

地铁车站地下连续墙裂缝控制标准的优化探讨

吴小将¹, 刘国彬¹, 卢礼顺², 李志高¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海磁悬浮交通发展有限公司, 上海 201204)

摘要: 通过对上海软土地区的几个地铁车站深基坑工程的地下连续墙的弯矩和钢筋应力进行跟踪分析, 得到了这些基坑地下连续墙所受弯矩的包络图, 并与地下连续墙能承受的弯矩极值进行对比, 得到深基坑工程地下连续墙的弯矩承载能力还有一定的发挥余地。分析了导致设计中地下连续墙配筋偏大的原因主要是由于最大裂缝宽度 $w_{lim}=0.2\text{ mm}$ 引起的, 若将地下连续墙的最大裂缝宽度放宽至 $w_{lim}=0.3\text{ mm}$, 则在可以满足深基坑工程地下连续墙的弯矩承载能力的同时, 也可大大地降低地下连续墙的配筋, 减少工程投资, 达到充分利用建设资金的目的。

关键词: 地下工程; 深基坑; 地下连续墙; 承载力; 最大裂缝宽度

中图分类号: TU 28

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5395 - 05

DISCUSSION ON OPTIMIZATION OF ALLOWABLE CRACK WIDTH FOR DIAPHRAGM WALL OF METRO STATION

WU Xiao-jiang¹, LIU Guo-bin¹, LU Li-shun², LI Zhi-gao¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Maglev Transportation Development Co., Ltd., Shanghai 201204, China)

Abstract: In the soft region, the optimisation design of diaphragm wall is very important to decrease total investment of whole project. From the survey results of some metro excavations in Shanghai, the designs of diaphragm wall are conservative: both the stress of reinforcing steel and the moment of wall are less than those of the design value. These conservative designs must waste a large amount of fund and urge engineers find ways to solve this contradiction. Through the theory of diaphragm wall design analysed, the allowable width of structure crack $w_{lim}=0.2\text{ mm}$ is confirmed to be the most important factor which caused the negative design. According to the national codes, the ratio of M_s and M_u should be between 0.73 and 0.89. When the criterion of $w_{lim}=0.2\text{ mm}$ was adopted in the design of metro excavation, the ratio value of M_s and M_u of the diaphragm wall was normally less than 0.6. Compared with the $w_{lim}=0.2\text{ mm}$, this paper points out when the allowable width of structure crack broaden to $w_{lim}=0.3\text{ mm}$, the design will be more reasonable. By calculating and comparing, a conclusion can be drawn that when the allowable width of structure crack broaden to $w_{lim}=0.3\text{ mm}$, not only can the complex wall which is composed by diaphragm wall and lining can meet the reduced demand of structure crack under the natural conditions, but also the safety of the excavation can be guaranteed and project investment will be reduced.

Key words: underground engineering; deep foundation pit; diaphragm wall; capacity; allowable crack width

1 引言

随着高层建筑和城市轨道交通的快速发展, 深

基坑甚至超深基坑数量激增。作为钢筋混凝土的地下连续墙, 由于其刚度大, 不但能够承受作用于墙面上的侧压力、具有挡水防渗功能, 而且可以兼作高层建筑地下室或地下地铁车站的一部分, 在软土

收稿日期: 2005 - 06 - 26; **修回日期:** 2005 - 07 - 28

作者简介: 吴小将(1978 -), 男, 2003 年于西安建筑科技大学岩土工程系获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事软土深基坑设计与施工方面的研究工作。E-mail: wwwxjj2003@163.com。

地区深基坑工程中得到了大量的应用。

从目前国内外对地下连续墙的设计研究成果来看,研究大多集中在挡土结构的水土压力取值以及挡土结构内力计算模型2个方面。当前,在软土地区,考虑地下水对土压力的影响时,是采用水土压力分算还是水土压力合算比较符合实际情况,在岩土工程界认识还不一致。另外在土压力计算过程中,强度指标的选择(是采用固结不排水指标(CU)还是不固结不排水指标(UU))也未达成共识^[1~4]。相比较水土压力计算而言,在挡土结构内力计算方法方面研究比较成熟,大多是在古典方法(如平衡法、弹性曲线法、等值梁法、塑性铰法等)、解析方法(山肩邦男法、弹性法、弹塑性法等)和有限元法(杆系有限元法和连续介质有限元法)基础上进行完善^[5,6]。但是从目前的研究应用成果来看,实际工程中地下连续墙的内力与设计计算的结果差别还是很大。如在上海软土地区,大量的地铁车站地下连续墙的钢筋内力监测结果表明:地下连续墙内的钢筋应力没有得到充分发挥,通常都在钢筋设计应力的60%以下,由此可以认为按照目前的设计理论方法设计的地下连续墙偏于保守。由此笔者结合地下连续墙的内力调查结果,分析了地下连续墙内力未得到充分发挥的原因,并对其中一个重要影响因素——最大裂缝控制标准展开了讨论,探讨裂缝控制标准的改变对地下连续墙设计的影响,并分析了裂缝控制标准放宽以后所能取得的经济效益。

2 地下连续墙内力测试结果

地下连续墙内力指的是墙内钢筋应力和墙体弯矩。若在深基坑施工时对墙体中的钢筋应力进行监测,则钢筋应力可以直接从监测结果得到,墙体弯矩可以通过钢筋应力推算。若在施工时未对钢筋应力进行监测,则可以根据梁的弯矩与变形之间的数学关系,通过地下连续墙的侧向变形曲线(测斜)反算出地下连续墙墙体弯矩,间接得到地下连续墙的内力。

笔者曾对上海轨道交通几个车站的地下连续墙的内力进行了测试,其中对2个车站的地下连续墙的钢筋应力进行了直接监测,而其他车站的地下连续墙内力则是通过测斜反算间接得到。

A 车站开挖深度约 25 m, 基坑保护等级为一级,

车站基坑围护结构采用 1 000 mm 厚的地下连续墙,地下连续墙深度为 40 m,采用 C30, S8 混凝土,纵向垂直主筋采用 II 级热轧钢筋,钢筋强度的设计值为 310 MPa,在墙体-5~-35 m 深度范围内,每隔 2.5 m 分别在开挖面和迎土面纵向主筋上埋设了钢筋应力计进行监测,另对外本工程在基坑开挖过程中在钢筋应力监测点附近墙体的侧向变形进行了跟踪监测。

通过对该车站地下连续墙钢筋应力监测,发现在整个地下车站施工过程中,钢筋应力最大值为 53.93 MPa,远小于钢筋的强度设计值 310 MPa,只为强度设计值的 17%。通过实测的钢筋应力推算的地下连续墙墙体弯矩与地下连续墙设计极限承载弯矩以及测斜反算墙体弯矩进行对比(如图 1 所示),可以发现:通过测斜反算的弯矩要稍大于实测弯矩(如图 1 中散点所示),但 2 种方法计算的弯矩都远小于墙体所能承受的极限能力,实际弯矩发挥一般不超过设计值的 60% (-32.5 m 处测斜反算最小弯矩除外)。

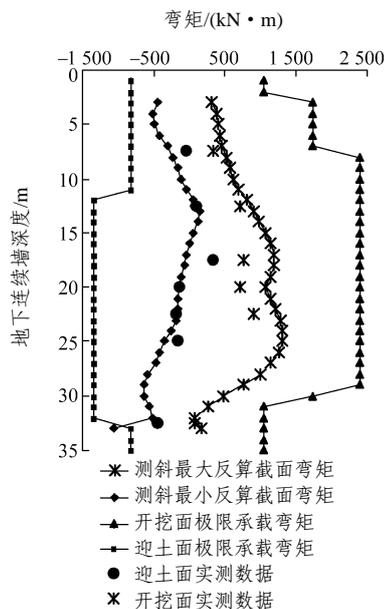


图 1 A 车站基坑地下连续墙弯矩发挥对比

Fig.1 Comparison between tested bent moment and limited capacity of A excavation

B 车站基坑地下连续墙的埋深 28 m, 开挖深度 15.5 m, 地下连续墙厚度为 800 mm, 采用 C30, S8 混凝土,纵向垂直主筋采用 II 级热轧钢筋,钢筋强度设计值为 310 MPa,在墙体-3~-27 m 深度范围内,每隔 3 m 分别在开挖面和迎土面纵向主筋上埋设了钢筋应力计进行监测,监测结果如图 2 所示。

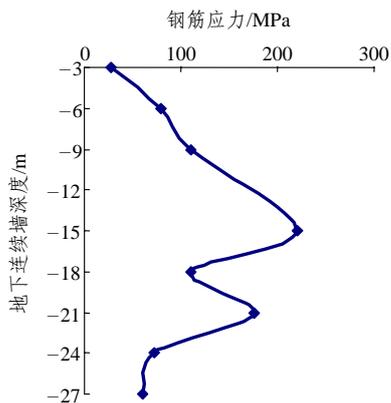


图2 B 车站基坑地下连续墙钢筋应力监测结果
Fig.2 Measured result of reinforce stress in B excavation

C 车站基坑地下连续墙的埋深为 25 m，开挖深度为 13.2 m，地下连续墙厚度为 800 mm，采用采用 C30，S8 混凝土，纵向垂直主筋采用 II 级热轧钢筋，钢筋强度设计值为 310 MPa。通过基坑开挖期间对地下连续墙测斜监测结果反算了地下连续墙在基坑开挖过程中的弯矩包络图(如图 3 所示)。

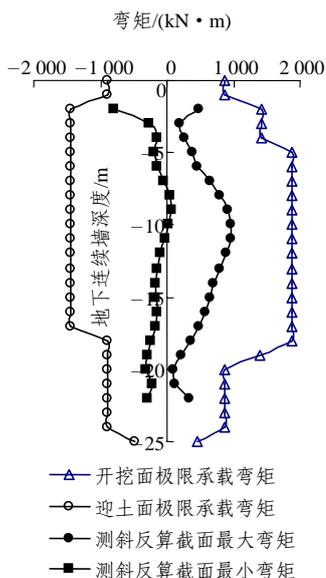


图3 C 车站基坑地下连续墙弯矩发挥对比
Fig.3 Comparison between tested moment and limited capacity of C excavation

从图 1~3 中可以发现，按照现有地下连续墙设计理论进行设计，在基坑开挖过程中墙内的钢筋应力和弯矩承载能力都还有一定的发挥余地。

3 关于地下连续墙设计裂缝控制标准的讨论

3.1 地下连续墙配筋设计控制因素

钢筋混凝土构件一般都按照构件的使用极限状态来设计，按照功能的不同，将极限状态分为 2 种：承载能力的极限状态和正常使用的极限状态。

按照以上设计原则，地下连续墙的设计首先要按照文[7]推荐的弹性支点法或者杆系有限元方法计算截面弯矩 M_s 和剪力 V_s ，再按照承载能力的极限状态确定地下连续墙弯矩 M_u 和剪力 V_u 的设计值，计算公式^[7~9]为

$$M_u = 1.25\gamma_0 M_s \tag{1}$$

$$V_u = 1.25\gamma_0 V_s \tag{2}$$

式中： γ_0 为重要性系数，一般按照文[8]取为 0.9，1.0 或 1.1。

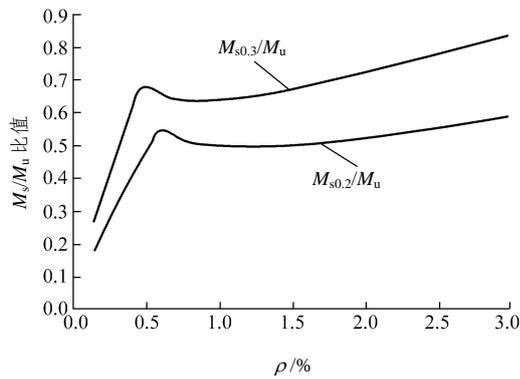
虽然作用在挡土结构上的水土压力理论还不很成熟，但是经过诸多实际工程的正反分析实测对比，水土压力取值的诸多参数皆可按照经验选取，因此计算的截面弯矩 M_s 和理论计算的差值一般在工程允许的误差以内。而通过诸多工程实测地下连续墙内力分析来看，笔者认为墙内的钢筋应力没有充分发挥是由于混凝土结构设计中最大允许裂缝宽度控制标准引起的。

文[8]要求构件在承受短期荷载效应作用下能够满足裂缝控制要求。按照文[8]规定，地铁车站兼作主体结构一部分的地下连续墙的裂缝控制等级为三级，即最大裂缝宽度限制为 $w_{lim} = 0.2 \text{ mm}$ 。

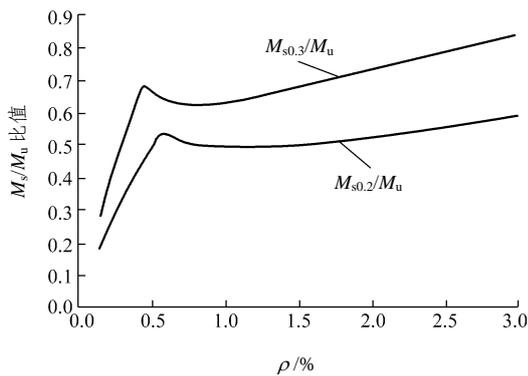
按照式(1)，地下连续墙 M_s/M_u 的比值应该为 0.73~0.89，但是在地下连续墙设计中，由于墙体所受弯矩较大，地下连续墙的 2 种极限状态中，按照裂缝控制来设计占支配地位，如图 4 所示。通过图中可以发现，对于厚度为 600~1 000 mm 的地下连续墙，在配筋率 ρ 为 0%~3.0%， M_s/M_u 都小于 0.6，均小于 0.73(注： $M_{s0.2}$ 表示按照 $w_{lim} = 0.2 \text{ mm}$ 地下连续墙在正常使用极限状态下允许最大的弯矩， $M_{s0.3}$ 类似)。

3.2 裂缝控制标准的调整与讨论

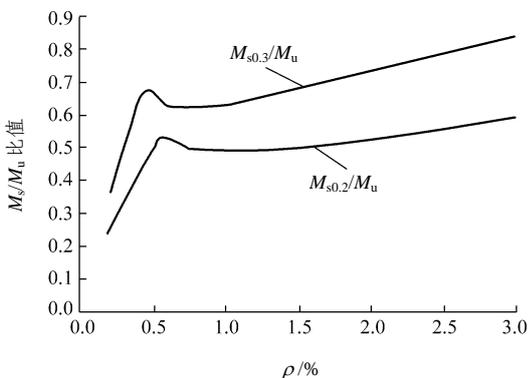
地下连续墙作为深基坑围护结构，一般均为临时性结构，但是作为地铁车站深基坑来说，它还是车站主体结构的一部分。在车站主体结构施工时，要在地下连续墙的开挖面一侧加上一层钢筋混凝土内衬，按照上海地铁车站设计经验，该内衬厚度通常为 400 mm，因此，在车站建成以后，抵抗墙后



(a) 截面尺寸 1 000 mm × 600 mm, $d = 30$ mm, $c = 50$ mm



(b) 截面尺寸 1 000 mm × 800 mm, $d = 30$ mm, $c = 50$ mm



(c) 截面尺寸 1 000 mm × 1 000 mm, $d = 30$ mm, $c = 50$ mm

图 4 ρ - M_s/M_u 对应关系

Fig.4 Relationship of ρ and M_s/M_u

土压力的将是地下连续墙与内衬组成的重叠墙。另外根据地铁车站施工监测结果来看,地下连续墙的侧向变形在基坑底板完工后已趋于稳定,由此可知,在车站主体结构完工后,地下连续墙和内衬组成的重叠墙所抵抗的弯矩可以看成不变,而墙体的抗弯刚度 EI 将有很大提高:对于 600 mm 厚的地下连续墙, EI 将提高 363%; 1 000 mm 厚的地下连续墙 EI 提高 174%。由此可知,车站建成后由原有地下连续墙和内衬组成的重叠墙抗裂性能将大大提高,原来基坑开挖阶段产生的裂缝宽度大大减小,这种情

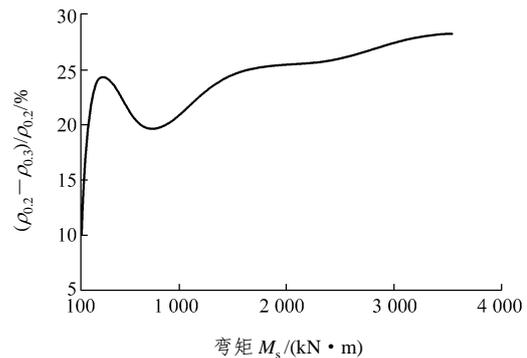
况下地下连续墙的仍按最大裂缝宽度 $w_{lim} = 0.2$ mm 进行设计必将带来很大的浪费。为此笔者参照了国外部分国家规范^[10],如美国混凝土学会 224 委员会对处于潮湿空气中或土壤中的最大裂缝宽度允许值为 0.3 mm,建议对于在地铁车站深基坑工程的地下连续墙设计中,将地下连续墙的最大允许裂缝宽度放宽至 $w_{lim} = 0.3$ mm。

4 经济效益分析

4.1 经济效益比较

地下连续墙设计的构造要求要求其主钢筋的间距应在 3 倍钢筋直径以上。这样,对于开挖面单排配筋的地下连续墙,600 mm 厚的地下连续墙最大配筋率 $\rho_{max} = 2.1\%$; 800 mm 厚的 $\rho_{max} = 1.6\%$; 1 000 mm 厚的为 $\rho_{max} = 1.25\%$ 。因此,当地下连续墙的最大裂缝允许宽度放宽至 $w_{lim} = 0.3$ mm 以后,设计中起控制因素的还是按照正常使用极限状态进行设计,这可从图 4 中看出。

当地下连续墙的允许裂缝宽度放宽以后,地下墙的配筋率将会由明显的降低,如对于厚度为 1 000 mm 的地下墙而言,纵向钢筋为 II 级热轧钢筋,直径 $d = 30$ mm,保护层厚度 $c = 50$ mm,混凝土强度等级选用为 C30 时,采用 $w_{lim} = 0.3$ mm 标准控制裂缝设计比按 $w_{lim} = 0.2$ 设计可最低节约钢筋 15% 以上,如图 5 所示。



截面尺寸 1 000 mm × 600 mm, $d = 30$ mm, $c = 50$ mm

图 5 $(\rho_{0.2} - \rho_{0.3})/\rho_{0.2}$ - M_s 关系

Fig.5 Relation of $(\rho_{0.2} - \rho_{0.3})/\rho_{0.2}$ and M_s

另外,当地下连续墙的允许裂缝宽度控制标准由 $w_{lim} = 0.2$ mm 放宽至 $w_{lim} = 0.3$ mm 以后,其配筋量减小,同时可使地下连续墙厚度变薄,这样地下连续墙的设计可更进一步优化。

4.2 应用举例

上海轨道交通某地铁车站主体结构基坑开挖深度为 15.7 m, 原方案按照裂缝控制标准 $w_{lim} = 0.2$ mm 设计, 车站边墙为 800 mm 厚地下连续墙+400 mm 厚内衬, 当把钢筋混凝土结构构件的裂缝宽度标准放宽至 $w_{lim} = 0.3$ mm 后, 优化调整后的车站边墙为 600 mm 厚地下连续墙+400 mm 厚内衬, 这样仅地下连续墙施工一项就节约: 成槽挖方 200.16 万元; 连续墙混凝土 148.51 万元; 钢筋 54.98 万元, 合计 403.65 万元。

5 结 语

由以上分析可得到以下结论: 在软土地区地铁车站深基坑工程地下连续墙设计中, 在现有设计理论下若将钢筋混凝土结构构件的允许最大裂缝宽度指标由原来的 $w_{lim} = 0.2$ mm 放宽至 $w_{lim} = 0.3$ mm 后, 则在能确保基坑施工期间安全以及车站建成后地下连续墙作为主体结构正常使用的前提下, 优化地下连续墙的配筋和截面尺寸, 从而大量节约建设成本, 能够取得良好的经济效益和社会效益。

参考文献(References):

- [1] 王 钊, 邹维列, 李广信. 挡土结构上土压力和水压力[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 146 - 150.(Wang Zhao, Zou Weilie, Li Guangxin. Earth pressure and water pressure on retaining structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 146 - 150.(in Chinese))
- [2] 张其光, 李广信, 温庆博. 应力路径和强度指标对基坑支护结构上土压力计算的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增 1): 952 - 957.(Zhang Qiguang, Li Guangxin, Wen Qingbo. Effect of stress path and strength parameters on estimating earth pressure and water pressure on the supporting structure around a foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.1): 952 - 957.(in Chinese))
- [3] 陈愈炯, 温彦锋. 基坑支护结构上的水土压力[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 139 - 143.(Chen Yujiong, Wen Yanfeng. Water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 139 - 143.(in Chinese))
- [4] 杨晓军, 龚晓南. 基坑开挖中考虑水压力的土压力计算[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 58 - 62.(Yang Xiaojun, Gong Xiaonan. Calculation of earth pressure on excavation considering pore water pressure[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 1997, 30(4): 58 - 62.(in Chinese))
- [5] 杨 敏, 艾智勇, 冯又全. 考虑空间作用对地下连续墙弹性支点法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 440 - 445.(Yang Min, Ai Zhiyong, Feng Youquan. Research on diaphragm wall's spatial effect by finite-element method of beam on elastic subgrade[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(4): 440 - 445.(in Chinese))
- [6] 张永谋, 郭志勇, 伍永平. 对地下连续墙弹性支点法的改进[J]. 西安矿业学院学报, 1998, 18(3): 222 - 225.(Zhang Yongmou, Guo Zhiyong, Wu Yongping. Research on diaphragm wall's contact frictional effect by finite-element method of beam on elastic subgrade[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1998, 18(3): 222 - 225.(in Chinese))
- [7] 中华人民共和国行业标准编写组. 建筑基坑支护技术规程(JGJ120 - 99)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations(JGJ120 - 99)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组. 混凝土结构设计规范(GB50010 - 2002)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The National Standard Compilation Group of People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures(GB50010 - 2002)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [9] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(Wang Tiemeng. Control of Cracking in Engineering Structure[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [10] 丁云生, 武有根. 大型地铁车站地下连续墙结构的优化[J]. 建筑施工, 2003, 25(6): 462 - 463.(Ding Yunsheng, Wu Yougen. Structural optimization of slurry wall for large subway station[J]. Building Construction, 2003, 25(6): 462 - 463.(in Chinese))