

李平, 薄景山, 齐文浩, 刘德东, 肖瑞杰. 2012. 土层结构对汉源烈度异常的影响. 地震学报, 34(6): 851-857.  
Li Ping, Bo Jingshan, Qi Wenhao, Liu Dedong, Xiao Ruijie. 2012. Effects of soil structure on abnormal intensity in Hanyuan old town. Acta Seismologica Sinica, 34(6): 851-857.

## 土层结构对汉源烈度异常的影响<sup>\*</sup>

李 平<sup>1,2),\*</sup> 薄景山<sup>1,2)</sup> 齐文浩<sup>2)</sup> 刘德东<sup>2)</sup> 肖瑞杰<sup>1)</sup>

1) 中国河北三河市 065201 防灾科技学院

2) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

**摘要** 汶川  $M_s 8.0$  大地震在远离震中近 200 km 的汉源县县城产生了高烈度异常, 其原因比较复杂. 为了分析土层结构对汶川大地震中汉源县老县城高烈度异常的影响, 在汉源县地震害科学考察基础上, 依据地震烈度异常的分布情况, 在背后山滑坡前缘地带布设 5 个工程地质勘察钻孔, 获得了汉源县老县城场地土层结构资料. 在现场测试和室内试验的基础上, 给出了汉源县老县城场地各层土体动力学参数. 本文利用汶川地震九襄强震台的强震记录, 结合其台站的场地资料反演给出了汉源县老县城的基岩地震动时程, 作为地震反应分析的基岩输入地震动. 在此基础上利用土层地震反应一维等效线性方法对汉源县老县城场地进行了地震反应分析, 并将计算所得结果与 VI 度区其它强震台站获得的强震记录进行比较. 研究结果表明, 汉源县老县城土层结构对地震动的放大作用导致地表地震动异常, 是汉源县老县城高烈度异常的主要原因之一.

**关键词** 汶川地震 土层结构 烈度异常 地震反应

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2012.06.011

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

## Effects of soil structure on abnormal intensity in Hanyuan old town

Li Ping<sup>1,2),\*</sup> Bo Jingshan<sup>1,2)</sup> Qi Wenhao<sup>2)</sup> Liu Dedong<sup>2)</sup> Xiao Ruijie<sup>1)</sup>

1) Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Sanhe City, Hebei Province 065201, China

2) Institue of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

**Abstract:** Hanyuan town, Sichuan, is 200 km away from the epicenter of the 2008 Wenchuan great earthquake, yet high abnormal seismic intensity was observed there. In order to analyze the effects of soil structure on the abnormal intensity at Hanyuan old town, based on scientific investigation on seismic damage distribution there, five boreholes were drilled on the frontal landslide slope of the Beihou Mountain and the data of soil layer structures were obtained. On the basis of field test and laboratory experiment, the dynamic parameters of soils in different layers in Hanyuan old town were deduced. By

<sup>\*</sup> 基金项目 中国地震局教师科研基金(20110108)、国家自然科学基金项目(50978237)和中央高校基本科研业务专项资金(ZY20110102)资助.

收稿日期 2011-12-22 收到初稿, 2012-03-06 决定采用修改稿.

<sup>+</sup> 通讯作者 e-mail: chinaliping1981@126.com

网络出版时间: 2012-09-12 19:00:00

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2021.P.20120912.1900.004.html>

inverting the strong motion data recorded at Jiuxiang strong-motion station and associate site information of this station, the time-history of ground motion was derived, and was taken as input bedrock waves for ground seismic response analysis. With 1-D equivalent linearization wave motion method, which is widely used in ground response analysis, Hanyuan old town ground motion parameters were calculated. The calculation result was compared with the strong motion record corresponding to intensity VI during the Wenchuan earthquake. The analysis result shows that the soil structure of Hanyuan old town region amplified ground motion, hence leading to abnormal ground motion. This is one of the main reasons for abnormal intensity.

**Key words:** 2008 Wenchuan earthquake; site soil structure; abnormal intensity; ground seismic response

引言

2008 年 5 月 12 日四川省汶川县发生  $M_s8.0$  大地震, 强烈的地震造成了巨大的社会经济损失和人员伤亡, 摧毁了大量的工业与民用建筑和基础设施. 从汶川  $M_s8.0$  地震烈度分布简图(图 1)可以看出, 极震区的烈度高达 XI 度, 等烈度线整体上呈近椭圆型分布(袁一凡, 2008). 在烈度评定中发现, 位于震中西南方向约 200 km 的汉源县老县城是 VI 度区内的 VII 度异常区, 这种跨两度的烈度异常现象十分罕见. 这一现象已经引起了学术界的广泛关注, 国内的一些学者通过汶川地震科学考察初步分析了造成这种高烈度异常原因. 高孟潭等(2008)从场地条件, 场区的地震构造背景, 汉源县附近地震台震相特征, 以及震源过程等方面的影响对该烈度异常进行了初步解释, 并提出上述几方面是造成汉源县老县城高烈度异常的主要因素. 薄景山等(2009)利用汶川地震科学考察所收集到的资料, 经过简要的计算提出了汉源背后山古滑坡复活和土层结构对汉源县老县城烈度异常有较大的影响.

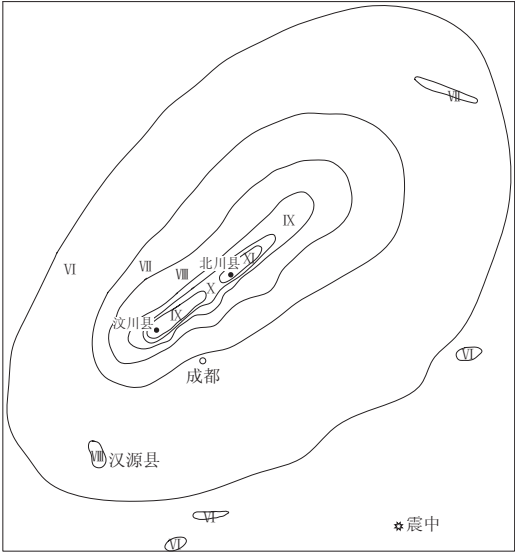


图 1 汶川  $M_s8.0$  地震烈度分布简图[据袁一凡(2008)图修改]  
Fig. 1 Sketch of seismic intensity distribution during Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake (modified after Yuan Yifan, 2008)

齐文浩等(2010)通过对汉源县老县城地脉动测试数据的分析, 总结得到了软弱场地是造成汉源县老县城烈度异常的主要原因之一. 以上的研究成果只是基于汶川地震科学考察基础上的初步分析结果, 缺乏具体实际计算数据支撑. 本文在此基础上基于场地深入调查和钻孔勘察资料, 从土层结构着手进行场地土层地震分析, 并以此获得了汉源场地土层结构对汉源县地震烈度异常的影响.

1 场地勘察

汉源县城位于四川省雅安市南部, 是一座典型山城, 大渡河和流沙河流经县城附近并在此交汇. 该县城分为老县城和新县城, 汉源县老县城处于流沙河河畔的二级、三级阶地和山前洪积扇的交汇地带. 汉源河谷盆地北部山前地带, 地下土质相对松散, 为第四系沉积物分布, 层位不稳定, 覆盖层较厚. 本次现场勘察的钻孔布设在老县城, 在震害调查和工程地质调查的基础上, 在地震烈度异常集中地带、背后山滑坡前缘共布置了 5 个工程地质钻孔进行了补充场地勘察, 钻孔平面如图 2 所示. 钻孔 ZK1 进尺 60 m, 钻孔 ZK2 进尺 58 m, 钻孔 ZK3 进尺 62 m, 钻孔 ZK4 进尺 44 m, 钻孔 ZK5 进尺 30 m, 总进尺 254 m. 除 ZK1 钻孔于 50.7 m 处见到惜格达泥岩地层, 其余钻孔未钻至基岩面, 根据同一工程地质单元可知其余钻孔覆盖层厚度都大于 50 m. 通过场地工程地质钻孔勘察, 获得了汉源县老县城较详细的场地土层结构资料. 各钻孔按《岩土工程勘察规范》(中华人民共和国建设部, 2009)中的要求完成了钻孔取样、标贯、剖面分层、岩土性状描述等工作, 共取有代表土样 27 组. 通过原位试验和室内土常规试验、共振柱试验, 获取了土体剪切波速及动剪切模量比、阻尼比随剪应变的变化等土动力学参数, 为分析和计算提供了基础资料和计算参数.

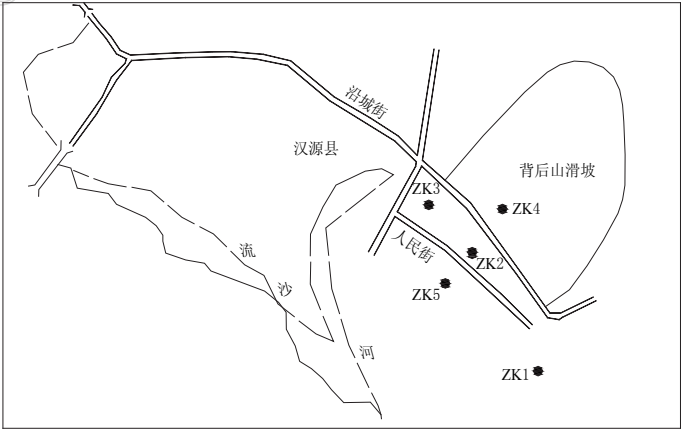


图 2 钻孔分布示意图  
Fig. 2 Location of boreholes (black dots)

根据场地勘察资料, 按《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国建设部, 2010)进行场地类型划分, 计算结果如表 1 所示. 从表 1 可以得知汉源县老县城为Ⅲ类软弱场地. 从钻孔资料可知, 汉源县老县城出现的土类有杂填土、粉质粘土、粉土、粉砂、中砂、细砂和漂卵石等土, 土层结构比较复杂. 场地土层结构可以改变基岩地震动的峰值、频谱及持时等特性. 国内外学者对场地土层结构及覆盖土层厚度的影响进行了大量的研究(薄景山等, 2003a, b; 2004). 通常采用一维土层地震反应分析方法(李小军, 廖振鹏, 1989)来研究场

地土层的影响. 这次地震场地土层结构对汉源县震害究竟有多大影响, 下面通过地震反应分析的方法来揭示.

表 1 汉源县老县城场地类型  
Table 1 Site types of Hanyuan old town

钻孔编号	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
等效剪切波速 $v_s/m \cdot s^{-1}$	171.1	160.4	156.2	157.7	163.9
覆盖层厚度/m	50.7	>50	>50	>50	>50
场地类别	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

2 计算参数的确定

在研究汉源县老县城上述获取的 5 个工程场地钻孔资料基础上, 整理选取了有代表性的 ZK1 和 ZK2 钻孔剖面作为计算剖面, 如图 3 所示. 地震反应计算分析所需要剪切波速数据采用现场测试结果, 剪切波速值随深度变化如图4所示. 根据现场所取土样的试验测

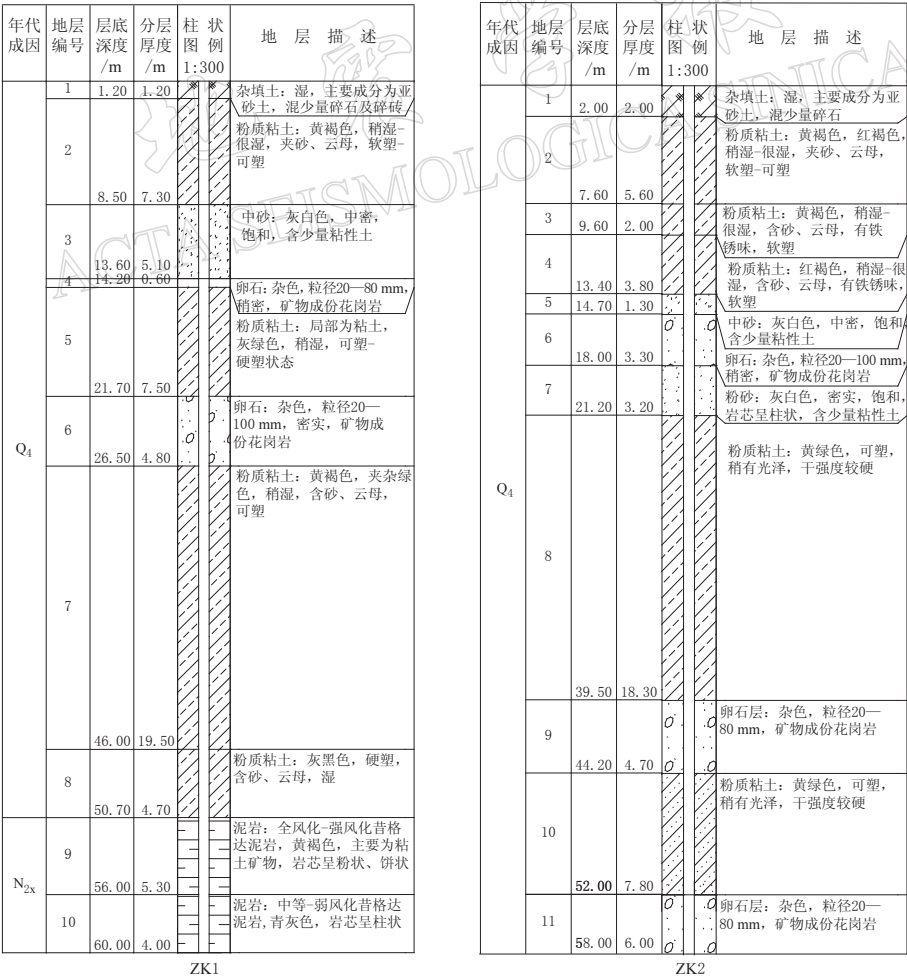


图 3 汉源县老县城钻孔柱状图  
Fig. 3 Borehole columns in Hanyuan old town

得的动剪切模量比及动阻尼比与剪应变关系，利用最小二乘法进行回归分析，得到了粉质粘土(软塑、可塑、硬塑)、中砂、细砂和粉砂 4 种典型土 7 个状态下的动剪切模量比、阻尼比随剪应变的变化，以及杂填土、卵石和基岩动力学参数等参考经验值，如图 5 所示。

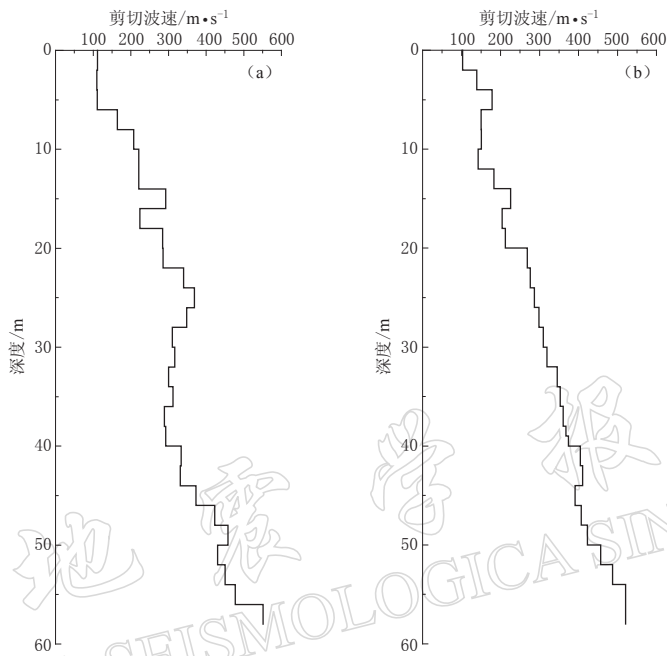


图 4 钻孔 ZK1(a)和 ZK2(b)剪切波速随深度变化图  
Fig.4 Shear wave velocity variation with depth obtained from boreholes ZK1 (a) and ZK2 (b)

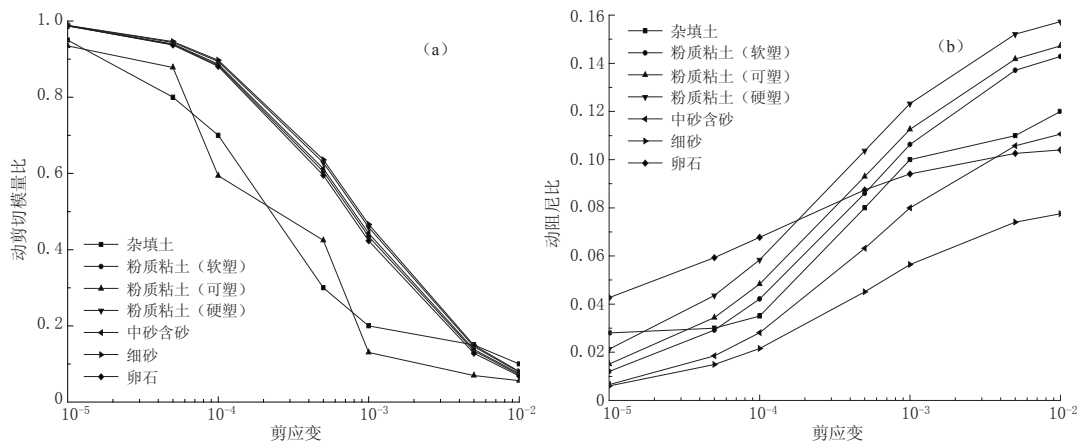


图 5 土动剪切模量比(a)和阻尼比(b)随剪应变变化曲线  
Fig.5 Variation of soil dynamic shear modulus ratio and damping ratio with shear strain

3 基岩输入地震动的确定

目前，基岩输入地震动的确定方法有人工合成地震动和强震动记录匹配两种方法。人工合成法的缺点是无法模拟实际地震动的丰富频谱特性；地震动记录匹配方法的缺点是很

难找到与场地条件符合较好的强震记录. 在对汶川地震强震记录及其台站的场地资料细致的分析后, 没有找到适合作为汉源县地震反应分析的基岩输入地震动的强震记录. 考虑到汶川地震地震动特有的频谱特性以及时程长的特点, 为了使基岩输入地震动尽量反映汶川地震时汉源县老县城的基岩地震动情况, 本文选用汶川地震中离汉源县老县城最近的九襄强震台的强震记录作为反演记录. 强震记录共 63 459 记录点, 时间步长 0. 005 s, 其峰值加速度东西向为  $72.7\text{ cm/s}^2$ 、南北向为  $80.35\text{ cm/s}^2$ . 该强震记录时程曲线如图 6a 所示. 由于九襄强震台有详细的场地土层和土体动力学参数资料, 所以可以采用一维等效线性方法进行反演. 这一方法是以地表记录到的强震记录时程作为输入, 反演计算出基岩地震动时程. 经计算得到了九襄强震台基岩输入地震动时程, 时程曲线如图 6b 所示.

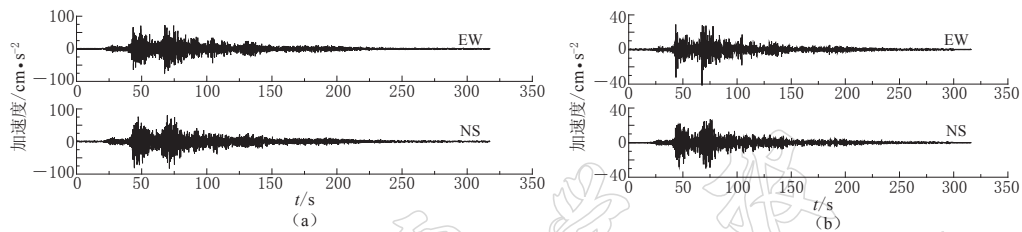


图 6 九襄强震记录(a)及反演基岩地震动时程(b)曲线  
Fig. 6 Strong motion record (a) of the Jiuxiang station and inverted bedrock time history (b)

4 计算结果分析

震害调查表明, 绝大部分结构的破坏是强烈地震动所致. 一般情况下, 震害严重则地表峰值加速度较大; 震害轻则地表峰值加速度较小. 因此汉源县烈度异常的主要原因可能是由于该场地地震动异常造成的. 经地震反应分析计算, 本文得到了汉源县老城地表峰值加速度及其放大倍数  $M$  ( $M$  定义为地面峰值加速度比基岩输入地震动峰值), 计算结果如表 2 所示. 其中, 放大倍数最大值已达到 4. 92 倍, 这表明老县城场地土层结构对基岩输入

表 2 地表峰值加速度及放大倍数表  
Table 2 Peak ground acceleration and the amplification factors

钻孔编号	ZK1		ZK2	
	EW	NS	EW	NS
地面峰值加速度/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$	116.6	122.6	136.5	121.9
放大倍数( $M$ )	2.80	4.92	3.28	4.90

地震动有显著的放大作用. 为了分析汉源县场地土层结构对地表地震动的影响, 选取了 5 个Ⅵ度区的强震记录与计算所得的汉源县老县城地表地震动峰值加速度进行比较. 强震台台站的土层结构与汉源县老县城的土层结构完全不同, 从强震台建台报告中可知, 这 5 个台站的土层结构简单且单一, 除表层填土外均为碎石土或卵石土且覆盖层厚度均不超过 20 m. 为了消除断层距、断层上下盘以及断裂方向性的影响, 所选取的台站与汉源县老县城位于同一断层盘且断层距基本相当, 对比结果如表 3 所示. 表中  $C_{\text{EW}}^{\text{LW}}$  表示汉源县老县城钻孔 ZK1 的地表峰值加速度与强震台 EW 向强震记录峰值加速度的比值, 其它 3 个符号的意义依此类推. 从表 3 可以得知, 其比值最小的是 1. 3 倍, 最大的达到了 6. 29 倍. 这表明汉源

表 3 地表峰值加速度与强震记录峰值加速度比较表

Table 3 Comparison between calculated peak ground acceleration and peak strong motion record

强震台名称	断层距/km	峰值加速度		$C_{EW}^1$	$C_{NS}^1$	$C_{EW}^2$	$C_{NS}^2$
		EW/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$	NS/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$				
康定	153.40	21.69	34.18	5.38	3.59	6.29	3.57
汉源宜东	156.75	82.73	80.78	1.41	1.52	1.65	1.51
汉源九襄	163.05	74.91	83.04	1.56	1.48	1.82	1.47
汉源乌斯河	177.91	63.21	49.01	1.84	2.50	2.16	2.49
石棉挖角	188.65	75.61	93.89	1.54	1.31	1.81	1.30

县老县城的地表地震动峰值都远远大于强震台的强震记录峰值，也就是说高烈度异常区的峰值加速度大于非烈度异常区的峰值，从而说明了汉源县老县城的土层结构对地震动显著的放大作用导致地表地震动异常，这种异常的地震动超出了已有地面房屋的设计抗震能力，从而造成了震害异常。

5 讨论与结论

地震高烈度异常是地震震害中一种常见现象，烈度异常产生原因很多，通常认为与场地条件有密切联系。本文只从场地土层方面采用一维土层地震反应分析方法对汉源县老县城的震害异常进行分析，得到了造成汉源县地震烈度异常的原因是汉源县老县城的场地属于软弱深厚的Ⅲ类场地，同时其土层结构对地震动具有显著的放大作用，地震动峰值加速度超过了周围场地所记录到的地震动峰值加速度，造成了严重的震害现象，从而导致了汉源县老县城的高烈度异常。

烈度异常的原因是复杂的，造成汉源县高烈度异常的原因不只是一个，应在收集更广泛的地质构造以及地形地貌等资料基础上，对其进行更深入的研究。拟采用二维或三维的数值模拟研究地形地貌对高烈度异常的影响，同时考虑其背后山古滑坡的影响，只有综合分析各个影响因素才能对这一现象的成因给出科学的解释。

参 考 文 献

薄景山, 齐文浩, 刘红帅, 刘博, 刘德东, 孙有为. 2009. 汶川特大地震汉源烈度异常原因的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, **29**(6): 53-64.

薄景山, 吴兆营, 翟庆生, 齐文浩. 2004. 三种土层结构反应谱平台值的统计分析[J]. 地震工程与工程振动, **24**(2): 23-28.

薄景山, 李秀领, 刘德东, 刘红帅. 2003a. 土层结构对反应谱平台值的影响[J]. 地震工程与工程振动, **23**(4): 29-33.

薄景山, 李秀领, 李山有. 2003b. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程, **19**(2): 11-15.

高孟潭, 陈学良, 俞言祥, 雷建成. 2008. 5·12 汶川 8.0 级地震汉源烈度异常机理的初步探讨[J]. 震灾防御技术, **3**(3): 216-223.

李小明, 廖振鹏. 1989. 地表土层地震反应的等效线性化解法[M]//地震小区划(理论与实践). 北京: 地震出版社: 141-153.

齐文浩, 薄景山, 郭迅, 刘德东, 刘奇斌. 2010. 汶川地震中一个特殊场地研究初探[J]. 地震工程与工程振动, **30**(3): 53-58.

袁一凡. 2008. 四川汶川 8.0 级地震损失评估[J]. 地震工程与工程振动, **28**(5): 10-19.

中华人民共和国建设部. 2009. GB50021-2001(2009 版)岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 8-12.

中华人民共和国建设部. 2010. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 19-20.