

黄河下游堤防荆隆宫截渗墙工程

质量检测试验研究课题

# 现场注水试验报告

项目负责人:吕文堂 朱岐武

主要完成人:吕文堂 朱岐武 杨邦柱 务新超 高永传

梁东海 薛建荣 李红旗 冯炳伟 蒋武生

报告编写:朱岐武 杨邦柱 务新超

审 核:刘纯义 张柏山

## 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。

荆隆宫截渗墙现场注水试验研究的主要任务是:在整个截渗墙范围内选取一试验段,在截渗墙前进行注水试验,借助工程中已埋设的测压管,观测截渗墙前后的水位变化,根据设计情况下的水位变化,分析不同高水位下荆隆宫截渗墙工程的整体防渗效果,为黄河下游采用混凝土截渗墙工程措施加固薄弱堤防提供设计和施工依据。该项目是荆隆宫截渗墙工程质量检测试验研究课题最关键的项目。

## 1.工程概况

黄河大堤新乡荆隆宫段,系黄委会明确的“老口门潭坑”类险点。该堤段位于黄河北岸新乡市封丘县境内荆隆宫乡,北距封丘县城约10km,临黄大堤桩号159+200~162+388,全长3.188km。据历史记载,在桩号161+000~162+000的1.0km范围内,自明朝洪武35年(公元1402年)至清朝顺治7年(公元1650年)的248年内先后决口9次。大堤经过多次冲决和堵复抢修并经过多次加高培厚,目前堤防断面为:堤顶宽10m,临河坡1:3,背河坡1:2.5~1:3,堤顶高程86.30m~86.90m(黄海标高,下同);临背河地面高差6.5m左右。该堤段处存在许多潜在的隐患,为了消除隐患,经过多种方案比较,在该堤段采用混凝土截渗墙截渗。

## 2.地形及工程地质

黄河在荆隆宫一带的流向自西向东,河道开阔,由于泥沙大量沉积,河槽逐年抬高,形成典型的地上悬河。从宏观看,地貌单元可分为黄河河槽—低漫滩—高滩—大堤—背河洼地。低漫滩高程约有78.00m,高滩为78.00~81.00m,黄河大堤堤顶高程为86.30~86.90m,背河洼地地势平坦,地面高程75.00~76.00m。

根据地质勘探所揭露的40余米深度,该堤段自堤顶而下地层岩性分为五层。

①层:堤身填筑土,主要为浅黄色壤土,含棕红色粘土块,局部夹有砂壤土和少量粉砂。

①-1层:老口门秸料堆填土(分布高程在60.00~71.00m),其组成多为麦秸、玉米杆、少量荆条、小木块、混杂大量粉细砂和壤土团,秸料层由于年代已久,秸料腐烂严重,呈黑色,手搓即成粉状。

②层:根据物理力学性质及沉积时代的先后;又分为2个亚层,即②-1、

②-2层。

②-1层：新近沉积土，上部为浅黄色壤土、砂壤土，下部为浅黄色—黄灰色粉砂，多分布在老口门决口影响范围的临、背河处，远离口门，呈透镜体状逐渐尖灭。厚 9~15m，临背河层底标高分别为 67.00~73.00m 及 62.00~65.00m，层厚 9-15m。

②-2层：褐黄色—灰色壤土为主，灰砂壤土、粉砂透镜体。该层临河厚度 17~22m，背河厚度 15m 左右，层序清楚、沉积韵律较明显，层底标高 60.00~61.00m。

③层：黄灰—灰白色重壤土，粘粒含量偏高，夹有薄层粘土及砂壤土透镜体，斑状结构，是本堤段潜水与承压水的分界面。临河埋深 17~22m，层底标高在 52.00~57.00m；背河埋深 13~15m，层底标高在 53.00~57.00m，厚度 3~9m，该层在老口门局部范围被冲掉，在其它地方分布稳定，普遍覆盖于细砂含水层之上，形成良好的隔水层。

④层：褐黄色细砂为主的承压含水层，其岩性自上而下分别为粉砂、细砂、中砂，局部夹粘土薄层。在本区埋置深度为临河 22~28m、背河 16~21m，层底标高 35.00~39.00m 左右，厚约 18m，为良好的承压含水层。

⑤层：灰色—褐灰色壤土，局部为粘土夹砂壤土透镜体，该层埋深一般在 35m 以下，仅部分钻孔揭露，未揭穿，厚度不祥。

该堤段综合地质剖面见图 1,土的物理力学指标见表 1

### 3.水文地质

该堤段地层属双层结构，上部为粘性土层，其中地下水为孔隙潜水，下部为砂性土层，地下水为孔隙承压水，含钙质结核的重壤土（第 3 层）为相对隔水层。



表 1

荆隆宫堤段土的主要物理力学性质指标

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	18.5	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	2×10 <sup>-5</sup>
	壤土	24.44	1.58	0.72	7×10 <sup>-5</sup>
	砂壤土	21.00	1.60	0.70	5×10 <sup>-4</sup>
	粉砂	19.59	1.69	0.60	3×10 <sup>-3</sup>
② <sub>2</sub>	粘土	31.65	1.49	0.86	2×10 <sup>-6</sup>
	壤土	22.74	1.48	0.70	2×10 <sup>-5</sup>
	砂壤土	22.49	1.58	0.72	3×10 <sup>-4</sup>
③	壤土	24.05	1.60	0.71	5×10 <sup>-5</sup>

潜水埋置于第②层粘性土层中，临河潜水水位埋深 7~9m，标高为 72.00m 左右，背河埋深 2~4m，标高 71.00m 左右，潜水水量较弱，受季节性影响，水位变化较大。

承压水主要埋置于第④层砂性土中，该层上部覆盖着厚约 3~9m 的重壤土。在老口门处第②层被决口冲刷切割，后期冲积、堵复形成粉细砂、粘料堆积层，使承压含水层加大，承压含水层顶板埋置标高一般在 57.00m 左右，底板标高为 35.00~39.00m，厚度一般为 18m，老口门处厚度可达 23m 左右。

不论是潜水或承压水，一般是临河高于背河，地下水的渗流趋势是由临河到背河。潜水的主要补给来源于黄河水和大气降水，局部地区接受承压水垂向渗流补给，排泄方式主要是蒸发。承压含水砂层与黄河河底粉细砂层相互连通，承压水的补给来源主要是黄河水，其排泄方式是侧向渗流。

#### 4. 试验任务和要求

荆隆宫截渗墙是黄河上首次采用截渗墙并采用据槽机施工的堤防防渗工

程，截渗效果如何，关系着截渗墙工程能否在黄河上推广和运用。为了检查荆隆宫截渗墙的整体防渗效果，根据黄河下游荆隆宫截渗墙工程质量检测试验研究课题的技术路线，荆隆宫截渗墙现场注水试验研究的内容和任务是：在整个截渗墙范围内选取一试验段，在截渗墙前进行注水试验，借助工程中已埋设的测压管，观测截渗墙前后的水位变化，结合室内砂槽模型试验和有限元计算综合分析不同高水位下，荆隆宫截渗墙工程的整体防渗效果，为黄河下游采用混凝土截渗墙工程措施加固薄弱堤防提供设计和施工依据。

### 5. 注水试验检测截渗墙防渗效果的依据

在截渗墙前（临河侧）进行注水，提高截渗墙前的水位，对截渗墙前后水位进行观测。如果截渗墙前水位升高后，截渗墙后的水位变化在设计范围内，说明截渗墙的防渗效果满足设计要求，若截渗墙后的水位变化（升高）超过设计范围，说明防渗墙的防渗效果没有达到防渗要求。

## 6. 现场注水试验设计

### 6.1 试验段的选择

荆隆宫堤防截渗墙工程总长 3.188Km，历史上曾在桩号 161+000~162+000 的 1Km 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 断面位于历史上多次决口的老口门处，历史上大堤假水记载资料较多，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，具备注水试验条件。

161+000 断面位于施工标段的中部，截渗墙体净深在整个工程中最深，达 42.5m，而且采用液压锯槽机开槽新工艺施工，施工资料齐全。所以选择该堤段作为试验研究对象具有典型的代表性。

## 6.2 临河水位的模拟

为了检测不同设计水位情况下荆隆宫混凝土截渗墙所在位置的整体防渗效果,就必须模拟大堤假水的不同水位。根据工程经验可采用以下方案:

第一种方案,开槽注水。由于开槽深度不宜太深,开挖太深,混凝土截渗墙将受到很大的土压力作用,易造成混凝土截渗墙断裂,甚至倒塌。其次由于土质疏松,开挖边坡缓,工程量大,施工难度大。开挖深度浅,槽底不能穿透①砂壤土层和③层重壤土层(地面以下埋深24m),注水形成的渗流受到壤土层的隔阻后进入强透水层中的注水量将大大减少,难以在截渗墙前形成较大的水压力,无法模拟大堤假水的渗流情况。

第二种方案,采用围堤灌水(人工水库)。该方案占地面积大,费用高,渗流稳定速度慢,野外试验时间长。

第三种方案,采用截渗墙前打井。在地面建蓄水池注水的方法模拟临河水位。采用这种方法可以使井管直接穿透第③层重壤土层,而且避免了前两种方案存在的缺点,因此采用第三种方案。

## 6.3 注水试验区的布置

根据室内砂槽模型试验提供的技术参数,利用工程已布设的观测井,注水试验区以161+000断面为对称轴,沿截渗墙长度方向左右各取20m,注水段总长40m。注水井采用单排布置,井距1.0m,孔径50mm,距截渗墙1.0m,注水井数量为40个。在截渗墙顶的地面(墙前)砌筑40×1.2×1.5m(长×宽×高)的集水池,以便稳定水位和调整水头,池中设标尺控制水位。模拟设计洪水时,在大堤堤坡上设注水池,通过塑料管向井中注水。现场注水试验区布置如附图1、附图2。

## 6.4 注水井的设计



根据 161+000 断面的地质情况和砂槽模型试验成果, 为正确模拟截渗墙前水位, 缩短形成稳定渗流时间, 注水井井深采用 25.0m, 深入承压水细砂层 1.0m, 注水井采用人工打井, 井管采用  $\phi 50$ PVC 管, 地面 1.0m 以下为花管, 花管外设反滤层, 花管长度 24.0m。注水井采用人工打井的方法进行施工, 地面以下 1.0m 范围内采用粘土封闭。

## 7. 现场注水试验

注水试验从 2002 年 2 月 6 日 10 点开始。相继进行了 81.00m、82.00m、83.70m 水位的现场注水试验。根据砂槽模型试验提供的注水量, 采用 13.2KW 的高速柴油机为动力 (两台) 带动 2 台 4 吋软轴泵, 从试验区 100m 以外的机井向蓄水池供水, 使池中水位保持稳定, 用电测法测量观测井中的水位。绘出水位与时间的关系曲线, 根据关系曲线的稳定情况确定注水结束时间。注水试验于 2002 年 3 月 5 日结束。墙前和墙后水位的变化见附图 3、附图 4、附图 5。

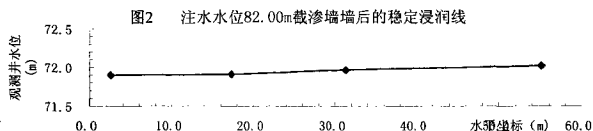
## 8. 现场注水试验成果

### 8.1 注水水位保持 82.00m 时观测井水位观测成果

从 2 月 6 日到 2 月 24 日注水池水位保持在 82.00m, 观测井水位变化过程见附图 3, 截渗墙后稳定水位如表 2 所示、浸润线如图 2 所示。

表 2 注水水位 82.00m 观测井稳定水位表

观测井号	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
水位(m)	73.50	71.90	71.92	71.97	72.02

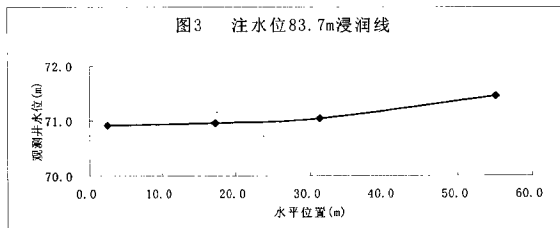


## 8.2 注水水位保持 83.70m 时观测井水位观测成果

从 25 日 22 时, 注水水位调整到 83.70m, 在 26 日早 7 时, 沿注水井管开始出现冒水现象, 下午冒水现象更加严重, 原注水槽底部开裂, 地下泥沙被翻到地面, 26 号下午 17 时停止注水, 地下水位变化过程见附图 4。截渗墙后稳定水位如表 3 所示、浸润线如图 3 所示。

表 3 注水水位 83.70m 横断面观测井稳定水位

观测井号	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
水位 (m)	75.96	70.92	70.91	70.04	71.45



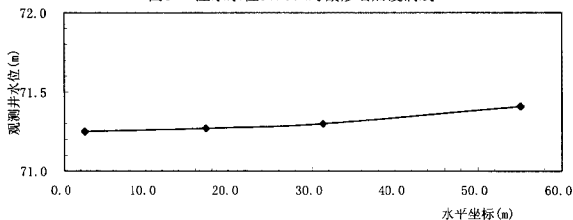
## 8.3 注水位保持 81.00m 时观测井水位观测成果

从 3 月 2 日 12 时开始, 注水位调整为 81.00m, 3 月 5 号 9 点停止灌水, 历时 3 天, 各观测井水位变化过程见附图 5, 截渗墙后稳定水位如表 4 所示、浸润线如图 4 所示。

表 4 注水水位 81.00m 横断面观测井稳定水位

观测井号	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
水位 (m)	71.93	71.25	71.27	71.30	71.41

图4 注水水位81.00m时截渗墙后浸润线



## 9 注水试验成果分析与结论

### 9.1 试验成果分析

(1) 当注水水位为 82.00m 时, 注水后各观测井中水位均有所上升, 截渗墙前后各观测井中的最高水位及变幅如表 5 所示。由表 5 可知截渗墙后水位的升幅度较小, 一般不足截渗墙前水位升高值的 10%。由附图 3 可以看出: 现场注水后各观测井中水位均有所上升, 水位变化受注水时间及周围地下水水位的影响, 但截渗墙前后影响不同。截渗墙前水位以观测井  $C_1$  的水位为代表, 在整个注水期间水位有升有降, 其变化特征可以分为以下几段: ①在 2 月 7 日以前为起始注水段, 截渗墙前水位随时间不断升高; ②2 月 8 日~2 月 15 日, 截渗墙前基本保持稳定, 由于老口门处存在粘料区, 渗透系数较大, 透水性强, 需要一定的注水量才能饱和, 此段时间主要以充填截渗墙前粘料区为主, 直至该区饱和为止; ③2 月 15 日~2 月 17 日晨, 为截渗墙前水位二次升高时段, 由于截渗墙前相互连通的粘料区已趋于饱和, 该时段渗流量逐渐减小, 致使注水段截渗墙前水位继续升高, 具体表现为观测井  $C_1$  的水位第二次升高; ④2 月 17 日~2 月 20 日晨, 截渗墙前水位基本保持稳定高水位, 该段时间内注水井周围形成稳定“注水漏斗”, 地下形成稳定渗流, 因此观测井  $C_1$  的水位基本保持不变; ⑤2 月 20 日以后, 截渗墙前水位大幅下降, 最大降幅达 1m,

后期基本保持稳定水位微有上升，该时段陡降的原因是由于春灌影响所致，虽然2月19日已有少量春灌开始，但由于抽水量小，且离注水区较远，所以影响很小，而2月20日滩区大面积春灌致使注水区水位陡降。

表5 注水水位 82.00m 观测井水位变化表

观测井号	注水前水位(m) (2月6日8:00)	最高水位(m)	变幅(m)	备注:
C <sub>1</sub>	72.429	75.059	2.56	墙前
C <sub>2</sub>	71.709	71.949	0.24	墙后
C <sub>3</sub>	71.739	71.955	0.216	墙后
C <sub>4</sub>	71.849	72.050	0.201	墙后
C <sub>5</sub>	71.888	72.033	0.145	墙后

截渗墙后各观测井水位变化基本同步，具有相似性。变化曲线大致可以分为两段：①自2月6日~2月17日，该时段截渗墙后各观测井水位短期微升后，基本保持稳定，尽管截渗墙水位在不断升高，但墙后水位的影响较小。②2月18日以后，该时段过程线先是短期陡降而后基本稳定，有微小的变幅。根据现场观测发现，该段截渗墙后水位下降的原因是堤外抽水春灌影响所致。2月16日已有部分井开始春灌，致使2月16日晚量测水位发现各观测井水位稍有下降，2月17日普遍春灌，因此水位降幅较大，而后相对稳定，其小幅变动可能是由于部分井晚上不抽水所致。

分析截渗墙前后变化曲线可知：①开始注水时段，截渗墙后水位首先稳定，而截渗墙前水位仍在持续升高，其原因是由于注水管伸入下部强透水层一定深度，高压直接作用在强透水层处的截渗墙及下部土层上，使截渗墙后水位同部升高，而截渗墙前受粘料区及浅层弱透水层的影响，水位稳定需较长时间，因此出现截渗墙前水位稳定滞后现象。②虽然截渗墙前水位不断升高，但墙后水位基本保持稳定，由此足以说明上部截渗墙抗渗性能很好。③堤外

虽已于2月16日开始春灌,致使截渗墙后水位下降,但截渗墙前水位仍在不断升高,由此说明强透水区截渗墙防渗效果是可靠的。

(2) 现场注水水位为83.70m时,截渗墙前观测井C<sub>1</sub>与截渗墙后观测井C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>和C<sub>5</sub>的观测水位沿时间的变化如附图4所示,各观测井的具体变幅见表6。各观测井水位如表3、图3。由图3可以看出,墙前水位升高较多,墙后水位变化较小,造成这一问题的原因是在高水头作用下,当经过16个小时注水后使墙前水位升高,地下渗流变缓,造成注水井管周围冒水,墙前C<sub>1</sub>井水位达到76.00m后开始下降。因为注水时间短,使墙前水位未能完全稳定,墙后水位变化较小。

表6 注水水位83.70m观测井水位变化表

观测井号	注水前水位(m) (2月25日18:00)	最高水位(m)	变幅(m)	备注:
C <sub>1</sub>	71.399	75.999	4.60	墙前
C <sub>2</sub>	70.841	70.949	0.108	墙后
C <sub>3</sub>	70.891	70.971	0.080	墙后
C <sub>4</sub>	70.939	71.020	0.081	墙后
C <sub>5</sub>	71.358	71.490	0.132	墙后

(3) 注水水位81.00m情况,截渗墙前观测井C<sub>1</sub>与截渗墙后观测井C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>和C<sub>5</sub>的观测水位沿时间的变化如附图5所示,各观测井水位如表4、图4。由附图5可看出,随着注水时间增加,截渗墙前后地下水位逐渐稳定,截渗墙后注水前后的水位变幅较小。注水前后的水位变幅见表7。

截渗墙前地下水位升高,截渗墙后的地下水位也升高,但变化幅度很小,说明墙前水位变化对墙后地下水位是有影响的。

(4) 当注水水位分别为83.70m、82.00m、81.00m时,对应的等效水位及实测的截渗墙前C<sub>1</sub>井水位和截渗墙后观测井C<sub>2</sub>水位见表8。

表 7

观测井水位变化表

(注水水位 81.00m)

观测井号	注水前水位(m) (3月2日6:00)	最高水位(m)	变幅(m)	备注:
C <sub>1</sub>	71.379	72.029	0.69	墙前
C <sub>2</sub>	71.099	71.309	0.21	墙后
C <sub>3</sub>	71.101	71.310	0.209	墙后
C <sub>4</sub>	71.119	71.369	0.25	墙后
C <sub>5</sub>	71.328	71.448	0.12	墙后

表 8

各种注水水位下的等效水位

注水槽水位 (m)	83.70	82.00	81.00
等效水位 (m)	77.60	76.55	76.10
C <sub>1</sub> 井最高水位 (m)	76.00	75.06	72.02
C <sub>2</sub> 井观测水位 (m)	71.49	72.03	71.45
等效水位与 C <sub>2</sub> 最高水位差 (m)	6.11	4.52	4.65
C <sub>1</sub> 井水位与 C <sub>2</sub> 井水位差 (m)	4.51	3.03	0.57

注: 截渗墙后水面出现倒坡, C<sub>2</sub>井最高水位用 C<sub>3</sub>水位代替。

由表 8 可以看出: 三种不同水位情况下的现场注水试验, 其等效水位与观测井 C<sub>2</sub> 中的最大水位差分别为 6.11m、4.55m、4.65m, 绘制等效水位与观测井 C<sub>2</sub> 中的最大水位差曲线, 如图 5 所示。其等效水位与观测井 C<sub>2</sub> 中的最大水位差值 ( $\Delta h$ ) 均落在计算关系曲线的右侧, 即等效水位与实测的观测井 C<sub>2</sub> 中的最大水位差 ( $\Delta h$ ) 大于按设计条件下进行有限元计算的截渗墙前后的水位 (C<sub>2</sub> 管所对应的浸润线高程) 差 ( $\Delta h'$ )。因此, 说明试验段的截渗墙的整体防渗效果满足设计防渗要求。为了进一步说明截渗墙防渗效果的可靠性, 又将实测的截渗墙墙前 C<sub>1</sub> 井的水位作为截渗墙前的作用水位, 计算出 C<sub>1</sub> 井与 C<sub>2</sub> 井的水位差, 点绘于图 5 上。可以看出, 当注水位为 82.00m 和 81.00m 时, 截渗墙底部概化为粘土时有限元计算值落在关系线的左侧, 并且靠近关系线, 其余的点均落在关系线的右侧。因此, 截渗墙墙前水位即使用 C<sub>1</sub> 代替也可以说明试验段防渗效果达到了截渗墙底部土层概化为壤土条件下的设计标准。

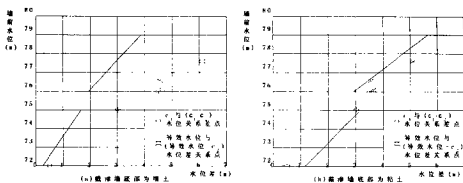


图5 截渗墙前水位与截渗墙后观测井 C<sub>2</sub> 水位差图

## 9.2 防渗效果可靠性分析

(1) 有限元计算结果，与原工程设计的有限元计算基本一致，在相同边界条件下与砂槽模型试验实测的浸润线相吻合；数学模型与物理模型相应点上的水头非常接近；数学模型与物理模型相互支持，互相验证，提供的技术参数是可靠的。

(2) 现场注水试验选择的试验段具有代表性。试验段采用的是锯槽机开槽，水下混凝土浇筑。采用这种施工工艺的截渗墙的长度占总长度的 80%，试验段又是历史上的老口门段，在堤基中有较多的粘料区，渗透系数大，并且截渗墙的净深最大，施工难度大，所以如果该段防渗效果较好，可以推断整个工程的防渗效果基本达到设计防渗要求。

(3) 现场注水试验段有足够的长度 (40m)，从模型提供的技术参数表明，在试验段中间 (161+000 断面)，可以保证是平面渗流，这为现场注水试验和有限元计算 (二元平面恒定渗流) 成果进行对比，判断截渗墙的整体防渗效果提供了条件。

(4) 现场注水试验采用井管注水，井管深度已穿透第③层壤土进入细砂层 1m，作用在细砂层顶面的作用水头，近似等于注水槽中的水位与细砂层 (第④层) 顶面高程的差值，由总报告可知，在设计情况下，实际细砂层顶面的作用水头不足临背河水位差的 80%。所以采用井管注水试验研究截渗墙的防

渗效果偏于安全。

(5) 采用观测井  $C_1$  中的水位作为等效水位，比模型试验提供的等效水位低，但  $C_1$  井和  $C_2$  井的水位差仍大于截渗墙底部土层概化为壤土条件下所计算水位差，更能说明试验段的截渗墙符合防渗设计要求。综合三种注水情况的观测资料，结合图 2、图 3、图 4、可以看出，截渗墙后一定范围内的浸润线为倒坡。造成倒坡的原因是：根据工程地质和水文地质条件可知，老口门处地下水有垂向（承压水）补给，历史决口冲刷使第 3 层壤土遭到破坏，在大堤下面逐渐出现尖灭现象，由于该层为强透水路顶板，所以在尖灭处出现承压水的释放，离开截渗墙越远越有利于承压水的释放，所以浸润线出现了倒坡。

### 9.3 结论

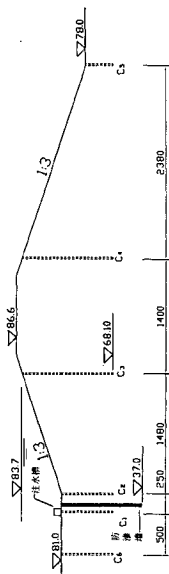
(1) 本次检测中，注水水位为 82.00m 时，截渗墙前后水位差最大达到 4.52m，基本模拟了黄河洪水过程，其截渗墙后实际观测的最高浸润线低于设计情况浸润线，说明荆隆宫混凝土截渗墙总体防渗效果满足设计要求。

(2) 在注水试验中实测浸润线出现倒坡的原因是第 3 层壤土层在大堤下尖灭，承压水在该处垂直补给所造成。

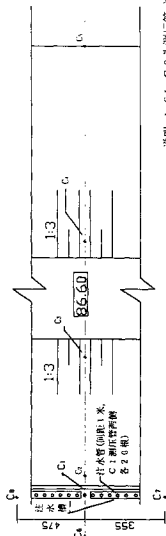
(3) 现场注水检测截渗墙防渗效果的方法可靠，基本能达到检测目的，尤其在模拟黄河高水位方面，具有较好的效果，是比较经济可靠的方法。



附图1 现场注水试验区布置图



现场施测段断面图 (单位:cm)



说明: 1. C1-C3 为测压管, 注水管直径为 50mm。  
2. 本图单位为厘米。

现场施测段平面图 (单位:cm)