



中国石油化工总公司抗震办公室 编译

地震的教训

—1989年美国洛马·普里埃塔地震

地震出版社



地震的教训

——1989年美国洛马·普里埃塔地震

中国石油化工总公司抗震办公室 编译

地震出版社

1990

内 容 提 要

本书编译了有关1989年10月17日美国旧金山东南洛马·普里埃塔地震的考察报告和论文共18篇。内容除记述这一强烈地震的基本情况外，重点是介绍和分析这一地震引起的各种震害现象，涉及房屋建筑、道路桥梁、给排水设施等生命线工程，以及震后采取的应急措施。书中总结的经验教训和建议，对我国的防震抗震工作，特别是城市的防震抗震工作有重要参考价值。

地 震 的 教 训

——1989年美国洛马·普里埃塔地震

中国石油化工总公司抗震办公室 编译

地震出版社 出版

北京民族学院南路9号

朝阳展望印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 11印张 278千字

1990年10月第一版 1990年10月第一次印刷

印数 0001—2000

ISBN 7-5028-0409-9/P.262

(797) 定价：6.00元



前 言

1989年10月17日发生在美国加州旧金山东南60英里的洛马·普里埃塔(Loma Prieta)7.1级地震,是1906年旧金山大地震以来发生在这个地区的最为强烈、损失最为严重的一次地震。这次地震造成62人死亡,3757人受伤,12000人无家可归,经济损失达60亿美元。

这次地震的最大特点是,破坏集中在离震中较远的软土地基上的结构物,这可能是长周期地震波传播较远且在软土层上放大显著的缘故。这说明,对于地震区内软土地基上的结构物的地震安全应给予特别的注意和考虑。

在这次地震中,连接旧金山和奥克兰两市的海湾大桥塌落。通向奥克兰市的双层高速公路880号线塞普里斯地段的破坏,不仅造成人员伤亡,经济损失,而且使交通一度中断。这说明,建在软土地基上的生命线工程最易在强震时毁坏。我们应当十分重视这类工程的抗震鉴定、加固和维护管理,一旦发现问题,必须及时而果断地作出处理。

这次地震房屋建筑的破坏局限在离震中90公里的旧金山市地基不良的马里纳地区,没有加固过的砌体建筑破坏最多。按照1933年地震以后颁布的抗震设计规范设计的建筑,包括厂房和高层建筑都毫无例外地经受住了考验。这说明,地震区的一切新建工程都必须严格按照国家颁布的抗震设计规范进行设防,为此而增加一些基建投资是值得的,必要的。

地震发生后,救灾与恢复工作进展十分顺利。其主要特点是,震前确立了应急组织,制订了细致的应急预案,并进行了训练演习,震时作到反应快速,立见成效。由一个行政管理部门负责对遭到破坏的建筑物和生命线工程迅速采取了对策,对发生火灾采取应急措施迅速予以控制,对受灾地区的食品、物资供给、医疗救护迅速及时,社会秩序迅速得到维持,社会事业自愿服务者的行动引人注目,市政府各部门的应急反应情况经受了考验,市长满意。这一切都说明现代城市抗震防灾工作的极端的重要性。

为了认真吸取美国这次地震的经验教训,作为我国抗震防灾工作的借鉴,中国石油化工总公司抗震办公室韩精忠、工程抗震振动技术中心站耿艳玲、韦树莲、刘文彦等同志会同中国建筑技术发展研究中心情报所姚国华、薛吟、刘丽文等同志将有关这次地震的资料搜集、组织翻译并汇编成书,供有关抗震防灾工作者参阅。为减少重复,对原文有少量的删减。

叶耀先

1990年5月10日

目 录

1989年10月17日美国加州洛马·普里埃塔地震的经验教训	(1)
1989年洛马·普里埃塔地震考察报告	(47)
简要的考察报告	(58)
洛马·普里埃塔地震震害调查分析	(65)
高速公路和桥的坍塌原因——在软土地基上震动放大对接点的抗震性能提 出了疑问	(80)
建筑物的破坏——地基性状与抗震等级决定着建筑物的受害程度	(92)
钢筋混凝土建筑的地震表现	(104)
地震破坏的最初印象	(107)
震后的大规模研究	(122)
地震的破坏估计	(127)
震中附近地区的地震破坏	(136)
洛马·普里埃塔地震对日本发出的警告	(139)
交通系统出现的危机	(142)
给排水设施的抗震问题	(146)
地震对工业生产造成的损失	(152)
震后采取的应急措施	(157)
奥克兰的震后应急工作	(161)
加州的灾难	(163)

1989年10月17日美国加州洛马·普里埃塔 地震的经验教训*

George Plater John P. Galloway

引 言

自1906年旧金山大地震以来,7.1级的洛马·普里埃塔(Loma Prieta)地震(1989年10月17日太平洋夏令时下午5时04分)是袭击这一居住着590多万人的旧金山海湾及附近地区(图1)的最大地震。地震有感范围近400000平方英里(约1036000平方公里),其区域南到洛杉矶;北到俄勒冈-加州分界线,东到内华达西部。地震震动约15秒。其震动范围从 Monterey 海湾蔓延到旧金山海湾北部。这次地震造成:

- 62人死亡
- 3757人受伤和12000多人无家可归¹⁾
- 财产损失超过60亿美元¹⁾
- 交通、公用事业和通讯被迫中断

公共和个人财产损失之大已近乎名列美国损失最大的自然灾害之首,而且它还是自1906年以来代价最高的一次地震。正巧当时第三届世界棒球赛在旧金山举行,这时第一个大型棒球联赛因地震而被取消,Loma Prieta地震创下有史以来让最多的电视观众目睹一次地震直接影响的播放记录。自1906年以来,对美国产生影响的较大地震仅是1952年7月21日震级为7.5的加州Kern县地震(12人死亡;4900万美元的经济损失)和1964年3月27日9.2级的Alaska大地震(130人死亡,经济损失相当于1987年时的5亿美元)。

Loma Prieta 地震使Santa Cruz (圣克鲁斯)山脉之下的一段San Andreas (圣安德烈斯)断层破裂了——此段过去一直认为在南加州 Mojave 沙漠北部的所有断层段中最有可能(最近30年的概率为30%)发生一次6.5到7级地震的一段(美国地质调查局,1988年)。

正如这次地震的位置和范围都没有使地震专家们感到意外一样,位置和范围二者也都不是这次地震的主要影响要素——尽管所有的大地震都有预料不到的后果和新的教训。一些主要而又初步的总结是:

• 地震学和测地学数据表明, Santa Cruz山脉地震伴随着一个地层滑移,它沿 San Andreas

* 1989年11月22日收审印刷原稿。

1) 加利福尼亚州州长救急服务办公室通讯, 1989年11月21日。

断层的25英里(40公里)长的一段滑移, San Andreas断层把地壳断裂开, 其破裂深度约11英里(18公里), 在向西南俯角约为70°的断层上的水平位移约6英尺(1.83米), 竖向位移约4英尺(1.22米); 断层的西南侧相对于东北侧向西北方向并同时向上方运动(参考图1——译注)。上述位移与发生在近乎铅直的平面上以水平运动为主的位移有明显的不同。此铅直平面具有地震活动特征, 并且沿 San Andreas断层许多段, 历史上出现过断裂面。

- 未发现有预示即将发生地震的短期地震或应变前兆。
- 地震的一个特殊方面是缺乏可辨认的主要地表断层作用; 换言之, 沿着和靠近San Andreas断层地表迹线(trace)的附近有一个宽达3英里(5公里)的布满许多地面裂缝的地带, 这说明应变是分布在一个广阔的范围内。横跨许多这些裂缝的位移之大足以毁坏房屋和公路; 其中许多裂缝也出现在产生滑坡的地方。1906年在这个地区观察到了类似的情况。这种裂缝的分布形式, 使得危害远远超出明确划定的San Andreas断层大部分狭窄的断层迹线(fault trace)。
- 正如1906年地震所观测到的和未来地震影响图所预测的, 地震震动局部被放大。明显放大发生在未固结的沉积物区域和在未固结的沉积物上人工填充土的区域, 这些未固结的沉积物广泛分布在Montevuey海湾和旧金山海湾的边缘和沿着湖泊、沼泽和河流的区域。放大的地面运动能够影响在远离震中的这类沉积物上的构筑物, 它被怀疑是结构损坏的重要因素, 如海湾大桥, 880号公路的Cypress分段、280号公路和Embarcadero高架桥路等结构的损坏。
- 下伏饱和水松散沙泥的厚层沉积物区域, 不仅受到了强烈的震动, 而且也受到了地震期间液化的沉积物的竖向挤压和强度损失的影响; 1906年的地震中, 许多区域经历了类似的过程。这类沉积物的沉陷、倾斜和裂缝对破坏产生巨大的影响, 主要发生在这种相同的放大地面运动的区域中。这次地震生动地表明, 某些只经粗劣工程处理的填充土地区(例如旧金山Marina区发生严重损坏区域的下面), 在比预期的地震震动程度低得多的情况下就遭破坏。
- 在整个强烈地面运动地区, 地震震动在陡峭不稳定的斜坡区域上, 包括许多人工挖土和填土的地方, 触发了多处滑坡。在农村山区, 滑坡除了造成至少两人死亡和建筑物和公用设施大范围的损坏以外, 还阻塞了许多公路和道路, 因而阻碍了抢救和救济工作。
- 在震中地区以外, 建在良好场地上加设有基础的平房和多层楼房的损坏是极小的。严重的破坏基本上只限于一些老建筑物, 它们是按以前的建筑规范设计的, 许多损坏可以归结为不良的基础联结、无钢筋的砖石结构、砖表面结构、或多层木框架建筑物, 这种建筑物的第一层对地震震动缺乏足够的侧向抗力。
- Los Gatos部分市区被毁坏, 可是其周围市区却没有遭受破坏。破坏增加的小区域出现在从Los Gatos到Palo Alto, 沿着Santa Cruz山脉东北部的丘陵地带延伸的一个非延续带。有些破坏位于有大量地面裂缝和地表变形的区域。破坏分布及其与地表破裂和翘曲作用的关系说明, 破坏可能与其地下的地质情况有关, 尽管这个关系还未得到证实。

这份报告是我们概括有关Loma Prieta地震起因和影响的主要的初步发现。它既发表给普通大众又发表给地球科学家和有关领域的研究人员, 向他们提供这次地震的资料和关于这

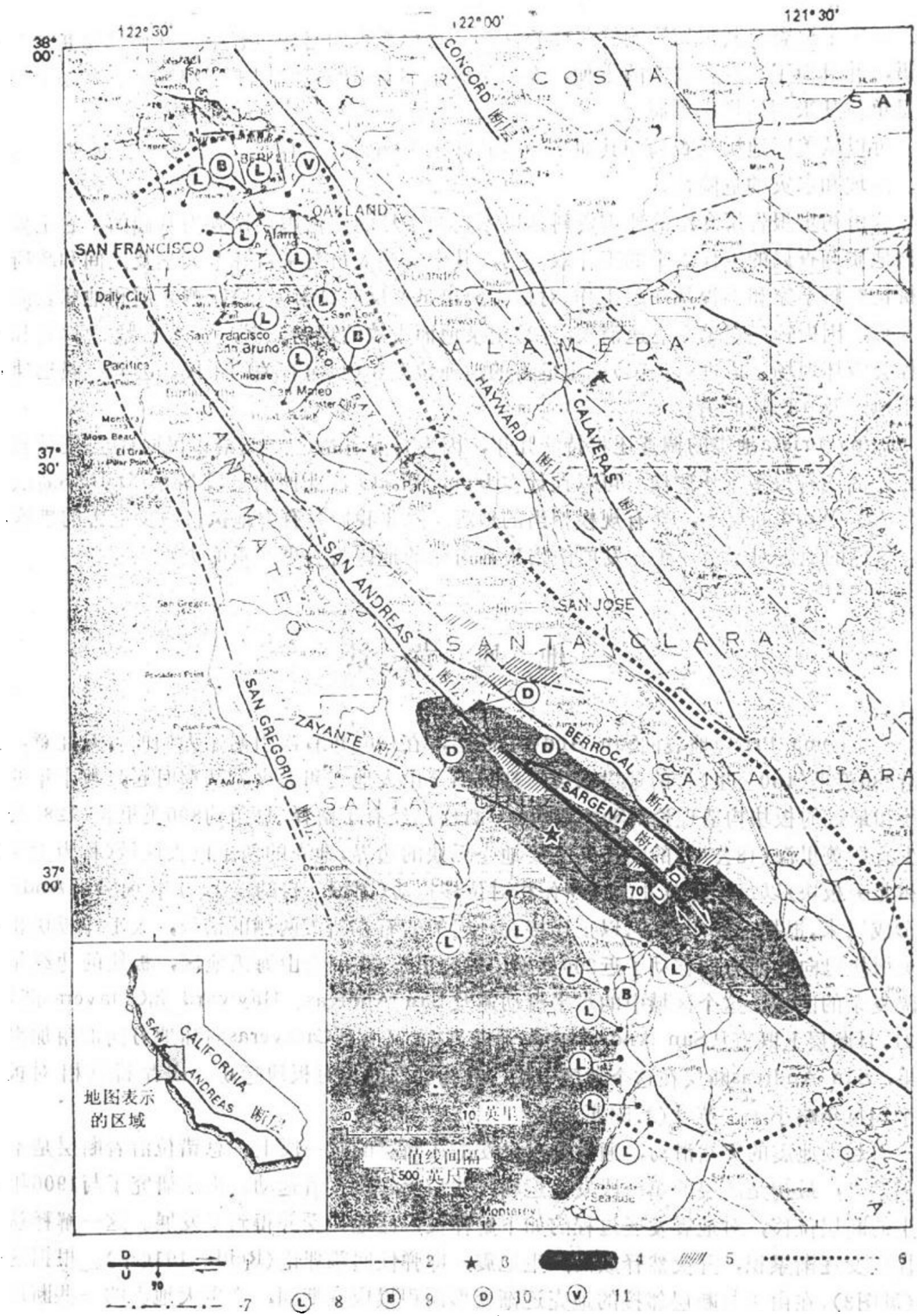


图1 Loma Prieta地震的主震震中，和在发生较大余震、大量地面裂缝、滑坡及建筑物损坏的地区内的推测的断层破裂分布图。本图也表示了主要结构物破坏的位置和主要地面裂缝和砂土液化的区域

说明： 1——Loma Prieta地震的断层破裂——两个大箭头表示相对水平运动；小箭头和数字表示倾斜的方向和量值； U——上地，D——下落； 2——断层，虚线表示近似位置； 3——主震震中； 4——余震和大量滑坡的区域； 5——可能与断层作用有关的地面裂缝区； 6——结构性破坏的大概范围； 7——滑坡的大概范围； 8——液化显著的地区； 9——破坏的大桥； 10——破坏的大坝； 11——破坏的双层高架桥路

一地区未来地震及其预期影响的总体看法。在这份报告的写作过程中，我们已尽量少用科技术语，并且为了非专业读者的方便，在引进概念和术语时对它们做了解释。我们还把多数的测量单位从米制转换成英制。

可以从美国地质调查局和其他来源得到许多公开发表的报告，这些文件证明了来自地震、滑坡和水灾的危险性。

这份初步报告所介绍的地震资料是以不到一个月的广泛震后调查为基础的。它主要是由美国地质调查局的工作人员的工作取得的，其中有些人员与来自几个大学及民间和政府的组织机构的科学家和工程师一起工作。对地震做出迅速反应是为了(1)监测余震和地球表面的震后变形，因为这些现象会迅速消失，(2)记录地面失效的现场证据，这要在紧急修复和天然过程会毁坏现场之前进行；(3)确定危害的地理位置和(4)向有关的市民和公职官员迅速提供关于地震及其影响的消息。

Loma Prieta地震的调查还将持续几年，因为要弄清楚这份送给市民同样也送给科学家的纪念品还有很多工作要做。可以预计在Loma Prieta段北面的一段San Andreas断层上，或在Hay Word断层上，会有规模相当的地震。除非我们强有力地执行减少危害的措施，否则，这样的地震对于这一正在发展的密集都市化的地区将有更严重的灾难。

地 质 背 景

产生Loma Prieta地震的San Andreas断层，在1906年首次引起了人们的普遍注意，当时它沿280英里(450公里)长的地段破裂，造成旧金山大地震和大火。从那时起，数十年的地质测绘和最近的板块构造理论对San Andreas断层已经有了解释。这条约800英里长(1287公里)、最少有11英里深(18公里)的断层是主要地壳板块的边界，地壳的两个巨大区域(称为太平洋板块和北美板块)以每年几英寸的速率作相对位移运动(图2)。自约三千万年前San Andreas断层形成以来，根据已知年代的，以前连接在一起的岩石在断层两侧的错位，太平洋板块相对于北美板块已向西北方向移动了近200英里(322公里)。在旧金山海湾地区，板块的边缘是一个广阔复杂的区域，这个区域中的水平滑动遍及San Andreas、Hayward和Calaveras断层(图1,2)，且断层上既有从San Andreas向海洋的方向，又有从Calaveras向陆地方向的附加滑移。结果，San Andreas断层在这个地区中仅占有约40%的相对板块运动，或者说其相对板块运动平均每年略小于1英寸(2.54厘米)。

引起大地震的突然滑动，通常每次只发生在断层的某一段上。总错位沿着断层是不均匀地积累的，最初是断层的第一段发生运动，然后另一段接着运动。由于研究了与1906年地震伴生的断层位移，对地震发展过程的如下解释被广泛地接受并得到了发展。这一解释认为，弹性应变逐渐累积，并突然释放而产生地震，即弹性回跳理论(Reid, 1910年)。根据这一理论(见图3)，在由于与断层邻接的地壳逐渐变形而积累应变期间，产生大地震的一些断层段可在几十至数百年中保持锁住和平静状态；产生地震的断层突然位移，这个应变就周期性地得到解除。

在San Andreas断层上，Loma Prieta地震时发生的断裂是在南Santa Cruz山脉的人烟

稀少的地方，此山在Loma Prieta附近海拔高达3791英尺(1156米)(图1)。Santa Cruz 山脉

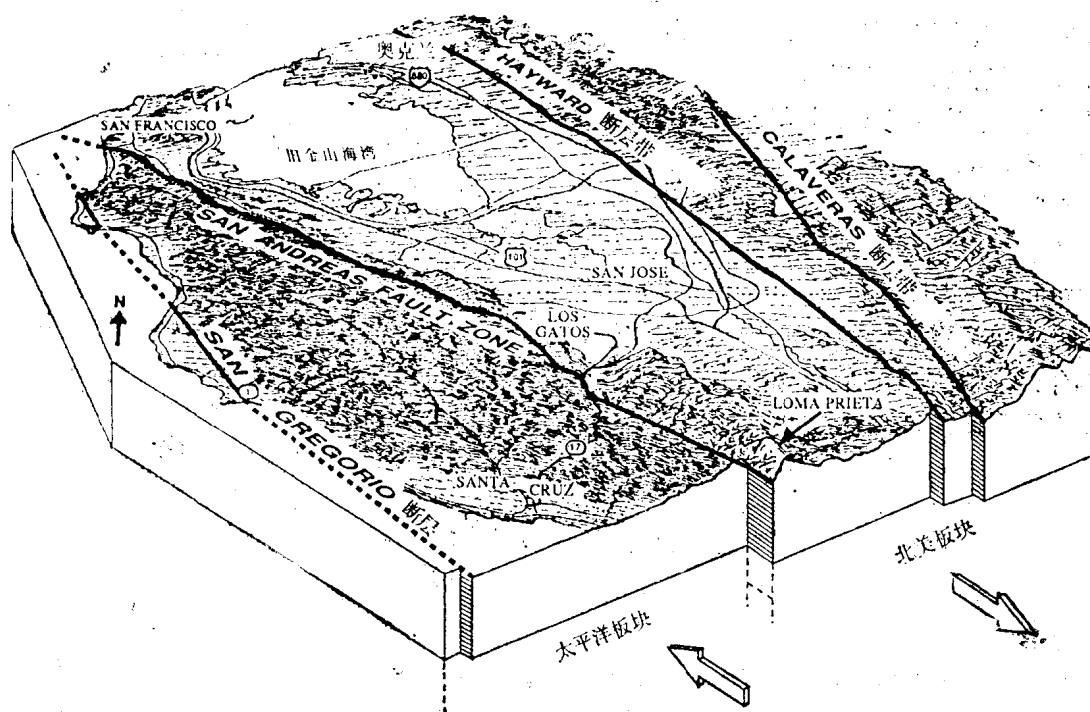


图2 说明太平洋和北美板块的相对运动和旧金山湾区主要走滑活断层的运动方向的立体图。断层在隐藏处画虚线，根据Alpha等人的文献(1989年)修改而得

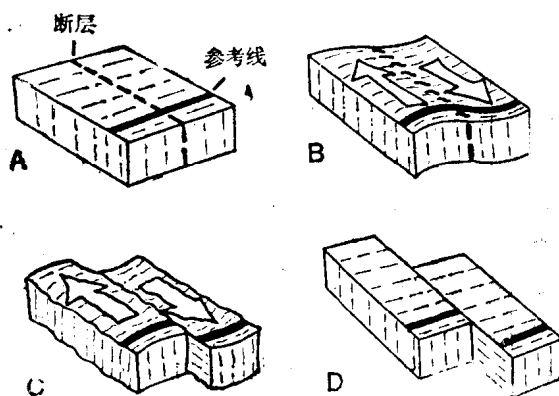


图3 根据弹性回跳理论说明一个右旋走向滑动断层的地震过程的立体图(A.处于静止状态的地壳断块;B.应力积累期的形变;C.破裂的瞬间;D.回跳到新的平衡状态)

从旧金山开始向东南方向延伸,且把Santa Cruz和Watsonville的海滨地区跟旧金山海湾和Santa Clara山谷隔离开了。山脉下面是经过变形的和固结程度不同的基岩,而海湾的边缘和Santa Clara山谷下面是来源于周围高地的未固结的沉积物(Helley等人,1979年)。这些流动沉积物随着向海湾接近而逐渐变得松散和不密实,而这个海湾的边界和海湾的下面都广泛地分布着被称为海湾泥砂的港湾沉积物。本世纪以来,人们在下述广大区域内已建起了很多大楼、桥梁、高速公路、机场和其他设施,这些区域是在淤泥上回填土而成的,它在地震中特别容易失效。

当地壳板块呈现的运动方向稍微偏离San Andreas断层的走向时就产生一个垂直于断层的小的压力分量,这在山脉的隆起和Santa Cruz山脉年轻岩石的变形中可以明显看到。南部的Santa Cruz山脉在东北面被冲断层(thrust fault)挡住,沿着这个冲断层,靠山谷一侧的山坡已向上和向东北方向移动了。地层和地震的数据都表明这些断层是活动的(McLaughlin,1974年)。可能在Santa Clara山谷和旧金山海湾的淤积沉积物的下面存在类似的断层,尽管这还未得到证实。

地震及其余震

主震

10月17日地震的震中位于Santa Cruz山脉,北纬 $37^{\circ}20'$ 、西经 $121^{\circ}53'$ 、即在Santa Cruz市的北东东约10英里(16公里)和旧金山的东南60英里(97公里)处(图1)。断层主要破裂是从下午5点4分15秒(太平洋夏令时)开始,震源深度约在地面下11英里(18公里)。在紧接着的7到10秒钟内,破裂向西北和东南方向扩展了约26英里(42公里),向上扩展了约8英里(13公里)、在地面下3到4英里(5到6.4公里)的地方停止扩展。尽管地震破裂没有达到地球表面,但在断层上表面的一个190平方英里(492平方公里)的区域毕竟免不了滑移。

从环绕地球表面记录下的面波计算出这次地震的震级为7.1级,这使它成为自1906年以来San Andreas断层上最大的地震。这次地震由地震波释放出的能量(10^{22} 尔格)大约等于从一个500000吨TNT的热核炸弹中产生的总能量;额外的能量消耗在岩石的破裂和部分Santa Cruz山脉的抬升上。

我们确信,1906年已断裂的最南端23英里(42公里)长的一段断层,在这次地震中重新破裂了。因为太平洋板块相对于北美板块向上和向西北方向的移动(图4),这次地震在陡倾的断层面上具有大致相等的右旋滑移和逆向滑移。由于San Andreas断层中的弯曲和前面提到过的压力分量,出现这些地震迹象是不足为奇的。断层面的方位估计是沿北 $50^{\circ} \pm 8^{\circ}$ 西的走向,或近似北西方向,且向西南倾斜 $70^{\circ} \pm 10^{\circ}$ 。这个倾斜面的滑动方向估计为 $130^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 。这些数据是基于在加利福尼亚中部记录到的267个纵波的观测结果而得的。日本的Tsukuba和加利福尼亚的Pasadena台的面波和体波的记录给出了基本相同的结果:走向北 54° 西,向西南倾斜 72° ,和断层面滑动方向 132° 。这个滑动的取向与移了位的勘测石桩的观测结果和余震的三维分布是协调一致的。

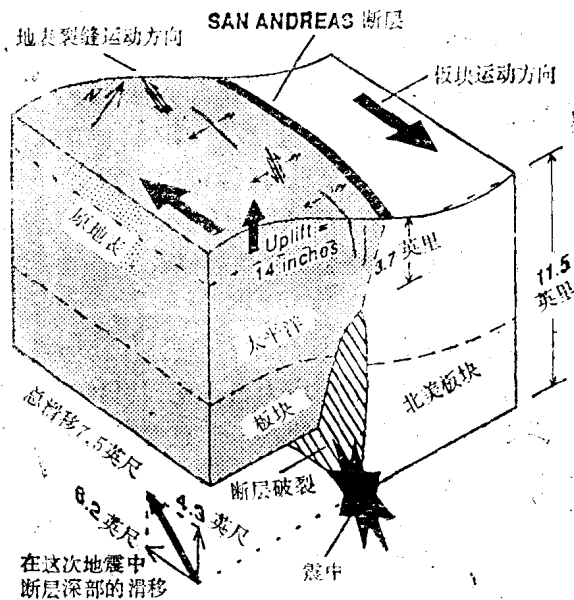


图4 在Loma Prieta地震期间, San Andreas断层上推测的运动的示意图。沿着南面的Santa Cruz山脉的断层段, 太平洋板块和北美板块沿向西南俯角近70°的斜面交汇。板块运动基本上是由沿这个斜面走向滑动约6.2英尺(1.9米)和沿逆向滑动4.3英尺(1.3米)组成的, 此时, 太平洋板块便沿断层面上移且压在北美板块上。断层的滑移量和地表的竖向变形是根据大地测量数据确定的。本图是根据M.J.Rgmer的图形修改而得的

地震活动背景

这次地震发生在1906年最后一次大错动后锁住的一段San Andreas断层的蠕动段的北面。从1906年以来记录的微震活动中可以明显地看出断层的对比性状(图5)。在San Juan Bautista和Parkfield之间, San Andreas断层平稳地蠕动着, 且在缺少明显的积累弹性应变

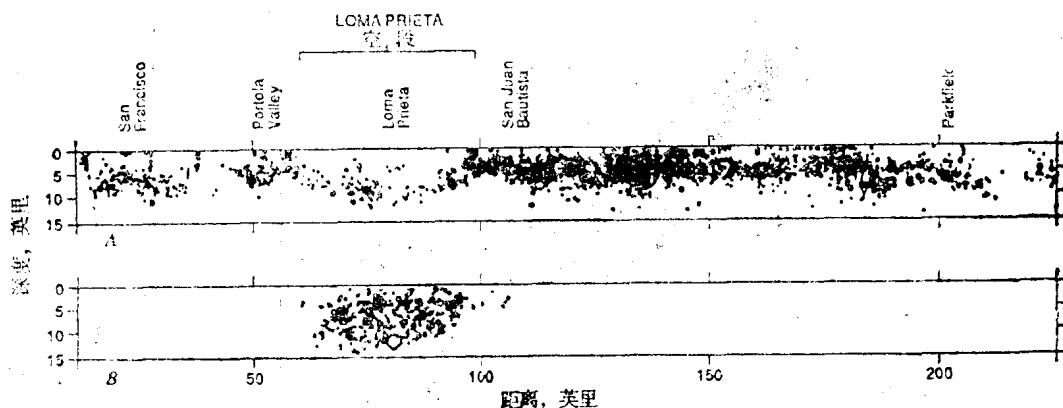


图5 从旧金山的北部到Parkfield的南部沿着San Andreas断层的地震活动的剖面图。A. 在地震前20年间记下的地震活动背景。San Juan Bautista南部的密集活动区是San Andreas断层的蠕动段。San Juan Bautista北部的San Andreas断层从1906年以来一直未发生地震。在Loma Prieta段上发生的如此少的地震活动已有效地划出了这个在过去20年中实际上未发生过地震的U形区(Loma Prieta 间隔区)。B. 余震和主震(大圆圈)几乎完全填满了前图中平静的Loma Prieta空区

的情况下产生大量的小地震。对比之下,在Watsonville以北的断层从1906年以来一直保持相对平静或无震状态。最近20年,那里发生了那么小的地震活动,这就约在Watsonville和Los Gatos之间划出了一个无震间隔区(空区),该间隔区已被这次Loma Prieta地震的余震填补回去了。Loma Prieta部分被认为是一个过渡区,这类似于始于它南面约124英里(200公里)的Parkfield段(图5)。这些过渡区位于蠕动段的外侧,且比它们北面 and 南面 有关的相邻段(加利福尼亚较大的地震发生在那里)经受了更频繁但较小的地震。

余震

用余震的三维分布来划定在主震期间和主震过后破裂的断层界线(图6)。这些余震是由于主震时San Andreas断层滑移之后的应力再分配而引起的。主震震源位于余震分布的底部中心(图6, A—A' 截面)。大部分余震限制在一个在主震震源上方、倾向南西倾角为 70° 的平面内(图6, B—B' 截面)。这个平面就是主震平面,它对地表面的投影正好落在San Andreas和Sargent断层的迹线之间。但是,在深2到4英里(3.2到6.4公里)间的密集震群标志了推测的主震破裂的上部界限。在这破裂点之上,复杂的余震型式大概表示了包括San Andreas和

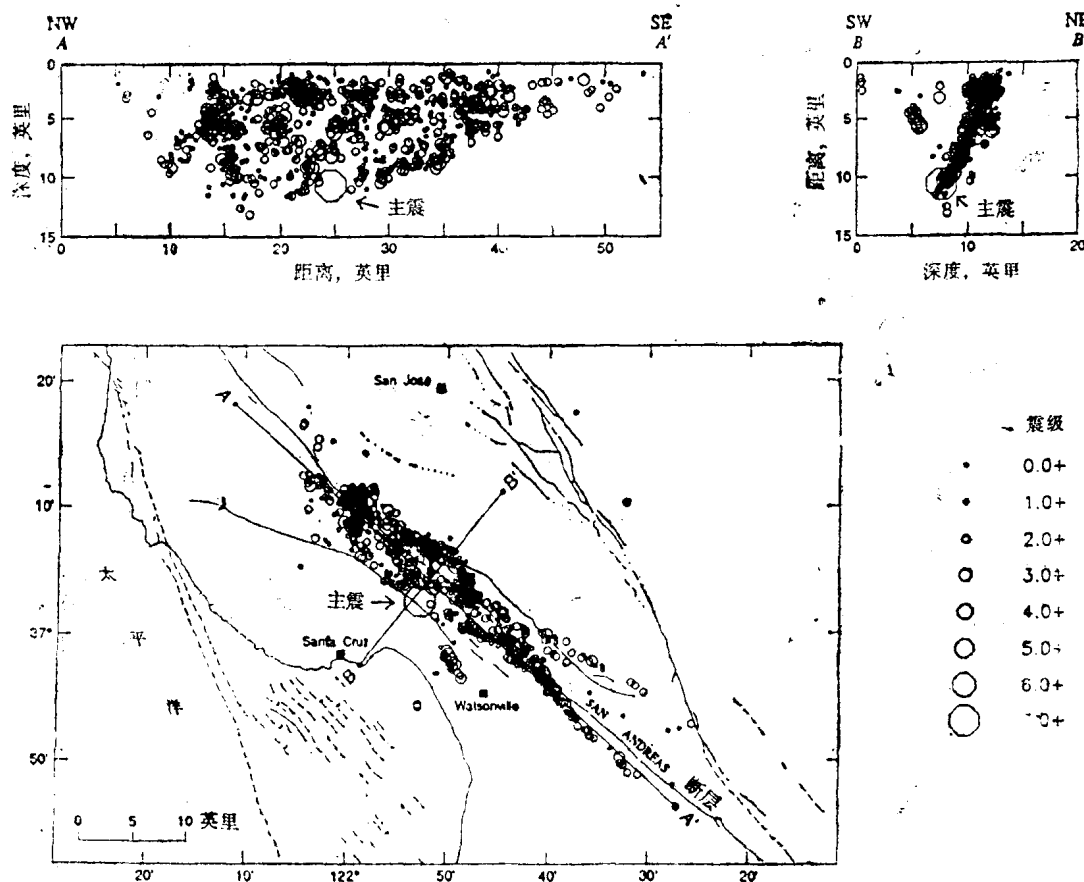


图6 与San Andreas断层有关的Loma Prieta地震的余震的空间分布。沿着断层,或者说沿着纵向的截面A—A', 和沿着断层的正交面,或者说沿着横向的截面B—B', 显示了在竖向平面内余震沿深度的分布。画短划线处是断层近似位置;画点线处是推测的断层位置,加问号处是不确定的断层位置

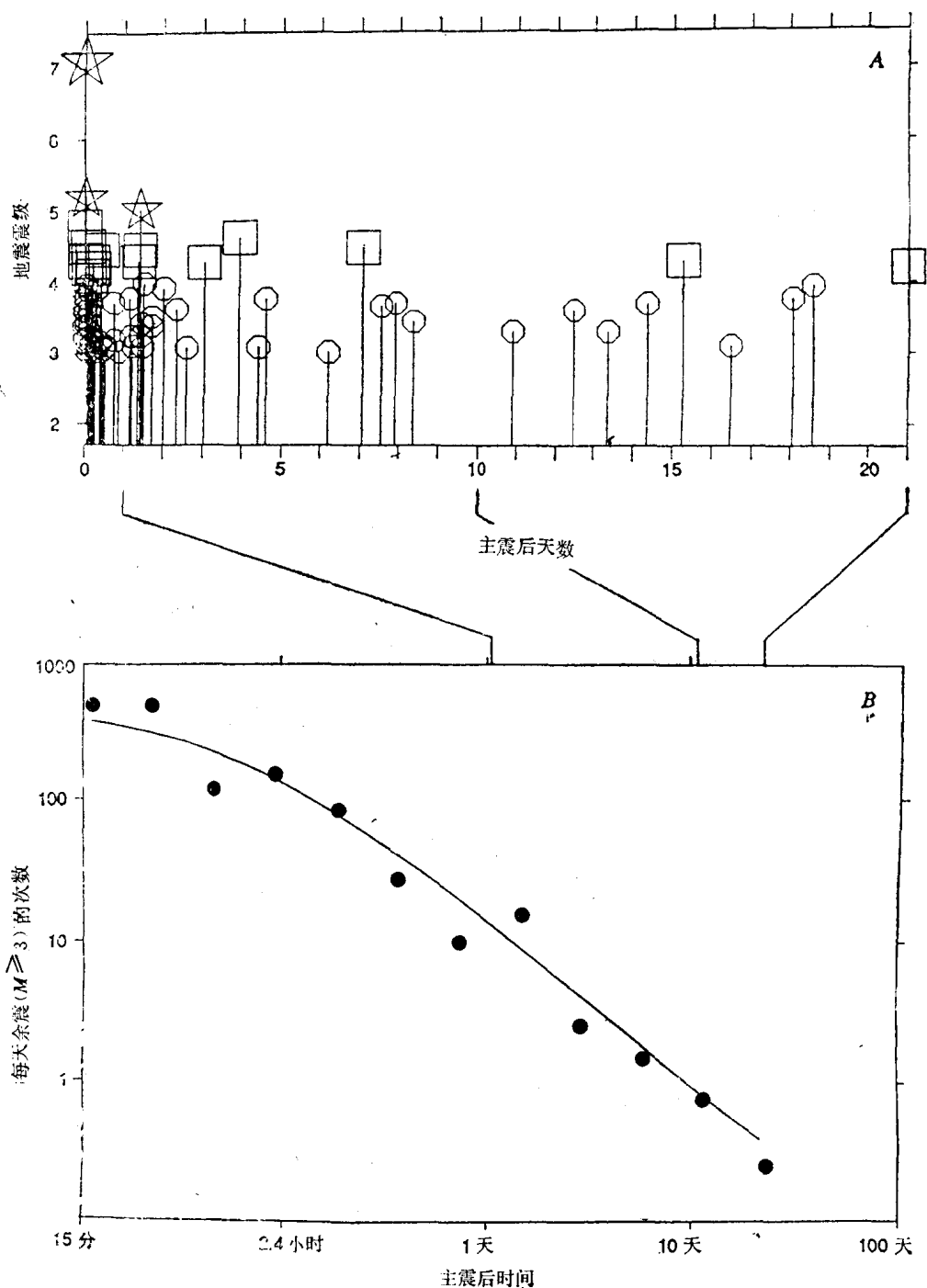


图7 Loma Prieta地震中, 震级(M)不小于3的余震随时间的分布图。A. 在震后三个星期内, 发生不小于3级($M \geq 3$)的余震用圆圈表示, $M \geq 4$ 的用方框表示, $M \geq 5$ 的用星号表示。在序列的第一星期内余震活动度迅速衰减。B. 把 $M \geq 3$ 的余震活动度作为时间的函数, 时间用对数坐标表示。画的圆点表示按余震序列观测到的活动率, 实线是期望的余震活动率的理论曲线。地震序列与期望的时间特性高度吻合

Sargent断层的浅度竖向段落在内的多重分支断层的运动。因此,根据较深余震的几何形状,初始破裂是发生在San Andreas断层的倾斜隐伏部分。

在余震主要区域的西南面,一个明显近乎平行的地震群被一个5.0级的余震激发起来了,这个余震是在主震33小时后发生的。在地震序列中,接着第二个最大余震后的这个震群形成了一个第二期余震序列,这第二余震序列与上部(太平洋板块)断块中一段孤立的断层破裂事件有关。这个余震群的位置指出了Zagante断层(见图1)的运动可能性;但是,沿着这个断层的地表迹线还没有资料证明有任何位移。

随着主震过后的时间推移,余震活动度快速地下降,这是加利福尼亚地震序列的一个典型模式(图7)。共有51次3级和3级以上的余震发生在主震后的当天,接着第二天又发生了16次。到21天后,共发生了87次不小于3级的余震。应用一个很好地建立的余震衰减规律,根据所观测得的型式推断,在震中地区至少两年内将持续感觉到有不小于3级的余震。

地 表 变 形

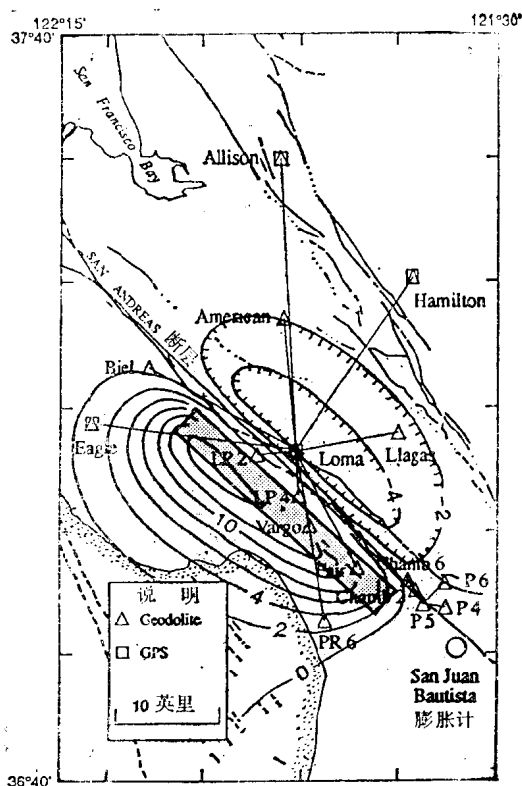


图8 Loma Prieta地震后所观测的测地仪线和全球定位系统(GPS)矢量。深达4到11英里的断裂面在地表的投影用阴影矩形表示。等高线表示推测的,由于断层面的倾斜滑动而产生的地表上升值(实线)和沉陷值(齿线),两等高线间的上升或沉陷值之差约2英寸(5厘米)。最大的上升和沉陷分别为1.5和0.5英尺。San Juan Bautista膨胀计的位置用圆圈表示。断层(由Jennings得,1975年)在近似位置上画虚线,在推测的位置上画点线

Loma Prieta地震期间, San Andreas断层的运动改变了地球表面的形状。利用长期标志地点(测地站)所发生的、与地震有关的各个位置变化,可推测断层滑移的量值和分布。

在一个广阔且频繁测量的测网内,沿1906年破裂的西南端发生了Loma Prieta地震。自从70年代初,美国地质调查局通过重复测量测网间的距离,来监测靠近Loma Prieta区域的地壳变形。根据Sarage和Prescott拟定的程序(1973年),应用一个测地仪(一种高精度的电子光学距离测量仪器),测量其长度范围在3到28英里(5到45公里),其误差可不大大于0.4英寸(1.0厘米)。网络勘察每隔一到五年重复一次。从1980年开始,每月测量从Loma Prieta到位于Eagle岩、Allison山和Hamilton山的测地站(图8)之间的距离。1985年,绕地球运转的一个测地卫星系统——即所谓全球定位系统(GPS)获得的这些相同测点间相对位置矢量的每月观测结果补充了测地仪的观测结果(Prescott等人,1989年)。从10月17日的Loma Prieta地震以来,这个测网中的大部分已经或正在重新勘测。

根据事件发生后立即勘测11个测地仪距离和4个全球定位系统矢量的变化的初步分析,在走向北48°西和向西南俯角为70°的断层面上,我们推测出这个断错约6英尺(1.8米)的右旋走向滑移和4英尺(1.2米)的逆冲滑移(图4)。这个吻合最好的断裂表面沿着走向延伸了约25英里(40公里),深度约4到11英里(6到18公里)。这些数据给出了一个宽阔的地表隆起范围,在西南断块上最大隆起值约1.5英尺(0.46米),还给出了一个比较有限的沉陷区域,在东北断块上最大沉陷值达-0.5英尺(0.15米),现用等高线粗略地把它们绘制在图8中。被掩盖着的断裂表面与缺少地震有关的地表位移是一致的。断层面上的滑移具有一个可观的逆滑分量,这与地震学资料的推测是基本相同的。断层破裂上逆滑位移值与测地仪和GPS数据不太一致,这些数据对水平变形最为敏感。竖向变形的一个较好的估计可以从Loma Prieta地区124英里(200公里)长水准线路的重新勘测中获得。多数原始高程勘测(其中有几个横贯断层破裂处附近的San Cruz山脉)是40年代和50年代做的,并且除了沿海岸和Santa Clara山谷的几段以外,别处都没有重测过。

前兆变形

尽管确定应变变化的几个应变系统在Loma Prieta地震时及其前后,一直在持续运行。但没有观测到任何预兆的信号。

断层作用的地表显示

San Andreas断层带

地震后的24小时内,美国地质调查局人员和其他人员都确认在San Andreas断层的25英里(40公里)长的深层断裂段上面没有产生右旋的地表断层作用。附近的Sargeut和Zayante断层也缺少地质构造破裂的明显证据。根据San Andreas断层上历史地震的情况和在世界范围内其他走滑断层上震级相当的地壳地震的情况,我们已经预料会有3到6英尺(0.9米到1.8米)右旋位移的贯穿地表断层作用(Bonilla等人,1984年)。

在余震带,沿San Andreas断层测绘的迹线上,只观测到带有小右旋错位的局部裂缝和裂缝群。最大的裂缝在Madonna山公路附近,在那里探测到了近0.6英里(1.0公里)的右旋成阶梯形的裂缝。在主震后的16小时内,沿San Andreas断层在Madonna山公路测量到的右旋错位约为3/4英寸(1.9厘米)。从这里向西北延伸的裂缝,在一个3到30英尺(0.9到9米)宽的区域内始终保持向左步进的型式。地震后17天内所作的重复测量表明, Madonna山公路在穿过San Andreas断层处约有1/20英寸(1/8厘米)的微小附加右旋移动。

地面张裂缝区域

看来,发生在San Andreas断层相对上升的西南侧,即在17号高速公路的南面约5英里(8公里)长和3英里(5公里)宽的区域内出现的地面裂缝群是与区域性变形有关而与局部塌陷无关的。大多数张裂缝的一个显著特点是,裂缝两边的错位通常是张开和左旋或右旋水平滑移的组合。

在Summit公路地区,正好在断层主迹线的西南侧、震中的西北面约7 1/2英里(12公里)处,出现了一个张开和左旋的裂缝带。这些带中的裂缝分布在5英里(8公里)长和1.5英里(2.5公里)宽的区域内。这个区域在17号高速公路和老San Jose公路之间,位于被Summit公路横

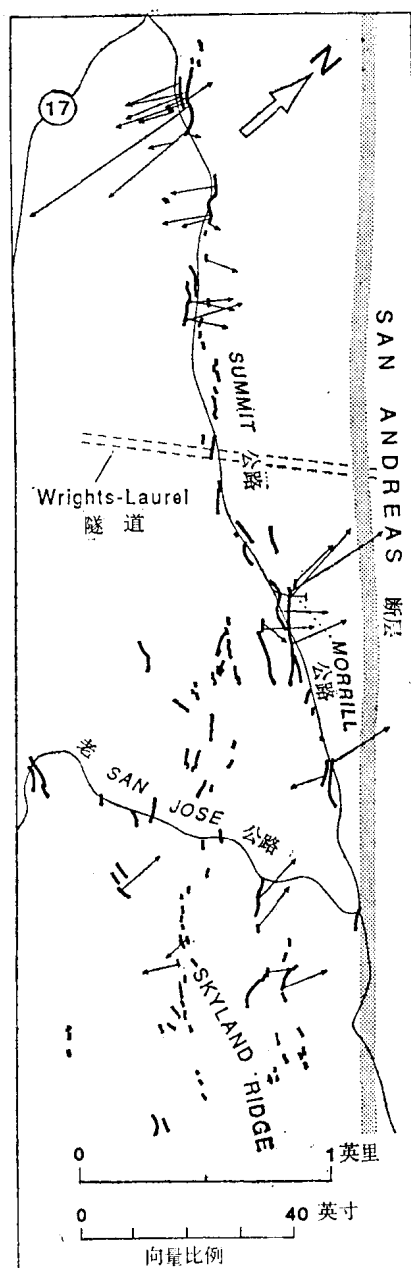


图9 表示Santa Cruz山脉 Summit 公路附近显著的地表裂缝(粗线)和净位移矢量(箭头)地带。与局部的地面失效或滑坡有明显关系的张开裂缝未予表示。只有大于5英寸(13厘米)且靠近 Summit 公路处的矢量才予表示。宽的灰带(指图中由密细点表示的 San Andreas 断裂带——译注)是 San Andreas 断层主迹线的近似位置。这正如1906年Wrights—Laurel隧道的错位和沿着及超过图中的西北和东南边界的地形所示

1906年地震后，沿着断层这一范围针对错位做了最可靠的测量，在隧道中这些左滑裂缝的北

穿的山脊顶部和往南下一个山脊的部分地区(图9)。这些裂缝由于具有沿走向的连续性、位移相对、和(或)长度大[达2000英尺(600米)]的特点，可与遍及强烈地震动区域的大量小裂缝区分开。这个强烈地面震动是与天然地面和路面的局部塌陷有关。这些裂缝朝西北方向，从单一的大裂缝变成阶梯形、交接汇合、或不连续的裂缝群(图10, 11)。这些裂缝两边的位移主要是张性的，通常带有约2.5英尺(75厘米)的左滑分量，且局部有2英尺(60厘米)的下滑分量。通常认为应沿重力方向下滑，但实际与此相反，某些裂缝的下坡侧始终是向上的。裂缝两对边的分离向量(滑移矢量)始终是与Summit公路总走向的法线方向大体一致的(图12)。横跨这些裂缝的重复测量已得出在地震以后的一个月没有发生任何震后位移。

区域中一些特殊的裂缝一般是随着原有的地形，并沿着斜坡断口和线状山脊发生；某些裂缝则是沿洼地线状边界发生。Summit公路的山脊区域现有的地形就是由于这些断裂带重复相似的运动形成的。一些断裂带紧紧地沿着由Sarna-Wojcicki等人(1975年)确定的线状地形的走向，且被他们解释为与这一段 San Andreas 断层有关的一个复杂断层型式的组成部分。沿着断层的这一部分，1906年的地表断裂和与其有关的地面破坏是没有多少资料可用来证明的(Lawson等人，1908年)。但是，1989年Summit公路裂缝中的两条与在1906年地震随后的场地调查期间绘制的左旋错位完全一致。两条裂缝中较大的一条所显示的左滑在1906年约为4英尺(1.22米)，但在Loma Prieta地震中约为1.2英尺(0.37米)(图13)。1989年的裂缝在现已废弃和关闭了的Wrights-Laurel火车隧道(它在山脊顶峰的700英尺——即214米以下通过)中心轴的西南边横穿过Morrill公路。