

三峡永久船闸高边坡工程的实践及验证

张超然

(中国长江三峡工程开发总公司, 湖北宜昌 443002)

[摘要] 三峡工程永久船闸高边坡工程系从左岸山体开挖形成, 两侧高边坡最大开挖深度达 170 m, 其下部为 68 m 高的直立墙, 是三峡工程建设的重大技术难题。文章对三峡永久船闸高边坡设计原则和轮廓, 施工程序, 防渗及排水系统, 高边坡加固支护措施, 高边坡稳定分析以及永久船闸高边坡变形预测和高边坡监测资料验证等的研究结论和工程的重大科技成就做了介绍。

[关键词] 三峡; 永久船闸; 高边坡

1 概述

三峡双线连续 5 级永久船闸是三峡工程重要建筑物之一。因其独特的结构要求, 需在三峡坝址左岸制高点坛子岭北侧花岗岩山体中深切开挖修建, 形成最大深度 170 m、下部 68 m 直立闸墙的双向岩质高边坡, 两线闸槽间保留宽 57 m、高 68 m 的直立岩石中隔墩。为永久船闸结构所需的三条贯穿主体闸室(首)段的纵向输水隧洞和每个闸首两侧开挖的 36 个竖井, 布置在两侧边坡和中隔墩岩体内。直立闸槽边墙结构为厚度 1.5 ~ 2.4 m 的混凝土薄衬砌墙, 该混凝土墙通过高强锚杆与岩体连接共同组成结构。永久船闸高边坡具有一般高边坡所没有的特点和难点, 一直受到国内外专家学者的关注。

三峡永久船闸高边坡和一般高边坡相比具有以下特点: a. 它是在山体中深切出来的陡高边坡, 高度大、形态复杂、范围广、应力释放充分, 呈现出明显的卸荷和非均质特征。b. 边坡稳定, 尤其是变形特性有严格要求。长江是我国的黄金水道, 作为永久船闸的边坡, 不仅整体和局部稳定必须保证, 而且对边坡的流变必须严格控制, 以满足船闸人字门的正常运行要求。c. 施工难度大、干扰多、

工期紧。船闸工程不仅地面施工强度高, 窄、深且陡的闸室直立边墙开挖困难, 而且与大量地下隧洞与竖井开挖同步进行, 如何解决开挖爆破的相互影响, 最大限度地减少岩体损伤和确保施工安全都是需要处理的难题。

鉴于三峡永久船闸高边坡的重要性的技术难度, 为了解决三峡永久船闸高边坡中的重大技术问题, 在“七五”、“八五”期间, 国家有关部门安排了重大科研攻关项目和三峡工程关键问题的应用基础研究项目^[1]: 对地质概化模型; 结构优选; 岩体边坡的基本力学参数试验方法与取值标准; 边坡卸荷、非线性、非均质及流变特性; 永久船闸长期变形; 渗流对边坡稳定的影响; 边坡稳定分析方法、破坏机制与安全评判准则; 开挖程序方法和支护技术; 边坡安全监测和反馈分析; 边坡爆破开挖和支护技术, 等等。通过联合攻关, 取得了一大批具有先进水平的科研成果。

配合现场施工, 三峡公司组织专家也进行了一系列的施工科研: 控制爆破方案, 爆破要最大限度地减少对岩体的扰动; 对双向岩质高边坡和中隔墩岩体应具备足够的整体稳定性; 岩体位移对三峡永久船闸大型人字门工作性态的影响研究, 长期变形应有严格的控制, 保证闸门正常运行; 永久船闸高

边坡加固采用截、防、排水和岩锚支护的综合处理方案；永久船闸高边坡山体排水系统排水效果分析；永久船闸高边坡地下洞井稳定分析；永久船闸中隔墩裂缝分析和处理措施研究；永久船闸直立边坡局部不稳定块体处理；加强施工期和运用期监测，对永久船闸变形稳定反馈分析及进行动态跟踪反馈设计和研究。在施工的关键阶段多次组织岩石力学专家来现场对永久船闸高边坡施工进行咨询。施工研究成果为三峡永久船闸高边坡按期高质量的建成提供了科学依据。

下面对三峡永久船闸高边坡工程的研究结论和工程的科技成就进行介绍。

2 永久船闸高边坡设计原则和轮廓

2.1 永久船闸高边坡设计原则

1) 永久船闸高边坡设计总体方案在满足船闸结构布置与安全运行要求的前提下，充分利用边坡岩体强度高的特点，以节约工程量。闸墙段边坡应尽可能挖成直立坡，以减少开挖量和结构混凝土；闸墙顶以上的边坡应达到梯段边坡基本自稳，以减少边坡处理工程量。

2) 永久船闸高边坡总体稳定。通过选择合适的边坡坡度，并采取以截、防、排水系统措施为主，岩锚加固措施为辅的方案。

3) 永久船闸高边坡上的局部不稳定体，采取岩锚加固和喷锚支护措施处理。

4) 设计方案应方便施工，同时为工程运行、管理、维修及观测创造条件。

5) 施工方案的选取。应充分注意保护岩体，应特别注意采取有效的控制爆破技术，尽量减少对边坡岩体的损伤。

6) 全过程贯彻动态设计思想，加强安全监测和施工地质工作，建立迅速、准确的信息采集和分析反馈系统，及时调整和优化设计方案。

7) 兼顾环境美化和旅游要求。

2.2 永久船闸高边坡轮廓

2.2.1 梯段开挖坡比 按照梯段边坡基本自稳的原则，根据工程地质条件、岩体结构面力学特性，边坡稳定分析成果和坝区自然边坡与人工边坡的调查结构，并类比其他边坡工程的实践经验，综合分析确定了不同岩体类型边坡的梯段开挖坡比如下：微、新岩体类型为1:0.3；弱风化岩体类型为1:0.5；强风化岩体类型为1:1；全风化岩体类型为

1:1~1:1.5。

2.2.2 永久船闸高边坡梯段高度和马道宽度 闸墙顶以上边坡梯段高度一般为15 m，并根据结构布置、交通及总体稳定需要作适当调整。为施工需要闸墙直立坡梯段坡高为10~12 m；闸墙顶以上坡段，每一梯段均设一条宽5 m的马道，以增加边坡整体稳定性；在边坡高度较大部位，马道宽度增至10~15 m；南北坡闸墙顶按结构和总体布置需要，均设置宽15 m的闸墙顶平台，各闸首因输水隧洞阀门井及启闭设备布置需要，均设置一段凹向坡内的“大耳朵”平台。闸室衬砌墙直立坡段为满足钻爆施工需要，每梯段留0.3 m的施工小马道。

2.2.3 坡顶平台及最大坡高 北坡结合公路布置，在边坡高度最大的二闸室至三闸首段坡顶开挖形成平台，并与公路相通；南坡将位于三闸室段中部的地形制高点坛子岭削减13 m，以减少最大坡高，增加边坡稳定性。

3 永久船闸施工程序

确定施工程序主要考虑了以下几个因素。开挖程序（尤其是左右闸室的开挖程序以及在闸槽37 m宽的狭窄场地内的开挖程序）对边坡岩体的应力、变形的影响和施工进度与施工布置的要求。

地下洞室爆破对边坡及其喷锚支护产生振动影响，以及尽早形成地下排水系统以促进边坡稳定。边坡的应力释放和变形的时间效应，加固支护的合适的支护时机，防止边坡围岩的松弛发展、强度降低，有利于支护施工，并与开挖密切配合。闸室开挖不致造成与闸室结构混凝土施工的干扰，保证混凝土施工有足够的工期。以上相关因素，在确定施工程序时主要遵循了以下几个方面：

3.1 明挖施工顺序

闸墙顶以上部位：自上而下、全线分层开挖，相邻开挖工作面高差不大于一个梯段。闸墙顶以下部位：同区段左右线闸槽平行下挖，右线闸槽开挖领先时领先不超过左线闸槽开挖一个梯段；相邻开挖工作面高差不大于一梯段。闸墙顶以下深槽开挖时预留侧向保护层，先进行闸槽中部先锋槽梯段控制开挖，然后再进行侧向预留保护层和直立墙成型开挖。

3.2 明挖与地下洞室开挖的关系

明挖与输水隧洞开挖：输水隧洞及其施工支洞开挖超前相应同区段闸室明挖，超前开挖上覆的岩

体至少保留自闸室底面以上 30 m。明挖与排水洞开挖：排水洞先于船闸明挖。明挖与竖井开挖：竖井开挖在明挖至闸墙顶后进行，闸槽开挖以滞后竖井开挖不少于一个梯段为原则；对竖井开挖滞后的个别部位，为解决明挖与地下洞室开挖的矛盾，有利于船闸总体工期；闸槽开挖以窄槽开挖形式通过竖井部位，与竖井开挖同时下挖或闸槽超前下挖，在竖井与闸槽开挖部位之间至少相距 30 m 以上的水平距离。

3.3 支护与开挖的关系

锁口支护、随机支护及边坡锚喷与开挖同梯段实施，随开挖及时跟进，且满足爆破振动影响要求。高强锚杆、锚索原则上与开挖梯段隔一梯段实施，随开挖适时跟进。特殊部位支护由监理、设计和施工单位确定支护时机及时实施。

3.4 明挖、支护与混凝土衬砌的关系

明挖和支护施工尽早完成，分阶段向混凝土施工提交工作面，保证混凝土施工有足够的工期，同时避免开挖和锚固与混凝土施工的相互干扰。

4 永久船闸防渗及排水系统

大量工程实践证明，防渗和排水是改善和提高边坡稳定性的一项经济有效的处理措施。三峡永久船闸高边坡在综合分析边坡地下水补排关系、渗透特性及水文地质条件的基础上，经过大量的渗流计算、渗流试验和分析研究后，决定了以地下排水为主，地表截、防、排为辅的综合防治措施，以降低地下水位，减少渗水压力，提高边坡稳定性。

4.1 地表截、防、排系统

地表截、防、排是为了减少大气降雨入渗，阻隔边坡面与地下水的水力联系，使地下排水系统充分发挥疏排作用。

4.1.1 周边截水沟 在距坡顶边坡开口线以外 5 m 左右处设置系统完整的周边截水沟，拦截开挖边坡以外的地表迳流。

4.1.2 坡面喷混凝土防护 为防止降雨从坡面入渗，结合坡面岩体保护和支护处理，在周边截水沟以内的坡顶作表面清理后喷 12 cm 厚的混凝土护面；开挖斜坡面的全、强、弱风化带，挂网喷 12 cm 厚混凝土，微新岩体段喷 7 cm 厚素混凝土防护；闸墙顶平台、中隔墩平台及各级马道全部浇 20 cm 厚混凝土面板防护。

4.1.3 坡面排水 在所有斜坡面及铅直坡面，均

钻设坡面排水孔，以排除防护层后的残余渗水压力。斜坡面排水孔为上倾 10° 的仰孔，孔排距 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ ，孔径 $\phi 46\text{ mm}$ ，孔深 $0.7 \sim 0.3\text{ m}$ 。在闸墙顶平台及其以上的坡面及马道，设置完善的坡面纵横排水沟系统，并与周边截水沟相连通，其断面尺寸按泄水量分段计算确定。

4.2 地下排水系统

4.2.1 排水洞布置 在船闸南北两侧边坡山体各设置 7 层共 14 条排水平洞，其与同高程的边坡面的水平距离为 $30 \sim 45\text{ m}$ 。各排水洞高程上下高差 $20 \sim 30\text{ m}$ 。其断面一般为 $2.5\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ ，兼作锚固施工的排水洞断面为 $3\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 。为保证施工及运行期的通风和吊物需要，在南北两侧边坡各布置两条通风吊物竖井，通过交通支洞与各层排水洞连通。竖井断面为圆形，直径 $\phi 3.0\text{ m}$ 。排水洞底板靠山侧都布置有断面为 $0.25\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的排水沟。

4.2.2 山体排水孔 经试验论证，弱风化岩体储水丰富，而微新岩体渗透性微弱，排水缓慢，疏排较困难，故在微新岩体内钻设排水孔，不能产生明显的排水效果，而在排水洞内钻设排水孔则效果明显。因此，船闸边坡排水洞内均钻设排水孔，以便形成完整的排水孔幕，以有效疏干边坡岩体。

排水孔结合不同岩体的水文地质特征布置。在弱风化岩顶板附近是地下水富集带和水位变动带，各层排水洞均布置 2 排孔。其中，一排为铅直向上的仰孔，另一排为斜向山体的仰孔。各层排水洞段均设一排向上斜孔。各层排水洞为第一层排水孔的，孔深按深入强风化层 5 m 控制，其余洞段按孔深超过上一层排水洞底板高程 0.5 m 控制，排水孔孔径 91 mm，孔距一般为 2.5 m（一闸室部位因临近库水，补给渗径短，孔距加密为 2 m）。

排水孔穿过地质缺陷和强风化岩体的孔段，根据需要采取塑料花管外包工业过滤布的孔内装置作孔内保护，以防疏松结构岩体塌孔或产生管涌。

按上述布置的条件进行渗流分析计算，排水洞和排水孔幕排水效果良好，可达到疏干边坡岩体的目的，岩体内的地下水位线基本为各排水洞的边线。

5 永久船闸高边坡加固支护措施

三峡永久船闸边坡的加固支护主要措施包括预应力锚索加固，系统锚杆加固，随机锚杆加固及坡

面喷混凝土保护等。

5.1 预应力锚索

主要用于加固边坡上规模较大的不稳定块体,限制边坡因卸荷和爆破引起的较大范围的受损区进一步发展和恶化,改善直立坡段边坡及中隔墩岩体的应力、变形条件和稳定性。

用于加固不稳定块体的预应力锚索一般为端头锚,设计预应力为1 000 kN和3 000 kN 2种,采取现场动态设计方式布置实施。其操作程序为:开挖—施工地质预报—几何可移块体搜索及稳定复核—加固方案及锚索布置设计—发送设计通知单并组织实施—安全监测及信息反馈。

用于限制受损区进一步发展和恶化,改善直立坡段及中隔墩岩体的应力变形和稳定性的预应力锚索,根据边坡稳定分析,按需要布置实施。直立坡段有条件的部位和中隔墩布置此类预应力对穿锚索。一般为有粘结锚,用于长期观测的锚索为无粘结锚。

预应力锚索主要用于船闸主体段和闸墙顶以上的斜坡段。为改善高边坡上部应力、变形条件,边坡高度最大的二、三闸室段的两侧边坡共布置1 000 kN级锚索226束,3 000 kN级系统锚索1 684束。系统锚索一般长40~60 m。块体加固锚索根据块体滑动面埋深确定,一般长度为25~50 m不等。锚索孔一般垂直坡面布置。

5.2 系统锚杆

采用全粘结普通砂浆锚杆,主要用于:a.与坡面喷混凝土结合,提高边坡表层松动带的整体性和稳定性;b.加固处理出露于边坡表面的随机不稳定楔形体;c.位于边坡直立墙段的系统锚杆,除具有前述的作用外,还提供满足闸室衬砌墙稳定所需要的锚固支护力。

用于坡面表层全、强、弱风化带的系统锚杆结合喷混凝土挂网需要布置,为 $\phi 25$ 普通钢筋, $@ = 200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$, $L = 150 \text{ cm}$ 。孔向为垂直边坡面。

斜坡的弱风化及微新岩体段系统锚杆原设计为 $@ = 400 \text{ cm} \times 400 \text{ cm}$ 和 $@ = 300 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$, $\phi 25$,垂直边坡走向,下倾 7° ,锚深6~8 m。施工中根据施工地质编录及预报资料,实施现场动态优化设计,改系统布置为针对结构块体、节理裂隙密集带、构造岩带等地质缺陷布置,取消了完整岩体坡段系统锚杆,加强了地质缺陷部位的支护;深度

及锚固方位角也根据地质条件作了相应调整,收到了良好的效果并减少了部分工程量。

直立坡段(含中隔墩两侧)的系统锚杆,除直立墙顶3~5排锚固深度受边坡加固支护控制外,锚杆强度、结构形式、密度等均受闸室衬砌墙稳定控制。所以,直立坡段系统锚杆采用5级精轧螺纹钢, $\phi 32$, $@ = 300 \text{ cm} \times 300 \text{ cm} \sim 120 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$, $L = 800 \sim 1\,400 \text{ cm}$,垂直坡面布置。在基岩与混凝土接触面设30~50 cm的自由段,锚杆延入衬砌墙混凝土内距墙面5 cm处。直立坡段系统高强锚杆共布置约10万根。为保证直立墙施工期安全,针对直立墙顶开挖爆破卸荷严重、入槽开挖第一梯段爆破抬动现象及槽口小规模随机楔形块体较普遍存在等,将台口施工期临时支护变为系统锚杆锁口支护,锁口锚杆采用普通螺纹钢, $\phi 32$, $@ = 300 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$, $L = 1\,200 \sim 1\,400 \text{ cm}$ 。从闸墙顶以下1 m开始,共布置5排,因此,施工期新增系统锁口锚杆约7 000根。

5.3 随机锚杆

亦采用全粘结普通砂浆锚杆,用于施工中随时处理出露的较小的不稳定块体或其他施工期临时加固处理。

6 永久船闸高边坡稳定分析

稳定分析的内容包括整体稳定分析、局部块体(定位、半定位、随机块体)稳定分析、塑性受损区稳定分析等。

6.1 整体稳定分析

分析结果表明,边坡整体稳定性好。在最高边坡段,整体边坡无地震时稳定安全系数大于2.9;施加预应力锚索对直立坡段可提高安全系数10%左右,但对整体坡作用不大;在Ⅶ度地震作用下,考虑动力放大作用,稳定安全系数下降15%左右,但仍在1.5以上。

6.2 定位块体稳定分析

定位块体是指由断层与断层(岩脉)组合,并在坡面上出露的几何可移块体。由于同一地段很少同时发育两组倾向相反的断层或岩脉,因此定位块体出现的机遇较少。技术设计阶段发现的定位块体极少,均位于直立坡段,体积几百至数千立方米不等,埋深6~48 m。稳定分析成果显示,定位块体稳定性多数较好。

6.3 半定位块体稳定分析

半定位块体是指由断层（岩脉）与裂隙交切，并在坡面出露的几何可移块体。技术设计阶段，根据坡面上出露的断层（岩脉），假设所在部位各组优势面裂隙长度为10 m，按最不利组合，搜寻确定的半定位块体，经分析大部分不能满足稳定要求。

6.4 随机块体稳定分析

随机块体是由裂隙与裂隙组合，并在坡面出露的几何可移块体。由于裂隙长度一般为2~10 m，大于10 m的极少，且多为陡倾角发育，因而随机块体多在陡坡上出现，在1:1及缓于1:1的边坡上基本不出现，但总数量大。大多数随机块体形状细长、体积小、埋深在8 m以内。稳定计算结果表明，大部分随机块体的稳定性较差。

6.5 塑性受损区岩体的稳定分析

根据有限元分析，塑性区主要出现在各梯段坡的坡肩部位，以左右边坡直立段及中隔墩部位范围较大。以直立坡为代表，计算时，塑性受损区内岩体力学参数采用岩体的残余强度，坡顶宽度为直立坡顶平台宽度15 m，高度参考有限元分析成果为40 m，裂隙连通率按开挖卸荷后增加1倍取20%，假设开挖卸荷在坡顶处产生拉裂缝，深度按有锚固措施止裂考虑，取7.5 m，水荷载在拉裂缝中取全水头，拉裂缝以下三角形分布。按此计算稳定安全系数为2.7，大于设计要求值。

7 永久船闸高边坡变形预测

为预测永久船闸高边坡的变形，进行了弹性、弹塑性、弹脆塑性、粘弹性等多种材料的模型的二维、三维有限元数值分析。分析中考虑了地下水、地应力、分步开挖（未考虑坡面爆破松弛区）等多种因素。

7.1 施工期变形预测

边坡开挖结束后，左右边坡均呈卸荷回弹变形，即左边坡向右上位移，右边坡向左上位移。中墩除向上卸荷回弹外，还与左右边坡坡高的差异有关，坡低的一侧水平位移比坡高的一侧大。最大水平位移量值^[2]：左右边坡的全强风化带为20~28 mm，微新岩体内左右边坡直立坡顶分别为17~26 mm和18~28 mm；最大竖直位移量值：左右边坡全强风化带为43 mm，左右边坡直立坡顶分别为16 mm和26 mm，中墩顶部最大可达48 mm。

7.2 长期变形预测

按广义凯尔文模型进行的二维数值分析表明，开挖结束后，由于岩体的流变特性而产生的粘性位移指向开挖临空面，其位移形态较施工期位移形态稍有改变；水平位移量值加大，垂直位移量值减少，相应的总位移量值增大。开挖结束后，直立坡顶部水平向流变位移的发展时程见表1。结果表明，船闸边坡岩体流变特性微弱，量值不大，属稳定型流变，其中大部分变形发生在施工期。

表1 直立坡顶水平向流变位移

Table 1 Horizontal rheological displacement of the roof of vertical slope

时间/a	位移/mm	时间/a	位移/mm	时间/a	位移/mm
0	0.00	1	3.15	30	4.03
1/12	2.18	10	3.75	50	4.16

三峡船闸花岗岩系弹脆性体，流变不是主要问题，但是闸首的结构却对岩壁变形甚为敏感，要求竣工安装好闸门后，位移不超过5 mm。因此，长期变形仍是永久船闸所关心的问题。为此，开展了岩石室内和现场的流变试验，确定岩体的流变参数；考虑流变和粘性的数值分析；对监测资料进行长期变形分析等科学研究。从长期变形的数值分析和监测资料的分析结果表明，三峡永久船闸的长期变形可以满足船闸人字门的正常运行要求。

8 永久船闸高边坡监测资料验证

8.1 监测控制

永久船闸监控的主要目的包括：验证前期边坡研究和设计成果；为动态反馈设计提供依据；监控边坡长期运行动态。

船闸监控包括系统监测和施工期随机监测。在永久船闸部位共埋设1500支监测仪器，主要监测项目有边坡岩体外部和内部变形，初始地应力、地应力变化和锚杆应力监测，边坡松弛范围监测及渗流监测，爆破振动监测以及混凝土应力应变、温度、接缝、钢筋应力等的监测和水力学专项监测。

各项监测随施工进展，具备安设条件时及时布置，并定期观测。

8.2 动态设计

实施动态设计是永久船闸高边坡工程遵循的基本原则，也是永久船闸高边坡正在实施的技术保障手段之一。动态设计优化调整的主要内容有：a.

在邻近每级马道的坡肩部位，系统布置两排锁口锚杆，以处理该部位因开挖卸荷和爆破而形成的强松弛区。**b.** 将原布置的斜坡段系统锚杆，调整为根据施工地质资料，针对出现的裂隙密集带、岩体松弛区而布置和重点加固锚杆。**c.** 对出现的 580 余处块体，根据稳定分析成果，较大的不稳定块体采取预应力锚索加固，较小的不稳定块体采取普通砂浆锚杆加固。预应力锚杆因施工工艺相对复杂，基本上未采用。

8.3 监测变形现状

截至 2000 年 9 月，测得的北坡岩体向闸室中心线方向最大位移为 44 mm，北坡直立墙顶的最大水平位移为 32 mm；南坡岩体向闸室中心线方向最大累计水平位移为 57 mm，南坡直立墙顶的最大位移为 47 mm，各测点的年垂直位移变化不大，累计垂直位移量大多在 ± 6 mm 以内；中隔墩顶部岩体北侧向北线闸室实测最大累计位移量为 37 mm；南侧向南线闸室实测最大位移量为 19 mm；中隔墩顶部岩体的垂直位移均表现为回弹，实测累计最大回弹量为 24 mm。这些数值与设计的计算值基本一致。

通过对永久船闸高边坡埋设的大量监测仪器，已经取得的工程施工期的变形监测信息分析表明，船闸高边坡与中隔墩岩体整体性能稳定。自 1999 年 4 月闸槽开挖基本结束后，两侧边坡及中隔墩岩体月位移速率开始衰减并呈现收敛趋势，说明岩体的变形已逐步趋于稳定。安全监测实践表明，监测

成果已经在动态优化设计、施工决策等方面发挥了重要作用，取得了显著的经济效益和社会效益。

9 结语

三峡永久船闸高边坡工程，无论其规模、难度均是空前的，它不同于一般的结构工程，也不同于常见的岩土工程。三峡工程永久船闸系从左岸山体内部开挖形成，两侧高边坡最大开挖深度达 170 m，其下部为 68 m 高的直立墙。永久船闸闸室两侧仅设薄混凝土衬砌，需依赖岩体自身保持稳定，在世界工程史上尚无先例，如何保持其整体稳定和限制其变形，是具有极大风险的挑战性的工程。设计上采用了山体排水和预应力锚索、高强锚杆、喷混凝土支护等措施，施工上严格控制施工程序和一整套控制爆破措施。永久船闸总量约 $4\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的开挖已于 1999 年 9 月基本完成；3 600 余索预应力锚索和 10 万根高强锚杆的施工已于 1999 年底基本完成。大量监测资料的分析成果表明，高边坡开挖后边坡向船闸中心线方向的最大位移量（截至 2000 年 9 月）为 57 mm，在设计预测的范围内。高陡岩体边坡趋于稳定，解决了三峡工程多年来的一个重大技术难题。

参考文献

- [1] 张有天, 周维垣. 岩石高边坡的变形与稳定[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999
- [2] 清华大学, 长江勘测规划设计研究院. 长江三峡永久船闸边坡变形稳定反馈分析及预报研究[R]. 1999

Practice and Experimental Verification of TGP's Permanent Shiplock Slope

Zhang Chaoran

(China Yangtze Three Gorges Project Development Corporation, Yichang, Hubei 443002, China)

[Abstract] The high slope for the permanent shiplock of the Three Gorges Project (TGP), excavated from the mountain body on the left bank, is one of the major technical issues of the Project construction. The excavation for the slope on each side is 170 m deep in maximum consisting of a 68m high vertical wall on its lower part. Several aspects are described in the paper for the permanent shiplock slope including the general description, design principles and outline, construction procedures, seepage prevention and drainage system, consolidation and support measures, stability analysis, deformation prediction, monitoring data verification as well as some significant scientific and technical achievements.

[Key words] TGP; permanent shiplock; high slope