

# 扶壁式加筋复合挡墙变形规律和受力机理

周 健<sup>1,2</sup>, 李翠娜<sup>1</sup>, 黄 金<sup>3</sup>, 张 娇<sup>4</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 中国民航机场建设集团公司西南分公司, 成都 610202; 4. 上海城市管理职业技术学院 土木工程与交通学院, 上海 200432)

**摘要:** 采用离心机模型试验和 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟相结合的方法, 研究上海某高填土工程中扶壁式挡墙与包裹式土工格栅组合的复合挡墙变形规律和受力机理. 离心机模型试验结果表明, 复合挡墙的水平位移较小, 能较好地控制高填土水平位移. 在离心机模型试验的基础上, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 计算了复合挡墙的水平土压力, 并与同尺寸和参数条件下的纯加筋挡墙、纯扶壁式挡墙的水平位移和水平土压力进行对比分析, 结果表明, 复合挡墙中扶壁式挡墙能有效地控制水平位移, 包裹式土工格栅分担大部分水平土压力. 该研究为高填土复合挡墙工程设计提供了理论依据.

**关键词:** 扶壁式挡墙; 包裹式土工格栅; 复合挡墙; 离心机模型试验; FLAC<sup>3D</sup>

中图分类号: TU476.4

文献标志码: A

centrifuge model test, FLAC<sup>3D</sup> was used to simulate the horizontal earth pressure of combined retaining wall, and compare horizontal displacement and horizontal earth pressure with wrapped-reinforced retaining wall and counterfort retaining wall with the same condition, simulation results show that counterfort retaining wall can control horizontal displacement efficiently and wrapped-reinforced retaining wall shares most of horizontal earth pressure. Based on the results of test and simulation, some suggestions and references are provided for the design of combined retaining wall of high filled project.

**Key words:** counterfort retaining wall; wrapped-reinforced retaining wall; combined retaining wall; centrifuge model test; FLAC<sup>3D</sup>

## The Deformation Law and Stress Mechanism of Wrapped-reinforced and Counterfort Combined Retaining Wall

ZHOU Jian<sup>1,2</sup>, LI Cuina<sup>1</sup>, Huang Jin<sup>3</sup>, Zhang Jiao<sup>4</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Civil Aviation Airport Construction Corporation of Southwest Branch, Chengdu 610202, China; 4. School of Civil Engineering and Transportation, Shanghai Technical College of Urban Management, Shanghai 200432, China)

**Abstract:** Apply centrifuge model test and FLAC<sup>3D</sup> simulation to understand high filled project of Shanghai about the deformation law and stress mechanism of combined retaining wall that wrapped-reinforced retaining wall combined with counterfort retaining wall. Centrifuge model test's results show that the horizontal displacement of combined retaining wall is smaller, and that combined retaining wall can better control the horizontal displacement of high filling. Based on

目前, 国内外学者对加筋挡墙主要研究带有面板的筋带加筋挡墙, 而对包裹式加筋挡墙、扶壁式挡墙特别是两种形式相结合的复合结构较少涉及. 自 20 世纪 60 年代初法国工程师 Vidal<sup>[1]</sup> 提出加筋土概念以来, 国内外学者对加筋土的加筋机理进行了大量研究. Viswanadham<sup>[2-3]</sup> 在离心模型试验过程中监测加筋边坡侧向位移、坡顶沉降和筋材自身应变分布三大指标, 对加筋边坡破坏时的筋材性能进行研究. 顾培等<sup>[4]</sup> 针对建造在软土和刚性地基上的加筋土挡墙工作机理进行离心模型对比试验研究. Sonnenberg<sup>[5]</sup> 为研究树根加筋对加筋边坡稳定性影响进行一系列加筋边坡离心机试验. 王旭等<sup>[6]</sup> 采用有限元强度折减方法对超高加筋土挡墙进行了计算分析, 使得超高加筋土挡墙的设计更为优化. 肖成志等<sup>[7]</sup> 综合对比分析土工格栅加筋土柔性桥台基础距下部挡墙面板的距离  $D$  对柔性桥台结构极限承载力、下部挡墙变形特点、筋材应变和土压力的影响.

收稿日期: 2014-03-31

第一作者: 周 健(1957—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为软土地基处理技术、土体细观力学模拟.

E-mail: tjugezhoujian@tongji.edu.cn

通讯作者: 李翠娜(1990—), 女, 硕士生, 主要研究方向为泥石流形成宏观机理. E-mail: licuina19900203@163.com

王元战等<sup>[8-9]</sup>对扶壁式挡墙利用静力平衡条件对滑动土楔体内的水平土体微元进行分析,计算出了墙背水平土压力. Sommers<sup>[10]</sup>在离心模型试验中研究土工布包裹式加筋砂土边坡承受坡顶竖向加载破坏性状. 朱文婷等<sup>[11]</sup>将加筋土与悬臂式挡墙相结合的结构运用于梯形断面向矩形断面的渐变段结构设计中,大大降低了墙踵与墙底的基底应力比.

本文针对上海某高填土工程中采用的扶壁式加筋复合挡墙,采用离心机模型试验和 FLAC<sup>3D</sup>数值模拟相结合的方法研究复合挡墙变形规律和受力机理. 离心机试验中,在 40g ( $g$  为重力加速度)离心场下对扶壁式加筋复合挡墙的水平 and 竖向变形规律进行研究分析. 在离心机试验结果的基础上,采用 FLAC<sup>3D</sup>对离心模型试验结果进行模拟,并将复合挡墙与同尺寸和参数条件下的纯加筋挡墙、纯扶壁式挡墙的水平位移和水平土压力进行对比研究,进一步探究了复合挡墙变形规律和受力机理. 基于以上离心机模型试验及其数值模拟结果,为复合挡墙工程提供建议和参考.

## 1 离心机模型试验

### 1.1 离心试验材料

#### 1.1.1 试验土样

离心模型试验土样采用上海典型的②层粉质粘土,地基土和填土的基本物理力学性质指标见表 1—2.

表 1 地基土的物理力学性质指标  
Tab.1 The physical and mechanical indexes of foundation soil

密度 $\rho/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	含水量 $\omega/$ %	塑限 $w_p/$ %	液限 $w_L/$ %	塑性指 数 $I_p$	粘聚力 $c/$ kPa	摩擦角 $\varphi/$ ( $^\circ$ )
1.84	32.5	17	29	12	22	18.5

表 2 填土的物理力学性质指标

Tab.2 The physical and mechanical indexes of land fills

土粒密度 $\rho_s/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	压实度 $\lambda$	最大干密度 $\rho_{dmax}/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	最优含 水量 $w_{opt}/$ %	粘聚力 $c/$ kPa	摩擦角 $\varphi/$ ( $^\circ$ )
2.73	0.9	1.7	19.6	24	20

#### 1.1.2 土工格栅和扶壁式挡墙材料

##### (1) 土工格栅替代材料

离心机模型试验中,可通过控制方程或量纲分析法对加筋材料进行推导<sup>[12-13]</sup>,其相似条件为

$$\frac{E_m t_m}{E_p t_p} = \frac{1}{n} \quad (1)$$

式中:  $E_m, E_p$  分别为模型和原型筋材的弹性模量;

$t_m, t_p$  分别为模型和原型筋材厚度;  $n$  为模型相似比.

综合考虑模型相似比、材料稳定性、制样操作空间等因素,最终选定聚丙烯腈滤网替代土工格栅,其初始拉伸模量为  $E_m = 58 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ .

##### (2) 扶壁式挡墙替代材料

考虑扶壁式挡墙的刚性特征,通常用钢板作为其替代材料. 因为扶壁式挡墙为抗弯构件,要保证模型与原型的应力水平一致,应使两者的抗弯刚度相等<sup>[11]</sup>,即:

$$\delta_m = \frac{t_p}{n} \sqrt[3]{\frac{E_p}{E_m}} \quad (2)$$

对扶壁式挡墙的墙面板和踵板,把  $E_p = 26 \text{ GPa}, E_m = 200 \text{ GPa}, t_p = 450 \text{ mm}, n = 40$  代入公式得:  $t_m = 5.7 \text{ mm}$ ,同理可得扶肋的模型厚度为  $2.6 \text{ mm}$ .

## 1.2 离心机模型试验介绍

### 1.2.1 离心机模型试验装置

使用同济大学 TLJ-150 复合型岩土离心试验机,其试验最大容量为  $150 \text{ g} \cdot \text{t}$ . 模型箱尺寸为  $90 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高),模型与原型几何相似比例为  $n = 40$ .

本文在 40g 离心场下对扶壁式加筋复合挡墙进行研究,离心机模型缩尺示意图如图 1 中所示. 图中, LVDT 为位移传感器, LVDT\_V1~LVDT\_V3 表示监测竖向位移的 3 个传感器, LVDT\_H1~LVDT\_H3 表示监测水平位移的 3 个传感器. 模拟实际工程中的尺寸为:地基土长 36 m、厚 12 m、宽 28 m;填土长 13 m、高 8 m;扶壁式挡墙的立壁高 8 m、踵板长 4 m,包裹式筋材长 9 m、反包 2 m、竖向间距 1 m;扶壁式挡墙和包裹式筋材之间的距离为 1 m.

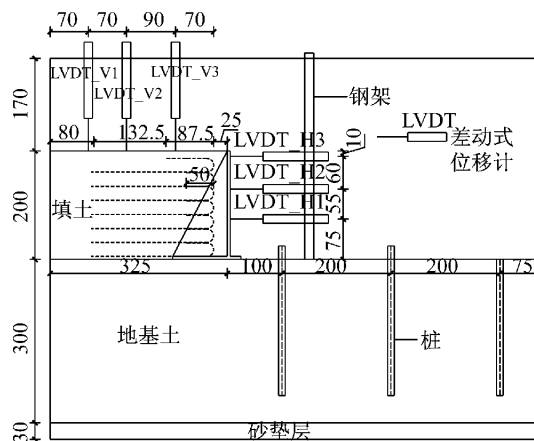


图 1 离心机模型和位移计布置缩尺示意图(单位: mm)  
Fig.1 Centrifuge model and displacement meter position scaling diagrammatic sketch (unit: mm)

离心机模型试验的位移计布置示意图如图 1 所示,分别在水平和竖向各布置三个位移计监测复合挡墙的水平 and 竖向位移。

### 1.2.2 离心机模型制作

试验土样从现场取土,然后晒干、粉碎、加水,其中地基土和填土部分的土样制备不同。

#### (1) 地基土制作

在模型箱底铺设 3 cm 饱和砂垫层,再分层均匀铺填淤泥质粉质粘土 40 cm,每 5 cm 一层。地基土固结时,缓慢将离心加速度增至 40g,当监测孔压消散 90%时,认为地基土固结已完成。

#### (2) 填土制作

根据击实试验确定填土的最优含水率和最大干密度,试验后取样得到压实度为 0.9 的填土。在地基土上设置扶壁式挡墙后,依次铺设筋材和填土,每层填土厚 2.5 cm。填土和筋材布置完成后,在筋材和挡墙之间的空隙回填砂土。

## 1.3 离心机模型试验结果

### 1.3.1 复合挡墙水平位移分析

复合挡墙三个水平位移计的监测结果随着时间的变化如图 2 中所示。图中曲线均表现为试验初期,水平位移随时间呈线性快速增加,之后逐渐趋于稳定。复合挡墙 H1,H2,H3 处水平位移试验的稳定值分别为 2.79,3.40,4.04 cm。

复合挡墙 H1,H2,H3 处,墙面水平位移稳定值随墙高呈现线性增大的趋势(图 3),表明复合挡墙中扶壁式挡墙刚性的特点。可近似得到墙面水平位移稳定值与墙高的关系式为: $y=3.680x-7.284$ ,据此关系式预测墙底水平位移 1.98 cm,墙顶水平位移 4.15 cm,墙体有绕墙趾转动的趋势。墙面水平位移较小,表明扶壁式加筋复合挡墙整体稳定性较好。

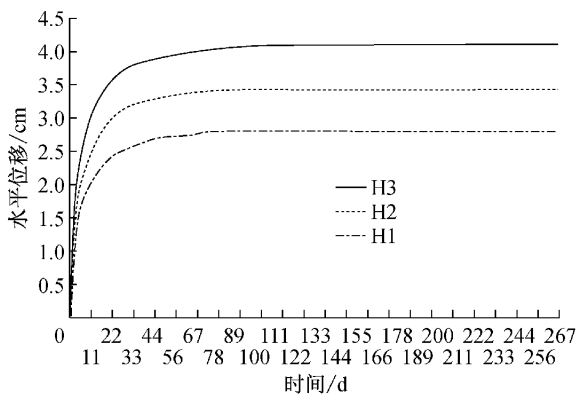


图 2 墙面测点的水平位移变化曲线  
Fig.2 Horizontal displacement curve of wall measured-point

### 1.3.2 坡顶竖向位移的分析

复合挡墙三个竖向位移计的监测结果随着时间的变化如图 4 中所示。图中各曲线在试验初期,竖向位移随时间增加较快,之后逐渐趋于稳定,复合挡墙 V1,V2,V3 处试验稳定值分别为 11.27,12.06,12.94 cm。

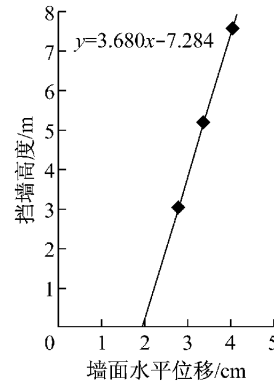


图 3 墙面水平位移随高度变化图  
Fig.3 Horizontal displacement of wall along with wall height

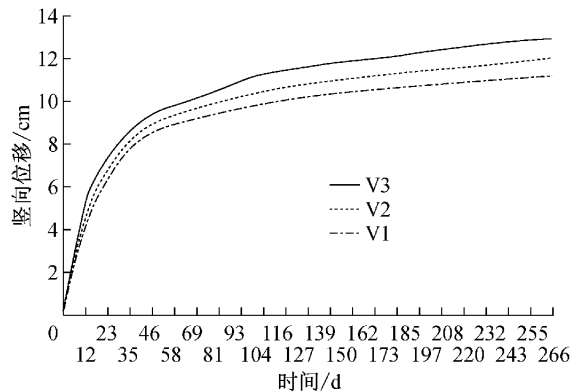


图 4 坡顶测点的竖向位移图  
Fig.4 Vertical displacement curves of top of the slope measured-point

复合挡墙 V1,V2,V3 处(图 5),填土表面测点的竖向位移随着距挡墙距离的增加有减小的趋势。可近似得到测点到挡墙距离与竖向位移之间的关系

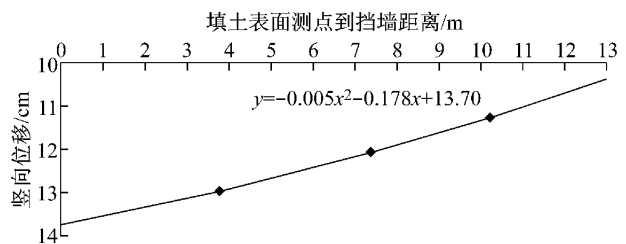


图 5 坡顶竖向位移随与挡墙距离变化图  
Fig.5 The relationship of vertical distance on slope with the distance towards wall

式为： $y = -0.005x^2 - 0.178x + 13.7$ ，据此关系式预测得到最小和最大竖向位移为 10.54 和 13.7 cm，位移值较大。

三个测点位移值均较大，且比较接近，表明复合挡墙有整体固结沉降的趋势；竖向位移值比水平位移大得多，表明填土以竖向固结沉降为主；靠近挡墙一侧位移值偏大，远离挡墙位移值偏小，这是由于：靠近挡墙的填土向挡墙方向移动，填补挡墙水平位移产生的空隙；在土压力作用下，填土有向挡墙移动的趋势。

## 2 FLAC<sup>3D</sup>数值验证及分析

### 2.1 模型建立及数值验证

#### 2.1.1 模型建立

基于摩尔-库伦模型，采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立了扶壁式加筋复合挡墙的数值模型。为了简化分析，在数值模拟中不考虑水的渗流作用。模型尺寸为重力场下离心模型试验的原型尺寸，如图 6 所示。

#### 2.1.2 土体参数的确定

基于复合挡墙的离心机试验结果，通过参数反演，确定数值模型中土体的土性参数(表 3)。土工格栅与土体相互作用通过两者共用节点和设置土工格栅参数实现。本文通过拉拔试验和直剪试验，最终确定土工格栅的参数取值见表 4。将扶壁式挡墙视为壳单元，壳单元参数是根据扶壁式挡墙的实际材料属性和截面尺寸确定的(表 4)。

表 3 土体的物理力学参数

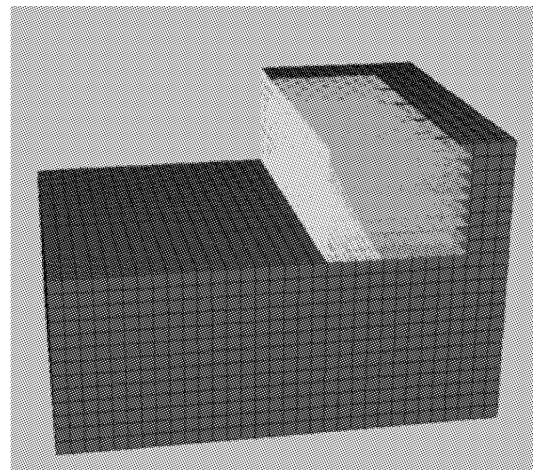
土层	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	泊松比 $\nu$	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(\circ)$
填土	4	1.33	0.35	24	20
地基土	5.4	1.8	0.35	22	18.5

表 4 土工格栅单元和壳单元计算参数

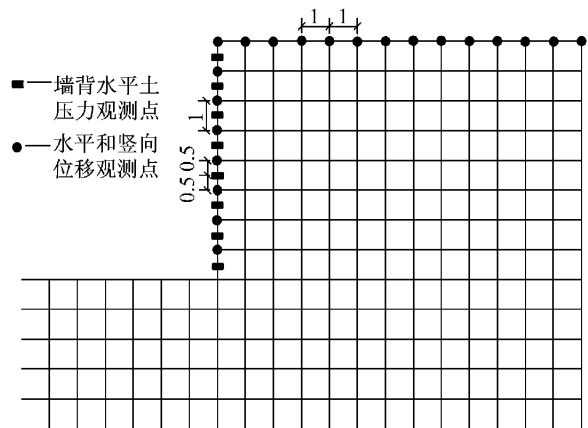
类别	弹性模量 E/MPa	泊松比 $\nu$	耦合弹簧切向刚度 $k/(\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$	耦合弹簧粘聚力 c/kPa	耦合弹簧摩擦角 $\varphi/(\circ)$
土工格栅	670	0.33	5 000	8	15
扶壁式挡墙	30 000	0.2			

#### 2.1.3 数值计算结果验证

在挡墙中间位置，从墙底 1 m 到墙顶 8 m 处每间隔 1 m 选取一个观测点，共 8 个观测点(图 6b 中所示)。将数值模拟得到的测点水平位移与离心模型试验得到的墙面水平位移进行比较，如图 7 所示。从



a 三维模型示意图



b 观测点位置示意图

图 6 三维数值模型示意图(单位:mm)

Fig.6 three-dimensional numerical model diagrammatic sketch (unit:mm)

图 7 中可以看出，数值模拟和离心试验的墙面水平位移均随挡墙高度表现出线性增大的特点，数值模拟比离心试验结果小 10.4% 左右，误差相对较小。

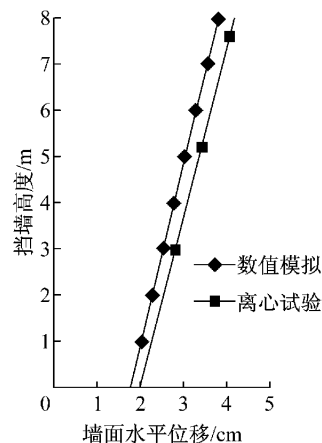


图 7 墙面水平位移变化曲线

Fig.7 Horizontal displacement curve of wall

取填土表面中间位置与挡墙距离从 0 m 到 13 m 处,每间隔 1 m 取一个测点,共 14 个测点(图 6b 中所示).将数值模拟与离心模型试验的竖向位移进行比较,如图 8 所示.从图中可以看出,数值模拟和离心试验得到的填土表面竖向位移在数值上比较接近,最大相差 9%,误差相对较小.

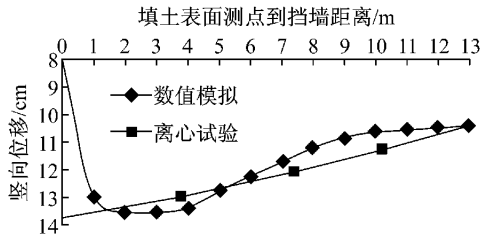


图 8 坡顶竖向位移曲线

Fig.8 Vertical displacement curve of the top of slope

图 7 和图 8 表明,复合挡墙水平和竖向位移数值模拟结果与离心试验结果基本一致,水平和竖向位移变化规律大致相同.数值模拟较好地反映了离心试验结果.

### 2.2 墙背水平土压力结果分析

为了研究复合挡墙受力机理,在复合挡墙水平和竖向位移数值模拟的基础上,采用 FLAC<sup>3D</sup>对复合挡墙的墙背水平土压力进行模拟.在挡墙中间位置,从墙底 0.5 m 到墙顶 7.5 m 每隔 1 m 取一个测点共计 8 个测点(图 6b 中所示),得到复合挡墙中扶壁式挡墙墙背水平土压力随挡墙高度变化的曲线如图 9 所示.

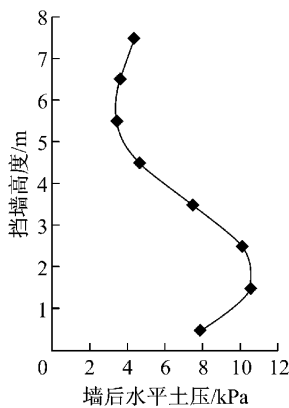


图 9 墙背水平土压力分布曲线

Fig.8 Horizontal earth pressure distribution curve of the back of the wall

图 9 中,从坡顶往下分析,墙后水平土压力先小幅减小,然后逐渐增大直到距离坡顶大约 3/4 高度处达到最大值,最后再小幅减小.7~8 m 的填土没有反包土工格栅,而 7~6 m 的填土有反包土工格栅

使得水平土压力略有减小,这充分说明土工格栅分担土压力的作用;1~2 m 土压力小幅减小,这是由于扶壁式挡墙约束了土工格栅的变形,土工格栅竖向土压力较大,各层土工格栅之间的摩擦力增大,土工格栅分担的水平土压力较大,传递到挡墙的水平土压力较小.

墙背水平土压力分布曲线表明:复合挡墙中,扶壁式挡墙限制了土工格栅的变形,土工格栅分担扶壁式挡墙的水平土压力.数值模拟得到的墙后水平土压力在距离挡墙底部大约 1/4 高度处达到最大值 10.0kPa 左右,水平土压力较小,对于高填土,复合挡墙比较安全,安全储备较高.

### 2.3 变形机理对比研究分析

为了进一步研究复合挡墙受力机理,将复合挡墙与同尺寸和参数条件下纯加筋挡墙、纯扶壁式挡墙(图 10)的墙背水平土压力的数值模拟结果进行对比分析.选取挡墙中间位置,从墙底 0.5 m 到墙顶 7.5 m 每隔 1 m 选取一个测点,共 8 个测点(图 6b),研究其水平位移.复合挡墙、纯加筋和纯扶壁式挡墙三者数值模拟的结果进行分析比较,得到墙面水平位移随高度变化的曲线如图 11 所示.

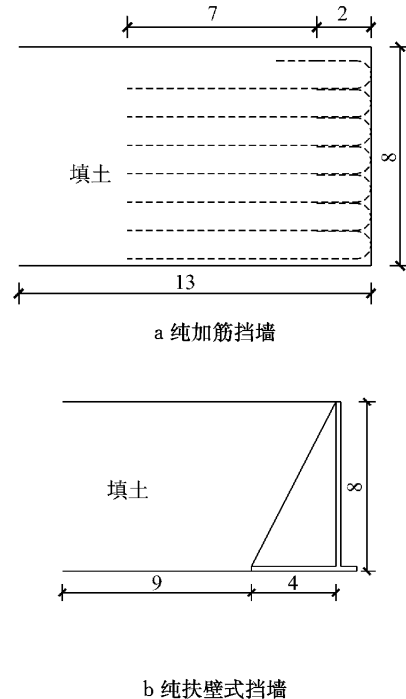


图 10 纯加筋挡墙和纯扶壁式挡墙的结构设计断面图(单位:m)

Fig.10 Structural design section figures of wrapped-reinforced retaining wall and counterfort retaining wall(unit: m)

从图 11 中可以看出:复合挡墙和纯扶壁式挡墙

的墙面水平变形比纯加筋挡墙相比小得多,前者水平变形量不超过 6 cm,而后者水平变形量最大能达到 16 cm.

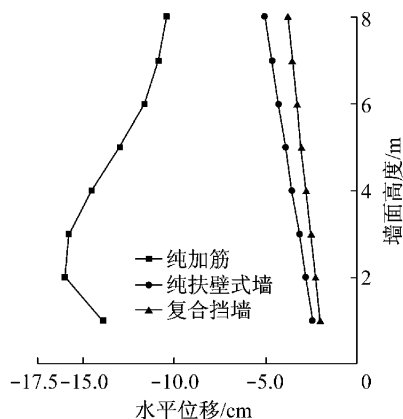


图 11 墙面水平变形比较图

Fig. 11 Comparison curves of horizontal displacement of the face of the wall

对于复合挡墙墙面水平变形的特点,可以看出复合挡墙中的扶壁式挡墙属于刚性较大的结构,能够有效控制墙面的水平位移.复合挡墙可用在对墙面水平位移要求较高的工程中.

#### 2.4 受力机理对比研究分析

为了进一步研究复合挡墙受力机理,将复合挡墙与同尺寸和参数条件下纯加筋挡墙、纯扶壁式挡墙(图 10)的墙背水平土压力的数值模拟结果进行对比分析.选取挡墙中间位置,从墙底 0.5 m 到墙顶 7.5 m 每隔 1 m 选取一个测点,共 8 个测点(图 6b).

复合挡墙、纯加筋和纯扶壁式挡墙三者墙背水平土压力数值模拟结果随高度变化的曲线如图 11 所示.

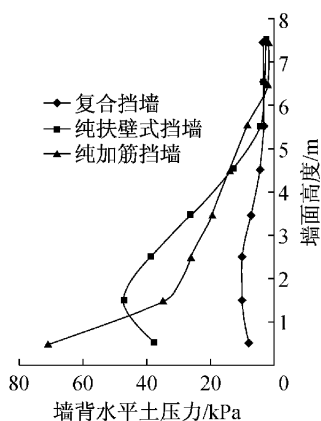


图 12 墙背水平土压力比较

Fig. 12 Comparison curves of horizontal soil pressure of the back of the wall

从图 12 中可以看出,复合挡墙比纯加筋挡墙和

纯扶壁式挡墙的墙背水平土压力小得多,前者墙背水平土压力最大约为 10.5 kPa,而后两者墙背水平土压力最大达到 71.4 kPa 和 47.8 kPa.

在挡墙底部 0.5 m 处,复合挡墙水平土压力约为纯加筋挡墙的 14.7%.这是由于复合挡墙中,扶壁式挡墙为刚性,阻止了土工格栅的变形,在土压力作用下,各层土工格栅挤压密实,摩擦力增大,传递到扶壁式挡墙的水平土压力较小.

复合挡墙的水平土压力在墙高 5.5 m 处以下明显小于纯扶壁式挡墙,在墙高 1.5 m 处,复合挡墙水平土压力约为纯扶壁式挡墙的 22.0%,这是由于复合挡墙中的筋材已经承担大部分水平土压力,剩下小部分传递到扶壁式挡墙,由此充分体现复合挡墙在减小墙背水平土压力方面的优势.

#### 2.5 复合挡墙土压分担的分析及工程建议

分析得到包裹式土工格栅和扶壁式挡墙共同承担填土产生的水平土压力的原理:两者之间预留一定的空隙,铺设包裹式土工格栅并进行填土堆筑到一定高度,此时土工格栅已发生较充分的变形,大部分水平土压被土工格栅承担;再回填空隙,由于施工结束后包裹式加筋土会继续变形,部分水平土压逐渐由扶壁式挡墙承担,最终形成包裹式土工格栅与扶壁式挡墙共同受力的模式.据此,对实际工程可提供一定建议:

(1)扶壁式挡墙主要起控制墙面水平位移作用,对水平土压力分担的比例较小,因此建议取消扶肋而使用普通 L 型挡墙,挡墙的厚度也可适当变薄,这样可以节省材料、使得包裹式土工格栅的铺设也更加方便;

(2)复合挡墙预留的空隙主要起传递水平土压力的作用,本身密实度和强度要求不高,因此可选择在空隙中回填中粗砂等粗颗粒填料,还可以起到排水作用.

### 3 结论

本文采用离心机模型试验和 FLAC<sup>3D</sup>数值模拟相结合的方法研究扶壁式加筋复合挡墙的变形规律和受力机理,得到结果如下:

(1)复合挡墙水平位移较小,变形以竖向固结沉降为主.复合挡墙变形规律具有扶壁式挡墙刚性和包裹式土工格栅柔性的双重特征.

(2)复合挡墙中扶壁式挡墙承担小部分水平土压力;与同尺寸和参数条件下的纯加筋、纯扶壁式挡

墙相比,复合挡墙水平土压力大大降低。

(3)高填土复合挡墙工程中,可取消扶壁式挡墙扶肋而使用普通L型挡墙,挡墙的厚度也可适当变薄,预留空隙中可回填中粗砂等粗颗粒材料。

#### 参考文献:

- [1] Vidal H. The principle of reinforced earth. Highway research record 282[R]. Washington D C.: Highway Research Board, National Research Council, 1969.
- [2] Viswanadham B V S. Modeling of geotextile reinforced highway slopes in a geotechnical centrifuge[C]//Conference on Geotechnical Engineering for Transportation (Geo-Trans 2004). Los Angeles: Geotechnical Special Publication, 2004: 637-646.
- [3] Viswanadham B V S, Mahajan R. Centrifuge model tests on geotextile-reinforced slopes [J]. Geosynthetics International, 2007, 14(6): 365.
- [4] 顾培,高长胜,杨守华,等. 加筋土挡墙离心模型试验研究[J]. 水利水电工程学报, 2010, 2(3): 67.  
GU Pei, GAO Changsheng, YANG Shouhua, *et al.* Centrifugemodel tests of reinforced earth retaining wall [J]. Hydro-science and Engineering, 2010, 2(3): 67.
- [5] Sonnenberg R, Bransby M F, Bengough A G. Centrifuge modelling of soil slopes containing model plant roots [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(1): 1.
- [6] 王旭,刘一通,刘伟. 超高加筋土挡墙有限元方法计算分析[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(2): 185.  
WANG Xu, LIU Yitong, LIU Wei. Study of geogrid-reinforced retaining design method of by FEM [J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(2): 185.
- [7] 肖成志,刘贺,王荣霞,等. 土工格栅加筋土柔性桥台结构性能的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 767.  
XIAO Chengzhi, LIU He, WANG Rongxia, *et al.* Experimental study on performance of GRS bridge abutment with flexible face [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 767.
- [8] 王元战,李蔚,黄长虹. 墙体绕基础转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 208.  
WANG Yuanzhan, LI Wei, HUANG Changhong. Distribution of active earth pressure with wall movement of rotation about base [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 208.
- [9] 王元战,李新国,陈楠楠. 挡土墙主动土压力分布与侧压力系数[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1019.  
WANG Yuanzhan, LI Xinguo, CHEN Nannan. Active earth pressure on a retaining wall and lateral coefficient of earth pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1019.
- [10] Sommers A N, Viswanadham B V S. Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(6): 497.
- [11] 朱文婷,张波. 加筋土与悬臂式挡墙组合的渠道渐变段结构设计[J]. 人民长江, 2012, 43(17): 15.  
ZHU Weiting, ZHANG Bo. Combination of reinforced earth and cantilever retaining wall in transition section of canal [J]. Yangtze River, 2012, 43(17): 15.
- [12] 向科,罗凤. 土工离心模型实验中的加筋材料[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 789.  
XIANG Ke, LUO Feng. Reinforcing material in centrifugal model test [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 789.
- [13] 匡希龙,李振. 土工离心模型试验中结构物替代技术探讨[J]. 公路交通技术, 2008(1): 5.  
KUANG Xilong, LI Zhen. Dission on structure substituting technique in geotechnical engineering eccentric model test [J]. Technology of Highway and Transport, 2008(1): 5.