

复杂地下综合体结构设计研究

郭 东

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 为实现土地集约化利用,集地铁、管廊、地下空间开发于一体的大型综合体建设项目逐渐增多。此类工程结构复杂、涉及范围广、约束条件多,设计较为困难。因此,有必要探究已建类似项目的设计思路与工程经验,从而为以后类似项目的建设提供参考。以武汉市光谷中心城中轴线区域的地下公共走廊及配套设施工程为例,分析其结构主要特点和桩基选型设计原理,阐述了重建式结构抗震设计可行性、主动抗浮设计的优点和超长结构裂缝控制方法等,得出以下结论:对于空桩段较长且有效桩长较短的灌注桩,采用双套筒试桩可以提高试桩精度;采用反应谱法与反应位移法叠加的简化分析方法进行重建式结构抗震设计具有可行性;相较于传统的抗拔桩和压重抗浮设计,在适当的地质条件下,采用主动抗浮方案可显著缩短工期和降低费用;对超长结构的温度应力进行计算,根据计算结果配置钢筋并综合考虑构造措施,可以较好地控制裂缝产生。

关键词: 复杂地下综合体;双套筒试桩;重建式结构抗震;主动抗浮设计;超长结构

中图分类号: TU984

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0127-05

Research on Structural Design of Complex Underground Complexes

GUO Dong

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group), Shanghai 200092, China]

Abstract: In order to achieve the intensive land use, the large-scale complex construction projects integrating subways, utility tunnels and underground space development are gradually increasing. The design of these projects is more difficult because of a complex structure, a wide range of involvement and many constraints. Consequently, it is necessary to explore the design approaches and engineering experience from the completed analogous projects so as to provide a reference for the similar project in the future. Taking the underground public corridor and supporting facility project in the central axis area of Wuhan Optics Valley as an example, the main characteristics of its structures and the design principle of pile foundation type selection are analyzed, and the feasibility of seismic design for reconstructed structures, the advantages of active anti-floating design and the methods for controlling cracks in super-long structures are expounded. The conclusion is that for cast-in-place piles with long empty pile sections and short effective pile lengths, and the use of double-sleeve test piles can improve the accuracy of test piles. It is feasible to conduct the seismic design for reconstructed structures by using a simplified analysis method superimposing the reaction spectrum method and the reaction displacement method. Compared with the traditional anti-uplift pile and load-bearing anti-floating design, the use of active anti-floating scheme can significantly shorten the construction duration and reduce the cost under the suitable geological conditions. The temperature stress of ultra-long structures is calculated. By configuring the reinforcing bars based on the calculation results and comprehensively considering the structural measures, the occurrence of cracks can be well controlled.

Keywords: complex underground complexes; double-sleeve test pile; seismic design of reconstructed structures; active anti-floating design; extra-long structure

0 引 言

为满足土地集约化利用的要求,集地铁、管廊、地下空间开发乃至高架桥于一体的大型综合体建设项目逐渐增多。洪静^[1]和熊朝辉等^[2]主要从空间布

局、流线组织和消防等方面介绍该类地下综合体的设计经验和思考。农兴中等^[3]主要针对中心城区的城市综合管廊与地铁合建形式进行分析研究。在结构设计方面,周兵^[4]以武汉市光谷广场综合体为例,介绍了地下综合体的总体设计方案、基坑设计方案和主体结构布置方案。高扬^[5]、陈炜^[6]、曹辉^[7]主要采用反应位移法,对不同类型的地下空间结构进行抗震分析和设计。李媛^[8]研究了超长地下混凝土框

收稿日期: 2025-10-09

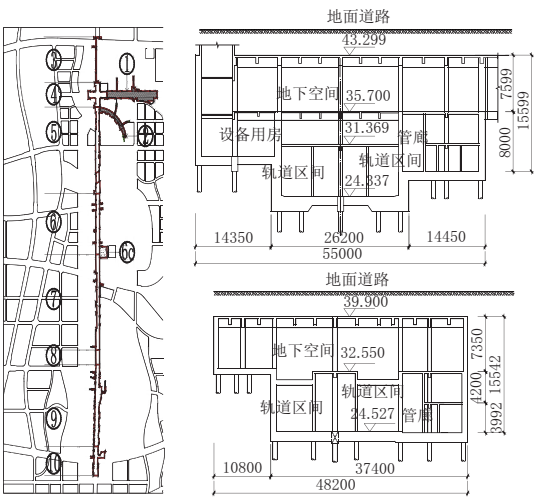
作者简介: 郭东(1981—),男,硕士,高级工程师,从事结构设计工作。

架结构的温度效应。总之,该类项目功能复杂、约束条件多、设计难度大,成熟的案例较少。因此,本文以武汉市光谷中心城地下公共走廊为案例,介绍了其结构特征和基础方案,并对案例特有的几个关键问题进行分析说明,从而为后续工程设计研究提供参考。

1 工程概况

光谷中心城中轴线区域的地下公共走廊及配套工程项目总建筑面积约为51.65万 m²,是国内最长的地下空间公共走廊,全长约为5.8 km。

该项目主要区段为沿光谷五路南北走向。如图1(a)所示,图中数字代表分段号,其中,2段和6c段为地下空间;4段、6段、8段和10段是地铁19号线车站,包含与地铁11号、13号及9号线的换乘站;3段、5段、7段和9段是地下空间与地铁19号线及管廊的合建部分。本文主要研究地下空间与地铁及管廊的合建部分,其典型结构断面如图1(b)所示,地下一层为商业开发,地下二层为地铁19号线区间和管廊。此外,2段与6c段也是本文的研究对象。



(a)区段划分图 (b)典型断面图(高程:m,尺寸:mm)
图1 光谷中心城地下公共走廊区段划分及典型断面图

2 结构设计

2.1 变形缝和后浇带设置

依据功能特点,设计方案将地下综合体项目划分为10段,在各段之间设置伸缩缝,使之完全断开。各区段结构纵向长度如表1所示。

由表1可知,3段、5段、7段、9段结构虽然因伸缩缝而与相邻的地铁车站分开,但其自身仍为超长结构。为降低混凝土收缩和温度变化造成的影响,设计方案设置了伸缩缝,将各区段划分为若干个结构

表1 各区段结构纵向长度和桩基持力层

结构区段	结构纵向长度/m	桩基持力层
3段	444.5	泥岩
5段	750.5	灰岩
6c段	97.5	泥岩
7段	763	灰岩
9段	730	黏土

注:单桩抗压承载力特征值为5 000 kN,抗拔承载力特征值为1 600 kN。

独立的单元,伸缩缝的间距总体控制在200~300 m。不同的是,为了控制轨道交通的沉降差异,本项目仅在底板以上部分设置伸缩缝,底板不设置伸缩缝,仅通过设置施工后浇带来降低混凝土收缩造成的不利影响,后浇带间距控制在40 m左右。

2.2 结构体系和结构布置

本工程与地铁、管廊合建区段的设计使用年限为100年,建筑结构安全等级为一级。由于建筑功能的需要,地下一层采用框架结构,地下室顶板采用梁板结构体系;地下二层采用地铁及管廊常用的箱涵结构。

根据规范要求,地下结构的抗震分析采用反应位移法。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[9]和《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)^[10]的相关抗震指标要求和本项目的抗震设计计算结果如表2所示,在设防地震和罕遇地震作用下,设计可以满足规范要求。其中,在罕遇地震作用下,1/636的反应位移法计算结果说明,即使在大震作用下,大部分地下结构仍处于弹性状态。

表2 设计方案抗震验算结果

地震等级	《建筑抗震设计规范》	《城市轨道交通结构抗震设计规范》	反应位移法计算结果
设防地震作用下	弹性位移角限值1/550	性能要求Ⅰ(弹性)	1/1 167
罕遇地震作用下	弹塑性位移角限值1/250	性能要求Ⅱ(局部进入弹塑性)	1/636

3 桩基设计

为满足结构的抗浮要求,本项目中3段、5段、7段和9段的地基基础采用直径为800 mm的钻孔灌注桩。桩基持力层如表1所示。

3.1 岩溶处理

5段、7段和9段的部分区域岩溶强发育,存在溶洞的情况。因此,设计采用超前钻形式逐桩进行勘察。桩基承载力应按超前钻结果逐一计算并确定桩长。同时,控制桩端全断面嵌入完整岩层表面,嵌入深度不应小于桩身直径的2倍,且不小于2 m。本项

目共计算约 4 400 根桩长。一旦超前钻遇到岩溶,应立即进行注浆预处理。

3.2 双套筒试桩

试桩在自然地面完成。由于基础底板埋置深度较深,为 15 ~ 20 m,而有效桩长较短,最短桩长仅为 5 m,为消除基础底板以上桩侧摩阻力的影响,设计采用双套筒法进行试桩。双套筒横截面如图 2 所示。

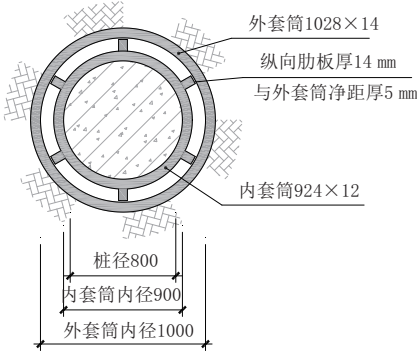


图 2 双套筒横截面示意图(单位:mm)

双套筒试桩的关键是内套筒相对外套筒可以自由滑动。项目采取的措施包括:将外套筒与孔壁通过注浆固定;在内外套筒之间的底部 1 m 范围内,采用低模量强力密封胶进行密封,保证内外套筒之间不进入浆体;使内套筒的纵向加劲肋等与外套筒保持距离。

4 关键问题研究

4.1 复建式抗震设计

如图 3 所示,本项目 7 段存在高架桥梁这一复杂节点,且桥梁位于地下空间上方。桥梁钢箱梁高 2 m,柱子落于地下空间顶板,与地下空间合建,形成复建式地下结构。

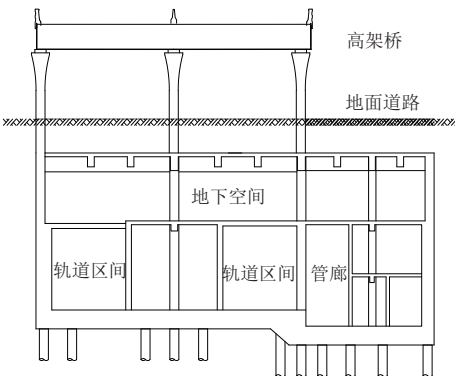


图 3 复建式地下结构横断面示意图

复建式地下结构在地震作用下的受力情况复杂,项目设计不仅需要考虑其受到地上结构惯性作用的影响,还需要考虑地下结构的土-结构相互作用

产生的重要影响。然而,目前学术界对复建式结构在地震作用下的机理研究尚浅。因此,从设计角度出发,本项目提出结合反应谱法与反应位移法叠加的简化分析方法,即将复建式地下结构的地震响应,看作地震在地上、地下结构中引起的惯性力与地下结构在地震作用下产生的侧向土压力及周面剪力作用之和。本研究利用有限元软件 ABAQUS,对动力弹塑性时程进行分析,以检验该简化分析方法的实用性。

4.1.1 地震动输入

根据地质报告,本研究将拟建场地的设计地震分组为第一组,将拟建场地的类别划为 II 类。根据《建筑抗震设计规范》^[9]中表 5.1.4 的内容,拟建场地特征周期值为 0.35 s。基岩处的地震波采用 PKPM 地震波数据库,选取特征周期值为 0.35 s 的地震波 RH1TG035、TH1TG035 和 TH3TG035 进行调幅(见图 4)。根据设防要求调幅至概率水准分别为 100 年内超越概率为 10%(峰值加速度为 0.09g)和 100 年内超越概率为 2%(峰值加速度为 0.16g)的 2 个水平向地震波,每个概率水准为 1 组,每组 3 条,共计 6 条。

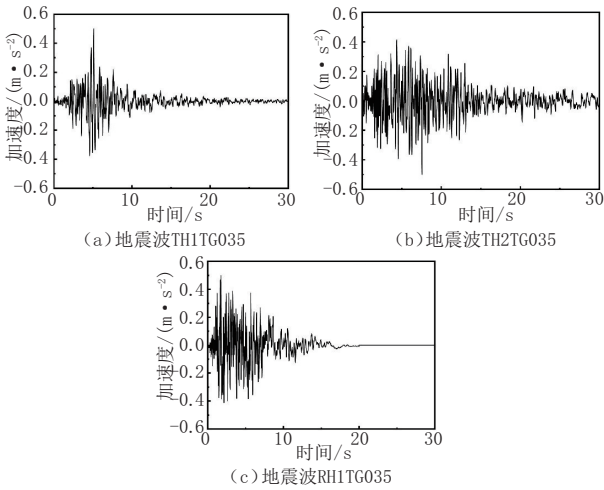


图 4 各地震波加速度反应谱示意图

由于本项目中的复建式地下结构体量较大,功能复杂,本研究选取本工程的标准断面,利用通用软件 ABAQUS 建立有限元模型,对动力弹塑性时程进行分析,并与前文所提设计方法进行对比。

4.1.2 数值模拟

动力弹塑性时程分析数值模型如图 5 所示,盈建科数值模型如图 6 所示。由于结构较长,本研究选择以平面应变问题处理。模型尺寸:长 310 m,高 70 m,纵向柱距取 8.5 m。地震波从模型底部输入,模型两侧采用无限元,以减弱地震波边界的反射效应,模拟

半无限空间。土体采用 CPE4R 单元,无限元土体采用 CINPE4 单元,结构采用 B21 单元。根据项目的地勘报告,本研究对土体进行分层建模,土体与结构接触采用摩尔—库伦摩擦模型,土体采用摩尔—库伦本构模型,混凝土采用线弹性模型。

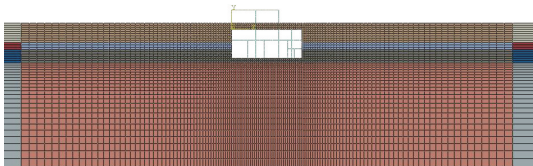


图5 动力弹塑性时程分析数值模型示意图

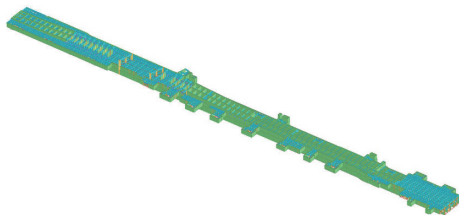


图6 盈建科数值模型示意图

4.1.3 结果分析

本研究选取 3 条地震波动力时程分析结果中的大值,与盈建科分析结果进行对比。如图 7 所示,选取典型位置如下: B2 层侧墙底部(A 点)、B2 层侧墙顶部(B 点)、B1 层侧墙顶部(C 点)、B2 层中柱底部(D 点)、B2 层中柱顶部(E 点)、B1 层中柱顶部(F 点)。

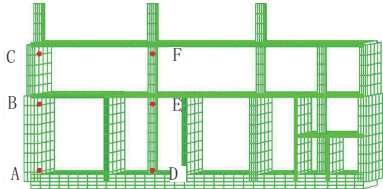


图7 典型分析位置点示意图

侧墙和中柱对比分析情况如图 8 和图 9 所示。其中,地震组合工况 1 为时程分析结果与重力荷载代表值组合,并乘以承载力抗震调整系数;地震组合工况 2 为反应谱法与反应位移法叠加后,与重力荷载代表值组合,并乘以承载力抗震调整系数。首先,从图中可以发现,侧墙和中柱在地震组合工况 1 下的弯矩均小于地震组合工况 2。相较于动力弹塑性时程分析法,采用反应谱法与反应位移法叠加的简化分析方法,能够满足设计需求,且两者的差异在工程可接受范围内。其次,地震工况组合下的侧墙和中柱弯矩均小于基本组合,说明该结构形式在设防地震作用下以静力工况控制为主。最后,相较于动力弹塑性时程分析二维模型,采用盈建科三维模型,更能观测到结构大开洞及由结构变化处的薄弱环节引起的地震作用放大现象,因此能够采取重点加强

措施。

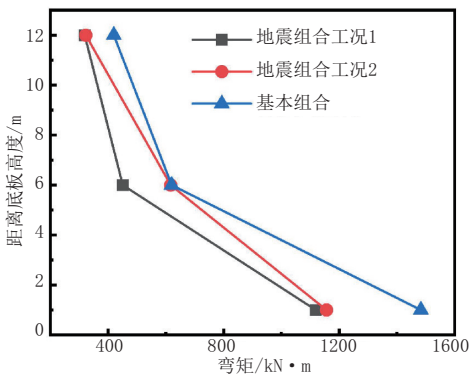


图8 侧墙弯矩对比分析图

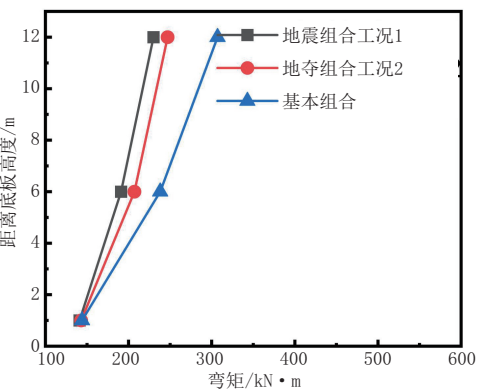


图9 中柱弯矩对比分析图

4.2 主动抗浮设计

相较于常规的“被动”抗浮方法(如抗拔桩和抗拔锚杆等),工程中还常采用排水限压法、泄水减压法等主动抗浮方法。其目的在于采取一定的措施,将地下水位有效降低至目标水位以下,从而减小水浮力对结构的影响。武汉市五角西岸住宅项目^[11]、新城·璞樾门第项目^[12]均采用了泄水减压法,并取得了不错的效果。结合这些案例,本项目中 6c 段的抗浮设计也采用了泄水解压法。

根据图 10 所示,地下室底板位于泥岩残积土层,地下室外墙位于①₃耕植土、③₂黏土和④₄泥岩残积土层。除了耕填土层外,其余土层均为弱透水土层(岩层),渗透系数较小。地下水类型主要为上层滞水、基岩裂隙水和岩溶裂隙水,其中对地下室抗浮有影响的为上层滞水。上层滞水为从地面向下和四周渗透至地下室外墙肥槽内的地下水。根据上述分析,本项目方案沿着地下室周边设计环形闭合区域,对进入肥槽范围内的水进行拦截和排泄,使渗入底板下的水量微乎其微,无法形成连通的水体,从而降低底板下的水压力。该方案经专家论证后,认为采用泄水减压法进行抗浮是适合的,并且可以节省工程费用 1 000 万元,同时缩短工期 3 个月。

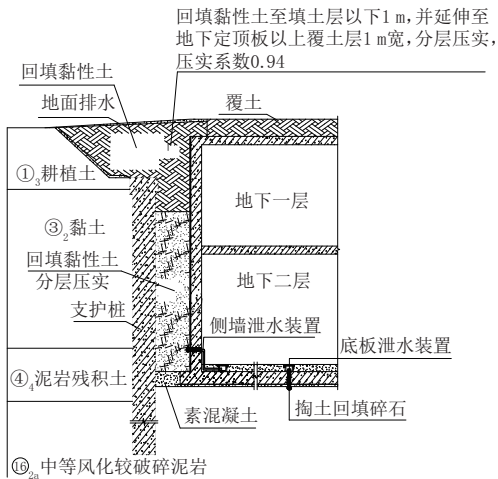


图 10 6c 段横剖面示意图

为确保泄水减压法能够安全、平稳地实施,本项目采取如下措施。

(1)肥槽应采用黏性土回填,并分层压实,回填范围及要求如图 10 所示。尤其要严格把控浅层的肥槽回填施工质量,压实系数应不小于 0.94。考虑到要阻止耕植土和地下室顶板的上层滞水进入肥槽,实施范围见剖面图。底板与支护结构之间采用素混凝土封闭。

(2)硬化地面,并通过有组织地排水,防止地面长期积水,引起上层滞水渗入地下。

(3)在地下室侧墙内埋设泄水孔,距离地面 0.7 m,间距不大于 2.5 m。当侧墙无法设置泄水孔时,在底板一定位置设置泄水孔,并确保其在四周闭合。外墙外及底板下的地下水,由各个泄水减压装置汇集后统一排入地下室的排水沟内,再汇入集水坑内,最终由集水坑的水泵统一排出,从而降低水位。根据湖北省地方标准《建筑地基基础技术规范》(DB 42/242—2014)^[13]第 11.5.3.6 条的要求,当地下建筑物周边有连续可靠的排水通道,且排水量及排水速度大于地面水和地下水的补给速度时,可取排水通道的标高作为抗浮设计水位。根据咨询公司相关的论证和分析报告,并经过专家论证,本项目确定的泄水减压后的抗浮水位为泄水装置标高以上 1.5 m,则仅结构自重便可满足抗浮要求。

(4)设置地下水位及水压力监测装置。

(5)在建筑物正常使用年限及运营期间,应由建设单位或运营管理单位对泄水减压设施进行日常检查和维护。其中,泄水装置在使用期间应每年至少检查 1 次装置的运行情况并进行维护。对于泄水装置堵塞的,可取出滤芯装置清洗后再放入;对于泄水装置已经损坏且无法正常使用的,需立即联系专业

施工单位进行更换处理。检查维护时间应尽量选在雨季,或在雨季增加 1 次维护措施,保证此期间地下室内抗浮系统正常运行。

4.3 超长结构裂缝控制

设置伸缩缝后,各结构单元的纵向长度仍达 200 ~ 300 m,均属超长结构,因此,应对温度收缩应力和裂缝变形采取控制措施。

武汉市的基本气温(50 年一遇的月平均最低和最高气温)取值如下:最低为 -5℃,最高为 37℃。计算基本气温按不利取值,最低为 -5℃,最高为 37℃。混凝土终凝温度取值如下:冬季取 10℃,夏季取 25℃。本工程采用整体建模方式,对温度应力进行分析。

计算结果表明,顶板温度应力取 1.5 MPa(局部较大处取 3.0 MPa),地下一层中板温度应力取 1.3 MPa(中庭区域取 2.0 MPa)。由于温度荷载产生的拉应力较大,需要配置相应的温度钢筋,以确保混凝土在正常使用过程中不会出现开裂情况。

此外,地下一层长向的边柱弯矩受温度变化的影响较大,因此,每个单体两侧 3 跨柱配筋按照温度效应增加柱配筋。

还需采取一些构造措施,如设置施工后浇带、适当增加配筋率、控制配筋间距、增加抗裂纤维和混凝土材料,以及控制施工过程等。在本项目中,梁腰筋配筋率控制在每侧 0.20%,且腰筋细而密,间距控制在 150 mm 以内;地下室外墙水平钢筋配筋率控制在每侧 0.25% 左右,钢筋间距控制在 100 ~ 150 mm。混凝土原材料应采用低收缩、低水化热水泥,控制水泥用量,并掺入适当的粉煤灰。控制混凝土的浇筑时间和浇筑温度,采取措施减少水化热对混凝土构件的影响,确保混凝土振捣密实并加强养护。根据以往的项目经验,在地下室底板、侧墙和顶板中掺加一定量的聚丙烯纤维,可以提高其抗裂性能。

5 结 论

(1)针对复建式结构,本研究从设计角度提出反应谱法与反应位移法叠加的简化分析方法,并通过通用有限元软件的动力弹塑性时程分析,验证了该方法的可行性与实用性。

(2)对于空桩段较长且有效桩长较短的灌注桩,采用双套筒试桩可以提高试桩精度。

(3)对于本工程 6c 段的地质条件,采用泄水减压法进行抗浮是适合的。该方法可显著降低工程费用

(下转第 192 页)