

黄河下游堤防荆隆宫截渗墙工程

质量检测试验研究课题

# 模型试验报告

新乡市黄河河务局

黄河水利职业技术学院

2002年3月12日

黄河下游堤防荆隆宫截渗墙工程

质量检测试验研究课题

## 模型试验报告

项目负责人：梁建林 务新超 高永传

主要完成人：梁建林 务新超 高永传 张宇华

薛建荣 温红杰

参加人员：王玉珏 许新庆 孙其龙 王卫红

报告编写：务新超 梁建林

审 核：刘纯义 杨邦柱

## 前 言

黄河下游堤防荆隆宫截渗墙工程质量检测试验研究课题是通过砂槽模型试验、有限元计算、截渗墙混凝土取芯试验、混凝土材料试验以及现场注水试验等分项目的研究，对荆隆宫截渗墙工程质量和防渗效果进行综合分析评价。

荆隆宫截渗墙工程模型试验研究项目主要任务是通过砂槽模型试验，为现场注水试验提供注水段长度、注水设备容量、注水管间距等技术参数；确定现场注水试验截渗墙前在不同注水位时的等效水位；验证有限元计算成果。该项目是荆隆宫截渗墙工程质量检测试验研究课题的关键项目之一。

## 1 工程概况

黄河下游堤防荆隆宫堤段系黄委会明确的“老口门潭坑”类险点，桩号 159+200~162+388 全长 3.188Km，截渗墙工程在临河堤脚 1.6m 处，墙顶高程 79.50m，上接土工布，防渗高程 85.00m。截渗墙共分四段。老口门上段 159+200~159+900，长度 700m，墙体净深 19.5m；老口门段 159+900~160+000 和 160+000~161+600，总长 1700m，墙体净深分别为 19.0m 和 42.5m；老口门下段 161+600~162+388，长 788m，墙体净深 20.5m。该堤段临背河悬差 6.5m 左右。临河堤脚有一条宽 4~10m，深 2~5m 几乎连通的串沟，背河洼地地势平坦。

该段堤防填土主要为黄色壤土，老口门处有秸料层。临河地表覆盖有壤土、砂壤土和粘土层。下部分别为粉砂、细砂及中砂层。埋深在高程 35.00m 以下有粘土加砂壤土。详见附图 1 综合地质剖面图。

## 2 试验任务和要求

荆隆宫截渗墙工程质量检测课题研究工作采用砂槽渗流模型试验的方法进行研究。根据设计提供的资料和地质勘探报告，选定典型试验段处，模拟不同的临河水位和注水水位进行试验研究。

根据本课题拟定的研究技术路线，模型试验的主要任务和要求是：

(1) 观测各布测点的测压管水头及浸润线高程，与有限元计算进行对比验证。

(2) 进行模型注水试验，观测分析截渗墙后的渗流情况，界定截渗墙后形成平面渗流的最小注水段长度，为现场原型注水试验提供注水试验参数，同时对现场注水试验中的有关问题进行必要的对比验证

试验。

(3) 分析确定在不同注水位时截渗墙前的相应等效水位(与注水试验产生的浸润线相同的临河水位称为该注水水位的等效水位),为现场注水试验提供依据。

### 3 模型设计与制作

#### 3.1 模型的相似条件

在各种模拟地下水渗流问题的研究中,最直观的方法是砂槽模型试验。为使模型中的水流运动完全复演自然状态的水流,模型比尺必须基于一定的相似准则。根据达西定律(H·Darcy)可得相似比尺条件为:

$$v_{ir} = k_{ir} h_r / x_{ir}$$

式中: $v_{ir}$ 和 $k_{ir}$ 分别表示模型的渗流速度和渗透系数。取正态模型(即 $x_r = z_r = h_r = L_r$ )时:

$$v_{ir} = k_{ir}$$

$$\text{流量比尺: } Q_r = L_r^2 k_r$$

在地下渗流模型设计中,因为地下渗流流速低,粘滞力影响较大,又受重力作用,故设计模型时,将粘滞力相似定律和重力相似定律结合使用,几何比尺和渗透流速比尺单独考虑。

#### 3.2 模型范围确定及几何比尺选择

##### 3.2.1 试验段的选择及模型范围确定

荆隆宫堤防历史上曾在桩号161+000~162+000的1 Km堤段内,先后决口九次,而且大堤防护薄弱,各种隐患众多,其中161+000断

面附近位于历史上多次决口的老口门处，历史上大堤洪水记载资料较多，工程设计和工程地质资料完整。该断面原型布设有 5 个观测井，有近期实测的临背河地下水位资料。从对整个工程现场勘察看，该处临河无群众取土形成的坑洼和串沟，场地开阔平坦，水源距离适当，具备现场注水试验条件，而且该堤段截渗墙位于施工标段的中部，采用液压锯槽机开槽新工艺施工，施工资料齐全，截渗墙体净深最大，达 42.5m。所以选择该堤段作为试验研究对象，模拟长度 150m，模拟深度 70m。临背河长度根据一般渗流模型设计经验，取渗流模拟深度的 3~5 倍，模拟长度为 210m。考虑到本试验的主要目的是观测截渗墙后的渗流情况，故以截渗墙为界，临河模拟长度 108m、背河模拟长度 102m。

### 3.2.2 模型比尺选择

根据《荆隆宫截渗墙工程质量评价研究协议书》的要求和试验段的地形地质特点，结合我院试验室的试验条件，本试验模型选用正态模型，几何比尺  $L_r=60$ ，渗透系数比尺和渗透流速比尺  $V_r=K_r=1$ 。

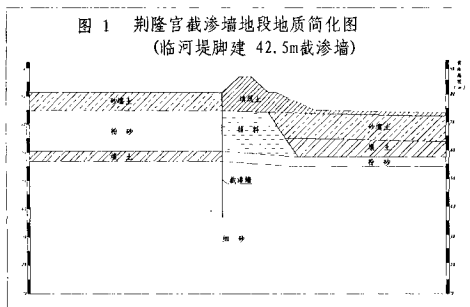
根据所确定的模型试验范围和模型比尺，选定模型平面范围相当于原型范围尺寸为（纵向×横向）210×150m，模型底部高程为 13.00m。详见附图 2、附图 3 模型设计图。

## 3.3 模型土料

### 3.3.1 地质情况模拟

根据《黄河下游堤防截渗墙地段综合工程地质图（左岸第一大段封丘县 159+200~162+388）》见附图 1，从地质情况看，表面是新近沉积层，其下为粘土层，以壤土和砂壤土为主，临河标高 52.00~57.00m、埋深 17~22m 有重壤土，粘粒含量偏高，形成良好的隔水层及天然铺盖。

重壤土层以下为以细砂为主的承压含水层，其土质自上而下分别为粉砂、中砂、局部夹有粘土微薄层。第 4 层为粘土夹砂壤土透镜体，硬性状。临河侧堤身内有历史上抢险秸料，渗透系数大。地下渗流的主要土层是粉砂、细砂，砂层中间局部夹杂壤土层，但不连续且较薄。为了能够模拟在最不利地质条件下截渗墙后的渗流情况，为现场注水试验提供依据，根据《黄河下游堤防荆隆宫截渗墙工程设计》所简化的 161+000 断面地质材料分布情况，地质条件模拟详见图 1。



### 3.3.2 模型土料选择

为保证模型与原型的相似条件，根据地质勘探报告提供的土质与物理学指标，选择与原型土质相同或相近的细砂、粉砂及粘土等土料作为模型土料，模型中的壤土用所选择的粉砂和粘土按 1: 1 比例配制而成。

### 3.3.3 原型、模型土料的物理力学指标

根据设计提供的《黄河下游堤防荆隆宫地质勘探报告》，该堤段土的物理力学指标见表 1。

### 3.3.4 渗透系数模拟

为了保证模型与原型的渗透系数相同，模型土料填筑时需按干密度和

表 1 土料的主要物理力学指标

层位	岩性	含水量(%)	干密度(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比	渗透系数(cm/s)
①	粘土	18.50	1.55	0.78	
	壤土	17.82	1.53	0.80	
	砂壤土	19.18	1.53	0.78	
① <sub>1</sub>	粉砂	22.45	1.63	0.66	
② <sub>1</sub>	粘土	32.58	1.43	0.93	$2 \times 10^{-5}$
	壤土	24.44	1.58	0.72	$7 \times 10^{-5}$
	砂壤土	21.00	1.60	0.70	$5 \times 10^{-4}$
	粉砂	19.59	1.69	0.60	$3 \times 10^{-3}$
② <sub>2</sub>	粘土	31.65	1.49	0.86	$2 \times 10^{-6}$
	壤土	22.74	1.48	0.70	$2 \times 10^{-5}$
	砂壤土	22.49	1.58	0.72	$3 \times 10^{-4}$
③	壤土	24.05	1.60	0.71	$5 \times 10^{-5}$
④	细砂	16.34	1.71	0.56	$4 \times 10^{-3}$

含水量控制。因此，需要通过土工试验测定与原型渗透系数相同时各层土料的干密度和含水量。制备不同干密度的土样，分别进行渗透试验，测定不同干密度土样的渗透系数，按照规范规定建立孔隙比  $e$  和渗透系数  $k$  的关系曲线，依据《黄河下游堤防荆隆宫截渗墙工程设计》资料中提供的各种土质的渗透系数（见表 2），求出各种土料的控制干密度和含水量。

表 2 荆隆宫堤段土料渗透系数表

土质	渗透系数 (cm/s)	
	试验平均值	建议值
粘土	$1.77 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-6}$
壤土	$5.87 \times 10^{-5}$	$5.00 \times 10^{-5}$
砂壤土	$1.28 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-4}$
粉砂	$4.90 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-4}$
细砂		$4.00 \times 10^{-3}$
中砂	$7.20 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$



模型试验土料应符合表 2 中土料渗透系数。2001 年 12 月 3 日由野外取土运至我院土工试验室, 根据, 《土工试验规程》(SL237-1999) 要求的操作规程, 对粉砂、细砂和粘土分别经过筛(细砂、粉砂过 1.0mm 筛, 粘土过 0.5mm 筛) 后进行试验, 壤土用粉砂和粘土按照一定的比例配制, 分别测定其渗透系数, 测定成果如表 3。

表 3 渗透试验成果

土质	孔隙比	干密度 (kN/m <sup>3</sup> )	渗透系数(cm/s)	备注
细砂	0.762	15.2	$4.00 \times 10^{-3}$	符合要求
粉砂	0.912	14.0	$3.00 \times 10^{-3}$	符合要求

细砂和粉砂经测定与设计资料中的渗透系数相同, 壤土经多次测试其渗透系数不满足要求。2001 年 2 月 25 日野外取粘土运至实验室, 经过筛(粘土过 0.5mm 筛) 后测定成果如表 4 所示。

表 4 渗透试验成果

土质	孔隙比	干密度 (kN/m <sup>3</sup> )	渗透系数(cm/s)	备注
粘土	1.22	12.5	$5 \times 10^{-5}$	与设计资料壤土 K 相同
1: 2 的混合土 (粘土: 粉砂)	0.74	15.5	$2 \times 10^{-4}$	与设计资料砂壤土 K 相同
1: 1 混合土 (粘土: 粉砂)	0.790	15.0	$2 \times 10^{-4}$	与设计资料砂壤土 K 相同

各种土质的 e~k 关系曲线如附图 4 所示。由 e~k 的关系曲线分析, 1: 1 混合土 e~k 的关系曲线的试验数据点离散性较小, 稳定性好, 故采用 1: 1 的混合土代替砂壤土作为模型土料。

### 3.4 地下水位模拟

据试验需求, 对现场各观测井中的地下水位进行测量, 161+000

各观测井实测水位如图 2 所示。

为使模型与原型地下水位满足相似，按近期实测地下水位进行模拟，临河地下水位为 71.93m ( $C_1$ 管水位)，背河地下水位为 71.62m ( $C_5$ 管水位)。为了保持模型临背河的地下水位，模型采用两个溢流设备进行控制，在模型临背河分别稳定 71.93m 和 71.62m 地下水位，经渗流后，模型观测管水位与实测观测井水位相似。

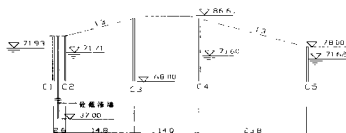


图 2 现场观测井布置及实测水位

### 3.5 模型量测系统

模型的量测系统包括渗透压力和浸润线量测设备。

#### 3.5.1 测压管布置

在截渗墙前后布设 13 个多孔式测压管与测压计相连，观测各点渗透压力。其布置详见附图 2，布置测点 13 个，底排测点高程与截渗墙墙底高程 37.00m 同高，共 8 个，测点在模型中心轴线上。上排测点高程 40.00m，共 6 个，测点布置在四分之一模型宽度处。

#### 3.5.2 浸润线量测

在模型背河按原型观测井位置布置 3 排观测管，每排 4 个，共 12 个测点 ( $A_2 \sim A_5$ 、 $B_2 \sim B_5$ 、 $C_1 \sim C_5$ )，见附图 2。

根据《黄河下游堤防荆隆宫截渗墙工程设计》报告提供的临河上游设防水位 83.70m 时,临背河水位差 8.4m,则相应下游水位为 75.30m。在此情况下进行模型试验与有限元计算成果进行对比。

在模型截渗墙临背河分别保持 83.70m 和 75.30m 水位,渗流稳定后,等时段实测成果见表 6

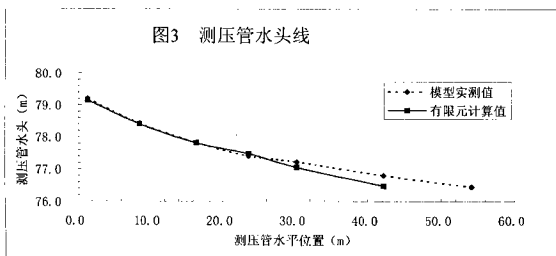
由模型测试水位与有限元计算水位对比可知,相应测点的测压管水位最大相差 0.35m(原型),最小 0.01m(原型),相对误差最大为 4.2%,且截渗墙底部相对误差较小,大部分不足 1%,见表 7 和图 2。同时,实测浸润线与有限元计算结果基本一致见图 3,误差均满足要求。

表 6 荆隆宫截渗墙渗流模型试验记录 (测压牌基点高程: 20.53m)

试验情况: 上游地下水位: 83.70m 下游地下水位: 75.30m							
测压管号	原型坐标 (m)		测压管读数(cm)				原型水位 (m)
	X 坐标	Y 坐标	1	2	3	均值(cm)	
1	-1.35	0.00	98.70	98.69	98.71	98.70	79.75
1'	-1.35	39.00	98.70	98.71	98.69	98.70	79.75
2	1.35	0.00	97.80	97.80	97.82	97.81	79.21
2'	1.35	39.00	96.60	96.59	96.60	96.60	78.49
3	8.55	0.00	96.50	96.51	96.49	96.50	78.43
4	16.35	0.00	95.50	95.49	95.51	95.50	77.83
4'	16.35	39.00	95.00	95.00	95.02	95.01	77.53
5	23.55	0.00	94.80	94.80	94.79	94.80	77.41
6	30.15	0.00	94.50	94.48	94.50	94.49	77.23
6'	30.15	39.00	94.00	94.00	94.01	94.00	76.93
7	42.15	0.00	93.80	93.81	93.79	93.80	76.81
8	54.15	0.00	93.20	93.22	93.19	93.20	76.45
8'	54.15	39.00	93.00	93.00	93.01	93.00	76.33

表 7 模型试验与有限元计算结果对照表

试验情况: 上游水位: 83.70m		下游水位: 75.30m		
测试点号	模型测试水位 (m)	有限元计算水位 (m)	差值(m)	相对误差(%)
1	79.75	79.40	0.35	4.2
2	79.21	79.16	0.35	0.6
3	78.43	78.41	0.02	0.2
4	77.83	77.82	0.01	0.1
5	77.41	77.48	-0.07	0.8
6	77.23	77.06	0.17	2.2
7	76.81	76.48	0.33	3.9



#### 4.2 模型注水试验

注水试验用  $\phi 15$  的 PVC 管, 下部花管长 40cm 裹滤网进行注水试验, 根据《渗流分析与控制》(毛昶熙主编) 的注水量计算公式:

$$Q = K \cdot 2\pi r_0 (h_0 - H) / \ln \frac{l_0}{r_0}$$

式中:  $Q$ -----单井注水量( $\text{cm}^3/\text{d}$ )

$k$ -----综合渗流系数( $\text{cm/s}$ )       $k=3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$

$l_0$ -----滤管长度(cm)                       $l_0=40\text{cm}$   
 $r_0$ -----滤管半径(cm)                       $r_0=0.75\text{cm}$   
 H-----管周围原有水头(cm)  
 $h_0$ -----管内水头(cm)

在注水位为 83.70m 时(原型水位), 计算单管注水量为  $Q=1.98(l/d)$ , 考虑截渗墙和群管的影响单管注水量取  $\frac{2Q}{3}$ , 模型注水量  $Q_m=1.32(l/d)$ 。根据单管注水量, 初步确定注水槽长度和注水管间距进行试验。

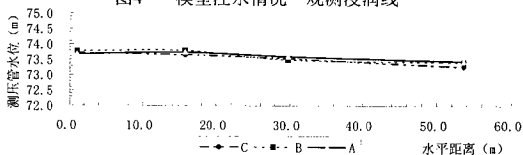
(1)注水情况一: 注水段长度 140cm(相应原型长度 84m)。注水管间距 20cm, 注水水位 83.70m。试验成果见表 8 和图 4 所示。

表 8                                      注水情况一试验成果

模型注水水位: 83.7m, 上游地下水位: 71.93m, 下游地下水位: 71.62m, 注水管间距: 20cm, 注水段长度 140cm

测点号	坐标 (m)	模型换算为原型水位 (m)			
		1	2	3	均值
C1	-1.50	79.12	78.22	78.46	78.60
C2	1.00	73.78	73.72	73.66	73.72
C3	15.80	73.72	73.72	73.54	73.66
C4	29.80	73.48	73.54	73.60	73.54
C5	53.60	73.12	73.36	73.36	73.28
B2	1.00	73.66	73.90	73.78	73.78
B3	15.80	73.78	73.84	73.78	73.80
B4	29.80	73.42	73.60	73.48	73.50
B5	53.60	73.30	73.54	73.42	73.42
A2	1.00	73.66	73.72	73.66	73.68
A3	15.80	73.66	73.84	73.72	73.74
A4	29.80	73.60	73.60	73.60	73.60
A5	53.60	73.45	73.51	73.39	73.45

图4 模型注水情况一观测浸润线



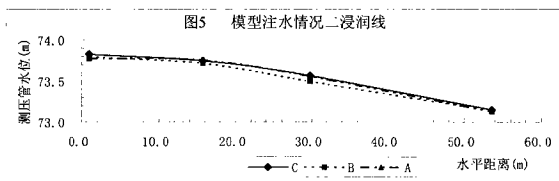
从截渗墙后各观测管实测数据分析可知， $C_2$ 、 $B_2$ 、 $A_2$  观测水位分别为 73.72m、73.78m、73.68m，对应  $C_3$ 、 $B_3$ 、 $A_3$  水位分别为 73.66m、73.80m、73.74m，A、B、C 三个断面浸润线基本相同，证明注水段 140cm，注水管间距 20cm 时截渗墙后呈现为平面渗流。

(2)注水情况二：模型注水段长度为 70cm（原型长度 42m）。注水管间距调整为 10cm。注水水位仍保持 83.70m，试验成果见表 9 和图 5。

表 9 注水情况二试验成果

模型注水试验水位 83.7m、上游地下水位 71.93m、下游地下水位 71.62m、注水管间距 10cm、注水段长度 70cm

测点号	坐标 (m)	测压管读数换算为原型水位 (m)			
		1	2	3	均值
C2	1.00	73.84	73.81	73.85	73.83
C3	15.80	73.74	73.76	73.75	73.75
C4	29.80	73.56	73.58	73.57	73.57
C5	53.60	73.18	73.12	73.15	73.15
B2	1.00	73.82	73.79	73.79	73.80
B3	15.80	73.71	73.73	73.72	73.72
B4	29.80	73.56	73.57	73.58	73.57
B5	53.60	73.14	73.13	73.15	73.14
A2	1.00	73.76	73.78	73.80	73.78
A3	15.80	73.72	73.71	73.72	73.72
A4	29.80	73.55	73.57	73.56	73.56
A5	53.60	73.13	73.12	73.14	73.13



由实测数据分析知：各断面浸润线高程基本相同，仍属于平面渗流。

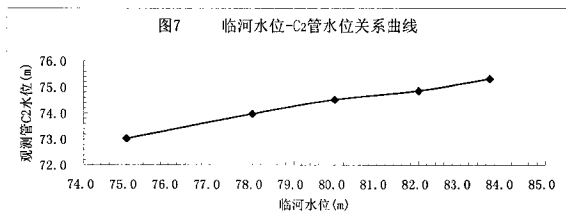
从两次不同注水槽长度和不同的注水管间距的实测资料分析，截渗墙后属于平面渗流问题，但模型 A 断面  $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$  观测管水位与 C 断面对应各观测管略低，这说明再缩短注水段长度，可能会造成截渗墙后平面渗流区域减少，因此建议现场注水试验沿堤轴线方向长度不得少于 40m。

#### 4.3 试验确定临河等效水位

模拟大堤不同临河水位，对应观测管  $C_2$  有不同的水位，实测资料见表 10，绘制不同临河水位与  $C_2$  管水位关系曲线，如图 7 所示。

表 10 大堤不同临河水位  $C_2$  管水位观测值

上游水位 (m)	75.00	78.00	80.00	82.00	83.70
$C_2$ 管水位 (m)	73.03	73.98	74.53	74.86	75.32



由模型注水试验情况二成果 (表 9) 可知，注水水位为 83.70m 时，

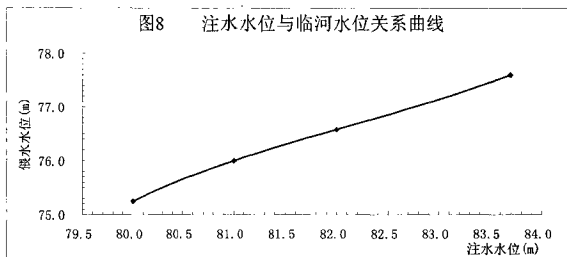
观测管 C<sub>2</sub> 中水位为 73.83m, 从图 7 曲线上找到截渗墙前等效水位 (与注水试验产生的浸润线相同的临河水位称为该注水水位的等小水位) 为 77.60m, 用 77.60m 作为临河水位, 计算出截渗墙后的浸润线, 与现场注水试验观测井实际观测水位对比, 分析判断截渗墙的防渗效果。

用同样的注水方法, 分别进行水位为 82.00m 和 81.20m 的注水试验, 测得 C<sub>2</sub> 管的水位分别为 73.45m、73.33m, 由图 3-4-8 可以查出注水水位为 82.00m 和 81.20m 的等效水位分别为 76.55m、76.10m。

由注水试验及临河供水试验对应 C<sub>2</sub> 管水位, 确定出注水位与截渗墙前临河水位的的关系曲线如图 8 所示 (观测数据列于表 11)。

表 11 注水水位与临河水位表

注水水位(m)	80.00	81.00	82.00	83.70
供水水位(m)	75.25	76.00	76.58	77.60



## 5 结论与建议

综合以上成果分析可知:

(1) 模型注水量为  $Q=1.32$  (l/d), 由模型流量比尺  $Q_r=V_1 I_r^2=1 \times 60^2=3600$ , 原型单井注水量为  $Q_{\text{井}}=3600 \times 0.00132=4.752\text{m}^3/\text{d}$ , 以此注水



量作为选择现场注水试验抽水设备容量的依据。

(2) 根据模型注水试验成果,在注水段长度为 42m 时,截渗墙后为平面渗流问题,此时井点管间距为 10cm (模型),由于模型注水管直径为 15mm,原型打井配套设备井管直径为 50mm,根据等渗流量原理,现场注水试验注水井间距应为 0.7~1.0m。建议取 1.0m,建议注水槽长度不小于 40m。

(3) 为了使注水直接渗入透水层,模型注水管滤管长度为 40cm,相应原型为 24m。考虑到注水面积应尽量大,建议现场注水管花管长度取 25m。

(4)由模型试验实测注水位 83.70m、82.00m 和 81.20m 时,截渗墙前的等效水位分别为 77.40m、76.55m、76.10m,以此水位作为现场注水试验和分析截渗墙防渗效果的重要依据。