

土木研究所資料

Loma Prieta 地震 (1989.10.17)
におけるダムの挙動

平成2年6月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

「Copyright © (1990) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

Loma Prieta 地震 (1989.10.17) におけるダムの挙動

フィルダム研究室 室 長 松 本 徳 久
主任研究員 安 田 成 夫
正 国 之 弘

要 旨

1989年10月17日、米国 California 州において、マグニチュード7.1の Loma Prieta 地震が発生した。本報告は、この地震による震央付近に位置するダムの挙動をとりまとめたものである。調査方法は、筆者らの一人による現地調査および文献調査である。

キーワード：フィルダム，地震，地震動

Behaviors of Dams during Loma Prieta Earthquake. (1989. 10. 17)

Norihisa MATSUMOTO
Chief, Filltype Dam Division
Nario YASUDA
Senior Research Engineer
Yukihiro MASAKUNI

Synopsis

An earthquake called Loma Prieta Earthquake occurred on October 17, 1989 in California, USA. The magnitude of the event was 7.1 on the Richter scale. The field investigations were made by one of the authors and related data were collected from published reports. We describe the behaviors of dams in the vicinity of the epicenter during this earthquake.

Key Words : Embankment Dam, Earthquake, Earthquake Motion

目 次

1. 地震の概要	1
2. 一般の被害	1
3. ダムの挙動	1
3-1 Lexington ダム	2
3-2 Anderson ダム	2
3-3 Guadalupe ダム	2
3-4 Chesbro ダム	3
3-5 Vasona ダム	3
3-6 Austrian ダム	3
3-7 Newell ダム	4
3-8 Almaden ダム	5
3-9 Calero ダム	5
3-10 Coyote ダム	5
3-11 Del Valle ダム	5
3-12 Lower Crystal Springs ダム	5
4. まとめ	5
5. 付記	6
6. 謝辞	6
7. 参考文献	6
・図表および写真	8

1. 地震の概要¹⁾

米国地質調査所 (United States Geological Survey, 略称 USGS) によれば, 地震の概要は以下の通りである。1989年10月17日午後5時04分 (Pacific Daylight Time) に, 北緯37.037°, 西経121.883°を震央とする, マグニチュード7.1 (表面波マグニチュード) の地震が発生した。震源深さは18kmであった。地震は, Santa Cruz 山脈における San Andreas 断層の一部が破壊したことによる。地震は震源近くの山の名にちなみ, Loma Prieta 地震と命名された。破断面は南北方向におよそ40km, 深さ方向におよそ10kmであると推定され, すべりの量は右横ずれが 1.9 ± 0.2 m, 逆上下方向のずれが 1.3 ± 0.4 mと推定されるが, 破断面は地表より6km~20km深部に分布し, 地表でのずれは確認されていない。地震動の解析からは, 右横ずれで南西側が隆起する逆断層の要素を持っているとされる。断層面の走向はN55°W, 傾斜は70°SWである。San Andreas 断層の走向は平均N50°Wで, 断層について行われた解析結果にほぼ一致している。主要動の継続時間は約8秒である。

2. 一般の被害

震源は, California 州 San Francisco 市の南方約90km, Santa Cruz 市の西方約16kmに位置しており, 1989年11月初旬時点での California 州の発表によると, 被害は死者62人, 負傷者3,208人であり, 全壊家屋は1,100戸, 半壊家屋は100,000戸以上とされる²⁾。また被害額は65~100億ドルとされる³⁾。今回の地震は, Oakland の高速道路880号の破壊, San Francisco-Oakland Bay Bridge の床版の落下, マリーナ地区の家屋の倒壊等の都市型被害に象徴される。California 州 Pacific Gas and Electric 会社によると⁴⁾, 地震直後140万人が電力供給を, 15万人がガス供給を受けられなくなった。しかしながら, 電気は翌日までにはバイパスにより供給が再開された。また, ガスは各世帯の点検を5日間で終了, 受益世帯の2/3が復旧したが, 完全に元に戻るまでには11月末まで要したとのことである。この会社に電力を供給している発電所は, 図-1に示すように大部分が震源から遠く離れており, San Francisco 市内の2つを含めた3発電所(火力)が供給を停止したのみである。しかし送電線や変電所(San Francisco 南部)は, かなりの被害を受けたと報告されている。またガスにおいても, Marina 地区, Los Gatos と Watsonville の一部で分配機能が著しく損なわれたとのことである。

地盤の液状化および地すべり等が認められた地点を日本政府調査団のデータにより図-2に示す。図-3(a)に震央から南北約160kmの範囲の水平最大加速度分布を示す。図-3(b)は, ベイエリアの水平最大加速度分布である。図-4は, 地盤種別に, 最大加速度の距離減衰を示す。震央距離40km以上において沖積層は岩盤に比して大であるが, 特に Bay Mud 地点では増幅が著しい。

3. ダムの挙動

地震時におけるダムの挙動を以下にまとめる。本報告は, 筆者らの1人(安田)による現地調査の他, 本稿末に示した参考文献に基づいている。現地調査は地震発生から2ヵ月半が過ぎた1990年1月

3日～5日までの3日間にわたり実施したものである。

図-5に、Loma Prieta地震の震央、San Andreas, Hayward, Calaveras断層、およびダムの位置を示す。また、表-1に各ダムの諸元を示す。地震による地盤加速度が0.05G以上の範囲には120のダムがあるが¹⁰⁾、報告の対象としたダムは、本地震において強震記録の得られたダム、変状が報告されたダム、現地調査したダムであり、震源付近のダムすべてを示したのではない。以下ダムの挙動を記述する。

3-1 Lexington ダム

本ダムは、河床砂礫・粘着土を用いたゾーン型アースフィルダムである。基礎は、Franciscan Formationで、砂岩、粘板岩および頁岩から成る。

上下流法面左右岸アバットメント沿いに亀裂が生じ、その深さは左岸で2.6m、右岸で1.2mであった。右岸の上流部でも基礎の取り付け部で亀裂が生じ天端を越えて下流に伸びていたが（長さ150m）、幅1.8～2.1mのトレンチを掘り、採取材料を用いて締固め試験および含水比試験を実施した。さらに亀裂の発生した場所は、材料を置き換え、小型の振動機で締固めている。図-6(a)の平面図に亀裂およびトレンチの位置を示す。また、断面図を図-6(b)に示す。

洪水吐と堤体との間のずれの開口幅は0.6cmで、それは吞口付近に限られていた。なお洪水吐は、岩盤の上に載せられている。亀裂は、上流面の連絡道路にも発生した。他に上水供給用のパイプが堤体上に設けられていたがこの継手がはずれた。

地震時の貯水位は低く、過去3年間同水位を維持しており、当時湖水でボート遊びをしていた人たちの話によると、水面に波は起きず、船底から足の裏が軽く叩かれる感じであったとのことである。

堤体の変形は、沈下が天端で20～25cm、水平変位は下流方向へ7.6cmであった。

図-7に強震計の配置、図-8(a)、(b)に加速度時刻歴、表-2に最大加速度および推定周期を示す。

3-2 Anderson ダム

本ダムは、センターコア型ロックフィルダムであり、上下流にはロック材が配置されている。ダムの平面図と断面図を図-9(a)～(c)に示す。基礎はFranciscan Formationで、風化した玄武岩が主体である。亀裂は嵩上げ時の上下流のフィルター境界部に沿って2本生じた。

貯水池は、Calaveras断層の上に湛水しており、この断層を震源とするMorgan Hill地震(1984)の際に、天端の上流部および下流部に1本ずつダム軸に平行に亀裂が生じ、今回の亀裂よりも若干規模が大きかった。

図-10に強震計の配置、図-11(a)～(g)に加速度時刻歴およびパワースペクトル、表-3に最大加速度および推定周期を示す。

3-3 Guadalupe ダム

本ダムの基礎も、Franciscan Formationである。天端標高はEL. 189mで10月27日の水位はEL. 167m、震央距離は17kmである。堤体は粘土質材料を用いた均一型アースフィルダムである。平面図を図-12(a)に、断面図を図-12(b)に示す。ダムは、上流面にコンクリート版が施工されているが、進水壁で

はなく貯水池の波浪から、堤体を保護するためのものである。また、1971年に堤体下部が緩んだために1:5の緩勾配でコンクリート版の上に盛土している。今回の地震でコンクリート版に亀裂が入ったほか、盛土にも幅5.1~7.6cm深さ1.5mにわたって亀裂が生じ、その方向はダム軸方向で数条である。左岸洪水吐寄りに、天端で上下流方向の亀裂が、また右岸アバットメントの付け根にも亀裂が発生した。天端の左右岸アバットメントに亀裂が発生したが、調査当時左岸側では材料を置換し再締固めを行っている最中であった。

堤体の沈下は、50年経過した現在天端で61cmであり、地震により6.1cm程沈んだとのことである。

3-4 Chesbro ダム

堤体は均一型アースフィルダムで、基礎は Franciscan Formation である。天端は EL. 163m、10月30日水位は EL. 142m である。平面図を図-13(a)に、断面図を図-13(b)に示す。本ダムは、Santa Clara Water District の前の所有者が、堤体上流面を波浪から保護するために、天端から3.0mの深さまでをロック材で置き換えている。ところが、その部分の締固め不足のため、今回の地震により、ロック材と従来の材料の境界に添って天端に亀裂が発生した。(図-14(a), (b)参照) 雁行状の亀裂は幅10cm・段差10cmで総延長は60mである。また、右岸上流側アバットメント沿いにも亀裂が発生した。それ以外の部分には、亀裂は発生していない。補修は、天端から3.1m深さまでを細粒分を含んだ材料で置き換えて締固め、上流面にはロック材を配している。最大沈下は、1989年7月12日以来9.8cm、水平変位は上流方向へ1.5cmであった。

3-5 Vasona ダム

本ダムは、中央に重力式コンクリートダムを有するアースフィルダムとの複合型である。天端は EL. 93m で設計最高水位は91.4m である。平面図および断面図を図-15に示す。ダムは、レクリエーションと下流の流水機能維持を主たる目的としている。変状は、主に右岸側アースフィル部天端に、ダム軸に平行に数条発生した亀裂であり、その大きさは幅5mm・最大深さ1.5m・長さ6.1~9.2m程度であった。また、それらは連続性があり、総延長は45mであった。補修作業は、1990年1月8日の週に開始されている。

ダムは上流面にコンクリート壁を有しているが、これは波浪から堤体を保護することを目的としている。フィル部の堤体材料は、細粒材を上流側に置き、下流側に粗粒材が多くなるように盛り立てた均一型アースフィルダムとなっている。基礎は Santa Clara Formation であり、砂礫や粘土が流入し堆積し圧密されたものである。基礎には、シルト層も存在するのであるが、ピエゾメータによれば不飽和状態であることを示しており液状化の可能性はなかった。堤体のピエゾメータには地震時何ら変化がなく、浸透流上の問題もなかった。

重力部とアースフィル部の接合部については、重力部がバットレス型式の擁壁になっているために、何らの変状も生じなかった。

3-6 Austrian ダム

本ダムは、San Jose Water Co. が所有する私的なダムで、堤体材料は貯水池内から採取した粘着

性のある砂岩および頁岩が主体の均一型アースフィルダムである。平面図を図-16(a)に、断面図を図-16(b)に示す。基礎岩盤は、砂岩および頁岩である。ダムは、建設当時左岸の表土を十分に掘削しなかったために、初期洪水で左岸下流の低位標高で漏水を生じた。そのため、左岸地山にグラウチングを施し、その後洪水による漏水は認められないとのことである。

地震による被害は、天端アスファルトにダム軸方向に無数の亀裂が入り、アスファルトをはがしてみると亀裂の深さは平均3.1~4.6m(最大6.1m)に達していた。また、堤体の沈下量は図-17(a)に示すように、堤体全体にわたり61~92cmで洪水吐のある右岸側で61cm、左岸側で15cmの沈下となっている。水平変位は図-17(b)に示すように、右岸洪水吐で下流方向へ36cm、左岸部で上流方向15cmであった。堤体の変形は相対量であり、偶然にも地震前日の10月16日計測しておりこれが基準となっている。また、図-17(c)に示すとおり、地震による間隙水圧の上昇も確認されている。間隙水圧計の位置は、図-16(b)の断面図中に示す。右岸アバットメントに洪水吐があるが、図-18に示すように下方部分の2/3は、古い崖錐の上に載っている。地震によりこの崖錐が、長さ122m・深さ92cmの規模で、下方へ約30cmすべったために、洪水吐も共に下方へすべった。そのため、洪水吐の上方部分1/3に流水方向に対して直角に無数の亀裂が生じた。もともと古い亀裂もあったのだが、それらもさらに地震で開いた。また、洪水吐と堤体の接合部は、沈下は前述のとおり61cmであるが、図-18に示すように呑み口の左岸側がコの字型になっている部分で、コンクリート部とフィル堤体部の間に、ダム軸方向に幅10cm・深さ6.1cm、上下流方向に約30cmの開きができた。この他にも堤体地山の右岸下流部と、左岸上流部で地すべりがあったとのことである。堤体下流の橋は橋脚から31cm横へずれたが、その脇に設置してあったパイプラインには何ら被害がなかった。現在、堤体は天端から4.6mを除去し、新たに材料を搬入し締め直している。左岸のリム部は漏水のおそれがあるので、スリーブグラウトを行っている。洪水吐は、エポキシ系樹脂あるいはセメントグラウトにより、亀裂や導流壁および床版の裏側の空隙を埋めている。グラウトは、床版と導流壁の接合部の方が、床版よりも多く注入された。

地震による堤体沈下の原因の一つとして、堤体の沈下以外に基礎の沈下の可能性が考えられるので、後日、本ダムの主任設計者である Dr. Kenneth, V. Rodda にこのことについて質問の手紙を出したところ、ダムは岩盤の上に建設されているとの返事が届いたことを付記しておく。

3-7 Newell ダム

本ダムは、Santa Cruz 市が所有するダムである。今回現地調査した9ダムの内、このダムだけが San Andreas 断層の西側に位置する。平面図および断面図を図-19(a)~(c)に示す。地震による主な被害は、堤体上流面のダム軸に平行な2本の亀裂である。亀裂の標高はダム天端から7 m下である。なお地震時の貯水位は、天端から16.8m下であった。亀裂は、ピットを掘って調査しており、幅2 cm・深さ3.1mである。堤体上流面の貯水面下の変状を調査するために超音波による探査が行われたが、法面の盛り上がりや亀裂などの変化はなかった。上流面に設置された斜樋型のコンクリート製取水設備は、天端から7 m下の亀裂が発生したところで、2.5cm下方向へ移動しコンクリートの打継ぎ目が開いている。さらに沈下が最大断面で3.8cmあり上下流方向の変形はなかった。

上流面の補修は、深さ3.1m・幅3.1mにわたって掘削し、新たに材料を搬入し締め固めている。その上に、砕石を置き波浪から保護している。基礎は、破砕された砂岩、頁岩であり堤体材料も同じもの

である。

地震時に、湖面でレンジャーボートに乗っていた人の話によると、1.8m 程の波が発生し、水底の有機物が攪拌され水面が濁ったとのことである。水面はその後4日できれいになった。堤体下流で計測された漏水量は、32 ℓ/min から182 ℓ/min になったが、2週間後にはもとの状態に戻った。漏水は濁りがなく、清冽であったとのことである。また、左岸ダム軸の上の地山にすべりがあった。

3-8 Almaden ダム

本ダムは、Guadalupe ダムと同型式であるが、小規模である。断面図を図-20に示す。Almaden ダムは Calero ダムとともに他の調査7ダムよりも震央距離が短かったが何らの被害もなかった。

3-9 Calero ダム

本ダムも、Guadalupe ダムと同型式であるが、何らの被害もなし。

3-10 Coyote ダム

このダムサイトは、San Andreas 断層の主要な派生断層である Calaveras 断層上に位置していたため、建設当初より、ダム基礎の断層がずれることを想定して設計・施工された特殊なダムである。図-21(a)に示す断面図のとおり、均一型のアースフィルダムで、上下流には砂礫が積まれている。図-21(b)に加速度時刻歴、表-4に最大加速度を示す。

3-11 Del Valle ダム

図-22(a), (b)に加速度時刻歴、表-5に最大加速度を示す。

3-12 Lower Crystal Springs ダム

図-23に平面図および断面図を示すが、本ダムはメイソンリーの曲線重力式ダムである。図-24に強震計配置図、図-25(a), (b)に加速度時刻歴、表-6に最大加速度および推定周期を示す。

4. まとめ

- ① Loma Prieta 地震は、マグニチュード7.1と中規模の地震であり、高速道路880号の被害に代表されるように都市型災害を特徴とするものである。California State Department of Water Resourcesによると、今回の地震で7つのダムに変状あるいは被害が発生したと報告されている。そのうち、Austrian ダム以外は堤体に亀裂が生じた程度の変状である。Austrian ダムは、建設時に表土の掘削残しあるいは、洪水吐が崖錘の上に載っているなど、元々基礎に問題があり、そのことが今回の地震により被害となって現れたと考えられる。それに対して、Austrian ダムと震央距離がほぼ等しい Almaden ダム、Calero ダムあるいは、1984年の Morgan Hill 地震で直近の Anderson ダムが天端に数条の亀裂の発生だけで済んだことは確実に施工されたフィルダムが充分耐震性を有することを裏付けている。

- ② Lexington, Anderson, Coyote の3ダムのアバットメントにおいて、それぞれ0.45, 0.08, 0.49 Gの最大加速度が観測された。周期は0.5~1.0秒程度で、近い地震としてはかなり長い周期を持つ。また、Lexington, Anderson ダムの天端では、それぞれ0.45, 0.43Gの最大加速度が記録されている。これらの記録を堤体および地盤の動的特性と合わせて解析すればフィルダムの地震時の強さについての重要な資料となろう。

5. 付記 (1984年 Morgan Hill 地震)⁵⁾

1984年4月24日にマグニチュード6.2のMorgan Hill 地震がCalaveras 断層で生じた。震央から至近にAnderson ダムとCoyote ダムがあり、報告があるので記載しておく。

① Anderson ダム

震央より19km南東に位置していた。天端で0.63G、法尻で0.41Gの加速度を記録した。被害としては、ダム軸方向の亀裂(3 m離れて平行する2本、長さ6 m)が発生した。亀裂は、粘土コアと粘土質礫の境界に僅かに発生している。

② Coyote ダム

左岸アバットメントで1.29Gの最大加速度が観測された。この記録は非常に大きいので、計器の異常を想定し、振動台上でチェックしたところ正常なので、記録は正しいとされている。変状は、天端に限定された亀裂である。なお、断層のずれによる亀裂はなかった。

6. 謝 辞

調査に当たり、San Francisco のS. M. W. SEIKO Co. 社長の多喜紀氏および社員のDr. David Yang 氏には、各関係機関との交渉および現地案内において大変お世話になった。コンサルタントのDr. Kenneth V. Rodda (Austrian ダム)、Santa Cruz 市職員のMr. Ron Tipton (Newell ダム) およびSanta Clara Valley Water District のMr. Robert E. Tepel (その他のダム) には現地で被害の説明を、California State Department of Water Resources のDr. Donald H. Babbitt, Mr. Albert Sousa, IIからはダムに関する貴重な資料を頂いた。また、U. S. G. S. Dr. A. G. Brady からは、Anderson ダムのデジタル化された加速度記録を当研究所地震防災部を通じ提供していただき、大変参考になった。末筆ながら感謝の意を表します。

7. 参考文献

- 1) Staff of the U. S. Geological Survey, "The Loma Prieta, California Earthquake : An Anticipated Event", Science, 11/17/89
- 2) R. Maley, et al. "U. S. Geological Survey Strong-Motion Records from the Northern California (Loma Prieta) Earthquake of October 17, 1989", Geological Survey Open-File Report 89-568, U. S. G. S. Oct. 1989

- 3) A. Shakal, et al. "CSMIP Strong-Motion Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California Earthquake of 17 October 1989", Report No. OSMS 89-06, California Strong Motion Instrumentation Program
- 4) A. Astaneh, et al. "Preliminary Report on the Seismological and Engineering Aspects of the October 17, 1989 Santa Cruz (Loma Prieta) Earthquake", Report No. UCB/EERC-89/14, Oct. 1989.
- 5) J. H. Bennett, R. W. Sherburne, "The 1984 Morgan Hill, California Earthquake, Special Publication 68", California Department of Conservation
 - 5-1 G. L. Hanegan, W. J. Bennett, "Response to the Morgan Hill Earthquake and Observations by the State Division of Safety of Dams"
 - 5-2 R. E. Tepel, R. L. Volpe, G. Bureau, "Performance of Anderson and Coyote Dams During the Morgan Hill Earthquake of 24 April 1984"
 - 5-3 J. Hovland, J. C. Gamble, B. J. Mah, J. E. Valera, "The 1984 Morgan Hill Earthquake. Effects near Coyote Dam"
 - 5-4 A. F. Shakal, R. W. Sherburne, D. L. Parke, "Principal Features of the Strong-Motion Data From the 1984 Morgan Hill Earthquake"
- 6) A Special Report by Dames & Moore, "The October. 17, 1989 Loma Prieta Earthquake"
- 7) 日本政府調査団報告書
- 8) E. B. Kollgaard, W. L. Chadwick, "Development of Dam Engineering in the United States", Pergamon Press
- 9) Pacific Gas and Electric Company, "Quarter Report to Shareholders for the Period Ended September 30", 1989
- 10) "The Great Quake On-Site Reports", Civil Engineering, ASCE, Dec. p47, 1989
- 11) Robert B. MacDonald, "Dam Performance During the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989", The 22nd Joint Meeting U. S. - JAPAN PANEL on Wind and Seismic Effects, May 1990

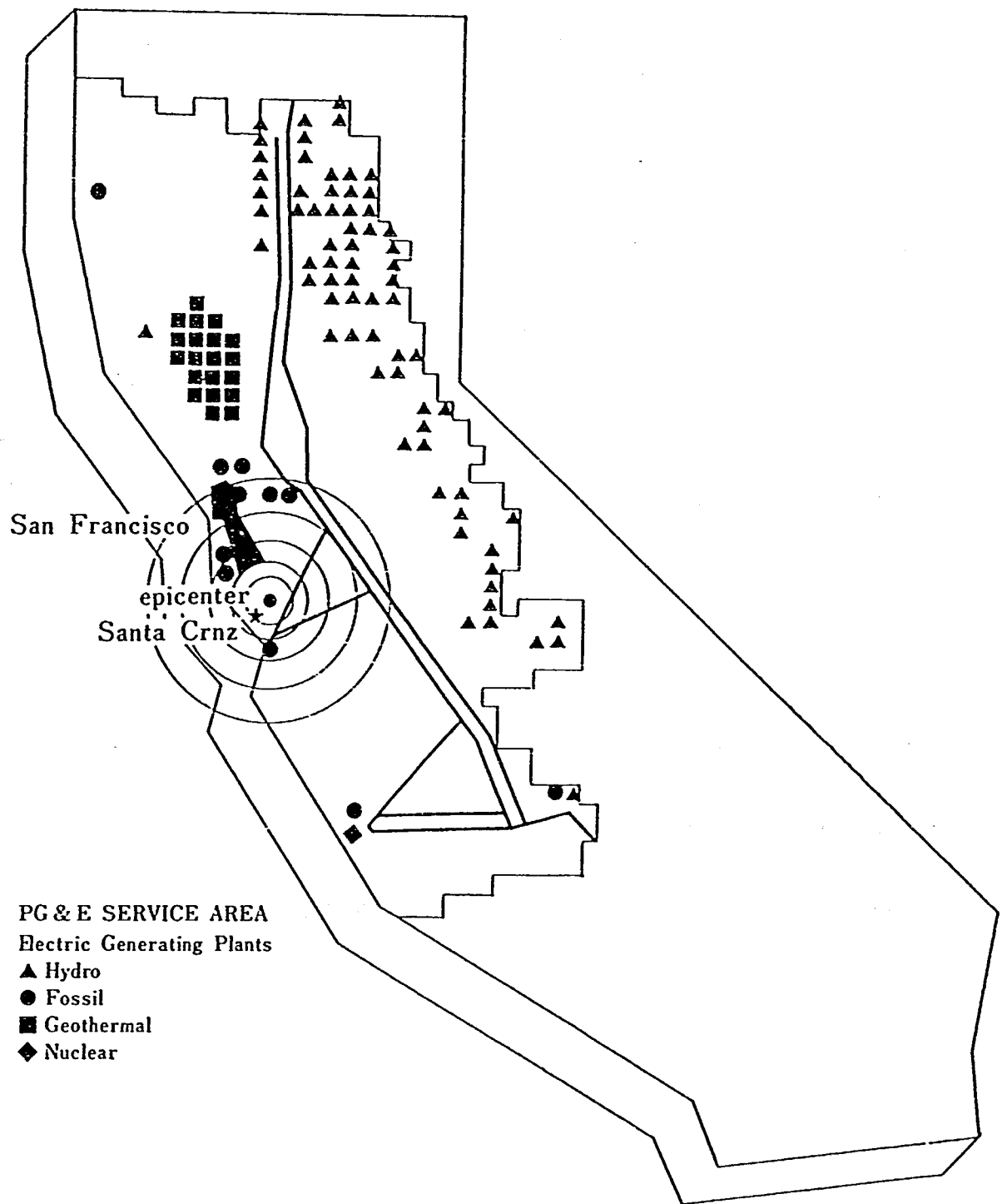


図-1 San Francisco 周辺の発電所
(Pacific Gas and Electric 会社による)⁹⁾

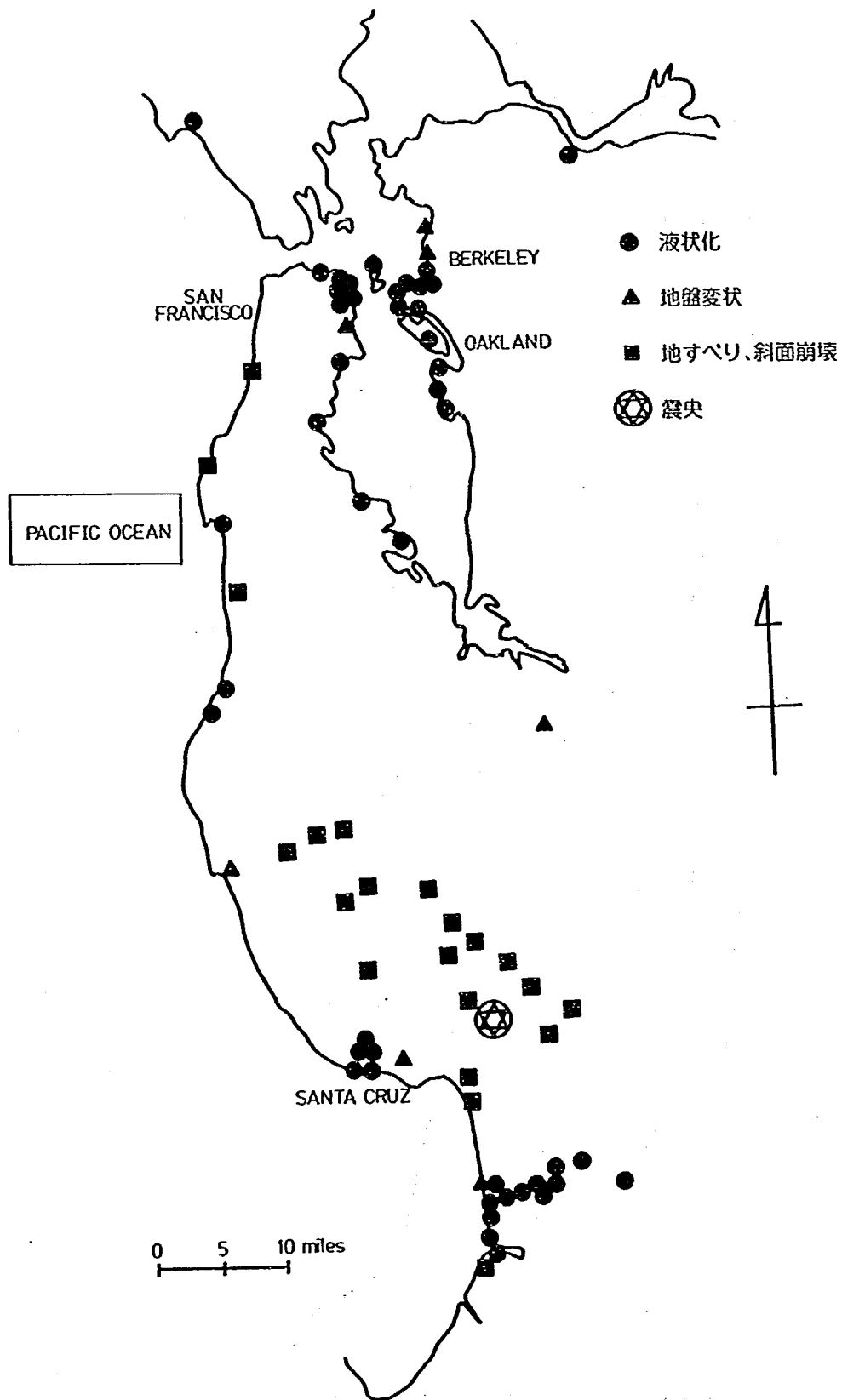


図-2 Loma Prieta 地震により地盤変状の認められた箇所⁷⁾
 (日本政府調査団が California 大学 Berkeley 校 Seed
 助教授のデータ、および米国地方公共団体のデータに
 日本政府調査団のデータを追加したもの)

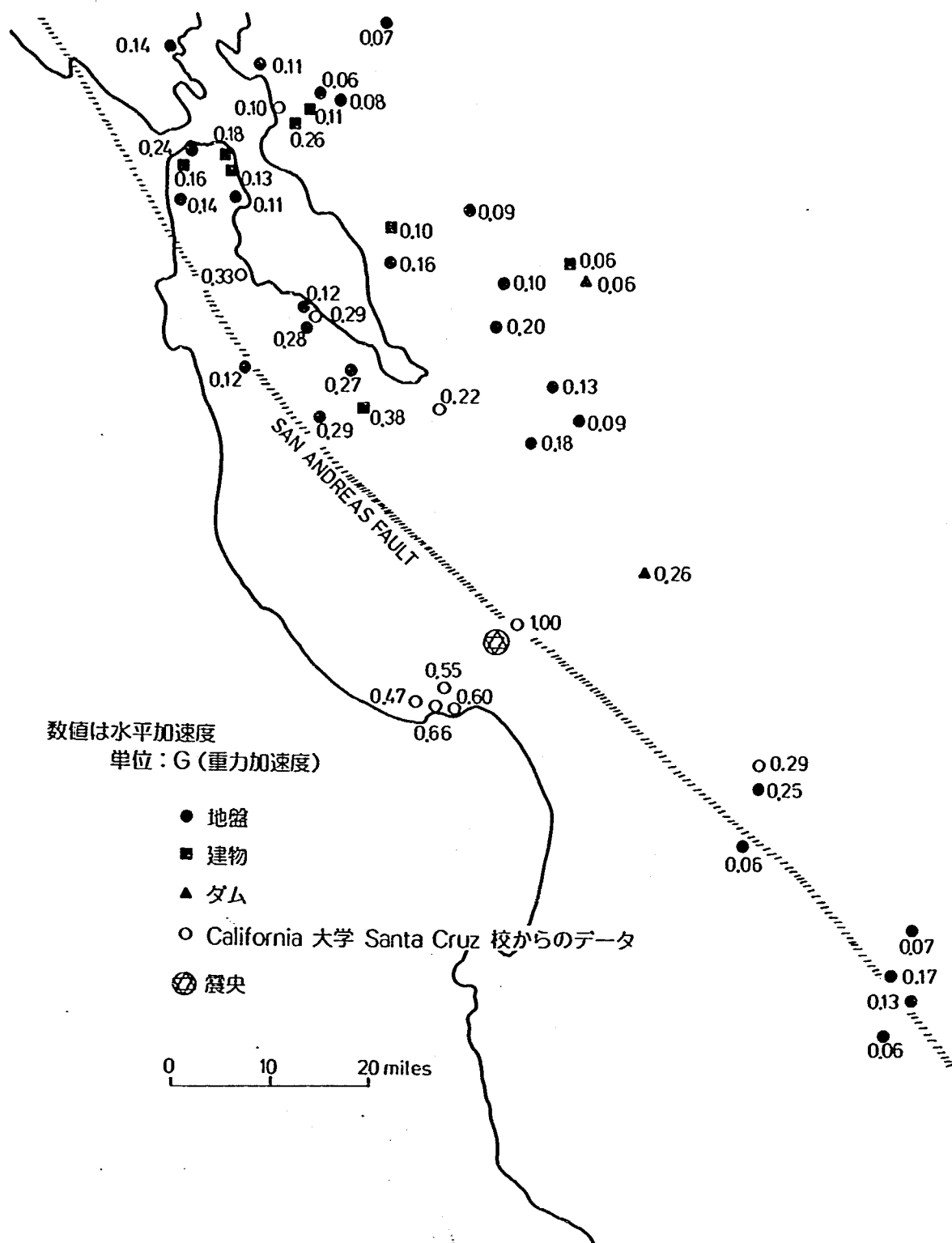


図-3(a) 震央から160km以内で記録された最大加速度⁷⁾
 [U. S. G. S. の OPEN-FILE REPORT 89-568 の資料
 および California 大学 Santa Cruz 校のデータを基に
 日本政府調査団がとりまとめたもの]

数値は水平加速度
単位：G（重力加速度）

- 地盤
- 建物
- ▲ タム
- California 大学
- Santa Cruz 校からのデータ

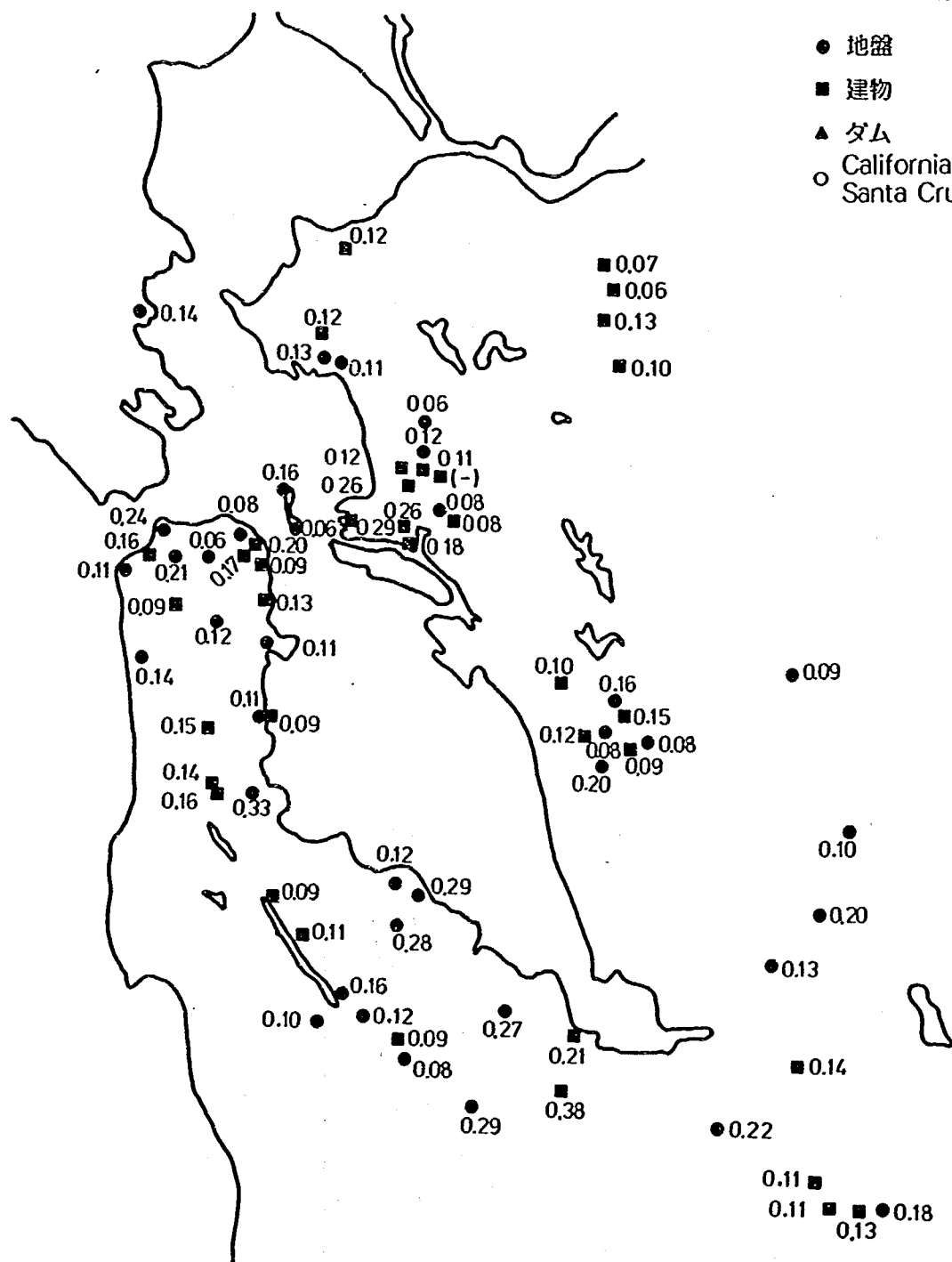


図-3(b) ベイエリアで記録された最大加速度²⁾

この図は、政府調査団が NORTH AMERICAN MAPS の地図をトレースしたものに、C. D. M. G. の REPORT OSMS89-06 および U. S. G. S. の OPEN-FILE REPORT 89-568 の記録をプロットしたものである。位置は大略の地点を示す。

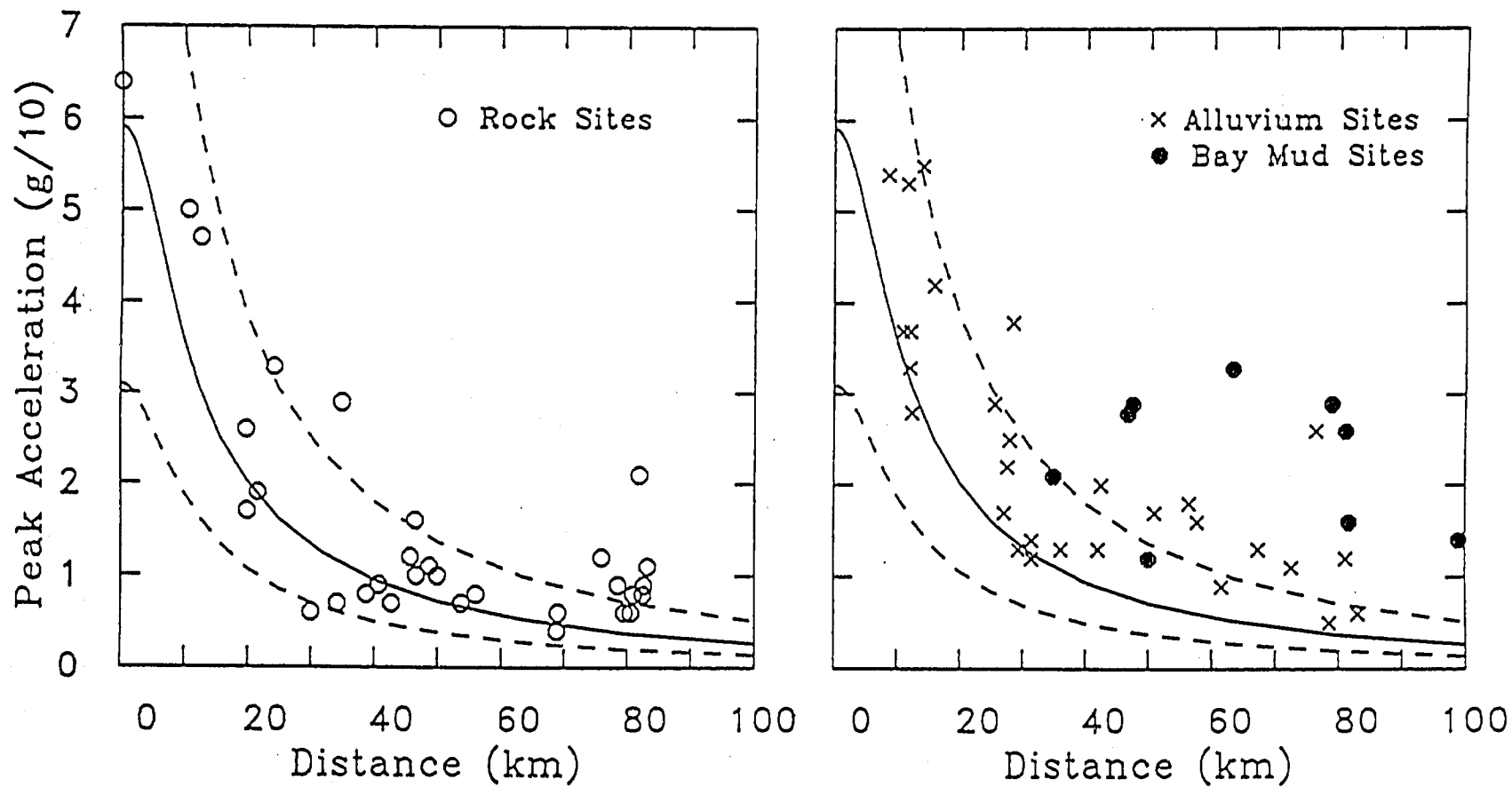


図-4 地盤種別最大加速度 (U. S. G. S. より)¹⁾

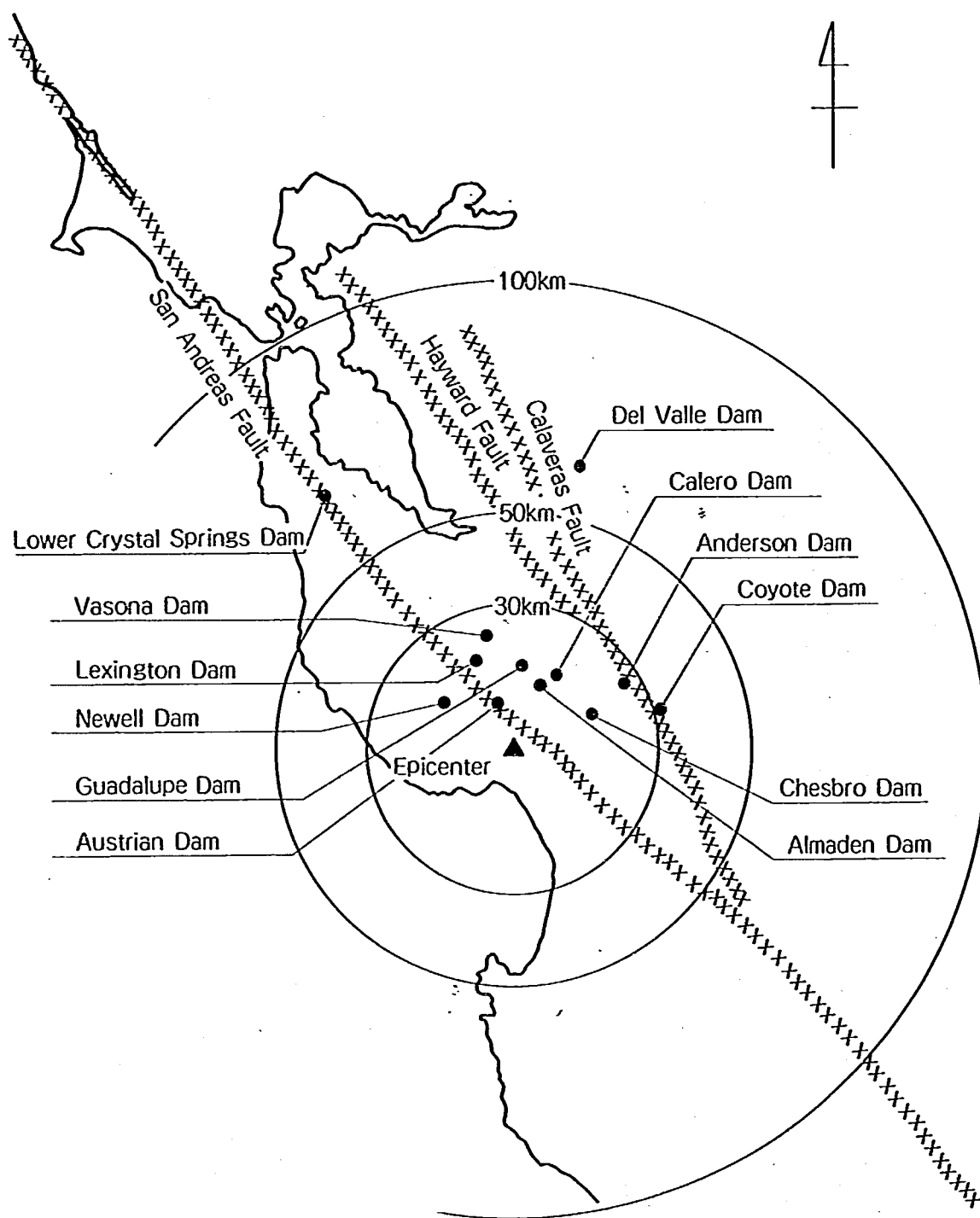


図-5 Loma Prieta 地震の震央とダムの位置

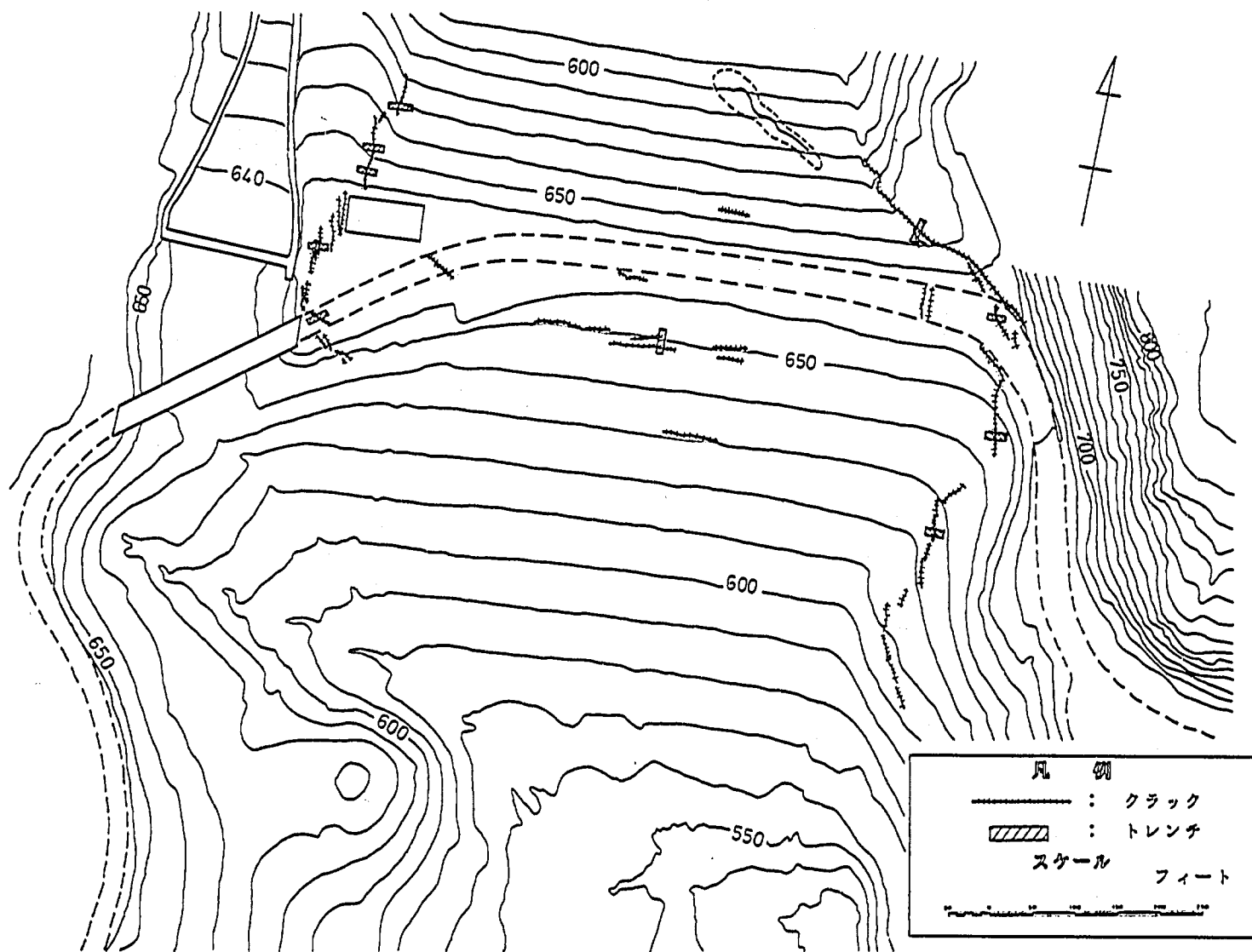


図-6(a) Lexingtonダムの平面図
 [原図は Santa Clara Valley Water District
 Robert E. Tepel 氏の提供。筆者ら再作図]

Lexington

番号	ゾーン	材 料	まき出し厚	含水比	締固め機械と 重量	転 圧 回 数	材料強度	粒 度	Weight wet sat.
3A	Most Upstream Perv.		4" After Compaction	15%	Sheepfoot 30,000 ft lb Pneumatic 20,000 ft lb	10 Passes	$\phi=21'48'$ C=800psf	No rock over 5"	145 146
1	Imperv. Center	Clay loams & Gravelly clay loams	4" After Compaction	15%	//		$\phi=22'$ C=800psf	No rock over 5"	137 140
2	Filter		10" Layers		High Pressure Water Jet		$\phi=35'$ C=0		Dry 110 130
3B	Semi. Perv. Ballast		4" After Compaction	15%	Sheepfoot 30,000 ft lb Pneumatic 20,000 ft lb	10 Passes	$\phi=22'$ C=800psf	No rock over 4"	145 146

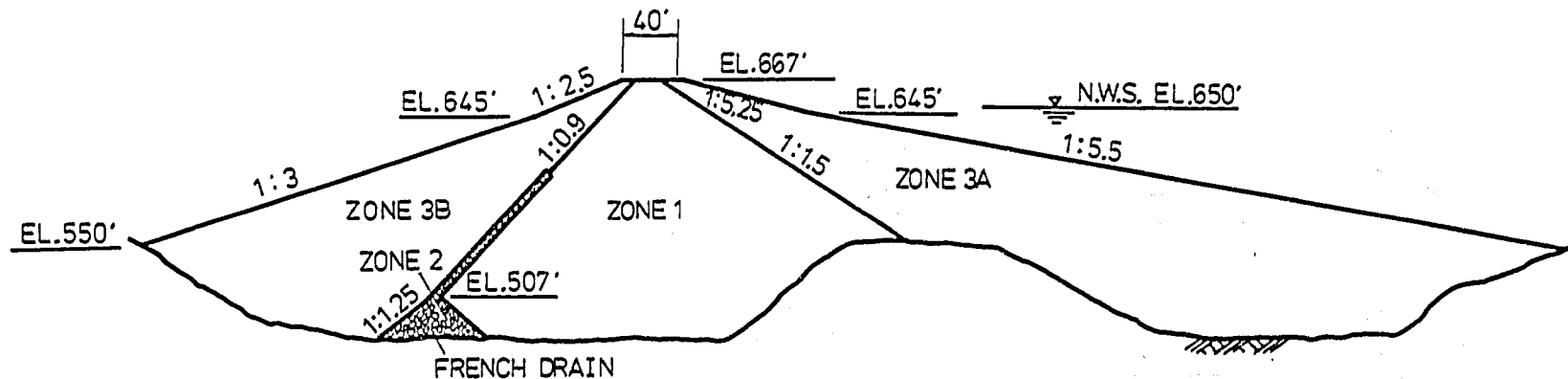


図-6(b) Lexington ダムの上下流方向断面図

〔原図および枠内のデータは California State Department of
Water Resources, Donald H. Babbitt 氏の提供、筆者ら再作図〕

Earth Dam
Maximum Height = 205'
Construction Date: 1953

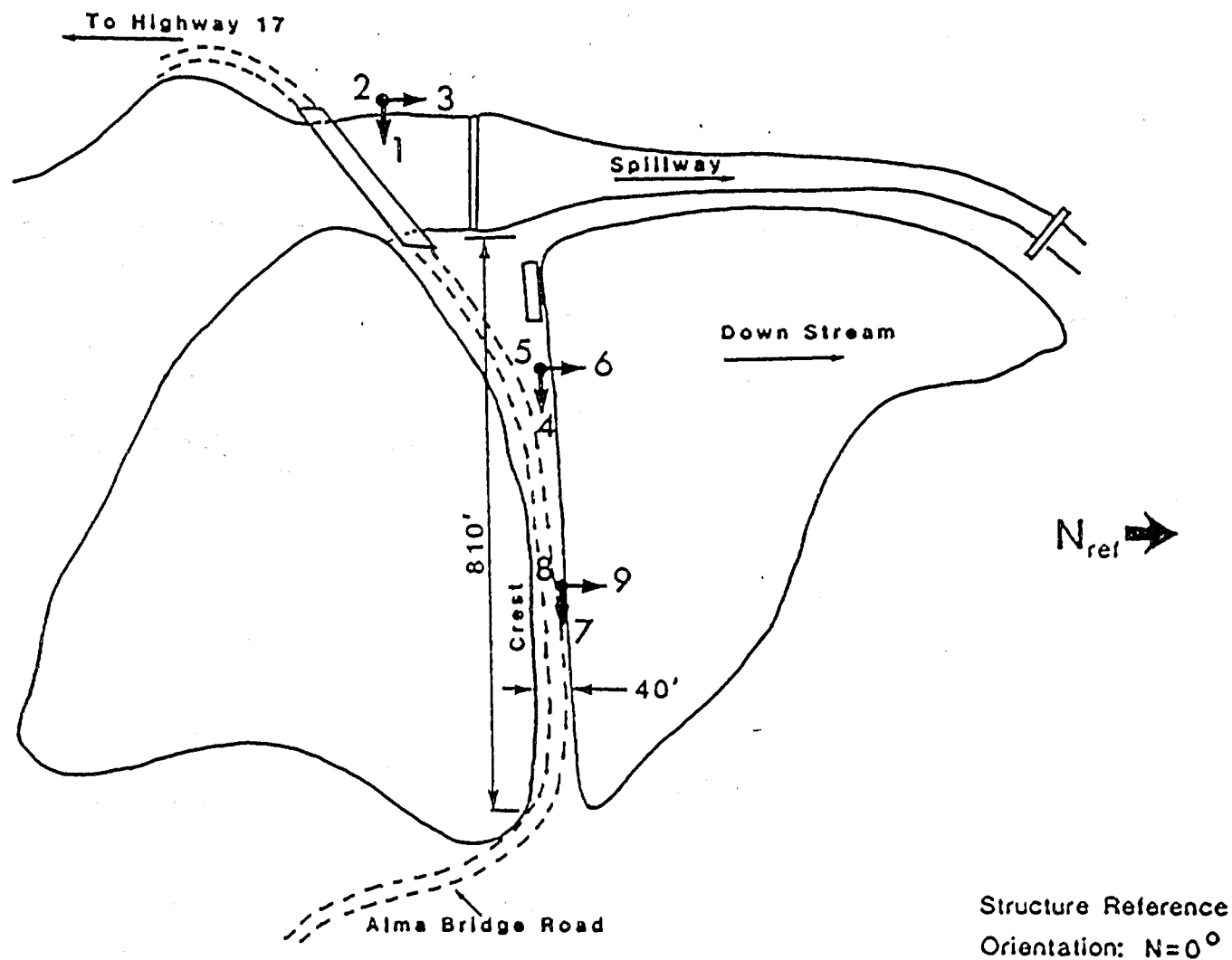
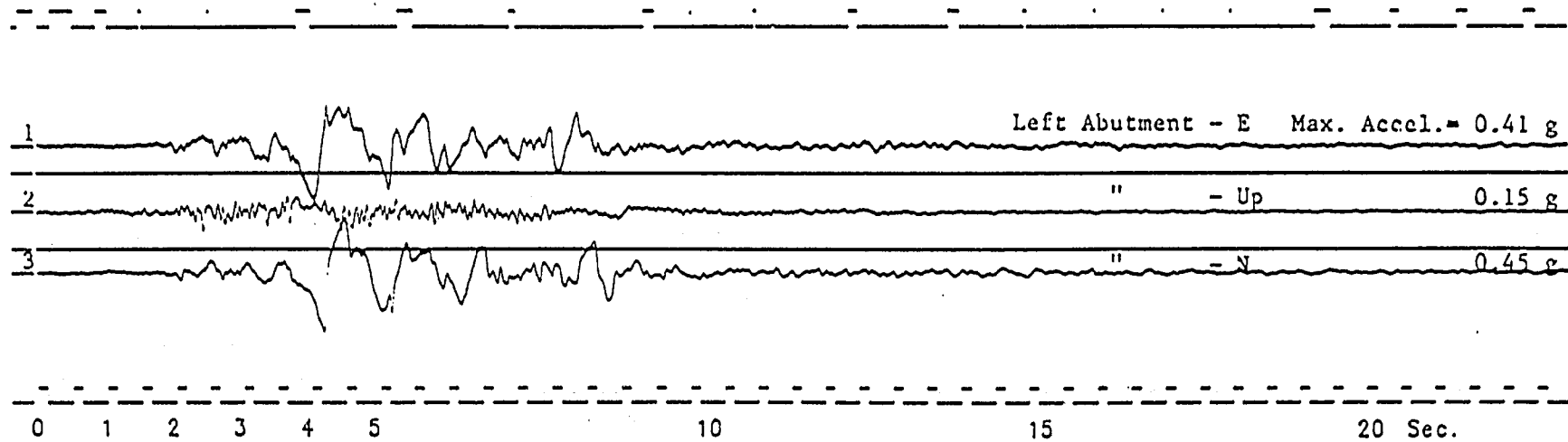


図-7 Lexington ダムの強震計の配置
(C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06 より)³⁾

Lexington Dam
(CSMIP Station 57180)

Record 57180-S2130-89292.02



Lexington Dam
(CSMIP Station 57180)

Record 57180-S2131-89292.03

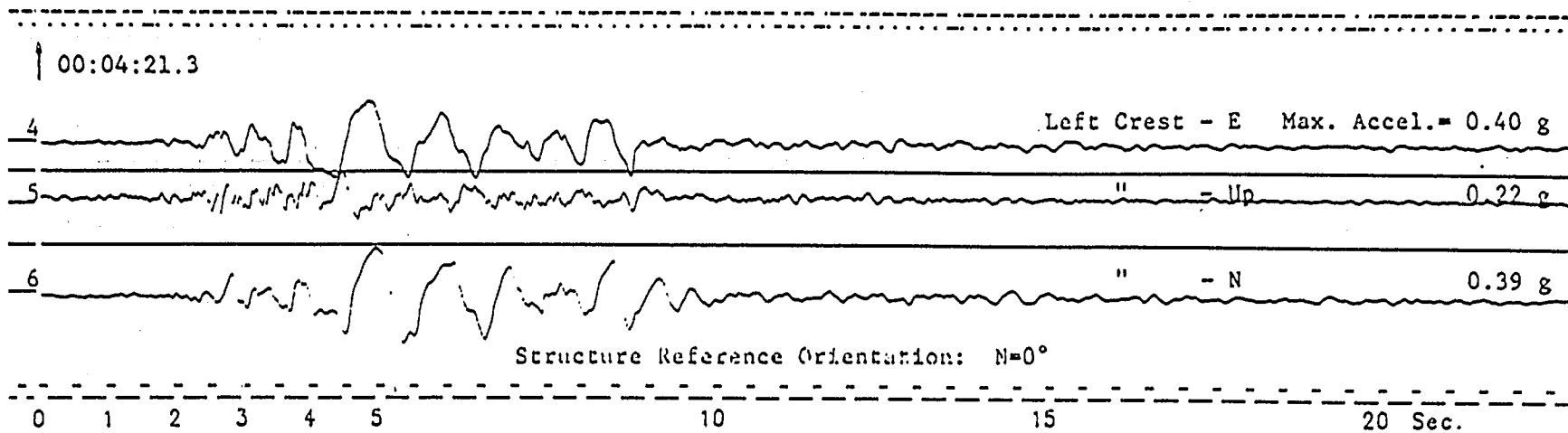


図-8(a) Lexington ダムの加速度時刻歴
(C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06 より)³⁾

Lexington Dam
(CSWIP Station 57180)

Record 57180-S2132-89292.04

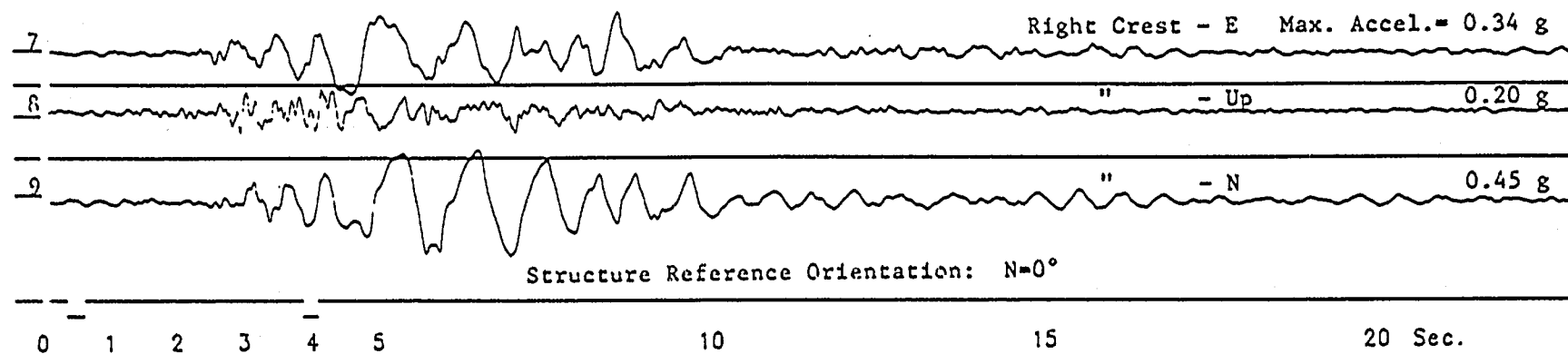
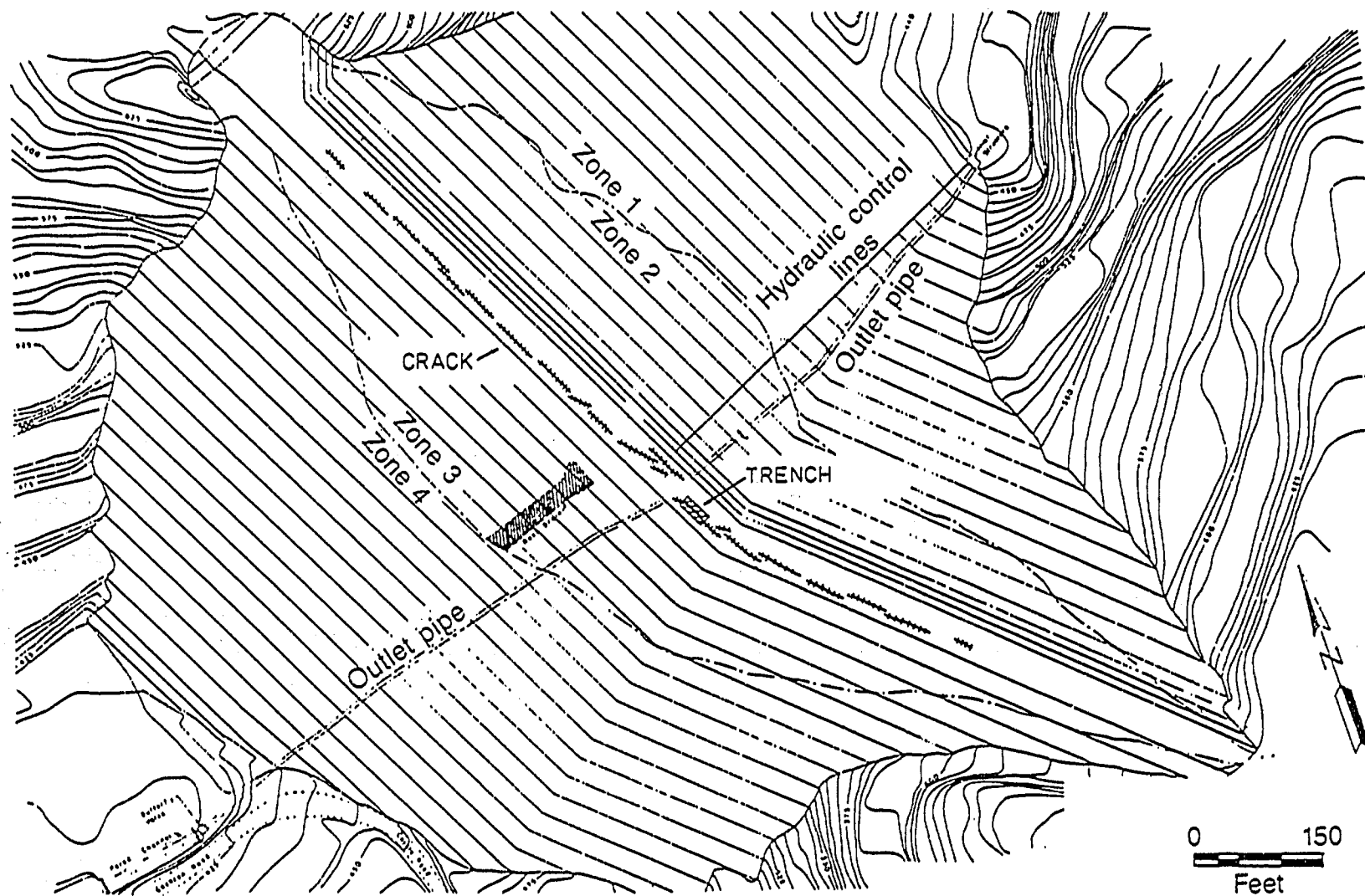


図-8(b) Lexington ダムの加速度時刻歴
(C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06 より)³⁾



PLAN

図-9(a) Anderson ダムの平面図⁸⁾

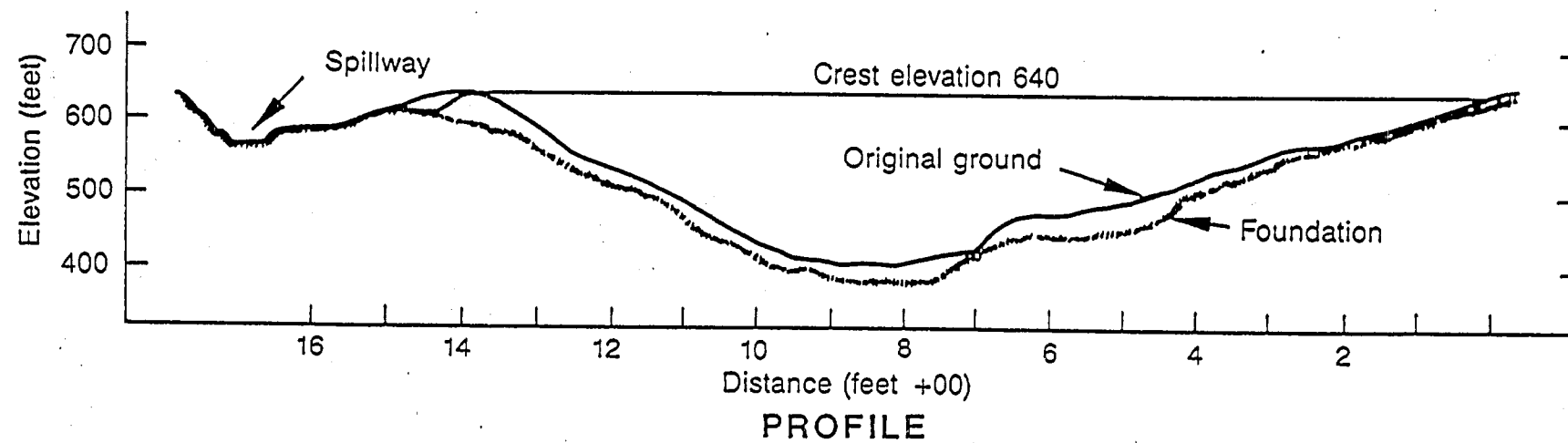


図-9(b) Anderson ダムのダム軸方向断面図

Anderson

番号	ゾーン	材 料	まき出し厚	締固め機械	転圧回数	材料強度
3a	SHELL	ROCK (SILICA)	DUMPED	SHEEPSFOOT	2	$\phi=35^\circ$ C=0
1	IMPERVIOUS ROLLED FILL	CLAY LOAM	6" AFTER COMPACTION	//	10	$\phi=15^\circ$ C=800 psf
3b	ROLLED FILL	SAND & GRAVEL	//	//	10	$\phi=37^\circ$ C=100 psf
3c	SHELL	ROCK (CHART)	DUMPED	//	2	$\phi=35^\circ$ C=0
b	FOUNDATION	SHALE SANDSTONE				

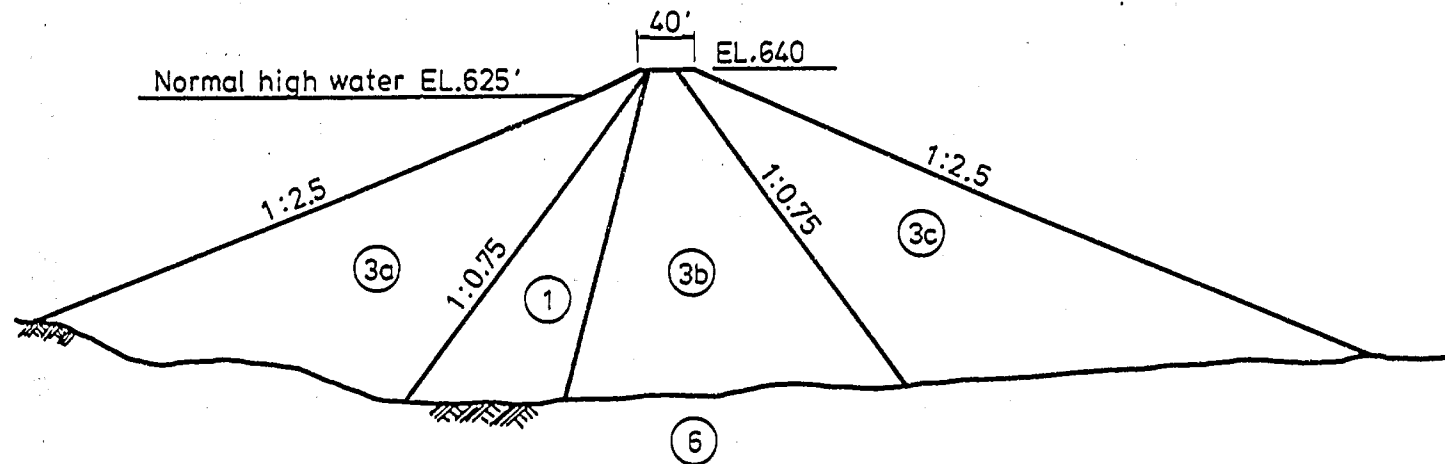
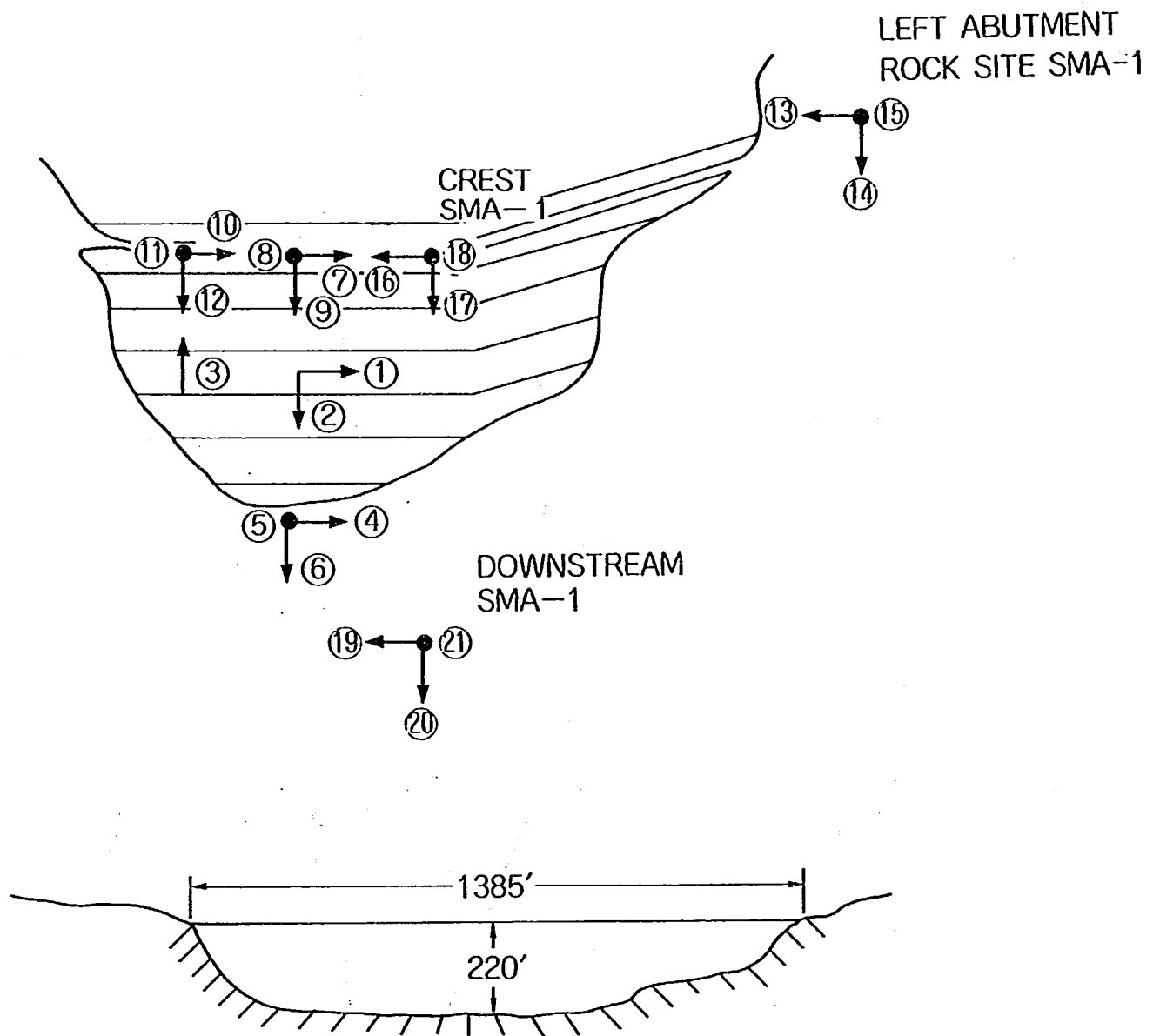


図-9(c) Anderson ダムの上下流方向断面図

{ 原図および枠内のデータは California State Department of
Water Resources, Donald H. Babbitt 氏の提供、筆者ら再作図 }

ANDERSON DAM STRUCTURE ARRAY



DAM TYPE
ROLLED EARTH AND ROCKFILL STRUCTURE WITH CLAY CORE

図-10 Andersonダムの強震計の配置
(U. S. G. S. Open-File Report 89-568 より)²⁾

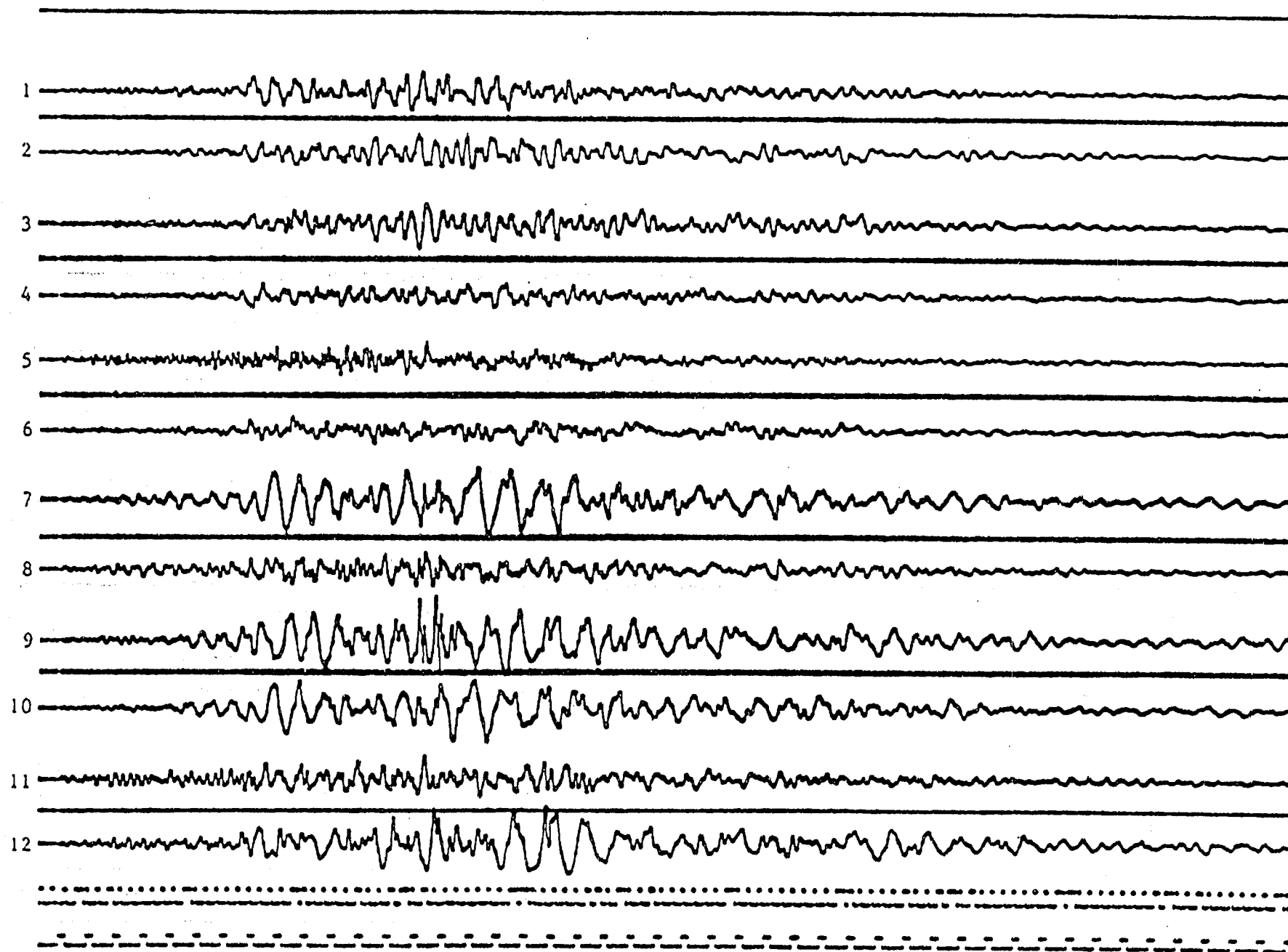


図-11(a) Anderson ダムの加速度時刻歴
(U. S. G. S. Open-File Report 89-568 より)²⁾

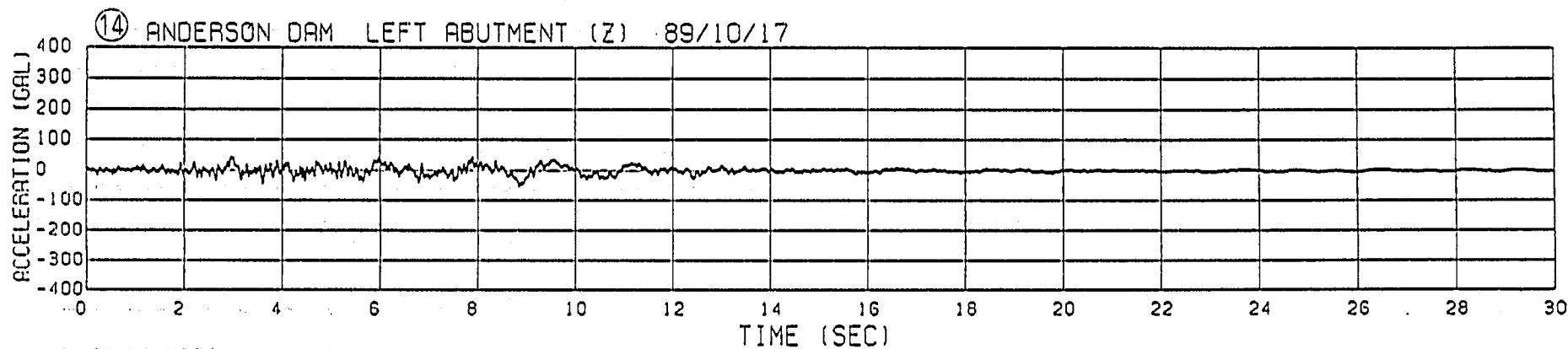
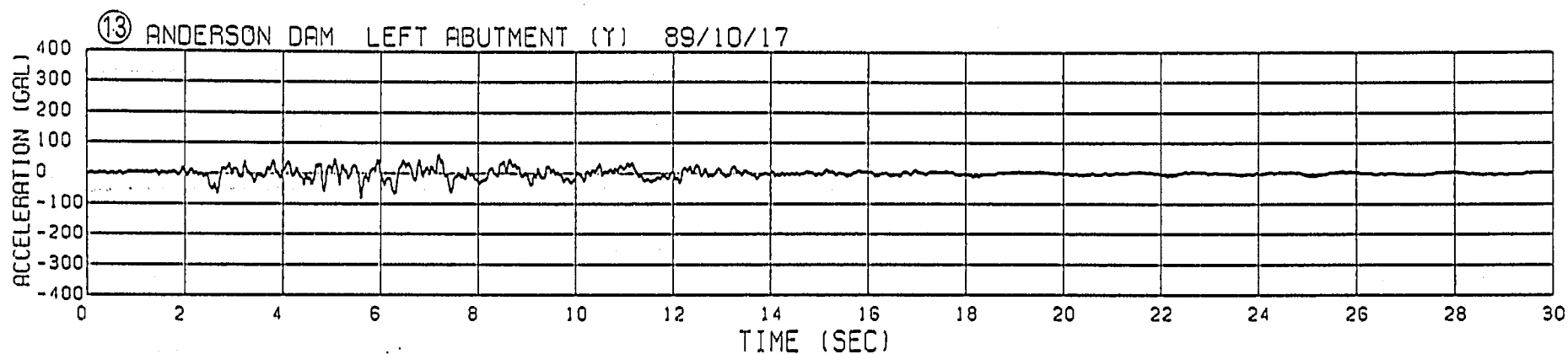
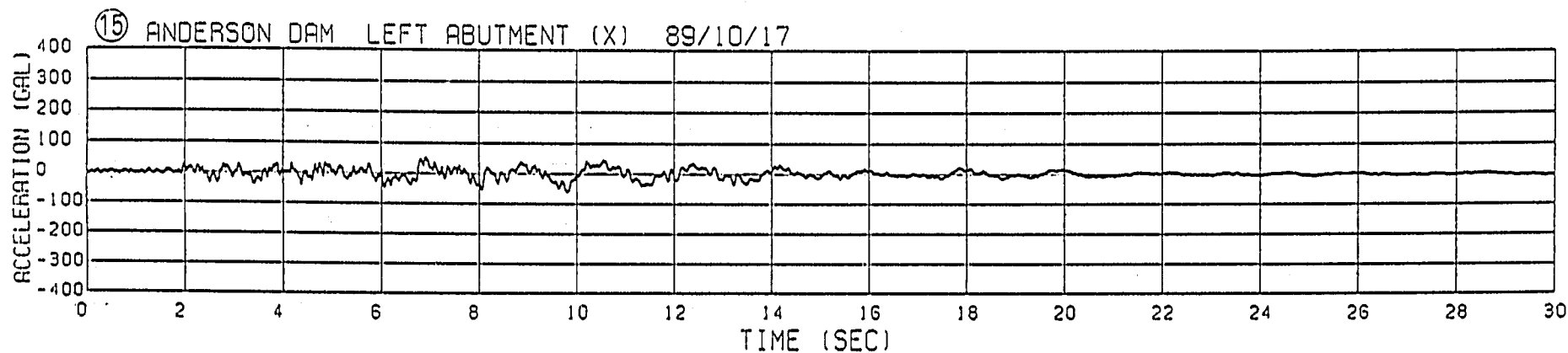


図-11(b) Anderson ダム 左岸アバットの加速度時刻歴
(デジタル値は、U. S. G. S., A. G. Brady 氏より提供)

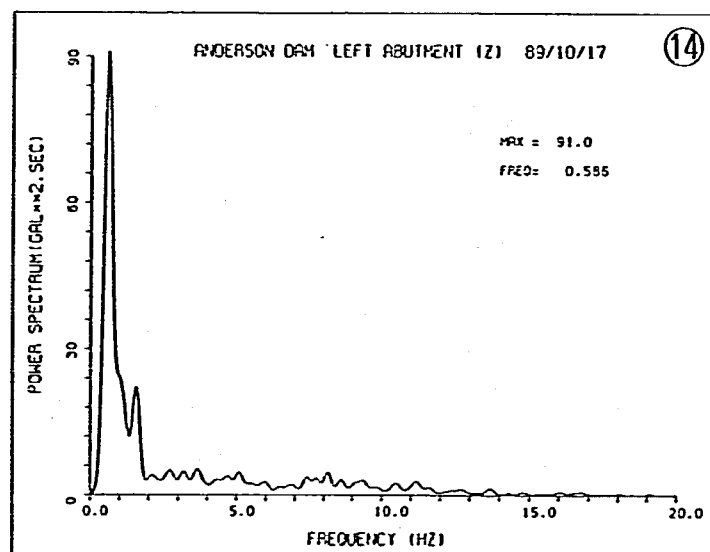
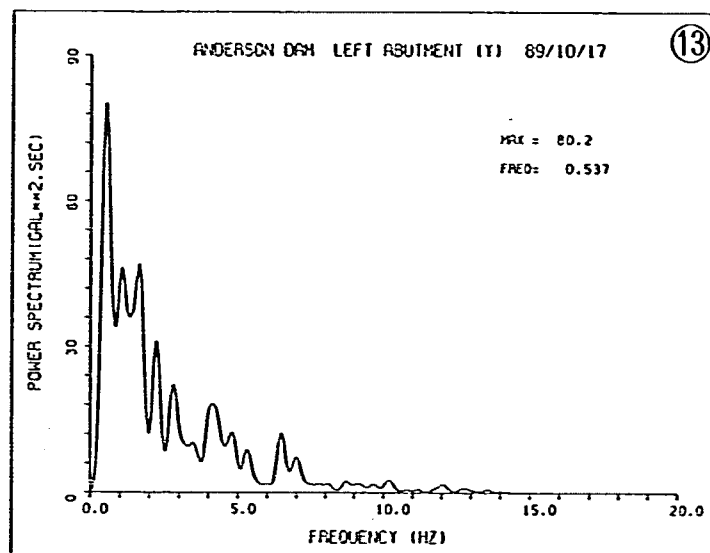
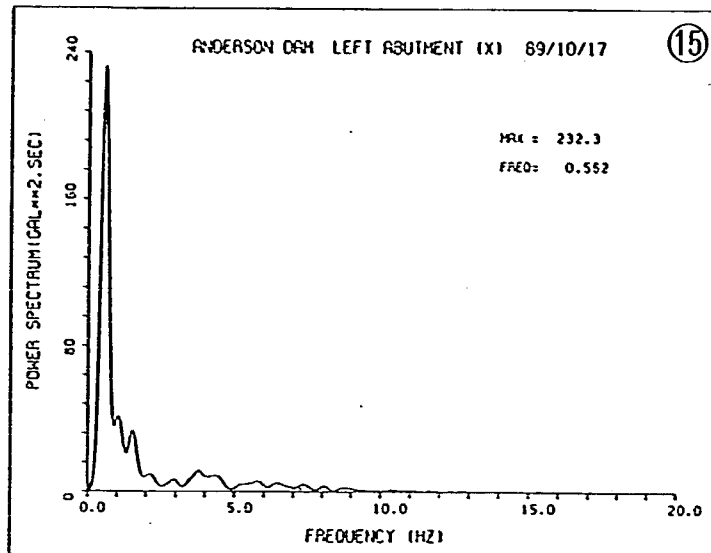


図-11(c) Andersonダム 左岸アバットのパワースペクトル
(デジタル値は, U. S. G. S., A. G. Brady氏より提供)

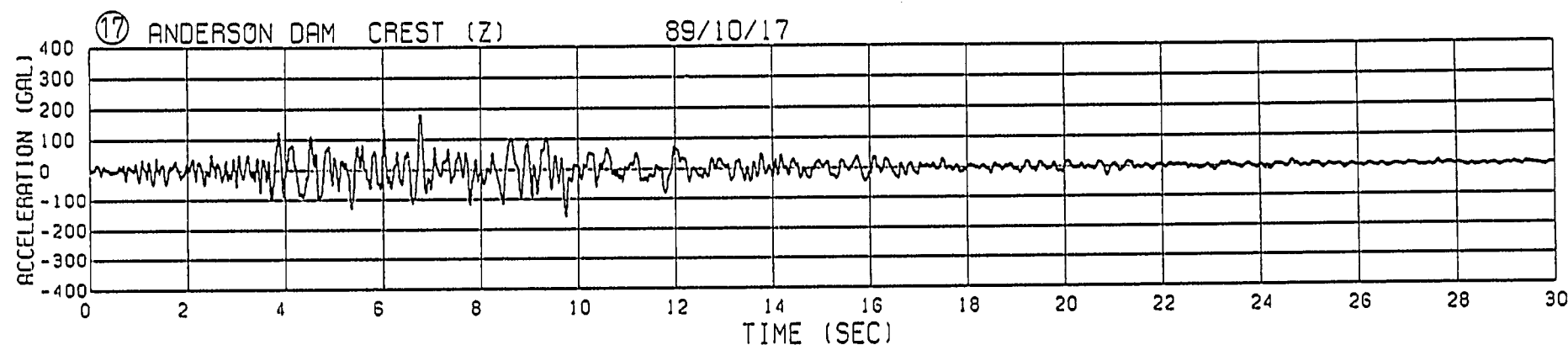
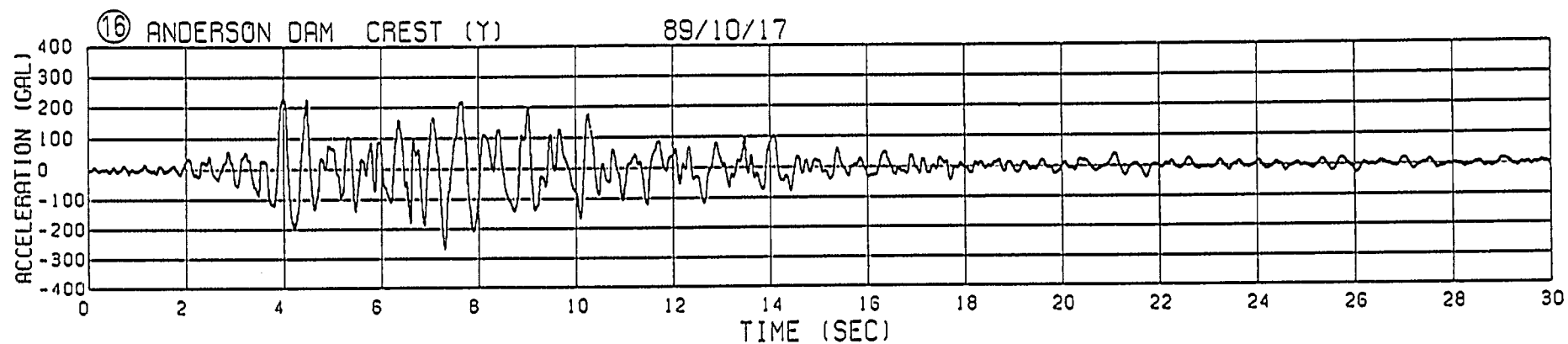
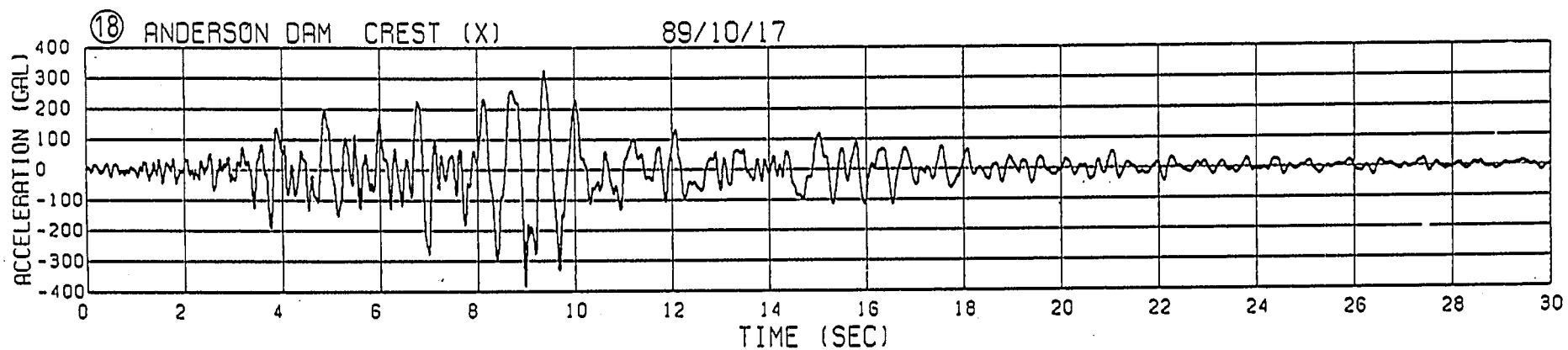


図-11(d) Andersonダム 天端の加速度時刻歴
(デジタル値は, U. S. G. S., A. G. Brady 氏より提供)

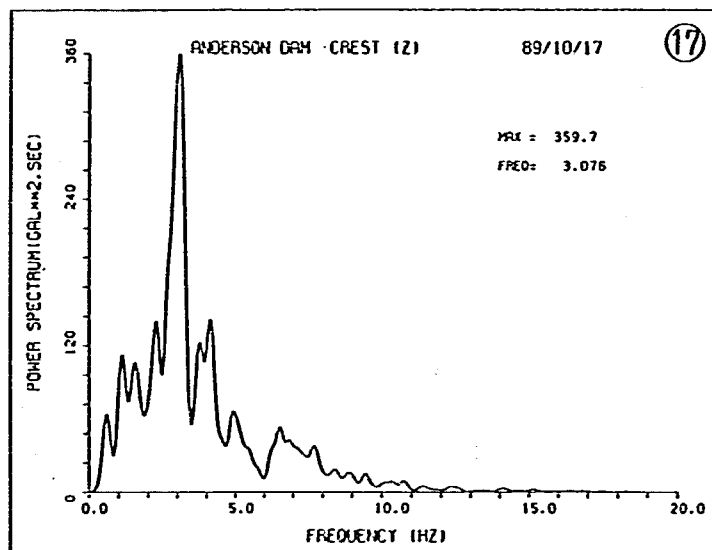
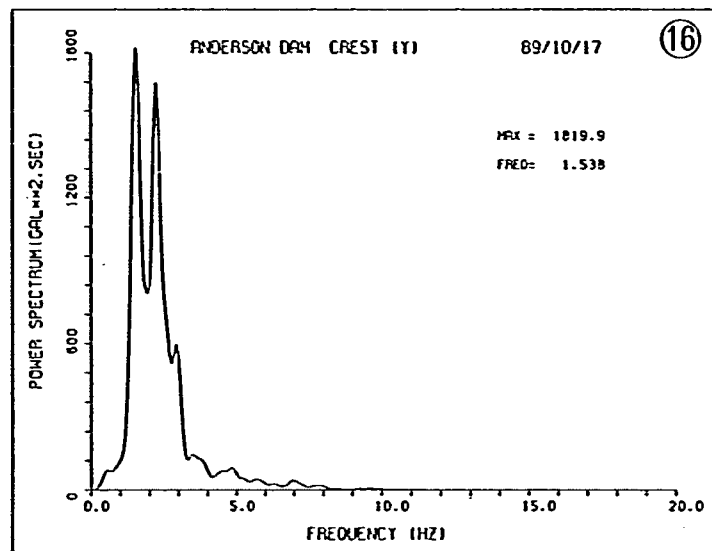
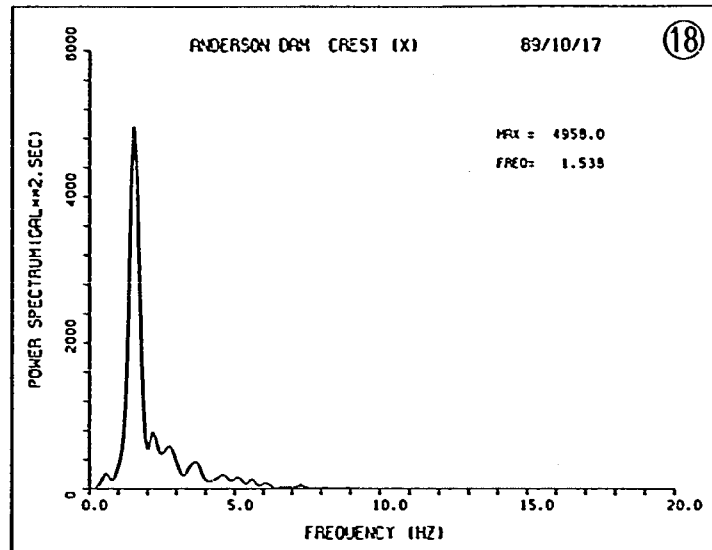


図-11(e) Anderson ダム 天端のパワースペクトル
(デジタル値は, U. S. G. S., A. G. Brady 氏より提供)

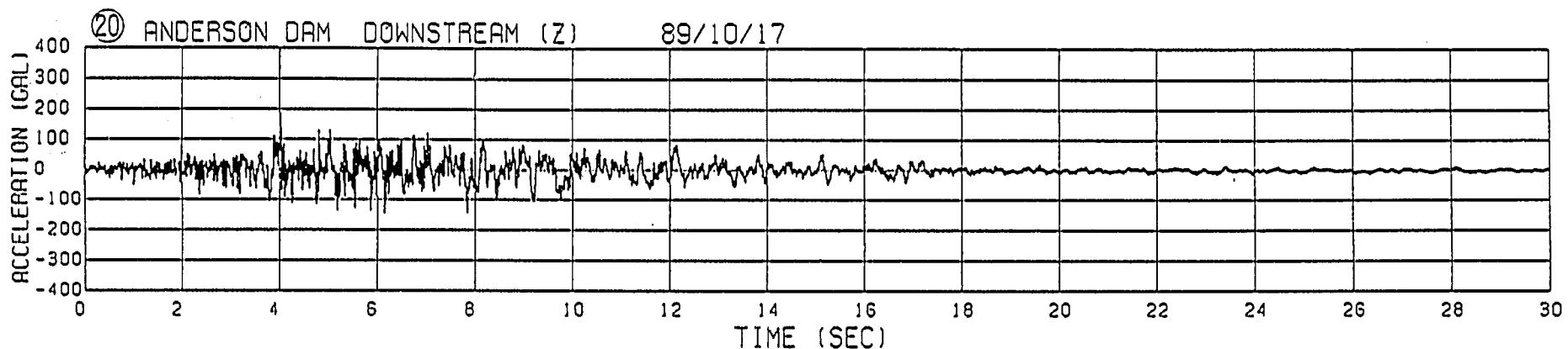
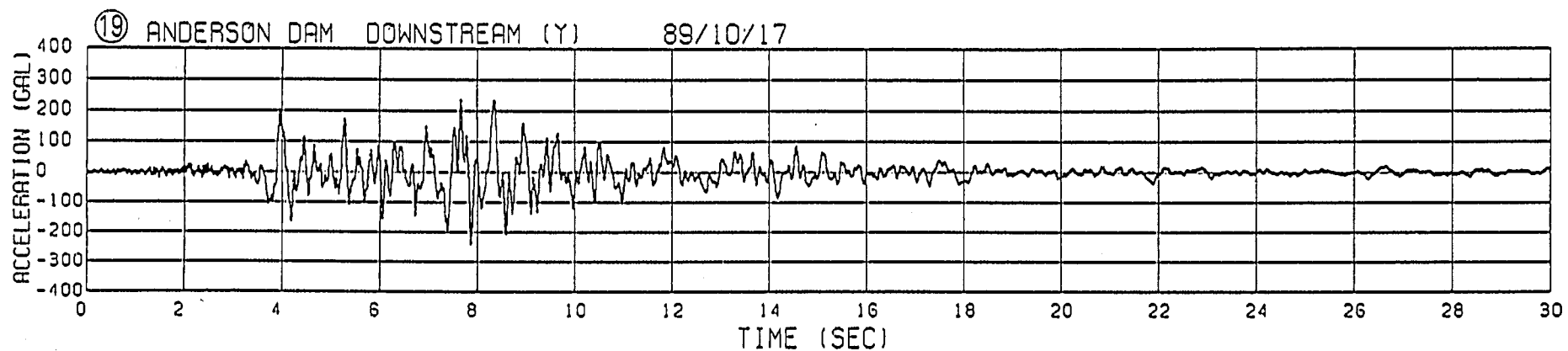
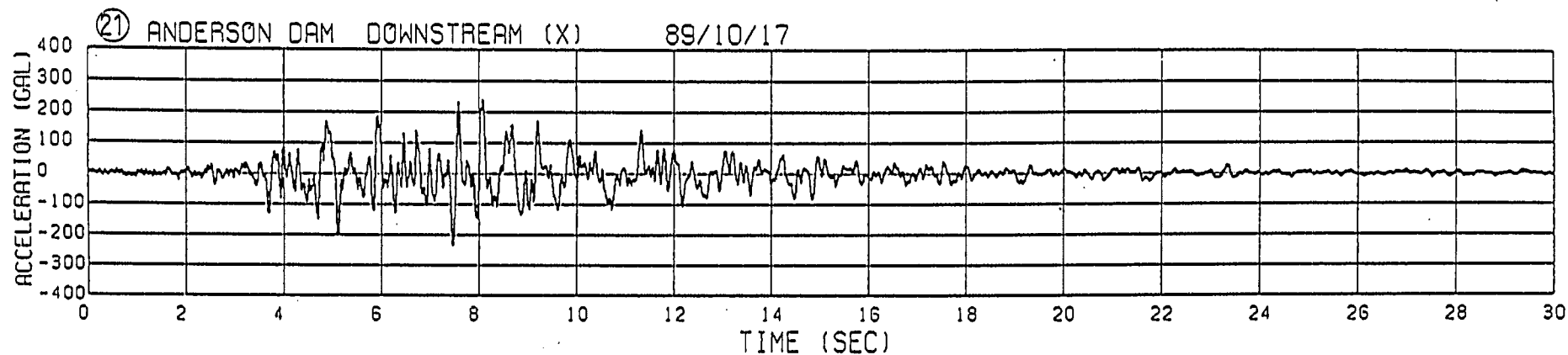


図-11(f) Andersonダム 下流法尻の加速度時刻歴
(デジタル値は、U. S. G. S., A. G. Brady氏より提供)

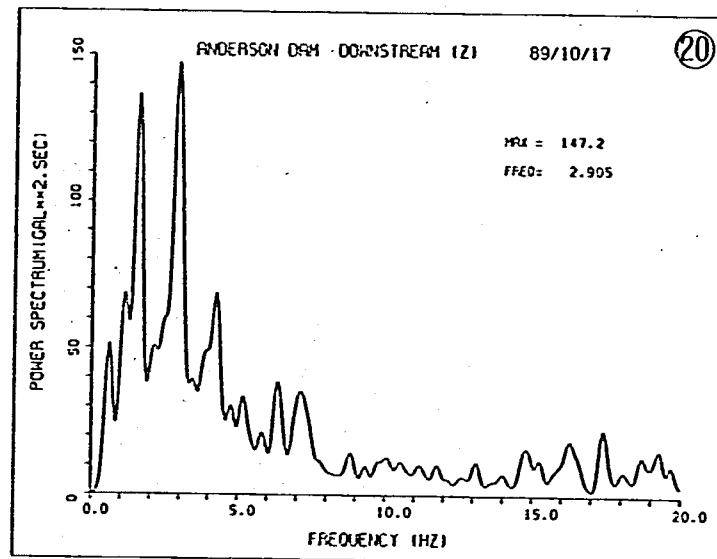
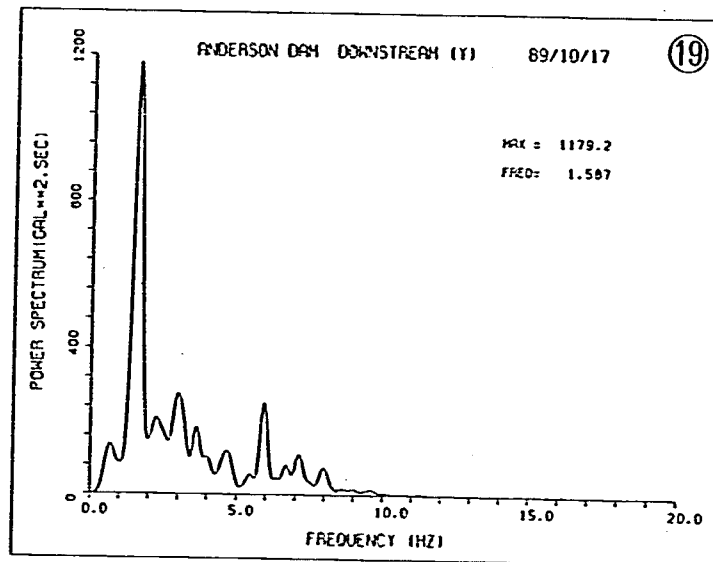
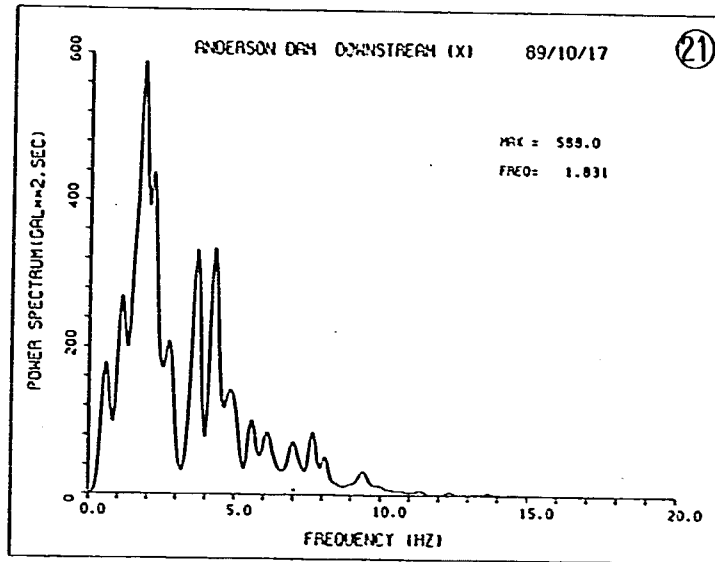


図-11(g) Anderson ダム 下流法尻のパワースペクトル
(デジタル値は, U. S. G. S., A. G. Brady 氏より提供)

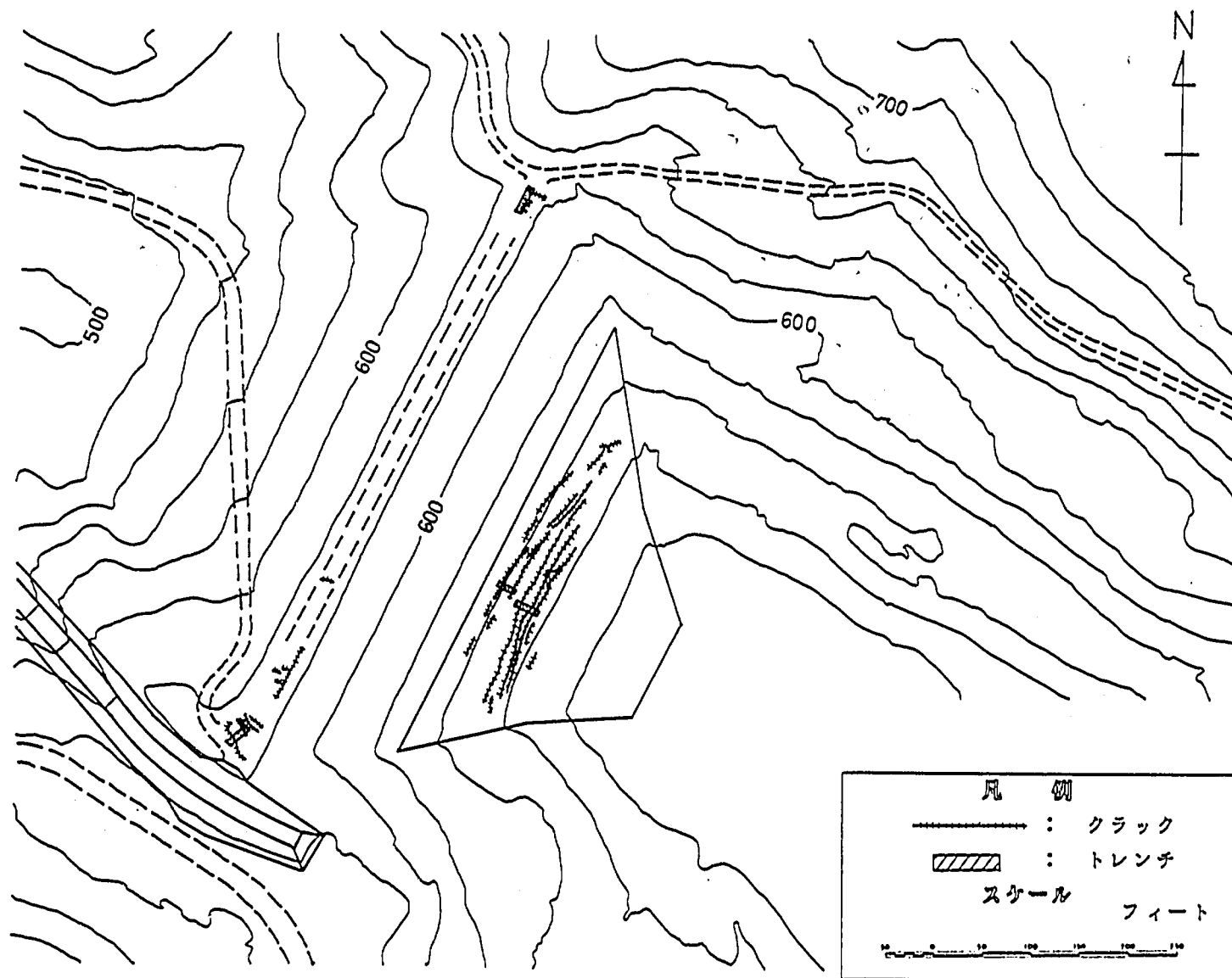


図-12(a) Guadalupe ダムの平面図
 [原図は Santa Clara Valley Water District]
 [Robert E. Tepel 氏の提供, 著者ら再作図]

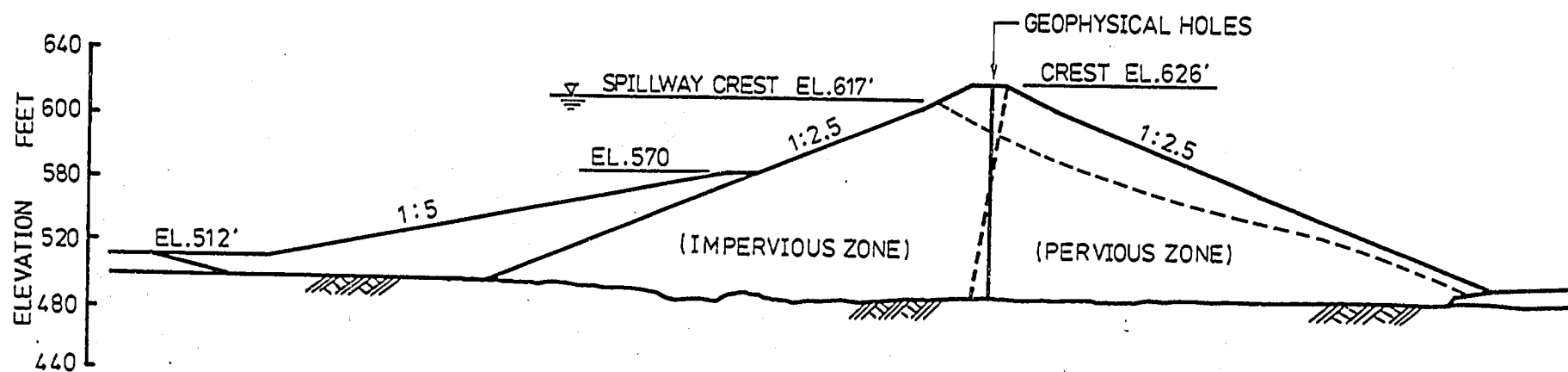


図-12(b) Guadalupe ダムの上下流方向断面図
 [原図は California State Department of Water
 Resources, Donald H. Babbitt 氏の提供、著者ら再作図]

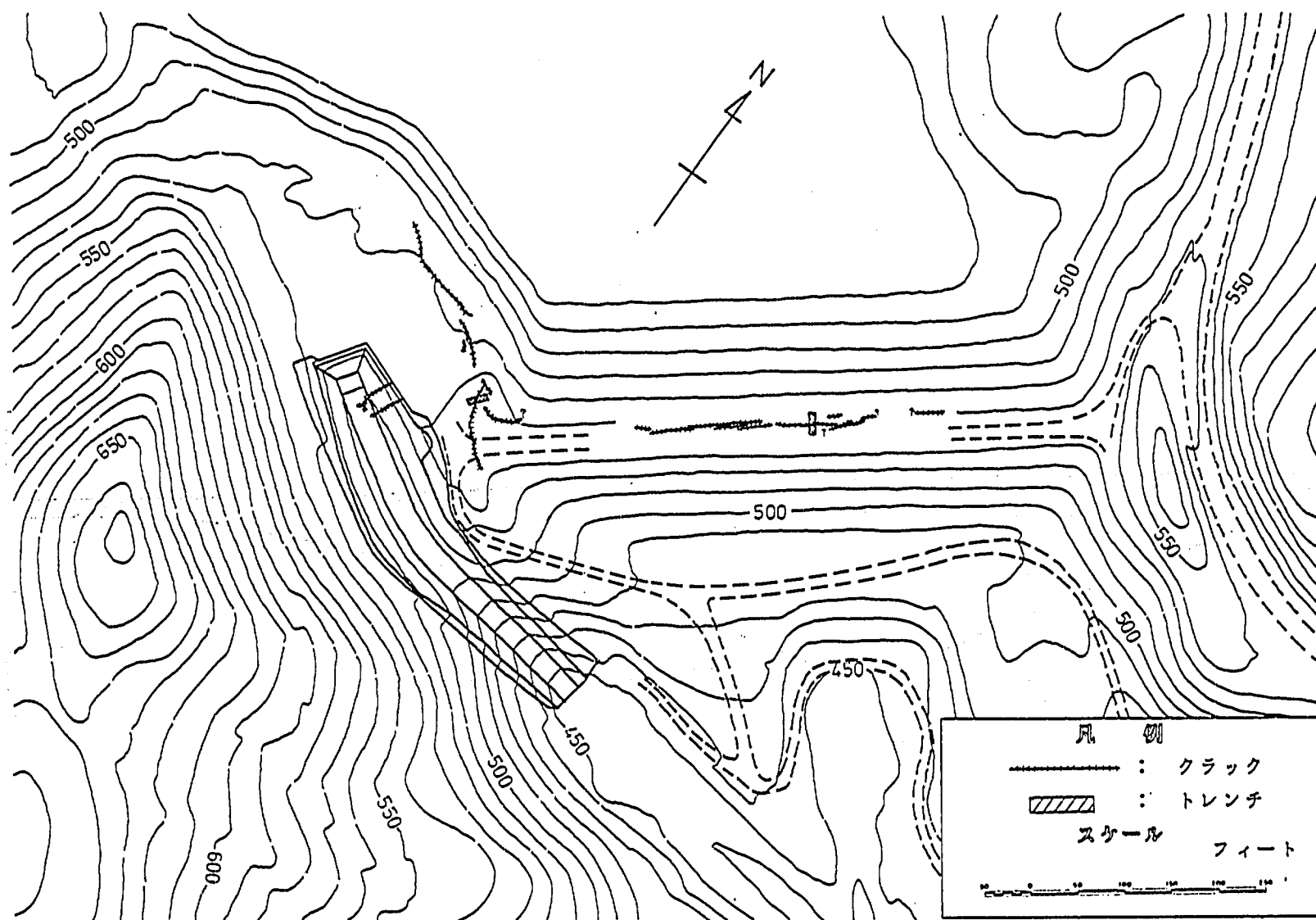


図-13(a) Chesbro ダムの平面図
〔原図は Santa Clara Valley Water District
Robert E. Tepel 氏の提供、著者ら再作図〕

Chesbro

番号	ゾーン	材 料	まき出し厚	管理基準	締固め機械	転圧回数	材料強度	透水係数	粒 度
①	Core/Shell	CL	5" Compacted	95% min. 56,000 ft·lb/ft ³	Tamping roller	10	$\phi = 27^\circ$ C= 800	0.02-0.05 ft/year	Local borrow
③	Berm	Rock from S/N exc.	36" Loose		Hauling equip				2 cubic yard max.
⑤	Wave Wash Protection	Rock from S/W exc.			Damped				1 cubic yard max. 1 cubic feet ave.
②	Drain	GW							

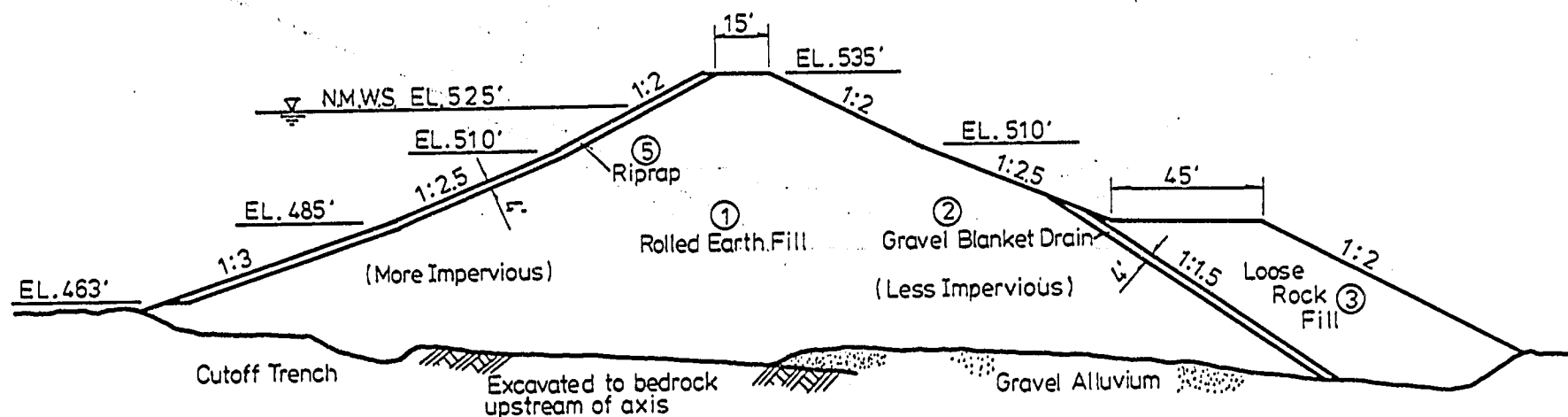


図-13(b) Chesbro ダムの上下流方向断面図

〔原図および枠内のデータは California State Department of
Water Resources, Donald H. Babbitt 氏の提供、著者ら再作図〕

ここに沿って
亀裂が発生した

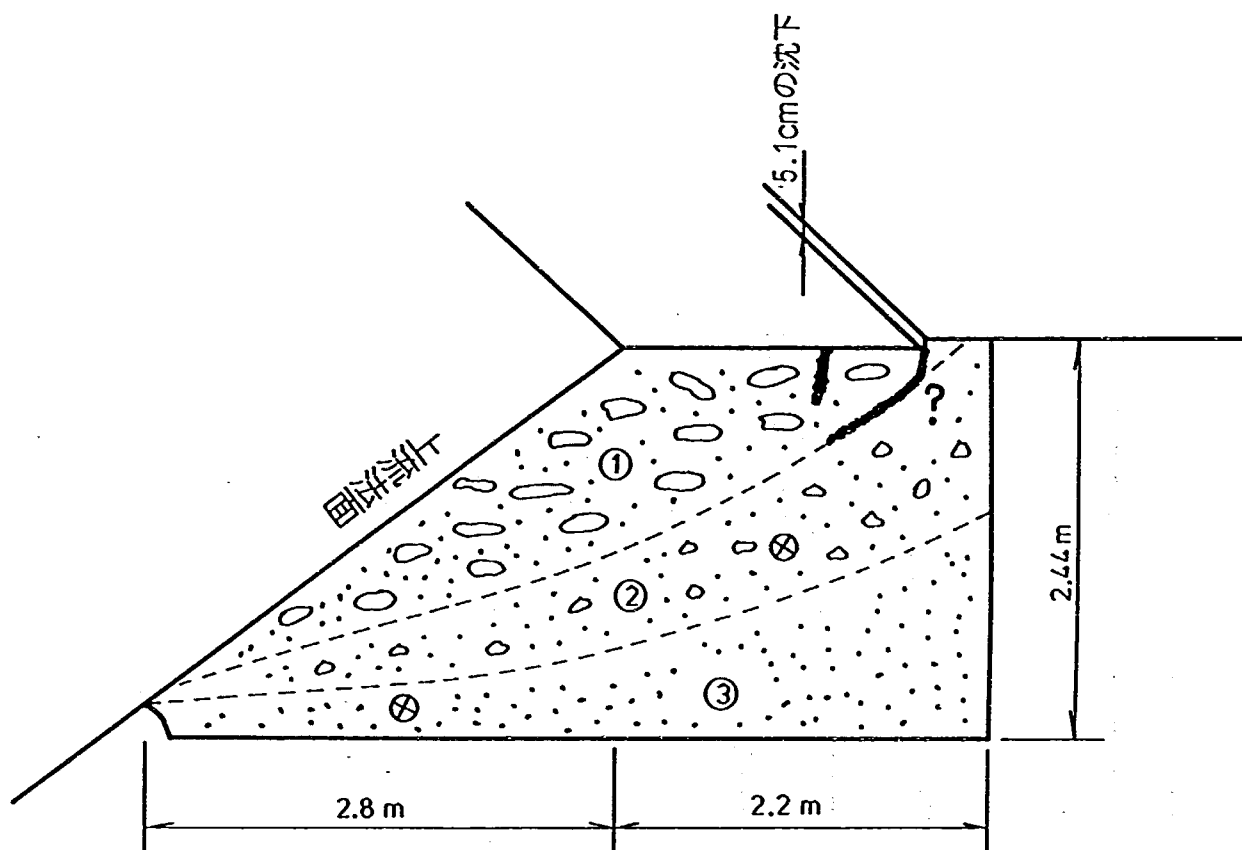
4.6 m

3.0 m

地震後に材料を
置換し締固めた

1.2 m
リップラップ材

図-14(a) Chesbro ダムの亀裂発生位置及び修復状況
〔Santa Clara Valley Water District, Robert E. Tepel〕
〔氏の説明から著者らが作図〕



- ①密度が低く淡い紫色の玉石のリップラップ材
- ②暗赤褐色の砂利混り粘性砂
(Medium Dense, Medium Plasticity)
- ③淡い赤褐色の砂利混り粘性砂
(Moderate Plasticity, Dense)
- ⊗試料採取

図-14(b) 天端中央ピット左岸側壁
 [Santa Clara Valley Water District, Robert]
 [E. Tepel 氏の提供]

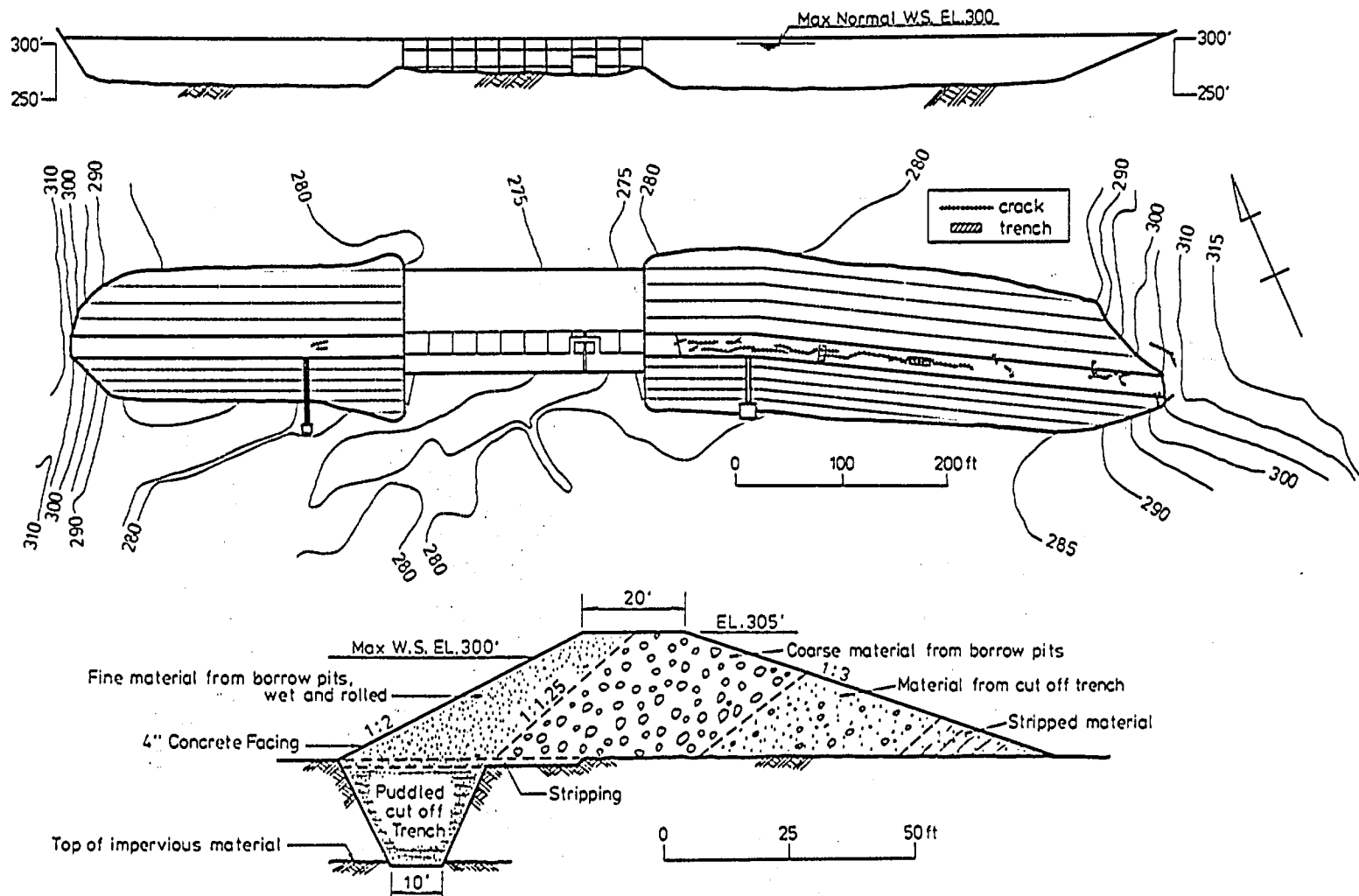


図-15 Vasona ダムの平面図および断面図
 (原図は Santa Clara Valley Water District, Robert E. Tepel 氏の提供、筆者ら再作図)

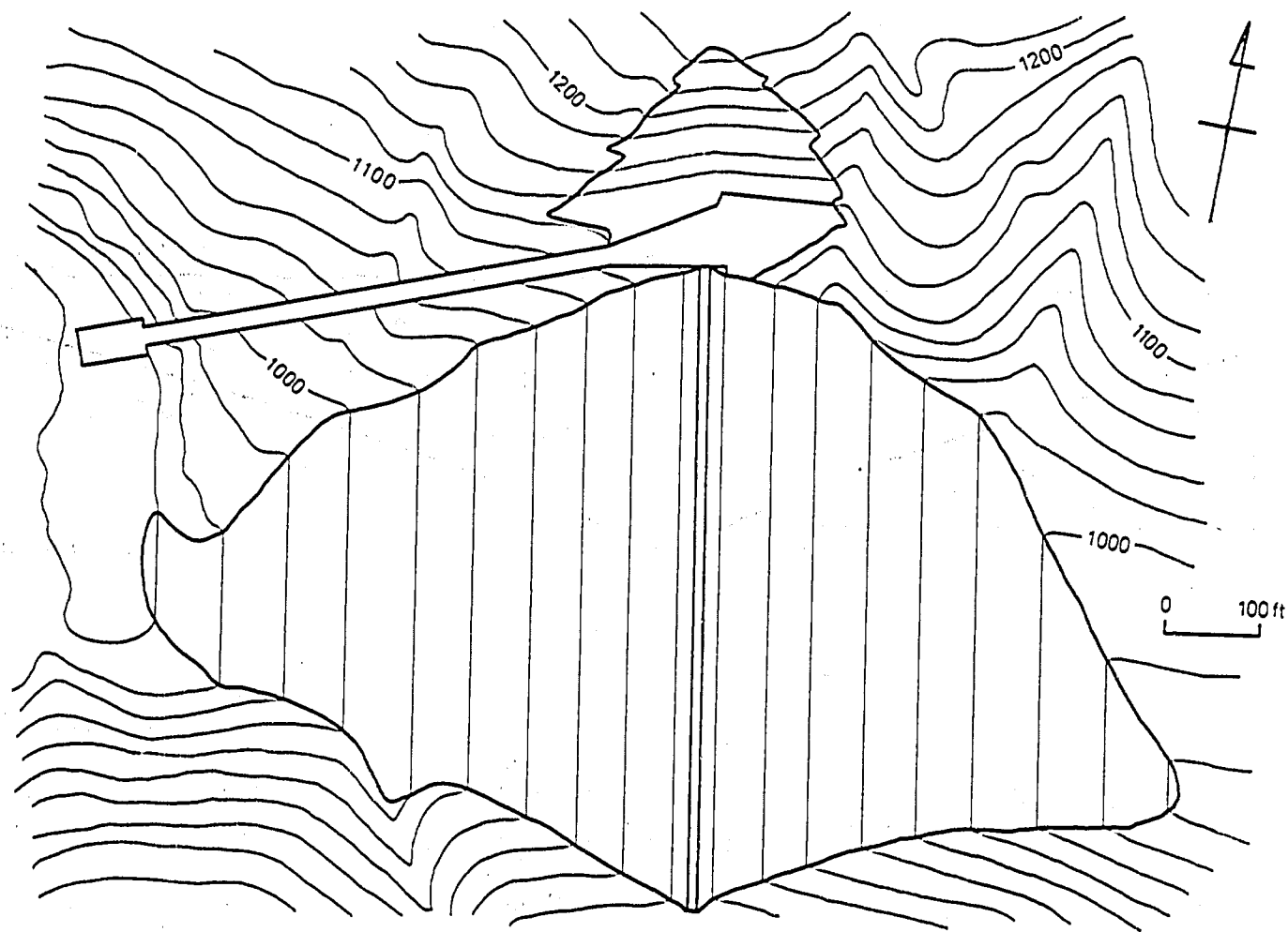


図-16(a) Austrian ダムの平面図
〔原図は California State Department of Water Resources〕
〔Donald H. Babbitt 氏の提供、筆者ら再作図〕

Austrian

番号	ゾーン	材 料	まき出し厚	管理基準	締固め機械	材料強度	透水係数	粒 径 (最大)	No. 4	No. 200
1	IMPERVIOUS EMBANKMENT	SANDSTONE & SHALE	6" UNCOMPACTED	300 lb/in ² PENETRATION NEEDLE	SHEEPS FOOT ROLLER	$\phi=29'30''$ C=711 psf	0.11~24.9 ft ³ /ft ² year	1.5"~3"	57.6TD 88.8%	12.6TD 43.7%
2	PERVIOUS EMBANKMENT	SANDSTONE & SHALE	6" UNCOMPACTED	300 lb/in ² PENETRATION NEEDLE	SHEEPS FOOT ROLLER	$\phi=29'30''$ C=711 psf	0.11~24.9 ft ³ /ft ² year	1.5"~3"	57.6TD 88.8%	12.6TD 43.7%
3	FOUNDATION	STREAM BED MATERIAL								

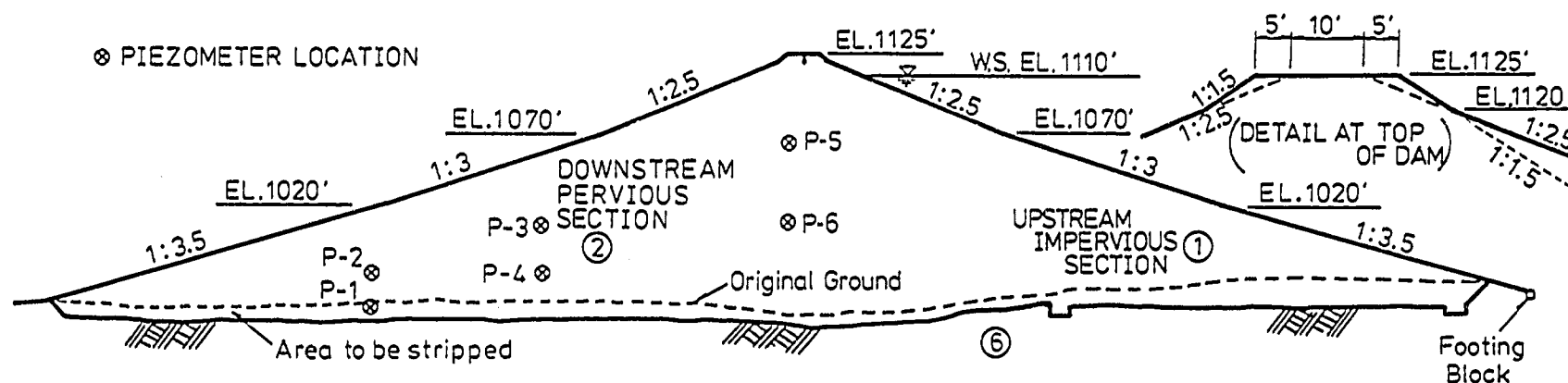


図-16(b) Austrian ダムの上下流方向断面図

〔原図および枠内のデータは California State Department of Water Resources, Donald H. Babbitt 氏の提供、筆者ら再作図
 ピエゾメータの位置は、Dam Performance During the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989¹¹⁾による〕

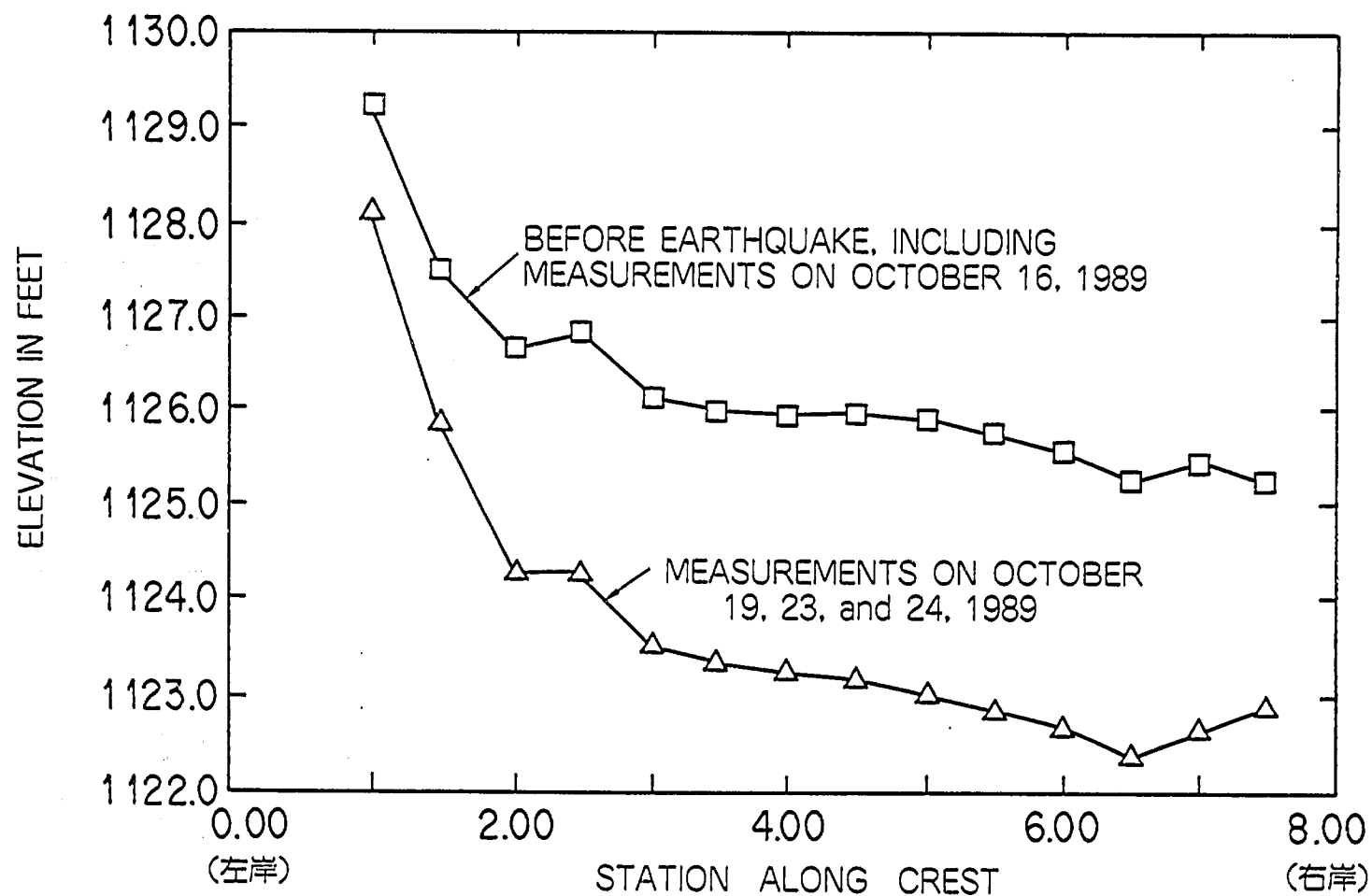


図-17(a) Austrian ダム天端の沈下状況¹¹⁾
〔Dam Performance During the Loma Prieta〕
〔Earthquake of October 17, 1989 による〕

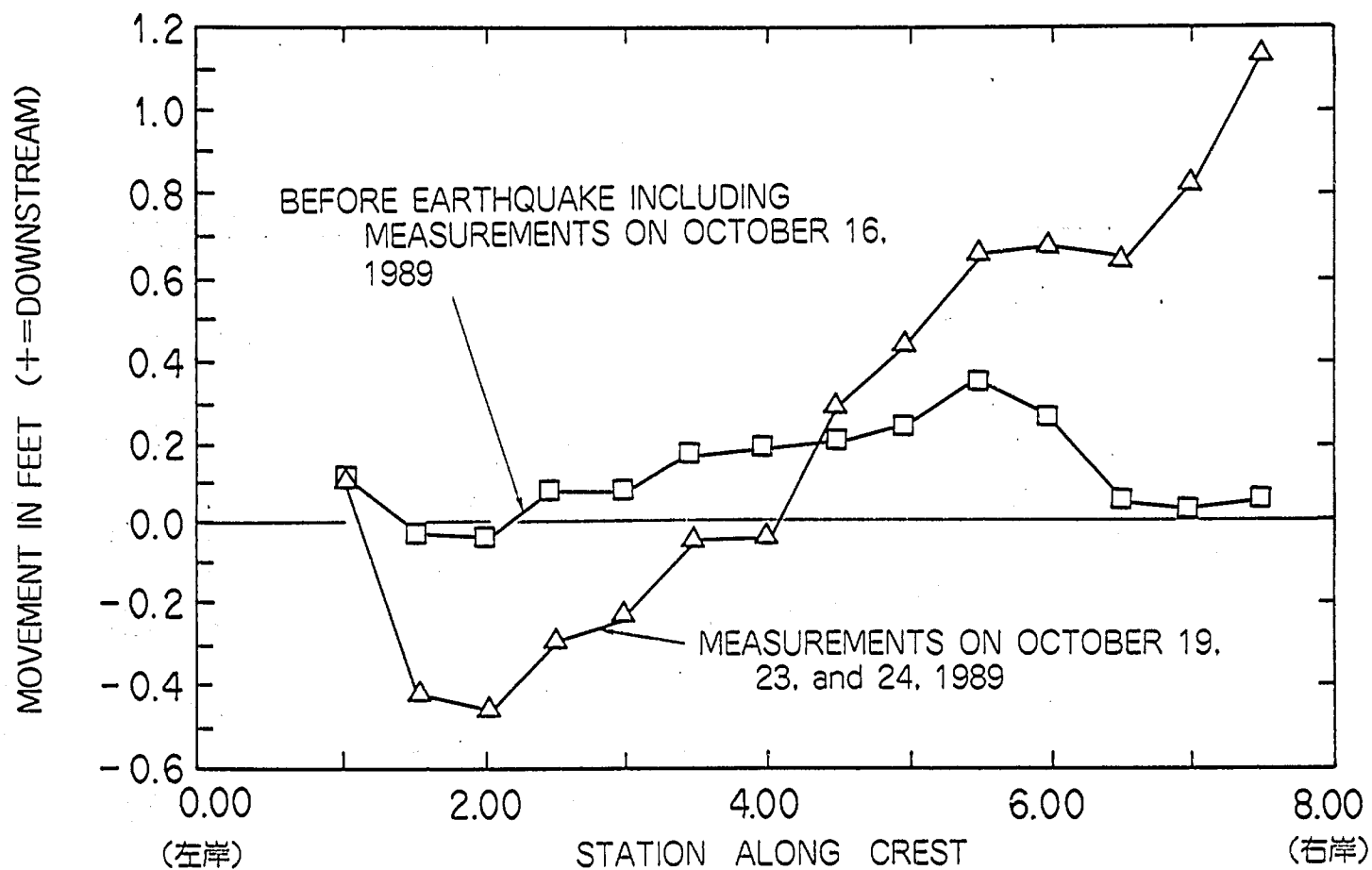


図-17(b) Austrian ダム天端の上下流方向変位の状況¹¹⁾
 [Dam Performance During the Loma Prieta
 Earthquake of October 17, 1989 による]

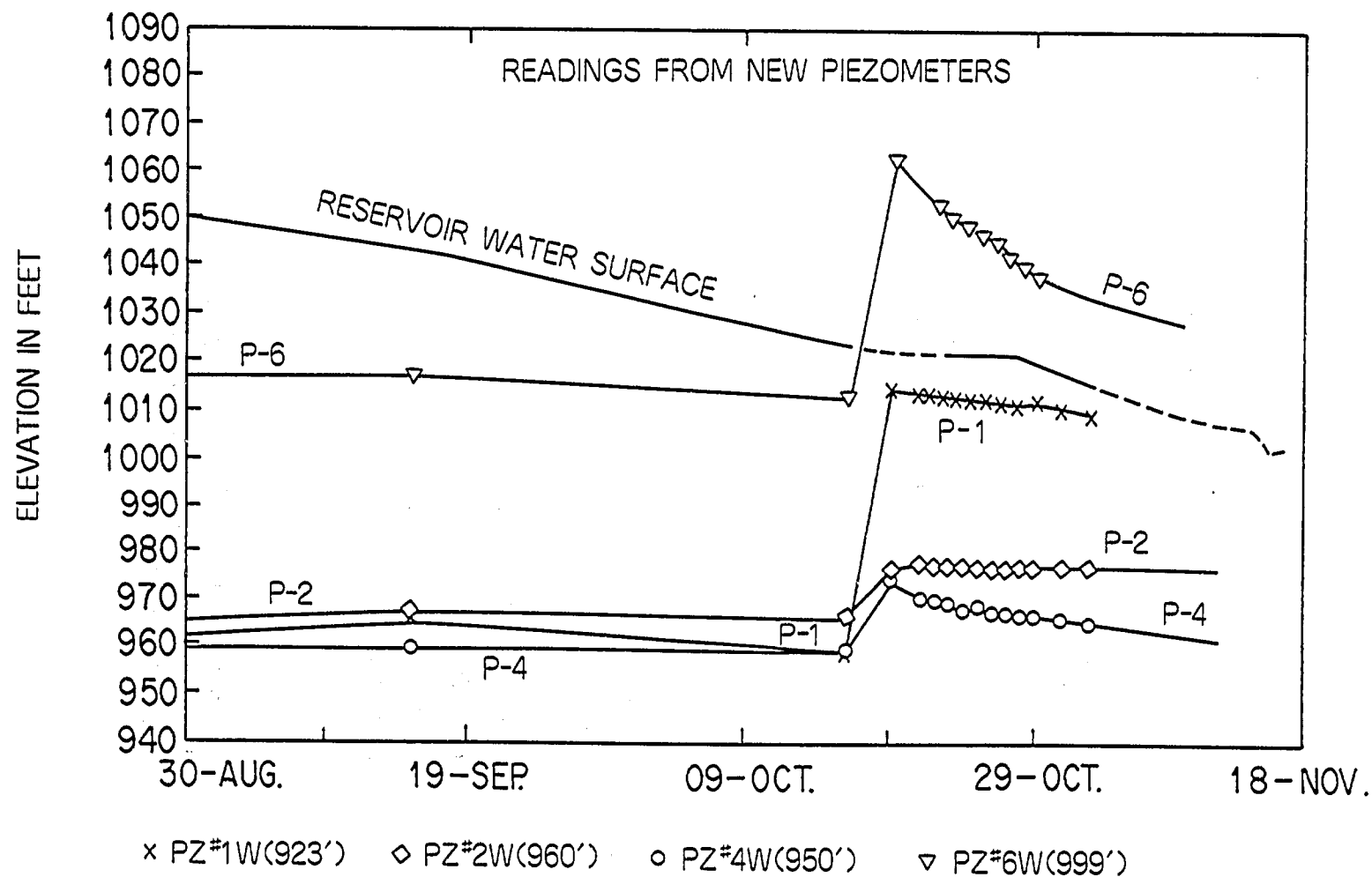


図-17(c) Austrian ダムの間隙水圧の変化¹¹⁾
 { Dam Performance During the Loma Prieta
 Earthquake of October 17, 1989 による }

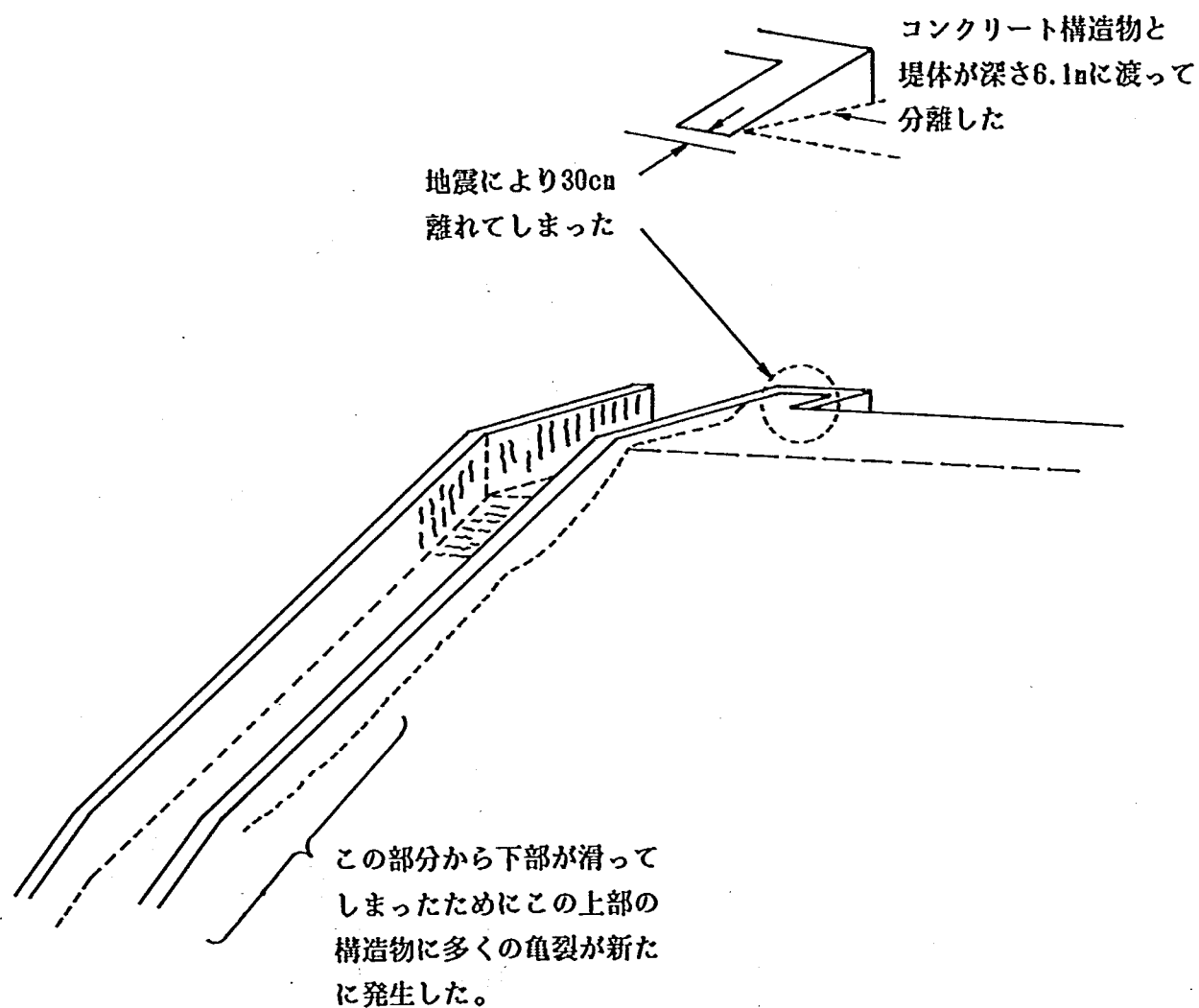


図-18 Austrian ダムの洪水吐の被害
〔Wahler Associates, K. V. Rodda 氏の現地説明〕
に基づき筆者らが作図

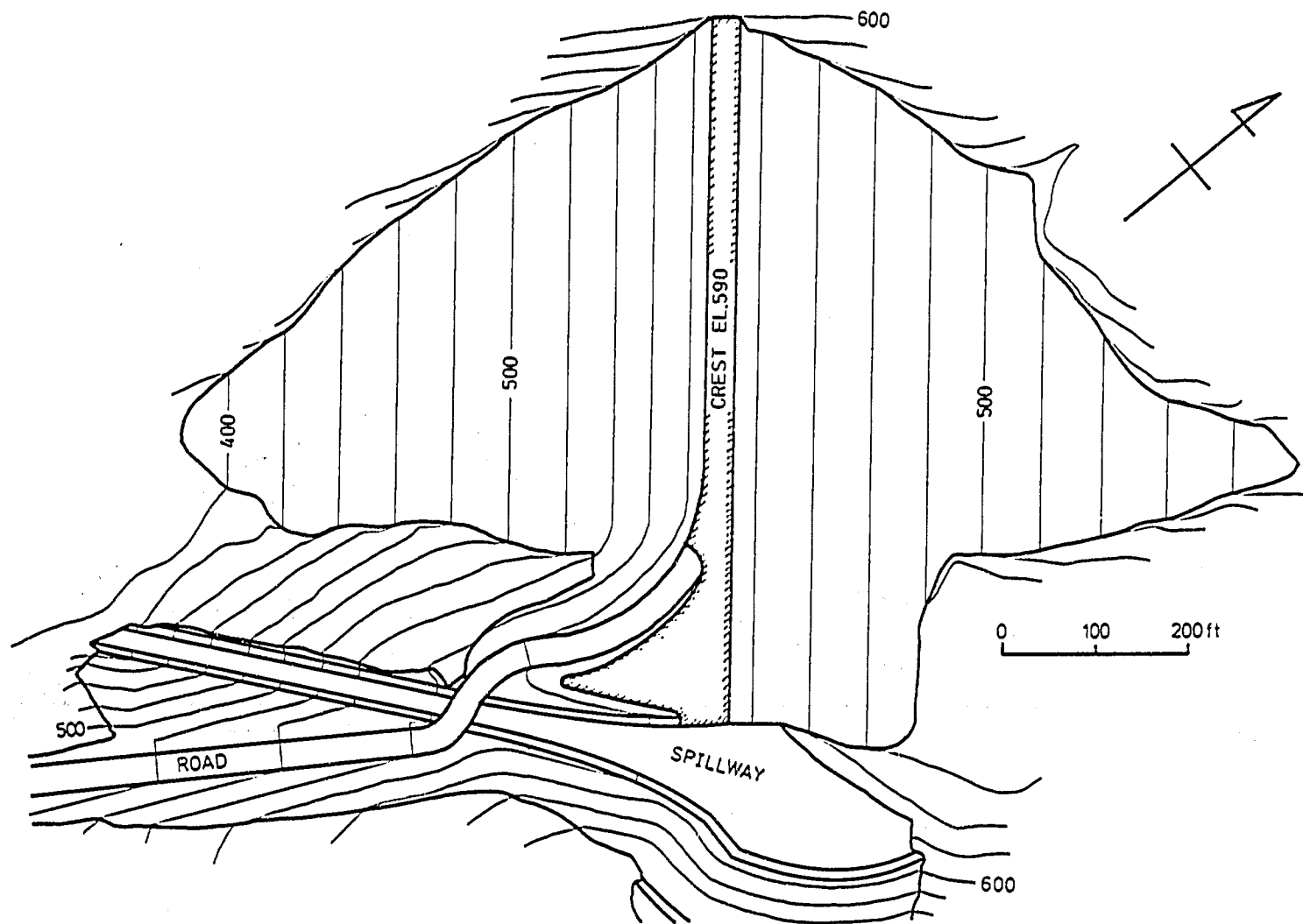


図-19(a) Newell ダムの平面図
〔原図は California State Department of Water Resources〕
〔Donald H. Babbitt 氏の提供、筆者ら再作図〕

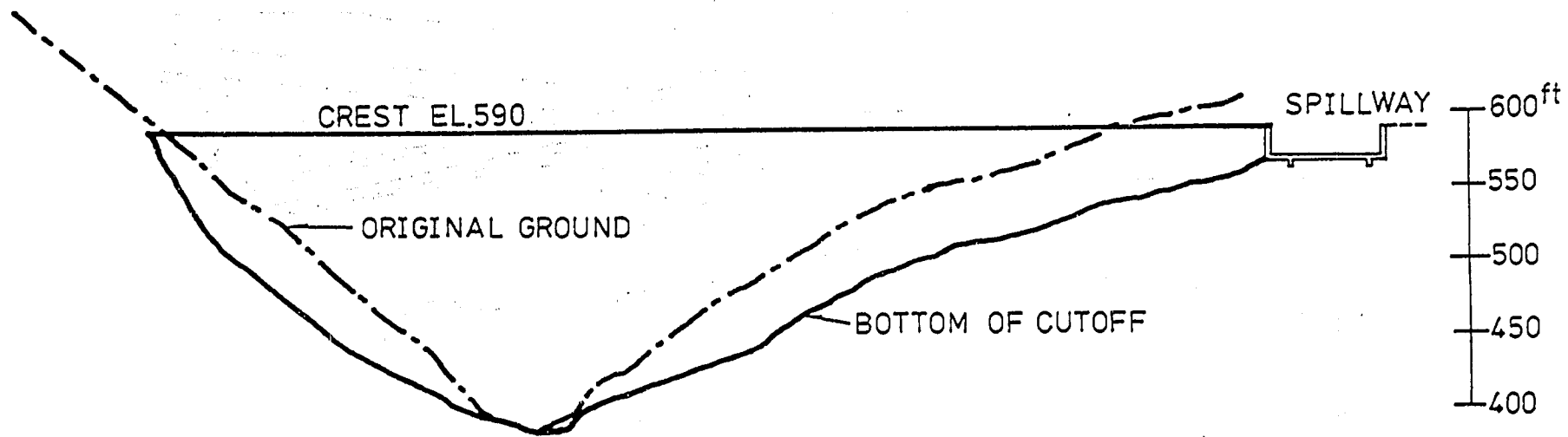


図-19(b) Newell ダムのダム軸方向断面図
 { 原図は California State Department of Water Resources }
 { Donald H. Babbitt 氏の提供、筆者ら再作図 }

Newell

番号	ゾーン	材 料	まき出し厚	含水比	管理基準	締固め機械と重量	転圧回数	材料強度	透水係数	粒度
1	RANDOM	QUARRY OVERBURDEN WEATHERED SILTSTONE	9" LOOSE	REQUIRED MORST $\pm 2\%$	100% COMP. 12,250 ft·lb/ft ³	TAMPING ROLLER		$\phi = 28"$ C= 200-800 psf		8"
2	PERV.	ROCKFILL	5'	SLUICE 1:1::W:F				$\phi = 35"$ C= 0		
3	IMP.	GRAVELLY SILTY SAND	8" LOOSE	REQUIRED MORST $\pm 1\%$	100% COMP. 12,250 ft·lb/ft ³	SHEEPSFOOT 4000 lb/ft		$\phi = 28"$ C= 200-800 psf	~ 0.0004 ft/year	4"
4	RANDOM	REQUIRED EXC.	9" LOOSE	REQUIRED MORST $\pm 2\%$	100% COMP. 12,250 ft·lb/ft ³	TAMPING ROLLER		$\phi = 28"$ C= 200-800 psf		8"
5	DRAIN	COARSE ROCK	1 LIFT	SLUICE 1:1::W:F				$\phi = 35"$ C= 0		
	FILTER	SAND & GRAVEL	9" LOOSE	SATURATED		D-8 CAT	4			
	TRANSITION	QUARRY FINES	9" LOOSE	REQUIRED MORST $\pm 2\%$	100% COMP. 12,250 ft·lb/ft ³	TAMPING ROLLER				
	FOUNDATION	SHALE & SILTSTONE								

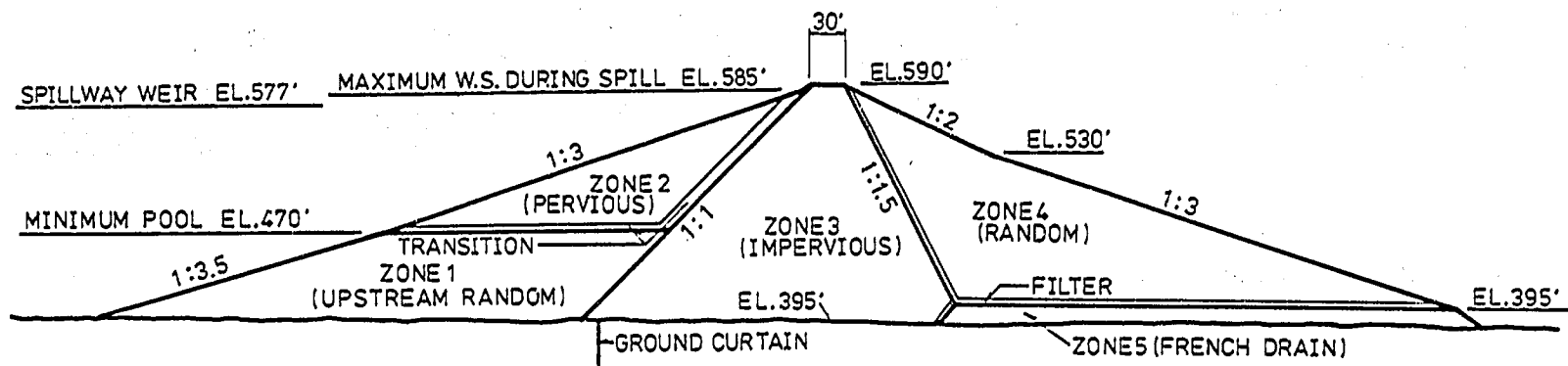


図-19(c) Newell ダムの上下流方向断面図
 (原図および枠内のデータは California State Department of Water
 Resources, Donald H. Babbitt 氏の提供、筆者ら再作図)

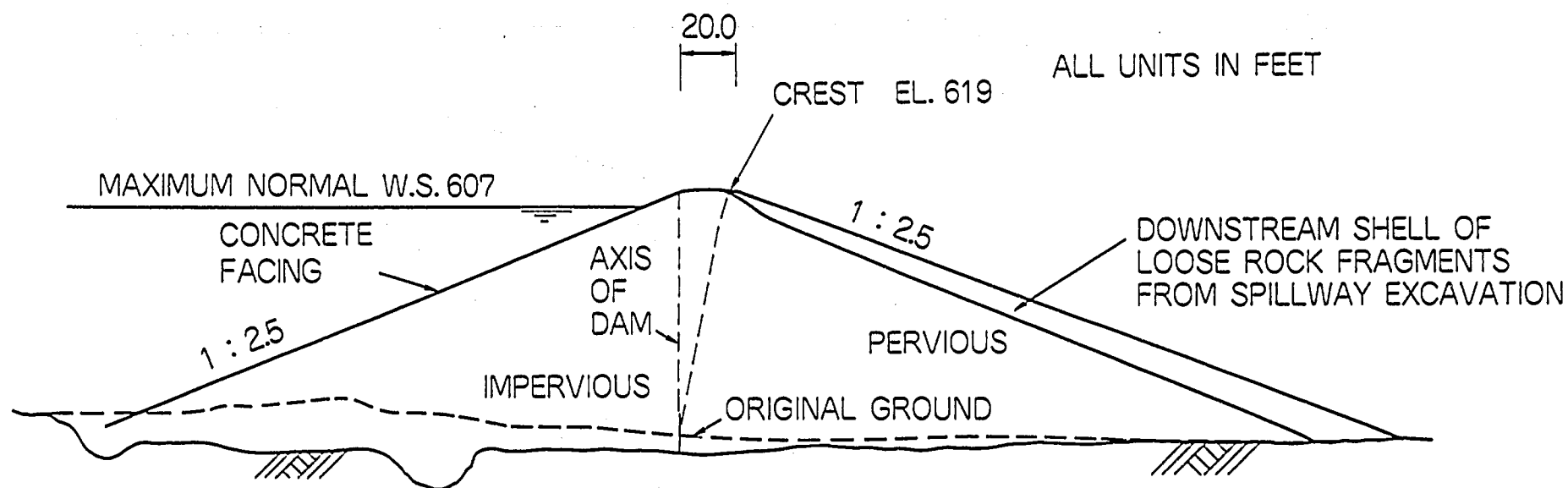


図-20 Almaden ダムの上下流方向断面図¹¹⁾
 [Dam Performance During the Loma Prieta
 Earthquake of October 17, 1989 による]

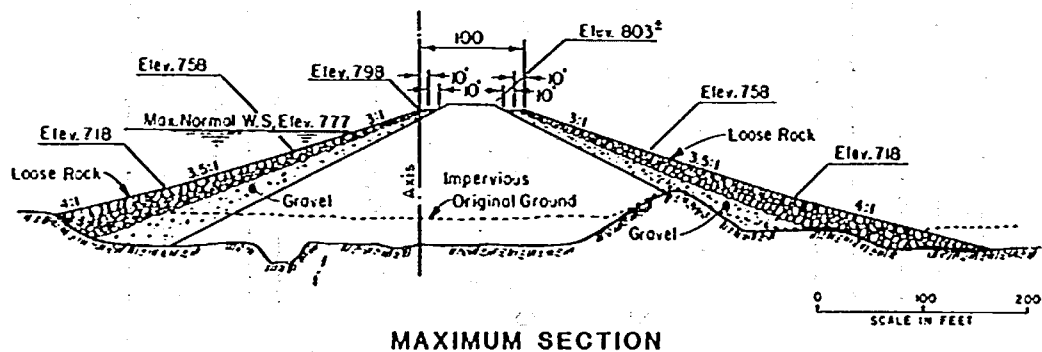
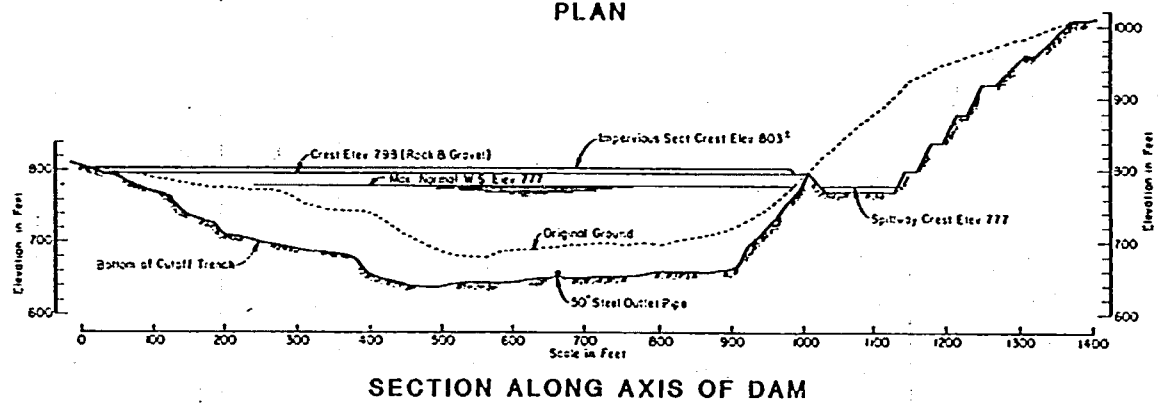
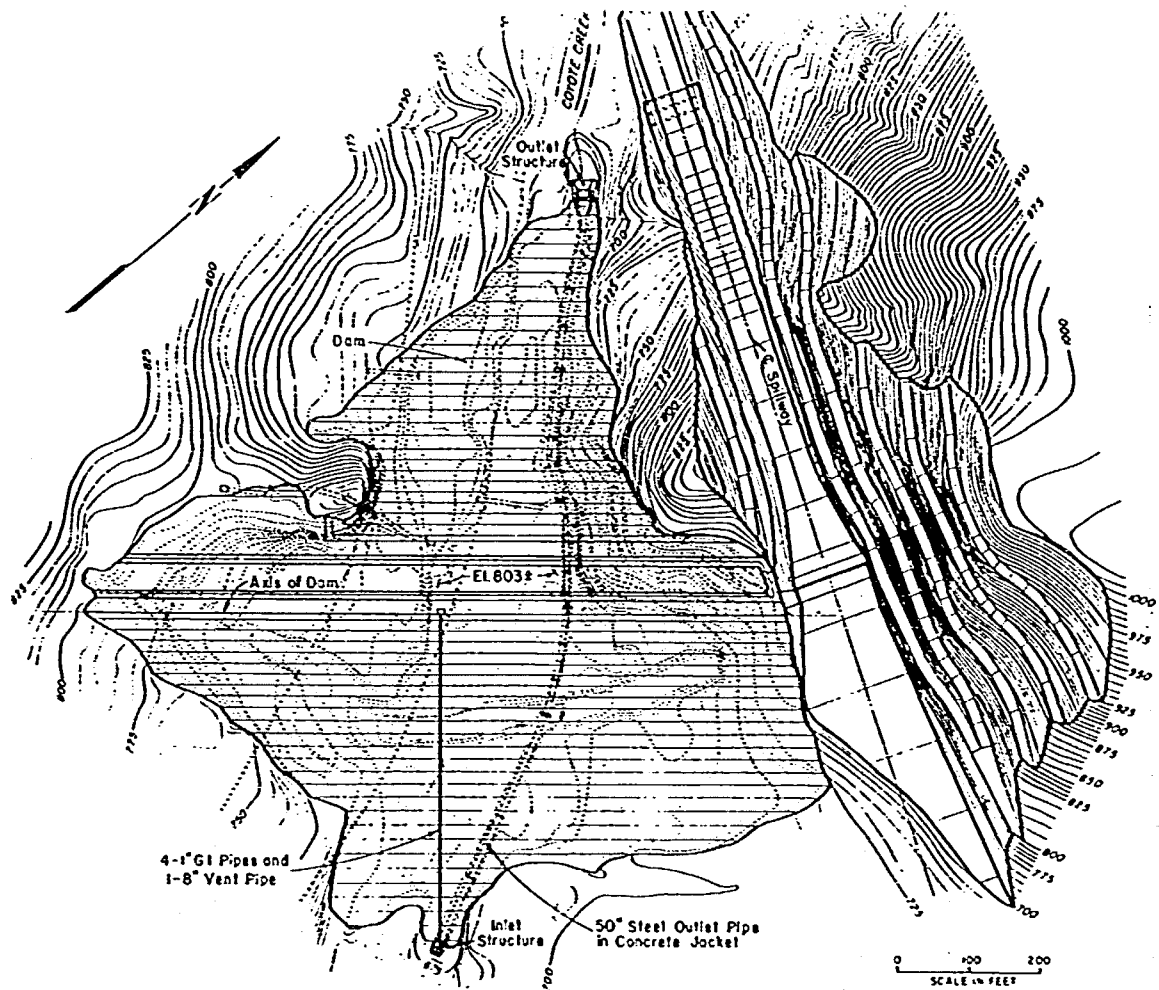
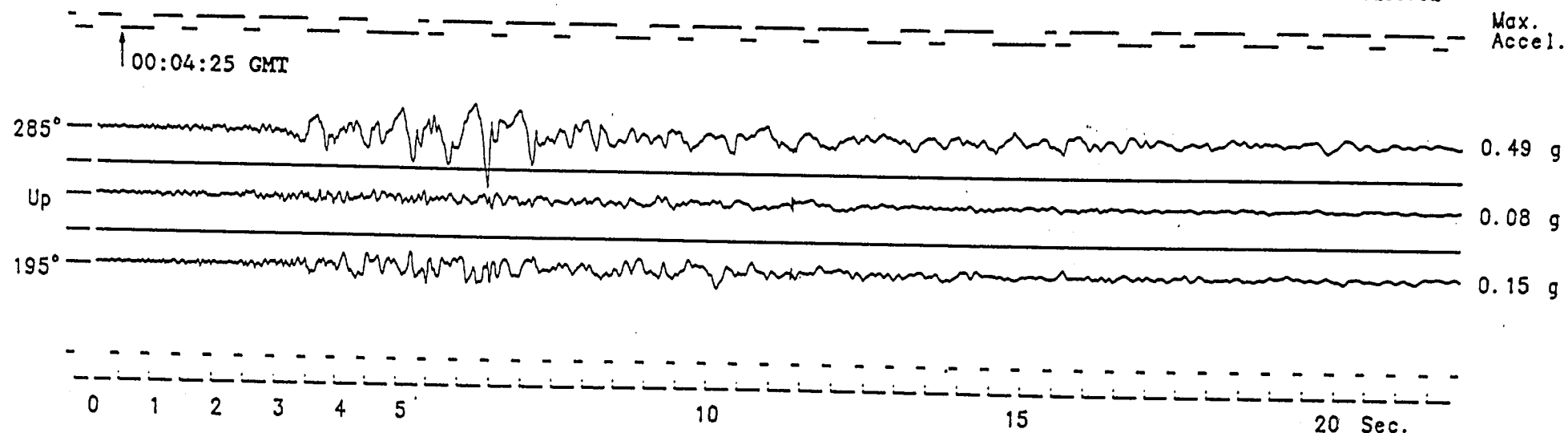


図-21(a) Coyoteダムの平面図および断面図⁸⁾

Coyote Lake Dam - Southwest Abutment
(CSMIP Station 57217)

Record 57217-S2569-89293.02



Coyote Lake Dam - Downstream
(CSMIP Station 57504)

Record 57504-S1830-89293.01

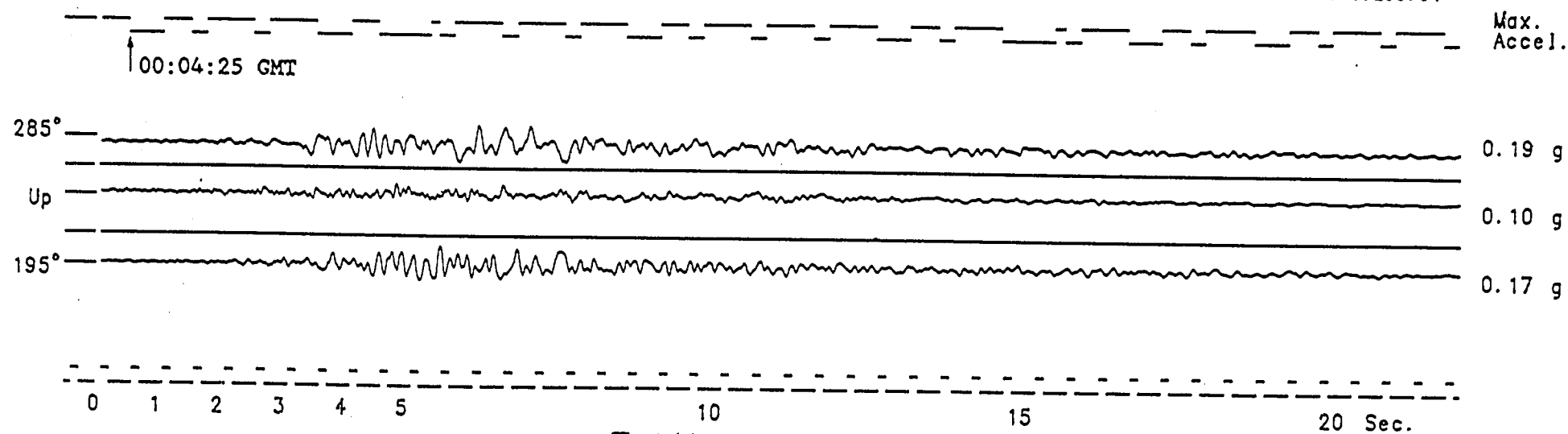


図-21(b) Coyote ダムの加速度時刻歴
(C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06 より)³⁾

U.S. STRONG-MOTION NETWORKDIRECTIONCONSTANTSMAX. ACCELERATION

Station No. 1265 37.615N, 121.745W

065°

Sens. = 2.00 cm/g
Freq. = 25.4 Hz
Damp. = 0.6 crit

0.06g

Del Valle Dam - Toe

SMA-1 No. 451 (CDWR)

Up

Sens. = 1.80 cm/g
Freq. = 25.6 Hz
Damp. = 0.6 crit

0.03g

EARTHQUAKE OF

18 October 1989 - 0004 G.m.t.

335°

Sens. = 1.80 cm/g
Freq. = 25.9 Hz
Damp. = 0.6 crit

0.04g

Film speed = 1 cm/sec

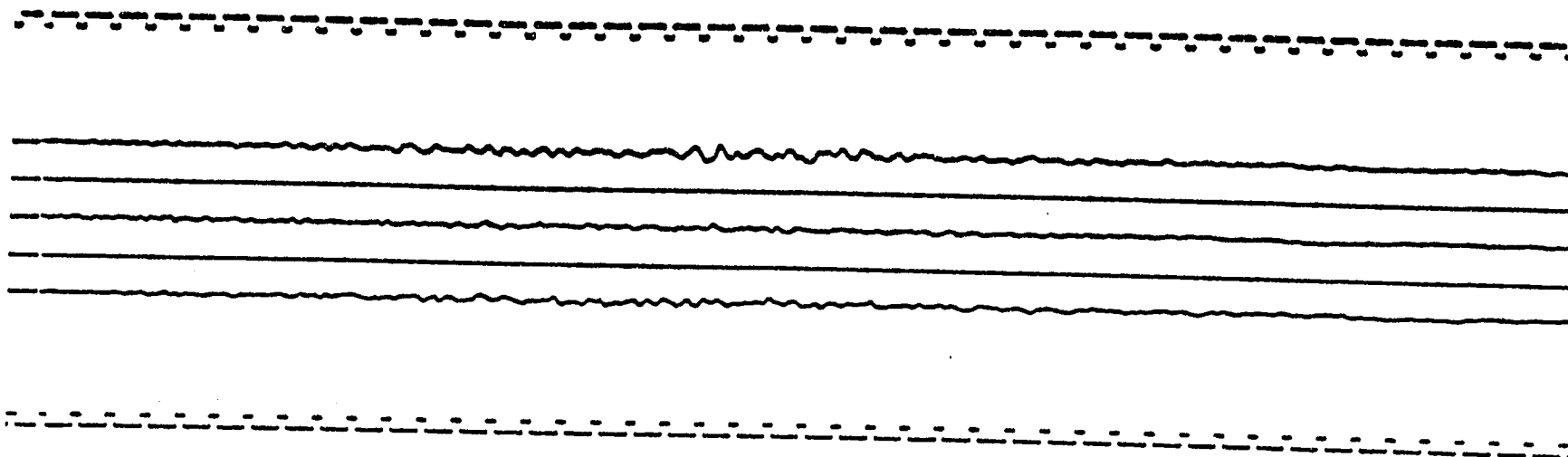


図-22(a) Del Valle ダムの加速度時刻歴
(U. S. G. S. Open-File Report 89-568 より)²⁾

U.S. STRONG-MOTION NETWORKDIRECTIONCONSTANTSMAX. ACCELERATION

Station No. 1265 37.615N, 121.745W

065°

Sens. = 1.90 cm/g

0.08g

Del Valle Dam - Crest

Freq. = 25.4 Hz

Damp. = 0.6 crit

SMA-1 No. 444 (CDWR)

Up

Sens. = 1.75 cm/g

0.07g

EARTHQUAKE OF

Freq. = 26.5 Hz

Damp. = 0.6 crit

18 October 1989 - 0004 G.m.t.

335°

Sens. = 1.70 cm/g

0.08g

Freq. = 26.5 Hz

Damp. = 0.6 crit

Film speed = 1 cm/sec

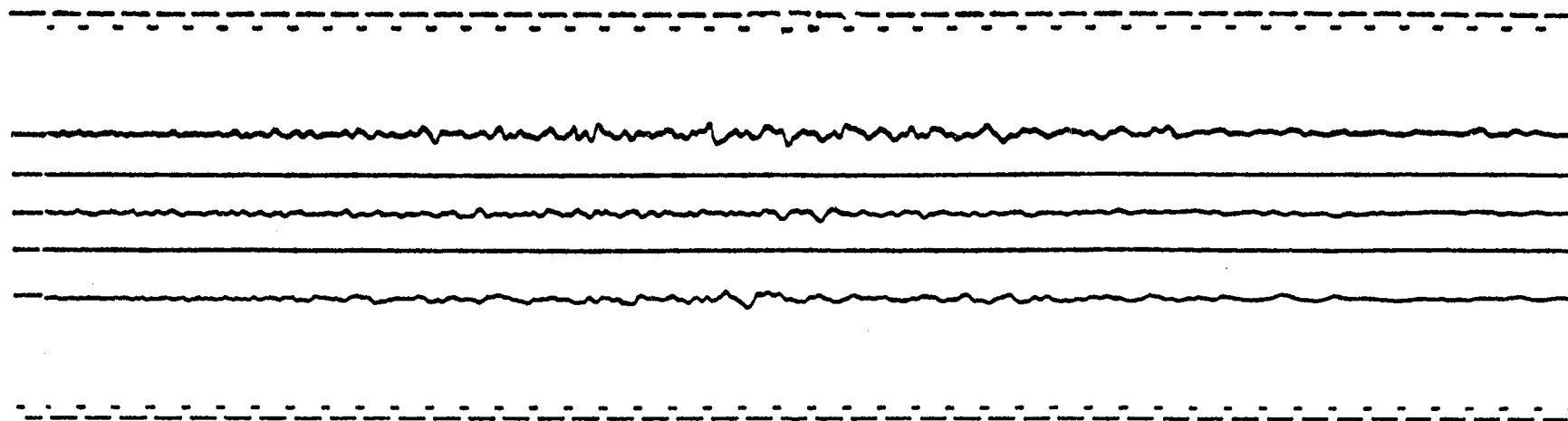


図-22(b) Del Valle ダムの加速度時刻歴
(U. S. G. S. Open-File Report 89-568 より)²⁾

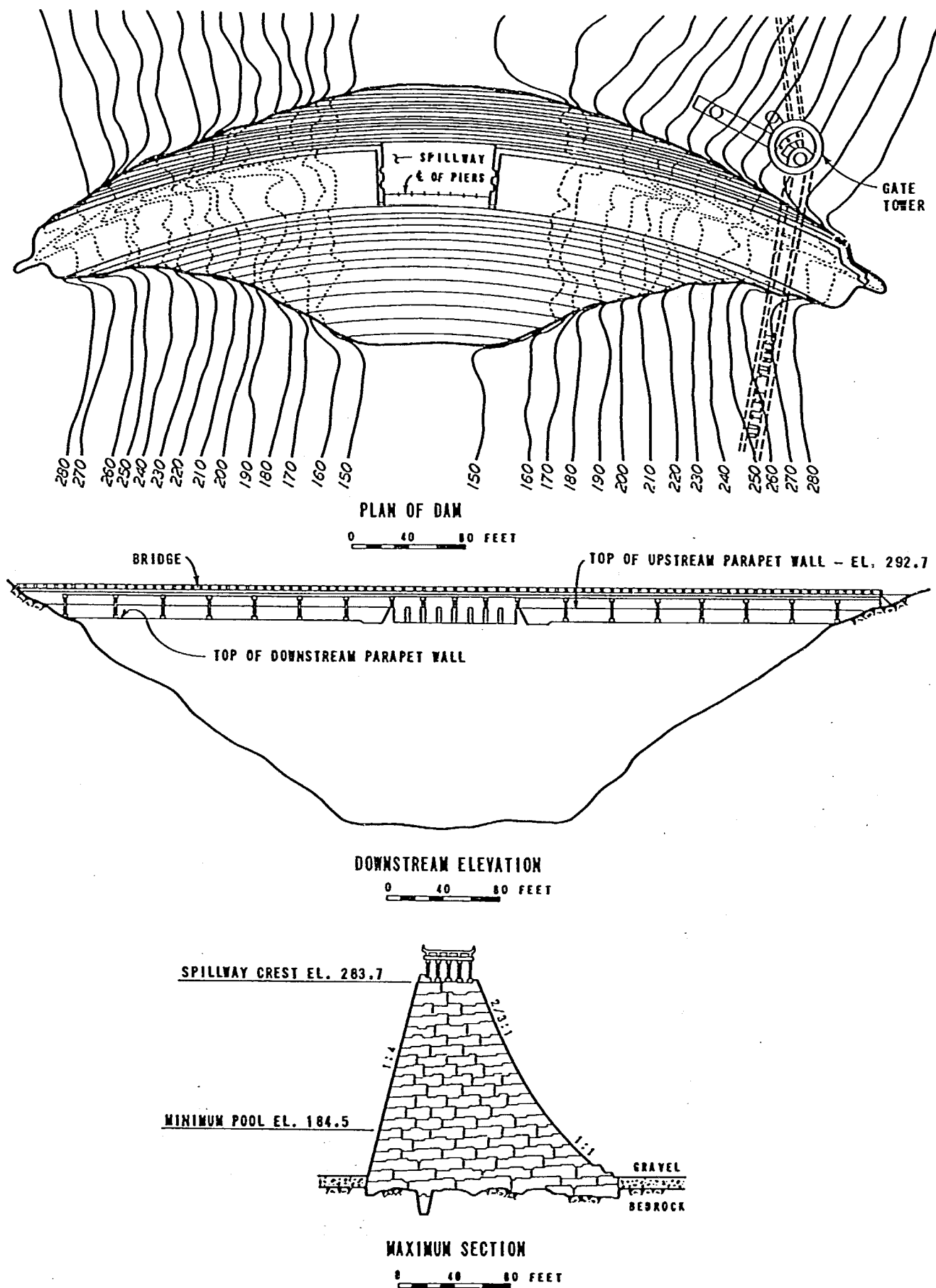


図-23 Lower Crystal Springs ダムの平面図および断面図⁸⁾

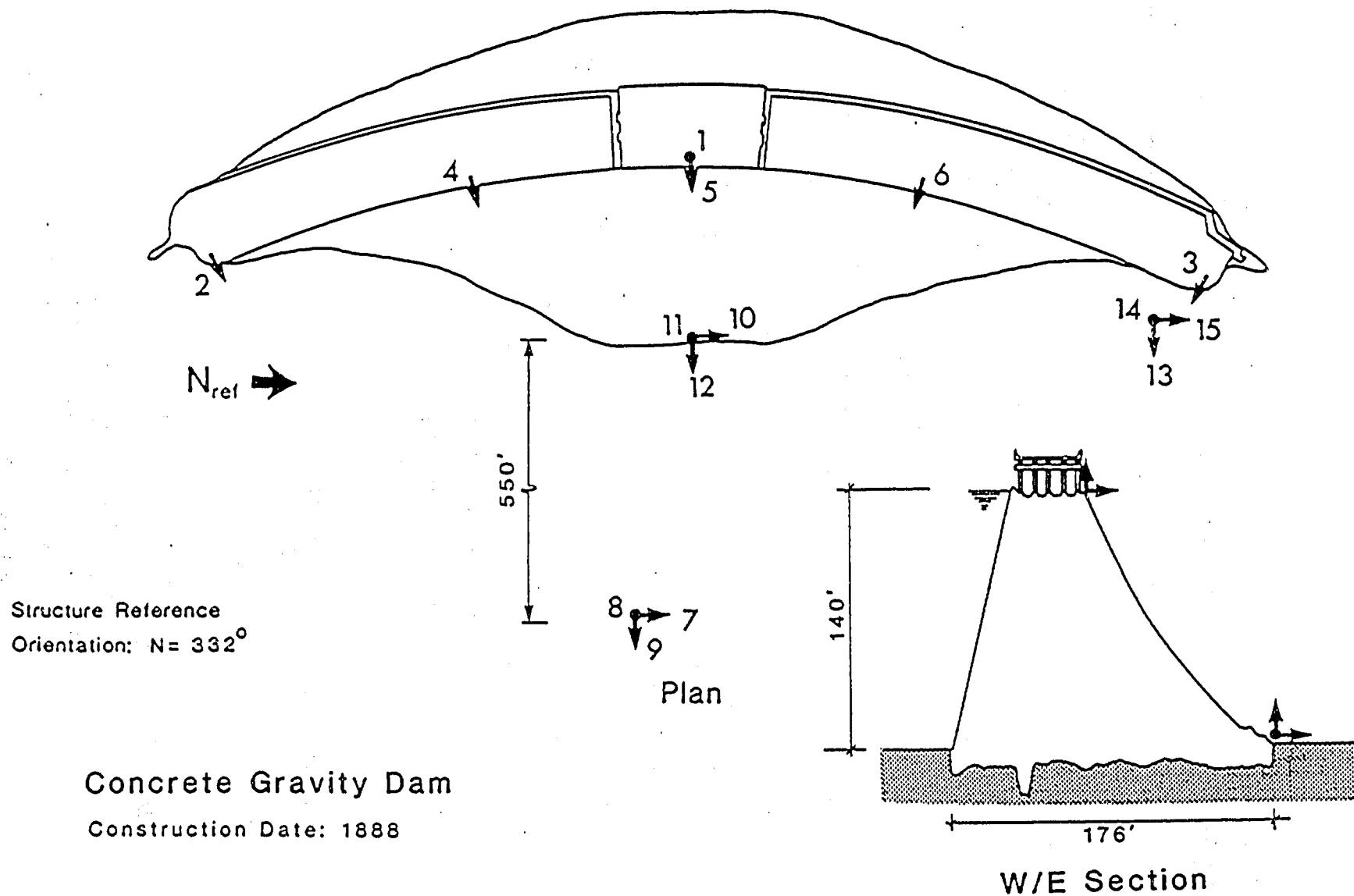


図-24 Lower Crystal Springs ダムの強震計の配置
 (C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06 より)³⁾

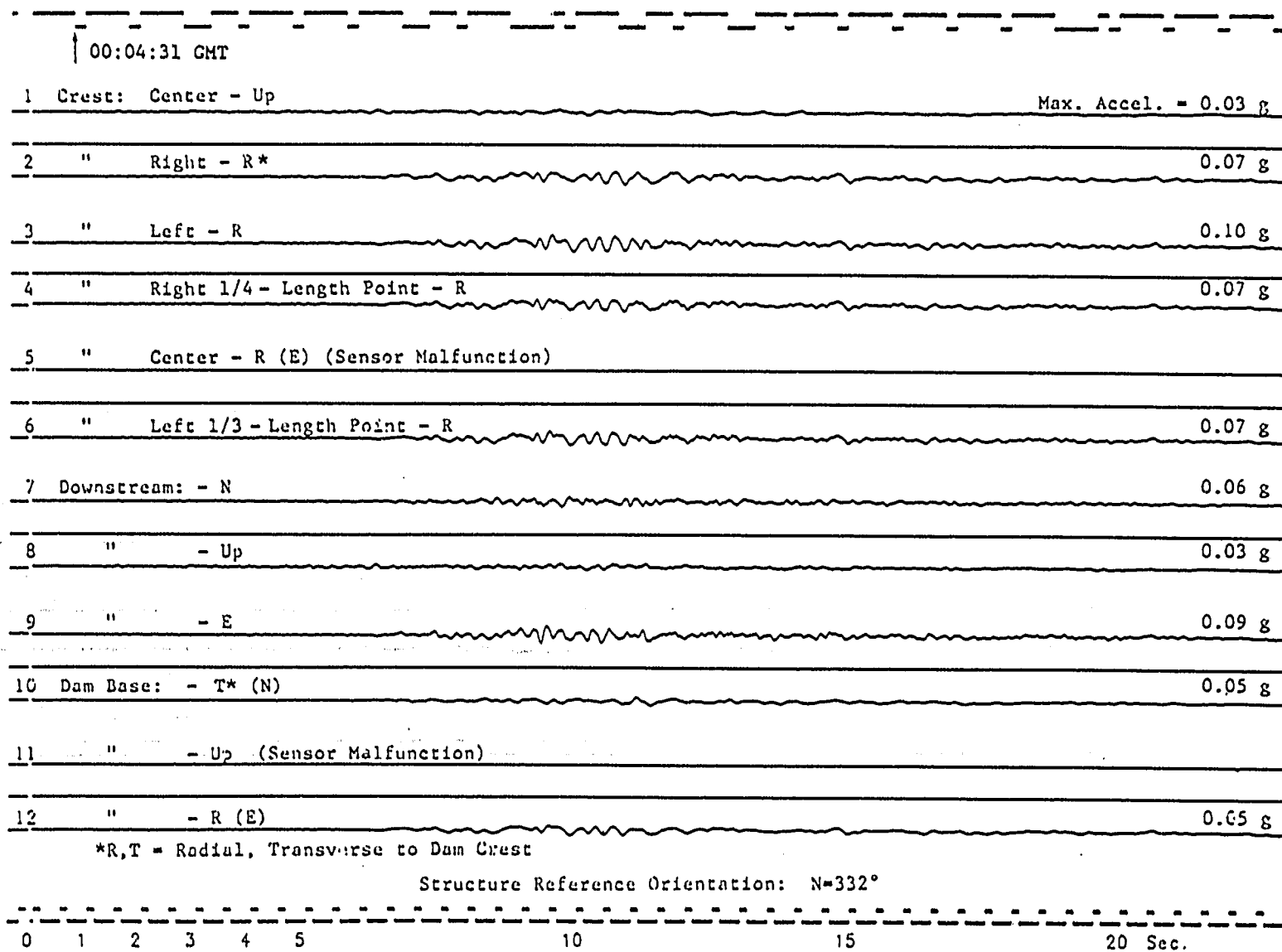
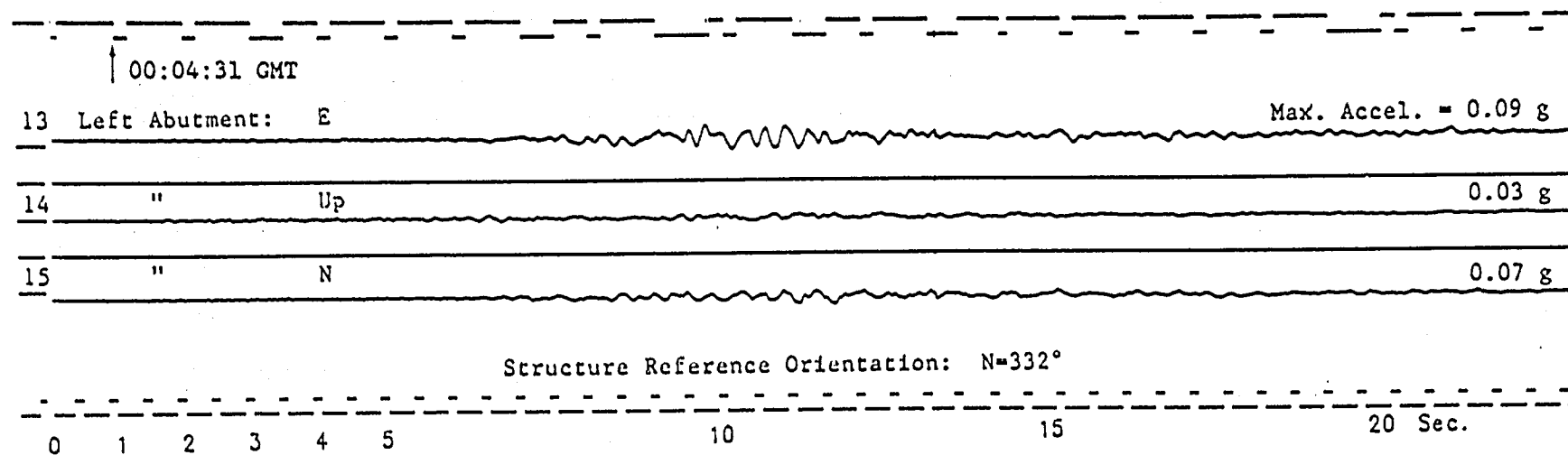


図-25(a) Lower Crystal Springs ダムの加速度時刻歴
(C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06 より)³⁾



☒-25(b) Lower Crystal Springs ダムの加速度時刻歴
(C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06 より)³⁾

表-1 各ダムの諸元

ダム名	型式	竣工年	堤高 (m)	堤頂長 (m)	所有者	震央 距離 (km)	被害	強震 記録	備考
Lexington*	7-スライ	1953	62.5	244	Santa Clara Valley Water District	21	有	有	
Anderson*	ヒンター-17型 ロックフィル	1950	71.6	422	〃	27	若干	有	1985年 嵩上げ
Guadalupe*	7-スライ	1935	43.3	212	〃	18	有	無	
Chesbro*	7-スライ	1955	29.0	220	〃	19	有	無	
Vasona*	複合型	1935	10.4	305	〃	24	有	無	
Austrian*	7-スライ	1950	56.4	213	San Jose Water Co.	12	著しい	無	
Newell Creek*	7-スライ	1960	55.5	232	Santa Cruz City	19	有	無	
Almaden*	7-スライ	1936	33.5	—	Santa Clara Valley Water District	15	無	無	
Calero*	7-スライ	1935	29.9	—	〃		無	無	
Coyote	7-スライ	1936	42.7	296	〃	31	無	有	
Del Valle	7-スライ	1968	67.7	—	State of California	66	無	有	
Lowre Crystal Springs	7- グラウ・イ	1888	42.7	183	City and County of San Francisco Public Utilities Commission	69	無	有	

* : 現地調査の対象としたダム

表-2 Lexington ダムの最大加速度と推定周期
(C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06^{*)}に基づき作成)

位 置	計器番号	*1 方向	最大加速度 (G)	推定周期 (sec)
左岸アバット	3	X	0.45	1.10
	1	Y	0.41	1.20
	2	Z	0.15	0.11
天端左岸寄り	6	X	0.39	0.84
	4	Y	0.40	0.89
	5	Z	0.22	0.46*2
天 端 中 央	9	X	0.45	0.86
	7	Y	0.34	0.85
	8	Z	0.20	0.48*2

*1 X : 上下流, Y : ダム軸, Z : 鉛直

*2 堤体のZ成分には低周期と高周期の2成分があり、
ここには低周波成分のみ記す

表-3 Anderson ダムの最大加速度と推定周期
(U. S. G. S. Open-File Report 89-568²⁾に基づき作成)

位 置	計器番号	方向 [*]	最大加速度 (G)	推定周期 (sec)
中段・中央	2	X	0.14	
	1	Y	0.11	
中段・左岸	3	X	0.14	
法 尻	6	X	0.23	
	4	Y	0.18	
	5	Z	0.16	
天 端 中 央	9	X	0.43	
	7	Y	0.32	
	8	Z	0.16	
天端・右岸	12	X	0.38	
	10	Y	0.32	
	11	Z	0.23	
左岸アバット (岩盤)	15	X	0.07	
	13	Y	0.08	
	14	Z	0.05	
天 端	18	X	0.39	0.59
	16	Y	0.26	0.48
	17	Z	0.19	0.29
下 流 法 尻	21	X	0.26	0.55
	19	Y	0.25	0.39
	20	Z	0.17	0.29

* X: 上下流, Y: ダム軸, Z: 鉛直

表-4 Coyote ダムの最大加速度と推定周期
(C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06³⁾に基づき作成)

位 置	方向 [*]	最大加速度 (G)	推定周期 (sec)
南西アバット	X	0.49	0.47
	Y	0.15	0.30
	Z	0.08	0.25
下 流	X	0.19	0.25
	Y	0.17	0.19
	Z	0.10	0.16

* X: 上下流, Y: ダム軸, Z: 鉛直

表-5 Del Valle ダムの最大加速度

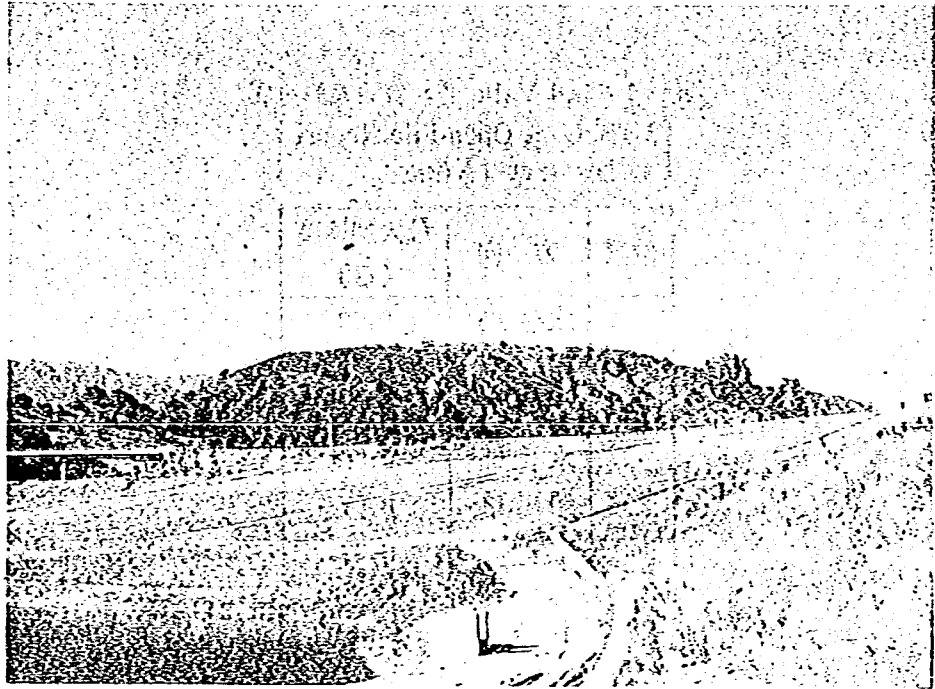
(U. S. G. S. Open-File Report
89-568²⁾に基づき作成)

位置	方 向	最大加速度 (G)
法尻	水平 65°	0.06
	鉛 直	0.03
	水平335°	0.04
天端	水平 65°	0.08
	鉛 直	0.07
	水平335°	0.08

表-6 Lower Crystal Springs ダムの最大加速度と推定周期
(C. S. M. I. P. Report No. OSMS 89-06²⁾に基づき作成)

位 置	計器番号	* 方向	最大加速度 (G)	推定周期 (sec)
天 端 中 央	5	R		
	1	Z	0.03	
右岸アバット	2	R	0.07	
左岸アバット	3	R	0.10	0.28
天端右岸寄り	4	R	0.07	0.45
天端左岸寄り	6	R	0.07	
岩 盤	1 2	X	0.05	0.44
	1 0	Y	0.05	
	1 1	Z		
左 岸 岩 盤	1 3	X	0.09	
	1 5	Y	0.07	
	1 4	Z	0.03	
基 礎 岩 盤 (165m 遠方)	9	X	0.06	0.28
	7	Y	0.09	
	8	Z	0.03	

* X : 上下流, Y : ダム軸, Z : 鉛直, R : 半径方向



写真－1 Lexington ダム：上流右岸から堤頂部を望む
(土木研究所地震防災部振動研究室田村主任研究員より提供)



写真－2 Lexington ダム：上流右岸の亀裂
(土木研究所地震防災部振動研究室田村主任研究員より提供)

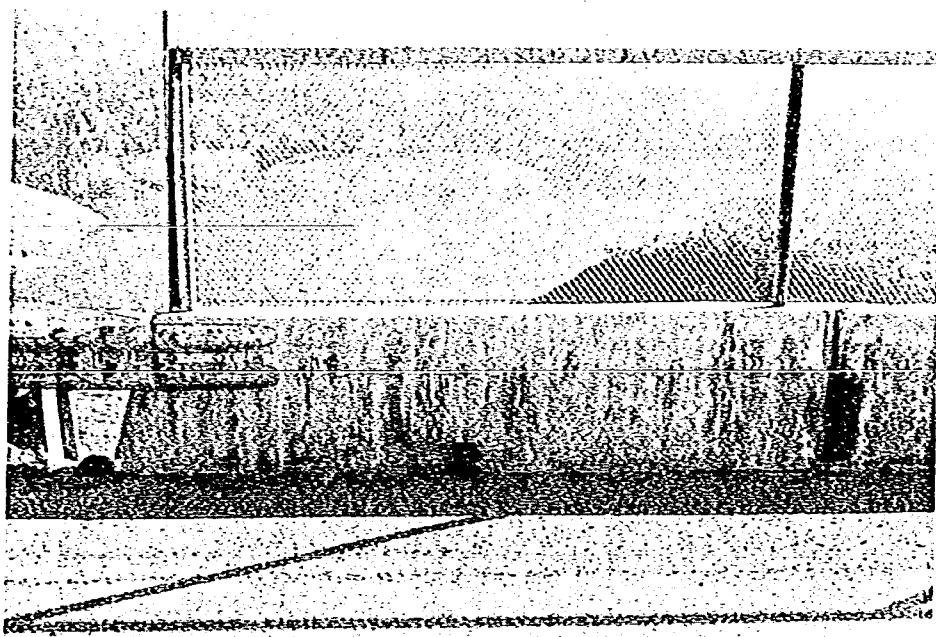


写真-3 Lexingtonダム：天端への橋梁の被害
(土木研究所地震防災部振動研究室田村主任研究員より提供)

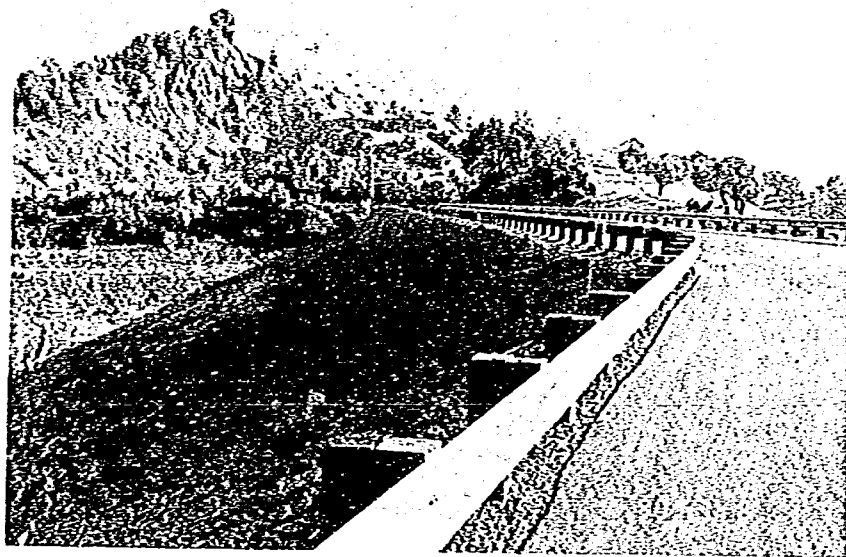


写真-4 Andersonダム：天端右岸および上流面
(撮影：安田)

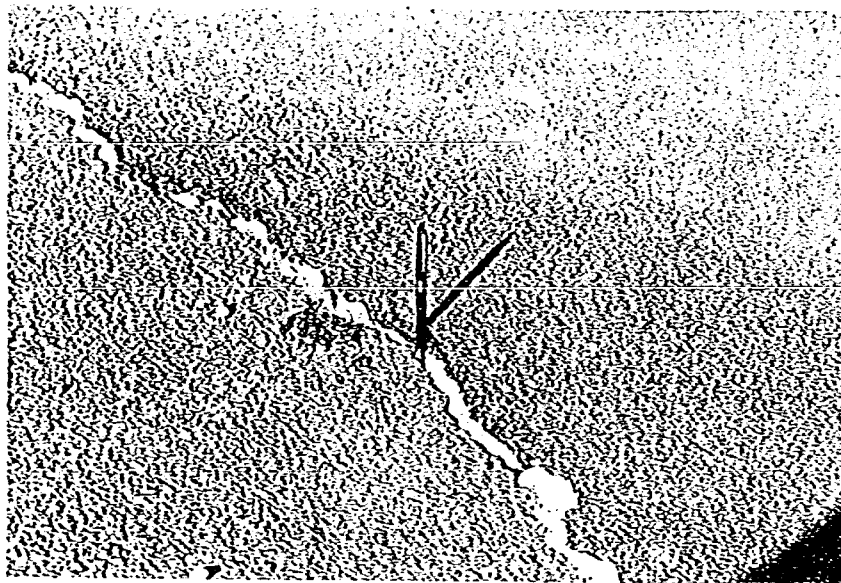


写真-5 Andersonダム：天端亀裂の応急処置
(撮影：安田)

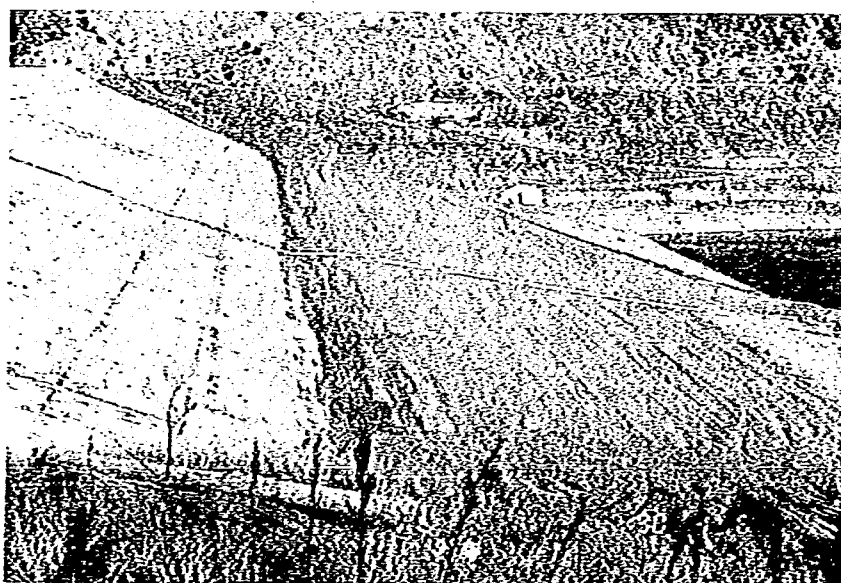


写真-6 Guadalupeダム：左岸上流部より波浪保護工および
盛土を望む
(撮影：安田)



写真-7 Chesbro ダム：上流面の補修後
(撮影：安田)

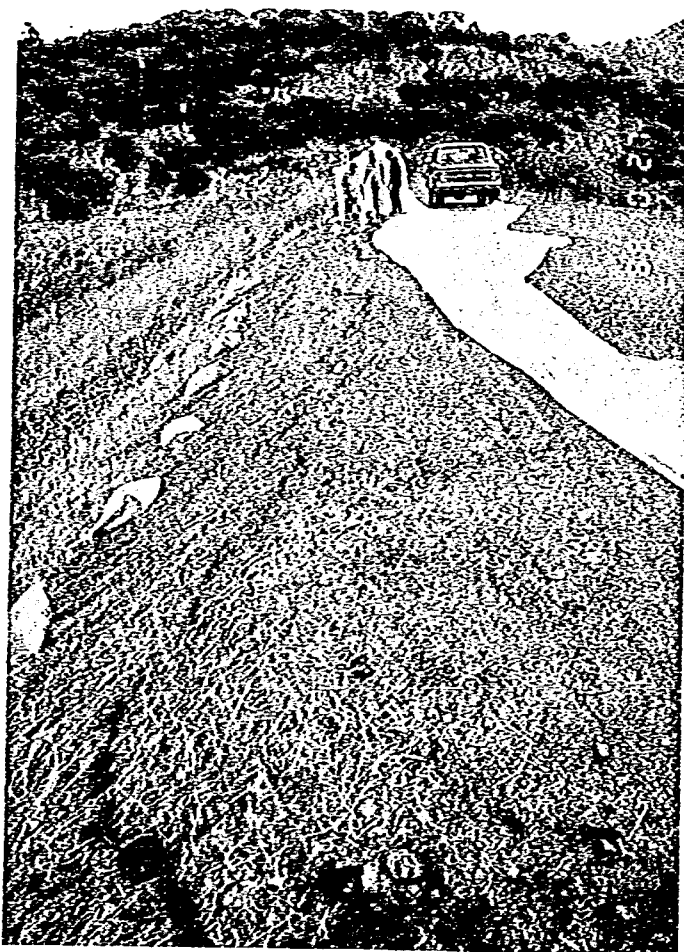


写真-8 Chesbro ダム：天端上流法肩の亀裂
〔Santa Clara Valley Water District〕
〔Robert E. Tepel 氏より提供〕

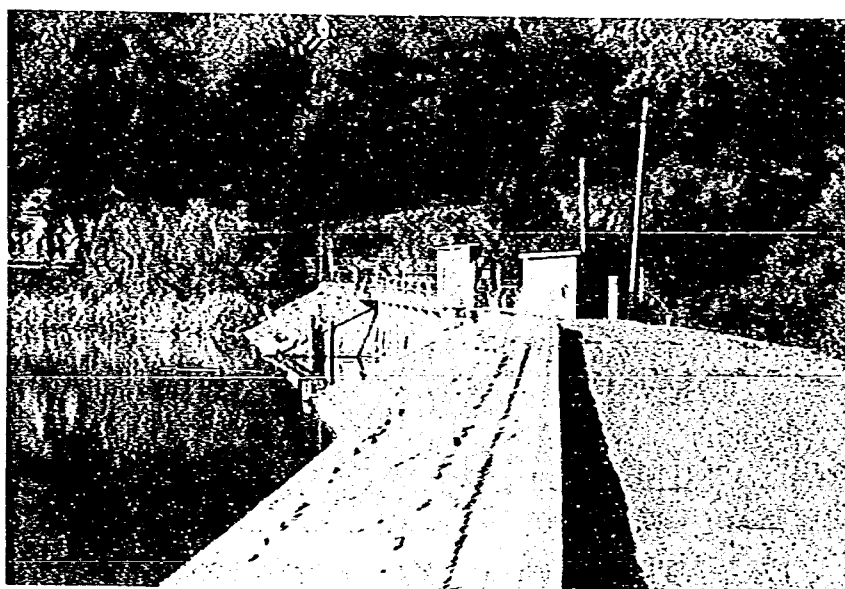


写真-9 Vasona ダム：ゲート付近を望む
(撮影：安田)



写真-10 Austrian ダム：下流法尻から右岸洪水吐を望む
(撮影：安田)

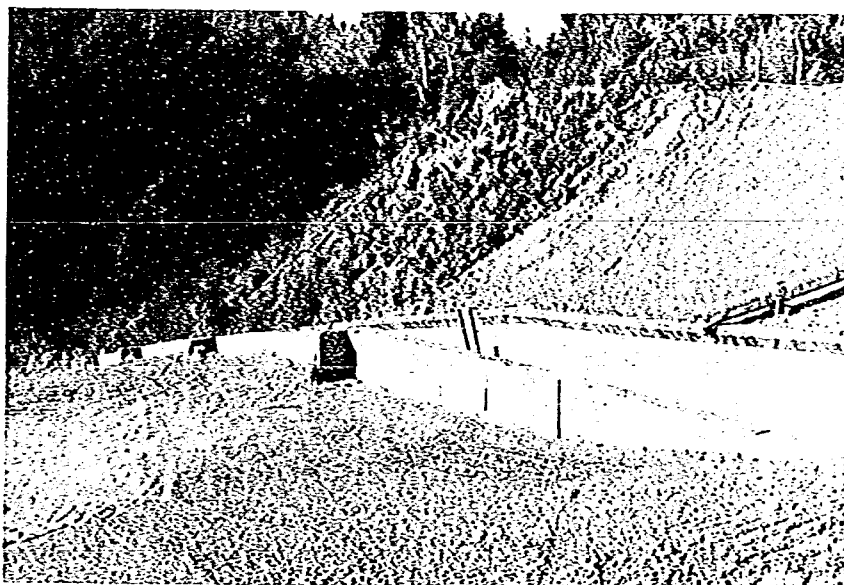


写真-11 Austrianダム：洪水吐と堤体の接合部, 材料を置換し締固めている
(撮影：安田)

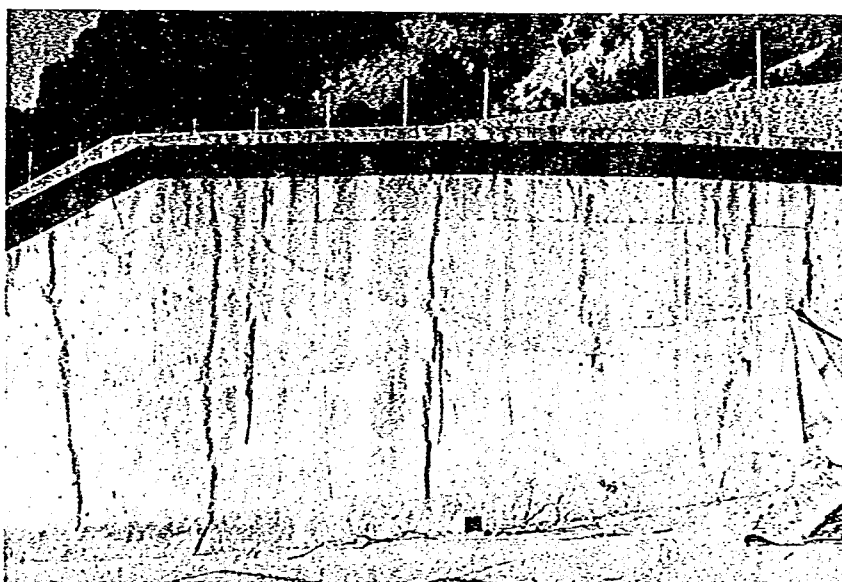


写真-12 Austrianダム：洪水吐天端付近の導流壁
(撮影：安田)

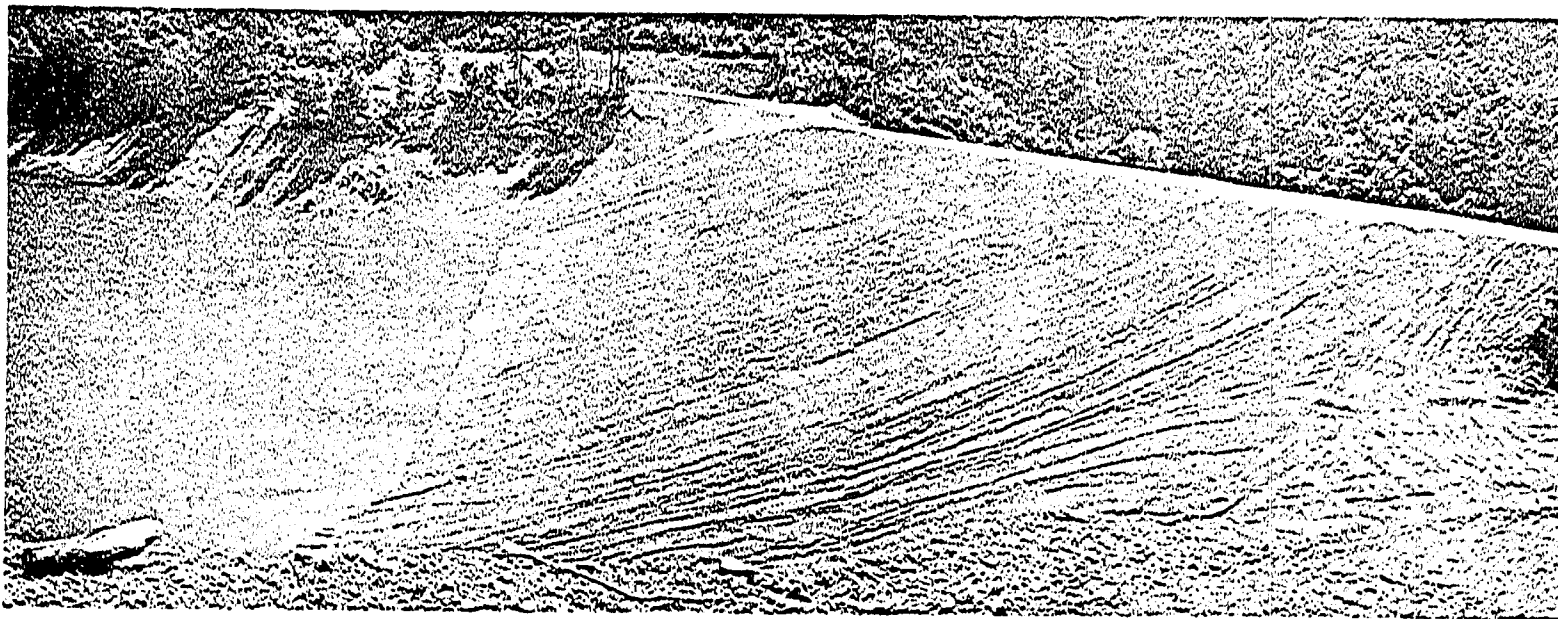


写真-13 Austrianダム：右岸から上流法面を望む、補修後
(水資源開発公団試験所 第一試験課長 播田一雄氏より提供)

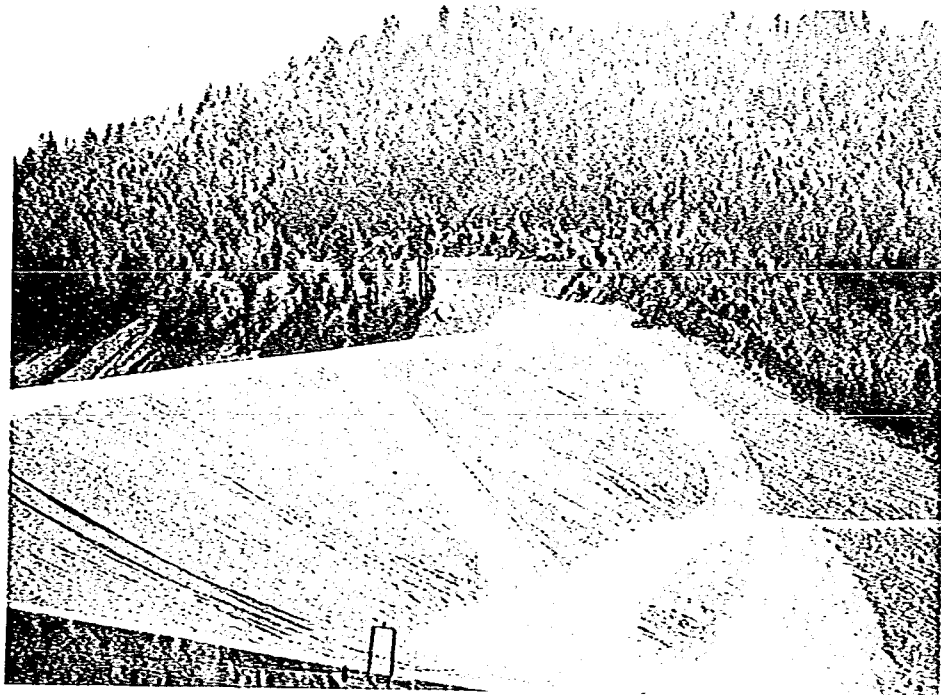


写真-14 Austrian ダム：右岸から下流法面を望む，補修後
(水資源開発公団試験所 第一試験課長 橋田一雄氏より提供)

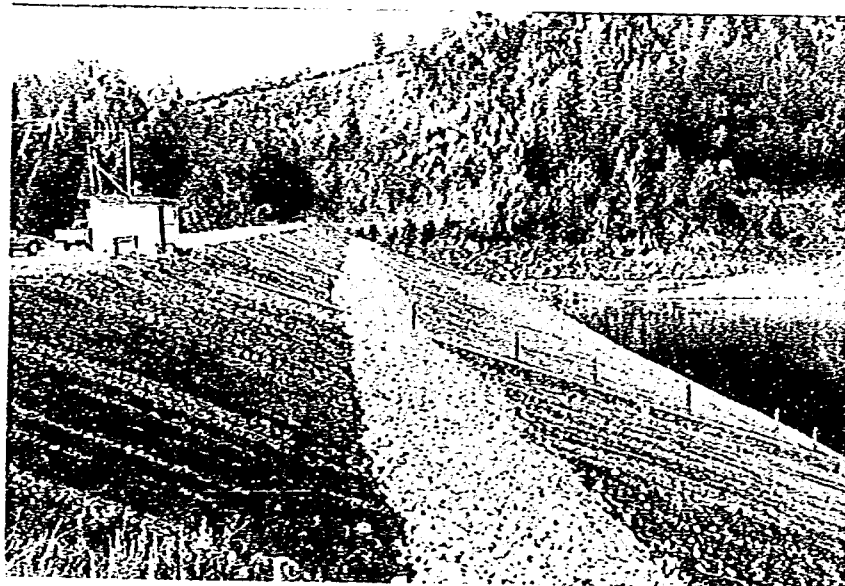


写真-15 Newell Creek ダム：左岸から上流面を望む，修復部
分の上に碎石が載っている
(撮影：安田)

Loma Prieta地震 (1989. 10. 17)
におけるダムの挙動

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2892号
平成2年6月 (1990)

松 本 徳 久
安 田 成 夫
正 国 之 弘

キーワード：フィルダム，地震，地震動

1989年10月17日，米国 California 州において，マグニチュード7.1の Loma Prieta 地震が発生した。本報告は，この地震による震央付近に位置するダムの挙動をとりまとめたものである。調査方法は，筆者らの一人による現地調査および文献調査である。

郵便はがき

3 0 5 - □ □

41円切手
をはって
下さい。

建設省土木研究所
フィルダム研究室

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 86

No. 86

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2892号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

