

# 青草沙水库建设中的技术难题研究

卢永金<sup>1</sup>, 顾金山<sup>2</sup>, 顾玉亮<sup>2</sup>, 刘新成<sup>1</sup>, 李锐<sup>1</sup>

(1. 上海市水利工程设计研究院, 上海 200061; 2. 上海青草沙投资建设发展有限公司, 上海 201206)

**摘要:**青草沙水库是建设在潮汐河口江心的大型蓄淡避咸水库, 以水力充填法构筑堤坝, 具有地形冲淤多变、缺少石料和水上施工等特点。运用数值模拟、物理模型试验和现场试验等手段, 提出多因素、多尺度、多层次的系统综合技术路线, 研究了青草沙水库的河势滩势变化、咸潮入侵规律、水力充填深水堤坝的结构及渗流特性、特大龙口布置与截流工艺等关键技术难题, 有关解决方案在水库建设与安全运行管理中得到应用。

**关键词:**水力充填堤坝; 龙口; 堤坝防渗; 防冲保滩; 长江口; 蓄淡避咸水库; 青草沙水库

**中图分类号:**TV62      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2013)03-0045-05

**Study on technical problems of reservoir and dam construction for the Qingcaosha Reservoir**//LU Yongjin<sup>1</sup>, GU Jinshan<sup>2</sup>, GU Yuliang<sup>2</sup>, LIU Xincheng<sup>1</sup>, LI Rui<sup>1</sup>(1. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute, Shanghai 200061, China; 2. Shanghai Qingcaosha Investment Construction and Development Co. Ltd., Shanghai 201206, China)

**Abstract:** Qingcaosha reservoir, located in the middle of tidal estuary, is a large reservoir for storing fresh water and holding back saltwater. It has hydraulic fill dams, and is characterized by the changeable tidal flat, lack of building stones, and over-water construction. Based on the numerical simulations, physical models, and field tests, a multi-factor, multi-scale, and multi-level comprehensive technological route was proposed to study the variation of river regime, saltwater intrusion laws, structures and seepage characteristics of the hydraulic fill deep water dam, and the layout and closure of the oversize closure gap. The results of this study were used successfully to guide the construction and safe operations of reservoirs.

**Key words:** hydraulic fill dam; closure gap; dam anti-seepage; erosion and beach protection; Yangtze River estuary; reservoir for storing fresh water and holding back salt water; Qingcaosha Reservoir

## 1 工程概况与主要技术难题

长江口河段长约180 km, 呈三级分汊、四口入海的扇形分汊河势格局, 共有北支、北港、北槽和南槽4个入海通道。青草沙水库位于长江口南支下段南、北港分流口水域, 由长兴岛西侧和北侧的中央沙、青草沙以及北小泓、东北小泓等水域组成。

青草沙水库总面积66.15 km<sup>2</sup>, 设计总库容5.24亿 m<sup>3</sup>, 有效库容4.35亿 m<sup>3</sup>, 供水规模719万 m<sup>3</sup>/d。水库由中央沙库区和青草沙库区组成, 环库大堤包括南堤、西堤、北堤、东堤及长兴岛海塘, 总长48.5 km, 其中青草沙库区新建北堤、东堤22 km, 加高加固老堤26.5 km。

水库设有两个取、排水口, 分别位于北堤上、下端。上端取水口含有设计流量为200 m<sup>3</sup>/s的泵站和净宽为70 m的水闸; 下端设净宽为20 m的水闸。输

水系统进水口采用输水闸井形式, 输水闸净宽24 m。

本工程是国内外迄今为止建在潮汐河口江心最大的蓄淡避咸水库, 在建设条件、堤坝结构、施工和运行管理等方面有其自身的特点和技术难点, 主要表现在以下几个方面:

**a. 水文与河势特征。**青草沙水库地处长江口江心, 南、北港分流口暗沙众多, 河床泥沙可动性较强, 受径流、潮流以及风浪作用, 流态复杂, 互动因素较多, 水动力条件、咸潮入侵规律和河势演变等十分复杂。因此, 需在广泛调研和收集资料的基础上, 采用多种手段分析预测河势滩势变化和咸潮入侵规律, 结合长江口综合整治、水库蓄淡避咸功能及建设运行管理等方面的需求, 制定出科学合理的选线选址、水库水位、取水调度、工程规模和防冲护滩方案。

**b. 施工顺序与防冲保滩。**新建堤总长达22 km, 建在河口江心涨潮沟外侧的沙脊上, 并穿越

多道深槽泓沟。由于涨潮沟是特有水动力作用下的一种不稳定平衡状态,潮流场、波浪或泥沙条件的改变,极易引起带状沙脊冲刷,而且一旦冲刷启动,冲刷的速度往往很快,一两个潮汐周期可能引起大片沙脊消失。施工筑堤的阻水扰流也极易引起沙洲冲刷和河势调整。因此,需研究合理的施工顺序,选择合适的大堤施工作业面和进占速度控制要求,以及适宜的防冲保滩结构,维护沙洲或沙脊稳定,避免施工过程中和完工后围堤沿线滩地冲刷和河势急变。

c. 深水筑堤结构与工艺。新建东堤滩面高程约为-10.5~-5.0 m,横穿涨潮沟深槽,全长约3.0 km,属于深水筑堤。工程所在区域水深、浪大、流急、地基软弱、施工作业面窄,而且缺乏石料,没有陆上推进筑堤的条件。为此,需针对建设条件探索研究合适的堤身结构形式和建造工艺。

d. 渗流特性与防渗。新建大堤22 km,需承受水库内外7.0~8.0 m的双向水头作用。新堤采用水力充填管袋斜坡堤结构,堤身两侧及水下部分主要由土工织物管袋充填砂土堆叠而成,堤身中上部由砂性土散吹形成,其渗透规律不同于一般土坝。因赶潮施工,质量控制较难,加上地基土多为砂性土或者粉性土,极易发生渗透破坏。在潮汐河口以水力充填法建设水库堤坝的类似工程经验不多,其渗透特性、渗流计算、渗透稳定控制标准以及可大规模施工的可靠渗控措施,都是需要攻关研究的课题。

e. 龙口设置与截流工艺。青草沙水库在截流期设计纳潮量约3.0亿m<sup>3</sup>/d,设计截流流速高达9 m/s左右。与大江大河径流式水库合龙相区别,本工程龙口受潮汐半日潮往复流作用,合龙时机有周期性,适宜的连续作业天数6~8 d,且宜在岁末年初小潮汛期施工;工程区缺乏石料和陆上抛石作业条件;软土地基易冲难护,且一旦发生冲刷极难控制。因此,龙口的选址、规模、护底结构及截流方式是本工程设计核心内容之一,是整个水库工程建设的最大关注点。

## 2 研究内容和技术路线

针对上述5类技术难点和需求,开展了长江口青草沙水域水文水动力及咸潮与河势特性、潮汐河口水库堤坝与护滩工程、潮汐河口水库水力充填堤坝渗流控制、潮汐水流作用下特大龙口的设置及保护与截流等关键技术专题研究(表1)。

各专题的研究内容涉及的因素复杂,并且常具有不确定性。为此,整个研究有针对性地采用了现场测验、历史资料对比与统计、多尺度多重嵌套和多

表1 青草沙水库建设关键技术专题

| 专题名称                       | 研究内容                   |
|----------------------------|------------------------|
| 长江口青草沙水域水文水动力及咸潮与河势特性研究    | 特征潮位与典型潮型过程拟定          |
|                            | 波浪特性及波浪要素计算            |
|                            | 长江口潮流场及泥沙输移通量特征        |
|                            | 长江口咸潮入侵规律及青草沙水域典型咸潮过程  |
| 潮汐河口水库堤坝与护滩工程关键技术研究与应用     | 河势演变特征与工程方案相互影响分析      |
|                            | 青草沙水库工程河势滩势分析          |
|                            | 青草沙水库选址选线方案            |
|                            | 潮汐河口特大型水库堤坝施工顺序        |
| 潮汐河口水库水力充填堤坝渗流控制关键技术研究与应用  | 深水筑堤关键技术               |
|                            | 潮汐河口保滩护底关键技术           |
|                            | 水力充填堤坝渗透特性             |
|                            | 水力充填堤坝渗流数值模拟技术         |
| 潮汐水流作用下特大龙口的设置及保护与截流关键技术研究 | 深厚透水地基上复杂结构堤坝渗控措施      |
|                            | 防渗墙质量检测方法及评价体系         |
|                            | 潮汐河口特大型水库龙口选址与规模研究     |
|                            | 潮汐作用下特大龙口保护与截流结构及工艺    |
|                            | 潮汐河口特大型水库龙口水力特性研究与截流预报 |

维水流数值模拟、多尺度正态或变态水动力物理模型试验、土固耦合三维有限元模拟、现场试验工程等多种手段和方法,理论分析与数值模拟、物模试验相结合,或层层深入,或相互验证,系统研究,综合分析。各专题研究内容、方法及其技术路线分别见图1~4。

## 3 研究成果

在河势分析、龙口高速水流、河势演变机理、龙口护底、大堤防渗等方面的研究取得了突破,主要体现在以下几个方面:

a. 揭示了长江口工程区复杂的“水沙盐”特征规律和建库的基本条件,即该区域水质优良,大多时间达Ⅱ类水质,除冬春季有间隙性咸潮入侵外,常年淡水资源丰富,按97%的水量保证率、以1978年冬至1979年春为典型年进行计算,水库取水口水域水体含氯度高于250 mg/L,不可取水的最大连续天数为68 d;工程区沙洲移动、河势演变和河床冲刷游荡规律复杂,但总体上南、北港分流口头部以20余年为周期,“上提下退”来回演变,演变范围20 km左右,抓住河势格局相对平顺稳定的时机,及时在南、北港分流口水域沙洲外围沙脊上顺势布置堤线,可以建设大型水库并有利于稳定河势和促进长江口的综合整治。

b. 揭示了典型的咸潮入侵过程,并制定了合理的水库调度运行规则,据此以水库建设和运行成本低、水质保持为目标,系统地优化确定了水库特征水位和配套的取、输水泵闸规模<sup>[1-3]</sup>,水闸自流取水常水位2.0~4.0 m,死水位-1.5 m,泵站蓄水最高水位7.0 m。实现了水库水闸自流、泵站机动的最大化节

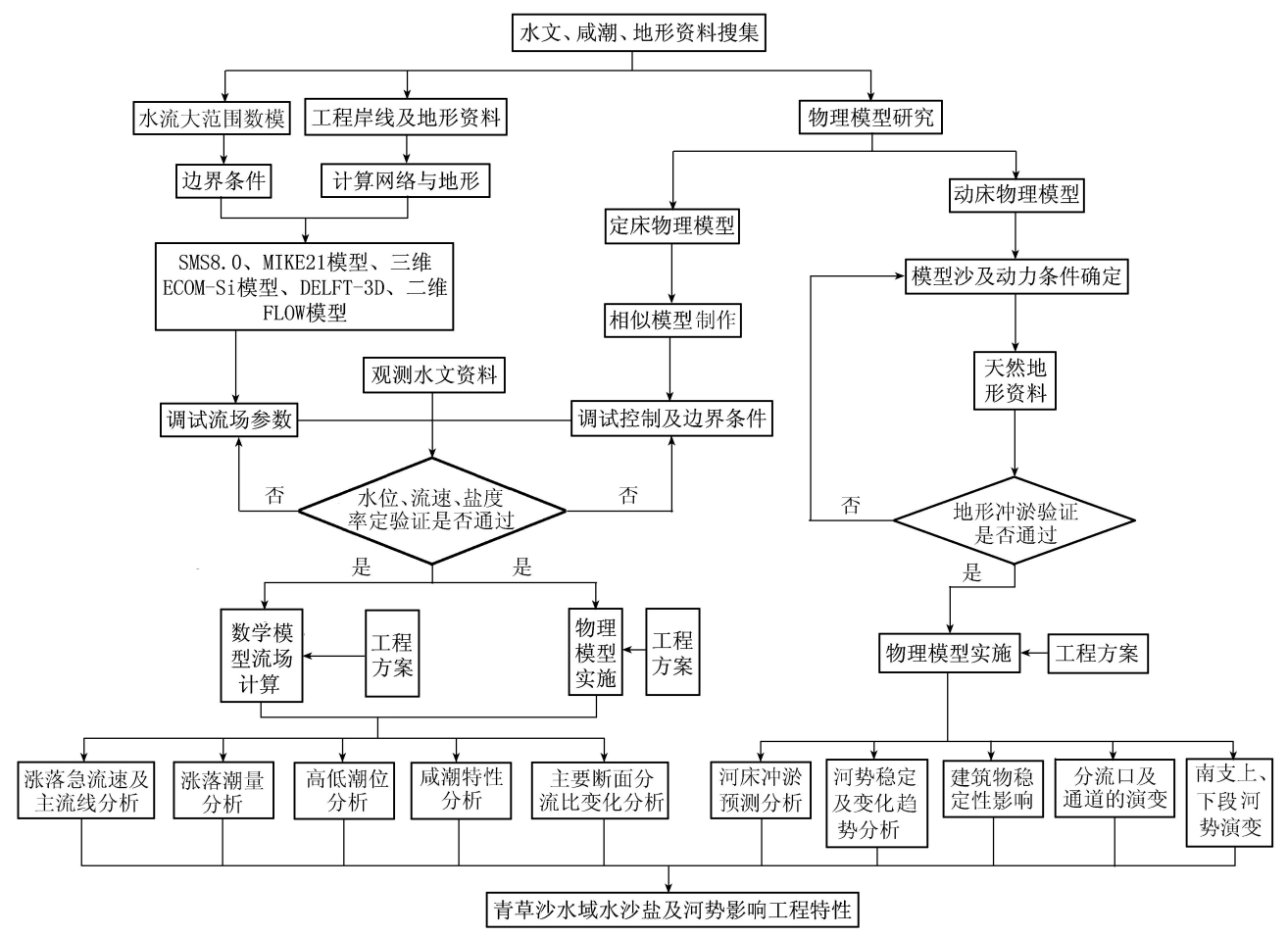


图 1 水文水动力及咸潮与河势特性研究的技术路线

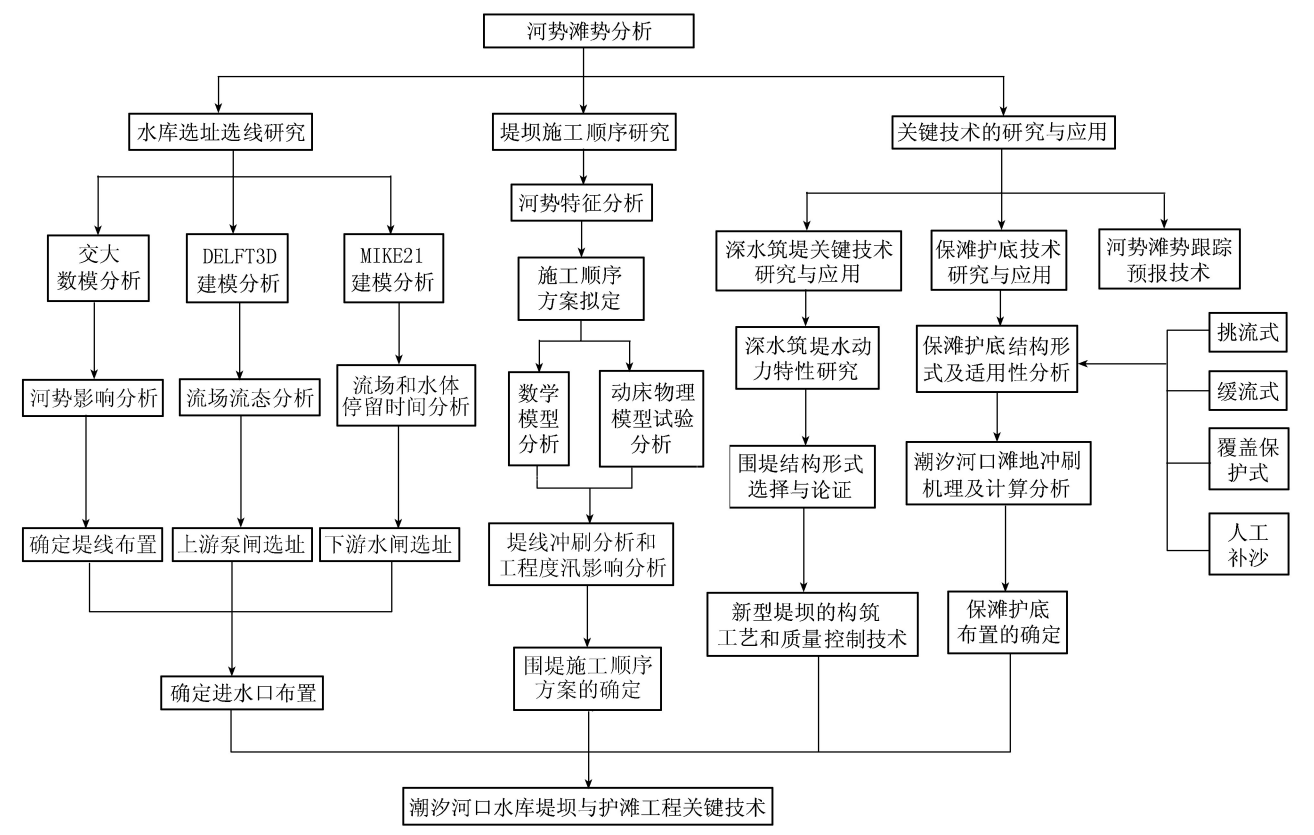


图 2 堤坝与护滩工程关键技术研究的技术路线

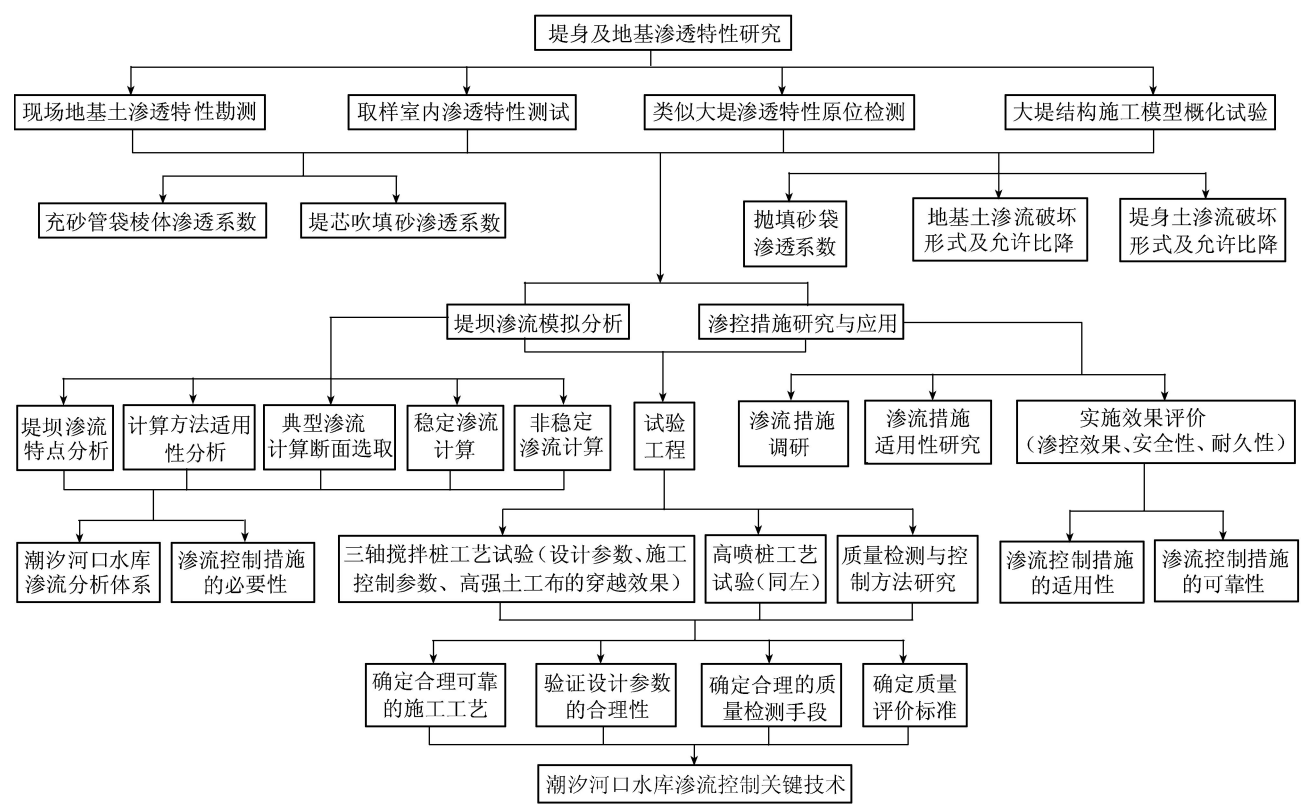


图3 水力充填堤坝渗流控制关键技术研究的技术路线

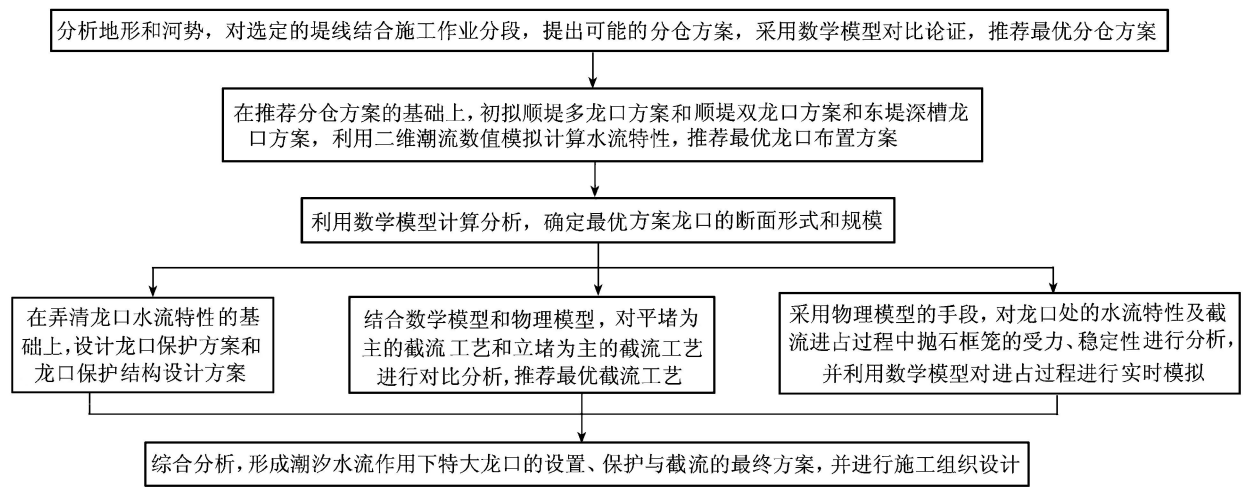


图4 特大龙口的设置及保护与截流关键技术研究的技术路线

能和水质保持的取水模式,非咸潮期水闸自流取水,库中水量可满足应对库外突发事件至少12 d不可取水,以及为保持水质控制水体库中停留天数不超过20 d的要求;咸潮来临前可30 d用泵站蓄水至6.2 m高程,并维持运行,并可根据咸潮7 d短期预报提升至7.0 m。

c. 改进了适应于深水流急条件的水力充填砂堤坝结构,揭示了长距离高强度江心筑堤的河床和沙洲冲刷特征,据此提出了“全线多点作业,先护底后筑堤,先高滩出水,后沟槽截流,最后集中力量封堵龙口”的整体控制和施工顺序<sup>[4]</sup>,并明确了各工段、各工序的进度和尺度控制要求,其中超前铺排长

度由通常的1 500 km以上缩短到200 m左右,大幅提高了筑堤进度;总结提出挑流、缓流、覆盖等保滩结构机理,优化改进铰链排、抛石、丁顺坝和杓槎等护滩结构<sup>[5]</sup>,从工程整体上创新性运用了连堤式、分离式和动态实施式组合防冲护滩方案,有效避免大型河口复杂分流口水域大范围短历时圈围引起的急剧河势调整。

d. 揭示了龙口在高速往复潮流和波浪作用条件下框笼结构复杂的水动力特征;发明了潮汐淤泥河槽中800 m特大龙口采用面质量为1 300 g/m<sup>2</sup>的超强土工织物砂肋软体排上覆盖混凝土铰链排和网兜石3层组合护底结构,同时发明了单个体积约为1 000 m<sup>3</sup>大



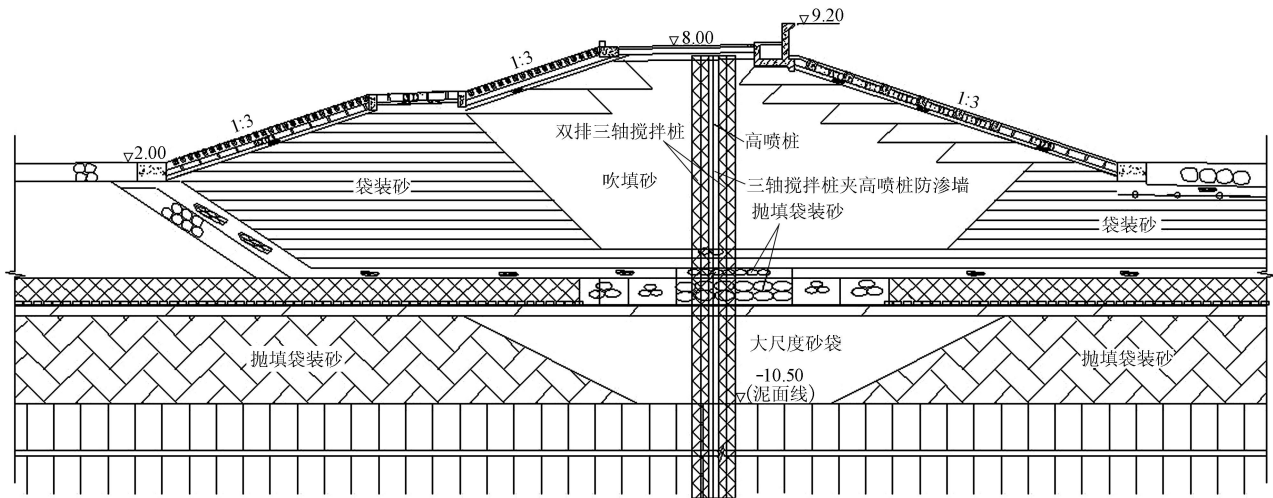


图5 龙口段堤身结构与截渗墙布置(单位:m)

型钢框笼抛石截流技术<sup>[6]</sup>,创造了面积达49.8 km<sup>2</sup>大水域不分区、一个潮汐周期龙口上单向过水量达1.5亿 m<sup>3</sup>的特大型圈围工程整体合龙的纪录。

e. 系统地揭示了长江口新沉积土及水力充填堤坝的渗透特性和渗透破坏机理;发明了三层(三轴搅拌桩)一夹(高压旋喷桩)新型防渗墙结构(见图5),三轴搅拌桩桩长约25 m,采用直径850 mm、间距600 mm套打,水泥掺量20%,通过改进钻进工艺和切割方法,解决了抛填砂袋中三轴搅拌桩难以成形的问題,从而攻克水力充填砂袋堤身夹有2 m厚抛石层、双向挡水最大水头差6.55 m的截渗难题。这些成果的成功运用,在土工模袋堆砌体及水下抛填袋装砂体的防渗理论及措施研究方面均有所突破。

## 4 结 语

长江河口河床演变、水动力条件和工程地质条件等极其复杂,气象、水文、主要建筑材料和施工作业条件等对工程建设限制颇多,可借鉴的经验和资料较少。围绕着江心建库的实践需求开展了潮汐河口水库选址选线与保滩、潮汐水流作用下特大龙口的设置及保护与截流合龙、潮汐河口水库水力充填堤坝渗流控制等课题研究,通过大量的数值模拟计算、定床和动床物理模型试验、龙口整体物理模型、波浪水池物理模型实验、堤基土渗流特性试验、类似工程原位渗透特性对比试验、截渗方案现场试验工程等,取得了深水筑堤、防冲保滩、特大型龙口设置和防护及截流合龙等创新成果,保障了水库工程的顺利施工和安全节能运行。

## 参考文献:

[1] 刘小梅,王晓鹏,关许为. 青草沙避咸蓄淡水水库库容与特征水位研究[J]. 水利水电技术,2009,40(7):5-8. (LIU

Xiaomei,WANG Xiaopeng,GUAN Xuwei. Study on storage capacity and characteristic water level for Qingcaosha Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2009,40(7):5-8. (in Chinese))

[2] 李茂学,刘小梅,付新永. 青草沙水库取水泵闸规模论证[J]. 给水排水,2009,35(2):50-54. (LI Maoxue,LIU Xiaomei,FU Xinyong. Discussion on intake bump station and sluice scale of Qincaosha Reservoir [J]. Water and Wastewater Engineering, 2009, 35 (2): 50-54. (in Chinese))

[3] 乐勤,关许为,刘小梅. 青草沙水库取水口选址与取水方式研究[J]. 给水排水,2009,35(2):46-50. (LE Qin, GUAN Xuwei, LIU Xiaomei. Research on intake site selection and run mode of Qincaosha Reservoir[J]. Water and Wastewater Engineering, 2009, 35 (2): 46-50. (in Chinese))

[4] 卢永金,宋少红,刘新成. 圈围特大涨潮沟的实施顺序与龙口选址[J]. 水利水运工程学报,2010(1):95-100. (LU Yongjin,SONG Shaohong,LIU Xincheng. Construction procedure and closure gap site selection for dike closing project in large flood channel [J]. Hydro Science and Engineering,2010(1):95-100. (in Chinese))

[5] 舒叶华,李锐,卢永金. 杓槎在潮汐河口护滩工程中的应用[J]. 水利水电科技进展,2009,29(5):61-65. (SHU Yehua,LI Rui,LU Yongjin. Application of abatis in beach protection engineering of tidal estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(5): 61-65. (in Chinese))

[6] 卢永金,佟宏伟,李锐. 潮汐河口上超大龙口保护与截流工艺及结构研究与实践[J]. 水利水电技术,2009,40(11):88-93. (LU Yongjin,TONG Hongwei,LI Rui. Study and practice of technologies for protection and closure of extra large closure gap of tidal estuary[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40 (11): 88-92. (in Chinese))

(收稿日期:2012-08-07 编辑:周红梅)