

汶川大地震灾害与灾区重建的岩土工程问题

谢和平, 邓建辉, 台佳佳, 何昌荣, 魏进兵, 陈继平, 李小余
(四川大学水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 2008 年 5 月 12 日 14:28 四川省西部龙门山山区发生 $M_s = 8.0$ 级强震。地震是由龙门山中央断裂逆冲兼走滑产生的, 沿 300 km 长的断裂带造成大量的山体崩塌、滑坡, 城镇与村庄房屋坍塌不计其数, 厂矿与交通设施严重毁损, 并造成大量的人员伤亡。截至 7 月 11 日 12 时, 地震已造成 69 197 人遇难、18 341 人失踪、374 176 人受伤。基于震后灾区的第一手调查资料, 在简介龙门山地质条件与断裂构造格局的基础上, 从工程角度对地震产生的灾害类型和分布, 及其与断裂构造的关系等进行初步的总结和归纳, 提出灾区重建工作中面临的主要岩土工程问题, 以期灾后重建和相关科研工作提供参考。

关键词: 岩土力学; 汶川大地震; 灾害类型与分布; 重建; 岩土工程

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)09-1781-11

WENCHUAN LARGE EARTHQUAKE AND POST-EARTHQUAKE RECONSTRUCTION-RELATED GEOTECHNICAL PROBLEMS

XIE Heping, DENG Jianhui, TAI Jiajia, HE Changrong, WEI Jinbing, CHEN Jiping, LI Xiaoyu
(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: At 14:28, May 12th, 2008, a large earthquake measured $M_s = 8.0$ hit Longmenshan mountainous area, west Sichuan Province, China. The earthquake was induced by the thrust and strike-slip of Longmenshan central fault and its 300 km-long fault rupture resulted in a large number of rock avalanches and landslides, destroyed numerous villages and towns, leading to many human fatalities. By 12:00, July 11th, the earthquake has caused 69 197 peoples to die, 18 341 peoples to be missing, and 374 176 peoples to be injured. Based on field reconnaissance, the geological conditions and fault patterns in Longmenshan mountain area are introduced briefly; the types and distributions of disasters and their relations with fault patterns are summarized from the engineering viewpoint. And then the major geotechnical problems to be faced in post-quake reconstruction are put forward, so as to provide references to reconstruction and further researches.

Key words: rock and soil mechanics; Wenchuan large earthquake; type and distribution of disaster; reconstruction; geotechnical engineering

1 引言

2008 年 5 月 12 日 14:28, 四川省汶川县境内发生强震。根据中国地震信息网公布的权威数据^[1],

震中位于北纬 31.0° , 东经 103.4° , 震级 $M_s = 8.0$ 级, 震源深度 14 km。除主震外, 截至 7 月 11 日 12 时, 主震区已累计监测到余震 16 993 次^[2], 其中 4.0 级及以上的余震 229 次。

地震涉及四川省 18 个市(州)和甘肃、陕西、重

收稿日期: 2008-07-05; **修回日期:** 2008-08-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50639100); 国家自然科学基金特别项目(50849004); 国家自然科学基金面上项目(50579042); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412702, 2002CB412705)

作者简介: 谢和平(1956-), 男, 博士, 1978 年毕业于中国矿业大学工程力学专业, 现任中国工程院院士、教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: xiehp@scu.edu.cn

庆部分地区,包括 237 个县(市),其中极重灾区 10 个县(市),重灾区 41 个县(市、区),一般灾区为 186 个县(市、区)^[3],受灾面积超过 $1 \times 10^5 \text{ km}^2$,受灾人口 2 792 万人。地震影响波及除新疆、黑龙江和吉林 3 省区之外的全国绝大部分地区,乃至境外,是新中国建立以来我国大陆发生的破坏性最为严重的地震。

地震及其次生地质灾害不仅造成大量的人员伤亡,而且严重破坏灾区的生产和生活设施,使灾后重建工作面临巨大困难。截至 7 月 11 日 12 时,地震已造成 69 197 人遇难,374 176 人受伤,18 341 人失踪^[2]。据不完全统计,地震严重损坏房屋 593.25 万间、倒塌房屋 546.19 万间,四川省 14 207 家工业企业生产设施受损,德阳、广元、绵阳等重灾区大部分工业设施几乎完全被毁。四川省 7 条高速公路、5 条国道和 10 条省道公路的部分路段路基、桥梁、隧道等结构物严重受损,超过 $1.7 \times 10^4 \text{ km}$ 长的农村公路损毁,累计受损里程 53 295 km。

自 5 月中旬开始,作者开始对严重受灾的县市进行现场调查,收集地震引起的工程设施破坏现象。本文将结合龙门山的地质构造特点,初步分析工程结构破坏的原因,以期为灾后重建和相关科研工作提供参考。

2 龙门山地质条件简介

地震的震中位于四川盆地西部的龙门山冲断裂带。该断裂带处在扬子地台与松潘—甘孜地槽褶皱系的分界线上,并以典型推覆构造和广布的“飞来峰”构造而闻名。龙门山断裂带南起泸定、天全,向东北经灌县、茂汶、北川、广元北后进入陕西勉县一带,长约 500 km,宽 30~40 km。该断裂带是由龙门山后山断裂(由耿达—陇东断裂和茂汶—汶川断裂组成)、中央断裂(由盐井—五龙断裂、北川—映秀断裂和北川—林庵寺断裂组成)、前山断裂(由大川—双石断裂、灌县—安县断裂和江油断裂组成)和山前隐伏断裂等 4 条主干断裂及其控制的逆冲构造岩片(推覆体)组成的具有前展式发育特点的推覆构造带^[4],见图 1。主干断裂总体走向为 $30^\circ \sim 50^\circ$,倾向为 NW,倾角为 $50^\circ \sim 70^\circ$,破碎带宽从不足 10 m 到 100 多米。

龙门山断裂带形成于中生代,燕山期局部有重

新复活的现象。新生代以来,印度板块与欧亚板块强烈碰撞而产生的强大推挤力,使其又发生大规模的逆掩推覆构造变形,龙门山继续抬升,山前强烈凹陷,并形成多级夷平面。晚第四纪(晚更新世~全新世),龙门山断裂带继续活动,活动性自北而南加强^[5]。

龙门山断裂带大致以岷山隆起东界的近 SN 向虎牙断裂和北川—安县一线的播东断裂为界,分为西南段和东北段,其晚第四纪活动差异显著。西南段晚更新世以来活动强烈,中小地震频繁;东北段第四纪活动微弱,仅偶有小震分布^[6]。在岩性分布方面,西南段和东北段的差异也较显著。西南段后山以“彭灌杂岩”为代表的火山岩为主,前山以三叠系中统须家河组碎屑岩为主,上覆泥盆、石炭和二叠系灰岩;东北段后山带出露一套震旦系、寒武系、志留系茂县群的含锰含磷硅质岩、碳酸盐岩、砂板岩及千枚岩。前山带主要为一套未变质的古生界和中生界泥页岩、砂岩、灰岩和白云岩。

3 地震灾害及其分布特点

汶川大地震发生在四川龙门山逆冲推覆构造带之映秀—北川断裂之上。地震破裂面南段以逆冲为主兼具右旋走滑分量,北段以右旋走滑为主兼具逆冲分量,该破裂面从震中汶川县开始破裂,并且破裂以 3.1 km/s 的平均速度向 NE49° 方向传播,破裂长度约 300 km,破裂过程总持续时间近 120 s,地震的主要能量于前 80 s 内释放,最大错动量达 9 m^[7]。虽然主震发生在龙门山主中央断裂,但是后山断裂和前山断裂均出现了震级较高的余震,部分余震甚至出现在山前隐伏断裂部位(见图 1)。因此,除主断裂带外,龙门山山前平原地带的工程结构也遭受严重破坏。

3.1 地表破裂带、建筑结构与基础

中央断裂之北川—映秀断裂,由于逆冲作用,NW 侧的上盘在映秀镇相对抬升约 2 m,在 G213 国道上分别留下陡坎和鼓包,跨越断层的建筑物或严重毁损或坍塌(见图 2)。在绵竹市汉旺镇的绵远河右岸,前山断裂之灌县—安县断裂也以逆冲破裂为主,垂直错动约 1.5 m(见图 3)。

从作者的调查情况来看,地表破裂带出现在中央断裂带和前山断裂带的映秀镇和灌县以北段,最

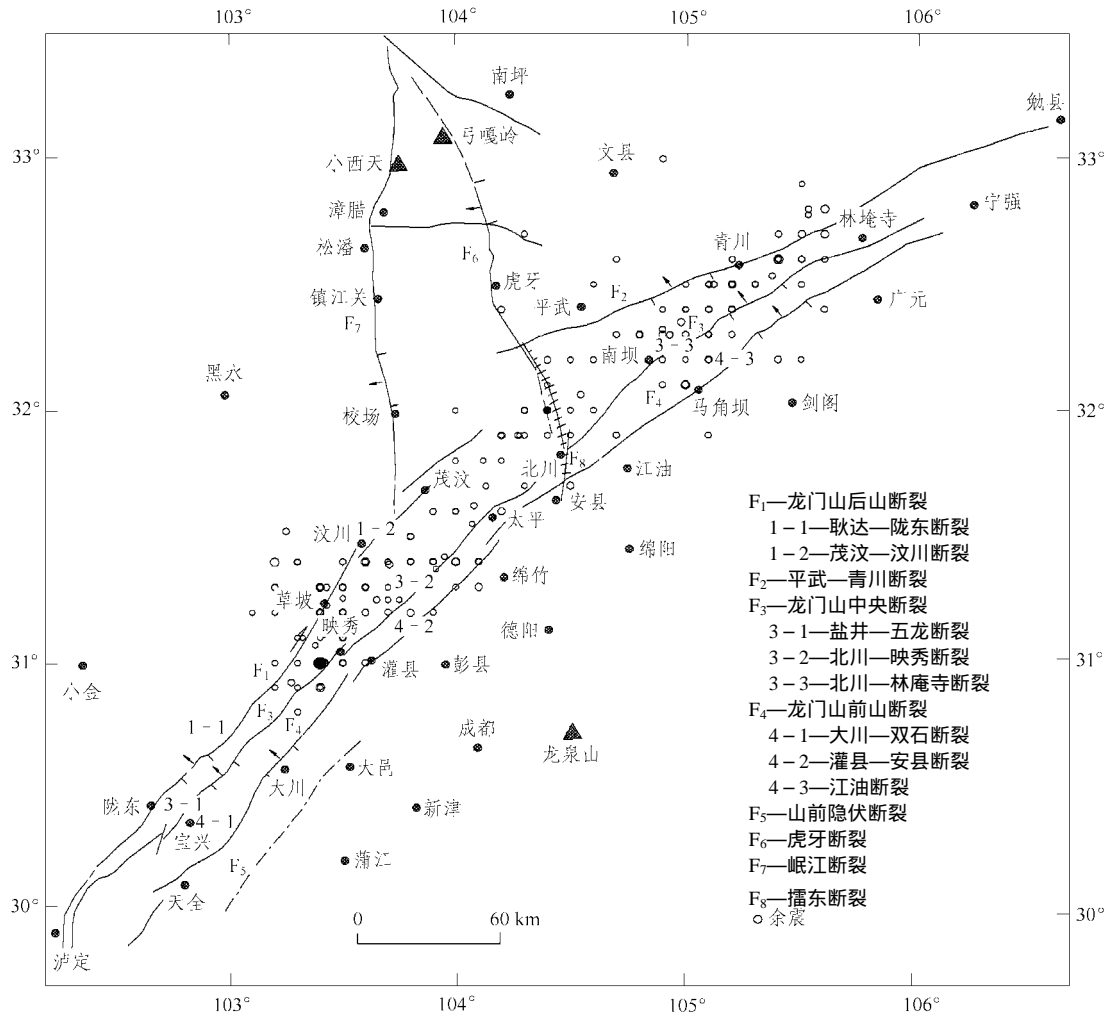
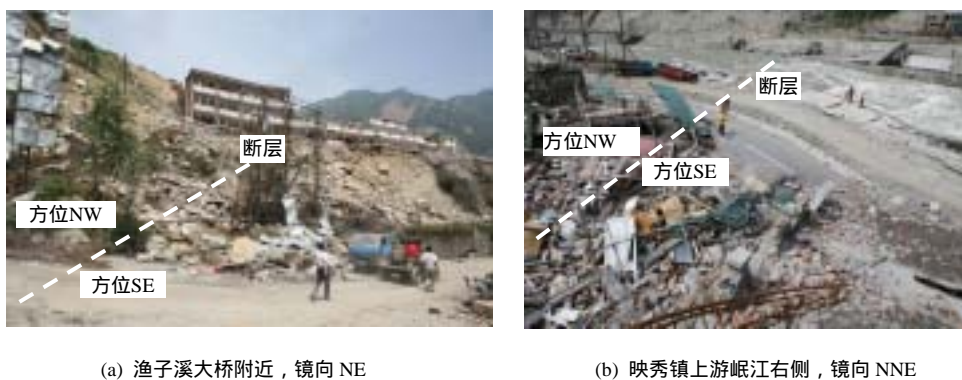


图 1 龙门山断裂构造与余震分布图(修改自邓起东等^[5])

Fig.1 Longmenshan fault belt and distribution of aftershocks(revised from DENG Qidong et al^[5])



(a) 渔子溪大桥附近, 镜向 NE

(b) 映秀镇上游岷江右侧, 镜向 NNE

图 2 北川—映秀断裂在映秀镇产生的地表破裂带

Fig.2 Rupture zone induced by Beichuan—Yingxiu Fault on ground surface of Yingxiu Town

远延伸至青川县关庄镇。破裂带的变形总体以逆冲为主, 右旋错动为辅; NW 向地层相对抬升, SE 向地层相对下降。但是实际的地表破裂带形态受区域

地质条件限制, 呈现出多样性特点。例如, 在虹口乡高原村, SE 向地层相对上升约 3.2 m(见图 4(a)), 主要的地表破裂带也没有出现在主断裂带上。最大



图 3 灌县—安县断裂在汉旺镇绵远河右岸公路产生的地表破裂带

Fig.3 Rupture zone induced by Guanxian—Anxian Fault on the right bank road of Mianyuan River, Hanwang Town



(a) 高原村



(b) 深溪沟村



(c) 八角庙村

图 4 北川—映秀断裂在虹口乡产生的地表破裂带

Fig.4 Rupture zone induced by Beichuan—Yingxiu Fault on ground surface of Hongkou Town

的水平与垂直错动带也出现在虹口乡，分别达 4.8 m (深溪沟村)(图 4(b))和 5.1 m(八角庙村)(图 4(c))。目前发现的唯一基岩错动带也出现在八角庙村的三叠系中统须家河组煤系地层中，其多期错动和右旋错动特征明显(见图 5)。



图 5 北川—映秀断裂在虹口乡产生的基岩地表破裂带

Fig.5 Rupture zone induced by Beichuan—Yingxiu Fault in bedrock on ground surface of Hongkou Town

建筑结构破坏是地震灾区最触目惊心的现象，本文仅探讨其区域分布规律及其与地质构造的关系，不详细探讨各类建筑结构的破坏形式。国家定义的极重灾区 10 县市，包括汶川县、北川县、绵竹市、什邡市、青川县、茂县、安县、都江堰市、平武县、彭州市均位于龙门山断裂带的四川部分。据作者所见，在这 10 县市中，建筑结构破坏最为严重的城镇包括都江堰市、汶川县映秀镇和漩口镇、什邡市红白镇和蓑华镇、绵竹市汉旺镇和北川县城等。这些城镇基本上位于 3 条主要断裂带上，如映秀镇和北川县城是主中央断裂通过部位。同时，由于断裂带南北的破裂形式不同，建筑结构的破坏形式又存在较大差异。在西南段，断裂以逆冲破坏为主，建筑物破坏最为严重，建筑物坍塌十分普遍(见图 6(a))，坍塌原因大部分为构造柱破坏，或结构柱在与梁或基础结合部位形成塑性铰破坏(见图 6(b))。建筑物坍塌在西南段所造成的人员伤亡比例最大；在东北段，断裂破坏的走滑分量相对较大，建筑物虽然破坏严重，但是坍塌比例相对较低，崩塌、滑坡等次生地质灾害造成的伤亡比例较大，如图 7 所示，北川县城坍塌的大部分建筑物是由一个大型滑坡(左侧的老县城)和一个大型崩塌(右侧的新县城，包括



(a) 映秀镇漩口中学坍塌的 5 层教学楼



图 8 映秀镇阿坝州烟草公司宿舍楼倾斜

Fig.8 Tilting of dormitory building of Aba Tobacco Corp. at Yingxiu Town



(b) 结构柱常见的破坏形式

图 6 西南段建筑结构的破坏形式

Fig.6 Failure patterns of building structures in the southwest section



图 9 紫坪铺水利工程副厂房大楼的地基沉降

Fig.9 Ground settlement of auxiliary plant building of Zipingpu Water Conservancy project



图 7 东北段建筑结构的破坏形式

Fig.7 Failure patterns of building structures in the northeast section

北川中学)引起,造成了最为惨烈的伤亡。

基础问题造成的破坏现象在都江堰市、映秀镇等地较多,主要原因是这些城镇大部分修建在河漫滩或山口冲积平原上,砂土层液化或由于振动造成的不均匀沉降是基础破坏的主要原因(见图 8)。修建在桩基础上的建筑物抗震性能相对较好,例如紫坪库水利工程的副厂房大楼,虽然地基沉降了约 30 cm,但是整座大楼除部分玻璃碎裂外仍完好无损(见图 9)。

3.2 崩塌、滑坡与堰塞湖

主震过后,整个龙门山地区可以说是满目疮痍。1999 年台湾集集地震产生的崩塌、滑坡数量过万处^[8],本次地震不论是震级,还是影响范围均远超出集集地震。初步调查表明,本次地震触发了至少 15 000 处崩塌、滑坡,形成了数千处潜在不稳定斜

坡,确切数量尚需借助遥感等先进手段进行统计。本文主要讨论产生较大灾害的大型滑坡的特点及其分布规律。

前述的北川县城崩塌、滑坡是较为典型的实例,左侧的滑坡为一顺层滑坡,滑坡地层为泥盆系中统观雾山组,主要岩石为相对软弱的泥灰岩和砂页岩等;右侧的崩塌地层为石炭系总长沟群石灰岩夹页岩等,虽然地层产状为逆坡向,石灰岩相对坚硬,但是由于北川—映秀断裂通过,岩体完整性较差。顺层滑坡和岩体完整性差是北川县城灾难的两个基本条件,邻近断裂的高地震烈度则是促成灾难的外在动力。

顺层滑坡在灾区常见,有些河谷岸坡虽然为逆坡,但是由于龙门山地区在第四纪抬升速度较快^[9],岸坡风化与卸荷裂隙发育,岸坡失稳也呈现出沿裂隙顺层滑坡的特点(见图 10)。由于边坡对地震动存在放大效应,地震产生的滑坡后缘往往出现在接近坡顶部位,具有推移式滑坡特点。特别是在岸坡相对高差较大的地区,极易形成高速滑坡。青川县关



图 10 绵远河汉旺镇上游右岸的逆层滑坡

Fig.10 Thrust landslide on the right bank of upstream Mianyuan River in Hanwang Town

庄镇的东河口滑坡(见图 11)为典型的切层滑坡。东河口滑坡的方量初步估计在 $800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上, 滑坡高速下滑, 冲入前沿的红石河, 并在对岸爬高 70 m, 然后顺青竹江继续滑行近 1 500 m, 分别在青竹江和红石河各形成一个滑坡坝。滑坡摧毁东河口村 4 个社和邻近的关庄镇沙坝社区的 1 个社, 以及东河口电站, 约 260 户 700 人被全部掩埋。一辆从青川县城开至石坝乡方向的客运中巴车也被掩埋, 车上载有 20 余名乘客。岸坡松散堆积物滑动也很常见, 青川县红光乡红石河滑坡较为典型, 该滑坡方量小于东河口滑坡, 但是速度很高, 产生的气浪令对岸高程约 70 m 的小麦(图 12 中人站立之处)全部倒伏。



图 11 青川县关庄镇东河口高速滑坡全景

Fig.11 Panorama view of Donghekou high-speed landslide in Guanzhuang Town, Qingchuan County



图 12 青川县红石河高速滑坡气浪产生的小麦倒伏现象

Fig.12 Lodged wheat by air waves of Hongshihe high-speed landslide in Qingchuan County

东河口滑坡和红石河滑坡均出现在志留系上统沙帽群地层中, 岩性为黄色、紫红色页岩, 砂质页岩, 夹薄~中厚层石英细砂岩等软弱岩石。

山区岸坡的崩塌、滑坡极易堵塞河流, 形成滑坡坝和堰塞湖。在川西地区, 较为著名的滑坡坝和堰塞湖包括 1786 年康定南地震在大渡河泸定县形成的磨西面滑坡坝^[10]和 1933 年叠溪地震形成的大、小海子^[11]。5 月下旬龙门山区的通口河、绵远河、石亭江、湔江、岷江和西河等流域共发现 34 处堰塞湖(见图 13 和表 1)。有些堰塞湖要么规模或危险性较小(如寿溪河的三江口堰塞湖), 要么位于深山没有发现(如白沙河的枷担湾、窑子沟和关门山堰塞湖), 未能列入。因此, 实际的滑坡坝或堰塞湖数量远不止于此。

如图 13 所示, 堰塞湖的分布一方面受主要断裂带控制, 另一方面也受断层的活动特性和岩性控制。龙门山东北段的志留系和泥盆系地层广布, 岩性以千枚岩、砂页岩、泥页岩等软弱岩石为主, 因此, 极易形成大型滑坡。例如, 北川县的 9 个堰塞湖中, 治成滑坡的地层为志留系中统茂县群千枚岩夹泥页岩、石灰岩、砂岩等; 包括唐家山堰塞湖在内的其他 8 个滑坡的地层均与北川县城滑坡的地层相同, 即泥盆系中统观雾山组泥灰岩和砂页岩。相对而言, 西南段地层中火成岩、泥盆、石炭和二叠系灰岩等硬质岩石所占比例较高, 相对软弱的三叠系须家组砂泥岩则主要位于相对低矮的前山地带。

滑坡堆积坝大致可以分为 3 种类型: 顺层滑坡型、崩塌堆积型和松散堆积型。通口河唐家山滑坡和石亭江红松一级电站滑坡(见图 14)属于顺层滑坡。这类滑坡属于整体滑移, 滑坡坝的完整性和抗渗性均较好, 不易发生突发性溃决。该类滑坡坝的抗冲刷性能取决于滑坡堆积体的岩性。红松一级电站滑坡的岩性为巨厚层砂岩, 抗冲刷性能较好, 整体稳定性良好。至今保存完好的叠溪小海子滑坡坝就属于这种类型。唐家山滑坡的岩性为泥灰岩和砂页岩, 抗冲刷性能较差, 一旦库水漫坝存在溃坝的可能性。考虑该堰塞湖库容巨大, 及时进行疏通处理十分必要。石亭江上的燕子岩滑坡坝(见图 15)属于崩塌堆积型, 这类滑坡坝往往出现在硬质岩石构成的峡谷地段。其特点是滑坡的透水性较好, 大块石的抗冲刷性能较高, 不易溃坝。至今保存完好的叠溪大海子滑坡坝就属于这种类型。白沙河上游的

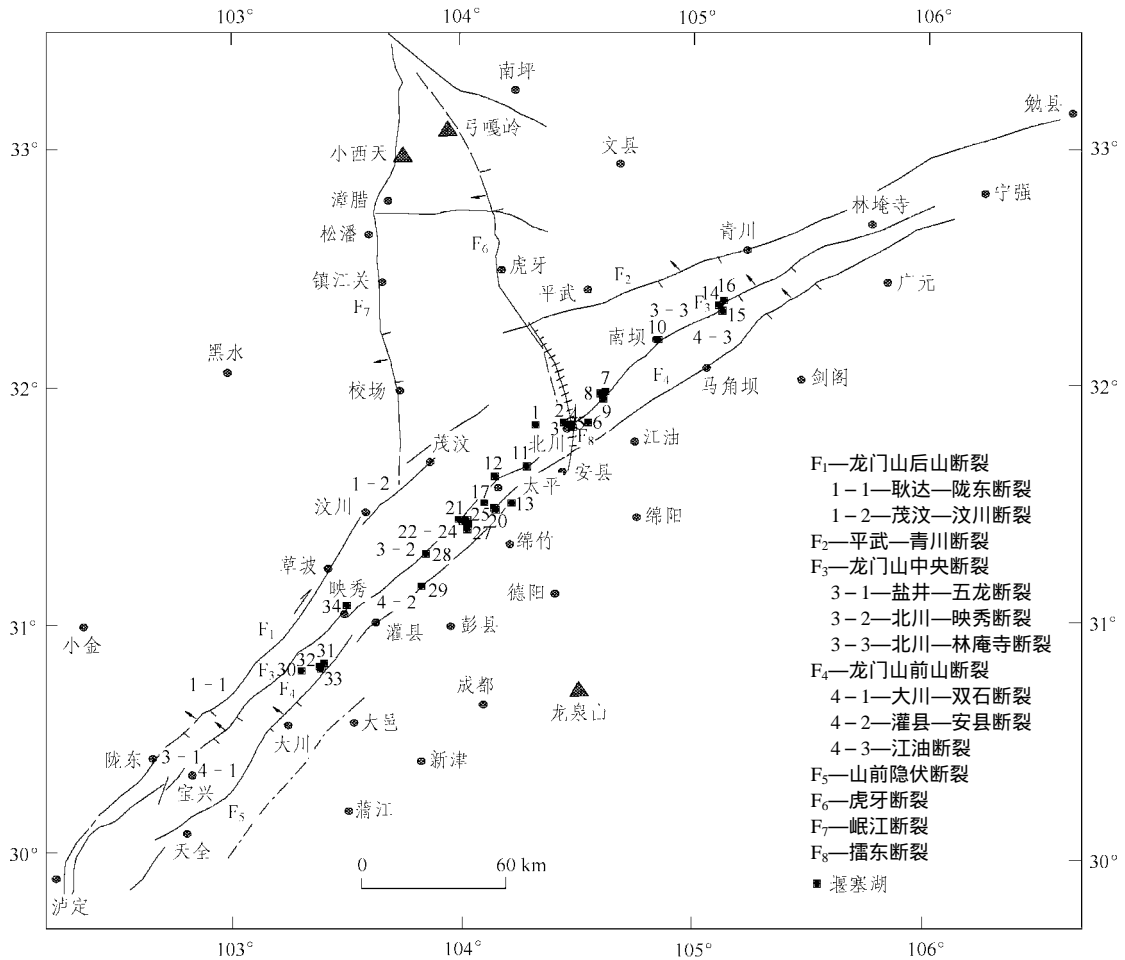


图 13 龙门山断裂构造与堰塞湖分布图(修改自邓起东等^[5])

Fig.13 Longmenshan fault belt and distribution of dammed lakes(revised from DENG Qidong et al^[5])

表 1 汶川地震堰塞湖统计表

Table 1 List of dammed lakes in Wenchuan earthquake

序号	名称	地点	河流	堰塞体组成	体积/(10 ⁴ m ³)	顺河长/m	横河宽/m	堰高/m
1	冶城	北川县	通口河					
2	唐家山	北川县	通口河	土石堆积体	2 037.0	803	610.0	82.0 ~ 124.0
3	苦竹坝下游	北川县	通口河	土石堆积体		300	200.0	60.0
4	新街村	北川县	通口河	土石混合堆积		200	350.0	20.0
5	白果村	北川县	通口河	土石混合堆积	40.0	100	200.0	10.0 ~ 20.0
6	岩羊滩	北川县	通口河	土石混合堆积		250	120.0	20.0 ~ 30.0
7	孙家院子	北川县	通口河	土石混合堆积			180.0	50.0
8	罐子铺	北川县	通口河	土石混合堆积			390.0	60.0
9	唐家湾	北川县	通口河	土石混合堆积	200.0		300.0	30.0
10	南坝	平武县	石坎河	土石混合堆积	600.0	200	600.0	25.0 ~ 50.0
11	肖家桥	安县	茶坪河	土石混合堆积	228.0	280	220.0	65.0
12	老鹰岩	安县	茶坪河	灰质岩堆石渣	260.0	105 ~ 240	180.0 ~ 200.0	105.0 ~ 130.0

续表 1

序号	名称	地点	河流	堰塞体组成	体积/(10 ⁴ m ³)	顺河长/m	横河宽/m	堰高/m
13	睢水镇罐滩	安县	干河子	土石堆积体	160.0	135	250.0	70.0
14	石板沟	青川县	青竹江	松散土夹石块	98.3	300	120.0	70.0~80.0
15	红石河	青川县	红石河	松散土夹石块	800.0	370	140.0	55.0
16	东河口	青川县	青竹江	松散土夹石块	530.0	300	312.0	12.0
17	黑洞崖	绵竹市	绵远河	沙页岩堆积	40.0	30~50	120.0	50.0~80.0
18	小岗剑电站上游	绵竹市	绵远河	较大灰岩块石	90.0	300	150.0	62.0~72.0
19	小岗剑电站下游	绵竹市	绵远河	较大灰岩块石		150	150.0	30.0
20	一把刀	绵竹市	绵远河	较大灰岩块石	32.9	248	57.6	26.4
21	干河口	什邡市	石亭江					
22	马槽滩上游	什邡市	石亭江	灰岩磷矿石	200.0	300	100.0	40.0~50.0
23	马槽滩中游	什邡市	石亭江	灰岩磷矿石	60.0	80	90.0	40.0~50.0
24	马槽滩下游	什邡市	石亭江		14.0	60	80.0~100.0	30.0
25	木瓜坪	什邡市	石亭江		6.0	20~30	100.0	15.0
26	燕子岩	什邡市	石亭江			20	30.0	10.0
27	红松电站厂房	什邡市	石亭江	沙岩石块	25.0	105	113.0	30.0
28	谢家店子	彭州市	湔江	泥砾岩	18.0	250	70.0	10.0
29	凤鸣桥	彭州市	湔江	泥砾岩	24.0	300	80.0	10.0
30	鸡冠山乡竹根顶桥	崇州市	西江	石灰岩为主夹其他岩质	300.0	500	68.0	90.0
31	鸡冠山乡六顶沟	崇州市	西江	石灰岩为主夹其他岩质	150.0	500	50.0	60.0
32	火石沟	崇州市	西江	石灰岩为主夹其他岩质	240.0	500	40.0	120.0
33	海子坪	崇州市	西江	石灰岩为主夹其他岩质	67.0	1200	70.0	8.0
34	映秀湾与太平驿之间	汶川县	岷江	土石堆积体	100.0			



图 14 石亭江红松一级电站滑坡

Fig.14 Landslide at Hongsong stage first hydropower station on Shiting River



图 15 石亭江燕子岩滑坡坝(德阳市水利局提供)

Fig.15 Yanziyan landslide dam on Shiting River(provided by Deyang Water Conservancy Bureau)

3 个堰塞湖也属于此类,虽然是在地震后一个半月才发现,但是直到 7 月初疏通工程开始时,滑坡坝没有出现任何破坏迹象。松散堆积型滑坡可能是基岩滑坡(如东河口滑坡),也可能属于阶地或崩坡积物等松散堆积层滑坡(如三江口滑坡)。该类滑坡坝的稳定性最差,前述的大渡河磨西面滑坡坝溃决洪水造成了大渡河下游沿岸约 10 万人死亡。

3.3 边坡支护工程

从调查情况来看,很多滑坡与工程活动存在或多或少的联系,包括小型水电工程、采矿工程或山区公路修建工程。石亭江红松一级电站滑坡发生在厂房后侧边坡部位;绵远河和石亭江流域的磷矿开采是当地的支柱产业,马槽滩等滑坡坝的出现均与此相关;公路沿线崩塌、滑坡更是不计其数,受其影响,截止 7 月 6 日汶川县映秀镇老虎嘴—草坡乡彻底关大桥、映秀镇—耿达乡、北川县擂鼓镇—禹里乡 3 处公路断点仍未能打通。

崩塌、滑坡出现部位往往没有支护,或仅有简单的支护(如防护网、喷层、低矮挡墙等)。以石亭

江红松一级电站厂房后边坡为例, 其岩层走向与边坡走向呈近 20° 相交, 巨厚层石英砂岩完整性和层面胶结良好, 若仅从静力角度考虑, 该边坡的稳定完全能够满足设计要求。由此可见工程边坡支护的重要性。

防护网, 不论是主动的还是被动的, 抗震性能均较差。G213 国道紫坪铺库区段的主动防护网损坏严重, 被动防护网往往因崩塌方量太大, 不堪重负而破坏。浆砌石挡墙的抗震性能较差(见图 16), 混凝土重力挡墙较好。锚索支护、锚索格构支护、锚喷支护和抗滑桩的整体表现良好。图 7 所示的北川县城滑坡右侧未滑出部分就是抗滑桩加固的成果。图 17 比较了紫坪铺水利枢纽边坡支护与不支护的效果差异。



图 16 漩口镇的浆砌石挡墙破坏现象

Fig.16 Collapse of cement-rubble retaining wall in Xuankou Town



图 17 紫坪铺水利枢纽冲沙洞出口边坡支护效果比较

Fig.17 Comparison of slopes with or without support in Zipingpu Water Conservancy Project

3.4 水电工程

大型水电工程整体上经受住了地震考验, 无一溃坝事故, 也没有出现与 1999 年台湾集集地震中石冈重力坝错断类似的大坝严重损毁事故, 说明大型

水电工程至少在选址方面是成功的。综合距震中较近的紫坪铺面板堆石坝、寿溪河黑土坡引水发电工程、太平驿重力坝和沙牌碾压混凝土拱坝等电站的震害情况来看, 主要震害表现在泄洪系统闸门无法开启、局部结构破坏, 发电控制系统破坏, 断电引起发电机组淹没, 开关站等附属建筑物结构破坏, 引水管爆裂, 堆石坝坝体沉降和面板裂缝等。部分震害由崩塌、滑坡等次生地质灾害引起。

大型水电工程为抗震救灾作出了重大贡献。唐家山堰塞湖处理过程中, 其下游水库全面放空, 对可能的溃坝洪水起到了拦截和削峰作用。紫坪铺水利枢纽的大坝为面板堆石坝, 坝高 156 m, 按地震烈度 VIII 度设防, 加速度为 0.26 g。本次地震中坝址区出现了控制系统震损导致发电机组停转、冲沙闸和泄洪洞闸门无法开启、大坝沉降(73 ~ 100 cm)导致上游二期和三期混凝土面板之间结构缝位错和局部面板开裂(见图 18, 19), 泄洪洞在 F₃ 断层通过



图 18 紫坪铺大坝面板位错现象(四川省紫坪铺开发有限责任公司提供)

Fig.18 Offset of concrete face in Zipingpu Dam(provided by Sichuan Zipingpu Development Co. Ltd.)



图 19 紫坪铺大坝面板开裂现象(四川省紫坪铺开发有限责任公司提供)

Fig.19 Cracking of concrete face in Zipingpu Dam (provided by Sichuan Zipingpu Development Co. Ltd.)

部位沿结构缝出现约 5 cm 位错等震害。但是,大坝未出现拉裂和滑坡,发电机组和主、副厂房完好,大坝和溢洪道边坡未出现开裂和滑坡现象。汶川大地震坝址区的实际烈度为 IX 度,加速度为 0.55 g,超出设计值一倍有余。在这种强震条件下,仅仅出现上述轻灾,与其说奇迹,不如说是该公司严格的质量管理结果。笔者曾参与该工程坝区和库区的相关科研和咨询工作,对此体会颇深。紫坪铺坝址区为三叠系中统须家组砂页岩夹煤系地层,地质条件很差,不论是坝区边坡,还是库区 G213 国道还建公路工程,施工过程中均出现不少滑坡现象,为此公司额外花费了较多资金用于边坡和路基加固工程,确保整个工程安全。从这次地震结果来看,这种额外投入所产生的经济和社会效益是巨大的:首先,坝区未出现严重的震害;其次库区还建公路除百花大桥附近地震烈度达到 XI 度破坏严重外,其他路段震害相对较轻,为 G213 国道都江堰—映秀段快速打通,开辟一条生命通道奠定了基础。

公司的管理理念也很简单:其一,紫坪库水库是都江堰灌区和成都市 2 000 多万人的唯一的水源工程,正常蓄水位高出成都 300 多米,坝区任何事故均可能威胁下游都江堰市和成都市的安全和稳定;其二,G213 国道是进出阿坝州的咽喉要道,还建公路一旦因事故中断,对阿坝州旅游可能造成的损失将以亿元来计量。正是由于这种质量管理理念,四川省紫坪铺开发有限责任公司才能够做到员工无一重伤;震后 7 min 首台机组成功启动空载过流,确保下游供水;5月13日14:18成功打开冲沙洞,17:28成功开启2#泄洪洞闸门,使水库总泄量达到 850 m³/s,大于入库流量 600 m³/s,确保了大坝安全,并为面板维修工作奠定了基础;5月17日19:52,电站开始恢复发电。至此紫坪铺水库已经基本上恢复正常运行,不仅有效提高了工程的泄流能力,进一步消除了下游人民的顾虑,而且极大地缓解了四川电网缺电的压力,也给灾区企业恢复生产增强了信心。

关于紫坪铺工程的争论很多。在四川灾区调查期间,笔者常想,假如没有紫坪铺工程或四川省紫坪铺开发有限责任公司的质量管理理念,可能会出现的情况会是什么:

(1) 不会出现水库提供的快捷生命通道,岷江流域伤亡可能更加惨重;

(2) G213 国道都江堰—映秀段不会快速打通,第二条生命通道的出现不会那么快;

(3) 灾区最著名的堰塞湖会出现在岷江,不再是唐家山堰塞湖了。

.....

由此可见工程质量问题的重要性。质量好的建筑物,不论是房屋、桥梁,还是水库会救人,反之则只能害人了。

4 灾后重建相关的岩土工程问题

对人类赖以生存的地球,人类还知之甚少,地震的临震预报工作困难重重。但是,现有的科技水平至少表明,印度板块的挤压尚未停止。在这种背景下,川西地区的地震活动不会终止。因此,防震减灾工作应该成为工作的重点。

4.1 松散堆积物问题

目前灾区余震活动已经接近尾声,地震中山区大量崩塌和滑坡产生的松散堆积物会构成灾区重建过程中最严重的次生地质灾害。从台湾集集地震等的经验来看,在地震过后的数年内,松散堆积物在雨季形成泥石流的频度和规模大大增加。因此,如何预测可能形成的泥石流范围、规模,及其对灾区工程结构和生产生活设施的潜在影响是一个值得关注的问题。

4.2 山区村镇选址问题

考虑中国的土地资源和人口分布特点、社会稳定、以及灾区的长期可持续发展要求,除部分县镇(如北川县等)需要重新选址外,更多的则要考虑在原址或其附近重建。从本次震灾的情况来看,震害严重的村镇基本上位于断裂通过部位或次生地质灾害严重部位。实际上,在部分地区,特别是在山区,遴选一块完全不存在灾害威胁的场址是困难的,部分村镇位于河漫滩等部位,还需要进一步考虑山洪的威胁。

山区虽然灾害频繁,但是每种灾害发生的频度、可能造成的损失、工程可治理性和造价等是不一样的,可综合考虑上述因素进行场址可利用性评价和灾害风险区划。从美国加州的相关经验来看,只要断层通过部位确定了,在离断层 50 ft(约 15 m)之外是可以修建住房等建筑物的。过去由于覆盖层遮掩等原因,断层确切通过部位难以确定,那么通过本

次地震大范围的地表破裂现象的详细调查, 这一问题迎刃而解。

4.3 山区公路建设问题

山区公路, 特别是乡村简易公路往往采用半挖半填的方法沿河修建, 以节省施工造价。由于地震灾区构造抬升强烈, 河谷快速下切过程中岸坡演变未能趋于稳定。即使没有地震, 岸坡崩塌现象十分常见, 特别是在雨季。本次地震期间, 出现大量公路因崩塌、滑坡而损毁的现象可以说是不奇怪的。

山区公路损坏切断了山区居民的逃生线路, 也给救援工作带来巨大困难。上述公路修建方法是值得反思的。从 G213 国道都江堰—映秀段的情况来看, 本次地震中, 马鞍山隧道无任何破坏, 友谊隧道局部因层间错动衬砌出现轻微损坏, 白云顶隧道在断层通过部位衬砌轻微破坏, 与映秀—汶川段至今未能完全打通形成强烈的反差, 也印证了地下结构的抗震性能较好的论断。因此, 在地震山区, 特别是山谷的峡谷段宜尽量使用隧道方案。在地质、地形条件较好的地段, 若使用传统的方案, 开挖边坡也需要进行锚固。短期来看, 工程的投资是增加了, 但是从长远的社会与经济效益来看, 增加的投资是值得的。对部分山区而言, 由于不处于交通要道, 公路利用率很低, 按上述思路修建公路并不可行。可考虑结合水电开发, 利用水库开辟水上交通也是一种可以考虑的方案。

5 结 论

作者根据本文在地震灾区的调访, 对灾区震害的特点进行了简要介绍, 初步分析了出现上述震害特点的原因, 并以此为基础对灾区重建面临的岩土工程问题进行了初步分析。限于作者的专业局限和水平, 文中的观点和分析未必恰当, 希望读者批评指正。

致谢 本文在调研过程中得到各级政府与企业的支持与协助。本文能够成文得益于学报主编冯夏庭研究员和执行副主编余诗刚研究员的支持与约稿。文中部分内容是在与加州大学 Nicholas Sitar 教授, 中国科学院地质与地球物理研究所戴福初研究员讨论基础上形成的。在此, 谨对他们的支持与鞭策表

示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] <http://www.csi.ac.cn/sichuan/index080512.htm>[EB/OL]. (2008-05-12)[2008-03-05].
- [2] http://www.china.com.cn/news/txt/2008-07/11/content_15995819.htm[EB/OL]. (2008-05-15)[2008-03-05].
- [3] <http://www.chinanews.com.cn/gn/news/2008/07-12/1310643.shtml>[EB/OL]. (2008-07-12)[2008-03-05].
- [4] 唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1993.(TANG Rongchang, HAN Weibin. Active faults and earthquakes in Sichuan[M]. Beijing: Earthquake Press, 1993.(in Chinese))
- [5] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 1994, 16(4): 389-403.(DENG Qidong, CHEN Shefa, ZHAO Xiaolin. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmen Mountains and its adjacent regions[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4): 389-402.(in Chinese))
- [6] 陈国光, 计凤桔, 周荣军, 等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质, 2007, 29(3): 657-673.(CHEN Guoguang, JI Fengju, ZHOU Rongjun, et al. Preliminary research of activity segmentation of Longmenshan fault zone since late quaternary[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(3): 657-673.(in Chinese))
- [7] <http://www.csi.ac.cn/sichuan/beijing04.htm>[EB/OL]. (2008-07-15)[2008-03-05].
- [8] KHAZAI B, SITAR N. Evaluation of factors controlling earthquake-induced landslides caused by Chi-Chi earthquake and comparison with the Northridge and Loma Prieta events[J]. Engineering Geology, 2004, 71(1/2): 79-95.
- [9] 唐荣昌, 文德华, 黄祖智, 等. 松潘—龙门山地区主要活动断裂带第四纪活动特征[J]. 中国地震, 1991, 7(3): 64-71.(TANG Rongchang, WEN Dehua, HUANG Zuzhi, et al. The quaternary activity characteristics of several major active faults in the Songpan—Lonemenshan region[J]. Earthquake Research in China, 1991, 7(3): 64-71.(in Chinese))
- [10] DAI F C, LEE C F, DENG J H, et al. The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, Southwestern China[J]. Geomorphology, 2005, 65(3/4): 205-221.
- [11] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.(HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454.(in Chinese))