

高压喷射灌浆技术 在蓟运河防潮闸基础加固工程中的应用

高晓梅 武永新 王 浩

(水利部天津水利水电勘测设计研究院)

[摘要] 蓟运河防潮闸位于蓟运河入永定新河交汇处,共 14 孔,单孔净宽 8m,钢筋混凝土灌注桩基础,双向挡水。受 1976 年唐山地震影响,闸基出现了地基土沉陷、闸底板脱空,灌注桩顶部与闸底板接触部位混凝土断裂等严重问题。针对上述问题,在不做上下游围堰的情况下,采用高压喷射灌浆技术对闸基进行了处理,取得了很好的效果。

[关键词] 高压喷射灌浆 闸基加固

一、防潮闸工程概况

蓟运河防潮闸位于天津市塘沽区、蓟运河与永定新河交汇处,始建于 1973 年。是一座排沥、防洪、挡潮、蓄淡综合利用的大中型水闸。该闸共 14 孔,中间 12 孔为过流孔,中部 8 个深孔底板高程 -6.0m ,两侧各 3 个边孔为斜坡式,坡度 1:4,最外侧 2 孔设有鱼道。闸室总宽 128.9m,单孔净宽 8m,开敞式闸室,分离式底板灌注桩基础,墩底板兼桩基承台。中部 3~12 号孔中墩底板宽 4.5m,厚 1.2m,布置两排 12 根 $\Phi 85\text{cm}$ 灌注桩,桩长 15m,其余各墩底板尺寸、桩数均略有变化。各孔中底板厚度均为 0.8m。灌注桩混凝土强度标号 R150S4。原设计单桩水平承载力 25t。

闸基为近代浅海沉积层,土质松软,多呈饱和状态。按地质岩性可分为三层,第一层(+2.4~-6.5m)为黑灰色淤泥质粘土,含云母及有机质,有粘土及轻亚粘土互层,土质稀软,呈流动状,渗透系数 $k=3.78\times 10^{-4}\sim 6\times 10^{-8}\text{cm/s}$;第二层(-6.5~-27m)为水闸主要持力层,该层自上而下又分为轻亚粘土、亚粘土和重亚粘土 3 小层,其性状自流塑、软塑至硬塑,渗透系数 $k=9.7\times 10^{-4}\sim 4.7\times 10^{-8}\text{cm/s}$,第三层(-27.0m 以下)为黄褐色亚砂土。

二、防潮闸基础存在的主要问题

防潮闸自 1973 年建成至今已运行了近 30 年,其间经历了 1976 年唐山地震,工程受到了不同程度的破坏。1997 年对防潮闸进行质量检测,发现闸基存在以下主要问题:

1、闸室底板脱空。由于闸基土普遍下沉,而灌注桩对闸底板有支撑作用,导致闸底板脱空,闸底板高程较上游防渗板和下游消力池底板高出 4.6cm 和 6.5cm。钻孔取芯检测

表明, 80%的钻孔检测有脱空现象。中部闸室内钻孔平均涌水量为 320ml/min, 个别可达到 900~1090ml/min, 说明闸底板下存在涌水通道, 闸基土呈流塑状。

2、灌注桩桩身混凝土质量差, 自闸墩顶钻孔压水检测结果表明, 桩身完好的仅占 14%, 桩端与底板结合良好的仅占 28%。大部分桩身混凝土芯样质地松散、破碎、强度低, 桩端混凝土芯样为松散的细砂、卵石、砂浆碎块, 并有断桩。经验算, 特殊工况下单桩水平受力达 30.2t, 远超过同类基土、同类桩的允许承载力。

3、1986 年曾在闸室中段进行过定喷截渗和静压灌浆处理, 但由于截渗墙体薄, 孔位偏差大, 造成墙体不连续。本次检测到墙体芯样软、孔隙大、抗压强度仅 0.8MPa, 渗透系数仅 10^{-5} cm/s, 墙体顶部与闸底板也有脱空间隙。防渗墙抗渗能力弱, 闸室上、下游仍存在冒水现象。

上述问题表明, 闸室的渗流稳定与抗滑稳定已不满足规范要求, 急待加固处理。

三、高压喷射灌浆技术在闸基加固中的应用

1、闸基加固设计方案的确定

针对蓟运河防潮闸闸基存在的三个问题, 为降低加固工程造价, 初期决定采用灌浆技术, 在不破坏闸室结构前提下, 对闸基进行加固处理。主要处理措施为:

(1) 灌注桩加固——自桩顶向灌注桩内钻孔, 采用磨细水泥进行补强灌浆。

(2) 桩间土旋喷加固——原灌注桩间新增旋喷桩对桩间土进行加固, 缓解灌注桩承载力不足的问题。

(3) 闸室渗流稳定加固——在 3#~10#闸底板下, 采用旋喷技术设置一圈封闭防渗墙。对闸底板与闸基土间进行接触灌浆, 填充脱空范围, 并固化闸基土层。

上述闸基加固措施项目多, 技术难度大。为进一步优化、完善处理方案, 对加固方案和施工方法进行了深入细致的研究, 认为上述加固处理方案中水泥旋喷防渗墙较之 1986 年实施的定喷防渗墙具有厚度大、强度高、防渗效果好, 能够解决闸基渗流稳定问题; 防渗墙施工后进行底板下接触灌浆能够解决闸底板脱空问题; 灌注桩桩身补强灌浆技术难度大, 补强效果检查困难, 采用旋喷桩进行桩间土加固受力不明确, 工程投资大, 改为利用旋喷、摆喷结合技术对原灌注桩身进行包裹, 形成复合桩的方法, 该方法还可对原灌注桩表面缺陷进行冲洗、置换和胶结, 改善原桩缺损情况, 新老桩紧密结合, 从而增大桩的横截面积和桩的强度, 提高桩的垂直和水平承载力。修改后的方案以水下高压喷射灌浆为主, 提高了新技术含量, 工程投资也较原方案降低了约 25%。

上述加固设计方案有两种施工方法: 第一种是在闸室上、下游各做一道施工围堰, 经抽水和清淤后在干地施工。这种方法施工简单, 质量容易保证。第二种方法是不做围堰, 直接在交通桥上进行水下施工, 这样可节省 3000 万元的围堰投资, 但施工和质量保证均有一定的难度。为了节约工程投资, 在对方案的可行性进行充分论证的基础上, 决定采用第二种施工方法。

2、技术参数的确定

(1) 试验内容

蜀运河闸基加固工程投资大，技术难度高，加固设计的技术参数和加固效果有待试验验证。防潮闸上游常年蓄水，下游一日两潮，对基础加固施工带来了很大困难，因此其施工工艺和施工方法也有待试验验证。为确保加固工程达到预期的目的，经上级主管部门批准，先在第4#闸孔进行了基础加固生产性试验，试验内容包括：

① 在闸室上、下游布置旋喷桩防渗墙。旋喷桩布置在第一排和最后一排灌注桩轴线上，左右与两端的灌注桩相连，旋喷桩中心距 0.7m，成桩直径 0.9m，形成防渗墙体的最小厚度 0.5m。防渗墙布置如图 1 所示。经计算分析，需桩长 5m。

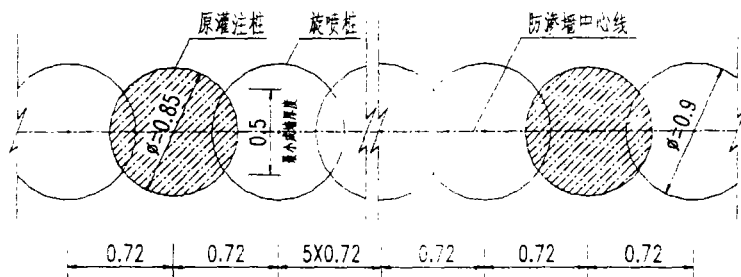


图 1 高喷防渗墙横剖面示意图 (单位: m)

② 灌注桩加固。在每排灌注桩的顺水流方向，距灌注桩外缘 0.30m 处，于桩的前后各布置桩径为 0.9m 的旋喷桩，对灌注桩进行前后包裹。再利用摆喷技术，对灌注桩左、右未能包围的部分进行补充围封，形成完整的老桩的复合桩体。复合桩长 6m；深入原桩受力反弯点以下。灌注桩加固横剖面如图 2 所示。

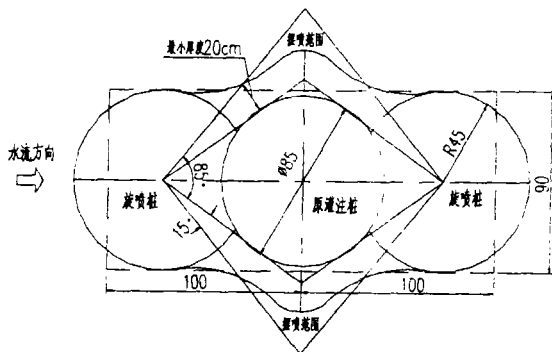


图 2 灌注桩旋、摆喷加固横剖面示意图 (单位: m)

③ 闸底板下脱空处理。在中底板均匀布置 8 个接触灌浆孔，利用上、下游防渗墙灌浆孔和灌注桩加固灌浆钻孔，在上述灌浆施工完毕后，进行接触灌浆。接触灌浆的顺序为先灌上、下游防渗墙内侧及闸底板下两墩底板，再分序实灌中底板。

(2) 试验施工的主要控制点

基础加固生产性试验均为水下作业,工作平台为交通桥面,难度大,试验施工的主要控制点如下:

①灌注桩两侧的旋喷桩应以均质的形式包裹灌注桩,形成完整的复合桩体,要求强度不小于 10MPa,弹性模量不小于 1000MPa。

②旋喷防渗墙应保证墙体厚度不小于 0.5m,强度不小于 10MPa,墙体均一连续,防渗性能好,渗透系数小于 10^{-7}cm/s 。

③第三道工序接触灌浆施工完毕后,闸底板下应能形成一个完整的封闭式箱式基础,彻底解决闸基渗流稳定和整体抗滑稳定问题。

④为保证水下灌浆质量,用套管和橡胶卡塞将地表水隔开。

⑤为减少钻孔数量,旋喷防渗墙钻孔为一孔两用、墩底板下旋喷桩钻孔一孔三用,均为在旋喷、摆喷灌浆初凝前进行接触灌浆。

⑥为加强旋喷桩、旋喷墙与闸底板接触部位的结合能力,在灌浆结束后,封孔前,插入直径 28mm 长 5m 的螺纹钢筋,防止闸底板与桩体脱离。

⑦封孔采用浓水泥砂浆自下而上封堵,要求封孔水泥砂浆与底板接触部位的抗剪强度大于 1.5MPa。砂浆配比和退塞时间有待试验总结。

(3) 试验成果分析

蓟运河闸基加固生产性试验历时 2 个月。试验结束后,由主管单位、设计单位和施工单位共同对试验工程的质量进行了检测和成果分析。结果表明:

①对接触灌浆的 10 个检查孔进行现场注水试验,有 8 个孔的 k 值小于 $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$,1 个孔为 $1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$,1 个孔数值偏大为 $1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$,其中小于 $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ 的占 80%。个别孔 k 值偏大的原因是止水卡塞橡胶老化失灵,更换橡胶止水后,渗透系数 k 值均在 $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ 以下。闸底板与接触灌浆结合部位的芯样表明,结合部位充填密实,质量满足要求。

②上、下游旋喷防渗墙经 4 个孔的现场注水试验,其 k 值均小于 $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$,6 组试件的渗透试验, k 值平均值也小于 10^{-7}cm/s 。上、下游防渗墙的平均天然容重为 1.72g/cm^3 。上游墙取芯率为 89%,下游墙取芯率仅 52%,分析原因是下游墙施工在先,施工控制尚不稳定,且下游潮位较高,淤泥较深,施工条件差,钻杆纠偏困难。因此需在大规模施工中合理控制参数,进一步搞好质量控制。

③灌注桩围封加固旋喷桩的 6 个芯样,平均抗压强度 16.17MPa,弹模平均值 4128.83MPa,均高于设计值,达到了沿上、下游方向围封加固灌注桩的目的。灌注桩摆喷围封部分取样多为淤泥,里面夹有不连续的水泥碎片,远未达到围封灌注桩左右两侧的目的。分析原因为摆喷浆压 4MPa 左右,摆喷半径只有 0.5m 左右,故不能达到摆喷范围。

④封孔部位混凝土芯样表明,封孔质量良好,界面结合牢固,现场注水试验 k 值小于 10^{-7}cm/s ,抗剪指标也满足要求。

为确保灌注桩加固中的摆喷质量,在闸基大规模加固施工前,在岸边滩地上,补做摆喷试验,以修订施工控制参数,经开挖检验和取样实验,取得了较好的效果。

上述试验结果表明,在交通桥上进行水下施工是完全可行的。

根据上述检测结果,对防潮闸基础加固设计与施工提出了修改建议:研究采用大功率的摆喷机,加大摆喷半径;施工中加强钻孔定位和防止孔斜措施,设置科学的孔斜量测法。根据现场基础加固试验的施工情况,确定符合防潮闸施工条件和基础特性的旋、摆喷施工控制参数见下表:

蓟运河防潮闸基础加固旋、摆喷施工控制参数

序号	项 目	旋 喷		摆 喷		备 注
		喷水	喷浆	喷水	喷浆	
1	提升速度 (cm/min)	8~10	10~12	8~10	15~20	
2	旋转速度 (° / s)	8~10	10~12	5°	5°	
3	水压 (MPa)	≥30		30~34		
4	浆压 (MPa)		5~6		5~6	
5	进浆比重		≥1.6		≥1.6	
6	回浆比重		≥1.3		≥1.3	
7	进浆量 (L/min)		60~70		60~70	
8	进水量 (L/min)	75		75		

四、基础加固工程施工

防潮闸基础加固设计贯彻了以最先进的施工方法,以最简易的工艺流程完成闸基全面加固的主导思想,其主要施工工艺高压旋喷是采用了近几年来发展起来的最先进的单管分喷和双管分喷置换法实施。采用的主要施工方法是高压旋、摆喷和接触灌浆。

1、旋喷防渗墙

基础防渗是在 3#~10#闸室上、下游和左、右侧均设置一道旋喷防渗墙,形成连续、独立和封闭的防渗系统,以此延长地基土的渗径,达到降低闸室水平段和出口段水力坡降的目的。钻孔、止水工序完成后,首先下直径 127mm 的套管于闸底板上定位,而后用直径 91mm 钻具开孔至底板内 0.3m,再下直径 89mm 的套管入内进行卡塞止水,将管内外水分开,然后用直径 67mm 钻具钻至底板下 6.0m。钻孔终孔后,在孔口进行试喷,当各项参数符合要求后,保护好喷头,将喷管下至孔底,通入高压水,自下而上第一次旋喷,起到切割、松散土层的作用,然后将喷管重新下至孔底,送入水泥浆,待孔口返浆后,即可自下而上旋喷,边喷边提,直至底板底部时停止提升,继续旋喷 1min 后结束喷浆。拔出喷管,用 $\phi 32$ 长 5m 的钢筋(顶部带有棘爪,以防其落入孔底)下至孔内,最后封孔。

2、灌注桩加固

灌注桩加固目的是提高单桩水平承载力,增加闸室稳定性。其定位、止水、旋喷和封孔工序与旋喷防渗墙完全相同,不同的是增加了摆喷工序。摆喷采用夹角为 85° 的双咀摆喷法,钻孔完毕后将喷管下至孔底,通入高压水自下而上摆喷水后,重新下喷管至孔底,

送入水泥浆进行自下而上摆喷浆，摆喷完后按上述工序进行旋喷和封孔。

3、接触灌浆

接触灌浆目的是解决闸室底板脱空的问题。其定位、止水工序完成后，接着用 $\phi 67\text{mm}$ 钻具钻至底板下 1.0m ，然后进行接触灌浆。灌浆采用纯压灌浆方式，浆液采用 2: 1: 1: 2: 0.5: 1 三级配比在灌浆压力 $0.2\sim 0.3\text{MPa}$ 下吸浆率 $\leq 0.4\text{L}/\text{min}$ 后延灌 30min 封孔。封孔是在 $0.2\sim 0.3\text{MPa}$ 压力下，以 0.6: 1: 1（水：砂：水泥）浓度的水泥砂浆自下而上封堵，控制好时间后退出卡塞和套管。

五、质量检查及加固效果分析

为了验证基础加固质量，分别对上、下游旋喷防渗墙、加固旋喷桩及闸底板下接触灌浆进行了质量检测，检测结果如下：

上、下游旋喷防渗墙墙体取样 14 组，共 42 个试件，试验结果渗透系数为 $0.027\sim 0.889 \times 10^{-7}\text{cm}/\text{s}$ ；墙顶与闸底板接触部位钻孔现场注水试验 14 孔，除一孔渗透系数为 $1.118 \times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ 略大于设计值外，其余 13 孔渗透系数为 $0.055\sim 0.507 \times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ ，满足要求，说明旋喷防渗墙施工质量较好。通过渗流稳定计算，闸基水平段水力坡降 $0.026\sim 0.044$ ，小于允许坡降 0.30，闸室出口段水力坡降 $0.201\sim 0.323$ ，小于允许值 0.6。

灌注桩围封加固，通过对 26 根加固旋喷桩（上、中、下部位各取 3 个芯样）共 78 组做室内实验，其抗压强度试验值范围为 $10.10\sim 13.86\text{MPa}$ ，弹性模量试验值范围为 $3510\sim 11763\text{MPa}$ ，均满足设计要求。复合桩顺水流方向截面有效长度达 200cm ，垂直水流方向截面宽 90cm ，顺水流方向的刚度和水平承载力大大提高，经计算复合桩单桩水平承载力可达 34t ，闸室稳定满足规范要求。

闸底板下接触灌浆主要是检查底板下通过灌浆是否充填密实，是通过现场注水试验求得钻孔的单位吸水率，而后换算为渗透系数。通过对 26 个检查孔进行注水试验，求得检查孔现场注水渗透系数为 $0.0229\sim 0.641 \times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ ，均满足 $k \leq 1.0 \times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ 的要求，说明接触灌浆充填效果良好。

六、结语

采用高压喷射灌浆技术对蓟运河防潮闸进行基础加固，由于无需在做上、下游围堰的情况下进行干地施工，可以极大地节省工程投资。加固方案的关键技术在于水下高压旋喷灌浆防渗墙和加固有结构缺陷的灌注桩，通过工程实践，总结出了一套成功的施工工艺和技术参数。蓟运河防潮闸基础加固工程设计和施工的成功，为水闸基础，尤其是软基桩基基础处理提供了成功的经验，对于其它水工建筑物基础处理也是值得借鉴的。