

文章编号:1007-2993(2021)01-0027-05

考虑分层填筑及地应力平衡的挡土墙数值仿真

张红叶

(盐城市建设工程质量检测中心有限公司,江苏盐城 224000)

【摘要】 针对重力式挡土墙后分层填土对墙身受力影响的问题,深入研究分析墙背土压力动态变化值及规律性,利用大型通用有限元分析软件 ADINA,建立了平面应变单元及墙、土接触单元的有限元计算模型,并且综合考虑墙后回填土 Mohr-Coulomb 材料本构模型,初始地应力场平衡、墙后回填土分层碾压填筑,设置墙、土之间的接触受力进行有限元分析计算,最终采用库仑主动土压力理论计算、预埋土压力仪器监测与有限元仿真计算结果进行对比分析,能够准确地反映墙后回填土因分层填筑而导致土压力变化的规律及三者偏差幅度规律,为同类重力式挡土墙在土基上的设计和施工提供科学的技术支撑和经验参考。

【关键词】 重力式挡墙;初始地应力;分层碾压填筑;接触面单元;主动土压力

【中图分类号】 TU 431

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2021.01.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Retaining Wall Considering Layered Filling and Initial Ground Stress Balance

Zhang Hongye

(Yancheng City Construction Engineering Quality Inspection Center Co., Ltd., Yancheng 224000, Jiangsu, China)

【Abstract】 Focusing on the influence of layered soil filling behind the gravity retaining wall on the stress of the wall body, the dynamic change value and regularity of earth pressure behind the wall are studied and analyzed. The finite element calculation model of plane strain element and contact element of wall and soil is established by using the large-scale general finite element analysis software ADINA, and the Mohr-Coulomb material constitutive model of backfill behind the wall is comprehensively considered. The initial ground stress field is balanced, the backfill behind the wall is compacted and filled in layers, and the contact forces between the wall and the soil are set for finite element analysis and calculation. Finally, the Coulomb active earth pressure theory, the embedded earth pressure monitoring instrument and the finite element simulation results are used for comparative analysis, which can accurately reflect the law of the earth pressure change caused by layered filling of the backfill behind the wall and the deviation amplitude of the three. The law of degree provides scientific technical support and experience reference for the design and construction of similar gravity retaining wall on soil foundation.

【Key words】 gravity retaining wall; initial ground stress of foundation; layered compacted filling; contact unit; active earth pressure

0 引言

随着计算机 FEM 计算方法的快速发展,岩土结构设计中,当两种相邻建筑材料变形刚度相差较大时,为了真实模拟其相互之间的作用,散粒体与刚体之间相互作用面的接触单元理论应运而生^[1];初始地应力场是已经存在的,且相对于工程建设来说可认为是一个稳定的应力场,自瑞典地质学家

Heim 提出初始地应力概念后,经历了近百年的研究,出现了多种确定地应力的计算方法,推荐采用“平衡位移”的计算初始地应力的方法^[2];为了减小挡墙后填土的工后沉降和墙身受土压力,采用分层碾压技术来提高回填土的密实性及抗剪强度^[3];考虑墙后回填土的分层填筑的施工工艺,能够准确地分析出墙后填土对挡墙作用的动态变化过程。通过

作者简介:张红叶,女,1987年生,江苏盐城人,硕士研究生,工程师,主要从事混凝土结构设计与检测。E-mail:1033461990@qq.com

预埋监测仪器的测量数据来反分析^[4]印证理论公式及有限元计算成果的可靠性。

上述文献分别介绍了相互作用的接触单元,地应力平衡方法及分层填筑技术在工程建设中的应用,取得了较好的应用效果。本文将以上所述因素综合考虑,利用大型通用计算软件 ADINA FEM 真实模拟回填土的施工过程,计算得出挡墙墙顶位移及墙身土压力变化的动态过程,同时与监测数据,传统理论土压力公式的计算结果进行对比分析研究,为同类挡土墙的设计和施工提供可靠的参考和借鉴。

1 工程概况

重力式挡土墙由于其具有施工工艺简单、能够就地取材、经济实用等众多优点,被广泛用于道路工程建设中的支挡结构。而准确计算土压力是能够设计出经济合理断面的基本前提;随着计算机的高速发展,与理论紧密结合的有限元仿真计算成果结合监测数据进行对比被大量用于工程实践分析中。

本工程中挡土墙结构最大高度为 9 m,为减小墙后主动土压力,增加挡土墙的抗滑、抗倾的能力,提高支挡结构运行的安全保证率,墙后填土必须分层碾压填筑^[5],单层压实厚度不超过 0.5 m,压实度不小于 0.96,且回填土在碾压施工过程中,不得冲撞、损坏预埋土压力计,监测仪器的预埋设位置及挡土墙剖面图见图 1。

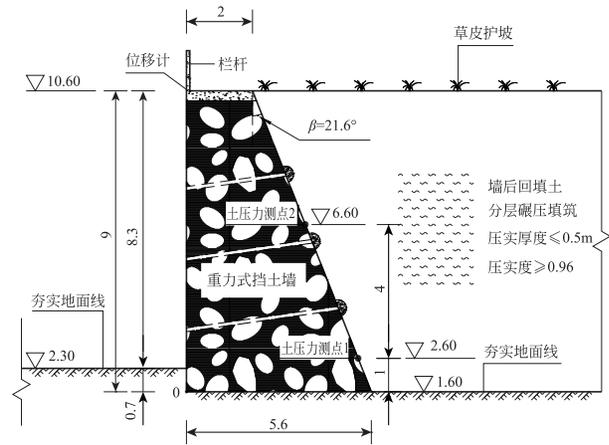


图 1 重力式挡土墙典型剖面图(单位:m)

2 计算理论与计算方法

2.1 计算理论

(1)Mohr-Coulomb 材料本构

Mohr-Coulomb 材料本构^[6]能适用于大或小位移/小应变变形状态的数值仿真分析,其屈服方程如式(1)、式(2)所示。

$${}^t f_{MC} = \sin\varphi^t I_1 + \frac{1}{2} \left[\frac{3(1-\sin\varphi)\sin\varphi^t \theta}{+\sqrt{3}(3+\sin\varphi)\cos^t \theta} \right] \sqrt{{}^t J_2} - 3c\cos\varphi \tag{1}$$

$${}^t \theta = \frac{1}{3} \arccos\left(\frac{3\sqrt{3}{}^t J_3}{2({}^t J_2)^{3/2}}\right) \tag{2}$$

式中: θ 为相似角或应力平面的斜交角, $\theta \in [0, \pi/3]$; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; ${}^t I_1$ 为第一主应力不变量; ${}^t J_2$ 为第二偏应力不变量; ${}^t J_3$ 为第三偏应力不变量。

(2)约束函数

采用约束函数^[6]的算法来求解土压力,接触面和目标面无穿透,同时还可以考虑两接触面的摩擦因素,函数表达式如式(3)所示,式中参数 ϵ_N 可取 $1e-12$, g 为目标法向接触因子, λ 为法向接触因子, $w(g, \lambda)$ 为约束函数值,法向接触约束函数示意图见图 2。

$$w(g \cdot \lambda) = \frac{g + \lambda}{2} \sqrt{\left(\frac{g - \lambda}{2}\right)^2 + \epsilon_N} \tag{3}$$

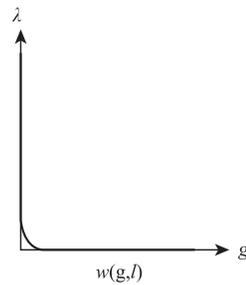


图 2 法向接触约束函数示意图

2.2 计算方法

对于工程建设而言,由于自重力作用及地基沉降已完成两个因素,形成了一个基本稳定的初始地应力场,因此,为仿真模拟计算模型实际的受力状态,挡土墙土压力数值仿真分析计算分为 2 个步骤:(1)考虑重力式挡土墙施工完毕后,地基应力已稳定且沉降已完成,在 FEM 计算中需采用地应力平衡^[7]的方法来模拟抵消地基已完成的初步沉降。(2)回填土分层填筑,在加载过程中利用土体单元生死时间来控制填筑速度,且在整个施工过程中假定回填土均匀上升;在土体回填至设计高程后,土压力达到稳定状态;墙后填土高度为 9 m,在本次有限元仿真计算中,分为 9 个加载过程,每级加载单元厚度为 1 m。

墙背与回填土分界面之间存在接触关系,采用上述接触理论来仿真模拟,墙背属于刚性面,设置为目标接触面,而回填土面为相对柔性面,设置为主动

接触面,同时假设挡土墙墙背光滑无摩擦,则 $\delta=0^\circ$, (法向接触压力)库仑主动土压力作用方向垂直于墙背。

3 计算模型及参数

3.1 有限元计算模型

对重力式挡土墙的设计进行科学合理的简化,简化后 FEM 模型的计算域如下所述:墙后回填土范围为 2 倍墙高+墙底宽,共计 23.6 m,地基土深度为 2 倍墙高,为 18 m;坐标系原点见图 2 所示 O 点, FEM 模型边界约束条件:模型两侧地基土及回填土水平向位移为 $X=0$,地基地部边界竖向位移为 $Y=0$,挡墙垂直面为自由面。

重力式挡土墙设计横缝间距为 12 m,属于平面应变的受力状态,因此采用 2-D Solid 平面应变单元来仿真模拟不同部分受力结构。挡土墙和地基土采用线弹性材料本构,墙后分层填筑的回填土选用 Mohr-Coulomb 材料本构;根据有限元网格划分规则及计算精度要求,计算模型中平面应变单元组 3 个,单元数为 684 个,单元节点为 767 个,9 个接触对单元,计算模型见图 3。

3.2 计算参数

由于工程所在地地基土性质较好且均匀,计算中已考虑了初始地应力场的平衡,因此对回填土压力的影响较小,可将地基土简化为同一种材料,不再根据地质分层去建立地基模型。根据本项目的地质勘察报告及室内压缩、剪切试验成果,将有限元计算模型所需的物理力学性能参数汇总于表 1。

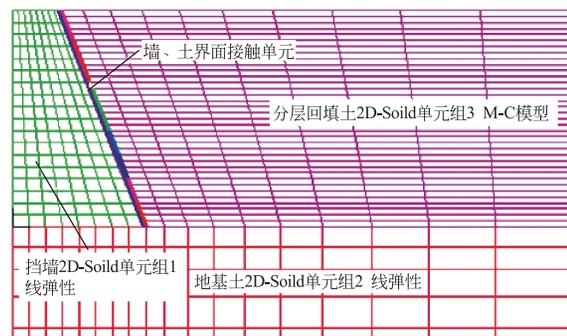


图 3 重力式挡土墙 FEM 计算模型
(地基土单元未全部显示)

表 1 重力式挡土墙有限元计算物理力学性能参数汇总表

名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	材料本构
挡土墙	25.0	20×10^3	0.167			线弹性
回填土	19.5	12.5	0.200	21.5	25	摩尔-库仑
地基土	21.0	30.0	0.200			线弹性

4 土压力理论计算、仿真计算与实测成果对比分析

4.1 墙顶水平位移成果对比分析

挡土墙墙顶预埋设位移计,墙后填土填筑面每上升 1 m,均采集记录一组监测数据;同时 FEM 计算一次得出墙顶水平向位移(见图 4)。分析可知,在墙后回填土填筑完毕后,填土高度达到 9 m 时,墙顶最大水平位移为 2.6 cm,两者的差值很小;随着回填土填筑面的不断上升,位移计的监测值和 FEM 计算值两者的偏差逐渐缩小,施工完毕后,两者几乎相等,因此利用 FEM 预测墙顶位移的方法是合理、可靠的。

4.2 主动土压力理论解

根据重力式挡土墙受力特点,墙背离土压力的

$$K_a = \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin^2 \alpha \sin^2(\alpha+\beta-\varphi-\delta)} \left\{ K_q \left[\frac{\sin(\alpha+\beta) \sin(\alpha-\beta)}{\sin(\varphi+\delta) \sin(\varphi-\beta)} + 2\eta \sin \alpha \cos \varphi \cos(\alpha+\beta-\varphi-\delta) \right] - 2\sqrt{K_q \sin(\alpha+\beta) \sin(\varphi-\beta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi} \times \sqrt{K_q \sin(\alpha-\delta) \sin(\varphi+\delta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi} \right\} \quad (4)$$

方向变形,因此墙背受主动土压力,根据《建筑边坡工程设计规范》(GB 50330—2013),库仑主动土压力计算理论见式(4)一式(6)。

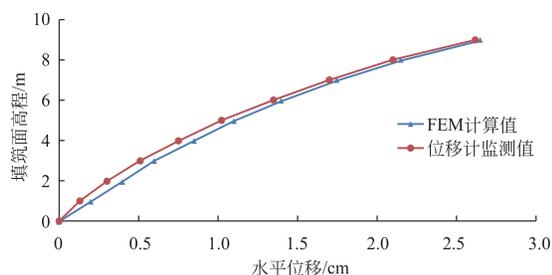


图 4 重力式挡土墙墙顶水平位移对比分析图

$$K_q = 1 + \frac{2q\sin\alpha\cos\beta}{\gamma H \sin(\alpha + \beta)} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{2c}{\gamma H} \quad (6)$$

式中: K_a 为主动土压力系数; H 为挡土墙高度, m; γ 为土体重度, kN/m^3 ; c 为土的黏聚力, kPa ; φ 为土的内摩擦角, ($^\circ$); q 为地表均布压力, kN/m^2 ; δ 为土对挡土墙墙背的摩擦角, ($^\circ$); β 为填土表面与水平面的夹角, ($^\circ$); α 为支挡结构墙背与水平面的夹角, ($^\circ$).

根据重力式挡土墙设计的已知条件: $H=9\text{ m}$; $\gamma=19.5\text{ kN}/\text{m}^3$; $c=21.5\text{ kPa}$; $\varphi=25^\circ$; $q=0\text{ kN}/\text{m}^2$; $\delta=0^\circ$; $\beta=0^\circ$; $\alpha=90^\circ-21.6^\circ=68.4^\circ$; 带入式(4)~式(6), 计算得到库仑主动土压力系数: $K_a=0.329$, 则库仑主动土压力 $e_a=K_a\gamma H$, 主动土压力作用方向为垂直于墙背。

4.3 主动土压力成果对比分析

通过库仑主动土压力理论公式计算值、有限元仿真计算值及土压力计监测值三者对比分析: FEM 计算结果表明, 沿墙高的土压力分布基本呈线性分布的规律, 与库仑主动土压力理论公式分布规律吻合^[8], 土压力的数值大小偏差较小; 墙背预埋设的两支土压力计的监测值同时基本落在两条线的附近,

偏差也不大(见图5)。

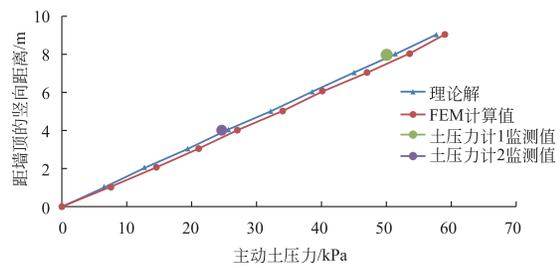


图5 重力式挡土墙沿墙高的土压力分布对比分析图

有限元计算值均比理论值偏大, 偏差为+4.3%~+5.5%, 土压力计监测数据均比理论值偏小, 偏差为-2.7%~-4.8%, 且两者偏差的绝对值随着填土高度增大而逐渐减小, 越接近理论公式计算值(见表2)。

根据表2中土压力对比结果, 偏差值均较小, 在可接受的范围之内, 表明利用 Mohr-Coulomb 材料本构模拟分层回填土^[9], 同时采用接触理论模拟墙背与回填土界面的受力关系, 可以准确预测反映墙背主动土压力的大小及分布规律, 对墙后回填土分层碾压施工确保挡墙施工期安全稳定具有重要的指导意义。

表2 库仑主动土压力理论值、有限元计算值及土压力计监测值对比表

回填土 填筑面高程/m	对比分析主动 土压力点高程/m	主动土压力 对比分析	数值/kPa	偏差	备注
6.10 填土高度 4.5		理论值	22.45	0%	
	2.60	有限元计算值	23.68	+5.5%↑	
		监测值	21.35	14.8%↓	土压力计1监测值
10.60 填土高度 9.0		理论值	51.32	0%	
	2.60	有限元计算值	53.53	+4.3%↑	
		监测值	49.93	-2.7%↓	土压力计1监测值
	6.60	理论值	25.66	0%	
		有限元计算值	26.99	+5.2%↑	
		监测值	24.51	-4.5%↓	土压力计2监测值

5 结论

针对道路工程的重力式挡土墙, 运用大型有限元软件 ADINA 对工程实例进行定量的数值仿真分析, 综合考虑初始地应力场平衡、墙后回填土分层碾压填筑, 设置墙、土之间相互作用的接触单元等因素并且通过传统库仑主动土压力计算理论、预埋土压力仪器监测与有限元仿真计算结果三种方式进行对比分析研究, 得出以下结论:

(1) 利用有限单元法预测重力式挡土的墙顶位移的方法是合理、可靠的。

(2) 有限单元法能够准确地反映挡墙后的回填土分层填筑后主动土压力变化的规律及大小, 同时三者偏差幅度均在合理范围之内。

(3) 对比分析成果能够为同类同规模的重力式挡土墙在土基上的设计施工以及监测提供科学的技术支撑和经验参考, 有利于确保工程质量优良又达

到经济合理的目标。

参 考 文 献

- [1] 陈慧远. 摩擦接触单元及其分析方法[J]. 水利学报, 1985, 4(1): 44-50.
- [2] 徐志雄, 周创兵, 陈益峰. 基于 ν -SVR 和 GA 的初始地应力场位移反分析方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 151-156.
- [3] 赵炼恒, 罗 恒, 李 亮. 冲击压实技术在高填方路基中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 4191-4197.
- [4] 刘洪波. 分层碾压填筑的高填方路基有限元变形分析[J]. 建筑与工程, 2011, 7(1): 241-242.

- [5] 王同强. 高速公路挡土墙施工技术[J]. 交通标准化, 2014, 42(18): 48-50.
- [6] BATHE K J. Adina Theory and Modeling Guide [M]. ADINA R& D, Inc., 2010.
- [7] 金长宇, 冯夏庭, 张春生. 白鹤滩水电站初始地应力场研究分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 846-850, 855.
- [8] 贾韵洁. 重力式挡土墙设计中土压力的计算[J]. 道路工程, 2011, 15(1): 37-39.
- [9] 黄 豪, 赵雷鸣, 邹志强, 等. 高填方涵洞分层回填的数值模拟和土压力分析[J]. 交通与计算机, 2008, 26(1): 96-98.

收稿日期: 2019-12-10

(上接第 26 页)

(4) 为了满足监测的准确性、降低用电危险、节约能源, 结合室内试验, 通电加压最优参数为加压功率 3 W/m、加压时长 30 min。

(5) 基于 DTS 的内加热光缆对检测地下连续墙墙体完整性和监测墙体渗漏情况具有良好的可行性, 该光缆也十分适用于现场墙体中, 取得了良好的渗漏监测效果。

参 考 文 献

- [1] 王 鹏, 钟有信, 杜广林, 等. 地铁深基坑连续墙渗漏风险的量化控制[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 90-93.
- [2] 丁春林. 软土地区弱透水层承压水基坑突涌计算模型研究[J]. 工程力学, 2008(10): 194-199.
- [3] 杜家佳, 杜国平, 曹建辉, 等. 高坝大库声纳渗流检测可视化成像研究[J]. 大坝与安全, 2016(2): 37-40.
- [4] 王绍彪, 汤 浩. 综合物探方法在探测基坑围堰渗漏中的应用[J]. 人民珠江, 2011, 32(S1): 52-53.
- [5] 韩 鹏. 高密度电阻率法在探测不同充填类型溶洞中的正反演研究[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6): 1219-1225.
- [6] 张 瑾, 刘 涛, 王旭春, 等. 微测井电法在基坑围护防渗检测中可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2591-2600.
- [7] 孙 聪. 地球物理方法在混凝土连续墙渗漏检测中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [8] 李 罡, 张志强, 刘道学, 等. 基于地质雷达的基坑地

下连续墙接缝处渗漏水监测技术[J]. 能源技术与管理, 2020, 45(6): 11-14.

- [9] 肖衡林, 周锦华. 渗漏监测技术研究进展[J]. 中国水运(学术版), 2007(2): 87-91.
- [10] 薛志平, 王 东, 王 宇, 等. 分布式光纤拉曼测温系统信噪比优化研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(1): 17-21.
- [11] 鲍汝苍. 基于分布式光纤测温技术的基坑围护结构渗漏监测方法应用研究[C]// 中冶建筑研究总院有限公司. 2020 年工业建筑学术交流会议论文集(下册). 2020.
- [12] 符韵梅, 董艳辉, 谢月清, 等. 基于分布式光纤温度示踪探测裂隙岩体地下水渗流特征[J/OL]. 工程地质学报: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3249.p.20201102.1557.009.html>.
- [13] 姜 云, 余有光, 姜 超, 等. 分布式光纤在大型桥梁建设中温度监测的智能化技术应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(9): 241-244.
- [14] 曹鼎峰, 施 斌, 严珺凡, 等. 基于 C-DTS 的土壤含水率分布式测定方法研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 910-915.
- [15] 王 刚, 吕京生, 刘金清, 等. 基于分布式光纤温度传感的煤层气井测试[J]. 光电子·激光, 2020, 31(12): 1299-1305.

收稿日期: 2019-11-05