

浅谈大型综合交通枢纽一体化开发结构设计

刘 强, 包明浩

(山东轨道交通勘察设计院有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要: 北京城市副中心站综合交通枢纽工程项目位于城市副中心“一带一轴”空间结构的交汇处, 是副中心拉开城市框架, 推进京津冀协同发展的标志性工程。它连接 M6 线、平谷线、M101 线 3 条轨道交通线路和京唐铁路、城际联络线 2 条铁路线路, 将成为亚洲最大的地下综合交通枢纽。北京城市副中心站综合交通枢纽工程作为超大规模的地上地下一体化设计和施工的复杂结构, 相较于传统结构设计面临的主要技术难点包括地下结构抗震计算方法和超长结构温度应力处理方法等。为确保工程实施的顺利展开, 针对该工程采用修正后的计算假定, 并对相关专题作了专门课题研究, 为类似工程提供了一种新的解决方案。

关键词: 超长结构; 温度应力; 地下抗震; 大体积混凝土

中图分类号: U115

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0371-04

Brief Discussion on Structural Design of Integrated Development of Large Comprehensive Transportation Hub

LIU Qiang, BAO Minghao

(Shandong Rail Transit Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: The Beijing Urban Sub-central Station Comprehensive Transportation Hub Project is located at the intersection of the “One-belt One-axis” spatial structures of the urban sub-center, which is a landmark project for the sub-center to open the urban framework and promote the coordinated development of Beijing, Tianjin and Hebei. The hub connects three rail transit lines of M6 Line, Pinggu Line and M101 Line, and two railway lines of Beijing-Tangshan Railway and Inter-city Liaison Line, which will become the largest underground comprehensive transportation hub in Asia. As a super-large complex structure with integrated design and construction of underground and above ground, the Beijing Sub-central Station Comprehensive Transportation Hub Project faces the major technical difficulties compared with traditional structure design, including the seismic calculation method of underground structure and temperature stress treatment method of super-long structure. In order to ensure the smooth implementation of the project, the revised calculation assumption is adopted for this project, and the relevant topics are studied in a special subject, which provides a new solution for similar projects.

Keywords: super-long structure; temperature stress; underground seismic resistance; mass concrete

0 引 言

民用建筑在抗震设计中, 往往将地下结构视作上部结构的嵌固部位, 实际未充分考虑地下抗震效应。城市轨道交通结构抗震设计采用的反应位移法通常适用于无地上作用、符合平面应变假定的场合, 作为地上结构和地下结构两者的结合, 找寻适合本项目的地震作用方法尤为重要。

目前超长混凝土结构大部分通过设置永久伸缩缝或施工缝来释放温度应力, 以此进行裂缝控制。

作为一项重大标志性工程, 北京城市副中心站综合交通枢纽工程面临超长结构设计和施工的挑战, 主要问题在于设置合理的变形缝以控制施工和使用期间收缩变形和温度应力。本文通过相应专题研究分析, 旨在找寻以上问题在设计中的解决办法, 为相关设计、施工和研究人员提供参考。

1 项目概况

1.1 工程项目概况

本项目地处北京东六环、北运河与现状京哈铁路围合的三角地内。包含一体化实施范围内的 2 条城际铁路工程(城际联络线、京唐城际)、3 条城市轨道交通工程(新建平谷线、新建 M101、改造既有 M6)、配套交通场站工程、地下公共空间、周边配套

收稿日期: 2024-05-28

作者简介: 刘强(1991—), 男, 学士, 工程师, 从事轨道交通结构设计工作。

道路和市政设施工程等。

本工程以芙蓉路为界分为东西两部分,均属于超长结构。其中芙蓉路以东东西方向最长达1 270 m(城际车站位置),南北方向最长达600 m(见图1)。

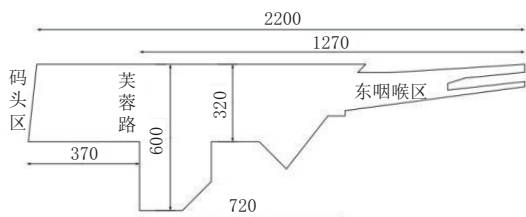


图1 超长结构平面示意图(单位:m)

地下结构整体采用框架结构体系,塔楼投影范围采用与地上相同的结构体系,高层、超高层结构主要为框架-核心筒或筒中筒结构,多层裙房为框架或框剪结构。普通楼屋面采用现浇钢筋混凝土楼板体系,地下结构标准柱跨为9 m×9 m。地下结构层数2~3层,部分区域含夹层;无塔楼区域地面覆土厚度2~5 m,地面局部开天窗位置采用钢结构屋盖,城际车站和地铁平谷线范围基底最大埋深约32 m,其余枢纽区域埋深约25 m。北京城市副中心站综合交通枢纽工程地上建筑效果图见图2。



图2 北京城市副中心站综合交通枢纽工程地上建筑效果图

1.2 项目设计难点

(1)经典的反应位移法仅适用于平面结构,通常无法考虑结构的扭转效应。而本项目存在大量高塔楼,由于地上地下结构的耦联作用导致结构变形复杂,地下结构在地震下发生扭转的可能性较大,因此传统的抗震计算方法无法适用。

(2)作为一项重大标志性工程,“副中心枢纽”工程面临超长结构设计和施工的挑战,主要问题在于设置合理的变形缝以控制施工和正常使用期间混凝土结构收缩变形和温度应力^[1-2]。

2 实施过程

2.1 修正反应位移法总结

2.1.1 修正反应位移法计算

鉴于本工程不符合平面应变假定,需采用三维

模型进行抗震分析,模型的位移计算和地震响应采用三维时程分析。但对于结构工程设计,将三维时程分析结果直接应用于结构构件设计存在较大的困难,且结构的地震效应组合和相关的抗震调整系数在时程工况下均不易实现。

为方便进行地震工况下的结构配筋设计,借鉴反应位移法理论,基于时程分析的结构变形,对一维场地分析下均一土层位移进行修正。通过基于时程分析结果的位移修正,考虑结构扭转效应下的结构反应位移,并以此内力对结构进行抗震计算。

修正反应位移法采用经典反应位移法的基本原理,通过土-结构相互作用模型进行时程分析,得到结构的地震响应,进而取出结构“子系统”,将时程分析得到的地震作用(结构位移、结构周围剪力和结构惯性力)施加在结构“子系统”中,进行结构的抗震分析和设计。时程分析模型见图3,结构“子系统”示意图见图4。

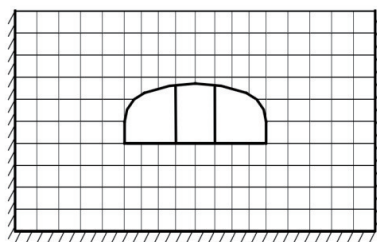


图3 时程分析模型

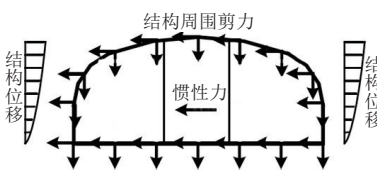


图4 结构“子系统”示意图

修正反应位移法将经典反应位移法的结构计算模型作为计算基础,将时程分析结果代入到模型的边界荷载取值中,经过迭代得到与复核时程分析位移一致的计算模型,并据此进行地震工况结构设计和配筋包络。

修正反应位移法计算流程见图5。

2.1.2 地震荷载组合系数K

(1)中震弹性工况下, $K=r_{RE} \times [1.2 \times (1.0 \times D_L + 0.5 \times L_L) + 1.3 \times E]$ 。式中: r_{RE} 为承载力抗震调整系数; D_L 为恒荷载; L_L 为活荷载; E 为水平地震力。将通过修正反应位移法模型得到的节点反力乘以1.3/0.6的系数并施加在PKPM模型的活载工况,则 $K=1.02 \times D_L + 0.51 \times L_L$ 。

(2)中震不屈服工况下, $K=1.0 \times D_L + 0.5 \times L_L + 1.0 \times E$ 。

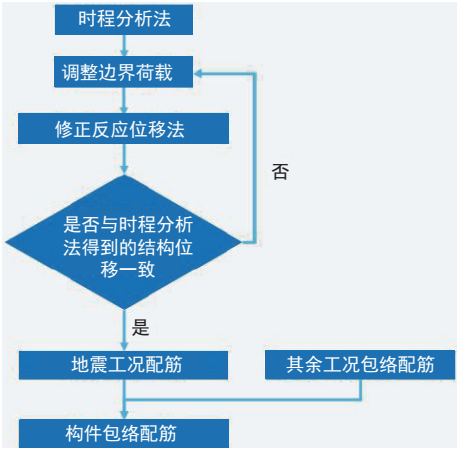


图5 修正反应位移法计算流程

将通过修正反应位移法模型得到的节点反力乘以 1.0/0.5 的系数并施加在 PKPM 模型的活载工况,则 $K=1.0\times D_L+0.5\times L_L$ 。

采用 PKPM (V5.2.0) 对主体结构进行计算分析,采用 MIDAS GEN 进行修正反应位移法的计算,并根据计算结果对 PKPM 模型进行修正。

提取 MIDAS GTS 时程分析得到的节点位移信息并导入 MIDAS GEN 模型中,作为等效地震荷载,再与其他荷载进行组合求解结构响应。程序导入的节点位移模型如图 6 所示。

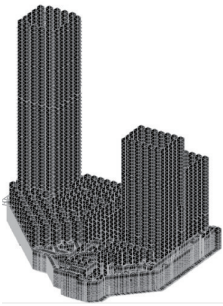


图6 施加节点强制位移模型

2.2 温度效应对超长结构体系影响及设计方法总结

2.2.1 建筑结构温度裂缝控制中伸缩缝设置的局限性

建筑在运营阶段承受着季节性气候变化、骤然降温、太阳辐射等环境因素所产生的温度作用,这些环境因素的共同作用会导致建筑结构中产生复杂多变的温度分布,并引起难以忽略的温度变形和应力,从而导致建筑结构产生裂缝。

目前混凝土结构的裂缝控制以设置永久伸缩缝或施工缝来释放温度应力为主。我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)对钢筋混凝土结构内伸缩缝最大间距的设置要求明确,位于土中地下室挡土墙、墙壁类现浇钢筋混凝土结构的伸缩缝最大间距为 30 m。同时对伸缩缝最大间距的调整作了适

当说明,如有充分依据则可将伸缩缝最大间距增大。国外诸如英、美、法、日等国的混凝土结构设计规范对伸缩缝间距没有硬性规定,但需要对超过长度限值的结构计算温度效应并采取必要措施。

然而在建筑中设缝存在一系列不利因素,主要包括^[3-4]:

- (1)变形缝会影响铁路和人防使用功能。
- (2)伸缩缝材料在地基沉降、地震、火灾等情况下容易破坏,且容易老化失效,与工程 100 a 耐久性不符。
- (3)伸缩缝两侧需设置双柱或者双墙,会破坏建筑整体连续性和立面美观性,影响建筑美感。
- (4)设缝会影响到建筑装修的风格并提高装修的难度。
- (5)设缝会影响建筑的防水、保温以及耐久性,尤其是地下结构,其水密性十分重要,需要严防渗漏,否则维修费用相对较高,维修难度也比较大。

2.2.2 建筑结构不设缝技术路径探索

受到结构功能使用、耐久性要求以及建筑外观需求的影响,变形缝难以正常设置。因此本工程地下结构拟整体不设缝,相关依据包括^[5-7]:

- (1)本工程地下结构深埋地下,且设置空调系统,受地上环境温度变化影响较小,温度应力小。
- (2)通过设置后浇带、施工缝、加强带,使用外加剂、合理增加钢筋和预应力钢绞线等措施,可以控制施工和使用期间的收缩变形及温度应力。
- (3)目前国内对超长结构不设缝也作了较多探索和研究,已经有一些成功应用的工程,如广深港客运专线福田站。其总长 1 025 m,最宽处 81.26 m,平均埋深 32.5 m,采用钢筋混凝土框架结构和型钢混凝土框架结构,结构柱为钢管柱和钢筋混凝土柱,地下 3 层,单跨到 5 跨,横向跨度最大 21.6 m,纵向 12 m,地下结构采用整体不设缝。

为了给相关决策提供指导和支持,依托北京城市副中心综合交通枢纽超长结构项目实例开展相应的温度效应研究。研究成果可明确超长结构服役期间的温度应力分布规律,一方面对北京城市副中心综合交通枢纽超长结构的设计、施工具有重要意义,另一方面可为后续同类型超长结构设计提供参考和借鉴。

针对北京城市副中心综合交通枢纽超长结构温度效应分析课题,依据文献和通州地区的统计数据,建立了通州地区地下工程岩土环境的温度场。结合

设计提供的室内环境温度相关资料计算得到温度荷载,研究了温度场模型的合理性以及相关参数的敏感性;利用PKPM、YJK等软件数据格式转换得到MIDAS有限元分析的几何模型(见图7),对比分析了不同几何尺寸、约束形式、约束强度下的温度效应;最终偏于保守地选取了荷载条件和约束条件,对超长结构模型进行了温度效应计算,计算结果考虑了收缩徐变的折减。分析如下:

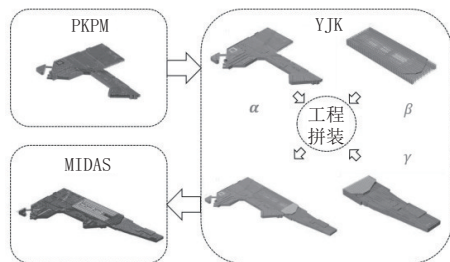


图7 几何模型建立程序

(1)基础底板受到地基土体水平摩擦以及侧墙的约束作用,温度应力呈现由两侧向中间递增的分布规律。

(2)侧墙受到基础底板以及周边土体摩擦的约束作用,温度应力同样呈现由两侧向中间递增的分布形式,在中间温度应力取到最大值。侧墙从底部到接近地表,温度应力呈现先降低后增加的趋势,这是由于从下到上基础底板对侧墙的约束作用逐渐减弱,而土体的保温作用同样逐渐减弱所致。

(3)顶板区域受大开洞影响,降温工况下,顶板开洞区域平行于X方向侧 σ_{xx} 值较大,局部区域最大可以达到3.3 MPa。

2.2.3 超长混凝土结构运营期温度应力控制技术研究

清华大学土木工程系针对本项目做了超长结构运营阶段温度效应研究报告,根据报告中混凝土配合比试验结果,通过采用大掺量粉煤灰、合适的水胶比和胶凝材料总量,可以获得低放热、低收缩,并且强度满足工程要求的混凝土。

(1)C35混凝土配合比关键参数建议:当以28 d作为强度检验龄期时,粉煤灰掺量为37%~40%,水胶比不高于0.42,胶凝材料总量不低于380 kg/m³;当以60 d作为强度检验龄期时,粉煤灰掺量为40%~43%,水胶比不高于0.42,胶凝材料总量不低于380 kg/m³。

(2)C40混凝土配合比关键参数建议:当以28 d作为强度检验龄期时,粉煤灰掺量为40%~43%,水胶比不高于0.37,胶凝材料总量不低于400 kg/m³;当以60 d作为强度检验龄期时,粉煤灰掺量为

43%~46%,水胶比不高于0.37,胶凝材料总量不低于380 kg/m³。

(3)使用膨胀剂的建议:在侧墙局部、顶板大开洞区域、管廊附近楼板以及加强带、后浇带等应力较大的部位使用MgO膨胀剂,C35混凝土的膨胀剂掺量不低于胶凝材料总量的7%;C40混凝土的膨胀剂掺量不低于胶凝材料总量的6%,膨胀剂宜使用M型。

(4)养护要求:混凝土浇筑后及时养护,保湿养护时间不少于14 d。

(5)根据温度应力控制工况荷载组合公式: $r_0(1.3 \text{ 恒荷载} + 1.5 \text{ 活荷载} + 1.5 \times 0.6 \text{ 温度}) \leq R_d$ (R_d 为结构构件抗力设计值),考虑温度应力的影响,超长结构每延米板所需配筋面积 A_s 计算式为:

$$A_s = 0.6 r_0 r_{q1} (\sigma - f_t) h L / f_y \quad (1)$$

式中: r_0 为结构重要性系数,100 a设计使用年限按1.1取值; r_{q1} 为温度荷载分项系数,按1.5取值; σ 为温度应力值; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; h 为截面高度; L 为长度,取每延米; f_y 为钢筋抗拉强度设计值。

3 结 语

(1)修正反应位移法的结构变形基于时程分析结果,考虑了大型地下结构的扭转效应、土体非线性性能、地上结构等。其计算结果可以充分发挥时程分析方法处理复杂、大体量地下结构抗震时计算准确的优点,同时又能够大幅度减少设计计算量,符合通常地下结构抗震的设计习惯,非常适合在本项目中采用。

(2)针对本工程的超长结构,在采用整体不设缝的方案下,通过配置温度钢筋等措施来控制底板、中板、侧墙等部位的结构整体温度应力;采用局部设后浇带、配置预应力筋与温度钢筋等措施来控制顶板、管廊附近与开洞区域的局部温度应力峰值,并考虑局部使用MgO膨胀剂。在满足结构应力和开裂控制的情况下,通过施工控制与合理养护,可实现整体不设缝的工程目标。

参考文献:

- [1] 冯健,吕志涛,吴志彬,等.超长混凝土结构的研究与应用[J].建筑结构学报,2001,22(6):14-19.
- [2] 廖媛媛,陈道政,钱光亮,等.基于Midas/Gen超长混凝土结构温度效应分析[J].施工技术,2012(增刊1):118-121.

(下转第378页)