

临水路堤微型桩—承台—挡墙结构受力与变形特性数值分析

卢玖辉¹, 谭可², 瞿永², 刘维正³, 石志国³

(1.张家界市自来水公司, 湖南 张家界 427303; 2.中建五局 土木工程有限公司, 湖南 长沙 410004;

3.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 微型桩—承台—挡墙组合结构作为一种新型支挡结构,其受力变形特性研究尚不完善。文中结合某临水路堤支挡工程,采用 ABAQUS 有限元软件建立微型桩—承台—衡重式挡墙加固路堤三维数值模型,模拟该结构各组成部分受力与变形特性,分析不同桩间距、桩排距和填土内摩擦角对微型桩内力与变位的影响。结果表明,墙体整体向外侧移动并向内侧轻微转动,墙底位移大于墙顶位移,土体产生的水平应力主要集中在衡重台附近;承台与微型桩连接处产生明显应力集中现象;微型桩水平位移沿桩身逐渐减小,桩体表现出主动防护作用,在桩顶出现一定范围轴向拉力分布,桩身弯矩呈勺子形,峰值出现在土层分界面处,桩身剪力方向与滑坡方向相同,上部荷载的影响使滑面以上桩身剪力变化很小;合理的桩间距为 5~6 倍桩径,排间距在 5 倍桩径时桩身受力情况最好,填土内摩擦角超过 30°时桩身受力与变形变化不明显。

关键词: 公路;微型桩—承台—挡墙;受力与变形;数值模拟

中图分类号:U418.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)03-0080-06

随着经济的高速发展,交通运输量不断增长,很多道路面临扩建和改造,产生大量路堤支挡工程。在中西部某些地区,考虑到地形地貌和地质条件的限制,单独的抗滑桩和挡墙承载力不能满足要求,产生了桩基+挡土墙的组合结构,中间采用托梁连接,在开挖条件不足时可用微型桩代替抗滑桩。

朱宝龙分析了微型桩群加固黏土边坡的受力机理,认为各排桩土压力承担比随时间变化,桩体上各测点弯矩随时间成复杂的非线性关系。刘鸿等通过地质力学模型试验研究滑坡推力引起的微型桩体系内力变化,结果表明桩前土压力分布较均匀,各排微型桩桩体的弯矩分布较接近。Zhi-chao Zhang 等对微型桩加固前后斜坡加筋土挡墙进行模型试验和数值模拟,分析了多级附加荷载作用及不同参数对微型桩—加筋土挡墙应力变形的影响。但目前针对微型桩—承台—挡墙组合结构的研究较少,对其受力机制缺乏足够的认识。该文结合张家界某临水路堤支挡工程,利用 ABAQUS 软件进行数值模拟,分析微型桩—承台—挡墙结构受力与变形特性。

1 工程概况

1.1 工程简介

张家界永定城区融山东路建设工程大致呈西南

—东北走向,全线沿澧水河畔及湖南省道 S306 建设,全长 2 180 m。场地土层主要包含人工填土、碎石土、粉质黏土、强风化砂质页岩、中风化砂质页岩等。土层物理力学参数见表 1。

表 1 土层物理力学参数

土层名称	天然重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	承载力容许值 f_0 / kPa
人工填土	18.5	10	8	—
粉质黏土	20.0	30	17	100
碎石土	19.8	5	35	140
强风化砂质页岩	22.5	—	—	400
中风化砂质页岩	25.0	—	—	1 000

1.2 设计方案

该工程施工区域左侧为临水陡坡段,右侧靠山,现状边坡陡峭,放坡条件不足,需采用挡墙进行支挡。由于施工场地狭窄,不便大量开挖,临水侧存在软弱土层,承载力不足,设计采用在挡墙底部加设微型桩的组合结构,利用承台进行连接(见图 1)。

2 有限元模型建立

利用 ABAQUS 软件进行数值模拟分析。选取 K1+920 段截面路基中心线左侧区域建立模型,为

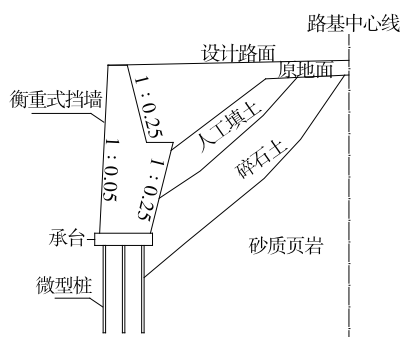


图1 微型桩—承台—挡墙结构示意图

减小边界条件的影响,模型尺寸取 $34\text{ m} \times 22.5\text{ m}$;考虑对称性,沿行车方向模型宽度取 2.5 m 。微型桩设置 3 排,桩长 8 m ,桩径 d 为 0.2 m ,桩排距 L 和桩间距 S 均为 $4d$;承台高 0.5 m ,长 2.4 m ;挡墙上、下部高度分别为 3.2 和 3.8 m (见图 2)。微型桩依次穿过人工填土层和碎石层,嵌入砂质页岩层。

微型桩采用注浆钢管桩,注浆使周围松散土层形成一个复合体,桩土间形成一种类似钢筋砼的复合结构,微型桩相当于钢筋的作用,故模拟微型桩土体作用时采用嵌入式约束作用。微型桩采用梁单元,承台和挡墙采用实体模型,网格采用 C3D8R 单元,整个模型共划分为 10 090 个单元。

组合结构采用弹性模型进行模拟,土体参数采用 M—C 模型,土体参数见表 1,模型参数见表 2。有限元模型见图 2。

表 2 模型参数

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
挡墙	2 400	30 000	0.15
承台	2 350	25 000	0.15
微型桩	2 500	33 000	0.15
路基填土	1 850	25	0.20

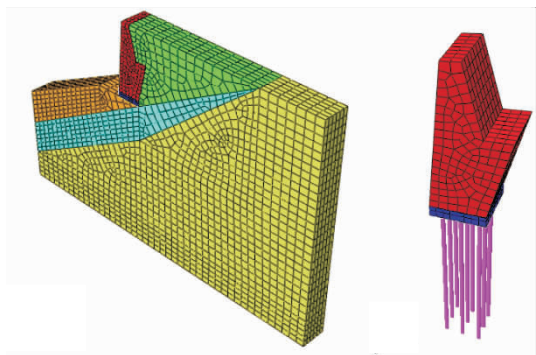


图2 微型桩—承台—挡墙有限元模型

3 数值分析结果

3.1 挡墙受力及变形

受到墙背填土压力作用,挡墙会产生应力和变形,其水平位移和水平应力分别见图 3、图 4。

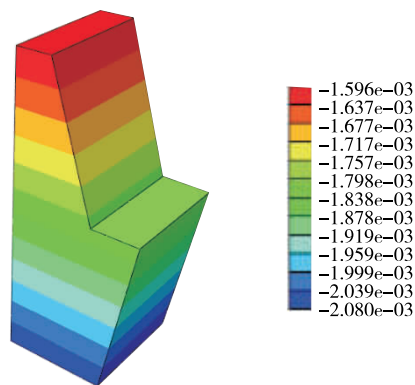


图3 挡墙水平位移云图(单位:m)

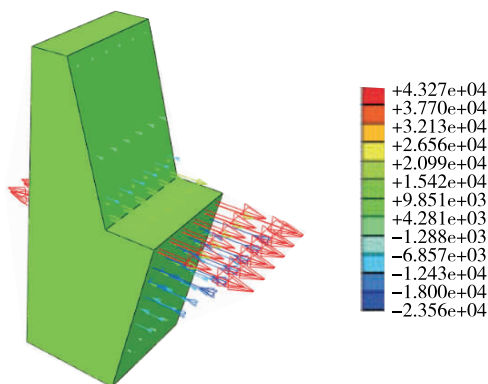


图4 挡墙水平应力矢量图(单位:Pa)

由图 3 可知:挡墙整体向外侧移动,水平位移沿挡墙高度方向基本呈层状分布,从墙顶到墙底位移逐渐增大,最大位移 -2.08 mm ,最小位移 -1.60 mm ,衡重台处的位移为 -1.83 mm 。造成这种现象的原因是衡重台的存在使挡墙具有很大的抗倾覆能力,挡墙底部受到桩基和托梁的约束,挡墙向内侧有轻微转动,故上部衡重式挡墙的最大位移出现在挡墙底部。

由图 4 可知:挡墙水平拉应力主要集中在衡重台附近,最大拉应力 43.27 kPa ;水平压应力主要出现在衡重台下部挡墙部分,最大压应力 23.56 kPa 。这是由挡墙向土体侧发生转动,土体与衡重台接触更紧密造成的。

3.2 承台应力分析

外荷载及挡墙产生的荷载通过承台传递到下部桩基,承台应力见图 5。

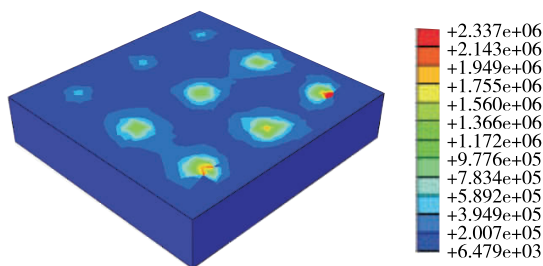


图5 承台应力云图(单位:Pa)

由图5可知:承台与微型桩连接部分出现明显应力集中现象,沿水平向外方向应力集中范围和应力值逐步减小,最大应力分别为2.34、1.63、0.94 MPa。这是由于土体沿水平方向有潜在滑动趋势,各排桩承担的滑坡推力不同,进而影响承台应力。

3.3 微型桩受力及变形

上部荷载通过承台传递到微型桩上,使微型桩产生受力与变形。各排桩水平位移变化见图6,桩身内力变化见图7~9。

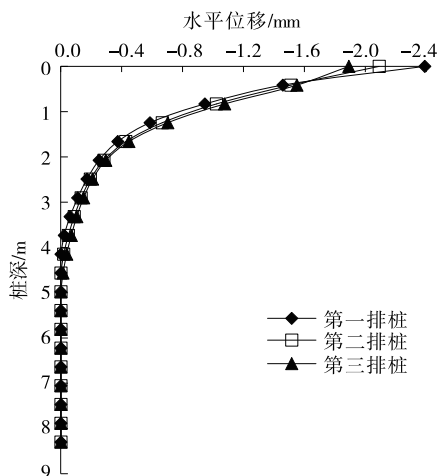


图6 各排桩的水平位移

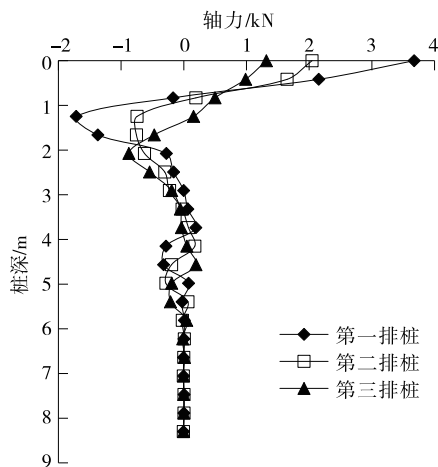


图7 各排桩的轴力

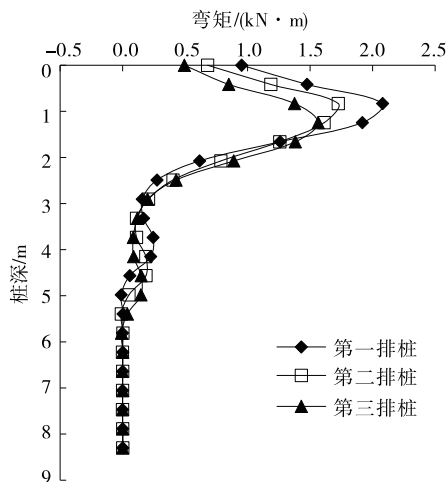


图8 各排桩的弯矩

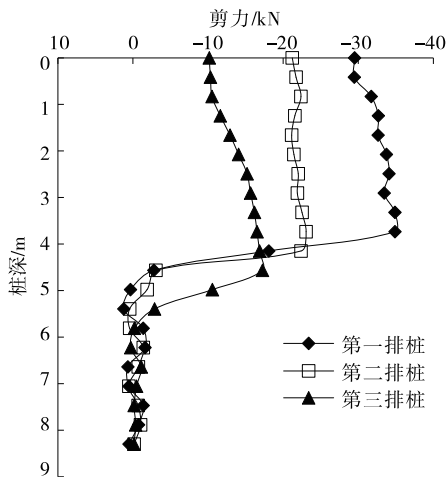


图9 各排桩的剪力

由图6可知:各排桩位移变化规律高度一致,表明微型桩变形协调效果好,沿桩身深度方向水平位移逐渐减小。文献[8]的研究结果也表明在桩顶荷载作用下微型桩协调变形良好。最大位移出现在桩顶,各排桩最大位移分别为为-2.4、-2.1、-1.9 mm,桩深4 m以下位移基本为零,表明滑面深度约为4 m。

轴力以受拉为正,受压为负。由图7可以看出:各排桩沿桩身深度方向轴力出现两个正负峰值点,最大正轴力出现在桩顶,各排桩最大正轴力分别为3.67、2.05和1.32 kN;轴力负峰值点分别位于桩深1.25、1.66和2.07 m处,各排桩最大负轴力分别为-1.72、-0.76和-0.88 kN。桩顶附近出现一定范围拉力分布,这是主动防护的一种表现。负峰值点未出现在滑面附近是因为第一层为软弱土层,在土层分界面附近易出现受力突变。

弯矩以临水侧受拉为正,反之为负。由图8可知:桩身弯矩呈勺子形,各排桩桩顶初始弯矩分别为1.07、0.68和0.49 kN·m;最大弯矩分别出现在桩深0.8、0.83和1.25 m处,其值分别为2.21、1.72和1.56 kN·m,峰值基本出现在软弱土层分界面处。弯矩变化规律与文献[10]类似。

剪力以与滑坡方向相反为正,相同为负。由图9可知:滑面以上桩身剪力均为负值,表明微型桩通过抗剪能力抵抗滑坡推力。由于上部荷载的作用,存在较大初始剪力,导致滑面以上桩体剪力均较大。各排桩剪力最大值出现在滑面附近,分别为34.9、24.1和17.2 kN。剪力变化规律与文献[8]类似。

4 参数分析

组合结构的自身设计变更、外部荷载变化均会对结构受力与变形产生影响,故设定两种工况,采用控制变量法,分析桩间距、桩排距和填土内摩擦角对

微型桩受力与变形的影响。其中:工况1为桩间距、桩排距改变,其余参数不变;工况2为回填土内摩擦角改变,其余参数不变。微型桩要承担上部结构荷载,对组合结构影响很大,根据上文分析结果,各排桩受力与变形规律相似,而第一排桩的内力与变形更大,故取第一排桩进行参数分析。

4.1 桩间距

在微型桩结构中,土拱效应与桩间距密切相关,土拱效应对桩身受力的影响较大。不同桩间距 S 时微型桩的变形与内力见图10。

由图10可知:微型桩水平位移和内力均随桩间距的增加而增大。桩间距从 $2d$ 增加到 $6d$ 时,水平位移、轴力、弯矩和剪力最大值分别增加40%、52%、23%、41%;桩间距增加到 $12d$ 时,水平位移、轴力、弯矩和剪力最大值分别增加115%、151%、105%、117%。桩间距超过 $6d$ 时,变形和内力增长速度加快,其中剪力增长最快,这是由于微型桩通过

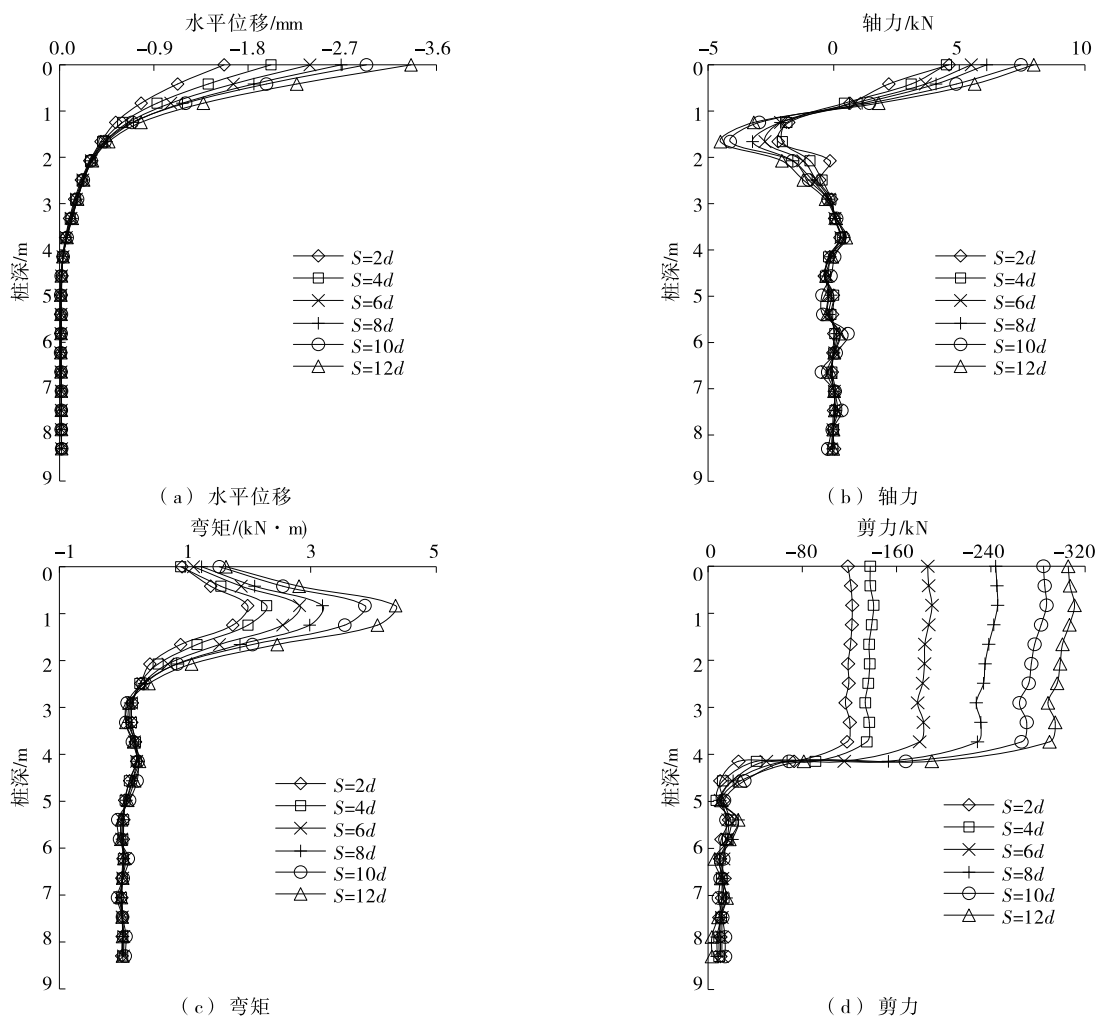


图10 不同桩间距 S 时微型桩的变形与内力

抗剪抵抗滑坡推力,桩间距在一定范围内会产生土拱效应,而土拱效应对桩体剪力的影响较大。文献[11]、[12]的研究结果表明,产生土拱效应的桩间距为 $3d \sim 9d$,桩间距为 $5d \sim 6d$ 时桩土协同工作效果好,内力分析结果也表明桩间距不宜超过 $6d$ 。因

此,最优桩间距为 $5d \sim 6d$ 。

4.2 桩排距

沿滑坡方向微型桩排间距会对结构受力产生一定影响。不同排间距 L 时微型桩的变形与内力见图11。

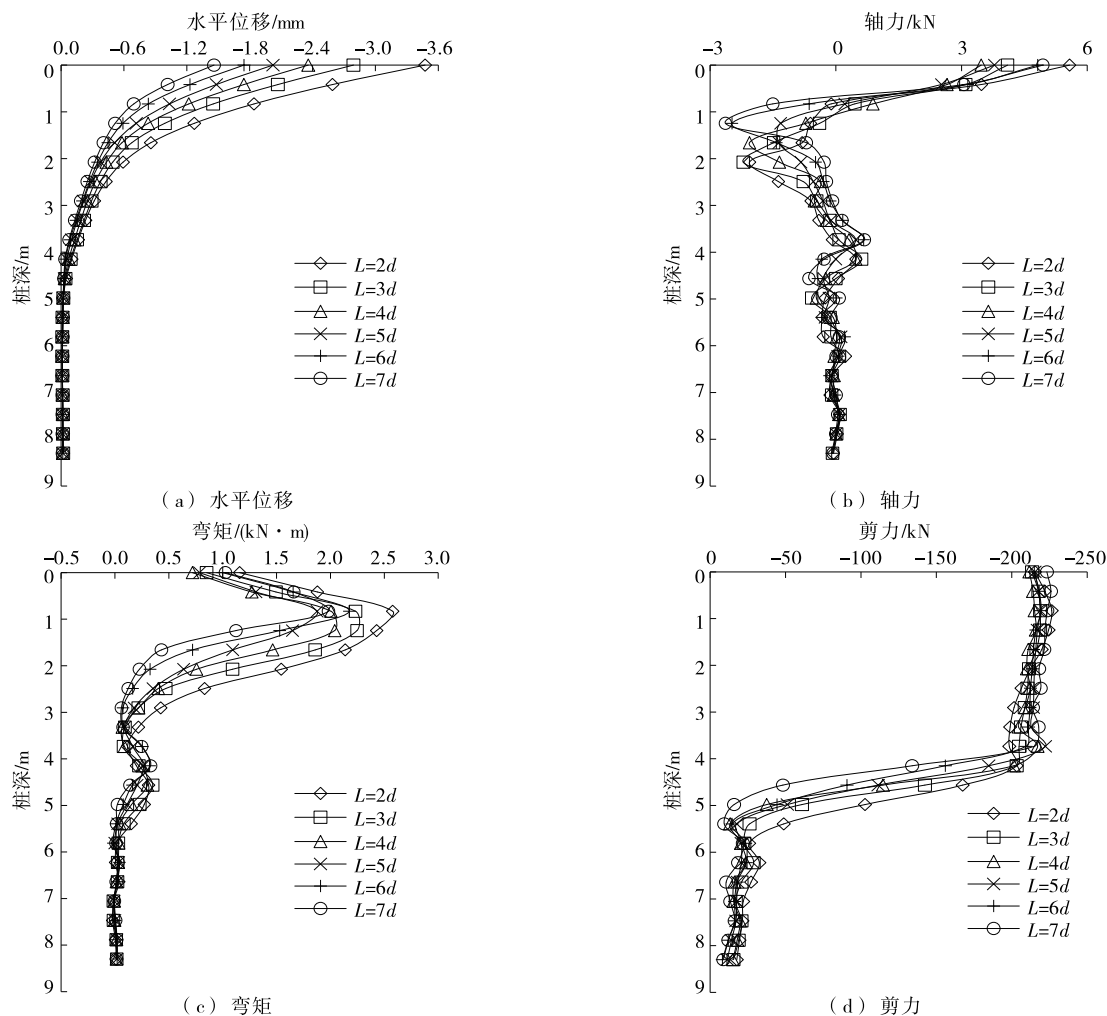


图11 不同排间距 L 时微型桩的变形与内力

由图11可知:随着桩排距的增大,微型桩水平位移逐渐减小。排间距从 $2d$ 增大到 $5d$ 时微型桩的轴力和弯矩减小,排间距超过 $5d$ 时变化则相反;由于排间距对滑坡推力影响不大,滑面以上剪力未出现明显变化。出现这种现象的原因是承台宽度和设桩排数是确定的,排间距过小时,微型桩群与承台覆盖土体形成的桩土复合结构范围小,会产生更大的内力;但设桩位置距离承台边界太近,会造成复合结构保护层厚度不够,也会使内力增大。因此,设计时要根据承台宽度选择合理的桩排距。

4.3 填土内摩擦角

由于填土内摩擦角与主动土压力和滑坡推力密

切相关,会对微型桩产生较大影响。不同内摩擦角时微型桩的变形与内力见图12。

由图12可知:当填土内摩擦角从 15° 增加到 30° 时,水平位移最大值从 -9.2 mm 减小到 -2.0 mm ;桩顶轴拉力分布深度逐渐减小,表明在摩擦角小时桩体主动防护范围更大,轴力负峰值点也从桩身 2.9 m 上移到 1.6 m ,最大负轴力值变化很小;弯矩最大值从 $5.1\text{ kN}\cdot\text{m}$ 逐步减小到 $1.4\text{ kN}\cdot\text{m}$;剪力变化则相反,剪力最大值从 -130.9 kN 增大到 -164.1 kN 。造成这种现象的原因是填土内摩擦角的改变造成上部荷载不同,使承台偏心受压情况产生变化,这种变化对3种内力有不同影响。摩擦角超过 30°

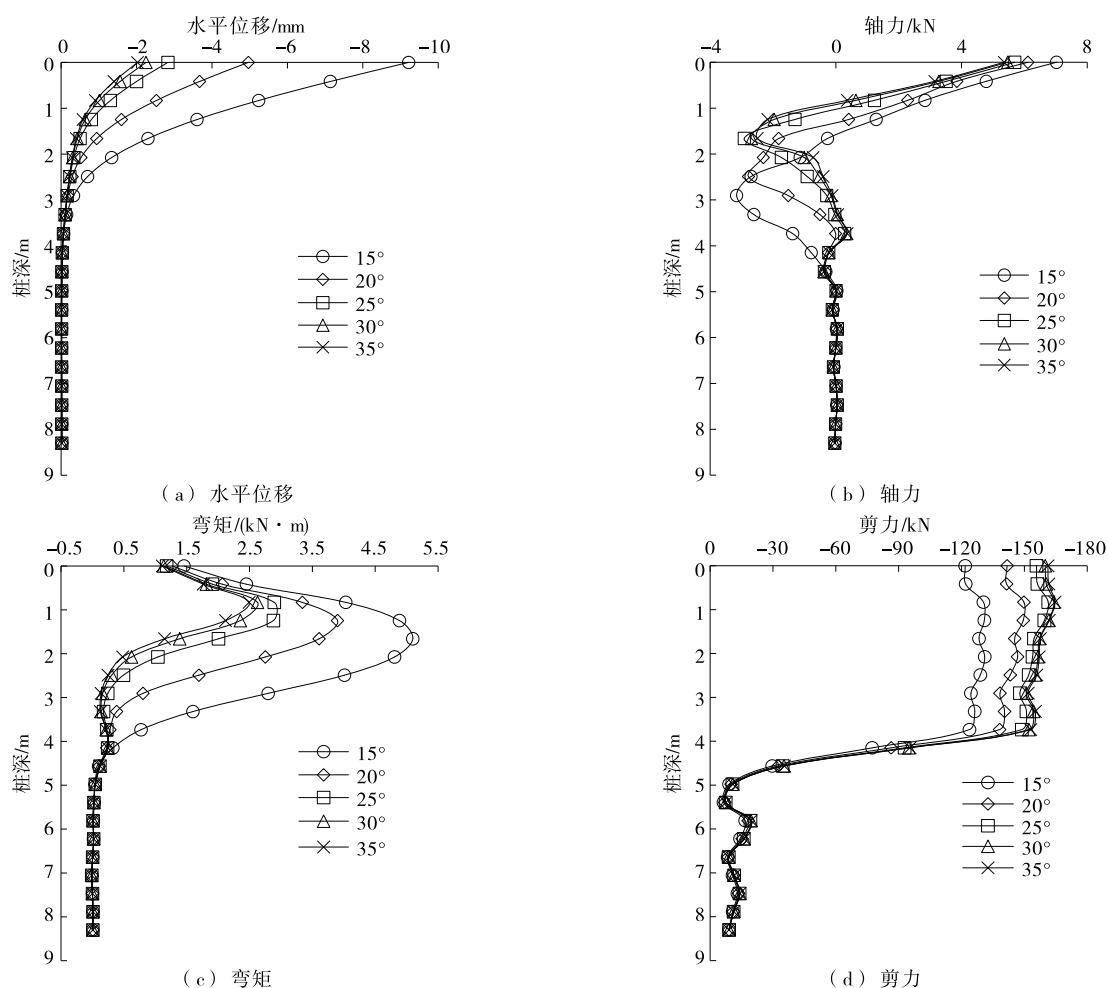


图12 不同内摩擦角时微型桩的变形与内力

时,桩体变形和内力均变化很小,选择填土时,内摩擦角不宜过大,以免造成浪费。

5 结论

(1) 墙背土压力作用使挡墙整体向外侧移动,墙底位移最大,为 -2.08 mm ;墙顶位移最小,为 -1.60 mm ;墙体在土压力作用下向内侧轻微转动。挡墙最大拉应力为 43.27 kPa ,主要集中在衡重台附近;最大压应力为 23.56 kPa ,出现在衡重台下部挡墙部分。

(2) 承台与微型桩连接部分出现应力集中现象,沿水平向外方向各排桩应力集中范围和应力值逐步减小,最大应力分别为 2.34 、 1.63 、 0.94 MPa 。

(3) 微型桩最大位移出现在桩顶,沿桩身逐渐减小;桩顶一定范围出现轴向拉力,这是主动防护的一种表现;桩身弯矩呈勺子形,最大弯矩出现在土层分界面附近;桩身剪力方向与滑坡方向相同,表明微

型桩通过抗剪能力抵抗滑坡推力。

(4) 随着桩间距的增大,微型桩的变形和内力均增大,合理的桩间距为 $5d\sim 6d$ 。排间距为 $5d$ 时,微型桩的轴力和弯矩最小,排间距对剪力的影响很小。填土内摩擦角超过 30° 时,桩身受力与变形变化不明显。

参考文献:

- [1] 李海光.新型支挡结构设计与工程实例[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 赵如意.桩基托梁式挡土墙在黄土路堑中的应用研究[J].铁道设计标准,2013(10).
- [3] 朱宝龙,陈强,巫席勇.微型桩群加固边坡受力特性离心模型试验研究[J].四川大学学报:工程科学版,2012,44(2).
- [4] 刘鸿,周德培,张益峰.微型桩组合结构模型抗滑机制试验研究[J].岩土力学,2013,34(12).

(下转第96页)

由图9可知:相同轴载作用次数下,随着荷载增加,相对车辙深度增大,超载对路面的影响不可小觑。超载对路面造成破坏的原因主要有:1) 超载车辆速度较慢时,停留在路面某一点的时间长,在路面结构层厚度较小时,路面可承受的强度较小,难以长期承受车辆荷载作用,导致路面产生较大应变;2) 超载会导致路面产生较大剪切应力,在路面持续高温影响下,沥青表面层产生裂缝。

4 结论

基于沥青材料粘弹性理论建立路面二维有限元模型,分析沥青路面在环境温度周期变化下永久变形的影响因素,得出以下主要结论:

(1) 对于重冻区高速公路,通过调查、采集当地温度数据建立路面温度场模型,计算不同交通荷载累计轴次作用下沥青路面的永久变形,计算结果与现场调查结果相近,可通过数值模拟预测路面车辙发展规律。

(2) 沥青路面车辙产生前期是由荷载作用次数增加所致,随着荷载作用次数的增加,沥青路面的永久变形在开始一个阶段内快速增长,后续增长速度则减缓。

(3) 行车速度对车辙深度存在一定影响,速度较小时,车辆轴载停留在路面的时间长,造成沥青混合料受到荷载的压力时间增加,引起车辙深度增加。

(4) 车辆超载情况下,车辙深度随着车辆轴重的增加而增大。超载是沥青路面产生永久变形的重要原因之一,路面设计中需慎重考虑。

参考文献:

- [1] 李保红,朱毅军.高速公路沥青混凝土路面病害调查与分析[J].公路,2006(8).
- [2] 高联斌.沥青路面车辙类型及影响因素[J].山西建筑,2017,43(3).
- [3] 彭妙娟,赵文宣.层间接触对沥青路面抗车辙性能的影响[J].公路交通科技,2016,33(7).
- [4] 罗要飞,张争奇,张苛.车辆超载作用下层间接触条件变化对沥青路面性能的影响[J].武汉大学学报:工学版,2016,49(4).
- [5] 陈嘉祺,罗苏平,李亮,等.沥青路面温度场分布规律与理论经验预估模型[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(4).
- [6] 刘兴东,杨锡武.温度对于沥青路面车辙的影响分析[J].公路交通技术,2007(3).
- [7] 冉武平,邹益强,孔二春.基于加速加载的 SMA 沥青路面轮辙特性分析[J].公路工程,2016,41(4).
- [8] 汤祖杰.沥青路面抗永久变形设计方程研究[D].西安:长安大学,2009.
- [9] 居浩.沥青路面车辙计算模型及参数研究[J].石油沥青,2008,22(5).
- [10] 谢可.季冻区沥青路面车辙预估模型方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [11] 王巍.浅析碾压复合式路面结构的温度应力[J].黑龙江科技信息,2011(19).
- [12] 朱厚江,杨三强,张冲,等.新疆路面沥青混合料疲劳寿命预估分析[J].公路工程,2017,42(1).
- [13] 涂义鹏.考虑温度场的沥青路面车辙变化特征分析研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [14] 单景松,杜贝贝.沥青路面温度场分析及全时域受力特性[J].公路工程,2014,39(1).

收稿日期:2018-12-06

(上接第85页)

- [5] Zhi-chao Zhang, Yu-min Chen, Han-long Liu. Numerical investigation on the impact resistance of road barriers of micropile-MSE wall for subgrade[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 82.
- [6] 贺永强,杨仕教,罗辉,等.基岩滑坡治理中钢管微型桩简化计算方法研究[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2).
- [7] 周群华.基于桩土相互作用的抗滑桩改进模式三维数值模拟研究[D].天津:天津大学,2014.
- [8] 杜庆者.板连式微型桩群加固土质边坡机理与计算方法研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [9] 胡田飞,梁龙龙,朱本珍.微型桩—锚组合新结构抗滑

特性的数值分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(5).

- [10] 李昌龙,姬同旭.承台微型桩系统加固土质滑坡设计计算方法研究[J].中外公路,2017,37(4).
- [11] 李志雨,何晖,郭智.基于桩间土拱效应的微型桩间距的分析[J].山地学报,2015,33(3).
- [12] 吴永珍,宋享桦,陆瑶.基于协同响应的微型桩复合土钉合理桩间距的有限元分析[J].施工技术,2017,46(增刊1).
- [13] 赖鹏晖,黄如发,张志祥,等.微型桩—加筋土挡墙应力变形特性和加固机理分析[J].福建建设科技,2016(1).

收稿日期:2018-11-19