

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.007



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 网格面板式加筋土挡墙的力学行为模型试验研究

杨凡艺<sup>1a</sup>, 肖世国<sup>1b</sup>, 王学文<sup>2</sup>, 王旭龙<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031;

2. 泰安现代塑料有限公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 网格面板式加筋挡土墙是一种新型加筋土结构, 其面板采用多层钢筋网格结构。为研究其力学行为, 依托实际填高6 m的路堤工程, 采用缩尺比为1:3、重度相似比为1:1的室内物理模型试验, 得到了填土顶面条形荷载作用下面板侧向位移、侧向土压力、网格钢筋应力与土工格栅拉筋拉力; 采用FLAC3D建立相应的数值模型, 通过强度折减法分析路堤内部的潜在破坏模式, 并对比不同类型面板结构的力学性能与经济环保性。结果表明: 随着荷载逐级增大, 面板主要经历线弹性、弹塑性、塑性变形等3个阶段, 最大侧移约为墙高的0.14%; 各层拉筋拉力呈单峰抛物线模式分布; 面板侧向土压力沿深度呈非线性分布, 顶点位于深约0.4倍墙高处; 各级单元的立臂杆、斜拉杆的应力均随深度非线性增大, 底杆应力则呈抛物线分布, 同一单元的立臂杆应力>斜拉杆应力>底杆应力; 路堤潜在滑体范围包含顶面条形荷载宽度, 滑面是非圆弧形曲面。网格面板结构在填土变形控制方面弱于整体面板结构, 但在材料造价与低碳环保性方面优于传统的混凝土面板结构。

**关键词:** 加筋土挡墙; 网格面板; 力学行为; 土压力; 模型试验

**中图分类号:** TU476.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-13

## Model test analysis on mechanical behavior of geogrid-reinforced soil retaining walls with rebar-grid facings

YANG Fany<sup>1a</sup>, XIAO Shiguo<sup>1b</sup>, WANG Xuewen<sup>2</sup>, WANG Xulong<sup>2</sup>

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R. China; 2. Taian Modern Plastics Co., Ltd., Taian 271000, P. R. China)

**Abstract:** The geogrid-reinforced soil retaining wall with rebar-grid facings is a new type of reinforced soil structures, whose panel is composed of multi-layer rebar grids. To study its mechanical behavior, laboratory model tests with geometric similarity ratio 1:3 and unit weight similarity ratio 1:1 are conducted based on a practical embankment example with a height of 6m. Under a series of strip surcharges on the modeled embankment top, some mechanical responses are observed such as lateral displacement and earth pressure on the panel, stress on rebar grids, and tensile force on geogrid reinforcements. On this basis, a numerical model is established based on FLAC3D. The potential failure mode in the reinforced embankment is accordingly

收稿日期: 2025-11-13

基金项目: 四川省交通运输科技项目(2024-A-04)

作者简介: 杨凡艺(2001-), 男, 主要从事路基与边坡工程研究, E-mail: 1306717050@qq.com。

肖世国(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xiaoshiguo@swjtu.cn。

Received: 2025-11-13

**Foundation item:** Sichuan Transportation Science and Technology Program (No. 2024-A-04)

**Author brief:** YANG Fany (2001-), main research interests: roadbed and slope engineering, E-mail: 1306717050@qq.com.

XIAO Shiguo (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xiaoshiguo@swjtu.cn.

analyzed through the strength reduction method. The comparison of mechanical performance as well as economic and environmental friendliness among various panel structures is comprehensively conducted. The results show that as the strip surcharge is increasing, panel displacement experiences three stages including linear elastic, elastoplastic, and plastic deformations, with the maximum displacement of the panel about 0.14% times of the wall height. Distribution of tensile force on each geogrid exhibits a unimodal parabola pattern. Lateral earth pressure on the panel is of a nonlinear profile with the apex at a depth of 0.4 times of the wall height under the surface. The stress on vertical and oblique bars in each member of the facings increase nonlinearly with depth, while the tensile stress on the bottom bar presents a unimodal parabola distribution. The relationship among the three stress values is the vertical  $>$  the oblique  $>$  the bottom. The potential slide area in the embankment covers the strip surcharge width, and the slip surface is non-circular. The new panel structure is weaker than the traditional integral panel in controlling the filling deformation, however it is better than the ordinary concrete panels in material cost together with low-carbon and environmental friendliness.

**Keywords:** geogrid-reinforced retaining wall; rebar-grid facings; mechanical behavior; earth pressure; model test

加筋土挡墙具有自重轻、抗震性好、适应变形能力强等优点,在公路、铁路等工程中得到广泛应用。然而,随着工程需求向高荷载、大高度及复杂环境方向发展,传统加筋土挡墙的面板结构存在着性能、施工与环保等多方面问题,对其进行结构改进已成为相关研究重点之一。

对于以往应用广泛的混凝土模块式面板结构<sup>[1-3]</sup>,整体性较差,易因局部应力集中导致面板开裂或鼓胀,尤其在动载作用下沉降敏感性的适应性有限,变形控制难度大<sup>[4-6]</sup>,易产生累积变形,以及出现面板变形不平整的问题<sup>[7]</sup>。

整体式刚性面板虽能充分保障工后墙面的平整性<sup>[8]</sup>,但存在施工灵活性差、对排水要求高<sup>[9]</sup>以及材料消耗大、低碳环保性不佳等问题。格宾式等柔性面板结构通过其自身变形来适应土体位移,但在振动台试验中表现出墙面外观平整性较差的缺点<sup>[10-11]</sup>。离心模型试验<sup>[12-14]</sup>、数值模拟分析<sup>[15-18]</sup>均表明,不同刚度的面板结构在力学性能、施工工艺与适用条件上存在差异;而现场原位试验<sup>[19]</sup>也揭示了多种面板的性能不足。实际上,传统面板结构普遍对水泥砂浆、混凝土或碎石等圬工类材料消耗量较大,低碳环保性欠佳,且施工过程繁琐,对施工过程质量控制要求较高。

由加筋土挡墙面板结构所存在的问题可见,研究兼顾良好结构性能、高效便捷施工与低碳环保理念的新型面板结构具有重要的实际意义,是加筋土挡墙技术发展的一个重要方向。对加筋土挡墙面板的力学行为与结构改进的研究,大多针对传统刚性或半刚性面板结构,而对于既具有良好力学性能又具有显著低碳环保性能面板结构的研究尚较为少见。笔者提出一种新型网格面板式加筋土挡墙

结构,并通过静力模型试验研究其在填土顶面荷载作用下的力学行为特征。

## 1 网格面板构造

针对传统加筋土挡墙面板结构的施工效率低、低碳环保性差等问题,提出一种新型钢筋网格面板式加筋土挡墙结构,如图1所示。该结构的面板主要由横截面近似直角三角形的多层钢筋网格框架组成,土工格栅拉筋通过插入扁条棒与钢筋网格底部凸起处固定连接,其余部分采用与填土相同的填料自下而上逐层铺设。

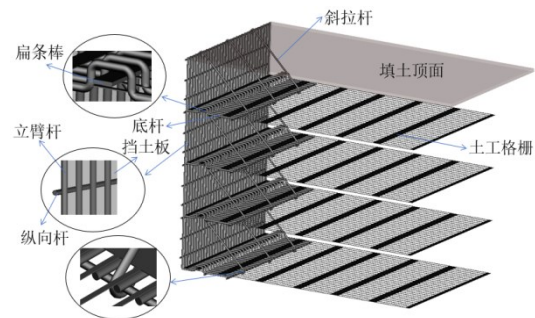


图1 网格面板式加筋土挡墙示意图

Fig. 1 Sketch map of a geogrid-reinforced soil retaining wall with rebar-grid facings

钢筋网格框架由若干预制钢筋笼式单元构成,每个单元包括由单根钢筋弯折形成的立臂杆和底杆、沿纵向焊接的纵向杆以及榫接于端部纵向杆的横向斜拉杆。立臂杆内侧设置局部挡土板,防止填土从网格空隙中流出。根据具体工程需求,挡土板可选用经济型薄塑料板(临时工程)或耐久性更好的塑胶板、木塑复合板、植生袋等(永久工程)。

网格面板结构在构造上显著区别于传统整体式刚性面板,采用预制拼装理念,由钢筋网格单元

现场组装构成墙面主体。这种构造实现了钢筋网架与局部挡土构件的完全分离和标准化预制,使施工过程简化为“吊装-就位-连接”的机械化流程,大幅降低对工人技术水平的依赖,可显著提高施工效率与过程质量可控性。

对网格面板式加筋土挡墙结构研究鲜见报道,为此,通过物理模型试验与数值模拟方法,揭示其在填土顶面条形荷载下受力与变形规律,获得钢筋钢筋和土工格栅拉筋的内力特征,全面确定此加筋土挡墙结构的力学行为。

2 实际工程概况

川南城际铁路工程相关的某改移机耕道路工程,路基填高 6 m,路面宽度 6 m,因用地限制,一侧以 1:1.5 的坡率放坡,另一侧采用路肩墙支挡,如图 2 所示。该路肩墙拟采用网格面板式加筋土挡墙方案。地基主要为砂卵石土体,基本承载力为 250 kPa。墙体总高度  $H=6\text{m}$ ,路基填土顶面的设计条形荷载  $q=50\text{ kPa}$ ,作用宽度为 2.4 m。墙体由上而下采用 4 级(层)钢筋网格面板单元,每个单元纵向长度 450 cm,折弯呈 90°的立臂杆和底杆长度均为 150 cm,间距为 15 cm;立臂杆和底杆上均等间距设有与其焊接的 3 根纵向杆,每个单元中含有 3 根间距为 150 cm 的斜拉杆,与端部的纵向杆勾连榫接。各单元的立臂杆内侧设置厚度 12 mm 的塑料板。钢筋均采用 HRB400 型,直径均为 8 mm,弹性模量为 200 GPa。与各层网格单元在底杆处相连接的水平拉筋采用 HPDE(高密度聚乙烯)单向土工格栅,长度为 6 m,抗拉强度为 120 kN/m。路基填料以砂类土与碎石类土为主,其重度、内摩擦角、黏聚力及含水率分别为 19 kN/m<sup>3</sup>、30°、5 kPa、6%,填土压实度控制值为 90%。

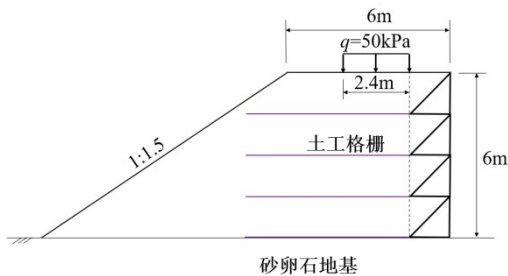


图2 实例路堤横断面示意图

Fig. 2 Sketch map of cross section of a practical embankment

3 试验设计与操作

3.1 相似比

基于实际工程情况,兼顾试验可用的室内场地

条件与设备设施等,确定模型试验的几何相似比为  $C_l=1:3$ ,重度相似比取为  $C_\gamma=1:1$ ,采用 FLT(力-长度-时间)基本量纲系统,根据相似理论,可推导出其他主要物理量的相似比见表 1。

表 1 模型对原型的相似比

| Table 1 Similarity ratio of model to prototype |                |     |
|------------------------------------------------|----------------|-----|
| 物理量                                            | 量纲             | 相似比 |
| 重度                                             | $[FL^{-3}T^0]$ | 1:1 |
| 黏聚力                                            | $[FL^{-2}T^0]$ | 1:3 |
| 内摩擦角                                           | $[F^0L^0T^0]$  | 1:1 |
| 应力                                             | $[FL^{-2}T^0]$ | 1:3 |
| 应变                                             | $[F^0L^0T^0]$  | 1:1 |
| 抗拉刚度                                           | $[FL^{-1}T^0]$ | 1:9 |

3.2 试验模型

根据试验原型与相似比,确定路基试验模型的长度为 4 m,高度为 2 m,试验模型的宽度为 1.5 m。模型中从下往上含有 4 级面板网格单元,其长×宽×高=1.5 m×0.5 m×0.5 m,每级单元立臂杆内侧放置一个厚 4 mm 的塑料挡板,单元底杆钢筋端部固定连接(通过凸凹插销方式榫接)长为 2.0 m、幅宽 1.5 m 的聚丙烯单向土工格栅(近似按与原型抗拉强度满足相似关系,向生产厂家定制,抗拉强度约为 15 kN/m),各单元中的 3 根对称布设的斜拉杆间距为 50 cm,立臂杆与底杆沿线路方向间距为 5 cm,立臂杆与底杆上分别等间距焊接 3 根纵向钢筋,将斜拉杆与面板网格边端的纵向钢筋进行钩接。模型路堤填土采用细砂,其下面的地基土体采用砾石,铺设于模型箱底部,厚度为 0.3 m。受限于可使用试验室场地长度条件,试验模型的中下部未模拟实际的放坡边界,而采用台阶式混凝土挡块予以局部支挡以减少模型长度。由于试验是为了研究网格面板式加筋土挡墙的力学行为,且所设置的混凝土挡块距拉筋尾端仍有足够的距离,对拉筋-土体界面摩擦作用影响很小,因而试验中这种近似模拟的边界对所研究的主要问题不会产生较大影响,且可节省试验填土。

试验模型整体的正视图与侧视图如图 3 所示,由下而上 4 级网格面板单元的编号依次为 I、II、III、IV。

试验模型置于既有的长×高×宽=6 m×2.8 m×1.5 m 的模型箱内,模型箱采用钢结构镶嵌透明钢化玻璃箱体,箱体底面和两个侧面均采用矩形钢管作为骨架,模型箱置于水泥硬化地面上。

3.3 试验材料

3.3.1 模型填土

试验中模拟模型路堤填土的细砂和模型地基



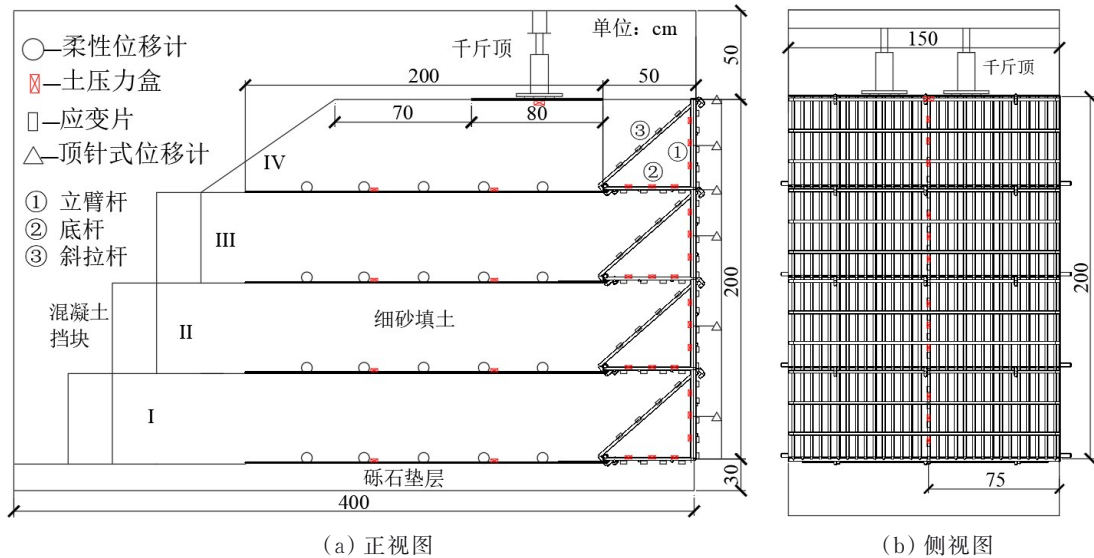


图3 试验模型及其测点布设图

Fig. 3 Diagram of test model and its measuring point layout

土体的砾石的主要物理力学参数见表2,其颗粒级配曲线见图4。

表2 试验填土的基本参数

Table 2 Basic parameters of filling in the test

| 类型 | 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 内摩擦角/(°) | 黏聚力/kPa |
|----|-------------------------|----------|---------|
| 细砂 | 1.85                    | 30       | 1       |
| 砾石 | 2.15                    | 35       | 0.7     |

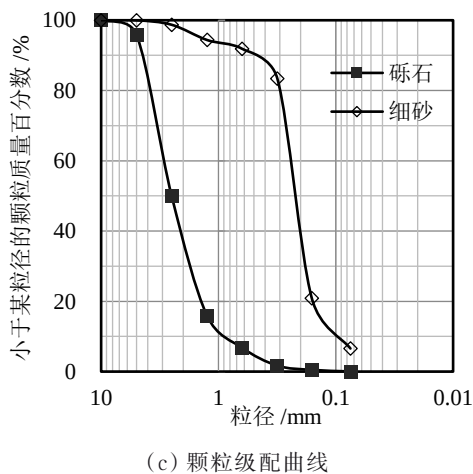
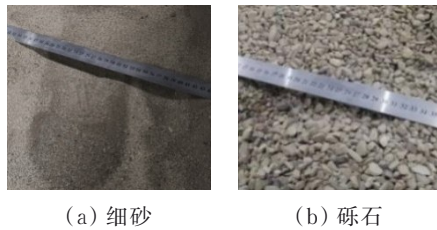


图4 试验填土及其颗粒级配曲线

Fig. 4 Test filling and their particle size distribution curves

### 3.3.2 网格面板单元

网格面板单元的钢筋直径取可购置的钢筋最

小直径6.3 mm,钢筋采用HRB400型;立臂杆内侧挡板采用轻便易安装且有一定抗弯刚度的PP塑料板(图5(a))。

### 3.3.3 土工格栅

试验模型拉筋采用高密度聚乙烯(HDPE)单向拉伸塑料土工格栅(图5(b))。考虑到实际工程状况,拉筋一般处于弹性工作阶段,因此,模型试验中以此条件为主选取拉筋,兼顾实际厂家可生产的最接近相似换算需求的土工格栅规格,从而试验中采用了拉伸曲线如图5(c)所示的土工格栅,其抗拉强度略高于按相似理论的换算值,可保证其在试验中处于弹性工作状态,不会对试验主要结果产生影响。

### 3.4 测点布设与测试系统

试验主要研究在填土顶面荷载作用下各级面板的侧向位移、面板后侧土压力、钢筋应力及拉筋拉力,对应采用顶针式位移计、微型土压力盒、电阻应变片及柔性位移计测试,通过综合采集模块和静态应变测试系统采集数据。基于体系荷载传递与面板结构受力的一般特征,进行测点布设(见图3)。其中,面板前侧(模型厚度中间位置)设6个顶针式位移计(图6(a)),根据条形荷载扩散特性<sup>[20]</sup>,其扩散角分别近似取为45°和填土内摩擦角,在Ⅲ级及以上面板加密位移计布设以便充分捕捉面板上可能的最大侧向位移。

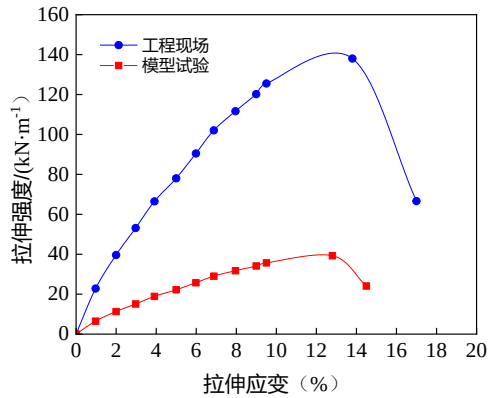
### 3.5 加载系统

在试验模型填土顶面用2个量程为20 t的油压千斤顶竖向逐级加载,如图6(b)所示,千斤顶上部设有反力梁,下面设有宽度为80 cm的加载垫板,通过千斤顶的推力模拟对填土施加条形面力荷载。



(a) 网格面板单元

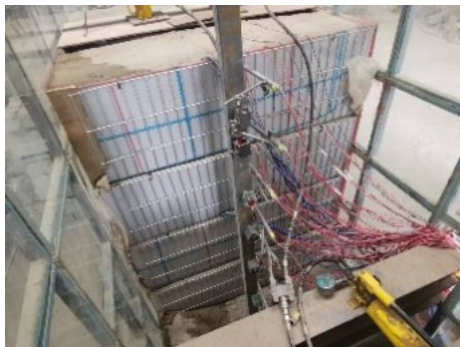
(b) 模型土工格栅



(c) 土工格栅拉伸曲线

图5 网格面板单元与模型土工格栅

Fig. 5 Member of grid facings and modeled geogrids



(a) 刚性位移计



(b) 加载装置

图6 试验测试与加载装置系统

Fig. 6 Monitoring and loading systems in the test

### 3.6 试验操作步骤

1)从模型箱底部开始以厚度10 cm 分层填筑与压实土体,采用灌砂法及时检测压实度,使模型填土路基压实度接近原型的90%;完成砾石垫层后安装Ⅰ级面板钢筋网格、铺设土工格栅,同步在立臂杆内侧放置塑料挡土板及后侧土压力盒,面板外侧

安装顶针式位移计;

2)继续逐层填筑与安装各级面板,直至模型顶面,同步完成各级传感器布设及相应清零,形成试验模型(图7);

3)测试在模型土体自重作用下各传感器的读数,进行记录与分析;

4)安装加载垫板、千斤顶及反力梁,调试加载系统后,对试验模型进行逐级加载,并测读与记录相应的各传感器读数。为充分展示模型随荷载的变形发展特征,试验加载至相当于原型设计荷载的2倍为止。



图7 填筑完成后试验模型照片

Fig. 7 Photo of completely constructed test model

## 4 试验结果与分析

### 4.1 面板侧向位移

图8为试验观测的面板侧向位移随填土顶面条形荷载的变化曲线。由图8可见,位移整体呈抛物线式增大。以位移最大处(距墙顶深约 $3H/8$ 处)的位移为对象,根据该位移随荷载变化曲线的斜率以及曲线的线性拟合程度,将面板变形过程近似划分为3个阶段:线弹性变形阶段、弹塑性变形阶段、塑性变形阶段。

1)线弹性变形阶段:当填土顶面荷载小于15.1 kPa时,随着荷载逐步增大,填土颗粒逐渐被挤密,面板侧向位移增长较小,最大位移仅约0.3 mm。位移-荷载曲线的斜率基本恒定,其线性相关系数 $R^2=0.971$ ,线性拟合优度显著,反映出加筋土挡墙体系整体处于弹性状态。

2)弹塑性变形阶段:在填土顶面荷载为15.1~26.8 kPa时,面板侧向位移逐步增大且略呈非线性变化,距墙顶深 $H/2$ 范围内增幅明显,面板最大位移约1.1 mm。位移-荷载曲线的线性相关系数 $R^2=0.896$ ,线性拟合程度下降,其中塑性变形占比约30.3%,表明此时体系处于弹塑性阶段。

3)塑性变形阶段:在填土顶面荷载达到26.8 kPa以后,面板侧向位移呈显著非线性增长,距墙顶深 $5H/8$ 范围内增幅明显,面板最大位移达到2.84

mm。位移-荷载曲线的线性相关系数  $R^2=0.683$ ，线性拟合程度显著下降，其中塑性变形占比约 56.2%，说明此时体系已处于塑性变形为主导的阶段。

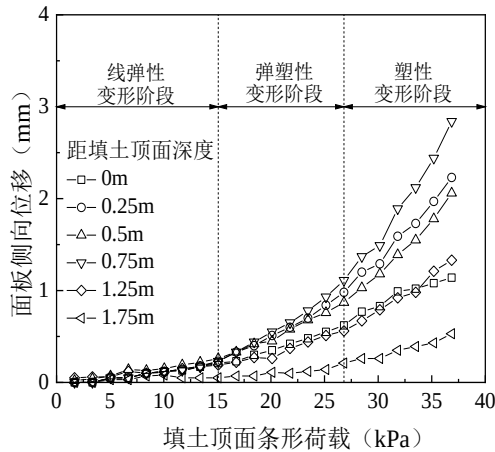


图8 面板侧向位移随条形荷载变化的试验曲线

Fig. 8 Test variation curves of panel lateral displacement with strip surcharge

此外,需要说明的是,试验中根据千斤顶压力表读数进行分级加载控制,设计的加载增量为 5 kPa,但由于土体变形,各级荷载按设定值施加后存在一定量的回表减小,待千斤顶压力表稳定后再读数,由设置于加载板底面的土压力盒读取实际作用于填土顶面的荷载,因而呈现各记录数据时的荷载值并非 5 kPa 的整倍数。

图9为试验中典型荷载作用下面板侧向位移沿高度的分布曲线。由图9可见,曲线呈两端小、中间大的抛物线形分布,顶点位于距墙顶深  $3H/8$  处,进一步说明面板位移主要发生在其中上部。当条形荷载达到一定值后(本试验为 10.1 kPa),面板位移随荷载呈现显著的非线性增长,当模型填土顶面条形荷载为 36.9 kPa 时,面板最大侧向位移对墙高占比为 0.14%。

面板中上部位移较大的主要原因在于:顶面条形荷载的应力传递与扩散效应,在距墙顶深  $H/4 \sim H/2$  区间形成典型的应力叠加效应,即侧向压应力由填土自重产生的土压力与荷载扩散传递的附加应力构成,面板侧向压应力高于其他区域,面板中上部为条形荷载强影响范围,使得相应部位的面板侧向位移相对较大。总体上,试验中面板最大侧向位移约为 2.8 mm ( $q=36.9$  kPa),处于较小的量值,其原因可能是斜拉杆与纵向杆对钢筋网格中立臂杆具有强烈的约束作用,使得立臂杆侧向位移(直接体现为面板侧向位移)较小。

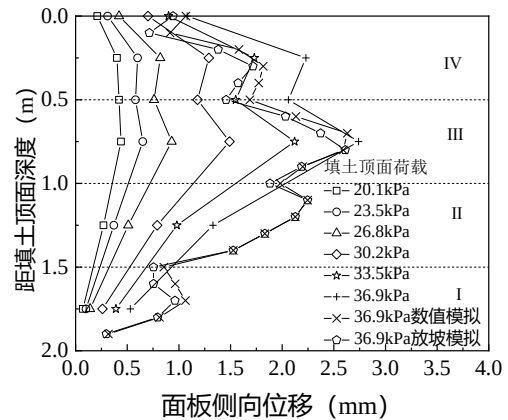


图9 典型荷载下面板侧向位移沿高度分布曲线

Fig. 9 Test variation curves of panel lateral displacement with height under typical surcharges

#### 4.2 拉筋拉力

距墙顶不同深度( $z$ )处拉筋拉力分布曲线如图10所示。由图10可见,各层拉筋拉力均呈现两端小、中间大的抛物线(单峰)分布,顶点均位于距面板水平距离为 1.16 m 处,若以拉筋内端点距面板的水平距离  $L=2.5$  m 为参照,则拉筋拉力最大值位于距面板水平距离  $0.46L$  处。同时,在  $z=1$  m 处,当条形荷载  $q=6.7$ 、20.1、36.9 kPa 时,拉筋最大拉力分别为 1.53、2.63、6.45 kN/m,该层向下各层拉筋拉力随深度呈非线性减小。

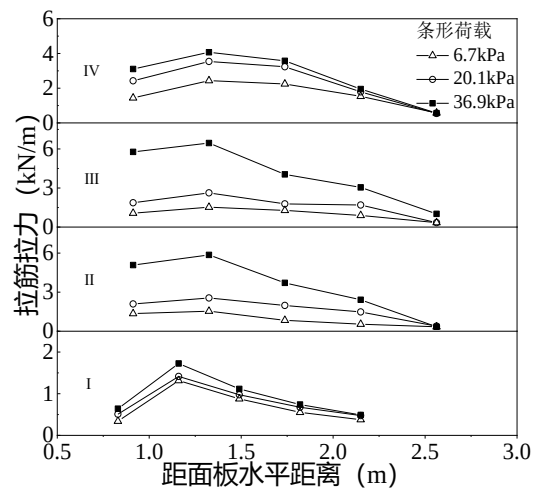


图10 拉筋拉力分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of tensile force on geogrids

第Ⅲ级网格单元的拉筋拉力相对较大,这与图9所示的面板侧向位移分布特征相协调,说明因该级单元的侧向位移大,导致约束其的土工格栅拉力增大,该层格栅中相应的拉伸变形也就增大。对于各层拉筋拉力沿横向呈现“单峰”分布模式,由拉筋拉力与表面剪应力一阶微分关系可得,拉力峰值点即为表面剪应力零点,因而由筋土相对位移关系可



知,该拉力峰值点即为土体中潜在滑面上的点。综合而言,对本试验模型,由Ⅲ、Ⅳ级单元中拉筋拉力分布曲线可初步判断,填土中潜在滑面与这两层拉筋交点近似位于距墙面约 1.25 m 处。

### 4.3 面板侧向土压力

各面板单元后侧的土压力沿深度分布曲线如图 11 所示。由图 11 可见,沿整个面板高度方向,侧向土压力表现为“鼓胀”模式,呈两端小、中间大的非线性分布,顶点位于距墙顶深度约 0.4H 处。“鼓胀”式分布原因在于条形荷载应力扩散作用。在顶面条形荷载为 16.8、20.1、36.9 kPa 时,最大土压力分别为 3.166、3.573、6.858 kPa。同时,顶面条形荷载对面板中上部的土压力影响程度明显大于面板中下部。在整个加载过程中,面板顶部侧向土压力由 0.243 kPa 增加到 3.395 kPa,增幅为 3.152 kPa,而面板底部侧向土压力仅由 1.554 kPa 增大到 1.667 kPa,增幅为 0.113 kPa。

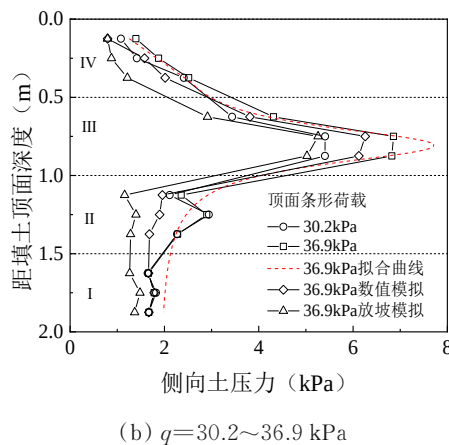
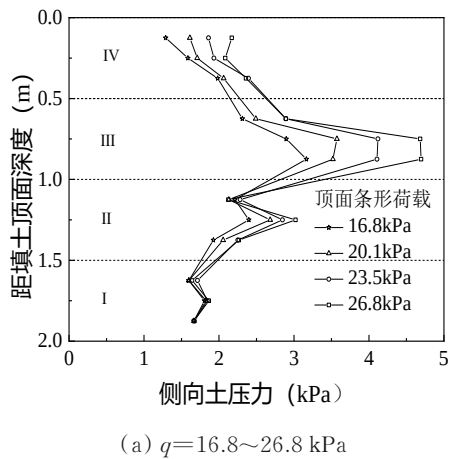


图 11 面板后侧土压力分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of lateral earth pressure on the panel

以  $q=36.9$  kPa 为典型,对实测土压力  $p$  进行曲线拟合,得到拟合优度为 0.93,相应的拟合曲线表达式为

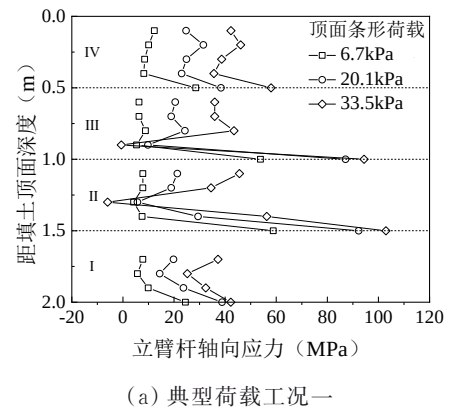
$$p = 1.87 + 0.515 \sqrt{4(z - 0.81)^2 + 0.08} \quad (\text{kPa}) \quad (1)$$

由图 11(b)可见,数值模拟与试验得到的面板侧向土压力总体较为接近,但二者之间仍存在一定偏差,其可能原因为:1)数值模拟中假设填土以及拉筋-填土界面的性质均匀,而试验中填土压实度、含水率等均存在一定的离散性,筋土界面参数也并非完全均匀;2)因为试验模型土体的弹性模量、泊松比等参数难以准确确定,数值模型中对填土变形特性的模拟可能存在偏差;3)试验模型的加载过程调整与变化特征在数值模型中难以完全一致模拟;4)试验模型中土压力盒的埋设与测量存在一定误差。

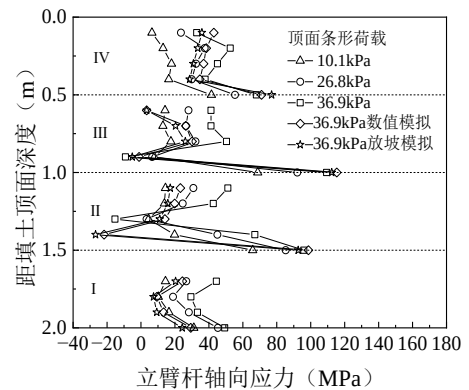
### 4.4 网格钢筋应力

#### 4.4.1 立臂杆

通过在各杆件上的电阻应变片测试数据,由胡克定律经过换算可得到相应的钢筋应力。在典型荷载工况下 ( $q=6.7\sim 36.9$  kPa),各级面板单元的立臂杆轴向应力分布曲线如图 12 所示。由图 12 可见,各级立臂杆应力沿高度呈非均匀分布,其底端的轴向应力(拉应力)最大,符合立臂杆作为悬臂杆的理论受力特征;沿高度方向,中上部区域立臂杆



(a) 典型荷载工况一



(b) 典型荷载工况二

图 12 立臂杆轴向应力分布曲线

Fig. 12 Distribution curves of axial stress on vertical bars

应力尤为突出,墙体顶部与底部单元的立臂杆应力相对较小,与前述面板后侧土压力分布特征具有同步性;当条形荷载为 20.1、36.9 kPa 时,立臂杆轴向最大应力分别约为 91、110 MPa,分别位于Ⅱ级、Ⅲ级单元立臂杆的底端,其值均明显低于钢筋的设计强度 360 MPa,说明钢筋杆件处于良好的安全工作状态;各级单元的立臂杆应力均具有上小下大的非线性分布特征,这符合立臂杆所具有的悬臂梁结构基本特点。

在荷载为 36.9 kPa 时,立臂杆应力沿墙高分布,试验与数值模拟结果均呈现“中间大、两端小”的分布特征(图 13(b)),二者最大应力偏差约为 6%。

从受力机理来看,墙体中上部区域处于条形荷载扩散角形成的应力叠加区,由填土自重产生的主动土压力和条形荷载扩散传递的附加侧向应力组

成,因而此区域的立臂杆所受侧向压力高于其余区域,其轴向应力值相对较大。

#### 4.4.2 底杆

图 13 给出了各级网格面板单元中底杆的轴向应力(拉应力)分布曲线。由图 13 可见,在典型荷载工况下,底杆的拉应力呈现为两端小、中间大的抛物线形分布,各级的顶点均位于距面板水平距离约 0.2 m ( $0.4b$ ,  $b$  为底杆长度)处,底杆上远离面板的端部附近拉应力相对更小,这符合该端部受约束较小的特征。沿高度方向,Ⅱ级、Ⅲ级单元的底杆拉应力最大,面板顶、底端两级的底杆拉应力相对较小;其中,当条形荷载为 36.9 kPa 时,Ⅱ级单元的底杆拉应力最大,达到约 77 MPa。随着填土顶面条形荷载的增大,各级单元的底杆拉应力具有非线性增大的变化特征。

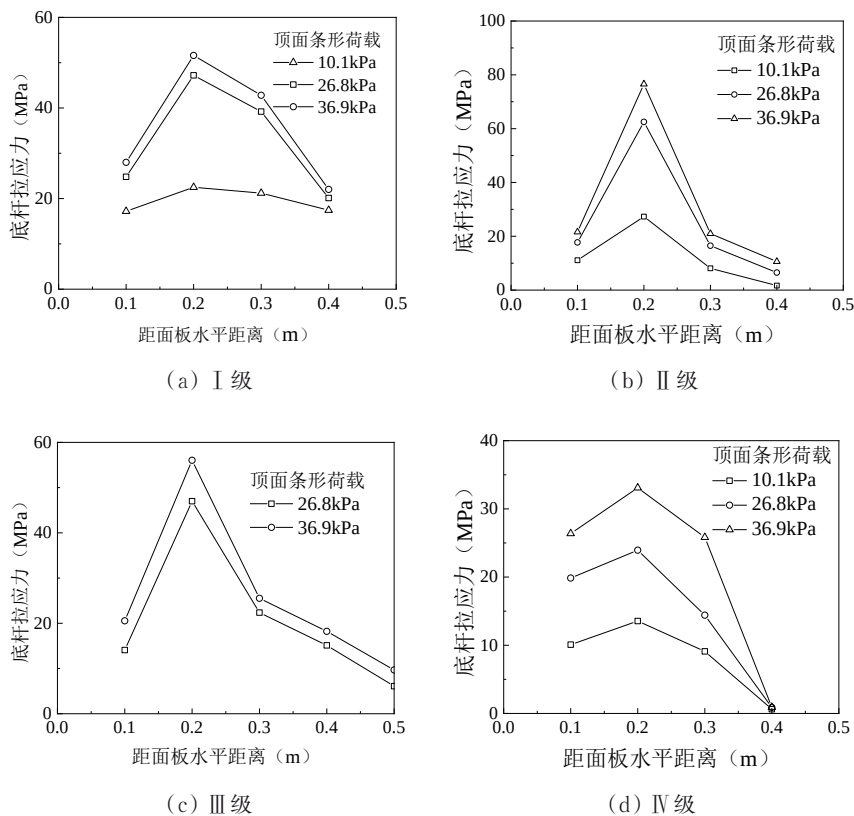


图 13 底杆拉应力分布曲线

Fig. 13 Distribution curves of tensile stress on bottom bars

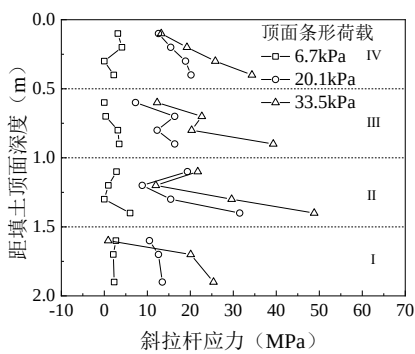
#### 4.4.3 斜拉杆

在典型荷载工况下,各级单元的斜拉杆应力沿高度分布曲线如图 14 所示。由图 14 可见,各级斜拉杆的应力沿深度具有非线性增大的特征;Ⅱ、Ⅲ级单元的斜拉杆的应力最大,其余两级的斜拉杆应力相对较小,这与前述的土压力、立臂杆应力的分布特征具有同步性;随着顶面条形荷载的增大,同

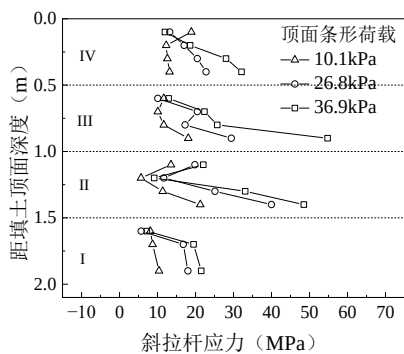
一斜拉杆的应力具有非线性增大的特征;当条形荷载为 36.9 kPa 时,Ⅲ级单元的斜拉杆应力最大,达到约 55 MPa。

综合立臂杆、底杆、斜拉杆的应力大小可见,在同一单元网格中,杆件应力大小关系一般为立臂杆 > 斜拉杆 > 底杆,即立臂杆受力最大,说明实际选取钢筋直径一般应由立臂杆应力控制。





(a) 典型荷载工况一



(b) 典型荷载工况二

图 14 斜拉杆应力分布曲线

Fig. 14 Distribution curves of tensile stress on oblique bars

5 数值模拟分析

为进一步拓展试验结果分析,针对试验模型建立 FLAC3D 数值模型,如图 15 所示。模型四周采用水平位移约束,底端采取固定约束边界,数值模型中土体采用理想弹塑性本构模型、服从 Mohr-Coulomb 屈服准则与非关联流动法则,挡土板、土工格栅、钢筋均采用各向同性弹性模型,分别以 FLAC3D 内置的 shell 单元、geogrid 单元、beam 单元(立臂杆与底杆)和 cable 单元(斜杆)模拟。根据相应的物理模型试验参数以及相关的材料参数室内试验结果,数值模型的主要计算参数取值见表 3。

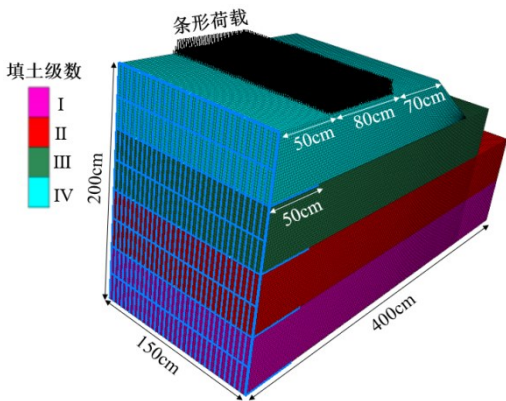


图 15 试验模型相应的数值模型

Fig. 15 Numerical model corresponding to the test model

表 3 数值模型主要参数

| Table 3 Main parameters of numerical model |                             |                   |      |              |             |
|--------------------------------------------|-----------------------------|-------------------|------|--------------|-------------|
| 材料                                         | 密度/<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模<br>量/MPa      | 泊松比  | 内摩擦<br>角/(°) | 黏聚力/<br>kPa |
| 细砂                                         | 1 850                       | 30                | 0.30 | 30           | 1           |
| 网格钢筋                                       | 7850                        | 2×10 <sup>6</sup> | 0.33 |              |             |
| 塑料挡板                                       |                             | 2000              | 0.31 |              |             |
| 土工格栅                                       |                             | 200               | 0.32 |              |             |

填土顶面荷载板中心点沉降量随条形荷载变化的数值模拟结果如图 16 所示,图 16 中同时给出了试验观测结果(由直接观测值内插确定整数荷载时的沉降值)。由图 16 可见,数值模拟与模型试验结果总体一致,在填土顶面条形荷载约为 40 kPa 时,数值模拟沉降量约为 6.2 mm,比试验值小约 13%。荷载-沉降曲线整体呈抛物线分布,在荷载大于 20 kPa 后,沉降随荷载呈显著的非线性增长。

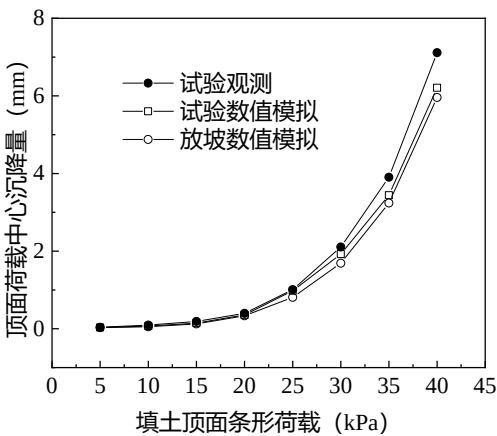


图 16 填土顶面沉降量随条形荷载变化曲线

Fig. 16 Variation curve of settlement on the filling top with strip surcharge

数值模拟得到的典型荷载工况下面板侧向位移沿高度分布曲线如图 17 所示,图 17 中同时给出了相应的试验结果。二者对比可见,在典型荷载工况下,数值模拟结果与试验值总体较为一致,数值模拟的面板最大侧向位移比为 0.13%,位于距墙顶深约 0.33H 处,与试验值的误差分别约为 8.5% 和 12%。

图 16 与图 17 说明建立的数值模型具有一定的合理性,基于此数值模型,可进一步拓展分析模型路基的潜在失稳破坏模式。

图 18 为采用上述数值模型得到的在典型荷载作用下路基中土体剪切强度折减到极限状态时最大剪应变增量云图,由此可确定填土内部相应的临界滑面(图中尺寸单位为 mm)。可见,在顶面条形荷载达到 26.8 kPa 时,路基稳定系数为 1.585,滑体的顶面宽度为 1 382 mm、最大深度约为 1 656 mm,

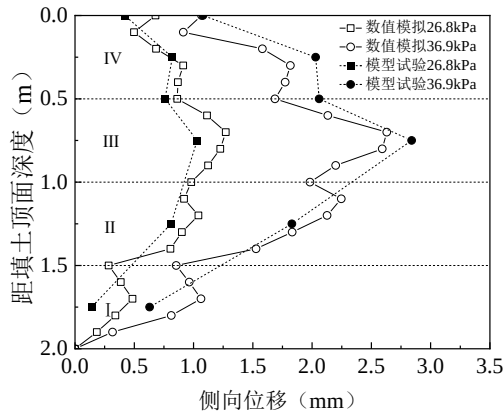


图 17 面板位移的数值模拟与模型试验对比

Fig. 17 Comparison of panel lateral displacement between numerical simulation and model test

滑体范围包含了条形荷载的作用宽度,滑面呈典型的非圆弧形曲面特征;当顶面条形荷载增大到 36.9 kPa 时,稳定系数为 1.328,滑体的顶面宽度为 1 399

mm、最大深度约为 1 676 mm。整体而言,两种工况下路基均处于稳定状态,但相较于前者,后者的稳定系数下降了 16.2%,滑体范围略有扩大,面积约增大 5%,滑面形状仍为非圆弧形的曲面,即临界滑面形态基本不受条形荷载影响。此外,数值模拟得到的临界滑面与Ⅲ、Ⅳ级单元中拉筋交点距墙面距离分别约为 1.22 m、1.37 m,与第 3.2 节由实测拉筋拉力分布曲线初步估算的 1.25 m 较为接近,最大偏差约为 10%,二者基本相互印证。

应该注意的是,上述两工况下路基填土中滑面底端均位于Ⅰ级单元的深度范围内,未向深部发展。其原因在于,基于试验模型建立的数值模型,底部为固定边界,限制了滑面向下发展。实际上,此计算结果属于路基填土内部稳定性分析范畴(非外部稳定性),即所得滑面为路基填土内部滑动破坏面,对于工程中地基强度较大的情况(如:基岩、刚性桩加固地基等)具有参考意义。

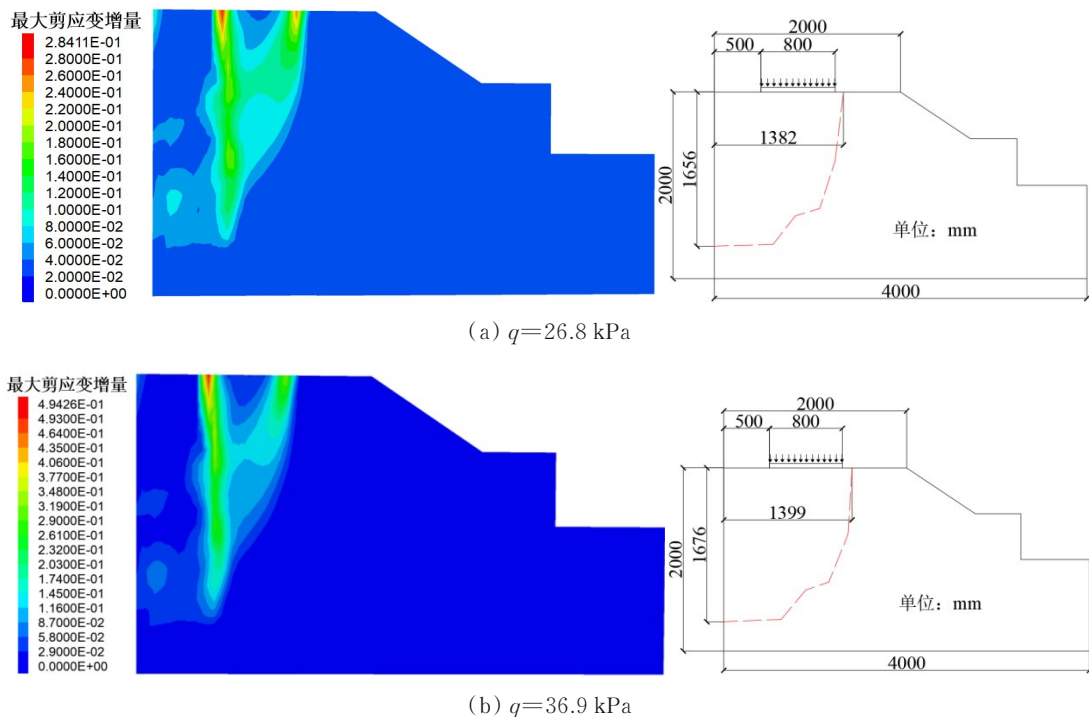


图 18 典型荷载作用下模型路基内部临界滑面

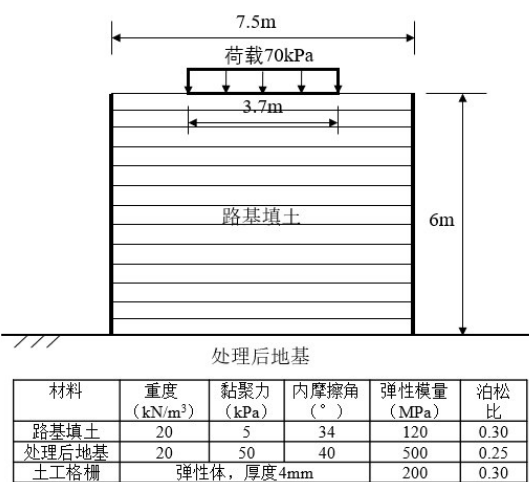
Fig. 18 Critical slip surfaces in the modeled embankment under typical surcharges

## 6 不同类型面板综合对比

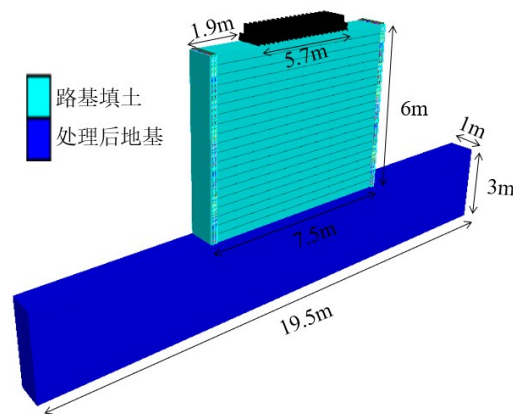
为具体对比网格格式面板与传统的整体式、模块式、反包式面板结构的力学性能差异性,基于经模型试验验证的数值建模方法,对图 19 所示的概化实例<sup>[21]</sup>进行 4 种面板类型的加筋土挡墙力学行为的数值模拟分析(拉筋竖向间距为 0.3 m)。为便于简化叙述且说明问题,以墙面板侧向水平位移为典型,其计算结果见图 20。由图 20 可见,4 类面板的最大

侧向位移均位于墙高中部附近,网格格式面板的最大侧向位移为 6.14 mm,虽大于整体式与模块式,但明显小于反包式,一般仍可满足正常使用要求。简言之,从力学性能角度,网格格式面板具有技术可行性。

为全面评估网格格式面板结构综合效益,从经济性与环保性(碳排放量)两个角度,将其与整体式、模块式、反包式面板结构进行对比分析。为便于量



(a) 横断面图与基本参数



(b) 数值模型

图 19 数值模拟依托实例的概化模型示意图

Fig. 19 Sketch map of generalized model of a practical example numerically simulated

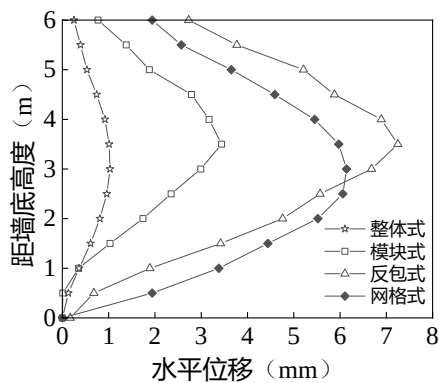


图 20 不同面板形式加筋土挡墙的墙面水平位移

Fig. 20 Lateral Horizontal Displacement of Reinforced Soil Retaining Walls with Different Panels

化讨论,这里以体积为 5m(长)×1 m(宽)× 0.3 m(高)、10 m(长)×1 m(宽)× 0.3 m(高)的填筑体作为基本单元 I、II,基于单元中的相关材料用量、基本单价(根据相关工程定额)与材料生产时碳排放量计算标准<sup>[22-23]</sup>可计算得到各类型面板相应的材料造价与碳排放量的具体值,如表 4 所示。实际加筋

土挡墙可结合拉筋长度且基于墙高与基本单元高度比,进行相应倍数扩大以近似估算。可见,虽然网格式面板结构的力学性质略弱于整体式与模块式,但其材料造价分别约为整体式和模块式的 0.52~0.58 倍与 0.79~0.84 倍,碳排放量分别约为整体式和模块式的 0.33~0.46 倍和 0.56~0.69 倍,因而网格式面板结构在经济环保性方面相对具有优势。

表 4 不同类型面板的经济环保性对比

Table 4 Comparison of cost and carbon emissions among different panels

| 面板结构 | 钢筋用量/kg | 土工格栅/m <sup>2</sup> | 面板/m <sup>3</sup> | 材料造价/元       | 二氧化碳当量/kg     |
|------|---------|---------------------|-------------------|--------------|---------------|
| 网格式  | 6.045   | 4.7/9.7             | 0.001             | 55.73/65.52  | 35.69/61.16   |
| 整体式  | 19.311  | 4.7/9.7             | 0.09              | 96.27/124.99 | 107.82/133.29 |
| 模块式  | 4.208   | 4.58/9.58           | 0.126             | 66.30/83.45  | 63.77/89.24   |
| 反包式  | 0       | 5.77/10.77          | 0                 | 11.54/21.54  | 29.38/54.84   |

注:/分割的两个数据中,左、右两侧数据分别为基本单元 I 与 III 对应的数据;单个数据表示基本单元 I 与 III 对应的数据相同。

综合而言,网格面板式加筋土挡墙结构在填方土体变形控制方面弱于整体面板式而强于反包式,在材料造价与低碳环保性方面相对于整体式和模块式均具有优越性,且碳排放量略高于反包式。因此,此类结构尤其适用于对填方土体变形控制要求不高的工程,如:弃渣场工程、施工便道工程、临时性填方工程等。

7 结论

针对新型网格面板式加筋土挡墙结构,依托实际填方路基工程,通过室内大比例模型试验及数值模拟方法,得到在填土顶面条形荷载作用下网格面板式加筋土挡墙的受力与变形特征、路基潜在破坏模式等,得出以下主要结论:

1)随着填土顶面条形荷载逐级增大,面板侧向位移整体呈抛物线式非线性增大,主要经历 3 个变形阶段:线弹性变形阶段、弹塑性变形阶段、塑性变形阶段。面板最大位移位于距墙顶深 3/8 倍墙高处,其值对墙高占比为 0.14%。

2)各层土工格栅拉筋拉力均呈现单峰抛物线分布模式,顶点均位于距面板水平距离 0.46L(L 为拉筋内端距面板水平距离)处。在距填土顶面深 1 m 处以下,各层拉筋拉力随深度呈非线性减小。

3)面板侧向土压力沿深度呈两端小、中间大的抛物线形分布,顶点位于距墙顶深度约 0.4 倍墙高处。荷载对面板中上部的土压力影响程度明显大于其中下部。



4)沿高度方向,中间两级面板单元的立臂杆、底杆、斜拉杆的应力均最大,各级单元的立臂杆、斜拉杆的应力均呈上小下大的非线性分布,底杆拉应力呈两端小、中间大的抛物线形分布。同一单元网格中,杆件应力大小关系为立臂杆>斜拉杆>底杆,实际选取钢筋直径一般受控于立臂杆,各级单元的最大应力位于立臂杆底端。

5)填土路基的潜在滑体范围包含了顶面条形荷载的作用宽度,滑面呈非圆弧形曲面特征;滑面形态基本不受条形荷载影响,底端位于I级单元的深度范围内。

6)网格面板式加筋土挡墙结构,在对填方土体变形约束方面弱于整体混凝土面板式加筋土挡墙,但在材料造价与低碳环保性方面对混凝土面板结构具有优势。

## 参考文献

- [1] 蔡晓光,李思汉,黄鑫.双级加筋土挡墙动力特性振动台试验[J].中国公路学报,2018,31(2):200-207.  
CAI X G, LI S H, HUANG X. Shaking table tests on dynamic characteristics of two-stage reinforced soil-retaining wall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 200-207. (in Chinese)
- [2] CAI X G, LI S H, XU H L, et al. Shaking table study on the seismic performance of geogrid reinforced soil retaining walls [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 6668713.
- [3] LI S H, CAI X G, JING L P, et al. Lateral displacement control of modular-block reinforced soil retaining walls under horizontal seismic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 141: 106485.
- [4] 蒋楚生,赵晓彦,李庆海,等.铁路多级加筋土挡墙研究现状及应用展望[J].高速铁路技术,2017,8(1):44-48.  
JIANG C S, ZHAO X Y, LI Q H, et al. Current situation and application prospect of multi-stage reinforced soil wall for railway [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(1): 44-48. (in Chinese)
- [5] 肖世国,李绍红,闫清卫,等.地基不均匀沉降下加筋土路基力学行为模型试验[J].吉林建筑大学学报,2025,42(1):60-67.  
XIAO S G, LI S H, YAN Q W, et al. Model test on mechanical behavior of reinforced embankment under uneven foundation settlement [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2025, 42(1): 60-67. (in Chinese)
- [6] 吕文良.加筋土挡墙研究现状综述[J].土工基础,2003,17(2):19-22.  
LU W L. Comprehensive introduction of status of reinforced soil retaining wall [J]. Soil Engineering and Foundation, 2003, 17(2): 19-22. (in Chinese)
- [7] 王贺,杨广庆,熊保林,等.模块面板式加筋土挡墙结构行为试验研究[J].岩土力学,2016,37(2):487-498.  
WANG H, YANG G Q, XIONG B L, et al. An experimental study of the structural behavior of reinforced soil retaining wall with concrete-block panel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 487-498. (in Chinese)
- [8] 牛笑笛.整体刚性面板加筋土挡墙工作机理及结构性能研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022.  
NIU X D. Study on working mechanism and structural performance of reinforced soil retaining wall with full-height rigid facing [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022. (in Chinese)
- [9] 王志杰,秦岩,张国伟,等.极端降雨条件下整体式刚性面板加筋土挡墙力学与变形行为试验研究[J].铁道学报,2025,47(11):185-192.  
WANG Z J, QIN Y, ZHANG G W, et al. Experimental study on mechanical and deformation behavior of reinforced soil retaining wall with integral rigid facing under extreme rainfall conditions [J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(11): 185-192. (in Chinese)
- [10] 路彤.复合式格宾土工格栅加筋土挡墙动力特性振动台试验分析[D].廊坊:防灾科技学院,2019.  
LU T. Shaking table test analysis of dynamic characteristics of composite gabion and geogrid reinforced soil retaining wall [D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2019. (in Chinese)
- [11] 李昀,杨果林,林宇亮.水平地震作用下加筋格宾挡土墙动力特性试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(12):1930-1935.  
LI Y, YANG G L, LIN Y L. Dynamic characteristics of reinforced gabion walls subjected to horizontal seismic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1930-1935. (in Chinese)
- [12] XU P, HATAMI K, JIANG G. Shaking table study of the influence of facing on reinforced soil wall connection loads [J]. Geosynthetics International, 2020, 27(4): 364-378.
- [13] SHEN Z, CAO Y, DING J W. Centrifugal model test and numerical simulation analysis on deformation and stability of aeolian sand and fly ash backfill in reinforced retaining walls [J/OL]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-02013-y>.
- [14] 徐鹏,蒋关鲁,王珣,等.面板对加筋土挡墙影响的离心模型试验研究[J].岩土力学,2019,40(4):1427-1432.  
XU P, JIANG G L, WANG X, et al. Centrifuge model tests on influence of facing on reinforced soil retaining walls [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1427-

1432. (in Chinese)
- [15] XU P, HATAMI K, LI T. Natural frequencies of full-height panel reinforced soil walls of variable cross-section [J]. *Geosynthetics International*, 2019, 26(3): 320-331.
- [16] 李思汉, 蔡晓光, 王学鹏, 等. 不同面板型式加筋土挡墙振动响应数值分析[J]. *地震工程学报*, 2024, 46(1): 163-173.
- LI S H, CAI X G, WANG X P, et al. Numerical simulation of the vibration responses of reinforced soil-retaining walls with different facings [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2024, 46(1): 163-173. (in Chinese)
- [17] 陈建峰, 柳军修, 石振明. 软弱地基刚/柔性组合墙面加筋土挡墙数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 422-432.
- CHEN J F, LIU J X, SHI Z M. Numerical simulation of reinforced soil walls with flexible/rigid facings on yielding foundation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 422-432. (in Chinese)
- [18] 陈建峰, 张旭, 柳军修. 软土地基刚/柔性组合墙面加筋土挡墙离散连续耦合数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(2): 159-166.
- CHEN J F, ZHANG X, LIU J X. Coupling discontinuous-continuous simulation of reinforced soil walls with flexible/rigid facings on soft foundation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(2): 159-166. (in Chinese)
- [19] 牛笑笛, 杨广庆, 王贺, 等. 不同面板形式加筋土挡墙结构特性现场试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(1): 245-254.
- NIU X D, YANG G Q, WANG H, et al. Field tests on structural properties of reinforced retaining walls with different panels [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(1): 245-254. (in Chinese)
- [20] XIAO S G, QI Y, XIA P. General variational solution for seismic and static active earth pressure on rigid walls considering soil tensile strength cut-off [J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2023, 24(5): 432-449.
- [21] 肖世国, 李绍红, 闫清卫, 等. 地基不均匀沉降下加筋土路基力学行为模型试验[J]. *吉林建筑大学学报*, 2025, 42(1): 60-67.
- XIAO Shiguo, LI Shaohong, YAN Qingwei, et al. Model test on mechanical behavior of reinforced embankment under uneven foundation settlement [J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2025, 42(1): 60-67.
- [22] 徐超, 陈铭铭, 杨阳, 等. 基于生产过程实测的土工合成材料碳排放因子[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2025, 44(1): 1-7.
- XU C, CHEN M M, YANG Y, et al. Measured carbon emission factors of Geosynthetics Based on production processes [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2025, 44(1): 1-7. (in Chinese)
- [23] GB/T 51366—2019 建筑碳排放计算标准[S].
- GB/T 51366—2019 Standard for building carbon emission calculation [S]. (in Chinese)
- (编辑 XXX)