

文章编号:1673-9469(2025)06-0029-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.004

## 多雨地区斜坡地基上不同高度加筋格宾挡土墙力学行为研究

王贺<sup>1,2</sup>, 尹宝银<sup>2</sup>, 宋帅<sup>2</sup>, 张羽<sup>2</sup>, 王岩<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 为研究多雨地区斜坡地基上不同高度加筋格宾挡土墙在施工期多雨条件下的力学行为演化规律, 依托沪渝蓉高速铁路宜昌北动车所加筋格宾挡土墙工程, 采用现场试验和数值模拟的方法对相互衔接的不同高度加筋格宾挡土墙(双级和单级墙体型)应力和变形演化规律进行对比分析研究。研究表明: 双级和单级加筋格宾挡土墙各级基底处竖向应力在填筑期间沿土工格栅铺设方向呈非线性分布, 但双级挡土墙上级墙基底竖向应力小于单级挡土墙; 随着填筑高度的增加, 双级和单级挡土墙各层墙背水平土压力逐渐增大, 但增长速率随填筑高度的增加而减小; 双级和单级挡土墙各层土工格栅应变随填筑高度的增加而增大, 沿其铺设方向呈非线性分布, 且格栅应变分布曲线出现明显峰值现象, 主要有单峰分布和双峰分布两种形式。工后双级和单级加筋格宾挡土墙变形的数值模拟分析可知, 二者墙顶差异沉降很小, 仅为 4.24 mm; 墙面水平变形整体呈外倾形式, 最大水平位移分别为 5.42、2.55、5.69 mm, 分别占本级墙高的 0.068%、0.059% 和 0.071%。双级挡墙上级墙墙面的水平变形形式及大小与单级挡墙较为一致。

**关键词:** 加筋格宾挡土墙; 斜坡地基; 现场试验; 数值模拟; 力学行为

中图分类号: TU476+.4

文献标识码: A

## Study on Mechanical Behavior of Reinforced Gabion Retaining Wall with Varying Height on Sloping Foundation in Rainy Area

WANG He<sup>1,2</sup>, YIN Baoyin<sup>2</sup>, SONG Shuai<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** To investigate the mechanical behavior evolution of the reinforced Gabion retaining wall at different heights on slope foundation in the rainy area under the condition of rainfall infiltration during the construction period, a study on the stress and deformation evolution of a reinforced gabion retaining wall with varying height was conducted using field tests and numerical simulations, relying on an actual engineering of the EMU Maintenance Station in the Yichang North Railway Station of the Shanghai-Chongqing-Chengdu High-speed Railway. The research results show that the vertical stress at the base of each level of the double-level and single-level reinforced gabion retaining walls distributes non-linearly along the direction of the geogrid laying during the filling process, but the vertical stress at the base of the upper wall of the double-level retaining wall is less than that of the single-level retaining wall; as the filling height increases, the horizontal earth pressure on the back of each layer of the double-level and single-level retaining walls increases, but the growth rate decreases with the increase in filling height; the strain of the geogrid in each layer of the double-level and single-level retaining walls increases with

收稿日期: 2024-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0104600); 国家自然科学基金资助项目(52079078)

第一作者: 王贺(1987—), 男, 河北石家庄人, 博士, 副教授, 从事加筋土技术方面的研究。

the increase in filling height, and it is distributed non-linearly along its laying direction, and the strain distribution curve shows a significant peak phenomenon, mainly in the form of single peak and double peaks. The numerical simulation analysis of the deformation of the post-construction double-level and single-level reinforced gabion retaining walls shows that the difference in settlement at the top of the two retaining walls is very small, only 4.24 mm; the overall horizontal deformation of the wall surface is in an outward-inclined form, and the maximum horizontal displacement is 5.42 mm, 2.55 mm, and 5.69 mm respectively, accounting for 0.068%, 0.059%, and 0.071% of the height of this layer of the wall. The horizontal deformation form and size of the wall surface of the upper wall of the double-level retaining wall are relatively consistent with those of the single-level retaining wall.

**Key words:** reinforced gabion retaining wall; slope foundation; field test; numerical simulation; mechanical behavior

我国对现代加筋土技术的应用始于20世纪70年代末。1979年,首座钢筋条带加筋土挡墙在云南省田坝矿区建成,标志着现代加筋土技术在我国应用的开端<sup>[1]</sup>。20世纪80—90年代,塑料土工格栅、无纺布等土工材料开始应用于公路、水利及地基处理等工程,加筋土技术规范相继出台。21世纪初期,各种新型土工合成材料不断产生,基于室内试验与数值模拟的加筋土原理探究不断开展,预制面板、整体式面板、格宾面板等不同形式的加筋土挡墙得到进一步推广。目前,加筋土技术被广泛应用于铁路工程领域。

加筋土挡墙的力学行为与设计理论较为复杂,已成为众多学者研究的焦点。国内外研究主要采用数值模拟、现场试验与模型试验等手段,对传统设计规范进行了深入验证与补充。在挡墙稳定性与破裂面研究方面,研究发现传统规范的计算值与实际存在差异。张琬等<sup>[2]</sup>指出,受墙趾阻力影响,实际筋材拉力值小于规范计算值。张飞等<sup>[3]</sup>提出了维持台阶式加筋土挡墙稳定所需的筋材加筋力的计算方法。对于破裂面形态,杨广庆等<sup>[4-5]</sup>的试验表明,格栅应变峰值分布的破裂面与“0.3H法”较为接近。赵晓彦等<sup>[6]</sup>细化了双级挡墙的差异,即下级墙潜在破裂面与“0.3H法”类似,而上级墙则更接近朗肯主动破裂面。王维等<sup>[7]</sup>提出了改进的双折线型潜在破裂面,为设计提供了新思路。台阶式挡墙的尺寸效应是另一个研究热点,其核心在于确定最优台阶宽度和筋材长度。多项研究表明,台阶宽度对挡墙的稳定性和变形有决定性影响。黄世斌等<sup>[8]</sup>发现,当台阶宽度为下级墙高的2/3时,结构性能最优。高珊等<sup>[9]</sup>指出,临界台阶宽度为1.2倍分级墙高。然而,Yoo等<sup>[10]</sup>研究表明,临界台阶宽度的实际值远小于美国FHWA设计指南的规定值,

并强调下级挡墙筋材长度对整体稳定性影响极大。Xu等<sup>[11]</sup>发现,台阶宽度和筋材长度的影响效应随上墙高度的增加而减弱。在应力与变形分布特性上,研究发现挡墙内部的应力分布并非线性。杨广庆等<sup>[12-14]</sup>观察到挡墙基底竖向应力呈独特的“双峰分布”或“V”形分布,并随台阶宽度增大逐渐转变为“倒S”形,施工完成后,筋材应变呈现双峰分布。在变形方面,侧向变形普遍呈“中间大、两侧小”的外鼓曲线分布<sup>[15]</sup>,静载下最大水平位移随台阶宽度增大而减小<sup>[12]</sup>,而动荷载下的最大变形则多发生于墙面0.2H高度处<sup>[5]</sup>。此外,加筋效果验证及动力特性研究也逐步深入。葛允雷等<sup>[15]</sup>通过对比发现,加筋能显著提升安全系数,有效控制变形。针对动荷载,林宇亮等<sup>[16-17]</sup>系统研究了振动次数、荷载幅值及填充率对加筋格宾挡墙动力变形特性的影响,拓宽了加筋土技术在抗震领域的应用。与此同时,新型结构(如绿色加筋格宾挡墙)得到发展,刘泽等<sup>[18-19]</sup>对其施工期及工后的力学行为进行了系统监测与分析。加筋土挡墙的破坏往往是排水不畅导致的面板破坏,但其中加筋填料整体仍保持较好的稳定性<sup>[20]</sup>。

目前,国内外关于斜坡地基上加筋格宾挡土墙力学行为的研究较少,尤其对于多雨条件下,同一斜坡地基上衔接的双级和单级加筋格宾挡土墙在施工期间的力学行为差异研究鲜见报道。本研究以多雨地区的沪渝蓉高速铁路荆门至宜昌段宜昌北动车所加筋格宾挡土墙为研究对象,开展了现场试验,对经历雨季后的同一斜坡地基上相互衔接的双级和单级加筋格宾挡土墙的力学行为演化规律进行了对比研究,揭示了应力、变形、土工格栅应变等力学行为差异。采用数值模拟分析的方法,研究了填筑完成后墙体压缩量和墙

面水平位移的演化规律,研究成果可为相关工程提供参考。

## 1 现场试验方案

### 1.1 材料特性

加筋格宾挡土墙填料为碎石土,其最大干密度为  $1.933 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率为  $3.3\%$ ,不均匀系数为  $60$ ,曲率系数为  $0.13$ 。加筋格宾挡土墙选用的土工格栅为 B 型、C 型两种不同抗拉强度的高韧性聚酯纱线集束格栅,其几何尺寸和力学特性见表 1。墙面由格宾石笼组成,宽度为  $0.8 \text{ m}$ ,格宾石笼的网面标称拉伸强度为  $42 \text{ kN/m}$ 、网面标称翻边强度为  $35 \text{ kN/m}$ ,C 型钉最小拉开拉力值为  $2 \text{ kN}$ 。

表 1 土工格栅物理和力学特性

Tab. 1 Physical and mechanical properties of geogrids

型号	横肋间距/m	抗拉强度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	5%应变时拉伸 强度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	峰值应变/ %
B 型	1	$\geq 150$	$\geq 79.5$	$\leq 9$
C 型	1	$\geq 200$	$\geq 106.0$	$\leq 9$

### 1.2 监测元件布置

本研究对宜昌北动车所加筋格宾挡土墙 A、B 断面进行现场监测,纵断面见图 1,横剖面见图 2。A 断面为双级墙,总墙高  $12.32 \text{ m}$ ,下级墙高  $4.32 \text{ m}$ ,上级墙高  $8 \text{ m}$ ,共铺设 24 层土工格栅,其中 1~8 层

采用 C 型高韧性聚酯纱线集束格栅,长为  $11 \text{ m}$ ; 9~24 层采用 B 型高韧性聚酯纱线集束格栅,长为  $8 \text{ m}$ 。B 断面为单级墙,墙高  $8 \text{ m}$ ,共铺设 16 层 B 型高韧性聚酯纱线集束格栅,长为  $8 \text{ m}$ 。A、B 断面铺设土工格栅的竖向间距均为  $0.5 \text{ m}$ ,格宾石笼外形尺寸均为  $3.0 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,墙面坡率为  $1:0.05$ ,墙脚设  $20 \text{ cm}$  厚的 C25 混凝土封闭层,墙前  $2 \text{ m}$  处设有 C35 钢筋混凝土桩板墙。

A、B 断面的监测元件包括土压力计、土工格栅应变计、沉降计和水平位移计等,监测元件布置见图 2,现场照片见图 3。

## 2 现场试验结果与分析

### 2.1 墙底竖向应力

在加筋格宾挡土墙填筑期,随着填筑高度  $h$  的增加,A、B 断面各级墙底处竖向应力沿水平方向的分布规律如图 4 所示。由图 4 可知,A、B 断面每级墙底竖向应力沿水平方向呈非线性分布,且在靠近面板处竖向应力均较小。这是因为墙底竖向应力由本级墙填土自重应力和上级墙填土向下扩散的附加应力两部分组成,挡墙台阶的存在导致面板处受到的附加应力小于中后部土体,此外,面板发生水平位移进一步减小了该区域的竖向应力。A 断面上级墙底和 B 断面墙底竖向应力分布规律相似,均呈现先增大后减小再增大的波动变化趋势,但 B 断面竖向应力整体高于 A 断面。

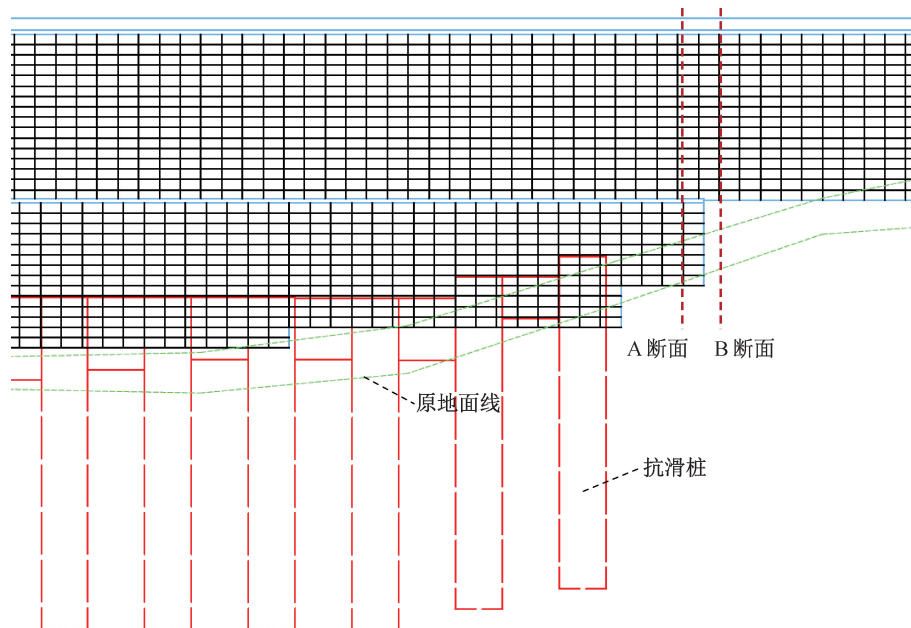


图 1 加筋格宾挡土墙纵断面图

Fig. 1 Longitudinal cross-section diagram of reinforced gabion retaining wall

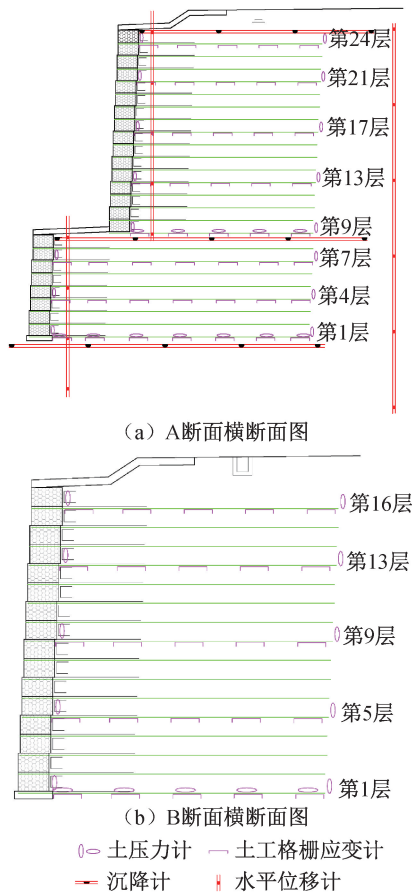


图2 A、B断面监测元件布置

Fig.2 Layout of monitoring elements for cross-sections A and B



(a) 墙面

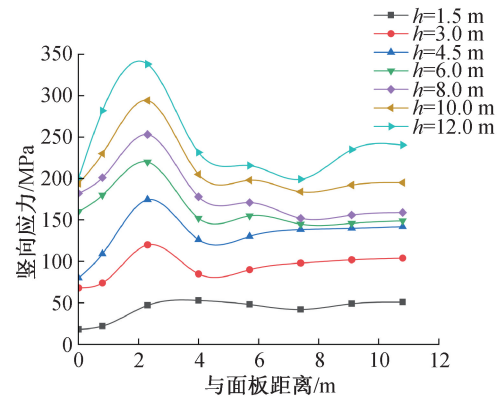


(b) 土工格栅铺设

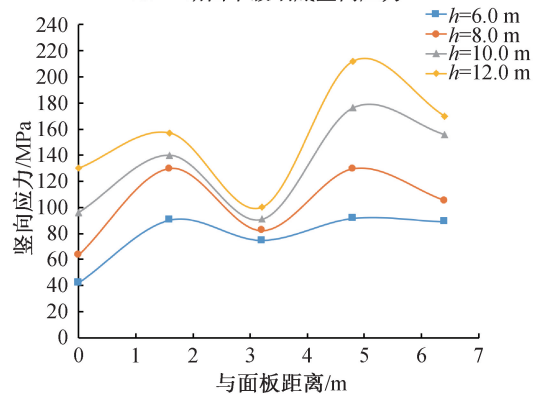
图3 加筋格宾挡土墙现场照片

Fig.3 Photos of reinforced gabion retaining wall

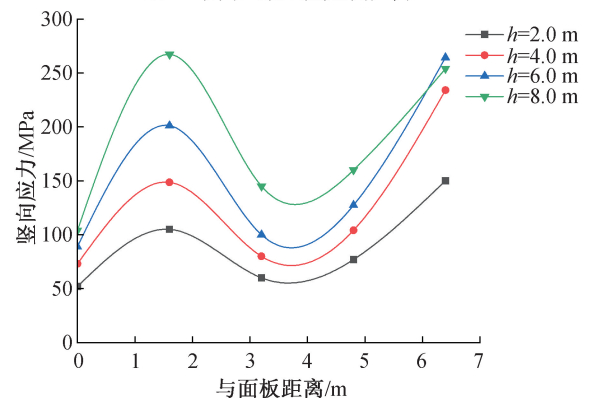
这是因为 A 断面受下级墙体水平位移的影响发生侧向变形,使筋土之间发生错位移动,促使界面摩



(a) A断面下级墙底竖向应力



(b) A断面上级墙底竖向应力



(c) B断面墙底竖向应力

图4 不同填筑高度时各级墙底竖向应力沿水平方向的分布

Fig.4 Distribution of vertical stress along the horizontal direction at the bottom of each level of the retaining wall with the filling progress

擦作用增大,土工格栅对上方土体的承托作用增强,引起填土内部应力重分布,进而降低了竖向应力。

### 2.2 墙背水平土压力

在加筋格宾挡土墙填筑期,A、B断面各层土工格栅的水平土压力随填筑高度的变化规律如图5所示。由图5可以看出,随着加筋挡土墙填筑高度的增加,A、B断面各级墙背水平土压力均持续增大,但增长速率随填筑高度的增加而减小。

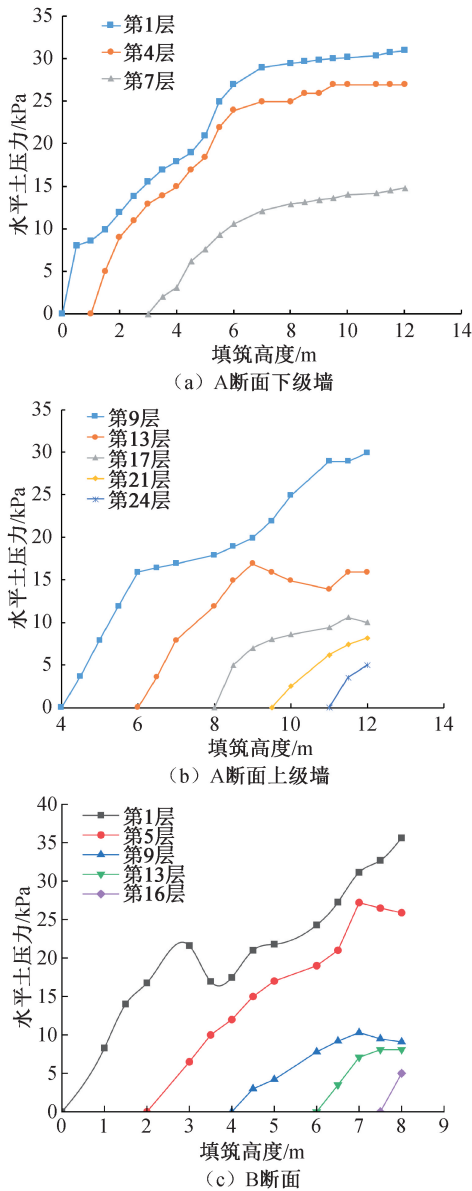


图 5 墙背水平土压力随填筑高度的变化

Fig. 5 Variation of horizontal earth pressure on the back of the wall with filling height

这是因为墙面水平变形和土体内部筋-土相互作用限制了水平土压力的增长。A 断面上级墙墙背水平土压力增长规律与 B 断面相似,但 A 断面水平土压力略低于 B 断面。此差异主要是由台阶卸载作用和 A 断面墙面水平变形共同导致的。

### 2.3 土工格栅应变

土工格栅的变形与墙面变形及墙背水平土压力的变化规律有关,土工格栅的受力情况很大程度上影响着挡土墙的稳定性的。若土工格栅受到的拉力过大,超过其能承受的极限抗拉强度,会导致拉断或连接部位破坏;若土工格栅位于土体稳定区域的有效锚固长度不足,则可能因抗拔力不足而导致挡土墙整体滑动。土工格栅的应变主要发生在填筑期间,因而分析施工阶段各层土工格栅的变形情况非常重要。

土工格栅应变随填筑高度的变化规律见图 6—图 8。土工格栅应变在填筑期间沿铺设方向呈非线性分布,土工格栅应变分布曲线具有明显的峰值,主要有单峰和双峰两种形态,且最大峰值的位置存在差异。A 断面下级墙第 7 层和上级墙第 9 层土工格栅应变曲线呈单峰分布,A 断面下级墙第 1 层、上级墙第 1 层和 B 断面第 1、9 层土工格栅应变曲线呈双峰分布。单峰分布的峰值点位于距墙面 2 m 处,是加筋体内潜在破裂面所在的位置。双峰分布的第 1 个峰值点位于墙面附近,第 2 个峰值点位于土工格栅中后部。

A 断面上级墙和 B 断面第 1 层土工格栅应变的分布沿其铺设方向存在差异。这与墙面变形及墙背水平土压力随填筑高度变化有关,二者的共同作用使土工格栅产生的应变不同。

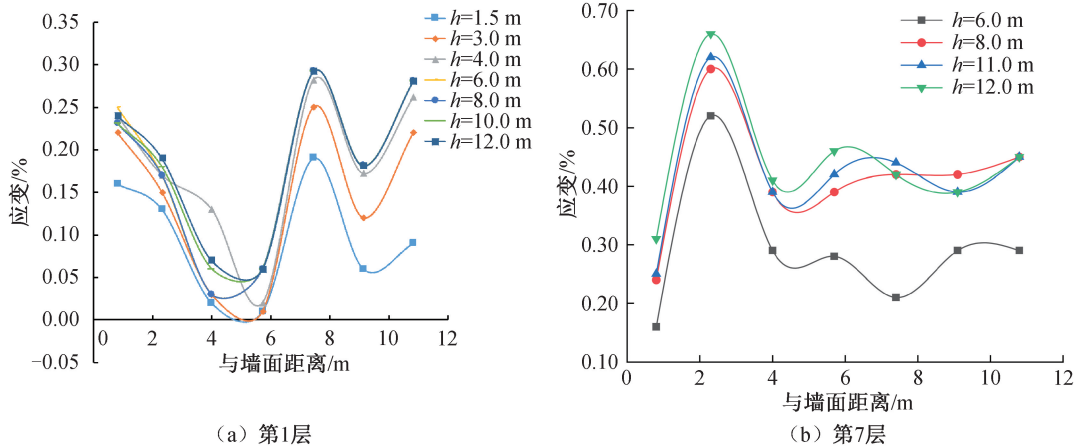


图 6 A 断面下级墙土工格栅应变随填筑高度的变化

Fig. 6 Strain variation of geogrids in lower wall of section A with filling height



混凝土结构材料参数、土工格栅与格宾石笼材料参数分别见表2、表3和表4。

通过 Interface 接触面单元模拟墙面与墙后填料之间的界面,接触面的法向刚度  $k_n$  和切向刚度  $k_s$  取墙后填料等效刚度的10倍,接触面相关参数(黏聚力、摩擦角等)取墙后填料参数的0.5倍。 $k_n$  和  $k_s$  按式(1)进行计算。

$$k_n = k_s = \max \left[ \frac{\left( K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right] \times 10 \quad (1)$$

式中:  $K$  为墙后填料体积模量, MPa;  $G$  为墙后填料剪切模量, MPa;  $\Delta z_{\min}$  为墙面与墙后填料接触面法线方向上连接区域最小网格尺寸, m。

A 断面下级墙底沉降实测值与模拟值的对比结果如图10所示,由图10可以看出,两者的分布规律基本一致,验证了本构模型参数选取的合理性。但是实测值整体略高于模拟值,这主要是由于实际工程环境复杂,影响因素多,而数值模拟考虑的因素较为简单,难以完全涵盖这些复杂条件,因此造成一定的计算偏差。

### 3.2 墙顶沉降

在高速铁路建设过程中,工后路堤顶面的沉降量是主要的变形控制指标之一。模拟得到的A、

B 断面墙顶工后沉降曲线如图11所示。随着计算步骤的增加,墙顶工后土体开始固结沉降,孔隙率逐渐减小,土体密实度不断增大,土体固结程度随之提高,进而使沉降量不断增加,并很快趋于稳定。A 断面墙顶最终沉降量为11.38 mm,约为墙高的0.09%; B 断面墙顶最终沉降量为8.04 mm,约为墙高的0.1%。A、B 断面墙顶差异沉降为4.24 mm。挡墙顶沉降量远小于《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)<sup>[21]</sup>规定的容许值。

### 3.3 墙面水平位移

加筋格宾挡土墙A、B断面的墙面工后水平位移如图12所示。由于格宾面板整体刚度大、抵抗弯曲变形能力强,墙面水平位移均较小,整体呈现外倾趋势。随着时间的推移,墙面水平位移逐渐增大,增长速率递减,表明挡土墙工后变形逐渐趋于稳定。A 断面上级墙最大水平位移为5.42 mm,占本级墙高的0.068%,下级墙最大水平位移为2.55 mm,占本级墙高的0.059%; B 断面墙最大水平位移为5.69 mm,占墙高的0.071%。由图12及水平位移数值可知,双级加筋格宾挡土墙上级墙和单级加筋格宾挡土墙墙面水平变形较为一致,由此可知,加筋格宾挡土墙具有较高的稳定性,下级墙与具有侧限应力状态的地基类似。

表2 填料与地基土材料参数

Tab. 2 Parameters of fill and subsoil

材料类型	本构模型	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )
强风化砂岩夹泥岩	莫尔-库仑模型	154	102	35.0	5.0	20
弱风化砂岩夹泥岩	莫尔-库仑模型	278	183	40.0	5.0	20
挡墙填料	莫尔-库仑模型	50	23	30.4	10.3	19
格宾石笼填充料	莫尔-库仑模型	333	154	35.0	0.0	26

表3 混凝土材料参数

Tab. 3 Parameters of concrete materials

材料类型	本构模型	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )
桩板墙 C35 钢筋混凝土	线弹性模型	1.75×10 <sup>4</sup>	1.35×10 <sup>4</sup>	24.0
封闭层 C25 混凝土	线弹性模型	1.56×10 <sup>4</sup>	1.17×10 <sup>4</sup>	23.5

表4 土工格栅与格宾石笼材料参数

Tab. 4 Parameters of geogrid and gabion

材料类型	本构模型	拉伸模量/ (kN·m <sup>-1</sup> )	泊松比	耦合弹簧 黏聚力/kPa	耦合弹簧 摩擦角/(°)	厚度/ mm
B 型土工格栅	线弹性模型	1 590	0.2	0.0	10.0	1
C 型土工格栅	线弹性模型	2 120	0.2	0.0	8.0	1
格宾石笼	线弹性模型	1 400	0.3	10.9	25.3	5

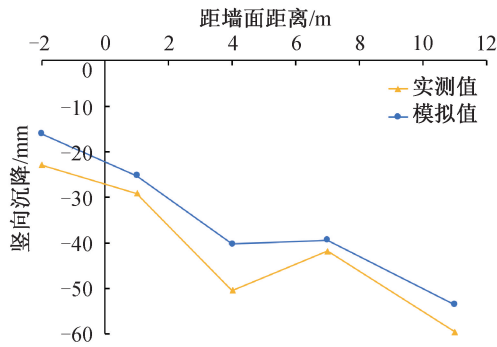


图 10 A 断面下级墙底沉降对比图

Fig. 10 Comparison of settlement at the base of the lower wall in section A

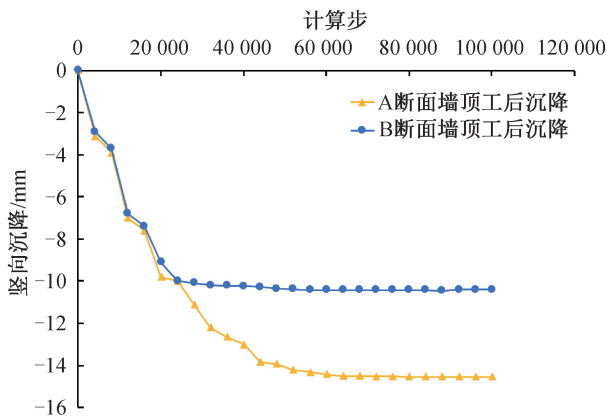


图 11 墙顶工后沉降

Fig. 11 Settlement of the retaining wall top after construction

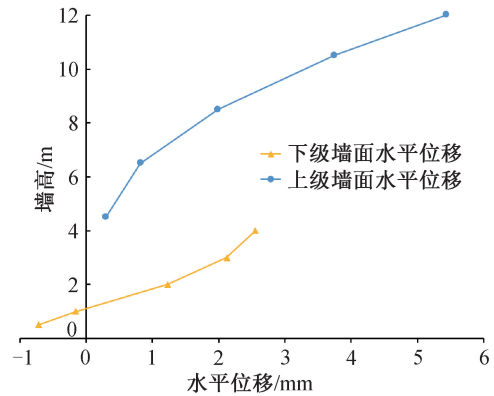
## 4 结论

1) 填筑期间,双级和单级加筋格宾挡土墙各级墙底处竖向应力沿水平方向呈非线性分布,且双级加筋格宾挡土墙上级墙和单级加筋格宾挡土墙墙底竖向应力分布规律基本一致,但双级加筋格宾挡土墙上级墙底竖向应力小于单级加筋格宾挡土墙。

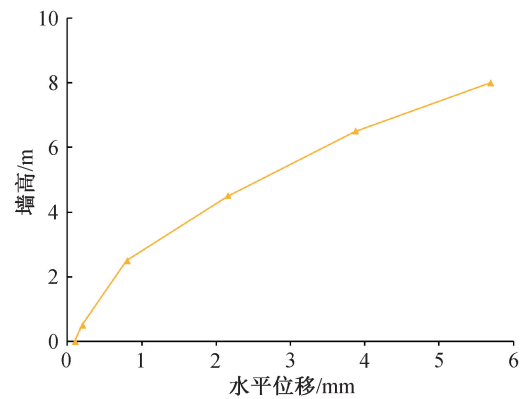
2) 随着填筑高度的增加,双级和单级加筋格宾挡土墙墙背水平土压力有所增大,但增长速率逐渐减小;双级加筋格宾挡土墙上级墙墙背水平土压力小于单级加筋格宾挡土墙。

3) 双级和单级加筋格宾挡土墙各层土工格栅应变随填筑高度的增加而增大,沿其铺设方向呈非线性分布,应变分布曲线主要有单峰分布和双峰分布两种形式。单峰分布中,峰值点距墙面背部 2 m;双峰分布中,第 1 个峰值点位于墙面背部附近,第 2 个峰值点位于土工格栅中后部。

4) 工后,双级和单级加筋格宾挡土墙墙顶差异沉降很小,仅为 4.24 mm。



(a) A断面



(b) B断面

图 12 墙面工后水平位移

Fig. 12 Horizontal displacement of the wall face after construction

5) 工后,双级和单级加筋格宾挡土墙墙面均呈外倾水平变形形式,双级加筋格宾挡土墙上级墙、下级墙以及单级加筋格宾挡土墙墙面最大水平位移分别为 5.42、2.55、5.69 mm,分别占墙高的 0.068%、0.059%及 0.071%,双级加筋格宾挡土墙上级墙与单级加筋格宾挡土墙墙面水平变形较为一致。

## 参考文献:

- [1] 吴幼泽. 装配式钢筋混凝土加筋土挡墙的设计与施工[J]. 林业勘察设计, 1982(2): 43-54.  
WU Y Z. Design and construction of prefabricated reinforced concrete reinforced soil retaining walls[J]. Forestry Prospect and Design, 1982(2): 43-54.
- [2] 张琬, 陈建峰, 孙蕊, 等. 考虑墙趾阻力的加筋土挡墙的数值分析与筋材拉力计算方法[J]. 力学季刊, 2023, 44(4): 956-966.  
ZHANG W, CHEN J F, SUN R, et al. Numerical analysis and calculation method for reinforcement loads in reinforced soil retaining walls considering toe resistance[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2023, 44(4): 956-966.

- [3] 张飞, 贾世林, 朱玉明, 等. 台阶式加筋挡墙稳定所需加筋力计算方法与影响规律[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3079-3089.  
ZHANG F, JIA S L, ZHU Y M, et al. Required strength of geosynthetics in reinforced multi-tiered wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 3079-3089.
- [4] 杨广庆, 牛笑笛, 周诗广, 等. 复合式整体刚性面板加筋土挡墙结构行为试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1794-1802.  
YANG G Q, NIU X D, ZHOU S G, et al. Experimental study on structural behavior of reinforced retaining wall with composite full-height rigid facing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(7): 1794-1802.
- [5] 刘光鹏, 肖宏, 杨松林, 等. 高速铁路加筋土挡墙破裂面特征的模型试验及数值模拟[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(6): 34-43.  
LIU G P, XIAO H, YANG S L, et al. Model test and numerical simulation of the failure surface characteristics in high-speed railway reinforced earth retaining wall[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(6): 34-43.
- [6] 赵晓彦, 范宇飞, 刘亮, 等. 铁路台阶式加筋土挡墙潜在破裂面特征模型试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2108-2118.  
ZHAO X Y, FAN Y F, LIU L, et al. Model test on potential failure surface characteristics of railway stepped reinforced soil retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2108-2118.
- [7] 王维, 黄向京, 许桂林, 等. 加筋格宾挡墙破裂面及承载力特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(6): 43-49.  
WANG W, HUANG X J, XU G L, et al. Study on the failure surface and the bearing capacity character of reinforced gabion retaining wall[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(6): 43-49.
- [8] 黄世斌, 侯森磊, 王家全, 等. 台阶宽度与级数对台阶式加筋土挡墙承载特性的影响分析[J]. 公路, 2022, 67(12): 119-126.  
HUANG S B, HOU S L, WANG J Q, et al. Analysis of the influence of step width and number on the bearing capacity of stepped reinforced soil retaining walls[J]. Highway, 2022, 67(12): 119-126.
- [9] 高珊, 肖成志, 丁鲁强, 等. 台阶式加筋土挡墙面板水平位移与稳定性关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 235-245.  
GAO S, XIAO C Z, DING L Q, et al. Correlation between lateral facing deformation and factor of safety for tiered GRS walls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 235-245.
- [10] YOO C, JANG Y S, PARK I J. Internal stability of geosynthetic-reinforced soil walls in tiered configuration[J]. Geosynthetics International, 2011, 18(2): 74-83.
- [11] XU P, HATAMI K, BAO J J, et al. Bearing capacity and failure mechanisms of two-tiered reinforced soil retaining walls under footing load[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 128: 103833.
- [12] 杨广庆, 刘伟超, 刘华北, 等. 台阶式加筋土挡墙水平位移模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3652-3658.  
YANG G Q, LIU W C, LIU H B, et al. Horizontal displacement modes of tiered geosynthetic reinforced soil retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3652-3658.
- [13] 杨广庆, 刘华北, 吴连海, 等. 台阶宽度对加筋土挡墙垂直应力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 209-216.  
YANG G Q, LIU H B, WU L H, et al. Effect of offset distance on vertical stresses in geosynthetics reinforced soil retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 209-216.
- [14] 牛笑笛, 杨广庆, 周诗广, 等. 铁路新型整体刚性面板加筋土挡墙现场试验研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(5): 1-10.  
NIU X D, YANG G Q, ZHOU S G, et al. Field test study on a new type of reinforced retaining wall with full-height rigid facing for railway[J]. China Railway Science, 2020, 41(5): 1-10.
- [15] 葛允雷, 张帅, 杨果林, 等. 退台式格宾加筋挡土墙现场测试及数值模拟分析[J]. 公路工程, 2018, 43(2): 72-78.  
GE Y L, ZHANG S, YANG G L, et al. Analysis between numerical and field tests of set-back gabion box reinforced retaining wall[J]. Highway Engineering, 2018, 43(2): 72-78.
- [16] 林宇亮, 杨果林, 李昀, 等. 加筋格宾挡墙在重复荷载作用下动变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 4027-4033.  
LIN Y L, YANG G L, LI Y, et al. Test study on dynamic deformation behavior of reinforced gabion retaining wall under cyclic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 4027-4033.
- [17] 林宇亮, 杨果林, 李昀, 等. 绿色加筋格宾挡墙工程特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3113-3119.  
LIN Y L, YANG G L, LI Y, et al. Test study of engineering properties of green reinforced gabion retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3113-3119.

- and rainfall infiltration on the water and salt migration of earthen sites during freeze-thaw process [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2023, 17(4): 573-584.
- [16] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2010[S]. 北京:中国铁道出版社,2011. Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for soil test of railway engineering: TB 10102—2010[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [17] 李静,白利舸,刘辉,等. 季节性冻土冻融周期多场地球物理探测与监测[J]. *地球物理学报*, 2025, 68(8): 3011-3024. LI J, BAI L G, LIU H, et al. Investigating and monitoring seasonal frozen soil freeze-thaw cycles with multi-geophysical data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2025, 68(8): 3011-3024.
- [18] 申艳军,魏欣,张蕾,等. 高寒山地区冰碛土水热迁移规律及聚冰冻胀孕灾机制研究进展[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(5): 1450-1465. SHEN Y J, WEI X, ZHANG L, et al. Hydrothermal migration of moraine soil and the mechanism of ice accumulation and frost swelling in alpine-cold mountain region [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(5): 1450-1465.
- [19] 刘爽,刘汉龙,肖杨. 毛细-吸附作用下考虑温度和孔隙比影响的土-水特征曲线研究[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(4): 877-886. LIU S, LIU H L, XIAO Y. Soil-water characteristic curve considering temperature and void ratio under capillarity and adsorption [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(4): 877-886.
- [20] RHOADES J D, CHANDUVI F, LESCH S. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements [J]. *FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO)*, 1999: 1-4.
- [21] 张莎莎,钱宇,王利鑫,等. 砾质硫酸盐渍土道基水盐迁移及变形特征[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(9): 48-58. ZHANG S S, QIAN Y, WANG L X, et al. Water and salt migration and deformation characteristics of gravelly sulfate-saline soil embankment [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2025, 52(9): 48-58. (责任编辑 张爱丽)
- 
- (上接第 37 页)
- [18] 刘泽,杨果林,申超,等. 绿色加筋格宾挡墙现场试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(2): 709-716. LIU Z, YANG G L, SHEN C, et al. Reinforced earth retaining wall of green gabion by field test [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(2): 709-716.
- [19] 杨果林,申权,徐健楠. 高速公路绿色加筋格宾挡墙数值分析及现场试验[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(6): 18-23. YANG G L, SHEN Q, XU J N. Site test and numerical analysis on reinforced earth retaining wall with green gabion on expressway [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(6): 18-23.
- [20] 李浩然,宋飞,吴博,等. 秦巴山区某填方边坡加筋土挡墙破坏机理研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(1): 81-87. LI H R, SONG F, WU B, et al. Study on failure mechanism of reinforced earth retaining wall of a fill slope in Qinling-Bashan mountain area [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2023, 40(1): 81-87.
- [21] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014 [S]. 北京:中国铁道出版社,2014. National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014. (责任编辑 张爱丽)