

预制模块式面板加筋土挡墙面板连接稳定性研究

郭志华^{1,2}, 黄方成³, 李 斌^{4,5,6*}, 张 飞^{1,2,4,5,6}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210024; 3. 浙江交投高速公路建设管理有限公司, 浙江 杭州 310020; 4. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300022; 5. 港口岩土工程技术交通运输行业重点实验室, 天津 300022; 6. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300022)

摘要: 基于极限平衡理论, 考虑预制模块的空心率建立筋材拉力与面板连接抵抗力计算方法, 形成预制混凝土模块面板加筋土挡墙的面板连接稳定性分析方法。通过开展空心模块面板填充物、加筋填土内摩擦角、模块宽度以及加筋间距的参数敏感性分析, 揭示了加筋土挡墙面板连接稳定性影响规律。研究表明: 挡墙面板连接稳定性随模块空心率增加而降低, 尤其对于挡墙中下部尤为显著, 工程中应选择空心率较低的模块, 填充土体应经过压实; 加筋土挡墙面板连接稳定性随模块宽度的减小和加筋间距的增大而降低, 且随着墙高的降低其愈发不稳定, 建议预制模块式面板加筋土挡墙模块宽度不宜小于 0.2 m 以及加筋间距不宜大于 0.3 m。

关键词: 预制模块; 加筋土挡墙; 连接稳定性; 极限平衡理论

中图分类号: TG333.17

文献标识码: A

Connection Stability Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Walls with Prefabricated Modular Panel

GUO Zhihua^{1,2}, HUANG Fangcheng³, LI Bin^{4,5,6*}, ZHANG Fei^{1,2,4,5,6}

(1. Key laboratory of Ministry of Education for Geomachanics and Embankment engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 3. Traffic Investment Expressway Construction Management Limited Company, Hangzhou, Zhejiang 310020, China; 4. Zhong Jiao Tianjin Port Engineering Research Institute Limited Company, Tianjin 300022, China; 5. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering and Transportation Industry, Tianjin 300022, China; 6. Zhong Jiao First Navigation Engineering Limited Company, Tianjin 300022, China)

Abstract: Based on the limit equilibrium method, the impact of the hollow rate of prefabricated modules into the connection stability analyses of geosynthetic reinforced soil (GRS) walls was involved. The calculation formula of the tensile force and the resistance of the connection to assess the connection stability of GRS walls with prefabricated modular panel were established. Parametric studies were conducted to investigate the influence of the hollow module panel filler, the internal friction angle of the reinforced fill, the module width and the reinforcement spacing on the connection stability. The obtained results demonstrate the connection stability decreases with the increase of the module hollow rate, especially for the lower part of the retaining wall, the module with lower hollow rate and the compacted filling soil should be used in the actual project; the connection stability also decreases with the decrease of the module width and the increase of the reinforcement spacing, and it becomes more pronounced as the wall height decreases. It is recommended that the module width should not be less than 0.2 m, and the

收稿日期: 2021-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078185); 港口岩土工程技术交通行业重点实验室开放课题基金资助项目(17-39)

作者简介: 郭志华(1996-), 男, 安徽宣城人, 硕士研究生, 主要从事加筋土挡墙及加固方向研究。

* 通讯作者: 李斌(1984-), 男, 河北承德人, 博士, 高级工程师, 主要从事港口、海岸及近海水工结构设计研究工作。

reinforcement spacing should not be exceeded 0.3 m.

Key words: prefabricated modular panel; geosynthetic reinforced soil wall; connection stability; limit equilibrium theory

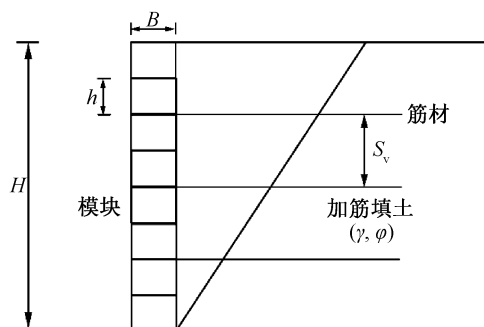
加筋土挡墙面板有预制模块式面板、土工格栅包裹性面板、整体现浇混凝土面板以及预制钢筋混凝土板块式面板等几种面板形式^[1],预制模块式面板形式具备施工装配性、经济耐久性及整体美观性等诸多优势^[2],在国内外工程中广泛应用。据统计,截止到2018年全球已建有超过20万座加筋土挡墙,其中模块式面板加筋土挡墙类型占比超七成^[3]。模块式面板加筋土挡墙在实际工程中会发生面板连接破坏^[4-5]。模块面板连接强度主要依赖于筋材与模块间的摩擦作用或连接件的机械作用,美国材料与试验协会(ASTM)制定的标准^[6]给出了相应的测试方法与规程,连接强度与法向荷载(即墙面模块高度)密切相关^[7],同时筋材施工损伤^[8]、长期蠕变^[9]等对连接强度也有一定影响。目前,加筋土挡墙面板安全设计方法以美国相关规范或设计指南为主。美国桥梁设计指南(AASHTO)^[10]认为每层筋材与面板连接强度,等于每层筋材通过土压力理论计算得到的加筋强度 $T_{\max}$ 。美国国家砌体协会的模块式加筋土挡墙设计指南(NCMA)^[11]定义了筋材与面板连接的安全系数,即表示为通过ASTM试验测得筋材与面板连接强度除以各层筋材强度 $T_{\max}$ 。我国现行规范^[12-13]鲜有考虑面板连接安全,只有2019年版《铁路路基支挡结构设计规范》^[13]提到了面板连接强度需不低于设计强度,但对面板连接设计并没有明确规定。由于面板连接作用机理较为复杂,上述设计方法确定面板连接稳定性时没有考虑面板与筋材的相互作用。为此,Wu等^[14]同时考虑了模块面板与筋材、模块间的相互作用方式,建立了面板连接稳定性分析方法,发现加筋土挡墙筋材与面板的连接稳定性较低。

实际工程中模块式面板加筋土挡墙常采用预制混凝土模块,这种模块具有一定空心率,本文将建立预制混凝土模块面板加筋土挡墙的面板连接稳定性分析方法,通过开展参数分析揭示模块面板填充物、加筋间距、模块宽度以及加筋填土内摩擦角对加筋土挡墙面板连接稳定性影响规律,进一步完善现有规范设计方法并指导实际工程。

1 面板连接稳定性分析方法

1.1 面板连接稳定性极限平衡理论

图1给出一预制模块式面板加筋土挡墙的简化模型。



注: H 为挡墙高度, S_v 为加筋间距, B 为模块宽度, h 为模块高度, γ 为加筋填土重度, φ 为内摩擦角。

图1 预制模块式面板加筋土挡墙简化模型

Fig. 1 Simplified model of GRS wall with prefabricated modular panel

为了开展加筋土挡墙面板连接的极限平衡分析,首先有以下几点假设:

- (1)挡墙墙面垂直,地基为刚性,未发生不均匀沉降;
- (2)模块式面板为刚体,且为干式堆砌形式,忽略面板与筋材的键或销等机械连接作用;
- (3)筋材铺设至模块前缘,筋材与模块的连接力始终沿水平向作用,加筋填土对模块沿侧缘产生的摩擦力竖直向下;
- (4)挡墙顶部作用的竖向荷载为均匀分布;
- (5)加筋长度足够,模块后加筋区的侧向土压力计算采用库仑主动土压力理论。

加筋土挡墙面板大多为预制混凝土模块,为了便于施工安装常采用空心形式(图2)。相比实心模块,空心模块与筋材的接触面积更小,会减少摩擦作用导致面板与筋材的连接破坏,为此这里定义了预制混凝土模块的空心置换率 m :

$$m = \frac{A_1}{A} \quad (1)$$

式中: A_1 为面板空心的表面积, A 为总表面积。

空心预制混凝土模块堆叠作为加筋土挡墙面板时,模块空心区域需要用土体进行填充,这样就

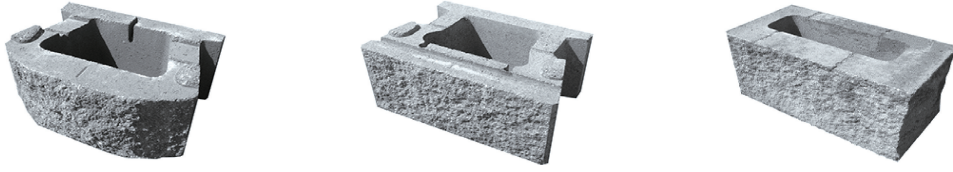


图2 常见模块式面板形式

Fig. 2 Common modular panel

会影响整个面板的重度和筋材与模块的摩擦角,根据所定义的模块空心置换率获得了置换后模块面板的等效重度 γ'_b 和筋材与模块摩擦角 δ'_{gb} [15], 分别表示为

$$\gamma'_b = \gamma_b(1 - m) + \gamma_s m \quad (2)$$

$$\tan \delta'_{gb} = \frac{(1 - m)\gamma_b \tan \delta_{gb} + m\gamma_s \tan \delta_{sb}}{\gamma'_b} \quad (3)$$

式中: $\tan \delta'_{gb}$ 为筋材与模块等效摩擦系数, γ_s 为空心模块填充的土体重度, δ_{sb} 为空心模块里填土与筋材的摩擦角。

先考虑加筋层间只有1个模块面板情况,选取第 i 层筋材对应距墙顶高度为 z_i 的加筋层上下相邻的两个模块进行受力分析(图3),分别对水平与竖直方向的受力建立平衡方程:

$$\text{水平方向: } T_i - P_i - F_{i-1} + F_{i+1} = 0 \quad (4)$$

$$\text{竖直方向: } W + F_{bi} + N_{i-1} - N_{i+1} = 0 \quad (5)$$

式中: T_i 为筋材与模块的连接拉力, P_i 为模块后加筋填土侧向土压力的合力, F 为模块顶部或底部产生的水平向摩擦力, N 为模块顶部或底部的法向压力, W 为模块自重产生的竖直向下重力, F_{bi} 为加筋填土对模块沿侧缘产生竖直向下的摩擦力。

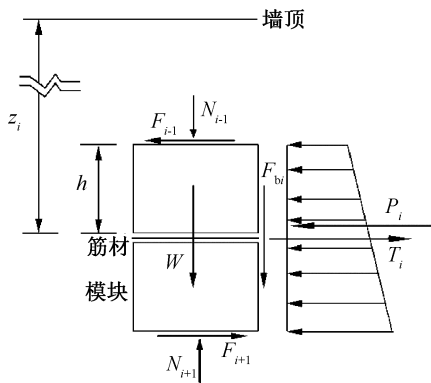


图3 面板连接受力分析图

Fig. 3 Force analysis diagram at the connection

根据面板后加筋区的库仑土压力分布,则 P_i 表示为

$$P_i = 2hK_a(\gamma z_i + q) \quad (6)$$

式中: K_a 为库仑主动土压力系数, q 为墙顶均布竖向荷载。

模块顶部或底部产生的水平向摩擦力 F 表示为

$$F_{i-1} = N_{i-1} \tan \delta'_{gb} \quad (7)$$

$$F_{i+1} = N_{i+1} \tan \delta'_{gb} \quad (8)$$

面板自重产生的竖直向下重力 W 表示为

$$W = 2hB\gamma'_b \quad (9)$$

加筋填土对模块产生的摩擦力 F_{bi} 表示为

$$F_{bi} = (P_i - T_i) \tan \delta \quad (10)$$

式中: δ 为模块与加筋土体摩擦角。

将公式(7)、(8)代入公式(5),再与公式(6)整理后,推导出筋材与面板的连接拉力 T_i 为

$$T_i = -\tan \delta'_{gb}(W + F_{bi}) + P_i \quad (11)$$

将公式(6)~(10)代入公式(11)获得:

$$T_i = 2h \left[K_a(\gamma z_i + q) - \left(\frac{\tan \delta'_{gb}}{1 - \tan \delta \tan \delta'_{gb}} \right) B\gamma'_b \right] \quad (12)$$

需要注意的是,由于筋材始终受拉,这样筋材与模块的连接拉力 T_i 不能为负值, $T_i < 0$ 时, T_i 设为0。

阻止筋材与模块连接破坏的抵抗力 R_i , 主要由面板与筋材间水平摩擦作用产生,表示为

$$R_i = (W_s + F_{bi}) \tan \delta'_{gb} \quad (13)$$

式中 W_s 为深度 z_i 上所有模块重力之和, $W_s = B\gamma_b z_i$, 将公式(10)代入公式(13), 获得面板连接破坏的抵抗力 R_i 为

$$R_i = 2 \left[B\gamma'_b z_i \tan \delta'_{gb} + \left(\frac{\tan \delta \tan^2 \delta'_{gb}}{1 - \tan \delta'_{gb} \tan \delta} \right) h B\gamma'_b \right] \quad (14)$$

挡墙加筋间距内有 n 个模块面板, 将公式(12)、(13)进行推广, 受力情况如图4所示。

此时筋材与面板的连接拉力和抵抗力分别表示为

$$T_i = 2nh \left[K_a(\gamma z_i + q) - \left(\frac{\tan \delta'_{gb}}{1 - \tan \delta \tan \delta'_{gb}} \right) B\gamma'_b \right] \quad (15)$$

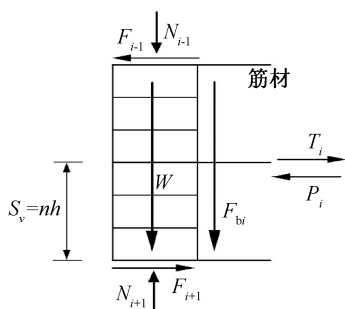


图4 多个模块面板连接受力分析图

Fig. 4 Force analysis diagram at the connection with blocks

$$R_i = 2 \left[B\gamma'_b z_i \tan \delta'_{gb} + \left(\frac{\tan \delta \tan^2 \delta'_{gb}}{1 - \tan \delta \tan \delta'_{gb}} \right) nhB\gamma'_b \right] \quad (16)$$

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

1.2 方法验证

这里采用 Wu 等^[14]研究中的实心模块式面板加筋土挡墙算例进行分析, 进而验证本文分析方法。加筋土挡墙 $H=6$ m, 墙后填土 $\gamma=19$ kN/m³、 $\varphi=40^\circ$, 墙顶荷载 $q=10$ kPa, 加筋填土与面板摩擦角 $\delta=(2/3)\varphi$, 模块重度 $\gamma_b=19$ kN/m³、 $B=0.2$ m、 $h=0.2$ m, 筋材-模块摩擦角 $\delta_{gb}=30^\circ$, 实心模块空心率 $m=0$ 。分别考虑三种不同加筋间距情况 (n 分别为 1、2、3), 图 5 给出了筋材与面板连接的净连接力沿墙高的分布, 从图中发现本文方法计算结果与文献结果完全吻合, 说明本文方法计算结果的正确性。

2 加筋土挡墙面板连接稳定性影响规律

运用所建立的加筋土挡墙面板连接稳定性分析方法开展参数敏感性分析, 主要考虑预制模块式面板及加筋土挡墙设计参数 (包括: 模块面板空心率 m 、加筋间距 S_v 、加筋填土内摩擦角 φ 、模块面板宽度 B 、空心模块填充土体内摩擦角 φ_s), 揭示这些参数对面板连接稳定性的影响规律。这里以一模块面板加筋土挡墙算例进行分析, 具体参数为: 墙高 $H=6$ m, 加筋间距 $S_v=0.4$ m, 墙后填土 $\gamma=20$ kN/m³, 加筋填土内摩擦角 $\varphi=30^\circ$, 空心模块里填土与加筋填土一致, 加筋填土与模块摩擦角 $\delta=(2/3)\varphi$, 墙顶荷载 $q=10$ kPa, 模块重度 $\gamma_b=24$ kN/m³, 模块宽度 $B=0.2$ m, 模块宽度 $h=0.2$ m, 筋材与模

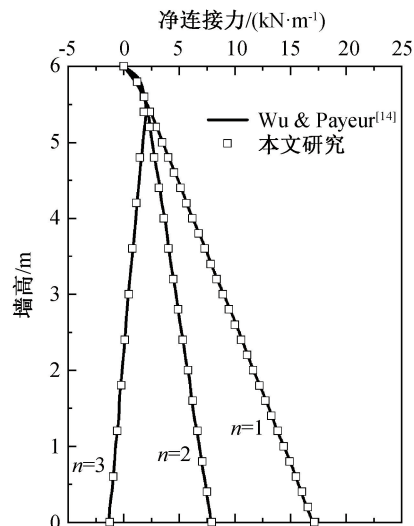


图5 面板净连接力沿墙高分布结果对比

Fig. 5 Comparison of the distribution results of the net connection force

块摩擦角 $\delta_{gb}=30^\circ$ 。

2.1 模块面板空心率

相比实心模块面板, 空心预制混凝土模块在成本、运输以及施工上具有一定优势, 经常应用在实际工程中。一般预制混凝土模块空心率 m 为 25%~50%, 这里选取两种模块空心率 $m=0.25$ 和 $m=0.5$, 同时考虑了实心模块面板情况, 即 $m=0$ 。图 6 分别给出了加筋填土与模块摩擦角 $\delta=0$ 和 $\delta=\varphi$ 情况下, 空心率对沿墙高面板净连接力分布的影响规律。

当模块侧面光滑时 ($\delta=0$), 空心模块面板的净连接力均为负值, 难以保证面板连接安全。实心模块的净连接力沿墙高分布接近 0, 面板连接稳定性处于临界状态。但是, 当加筋填土与模块摩擦角 $\delta=\varphi$ 时, 空心模块面板可以保证面板连接安全。这说明基于筋材与模块摩擦连接机制下, 加筋土挡墙面板在不依靠额外的机械连接时, 依然能够维持面板连接稳定。同时, 面板净连接力随模块空心率增加而减少, 尤其对于挡墙中下部降低尤为显著, 在实际工程中需要重点关注该位置的面板连接安全。

2.2 空心模块填充土体内摩擦角

在挡墙施工过程中, 安装空心模块面板会发现模块内未填充填土或填充土体压实性较低, 这样可能影响面板连接稳定性。这里考虑了空心模块中填土内摩擦角 $\varphi_s=0$ 、 $\varphi_s=\varphi/2$ 、 $\varphi_s=\varphi$ 的三

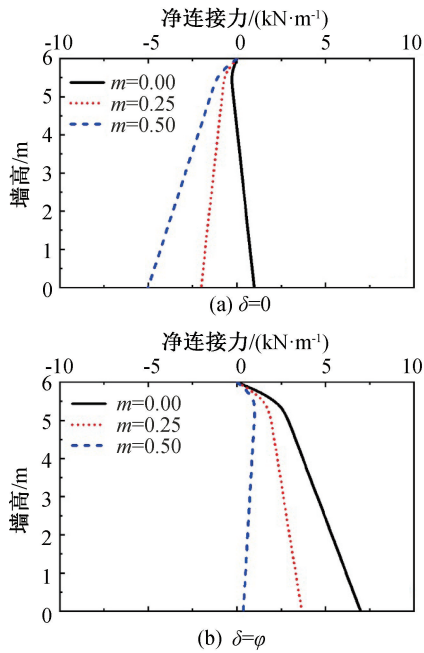


图 6 模块空心率影响下净连接力沿墙高分布规律

Fig. 6 Influences of module hollow rates on distribution of net connection force

种情况,其中 $\varphi_s=0$ 代表空心模块里无填土、 $\varphi_s=\varphi/2$ 为采用未经压实的填土、 $\varphi_s=\varphi$ 为与加筋填土内摩擦角保持一致,图 7 给出了两种面板空心率下填土内摩擦角对面板净连接力沿墙高分布的影响规律。

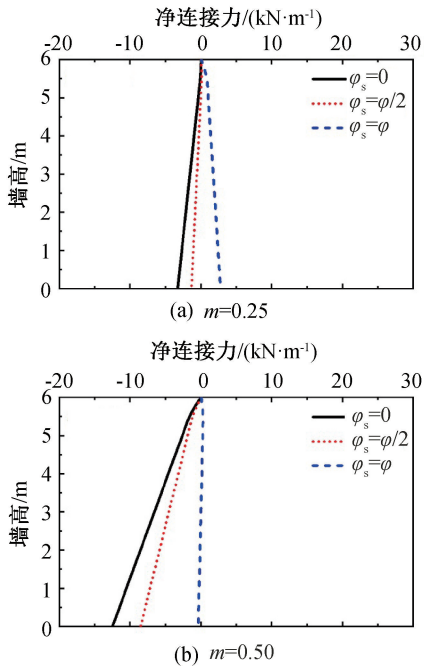


图 7 空心模块填充土体内摩擦角影响下净连接力沿墙高的分布规律

Fig. 7 Influences of friction angle of the soil filling hollow modules on distribution of net connection force

从图 7 中可以发现:当模块面板空心率较大时 ($m=0.50$),面板的净连接力基本均为负值,即便采用压实度较好的填土填充空心模块也难以保证面板连接安全;当 $m=0.25$ 时,只有对空心模块填充土体且压实性较高才能保证面板连接稳定。因此,加筋土挡墙采用空心模块面板时,需要选择空心率较低的模块,且填充土体经过压实,才能有效地保持面板连接稳定。

2.3 加筋填土内摩擦角

加筋土挡墙大多使用无黏性土作为填土,这里分别考虑加筋填土内摩擦角 $\varphi=20^\circ$ 、 $\varphi=30^\circ$ 、 $\varphi=40^\circ$ 三种情况,给出了填土内摩擦角影响下面板净连接力沿墙高的分布规律(图 8)。

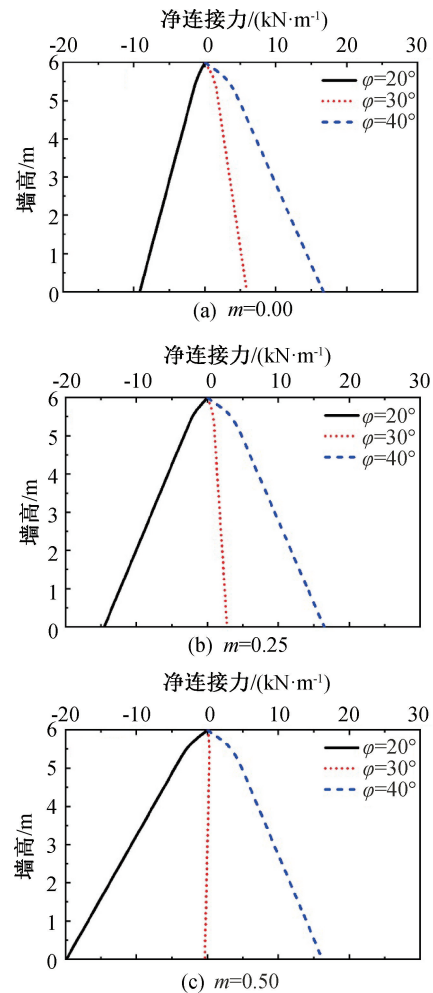


图 8 加筋填土内摩擦角影响下净连接力沿墙高的分布规律

Fig. 8 Influences of internal friction angles of the reinforced fill on distribution of net connection force

挡墙面板净连接力随着墙后加筋填土内摩擦角的提高而显著增加。采用不良填土时 ($\varphi=$

20°), 面板连接安全均难以保证, 会发生连接破坏。采用内摩擦角较大的填土时 ($\varphi = 30^\circ$ 和 $\varphi = 40^\circ$), 可以显著提升面板连接稳定性、尤其是挡墙中下部。因此, 加筋土挡墙选用模块面板时考虑面板连接安全, 需要对填土进行控制, 土体内摩擦角不宜低于 30° 。

2.4 模块面板宽度

筋材与模块的连接稳定性主要依靠筋材与模块之间的摩擦力, 其中摩擦力与模块的几何尺寸相关, 这里考虑了三种模块宽度 $B = 0.1 \text{ m}$ 、 $B = 0.2 \text{ m}$ 、 $B = 0.3 \text{ m}$, 图 9 给出了模块宽度对面板净连接力沿墙高分布的影响规律。

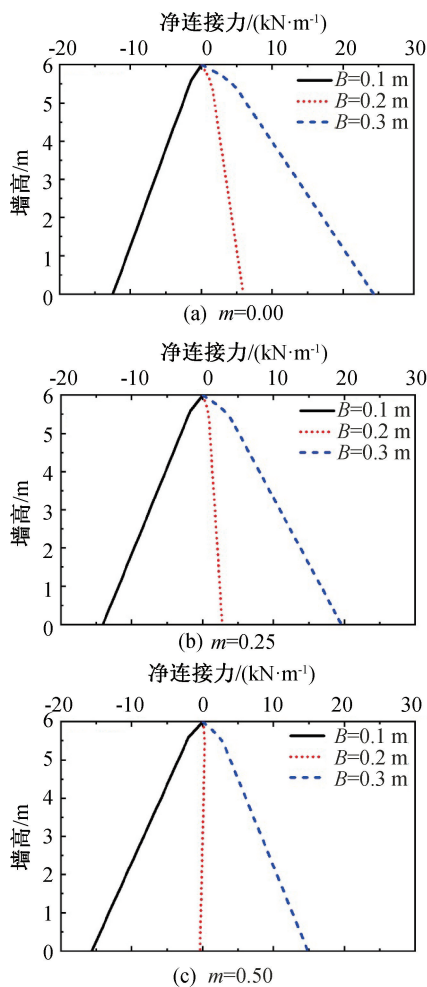


图 9 模块宽度影响下净连接力沿墙高的分布规律

Fig. 9 Influences of module widths on distribution of net connection force

挡墙面板净连接力随着模块宽度的增加而显著增大, 尤其对于挡墙中下部。当模块宽度较小时 ($B = 0.1 \text{ m}$), 模块面板连接安全难以保证, 均处于失稳状态。采用宽度较大的模块面板时, 可以显著提升面板连接安全。根据公式 (15) 和 (16),

增加模块宽度可以有效增大筋材与模块连接的抵抗力 R_i , 同时减小筋材拉力 T_i , 从而有效提高筋材与模块的净连接力, 保证面板连接安全。因此, 建议模块式面板加筋土挡墙的模块宽度不宜小于 0.2 m 。

2.5 加筋间距

加筋土挡墙设计相关规范^[13]要求: 挡墙加筋间距不应大于 0.6 m , 且不应小于 0.2 m , 这里分别选取了加筋间距 $S_v = 0.2 \text{ m}$ ($n = 1$)、 $S_v = 0.4 \text{ m}$ ($n = 2$) 和 $S_v = 0.6 \text{ m}$ ($n = 3$) 的三种情况。图 10 分别给出了预制模块空心率 m 分别为 0.00 、 0.25 以及 0.50 情况下, 加筋间距对挡墙面板净连接力沿墙高分布的影响规律。

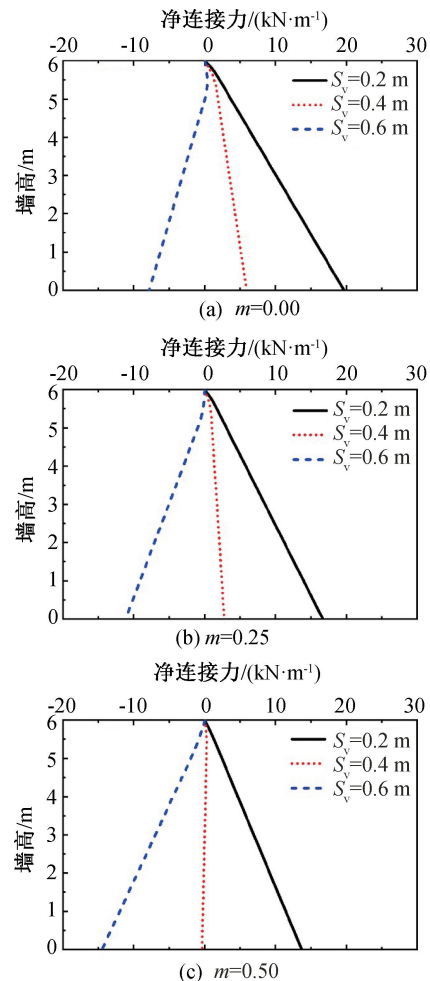


图 10 加筋间距影响下净连接力沿墙高的分布规律

Fig. 10 Influences of reinforcement spacing on distribution of net connection force

加筋土挡墙面板净连接力随加筋间距的增大而减小, 且随着墙高降低愈发显著, 表明加筋间距对加筋土挡墙面板连接安全十分重要。当加筋间

距较大时($S_v=0.6\text{ m}$),不同空心率的模块面板的净连接力均为负值,面板连接失效,表明过大的加筋间距难以保证面板连接安全。当加筋间距较小时($S_v=0.2\text{ m}$ 和 $S_v=0.4\text{ m}$),面板净连接力基本均大于0,此时挡墙面板连接处于稳定状态。所以,加筋土挡墙采用空心模块面板时,加筋间距不宜过大,以保证面板连接安全,参照美国联邦公路局加筋土挡墙与边坡设计指南(FHWA)^[16]规定的挡墙加筋间距 $S_v<0.3\text{ m}$ 的要求,建议模块式面板加筋土挡墙的加筋间距不宜大于 0.3 m 。

3 结论

本文建立了预制模块式面板加筋土挡墙面板连接稳定性分析方法,用于评估筋材与面板连接安全,通过参数分析揭示了预制模块式面板加筋土挡墙面板稳定性的影响规律,结论如下:

1)加筋土挡墙面板连接稳定性随模块空心率增加而降低,尤其对于挡墙中下部尤为显著,实际工程中应选择空心率较低的模块,且填充土体应经过压实,才能有效地保持面板连接稳定。

2)加筋土挡墙面板净连接力随着墙后加筋填土内摩擦角的提高而显著增加,采用不良填土时,面板连接安全均难以保证,会发生连接破坏。

3)加筋土挡墙面板净连接力随模块宽度的减小和加筋间距的增大而减小,且随着墙高的降低其愈发不稳定,建议模块式面板加筋土挡墙模块宽度不宜小于 0.2 m 、加筋间距不宜大于 0.3 m 。

参考文献:

- [1]杨广庆,徐超,张孟喜.土工合成材料加筋土结构应用技术指南[M].北京:人民交通出版社,2016.
- [2]宋梓璇.不同连接型式的模块式面板加筋土挡墙对比研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018
- [3]KOERNER R M, KOERNER G R. An Extended Data Base and Recommendations Regarding 320 Failed Geosynthetic Reinforced Mechanically Stabilized Earth (MSE) Walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(6): 904-912.
- [4]COLLIN J G. Lessons Learned From a Segmental Retaining Wall Failure[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2001, 19(7): 445-454.
- [5]朱宏伟,姚令侃,张旭海.两种加筋土挡墙的动力特性比较及抗震设计建议[J].岩土工程学报, 2012, 34(11): 2072-2080.
- [6]ASTM. Standard Test Method for Determining Connection Strength Between Geosynthetic Reinforcement and Segmental Concrete Units (Modular Concrete Blocks)[S]. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
- [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 Journal of the Transportation Research Board, 1992, 1414: 26-31.
- [8]COLLIN J, BERG R. Connection Strength Criteria for Mechanically Stabilized Earth Walls[J]. Transportation Research Record, 1993, 1414: 32-37.
- [9]BATHURST R J, HUANG B. A Geosynthetic Modular Block Connection Creep Test Apparatus, Methodology, and Interpretation[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33(2): 103-111.
- [10]AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. Washington, DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [11]NCMA. Design Manual for Segmental Retaining Walls [S]. 3rd Edition. Herndon, VA, USA: National Concrete Masonry Association, 2009.
- [12]JTG D30-2015,公路路基设计规范[S].
- [13]TB 10025-2019,铁路路基支挡结构设计规范[S].
- [14]WU J T H, PAYEUR J B. Connection Stability Analysis of Segmental Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Walls [J]. Transportation Infrastructure Geotechnology, 2015, 2(1): 1-17.
- [15]张茜茜.基于多尺度接触的结合面静摩擦系数分形模型[D].太原:太原科技大学,2020.
- [16]FHWA-NHI-10-024. Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slope[S]. Washington, DC, USA: National Highway Institute Federal Highway Administration and U. S. Department of Transportation, 2009.

(责任编辑 王利君)