

# 地铁建筑结构设计优化与安全性能分析

包华锋, 邹建武

中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300000

DOI:10.61369/ERA.2025100012

**摘 要 :** 随着城市化进程的加速, 地铁作为高效、便捷的城市轨道交通方式, 在城市交通体系中的地位愈发重要。地铁建筑结构设计优化与安全性能直接关系到地铁运营的可靠性、乘客的生命安全以及城市的可持续发展。本文深入探讨地铁建筑结构设计的优化策略, 详细分析其安全性能的关键影响因素与评估方法, 旨在为地铁工程建设提供理论支持与技术指导, 提升地铁建筑结构的整体质量与安全水平。

**关 键 词 :** 地铁建筑结构; 设计优化; 安全性能; 结构力学; 抗震设计

## Optimisation of Subway Building Structural Design and Safety Performance Analysis

Bao Huafeng, Zou Jianwu

China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300000

**Abstract :** With the acceleration of urbanisation, subways, as an efficient and convenient form of urban rail transit, have become increasingly important in the urban transportation system. The optimisation of metro building structure design and its safety performance directly impact the reliability of metro operations, passenger safety, and the sustainable development of cities. This paper delves into optimisation strategies for metro building structure design, conducts a detailed analysis of the key factors influencing safety performance and their evaluation methods, aiming to provide theoretical support and technical guidance for metro engineering construction, thereby enhancing the overall quality and safety standards of metro building structures.

**Keywords :** metro building structure; design optimisation; safety performance; structural mechanics; seismic design

### 引言

城市化的迅猛发展, 导致城市人口剧增, 交通需求大增。地铁具有大运量, 高效率 and 低污染的优点, 是缓解城市交通拥堵问题的重要途径。地铁建筑结构设计是承载地铁系统运营的根本, 它的设计是否合理和安全非常重要。优化地铁建筑结构设计不仅可以降低工程建设成本、提高施工效率、而且可以加强结构在多种复杂运行条件下的安全性, 确保地铁的长期平稳运营对于城市经济发展与社会稳定都有着深远的意义。

## 一、地铁建筑结构设计基础

### (一) 地铁建筑结构类型

#### 1. 明挖法结构

明挖法在地铁施工中应用较为普遍, 结构形式以矩形框架结构与拱形结构为主。矩形框架结构空间利用率较高, 施工便捷, 适合浅埋和场地空旷路段使用。拱形结构具有良好的受力性能, 能够有效地承受土压力及荷载, 多用于地质条件恶劣地区。明挖法施工结构, 首先是基坑开挖, 其次是基坑中结构的施工, 再次是土方回填。

#### 2. 暗挖法结构

暗挖法在城市繁华区域和地下管线密集地段不适合明挖法。盾构法隧道结构和矿山法隧道结构是暗挖法结构中的常见类型。盾构法隧道结构是由盾构机向地下开挖并同步拼装预制管片构成隧道衬砌的隧道结构。它具有施工速度快, 受周围环境影响较小等优点。矿山法隧道的构造主要是通过钻爆法或机械挖掘技术, 在地下逐渐挖掘并进行支撑以形成隧道, 这种方法适用于多种复杂的地质环境, 但其施工过程中的风险相对较大。<sup>[1]</sup>

#### 3. 盖挖法结构

盖挖法集明挖法与暗挖法之特点于一体, 首先建造结构顶板

并恢复地面交通后，再于顶板之下开挖土方并建造结构。盖挖法的构造有盖挖顺作法，盖挖逆作法及盖挖半逆作法。盖挖顺作法的施工顺序类似于明挖法，只需在顶底板施工完成之后再跟进操作。盖挖逆作法首先在顶板及中部进行竖向支撑施工，再从上至下逐层掘进及进行结构施工，对地面交通的影响不大，但是施工过程比较复杂。盖挖半逆作法结合了顺作法与逆作法各自的一些特点，并结合具体的工程条件灵活运用。

## （二）结构设计荷载

### 1. 永久荷载

永久荷载就是结构在使用过程中，它的数值不因时间而改变，或者它的改变相对于平均值而言可忽略。地铁建筑结构的永久荷载有结构自重，覆土压力和设备自重。结构自重是由结构构件大小及材料密度的计算来决定。覆土压力是由覆土厚度，土体重度和土压力计算理论共同决定的，一般用朗肯土压力理论或者库仑土压力理论计算。设备自重按实际安装设备种类及自重统计。<sup>[2]</sup>

### 2. 可变荷载

可变荷载就是结构在使用过程中，其数值会随着时间而发生变化，并且这种变化相对于平均值来说是不能忽视的。地铁建筑结构可变荷载包括列车荷载，人群荷载，温度作用和风荷载。列车荷载作为地铁结构中主要的可变荷载，列车荷载的大小及分布情况与列车种类，编组方式及运行速度相关。人群荷载视车站内不同地区人员密集程度而定，例如站台和通道地区人群荷载取值存在差异。温度作用综合考虑了不同季节、昼夜温差等因素引起的结构温度应力对其伸缩、变形具有显著影响。风荷载是地面车站及高架段结构设计中需要着重关注的问题，风荷载的大小由局部基本风压，地形地貌及结构的体型系数决定。

### 3. 偶然荷载

偶然荷载指结构在使用过程中并不一定会发生，但是一旦发生，其数值就非常大，作用时间也非常短。地铁建筑结构在地震作用，爆炸作用和撞击作用下可能遭遇的偶然荷载。地震作用按所在区域地震设防烈度和场地类别，依据抗震设计规范，采用反应谱法和时程分析法计算地震作用的相应方法。尽管爆炸作用与撞击作用出现的可能性不大，但其一旦出现将给结构带来严重的破坏，设计中需要采取合理的结构布置与强化构造措施以增强其抵抗偶然作用的能力。<sup>[3]</sup>

## 二、地铁建筑结构设计优化策略

### （一）结构选型优化

在地铁建筑结构设计，结构选型居于首要地位。选择中需要考虑工程地质条件，周围环境，施工方法和使用功能。比如在地质条件比较好和地下水位比较低的区域，采用明挖矩形框架结构也许是一种比较经济而又合理的方案；但在地质复杂，地下水位高，对周围环境影响有严格要求的地区，盾构法隧道结构或许更适用。通过分析比较不同结构类型力学性能，筛选出受力性能良好，材料用量小，施工方便的结构，从本质上达到优化设计目的。<sup>[4]</sup>

### （二）构件尺寸优化

确定了结构选型之后，优化结构构件尺寸可以有效地改善结构性能及经济性。以梁体，板体和柱体为例，以结构力学原理为

基础，通过构建力学模型分析了不同荷载作用下梁体内力分布规律，并采用优化算法对其合理截面尺寸进行了确定。在保证结构承载能力及变形要求的基础上，尽可能地缩小构件尺寸并减少材料用量。如对承受弯矩大的梁构件可通过适当调节梁高、梁宽来达到既能满足抗弯强度又能降低混凝土、钢材用量的目的。

### （三）结构布置优化

合理的结构布置可以使得结构受力更均匀，整体性能得到改善。地铁车站结构设计中柱网布置要兼顾车站使用功能及空间要求，又要让柱子均匀地承担上部荷载以避免局部受力过大。对隧道结构而言，要根据地质条件及线路走向等因素合理地确定其轴线位置及坡度，以减少不应有的转折与起伏及结构受力复杂程度。另外，通过对结构变形缝与施工缝的合理布置，可以有效地控制温度变化，混凝土收缩对结构开裂的影响，确保其整体性与耐久性。

## 三、地铁建筑结构安全性能分析

### （一）抗震性能分析

#### 1. 地震作用计算方法

对地铁建筑结构抗震性能进行分析，首先要对地震作用进行精确地计算。当前计算地震作用的常用方法包括反应谱法，时程分析法等。反应谱法以地震动反应谱理论为基础，把地震作用换算成等效水平地震力并由结构自振周期、阻尼比来推算地震力大小。该方法计算速度快，适合多数常规地铁结构抗震分析。时程分析法通过直接输入实际地震波或者人工模拟地震波进行动力时程分析可以更加真实的反应出地震作用下结构的受力与变形。对重要地铁结构或者位于复杂地质条件中的构造，常用时程分析法作为补充计算手段。<sup>[5]</sup>

#### 2. 抗震设计措施

为了使地铁建筑结构抗震性能得到改善，设计时采用了多项抗震措施。从结构选型上看，优先采用有利于抗震的结构，例如延性较好的框架-抗震墙结构等。结构布置时，确保了结构规则性与对称性，避免了平面不规则与竖向不规则，降低了地震时扭转效应。对结构构件进行了加固，使用了焊接和螺栓等可靠连接方式增强了结构整体性。对于那些关键的构件，例如柱子和节点，应当适度提升它们的抗震能力，增加配筋比例，以增强它们的变形和能量消耗能力。另外，隔震、消能减震技术也可应用于地震中，通过安装隔震支座或者消能减震装置来降低地震对构造的影响。

#### 3. 抗震性能评估方法

评价地铁建筑结构抗震性能，对于检验设计效果，确保结构安全至关重要。常见的抗震性能评价方法主要包括以承载力为基础，以位移为基础，以性能为基础。以承载力为基础的评价方法，主要是通过地震中结构内力及承载力进行计算来判定其是否达到强度要求。采用位移为基础的评估手段是以结构的位移响应作为主要的评价标准，例如层间的位移角度，以确保在地震影响下，结构的形变不会超出允许的范围。以性能为基础的评价方法兼顾了结构承载力，变形能力和耗能能力几个性能指标，按不同性能水准来评价结构，更加全面的体现了结构抗震性能。<sup>[6]</sup>

### （二）防火性能分析

#### 1. 火灾对结构材料性能的影响

火灾时高温环境对地铁建筑结构材料性能有明显影响。对混

凝土材料而言,其强度与弹性模量随温度的增加而减小,其内部水分挥发产生蒸汽压力可能会使混凝土出现裂缝,剥落等缺陷。钢材高温后强度及屈服点剧烈降低,变形加剧,易失稳破坏。火灾对于结构材料性能影响的大小,与温度高或低,时间长或短,材料自身性质等因素都有关系。所以在进行抗火性能分析时,必须精确地考虑火灾高温引起结构材料性能恶化的影响。

### 2. 结构抗火设计方法

为了确保火灾发生时地铁建筑结构的安全性,必须对其进行抗火设计。结构抗火设计方法包括以标准升温曲线为依据和以性能为依据。以标准升温曲线为基础的设计方法,即按有关规范中标准火灾升温曲线确定火灾下结构温度场,再按常温下结构设计方法对结构抗火验算,通过调节构件截面尺寸和增大保护层厚度,使结构达到了指定时刻抗火要求。以性能为基础的抗火设计方法更多地关注结构在火灾中的真实性能,通过构建结构火灾响应的数值模型,充分考虑了火灾的不确定性和结构的真实受力状况,结构优化设计使得结构达到经济合理同时又能满足具体性能目标。<sup>[7]</sup>

### 3. 抗火性能评估指标

对地铁建筑结构抗火性能进行评价,需明确其对应指标。常见抗火性能评价指标包括结构耐火极限,火灾作用下变形,关键构件温度分布。耐火极限为标准火灾升温情况下结构或者构件自遭受火灾开始至丧失其稳定性,完整性或者隔热性的时间范围。火灾中结构变形过大可能会造成结构破坏或者影响人员疏散等问题,所以对变形进行控制也是评价抗火性能的一个重要组成部分。通过对关键构件温度分布的监测,可了解火灾下结构的热响应,并对其是否符合抗火要求进行评判。

## (三) 抗疲劳性能分析

### 1. 疲劳荷载特性

地铁列车运行时,对轨道及下部结构施加重复动力,该重复动力形成地铁建筑结构疲劳载荷。疲劳荷载表现出循环性,随机性,复杂性等特征。列车起动,制动,加速,减速及轨道不平顺均可使结构承受荷载大小及方向发生连续改变,从而产生复杂荷载谱。相对于静荷载而言,疲劳荷载对结构产生损伤的机制有所不同,甚至当荷载幅值远远低于其极限承载能力时,在进行多次循环加载之后,由于疲劳损伤会导致结构失效。<sup>[8]</sup>

### 2. 结构疲劳损伤机理

疲劳荷载下地铁建筑结构疲劳损伤以裂纹萌生与扩展为主。一、问题的提出结构内部微缺陷或者应力集中处由于多次加载而

逐渐产生微小裂纹。这些微小裂纹随荷载循环次数增加而扩展,相连并产生宏观裂纹。宏观裂纹在一定范围内扩展时,其承载能力会逐步降低,并最终引起疲劳破坏。结构疲劳损伤与其材料性质,荷载大小及循环次数,结构应力集中程度有密切关系。<sup>[9]</sup>

### 3. 抗疲劳设计与评估方法

为了使地铁建筑结构抗疲劳性能得到改善,设计中应该采取相关措施。对结构材料进行了合理的选择,选取了疲劳性能良好的钢材与混凝土。对结构进行优化设计以降低应力集中,例如对构件连接处采取合理构造形式以避免尖锐转角及缺口。确保了结构施工质量并降低了内部缺陷。对已建地铁结构需开展抗疲劳性能评估。常见评估方法包括基于S-N曲线法,断裂力学法,有限元疲劳分析方法。基于S-N曲线方法依据材料疲劳试验数据获得应力幅值和疲劳寿命关系曲线,并通过计算结构所受疲劳应力幅值对疲劳寿命进行预测。断裂力学的方法主要是从裂纹生成和扩展的视角来探讨结构的疲劳特性。有限元疲劳分析方法是通过对构造结构有限元模型来模拟其在疲劳荷载作用下所受应力分布及疲劳破坏过程来评价抗疲劳性能。<sup>[10]</sup>

## 四、结论

总之,本论文针对地铁建筑结构设计优化及安全性能问题展开了较为系统地研究。结构设计中,对明挖法,暗挖法和盖挖法的不同结构类型及各自的特点进行说明,并对永久荷载,可变荷载和偶然荷载的结构设计荷载进行分析。提出了一套基于结构力学原理的优化设计方案,这包括选择合适的结构类型、调整构件的尺寸和优化结构布局,以及运用计算机辅助设计和数值模拟技术进行优化,例如计算机辅助设计软件的应用,有限元分析方法以及多目标优化算法等,从而达到对结构进行优化设计的目的。在安全性能分析中,对抗震性能,抗火性能以及抗疲劳等有关内容进行了深入探讨,其中包括地震作用的计算方法,抗震设计措施等、抗震性能评价方法中,介绍了火灾作用下结构材料的性能变化,结构的抗火灾设计方法及抗火性能评价指标等,并介绍了疲劳荷载特性,结构疲劳损伤机理及抗疲劳设计评价方法。通过上述研究为地铁建筑结构设计优化及安全性能保障等提供更全面的理论与方法支撑。

## 参考文献

- [1] 刘军. 地铁车站建筑结构设计优化与安全性能提升策略[J]. 建筑技术开发, 2024, 51 (10): 12-14.
- [2] 孙华. 地铁建筑结构抗震设计优化及安全性能分析[J]. 工程设计与设计, 2024, (08): 14-16.
- [3] 陈琳. 基于有限元分析的地铁建筑结构设计优化与安全性能评估[J]. 建材发展导向, 2024, 22 (05): 115-117.
- [4] 赵磊. 地铁隧道建筑结构设计优化与安全性能保障研究[J]. 居舍, 2024, (03): 125-127.
- [5] 吴伟. 地铁建筑结构设计优化中安全性能的关键影响因素及应对措施[J]. 智能城市, 2023, 9 (24): 133-135.
- [6] 王涛. 地铁车站建筑结构设计优化与安全性能分析[J]. 四川建材, 2023, 49 (11): 164-165.
- [7] 李婷. 地铁建筑结构设计优化对安全性能的提升作用研究[J]. 工程设计与设计, 2023, (20): 22-24.
- [8] 郑明. 基于多目标优化算法的地铁建筑结构设计与安全性能分析[J]. 建筑与装饰, 2023, (27): 142-144.
- [9] 杨阳. 地铁建筑结构设计优化与安全性能的关联性探讨[J]. 中国建筑金属结构, 2023, (09): 123-125.
- [10] 许文. 地铁建筑结构设计优化策略及其对安全性能的影响[J]. 工程技术研究, 2023, 8 (16): 183-185.