



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.028

李佳. 基坑开挖位移及土体水平抗力比例系数的反分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 185-191. LI Jia. Back analysis on displacement of supporting structure and proportional coefficient of horizontal resistance during foundation excavation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 185-191. (in Chinese)

基坑开挖位移及土体水平抗力比例系数的反分析

李 佳

(三门峡职业技术学院, 河南 三门峡 472000)

摘要: 基坑设计土体参数的正确选取直接影响支护结构的位移和内力计算结果, 特别是土体水平抗力比例系数 m 值对支护结构位移的影响最为显著。结合基坑开挖工程实例, 通过材料性状与基坑开挖施工过程的平面有限差分法模拟, 模拟计算基坑分布开挖过程结构的水平位移; 通过分析诸多土体参数对基坑支护结构水平位移的影响程度, 确定杨氏模量作为位移反分析所需获取的参数, 构建实测位移与模拟计算位移之间的目标函数, 反分析给出各层土的杨氏模量; 基于弹性地基梁法推导的 m 值与杨氏模量的关系, 给出反映实际侧向变形特性各层土的 m 值。研究结果为基坑工程设计参数的合理确定提供了一定理论参考依据, 对有效控制基坑位移与变形具有重要的实践意义。

关键词: 基坑; 平面有限差分法; 水平抗力比例系数 m 值; 杨氏模量; 弹性地基梁; 位移反分析

中图分类号: TU470 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0185-07

Back analysis on displacement of supporting structure and proportional coefficient of horizontal resistance during foundation excavation

LI Jia

(Sanmenxia Technical Institution, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: Reasonable soil parameters directly affect the displacement and internal force calculation results of the supporting structure in foundation pit design. Especially the proportional coefficient m of horizontal resistance has the most pronounced influence on the displacement of the supporting structure. Based on an engineering case of foundation excavation, the characters of materials and process of foundation excavation were simulated by the plane finite difference method, so that the horizontal displacement of the supporting structure for the excavation was simulated and calculated. Through analysis of the influence of soil parameters on the horizontal displacement of the supporting structure, it was determined that Young's modulus was the parameter to be obtained for the back analysis of displacement. The objective function between measured displacement and simulated displacement was built, and Young's modulus of each soil layer was obtained through back analysis. The relationship between m value and Young's modulus was derived by the elastic foundation beam method, and thereby m value of each soil layer was obtained. The research results provided a certain theoretical basis for reasonable determination of design parameters of foundation pit, and has important practical significance for the effective control of the displacement and deformation of foundation pits.

Key words: foundation pit; plane finite difference method; proportional coefficient m of horizontal resistance; Young's modulus; elastic foundation beam; back analysis of displacement

收稿日期: 2016-03-16 修回日期: 2016-07-18 网络出版时间: 2016-06-00

网络出版地址:

基金项目: 河南省高等学校“专业综合改革试点”项目

Funds: Project of "Comprehensive Reform of Specialty" in Colleges and Universities of Henan

作者简介: 李 佳(1982-), 男, 河南卢氏人, 副教授, 主要从事岩土工程技术方面研究。E-mail: jim_ljia@126.com

在基坑工程中,一般都是已知边界条件、力学参数来求解结构的内力与位移。然而,许多基坑工程中材料参数往往是未知的,通过试验测定费时费力。为此,工程界提出了反分析方法。反分析是通过现场获取的少量易测数据(如位移),以这些数据为已知量,通过理论方法反求不易量测的材料参数,获得所需合适的参数用于结构设计或变形控制计算。国家基坑规范和许多地方规范已将弹性抗力法即 m 法作为基坑支护结构设计的推荐方法,土体水平抗力比例系数 m 值成为关键参数。 m 值受诸多因素的影响,如基坑开挖深度、基坑内土体加固、开挖卸载、施工扰动等。规范对 m 值仅给出了较大的经验取值范围,选取具有较大的随机性和不确定性。位移反分析为 m 值的准确确定提供了一种重要的途径。熊巨华^[1]用试验结果和实测数据证明采用位移反分析方法是确定 m 值的有效方法。徐中华^[2]提出了一种结合 Ucode 反分析软件和 Abaqus 有限元分析软件,根据基坑围护墙实测变形反分析 m 值的方法。张军平^[3]通过理论计算和实测数据的对比,认为对于浅基坑,采用基于弹性支点法的 m 值的位移反分析方法,可达到工程需要参数的反演精度。陆勇^[4]根据基坑工程施工各工况实测位移,采用单纯形法位移反分析,对 m 值进行分析,反演得到优化位移与实测位移基本接近,建议 m 值取下限来控制基坑的最大变形。王旭东^[5]根据基坑施工监测资料,提出利用非线性单纯形方法反演地基土的 m 值。戴加东、宋建学等^[6-18]根据基坑工程变形实测值,采用相关软件或理论方法对 m 值进行了反演分析。

本文依托深港西部通道深圳侧接线工程道路部分城区地段基坑工程,采用平面应变有限差分法模拟基坑分布开挖施工过程,通过构建实测位移和计算模拟位移之间的目标函数,采用位移反分析方法分析基坑土层变形参数,利用基于弹性地基梁法推导的杨氏模量与 m 值的关系确定 m 值。为合理确定基坑支护结构设计参数 m 值及基坑工程变形控制提供了一定的理论依据。

1 工程简介

1.1 工程概况

深港西部通道深圳侧接线工程是西部通道过境车辆专用通道,全长约 4.48 km,道路部分区段采用下穿地道形式。城区地段道路两侧建(构)筑物密集,沿线埋设有市政、电力和通讯管线,周边环境对基坑结构的变形、位移和地下水的控制有很高的要求。该段线路基坑开挖深度范围内有一层 5.0~

8.0 m 厚的砾砂,具有强透水性,且地下水极为丰富。基坑支护工程的重点是地下水治理、基坑支护结构变形控制以及周边建(构)筑物的保护问题。

城区地段周边复杂路段对应里程 K2+100~K3+460,线路长为 1.36 km。地道工程基坑开挖深度 10.0~12.0 m,采用钻孔咬合排桩加多排钢支撑的支护方案,安全等级为一级。钻孔咬合排桩采用全长跟套管钻进法施工,具有较好的挡土、截水功能,避免因基坑开挖而造成地下水大量流失,发生流砂等事故;钢支撑具有较大的支撑刚度,通过施加预应力,可以将基坑的位移和变形控制在一定范围内。

1.2 工程地质与水文地质条件

该工程城区地段所经场地原始地貌为海冲积平原,根据地质钻探揭露,地层自上而下为 4 层。(1)人工填土层。道路填土层,经碾压后呈中密密实状态,填筑时间超过 10 年。(2)粗砾砂层。厚度 5.0~8.0 m,为较纯净的粗砾层,呈中密状态,透水性好。(3)冲洪积层。主要为黏土层,局部有淤泥质黏土分布。(4)残积土层。混合花岗岩风化残积而成,主要为砂质黏性土,压缩性小、强度高、透水性小,为良好的持力层。城区地段地下水埋深较浅,埋深为 1.0~2.0 m,粗砾砂层透水性大,地下水由海水补给,地下水丰富。

2 基坑开挖的平面有限差分模拟方法

基坑开挖施工是一个动态的过程,为了能够近似模拟基坑的开挖响应,假设基坑施工每一个步骤都近似达到平衡,即节点的不平衡力为零或者小于给定的某个阈值,将基坑开挖看作轴对称二维平面应变问题,采用平面有限差分法进行模拟。

2.1 材料性状的模拟

目前,土工计算中被广泛采用各向同性的本构模型,以 Duncan & Chang 非线性弹性模型与 Mohr-Coulomb 弹塑性模型为典型代表。Mohr-Coulomb 弹塑性模型能够反映土体不可恢复的塑性应变,计算参数较易确定,能够反映土体的剪切破坏,在实际应用中比较普遍。Vermeer & de Borst^[19]的试验报告证明,砂土和混凝土的应力应变关系与 Mohr-Coulomb 模型较为一致。模拟中土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。

钻孔灌注桩采用梁单元来模拟,单元参数根据混凝土的弹性模量和泊松比 μ 来选取。由于模拟分析采用平面应变问题,对于平面应力的结构单元应将弹性模量除以 $(1-\mu^2)$ 。水平钢支撑也选用梁单

元,单元参数也根据混凝土或钢材的弹性模量和泊松比来选取。

基坑开挖过程中,每步开挖都要卸掉一部分土层,处理的方法是直接从模型中将其去掉,设置为空单元。基坑开挖前或者开挖到一定深度后,需要对坑底软土进行注浆加固,直接将该加固土层设置为独立对象,加固土层材料参数主要依靠现场数据和经验选取。

土体与墙体的交接界面相对来说是光滑的,界面的强度低于邻近土体的强度,界面摩擦角取 12° ,黏聚力取为 2.5 kPa 。对于界面的法向刚度和切向刚度的选取,根据有关文献选取相邻土体最大刚度的 10 倍左右是合理的。这样选取的目的是让界面的变形对整个模拟的变形产生最小的影响,然而又不能取过大的值,这样会产生相邻节点刚度差过大,产生畸变。相邻土体最大刚度可用下式得到:

$$\max[(K + (4/3)G) / \Delta z_{\min}] \quad (1)$$

式中: K 为体积模量; G 为剪切模量; Δz_{\min} 为与界面单元邻近土体的最小法向距离。

2.2 基坑开挖的模拟

自重应力的模拟。通常情况下,地基土是一个半无限体,任何垂直面都是对称面,在自重应力的作用下,不可能发生侧向剪切变形,地面以下任何深度 z 处的垂直应力 σ_{z0} 等于上覆土层的自重应力。对于不考虑超载作用的地基,其初始应力场只考虑土自重应力的作用。水平应力 σ_{x0} 为侧压力系数 K_0 乘以垂直应力, K_0 取 0.5 。

围护桩施工过程的模拟。灌注桩的置入过程,主要是通过安置桩的位置将土体单元设置为空单元,然后置入梁单元。桩的自重会使土体的应力场和位移场变化,主要是通过界面单元与土体发生相互作用产生。

基坑降水的模拟。基坑降水有坑内降水和坑外降水,本次模拟的是坑内降水。坑内降水主要有两种模拟路径,一种是开挖一定深度前降水到该深度以下一定范围,然后开挖,开挖后又继续降水到下一个指定的开挖面以下位置,这样循环直到基坑开挖至基坑底部标高;另一种是在开挖前一次性降水到基坑底以下一定位置,然后开挖,在开挖过程中保持基坑内水位不变。根据实际情况,选用第二种降水路径模拟基坑降水,一次性降水至坑底 1 m 。

基坑开挖土体和支撑结构施工的模拟。在基坑降水后,开挖土体,先开挖到第一道水平支撑中心下 0.5 m 处,计算系统稳定后,架设第一道水平支撑,

预加一定轴力,计算系统稳定后,继续开挖至第二道水平支撑下 0.5 m 处,计算系统稳定后,架设第二道水平支撑,预加一定轴力,计算系统稳定后,开挖到基坑底设计标高,计算系统稳定。模拟中的每一个步骤能够计算应力和位移的重分布,稳定后再模拟下一个步骤,能够模拟多支撑支护结构的内力和变形随开挖过程的变化情况。

2.3 位移反分析模拟过程

土体材料参数泊松比 μ 对位移的影响不敏感,变化通常很小,均在 $0.25 \sim 0.35$ 之间变化。内摩擦角 φ 和剪胀角 ϕ 也不敏感。对于松散的砂,一般剪胀角 ϕ 为 $1^\circ \sim 2^\circ$;密实的砂砾、粗(砾)砂等通常不考虑剪胀角的影响, ϕ 为零。内摩擦角 φ 、泊松比 μ 和杨氏模量 E 对结构水平位移影响分析结果见图 1- 图 3。

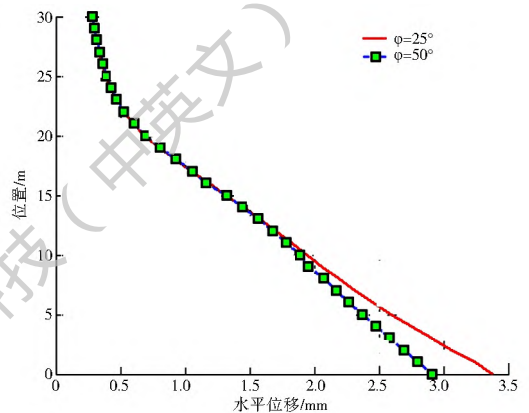


图 1 内摩擦角对水平位移的影响

Fig. 1 Influence of internal friction angle on horizontal displacement

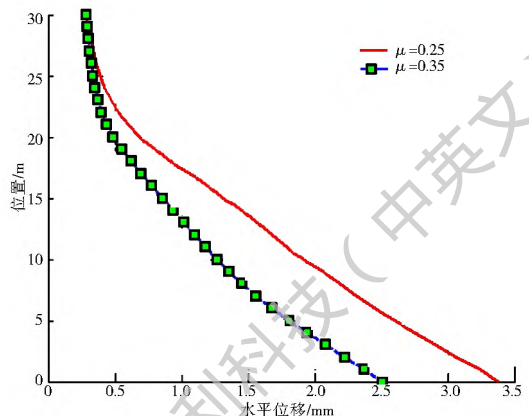


图 2 泊松比对水平位移的影响

Fig. 2 Influence of Poisson ratio on horizontal displacement

从图 1- 图 3 中水平位移影响因素分析可见,杨氏模量对水平位移影响最为显著,因此主要通过反分析得到杨氏模量 E ,而将内摩擦角 φ 、泊松比 μ 等参数作为已知值,取自土工试验或现场试验。以基坑开挖监测得到的水平位移与有限差分数值模拟得到的位移值的误差函数为目标函数,即:

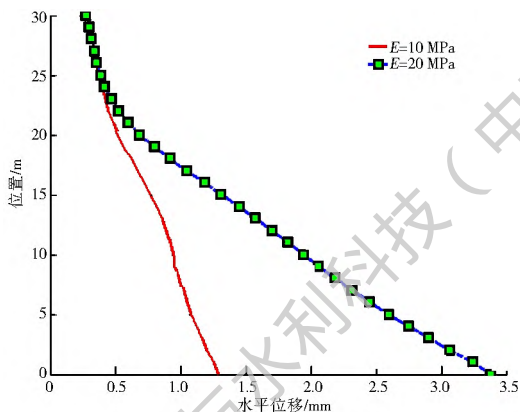


图 3 杨氏模量对水平位移的影响

Fig. 3 Influence of Young's modulus on horizontal displacement

$$\min_{X \in D^0} f(X) = \min_{X \in D^0} \sum_{i=1}^n [u_i - u_i(X)]^2 \quad (2)$$

式中： n 为监测点总数； u_i 为第 i 测点的实测位移值； $u_i(X)$ 为第 i 测点的计算位移值； X 为所需要确定的参数，即设计变量； D^0 为设计变量的区间，根据实际情况而定。

分步开挖模拟反分析按照如下过程进行：根据实测位移不断试算，按照每一步开挖平衡后计算位移值来确定目标函数。即从开始就反分析设计变量，把目标函数控制在允许范围内，不断丢掉最坏点，代之以既能使目标函数有所改进，又能满足约束条件的新点，不断试算，逐步调向“最优”点。当第一步开挖上层土体得到的参数所带来的误差结果在给定范围内时，认为上层土体的实际参数就在此计算参数附近，缩小搜索范围。继续第二步开挖，第三步开挖，一直到基坑开挖到底部。位移反分析模拟过程见图 4。

3 基坑开挖过程模拟反分析

3.1 计算模型与计算参数

选取分析断面 ZXK3+315，平面有限差分计算

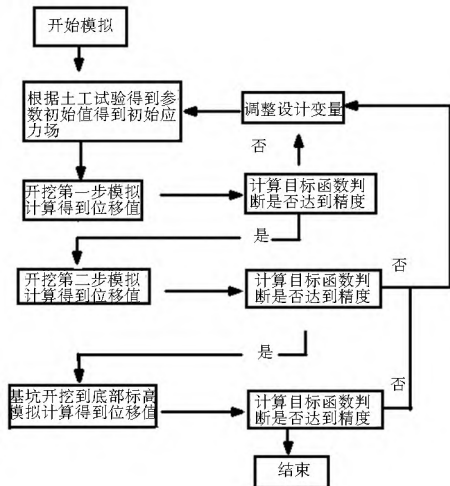


图 4 位移反分析模拟过程

Fig. 4 Simulation process for back analysis of displacement

模型网格划分见图 5，土层参数见表 1。表 1 中杨氏模量根据标贯击数及两者的经验关系得到，注浆固结体的参数选择参考《工程地质手册》^[20]，由标贯击数得到，其余参数由土工试验得到。围护结构灌注桩与钢支撑计算参数分别见表 2 和表 3。

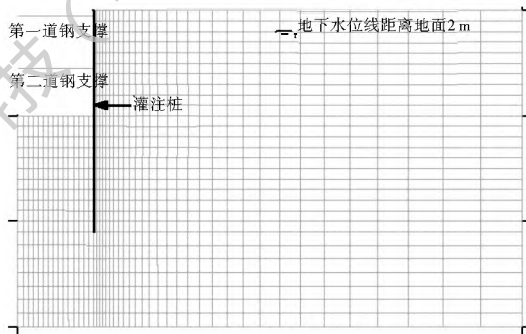


图 5 平面有限差分网格划分示意图

Fig. 5 The schematic diagram of plane finite difference mesh generation

表 1 土层参数

Tab. 1 Soil parameters

土层名称	厚度/m	饱和密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙率	杨氏模量/MPa	泊松比	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$k/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
人工填土	4	1 880	0.4	4	0.25	15	15	0.05
粗(砾)砂	8	2 010	0.3	25.5	0.25	0	38	25.0
淤泥质亚黏土	4	1 980	0.4	27	0.30	14	22	0.01
砾质亚黏土	12	2 000	0.4	42	0.25	25	34	0.03
注浆固结体	5	2 100	0.4	80	0.22	4 000	40	0.05

表 2 围护结构-灌注桩计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of enclosure structure bored pile

直径/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/MPa	泊松比	截面惯性矩/ m^4
0.5	2 500	28	0.17	0.049 08

表 3 围护结构-钢支撑参数

Tab. 3 Calculation parameters of enclosure structure steel support

支撑的位置	直径 /mm	厚度 /mm	密度 / (kg·m ⁻³)	杨氏模量 /MPa	间距 /m	截面惯性矩 /m ⁴	极限抗拉强度 /MPa	极限抗压强度 /MPa
地表下 0.5 m (第一道)	609.6	16	7 900	210	4	0.00132	200	200
地表下 5.5 m (第二道)								

3.2 分析步骤

有限差分网格模拟基坑开挖的程序可分为如下步骤: (1) 生成模型网格, 设置材料参数与边界条件; (2) 调用程序确定初始应力, 确定结构桩安装后的最初应力; (3) 降低地下水水位至基坑底 1 m; (4) 分布开挖第一步, 开挖到第一道钢支撑中心线下 0.5 m; (5) 安装第一道钢支撑并预加轴力 240 kN; (6) 分布开挖第二步, 开挖到第二道钢支撑中心线下 0.5 m; (7) 安装第二道钢支撑并预加轴力 280 kN; (8) 分布开挖第三步, 开挖到基坑底面标高处。模型建立后对上述步骤分别计算并修正参数, 得到每一个施工阶段支护结构的内力与水平位移等计算结果。

3.3 模拟反分析结果分析

模拟过程从第一步开始, 通过不断调整初始参数得到结构的水平位移, 计算目标函数式直到达到允许的范围。开挖阶段目标函数中的位移实测值的选择见表 4, 反分析模拟开挖最终得到符合目标函数的土工参数杨氏模量见表 5。

表 4 开挖阶段施工工况

Tab. 4 Construction steps at the excavation stage

施工工况	工况描述
工况一	安装第一道钢支撑并预加轴力 240 kN
工况二	安装第二道钢支撑中心线下 0.5 m 处
工况三	安装第二道钢支撑并预加轴力 280 kN
工况四	基坑开挖到坑底

表 5 位移反分析土层的杨氏模量

Tab. 5 Young's modulus of soil layers by back analysis of displacement

土层名称	人工填土	粗(砾)砂	淤泥质亚黏土	砾质亚黏土	注浆固结体
杨氏模量 /MPa	3.5	47.5	32.0	54.5	78.9

3.3.1 水平基床系数

在水平荷载作用下, 桩水平位移 u 越大, 侧压力 (即土的弹性抗力) σ 越大, 侧压力大小还取决于土的性质、桩身刚度及截面形状和入土深度, 可用如下公式表示:

$$\sigma = Cu \quad (3)$$

式中: C 为土的水平基床系数 (kN/m^3), 可通过试验得到, 如可以对桩在不同类别土质及不同深度实测水平位移 u 及侧压力 σ 后反算得到。大量试验表明, 基床系数 C 不仅与土的类别及其性质有关, 而且也随深度而变化。关于基床系数分布规律种类繁多, 其中被广泛采用的是假设基床系数 C 随深度成正比例增长, 即

$$C = mZ \quad (4)$$

式中: m 为土体水平抗力比例系数。

3.3.2 水平基床系数的反分析

如图 6, 在区域 D 内作用均布荷载 p , 某点 o 处的地面沉降量可用集中荷载作用下的地面弹性位移量计算公式:

$$u_{z(z=0)} = [(1-\mu)/2\pi G] Q/r = [(1-\mu^2)/\pi E] Q/r \quad (5)$$

式中: r 为计算点至集中荷载作用点的距离。以微面积 dA 上作用的荷载作为集中荷载 Q , 然后在区域 D 内积分, 即可求 o 点处的沉降量:

$$u_{z(z=0)} = [(1-\mu^2)p/\pi E] \int_D dA/r = [pB(1-\mu^2)/E] \times (1/\pi B) \int_D dA/r \quad (6)$$

令 $I_\rho = (1-\mu^2) \int_D dA/r$, 则:

$$u_{z(z=0)} = [pB(1-\mu^2)/E] I_\rho \quad (7)$$

式中: B 为荷载面宽度; I_ρ 是各种形状的面积积分, 称为位移影响值。

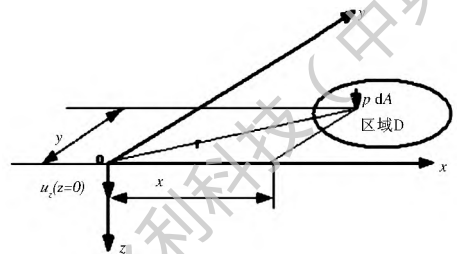


图 6 均布荷载作用下 o 点位移计算图示
Fig. 6 The schematic diagram of calculation of o point displacement under uniform load

对于宽为 B , 长为 L 的长方形荷载, 将式 (6) 在 x 方向从 0 到 B , y 方向从 0 到 L 积分, 得到长方形荷载角点下的沉降量:

$$u_{z(z=0)} = [pB(1-\mu^2)/E] I_\rho \quad (8)$$

式 (8) 中, $I_\rho = 1/\pi [n' \ln(1 + \sqrt{n'^2 + 1/n'}) +$

$\ln(n' + \sqrt{n'^2 + 1})]$, 为长方形荷载角点下的位移影响值, $n' = L/B$, 利用叠加原理可以计算中心处的位移。对于连续的桩、墙, 取单位延米来分析, 将其作为一个受水土压力作用的弹性地基梁, 水土压力对结构的作用可以像 Winkler 模型一样用一系列的土弹簧来表示(见图 7)。

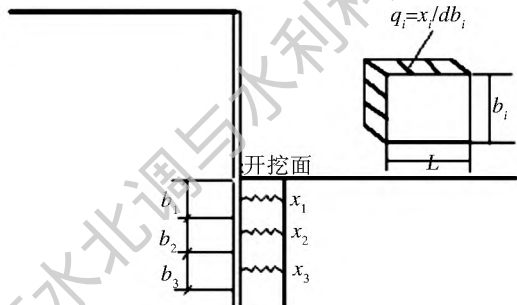


图 7 计算图示

Fig. 7 Calculation schematic diagram

对于开挖面以上的土弹簧如果受拉, 则弹簧不起作用, 弹簧的刚度系数 $k = 0$ 。设土弹簧产生的集中力为 x_i , 弹簧代表受压土面积为 $s = b_i \times d$, d 为结构的宽度, 取为 1 m, 则作用于该面积上的水土压力 q_i 为:

$$q_i = x_i / (b_i \times d) \quad (9)$$

设 $b_i < d$, 由弹性力学的 Boussinesq 解求得在 q_i 作用下的位移 u_i 为

$$u_i = dx_i (1 - \mu^2) \omega / (b_i d E) \quad (10)$$

弹簧的刚度系数 k_i 为:

$$k_i = x_i / u_i = b_i E / [(1 - \mu^2) \omega] \quad (11)$$

式(10)、(11)中, ω 是与长宽比有关的形状参数, 对于正方形, $b_i/d = 1$, $\omega = 1.12$; 对于狭长的矩形, 当 $b_i/d = 100$ 时, $\omega = 4.01$ 。式(3)可以写成:

$$\omega = x_i / s_i = C u_i \quad (12)$$

$$k_i = x_i / u_i = C s_i \quad (13)$$

当 d 取单位长度时, 上式写为:

$$C = E / [(1 - \mu^2) \omega] \quad (14)$$

对于 ω 的取值, 取 $b_i/d = 1$, $\omega = 1.12$ 。对于同一土层, E 是常数, C 也是常数, 不符合式(4)的定义。为了把杨氏模量 E 和基床系数 C 联系起来, 必须进行修正。作如下假设: (1) 基床系数 C 仅在离地面最近的单位土层厚度范围内式(4)成立; (2) 基床系数 C 在单位土层厚度的中点处 $C_{(1/2)} = E / [(1 - \mu^2) \omega]$ 。杨氏模量 E 与基床系数 C 的换算见图 8。

比例系数 m 为:

$$m = 2E / [(1 - \mu^2) \omega] \quad (15)$$

$$C(Z) = mZ = [2E / (1 - \mu^2) \omega] Z \quad (16)$$

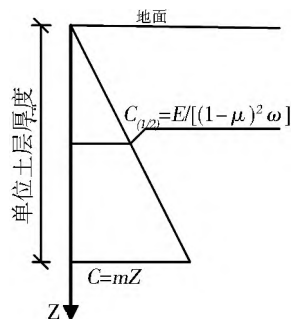


图 8 杨氏模量与基床系数的换算

Fig. 8 The conversion between Young's modulus and coefficient of subgrade reaction

不同土层的 m 值可由杨氏模量 E 来反映, 硬土层 E 较大, m 值也较大, 故由此确定的 m 值可以考虑软土和硬土层的差异, 符合实际工程。

3.3.3 m 值反分析结果

利用反分析得到的杨氏模量 E 和式(15), 得到比例系数 m 值, 计算结果见表 6。

表 6 ZXK3+315 断面土层的 m 值

Tab. 6 The m value of each soil layer on Section ZXK3+315

土层	土层名称	杨氏模量 / MPa	泊松比	水平抗力比例系数 $m / (MN \cdot m^{-4})$
1	人工填土	4	0.25	8
2	粗(砾)砂	25.5	0.25	70
3	淤泥质亚黏土	27	0.30	49
4	砾质亚黏土	42	0.25	80
5	注浆固结体	80	0.22	130

4 结语

(1) 结合基坑工程实例, 假设基坑施工每一步骤近似达到平衡状态, 将基坑分布开挖过程看作平面应变问题处理, 建立了二维有限差分计算模型, 利用平面有限差分法模拟了基坑分布开挖过程。

(2) 分析内摩擦角 φ 、泊松比 μ 和杨氏模量 E 等土体参数对基坑支护结构水平位移的影响程度, 确定杨氏模量 E 作为位移反分析获取的参数。

(3) 构建了以基坑开挖实测位移与有限差分数值模拟计算位移之间的目标函数, 结合基坑工程典型开挖断面, 反分析模拟基坑分布开挖施工过程, 获取符合目标函数的各土层的杨氏模量。

(4) 基于弹性地基梁弹性理论推导了土体杨氏模量与土体水平抗力比例系数 m 值之间的关系, 利用反分析获取各土层的杨氏模量, 获得了各土层的 m 值的建议取值。

上述分析结果为基坑工程设计参数的合理确定提供了一种重要途径, 对基坑结构位移与变形控制

提供了一定的理论依据和实践意义。

参考文献(References):

- [1] 熊巨华, 李建华. 基坑围护工程中土体水平抗力系数 m 值的分析与确定[J]. 建筑结构, 1998(6): 39-41. (XIONG Jir hua, LI Jian hua. Analysis and determination on " m " value of soil used in retaining structure[J]. Building Structure, 1998(6): 39-41. (in Chinese))
- [2] 徐中华, 李靖, 王卫东. 基坑工程平面竖向弹性地基梁法中土的水平抗力比例系数反分析研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 398-404. (XU Zhong hua, LI Jing, WANG Wei dong. Back analysis of proportional coefficient of horizontal resistance in vertical elastic subgrade beam method for deep excavations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 398-404. (in Chinese))
- [3] 张军平, 邹银生. 基坑位移反分析方法的对比研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(1): 52-56. (ZHANG Jun ping, ZOU Yin sheng. A comparative research of the reverse analyses of deep pit displacement[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2005, 32(1): 52-56. (in Chinese))
- [4] 陆勇, 卜良桃, 彭富强. 软土深基坑工程支护结构设计 m 值与弯矩反分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1096-1102. (LU Yong, BU Liang tao, PENG Fu qiang. Back analysis of m value and bending moment of supporting structure design parameters for deep excavation engineering in soft soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(5): 1096-1102. (in Chinese))
- [5] 王旭东, 黄力平, 阮永平, 等. 基坑工程中地土土水平抗力比例系数 m 值得反分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1998, 2: 49-54. (WANG Xu dong, HUANG Li ping, RUAN Yong ping, et al. Back analysing m value of subgrade reaction in excavation[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1998, 2: 49-54. (in Chinese))
- [6] 戴加东. 基坑工程中地土土 m 值的反演及光纤技术研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2005. (DAI Jia dong. Study on back analysis of m values of foundation soils and the application of optical fiber sensing in deep excavation[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [7] 宋建学, 翟永亮, 莫莉. 基于支撑内力和支护桩位移实测量的 m 值反演[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 156-160. (SONG Jian xue, ZHAI Yong liang, MO Li. m value identification based on horizontal displacement of piles and axial force of struts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 156-160. (in Chinese))
- [8] 刘晓虎. 宁波轨道交通深基坑工程变形规律及反馈分析[D]. 宁波: 宁波大学, 2011. (LIU Xiao hu. Deformation law and back analysis of deep excavation engineering in Ningbo urban rail transit [D]. Ningbo: Ningbo University, 2011. (in Chinese))
- [9] 叶荣华. 宁波软土深基坑时空效应分析及安全评价研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2013. (YE Rong hua. Time space effect analysis and safety evaluation of deep excavation in Ningbo soft clay area [D]. Ningbo: Ningbo University, 2013. (in Chinese))
- [10] 于升才. 哈尔滨地区基坑土体 m 值优化分析[J]. 市政技术, 2013, 3(31): 90-94. (YU Sheng cai. The m value optimization analysis of foundation pit soil in Haerbin region[J]. Municipal Engineering Technology, 2013, 3(31): 90-94. (in Chinese))
- [11] 朱翔, 朱宏洲, 刘振东, 等. 基于支撑轴力和支护桩深层位移实测的 m 值反演[J]. 河南科技, 2012, 9: 92. (ZHU Xiang, ZHU Hong zhou, LIU Zhen dong, et al. m value identification based on deep horizontal displacement and axial force of supporting structure[J]. Henan Science and Technology, 2012, 9: 92 (in Chinese))
- [12] 赖鹏程. 弹性地基梁 " m " 法在深基坑支护结构中应用[J]. 中国水运, 2006, 4(11): 6F-63. (LAI Peng cheng. Application of " m " method of elastic foundation beam in the supporting structure of deep foundation pits[J]. China Water Transport, 2006, 4(11): 6F-63. (in Chinese))
- [13] 吕刚, 李向国. 基于 m 法的深基坑支护内力计算有限差分法[J]. 西部探矿工程, 2004(7): 4-6. (LV Gang, LI Xiang guo. Finite difference method based on " m " method for calculation of internal forces of deep foundation retaining pile[J]. West China Exploration Engineering, 2004(7): 4-6. (in Chinese))
- [14] 郭文静. 哈尔滨地区基坑工程土体参数取值研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (GUO Wen jing. Study on deformation modulus of excavation pits in Harbin district[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [15] 冯俊福. 杭州地区地土 m 值的反演分析[J]. 杭州: 浙江大学, 2004. (FENG Jun fu. Back analysis of m value of foundation soils in Hangzhou [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese))
- [16] 赵登峰. 考虑应力路径的软土深基坑开挖分析及 m 值优化研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2014. (ZHAO Deng feng. Study on stress path of deep foundation pit excavation in soft soil area and the optimization of m value [D]. Ningbo: Ningbo University, 2014. (in Chinese))
- [17] 沈健. 基于 " m " 法的软土地区基坑工程时空效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006. (SHEN Jian. Research on time space effect in soft soil excavation based on " m " method [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006. (in Chinese))
- [18] 周诗庆, 颜波, 廖化荣. 基坑变形安全的反分析理论应用研究[J]. 山西建筑, 2011, 37(27): 66-67. (ZHOU Shi qing, YAN Bo, LIAO Hua rong. Research on application of anti-analysis theory of deformation safety of foundation pit[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(27): 66-67. (in Chinese))
- [19] Vermeer P A, De Borst R. Non associated plasticity for soils [J]. Concrete and Rock, 1984, 29(3): F-64.
- [20] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Engineering Geological Manual Editorial Board. Engineering geological manual (fourth edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))