

楼板变形对地下大空间外墙结构设计的影响分析

柏炯^{1,2}, 迟恒

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2.上海城市空间建筑设计有限公司, 上海市 200092]

摘要:在地下空间结构中,外墙设计是否合理直接影响工程造价及结构安全。在构建整体模型中,通常假定地下大空间楼板为平面内无限刚。但对于楼板存在边跨开洞、不连续、板墙刚度比较小等情况,外墙与楼板连接处仍采用铰接则不符合板墙实际受力。在实际工程中,当楼板平面内刚度相比外墙抗弯度较小时,深埋地下结构外墙的跨中弯曲变形及支撑薄板平面内变形较大,会引起外墙内力的重分布,若不考虑则会引起较大的计算误差。因此在板墙计算分析时,结构外墙的边界条件实际为刚度变化的弹簧支座,在设计上应依据有限元计算结果采用相应的加固措施。基于日照综合客运站北广场地下空间建筑工程对地下室外墙进行有限元计算,提出深埋大空间结构外墙结构设计优化方案。

关键词:地下大空间结构;楼板平面内刚度;外墙内力重分布;结构设计

中图分类号: TU354

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)03-0246-04

0 引言

随着国内城市轨道交通工程的高速发展,越来越多大型多功能地下结构应运而生,诸如综合客运站、地铁双线或多线换乘车站与之相连的地下空间一体化开发。而其设计方法及理论多沿用地面结构设计规范,使得对地下特殊结构形式的重要构件存在设计误差^[1]。

在工程设计中,通常将地下大空间结构近似转化为框架-剪力墙结构体系并根据周围地质岩土情况施加围压荷载及边界约束,并假定楼板为平面内无限刚度,即使楼板平面内各点统一位移,无平面内及平面外变形。虽然此方法极大简化了计算模型,提高了设计效率。但实践证明对于深埋地下大空间结构不宜采取此假设,需要还原楼板真实平面内外刚度。尤其对于局部抗侧力构件与楼板平面内刚度比过大,如楼板开洞,板墙厚度比、整体结构的长宽比较大及抗侧力构件间距较大等情况下,若不考虑楼板变形,即按照刚性楼板计算,计算配筋误差较大。因此,本文基于日照综合客运站北广场地下空间建筑工程项目对地下室外墙进行计算分析,探讨地下空间外墙结构内力随板墙刚度比变化的分布规律及楼板变形对结构协同作用的影响^[2]。

1 计算模型的建立

1.1 通用地下室外墙设计方法

在构造上地下结构外墙底部将与刚度较大的基础底板或基础梁相连,且底板普遍外伸,即底部两侧的刚度之和远大于墙体刚度,故外墙底边界设定为嵌固。若地下结构外墙未延伸至地面以上时,外墙与地下结构顶板相接,顶板刚度略小于墙刚度,故外墙顶边界可设定为铰接。而外墙与中间层楼板相连存在一定的约束效应,即实际边界情况类似于半刚性支座。但设计上通常认为相比外墙强刚度其约束力可忽略,仅考虑水平向位移约束,即近似于将板墙边界按水平铰接考虑^[3]。

当地下结构中无横墙布置或横墙间距大于本层高的2倍时,左右支座约束作用很小可忽略,地下室外墙可按“上铰下固”板或连续梁计算,见图1。

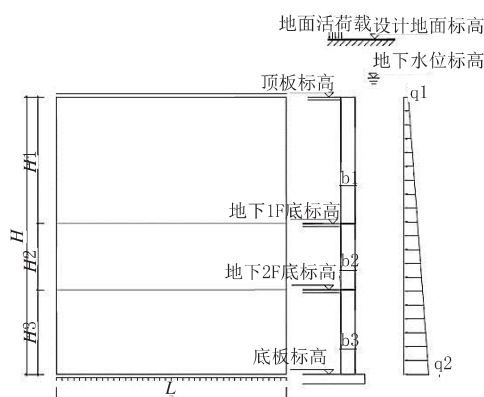


图1 地下空间结构外墙计算模型

收稿日期: 2021-06-01

作者简介: 柏炯(1973—),男,硕士,高级工程师,从事城市交通与地下空间设计工作。

内力计算时,地下室外墙壁板依据两个方向跨度比值可分为双向受力($0.5 \leq L_y/L_x \leq 1$)和单向受力($L_y/L_x < 0.5$)两种情况。双向受力时,外墙壁板在三角形荷载和均布荷载作用下的计算公式详见《建筑结构静力计算手册》,考虑到钢筋混凝土板的各向异性,则其弯矩计算公式为^[4]:

$$M_x = M_x^0 + \mu_c M_y^0 \quad (1)$$

$$M_y = M_y^0 + \mu_c M_x^0 \quad (2)$$

式中: M_x^0 、 M_y^0 为初始内力计算得到墙的水平及竖向跨中弯矩值; μ_c 为泊松比,取0.2。

其中本工程外墙多为单向受力,其在水土梯形荷载作用下的墙弯矩计算公式为:支座弯矩为式(3);跨中最大弯矩为式(4)。

其中最大弯矩作用点位于 $x=0.4274l_0$ 处($q_2 > q_1$)。

$$M = -(7q_1 + 8q_2)l_0^2/120 \quad (3)$$

$$M_{\max} = (0.0394q_1 + 0.0298q_2)l_0^2 \quad (4)$$

式中: q_1 、 q_2 分别为外墙顶板、底板位置的侧向压力^[4]。

1.2 地下室外墙有限元计算方法

依据《全国民用建筑工程设计技术措施》中楼(屋)盖结构设计与构造标准,当楼板在自身平面内相对挠度小于或等于 $1/12\,000$ 时,可认为楼板在其自身平面内为刚性板,则可依据上述计算模型及公式进行内力分析。而对于深埋地下结构在承担较大的侧向水土压力时,楼板刚度有限,结构协同作用及平面内整体性能介于柔性楼板和刚性楼板之间,可称为半刚性楼板,且靠近外墙的边跨区的低层楼板不仅存在平面外弯曲变形且存在平面内压缩及剪切变形,须用弹性板构建板墙模型计算其内力。

为分析真实工况下地下结构中楼板内力及变形位移分布,得到各项内力值的精确解,本文采用有限元法将连续介质离散化为有限单元组合体进行分析,表达式如下。其中,总刚度矩阵由各单元刚度组成。

$$[K]\{\alpha\} = \{P\} \quad (5)$$

式中: $[K]$ 为总结点位移矩阵; $\{\alpha\}$ 为总结点力矩阵; $\{P\}$ 为总刚度矩阵。

在计算实际工程中,使用Midas、Robot软件中四节点壳单元模拟外墙及楼板,还原平面内外真实刚度,并结合两节点梁单元模拟钢筋混凝土的框架梁柱。与SATWE计算模型对比,可知采用弹性楼板计算相比刚性楼板时结构的侧向刚度偏小、结构偏柔、自振周期增大;楼板变形使结构的侧移和层间位移角比刚性楼板大。其改进的计算简图,见图2。中板对

侧墙的平面支撑由铰接该为弹簧支座,弹性系数需要通过加载试验迭代计算获得。考虑到整体变形协调,外墙在支座位置处的弯曲位移与楼板压弯变形数值接近^[5]。

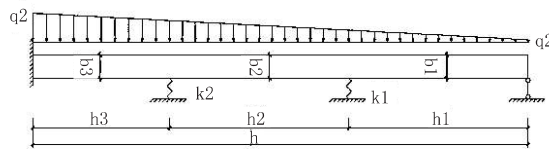


图2 地下结构外墙弹性楼板计算简图

2 工程概况

本文基于日照综合客运站北广场地下空间建筑工程讨论楼板刚度对地下大空间外墙配筋设计的影响。该工程站前广场主体结构为地下三层,埋深约17 m。平面宽度约199 m,平面长度约445 m(最长位置)。采用十字梁板楼盖方案,典型柱网尺寸为8.4 m×8.4 m。地下一层层高5.5 m,地下二层层高5.5 m,地下三层层高4.2 m,顶板板厚250 mm,B1、B2层板厚150 mm。地下室顶板覆土厚2.5 m左右。设定地下水位标高为设计地面标高。本工程主要结构构件混凝土强度等级为C35,受力钢筋主要采用HRB400级。采用Midas Gen构建整个工程计算模型^[6],见图3。

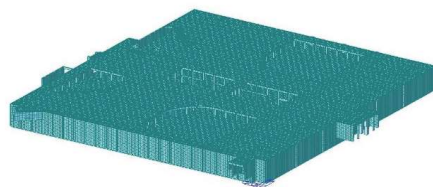


图3 日照北广场客运站整体模型

3 设计分析

在地下室外墙设计时,一般仅考虑水平围压作用下结构受力情况。按连续梁计算外墙竖向弯矩,见图4;由Midas整体建模计算侧向水土压力标准组合下地下结构外墙弯矩,见图5。

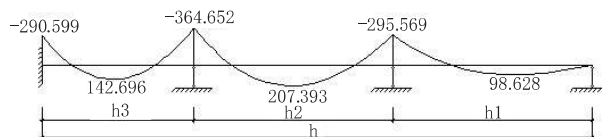


图4 采用连续梁计算外墙竖向弯矩图

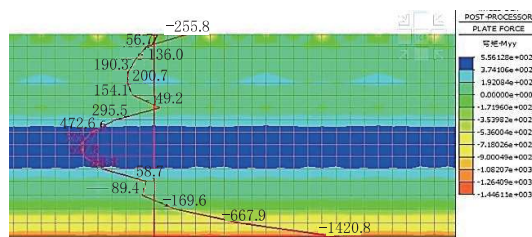


图5 采用Midas整体模型计算外墙竖向弯矩图

由计算结果可推断:随着楼板厚度越小,楼面平面内刚度越低,与外墙刚度比降低,有限元模型结果与连续梁模型内力分布相差较大,其中墙支座负弯矩值远低于传统计算结果,跨中正弯矩提升近2倍;且随着土层深度增加,由外墙传递于楼板上的围压增大,楼板同时存在平面内剪切及压缩变形和平面外弯曲变形,见图6、图7。因此,楼板变形过大以致无法提供足够的侧向支撑力,则有限元计算得到的内力分布与无限楼板支座的连续梁模型结果误差较大。配筋时需要考虑内力重分布进行包络设计。

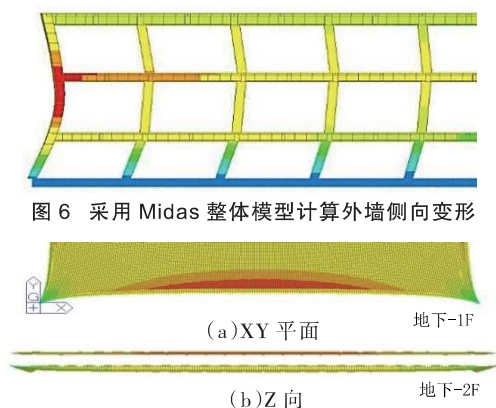


图6 采用 Midas 整体模型计算外墙侧向变形

地下结构外墙主要以弯曲变形为主,即抗侧刚度可近似由抗弯刚度 $E_w I_w$ 表示。式中: I_w 为结构每延米的外墙惯性矩。低层边跨楼板主要以压缩变形为主,即抗侧刚度为 $E_f A_f$ 。地下结构外墙两个方向的跨中内力最大值皆随板墙刚度比减小而增大,见图8,其中竖向弯矩呈3次幂函数增长。且需要校核水平向构造配筋,可提高钢筋等级、减小间距,或设置暗梁、暗柱。

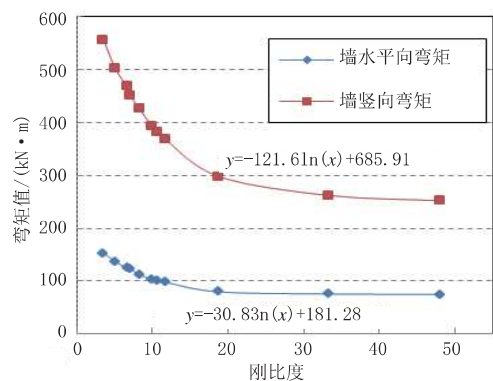


图8 外墙最大弯矩随刚度比的变化规律

分别依据刚性板及弹性板模型进行外墙内力计算,可得弯矩在楼层跨中处误差值随刚度比的变化规律,见图9。初始模型板厚150 mm,墙厚800 mm。随着墙板厚度接近,板墙刚度比逐渐增大,墙跨中弯矩误差值降低,且在板墙厚度相同时误差值趋于0。

在楼板支座外墙弯矩处误差值随刚度比的变化规律,见图10。随着板墙刚度比增大,弯矩误差值降低,其中中板B1层误差值以幂指数曲线降低。而B2层随墙板刚度增加其误差值趋于40%,即平面内无限刚假定不适用于多层地下结构的低层墙体计算模型。探究墙内力误差值随深度的变化,将原模型由三跨改为两跨及四跨,计算中板支座处弯矩误差值,见图11。随楼层降低误差值增大,同一标高处结构层数越多误差值越大^[7]。

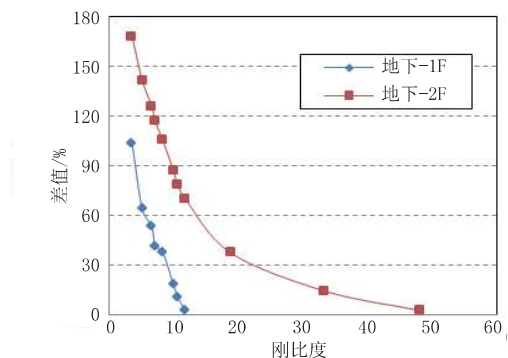


图9 楼层跨中处外墙弯矩差值随刚度比的变化规律

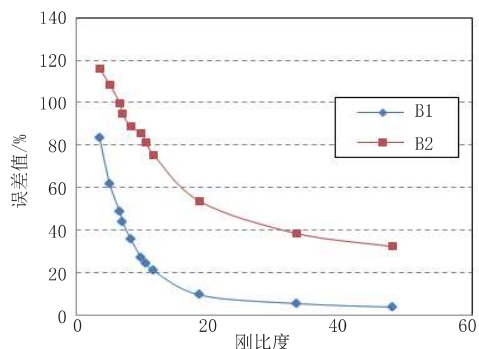


图10 楼板支座处外墙弯矩误差值随刚度比的变化规律

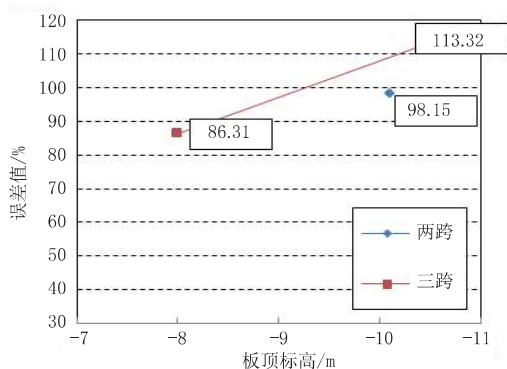


图11 不同标高处墙内力误差值

由于本工程板墙刚度比相差较大,若不改变板厚度时需要依据以上分析规律优化设计方案。依据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)对作用在地下结构外墙的荷载进行组合计算,其中地面超载取为 20 kN/m^3 。对外墙进行包络设计,见表1。

因此,在原配筋图的基础上,依据有限元模型计

表 1 配筋计算

外墙观测位置	MIDAS 弯矩 (标准值)消峰后/(kN·m)	配筋弯矩(设计值)消峰后/(kN·m)			配筋	裂缝验算 /mm	截面极限承载力 验算
		简化计算	有限元计算	包络设计			
地下-1F跨中	255	198	357	357	25@150+0@150	0.059 3<0.2	强度满足,827
B1层支座	-351	-491	-76	-491	22@150+28@200	0.038 2<0.3	强度满足,1 312
地下-2F跨中	604	312	845	845	25@150+32@150	0.093 6<0.2	强度满足,1 886
B2层支座	-389	-544	63	-544	32@150+32@150	0.017 2<0.3	强度满足,2 263

算结果,对墙内侧楼板支座处附加受拉钢筋,可适当减少墙外侧低层板支座处附加钢筋长度,见图 12。邻近外墙楼板还需要验算在水土压力和竖向荷载组合下是否满足挠度和裂缝要求,避免进入塑形阶段前裂缝大于规范要求,影响结构的耐久性和安全性。对于板墙刚度比小、低层楼板要依据其内力值对边跨板进行板厚调整,除局部加厚还可采取其他结构构造措施。例如增设暗梁形成三角形稳定结构^[9]。

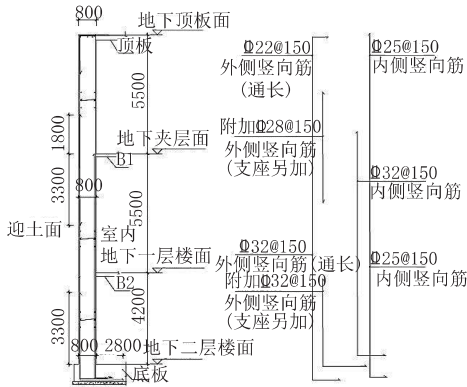


图 12 优化后墙体配筋图

4 结 论

本文通过调节结构墙板厚度、楼的刚度比来探讨地下大空间结构外墙的内力分布规律。由此得出结论:随着板墙刚度比降低,地下结构中板刚度相比于顶、底板平面内刚度有明显降低,则其对侧墙的支撑作用明显减弱。从而使侧墙在各楼层跨中处正弯矩随着刚度比降低而显著增加,且其极值点位置随着层数的增加而下移。

综上,在进行地下大空间结构内力分析时应充分考虑结构的空 间效应,避免平面简化模型对各结构构件协同受力作用和楼板开洞等特殊情况的忽略,合理调配板墙的刚度比,使传统计算结构更真实反映地下外墙在水土围压及地震作用下的受力情况。并依据设计规范及地下结构外墙真实内力分布增置受力钢筋及防裂构造筋。实现地下结构设计的合理性及整体结构的安全性,也可避免结构保护设计时的工程资源浪费现象。

参考文献:

[1] 俞志杰.大跨度地下建筑空间的结构性能研究[D].上海:同济大学, 2005.

[2] 王鑫.楼板平面内刚度计算方法的综述[J].四川建材,2015(6):35-36.

[3] 邢彤,陆海燕,鲍文博.地下室外墙优化设计研究[J].低温建筑技术, 2014,36(9):40-43.

[4] 焦柯,吴文勇.剪力墙配筋计算和施工图生成[J].建筑结构,2003(1): 25-26.

[5] 傅学怡,曲家新,孙臻.复杂截面剪力墙配筋研究[J].土木工程学报, 2009(12):43-50.

[6] 陈迎春,李小飞,何四祥.MIDAS/Gen 在建筑结构施工分析中的应用研究[J].建筑结构,2010(s1):504-505.

[7] 向伟明,周艳杰.某人防工程外墙受力特性分析[J].建筑科学,2014, 30(11):71-74.

[8] 韩世冲.地下室外墙优化设计分析[J].中国新技术新产品,2018(9): 127-128.

[9] 邱建庆.浅谈地下室墙板裂缝的成因与控制[J].科技与生活,2010(9): 145.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smedi.com

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com