文章编号:1673-9469(2024)03-0001-07 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.03.001

模块式空心面板加筋土挡墙面板连接稳定性研究

王恒亮[1],黄亦佳[2],郭志华[2],邱 月[3,4]

(1.南京市江宁区建设工程质量监督站,江苏 南京 211134;2.河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024;
3.山东科技大学 能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590;
4.山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,山东 青岛 266590)

摘要: 为揭示预制模块式空心面板加筋土挡墙的面板连接稳定性影响规律,基于极限平衡理论,深入研究了模块式空心面板加筋土挡墙面板连接稳定性。考虑了模块面板的空心率和倾斜角度,计算了筋材连接拉力和面板连接抵抗力,并建立了相应的稳定性分析方法。通过与已有文献结果对比验证了该方法的有效性。进一步对不同因素开展了参数分析。结果表明,增加模块空心率、减小填土内摩擦角和增加加筋间距会降低面板连接稳定性,对挡墙中下部的影响尤为显著;倾斜的加筋土挡墙面板连接稳定性显著降低,对挡墙中上部影响更为显著。

关键词: 预制模块;加筋土;连接稳定性;极限平衡

中图分类号:TU476.4 **文献标识码:**A

Connection Stability Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Walls with Prefabricated Modular Hollow Pane

WANG Hengliang[1], HUANG Yijia[2], GUO Zhihua[2], QIU Yue[3,4]

(1. Nanjing Jiangning District Construction Engineering Quality Supervision Station, Nanjing, Jiangsu 211134, China;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China;
3. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 4. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: To reveal the influence of prefabricated modular hollow panel reinforced earth retaining wall on panel connection stability, based on the limit equilibrium theory, the stability of modular hollow panel reinforced earth retaining wall panel connection was deeply studied. Considering the hollow ratio and tilt angle of the module panel, the tensile force of the reinforcement connection and the resistance of the panel connection were calculated, and the corresponding stability analysis methods were established. The effectiveness of this method has been verified by comparing it with existing results in the literature. Further parametric analysis was conducted on different influential factors. The results show that increasing the module void ratio, reducing the internal friction angle of the fill, and increasing the reinforcement spacing will reduce the stability of the panel connection, with a particularly significant impact on the middle and lower parts of the retaining wall. At the same time, the stability of the inclined reinforced soil retaining wall panel connection is significantly reduced, with a more significant impact on the upper part of the retaining wall.

Key words: segmental retaining wall; reinforced soil; connection stability; limit equilibrium

---

收稿日期:2023-08-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51809160)
作者简介:王恒亮(1988-),男,安徽滁州人,硕士,高级工程师,从事岩土力学方面的研究。

在现行加筋结构设计规范或指南[1-5]中,加筋土挡墙一般指墙面垂直或倾角小于或等于5°的支挡结构。然而受到工程场地的地形空间条件限制,加筋土挡墙在建造时往往具有一定的倾角。对于具有倾角的加筋土挡墙,通常使用预制模块建造。由于面板倾角和预制模块空心率的存在,筋材和预制面板间的作用力变得更加复杂,面板连接稳定性也受到影响。相关加筋土挡墙失效案例的统计数据表明,筋材与模块连接失效引起的局部破坏最为常见[6]。筋材与模块连接强度主要依赖于筋材与模块的摩擦作用或连接件机械作用,目前主要采用实验和理论的方法进行研究。Buttry 等[7]在不同法向荷载条件下开展了键和销等机械连接作用的筋材与模块连接强度实验,发现筋材与模块连接强度与法向荷载、机械连接方式密切相关;刘卫华等[8]开展了不同法向荷载作用下筋材与模块连接强度实验,给出了筋材与模块使用纯摩擦连接的使用条件;刘志祥等[9]进行了混凝土模块与加筋土挡墙筋材在机械连接下的筋材与模块连接强度实验,获得了工作状态和极限状态下的连接强度参数。理论分析中,国内外现行的大多数规范[1-5]主要采用基于极限平衡法的主动土压力理论,但这种方法容易造成设计保守[10-12];为此,Leshchinsky 等[13-14]基于极限平衡理论,将加筋土挡墙视为加筋土陡坡,建立了统一的加筋土结构设计方法,但未开展面板连接稳定性研究;Wu 等[15]以朗肯土压力为基础考虑筋材-模块之间的摩擦连接作用,对筋材-模块这一结构体系进行受力分析,计算出模块式面板加筋土挡墙沿墙高分布的筋材-模块连接强度,但仅限于直立加筋土挡墙且未考虑面板空心率的影响。

本文基于极限平衡法和对数螺旋线破坏模式,开展空心模块式倾斜加筋土挡墙面板连接稳定性研究,建立筋材连接拉力和面板连接抵抗力的计算方法。通过与试验实测所得筋材连接拉力对比,证明了该方法的正确性。同时探究不同模块空心率、墙面和墙顶倾角、填土性质等因素对不同工况面板连接稳定性的影响,为实际工程建设提供理论指导。

1 倾斜加筋土挡墙面板连接稳定性分析理论

1.1 基于对数螺旋破坏机制的极限平衡理论

倾斜加筋土挡墙破坏模式为转动破坏模式,本文选用对数螺旋转动破坏机制进行预制模块式面板加筋土挡墙面板连接稳定性分析。Baker 等[16]在没有事先假设的情况下,通过使用变分极限平衡分析方法,获得了对数螺旋滑动面的数学表示方法:

$$r(\beta) = Ae^{-\beta\tan\varphi} \tag{1}$$

式中:r 为对数螺旋面的极径;A 为常数;β 为极径与垂直线的夹角,(°);φ 为土体内摩擦角,(°)。

在直角坐标系(x,y)下,滑动面表达式为

$$\begin{cases} x = x_c + A\exp(-\beta\tan\varphi)\sin\beta \\ y = y_c + A\exp(-\beta\tan\varphi)\cos\beta \end{cases} \tag{2}$$

式中:(x_c, y_c)为直角坐标系下潜在滑动面的转动中心坐标。

根据对数螺旋线的破坏模式,本文给出了一个典型的预制模块式面板加筋土倾斜挡墙简化分析模型,如图1所示。其中:H 为挡墙高度,m;ω 为挡墙面板倾角,(°);α 为墙顶的水平倾角,(°);S_v 为加筋间距,m;B 为模块宽度,m;h 为模块高度,m;γ 为加筋填土重度,kN/m^3;φ 为内摩擦角,(°)。

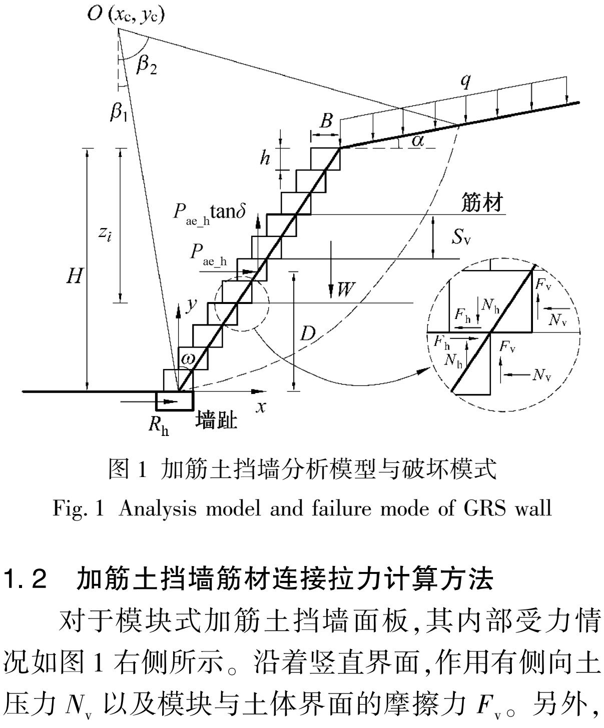

图1 加筋土挡墙分析模型与破坏模式

Fig. 1 Analysis model and failure mode of GRS wall

1.2 加筋土挡墙筋材连接拉力计算方法

对于模块式加筋土挡墙面板,其内部受力情况如图1右侧所示。沿着竖直界面,作用有侧向土压力 N_v 以及模块与土体界面的摩擦力 F_v。另外,在模块接触界面,有相互作用力 N_h 和 F_h。本文参考文献[13],在计算时忽略模块之间的作用力 N_h 和 F_h。

为了计算下加筋土挡墙筋材连接力,有以下几点假设:

(1)加筋挡墙内部稳定对应的潜在滑裂面假设为对数螺旋线,滑出点通过墙趾,且不发生深层破坏,由墙趾提供的阻力为水平方向;

(2)填土为均质无黏性土体,预制面板为刚性体,且忽略面板间的作用力;

(3)筋材与面板连接力等于侧向土压力,且始终沿水平方向作用,面板模块与土体界面摩擦力始终沿竖直方向作用。

图 1 左侧给出了倾斜预制模块式面板加筋土挡墙受力情况,其中筋材连接合力 P_{ae_h} 表示为

$$P_{ae\_h} = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_{ae\_h} \tag{3}$$

式中:K_{ae_h} 为土压力系数水平分量。

由于对数螺旋线形式的滑动面所受正应力和剪应力的合力始终指向滑动中心,合力矩为 0。因此建立围绕转动中心 O 的力矩平衡方程可表示为

$$P_{ae\_h}h_1 + P_{ae\_h}\tan\delta h_2 = M_w + M_{Rh} + M_q \tag{4}$$

式中:δ 为墙背摩擦角,(°);h_1 和 h_2 分别为 P_{ae_h}、$P_{ae\_h}\tan\delta$ 的力臂,m;M_w、M_{Rh}、M_q 分别为滑动区土体的重力、墙趾阻力和墙顶荷载绕转动中心的力矩,kN·m。

结合式(3)和式(4),可得土压力系数水平分量表示为

$$K_{ae\_h} = \frac{2(M_w + M_{Rh} + M_q)}{\gamma H^2(h_1 + h_2\tan\delta)} \tag{5}$$

由重力、墙趾阻力和坡顶荷载提供的力矩可分别表示为

$$M_{Rh} = R_h A\exp(-\beta_1\tan\varphi)\cos\beta_1 \tag{6}$$

$$M_w = \int_{x_1}^{x_2}\frac{A\exp(-\beta\tan\varphi)[Y - y_c - A\exp(-\beta\tan\varphi)]}{2}\mathrm{d}x \tag{7}$$

$$M_q = \frac{q}{2}\{[A\exp(-\beta_2\tan\varphi)\sin\beta_2]^2 - [A\exp(-\beta_1\tan\varphi)\sin\beta_1 - H\tan\omega]^2\} \tag{8}$$

式中:Y 为墙面和墙顶坐标方程,可表示为

$$Y = \begin{cases} x\cot\omega & x < H\tan\omega \\ H + (x - H\tan\omega)\tan\alpha & x \geqslant H\tan\omega \end{cases} \tag{9}$$

为了求出每层筋材的连接拉力 T_i,本文提出了筋材连接合力 P_{ae_h} 沿墙高的两种分布形式,如图 2 所示(z_i 为第 i 层筋材到墙顶的垂直距离)。第一种分布形式参考 Bathurst 等[17] 的实测数据,一般静力条件下,筋材连接合力 P_{ae_h} 沿墙高呈梯形分布,根据计算,$D=0.426H$。第二种为相关设计规范[3-5] 规定的线性分布形式,此时,$D=H/3$。根据图 2 所示筋材拉力分布形式,每层筋材的连接拉力 T_i 为

$$T_i = P_{ae\_h}D_{ti} \tag{10}$$

式中:D_{ti} 为每层筋材分布系数。

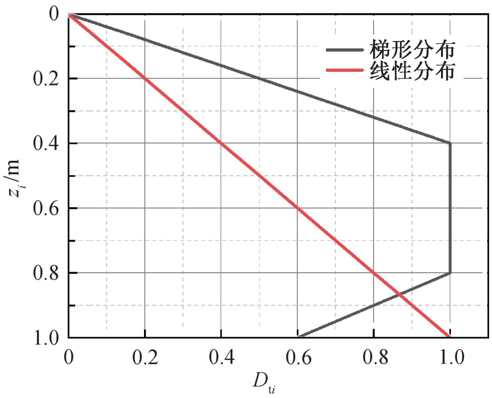

图 2 筋材连接拉力分布形式

Fig. 2 Tension distribution form of reinforcement connection

为了得到每层筋材拉力的分布,需要通过优化程序得到潜在的最危险滑动面,使得稳定所需的筋材连接合力 P_{ae_h} 最大,及土压力系数水平分量 K_{ae_h} 最大。之后根据式(10)便可求得每层筋材拉力的分布。

1.3 加筋土挡墙面板连接抵抗力计算方法

Helwany 等[18] 提出了面板连接抵抗力 R_i 的计算方法,其表达式为

$$R_i = N_i\tan\delta_{gb} + b \tag{11}$$

式中:N_i 为第 i 层筋材铺设位置处面板所承受的竖向压力,kN/m;δ_{gb} 为筋材与模块的摩擦角,(°);b 为键、销等机械连接方式的极限连接力,kN/m。值得注意的是,面板连接峰值抵抗力 R_{max} 一般为筋材极限拉伸强度的 80%。

如图 1 所示,模块所承受的竖向压力 N_i 为模块面板重力以及填土对模块面板的竖向摩擦力两部分组成,可表示为

$$N_i = \gamma_b(1 - m)(B - h\tan\omega)z_i + T_i\tan\delta \tag{12}$$

式中:γ_b 为模块面板重度,kN/m³;m 为模块面板空心率;z_i 为筋材到墙顶的垂直距离,m。

模块与筋材的连接力 T_i 大于抵抗力 R_i,模块与筋材则发生连接破坏。为了便于分析,这里采用净连接力($R_i - T_i$)进行计算:当 $R_i - T_i>0$ 时,面板连接稳定;反之,面板连接破坏。

2 计算方法验证

为验证上述倾斜预制模块式面板加筋土挡墙

面板稳定性分析方法及计算程序的正确性，分别选用 Gebremariam 等[19]和 Awad 等[20]所做的试验研究成果进行对比验证。

Gebremariam 等[19]在美国弗吉尼亚州一处加筋土挡墙建造现场，对所收集的筋材进行连接拉力评估验证。该挡墙面板倾角 $\omega=5°$，墙后水平倾角 $\alpha=0°$，墙顶荷载 $q=42$ kPa，挡墙高 $H=2.2$ m，挡墙加筋填土重度 $\gamma=16.5$ kN/m^3，内摩擦角 $\varphi=47.6°$，模块面板选用实心的混凝土砌块，模块重度 $\gamma_b=24$ kN/m^3，模块宽度 $B=0.4$ m，模块高度 $h=0.2$ m，筋材极限抗拉强度为 70 kN/m，加筋间距 $S_v=0.2$ m。对于静力条件下，本文采用筋材连接拉力为梯形分布的形式。图 3 给出了相同条件下本文分析方法计算的筋材连接拉力与现场试验所实测的筋材连接拉力沿墙高的分布情况。对比分析发现本文计算结果与现场试验所实测的结果较为接近，具有高度的一致性，从而验证了本文研究方法在计算静力条件下筋材连接拉力的正确性。

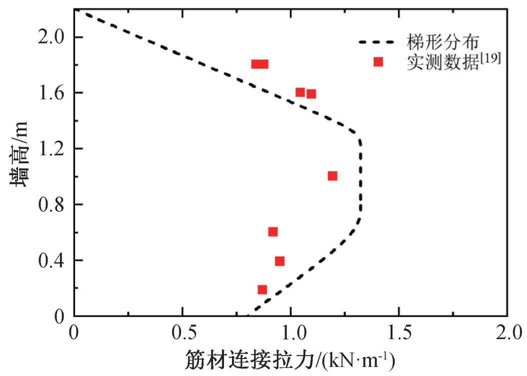

图 3 筋材连接拉力对比

Fig. 3 Comparison of reinforcement connection tensile force

为了验证面板连接抵抗力计算方法的合理性，这里选取了 Awad 等[20]开展的筋材连接测试试验进行研究。该试验按照 Bathurst 所提出的美国材料与试验学会试验规程[21]，选取的筋材宽度为 35 mm，筋材极限拉伸强度为 35 kN/m，筋材与模块采用摩擦连接方式，筋材与模块的摩擦系数为 0.8，无额外的机械连接。图 4 给出了采用 Helwany 等[18]计算的面板连接抵抗力以及实测的面板连接抵抗力的分布，研究发现两者结果高度吻合，说明 Helwany 等[18]计算面板连接抵抗力方法的正确性。

基于上述计算方法验证对比结果，验证了在静力条件下的筋材连接拉力以及 Helwany 等[18]提出的面板连接抵抗力计算方法的正确性，从而说明本文提出的倾斜预制模块式面板加筋土挡墙面板稳定性分析方法的有效性。

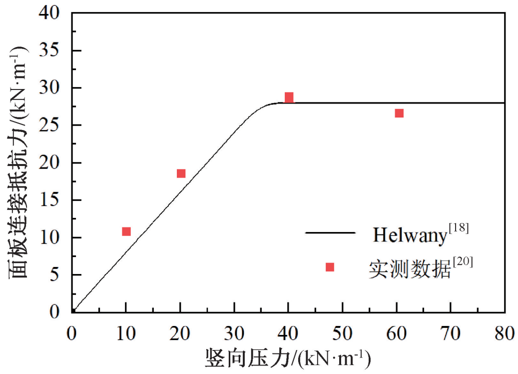

图 4 面板连接抵抗力对比验证

Fig. 4 Comparison and verification of panel connection resistance

3　空心模块式加筋土挡墙面板连接稳定性影响规律

运用所建立的倾斜加筋土挡墙面板连接稳定性分析方法，假设筋材连接拉力 T_i 呈梯形分布，开展静力条件下参数敏感性分析。面板的连接稳定性用面板的净连接力表示，净连接力为面板连接抵抗力减去筋材连接拉力。这里主要考虑墙面垂直倾角 ω、墙顶水平倾角系数 $\tan\alpha$ 和加筋填土与模块摩擦角 δ 三个限定加筋土挡墙几何形状的参数变量，并且选用了一具体预制模块化面板加筋土挡墙计算模型进行分析，模型具体参数为墙高 $H=6$ m，挡墙面板倾角 $\omega=10°$，墙顶的水平倾角 $\alpha=0°$，加筋间距 $S_v=0.4$ m，墙后填土 $\gamma=20$ kN/m^3，加筋填土内摩擦角 $\varphi=30°$，加筋填土与模块摩擦角 $\delta=(2/3)\varphi$，墙顶荷载 $q=20$ kPa，模块重度 $\gamma_b=24$ kN/m^3，模块宽度 $B=0.2$ m，模块宽度 $h=0.2$ m，筋材与模块摩擦系数为 0.8，筋材种类为单向土工格栅，极限抗拉强度 110 kN/m。

3.1　挡墙面板倾角

加筋土挡墙面板倾角是加筋土挡墙的结构设计中重要的一个环节，相关研究中的实测数据表明，随着挡墙面板倾角的增加，加筋土挡墙内筋材所受的拉力会明显减小[22]。美国混凝土砌体规范[5]和加筋土设计方法 K-刚度法[23-24]均考虑了墙面垂直倾角变化对挡墙筋材连接拉力的影响。本文研究了在不同空心率模块面板下（$m=0$、0.25 和

0.5),不同挡墙面板倾角(5°、10°和 20°)对面板净连接力的影响规律。

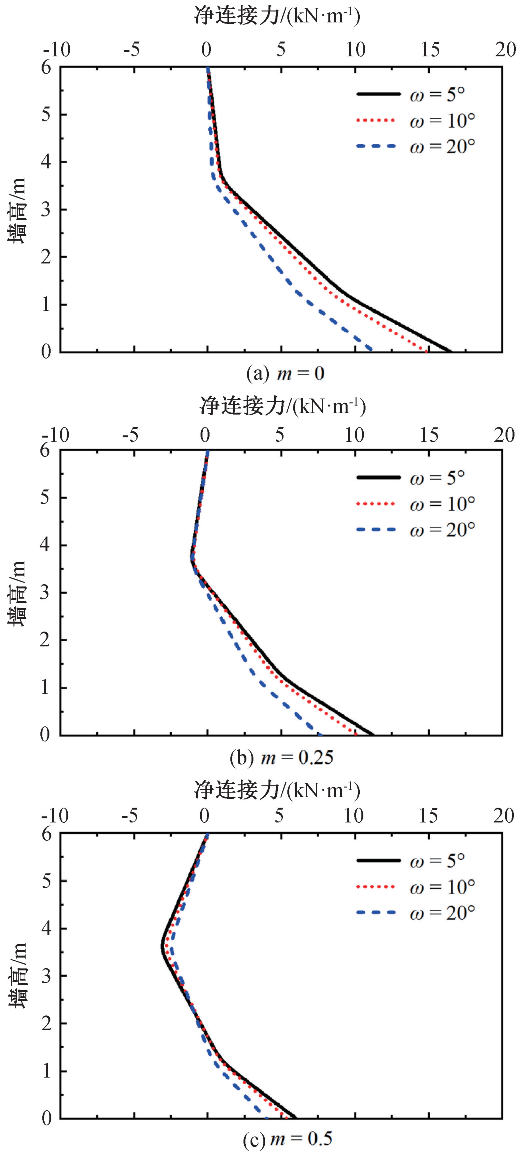

图 5　不同模块空心率下墙面倾角对面板净连接力的影响

Fig. 5　Effect of wall inclination angle on the net connection force of panels under different hollow ratios

由图 5 可以发现,当模块空心率较小时($m=0$ 和 0.25),随着挡墙面板倾角的增大,面板的净连接力不断减小,尤其对于挡墙中下部。这是由于随着挡墙面板倾角的增大,T_i 和 R_i 均显著地减小,且 T_i 减小的幅度小于 R_i。当模块空心率较大时($m=0.5$),面板净连接力显著减小。对于挡墙上部,挡墙面板倾角增大,面板净连接力增大。而在挡墙中下部,面板净连接力随着挡墙面板倾角的增大而减小。这是因为当模块空心率较大时,面板连接抵抗力 R_i 显著降低,且随着坡度增大,在挡墙中下部,R_i 降低幅度进一步增大。因此,对于面板倾角较大的挡墙,应选用空心率较小的模块。

3.2　墙顶水平倾角系数

墙顶水平倾角系数 $\tan\alpha$ 是影响加筋土挡墙几何形状的重要参数之一,它对加筋土挡墙的面板连接安全起着十分重要的作用。因此,图 6 给出了不同模块空心率情况下($m=0$、0.25 和 0.5),墙顶水平倾角系数对面板连接稳定性的影响,墙顶水平系数分别取 1∶∞($\alpha=0$)、1∶3 和 1∶2。

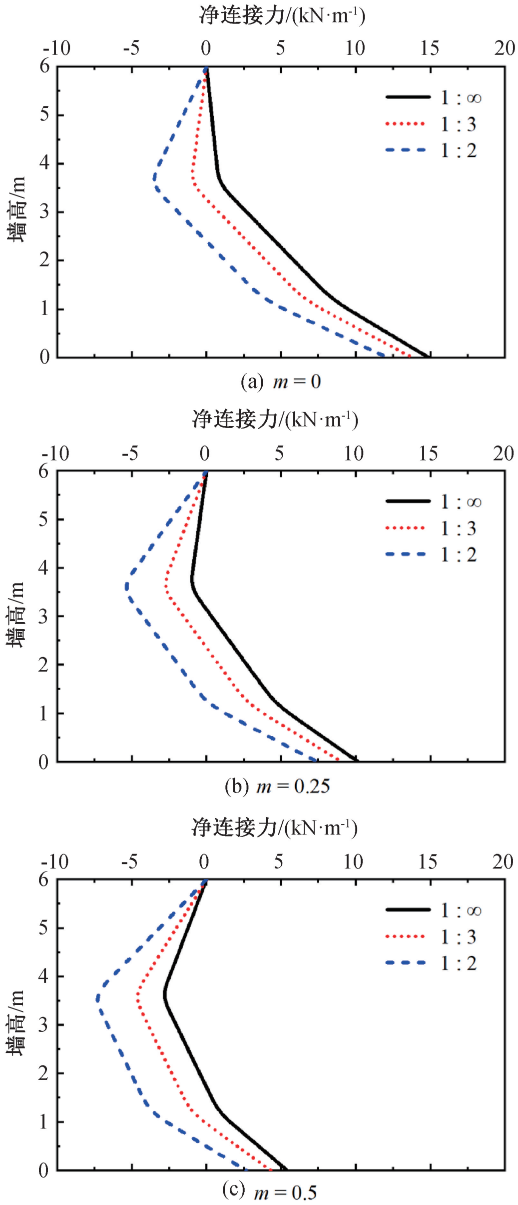

图 6　不同模块空心率下墙顶水平倾角系数对面板净连接力的影响

Fig. 6　Effect of wall top horizontal inclination coefficient on the net connection force of panels under different module void ratios

由图 6 可以发现,随着墙顶水平倾角系数的增大,加筋土挡墙面板连接稳定性显著降低,尤其对于挡墙中上部。当模块空心率增大时,加筋土挡墙的面板连接稳定性逐渐变低,当墙顶水平倾角系数较大时(1∶2 和 1∶3),加筋土挡墙面板连接安全均难以保证,面板连接失效。根据公式(12),由于墙顶水平倾角系数增大,显著地增大了筋材连接拉力 T_i。墙顶水平倾角越大,挡墙面板连接稳定性越低。实际工程中也能看到墙顶水平倾角变大而导致的面板连接的破坏,如李广信[25]调查了一处位于中美洲萨尔瓦多高达 8 m 的预制模块式加筋土挡墙破坏原因,发现该挡墙在施工完成以后在顶部又加高 1.5 m 的填土,最终造成加筋土挡墙顶部面板的局部连接破坏。因此,在实际工程中,应注意墙后水平倾角,尽量避免在加筋土挡墙墙顶堆土,保持墙顶水平。

3.3 加筋填土与模块摩擦角

现行加筋土挡墙设计规范一般按照实际工程经验确定加筋填土与模块的摩擦角,对于挡墙不同的排水条件和模块面板的粗糙程度,加筋填土与模块摩擦角取值一般有所不同。这里分别考虑加筋填土与模块摩擦角 $\delta=\varphi/3$、$\delta=2\varphi/3$ 和 $\delta=\varphi$,给出了不同模块空心率下加筋填土与模块摩擦角对面板净连接力的影响规律,如图 7 所示。

随着加筋填土与模块摩擦角 δ 的增大,加筋土挡墙面板筋材连接力逐渐增大。当加筋填土与模块摩擦角较大时($\delta=\varphi$),对于不同空心率的模块,加筋土挡墙面板连接稳定。当加筋填土与模块摩擦角较小时($\delta=\varphi/3$ 和 $\delta=2\varphi/3$),在采用空心率较大($m=0.5$)的模块式面板加筋土挡墙中,加筋土挡墙面板连接稳定性较差。因此,增加加筋填土与模块摩擦角,具体措施为增加模块面板的粗糙程度和改善加筋土挡墙的排水条件,可以有效地提高加筋土挡墙面板连接稳定性,保证面板连接安全。

4 结论

1)加筋土挡墙的面板连接稳定性随着模块空心率增加、加筋区填土内摩擦角减小和面板倾斜角度增加而降低,对于挡墙中下部的影响尤为显著。实际工程中为了保证面板连接稳定,应采用低空心率的模块、倾斜角度小的面板和压实性好的填土。

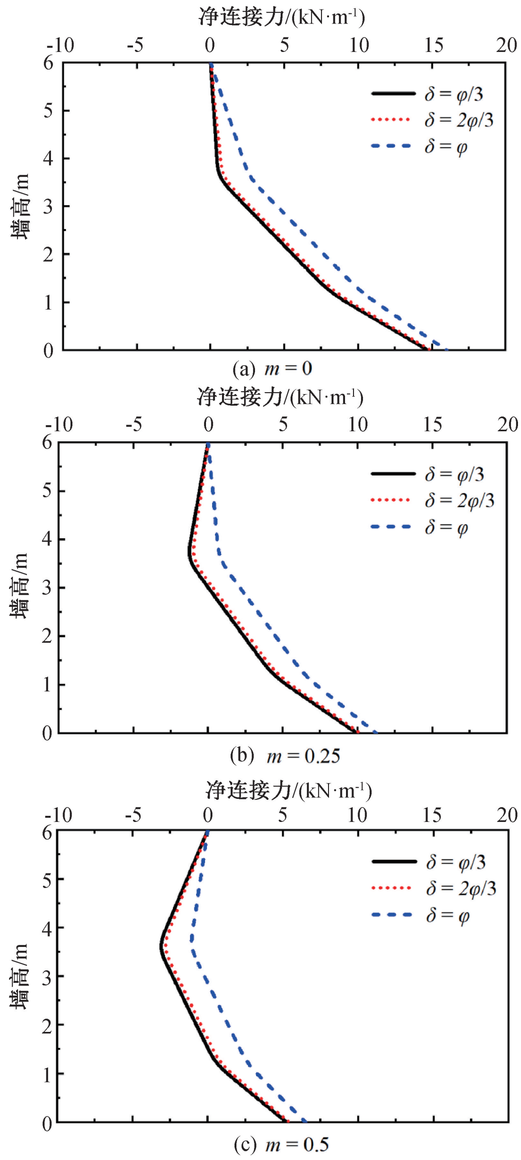

图 7 不同模块空心率下墙面垂直倾角对面板净连接力的影响

Fig. 7 Effect of vertical inclination angle of wall surface on net connection force of panel under different module void ratios

2)对于不同空心率的模块面板,筋材连接拉力 T_i 和面板连接抵抗力 R_i 随挡墙面板倾角的变化规律基本一致。随着挡墙面板倾角的增大,T_i 和 R_i 均显著地减小,且随着挡墙高度的减小,T_i 和 R_i 减小的幅度进一步增大,这说明挡墙面板倾角的增大对挡墙中下部的影响更大。当模块空心率较小时($m=0$ 和 0.25),随着挡墙面板倾角的增大,面板的净连接力不断减小,对于挡墙中下部的影响更甚。

3)随着挡墙墙顶水平倾角系数和加筋填土与模块摩擦角 δ 的减小,加筋土挡墙面板连接稳定性显著降低,尤其对于挡墙中上部。因此,在实际工

程中,应注意墙后水平倾角,增加模块面板的粗糙程度,改善加筋挡墙的排水条件,可以有效地提高加筋土挡墙面板连接稳定性。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工合成材料应用技术规范: GB 50290—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.

[2] 中华人民共和国铁道部. 铁路路基土工合成材料应用技术规范: TB 10118—2006[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.

[3] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications [S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.

[4] FHWA-NHI-10-024. Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slope[S]. Washington DC: National Highway Institute Federal Highway Administration and U. S. Department of Transportation, 2009.

[5] NCMA. Design manual for segmental retaining walls[S]. 3rd Edition, Herndon, Virginia: National Concrete Masonry Association, 2009.

[6] KOERNER R M, KOERNER G R. The importance of drainage control for geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth walls[J]. Journal of GeoEngineering, 2011, 6(1): 3-13.

[7] BUTTRY K E, MCCULLOUGH E S, WETZEL R A. Laboratory evaluation of connection strength of geogrid to segmental concrete units[J]. Transportation Research Record, 1992(1414): 26-31.

[8] 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, (S1): 3218-3223.

[9] 刘志祥, 葛恒军, 韩华平. 模块加筋土挡墙中模块与土工格栅连接强度特性试验[J]. 产业用纺织品, 2002(03): 22-25.

[10] 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(01): 245-254.

[11] 介玉新, 李广信. 加筋土的计算方法[J]. 水利水电技术, 1999(05): 67-69.

[12] ALLEN T M, BATHURST R J. Improved simplified method for prediction of loads in reinforced soil walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(11): 04015049.

[13] LESHCHINSKY D, EBRAHIMI S, VAHEDIFARD F, et al. Extension of Mononobe-Okabe approach to unstable slopes[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(2): 239-256.

[14] LESHCHINSKY D, VAHEDIFARD F. Impact of toe resistance in reinforced masonry block walls: Design dilemma[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(2): 236-240.

[15] WU J T, PAYEUR J B. Connection stability analysis of segmental geosynthetic reinforced soil (GRS) walls[J]. Transportation Infrastructure Geotechnology, 2015, 2: 1-17.

[16] BAKER R, GARBER M. Theoretical analysis of the stability of slopes [J]. Geotechnique, 1978, 28 (4): 395-411.

[17] BATHURST R, MIYATA Y, NERNHEIM A, et al. Refinement of K-stiffness method for geosynthetic-reinforced soil walls[J]. Geosynthetics International, 2008, 15(4): 269-295.

[18] HELWANY M, MCCALLEN D. Seismic analysis of segmental retaining walls. II: Effects of facing details[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(9): 750-756.

[19] GEBREMARIAM F, TANYU B, CHRISTOPHER B, et al. Evaluation of required connection load in GRS-IBS structures under service loads[J]. Geosynthetics International, 2020, 27(6): 620-634.

[20] AWAD M I, TANYU B F. Laboratory evaluation of governing mechanism of frictionally connected MSEW face and implications on design [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(5): 468-478.

[21] ASTM. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials: ASTM D790-17[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

[22] 张 垭, 汪 磊, 刘华北. 面板倾角对模块式面板加筋土挡墙筋材内力的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(09): 1680-1688.

[23] ALLEN T, BATHURST R J, HOLTZ R D, et al. A new working stress method for prediction of reinforcement loads in geosynthetic walls[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(5): 976-994.

[24] 郭志华, 黄方成, 李 斌, 等. 预制模块式面板加筋土挡墙面板连接稳定性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 1-7.

[25] 李广信. 地震与加筋土结构[J]. 土木工程学报, 2016, 49(07): 1-8.

(责任编辑 王利君)