

DOI: 10.11779/CJGE201403008

衡重式加筋土路肩挡墙土工离心模型试验研究

李 浩^{1, 2}, 罗 强^{1, 2*}, 张 良^{1, 2}, 蒋良淮^{1, 2}, 张家国¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 以某山区公路旧路拓宽改造工程中新建的衡重式加筋土路肩挡土墙为原型, 设计了4组模拟墙体实际位移形态的土工离心模型试验, 讨论了墙后土体压实度和土中加筋对墙背土压力和路基填土变形的影响规律。试验表明: ①墙后土体加筋对减小墙背承受的土压力作用随填土压实度的提高而趋于明显, 主要影响区域位于上墙背的下半部分, 压实度由88%增至95%会引起上墙背土压力分布由近似线性增大演化为折线型变化; ②衡重台对其上覆填土存在托举效应, 致使下墙背的土压力大幅减小, 其影响范围约为衡重台以下约1/3下墙高度; ③墙后土体加筋能提高路基填土的抗变形能力, 减小因墙体侧向位移引起的填土表面下沉, 对降低新旧路基间的不均匀变形效果显著。

关键词: 衡重式路肩墙; 土工离心模型试验; 土体加筋; 土压力; 压实度

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)03-0458-08

作者简介: 李 浩(1985-), 男, 湖北老河口人, 博士研究生, 主要从事路基和土工技术等方面的研究工作。E-mail: lhwen2008@sina.cn。

Centrifugal model tests on shoulder balance weight retaining wall with reinforced earth

LI Hao^{1, 2}, LUO Qiang^{1, 2}, ZHANG Liang^{1, 2}, JIANG Liang-wei^{1, 2}, ZHANG Jia-guo¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. MOE Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Using the new shoulder balance weight retaining wall of an old embankment widening project of a mountainous highway as the prototype, four groups of geotechnical centrifuge model tests on displacement control are designed. The influences of compactness and reinforced fill on the earth pressure on the wall and the deformation of the subgrade fill are discussed. The results show that: (1) the reinforced effect of backfill to reduce the earth pressure increases with the increasing degree of compaction. When the compactness is smaller than 95%, the reducing area of the earth pressure is mainly located in the lower half of the upper wall; (2) the equilibrator has uplift effect on its overlying soils so as to reduce the earth pressure on the lower wall, and the influence area below the equilibrator is about 1/3 height of the lower wall; (3) the reinforced soils can improve the resistance to the deformation of subgrade fill and thus reduce the settlement of surface fill caused by the lateral displacement of wall, and the uneven settlement between the old and the new subgrade is significantly mitigated.

Key words: shoulder balance weight retaining wall; centrifugal model test; reinforced earth; earth pressure; degree of compaction

0 引言

衡重式挡墙作为重力式挡墙的一种, 与其它重力式挡墙相比, 因衡重台的作用, 可使墙体重心后移, 改善基底压力分布使之更趋平衡, 提高挡墙高度以及增强挡墙的抗倾覆稳定性^[1]。但是由于衡重式挡墙的墙背形式较为复杂, 加之上墙背与下墙背承受的土压力存在相互影响现象, 也使其墙背土压力的性质较其它重力式挡墙更为复杂^[2]。

目前, 衡重式挡墙的墙背土压力计算仍以经典Coulomb土压力理论为基础, 多采用折线形墙背的土

压力计算方法^[3-4], 即上墙和下墙分开考虑, 上墙将填土侧墙顶边缘与衡重台外缘相连, 作为假想墙背, 按假想墙背的Coulomb理论求得土压力; 下墙则采用延长墙背法计算Coulomb土压力, 并认为土压力沿墙高呈线性分布。

然而, 大量的模型试验和现场测试表明^[5-7], 即使

基金项目: 973计划课题(2013CB036204); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682013ZT12)

收稿日期: 2013-07-15

*通讯作者

是刚性挡墙背的土压力沿墙高也大多呈非线性分布, 就衡重式挡土墙而言, 由于衡重台的存在导致墙背面呈不平整状, 墙土间相互作用复杂, 引起墙背土体破坏和土压力分布模式的剧烈变化是一个值得探讨的问题。此外, 在高大及受力情况复杂的挡墙背土体中铺设土工格栅加筋技术得到了较广泛的应用。一方面, 铺设于墙后土体中的土工格栅, 通过与土体的摩擦作用及格栅网眼的嵌锁、咬合作用, 限制土体侧向变形, 增强土体的整体性^[8], 减小墙背承受的土压力; 另一方面, 墙背土体加筋后, 也会更进一步加剧墙土间相互作用的复杂性, 尤其是衡重式挡墙背土体加筋之后的土压力作用特性、破裂面形状和位置等问题尚不十分明确。因此, 研究衡重式加筋土挡墙的土压力特性和墙后土体的变形特点, 对完善该类墙型的结构设计具有重要意义。

以某山区公路旧路拓宽改造工程中所应用的陡坡桩基托梁地基路肩衡重式加筋土挡墙为原型, 考虑墙后土体在88%和95%压实度及土体加筋条件下, 设计了4组土工离心模型试验, 研究了墙后土体压实度和土中加筋等因素对衡重式路肩墙背土压力的影响规律及墙后土体的变形特点。

1 试验设计

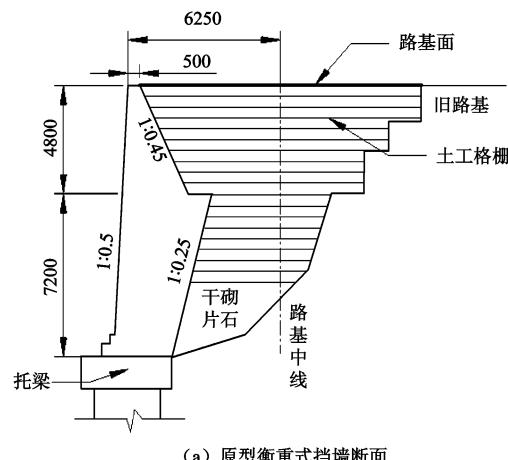
1.1 试验设备

试验所使用离心机是西南交通大学的 TLJ-2 型土工离心机, 其最大容量为 100 g·t, 最大加速度 200g, 有效半径约 2.7 m, 模型箱尺寸 0.8 m×0.6 m×0.6 m。

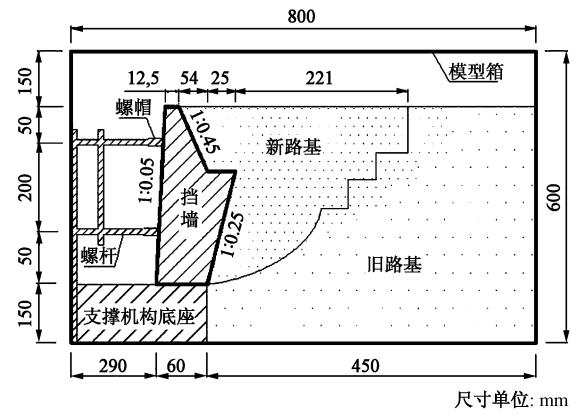
1.2 模型设计

(1) 衡重式挡墙原型结构和模型尺寸

衡重式挡墙模型是根据原型尺寸经模型率 $n=40$ 缩尺后由约 2 mm 厚钢板经焊接加工制成 (即试验时离心加速度为 40g)。原型挡墙的墙后填土重度 $\gamma \approx 19$ kN/m³, 综合内摩擦角 $\varphi \approx 40^\circ$, $\rho_{\text{dmax}} \approx 2.22 \text{ g/cm}^3$, $w_{\text{op}} \approx 5.8\%$, 土工格栅在填土中横向满铺、垂向间距 0.5 m, 共铺设有 18 层。挡墙原型和模型尺寸如图 1 所示。



(a) 原型衡重式挡墙断面



(b) 衡重式挡墙模型尺寸

图 1 衡重式挡墙原型断面及模型尺寸

Fig. 1 Prototype section and model size of balance weight retaining wall

(2) 模型填料

土工离心模型试验从理论上讲, 应当将结构物和填料同时按模型率进行缩尺和缩径, 而填料的过度缩径会使其与原型填料在物理力学性质上产生明显差异, 影响土工离心试验的可重现性。因此, 一般针对细颗粒填料, 可直接选用原型填料作为模型填料, 以保证模型填料在离心力场中与原型填料具有相同的应力应变关系。但对于粗颗粒填料, 需考虑因模型缩尺与填料缩径不协调而产生的粒径效应问题^[9-10]。

徐光明等^[9]认为, 粒径效应产生的本质原因是因结构物缩尺后, 作用其上的土颗粒数量有限, 此时土颗粒的不均匀性就会对土工离心模型试验的结果产生影响。因此, 结构物尺寸与土颗粒的粒径比应当具有合理的界限, 在保证土颗粒作用在缩尺结构物上的均匀性或连续性条件下降低粒径效应对土工离心模型试验结果的影响。目前, 在这一方面研究较多的是通过不同的基础底板尺寸 B_m 与土颗粒平均粒径 D_{50}^m 的比值 (B_m/D_{50}^m) 反映粒径效应对浅基础承载力特性的影响。Fuglsang 等^[11]进行的土工离心模型试验表明, $B_m/D_{50}^m > 35$ 的粒径效应影响较小。徐光明等^[9]开展的土工离心模型试验认为, $B_m/D_{50}^m > 30$ 的同时, 还需 $B_m/D_{\text{max}}^m > 23$ 。杨俊杰等^[10]完成的土工离心模型试验要求 $B_m/D_{50}^m > 233$ 。

衡重式挡墙原型填料的颗粒级配曲线如图 2 所示, 可得 $D_{50}^p \approx 5 \text{ mm}$, $D_{\text{max}}^p \approx 60 \text{ mm}$ 。而与模型填料直接接触的模型土压力简支梁式测力板有效长度 $B_m = 67.5 \text{ mm}$, 为保证土压力测试的准确性, 需满足 $B_m/D_{\text{max}}^m = 30$ 的粒径效应限值, 可得到模型填料允许的最大粒径 $D_{\text{max}}^m = 2.25 \text{ mm}$ 。基于代替法的填料缩径处理原则^[12], 以原型填料的最大粒径 D_{max}^p 与模型填料允许的最大粒径 D_{max}^m 之比作为基准, 将原型填料中 5~60

mm 的颗粒按比例进行缩小, 在保持模型与原型填料细粒土含量基本不变的情况下, 兼顾模型与原型填料的力学相似性, 可得到模型填料的粒径范围, 其级配曲线如图 2 所示。

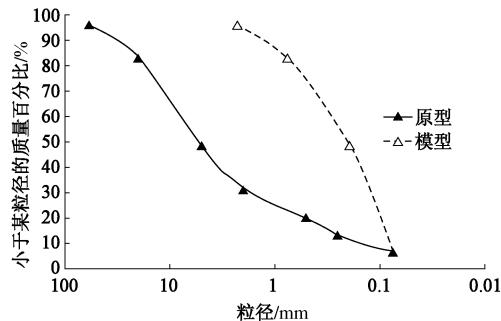


图 2 原型与模型填料级配曲线

Fig. 2 Grading curve of fill of prototype and model

(3) 加筋材料模拟

土工格栅由于厚度较小, 弹性模量高, 若按模型率将其尺寸缩小, 有较大的实现难度^[13]。因此, 土工离心模型试验中, 通常选用其它材料模拟土工格栅的加筋作用, 如纱布、试纸、铜带^[14]和塑料纱网^[15]等。土工格栅的模型材料一般遵循抗拉强度相似原则进行制备, 即原型土工格栅每延米拉伸屈服力 T_p 与模型加筋材料的每延米拉伸屈服力 T_m 之比满足模型率 n 的要求, 如下式

$$T_p / T_m = n \quad (1)$$

原型土工格栅型号为 TGSG20—20, 拉伸屈服力 20 kN/m。土工离心模型试验中, 使用塑料纱网作为土工格栅的模型材料, 其单层抗拉强度约 1.73 kN/m^[14], 按抗拉强度相似原理可知, 相当于原型土工格栅的单层抗拉强度为 69.2 kN/m, 近似等效为 3 层拉伸屈服力为 20 kN/m 的土工格栅效用。模型的上墙及下墙土层中各自均匀铺设有 4 层塑料纱网, 垂向铺设间距均 30 mm, 大致相当于原型每米厚度土层中铺设有抗拉强度 58 kN/m 的筋材, 比原型每米厚度土层中设计的 2 层土工格栅共 40 kN/m 的抗拉强度提高了约 45% 的加筋材料强度。

(4) 测点布设

沿模型挡墙背和衡重台依次布设测力板, 如图 3 (a) 所示, 用于量测墙背以及衡重台承受的土压力, 墙背测力板尺寸 70 mm×20 mm, 衡重台测力板尺寸 70 mm×25 mm; 在模型填土表面布设沉降计, 用于量测墙背填土表面沉降, 如图 4 (b) 所示。

(5) 模型挡墙的位移控制

为掌握衡重式挡墙的墙背土压力及墙后土体变形随墙体变位模式及在不同位移情况下的发展变化规律, 需要对模型挡墙的位移进行准确控制。位移控制

机构如图 4 所示, 主要利用钢质机构的上、下两排螺杆旋转或旋出限制模型挡墙的位移, 实现其变位模式。

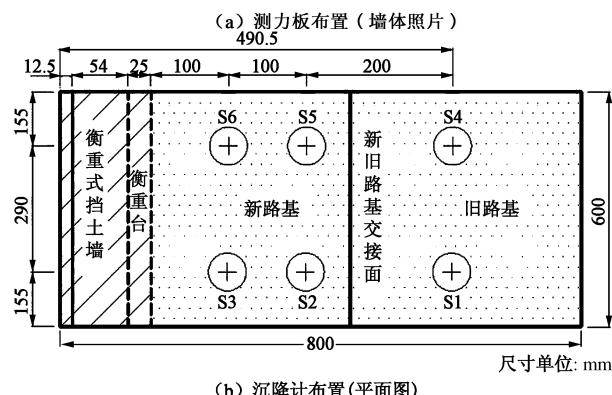


图 3 测力板及沉降计布置

Fig. 3 Layout of force plate and settlement sensors

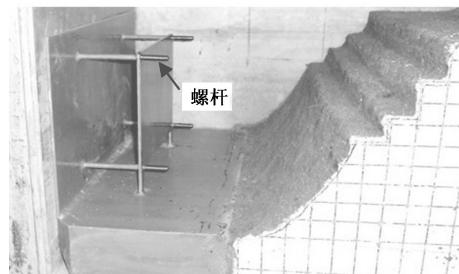


图 4 位移控制机构

Fig. 4 Displacement control mechanism

试验过程中, 按预设位移量控制上、下墙体位移, 致使墙背土压力由静止状态逐渐过渡到主动状态, 墙体预设位移量如表 1 所示。预设位移量是根据原型挡墙现场测试的位移情况而制定^[16], 如图 5 所示。

表 1 试验预设位移量

Table 1 Presupposed displacements of model tests (mm)

状态	上杆位移	下杆位移	M1	M2	M3	M4
0	0.00	0.00	√	√	√	√
1	0.50	0.35	√	√	√	√
2	1.00	0.70	√	√	✗	√
3	1.50	1.05	√	√	√	✗
4	2.00	1.40	✗	√	✗	✗
5	2.50	1.80	√	✗	√	√
6	3.00	2.10	✗	√	✗	✗
7	3.50	2.55	✗	✗	√	√
8	4.00	2.80	√	✗	✗	✗
9	6.00	4.20	√	✗	✗	✗

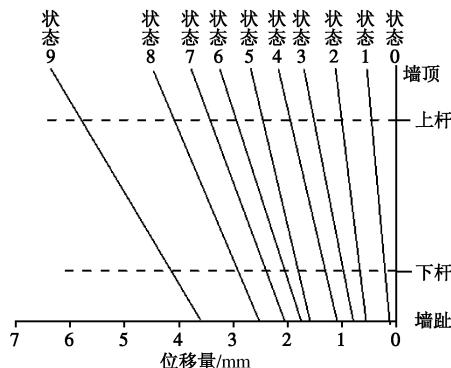


图 5 挡墙位移状态控制

Fig. 5 Displacement and turning angle of retaining wall in field tests

(6) 试验方案

为研究墙背填土压实度和土体加筋对墙背土压力及墙后填土变形的影响, 设计了 4 种工况的土工离心模型试验方案, 如表 2 所列。

表 2 土工离心模型试验方案

Table 2 Design conditions for centrifugal model tests

试验编号	填料压实度	是否加筋	位移模式
M1	95%	√	
M2	95%	×	
M3	88%	√	平动+绕墙趾转动
M4	88%	×	

2 试验数据分析

2.1 衡重式墙背土压力及其随墙体位移的变化

按表 1 所列的预设位移量对挡墙施加位移, 得到墙顶位移与上、下墙墙背总土压力的关系, 如图 6 所示 (图中数据均为模型数据, 下同)。

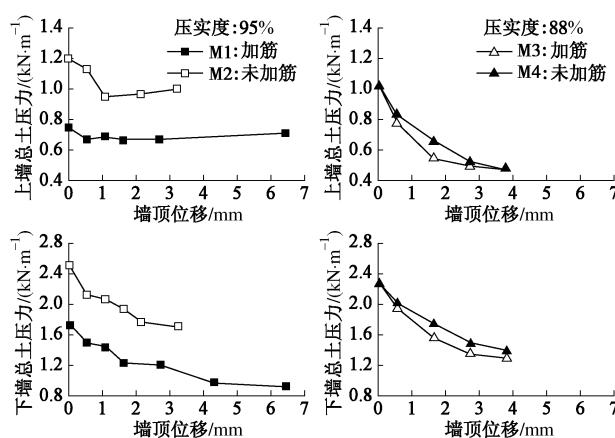


图 6 墙背土压力与墙体位移关系曲线

Fig. 6 Relationship between earth pressure and wall displacement

由图 6 可知, 随墙顶位移的增大, 上、下墙背土压力不断减小并趋于稳定。其中 M1、M2 上墙在墙顶位移分别约为 0.5, 1 mm 时基本达到主动土压力状态,

先于下墙 (分别约为 4, 2 mm); M3、M4 上、下墙在墙顶位移约为 3 mm 时基本同时达到主动土压力状态。

在墙背承受的总土压力大小方面, 压实度 95% 及墙后土体加筋条件下的 M1 模型, 其上、下墙土压力均小于未加筋的 M2 模型; 达到主动土压力状态时, M1 模型的上墙土压力较 M2 模型减小了约 68%, 下墙约减小 43%。而压实度仅为 88% 的加筋模型 M3 和未加筋模型 M4 中, 无论上墙还是下墙土压力由静止状态到主动状态的整个过程中, 其墙背承受的土压力并无明显差异。反映出墙后土体加筋对墙背土压力的减小作用与土体压实度密切相关, 墙后土体的加筋减压效应只有在路基填土得到有效压实的条件下才显现出来。

2.2 衡重式墙背土压力分布特征

试验获得的墙背土压力分布如图 7 所示, 图中的虚线和实线分别表示主动和静止土压力的分布状况。可知, M1 的上墙背土压力呈两段式折线形分布特征, 而 M2 的上墙背土压力则呈线性分布规律。其中, 距上墙顶 (0~0.5) H_d 范围内, 两者的土压力及其分布差异并不大, 但 M1 在距上墙顶 (0.5~1.0) H_d 范围的土压力基本呈矩形分布, 该现象反映出压实度较高条件下的墙后土体加筋减压效应主要体现在对上墙背下半部分土压力的影响方面。M3 和 M4 上墙土压力基本呈线性分布, 两者在数值上也基本一致, 表明在墙后填土压实不足情况下的土体加筋作用未能得到有效发挥。

图 7 还反映出, 衡重式挡墙的下墙土压力分布具有十分相同的规律。静止状态的土压力呈比较明显的两段式折线分布形态, 距衡重台下约 $H_d/3$ 范围存在显著的减压现象, 这主要是由于衡重台对上墙填土的托举作用而致使下墙产生了卸荷作用所引起。而主动状态的土压力则呈现出三段式的非线性分布特征, 其中, 因衡重台的托举减压效应主要影响衡重台下约 $H_d/3$ 范围 (图 7 中①) 的土压力分布, 距墙踵 $H_d/4$ 范围 (图 7 中③) 的土压力减小主要由土拱效应所导致^[17], 只有距衡重台 (1/3~3/4) H_d 范围 (图 7 中②) 的土压力可认为基本不受衡重台和墙踵附近土拱效应的影响。由此, 可将衡重式挡墙的下墙主动土压力分布划分为衡重台卸载作用影响区、土压力作用影响区和土拱效应影响区等 3 个区域。

基于图 7 所示的墙背土压力分布曲线的面域质心, 可得到上、下墙及全墙背在主动状态下的土压力合力作用点位置, 如表 3 所列。

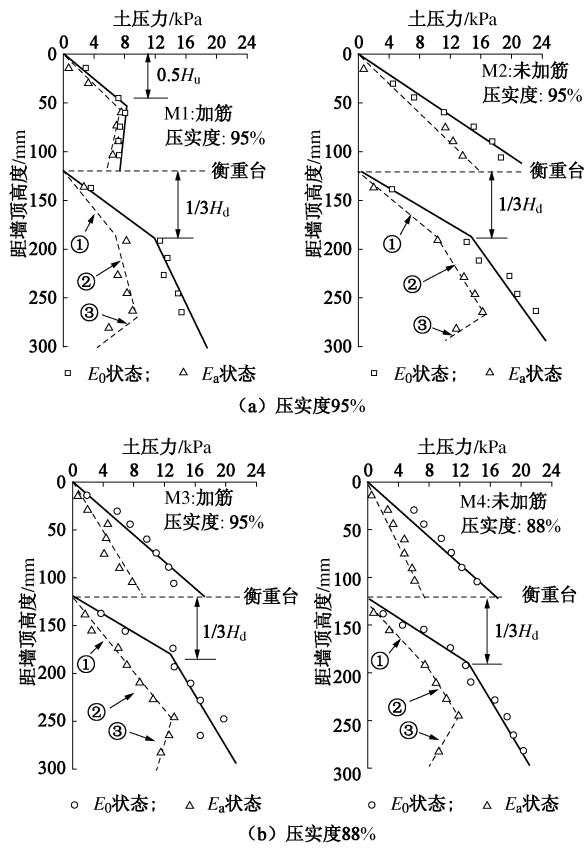


图 7 墙背土压力分布

Fig. 7 Distribution of back earth pressure

表 3 墙背主动土压力合力作用点位置

Table 3 Acting position of active earth pressure

编号	距上墙顶	距下墙顶	距全墙顶
M1	$0.61H_u$	$0.61H_d$	$0.55H$
M2	$0.65H_u$	$0.64H_d$	$0.59H$
M3	$0.67H_u$	$0.64H_d$	$0.65H$
M4	$0.65H_u$	$0.63H_d$	$0.64H$

注: H_u 为上墙高度; H_d 为下墙高度; H 为全墙高度。

由表 2 可知, 压实度为 88% 的 M3 和 M4 上、下墙及全墙主动土压力合力作用点分别位于距上、下墙及全墙墙顶约 2/3 高度处; 压实度为 95% 的 M2, 其上、下墙主动土压力合力作用点较 M4 基本相同, 而全墙主动土压力合力作用点位置提升了约 9%, 反映出提高填土压实度对全墙主动土压力合力作用点有一定影响, M1 在 M2 的基础上对墙后填土加筋处理后, 上、下墙及全墙主动土压力合力作用点均提升了约 7%。

2.3 衡重式墙后土体滑裂面形态

目前, 衡重式挡墙的土压力计算方法有实际墙背法、延长墙背法、第二破裂面法等, 其主要区别在于对墙后土体滑裂面出现位置假设的不同^[18], 因此, 准确掌握衡重式挡墙墙后土体的滑裂面特征对完善土压力计算具有重要作用。

通过试验加载前在墙后填土剖面(模型箱有机玻

璃侧)刻记网格线, 可观察试验完成后墙后土体的变形状况, 量测填土剖面网格节点位移, 经整理分析得潜在滑裂面形态及位置如图 8 所示。M1~M4 模型试验照片可参考文献[1]。

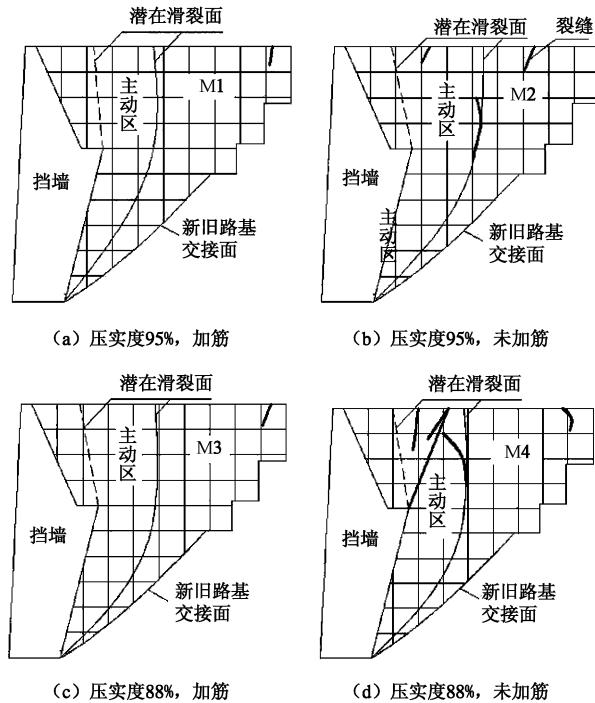


图 8 墙后土体破裂面形态

Fig. 8 Fracture plane forms of back wall fill

由图 8 可知, M1~M4 墙后土体中均存在两组潜在滑裂面, 其位置和形态基本相同。其中一组潜在滑裂面通过墙趾(图中细实线), 在上墙部分几乎为一竖直面, 而在下墙部分为一曲面, 该滑裂面与填土表面的交点均距墙顶约 150 mm(或距墙踵水平投影约 117.5 mm), 与全墙高的比值约 0.5(或 0.39); 另一组潜在滑裂面则出现在上墙后土体中, 其形态大致为通过衡重台后缘的斜面(图中虚线), 与填土表面交点距墙顶约 60 mm。这两组破裂面组成的区域内, 土体主要发生沉降变形, 形成主动区^[18]。通过衡重台后缘的滑裂面与上墙背组成的区域内, 土体变形不明显, 主要是由于衡重台对上部土体存在约束作用, 致使该区域内土体与挡墙一同发生位移, 可视为墙体的一部分。从试验结束后墙后土体中出现的裂缝(图 8 中粗实线, 试验照片如图 9 所示)可以反映出土体的加筋能够明显增强土体的整体性, 抑制土体裂缝的开展, 对于低压实度的情况, 抑制效果仍然明显。

2.4 衡重式墙后填土表面沉降

(1) 墙后填土表面沉降沿路基横断面分布

图 10 所示为达到主动土压力状态时墙后路基填土表面沉降沿横断面的分布情况(M2 在试验过程中传感器出现问题, 未能得到有效数据)。鉴于原型中旧

路基建成年代久远, 变形早已完成, 因此在模型中模拟旧路基填土时掺入了 5%水泥粉, 可视其基本不发生沉降, 布设于旧路基处的沉降计测试数据也表明整个旧路基的沉降量很小。

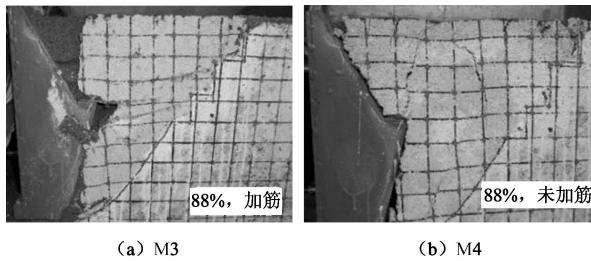


图 9 墙后土体典型破裂面照片

Fig. 9 Typical section of back wall fill

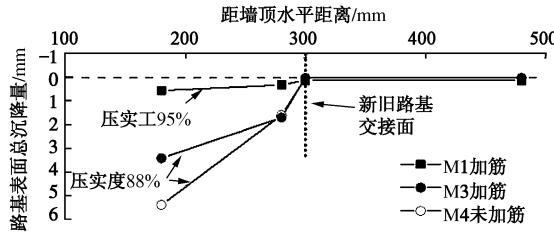


图 10 填土表面沉降沿路基横断面分布

Fig. 10 Distribution of surface settlements along cross section of subgrade

图 10 反映出墙后填土表面沉降主要发生在新填路基区域, 沿路基横断面基本呈三角形分布。对比 M1 与 M3、M4 发现, 提高墙后填土的压实度可有效改善路基面的不均匀沉降发展。而对比 M3 和 M4 的测试数据, 则反映出即使在 88% 的较低压实度下, 墙后土体加筋对填土表面的减沉仍有效果。

(2) 墙体侧向位移引起的墙后填土表面沉降

墙后填土表面沉降主要来源于两个方面, 一是在重力作用下产生的填土压密变形, 二是由墙体侧向位移所引起的填土形变沉降。图 11 所示为墙体侧向位移引起的填土表面下沉与墙顶位移的关系曲线, 图中, 填土沉降数据为图 3 (b) 所示的 S3、S6 沉降计测点位置的平均值, 而墙体侧向位移引起的填土表面沉降的理论值则基于以下假设获得: ①墙体侧向位移面积与墙后填土表面沉降面积相等; ②墙体侧向位移过程中, 墙后填土只有形变而无体变; ③新旧路基交接面处的填土表面沉降为零; ④墙体侧向位移引起的墙后填土表面沉降沿横断面呈三角形分布。理论值计算模式如图 12 所示。

参照图 5 所示墙体位移状态和图 11 所示理论值计算模式简图及相关假设可知, 图 11 中代表墙体侧向位移的四边形 BDEF 面积 S_t 应与代表墙后填土沉降的

$\triangle ABC$ 面积 S_m 相等, 则

$$\frac{1}{2}(d_1 + d_2)H = \frac{1}{2}Ds \quad . \quad (2)$$

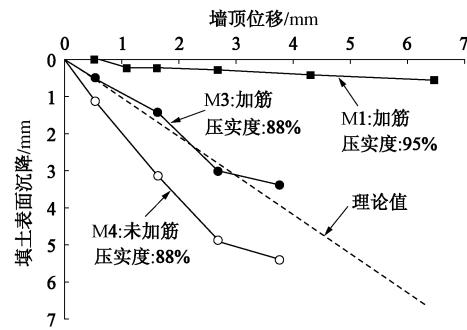


图 11 墙体侧向位移引起墙后填土表面沉降关系曲线

Fig. 11 Relationship between surface settlement of fill and displacement of top wall

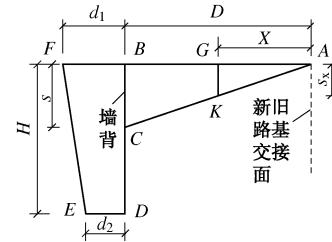


图 12 墙体侧向位移与墙后填土表面沉降的理论值计算模式

Fig. 12 Theoretical calculation of settlement of surface fill

可得墙顶处的路基填土表面沉降 s 与墙体侧向位移 d_1 、 d_2 及墙高 H 和新填路基面宽 D 的理论关系为

$$s = \frac{(d_1 + d_2)H}{D} \quad . \quad (3)$$

根据 $\triangle ABC$ 与 $\triangle AGK$ 相似关系, 路基横断面距新旧路基交接面任一位置 x 处 (可与沉降计测点位置对应) 的沉降量 s_x 为

$$s_x = \frac{sx}{D} \quad . \quad (4)$$

由图 11 的曲线可知, M4 的墙后填土表面沉降大于理论值, 映射出在墙体位移过程中墙后土体同时具有形变沉降和压缩变形存在, 表明墙后土体的压实度不够, 易产生较大的附加沉降; M3 的墙后填土表面沉降在理论值附近小幅波动, 说明在墙体位移过程中墙后土体以形变沉降为主, 反映出通过土体加筋可明显改善因墙体侧向位移引起的墙后填土表面沉降; M1 的墙后填土表面沉降明显小于理论值, 显示出墙后填土压实度较高及土体加筋条件下, 对增强土体的整体性十分有利, 可大幅消减墙体侧向位移引起的墙后填土表面附加沉降。

为此, 可通过实测墙体侧向位移面积 S'_t 与实测墙后填土沉降位移面积 S'_m 的相互关系, 定量反映墙后填土表面沉降对墙体侧向位移的总体响应情况, 用 E_r

表示, 则

$$E_r = (S'_t - S'_m) / S'_t \quad (5)$$

由 E_r 的定义可知: ① $E_r < 0$, 表示墙后填土存在较明显的压缩变形, 负值越大, 压缩变形越显著; ② $E_r \approx 0$, 表示墙后填土以形变沉降为主, 压缩变形不显著; ③ $E_r > 0$, 则表示墙后填土具有良好的整体稳定性, 由墙体侧向位移引起的沉降变形较小。

针对模型 M1、M3、M4 的测试数据得 E_r 值如表 4 所列, 其中, M4 的 $E_r = -0.67 < 0$, M3 的 $E_r = -0.04 \approx 0$, M1 的 $E_r = 0.90 > 0$ 。将 M3 与 M4 相比, 表明墙后土体加筋对减小填土表面沉降有较明显的效果; 将 M1 与 M3、M4 相比, 说明提高填土的压实度对减小填土表面沉降的作用更加明显。

表 4 墙体侧向位移与墙后填土表面沉降关系值 E_r

Table 4 Value of E_r

编号	M1	M3	M4
E_r	0.90	-0.04	-0.67

3 结 论

通过衡重式加筋土路肩挡墙的土工离心模型试验分析, 得出以下结论:

(1) 墙后土体加筋对减小墙背承受的土压力作用与土体压实度密切相关, 只有在路基填土得到有效压实的条件下墙后土体的加筋减压效应才显现出来。试验表明, 墙后填土压实度仅有 88%, 墙背土压力基本不受土体加筋的影响; 但当压实度增至 95%, 加筋作用可大幅降低上、下墙土压力分别达 68% 和 43%, 并对上墙背土压力的分布产生影响, 由线性增大变为折线型分布。

(2) 衡重台的存在, 对其上覆土体存在托举效应, 会导致衡重台以下约 1/3 下墙高范围内的土压力减小, 使得处于静止状态的下墙背土压力呈现出比较明显的两段式折线分布形态; 在主动状态下, 除因衡重台的托举减压作用引起下墙背上部范围土压力的降低外, 下墙踵附近的土压力也会因土拱现象的存在而减小, 致使下墙背土压力进一步演变为三段式的非线性分布特征。

(3) 墙后土体加筋对减小路肩式挡墙的填土压密下沉, 降低因墙体侧向位移引起的填土形变沉降效果突出。尤其在填土压实度较高的条件下进行土体加筋, 对提高路基填土的抗变形能力, 控制新旧路基间的不均匀变形效果更加显著。

参 考 文 献:

[1] 张家国. 衡重式挡土墙受力及变形特性离心试验模型研究

- [D]. 成都: 西南交通大学, 2004. (ZHANG Jia-guo. Centrifugal model test study on the soil pressure and deformation of retaining wall with equilibrator[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [2] 唐山铁道学院线路教研室挡土墙研究小组. 折线形挡土墙土压力—关于上下墙间影响的探讨[J]. 唐山铁道学院学报, 1964(2): 51 - 56. (Study Team of Line Staff Room of Tangshan Railway College. Earth pressure of polygonal-shape retaining wall—About discussion of the effect between upper and down wall[J]. Journal of Tangshan Railway College, 1964(2): 51 - 56. (in Chinese))
- [3] TB10025—2006 铁路路基支挡结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011. (TB10025—2006 Code for design on retaining structures of railway subgrade[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [4] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路挡土墙设计与施工技术细则[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd. Technical guidelines for design and construction of highway retaining walls[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [5] 刘国楠, 胡荣华, 潘效鸿, 等. 衡重式桩板挡墙上墙土压力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 94 - 99. (LIU Guo-nan, HU Rong-hua, PAN Xiao-hong, et al. Model tests on earth pressure of upper wall of sheet pile wall with relieving platform[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 94 - 99. (in Chinese))
- [6] 刘永春. 衡重式桩板挡墙的模型试验研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010. (LIU Yong-chun. The model test research on pile-supported relieving retaining wall[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2010. (in Chinese))
- [7] 罗强, 蔡英, 邵启豪. 成都粘土重力式挡土墙的工程试验[J]. 西南交通大学学报, 1995, 30(3): 270 - 274. (LUO Qing, CAI Ying, SHAO Qi-hao. Experimental study on gravity retaining wall filled with Chengdu clay[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1995, 30(3): 270 - 274. (in Chinese))
- [8] 闫澍旺, BARR Ben. 土工格栅与土相互作用的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 56 - 61. (YAN Shu-wang, BARR Ben. Finite-element modeling of soil-geogrid interaction with application to interpret the pullout behavior of geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(6): 56 - 61. (in Chinese))

- [9] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(3): 80 - 86. (XU Guang-ming, ZHANG Wei-min. Study of the grain size effect and boundary effect in centrifugal model tests[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 80 - 86. (in Chinese))
- [10] 杨俊杰, 柳 飞, 丰泽康男, 等. 砂土地基承载力离心模型试验中的粒径效应研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(4): 477 - 483. (YANG Jun-jie, LIU Fei, TOYOSAWAY, et al. Particle size effects on bearing capacity of sand ground in centrifugal tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 477 - 483. (in Chinese))
- [11] FUGLSANG L D, OVESEN N K. The application of the theory of modelling to centrifuge studies[C]// Centrifuge in Soil Mechanics, CRAIG W H, JAMES R G, SCHOFIELD A N, eds. Balkema, Rotterdam, 1988. 119 - 138.
- [12] 杜延龄. 土石坝离心模型试验研究[J]. 水利水电技术, 1997, **28**(6): 54 - 58. (DU Yan-ling. Study on the centrifugal model test for earth-rock dam[J]. Technology of Water Resources and Hydropower, 1997, **28**(6): 54 - 58. (in Chinese))
- [13] 匡希龙, 李 振. 土工离心模型试验中结构物替代技术探讨[J]. 公路交通技术, 2008(1): 5 - 8. (KUANG Xi-long, LI Zhen. Discussion on structure substituting technique in geotechnical engineering eccentric model test[J]. Technology of Highway and Transport, 2008(1): 5 - 8. (in Chinese))
- [14] 张 良, 罗 强, 陈 虎, 等. 基于离心模型试验的软基路堤基底压力和垫层筋带拉力分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2772 - 2779. (ZHANG Liang, LUO Qiang, CHEN Hu, et al. Analysis of tensile force in reinforced cushion and pressure at bottom of soft soil foundation embankment based on centrifugal model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2772 - 2779. (in Chinese))
- [15] 张 良, 罗 强, 周 成, 等. 基于离心模型试验的深厚层软基加固方案比较研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(7): 982 - 987. (ZHANG Liang, LUO Qiang, ZHOU Cheng, et al. Comparative research on reinforcement of thick soft clay ground based on centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(7): 982 - 987. (in Chinese))
- [16] 陆 阳, 廖敬梅, 廖 军. 高填方路基衡重式挡墙的变形及稳定的现场监测[J]. 中南公路工程, 2006, **31**(4): 9 - 13. (LU Yang, LIAO Jing-mei, LIAO Jun. Field monitoring of a gravity balanced retaining wall[J]. China Railway Science, 2006, **31**(4): 9 - 13. (in Chinese))
- [17] 周应英, 任姜龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(2): 19 - 26. (ZHOU Ying-ying, REN Jiang-long. An experimental study on active earth pressure behind rigid retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(2): 19 - 26. (in Chinese))
- [18] 周 镜, 李惠康, 郑明成. 衡重式挡墙的模型试验及其土压力计算[J]. 土木工程学报, 1963(10): 58 - 73. (ZHOU Jing, LI Hui-kang, ZHENG Ming-cheng. Model tests on balance weight retaining wall and calculation of earth pressure[J]. China Civil Engineering Journal, 1963(10): 58 - 73. (in Chinese))