

刚/柔性组合墙面加筋土挡墙离心模型试验

陈建峰¹, 柳军修¹, 薛剑峰²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 莫纳什大学 应用科学与工程学院, 澳大利亚 丘吉尔 3842)

摘要: 进行了相同软土地基条件下刚/柔性组合墙面和单一柔性墙面加筋土挡墙的离心模型试验, 比较分析了挡墙在墙顶均布荷载作用下的工作性状. 试验结果表明, 在自重及上覆荷载作用下, 刚/柔性组合墙面挡墙其刚性墙面仍基本保持垂直, 地基最大沉降发生在连接件锚固端位置; 而单一柔性墙面挡墙墙面外倾明显, 其地基最大沉降位于墙趾位置; 刚/柔性组合墙面加筋土挡墙在工作阶段其墙顶沉降和墙面位移仅为单一柔性墙面挡墙的 50%, 且前者墙顶不均匀沉降量明显小于后者; 刚/柔性组合墙面加筋土挡墙由于预埋件承担了刚性墙面墙背水平土压力, 使得筋材拉力及相应的应变减小; 刚/柔性组合墙面加筋土挡墙的刚性墙面在墙体中部弯矩最大, 为外侧受拉; 而墙顶和墙底附近的弯矩较小, 为内侧受拉; 刚/柔性组合墙面加筋土挡墙能适应软土地基的大变形, 并能更好地承担上覆工作荷载.

关键词: 加筋土挡墙; 刚/柔性组合墙面; 软土地基; 离心模型试验

中图分类号: TU47

文献标志码: A

the wall toe; during working stage, the lateral displacement of the face and the settlement at the surface of the wall with flexible/rigid facings decrease by approximately 50% as compared to the wall with flexible facing. And the differential settlement at the surface of the former wall is much less than that of the later one; the reinforcement forces and strain of the wall with flexible/rigid facings decrease because the embedded anchors bear the lateral earth pressures acting on the rigid facing; the rigid facing at the middle height bears tensile force at the outside and the maximum bending moment; whereas, the rigid facing nearby its bottom and top bears tensile force at the inside and relatively low bending moment; the wall with flexible/rigid facings can adapt large deformation and differential settlement of the soft foundation and can undertake more working stress on the top of the wall.

Key words: reinforced soil retaining wall; flexible/rigid facings; soft clay; centrifugal test

Centrifugal Test on a Reinforced Soil Wall with Flexible/Rigid Facings

CHEN Jianfeng¹, LIU Junxiu¹, XUE Jianfeng²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Applied Sciences and Engineering, Monash University, Churchill 3842, Australia)

Abstract: Centrifugal tests of reinforced soil retaining wall (RSW) with flexible/rigid facings and single flexible facing on the same soft foundation soils were carried out and their working behaviors under uniform loading on top of the walls were compared. The test results show: under the self-weight and surcharge loading, for the wall with flexible/rigid facings, the rigid facing remains basically vertical and the maximum foundation settlement is below the embedded anchors; whereas for the wall with flexible facing, the facing tilts forward and the maximum foundation settlement is below

加筋土挡墙作为一种新型的挡土结构, 以其适应性强、占地面积少、施工简便、抗震性能好、造价低廉而被越来越多地应用于建筑、交通、水利、矿山等领域的边坡治理中^[1-3]. 加筋土挡墙由墙面、填土和筋材等组成, 其中, 挡墙墙面可分为刚性和柔性两种. 刚性墙面通常是预制或现浇的连续钢筋混凝土板; 柔性墙面有筋材反包、干砌混凝土块体、格宾 (Gabion) 等形式. 相比于柔性墙面, 刚性墙面可提供墙面高度范围内的抗弯能力, 从而可约束水平土压力导致的弯曲变形. 但刚性墙面协调地基不均匀沉降的能力相对较差, 地基在纵向或横向较大的不均匀沉降将导致刚性墙面的倾斜或开裂; 而柔性墙面则具有很强的协调地基不均匀沉降的能力. 若能把柔性和刚性墙面有机结合起来, 形成刚/柔性组合墙面, 让柔性墙面发挥协调地基不均匀沉降的能力, 让

收稿日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(41072200, 41340025); 上海市浦江人才计划(14PJD032)

第一作者: 陈建峰(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地质工程. E-mail: jf_chen@tongji.edu.cn

通讯作者: 柳军修(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为地质工程. E-mail: tju_liu@hotmail.com

刚性墙面发挥约束由于水平土压力导致的墙面弯曲变形的能力,可使加筋土挡墙性能得到进一步提高。此外,刚性墙面也可起到增强挡墙耐久性和美观的功效。

刚/柔性组合墙面加筋土挡墙可分两步构建:先做柔性墙面的加筋土挡墙,待地基土主要压缩变形完成后,再在柔性墙面外构筑一刚性面板(如预制或现浇的钢筋混凝土板等),并使面板与墙体牢固连接。

刚/柔性组合墙面加筋土挡墙已在工程上得到应用。在美国新泽西州高压缩性、低强度的黏性土地上修筑的 8 个刚/柔性组合墙面加筋土挡墙桥台,其实测的沿柔性墙面产生的沉降达 0.6~0.9 m,但桥台工作正常^[4]。

然而,目前还未从试验和理论方面对刚/柔性组合墙面加筋土挡墙进行过机理性研究。本文进行了相同软土地基条件下刚/柔性组合墙面和单一柔性墙面加筋土挡墙的离心模型试验各 1 组,详细阐述了模型相似材料的选择和试验,比较分析了挡墙在墙顶均布荷载作用下的工作性状。

1 离心模型试验

1.1 试验设备

本次试验是在同济大学 TLJ-150 岩土离心试验机上进行的。其最大容量为 150gt,最大离心加速度为 200g,有效半径为 3.0 m,拖动功率为 250 kW。

1.2 模拟对象及模型尺寸

模拟对象为一高度为 3.0 m 的刚/柔性组合墙面加筋土挡墙,柔性墙面采用土工格栅反包墙面,格栅竖向间距为 0.6 m,加筋长度为 4.5 m;刚性墙面采用预制钢筋混凝土薄板,厚度 40 mm,受力钢筋采用 HRB400 级钢筋,对称配置,直径为 8 mm,间距为 100 mm;填土为砾、砂混合物;在挡墙底部和地基土之间铺设 0.6 m 厚砂垫层,用以补偿地基沉降,避免挡墙陷入地基中;软土地基厚度为 6 m。

刚/柔性墙面通过连接件进行连接,连接件钢筋两端分别与刚性墙面及角钢相连,刚性墙面抵抗侧向变形的能力通过预埋在填土内角钢的锚固力获得。

试验采用的模型率 $n=15$,模型箱尺寸为 0.9 m×0.7 m×0.7 m(长×宽×高)。按模型率 $n=15$ 缩小后的模型尺寸如图 1 所示。

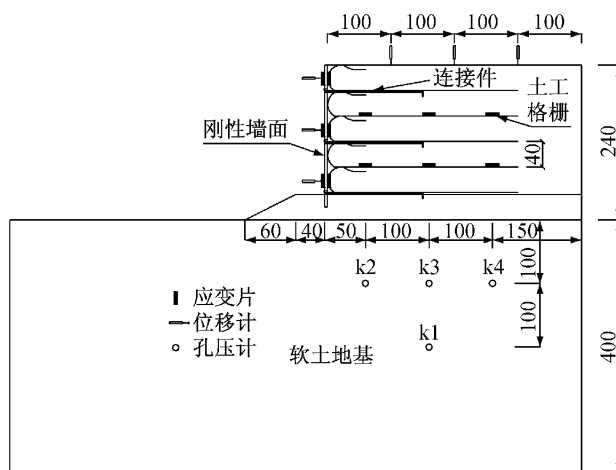


图 1 离心模型试验示意图(单位:mm)

Fig.1 Centrifugal model of reinforced soil retaining wall (unit: mm)

1.3 模拟材料及制备

1.3.1 填土及地基土

模型试验挡墙填土采用福建平潭标准砂,这是一种级配均匀的中砂,相对密度 $G_s=2.643$,平均粒径 $d_{50}=0.34$ mm,不均匀系数 $C_u=1.9$,曲率系数 $C_c=1.1$ 。离心模型试验中通过“砂雨法”控制挡墙填土重度 $\gamma=16.2$ kN·m⁻³,其内摩擦角 $\varphi=27.3^\circ$ 。

模型地基土采用 800 目(粒径为 0.018 mm)高岭土制备。液、塑限联合试验测得高岭土的塑限 $w_p=34.3\%$,液限 $w_L=54.2\%$,塑性指数 $I_p=19.9$;通过固结试验得到压缩系数 $a_{1-2}=0.35$ MPa⁻¹;采用 GDS 应力路径三轴仪对高岭土试样进行 4 组固结不排水剪试验,得有效黏聚力 $c=0$,有效内摩擦角 $\varphi=27.7^\circ$ 。由此可见,试验制备的高岭土与天然软土的力学性质较为一致。

1.3.2 模型土工格栅

选取聚酰胺网作为模型土工格栅,网格间距 1.2 mm。进行了 6 个试样的宽条拉伸试验,获得其抗拉强度均值为 13.5 kN·m⁻¹,2%和 5%伸长率的拉伸力分别为 0.875 和 1.92 kN·m⁻¹,乘以相似率 15 后对应原型 2%和 5%伸长率的拉伸力分别为 13.1 和 28.8 kN·m⁻¹。研究表明^[5],当筋材应变控制在 3%之内时,加筋土结构中的土体不会破坏,因此筋材力学特性可由 2%和 5%伸长率的拉伸力确定。原型单向拉伸聚丙烯土工格栅 TGDG50 在 2%和 5%伸长率下的拉伸力分别不小于 12 和 28 kN·m⁻¹,本试验采用的模型格栅的力学性质与之相似。

采用同济大学 SJW-200 型多功能界面剪切仪对模型土工格栅在福建平潭标准砂模型试验土中进行拉拔试验,试验箱有效尺寸为 600 mm×

400 mm×200 mm(长×宽×高). 试验获得筋土界面系数 $\mu_{sg}=0.83$, 而原型各类土工格栅在砂性土中拉拔的筋土界面系数一般介于 0.80~0.90 之间^[6], 可见本文模型土工格栅筋土界面特性与原型相似.

1.3.3 刚性面板及连接件

刚性墙面根据抗弯刚度相似原则, 采用厚度为 2 mm 的铝合金板模拟混凝土墙面. 铝合金板的弹性模量为 70 GPa. 在铝合金板上间隔 80 mm 设置了宽度为 2 mm 的矩形槽, 以便与预埋在柔性墙面挡土墙中的连接件进行连接. 模型中连接件由 L 型铝合金板和直径为 2 mm 的表面光滑的铜制杆件组成, 分别模拟原型连接件的角钢和钢筋. 杆件间距 $l=80$ mm, 与铝合金板上刻槽间距一致. L 型铝合金板竖向肢高度 $h=8.0$ mm, 横向肢宽度为 4.0 mm, 板件厚度为 2.0 mm. 图 2 列出了连接件及刚性墙面的示意图.

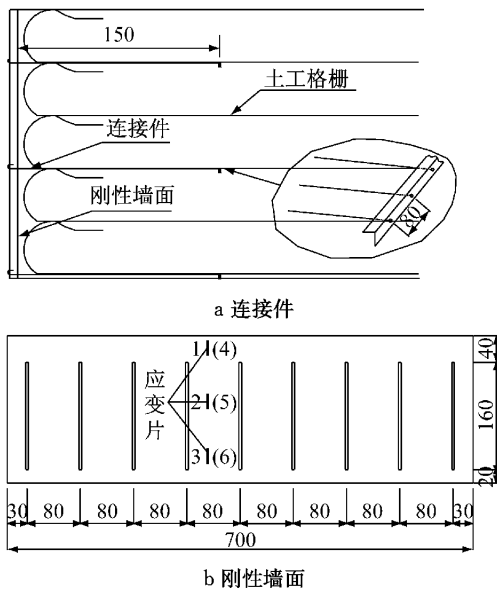


图 2 连接件及刚性墙面示意图(单位:mm)
Fig.2 Diagram of embedded anchors and rigid facing (unit: mm)

采用同济大学 SJW-200 型多功能界面剪切仪对模型连接件在福建平潭标准砂模型试验土中进行拉拔试验, 法向应力分别为 20, 50 和 80 kPa. L 型板在土中的埋置深度为 150 mm, 相当于原型角钢在挡墙中的埋深为 2.25 m. 将试验极限总拉拔力除以 L 型板在竖向平面的投影面积, 得连接件的极限锚固应力. 图 3 为极限锚固应力与法向应力关系曲线, 两者成较好的线性关系. 挡墙试验中最上层预埋件位置对应原型距离墙顶为 0.6 m, 其所受的竖向应力为 9.7 kPa, 则根据该试验关系可得出最上层预埋件所受的极限锚固应力为 186 kPa, 乘以原型中单根杆件

对应的 L 型板的面积 $15l \times 15h$, 得到单根杆件的极限锚固力为 26.8 kN.

根据卢肇钧的研究^[7], 对埋设深度小于 3 m 的锚定板, 设计上其容许锚固力可按下式进行计算:

$$T = 0.25\gamma H^2(K_p - K_a)B \quad (1)$$

式中: γ 为填土重度; H 为埋置深度; K_p 和 K_a 分别为被动和主动土压力系数; B 为锚定板边长. 取 B 为原型中单根杆件对应的 L 型板的等效宽度, 即 $B = \sqrt{15l \times 15h} = 0.379$ m, 并将 $\gamma = 16.2$ kN·m⁻³, $H = 2.25$ m, $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2) = 2.69$, $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2) = 0.37$, 一起代入公式(1)中, 得 $T = 18.0$ kN. 本文最上层预埋件的极限锚固力是容许锚固力的 1.5 倍, 即安全系数至少为 1.5, 这符合实际工程要求.

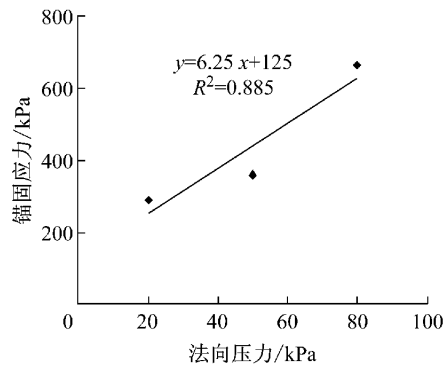


图 3 连接件锚固应力-法向应力关系曲线

Fig.3 Relationship curve between anchorage stress and normal stress of the embedded anchors

1.4 仪器埋设及布置

本次试验使用的微型孔隙水压力传感器型号为 KYB-300, 直径 8 mm, 厚度 3 mm, 量程 300 kPa, 系统精度为 2 级, 传感器渗水材料孔隙为 0.3 μm. 差动式位移传感器型号为 CW-40, 量程 ±4 cm. 上述仪器由中国物理研究院总体工程研究所生产.

如图 1 所示, 本次试验在地基土中埋设 4 个孔隙水压力传感器, 在挡墙墙面和墙顶分别布置 3 个差动式位移传感器, 在刚性墙面内外表面沿墙高对称粘贴 3 对应变片以测试墙面弯矩(图 2), 在第 2 层和第 4 层模型土工格栅表面用环氧树脂各粘贴 3 个微型应变片以测试筋材应变(见图 4).

1.5 试验过程

模型试验地基土采用含水率为 100% 的高岭土泥浆在 15g 离心加速度下充分固结制备, 然后采用作者专门制作并获得实用新型专利的小型静力触探仪进行贯入试验. 小型静力触探仪锥底直径 25.2 mm, 锥头面积 5 cm², 有效侧壁长度 40.3 mm^[8]. 图

5 为两组试验模型地基土比贯入阻力-深度曲线,可以看出,比贯入阻力随深度变化基本一致,可以认为两组试验地基土土性基本一致。

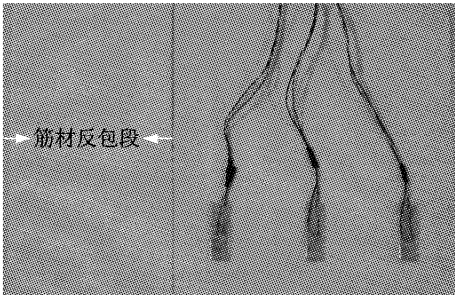


图 4 模型格栅上粘贴应变片

Fig.4 Strain gauges glued on model geogrid

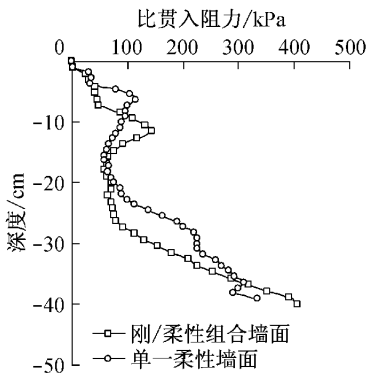


图 5 地基土比贯入阻力-深度关系曲线

Fig.5 Relationship curves between specific penetration resistance and depth of the foundation soil

刚/柔性组合墙面加筋土挡墙离心模型试验共运转 390 min,分为 2 个阶段,见图 6。

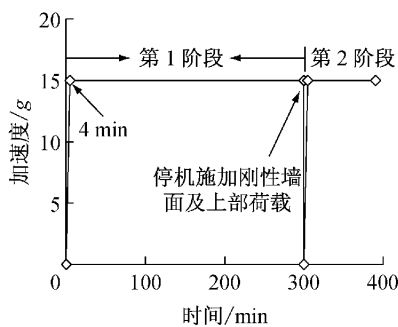


图 6 加速度-时间关系曲线

Fig.6 Relationship curves between acceleration and time

(1)第 1 阶段(0—300 min),运转柔性墙面加筋土挡墙.加速度在 4 min 内从 1g 增至 15g,而后维持不变,地基土在挡墙荷载下固结至稳定。

(2)第 2 阶段,运转刚/柔性组合墙面加筋土挡墙.在第 1 阶段 300 min 时停机安装刚性墙面,将刚性墙面与第 1 阶段预埋在柔性墙面挡墙内的连接件进行连接,并在挡墙顶部铺设 2 层 5 cm×5 cm×2

cm 的钢锭,相当于施加 45 kPa 的竖向均布荷载.然后运转 90 min 后停机。

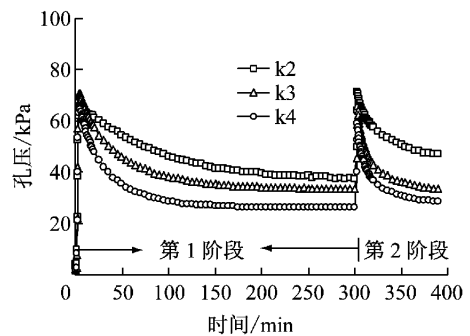
单一柔性墙面加筋土挡墙对比试验,也按上述第 1 和第 2 阶段试验过程进行,但不在柔性墙体内预埋连接件,也不施筑刚性墙面。

第 2 阶段试验研究的是挡墙在墙顶均布荷载作用下的工作性状。

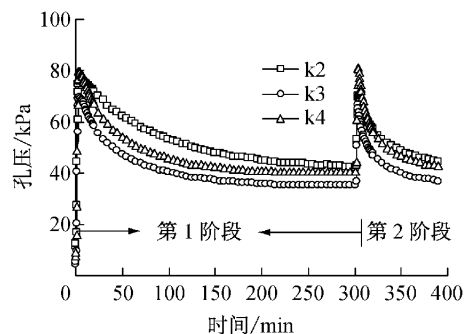
2 试验结果

2.1 孔隙水压力

图 7 为 2 组试验挡墙在整个试验过程中(0—390 min)k2,k3 和 k4 点孔隙水压力计监测的孔压变化情况.由于 k1 点孔隙水压力计连接通道出故障,故缺少该点监测数据.由图 7 可见,2 组试验孔压变化规律基本相似,在第 1 阶段(0—4 min),孔压随加速度增大迅速增大,而后开始消散,到 300 min 时孔压趋于稳定,表明地基土在柔性墙面挡墙荷载下固结基本完成,沉降达到稳定;第 2 阶段孔压变化与第 1 阶段类似,但较第 1 阶段消散得更快,在试验结束时孔压变化亦趋向稳定。



a 刚/柔性组合墙面挡墙



b 单一柔性墙面挡墙

图 7 孔隙水压力-时间关系曲线

Fig.7 Relationship curves of pore water pressures and time

无论刚/柔性组合墙面还是单一柔性墙面加筋土挡墙,都显示 k2 点的孔压稍大一些,这是由于 k2

点靠近挡墙墙趾位置,其应力较集中,变形也较大,这在后面挡墙变形分析中也可看到。

2.2 挡墙变形

图 8 为离心机同步相机所摄的 2 组试验挡墙在运行了 390 min 后的图片。图 9 为 2 组试验挡墙初始轮廓线以及根据图 8 绘制的变形后的轮廓线,图上也标示了变形后的筋材及 L 型板位置。由图 8 和图 9 可见,2 组试验挡墙均表现出明显的沉降和水平位移,但刚/柔性组合墙面挡墙沉降要小于单一柔性墙面加筋土挡墙。由于地基土很软,单一柔性墙面加筋土挡墙在自重和上覆荷载作用下,应力集中部位的墙趾下陷,使得墙面明显外倾,同时墙趾位置的地基沉降最大,为 64 mm,相当于原型的 0.96 m。而刚/柔性组合墙面加筋土挡墙其刚性墙面在试验结束时仍基本保持垂直,地基最大沉降发生在距墙面 15 cm 的位置,为 56 mm,相当于原型的 0.84 m。

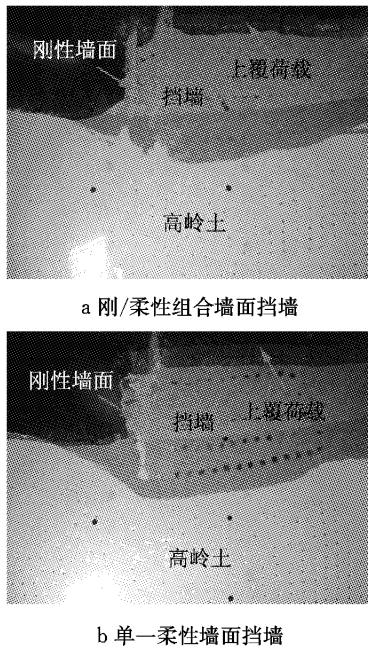


图 8 390 min 时同步相机所摄挡墙运行图片
Fig.8 Pictures of reinforced soil retaining walls taken at 390 min

刚/柔性组合墙面挡墙变形性状不同于单一柔性墙面挡墙的原因是,刚性墙面及预埋连接件使得连接件埋深范围内(距墙面 15 cm)的墙体整体刚度大幅提高,类似一个厚度为 15 cm(相当于原型为 2.25 m)的刚性墙体,其在上覆荷载下产生的沉降较小且较均匀,产生的水平位移沿墙高也较均一。而在距墙面 15 cm 的锚固端 L 型板后面,仍为柔性墙体,当刚性墙面受力时,L 型板发挥锚固作用,该位置会存在一个拉应力区,使得 L 型板所在位置的墙体底

部应力集中,导致该位置最终的地基沉降最大。

通过分析同步相机连续拍摄的照片,根据地基土和筋材侧面标记点在试验过程中展现的位移矢量,绘出 2 组试验挡墙大致的潜在滑动面如图 9 所示。可见,该滑动面位于 2 组试验挡墙加筋区后缘,为外部稳定的深层滑动问题。现场试验也表明^[9-10],当地基软弱且厚度较大时,加筋土挡墙的稳定主要表现为深层滑动问题。

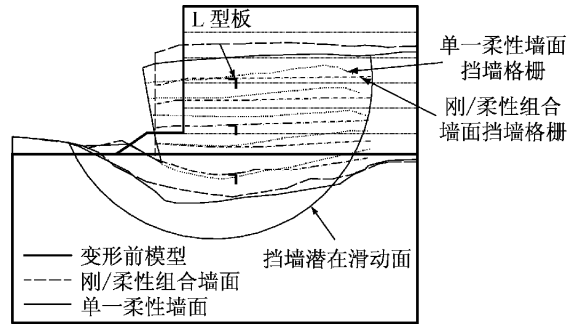


图 9 挡墙变形轮廓线及潜在滑动面
Fig.9 Deformed contour and potential slip surface of reinforced soil retaining walls

第 2 阶段(300—390 min)试验反映的是挡墙在第一阶段(0—300 min)完工后在墙顶作用 45 kPa 均布荷载下的工作性状,这是工程上所着重关注的内容。图 10 为 2 组试验挡墙在该阶段产生的墙顶沉降和墙面水平位移。由图 10 可见,在上覆均布荷载作用下,刚/柔性组合墙面挡墙墙顶沉降和墙面位移仅为单一柔性墙面挡墙的 50%。另外,2 组试验挡墙墙顶最大沉降均位于加筋体后缘(潜在滑移面经过位置),分别为 6.4 mm 和 15.7 mm,但刚/柔性组合墙面挡墙墙顶不均匀沉降量明显小于单一柔性墙面挡墙。

2.3 筋材应变

图 11 为 390 min 时 2 组试验挡墙第 2 层和第 4 层筋材应变分布。由图 11 可以看到,刚/柔性组合墙面挡墙筋材应变总体上低于单一柔性墙面挡墙;第 4 层应变较第 2 层筋材大;筋材末端应变较大;筋材应变均较小,量值上不超过 0.8%。

刚/柔性组合墙面挡墙筋材应变小于单一柔性墙面挡墙的原因,是由于预埋在挡墙内部的 L 型板承担了刚性墙面墙背水平土压力,这使得筋材的拉力减小;而单一柔性墙面挡墙水平土压力是由筋材全部承担的。

室内刚性地基上的足尺加筋土挡墙模型试验表明^[11],当墙顶作用均布荷载后,靠近墙顶的筋材拉力增大,以平衡增大了的墙顶附近挡墙的水平土压力,

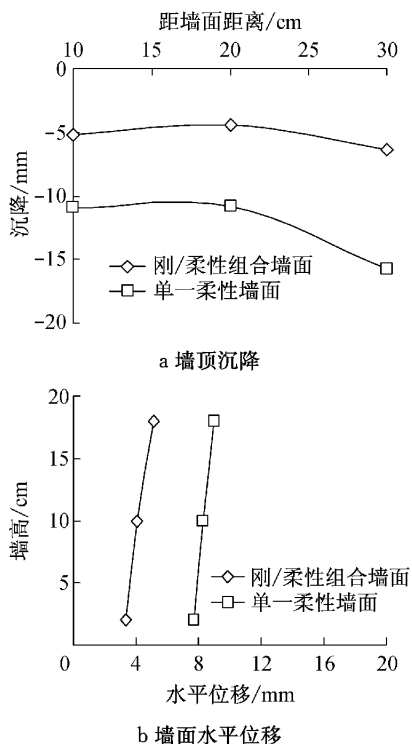


图 10 上覆荷载下挡墙变形

Fig. 10 Displacements of reinforced soil retaining walls under surcharge load

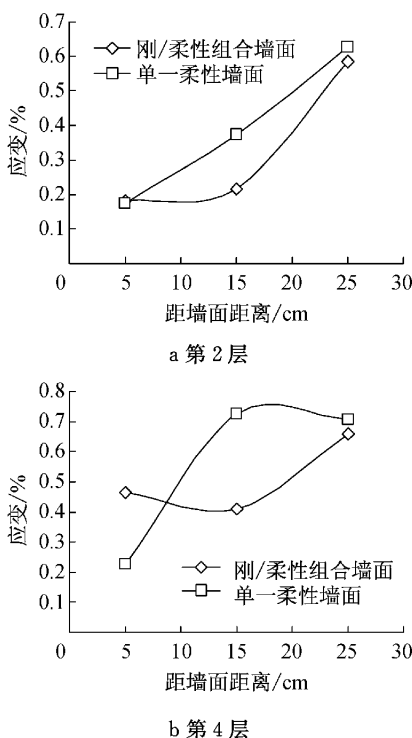


图 11 筋材应变分布

Fig. 11 Distribution of geogrid axial strains

其量值超过挡墙下部筋材的拉力. 本文试验挡墙为软土地基,但也得出同样的结论,即第 4 层筋材应变大于第 2 层筋材.

筋材末端应变较大与潜在滑动面处于筋材后缘有关,在潜在滑动面附近填土相对位移显著,现场试验中也发现同样的现象^[9].

从 2 组试验挡墙较小的筋材应变值来看,挡墙处于较好的工作应力状态:一是筋材作用还未进一步发挥,二是加筋区中的土体还完整. 从图 8 拍摄的图片看,尽管 2 组试验挡墙产生了显著的沉降和水平位移,但挡墙加筋区仍显完整,这证明了柔性墙面加筋土挡墙具有极好的适应大变形及地基不均匀沉降的能力;而刚/柔性组合墙面挡墙正是利用了柔性墙面挡墙的这一优点,在地基变形稳定后构筑刚性墙面,使之形成牢固结构而更能承受上覆工作荷载.

2.4 刚性墙面应变

对于刚/柔性墙面加筋土挡墙,在其刚性墙面内侧和外侧对称布置 3 组应变片,用于量测刚性墙面的弯曲应变,3 组应变片距离墙底高度分别为 2, 10 和 18 cm. 图 12 为 390 min 时根据应变测量值换算得到的原型挡墙刚性墙面弯矩分布曲线. 本文约定刚性墙面外侧受拉为负,内侧受拉为正. 由图 12 可见,刚性墙面在墙体中部的弯矩最大,达 $2.79 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$,为外侧受拉;在靠近墙顶和墙底位置处弯矩相对较小,分别为 0.58 和 $1.07 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$,为内侧受拉. 根据《混凝土结构设计规范》^[12]可得刚性墙面的抗弯强度设计值为 $3.67 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$,可以看出,试验中刚性墙面承受的弯矩低于其抗弯强度设计值的 24%,说明在本试验上覆 45 kPa 均布荷载下,原型 40 mm 厚度刚性薄板仍具有安全冗余.

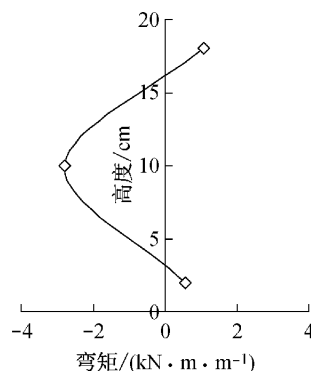


图 12 刚性墙面弯矩分布

Fig. 12 Distribution of rigid facing moments

由以上分析可以看出,墙面水平位移、墙顶沉降、筋材应变以及刚性墙面弯矩等参数都能较好地反映出刚/柔性组合墙面加筋土挡墙的变形和受力规律.

刚/柔性组合墙面加筋土挡墙由于增加了刚性

墙面和预埋连接构件,其受力机制较一般加筋土挡墙复杂很多,预埋连接件的锚固作用对筋材受力、挡墙内部稳定性以及挡墙体内土体的应力状态及其演化均有影响.但是,由于目前测试手段的局限性,仅通过模型试验较全面地揭示其内部作用机理还存在困难,如无法测试土体中的拉应力区,无法测试整条筋材和连接件的受力等.

3 结论

本文开展了相同软土地基条件下刚/柔性组合墙面和单一柔性墙面加筋土挡墙的离心模型试验,详细阐述了模型相似材料的选择和试验,比较分析了挡墙在墙顶均布荷载作用下的工作性状,得出以下主要结论:

(1)在自重及上覆荷载作用下,刚/柔性组合墙面挡墙其刚性墙面仍基本保持垂直,地基最大沉降发生在连接件锚固端位置;而单一柔性墙面挡墙墙面外倾明显,其地基最大沉降位于墙趾位置.

(2)在上覆均布荷载工作阶段,刚/柔性组合墙面加筋土挡墙墙顶沉降和墙面位移仅为单一柔性墙面挡墙的 50%,且前者墙顶不均匀沉降量明显小于后者.

(3)由于预埋在挡墙内部的 L 型板承担了刚性墙面墙背水平土压力,使得刚/柔性组合墙面加筋土挡墙筋材拉力及相应的应变减小.

(4)刚性墙面在墙体中部的弯矩最大,为外侧受拉;在靠近墙顶和墙底位置处弯矩相对较小,为内侧受拉.但本试验刚性墙面承受的弯矩低于其抗弯强度设计值的 24%,说明在本试验上覆荷载下,原型预制刚性薄板仍具有较大安全冗余.

(5)刚/柔性组合墙面加筋土挡墙能适应软土地基的大变形,并能更好地承担上覆荷载.

参考文献:

[1] Wu J T H. Design and construction of low cost retaining walls [R]. Denver: Colorado Transportation Institute, 1994.
[2] Bathurst R J, Alfaro M C. Review of seismic design, analysis and performance of geosynthetic reinforced walls, slopes and embankments [C]//Earth Reinforcement. Rotterdam: A A

Balkema, 1997: 887-918.

- [3] Wu J T H, Lee K Z Z, Pham T. Allowable bearing pressures of bridge sills on GRS abutments with flexible facing[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(7): 830.
[4] Bloomfield R A, Soliman A F, Abraham A. Performance of mechanically stabilized earth walls over compressible soils [C]//Landmarks in Earth Reinforcement. Rotterdam: A A Balkema, 2001: 317-322.
[5] Allen T M, 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.
[6] AASHTO. LRFD bridge design specifications [S]. 5th ed. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
[7] 卢肇钧. 锚定板挡土结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
LU Zhaojun. Anchor slab structure retains earth fill [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989.
[8] 陈建峰, 柳军修, 马君. 实验室用小型单桥静力触探探头的标定[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 549.
CHEN Jianfeng, LIU Junxiu, MA Jun. Calibration of a miniature cone penetrometer for geotechnical model test[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(4): 549.
[9] 陈建峰, 顾建伟, 王艳玲, 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(S1): 3370.
CHEN Jianfeng, GU Jianwei, WANG Yanling, *et al.* Field test study of reinforced soil wall on soft ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3370.
[10] 陈建峰, 柳军修, 石振明. 软土地基加筋土挡墙数值模拟及稳定性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1928.
CHEN Jianfeng, LIU Junxiu, SHI Zhenming. Numerical simulation and stability discussion of a reinforced soil wall on soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1928.
[11] Bathurst R J, Vlachopoulos N, Walters D L, *et al.* The influence of facing stiffness on the performance of two geosynthetic reinforced soil retaining walls [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(12): 1225.
[12] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.