

# 三峡永久船闸高边坡开挖及加固支护设计

徐年丰

(长江水利委员会 武汉 430010)

**摘要:** 永久船闸高边坡是三峡工程的重要建筑物,也是船闸结构的重要组成部分,规模巨大,技术复杂。确定合理的设计原则,选定合适的安全度标准,拟定合理的开挖形态和进行恰当的加固支护,制定合理的开挖与加固施工程序,确保边坡稳定和变形满足结构及运行要求是船闸高边坡设计中研究的主要问题。本文结合围绕高边坡设计所进行的大量试验及分析研究成果,系统介绍了船闸高边坡的基本设计思想及开挖与加固支护基本设计方案。

**关键词:** 三峡工程 船闸高边坡 分析研究 开挖加固 设计方案

## 1. 概述

三峡双线连续五级船闸位于长江左岸坛子岭北侧,全长6442m,设计年单向通航能力5000万t,是三峡工程主要通航建筑物。其主体段,长1617m,轴向111°,系在山体中深切开挖后采用锚固于边坡岩体上的薄衬砌墙结构形式修建,最大开挖深度达175m。开挖后,两闸槽间保留宽55~57m的岩体隔墩,两侧形成高50~160m的高陡岩质边坡,下部闸槽段为高50~70m的直立坡。船闸高边坡不仅有高度大、线路长、轮廓复杂及深切开挖岩卸荷变形的特点,而且边坡岩体还是船闸结构的组成部分,其运行要求不同于一般边坡工程,高边坡成为三峡工程中的关键技术课题之一。确定合理的设计原则,选定合适的安全度标准,拟定合理的开挖形态和进行恰当的加固支护,制定合理的开挖与加固施工程序,确保边坡稳定和变形满足结构及运行要求是船闸高边坡设计中研究的主要问题。

## 2. 基本条件

基岩为前震旦纪闪云斜长花岗岩,间含少量岩脉。自上而下分为全、强、弱、微四个风化带,全强风化带平均厚15~20m,弱风化带平均厚13~15m。边坡以微新岩体为主,岩体完整,微新岩体湿抗压强度达100MPa。

断层按走向分NE~kN、NNW、NNE、kN~NW四组,0.04条/m;陡倾角占82%,缓倾

角占4%;多为长度小于50~100m,宽度小于0.5m的Ⅲ级结构面,构造岩多胶结良好。裂隙走向和分级与断层近一致,1~2条/m;陡倾角占74%,缓倾角占7%;长度一般5~10m,平直稍粗面为主,多闭合无充填。结构面分Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级,以走向NE~kN、NNW的Ⅲ、Ⅳ级为主,与边坡走向呈30~75°和40~70°交角,Ⅴ级结构面优势走向NEE,倾角73~77°。结构面走向对边坡稳定有利。

地下水由大气降雨经全强风化岩体垂直入渗于弱风化带内并形成地下水位,水位年变幅3~9m,高地下水位出现在当年雨季末期,变化一般滞后降雨10~20d。弱风化带地下水一部分沿复杂的裂隙网络向深部运移,另一部分则在该带中形成地下迳流向临空面排泄。岩体透水性自上而下降低,微新岩体透水性极微,主要沿断层、裂隙渗水。岩体渗透性受构造控制具非均质各向异性特征,岩体地下水具有入渗透迅速而导排疏干缓慢的特点。

区域地震基本烈度为Ⅵ度。闸室部位最大水平向地应力约6~11MPa,NNW向。

经大量试验及分析论证,得出各类(含卸荷)岩体及结构面的物理力学参数、岩体渗流力学参数、岩石断裂参数、岩体及结构面流变参数等。

## 3. 边坡设计原则与安全系数取证

### 3.1 设计原则

高边坡规模巨大,决定着船闸的正常运行与航运安全,属重要建筑物。鉴于影响高边坡稳定的不可预见性因素较多。因此,设计方案必须具有足够的安全度,且经济合理,并不断通过施工安全监测和施工地质反馈,及时调整与优化完善。动态设计是高边坡的基本设计思想之一,也是边坡工程设计须遵循的总原则。针对船闸高边坡的具体特点和客观条件,经大量分析及比较论证,拟定边坡设计的基本原则如下:

(1) 边坡总体设计方案应在满足船闸结构布置要求与船闸安全运行的前提下,充分利用岩体强度高的特点,以节约开挖工程量。

(2) 开挖边坡应具有足够的稳定性,确保施工和运行期安全。总体开挖轮廓在排水条件下达到自稳,各梯段边坡在无明显地质缺陷条件下达到自稳,以减少处理工程量。

(3) 边坡加固支护以截防排水措施为主,岩锚加固支护措施为辅;局部不稳定体采取岩锚加固和喷锚支护处理。

(4) 设计方案应方便施工,并为工程运行、管理、维护及安全监测创造条件。

(5) 施工方案的选取,应注重保护岩体,采取有效的控制爆破技术及快速支护技术,尽量减少对岩体的破坏。

(6) 注重采用新技术、新工艺,提高设计水平和施工质量。

(7) 保护环境,兼顾环境美化及旅游要求。

### 3.2 安全系数取证

稳定安全系数是判定边坡稳定性,确定边坡设计标准及处理工程量的一项重要指标,直接关系到边坡工程的安全性、经济性与合理性。由于目前国内边坡(含滑坡)工程的设计和施工尚无统一的规范和标准,因此,对国外近十个和国内近二十个边坡工程的安全系数取值、国内外相关专业的规程规范及专业文献、影响三峡船闸高边坡安全系数的因素等进行了系统的分析研究。研究表明,国内外各类边坡或滑坡工程设计采用安

全系数一般为1.05~1.5,其中岩质边坡多为1.1~1.3。经大量分析研究,并考虑船闸边坡的具体特点,取定船闸高边坡稳定安全系数:设计工况 $K_c \geq 1.5$ ;校核工况 $K_c \geq 1.1 \sim 1.3$ 。

### 4. 开挖轮廓设计

遵循高边坡设计的基本原则,在满足结构布置要求的前提下,考虑开挖与加固支护的相互关系及地质条件、施工条件等主要因素,拟定边坡开挖轮廓形态如下:

(1) 边坡总体形态:横向呈下陡上缓的喇叭形,下部为两条深50~70m,宽37~39m的直立坡闸室槽;槽间为宽55~57m的岩体隔墩;槽顶两侧为宽15~30m的平台,以上为1:0.3~1:1梯段斜坡和马道。纵向以二、三闸室段边坡最高,坡高向上、下游降低;坡脚各闸室底板呈台阶下降,北坡和中隔墩直立坡顶为与底板一致的阶梯式平台,南坡直立坡顶为一条贯上、下游的斜坡公路。开挖成形后,北坡最大坡高140m,位于三闸首;南坡最大坡高160m,位于三闸室中部。

(2) 梯段开挖坡比:根据船闸工程地质条件、边坡稳定分析成果及坝区自然与人工边坡的调查结果,并类比其它工程的经验,确定高边坡梯段开挖坡比为:微新岩体1:0.3(闸室墙部位为直立坡);弱风化岩体1:0.5;全强风化岩体1:1(局部1:1.5)。

(3) 梯段高度与马道宽度:考虑边坡施工期开挖、支护和运行期维护、检修的需要,并参考其它工程经验,确定梯段开挖坡高一般15m,马道宽度一般5m。同时根据结构布置、边坡总体稳定及交通的需要,对坡高较大部位,在弱风化顶部处马道加宽至10~15m。

按上述开挖设计方案,主体段明挖工程量达2287万 $m^3$ 。

### 5. 边坡分析成果

#### 5.1 基本条件

(1) 地震设防标准及动力放大系数:鉴于工程的规模及重要性,选取地震设防标准为基本地震烈度Ⅶ度。根据边坡动力分析成果,选取边坡地震放大系数为2。

(2) 地应力场: 根据钻孔实测地应力回归分析得出地应力场分布。

(3) 边坡渗压力概化模式: 根据渗流分析成果, 同时考虑闸室墙后排水管网的排水效果, 拟定边坡设计渗压力分布形态为: 各层排水洞坡面外侧5m处连线, 上接岩体弱风化顶板线, 下接闸墙后排水管网效率系数0.6计18m的残余水头。

## 5.2 边坡应力状态分析

考虑到边坡系在地应力场条件下深开挖及边坡几何形态复杂的特点, 为了解边坡岩体应力状态, 经二、三维数值计算分析表明: 随着边坡下挖, 岩体应力状态不断调整, 局部出现拉应力区, 上部斜坡段, 弱风化带拉力区延伸较大, 微新岩体拉力区一般在15m内, 两侧直立墙后上3/4为三角形拉力区, 中隔墩上3/4为拉力区, 拉应力一般小于0.6MPa; 直立坡脚呈压应力集中, 应力达25~36MPa。同时边坡局部出现拉剪或压剪屈服区, 多在拉力区内, 各梯段斜坡坡肩均有小片屈服区, 两侧直立墙后上2/3为三角形屈服区, 中隔墩上1/2为屈服区; 坡脚出现小片压剪屈服区。

模拟加锚的数值计算表明: 施加预应力锚固对改善边坡拉、压应力状态, 减小拉力区范围有较明显的效果, 对屈服区改善不大; 施加普通锚杆改善应力作用很小。

## 5.3 边坡变形分析

边坡变形规律与变形量如何, 是否会对船闸结构, 特别是对闸门设备运行带来影响, 是边坡分析时必须研究的一项关键技术问题。为此进行了包括弹性、弹塑性、弹脆塑性、粘弹性、弹塑粘性、弹塑性断裂损伤、流变损伤断裂等多种模型的二、三维分析, 计算结果变形值相差不大, 均为同量级。

(1) 施工期变形: 随边坡下挖, 左右边坡均呈向外及向上的卸荷回弹变形, 中隔墩除向上卸荷回弹外, 还随两侧坡高的差异, 坡高较低一侧水平位移小, 较高的一侧大。最大水平位移: 左右边坡全强风化带为20~28mm, 左边坡直立坡顶为20~21mm, 右边坡直立坡顶为19~

33mm; 最大竖向位移: 左右边坡全强风化带为43mm, 左边坡直立坡顶为17mm, 右边坡直立坡顶为32mm, 中隔墩顶达54mm。

(2) 长期变形预测: 按广义Kelvin模型并考虑开挖卸荷效应的二维数值计算表明: 边坡每一步开挖结束后, 10天内即完成总变形的90%, 一般15~20天达基本稳定; 全强风化、弱风化和微新岩体的时效变形量分别为4~6mm、2~4mm、0.5~2mm。直立坡顶部流变位移发展过程见表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。由于各闸首均位于微新岩体内, 流变不明显, 一般不至对闸首人字门造成影响。

表1 直立坡顶水平向流变位移

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

模拟普通锚杆、预应力锚杆和预应力锚索加固的二维弹塑性数值计算表明: 三种加固措施对减少岩体水平位移效果均不明显。而模拟岩体开裂的二维断裂力学数值分析表明: 及时施加预应力锚固对限制岩体裂缝扩展有明显效果。

## 5.4 边坡稳定分析

(1) 失稳模式分析: 基岩以微新岩体为主, 坚硬完整, 强度高, 产生整体失稳的可能性较小; II、III级结构面与边坡走向夹角一般大于40°, IV、V级结构面与边坡走向夹角30°以上, 中缓倾角结构面不发育, 均不具备构成边坡整体滑动的切割条件; 由受结构面构成的楔体滑动是边坡破坏的主要模式。同时研究认为, 因开挖卸荷引起岩体应力调整, 局部形成屈服区, 区内岩体强度降低, 对屈服区内岩体剪切滑动需进行核算。

(2) 整体稳定分析: 为评价边坡整体稳定安全度, 选取高边坡典型断面计算分析, 考虑地下排水, 分析表明: 无地震、不加锚时, 整体边坡 $K_c \geq 2.9$ , 直立坡段 $K_c \geq 1.7$ , 满足设计要求; 施加预应力锚索, 直立坡段 $K_c$ 提高10%, 但对整体坡作用不大; 地震作用下, 考虑动力放大, 直

立坡段 $K_c$ 下降15%，但乃在1.5以上。整体稳定性好。

(3) 局部稳定分析：包括由断层（岩脉）与断层组合而成的定位块体，由断层（岩脉）与裂隙组合而成的半定位块体及由裂隙与裂隙组合而成的随机块体。

技设阶段搜寻共组合定位块体8个，均位于直立坡段，考虑开挖爆破及卸荷影响，结构面参数取残余强度，分析表明：在不计水压力和地震作用时，所有定位块体 $K_c \geq 1.9$ ；在半水头作用下 $K_c \geq 1.5$ ；在全水头作用下仅1个块体 $K_c = 1.29$ ，略小于设计要求的1.3。

技设阶段按10m长裂隙进行各组优势面组合，取最不利组合控制，共搜寻37个半定位块体，考虑开挖爆破影响，不计C值，分析表明：27个失稳，10个稳定。

由于裂隙一般长2~10m，极少大于10m，且多为陡倾角发育，因而随机块体多在陡坡上出露，块体大多形状细长、体积小、埋深浅，分析表明：大部分随机块体不稳。

鉴于局部块体具有不确定性，因而需在施工过程中根据具体情况进行复核计算。

(4) 屈服区岩体稳定分析：数值计算表明直立坡段屈服区范围较大，为此以直立坡段为代表进行稳定分析。计算时区内岩体采用残余强度，坡顶宽度取直立坡顶平台宽度15m，高度根据有限元成果取40m，裂隙连通率按开挖卸荷后增加一倍取20%，假设开挖在坡顶处产生拉裂缝，深度按有加锚措施止裂取7.5m，水荷载裂缝中取全水头，拉裂缝以下按三角形分布，计算稳定安全系数为2.66，大于设计安全值。

## 6. 加固支护设计

船闸高边坡加固支护包括防渗及排水系统和岩锚加固支护系统两大部分。

### 6.1 防渗及排水系统设计

高边坡稳定分析成果显示，地下水是影响边坡稳定的主要因素。三维渗流场分析成果表明：船闸开挖成形后，在坡面喷护防渗条件下，遇连续降雨，若无排水设施，两侧边坡岩体地下水自

由面下降不大，坡面出逸点在微风化带顶板附近；若只设排水洞，地下水自由面有所降低，但不明显；若在排水洞中设置排水孔幕，地下水有较大幅度的降低，南北坡地下水出逸点已接近闸室底板，排水效果显著。现场岩体疏干试验成果亦表明：微新岩体中如只采用单一的排水洞，不能产生明显的排水效果；当在排水洞内钻设排水孔幕时，则有明显的疏干效果。据此，拟定船闸边坡采用地表截、防排水与地下排水相结合，以地下排水为主，地表截、防排水为辅的综合排水设计方案。通过截、防、导排，尽可能降低边坡岩体地下水位，减小渗水压力，提高边坡稳定性。

(1) 地表截防排水系统：其作用是拦截坡外地表径流，阻隔地面与地下水力联系，将地表水尽快排离边坡范围，减少坡面入渗。具体布置如下：

①坡面喷、浇砼防护：距边坡开口线15~30m范围坡顶进行表面清理后喷12cm厚砼；全强风化坡面挂网后喷12cm厚砼；闸墙以上微新岩体坡面喷7cm厚砼；边坡马道浇20cm厚砼，中隔墩顶及闸墙顶公路浇25cm厚砼护面。

②截、排水沟：紧邻坡顶喷砼层外侧设周边截水沟；各级马道上设纵向排水沟，并与周边截水沟相连；坡面每100~150m设一横向排水沟，连接上下层纵沟。截、排水沟构成坡面排水沟系统，设计标准按实测最大小时降雨量101.6mm沟不漫流控制断面。

③坡面排水孔：坡面均设置上倾 $10^\circ$ ，孔排距 $3 \times 3$ m，深0.7~3m， $\phi 46$ mm的排水孔，以释放由各种原因形成的喷砼层后残余渗水压力。

(2) 地下排水系统：由地下排水洞及洞内钻设的排水孔组成。具体布置如下：

①排水洞：两侧边坡岩体内各布置7层排水洞，洞距坡面水平距离30~45m，一般纵坡5‰。排水洞兼顾地质勘探、安全监测及科研试验，位于直立坡段的排水洞兼作边坡锚固施工洞。一般洞断面 $2.5 \times 3.0$ m，兼锚洞断面 $3.0 \times 3.5$ m。为确保施工及运行期必要的通风条件及施工期吊物，

两侧各设置两条竖井，断面圆形，直径3.0m，通过水平交通洞与各层排水洞相连。上述布置方案，洞挖方达18万 $m^3$ 。

②排水孔：根据渗流敏感性分析成果，南北坡最上层排水洞及其余排水洞在相对最上层范围的洞段均设两排排水孔，深入强风化层3~5m，其余各洞段均设一排孔，孔距均为2.5m，第一闸室因距上游库水较近，孔距加密为2.0m。排水孔均为仰孔， $\phi 91mm$ ，相互搭接形成一道连续的排水孔幕。上述布置方案，排水孔进尺达11.8万m。

根据渗流分析，由上述排水洞和排水孔幕组成的岩体排水系统，可起到良好的排水效果，排水后的地下水位线基本为各排水洞连线。

## 6.2 岩锚加固支护系统设计

加固是指在采取充分排水措施维持边坡总体自稳的开挖轮廓的前提下，为解决边坡局部稳定，增加和改善边坡岩体稳定性及应力变形条件，而采取的以岩锚为主的各种加固支护措施，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砼支护等。

(1) 预应力锚索加固：主要加固边坡上规模较大的不稳定块体，限制边坡屈服区的进一步发展和恶化及边坡卸荷裂隙的扩展，改善直立坡段及中隔墩岩体的应力状态、变形条件及稳定性。具体布置如下：

①斜坡段：在二、三闸室段弱至微风化斜坡面系统布置1~2排1000kN和1排3000kN预应力端头锚索，以防边坡张裂，锚索深35~40m，间距3m。

②两侧直立坡屈服区系统布置2排3000kN级锚索，上排设在坡顶以下4~6m处，深40~45m，下排设在直立坡中部，深35~40m，间距均3m，且均为与对应地下排水洞对穿锚；中隔墩屈服区范围大，设计考虑预列了一定锚索量，施工图中先对断层、阀门井及闸首支持体部位系统布置2~3排3000kN级预应力对穿锚索，深36~55m，间距3~4m，其它部位视开挖实际情况，按照动态设

计原则，结合边坡块体，现场具体布置随机或系统锚索。

斜、直立坡施工图共系统布置1000kN级锚索226束，3000kN级锚索1892束。至99年9月底现场共布置块体处理锚索及系统锚索：1000kN级4束，3000kN级1834束。锚索总量达3956束/146360m。锚索一般为全粘结锚，部分为观测锚索，采用无粘结锚。按此量，船闸边坡平均每延米0.6束，是不大的。

(2) 系统锚杆加固：均为全粘结砂浆锚杆，主要用于：与坡面喷砼结合，提高边坡表层松动带的整体性；加固边坡表层出露的随机不稳定体；直立坡段兼作闸室衬砌墙结构锚杆。具体布置如下：

①斜坡段：全强风化层垂直坡面系统布置2 $\times$ 2m，深1.5m挂网锚杆；弱风化层下倾7 $^\circ$ 布置4 $\times$ 4m，深6~8m系统锚杆，间插2 $\times$ 2m，深1.5m挂网锚杆；微新岩层下倾7 $^\circ$ 布置3 $\times$ 3m，深5~8m的系统锚杆。均为 $\phi 25mm$ 普通锚杆。船闸分两期施工，一期工程施工中，根据施工地质编录及预报，实施动态优化设计，改系统布置为针对马道锁口、块体与裂隙密集带支护，取得了较好的效果，并节省了工程量。二期工程预先在施工图中仅系统布置2排马道系统锁口锚杆，其它部位，现场视情况动态布置。一、二期斜坡段施工图共布系统锚杆4144根，挂网锚杆21038根。一期动态优化设计节省量在抵消掉二期现场布置锚杆量的前提下，尚节省锚杆近2000m。斜坡段锚杆总量达25793根/43484m。

②直立坡段：垂直坡面自上而下布置2 $\times$ 2~1.3 $\times$ 1.3m，深8~14m， $\phi 32mm$ 高强结构锚杆，兼作边坡支护锚杆，共约10万根/100万m。施工中，根据闸室入槽开挖第一梯段块体普遍较多的情况，经施工建议，业主同意，将直立坡上临时支护改为系统锚杆锁口，共布置3~5排，孔距3m，排距2m，深12~14m， $\phi 32mm$ 普通锚杆，共约7000根。

(3) 随机锚杆加固：主要在直立坡段用于

加固系统锚杆不能兼顾的坡面随机块体,采取设计提供标准处理模式由监理和施工单位现场具体布置的方式实施。

(4) 坡面喷砼支护:斜坡面均采用喷砼或挂网喷砼支护。挂网采用自行推广应用的机编镀锌铁丝网代替传统的钢筋编织网,大大加快了速度,节约了工程投资。

### 6.3 关键施工控制程序与要求

根据模拟开挖及加锚的数值计算和洞井挖与明挖影响分析的数值计算成果,制定:

(1) 明挖程序:自上而下开挖;允许沿船闸中心线分区实施,但相邻区段间开挖下切高差不得大于一个梯段;同区段两闸槽应尽可能平行下挖,若不能平行下挖时,两者开挖高差不大于一个梯段。

(2) 明挖与洞挖的关系:根据结构要求及边坡排水布置,两侧山体及中隔墩内共有3条输水隧洞、36个竖井、14条排水洞及4个通风井。要求洞挖在高程上超前相应部位明挖20~30m;竖井开挖在高程上超前相应部位明挖至少一个爆破梯段。

(3) 明挖与锚固的关系:要求锚固支护施工紧随开挖及时进行。

(4) 关键施工要求:斜坡面采用预裂爆破;马道采用水平预裂;闸墙顶平台预留保护层开挖;直立坡段采用预裂爆破加光面爆破技术。

## 7. 结论

围绕船闸高边坡,先后进行了大量的卓有成效的研究工作,不断回答了工程中的一些重大技术问题,为高边坡设计提供了可靠的依据。目前,船闸边坡已开挖成形,资料显示边坡各项指标均在设计预计范围内,施工期边坡变形值及施工间歇期流变位移值与设计预测基本一致,为同量级;边坡地下水位已降至设计排水线以下。理论与实践证明:

(1) 边坡整体稳定性好,不具备产生大规模整体破坏的条件;受结构面控制的局部块体施加锚固后稳定。

(2) 施工期边坡变形量值为厘米级,运行期变形量值为毫米级;边坡岩体流变性不明显,属稳定型,一般不至对结构造成影响。

(3) 边坡动态优化的基本设计思想正确,在三峡船闸边坡工程中,取得了确保设计质量,节省工程投资的良好效果,具有重要现实意义,值得推广。

(4) 设计原则确定合理;安全度标准选定合适。

(5) 在满足结构布置与要求的前提下开挖,在边坡开挖自稳的前提下施加锚固的设计思路合理,确保了施工安全,节约了处理工程量。

(6) 边坡岩体以排为主,以防为辅的综合排水设计思路正确,实施排水效果显著。

结合边坡监测资料,进一步完善边坡设计,是下阶段将进行的主要工作。

### 参考文献

1. 徐麟祥,杨启贵,三峡船闸高陡岩石开挖边坡设计研究,人民长江,1997.10
2. 长江三峡水利枢纽永久船闸高边坡设计基本方案专题报告,水利部长江水利委员会,1994.11
3. 盛谦等,三峡船闸高边坡开挖与锚固数值模拟及稳定性评价,长江科学院,1994.8
4. 葛修润等,长江三峡永久船闸高边坡三维有限元非线性分析,中科院武汉岩土所,1995.1
5. 任大春等,三峡水利枢纽永久船闸高边坡渗流场三维有限元计算分析报告,长江科学院,1995.1
6. 李思慎等,三峡永久船闸高边坡岩体饱和和非饱和渗流研究(85攻关),长江科学院,1995.12
7. 周维垣等,三峡船闸高边坡三维非线性有限元整体稳定分析,清华大学水利水电工程系,1996.3
8. 张楚汉等,三峡船闸高边坡施工开挖卸荷变形与爆破动力稳定分析研究,清华大学水利水电工程系,1996.6
9. 徐平等,三峡船闸高边坡岩石断裂试验及断裂数值分析,长江科学院,1994.8
10. 周维垣等,三峡船闸高边坡的粘弹塑有限元分析,清华大学水利水电工程系,1995.6
11. 葛修润、任放等,三峡船闸高边坡稳定性考虑脆性破坏特点的二维有限元分析(85攻关),长江科学院,1995.11
12. 朱维申等,三峡船闸高边坡锚杆(索)加固有限元计算,中科院武汉岩土所,1995.5
13. 龚壁新等,三峡工程船闸区地应力场分析,长江科学院,1993.6
14. 夏熙伦等,高边坡岩体流变断裂特性研究(国家自然科学基金项目),长江科学院,1998.8