

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.08.011

公路路基震害特征及震后工作状态的安全评估

李志强¹, 李金贝², 张鸿儒²

(1. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为了深入研究公路路基震害特征及震后路基工作状态的安全评估, 根据汶川地震灾区的大量路基震害调查、检测与抢通保通的成果, 概括介绍了汶川地震路基的损毁情况; 归纳总结了公路路基结构的典型震害表现形式及特征; 探讨了路基及其支挡结构的震害影响因素。研究结果表明: 路基结构震害主要表现为路基沉陷、扭曲变形、开裂、滑坡、路面隆起以及地震对路基结构产生的次生破坏; 路基的震害影响因素主要是地质条件、地震烈度、路基结构形式等。据此给出了震后路基结构安全诊断项目及检测结果的评估, 同时根据评估结果, 针对抢险救灾阶段和恢复重建阶段, 对不同安全等级的路基结构提出不同处治建议, 以期震后路基结构病害预防、工作状态诊断和病害处理提供技术参考。

关键词: 道路工程; 安全评估; 震害检测; 路基

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2011) 08-0057-06

Earthquake Damage Characteristics and Safety Assessment of Post-earthquake Working Status of Road Subgrade

LI Zhiqiang¹, LI Jinbei², ZHANG Hongru²

(1. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: For investigate the earthquake damage features and safety assessment of post-earthquake working status of highway subgrade, the damage of subgrade in Wenchuan earthquake was briefly introduced based on the results of Wenchuan earthquake investigation, inspection, rush repairing and recovery. The typical earthquake damage forms and features of subgrade as well as the influencing factors of earthquake damage were discussed. The results show that (1) the forms of subgrade damage mainly contain subsidence, distortion, cracking, slipping, apophysis and secondary damage; (2) the main influencing factors of subgrade damage are geological condition, earthquake intensity, subgrade structure, etc. The post-earthquake subgrade structure safety diagnosis items and evaluation of testing results were determined. Different treatment advices were given on different security levels of subgrade structure for rush repairing and recovery stages based on the assessment result to provide technical references for the post-earthquake disease prevention, diagnosis and disease treatment.

Key words: road engineering; safety assessment; inspection of seismic damage; subgrade

0 前言

地震作用下路基结构的安全性是岩土地震工程

以及公路工程等领域的重大问题之一。汶川地震中, 路基工程的抢通和保通, 一度成为需要保障的最为关键的生命线工程, 使得震后路基工程的安全评价

问题,成为亟待解决的关键课题。

在地震过程中,公路路基结构遭到破坏是非常常见的,强度不一的地震可能会引起路基结构变形,局部破坏甚至坍塌。历史上,国内外的许多地震事例中可以看出^[1-5],由于地震引发的公路路基破坏事例屡见不鲜,给社会造成了很大的经济损失。震害调查是了解路基结构震后工作性能最直接、最可靠的方法,而且也是验证理论分析、模型试验方法和成果的重要依据^[6]。不同地震作用下,不同场地条件的工程构筑物的震害特征也不同。此前,关于路堤的详细震害调查见于2004年日本Niigata-kenChuetsu地震^[7],震级6.8级,所记录的最大加速度超过 $1g$,对大范围的路路堤造成了损毁。2008年中国汶川地震,震级8.0级,所记录的最大加速度也高达 $0.973g$,持时更长达 80 s ^[8],是近代我国西部山区发生的最强烈地震,震区公路路堤破坏形式多样,损毁严重。

我国地处世界上两个最活跃的地震带,是个多发地震国家,有无数条公路位于强震地带。1976年唐山地震中,在地震区内的公路路基结构破坏严重,其中,在北京—山海关铁路线K267+374处,在山海关一侧的石砌路肩挡土墙高 $3\sim 4\text{ m}$,长 9 m ,当地震发生后,挡土墙整体向外倾覆 20 cm 。2008年汶川地震中,地震区内公路路基破坏极为严重,其中,在国道213线都江堰—映秀公路K1030+400处路基沉陷、路面开裂、右侧挡土墙外倾且基础脱空,半幅通行。因此,研究震后公路路基结构调查检测技术,对路基结构的震后安全性进行快速评价和损伤探测,尽快恢复交通,保证救援人员安全和最大限度的减少生命财产损失,同时为路基结构的抗震加固提供科学依据,具有非常重要的意义。

1 公路路基结构震害表现形式

1.1 路基结构的震害类型主要有两种

(1) 直接破坏: 所谓直接破坏是指由于路基填方质量不好,墙体支挡能力不够,地震荷载过大而引起路基结构本身的破裂或失稳(见图1: G213线路基开裂)。

(2) 间接破坏: 是指由于地震诱发坡体滑动导致的路基挤压变形,容易诱发路基的开裂滑动甚至坍塌,这是所有路基结构事故中最严重的情形(见图2: S302路基隆起)。

1.2 路基结构震害具体表现形式^[9-13]

(1) 路基沉陷、扭曲变形: 这是震区较为普遍



图1 路基结构直接破坏

Fig. 1 Direct damage of subgrade structure



图2 路基结构间接破坏

Fig. 2 Indirect damage of subgrade structure

的震害(见图3),表现为2个方面: ①路基沉陷变形破坏; ②因地震造成的断裂错动或地下岩层受挤压、扭曲、拉伸作用发生变形而表现出路基路面变形破坏。



图3 路基沉陷变形破坏

Fig. 3 Subsidence of subgrade

(2) 路基开裂、滑动破坏(见图4): 多表现在斜坡半填半挖路基,由于填方与挖方路基的密实度不一致,基底软硬不一致,地震时易沿填挖交界面出现裂缝并与岩土分界面或填土与原状土界面形成贯通性软弱面造成滑动破坏,另外就是由于路基填料为卵砾石土时,地震时,路基边部出现松散滑落。

(3) 路基路面隆起、挤压破坏(见图2): 受地震面波的影响,地表波浪起伏,使路基随之起伏变形,在鼓起地段,产生众多横向张裂缝,严重者将



图4 路基开裂破坏

Fig. 4 Crack of subgrade

路面挤走。

(4) 崩塌、滑坡、泥石流: 崩塌常发生在裂缝发育、岩体松散破碎的高边坡路段, 崩塌性滑坡则多与存在软质破碎岩石、地下水活动、构造软弱面等有关, 而泥石流则往往在陡峻山谷因崩塌、滑坡形成的松散堆积物在雨水因素作用下产生。另外, 松散饱和的碎砾石土边坡也经常出现浅表层的溜坍破坏。

(5) 路基支挡、防护工程破坏: 震区路基挡墙出现坍塌、外倾、侧移、墙面鼓胀、基础脱空等现象较多, 这些现象与地震时地基承载力降低、土压力增大、地基不均匀沉降、墙体材质、施工质量等因素有关, 另外, 调查区部分挡墙采用卵石作原料, 震后, 这些挡墙基本上成散体状。

(6) 地震对路基产生的次生破坏: 如塌方造成河道阻塞、水位上升而淹没公路; 河道压缩致使湍急的水流冲毁路基; 崩塌落石砸坏路基; 滑坡、泥石流淹埋路基。不仅如此, 因岩体震松, 山坡裂缝, 在震后相当长的一段时间内, 还将陆续出现滑坡、崩塌、泥石流等次生灾害, 对公路造成极大危害。

1.3 路基支挡结构震害的主要特征

(1) 地震时, 挡土墙与其周围介质一起产生运动, 当结构存在明显惯性或周围介质与结构间的刚度失配时将产生过度变形而破坏。

(2) 挡土墙震害多发生在所处地层条件有较大变化的区域, 在这些区域内, 地质条件或地形的变化导致地层振动及位移响应有较大不同, 从而在其中产生大的应变, 致使挡墙结构破坏。

(3) 在挡墙断面厚度和高度发生明显变化的部位容易发生破坏。在挡墙拐角部位也容易发生破坏, 是抗震的薄弱环节。

(4) 挡墙处于可液化地层、断层等不良地质时易遭受地震破坏。

2 路基结构震害影响因素

2.1 路基的震害影响因素

(1) 路基边坡的破坏与组成边坡的岩体岩性、风化碎裂程度及所处的地质构造等有关。映秀以南和以北, 分别处于中央断层下盘和上盘, 岩性和风化碎裂程度差异较大, 表现出的破坏类型和破坏程度也不同。映秀以北位于北川—映秀断裂上盘, 岩体以花岗闪长岩为主, 属脆硬性岩石, 受卸荷和风化影响程度大, 岩体中节理、裂隙非常发育, 在地震作用下, 极易发生大规模的深层松动和崩塌、落石; 有名的老虎嘴崩滑体就是深层崩滑造成。而映秀以南, 地层以三叠系须家河组砂泥岩互层为主, 属中—软性岩石, 节理裂隙发育的规模小, 风化深度相对较浅, 地震影响下发生的岩体松动深度有限, 形成的崩塌、落石规模相对较小。断层的上下盘的差异也表现在沿地震断裂带的上盘崩塌、滑坡和泥石流灾害严重性远大于下盘。由此可见, 地层岩性不同及断裂带的上下盘不同很大程度上决定了形成的地质灾害类型和规模的差异。

(2) 路基破坏程度与距震中和发震断层的远近有密切关系调查发现, 从公路路基破坏情况看, 距震中和发震断层越近的路基破坏程度越大, 映秀、北川、青川、汉旺等附近公路路基的开裂、滑移、鼓胀、下沉等震害非常集中, 而远离震中和发震断层, 路基破坏则以路基的轻微开裂和鼓胀为主, 几乎无路基整体破坏的路段, 这与有关研究成果^[14]所描述的地质灾害发育情况类似。

(3) 路基下边坡破坏与所处边坡坡度、防护类型及高度、处治措施等因素有关。

①陡斜坡路堤易发生开裂、滑移破坏。多表现在陡斜坡坡半填半挖路基, 由于填方与挖方路基的密实度不一致, 基底软硬不一致, 且斜坡坡度较陡, 地震时易沿填挖交界面或岩土分界面形成滑动而导致路堤开裂或路堤滑移破坏。

②路基外侧挡防工程倾斜引发路基开裂。挡墙受地震力影响多发生向临空方向外倾, 直接引起路基出现开裂和坍塌破坏, 而部分锚索挡墙, 受锚索约束震后整体完好。

③挡墙倾倒或局部破坏等引起路基垮塌。挡墙倾倒或局部破坏等引起路基垮塌, 可能与墙高和基底岩土土体稳定性有关。

④路基上边坡震害与是否防护、防护类型是否合适、岩体岩性及风化碎裂程度等因素有关。

有无防护措施的破坏差异。从调查情况看，路基上边坡采用了边坡防护明显破坏程度小于未防护的边坡，崩塌、滑坡出现的部位往往没有支护。

防护边坡类型不同的破坏差异。实施了防护工程的边坡也有破坏差异，有的边坡虽然实施了防护措施，但仍没有达到加固边坡的目的，需要根据边坡的岩性、风化程度等综合选择合适的防护措施。比如，边坡风化碎裂带较深，则不适合采用短锚杆的挂网喷混凝土，而采用长锚杆框架梁较为合适。

2.2 路基支挡结构震害影响因素

(1) 地震烈度。大量震害资料表明：当地震烈度达 7 度时，挡土墙可能产生倾覆、滑移、裂缝甚至坍塌破坏，可见地震烈度对挡土墙的震害有显著影响，在相同的场地条件下平均震害率随地震烈度的增加而增加。

(2) 地质条件。地质条件直接影响地震作用时挡土墙周围介质对挡土墙作用力的大小和方式，而作用于挡土墙上的力的方式对挡土墙的破坏形式有决定性的作用。

(3) 挡土墙的高度。随着挡土墙墙高的增加，挡土墙位移、合力的随机地震响应，都有增加的趋势，而且基本上是线性增加。

(4) 挡土墙的结构类型。圬工挡土墙的抗震能力较钢筋混凝土重力式挡土墙弱，重力式挡土墙抗震能力较加筋土等柔性挡土墙的抗震能力弱。

(5) 挡土墙结构的抗震能力。挡土墙是否有排水管和反滤层等排水设施，挡土墙是否配有钢筋等均会反映挡土墙的抗震能力。抗震能力越强，可以承受的地震能量越大。

3 震后路基工作状态安全评估

3.1 震后路基结构安全诊断项目及评估

地震后，应对路基立即进行特别检查。调查检测的主要目的是确认路基的安全性，掌握路基的震后现状，发现对路基结构安全和功能有影响的不利因素，应根据不利的程度，尽早采取对策，及时处理，确保路基的安全，从而保障交通顺畅。震后路基的检测项目主要有边坡、地基、路面、排水系统和支挡结构等，具体检测内容见表 1，根据检查结果按表 2 的规定分为 3 类进行评估。

3.2 震后路基结构工作状态诊断方法

发生地震后，调查检测的主要目的就是确认路基结构的安全性。因此，要求调查检测方法要快速便捷，针对性强，采取的诊断方法主要有以下 3 种：

表 1 震后路基结构检测内容

Tab. 1 Detect contents of post-earthquake subgrade structure

调查对象	调查内容
路基	坑槽（深度、成因、面积）；
	裂缝（长度、宽度、间距、错坎高度）；
	整体沉降；排水设施完善程度、路面湿润程度；
	路面变形破坏；路基边坡坡面变形破坏；
	路基边坡坡脚及地基变形；边坡含水状况；
支挡结构	地表排水系统运行状况。
	表观完整性；变形移动特点（平移、旋转）；
	与支挡结构关联的岩土变形破坏情况；
	岩土体特征指标；岩土体赋存环境指标。

表 2 震后路基结构检测结果的评估

Tab. 2 Test result assessment of post-earthquake subgrade structure

路基安全等级	评估分类	损害程度	损害状况	交通措施
无立即危险	S	无异常	通过肉眼观察没有发现异常情况，路基表面及挡墙无明显破坏，震后无需修补。	正常通行
		轻微异常	肉眼能观察到轻微挡墙面开裂，路面有细微裂缝、轻微凹陷鼓胀现象，不影响正常使用，对交通没有影响，震后暂时无需修补。	
危险	B	异常	路基表面破坏较明显，路面有开裂错台，凹凸鼓胀现象，裂缝宽度较小，路堤边缘有小范围垮塌现象，路堑边坡落石剥落至路面，造成行车不便，经简单处理能顺利通车；支挡结构有墙面剥落、勾缝错动、钢筋外露、伸缩缝错动等，对交通有影响。	管制通行
危险	A	异常显著	路基表面破坏明显，路面开裂明显，路面错台严重，裂缝宽度较大，路面凹凸鼓胀导致路面损坏，路堤垮塌、侧移，边坡崩塌落石砸落至路面，边坡滑坡掩埋路面，行车空间狭小或无法通行；挡土墙边坡滑塌、挡土墙滑移或倾覆、挡土墙基础脱空等，经过一定时间清理才能恢复通车。	禁止通行

(1) 目视检测方法。在工地现场，徒步近距离检查。在调查检测过程中，除用肉眼仔细观察外，还应结合先进的光学仪器进行检测，如裂缝观测仪、全站仪及数码相机等，为判定路基结构安全性提供准确的检测数据。

(2) 无损检测方法。依据目视检测结果，明确

重点检测部位进行地质雷达检查,判定路基结构内部的裂隙发展。

(3) 特殊调查、检测。路基结构遭遇地震后,为及时掌握路基结构受损情况,判断是否满足使用功能和安全性,并为路基维修加固设计提供依据和建议,除进行上述检查检测外,还应进行特殊的调查检测,特殊调查检测主要项目包括:地表状况、钻孔取芯、挡土墙强度、挡墙墙趾埋深等。

4 震后路基病害处治建议

4.1 抢险救灾阶段

根据灾后应急安全评估结果,对不同应急安全等级的路基结构提出不同处治建议:

(1) 正常通行:此类路基在应急状态下可正常通行,但需加强观测,若应急运营中路基挡土墙病害发展,路基结构应急安全评估等级可能发生改变,需采取针对性措施保证短期安全性。路基病害处治需要进行详细检测,并制定针对性方案。

(2) 管制通行:在应急保通条件下可采取临时措施在一定限制条件下恢复路基结构部分服务功能。此类路基在限制条件下满足应急交通需求,但需进一步观测,保障其短期安全性。

(3) 无法通行:因路基挡土墙坍塌等而不可通行的道路可采用绕道,搭设便桥等应急措施保证应急通道畅通。

4.2 恢复重建阶段

(1) 对软基路段的路堤坍塌病害或因路基主体与边部碾压质量差别大而引起的边坡溜坍病害,可清除坍塌体并在原破坏面上挖宽大错台,然后分层回填压实,为加强新旧路基的衔接,还应适当加铺土工格栅。

(2) 对路基纵横向开裂及路堤下沉病害,主要采取灌浆(水泥粉煤灰)或灌沙措施充填路基空洞,上部路面裂缝由路面工程进行详细的细部技术处理,然后重铺路面,调平路面高程。

(3) 护坡变形处理:对护坡工程出现的挤压破碎部分应拆除重建,对护坡工程中出现的裂缝问题可用砂浆填塞处理。

(4) 路堑边坡坡面崩塌、溜坍及滑坡处治:在详细收集资料的基础上,针对不同的坡面岩土特性、边坡高度,可分别采用清方、主动防护网,护脚矮挡墙(针对土质边坡)、抗滑挡墙、抗滑桩、框架锚杆(索)、挂网喷播绿化、仰斜孔排水等措施进行综合处理。

(5) 对上边坡已有的支挡结构,如抗滑桩、框架锚索(杆)、路堑挡墙等应进行详细检测,并根据检测结果提出相应的加固处理措施,如拆除剪断的上挡墙重建、对变形的抗滑桩增设预应力锚索、对松的框架锚索作补充张拉或新增垫墩锚索加固。

(6) 对采用挂网喷浆或浆砌护面墙防护的原有边坡,视其破损情况,可灵活选用浆砌片石嵌补、框架锚杆加固,补喷或作进一步的变形观测等方式处理。

(7) 陡斜坡路段上路基开裂、裂缝贯通成圈椅状、边坡整体稳定性明显存在问题的边坡,应进行详细的勘察与计算分析,视分析结论选用抗滑挡墙、抗滑桩或桩板墙方式处理。

(8) 对已垮塌的路堤,则应采取回填或支挡回填的方式予以恢复,回填过程中应特别加强与残存留用的旧路基的衔接,如增设宽大错台、加铺高强土工格栅等。

(9) 挡土墙的恢复与加固:对于垮塌破坏的挡墙按清理后重建处理;对外倾、侧移、墙面鼓胀变形的挡墙可采取于墙面增设框架锚杆(索)的方式加固处理,对基础脱空的挡墙可选用浆砌片石嵌补、混凝土支撑柱加固的措施处理。也可根据挡墙变形破损情况按以上所提措施进行综合治理。

(10) 抗滑桩、桩板墙变形处理:应在全面检测的基础上提出相应的补救、加固措施,如桩顶增设锚索、桩周增加抗滑桩、桩顶增设横系梁等。

(11) 崩塌、危岩的处理:应在全面清查基础上提出相应的预防与处治措施,如设SNS柔性主动防护网或被动防护网、线路绕避、清除危岩、设落石坑栏石墙等。

(12) 对特大型地震灾害路段,则首先考虑改线绕避方案,条件不允许则考虑进行综合整治处理。

5 结语

汶川地震对公路造成的破坏现象和特点值得深思,特别是对低等级公路的破坏,几乎是全毁。通过这次地震我们可以看出,公路工程的抗震能力仍十分薄弱。当地震烈度达到7度时,路基结构可能因震害产生裂缝甚至坍塌倾覆、中断交通,造成巨大经济损失。研究震后路基结构的安全评估,及时确定路基的安全性,以便采取合理的震后修补措施,确保道路的安全运营十分重要。本文分析了公路路基结构震害的一般表现形式、震害的主要特征及震害影响因素,在此基础上给出了路基结构震后安全

检测内容及评估方法,可供相关专业技术人员在震后公路路基结构调查、诊断研究时参考。

参考文献:

References:

- [1] LING H I, LESHCHINSKY D, CHOU N N S. Post-earthquake Investigation on Several Geosynthetic-reinforced Soil Retaining Walls and Slopes During the Ji-Ji Earthquake of Taiwan [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21: 297-313.
- [2] FANG Y S, YANG Y C, CHEN T J. Retaining Walls Damaged in the Chi-Chi Earthquake [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40: 1142-1153.
- [3] SANDRI D. A Performance Summary of Reinforced Soil Structures in the Greater Los Angeles Area after the Northridge Earthquake [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, 15: 235-253.
- [4] 姚令侃, 冯俊德, 杨明. 汶川地震路基震害分析及对抗震规范改进的启示 [J]. 西南交通大学学报, 2009, 44 (3): 301-311.
YAO Lingkan, FENG Junde, YANG Ming. Damage Analysis of Subgrade Engineering in Wenchuan Earthquake and Recommendations for Improving Seismic Design Code [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44 (3): 301-311.
- [5] 吉随旺, 唐永建, 胡德贵, 等. 四川省汶川地震灾区干线公路典型震害特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (6): 1250-1260.
JI Suiwang, TANG Yongjian, HU Degui, et al. Analysis of Typical Seismic Damages of Highways in Wenchuan Earthquake-induced Hazard Areas in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (6): 1250-1260.
- [6] 汪闻韶, 金崇磐, 王克成. 土石坝的抗震计算和模型实验及原型观测 [J]. 水利学报, 1987, 12: 1-16.
WANG Wenzhao, JIN Chongqing, WANG Kecheng. Aseismic Calculation, Model and Prototype Experiments and Field Monitoring of Earth-rock Dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 12: 1-16.
- [7] TATSUOKA F, TATEYAMA M, MOHRI Y, et al. Remedial Treatment of Soil Structures Using Geosynthetic-reinforcing Technology [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25 (4/5): 204-220.
- [8] 周朝晖. 2008年四川汶川8.0级地震强震动台网观测记录 [J]. 四川地震, 2008 (4): 25-29.
ZHOU Chaohui. The Strong Ground Motion Recordings of the Ms8.0 Wenchuan Earthquake in Sichuan Province [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2008 (4): 25-29.
- [9] 李建国, 栲宇光, 杜玉柱. 汶川地震铁路路基工程震害调查与分析 [J]. 铁道工程学报, 2008 (增2): 91-95.
LI Jianguo, CHU Yuguang, DU Yuzhu. Investigation and Analysis of Damage of Railway Subgrade Engineering in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008 (S2): 91-95.
- [10] 朱颖, 魏永幸. 汶川大地震道路工程震害特征及工程抗震设计思考 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (增1): 3378-3386.
ZHU Ying, WEI Yongxing. Characteristics of Railway Damage due to Wenchuan Earthquake and Countermeasure Considerations of Engineering Seismic Design [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (s1): 3378-3386.
- [11] 谢和平, 邓建辉, 台佳佳, 等. 汶川大地震灾害与灾区重建的岩土工程问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (9): 1781-1791.
XIE Heping, DENG Jianhui, TAI Jiajia, et al. Wenchuan Large Earthquake and Post-earthquake Reconstruction-related Geotechnical Problems [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (9): 1781-1791.
- [12] 周海涛. 公路工程抗震减灾技术回顾与展望 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (9): 39-43.
ZHOU Haitao. Review and Prospect of Earthquake Resistance and Disaster Mitigation Technology of Highway Engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (9): 39-43.
- [13] 曾超, 王可君, 李曙平, 等. “5.12”汶川大地震公路路基震害浅析 [J]. 世界地震工程, 2009, 25 (3): 162-166.
ZENG Chao, WANG Kejun, LI Shuping, et al. Primary Analysis of the Seismic Damage to Roadbeds During Wenchuan Earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25 (3): 162-166.
- [14] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (12): 2585-2592.
HUANG Runqiu, LI Weile. Research on Development and Distribution Rules of Geohazards Induced by Wenchuan Earthquake on 12th May [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (12): 2585-2592.