活动断裂带工程地质研究

张永双^{1,2)},任三绍^{1,2)},郭长宝²⁾,姚鑫²⁾,周能娟²⁾

1) 中国地质调查局天津地质调查中心,北京,300170; 2) 中国地质科学院地质力学研究所,北京,100081

内容提要:活动构造带工程地质问题是工程地质和岩土工程界长期关注的难点,主要涉及断裂剧烈活动(地震) 产生的地表破裂、隧道震害、斜坡地质灾害、非震期活动断裂带隧道应力异常、碎裂岩带大变形,以及活动断裂长期演 化过程中对地形地貌、斜坡岩体结构和局部地应力场的影响等。本文简要回顾了国内外活动断裂带工程地质研究从 模糊到逐渐清晰的过程,重点梳理总结了地面工程避让活动断裂、隧道工程穿越活动断裂带的稳定性评价、活动断裂 带斜坡地质灾害效应等方面的主要进展,结合作者以往研究认为:①不同类型活动断裂的影响带宽度或避让距离有 所差异,逆断型地表破裂影响带宽度(D)与垂直位移(H)基本符合线性关系 D=10H+16.0m,可据此确定避让距离, 走滑型地表破裂的避让距离取 15m 为宜。②结合复杂艰险山区铁路选线和施工过程,给出了隧道工程穿越活动断裂 带的合理角度,以及地震期和非地震期活动断裂带附近的隧道变形破坏特征。③从活动断裂带对地形地貌和岩体结 构的影响、断裂剧烈活动(地震)诱发崩塌滑坡灾害、断裂蠕滑作用对斜坡应力场和稳定性的影响、断裂活动力地质灾 害链提供大量物源等方面,揭示了活动断裂带地质灾害效应的主要表现形式。综合以上研究进展和存在的问题,提 出了今后值得关注的主要研究方向,对于活动构造区工程地质研究和防灾减灾具有指导意义。

关键词:活动断裂带;避让距离;隧道稳定性;斜坡地质灾害;重大工程

活动断裂不仅可直接错断工程建(构)筑物,还 可促进或诱发崩塌、滑坡、碎屑流等地质灾害。随着 世界各国工程建设规模不断扩大,特别是工程建设 不断向地质条件复杂地区延伸,工程地质工作正面 临着新的挑战。中国是活动断裂十分发育的国家, 面临着大量与活动断裂相关的工程地质问题。一些 重大工程项目的选址以及城市规划布局等对工程地 质的要求,不再仅仅限于建筑物荷载对地基承载力 和边坡稳定性等工程地质评价问题,还涉及地质环 境变化或内外动力耦合作用对场地工程地质条件的 影响等方面(Peng Jianbing et al., 2006)。其中,活 动断裂带工程地质问题及其防范技术研究是当前急 待攻克的重大工程地质课题,受到地质学界、工程技 术界以及决策部门的普遍关注。

国内外由活动断裂引发的工程地质问题比比皆 是。例如,印度 Chhibro-Khodri 隧道横穿多条活动 断裂,隧道施工时高地应力、围岩大变形等问题频繁 出现,致使工期延后六年之久(Jethwa et al., 1980)。1995年日本阪神 7.2级地震 90%以上的震 亡人数、30%以上的倒塌房屋均分布在地震断裂 1km 范围内(Tsukawa, 1995), 造成 Rokko 隧道多 处出现裂缝,交通中断4个月(Asakura, 1997)。 1999年台湾集集 7.6级地震的发震断裂两侧十几 米内几乎所有建筑物夷为平地,而该范围以外的建 筑物结构基本完好(Xu Xiwei et al., 2002)。2008 年汶川 M₈8.0级地震沿龙门山中央断裂带形成长 约 270km 的地表破裂带,导致山脊水系和建筑物大 多被错断毁坏(Dong Shuwen et al., 2008; Xu Xiwei et al., 2009; Zhang Yongshuang et al., 2010b)、都汶高速公路穿越断裂的13座隧道严重破 坏(Qian Qihu et al., 2009), 地震触发的滑坡崩塌 泥石流直接造成2万人死亡(Yin Yueping et al., 2009; Sun Xiaoyu et al., 2010)。在川西鲜水河断 裂带沿线发育一系列大一中型滑坡,不少是历史地 震造成的老滑坡,在断裂蠕滑作用下产生复活并转 化为泥石流,几乎每年都导致公路中断、阻断河道。

with active fault zone. Acta Geologica Sinica, 93(4):763~775.

引用本文:张永双,任三绍,郭长宝,姚鑫,周能娟. 2019. 活动断裂带工程地质研究.地质学报,93(4):763~775, doi: 10.19762/j.cnki. dizhixuebao. 2019067. Zhang Yongshuang, Ren Sanshao, Guo Changbao, Yao Xin, Zhou Nengiuan. 2019. Research on engineering geology related

注:本文为国家自然科学基金重点项目(编号 41731287)和中国地质调查局项目(编号 1212010914025)资助成果。

收稿日期:2019-03-01;改回日期:2019-03-29;网络发表日期:2019-04-01;责任编辑:周健。

作者简介:张永双,男,1968年生。研究员,博士生导师,主要从事工程地质与地质灾害研究。Email:zhys100@sohu.com。

可以看出,活动断裂带工程地质问题不仅体现 在断裂剧烈活动产生的地表破裂问题、隧道震害问 题、地震地质灾害问题,在非地震期活动断裂造成的 隧道高地应力、软岩大变形,活动断裂在长期演化过 程中对地形地貌、岩体结构、斜坡结构以及局部地应 力条件的影响等,都是活动断裂带工程地质的研究 范畴。本文在简要回顾国内外活动断裂带工程地质 研究历程的基础上,总结相关领域取得的主要进展, 结合笔者区域工程地质调查工作经历,提出今后值 得关注的主要研究方向,以期对活动构造区工程地 质问题研究有所裨益。

1 活动断裂带工程地质研究回顾

我国活动断裂带工程地质研究经历了从无到有 的过程,国内不少学者曾做过相关的分析和总结 (Zhou Zhenghua et al.,2003;Tie Rui,2009)。大 致可以分为萌芽阶段、区域稳定性理论形成阶段、探 索和发展阶段、快速发展阶段、活动断裂带工程地质 研究的新阶段等5个阶段。

1.1 萌芽阶段(20世纪60年代以前)

20世纪60年代以前,国内外有关活动断裂工 程地质研究较少,多限于强震地面断裂带的规模、空 间分布、力学性质、等震线总体形状及其与发震断裂 关系等方面的调查,主要反映强震断裂的地面破坏 效应和震害情况。该阶段从工程地质角度研究活动 断裂主要有两方面:一是对工程建筑载体和地下工 程建筑结构地质体的质量评价,二是对工程建筑区 地质环境的质量评价。强调在工程建设时要避开断 裂,否则要提高设防烈度,主要沿用前苏联的成因地 质学理论分析工程地质问题。由于受当时的科技水 平限制,理论研究和工程实践方面进展都不大 (Deng Qidong et al., 2008)。但是,在这一时期,李 四光、谷德振、刘国昌等在研究构造地质、地震地质 应用于工程建筑的实际问题时,已经孕育着"区域稳 定性"思想,为"安全岛理论"和"地质构造控制论"的 提出奠定了基础。

1.2 区域稳定性理论形成阶段(20世纪60~70年代)

20世纪 60~70 年代,由于美国新建核电站和 大型水电站对场地地震安全的要求,活动断裂和地 震危险性评价工作取得了长足的进展,奠定了研究 的基本框架(Zhang Peizhen, 2013)。我国在此期间 完成了对不同区域活动断裂带的普查工作,胡聿贤 等总结了一整套研究场地土、断层、局部地形等场地 因素 对 震 害 与 地 震 动 影 响 的 研 究 方 法 (Zhou Zhenghua et al., 2003)。李四光于 60 年代初期在 指导西南强震地区的重大工程选址时,要求首先查 明活动构造带或地震危险区,并在其中找到"相对安 全的地区"或"比较稳定的地块",统称为"安全岛" (Yi Mingchu, 2014)。1963 年谷德振提出"岩体结 构"的概念和岩体工程地质力学的学术思想,并撰写 了《岩体工程地质力学基础》(Gu Dezhen, 1979)。 Liu Guochang(1979)、Hu Haitao(1979)等也相继 提出了"区域稳定性"的基本概念。随后,场地地质 环境与岩土体稳定性评价也纳入工程地质的研究范 畴,其核心是地壳稳定性问题。

值得指出,1976年唐山地震进一步唤起人们对 场地地基抗震问题的重视,主要涉及地震断裂、砂土 液化、地面运动、震害分析和地震工程地质勘察等。 Wang Zhongqi et al. (1983)结合我国与全球范围大 地震的经验,初步构建了地震工程地质学框架,成为 地震工程学与工程地质学的一个交叉领域。

1.3 探索和发展阶段(20世纪80~90年代初)

20世纪80年代起,地震地质领域开展了我国 17条主要活动构造带1:5万地质调查和填图,研 究了各类活动构造的几何学和内部结构、运动学和 滑动速率、古地震和大地震重复间隔、地震破裂带和 同震位移、分段性和破裂过程、变形机制和动力学等 (Zhang Peizhen, 2013)。在此期间,随着工程实践 经验的不断积累,工程地质界逐步形成了区域稳定 性评价理论和方法体系。代表性的主要有区域稳定 工程地质学、区域地壳稳定性和"安全岛"等理论体 系(Gu Dezhen, 1979; Liu Guochang, 1993; Hu Haitao et al., 1996)。这些理论体系的基本依托是 地质力学理论,其着眼点都是地壳运动、构造与地震 等因素对工程区的直接影响或危害性评价。Sun Guangzhong(1988)将岩体结构的概念融入岩体力 学的研究,提出"岩体结构控制论"和"地质构造控制 论",成为研究活动断裂与工程地质之间关系的理论 基础,对解决我国工程建设遇到的一些关键工程地 质问题发挥了积极作用。

1.4 快速发展阶段(20世纪90年代初~2008年)

20世纪90年代以来,中国活动构造的应用研究与国民经济建设的关系更加密切,除了及时服务于重大工程建设的断裂活动性评价、地震安全性评价外,还针对城市建设的防震减灾规划需求开展专项活动断裂探测与地震危险性评价工作(Zhou Zhenghua et al., 2003),特别是"十五"期间(2001~2005年)启动了20个城市的"城市活断层探测与

765

地震危险性评价"。在工程地质领域,继续重视活动 构造与工程地质稳定性、地质灾害的相关性研究,相 继编制一系列全国性的区域地壳稳定性分区图 (Sun Ye, 1996; Du Dongju et al., 1996; Yi Mingchu, 2006)。Peng Jianbing et al. (2001)将大 陆地壳动力学过程、构造活动性、地震活动性与岩土 体工程地质条件和环境有机统一,实现了从区域地 壳到场地地基不同尺度稳定性问题的合理评价。但 是,该阶段我国的断裂场地评价体系还不健全,对断 裂地震的发生规律及影响因素的了解还不够全面, 因此活动断裂工程地质效应的研究仍处于发展 阶段。

1.5 活动断裂带工程地质研究的新阶段(2008年以来)

2008 年汶川 M₈ 8.0 级地震之后,由于地震地 表破裂、隧道震害、山体滑坡等都极其发育,进一步 促进了活动断裂带工程地质问题的研究和发展。如 何在地震灾后重建和重大工程选址过程中避开地震 断裂、选取最小安全避让距离,成为研究的热点问 题,受到国内有关部门和学者的重视。及时修订了 《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001,2008 年版), 随后颁布了《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001,2008 年版), 随后颁布了《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010); Zhou Qing et al. (2008)在野外调查的基础上,初步 探讨了汶川地震断裂两侧的避让带宽度问题。 Zhang Yongshuang et al. (2010b)调查统计了龙门 山断裂带地表破裂的水平和垂直位移以及地震地表 破裂的影响带宽度,对汶川地震灾后重建场地选址 具有重要的实际参考价值。

2008年以来,我国先后在青藏高原东缘活动构 造区开建了川藏铁路、兰渝铁路、成兰铁路等重大工 程,众多学者对穿越活动断裂带的铁路选线以及高 地应力、隧道大变形等工程地质问题进行过深入研 究(Zhang Yongshuang et al., 2009a;Zhong Xin et al., 2012;Guo Changbao et al., 2012;Zhou Nengjuan et al., 2013),极大促进了活动断裂带隧 道工程地质问题的研究和发展。同时,活动断裂带隧 道工程地质问题的研究和发展。同时,活动断裂的 地质灾害效应也逐渐成为地质灾害领域的研究热 点,认识到断裂的活动方式、上下盘效应以及内外动 力耦合作用都对地质灾害的发育有重要影响 (Huang Runqiu et al., 2008;Wu Zhenhan et al., 2008;Zhang Yongshuang et al., 2009b)。

综上所述,活动断裂带工程地质研究的内容主 要涉及以下方面:活动断裂识别与鉴定、区域地壳稳 定性与场地稳定性评价、活动断裂的避让问题、活动 断裂带隧道工程稳定性问题、活动断裂的地质灾害 效应及其防范等,随着工程实践经验的不断积累、研 究领域的不断扩大和技术水平的不断提高,相关理 论和方法体系日臻成熟和完善。近年来,中国在该 领域的研究十分活跃,研究水平处于国际前列。

2 地面工程的活动断裂避让问题

沿地震地表破裂带建筑物普遍严重破坏,而避开 该带,即使是十几米,在工程质量保证的前提下建筑 物可保持完好(Xu Xiwei et al., 2002)。如能预先确 定活动断裂未来地震地表破裂的范围,并在工程规划 和建设中合理避让,对城市和重大工程防震减灾具有 重要的现实意义。因此,活动断裂工程地质效应研究 的关键问题之一是活动断裂的避让问题。

2.1 我国历史地震地表破裂概况

大量震例表明,我国大陆西部地区震级 6 $\frac{1}{4}$ 级 以下、震中烈度在 8 度及以下的地震,诱发地表破裂 的可能性极小。Tie Rui(2009)对我国 1900~2009 年 6.0级以上地震的地表破裂进行了统计,分地区 给出了地表破裂与地震震级(*M*)分布区间(图 1)。 结果表明,7 \leq *M*<8 具有优势分布特性,各个地区该 震级区间伴有地表破裂的地震次数要超出 6 \leq *M*<7 和 *M* \geq 8。地表破裂特征受断裂类型控制:走滑型 的地表破裂带较为集中,主要分布在地表迹线附近; 逆断和正断型的地表破裂带宽度较大,逆断型最大, 地表破裂主要分布于上盘,浅源逆断型地表破裂可 能会远离断裂地表迹线。



图 1 伴有地表断裂强震分布柱状对比图(据铁瑞,2009) Fig. 1 Distribution histogram of strong earthquakes with surface ruptures (after Tie Rui, 2009)

2.2 地表破裂带的表现形式

活动断裂在过去数十万年至上百万年期间无数 次错动,甚至有些活动断裂是新生代早期或前新生 代断裂带的复活,其破碎带宽度可以很大,但活动断 裂的最新错动面或主滑移面只局限在很窄的地段, 地面建筑设施需要避让的是活动断裂最新错动面或 地表活动线,而不是整个断裂破碎带(Xu Xiwei et al.,2007)。因此,活动断裂避让的重点是确定断 裂的地表破裂带位置及其表现形式。

国内外不少学者在研究平原区地震地表破裂时,大多考虑了基岩上覆土层对地表破裂宽度的影响(Wang Zhongqi et al., 1983;Bray et al., 1994; Guo Endong, 2002;Zhou Qing et al., 2006),且主 要是从断裂的受力机制判断。一般来讲,可以通过 勘查获得断裂的运动形式、推测土体的受力,但由于 现场条件限制,实际上人们更多地通过试验和数值 模拟方法,研究上覆土体和断裂错动的关系。Bray et al. (1994)从震害资料分析、实验模拟及理论模型 分析等方面,研究了发震断裂上覆土层的破坏情况, 给出了活动断裂导致上覆土层破坏延伸到地表的路 径(图 2,图 3)。



图 2 走滑型错动在上覆土层中形成的破裂轨迹(据 Bray et al., 1994)

Fig. 2 Rupture trajectories formed by diastrophism of strike-slip fault in overlying soil (after Bray et al., 1994) (a)一硬土层;(b)一软土层





图 3 逆断型和正断型错动在上覆土层中形成的破裂轨迹(据 Bray et al., 1994)

Fig. 3 Rupture trajectories formed by diastrophism of reverse and normal fault in overlying soil (after Bray et al., 1994)
(a)—逆断层错动;(b)—正断层错动;①—硬土层,错动角度陡;②—硬土层,错动角度平缓;③—软土层,错动平缓
(a)—Reverse fault displacement; (b)—normal fault displacement;①—Hard soil layer with steep displacement;
②—hard soil layer with gentle inclined displacement; ③—soft soil layer with gentle inclined displacement

值得一提的是,Xu Xiwei et al. (2007)通过对 青藏高原北部走滑型地震破裂的研究认为,地表 破裂带宽度与松散沉积物厚度和岩性的关系不 大,但与断裂本身的几何结构关系密切。一般情 况下,基岩或地表覆盖层较浅的丘陵山区地震的 地面断裂带比较狭长,地表破裂的连续性也较好。 相反,平原和盆地内部的强震地表断裂带宽短、且 连续性较差。

2.3 国内外地震地表破裂的避让距离

前已述及,地震地表破裂不是一条线,而是 一条带,确定地表破裂带宽度(或避让距离)是有 效避开断裂同震错动对地面设施直接破坏的前 提。Zhang Jianyi et al. (2012)在分析有关国家或 地区活动断裂避让规范和有关研究进展的基础 上,对地震地表破裂及其避让问题进行了总结。

2.3.1 有关国家或地区法规的统计分析

《欧洲 EC81998 抗震规范》第 4.1 条指出,严禁 建筑物和重要构筑物建设在紧邻活动断裂上。而在 2006 年雅典召开的欧洲技术委员会会议上,一致建 议将该条修改为:在没有进行合适正确的地质构造 和建筑物结构分析的前提下,都不能把建筑物和重 要构筑物建立在紧邻活动断裂上,并给出了"紧邻" 的避让量化建议。1971年美国 San Fernando 地震 期间至 1972 年初,美国加州政府通过了"特别调查 法案",1994年修订为"地震断裂划定法案",1999年 进一步增补了数字化的断裂信息图,主要目的是防 止将房屋建在活动断裂的地表形迹上,并规定在地 震断裂迹线两侧各 50ft(15.24m)内一般不能建设。 日本的《活断层法》规定,离断裂线一定范围内不许 建设或建设时必须采取一定对策(Takashi et al., 2003)。由于大地震发生时,活动断裂不同部位地表 破裂发生的位置和破裂宽度有很大差异,因此,日本 还规定在活动断裂带两侧各 100m 范围内,禁建大 型工程设施。

中国台湾地区《建筑技术规则(建筑设计施工 编)》(1998)中给出了山坡地的避让范围,1999年 集集地震后,提出永久性禁、限建设计原则:地震 断裂两侧各 15m 范围内,不得兴建学校、医院、警 察局、消防救灾等公共建筑及大型公众营业场所。 中国大陆在 2008 年汶川地震后,新修订的《防震 减灾法》第 67 条指出,重建工程的选址应当符合 恢复重建规划和抗震设防、防灾减灾要求,避开活 动断裂。同时,国家有关标准亦给出了活动断裂 避让的有关内容。

2.3.2 相关研究成果资料的统计分析

Boncio et al. (2008) 给出了基于 2009 年 L' Aquila 地震的 Apennine 山正断型地震断裂带 (*EFZ*)和避让宽度(*S*)量化值:① 有明确的断裂迹 线时,上盘 *EFZ*=150m,下盘 *EFZ*=30m,上盘 *S* = 40m、下盘 *S*=15m,*EFZ*=180m;② 无明确的 断裂迹线、但两盘迹线之间地质不确定带(g.u.) 可测出时,上盘 *EFZ*=150m、下盘 *EFZ*=30m, *EFZ*=g.u.+180m,*S* 无法给出;③ 无明确的断裂 迹线、且两盘迹线之间地质不确定带(g.u.)亦不 可测时,上盘 *EFZ*=150m,下盘 *EFZ*=150m,*EFZ* = 300m。

Konagai(2003)总结了前人资料,给出了基 于限制等级参数(ζ)的活动断裂附近建筑物危害 的评价方法,即:① ζ >1时,有较浅埋的刚性底 板基础的建筑可建在迹线不明的断裂上;② ζ >1 时,若断裂确定,建筑物距离断裂迹线至少 $\alpha \times \zeta$ $\times H$ 。其中 $\zeta = D/\gamma_y H$,H为覆盖层厚度,D为基 岩位错, γ_y 为土剪坏应变, α 为断裂类型(正、逆、 走滑)系数。

Xu Xiwei et al. (2002)采用统计分析法,确定 了活动断裂"避让带"宽度为 30m。Zhou Qing (2008)研究认为,汶川 M, 8.0级地震地表破裂的避 让距离为15~50m。Zhang Jianyi et al. (2010)根据 玉树地震资料并结合他人结果,给出了8度区框架 结构避让主破裂带距离大于 15m, 砌体结构避让主 破裂带距离大于 30m 基本能保证不出现严重倒塌, 并给出了距地表主破裂距离(D)的典型建筑物震害 指数(I)公式:I = 0.7969 - 0.00231D。笔者认为, 不同类型断裂的影响带宽度有所差异(Zhang Yongshuang et al., 2010a, 2010b), 汶川 M_s 8.0 级 地震龙门山中央断裂(逆断型)地表破裂影响带宽度 主要集中在16~60m,影响带宽度(D)与垂直位移 (H)具有较好的线性关系 D=10H+16.0m(图 4, 图 5), 逆断型地表破裂影响带宽度可以根据上式进 行初步估算,且上盘与下盘影响带宽度的比值一般 为2:1~3:1。玉树 M_s 7.1级地震地表破裂(走 滑型)的工程建设避让距离取 15m 为宜,这也适用 于其他走滑型断裂的破裂带宽度估算。

3 活动断裂带隧道工程稳定性问题

活动断裂带隧道工程稳定性问题主要分为地震 期的隧道工程震害问题和非地震期的隧道工程地质 问题。在复杂艰险山区,生命线工程一般都难以避





免穿越活动断裂带,活动断裂成为制约越岭隧道工 程施工和运营安全的关键问题。

3.1 活动断裂带隧道工程震害问题

近100年来,全球许多隧道遭遇不同程度的 震害。在地震波作用下,衬砌几分钟内就发生错 动、开裂、松动,甚至塌落等,有时会造成交通受 阻。在1906年美国 San Francisco M_w 7.8级地震 中,Wright 隧道在 San Andreas 活动断裂处发生 横向位移约 1.80m (Prentice et al, 1997)。在 1978 年日本 Izu-Oshima-Kinkai M, 7.0 级地震 中, Inatori 活动断裂附近的隧道发生 50~70 cm 的变位,隧道衬砌及仰拱严重破裂,钢筋被拉断 (Kawakami, 1984)。在 1999 年中国台湾集集 $M_{\rm L}$ 7.3级地震中,与九芎坑断裂相交的输水隧洞 产生垂直位移4m、水平位移3m,完全被毁 (Wang et al, 2001)。2008 年中国汶川地震造成 G213 国道沿线隧道大范围损坏,其中龙溪隧道 在断裂带两侧各约 100m 范围内出现混凝土坍 落、开裂和错台、仰拱隆起等(Li Tianbin, 2008)。

3.2 非地震期活动断裂带隧道工程地质问题

在非地震条件下,活动断裂附近通常存在高 地应力,导致围岩发生持续变形,衬砌被逐渐剪坏 或拉裂,出现拱顶下沉甚至塌方现象,同时还可能 伴生涌水突泥问题。国内外因忽视非震期活动断 裂作用而引发工程问题的案例不胜枚举。除了前 文提到的之外,美国 BART 隧道在穿越 Hayward 走滑断裂时,围岩破碎带宽达215m,施工异常艰 难,最终调整为柔性支护,以适应断裂的蠕滑位移 (Brown et al., 1980)。土耳其 Bolu 隧道在穿越断 裂带时,隧道顶部最大沉降量分别为1.2m、0.8m, 导致混凝土开裂、钢筋严重扭曲(Dalglc, 2002)。 在我国,兰新铁路乌鞘岭隧道穿越祁连山东麓的 毛毛山-老虎山断裂时,多处遇到围岩大变形和二 衬开裂等问题,水平最大变形 1.034m,拱顶最大 下沉 1.053m,导致支护失效且持续变形不收敛 (Dong Qinyin, 2005; Liu Zhichun et al., 2006). 京昆高速大相岭泥巴山隧道穿越16条断裂,施工 期间遭遇围岩大变形和突水等严重问题(Deng Ronggui et al., 2010).

3.3 龙门山断裂带邓家坪隧道工程稳定性研究

成兰铁路邓家坪隧道穿越 2008 年汶川地震的 发震断裂带——龙门山中央断裂带,因此备受关注。 笔者基于隧址区断裂特征和构造应力场分析,建立 了三维地质模型和 ANSYS 有限元模型(图 6,图 7),并采用三轴试验确定了围岩、断裂破碎带和断裂 影响带的力学参数(Zhou et al., 2013)。



Dengjiaping tunnel in Chengdu-Lanzhou railway

(1)不同线路走向方案的岩体变形特征。通常 认为,生命线工程因线形限制必须穿越断裂时,应尽 量保持隧道轴线与断裂走向正交(Lu Yulong,



Fig. 7 Three-dimensional geological model of Dengjiaping tunnel

1996; Huang Shengwen et al., 2006)。然而,隧道 走向与断裂正交是比较苛刻的条件。笔者从隧道工 程地质选址与优化的角度,通过模拟隧道以 10°、 30°、50°、70°和 90°夹角穿越活动断裂的破坏影响范 围,认为当隧道与断裂夹角大于 50°时,影响范围相 对较小(图 8)。龙门山断裂对隧道影响的上盘效应 明显,上盘与下盘影响带宽度比为 1.25~1.5。

(2)地震作用下断裂附近的隧道变形特征。在 地震作用下,除了断裂上盘变形量比下盘大外,与断 裂交汇处的隧道断面处于压、拉、扭共存的极其复杂 应力状态,影响带宽度达 130~175m(图 9)。在衬 砌条件下应力状态有明显改善,建议在断裂带处采 用多种支护方式以满足地震状态下支护结构的强度 和变形需要。

(3)非地震状态下断裂附近的隧道变形特征。 在非地震条件下,断裂带作为软弱带,隧道围岩变形 较大,*a*=50°时的断裂带处最大变形可达 22cm,已 超出允许变形值;在拱顶出现压应力集中,最大压应 力达 41.4MPa,需加强支护(图 10)。

4 活动断裂带的地质灾害效应

活动断裂带的地质灾害效应不仅仅是地震诱发



图 8 不同线路方案的最大剪应力及对应的断裂影响带宽度分布曲线

Fig. 8 Maximum shear stress and corresponding influence width for different route schemes



图 9 a=50°时与断裂带交汇处隧道断面各特征点位移 Fig. 9 Landmark displacements of tunnel section at the intersection of fault zones when a=50° (a)一横向位移;(b)一轴向位移;(c)一竖向位移

(a)-Lateral displacement; (b)-axial displacement; (c)-vertical displacement



图 10 a=50°时隧道围岩位移和应力分布云图

Fig. 10 Distribution map of displacement and stress of tunnel wall rock when $a=50^{\circ}$

(a) 一模型内部展示图;(b) 一隧道围岩总位移分布云图;(c) 一隧道围岩最大主应力分布云图;(d) 一隧道围岩最小主应力分布云图 (a) 一Model internal display diagram; (b) — distribution map of total displacement in tunnel wall rock; (c) — distribution map of maximum

principal stress in tunnel wall rock; (d)—distribution of minimum principal stress in tunnel wall rock

崩塌滑坡等地质灾害过程,还涉及活动断裂带对地 形地貌和岩体结构的影响、断裂蠕滑作用对斜坡应 力场和稳定性的影响、断裂活动为地质灾害提供物 源以及活动断裂带斜坡在持续重力作用下的变形破 坏等方面,因此,无论从区域活动构造控震角度还是 从局地斜坡带活动断裂控滑角度,活动断裂对群发 地质灾害的诱发作用均不容忽视。

4.1 活动断裂带对地形地貌和岩体结构的影响

断裂活动造成地质块体快速差异性隆升、河流 深切,容易积累势能(Peng Jianbing, 2006)。断裂 带斜坡内结构面通常密集发育、类型多样,斜坡岩体 完整性大大降低,岩体力学性质急剧裂化,极易导致 大型崩塌滑坡发生,且稳定性较差。野外调查和研 究表明,活动断裂带附近的大型滑坡灾害主要受控 于特殊的地形地貌、山体结构以及断裂活动的动力 特征等方面,常形成完整的断裂活动一差异性隆 升一风化剥蚀(滑坡)的演化序列(Zhang Yongshuang et al., 2016b)。

4.2 断裂剧烈活动(地震)诱发崩塌滑坡灾害

断裂剧烈活动引起的地震作用不仅可以造成不 稳定的山体直接形成崩塌滑坡等地质灾害,还可导 致地质灾害易发程度低的山体成为灾害敏感区。以 龙门山断裂带为例,汶川地震诱发大型一特大型滑 坡数百处,在四川汶川、什邡、绵竹、安县、北川和青 川等地最为发育,其中70%以上的大型滑坡密布于 龙门山中央断裂附近。在距发震断裂约 3km 范围内,大型高速远程滑坡达 94 个,超过大型滑坡总数的 50%,说明距发震断裂越近,滑坡密度越大,滑坡 规模也越大(Xu Qiang et al., 2010)。

4.3 断裂蠕滑作用对斜坡稳定性的影响

众所周知,并非所有的活动断裂都会诱发地震, 断裂的蠕滑作用对斜坡应力场具有重要的影响,并 制约着地质灾害的发育特征。从大尺度来说,大型 断裂控制了区域构造应力场的分布;从小尺度来看, 在褶皱或断裂构造附近,应力场常发生变化,形成与 区域应力场不一致的局部应力场。断裂构造附近的 坡体结构更易破坏,从而产生规模更大、破坏性更强 的崩塌滑坡等,是内外动力耦合作用形成地质灾害 的主要表现形式之一(Li Xiao et al., 2008; Zhang Yongshuang et al., 2009b)。

近年来,断裂蠕滑作用对滑坡的影响得到国内 外学者的重视。Scheingross et al. (2013)采用 InSAR 监测技术,在美国加州圣安德烈斯断裂附近 获取了150个以前未识别出来的蠕滑型滑坡,主要 发生在坡度为20%~40%的山坡上,其中75%的滑 坡位于距断裂不到2km 范围(图11)。这种现象仅 用地形、降水和岩石类型等来解释是远远不够的,这 极可能是圣安德烈斯断裂导致区域岩体强度降低而 加剧山坡失稳的结果。笔者在川西鲜水河断裂带也 获得了类似的结果(Zhang Yongshuang et al., 2016b; Yao Xin et al., 2017), PS-InSAR 观测到的 蠕滑型滑坡主要沿断裂带分布(图 12), 很好地反映 了断裂蠕滑作用的地质灾害效应。





Fig. 11 PS-InSAR monitoring result of slides along the San Andreas fault (after Scheingross et al., 2013)

4.4 断裂活动为地质灾害链提供大量物源

区域性活动断裂常控制河谷的形成发育,并与 泥石流主沟呈大角度相交,成为地质灾害链的源头。 特别是,当活动断裂垂直穿越部分泥石流沟的形成 区和流通区时,造成沟道两岸岩土体破碎强烈,易发 生崩塌滑坡,为泥石流提供丰富物源(Zhang Yongshuang et al., 2014)。上述现象在青藏高原 东缘十分常见,例如安宁河断裂带沿线的浑水沟泥 石流、冷渍沟泥石流、盐井沟泥石流、勒帕沟泥石流 和拖乌泥石流等活动强烈,危害严重。

5 研究展望

活动构造带工程地质问题是工程地质和岩土工 程界长期关注的难点,通过多年持续的研究,有望形 成一个融合构造地质、工程地质和现代技术方法的 交叉学科——活动断裂带工程地质学。结合笔者十 余年在青藏高原活动构造区工程地质调查工作经验 和体会,提出今后需要加强研究的方向。



图 12 鲜水河断裂带滑坡 PS-InSAR 监测结果 Fig. 12 PS-InSAR monitoring results of the slow-moving slides along the Xianshuihe fault zone

5.1 活动断裂带工程地质应用基础理论研究

从研究对象和工程类型考虑,活动断裂带工程 地质研究应进一步聚焦以下方面的应用基础理论: 活动断裂识别与鉴定、区域地壳稳定性和场地工程 地质稳定性问题、活动断裂的避让问题(地面工程)、 活动断裂带隧道工程稳定性问题(地下工程)、活动 断裂带地质灾害效应(斜坡稳定问题)。在活动构造 区,地震诱发地质灾害预测也是需要重点研究的问 题。应着重研究上述问题的发育特征、成因机理和 变化规律,并探索揭示这些规律的新技术新方法。

5.2 活动断裂带工程地质习性的精细刻画与工程 效应研究

进一步关注活动断裂带分段活动习性、工程地 质岩组的工程特性,将断裂影响带作为特殊工程地 质岩组,加强活动断裂带隧道围岩工程地质岩组的 精细刻画及围岩工程分类研究,这是隧道施工工程 地质问题预测和评估的基础。活动断裂带工程地质 岩组划分应与围岩工程分类相联系,并综合考虑隧 道埋深或所处的应力环境,揭示不同条件下活动断 裂不良习性与工程相互作用机理。加强非震状态下 内外动力耦合作用机理研究,包括地面工程和地下 工程。特别是关注高山峡谷区活动断裂附近的应力 重分布规律,揭示岸坡重分布应力场对隧道进出口 围岩稳定和高陡岸坡稳定性的影响。

5.3 活动断裂带工程地质问题防范的新技术研发 进一步改进遥感、地面调查、物探、钻探、试验测 试等传统工程地质调查勘察技术,加强相关技术的 适配性分析。重点研发针对活动断裂带工程地质问 题的预测评价、监测预警和防范防控技术,在预测评 价方面,提升基于活动断裂带地质灾害机理的早期 识别和隐患判识预判能力;在监测预警方面,形成基 于地质演化过程的空-天-地一体化监测预警技术; 在防范技术方面,研发与活动断裂习性相适应的隧 道施工工艺(如针对隧道 TBM 施工技术适宜性,关 注断裂带非对称性变形及其防控对策)、隧道大变形 综合防控技术、节理化岩体或震裂山体的斜坡防护 和灾害防范技术等。

在西南复杂艰险山区的活动断裂带,还要针对 人类工程活动广度和深度不断加大的特点,研发极 端条件下的地质探测、问题防控和灾害防治新技术 方法。例如,川藏铁路途经我国乃至全球地形陡度 最大、内外动力作用最强烈、极端气候异常不断加剧 的区域,不仅穿越多条区域性活动断裂带,而且在断 裂带附近可能同时出现隧道围岩稳定、高温热害、涌 水突泥等疑难问题。这些问题耦合效应的预判,需 要多学科联合攻关和技术交叉融合。

5.4 相关技术标准研究

在活动断裂带重大工程地质问题成灾机理与防 控技术研究的基础上,进一步建立和完善相关技术 标准。针对不同工程类型(地面工程、隧道工程、边 坡工程等)的特点,研发相应的预测评价、监测预警 和防范防控技术规范或指南,先试点、示范,再推广 应用。

6 结论

活动断裂带工程地质研究的内容主要涉及活动 断裂识别与鉴定、区域地壳稳定性与场地稳定性评 价、活动断裂的避让问题、活动断裂带隧道工程稳定 性问题、活动断裂的地质灾害效应及其防范等。本 文简要回顾了国内外活动断裂带工程地质研究从模 糊到逐渐清晰的过程,重点梳理总结了地面工程避 让活动断裂、隧道工程穿越活动断裂带的稳定性评 价、活动断裂带地质灾害效应等方面的主要进展,提 出了今后应继续加强活动断裂带工程地质应用基础 理论研究、活动断裂带工程地质习性的精细刻画与 工程效应研究、活动断裂带工程地质问题防范的新 技术新方法研发,以及相关技术标准研究等。通过 破解活动断裂带工程地质研究的关键科学问题,有 望构建融合构造地质、工程地质和现代技术方法的 交叉学科——活动断裂带工程地质学,为重大工程 规划和防灾减灾提供新的理论和技术支撑。

致谢:在 2016 年全国地质灾害学术论坛上,笔 者报告得到王思敬院士的认可和启发,进而补充完 善形成本文。笔者近期受邀在 2019 年第 225 期双 清论坛作了主题报告,希望起到抛砖引玉的作用。

References

- Asakura T. 1997. Mountain Tunnels Performance in the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake. The International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics.
- Boncio P, Galli P. 2008. Surface fault rupture hazard zoning: insights from the L' Aduila 2009 earthquake. Il Contributo della Geologia Allaeom Prensione dei Terremoti, 22(3): 8~9.
- Bray J D, Seed R B, Seed H B. 1994. Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil. Journal of Geotechnical Engineering-ASCE, 120(3): 562~580.
- Brown T, Brekke T L. 1980. Some aspects of the behaviour of tunnels that cross active faults. Proc 3rd Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington, 12~16 May 1980, 2: 189~194.
- Dalgle S. 2002. Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway, Turkey. Engineering Geology, 67(1-2): $73 \sim 96$.
- Deng Qidong, Wen Xueze. 2008. A review on the research of active tectonics—history, progress and suggestions. Seismology and Geology, 30(1): 1~30 (in Chinese with English abstract).
- Deng Ronggui, Fu Xiaomin, Shao Jiang. 2010. Rock Engineering Problems of Extra-Long Deep Tunnel in Niba Mountain. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press (in Chinese).
- Dong Qinyin, Song Jianping. 2005. Design and construction of F7 moveable faultage on Wuqiaoling tunnel. Tunnel Construction, 25(3): 58~61 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Wu Zhenhan, Yang Nong, Ma Yinsheng, Shi Wei, Chen Zhengle, Long Changxin, An Meijian. 2008. Surface rupture and co-seismic displacement produced by the M_s 8.0 Wenchuan earthquake of May 12th, 2008, Sichuan, China: Eastwards growth of the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Geologica Sinica, 82(5): 938~948.
- Du Dongju, Li Tonglu. 1996. Division and evaluation of regional stable engineering geology in Mainland China. Proceedings of the 30th International Geological Congress Geological Science Research. Beijing: China Economic Publishing House, 499 ~ 510 (in Chinese with English abstract).
- Gu Dezhen. 1979. Foundation of Rock Engineering Geomechanics. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Guo Changbao, Meng Qingwei, Zhang Yongshuang, Zheng Guang. 2012. Numerical simulation of fault structure influence on stress field of slope body and study on disaster-causing mechanism. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 32 (5): 592 \sim 599 (in Chinese with English abstract).
- Guo Endong, Shao Guangbiao, Bo Jingshan, Shi Zhaoji. 2002. A method for earthquake rupture analysis of overlying soil site. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 22(5): 122~126 (in Chinese with English abstract).
- Hu Haitao, Yi Mingchu. 1979. Regional Stability along the Qinghai-Tibet Railway (Germu-Naqu). Selected papers for the first National Engineering Geology Conference (in Chinese with English abstract).
- Hu Haitao, Yin Yueping. 1996. Theory and evaluation methods of regional crust stability safety island. Geoscience Frontiers, 3 (1-2): 57~68 (in Chinese with English abstract).
- Huang Runqiu, Li Weile. 2008. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th may, 2008. Chinese Journal of Rock

Mechanics and Engineering, 27(12): $2285 \sim 2592$ (in Chinese with English abstract).

- Huang Shengwen, Si Tiehan, Chen Weisheng, Ye Guangyao. 2006. Finite element analyses of influence of fault on large-span tunnel surrounding rock stress. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(s2): 3788~3793 (in Chinese with English abstract).
- Jethwa J L, Singh B, Mithal R S. 1980. Influence of geology on tunneling conditions and deformational behavior of supports in faulted zones—A case history of the Chhibro-Khodri tunnel in India. Engineering Geology, 16(3-4): 291~319.
- Kawakami H. 1984. Evaluation of deformation of tunnel structure due to Izu-Oshima-Kinkai earthquake of 1978. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 12(3): 369~383.
- Konagai Kazuo. 2003. An assumed scenario for seismic fault zoning. Japan Society of Civil Engineers, 4: 1~10.
- Li Tianbin. 2008. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 16 (6): 742~750 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiao, Li Shouding, Chen Jian, Liao Qiulin. 2008. Coupling effect mechanism of endogenic and exogenic geological processes of geological hazards evolution. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(9): 1792~1806 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guochang. 1979. Regional stability and earthquake. Hydrogeology and Engineering Geology, 2: 3~9 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guochang. 1993. Regional Stability Engineering Geology. Changchun: Jilin University Press (in Chinese).
- Liu Zhichun, Li Wenjiang, Sun Minglei, Zhu Yongquan. 2006. Monitoring and comprehensive analysis in F4 section of Wuqiaoling tunnel. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(7): $1502 \sim 1511$ (in Chinese with English abstract).
- Lu Yulong. 1996. Railway Engineering geology and construction practice at plateau regions of Southwest China—along Nanning-Kunming railway lines as an example. Journal of Railway Engineering Society, 13 (2): 211 ~ 220 (in Chinese with English abstract).
- Peng Jianbing, Mao Yanlong, Fan Wen. 2001. Research on Regional Stability Dynamics. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Peng Jianbing. 2006. Some important problems to be addressed in research of active tectonics and environmental disasters in China. Journal of Engineering Geology, 14(1): $5 \sim 12$ (in Chinese with English abstract).
- Prentice C S, Ponti D J. 1997. Coseismic deformation of the Wrights Tunnel during the 1906 San Francisco earthquake; a key to understanding 1906 fault slip and 1989 surface ruptures in the South Santa Cruz Mountains, California. Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets, 102(1): $635 \sim 648$.
- Qian Qihu, He Chuan, Yan Qixiang. 2009. Dynamic response characteristics of tunnel engineering and seismic damage analysis of Wenchuan earthquake tunnel. Analysis and research on earthquake damage of Wenchuan Earthquake Engineering. Beijing: Science Press, $608 \sim 618$ (in Chinese with English abstract).
- Scheingross J S, Minchew B M, Mackey B H, et al. 2013. Faultzone controls on the spatial distribution of slow-moving landslides. Geological Society of America Bulletin, 125(3-4): 473~489.
- Sun Guangzhong. 1988. Structural Mechanics of Rock Mass. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Sun Xiaoyu, Zhou Chenghu, Guo Zhaocheng, Zhang Jun, Su Fenzhen, Kin Tianyu, Zhang Dandan, Lü Tingting. 2010. Wenchuan 5.12 earthquake surface secondary disaster assessment and analysis. Acta Geologica Sinica, 84(9): 1283~

1291 (in Chinese with English abstract).

- Sun Ye, Tan Chengxuan, Wang Ruijiang, Hu Daogong. 1996. An assessment and zonation of regional crustal stability in and around the dam region of the Three Gorges Project on the Yangtze River. Acta Geoscientia Sinica, 17(3): 258~268 (in Chinese with English abstract).
- Takashi Nakada, Takashi Kumamoto. 2003. On the problem of land use from the viewpoint of active fault location information and "active fault method": examples of utilization of digital map of active fault (1) school facility and activefault. Active Fault Study, 13~18 (in Japanese).
- Tie Rui. 2009. Research on surficial fracture characteristics and avoiding fortification of active faults. Beijing University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Tsukawa S, Lu Z H. 1995. Exploring the system and reality of chain disasters. Disaster Prevention Expo, 5: 22~27.
- Wang W L, Wang T T, Su J J, et al. 2001. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chiearthquake. Tunneling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 16(3): 133~150.
- Wang Zhongqi, Xie Junfei, Shi Zhaoji. 1983. Introduction to Earthquake Engineering Geology. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Wu Zhenhan, Zhang Zuochen. 2008. Types of seismic and geological hazards caused by the $M_{\rm s}$ 8.0 Wenchuan earthquake. Acta Geologica Sinica, 82 (12): 1747 \sim 1757 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qiang, Li Weile. 2010. Distribution of large-scale landslide induced by Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 18(6): 818~826 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Yu Guihua, Ma Wentao, Ran Yongkang, Chen Guihua, Han Zhujun, Zhang Lanfeng. 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault. Seismology and Geology, 24 (4): 470~483 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Yu Guihua, Chen Guihua, Li Chenxia, Zhang Lanfeng, Yann Klinger, Paul Tapponnier, Liu Jing. 2007. Near-surface character of permanent geologic deformation across the megastrike-slip faults in the northern Tibetan plateau. Seismology and Geology, 29(2): 201 ~ 217 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Wen Xueze, Yu Guihua. 2009. Coseismic reverse and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China. Geology, 37(6): 515~518.
- Yao Xin, Zhang Yongshuang, Li Lingjing, Ling Sheng, Wang Zongsheng, Zhou Zhenkai. 2017. InSAR-based recognition of slow-moving slop disasters along the Xianshuihe active fault in the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Geologica Sinica, 91 (8): 1694~1705 (in Chinese with English abstract).
- Yi Mingchu, Hu Haitao, Yin Yueping, Peng Hua. 2006. Developing Li Siguang's "Safe Island" thought and making serious evaluation and research on regional crustal stability in areas of engineering works. Journal of Geomechanics, 12(2): $105 \sim 118$ (in Chinese with English abstract).
- Yi Mingchu. 2014. Development and Application of Li Siguang's "Safe Island" Thought and Activity Structure System. Tianjin: Tianjin People's Publishing House (in Chinese).
- Yin Yueping. 2008. Researche on the geohazards triggered by Wenchuan earthquake Sichuan. Journal of Engineering Geology, 16(4): 433~444 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianyi, Bo Jingshan, Li Ping, Li Juwen. 2010. Influence of surface ruptures on buildings during $M_{\rm s}$ 7.1 Yushu earthquake. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 30(6): $24 \sim 31$ (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianyi, Bo Jingshan, Yuan Yifan, Huang Jingyi. 2012. Review of research on active fault and its setback. Journal of Natural Disasters, 21(2): 9~18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Zhuqi, Li Haibing. 2013.

Active faults, earthquake disasters and their dynamic processes in China Mainland. Science China (Earth Sciences), 43(10): $1607 \sim 1620$ (in Chinese with English abstract).

- Zhang Yongshuang, Hu Daogong, Wu Zhonghai, et al. 2009a. Crustal Stability and Major Engineering Geological Problems along the Yunnan-Tibet Railway. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang Yongshuang, Shi Jusong, Sun Ping, Yao Xin. 2009b. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geohazards. Journal of Geomechanics, 15(2): 131 ~ 141 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Ma Yinsheng, Hu Daogong, Yang Nong, Xiong Tanyu, Guo Changbao. 2010a. Investigation and research on the surface rupture of the Yushu earthquake and reconstruction Site Selection. Acta Geologica Sinica, 84(5): 593~605 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshaung, Sun Ping, Shi Jusong, Yao Xin, Xiong Tanyu.
 2010b. Investigation of rupture influenced zones and their corresponding safe distances for reconstrution after 5. 12
 Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 18 (3): 312 ~319 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Cheng Yuliang, Yin Yueping, Lan Hengxing, Wang Jun, Fu Xiaoxiao. 2014. High-position debris flow: A long-term active geohazard after the Wenchuan earthquake. Engineering Geology, 180: 45~54.
- Zhang Yongshuang, Yao Xin, Yu Kai, Du Guoliang, Guo Changbao. 2016a. Late-Quaternary slip rate and seismic activity of the Xianshuihe fault zone. Acta Geologica Sinica, 90 (2): 525~536.
- Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Yao Xin, Yang Zhihua, Wu Ruian, Du Guoliang. 2016b. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau. Acta Geoscientica Sinica, 37(3): 277 ~ 286 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Xin. 2012. Research on integrated route selection of Chengdu-Lanzhou railway in highlyseismic mountain area. High Speed Railway Technology, 3(6): 14~17 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Nengjuan, Zhang Yongshuang, Guo Changbao. 2013. Stability analysis of the tunnel across active fault under seismic load. Proceedings of the International Symposium and 9th Asian Regional Conference of IAEG, Beijing, China, 23~25.
- Zhou Qing, Zhou Bengang, Ran Hongliu. 2006. Comparative study on surface rupture of faults in different soil mass. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 1 (3): 225 ~ 233 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qing, Xu Xiwei, Yu Guihua, Chen Xiancheng, He Honglin, Yin Gongming. 2008. Investigation on widths of surface rupture zones of the $M_{\rm s}$ 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan Province, China. Seismology and Geology, 30(3): 778~788 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenghua, Zhang Yanmei, Sun Pingshan, Lu Tao. 2003. A summary of damage study on fault site. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 23(5): $38 \sim 41$ (in Chinese with English abstract).

参考文献

- 翠川三郎,卢振恒.1995.探讨连锁性灾害的系统和实态.防灾博 览,5:22~27.
- 邓起东,闻学泽. 2008. 活动构造研究——历史、进展与建议. 地震 地质, 30(1): 1~30.
- 邓荣贵, 付晓敏, 邵江. 2010. 泥巴山深埋特长隧道岩体工程问题 研究. 成都: 西南交通大学出版社.
- 董勤银, 朱建平. 2005. 乌鞘岭隧道 F7 活动断裂设计与施工. 隧道 建设, 25(3): 58~61.
- 杜东菊,李同录. 1996. 中国大陆区域稳定工程地质分区与评价.

见:第30届国际地质大会地质科学研究论文集.北京:中国经济出版社,499~510.

- 谷德振. 1979. 岩体工程地质力学基础. 北京:科学出版社.
- 郭恩栋, 邵广彪, 薄景山, 石兆吉. 2002. 覆盖土层场地地震断裂反 应分析方法. 地震工程与工程振动, 22(5): 122~126.
- 郭长宝,孟庆伟,张永双,郑光.2012.断裂构造对斜坡应力场影响 的数值模拟及成灾机理研究.防灾减灾工程学报,32(5):592 ~599.
- 胡海涛,易明初.1979. 青藏铁路沿线(格尔木一那曲)的区域稳定 性.全国首届工程地质学术会议论文选集.
- 胡海涛,殷跃平.1996.区域地壳稳定性评价"安全岛"理论及方法. 地学前缘,3(1-2):57~68.
- 黄润秋,李为乐.2008."5·12"汶川大地震触发地质灾害的发育分 布规律研究.岩石力学与工程学报,27(12):2285~2592.
- 黄生文,司铁汉,陈文胜,叶光耀.2006.断层对大跨度隧道围岩应 力影响的有限元分析.岩石力学与工程学报,25(s2):3788 ~3793.
- 李天斌. 2008. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素 分析. 工程地质学报, 16(6): 742~750.
- 李晓,李守定,陈剑,廖秋林. 2008. 地质灾害形成的内外动力耦合 作用机制. 岩石力学与工程学报, 27(9): 1792~1806.
- 刘国昌. 1979. 区域稳定性与地震. 水文地质工程地质, 2: 3~9.
- 刘国昌. 1993. 区域稳定工程地质. 长春: 吉林大学出版社.
- 刘志春,李文江,孙明磊,朱永全. 2006. 乌鞘岭隧道 F4 断裂区段 监控量测综合分析. 岩石力学与工程学报,25(7):1502 ~1511.
- 陆玉珑.1996.中国西南高原区的铁路工程地质与施工实践——以 南昆铁路为例.铁道工程学报,13(2):211~220.
- 彭建兵,毛彦龙,范文.2001.区域稳定动力学研究.北京:科学出版社.
- 彭建兵.2006.中国活动构造与环境灾害研究中的若干重大问题. 工程地质学报,14(1):5~12.
- 钱七虎,何川,晏启祥.2009.隧道工程动力响应特性与汶川地震 隧道震害分析及启示.汶川大地震工程震害调查分析与研究. 北京:科学出版社.608~618.
- 孙广忠. 1988. 岩体结构力学. 北京:科学出版社.
- 孙晓宇,周成虎,郭兆成,张俊,苏奋振,仉天宇,张丹丹,吕婷婷. 2010. 汶川 5.12 大地震地表次生灾害评价与分析.地质学报, 84(9):1283~1291.
- 孙叶,谭成轩,王瑞江,胡道功.1996.长江三峡工程坝区及外围地 壳稳定性评价与分区研究.地球学报,17(3):258~268.
- 铁瑞.2009. 活断层强震地面断裂特性及避让设防研究.北京工业 大学.
- 王钟琦,谢君斐,石兆吉. 1983. 地震工程地质导论. 北京:地震出版社.
- 吴珍汉,张作辰. 2008. 汶川 8 级地震地质灾害的类型及实例.地 质学报,82(12):1747~1757.
- 徐锡伟,于贵华,马文涛,冉永康,陈桂华,韩竹军,张兰凤.2002. 活断层地震地表破裂"避让带"宽度确定的依据与方法.地震地 质,24(4):470~483.
- 徐锡伟,于贵华,陈桂华,李陈侠,张兰凤,Yann Klinger, Paul Tapponnier,刘静. 2007. 青藏高原北部大型走滑断裂带近地 表地质变形带特征分析. 地震地质,29(2):201~217.
- 许强,李为乐.2010. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究. 工程 地质学报,18(6):818~826.
- 姚鑫,张永双,李凌婧,凌盛,王宗盛,周振凯. 2017. 青藏高原鲜 水河活动断裂带蠕变斜坡地质灾害 InSAR 识别研究. 地质学 报,91(8):1694~1705.
- 易明初,胡海涛,殷跃平,彭华.2006.发扬李四光"安全岛"思想, 认真做好工程建设地区的区域地壳稳定性评价研究工作.地质 力学学报,12(2):105~118.
- 易明初.2014. 李四光"安全岛"思想及活动构造体系的发展和应用.天津:天津人民出版社.
- 殷跃平. 2008. 汶川八级地震地质灾害研究. 工程地质学报, 16 (4): 433~444.

- 张建毅, 薄景山, 李平, 李巨文. 2010. 玉树地震地表破裂对建筑物 影响的分析. 地震工程与工程振动, 30(6): 24~31.
- 张建毅, 薄景山, 袁一凡, 黄静宜. 2012. 活动断层及其避让距离研 究综述. 自然灾害学报, 21(2): 9~18.
- 张培震,邓起东,张竹琪,李海兵. 2013.中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程.中国科学:地球科学,43(10):1607~1620.
- 张永双,胡道功,吴中海,等. 2009a. 滇藏铁路沿线地壳稳定性及 重大工程地质问题. 北京:地质出版社.
- 张永双,石菊松,孙萍,姚鑫. 2009b. 汶川地震内外动力耦合及灾 害实例.地质力学学报,15(2):131~141.
- 张永双,马寅生,胡道功,杨农,熊探宇,郭长宝. 2010a. 玉树地震 地表破裂调查与灾后重建避让选址研究. 地质学报,84(5): 593~605.
- 张永双,孙萍,石菊松,姚鑫,熊探宇. 2010b. 汶川地震地表破裂 影响带宽度调查与建筑物场地避让宽度探讨分析. 工程地质学

报,18(3):312 ~319.

- 张永双,郭长宝,姚鑫,杨志华,吴瑞安,杜国梁. 2016. 青藏高原 东缘活动断裂地质灾害效应研究.地球学报,37(3):277 ~286.
- 中田高, 隈元崇. 2003. 活断層位置情報からみた土地利用の問題 点と「活断層法」について:活断層詳細デジタルマップの活用 例(1) 学校施設と活断層. 活断層研究, 13~18.
- 钟新. 2012. 高烈度地震山区成兰铁路综合选线研究. 高速铁路技 术,3(6):14~17.
- 周庆,周本刚,冉洪流.2006.不同土质条件下断层地表破裂对比研究.震灾防御技术,1(3):225~233.
- 周庆,徐锡伟,于贵华,陈献程,何宏林,尹功明. 2008. 汶川 8.0 级地震地表破裂带宽度调查. 地震地质, 30(3): 778~788.
- 周正华,张艳梅,孙平善,卢滔. 2003. 断层场地震害研究综述.地 震工程与工程振动,23(5):38~41.

Research on engineering geology related with active fault zone

ZHANG Yongshuang^{*1,2)}, REN Sanshao^{1,2)}, GUO Changbao²⁾, YAO Xin²⁾, ZHOU Nengjuan²⁾

1) Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin, 300170;

2) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081

* Corresponding author: zhys100@sohu.com

Abstract

The engineering geology of active tectonic zone is a difficult problem in engineering geology and geotechnical engineering for a long time. It mainly involves problems of surface rupture, tunnel seismic damage and slope geo-hazards caused by severe earthquakes, and abnormal stress of tunnels, large deformation of jointed rock zone, and the influence of long-term evolution of active fault on terrain landforms, slope rock mass structure and partial geostress field during non-seismic. Research on engineering geology related with active fault zone in domestic and foreign is briefly reviewed from fuzzy to gradually clear. The main progress in the active fault avoidance of surface engineering, the stability prediction and evaluation of tunnel through active fault zone, and geo-hazard effect of active fault zone are summarized. Combining with the authors' previous research, it is considered that: (1) The width of influence zone or avoiding distance is different with the type of active fault, the linear relationship D=10H+16.0 m between the width of influence zone (D) and vertical displacement (H) of reverse-fault surface rupture can be used to determine the avoidance distance, avoidance distance of strike-slip surface rupture should be 15 m. ②According to the railway alignment and construction process in complex and dangerous mountainous areas, it is given that the reasonable angle of tunnel engineering crossing active fault zone and the tunnel deformation and failure characteristics near active fault zone during earthquake and nonearthquake periods. ③ The major manifestations of the geohazard effects of active faults zone are revealed in terms of the influence of active fault on terrain landforms, rock mass structure, collapse and landslide hazards induced by violent fault activity (earthquake), the effect of fault creep on slope stress field and stability, and the fact that fault activity provides a large number of material sources for the geohazard chain. Based on the above research progress and existing problems, the main research directions that deserve attention in the future are put forward, which has guiding significance for the research of engineering geological problems and disaster prevention and mitigation in active tectonic zone.

Key words: active fault zone; avoiding distance; tunnel stability; slope geohazard; mega project