

DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0879

# 不同荷载作用下折角式加筋土挡墙 应力-应变特征模型试验研究

裴媛媛<sup>1,2</sup>, 龙建辉<sup>1</sup>, 郭师苾<sup>1,3</sup>, 安成纪<sup>1,4</sup>, 翁杭雨<sup>1</sup>, 张吉宁<sup>5</sup>

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省第三地质工程勘察院有限公司, 山西 榆次 030620;  
3. 山西省交通新技术发展有限公司, 山西 太原 030006; 4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;  
5. 山西冶金岩土工程勘察有限公司, 山西 太原 030000)

**摘要:** 不同于线性的路基填土挡墙, 黄土山区因新建场地产生了为数不少的以折角形式出现的加筋土挡墙, 而挡墙上部往往因修建工业厂房(矩形荷载)或道路(条形荷载), 折角处更容易产生变形破坏, 影响其使用寿命。为了研究矩形荷载和条形荷载对折角式加筋土挡墙拐角部位的作用效应, 建立折角直立式加筋土挡墙的物理模型, 探究墙内土压力分布和墙体位移的变形规律。试验结果表明: (1) 在两种荷载作用下, 挡墙拐角-直线过渡段的土压力分布差异显著, 在矩形荷载作用下, 最大垂直土压力出现在拐角部位, 并且从拐角向两端逐渐降低, 而在条形荷载作用下, 整体没有出现显著波动, 仅在挡墙顶部沿墙背表现出逐渐减小的趋势; (2) 加筋土挡墙在不同荷载作用下挡墙折角段的水平变形均呈现鼓肚状, 竖向变形均随荷载增加至 80 kPa 后增长放缓, 宏观变形裂缝均表现为对数螺旋形且沿拐角角平分线呈对称分布。该研究成果可为类似折角结构的加筋土挡墙优化设计提供理论依据。

**关键词:** 加筋土挡墙; 拐角部位; 荷载; 模型试验; 黄土

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 02-539-12

## Model test study on stress-strain characteristics of angled reinforced soil retaining wall under different loads

PEI Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, LONG Jian-hui<sup>1</sup>, GUO Shi-yi<sup>1,3</sup>, AN Cheng-ji<sup>1,4</sup>, WENG Hang-yu<sup>1</sup>, ZHANG Ji-ning<sup>5</sup>

(1. School of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 2. Shanxi Provincial Third Institute of Geological Engineering Investigation, Yuci, Shanxi 030620, China; 3. Shanxi Transportation New Technology Development Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030006, China;  
4. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China;  
5. Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Survey Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030000, China)

**Abstract:** In the loess mountainous area, many reinforced soil retaining walls are constructed with corners, unlike linear embankment fill retaining walls, due to new site developments. The upper sections of these walls are more prone to deformation and damage at the corners due to industrial plant (rectangular loads) or road (strip loads) construction, affecting their service life. To investigate the effects of rectangular and strip load types on the corners of folded-angle reinforced earth retaining walls, a physical model with both folded and vertical angles was established to explore soil pressure distribution and wall displacement deformation. The experimental results indicate: (1) A significant difference exists in soil pressure distribution in the transition section between the corner and the straight line of the retaining wall under the two load types. Under rectangular loads, maximum vertical soil pressure occurs at the corner, decreasing towards both ends. In contrast, the retaining wall under strip loads shows no significant fluctuation, only a gradual decrease along the top back of the wall. (2) The horizontal deformation of the reinforced soil retaining wall at the corner section under different loads shows a bulging shape, and the vertical deformation slows down as the load increases to 80 kPa. The macroscopic deformation cracks show a logarithmic spiral shape and are symmetrically distributed along the bisector of the corner angle. The research findings provide a theoretical basis for optimizing the design of reinforced soil retaining walls with similar folded angle structures.

收稿日期: 2024-07-15

录用日期: 2024-10-08

基金项目: 山西省自然科学基金面上项目 (No. 202103021224112)。

This work was supported by the General Project of Shanxi Provincial Natural Science Foundation (202103021224112).

第一作者简介: 裴媛媛, 女, 1999 年生, 硕士, 主要从事地质灾害、岩土工程方面的研究。E-mail: peiyuanyuan1@163.com

通讯作者: 龙建辉, 男, 1972 年生, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害方面的教学与研究。E-mail: longjianhui@163.com

**Keywords:** reinforced soil retaining wall; corner parts; loads; model test; loess

## 1 引言

黄土高原内部山峦叠嶂,丘陵起伏,沟壑纵横。黄土高原区域内资源丰富,随着西部大开发和西部崛起,其开发强度也日趋提高,工程建设中产生了大量的工程边坡。其中就出现了为数甚多的加筋土填方边坡。加筋土挡墙作为边坡治理的主要手段之一,具有施工简单、蠕变变形小、耐久性强等特点,被广泛应用于公路、铁路等。为此国内外众多学者对加筋土挡墙展开了大量研究,杨正权<sup>[1]</sup>利用 FLAC 2D 程序,采用强度折减法,进行了一系列加筋土挡墙稳定性分析,研究了加筋土挡墙的失稳模式和破坏机制,在理论上对加筋土挡墙的设计和施工提供了一些帮助。杨广庆等<sup>[2-4]</sup>对不同面板形式加筋土挡墙的结构特性进行了模型试验研究。周世良等<sup>[5]</sup>对格栅加筋土挡墙和台阶式加筋土挡墙的结构特性进行了模型试验研究。Yoo 等<sup>[6]</sup>对 5 m 高两级台阶式加筋土挡墙进行了足尺试验和三维有限元分析,得到了不同超载下筋材应变的分布和衰减情况。

而在加筋土挡墙的实际应用过程中,往往因挡墙顶部修建工业厂房或道路,导致挡墙发生变形破坏,影响其使用寿命。国内外学者们深入分析了顶部荷载对挡墙的影响。肖成志等<sup>[7-9]</sup>利用模型试验研究了静荷载和交通循环荷载作用下台阶式加筋土挡墙的力学与变形性能。王贺等<sup>[10-12]</sup>通过室内模型试验研究了墙顶荷载作用下返包式加筋土挡墙和模块面板式加筋土挡墙的受力和变形状态,并了解了其工作机制。Shinde 等<sup>[13]</sup>通过加筋土挡墙在垂直附加条形荷载作用下的室内模型试验得到了墙面变形和拉筋应变的分布情况,并与 PLAXIS 有限元分析进行了对比。王家全<sup>[14]</sup>、屈畅姿<sup>[15]</sup>等也对静、动荷载作用下不同类型的挡墙变形及应力特征进行了研究与分析。

然而在现场施工应用中,由于黄土高原的地形复杂多变,新建工程场地中出现了为数不少的拐角形式填土边坡,因而在修建加筋土挡墙时就会存在大量的拐角段。但就目前的研究而言,众多学者的关注点大多集中于挡墙的直线段,《公路加筋土工程设计规范》(JTJ 015-91)<sup>[16]</sup>也只对挡墙直线段提出要求,鲜少有人对加筋土挡墙拐角部位进行研究。仅刘晓明等<sup>[17]</sup>结合红砂岩地区加筋土挡墙实例分析了加筋土挡墙凸角部位的鼓胀变形原因,认为与一般顺直段相比,凸角区地形、筋带和锚固区受力均更为不利。Lee 等<sup>[18]</sup>采用有限元方法,对挡土墙

直线和弯曲部分的横向挠度、地面和墙壁的沉降等结果进行了分析与比较。龙建辉等<sup>[19-23]</sup>通过建立加筋土挡墙三维数值模型,从理论上研究了不同拐角形式下加筋土挡墙的受力变形特征,随后又通过建立直角直立式和直角台阶式加筋土挡墙物理模型,对其在顶部矩形均布荷载作用下拐角部位发生的应力-应变进行分析与验证,但并未对折角直立式加筋土挡墙进行物理模型试验分析。

本文建立折角直立式加筋土挡墙模型,通过试验研究在顶部矩形荷载和条形荷载作用下挡墙拐角部位的墙内土压力分布和墙体变形规律。以期为类似折角结构的加筋土挡墙优化设计提供理论依据。

## 2 物理模型试验

### 2.1 试验装置

工程实践中单级边坡高度 $\leq 10$  m,本文结合 Li<sup>[22]</sup>、郭师苡<sup>[23]</sup>等的试验研究,按照 1:5 的比例建立加筋土挡墙的物理模型。挡墙模型试验主要由挡墙模型、加载系统、测试系统组成,如图 1 所示。模型箱的外部尺寸为 3 m $\times$ 3 m $\times$ 2 m,挡墙实际建造尺寸为直线段 1.2 m、折角段 1 m,填筑高度为 1.6 m,折角段角度均为 135°。模型箱的底部、顶部以及侧翼均采用工字钢进行焊接固定,确保了焊接点的牢固性,从而满足了模型框架整体稳定性和试验刚度的要求。此外,为了观察挡墙内部土体在受力过程中的变形特性,模型箱两侧壁的工字钢内侧安装了厚度为 0.1 m 的钢化玻璃板,这为试验提供了便利的观测条件。



图 1 物理模型试验现场效果图  
Fig.1 Physical model test site rendering

### 2.2 试验所需材料

试验土样取自某建筑工地的基坑现场,为实际建筑工程所用材料。试验前对取得的土壤进行过筛处理,去除了其中的颗粒石块,以防在后续填筑过程中对试验元器件造成损害。试验过程中,对挡墙

内部土体进行压实，压实度为 0.45。试验前后，分别取出部分土样进行室内土工试验，以测定其密度、黏聚力等物理参数。测得的物理力学参数指标见表 1。

表 1 填土的主要物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical indexes of filling

组别	干密度 $\rho$ /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\phi$ /( $^\circ$ )	含水率 / %	压实度
压实前	1.1	18	23	15.90	0.45
压实后	1.6	24	27	14.76	

土工布作为一种加筋材料，是以丙纶高强丝为原料，经特殊工艺加工而成的长丝机织土工布，具有耐腐蚀、抗拉强度高、延伸率低的特点。土工布的具体物理性质指标见表 2。

表 2 土工布的主要物理性质指标

Table 2 Main physical property indicators of geotextiles

名称	单位面积质量 /( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	厚度 /mm	断裂强度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	撕破强度 /kN	等效口径 /mm
长丝土工布	450	3.1	22	$\geq 0.63$	0.07~0.20

挡墙面板采用 C30 抗裂砂浆手工自制而成，中间砖块呈上凸下凹型，基底砖块呈上凸下平型，顶部砖块呈上平下凹型，用于卡接并固定土工筋带。直线段和折角段连接部位使用自制的三角形砖块，避免面板之间存在较大空隙而影响挡墙整体稳定性。面板与筋带的连接型式见图 2。

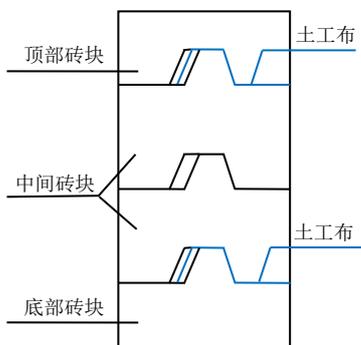


图 2 面板与筋带的连接型式

Fig.2 Connection type between panel and rib

测试元件包括土压力盒、JMZX-3001L 综合测试仪、百分表、千斤顶、户外移动电源。

2.3 模型试验方案

2.3.1 挡墙整体构造

挡墙试验采用分层构造，按照试验方案，依次铺设好土工布和土压力盒。直至整个挡墙结构建造完毕。通过这种逐层施工和测量方法，能够确保试验数据的准确性和挡墙结构的稳定性。

2.3.2 土工布布设方案

挡墙构造分为加筋区和未加筋区，加筋区即在挡墙内部土体中间按图 3 所示铺设土工布即为加筋区，从而增加挡墙的抗变形能力。未加筋区只用土体搭建，未在挡墙内部铺设土工布。通过这种搭建方式，能够清晰地对比分析加筋材料对挡墙内部土压力和挡墙面板变形位移的影响。

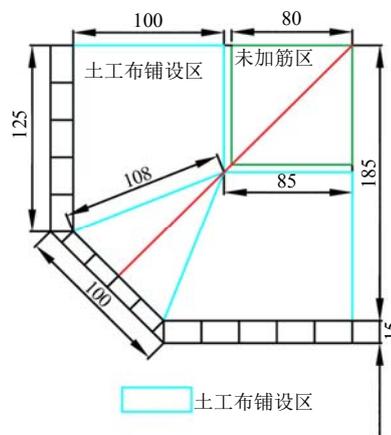


图 3 土工布铺设图 (单位: cm)

Fig.3 Geotextile laying diagram (unit: cm)

2.3.3 土压力盒布设方案

依据模型特点，土压力盒分为水平埋置和垂直埋置两类，分别用来测量垂直土压和水平土压，如图 4 所示。由于挡墙墙体是以角平分线为轴线的对称结构，因此对仪器进行单侧布设，在另一侧布设验证仪器用以验证数据的准确性和可靠性。根据试验方案，须在一侧的水平位置、垂直位置以及拐角平分线位置等距布设土压力盒用以测量墙体土压力值。

2.3.4 百分表位移计布设方案

为了监测挡墙的水平变形，共设置了两列百分表位移计，它们平行布置于挡墙的折角段角平分线以及靠近折角段的直线段，每列布置 5 个（如图 1 所示）。同时，为了观测挡墙的竖向变形，在顶部传压板上按照对称原则布置了 3 个百分表位移计，具体见图 5 中不同荷载下的位移百分表摆放。需要特别指出的是，百分表的磁性表座被吸附在自制的百分表支架上，而这个支架独立固定于模型之外。

这样的设计可以有效避免模型箱在荷载作用下产生变形,进而影响测量结果。通过这种方式,确保了所测得数据的真实性和可靠性。

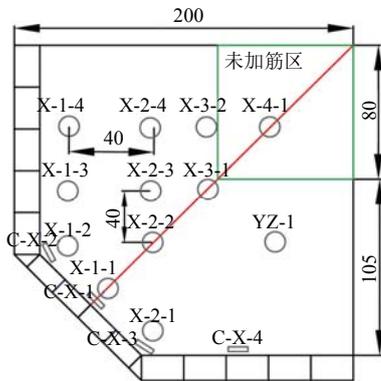
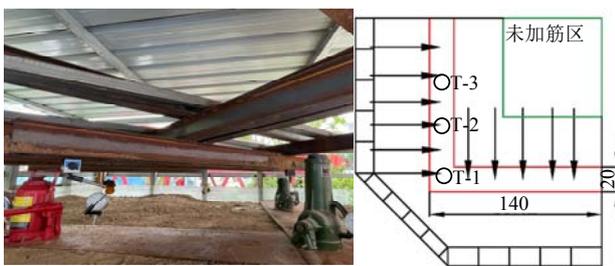


图4 土压力盒布设图(单位: cm)

Fig.4 Layout diagram of soil pressure boxes (unit: cm)



(a) 矩形荷载



(b) 条形荷载

图5 荷载分布情况示意图(单位: cm)

Fig.5 Schematic diagram of load distribution (unit: cm)

## 2.4 模型试验搭建与加载

### 2.4.1 挡墙搭建

首先在模型底部铺设一层 0.1 m 厚的填料土,以此作为基底。随后在其上方铺设预先裁剪好的土工布,继而填埋并夯实 0.15 m 厚的填料土。在此基础上,在预定位置挖坑并埋设土压力盒,并用细砂对土压力盒进行保护,以便准确测量基底土压力。完成上述步骤后,对土压力盒进行调零操作,并继续填埋夯 0.15 m 厚的填料土层。之后,对土压力盒

进行测量。接着,再次铺设一层土工布,并重复填埋夯实 0.15 m 填料土的步骤,并测量土压力盒数据。此过程循环进行,直至整个挡墙结构建造完毕。

### 2.4.2 施加荷载

完成模型搭建以后,静置 7 d,以使得土体与土工布以及土压力盒之间达到充分耦合。耦合完成后,对土压力盒进行加载前的最终测量并做记录。在确认各测量仪器的初始读数已经记录完毕后,开始正式的加压过程。这一过程是通过螺旋千斤顶在挡墙顶部依次施加矩形荷载和条形荷载来实现的,荷载的具体施加范围和面积见图 5。两个试验加压过程分为 12 个阶段,每个阶段增加 10 kPa 的荷载,即从 10 kPa (6.4 kN) 开始,逐步增加至 20 kPa (12.8 kN) 和 30 kPa (19.2 kN),直至 120 kPa (76.8 kN)。在每一阶段的加压后,每隔 1 h 记录 1 次各元件的读数。当连续两次记录的数据差异为 0 时,即土体已经稳定,随后进行下一阶段的加载。在整个过程中,观察并记录墙体的变形情况。

## 3 挡墙土压力分布

### 3.1 挡墙水平土压力分布

图 6(a)为矩形荷载作用下加筋土挡墙水平土压力沿墙高的变化规律,图 6(b)为条形荷载作用下相应的变化规律。通过对比图 6(a)、6(b)可以发现,当挡墙承受的荷载在 0~80 kPa 范围内时,随着墙高的增加,水平土压力值逐渐减小;当荷载水平介于 80~120 kPa 之间时,水平土压力呈现出先减小后增大的趋势。两种荷载作用的差异在于矩形荷载作用下顶部水平土压力超过底部,而条形荷载作用下情况则相反。

观察挡墙底部发现,加载前后水平土压力的变化并不显著。这主要是由于该区域的水平土压力主要受到土体自重应力的控制,同时,由于土工布层层限制的作用,该区域受外部荷载的影响较小。对于挡墙顶部,水平土压力则表现出较明显的发散趋势,说明该区域对荷载响应敏感。此外,挡墙中部位置的水平土压力值处于最小值,这可能是由于加筋效应和墙面板水平位移的综合影响。加筋材料的存在改善了土体的力学性能,而墙面板的水平位移可能导致土压力的重新分布,两者共同作用导致中部土压力的降低。

因此,在加筋土挡墙的实际设计中,根据实际荷载特性调整筋材布局,并考虑采用具有适宜刚度和变形能力的墙面板,确保顶部和底部的土压力分布更加合理。

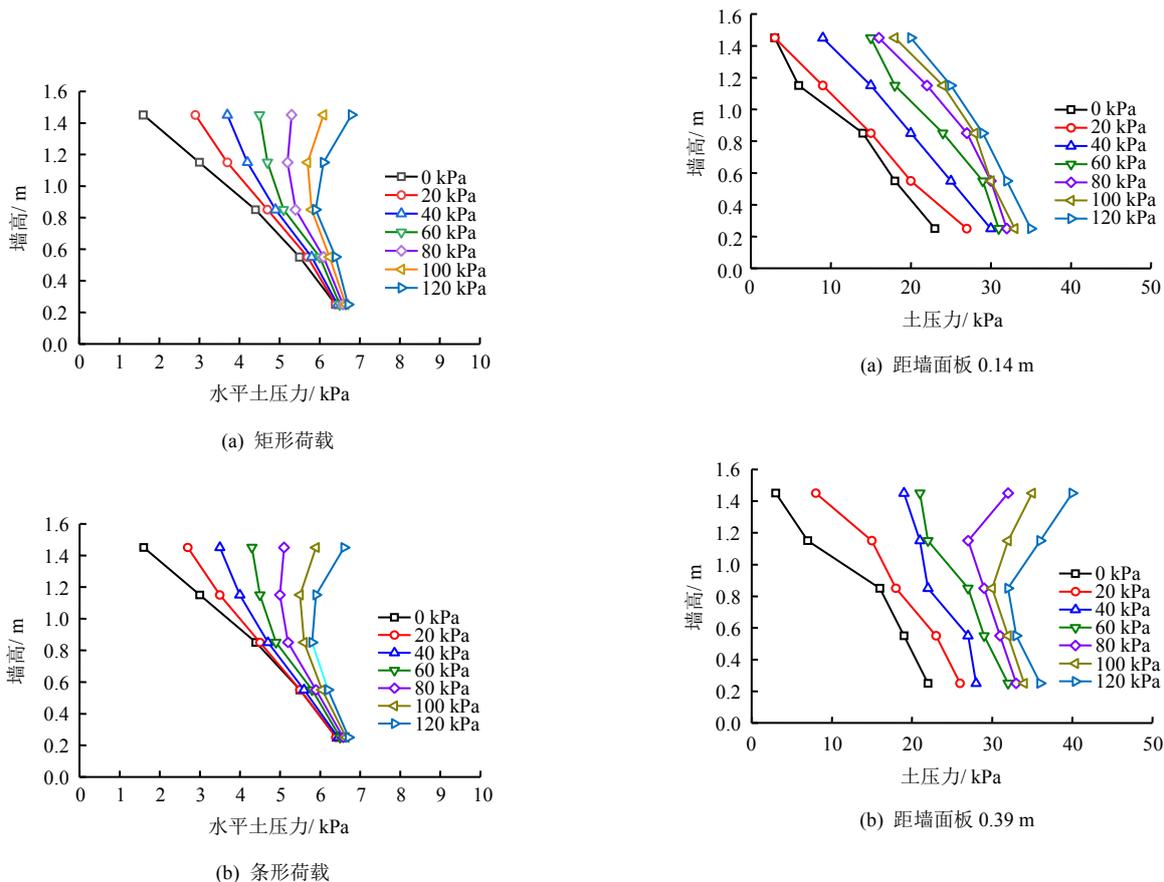


图 6 挡墙水平土压力变化规律

Fig.6 Variation of horizontal earth pressure on retaining wall

### 3.2 挡墙折角段角平分线垂直土压力分布

图 7 为挡墙折角段角平分线上的土压力盒分布示意图。图 8 为矩形荷载作用下加筋土挡墙折角段角平分线上距墙面板不同距离处的垂直土压力沿墙高的变化规律。由图可知，在距墙面板 0.14 m 的位置，垂直土压力总体表现出随墙高增加而减小的趋势

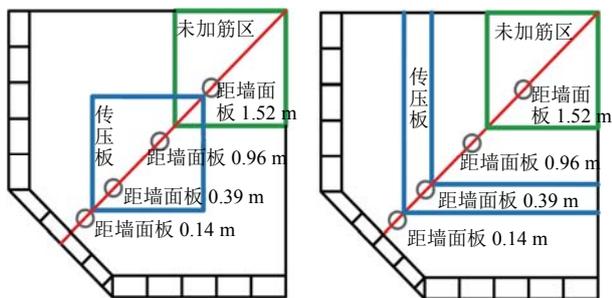


图 7 挡墙折角段角平分线上土压力盒示意图

Fig.7 Schematic diagram of earth pressure boxes on angle bisection line of corner section of retaining wall

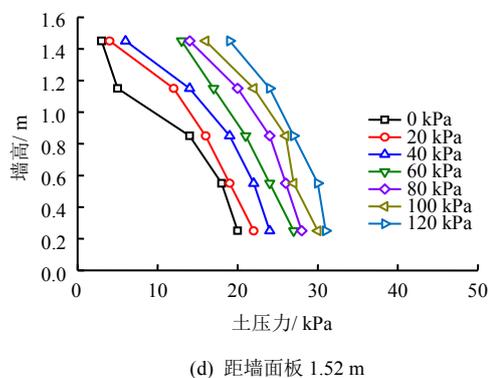


图 8 矩形荷载下挡墙距墙面板不同位置的垂直土压力  
Fig.8 Vertical soil pressure at different positions on retaining wall away from wall panel under rectangular loads

势,即上小下大的分布特征。这主要是因为该位置距荷载作用区较远,土体自重应力对挡墙的影响超过了外部荷载的影响。在距墙面板 0.39 m 的位置,可以发现挡墙顶部在荷载影响下垂直土压力呈发散状态,表明该剖面处上部结构受到荷载的显著影响。由于筋材的支撑作用,挡墙下部的垂直土压力受荷载影响较小。在距墙面板 0.96 m 的位置,挡墙上部的垂直土压力发散现象更为显著,且相较于 0.39 m 处的相同高度位置,土压力值有所增大。这一变化说明该区域处于加筋末端,筋材的限制作用对垂直土压力的分布有显著影响。在距墙面板 1.52 m 的位置,垂直土压力再次呈现出上小下大的分布趋势。这一现象是由于该位置位于未加固的素填土区,不受土工布网兜效应的影响,并且相对远离荷载施加点,因此土压力的分布主要受土体自重应力的控制。

试验结果表明,除距墙面板 0.96 m 外,条形荷载作用下的其他位置的垂直土压力变化与矩形荷载作用下的情况相似,因此本文对其他位置不进行详细比较。图 9 为条形荷载作用下加筋土挡墙拐角平分线上距墙面板 0.96 m 处的垂直土压力沿墙高的变化规律。在距离墙面板 0.96 m 处,条形荷载作用下垂直土压力呈现上小下大的趋势。特别是在挡墙上部,土压力值的变化幅度较为显著。这一现象可能与该测点相对远离荷载施加区域有关。而在挡墙中下部,垂直土压力的变化较小,这可能是由于土工布形成的网兜效应限制了土压力的变化,从而在一定程度上均化了垂直土压力的分布。

图 10(a)为矩形荷载下墙高 1.15 m 处的垂直土压力沿角平分线方向的变化规律。由图可知,墙体内部的最大垂直土压力出现在加载点正下方(距墙面板 0.96 m 的位置),向两侧逐渐减小。这种现象可能与顶部荷载作用导致的墙面水平位移有关,该位移使得靠近墙面板一侧的垂直土压力得到释放。而在未加筋区,垂直土压力的减小可能是由于缺乏土工布的限制作用所致。图 10(b)为条形荷载作用下相应的变化规律。由图可知,与矩形荷载作用相比,条形荷载作用下垂直土压力变化趋势相似,但最大垂直土压力出现在距墙面板 0.39 m 的位置,这是因为该位置处于条形荷载正下方,直接承受了最大的荷载作用。

### 3.3 挡墙折角-直线段垂直土压力分布

图 11 为挡墙折角-直线段上的土压力盒分布示意图。图 12 为矩形荷载下加筋土挡墙拐角-直线过渡段距地基不同高度的垂直土压力变化规律。

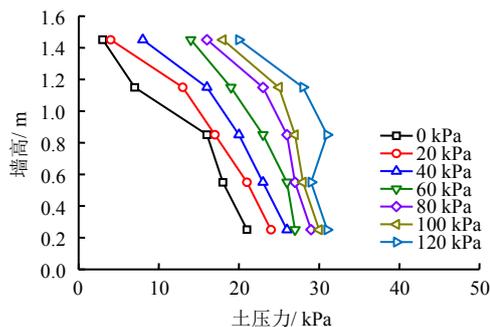
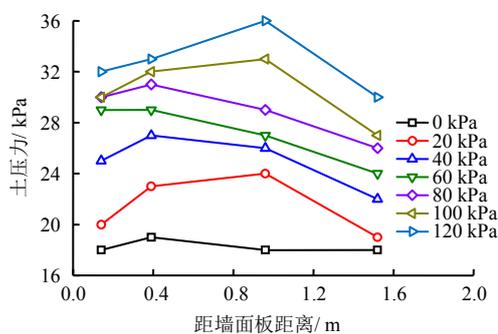
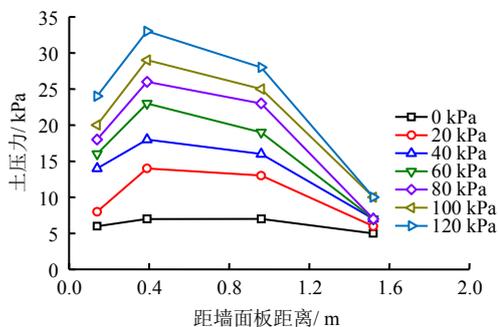


图 9 条形荷载下挡墙距墙面板 0.96 m 处的垂直土压力  
Fig.9 Vertical soil pressure on retaining wall at a distance of 0.96 m from wall panel under strip loads



(a) 矩形荷载



(b) 条形荷载

图 10 墙高 1.15 m 处垂直土压力变化规律  
Fig.10 Variation of vertical soil pressure at wall height of 1.15 m

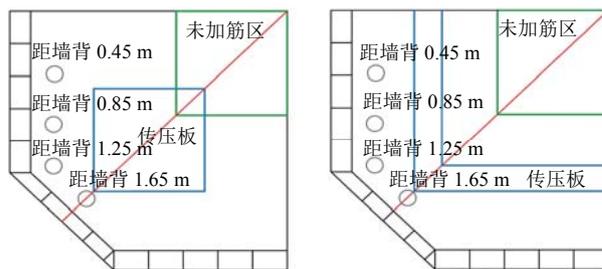
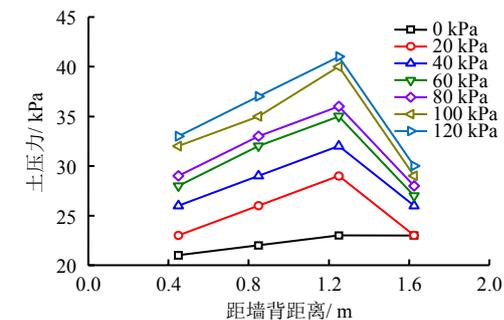
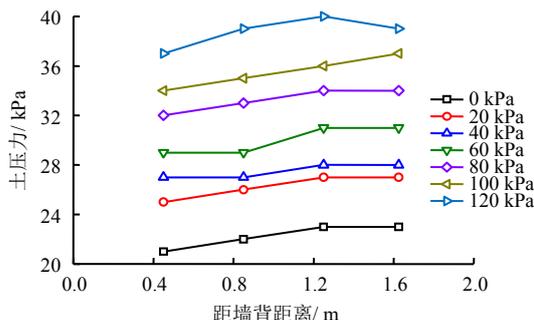


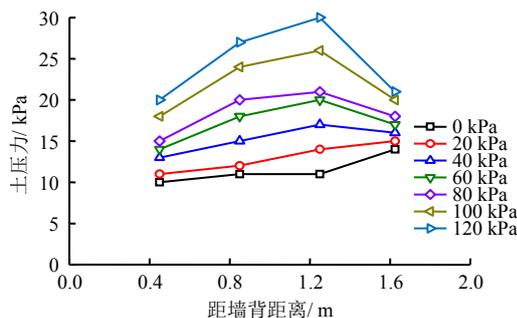
图 11 挡墙折角-直线段土压力盒示意图  
Fig.11 Schematic diagram of earth pressure boxes in the angle of retaining wall and straight line section



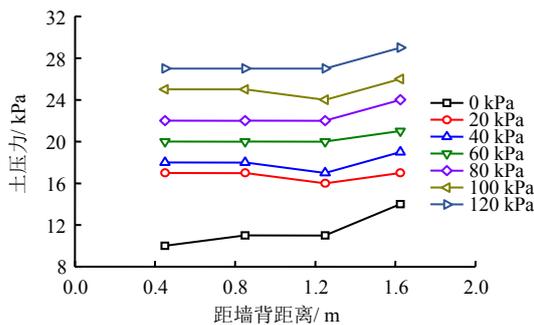
(a) 墙高 0.25 m



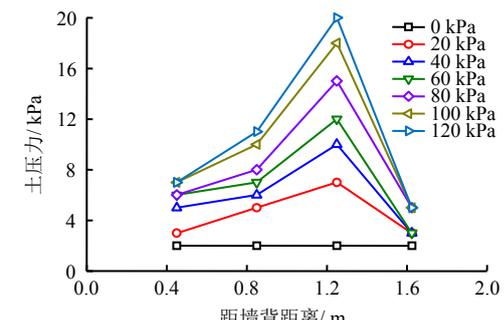
(a) 墙高 0.25 m



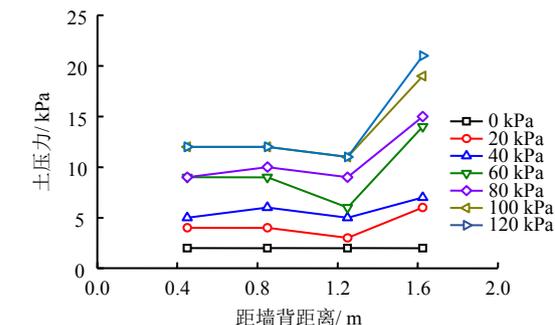
(b) 墙高 0.85 m



(b) 墙高 0.85 m



(c) 墙高 1.45 m



(c) 墙高 1.45 m

图 12 矩形荷载下挡墙拐角-直线段不同高度处垂直土压力变化规律

Fig.12 Variation of vertical soil pressure at different heights of corner-straight section of retaining wall under rectangular loads

由图 12 可知，挡墙的拐角-直线过渡段垂直土压力整体表现出先增大后减小的趋势，其中最大垂直土压力出现在折角段与直线段的连接处，这是因为该位置受到了直线段和折角段的合力。

图 13 为条形荷载作用下加筋土挡墙拐角-直线过渡段距地基不同高度的垂直土压力的变化曲线。由图可知，在挡墙中下部，墙内的垂直土压力沿拐角-直线段基本保持稳定，在挡墙上部，拐角部位的垂直土压力受荷载作用变化明显，且较直线段有显著增加。由此可知，条形荷载对挡墙折角段中心部位的压力比其他部位要大，所以在加筋土挡墙的实际工程应用中，应加强对挡墙拐角部位的构建。

图 13 条形荷载下挡墙拐角-直线段不同高度处垂直土压力变化规律

Fig.13 Variation of vertical soil pressure at different heights of corner-straight section of retaining wall under strip loads

### 4 挡墙变形分析

#### 4.1 挡墙水平变形分析

图 14 为矩形荷载作用下加筋土挡墙面板不同位置的水平变形沿墙高的变化规律。由图 14(a)可知，挡墙折角段的墙面水平变形随着墙面板高度的增加整体表现出先增大后减小的趋势。具体来说，挡墙下部的水平变形增量较小，挡墙中上部的水平变形增量迅速增大，达到最大变形量之后在顶部又急剧减小，形成了明显的“鼓肚”现象。由图 14(b)可知，挡墙直线段的水平变形随着墙面板高度的增加而逐渐增大，整体呈现出“外倾”的现象。对比图 14(a)、14(b)的水平变形量可以发现，挡墙折角段的水平变形最大，并随两侧直线段的延伸而逐渐

减小。在荷载水平方面,当荷载小于 40 kPa 时,挡墙的水平变形增量较缓慢,表明此时挡墙具有较强的抗变形能力。当荷载为 40~100 kPa 时,墙面板的水平变形增量逐渐增大,说明挡墙受荷载的影响变得更加显著。而当荷载为 100~120 kPa 时,墙面板的水平变形增量开始减小,这可能是因为土工筋材与土体逐渐结合成一体,导致挡墙的整体稳定性

和安全性。

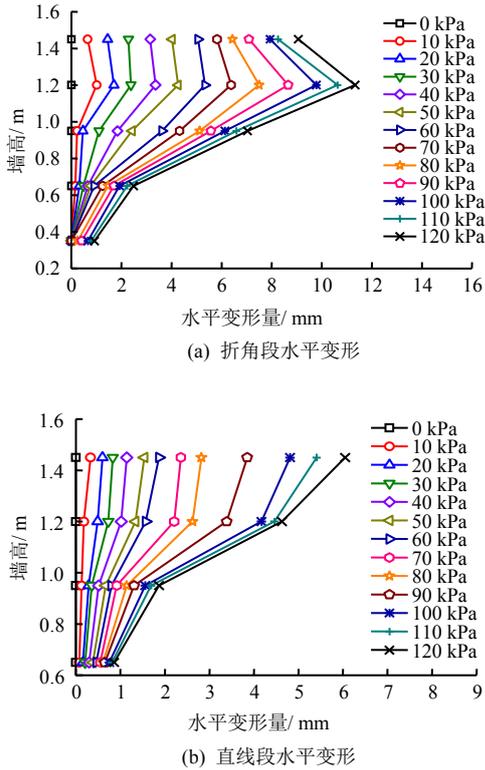


图 14 矩形荷载下挡墙水平变形曲线  
Fig.14 Horizontal deformation curves of retaining wall under rectangular loads

图 15 为条形荷载作用下加筋土挡墙面板不同位置处的水平变形沿墙高的变化规律。由图可知,在条形荷载的作用下,挡墙折角段以及直线的中下部水平变形均随着墙面板高度的增加而逐步增大,并在墙高 1.2 m 处达到最大水平变形增量,之后在顶部又迅速减小,整体呈现出一种“鼓肚”状的变形分布模式。对比图 15(a)、15(b)的水平变形量可以发现,折角段的水平变形最为显著,且自折角段向直线段逐渐递减。这一现象表明,在条形荷载作用下,挡墙折角段受到较大的水平推力作用,导致该区域的水平变形较其他部位更为突出。综上所述,在实际工程应用中,应针对挡墙的折角段部位采取相应的加固措施,以优化挡墙的整体稳定性

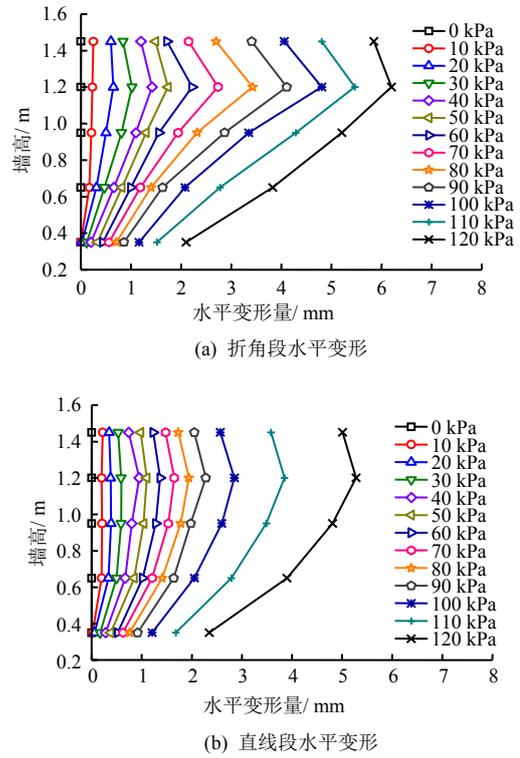


图 15 条形荷载下挡墙水平变形曲线  
Fig.15 Horizontal deformation curves of retaining wall under strip loads

如图 16 所示,两种荷载形态引起的最大水平变形随着荷载等级的增加均呈现出线性增长的趋势。虽然变形的增长趋势在两种荷载作用下相似,但研究发现,相较于条形荷载,矩形荷载导致的水平变形量更大。

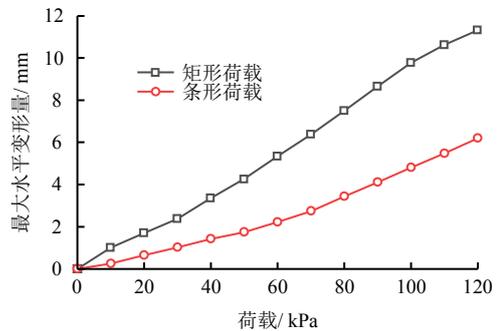


图 16 两种荷载作用下的最大水平变形量  
Fig.16 Maximum horizontal deformation under two types of loads

#### 4.2 挡墙竖向变形分析

图 17(a)为矩形荷载下挡墙顶部不同位置处的竖向变形变化曲线。由图可知,当荷载为 0~80 kPa

时，挡墙的竖向变形增量变化较为显著。当荷载达到 80 kPa 时，变形增量的增长趋势开始放缓，这表明挡墙的强度和压实度有所提高，使得挡墙更难以发生变形。通过对比 T-1、T-2 和 T-3 位置（具体位置见图 5）的数据可以发现，挡墙拐角部位 T-1 处的竖向变形量最大，这可能是因为拐角部位受到的荷载压力较大，且结构相对较为复杂。沿着挡墙直线段远离拐角位置的 T-2 处竖向变形次之，这可能是由于荷载压力在直线段上的分布较为均匀。而远离墙面深入挡墙内部的 T-3 处竖向变形最小，这可能是因为内部土体对挡墙的支撑作用较强，使得挡墙内部不易发生变形。

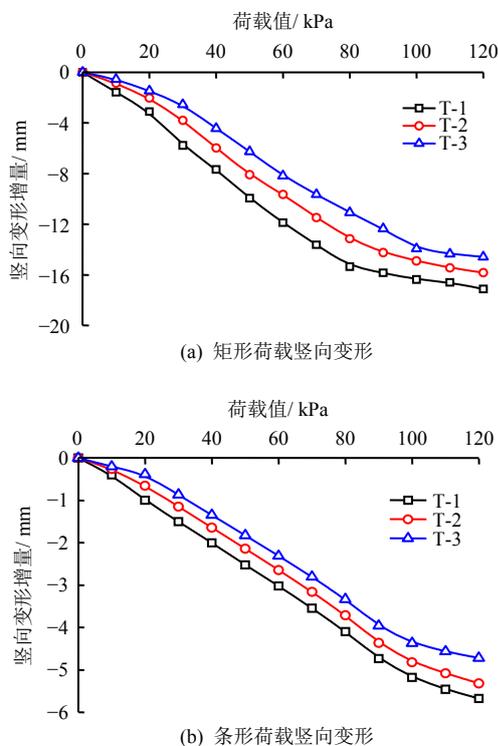


图 17 挡墙竖向变形变化曲线  
Fig.17 Vertical deformation curves of retaining wall

图 17(b)为条形荷载作用下相应的变化情况。由图可知，当荷载为 0~80 kPa 时，挡墙的竖向变形增量变化较为显著。当荷载达到 80 kPa 时，变形增量的增长趋势开始放缓，这表明挡墙的强度和压实度有所提高，使得挡墙更难以发生变形，这一规律与矩形荷载基本一致。通过对比 T-1、T-2 和 T-3 位置的数据，挡墙的竖向变形沿直线段向墙背方向逐渐减小，最大位移量在折角位置 T-1 处，可能是由于荷载压力在直线段上的分布较为均匀。

如图 18 所示，无论是矩形荷载还是条形荷载，

随着荷载等级的增加，竖向变形均表现出线性增长的趋势。尽管两种荷载形态下的变形增长趋势相似，但观察发现，矩形荷载引起的竖向变形量超过了条形荷载。

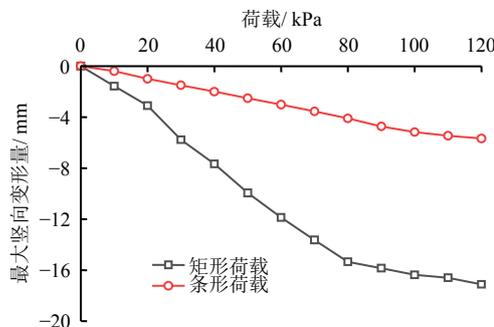


图 18 两种荷载作用下的最大竖向变形量  
Fig.18 Maximum vertical deformation under two types of loads

基于上述发现，本文建议在实际的工程设计与施工中，对于承受矩形荷载的加筋土挡墙，特别是在结构的折角段，应实施相应的加固措施。同时，考虑到条形荷载引发的变形相对较小，设计阶段应优先考虑将结构顶部荷载设计为条状，以达到优化挡墙性能和提高挡墙稳定性的目的。

### 4.3 挡墙破裂面分析

图 19 展示了矩形荷载作用下挡墙顶部土体裂缝的形状。随着荷载的逐渐增大，挡墙顶部土体开始出现裂缝。当加压完成后，挡墙顶部形成了一条宽度约为 0.5 cm 的圆弧形裂缝。为了进一步分析挡墙的破裂面位置，将挡墙侧面的墙面板取下一小部分。从取下的墙面板可以明显看出，挡墙侧面裂缝延伸长度约为 50 mm，且未延伸至底部（遗憾的是，未能进行拍照记录）。根据裂缝的延伸方向，可以



图 19 矩形荷载下挡墙顶部裂缝  
Fig.19 Cracks on top of retaining wall under rectangular loads

初步推断其潜在破裂面可能呈对数螺旋形，交会于

挡墙拐角直线段高度约 1/3 的位置, 形成一个类似“圈椅”状的滑动面。整个不稳定体沿拐角线中心呈轴对称分布。

图 20 展示了条形荷载作用下加筋土挡墙顶部土体裂缝的形状。随着荷载值从 20 kPa 逐步增加至 120 kPa, 挡墙顶部土体开始产生裂缝, 且随荷载的增大裂缝逐渐扩展。当荷载施加至最大值时, 挡墙顶部形成了一条宽度大约为 0.5 cm 的直角状裂缝。为了更深入地分析挡墙的破裂面位置, 将挡墙侧面的墙面板取下一小部分。通过观察可以发现, 挡墙侧面的裂缝与矩形荷载所产生的裂缝相似, 同样根据裂缝的延伸方向, 可以初步推断其潜在破裂面可能呈对数螺旋形, 交会于挡墙拐角直线段高度约 1/3 的位置, 形成一个类似“圈椅”状的滑动面。



图 20 条形荷载下挡墙顶部裂缝

Fig.20 Cracks on top of retaining wall under strip loads

基于以上分析可知, 在实际工程应用中, 应当根据具体的工程条件和环境制定合适的荷载范围和挡墙结构设计, 以确保挡墙具备良好的使用性能和安全性。同时, 对于已经出现裂缝的挡墙, 应立即进行修复和加固措施, 以防止裂缝进一步扩展和可能引发的结构恶化, 确保工程的稳定性和长期安全。

## 5 结 论

本文通过进行折角直立式加筋土挡墙物理模型试验, 对比分析加筋土挡墙拐角部位在矩形荷载和条形荷载作用下的影响, 探究在不同荷载作用下加筋土挡墙折角段部位的应力-应变分布特征, 得出以下结论:

(1) 对比分析矩形荷载和条形荷载下加筋土挡墙的垂直土压力, 可以发现两种情况下拐角部位均承受了较大的土压力。因此, 在实际工程应用中, 应特别关注加筋土挡墙拐角部位的结构性能, 尤其是挡墙上部。加强对这一区域的构建和加固措施,

有助于提高整个挡墙的稳定性和安全性, 确保其在承受荷载时能够有效地分散和传递土压力, 防止因应力集中而导致的结构破坏。

(2) 加筋土挡墙在矩形荷载作用下折角段的水平变形和竖向变形均大于条形荷载。故对于承受矩形荷载的加筋土挡墙, 特别是在结构的折角段, 应实施相应的加固措施。同时, 考虑到条形荷载引发的变形相对较小, 设计阶段应优先考虑将结构顶部荷载设计为条状, 以达到优化挡墙性能和稳定性的目的。

(3) 在两种荷载作用下, 加筋土挡墙顶部均形成了一条裂缝, 整体来看, 这些裂缝均在二维平面上呈现为类圆弧状, 在三维空间中表现为对数螺旋形状。所以在实际工程应用中, 应当根据具体的工程条件和环境制定合适的荷载范围和挡墙结构设计, 以确保挡墙具备良好的使用性能和安全性。同时, 对于已经出现裂缝的挡墙, 应立即进行修复和加固措施, 以防止裂缝的进一步扩展和可能的结构恶化, 确保工程的稳定性和长期安全。

综上所述, 在实际工程中, 应特别关注挡墙折角段的结构性能, 采取相应加固措施以提高其稳定性和安全性。同时, 考虑挡墙在不同荷载条件下的应力-应变特性规律对于优化设计和施工具有重要指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] 杨正权. 加筋土挡墙的稳定性分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
YANG Zheng-quan. Study on stability analysis of reinforced soil retaining walls[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [2] 杨广庆, 吕鹏, 张保俭, 等. 整体面板式土工格栅加筋土挡墙现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2077-2083.  
YANG Guang-qing, LÜ Peng, ZHANG Bao-jian, et al. Research on geogrids reinforced soil retaining wall with concrete rigid face by field test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(10): 2077-2083.
- [3] 杨广庆, 吕鹏, 庞巍, 等. 返包式土工格栅加筋土高挡墙现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 517-522.  
YANG Guang-qing, LÜ Peng, PANG Wei, et al. Research on geogrid reinforced soil retaining wall with wrapped face by in situ tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 517-522.

- [4] 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 Xiao-di, YANG Guang-qing, WANG He, et al. Field tests on structural properties of reinforced retaining walls with different panels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(1): 245-254.
- [5] 周世良, 何光春, 汪承志, 等. 台阶式加筋土挡墙模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 152-156.  
ZHOU Shi-liang, HE Guang-chun, WANG Cheng-zhi, et al. Study on stepped reinforced soil retaining walls by model tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(1): 152-156.
- [6] YOO C, KIM S B. Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: full-scale load test and 3D finite element analysis[J]. **Geotextiles & Geomembranes**, 2008, 26(6): 460-472.
- [7] 肖成志, 高珊, 李海谦, 等. 均布荷载下台阶式加筋土挡墙性能的试验分析[J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1359-1367.  
XIAO Cheng-zhi, GAO Shan, LI Hai-qian, et al. Test analysis of the performance of step reinforced soil retaining wall under uniform cloth load[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2020, 28(6): 1359-1367.
- [8] 肖成志, 李海谦, 高珊, 等. 循环荷载下台阶式加筋土挡墙力学与变形性能的试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2021, 40(4): 802-813.  
XIAO Cheng-zhi, LI Hai-qian, GAO Shan, et al. Experimental study on mechanical and deformation performances of geogrids-reinforced soil retaining walls under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(4): 802-813.
- [9] 肖成志, 李海谦, 高珊, 等. 交通荷载下台阶式加筋土挡墙动力响应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1789-1797, 1961.  
XIAO Cheng-zhi, LI Hai-qian, GAO Shan, et al. Dynamic response of tiered geogrid-reinforced soil retaining walls under traffic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(10): 1789-1797, 1961.
- [10] 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 He, YANG Guang-qing, XIONG Bao-lin, 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.
- [11] 王贺, 杨广庆, 吴连海, 等. 墙顶荷载对加筋土挡墙工作特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2573-2581.  
WANG He, YANG Guang-qing, WU Lian-hai, et al. Experimental study of geogrids reinforced retaining wall under overhead loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(12): 2573-2581.
- [12] 王贺. 静动荷载作用下高速铁路土工格栅加筋土挡墙结构行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.  
WANG He. Research on structural behaviour of geogrid reinforced soil retaining wall under static or dynamic loads[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [13] SHINDE A L, MANDAL J N. Behavior of reinforced soil retaining wall with limited fill zone parameter[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2007, 25(6): 657-672.
- [14] 王家全, 仲文涛, 黄世斌, 等. 模块式加筋土挡墙模型试验及静动力学性能研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1435-1444.  
WANG Jia-quan, ZHONG Wen-tao, HUANG Shi-bin, et al. Experimental study on static and dynamic performances of modular reinforced earth retaining wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(5): 1435-1444.
- [15] 屈畅姿, 李梦竹, 刘泽, 等. 土工格室加筋土挡墙静载模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3424-3434.  
QU Chang-zi, LI Meng-zhu, LIU Ze, et al. Model experimental study on geocell-reinforced soil retaining wall under static loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(12): 3424-3434.
- [16] 山西省交通厅. JTJ 015—91 公路加筋土工程设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.  
Department of Transportation of Shanxi Province. JTJ 015—91 Specifications for design of highway reinforced earth engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 1993.
- [17] 刘晓明, 袁振宇, 陈昌富, 等. 红砂岩地区某加筋土挡土墙凸形拐角鼓胀病害分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊 2): 18-22.  
LIU Xiao-ming, YUAN Zhen-yu, CHEN Chang-fu, et al. Analysis of convex swelling of a reinforced earth retaining wall in red sandstone area[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(Suppl.2): 18-22.
- [18] LEE Jong-hyun, OH Dong-wook, KONG Suk-min, et al.

- Investigation of behaviours of wall and adjacent ground considering shape of geosynthetic retaining wall[J]. **Korean Geosynthetics Society**, 2018, 17(1): 95-109.
- [19] 龙建辉, 焦姗, 王晓娅. 考虑摩擦损耗的加筋挡土墙临界高度研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 124-128.
- LONG Jian-hui, JIAO Shan, WANG Xiao-ya. Critical height research of reinforced retaining wall considering the friction loss[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2018, 51(1): 124-128.
- [20] 李鸿强, 龙建辉, 任俊姣, 等. 不同拐角形式的加筋土挡墙变形特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 118-124.
- LI Hong-qiang, LONG Jian-hui, REN Jun-jiao, et al. Analysis of deformation characteristics of reinforced earth retaining walls with different corners[J]. **Coal Science and Technology**, 2021, 49(11): 118-124.
- [21] 龙建辉, 李鸿强, 孙自强, 等. 加筋土挡墙拐角部位应力应变特征研究[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(3): 360-365.
- LONG Jian-hui, LI Hong-qiang, SUN Zi-qiang, et al. Study on the stress and strain characteristics at the corner part of the reinforced soil retaining wall[J]. **Journal of Taiyuan University of Technology**, 2021, 52(3): 360-365.
- [22] LI X P, LONG J H, GUO S Y, et al. Experimental study on FBG sensing technology-based stress monitoring at the corners of reinforced soil retaining walls[J]. **Science Progress**, 2022, 105(4): 00368504221135380.
- [23] 郭师苡, 龙建辉, 李旭鹏, 等. 直角台阶式不规则加筋土挡墙静力荷载试验及FBG监测研究[J/OL]. 太原理工大学学报, 2024: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/14.1220.N.20240510.1043.004>.
- GUO Shi-yi, LONG Jian-hui, LI Xu-peng, et al. Static load test and FBG monitoring research on irregular reinforced soil retaining wall with right angled steps[J/OL]. **Journal of Taiyuan University of Technology**, 2024: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/14.1220.N.20240510.1043.004>.