

基于支撑内力和支护桩位移实测的 m 值反演

宋建学¹, 翟永亮^{1,2}, 莫莉^{1,3}

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州市第一建筑工程集团有限公司, 河南 郑州 450004;

3. 中国建筑技术集团中南分公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 在深基坑支护设计中, 利用弹性地基梁 m 法计算结构内力和变形应用广泛。 m 取值是否合理、准确直接影响计算结果。结合郑州地区地铁车站工程案例, 布设钢支撑轴力和支护桩水平位移(测斜法)监测点位, 在不同开挖工况下按一定周期实测支护结构内力和变形, 并根据静力平衡条件反演出基坑开挖面以上不同土层的 m 值。然后, 用反演 m 值计算后续工段变形, 其结果更接近实测变形值。反演得到的 m 值丰富地区经验, 提高设计效益。

关键词: 基坑支护; 弹性地基梁法; m 值; 反演

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)S1-0156-05

作者简介: 宋建学(1967-), 男, 汉族, 河南洛阳人, 教授, 博士, 主要从事工程安全监测技术研究。E-mail: ylzhai@126.com。

m -value identification based on horizontal displacement of piles and axial force of struts

SONG Jian-xue¹, ZHAI Yong-liang^{1,2}, MO Li^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou No.1 Construction Engineering Group

Co., Ltd., Zhengzhou 450004, China; 3. Zhongnan Branch of China Building Technique Group Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: m is the proportion factor of horizontal reaction in soil when the soil is horizontally displaced, and the corresponding method for analyzing pit retaining structures is named as m -method. The m -method has been widely used to determine the working state of pit retaining structures in China. However, the value of m significantly varies when deduced by different approaches. An analysis unit is chosen in the subway station pit in Zhengzhou. The combined retaining structures consist of reinforced concrete piles and steel pipe struts. The horizontal displacements of retaining piles and the axial forces of pipe struts are monitored. An assumption is taken as that at the elastic deformation stage, the value of m for each soil keeps constant. A series of equilibrium equations of forces acting on the retaining structures are set up to determine the values of m for each soil corresponding to different excavation stages. When the identified values of m are applied in the later projects, the validity and accuracy of the method are shown. This method and its results are applicable to some underground projects. At the same time the precise values of m are applied in similar geological sites to optimize the retaining structures.

Key words: foundation pit support; elastic foundation beam method; m -value; back analysis

0 引言

弹性地基梁法能够考虑支护结构的平衡条件以及结构和土体的变形协调, 所需参数单一且土的水平抗力系数取值已积累了一定的经验, 并可考虑基坑开挖过程中多种因素的影响, 如锚杆或内支撑施加的预应力和桩位移对桩内力、变形的影响等, 同时从支护桩的水平位移可以初步估计开挖对邻近建筑或市政工程的影响程度, 因而在实际工程中已经成为一种重要的设计方法, 成功地分析了多项深基坑支护工程。

弹性地基梁法中的 m 法在我国实际工程中应用最

为广泛, 但 m 法计算参数的选取是工程界的一项难题, m 值的取值具有较大的随意性, 它不仅与土的类别和性质有关, 还与桩身材料和刚度、水平位移和荷载作用方式等有关, 所以要想给出一个考虑所有因素的 m 值, 具有一定的困难。因此对于特定工程, 必须结合当地具体岩性条件和变形性状取值, 确定适合当地土体条件的 m 值。准确、合理的 m 值不仅能够真实反映结构实际的工作状态, 也可当地类似实际工程设计提供参考, 具有重要的工程意义^[1-2]。

收稿日期: 2010-05-06

本文试图以一组类似工程(地铁车站)中的典型案例, 根据支撑内力和支护桩位移实测量反演 m 值, 为后续工程设计提供参考。

1 计算方法

1.1 基本假设

大量现场试验证明, m 值是随着位移的增加而减小的。我国许多设计规范都对围护结构的水平位移限值作有规定, 根据大量的钢筋混凝土灌注桩水平静载试验资料, 当桩的配筋率较低时, 这个限定值为 6 mm, 当配筋率较高或为钢桩时, 限定值可以适当提高。本文以地铁车站基坑工程中的灌注桩加钢管内支撑支护形式为例, 将施工过程中基坑监测结果与不同行业(地方)规范在建议 m 值时的位移限值进行对比分析, 结合地基层实际情况, 给出以下假设:

(1) 假设正常设计与正常施工的桩撑支护体系中, 水平地基反力系数的比例系数 m 在基坑施工过程中保持恒定, 不随施工中的桩体水平位移而变化。

(2) 当基坑开挖面以下有多个土层时, 各土层的 m 值按等效面积法换算成为一种土的等效 m 值。如式 1 和图 1 所示, 等效面积法确定等效 m 值的方法如下:

$$\frac{mh^2}{2} = \frac{m_1h_1^2}{2} + \frac{m_2h_1 + m_2(h_1 + h_2)}{2}h_2 + \frac{m_3(h_1 + h_2) + m_3(h_1 + h_2 + h_3)}{2}h_3 \quad (1)$$

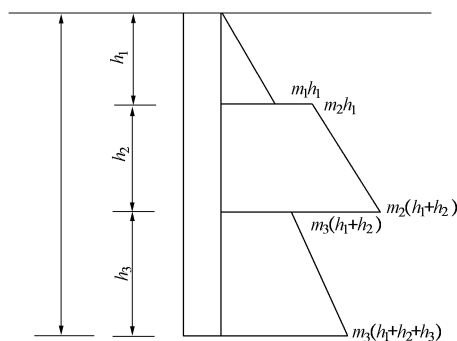


图 1 m 值转换图

Fig. 1 Calculation model for equivalent m -value

1.2 计算方法

实际工程的基坑开挖情况可以划分为不同的工况, 一般基坑开挖是分段、分步开挖, 支撑逐级架设。取支护结构的一个节间作为一个计算单元, 以整个节间内支护桩后、桩前土体以及支撑相互平衡为条件, 可以建立静力平衡方程。对于桩后土体, 按照图 2 所示的土压力模式进行计算; 桩前开挖面以上钢支撑采用现场测定的实际受力值, 开挖面以下土体假定为弹簧单元, 土的抗力为土的水平刚度系数与相应位置的

水平位移的乘积。

假设桩身范围内有 n 个不同的土层, 基坑开挖面以上有 k 个土层, 每一土层的层底深度分别为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k$ 。对于开挖面以下土层的 m 值, 按照式 (1) 的转换原则进行等效, 把开挖面以下的 $(n-k)$ 个土层等效为一个 m 值。为求得开挖面以上每一个土层和开挖面以下等效土层的 m 值, 分 $k+1$ 个不同的工况进行计算。在基坑开挖过程中对支护结构进行全过程监测, 并取出每一工况下的桩体水平位移。假设在第一个工况下, 此时桩体的位移曲线为 $y_{z_1}(x)$, 那么按照平衡理论, 此时支护桩两侧受力可表示为

$$b_s E_1 = b_0 \left(T_1 + \int_{z_1}^{x_1} m_1(x - z_1) y_{z_1}(x) dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{x_i}^{x_{i+1}} m_{i+1}(x - z_i) y_{z_i}(x) dx \right) \quad (2)$$

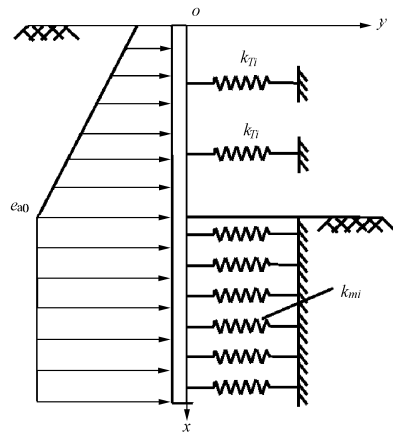


图 2 弹性地基梁法计算模式

Fig. 2 Analysis model for elastic foundation beam method

式中 b_s 为桩后荷载计算宽度 (m); 排桩取桩间距。 E_1 为第 1 工况下桩后总土压力 (kN/m); T_1 为第 1 工况下桩体横向每延米承担钢支撑轴力 (kN/m); m_i 为第 i 层土的水平抗力系数的比例系数 (kN/m⁴); $y_{z_1}(x)$ 为第 1 工况下支护结构实测水平位移曲线方程; b_0 为桩前抗力计算宽度 (m); 圆形桩按下式计算: $b_0 = 0.9 \times (1.5d + 0.5)$, d 为桩的直径, 当 b_0 大于排桩桩间距时应取排桩间距。

在第 i 个工况下, 基坑开挖到第 j 个土层, 开挖深度为 x_j , 此时桩体的位移曲线为 $y_{x_j}(x)$, 那么此时的平衡方程为

$$b_s E_i = b_0 \left(T_i + \sum_{j=1}^{n-1} \int_{x_j}^{x_{j+1}} m_{j+1}(x - x_j) y_{x_j}(x) dx \right), \dots \quad (3)$$

综上所述, 可得出 $k+1$ 个方程, 联立方程、整理, 可得方程组式 (4) 并对方程组求解, 即可得各土层的 m 值。

$$\begin{cases} p_1 = a_{11}m_1 + a_{12}m_2 + \cdots + a_{1(k+1)}m_{k+1}, \\ p_2 = a_{21}m_1 + a_{22}m_2 + \cdots + a_{2(k+1)}m_{k+1}, \\ \cdots, \\ p_{(k+1)} = a_{(k+1)1}m_1 + a_{(k+1)2}m_2 + \cdots + a_{(k+1)(k+1)}m_{k+1}. \end{cases} \quad (4)$$

式中 p_i 为整理各方程得到的桩前、后承受土压力值代数和; m_i 为各土层水平反力系数的比例系数; m_{k+1} 为基坑开挖面以下等效土层水平反力系数的比例系数。

2 工程实例

2.1 工程概况

郑州快速轨道交通一号线一期工程七里河地铁站位于郑州市郑东新区七里河北路与祥盛路之间, 东风东路西侧。车站外包总长 195.70 m, 车站标准段外包宽度为 18.50 m, 总高 13.96 m, 为地下两层岛式站台。基坑开挖采用明挖顺做法施工, 其中端头井部位开挖深度 17.5 m, 标准段开挖深度 15.5 m。基坑采用钢筋混凝土灌注桩加钢管支撑支护形式, 灌注桩在端头井和标准段的桩长分别为 32 m 和 26 m (如图 3 所示)。场地内浅层地下水可分为孔隙潜水和承压水两种类型, 主要赋存在约 -15.2~-38.9 m (± 0.00 下) 深度范围内的粉土、粉质黏土和细砂、中砂土层中。

2.2 支护结构现场监测

在基坑开挖和主体结构施工过程中, 对桩撑结构的内力和变形进行了全程监控, 通过对量测数据的整理和分析, 及时确定相应构件承载能力和变形状态, 并预测后续施工过程中的结构效应, 对施工过程中出现的异常情况及时反馈, 并采取必要的应对措施, 重新优化和重组施工方案, 确保施工安全, 并减少对基坑周边环境的过量影响。基坑监测点布置如图 4 所示。

2.3 m 值的反演

以 #105 桩为例, 工程勘察给出该位置土层分布及物理参数如表 1 所示。各层土的抗剪强度指标按直接

快剪 (q) 试验取值。

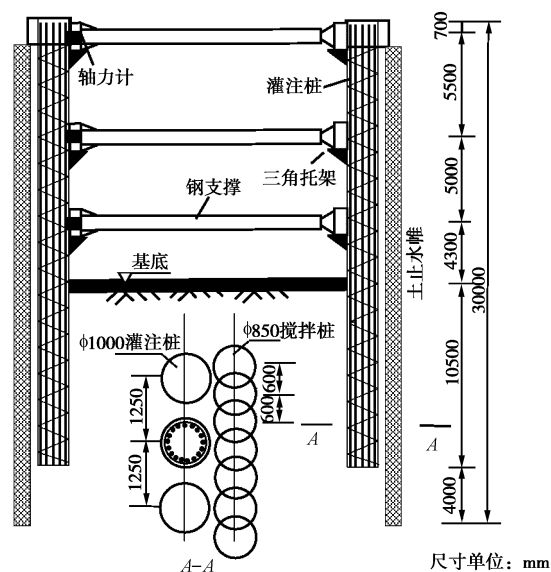


图 3 标准段支护结构典型剖面图

Fig. 3 Section of retaining structures in normal segment of subway station

基坑开挖深度为 15.5 m, 将基坑开挖过程分 5 个工况进行计算, 每挖一层土作为一个工况, 直至开挖至底。现场量测各工况下的桩体变形和钢管支撑的轴力, 并对测斜数据用拟合工具进行拟合 (如取第五工况下的水平位移进行拟合, 图 5 所示), 得出满足精度要求的曲线方程 $y_i(x)$; 计算各工况下桩后土压力, 建立平衡方程, 然后联立求解形如式 (4) 的方程组, 即可求出相应土层的反演 m 值 (表 2 中第 1 组数值)。影响基坑支护结构变形的因素很多, 支护结构的刚度、土的岩性条件及现场施工方案等都会影响到基坑支护结构的变位, 建立在基坑实际变形结果上的反演分析必须明确产生变形的具体因素。本例由于基坑分段、分部开挖, 施工速度较快, 没有考虑基坑开挖过程中时空效应影响, 基坑周边堆土、施工机械等均按地面超载 20 kPa 考虑。

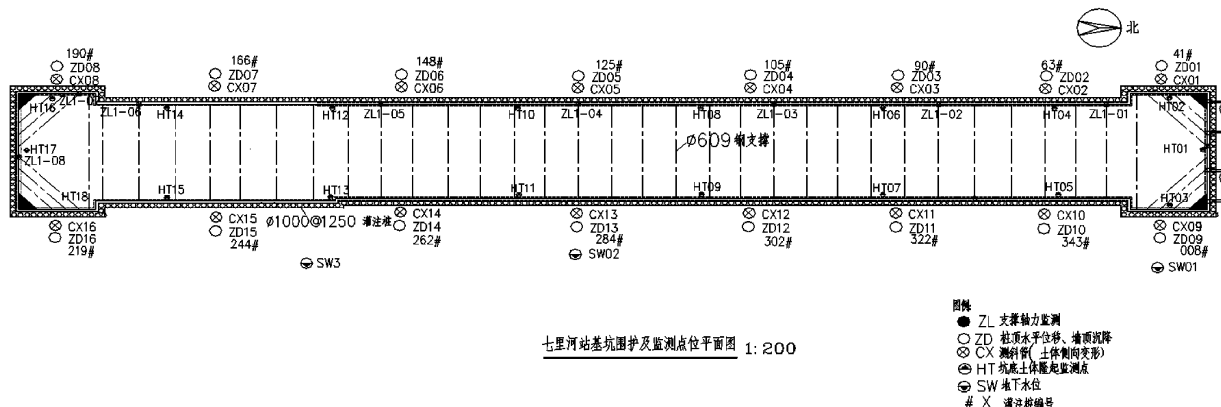


图 4 基坑监测点布置平面图

Fig. 4 Configuration of monitoring sensors

表 1 #105 桩土层分布及土体物理参数

Table 1 Geological features and parameters of soil near pile No. 105

土层编号	土层名称	工程状态	厚度 h/m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	含水率 $w/\%$
(1-1)	素填土	—	1.5	18.1	10	20	—
①	粉土	$0.59\leq e\leq 0.78$	4.0	20.0	15	23	21.1
③	粉质黏土	$0.24\leq I_L\leq 0.67$	4.0	19.5	22	16	26.5
④	粉土	$0.41\leq e\leq 0.82$	5.0	20.0	16	24	23.5
⑦	细砂	中密	4.0	20.9	0	26	18.7
⑧	中砂	密实	9.0	21.4	0	31	19.4

注：图中曲线拟合相关系数和标准误差： $r=0.9647$ ， $s=0.000601$ 。

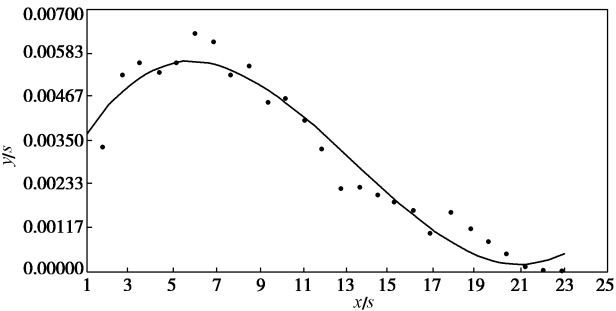


图 5 第五工况下#105 桩水平位移拟合曲线

Fig. 5 Fitting displacement curve for pile No. 105 at fifth stage of excavation

3 计算结果分析

按照相同方法，求解其他两组 m 值（#63 桩和 #90 桩处），其结果分别为表 2 第 2，3 组 m 值。

表 2 七里河站水平地基反力系数的比例系数

Table 2 Proportion factors of horizontal reactions in case study

编号	土层名称	工程状态	$m/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$		
			1 组	2 组	3 组
①	粉土	$0.59\leq e\leq 0.78$	8.65	7.56	10.23
③	粉质黏土	$0.24\leq I_L\leq 0.67$	7.76	5.32	9.86
④	粉土	$0.41\leq e\leq 0.82$	10.33	9.87	12.35
⑦	细砂	中密	20.0	22.0	16.62
⑧	中砂	密实	27.49	24.0	22.08

3 组反演出的 m 值稍有偏差，但是呈现一定的规律，相同土层的数值比较接近。由于计算基于一定的假设，并且基坑变形取值仅仅考虑基坑开挖阶段，车站主体施工期间由于时间效应等其他影响，后期还会有一定的变形，所以在设计计算中应根据实际情况，对本地区 m 值予以适当调整。

为了验证表 2 中反演 m 值的可靠性，基于本文反演的 m 值用弹性地基梁 m 法对七里河车站基坑支护结构中#148 桩处水平位移进行计算和有限元数值模拟，并与实测值进行对比（如图 6 所示），同时结合 JGJ120—99《建筑基坑支护技术规程》^[3]土体 m 值经验公式，按郑州当地实测基坑变形范围（5~15 mm）的限制条件，对这几种类别土的 m 值进行了计算。得出如下结论：

（1）基于本文反演的 m 值，计算出的最终水平位移比实测值略大，但总体变形形式具有较好的一致性。

（2）计算所得的最大水平位移为 8.13 mm，位于深度 13 m 处；实测最大位移 6.4 mm，位于深度 14 m 处。两者最大位移处比较接近，变形曲线也有较好的吻合性，可见反演得出的 m 值基本可以反映各层土体的性态。

（3）对反演结果与我国各行业标准给出的相近地基土类别的 m 建议值及按照经验公式计算的 m 值进行对比（见图 7），反演成果缩小了 m 值的取值范围，计算精度也得到了提高^[4-5]。

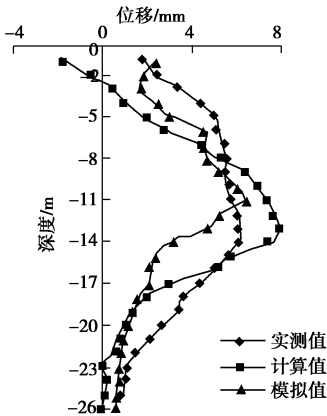


图 6 #148 桩实测、计算和模拟水平位移包络图

Fig. 6 Horizontal displacements determined by monitoring, back analysis and numerical simulation

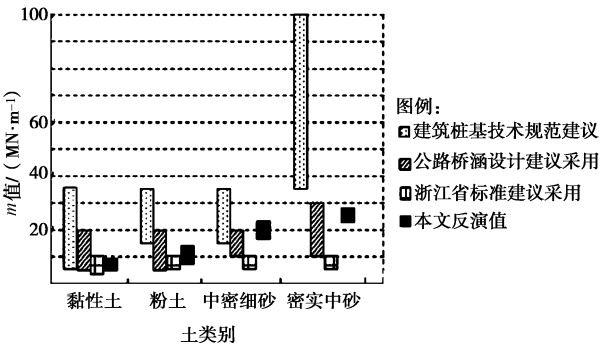


图 7 不同规范 m 值取值范围对比

Fig. 7 Variation of m -value in several kinds of technical codes

4 结 论

本文根据郑州快速轨道交通一号线一期工程七里河地铁站基坑工程支撑内力和支护桩位移实测值,应用静力平衡法反推出场地地基土的 m 值。主要得到下列结论:

(1)本文提出利用现场监测数据以静力平衡方法反演土体 m 值的方法,计算原理简单,方法快捷,结果精确;适用于某一地区组群式地下工程,以典型工程反演参数,可以更好地应用在后续基坑工程变形预测分析上。

(2)以郑州地铁七里河车站为工程实例,反演出各土层的 m 值,并据此进行后期工况的预测,结果与实测值更吻合。反演 m 值符合郑州地区的地基土体条件,丰富了当地的工程取值经验,为以后的工程设计提供参考。

参考文献:

[1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Manual of

construction pit[M]. Beijing: Construction Industry Press, 1997. (in Chinese))

[2] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ94—2008 Pile foundation technical specification[S]. 2008. (in Chinese))

[3] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JGJ120—99 Pit retaining technical specification[S]. 1999. (in Chinese))

[4] 田 毅, 何 树, 杨国栋. 弹性抗力“ m ”法对单排灌注支护桩的设计应用[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(1): 68 - 70. (TIAN Yi, HE Shu, YANG Guo-dong. Application of elastic m -method in single line casting pit retaining pile structure[J]. Journal of Kunming Poly Technical University, 2000, 25(1): 68 - 70. (in Chinese))

[5] 赖鹏程. 弹性地基梁“ m ”法在深基坑支护结构中的应用[J]. 中国水运, 2006, 4(11): 61 - 63. (LAI Pen-cheng. Application of elastic grade beam m -method in pit retaining structure[J]. Journal of Chinese Marine Traffic, 2006, 4(11): 61 - 63. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)