

DOI: 10.11779/CJGE201810018

不同墙趾约束条件下模块式加筋土挡墙离心模型试验

陈建峰, 张 琬

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 开展了墙趾正常约束、仅对模块-基座界面作光滑处理、仅对基座-地基界面作光滑处理, 以及对基座-地基界面作光滑处理且将基座前方土体挖除这 4 组不同墙趾约束条件的模块式加筋土挡墙离心模型试验, 以研究工作应力下墙趾约束条件对挡墙内部稳定性的影响。研究表明, 墙趾约束条件对模块式加筋土挡墙内部稳定性影响显著; 对模块-基座界面作光滑处理的挡墙, 其底层模块沿该界面滑移, 挡墙中下部的墙面水平位移和筋材应变明显增大, 筋材连接力沿墙高呈三角形分布; 对基座-地基界面作光滑处理的挡墙, 基座前方地基土仍可给基座提供足够的墙趾约束作用, 挡墙内部稳定性同墙趾正常约束情况; 对于基座-地基界面作光滑处理后又将基座前方土体挖除这种模拟墙趾受到冲刷的挡墙, 其基座沿该界面滑移, 挡墙中下部的墙面水平位移和筋材应变显著增大, 筋材连接力接近极限状态 AASHTO 法计算的筋材最大拉力, 但挡墙仍能保持稳定; 在墙趾可能受到冲刷的极端情况下, 挡墙在设计上不应考虑墙趾的约束作用, 而对于正常服役状态的挡墙, 可采用考虑墙趾约束作用的 K -刚度法进行挡墙内部稳定性的计算。

关键词: 加筋土; 模块式挡墙; 离心模型试验; 墙趾约束; 内部稳定性

中图分类号: TU476.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)10-1905-07

作者简介: 陈建峰(1972-), 男, 浙江余姚人, 教授, 工学博士, 主要从事加筋土结构与边坡支护、岩体力学与工程等方面的教学与研究工作。E-mail: jf_chen@tongji.edu.cn。

Centrifuge modeling on reinforced soil segmental retaining walls under different toe restraint conditions

CHEN Jian-feng, ZHANG Wan

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The centrifugal model tests are performed on four reinforced soil segmental retaining walls under different toe restraint conditions, which are normal toe restraint, smoothing the block-pad interface, smoothing the pad-foundation interface, smoothing the pad-foundation interface and then excavating the foundation soils in the front of the leveling pad. The influences of the toe restraint condition on the internal stability of reinforced segmental wall under working stress are discussed. The test results show that the toe restraint conditions significantly affect the internal stability of reinforced soil segmental walls. For the wall that the block-pad interface is smoothed, the bottom block slides along the block-pad interface, which leads to an obvious increase in the horizontal displacements and reinforcement strains within the middle and lower parts of the wall and a triangular distribution with height of connection loads between reinforcements and facing. For the wall with the pad-foundation interface smoothed, the foundation soils in the front of leveling pad can provide the pad with enough restraint, thus the internal stability of the wall is the same as that under the normal toe restraint. The purpose of smoothing the pad-foundation interface and then excavating the foundation soils in the front of the leveling pad is to simulate the condition that the toe is scoured. In such condition, the pad slides along its interface with the foundation soils, the facing displacements and the reinforcement strains within the middle and bottom parts of the wall increase significantly, and the connection loads in reinforcements are close to the maximum reinforcement loads under the limit state calculated by the AASHTO method, but the wall still remains stable. In the extreme situation where the toe is eroded by scouring, the effect of toe constraint should not be considered in the design of the reinforced soil segmental retaining walls. For the walls under working stress, the reinforcement loads can be calculated using the K -stiffness method with consideration of the toe restraint effects.

Key words: reinforced soil; segmental retaining wall; centrifugal model test; toe restraint; internal stability

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772289, 41072200)

收稿日期: 2017-08-15

0 引言

模块式加筋土挡墙因具有造价低廉、外形美观、施工简便、抗变形能力强等优点,被广泛应用于桥台、路堤以及滑坡防治等工程领域^[1-2]。模块式加筋土挡墙的墙面由小尺寸混凝土砌块堆叠干砌而成,模块之间通过插销或凹凸槽连接,最底层模块放置于一素混凝土或碎石做成的水平基座上,在底层模块-水平基座之间和水平基座-地基土之间存在两个墙趾界面。

加筋土挡墙处于工作状态时,墙面受到的水平土压力通过混凝土模块向下传递至墙趾,墙趾界面上由此产生的摩擦阻力与墙面处的筋材连接拉力一起平衡墙背水平土压力^[3]。Bathurst等^[4]开展了3.6 m高模块式加筋土挡墙足尺试验,试验中底层模块搁置在水平滚轴上,并在其侧向设置刚性测力环以测试墙趾的水平受力,试验结果表明,在挡墙完工时墙趾和筋材分别承担了约82%和18%的墙背水平土压力。然而,Leshchinsky等^[3, 5]认为,该试验对墙趾施加了恒定刚度约束,且地基是刚性的,这与实际情况不符,墙趾可能会沿着模块-水平基座界面和水平基座-地基土界面中剪切刚度低的界面滑移。笔者^[6-8]为此采用FLAC有限差分程序和可反映墙趾真实约束条件的双曲线界面模型,对美国华盛顿州SR-18高速公路一6 m高的模块式加筋土试验挡墙进行数值模拟,得出墙面连接处筋材拉力因受地基沉降和填土压实产生的下拉力影响而大于填土中筋材最大拉力,故K-刚度法不能用于墙面筋材连接力的验算;尽管基座-地基界面剪切刚度较模块-基座界面要小很多,但由于其承受的剪应力也很小,墙趾并没有沿着基座-地基界面发生明显滑移,模块-基座界面对挡墙墙趾起到主要的约束作用。

模块-基座和基座-地基界面的剪切刚度会因混凝土墙面模块和水平基座表面粗糙度的不同以及地基土性质的不同而发生改变。Huang等^[9]通过数值模拟方法研究了模块-基座界面的剪切刚度对模块式加筋土挡墙内部稳定性的影响,发现当此界面剪切刚度较大时,筋材拉力沿墙高呈K-刚度法所认为的梯形分布,但当此界面剪切刚度很小、界面近于光滑时,筋材拉力沿墙高近似呈顶部小、底部大的三角形分布。然而该研究没有考虑基座-地基界面剪切刚度对挡墙内部稳定性的影响。

本文共设计了4组不同的墙趾约束条件,分别为墙趾正常约束、仅对模块-基座界面作光滑处理、仅对基座-地基界面作光滑处理,以及对基座-地基界面作光滑处理且将基座前方土体挖除,对这4组不同墙趾约束条件的模块式加筋土挡墙开展离心模型试验,以

进一步研究墙趾约束条件对挡墙内部稳定性的影响。

1 离心模型试验

1.1 模型尺寸与试验方案

采用同济大学TLJ-150复合型岩土离心机进行模块式加筋土挡墙离心模型试验。模拟的原型模块式加筋土挡墙高度为3.6 m,墙面仰角 8° ,筋材长2.52 m,筋材竖向间距600 mm,墙面模块宽600 mm,高600 mm,水平基座宽1200 mm,高500 mm。试验模型箱尺寸为600 mm×400 mm×500 mm(长×宽×高),根据模型箱与原型挡墙尺寸大小,选定模型率 $N=20$,模型尺寸如图1所示。

共进行4组墙趾约束条件不同的试验,试验方案列于表1。W1对模块-基座和基座-地基界面不作处理,即墙趾正常约束。W2和W3采用聚四氟乙烯膜分别对模块-基座界面和基座-地基界面作光滑处理,即试验中分别忽略这两个墙趾界面的约束作用,以研究其对挡墙内部稳定性究竟有何影响。模型W4在W3的基础上,将基座前方的土体挖除,即对基座不作埋置。

W4模拟的是一种挡墙墙趾受到冲刷的极端情况。对于建造在河岸、山区等地的加筋土挡墙,其墙趾其可能会受到洪水或泥石流等的冲刷而被掏空^[10],如图2所示。

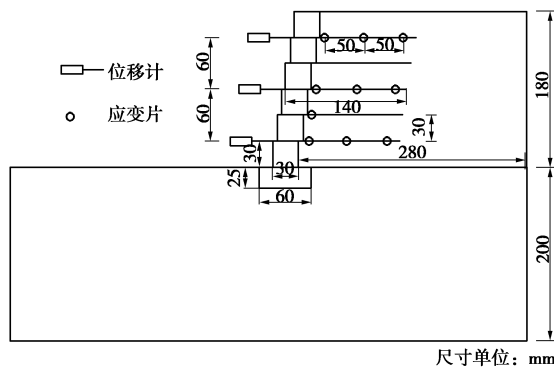


图1 挡墙示意图

Fig. 1 Schematic diagram of retaining wall

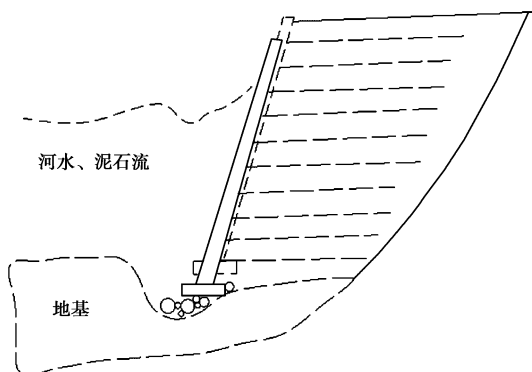


图2 加筋土挡墙墙趾受冲刷示意图

Fig. 2 Schematic diagram of toe eroded by scouring

表 1 试验方案
Table 1 Test plans

模型	墙趾约束条件		
	模块-基座界面	基座-地基界面	基座
W1	正常	正常	埋置
W2	光滑处理	正常	埋置
W3	正常	光滑处理	埋置
W4	正常	光滑处理	不埋置

1.2 试验材料与制备

(1) 填土与地基土

模型挡墙填土与地基土均采用建筑黄砂，经颗粒分析试验确定其为中砂。该黄砂的最大、最小干密度分别为 1.65, 1.44 g/cm³。在建造模型时，控制地基与填土的相对密实度分别为 85%和 65%，压实度分别为 97%和 95%，对应的密度分别为 1.62 g/cm³和 1.57 g/cm³。通过直剪试验得到地基和填土的内摩擦角分别为 42° 和 36°。

(2) 筋材

模型筋材选用尼龙灰窗纱，对其按照规范要求^[11]进行宽条拉伸试验，测得其极限抗拉强度为 2.51 kN/m, 5%伸长率下的拉伸强度为 0.91 kN/m, 刚度(5%伸长率下的拉伸强度与伸长率之比)为 18.2 kN/m。测量值乘以模型率得到原型筋材的极限抗拉强度为 50.2 kN/m，刚度为 364 kN/m。

(3) 墙面模块与水平基座

墙面模块和水平基座是由水泥砂浆浇筑而成的素混凝土块体，如图 3 所示。模块尺寸为 30 mm (高) × 30 mm (宽) × 50 mm (长)，底部有凹槽，顶部有与凹槽相契合的凸起，用于模拟实际模块式挡墙墙面模块之间的剪力键。水平基座尺寸为 25 mm (高) × 60 mm (宽) × 100 mm (长)。

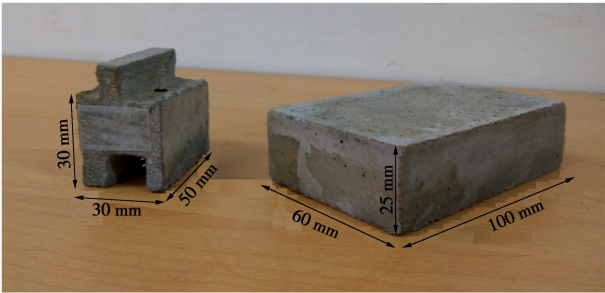


图 3 墙面模块与水平基座

Fig. 3 Facing block and leveling pad

1.3 模型挡墙制作

在模型箱有机玻璃视窗内壁与墙面混凝土模块、基座接触位置，以及模块、基座接触箱壁的两个侧面粘贴聚酯 (PET) 透明塑料膜，在模型箱其余 3 个内壁上涂抹凡士林，并粘贴聚四氟乙烯膜，使得试验过程中基座和面板与箱壁间为膜间摩擦以减小边界效应。

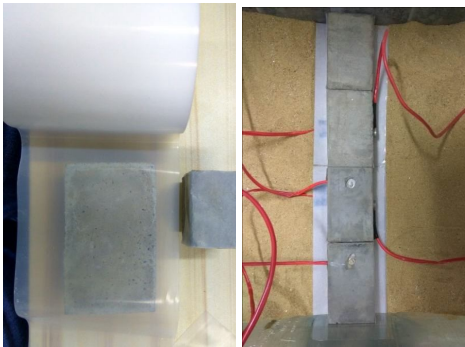
同样，采用聚四氟乙烯膜对模块-基座和基座-地基界面分别作光滑处理，如图 4 (a)、(b) 所示。

模型挡墙建造过程如下：

(1) 采用砂雨法制备模型地基土，控制密度为 1.62 g/cm³。

(2)埋置水平基座并用软毛刷子轻扫基座表面使其洁净。

(3)放置第一层墙面模块，之后铺设模块对应高度的填土，用橡皮锤进行压实，控制填土密度为 1.57 g/cm³，然后铺设筋材，如此往复，直至挡墙填筑完成。完成后的 W1 挡墙模型如图 5 所示。



(a) 模块-基座界面 (b) 基座-地基界面

图 4 墙趾界面光滑处理

Fig. 4 Smoothing of toe interfaces

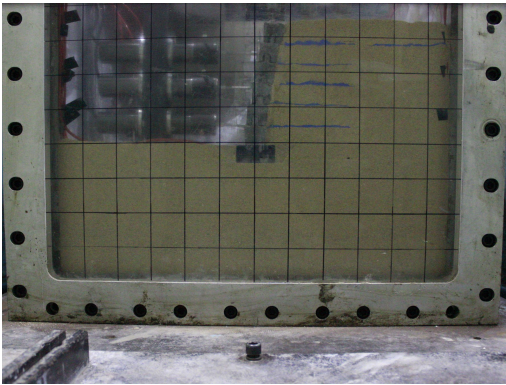


图 5 W1 模块式加筋土挡墙离心模型

Fig. 5 Centrifugal model of reinforced soil segmental retaining wall of W1

1.4 仪器布置

如图 1 所示，在挡墙中间墙面位置沿墙高布置了 3 个差动式位移传感器，以测试挡墙墙面水平位移。差动式位移传感器型号为 YWC-5，量程为 ±50 mm。模型玻璃视窗一侧安装同步相机对模型挡墙进行摄像，用以图像分析。

在每层筋材与墙面连接处粘贴电阻式应变片，以测试筋材与墙面间连接应变(拉力);在自下而上第一、三、五层筋材上又各增加 2 个应变片，以测试筋材内部的应变 (拉力)，如图 1 所示。应变片型号为

BX120-2BB。粘贴应变片前,先在尼龙窗纱表面采用环氧树脂浇出一个边长为 15 mm 的正方形薄层作为传力介质,再在其上粘贴应变片并焊接电线,之后用硅橡胶覆盖应变片以保护其不受砂粒棱角破坏。粘贴应变片后的模型筋材如图 6 所示。

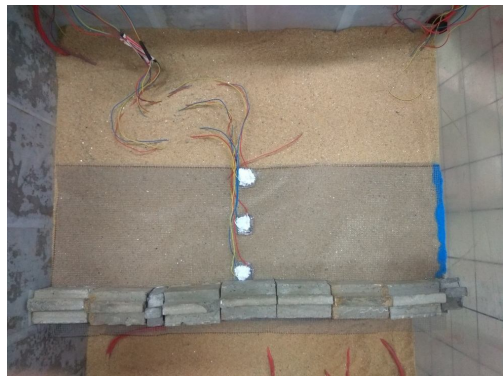


图 6 模型筋材上应变片布置

Fig. 6 Layout of strain gauges on model reinforcement

1.5 试验过程

4 组试验模型的加速度均由 1g 匀速增加到 20g,之后保持 20g 的加速度直到各测量元件的数据曲线达到稳定。

2 试验结果分析

2.1 挡墙变形

图 7 为 4 组挡墙模型在试验结束后的变形情况,图中虚线为试验前挡墙轮廓线。由图 7 可见,在离心模型尺度下,试验后的 W1 和 W3 几乎看不出有变形产生,而 W2 和 W4 的中下部墙面有相对较明显的向外突出。

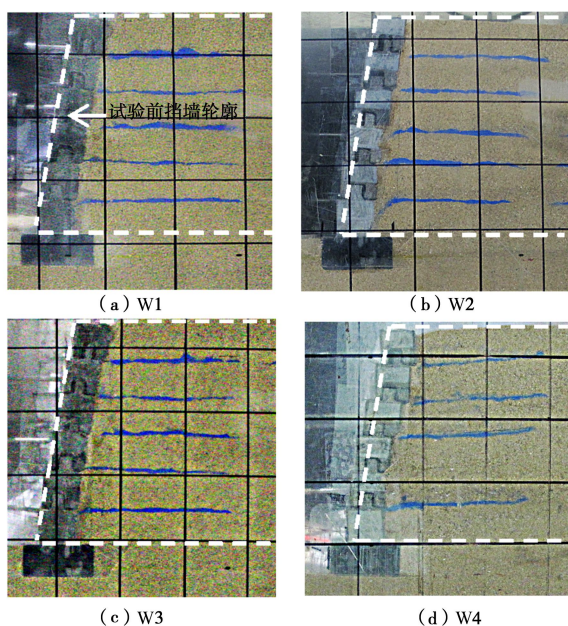


图 7 试验结束后挡墙模型变形情况

Fig. 7 Deformations of model wall after tests

对图 7 进行图像处理,分析墙面每一模块(基座)半高处相对试验前所产生的水平位移,并按离心模型率 $N=20$ 还原成原型墙面(基座)水平位移,绘制成如图 8 所示的曲线。横坐标轴位置为挡墙底面,紧邻其上的标记点表示底层模块所产生的水平位移,其下标记点表示基座所产生的水平位移。图 8 中另加上在挡墙中间沿墙高布置的差动式位移计量测的墙面水平位移。可以看到,各组挡墙墙面水平位移的图像分析值与位移计测值均较为接近,这说明试验中所采取的消除侧壁摩擦阻力的措施起到了预期的效果。

从图 8 可见,原型 W1 和 W3 的墙面位移很小且两者基本一致,墙面最大水平位移位于挡墙中部,约为 6.7 mm,底层模块和基座的水平位移则分别仅为 4.5 mm 和 3 mm 左右。W3 的这种表现表明,在工作应力下,即使将基座-地基界面作光滑处理,挡墙并没有沿着该界面滑移。原因应是在 W3 的基座产生一定量的水平位移后,激发了基座前方地基土产生被动土压力,同时底层模块与基座间又产生了相对位移量,使得筋材承担的墙背水平土压力增大,而通过模块-基座界面传递至基座的水平土压力减小,从而使得作用在基座上的水平力达到平衡状态,阻止了基座沿经光滑处理的基座-地基界面滑移。

与 W1 和 W3 相比, W2 的墙面水平位移明显增大,最大位移位于挡墙 1/3 墙高处,为 15.2 mm 左右,底层模块和基座的水平位移分别为 13 mm 和 2.2 mm 左右,底层模块产生了明显的水平位移,而基座的水平位移较 W1 和 W3 还要小一些。可见对模块-基座界面作光滑处理使得此界面的摩擦阻力大幅减小,墙背水平土压力传递至底层模块时,底层模块即沿模块-基座界面发生滑移,进而带动墙面中下部水平位移明显增大,相应地,筋材承担的墙背水平土压力会明显增大,而通过模块-基座界面传递至基座的水平土压力会明显减小,故 W2 的基座水平位移较 W1 和 W3 还小。

而 W4 的墙面和基座水平位移较 W2 更为显著,其最大水平位移约为 19 mm,位置与 W2 一样均在 1/3 墙高处,其底层模块和基座的水平位移则分别达到 18.8 mm 和 18.2 mm 左右,这表明基座产生了显著滑移,进而带动整个墙面发生显著位移。如前所述, W4 是在 W3 对基座-地基界面作光滑处理基础上又将基座前方土体挖除,因此当墙背水平土压力通过底层模块传递至基座时,由于基座前方没有地基土,导致基座沿经光滑处理的基座-地基界面滑移,带动墙面发生了较大位移。W4 模拟的是挡墙墙趾受冲刷这种极端情况,在这种情况下才出现 Leshchinsky 所认为的挡墙沿着基座-地基界面滑移这一问题^[3]。

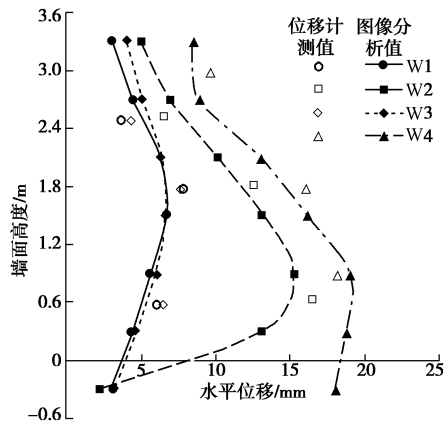


图 8 墙面与基座水平位移

Fig. 8 Horizontal displacements of facing and leveling pad

2.2 筋材应变

图 9 为各组模型从下到上第一、三、五层筋材应变分布曲线。从图 9 可见, 总体上各层筋材应变随着与墙面距离的增大而减小, 在墙面处筋材应变最大。墙面处筋材受到填土压实、地基沉降所产生的下拉力以及墙面变形的影响, 导致其应变通常为层筋材中最大应变, 加筋土挡墙现场和室内试验实测的筋材应变也呈现此分布规律^[4, 12]。只有 W4 的第五层筋材连接处应变偏小, 这可能是由于该模型顶层模块与筋材连接较为松动所致。

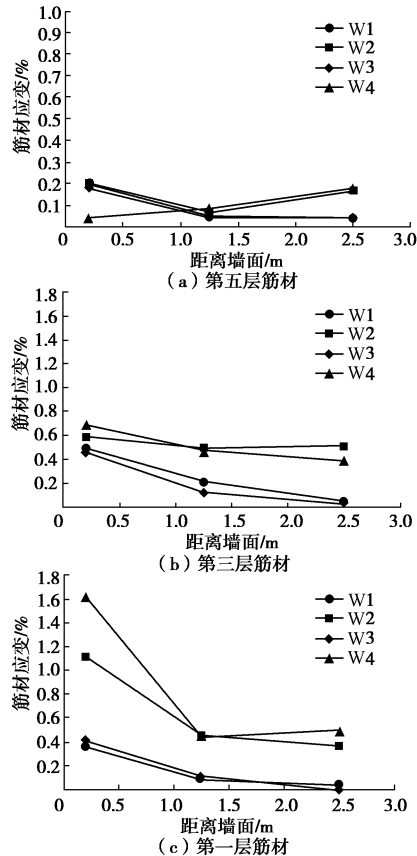


图 9 筋材应变分布曲线

Fig. 9 Distribution of reinforcement strain

W1 和 W3 的顶、底层筋材应变较小, 中间层 (第 3 层) 筋材应变相对较大一些, 而 W2 和 W4 各层筋材应变由顶层至底层依次增大。各组挡墙的各层筋材应变大小与图 8 中的墙面位移分布相吻合, 墙面位移大, 筋材应变也相应变大。另外, W2 和 W4 的筋材末端应变也较大, 这应是这两者较大的墙面水平位移引起加筋体的水平位移, 使得筋材末端产生筋土相对位移所致。

2.3 筋材连接力

图 10 为筋材连接力 T_{conn} 沿墙高的分布曲线。筋材连接力由筋材与墙面连接处测得的应变值乘以筋材刚度计算得到。由于模型筋材的连接力很小, 故这里乘以离心模型率将其转化为原型筋材连接力进行分析。图中还给出了采用 AASHTO 规范法计算的各层筋材最大拉力 T_{max} 。

从图 10 可见, W1 和 W3 的筋材连接力基本一致, 这是因为筋材发挥作用的大小与墙面水平位移量值相对应。两者总筋材连接力 $\sum T_{\text{conn}}$ 分别为 6.7 kN/m 和 6.8 kN/m。由于墙背水平土压力 P_{AH} 由总的筋材连接力 $\sum T_{\text{conn}}$ 和墙趾阻力 F_{H} 共同承担, 即 $P_{\text{AH}} = F_{\text{H}} + \sum T_{\text{conn}}$, 故这两组挡墙墙趾承担墙背水平土压力的能力基本相同。W1 和 W3 的筋材连接力分布曲线均沿挡墙高度呈现中部较大, 顶、底部较小的分布, 此分布符合在模块式加筋土挡墙墙趾受到正常约束条件下筋材连接拉力的分布规律^[8]。

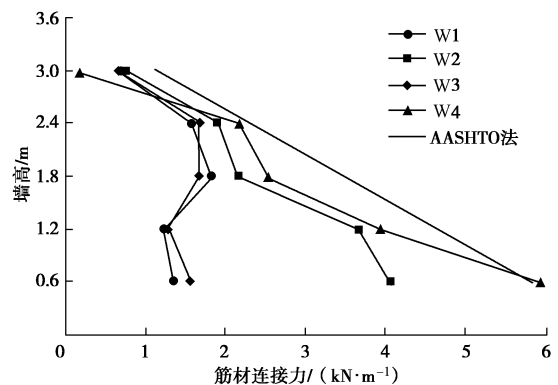


图 10 筋材连接力分布曲线

Fig. 10 Distribution of connection loads between wall facing and reinforcements

与 W1 和 W3 相比, W2 下部发生了较大的墙面位移, 因此 W2 的筋材连接力在挡墙下部明显增大。W2 总的筋材连接力为 $\sum T_{\text{conn}} = 12.5$ kN/m, 可见其比 W1 和 W3 大近 2 倍。W2 的筋材连接力沿墙高呈顶部小、底部大的三角形分布, 这与 Huang 等^[9]在模块式加筋土挡墙数值模拟中将模块-基座界面设置为接近光滑时所得到的筋材连接力分布一致。

W4 的筋材连接力沿墙高也呈三角形分布。除顶层筋材因与墙面连接松动偏小外,其他层的筋材连接力均接近 AASHTO 法计算值。W4 总的筋材连接力为 $\sum T_{\text{conn}} = 14.8 \text{ kN/m}$, 稍小于 AASHTO 法计算的 $\sum T_{\text{conn}} = 17.4 \text{ kN/m}$ 。AASHTO 法假定墙后填土达到主动土压力极限状态,墙背水平土压力完全由筋材承担,而没有考虑挡墙在工作应力状态下墙趾可以承担很大的水平土压力^[13]。可见,对于 W4 这种墙趾受到冲刷的极端情况,同 AASHTO 法的极限状态假定,其筋材承担了全部墙背土压力。

然而离心模型试验表明, W4 并未因墙趾失去约束或各层筋材连接力接近 AASHTO 法计算的筋材最大拉力 T_{max} 而失去稳定,挡墙仍然保持很好的稳定状态。这在实际加筋土挡墙工程中也得到证明。2012 年日本九州岛山区的一条铁路路基遭受洪水强烈冲刷,导致传统的混凝土挡墙路基段发生倾覆破坏,而采用加筋土挡墙路基段,尽管墙趾地基土已被冲刷,但挡墙整体仍保持稳定^[10]。此外, Bathurst 和 Miyata 等^[14-15]也通过加筋土挡墙足尺试验发现,即使墙趾失去地基土的支撑,挡墙仍能稳定。

由以上分析可见,模块式加筋土挡墙墙趾约束条件对其内部稳定性影响显著。在墙趾受到冲刷等极端条件下,基座和底层模块前方的土体可能被冲刷掉,甚至底层模块被冲掉或者脱落,则不应考虑墙趾的约束作用。而在墙趾不受冲刷威胁且筋材与模块连接可靠的工作应力条件下,仍可考虑墙趾的约束作用,毕竟大多数已建的模块式加筋土挡墙均处于此类正常服役状态,并且实际中模块-基座和基座-地基界面总是存在相当的摩擦作用,基座前方的土体又提供了附加的对墙趾的约束作用,因此设计上可采用 Bathurst 提出的 K -刚度法进行挡墙内部稳定性的计算。 K -刚度法在考虑墙面刚度(墙趾约束作用)外,还考虑了筋材和填土刚度、墙面倾角对挡墙内部稳定性的影响^[13,16]。

3 结 论

本文共开展了墙趾正常约束、仅对模块-基座界面作光滑处理、仅对基座-地基界面作光滑处理,以及对基座-地基界面作光滑处理且将基座前方土体挖除等 4 组不同墙趾约束条件的模块式加筋土挡墙离心模型试验,以研究工作应力下墙趾约束条件对挡墙内部稳定性的影响。论文得出以下主要结论:

(1) 对模块-基座界面作光滑处理的挡墙,其底层模块沿该界面滑移,使得挡墙中下部的墙面水平位移和筋材应变明显增大,筋材连接力沿墙高呈顶部小、底部大的三角形分布。

(2) 对基座-地基界面作光滑处理的挡墙,其基座前方地基土仍可给基座提供足够的约束作用,挡墙内部稳定性同墙趾正常约束情况,其墙面水平位移和筋材连接力量值小且沿墙高呈中部大、顶底部小的梯形分布。

(3) 对基座-地基界面作光滑处理后又将基座前方土体挖除这种模拟墙趾受到冲刷的挡墙,其基座沿该界面滑移,使得挡墙中下部的墙面水平位移和筋材应变显著增大,筋材连接力接近极限状态 AASHTO 法计算的筋材最大拉力,但挡墙仍能保持稳定。

(4) 在墙趾可能受到冲刷的极端情况下,不应考虑墙趾的约束作用;对于正常服役状态的挡墙,可采用考虑墙趾约束作用的 K -刚度法进行挡墙内部稳定性的计算。

参考文献:

- [1] BATHURST R J, SIMAC M R. Geosynthetic reinforced segmental retaining wall structures in North America[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. Singapore: Southeast Asia Chapter of the International Geotextile Society (SEAC-IGS), 1994: 1 - 41.
- [2] KOERNER R M, SOONG T Y. Geosynthetic reinforced segmental retaining walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(6): 359 - 386.
- [3] LESHCHINSKY D, VAHEDIFARD F. Impact of toe resistance in reinforced masonry block walls: Design dilemma[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(2): 236 - 240.
- [4] BATHURST R J, WALTERS D, VLACHOPOULOS N, et al. Full scale testing of geosynthetic reinforced walls[M]// ZORNBERG J, CHRISTOPHER B R, eds. ASCE Special Publication No. 103, Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems using Geosynthetics. Denver: ASCE, 2000: 201 - 217.
- [5] LESHCHINSKY D. Discussion on "The influence of facing stiffness on the performance of two geosynthetic reinforced soil retaining walls"[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(12): 1479 - 1482.
- [6] CHEN J F, YU Y, BATHURST R J. Influence of leveling pad interface properties on soil reinforcement loads for walls on rigid foundations[C]// Proceedings of GeoShanghai International Conference 2014. Reston, 2014: 481 - 492.
- [7] 陈建峰. 基于墙趾真实约束条件的模块式加筋土挡墙数值

- 模拟[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1640 - 1647. (CHEN Jian-feng. Numerical modeling of reinforced soil segmental walls under real toe restraint conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1640 - 1647. (in Chinese))
- [8] 陈建峰, 张 琬. 采用 K -刚度法设计的模块式加筋土挡墙数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(6): 1004 - 1011. (CHEN Jian-feng, ZHANG Wan. Numerical modeling of a reinforced soil segmental retaining wall designed with K -stiffness method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(6): 1004 - 1011. (in Chinese))
- [9] HUANG B, BATHURST R J, HATAMI K. Influence of toe restraint on reinforced soil segmental walls[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(8): 885 - 904.
- [10] TATSUOKA F, TATEYAMA M, KOSEKI J, et al. Geosynthetic-reinforced soil structures for railways in Japan[J]. Transportation Infrastructure Geotechnology, 2014, **1**(1): 3 - 53.
- [11] GB 50209—98 土工合成材料应用技术规范[S]. 1998. (GB50209—98 Technical standard of application of geosynthetics[S]. 1998. (in Chinese))
- [12] ALLEN T M, BATHURST R J. Design and performance of 6.3-m-high, block-faced geogrid wall design using K -stiffness method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **140**(2): 04013016.
- [13] 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**: 976 - 994.
- [14] BATHURST R J, MIYATA Y, KONAMI T, et al. Stability of multi-anchor soil walls after loss of toe support[J]. Géotechnique, 2015, **65**(11): 945 - 951.
- [15] MIYATA Y, BATHURST R J, MIYATAKE H. Performance of three geogrid-reinforced soil walls before and after foundation failure[J]. Geosynthetics International, 2015, **22**(4): 311 - 326.
- [16] BATHURST R J, MIYATA Y, NERNHEIM A, et al. Refinement of K -stiffness method for geosynthetic reinforced soil walls[J]. Geosynthetics International, 2008, **15**(4): 269 - 295.

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计院有限责任公司（原冶金勘察研究总院）主办的学术—技术类双月刊，是中国科技论文统计源期刊，中国地质文摘引用期刊，中国学术期刊（光盘版）、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期刊，多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富，理论结合实际，适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行，双月刊，大 16 开本，双月 20 日出版。每期定价 10.0 元，全年 60 元。邮发代号 18-153。全国各地邮局均可订阅，也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告，价格适中，印制精良，注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址：河北省保定市东风中路 1285 号《勘察科学技术》编辑部邮编：071069，Tel：0312-3020887，3094054，Fax：0312-3034561，E-mail：kckxjs@163.com，kckxjs@126.com。

（《勘察科学技术》编辑部 供稿）