

# 三峡工程通航建筑物技术设计审查

梁应辰

(中华人民共和国交通部, 北京 100736)

**[摘要]** 三峡工程是当代全球最大的水利工程, 其中的每一项重大工程技术与施工建造, 均可列为世界水利工程的难题和典型案例, 是人类水利工程建设中的一笔宝贵财富。

文章根据1994年开始的三峡通航建筑物技术设计的全面审查, 就通航建筑物总体布置, 船闸输水系统和船闸水力学, 永久船闸高边坡设计, 永久船闸水工结构, 升船机, 技术设计阶段的科研工作成果等6个部分做了阐述和讨论。

**[关键词]** 三峡工程; 通航建筑物技术设计; 永久船闸; 升船机

## 前言

长江是我国东西向交通运输的大动脉, 它对长江流域和大西南, 特别是重庆市的重大作用是无可代替的。三峡工程航运是三峡工程的三大效益之一。当年周恩来总理在审查葛洲坝工程提到三峡大坝时说, 对三峡大坝的建设要战战兢兢, 如履薄冰, 如临深渊, 可不能太自信, 并着重指出, 葛洲坝工程是三峡工程的实战准备。1986~1988年三峡工程重新论证阶段, 航运专家们实践了周恩来总理的这个指示, 取得了丰硕的成果, 为三峡工程航运部分可行性研究阶段打下了基础。1994年以来的三峡工程航运项目技术设计审查, 航运专家们继续实践着周恩来的指示, 尽心尽力地进行了审查工作, 取得了重要的成果。

建坝通航的基本要求是使过坝设计船队(舶)在工程建设过程中和建成后安全通畅通过坝。安全是绝对要保证的, 通畅要求则是相对的, 即要满足

《内河通航标准》和《船闸设计规范》及有关规范的标准和规定。专家组结合三峡工程建坝条件和国情, 比较好地对三峡工程通航建筑物单项工程技术设计进行了审查。

## 1 通航建筑物总体布置

三峡水利枢纽总体布置和三峡水利枢纽通航建筑物总体布置示如图1、2。这两个示意图的通航建筑物总体布置部分都是技术设计审查前的, 其上游防淤隔流堤是按设计部门推荐的方案布置的, 堤左方水域仅包括了永久船闸上游引航道, 即本文所称的“小包”方案。

三峡工程通航建筑物总体布置是三峡工程建成后设计船队安全通畅通过坝的关键, 它要满足不同阶段的设计船队通航水流条件的要求, 而通航水流条件受到诸如不同阶段的船型船队、坝前水位、地貌等和泥沙淤积的制约和影响, 这是与其他国家和一般大型通航枢纽通航建筑物总体布置的基本区别。

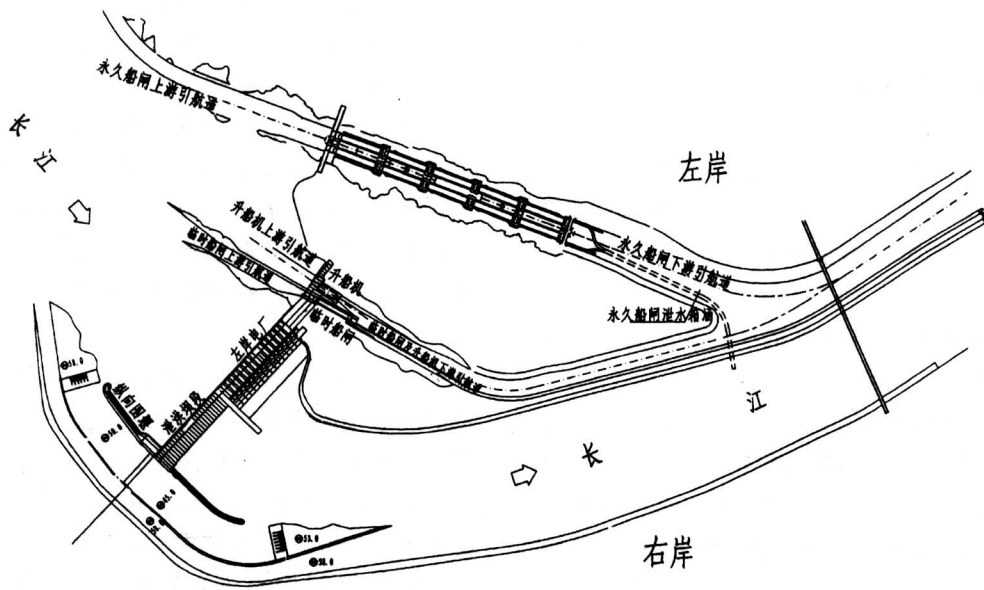


图 1 长江三峡水利枢纽总体布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the general layout of the TGP

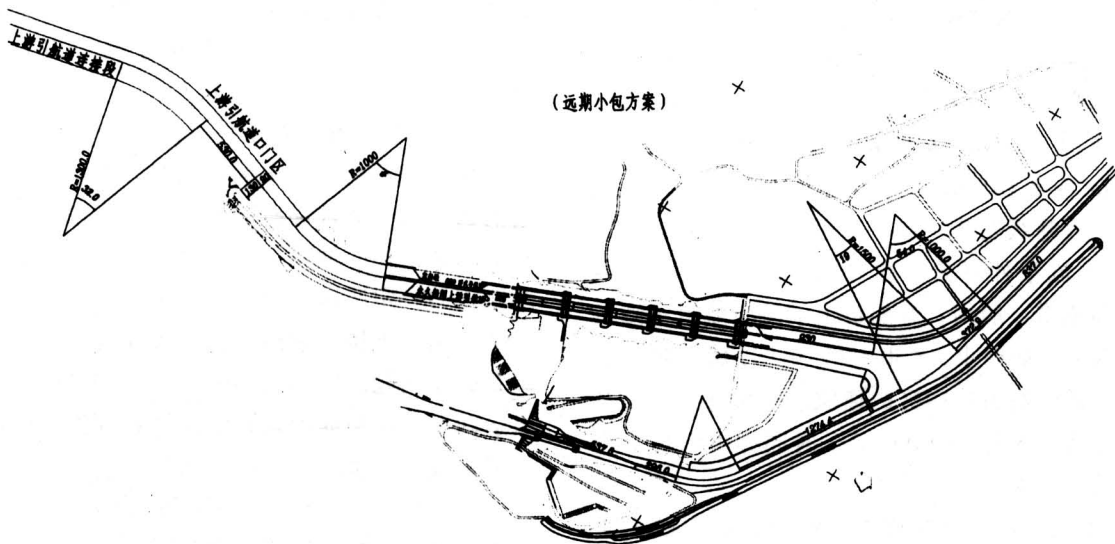


图 2 三峡水利枢纽通航建筑物布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the TGP navigation construction

1.1 对通航建筑物总体布置的审查意见

1) 同意设计推荐的双线连续 5 级船闸Ⅳ线布置方案。上下游口门位置、布置尚需继续进行试验研究优选，在技术设计阶段审定。

2) 坝区泥沙问题等，下阶段应进一步研究引航道口门位置和走向，隔流堤可研究利用开挖弃渣分期建设以免将来水下施工困难。

3) 船闸上游隔流防淤堤对航运很重要，需列入工程项目。其具体布置，通过试验研究优选，其兴建和施工程序，在技术设计阶段审定。

船闸上引航道的隔流堤不宜缓建，但为节约投资可考虑分期修建，例如结合施工过程中的开挖弃渣；首先建成隔流堤的主体部分，以后根据试验优化结果，相机续建，以避免水下施工的困难。

4) 双线船闸输水廊道进水口布置对上游引航道水流条件的影响, 应进行水工模型试验; 在最低通航水位时双线船闸同时灌水, 水面最大纵向流速不大于  $0.5 \sim 0.8 \text{ m/s}$ 。

5) 同意冲沙隧洞进水口与船闸同时兴建, 出水口尾段亦应同时建设, 以避免后期建设时造成断航; 应进一步进行水工模型试验, 优化冲沙隧洞出口处的消能措施。

6) 请研究大坝泄洪与电站日调节不稳定流对航运的影响问题。

7) 永久船闸的防淤、清淤措施目前尚未完全落实, 需要在下阶段进行专题研究, 特别是探索防止泥沙进入引航道的方法; 对于  $135 \text{ m}$  围堰发电和  $156 \text{ m}$  蓄水运用期间的泥沙淤积与处理方法有待研究落实。

8) 升船机进口处的水流条件, 在某些水位流量的组合条件下不利于通航, 需要进一步研究改善流势的途径和方法。

## 1.2 设计单位对总体布置提出的重大修改

1) 水流量与船队的组合。设计提出三峡枢纽的通航标准应基本上与葛洲坝枢纽一致, 最高通航流量  $55\,000 \sim 56\,700 \text{ m}^3/\text{s}$  与  $147 \text{ m}$  水位相结合, 在单向通行  $3\,000 \text{ t}$  级争取达到  $6\,000 \text{ t}$  级船队,  $45\,000 \text{ m}^3/\text{s}$  与  $145 \text{ m}$  水位相结合。升船机的通航流量可与万吨级船队一致, 采用  $45\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2) 水流条件评价。在  $(30+2)$  年\* 上游不建防淤隔流堤, 船闸、升船机上下游引航道水流条件可以满足通航要求,  $(50+4)$  年\* 以后, 船闸和升船机下游引航道口门区的通航水流条件, 采用左进右出方式在流量  $45\,000 \text{ m}^3/\text{s}$  时同样可满足万吨级船队的双向航行。

3) 引航道防淤清淤措施。解决三峡引航道碍航淤积问题已不宜简单采用葛洲坝枢纽动水冲沙的设计, 故拟为后期预留的冲沙隧洞方案应予修改, 因隧洞冲沙方案工程量巨大, 技术条件复杂, 造价昂贵, 冲沙效果很差, 一般只能对引航道口门以内的  $1/3$  淤积量有冲沙效果, 且尚不能完全冲掉。

根据泥沙组建议, 经初步试验和分析, 三峡通航建筑物引航道从比较经济合理的角度来说, 可采用以下综合防淤清淤措施:

保留原定将临时船闸改建为冲沙闸的方案, 在下泄不大于  $2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$  流量, 在航道内形成小于  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  流速情况下辅以机械松动进行冲沙;

在引航道口门附近设置气帘、水帘以破坏异重流进入引航道, 减少引航道泥沙淤积, 初步试验水帘具有明显的减淤效果;

在引航道口门处设截沙槽, 配合排泥设备将异重流在口门处直接引入主河道以减少引航道淤积;

作为基本的清淤手段, 工程自备自航式高性能工程挖泥船, 上游利用汛前, 下游利用汛期低水位和汛末进行挖泥, 维护足够的航深, 经研究已有具体方案。

4) 关于防淤隔流堤兴建时机及其布置。设计提出防淤隔流堤不宜一次建成, 应予缓建或分期兴建, 以免将几十年后可能产生的口门区通航水流条件问题, 转化为船闸一投入运行即会遇到对升船机通航水流条件的影响和在引航道内的水力学问题。关于防淤隔流堤兴建的分期, 倾向于先利用弃碴将隔流堤建至  $130 \text{ m}$  高程并适当加宽, 为后期水上抛填留有足够余地。

## 1.3 专家组主要审查意见

1) 关于通航流量标准。三峡工程坝区泥沙和通航建筑物专家组指出, 三峡工程通航标准可与葛洲坝枢纽三江一致\*\*, 当流量为  $56\,700 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 三峡枢纽坝上水位可定为  $147 \text{ m}$ 。

2) 关于通航水流条件。航运专家们认为, 各科研单位虽然在解决永久船闸和升船机上下游引航道的通航水流条件和碍航淤积问题方面做了大量卓有成效的工作, 取得了丰富的成果, 但对最终解决问题仍有一定距离。建议进一步研究解决三峡工程永久船闸上下游引航道口门区及连接段水流和泥沙淤积碍航问题。1997年5月9日至11日, 泥沙和航运两个专家组联席会议还特别提出隔流防淤堤堤头段暂不填筑至  $135 \text{ m}$  的决定。

在升船机上游也存在通航水流条件问题, 专家们主张选用将升船机上游航道包起来的隔流堤方案。

3) 关于引航道防淤减淤和清淤措施。泥沙和航运两个专家组联席会议指出, 航道泥沙防治十分

\* 考虑到特大丰水丰沙年可能对通航发电的灾难性影响, 决策泥沙模型试验在施放 1961~1970 年系列循环进行试验后 30 年、50 年和 70 年各加一个 1954 年和 1955 年型水沙年, 即文中所指出的  $(30+2)$  年、 $(50+4)$  年和  $(70+6)$  年。

\*\* 葛洲坝枢纽三江标准为:  $45\,000 \text{ m}^3/\text{s}$  流量时, 万吨级船队双向航行,  $45\,000 \sim 60\,000 \text{ m}^3/\text{s}$  流量时, 万吨级船队单向航行,  $60\,000 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $56\,700 \text{ m}^3/\text{s}$  分别为葛洲坝工程和三峡工程的最高通航流量。

重要，坝区泥沙淤积规律已大体清楚，引航道及上下连接段淤积量的大致范围也已基本掌握，应尽早落实防治措施。多数专家认为，采用冲沙与机械清淤相结合的方式，对于解决三峡坝区泥沙仍是缺一不可的。鉴于由临时船闸改建的冲沙闸过流能力有限，冲沙效率不能满足要求，因而认为在永久船闸与升船机之间增建冲沙隧洞，以加大冲沙流量是必要的。建议下阶段落实松动冲淤原型试验和对航行干扰小的挖泥船的研制，并尽快安排隧洞冲沙、冲沙流量和冲沙时机的试验研究工作，为尽早落实解决引航道泥沙问题的综合措施方案提供科学根据。

关于在引航道口门附近设置气帘、水帘以破坏异重流进入引航道，减少引航道泥沙淤积的措施，试验和分析证明效果不理想，操作维修困难，可以否定。

在引航道口门处设截沙槽，配合排泥设备将异重流在口门处直接引入主河道减淤有实际困难，也不推荐应用。

经组织专门课题研究，工程挖泥船在三峡工程上下引航道条件下不能解决泥沙淤积问题。仅用挖

泥船在引航道清淤赶不上汛期干流输沙高峰时期引航道的淤积速度，导致较长时期断航；在引航道内高强度长时间挖泥严重干扰运输的现象无法避免；清淤抛泥与效益之间也无法取得统一。

综合以上科研成果和专家审议意见，仍应按初步设计审查意见解决引航道泥沙淤积问题，即以隧洞冲沙为主，辅以机械清淤。隧洞进水口和出水口尾段亦应同时与船闸同期建成，当前应进一步做好有关模型试验和设计补充工作。

4) 关于上游引航道布置方案和隔流防淤堤线路。泥沙、航运专家组联席会议指出：

鉴于“小包”方案既存在永久船闸上引航道往复波流影响通航的问题，又将升船机置于隔流堤外侧，汛期清淤困难，水流条件和水深都难于满足正常通航要求，不予采用；

多数专家认为，“大包”（见图3）和“全包”（见图4）两方案都具有改善永久船闸和升船机的通航水流条件的类似优点，都是可取的，从配合施工进度考虑，初步确定先以“全包”方案分步实施作为下阶段设计的依据进行工作。

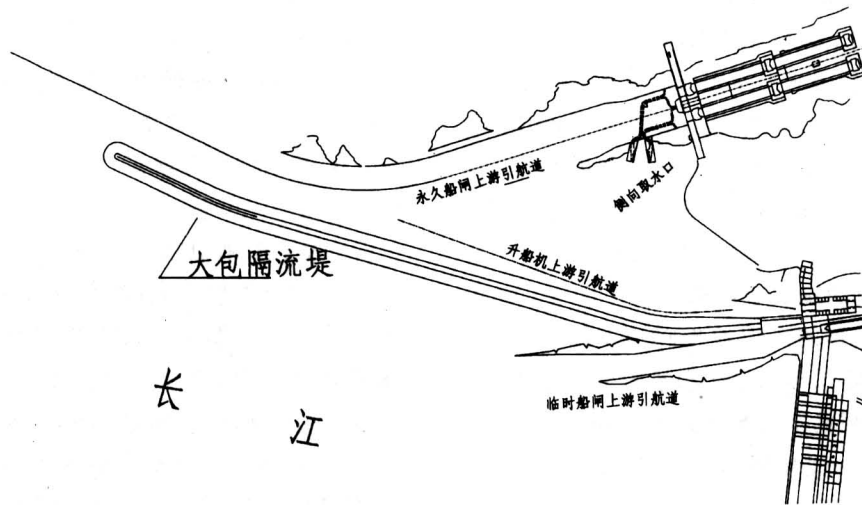


图3 大包方案（永久船闸、升船机在隔流堤内）

Fig.3 Permanent shiplock & shiplift on the inside of the partition

5) 关于工程分期。经过综合比较，确定采用分期连续建设的方案。在初期水库蓄水前将混凝土直立墙和船闸右侧的短堤建成，在水库水位超过135 m以前除堤头段外将全部隔流堤（包括跨越临时船闸引航道的深填方堤段）填筑到135 m高程以上。

6) 关于永久船闸输水系统进水口。设计单位提出的永久船闸输水系统进水口为正面进水，进水口设在永久船闸上游正前方。永久船闸专家组在审查会议上提出，正向进水引航道内通航水流条件将达不到通航水流条件要求，应改为侧向进水，即进水口应移至上游导航墙右侧一段距离，以短隔流堤

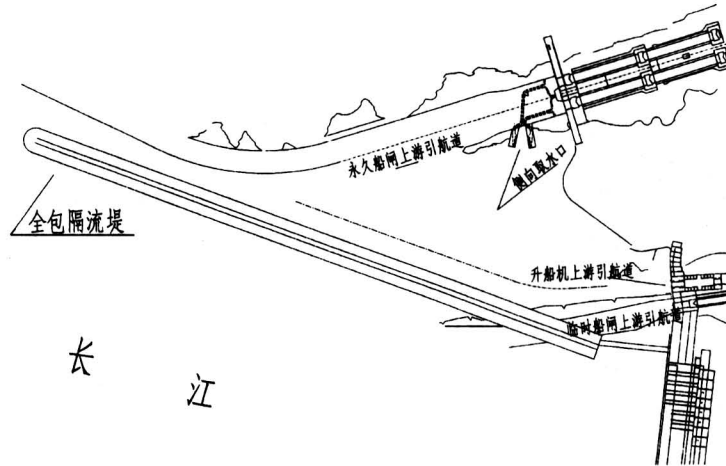


图4 全包方案（永久船闸、升船机和冲沙闸全包在堤内）

Fig.4 Permanent shiplock, shiplift & scouring sluice on the inside of the partition dam

与船闸上引航道隔开。

## 2 关于船闸输水系统和船闸水力学

三峡工程总水头 113 m，永久船闸最大工作水头 45.2 m，一次充泄水最大输水量超过  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，第一闸首人字门最大淹没水深 35 m，这些指标超过了当前世界船闸水力学的综合水平；永久船闸连续 5 级，上游水位变化高达 30 m，下游水位变化 11.8 m，运行过程中充水、补水和泄水都非常复杂。三峡工程永久船闸输水系统和船闸水力学是永久船闸建设中的重大关键技术问题之一。

### 2.1 初步设计审查的主要审查意见

1) 同意设计推荐的等惯性长廊道及四区段顶部出水消能盖板的船闸输水系统布置方案；主廊道宜改用每线船闸两侧输水的布置方案，并通过进一步水力学试验研究，优化输水廊道及阀门井的布置。

2) 船闸输水系统水力学问题涉及船闸运行安全，至为重要，要慎重对待。应进一步进行船闸输水系统水力学试验，研究采取必要措施，避免阀门后空化现象。对输水廊道和阀门的大小、体型、淹没深度、坡度等以及超灌超泄对运行的影响和改善措施，需通过水工模型试验，并要考虑设计、施工等综合因素。最下一级泄水廊道汇入长江的流量，关于下游引航道的运行条件和淤积情况等，应通过试验论证确定。

### 2.2 设计单位对船闸输水系统设计的推荐意见

1) 输水系统进水口和船闸进水。输水系统进水口为正向进水，进水口设于双线船闸的正前方。由于两线船闸第一级同时充水会使上游引航道流速和停靠船舶缆绳拉力超标，推荐两线船闸错开时间充水；三峡船闸输水系统采用等惯性底部纵支廊道四区段分散出水盖板消能方式。

2) 阀门防气蚀措施主要采用降低阀门段廊道高程（阀门初始淹没水深 26 m），快速开启阀门（1 min）和门后廊道顶扩（1:10 顶坡），并辅以通气等措施。

3) 关于船闸泄水，为节约投资，决定旁侧泄水系统采用下游航道底部挖槽浇筑钢筋混凝土箱涵结构方案，涵管断面尺寸为  $9.6 \text{ m} \times 9.6 \text{ m}$ ，穿下游隔流防淤堤通往长江主河道。

船闸设辅助泄水廊道，阀门断面（高×宽）为  $3.60 \text{ m} \times 3.75 \text{ m}$ ，设在最后一个人字门的门龛内，廊道底高程为 51.25 m。出口为喇叭型，以便取水的同时可兼顾门库内的冲淤。

### 2.3 船闸专家组的主要审查意见

1) 关于输水系统进水口。船闸输水系统进水口正向布置满足不了通航建筑物总体布置的要求，应改为侧向进水。通过模型试验表明，如第一级人字工作门关闭，当第二闸首做首级时，输水时间不能满足设计要求，尚需进一步研究，进行必要的模型试验和设计优化工作。

2) 关于闸室输水型式。现定的三峡工程船闸输水型式为等惯性底部纵支廊道四区段分散出水盖

板消能方式，实际是葛洲坝枢纽一号船闸所用的方式，它的优点是流量系数大，输水时间短；缺点是四区段之间和上下人字工作门闸室段都基本是泥沙淤积区，清淤量大，而且困难，闸室底板以上的输水管道高度大，开挖量大，输水支廊道复杂，施工难度也大。科研试验单位提出的三峡永久船闸腔体水平分流带，纵坡的闸底纵支廊道二区段闸室出水，及高效能盖板减少闸室泥沙淤积的输水系统布置方案，对闸室防淤、减淤效果较好，输水高度也有所减小，开挖量减少，施工难度也降低了。因此，如果时间来得及，可以考虑修改设计，改变闸室输水方案。

3) 关于输水阀门防气蚀空化和振动措施。通过大量科研试验，采取了综合措施，即采用反向弧门型式，阀门淹没水深 26 m；阀门后采用顶扩和底扩，以 2 min 左右快速开门（受启闭机械制约，不允许阀门开启更快），并采用门楣通气措施等；要求利用 1:10 阀门模型试验，对门型底缘型式和吊杆结构等做进一步的科研试验。

4) 关于输水系统超灌超泄问题。与单级船闸不同，超灌超泄在三峡工程连续 5 级船闸又同时采用人字工作门条件下，需要解决的重大技术问题是，既要保证人字工作门、启闭机械和电气设备安全，更要满足闸室内船舶停泊条件的要求，特别对客船和装有危险品的船舶。审查同意设计提出的采用提前关闭阀门解决超灌超泄措施，但为保证万无一失，建议要有具体措施细节，包括借助数学模型等手段，并进行专门鉴定和验收。

5) 关于船闸泄水。审查要求对泄水主廊道动水关门的水击及压力进一步解决好，并应做到与冲沙隧洞出水口尾段和消能设施布置不发生矛盾。

6) 关于输水系统维修。考虑到三峡工程双线连续 5 级船闸输水系统的复杂性，为有利船闸的运行和管理，审查特别提出，应对输水系统、闸阀门金属结构、启闭机械和电气做出完整的方便易行的检修设计，并从便于施工、降低造价和便于维修出发；同时，对主廊道设计进行必要的优化。

### 3 关于永久船闸高边坡设计

永久船闸开挖边坡最高达 170 m，是船闸设计中的重大关键技术问题之一，是船闸水工结构的重要组成部分。初步设计审查认为，只要精心设计，精心施工，高边坡设计方案是可以成立的，并提出

了如下主要意见：

对永久船闸高边坡稳定问题，应补做必要的地质勘测工作，进一步查明影响边坡稳定的主要结构面分布，岩体水动力学特征，岩体及结构面力学特征等；补充地应力测试和分析；对边坡稳定性作出确切评价。

防渗和排水是改善和提高边坡稳定性的一项有效处理措施，是高边坡处理的首选工程措施。坡面防渗和山体排水对降低边坡岩体内地下水压力效果明显，两项措施相辅相成，缺一不可。因此，应重视和优化岩体和砌衬墙后的排水系统设计，加强坡面保护和表面排水。

适当调整边坡和马道宽度；边坡表面因开挖卸荷和爆破影响将是明显的，在一定深度范围内裂隙发育，岩体完整性降低，坡面采取系统锚杆进行加固是必要的。施工中应分层开挖，边挖边锚边观测和进行地层测绘，发现不稳定岩体或异常情况及时进行分析，必要时采用深锚或预应力锚索。

船闸高边坡开挖施工，应在已有设计、科研成果的基础上，制定正确的施工方案和监测手段，提出专题报告，并尽快安排现场试验。

设计单位 1994 年 11 月根据以上初步设计审查要求和意见，提出了永久船闸高边坡设计基本方案专题报告，并扼要纳入永久船闸单项工程技术设计报告的船闸高边坡设计中。

审查认为，设计单位在较短时间内对船闸区做了大量地质勘探、测绘和分析研究等工作，应予以肯定。对于工程地质和高边坡提出如下审查意见：

1) 关于永久船闸高边坡基本地质条件。设计单位查明了船闸区岩性、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。同意对船闸区工程地质宏观评价意见，即组成船闸边坡的花岗岩体除边坡上部风化壳以外，微新花岗岩岩体完整，强度高，无大断层，主要断裂结构面与边坡走向成  $30^\circ$  以上交角，结构面性状好，已测到的地应力方向一般与坡夹角较小，总体看对边坡稳定是有利的。地下水位较高，渗流对边坡稳定影响较大，采取可靠的排水措施可以解决。边坡不稳定块体可加固处理，具备形成高边坡的基本地质条件。鉴于人工开挖高陡边坡达 170 m，其开挖边坡稳定和应力变形问题仍

应十分重视。

2) 关于船闸高边坡稳定的地质问题可分为:

整体稳定。根据对断层、岩脉组合构成的宏观分析,整体稳定问题不大。鉴于 NWW 向构造与船闸边坡交角小,长度在 50~100 m 的 III<sub>1</sub> 级结构面仍有分布,必须高度重视,结合施工进一步查明。

局部稳定。专题报告提出的定位块体、半定位块体、随机块体和各定位、半定位块体具体的边界条件进行稳定分析是合适的,也同意新建议的力学参数数值,并建议在施工过程中进一步核定有关力学参数作为稳定计算的依据。

3) 高边坡。同意设计提供的高边坡轮廓布置,应力应变趋势和加固措施。在高边坡分析计算中采用的抗剪参数和安全系数要配套。

4) 塑性区。高边坡分析得出的塑性破坏区基本可信,对塑性区部位的应力状况(拉应力和剪应力)需进一步摸清。设计在岩体稳定计算中采用适当降低该部位抗剪参数(改用残余强度)基本上是合适的,要特别重视对塑性区的性状、范围、机理以及温度作用及时间影响,并应做进一步研究。考虑徐变产生的变形值对船闸极为重要,需根据具体地质情况再进一步落实。

5) 岩体力学。应予补充完善,并对以下问题应进一步分析:

对一些关键岩体、岩性物理力学参数的设计取值及其根据,要求作进一步论证;

对边坡整体稳定和岩体开挖时的局部破坏问题,要求再就其他多种可能的地质模型及其计算图式作必要的补充考虑,并列明相应的分析结果;

研究陡坡部分岩体在施工中因坡面岩块脆性破坏导致崩落的可能性;

深化探讨山体长期蠕动和岩体软弱结构面流变抗剪强度降低,对闸首结构时效变形不利影响的估计与评价;

对相隔墩塑性区的岩体裂损机理及其对相隔墩强度、稳定与不利影响的估计和评价;

对维护边坡岩体截、防、排水系统以及闸墙背后排水网络泄水通畅有效性及其相应的技术措施;

对边坡和相隔墩岩体治理及支护加固方案,特别是岩锚方式和锚筋数量的优选;

各种地下工程施工和输水运营对边坡和中墩稳定、变形与渗流场变化的影响与分析;

开挖爆破施工对边坡稳定的不利影响,须认真做好施工爆破设计并精心施工;

补充地应力资料及分析论证。

6) 施工及动态设计。强调贯彻科学施工和文明施工原则,要边开挖边进行地质编录,边观测边进行地质预报及支护。如发现异常,可再补充进行支护;建议施工采用控制性爆破,施工及爆破开挖等参数,要经过现场试验并在施工中根据具体情况随时调整;加强施工质量监督,在施工开挖、监测反馈和进一步地质勘察过程中,应随时按照动态设计原则修正有关参数,并贯彻于高边坡和闸首主体部分施工的总过程。

排水洞和排水幕的形成是边坡稳定的重要保证,并可开展地下水和边坡变形等一系列监测。并可进一步揭露高边坡及闸首闸室的地质情况。地下开挖应先于地面工程,并应尽快形成。

高边坡审查设计中,还提出:

应十分重视 NWW 走向的节理,这组节理对边坡稳定与岩石力学有较大的影响,对边坡稳定十分敏感;

应对船闸区地应力提出实测和分析资料;

设计单位应提出专门对高边坡的受力情况和大坝基岩的区别论证,因为设计单位认为,卸荷回弹与长期流变引起的岩体及其结构面物理力学参数降低和裂隙扩展,边坡岩体和坝基岩体有较大差异;

建议补充高边坡的块体稳定、岩体应力、应变、渗流分析成果专题报告;

建议提出船闸地下工程在结构上和施工中对边坡影响的专题报告。

#### 4 关于永久船闸水工结构设计

永久船闸水工结构要满足船闸有关尺度和输水系统的要求,并受船闸高陡边坡设计的影响。工程量大,结构复杂,特别是闸首和输水廊道阀门段,更应作为重点进行研究。现略去初步设计审查意见。

关于船闸水工结构设计,共进行了三次专家组评审,主要审查意见如下:

1) 闸首结构。闸首结构是水工结构中最重要也是最复杂的部位,是水工结构审查的重点,须注意以下几点:

设法改善边墩的稳定性,支持体的整体性及刚度,确保顺水流方向的自身稳定性,包括研究闸首

采用整体式或改变分缝位置等措施；

对墙后渗压强度、温度影响进一步研究；

对各种不利工况的补充完善；

对闸首排水及细部结构等进行优化；

考虑地质情况在开挖后可能与原设计情况发生一些变化，弹抗及弹模等参数宜有一定变动范围；

第一闸首中隔墩岩体厚度仅 20~26 m，高约 40 m，是否要挖除需进一步研究。

2) 高边坡与闸首的关系。考虑到高边坡中局部岩块有可能失稳，对闸首部位应绘制地质平、剖面图，对岩体稳定进行具体分析，同时连同该部位的闸首、闸室等进行研究。

与闸首相连的岩体（高边坡）应作为建筑物地基考虑其稳定，除按原规定安全系数设计外，尚应采用与大坝相同的安全系数进行复核。

应保证人字门的正常运行，并将所承受的巨大水压力安全地传递给闸首混凝土结构，要求闸首支持体结构（人字门支座处）在各种工况和荷载组合下的变位最小。重视高边坡蠕变对支持体引起的变形，要对闸首结构形式采取有效措施，使人字门在闸墙变位情况下，留有一定调整余地。

3) 输水隧洞及竖井。建议调整弹性抗力系数，对隧洞及竖井进行敏感性分析，以供比较和选用。

4) 关于第二闸首人字门移位安装方案。基本同意设计单位推荐采用一道人字门方案，但需进一步优化。

考虑到人字门移位安装时升船机尚未投产，船型船队较目前又不会有很大变化，一线船闸长期运行将无法适应运输要求，对国民经济发展影响巨大。建议设计单位调查研究，进行施工方案优化，尽量压缩人字门移位安装和本闸停航时间；然后向三峡总公司提出补充报告并最后组织审定。

5) 尚待审查的船闸水工结构重大技术项目有：

冲沙隧洞的进水口、出水口（包括消能工）和隧洞技术设计；

输水系统进水口和出水口（可能与冲沙系统出水口及消能工的相互影响）；

船闸闸室输水系统与葛洲坝 1 号船闸闸室输水系统基本相同，实践证明淤积部位较多，淤积数量较大，形式不理想，宜进行改进。

此外，有的专家还指出了一些重要意见，如船闸中隔墩改为混凝土，对边墙、底板等分缝分块结合设计及温度应力进行研究等。

## 5 关于升船机上闸首地基抗滑稳定

三峡工程垂直升船机上闸首，同时又是大坝挡水建筑物，其性质、部位都非常重要。

升船机上闸首区段有坝区最大的  $f_{23}$  断层和性状最差的  $f_{215}$  断层穿过，并在本区段相交；还有不容忽视的  $f_{603}$ ， $f_{548}$ ， $f_1$ ……等断层，地质情况极为复杂，是坝区地质条件极差的区段。此外，升船机上闸首受外部荷载很大，受荷载条件也很复杂，因此，对升船机上闸首地基抗滑稳定应给予充分重视。

1) 1996 年 9 月设计单位提出了升船机上闸首地质专题报告，专家的审查分析认为，该报告对上闸首地基的工程地质条件阐述清楚，抗滑稳定及变形问题论证合理，地质资料可以作为设计的基本依据。审查的意见主要为：

a. 基本同意专题报告的工程地质分析评价。上闸首地基主要为微风化到新鲜的闪云斜长花岗岩体，夹有煌斑岩脉、花岗岩脉和辉绿岩脉。岩体中有陡倾的 NNW 向的  $f_{23}$  断层并与 NE-NEE 向的  $f_{215}$ ， $f_{603}$ ， $f_5$ ， $f_1$ ， $f_6$ ， $f_{548}$  等断层破碎带相交汇，还分布若干条缓倾下游的绿泥绿帘石及钙质充填的硬性结构面。其中 NNW 压扭性的断层  $f_{23}$  胶结较好，NE-NEE 向的  $f_{215}$  张性、张扭性等断层破碎带呈疏松-半疏松状态。岩体微透水，断层局部为严重透水，特别是张性、张扭性破碎带透水性较大。总体上具备修建上闸首的工程地质条件，但存在闸基抗滑稳定、变形、渗流等工程地质问题。鉴于闸基目前右侧及下游临空，闸基面已开挖到位，还存在因应力释放引起的局部岩体松弛，以及坡脚应力集中问题。

b. 基本同意报告提出的浅层滑动和深层滑动的地质结构模式。 $f_{23}$  与  $f_{215}$  构成上游切割面；承船厢处的  $f_{11}$  断层，可能成为深层滑移的边界，缓倾下游的  $T_1$ 、 $T_{12}$ 、 $T_{17}$ 、 $T_{11}$ 、 $T_{46}$  等构成浅层底滑面，按确定性地质模型连通率为 70%~100%；深层阶梯形底滑面，按确定性地质模型连通率为 60%~63%；顺水流方向的 NW 向侧向切割面不发育。建议尽快清除高程 95 m 平台和高程 48 m 平台堆碴，以核实各组断层和缓倾结构面的展布，特别是有无较大的 NW 向的构造。

c.  $f_{23}$  断层与  $f_{215}$ 、 $f_{603}$ 、 $f_{548}$  等断层交汇带，以及断层、缓倾结构面的不均匀分布，各部位岩体变



形模量差别较大, 闸基存在不均匀变形问题, 对断层交汇带、断层以及裂隙密集带必须进行工程处理。提高岩体整体刚度, 消除不均匀变形影响。

d. 同意报告提出的施工程序, 先做好岩体的侧向约束。

e. 对闸基处理的意见为: 建议下游面跟部加固措施待深层抗滑稳定分析后确定; 断层置换洞塞开挖将损伤岩体, 建议研究灌浆处理的可能性, 可先进行试验性灌浆, 取得灌浆技术参数和灌浆效果指标, 也可研究高压旋喷灌浆处理措施, 对于右下角的  $f_{548}$  断层构成的三角岩体, 也建议加大开挖深度; 右侧及下游临空面出露的断层应当先做开挖回填处理, 对长大裂隙进行锚固后再浇混凝土;  $f_{23}$  与  $f_{215}$  在上闸首的前缘分布并交汇, 需研究帷幕布置、深度、排数和灌浆材料, 以便有效的进行防渗, 为改善抗滑稳定条件和防止断层破碎带的渗透破坏, 需要设置排水系统; 建立上闸首岩体不同部位、不同深度的长期监测系统, 收集和分析变形和地下水动态资料。

上闸首岩体既是闸基, 也是挡水结构的一部分, 因此, 必须对岩体中的断裂, 精心研究处理方案、施工程序和有效的施工方法, 避免进一步损害岩体, 改善岩体的工程地质特性。

2) 在审查升船机上闸首地质专题报告的基础上, 召开了升船机上闸首技术讨论会, 提出了升船机上闸首技术要点:

a. 尽快完成升船机开挖边坡北坡的排水洞及排水幕工程, 以消除低山体地下水对边坡稳定及裂缝发展的不利影响。加强边坡的监测工作, 查明变形及错动等发展并及时将有关信息反馈给设计及有关方面以指导下步工作。

b. 鉴于升船机上闸首对变形的要求, 应将高程 48~95 m 的基岩视为升船机上闸首的一部分, 对该部基岩所存在的断层及地质缺陷处理, 应以避免爆破扰动基岩为原则, 提出固结灌浆(水泥和化学)和高压旋喷的处理措施, 建议先进行试验。

c. 有专家建议上闸首高 137 m, 长 125 m, “高跟”宽 30 m 可适当减薄; 也有专家认为上闸首结构复杂, 要认真对待, 建议通过上述几种模式计算比较选出一种模式用材料力学法对上闸首应力及稳定进行较深入的计算, 以论证上闸首体型的合理性, 需要对具体尺寸可进行适当修改。在此基础上再进行有限元的分析, 参照这些分析结果对分

缝结构型式, 灌浆排水帷幕位置可进行适当优化。此外对闸室边墙, 底板等主要结构以及锚杆锚索等进行分析论证。

d. 上闸首的 5 种抗滑稳定分析模式原则合理, 但建议再补充从倾斜底滑面延伸并从承船箱底板逸出的模式, 并对其进行敏感性分析。

e. 有专家建议: 为分清左非 8 号坝段对升船机上闸首抗滑稳定的作用, 建议对左非 8 号坝段的抗滑稳定进行复核; 由于左非 7 号坝段是建在山体开挖的斜坡上, 应研究其侧向稳定对升船机上闸首的不利影响; 升船机上闸首及相邻的 8 号、7 号等坝段位于岸坡, 左右地基高程相差较大, 坝底受侧向力(顺坝轴线向)宜对沿坝轴线方向的稳定进行复核, 或将接近基础部分横缝灌浆连成一体; 升船机上闸首基岩右下角出露应采取封闭的措施; 做好升船机上闸首基岩的排水措施, 以减少渗透水扬压力对抗滑稳定的不利影响, 同时也应分析排水失效对抗滑稳定的不利影响。

## 6 技术设计阶段的科研工作成果

三峡工程通航建筑物建设规模宏大, 技术复杂, 有很多技术问题属世界水平, 主要有:

长江三峡工程河段为多沙河流, 年均输沙量达  $5.3 \times 10^8$  t, 并集中于汛期。泥沙淤积量大, 对坝区通航水流条件有非常严重的影响。

长江三峡河段汛期流量大, 最高通航流量定为  $56\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$ , 引航道及其口门区的流速流态包括往复波流等极为复杂, 影响通航。

船闸尺度大, 输水量大, 一次充(泄)水最大达  $23.7 \times 10^4\ \text{m}^3$ ; 阀门最大工作水头达 45.2 m, 最大补水层厚度为 13.35 m。

船闸高陡边坡最大开挖高度达 170 m; 升船机最大工作水头达 113 m, 承船厢带水总重 11 800 t。

某些部位地质条件极为复杂, 如升船机上闸首等; 某些结构技术要求很高, 如升船机上闸首、塔柱、船闸闸首, 闸室衬砌墙、隧洞冲沙出口消能工等。

三峡工程通航建筑物技术设计审查工作中, 也是科研工作最集中和提出科研成果最丰富的阶段, 同期补充了大量的勘测工作。

## 结语

由航运和泥沙专家组审查推荐采用“全包”方

案，并已由三峡总公司审定，同时据此取消了永久船闸上游的 660 m 短堤，永久船闸输水系统进水口因此由侧向进水改为正向进水。

目前，三峡工程通航建筑物泥沙模型试验终结

试验正在进行，还要进行冲沙试验。另外，随着时间推移，三峡工程升船机科研和技术设计审查工作将恢复进行，即三峡工程通航建筑物技术设计审查今后还有一定的工作。

## The Examination of the Technical Design of the Navigation Construction in the Three Gorges Project

Liang Yingchen

(Ministry of communications, Beijing 100736, China)

[Abstract] The Three Gorges Project (TGP) is the greatest water conservancy engineering being built in the world. Each of the technical design and the engineering construction in the project can be a worldwide key technical difficult and a representative case of water conservancy engineering.

Based on the overall examination of the Three Gorges Project navigation construction technical design, which started in 1994, the following 6 topics are described and discussed: 1) the general layout of the TGP navigation construction; 2) lock's filling and emptying system and the lock's hydraulics; 3) the design of the high slope of the permanent ship lock; 4) the hydro-structure of the permanent ship lock; 5) shiplift; 6) scientific research and its achievement during the technical design stage.

[Key words] Three Gorges Project; technical design; navigation construction; permanent shiplock; shiplift

### 《中国工程科学》2000 年第 6 期要目预告

中国开创的抗爆钢复合材料压力容器技术  
..... 朱国辉  
对下一代坦克火力系统发展的思考 .....  
..... 孟慎非  
生物材料的仿生构思 ..... 姚康德等  
大气探测系统设计和工程建设 ..... 郑国光  
二元光学在强激光波面整形中的应用 .....  
..... 金国藩等  
中国大坝的安全和管理 ..... 吴中如  
叶轮机械弯扭叶片的研究现状及发展趋势  
..... 王仲奇等  
二次调节扭矩加载系统动态特性的研究 ...  
..... 战兴群等

动态设定型板形板厚自动控制系统 .....  
..... 张进之等  
矿浆电解过程的浸出机理 ..... 张英杰等  
我国农村地区能源形势分析 ..... 邓可蕴等  
新型苯加氢反应器的研究 .....  
..... A. M. Anter 等  
电气化铁路既有线扩堍石方控制爆破安全快速施工技术 ..... 何广沂等  
发展燃料酒精的建议 ..... 章克昌  
关于农业信息科学形成的讨论 ... 王人潮等  
超环面行星蜗杆传动研究综述 ... 许立忠等