

5.12 汶川大地震损毁城镇的震害效应与重建选址问题

李渝生, 黄润秋

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 汶川大地震严重损毁城镇的震害效应主要有断层错动效应、场地及地基效应、地形震动放大效应及地质灾害效应等类型。损毁城镇重建选址问题涉及地震断裂、地质灾害及社会民生、经济发展等诸方面因素, 是一个复杂的系统工程问题。考虑问题的基本原则应是: 对于位于地震断裂带上且地质环境恶化、存在严重地质灾害隐患的城镇, 必须异地迁建; 对于虽然损毁较严重、但远离断裂带且不存在致命地质灾害隐患的城镇, 应按照“科学规划, 规范避让, 合理调整抗震设防标准”的原则, 原址重建。重建选址还应重视地质灾害的隐蔽性、诱发因素的多重性与长期持续性问题, 加强地质环境的适宜性评价及地质灾害的风险性评估。

关键词: 工程地震; 震害效应; 地震断层; 场地效应; 地基震陷; 地质灾害

中图分类号: P 315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)07 - 1370 - 07

EARTHQUAKE DAMAGE EFFECTS OF TOWNS AND RECONSTRUCTION SITE SELECTION IN WENCHUAN EARTHQUAKE ON MAY 12, 2008

LI Yusheng, HUANG Runqiu

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: During Wenchuan earthquake, earthquake damage effects which severely damaged towns mainly include fault dislocation effect, site and foundation effect, amplification effect of ground motion and geological hazard effect. Site selection problem involves with complex factors, such as earthquake faults, geological hazards, national well-being and the people's livelihood, economic development, and so on. It is a complicated system engineering. The basic principle of solving the problems is described as follows. For the towns located in earthquake fault zones and deteriorative geological environment with severe hidden trouble of geological hazard, they must be moved to other places; for the town without severe hidden trouble of geological hazard, damaged seriously but far away from earthquake fault zones, they should be in-situ reconstruction according to the principles of “scientific planning, norms avoidance, reasonable adjustment to the aseismic standards”. During reconstruction site selection, attention should be paid to potential geological hazards, multiplicity of inducing factors and long-term sustainability, and suitability evaluation on geological environment and risk assessment of geologic hazard should be strengthened.

Key words: engineering seismology; earthquake damage effects; earthquake fault; site effect; earthquake-induced ground settlement; geological hazard

收稿日期: 2009 - 03 - 04; **修回日期:** 2009 - 04 - 10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2008CB425801)

作者简介: 李渝生(1956 -), 男, 1982年毕业于成都地质学院工程地质专业, 现任副教授, 主要从事工程地质及地质灾害防治方面的教学与研究工作。
E-mail: liyusheng@cdut.cn

1 引言

5.12 汶川大地震导致龙门山地区 $13.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ 范围内, 包括汶川、都江堰、北川、绵竹、什邡、安县、青川、彭州等在内的 44 个县(市)的城镇遭受严重损毁^[1, 2], 并导致原本脆弱的地质环境进一步恶化, 存在再度成灾的风险, 留下了巨大的安全隐患, 使得损毁城镇的震后恢复重建工作极为困难。首先涉及到的问题是损毁城镇是原地重建还是异地迁建, 若是异地迁建又该如何选择安全可靠的建设场地。在极为复杂的地质环境下, 处于不同场地条件下的城镇, 在地震的震害类型及强烈程度、控制因素及其对场地稳定性的影响等方面存在很大的差异。解决损毁城镇重建选址问题, 有赖于对震害类型及其控制因素的进一步认识与理解, 以便针对不同震害对场地稳定及建设安全的影响程度, 确定恢复重建的工程选址原则。

为了对损毁严重的城镇灾后恢复重建工作提供科学依据, 本文针对北川、青川及汶川等重灾县(市)28 个严重损毁城镇重建选址中的一些关键问题, 开展了深入的研究工作。

2 损毁城镇的震害效应

汶川大地震发生过程中, 强烈的断裂错动和地震动导致龙门山区广大地域内的城镇因地面破裂、地基失效、地质灾害及建筑结构强度失效等因素, 发生极为严重的损毁破坏。研究表明, 这些强烈的震害效应及控制因素主要有 4 类典型情况。

2.1 地震断层效应

强烈的地震断层效应导致沿龙门山中央断裂带及前山断裂带分布的城镇, 遭受极为严重的永久性破坏。地震断层效应的产生条件及作用机制, 主要表现在错动效应及震动效应两个方面。

(1) 地震断层的错动效应

地震断层的错动效应是指破裂直接切错、破坏地面工程设施^[3]。汶川大地震导致龙门山中央断裂及前山断裂产生大幅度的地面破裂。地震断层的地表错动形式主要表现为压性逆推错动(见图 1(a)), 兼有较小幅度的右旋走向位错(见图 1(b)), 中央断裂及前山断裂的地表垂直断距分别高达 4.74 及 3.07 m(见表 1)。由此而产生的强烈破坏作用, 对于破裂场地上建筑物, 其原有抗震措施是难以抵御的。



(a) 崇州市白鹿镇中心校前山断裂逆断错动



(b) 绵竹市清平乡中央断裂右旋位错

图 1 地震断层错动及破坏情况

Fig.1 Earthquake fault dislocation and damage situations

表 1 龙门山断裂带地震变形

Table 1 Deformations of Longmenshan fault zones in earthquake

断裂名称	观测位置	地震断层产状或走向	地震变形/m	
			垂向断距	水平位错
中央断裂	清平乡北	NE50°/NW∠72°	4.74	0.70(右旋)
	高川乡五郎庙	NE65°	3.63	1.20(右旋)
	高川乡插秧沟口	NE60°	3.97	-
前山断裂	八角镇五马村		2.45	0.22(右旋)
	八角镇馍馍店	NE30°/NW∠43°	0.52~2.84	0.03~0.08(左旋)
	向家湾	NE20°/NW∠60°	2.44~3.07	-
	汉旺镇北山口	NE60°	1.20~2.01	0.34(右旋)
	白鹿镇中心校	NE50°	1.85	0.60(左旋)

(2) 地震断层的震动效应

地震断层是地基及结构振动的应力波来源^[4]。汶川大地震产生的剧烈震动效应, 使得地震断裂两侧一定范围内的狭长地带, 出现极为强烈的烈度异常^[5, 6](见图 2)。导致震害加重的作用机制主要在于, 错动产生的瞬时加速度骤然升高, 使得场地的震动幅度、频率特性及震动历时等基本要素均发生剧烈改变, 导致某些刚度较小的地面工程建筑, 或因



图2 位于地震断裂带上的汉旺镇严重损毁情况^[5, 6]
Fig.2 Severe damage situations of Hanwang Town located in earthquake fault zone^[5, 6]

共振、地基失效等原因而发生结构性毁坏。由此而产生的震害效应，通常是毁灭性的。

2.2 场地及地基震害效应

汶川大地震中，最大地震动振幅的衰减明显大于通常的理论估算^[7](见表 2)。但仍有相当多的城镇虽未处于地震断裂带附近，却损毁极为严重。震害及场地条件调查显示，这种地面加速度与震害分布不一致的现象，除了与局部的震陷、地基液化、地面张裂等常见原因有关外，还与建筑场地近地表的地质结构及地震频谱两方面因素密切相关。

表 2 最大振幅实测参数(以台站记录的最大振幅作为 100%)^[7]

Table 2 Measured parameters of maximum amplitude(station records of maximum amplitude as 100%)^[7]

震中距/km	高程/m	相对振幅/%	
		垂直分量	水平分量
153	779	-	73.82
167	167	49.14	66.56
202	1 262	81.49	73.20
243	718	31.73	48.38
338	2 497	11.00	13.75
411	2 394	7.60	14.87

一方面，建于较厚松散沉积层地基之上的建筑物，震害异常与表层沉积层对地震波的放大作用有关^[8~10]。地震波由下部基岩向上传至地表后，受界面条件的限制而向下反射，波动位移将比由下方传入的剪切波振幅明显增大。多频次的反射、叠加，使得剪切波在波速降低的同时，振幅、周期及加速度被放大(见图 3)，产生剧烈的地面震动。属于这类场地的汉旺镇、青川县木鱼镇及什邡市红白镇等，场地震害均表现得极为强烈。

另一方面，在严重损毁的城镇，地基与建筑物之间的周期频谱效应表现出 3 种特殊情况：

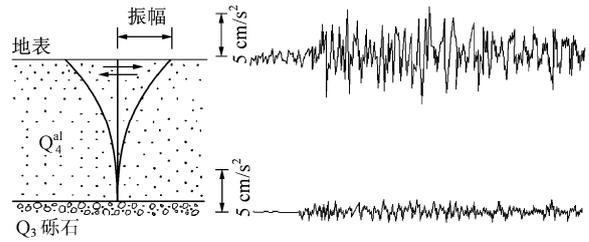


图 3 密实砾石层与松散沉积层振幅及加速度的差异
Fig.3 Differences of amplitude and acceleration between dense gravel layer and loose sediment layer

(1) 清平磷矿住宅区，由于短周期高频震动作用，建筑物上部实际上保持不动，结构基本完好，下部结构则完全破坏(见图 4(a))；



(a) 短周期高频震动



(b) 长周期地面震动



(c) 地面震动周期=建筑物的自振周期

图 4 地面运动周期与建筑损毁情况

Fig.4 Ground motion period and damage situations of buildings

(2) 在远离极震区的青川县城东桥附近，由于

在长周期地面震动作用下, 建筑物顶层加速度大于地面加速度, 破坏主要发生在建(构)筑物上部(见图 4(b));

(3) 在地处平原区的汉旺镇部分建筑场地, 当地面震动周期与建筑物的自振周期相近时, 共振效应致使建筑物上部加速度及振幅急剧放大, 导致其结构强度崩溃(见图 4(c)).

2.3 地形震动放大效应

在汶川大地震主震发生过程中, 处于孤立凸出地形的建筑, 表现出明显的震害异常。这类场地在地震过程中, 当地震波的波长与地形尺寸为同一量级时, 由于山体共振或山体内地震波多次反射, 导致位移、速度及加速度均有明显的放大^[11]。

青川县木鱼镇中学严重损毁即是这类“地形震动放大效应”的典型例子。木鱼镇中学原校址坐落于三面临空的山脊平台(见图 5)。在汶川大地震主震发生过程中, 孤立凸出的场地因强烈的震动波放大效应, 导致学校建筑物遭受毁灭性破坏。



(a)



(b)

图 5 青川县木鱼镇中学孤立地形及建筑损毁情况

Fig.5 Isolated topography and building damage situations of Muyu middle school in Qingchuan County

2.4 地质灾害效应

地质灾害效应作为加重震害的主要因素之一^[12, 13], 在地震发生过程中表现极为普遍。强烈的

震动和地震惯性作用力, 使岩体结构松动, 形成破裂面, 引起软弱结构面错位, 从而降低岩体的稳定性, 反复作用造成的积累效应, 导致原本稳定性安全储备不高的山体失稳破坏。对于碎裂状结构的山体, 强烈的震动甚至可使之整体崩解溃散^[4]。这类严重的地质灾害事件, 在地震发生过程中表现得极为强烈。

北川县东侧王家岩山体地形高陡, 岩体结构复杂, 稳定性的安全储备相对较低。地震产生的强大惯性力, 促使岩体结构面迅速扩展, 并引起分割块体剧烈晃动而导致破坏。由此而形成的大型山体滑坡(见图 6), 对城镇造成毁灭性破坏。



图 6 北川县王家岩山体滑坡对城区损毁情况

Fig.6 Damage situations of town induced by Wangjiayan landslide in Beichuan County

绵竹市小天池乡东南侧山体顶部岩体, 具有碎裂状结构和较高势能。在加速度高达(0.5~1.0) g 的强烈震动下, 岩体结构发生整体性溃散, 形成大规模的崩滑碎屑-块石流灾害(见图 7)。



图 7 小天池乡崩滑块石流摧毁乡镇情况

Fig.7 Damage situations of towns induced by slum-blow in Xiaotianchi Village

3 震后地质环境的恶化与灾害诱发因素的多重性和持续性

3.1 震后地质环境普遍恶化

地震产生的严重后果不仅仅是直接的, 更为严重的是, 在强烈的震动作用下, 山体因松弛变形或破坏而稳定性普遍降低, 使得龙门山区原本复杂的

地质环境进一步恶化, 再度成灾的风险陡然增加。

青川县的东、西及南侧山体在强烈的地震动作作用下, 形成东山、狮子梁及桅杆梁 3 处较大规模的张裂变形体(见图 8), 使得原本断裂构造发育的复杂地质环境, 因山体变形而进一步恶化, 威胁城区安全的潜在地质灾害风险加大。



图 8 青川县震后地质环境图

Fig.8 Geological environment map after earthquake in Qingchuan County

3.2 地质灾害诱发因素的多重性和持续性

强烈的地震动导致极震区发生大量的山体崩塌、滑坡, 积累了数十亿方的松散堆积物。在汛期的高强降雨、强余震活动等极端环境因素的影响下, 不可避免地会产生新的崩塌、滑坡和泥石流, 并可能堵塞河道形成堰塞湖, 进而引发洪水、溃决型泥石流和回水淹没等多重次生灾害的持续发生。这使得损毁城镇附近的地质灾害, 不仅表现出灾害类型及诱发因素的多重性, 而且在今后较长一段时间内, 这些灾害及其诱因将持续发生和存在。

最为典型的情况发生在北川县。5.12 汶川大地震同时引发地震断裂、城东王家岩滑坡及唐家山堰塞湖等多重地质灾害。震后 4 个多月的 9 月 24 日暴雨, 引发高强度泥石流活动, 使得已被地震摧毁的县城再次遭受泥石流掩埋(见图 9), 而且在今后若干年内, 泥石流灾害仍将持续发生。

因此, 在重建选址的场地评估工作中, 应特别注意震后地质环境的变化及灾害诱发因素的多重性和长期持续性问题。

4 损毁城镇重建选址的基本原则

损毁城镇恢复重建的选址工作, 是一个较为复杂的系统工程。它不仅涉及到地震断裂、地质灾害



图 9 北川县 9.24 泥石流灾害(2008 年)

Fig.9 Debris flow disaster in Beichuan County on September 24, 2008

及场地稳定性等工程地质问题, 还与水资源利用、环境保护、社会民生及经济发展等因素密切相关。稍有不慎, 则有可能造成敏感的社会问题和严重的安全隐患。

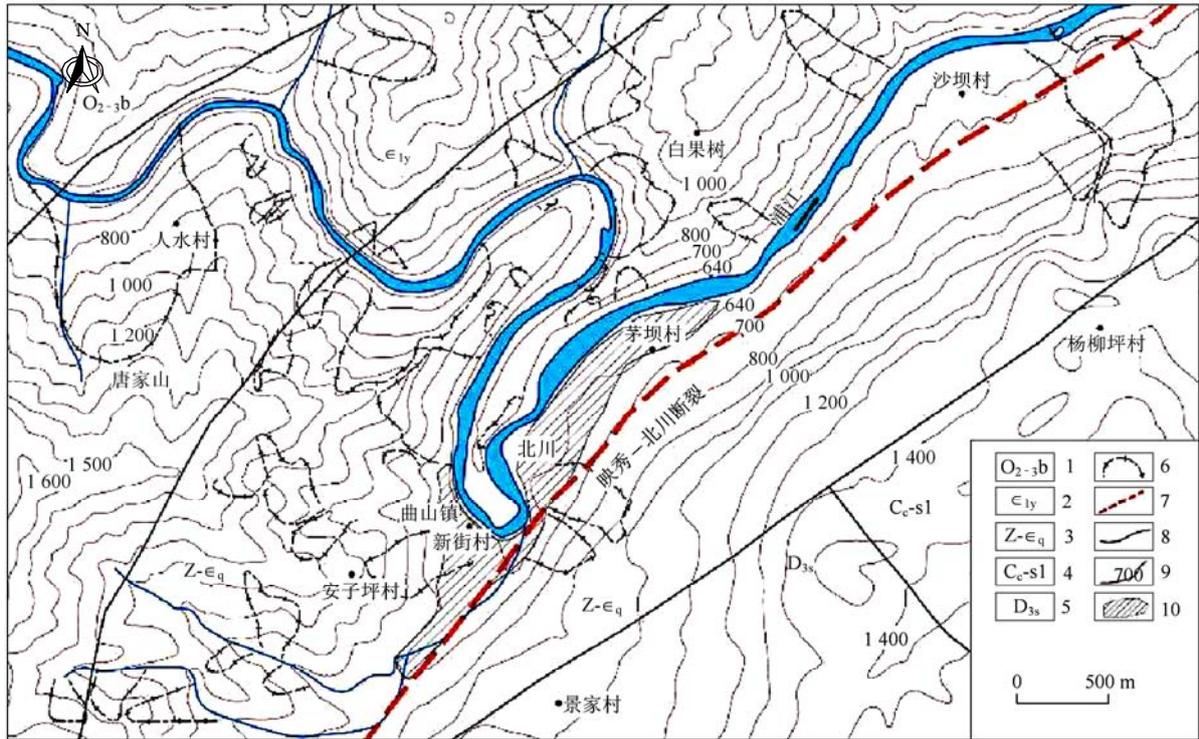
基于上述有关震害控制因素方面的研究工作, 本文提出损毁城镇的重建选址问题, 总体上应分两类情况区别对待^[14]。

一类情况是位于地震断裂带上的城镇, 存在严重的地震及地质灾害风险, 原则上必须异地迁建。北川县是这类损毁城镇最为典型的代表。

北川县原址位于涪江河谷的狭小阶地上, 龙门山中央断裂带主断层映秀—北川断裂切过县城主城区(见图 10)。汶川大地震导致该断裂强烈错动及由此而产生的强烈震动, 瞬间摧毁了县城大部分建筑。更为严重的是, 城东王家岩及城南 2 处大型山体滑坡, 对县城建筑物形成毁灭性破坏; 唐家山堰塞湖泄流洪水淹没整个县城; 震后的持续降雨(2008 年 9 月 24 日), 使得原已震动松弛的山体发生大规模泥石流灾害, 对县城南部再次造成毁灭性破坏。地震及诱发的大规模次生地质灾害, 导致县城的地质环境极度恶化, 原址恢复重建的可能性已不复存在, 迫使县城必须异地迁建。

另一类情况是对于损毁较严重、但离开断裂带有一定距离、且不存在致命地质灾害风险的城镇, 应按照“科学规划, 规范避让, 合理调整抗震设防标准”的原则, 在防治地质灾害的基础上原址重建。

在地震灾区损毁严重的乡镇中, 相当多的情况是原址距地震断裂带有一定距离, 烈度异常的主要原因是场地地震效应及建筑抗震性能差等。这类城镇的恢复重建, 只要按照“科学规划, 规范避让, 合理调整抗震设防标准”的原则, 适当避开地震断裂带, 即可在防治地质灾害的基础上原址重建。青川县木鱼镇是这类城镇中的典型情况。



1—宝塔组; 2—油房组; 3—邛家河组; 4—长岩窝组、石喇嘛组并层; 5—沙窝子组;
6—震后地质灾害界线; 7—映秀—北川断裂; 8—地层界线; 9—等高线; 10—主城区范围

图 10 北川县地震断裂及地质灾害分布图(单位: m)

Fig.10 Beichuan County earthquake faults and geological hazard distribution map(unit: m)

研究表明, 木鱼镇原址并不在地震断裂带上(见图 11), 断裂错动型震害仅发生在镇北 0.9 km 处

的断裂通过部位, 场镇的震害异常主要与表层沉积层对地震波的放大作用及建筑物抗震设防标准较低等因素有关。木鱼中学严重破坏的原因在于孤立地形对地震波的放大效应, 场镇附近不存在发生大规模地质灾害的环境条件。在这种特定场地条件下, 完全可以按照“科学规划, 规范避让, 调整抗震设防标准”的原则原址重建。

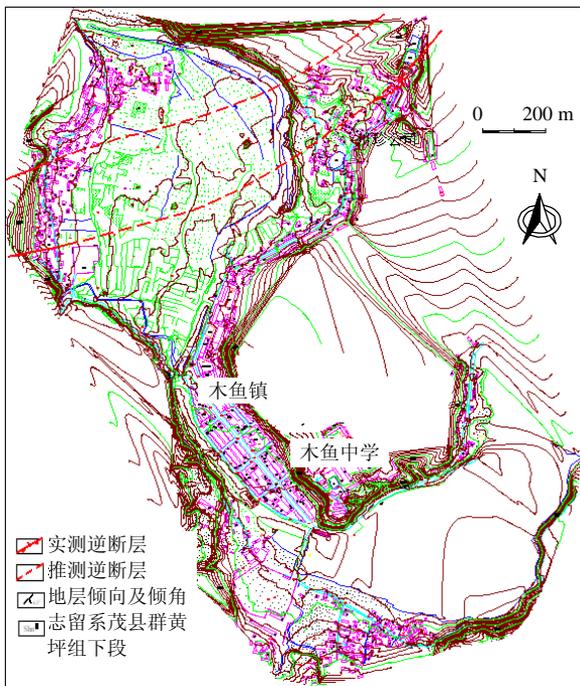


图 11 木鱼镇断裂构造分布图

Fig.11 Faults structures distribution map of Muyu Town

5 结 论

(1) 汶川大地震发生过程中, 断层错动效应、场地及地基地震效应、地形震动放大效应及地质灾害效应等是导致城镇严重损毁的主要原因。研究这些效应的形成条件及其控制因素, 对于城镇重建的选址工作极为重要。

(2) 地震产生的严重后果不仅仅是直接的, 更为严重的是, 在强烈的震动作用下, 山体因松弛变形或破坏而稳定性普遍降低, 使得龙门山区原本复杂的地质环境进一步恶化, 存在再度成灾的风险。

(3) 极震区普遍发生的大量山体崩塌、滑坡,

积累了数十亿立方米的松散堆积物。在汛期高强降雨、强余震活动等极端环境因素的影响下,不可避免地会产生新的崩塌、滑坡和泥石流,并可能堵塞河道形成堰塞湖,进而引发洪水、溃决型泥石流和回水淹没等次生灾害持续发生,使得损毁城镇附近的地质灾害诱发因素,表现出明显的多重性和持续性特征。

(4) 震后山区地质灾害的普遍性与隐蔽性特征,是山区城镇场地评估工作中应注意的另一重要问题。前期工作已发现的灾害隐患仅仅是少数,相当多的地质灾害隐患尚未被发现。这些问题在恢复重建工作中将逐渐显现,并可能对恢复重建工作产生较大影响甚至酿成严重后果,应引起高度重视。

(5) 损毁城镇的重建选址问题,涉及到地震断裂、地质灾害及社会民生、经济发展等诸方面的复杂因素。考虑问题的基本原则应是:对于位于地震断裂带上、地质环境恶化、且存在严重地质灾害隐患的城镇,必须异地迁建;对于虽然损毁较严重,但离开断裂带一定距离、且不存在严重地质灾害隐患的城镇,应按照“科学规划,规范避让,合理调整抗震设防标准”的原则原址重建。

(6) 龙门山区资源丰富,社会人文沉淀深厚,应尽可能地遵循就地重建和就近异地迁建的原则。但要在山区寻找地势平坦开阔的建设场地十分困难,一部分恢复重建工程将无法彻底避开地质灾害的威胁,即场址本身存在一定的地质灾害风险。因此在恢复重建工作中,应重视对地质灾害风险的评价工作,为重建场地的地质灾害防治提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 杨主恩,邓志辉,马文涛,等.汶川8.0级强震极震区破坏情况与烈度[J].地震地质,2008,30(2):349-354.(YANG Zhuen, DENG Zhihui, MA Wentao, et al. Some destruction and its seismic intensity in meizoseismal region of Wenchuan earthquake with magnitude 8.0, Sichuan, China[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(2): 349 - 354.(in Chinese))
- [2] 李志强,袁一凡,李晓丽,等.对汶川地震宏观震中和极震区的认识[J].地震地质,2008,30(3):768-777.(LI Zhiqiang, YUAN Yifan, LI Xiaoli, et al. Some insights into the macro-epicenter and meizoseismal region of Wenchuan earthquake[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 768 - 777.(in Chinese))
- [3] 王钟琦,谢君斐,石兆吉.地震工程地质导论[M].北京:地震出版社,1983.(WANG Zhongqi, XIE Junfei, SHI Zhaoji. Introduction to seismic engineering geology[M]. Beijing: Earthquake Press, 1983. (in Chinese))
- [4] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].2版.北京:地质出版社,1994.(ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Principles of engineering geology analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [5] 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等.汶川 M_S 8.0地震地表破裂带及其发震构造[J].地震地质,2008,30(3):597-629.(XU Xiwei, WEN Xueze, YE Jianqing, et al. The M_S 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 597 - 629.(in Chinese))
- [6] 周庆,徐锡伟,于贵华,等.汶川8.0级地震地表破裂带宽度调查[J].地震地质,2008,30(3):778-788.(ZHOU Qing, XU Xiwei, YU Guihua, et al. Investigation on widths of surface rupture zones of the M_S 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan Province, China[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 778 - 788.(in Chinese))
- [7] 刘启元,陈九辉,李顺成,等.汶川 M_S 8.0地震:川西流动地震台阵观测数据的初步分析[J].地震地质,2008,30(3):584-596.(LIU Qiyuan, CHEN Jiuhui, LI Shuncheng, et al. The M_S 8.0 Wenchuan earthquake: preliminary results from the Western Sichuan mobile seismic array observations[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 584 - 596.(in Chinese))
- [8] IDRISSE I M, SEED H B. Response of earth banks during earthquakes[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1967, 93(3): 61 - 82.
- [9] 曾心传,秦小军.土层对地震的随机反应分析[J].地震工程与工程地震,1998,18(3):27-39.(ZENG Xinzhan, QIN Xiaojun. Analysis of random response of soil layer to earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(3): 27 - 39.(in Chinese))
- [10] IDRISSE I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(4): 1 003 - 1 034.
- [11] WIEGEL R L. Earthquake engineering[M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall, 1970.
- [12] 黄润秋,王士天,张倬元,等.中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[M].成都:四川大学出版社,2001.(HUANG Runqiu, WANG Shitian, ZHANG Zhuoyuan, et al. The dynamic process of earth's superficial crust and its engineering environmental effects[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001.(in Chinese))
- [13] 王士天.复杂环境中地质工程问题研究的理论与实践[M].成都:四川大学出版社,2002.(WANG Shitian. Theory and practice of geology engineering problem analysis in complicated environment[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2002.(in Chinese))
- [14] 李渝生,黄润秋.中国汶川特大地震损毁城镇恢复重建选址的工程地质评价[J].工程地质学报,2008,16(6):764-773.(LI Yusheng, HUANG Runqiu. Engineering geological assessments of reconstruction sites for cities and towns destroyed by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 764 - 773.(in Chinese))