

# 隧道与地下工程智能优化系统

段军萍<sup>1</sup>,南振岐<sup>1</sup>,王胜利<sup>1</sup>,范亚君<sup>1</sup>,赵文杰<sup>3</sup>,张晶晶<sup>3</sup>,薛小虎<sup>2</sup>,姚尔果<sup>3</sup>,闫秋粉<sup>3</sup>

(1. 兰州南特数码科技股份有限公司,甘肃 兰州 730070; 2. 西北师范大学,甘肃 兰州 730070;

3. 兰州交通大学,甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**为解决隧道与地下工程衬砌设计存在的问题,根据国际先进水平的《隧道与地下工程设计施工新法》编制,用立体极限地压理论、优化承载主体、自动确定合理拱轴线等方法,解决了正确计算地下工程荷载、智能确定最佳拱形和最佳衬砌厚度等问题,使隧道与地下工程设计进入了新高度。利用本系统不仅可以在几分钟时间内完成隧道衬砌设计分析工作,计算精度较经典范例提高 100 倍,工程经济技术指标显著提高。经过大量实测数据与多项工程试验证明,是可靠、实用、经济的方法。比复合式衬砌总厚度平均减薄 30% 以上。按本系统设计和施工的不同试验工程,经过长期考验,全部获得成功。不仅实现了安全无事故、优质、快速,而且节约水泥、钢材、木材 40% 以上。

**关键词:**地下工程;隧道;优化设计;智能分析

**中图分类号:** U456

## 1 前言

迄今为止,以工程类比法为主、量测为辅的现场监控设计仍然是隧道和地下洞室设计的主要方法。由于隧道工程环境条件数量化表达方面的困难,常常会使得力学家们所提出的一些理论和计算方法,难以对具体工程起到指导作用。隧道与地下工程设计与分析方法主要有地层结构法和荷载结构法两种。地层结构法是基于现代支护结构原理,建立在围岩与支护共同作用的基础上的设计模型,显然,比支护单独承载是一种技术进步,但由于理论缺陷,其作用机理,围岩与支护相互作用以及复合式衬砌设计施工等方面,尚存在诸多问题。特别是大量原始参数准确测试问题没有解决,目前只能达到定量计算而定性使用的水平。有的工程应变实测值为理论计算的 5~10 倍,甚至有些规律还不同。特别是计算得到的收敛值与实测所得的规律不符。因此,地层结构法一般作为定性参考或校核。

荷载结构法因具有明确的受力概念及清楚的安全系数评价方法,而被许多国家普遍使用。但也存在若干问题,一是荷载确定方法还不可靠,至今处于经验统计分析阶段,特别是侧压力系数与实测相差甚大。二是荷载结构模型虽然考虑了围岩的粘聚力、摩擦力、弹性抗力的承载作用,但未考虑围岩承载拱的承载作用,因此不能正确解释围岩自稳等问题。三是缺乏可行的优化设计方法。传统做法是由工程类比初步选定断面几何形状及尺寸,用反复试

算或大比例作图试凑的办法进行设计优化,不仅费工费时,难以最优,影响安全或经济性。四是设计计算过程比较烦琐,优化计算周期较长,而且容易出错,不能满足快速设计和动态设计的要求。

本系统在解决存在问题的基础上,使隧道与地下工程衬砌设计分析,向科学、可靠、安全、经济和方便实用的新境界前进了一大步。

## 2 系统编制依据和创新点

系统根据现行《公路隧道设计规范》、《铁路隧道设计规范》、《人民防空工程设计规范》荷载结构法计算规定和具有国际先进水平的科研成果《隧道及地下洞室设计施工新法》编制,经与朱-布法、纳氏法、链杆法、矩阵力法、能量法等等计算范例对比验证无误后,考虑了各种不利的极限情况,在确保安全前提下,完成了隧道及地下洞室优化的智能系统编制、测试以及著作权报批工作。其创新点如下。

### 2.1 立体极限地压理论使荷载计算走向实用阶段

《隧道工程设计要点集》指出:“隧道设计时,掌握支护结构上的围岩压力是非常必要的。遗憾的是,在这个问题上我们还存在许多不清楚的地方”。《公路隧道施工》写道:“在设计中由于荷载不明,围岩参数不清楚及设计理论尚不完善;喷锚支护和二次衬砌设计参数只能参考经验或套用规范。这样做对每座隧道来讲具有较大的主观性,往往与实际山体地质及围岩应力状态出入较大”。立体极限地压理论在泰沙基理论的基础上有四项新突破:一用立体

计算取代了传统的平面计算,考虑了进深对荷载的影响;二是考虑了围岩的层理、裂隙、节理、水害、施工震动及暴露时间对  $c$  值的影响, $c$  值折减系数在 0.3~1 之间变化;三是考虑了不同施工条件下,垂直荷载传递引起的侧压力系数增加的变化;四是考虑了深埋隧道极限压力问题,使深、浅埋隧道设计荷载都接近于实际。从而使计算围岩压力与实测围岩垂直压力基本符合。立体极限地压理论的计算值,与我国的 40 项工程实测地压十分接近。误差在  $\pm 20\%$  占 93.5%;误差在  $\pm 20\%$  至  $\pm 34.5\%$  占

6.5%。误差最大的洛河东坡单线铁路隧道,实测地压是 20kPa,计算地压是 26.9kPa,优化后衬砌厚度影响不超过 2cm。鉴定委员会专家对深埋、浅埋、模筑支护、喷锚支护四座不同隧道的计算围岩压力测试结果,其误差均小于 10%,见表 1。

与 357 个铁路单线隧道实测平均坍塌荷载相一致,也与铁路、公路隧道最新规范深埋隧道的计算经验公式计算结果相一致,见表 2,而且,立体极限地压理论计算荷载与铁路隧道实测平均坍塌荷载最为接近,说明垂直压力计算值是符合实际的。

表 1 实测地压与计算地压比较

工程名称	不同点	泰氏公式	普氏公式	卡柯或谢家杰公式	公路隧规	立体极限地压公式	实测地压
白虎山隧道	深埋		364.9	83.7	248.5	100.9	92
土家湾隧道	浅埋	242.7			444.6	139.2	136.8
新庄岭隧道	模筑支护	346.5		803.5	733.5	417.7	424.1
某试验隧洞	喷锚支护			40		58.39	56.3

表 2 实测坍塌荷载与计算值比较

单位: kPa

围岩级别	关式统计公式计算 松弛荷载 kPa	立体地压理论 计算荷载 kPa	357 个铁路单线隧道 实测平均坍塌荷载 JPa	铁路规范深埋松弛 地压计算式 kPa	公路规范深埋松 散地压计算式
	17.80	16.7	17.55	17.83	15.02
	32.50	35.8	33.54	32.57	28.92
	56.80	58.3	57.6	57.01	53.40
	96.50	85.8	92.88	96.86	95.67
	157.50	173.2	177.6	158.06	164.64
	258.40	305.2	307.2	259.25	284.77

水平侧压力计算值虽然普遍比规范值高,但与实测值比较接近,有利于工程安全。这样,把长期以来凭经验设计提高到理论分析走出了新的一步。使荷载计算走向了实用阶段。

2.2 用荷载结构法计算围岩承载,促进了荷载结构法的发展

荷载-结构模型是地下工程结构设计使用得最多一种,前苏联、美国、澳大利亚、英国、意大利、德国、日本等国家普遍使用这种设计方法,我国现行的《地铁设计规范》和《铁路隧道设计规范》中也均推荐采用。采用这种设计模型,具有明确的受力概念及清楚的安全系数评价方法。但是,现代支护理论认为:传统的荷载结构法只考虑围岩产生荷载而不能承载,是有悖于地下结构的本质特征的。实际上,荷载-结构法也考虑了围岩的粘聚力、摩擦力的承载作用,使实际设计荷载远比整个围岩自重低。唯一欠缺的是没有考虑围岩承载拱的承载作用。本系统考虑了围岩承载拱的作用,不仅可以计算无衬砌自稳洞室的尺寸和形状;可以计算围岩承载;也可计算衬砌承载或共同承载。从而,使荷载结构法得到

了新发展。它不仅可以用于深埋、浅埋隧道整体式衬砌设计,也可应用于复合式衬砌设计,还可用于自稳洞室设计。而且,其计算结果,比地层结构法清晰、可靠和节约,可以对具体隧道工程起到指导作用。

2.3 系统通过智能选择合理拱轴,使受力优化,显著提高了围岩自承能力和衬砌承载能力

“新奥法的理论基础是围岩具有自承能力,经济合理的隧道工程建设的关键是充分发挥围岩的自承能力。围岩自承能力源于围岩强度,因此基本维持围岩原始状态,既是为了保持原有的围岩强度,又是发挥围岩自承能力的充分必要条件”但是,尽可能保持原有的围岩强度是必要的,但不是充分的。围岩强度有抗压、抗拉、抗弯、抗剪强度之分,如何利用其抗压强度高的优势,尽量避免受弯拉剪破坏,仍是关键之举。这样,可以不用额外投入,就能获得显著提高围岩的自承能力的效果。

在同样围岩和洞室尺寸的情况下,通过智能优化系统计算,发挥抗压优势可衬砌厚度显著减薄,已在不同的试验工程中得到验证。按照本方法设计施工的不同围岩、不同跨度、不同埋深的 9 个可比的优

化工程对比证明,所有优化工程,经过 13~29 年的长时间考验,不仅全部安全无事故,解决了裂缝、净空不足、渗漏等影响使用问题,工程质量至今完好。实际平均节约混凝土 41.1%,节约钢材 50%,节约木材 90%,节约建设资金 28.6%,见表 3。部分优化工程见图 1~3。

表 3 经过多年考验的优化工程实际节约情况表

工程名称	建成年份	跨度 (m)	衬砌厚 (mm)	原混凝土用量 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	优化后用量 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	节约混凝土 (%)
某地下礼堂	1980	20.26	270~800	1.39	0.48	65.47%
元帽山坑道	1981	4	350~400	1.13	0.96	15.04%
某松软 Q <sub>4</sub> 黄土窑洞式洞库	1983	4	210~300	1.13	0.595	47.35%
四号洞新偏洞	1983	6	210~300	1.48	0.662	55.27%
五泉洞天“水晶宫”	1983	4	210~300	2.2	0.872	60.36%
五泉洞天“别有天”	1983	6	210~300	2.21	1.094	50.50%
西关地下商场北商场	1986	10	210~350	0.648	0.504	22.22%
东方红地下商城挡土、主体两用墙	1995	8	210~350	节约混凝土 12.5%;节约钢材 50%		
东方红地下商城防排结合素混凝土反拱	1996	8	300	节约混凝土 17%;节约钢材 94%		

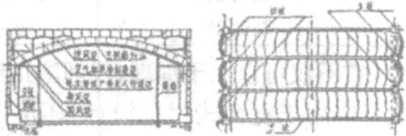
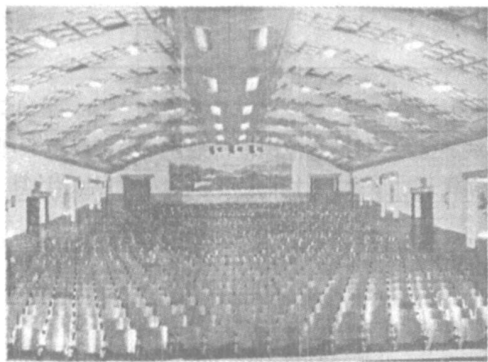


图 1 用逆作法施工的地下礼堂

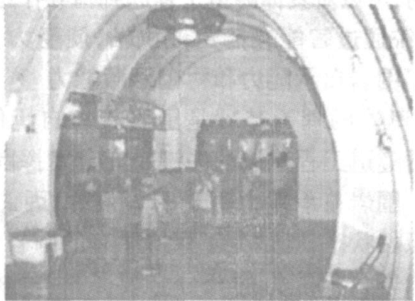


图 2 水晶宫(上)和别有天(下)

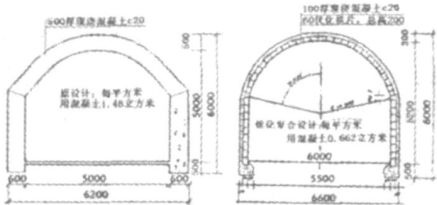


图 3 四号洞二种编洞的对比

2.4 双曲优化整体组合衬砌,为保障隧道全过程稳定平衡创造了有利条件

系统推荐的双曲优化组合衬砌,是由 6cm 厚、30cm 宽、100cm 长的多功能预制拱片和泵送防水混凝土组成的立体受力结构,由于已达设计强度的预制拱片与现浇混凝土的组合衬砌具有立即受力、合理受力、立体受力、共同受力、稳定受力的特性,且其强度与围岩压力同步增长,保证了施工全过程处于稳定平衡状态。加之,双曲优化组合衬砌在绝大多数情况下,无须喷射混凝土、锚杆加固和钢筋网加强,也无须支撑和模板,减少了工序、节约了施工时间、减轻了围岩扰动,因此能有效保护围岩和减少围岩变形,并使衬砌施工人员始终在承载拱保护下工作,确保了施工安全。不仅具有简化工序;节约材

料;成洞迅速等优势,而且,有利于施工环境改善,便于发展工业化施工。同时,还实现了临时支护和永久支护合一;柔性支护与刚性支护合一;自动应力调整或人工应力调整结合;合理受力与共同承载结合。是一条经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥新路子。

### 3 系统的基本功能

本系统采用了荷载—结构模型,适用于铁路、公路、冶金、煤炭、水电、水利、人防、国防等隧道、巷道、坑道、地道以及城市地铁、窑洞民居等地下拱形工程。主要有以下五种用途。

#### 3.1 用于围岩压力计算

系统除包括按公路隧道设计规范公式计算、按铁路工程技术规范直接荷载确定法计算、按普式压力拱理论计算外,特别推荐按立体极限地压理论公式计算围岩压力。这种方法考虑了洞室埋深、毛洞跨度、与洞形有关的毛洞计算高度、毛洞长度、地层内摩擦角、粘聚力、重度、侧压力系数、考虑地层两侧地层物理力学性质、洞宽、洞高、洞形及施工方法影响的侧荷载系数以及考虑岩体构造状况、施工方法、支护时间、施工爆破情况、地面地下水影响、毛洞风化程度、施工环境、风化程度等对  $c$  值影响的折减系数等影响因素,计算结果与实测十分接近,有利于隧道设计安全可靠,防止因荷载偏离过大引起的设计失误和浪费。而且,可以自动传输数据进行优化设计,准确方便,立等可取。

#### 3.2 用于常规衬砌设计

在已知荷载和轴线尺寸条件下,设定断面厚度,进行内力计算,绘制弯矩、轴力图,进行强度校核、工程量计算,净空校核、绘制施工图等。其荷载可以是垂直、水平荷载按均布、马鞍形、山形、梯形、三角形分布的 25 种不同组合。

拱形可包含直墙或曲墙,单心圆、三心圆、五心圆、七心圆等各种不同形式的拱形。截面厚度可以是等截面、直线变截面、余弦变截面和任意变截面。同时,还可以考虑弹性抗力或不考虑弹性抗力、考虑地层与衬砌间摩擦力或不考虑摩擦力等情况。计算要求灵活,计算结果准确。与多种计算方法的典型范例比较,计算结果都很接近。其计算精度比经典设计范例提高 100 倍。

#### 3.3 用于优化衬砌设计

(1)单优化设计:根据已定结构尺寸和拱形进行截面厚度优化设计。系统自动按规范要求,选择既

符合安全强度要求、又经济节约的混凝土衬砌截面厚度。不仅节约了反复试算的时间,而且,较常规设计明显节约。对经典算例,一般已经单优化,节约混凝土较少,但对多数设计仍有潜力可挖。如同济曙光软件计算地处Ⅲ类围岩、净宽 9.5m 的二级公路隧道算例,衬砌厚度为 C25 混凝土 60cm,经单优化其最小厚度为 56cm,说明该设计在该设定拱形不变情况下已经优化,节约余地较小。而新庄岭黄土公路隧道,原设计为 11 × 8m 的直墙单心圆双车道隧道,采用 80 ~ 100cm 厚的 C25 混凝土衬砌,最小安全系数是 5.2,偏于保守;在拱形不变情况下,单优化衬砌厚度为 65cm,最小安全系数是 3.22,即可满足规范要求。这与实测结果“一次衬砌厚度 45 ~ 65cm,实际承载 89.5%,二次衬砌 35cm,实际承载 10.5%”的结论十分接近。

(2)双优化设计:根据荷载和洞室尺寸,系统自动选择优化拱形和优化衬砌厚度。可在满足净空要求的条件下,设计出更适用、经济的衬砌截面来。所有选择(包括决定拱形的各半径大小、圆心位置、各段圆弧对应圆心角等和决定最佳衬砌厚度)计算、校核,全部智能自动确定,无须人工干涉。使过去二十天的工作量在一分钟左右精确完成,为又好又快地进行方案对比、动态设计创造了条件。上述两例如果采用拱形优化,在满足净空、强度和偏心的要求下,其衬砌厚度仅需 36cm,说明拱形优化能充分发挥混凝土抗压优势,是大有潜力可挖的,而且已经得到了实践证实。1986 年建成的西关地下商场工程,净跨 10m,荷载也基本相似,其优化设计仅需 21 ~ 35cm 素混凝土衬砌,在地面公交通道车附加荷载作用下,至今已完好安全使用二十余年。由此可见,拱形优化是提高衬砌承载力的主要因素。对比计算表明:双优化较权威著作典型设计范例平均节约混凝土 30.53%。比现代支护理论推荐的复合式衬砌标准设计平均节约混凝土 39.05%;比日本单双线隧道和新干线平均减少混凝土 31.76%。

#### 3.4 用于围岩稳定分析

如果将承载主体由衬砌材料变成围岩,系统就能进行洞室自稳计算。黄土洞室的稳定计算与黄土地下建筑技术条例调查结果完全一致;各级围岩的自稳计算与公路隧道设计规范的各级围岩自稳能力判断表基本符合。判断表中的稳定跨度与围岩物理力学参数平均值计算结果相同,一般偏于安全或保守。本系统能分析任何实际洞室的稳定性,因此具有普遍意义。例如,规范判断表中:Ⅱ级围岩跨度

20m可长期稳定,计算检验是正确的。但对于跨度115m稳定了150多年的中洞苗寨是否能够长期稳定呢?计算表明:当围岩物理力学指标达到Ⅱ级时,该洞室可以长期稳定,而且稳定的形状与实际洞形十分接近,见图4。判断表认为Ⅱ级围岩无自稳能力,这对于公路隧道来说是对的,但是,计算结果,Ⅱ级围岩1.5m跨度也能暂时自稳。所以,任何围岩都有一定的自稳能力,只不过是自稳洞室的尺寸不同而已。这样通过围岩自稳计算,合理控制毛洞开挖尺寸和进尺,以有利施工安全。

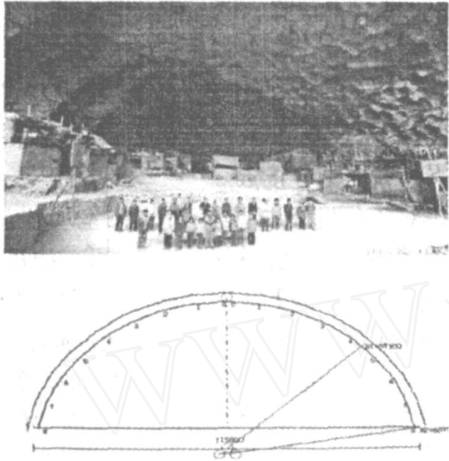


图 4 中洞苗寨

3.5 用于复合式衬砌设计

如果将承载主体由衬砌材料变成围岩,并选择设置注浆锚杆,系统会自动考虑围岩的强度,这样计

算出的围岩厚度加锚杆锚固长度就是设计的锚杆长度。如承载主体选择某种标号的喷射混凝土或模筑混凝土,计算出的厚度即为初期支护设计厚度或二次衬砌厚度。同样,可以按照已定拱形不优化;衬砌厚度单优化;衬砌厚度及拱形双优化进行设计。

3.6 用于反推地压和动态设计

原铁道部黄土双线隧道设计研究组对陇海线13座黄土双线隧道裂缝问题调查研究发现:“黄土隧道开裂与结构形式有密切关系。尖拱型单线隧道,则拱腰部分出现纵向裂缝;双线隧道均属尖拱型,拱腰普遍出现裂缝。因此,得出结论:裂缝的主要原因是尖拱型衬砌不适应实际土压力大小及分布”。为弄清土压力大小及分布,原国家建委某工程黄土洞室科研组在山西进行了近二年的《黄土洞室稳定性的野外试验》(表4),测得109洞垂直荷载为86kPa,水平荷载按侧压力系数0.3计算是25.8kPa,其按此分析结果得出计算变形与实际变形完全相反;原国家建委五局建筑科学研究所据此试验实测数据,认为平均垂直荷载是86kPa,推断其拱顶至拱脚的垂直荷载按2.7~172.1kPa直线变化,呈马鞍形分布,但这种荷载的计算结果与实际变形也不完全相符;本系统反推侧压力系数为0.6099,完全符合拱顶向上位移,两侧向内位移的实际情况,得到了理论计算与实际破坏完全一致的结果。对保证动态设计的安全、经济性有重要作用。

表 4 不同荷载作用下,109洞各截面弯矩、安全系数变化与实测数据对照表

计算	第一种情况		第二种情况		第三种情况		实测荷载和变形
结果	(按黄土地下建筑技术条例计算)		(垂直压力按原国家建委五局建筑科研所公式计算)		(按本发明计算)垂直压力按立体极限地压理论计算		由国家建委黄土洞室科研组历时一年半测出的实测值
q(kPa)	86近似按实测荷载		2.7~172.1(均值为87.4)		86.66		85.8
e(kPa)	25.8		25.8		52.85		未测出
截面号	M弯矩 (10 <sup>4</sup> N·m)	安全系数 K	M弯矩 (10 <sup>4</sup> N·m)	安全系数 K	M弯矩 (10 <sup>4</sup> N·m)	安全系数 K	
0拱顶	-1.14	7.92 不符合	-2.4	1.68 符合实际	-4.66	0.82 符合实际	向上位移,内缘压碎。应该是负弯矩,安全系数不够。
1	-0.36	16.09	-0.89	9.2	-2.88	1.59	
2	1.28	8.06	1.87	2.38	0.7	11.89	
3	1.39	8.17	2.43	1.79	2.34	2.37	
4	0.45	11.58 不符合	1.01	11.25 不符合	2.54	2.16 符合实际	向内位移,内缘拉裂。应该是正弯矩,安全系数不够
5	-0.99	9.47	-1.3	9.04	1.91	4.38	
6	-2.06	3.97	-3.06	1.73	1	9.17	
7	-1.95	4.85	-2.44	2.88	0.25	10.54	
8拱脚	0.01	10.9	0.01	10.36	-0.01	10.77	

3.7 用于隧道施工安全计算

静宁隧道是位于松软、潮湿、饱和新黄土地段的双车道隧道,2007 年发生的大塌方事故,除遇连续降雨,渗水使黄土强度急剧降低,粘聚力显著折减等不利条件影响外,其重要原因之一就是为抢工期,一次衬砌太长、二次衬砌没有跟上,造成冒顶坍塌事故。该隧道在松软黄土地层中构筑,勘测确定为级围岩。系统计算:一次衬砌承载长度在 3m 以下,安全系数 >2,可保安全;一次衬砌承载长度在 3m ~ 10m,安全系数 >1,暂时安全;一次衬砌承载长度 > 10m,安全系数 <1,不安全。实际一次衬砌承载长度控制 30m,安全系数在 0.72 以下,事故难以避免。本系统可按照实际拱形,计算最大掘进进尺长度、计算一次衬砌最大承载长度、校核二次衬砌允许拆模强度等,对隧道安全施工具有一定指导意义。

3.8 用于围岩破坏机理研究

围岩自承载能力决定于围岩物理力学性质、隧道断面尺寸和形状以及掘进长度等。毛洞的破坏主要因素是荷载大小、分布与围岩强度、挖掘洞形不相适应、承载拱以内的地层失稳造成的。洞室破坏后形成新的优化拱形而暂时稳定,但随着垂直和侧向水平荷载的相互变化,又会形成新的失稳,以新的优化拱形暂时稳定。每次暂时稳定的优化拱形和尺寸,可以通过系统算出。其计算结果与陕西省建工局建筑科学研究所,西安冶金建筑学院地下结构专业八孔土窑失稳破坏全过程调查结果相同,见图 5,也与西安冶金建筑学院采矿系模拟试验研究小组黄土峒库模拟试验结论相似。不仅片帮、冒顶的形状、尺寸与实测接近,而且片帮、冒顶的顺序也与实际相同。

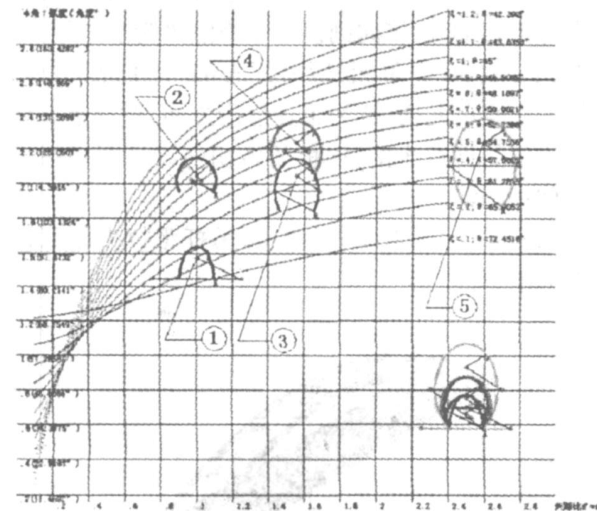


图 5 陕西八孔窑洞破坏顺序和破坏形状计算图

4 结语

本系统针对当前隧道与地下工程衬砌设计存在的问题,解决了地下工程荷载计算、用荷载结构法计算围岩承载、智能确定优化拱形和最佳衬砌厚度等问题,并经过理论与实践的长期检验,证明是可用于指导隧道具体工程的实用设计系统,除了能精确、快速地进行衬砌优化设计外,还能用于围岩稳定分析、复合式衬砌设计、反推围岩压力分布、动态设计、隧道施工安全计算和围岩破坏机理研究等工作。但其试验工程还局限于部分地区的少量工程,缺乏普适性验证。隧道及地下工程量大面广,地质条件工程情况千变万化,还需要广大同行通力协作,在不同条件下进行试验和检测,以通过大量工程实践,进一步发现问题,完善补充,扩大应用,为我国乃至世界隧道及地下工程发展作出贡献。

5 后记与致谢

本系统在继承和发扬太沙基理论、荷载结构法、合理拱轴原理的基础上,进行了创新、论证、检验、试验等工作,于 2007 年通过省级鉴定,与会专家一致认为:该研究成果在地下洞室优化设计方面达到国际先进水平;2008 年获得甘肃省科技进步奖;2009 年取得国家知识产权局批准公布的三项国家发明专利。这些工作,单靠我们的力量是难以完成。其取得进展,离不开广大隧道及地下工程工作者的辛勤劳动和无私奉献。因为,从室内模拟试验、围岩压力的测试、优化工程的实践以及理论问题的探讨等,广大隧道工作者都做了大量工作,为成果完成起了很大作用。例如:清华大学、同济大学、哈尔滨建筑工程学院、重庆建筑工程学院、天津大学、淮南煤炭学院、山东矿业学院、西安冶金建筑学院、兰州铁道学院、铁道科学院、铁路专业设计院、北京市政设计院、中华人民共和国交通部、中国人民解放军工程兵司令部等编著的曲墙或直墙拱结构计算实例,为理论上验证系统计算的精确性和优化效果提供了条件;长安大学公路学院、原国家建委某工程黄土洞室科研组、原铁道部黄土双线隧道设计研究组、广州铁路局科学技术研究所等众多单位的 40 项工程围岩压力测试和裂缝隧道调查统计以及 357 个铁路单线隧道塌方统计分析,为对比计算与实测结果、检验系统的正确性和可行性提供了依据;国内外 173 项隧道与地下工程实践,为检验设计的安全性、经济性对比提供了条件;

(下转第 130 页)

液等等,都能起到一定的防裂作用。

#### 4.7 冬季施工必须采取有效的措施

对于冬季砼施工,必须采取有效的防冻措施,确保在砼受冻之前,砼结构要达到一定的强度,以防止砼受冻开裂。

### 5 裂缝的处理

#### 5.1 裂缝的分类

砼结构的裂缝,根据裂缝深度与结构厚度的关系,一般可分为表面裂缝、浅层裂缝、纵深裂缝和贯穿裂缝。用  $h$  表示裂缝深度,用  $H$  表示结构厚度,当  $h < 0.1H$  时,为表面裂缝;当  $0.1H < h < 0.5H$  时,为浅层裂缝;当  $0.5H < h < 1.0H$  时,为纵深裂缝;当  $h = H$  时,为贯穿裂缝。

#### 5.2 裂缝的分析处理

对于砼结构出现的裂缝,首先应分析裂缝原因,其次查明影响程度,再次观察裂缝发展的情况,最后确定处理方案,对于威胁到结构安全的裂缝,必须采取必要的加固措施,如裂缝对安全不造成影响,只是存在外观、防水等方面的缺陷,且裂缝宽度已不再继续发展,可根据实际情况,进行修补处理。

#### 5.3 裂缝的修补

##### 5.3.1 表面处理法

对于细而浅,深度未达到钢筋表面的发丝裂缝,如不存在渗漏水问题,且不再发展,一般采取表面处理法进行修补,即凿除裂缝处的装饰层,重新进行抹灰、油漆等修饰。

##### 5.3.2 填充法

所谓填充法,就是采用胶泥等填充材料(有防水要求的采用防水材料),直接对裂缝进行填嵌处理。这种处理方法,施工方法简单,费用较低,一般

对缝宽大于  $0.3\text{mm}$  的较宽裂缝,可用修补材料直接进行填嵌处理,对于小于  $0.3\text{mm}$  的缝,则需凿成“V”形槽,然后进行处理。

#### 5.3.3 化学灌浆法

这种处理方法对细缝和宽缝均适用,但工程中常用于处理缝宽较大,影响比较严重的裂缝,这种处理方法效果较好,但施工成本较高。一般按如下方法进行施工:

A. 凿缝。先沿缝凿出宽和深各为  $15 \sim 20\text{mm}$  的 V 形槽。B. 埋设注浆管嘴,沿裂缝方向每隔  $500\text{mm}$  间距钻孔,然后埋设注浆嘴,并用胶固定。C. 封闭裂缝。采用结构胶骑缝刮实,并封闭分支裂缝。D. 吹气试压。如发现有漏气的部位,补胶封闭。E. 注浆。配制好灌浆液,然后注入灌浆器中,用空压机加压  $0.2\text{MPa}$ ,从埋设的注浆嘴中进行注浆,当注浆至从邻近灌浆嘴中溢出时为止,封闭灌浆嘴,依次进行下一次注浆。F. 拆除灌浆嘴,并将该处封闭。

### 6 结束语

长期以来,砼的裂缝,是施工技术人员感到很头疼的问题,尤其当业主方专业知识缺乏,谈“缝”变色的情况下,如处理不好,不仅业主方意见较大,而且直接影响到施工方的经济利益和造成不良的社会信誉,所以即使对建筑物影响不大的裂缝,施工方必须从用户的利益和本企业的社会信誉为出发点,给以高度的重视,从施工图纸的会审到施工方案的制订、施工材料的采购实验、施工过程的控制等每一个环节,都采取认真细致的防裂措施,力争施工出完美的建筑精品。

(上接第 125 页)甘肃省人防、兰州市人防、原甘肃省建委、兰州市建委提供的 9 项隧道与地下工程优化试验工程,为进一步长期实践考验优化工程的安全、质量、速度、节约性能作出了最有力的证明。

#### 参考文献:

- [1] 朱汉华,王迎超,祝江鸿. 隧道预支护原理与施工技术 [M]. 人民交通出版社, 2008: 131.
- [2] 黄成光,于敦荣. 公路隧道施工 [M]. 人民交通出版社, 2008: 4.
- [3] 王胜利. 隧道及地下洞室设计施工新法 [J]. 中国科技成果, 2005 (19): 34-36.
- [4] 王梦恕. 21 世纪山岭隧道修建的趋势 [J]. 铁路标准设计, 2004 (9): 38.

- [5] 喻渝,陈中,王明年. 隧道设计计算模型对围岩适应性的探讨 [J]. 现代隧道技术, 2004 (4): 6.
- [6] 关宝树. 隧道工程设计要点集 [M]. 人民交通出版社, 2003: 42.
- [7] 赵占厂. 黄土公路隧道围岩压力测试分析 [J]. 现代隧道技术, 2003, 40 (4): 58-61.
- [8] 徐干成,白洪才,郑颖人. 地下工程支护结构 [M]. 中国水利水电出版社, 2003: 240.
- [9] 王建宇. 关于我国隧道工程的技术进步 [J]. 中国铁道科学, 22 (1): 75.
- [10] 王胜利,王堪余. 优化拱片与隧道工厂化 [C]. 第三届地下空间和掩土建筑国际会议论文集: 779-782.