

7770

56.2537

洛马普里埃塔地震考察

美国地震工程研究会

中国石油化工总公司抗震办公室 译



地震出版社



洛马普里埃塔地震考察

美国地震工程研究会

中国石油化工总公司抗震办公室 译

地震出版社

1991

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

本书详细阐述了 1989 年 10 月 17 日美国加州洛马普里埃塔地震震害、经济损失及人员伤亡情况。这次地震在地质学、地面运动、土工、房屋、桥梁结构、工业设施、生命线系统、建筑、机械与电气非结构、城市规划、地震的社会经济影响、以及地震的应急反应和恢复重建等方面都提供了极为丰富的资料和经验。对我国抗震防灾事业有一定的参考价值。

可供从事地震、抗震、防震、教学和管理工作人员参阅。

洛马普里埃塔地震考察

美国地震工程研究会

中国石油化工总公司抗震办公室 译

地 震 出 版 社 出 版

北京民安学院南路 11 号

中国科技情报研究所印刷厂印刷

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 23.5 印张 580 千字

1991 年 12 月第一版 1991 年 12 月第一次印刷

印数 0001--2500

ISBN 7-5208-0556-7 / P.370

(945)

定价: 13.00 元

前 言

1989年10月17日,美国加州洛马普里埃塔(Loma Prieta)地震使8000平方公里地域受到破坏,损失超过70亿美元。在死亡的62人中,有42人是由于离震中90公里处的赛普里斯高架道路毁坏所造成。这次地震在地学,地面运动,土工,房屋,桥梁结构,工业设施,生命线系统,建筑、机械与电气非结构,城市规划,地震的社会经济影响,以及地震的应急反应和恢复重建等方面都提供了极为丰富的资料和经验。为使国人对这次地震的经验教训有更多的了解,中国石油化工总公司抗震办公室韩精忠同志会同中国建筑技术发展研究中心情报所薛吟和刘丽文等同志,将美国地震工程研究会(Earthquake Engineering Research Institute)专业杂志Earthquake Spectra 1990年5月号所载《洛马普里埃塔地震考察报告》翻译编成此书,供从事抗震科研、教学和管理工作人员参阅。

这个考察报告对洛马普里埃塔地震作了比较全面的分析和总结,所总结的主要经验可列举如下:

1. 土壤条件对地面运动、震害严重程度和震害分布范围影响很大。这次地震取得了迄今为止有关地震地面运动的最为完整的仪器记录。对所得记录的分析表明:在震中区,地面运动最大加速度与地表地质条件无关;随着震中距离的增大,硬土层上的地面加速度峰值按通常规律衰减;而在软土层上,地面加速度峰值在一些情况下比硬土层上大三倍。这再次证实了1985年墨西哥地震和1988年亚美尼亚地震考察所得到的结论:地面运动加速度峰值、震害严重程度和震害的分布范围与土壤条件关系很大。建筑物破坏多数发生在厚粘土场地上。

2. 建筑法规保障了建筑主体结构的地震安全,但建筑的非结构震害仍未能幸免。这次地震表明:规范颁布以前建造的房屋,尤其是无筋砖石房屋和底层柔性建筑,破坏最为严重;按建筑规范设计的房屋和按1933年土地利用法设计的学校建筑损坏轻微;非结构构件由于建筑规范尚无严格规定,遭受破坏者甚多。

3. 软土场地和连接薄弱是高架公路倒毁的基本原因。赛普里斯高架道路和旧金山到奥克兰海湾大桥支承塔架上的连接跨倒塌就是由于位于软土层,钢筋混凝土非延性连接和螺栓联接薄弱等因素所造成。80多座桥梁的破坏,说明土壤条件影响和连接的重要性。

4. 采取抗震措施的文物破坏轻微。对海湾区8个博物馆内的50多万件文物的调查表明,由于最近几年采取了预防措施,只有大约150件文物受到损坏。

5. 非结构和设备抗震问题需给予更多关注。这次地震后,绝大多数建筑物的结构体系表现良好,但由于高柔结构系统在中、强震下水平向相对侧移较大,致使隔墙、围护墙、玻璃、管道系统、电梯等非结构和一些设备受到破坏,不仅造成重大经济损失,而且有些建筑物因而丧失功能。对这方面问题应采取有效措施解决。

6. 应急准备计划是减轻地震灾害的有效措施。这次地震在震前建立了应急组织,制订了细致的应急方案,进行了训练和演习,因而震后反应迅速,救灾和恢复工作进展十分顺利。例如,对遭到破坏的建筑物和生命线工程及时修复,震后火灾得以控制,食品、物

资和医疗救护提供及时等等。

本书的出版，希望能对我国抗震防灾事业有所推动和借鉴。诚恳广大抗震工作者提出指正意见。

叶耀先 曹炳炎

1991年7月20日

目 录

一、引言与综述

地学	(2)
地面运动	(2)
土工问题	(2)
建筑物	(3)
桥梁构筑物	(3)
工业设施	(3)
生命线	(3)
建筑物、建筑构件及建筑内部设备	(4)
城区规划	(4)
社会经济影响和应急措施	(5)
结论	(5)

二、地 学

概述	(6)
地震学问题	(6)
主震	(6)
过去的地震活动	(7)
余震	(8)
地面破裂状况	(9)
萨米特公路—斯凯兰山脊地区的地表断裂	(11)
沿圣克鲁斯山脉东北山脚的地形变	(16)

三、地 面 运 动

概述	(19)
强震记录	(19)
美国地质调查局的强震记录	(19)
加州强震观测实施计划(CSMIP)的强震记录	(25)
峰值加速度的初步分析	(43)
地震烈度的分布与强地面运动	(50)
修正的麦卡利地震烈度表及其评价	(50)
强地面运动	(57)

地震烈度和强地面运动的有关结论.....	(60)
弱地面运动.....	(62)
场地反应研究.....	(63)
在震中区的仪器布置.....	(66)
有关弱地面运动的结论.....	(66)

四、土 工 问 题

地质和土质条件.....	(69)
砂土液化.....	(71)
旧金山市.....	(71)
珍宝岛.....	(81)
旧金山海湾东岸.....	(82)
圣克鲁斯和蒙特雷湾地区.....	(87)
局部场地对强地面运动和损坏的影响.....	(91)
旧金山海湾地区.....	(91)
滑坡和岩崩.....	(98)
经工程设计和处理的填方	(100)
挡土构筑物	(102)
关于科学研究的建议	(103)

五、建 筑 物

无筋砌体建筑物	(107)
砖砌结构的出平面破坏	(107)
砖结构的平面内破坏	(108)
隔墙的挠曲 / 破坏	(109)
撞击破坏	(109)
旧金山地区无筋砌体建筑物的基本数据	(110)
传统的未经设计的建筑物	(113)
经过设计的建筑物	(113)
一般性能	(113)
急救医院和技术护理设施	(122)
公立学校建筑物	(124)
州政府建筑物	(125)

六、桥 梁 构 筑 物

概述	(128)
----------	-------

赛普里斯高架道路	(129)
排架类型	(129)
地震破坏	(130)
恩巴卡德罗高架路	(132)
中央高架道路	(134)
旧金山—奥克兰海湾大桥	(137)
地震破坏	(138)
斯特鲁弗沼泽桥	(143)
地震破坏	(143)
圣马特奥—海沃德大桥	(143)
980 号州际公路南行会接部	(143)
Mora Drive 上跨路桥	(149)
地震破坏	(149)
5 号路高架桥	(149)
地震破坏	(150)
科拉利托斯克里克桥	(155)
莫科科高架桥	(155)
卡基尼斯桥	(155)
奥克兰上跨路桥	(157)

七、工 业 设 施

食品加工业	(160)
沃森维尔地区的冷藏设施	(160)
吉尔罗伊附近的酿酒厂	(162)
圣克鲁斯的脱水食品包装厂	(166)
轻工制造业	(167)
在 Scotts 的仪器装配厂	(167)
沃森维尔的计算机磁盘驱动器装配厂	(169)
重工业	(171)
莫斯兰汀的氧化镁和耐火砖厂	(173)
发电厂	(174)
莫斯兰汀电厂	(174)
亨特岬和 Potrero 发电厂	(179)
吉尔罗伊能源共生电厂	(181)
炼油厂和贮油总站	(183)
反应器的辅助构筑物	(184)
支承风机的构筑物(I)	(185)
支承风机的构筑物(II)	(187)

管廊架	(188)
管线与管道	(190)
立式容器	(190)
卧式容器	(194)
贮罐	(195)
码头	(197)
电力供应	(197)
归纳和结论	(198)

八、生命 线

综述	(200)
震后交通系统的管理	(201)
交通系统的观察与建议	(202)
旧金山马里纳区的灭火反应	(203)
用于应急供电的引擎发电机的安装与维修	(205)
给水和排水系统	(206)
地理区域	(207)
给水系统	(207)
海湾地区中心区域	(207)
南海湾区域	(211)
蒙特雷海湾区域	(214)
圣克鲁斯区域	(215)
排水系统	(217)
海湾地区中心区域	(217)
南海湾区域	(218)
蒙特雷海湾区域	(220)
圣克鲁斯区域	(220)
结论与建议——给水和排水系统	(221)
交通系统	(224)
公路	(224)
通过圣克鲁斯和圣克拉拉县的州属 17 号公路	(224)
圣克鲁斯县	(225)
圣克拉拉县	(226)
旧金山	(226)
铁路和公共交通	(226)
海湾地区高速交通系统(BART)	(226)
旧金山市内铁路交通系统(MUNI)	(228)
加州铁路线	(228)

有关铁路和公共交通的总结	(229)
机场	(229)
旧金山国际机场	(230)
奥克兰国际机场	(232)
圣何塞国际机场	(233)
阿拉梅达海军航空站	(233)
沃森维尔机场	(234)
对机场的总结和有关建议	(234)
港口	(236)
雷德伍德城港口	(236)
里士满港口	(239)
旧金山港口	(239)
奥克兰港口	(241)
港口方面的总结	(246)
通讯系统	(246)
电话系统	(246)
长途电话网	(246)
地方电话网	(248)
电话总局的 Centrex 系统	(250)
用户小交换机	(250)
蜂窝电话	(251)
911 公共安全通讯系统	(252)
无线通讯系统	(255)
业余无线电应急反应	(256)
关于通讯系统的结论	(257)
对通讯系统的建议	(258)
普通通讯系统	(258)
公共通讯	(258)
关键设施	(258)
业余无线电应急服务	(260)
宣传工具	(260)
广播	(261)
电视	(262)
报纸	(262)
电力系统	(264)
发电设备的地震破坏	(265)
莫斯兰汀发电厂	(265)
亨特岬发电厂	(265)
Potrero 发电厂	(265)

其它发电厂	(266)
输电设备的地震破坏	(266)
莫斯兰汀变电站	(266)
梅特卡夫变电站	(273)
圣马特奥变电站	(277)
蒙特维斯塔变电站	(281)
纽瓦克变电站	(281)
洛斯巴诺斯变电站	(281)
配电设备的地震破坏	(282)
天然气系统	(283)

九、建筑物、建筑物内部陈设及建筑体系

非结构构件及内部设备	(285)
破坏的某些一般型式	(285)
伤亡	(285)
非结构构件的破坏	(286)
对建筑物构件界面的观察	(288)
活动地板	(288)
建筑物隔离缝	(288)
抗震	(288)
外墙板隔离缝	(288)
非结构构件和内部设备的结论	(288)
住宅建筑	(289)
建筑物布局与形状	(289)
文化遗产	(291)
对历史性建筑物的调查	(291)
破坏统计	(293)
对历史性建筑物的结论及建议	(295)
海湾地区博物馆内艺术品破坏情况调查	(295)
收藏品的损坏	(296)
艺术品破坏的具体事例	(299)
博物馆的综合反应	(300)
数据处理设施	(300)
活动地板	(301)
处理设备	(301)
磁带和微型磁带架	(301)
台上设备	(301)
吊顶	(301)

辅助公用设施	(301)
一般意见与调查结果	(301)
问题与建议	(305)
活动地板的合理设计	(305)
数据处理设备锚固还是不锚固	(305)
辅助设备的抗震设计	(306)
通讯	(306)
对研究和调查的建议	(306)
电梯的性能	(306)
破坏	(308)
电梯防震装置	(309)
医院电梯	(311)
斯坦福大学的实例研究	(312)
对电梯的结论和建议	(313)

十、城 区 规 划

概述	(317)
短期经济影响	(318)
交通运输	(320)
住房	(322)
物质规划：土地利用与建筑	(323)
历史建筑物的翻新改造	(324)
应急准备	(325)

十一、社会经济影响及应急反应

综述：事件及其来龙去脉	(328)
伤亡和损失	(328)
本章结构	(329)
顺利解决的问题	(331)
医疗反应	(331)
城市搜寻和营救	(334)
地方应急反应行动：奥克兰和旧金山	(335)
得以证实的教训	(338)
震后火灾	(338)
灾情报道和应急行动中心	(339)
地方应急行动中心	(339)
机构间和政府间的协作	(339)

地方各级组织的行动：奥克兰赛普里斯高架道路构筑物 (340)

加利福尼亚州地区震害信息 (342)

结构损害评估：实例研究 (343)

潜在的教训和新问题 (344)

结束评语 (352)

一、引言与综述

1989年10月17日星期二下午5时04分(太平洋夏令时)在加利福尼亚圣克鲁斯山地表下约18km深处发生了面波震级(M_s)为7.1的地震。震中在圣克鲁斯东北约16km、在圣何塞南面30km。地震造成圣安德烈斯断层40km地段的断裂。南起洛杉矶、北到俄勒冈州边界,东到内华达州都有震感。震害涉及8000km²的范围。强震持续时间不到15s,但却引起70亿美元以上的损失。最重的人员伤亡发生在离震中90多km处,当时880号州际公路1英里长的高架路段,即赛普里斯高架道路的一段倒塌,死亡42人。

这次大地震,实际上论震级又不是特别大,致使死亡62人,伤3757人,毁坏了367家工商企业,使得12000多人无家可归。

靠近震中的较小社区破坏尤为严重。独立框架住宅从其基础上滑坍,旧的商业建筑倒塌,砸死4人,给这些社区的小店主们带来经济灾难。震后数月里震中地区的家庭一直过着没有永久住房和上下水的生活。震后,有10个县被总统宣布为灾区。

运输网络受打击特别严重。除赛普里斯高架道路外,奥克兰海湾大桥因一跨毁坏而关闭修理。震后旧金山另外两条主要公路也立即关闭并在决策者们辩论其修复方案和今后安全期间曾持续关闭了几个月。多处的滑坡致使穿越圣克鲁斯县乡间的17号州属公路一些路段关闭,造成几个星期交通困难。

距震中98km的旧金山市马里纳区的震害使数百名居民临时迁居。为彻底修复生命线系统而不得不将其关闭数月。由于旧金山约有5100套住宅以及阿拉梅达县有3400套住宅受损或被毁坏,城市决策者们面临着住宅需求困难。

虽然震中位于人口稀少地区,可是这次地震之强烈足以在许多居民区和政府管辖区造成损坏。它为都市地区地震,无论是北加利福尼亚、南加利福尼亚或是其它地区,未来会连带出现的问题提供了一次预演。

相对来说,较短持续震动时间(对于7.1 M_s 地震而言)对观测到的震害图象和需要的应急措施的规模方面有重要影响。假如它再持续10—20s损害及种种应急则大大加重。

海湾地区距震中约70km这使得辐射地震波相当大地衰减。向双侧发生的破裂必然缩短了强震持续时间并可能把能量集中在北南方向上。从靠近活动断层地段一端的初始破裂发展的一次更常见的单侧向断错过程可能使得强震持续时间延长1倍。因此,这次地震似乎不应被看作为靠近圣安德烈斯、海沃德或卡拉维斯断层的海湾地区未来发生地震时的典型地面运动。洛马普里埃塔地震期间,海湾大多数地区的结构物仅在持续不到10s内受到中到轻度震动(0.05g以上),因而没有经受剧烈的考验。海湾地区软土和地形的多样化产生了局部放大并是震损形式的关键。

地震后一个月,应国家科学基金会请求,地震工程研究学会(EERI)召集了一个工作班子来为洛马普里埃塔地震拟定研究工作计划。一个由研究人员和工程人员组成的小组

与勘察调查队协调员们一起设法确定特别值得注意地区，在那里需要更多的研究或实施变更习惯作法以减少未来的损失。他们的建议包括在附录中。

本调查报告的章节由调查队各专业组写成。要求每组就其调查观测结果提出综述，要特别注意吸取的教训及需要进一步研究或需要努力应用现有知识的地方。

地 学

勘察工作提供了大量地学情报。尽管本次地震的地点和规模未使地学家们惊奇，但断层的错动还是与圣安德烈斯断层多数地段历史上地表断裂以水平错动为主的特征有很大不同。破裂始自断裂带下界附近，向上移动至离地面不到 6km 处，并向西北和西南方向延伸约 20km。破裂的这一双侧延伸发生在约 7—10 秒之内，导致了一次持续时间相对较短的地面震动。虽然未发生地表破裂，但广阔地区的地面开裂还是表明应变分布在广大地域。

地面运动

本次地震得到了迄今为止对一次大地震所记录的一套最大量的完美的仪器测定数据。该地区由美国地质调查局、加利福尼亚强震观测计划以及其它公共和私人业主进行了完善的仪器监测。然而，如果仪器再多些会更有利。比如：场地放大作用的重要性清楚地由表面地面运动测量和整个地区震损图象显示出来。然而未获得重要的井下测量数据，它本来可供分析得出放大作用形式并导致更佳的工程实践。同样，在旧金山严重受损的马里纳区，震前也未在软土中设置强震加速度记录仪。最近的强震仪离损害区有 2—3km，而且是置于坚实的页岩和砂岩上。

离震中最近的强震仪位于不到 10km 远的科拉里托斯，从余震分布情况和记录的水平运动峰值为 0.64g 推断，该强震仪的位置大概离地震断层不到 1km。在 7 级地震附近的现场得到的这一记录为研究紧邻发震断层的衰减提供了重要数据。

建筑物记录为抗震设计数据库作了全面重要补充，这包括从一经受水平方向加速度峰值为 0.25g 的地面运动的无筋砌体结构上首次获得的数据。

洛马普里埃塔地震证实了学者们在墨西哥城（1985 年）和亚美尼亚（1988）地震后确认的土壤条件对于地面运动及所造成震害的严重程度和分布状况的重要性。在震中区内，地面加速度峰值同地表地质似乎无关；随着震中距加大，在硬土地地上的地面加速度峰值如预料的一样衰减；然而，在震中北面的软土地地上，在某些情况下，加速度峰值比附近岩石地观测到的要大 3 倍以上。

土工问题

虽然地面震动是短时的，在遍及 8000km² 范围内还是发生了损害。无论是非结构还是结构性的震害都是巨大的。旧金山城区的奥克兰的强烈震动造成的结构性损害多发生在厚粘土场地上。调查组考察了无数处造成整个海湾地区建筑物和公路毁坏的滑坡的砂土液

化的例子。观察到的最北面的砂涌是在苏伊森湾南岸的马提尼兹，该地距震中 110km。

建筑物

最引人注目的建筑物损坏发生在规范颁布前建成的建筑上，主要是位于圣克鲁斯市区太平洋花园林荫路以及沃森维尔、旧金山和奥克兰市中心的无筋砌体建筑。马里纳区下面几层的木框架建筑由于横向抗力不足性能表现不好，特别是在深层土壤扩大了震动强度的地域。

勘察研究人员发现，经工程设计的建筑物大部分性能良好，尽管其中许多遭到重大的非结构损失。

1933 年土地用法对改进加利福尼亚学校建筑的性能起了作用。然而，这次地震再次显示出在 1933 年至 60 年代中期翻修的那些土地用法颁布前的建筑物更易受损。尽管仅有少数学校遭受重大损失，许多则受到昂贵的和有潜在危险的非结构损坏。

建筑物内的大多数问题通过土地利用的控制（区划）、建筑规范和翻建加固已有了解决方法。

桥梁构筑物

这次地震中最引人注目的结构坍塌发生在几座主要公路桥。最大的损坏发生在软土地上的较旧的构筑物，诸如赛普里斯高架道路及旧金山—奥克兰海湾大桥支撑塔架上方的联接跨。在前一事件中，非延性钢筋混凝土双层高架道路在上下层连接处毁坏。在联接跨事件中在该跨支撑桁架下方两处螺栓栓接处毁坏导致该跨的坍塌。

80 多座桥梁受到震损，损坏程度从塌跨到接头剪切破坏。土壤条件的影响及适用连接的重要性在调查损坏情况时显得很清楚。许多引道填方在桥墩后面沉降；但是多数在震后很快重作了面层因而道路几乎立即修复。

工业设施

总的来说，这次地震中工业设施未遭严重破坏。但调查者们发觉由于广泛的主要是非结构性破坏，致使企业的业务出现了中断。调查了食品加工厂、轻重制造业、发电设施以及炼油厂。本报告详细报导一些专业设施的性能。

生命线

生命线一章的准备工作由地震调查委员会、美国土木工程师协会生命线地震工程技术委员会（TCLEE）进行协调。许多个人参加了上下水系统、动力系统、交通运输网络工程及通讯系统性能情报的收集工作。他们详细的观察及避免以后损失的建议为全美国地震规划提供了经验教训。

建筑物、建筑构件及建筑内部设备

虽然大多数经工程设计的建筑物从结构角度出发令人满意，然而直接费用以及因非结构性和设备损坏造成功能损失而发生的费用引起了关注。因为在中到大地震时，柔性结构承受很大的水平方向偏移，所以抗震分隔、外部围护和玻璃的细部设计需要仔细考虑。勘察队员们注意到在较旧建筑物中的设备和管道系统往往没有阻震装置，在新建筑物中也未适当包括进去。

初步估计遭震害地区已开发产业受损坏不到 1%。然而一些大公司已上报财产损失高达 5000 万美元，主要是设备和非结构构件。

砖石镶面和立面系统的损坏对下面行人造成极大危险。现代围护结构和玻璃立面体系性能良好，但是这也许是因为在海湾地区主要城市的震动程度和时间仅仅大到足以把建筑物带到损坏的临界而已。

当地有许多文化财产受地震影响。一批历史性建筑物受到影响，许多被拆除而未予修复。历史性建筑物的损坏集中在圣克鲁斯、沃森维尔、圣何塞、奥克兰和旧金山的市中心。历史性建筑在全部受损或毁坏的建筑物中占很小的百分比，但是它们常常群集在老旧城区，它们的损失可能对社区造成巨大观瞻和经济上的影响。关于海湾地区博物馆收藏品的损坏性质及程度的情况已收集。被调查的 8 座博物馆共有总数达 50 多万件收藏品，但不到 150 件受损，其原因是几年来采取了预防措施以保护它们。这一统计清楚表明了预防工程起了作用。

从设置在大海湾地区的 32 个数据处理设施获得了信息。停机的主要原因是没有电力。近几年建造的抬高活动楼板性能良好。

1971 年圣费尔南多地震时电梯广泛损坏。致使 1975 年加利福尼亚电梯规范中采用了抗震条款。这次地震以及 1987 年爱梯尔海峡 (Ehittier Narrows) 地震使大量加固后的电梯承受了可能造成损坏的运动。这些电梯中许多平衡物仍然脱轨而出。许多滑轨托架和系杆过于柔性。侥幸的是，要求的抗震开关常常阻止了电梯使用直至进行损坏检查，但是这同样给维修人员加上了沉重的工作负担。

城区规划

这次地震提供了机会来检验现有减轻灾害规划和抗灾准备及应急计划的有效性。虽然洛马普里埃塔强地面运动持续时间短，且只是中等强度地震，但所造成的损失却可列入美国历史上严重灾害之中。这次地震使人们注意到由在现行规范之前建造的大量建筑物及构筑物形成的经济与生命安全方面的危险。

震后的事态对减轻灾害后果和加速震后恢复的地方和区域的既定计划及政策的有效性来说提供了衡量尺度。巨大的经济破坏是在短期内引起的；而对商业及文化的长期后果正在进行研究。城市规划者可能希望在将来集中鉴别和衡量人们及社区对小商业损失、交通系统阻断以及住房损失的适应方式。由于其关系到低收入及老年人口，这些问题特别重要。因为很多短期费用被个人及小商业吸收，衡量起来并不容易。

灾害影响了许多企业。圣克鲁斯县商业和住宅的损失估计为 10 亿美元。虽然海湾地