

装配式生态格栅挡墙结构特性数值分析

王新泉^{1,2}, 朱聪^{1,2}, 黄天元³, 刁红国², 彭熙建³

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312099; 2. 浙大城市学院 工程学院, 浙江 杭州 310015;

3. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310006)

摘要:挡土墙是常见的护坡结构, 针对目前可绿化且高预制程度挡墙较少的问题, 施工效率高、可绿化的装配式生态格栅挡墙应运而生。为探究装配式生态格栅挡墙的受力特点及影响因素, 利用Abaqus有限元软件, 对不同路堤高度、不同填土的装配式生态格栅挡墙立柱、倾斜搁板受力特性展开探讨。研究结果表明: 不同填土高度对立柱的侧移影响不同, 在填土高度1 m范围内, 填土高度对立柱影响可忽略不计; 挡墙侧移随着黏聚力增加和内摩擦角的减小而减少。当挡墙为路堤墙时, “等效内摩擦角法”不适用于计算倾斜搁板受力; 立柱侧向位移较小, 且随着柱底转动; 由于倾斜搁板为开放式结构, 导致其应力分布规律为多段U形曲线, 与传统桩间土拱效应的先递增后减小趋势不同。当单根立柱的锚杆失效时, 立柱侧移量增加较小, 倾斜搁板合力点发生偏移。

关键词:装配式挡墙; 生态挡墙; 倾斜搁板; 有限元分析; 桩间土拱效应

中图分类号: U417.1+1

文献标志码: A

0 引言

挡土墙是常见的边坡支挡构筑物。挡土墙预制化程度、可绿化能力以及排水能力, 对挡土墙的施工效率以及环境友好性具有至关重要的作用。传统桩板式挡墙预制程度较低, 多为现浇, 其用于土质边坡时, 需在现浇立柱施工完成后, 将其钻孔, 在土合力点附近打入锚杆等结构限制其转动, 此举破坏了立柱原本的完整性; 因其封闭式的板结构, 导致其排水性能较差、可绿化能力较弱, 总之其结构需改进。

对于预制挡墙形式的创新, 蒋梅东^[1]将悬臂式挡墙拆分为立板和底板, 提出焊接装配、螺栓角钢装配、锚栓装配3种装配形式, 经过理论计算得出螺栓、预留钢筋的节点设计方法, 运用FLAC^{3D}讨论了上下级墙间距、上级墙埋深以及墙背填土强度对挡土墙稳定性的影响; 刘泽等^[2-3]在蒋梅东^[1]的研究基础上, 通过室内模拟、现场试验和有限元模拟, 确定使用锚栓作为连接措施; 邓凯等^[4]提出一种减压板式挡土墙, 并建立数学模型, 同时采用有限元软件Abaqus, 模拟不同长度减压板对挡土墙的影响。显然, 文献

[1-4]并未就可绿化功能展开研究, 其可绿化能力较差, 且预制结构尺寸较大, 并未体现高度预制化, 无法轻易做到随装随拆; 韩晓云^[5]利用理论计算与数值模拟软件FLAC^{3D}探讨了不同路堤填料墙踵长度、墙趾长度以及凸榫位置时路堤边坡变形特征以及墙体位移, 得出适用于二级公路路堤边坡加固的合理参数, 其涉及肋板安装以及挡土板镂空与安装, 虽然极大地提高了预制程度, 但同时也增加了预制难度以及现场的安装难度。

针对桩板墙挡土板的改进, 周航等^[6]将传统桩板墙挡土板更改为拱结构, 讨论了矩形截面的长宽比、桩体嵌入深度、土体摩擦角等影响桩拱挡墙极限荷载的因素, 但是该类挡墙无法绿化, 且需大规模现浇, 施工效率低下; 屈俊童^[7-10]通过足尺试验、有限元模拟等手段, 对现浇带倾斜搁板桩板墙受力问题展开探讨, 得到了倾斜搁板板间受力规律, 以及倾斜搁板板后土压力计算方法, 但是该研究针对的是现浇结构, 且计算方法是基于朗肯土压力理论的“等效内摩擦角法”, 结果与相关文献^[11-12]具有差异性, 具体表现在文献[10]为应力总体趋势随高度增加而递增, 而文献[11-12]应力随高度增加先递增后减小, 结果

收稿日期: 2022-01-04

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(编号: 2019007); 浙江省教育厅一般科研项目(编号: Y201941345)

作者简介: 王新泉, 男, 博士, 教授. E-mail: wangxq@zucc.edu.cn

差异可能与边坡内摩擦角大小有关。虽然文献[13]介绍了倾斜搁板体系挡墙的制造、施工工艺,但该类挡墙桩体结构为现浇且体积过于臃肿。

如图1所示,装配式生态格栅挡墙由立柱、倾斜搁板、锚杆组成。相邻立柱横向定位凸台作为倾斜搁板架,提供倾斜搁板支撑;多层预制板朝向边坡倾斜,层与层之间形成格栅槽;柱体横截面为矩形截面,由锚入边坡的锚杆进行固定。倾斜搁板由工厂标准化预制,通过其与立柱组合,实现可绿化的目的。

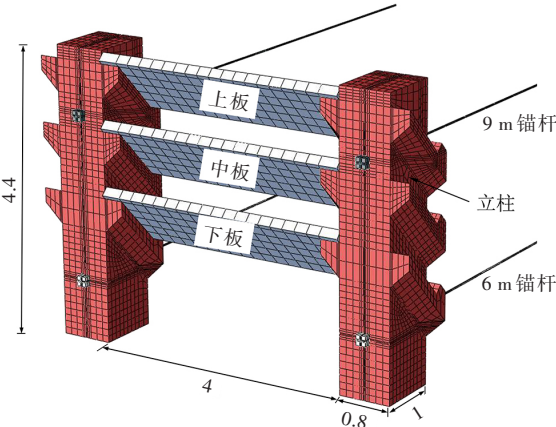


图1 装配式生态格栅挡墙(单位:m)

Rabie^[14]对锚杆挡墙采用极限平衡法和二维有限元模型进行模拟时发现,极限平衡设计方法可能不适用于组合式锚杆挡墙,需要采用有限元进行模拟。

装配式生态格栅挡墙的一些受力特点尚不明朗,为进一步探究装配式生态格栅挡墙的受力特点,该文基于Abaqus建立该类挡墙的数值分析模型,通过分析对比挡墙结构的受力以及变形,探讨上部填土高度、填土的黏聚力、内摩擦角等因素对挡墙立柱和倾斜搁板的影响。

1 挡墙模型

1.1 模型建立

图2为装配式生态格栅挡墙的三维有限元模型,土体三边约束假设为辊支承形式(Roller),模型采用结构化网格划分方法,柱体、土体、锚杆、倾斜搁板、调平层均采用八节点六面体实体单元(C3D8);倾斜搁板与立柱接触面正向接触采用Hard Contact,切向接触采用“罚”;立柱内部钢筋笼、倾斜插板内部钢筋网采用桁架划分(1D),采用Embedded Region嵌入

立柱和插板中;锚杆锚头采用Tie绑定于立柱以模拟封锚,锚杆末端三相固定模拟其嵌入山体。每根立柱打2根锚杆,上部在 $0.8h$ (h 为柱高,下同)处内置9 m锚杆,下部在 $0.14h$ 处内置6 m锚杆,锚杆采用直径25 mm的PSB930精轧螺纹钢锚杆,锚孔孔径为90 mm。因底部为岩石地基,故简化模型,将立柱底三相固定。

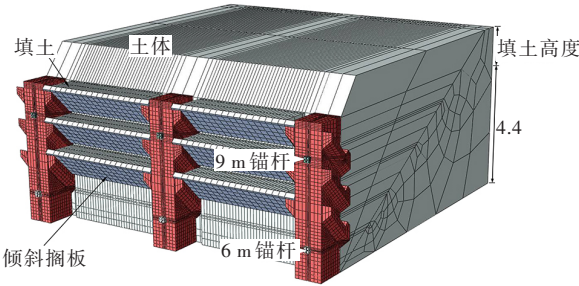


图2 装配式生态格栅挡墙模型(单位:m)

1.2 基本参数选取

锚杆、钢筋采用弹性本构,材料假定各向同性。文献[15-19]对Abaqus中混凝土弥散开裂模型和塑性损伤模型进行比较,得到弥散开裂模型适用于单调荷载结构,而损伤模型适用于往复荷载结构的结论,故挡墙以混凝土弥散开裂本构进行模拟。土体视为服从Mohr-Coulomb破坏准则的理想弹塑性体。材料基本输入参数如表1所示。

表1 材料基本输入参数

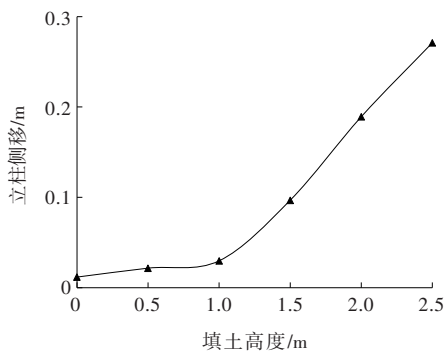
单元类别	杨氏模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
基土	25	0.3	1 800
混凝土	30 000	0.2	2 700
钢筋	200 000	0.3	7 800

2 挡墙结构影响因素分析

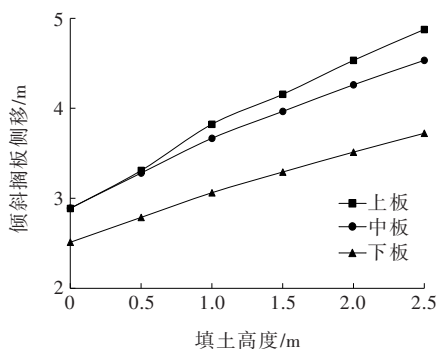
为进一步探究这类装配式挡墙使用时的受力特性与变形规律,以上述模型为基础,以模型的最大侧向变形值为参考,进一步分析上部填土高度和墙后填土强度对挡墙的影响。

2.1 上部填土高度的影响

为探究上部填土高度对结构的影响,基于控制变量法,为保证模型易于收敛,且结果明显,设土体内摩擦角为30°,黏聚力为20 kPa,得到填土高度对挡墙结构影响结果如图3所示。



(a) 立柱最大水平位移



(b) 倾斜搁板最大水平位移

图 3 填土高度的影响

由图 3(a)可知:由于填土高度的增加,立柱最大水平位移逐渐增大,在填土达到 1 m 后,水平位移增加速率变大。这是由于锚杆的约束,当填土高度在 1 m 以内时,最大位移并非出现在柱顶,而是产生在 2 根锚杆之间,形成类似于“胀肚形”^[20]的形变,顶端位移值为负;当填土高度大于 1 m 后,由于土压力较大,上部锚杆发生较大形变,柱顶位移为正,且随着填土高度的增加,侧向位移呈线性增加。

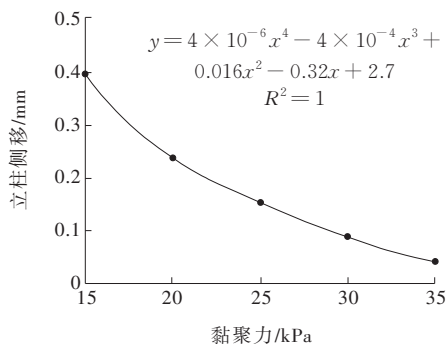
由图 3(b)可知:在填土高度为 0.5~1 m 时,上板位移增加速率变大,而中板和下板水平位移随高度变化基本呈线性增加。进一步地,当挡墙处于“路肩墙”范畴,即填土高度为 0 时,其斜插板受力规律遵循文献[10],即遵循适用于路肩墙之斜插板的“土拱效应”。但挡墙随着填土高度增加,倾斜搁板结构的受力规律无法采用“等效内摩擦角法”进行计算,需对最上部板进行额外的计算,以确保最上部斜板结构安全。与此同时,上板在填土高度大于 1 m 后,最大水平位移突然增加,由此可知当填土高度大于 1 m 后,此结构类型挡墙受力分布情况发生变化。

2.2 墙背填土参数的影响

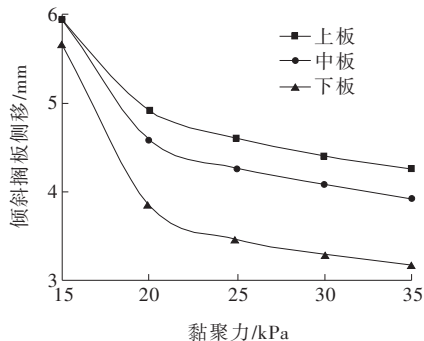
墙背回填土性质对墙背土压力有重要影响,故

对其进行探讨。分别取墙背填土黏聚力 c 为 15 kPa、20 kPa、25 kPa、30 kPa、35 kPa,内摩擦角 φ 为 25°、30°、35°、40°、45°,分析墙背回填土材料性质对挡土墙的影响。

基于控制变量法及结果易于收敛,取填土高度为 2.5 m。① 固定内摩擦角 φ 取 25°,由 2.1 节可得,填土高度为 0 时,柱顶不发生位移,在 1 m 及以上时结构的受力分布发生变化,柱顶产生位移,且呈线性增长,当黏聚力 c 分别取 15 kPa、20 kPa、25 kPa、30 kPa、35 kPa 时,立柱和倾斜搁板的最大水平位移结果如图 4 所示;② 固定黏聚力取 30 kPa,内摩擦角 φ 取 25°、30°、35°、40°、45°时,立柱和倾斜搁板的最大水平位移情况如图 5 所示。



(a) 立柱最大水平位移

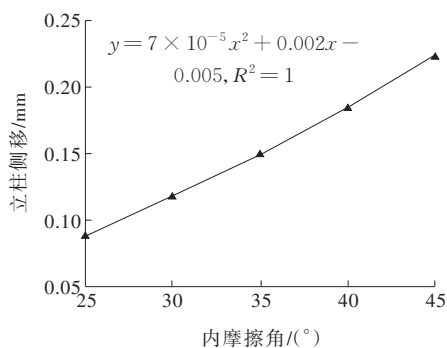


(b) 倾斜搁板最大水平位移

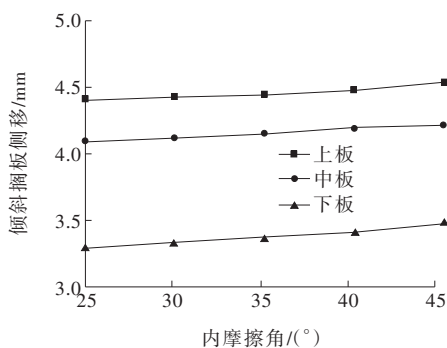
图 4 黏聚力的影响($\varphi=25^\circ$)

由图 4(a)可知:随着土体黏聚力的增加,立柱最大水平位移逐渐减小,位移减小速率逐渐变小,倾斜搁板在黏聚力为 15~30 kPa 时发生突变,此时立柱侧移变化仍较平缓,可知倾斜搁板对立柱侧移几乎无影响,即立柱所受土压力可用“等效内摩擦角法”进行计算。对此曲线进行拟合,可得:

$$y = 4 \times 10^{-6}x^4 - 4 \times 10^{-4}x^3 + 0.016x^2 - 0.32x + 2.7, \quad R^2 = 1 \quad (1)$$



(a) 立柱最大水平位移



(b) 倾斜搁板最大水平位移

图5 内摩擦角影响($c=30$ kPa)

由图4(b)可知:随着土体黏聚力增加,倾斜搁板位移减小,在黏聚力 c 取 $15\sim 20$ kPa时减小速率较大,在黏聚力 c 取 $20\sim 25$ kPa时减小速率突然变小,且近似呈线性减少。在 c 取 $20\sim 35$ kPa时,上板、中板、下板三者之间的侧移曲线基本平行,即上板较中板侧移量大7.5%左右,中板较下板侧移量大23%左右。

由图5(a)可知:立柱水平侧移随着内摩擦角的增大呈抛物线形增加,可用二次方程式表示:

$$y = 7 \times 10^{-5} x^2 + 0.002x - 0.005, R^2 = 1 \quad (2)$$

由图5(b)可知:倾斜搁板最大水平位移随内摩擦角的增加缓慢增加,基本呈线性增长,上板受力最大,中板其次,下板最小;若采用“等效内摩擦角法”计算“土拱效应”对倾斜搁板侧移的影响^[10],势必为中板最大,上板次之,下板最小,即趋势为“胀肚形”曲线^[20],故“等效内摩擦角法”不适用于此类挡墙在路堤墙时的设计。

3 常用工况分析

3.1 工况概述

工况1:填土为宕渣,文献[21-22]通过现场试验,

结合Abaqus模拟,分析其回弹模量和内摩擦角的变化规律,据此推知宕渣黏聚力约为30 kPa,内摩擦角为 $15^\circ\sim 20^\circ$ 。

工况2:填土为灰土,文献[23]通过现场试验,推知灰土的黏聚力为 $5\sim 20$ kPa,内摩擦角为 $10^\circ\sim 20^\circ$ 。

工况3:填土为基土,其黏聚力为20 kPa;内摩擦角为 32° 。

3.2 模型建立

该工程基本参数如表1所示,上部填土高度2.5 m,边坡剖面如图6所示。

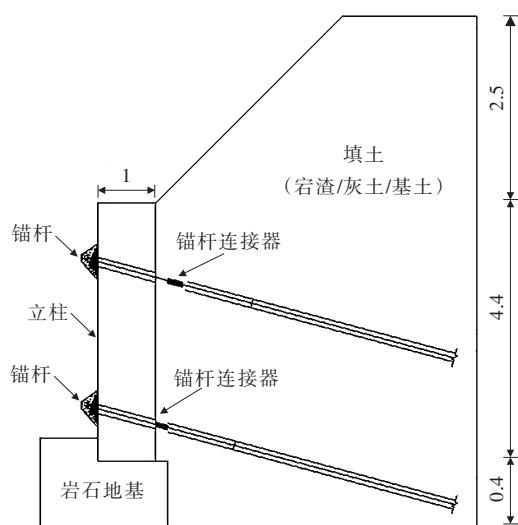


图6 边坡剖面图(单位:m)

3.3 挡墙受力分析

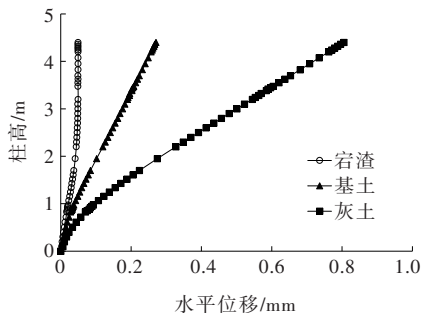
图7为3种工况下挡墙立柱水平位移及倾斜搁板侧移曲线。

由图7(a)可知:当填土为宕渣时,由于其黏聚力较大,且内摩擦角较小,立柱的水平位移较小,当柱高接近2 m时,水平位移已不再增加;当填土为灰土时,虽然其内摩擦角较小,但其黏聚力亦较小,导致立柱水平位移较大;当填土为基土时,其黏聚力、内摩擦角均较大,故其水平位移较宕渣大、较灰土小。

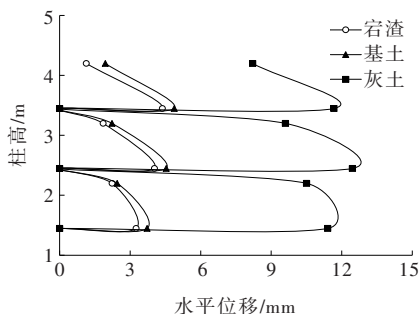
由图7(b)可得:当填土为宕渣与基土时,倾斜搁板水平位移较小,填土为基土的倾斜搁板水平位移稍大于宕渣填土;当填土为灰土时,倾斜搁板水平位移较大,故此类挡墙墙后填料不建议使用灰土。

4 锚杆连接器失效分析

锚入边坡的锚杆经过锚杆连接器接长,与立柱



(a) 立柱侧移



(b) 倾斜搁板侧移

图 7 3种工况下挡墙位移情况

发生联系,锚杆连接器的使用状态直接影响挡墙的受力状态,故对连接器的失效研究亦至关重要。

4.1 锚杆失效对立柱的影响

图8为锚杆失效时的立柱侧移情况。

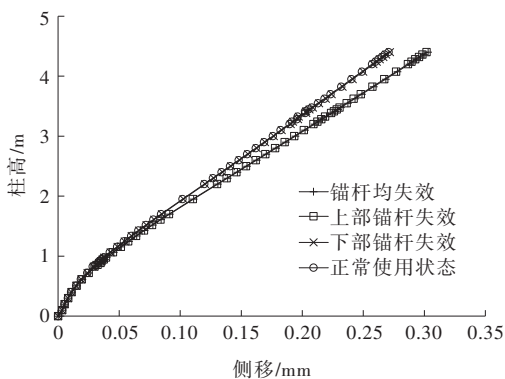


图 8 锚杆失效对立柱的影响

由图8可知:锚杆失效时立柱的侧移量增加,但在正常使用时土体已稳定,故侧移增加量较小。上部锚杆失效时,由于上部约束缺失,立柱最大水平位移增加了11.5%;下部锚杆失效时,由于缺失下部锚杆的约束,使得该类超静定结构受力状态发生改变,立柱最大水平位移增加4.4%;当上、下锚杆均失效时,由于受下部岩石地基约束,柱底绕着地基转动,立柱水平位移增加12%;虽然立柱侧移量较小,但边

坡整体的受力将发生改变,不可忽视。

4.2 锚杆失效对倾斜搁板的影响

图9为当上下锚杆均失效时,倾斜搁板的最大位移点偏离情况。由于立柱缺失锚杆约束,相邻立柱以及倾斜搁板的受力状态发生改变,倾斜搁板的最大位移点由板间向失效锚杆的立柱靠近,其偏移值均接近0.2 m,约占板总长的5%,即锚杆失效时,倾斜搁板的合力偏移量在5%以内。

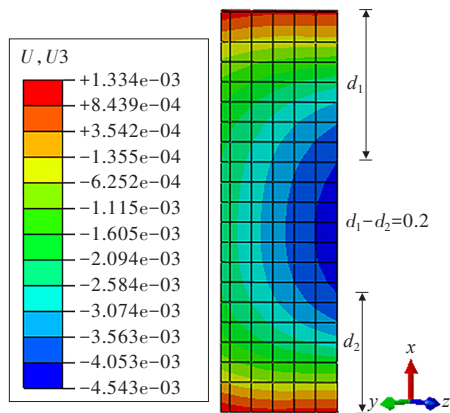


图 9 锚杆失效对倾斜搁板的影响(单位:m)

5 结论

利用Abaqus有限元软件,对装配式生态格栅挡墙的受力特点进行模拟,着重对路堤墙情况的挡墙进行分析,得出以下结论:

(1) 立柱由于受到锚杆约束,其位移较小;在填土高度为0~1 m时,柱顶位移几乎不变,最大水平位移出现在柱高1/3处;在填土高度大于1 m时,柱顶位移随填土高度的增加呈线性增长,随填土黏聚力的增加呈抛物线形减少,随填土内摩擦角增加呈抛物线形增加。

(2) 倾斜搁板由于受到“土拱效应”的影响,在其为“路肩墙”时,遵从“土拱效应”的一般规律,即板间受力呈“胀肚形”曲线,可采用“等效内摩擦角法”计算其受力特性;当其为“路堤墙”时,由于其上有填土,上部板最大水平位移大于中部板,已无法采用“等效内摩擦角法”的“土拱效应”计算方法,需对最上部板进行额外分析。

(3) 倾斜搁板的最大水平位移,随着填土高度的增加大致呈线性增加;随着填土黏聚力的增加,当黏聚力取15~20 kPa时,水平位移减少迅速,当黏聚力

大于 20 kPa 时,倾斜搁板的水平位移与填土黏聚力的相关性减小;倾斜搁板的水平位移随着填土内摩擦角的增加呈线性增加。

(4) 对宕渣、灰土、基土回填土实际工况进行分析,得到挡墙的最大受力位置以及应力分布情况。

(5) 针对锚杆的失效分析,由于挡墙在实际使用过程中,墙背土体已经趋于稳定,且由于锚杆对边坡的支护作用,故挡墙由于锚杆失效增加的位移不大,锚杆失效时,倾斜搁板合力点发生改变,偏移量占板长的 5% 左右。虽然影响较小,但仍需对其锚杆连接处进行修复,以避免偶然事件的发生。

参考文献:

- [1] 蒋梅东. 装配式挡土墙结构与试验研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2017.
- [2] 刘泽,何矾,黄天棋,等. 装配悬臂式挡土墙节点承载特性试验研究[J]. 公路交通科技,2020,37(9):25-33.
- [3] 刘泽,黄天棋,蒋梅东,等. 两级垛式悬臂挡土墙结构特性数值分析[J]. 湖南工业大学学报,2019,33(5):1-7.
- [4] 邓凯. 可调节多层减压板的装配式挡土墙数值模拟分析[D]. 湘潭:湘潭大学,2016.
- [5] 韩晓云. 路堤边坡绿化装配式挡土墙的稳定分析[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [6] 周航,陈烨,刘汉龙,等. 桩拱组合式挡土墙及其简化设计方法研究[J]. 土木与环境工程学报,2020,42(1):1-8.
- [7] 屈俊童,段自侠,雷真,等. 土拱效应下的挂板式斜插桩板墙模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(2):420-430.
- [8] 屈俊童,孙再斌,段自侠,等. 基于板间竖向土拱效应锚固式斜插桩板墙模型试验研究[J]. 建筑科学,2019,35(7):97-104.
- [9] 屈俊童,胡文斌,段自侠,等. 基于土拱效应的斜插桩板墙受力数值模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(4):628-636.
- [10] 屈俊童,胡文斌,吴绍山,等. 考虑板间土拱效应的斜插桩板墙受力机理研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2019,37(4):529-532.
- [11] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons,1943.
- [12] 周世良,陆春华. 柱板式挡土墙面板后土压力有限元分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2004,27(8):100-104.
- [13] 张燕. 斜插式桩板墙在边坡支护中的运用[D]. 重庆:重庆交通大学,2008.
- [14] RABIE M. Performance of hybrid MSE/soil nail walls using numerical analysis and limit equilibrium approaches[J]. HBRC Journal,2016,12(1):63-70.
- [15] 聂建国,王宇航. Abaqus 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学,2013,30(4):59-67,82.
- [16] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures,1989,25(3):299-326.
- [17] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics,1998,124(8):892-900.
- [18] BELARBI A, HSU T T C. Constitutive laws of softened concrete in biaxial tension-compression[J]. ACI Structural Journal,1995,92(5):562-573.
- [19] MANSOUR Mohamad, LEE Jung-Yoon, HSU Thomas T C. Cyclic stress-strain curves of concrete and steel bars in membrane elements[J]. Journal of Structural Engineering,2001,127(12):1402-1411.
- [20] 王新泉,崔允亮,张世民,等. 长江漫滩高承压水地基地连墙承载特性现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(3):773-780.
- [21] 詹炳根,叶晓华,韩丁,等. 宕渣土桥背回填冲击累积变形研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2013,36(11):1347-1351.
- [22] 阮宜东. 宕渣土填筑性能的试验研究与仿真优化设计[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
- [23] 王力威,茅一帆,孙康乐. 灰土比和龄期对灰土抗剪性能影响的试验研究[J]. 科技通报,2016,32(11):89-93,114.