

# 第一章 总述

## 一、猫山隧道工程概况

猫山隧道位于广东省新会市崖南镇潭江入海口——崖门口，是广东省西部沿海高速公路新会段的重要构造物。由于隧道紧连崖门大桥西桥头，受大桥宽度的影响，设计为双洞双向四车道曲墙连拱隧道。隧道按高速公路平原微丘标准设计，两隧道轴线间距 13m 连拱跨度 26 m 中隔墙最小厚度 1.9 m 隧道单洞长 411m。隧道内轮廓为曲墙半圆拱，拱半径 5.75m、曲墙半径 7.59m，两侧设检修道。隧道单洞净宽 11.32m 即  $2 \times 1.16\text{m} + 2 \times 0.75 + 7.5\text{m}$  净高 7.27m 净空面积  $68.3\text{m}^2$  隧道路面横坡 2%、纵坡 -2%。

猫山隧道由广东省西部沿海高速公路新会段有限公司投资建设，广东省公路勘察规划设计院与交通部重庆研究所设计，广东冠粤路桥有限公司施工总承包，广东虎门大桥咨询有限公司监理，中铁第十四工程局第四工程处施工。原合同工期 428 天，1998 年 12 月 9 日开工 主体工程于 2000 年 6 月 29 日竣工 历时 450 天。

## 二、工程地质条件

该隧道所处地段为第四系地层，含花岗岩残积、坡积碎块石砂、砾质亚粘土，覆盖厚度 0 ~ 0.8m。基岩为燕山期中、粗粒花岗岩 呈肉红色、灰白色 岩体巨厚、裂隙发育 多为巨块状镶嵌结构和砌体结构。山体表层风化程度较高，其厚度为 8.2m。

经地质勘探判断，隧道穿山体地段不存在构造断裂。但是岩体中裂隙普遍发育，有一组走向为  $60 \sim 70^\circ\text{EW}$  的剪切裂隙，裂面近于直立，连续性较强，且与隧道轴线近乎平行。隧道进口位于分水垭口东侧坡地，地面坡度较陡，场地狭窄，洞口面向崖门大桥。洞口右侧为分水垭口冲沟，左侧为低山主体，边坡稳定，无不良地质现象。隧道出口位于垭口西侧冲沟部位。冲沟两侧山坡较稳定，无不良地质现象。但在隧道开挖施工中，出现 4 条方向为  $\text{NE } 60^\circ \sim 70^\circ$ 、 $\angle 70^\circ \sim 90^\circ$  宽 1 ~ 2m 的较大断层 洞身为 II、III、IV 类围岩 按《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90 规定的围岩分类标准)

本段地下水为花岗岩风化裂隙水 受大气降水补给 流量少 随季节变化大。地下水类型为低矿化度 ( $31.9\text{mg/L}$ ) 侵蚀性  $\text{CO}_2 = 2.54\text{mg/L}$  不具侵蚀性。

## 三、施工前设计情况

结构设计 采用复合式衬砌结构 初期支护以喷锚钢筋网为主要支护手段。II、III 类围岩地段采用格栅钢架作为加强措施 洞口 II 类围岩地段采用双排超前小导管作超前支护。支护参数由于同类工程 连拱 实例不多 考虑到中隔墙的作用 从安全角度出发按三车道隧道类比。II、III 类围岩二次衬砌采用 C25 钢筋混凝土 衬砌厚度为 60cm，III、IV 类围岩二次衬砌采用素混凝土 (局部设构造钢筋) 衬砌厚度分别为 50cm、40cm。II、III 类围岩均设有仰拱 混凝土厚度分别为 60cm 和 50cm。

## 四、施工概况

### (一) 总体方案

掘进采取进口（东洞口）和出口同时推进方案，由于隧道纵断面从东往西设有 2% 的降坡，东洞口施工段采用集水井强制排水，洞室开挖采用台阶法。

（二）隧道主体基本施工方法

1. 洞身采用三导坑开挖，化大断面为小断面，以控制和减小围岩的松动范围。
2. 中隔墙导坑先行，并做好导坑的临时支护。
3. 从中导坑中间向两端洞口浇筑中隔墙混凝土，并将中隔墙墙顶与导坑拱顶回填紧密，控制围岩松动高度，以减小围岩荷载。
4. 左右洞侧壁导坑开挖，紧跟掌子面及时做好初期支护和临时支撑。
5. 边墙二次衬砌在侧导坑开挖过程中施作，其余的在侧导坑全部贯通以后进行。
6. 主洞开挖之前先施作明洞，保证边仰坡稳定。明洞按仰拱—中隔墙—拱墙衬砌顺序施工。
7. 左右隧洞开挖错开距离不小于 50m。
8. 洞身二次衬砌按先墙后拱的顺序施工。

（三）隧道主体工程施工主要程序（见图 1-1）

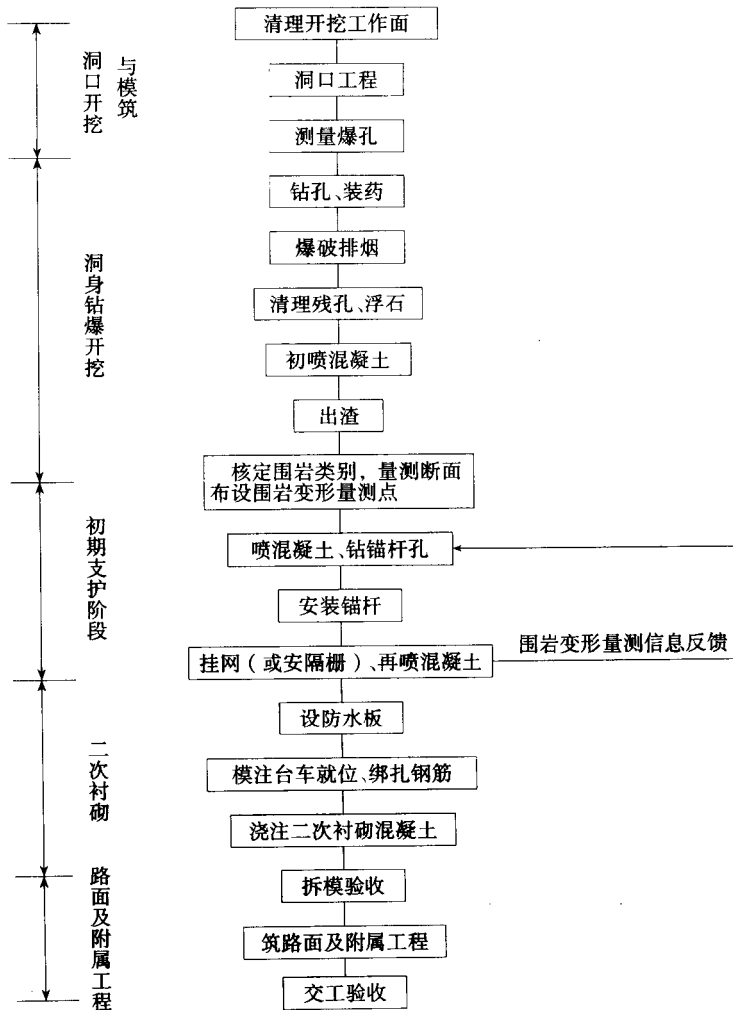


图 1-1 施工程序图

## 五、预设计执行情况

### (一) 对围岩类别的修正

1998年10月,业主根据设计单位提供的猫山隧道“两阶段施工图设计”文件,通过招标确定施工单位。猫山隧道主体工程及附属工程初期支护基本是按预设计图纸进行施工的,但围岩类别与实际相差较大,致使在施工过程中作了大量变更。预设计图的IV、V类围岩总长度为782m(以单洞计),实际IV、V类围岩只有283m(以单洞计),相差499m;预设计中没有II、III类围岩,而实际有499m,占整座隧道围岩的63.8%。围岩变化情况见表6-12。

### (二) 支护结构的变更

由于围岩类别的变更,隧道支护结构也相应的作了变更,各类围岩每延米支护结构工程量如表1-1。

猫山隧道各类围岩每延米支护结构数量

表 1-1

围岩	喷射混凝土 (m <sup>3</sup> )	锚 杆		钢筋网 φ6 (kg)	钢格 栅拱架 (kg)	仰拱填充 混凝土 (m <sup>3</sup> )	模筑混凝土 (m <sup>3</sup> )	注浆小导管 (t)
		根 数	重 量 (kg)					
V	3.2	22(长 3.0m)	196	13.5			21.94	
IV	4.0	32(长 3.0m)	286	13.7			21.94	
III	8.61	30(长 3.5m)	313	43.0	(间距 1m)	19.32	45.62	
II	16.65	55(长 3.5m)	573	43.9	(间距 0.75m)	19.32	47.51	0.696

由于围岩的变化,工程量及造价相应也有较大的变化:

(1)工程材料变更:锚杆数量增加 1.39 倍;

钢筋数量增加 3.2 倍;

混凝土数量增加 2.75 倍。

(2)每延米支护结构造价,按可比价格计算,每延米 II、III类围岩支护工程造价类比 IV、V类围岩增加约 7.35 倍,可见围岩类别的变动对工程造价影响是很大的。

## 六、主要指标完成情况

### (一) 隧洞施工进度

1.隧洞月平均 41.16 双车道米。

2.隧洞开挖折合全断面开挖,单口月平均进尺 30.08m,最高为 68.17m。

3.隧道衬砌:单口月平均浇筑 22.34m(2 台模板台车),使用一台模板台车单口最高月浇筑 60m。

4.隧道衬砌采用一台模板台车,拱部每循环脱模周期平均为 7d,最短周期为 3d。

5.全隧道最高月成洞 104.7 双车道米(4 台模板台车)。

6.全隧道最高年成洞 558 双车道米(4 台模板台车)。

### (二) 完成主要工程量(见表 1-2)

洞内主要工程数量表(竣工统计)

表 1-2

工程项目	单 位	数 量	工程项目	单 位	数 量
开挖土石	m <sup>3</sup>	82006	灌注混凝土及钢筋混凝土	m <sup>3</sup>	24964
打小导管	t	100	钢筋网及衬砌钢筋	t	433.8
打锚杆	t	249.4	铺设防水板	m <sup>2</sup>	38544
钢支撑、钢格栅	t	745.6	敷设排水管	m	42576
喷混凝土	m <sup>3</sup>	5396			

## (三) 主要技术经济指标(表 1-3)

隧道主体工程各类围岩主要技术经济指标(竣工统计测算)

表 1-3

指标名称	单 位	指标(单洞双车道延米)			
		II	III	IV	V (喷锚、衬砌)
建安费	元	116260	46881	31673	28665
开挖断面建安费	元/m <sup>2</sup>	991.26	428.49	371.40	337.71
人工	工日	495.9	316.2	201.8	199.5
木材	m <sup>3</sup>	0.686	0.142	0.088	0.088
钢材	t	4.995	0.579	0.418	0.417
水泥	t	26.506	19.083	8.325	2.644
炸药	kg	41	96	100	113
油料	kg	1747	1511	1154	1070
电力	kW·h	4586	2876	2213	2137
塑料防水板+无纺布	m <sup>2</sup>	88.61	20.65	20.13	20.12
软式透水管及PVC管	m	62.9	19.54	25.01	1.9
2~3m <sup>3</sup> 装载机	台班	1.01	1.17	1.22	1.44
9m <sup>3</sup> 空压机	台班	13.2	10.627	9.77	10.233
凿岩机	台班	6.515	6.565	6.336	8.99
250L强制混凝土拌和机	台班	8.21	5.99	2.71	2.11
混凝土运输车	台班	4.485	4.075	3.176	3.161
模板台车	台/百米	0.49	0.49	0.49	0.49
12t自卸车	台班	1.89	2.199	2.268	2.69

续上表

指标名称	单位	指标(单洞双车道延米)			
		II	III	IV	V (喷锚、衬砌)
10t 自卸车	台班	0.66	0.972	0.757	0.754
1t 机动翻斗车	台班	18.4	14.78	8.24	7.69
30-40KVA 交流电焊机	台班	7.13	1.97	1.9	1.89
140L/min 液压注浆泵	台班	4.36	2.228	1.238	0.643
30kW 轴流通风机	台班	6.37	5.733	5.374	5.856
150mm 电动离心水泵	台班	2.473	2.9	3.598	3.16

注：本表为各类围岩按不同断面和支护要求测算单洞双车道每延米（包括开挖、喷锚、支护、衬砌、防排水等）消耗量指标。

### 七、在施工中贯彻新奥法的做法

猫山隧道属中型隧道，但在国内双连拱隧道中算是较大的。双连拱隧道与普通分离式单洞隧道相比设计和施工难度较大，主要是设计计算模型和围岩稳定性分析较难，连拱跨度达26m，施工方法复杂和危险性较大。加之猫山隧道地质复杂，围岩变化大，中隔墙顶要受多次爆破振动，围岩的稳定和钻爆控制较难。但这些难点，经隧道全体建设者的共同努力，全面贯彻新奥法施工，逐一得到克服，总的施工质量实现全优。在长达450余天的紧张施工中，未出现大的事故，各项经济技术指标均达到优良水平，隧道的防排水解决最好。在2001年6、7月两月内连续下了10余天的大雨，发生多次山洪爆发，而隧道内无一处渗水。在施工中，他们发动群众，撰写了20余篇技术论文，全面总结了猫山隧道建设和贯彻新奥法的经验，这一点在公路隧道工程中是为数不多的。这里简要介绍他们贯彻新奥法的主要做法。

#### （一）全面深入学习新奥法的原理，搞清基本概念。

猫山隧道的领导者和组织者深深懂得新奥法是现代隧道工程先进的施工技术和管理方法之一，采用新奥法不但是猫山隧道争创优质工程的必须，而且是队伍自身建设的必须。根据当前隧道工程建筑市场的形势，特别在我国加入WTO之后，我国隧道工程施工队伍如不能在实际中全面提高现代施工管理和施工技术水平，将失去竞争条件和生存能力。所以，施工队伍进入猫山隧道工地之后，始终把贯彻新奥法的宣传教育和思想发动工作放在第一位，使广大员工深入了解和掌握新奥法的理论基础、精神实质、内容和要求。比如新奥法“三大技术措施”（即光面爆破、喷锚支护、围岩变形量测）的内容是什么，重要性在哪里等等，都要求广大施工人员深入了解，以提高他们贯彻新奥法的自觉性和主动性。有了群众的自觉行动，再加上领导和监理的督促检查，使新奥法逐一落到了实处。

#### （二）采用光面爆破技术，提高爆破效果。

猫山隧道两个单洞共长830m，开挖断面116m<sup>2</sup>，共需挖出石方约8.2万m<sup>3</sup>。要开挖这样巨大的石方量，应用好光面爆破技术，对于节约投资、保证工期、保证质量和保证施工安全意义特别重大。但猫山隧道岩性变化大，对推行光面爆破技术极为不利。有的同一开挖断面上II、

III、IV类岩均有，如爆破稍有不慎，就会造成大的超挖或塌方。特别是维持中隔墙顶部的稳定是爆破施工成败的关键。针对这些情况，专门组织了光面爆破设计试验组，专门试验设计各类围岩各个开挖部位的爆破参数和工艺，在取得经验基础上，逐步推广。在爆破施工中，应用非电毫秒爆破工艺和中隔墙顶微振爆破控制，领导干部和技术骨干亲自到掌子面，检查爆孔布置、装药、起爆装置，查看爆破效果，总结经验。由于措施具体，工作到位，使整个爆破作业很少出现哑爆，人员无一伤亡，硬岩光面爆破炮眼痕迹保存率及超欠挖指标基本达到规范要求。由于爆破控制得当，对围岩的扰动小，围岩较为稳定，对后续工序、喷锚支护、二次初砌的施工质量均起了有力的保证作用，所以猫山隧道支护结构基本未出现过开裂现象。

#### （三）作好围岩变形监控量测，保证施工安全。

猫山隧道的参建人员深深懂得，围岩变形量测是新奥法的核心，是保障施工安全的耳目和哨兵。施工队专门成立了变形量测组，主要工作由一名测量工程师负责，配备了必要的仪器和工具，在地面和洞内均布设有量测点和断面。在隧道主体施工过程中重点量测了18个断面，按规定的频率量测隧道拱顶沉降量和两边墙的收敛值，共获得数千个数据，并对量测数据进行了回归整理分析，为领导决策提供科学依据。由于量测及时，基本摸清了各类围岩变形情况和支护结构的稳定规律，从量测的时态曲线中几次发现围岩出现塌方先兆，及时发出险情预报，作了处理，避免了塌方的发生。同时用量测信息进行反分析，发现个别地段的初期支护有不足和过于保守的现象，及时给领导提出调整的建议。总之，猫山隧道围岩变形量测工作受到重视，效果明显，对整个隧道施工安全起到了重要作用。

#### （四）引进先进技术，解决施工难题，提高施工水平。

猫山隧道是一座大跨度的双洞连拱结构，支护结构主要是按工程类比法进行设计。工程类比法本身是一个定性经验方法，用于软弱围岩可能偏于危险，而且还不能随跨度、洞形等具体变化而改变支护参数，加之猫山隧道地质复杂，目前国内建成这样洞形的隧道还不多，类比资料也不是很充分，施工安全一直是被十分关注的一个问题。故此，施工单位除在施工中加强围岩变形量测，进行安全监控外，还特地引进了我国国防系统研究的具有国际先进水平的隧道设计新理论——即典型类比分析法及其相应的软件（其详细内容见本书第八章和附录三），该法应用典型工程原位测试资料与专家经验加上岩石力学理论分析方法与计算机技术相结合研究而成，是隧道工程半经验半理论方法应用的一种新发展。经在施工中初步应用证明，它可以预测待开挖隧洞的围岩变形和破坏形态；可以利用施工中量测的围岩变形信息及时进行反分析，计算出反映围岩和支护稳定的几个重要参数，从而可概略了解隧道围岩和支护稳定情况，为调整支护结构决策提供具有专家咨询水平的意见。使用这一程序，除微机外无须其他设备，需要的数据也不很多，使用简便、快速，很适合施工现场使用。应用这一技术大大地增加了对隧道围岩和支护稳定监控的科学性，减少了盲目性，从而把猫山隧道施工提高到半理论半经验的现代先进水平。

### 八、从猫山隧道工程实践看公路隧道预设计需改进的几个问题

#### （一）应加强和改进公路隧道施工前地质调查工作，提高围岩预测精度。

围岩类别是隧道设计、施工的基本依据，围岩类别不同，开挖方法不同，支护结构不同，工程造价也不同。据资料介绍，软弱松散围岩隧道单位造价比自稳性很好的围岩隧道造价可增大达10倍，故施工前围岩预测精度要求，应以施工中不产生大幅度变更设计和施工计划以及大幅度增加工程投资为原则。但从一些已竣工的公路隧道资料来看，围岩预测精度普遍较低。

猫山隧道在施工前预测的 II、III类围岩为零 但实际开挖后 经各方人员共同评定 ,II、III类围岩却长达 499m 占总长度的 63.8%。由于预测围岩类别不准 施工中变更设计多 工程造价变动大, 给工程投资控制、工程管理带来不小的负面影响。造成这个结果的原因, 除了与围岩预测难度较大有关外, 还与地质调查工作和隧道设计工作分家有较大关系。由于地质勘察仪器设备性能差、经费投入少等因素 往往造成钻孔少、分析不够 不能为隧道设计提供准确的地质资料 满足不了设计要求 再加上勘察与设计不是同一个单位 协调起来有一定困难 所以隧道设计者对地质调查报告, 特别是围岩类别的预测资料也难进行复审, 所以要提高公路隧道围岩预测的精度 必须创造一个“利益一致、便于协调”的工作环境 使地质调查者与隧道设计者共同努力 才能达到。英国矿业工程学会出版的《岩石地下工程》指出“正确剖析地质情况乃是进行合理设计的一个主要先决条件”, 设计师的职责并不在于精确计算 而在于正确判断”。这些经验是很值得借鉴的。公路隧道施工前的地质调查应像铁路隧道一样, 由设计单位统一管理, 并将围岩的预测精度与设计质量和设计费用挂起钩来。

### (二 根据隧道工程特点 公路隧道应采用信息化动态设计模式。

面对复杂多变的地质问题, 加之我国公路中、小型隧道工程的前期技术准备时间短, 地质勘探工作力度不够, 要求在预设计阶段, 完全弄清隧道开挖断面中全部围岩状况也是不现实的。特别是地质复杂的隧道, 本来就是一个不能准确预定和精确确定的活动过程, 地下情况, 不可能在施工前彻底了解 隧道围岩详细状况只能是“挖开来看” 所以隧道支护设计不能像地面工程那样可以一步到位, 提供稳定准确的施工详图和相应的工程概预算。地面工程一经领导批准, 就可以要求承包商按图施工, 施工中一般不再修改。而隧道工程在施工前提出的预设计图, 在施工过程中要随着围岩类别变化情况不断进行修改完善, 这就要求在施工过程中设计人员一定要深入施工现场 与施工、监理、业主代表结合 直接观察开挖工作面围岩变化情况, 评定围岩类别。而当前有的隧道设计单位交出“施工图”之后, 很少主动派人常驻现场, 当掌子面围岩发生变化时 须由施工单位提出申请 上报监理、甲方再转设计方 再由设计单位派员来到现场确认; 有的由于设计单位距施工现场远, 设计人员不能按要求及时来到现场, 延误了喷锚支护的及时性, 造成了不应该出现的塌方事故, 致使工期延长, 造价增加。这种局面是应该改变的。

### (三 根据公路隧道工程特点 应改变隧道设计文件编制办法。

我国交通部公布的关于公路工程设计文件编制办法中规定, 隧道工程采用两阶段设计。要求初步设计阶段, 确定隧道位置结构类型及主要尺寸, 提出工程投资概算; 要求在施工设计中 进一步审定设计方案 将技术决策加以具体化 计算出工程数量 编制施工预算。猫山隧道以及一些其他公路隧道基本是按这一要求来编制设计文件的。从实践来看, 按这一要求提出的施工图, 多数不能完全按图施工。设计图提出的围岩类别, 与实际情况出入较大, 工程投资概算、预算均有较大的突破, 造成工程管理上的混乱, 其根本原因是公路隧道设计要求脱离实际, 不适合信息化设计要求, 把地面的道路桥梁工程设计要求照搬照套在隧道工程来, 与隧道工程特点不相适应。下面我们来看看铁路隧道工程对设计的要求。我国《铁路隧道新奥法指南》规定 隧道设计应有两个阶段, 一为施工前预设计阶段 二为信息反馈修改设计阶段。在施工前预设计阶段设计主要任务, 是确定隧道断面形式、尺寸、衬砌类型参数及施工方法、顺序等。在这一阶段一般难以详尽地掌握实际工程地质和水文条件, 预设计项目不可避免地有一定幅度的变动 需通过施工中的地质调查和现场监控量测 来确认和修正预设计 因此 按新奥法原理设计隧道工程, 必须要有信息反馈修正阶段, 也是最终确定设计参数并据以实施的阶

段。

另据资料介绍，日本国制定的铁路公路隧道《新奥法设计施工指南》亦将隧道设计分为初步设计（隧道发包时的设计）与修改设计（施工中根据观察和量测及时修改设计）两个阶段。指南还规定初步设计方法：①标准支护模式法；②工程类比法；③解析法，并对这三种方法的地位和作用作出明确的规定：“在一般围岩中的标准断面初步设计阶段，主要是采用与围岩等相应的模式化的标准设计”，在标准支护模式的条件之外，当所设计的隧道与过去施工过的隧道的条件非常类似时，采用工程类比法；理论计算方法或有限元进行解析的方案，一部分虽应用于实际设计中，但目前阶段尚未成为通用的方法”。

美国土木工程师协会出版的《隧道衬砌设计指南》、英国矿冶工程学会出版的《岩石地下工程》其支护设计方法和程序与我国和日本的铁路界的思想和方法均大体一致，因此我国公路隧道工程支护结构设计应改变做法，与国际接轨。

## 第二章 猫山隧道支护结构设计

### 第一节 隧道支护设计思想与方法简述

目前隧道设计还没有统一的模式。在国际隧道学会归纳的隧道结构设计模型的基础上，从中国地下工程实际出发，我国目前隧道支护设计主要采取以下四种模式：

#### 一、荷载—结构设计模式

这种模式是假定已知地压荷载和地层对结构变形的约束抗力（前者在浅埋松散岩土荷载条件下为已知，后者均为假定）的条件下，按弹性地基上杆件系统的结构力学原理进行衬砌内力计算，这种设计方法的概念与地面结构设计相近，容易理解，计算也比较简单，受力明确，容易被设计人员接受，具有一定的实用性。这个方法在一个相当长的时间内是我国中、小隧道及浅埋隧道的主要设计方法。但经过长期实践发现，这种设计模式不能反映实际情况，致使支护结构很厚，材料浪费很大。

#### 二、信息化设计模式

20世纪60~70年代，隧道支护设计原则已逐渐被新奥法取代，逐渐演变出信息化模式，其特点是：隧道开挖后，把围岩和支护系统力学形态的变化动态作为判定围岩稳定的依据，把施工监测所获得的信息加以处理并与工程类比相结合，建立一些必要的判断准则，据此利用量测结果进行现场反馈、修改支护设计。这种设计、施工、现场量测为一体并通过量测信息反馈进行安全施工决策和支护系统设计的方法就是信息化设计方法。目前我国《公路隧道设计规范》规定衬砌结构设计通过工程类比和结构计算综合分析确定。

#### 三、连续介质模型—岩石力学解析法和数值法

解析法难以适应隧道工程复杂的地质条件，目前应用较少。常用的数值计算方法主要是岩石力学有限元法，其次是边界元法。

#### 四、典型类比分析法

典型类比分析法是当代新奥法隧道工程支护设计的一种新技术，是在中国新奥法隧道工程实践经验基础上对信息化设计技术的应用和发展。在隧道开挖前，应用此法对围岩的变形特性与破坏形态作出定量分析和预测，在施工中利用围岩量测数据进行位移反分析，修正设计，应用变形速率比值判别法对围岩稳定性支护效果作出定量判别，详见本书附录三及第八章第二节。

由于地质条件的千变万化，上述各种方法各有适用的场合和局限性，因此重要隧道在进行支护结构设计时应多种设计方法进行比较，经验方法和理论方法综合应用。专家指出，对隧

道支护这类尚不能完全弄清的复杂问题来说，将经验与理论相结合，即半经验半理论的方法是科学的。地下结构设计不能完全依赖计算，在目前的情况下很大程度上仍需依据经验和实测，这是当今隧道工程支护设计最基本的指导思想和原则。

## 第二节 猫山隧道的支护设计

猫山隧道为连拱结构，目前国内同类工程实例不多，公路隧道设计规范也没有涉及这方面的内容。猫山隧道的设计依据是现代隧道设计理论，采用信息化设计模式，应用多种方法进行比较，力求作出既安全又经济的设计方案。在预设计中，对隧道主体工程应用工程类比法，初步确定了支护参数之后 根据新奥法原理和有关典型工程的经验参数等 (如大瑶山隧道) 对各类围岩预设计支护参数进行了校核计算，并且应用典型类比分析法对预设计的围岩的破坏变形状态进行了初步分析。最后通过施工量测得到围岩和支护结构变形的信息进行反分析，校核围岩和支护结构的稳定性。尽管双连拱隧道简化设计计算模型有相当的难度，设计单位还是进行了有限元试算，此外对隧道明洞和浅埋段还采用“结构—荷载”模式对支护结构进行设计计算。从施工结果来看，猫山隧道设计是合理的。

### 一、运用工程类比法选定支护参数

根据连拱隧道的施工顺序，采取中导洞先行的开挖方法。先开挖中隔墙，用混凝土填筑后，再分别进行两侧正洞开挖，并将两单洞开挖工作面错开 30~50m 这样充分利用中隔墙的支护作用，将毛洞开挖宽度缩小为 15m 这与三车道的隧道跨度相当 按此状态进行工程类比，预定支护参数。

在设计期间，考察了广州白云隧道（双洞连拱结构）和广东省几座三车道的隧道工程的支护实例 见表 2-1 至表 2-5。在此基础上拟定了猫山隧道的支护参数（见表 2-6）和 II~V 类围岩的衬砌设计图 见图 2-1 至图 2-5。

虎门大桥引道隧道（三车道，净跨13.75m开挖毛跨17m）支护结构参数表

表 2-1

围岩类别		II	III	IV	V
支护结构名称					
喷射混凝土厚(cm)		25	20	20	15
锚杆 Φ22	间距(cm)	100 × 100	100 × 100	100 × 100	
	长度(cm)	300	300	300	
钢筋网		Φ6 20 × 20 双层	Φ6 20 × 20	Φ6 20 × 20	局部设置
钢格栅拱架		间距 75cm	间距 100cm		
仰拱(cm)		50			
模筑衬砌厚度(cm)		80	45	40	35

京珠高速公路大宝山隧道 三车道 支护结构参数表

表 2-2

围岩类别		II	III	IV	V
支护结构名称					
喷射混凝土厚(cm)		25	20	15	5
锚杆 $\Phi 22$	间距(cm)	100	120 × 150	150 × 150	局部设置
	长度(cm)	400	350	350	
钢筋网		$\Phi 6$ 10 × 10 双层	$\Phi 6$ 10 × 10	$\Phi 6$ 10 × 10	
钢格栅拱架 $I_{20b}$		间距 60cm	间距 80cm		
二次衬砌 混凝土厚(cm)	拱墙	60	50		
	底部	50	40	15	

京珠高速公路靠倚山隧道(三车道)支护结构参数表

表 2-3

围岩类别		II	III	IV	V
支护结构名称					
喷射混凝土厚(cm)		27	25	10	12
锚杆 $\phi$ (mm)	间距(cm)	120 × 50	100 × 100	150 × 75	
	长度(m)	$\Phi 42 \times 3.5m$ 钢管(注浆)	$\Phi 22 \times 3.5m$	$\Phi 22 \times 3.5m$	
钢筋网		$\Phi 8$ 25 × 25 双层	$\Phi 6$ 25 × 25 双层	$\Phi 6$ 25 × 25 双层	钢板扩张网
钢格栅拱架 $I_{20b}$		$I_{20b}$ 间距 75cm	$I_{18b}$ 间距 100cm		
二次衬砌混凝土厚(cm)		50	50	50	

深圳大梅沙隧道(三车道)支护结构参数表

表 2-4

围岩类别		II	III	IV	V	VI
支护结构名称						
喷射混凝土厚(cm)		30	25	20	10	
锚杆 $\Phi 22$	间距(cm)	80 × 80	100 × 100	120 × 120	150 × 150	150 × 150
	长度(cm)	400	350	350 局部	300 局部	250 局部
钢筋网 $\Phi 6$ 间距(cm)		15 × 15	15 × 15	20 × 20	20 × 20	20 × 20
钢格栅间距(cm)		80	100	100		
二次衬砌混凝土 C25 厚(cm)		50	50	40	40	40

广州白云隧道（连拱三车道）支护结构参数表

表 2-5

围岩类别		II	III	IV	V
支护结构名称					
喷射混凝土厚(cm)		25(C25)	25(C25)	25(C25)	8(C20)
锚杆 Φ22	间距(cm)	100×100	120×120	120×120	
	长度(cm)	350	300	250	
钢筋网		Φ8 15×15	Φ6 20×20	Φ6 20×20 (仅设于拱部)	
钢格栅拱架间距(cm)		75	100	100	
二次衬砌混凝土厚(cm)		50(C25)	50(C25)	40(C20)	40(C20)

注：广州市白云隧道单洞长 242m 其中 II、III 类围岩共长 110m 隧道净宽 13.82m 净高 7.57m 中直墙高 3.6m 两侧为曲墙 连拱中隔墙宽 2.37m, 1993 年 10 月竣工。

猫山隧道支护结构参数表

表 2-6

围岩类别		明洞	II	III	IV	V
支护结构名称						
喷射混凝土 C25 厚(cm)			25	20	10	10
锚杆 Φ22	间距(cm)		75×80	100×100	100×100	120×120
	长度(cm)		350	350	300	300
钢筋网 Φ6.5(cm)			20×20	25×25		
钢格栅拱架(cm)			75	100		
模筑混凝土衬砌 C25(cm)				50	40	35
模注钢筋混凝土衬砌 C25(cm)		60	60			
混凝土仰拱 C25(cm)				50		
钢筋混凝土仰拱 C25(cm)		60	60			

## 二、喷锚支护参数的计算

如前所述，由于力学分析的荷载、结构和材料特性不甚明确，隧道支护设计计算结果与实际情况往往相差很远，所以专家指出，对隧道工程喷锚支护这类尚不能完全认清的复杂问题，采取半经验半理论的方法是符合科学的。猫山隧道在设计过程中采用了多种方法进行计算探讨 亦参照《大瑶山隧道》关于支护参数的计算方法 见参考文献 1) 进行计算。本书在此只简要地介绍所采用的支护参数的计算和预测方法，仅供参考。

### 1. IV、V类围岩中喷锚支护参数的计算

IV、V类围岩岩体本身的强度较高，而结构面所造成的岩体不连续性是决定此类围岩稳定

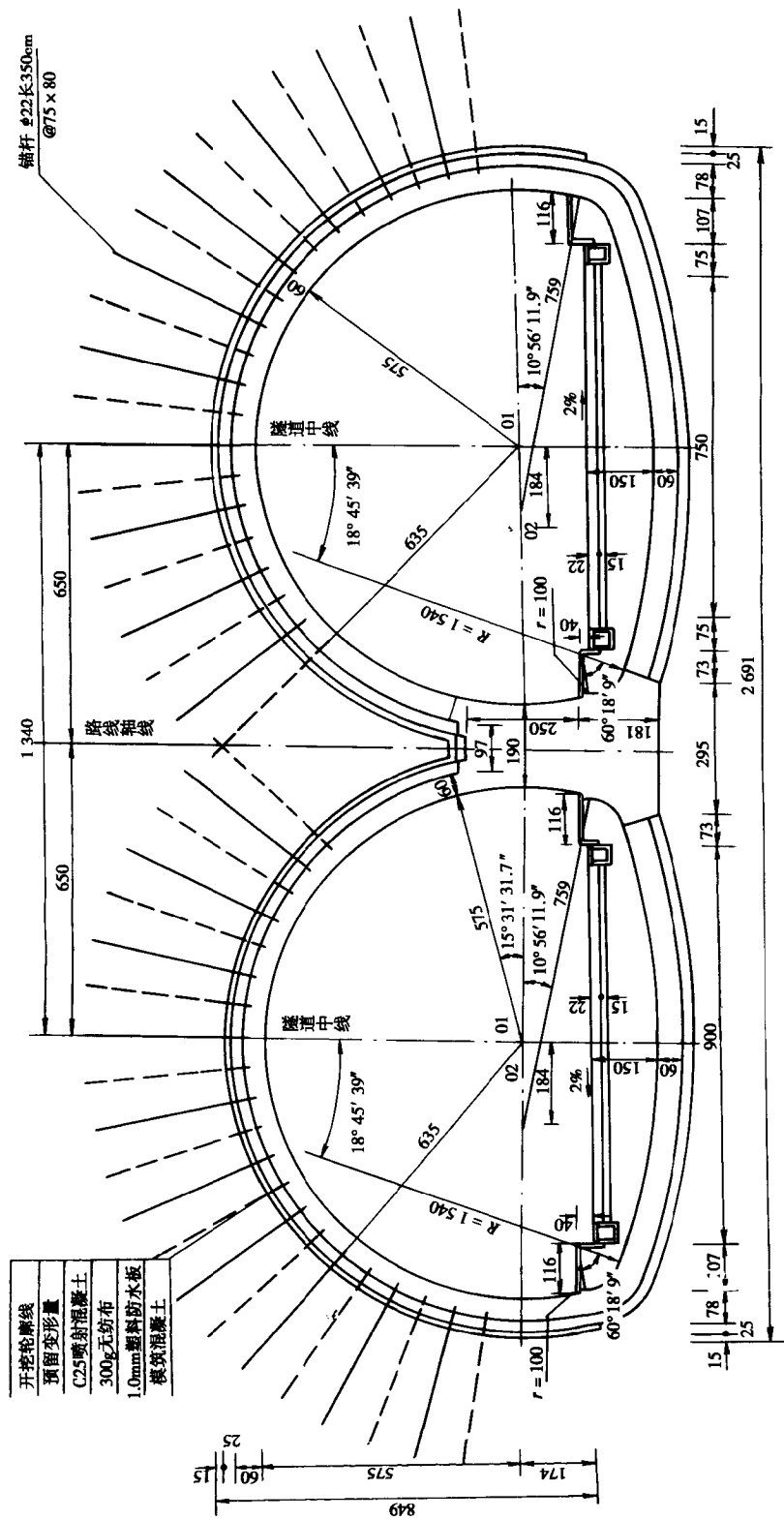


图 2-2 II 类衬砌断面图(尺寸单位:cm)

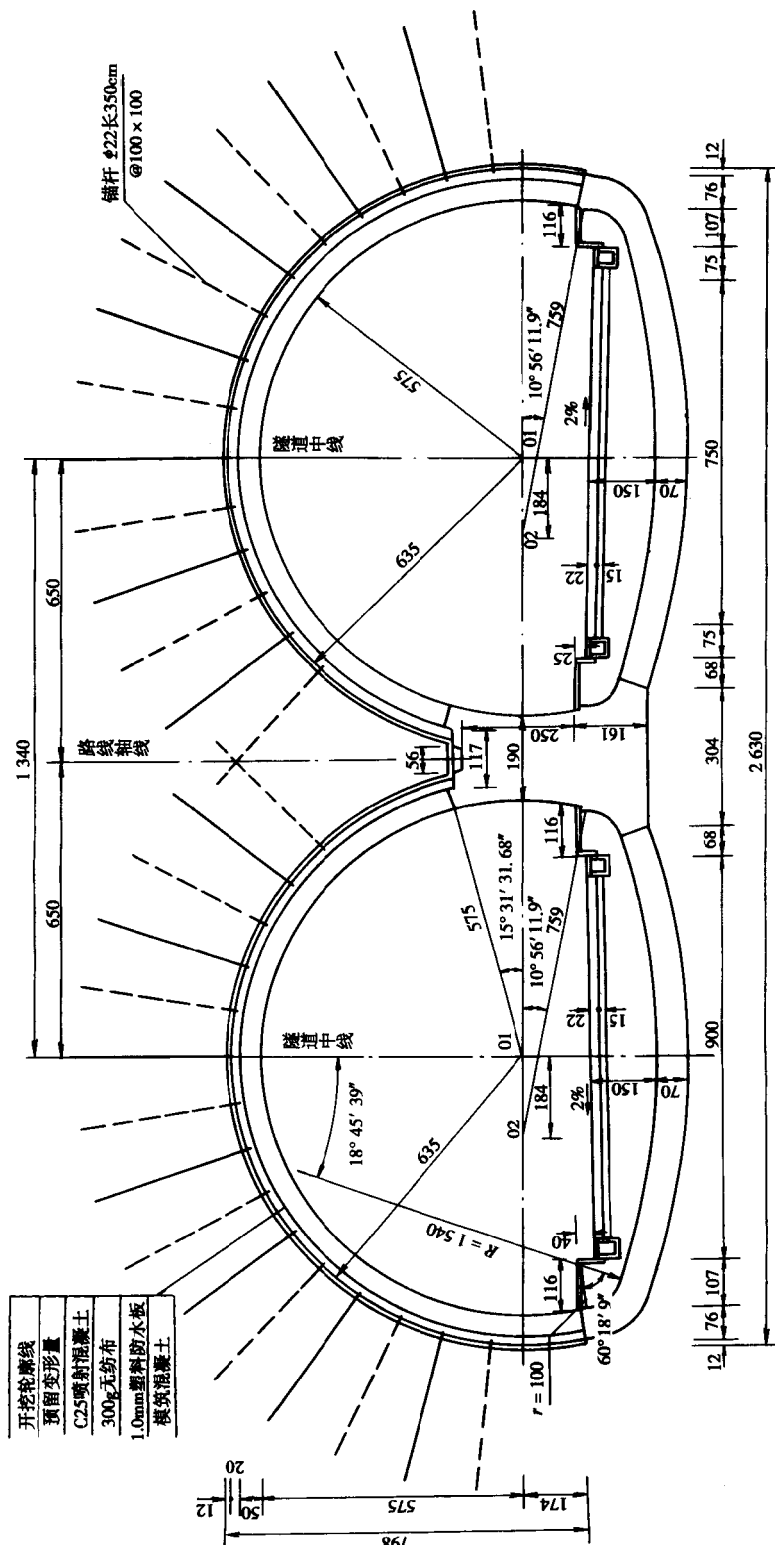


图 2-3 III 类衬砌断面图(尺寸单位:cm)

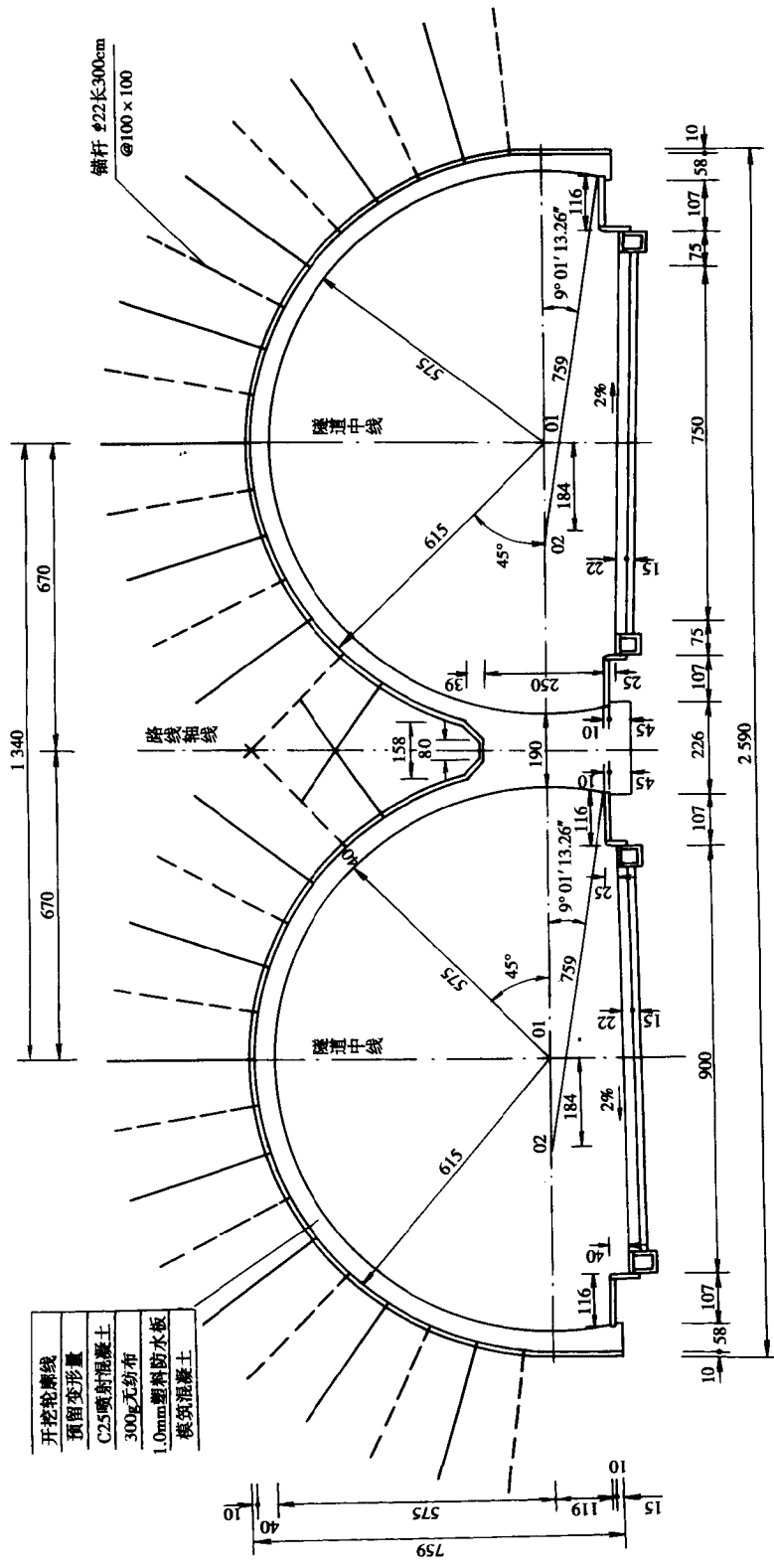


图 2-4 IV 类衬砌断面图(尺寸单位:cm)



性的主要因素。其变形和破坏的特点主要由结构面的交割情况而定。由于各岩块的相互镶嵌，使岩块间产生了连锁和咬合作用，围岩的坍塌总是从表面某一块最容易坍塌的危石开始，从而导致岩块间连锁和咬合作用的破坏。如能及时而有效地防止个别岩体的坍塌，就能发挥岩体的镶嵌、咬合而产生自稳作用，从而保证围岩的整体稳定性。喷锚支护正是能及时而有效密贴地防止这种危石的松动和坍塌的最好支护形式。

在块状围岩中设计喷锚支护时，首先应根据岩体的地质结构来确定危石块体，尔后用块体的静力平衡条件计算出为防止危石坍塌所必须提供的支护抗力，并核算喷层与锚杆的支护参数。

不稳定岩块的位置和形状采用赤平极射投影确定 拱部不稳定岩块重力 采用  $G = 350\,000\text{N}$ 。

#### (1) 锚杆

锚杆在节理、层理发达的硬岩、中硬岩中，由于岩块本身强度高，只会产生岩块滑动式掉落，此时采用锚杆的目的是抑制岩块滑动，以保持围岩的稳定性。

锚杆设计的内容包括锚杆类型选择及锚杆长度、直径、材质、锚固方式、间隔布置等的确定。

猫山隧道采用全长粘结型锚杆，个别地段也曾采用端头锚固型锚杆、楔缝式摩擦锚杆、低预应力带螺纹全粘结锚杆等。本隧道的计算内容如下：

锚杆杆体截面积：

$$A_S = \frac{KG}{nf_{st}} \quad (2-1)$$

式中： $K$ ——安全系数 取  $K = 2$ ；

$G$ ——锚杆承受危石重力 (N)；

$A_S$ ——单根锚杆截面积 ( $\text{cm}^2$ )；

$n$ ——锚杆根数 拱部  $n = 9$ ；

$f_{st}$ ——锚杆钢筋设计抗拉强度 (N)。

$$A_S = \frac{2 \times 350\,000}{9 \times 30\,000} = 2.59\text{cm}^2$$

选用  $\phi 22$  钢筋， $A_S = 3.801\text{cm}^2 > 2.59\text{cm}^2$ 。即拱部需设置 9 根  $\phi 22$  锚杆。

锚杆长度按下式计算：

$$L = L_{\text{锚}} + L_{\text{支}} + L_{\text{超}} \quad (2-2)$$

式中： $L$ ——锚杆长度 (m)；

$L_{\text{锚}}$ ——砂浆锚杆锚固长度 (m)；

$L_{\text{支}}$ ——锚杆支护长度 取  $L_{\text{支}} = 1.3\text{m}$ ；

$L_{\text{超}}$ ——锚杆超出孔口长度 取  $L_{\text{超}} = 0.1\text{m}$ 。

锚固段长度按下式计算：

$$L_{\text{锚}} = \frac{KP_{\text{锚}}}{\pi d \tau_{\text{粘}}} \quad (2-3)$$

式中： $P_{\text{锚}}$ ——按规范要求不小于  $60\text{kN}$  取  $P_{\text{锚}} = 60\text{kN}$ ；

$K$ ——安全系数， $K = 1.2$ ；

$d$ ——锚杆直径， $d = 2.2\text{cm}$ ；

$\tau_{\text{锚}}$ ——锚杆与砂浆的粘聚力， $\tau_{\text{锚}} = 2\text{MPa}$ 。