

# 地下车库结构设计中关键要素的计算分析及研究

周慧芳

河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

**[摘要]**随着城市地下空间开发的持续深化,地下车库作为整合交通功能、人防需求与设备安置的复合型地下构筑物,其结构设计的精准性直接决定工程安全、耐久性与全生命周期价值。文章针对地下车库土-结构共同作用的复杂受力特性、严苛的环境适应要求,构建涵盖永久荷载、可变荷载、环境作用、偶然作用及特殊因素的关键要素体系,明确各要素的作用机制与量化方法。在此基础上,阐释基于极限状态设计理论的荷载组合逻辑、土压力与水压力计算的土力学原理、地震响应分析的振型分解反应谱法等核心计算理论,结合有限元数值模拟、动力时程分析、CFD火灾仿真等现代技术手段。

**[关键词]**地下车库; 结构设计; 关键要素; 计算理论

DOI: 10.64635/ja.2026.1076

中图分类号: TU476

文献标识码: A

## Calculation and Analysis of Key Factors in Underground Parking Garage Structural Design

Zhou Huifang

Hebei Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China

**Abstract:** With the continuous deepening of urban underground space development, underground parking garages, as composite underground structures integrating traffic functions, civil defense requirements, and equipment accommodation, rely on the precision of their structural design to ensure engineering safety, durability, and whole-life-cycle value. In view of the complex mechanical behavior arising from soil-structure interaction and the stringent requirements for environmental adaptability in underground parking garage design, this paper establishes a key-factor system covering permanent loads, variable loads, environmental actions, accidental actions, and special factors, and clarifies the mechanisms and quantitative methods associated with each factor. On this basis, it explains the core calculation theories involved, including the load combination logic based on the limit state design theory, the geotechnical principles for calculating earth pressure and water pressure, and the mode-superposition response spectrum method for seismic response analysis, in combination with modern technical means such as finite element numerical simulation, dynamic time-history analysis, and CFD fire simulation.

**Keywords:** underground parking garage; structural design; key factors; calculation theory

### 引言

工信部等部门发布《原材料工业数字化转型工作方案(2024—2026)》等文件提出数字化、智能化新技术在工程领域中的应用。新时期对地下车库提出了新的需求,综合考虑结构的安全、适用、耐久、环保、智能、经济等因素,既需要提高传统的安全及使用功能,又要平衡结构的耐久性、环保性、智能化以及经济性,需要研究地下车库结构设计关键要素,并对其进行梳理、研究地下车库结构设计的计算理论和分析方法,有利于更好迎接目前越来越复杂的实际设计情况以及各种政策要求,具有很高的理论价值和现实意义。

### 1 地下车库结构设计的关键要素体系构建

#### 1.1 地下车库的结构特点与设计原则

地下车库作为典型的地下构筑物,其结构形式多为现浇钢筋混凝土框架或框架-剪力墙结构,整体呈埋置于地下的箱型或多层箱型结构。其结构特点显著:首先,受力状态复杂,结构要承受内部的车辆、人群等使用荷载,更要常年承受来自周围土体、地下水的巨大压力以及地面堆载等外部作用,是一种典型的土-结构共同作用体系;其次,空间尺度大,特别是大型公共建筑或住宅区的地下车库,常因平面尺寸过大而成为超长结构,温度变化、混凝土收缩徐变等引起的内力与变形不容忽视;再次,环境条

件严苛,长期处于高湿度、与土壤和地下水直接接触的环境中,对结构的防水、抗渗、抗腐蚀等耐久性要求极高;最后,功能复合化,现代地下车库常兼具人防、设备机房等多种功能,需同时满足不同功能下的荷载与防护要求。基于以上特点,地下车库的结构设计遵循以下核心原则:

(1) 安全可靠原则,确保结构在设计使用年限内,能以足够的可靠度抵抗各种可能出现的荷载与作用,防止发生破坏或影响正常使用的变形;(2) 适用耐久性原则,保证结构具有良好的使用性能,如满足净高要求、无有害裂缝、不渗漏,并具备抵抗环境侵蚀、维持长期稳定工作的能力;(3) 经济合理性原则,在满足安全和功能的前提下,通过优化结构方案、合理选择材料、精确进行计算分析,力求降低工程造价,实现技术与经济的统一;(4) 可持续性原则,响应国家绿色发展号召,在设计中考虑节能、节材、环保等因素,推动地下空间的可持续开发。

## 1.2 关键要素识别与分类

### 1.2.1 永久荷载

永久荷载是在结构使用期间,其值不随时间变化,或变化与其平均值相比可以忽略不计的荷载。对于地下车库,其主要由结构自重、土压力和水压力构成。结构自重是根据构件尺寸和材料密度计算得出的恒定荷载。土压力是侧向约束土体对车库外墙产生的压力,其大小、分布与土体力学性质、填土方式、墙体位移模式及地下水位密切相关,是地下车库最重要的侧向荷载之一。水压力则源于地下水,包括作用于底板的浮力(静水压力)和作用于侧墙的静水或动水压力。在计算中,常需根据土层的渗透性,采用“水土分算”或“水土合算”的方法来确定总侧向压力。根据有效应力原理,土骨架产生的有效应力与孔隙水压力应分别考虑,这两种荷载是决定地下车库主体结构截面尺寸和配筋的关键因素。

### 1.2.2 可变荷载

可变荷载是在结构使用期间,其值随时间变化,且变化与其平均值相比不可忽略的荷载。地下车库的可变荷载主要包括车辆荷载、人群荷载和施工荷载。车辆荷载是地下车库最主要的可变荷载,其标准值在《建筑结构荷载规范》(GB 50009)中有明确规定,通常在楼板设计中以等效均布活荷载的形式取用,但对于车道等局部区域,需考虑集中荷载的不利影响。同时,消防车荷载是车库顶板设计中必须考虑的特殊且重大的车辆荷载,其取值远大于普通小汽车荷载。人群荷载主要分布在人行通道、楼梯间等区域。施工荷载是施工阶段临时作用的荷载,如施工机具、

材料堆放、临时运输车辆等,尤其是在车库顶板尚未覆土回填时,大型施工机械的通行可能会产生比设计活荷载更大的控制性荷载,必须予以充分考虑。

### 1.2.3 环境作用

环境作用是指由周围环境因素引起的、对结构产生影响的作用。地下水腐蚀性是影响结构耐久性的重要因素,地下水和土壤中存在的氯离子、硫酸根离子等侵蚀性介质会腐蚀混凝土和钢筋,设计时需根据水土腐蚀性评估报告,采取提高混凝土抗渗等级、使用耐腐蚀水泥、增加保护层厚度或进行防腐处理等措施。温度作用对于平面尺寸巨大的地下车库尤为关键。由于混凝土与土体约束,季节性温差和混凝土水化热导致的温度变化会使结构产生巨大的温度应力,易导致结构开裂,因此超长结构必须设置伸缩缝或后浇带,并进行详细的温度应力计算。混凝土的收缩(干缩、塑性收缩等)和徐变(在持续荷载下变形随时间增长的现象)同样会产生类似降温的效应,引起结构收缩应力和变形。在设计中常将其等效为一定的温差与实际温度作用合并考虑,以准确评估其对结构的不利影响。

### 1.2.4 偶然作用

偶然作用是指在结构设计使用年限内不一定出现,但一旦出现,其量值很大且持续时间很短的作用。地震作用是地下结构设计必须考虑的关键偶然作用。地下结构的地震响应与地面结构有显著差异,其受到周围土体的约束,地震反应相对较小,但仍需根据《建筑抗震设计规范》(GB50011)进行抗震计算,特别是出入口、与主楼连接处等位置是抗震设计的薄弱环节。人防荷载是为满足战时防空要求而施加的特殊荷载,许多大型地下车库被要求兼作人防工程,设计时需在平时使用功能的基础上,复核战时核武器或常规武器爆炸产生的等效静荷载作用下的结构安全性,并满足人防规范的特殊构造要求。

火灾是另一种重要的偶然作用,虽然火灾本身不直接作为结构荷载计算,但其产生的高温会导致钢筋和混凝土材料性能严重退化,从而降低结构承载力,可能引发结构破坏。因此,结构设计必须满足《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》(GB 50067)等消防规范对构件耐火极限、防火分区、防排烟系统等要求。

### 1.2.5 特殊因素

除上述作用外,一些特殊因素也深刻影响着地下车库的设计。抗浮设计是当地下车库底板位于地下水位以下时必须进行的重要专项设计。地下水会对底板产生巨大的上浮力,若结构自重及上部荷载不足以抵抗该浮力,将导致

整个结构上浮破坏。因此,进行抗浮稳定性验算,确保抗浮安全系数满足规范要求(通常不小于1.05),必要时需设置抗拔桩、增加结构自重或采取永久性疏排水措施。基坑支护影响主要体现在施工阶段,基坑开挖会引起周边土体位移,支护结构(如桩、墙)的变形会传递给主体结构,对结构产生附加内力,设计时应考虑施工过程对永久结构的影响。相邻建筑影响则是指当地下车库靠近既有建筑物或地铁线路时,车库的基坑开挖可能导致相邻建筑产生不均匀沉降或损坏。反之,相邻建筑的荷载也会改变车库周围的土压力分布,增加车库外墙的侧向荷载。这些影响需通过精细化的计算分析进行量化评估。

## 2 地下车库结构设计中关键要素的计算理论与分析方法

### 2.1 地下车库结构设计中关键要素的计算理论

地下车库结构的计算分析是在众多较为完善的力学理论及工程设计理论基础上的,以概率论为基础的极限状态设计理论是地下车库结构设计计算分析的核心所在,要求结构在正常使用极限状态下(包括变形、裂缝等)和承载能力极限状态下(包括强度破坏、失稳等)有足够的可靠性。

荷载组合计算是该理论的具体体现,依据《建筑结构荷载规范》(GB 50009),通过对永久荷载和可变荷载乘以不同的分项系数进行组合,形成设计荷载值。对于土压力和水压力的计算,主要依据土力学中的朗金(Rankine)土压力理论或库仑(Coulomb)土压力理论,并结合有效应力原理。朗金理论适用于墙背竖直、光滑、填土面水平的理想情况,而库仑理论则能考虑更复杂的边界条件。抗浮设计的理论基础是阿基米德浮力定律,通过精确确定设计抗浮水位,计算结构排开水的重量,并与结构自重及其他压重荷载进行比较。

地震作用的计算理论主要是振型分解反应谱理论。该理论将复杂的多自由度体系振动分解为若干个单自由度体系振动的叠加,通过查询规范给定的设计反应谱来确定各个振型的地震作用,最终组合得到总的地震效应。对于火灾作用下的结构分析,则越来越多地采用基于火灾动力学和热力学理论的性能化设计理论。该理论通过设定火灾场景(如热释放速率HRR)分析火场温度分布,并根据材料在高温下的本构关系,评估结构在火灾下的响应和耐火能力。温度应力及收缩徐变的计算则基于热弹性和粘弹性力学理论,将混凝土收缩等效为温度变化(收缩当量温差),其核心公式为 $\Delta T = \varepsilon / \alpha$ ,其中 $\varepsilon$ 为收缩应变, $\alpha$ 为线

膨胀系数,然后应用传热学和结构力学理论计算温度场和温度应力。

### 2.2 地下车库结构设计中关键要素的分析方法

伴随计算机技术的不断发展,数值模拟方法已成为当前我国地下车库结构设计的主要分析手段。其中最常用的方法是有限元法(FEM),设计人员可利用Midas、ANSYS、YJK、PKPM等商业软件来建立整个地下车库的三维或二维有限元模型,在这个模型中梁、板、柱、墙等构件将被离散成若干个单元,可以较好地体现结构的几何外形、材料性质及边界条件等特性。

对于土-结构相互作用,通过施加土弹簧(Winkler地基梁模型)或建立土体实体单元的方式进行模拟,更真实地分析土压力分布、不均匀沉降等问题。针对地震作用,规范化的分析方法是振型分解反应谱法,在有限元软件中输入场地类别和设计地震分组,即可自动计算地震作用并进行荷载组合。

对于特别重要或复杂的结构,则采用动力时程分析法,即输入实际的地震波记录,直接对结构进行非线性动力分析,以获得更精确的地震响应结果。在消防安全评估方面,性能化设计越来越多地采用计算流体动力学(CFD)软件(如FDS)。通过建立车库的三维模型,设定火源参数,CFD软件可以模拟火灾中烟气的流动、温度的扩散以及能见度的变化,为排烟系统设计、疏散通道评估提供定量依据。对于超长结构的温度应力分析,同样采用有限元法,通过施加温度荷载(包括季节温差和收缩当量温差)来计算温度应力,并据此确定后浇带的设置位置和封闭时间。

针对上述有关相邻建筑的影响及复杂岩土问题,目前通常应用PLAXIS、FLAC3D等专门的岩土类有限元软件,对现场复杂施工过程进行建模并模拟开挖、支护、降水等施工步骤,实现对于临近影响程度的精确定位。使用此类先进的分析手段来开展相应工作,更为精细且全面地模拟出地下车库的地下空间开挖施工及衬砌结构设计等工作阶段中,所发生的力学变化情况,并用可视化的方式把上述信息完整的表现出来。

## 3 结束语

地下车库结构设计具有综合性较强、影响因素较多的特点,在此之上建立起包括永久荷载、可变荷载、环境作用、偶然作用及一些特殊因素在内的要素群,研究相关的计算理论和现代分析方法。研究表明,精确识别并量化这些关键要素的作用,是保障地下车库安全、耐久和经济的根本前提。设计实践中,应在严格遵循《建筑结构荷载规

范》等国家标准的基础上,根据工程的具体特点,灵活选用恰当的计算理论和分析方法。

面向未来,随着城市地下空间越来越深、越大、越复杂,

“双碳”背景下人们对绿色、低碳建筑的需求逐渐加深,地下车库结构设计会迎来新的挑战 and 机遇。未来要重点关注:(1)高性能、低碳环保材料的应用及设计理论研究;

(2)基于 BIM 技术全生命周期协同设计及管理,实现全过程的数字化、信息化设计及管理;(3)结构健康监测关键技术,针对主要受力部位开展长期监测,实时掌握其状态,并结合结构性能进行状态判断和评估维护;(4)智能技术和结构设计结合,在地下车库中开展智能通风、智能防灾系统等技术研发,以更好地保障地下车库的安全韧性和使用舒适度。不断采用新技术、新工艺,完善理论知识体系,使我国地下车库建设得到更好的发展。

#### [参考文献]

- [1]常启玉.城市住宅区地下车库顶板回填施工技术应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(34):134-136.
- [2]陈国阵,李秋林,王素.住宅地下车库结构鉴定及抗震加固设计研究[J].江西建材,2025,(11):275-277.
- [3]马靖宙.地下车库与地上建筑结构协同布置的设计机制研究[J].陶瓷,2025,(11):230-233.
- [4]庄智韬.住宅小区地下车库方案优化设计分析[J].江西建材,2025,(10):234-236.
- [5]冯泽云.底板跳仓法在地下车库结构中的应用与应力分析[J].建筑技术开发,2025,52(02):17-19.

作者简介:周慧芳(1985.08—),毕业院校:大连理工大学,所学专业:结构工程,当前就职单位:河北建筑设计研究院有限责任公司,职称级别:高级工程师。