



四川特长公路隧道的建设与展望

陈乐生

(四川省交通厅 成都 610041)

摘要 近年来在四川的特长隧道建设中 经历了高地应力、岩爆、瓦斯、岩溶地质、涌水突泥、大变形、高寒防抗冻等一系列隧道技术难题的考验,从中取得了一定的经验和建设成就。本文重点介绍四川在特长隧道方面的建设现状和发展趋势,并对下一步四川特长公路隧道的建设提出几点建议。

关键词 四川公路 特长隧道 建设成就 展望

1 引言

近年来,随着国家经济实力的增强和高等级公路的日益增多,采用隧道工程穿山越岭逐步为设计师们所接受。目前 四川已建成几座特长公路隧道 如二郎山隧道、华蓥山隧道、鹧鸪山隧道等 经历了高地应力、岩爆、瓦斯、岩溶地质、涌水突泥、大变形、高寒抗防冻等一系列隧道技术难题的考验,积累了一些经验教训。四川地质构造复杂,地貌类型多样,地理环境独特。西部是高原山地,东部为四川盆地,中间为过渡地带。多山的地理环境给交通带来极大不便,也给隧道工程的发展带来了历史机遇。

2 四川特长公路隧道建设现状

2.1 四川公路网现状

截至 2004 年年底四川公路通车里程达 113000 万 km 位居全国第二位 其中高速公路 1758km(位居全国第五位)、一级公路 1496km 二级公路 9633km 三级公路 13348km, 四级公路 50166km, 等外级公路 36642km。各级公路所占比例见图 1。沥青路面 24574km, 水泥路面 19658km, 未铺装路面 68811km。沥青、水泥路面占总里程的比例 39.13% 全省公路密度每百平方公里有 23.18km 每万人拥有 13.25km。乡镇通公路比例为 98.81%, 行政村通公路的比例为 88.15%。交通建设完成投资保持稳步增长,连续七年投资超百亿元,交通主骨架网络基本形成,公路交通事业得到长足的发展 与社会经济发展需求的差距逐步缩小 公路交通对国民经济的“瓶颈”制约得到明显缓解。

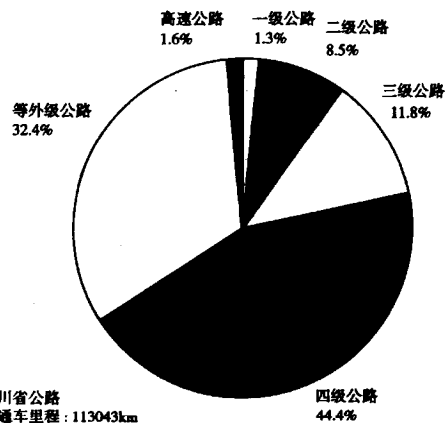


图 1 四川省各级公路比例

目前已初步形成以成都为中心 由 3 条国道主干线、6 条国家干线公路 (西部通道)、4 条一般国道、33 条省道连接城乡、沟通山区、贯通相邻省区和打造成渝经济圈的公路网络。四川多山的地理环境,隧道工程也为该公路网络的形成发挥了重要作用。

2.2 特长隧道规模

采用隧道方案 对于缩短路线里程、绕避不良地质病害 (如冰雪、滑坡、泥石流等) 优化路线平纵线形指标、保护生态环境和提高运输效率等方面都有着不可比拟的优越性。

目前四川省已建和在建公路隧道共 52 座 单洞总长达 128.9km。按长度分类 特长、长、中、短隧道座数和单洞长度见图 2。其中 高速公路隧道共 39 座 双洞总长约 50km 非高速公路隧道共 13 座 单洞总长 27.6km 特长隧道共 9 座 单洞总长 65km。

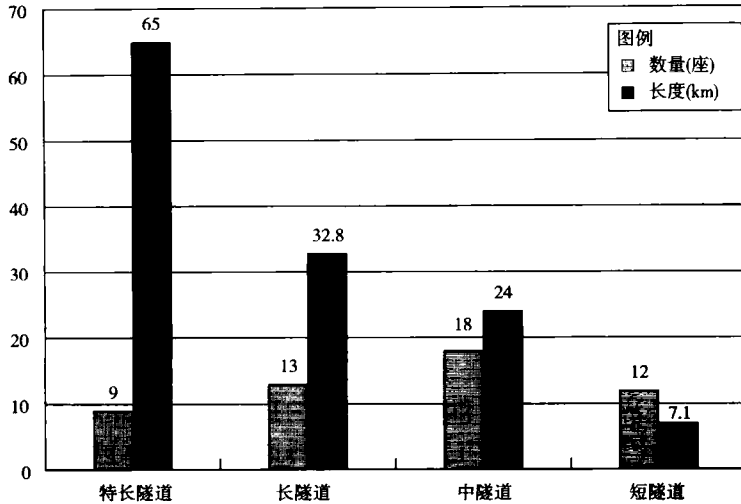


图 2 四川省公路隧道统计

注 隧道长度 $L(m)$ 分类标准为 特长隧道 ($L > 3000$) 长隧道 ($3000 \geq L > 1000$) 中隧道 ($1000 \geq L > 500$) 短隧道 ($L \leq 500$)

四川已建成 3 座特长公路隧道 详见表 1。其中华蓥山隧道为省内已建成最长的公路隧道，鹧鸪山隧道为省内建成海拔最高的特长公路隧道。这些隧道的建成通车，为区域交通环境的改善和经济发展创造了良好的基础条件。

四川已建或在建的特长隧道

表 1

隧道名称	长度(m)	所在路线	等级	行车方式	建成时间	备注
二郎山隧道	4176	川藏公路(国道)	二级	单洞对向	2000 年	平导通风
华蓥山隧道	4706	广渝公路广(安)邻(水)段	高速	双洞单向	2000 年	人字坡
鹧鸪山隧道	4448	国道 317 线	二级	单洞对向	2004 年	平导通风
明月山隧道	6557	垫(重庆垫江)邻(四川邻水)路	高速	双洞单向	在建	竖井通风
铜锣山隧道	5197	垫(重庆垫江)邻(四川邻水)路	高速	双洞单向	在建	竖井通风
董家山隧道	4111	国道 317(213)线都汶公路	高速	双洞单向	在建	单向坡
五指山隧道	3911	沐(川)新(市)路(省道)	二级	单洞对向	在建	人字坡
龙溪隧道	3691	国道 317(213)线都汶公路	高速	双洞单向	在建	单向坡
拉纳山隧道	3451	国道 318 线海子山至竹巴笼段	三级	单洞对向	在建	人字坡

近年来，开工建设的特长公路隧道也越来越多，目前四川在建特长公路隧道 6 座 长度在 3000~6000m 之间(见表 1)。

2.3 建设特点

近年来四川省的公路建设已从盆地周边山区发展，工程越来越艰巨，技术难度越来越大 就特长隧道而言 表现为以下特征：

a. 越岭隧道多，隧道长度越来越大。已建成的华蓥山隧道长 4706m 为目前省内最长的公路隧道 在建的邻垫路明月山隧道长 6557 m 将刷新这一记录 即将开工建设的雅泸路大相岭泥巴山隧道长 10300 m 将国内公路隧道的长度推至新高。

b. 地应力高，地质条件复杂。四川地处三江地槽褶皱的东部，受青藏高原不断抬升和东移

的影响，地壳活动强烈，地震活动频繁。隧道穿越区域受构造影响强烈，断层多，地应力高。

c. 山区气候条件差，外营力风化剥蚀作用强，地表岩体破碎，偏压、浅埋洞口多，隧道进洞困难。很多洞口明挖不行（刷坡太高）暗挖不成（洞壁太薄）只能采取地表注浆或水泥混合土改造山体这样的特殊工法进行施工，加大了工程难度和造价。

d. 高寒隧道多。如已建成的二郎山隧道海拔 2200m，鹧鸪山隧道海拔 3400m 正在规划中的雀儿山隧道海拔 4300m。高海拔隧道的设计和施工都有很多新课题，如结构的抗防冻问题、衬砌和水沟的保温问题、运营通风问题、施工缺氧的劳动保护问题等。

e. 大涌水隧道的设计和施工问题。西部山区多灰岩、岩溶管道大涌水以及长大隧道的砂岩裂隙水问题比较突出。华蓥山隧道设计时预计最大水量 $25 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 已经给排水设计带来很大困难，实际施工时左洞最大突水为 $68 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 右洞最大突水为 $52 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 最后不得不在隧道下方设置总长达 2472m 的纵横泄水洞并结合注浆才得到解决。

f. 瓦斯隧道瓦斯含量高，个别具有瓦斯突出可能。如华蓥山隧道，勘察资料表明，其瓦斯压力达到 1.87MPa 瓦斯含量达 $8.94 \text{m}^3/\text{t}$ 瓦斯涌出量为 $3.66 \sim 17.68 \text{m}^3/\text{min}$ 。后经过从设计措施、施工工序、安全设备等一系列调整后，顺利通过了该隧道的瓦斯地层。目前在建的都汶路董家山、龙溪隧道也有类似的瓦斯段落。

g. 隧道结构趋于复杂化。近年来特长隧道越来越长，随着工程规模的增大，隧道通风和防灾救灾的要求也越来越高，因而一些项目采用了平导、竖井或斜井等作为通风或防灾救灾的工程措施，进一步增加了隧道结构的复杂程度。如已建成的鹧鸪山隧道，采用平导作为通风或防灾救援通道；在建的明月山和铜锣山隧道采用竖井作为通风通道；拟建的大相岭泥巴山隧道采用斜井和竖井相结合作为通风通道。

2.4 有关科研与建设成就

交通部和我省有关部门非常重视特长隧道工程的有关科研工作，为此集中了有限的物力人力，进行了多项技术攻关。为提高设计质量、施工技术水平和解决工程中面临的很多技术难题做出了特殊的贡献。

隧道设计需要由地质、结构、交通工程等众多专业技术人员通力合作完成，专业交叉和学科融合频繁，工作量大，易错难改。设计质量的高低直接影响到整个隧道工程的质量优劣。通过组织有关科研人员开发了隧道 CAD 辅助设计系统，使设计人员从简单和重复性的劳动中解脱出来，将更多的精力投入到关键和重点的技术研究上，有效地提高了设计质量，缩短了设计周期，特别是应用于施工现场信息反馈设计后，进一步地保证了施工安全、质量与进度。

在新型结构形式方面，我省有关研究机构和设计部门主持和参与了“双洞小净距隧道设计与施工关键技术研究”和“连拱隧道建设关键技术研究”等课题的研究工作，以实际建设的工程项目为依托，加强理论与实践的结合，在这些新型结构形式的应用做了很多有益的探索。目前这些项目仍在按照研究大纲制定的计划进度在顺利推进。

在特长隧道的施工技术方面，经过设计、施工和科研人员的共同努力，取得了很多宝贵的实践经验并获多项殊荣。如已建成的华蓥山隧道，在溶洞处理、揭煤过煤工艺、气密性混凝土施工工艺以及施工通风等方面都做出了很多创新性的成果，先后获 2001 年铁道部优质工程一等奖、四川省优秀设计一等奖和天府杯优质工程奖、2002 年国家优质工程银奖，以及第三届詹天佑土木工程大奖等多个奖项。已建成的川藏公路二郎山隧道，在围岩变形破坏、高地应力、岩爆、大变形等围岩稳定问题以及高海拔地区隧道营运通风和海拔高度系数问题多个技术难题的科研攻关上也取得了突出成绩，先后获得了 2004 年度中国建筑工程鲁班奖（国家优质工

程)第四届詹天佑土木工程大奖 以及四川省建筑行业最高 '天府杯'奖等 10 多项部、省级奖项和荣誉称号。

随着四川隧道逐步向高海拔复杂地质条件地区的延伸,很多技术难题也迫在眉睫地需要得到解决。为此交通部西部交通科技建设中心专门立项对高海拔隧道的抗防冻、高海拔地区特长隧道的通风与防灾、高海拔地区公路隧道施工技术和高烈度地震区的抗减震技术等有关课题开展了研究工作,为已建成的鹧鸪山隧道、在建国道 318 川藏路黄草坪隧道以及规划中的雀儿山隧道提供技术支持和研究验证。

3 四川特长隧道建设展望

从实施'西部大开发'战略、完善国家公路路网和四川省公路网主骨架、开发山区资源、振兴少数民族和贫困地区经济等方面的实际需要出发,实现有关公路路网规划,四川省内还有若干个重大的特长隧道工程需要建设。

根据四川|省高速公路网规划目标:2005 年底,实现高速公路通车里程 1700km 全省所有市州政府所在地一天到达成都,这个目标已基本得到实现;2010 年 建成高速公路 2700km 全面建成国家规划的国道主干线,实现打通和完善十二条进出川快速大通道目标;2020 年 高速公路达到 4300km 实现目前 15 万人口以上的中等城市通过高速公路连接,除三州部分县城所在地外 省内 136 个县城所在地到达成都的车程不超过半天。基本实现“内联市县、外接周边、通江达海”的目标。今后 5~15 年内,四川省计划还将修建 2500km 的高速公路。具体实施计划是:

2005~2010 年,新建雅泸路、垫邻路等九条高速公路 872km,实现高速公路通车里程达到 2716km。

2011~2015 年 新建广元~南充、纳溪~赤水河等 5 条高速公路 745km 实现高速公路通车里程达到 3460km。

2016~2020 年 修建泸州~江津、巴中~达州~万州等七条高速公路 813km 实现高速公路通车里程 4274km。

在以上建设项目中 路线中桥隧比例高 隧道数量多 隧道规模大的典型项目有雅安 泸(沽)路 垫(重庆垫江)邻(四川邻水)路 达州 陕西路 广元 巴(中)路 巴中~达州~万州等。

目前已进入设计阶段并即将投入建设的雅安~石棉~泸沽高速公路大相岭泥巴山隧道为超特长隧道 长度达 10.3km 洞身埋深大(最大埋深达 1600m) 具有通风特点显著、工程规模大、施工难度大、工期长的特点。

拟建的达州~陕西高速公路 穿越大巴山脉 山高谷深 壁峭崖悬 为不多见的隧道群。全线共设隧道 26 座 总长 47.2km 其中大巴山隧道为特长隧道 长 5090m。

在一些重要的省道公路和进藏公路方面,为了穿越一些大的山脉,尤其是常年积雪区,打通区域交通通道,解决这些地区交通运输困难问题,也拟定了几个重大的特长隧道方案。

拟建项目巴朗山隧道地处四川盆地西部边缘,位于阿坝藏族羌族自治州南部小金县以东的小金、汶川、宝兴三县交界处,周围聚集了卧龙大熊猫自然保护区、四姑娘山风景名胜区、夹金山国家森林公园、丹巴千碉之国、美人谷等一系列的旅游资源,然而由于交通条件的制约,许多人只闻其名而不敢贸然前往。现有公路(省道 303 线)技术等级低、海拔高、地势陡峭 地质稳定性极差 路基沉降现象突出 滑坡、雪灾、冰冻、水毁等自然灾害与地质病害严重 抗灾害能力弱 经常造成交通阻塞 甚至断道 致使车辆行驶速度慢、服务水平低、运输效率差、交通事故

时有发生。目前拟订的巴朗山隧道方案洞口海拔高程约为 4050m 隧道长 5.7km 按单洞对向交通设计。该隧道的建成将有效改善这一区域的交通状况。

拟建的国道 317 线（川藏公路北线）雀儿山隧道所处路段地势险峻、气候恶劣、地质复杂海拔高（主峰海拔 6168m 公路通过垭口海拔 5050m），致使该路段道路崎岖狭窄、技术等级低、通行能力差、运输效率低、灾难性交通事故时有发生。该路段成为制约川藏公路北线畅通的瓶颈，严重影响了沿线地区社会经济的发展。拟建的雀儿山隧道计划建设长度约为 6.8km，隧道洞口高程约为 4400m。该项目的建成，将对加强战备、维护民族团结、加大扶贫和加快川西矿产、水力、旅游资源开发和利用等方面发挥重大作用。

4 四川特长隧道建设面临的突出问题

4.1 特长隧道的防灾与救援

随着特长隧道的增多，隧道的营运安全越来越受到人们的重视。隧道属于半封闭空间，一旦发生火灾，其烟雾浓度大且扩散慢，洞内温度升高快，疏散救援都比较困难，易发生群死群伤危及公众安全的恶性事件。

近年来著名的几个特长公路隧道发生的火灾事故，给我们提出了重要警示。1999 年 3 月在法国与意大利相连的勃朗峰公路隧道内发生的火灾，持续燃烧了近 3 天，至少有 41 人死亡，36 辆汽车（其中 24 辆为载重卡车）被毁。勃朗峰隧道火灾后仅两个月，奥地利中部穿越阿尔卑斯山的陶恩隧道内再次发生火灾，导致 12 人死亡，50 人受伤。随后于 2001 年在连接瑞士与意大利的圣哥达隧道内因两辆货车迎面相撞而发生的爆炸并燃烧，大火燃烧了一整天后被消防人员扑灭，至少造成 10 人死亡，有 100 多人下落不明。

这些血的教训告诉我们，必须将特长隧道的防灾和救援工作从设计到后期的运营管理上都给与充分的考虑。保证隧道具备合理的避难场所和疏散通道，配备完善的消防设施和紧急疏散指示标志，做好隧道的监控管理和应急预案处理，防患于未然，为公众提供一个舒适、安全的交通通道。

4.2 高寒隧道越岭标高的选择

高寒隧道越岭标高的选择，是涉及隧道的工程规模、路线平纵指标优化和运营安全等方面的重大决策性问题。隧道采用高线方案，可以有效缩短隧道长度和控制工程规模，但也带来隧道平纵线型较差，引道较长，不易躲避不良地质病害地段，且行车安全易受冰、雪、雾等气象因素影响；隧道采用低线方案，可以取得较好的路线平纵线型，躲避引道段不良地质地段和可选择较好的进洞位置，行车受气象因素影响小，安全容易得到保证，但也存在隧道工程规模一般较大、投资巨、工期长等缺点。故应综合地质、地形条件以及近远期的交通量等因素，慎重选择合理合适的越岭线隧道标高，以满足和适应不断增长的交通需要。

在这方面我们也取得了一些经验和教训。著名的二郎山隧道，隧道洞口高程为 2200m，隧道长度为 4176m，隧道东进口为一大冲沟，1997 年雨季泥石流给引道段造成极大的破坏，导致交通断道，处治该泥石流工程费用高达 4000 余万元。且后来发现东洞口处于复活的大滑坡体上，滑动面深达 50m，后期的滑坡治理也造成了重大的经济负担。由于该隧道洞口高程相对较高，因而冬季引道段行车受季节和气候的影响也较大，使得该隧道并未取得预期的社会效益。

此外，高海拔地区由于低温、低气压、低氧分等方面的条件，导致隧道施工困难，工程进度缓慢以及隧道开裂漏水严重等问题也逐步凸现出来。研究科学合理的衬砌支护结构形式和快速安全的施工工法，从设计理念创新和合理配套施工机具方面下工夫，也许是解决隧道防冻抗

冻的基本方向。在这方面，挪威等国取得了一些值得借鉴的经验，如采用挪威法理念进行隧道的设计和施工，采用单层衬砌、离壁式衬砌作为防冻衬砌的结构形式，以及采用高性能喷射混凝土作业工艺等。

4.3 不良地质、灾害地质预测预报与防治

隧道工程属于地下工程，会遇到各种可能的不良地质和灾害地质问题，尤其是特长隧道，受地质条件的复杂性和勘察周期的制约，有些复杂场地（岩溶、破碎带、岩性纵横向差异大的地区）在设计阶段难以布置充分的勘察工作量，在勘察阶段将所有的地质问题都做出准确的预测预报，的确不够现实。但重视不良地质、灾害地质的预测预报与防治工作，不仅可以有效地保证施工安全，而且可以对施工质量和工程进度产生重要影响。为此，应加强以下三方面的工作：

首先，采用先进勘察手段，提高勘察工作质量。特长隧道勘察成本较高，只有依赖先进的技术手段制定全面、科学、严谨的勘察工作大纲采用调查、测绘、槽探、坑探、钻探、物探等综合勘察手段，才能对隧道穿越地层的地质情况有比较准确的把握和清楚的认识。

其次，遵循信息化施工和动态设计的基本原则，及时发现施工中出现的有关地质问题。设计阶段的勘察工作对地质现象和地质规律的认识往往是不全面的，据此进行的设计只能称为预设计。为了保证施工安全和工程质量，必须遵循信息化施工和动态设计的原则，根据实际揭示的地质条件，及时适时调整和完善设计。

最后，对于重大的地质问题，容易导致比较严重后果，应有应对各种可能性的预防和处理措施，作好预案机制。如对瓦斯地质、岩溶地质或有涌水可能的隧道，应具有处理预案，保证施工安全。

4.4 重视质量、依靠科技和提高建设与营运管理水平

隧道结构物与一般工程结构物相比，在性质上有很大的不同。主要体现在隧道结构物的隐蔽性及其伴随的风险性、力学状态的不确定性和不易维修性。隧道开裂漏水甚至局部失稳引起的维修，不仅影响到隧道的运营通行，而且给国家造成维修费用上沉重的经济负担。在龙泉山隧道、金鸡关隧道的病害整治中，对这一点有深切的体会。因此，切实从设计措施和施工工艺上对隧道的质量加以控制，是保证隧道工程取得良好经济效益和社会效益的根本，“百年大计，质量为本”的建设理念应在隧道工程的建设全过程中得到不折不扣的贯彻。

今后特长隧道的建设，还会遇到很多技术难题。只有进一步加大科研投入，依靠科研攻关和技术开发，才能实现设计创新和推动科技进步，培养和壮大交通科技人才队伍，为四川乃至全国的交通建设做出应有的贡献。

管理也是生产力，科学的管理是实现资源有效利用和调配的重要手段。隧道工程建设的最终目的是为了实现在隧道其特有的服务功能，为提高隧道工程的服务效能，需要强化隧道工程的信息化管理。应建立一套包括勘察、设计、施工、营运等全过程的隧道状态信息资料库，分阶段设计隧道状态指标体系，采集信息资料应及时、准确、全面。结合工程实际，不断地总结分析和研究解决这些新情况、新问题，提高公路隧道建设管理和营运服务水平，实现整个交通环境的安全、舒适、高效、优质。

5 结语

四川多山的地理环境，给交通建设带来了巨大挑战，也给隧道工程，特别是特长隧道工程的技术进步和发展带来了发展机遇。随着西部大开发的推进，四川的隧道工程建设将会得到日新月异的发展。在全省公路网实现安全、畅通和高效的目标下，“蜀道难”的面貌将成为过去。

参考文献

- 1 夏永旭等.我国长大公路隧道建设的有个技术问题.现代隧道技术,2001(12)
- 2 陈建华等.特长交通隧道的安全环境分析.铁道建筑,1999(4)
- 3 张进华等.上区公路隧道线形设计.中南公路工程,2002(12)

黄土浅埋偏压连拱隧道合理中隔墙厚度研究

刘元雪^{1,2} 蒋树屏²

(1.后勤工程学院建筑工程系 重庆 400041;2.重庆交通科研设计院 重庆 400067)

摘要 大跨连拱隧道与洞外线路平面接线及洞口位置选择上的灵活性,使得一些中短隧道往往采用双连拱隧道结构形式,但在设计方面的中隔墙厚度的确定是凭经验得出的。结合我国第一条黄土连拱隧道,通过连拱隧道施工过程数值分析,得出了中隔墙受力最不利的工况。通过不同厚度中隔墙的连拱隧道在最不利工况下的受力状态分析,得到了中隔墙的合理厚度。

关键词 隧道 连拱隧道 有限元 中隔墙

1 前言

大跨连拱隧道与洞外线路平面接线及洞口位置的选择上的灵活性,使得一些中短隧道往往采用双连拱隧道结构形式。但是连拱隧道作为一种较新的隧道形式,无论从设计角度,还是从施工角度而言,其结构的受力状况都十分复杂。连拱隧道的研究引起了许多科研与设计单位的重视^[1-14]。五龙岭隧道为京珠高速公路粤境南段的一座双连拱隧道,它位于广东省翁源县新江镇塘心村南面洋河河谷南侧,整个隧道处于断层挤压带内,近正交方向穿越五龙岭山脊。一侧山势较高,另一侧山势较低,形成明显的自然偏压。主要工程措施:a.合理控制三个导洞开挖作业之间的距离。b.合理控制左、右线正洞开挖作业面之间的距离。c.控制正洞开挖作业面与衬砌作业面之间的距离。d.偏压的控制:为防止左右洞开挖造成中墙受力不均,而产生附加弯矩,施工时中墙两侧采用回填土及回填 C10 混凝土来达到控制偏压的目的,以抵抗施工过程中的不平衡推力,中墙顶由于变形大,施工困难,采用了喷混凝土充填密实。云南元江至磨黑高速公路全长 147km。全线设隧道 23 座 共计 13km 占线路总长的 9% 其中连拱隧道 15 座 占隧道总长的 27%。从云南省连拱隧道的建设经验看,中隔墙的裂缝主要是由于施工引起的偏压荷载导致的,在二次衬砌成闭合结构后,中隔墙主要受压,而混凝土的抗压强度是足够的。因而解决中隔墙开裂的关键在于施工时及时加设临时支撑以平衡施工阶段的偏载。莲花山隧道全长为 400m,为双向双车道连拱隧道。隧道的单拱截面跨度为 11.7m 连拱全断面的开挖跨度达 23.4m 截面开挖高度为 8.17m 高跨比仅为 1:2.86。由于该工程围岩非常好,所采用的左右洞全断面平行掘进中隔墙岩柱跳槽式开挖的设计方案与常用的台阶式隧道开挖方案相比,具有明显的技术经济优势。虽然我国在连拱隧道的理论与实践取得了长足的进步,但在设计方面有一些因素是凭经验得出的,如中隔墙的合理厚度。下面将结合我国第一条黄土连拱隧道来研究中隔墙的合理厚度。

青岛至银川(国道主干线山西省汾阳~离石高速公路离石隧道,为二车道黄土连拱公路隧道图 1)。隧道全长 180m,隧道围岩地层为第四系中更新统离石组黄土(Q₂)夹含零星姜石或姜石薄层,具柱状节理。隧道在施工中发现隧道大部分段落有偏压现象。该工程土质较差,

估计两洞同时开挖，中隔墙无法确保稳定，决定采用三导洞法进行施工。该隧道是我国第一条黄土连拱隧道，没有可以借鉴的经验。拟结合该工程实际，研究黄土连拱隧道的合理中隔墙厚度。隧道支护设计参数为：a. 初期支护采用 25cm 厚的 25 号喷射混凝土，锚杆为长 3.5m 钢筋直径 22mm，间距为 @100×100 采用梅花形布置 为保证初期支护尽早承载，使用 20a 工字钢支护，纵向间距 80cm 同时还有超前支护；b. 中隔墙为 25 号钢筋混凝土；c. 仰拱为 25cm 厚的 25 号喷射混凝土及 45cm 厚的 25 号钢筋混凝土；d. 二次衬砌为 45cm 厚的 25 号钢筋混凝土。

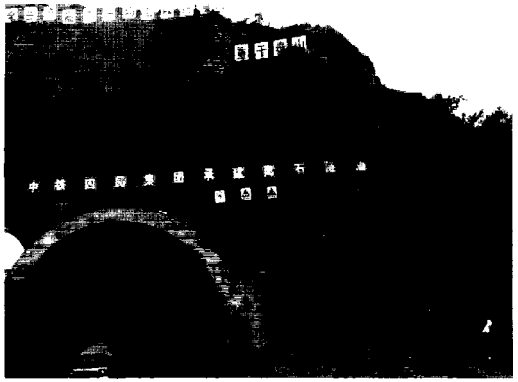


图 1 离石黄土连拱隧道

2 本构模型与计算方法

土体与混凝土材料采用弹塑性分析。实验和工程实践已证实，摩尔-库仑屈服准则能较好地描述土壤、岩石等材料的破坏行为，在岩土工程领域得到了广泛的应用。ANSYS 程序中的 Drucker-Prager 理想弹塑性模型的屈服准则为摩尔-库仑外接圆 D-P 屈服准则 直接采用该准则进行工程计算是偏于危险的。对于本次研究的二维平面应变问题，围岩和混凝土衬砌采用平面应变条件下与摩尔-库仑等效的 D-P 准则^[15]。锚杆采用线弹性模型，各种材料的力学参数如表 1 所示。

材料力学参数

表 1

材料	弹性模量 (MPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)	内聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
喷射混凝土	23000	0.167	2400	1500	52
钢筋混凝土	29000	0.167	2400	2000	55
锚杆	210000	0.3	7850		
黄土	136	0.3	1710	76	23

计算采用的软件为美国 ANSYS 公司的大型有限元计算软件 ANSYS 采用平面应变弹塑性数值模拟。围岩 黄土 采用 6 节点三角形单元 PLANE2 模拟 初次支护喷射的 25cm 混凝土采用梁单元模拟，其厚度在实常数中输入，二次衬砌结构采用三角形平面单元 PLANE2 模拟 中隔墙采用三角形平面单元 PLANE2 模拟 锚杆单元采用梁单元 beam3 模拟。

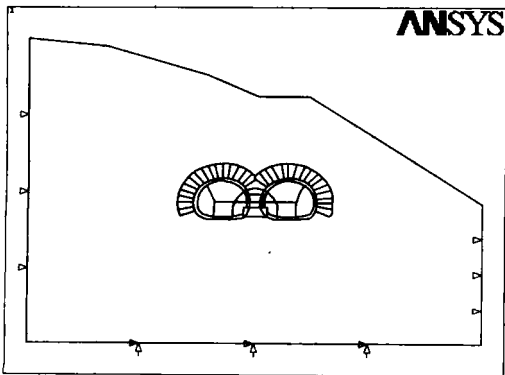


图 2 隧道计算断面

3 施工步骤与中隔墙的应力状态变化

隧道计算断面如图 2 所示。各施工步骤的数值模拟结果简介如下：第 1 步 中导坑开挖 施作临时支护 喷射 25 号混凝土 第 2 步 浇筑连拱隧道中隔墙，从中隔墙的塑性区分布看出，中隔墙没有塑性区，还处于弹性状态；第 3 步 左洞左侧导洞开挖，导洞进行初期支护，此时中隔墙受力不对称 第 4 步，左洞上半断面开挖，左洞上半断面施作初期支护，此时中隔墙右侧出现塑性区，另外左

下脚处由于应力集中 此处也出现塑性区 第 6 步,左洞下半断面开挖,由锚杆的轴力分布可以看出 左洞左下侧锚杆受力较大 第 6 步引起的位移变化不大,由于左侧隧道的开挖,引起中隔墙发生偏转 第 7 步,左洞施作二次衬砌和仰拱,左侧隧洞二次衬砌施工后,中隔墙的塑性区大大减小 第 8 步 右洞右侧导洞开挖 进行初期支护 第 9 步 右洞上半断面开挖 右洞上半断面施作初期支护 第 10 步 右洞下半断面开挖 第 11 步,右洞施作二次衬砌和仰拱。随着左右隧洞二次衬砌的实施,中隔墙受力状况得到改善,塑性区基本消失。

从上述分析可知,施工过程中中隔墙受力最不利的工况是左洞开挖,二次衬砌还没有施工的时候,此时因为没有二次衬砌的支护,正洞仅仅有初期支护,中隔墙受偏压。下面将通过不同厚度中隔墙的连拱隧道在最不利工况下的受力状态分析,来探讨中隔墙的合理厚度。根据本隧道设计,最不利工况下,中隔墙厚度不包含两洞衬砌厚度(0.9m)。

4 计算依据

关于合理中隔墙厚度的研究未见报道,存在一个确定中隔墙厚度的标准问题。在采矿领域的采煤方法研究中,存在一个预留煤柱尺寸的确定问题^[16-18]。煤柱屈服区宽度计算是煤柱稳定性分析中的一项重要内容,国内外采矿界对此历来极为关注,先后提出了一系列理论公式。这些理论都是以“煤柱可分为屈服区和核区两部分,核区受屈服区约束”这一事实为根据的,均有各自的合理成分和应用条件。Obert.Salamon 和 Wilson 经过大量的理论研究和实例分析 各自提出了自己的计算方程以及主要结论 但在大采出率条件下(大采出率是指工作面长度较大,相对工作面两侧所留煤柱宽度较小而言),其计算结果误差偏大。Obert.Salamon 和 Wilson 是在分析煤柱强度的基础上,推导出煤柱宽度方程。他们认为,煤柱的强度是支撑上覆岩层的承载能力,亦即,煤柱的破坏是由于上覆岩层重力作用所致。但是,在大采出率条件下,煤柱受力不仅仅是覆岩自重,而由于开采条件变化出现了附加力。随着岩土塑性理论与计算机模拟技术的发展,对合理煤柱宽度的研究具有极大的推动作用。因为它可以考虑复杂的地质、地形、地貌情况及复杂的开采工艺。经过这么多年的计算机模拟结果与现场实况对比,认为合理的煤柱宽度应为最不利受力状态下煤柱的塑性区面积达到煤柱面积的 70%。显然最不利的受力状态为煤柱间煤层都开挖后的应力状态。

应该说煤柱宽度的计算与最小中隔墙厚度的计算有类似的之处。煤柱在于确保煤炭开挖时的安全,一旦煤炭采过一段距离后,煤柱失效是容许的。也就是说煤柱只要确保临时的稳定,不需要确保永久安全。对于连拱隧道的中隔墙也是这样:最不安全的应力状态在施工过程中,即一侧洞子开挖完毕,二衬还没有砌筑的时候;一旦隧道二次衬砌完成后,中隔墙的应力状态就大为改善,塑性区基本消失;也就是说中隔墙只需确保施工期间的稳定即可。鉴于此,笔者认为中隔墙合理厚度的计算与煤柱合理宽度的计算原理是一致的,即取中隔墙最不利受力状态下的塑性区宽度达到中隔墙宽度的 70%。

5 不同厚度中隔墙数值模拟结果分析

中隔墙厚度(不包括二衬的厚度,下同)为 0.9m 的最不利工况的计算模型局部放大如图 3,数值模拟结果中的中隔墙塑性区分布如图 4 所示 其塑性区已经贯通 可以认为 此时中隔墙已经处于不稳定状态,不能满足工程要求。中隔墙厚度为 1.5m 时 中隔墙中部塑性区也贯通,也不能满足工程要。中隔墙厚度为 1.8m 时,中隔墙中部塑性区几乎贯通,受力很不合理。中隔墙厚度为 2.1m 时 中隔墙中部塑性区(图 5)没有贯通,但是面积约占中部宽度的 70%。当中隔墙厚度为 2.4m 时,中隔墙中部塑性区没有贯通,塑性区约占中隔墙宽度的 60%。当中隔墙厚度为 2.7m 时 中隔墙中部塑性区(图 6)约占中隔墙宽度的 45%。

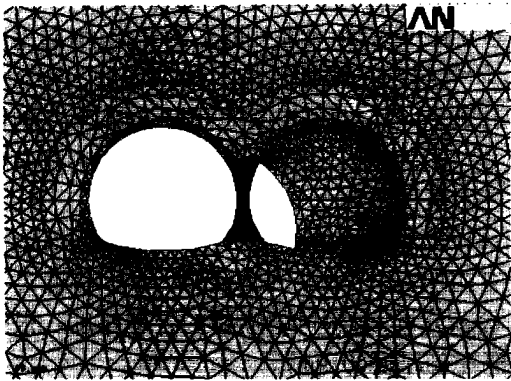


图3 中隔墙厚度为0.9m时受力最不利的工况时计算模型(局部放大)

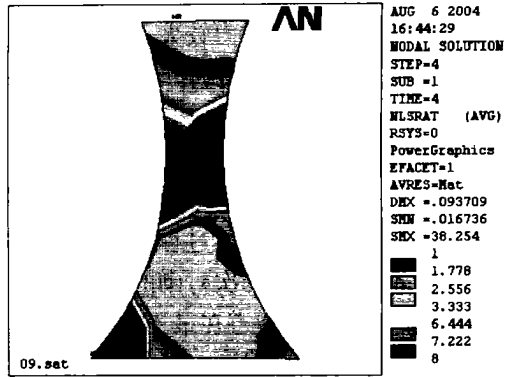


图4 中隔墙厚度为0.9m时中隔墙塑性区分布图(受力最不利的工况时)

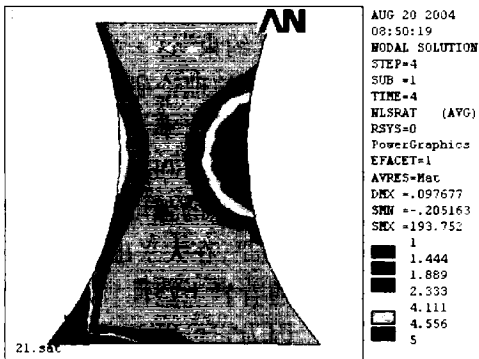


图5 中隔墙厚度为2.1m时中隔墙塑性区分布图(受力最不利的工况时)

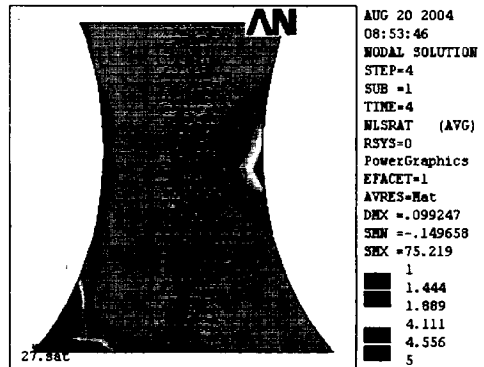


图6 中隔墙厚度为2.7m时中隔墙塑性区分布图(受力最不利的工况时)

通过分别对中隔墙厚度为0.9m、1.5m、1.8m、2.1m、2.4m、2.7m的隧道进行数值模拟结果表明中隔墙受力最不利阶段的塑性区主要出现在中部宽度最小处，中隔墙厚度在小于1.8m时，中隔墙中部的塑性区已经贯通。当中隔墙厚度为2.1m时，中隔墙中部塑性区宽度达到中部总宽度的70%左右，随着中隔墙厚度的增加，塑性区逐渐减小。当中隔墙厚度为2.4m时，中隔墙中部塑性区宽度达到总宽度的60%左右，当中隔墙厚度为2.7m时，中隔墙中部塑性区宽度达到总宽度的45%左右。根据前面的分析，为保证施工阶段的临时稳定，塑性区范围应控制在70%以内，我们认为对于本次计算的黄土浅埋偏压隧道的最小中隔墙厚度控制在2.1m较为合适。加上二次衬砌的厚度，中隔墙的厚度应为3m。

最不利受力应力状态下，中隔墙左侧底部尖角处均出现应力集中。二次衬砌施工完毕后，中隔墙厚度增加0.9m，曲墙底部的尖角应力集中也不再存在。由于二次衬砌要发挥作用，中隔墙的厚度也相应增加0.9m。因此只要隧道二次衬砌施工完毕后，不管是二次衬砌结构还是中隔墙都不会再有问题，隧道的稳定性关键在施工期间，尤其是在最不利工况下（一侧洞子开挖完毕，二次衬砌还没有浇筑；另一侧洞子还没有开挖的明显偏压状态）。

6 结论

a. 计算分析表明连拱隧道施工过程中中隔墙受力最不利的工况是：一侧洞开挖完毕，而二

次衬砌尚没有施工，另一侧洞也没有开挖。这种不对称开挖，使中隔墙受力不平衡，引起中隔发生偏转，此时塑性区最大。这种由于左右两侧隧道开挖不同步，再加上偏压的存在，施工中极易使中隔墙受偏压而倾斜开裂。施工中务必引起重视，可采用中导洞回填或钢支撑。当施工结束，两洞二次衬砌浇筑完成后，中隔墙受力状态大为改善，塑性区基本消失。

b.连拱隧道中隔墙的设计直接影响着隧道的稳定性，通过有限元数值分析表明，对于本次计算的 Q2 黄土 4 车道连拱隧道的合理中隔墙厚度应为 2.1m，考虑本工程设计二次衬砌的厚度中隔墙的最小厚度为 3m。

参考文献

- 1 蒲春平,刘可,胡占荣.京珠高速公路粤境南段五龙岭大跨连拱隧道的施工[J].世界隧道,2000(6):34-37
- 2 刘洪洲,黄伦海.连拱隧道设计施工技术研究现状[J].西部探矿工程,2001(1):54-55
- 3 周晖,曹德洪.连拱隧道施工方法及渗漏水整治对策建议[J].浙江交通科技,2002(4):48-49
- 4 李德宏.连拱隧道施工监测与分析[J].现代隧道技术,2003,40(1):59-64
- 5 周玉宏,赵燕明,程崇国.偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):679-684
- 6 刘招伟,何满潮,肖红渠.浅埋大跨连拱隧道施工中变形的监测与控制措施[J].岩土工程学报,2003,25(3):339-343
- 7 朱有元,蒲春平.浅埋大跨双连拱隧道的施工[J].湖南交通科技,2001,27(3):72-74
- 8 郝景文.浅埋段连拱隧道施工中的关键环节[J].山西交通科技,2003(3):70-71
- 9 汪俊民.软弱围岩地段双连拱隧道施工技术[J].西部探矿工程,2003(6):95-97
- 10 余晓琳,黄小华,彭立敏.软弱围岩条件下连拱隧道施工阶段的受力分析[J].西部探矿工程,2002(4):66-68
- 11 赵玉光,张焕新,林志远,李晓洪,杨峥.双连拱隧道施工力学数值模拟与施工方法比选[J].广西交通科技,2003,28(4):25-30
- 12 咎成忠,熊四华,李国礼.水磨房 2 号连拱隧道施工方案探讨[J].重庆交通学院学报,2002,21(4):20-23
- 13 卢耀宗,杨文武.莲花山大跨度连拱隧道施工方法研究[J].中国公路学报,2001,14(2):75-77
- 14 林刚,何川.连拱公路隧道施工方法模型试验研究[J].现代隧道技术,2003,40(6):1-6
- 15 赵尚毅,郑颖人,时卫民,王敬林.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346
- 16 史鹏飞,张奋林.大采出率条件下煤柱宽度的确定[J].太原理工大学学报,1998,29(5):461-463
- 17 陆士良,郭育光.护巷煤柱宽度与巷道围岩变形的关系[J].中国矿业大学学报,1991,20(4):1-7
- 18 吴立新,王金庄.煤柱宽度的计算公式及其影响因素分析[J].矿山测量,1997(1):12-16

基于连拱隧道中墙内力的两洞开挖面合理间距研究

申玉生 赵玉光

(西南交通大学土木工程学院 成都 610031)

摘要 本文结合广(州)惠(州)高速公路小金口双连拱隧道实际工程,通过在中墙埋设量测元件,分析了双连拱隧道两洞开挖对中墙内力的影响范围,得出隧道右洞(先施工正洞)和左洞施工对中墙内力(弯矩)影响范围分别为 16m 和 24.5m 左右;中墙是连拱隧道的核心构件,其受力要在隧道整体结构中进行调整,隧道左洞施工对中墙内力影响的空间效应和时间效应分别滞后 5m 左右和滞后 3 天左右出现;提出了在软弱围岩中连拱隧道两洞开挖面合理间距为 2B(单洞开挖跨度为 12m)但必须同时满足在 2B 范围内施工工期不少于 15 天,以保证围岩应力稳定释放。

关键词 连拱隧道 监控量测 合理间距 工期

1 引言

随着山区高等级公路建设在我国大面积的展开,公路隧道建设规模正以空前的速度发展。在山岭重丘区,双连拱隧道以其独特的结构形式而得到广泛的应用和发展,但连拱隧道由于跨度较大(双车道大于 20m 三车道达到 30m 以上)结构复杂左右主洞开挖与支护交错进行,导致围岩应力变化和衬砌荷载转换复杂化^[1]。在连拱隧道中两洞开挖面的合理间距,将直接关系到隧道整体结构的稳定性,在隧道施工过程中,由单侧施工过渡到双侧施工时,围岩应力释放不均衡,从而导致中墙承受较大的偏心荷载,可能导致隧道中墙失稳^[2]。在元磨高速公路桥头连拱隧道施工过程中,隧道左右洞开挖面间不合理间距而导致初期支护和中墙出现开裂^[3]。

目前我国已建(在建)双连拱隧道数量已达上百座,其中在元磨高速公路中有 15 座连拱隧道,在金丽温高速公路中有 20 多座^[4],但在两洞开挖工作面的间距问题上尚需进一步研究。在已发表的论文中大部分是对双连拱隧道进行二维或三维有限元数值分析^[5~9]然后分析两洞开挖面的间距或中墙内力分析。有限元数值计算存在较多的假设条件(如模型取各向同性、线弹性体、不考虑构造应力,不考虑衬砌施作的时间差等)和较多的不合理因素(一个开挖荷载步为 6m),从而导致连拱隧道两洞开挖面间距研究有一定的局限性。

通过已发表有关双连拱隧道的资料分析^[1~11],围岩变形和中墙应力变化与两洞开挖工作面的间距有着密切的关系,围岩应力的释放不仅存在空间效果,而存在时间效应。因此,有必要通过现场的监控量测资料对连拱隧道两洞开挖面的合理间距进行分析研究。所得的数据和结论对大跨度双连拱公路隧道设计和施工具有一定的指导和借鉴意义。

2 依托隧道工程概况

广惠高速公路小金口互通 A 匝道隧道是一座上、下行合建的四车道连拱高速公路短隧道 隧道轴向近东西方向长 200m,隧道建筑限界净宽 22.0m 净高 5.0m 内轮廓采用承载能力较好的单心圆形式 边墙为曲墙 中墙为直墙 厚度为 1.6m,隧道最大埋深 45m。隧道进出口地层为残坡积硬塑性亚粘土及强风化粉砂岩、角砾岩,掘进较容易,但易出现滑动和坍塌。洞身穿过的岩体主要为弱风化粉砂岩 构造角砾岩 岩芯破碎 隧道以 II、III 类围岩为主。残坡

积亚粘土中含少量孔隙水，强—弱风化的基岩含裂隙水，受大气降水补给，径流排泄条件良好。

小金口双连拱隧道的施工方法为三导洞施工方案，即将整个开挖断面分为三个小洞室超前掘进（两个侧壁导坑和一个中导坑），正洞施工采用短台阶法掘进，上台阶超前下台阶 3~5m，上下台阶均采用微震控制爆破开挖，开挖循环进尺为 1.5m 初期支护紧跟掌子面。

3 量测断面布设

在隧道的 II、III 类围岩中 分别选取两个试验段（各 3 个断面），在中墙埋设的量测传感器采用 $\varphi 22$ 的钢弦式钢筋应力计，利用相同直径的钢筋对接钢筋应力计后，顶替中墙原位置的一根纵筋（图 1 和图 2）。在隧道中墙不同位置的元件分别编号为 A、B、C、D、E、F 在隧道纵向可以组成 A-B 截面、C-D 截面和 E-F 截面来计算中墙在不同位置处的轴力与弯矩。

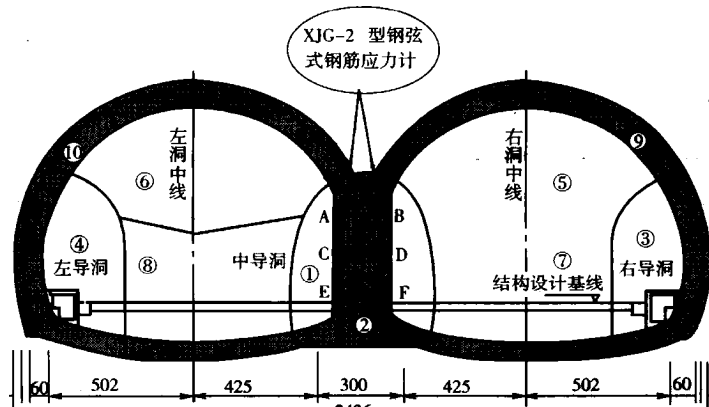


图 1 小金口双连拱隧道设计断面与开挖顺序（单位：cm）

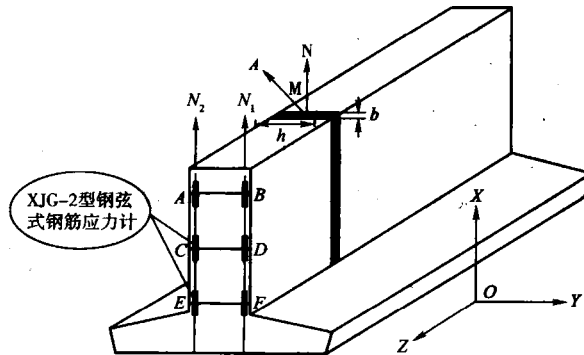


图 2 中墙量测断面和测点布设示意图

4 现场监测数据处理

中墙是连拱隧道的主要承载结构体，不但要承受来自中墙上部岩体传来的压力，而且要承担两侧耳墙传来的压力，受力十分复杂，而中墙的力学行为和它的位移及沉降指标直接关系到连拱隧道的总体稳定性，因此连拱隧道的两洞开挖工作面的间距大小将对中墙内力产生重要影响。

在小金口双连拱隧道的中墙监控量测中，共埋设 6 个断面，由于篇幅所限，本文只选取 1-1

断面（在此里程附近左右洞施工较为连续）为研究对象，该断面埋设于 II 类围岩中。

4.1 中墙内力时态曲线分析

中墙是连拱隧道应力最为集中的部位，左右洞的拱形支护结构在承受围岩压力时，将剪力和弯矩转化为轴力传递于中墙，因此中墙将承担来自隧道上方的绝大部分的围岩压力，中墙的内力是以轴力（受压为主）（图 3）。中墙轴力大部分时间处于较为平稳的变化之中，在进行正洞施工后（工序 ③），中墙的轴力开始出现较大幅度的变化，中墙各截面的轴力均增大了 2000kN/m 左右，说明双连拱隧道的左洞掘进对中墙的内力产生重大影响。在同一断面处，各截面的轴力沿中墙向上依次减小，但两者之差并不仅仅是中墙自重，而且还必须考虑中墙在隧道轴向的扭距及隧道垂直方向上的剪力等方面的因素。

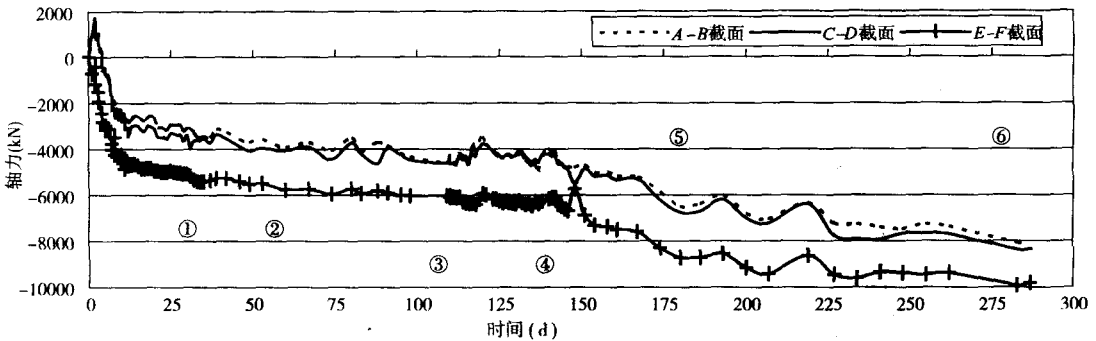


图 3 1-1 断面中墙轴力时态曲线

注：①右侧壁导坑施工 ②左侧壁导坑施工 ③右正洞施工 ④左正洞施工 ⑤右洞二衬施工 ⑥左洞二衬施工。

相对于中墙轴力变化，其弯矩受隧道两洞施工影响变化较为明显（图 4）。在隧道左右洞施工期间，中墙各截面的弯矩时态曲线开始有剧烈变化，中墙各截面的弯矩均出现了从左洞到右洞方向的弯矩（弯矩为负值）变化最大的是 E-F 截面（位于中墙底部）达到 800kN·m 中墙上方围岩经过三次扰动后，围岩应力释放率较大，从而影响了中墙的整体稳定性，使中墙出现了一定程度的偏压。隧道从单侧施工过渡到双侧施工时（工序 ④），中墙将承受较大的偏心荷载。隧道左洞的施工使围岩应力释放方向发生变化，产生了反方向回推力，是中墙弯矩值迅速减小的原因。但中墙受力是在连拱隧道整体结构中进行调整，在 10d 后中墙弯矩值再次出现增大趋势，E-F 截面弯矩值达到 600kN·m 随后逐渐趋于收敛。

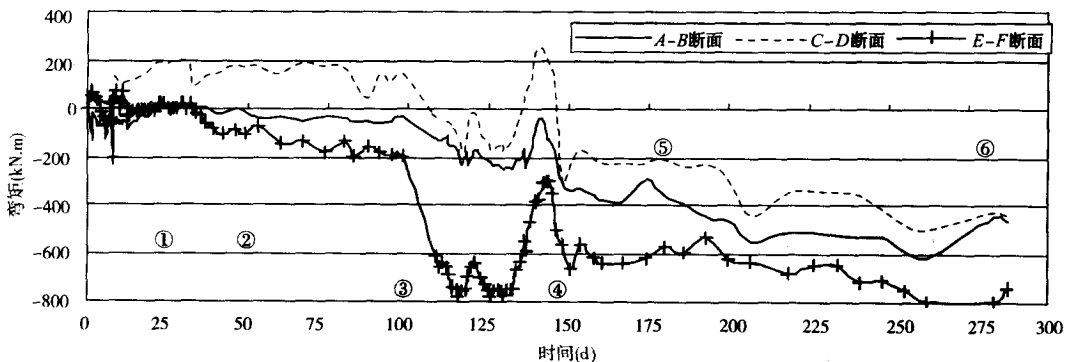


图 4 1-1 断面中墙弯矩时态曲线（弯矩值为正表示中墙产生逆时针方向的弯矩，反之为顺时针方向）

注：①右侧壁导坑施工 ②左侧壁导坑施工 ③右正洞施工 ④左正洞施工 ⑤右洞二衬施工 ⑥左洞二衬施工。

4.2 中墙弯矩的时空效应分析

中墙是连拱隧道的核心构件，其受力要在隧道整体结构中进行调整，围岩应力释放不均匀就可能造成较大的偏压现象，偏压可能导致隧道中墙和支护结构受力受损，进而可能影响连拱隧道结构的整体稳定性。因此，分析隧道左右洞施工对影响中墙内力的空间效应和时间效应十分关键。

从图 5 中可以看出，隧道右洞施工对中墙弯矩的影响较大，右洞开挖面到达量测断面前 (MO 段) 6m，中墙的弯矩已经开始发生变化， $E-F$ 截面弯矩值由 $-199 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 变化至 $-400 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。开挖面经过量测断面后 (ON 段) 10m 中墙 $E-F$ 截面弯矩开始趋于稳定 $-649 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (表 1)。由图 3 可以查出隧道右洞开挖 MO 段经历时间为 5d 开挖 ON 段所用时间为 7d。

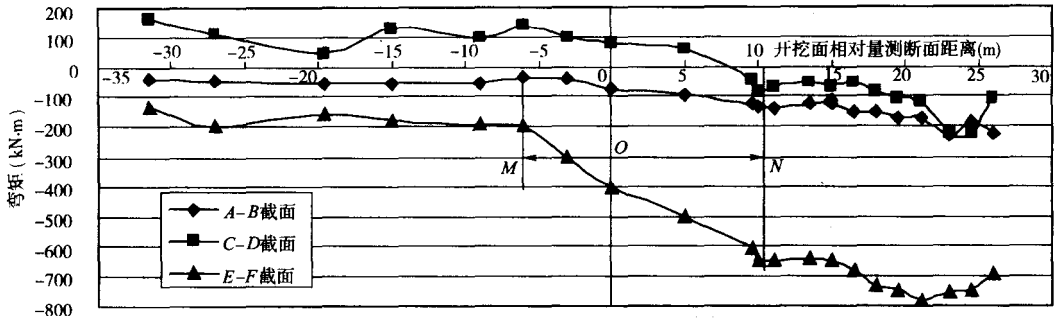


图 5 隧道右洞施工引起中墙弯矩变化曲线

隧道右洞施工对中墙弯矩变化一览表

表 1

位置	弯矩(kN·m)			备注
	A-B 截面	C-D 截面	E-F 截面	
M 点	-30.9	142.7	-199.0	距 O 点 6m
O 点	-70.5	80.3	-400.2	量测断面处
N 点	-132.6	-85.4	-649.2	距 O 点 10m

隧道左洞的施工对中墙弯矩空间效应 (图 6) 和时间效应 (图 3) 较右洞大，并且出现了强烈的波动现象。隧道左洞开挖面在量测断面前 (PO 段) 8m 开始影响中墙弯矩，中墙的 $E-F$

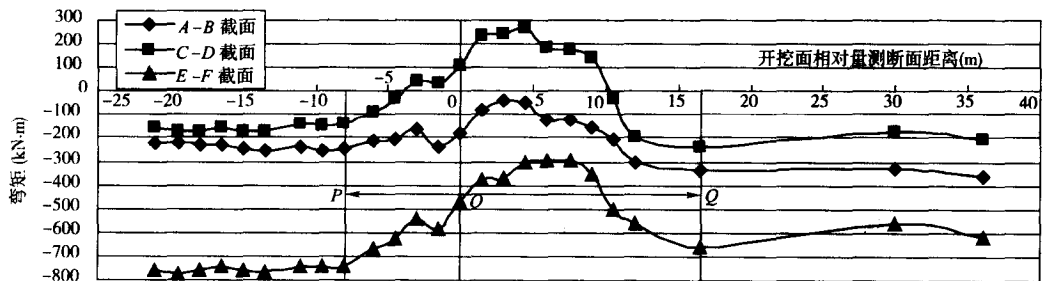


图 6 隧道左洞施工引起中墙弯矩变化曲线

截面弯矩值由 $-744.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 变化至 $-466.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (表 2)。中墙是连拱隧道的核心构件，其受力要在隧道整体结构中进行调整，隧道左洞施工对中墙内力的空间效应和时间效应分别滞后 5m 左右和滞后 3d 左右，围岩应力释放达到最大值，说明此时左洞对中墙的回推力是最大的，对中墙的抗倾覆能力是一个最大的考验。开挖面在经过量测断面后 16.5m 后 (OQ 段)，