

山区高速公路隧道结构的设计要点

章日凯

杭州市交通规划设计研究院有限公司

摘要：现阶段山区高速公路隧道工程在建设期间均存在隐蔽性强、安全隐患较多等问题，如没有加强设计期间的管控力度，将会严重影响到工程建设期间的综合效益，导致工程施工安全事故频繁出现。因此在山区高速公路隧道工程实际工作开展过程中，设计人员需要着重分析存在于高速公路隧道结构设计及实施期间的难点，结合工程具体建设要求，制定合理的设计方案。本文就针对此，首先剖析山区高速公路隧道结构设计原则，明确高速公路隧道结构设计具体内容，提出山区高速公路隧道设计原则与设计注意事项，以期对相关工作人员提供理论性帮助。

关键词：山区高速公路；隧道结构；设计原则；设计要点

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.11.055

前言：随社会经济发展速度不断加快，高速公路隧道工程数量增多，高速公路隧道结构更复杂。为从根本上提升高速公路隧道设计水平，还需要明确隧道结构设计原则，结合工程所在地区地理条件与使用特征，不断优化高速公路隧道结构设计方案。积极引进先进的BIM技术手段，构建高速公路隧道结构三维模型，确保设计出的高速公路隧道结构能够在保障工程建设质量及效率中发挥出重要作用。

一、山区高速公路隧道结构设计原则

（一）隧道洞口设计原则

洞口是隧道的咽喉，隧道洞口地质条件一般较差，岩体破碎、风化较为严重，常遇有松散堆积体；隧道洞口开挖后，改变了地表形态，形成洞口边坡、仰坡，可能引起坍塌、产生偏压、诱发滑坡等地质灾害。因此，隧道洞口应尽量避免不良地质地段，并根据“早进晚出”原则尽量降低边、仰坡开挖高度，减少对环境破坏。隧道洞门设计“以人为本”，尽量零开挖洞口，并重视隧道洞口景观设计，力求简洁、造型新颖、自然和谐、经济美观，突出表现地方特色和不同角度的视觉效果，并提高行车安全性。

（二）隧道衬砌设计原则

隧道衬砌的设计，应根据沿线不同的地段的工程地质、水文地质及周围环境的要求，通过技术、经济、环境影响和使用效果等综合比较，选择合适的结构形式和施工方法，确保隧道结构应有足够的强度和耐久度。

（三）隧道防排水设计原则

隧道防排水遵循“防、排、截、堵结合，因地制宜，综合治理”的原则，保证隧道结构物和营运设备的正常使用和行车安全。隧道防排水设计应对地表水、地

下水妥善处理，洞内外应形成一个完整通畅的防排水系统。对地下水发育，且修建隧道会对生态或工程环境可能产生不利影响的地段，采取“以堵为主，限量排放”的原则。

二、山区高速公路隧道结构设计要点

（一）隧道横断面设置

隧道横断面除应满足隧道建筑限界的规定以外，还应考虑通风设备、排水、照明、消防、监控、管线电缆等设施所需的富余量。对工程各项设计方案展开全面分析，实现以最小投资成本换取最大化目标。假定山区高速公路隧道结构为双向分离式，经过优化分析确定的隧道横断面内轮廓采用拱部为三心圆、侧墙为大半径圆弧的断面形状，内部空间还应考虑侧墙预留装修层10cm，拱部预留施工误差5cm。

（二）隧道洞口设计

洞口设计既要注重建成以后的整体效果，又要注意减少施工过程中对山体的扰动和破坏，应尽可能与洞口地形协调，保护自然环境，按照“早进洞、晚出洞”的原则，提早施作明洞或洞门结构，减少洞口开挖，体现“不破坏就是最大的保护”这一设计理念。同时适当设置诱导设施，使驾驶员尽快适应洞内外行驶环境变化，以利行车安全。

隧道洞口段开挖进洞，以不产生过大的坡面开挖痕迹为原则。设计时考虑采用针对性的技术手段，结合洞口超前支护，尽量降低边仰坡开挖高度，减少对自然环境的破坏；洞口仰坡开挖痕迹通过接长明洞，在隧道顶回填土石、恢复植被等进行掩饰，洞口坡面（特别是仰坡坡面）采取构造措施，淡化或隐藏支挡结构物的存在。

（三）隧道支护结构设计

现代支护形式要求在洞室开挖后及时进行。支护与围岩紧密贴合，并且本身具有一定的柔性和变形特性，在开挖后及时有效地控制和调整围岩应力的重分布，最大限度保护岩体结构和力学特性，防止围岩松动和坍塌。

隧道衬砌结构主要采用喷锚初期支护与二次衬砌的复合式衬砌。如衬砌结构的柔性与整体性较好，还需要将结构设置成拱形或者弧形，避免关键块结构掉落，对隧道岩层应力结构造成不利影响。

锚杆支护结构主要用于隧道围岩支护形式，主要由黏结型、端头锚固型、摩擦型与混合型组成。隧道支护结构的最大特征主要就是从岩体内部约束围岩形变压力，从而提供支护阻力，减少山岩压力传递给隧道衬砌

结构。在锚固结构周边形成压应力区域，改善围岩结构应力分布特征。进一步提高围岩结构的整体性，增强围岩结构的力学传导性能，对能够影响力学传递效果的围岩黏聚力、内摩擦角以及抗压强度进行全面分析，钢架支护结构的刚性较强，主要应用在隧道开挖初期支护期间，配合初期支护方式，提高初期支护体系承载范围。钢架支护设计主要用于控制钢架与围岩结构的变形。根据使用材料特征，钢架也可以细致划分为钢拱架以及格栅钢架。相较于钢拱架而言，格栅钢架具有重量轻、受力均匀、承载力强等特征，能够与隧道围岩结构紧密结合在一起。

（四）BIM技术在高速公路隧道结构设计中的应用

在传统交通设计行业，通常采用二维设计和平面出图的方式。随着BIM技术的成熟，BIM技术展现出来的可视化、协调性、模拟性、优化性及可出图性等优势，使得BIM技术在工程设计领域应用越来越多。

BIM技术在高速公路隧道结构设计中的应用，可借助BIM技术构建三维可视化模型，着重分析工程施工现场复杂地形环境，确保设计出的方案能够与工程实际相符。

在隧道洞身设计过程中，主要包括隧道平面、纵断面、横通道等设计工作。在使用BIM技术时，可以导入地址信息及三维地图模型，对周边围岩条件、隧道埋深、隧道净距离等信息进行全面分析，从而选择更加适宜的衬砌结构。在布置横通道完成后，优化隧道洞身设计方案。

利用BIM技术构建起三维隧道实景模型图，确保隧道内较为复杂的空间关系，能够在三维模型上直观展现出来。要求在模型构件时应当着重关注隧道埋深、地质条件穿越情况、线间距大小、洞口偏压情况，借助直观对比分析，制定出切实可行的隧道施工方案。

如高速公路的特长隧道需要设置竖斜井来满足隧道通风要求，还可利用BIM技术对比不同斜井位置的设置优势，选择最佳斜井位置，充分发挥出斜井布置工作的积极作用，提升工程设计效率。

三、隧道结构计算注意事项

建立隧道结构计算模型，应着重评估隧道结构设计期间的安全性，配合使用有限元分析软件。在设置模型集合边界与参数过程中，需要首先分析平面应变问题，取隧道围岩结构的4倍开挖洞径。隧道模型的上边界为自由边界，可以发生竖向压缩变形以及水平位移。隧道围岩与衬砌结构的参数可以依照设计资料、岩土勘察报告、参数等情况确认。

划分隧道结构网格图。着重分析网格尺寸、网格数量对数据模拟结果以及计算效率造成的影响，在着重考虑围岩应力变形准确度、计算机运行速度的情况下，将隧道区域网格进行划分，确保网格向外逐渐变稀。

隧道围岩结构破坏模拟需要采用专项屈服模型，模型在模拟围岩变形特征时需要计算参数容易测定，着重

考虑围岩结构的抗拉强度值，弥补摩尔库伦准则导数在节点处的不连续问题。

四、山区高速公路隧道结构设计案例

本文以某山区高速公路工程为例，该工程采用双向四车道高速公路标准，设计速度100公里/小时，路线全长为85.5公里。项目共设置隧道29座，隧道总长33.7公里，其中特长隧道3座，长隧道9座，中短隧道17座。工程所在区域属中山丘陵，项目沿线以低山丘陵间夹沟谷为主，地势起伏大，区内植被茂盛，以松、杉、灌木为主。

工程穿越地层结构主要为强风化岩以及中风化岩。路线沿线断层发育，岩体破碎、风化强烈，多数断裂带地貌上多显示为沟谷洼地，局部形成峭壁。位于隧道处的断裂严重影响隧道的稳定性，易形成坍塌、涌水等工程问题。项目沿线地下水总体埋深较浅，主要接受大气降水和地下侧向径流补给，在断层带或岩性接触带附近可能存在富水带，隧道施工时可能出现涌水突泥。

（一）一般围岩条件的隧道结构设计

该工程规模大，隧道数量多，项目沿线地质变化较大。为提高设计效率和质量，提高隧道设计的标准化程度是非常重要的。对一般围岩条件进行预设计，在切实进行围岩分级，充分考虑应用条件下，采用标准设计法。标准支护模式的主要构件是喷射混凝土、锚杆、钢支撑等，同时要考虑开挖、仰拱、二次衬砌等。

初期支护参数确定主要依据工程类比法确定，二次模筑衬砌衬砌部分承载结构计算，计算模型为荷载结构体系，初期支护与二次衬砌之间防水层只传递径向力。计算按《隧规》（JTG 3370.1-2018）规定进行。各种围岩及断面条件下的支护参数见下表。

（二）高压富水层的隧道结构设计

根据工程实践中水量、水压对施工安全、施工难度的影响，一般情况下水压高于1MPa、水量大于1000m³/d，可视为高压富水层。隧道穿越高压富水层时易产生突水突泥，给施工带来极大风险，因此需要对高压富水层进行专项设计。

隧道穿越高压富水层，首先要处理地下水，基本原则为堵排结合，排就是降低地下水位、降低水压；堵就是降低地层渗透系数，减小涌水量，同时加固围岩。处理地下水是，要综合考虑地下水排放条件、对周边环境影响、围岩条件、施工安全、施工条件等因素，既要保证掌子面稳定和开挖施工安全，又要保证施工的可操作性，使工程顺利推进。

具体设计处治措施如下：

①加强超前预报，提前掌握涌水动态。暗洞掌子面采用TSP长距离预报+地质雷达近距离预报+掌子面6处超前钻孔的综合预报方法，精准掌握掌子面前方围岩变化及出水情况，并根据预报情况制定堵水方案与注浆参数。

②采用控制爆破，保护围岩完整性。考虑到该段围

表1 隧道一般断面复合式衬砌支护参数

衬砌类型	超前支护	初期支护				二次衬砌	
		锚杆	钢筋焊接网	喷砼	钢拱架	拱圈	仰拱
Va型	管棚或超前小导管	φ25先锚后灌式注浆锚杆—0.5m×1.0m,长3.5m	A6	25cm C25砼	18号工字钢拱架间距0.5m	45cm C30模筑钢筋砼	45cm C30模筑钢筋砼
Vb型	管棚或超前小导管	φ25先锚后灌式注浆锚杆—0.75m×1.0m,长3.5m	A6	25cm C25砼	18号工字钢拱架间距0.75m	45cm C30模筑钢筋砼	45cm C30模筑钢筋砼
Vc型	管棚或超前小导管	φ25先锚后灌式注浆锚杆—0.75m×1.0m,长3.5m	A6	25cm C25砼	16号工字钢间距0.75m	45cm C30模筑钢筋砼	45cm C30模筑钢筋砼
IVa型	超前锚杆	φ25先锚后灌式注浆锚杆—1.0m×1.0m,长3.0m	A6	20cm C25砼	格栅钢架间距0.75-1.0m	40cm C30模筑砼	40cm C30模筑砼
IVb型	超前锚杆	φ25先锚后灌式注浆锚杆—1.0m×1.0m,长3.0m	A6	20cm C25砼	格栅钢架间距1.0m	35cm C30模筑砼	35cm C30模筑砼
IVc型	超前锚杆	φ25先锚后灌式注浆锚杆—1.2m×1.2m,长3.0m	A6	20cm C25砼	格栅钢架间距1.2m	35cm C30模筑砼	-
IIIa型	-	φ25先锚后灌式注浆锚杆—1.2m×1.2m,长3m	A6	15cm C25砼	格栅钢架间距1.2m(局部)	35cm C30模筑砼	-
IIIb型	-	φ25先锚后灌式注浆锚杆—1.5m×1.5m,长2.5m	A6	10cm C25砼	-	35cm C30模筑砼	-

岩位于强~中风化砂岩内,岩质较坚硬,施工时应采用预裂爆破技术,周边眼采用不耦合装药或水压预裂爆破技术,并严格控制周边眼的钻孔方向,最大限度保护拱顶及周边围岩的完整性,避免爆破导致的节理面贯通从而形成涌水通道。

③根据地质超前预报,当通过超前探孔判断存在突水可能时,即采取超前全断面帷幕注浆堵水,注浆圈范围为开挖轮廓线外6m,每循环注浆长度为30m,注浆材料推荐采用水泥水玻璃双液浆。注浆后隧道限量排放标准为每延米洞壁渗流量不大于1m³/d,并采用环、纵向盲沟引入中心水沟内,避免隧道衬背承受水压。

(三) 岩溶隧道结构设计

岩溶对隧道工程的影响主要来源于洞穴、地下水、洞穴填充物,可能引起隧道坍塌、洞顶地表塌陷。岩溶水处理宜采取疏导为主的措施,尽量恢复或维持既有排泄通道,必要时增设排水洞、管涵等措施。隧道衬砌结构相应加强。

①溶洞位于隧道拱部:施工前采用综合超前地质预测预报措施,摸清楚溶洞规模、填充物类型、溶洞底岩层至开挖面的厚度及是否与地面贯通等详细资料,防止出现突水涌泥事故。采用超前帷幕或周边注浆的方式加固溶洞填充物;对于溶洞填充物已坍塌的情况,采用清除危石、锚喷防护、混凝土护拱及浆砌片石回填密实等措施加固围岩和衬砌。

②隧道从溶洞中穿过:当溶洞规模较大,溶洞内充填物松软时,首先应采用帷幕注浆进行加固;当基础处理工程修建困难,或要求不堵塞水流时,可根据具体条件采用梁或板跨越的形式;有条件对基础进行处理时,采用换填、注浆加固或桩基等方式加固隧底充填物,以

保证隧道的安全。

③溶洞位于隧底时:根据溶洞顶岩层厚度的大小、岩溶水的情况,可采用局部回填、对溶洞顶采用锚喷网加固、钢筋混凝土柱支顶、基底注浆等加固措施。对于岩溶水发育的情况,采用扩挖排水沟或引水洞、设置涵洞等措施,保留恢复岩溶水通道。

五、结语

结合山区高速公路隧道工程,分析隧道结构设计原则以及断面形式,在制定高速公路隧道支护方案过程中,需要切实分析隧道结构力学特征,根据实际施工方法,选择适宜的围护结构形式。山区高速公路隧道在设计初期之后以及二次衬砌结构后,还应当结合实际设计方案,开展高质高效的施工工作,加强施工全过程管控力度,确保隧道结构强度与稳定性能够在延长工程全生命周期中发挥出重要作用。

参考文献

[1]中华人民共和国行业标准.JTG 3370.1—2018 公路隧道设计规范(第一册:土建工程)[S].北京:人民交通出版社.2019.
 [2]田志宇,汪波.公路隧道结构计算改进探索与工程实践[M].北京:人民交通出版社.2018.
 [3]肖广智.不良、特殊地质条件隧道施工技术及实例[M].北京:人民交通出版社.2015.
 [4]何川,张志强等.高速铁路隧道[M].北京:中国铁道出版社.2021.
 [5]吴继峰等.BIM技术在公路隧道工程设计中的应用探索[J].隧道建设(中英文),2019,39(01):310-320.