

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 2-0094-06

衡重式桩板挡墙上墙土压力模型试验研究

刘国楠¹, 胡荣华¹, 潘效鸿², 刘永春¹

(1. 中国铁道科学院深圳研究设计院, 广东 深圳 518034; 2. 深圳市国土资源和房产管理局直属分局, 广东 深圳 518034)

摘 要: 简要介绍了几何相似系数为 7 的衡重式桩板挡墙模型和多工况模型试验, 着重分析了上墙在不同卸荷板尺寸和设置位置及有外荷载工况下对上墙土压力的分布问题。试验结果表明: ①板埋深超过某一深度时, 并不能有效改善上墙主动土压力的分布情况, 反过来说明存在最佳埋深位置。②板宽对卸荷板上表面处的土压力影响较大, 但对上墙土压力总体分布趋势没有影响。③填土荷载下, 当卸荷板宽度和上墙高比值小于 0.4 时, 上墙土压力接近于朗肯土压力分布; 当宽高比大于 1.3 时, 上墙土压力分布更接近于静止土压力。④工程设计时, 上墙土压上墙土压力可按公式 $\gamma h_0 k_0 + qk_a$ 计算。

关 键 词: 衡重式桩板挡墙; 上墙; 土压力; 模型试验

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Model tests on earth pressure of upper part wall of sheet pile wall with relieving platform

LIU Guo-nan¹, HU Rong-hua¹, PAN Xiao-hong², LIU Yong-chun¹

(1. Shenzhen Research and Design Institute, China Academy of Railway Sciences, Shenzhen, Guangdong 518034, China;

2. The First Branch of Shenzhen Municipal Land, Resources and Housing Administrative Bureau, Shenzhen, Guangdong 518034, China)

Abstract: The model tests of sheet pile wall with relieving platform by use of geometric similarity coefficient of 7 and its different conditions are introduced briefly. The earth pressure distributions on upper wall with changing of the width and depth of relieving platform under the conditions of embankment and an external load are analyzed emphatically. The results show that: ①The depth of relieving platform exceeds a certain depth, which can't improve effectively the distribution of active earth pressure on the upper wall; in turn that exists best depth location. ②The change of width of relieving platform has a great influence on earth pressure near the surface of relieving platform, but has no effect on the overall distribution trend of earth pressure on upper wall. ③In the embankment load, when the ratio of the relieving platform width to the height of upper part wall is less than 0.4, the distribution of earth pressure on the upper wall is close to the Rankine's earth pressure; when the ratio is more than 1.3, the distribution of earth pressure on the upper wall is close to the at rest earth pressure. ④In engineering design, it is suggest that the upper part wall earth pressure can be calculated by the formula $\gamma h_0 k_0 + qk_a$.

Key words: sheet pile wall with relieving platform; the upper part wall; earth pressure; model test

1 引 言

桩板挡墙具有布置空间小, 不受地基承载力限制, 但结构受力不合理, 材料利用率低特点; 锚索桩板墙改进了桩板墙的受力, 有较好的技术和经济性, 但受锚固地层和锚索耐久性等因素的限制^[1-3]。在工程实践中作者提出了一种带有衡重台的桩板墙结构形式(如图 1 所示)^[4], 在桩板墙的上部设置刚性连接的卸荷板, 起到减少下墙土压力, 削减桩

身弯矩, 改进结构受力的作用。该类挡墙称之为衡重式桩板挡墙, 已在多个工点取得应用^[4-7]。

由于卸荷板的存在, 挡土结构的受力和变形性状相对传统的(锚索)桩板挡墙更为复杂^[8-10], 以卸荷板为界的上墙和下墙的土压力分布模式和计算方法还不明确, 卸荷板的尺寸和设置位置对结构受力和变形性状也有较大影响。为此, 在深圳市国土资源和房产管理局国土基金的资助下, 进行了衡重式桩板墙模型试验研究。限于篇幅, 本文仅分析模

收稿日期: 2011-04-16

基金项目: 深圳市国土资源与房产管理局国土基金项目(No. 20080130002A)。

第一作者简介: 刘国楠, 男, 1957 年生, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要从事支挡结构、地基处理的科研、设计与咨询工作。E-mail: lgn2004@163.com

型试验研究的上墙土压力分布模式，下墙土压力分布模式将另文分析。

2 模型试验概况

2.1 模型试验原型

选取深圳市某地质灾害治理工点 12.0 m 高的衡重式桩板墙作为模型试验的原型，结构尺寸如图 1 所示^[4]。

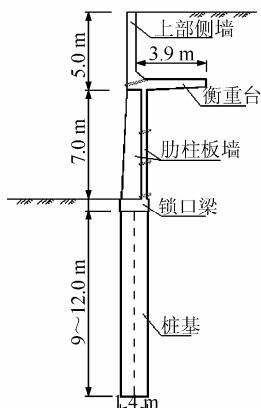


图 1 某工点衡重式桩板挡墙断面
Fig.1 The section of sheet pile wall with relieving platform in a field

2.2 相似原理

本挡墙模型试验研究属于用物理模拟的方法来研究结构的受力、变形等问题。模型与原型结构(包括基础)之间，必须满足相似律的要求^[11-13]。

原型和模型间相同的物理量相似系数为

$$\lambda_x = x_p / x_m \quad (1)$$

式中： x 为任一物理量，下标“p”和“m”分别代表原型和模型。

根据弹性理论、土体强度理论以及衡重式桩板挡墙的主要荷载是土压力(面积力)和自重(体积力)，推导出各物理量相似系数之间满足的关系见表 1(与 Lai 等^[14]推导的相似关系式一致)，同时选定了本次试验的几何相似系数值为 7。

2.3 模型试验箱及结构模型

2.3.1 模型试验箱

模型箱为钢筋混凝土结构，如图 2(a)所示，平面尺寸为 6.5 m×2.0 m(长×宽)，桩埋深段高度为 2.0 m，模拟支挡高度为 2.0 m。试验中为减小边界效应，在模型箱内壁涂抹了润滑油并铺设了塑料薄膜。模型箱实物图见图 3。

表 1 主要物理量的相似关系

Table 1 Similarity relation to the main physical parameters

长度 l 相似关系		密度 ρ 相似关系		应变 ε 相似关系		位移 s 相似关系		单位抗弯刚度 EI 相似关系		单位宽度弯矩 M 相似关系		剪力 Q 相似关系	
公式	取值	公式	取值	公式	取值	公式	取值	公式	取值	公式	取值	公式	取值
λ	7	λ_ρ	0.32	λ_ε	1	$\lambda\lambda_\varepsilon$	7	$\lambda^4\lambda_\rho/\lambda_\varepsilon$	768.32	$\lambda^3\lambda_\rho$	109.76	$\lambda^2\lambda_\rho$	15.68

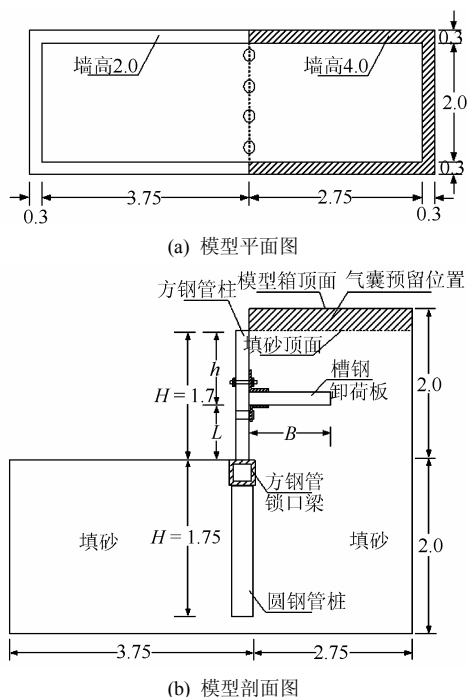


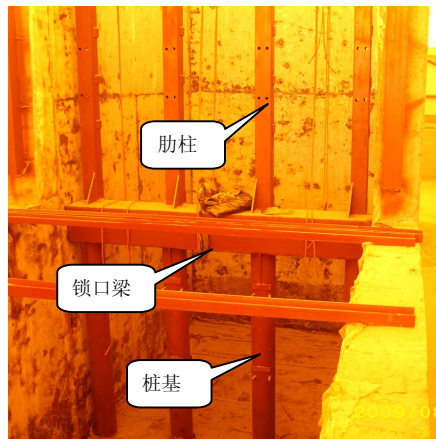
图 2 模型结构图(单位: m)
Fig.2 The schematic drawing of model(unit: m)



图 3 模型箱实物图
Fig.3 The physical map of model box

2.3.2 挡墙结构模型

模型结构采用钢结构，如图 2(b)所示。其中桩采用 159 mm×5 mm 圆钢管，锁口梁采用 250 mm×5 mm 方钢管，地面以上柱采用 100 mm×2.5 mm 方钢管，挡土板采用厚 18 mm 的木板，卸荷板采用 10 号槽钢上下穿心螺栓固定于柱。结构模型实物见图 4。



(a) 肋柱、锁口梁及桩基



(b) 卸荷板

图 4 结构模型实物图

Fig.4 The physical map of structure model

2.3.3 加载装置

在模型墙顶面设置反力架和气囊，通过加气压实现墙顶加均布外荷载。加载示意图见图 5。加载实物见图 6。

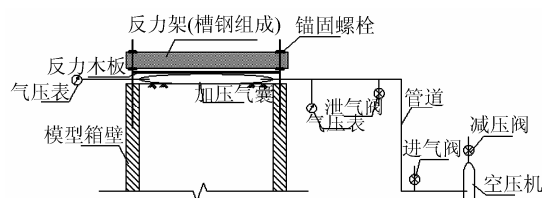


图 5 气囊加载示意图

Fig.5 The schemes of gas bag loading

2.4 试验土样

2.4.1 土样参数

模型试验用土选用过 2.5 mm 筛的中粗砂，含泥量小于 3%。砂颗粒相对密度 G_s 为 2.65，最大与最小干密度分别为 $\rho_{dmax} = 1.78 \text{ g/cm}^3$ ， $\rho_{dmin} = 1.40 \text{ g/cm}^3$ ；粒径组成特性参数为 $d_{60} = 0.6 \text{ mm}$ ， $C_u = 2.86$ ， $C_c = 0.92$ ；内摩擦角 $\varphi = 35.8^\circ$ ，砂填入模型槽时控制干密度 $\rho_d = 1.60 \text{ g/cm}^3$ ，试验完毕后土样的三轴试验结果表明，土样物理力学参数基本无变化。

2.4.2 土样装填方法

试验箱中填砂厚度按照 30 cm 分层。采用铁锹人工将砂子铲进模型箱，每填完一层后用小型压实



(a) 充气管及调压装置



(b) 气囊充气加载状态

图 6 气囊加载实物图

Fig.6 The physical map of gas bag loading

机压实并将砂层顶面整平（顶面用小木板轻轻刮平）。填砂过程中适时提升挡墙模型至预定高度（桩底离开箱底 30 cm）。填砂厚度至 2 m 后，挡墙前不再填砂，墙后继续填砂。填砂过程中应尽量保持每层的填砂方式一致，由此可保证砂土的密实度一致。

2.5 量测与数据采集

模型试验中，土压力量测布置见图 7。压力盒采用振弦式，尺寸为 120 mm×10 mm（直径×厚度），量程为 100 kPa，精度为 0.1 kPa。数据采集由计算机控制。

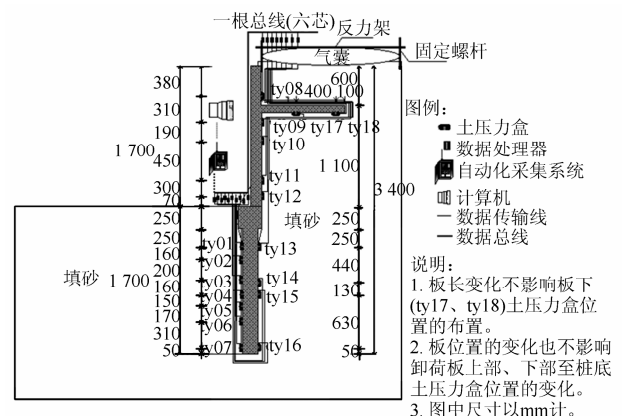


图 7 土压力盒的布置 (单位: mm)

Fig.7 Instrumentation of earth pressure(unit: mm)

数据的采集测读以及加载方式如下：

(1) 无外加荷载

每隔 10 min 测读记录一次应变与土压力值，之后每隔 15 min 测读一次，累计 1 h 后每隔 30 min 读一次。如果每 1 h 内挡墙侧向位移小于 0.03 mm，并连续出现两次，即认为挡墙已趋于稳定。

(2) 有外加荷载

按 10 kPa 为一个等级，用气囊在墙顶逐渐加载至 50 kPa。每隔 5 min 测读记录一次应变与土压力值，之后每隔 20 min 测读一次，累计 2 h 后每隔 30 min 读一次。如果每 2 h 内挡墙侧向位移小于

0.03 mm，并连续出现两次，即认为挡墙已趋于稳定，再施加下一级荷载。

2.6 试验方案

试验采用 6 种尺寸卸荷板和 3 种埋设位置组合，以及加载和不加载两种工况，测试上下墙的土压力分布。为了便于理解，将模型的支护高度作为基本参数，卸荷板的宽度和埋设位置均表达为墙高的相对尺寸。卸荷板的宽度分别取 0.25H、0.30H、0.35H、0.50H、0.60H 和 0.70H 共 6 种；卸荷板的埋设深度分别取 0.35H、0.50H 和 0.70H。试验参数组合如表 2 所列。

表 2 试验组合

Table 2 The combination of test

B/H	h/H	荷载 q / kPa	组数	备注
0.25, 0.30, 0.35, 0.50, 0.60, 0.70	0.35, 0.50, 0.70	0	B 与 h 两两组合共 18 组	无外荷载
0.25, 0.35, 0.60	0.35, 0.50, 0.70	10~50	B 与 h 两两组合共 9 组	荷载分级施加，每级 10 kPa

注： B 和 h 参见图 2。

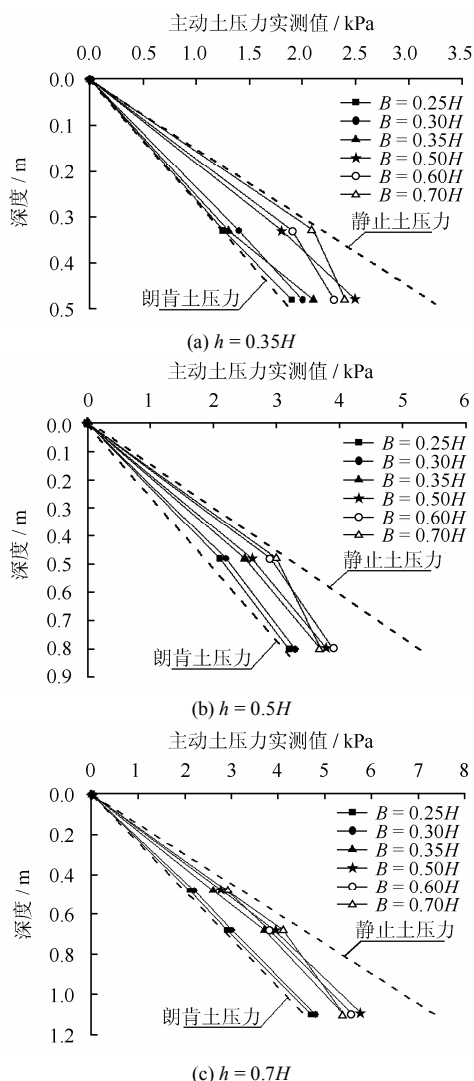


图 8 填土荷载下上墙土压力分布

Fig.8 The distribution of earth pressure of the upper wall

3 试验结果与分析

3.1 填土荷载下上墙土压力

在填土荷载下，不同卸荷板尺寸和设置深度时，模型试验中上墙土压力测试值如图 8 所示。图 8 中标出了静止土压力和朗肯土压力分布线。

由图 8(a)可知， $h = 0.35H$ 时，板宽较小的情况下 ($B/h \leq 1.0$)，土压力接近朗肯土压力值；板宽较大的情况下 ($B/h \geq 1.3$)，土压力接近静止土压力值。

由 8(b)可知， $h = 0.50H$ 时，板宽较小的情况下 ($B/h \leq 0.6$)，土压力接近朗肯土压力值；板宽较大的情况下 ($B/h \geq 0.7$)，土压力接近静止土压力值。

由 8(c)可知， $h = 0.70H$ 时，板宽较小的情况下 ($B/h \leq 0.4$)，土压力接近朗肯土压力值；板宽较大的情况下 ($B/h \geq 0.5$)，土压力接近静止土压力值。

由上述分析可知：

(1) 在 $h = 0.50H$ 与 $h = 0.70H$ 时两种埋深条件下，板宽较大 ($B \geq 0.35H$) 更合适。同时也说明，在此两种埋深条件下，板宽的变化对上墙主动土压力分布的影响相同，即板埋深超过某一深度时，并不能有效改善上墙主动土压力的分布情况，反过来说明存在最佳埋深位置（最佳位置的确定需结合下墙土压力，将另文分析）。

(2) 当 h 为定值时，在无外荷载的情况下，上

墙主动土压力实测值介于朗肯土压力值与静止土压力之间。 $h = 0.35H$ 时, 上墙实测土压力值为同一深度处朗肯土压力值的 1.05~1.54 倍、静止土压力值的 0.57~0.95 倍。 $h = 0.50H$ 时, 上墙实测土压力值为同一深度处朗肯土压力值的 1.05~1.51 倍、静止土压力值的 0.60~0.94 倍。 $h = 0.70H$ 时, 上墙实测土压力值为同一深度处朗肯土压力值的 1.04~1.46 倍、静止土压力值的 0.64~0.90 倍。由此可得, 上墙土压力大小可按公式 $\gamma h_0 k_a \xi$ 计算, γ 为土体重度, h_0 为计算点深度, k_a 为主动土压力系数, ξ 为主动土压力放大系数, 建议取值范围为 1.1~1.5。为了给挡墙结构一个安全储备, 建议上墙土压力的计算直接采用静止土压力公式 $\gamma h_0 k_0$ 计算, k_0 表示静止土压力系数。

(3) h 为定值时, 当板较宽较大时, 在卸荷板上板面附近处的水平向土压力按照分布趋势应该接近静止土压力值, 但结果是在板附近处的水平向土压力值大大小于静止土压力值。经分析认为是板宽较大时, 板与砂层间的水平向摩擦力较大, 影响了接近板位置处的水平向土压力, 且板宽越大时, 对卸荷板附近水平向土压力的影响也越大。

(4) h 为定值时, 板宽变化的情况下, 上墙土压力总体分布趋势相同, 即板宽变化对上墙土压力总体分布趋势没有影响。卸荷板的宽度对土压力分布有影响, $B/h \leq 0.4$ 时, 接近朗肯土压力分布; $B/h \geq 1.3$ 时, 接近静止土压力分布; 卸荷板的埋置深度对土压力的分布模式无重要影响。

(5) h 为定值时, 当板宽较小时, 更接近主动破坏状态; 当板宽较大时, 更接近静止状态, 说明卸荷板过短时其作用不大。

3.2 加载时上墙土压力

不同工况及不同埋深土压力盒的观测结果整理如图 9 所示。为了比较在有荷载条件下土压力的分布规律, 图中分别标出了静止土压力、朗肯土压力以及 $\gamma h_0 k_0 + qk_a$ 计算土压力值。

(1) 在土压力盒埋深较浅时 ($h_0 \leq 0.38$ m), 实测土压力值介于静止土压力与 $\gamma h_0 k_0 + qk_a$ 之间, 且更接近后者。

(2) 在土压力盒埋深较大时 ($0.70 \leq h_0 \leq 1.0$ m), 实测土压力值介于朗肯土压力与 $\gamma h_0 k_0 + qk_a$ 之间, 且与两者都很接近。在土压力盒深度超过 1.0 m 时实测土压力值更接近 $\gamma h_0 k_0 + qk_a$ 。为了给结构一个安全储备, 土压力的计算可用 $\gamma h_0 k_0 + qk_a$ 来计算。

(3) 同一深度处的土压力随着外荷载的增加基

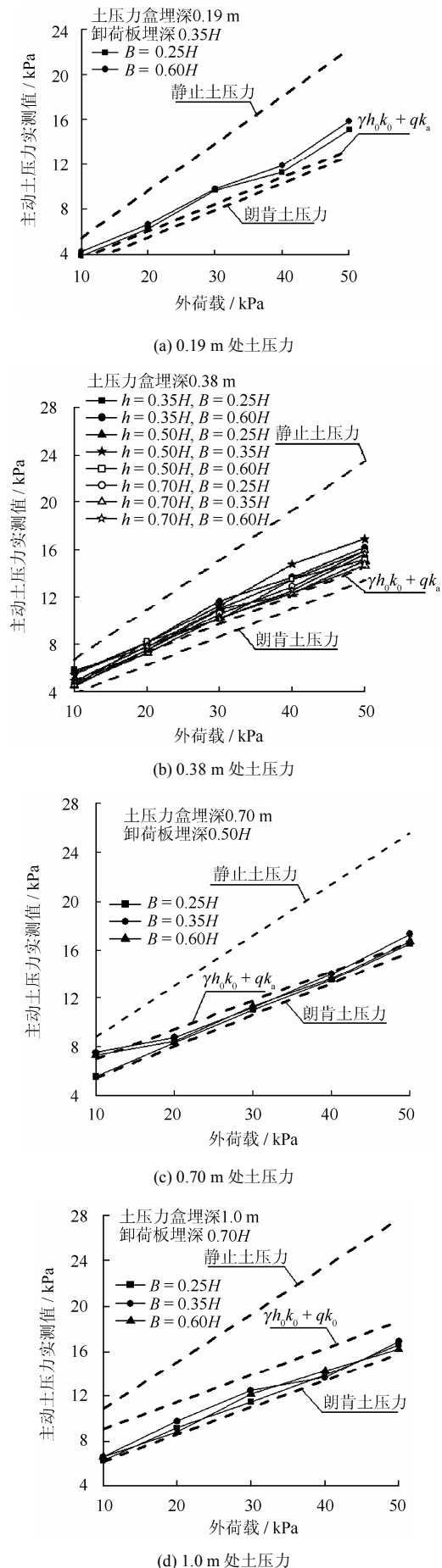


图 9 外荷载下上墙土压力分布
Fig.9 The distribution of earth pressure under the load

本呈线性增加。

上述分析结果表明, 在外荷载的条件下, 上墙土压力可用公式 $\gamma h_0 k_0 + qk_a$ 来计算。

4 结 论

(1) 板埋深超过某一深度时, 并不能有效地改善上墙主动土压力的分布情况, 反过来说明存在最佳埋深位置, 亦即板埋深超过一定值后, 板埋置的变化对土压力的分布模式影响不大。

(2) 板宽对卸荷板上表面处的土压力影响较大, 但对上墙土压力总体分布趋势没有影响。卸荷板的埋置深度对土压力的分布模式也无重要影响。

(3) 填土荷载下, 当卸荷板宽度和上墙高比值小于 0.4 时, 上墙土压力接近于朗肯土压力分布; 当宽高比大于 1.3 时, 上墙土压力分布更接近于静止土压力, 即卸荷板宽度过短时其作用不大。

(4) 上墙土压力可按公式 $\gamma h_0 k_0 + qk_a$ 计算。

参 考 文 献

- [1] 李海光. 新型支挡结构设计 with 工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 王恭先, 徐峻岭, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 376—377.
- [3] 吴积善, 王成华. 山地灾害研究的发展态势与任务[J]. 山地学报, 2006, 24(5): 518—524.
WU Ji-shan, WANG Cheng-hua. The development trend of the mountain hazards research and the task[J]. **Journal of Mountain Science**, 2006, 24(5): 518—524.
- [4] 刘国楠. 深圳插花地港鹏新村南侧边坡地质灾害治理工程设计[R]. 深圳: 中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 2005.
- [5] 刘国楠. 深圳西部通道侧接线工程基坑滑坡治理工程设计[R]. 深圳: 中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 2005.
- [6] 刘国楠. 深圳市园景台小区边坡支挡工程设计[R]. 深圳: 中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 2007.
- [7] 刘国楠, 刘峰. 深圳地铁三号线运营配套公寓与培训基地边坡支挡工程设计[R]. 深圳: 中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 2009.
- [8] 董捷, 张永兴, 黄治云. 柔性板桩板墙加固斜坡填方地基的土压力分配问题研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2489—2506.
DONG Jie, ZHANG Yong-xing, HUANG Zhi-yun. Study of earth pressure distribution of flexiboard sheet-pile walls used in reinforced fill foundation on ramp[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2489—2506.
- [9] 蒋忠信, 蒋良滩. 南昆铁路支挡结构主动土压力分布图式[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1035—1040.
JIANG Zhong-xin, JIANG Liang-wei. Distribution map forms of active earth pressure on retaining structures in Nanning—Kunming railway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(6): 1035—1040.
- [10] 代军, 胡岱文, 吴曙光. 桩锚支挡结构体系挡土土压力试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(4): 48—54.
DAI Jun, HU Dai-wen, WU Shu-guang. Experimental study of soil stress on the holding sheet of pile-anchor holding-block structure system[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2001, 23(4): 48—54.
- [11] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.
- [12] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- [13] SABINS G M, HARRIS H G, WHITE R N, 等. 结构模型和试验技术[M]. 朱世杰译. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [14] IAI S. Similitude for shaking table test on soil-structure-fluid model in 1-g gravitational field[J]. **Soils and Foundations**, 1989, 29(1): 105—118.