

渗流作用对多支点地下连续墙嵌固深度的影响分析

武俊东^{1,2}, 丁文其^{1,2}, 刘文军³

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 无锡市轨道交通发展公司, 江苏 无锡 214013)

摘要: 在软土地区采用地下连续墙作为基坑围护结构的基坑工程设计中, 合理嵌固深度的地下连续墙对控制支护体系造价及保证基坑工程安全具有重要的意义。在软土高地下水位的东部沿海地区, 基坑降水开挖过程中渗流作用对基坑变形及内力的影响已不可忽视, 国家规范对多层支撑地下连续墙嵌固深度的相关条文已越来越不适应目前的设计要求。针对此, 探讨了渗流作用对软土地区多层支撑围护结构合理嵌固深度的影响, 并提出了确定围护结构嵌固深度的建议控制指标, 同时结合施工监测结果, 在基坑开挖变形及内力分析中是否应考虑渗流作用方面得到了较好的结论。

关键词: 软土地区; 渗流作用; 多层支撑地下连续墙; 嵌固深度

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0054-06

作者简介: 武俊东(1987-), 男, 同济大学地下建筑与工程系硕士研究生, 主要从事基坑工程方面的研究。E-mail: wujd060701@126.com。

Influence of seepage flows on embedded depth of multi-pivot diaphragm walls

WU Jun-dong^{1,2}, DING Wen-qi^{1,2}, LIU Wen-jun³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Wuxi Rail Transit Development Co., Ltd., Wuxi 214013, China)

Abstract: In the eastern coastal area of China, the effect of seepage flows caused by dewatering and excavation on the pit deformation and stress cannot be ignored. The relevant terms of national norms for the embedded depth of multi-pivot supporting system have become increasingly unsuitable to the current design requirements. Aiming at this problem, the determination method for the embedded depth of multi-pivot supporting system considering the effect of seepage flows in soft soil area is discussed. The proposed controlling index to determine the embedded depth is put forward. Combined with the monitoring results, a conclusion on whether to consider the effect of seepage flows in the excavation deformation and stress analysis is drawn.

Key words: soft soil area; effect of seepage flow; multi-pivot diaphragm wall; embedded depth

0 引言

在以地下连续墙作为围护结构的基坑工程中, 地下连续墙造价在整个支护体系总造价中占有相当大的比重(70%~80%), 合理确定地下连续墙的嵌固深度对基坑工程的经济性具有重要的意义^[5]。

在饱和软黏土中开挖基坑, 由于地下水位高, 在围护结构周围流线和等势线很集中, 因此很容易发生由于渗流作用引起的基坑底部失稳破坏, 因而在确定围护结构最小嵌固深度时需要考虑渗流作用对基坑安全的影响。围护结构嵌固深度的大小, 关系到基坑工程安全和工程造价, 应当慎重选择, 它不但要满足基坑和墙体的稳定和强度要求, 还应满足渗透稳定要求^[3]。

1 规范中嵌固深度相关条文分析

目前基坑支护设计采用文献[1], 同时各地在实践中总结出了适合当地条件和特点的技术规范和规程, 如文献[3]。

根据《建筑基坑支护技术规程》, 在深基坑工程设计中, 多支撑地下连续墙嵌固深度应满足:

(1) 嵌固深度计算值应采用圆弧滑动简单条分法确定^[1](图1), 应满足

$$\sum c_{ik} + \sum (q_0 b_i + \omega_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{ik} -$$

基金项目: 无锡轨道交通一号线土建科研(GD01KYHT0901)和铁道部科技研究开发计划(2007G045-C)联合资助

收稿日期: 2012-08-23

$$\gamma_k \sum (q_0 b_i + \omega_i) \sin \theta_i \geq 0 \quad (1)$$

即任一土条的稳定力矩 M_r 均大于等于其滑动力矩 M_s , 当嵌固深度计算值小于 $0.2h$ 时取 $0.2h$ 。

(2) 当基坑底为碎石土及砂土、基坑内排水且作用有渗透水压力时, 嵌固深度尚应满足抗渗透稳定条件

$$h_d \geq 1.2\gamma_0(h - h_w) \quad (2)$$

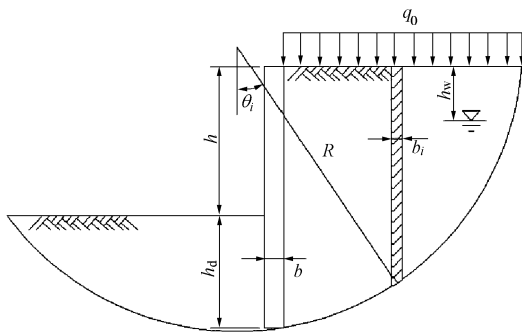


图1 圆弧滑动分析法计算简图

Fig. 1 Computational model of circular sliding analysis method

JGJ120—99 形成年代较早, 对于当时大规模的工程建设起到了较好的指导和规范作用。但随着近年来城市高层建筑和轨道交通的大规模兴建, 基坑工程不论在深度、规模还是复杂程度都越来越大, 特别是沿海地区, 由于地下水位较高, 深基坑降水引起的渗流作用对基坑变形与内力的影响已不可忽视, 而原规程只适用于浅层地下水和单一透水地层的基坑。

上海市《基坑工程技术规范》(DG/TJ08—61—2010) 对于多层支撑板式支护体系嵌固深度尚未有明确条文, 嵌固深度确定满足围护结构稳定性验算要求。在实践中, 对多层支撑地下连续墙嵌固深度确定主要通过经验来确定。在上海地区, 通常取基坑开挖深度的 $0.6 \sim 1.2$ 倍, 随开挖深度的增加, 插入比减小。

2 渗流作用下地下连续墙合理嵌固深度探讨

目前的深基坑围护结构设计中, 通常确定嵌固深度的方法是, 根据施工场地的水文地质条件并结合当地设计经验, 选定一个经验嵌固深度, 按照满足规范的安全系数对围护结构受力、变形及基坑稳定性进行验算。如不能满足验算要求, 则适当调整嵌固深度重新验算, 直至满足各项验算要求, 即为最终选用嵌固深度。

鉴于软土地区渗流作用对基坑的变形和稳定性有不可忽视的影响, 本节试图建立考虑渗流作用时围护结构嵌固深度的确定方法。考虑渗流作用对围护结构

变形及基坑稳定性的影响确定围护结构嵌固深度的思路如下:

(1) 初步确定最小嵌固深度

根据基坑稳定性验算的要求, 分别对抗渗流稳定性、基坑整体稳定性、坑底抗隆起稳定性、基坑抗倾覆稳定性进行验算, 确定满足所有验算要求的围护结构最小嵌固深度。

(2) 嵌固深度优化

根据(1)确定的最小嵌固深度, 在考虑渗流作用的情况下对基坑变形及稳定性进行数值分析, 根据基坑的实际情况, 以围护结构水平位移、基坑坑底回弹变形、周围地表沉降作为优化控制指标, 对围护结构嵌固深度进行调整, 确定最终围护结构嵌固深度。

3 嵌固深度确定过程实例分析

以无锡市民广场地铁车站基坑 CX-12 断面为例, 对其合理嵌固深度进行分析。CX-12 断面开挖深度 17.15 m 、开挖宽度 20.7 m , 采用有限差分软件 FLAC, 模型尺寸为 $141.6 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。围护结构采用 0.8 m 厚地下连续墙, 内设四道支撑, 第一道支撑为钢筋混凝土内支撑 (断面为 $0.8 \text{ m} \times 1 \text{ m}$), 其余三道均为 $\phi 609 \times 16 \text{ mm}$ 钢支撑 (其中第三道钢支撑为两道 $\phi 609 \times 16 \text{ mm}$ 钢管组成); 地下水位于 -1.500 m 处; 基坑分五步开挖, 开挖层厚依次为 $2, 5.5, 3.5, 3.5, 2.5 \text{ m}$; 断面土层及参数取值见表 1, 表 1 中土体强度指标 c 、 φ 采用固结快剪试验结果, 均为总应力指标。

3.1 初步确定最小嵌固深度

对基坑抗渗流稳定性、基坑整体稳定性、坑底抗隆起稳定性、基坑抗倾覆稳定性进行验算, 确定满足所有验算要求的围护结构最小嵌固深度。考虑到无锡地区土体条件比上海地区好, 在整体稳定性验算、坑底抗隆起稳定性验算、抗倾覆稳定性验算中, 安全系数按照无锡经验均折减为上海地区规范的 0.8 倍。

抗渗流稳定性验算: 根据上海市基坑工程技术规范 (DG/TJ08—61—2010) 中条文 6.6.1 及市民广场的土层地质条件, 抗渗流稳定性验算所得最小嵌固深度为 $d \geq 7.5 \text{ m}$ 。

利用同济大学地下建筑与工程系开发的启明星岩土工程软件, 结合无锡地区土质条件, 按照水土合算计算水土压力, 分别计算满足基坑稳定性要求的最小嵌固深度如下: 整体稳定性验算, $K > 1.06$, 最小嵌固深度 11 m ; 坑底抗隆起稳定性验算, $K > 2$, 最小嵌固深度 14 m ; 抗倾覆稳定性验算, $K > 1.1$, 最小嵌固深度 10 m 。

表 1 无锡市民广场 CX-12 断面土层参数表

Table 1 Soil parameters of section CX-12 of Civic Square, Wuxi

土层名称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	E/MPa	泊松比	c/kPa	φ	k _v /(cm·s ⁻¹)	k _h /(cm·s ⁻¹)	孔隙率
③ ₁	6	19.8	21.36	0.32	72.79	12.19	4.53×10 ⁻⁶	5.68×10 ⁻⁶	0.43
③ ₂₋₁	3	19.2	15.75	0.33	17.98	15.22	2.08×10 ⁻⁴	1.97×10 ⁻³	0.46
③ ₃₋₁	2	19.1	14.82	0.33	29.35	11.33	2.03×10 ⁻³	2.57×10 ⁻³	0.47
③ ₃	4	19.0	18.09	0.29	18.02	15.70	2.00×10 ⁻³	2.02×10 ⁻³	0.46
⑥ ₁₋₁	4	19.8	33.70	0.30	65.59	11.98	3.59×10 ⁻⁶	4.11×10 ⁻⁶	0.43
⑥ ₁	5	19.9	39.2	0.29	70.10	12.94	2.56×10 ⁻⁶	3.01×10 ⁻⁶	0.42
⑥ ₂	4	19.6	32.15	0.31	62.45	10.15	4.64×10 ⁻⁵	4.87×10 ⁻⁵	0.44
⑥ ₃₋₁	1	19.2	29.15	0.30	43.87	10.04	9.47×10 ⁻⁵	8.75×10 ⁻⁴	0.46
⑥ ₃	12	19.2	32.9	0.30	11.99	15.68	3.62×10 ⁻⁴	3.62×10 ⁻⁶	0.45
⑧ ₁	9	19.3	33.55	0.32	64.03	10.83	2.41×10 ⁻⁶	5.62×10 ⁻⁶	0.43

综上得CX-12断面初步设计最小嵌固深度为14 m。

3.2 嵌固深度有限元影响分析

采用有限差分软件 FLAC 进行模拟。相比其他岩土工程有限元分析软件，FLAC 提供了丰富的流体边界条件，包括流体压力、涌入量、渗漏量、渗流量、不可渗透边界、抽水井、点源、体积源等，可以真正实现流固耦合计算，同时可以考虑由时间因素引起的降排水效果，可以更好地考虑降水引起渗流作用对基坑与地层变形及其对周围环境的影响。

渗流作用对基坑变形及稳定性影响的原理是，土体中的孔隙水流以渗流体积力的形式对土体产生作用，引起地层应力场和位移场的改变，而地层位移的分布反过来影响土体孔隙的变化，进而改变渗流场的分布。在最小嵌固深度 14 m 的基础上，分别对嵌固深度为 12，13，14，15，16，17，18 m 等 7 种情况进行了 FLAC 软件数值模拟分析。

数值模拟中，地下水埋深为-1.5 m，模型左右边界不透水，基坑每次开挖前，坑内水位降至目标开挖面下 1.0 m。

图 2 为坑底回弹随嵌固深度的变化曲线，随着嵌固深度的增加，坑底回弹值减小并趋于稳定（40 mm 附近），嵌固深度小于 15 m 时，增加嵌固深度对坑底回弹量控制效果明显，而嵌固深度大于 15 m 后，增加嵌固深度对坑底回弹值控制效果甚微。

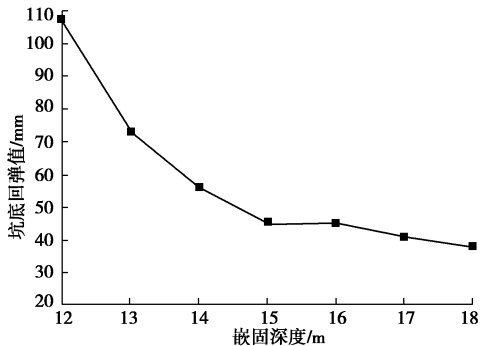


图 2 坑底最大回弹值随嵌固深度变化曲线

Fig. 2 Variation of maximum value of bottom heave with embedded depth

图 3 为地连墙水平侧移随嵌固深度的变化曲线，随着嵌固深度的增加，地连墙水平侧移趋于稳定（21~22 mm 之间），这意味着在保证基底不隆起失稳条件下，或者说嵌固深度满足最小值要求的条件下（≥14 m），继续增加围护结构嵌固深度对控制围护结构水平位移的效果甚微。Broms 教授对新加坡软弱的海相成因的黏土地层中某深挖基坑工程用有限元法分析后也得到相同的结论；Peck 教授对软弱和中等强度黏土层中深挖基坑钢板桩入土深度得出的结论同样如此。

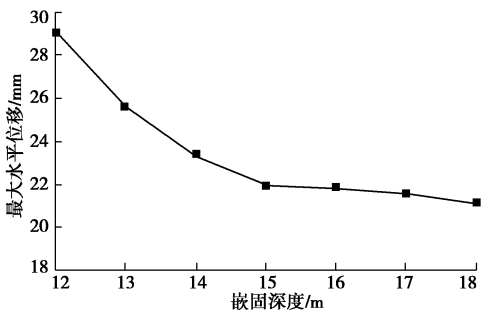


图 3 水平最大侧移值随嵌固深度变化曲线

Fig. 3 Variation of maximum lateral displacement with embedded depth

图 4 为第一道钢筋混凝土支撑轴力随嵌固深度的变化曲线，随着嵌固深度的增加支撑轴力一直增加，一般钢筋混凝土支撑设计轴力值远大于其实际轴力水平，不会发生由于嵌固深度不够引起的支撑轴力超过设计值而发生受力破坏，而只会出现由于围护结构嵌固深度不足引起基坑的稳定性破坏。

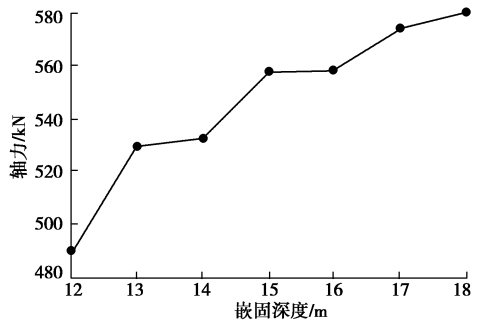


图 4 第一道钢筋混凝土支撑轴力随嵌固深度变化曲线

Fig. 4 Variation of axial forces of first strut with embedded depth

图 5 为最大钢支撑轴力随嵌固深度的变化曲线, 随着嵌固深度的增加最大钢支撑轴力一直增加, 同样地, 一般钢支撑设计轴力值远大于其实际轴力水平, 不会发生由于嵌固深度不够引起的钢支撑轴力超过设计值而发生受力破坏。

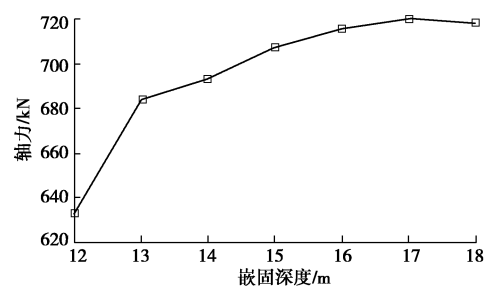


图 5 钢支撑最大轴力随嵌固深度变化曲线

Fig. 5 Variation of maximum axial forces of steel-strut with embedded depth

3.3 基坑渗流场分析

图 6, 7 为考虑渗流作用时, 基坑降水开挖并经过渗流作用后地层孔隙水压力分布以及渗流场分布图。降水引起的基坑渗流主要发生在距围护结构约 30 m 的范围内, 30 m 范围之外孔隙水压力变化趋于平缓, 渗流速度也减小到可以忽略的程度。渗流区域纵向主要集中在坑底以下 11~24 m 之间, 其对应土层为渗透系数较大的⑥3-1、⑥3 粉土层; 地下连续墙底部渗流速度最大。

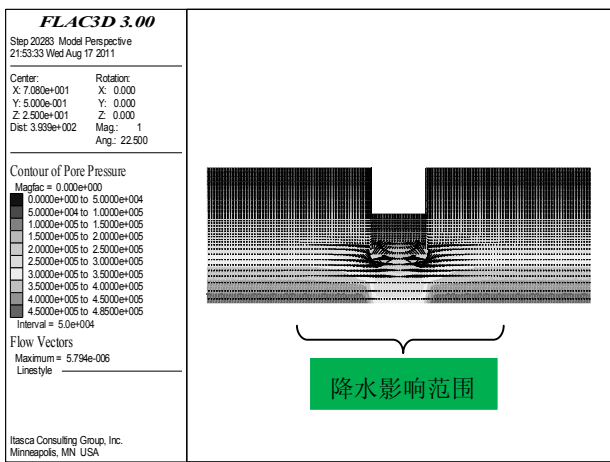


图 6 降水后孔隙水压力分布及基坑渗流场典型分布 (Pa)

Fig. 6 Distribution of pore pressure and seepage field after precipitation

图 8 为嵌固深度为 15 m 时各开挖阶段最大渗流速度变化曲线, 在第二开挖步渗流速度达到最大值, 这是由于第二开挖步土层开挖厚度 5.5 m, 降水水头变化也最大; 随着渗流时间的增加, 最大渗流速度逐渐减小并趋于稳定。

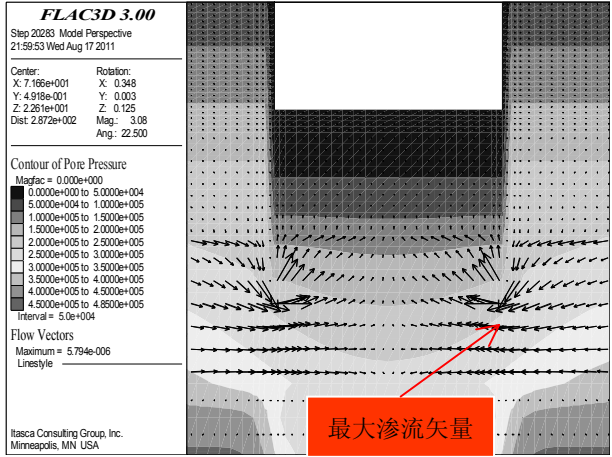


图 7 降水后孔隙水压力分布及基坑渗流场典型分布放大图

Fig. 7 Enlarged image of Fig. 6

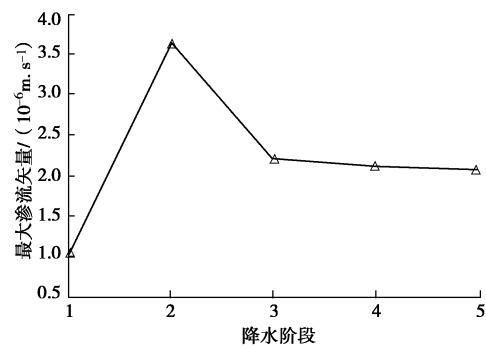


图 8 各开挖阶段最大渗流速度变化曲线

Fig. 8 Maximum flow speed at different excavation stages

图 9 为最大渗流速度随嵌固深度变化曲线, 可以发现最大渗流速度随嵌固深度变化很小, 由于地连墙底部正好位于⑥3 粉土层 (层厚 12 m) 顶部, 12~18 m 的嵌固深度均未贯穿该土层, 因而对最大渗流速度影响很小。

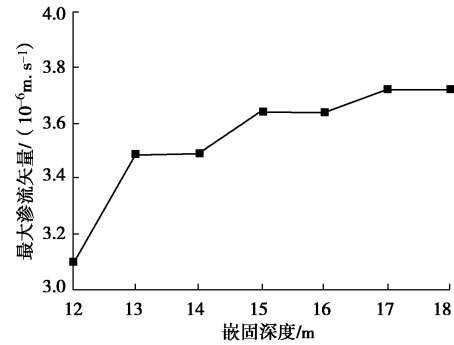


图 9 最大渗流速度随嵌固深度变化曲线

Fig. 9 Variation of maximum flow speed with embedded depth

3.4 最终嵌固深度确定

嵌固深度的最终确定要综合考虑包括基坑稳定性验算、围护结构水平侧移控制、土层开挖坑底回弹值控制以及造价等多方面的因素。

(1) 坑底回弹

根据软土地区经验,以开挖深度的 0.3%~0.4% 作为坑底回弹值的报警值^[2](相应报警值 51~68 mm)。根据图 1: 嵌固深度为 15 m 时满足坑底回弹值的控制要求; 当嵌固深度 ≤ 15 m 时, 增加嵌固深度对坑底回弹量的控制效果明显; 当嵌固深度 ≥ 15 m 时, 增加嵌固深度对坑底回弹量影响很小。

(2) 围护结构水平位移

根据软土地区经验,以开挖深度的 0.15%~0.18% 作为围护结构水平位移的报警值^[2](相应报警值 25.5~30.6 mm)。根据图 2: 嵌固深度取 14 m 即可满足水平位移控制要求; 当嵌固深度 ≤ 15 m 时, 增加嵌固深度对围护结构水平位移的控制效果较明显; 当嵌固深度 ≥ 15 m 时, 增加嵌固深度对围护结构水平位移影响很小。

(3) 支撑内力

无论钢支撑还是钢筋混凝土支撑, 根据 FLAC 分析结果, 其内力均远小于支撑轴力设计值的 80%, 其对嵌固深度确定不具有参考意义。

(4) 最大渗流速度

根据图 8: 不同嵌固深度对最大渗流速度的影响微小; 最大渗流速度与场地水文地质条件关系密切, 而非围护结构嵌固深度。

综合以上分析, 在满足基坑稳定性验算初步确定最小嵌固深度的基础上, 通过不同嵌固深度的基坑内力变形分析, 以基坑变形为控制指标(坑底回弹、围护结构水平位移), 围护结构嵌固深度设计中最终确定为 15 m。

4 数值模拟与监测结果对比分析

为了分析渗流作用对围护结构变形的影响以及验证上述围护结构嵌固深度确定方法的正确性, 结合 CX-12 断面监测数据(实际设计中采用 15 m 的嵌固深度), 对数值模拟结果与监测结果进行了对比分析。

如图 10 所示, 三条曲线分别为①不考虑渗流作用时地连墙侧移的数值计算曲线, ②考虑渗流作用时地连墙侧移的数值计算曲线, ③地连墙侧移的监测结果曲线。可以发现考虑渗流作用数值分析结果更接近监测结果。监测地连墙最大侧移值为 20.53 mm, 最大位移位置发生在开挖深度约 12.5 m 处, 而据考虑渗流作用时的数值模拟水平侧移曲线, 地连墙最大侧移值为 21.96 mm, 与监测结果相差 7%, 最大位移位置发生在开挖深度约 13 m 处, 同样与监测结果非常接近。而不考虑渗流作用时的数值分析结果明显小于监测结果, 各深度处侧移值都小于监测结果, 地连墙最大侧移值仅为 13.40 mm, 比监测最大侧移值小约 35%, 这

说明在 FLAC 有限差分模拟中, 不可忽视地下水渗流作用对围护结构变形的影响。

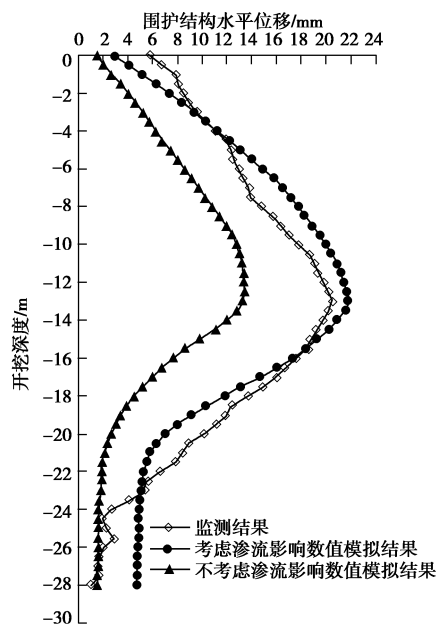


图 10 开挖至坑底时地下连续墙水平位移计算值与监测值对比
Fig. 10 Comparison between calculated and monitored lateral displacements after excavation to pit bottom

图 11 为三种情况下各开挖阶段地连墙最大侧移值对比曲线。第 2 开挖步最大水平位移相差较大, 可能是由于数值模拟过程与实际开挖过程不一致造成, 数值模拟中第 2 开挖步层厚达 5.5 m, 因而水平位移变化较大。而不考虑渗流作用数值模拟结果比监测结果小, 随着开挖深度的加大, 数值模拟结果与监测结果的偏差越来越大。

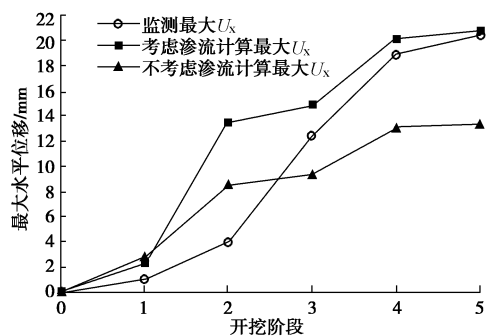


图 11 各开挖步围护结构最大水平位移对比

Fig. 11 Comparison between calculated and monitored lateral displacements at different excavation stages

图 12 为最大钢支撑轴力计算与监测结果对比曲线, 监测最大钢支撑轴力在 497.12 kN 与 974.61 kN 之间波动, 考虑渗流作用计算轴力为 707.7 kN, 均远小于设计值 3200 kN, 处于安全的范围内。不考虑渗流作用计算轴力为 381.3 kN, 小于监测轴力的最小值, 与监测轴力偏差较大。

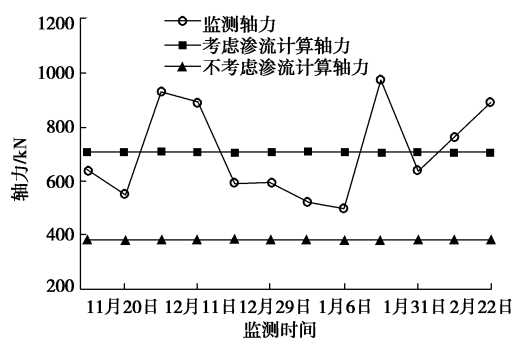


图 12 最大钢支撑轴力对比

Fig. 12 Comparison between calculated and monitored maximum axial forces of steel-strut

5 结 论

(1)分析了现行规范中对多层支撑地下连续墙嵌固深度确定方法不足, 现行规范通过满足基坑稳定性要求并结合地区设计经验确定多层支撑地连墙的嵌固深度, 未能考虑软土高地下水地区降水开挖过程中渗流作用对嵌固深度选择的影响。

(2)提出了考虑渗流影响的多层支撑地连墙嵌固深度确定方法, 即在满足基坑稳定性验算要求的初步最小嵌固深度的基础上, 利用数值软件, 考虑渗流作用影响的条件下对围护结构嵌固深度进行调整, 确定最终围护结构嵌固深度。

(3)根据数值计算对多层支撑地连墙嵌固深度的优化分析结果, 提出了确定围护结构嵌固深度的建议变形控制指标, 即坑底回弹量与围护结构水平位移值, 存在某一合理围护结构嵌固深度, 当嵌固深度值小于该值时嵌固深度变化对坑底回弹与围护结构水平位移影响明显, 反之则影响微小。

(4)根据数值分析结果与监测结果的对比分析, 在基坑变形分析中, 不可忽视渗流作用的影响, 因而在多层支撑地连墙嵌固深度确定时, 需要考虑渗流作用的影响。

参考文献:

[1] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation

excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))

[2] GB 50497—2009 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. (GB 50497—2009 Technical code for monitoring of building excavation engineering[S]. Beijing, 2009. (in Chinese))

[3] DG/TJ 08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2010. (DG/TJ 08—61—2010. Technical code for excavation engineering[S]. Shanghai, 2010. (in Chinese))

[4] 章杨松, 陈新民. 多支撑挡墙边坡稳定性的强度参数折减有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1952 - 1957. (ZHANG Yang-song, CHEN Xin-min. Finite element analysis for slope stability with multi-braced retaining wall through reduction of strength parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1952 - 1957. (in Chinese))

[5] 李玉歧. 考虑渗流影响的基坑工程性状研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2005. (LI Yu-qi. Studies on the behavior of foundation pit with excavation considering seepage[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))

[6] 农兴中, 王 睿. 软土地区围护结构嵌固深度研究[J]. 都市轨道交通, 2011, 24(3): 74 - 78. (NONG Xing-zhong, WANG Rui. Study on the embedded depths of retaining structures in soft soils[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(3): 74 - 78. (in Chinese))

[7] 傅志峰, 吴晓云, 刘 芳, 等. 支护结构嵌固深度的计算分析[J]. 土工基础, 2011, 25(2): 72 - 75. (FU Zhi-feng, WU Xiao-yun, LIU Fang, et al. Embedded depth calculation of retaining structure[J]. Soil Eng and Foundation, 2011, 25(2): 72 - 75. (in Chinese))

[8] 周汉香, 莫海鸿. 悬臂支护结构嵌固深度的可靠性优化分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2000, 28(7): 109 - 115. (ZHOU Han-xiang, MO Hai-hong. Analysis of reliability of optimal embedment of cantilever supporting structure[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2000, 28(7): 109 - 115. (in Chinese))

(本文责编 明经平)