

文章编号:1673-0291(2008)04-0078-05

## 强夯地振动统计分析评价

倪永军<sup>1</sup>,滕忻利<sup>1</sup>,张雪峰<sup>2</sup>,王万洪<sup>1</sup>

(1.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;2.内蒙古呼和浩特市交通局,呼和浩特 010010)

**摘要:**强夯法加固地基由于其施工简单,工程造价低,在世界范围内受到广泛应用.近年来强夯引发的地振动对邻近的建(构)筑物的影响受到业内的日益关注.基于高速公路强夯加固地基施工现场采集的207条振动记录,对强夯振动的峰值加速度与峰值速度随振源距的变化进行了统计分析.参照中国地震烈度表(GB/T 17742-1999)的烈度分级和《安全爆破规程》(GB6722-2003)的允许振速,对强夯的地震动效应作出评价,并建议在该强夯能级下不同结构类型的允许安全距离.

**关键词:**强夯;地振动效应;统计分析;评价

**中图分类号:**P315.25 **文献标志码:**A

## Statistical Analysis and Assessment of Ground Vibration Due to Dynamic Compaction

NI Yongjun<sup>1</sup>, TENG Xinli<sup>1</sup>, ZHANG Xuefeng<sup>2</sup>, WANG Wanhong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Huhhot Traffic Bureau, Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010010, China)

**Abstract:** Being of the simple constructing procedure and low cost, dynamic compaction method was widely used in the foundation consolidation around the world. Recently, the vibration effect due to the dynamic compaction on the adjacent structures was highlighted in the construction field. Based on 207 vibration records recorded in-situ during the construction of foundation consolidation by the way of dynamic compaction, the statistical analysis respecting to the peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) was performed. Referring to the earthquake intensity classification of the "China Earthquake Intensity Table" (GB/T 17742-1999) and the allowable vibration velocity of the "Safe Blasting Regulation" (GB6722-2003), the vibration assessment for the dynamic compaction was carried out. The allowable safety distance for the different structures with the dynamic compaction under the specified energy grade was proposed as well.

**Key words:** compaction; ground vibration effect; statistical analysis; assessment; vibration; evaluation

强夯法处理地基施工简单,工程造价低,在世界范围内受到广泛应用.但强夯引发的地面振动却对邻近的建(构)筑物造成了很大的影响,由施工引发的建筑结构破坏争议也时有发生.国内外大多数场合采用质点振动速度值来评价建筑物的振动安全问题,同时某些工程也采用了质点加速度值来评价振

动效应.具体到强夯振动危害的判断,目前仍存在不同的看法.

2001年方磊等<sup>[1]</sup>经过对实测振动资料的深入分析,认为当强夯所引起的地面振动加速度衰减到0.1g时,对建筑物几乎没有危害.同时得出当强夯夯击能为1.5,2.0,2.5,3.0 MN·m时,其对构筑物

收稿日期:2007-09-12

基金项目:内蒙古交通科技资助项目

作者简介:倪永军(1973—),男,陕西府谷人,副研究员,博士. email: yjni@bjtu.edu.cn

的安全距离分别为 14, 17.5, 18.7, 19.5 m.

2002 年雷学文等<sup>[2]</sup>研究了强夯振动的衰减规律, 根据最大振动加速度  $a_{g, \max} \leq 0.2g$  来估算安全施工距离为 10 m.

2003 年李廷等<sup>[3]</sup>根据实测数据以及国内外相关资料, 将强夯试验振动在平面上的影响分为 3 个区:

1) 振动破坏区. 离夯点边缘的距离小于 20.4 m, 区域内土体振动加速度大于  $0.5 \text{ cm/s}^2$ , 速度大于  $5.0 \text{ cm/s}$ , 振动位移大于 1.0 mm. 该区域内振动将对一般建筑物造成破坏, 但具体对不同的结构形式所造成破坏程度尚待研究.

2) 振动损坏区. 离夯点距离在 20.4 ~ 30 m 之间, 区域内土体振动加速度为  $0.02 \sim 0.5 \text{ cm/s}^2$ , 速度  $0.2 \sim 5.0 \text{ cm/s}$ , 振动位移 0.1 ~ 1.0 mm. 该区域内振动将对一般建筑物造成一定程度的损坏.

3) 相对安全区. 离夯点距离大于 30 m, 区域内土体振动加速度小于  $0.2 \text{ cm/s}^2$ , 速度小于  $0.5 \text{ cm/s}$ , 振动位移小于 0.1 mm. 该区域内振动除对精密仪器设备有一定影响外, 对一般建筑物不会造成损坏.

2004 年欧阳立胜等<sup>[4]</sup>现场实测了佛山地区强夯法加固软基时的场地振动响应, 指出在强夯能级为  $10 \times 14 \text{ t} \cdot \text{m}$  时, 场地的振动主频为 4 ~ 7 Hz, 强夯振动影响烈度 V 度区离强夯点的最大距离约为 70 m. 邹立华等<sup>[5]</sup>基于黄土强夯的现场试验与振动数据分析, 指出在市区进行强夯施工时应注意强夯能级, 并应考虑 15 m 范围内建筑物的安全及 50 m 范围内居民的舒适度. 张孟喜等<sup>[6]</sup>研究了黄土受强夯扰动的工程特性与环境公害, 指出对于 1 000 ~ 3 000 kJ 的夯击能量, 强不利扰动区一般与夯点距离小于 10 m; 中不利扰动区一般距夯点距离 10 ~ 30 m; 弱不利扰动区一般与夯点距离大于 30 m. 耿光旭等<sup>[7]</sup>参考了国内外爆破安全标准, 对比了不同施工方法下质点振动的频率、振幅、持续时间等规律, 建议对于强夯施工, 振动速度限值为  $10 \text{ mm/s}$ , 强夯能级为 3 000 kN·m 以下时, 安全距离 8 ~ 15 m; 强夯能级为 3 000 ~ 5 000 kN·m 时, 安全距离取 15 ~ 30 m.

2005 年史慧杰<sup>[8]</sup>根据强夯施工振动监测数据指出, 对于 8 000 kN·m 能级加固区强夯点和建筑物的最小安全距离为 45 m; 6 000 kN·m 能级强夯试夯区强夯点和建筑物的最小安全距离为 36 m; 2 000 kN·m 能级强夯区强夯点和建筑物的最小安全距离为 18 m.

综上所述, 国内常用《爆破安全规程》(GB6722-2003)<sup>[9]</sup>来评价强夯引起的环境振动并进而确定安全施工距离, 且针对强夯能级、夯锤形状、场地条件以及临近构筑物的不同得出了不同的结论, 不同的工程项目需要根据相应的条件单独确定. 呼和浩特市正在兴建的环城高速公路, 在 100 m 范围内有普通民居, 也有该路线上已经完工的桥梁及涵洞. 为了明确强夯振动的影响范围, 确定强夯对既有建(构)筑物的允许安全距离, 在现场布设了拾振器来采集强夯引发的地面振动数据, 并据此分析, 对强夯引发的环境振动影响做出评价.

## 1 强夯振动现场实测

强夯振动试验在现场布置了 7 条测线, 分布在距离强夯振源 10.1 ~ 100 m 的范围内. 强夯能级约为 1 800 kN·m (锤重为 16 t, 落距为 11.5 m), 现场布置的拾振器情况见表 1.

表 1 现场布置的拾振器情况

Tab. 1 Instrument allocation for the vibration data collecting in-situ  
(a) 拾振器的放大倍数及振源距

测线	夯次	测试点 1		测试点 2		测试点 3	
		放大倍数	振源距/m	放大倍数	振源距/m	放大倍数	振源距/m
1	7	5		20		100	
	8	5	14	20	30	50	50
	9	5		10		20	
	10	5		10		20	
2	8	5		10		20	
	9	5	12	10	28	20	48.2
	10	5		10		20	
3	8	5		10		20	
	9	5	10	10	26	20	45.7
	10	2		10		20	
4	8	5		10		20	
	9	5	14	10	30	20	50.1
	10	5		10		20	
5	8	5		10		20	
	9	5	13	10	28	20	48
	10	5		10		20	
6	8	5		10		20	
	9	2	13	10	27	20	46.7
	10	2		10		20	
7	5	20		50		100	
	7	20		50		100	
	8	20	50	50	70	100	100
	9	20		50		100	

(b)拾振器的标号及灵敏度

测试点	方向	拾振器标号	灵敏度
1	垂向	v500	0.138
	东西	923	0.162
	南北	1326	0.1603
2	垂向	v558	0.134
	东西	862	0.142
	南北	863	0.139
3	垂向	876	0.107
	东西	1133	0.0973
	南北	1136	0.0973

## 2 强夯振动数据分析

对试验现场采集的207组强夯振动(垂向、东西向和南北向)加速度时程进行了统计和分析计算.典型的垂向、东西向和南北向加速度时程图见图1.

由图1可以看出,强夯引发的地面振动持时较短,且呈现为脉冲型地面运动.其中垂向地面运动峰值随振源距的衰减较快,而水平向的地面运动峰值则随振源距的衰减较慢.

基于试验采集的强夯记录,对其加速度、速度的峰值进行了统计,其垂向、东西向及南北向的峰值数据随振源距的变化散点图见图2.

由图2(a)、(b)可以看出,对于垂向地面运动:

①在振源距为14 m左右时,地面运动的峰值加速度离散性较大,分布在 $1.0 \sim 2.75 \text{ m/s}^2$ 之间;峰值速度的离散性也很大,分布在 $0.25 \sim 1.40 \text{ m/s}$ 之间.

②在振源距为30 m左右时,峰值加速度集中在 $0.31 \sim 0.63 \text{ m/s}^2$ 之间;峰值速度则集中在 $0.13 \sim 0.30 \text{ m/s}$ 之间.

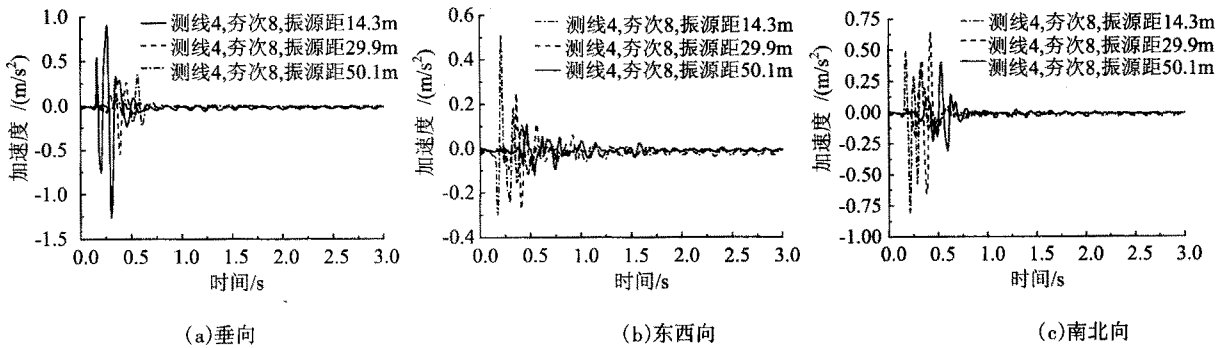


图1 典型的加速度时程

Fig.1 Typical acceleration histories

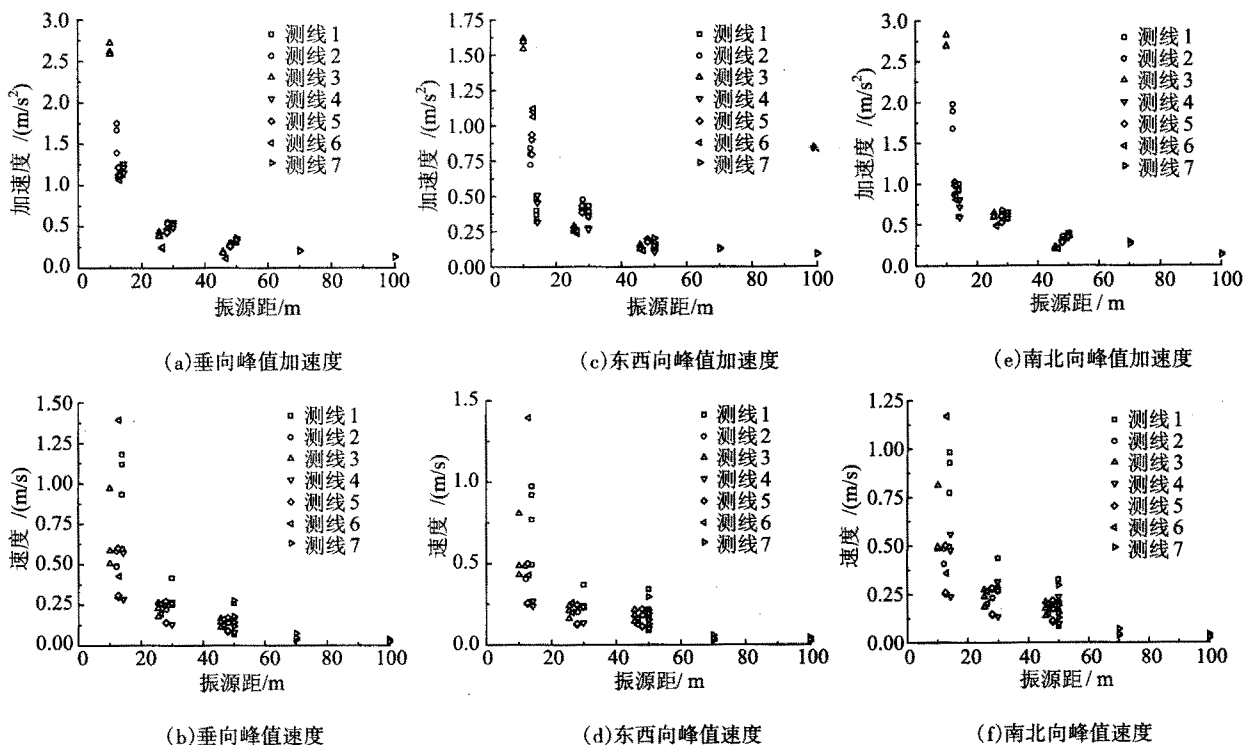


图2 峰值加速度与峰值速度随振源距的变化

Fig.2 PGA and PGV with the vibration distance

③在振源距为 50 m 左右时,有少量的峰值超过了  $0.31 \text{ m/s}^2$ ,大部分在  $0.31 \text{ m/s}^2$  以下;峰值速度大部分在  $0.25 \text{ m/s}$  以下,在  $0.06 \sim 0.13 \text{ m/s}$  之间。

④在振源距为 70 m 和 100 m 时,峰值加速度都在  $0.31 \text{ m/s}^2$  以下;峰值速度个别点超过  $0.06 \text{ m/s}$ ,一般在  $0.06 \text{ m/s}$  以下,但也都在  $0.02 \text{ m/s}$  以上。

由图 2(c)、(d)可看出,对于东西向地面运动:

①在振源距为 14 m 左右时,地面运动的峰值加速度离散性较大,分布在  $0.31 \sim 1.75 \text{ m/s}^2$  之间;峰值速度的离散性也很大,分布在  $0.25 \sim 1.40 \text{ m/s}$  之间。

②在振源距为 30 m 左右时,峰值加速度集中在  $0.25 \sim 0.50 \text{ m/s}^2$  之间;峰值速度则集中在  $0.13 \sim 0.25 \text{ m/s}$  之间。

③在振源距为 50 m 左右时,峰值加速度都在  $0.31 \text{ m/s}^2$  以下;峰值速度主要集中在  $0.13 \sim 0.25 \text{ m/s}$  之间。

④在振源距为 70 m 和 100 m 时,峰值加速度都在  $0.31 \text{ m/s}^2$  以下;峰值速度个别点超过  $0.06 \text{ m/s}$ ,一般在  $0.06 \text{ m/s}$  以下,但也都在  $0.02 \text{ m/s}$  以上。

由图 2(e)、(f)可以看出,对于南北向地面运动:

①在振源距为 14 m 左右时,地面运动的峰值加速度离散性较大,分布在  $0.5 \sim 2.75 \text{ m/s}^2$  之间;峰值速度的离散性也很大,分布在  $0.25 \sim 1.25 \text{ m/s}$  之间。

②在振源距为 30 m 左右时,峰值加速度集中在  $0.4 \sim 0.7 \text{ m/s}^2$  之间;峰值速度离散性稍大,分布在  $0.25 \sim 0.4 \text{ m/s}$  之间。

③在振源距为 50 m 左右时,峰值加速度都在  $0.2 \sim 0.4 \text{ m/s}^2$ ,有较多点  $0.31 \text{ m/s}^2$  以上;峰值速度主要集中在  $0.13 \sim 0.25 \text{ m/s}$  之间,有部分点超过了  $0.25 \text{ m/s}$ 。

④在振源距为 70 m 和 100 m 时,峰值加速度都在  $0.31 \text{ m/s}^2$  以下;峰值速度个别点超过  $0.06 \text{ m/s}$ ,一般在  $0.06 \text{ m/s}$  以下,但也都在  $0.02 \text{ m/s}$  以上。

从水平向地面运动的峰值加速度和峰值速度来看,一般南北向的大于东西方向,说明强夯引发的地面运动有较强的方向性,其最大振动方向并非沿强夯的前进方向,这与夯锤的形状以及地基土体的分布有关。

### 3 强夯振动影响评价

到目前为止,各国对强夯振动的评价体系尚不完善。国内一般采用《爆破安全规程》(GB6722-2003)<sup>[9]</sup>来评价强夯引发的地面振动:振动频率低于 10 Hz 时,土坯房、毛石房屋的安全允许振速为  $0.5 \sim 1.0 \text{ cm/s}$ ;一般砖房、非抗震的大型砌块建筑

物的安全允许振速为  $2.0 \sim 2.5 \text{ cm/s}$ ;钢筋混凝土结构房屋的安全允许振速为  $3.0 \sim 4.0 \text{ cm/s}$ 。也有采用中国地震烈度表(GB/T 17742-1999)<sup>[10]</sup>作为强夯地面振动的评价依据。中国地震烈度表是用房屋震害程度和在地面上人的感受来定义烈度,对应的地面运动参数为峰值加速度和峰值速度两个指标:烈度为 V 时对应的峰值加速度为  $0.22 \sim 0.04 \text{ m/s}^2$ ,峰值速度为  $0.02 \sim 0.04 \text{ m/s}$ ;烈度为 VI 时对应的峰值加速度为  $0.45 \sim 0.89 \text{ m/s}^2$ ,峰值速度为  $0.05 \sim 0.09 \text{ m/s}$ ;烈度为 VII 时对应的峰值加速度为  $0.90 \sim 1.77 \text{ m/s}^2$ ,峰值速度为  $0.10 \sim 0.18 \text{ m/s}$ 。不同烈度对应的房屋震害程度,地面上人的感受及其他震害详见文献[10]。

由于《爆破安全规程》规定了频率范围,采用允许振速单因素作为控制指标;而中国地震烈度表采用具体的房屋震害程度和地面上人的感受来描述烈度,用峰值加速度和峰值速度双因素作为控制指标。因此,处于安全考虑和避免工程纠纷,本文作者结合两个规范的指标来评价呼和浩特绕城高速公路工程项目的地面振动情况。

由统计结果可看出,在振源距为 14 m 以内时,水平向地面运动峰值加速度离散性很大,但相当多的峰值在  $1.25 \text{ m/s}^2$  以上,峰值速度大于  $0.25 \text{ m/s}$ ,据此可判定在此范围内,地面振动的烈度都达到了 VII 度,个别达到了 VIII 度;在振源距为 30 m 左右时,水平向地面运动的峰值加速度在  $0.25 \sim 0.70 \text{ m/s}^2$  之间,峰值速度在  $0.13 \sim 0.4 \text{ m/s}$  之间,可以判定在此距离处地面振动的烈度达到了 VI 度;在振源距为 50 m 左右时,水平向地面运动的峰值加速度在  $0.2 \sim 0.4 \text{ m/s}^2$  之间,峰值速度在  $0.13 \sim 0.25 \text{ m/s}$  之间,可以判定在此距离处地面振动的烈度达到了 V 度。在振源距为 70 m 以上时,水平向地面运动的峰值加速度较小,一般在  $0.31 \text{ m/s}^2$  以下,但峰值速度仍然较大,个别甚至超过了  $0.06 \text{ m/s}$ 。如果按照爆破振动安全允许标准,则超过了一般建(构)筑物的安全允许振速。这与现场实际工程中强夯时建(构)筑物的实际状态不符。这也再次说明爆破安全规程不宜用于本工程中强夯振动的评价。

基于上述分析,建议在强夯能级  $1800 \text{ kN}\cdot\text{m}$  下,对于不同的结构类型,采用如下的允许安全距离:

对于一般民居(无抗震设防的砖房及土坯房),强夯振动的安全距离宜在 70 m。

对于扩大型基础的钢筋混凝土结构(涵洞),强夯振动的安全距离宜在 50 m。

对于采用桩基础的桥梁,强夯振动的安全距离

宜在 30 m.

#### 4 结语

对强夯法加固高速公路地基时引发的地面振动进行了现场数据采集,基于采集的振动数据,对其峰值分布及随振源距的变化作了统计分析.统计结果表明,对于强夯中采用的夯锤能级 1 800 kN·m,其引发的地面振动主频范围都在 10 Hz 以下,仅考虑峰值速度作为评价指标的爆破安全规程(GB6722-2003)用于强夯振动评价依据尚不充分.强夯引发的水平地面振动传播的较远,按照中国地震烈度表(GB/T 17742-1999)中烈度的分级,在振源距为 14 m 时,地面振动的烈度都达到了Ⅶ度,个别达到了Ⅷ度;在振源距为 30 m 左右时,地面振动的烈度达到了Ⅵ度;在振源距为 50 m 左右时,地面振动的烈度达到了Ⅴ度.考虑到强夯的反复作用次数多,建议对于一般民居(无抗震设防的砖房及土坯房),强夯振动的安全距离宜在 70 m;对于扩大型基础的钢筋混凝土结构(涵洞),强夯振动的安全距离宜在 50 m;对于采用桩基础的桥梁,强夯振动的安全距离宜在 30 m.

由于本次强夯振动采集的强夯能级单一,对于安全距离的建议仅供类似工程参考,进一步的强夯振动评价还依赖于更多的试验数据支持与分析.

#### 参考文献:

- [1] 方磊,经绯,刘松玉.强夯振动影响与构筑物安全距离研究[J].东南大学学报:自然科学版,2001,31(3):29-32.  
FANG Lei, JING Fei, LIU Songyu. Influence of Vibration Caused by Dynamic Compaction and Safe Distances for Buildings[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2001, 31(3): 29-32. (in Chinese)
- [2] 雷学文,白世伟,孟庆山.强夯引起的振动规律及对建筑物的影响分析[J].建筑技术开发,2002,29(12):20-21.  
LEI Xuewen, BAI Shiwei, MENG Qingshan. Analysis on the Vibration Produced by Heavy Tamping and Its Influence on Building[J]. Building Technique Development, 2002, 29(12): 20-21. (in Chinese)
- [3] 李廷.强夯振动效应研究[J].山西建筑,2003,29(13):13-14.  
LI Ting. Study of Vibration of Dynamic Compaction[J]. Shanxi Architecture, 2003, 29(13): 13-14. (in Chinese)
- [4] 欧阳立胜,王迪洁.强夯地震效应浅析[J].华南地震,2004,24(3):96-100.  
OUYANG Lisheng, WANG Dijie. Simple Analysis for the Seismic Effect of Dynamic Compaction[J]. South China Journal of Seismology, 2004, 24(3): 96-100. (in Chinese)
- [5] 邹立华,赵建昌,陈全红.湿陷性黄土强夯加固振动试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3393-3397.  
ZOU Lihua, ZHAO Jianchang, CHEN Quanhong. Experiment Study on Vibration to Improve Collapsible Loess With Dynamic Compaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3393-3397. (in Chinese)
- [6] 张孟喜,王玉玲,冯建龙.黄土受强夯扰动的工程特性与环境公害研究[J].岩土力学,2004,25(12):1903-1909.  
ZHANG Mengxi, WANG Yuling, FENG Jianlong. Engineering Properties of Loess Disturbed and Geo-Environmental Damage Due to Dynamic Consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1903-1909. (in Chinese)
- [7] 耿光旭,李华平,刘金川.施工振动对环境影响的检测[J].勘察科学技术,2004(4):54-57.  
GENG Guangxu, LI Huaping, LIU Jinchuan. Monitoring of Construction Vibration to Environment[J]. Science and Technology of Reconnaissance, 2004(4): 54-57. (in Chinese)
- [8] 史慧杰.强夯施工振动监测与夯后地基处理效果振动测试研究[D].青岛:中国海洋大学,2005.  
SHI Huijie. Vibration Monitoring of Dynamic Compaction and Vibration Testing of Consolidation Effect of Ground Bed by Dynamic Compaction[D]. Qingdao: China Ocean University, 2005. (in Chinese)
- [9] 中国工程爆破协会.爆破安全规程(GB6722-2003)[S].北京:中国标准出版社,2003.  
China Society of Engineering Blasting. Blasting Safety Specification (GB6722-2003)[S]. Beijing: China Standard Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 中国质量技术监督局.中国地震烈度表(GB/T 17742-1999)[S].北京:中国标准出版社,1999.  
China Quality Supervision Bureau. China Earthquake Intensity Table (GB/T 17742-1999)[S]. Beijing: China Standard Press, 1999. (in Chinese)