

基于FLAC^{3D}的堆载预压结合塑料排水板 软土路基复合加固研究

潘岳林,程朋,刘杰

(湖南省建筑设计院集团股份有限公司,湖南长沙410000)

摘要:在城市道路建设过程中,通常会遇到各种地质情况,软土地基是常见的地质问题之一。城市道路的路基是路面的基础,应满足强度、变形和稳定性的要求,由于软土具有天然含水量大、压缩性高、承载力低和抗剪强度很低等特点,当遇到软土作为路基基础时,应采取各类地基加固处理措施来对软土地基进行处理,使得城市道路能满足设计的要求。以湖南省益阳市经济开发区团圆南路道路工程为案例,通过FLAC^{3D}数值计算,详细介绍了建立软土路基堆载预压结合塑料排水板复合加固有限差分法模型的步骤,通过数值模拟得到软土地基在堆载预压结合塑料排水板作用下的响应情况,并得到预压荷载施加后超静孔隙水压力消散规律,揭示了软土路基在堆载预压结合塑料排水板作用下的孔隙水压力、固结沉降分布特征,最终,获得了软土路基土体中孔隙水压力、各层总沉降、各层的分层沉降随着深度方向的变化规律,研究结论对软土地基处理起到很好的指导作用。

关键词:FLAC^{3D};软土路基;堆载预压;塑料排水板;固结沉降

中图分类号:TU471+8

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)08-0056-05

0 引言

在软土地区填筑路基,天然状态下的软土路基具有存在强度低、固结慢、变形大的特点^[1-2],在工程使用过程中,并不能满足强度、变形和稳定性的要求,当对软土地基未进行地基加固处理时,路基经常发生总沉降或差异沉降过大的现象,造成路堤外侧土体隆起、路堤侧向滑动、桥梁与路堤衔接处差异沉降、路面结构破坏等一系列问题,严重影响道路的施工质量和后期正常使用^[3-4]。对于软土路基采取针对性的地基加固处理措施,提高软土路基强度、刚度、稳定性的施工工艺被称为软土路基处治方法^[5]。常用软土地基处治技术有^[6]:换填法垫层法、真空预压和堆载预压法塑料排水板、砂桩挤密法和灰土桩法、强夯法结合强夯置换法、水泥土搅拌桩结合高压喷射注浆桩。

堆载预压结合塑料排水板法具有施工工艺简单,适用范围广、机械简单、节省材料、缩短施工工期、造价低廉等优点^[7]。针对堆载-真空联合预压未打穿竖井的地基固结理论计算,田乙^[8]提出了一种未打穿竖井的地基固结度简化计算方法,有效得到了未打穿竖井地基的固结公式。对于真空联合

堆载预压下砂井地基加固问题,林伟岸^[9]考虑堆载随时间变化、真空压力沿深度及径向的衰减、砂井的涂抹效应等因素,建立了基于Barron砂井地基等应变固结理论的固结控制方程。在废弃矿坑的回填处置安全问题时,常采用工程泥浆回填处理的方式;软土地基存在非线性固结现象,黄鹏华^[10]采用非线性压缩及非线性渗透模型,得到了真空堆载预压结合电渗竖向排水的固结解析解。詹良通^[11]开展上部堆载预压处理和底部真空废弃工程泥浆的模型试验,探讨上部堆载预压处理和底部真空技术的可行性。传统预测方法对于深厚软基大面积堆载预压的沉降预测存在精度较低的缺陷,李波^[12]提出了一种基于工后沉降预测模型,预测的可靠性和精度能较好地符合实际软土沉降特征。软土的不良地质特性,导致了路基存在潜在的工后沉降,会引起城市道路建设和后续的交通运输以及养护维修过程中的强度破坏、变形过大、失稳破坏的等一系列问题。

本文以湖南省益阳市经济开发区团圆南路道路工程为案例,简述其软土的分布,以现有的地勘资料和现场地质条件为基础,运用有限差分软件FLAC^{3D},建立堆载预压结合塑料排水板加固的数值分析模型^[13-14]。首先,分析预压荷载施加后超静孔隙水压力消散规律,然后,揭示软土路基在堆载预压结合塑料排水板作用下的孔隙水压力、固结沉降分布特征,最

收稿日期:2022-10-06

作者简介:潘岳林(1990—),男,本科,工程师,从事道路工程设计与研究工作。

终,得到路基土体孔隙水压力、各层总沉降、各层的分层沉降沿深度方向的变化规律。本研究对软土地基加固施工工艺的改进,控制施工进度,保证工程安全经济,具有重要的理论与工程意义^[15]。

1 工程概况

湖南省益阳市经济开发区团圆南路道路工程项目的地理位置分布如图 1,地处湖南省益阳市赫山区。益阳作为洞庭湖经济圈中重要的城市之一,将以该机遇为契机,努力将益阳打造成生态、宜居山水生态旅游城市。团圆南路道路工程的建成,对益阳市高新区经济社会发展有较大的促进作用。同时益阳高铁南站位于城市南部,是国家干线铁路呼南高铁和渝长厦高铁的交汇站点,是城市对外出入门户,也承载着城市新区发展的功能,将成为带动城市发展的新引擎,是关系今后益阳城市发展的核心要素之一。按照“四化两型”战略要求,深入实施“工业强市、绿色发展、开放带动和城乡统筹”战略,以转变发展方式为主线,融入长株潭都市区为路径,以新型工业化作为动力,加快推进新型城镇化,构建城市长远发展骨架,努力把益阳建设成为经济繁荣、社会和谐、生态优美、人民幸福的宜居山水生态城市。道路全长约 3.222 km,本次设计项目为梅林路至关山路,设计起点为 K0+843.945,设计终点为 K4+066.483,不包括团圆南路与梅林路(已建成)和关山路交叉口(纳入关山路工程范围)。道路主线采用主干路标准,设计速度 50 km/h,道路标准段红线宽 34 m,为城市主干路。



图 1 湖南省益阳市经济开发区团圆南路道路工程项目位置图

湖南省益阳市经济开发区团圆南路道路工程项目施工现场如图 2 所示。道路所在区域基本属于丘陵地貌,以微丘、田地、池塘为主,场地标高有一定起伏,标高在 49.3~70.1 m 之间变化。该地区软土地形较平坦,地层岩性主要由人工填土(砂土)、淤泥质土等组成,天然状态下一般情况下不能满足路基和小型构造物对地基土的要求,需要进行地基处理^[15]。该

段基岩埋深较大,地下水埋深小,水量中等丰富,未见断裂和褶皱构造发育,无不良地质。可以看出该区总体工程地质条件较差,软土地基加固方法主要为堆载预压结合塑料排水板法。



图 2 湖南省益阳市经济开发区团圆南路道路工程项目施工现场

2 有限差分法软件 FLAC^{3D} 介绍

在软土地基上修筑城市道路,可能产生严重的沉降问题,导致路基、路面的开裂破坏。当考虑土体荷载、土体的侧向变形模式和边界约束条件的变化的影响时,采用理论解析法进行求解存在很大的难度;因此,可采用数值分析方法进行精确计算^[16-17]。FLAC^{3D} 软件属于有限差分法软件,是计算机数值模拟领域采用较广泛的软件。

3 有限差分法模型的建立

3.1 几何尺寸的的建立

本文用 FLAC^{3D} 对湖南省益阳市经济开发区团圆南路道路工程 K1+950 断面进行有限差分法数值分析计算。软土路基堆载预压结合塑料排水板加固,在建立数值模型时,模型水平径向、水平切向均采用 12 m;竖向方向上,取 5.1 m 人工填土(砂土)和 16.2 m 淤泥质土,总深度取为 21.3 m。数值计算模型包括 74 800 个 zone 单元,建立后的 FLAC^{3D} 数值模型如图 3 所示。

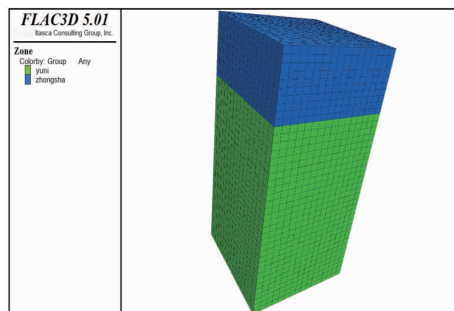


图 3 有限差分法三维数值模型

3.2 土体物理力学参数选择

FLAC^{3D} 是三维的有限差分程序,能够有效模拟岩石、土质、和其它材料的三维结构受力特性^[18-20]。

根据勘探报告得知 K1+950 断面的土层主要由 5.1 m 人工填土(砂土)、16.2 m 淤泥质土等组成,本次软土地基堆载加固模拟的两层土体均采用在岩土体剪切破坏分析中常用的可较好实现张拉破坏与剪切破坏相复合的破坏准则的 Mohr-Coulomb 模型。场地土层具体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 场地土层具体物理力学参数

土体类型	土层厚度 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	压缩模量 E/kPa	泊松比	黏聚力 c/kPa	摩擦角 /(°)	渗透系数 /(m·d ⁻¹)
人工填土(中砂)	5.1	18.1	3.5×10^3	0.24	0	28	0.067
淤泥质土	16.2	17.5	1.8×10^3	0.41	25.8	5	1.8×10^{-5}

为验证建立模型的正确性,可观察计算模型在重力作用的竖向应力等值线图(图 4)。观测计算模型底面的竖向应力,当达到计算精度要求后,可认为计算模型处于自重应力平衡状态。地下水位面位置示意图及初始孔隙水压力分布等值线如图 5 所示。

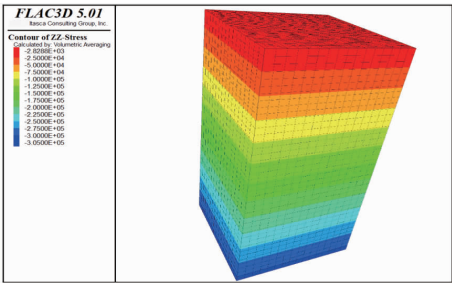


图 4 自重平衡后竖向应力等值线图

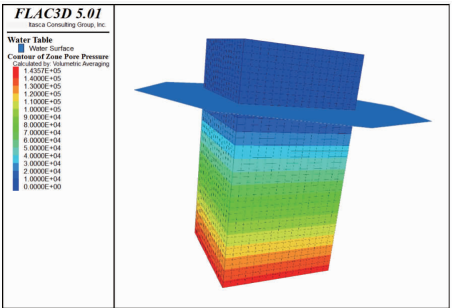


图 5 初始孔隙水压力分布等值线及水位面示意图

3.4 预压荷载的施加

软土地基堆载预压荷载分 2 个阶段施加,第 1、2 阶段分别施加 50 kPa、80 kPa,施加次数分别为 10 级、8 级匀速施加;总堆载预压荷载为 130 kPa。当采用管井降水后,水位由原来的地表以下 3.2 m 处降至 5.1 m 处,该深度范围内土体竖向有效应力增加 19 kPa。由于降水引起的增加的竖向应力在数值分析过程中一并按预压荷载在第 1 级荷载中进行考虑。

3.3 边界条件和初始条件

计算模型的边界条件应与土体实际工况相一致,模型顶面为人工填土(中砂),上部空间为空气,无约束状况,可设置自由边界;模型底面为淤泥质土,由于假定距离地面一定距离的竖向位移为 0,可设置约束竖向位移为 0 的固定边界;大面积地基处理,由于对称性,模型均不存在水平位移,模型侧面均设置为约束其法线方向的位移且允许竖向位移的固定边界。

4 堆载预压阶段的数值模拟结果分析

4.1 预压荷载施加后超静孔隙水压力消散规律分析

预压荷载施加后剖面处土中孔隙水压力分布等值线如图 6 所示。从图 6 可知,在不排水条件下,预压荷载施加后,土中孔隙水压力显著增加,在不同深度大小不同;在布置塑料排水板和地下水位面处孔隙水压力显著减小;淤泥质土层深度 0.8~1.5 m 范围内孔隙水压力值最大。

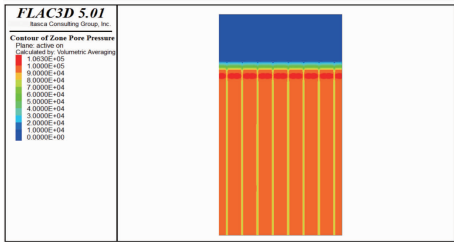


图 6 预压荷载施加后土中孔隙水压力分布等值线图

图 7 至图 11 为平均固结度为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 时,淤泥质土层中孔隙水压力等值线图。可以看出,随着软土路基渗流持续发展,淤泥质土中的水沿着塑料排水板和淤泥质土层表层砂层逐渐排出,淤泥质土体中的孔隙水压力从上到下依次增大,表明孔隙水压力消散值从上到下依次减小,土体逐渐达到固结的状态。

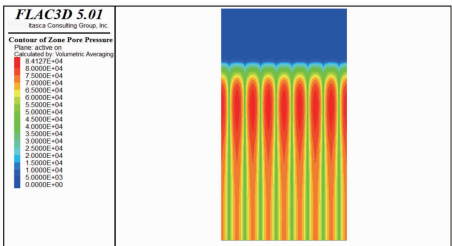


图 7 Ut=0.2 时剖面处孔隙水压力分布等值线

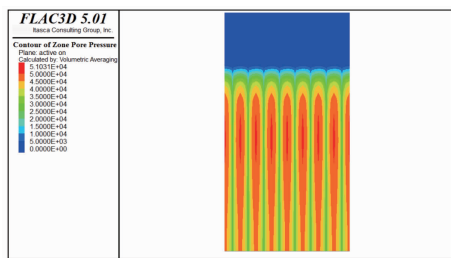


图8 Ut=0.4时剖面处孔隙水压力分布等值线

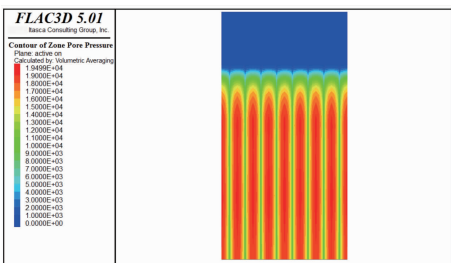


图9 Ut=0.6时剖面处孔隙水压力分布等值线

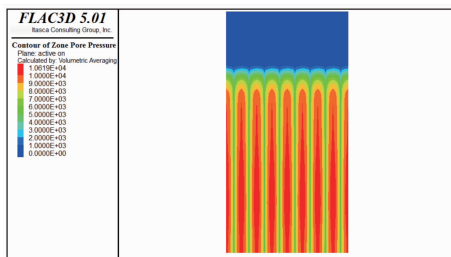


图10 Ut=0.8时剖面处孔隙水压力分布等值线

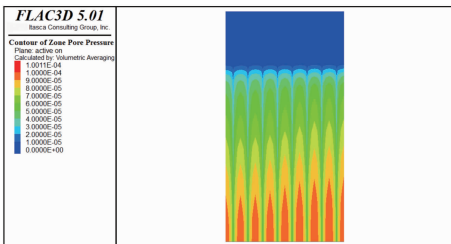


图11 Ut=1.0时剖面处孔隙水压力分布等值线

从图7至图11所示可知,随着平均固结度的不断增大,淤泥质土层中的超静孔隙水压力消散值随深度增加而降低。这主要是由于淤泥质土体上部人工填筑的砂土和淤泥质土体内部的塑料排水板起到了很好的排水固结作用^[22]。

对于淤泥质土层内部来说,在设置了竖向排水体后,土体的排水固结速度加快。同一水平面,塑料排水板中心处超静孔隙水压力最小,随之向两侧延伸,超静孔隙水压力逐渐增大,由此可知塑料排水板对促进饱和软土地基排水固结起到了重要促进作用。此外,整个淤泥质土层范围内的超静孔隙水压力消散程度均很高,在整个排水固结过程中,淤泥质土层中的超静孔隙水压力最大值从106300 Pa消散至0.1 Pa,基本可以认为超静孔隙水压力完全消散,完全达到了预期的固结效果。

4.2 土体固结沉降变化规律分析

根据有效应力原理:总应力=有效应力+超静孔隙水压力。通过数值模拟得出软土固结沉降变化曲线如图12所示。

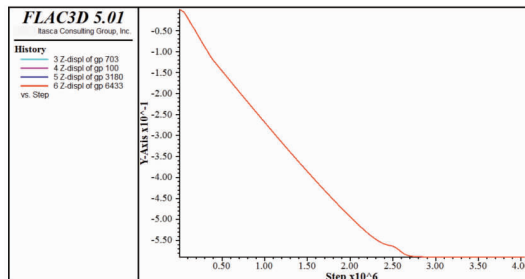


图12 淤泥质土层总沉降变化曲线

从图12可以看出:随计算步数的增大,排水固结持续发生,固结沉降量显著增加,运用FLAC^{3D}得到数值模拟发现,当固结度为1.0,淤泥质土层的总沉降量在计算固结完成时,工程现场实测固结度达到1.0的平均固结沉降量分别为574.7 mm、598.9 mm。计算值与实测值相对误差仅为4.04%,由此可知,该数值模型模拟计算结果能较好地反应工程实际情况。

4.3 分层沉降规律分析

对淤泥质土层进行分层划分,以每1层厚度为1.35 m将总厚度为16.2 m的淤泥质土层划分为12层。图13和图14分别为当固结度为1.0对应的软土路基固结完成后的淤泥质土层不同深度处各层总沉降和单层沉降实测值和模拟值对比曲线。

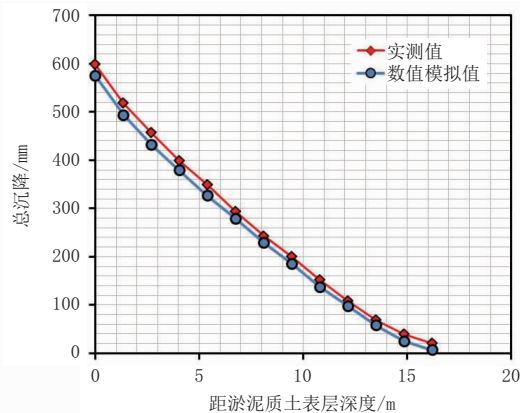


图13 淤泥质土层各层总沉降实测和模拟值曲线

从图13可以看出,就各层总沉降而言,计算模拟值、实测值均表现出相同的规律,即随着深度增加各层总沉降值逐渐减小,模拟值从淤泥质土层表面为574.7 mm降到该土层16.2 m深度处的13.9 mm,实测值相对应的位置模拟值从598.9 mm到15.7 mm,数值模拟结果与实测具有较好地一致性。从图14可以看出,在预压荷载下,淤泥质土层上部受到的影响

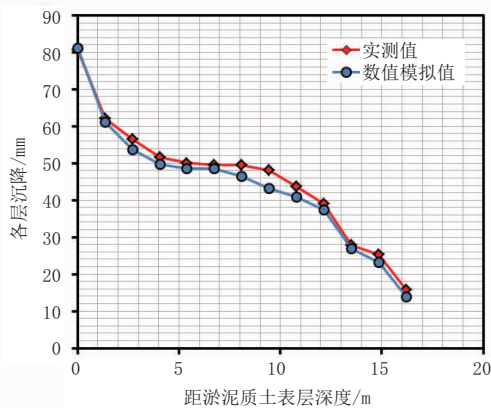


图14 淤泥质土各层沉降实测和模拟值曲线

较为明显,各单层土层的固结变形量随着深度增加呈显出先逐渐减小,再保持稳定,再显著减小的趋势。本次堆载预压结合塑料排水板路基处理的最终目标是淤泥质土层上部4.5 m范围土层物理力学性质指标得到明显改善,从图14可知在淤泥质土层上部5 m范围内各土层的固结沉降值相对较大,因此从实测和数值模拟结果来看,处理深度均能够较好地满足设计要求。

4.4 代表性测点孔压变化规律

图15为运用FLAC^{3D}数值模拟得到的不同固结度条件下淤泥质土层中孔隙水压力沿深度的变化曲线。

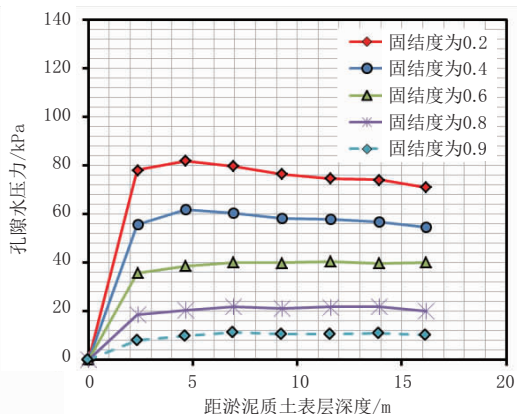


图15 不同固结度下孔隙水压力沿深度变化曲线

从图15可知,总体上,由于在淤泥质土层的上部中砂层和土中设置了塑料排水板,因此淤泥质土层各个深度处,出现了超静孔隙水压力随固结度增加都呈迅速减小的规律,充分体现了堆载预压结合塑料排水板的显著排水作用。

5 结论

堆载预压结合塑料排水板使软土地基达到一定固结度进行地基加固,不仅具有造价低、施工简单的优势,而且加固效果良好,在国内城市道路工程中得

到广泛应用。本文利用基于FLAC^{3D}对湖南省益阳市经济开发区团圆南路道路工程软土地基进行了分析与研究,对软土地基进行堆载预压结合塑料排水板复合地基加固研究,分析软土地基过程中软土地基的孔隙水压力和总沉降、各层沉降等多个参数随软土深度变化规律,结果表明:

由于淤泥质土体上部的人工填筑的砂土和淤泥质土体内部的塑料排水板起到了很好的排水固结作用,随着平均固结度的不断增大,淤泥质土层中超静孔隙水压力消散值随深度增加而降低。同一水平面,塑料排水板中心处超静孔隙水压力最小,随之向两侧延伸,超静孔隙水压力逐渐增大;由此可知塑料排水板对促进饱和和软土地基排水固结起到了重要促进作用。

随着排水固结的不断进行,淤泥质土层越靠上部,超静孔隙水压力消散程度越高。当固结度为1.0,淤泥质土层的总沉降量的数值计算值、实测值相对误差仅为4.04%,认为该模型模拟计算结果能较好地符合工程实际情况。软土路基各层总沉降值均随着深度增加逐渐减小,在预压荷载下,淤泥质土层上部受到的影响较为明显,各单层土层的固结变形量有随着深度增加呈显出先逐渐减小,再保持稳定,再显著减小的趋势。由于在淤泥质土层的上部中砂层和土中设置了塑料排水板,淤泥质土层各个深度处,超静孔隙水压力随固结度增加都呈迅速减小的规律,充分体现了堆载预压结合塑料排水板的显著排水作用。

本次堆载预压结合塑料排水板路基处理的最终目标是淤泥质土层上部4.5 m范围土层物理力学性质指标得到明显改善,在淤泥质土层上部5 m范围内各土层的固结沉降值相对较大,从实测和数值模拟结果来看,处理深度均能够较好地满足设计要求。

参考文献:

- [1] 冯莉.直线边界软土路基水平侧向应力分析研究[D].广西:桂林理工大学,2009.
- [2] 魏建波.地铁车站明挖基坑围护结构稳定性研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [3] 刘星峰.公路桥头过渡段路基病害特征及处理探究[J].河南科技,2014(15):144.
- [4] 苏兆华.道路桥梁施工技术及管理对策[J].建筑工程技术与设计,2018(2):1284.
- [5] 邓育燕.软土路基施工[J].科技信息(学术版),2007(24):575.
- [6] 黄亮清.软土路基施工技术探讨[J].中华民居,2012(6):1246-1247.
- [7] 蔡烽.塑料排水板堆载预压法处理温州软基的研究[J].浙江建筑,

(下转第70页)

将结合段最不利荷载工况下轴力 238 433 kN、弯矩 -137 008 kN·m(负值代表截面下缘受压)及开孔板连接件和焊钉连接件相互等效后的相关参数代入式(1)可得开孔板和焊钉连接件的最大剪力分别为:

$$V_{d\text{开}} = k_1 \times k_2 \times \left(\frac{N_d}{n_a} + \frac{M_d}{Z \times n} \right) =$$

$$0.5 \times 0.3 \times \left(\frac{238\,433}{367} + \frac{137\,008}{2.4 \times 120} \right) = 168.8 \text{ kN}$$

$$V_{d\text{焊}} = k_1 \times k_2 \times \left(\frac{N_d}{n_a} + \frac{M_d}{Z \times n} \right) =$$

$$0.5 \times 0.3 \times \left(\frac{238\,433}{931} + \frac{137\,008}{2.4 \times 217} \right) = 77.9 \text{ kN}$$

对比简化计算方法与有限元分析方法结果可知,简化计算方法开孔板和焊钉连接件最大剪力分别约 169 kN、78 kN,均大于有限元分析方法的 155 kN、68 kN,安全系数分别为 1.09、1.15,简化计算方法可以较准确估算连接件最大剪力且偏安全。

5 结 语

本文结合工程实际,对自锚式悬索桥钢-混结合段进行有限元计算和分析,研究结合部受力性能,提出连接件最大剪力简化计算方法,主要得出以下结论:

(1)最不利荷载工况下,混凝土梁纵向最大应力出现于混凝土梁过渡段底板转角处,需加强此处配筋设计;结合段混凝土纵向最大应力出现于混凝土底板靠近承压板处,应加强格室混凝土振捣质量;结合段混凝土均处于受压状态,应力下缘明显大于上

缘,呈压弯受力特性。

(2)钢结构纵向应力沿纵桥向逐渐增大,主梁中间箱室底板应力大于边箱,应力横向分布不均匀,开孔板连接件与承压板连接处及过渡加劲肋末端均出现局部应力集中,钢结构总体应力水平较为合理。

(3)结合段连接件最大剪力均出现于远离后承压板的结合段末端,最大剪力在其所在列的占比均不超过 30%,隔板上的开孔板连接件承受大部分剪力,顶底板上的焊钉连接件受力较小,主要用于防止结合段处混凝土与钢结构可能出现的相对剥离。

(4)结合段钢结构与混凝土之间的轴力传递大致呈线性变化,承压板传递约 58%的轴力,其余通过连接件传递,轴力分担比例较为合理,传力平顺。

(5)在结合段连接件最大剪力简化计算的基本假定下,采用简化计算方法,可以较准确估算连接件最大剪力且偏安全。

参考文献:

- [1] 黄琼.钢-混凝土混合梁自锚式悬索桥受力性能与计算方法研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [2] 郭济.大跨径自锚式悬索桥混合梁结合段受力分析[J].上海公路,2018(3):28-33.
- [3] 陈泉.自锚式悬索桥加劲梁钢混结合段和锚固段受力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [4] 孙叔禹.广州猎德大桥主桥设计[J].山西建筑,2007(22):299-300.
- [5] 刘玉擎.混合梁接合部设计技术的发展[J].世界桥梁,2005(4):9-12.
- [6] 刘荣.斜拉桥混合梁结合段合理设计研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [7] 丁望星,姜友生.荆岳长江大桥主梁钢混结合段设计[C]//全国斜拉桥关键技术论文集(2012),2012.
- [8] 田乙,吴文兵,张霖,等.堆载-真空联合预压下的未打穿竖井地基固结理论[J].岩土工程学报,2022,44(3):533-540.
- [9] 林伟岸,江文豪,詹良通.考虑真空加载过程及堆载随时间变化下砂井地基的普遍固结解析解[J].岩土力学,2021,42(7):1828-1838.
- [10] 黄鹏华,王柳江,刘斯宏,等.真空堆载预压联合电渗竖向排水地基非线性固结解析解[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):206-216.
- [11] 詹良通,张斌,郭晓刚,等.废弃泥浆底部真空-上部堆载预压模型试验研究[J].岩土力学,2020,41(10):3245-3254.
- [12] 李波,程文亮,项存平,等.大面积堆载预压处理深厚软基工后沉降预测研究[J].岩土工程学报,2021,43(S2):162-165.
- [13] 王光.高速公路软土区段桩基路堤沉降及稳定性分析[J].建筑安全,2019(9):75-77.
- [14] 帅宇轩.临清高速强夯加固软土地基效果分析与评价[D].北京:北京交通大学,2020.
- [15] 何敏.浅析公路工程软基处理技术及质量控制[J].四川水泥,2016,(2):198-198.
- [16] 舒晓武.高速公路加宽工程技术及应用研究[D].天津:天津大学,2006.
- [17] 王涛,韩焯,赵先宇,等.FLAC^{3D}数值模拟方法及工程应用-深入剖析FLAC^{3D}5.0[M].北京:建筑工业出版社,2015.
- [18] 杨天琪.临清高速公路河谷区多层软土强夯加固地基路基隆陷分析与预测[D].北京:北京交通大学,2021.
- [19] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC^{3D}基础与工程实例[M].武汉:中国水利水电出版社,2013.
- [20] 刘学力.FLAC^{3D}在软土基坑开挖计算中的应用[J].路基工程,2008(6):166-168.
- [21] 董超强.塑料排水板堆载预压法处理超软土地基固结沉降与稳定性控制研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [22] 张社荣.塑料排水板加固软基工期优化及数值仿真[J].中国农村水利水电,2007(2):40-42,47.

(上接第 60 页)

2020,37(4):33-37.