

TOD 有轨电车上盖转换项目结构体系选型及力学性能分析

田景文

上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125

[摘要]有轨电车上盖转换项目作为站城一体化的核心载体,其结构体系需兼顾有轨电车运营安全性及结构自身经济性。其选型的合理性与力学性能的优劣直接决定项目整体安全与使用品质。文章结合 TOD 有轨电车上盖转换项目的结构特点与设计约束,明确结构体系选型的核心原则,通过数值模拟方法对各体系的承载力、刚度、变形及抗震性能进行对比分析,提出适配 TOD 有轨电车上盖转换项目的结构体系选型策略,为同类项目的结构设计提供理论支撑与技术参考。

[关键词]TOD; 有轨电车; 上盖转换; 结构选型; 力学性能

DOI: 10.33142/ucp.v3i1.19211

中图分类号: TU248

文献标识码: A

Structural System Selection and Mechanical Performance Analysis of TOD Tram Overcover Conversion Project

TIAN Jingwen

Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200125, China

Abstract: As the core carrier of station city integration, the structure system of the tram roof conversion project needs to take into account both the operational safety of the tram and the economic efficiency of the structure itself. The rationality of its selection and the quality of its mechanical performance directly determine the overall safety and quality of use of the project. The article combines the structural characteristics and design constraints of the TOD tram roof conversion project, clarifies the core principles of structural system selection, and compares and analyzes the bearing capacity, stiffness, deformation, and seismic performance of each system through numerical simulation methods. It proposes a structural system selection strategy suitable for TOD tram roof conversion projects, providing theoretical support and technical reference for the structural design of similar projects.

Keywords: TOD; tram; upper cover conversion; structural selection; mechanical properties

引言

随着我国新型城镇化进程的加快,城市土地资源紧张和公共交通发展需求之间的矛盾日益突出, TOD 模式已成为城市更新与空间优化的重要方向。实现站城一体化融合的关键路径-TOD 有轨电车上盖转换项目,与传统建筑项目存在显著差异。它需满足下部有轨电车运营的净空、振动控制及安全防护要求,避免结构变形与振动对电车运行产生的不利影响;同时也要满足上部开发的空利用与结构安全要求,需通过转换层实现上下部结构柱网及功能的衔接与过渡。其结构体系的选型不仅关系到上下部结构的传力合理性,还直接影响项目的造价及使用年限。当前,国内针对 TOD 上盖结构的研究多集中于地铁上盖项目,缺乏通用性的选型方法与力学性能系统分析。本文聚焦 TOD 有轨电车上盖转换项目的共性需求,提出科学合理的选型策略,为 TOD 有轨电车上盖转换项目的结构设计提供理论依据与技术支撑。

1 TOD 有轨电车上盖转换项目结构特点及选型原则

1.1 结构特点

TOD 有轨电车上盖转换项目的结构体系由下部轨道结构、转换层结构及上部开发结构三部分组成。下部有轨电车轨道结构需保持通透,上部开发结构的竖向荷载和水

平荷载需通过转换层有效传递至下部基础。转换层要承担“承上启下”的传力核心作用,且需避免荷载传递对轨道结构产生的不利影响。下部有轨电车运营对净空有明确要求,不得影响电车的正常行驶与检修;上部开发功能多样,对柱网布置空间灵活性要求较高,两者柱网难以直接对应,转换层需实现柱网的合理转换,兼顾上下部功能需求。转换层作为结构薄弱部位,在地震作用下易产生应力集中,要满足抗连续倒塌的设计要求,避免因刚度突变导致地震响应放大,确保结构在多遇地震作用下的安全性。

1.2 结构体系选型原则

结构体系需具备足够的承载力、刚度及抗侧移能力,能够有效承受上下部结构的各类荷载,需要满足国家现行规范对结构安全的要求。转换层构件需避免应力集中,同时满足抗连续倒塌概念设计要求。转换层需实现荷载的直接传递,减少传力路径中的转折与应力损耗,避免出现复杂的受力状态。上下部结构的刚度匹配合理,确保结构受力均匀。结构体系需适配 TOD 项目的施工环境,避免采用施工难度大、工期长及对有轨电车运营影响大的施工工艺。转换层构件的布置需便于施工组织,确保施工安全与进度。结构体系需兼顾下部有轨电车运营与上部开发功能,同时适配上部建筑的柱网布置与空间需求,有需要时采用

隔振措施。结构选型需严格遵循现行的规范要求，针对不同抗震设防烈度，合理的选择转换结构形式与抗震措施。

2 TOD 有轨电车上盖转换结构体系类型及适用条件

梁式转换体系核心在于通过设置转换梁来实现上下部柱网的转换，上部结构柱直接落在转换梁上。其中，型钢混凝土转换梁因承载力高、刚度较大的特点，能够灵活适配不同的柱网转换需求。板式转换体系以转换板为核心的构件，转换板采用厚板设计，无需额外设置单独的转换梁。该体系的核心特点是空间利用率高，转换板表面平整，能够适配大跨度、大柱网的转换需求。箱型转换体系由上下盖板、侧板及隔板组成封闭的箱型结构，上部结构柱落在箱型转换结构上，荷载通过箱型结构均匀传递至下部基础。组合箱型结构兼具钢结构的轻质高强，以及混凝土结构的刚度大和耐久性好的优点。隔震转换体系是在传统的转换层基础上增设隔震的缓冲支座，从而形成双转换层结构。四种转换结构体系适用条件见表 1。

表 1 四种转换结构体系适用条件对比

转换体系类型	核心特点	适用跨度	适用荷载	抗震性能	造价水平
梁式转换体系	传力清晰、施工成熟、占用净空较大	≤12m	中等	一般	低
板式转换体系	空间利用率高、刚度大、自重较重	12~18m	较大	较好	中
箱型转换体系	刚度大、承载力高、施工复杂	>18m	大	好	高
隔震转换体系	隔震隔振效果好、设计精度高	不限	不限	优秀	高

3 转换结构体系力学性能数值模拟分析

3.1 数值模型构建

建模工作结合 TOD 有轨电车上盖转换项目共性开展：下部轨道结构净空 4.5m，转换层高度 3.0m，上部 10 层开发结构（每层层高 3.0m，总高 33.0m）；上部柱网 8m×8m，下部落地柱网 12m×12m，转换跨度 12m（梁/板式）、18m（箱型）、15m（隔震）。在材料选用方面，混凝土选用 C40，钢筋为 HRB400E，型钢选用 Q355B；隔震支座为天然橡胶材质（直径 800mm、厚 200mm，水平刚度 1000kN/m，阻尼比 0.05）。荷载条件：竖向荷载包含结构自重以及活荷载（住宅活荷载标准值为 2.5kN/m²，商业活荷载标准值为 3.5kN/m²）；水平荷载包括地震荷载（抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度值为 0.15g，场地类别为 II 类，设计地震分组为第一组）和风荷载（基本风压为 0.5kN/m²，地面粗糙度类别为 B 类）。采用盈建科建模，首先进行轴网定义，根据下部落地柱网 12m×12m 和上部柱网 8m×8m 的尺寸，准确绘制出各层轴网。然后依据项目的高度信息，依次定义各楼层标高，构建出结构的三维空间框架；下部轨道结构与基础之间采用固定支座

约束，以模拟其与地基之间的可靠连接，确保下部结构在荷载作用下不发生整体移动。网格：采用盈建科软件中的自动网格划分功能，结合结构的特点和计算精度要求，对模型进行网格划分，转换层核心区域网格尺寸 0.5m³，其他区域 1.0m³；钢筋采用嵌入式协同混凝土的方式进行处理。

3.2 力学性能分析结果

竖向承载力是转换结构体系核心力学指标，它能够直观反映转换层构件承受上部竖向荷载能力。通过模拟逐步施加上部竖向荷载的过程，得出各体系转换层核心构件最大应力与承载力极限值（见表 2）。表 2 显示，箱型转换体系的竖向承载力最高，极限值 8200kN，核心构件的最大应力 235MPa，应力值未超过混凝土（抗压强度设计值为 19.1MPa）与型钢（抗压强度设计值为 310MPa）的抗压强度设计值，因封闭箱型结构整体受力均匀的特点、承载力储备比较充足；隔震转换体系的承载力接近箱型，达 7900kN，隔震支座未降低竖向承载力，且有效分散荷载；板式转换体系承载力 6800kN，因转换板厚、受力均匀、应力分布合理，可以承受一定的竖向荷载；梁式转换体系承载力最低，5200kN，转换梁应力集中，梁端与柱交接处明显，需加强配筋。各转换体系竖向承载力分析结果见表 2。

表 2 各转换体系竖向承载力分析结果

转换体系类型	承载力极限值 (kN)	核心构件最大应力 (MPa)	应力分布均匀性
梁式转换体系	5200	18.7	较差（梁端应力集中）
板式转换体系	6800	16.3	较好
箱型转换体系	8200	14.9	优秀
隔震转换体系	7900	15.2	优秀

各转换体系转换层挠度对比

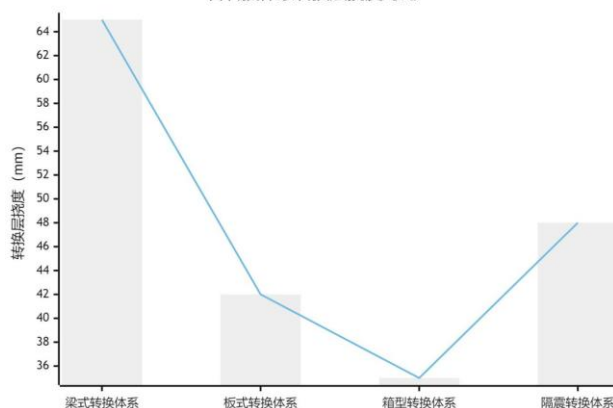


图 1 各转换体系转换层挠度对比

刚度与变形直接影响结构的稳定性与使用功能，本文通过计算各体系的侧向刚度（抗侧移刚度）、转换层挠度及层间位移角，评价各体系的刚度与变形性能，结果见表 3，各体系转换层挠度对比见图 1。

侧向刚度上,箱型转换体系最大(28000kN/m),得益于其封闭箱型结构具有出色的抗扭和抗侧移能力;板式次之(22000kN/m),转换板整体刚度大,较好地抵抗水平变形;隔震体系为18000kN/m,因隔震支座柔性降低整个体系的整体刚度,但满足规范;梁式转换体系的侧向刚度最小(15000kN/m),因为转换梁在抵抗侧移方面的能力相对较弱,易出现水平变形。变形性能上,各体系转换层挠度与层间位移角均达《高层建筑混凝土结构技术规程》要求(挠度限值 $L/300$,层间位移角限值 $1/1000$)。箱型转换体系转换层挠度最小,仅为35mm(对应 $L/514$),层间位移角0.00075;板式挠度42mm($L/428$),层间位移角0.00082;隔震挠度48mm($L/375$),层间位移角0.00090;梁式挠度最大达到了65mm(对应 $L/307$),层间位移角0.00098接近限值,需增转换梁截面或配筋量提升刚度。各转换体系刚度与变形分析结果见表3。

表3 各转换体系刚度与变形分析结果

转换体系类型	侧向刚度 (kN/m)	转换层挠度 (mm)	层间位移角	是否满足规范要求
梁式转换体系	15000	65	0.00098	是
板式转换体系	22000	42	0.00082	是
箱型转换体系	28000	35	0.00075	是
隔震转换体系	18000	48	0.00090	是

地震应力响应上,隔震转换体系转换层构件最大地震应力最小,仅为12.3MPa。隔震支座耗能减响应、防止应力集中;箱型体系的最大地震应力为13.8MPa,封闭结构分散荷载;板式体系的最大地震应力15.1MPa,应力分布均匀;梁式体系的最大地震应力17.9MPa,接近混凝土抗拉设计值,梁端易裂、延性差。地震位移方面,各体系最大水平位移均满足规范(限值66mm)。隔震体系最大水平位移58mm,虽大但隔震支座耗能,延性比3.8,抗震延性最优;箱型体系的最大水平位移42mm,延性比3.2,性能较好;板式体系的最大水平位移48mm,延性比2.9;梁式体系的最大水平位移62mm,延性比2.5,延性差。此外,隔震体系能减小有轨电车运行振动对上部建筑的影响,隔震支座的缓冲作用使振动加速度降低,提升舒适度。各转换体系抗震性能分析见表4。

表4 各转换体系抗震性能分析结果

转换体系类型	转换层最大地震应力 (MPa)	最大水平位移 (mm)	延性比	抗震等级
梁式转换体系	17.9	62	2.5	三级
板式转换体系	15.1	48	2.9	二级
箱型转换体系	13.8	42	3.2	一级
隔震转换体系	12.3	58	3.8	一级(隔震)

4 TOD 有轨电车上盖转换结构体系选型策略

4.1 基于转换跨度的选型策略

转换跨度是结构体系选型的核心影响因素,结合各体系的适用跨度的力学性能,应选用梁式转换体系,该体系传力清晰、施工成熟及造价较低等优点,能够满足中等荷载的需求。若上部荷载较大或抗震设防烈度较高,可以选用型钢混凝土转换梁,以提升承载力与抗震的性能,同时避免转换梁截面尺寸过大占用下部净空。当需要适配大柱网转换需求时选用板式转换体系,其受力均匀。上部开发对空间平整度要求较高,选用空心厚板转换体系,减轻结构自重节省材料。

4.2 基于抗震设防烈度的选型策略

抗震设防烈度6度可选用梁式和板式转换体系。若上部荷载较大,应选用板式转换体系。抗震设防烈度7度需选用板式或者箱型及隔震转换体系。其中,隔震转换体系可提升结构延性,减少地震破坏。抗震设防烈度8度及以上必须选用隔震转换体系或箱型转换体系,通过隔震支座消耗地震能量,降低上部结构地震响应。若转换跨度极大,可采用箱型+隔震复合转换体系,兼顾承载力与抗震性能。

4.3 基于功能需求与造价的选型策略

对于上部开发功能为办公与住宅的综合项目,在转换体系的选择方面,建议优先选择板式转换体系以及隔震转换体系。隔震转换体系有助于提高建筑使用的舒适度,减少外界震动对室内环境造成的干扰。对于商业项目而言,若商业项目对于净空以及层高有着较为严格的标准要求,建议选择箱型转换体系,在满足建筑功能需求的同时可以优化空间结构,提高空间的利用率。如果项目选用的是梁式转换体系,可在梁式体系的基础之上增设一些简易的隔震措施,以此来提高建筑的抗震与隔震能力。当选用隔震转换体系时需要高度重视后续的维护工作,定期检查隔震支柱,及时发现问题,及时进行处理,消除潜在的问题,确保其长期的工作性能。

4.4 选型注意事项

为了避免出现刚度突变、应力集中等相关问题,结构体系的选型需结合项目的整体设计,严格遵循相关规范标准,确保转换成构件设计参数的精准性与合理性。与此同时,科学合理的布置暗梁,并遵循相关标准规范铺设钢筋网,从而增强其承载能力提高刚度。对于箱型转换的结构,为了确保结构整体受力的协调性与稳定性,应该着重强化侧板与隔板之间的连接构造。另外,根据项目的具体工况情况以及抗震要求,科学合理的选择防震支座的型号。结构体系的选型需要充分考虑后期运营维护的便利性与经济性。鉴于项目周边存在的有轨电车运营的特殊情况,加强施工的质量管控,从而确保结构的安全稳定状态。

5 结论与展望

TOD 有轨电车上盖转换项目结构体系需兼顾有轨电

车运营安全,上部开发功能及结构自身性能,兼容适配的核心原则,严格遵循现行规范要求。本文提出了基于转换跨度、抗震设防烈度、功能需求与造价的综合选型策略,明确不同场景下的最优转换体系,为 TOD 有轨电车上盖转换项目结构设计提供了科学依据。TOD 模式推广下,有轨电车上盖转换项目规模和复杂度将增加。未来需研发新型的转换结构体系,采用新型的材料以及技术以提升 TOD 有轨电车的性能与效率。持续优化振动的控制技术,改善上部的建筑舒适度,研究多因素耦合下的力学性能,为设计维护工作提供全面的支撑。应用智能化设计与施工技术,提升项目的精确度与智能化水平。

[参考文献]

- [1]陆化普,刘若阳,张永波,等.基于 TOD 模式的都市空间结构优化研究[J].中国工程科学,2022,24(6):137-145.
- [2]吴红艳.地铁车辆段上盖 TOD 项目综合开发一体化研究[J].铁道建筑技术,2024(3):17-19.
- [3]王春森,李瑞嵩,邢民,等.轨道交通共构工程钢-混凝土组合结构体系抗震性能分析[J].工业建筑,2024,54(1):96-101.
- [4]郑非艺.TOD 开发模式下地铁高架车站设计实践——以福州滨海快线帝封江站为例[J].福建建材,2023(9):44-46.
- [5]张明,刘菁.适合中国城市特征的 TOD 规划设计原则[J].城市规划学刊,2007(1):91-96.
- [6]杜瞳瞳,卢颖,王硕.TOD 理念下的城市综合体规划设计策略分析[J].现代工程科技,2023,2(7):81-84.

作者简介:田景文(1976.10—),毕业院校:河海大学,所学专业:建筑工程,职称级别:中级。