

文章编号: 0253-374X(2015)03-0379-07

DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2015.03.009

圬工与加筋土组合式挡墙离心模型试验

徐超^{1,2}, 贾斌¹, 罗玉珊¹, 董健³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

摘要: 以湖北十房(十堰至房县)高速公路某处圬工与加筋土组合式挡墙为研究对象, 通过土工离心模型试验技术, 研究圬工与加筋土组合式挡墙的变形特性及内部土压力分布, 并探讨强筋与弱筋(筋材模量)、长筋与短筋(加筋长度)以及密筋与疏筋(层间距)等参数对组合式挡墙的影响。研究发现: 圬工挡墙与加筋土挡墙存在明显的相互影响, 上部挡墙荷载使圬工挡墙发生内倾, 这一内倾使加筋土挡墙上部水平位移进一步增大, 并造成墙体底部土压力分布更不均匀; 增大土工格栅模量、增加加筋长度、减小加筋间距, 更有利于控制加筋土挡墙的变形; 加筋土挡墙内部土压力和墙后水平土压力总体上小于理论值, 且受挡墙加筋参数的影响; 组合挡土结构的墙顶沉降主要发生在施工期, 应加强施工质量控制, 保证填土的密实度。

关键词: 圬工与加筋土组合式挡墙; 离心模型试验; 变形特性; 土工格栅

中图分类号: U416.3

文献标志码: A

Centrifuge Model Tests of Behavior of Masonry and Reinforced Soil Composite Retaining Wall

XU Chao^{1,2}, JIA Bin¹, LUO Yushan¹, DONG Jian³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Communication Planning Design Institute of Hubei Province, Wuhan 430051, China)

Abstract: Taking amasonryand reinforced soil composite retaining wall of Hubei Shifang (Shiyan to Fangxian) Expressway as the research object, using the geotechnical centrifuge model test, the deformation characteristics and the soil pressure distribution of the combined retaining wall was studied, and the effects of reinforcement modulus, length and vertical spacing of reinforcement on the composite retaining wall was investigated. It is found out that the lower masonry retaining wall and the upper reinforced earth retaining wall

have obvious mutual influences, the introversion of masonry retaining wall occurs under the load of upper reinforced soil wall, and the introversion of masonry wall further increases the horizontal displacement of the upper part of reinforced soil retaining wall and makes the pressure distribution more uneven at the bottom. Increasing the geogrid modulus, increasing reinforced length and reducing reinforcement spacing are more conducive to the control of the deformation of reinforced soil retaining wall. The earth pressure in reinforced soil and the horizontal earth pressure behind retaining wall, which are impacted by reinforced parameters, are smaller than the theoretical value. The wall top settlement of composite retaining wall occurs mainly in the construction period, and measures should be taken to strengthen the construction quality control and ensure the compactness of soil.

Key words: masonry and reinforced soil composite retaining wall; centrifuge model test; deformation characteristics; geogrid

由于加筋土挡墙具有技术上的优越性, 与环境的可协调性好, 建造费用低且对施工场地和施工机械要求不高等优点; 因此, 在我国的公路、铁路等领域得到广泛应用。我国中西部山区山高坡陡, 在交通建设中使用加筋土挡墙技术可以提高坡率, 减少征地, 同时可就地取材, 甚至可以利用削坡和隧道开挖产生的弃土作为填土, 提高工作效率, 增加工程建设的经济效益和社会效益。

国内外已有很多学者采用离心模拟技术开展了加筋土挡墙工作机理的研究。章为民等^[1]通过离心模型试验研究发现加筋挡土墙的破坏面接近于对数螺线, 认为设计计算分析中采用 0.3H(H 为挡墙高度)型破坏面较 Rankine 破坏面更为合理。Zornberg

收稿日期: 2014-04-04

基金项目: 湖北省交通科学研究计划(2011-700-3-42)

第一作者: 徐超(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土工合成材料和地基加固。E-mail: c_axu@tongji.edu.cn

等^[2]结合土工离心模型试验和数字图像技术,分析在极限破坏状态下加筋土挡墙中的应力分布。林彤^[3]利用离心模型试验分析研究了各级加筋土挡墙墙背土压力与墙高、时间的关系,钢塑复合拉筋拉力在长度上的分布规律等。唐辉明等^[4]利用离心模拟技术对三峡工程库区 57 m 超高加筋土挡墙的墙背土压力分布规律和拉筋的拉力分布规律进行了系统研究。雷胜友^[5]在离心机上进行 30.0~62.5 m 的双面加筋土挡墙模型试验,研究了挡墙破坏形式及墙后土压力的分布情况。王岚等^[6]利用离心模型试验方法,研究了加筋风积砂挡墙的变形、加筋材料的应变分布等加筋风积砂挡墙的工作机理。Chen 等^[7]利用离心模型试验方法,模拟了在持续降雨及排水条件较差,且以黏性土为填料条件下,对垂直加筋土挡墙的筋材极限长度及加筋间距进行了研究。Sommers 等^[8]通过离心模型试验在靠近加筋土边坡坡面不同位置设置条形基础,并结合图像分析及边坡稳定性,研究加筋土边坡的稳定性。Lee 等^[9]通过离心机研究了超载情况下短加筋挡墙的变形特性。除了离心模型试验研究外,杨广庆等^[10-11]完成的系列原型加筋土挡墙测试与分析结果表明:基底垂直土压力其数值小于按照自重应力计算的理论值,侧向土压力实测数值均小于主动土压力,且沿墙高呈非线性形式分布。陈建峰等^[12]对软土地基上反包式土工格栅加筋黏性土挡墙进行了现场测试,发现软土地基加筋土挡墙的破坏形式表现为外部失稳,侧向位移发生在挡墙中部,墙面出现“鼓肚”现象。

除了单独使用加筋土挡墙,在工程实践中也出现加筋土挡墙与其他挡土结构的组合模式。邹维列等^[13]介绍了实践中出现的在重力式挡墙后填土中加筋的重力式加筋土挡墙,并提出了土压力计算方法。本文研究的圬工挡墙与加筋土组合式挡土结构,是由下部圬工重力式挡墙与上部加筋土挡墙构成。这种组合挡墙结构可以规避公路工程中加筋土挡墙不宜超过 12 m 的限制,也很好地适应于山区加筋路基面临的施工场地受限制的情形。这种组合挡土结构存在圬工挡墙与加筋挡墙的相互影响,特别是下级圬工挡墙对上级挡墙变形和稳定性的影响问题,对此尚缺乏深入的认识。本文在已有研究经验基础上,结合拟建十房(十堰至房县)高速公路圬工与加筋土组合式挡墙的具体条件,利用土工离心模型试验,通过改变筋材模量、加筋长度及加筋间距,分析这些因素对加筋土挡墙性状的影响,研究组合式挡墙的变形特征以及圬工挡墙与加筋土挡墙的相互影响。

1 离心模型试验

1.1 试验设备

本次离心试验在同济大学 TLJ-150 复合型岩土离心机(图 1)上进行。该机最大容量 150 g·t(g 为重力加速度, t 为质量单位吨), 最大加速度 200g, 有效旋转半径 3.0 m, 拖动功率 250 kW。对原型按比例 1: n 缩尺, 使土工模型在离心场中运行保证模型与原型的应力应变相等, 变形相似, 破坏机理相同, 能再现原型的受力变形状态, 从而达到试验研究的目的。

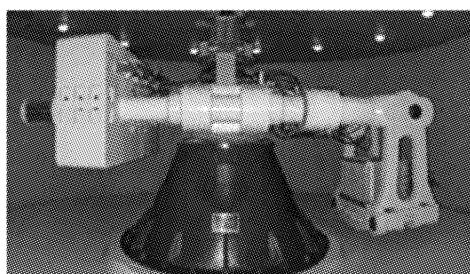


图 1 TLJ-150 岩土离心机

Fig.1 TLJ-150 geotechnical centrifuge machine

1.2 模拟对象及试验方案

本次研究以十房高速公路 5 标试验段圬工与加筋土组合式挡墙为研究对象。原型总高为 22 m, 下部 9 m 为圬工重力式挡墙, 坡率 1:0.25, 中部为 12 m 高的加筋土挡墙, 坡率 1:0.25, 加筋长度 9.0 m, 加筋间距 0.6 m, 墙面采用返包结构, 返包长度 1.0 m, 顶部为 1.0 m 厚的填土路基, 坡率 1:1.5。为研究不同材料模量、加筋长度及加筋间距等因素对圬工与加筋土组合式挡墙稳定性的影响, 本次共进行 4 组试验, 模型试验方案见表 1。试验采用的模型率 $n=40$, 模型箱尺寸为 900 mm × 700 mm × 700 mm (长×宽×高)。按模型率 1:40 缩小后的模型尺寸和测点布置图见图 2。

表 1 离心模型试验方案

Tab.1 Project of centrifugal model test

模型编号	筋材模量/ (kN·m ⁻¹)	加筋长度/ cm	加筋间距/ cm
M1	22.62	21	1.5
M2	10.90	21	1.5
M3	10.90	15	1.5
M4	10.90	15	2.0

1.3 试验材料及制备

试验中采用普通黄砂作为填料, 颗粒分析结果

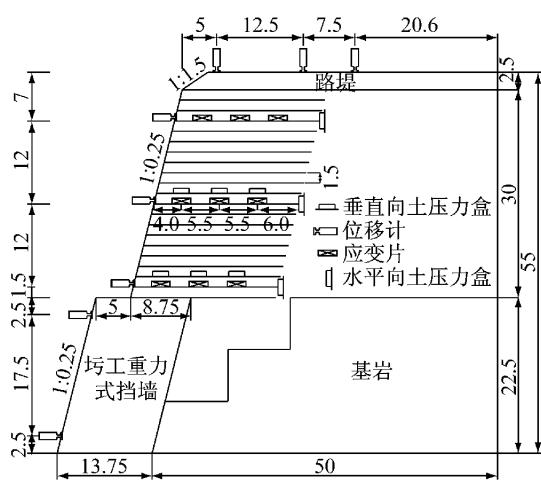


图2 模型M1和M2布置图(单位:cm)

Fig.2 Profile of centrifuge model 1 and model 2 (unit:cm)

确定为中砂,为了确保回填砂土的均匀性和密实度,通过加筋土挡墙断面尺寸计算控制每层所需的砂土总体积,同时采用落雨法进行铺设,保持落距60 cm不变,施工完成后,测试采用该法的回填砂土重度约

为 $15.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,黏聚力接近0,内摩擦角为 25.4° .

施工时稳定岩质边坡需分级开挖,经过比选测试,采用整块的坚硬实木来模拟岩质边坡;下部圬工重力式挡墙相对于上部加筋土挡墙而言,刚度较大,变形小,采用片石混凝土来模拟.

模拟原型土工格栅是本次试验的难点和重点.作者分别对菱形聚丙烯腈纶窗纱、医用纱布、玻璃纤维窗纱等材料进行拉伸试验,由于要同时满足力学相似和尺寸相似比较困难,依据力学性能相似原则,最后采用玻璃纤维窗纱来模拟模型格栅.采用同济大学自主研发的MGT1000多功能土工合成材料拉伸试验机,按照我国标准^[14]进行宽条拉伸试验,得到模型格栅及原型格栅的抗拉强度和延伸率特性指标(见表2).由表2可知,玻璃纤维窗纱长度方向的拉伸强度、2%和5%伸长率的拉伸强度以及5%割线模量乘上模型率40后均与原型格栅接近.窗纱的两个方向分别等效于拉伸模量为 $904 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $436 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 的原型土工格栅

表2 玻璃纤维窗纱试验参数

Tab.2 Parameters of fibre-glass screen netting

拉伸方向	2%拉伸强度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	5%拉伸强度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	5%割线模量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	极限抗拉强度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	断裂延伸率/ %
玻璃纤维窗纱长度方向	0.525	1.131	22.62	1.433	6.90
玻璃纤维窗纱宽度方向	0.202	0.545	10.90	1.556	22.62
原型单向土工格栅	>26	>48	960	>90	≤12

加筋土挡墙按设计层间距分层制作,在圬工挡墙顶面铺设第一层筋材,按落雨法铺设填土,筋材在墙面处进行返包.模拟运行期的试验中,在挡墙顶面满铺1.5 cm厚的钢板来模拟运营期的交通荷载,在离心加速度 $40g$ 时,相当于施加了49 kPa路面结构层自重与运营期路面等效交通荷载.

1.4 监测设备布置

本次试验共布置了5个差动式位移计,用于测量挡墙顶部沉降和圬工挡墙侧向位移;共布置3个非接触式激光位移计量测加筋土挡墙临空面的水平位移.为了准确量测加筋土挡墙内部土压力分布,试验中采用9个微型土压力计对不同位置的水平、竖向土压力进行量测.为了测得土工格栅的应力应变分布特征,每组试验选取三个特定位置的格栅进行研究,在选取格栅的特定位置贴上应变片.

1.5 试验过程

逐级增大加速度到 $40g$,然后稳定1.5 h,用以模拟3个月的施工期及路面结构施工前的休止期,本次讨论为表达方便将其统称为施工期;施工期结

束后停机,在墙顶满铺1.5 cm厚的钢板,用来模拟路面结构层自重和运营期的交通荷载,再逐级增大加速度直到设计模型率 $40g$,然后运行5.5 h,用于模拟1年的运营期.

2 试验结果

在 $40g$ 重力场中和墙顶施加荷载后,组合式挡墙均未发生破坏,表明十房高速公路5标试验段的设计方案是可靠的.在试验中和试验后分析发现,电阻应变片测量结果异常,根据应变换算的筋材受力远超筋材的抗拉强度,但挖出筋材检验发现其并未断裂.下面给出组合挡土结构换算后的变形与土压力监测结果.

2.1 墙顶沉降

图3~5分别为M1,M2,M3,M4模型试验的各测点墙顶总沉降、施工期墙顶沉降及运营期墙顶沉降曲线.

由图3~5可以看出:无论是施工期沉降、运

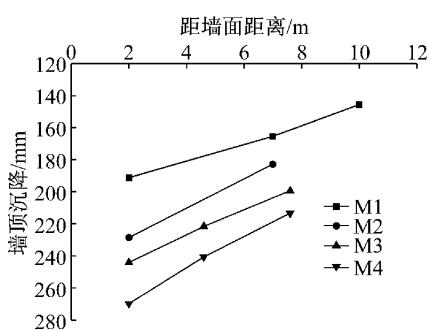


图3 墙顶总沉降图

Fig.3 Total top settlements of walls

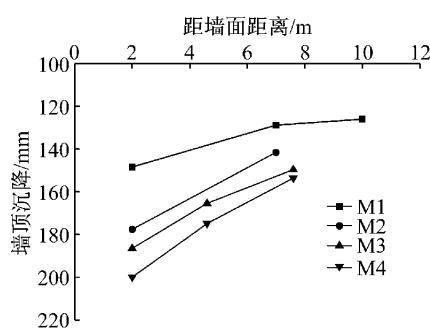


图4 施工期墙顶沉降

Fig.4 Top settlements during construction

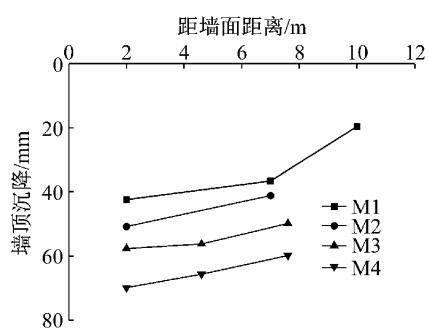


图5 1年运营期墙顶沉降

Fig.5 Top settlements in 1-year service

营期沉降还是墙顶总沉降,4组模型的墙顶最大沉降均发生在离墙面较近的区域,且沉降随离墙面距离的增大而减小;4组模型的墙顶沉降规律都相似,且施工期墙顶沉降大于运营期墙顶沉降。因此加筋土挡墙建造过程中应严格控制施工质量,以减少施工沉降和总沉降。

图3~5显示,各模型挡墙的墙顶沉降差别较大,表明模型参数(筋材模量、加筋长度和加筋间距)对墙顶沉降影响显著。表3给出了各模型挡墙墙顶最大总沉降量,可以看出,M1组墙顶总沉降最小,M2次之,M4组墙顶总沉降最大。

表3 各组模型墙顶最大总沉降

Tab.3 Total settlements of four wall models

模型编号	最大沉降/mm	与M1相比的增长率/%
M1	191.2	0.0
M2	228.5	19.5
M3	244.1	27.7
M4	269.8	41.1

加筋土挡墙施工期的沉降主要是由于在填土自重作用下,下部填土压密引起的,运营期的沉降是由顶部施加荷载造成的。在加筋土压缩过程中,由于临

空面一侧缺乏限制,越靠近墙面加筋土的侧向变形将会越大(下述侧向变形监测结果证实了这一点),就会出现靠近墙面的测点沉降量大,远离墙面的测点沉降量小的现象。从图3~5的墙顶沉降监测结果,结合表1中各模型参数的差别,可以发现:强筋挡墙(M1)的墙顶沉降比弱筋(M2)的小;长筋挡墙(M2,筋长0.7H)的墙顶沉降比短筋(M3,筋长0.5H)的小;密筋挡墙(M3,层间距0.6m)的墙顶沉降比疏筋(M4,层间距0.8m)的沉降小。这里强筋是指在筋材不被拉断情况下拉伸模量高,弱筋则相反;考虑间接加筋作用^[15],密筋应理解为间接加筋作用的影响范围不小于层间距的一半,两层筋材之间的填土均受到了加筋的限制作用。

2.2 墙面水平位移

图6~8分别为M1,M2,M3,M4模型试验墙面总水平位移、施工期墙面水平位移及运营期墙面水平位移沿墙高度的变化曲线。图中纵坐标0~9m部分为圬工重力式挡墙,9m以上部分为加筋土挡墙上的测点。

从图6~8可看出:无论在施工期墙面水平位

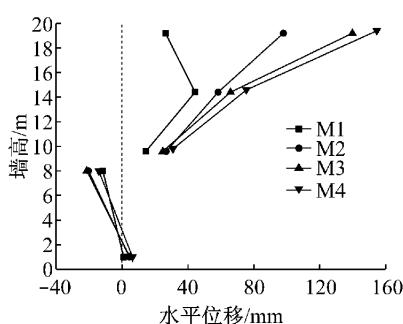


图6 墙面总水平位移

Fig.6 Total horizontal displacement of panels

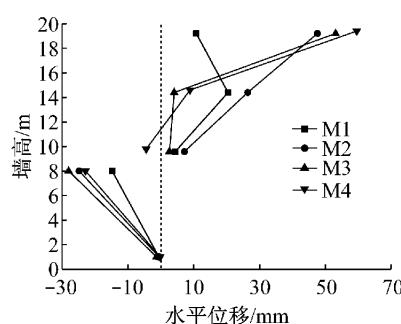


图7 施工期墙面水平位移

Fig.7 Horizontal displacement of panels during construction

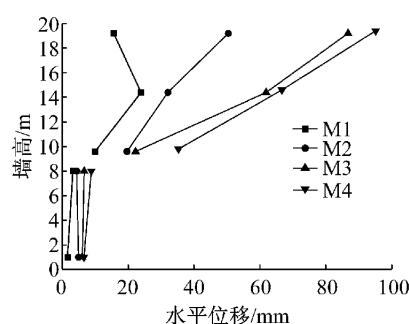


图8 1年运营期墙面水平位移

Fig.8 Horizontal displacement of panels in 1-year service

移、运营期墙面水平位移还是墙面总水平位移,除M1模型试验的最大位移发生在加筋土挡墙中部外,M2~M4模型的最大位移均发生在墙顶;在施工期内,圬工挡墙墙顶向墙内转动,运营期圬工挡墙整体向临空面平移,顶部位移略大于底部位移;总体上圬工挡墙向墙体内部倾斜,加筋土挡墙随着高度的增加水平位移幅度增大,表现向外倾覆变形。

从组合挡墙侧向变形的监测结果可以看出:模型参数(筋材模量、加筋长度和加筋间距)对墙面水平位移影响显著,从加筋土挡墙侧向位移来看,加筋因素对挡墙水平位移的影响与上述对墙顶沉降的影响规律一致。因此可以认为,从控制加筋土挡墙变形(沉降和位移)的角度,强筋优于弱筋,长筋优于短筋,密筋好于疏筋。这也是M1模型试验的墙顶沉降和水平位移远远小于M4的原因。进一步分析,强筋模量高,延伸率低,在相同荷载作用下,能更好地限制加筋土的侧向变形,进而减少侧向变形和沉降;加筋土挡墙从本质上是重力式挡墙,在加筋间距较小的情况下,加筋土作为整体发挥挡土作用,短筋($0.5H$)挡墙抵抗墙后土压力作用能力弱,整体侧向变形将大于长筋($0.7H$)的挡墙,另一方面,短筋情况下可能会存在锚固长度不足的情况,同样会引起较大的侧向变形和墙顶沉降;密筋挡墙整体性强,疏筋情况下,层间填土受加筋作用的限制小或不受限制,在荷载作用侧向变形将更大。

从M1~M4组合挡墙的水平位移监测结果来考察加筋土挡墙与圬工挡墙的相互影响。如果仅有圬工挡墙,一般情况下挡墙将在墙后土压力作用下向临空面位移或倾覆,但在上部加筋土挡墙垂直荷载作用下,圬工挡墙在施工期发生了不同程度的内倾。可能正是由于圬工挡墙内倾,改变了上部加筋土挡墙的侧向变形形态。从已有的坚实基础上加筋土挡墙的现场观测和模型试验结果看^[10-11],加筋土挡墙的墙面变形多表现为墙顶和墙脚位移小,而中部或中上部位移大的外凸形态,和本次试验研究中的M1模型相似。但本次试验研究中的M2~M4模型则表现为整体外倾,靠近墙脚水平位移小,而靠近墙顶位移量大,这就显示了下部圬工挡墙对上部加筋土挡墙的影响,即下部内倾的圬工挡墙进一步减小了加筋挡墙墙脚的水平位移,使加筋土挡墙在土压力作用下向外倾覆。再对比施工期和1年运营期后组合挡土结构的水平位移,可以看出由于运营期圬工挡墙发生整体向临空面平移,促使上部加筋土挡墙的侧向位移进一步发展,且大于施工期内的水平

位移。至于M1模型的侧向变形与其他各组模型不同,应归为两个因素:一是M1模型中圬工挡墙内倾程度低,其对加筋土挡墙的影响就会小;二是强筋、长筋的加筋作用也会对挡墙的变形形态产生影响。

2.3 墙内竖向土压力

图9和图10分别为4组模型试验中埋深11.8 m(其中M4埋深11.4 m)处在施工期和运营期的竖向土压力分布情况。按目前规范^[16]的计算方法,M1~M3中埋深11.8 m处的自重土压力为177 kPa,M4埋深11.4 m处的自重土压力为171 kPa。

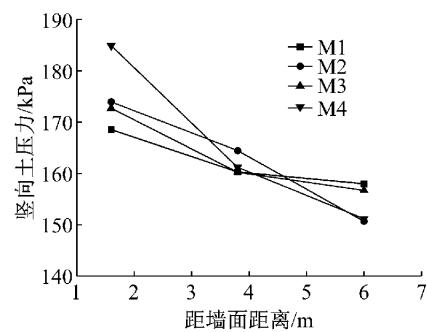


图9 施工期埋深11.8 m处竖向土压力

Fig. 9 Distribution of earth pressure at a depth of 11.8 m during construction

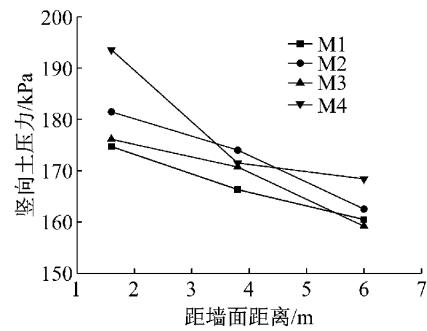


图10 运营期埋深11.8 m处竖向土压力

Fig. 10 Distribution of earth pressure at a depth of 11.8 m in service

图11和图12分别为4组模型试验中埋深7.0 m(M4埋深6.6 m)处在施工期和运营期的竖向土压力分布情况,经计算,M1~M3组模型埋深7.0 m处的自重土压力为105 kPa,M4组模型埋深6.6 m处的自重土压力为99 kPa。

由图9和图10可以看出:在加筋土挡墙墙底区域,竖向土压力分布很不均匀,随距墙面距离的增大逐渐减小,近似线性分布。而图11和图12显示:在加筋土挡墙的中上部竖向土压力存在峰值,具有随距墙面距离的增加先增大再减小的特征。这种土压力分布与上文加筋土挡墙的变形特征是协调的,可

以归结为加筋约束与下部圬工挡墙影响的共同作用,加筋作用使加筋土行为像一个柔性整体,虽不会像刚性重力式挡墙发生整体倾覆,但仍会在墙后水平土压力作用下发生偏心作用,并产生整体向临空面位移,使墙底土压力分布不均匀,墙脚处土压力增大;下部圬工挡墙作为加筋土挡墙的刚性支撑,并且向内偏转,就会加剧加筋土挡墙上部的侧向位移和墙底土压力的更不均匀,使墙脚处应力集中。

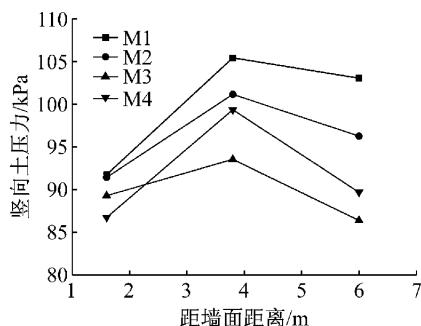


图 11 施工期埋深 7.0 m 处竖向土压力

Fig. 11 Distribution of earth pressure at a depth of 7.0 m during construction

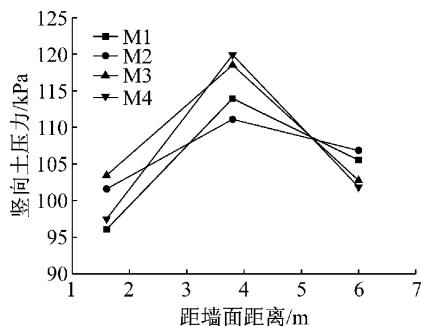


图 12 运营期埋深 7.0 m 处竖向土压力

Fig. 12 Distribution of earth pressure at a depth of 7.0 m in service

从试验结果看,加筋土挡墙的加筋参数对土压力大小和分布影响很大,除疏筋同时也是短筋挡墙(M4)的土压力与计算值接近外,其余模型墙底土压力测试结果均小于计算值,特别是强筋、密筋、长筋挡墙 M1,显示出加筋作用对土压力的“屏蔽”作用和加筋土具有更强的应力扩散作用,这与已有原型监测结果一致^[11]。

2.4 墙内水平土压力

本次水平土压力计布置在加筋体后部,贴近格栅端部,用于测量加筋体外部的水平土压力。图 13 和图 14 分别为施工期和运营期格栅末端水平土压力分布曲线,其中 M3 中 T9 土压力计失效。由图可知:水平向土压力远小于朗肯主动土压力和静止土压力,而随着深度增加,其侧向土压力明显偏离理论

计算值。

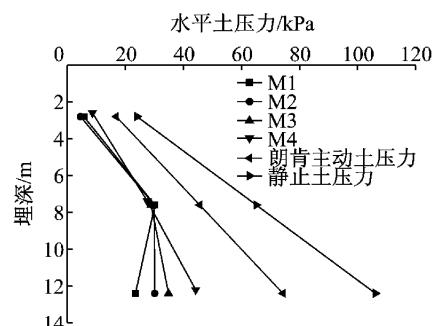


图 13 施工期格栅末端水平土压力分布曲线

Fig. 13 Distribution of lateral earth pressure at the end of the geogrid during construction

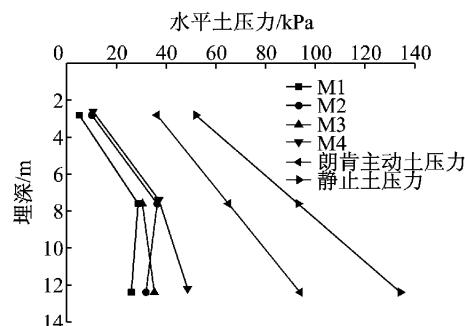


图 14 运营期格栅末端水平土压力分布曲线

Fig. 14 Distribution of lateral earth pressure at the end of the geogrid in service

墙后土压力小于朗肯主动土压力理论值的原因很多,包括实际存在的准黏聚力和计算时采用的内摩擦角小于实际值等。在本例中,根据前文加筋土挡墙变形监测结果,由于加筋土挡墙的水平位移较大,将会引起墙后填土内部的应力松弛,同样也会造成墙后水平土压力降低。

3 结论

(1) 试验研究结果表明,圬工挡墙与加筋土挡墙存在明显的相互影响。倾斜的圬工挡墙在上部加筋土荷载作用下会发生一定程度的内倾;圬工挡墙为加筋土挡墙提供了基础,其内倾变形反过来会改变上部加筋土挡墙的变形形态,使加筋土挡墙上部位移进一步放大,促使加筋土挡墙墙底土压力分布更不均匀,使墙脚处出现应力集中。

(2) 挡墙的加筋参数(筋材模量、加筋长度及加筋间距)对组合式挡墙的变形和加筋土挡墙的行为具有明显的影响。从控制挡墙变形角度,强筋优于弱筋,长筋优于短筋,密筋好于疏筋。密筋情况下,加筋

土的变形显示出整体性。

(3) 加筋土挡墙底部土压力分布不均,随离墙面的距离增加而减小,且总体上测得的土压力小于计算值。加筋土挡墙墙后水平土压力受各种因素,特别是墙体整体位移的影响,明显小于朗肯主动土压力计算值。

(4) 圩工与加筋土组合式挡墙的墙顶沉降主要发生在施工期,因此应加强对施工质量的控制,保证填土的密实度;本研究模拟实际案例,结果表明只要下部圬工挡墙稳定,上部加筋土挡墙稳定可靠,变形可控。

参考文献:

- [1] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 加筋挡土墙离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 84.
ZHANG Weimin, LAI Zhongzhong, XU Guangming. Centrifuge modeling of geotextile-reinforced cohesiveless soil retaining walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 84.
- [2] Zornberg J, Arriaga F. Strain distribution within geosynthetic-reinforced slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003(1): 32.
- [3] 林彤. 离心模型试验在超高加筋土挡墙中的应用[J]. 土木工程学报, 2004, 37(2): 43.
LIN Tong. Study on the application of centrifuge modeling test to super-elevation reinforced earth retaining wall [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(2): 43.
- [4] 唐辉明, 林彤. 三峡水库区巫山县加筋土挡墙离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2893.
TANG Huiming, LIN Tong. Centrifuge modeling test on reinforced earth wall at Wushan county in reservoir area of three gorges project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2893.
- [5] 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.
LEI Shengyou. Centrifuge modeling of high double-face reinforced earth retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 417.
- [6] 王岚, 邢永明, 苏跃宏, 等. 加筋风积砂挡墙工作机理的离心模型试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 30.
WANG Lan, XING Yongming, SU Yuehong, et al. Centrifuge modeling to working mechanism of reinforced aeolian sand retaining wall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 30.
- [7] Chen H T, Hung W Y, Chang C C, et al. Centrifuge modeling test of geotextile-reinforced wall with a very clayey backfill [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007(25): 346.
- [8] Sommers A N, Viswanadham B V S. Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009(27): 497.
- [9] Lee Y B, Ko H Y, McCartney J S. Deformation response of shored MSE walls under surcharge loading in the centrifuge [J]. Geosynthetics International, 2010(17): 389.
- [10] 杨广庆, 蔡英, 苏谦. 高路堤加筋土挡土墙的变形和受力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 321.
YANG Guangqing, CAI Ying, SU Qian. Testing study on deformation and stress of reinforced earth retaining wall for high embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 321.
- [11] 杨广庆, 吕鹏, 庞巍, 等. 反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.
YANG Guangqing, 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.
- [12] 陈建峰, 顾建伟, 石振明, 等. 软土地基加筋土挡墙现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增1): 3370.
CHEN Jianfeng, GU Jianwei, SHI Zhenming, et al. Field test study of reinforced soil wall on soft ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Suppl. 1): 3370.
- [13] 邹维列, 冷建军, 王协群. 重力式加筋土挡墙的工作性能和土压力计算[J]. 岩土力学, 2011, 32(增2): 70.
ZOU Weilie, LENG Jianjun, WANG Xiequn. Numerical analysis of working properties and soil pressure calculation of geosynthetic-reinforced soil gravity retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Suppl. 2): 70.
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T17689—2008 土木合成材料塑料土工格栅标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
The National Standards Compliation Group of People's Republic of China. GB/T17689—2008 Geosynthetics-plastic geogrids [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [15] 包承纲, 汪明远, 丁金华. 格栅加筋土工作机理的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 34.
BAO Chenggang, WANG Mingyuan, DING Jinhua. Mechanism of soil reinforced with geogrid [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(1): 34.
- [16] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50290—98 土木合成材料应用技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1998.
The National Standards Compliation Group of People's Republic of China. GB 50290—98 Technical standard for applications of geosynthetics [S]. Beijing: China Planning Press, 1998.