



三峡船闸高边坡工程地质勘察与研究综述

摘要：三峡双线五级船闸高边坡稳定至关重要。初步设计阶段共进行了 4 条线路比较的勘察与研究，并在此基础上布置了 20 条勘探横剖面，每条剖面 5 个钻孔，布置了长 600 多 m 的勘探平洞，作为初设补充勘探。初步设计阶段基本确定了边坡的开挖坡比。技术设计阶段主要勘察工作量有：1:1000 工程地质测绘，坑槽探，勘探剖面 20 条，钻孔 216 个，400m 平洞和各类试验。通过上述工作，查明了船闸区岩性、构造分布及结构面特征、岩体风化分带及厚度、岩体水文地质结构及渗透性，提供了岩体结构分类、应力及地震动参数、岩体物理力学建议指标，对高边坡稳定性进行了分析，提出了有关边界条件及参数的建议，基本满足了设计要求。

关键词：工程地质勘察；高边坡；三峡工程船闸

1 工程简介

三峡工程双线五级船闸整个闸室段均在花岗岩山体中开挖修建，最大开挖深度 174.5m。开挖后形成南、北两侧高边坡，南坡最大坡高 170.28m，北坡最大坡高 137.8m；两线船闸之间保留宽 54~57m 的岩体中隔墩，闸墙部位，即中隔墩顶面以下为直立坡，呈双槽状四面直立坡。直立坡高度一般在 50m 左右，最大高度为 67.6m。在南、北两侧高边坡岩体内，各布置 7 层排水洞，在中隔墩和南北侧边墙岩体内各布置一条输水隧洞，每级闸首上游岩体内布置有阀门井和检修门井。与输水隧洞相连，共 36 个。

船闸高边坡稳定至关重要，不允许有任何规模的破坏；边坡兼有突出的高度、陡度与长度，开挖形态复杂，在每个闸首部位由于结构需要均开挖成向闸室直立坡



内嵌入的凹槽，造成岩体多面临空；边坡在相当短的时间(5a)内劈岭开挖形成，经受较急剧的应力调整；边坡下部直立坡是船闸结构的一部分，闸墙采用薄混凝土墙，靠高强锚杆与直立坡岩体结合在一起，承受闸室内外的水压力和温度应力；闸首部位不宜有过大的变形，否则会影响闸门的开启与关闭。

2 地质概况

船闸区出露基岩为前震旦系闪云斜长花岗岩，新鲜岩石坚硬完整。岩体内有捕虏体及岩脉发育，岩脉主要是细粒花岗岩脉和辉绿岩脉，岩脉本身质地坚硬，但岩脉内及其周边围岩中裂隙一般较发育。

闪云斜长花岗岩自上而下分为全、强、弱、微 4 个风化带全强风化带厚度一般在 20m 左右，弱风化带上部厚度一般为 5~10m，弱风化带下部与微风化带岩体风化程度轻微，与新鲜岩体强度相差不大。

闸室段断层分为 4 组，NNW 组、NEE 组、NNE 组、NWW 组。断层发育不均匀，以 NNW 组和 NEE 组最发育；其他发育稀少。裂隙也主要发育 4 组，NE~NEE 组、NNW 组、NNE 组及 NWW 组。裂隙发育具有明显的不均匀性，同一地段以 1-2 组占优势，陡倾角裂隙占 60% 以上。在弱风化带下部及微新岩体中，块状结构占 90% 以上，岩体完整性好。

地下水以大气降水入渗为主，全强风化带为透水性强的孔隙介质，弱风化带为裂隙孔隙介质，微新岩体为透水性弱的裂隙介质。



施工前地应力测试，闸室底板以上微新岩体以构造应力为主，最大水平主应力方向为 NW，量值为 6~11MPa。

闪云斜长花岗岩微新岩体湿抗压强度为 90~110MPa，变形模型试验值达 50~60GPa。硬性平直稍粗面 f 值为 0.70，c 值为 0.3MPa 左右。

3 施工前勘察与研究

3.1 初步设计阶段勘察与研究

初步设计阶段可分为船闸线路方案比较阶段及初设补充勘察阶段。

3.1.1 线路方案比较阶段

1986—1990 年间共进行了 I、II、III、IV4 条线路比较的勘察与研究，进行了 1:2000 工程地质测绘，钻孔与平洞工作量主要集中在 I 线双线连续五级船闸方案。I 线位于坛子岭右侧，其基本地质条件与最终选定的 IV 线相近，但边坡高度及开挖量均小于 IV 线，边坡最大高度 150m。

1987—1990 年国家“七·五”重点科技攻关，按 I 线方案完成了《长江三峡工程高边坡岩体工程问题研究》和《长江三峡工程高边坡岩体开挖加固技术研究》。高边坡岩体工程问题研究的主要成果是：

(1)以岩体结构分析为中心采用多种方法，特别是地质的和结构面网络模拟的方法，以及二维、三维有限元分析论证了边坡的破坏模式，得出了有利于工程兴建的结论。



(2)船闸区水文地质结构模型的提出，为边坡评价和工程排水设计提供了有价值的资料。特别是裂隙介质各向异性水文地质参数的测定做了大量有创造性的工作，分析方法方面有所突破。提出了多层排水廊道为基础的地下水排水方案。

(3)边坡评价分宏观评价、整体稳定性和局部稳定性评价，符合系统论的思维模式，大大增加了研究结论的可靠性。提出了边坡优化坡角的建议值，全强风化带 55° ，闸室以上弱风化岩体 63° ，微风化和新鲜岩体 73° ，闸室墙部位微新岩体 90° 。这一建议因多种方法得出，具有扎实的基础。

(4)进行结构面抗剪流变、大型疏干排水试验和地应力模拟反演。

以上研究成果为以后的勘察与研究奠定了一定的基础，在理论和方法上进行了创造性的探索。

3.1.2 初步设计补充阶段

1991年开始在坛子岭左侧的IV线进行勘察工作，1992年底完成初步设计阶段勘察工作。主要工作是在1:2000工程地质测绘的基础上，布置了20条勘探横剖面，间距80~100m，每条剖面5个钻孔，分别布置在船闸中心线，距中心线70m的两侧闸室边墙部位，距中心线120m的两侧边坡开口线附近。通过钻孔，基本查清闸室段岩体的风化厚度；通过钻孔定向取芯，来判断岩体中结构面的产状，为评价边坡稳定提供依据；在地表进行了大量的坑槽探，通过编录了解结构面在不同部位的发育规律，为稳定评价提供依据；在南侧高边坡闸室墙部位，距离闸室直立坡30m，布置了长600多m的勘探平洞，了解直立坡部位岩体性状，结构面性状及发育规律，为评价高边坡稳定提供依据。



初步设计阶段基本确定了边坡的开挖坡比：全强风化带 1:1，弱风化带 1:0.5，闸墙以上微新岩体 1:0.3，每隔 15m 高差设一宽 5m 马道，全强风化底部马道宽 10~20m；闸墙以下为直立坡。

3.2 技术设计阶段勘察与研究

1993 年 5 月初步设计审查最终确定 IV 线方案，要求 1994 年 11 月完成三峡船闸单项技术设计工作，工作量大，时间紧。为了保障船闸 2003 年通航，1994 年 4 月提前开工，形成了勘测设计与施工并行和交叉的局面。

布置的主要勘察工作量有：1:1000 工程地质测绘；坑槽探；勘探剖面 20 条，小口径钻孔达到 216 个；北侧边坡距离直立坡 30m 布置 1 条长 400m 平洞；在平洞内进行现场岩体变形试验，岩体及结构面抗剪试验；钻孔彩色电视录像；压水试验及地下水长期观测；平洞内钻孔及地面钻孔地应力测试 8 孔。

通过上述工作，查明了船闸区岩性、构造分布及结构面特征、岩体风化分带及厚度、岩体水文地质结构及渗透性，提供了岩体结构分类、地应力及地震动参数、岩体物理力学建议指标，对高边坡稳定性进行了分析，提出了有关边界条件及参数的建议，基本满足了设计要求。

根据工程附近公路边坡失稳情况，进行了边坡破坏模式分析。对边坡的整体稳定性进行了极限平衡分析、二维及三维弹塑性有限元分析。对块体稳定性也进行了分析。得出了船闸开挖边坡不存在失稳地质条件的结论。边坡稳定问题主要是由结构面组合形成块体面构成的局部稳定问题。



由于船闸区构造断裂比较发育，结构面分布有其随机性和隐蔽性，又受勘探手段局限，裂隙的长度等不能确定，确实存在着不可预见的地质问题，根据勘探平洞揭露的结构面推测组成的块体需要开挖验证。由随机结构面组成的块体只能在开挖后才能确切定位。

经开挖验证，前期勘察成果准确性好，岩体风化界线控制较好，边坡开口线和开挖形态合理，没有造成二次开挖。边坡整体稳定性好也得到验证。提出的截排水措施也是合理的。

4 施工期勘察与研究

施工期地质工作主要有施工地质、专门性勘察及专题研究。

4.1 施工地质

施工地质工作包括地质巡视、地质编录、地质预报等。在三峡船闸共完成1:200地质编录近100万m²。

(1) 高边坡块体超前地质预报

尽管前期勘探查明了结构面的发育规律，但由于大部分结构面尺度有限，分布具随机性和隐蔽性，块体的具体位置、规模、埋深、稳定程度等准确预报只能在施工期解决。块体预报采用地质

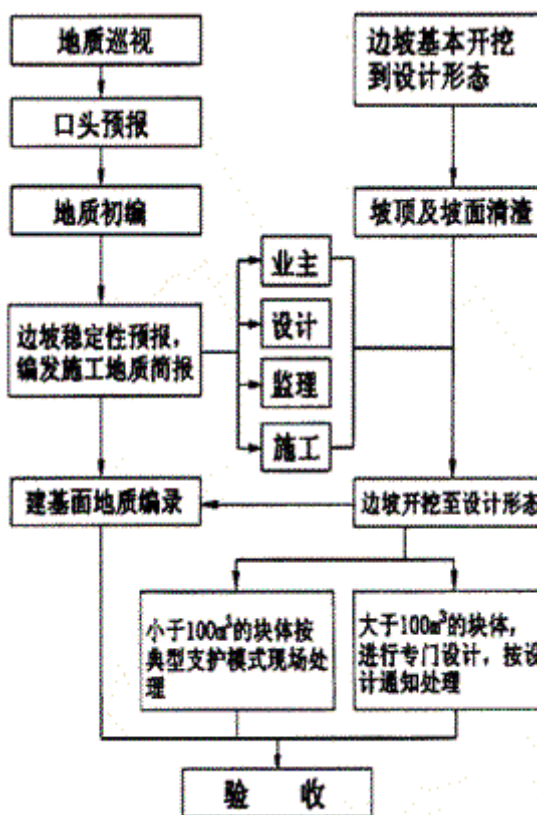


图1 施工期边坡稳定性地质预报框图



巡视、专门性测绘、数字摄像编录、详细地质编录等手段分步骤分层次进行，每开挖一个梯段(一般 10~15 m)，编录一个梯段，预报一个梯段。根据上一个梯段预报下一个梯段，采用自行研发的三维结构面网络、三维立体显示模型等进行预测，并对大型块体进行了专门勘察和重点预报。地质预报程序见图 1。

地质预报成果均采用施工地质简报方式及时提交给参建各方，预报块体的位置、规模、埋深、结构面性状及力学参数、稳定程度等。共编发高边坡地质简报 344 期；预报了块体 1054 个，其中大于 10 000m³ 的 1 个，1 000~10 000m³ 的 51 个，100~1 000m³ 的 308 个，小于 100m³ 的 694 个。在船闸高边坡的施工过程中，未发生漏报事件与因块体预报不及时而发生的伤亡事故。

(2)中隔墩稳定问题地质预报



根据实际开挖地质条件,分析了与边坡近平行的结构面对中隔墩稳定性的影响,对存在的工程地质问题进行了预报,提出了中隔墩增加对穿锚索的建议,保证了中隔墩的整体性和稳定性。

(3)对断层及不完全切割块体的预报

对边坡上断层带的位置及性状,不完全切割块体的边界条件进行了及时预报,提出了处理建议。

4.2 施工期专门性勘察

(1)闸室直立坡局部地段岩体风化勘察

在闸室直立坡开挖过程中,左线六闸首和右线一闸室局部没有钻孔控制的部位,地质巡视发现风化界线高程比预测的低。经过专项勘察,查明了风化界线,局部进行设计修改,保证了工程的顺利进行。

(2)块体边界条件专门勘察

二期工程直立坡刚开始施工时,在右线二闸首南坡发现了由 f1239 断层构成的大块体,为了查清块体的边界条件,布置了小口径钻孔、彩电录相、物探测试等手法,查清了块体的边界条件,为块体的预报及处理提供了范例。

4.3 专题研究

(1)高边坡稳定性地质专题研究



三峡船闸单项技术设计中，高边坡被列为专题，对高边坡稳定进行了专题研究，研究中充分利用了一期边坡开挖揭露的地质条件，对边坡稳定计算所需的地质条件进行了概化，给出了裂隙的统计参数、主要断层及结构面的力学参数、岩体水文地质参数，对岩体松弛特征进行了研究，首次将边坡岩体划分为三个带，并提出了各带的力学参数，使数值计算更符合实际。根据一期边坡的结构面资料对二期直立坡的稳定性进行了预报，预测二期直立坡上块体的出露位置和规模。

(2) 边坡变形与稳定反馈分析及预报研究

船闸高边坡自开始施工起就埋设监测仪器进行监测，包括边坡表层及深部岩体变形监测、地下水监测、锚杆锚索应力监测、地应力监测、岩体裂缝监测等，取得了丰富的资料，根据监测资料进行反馈分析，可以预测边坡的变形与稳定。根据整个边坡的实际地质资料，对边坡岩体进行了工程地质分区，建立了反馈分析的三维地质概化模型。研究厂二维及三维弹塑性反演分析方法、弹塑粘性反演分析方法、三维渗流反演分析方法等。所获结果表明三峡船闸高边坡在总体上是稳定的，局部的裂缝与块体稳定性通过适当的工程措施可得到保证，边坡的长期变形不会影响船闸安全运行。

(3) 边坡与洞井岩面找平混凝土及喷护混凝土裂缝现象工程地质研究

船闸中隔墩顶面在开挖到设计高程后浇筑了厚约 20cm 的找平混凝土，随着中隔墩两侧闸槽的开挖，找平混凝土开始出现裂缝，最宽达 23mm。随着开挖的下降，在竖井壁面也发现沿裂隙张开现象。这一现象引起了参建各方的广泛关注，为此进行了工程地质研究。



通过多次调查，查清了边坡与洞井找平混凝土和喷护混凝土裂缝的分布情况，以及混凝土裂缝的长度、宽度、下切深度、延伸方向等基本特征，按成因将混凝土裂缝分为两类：岩体变形引起的混凝土裂缝与混凝土收缩缝，前者又分为与下伏岩体中结构面对应关系的追踪型裂缝和与结构面无对应关系的裂缝。通过对边坡岩体变形特征及发展态势进行研究，结果表明岩体变形型裂缝开度与开挖有较好的对应关系，不影响边坡的稳定，经过对混凝土裂缝所在部位地质条件的分析，均未发现混凝土裂缝所在部位的结构面组合形成尚未预报的块体，边坡稳定性好。

(4)中隔墩岩体性状工程地质研究

中隔墩岩体出现开裂现象后，其岩体完整性及性状如何引起了大家的关注。为了研究中隔墩岩体性状，采用了小口径钻孔取芯鉴定，压水试验，钻孔彩色电视录相，单孔声波测试，跨孔地震波测试。电磁波透视(CT)。钻孔弹模和变模测试，岩样力学试验。进行二、三维弹塑性数值分析，中隔墩岩体开裂机理及加固效果的数值分析。根据试验成果将中隔墩岩体划分为爆破—卸荷松弛带、卸荷松弛带和非松弛带。研究表明。上部两松弛带主要表现为部分原有结构面不同程度的张开。其工程地质性状及物理力学性质有所变化，但整体上没有改变岩体结构及结构面组合方式，因此除表层爆破影响区外，基本不影响岩体的稳定条件，松弛带仍具有较高的整体性和力学强度。整个中隔墩岩体保持了良好的整体性和弹性性质。

(5)地下水腐蚀性及其析出物上程地质研究

船闸施工过程中，在两侧山体排水洞内局部发现从地下。水中析出的白色物质以及红棕色胶状物；为厂查清这些物质的来源、成份。以及地下水对混凝土和锚索



锚杆是否具有腐蚀性及其腐蚀程度如何，进行了取样分析专题研究。结果表明。施工前后地下水的 PH 值变化较明显，离子含量变化较小。大部分地下水对混凝土不具腐蚀性，少数地下水对混凝土具弱腐蚀性，极少数具中等腐蚀性。地下水对裸露的钢结构具腐蚀性，对混凝土中的钢结构不具腐蚀性。排水洞内白色析出物主要为 ca 的化合物，红色物质主要为高价 Fe 的氧化物。研究认为，析出物中 Ca 质和 Fe 质主要来源于地表喷扩的混凝土以及堆积的钢材等。

5 结语

三峡船闸高边坡工程地质勘察与研究经过实践检验是成功的，它为我们今后建设类似工程积累了经验。

(1)岩体风化界面控制，钻孔是最有效的方法，钻孔间距应在 40~60m 之间。

(2)在确定了边坡岩体自稳坡角后，块状结构岩体边坡稳定主要由结构面控制。边坡的整体稳定由III级及其以上结构面控制，可以通过地表地质测绘和勘探平洞基本查明。局部稳定主要由IV级及其以下结构面组合形成的块体稳定问题，由于它们是随机分布的，局部稳定问题只能在施工期解决。

(3)详细的施工地质工作是查明块体的位置及边界条件的基础，由于结构面是闭合的，需要清洁的岩面才能发现，因此，建设各方的相互配合尤为重要。

(4)排水洞与排水孔结合疏排地厂水是有效的。

(5)前期勘察不可能把所有问题查清，施工过程中出现的岩体卸荷开裂等问题的研究。首先在于对地质条件的把握，及时进行动态设计是成功的关键。



(6)岩体变形主要是卸荷造成弹性变形，因此，数值分析时，将弱风化下带及微新岩体作为弹性介质分析是合理的，计算所得边坡岩体总变形与实际监测值在同数量级范围内。

(7)三峡船闸高边坡岩体为块体结构，岩体为断续介质，锚固是限制变形的一种有效措施。