



“十三五”国家重点图书出版规划项目

中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

公路隧道结构计算改进 探索与工程实践

田志宇 汪 波

编著

Improvement Exploration
and Engineering Practice
of Highway Tunnel Structure Calculation



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十三五”国家重点图书出版规划项目

中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

公路隧道结构计算改进 探索与工程实践

田志宇 汪波

编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书首先提出目前隧道结构计算中主要存在的四个问题:①对隧道支护体系各个组成部分的具体作用没有统一认识;②初期支护与二次衬砌的荷载分担比例没有定论;③没有初期支护与二次衬砌的承载能力计算方法;④《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)与《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)中结构计算部分条文存在错漏碰缺,直接影响计算精度。进而针对上述问题进行深入研究,根据研究成果,提出了“基于承载能力量化分析的公路隧道支护体系设计方法”,并在部分实际项目中成功应用,取得了良好的工程效果。

本书提出的一些规范修改建议,可为相关规范的修编提供参考。同时,全新的设计方法在工程实践中的成功应用,也可供其他类似工程借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道结构计算改进探索与工程实践 / 田志宇,
汪波著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.3
ISBN 978-7-114-14483-7

I. ①公… II. ①田… ②汪… III. ①公路隧道—结
构计算—研究 IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 013580 号

书 名:公路隧道结构计算改进探索与工程实践

著 作 者:田志宇 汪 波

责任编辑:王 霞 李 娜

责任校对:张 贺

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京盛通印刷股份有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:9.5

字 数:210千

版 次:2018年5月 第1版

印 次:2018年5月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14483-7

定 价:68.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

作者简介

Author Introduction

田志宇

田志宇,男,1981年3月生,2006年毕业于西南交通大学桥梁与隧道工程专业,获硕士学位,现就职于四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院,作为设计负责人主持设计了70座隧道,参与设计了600余座隧道,获省部级科技进步一二等奖各1项、四川省勘察设计一等奖4项,发表了30余篇学术论文,撰写或参与编写了2部专著,获得了6项专利、3项软件著作权,取得多项研究成果,其中小净距隧道设计与施工关键技术、隧道抗减震技术、隧道全自动结构计算软件、四川省公路隧道通用图等成果已在实际工程中得到广泛应用。



汪波

汪波,男,1975年10月生,工学博士,西南交通大学地下工程系教授,博士生导师,大型及复杂交通隧道工程教育部创新团队成员,中国土木工程学会交通专委会委员,国家自然科学基金通讯评审专家,入选“第四届中国公路隧道优秀工程师”。

近年来主持国家自然科学基金面上项目2项、国家重点研发计划及国家科技支撑计划子课题各1项,国家重点实验室基金1项、省部级及横向科研课题多项;主研了包括863、973、国家杰出青年基金等多项国家级、省部级科研课题,参与了拉林铁路、川藏公路、蒙华铁路、滇中引水工程、西成铁路、合福高铁等重大工程的项目咨询与研究。在《Structural Control and Health Monitoring》《岩石力学与工程学报》等国内外期刊上发表论文60余篇(其中SCI检索16篇,EI检索20余篇),一篇文章入选“领跑者F5000-中国精品科技期刊顶尖论文”。曾任SCI期刊《Applied sciences》(special issue)“Structural Health Monitoring (SHM) of Civil Structures”副主编。担任《Earthquake Engineering and Engineering Vibration》《Energy Exploration and Exploitation》《中国公路学报》《振动与冲击》《西南交通大学学报》《隧道建设》等多部期刊审稿人。获省部级科技进步奖6项,其中特等奖1项、一等奖1项、二等奖3项、三等奖1项。获国家授权专利12项,软件著作权1项,参编教材1部。



由于隧道与地下工程的复杂性,当前隧道结构设计是以工程类比法为主,结构计算为辅。有些设计院甚至直接省略了隧道结构计算这一步,仅使用工程类比法进行隧道结构设计。造成这种局面的原因一方面是工程类比法简单实用,长期以来设计人员习惯于按该方法进行隧道结构设计;另一方面是隧道结构计算本身存在一些问题,使其不能在设计过程中发挥应有的作用。

目前隧道结构计算主要存在以下四个问题:①对隧道支护体系各个组成部分的具体作用没有形成统一认识,尤其是对系统锚杆作用的认识分歧很大;②初期支护与二次衬砌的荷载分担比例没有定论;③没有初期支护与二次衬砌的承载能力计算方法;④《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)与《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)中结构计算部分条文存在错漏碰缺,直接影响了计算精度甚至是计算结果的正确性。

以上几个问题的存在使得隧道结构计算在设计过程中难以发挥其应有作用,因此有必要对上述问题进行深入研究。

本书主要取材于四川省交通运输厅科技项目“基于承载能力量化分析的公路隧道支护体系适应性研究”的研究成果。本书对以上四个问题进行了系统性的研究分析,取得了一些研究成果,并以这些成果为依据提出了“基于承载能力量化分析的公路隧道支护体系设计方法”。

该设计方法先后在四川省雅安至康定高速公路、云南省香格里拉至丽江高速公路、广东省惠州至清远高速公路、广西壮族自治区梧州至柳州高速公路等项目的隧道设计与后期服务中得到了成功应用,取得了比较好的工程效果。

由于作者水平有限,书中难免有谬误之处,恳请读者予以批评指正。如有意见交流,可发送至作者邮箱 76453607@qq.com。

田志宇 汪波

2017年10月于成都

第1章 当前隧道结构计算存在的问题	1
1.1 隧道结构计算的重要性	1
1.2 隧道结构计算存在的四个问题	3
1.3 撰写本书的目的与意义	4
第2章 隧道支护体系各个组成部分的具体作用	5
2.1 调研分析	5
2.2 系统锚杆支护效果	7
2.3 本章小结	50
第3章 初期支护与二次衬砌的荷载分担比例	52
3.1 调研分析	52
3.2 现场试验	54
3.3 本章小结	63
第4章 初期支护与二次衬砌的承载能力计算方法	64
4.1 调研分析	64
4.2 初期支护与二次衬砌安全系数计算方法	64
4.3 初期支护与二次衬砌的承载能力	67
第5章 《公路隧道设计规范》结构计算部分条文的修改建议	68
5.1 附录 G 明洞设计荷载的计算方法	68
5.2 附录 E 浅埋隧道荷载计算方法、附录 F 偏压隧道衬砌荷载计算方法	71
5.3 附录 K 钢筋混凝土受弯和受压构件配筋量计算方法	73
5.4 本章小结	74

第 6 章 《公路隧道设计细则》结构计算部分条文的修改建议	75
6.1 细则 8.3 深埋连拱隧道围岩松散压力	75
6.2 细则 10.3.8 初期支护计算模型的拱脚约束方法	77
6.3 细则 10.3.9 二次衬砌计算模型的拱脚约束方法	79
6.4 细则 10.4.19、细则 10.4.20	79
6.5 本章小结	81
第 7 章 基于承载能力量化分析的公路隧道支护体系设计方法	82
7.1 调研分析	82
7.2 基于承载能力量化分析的公路隧道支护体系设计方法	84
7.3 该设计方法的两种应用方式	84
第 8 章 工程应用实例	85
8.1 紫石隧道右线出口穿越巨厚覆盖层段结构承载能力的确定	85
8.2 阿色隧道塌方段结构承载能力的确定	92
8.3 杨给隧道右线出口变形开裂段衬砌安全性评价	97
8.4 冷都坡隧道下穿老 G214 段支护参数的确定	107
8.5 枫木界隧道Ⅲ级围岩较差段支护参数的确定	116
8.6 百丈隧道穿越流塑状富水破碎带的工程措施及其安全性评价	120
8.7 双洞四车道公路隧道($v=80\text{km/h}$)支护参数优化建议	127
第 9 章 本书主要结论	135
9.1 系统锚杆的二象性	135
9.2 初期支护与二次衬砌荷载分担比例	135
9.3 初期支护与二次衬砌的安全系数计算公式	136
9.4 初期支护与二次衬砌的承载能力	137
9.5 《公路隧道设计规范》结构计算部分条文的修改建议	137
9.6 《公路隧道设计细则》结构计算部分条文的修改建议	138
9.7 基于承载能力量化分析的公路隧道支护体系设计方法	138
参考文献	139

第1章

当前隧道结构计算存在的问题

1.1 隧道结构计算的重要性

由于隧道与地下工程的复杂性,当前隧道设计是以工程类比法为主、结构计算为辅。设计时一般按照以往的工程经验确定隧道支护参数,然后按照《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)中的计算方法验算该支护参数的安全性是否满足规范要求。

随着隧道与地下工程不断发展,新情况不断涌现,仅采用工程类比法进行隧道结构设计的模式越来越不适应当前形势的需要,有时甚至会造成难以挽回的后果。

2010年,一座还未投入运营的下穿隧道中墙上方的顶板上缘沿隧道纵向开裂,裂缝长达440m。据了解,虽然这种矩形下穿隧道的荷载非常明确,结构计算方法也很简单,但是设计人员并没有先进行结构计算,然后根据计算结果进行结构设计,而是依然按照传统的拱形山岭隧道的工程类比法直接确定结构设计参数。该下穿隧道结构设计图见图1-1、图1-2。

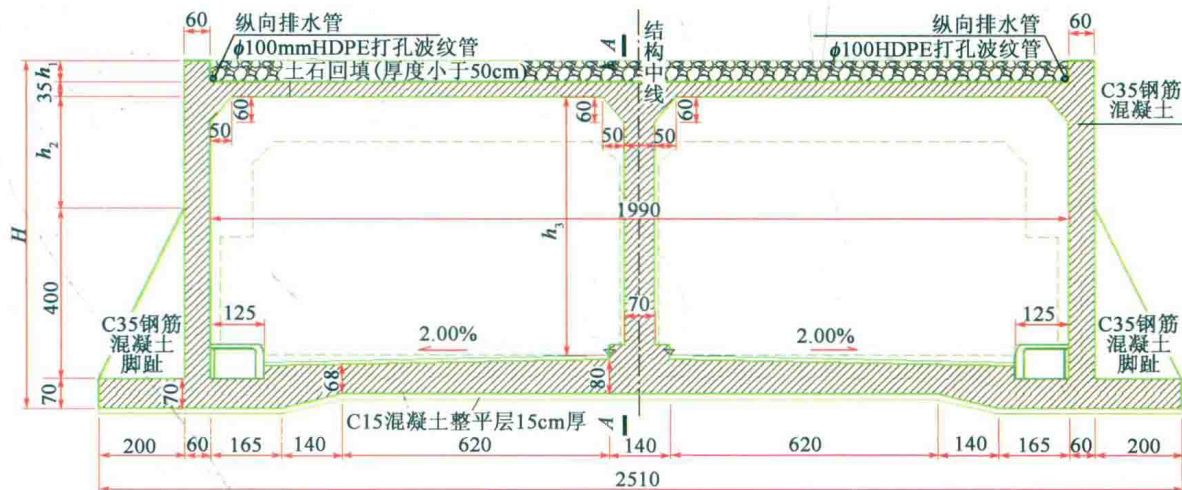


图 1-1 某下穿隧道结构图(尺寸单位:cm)

下面通过结构计算分析找出结构开裂的原因。根据该隧道的地层及结构情况,建立计算模型,如图1-3所示。经计算,该隧道结构的变形如图1-4所示,弯矩如图1-5所示。

由图1-5可知,顶板开裂处弯矩高达 $218\text{kN}\cdot\text{m}$,而设计图纸中该处却没有布置钢筋。顶板开裂的原因就在于此。

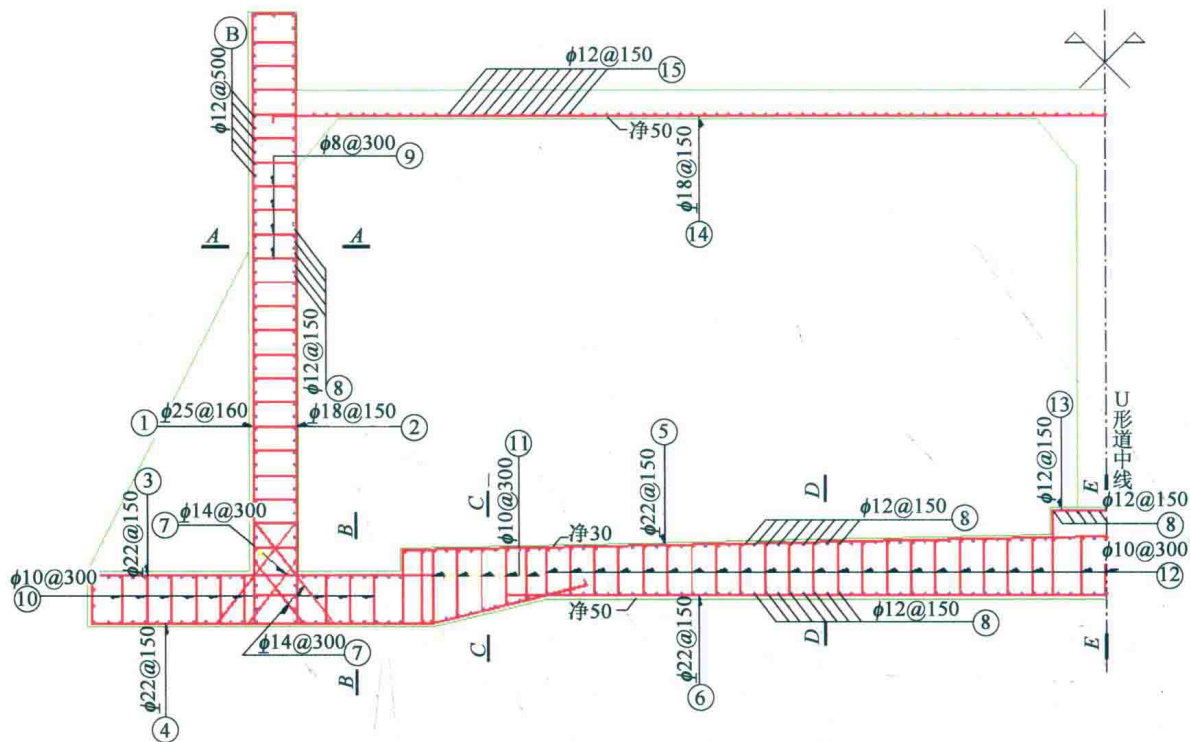


图 1-2 四川某下穿隧道结构钢筋布置图(尺寸单位:mm)

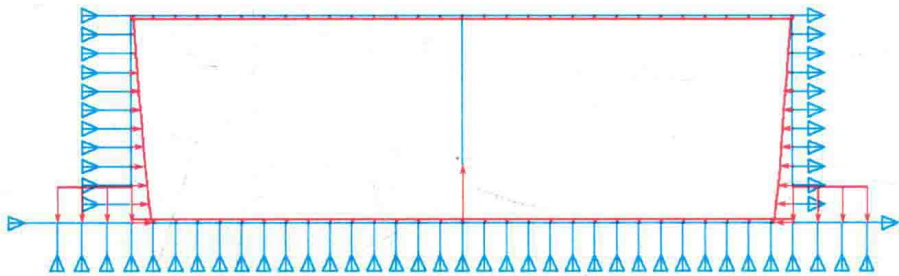


图 1-3 四川某下穿隧道计算模型

DMX=.008515

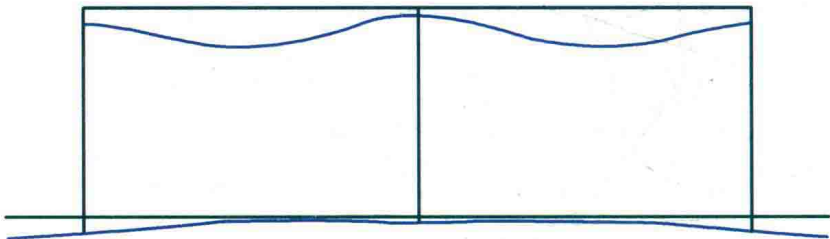


图 1-4 四川某下穿隧道结构变形

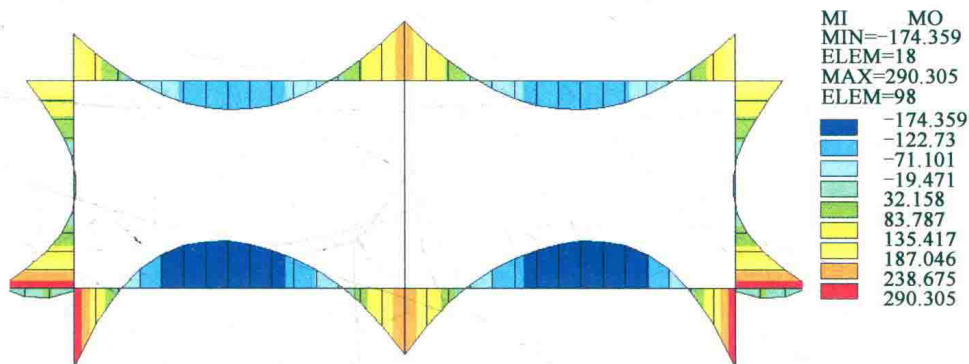


图 1-5 四川某下穿隧道结构弯矩

这个工程案例在一定程度上说明了工程类比法的局限性,以及隧道结构计算的重要性。但是,当前隧道结构计算方法是不是已经非常完善、实用呢?对此,进行以下分析。

1.2 隧道结构计算存在的四个问题

设计人员使用工程类比法而非荷载结构计算法来确定隧道结构支护参数,一方面是因为工程类比法简单实用,另一方面隧道结构计算也确实存在一些问题,使其不能在工程实践中发挥其应有的作用。其中有以下四个问题比较突出:

(1)对隧道支护体系各个组成部分的具体作用没有形成统一认识。

比如围岩+初期支护与二次衬砌谁是承载主体?比如系统锚杆在支护体系中发挥什么样的作用?计算中该如何考虑?

尤其是系统锚杆的作用几乎成为每次公路隧道年会的争论焦点,“挺杆派”与“倒杆派”的观点针锋相对,而且都有各自的理论与工程实践论据来证明各自观点的正确性。

(2)初期支护与二次衬砌的荷载分担比例没有定论。

对于荷载分担比例,《公路隧道设计规范》(JTG D70—2014)与《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)中的规定相差较大,且相关规定没有研究成果支撑,按照这些规定进行隧道结构计算和设计时让设计人员感觉心里没底。

例如,按照《公路隧道设计规范》第185页“表9-1 释放荷载分担比例表”中的规定,V级围岩中“围岩+初期支护”分担20%~40%的荷载,二次衬砌分担60%~80%。如果计算时取中值,将30%的荷载施加于初期支护之上,计算出的结构安全系数满足规范要求,从而认为该初期支护的支护参数是安全合理的。

但是,实际施工过程中存在很多不可控情况。例如,由于二次衬砌台车或材料没有及时施工到位,导致二次衬砌浇筑滞后;由于春节放假、劳资矛盾、村民阻工导致工地停工……总之,实际施工过程中,初期支护在一些情况下需要长时间承担所有荷载。如果结构计算时仅考虑其承担一部分荷载而算出的结构安全系数满足规范要求,而实际上是不符合工程实际的,也不能保证衬砌结构在各种情况下都是安全的。

另外,查阅相关资料可知,学术界在初期支护与二次衬砌的荷载分担比例这个问题上分歧很大,而这个问题直接关系到隧道结构计算时荷载的取值,从而影响结构安全性的评价。

(3) 没有初期支护与二次衬砌的承载能力计算方法。

在设计与施工过程中,经常有人会问 24cm 厚的 C25 喷射混凝土(内含 I18@60cm 的钢架)的承载能力有多大? 60cm 厚的 C30 钢筋混凝土二次衬砌的承载能力有多大? 只依照《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)与《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)中的结构计算内容是无法回答此类问题的。

因为安全系数的计算是评估隧道支护体系承载能力的基础,而《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)与《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)没有明确给出初期支护与二次衬砌安全系数的计算方法。

(4)《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)与《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)中结构计算部分条文存在错漏碰缺。

《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)与《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)是公路隧道结构设计的基础与依据,其中结构计算部分条文存在的错漏碰缺直接影响了计算精度甚至是计算结果的正确性,从而使结构计算在设计过程中无法发挥应有的作用。

以明洞荷载的计算方法为例,《铁路工程设计技术手册 隧道》中对此有系统完整的规定,但是《铁路隧道设计规范》(TB 10003)从中引用时出现了错误与遗漏,《公路隧道设计规范》又引用了《铁路隧道设计规范》中的相关内容,《公路隧道设计细则》《公路隧道设计手册》又引用了《公路隧道设计规范》中的相关内容,从而形成了多米诺骨牌效应。

1.3 撰写本书的目的与意义

本书围绕以上 4 个问题展开研究,给出问题的解决方法,以此为基础提出“基于承载能力量化分析的公路隧道支护体系设计方法”,并在工程实践中应用该方法进行设计。最终实现“在荷载明确的隧道工程中,使用以结构计算为主、工程类比为辅的设计方法”的目的。

笔者希望该设计方法能够对公路隧道设计方法的改进提供一些参考,同时希望本书中提出的关于《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)与《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)结构计算部分条文的修改意见能够在下一版规范与细则的修编中得到采纳,以便使规范与细则日臻完善。

第2章

隧道支护体系各个组成部分的具体作用

2.1 调研分析

根据新奥法理论,隧道支护体系应分成3个部分,即围岩、初期支护、二次衬砌;也可以分成两个部分,即围岩+初期支护、二次衬砌。对此学术界目前认识较为统一,几乎不存在分歧,但是对于各个部分所起的具体作用存在一定争议,具体表现在两个方面:

(1)围岩+初期支护与二次衬砌在支护体系中所扮演的角色。从《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)第184页中的释放荷载分担比例表中的数值可以看出,该规范认为在Ⅳ级围岩中,围岩+初期支护是支护体系的承载主体,二次衬砌属于辅助部分;在Ⅴ级围岩中,二次衬砌是支护体系的承载主体,围岩+初期支护属于辅助部分^[1]。而王梦恕院士则认为围岩+初期支护是支护体系的承载主体,二次衬砌作为安全储备,其厚度一般定为30~40cm,不随围岩改变而改变^[2]。

(2)系统锚杆在支护体系中的作用。按照一般传统观点来看,锚杆和喷射混凝土作为初期支护的主要支护手段,控制围岩的变形和松弛,使围岩成为支护体系的组成部分,因此系统锚杆对于支护体系有重要的存在价值与意义。然而实际施工过程中,系统锚杆的施工质量很差,并且存在严重的偷工减料现象,因此有学者对系统锚杆所起的作用进行了一系列的研究。

王梦恕院士提出对于Ⅴ、Ⅵ级围岩不应设置系统锚杆,Ⅲ、Ⅳ级围岩局部破碎设置锚杆,各级围岩中的拱部锚杆均应取消^[2]。

谭忠盛等依托郑州—西安铁路客运专线大断面黄土隧道,采用现场对比试验对深埋黄土隧道系统锚杆的作用效果进行研究,试验选取两个试验段,分别设有系统锚杆和不设系统锚杆。试验结果表明二者的拱顶沉降、水平收敛、土压力和钢架应力相差不大,而锚杆轴力在边墙受拉,有一定作用,拱部受压,支护效果不明显,建议取消^[3]。此外,采用现场对比试验对浅埋黄土隧道系统锚杆的作用效果也进行了研究。试验结果表明:有系统锚杆段比无系统锚杆段的拱顶沉降和水平收敛都大,土压力和钢架应力相差不大,锚杆轴力较小且拱部受压。认为取消拱顶锚杆可减少施工工序,加快隧道初期支护断面及早封闭^[4]。

郭军等依托郑州—西安铁路客运专线大断面黄土隧道,通过理论推导阐明了锚杆的作用机制,指出了浅埋大跨度黄土隧道中锚杆的受力原因,理论和实测分析表明,拱部锚杆受力很小,锚固效果差,而边墙锚杆受力较大,锚固效果好。实测结果表明拱顶锚杆受拉和受压的情况均有,拱脚部位锚杆基本受压,边墙锚杆受拉较大^[5]。

陈建勋等依托青岛—银川高速公路某黄土隧道,现场测试表明,有、无系统锚杆的两个试验段的测试数据无论从变形还是从受力上讲,同类数据均处于同一量级,认为系统锚杆对黄土隧道的结构稳定性作用不大,钢格栅、喷射混凝土、钢筋网共同组成的支护结构是合理的黄土隧道初期支护结构^[6]。

陈建勋等依托哈尔滨绕城高速公路天恒山隧道,采用现场对比试验对高含水率土质隧道不设系统锚杆的作用效果进行试验研究,该试验在Ⅵ级围岩段选取两个监测断面,分别设有系统锚杆和用锁脚锚杆代替系统锚杆,测试结果表明,在取消系统锚杆,采用锁脚锚杆代替的情况下,隧道初期支护的结构变形和受力均在容许范围内^[7]。

陈建勋等依托包家山隧道,采用现场对比试验方法,研究在软弱围岩隧道中采用锁脚锚杆代替系统锚杆的初期支护结构。研究表明:取消系统锚杆不影响初期支护结构的安全和稳定,用钢架+喷射混凝土+钢筋网+锁脚锚杆+纵向连接筋组成的初期支护结构是合理可行的;拱部锚杆有受拉也有受压,但受力都不大;锁脚锚杆拉力较大,钢架支护作用明显^[8]。

吴金刚等分别对公路隧道系统锚杆在硬岩、软岩以及松散土砂中的作用机理和主要作用效果进行研究,通过数值模拟和现场实测分析认为:在块状硬岩与水平走向的层状硬岩中,系统锚杆采用局部设置和拱部设置;在软岩中系统锚杆应在除仰拱外的全断面设置;在土砂围岩中锚杆应以锁脚和稳定掌子面为主要目的,设计应以支护结构为主,取消或减少系统锚杆^[9]。

陈力华等用有限元强度折减法分别计算了Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩条件下无锚杆隧道和有锚杆隧道安全系数的大小,计算结果表明,系统锚杆不能有效地提高隧道结构的安全储备,对隧道的安全系数影响不大^[10]。

杨建民等依托郑州—西安铁路客运专线大断面黄土隧道,通过对比试验研究分析了浅埋大断面黄土隧道初期支护中锚杆的作用。测试分析结果表明:黄土隧道系统锚杆对改善初期支护受力作用不大,建议在浅埋老黄土隧道取消拱部系统锚杆,锁脚锚杆是初期支护仰拱闭合之前控制初期支护下沉的主要手段之一,在减少拱部系统锚杆后应加强拱脚锁脚锚杆的设置^[11]。

郭小红等分析了不同地质条件下的锚杆作用效应和锚杆抗拔力等,同时根据锚杆承载拱理论给出了系统锚杆承载能力的计算方法,应用该方法分析了隧道在不同地质条件下各类支护形式的承载能力及其费效比,分析认为:系统锚杆在相对破碎的岩层中对洞室稳定的作用较大,随着地质条件变差,系统锚杆的费效比大幅度降低;在软弱围岩地段,不宜设计密集的系统锚杆形成承载拱,而采用疏而长的锚杆^[12]。

李强等结合软弱围岩隧道工程地质和支护设计特点,应用三维数值方法模拟研究了软弱围岩隧道系统锚杆在一次支护中的作用效果,结果表明:系统锚杆不仅可以降低一次支护和二次支护结构的内力,提高结构的安全度,而且可以有效抑制隧道周边围岩的应力松弛,改善周边围岩的受力特性,提高施工的安全性^[13]。

郑甲佳依托西安地铁二号线工程的两段黄土浅埋暗挖隧道,通过室内模型试验、现场测试和有限元数值模拟的方法,研究黄土浅埋暗挖地铁隧道系统锚杆的力学特性。研究分析表明:拱顶和仰拱锚杆基本受压力,且受力较小,而拱肩到墙角范围内锚杆受拉力,作用较明显;衬砌结构从出现裂缝到破坏的过程中,系统锚杆作用凸显,能有效提高整个支护系统的安全性^[14]。

田志宇等以广元至南充高速公路的隧道为研究对象,以有限元二维数值分析为研究手段,

模拟双车道公路隧道施工,分析不同锚杆布设方式对围岩稳定性、喷射混凝土安全系数,以及二次衬砌安全系数的影响,提出了锚杆稀布的优化设计方案,突破了《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)对锚杆最小间距的规定,并在工程中得到成功应用^[15]。

田志宇等利用自主研发的全自动隧道结构计算软件 SDC 对锚杆布设方式进行了系统性研究,提出了锚杆稀布的优化设计方案,并在四川 21 条高速公路 188 座隧道中进行了应用,节省投资约 6.5 亿元,取得了良好的工程效果与经济效益^[16]。

根据以上调研分析可知:目前对隧道支护体系各个组成部分具体作用的研究还不全面、不系统,没有形成完善的理论体系。尤其是对于初期支护与二次衬砌谁是承载主体,以及系统锚杆的支护效果等问题,学术界还存在一定争议,需要做进一步研究探讨。

初期支护与二次衬砌谁是承载主体的研究与隧道支护体系各个组成部分荷载分担比例的研究,前者偏重于定性,后者偏重于定量,只要明确了初期支护与二次衬砌各自的荷载分担比例,则谁是承载主体便一目了然,因此将二者一并放到第二章进行研究。本章将重点研究系统锚杆支护效果的问题。

2.2 系统锚杆支护效果

2.2.1 二维数值计算

1) 计算方案

选择设计速度为 80km/h 的双车道公路隧道作为研究对象,其内空断面图见图 2-1。综合考虑围岩级别、埋深、支护参数等因素,拟定计算方案见表 2-1。

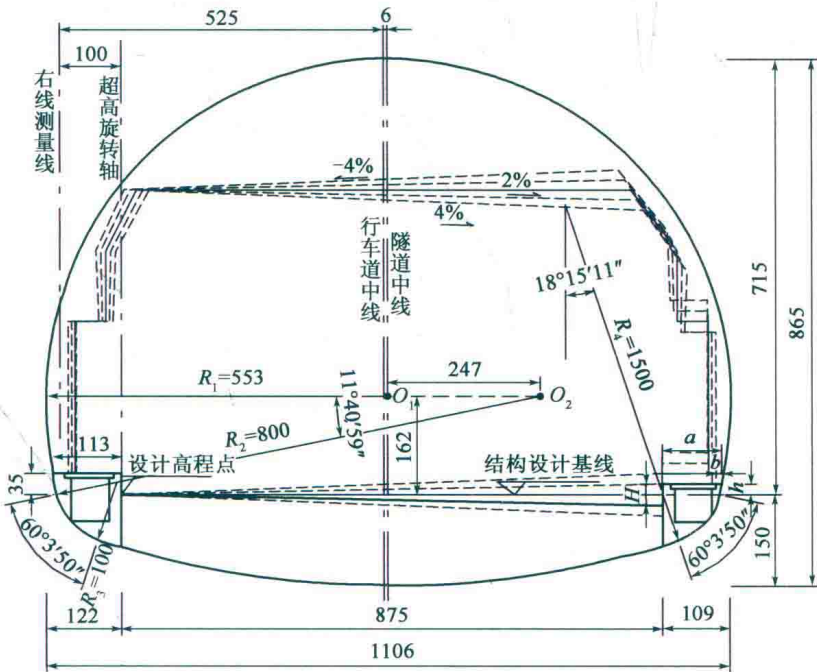


图 2-1 隧道内空断面图(设计速度 80km/h)(尺寸单位:cm)

计 算 方 案

表 2-1

方案 编号	围岩 级别	埋深 H(m)	初期支护 (cm)				二次衬砌 (cm)		备 注
			喷射 混凝土	锚 杆		钢 架	拱 墙	仰 拱	
				长度	纵 × 环				
1	V	15	24	300	60 × 100	I18@60	50(Φ20@20)	50(Φ20@20)	全环布设锚杆
2	V	15	24	300	60 × 200	I18@60	50(Φ20@20)	50(Φ20@20)	全环布设锚杆
3	V	15	24	300	60 × 200	I18@60	50(Φ20@20)	50(Φ20@20)	仅拱部设锚杆
4	V	15	24	—	—	I18@60	50(Φ20@20)	50(Φ20@20)	无锚杆
5	V	50	24	300	80 × 100	I18@80	40(Φ18@20)	40(Φ18@20)	全环布设锚杆
6	V	50	24	300	80 × 200	I18@80	40(Φ18@20)	40(Φ18@20)	全环布设锚杆
7	V	50	24	300	80 × 200	I18@80	40(Φ18@20)	40(Φ18@20)	仅拱部设锚杆
8	V	50	24	—	—	I18@80	40(Φ18@20)	40(Φ18@20)	无锚杆
9	IV	15	20	250	80 × 100	I14@80	40	40	全环布设锚杆
10	IV	15	20	250	80 × 200	I14@80	40	40	全环布设锚杆
11	IV	15	20	250	80 × 200	I14@80	40	40	仅拱部设锚杆
12	IV	15	20	—	—	I14@80	40	40	无锚杆
13	IV	50	18	250	100 × 100	10 × 15 格栅@100	40	40	全环布设锚杆
14	IV	50	18	250	100 × 200	10 × 15 格栅@100	40	40	全环布设锚杆
15	IV	50	18	250	100 × 200	10 × 15 格栅@100	40	40	仅拱部设锚杆
16	IV	50	18	—	—	10 × 15 格栅@100	40	40	无锚杆

由表 2-1 可以看出,方案 1~4,围岩级别均为V级,埋深均为 15m,除锚杆外的其余支护参数均相同,只是锚杆布设方案有差异,从方案 1 到方案 4,锚杆布设越来越稀少。方案 5~8、方案 9~12、方案 13~16 与方案 1~4 类似,也是除锚杆外的其余计算参数均相同,只是锚杆越来越稀少。

2)计算参数

围岩的物理力学参数参照《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)表 A. 0. 4-1 取值,见表 2-2;支护材料的物理力学参数参照《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)表 5. 2. 1、表 5. 2. 4、条文 5. 2. 4、条文 5. 2. 6、表 5. 2. 9、条文 5. 2. 13、表 5. 2. 13 取值,见表 2-3^[1]。

围岩的物理力学参数

表 2-2

围 岩 级 别	重度 γ (kN/m ³)	变形模量 E(kPa)	泊松比 ν	黏聚力 c(kPa)	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
V	18.5	1.5×10^6	0.4	130	23.5
IV	21.5	3.7×10^6	0.33	450	33

支护材料物理力学参数

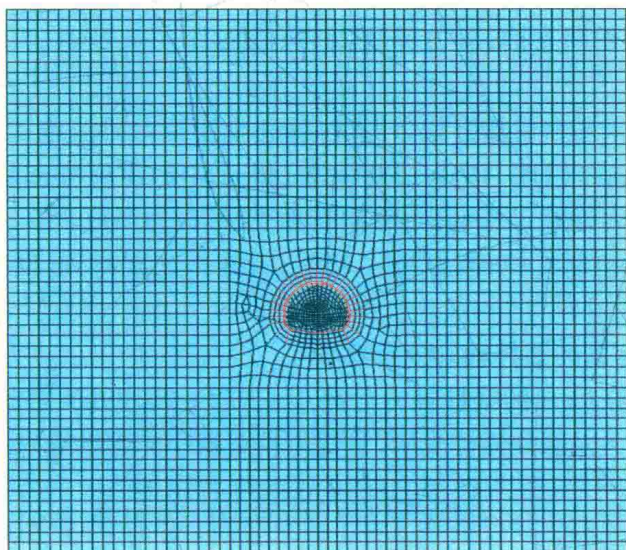
表 2-3

支 护 材 料	重度 γ (kN/m ³)	变形模量 E(kPa)	泊松比 ν	抗拉极限强度 R_t (kPa)	抗压极限强度 R_a (kPa)
C20 喷射混凝土	22	2.1×10^7	0.2	1.7×10^3	1.55×10^4
C30(钢筋)混凝土	23	2.95×10^7	0.2	2.0×10^3	1.9×10^4
HRB400 钢筋	77	2.0×10^8	0.3	400×10^3	400×10^3

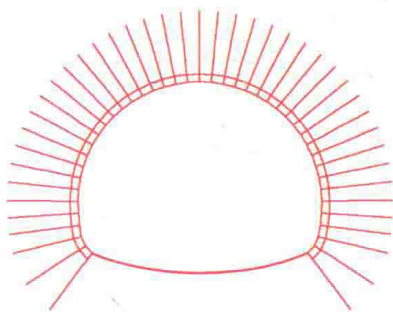


3) 计算建模

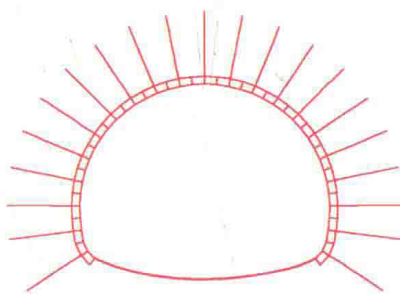
计算方法采用《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)中规定的地层结构法,计算软件采用通用有限元计算软件 ANSYS,采用二维建模进行计算分析,计算模型为平面应变模型。参照隧道力学的相关资料,模型边界水平方向应取3~5倍的开挖洞径,垂直方向取2~3倍的开挖洞径。为了尽量减小边界效应,计算模型左右边界各取50m,下边界取40m,上边界(埋深)根据实际情况取值。在模型的左右边界施加横向约束,在计算模型的下边界施加竖向约束。初始应力场为重力场。最终建立计算模型见图2-2。



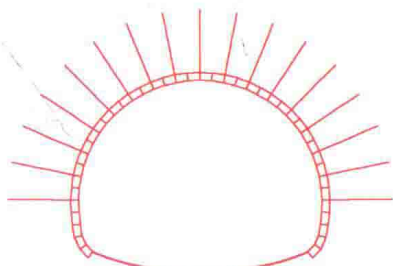
a) 岩土单元



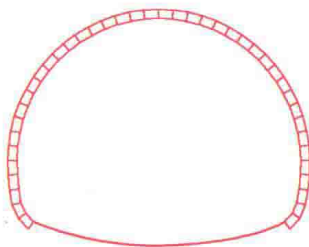
b) 方案1支护体系



c) 方案2支护体系



d) 方案3支护体系



e) 方案4支护体系

图2-2 计算模型

地层采用 PLAN42 平面单元模拟,本构模型采用弹塑性模型,屈服准则选用 D-P 准则;锚杆用 LINK1 单元模拟,采用与围岩共用节点的方式实现模拟全长黏结型锚杆;喷射混凝土、二次衬砌采用 BEAM3 单元模拟;喷射混凝土与二次衬砌之间采用 LINK10 单元连接,通过单元特性设置将其设置为只能受压不能受拉。

4) 开挖过程模拟

V 级围岩中,隧道采用台阶法开挖,计算过程完全模拟台阶法施工工序,围岩应力释放系数按《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)第 185 页中的建议值选取:①生成自重应力场;②开挖上台阶围岩,应力释放 5%;③上台阶初期支护,应力释放 25%;④开挖下台阶围岩,应力释放 10%;⑤下台阶初期支护,应力释放 25%;⑥施作二次衬砌,回填仰拱,释放全部剩余应力。

IV 级围岩中,隧道采用台阶法开挖,计算过程完全模拟台阶法施工工序,围岩应力释放系数按《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)第 185 页中的建议值选取:①生成自重应力场;②开挖上台阶围岩,应力释放 35%;③上台阶初期支护,应力释放 35%;④开挖下台阶围岩,应力释放 35%;⑤下台阶初期支护,应力释放 35%;⑥施作二次衬砌,回填仰拱,释放全部剩余应力。

5) 不同锚杆布置方案的锚杆轴力分布比较

如图 2-3 所示,方案 1~4 的锚杆轴力分布于 $-9.2 \sim 22.39\text{kN}$ 之间,拱部锚杆受拉,且受力相对较大,起拱线以下大部分锚杆受压,且受力相对较小。起拱线附近的锚杆轴力最大。

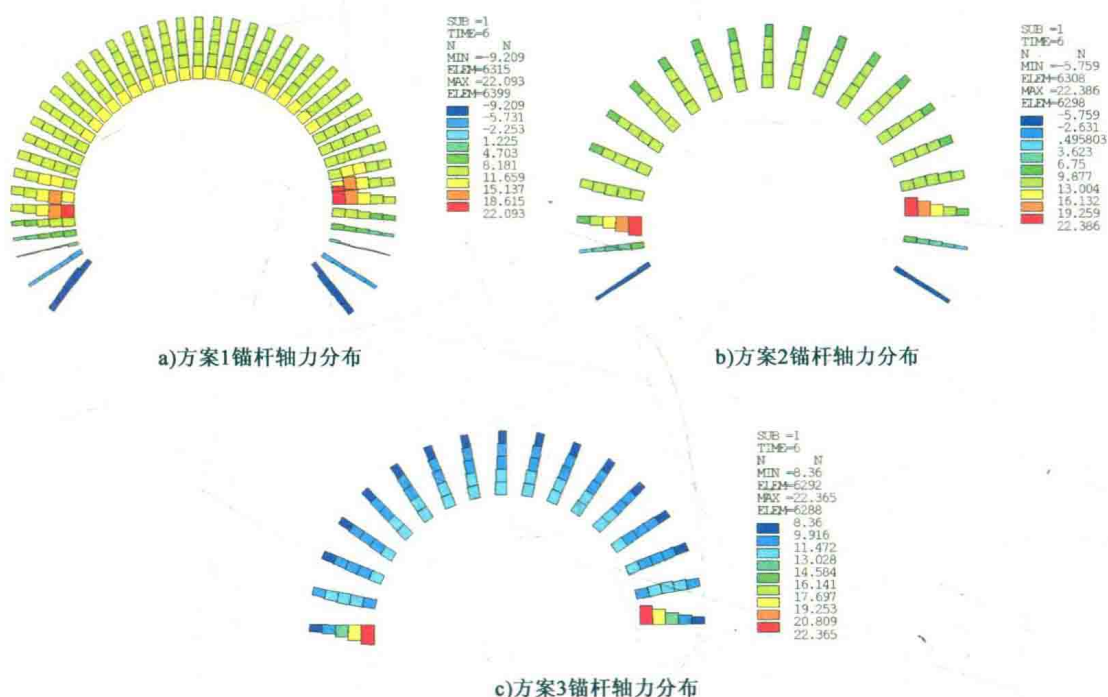


图 2-3 方案 1~4 锚杆轴力分布比较

如图 2-4 所示,方案 5~8 的锚杆轴力分布于 $-15.07 \sim 38.24\text{kN}$ 之间,拱部锚杆受拉,且受力相对较大,起拱线以下大部分锚杆受压,且受力相对较小。