より少ない値を減ずるべきであろう。

Juvenile Hall 辻りはその深さに比例して非常に長いと考えられている。この強度の減少は間隙水圧の上昇によると既に説明されている。そして礫状土の剪断強度は

$$\tau = (\sigma_n - u) \tan \phi \quad (1)$$

ここで、 τ は土の剪断強度、 u は間隙水圧、 σ_n はすべり面上の垂直応力（低角度斜面のために静的応力）、 ϕ は土の内部摩擦角である。このようにもし Juvenile Hall 辻りの間隙水圧が地震時に静的応力に近い値に上昇するならば、土の剪断強度は0になり、すべりは生ずる。現場の証拠はたぶんこんな場合を示している。

Van Norman 湖の周囲の沖積層の辻りの全部ではないにしても大部分は直接地震による間隙水圧の上昇に帰せられることもまた理由のあることである。

6. サンフェルナンド地区の地震断 裂地帯から離れたところの崩壊

Ground Failure on the San Fernando Surface
away from Obviously Tectonic Rupture Zones

合衆国地質調査所

Robert V. Sharp

2月9日の地震は San Fernando 及び Sylmer地区の多くの箇所で、クラック、スラスト、スラブ等の形で広範囲に地割れを作った。ここで“San Fernando surface”と呼ぶ相対的に平坦な地表は U.S.G.S. のスタッフにより総合地割れ図として示されている。San Fernando surfaceの地割れは舗装道路、歩道において顕著である。割目の変位の特徴は深い所にある構造の影響の可能性を示している：なお段差の大部分は構造運動を含まない表層すべりによって十分に説明されうる。周辺の広大な地域から San Fernando 地区に推察される断層の地質的特徴（形跡）について前述の文献から、割目の発生が一般に被覆断層にそう構造運動の再活動を反映しているかどうかを決定するために地区全体について調査された。

影響を受けた地域の試験調査は本編に記された以外に構造帯に限定されずに行なわれた。断層線にそって期待される一定のパターン又は割目帯の直配列を立証するために特に努力が払われた。否定的な証拠にもかかわらず、構造の運動の確認されていない地域で精密な方法により、San Fernando 地区の地形が変わったということが考えられた。地区内の設定された点の水平垂直位置の測量が現在進行中である。この種の詳細なデータが San Fernando 断層帯の構造変位のため或いはそれに対して決定的証拠となるであろう。断層帯の割目発生は U.S.G.S. の Kamb 等により他の部に記述されている。

崖くずれ、地送り、傾動などによって生ずる割目が構造破砕帯の近く又は中で発達するところでは個々の割目の発生を決定することは時として非常に難しい。しかし割目の多くはその地域的分布、自然又は人工の地形および建造物に関する方向性、およびそれらにそう段差の意味と形のために、すでに構造運動の途中であるとされている。構造破砕はその連続性と分布の型、変位の形式、上に建設された位置の違いにより最初に認められる。

割目の発生による三種の崩壊が San Fernando 地区の構造運動主体の外側に認められる——噴砂及び土構造物に見られる明らかな地表破断、建造物の周囲の土に限定されたクラック、及び表層以下に作られた舗装道路及び薄い構造物中のクラック。これらはすべて微地形や土工に関係する方法で地表をかえている、そしてそれらは破砕帯系全体を通して関係しているようには現れていない。非構造型破断は図化されず、この速報にも図示されていない。

地表は大規模又は小規模の土構造物及び基礎地盤共に破壊している。San Fernando juvenile Hall の地送りのようなタイプの大規模な破壊は Y oud による章で論ぜられている。土質や土構造物の破壊のような小規模の破壊や割目は地表に人工の切土や盛土に主として関係して現われている。盛土の上端に発達する自然斜面と人工斜面の間の類似は小規模の下向きの動きによる送りである。

構造物や大盛土の周辺の送りは San Fernando 地区が一般に震動したのに起因している。小規模のスラスト断層によって示される引張と圧縮クラックは家屋、コンクリート壁、縁石、歩道や地中に

埋設された他の重量物の振動や傾動によって生じている。これらの破断はそういったものの上にある車道のような小構造物にさえびていない。あらゆる場合に、このタイプの破断の分布は構造物や大盛土の周辺に制限され、構造運動であるとは考えられていない。

構造帯として知られる破断域の外側にある地域を明らかにする最も普通に見られる特徴は舗装道路縁石、歩道の破壊、まくれ上り、バックリングである。しかし例外として、地表より1 m位に破断が進行していて、大部分は舗装道路のスラブの端で終わっている場合がある。このような特徴は大部分の舗道の破断が地中の変位を反映しているのではなく、それ故構造運動ではないことを示している。舗道中の垂直段差は一般に開りの土中には進行せず、締め固めた路床やパイプラインの埋め戻し土に生じている。強い震動時に舗道（歩道や縁石を含む）のスラブは一般に土から切り離されていて、道路の延長方向にそって下向きに動いた。片方のスラブに対してもう片方のスラブの動きのわずかな違いからもたらされるわずかな回転効果は地震時の舗道の破壊である多くのオープン引張りクラックの側方段差によって示されている。

真の構造運動による震動によって生ずる種々のタイプの変位を分類することは結局は位置の真の引張、短縮変化があるかどうかである。舗道ブロックのまくれ上り、バックリングが現われる前に、道路にそって数ブロック間にわたって圧縮が伝わるという観察が、構造運動に起因する小規模の地中変位の問題を複雑にしている。引張による開口や圧縮による積み重なりをまとめることによって道路にそう位置的变化を早く決定しようとする企ては、求められた段差の大きさに匹敵するエラーの可能性のあることを示している。できるだけ正確に割目を測定することに加えて、舗道やスラブの圧縮による短縮や引張による伸長の形で永久的寸法変化が生ずることが知られている。他の寸法変化はそれらの極端に小サイズのために発覚されない無数の割目によっておそらく生じた。明らかに相対的に大きな段差が見つけられ、歩道や舗道の測定できる割目によって荒く評価され、小さいが構造的段差が容易に見落された。

7. 地塊の移動と基礎の破壊に関 連して施設等に生じた被害

Damage to Constructed Works Associated
with Soil Movements and Foundation Failures

合衆国地質調査所

T-L Young, H.W.Olsen

本報告では種々の形態の地殻の震動、ならびに基盤の破壊により、或はこれらに関連して生じた北部 San Fernando Valley のダムおよび水路、輸送路、公共物および建築物の地震による被害状況について述べる。今回の我々のおこなった踏査は比較的短期間に、かつ踏査範囲はごく限られたものであったため、ここに提出する踏査報告はこれら種々の形態の被害状況に対する予備的で部分的な報告にすぎない。

ダムおよび導水路

2月9日の地震は Upper Van Norman Dam および Lower Van Norman Dam に甚大なる損害を与えた。後者のダムは決壊寸前の状態になり、もし実際に決壊していたら、このダムの下にある人口稠密な地域に破滅的な洪水をもたらしたであろう。強い余震が続く間、これ以上ダムへの被害が生じた場合でも洪水を防げるほどに貯水池内の水が一定の水位にまで下がる間、8万人の住民が4日間に亘り家屋を放棄して避難しなければならなかった。強い震動があった地域のこれ以外のダムを我々が短期間に見た限りでは、ごく僅かな被害か、ほとんど無視し得る程度の被害しか認められなかった。

この Van Norman Lakes の近辺ではいくつかの導水路の区間が激しい損害を受けており、大がかりな修復工事をしなければ使用不能の状態であった。洪水調整池の堤防も数箇所にわたり落込んでいたが、ショックがあった時には水がなかったため、堤防が壊れても直接的な被害はなかった。

このショックの水文学的影響と配水サービスおよびこれに関連した設備等の破壊状況については本報告書中で Waanamen が検討を加える。Lower Van Norman Dam の主な被害は上流の斜面の塊状破壊であり、土の堤防の大きな部分が崩れ、貯水池の内へ落ちてしまった。この堤防の崩れと共に上流のコンクリート・ライニングとダムのクレストも崩れ、ダムの下流の水面からたった 1.5 m の高さで横切る破断面にそって落下した（カリフォルニア水資源局副理事 John R. Teerink 氏の 1971 年 2 月 24 日、カリフォルニア州ロスアンゼルス市での公共事業に関する議会協議会の特別調査小委員会へ提出された報告）。

下側の湖のすぐ上に位置する Upper Van Norman Dam はショックの間に約 0.9 m 沈下し、下流方向に約 1.5 m 位置を変えた（ロスアンゼルス水資源電力局、W. F. Hansen 氏の証言）。

広範囲にわたるキレツと沈下のため、このダムの上流のコンクリート・ライニングが粉々に壊れ、堤防の下流の傾斜面にもき裂が発生した。Upper Van Norman Lake の周囲のコンクリート・ライニングは高水位付近で広範囲にわたりき裂が発生した。

Upper Van Norman Dam も Lower Van Norman Dam も共に「水締め工法」によって建設されたものである。下流のダム（Lower Dam）の方は 1918 年に建設され、以後数回にわたり嵩上げされ

てきた（上記 J・R・Teerink 氏の報告）。上流のダム（Upper Dam）は 1921 に建設された。下流のダムに使用されている材料は破壊した斜面の露出した部分からみると砂状のものではっきりした層を形成していた。

1964 年に Lower Van Norman Dam について行なわれた安全性調査の結果、貯水池操作を制限し、水面のレベルを通常のレベルより約 10 フィート下に抑えるようカリフォルニア州とロスアンゼルス市の水資源電力局との間で同意に達した（前掲の J・R・Teerink の報告）。今回の地震によりダムの高さがかなり低下した点からみると、この安全性に対する余裕の幅が設定されたことは実に幸運であった。

Lower Van Norman Dam の斜面の塊状崩壊は地震によって引起された慣性力だけによるものか、あるいは堤防に使用されていた材料の溶解、又は構造上の変形、又は基盤の土の崩壊等が重なって生じたものと思われる。構造上の変形が考えられるのは、このダムの東端近くの San Fernando 断層地帯の Mission Hills 区に地表の破断が発見されたこと、およびまだ検知されていない運動がこのダムの周辺にまで及んだのではないかと推測されるからである。基盤の土の運動が原因として考えられるのは、このダムへの接近路に多くの地すべりが認められたからによる（本報告書中の Youd の報告）。

Upper Van Norman Dam の沈下と下流方向への移動の理由としては地震による圧縮、堤防の横方向への引張、そして Youd が記載しているように地じりに関連した基盤の運動等が考えられる（本報告書）。Van Norman Lakes 周辺の導水路の被害は主としてコンクリート・ライニングのひび割れと破壊、および導水路の土手の転位である。ほとんどの箇所でのこの被害は、導水路の下部の地じりによる導水路の沈下、又は導水路の構造の転位に関係して発生している。例えば Sylmar の変電所と Interstate 5 の中間にある導水路のライニングは Juvenile Hall の地じりを起した地点ではひどく破壊されているが（Youd. 本報告書）、この地区以外では被害は僅少であった。

輸送路

地震の被害により、北部 San Fernando Valley を通る数本の幹線輸送路が通行不能となり、その他多くの道路が被害を受けた。落橋により Interstate Highway 5 は両車線にわたり通行不能となり、Foothill インターチェンジ Southern Pacific Railroad の幹線も何本か使用不能となった。この他多数のハイウェイの橋が落ち、或は修理不能なほどに被害を受けた。斜面の破壊、橋の取り付け部の沈下、そして歩道の曲がりとか転位等のため、高速道路や幹線道路、市街路等にさまざまな程度の破壊をもたらした。

この地震による舗装の被害の大部分は San Fernando 断層地帯における構造的転位によるものであった。車道とか、縁石とか歩道等の構造物が地殻構造上の運動を起した地帯を横切る箇所ではどこでも破壊され、あるいは曲がり、あるいは転位した。場所によってはこうした破壊のため道路をふさぎ、又、他の場所にあってはこうした構造的転位の程度が少く、あるいはより広い面積に力が分散し、このため舗装にひびが入ったり、ゆがんだりしたが、それほど交通の障害にはならなかった。

衝上断層運動は特に舗装に破壊的に働き、断層による破壊が通過したと認められる地点では、あらゆる所で舗装が破壊され、垂直に転位した跡が認められた。明らかに衝上断層運動によってもたらされた圧縮により、弱い地点で強固に舗装された箇所が曲り、道路の交叉点では歩道を縁石の方へ押しあげていた構造的破壊地帯では伸長作用によるき裂が一般的に見受けられたが、一般に小規模のもの

で交通にはそれほど障害となっていなかった。が、水の浸入を防ぐためにもこれらは修理を要するものであった。こうした種類の舗装の被害は構造的な破壊地域以外でも重力作用による小規模な下方へのり運動により発生していた。

地りもハイウェイに甚大な被害をもたらした。例えば大損害を受けたFoothill インターチェンジのすぐ北方のWildon Canyon では山側に切開かれたFoothill Boulevardの一部が崩れ落ち、Interstate 5の北方に向う路線の両側の車線をふさいでしまった。又、Lower Norman Lakeの東岸の近くの土手が破壊し、Interstate 5の南方に向う車線を破壊した。ここでは地りのために舗装がひどく破損し、土手の斜面には深さ4 mもの割れ目が生じた。ここでは応急修理がおこなわれ、地震発生後数時間で交通が再開した。

Juvenile Hall の地りもSouthern Pacific Railroad や San Fernando Boulevard 更に Interstate 5 と交叉した場所では鉄道や車道の土台が場所によってかなり沈下し、全体的に0.5 m以上も横に転位した。交通を正常な状態に戻すためには、ハイウェイにも鉄道にも、かなりの修理を要した。San Fernando Valley の北部ではハイウェイの橋への取り付けの部分が沈下した例は珍らしくなく、これは多分、ハイウェイの土盛りの部分、又はその下の土が地震による両側からの圧迫、又は側方への伸張により起ったものと思われる。ハイウェイが坂になっている所で基盤が詰まっている部分が切通しの部分に隣接した箇所では圧縮ならびに（又は）側方への張力作用のため、かなりの沈下をもたらした。この種の被害の例は Van Norman Lake の東方の Interstate 5 の坂に見受けられる。吾々の視察した橋梁の被害の主要原因は、構造上の地殻の運動や地り、又は局所的な耐久力の欠陥よりむしろ地震による震動によるものと見受けられた。

施設物

San Fernando Valley 北部の Sylmar, San Fernando および Pacoimaの各地区では電話、電力、ガス、水道、そして下水システム等に広範囲にわたる被害が発生した。地下に埋設されていたパイプラインは特に激しく打撃を受け、多分数千箇所にも及ぶ切断箇所のために、これら不可欠のサービスが寸断された。上述の地下に埋設された諸設備も同様に被害をこうむった。応急修理はしたもの、ガスと電気という不可欠のサービスの回復には2週間以上要した。

Sylmar の変電所は大損害を受け、被害額は2,800万ドルと推定されている。この変電所の施設は南部カリフォルニアと Bonneville 電力系統を結び、直流から交流に変える設備である点からして特に重要なものである。この施設に対する被害は主として横倒しとなって破損した電気設備と破壊された地下導管等である。施設の完全な復旧にはおそらく1年はかかるであろう。

この変電所の北にある発電所も大損害を受け当分の間、給電不能の状態が続くものとみられる。激しい地震を経験した地域全体にわたり、変電所の支局、送電塔、電柱そして電力線などがこれほどではないが、かなりの被害を受けた。

地下パイプラインに対する広範囲にわたる損害は San Fernando 断層地帯の構造運動により発生した地表の破断の場所、大きさ、そして分布状況等に多分に関係している。最も大きい断層による転位は衝上と左転位の要素をもっている。こうした破断地点を横断するパイプラインのほとんどは折れるか、ひどく曲がってしまっている。第18図にはこうした衝上、および左転位の模様とこれらの運動が建造物やパイプラインに与える影響を図解してある。

張力によるキレツの地帯と圧縮の地帯は構造的破壊に関連している。張力による転位はしばしばバ

イブラインを切断するほど強力なものであった。この型の転位は図18Dに図解してある。圧縮を受けた地帯では曲がったり、折れ重なったり、あるいはマンホールに突出したパイプが多くあり、通常、数十センチにわたる転位を伴っている（本報告書の合衆国地質調査所の“地表の断層”の項に図解）。

地じりと小規模の斜面での重力による変動もパイプラインの被害の主な原因となっている。これに関連した示差的な水平および垂直の転位は通常の場合、パイプラインの破損の箇所を示していた。例えば、Juvenile Hall の地じりの端、頂上、そして上り坂に沿って数箇の切断箇所が発見された。こうした切断箇所では横、縦、および引張りの形でのパイプの食違いが認められ、これらの食違い管はかならず地表の運動と一致していた。

Juvenile Hall の地じりの最上端から上方に向った地区にはパイプラインの切断された地点の周囲に幅が30 mm にも及ぶ数箇のき裂が発見された。これらのき裂は Sharp が問題とした（本報告書中で）運動に類似した下向きの運動を示しており、範囲のはっきりしない地じりを示している。

Sylmar 変電所は Juvenile Hall の地じりの両方の低い部分にまたがった形に位置している。この地じりは外観的には重大な構造的損害を与えてないように見えるが、周囲の構内には多数のクレツが発見された。これらのクレツは変電所の地下設備の被害に重大な役割をはたしたかも知れない。

地表で全く破断箇所が認められない場所で若干のパイプラインの破損が発生した。降伏点による破損、又は疲れ破面が検出された。降伏点による破損又は疲れ破面がこうした破壊をもたらしたのであろう。

ガス管と水道管の切断による共通した二次的影響は水もれによる腐食か高圧ガスの噴出によるクレーター形成のいずれかによる地表の破壊であった。2-3 の箇所ではガスに引火し、ものすごい火を吹上げた。

電話線とか送電線をも含めた空中に設備した公共物への被害は、強く引張られ、時には切断したワイヤー、たるんだワイヤー、そして倒れたり傾いた電柱等が主なるものであった。この種の被害の主な原因としては、構造運動又は地じりのため、電柱又は塔間の距離の短縮、又は伸張、そして地表の破断による電柱の基礎の破壊等があげられる。

建築物

建築物の被害は小規模なひび割れから全潰にいたるまでロスアンゼルス全域にわたって発生した。が、Pacoima, San Fernando および Sylmar といった San Fernando Valley 北部の地区の被害が最もひどくかつ広域にわたった。これら地区ではあらゆる種類の建築物、例えば一家族や複数家族の住宅、商業家屋や工業用建築物、学校・病院等が大損害を受けた。これらの地区では高層建築はなかった。この地区では病院がその最も高い建築物であり、これらの病院が部分的に崩壊したことにより死者と負傷者のほとんどをだし、この地震で最も悲劇的な損害を与えた。Olive View Hospital と Veterans Administration Hospital の崩壊をも含め、被害の一部は何ら地表又は基礎の破壊が認められない場所で発生している。我々が行った踏査で観察した建築物への被害のかなりの部分は構造物の下での地表の破壊と直接的に関連したものであった。第18図に、われわれが観察した地表の破壊の基本的な形態のスケッチと、これらの破壊箇所の上に位置した建築物へ起った被害の型の略図を示した。横方向への転位を伴った、あるいは伴はない衝上断層の上に位置するほとんどすべての建築物は被害がひどかった。第18A図はこうした転位が上にある構造物にもたらした被災状況を示している。また、衝上断層により破壊された家屋もある。一般的に言って、こうした破壊

により下部を切取られた建築物は水平方向に押動かされ、場所によっては隣接する建築物に押付けられていた（本報告書中の合衆国地質調査所による“地表の断層”の項中の写真を参照）。

前述した如く、断層による転位の垂直・水平方向の要素により、ある程度伴ったキレツは San Fernando 断層地帯中を通じて共通にみられた現象であった。同じようなキレツが弱い地送り運動によっても傾斜面に形成されていた。こうした性格のキレツが軽量の建築物の下を通過した場所では、しばしば土台が張力のため破壊し、これが逆に上部にある構造物にキレツを生じさせていた（第18図）。この種の型の被害の一例は、Pacoima Wash に向って傾斜している地域である Rajar Street の東の Tucker Avenue に面した家で観察された。2～30 センチ程度の斜面で転位のためにキレツを生じ、これが車道と歩道を破壊し、家屋の下まで達し、向う側の坂まで続いた。この家屋のスラブの基礎は張力によるキレツのため破壊し、家自体も破壊した。被害程度は大きく、危険家屋と指定された。基礎の破壊によるこの家の弱体化のため、これ以上の震動による被害を多く受け易くなっていた。

Juvenile Hall の地送りの位置にあった San Fernando Valley Juvenile Hall は大損害をこうむった。地送りを起した地帯の地面は垂直の転位（第18図）。横側への転位（第18図）そして張力による転位（第18図）と各種の要素を含んだ複雑な方法で破壊した。この地区の一部では、基盤と地下の土がブロック（塊）に分れ、これらのブロックが第18図のような方法でたがいに相対的に震動したものである。この現象は土のブロックがその下にある流動性、又は半流動性の層で一時的に支えられたものであることを示唆している。これは近くに噴砂とか、地送りが生じた非常に緩い傾斜面があることからしても確められている。

要 約

地表の震動と基礎の破壊は San Fernando Valley 北部の構造物への損害の多くと何らかの関係があった。圧縮（衝上）による転位、垂直方向への転位、横方向への転位、そして張力による転位を含む各種の構造的運動は地下に設備された公共物とかその上のあらゆる種類の構造物に特に被害をもたらした。ほとんど平坦な地面での地送り運動はパイプラインとか導水路、そして Juvenile Hall といった軽量建築物に対して広範囲にわたる損害を与えたが、Sylmar 変電所の主要建造物のような大型の基礎の上に建てられた重量建造物にはほとんど損害を与えなかった。丘陵地帯での小規模の地送りや小規模のキレツとか転位をもたらし、その上にある単独家庭の住宅に甚大なる損害を与えた。険しい山の斜面や人造の土手等を襲った大型の地送りでは、数箇所ですべて幹線ハイウェイを交通不能におとし入れ、Lower Van Norman Dam をほとんど決壊寸前までに追いやった。

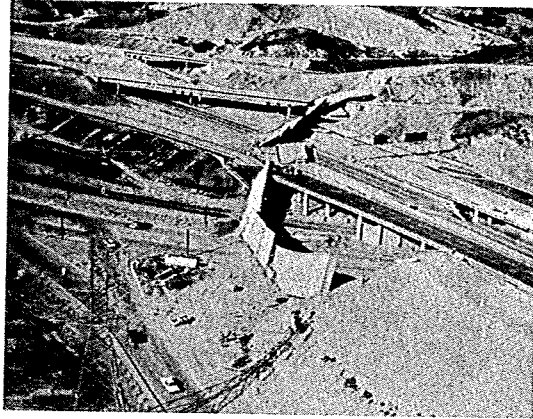


図-17 Golden State Freeway と Foothill Freeway
とのインターチェンジ

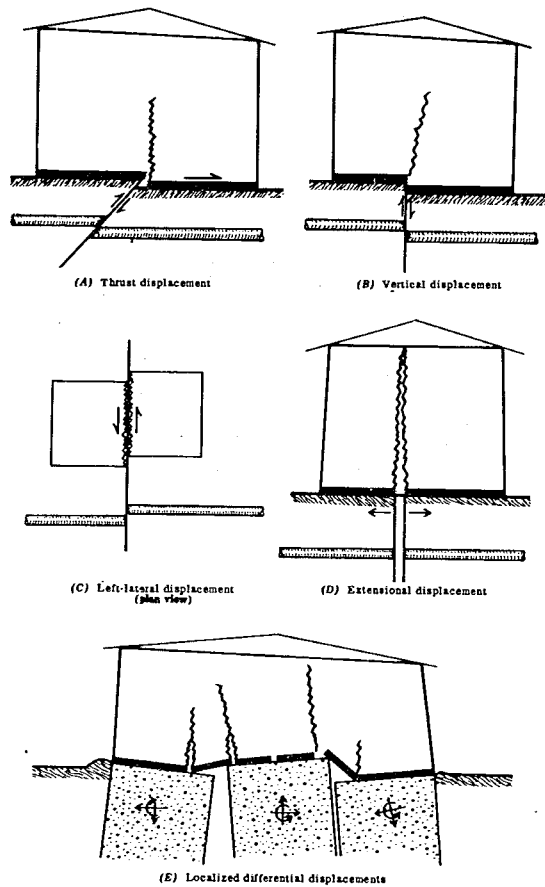
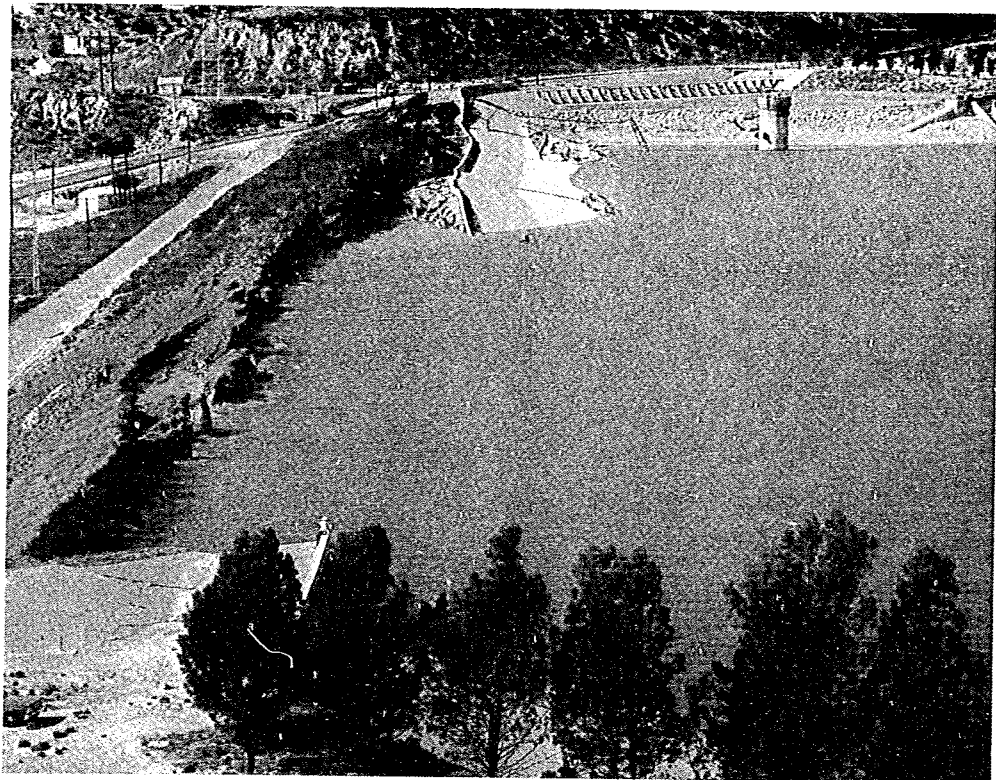


図-18 地表面の断裂と構造物被害のパターン



图-19 Upper San Fernando Dam 下流斜面



☒ - 20 Lower San Fernando Dam

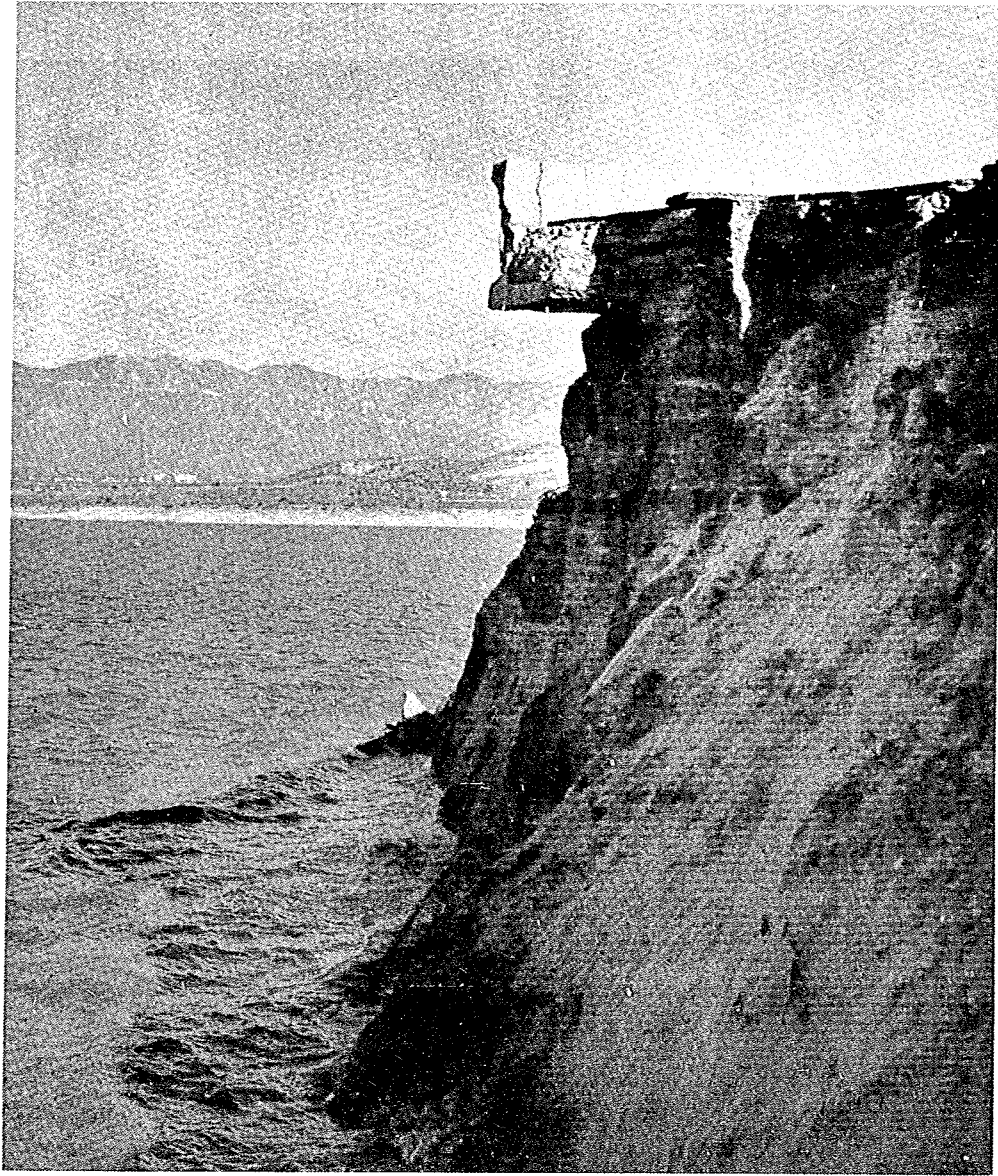


図 - 21 Lower San Fernando Dam の左岸付近

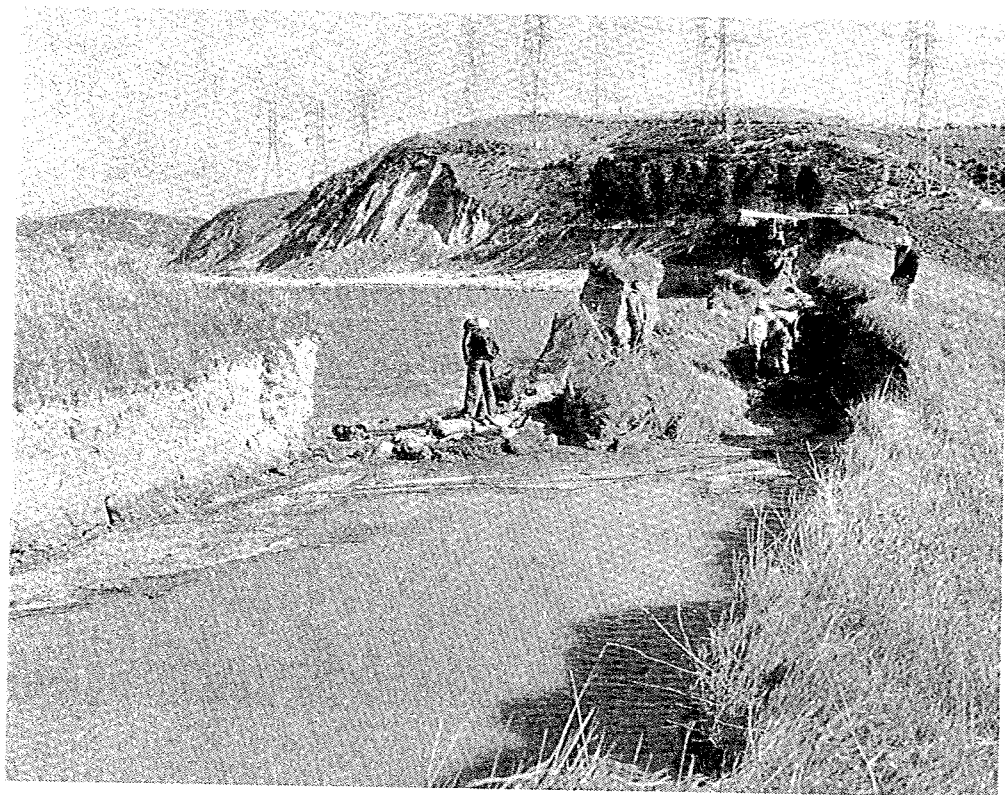


図-22 Lower San Fernando (地震直後)

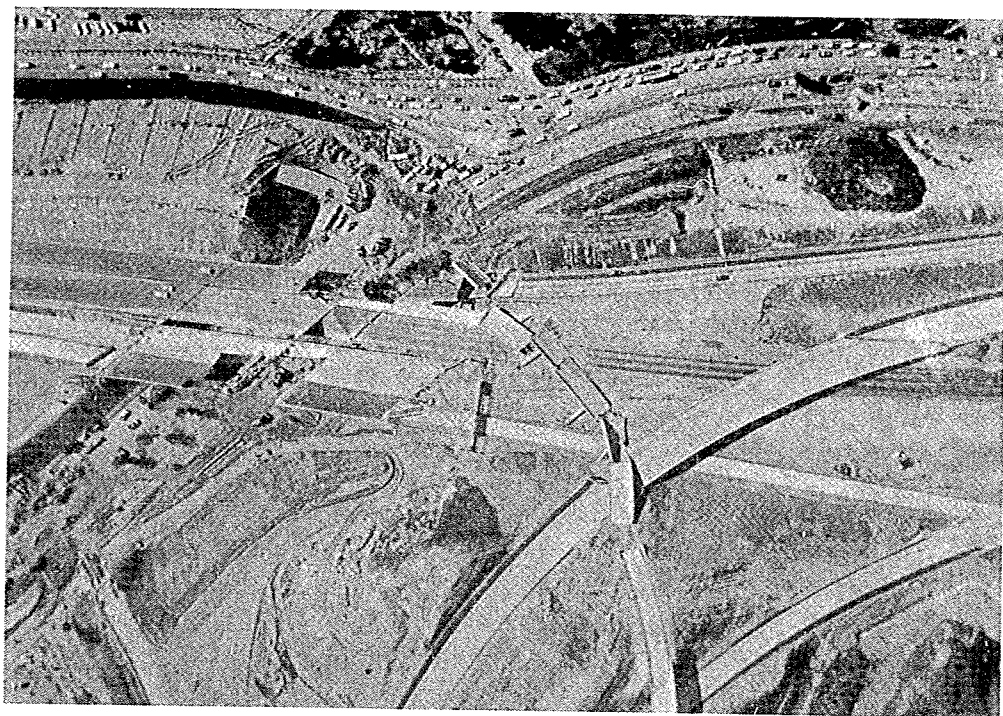


図-23 ルート5と210とのインターチェンジ



図-24 ルート5と14とのインターチェンジ

8. 構造物調査にもとづく予備的な結論と勧告

Preliminary Conclusions and Recommendations Based on Engineering Studies

Earthquake Engineering Research Institute Committee

調査委員会は次のような予備的な結論と勧告に達した。

1. 非耐震構造物の問題が、再び強調された。古い構造物特に弱いモルタルの壁でささえている無筋コンクリートはよくない。Veterans Hospital の無筋中空タイルを壁とした 非耐震性のコンクリートの建物の崩壊は、1つの被害としては最大の犠牲者を出した。
2. 最新式の高層構造物は、このショックによく耐えた。しかし多くのものは、震央から遠かったので、十分テストされていない。我々は、強震記録と設計基準を比較してできるだけ学ばなければならない。
3. 驚くほど大きな地盤震動が記録された。あるところでは、El Centro 地震や Taft 地震の記録を上まわった。これらの記録は過去30年間耐震設計の基準になってきたものである。計器による記録や目撃者の報告によると、多分、大きい垂直方向の加速度が、構造物の被害を増大させた。
4. 橋梁、跨道橋、建築物、水締め工法による築堤部分を含むアースダムについては、数ヶ所の設計基準や設計方法の再検討の必要性が示されていた。多くの1階建工場や商店が思わしくなかったことに特に注意すべきである。何故なら住宅以外の建物の大多数を占めているからである。合板製壁板は研究し、試験されなければならない。補強やつなぎの詳細は改良されなければならない。
5. 重要な建築物の設計は、様々な動きをする地盤に合うようにすることが、望ましいということは考慮されなければならない。同様に、病院・電気・ガス・水道・救急的なものなどのように重要な構造物の耐震性の全体的な安全性は再検討されなければならない。
6. 大きい断層帯中の建物に関しては、もっと大きな注意が要望される。断層の位置をもっとよくマップし、その活動の程度（危険性）を理解する努力が必要である。多くの場所で傾動や、沈下・クラック・短縮など地面の動きが、疑いもなくこれらの地域での重大な構造物被害の原因となった。
7. カリフォルニア州公立学校の設計基準や設計法に対する自信が増した。しかし、非耐震設計の学校建築物は思わしくなかった。
8. 今回の地震は観測データや耐震構造物の試験という見地からすれば、歴史上最も重要な地震である。
9. 最新式の1階建木造建築やしっくい住宅は、高加速度や地震動を考えればかなりよかった。しかし、設計基準や強化法の再検討が必要であることが、特に2階建の建物や石積み煙突で示された。
10. 重要な電気・機械・通信施設を被害から守るための新しい努力が必要である。新しい設計基準や方法が開発されなければならない。
11. ガラスの破損によって引き起こされる問題に大きな注意を払う必要がある。

12. 救急活動は効果的であったが、組織と通信については改良した方がよい。
13. Earthquake Engineering Research Institute は、このまたとない地震が重要な調査・報告のテーマに連いないことを確信する。