



软土深基坑工程支护结构设计 m 值与弯矩反分析

陆勇¹, 卜良桃², 彭富强¹

(1. 湖南交通职业技术学院 岩土工程材料研究所, 湖南 长沙 410132;
2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:基于实际软土深基坑工程,依据施工各工况实测位移,分别采用单纯形法位移反分析对基坑支护结构设计参数 m 值和光顺样条法拟合对地下连续墙弯矩进行分析,并判定设计值和预测值之间的相互关系,为设计和施工提供一定的理论依据。根据单纯形法反演得到优化位移与实测位移基本接近,验证了反分析方法的可靠性,对设计参数 m 值可取其下限来控制基坑的最大变形。根据光顺样条法拟合求得曲率的基础上分别按弹性刚度和短期刚度进行弯矩估算,可得地下连续墙最大弯矩变化规律基本一致,且在基坑开挖初期,地下连续墙弯矩可以通过弹性刚度法估算墙体的弯矩承载力,随着基坑的开挖,地下连续墙弯矩实际更接近于规范短期刚度计算值。

关键词:软土深基坑;支护结构; m 值;弯矩;单纯形法;光顺样条法

中图分类号:TU91 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-7029(2015)05-1096-07

Back – analysis of m value and bending moment of supporting structure design parameters for deep excavation engineering in soft soil

LU Yong¹, PU Liangtao², PENG Fuqiang¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering Materials, Hunan Communication Polytechnic, Changsha 410132, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract:Based on the practical deep foundation pit engineering of softsoil and the measured displacement of construction condition, simplex method for displacement back analysis of foundation pit retaining structure design parameter m (supporting structure design parameter) was analyzed. The smoothing spline fitting method of underground continuous wall bending moment were also studied. The design value and the mutual relation ship between the predicted values were used to provide certain theoretical basis for the design and construction. According to the simplex method, the optimal displacement and the measured displacement are obtained, and that verifies the reliability of the inverse analysis method. Besides, the m value of the design parameters can be used to control the maximum deformation of the foundation pit. According to the smoothing spline fitting method which was used to obtain the curvature based respectively according to the elastic stiffness and short – term stiffness of bending moment estimation, underground continuous wall maximum bending moment changes are basically the same. In the early foundation pit excavation, the underground continuous wall bending moment can be used through the elastic stiffness method to estimate wall bending moment capacity. With the excavation of foundation pit, underground continuous wall bending moments is closer to the regulate short – term stiffness calculation value.

Key words:soft soil deep foundation pit; supporting structure; m value; bending moment; simplex method; smoothing spline fitting method

伴随着我国地下空间快速开发利用,软土基坑工程朝着规模大、大深度的方向发展。基坑工程开挖期间其承受外部作用、内力和变形随着施工工况呈现动态变化过程。因此,将常规的反演分析法与基坑施工过程相结合以便准确预测支护结构的受力状态^[1]。随着反演分析理论不断成熟,根据现场监测资料确定设计计算参数引起广泛的研究^[2-10]。目前,众多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, m 值和弯矩的确定成为其关键参数。本文结合软土地区上海市轨道交通车站基坑工程,在监测施工各工况实测变形位移的基础上,采用单纯形法对基坑支护结构设计参数 m 值及采用光顺样条法对地下连续墙承受弯矩进行研究,并同时判定设计值和预测值之间的相互关系,为合理地确定基坑支护结构设计参数 m 值及地下连续墙设计弯矩提供一定的理论参考依据。

1 工程概况

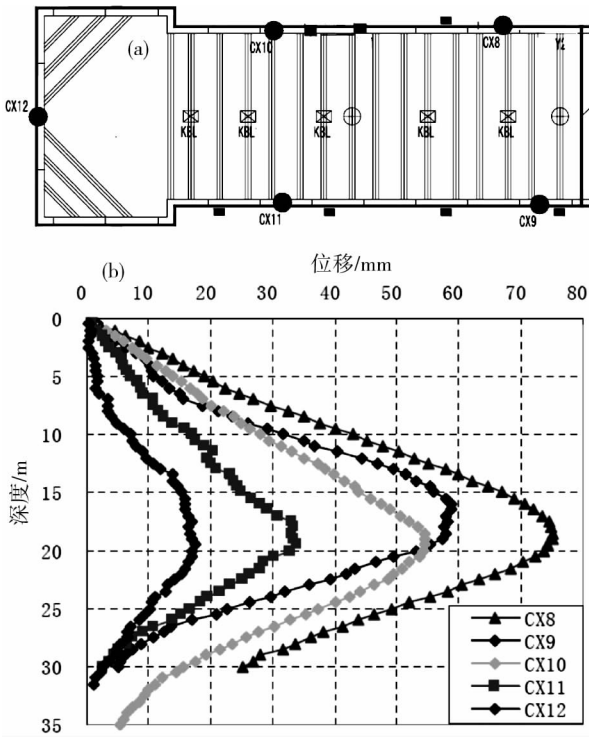
根据上海市轨道交通地下车站设计资料,拟建场地主要为白垩系和第四系地层,车站基坑拟采用明挖顺作法施工,开挖深度为 18.01 m,支护结构地下连续墙厚度为 800 mm,地下连续墙深度为 38.3 m。施工期间共设六道撑,21 个分步工况,钢筋混凝土支撑截面尺寸为 1 m×0.8 m,支撑间距为 9 m;钢支撑采用 Φ609,支撑间距为 3 m。

2 基坑支护结构设计 m 值反分析

以 m 法为围护结构的力学模型,利用位移反分析方法,输入实测位移值为基础,采用合适的目标函数来反推地基土水平抗力系数 m 值,并利用该值对变形进行预测。

2.1 基础监测数据

根据车站基坑监测资料,选取位于地下连续墙上的 CX8, CX9, CX10, CX11 和 CX12 共 5 个测斜孔,其平面布置如图 1(a) 所示,建立各个施工工况下的各测点的实测水平位移数据库。CX8 位于在基坑中部, CX12 位于端头井,测斜孔 CX8 位移最大,为 75.12 mm,最大位移深度位于地表以下 18.5 m,测斜孔 CX12 位移最小,如图 1(b) 所示。



(a) 各测斜孔的布置平面图;
(b) 各测斜孔水平位移与深度关系曲线

图1 各测斜孔分布和水平位移

Fig. 1 Distribution and horizontal displacement of the inclinometer holes

2.2 目标函数

以位移量测值输入为基础,构成合适的目标函数使实测位移与计算位移尽量一致,采用最优化技术来反推待求的土层参数即为位移反分析法^[11]。目标函数为:

$$f = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (u_{i(j)} - u_{i(j)}^*)^2 \tag{1}$$

式中: M 为工况数; N 为测点总数; $u_{i(j)}$ 为测点 i 在 j 工况的水平位移实测值,mm; $u_{i(j)}^*$ 为测点 i 在 j 工况的水平位移计算值,mm。

优化模型:

m 值受土层性质的影响,确定其变化区间即存在如下的约束条件:

$$\min f(m_1, m_2, \cdots, m_n) \tag{2}$$

式中: $m_i^{\min} \leq m_i \leq m_i^{\max}$, $i = 1, 2, \cdots, n$ 其中: m_i^{\min} 和 m_i^{\max} 为 m_i 的上、下限值。

2.3 确定 m 上下限值

统计该车站以及车站前后 2 个区间内所有勘察孔的固结快剪实验数据资料,选取确定⑤₃层以上所有土层的 c 和 φ 上下限值。结合 c 和 φ 值上下限值,根据基坑规范中 m 值计算公式^[12]:

$$m = (0.2\varphi^2 - \varphi + c)/d \tag{3}$$

式中： c 和 φ 取固结快剪峰值； d 为坑底位移估计量。

计算出 m 值上下限,坑底位移 d 为每个测斜孔在坑底位置的实测位移值。表 1 为各测斜孔 m 值上下限值。

表 1 车站地基土 m 上下限值
Table 1 M range of station soil (kN/m⁴)

土层	CX8		CX9		CX10		CX11		CX12	
	m_{\min}	m_{\max}	m_{\min}	m_{\max}	m_{\min}	m_{\max}	m_{\min}	m_{\max}	m_{\min}	m_{\max}
①2 黏土	420	980	450	1 060	670	1 570	890	2 090	1 780	4 180
①3 淤泥质黏土	270	790	290	850	430	1 260	570	1 680	1 140	3 360
②2-1 淤泥	220	480	240	520	350	770	470	1 030	940	2 060
②2-2 淤泥质黏	230	1 340	240	1 450	360	2 140	480	2 850	960	5 700
③2 粉质黏土夹粉砂	610	1 430	670	1 550	980	2 280	1310	3 040	2 620	6 080
④2 黏土	320	690	350	750	520	1 100	690	1 470	1 380	2 940
⑤1 粉质黏土	780	1 590	850	1 720	1 250	2 540	1670	3 390	3 340	6 780
⑤3 砂质黏土	2 130	2 560	2 310	2 780	3 410	4 100	4550	5 470	9 100	10 940

2.4 基坑支护结构设计 m 值反分析

2.4.1 m 值反分析基本步骤

1) 根据土层地质参数、各测斜孔实测位移值确定 m 的初值即最大值与最小值。

2) 根据 m 的初值,计算该工况下支护结构的水平位移和内力。

3) 根据计算的水平位移 $u_{i(j)}^*$ 和相应的实测的水平位移 $u_{i(j)}$,采用单纯形法按 2.2 节建立目标函数,根据单纯形法原理求目标函数的极小值逐次迭代改进 m 值,迭代终止对应的 m 值即为所求优值。

4) 根据 m 的优值,计算该工况下支护结构的水平位移和内力,并预测下一工况支护结构的工作特征。

2.4.2 m 值反分析结果

根据反分析计算结果,建立设计位移、实测位移、优化位移和预测位移的数据库,对 CX8 ~ CX12 5 个测孔的位移进行反分析。其中,优化位移为依据 m 的初值得到位移值。以 CX11 测斜孔为例,给出各工况反分析过程的设计位移、实测位移、优化位移和预测位移对比结果如图 2 ~ 图 7。

图 2 为测孔 CX11 施加第 1 道钢支撑即工况 4 时,图 3 为施加第 2 道钢支撑(工况 6)时的设计位移、实测位移和优化位移的对比结果。由图 2 和 3 可以看出:实测位移较小,最大位移在 10 mm 以内,设计位移与实测位移较接近,而优化位移偏大,此时浅部土层反演 m 值基本取上限值这是因为在使用公式 $m = (0.2\varphi^2 - \varphi + c)/d$ 确定此测斜孔 m

值上下限时,采用开挖到坑底时的坑底位移,但此时基坑开挖时间不长,开挖深度不大,实际坑底位移量远小于挖到坑底时的坑底位移量,导致在前期 m 值偏小。

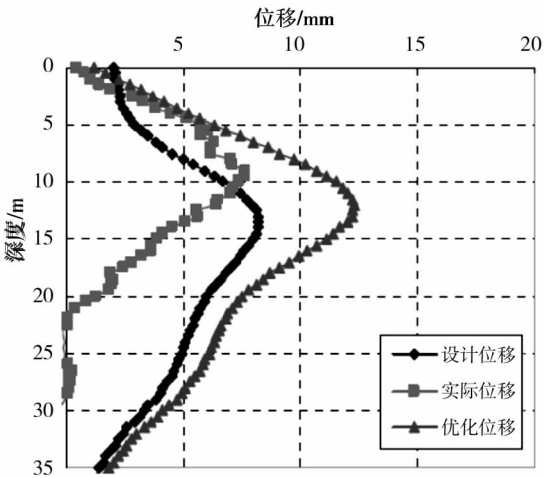


图 2 施加第 1 道钢支撑墙体位移曲线
Fig. 2 Wall displacement curves when applying the first steel supports

图 4 为 CX11 在施加第 4 道钢支撑即工况 10 的反分析结果。由图 4 可以看出:实测位移随着开挖深度的增加而逐渐加大,实测位移与优化位移曲线在 20 m 以上几乎重叠,最大位移分别为 17.3 mm 与 16.7 mm,都位于 16.5 m 深度处,说明此 m 值反演是非常准确。而设计位移小于实际位移,预测位移小于实测位移,说明在从上个工况到本工况过程中,土体 m 值变化较大,上个工况的 m 值不适用于本工况。

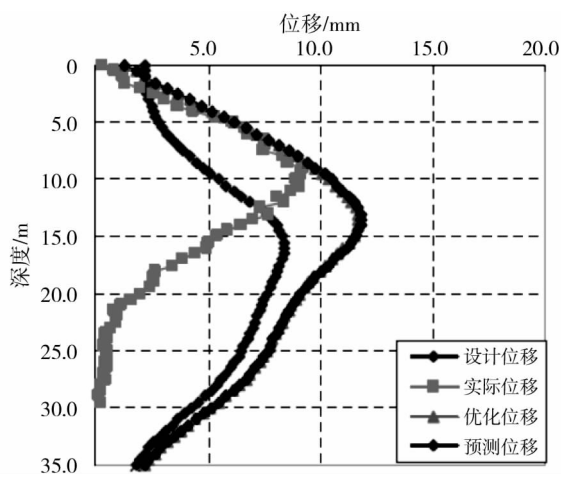


图3 施加第2道钢支撑墙体位移曲线
Fig.3 Wall displacement curves when applying the second steel supports

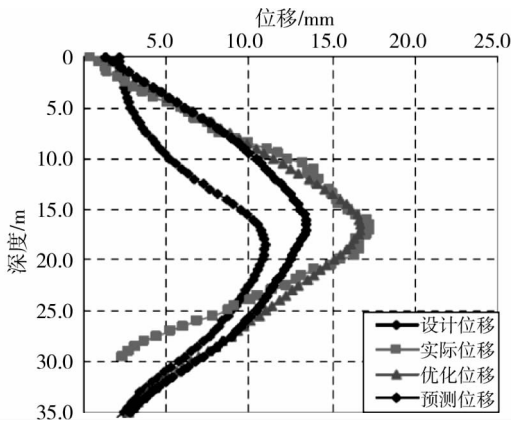


图4 施加第4道钢支撑墙体位移曲线
Fig.4 Wall displacement curves when applying the forth steel supports

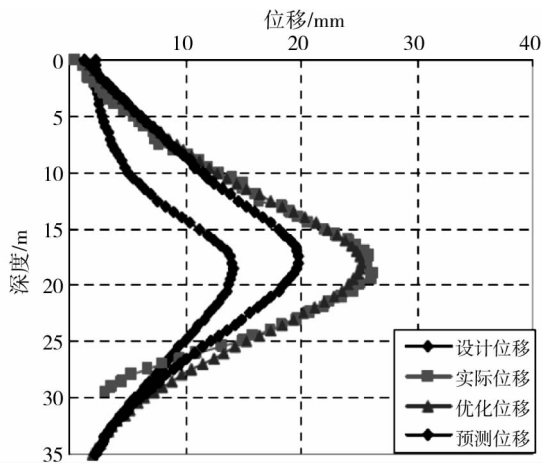


图5 挖到坑底墙体位移曲线
Fig.5 Wall displacement curves when excavating the pit bottom

图5为CX11在挖到坑底即工况11的反分析结果,实测位移随着开挖深度的增加而逐渐加大,实测位移与优化位移曲线在25 m以上几乎重叠,最大位移分别为26.1 mm与25.2 mm,都位于18.0 m深度处即开挖面以下1.5 m,说明此 m 值反演是非常成功的。而设计位移小于实际位移,预测位移小于实测位移,说明在从工况10到本工况11过程中,土体 m 值变化较大,上个工况的 m 值不适用于本工况。

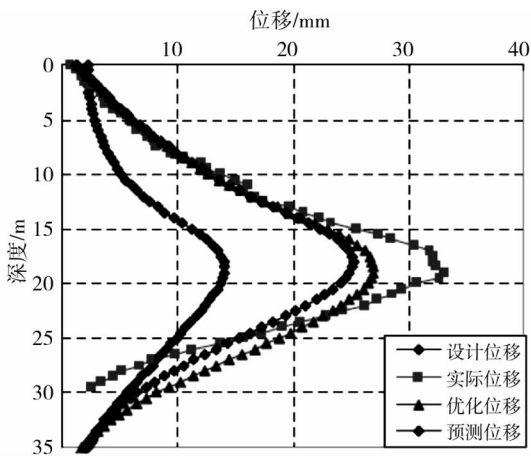


图6 底板浇筑完毕时墙体位移曲线
Fig.6 Wall displacement curves when bottom pouring

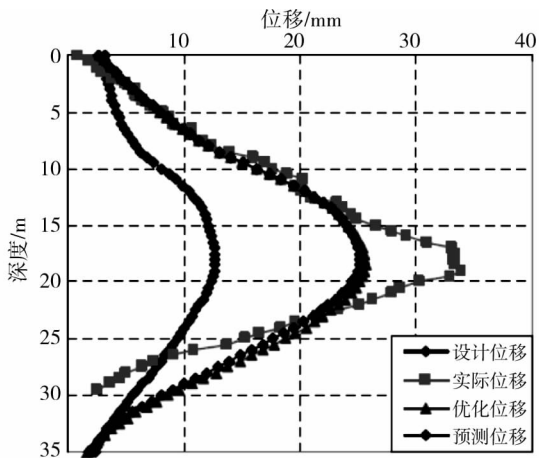


图7 全部施工结束时墙体位移曲线
Fig.7 Wall displacement curves at the end of all construction

图6为CX11测孔在底板浇筑完毕即工况12时的反分析结果,实测位移较工况11继续增大,最大位移32.7 mm,位于19.5 m深度处即开挖面以下3.0 m;优化位移最大位移27.0 mm,位于19 m深度处即开挖面以下2.5 m,优化位移与实测位移比较接近,表明反演出来的结果比较合理。而预测位移略小于优化位移,这表明利用工况11反演的参数 m ,用来预测工况12的位移是可行的。

图 7 为 CX11 测孔在加支撑,换支撑,拆支撑都已完成即工况 21 的反分析结果,此时位移已经稳定,较工况 12 略有增加。实测最大位移 33.9 mm,位于 19 m 深度处即开挖面以下 2.5 m;优化位移最大位移 25.7 mm,位于 18.5 m 深度处即开挖面以下 2 m,优化位移与实测位移比较接近,表明反演结果比较合理。而预测位位移与优化位移非常接近,这表明利用工况 12 反演参数 m 用来预测工况 21 的位移是可行的。

因此,采用单纯形法反演得到优化位移与实测位移基本接近,验证了反分析方法的可靠性。为控制变形,该软土深基坑支护结构设计参数 m 值应取下限来控制基坑的最大变形。

2.5 m 值对支护结构位移和弯矩的影响

取 6 组不同的 m 值,分别为 1 000,2 000,4 000,6 000,8 000 和 10 000,分析基坑开挖到底部时围护结构的位移及弯矩结果。

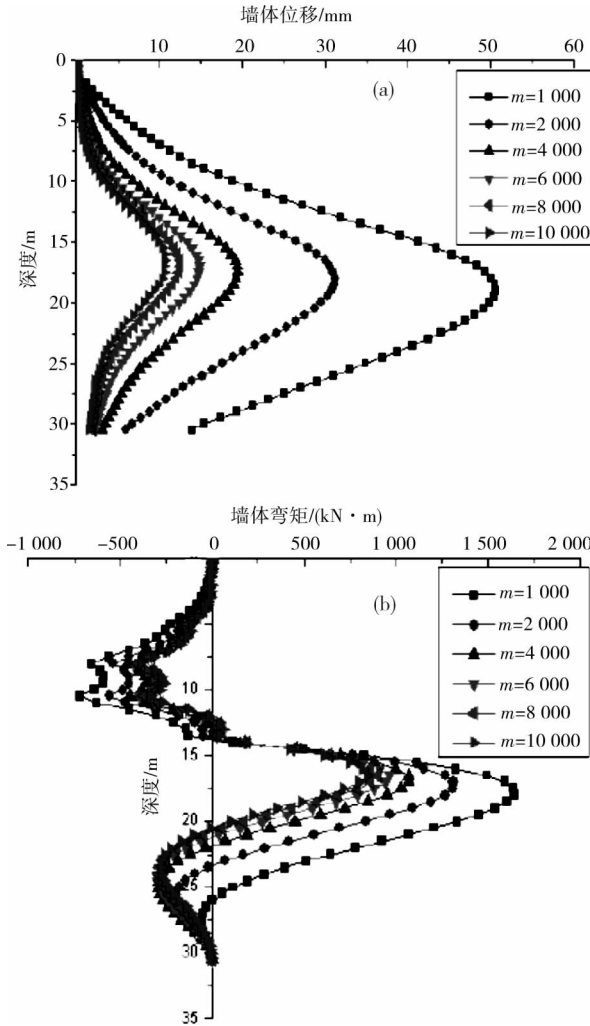
图 8(a)是考虑 m 分 6 种情况取值开挖到坑底时的围护结构侧移。由图可知:不同 m 值下墙体的位移形状一致,为纺锤形。不同 m 值条件下的围护结构最大位移深度相同。随着 m 值的增大,围护结构水平位移减小,并且减小趋势变缓。 m 值从 1 000 增大到 4 000,围护结构水平位移减小为原来的 2/5, m 值继续增大,围护结构水平位移变化很小。

图 8(b)是考虑 m 分别 6 种情况取值时,开挖到坑底时围护结构的弯矩结果。由图可知,开挖面上下墙体弯矩方向不同。随着 m 值增大,围护结构弯矩减小,并且减小趋势变缓,特别是 m 值从 1 000 增大到 4 000,围护结构弯矩减小为原来的 3/5。开挖面附近墙体弯矩与 m 值关系不大,随着 m 值的增大,开挖面墙体弯矩几乎不变。

综合可知:土层 m 在 4 000 左右时,基坑的变形和受力均处最优状态,因此,在基坑设计和施工时可以考虑对土体加固提高土层的 m 值。

3 基坑支护结构弯矩反分析

车站基坑支护结构体系采用地下连续墙,其在基坑开挖过程中承受水土压力、支撑反力和地面超载等共同作用。支护结构体系内力决定了结构自身的安全性与适用性,准确描述支护结构体系在施工过程中的实际受力状况,不仅可以对比其与设计值差值,为评定基坑安全等级提供重要参考,还可以根据支护结构实测弯矩进一步优化后续的设计^[1]。



(a)不同 m 值的支护结构水平位移;
(b)不同 m 值的支护结构弯矩

图 8 支护结构水平位移和弯矩

Fig. 8 Horizontal displacement and bending moment of supporting structure

3.1 测斜值曲线拟合反算弯矩

根据各测孔在各开挖工况下的侧向位移对地下连续墙的弯矩进行估算。在计算中先根据侧向位移进行光滑样条法^[13]拟合求得曲率 φ , 为了比较不同刚度计算方法对弯矩估算的影响,在拟合曲率的基础上分别按弹性刚度^[14]和短期刚度^[15]公式进行弯矩估算,不同刚度计算方法得到的弯矩估算结果如图 9(a)和 9(b)所示。

由图 9(a)和 9(b)中可知:采用弹性刚度和短期刚度 2 种估算方法得到的在开挖阶段各工况地下连续墙弯矩随深度变化的规律是基本一致的,即地下连续墙最大弯矩发生位置随着开挖深度逐渐下降,最大弯矩基本上都在开挖面附近 1 m 的范围之内。

3.2 弯矩估算结果与实测计算结果对比

基坑工程施工中对地下连续墙部分截面位置

预埋钢筋应力计,根据其监测数据计算所在截面位置处各个工况下的弯矩值,如图 10 所示。

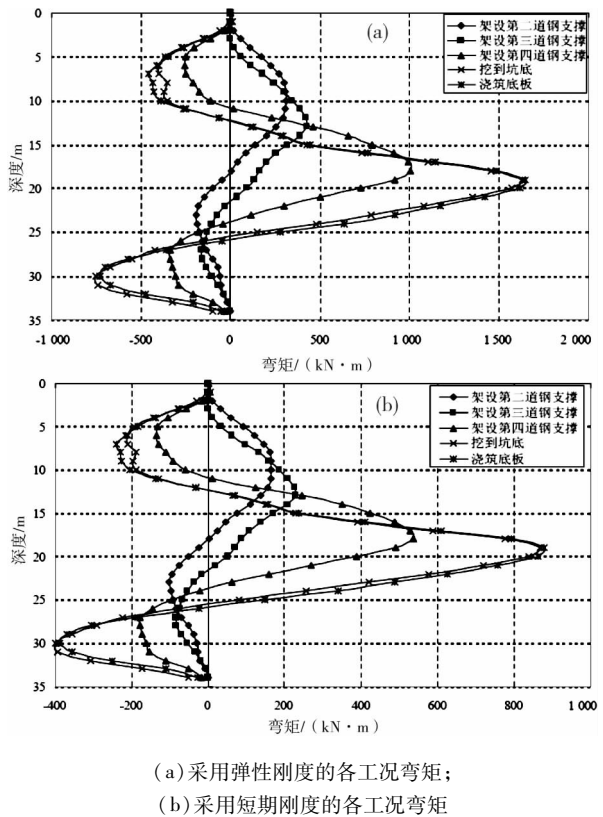


图 9 采用不同刚度的各工况弯矩

Fig. 9 Bending moments of different conditions with the different stiffness

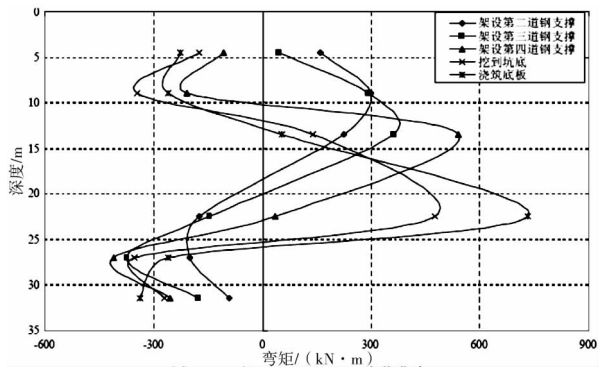


图 10 断面各工况下弯矩变化曲线

Fig. 10 Bending moment curves of different condition in section

由图 10 可知,实测散点曲线变化趋势与反分析曲线相同,并对各工况下实测曲线与反算弯矩曲线进行对比,如图 11(a)~11(c)所示。由图可以看出,在前 2 个工况(图 11(a)和 11(b))下墙体的实测弯矩与利用地下连续墙的测斜通过弹性刚度公式的弯矩估算方法计算结果较接近,这是由于此时墙体变形较小,墙体混凝土处于弹性工作状态。在底板浇筑工况(图 11(c))下墙体的实测弯矩与利用地

下连续墙的测斜通过规范短期刚度公式的弯矩估算方法计算结果较接近,这是由于此时墙体变形较大,墙体实际刚度与弹性刚度差别较大所致。

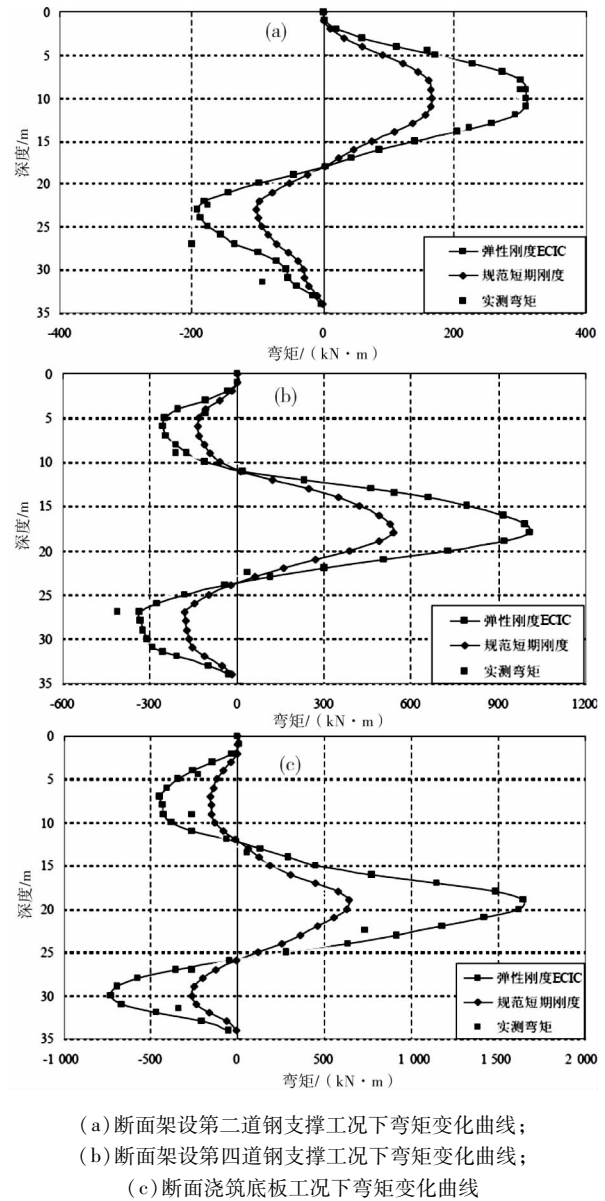


图 11 各工况下实测弯矩与反算弯矩对比

Fig. 11 Comparison of the measured moment and the inverse moment under different conditions

因此,在基坑开挖初期阶段,可采用弹性刚度法估算地下连续墙体的弯矩值,防止基坑支护结构受弯破坏情况的发生,并依据承载力分布状况制定预备补救措施避免基坑失稳破坏。

4 结论

1)该深基坑工程监测数据及反分析结果表明,采用单纯形法反演得到优化位移与实测位移基本接近,验证了反分析方法的可靠性,对设计参数 m 值可取其下限来控制基坑的最大变形。

2) 土层 m 值在 4 000 左右时, 基坑的变形和受力均处最优状态, 因此, 在基坑设计和施工时, 在保证施工造价、工期等基础上考虑提高土层的 m 值, 以保证其安全与稳定。

3) 根据光顺样条法拟合求得曲率的基础上分别按弹性刚度和短期刚度进行弯矩估算, 得地下连续墙最大弯矩变化规律基本一致, 发生位置随着开挖深度逐渐下降, 且最大弯矩基本上都在开挖面附近 1 m 的范围之内。

4) 在基坑开挖初期, 地下连续墙弯矩可以通过弹性刚度法估算墙体的弯矩承载力, 随着基坑的开挖, 地下连续墙弯矩变化更接近于规范短期刚度计算值。

参考文献:

- [1] 肖武权, 冷伍明. 深基坑支护结构设计的优化方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1201 - 1211.
XIAO Wuquan, LENG Wuming. Optimization methods of retaining structure in deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1201 - 1211.
- [2] 欧阳劲. 某基坑桩锚支护结构监测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(1): 87 - 91.
OU Yangjin. Monitoring and analysis of a deep foundation pit with pile - anchor retaining structure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(1): 87 - 91.
- [3] 王春波, 丁文其, 王军. 深基坑工程土层参数反分析方法探讨研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增2): 1638 - 1642.
WANG Chunbo, Ding Wenqi, WANG Jun. Discussion and research on back analysis method for deep foundation's soil parameters[J]. Chinese Journal of Undergroundspace and Engineering, 2011, 7(Sup2): 1638 - 1642.
- [4] 木林隆, 黄茂松, 吴世明. 基于反分析法的基坑开挖引起的土体位移分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 7(增): 60 - 64.
MU Linlong, HUANG Maosong, WU Shiming. Soil responses induced by excavations based on inverse analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 7(Sup): 60 - 64.
- [5] 王剑, 邓宗伟. 某超大直径断面顶管施工引起的地层位移分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(2): 95 - 100.
WANG Jian, DENG Zongwei. Analysis of ground surface settlement due to pipe jacking of super - large cross sections[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(2): 95 - 100.
- [6] 杨敏, 熊巨华, 冯又全. 基坑工程中的位移反分析技术与应用[J]. 工业建筑, 1998, 28(9): 1 - 6.

YANG Min, XIONG Juhua, FENG Youquan. Study on back - analysis for deep excavation[J]. Industrial Construction, 1998, 28(9): 1 - 6.

- [7] 燕彬, 黄义. 弹性支点法的 m 值反分析的研究[J]. 建筑结构, 2003, 33(11): 39 - 41.
YAN Shan, HUANG Yi. Study on the back analysis of m value in elastic fulcrum method[J]. Building Structure, 2003, 33(11): 39 - 41.
- [8] 戴加东. 基坑工程中地基土 m 值的反演及光纤技术研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2005.
DAI Jiadong. Study on back analysis of M - values of foundation soils and the application of optical fiber sensing in deep - exaction[D]. Nanjing: Nanjing university of Technology, 2005.
- [9] 许荣华. 基坑土体参数优化反分析及其变形预测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
XU Ronghua. Optimization back analysis of soil body parameters in foundation pit and deformation forecasting[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [10] 冯俊福. 杭州地区地基土 m 值的反演分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
FENG Junfu. Back analysis of M - value of foundation soils in Hangzhou[D]. Hangzhou: Hangzhou University, 2004.
- [11] 王旭东, 黄力平, 阮永平, 等. 基坑工程中地基土水平抗力比例系数 m 值的反分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1998, 15(2): 48 - 54.
WANG Xudong, HUANG Liping, Ruan Yongping, et al. Back - analyzing m value of subgrade reaction in excavation[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1998, 15(2): 48 - 54.
- [12] GB50202—2002, 建筑地基基础工程施工质量验收规范[S].
GB50202—2002, Acceptance of construction quality of building foundation[S].
- [13] 王震, 毛朝辉, 赵春风. 采用光顺样条反算基坑围护结构弯矩[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 434 - 438, 443.
WANG Zhen, MAO Zhaohui, ZHAO Chunfeng. The bending moment analysis of bracing structure of foundation pit with smoothing spline[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(3): 434 - 438, 443.
- [14] 夏明耀, 曾进伦. 地下工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
XIA Mingyao, ZENG Jinlun. Underground engineering design and construction manual[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999.
- [15] GB50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
GB50010—2002, Design of concrete structures[S].

(编辑 阳丽霞)