

文章编号: 0451-0712(2007)03-0040-06

中图分类号: 417.1

文献标识码: A

# 基于正交试验设计的模块式加筋土挡墙 墙面板与筋带之间摩擦性质研究

刘卫华<sup>1</sup>, 雷胜友<sup>2</sup>, 黄润秋<sup>1</sup>, 穆 兰<sup>3</sup>, 陈 辉<sup>4</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室 成都市 610059;

2. 长安大学公路学院 西安市 710064; 3. 石家庄铁路职业技术学院土木工程系 石家庄市 050041;

4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉市 430071)

**摘 要:** 运用正交试验设计方法, 设计了模块式加筋挡土墙墙面板与筋带之间摩擦的室内足尺试验, 研究竖向压应力(A)、筋带品种(B)、墙面板与筋带的砌筑方式(C)3个因素在不同水平下在峰值强度和 $S=19\text{ mm}$ 时, 对墙面板与筋带之间的摩擦系数的影响。通过正交试验, 确定了3种因素对摩擦系数的影响顺序、各因素的显著性水平及墙面板与筋带之间连接方式的最优方案。

**关键词:** 组合模块式墙面板; 筋带; 摩擦系数; 正交试验

加筋土挡墙以其适应性强、占地面积少、施工简便、抗震性能好、造价低廉, 而被越来越多地采用。模块式加筋土挡墙是近年来新兴的一种加筋土挡墙,

其主要特点为墙面板与筋带之间采用刚性连接或摩擦连接。当为摩擦连接时, 如果筋带与墙面板模块之间的摩擦力小于墙面板所受的墙背土压力, 筋带与

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室开放基金资助项目(GZ2005-03)

收稿日期: 2006-11-13

## Research on Climatic Factors and Evaluation Indicators of Impacting Asphalt Concrete Pavement

MIAO Ying-hao<sup>1, 2</sup>, WANG Bing-gang<sup>2</sup>

(1. Transportation Research Center, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Research on climatic factors and evaluation indicators of impacting asphalt concrete pavement is conducted for evaluation of impact of climate on asphalt concrete pavement. It is found that solar radiations, high-temperature process, freeze-thaw cycle, process of high temperature with precipitation, process of freeze-thaw cycle with precipitation and extremely low temperature are prominent climate processes and climate conditions of impacting asphalt concrete pavement. On the basis of characteristics of these climate processes and climate conditions, average daily solar radiation, average annual accumulated temperature above  $20^{\circ}\text{C}$ , average annual accumulated rain-temperature index, average annual precipitation-freezing index, maximum average monthly air temperature daily range and extremely low air temperature are established as climatic evaluation indicators for asphalt concrete pavement. These indicators provide foundation for evaluation of impact of climate on asphalt concrete pavement.

**Key words:** road engineering; asphalt concrete pavement; climatic evaluation indicator

墙面板模块之间会发生相对滑动,破坏整个加筋土挡墙的稳定,造成整个工程的失败。但现有研究对于筋带与墙面板的连接强度涉及很少。

“正交试验设计方法”是处理多因素试验的一种科学的试验方法,它使用一种规格化的表格——“正交表”合理安排试验。用这种方法只要较少次数的试验便可判断出较优的试验条件,若再对试验结果进行简单的统计分析,还可以更全面、更系统地掌握试验结果,做出正确判断。在模块式加筋土挡墙墙面板与筋带摩擦性质试验研究中,摩擦系数与竖向压应力、筋带品种、墙面板与筋带砌筑方式等多个因素密切相关,各因素都或多或少地对摩擦系数产生影响,到底哪个因素重要、哪个因素不重要,各因素依什么样的水平搭配起来更好等问题,都是多因素正交试验设计方法要解决的问题。墙面板与筋带摩擦性质正交试验是按照正交试验原理,合理地选择影响因素的不同组合进行试验,并将得到的一系列结果进行直观分析和方差分析,由此得出不同因素的变化对摩擦系数的影响,并把单个因素对摩擦系数的影响从试验结果中分离出来,进行单因素对指标的影响分析。

本文用正交试验分析了竖向压应力、筋带品种、墙面板与筋带砌筑方式等因数对摩擦系数影响的主次,提出了墙面板与筋带连接的最优方案。

## 1 模块与墙面板摩擦性质正交试验

采用正交试验研究竖向压应力、筋带品种、模块与筋带的砌筑方式3个因素对于摩擦系数的影响,每种因素拟考虑3个水平。选取的正交试验表为 $L_9(3^3)$ ,不考虑各因素的交互作用,即假定它们之间相互没有影响。本试验采用的因素与对应的水平数如表1所示。

表1 正交试验的因素及水平

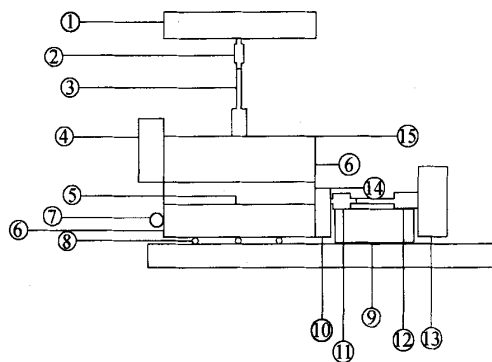
水平	因子		
	竖向压应力 (A)/kPa	筋带品种(B)	模块与筋带的砌 筑方式(C)
1	50	整体式单向土工格栅	干砌
2	100	CAT土工带	砂浆砌筑即时试验
3	150	点焊式单向土工格栅	砂浆砌筑龄期28 d

注:括号中的字母为因素代号。

需要指出,模块间砂浆砌筑龄期为28 d时,砂浆和模块之间具有一定的粘结力,在水平推力的作

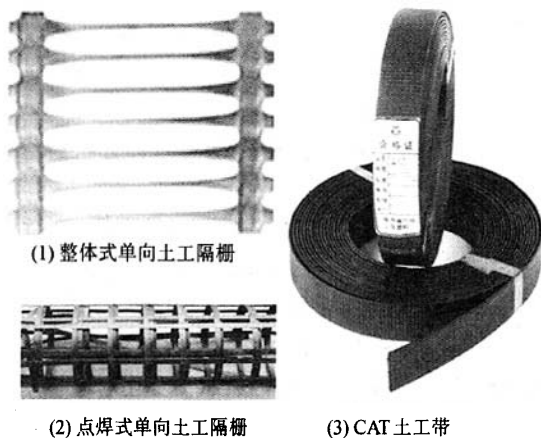
用下,模块与筋带、砂浆组成的复合体之间的作用力为剪切力,并视此剪切力为摩擦力,本文统一称为摩擦力,对应的系数称为摩擦系数。

采用专门的试验机(如图1)进行试验。试验机满足竖向加载和水平加载的要求,能进行位移测量和应力测量,能固定一个试块和满足另一个试块沿某一方向滑动的要求。墙面板模块为长方体,尺寸为500 mm×500 mm×220 mm,用C25的水泥混凝土浇注而成,与实际工程的要求一致。砌筑时用的水泥砂浆强度等级为M5。试验采用的3种筋带如图2所示。



- ① 竖向反力架 ② 竖向荷载传感器 ③ 竖向千斤顶  
④ 水平定位架 ⑤ 筋带固定装置 ⑥ 混凝土试块  
⑦ 水平位移计 ⑧ 滚子 ⑨ 钢架平台  
⑩ 水平荷载分配梁 ⑪ 水平荷载传感器  
⑫ 水平向千斤顶 ⑬ 水平反力架  
⑭ 筋带 ⑮ 竖向加载板

图1 试验机构造示意



(1) 整体式单向土工格栅 (2) 点焊式单向土工格栅 (3) CAT土工带

图2 试验用筋带

试验步骤为:将一定宽度的筋带敷装于砌筑的墙面板模块(模块砌筑的接触面为500 mm×500 mm)单元上,或者将筋带置于模块之间的砌筑

砂浆中,固定在下面的模块上,防止筋带发生移动;然后在模块单元的顶部垂直施加一定值荷载,同时对下面的模块施以水平推力,使下面的模块和筋带一起缓慢地沿水平方向移动,直至破坏。墙面板与筋带系统破坏定义为筋带失去连接能力,其最大摩擦力说明其强度。此强度是以两种强度形式来表述的:即峰值强度和工作状态下强度。这两种强度分别采用峰值强度准值及工作状态下的强度准值而应用于设计中。以上准则参考了美国SRWU试验规程。在模块式加筋土挡墙中,工作状态下的强度值取筋带

相对墙面板滑动长度 $S=19\text{ mm}$ 时的,这是因为当 $S>19\text{ mm}$ 即筋带相对墙面板滑动超过 $19\text{ mm}$ 时的变形已经很大,已经影响整个墙体的稳定性和使用功能。同一试验组做4次平行试验,共做36组试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验结果

根据设计的试验方案进行试验,记录每组试验峰值强度 and  $S=19\text{ mm}$  时的摩擦系数见表2。

表2 试验分析计算

试验号	竖向压应力(A)		筋带品种(B)		模块与筋带的砌筑方式(C)		峰值强度时 摩擦系数	$S=19\text{ mm}$ 时 摩擦系数
1	1(50 kPa)		1(整体式单向土工格栅)		1(干砌)		0.583	0.361
2	1(50 kPa)		2(CAT 土工带)		2(砂浆砌筑即时试验)		0.791	0.765
3	1(50 kPa)		3(点焊式单向土工格栅)		3(砂浆砌筑龄期28 d)		2.999	0.807
4	2(100 kPa)		1(整体式单向土工格栅)		2(砂浆砌筑即时试验)		0.774	0.765
5	2(100 kPa)		2(CAT 土工带)		3(砂浆砌筑龄期28 d)		2.604	0.729
6	2(100 kPa)		3(点焊式单向土工格栅)		1(干砌)		0.483	0.371
7	3(150 kPa)		1(整体式单向土工格栅)		3(砂浆砌筑龄期28 d)		2.433	0.669
8	3(150 kPa)		2(CAT 土工带)		1(干砌)		0.465	0.347
9	3(150 kPa)		3(点焊式单向土工格栅)		2(砂浆砌筑即时试验)		0.852	0.838
	峰值强度时	$S=19\text{ mm}$	峰值强度时	$S=19\text{ mm}$	峰值强度时	$S=19\text{ mm}$		
$F_{1j}$	4.373	1.933	3.79	1.795	1.531	1.079	$\sum y_i = 11.984$	$\sum y_i = 5.652$
$F_{2j}$	3.861	1.865	3.86	1.841	2.417	2.368		
$F_{3j}$	3.750	1.854	4.334	2.016	8.036	2.205		
$\bar{F}_{1j}$	1.458	0.644	1.263	0.598	0.510	0.360	$\bar{y} = 1.332$	$\bar{y} = 0.628$
$\bar{F}_{2j}$	1.287	0.622	1.287	0.614	0.806	0.789		
$\bar{F}_{3j}$	1.250	0.618	1.445	0.672	2.679	0.735		
R	0.208	0.026	0.182	0.074	2.169	0.429		

注:括号内数据为竖向压应力, kPa。

### 2.2 试验结果分析

希望在所得到的数据中,通过统计分析后达到以下几个目标:

(1)分清各因素分别对模块与筋带之间摩擦系数在试验峰值强度和 $S=19\text{ mm}$ 时影响的主次顺序;

(2)找出使摩擦系数较大的优化配比方案;

(3)分析各因素与摩擦系数(峰值强度和 $S=19\text{ mm}$ 时)间的关系,即当因素水平变化时摩擦系数如何变化,找出摩擦系数随因素水平变化的规律和趋势;

(4)区分因素各水平对应的试验结果的差异,分析是由于因素水平不同引起的,还是由于试验误差引起的;

(5)对于影响摩擦系数的各因素的重要程度给予精确的数量估计。

对于前3个目标,运用正交试验的直观分析来实现。对于后2个目标,采用方差分析来实现。

#### 2.2.1 试验直观分析

(1)计算诸因素在每个水平下的平均摩擦系数。

对试验结果进行分析计算,表2的“ $F_{1j}$ ”行给出在竖向压应力为50 kPa时,模块与筋带之间摩擦系数(峰值强度和 $S=19\text{ mm}$ 时)之和分别为 $F_{1j}=0.583+0.791+2.999=4.373$ 和 $F_{1j}=0.361+0.765+0.807=1.933$ ,其均值 $\bar{F}_{1j}$ 分别为1.458和0.644。类似地,竖向压应力为100 kPa时3次试验的平均摩擦系数(峰值强度和 $S=19\text{ mm}$ 时)分别为

1.287和0.622,竖向压应力为150 kPa时3次试验的平均摩擦系数(峰值强度和 $S=19$  mm时)分别为1.250和0.618。平均值的极差 $R=\max(\bar{F}_{1j}, \bar{F}_{2j}, \bar{F}_{3j})-\min(\bar{F}_{1j}, \bar{F}_{2j}, \bar{F}_{3j})$ 分别为0.208和0.026,列在表2的最后一行。类似的计算应用于因子B和C,详见表2。再计算出9次摩擦系数(峰值强度和 $S=19$  mm时)试验结果的总和 $\sum y_i$ 分别为11.984和5.652,以及9次试验结果的平均值 $\bar{y}=\frac{1}{9}\sum y_i$ 分别为1.332和0.628。

极差 $R$ 是度量数据波动大小的一个重要指标,极差值大的因子对指标的影响大,是影响指标的主要因子;反之,极差值小的因子对指标的影响就小,是影响指标的次要因子。据此分析,从表2的最后一行的极差看出:峰值强度时,因子C(模块与筋带的砌筑方式)是主要因子,其次是因子A(竖向压应力),再次是因子B(筋带品种); $S=19$  mm时,因子C(模块与筋带的砌筑方式)是主要因子,其次是因子B(筋带品种),再次是因子A(竖向压应力)。

#### (2) 平均摩擦系数点图。

为了更直观形象地比较各因子对指标影响的大小,选出各因子对指标最有利的水平,作因子和指标的关系图来分析。

##### ① 峰值强度时。

把每个因子的 $\bar{F}_{1j}, \bar{F}_{2j}, \bar{F}_{3j}$ 点在坐标纸上(图3),从而有如下结论:竖向压应力为 $A_1$ (50 kPa)时,平均摩擦系数最大;筋带为 $B_3$ (点焊式土工格栅)时,平均摩擦系数最大;墙面板与筋带砌筑方式为 $C_3$ (砂浆砌筑龄期28 d)时,平均摩擦系数最大。综合起来,当为 $A_1B_3C_3$ 时,平均摩擦系数最大。

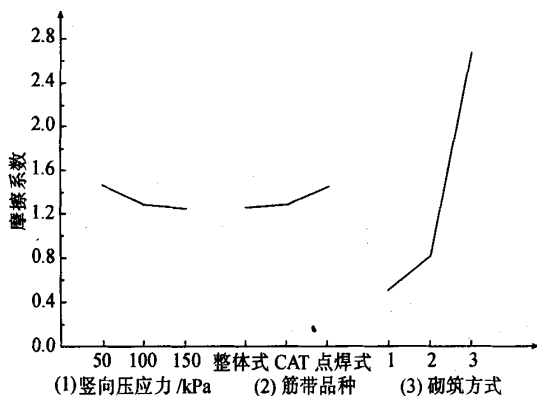


图3 各影响因子直观图

##### ② $S=19$ mm时。

把每个因子的 $\bar{F}_{1j}, \bar{F}_{2j}, \bar{F}_{3j}$ 点在坐标纸上(图4),从而有如下结论:竖向压应力为 $A_1$ (50 kPa)时,平均摩擦系数最大;筋带为 $B_3$ (点焊式土工格栅)时,平均摩擦系数最大;墙面板与筋带砌筑方式为 $C_2$ (砂浆砌筑即时试验)时,平均摩擦系数最大。综合起来,当为 $A_1B_3C_2$ 时,平均摩擦系数最大。

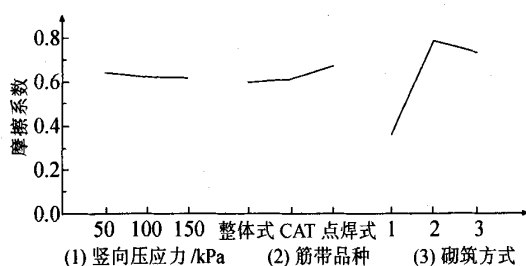


图4 各影响因子直观图

#### (3) 因素的影响排序。

在一项试验中,诸因素的影响是有主有次的。对于墙面板与筋带之间的摩擦试验,从直观图上很容易地看出,一个因子对平均摩擦系数影响大,是指这个因子不同的水平,其相应的平均加速度之间的差异比较大,则这个因子为主要的;一个因子对平均摩擦系数影响不大,是指相应的平均加速度的差异较小,则这个因子是次要的。反映在图上,点子散布大的因子是主要的,散布小的是次要的。

##### ① 峰值强度时。

根据上述原则,从图3看出,峰值强度时,模块与筋带的砌筑方式点子散布最大,是主要的因子;竖向压应力3个点子散布稍小,它的影响居第二位;筋带品种点子散布最小,它的影响为第三位。据此,即可将它们对平均摩擦系数的影响排序为 $C>A>B$ 。

##### ② $S=19$ mm时。

从图4看出,当 $S=19$  mm时,模块与筋带的砌筑方式点子散布最大,是主要的因子;筋带品种3个点子散布稍小,它的影响居第二位;竖向压应力点子散布最小,它的影响为第三位。据此,即可将它们对平均摩擦系数的影响排序为 $C>B>A$ 。

#### (4) 追加试验。

通过上述分析,推断在峰值强度时,摩擦系数最大的组合为 $A_1B_3C_3$ ,正交试验设计的9组试验中刚好包含这一组合,摩擦系数为2.999。而在 $S=19$  mm时,摩擦系数最大的组合为 $A_1B_3C_2$ ,在9组试验中不包含这一组合,需要追加试验。我们采用了此组合进

行追加试验,得到的摩擦系数为 0.894,大于所有 9 组试验在  $S=19\text{ mm}$  时摩擦系数的值,验证了推断的正确性。

### 2.2.2 正交试验的方差分析

对于极差分析,只是直观地进行分析,并没有对试验中由于各种原因而引起的误差进行分析,没有对各因素的显著性水平给一个定量的衡量。为了分析各因素是否对平均摩擦系数的变化有显著影响,采用正交试验的方差分析法对试验数据进行分析,基本过程如下。

检验各因素是否对平均摩擦系数的变化有显著影响,是检验式(1)的假设。

$$H_0: \beta_1 = \dots = \beta_s = 0, H_1: \beta_1, \dots, \beta_s \text{ 不全为零} \quad (1)$$

检验式(1)的常用方法是作方差分析。方差分析的主要思想是将响应的总平方和(式(2))分解为回归平方和(式(3))及残差平方和(式(4))。

$$SS_T = S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

$$\text{式中: } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \dots + \hat{\beta}_s x_{is},$$

为  $y_i$  的估计值。

总平方和与回归平方和及残差平方和之间的关系为:

$$SS_T = SS_R + SS_E$$

这 3 个平方和分别有自由度  $n-1$ ,  $s$  和  $n-1-s$ 。用平方和除以相应的自由度所得的商称为平均平方和,简称均方,记为:  $MS_T = \frac{SS_T}{n-1}$ ,  $MS_R = \frac{SS_R}{s}$ ,  $MS_E = \frac{SS_E}{n-1-s}$ 。

若式(1)的假设成立,  $MS_R$  和  $MS_E$  的期望值相同,则有:

$$F = \frac{MS_R}{MS_E} = \frac{SS_R/s}{SS_E/(n-1-s)} \quad (5)$$

式(5)可用来检验式(1)。用统计学语言来讲,当式(1)假设成立时,  $F$  应该服从  $F(s, n-1-s)$  分布。将计算和检验的结果列入一张“方差分析表”中(表 3),表 3 中  $p$  值为大于式(5)算出的  $F$  值的概率。若取  $\alpha=0.05$ , 当  $p < 0.05$  时,检验显著,否则不显著。常取  $\alpha=0.05, 0.01$  或  $0.1$ 。

表 3 方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方	$F$	$p$ 值
回归	$s$	$SS_R$	$MS_R$	$\frac{MS_R}{MS_E}$	
误差	$n-s-1$	$SS_E$	$MS_E$		
总和	$n-1$	$SS_T$			

采用上述方法对墙面板与筋带之间摩擦系数在峰值强度和  $S=19\text{ mm}$  时进行正交试验的方差分析,分析结果如表 4 所示。

表 4 方差分析结果

因素	峰值强度		$S=19\text{ mm}$	
	$F$	显著性	$F$	显著性
竖向压应力(A)	1.67		0.26	
筋带品种(B)	1.33		2.22	
砌筑方式(C)	187.94	**	79.91	*

注: \*\* 表示影响特别显著; \* 表示影响显著。

由正交试验的方差分析可以得出如下结论:  
(1)因素各水平对应的试验结果的差异是由因素水平不同引起的,并不是由试验误差引起的;(2)峰值强度时,对摩擦系数有特别显著影响的因素是墙面板与筋带的砌筑方式;(3)  $S=19\text{ mm}$  时,墙面板与筋带的砌筑方式对摩擦系数有显著影响;(4)墙面板与筋带的砌筑方式是摩擦系数的决定性因素。

### 3 结语

(1)竖向压应力、筋带品种和砌筑方式对墙面板与筋带之间的摩擦系数有影响,其影响主次关系为:峰值强度时,墙面板与筋带的砌筑方式是主要的因子,竖向压应力居第二位,筋带品种居第三位;  $S=19\text{ mm}$  时,模块与筋带的砌筑方式是主要的因子,筋带品种居第二位,竖向压应力居第三位。

(2)得到了在峰值强度和  $S=19\text{ mm}$  时,为获取较高摩擦系数的 3 种因子的优化配比方案。峰值强度考虑的是墙面板与筋带之间的最大连接强度,  $S=19\text{ mm}$  时考虑的是长期蠕变条件下墙面板与筋带之间的长期连接强度。进行模块式加筋土挡墙设计时要兼顾这两种情形,进行合理设计。

(3)墙面板与筋带的砌筑方式是摩擦系数的决定性因素。峰值强度时,砌筑方式对摩擦系数的影响特别显著;  $S=19\text{ mm}$  时,砌筑方式对摩擦系数有显著影响。

## 参考文献:

- [1] 林彤. 超高三级加筋土挡墙的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11).
- [2] 雷胜友. 双面加筋土高挡墙的离心模型试验及数值分析研究[D]. 成都: 四川大学, 1996.
- [3] 刘志祥, 等. 模块加筋土挡墙中模块与土工格栅连接强度特性研究[J]. 产业用纺织品, 2002, 20(3).
- [4] 雷胜友. 双面加筋土高挡墙的离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3).
- [5] 杨广庆, 周敏娟, 张俭. 加筋土挡土墙水平位移研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7).
- [6] 栾茂田, 李敬峰, 肖成志, 等. 土工格栅加筋挡土墙工作性能的非线性有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14).
- [7] 唐辉明, 林彤. 三峡工程库区巫山县加筋土挡墙离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17).
- [8] 周中, 等. 岩石边坡生态种植基强度的正交试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(6).
- [9] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 季夜眉, 吴大贤, 等. 概率与数理统计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [11] 刘卫华, 雷胜友, 黄润秋, 等. 模块式加筋土挡墙墙面板与土工格栅之间的摩擦性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊).
- [12] 刘卫华. 组合模块式加筋土挡墙墙面板与筋带的摩擦性质研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.

## A Study on Friction Character Between Geogrids and Concrete Block Reinforced Retaining Wall Based on Orthogonal Experiments

LIU Wei-hua<sup>1</sup>, LEI Sheng-you<sup>2</sup>, HUANG Run-qiu<sup>1</sup>, MU Lan<sup>3</sup>, CHEN Hui<sup>4</sup>

(1. National Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironmental Protection,  
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. Department of Civil, Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, China;

4. Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Using the orthogonal experiments, full-scale friction experiments of concrete block reinforced retaining wall between the block and geogrid are modeled on the special testing machine. The effects of three factors such as vertical pressure ( $A$ ), types of geogrids ( $B$ ) and the kind of masonry ( $C$ ) with different compositions on coefficient of friction between the block and geogrids in the peak strength and  $S=19$  mm are studied. By orthogonal experiments, the orders of three factors to influence coefficient of friction, the significance levels of different factors and the optimal scheme of connecting type between the block and geogrids are determined.

**Key words:** concrete block reinforced retaining wall; geogrids; coefficient of friction; orthogonal experiments