

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.03.067

浅谈大型复杂地下空间结构设计

张 蕾

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 随着我国经济高速发展,在发达城市地下空间利用率越来越高。大型地下空间集管廊,商业,环路,匝道,快速路,地铁区间为一体,是一个非常复杂系统。以南京某新区地下空间为例,浅析大型地下空间结构设计方法,利用 robot 以及 yjk 软件进行结构设计,分析了温度应力计算结果,以及用三维计算验算了二维 robot 计算结果。

关键词: 大型复杂地下空间;robot;yjk;结构设计;地震工况

中图分类号: TU31

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)03-0273-05

0 引言

伴随着城市的立体化开发,城市的一部分交通功能和市政公用设施与商业、娱乐等建筑功能综合在一起,被布置于城市地下空间中,从而成为地下城市综合体,简称地下综合体^[1]。地下综合体集管廊、商业、环路、匝道、快速路、地铁区间等为一体,多种类型和多种功能的地下建筑物和构筑物连接在一起,形成功能互补、空间互通的综合地下空间。上海建成地下综合体有人民广场地下综合体、徐家汇地下综合体、五角场地下综合体等取得了良好的社会经济效益。法国 Les Halles 地下综合体、巴黎 La Defense 地下综合体、柏林波茨坦广场地下综合体、香港九龙站交通城等均已成为当地重要的核心交通中心。

张小刚^[2]等综述了大型地下空间结构设计的注意事项;丁晓敏^[3]等利用 MIDAS/Gen 探索了是否考虑土对结构作用对模型影响。徐宁^[4]对复合墙的两建建模方式进行了探讨;曾小刚^[5]对市政隧道开口段异形箱涵结构进行分析;王一鸣^[6]等对框架箱涵结构进行了设计研究,分析覆土厚度对箱涵剪力和弯矩影响;张帆^[7]探讨了不同土层以及桩长对地下空间结构的影响;高松^[8]对采用中隔板或工字隔板箱涵进行有限元分析,提出相关设计方案和注意事项。

本文就南京某大型地下空间综合体项目结构设计,运用 YPool 软件以及结合 robot 软件对结构建模分析计算,并且进行了对比。

收稿日期: 2022-05-01

作者简介: 张蕾(1988—),男,硕士,工程师,从事大型地下空间设计工作。

1 概 况

1.1 工程概况

南京市江北新区某项目位于南京市浦口区中央大道两侧,江北新区核心区范围为西至万寿路及万寿路西侧规划路,北至定山大道北侧规划路,东至胜利路及胜利路以西规划路,南至商务西街北侧规划路。此次实施的四区是介于定山大街与定山大街西二路之间的横江大道段,图 1 为地下综合体为效果图。



图 1 地下综合体效果图

此次实施段的商业部分位于地下一层建筑内,地下一层两侧接分期实施的各地块。管廊位于横江大道下方,与地下空间结构相结合,沿横江大道布置一个综合舱和一个电力舱,管廊底板与地下空间结构顶板合建,采用框架结构形式;管廊顶板侧壁采用箱涵结构形式,此次实施段的地下环路位于地下二层,与地下空间结构合建。环路结构采用厚板形式,地下三层为环路匝道;环路匝道采用箱涵结构形式。此次实施段的地下快速路位于地下四层,与地下空间结构合建。快速路采用箱涵结构形式,基础采用平板式筏板基础,抗浮不满足时设置钻孔灌注桩。

1.2 工程地质

拟建项目拟采用钻孔灌注桩,基础形式采取筏板基础。物理力学参数见表1。

表1 物理力学参数

土层	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c_k / MPa	内摩擦角 $\varphi_k / (^\circ)$	压缩模量 E_0 / MPa	地基承载力征值 f_{ak} / kPa
①-2 层素填土	18	15	10	4	80
②-2 层 淤泥质粉质黏土	17.7	12	10	3.5	60
②-2a 层 细粉砂	18.5	5	24	7.8	150
②-3a 层粉质黏土夹粉砂	17.9	13	12	4.5	100
②-4 层粉砂夹粉质黏土	18	5	24	6.5	200
②-5a 粉质黏土夹粉砂	17.9	14	13	5	100
②-5 层 粉细砂	18.9	4	30	10.5	240
③-4 含砾中粗砂	19.3	3	32	13	350

1.3 水文地质

地下水位埋藏浅,埋深受季节影响明显,工程结构位于地下水位之下,应进行抗浮设计。

根据南京地区区域水文地质资料、勘察期间实测最高水位、地下水年变化幅度、地形地貌、地下水补排泄条件、周边场地平整标高等综合确定,建议抗浮设计水位取室外场地平整标高以下 0.50 m,最低地下水位取地面以下 2.50 m,计算基底压力时该水位为不利工况的地下水位,同时由于施工场区靠近长江,建议抗浮设计计算时应考虑长江洪水位的影响。

2 上部框架结构设计

2.1 商业层结构设计

地下空间商业层为梁板结构体系,在一般商业区域采用十字形梁板楼盖结构方案;在 x 向、 y 向柱网尺寸相差较大的区域,且商业净高有一定要求的区域推荐采用单向密肋楼盖方案。

采用北京盈建科软件有限责任公司编制的 YJK Structure 3.1.1 进行整体建模,整体模型见图 2。

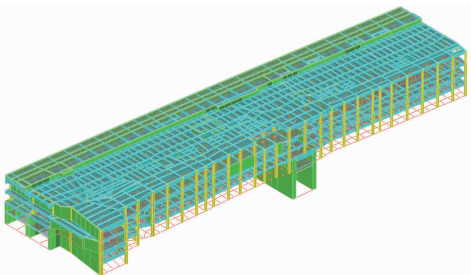


图2 整体计算 yjk 模型

由 yjk 的计算结果可以得到顶板的梁板柱配筋,进行结构设计。

2.2 超长结构温度应力设计

2.2.1 基本气温

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)附录 E.5,上海市基本气温:最低为 -6°C ,最高为 37°C 。

2.2.2 混凝土收缩、徐变

混凝土徐变对超长大面积混凝土结构的温度应力影响很大,由于徐变的存在导致混凝土结构应力的释放和降低。考虑混凝土徐变变形引起的构件应力松弛,据王铁梦^[9]以及辽宁省《地下混凝土结构防裂技术规程》(DB21/T 1745—2009)^[10],取徐变折减系数 0.35。

本工程后浇带封闭按 60 d 考虑,根据相关文献,收缩等效温差为 6°C 。

2.2.3 混凝土开裂刚度折减系数

考虑混凝土开裂后刚度降低,刚度折减系数取 0.70。

2.2.4 土体及围护结构保温隔热

根据《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012^[11]第 9.3.2 条的条文说明:对地下室与地下结构的室外温度,一般应考虑离地表面深度的影响。当离地表面深度超过 10 m 时,土体基本为恒温,等于年平均气温。南京年平均气温为 17.3°C 。

地下室顶板处土体最低温度取 -6°C 。考虑到商业区域未采取空调采暖区域,室内最低温度取 7°C 。地下顶板最低温度取两者平均值: $(-6+7) \div 2=0.5^\circ\text{C}$,南京日温差取 10° 。

2.2.5 负温差的取值

计算负温差取值的计算公式如下:

$$\text{负温差} = [(\text{混凝土最低温度} - \text{合拢温度} - \text{收缩等效温差}) \times 0.35 - \text{日温差}] \times 0.7$$

其中:

合拢温度控制在 20°C 以下,计算取 20°C ;

混凝土最低温度: 0.5°C ,0.35 为考虑徐变影响;

0.7 为考虑混凝土开裂后刚度折减。

结构各部位负温差计算如下:

$$\text{地下室顶板:负温差} = [(0.5 - 20 - 6) \times 0.35 - 10] \times 0.7 = -13.3^\circ\text{C}。$$

2.2.6 计算结果及配筋

温度应力结果见图 3。

温度应力在中间最大约为 3 MPa ,向两边慢慢减少。以 3 MPa 为例:

$$\sigma = 3 \text{ MPa}, \text{取 } 1 \text{ m 板宽计算}$$

$$250 \text{ mm 厚}, N = 3 \times 1\,000 \times 250 = 750\,000 \text{ N}$$

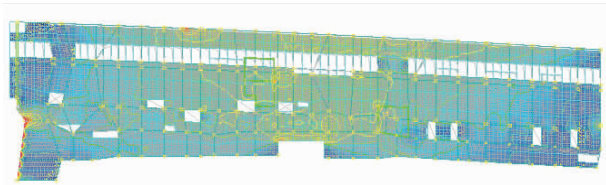


图3 yjk 温度应力计算结果(单位:MPa)

单层单向增加配筋:

$$A_s = N / f_y / 2 = 750\ 000 / 360 / 2 = 1\ 041\ \text{mm}^2$$

3 箱涵结构设计

3.1 典型箱涵剖面

由于此区段长度有 350 m 左右,地下功能复杂,集管廊、商业、地下环路、匝道、快速路、地铁等为一体,而且环路以及匝道快速路的标高是变化的,因此需要分区段建立二维模型,分别计算箱涵结构的配筋,本文以一典型剖面为例,介绍用 Autodesk 公司开发的 Robot Structural Analysis Pro 软件计算箱涵结构。典型剖面见图 4。

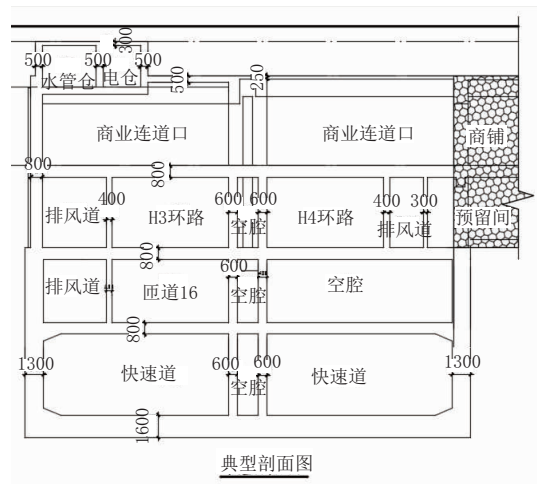


图4 箱涵典型剖面图(单位:mm)

3.2 计算荷载

- (1)结构自重: $25 \times$ 结构厚度;
- (2)面层吊顶: 1.5 kPa、2.0 kPa、4 kPa、5 kPa、8.0 kPa;
- (3)顶板覆土重: $18 \times$ 覆土厚度;
- (4)水土压力(水土分算)
 $P_{水} = 1 \times 10 \times h$
 $P_{土} = 0.5 \times 8 \times h \times k$
 其中 $k = h_1^3 / (h_1^3 + 0.5 \times h_2^3)$, h_1 为侧墙厚, h_2 为围护墙厚;
- (5)水浮托力: $10 \times$ 水头高度;
- (6)顶面活载: 20 kPa;
- (7)侧面活载: $20 \times$ 侧压力系数;
- (8)人群及行车活载: 4 kPa、5 kPa、8 kPa、10 kPa、

20 kPa。

3.3 计算采用的荷载组合

3.3.1 正常使用极限阶段

- 施工正常(未封闭泄水孔): $(①+②+③+④+⑥+⑦+⑧) \times 1.0$
- 使用浮托正常(水反力控制): $(①+②+③+④+⑤) \times 1.0$
- 使用正常(100%水浮力): $(①+②+③+④+⑤+⑥+⑦+⑧) \times 1.0$

3.3.2 承载能力极限状态

- 结构重要性系数取 1.1,活载设计使用年限调整系数取 1.1:
- 施工承载(未封闭泄水孔): $1.1 \times [(①+②+③+④) \times 1.3 + (⑥+⑦+⑧) \times 1.5 \times 1.1]$
- 使用浮托承载(水反力控制): $1.1 \times [(①+②+③+④+⑤)]$
- 使用承载(100%水浮力): $1.1 \times [(①+②+③+④+⑤) \times 1.3 + (⑥+⑦+⑧) \times 1.5 \times 1.1]$

3.4 约束以及弹簧刚度

- (1)桩基:采用双向弹簧,平面框架模型根据纵向间距进行折算;根据试桩报告及相邻地块经验,单桩抗拔刚度 220 000 kPa,抗压刚度 420 000 kPa,按 9.0 m 每跨计算,弹簧刚度为:抗拔 $220\ 000 / 9.0 = 24\ 444\ \text{kPa/m}$;抗压 $420\ 000 / 9.0 = 46\ 666\ \text{kPa/m}$ 。
- (2)地基土:根据地勘报告,基床系数取值 14500 kPa。
- (3)侧墙弹簧刚度:取值 10 000 kPa。
- (4)在商铺、设备间、车库的顶板处设置水平位移支座,约束其水平方向位移。

3.5 弯矩、剪力折减原则

- (1)支座处弯矩: $M_1 = M - 1/3 Vb$
 式中: M_1 为折减后弯矩; M 为中心处弯矩; V 为中心处剪力; b 为支座宽度。
- (2)支座处剪力:取支座边剪力。

3.6 结构分析模型

本工程箱涵结构基于荷载结构法,沿典型断面取 1 m 宽板带,将结构简化为二维杆系有限元模型。地层、桩基对结构的抗力作用采用弹簧支座进行仿真模拟,水土压力作为荷载作用在结构上,与其它恒活载进行不同工况下荷载组合。采用软件 ROBOT 进行模拟计算。

本工程采用的建模方案如下所示:

建模方式:围护墙不建入模型,只建侧墙。

侧向水土压力:采用水土分算,水压力作用在侧

墙上,土压力根据围护墙与侧墙的线刚度分配后,作用在侧墙上。水土侧压力分别见表2。

表2 水土侧压荷载分布表

土压力作用位置	水压/kPa	土压/kPa
墙顶	$(1.05-0.5) \times 10=5.5$	$(18 \times 0.5 \times 0.5+8 \times 0.5 \times 0.55) \times 0.72=4.8$
墙底	$(28.1-0.5) \times 10=276$	$(18 \times 0.5 \times 0.5+8 \times 0.5 \times 27.6) \times 0.72=82.7$

侧向土压力按照侧墙与地下连续墙刚度分配,系数计算如下:

$$1.3 \times 1.3 \times 1.3 / (1.3 \times 1.3 \times 1.3 + 1.2 \times 1.2 \times 1.2 \times 0.5) = 0.72$$

建立的 Robot 有限元模型见图5。

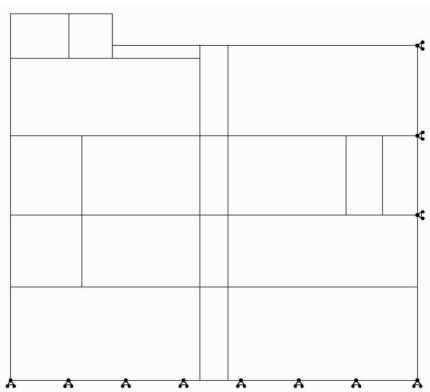


图5 Robot 计算模型

3.7 计算结果分析

Robot 可以得到标准组合以及基本组合的弯矩和剪力值。基本组合下的弯矩见图6。

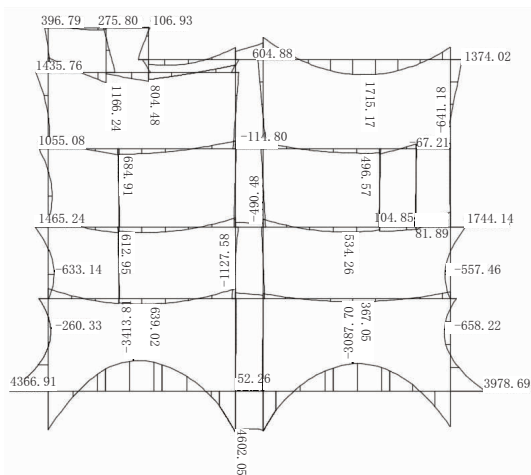


图6 基本组合工况下弯矩计算值(单位:kN·m)

从图6中可知最大弯矩发生在底板跨中位置,为4602.05 kN·m,其次为左侧外墙底部位置弯矩值为4366.91 kN·m。右侧外墙底部弯矩为3978.69 kN·m,稍微低于左侧外墙位置,因为右侧上部两层与右边有商业联通,不存在水土压力。根据弯矩值可以计算出需要配置的抗弯钢筋。

图7为基本组合工况下剪力设计图,从图7中可以看出最大剪力设计值为2649.4 kN,位于底板跨中,左侧外墙底部剪力为2379.78 kN,根据混凝土规范可以验算截面可以承受的最大剪力值1329.4 kN,需要配置抗剪切箍筋,见图8,在剪力大于1329.4 kN地区需要设置抗剪箍筋。

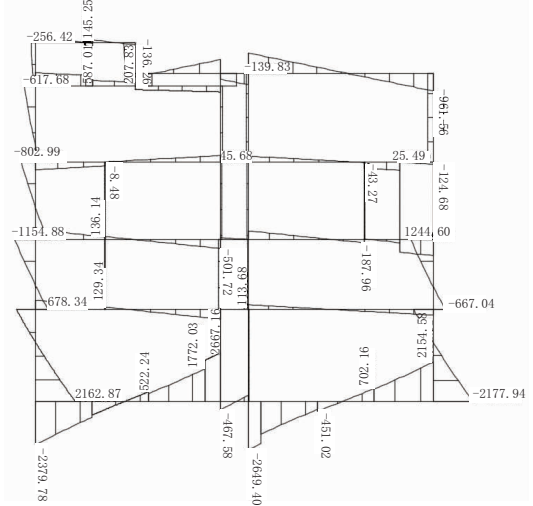


图7 基本组合工况下剪力计算值(单位:kN·m)

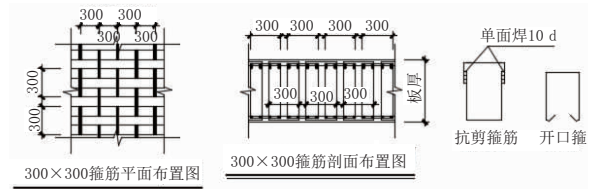


图8 抗剪箍筋示意图(单位:mm)

与土接触面需要满足裂缝为0.2 mm,其余为0.3 mm,裂缝计算需要读取标准情况下的弯矩值,见图9,根据实配钢筋和弯矩值可以计算裂缝是否满足要求。

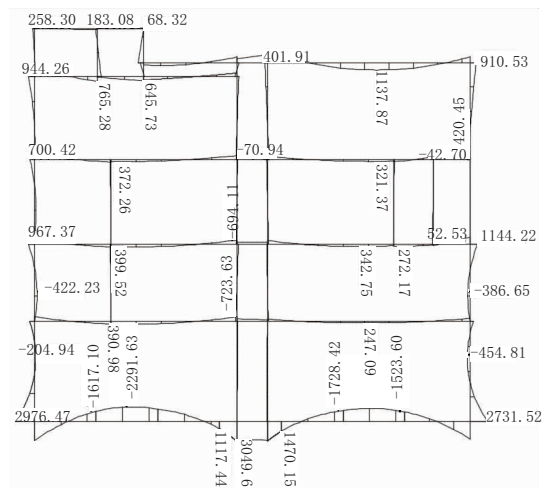


图9 标准组合工况下弯矩计算值(单位:kN·m)

4 三维有限元结果

4.1 三维有限元模型

利用 YPool4.0.0 软件建立三维有限元整体模

型,除了上部结构,在前处理中建立筏板和桩基,进行整体计算,见图10。

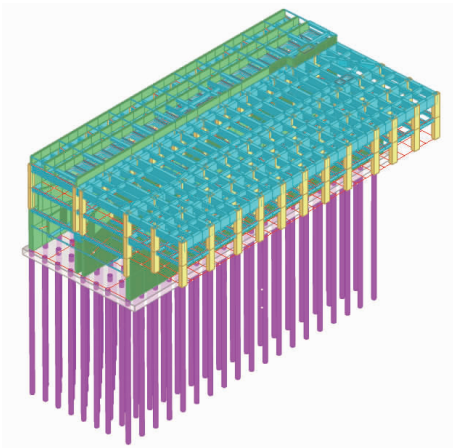


图10 YPool4.0.0三维计算模型

4.2 约束以及弹簧刚度

模型前处理中可以考虑筏板刚度以及桩刚度,单桩抗拔刚度 220 000 kPa,抗压刚度 420 000 kPa,筏板基床系数 14 500 kPa 取值和 ROBOT 计算保持一致。在 YPool 中右边建了两跨模拟右侧相连接的两层,水土压力直接在模型中输入,取值和表 2 保持一致。底板水浮力为 -289 kPa 与 ROBOT 模型保持一致,其余恒载活载取值按照 3.2 节。

4.3 三维有限元计算结果分析

计算的剪力墙弯矩云图见图 11,计算的基本组合工况下外墙底部弯矩左边为 4 222 kN·m,右边为 3 724 kN·m,比用 robot 二维计算的结果左边墙底弯矩 4 366.91 kN·m 以及右边墙底弯矩 3 978.69 kN·m 稍小。

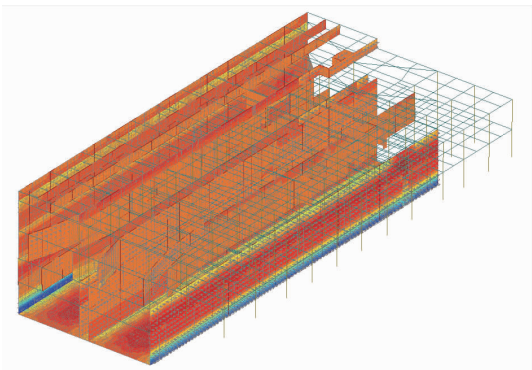


图11 YPool 剪力墙弯矩计算云图(单位:kN·m)

同时软件计算了基本组合下考虑地震工况组合,墙底弯矩比基本组合水土压力控制下的小,说明对于此项目控制工况为平时组合。

5 结论

本文以南京某大型地下空间综合体项目为案例,介绍了大型地下空间设计方法,总结出了以下结论,可为类似工程提供参考。

(1)对于大型地下综合体,通长长度比较大,大部分顶板不设缝,需要计算温度应力,温度应力在中间区域比较大,向两边慢慢减少,温度应力附加在楼板配筋中。

(2)介绍使用 robot 软件计算箱涵结构的弯矩和剪力,以及满足正常使用下的裂缝要求,对于不满足抗剪要求区域,需要附加抗剪切箍筋。

(3)通过使用 YPool 三维有限元软件,并且与 robot 二维计算的外墙底弯矩进行对比,发现 YPool 三维模型的墙底弯矩比 robot 计算的弯矩稍小,同时与地震工况组合比较,得知对于此地下空间项目控制工况为平时组合。

参考文献:

- [1] 崔阳.地下综合体功能空间整合设计研究[D].上海:同济大学,2007.
- [2] 张小刚,张栏馨.探讨大型地下空间项目的结构设计[J].低碳世界,2017,35(12):214-215.
- [3] 丁晓敏,张季超,朱超,等.基于 MIDAS/Gen 的地下结构抗震设计分析[J].建筑结构,2010,40(增刊):21-24.
- [4] 徐宁.某大型地下空间的复合墙应用分析[J].城市道桥与防洪,2020(7):311-313.
- [5] 曾小刚.市政隧道开口段异型箱涵结构设计研究[J].工程建设与设计,2020(19):26-28.
- [6] 王一鸣,王浩璇.市政隧道框架箱涵结构设计研究[J].赤峰学院学报(自然科学版),2019,35(6):100-102.
- [7] 张帆.某大型地下空间结构设计若干关键问题的研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [8] 高松.某车站环路工程地下通道设计实例[J].2019(4):37-40.
- [9] 王铁梦.钢筋混凝土结构的裂缝控制[J].混凝土,2000,127(5):3-6.
- [10] DB21/T 1745—2009,地下混凝土结构防裂技术规程[S].
- [11] GB 50009—2012,建筑结构荷载规范[S].