

软岩隧洞设计与 施工技术

张立德 周小兵 赵长海 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TV672

1

2006

软岩隧洞设计与 施工技术

张立德 周小兵 赵长海 著

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书通过系统的监测信息和对这些信息的分析、计算,全面阐述了软岩和极软岩隧洞的变形特性和规律,并利用这些规律,成功地指导了目前全国最长、开挖断面最大的极软岩隧洞建设。在岩石单轴饱和抗压强度不足 0.5MPa、埋深 80m 的顶山隧洞建设过程中,根据工程实际情况,并吸取了全国已建的近 200km 软岩和极软岩隧洞的建设经验,总结出了“短进尺、快支护、勤量测”的施工经验,取得了软岩隧洞建设中少有的施工过程中没有发生一次塌方事故、工期提前 6 个月、投资节省 6000 万元、工程质量优良的建设业绩。

本书通过详实的资料,系统地总结了顶山隧洞的施工方法和措施,并将收集到的部分软岩和极软岩的研究成果和建设经验进行整理,列为工程实例,为我国软岩和极软岩地区的洞室施工提供借鉴,可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

软岩隧洞设计与施工技术 / 张立德, 周小兵, 赵长海
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2006
ISBN 7-5084-4133-8

I. 软… II. ①张…②周…③赵… III. ①软弱岩石 岩石隧洞 设计②软弱岩石—岩石隧洞—工程施工 IV. U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 124086 号

书 名	软岩隧洞设计与施工技术
作 者	张立德 周小兵 赵长海 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 15.25 印张 362 千字 4 插页
版 次	2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—2800 册
定 价	55.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

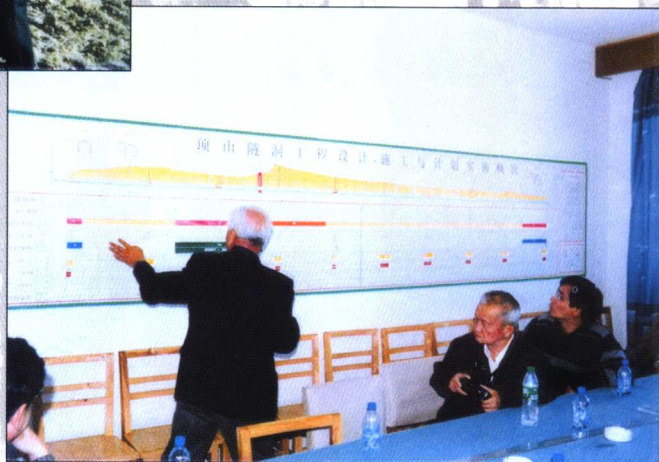
版权所有·侵权必究



顶山隧洞进口全貌



顶山隧洞出口段地质情况，施工人员在测量开挖边线与检查开挖质量



顶山隧洞采用信息化管理和施工，每天采集的施工信息和围岩变形信息上墙。用监测信息和数据指导动态设计和施工



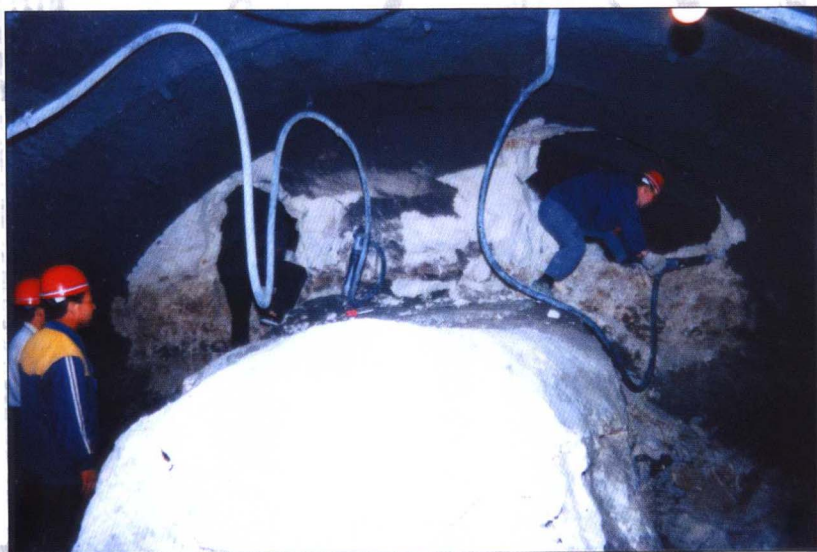
监测人员在检查监测仪器



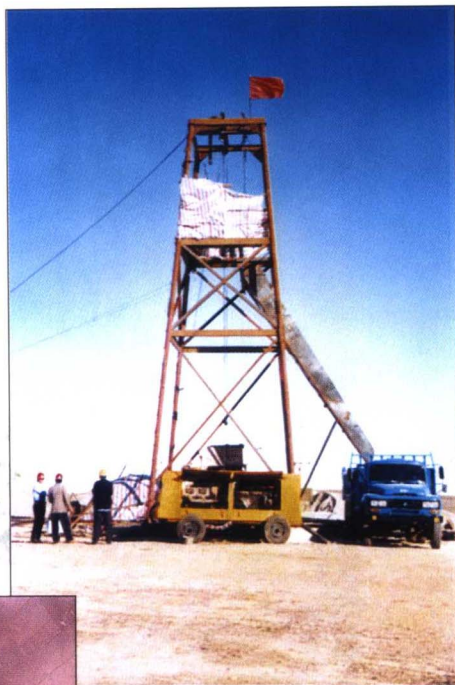
由地面造孔至隧洞顶部的多点位移计，用于测量开挖过程中的变形，指导安全施工



顶山隧洞竖井加固所使用的滑模系统



顶山隧洞由8个施工竖井和进出口共18个工作面同时相向开挖施工。照片为相邻工作面的贯通施工情况



顶山隧洞施工竖井全貌



顶山隧洞已经组装调试完好的钢模台车，
准备第一仓混凝土浇筑



混凝土衬砌完成后，顶山隧洞全貌



水利部质量监督站和业主在检查钢筋绑扎质量



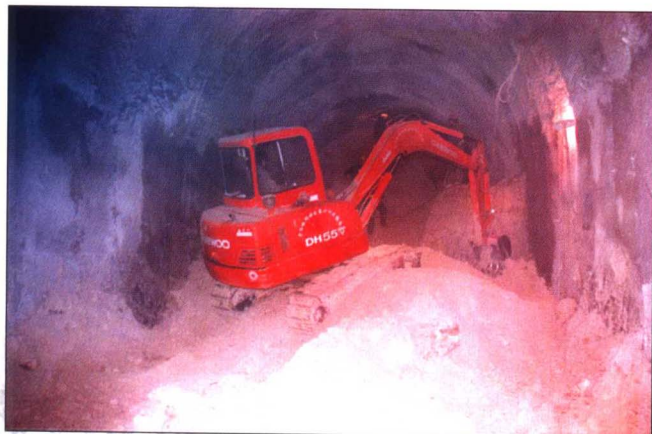
顶山隧洞出口进行自进式锚杆拉拔试验



顶山隧洞实行分部开挖，上导洞开挖后立即进行一次支护。照片为上导洞开挖与一次支护后的情况，喷射混凝土壁面平整，格栅拱架安装质量优良



在渺无人烟的戈壁滩中，测量人员进行放线，开始顶山隧洞的建设



顶山隧洞 I 标段进口工作面液压挖掘机正在进行开挖施工中



顶山隧洞 II 标段试验站人员和驻竖井技术人员在 7 号竖井上游段对一次支护喷射混凝土钻芯取样进行质量检查

编辑委员会

主 编 张立德 周小兵 赵长海

编 委 贺建国 李文新 孙根民 杜国文 成 平
汪正中 熊维龙 王 屹 王 军 李伯昌
梁 君 杨江英 刘忠富 张兴武 杨 武
高 垠 祁建国 王永兴 苏庆荣 陈 亮
郝长生 董春华 安瑞昌 张广俊 陈学光
蔡洪亮 刘 春 胡新贵 任祥泉 朱俊峰
段 俊 辛利春 刘祖权 潘建全 孙维忠
赵福荣

主编单位 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局

参编单位 新疆水利水电勘测设计研究院
中水东北勘测设计研究有限责任公司
中国水利水电第十四工程局
中铁第十六集团公司

前言

我国幅员辽阔，水资源分布极不平衡。解决水资源不均衡，合理地利用水资源，调整水资源的供求关系，进行调水工程的建设，是解决我国可持续发展的重要措施。毛泽东同志在 1952 年视察中国北方和南方最大河流——黄河和长江时就高瞻远瞩地提出：“南方水多，北方水少，如有可能借点来也是可以的”。进入 20 世纪 90 年代以后，随着我国经济的迅速发展，大型调水工程陆续开工建设，如引大入秦、引滦入津、东圳供水、引黄入晋、引黄入青、引碧入连、南水北调、大伙房引水以及北疆引水等工程。这些引水工程不仅线路长，而且地质条件十分复杂，很多技术问题都是水利工程建设史上未曾遇到过的。

在进行大型调水工程的建设过程中，几乎都会遇到软岩和极软岩的地质问题。在软岩和极软岩中修建水工隧洞和其他水工建筑物，是较为复杂的问题。由于软岩单轴饱和抗压强度不足 15MPa，而极软岩单轴饱和抗压强度不足 5MPa，甚至更低，开挖后围岩稳定性极差，许多地方几乎不能成洞，因此造成施工过程中大规模塌方屡见不鲜。目前我国在软岩和极软岩建造的隧洞工程已近 200km，由于地质条件恶劣，经常出现隧洞塌方，甚至有一些工程由于遇到不可处理的塌方而不得不将已建的工程报废，改线重建。

顶山隧洞长 14890m，开挖断面 40m²，最大过流能力 55m³/s，是目前我国在岩石单轴饱和抗压强度不足 1.0MPa 的第三系岩层中建造的长度最长、规模最大的输水隧洞。从建设一开始，就总结了我国已建类似条件下工程的建设经验，制定了切实可行的安全监测计划，建立了监测信息的采集、信息处理、信息利用的系统，利用监测信息认真分析极软岩的变形特性和规律，以动态设计和施工方法不断调整施工方案和技术参数，并制定了切实可行的工程措施，严格管理、精心设计、精心施工，创造了“短进尺、快支护、勤量测、严管理”的建设经验，有效地保证了施工安全，加快了施工进度，节省

了投资，并取得了工程建设质量优良的建设业绩，这在国内已建工程中是非常少见的。此外，本书还列举了我国和国外一些工程技术人员的研究成果和软岩与极软岩的工程建设经验，对指导软岩工程建设具有一定意义。

顶山隧洞工程的建设经验说明，只要以科学发展观，一切通过科学试验和科学论证，正确认识极软岩变形规律和特点，用监测信息及时处理工程问题，并在工程建设中不断总结经验，严格管理，精心施工，就能保证极软岩工程的顺利建设。

作者

2006年9月

目 录

前 言

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 软岩的基本概念与划分	2
1.3 软岩的力学性质	3
1.4 软岩和极软岩体的变形特性	8
1.5 根据围岩的变形规律所采取的工程措施	23
第 2 章 顶山极软岩隧洞的地质条件	26
2.1 可行性研究与初步设计阶段的地质工作	26
2.2 施工阶段的补充地质勘察	29
2.3 施工阶段岩体力学指标测定	33
2.4 施工地质工作与结果	43
第 3 章 顶山极软岩隧洞的设计	49
3.1 初步设计	49
3.2 施工图设计	54
3.3 施工过程中衬砌结构的安全复核	59
3.4 锚杆承载力研究与锚杆型式和长度的确定	67
3.5 顶山隧洞根据监测数据所进行的设计优化	74
第 4 章 施工	81
4.1 竖井施工	81
4.2 主洞开挖	82
4.3 一次支护	85
4.4 混凝土衬砌	90
4.5 顶拱回填灌浆	94
4.6 施工中较大问题的处理	98
第 5 章 安全监测与位移反分析计算	102
5.1 安全监测在极软岩隧洞建设中的作用	102
5.2 顶山隧洞监测项目与监测仪器布置	103
5.3 收敛监测	106
5.4 围岩内部及一次支护结构受力状况监测	125
5.5 混凝土衬砌应力状态监测	130

5.6	顶山隧洞监测结果的反分析	137
第6章	极软岩隧洞的工程质量与安全控制	154
6.1	概述	154
6.2	工程建设质量管理规定	154
6.3	质量保证体系	161
6.4	工程质量控制标准、检测项目及数量的规定	169
6.5	顶山极软岩隧洞的安全施工措施	177
6.6	质量评定	182
第7章	顶山极软岩隧洞的投资控制	184
7.1	顶山隧洞工期安排与计划实施	184
7.2	施工竖井工程造价	186
7.3	洞室开挖工程造价分析	187
7.4	一次支护工程造价分析	188
7.5	混凝土衬砌工程造价分析	189
7.6	顶拱回填灌浆工程造价分析	191
7.7	各设计阶段主要工程量及工程造价比较	191
第8章	软岩和极软岩隧洞工程建设实例	192
8.1	引大入秦输水工程的软岩隧洞	192
8.2	引黄入晋引水工程	201
8.3	山西引沁入汾草峪岭隧洞	204
8.4	罗碧水电站引水隧洞	204
8.5	引碧入连输水隧洞	206
8.6	南水北调北京西四环浅埋软岩隧洞工程设计与施工	207
8.7	新疆引水工程总干渠的极软岩隧洞	210
8.8	新疆引水工程西干渠的5条极软岩隧洞	214
8.9	邙山黄土隧洞成洞条件研究	216
8.10	控制围岩变形的工程措施研究	218
8.11	软岩最优支护计算方法	223
8.12	高地应力条件下软岩隧洞的变形规律	226
8.13	深圳东部引水工程极软岩隧洞施工	230
8.14	陶恩隧洞	232
	参考文献及参考资料	236

第 1 章

概 论

1.1 引言

目前我国大多数水工隧洞是在坚硬或比较坚硬的岩体中修建的, 由于岩体强度较高, 围岩较为完整, 开挖后围岩的自稳能力较强, 只要施工方法得当, 支护及时, 施工期和运行过程中的安全一般不会出现问題。

随着我国水利水电工程建设的发展, 大型或特大型水利水电工程的修建, 特别是为解决水资源分布不平衡问题, 一些大型跨流域调水工程开始建设, 长隧洞和在软弱岩体中修建输水工程是近几年来经常遇到的特殊问题。据初步不完全统计, 新中国成立以来, 我国水工隧洞建设总长度已近千公里, 特别是近 10 年间新增水工隧洞长度超过 500km, 已建成的引水隧洞最长的为引黄入晋工程的 7[#]隧洞, 独洞长度为 42.49km, 目前正在建设的大伙房输水隧洞长达 85km, 还有引黄入晋北干渠、八十一大板等长输水隧洞正在建设中。在近 10 年新增的 500km 输水隧洞中, 在软岩和极软岩中开凿的隧洞长度已达 140km, 占新增隧洞长度的 25.0%。

在软岩和极软岩中开凿地下洞室, 最主要的问题要解决施工过程中的安全问题, 保证施工过程中的围岩稳定, 减少塌方, 避免人员伤亡和设备损失, 使人民的生命和财产安全得到有效的保障。

已建工程的实践证明, 由于对软岩地区地下工程的岩体力学属性和变形特性分析不够, 对其给工程建设过程中带来的危害认识不足而造成工程事故屡见不鲜, 这一教训是极其深刻和刻骨铭心的。

例如引大入秦的盘道岭隧洞, 极软岩隧洞长度 12830m, 岩性为第三系半胶结状态砂岩, 岩石单轴饱和抗压强度仅为 0.2~0.8MPa, 施工过程中经常塌方, 其中最大一次塌方为冒顶塌方, 发生在 CH77+648~CH77+163, 地表形成深 10m、直径为 8m 的深坑; 东深供水的雁田隧洞, 总长度为 6400m, 穿越沟谷 11 处, 均为 V 类围岩, 岩体软弱破碎, 施工过程中发生了 3 次冒顶塌方; 珠海湾仔供水隧洞长 6393m, 上覆岩层较深, 多为松散坡积物, 强度低, 施工过程中发生过 8 次塌方, 3 次冒顶塌方; 又如新疆大型引水工程由总干渠、西干渠和南干渠组成, 总干渠通过白山嘴和博塔玛依两条隧洞, 总长度 4142m, 施工期发生多次塌方, 白山嘴两次较大塌方高度达 8m, 塌方长度达 24m, 博塔玛依隧洞塌方 40 余次, 一次较大塌方长度达 52m, 冒顶高度达 36m, 塌方和处理塌方量达 35 万

m³；西干渠由 5 条隧洞组成，总长度为 10005m，施工过程中也多次发生塌方，其中 1[#]隧洞、2[#]隧洞和 4[#]隧洞均发生过冒顶塌方。就是一些在坚硬岩体中开挖的隧洞，如遇断层、破碎带等软弱地层，再加上施工方法不当，也会发生较大塌方，例如小浪底导流洞、甘肃疏勒河昌马隧洞，均发生过较大规模的塌方。

由于塌方不仅造成工期延误，工程造价提高，还造成人民生命财产的损失，所以在软岩和极软岩中开挖隧洞一个最重要的问题，是采取合理的施工方法和程序避免塌方，减少损失是一个重要的课题。

1.2 软岩的基本概念与划分

虽然我国工程界对软弱岩体的工程力学性质及其应用进行了一些研究，也取得了一定的成果，但软岩工程力学理论与应用，仍然跟不上软岩工程建设的需要，很多基本理论仍然不十分清楚，对软岩的界定也尚未取得统一的认识。

水利水电部门软岩的划分是按岩石单轴饱和抗压强度来划分的。在《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287—1999)的围岩分类中给出了软岩与极软岩的概念与划分界限，详见表 1.1。^[1]

表 1.1 岩石强度评分				
岩质类型	硬 质 岩		软 质 岩	
	坚硬岩	中硬岩	较软岩	软岩
单轴饱和抗压强度 R_b (MPa)	$R_b > 60$	$60 \geq R_b > 30$	$30 \geq R_b > 15$	$15 \geq R_b > 5$

表 1.1 中明确了当 $R_b \leq 5\text{MPa}$ ，属极软岩，在进行围岩分类时，岩体完整性程度与结构面状态不参加评分。

我国煤炭部门认为软岩应分为地质软岩和工程软岩，地质软岩的定义为：具有软弱、松散破碎、膨胀性的岩体的总称；工程软岩定义为：在工程力作用下，能够产生显著塑性变形和流变的工程岩体。这个软岩的地质定义指出了软岩的地质自然特性，工程定义指出了工程环境及其特性。^[2]

水利水电系统关于软岩的定义虽然简单，并没有明确其工程中的变形特征，煤炭系统的软岩定义虽然较为全面，但也有一些不足之处。例如原来坚硬的岩石在高应力作用下，也可能产生显著的塑性变形和流变，根据前一个定义它不是软岩，而根据后一个定义它是软岩；其次，在工程环境中，只指出工程力也不全面，例如影响膨胀性软岩的主要因素是水；再其次，对于松散破碎岩体而言，主要属性为流动，是岩块或颗粒间的相对运动，而不是变形。基于上述看法，一些学者提出如下定义：在工程环境各种因素作用下，呈现软弱或松散破碎的自然性状，产生显著变形或流动的岩体称为软岩。总而言之，岩体是否为软岩一定要在工程环境中去判断，根据具体的岩体力学属性、变形特征，来指导软岩或极软岩地下工程的设计与施工。

由于软岩地质条件复杂，岩体强度极低，又具有特殊的变形和流变特征，在软岩或极

软岩中进行地下工程建设，一定要对岩体的力学和变形属性进行认真地研究与分析，充分掌握其变形规律，根据变形规律确定设计方法、支护措施，才能将复杂多变的问题变为简单一些，才能保证工程建设过程中的安全。

目前我国在软岩中已建的工程中均不同程度地出现较大塌方，甚至产生冒顶式塌方，究其原因是对具体工程中软岩的变形属性研究甚少，对各种监测资料和信息缺乏前瞻性的分析与研究所造成的。

1.3 软岩的力学性质

按照《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287—1999)的规定，软岩和极软岩，岩石单轴饱和抗压强度极低，软岩为 $15\text{MPa} \geq R_b > 5\text{MPa}$ ，而极软岩则小于 5MPa ，从岩体结构而言则多为松散、破碎。此种强度的岩体多出现于第三系和第四系地层，由于强度极低所以洞室开挖后受应力重新分布和施工过程的扰动，岩体自稳能力差，易于塌方，所以历来受到工程技术人员的重视，都把岩体力学指标作为工程建设首先要解决的问题。为了充分说明岩体的软弱程度，了解软岩地下工程所处位置的岩体力学性质，可从以下几个工程取得较为深刻的认识。

1.3.1 引大入秦盘道岭隧洞第三系地层的力学性质^[15~19]

盘道岭隧洞的全长 15.723km ，其中穿过第三系湖相沉积的极软岩地层 12.830km ，岩性为砂岩（包括粉、细砂岩）、含砾砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩，呈层状产出，倾角平缓 $10^\circ \sim 20^\circ$ 。岩体松软，如同砂土类围岩，岩石单轴饱和抗压强度 $R_b = 0.2 \sim 0.8\text{MPa}$ 。虽然经取样进行室内及现场原位试验，但因岩体破碎均未获得结果，后经承包商日本熊谷组技术研究和陕西机械学院根据收敛量测结果通过反分析计算，求得岩体力学参数，见表 1.2。

表 1.2 盘道岭隧洞第三系砂岩的物理力学指标

岩层特性	容重 (kN/m^3)	弹性模量 E (MPa)	泊松比 μ	内摩擦角 ($^\circ$)	粘聚力 C (MPa)
第三系地层有地下水 (饱和)	22	260	0.4	40	0.15
第三系地层无地下水 (原状)	22	500	0.4	45	0.16
白垩系岩层有地下水 (饱和)	23	600	0.3	43	0.13

1.3.2 水磨沟隧洞的力学性质^[3]

水磨沟隧洞全长 11649m ，约有 9850m 地段穿越第三系含漂砾岩、砂砾岩、砂岩，局部夹粉砂岩、粘土岩，岩体较弱，易分化，遇水后迅速崩解，出口处约 200m 穿越第四系黄土层。第三系和第四系地层岩，土物理力学性质见表 1.3。