

微型桩 - 加筋土挡墙的模型试验和数值模拟分析

张智超¹, 陈育民²

(1. 福建省地质工程勘察院 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室, 福建 福州 350002; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 微型桩 - 加筋土挡墙是一种适用于山区陡坡地带公路工程的新型路基支挡结构, 为了初步检验其工作机制和效果, 通过模型试验, 并结合有限元模拟, 对微型桩加固前后的斜坡加筋土挡墙在多级附加荷载下的静力响应进行对比研究。结果表明: 数值计算手段能够较好地再现模型试验结果; 在 2~10 kPa 附加荷载下, 实测微型桩 - 加筋土挡墙的沉降比加固前减小 11%~40%, 面板侧向位移减小 50%~66%, 且附加荷载越大, 减小的比例越大; 同时, 基底压力和侧向土压力也比加固前明显降低; 倾斜桩对挡土墙变形的限制发挥着更为重要的作用, 实测 2~10 kPa 附加荷载导致的倾斜桩身弯矩比竖直桩高出 25.9%~40.3%, 因而有必要采用较高强度的微型桩作为倾斜方向的加固构件。研究结论初步验证了微型桩 - 加筋土挡墙的有效性, 可为其在实际工程中的应用提供指导。

关键词: 边坡工程; 加筋土挡墙; 微型桩; 陡坡; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: P 64

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)04 - 0987 - 10

Model test and numerical analysis of micropile-MSE wall

ZHANG Zhichao¹, CHEN Yumin²

(1. *Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Land and Resources of China, Fujian Geological Engineering Survey Institute, Fuzhou, Fujian 350002, China*; 2. *College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China*)

Abstract: The micropile-mechanically stabilized earth(MSE) wall suitable for roadway construction in steep terrain of mountainous areas is a new type of earth retaining structure. To validate its working mechanism and effect, model tests and numerical simulation were conducted to study the multilevel surcharge induced static response of MSE walls on slope before and after the micropile reinforcement. The results indicate that the numerical method can simulate the model tests well. Under the surcharge loadings of 2 - 10 kPa, the measured subsidence of micropile-MSE wall is reduced by 11% - 40% compared to that of unreinforced model, whereas the wall deflection is reduced by 50% - 66%. The higher the surcharge loading, the larger the reduction is. The base and lateral earth pressures are also decreased notably. The inclined micropiles in the micropile-MSE wall play a more important role in the deformation control, which lead to a 25.9% - 40.3% higher bending moment in the inclined piles than in the vertical piles under the surcharge loadings of 2 - 10 kPa. Therefore it is necessary to use the micropiles of higher strength as the inclined reinforcement in the MSE wall. Thus, the reliability of the micropile-MSE wall is verified preliminarily.

Key words: slope engineering; mechanically stabilized earth(MSE) wall; micropile; steep slope; model tests; numerical simulation

收稿日期: 2016 - 04 - 19; **修回日期:** 2016 - 06 - 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609040); 福建省自然科学基金项目(2016J05112); 福建省科技创新平台建设(2014Y2007)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51609040), Natural Science Foundation of Fujian Province(Grant No. 2016J05112) and Science and Technology Innovation Platform of Fujian Province(Grant No. 2014Y2007)

作者简介: 张智超(1986 -), 男, 博士, 2008 年毕业于河海大学土木工程专业, 现任工程师, 主要从事边坡和挡土墙方面的研究工作。E-mail: zhangzhichao0704@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0374

1 引言

我国存在大量山区斜坡地段，公路建设如火如荼。在此地区修筑公路往往存在各种难点，如放坡空间不足，施工不便、大型机具不能进场，边坡稳定不易保障，不宜大量挖填方等，同时，山区公路一般直路少、弯道多，安全隐患突出的路段长，因而对公路护栏的安全系数要求较高，这从道路安全的角度给山区公路系统的建设提出了更高的挑战。

针对这些问题，提出了一种适用于山区陡坡地带公路工程的新型路基支挡结构——微型桩 - 加筋土挡墙(见图 1)，它同时吸收了柔性加固工艺——土工格栅，和刚性加固工艺——微型桩的优点，并借鉴了锚索抗滑桩的加固机制^[1-2]，在斜坡加筋土挡墙修筑完毕后，采用竖直和倾斜的一对微型桩对其进行加固处理。该加固系统的技术特点在于：

(1) 竖直和倾斜的一对微型桩贯穿加筋回填土区域，形成一个稳固的三角形加固体系，以控制柔性加筋土的变形，满足高等级公路对变形的要求，提高加筋土的内部稳定性(见图 1(a))。

(2) 微型桩锚固进地基，增加抗滑力，以减小回填土与天然地基或原有路基的沉降差异，抑制不协调变形，提高加筋土挡墙外部稳定性(见图 1(a))。

(3) 针对山区公路护栏安全系数要求高的特点，通过连接构件将公路护栏与地基梁及其下的微型桩结合，增强护栏的抗冲击能力(见图 1(b))。

(4) 沿公路长度方向浇筑的地基梁将公路挡土墙各个段面上的微型桩对结合，构成纵向框架组合形式，增强加固体系的整体性(见图 1(c))。

倾斜桩作为微型桩常用的一种布桩形式，其工艺特点和承载特性都得到了深入的研究和验证^[3-6]，同时，在加筋土中设置桩基础、增强结构水平承载性能的可行性也已得到广泛论证^[7-8]。因此，本文通过公路挡土墙的设计和加固方案，将竖直和倾斜布置的一对微型桩自上而下地应用于增强公路加筋土挡墙系统的护栏抗冲击性能、局部稳定性和整体稳定性，具有事半功倍、一举多得的效果。

与以往锚索抗滑桩结构不同的是，微型桩 - 加筋土挡墙中的倾斜加固构件也采用微型桩，不但具有常规锚索抗拉的性能，还具有较高的抗压和抗弯剪强度，因此，其中的倾斜微型桩不但能够协调竖直桩的受力，改变仅设置竖直桩时纯粹依靠锚固深度范围内的地基土体抗力来平衡滑坡推力的力学机制，使得竖直微型桩由类似悬臂式的受力状态变成上下端均近似为固接的受力结构，还可直接抵抗回填土区域的变形，对其沿着边坡的下滑提供抗滑力矩，更好地适应斜坡加筋土挡墙这种结构形式和受力条件都较为复杂的支挡结构；此外，从施工便利性的角度来说，微型桩与锚杆、锚索等都具有布置形式多样和施工便捷的优点，而加筋土挡墙中竖直和倾斜方向的加固构件均为微型桩，可不用更换施工设备，一次性完成施工，因而更为方便。

然而，微型桩 - 加筋土挡墙作为一种新型的公路挡土墙结构，其有效性还未得到实际工程的检验，因此，本文通过模型试验结合有限元计算的研究方法对其进行初步分析。一方面，可利用试验数据检验数值计算结果的合理性，为数值计算手段在微型桩 - 加筋土挡墙研究中的推广应用提供参考，另一方面，可将数值模拟与试验结果相互印证，对微型桩 - 加筋土挡墙的有效性进行多重检验，展示在试

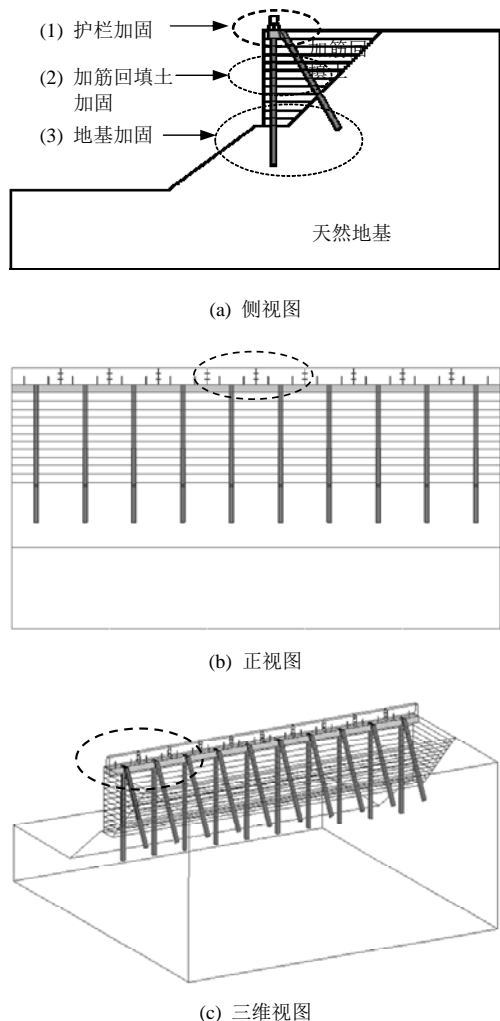


图 1 微型桩 - 加筋土挡墙

Fig.1 View of Micropile-MSE wall

验中所无法获取的结果。通过研究结论，可因地制宜地充分开发和利用我国的山区斜坡地段，为我国日益增加的山区公路建设提供一条可行之路。

2 模型试验介绍

2.1 试验概况

试验在砖墙砌筑而成的模型槽内进行，模型槽内部净空尺寸为 2 m×1 m×1.5 m(长×宽×高)。考虑到试验材料和场地条件的限制，所建立的加固前后的斜坡加筋土挡墙模型几何形状和尺寸如图 2 所示。加筋回填砂土区域高度为 60 cm，基底宽度为 15 cm，筋材层间距 10 cm，填筑于坡度为 45° 的黏土边坡上，挡土墙总体高度为 120 cm。为了削弱边界效应造成的影响，填筑了 3 个段面宽度的挡土墙模型，并主要测试和分析中间段面。模型槽宽度为 100 cm，因而每个段面的实际桩间距约为 33 cm。

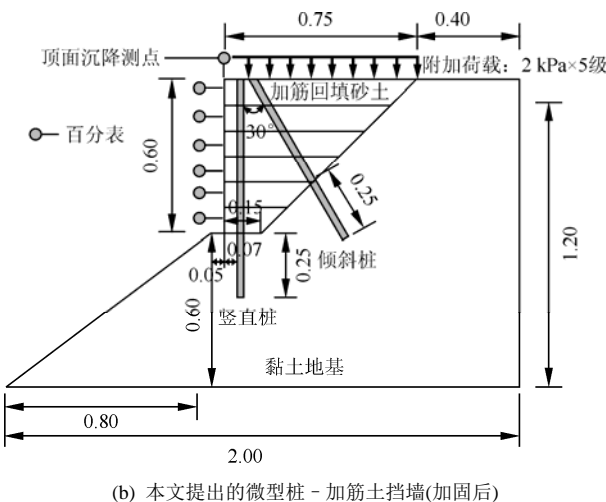
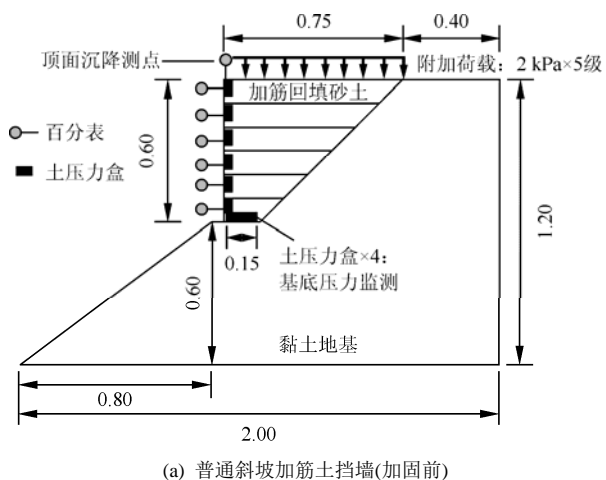


图 2 加固前后的加筋土挡墙侧视图(单位: m)

Fig.2 Side views of MSE Walls before and after reinforcement (unit: m)

微型桩的桩体截面为边长 3 cm 的正方形，在黏土地基中的锚固深度为 25 cm(见图 2(b))。实际工程中用于将垂直与倾斜微型桩在桩顶固接的承台，在试验中采用钢丝绑扎的简化方式来体现，这样可以大致实现由垂直与倾斜的一对微型桩所构成的三角形加固体系。但这与实际的承台浇筑相比，加固效果会有所削弱，需要引起注意。

通过在加筋回填土区域顶部均匀地铺置砖块来施加均布附加荷载(见图 3)，以测试挡土墙在各级附加荷载作用下的响应。一层砖块荷载为 1 kPa，每级施加两层砖，也即每级附加荷载为 2 kPa，共分为 5 级加载，最大堆载为 10 kPa。

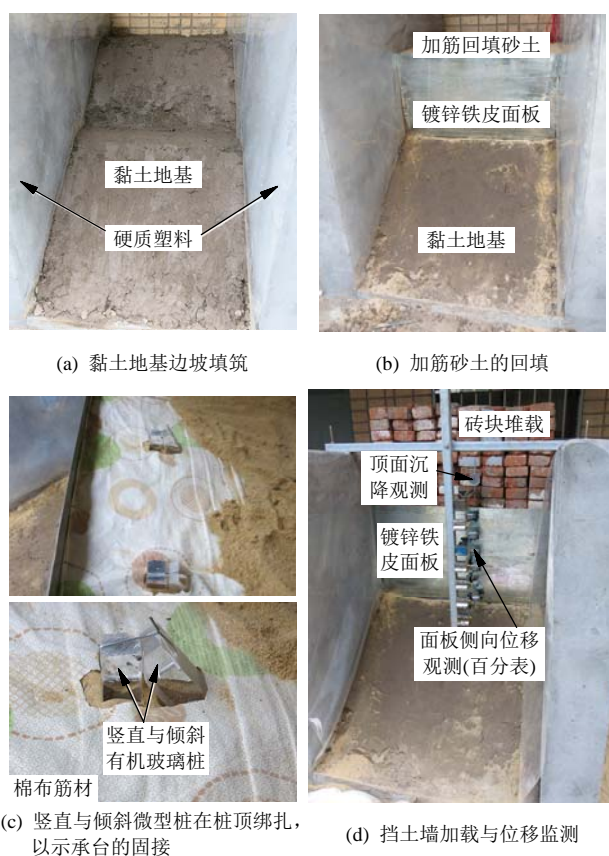


图 3 试验中的挡土墙模型概况

Fig.3 Model conditions in the tests

试验中要测试和比较的响应主要有：面板侧向位移、挡土墙顶部沉降、桩身弯矩、基底压力和侧向土压力。其中，沿着面板高度均布设置 6 个百分表，读取面板侧向位移；在承压板上设置一个百分表，读取挡土墙顶部沉降(见图 3)；在桩身每隔 10 cm 贴应变片，测试桩身应变，并转换为弯矩；在回填土基底埋置 4 个微型土压力盒来测试基底压力，在面板内侧每层回填砂土的中间高度(见图 2(a))布置 1 个土压力盒，共计 6 个，读取侧向土压力。

2.2 试验材料及相应数值计算参数

(1) 地基土与回填土

加筋土挡墙的回填土采用干燥的细砂，填筑于黏土地基上。经常规土工试验测试，回填土重度为 16 kN/m^3 ，颗粒相对密度 2.66，含水量 0.32%，不均匀系数 3.1，最大孔隙比 0.86，最小孔隙比 0.48，内摩擦角为 30° ；地基采用黏土，含水量为 12.5%，重度为 20 kN/m^3 ，最大干密度为 1.9 g/cm^3 ，最优含水量为 13%，其黏聚力为 24 kPa ，内摩擦角为 20° 。

采用 LS-DYNA 中的 Geologic Cap Model^[9]来模拟回填土和地基土体的力学行为。通过将该模型的塑性参数 γ 和 β 简化取 0，可将其简化为带帽盖的 Drucker-Prager 模型^[10]，只需要用 2 个强度参数 α 和 θ 来表达其剪切失效强度，同时强度参数 α 和 θ 可与经典 Mohr-Coulomb 准则中的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 相互转换。根据前述的试验用土的基本力学特性，并参考 J. T. H. Wu 等^[11]对加筋土挡墙土体材料参数的研究，可以得到数值计算中所需的 Geologic Cap Model 的材料参数，如表 1 所示。

(2) 筋材

试验中采用平纹针织棉布作为筋材，厚度约为 0.2 mm 。根据白刚等^[12]对平纹针织棉布材料属性的研究，可推测棉布的失效强度 $\sigma_y = 31.24 \text{ MPa}$ ，弹性模量 $E = 254 \text{ MPa}$ 。

数值模拟中采用理想弹塑性模型来模拟棉布，屈服后的切线模量 $E_t = 0$ ，计算参数见表 2。

(3) 面板

采用厚度为 1 mm 的镀锌铁皮作为面板，并预先钻孔，利用铁丝将棉布绑扎于面板上。镀锌铁皮^[13]密度为 7500 kg/m^3 ，弹性模量为 210 GPa ，泊松比为 0.25，在数值模拟中采用线弹性模型来模拟。

(4) 微型桩

试验中采用有机玻璃桩来模拟微型桩，弹性模量 2.9 GPa ，泊松比 0.25，密度 1200 kg/m^3 ， $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 时抗拉屈服强度约为 84.9 MPa ^[14]，初步估计实际模型试验中的有机玻璃桩远未达到屈服强度，因而简

化起见，在数值模拟中采用线弹性模型来模拟。

3 对比有限元模型的建立

数值计算模型如图 4、5 所示。鉴于有限元计算的网格敏感性，为微型桩加固前后的加筋土挡墙模型划分了同样的有限元网格。微型桩加固前，桩孔用土体材料填充，以示不含微型桩的工况(见图 4)；而微型桩加固后，桩孔则用有机玻璃材料填充(见图 5)，并设置桩与桩周土之间的摩擦接触关系，以示微型桩的加固。通过这样一套基本无差别的网格划分和设计，以期在分析中能够消除网格差异给结果可比性带来的影响，真正做到无干扰地分析微型桩的加固作用。竖直与倾斜微型桩在桩顶通过粘结接触相结合，以示承台的固接作用。

有限元模型中的土体和微型桩采用八节点常应力实体单元划分；面板采用壳单元划分，厚度为 1 mm ；筋材采用膜单元划分，厚度为 0.2 mm ，只有抗拉刚度而没有抗弯刚度。值得注意的是，采用分离式有限元对加筋土建模，需将膜单元和壳单元的厚度也考虑其中，为面板和筋材预留出空间，否则会引起材料之间的初始穿透，造成计算错误。

模型底部采用铰支，右侧和轴向 2 个外侧采用法向位移约束。在模型自重荷载稳定后，对回填土顶部施加附加荷载。根据经验，有机玻璃与地基黏土之间的摩擦因数为 0.16 ^[15]，回填砂土与有机玻璃之间的摩擦因数为 0.55 ^[16]，镀锌铁皮面板与回填砂土之间的摩擦因数为 0.47 ^[17]，并通过数值模拟试算，最终各材料之间的接触关系和参数见表 3。

4 试验结果与数值模拟的对比分析

4.1 挡土墙顶面沉降

选取了加筋回填土区域顶部靠近面板处的监测点(见图 2、3)来读取挡土墙顶面沉降。由于加筋土回填碾压和传感器埋设过程中造成的挡土墙变形

表 1 Geologic Cap Model 土体材料参数
Table 1 Parameters of Geologic Cap Model for soil

土类	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	初始帽盖 X_0/kPa	剪切模量 G/MPa	体积模量 K/MPa	α / kPa	θ / radian	β / MPa^{-1}	γ / MPa	塑性参数 W	塑性参数 D/MPa^{-1}	帽盖曲率参数 R	拉裂强度 T/kPa
回填土	1600	0	10	30	0 ($c = 0 \text{ kPa}$)	0.1667 ($\varphi = 30^\circ$)	0	0	1	0.0725	4	0
地基土	2000	0	10	30	22.55 ($c = 24 \text{ kPa}$)	0.1140 ($\varphi = 20^\circ$)	0	0	1	0.0725	4	20

表 2 棉布筋材的材料参数
Table 2 Parameters of cotton cloth

密度/(kg · m ⁻³)	σ_y /MPa	E /MPa	E_t /MPa	泊松比
900	31.24	254	0	0.3

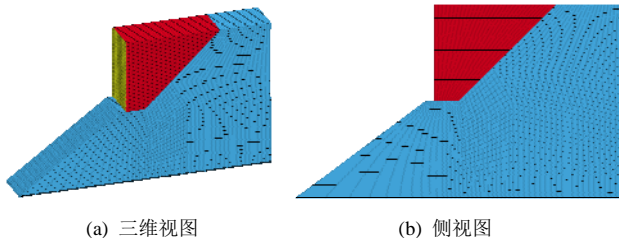


图 4 普通斜坡加筋土挡墙有限元模型(未加固)
Fig.4 FE model of MSE wall(no pile reinforcement)

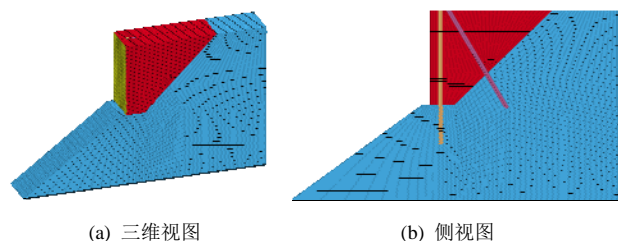


图 5 微型桩 - 加筋土挡墙有限元模型
Fig.5 FE model of micropile-MSE wall

表 3 接触关系
Table 3 Contact relationships

接触对	接触方式	摩擦因数
有机玻璃桩 - 黏土地基	摩擦接触	0.16
有机玻璃桩 - 回填砂土	摩擦接触	0.55
回填砂土 - 黏土地基	摩擦接触	0.50
镀锌铁皮面板 - 回填砂土	摩擦接触	0.47
棉布筋材 - 回填砂土	摩擦接触	0.50

不便计入在内，因而在加筋土填筑完毕后将百分表清零，对各级附加荷载作用所导致的挡土墙顶面沉降进行对比分析。

加固前后的加筋土挡墙的沉降实测值与模拟值如图 6 所示，由图可以看出，实测值与数值计算的结果显示出了较好的一致性，这在一定程度上验证了数值手段的合理性，但实测值在整体上比数值计算得到的沉降值稍小一些，这可能是由于试验中虽然在砖墙侧壁布置了光滑的硬质塑料来减小摩擦，并填筑了 3 个挡土墙模型段面，但仍具有一定边界效应，这与数值计算中理想情况下的光滑边界条件有所不同；此外，回填土与边坡之间的摩擦因数选取也是影响沉降结果的重要原因，加大回填土与边坡之间的摩擦可减小回填土的沉降。

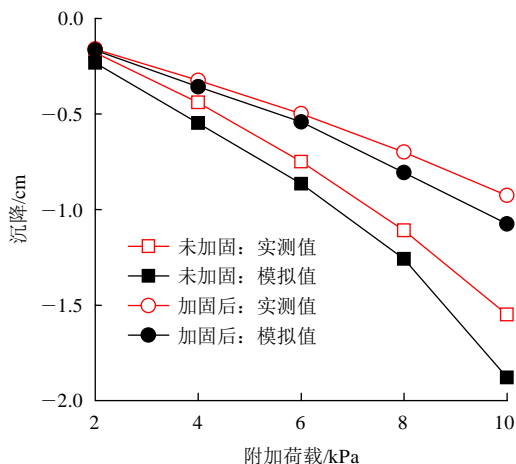
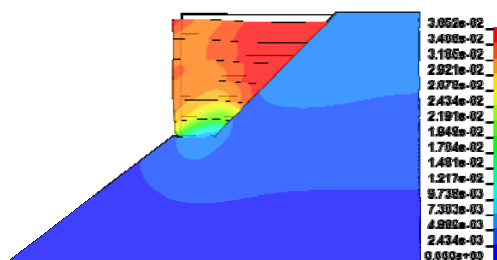


图 6 附加荷载作用下各挡土墙沉降对比
Fig.6 Comparison of subsidence of MSE walls induced by surcharge loading

同时，由图 6 还可发现，挡土墙的沉降随附加荷载的增大而增加，未加固的挡土墙沉降逐渐呈现非线性增长的趋势；而通过竖直与倾斜微型桩的加固，微型桩 - 加筋土挡墙的沉降保持在较小水平，在 2~10 kPa 附加荷载下，实测沉降比加固前减小了 11%~40%，而数值模拟的沉降值则为减小 13%~43%，实测值与模拟值较为接近，且附加荷载越大，减小的比例也越大，说明在受荷较大的情况下更能体现微型桩的加固效果。

试验中只测得了挡土墙顶面靠近面板处的沉降，为了进一步分析附加荷载作用下的整体变形规律，还通过数值模拟将各挡土墙在附加荷载作用前后的变形对比放大 2 倍，绘制于图 7。限于篇幅，仅给出 10 kPa 附加荷载作用后的变形。

由于修筑于陡坡之上，回填土区域基底宽度较窄，普通加筋土挡墙在附加荷载作用下虽然能保持稳定，但回填土区域沿着边坡产生了明显的整体下滑趋势(见图 7(a))，回填土区域顶部与黏土地基顶面之间产生了显著的沉降差异，位移为 3.65 cm，且回填土沿着边坡的下滑趋势使得大部分加筋土区域都处于高水平的位移状态，因而亟需采取加固措施。而对于本文提出的微型桩 - 加筋土挡墙结构(见图 7(b))，由于微型桩的加固对这种下滑趋势发挥了



(a) 普通加筋土挡墙

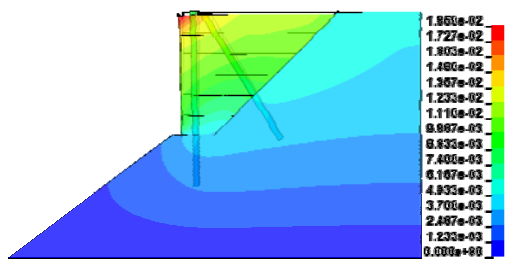


图 7 10 kPa 附加荷载作用下加筋土挡墙的变形(单位: m)
Fig.7 Deformation of MSE wall under surcharge of 10 kPa (unit: m)

显著的抑制作用, 大大降低了沉降差异, 使得挡土墙的最大位移仅为 1.85 cm, 比加固前减小了 49.3%, 且挡土墙的整体位移水平较低, 高水平的位移仅集中于面板顶部附近较小的局部区域。

因此, 这也说明了微型桩 - 加筋土挡墙同时吸收了柔性加固工艺(土工格栅)和刚性加固工艺(微型桩)的优点: 拉筋和面板将回填土形成柔性的整体结构, 使得土体能够依山填筑, 在陡峭的区域内保持直立, 保证了回填土区域的整体性; 在此整体性的基础上, 微型桩得以充分利用其刚性特征, 发挥抵抗变形的能力, 控制柔性加筋土的位移发展, 二者刚柔互补, 相得益彰。

4.2 桩身弯矩

桩身弯矩直接体现了加固构件的工作状况, 有助于对加固机制进行研究。根据试验测得的拉压应变 $+\varepsilon$ 和 $-\varepsilon$, 即可按照公式 $M = EI\Delta\varepsilon / d$ 计算断面处的桩身弯矩 M , 其中, d 为两个测点的间距, 此处也即桩径(m); EI 为桩的抗弯刚度($N \cdot m^2$)。

图 8, 9 分别为微型桩 - 加筋土挡墙竖直与倾斜桩的桩身弯矩实测值和模拟值对比。实测 10 kPa 附加荷载引起的桩身弯矩最大值见表 4。

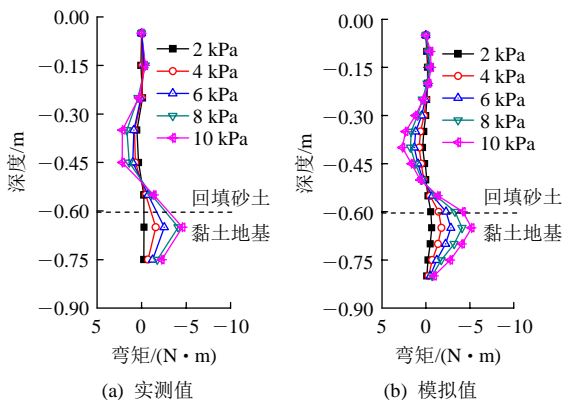


图 8 附加荷载下微型桩 - 加筋土挡墙的竖直桩身弯矩
Fig.8 Bending moments of vertical pile of micropile-MSE Wall induced by additional load

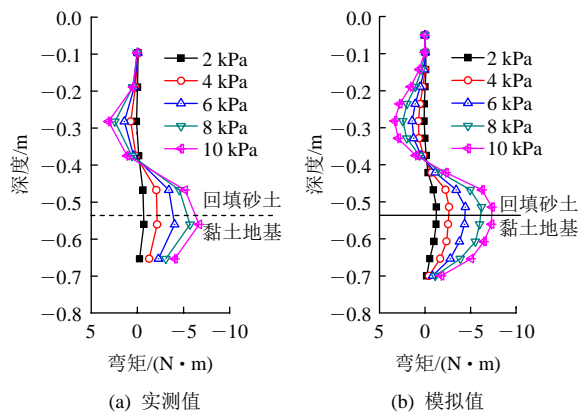


图 9 附加荷载下微型桩 - 加筋土挡墙的倾斜桩身弯矩
Fig.9 Bending moments of inclined pile of micropile-MSE wall induced by additional load

表 4 10 kPa 附加荷载引起的桩身弯矩实测值
Table 4 Measured bending moments induced by 10 kPa of surcharge loading

桩况	反弯点位置 (弯矩为 0)	最大弯矩/(N·m)	
		负弯矩	正弯矩
竖直桩	回填土以上 0.075 m	-2.2	4.6
倾斜桩	回填土以上 0.150 m	-3.1	6.7

随着附加荷载的施加, 各桩弯矩都逐级增大, 而最大弯矩点和反弯点(弯矩为 0)位置几乎都保持不变。竖直桩与倾斜桩的反弯点分别位于回填砂土与黏土地基交界面以上 0.075 和 0.15 m, 反弯点两侧的桩身弯矩呈抛物线的形式分布。在反弯点之上, 桩身弯曲方向与土体滑动方向相同(也即正弯矩); 而在反弯点之下, 桩身弯曲方向与土体滑动方向相反(也即负弯矩)。倾斜桩的最大负弯矩大致位于回填土和地基的交界面上(见图 9), 而竖直桩的最大负弯矩则出现在黏土地基内约 0.05 m 深度处(见图 8)。

由此也可以发现, 当微型桩锚固端内的地基土体为具有一定变形能力的黏土时, 桩身最大弯矩并非恰好位于滑动面(也即回填土和地基的交界面)上, 对于本文的挡土墙工况, 竖直桩最大弯矩点出现在交界面以下、锚固端内一定距离。这些弯矩极值点在桩身设计时值得引起注意, 弯矩最大点这也是桩体的薄弱位置, 有必要加强该处的配筋。

同时, 通过竖直桩(见图 8)与倾斜桩(见图 9)桩身弯矩的对比可以得知, 实际上倾斜微型桩对挡土墙变形的控制发挥着更为重要的作用, 各级附加荷载作用下实测倾斜桩身弯矩比竖直桩大 25.9%~40.3%, 而模拟值为大 19.3%~39.6%, 实测值与模拟值比较吻合, 这在一定程度上验证了数值手段的合理性, 同时也通过试验和数值手段, 共同说明了

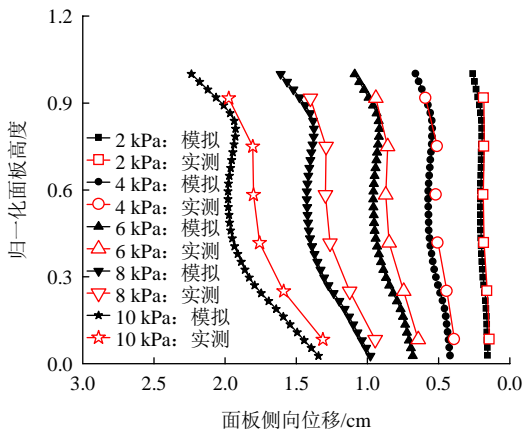
应着重加强倾斜微型桩的设计。

此外还可以发现，微型桩 - 加筋土挡墙中的倾斜加固构件也采用微型桩，不但具有常规锚索抗拉的性能，还具有较高的抗压和抗弯剪强度，因此，其中的倾斜微型桩不但能够协调竖直桩的受力，还可直接抵抗回填土区域的变形，对其沿着边坡的下滑提供抗滑力矩，更好地适应斜坡加筋土挡墙这种结构形式和受力条件都较为复杂的支挡结构，因而较之以往的锚索抗滑桩更为优越。

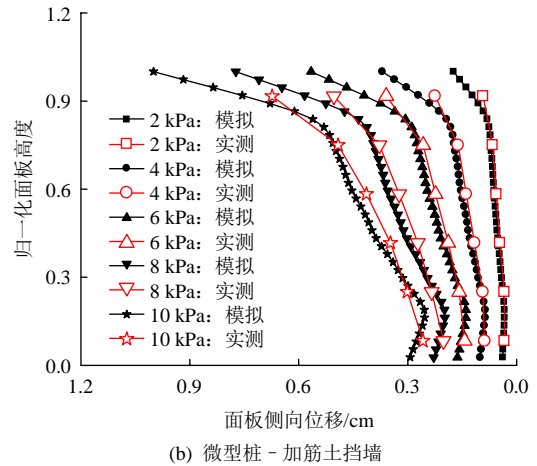
4.3 面板侧向位移

图 10 为各级附加荷载下的面板侧向位移实测值和模拟值，图中将面板高度进行归一化处理，使得高度都为单位 1。大体上实测值比模拟值稍小一些，同时，对于数值模拟结果，面板顶端由于缺乏拉筋的约束，在墙顶附加荷载的作用下逐渐产生了较为明显的向外挠曲现象；而实测结果中，顶层面板的向外挠曲则轻微了许多。这可能是因为试验中作为附加荷载的砖块和镀锌铁皮承压板无法铺设得与加筋土顶面完全贴合，因而实际施加的附加荷载并非完全满布，导致试验中附加荷载对顶层面板的影响比数值模拟理想条件下的满布附加荷载更小，从而使得实测的面板顶部向外挠曲不如数值模拟中的严重。此外，实测点的百分表间隔为 10 cm，离散的百分表测试点也可能是造成曲线特征不十分明显的原因之一。但模拟值与实测位移大体上比较接近，也反映出了类似的随荷载而递增的规律，在一定程度上证明了数值计算的可靠性。

此外，随着附加荷载的逐级增加，面板的侧向位移都逐渐增大，未加固的面板在中部发生了鼓胀现象(见图 10(a))，而微型桩 - 加筋土挡墙面板的鼓胀和整体侧向位移幅值都更小得多(见图 10(b))。



(a) 普通加筋土挡墙



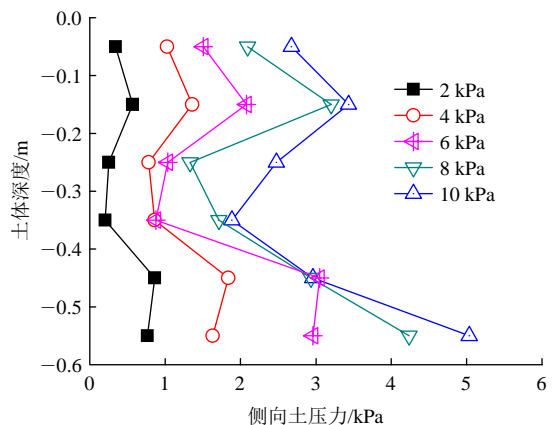
(b) 微型桩 - 加筋土挡墙

图 10 附加荷载下的面板侧向位移
Fig.10 Wall deflections of MSE Wall induced by additional load

面板最大侧向位移都发生在顶部，在 2~10 kPa 附加荷载作用下，加固前的实测最大位移为 0.18~1.98 cm，而模拟值为 0.26~2.23 cm；相比之下，加固后的实测最大位移为 0.11~0.67 cm，比加固前的实测值减小 50%~66%，而模拟值为 0.17~1.00 cm，比加固前的模拟值减小 57.7%~70.0%，且附加荷载越大，减小的比例也越大，再次说明在受荷较大的情况下，微型桩的加固效果更显著，同时，模拟值与实测值都较为吻合，证明了计算结果的合理性。

4.4 侧向土压力

图 11, 12 为各级附加荷载下的侧向土压力实测值和模拟值，由图可知，随着附加荷载的增加，各挡土墙中的侧向土压力也逐级增大，但可以明显地发现，微型桩 - 加筋土挡墙的侧向土压力(见图 12)大体上都比加固前(见图 11)更小，说明采用竖直与倾斜的一对微型桩构成的三角形加固体系，能够有效地减小面板受到的土体侧向压力，因而挡土墙也更容易保持稳定。



(a) 实测值

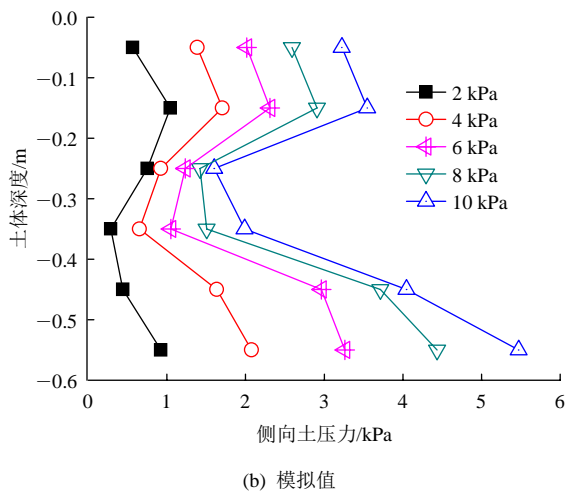


图 11 附加荷载作用下普通加筋土挡墙的侧向土压力
Fig.11 Earth pressure of MSE wall induced by additional load

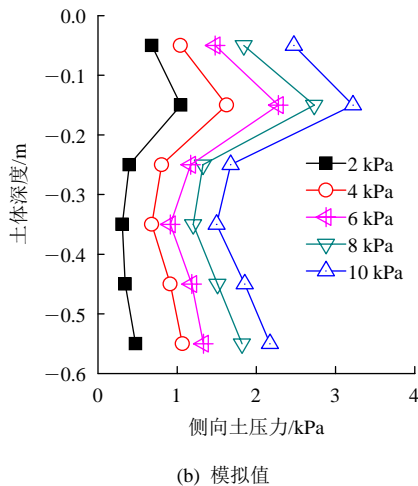
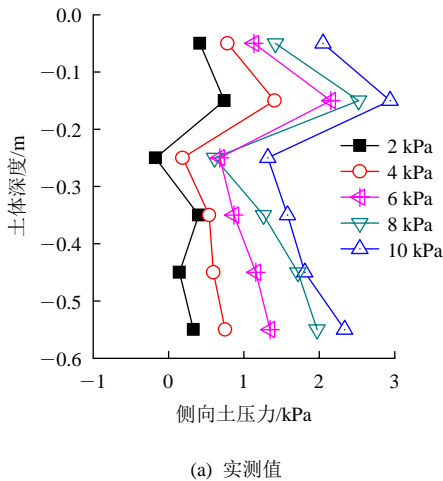


图 12 附加荷载下微型桩 - 加筋土挡墙的侧向土压力
Fig.12 Earth pressure of micropile-MSE wall induced by additional load

此外，侧向土压力分布曲线在大约 1/2 墙高处出现了明显的降低，据分析，这是由于面板在大约 1/2 高度处向外产生了一定的鼓胀趋势(见图 10)，使

得该处的土压力向主动状态靠近，从而导致了该处的土压力较其他位置更小。

为了进一步研究侧向土压力的分布规律和原因，以第二层加筋回填砂土的剖面为例(见图 13)，绘制了数值计算得到的各挡土墙土压力(x-stress)分布云图，如图 14 所示。为了更清楚地展示结果之间的差别，各图采用相同的应力尺度。

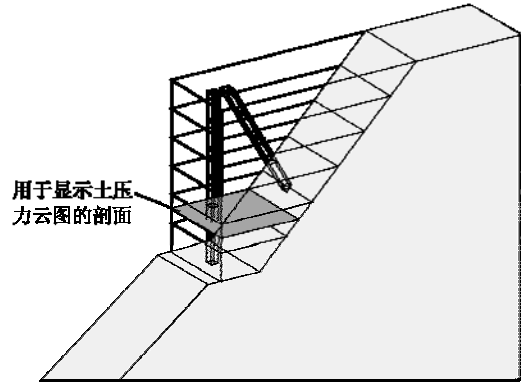


图 13 选取加筋回填砂土剖面以展示土压力分布
Fig.13 Cross section of reinforced soil chosen to show the earth pressure distribution

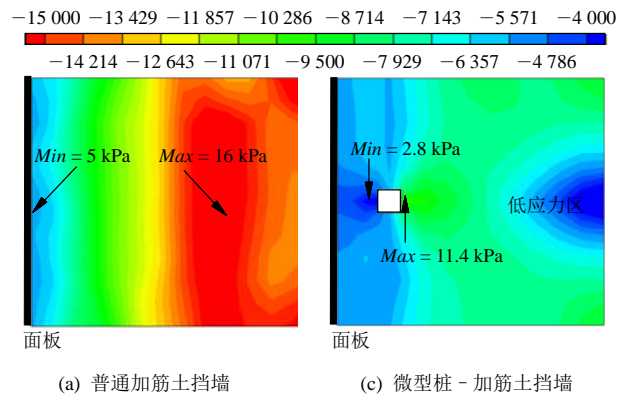


图 14 加固前后挡土墙截面上的土压力分布对比(单位: Pa)
Fig.14 Comparison of x-stress distribution in the cross section of MSE walls before and after reinforcement with micropiles (unit: Pa)

土体的滑动方向为从右向左。对于普通加筋土挡墙(见图 14(a))，从远端(也即靠近边坡)向面板接近(从右向左)，土体应力呈现先增大、后减小的趋势，且应力变化较为均匀，最小土压力(5 kPa)在靠近面板处，最大土压力(16 kPa)在中部靠近远端的边坡处。而微型桩 - 加筋土挡墙剖面上的整体应力水平都比加固前显著降低(见图 14(b))。同时，土压力在桩身附近产生了明显的波动，微型桩承担了一部分桩后土体推力，阻挡了桩后土体的滑动和变形，使得桩后土体产生了一定的应力集中和放大现象，

土压力最大值达到 11.4 kPa，而桩前的土体应力则相对较小，土压力仅为 2.8 kPa，这也是导致直接作用于面板上的土压力明显降低的原因。此外，倾斜微型桩还承担了桩体上部的部分土体荷载，使得在远端(也即靠近边坡)的桩体下部土体出现了一个明显的低应力区(见图 14(b))。

因此，数值计算结果再次证明了微型桩 - 加筋土挡墙能够有效地减小侧向土压力，从而有利于保证挡土墙的稳定。

4.5 基底压力

图 15, 16 为各级附加荷载作用下的基底压力。实测值与模拟值都相对较为接近，体现了数值计算的合理性，但基本上实测值会比模拟值稍小一些，这主要也是由于前述的边界效应以及回填土与边坡之间的摩擦因数选取所造成的。

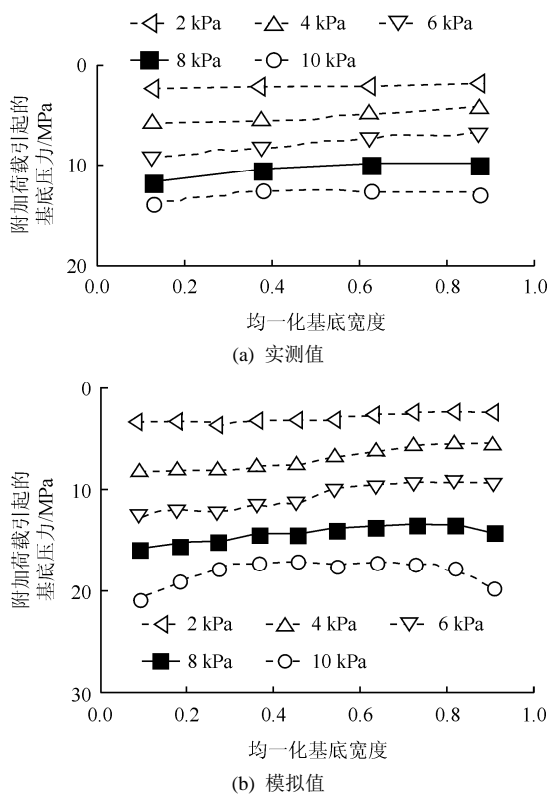


图 15 附加荷载下普通加筋土挡墙的基底压力

Fig.15 Base pressure of MSE wall induced by additional load

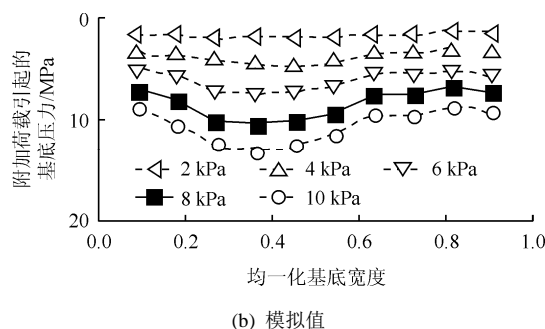
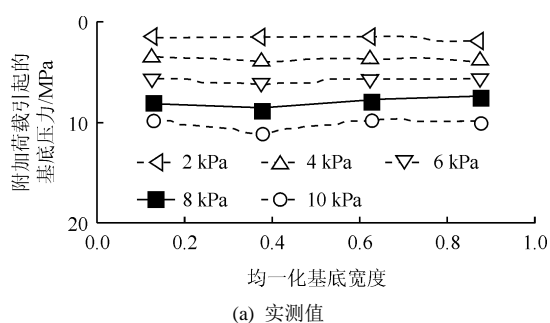


图 16 附加荷载作用下微型桩 - 加筋土挡墙的基底压力
Fig.16 Base pressure of micropile-MSE wall induced by additional load

大体上各挡土墙的基底压力都随着附加荷载的增加而逐级增大。对于加固前的加筋土挡墙(见图 15)，其各级附加荷载导致的基底压力都远大于该级附加荷载的实际值(也即 2, 4, 6, 8, 10 kPa, 共 5 级附加荷载)，这是因为回填土区域的基底宽度较窄(仅为 15 cm)，同时，在附加荷载作用下，回填土沿着黏土边坡产生的下滑趋势对基底造成了挤压，使得基底产生了应力重分布。

相比之下，微型桩 - 加筋土挡墙(见图 16)的基底压力则与相应的附加荷载大致相同，只是在部分区域略有放大。基底压力直接决定了对地基承载力的要求，而山区地带本身地势陡峭，地质条件复杂，地基承载力较低，而微型桩 - 加筋土挡墙的应用，削弱了陡坡地带回填土区域下滑所导致的基底压力放大现象，因而能够有效解决承载力问题。

5 结 论

提出了一个适用于山区陡坡地带公路工程的“微型桩 - 加筋土挡墙”新型路基支挡结构，以期能够一举多得地增强挡土墙外部稳定性、内部稳定性和护栏抗冲击性能。为了初步检验该新型结构的工作机制和效果，对其展开静载下的模型试验对比研究，并结合有限元分析，可以得到以下结论：

(1) 斜坡加筋土挡墙由于修筑于陡坡之上，回填土区域基底较窄，虽然仍能保持稳定，但回填土区域沿着边坡产生了明显的整体下滑趋势，不均匀沉降较明显；而经过微型桩加固后，在 2~10 kPa 附加荷载作用下，实测微型桩 - 加筋土挡墙的沉降比加固前减小了 11%~40%，面板侧向位移比加固前减小了 50%~66%，且附加荷载越大，减小的比例也越大，同时，挡土墙的基底压力和侧向土压力也明显降低，证明了微型桩的加固效果。

(2) 在附加荷载作用下,反弯点之上的桩身弯曲方向与土体滑动方向相同,而反弯点之下的桩身弯曲方向与土体滑动方向相反;倾斜桩的最大负弯矩大致位于回填土和地基的交界面上,而竖直桩的最大负弯矩则出现在黏土地基内约 0.05 m 深度处。这些弯矩极值点在桩身设计时需引起注意。

(3) 微型桩-加筋土挡墙的倾斜桩对变形的控制发挥着更为重要的作用,实测各级附加荷载下倾斜桩身弯矩比竖直桩大 25.9%~40.3%,因而需采用较高强度的微型桩作为倾斜方向的加固构件。

参考文献(References):

- [1] 周德培,王建松. 预应力锚索桩内力的一种计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 247 - 250.(ZHOU Depei, WANG Jiansong. Design method of retaining pile with prestressed cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 247 - 250.(in Chinese))
- [2] 周北. 预应力锚索抗滑桩结构设计理论与应用研究[硕士学位论文][D]. 长沙: 湖南大学, 2006.(ZHOU Bei. Study on the structure design theory and application of the anti-slide piles with pre-stressed cables[M. S. Thesis][D]. Changsha: Hunan University, 2006.(in Chinese))
- [3] 花鹏. 侧向荷载作用下微型斜桩工作性状研究[硕士学位论文][D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.(HUA Peng. Study on working behavior of inclined micro-piles under lateral loading[M. S. Thesis][D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.(in Chinese))
- [4] 吕凡任,陈仁朋,陈云敏,等. 软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 99 - 105.(LU Fanren, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin, et al. Field tests on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(3): 99 - 105.(in Chinese))
- [5] 胡明,雷用,赵晓柯. 基于 ANSYS 的倾斜微型桩支护边坡稳定分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增 1): 1 689 - 1 693.(HU Ming, LEI Yong, ZHAO Xiaoke. The finite element analysis of inclined micropiles based on ANSYS platform[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(Supp.1): 1 689 - 1 693. (in Chinese))
- [6] 龚健,杨建明,程光明. 微型桩基础的施工技术[J]. 施工技术, 2004, 33(1): 29 - 30.(GONG Jian, YANG Jianming, CHENG Guangming. Construction technology of micropile[J]. Construction Technology, 2004, 33(1): 29 - 30.(in Chinese))
- [7] PIERSON M. Behavior of laterally loaded shafts constructed behind the face of a mechanically stabilized earth block wall[Ph. D. Thesis][D]. Kansas City: University of Kansas, 2008.
- [8] ROLLINS K, PRICE J, BISCHOFF J. Reduced lateral resistance of abutment piles near MSE walls based on full-scale tests[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 6(2): 245 - 250.
- [9] HALLQUIST J O. LS-DYNA keyword user's manual(971 R6.0.0)[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2012: 138 - 143.
- [10] CHEN W F, SALEEB A F. Constitutive Equations for engineering materials. in: elasticity and modeling, vol.1[M]. Amsterdam: Elsevier, 1994: 580.
- [11] WU J T H, LEE K, HELWANY S, et al. Design and construction guidelines for geosynthetic-reinforced soil bridge abutments with a flexible facing system[M]. Washington, DC: Transportation Research Board, 2006: 59 - 60.
- [12] 白刚,吴坚,刘艳春. 机织物破坏形式及其影响因素[J]. 大连轻工业学院学报, 2001, 20(4): 297 - 300.(BAI Gang, WU Jian, LIU Yanchun. Damaging form of fabrics and its influencing factors[J]. Journal of Dalian Institute of Light Industry, 2001, 20(4): 297 - 300.(in Chinese))
- [13] 雷胜友. 双面加筋土高挡墙的离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 417 - 423.(LEI Shengyou. Centrifugal modeling of high double-face reinforced earth retaining wall[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 417 - 423.(in Chinese))
- [14] 范金娟,张卫方,陈新文. 定向有机玻璃的拉伸断裂行为研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26(5): 106 - 108.(FAN Jinjuan, ZHANG Weifang, CHEN Xinwen. Investigation of tensile fracture behavior of directional PMMA[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(5): 106 - 108.(in Chinese))
- [15] 张孟喜,张贤波,段晶晶. H-V 加筋黏性土的强度与变形特性[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1 563 - 1 568.(ZHANG Mengxi, ZHANG Xianbo, DUAN Jingjing. Strength and deformation properties of H-V reinforced clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1 563 - 1 568.(in Chinese))
- [16] 陈高峰. H-V 加筋饱和砂土的强度与变形特性[硕士学位论文][D]. 上海: 上海大学, 2009.(CHEN Gaofeng. Strength and deformation properties of saturated sands reinforced with horizontal-vertical(H-V) inclusions[M. S. Thesis][D]. Shanghai: Shanghai University, 2009.(in Chinese))
- [17] 张孟喜,王振武. 双层立体加筋砂土的强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3 289 - 3 298.(ZHANG Mengxi, WANG Zhenwu. Strength properties of two-layer three-dimensional reinforced sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp 1): 3 289 - 3 298.(in Chinese))