

文章编号: 1000-7598 (2011) 07-2001-06

强夯激励下黄土边坡动力响应模型试验研究

龚成明^{1,2}, 程谦恭¹, 刘争平³

(1. 西南交通大学 地质工程系, 成都 610031; 2. 铁道部工程管理中心, 北京 100844; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 设计并完成了 1:20 比尺的黄土边坡大型动力模型试验, 探讨了模型试验中的相似律、边界条件处理等问题; 研究了强夯激励下黄土边坡的动力特性变化规律与动力响应规律, 以及边坡坡率对动力特性和动力响应的影响。试验结果表明, 边坡坡率越大, 动力响应幅值越大; 强夯激励下黄土边坡的动力响应幅值均随冲击荷载作用而产生并迅速衰减; 振动周期在 1 s 之内, 主频率在 25~45 Hz 之间, 不会出现振动叠加现象。强夯激励下黄土边坡对径向加速度的放大效应更显著, 下部边坡以竖向振动为主, 上部边坡以径向振动为主。黄土边坡的边缘部位对强夯冲击振动的反应幅值较之内部存在放大现象。沿坡高方向, 边坡对输入加速度具有明显的放大作用, 坡顶处的放大效应最为显著。试验结果有助于揭示黄土边坡在强夯激励下的动力响应规律, 为黄土地区的工程设计和施工提供有益的参考。

关 键 词: 强夯; 黄土; 动力响应; 模型试验

中图分类号: U 416.16 文献标识码: A

Model test study of dynamic responses of loess slope by dynamic compaction

GONG Cheng-ming^{1,2}, CHENG Qian-gong¹, LIU Zheng-ping³

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. The Engineering Management Centre, Ministry of Railways, Beijing 100844, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This article has accomplished the large model test for 1:20 loess slope, investigated the law of similitude, boundary condition treatment in the model test, studied the change rules of dynamic properties and dynamic response rules for loess slope in dynamic compaction, as well as the dynamic properties and dynamic response rules under the influence of the slope ratio. Results show that the amplitude of dynamic response increased with increasing slope ratio. The amplitude of dynamic response for loess slope in dynamic compaction fades out rapidly with the impact loading effect; the vibration cycle is less than 1s and the major frequency is between 25-45 Hz that no superimposed vibration will occur. The amplification effect on radial acceleration is more obvious for loess slope in dynamic compaction; the vertical vibration prevails at lower part of slope while radial vibration prevails at upper part of slope. There is amplification effect for response amplitude on impact vibration of on the ridge of loess slope. There is obvious amplification effect on slope for input acceleration along the slope, especially the most obvious amplification effect at the top of slope. The test results have favorable influence on revealing the rules of dynamic response for loess slope in dynamic compaction, so as to provide instructive reference for the engineering design and construction in loess regions.

Key words: dynamic compaction; loess; dynamic responses; model test

1 引 言

在工程建设中若对湿陷性黄土认识不足, 采取措施不当, 常常会使建(构)筑物地基发生湿陷导致建(构)筑物出现断裂或裂缝, 影响到建(构)筑物的正常使用。为此, 在湿陷性黄土地区进行工程建设时必须消除黄土的湿陷性。强夯法在消除湿陷性黄土的湿陷性、减少变形量、提高强度等方面

有独特的优越性, 因而得到迅速发展与推广^[1-5], 特别是在我国陕西、山西、甘肃等省, 利用强夯法消除黄土的湿陷性已成为主要手段, 并且随着设备的改进与夯击能的提高, 其处理深度不断加大, 可达 10 m 以上。

在强夯施工时会产生较大的振动冲击波, 对施工场地和邻近建筑物安全带来一定危害。国内常用《爆破安全规程》^[6]来评价强夯引起的环境振动,

收稿日期: 2009-11-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划项目)(No. 2008CB425801); 国家自然科学基金项目(No. 50908234)。

第一作者简介: 龚成明, 男, 1963 年生, 博士研究生, 教授级高工, 主要从事边坡与地下工程方面的研究。E-mail: gongchengming-zsjdz@263.net

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。近年来,国内外学者对强夯对于邻近建筑物的影响进行了一系列的研究工作,提出了振动安全距离、振动衰减公式等^[7-12]。但对强夯对于黄土工程施工场地,尤其是邻近边坡动力响应问题涉及较少。因此,本文通过室内模型试验,就强夯振动下不同坡率条件下黄土边坡的加速度、速度、位移和放大效应等动力响应规律进行研究,为黄土地区的工程设计和施工提供有益的参考。

2 模型试验方案设计

本试验的目的是为了研究不同坡率条件下强夯振动对黄土边坡的动力响应(加速度、速度及位移),探询坡面及坡体内部不同位置处的动力响应规律及黄土工程边坡的动力响应放大效应,研究强夯振动下黄土边坡不同位置处应力及变形的变化规律,分析强夯对黄土边坡稳定性的影响机制。

2.1 土样的物理力学性质

试验采用郑西客运专线吕家崖隧道出口边坡开挖的现场土样,主要为砂质黄土,根据室内常规物理力学性质试验,其物理力学指标平均值见表1。表中最大干密度和最优含水率系由重型击实试验得出。

表1 土样的基本物理力学性质

Table 1 Basic physico-mechanical properties of soil sample

液限 /%	塑限 /%	颗粒密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	最优 含水率 /%	最大干 密度 /(g/cm ³)	动凝聚力 c _d /kPa	动内摩擦角 φ _d /(°)
24.7	16.5	2.71	10.34	11.4	1.96	50	23.2

2.2 模型试验方案设计

本试验模型及夯击功能按几何相似、运动相似以及力的相似规律进行设计,选择与实体原型相同的黄土料为模型材料。几何尺寸相似比为1:20,按 Buckingham π 定理导出了各物理量之间的相似关系。严格按相似性规律的模型实际上是不可能制造出来的,因为在模型材料性质方面受到许多严格限制,特别是质量密度这项。当重力对模型动力反应的影响小于动荷载的影响时,可以忽略重力的影响,采用忽略重力的模型。

模型边坡采用阶梯型边坡,分上下2级边坡,1级边坡坡率1:n分为1:1、1:0.75和1:0.5共3种工况,2级边坡坡率为1:1,各级边坡坡高均为0.5m,中间台阶宽0.2m(见图1),相当于原型各级边坡

坡高10m,台阶宽4m。

将现场取得的黄土料按一定的压实度,对照模型尺寸进行分层填筑。填筑过程中,在坡体内部及表面布设加速度传感器与位移监测点,路堤填筑形成后,在设计强夯点位实施夯击,夯击过程中通过加速度传感器测定边坡中夯击振动力的传递规律,同时测定夯点处及边坡表面的竖向和水平向变形。夯击过程中,通过加速度传感器测定路堤中夯击振动力的传递规律,以百分表测量坡面位移。模型尺寸及监测点布置图见图1、2,其中A1~A9每点布置水平向和竖直向一对加速度传感器,水平向百分表SH1~SH3和竖向百分表SV1~SV3分别布置在图中对应坡面处,共布置18个加速度传感器、6个百分表。强夯点D1与D2之间的间距为0.4m,对应于原型8m。

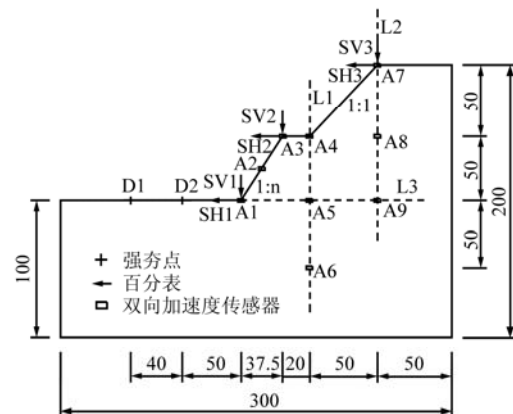


图1 模型尺寸及监测点布置图(单位:cm)

Fig.1 Model dimensions and layout for measuring points (unit: cm)



图2 黄土边坡模型

Fig.2 Model of loess slope

边坡作为一种半无限体理论上是没有边界的,但在振动台试验中,只能将模型土盛在有限尺寸的容器内。这样,由于其边界上的波动反射以及体系振动形态的变化将会给试验结果带来一定的误差,即所谓“模型箱效应”。成功的土体边界条件模拟应使容器中的模型土在地震作用下与原型自由场同

样的方式变形,减小边界条件的影响。常用解决办法是尽量加大模型箱的尺寸并在刚性壁上放置一定厚度的吸振材料,要求有较大的阻尼,同时又要有一定的硬度,防止产生较大变形。本试验强夯点距模型箱两侧距离为0.6 m,相当于原型12 m,根据Bornitz地面振动衰减公式^[12],12 m处的振幅值衰减为10.6%。为减小模型箱的反射效应,在模型箱的底面及除钢化玻璃之外的3个侧面粘附厚度为8 mm的颗粒状塑胶板。

2.3 试验装置及主要仪器设备

(1) 模型箱

采用自行研制的模型箱,框架由槽钢焊制,底板及3个侧面焊接钢板,为观察边坡内部变形情况,其中一个侧面安装透明的钢化玻璃,并在钢化玻璃上绘制网格以观测土体位移。模型箱的内部净尺寸:长×宽×高=3.0 m×1.2 m×2.0 m,重1.5 t。用滑轮起吊的圆形夯锤来模拟现场强夯施工。采用质量为25 kg、直径为20 cm的平底圆形夯锤,夯锤提升高度为1.5 m,按设计夯点况对路堤进行夯击压实。按相似律换算,则相当于现场锤重100 kN,落距为30 m,夯击能为3 000 kN·m。

(2) 加速度采集系统

采用德国Imc集成测控有限公司生产的高灵敏度的微型加速度传感器(18个)及SPARTAN系列多通道数据采集分析系统。

(3) 坡面位移

利用百分表来观测强夯过程中坡面水平及竖向位移的发展变化规律。

3 模型试验结果分析

基于强夯激励下黄土边坡动力响应的模型试验方案,按步骤逐步实施。根据相似定律将模型试验值换算为原型值,以下试验数据均为换算后的原型值。

3.1 夯沉量随夯击次数的变化规律

图3为阶梯型边坡D1夯击点累计夯沉量及单击夯沉量与夯击次数的关系曲线。从图中可以看出,随着夯击次数的增加,累计夯沉量逐渐增加,但增加量趋缓,一级边坡坡率为1:1、1:0.75和1:0.5的边坡最大夯沉量分别为80、82、90 cm;单击夯沉量随夯击次数的增加逐渐减小。

3.2 坡面位移变化曲线

根据1:0.75的阶梯型坡D1夯击点坡面位移监测点上百分表读数可以绘制出坡面位移随夯击次数的变化曲线,见图4,水平位移方向为远离坡体,竖向位移方向向下。从图中可以看出,强夯影响下

阶梯型黄土边坡坡面位移变化不大,其中水平位移量大于竖向位移量,从坡脚、坡中到坡顶位移量逐渐增大。

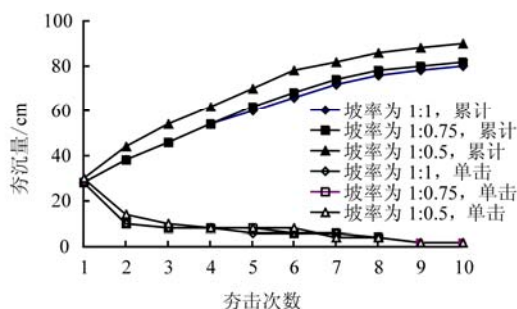


图3 夯沉量与夯击次数关系

Fig.3 Relationships between compacting settlement and ramming number

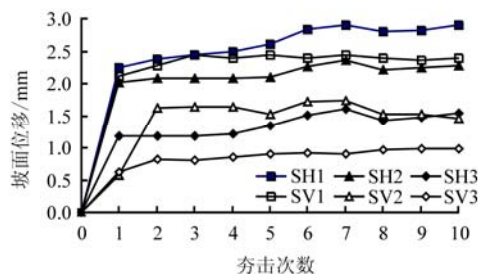


图4 坡面位移随夯击次数的变化曲线

Fig.4 Change curves of slope displacement vs. ramming number

3.3 典型实测波形图

强夯模型试验实测结果表明,强夯振动波形除幅值不同外,其波形基本相似。每一测点埋设了两个加速度传感器,分别监测了竖向和径向的加速度值。图5给出了D1处夯击时A2监测点第3次夯击时动力响应-时程曲线,速度和位移是根据加速度波形图通过数据处理机积分方法求得。根据对实测数据的分析,强夯振动传播变化的规律表现为:竖向和径向的加速度、速度、位移均随冲击荷载作用而产生并迅速衰减,振动周期在1 s之内;同一点的动力响应值径向大于竖向,这也与坡面百分表监测值相对应。A2点竖向与径向加速度峰值分别为0.39、0.72 m/s²、竖向与径向速度峰值分别为1.55、3.08 mm/s、竖向与径向位移值分别为0.14、0.25 mm。

振动速度的频谱分析表明,强夯振动的频率较低,主频率一般在25~45 Hz之间(见图6)。现场强夯施工时,每个夯点需连续夯击10次,每两次夯击时间间隔以“min”计,而振动波形分析表明,其持续时间在1 s之内,因此,不会出现振动叠加现象。

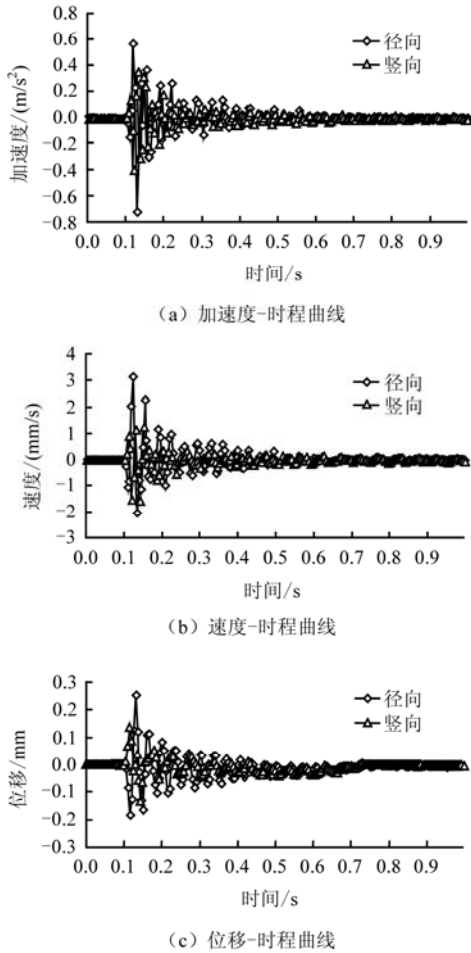


图5 动力响应-时程曲线
Fig.5 Time-history curves for dynamic response

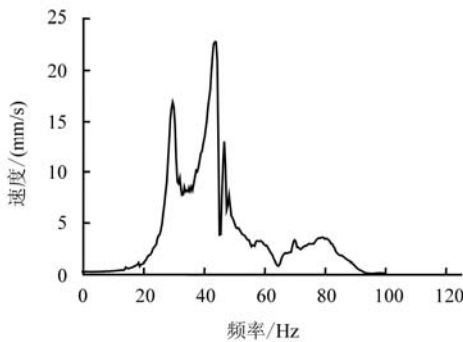


图6 实测加速度幅值-时程曲线
Fig.6 Time-history curve for actual acceleration amplitude

3.4 加速度随夯击次数的变化规律

在单点强夯试验时，随着夯击数的增加，土体被夯实，加速度值不断增大。当夯击数达到一定时，加速度达到峰值；如果继续夯击，则加速度值趋于定值。绘制阶梯型边坡不同坡率条件下 D1 处夯击时 A3 监测点竖向和径向加速度峰值与夯击次数的关系曲线（见图 7）。从图中可见，边坡坡率越大，

加速度峰值越大；随着夯击次数的增加，振动加速度峰值不断增加，但加速度增加趋势逐步减缓，径向峰值加速度大于竖向峰值加速度。坡率为 1:1、1:0.75、1:0.5 的径向和竖向最大加速度峰值分别为 0.78、0.80、0.82 m/s² 和 0.62、0.64、0.98 m/s²。

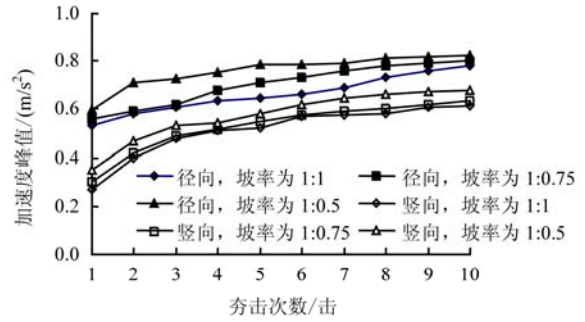


图7 加速度峰值与夯击次数的关系曲线
Fig.7 Relation curves of acceleration peak vs. ramming number

3.5 加速度沿坡面的变化规律

绘制 D1 夯击点第 5 击时阶梯型坡不同坡率坡面点竖向和径向加速度峰值的变化曲线于图 8。由图可知：边坡坡率越大，加速度峰值越大；1 级边坡竖向加速度大于径向加速度，此时边坡以竖向振动为主；2 级边坡径向加速度大于竖向加速度，该处边坡以径向振动为主。与竖向加速度相比，径向加速度从坡脚到坡顶逐渐增大，表明边坡对径向加速度的放大效应更显著。

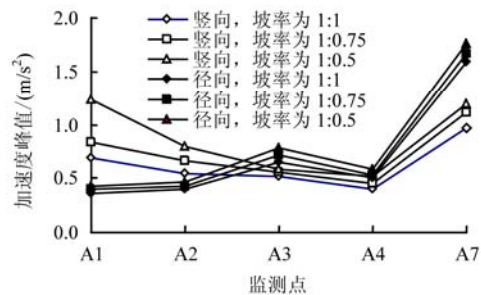


图8 加速度峰值沿坡面的变化规律
Fig.8 Change rules of acceleration peaks along slope

3.6 加速度监测点与强夯点距离的关系

图 9 为阶梯型坡不同坡率条件下两夯击点第 5 击时坡面各点径向加速度峰值与强夯点距离之间的关系曲线，其中坡面各点距夯击点 D1 的距离比距夯击点 D2 的距离远 8 m。由图可知，边坡坡率越大，径向加速度峰值越大；径向加速度峰值沿坡面逐渐增加，D2 各点加速度峰值比 D1 点平均大 0.12 m/s²，其中变破点 A3 和 A7 处的径向加速度增长最快。

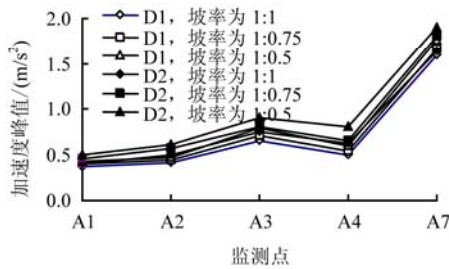
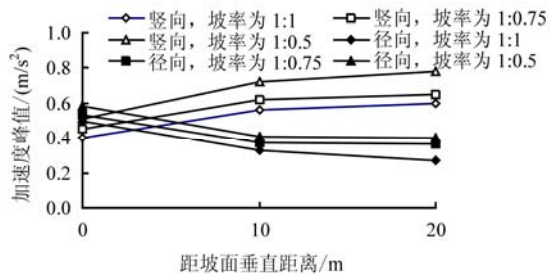


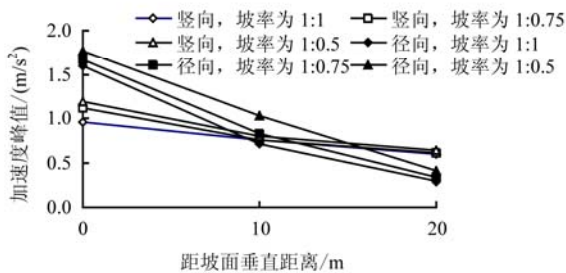
图 9 加速度监测点与强夯点距离之间的关系曲线
 Fig.9 Relation curves for acceleration measuring point vs. distance of compacting point

3.7 加速度在坡体内部的变化规律

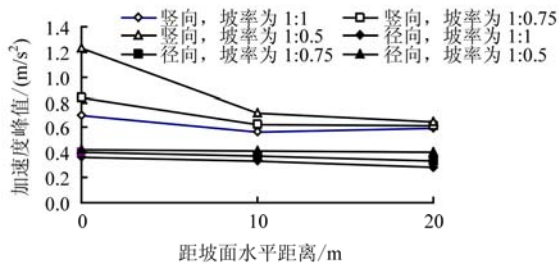
同一垂直位置处 (L1、L2 断面) 加速度幅值的变化规律为从低到高逐渐增大, 其中径向振动放大效应显著, 增长较快, 竖向振动变化规律不明显, 边坡的动力响应自下而上逐渐放大 (见图 10(a)、10(b))。同一水平位置处 (L3 断面) 加速度幅值的变化规律为从坡面至坡内逐渐减小, 其中竖向振动衰减较快, 径向振动变化不大 (见图 10(c))。对于同一监测点处不同坡率的黄土边坡, 坡率越陡者, 其加速度值越大。



(a) L1 断面



(b) L2 断面



(c) L3 断面

图 10 坡内加速度峰值变化规律

Fig.10 Change rules of acceleration peak in slope

3.8 加速度放大系数随坡高的变化规律

为了描述强夯作用下边坡加速度响应规律, 定义各测点动力响应加速度峰值与水平面上对应点加速度峰值 (由 Bornitz 地面振动衰减公式计算得到) 的比值为加速度峰值放大系数。试验结果表明, 在各工况强夯激励下, 模型边坡加速度响应具有相似的规律。模型试验结果表明, 在各工况强夯激励下, 黄土边坡加速度响应具有相似的规律。现以 D1 夯击点第 5 次夯击时竖向峰值加速度放大效应为例描述如下。图 11 给出了坡面各测点处竖向加速度峰值放大系数随坡高的变化规律。从图中可以看出, 边坡对强夯激励具有明显的放大作用。沿坡面方向向上, 加速度峰值放大系数呈现递增趋势, 坡面上半部增幅稍大, 在坡面的变坡点 A3、A7 处放大系数明显增大, 表明边坡点具有明显的振动放大效应。最大加速度峰值放大系数位于坡顶处的 A7 点, 1:1、1:0.75 和 1:0.5 坡率为最大放大系数分别为 2.4、2.8 和 3.0。

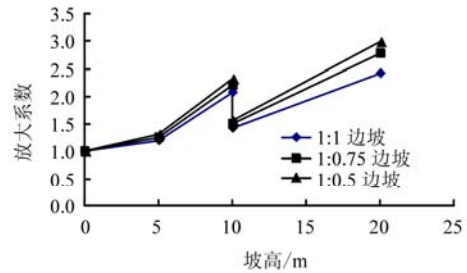


图 11 坡面各点加速度峰值放大系数

Fig.11 Amplification coefficients of acceleration peak at each point on slope

4 结 论

(1) 随着夯击次数的增加, 累计夯沉量逐渐增加, 但增加量趋缓。

(2) 阶梯型边坡的坡度对强夯激励下黄土边坡的动力响应有一定的影响, 边坡坡度越大, 动力响应幅值越大。

(3) 强夯影响下黄土边坡坡面位移变化不大, 水平位移稍大于竖向位移, 从坡脚、坡中到坡顶位移量逐渐增大。

(4) 强夯激励下黄土边坡的动力响应幅值均随冲击荷载作用而产生并迅速衰减; 振动周期在 1 s 之内, 主频率在 25~45 Hz 之间, 不会出现振动叠加现象。

(5) 强夯激励下黄土边坡对径向加速度的放大效应更显著, 下部边坡以竖向振动为主, 上部边坡

以径向振动为主。

(6) 黄土边坡的边缘部位对强夯冲击振动的反幅值较之内部存在放大现象。沿坡高方向, 边坡对输入加速度具有明显的放大作用, 坡顶处的放大效应最为显著。

黄土边坡在强夯作用下的动力响应是一个十分复杂的问题, 其动力响应特征和变化规律还需要进一步的研究。尽管如此, 本文的试验为验证理论与数值分析的研究成果, 为改进或提出合理的计算模型和分析方法提供了丰富的试验数据。试验结果有助于揭示黄土边坡在强夯激励下的动力响应规律, 为黄土地区的工程设计和施工提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] 费香泽, 王钊, 周正兵. 黄土强夯的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 437—441.
FEI Xiang-ze, WANG Zhao, ZHOU Zheng-bing. Experimental research of dynamic compaction of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 437—441.
- [2] 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 Li-hua, ZHAO Jian-chang, CHEN Quan-hong. Experiment study on vibration to improve collapsible loess with dynamic compaction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3393—3397.
- [3] LEONARDS G A, CUTTER W A, HOLTZ R D. Dynamic compaction of granular soil[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, Division, ASCE**, 1998, 106(1): 257—264.
- [4] 于克萍, 程侠, 折学森. 强夯处理黄土路堤的模型试验研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(4): 22—24.
YU Ke-ping, CHENG Xia, SHE Xue-sen. Model test of loess embankment treated by dynamic compaction[J]. **Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)**, 2003, 23(4): 22—24.
- [5] 骆行文, 陈静曦, 王吉利. 强夯法处理黄土地区公路地基试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 654—656.
LUO Xing-wen, CHEN Jing-xi, WANG Ji-li. Experimental study on foundation improvement by dynamic consolidation on loess region[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 654—656.
- [6] 中国工程爆破协会. GB6722—2003 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [7] SHEN C K, KIM Y S, BANG S, et al. Centrifuge modeling of lateral earth support[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1982, 108(9): 1150—1164.
- [8] TAMRAKAR S B, TOYOSAWA Y, ITOH K, et al. Failure mechanism of slopes in the centrifuge using in-flight excavator[C]// Proceeding of International Symposium on Landslide Hazard in Orogenic Zone from the Himalaya to Island Arc in Asia. Kathmandu: [s. n.], 2005: 255—264.
- [9] TAMRAKAR S B, MITACHI T, TOYOSAWA Y, et al. Measurement of slope movement during the slope excavation of small size full scale model[C]//Proceeding of International Symposium on Landslide Hazard in Orogenic Zone from the Himalaya to Island Arc in Asia, Kathmandu: [s. n.], 2005: 265—274.
- [10] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 27(3): 624—632.
XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 27(3): 624—632.
- [11] 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 Meng-xi, WANG Yu-ling, FENG Jian-long. Engineering properties of loess disturbed and geo-environmental damage due to dynamic consolidation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1903—1909.
- [12] 殷楚梅, 李树林. 建筑施工振动环境影响评价[J]. 云南环境科学, 2001, 20(增刊): 128—129.
YIN Chu-mei, LI Shu-lin. Construction vibration environmental impact assessment[J]. **Yunnan Environmental Science**, 2001, 20(Supp.): 128—129.