

文章编号:1003-1995(2018)11-0001-04

高速铁路隧道关键科学问题及发展趋势

张顶立,孙振宇

(北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心,北京 100044)

摘要 分析了高速铁路隧道的主要特点,即隧道断面大,长大隧道多,地质条件复杂,使得施工风险极高,可靠性要求高,耐久性控制严格。高速铁路隧道通常成为高速铁路建设的控制性工程,因而为了安全快速地建成高速铁路网,必须在复杂长大隧道修建技术方面实现新的突破。为此提出了高速铁路隧道的关键科学问题,在对现有研究工作进行总结的基础上,提出了高速铁路隧道应重点研究的内容与发展方向。建议通过系统研究建立高速铁路隧道工程的设计理论与技术体系,形成中国隧道建造方法。

关键词 高速铁路;隧道工程;关键问题;研究进展;发展趋势

中图分类号 U45 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2018.11.01

截至 2017 年底,中国建成通车的高速铁路隧道总长度约 4 537 km,占高速铁路线路总长的约 18.1%。作为支撑高速铁路基础设施的重点学科,隧道工程也随着高速铁路的修建得到了快速发展,同时为中国高速铁路的技术进步增添了动力。正是有了长大隧道、各种复杂地质条件下隧道修建技术的进步,才使高速铁路采用大曲线半径进而使高速列车穿山越岭成为可能。因此从某种意义上而言,没有隧道技术的进步,就没有今天的高速铁路^[1]。

高速铁路通常采用直线或大半径曲线,很难绕避不良地质或障碍物,这给隧道工程带来极大挑战。与普速铁路隧道相比,高速铁路隧道的主要特点有:①隧道断面大。高速铁路隧道净空有效面积、断面形式、洞口形式等主要技术标准比普速铁路隧道高,由此造成不同空间位置处的围岩参数差异性较大,围岩结构不确定程度较高,无法采用统一的技术标准进行设计。②长隧道多。高速铁路选线设计时曲线半径大,往往出现大量的长隧道。由于隧道线路长而施工工期紧,要求隧道施工速度快,从而对支护结构设计理论和施工质量提出更高要求。③地质条件复杂,施工风险极高。在普速铁路选线设计中遇到不良地质时,可采用小半径曲线规避绕行,选择地质条件相对较好的地段开挖隧道。而高速铁路线路曲线半径大,难于规避不良地质体,从而增大了隧道的施工风险。④可靠性要

求高,耐久性控制严格。高速铁路列车运行速度快,隧道内一旦出现病害,将是巨大的安全隐患。同时,高速铁路一旦发生安全事故,往往成为社会舆论关注的焦点,社会影响深远。因此,高速铁路对支护结构的安全性和耐久性要求更高,也更严格。

尽管我国隧道工程修建技术在一定程度上得到了提升,但也面临诸多的技术挑战与瓶颈,如尚未建立完善的隧道修建理论体系,导致设计与施工缺乏系统的理论支撑,隧道运营期病害问题仍比较突出,从而危及隧道结构长期安全性。根本原因在于对围岩稳定性、支护-围岩系统协同作用、围岩和结构劣化机理及相互间作用机制等问题研究尚不够深入,仍需进一步研究和突破,以满足日益增长的高速铁路隧道建设需求。为此,本文从高速铁路隧道建设的关键科学问题出发,并对其研究现状进行总结,指出高速铁路隧道建设所面临的挑战及发展趋势,为高速铁路隧道的设计、施工以及相关研究提供参考。

1 高速铁路隧道的关键科学问题与研究进展

隧道设计和施工的核心内容是采用合理的支护方式促使围岩尽快实现平衡而不致发生失稳破坏,因此,对于高速铁路隧道而言,其关键科学问题包括隧道围岩稳定性、支护与围岩的作用关系和支护结构体系的动力响应机制 3 个方面,其中围岩稳定性的分析和判别是隧道设计的基础,支护与围岩作用体系的深化研究是支护设计的前提,而支护结构体系的动力响应机制则是隧道结构抗震和耐久性设计的保障^[2]。

1.1 隧道围岩变形和破坏规律研究

隧道围岩变形机理的研究进展和岩体力学的发展

收稿日期:2018-09-10;修回日期:2018-10-20

基金项目:国家自然科学基金(51742811,51738002);国家重点研发计划(2017YFC0805401)

第一作者:张顶立(1963—),男,教授,博士。

E-mail:dlzhang@bjtu.edu.cn

存在着紧密的关系,隧道围岩变形和破坏机制的研究是岩体力学研究的重要内容,岩体力学的发展为隧道围岩变形机理的研究提供了理论基础。

目前,隧道围岩变形机理的研究大体上采用 3 种方法:①将隧道围岩视为均匀的各向同性体,利用连续介质力学理论处理隧道工程中遇到的岩体力学问题。②仍将岩体视为一种连续介质材料,但考虑岩体被裂隙切割,利用其力学性质变化的特点来处理隧道工程中遇到的问题。③将岩体视为“岩体结构”,以岩体结构力学效应、岩体力学性质、岩体变形和岩体破坏为基础,采用岩体结构控制技术来研究和处理隧道工程中遇到的问题。

对于隧道围岩变形机理的研究,上述理论均有一定局限性,且所研究对象基本为完整岩体,而隧道工程问题多出现在碎裂岩体和土体中。因此,结合上述理论和隧道工程的实际情况进行围岩变形机理的研究是十分重要的。

围岩稳定性研究与前述的围岩变形机理的研究密切相关。这是内在的、客观的因素,同时也受到外部的、人为的因素(如隧道尺寸、埋深、施工方法等)的强烈影响,这使得围岩稳定性的理论研究难度极大。从目前的研究结果看,大都将研究重心放在围岩本身所具有的承载能力上,而后引入外部因素对围岩进行评价。

围岩本身所具有的承载能力,一般以自稳时间表示,或采用无支护跨度或围岩相对裂隙间距表示,但这些指标在实际应用中都有其局限性。在量测技术快速发展的今天,围岩松弛范围也作为一种表示方式。随着开挖深度的增加,越来越多地发现初始地应力场与围岩强度比也是判定围岩稳定性的一个重要指标。而以“岩体结构”观点为代表的学派,则认为围岩稳定性受围岩结构的控制,对于不同结构的围岩,其稳定性具有本质区别。可见,如何准确评价围岩本身的自稳能力是一个亟待解决的问题。

1.2 隧道支护与围岩作用体系研究及设计方法

目前,新奥法已成为我国隧道工程设计施工的主要方法之一。其核心技术是以喷混凝土和锚杆作为初期支护,与围岩共同承受隧道开挖后的附加荷载,同时,在整个施工过程中,根据量测结果及时变更设计和施工参数,确保施工的安全性和经济性。

20 世纪 80 年代初意大利 Lunardi 教授^[3]提出了新意法。该工法将主要注意力放在掌子面前方一定范围内的围岩稳定上,通过控制掌子面前方围岩变形,来减小隧道开挖后的围岩变形量。

我国学者在上述领域中,也有大量研究成果,如轴变论、联合支护理论、锚喷弧板支护理论、松动圈理论、

主次承载区支护理论、软弱围岩工程力学支护理论等,但应用情况均不理想,具有一定局限性。

从当今国内外地下工程的设计实例来看,大致可概括为 3 种设计方法^[4]:

1)以围岩分级为基础的设计方法。这是各国普遍采用的方法,实质上属于半经验、半理论的设计方法。隧道工程的基本特点是围岩地质环境复杂,要取得准确的地质、围岩参数、设计荷载参数等数据极其困难,且一些施工技术的机理复杂,如锚喷支护等,当前对其研究尚不完善且计算理论不太成熟。因此,在相当长的历史时期内,这种依赖围岩分级的设计方法仍将起很大作用。这种设计方法的可靠性决定于围岩分级的可靠性。因此,围岩分级方法也是各国研究的重点。其设计程序为:分析工程地质情况,对拟建工程进行围岩分级,以围岩级别为依据,按有关规范^[5]提供的参数表或类似工程经验数据,查出支护参数,以此作为设计依据绘制施工图。现行设计往往都是半定量设计,即只给出支护参数范围,设计者必须以丰富的设计经验作出合理判断,不能一味以安全保险为目的选用最大值,否则就失去了类比设计给出的一定范围的价值,造成大量浪费。

2)以解析理论为基础的设计方法。尽管经验设计法简单易行,且只要地质条件吻合,则设计可靠性也较高。但由于隧道工程的复杂性,如围岩地质条件复杂,以及对无经验可参考的大断面隧道和特殊地质条件的隧道,只能采用解析方法进行预设计,或者用解析方法对经验设计的参数予以解析验证,甚至要进行专门的试验研究^[6]。

采用理论方法的设计程序为:分析工程地质情况,对拟建工程进行围岩分级,选定结构计算模型,初步拟定结构截面尺寸,确定结构所受的围岩压力,结构内力计算,截面配筋设计,结构稳定性验算及安全性评价,绘制结构施工图^[7]。其中结构计算模型选定、输入计算用的各种参数是关键。要综合考虑围岩地质特征、结构形式、洞室跨度、埋深、拟采用的施工方法等一系列因素,力求使计算结果符合实际受力情况。

3)以量测信息为基础的设计方法,即信息化设计方法。地下工程设计由于地质环境复杂、基础信息缺乏,无论采用理论计算法或工程类比法,依据目前的技术水平,都不可能得到十分准确的结果。另外,由于工期、经费、勘测手段等因素的限制,在开挖前不可能将地质信息等施工中可能出现的因素彻底厘清,而必须通过开挖后所揭示的地质条件对围岩级别进行再认识和再确定,如此将严重影响设计和施工决策的可靠性。设计文件中所拟定的断面尺寸、结构形式、支护参数、

预留变形量、施工方法等设计参数均不是一成不变的,需要在开挖过程中重新评估和确认,必要时需作调整或修正^[8]。因此,隧道工程的设计无法在开工前就一步到位,这是隧道工程有别于其他土木工程的重要特征。正因如此,目前在隧道工程设计中,广泛采用经验借鉴、理论分析、现场量测、信息反馈、超前预报和动态调整相结合的信息化设计方法,也即动态设计方法。

1.3 隧道结构体系的长期安全性

隧道结构长期安全性与其所处环境、材料组成、结构本身等诸多方面有关。一般来说,随着结构物使用年限的增加,由于外部条件的变化和养护维修管理不善,结构物会慢慢劣化,其性能必然降低,此劣化程度视各种条件有很大的差异^[9]。

西方国家建设和运营隧道的经验表明,重视基础设施的耐久性有重要的社会意义和经济价值。我国铁路隧道、公路隧道、城市隧道工程也不例外,很多隧道运营后不久就进行大修,严重时不仅影响正常使用,还会演变为潜在的安全隐患。这更说明了重视隧道结构耐久性设计和进行结构耐久性的研究是必要的。

此外,高速铁路隧道在长期运营过程中,对衬砌结构产生 2 方面的动力影响:①气动作用对隧道拱墙结构的影响;②列车振动对仰拱结构的影响。而无论是拱墙还是仰拱承受的作用,最终都将传递至围岩。

围岩在长期的列车动力作用影响过程中,参数发生劣化,形成附加荷载作用于隧道结构上。初期支护结构作为和围岩之间联系着的结构必然受到围岩劣化的影响,所受荷载增加,并传递至二次衬砌,降低支护结构体系的安全性^[10]。列车动力作用是一个长期往复的过程。在这一过程中,支护结构与围岩形成了一个交互作用的体系,最终体现为服役性能的下降。

既有成果对评估围岩损伤、衬砌性能下降都有一定的借鉴作用,但无法指导高速铁路隧道长期安全性评价。原因在于:①高速铁路列车气动效应用的主要部位是隧道的拱墙结构,拱墙和仰拱之间存在一定的连接,二者相互作用。②列车动载主要集中在仰拱,仰拱围岩在长期作用下发生劣化,导致作用在仰拱结构的荷载增加。③围岩劣化、拱墙结构变形、仰拱结构损伤,三者交互作用,形成附加荷载,导致了承载能力和耐久性能降低。

2 现有研究存在的主要问题

在“十二五”期间,国家自然基金委与原铁道部设立了“高速铁路基础研究联合基金”,隧道方面部署了 4 个课题,积极开展了隧道服役行为及安全风险控制研究,深化了隧道极限状态设计理论及其应用,推进了

交叉隧道动力特性及结构安全性理论研究,为提高铁路隧道建设水平和工程质量提供了技术支撑。但对于上述关键科学问题,无论从研究深度还是广度上看,都无法满足我国日益增长的高速铁路隧道大规模建设需求,主要体现在以下 3 个方面:

1) 对隧道围岩工程响应机理缺乏系统全面的认识。对高速铁路隧道围岩变形机制和失稳模式的认识较模糊,也缺少围岩稳定性的评价方法和评价标准,且围岩变异性影响未予考虑。设计时偏于安全考虑致使工程措施越来越保守,工程投资难以有效控制。

2) 对隧道支护的本质作用认识不清。工程实践证实初期支护是确保围岩稳定性的关键工序,而目前对于超前支护、初期支护和二次衬砌的分工和合作关系尚不明确,对于各项支护作用的本质、目标和技术标准缺乏清晰的认识。传统设计方法对初期支护的作用认识不足,对支护结构与围岩作用的力学特性和变形控制机理认识不清,仅强调二次衬砌结构荷载校验,而忽略初期支护及超前预支护的作用,这与事实严重不符。而隧道设计理论远远落后于工程实践,隧道设计多依赖于工程经验,缺乏准确的量化设计方法,实施的工程措施难以可靠地控制围岩的稳定,特别是在高速铁路大断面隧道中,致使施工安全事故时有发生。

3) 对高速铁路隧道结构病害演化机制及其对安全性的影响研究不足。往复循环动载作用下,高速铁路隧道围岩、初期支护累积损伤所致应力转移是导致衬砌结构劣化加剧、诱发病害的根本原因。目前对隧道病害成因的研究主要针对具体工程,具有一定局限性。就目前隧道质量缺陷和病害机理对结构安全性影响的研究现状来看,研究深度和广度不够,其实用性和合理性尚有待于验证,未形成一套完整的有关隧道病害机理的理论体系,而基于高速铁路特点的结构安全性的研究尚处于空白。

3 研究重点与发展方向

随着高速铁路隧道建设规模的扩大,隧道穿越的地质条件也趋于复杂多变,采用传统的基于工程经验的设计理论已无法满足高速铁路隧道高可靠性的要求。因此,很多方面的研究尚需进一步完善和深化,主要集中在以下方面:

1) 隧道围岩变形破坏机理及安全性评价方法。隧道围岩稳定性机制是支护设计的前提。为此首先需明确隧道围岩变形破坏全过程演化机制,揭示复杂条件下隧道灾变衍生机理和演化规律,并据此阐明复杂隧道围岩安全性内涵,建立相应的评价体系和评价方法。由此确定相应条件下的控制对策,明确控制重点

和目标,提出围岩安全性控制原理。

2)隧道支护体系的协同作用理论与设计方法。我国目前隧道设计理论严重落后于工程实践。为了实现支护结构体系的定量化设计,首先,应明确隧道支护作用的本质特征,揭示支护-围岩作用全过程演化机制,阐明超前支护、初期支护和二次衬砌的分工和合作关系;其次建立支护-围岩系统鲁棒性预测模型,提出相应的控制原理与措施,建立隧道支护结构稳健性设计理论体系和技术标准,最终形成中国隧道修建技术体系。

3)高速铁路隧道结构体系的动力响应与长期安全性控制。隧道围岩与支护结构体系的动力响应在一定程度上表征了隧道工程的长期安全性,主要体现在动力荷载效应与时间效应 2 个方面。为此首先应明确在循环气动荷载和振动荷载作用下高速铁路隧道结构体系的疲劳损伤规律,并研究支护-围岩系统的材料损伤机理、构件参数弱化规律、结构性能衰减机制以及系统整体稳定性演变规律,从而建立隧道结构体系长期安全性评价体系,据此提出长期安全性控制理论。

4)高速铁路隧道智慧化建造技术。随着电子信息技术的发展,隧道施工逐渐向信息化、智能化和智慧化方向发展。通过数据实时反馈及时修正设计方案,在一定程度上克服了经验设计方法的局限性,而其核心则是科学的设计理论。同时超前地质预报手段愈发精确,而如何实现地质预报与隧道设计的有效联动,其关键则是利用地质预报数据对隧道围岩的工程响应和安全效应进行精准预测和判断,从而实现智能决策。因此,结合信息反馈、多源异构数据融合、隧道力学和

综合评估等多学科理论和方法,有针对性地开展高速铁路隧道支护结构体系的设计理论和关键技术研究,对于保证高速铁路隧道长期安全性具有重大的理论意义和工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 张顶立,王梦恕,高军,等.复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):290-296.
- [2] 张顶立.隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J].力学学报,2017,49(1):1-19.
- [3] LUNARDI P.隧道设计与施工——岩土控制变形分析法[M].北京:中国铁道出版社,2011.
- [4] 张顶立,陈立平.隧道围岩的复合结构特性及其荷载效应[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3):456-469.
- [5] 中华人民共和国铁道部.TB 10003—2016 铁路隧道设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2016.
- [6] 孙振宇,张顶立,房倩,等.隧道初期支护与围岩相互作用的时空演化特性[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增2):3943-3956.
- [7] PANET M. Le Calcul Des Tunnels Par La Methode Convergence-confinement[M].Paris: Press De Iecole Nationale Des Ponts et Chaussres,1995: 75-100.
- [8] 孙振宇,张顶立,房倩,等.基于超前加固的深埋隧道围岩力学特性研究[J].工程力学,2018,35(2):92-104.
- [9] 宋瑞刚,张顶立.“接触问题”引起的隧道病害分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,14(4):69-71.
- [10] 仇文革,冯冀蒙,陈雪峰,等.深埋硬岩隧道初期支护劣化过程衬砌力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(1):72-77.

Key Scientific Problems and Development Tendency of High Speed Railway Tunnel

ZHANG Dingli, SUN Zhenyu

(Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The main characteristics of high speed railway tunnels were analyzed, including large tunnel sections, a lot of long tunnels, poor geology and complex topography, which leading to extremely high construction risk, high reliability requirement and strict durability control. Thus the high speed railway tunnels usually become control projects for high speed railway construction. Therefore, in order to build the high speed railway network safely and quickly, the new breakthroughs must be made in the construction technology of complex long tunnels with large section. The key scientific problems of high speed railway tunnels were proposed. On the basis of summarizing the existing research work, the content and development directions of the key research on high speed railway tunnels were put forward. It is suggested that the design theory and technical system of high speed railway tunnel engineering should be established systematically to form the method of tunnel construction in China.

Key words High speed railway; Tunnel engineering; Key problem; Research progress; Development tendency

(责任编辑 李付军)