

DOI: 10.11779/CJGE201504013

# 不同位移模式下衡重式路肩墙离心模型试验研究

李 浩<sup>1,2</sup>, 罗 强<sup>1,2\*</sup>, 张 良<sup>1,2</sup>, 蒋良淮<sup>1,2</sup>, 张家国<sup>1,2</sup>

(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路肩挡土墙为原型, 设计了墙体在平移(T)、绕墙趾转动(RB)、绕墙顶转动(RT)以及平移与绕墙趾转动复合形式(T+RB) 4种位移模式的土工离心模型试验, 讨论了挡墙位移模式对墙背土压力和路基填土变形的影响, 分析了墙后不同深度土体进入主动状态的进程, 试验表明: ①位移模式对上墙土压力大小及分布形态基本无影响, 但上墙浅层土体在挡墙位移与墙高比值小于 0.3%~0.5%时, 存在墙-土摩擦引起的土拱效应, 使水平土压力系数增大; ②由于衡重台的存在, 对下墙距衡重台约 1/3 下墙高度范围的土压力有遮蔽作用, 其结果是降低了土压力合力作用点位置; ③位移模式对填土沉降有明显影响, 在墙体位移最大值相同时, T 位移模式的填土沉降明显大于 RB 和 RT 位移模式, 而 RT 位移模式, 衡重台向下偏转, 促进了填土下沉, 最终使其填土沉降大于相同位移面积的 RB 位移模式, 也更容易使上墙出现第二破裂面。

**关键词:** 衡重式路肩墙; 土工离心模型试验; 位移模式; 土压力; 路基沉降; 土拱效应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)04-0675-08

**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 various motion modes

LI Hao<sup>1,2</sup>, LUO Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Liang<sup>1,2</sup>, JIANG Liang-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Jia-guo<sup>1,2</sup>

(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 centrifugal model tests are designed based on the wall motions under translation (T), rotating around base (RB), rotation around top (RT) and T+RB modes, the impact of wall motion modes on earth pressure and deformation of the filling is discussed, and the process of soils at various depths entering in to the active earth pressure is analyzed. The results show that: (1) The wall motion modes almost have no influence on the values and distribution of earth pressure on the upper wall, but when the ratio of displacement to height of retaining wall is less than 0.3%~0.5%, the shallow layer fills behind the upper wall have soil arching effect which is caused by wall-soil friction, and the coefficient of horizontal earth pressure increases; (2) The equilibrator has a shadowing effect on the down wall earth pressure, and the influence area is about 1/3 height of the down wall below the equilibrator. The results reduce the position of the acting point of earth pressure resultant force; (3) The motion modes have obvious impact on the fill settlement. When the maximum wall displacements are the same, the fill settlement of the T mode is significantly larger than that of the RB and RT modes. Under the RT mode, although it has the same displacement area as the RT mode, the equilibrator deflects downward. The fill settlement is promoted, leading to that the fill settlement of the RT mode is larger than that of RB mode, and the second fracture surface occurs easier on the upper wall.

**Key words:** shoulder balance weight retaining wall; centrifugal model test; motion mode; earth pressure; fill settlement; soil arching effect

## 0 引 言

挡土墙墙背土压力是土力学的经典课题之一, 早在 1773 年法国工程师 Coulomb 根据墙后土楔整体极

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项目(2682013ZT12)

收稿日期: 2014-09-04

\*通讯作者



心模型试验认为,  $B_m/D_{50}^m > 30$  的同时, 还需  $B_m/D_{max}^m > 23$ 。杨俊杰等<sup>[22]</sup>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  $D_{50}^p \approx 5 \text{ mm}$ ,  $D_{max}^p \approx 60 \text{ mm}$ 。而与模型填料直接接触的模型土压力筒支架式测力板有效长度  $B_m=67.5\text{mm}$ , 为保证土压力测试的准确性, 需满足  $B_m/D_{max}^m=30$  的粒径效应限值, 可得到模型填料允许的最大粒径  $D_{max}^m=2.25 \text{ mm}$ 。基于代替法的填料缩径处理原则<sup>[24]</sup>, 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。

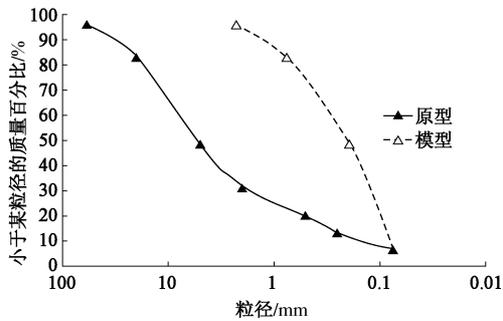


图 2 原型与模型填料级配曲线

Fig. 2 Grading curves of fill of prototype and model

(3) 测点布设

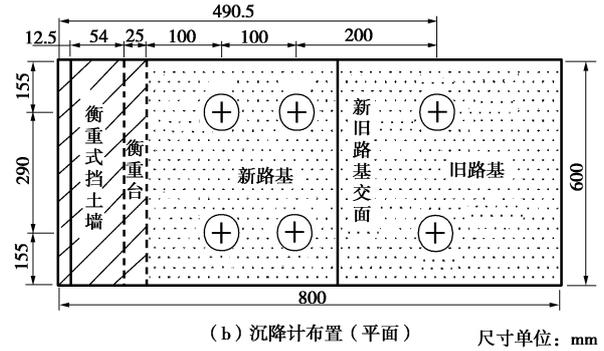
沿模型挡墙背和衡重台依次布设测力板, 如图 3 (a) 所示, 用于量测墙背以及衡重台承受的土压力, 墙背测力板尺寸 70 mm×20 mm, 衡重台测力板尺寸 70 mm×25 mm; 在模型填土表面布设沉降计, 用于量测墙背填土表面沉降, 如图 3 (b) 所示。

(4) 衡重式挡土墙模型位移控制

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、下两排螺杆旋进或旋出限制模型挡墙的位移, 实现其变位模式。



(a) 测力板布置 (墙体照片)



(b) 沉降计布置 (平面) 尺寸单位: mm

图 3 测力板及沉降计布置

Fig. 3 Layout of force parameters and settlement sensors

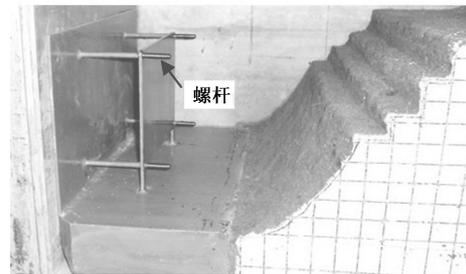


图 4 位移控制机构

Fig. 4 Displacement control mechanism

(5) 试验方案

为研究挡墙不同位移模式对墙背土压力、水平土压力系数以及墙后土体的变形影响, 设计了 4 种工况的土工离心模型试验方案, 如表 1 所示, 挡墙预设位移量如表 2 所示, 其中 M4 预设位移根据原型挡墙现场实测位移情况而制定<sup>[20]</sup>。

表 1 土工离心模型试验方案

Table 1 Design schemes for centrifugal model tests

试验编号	填土压实度/%	位移模式
M1	95	平动 (T)
M2	95	绕墙趾转动 (RB)
M3	95	绕墙顶转动 (RT)
M4	95	平动+绕墙趾转动 (T+RB)

试验时, 将挡墙模型以及旧路基 (满填) 在离心机上以 100g 的加速度运行 2.5 h, 相当于旧路基固结时间约 3 a, 然后按图 1 (b) 开挖新路基部分及台阶, 并填筑新路基, 之后进行正式试验。

表 2 模型墙体水平位移量设置

Table 2 Presupposition displacements of model tests (mm)

位移状态	上杆位移/下杆位移 (转角/10 <sup>-3</sup> rad)			
	M1	M2	M3	M4
0	0.0/0.0	0.0/0.0 (0)	0.0/0.0 (0)	0.0/0.0 (0)
1	1.0/1.0	1.5/0.3 (0.6)	0.2/1.0 (4)	0.5/0.3 (0.8)
2	2.5/2.5	2.5/0.5 (1)	0.4/2.0 (8)	1.1/0.6 (1.5)
3	3.5/3.5	3.5/0.7 (14)	0.6/3.0 (12)	1.6/0.9 (2)
4	4.5/4.5	4.5/0.9 (18)	0.8/4.0 (16)	2.2/1.3 (3)
5	—	—	—	3.2/1.9 (4.5)

## 2 试验数据分析

### 2.1 墙背总土压力及其随墙体位移的变化

按表2预设位移量控制挡墙位移,得到挡墙位移与墙背总土压力关系,如图5所示(图中数据均为模型数据,下同)。其中, M1, M2, M4取墙顶位移, M3取墙踵位移作为挡墙位移(下同)。

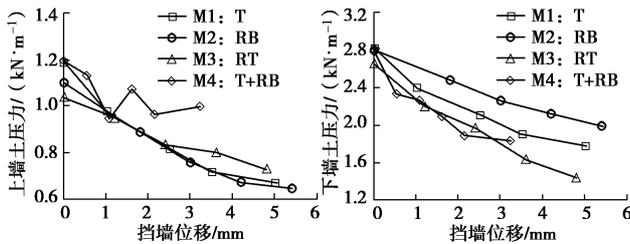


图5 墙背土压力与墙体位移关系曲线

Fig. 5 Relationship between earth pressure and wall displacement

由图5可知,随挡墙位移增大, M1~M4上、下墙背总土压力逐渐减小并趋于稳定,上墙由静止到主动土压力状态,墙背总土压力均值减小了约39%,下墙减小了约37%,衰减程度基本相同。其中, M1~M3上墙总土压力大小基本一致,反映出T, RB和RT位移模式对上墙土压力大小影响较小;下墙总土压力大小受挡墙变位模式的影响比较明显,具体表现为:在同一挡墙位移下, RB位移模式的M2,因墙踵附近墙体位移不充分,使得下墙总土压力大于T位移模式的M1和RT位移模式的M3, T+RB位移模式的M4出现上墙背总土压力偏大,下墙总土压力偏小的情况。

### 2.2 水平土压力系数 $K_h$ 变化特征及其主动极限状态判别

为反映各位移模式下,墙后不同深度土体达到主动土压力状态的进程,定义水平土压力系数  $K_h = \sigma_h / (\gamma Z)$ , 其中  $\sigma_h$  为水平土压力 (kPa), 试验所得土压力垂直于测力板方向, 将其换算至水平方向得到  $\sigma_h$ ,  $\gamma$  为墙后土体重度 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ),  $Z$  为路基面以下深度 (m), 得到水平土压力系数  $K_h$  与挡墙位移的关系曲线, 如图6所示。衡重台所处的深度  $Z=120$  mm。

由图6可知, 3种基本位移模式下 (T, RB和RT), 水平土压力系数  $K_h$  随挡墙位移的衰减程度与挡墙位移模式有关, 具体表现为: 在上墙部分, T, RB位移模式, 因墙体位移较为充分,  $K_h$  随挡墙位移的衰减比例基本一致, 均值分别约为46%和45%, 而RT位移模式下, 因上墙部分墙体位移受限,  $K_h$  衰减比例明显较低, 均值约为26%; 在下墙部分, 因T和RT位移模式下, 墙体位移充分, 衰减比例基本一致, 均值分别约为39%和41%, 而RB位移模式下, 因下墙部分墙体位

移受限,  $K_h$  衰减比例较低, 均值约为27%。反映出水平土压力系数  $K_h$  的衰减程度与墙体位移模式密切相关, 墙体位移受限部位, 则  $K_h$  衰减程度较小。

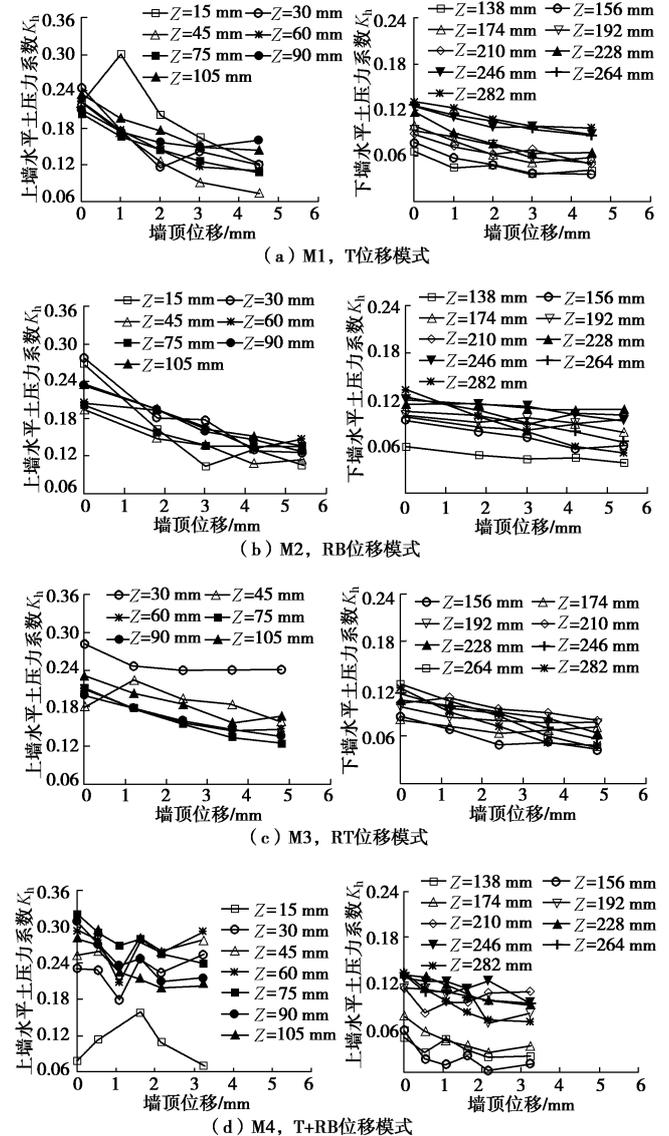


图6 水平土压力系数  $K_h$  与挡墙位移关系曲线

Fig. 6 Relationship between  $K_h$  and wall displacement

图6中, 在T, RT和T+RB位移模式下 (对应于M1, M3, M4), 墙体位移量较小时, 上墙上部  $K_h$  出现了增大的趋势, 如M1, M4中  $Z=15$  mm、M3中  $Z=45$  mm处。Fang等<sup>[7]</sup>的刚性挡墙模型试验中在挡墙上部也出现了这一现象, 并认为是土拱效应所致。Handy<sup>[12]</sup>认为在挡墙位移量很小时, 墙-土摩擦角的发挥在挡墙上部引起拱效应, 增大了墙背上部土压力, 随挡墙位移的增大, 墙后土体水平剪应力的发挥, 在挡墙下部引起拱效应, 减小了墙背下部土压力。Bang<sup>[11]</sup>认为刚性挡墙墙背土压力由静止状态到主动状态是渐变的过程, 由起始主动状态 (initial active)、中间主动状态 (intermediate active) 和完全主动状态 (full active), 并认为起始主动状态一般发生于挡墙上部。综合以上

文献的结论, 结合图6中水平土压力系数 $K_h$ 表现出的增大趋势, 反映出墙后浅层土体在挡墙位移较小时, 存在着可能由墙-土间摩擦效应引起的拱现象。值得注意的是, 图6中 $K_h$ 达到峰值后并开始减小时, 对应着上墙后土体中拱效应的瓦解或减弱, 与填土表面沉降的突增有较好的对应关系。

根据主动土压力的定义, 墙后某一深度处土体处于主动状态时, 水平土压力系数 $K_h$ 趋于稳定, 为判断墙后土体进入主动状态的临界点, 定义 $\lambda$ 为某一挡墙位移所对应的水平土压力系数 $K_{h(n-1)}$ 与后一挡墙位移下的 $K_{hn}$ 之差与 $K_{h(n-1)}$ 的百分比, 即

$$\lambda = \frac{K_{h(n-1)} - K_{hn}}{K_{h(n-1)}} \times 100\% \quad (1)$$

并规定当 $\lambda$ 值介于 $\pm 15\%$ 时认为墙后某一深度处土体已进入主动状态, 记作 $K_{ah}$ , 墙后不同深度土体的 $K_{ah}$ 与其所对应的墙体位移之间的关系就可以反映墙后土体达到主动土压力状态的进程, 如图7所示。

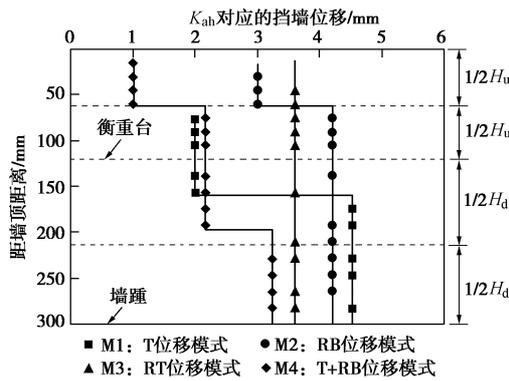


图7  $K_{ah}$ 与其所对应的墙体位移关系

Fig. 7 Relationship between displacement wall and corresponding  $K_{ah}$

由图7可知, 在不同位移模式下, 墙后不同深度土体达到主动土压力状态的进程有所差异, 但都有基本相同的变化规律, 具体表现为: T位移模式的M1, RB和T+RB的M2, M4均表现为上墙先于下墙达到主动状态, 反映出应力水平对墙后土体进入主动土压力状态所需墙体位移量有一定影响, 应力水平低(上墙部分), 所需墙体位移量较小, 应力水平高(下墙部分), 要求的墙体位移量大。而RT位移模式的M3基本同时达到主动土压力状态, 反映出墙后土体应力水平较低的部位, 当墙体位移受限将延迟该部位土体进入主动状态, 使其所需的墙体位移量增大。

### 2.3 墙背土压力分布

试验得到的墙背土压力分布如图8所示, 图中实线和虚线分别表示静止和主动土压力的分布状况。可知, 在衡重式挡墙的上墙部分, M1~M4墙背土压力基本

呈线性分布, 位移模式对墙背土压力的分布形态影响较小; 下墙部分, 土压力分布具有相似的规律, 静止土压力呈比较明显的两段式折线分布, 距平衡台下约 $H_d/3$ 范围内存在较明显的减压现象, 这主要是由于平衡台对上墙土体的托举、遮蔽作用而对下墙产生了卸荷。主动土压力除T位移模式的M1外, M2~M4在距墙踵一定深度范围, 土压力明显减小, 其分布形态也由两段式折线分布转变为墙踵处土压力不为零的三段式非线性分布。

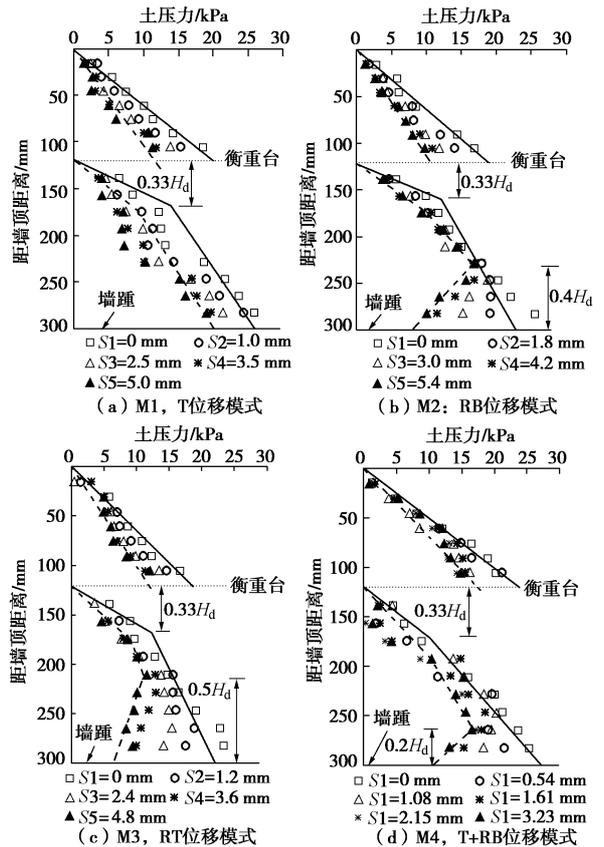


图8 墙背土压力分布

Fig. 8 Distribution of earth pressures

由图8所示的墙背土压力分布曲线的面域质心, 可得到上、下墙墙背土压力合力作用点位置随挡墙位移的变化趋势, 如图9所示。图9中纵坐标表示上、下墙土压力合力作用点分别距平衡台、墙踵的高度与上、下墙高度的比值。

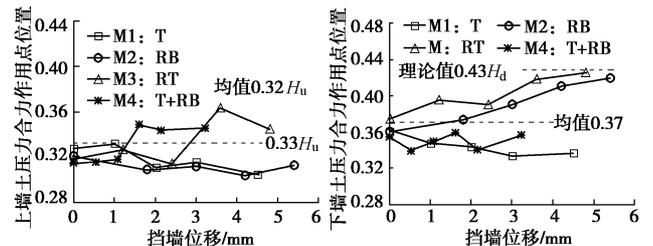


图9 土压力合力作用点位置与挡墙位移关系曲线

Fig. 9 Relationship between active position of earth pressure and wall displacement

图9中反映出, M1~M4上墙土压力合力作用点均值约 $0.32H_u$ , 与土压力三角形分布理论值 $0.33H_u$ 非常接近。随挡墙位移增大, M1, M2上墙土压力合力作用点位置稍有下降, 分别由 $0.33H_u$ ,  $0.32H_u$ 降低至 $0.31H_u$ ; 而M3, M4上墙土压力合力作用点位置略有提升, 由 $0.32H_u$ 分别上升至 $0.36H_u$ 和 $0.35H_u$ , 但总体上与 $0.33H_u$ 无明显差异。下墙部分, 在静止土压力状态, M1~M4下墙土压力合力作用点均值约 $0.36H_d$ , 低于传统延长墙背法的理论值 $0.43H_d$  (土压力按梯形分布得出), 根据图8的土压力分布特点, 衡重台对下墙卸荷作用的影响范围为距衡重台下约 $H_d/3$ , 反算得到下墙土压力合力作用点位置约为 $0.38H_d$ , 与M1~M4下墙土压力合力作用点均值 $0.36H_d$ 比较吻合。在挡墙位移过程中, 由于衡重台对下墙的卸荷作用, 使T位移模式下的M1土压力合力作用点位置不断下降, 由 $0.37H_d$ 下降至 $0.34H_d$ ; RB和RT位移模式下的M2和M3, 不仅有衡重台对下墙的卸荷作用, 在墙踵附近还存在着影响范围较大的土拱效应, 而使得其土压力合力作用点位置不断上移, 分别由 $0.36H_d$ ,  $0.38H_d$ 上升至 $0.42H_d$ 和 $0.43H_d$ , 接近理论值 $0.43H_d$ ; T+RB位移模式的M4, 其墙踵附近土拱效应的影响范围相对较小, 因此土压力合力作用点的位置基本保持不变, 均值约为 $0.36H_d$ 。

#### 2.4 墙后土体滑裂面特征

通过试验前后在墙后土体剖面 (模型箱有机玻璃侧) 刻划的网格线以及网格节点大头针位置的变化, 量测网格及大头针位移 (一个完整网格尺寸为 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ ), 经整理分析得到模型破裂面的形态以及所出现的位置, 如图10所示 (M2, RB位移模式因拆模失误, 未能得到试验前后网格变化形态)。图中粗实线表示墙后土体中实际出现的裂缝或破裂面, 细实线表示潜在破裂面, 虚线表示网格竖向变形的形态。

由图10可知, M1, M3和M4墙后土体中均存在3组破裂面 (或潜在破裂面), 其中两组破裂面通过衡重台后缘, 在竖直方向基本呈对称分布, 其中M3上墙出现了非常明显的第二破裂面特征, 与填土表面的交点距墙顶分别约 $30\text{ cm}$ 和 $130\text{ cm}$ 。这两组破裂面之间以及与上墙背之间的土体, 沉降变形不明显, 主要是由于衡重台对上部土体的刚性约束作用。另一组破裂面通过墙踵, 在上墙部分几乎为一竖直面, 而在下墙部分为一曲面, 与填土表面交点距墙顶约 $170\sim 180\text{ mm}$  (或距墙踵水平投影约 $117.5\sim 147.5\text{ mm}$ ), 该破裂面与通过衡重台后缘远离墙背的破裂面之间的土体, 因衡重台的存在, 主要发生错台式沉降变形, 形成主动区<sup>[25]</sup> (典型破裂面照片如图11所示)。值得注意的是, 此破裂面在墙踵附近与新旧路基交接面靠近, 在实际工程应当强化新旧路基的衔接, 防止墙后土体沿新旧路基

交接面产生滑移。

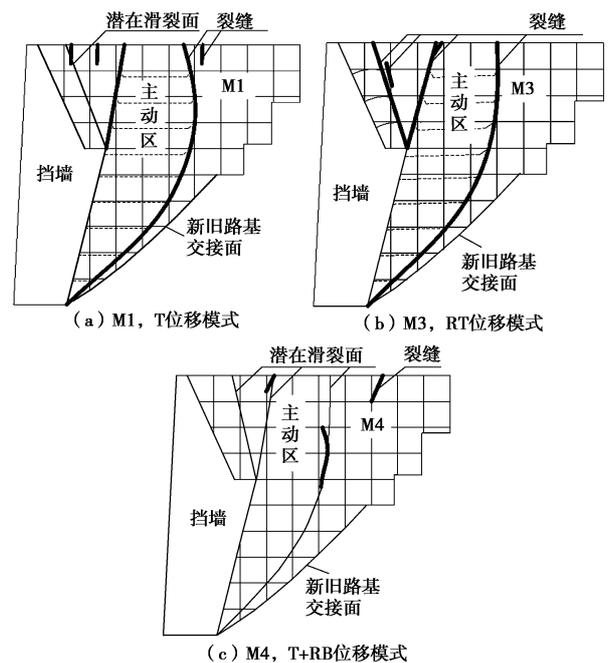


图10 墙后土体破裂面形态

Fig. 10 Fracture plane forms of backfill

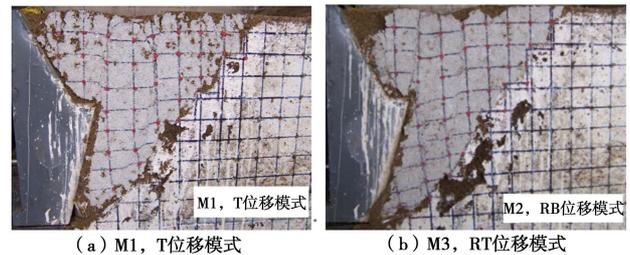


图11 墙后土体典型破裂面照片

Fig. 11 Typical section photos of back wall fill

#### 2.5 墙后填土表面沉降

墙后填土表面在无外荷载以及地基条件较好的情况下, 填土表面沉降主要来源于两个方面, 一是重力作用下产生的填土压密变形, 对于砂土等无黏性填料, 这部分沉降在填筑期内已基本完成; 二是由墙体侧向位移而引起的填土形变沉降。鉴于原型中旧路基建成较早, 变形已经完成, 因此在模型中模拟旧路基填土时掺入5%的水泥粉, 可认为旧路基基本不发生沉降, 新路基的地基条件较好, 则由墙体侧向位移而引起的填土形变沉降构成工后沉降的主要来源。墙体侧向位移引起的填土表面下沉与挡墙位移的关系曲线如图12所示, 图中填土沉降数据为图3 (b) 所示的S3, S6沉降计测点位置的均值 (M4因传感器故障, 未能得到有效数据)。图中T, RB和RT理论值确定见参考文献[26]。

由图12可知, 挡墙位移模式对墙后填土表面沉降有明显影响, 在同一挡墙位移下, T位移模式的M1, 其挡墙位移面积为RB位移模式的M2和RT位移模式的M3位移面积的2倍, 使得墙后填土表面沉降与M2和

M3沉降之和比较接近,同时与T位移模式的理论值相差甚远,反映出挡墙在T位移模式下,对墙后土体有显著扰动,会导致更大的填土沉降变形;墙体位移面积相等的RT位移模式的M3,墙体位移小于3.5 mm时,墙后填土沉降大于RB位移模式的M2,同时较RT、RB的理论值偏大,这与衡重台偏转方向有一定联系,RT位移模式下,衡重台向下偏转,在一定程度上会促进墙后土体的下沉,从而增大填土沉降,并且更容易在上墙形成第二破裂面(如图11所示)。此外,在挡墙位移大于1~2 mm后,墙后土体沉降变形存在突增的状况,参照图6可以发现,当挡墙位移大于1~2 mm时,正好对应着上墙浅层土体中拱效应的减弱或瓦解(如M1中 $Z=15$  mm, M3中 $Z=45$  mm处),反映出墙后填土中稳定的土拱能够抑制挡墙侧向位移引起的填土表面沉降,所对应的挡墙位移可作为挡墙侧向位移的限值。

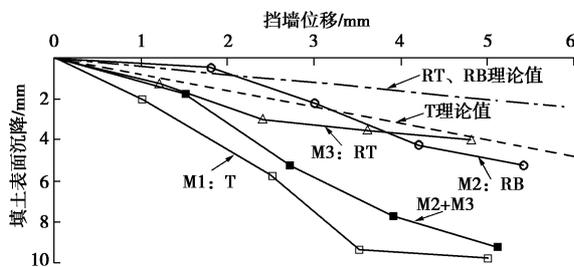


图 12 挡墙侧向位移引起墙后填土表面沉降关系曲线

Fig. 12 Relationship between fill settlement and lateral displacement of wall

### 3 结 论

通过4种位移模式下衡重式路肩墙土工离心模型试验分析,得到以下结论:

(1) 随挡墙位移增大, M1~M4上、下墙背土压力逐渐减小并趋于稳定。墙背土压力由静止到主动状态,上、下墙背土压力衰减比例基本相同,均值分别约为39%和37%。而上、下墙水平土压力系数 $K_h$ 衰减比例与挡墙位移模式密切相关,墙体位移受限部位, $K_h$ 衰减比例明显偏低。同时在墙后土体应力水平较低的部位,当墙体位移受限将使该部位土体进入主动状态所需的墙体位移量增大。

(2) 衡重台对上墙土体的托举、遮蔽作用导致下墙距衡重台约1/3下墙高度范围的土压力明显减小。主动土压力状态时,除衡重台的影响外,墙踵附近拱效应的存在使墙背土压力分布形态由静止状态的两段式折线分布演变为三段式的非线性分布特征,但位移模式对上墙土压力大小及分布形态基本无影响。

(3) 位移模式对墙后填土沉降有较大影响,在墙体位移最大值相同的情况下, T位移模式因墙体位移

面积较大,引起的填土沉降明显大于RB和RT位移模式,而RT位移模式,衡重台向下偏转,会促进填土下沉,最终使填土沉降大于相同位移面积的RB位移模式,也更容易使上墙出现第二破裂面。同时,挡墙侧向位移引起的填土表面沉降与上墙浅层土体中因墙-土摩擦引起的拱效应有一定关联,拱效应的减弱或瓦解将引起填土表面沉降的突增,对应的挡墙位移与墙高比值介于0.3%~0.7%。

### 参考文献:

- [1] COULOMB A C. Essai sur une application des règles de Maximis & Minimis à quelques Problèmes de Statique, relatifs à l'Architecture[J]. Présentés à l'Academie des Sciences par divers Savans, 1776, 7: 343 - 382. (COULOMB A C. Test on an application of the rules of maximis & minimis some static problems related to architecture[J]. Presented to the Academy of Sciences by Various Savants, 1776, 7: 343 - 382. (in French))
- [2] RANKINE W J M. On the stability of loose earth[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1857: 9 - 27.
- [3] 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))
- [4] 刘永春. 衡重式桩板挡墙模型试验研究[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))
- [5] 罗强, 蔡英, 邵启豪. 成都黏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))
- [6] TERZAGHI K. Large retaining-wall test I. pressure of dry sand[J]. Engineering News-Record, 1900, 112(5): 136 - 140.
- [7] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, 112(3): 317 - 333.
- [8] FANG Y S, CHENG F P, CHEN R T. Earth pressures under general wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 24(2): 113 - 131.

- [9] 周应英, 任姜龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研[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 Geotechnical Engineering, 1990, **12**(2): 19 - 26. (in Chinese))
- [10] KOBAKHIDZE A F. Form of the diagram of backfill pressure on a retaining wall[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977, **14**(1): 68 - 73.
- [11] BANG S. Active earth pressure behind retaining walls[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, **111**(3): 407 - 412.
- [12] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, **111**(3): 302 - 318.
- [13] TSAGARELI Z V. Experimental investigation of the pressure of a loose medium on retaining walls with a vertical back face and horizontal backfill surface[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1965, **2**(4): 197 - 200.
- [14] KHOSRAVIM H, PIPATPONGSA T, TAKEMURA J. Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode[J]. Géotechnique, 2013, **63**(12): 1020 - 1028.
- [15] 徐日庆, 龚慈, 魏纲. 考虑平动位移效应的刚性挡土墙土压力理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, **39**(1): 119 - 122. (XU Ri-qing, GONG Ci, WEI Gang. Theory of earth pressure against rigid retaining walls considering translational movement effect[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, **39**(1): 119 - 122. (in Chinese))
- [16] 应宏伟, 蒋波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 717 - 722. (YING Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active pressure against retaining walls considering arching effects[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 717 - 722. (in Chinese))
- [17] 王元战, 李新国, 陈楠楠. 挡土墙主动土压力分布与侧压力系数[J]. 岩土力学, 2005, **26**(7): 1019 - 1022. (WANG Yuan-zhan, LI Xin-guo, CHEN Nan-nan. Active earth pressure on a retaining wall and lateral coefficient of earth pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(7): 1019 - 1022. (in Chinese))
- [18] 王元战, 李蔚, 黄长虹. 墙体绕基础转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(2): 208 - 211. (WANG Yuan-zhan, LI Wei, HUANG Chang-hong. Distribution of active earth pressure with wall movement of rotation about base[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2003, **25**(2): 208 - 211. (in Chinese))
- [19] TERAZGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: J Wiley and Sons, Inc, 1943.
- [20] 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]. 中国公路工程, 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))
- [21] 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-min, 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))
- [22] 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 Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 477 - 483. (in Chinese))
- [23] FUGLSANG L D, OVESEN N K. The application of the theory of modelling to centrifuge studies[J]. Centrifuge in Soil Mechanics, 1988: 119 - 138.
- [24] 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))
- [25] 周镜, 李惠康, 郑明成. 衡重式挡墙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))
- [26] 李浩, 罗强, 张良, 等. 衡重式加筋土挡墙土工离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(3): 458 - 465. (LI Hao, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Centrifugal model tests on shoulder balance weight retaining wall with reinforced earth[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2014, **36**(3): 458 - 465. (in Chinese))