

黄浦江引水工程钢筋混凝土

低压输水管渠设计与施工

徐彬士 范民权

[提要]上海市黄浦江引水一期工程于1987年建成,引水规模为430万 m^3/d ,主干渠采用四孔管渠($3.6\times 3\text{m}$)。二期工程于1994年开始兴建,引水规模从430万 m^3/d 提高到540万 m^3/d ,经技术经济比较后主干渠仍采用四孔管渠($4\times 3.25\text{m}$)。本文以该工程为例,介绍了钢筋混凝土低压输水管渠的工艺设计、结构设计、辅助构筑物设计及施工方面的经验和体会。

[关键词]城市给水 输水工程 钢筋混凝土管 设计 施工

目前我国大部分城市供水以地面水源为主。城市工业的发展致使城市附近的地面水源普遍受到了不同程度的污染,用大量的投资来处理这些被污染的原水达到人们饮用的标准,显然是不合算的,于是长距离输水提到了议事日程。自七十年代起建成的或正在建的就有北京水源九厂的密云水库引水工程、北京石油化工总厂引水工程、天津的引滦工程、上海市的黄浦江上游引水工程、上海金山石油化工总厂的黄浦江引水工程、大连的引碧工程、青岛的引黄工程、西安的引黑工程、自贡的葫芦口水库引水工程、浙江黄椒温引水工程、河北秦皇岛市和邯郸市引水工程等等。

自90年代起估计我国每年需敷设长距离输水管线1000~1500km,长距离输水已成为我国给水事业发展的一个新课题。

根据经验,一般的给水工程,其输配水工程投资约占总工程投资的50~60%,长距离输水的给水工程占的比例就更大些。由于其所占比重极大,在整体布置合理的前提下研究输水管材的经济性和可靠性就显得十分必要。

我院在众多供水规模较大的长距离输水工程的设计实践中进行了大量的方案论证和技术经济比较,成功地采用了钢筋混凝土低压渠道

作为输水管材,节约了大量投资,取得了良好的经济效益和社会效益。

根据20多年来的低压渠道的设计和施工实践,在方案的比选、线路的确定、矩形渠道内流量的计量、划分不同压力段进行设计以及伸缩缝的设置和渠道的验收等各方面都积累了一些经验。本文试图在这些方面作一综合论述。

一、技术经济比较

在整体布置已定的前提下进行输水管材的

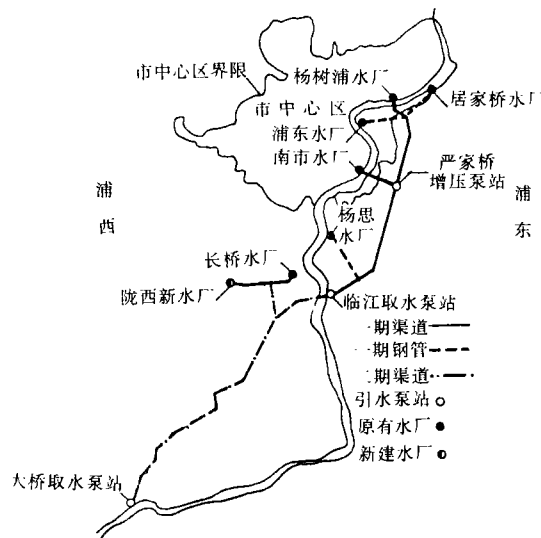


图1 上海市黄浦江上游引水工程总体布置示意图

比较极为重要。这个比较做得科学合理,工程就有了可靠的依据,就会取得巨大的效益。下面主要就上海黄浦江上游引水工程的方案比较作一介绍,其总体布置见图 1。

1985 年在设计该工程时,其总规模为 430 万 m³/d,在浦西分水后到达浦东时其规模为 250 万 m³/d。为此,曾做了高压钢管和低压钢筋混凝土管渠的比较。首先在一定输水规模条件下确定钢管的经济根数和渠道的经济孔数。在 430 万 m³/d 输水规模时,如采用钢管方案,则用 4 根是合适的;如采用渠道方案,则用 4 孔是合适的。在 250 万 m³/d 输水规模时,则采用 3 根钢管或 3 孔渠道是合适的。在这样比较的基础上然后再进行钢管和管渠的比较,比较结果见表 1。

从表 1 可看出钢管较之管渠的造价是高的,其水力坡降也是大的,因而能耗也是大的,同时由于钢管不耐腐蚀,其维护费用也很大,但钢管有施工较为简便的优点。平衡它们之间的优缺点,同时考虑到该工程施工期限也允许,所以决定采用钢筋混凝土低压渠道作为输水管材。

该工程在 1987 年建成浦东段一期(中游引水)工程后停顿了一段时间,于 1994 年开始二期工程建设。在考虑了新条件后决定把引水规模自 430 万 m³/d 提高到 540 万 m³/d,为此又重新做了方案比较,主要是钢管和混凝土管渠的比较,同时也对钢套筒钢筋混凝土管(简称 PCCP 管)进行对比。比较结果还是管渠方案略优于其它方案。具体比较情况介绍如下:

系统布置见图 2。首先对管渠进行孔数的比较。对主干渠进行了二孔、四孔、六孔三种过

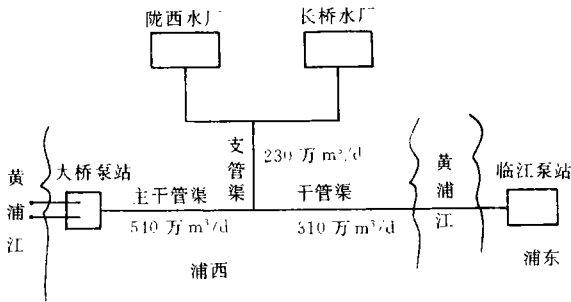


图 2 黄浦江上游引水工程二期系统布置图

水孔数六种断面尺寸的比较,其断面尺寸分别为:

- 二孔 5.0×4.4m,5.5×4.0m;
- 四孔 4.2×3.1m,4.0×3.25m;
- 六孔 3.2×3.0m,3.4×2.8m。

对干渠进行了二孔、三孔、四孔三种过水孔数六种断面尺寸的比较,其断面尺寸分别为:

- 二孔 4.4×3.5m,4.05×3.8m;
- 三孔 3.6×3.1m,4.0×2.8m;
- 四孔 3.5×2.6m,3.25×2.8m。

对支渠进行了二孔、四孔二种过水孔数四种断面尺寸的比较。其断面尺寸分别为:

- 二孔 3.5×3.0m,3.25×3.2m;
- 四孔 2.6×2.35m,2.9×2.1m。

比较结果为主干渠以四孔 4.0×3.25m,干渠以三孔 3.6×3.1m,支渠以二孔 3.5×3.0m 最为经济。

对钢管方案按每处为两根的前提下进行不同口径的比较,为便于加工制作,主干管和干管采用同一口径,支管采用另一口径。前者口径按 3.4~3.8m、后者口径按 2.5~3.5m 的 16 种不同组合情况进行比较。比较结果为主干管和干管以两根口径 3.5m,支管以两根口径 3.0m

上海黄浦江上游引水工程管材技术经济比较表 表 1

引水量	430 万 m ³ /d					250 万 m ³ /d				
	管渠根数及尺寸 (mm)	工作压力 (10 ⁵ Pa)	流 速 (m/s)	水力坡降 (%)	综合造价 (元/m)	管渠根数及尺寸 (mm)	工作压力 (10 ⁵ Pa)	流 速 (m/s)	水力坡降 (%)	综合造价 (元/m)
钢筋混凝土暗渠	四 孔 宽×高 3600×3000	1.3	1.19	0.306	6900	三 孔 宽×高 3000×2900	1.3	1.11	0.307	5000
钢管	4 根 Ø2700	6.0	2.17	1.323	10000	3 根 Ø2450	6.0	2.05	1.33	6600

上海黄浦江上游引水工程二期管材经济比较表

表 2

方 案	流 速 (m/s)			工程造价 (万元)	年电费 (万元)	10%贴现率时工程造价加下述年限内的 电费现值 (万元)		
	主管渠	干管渠	支管渠			10a	15a	20a
钢筋混凝土渠道	1.24	1.19	1.29	46584	4532	74432	81056	85169
钢 管	3.31	1.92	1.89	58812	12277	134250	152193	163335
钢套筒钢筋混凝土管	3.31	1.92	1.89	50891	12277	126328	144272	155413

最为经济合理。

对 PCCP 管方案按钢管的推荐口径进行计算,由于其长距离运输较为困难,故其造价按就地制作的方法考虑。

三种管材的综合经济比较见表 2。从表中可看出,以工程造价及年电费按 10~20a 考虑,渠道方案最为经济。此外从施工难易程度、运输条件、工程量大小以及已具有一期的施工经验等因素分析,渠道方案也优于其它方案。故最后该工程采用了渠道方案。

70 年代引水规模达 60 万 m^3/d 、引水距离 13km 的金山石化给水工程也曾对钢筋混凝土渠道和钢管进行了比较,得出了类似的结论。当时还对渠道的形式进行了矩形和下部为矩形、上部为半圆拱的两种方案的比较。比较结果为:从混凝土量来说矩形比半圆拱多 20%;从钢筋用量来说约多 3%。考虑到半圆拱施工较难,同时在过河处平管与倒虹吸管联结也有一定难度,故最后也是采用了矩形管方案。

二、设计

(一)工艺设计

为保证渠道安全,在渠道上不设置检修闸板或闸门,因此较小(也是很大的)流量的三孔以内的长距离输水多孔渠道实际上是单管输水,为此在设计中考虑要有其它安全供水措施,如黄浦江上游引水工程就不废弃原有水厂的取水口作为安全供水措施等。对于较大流量的四孔渠道则可分为两个二孔渠道独立运行,以增加输水的安全性。

管渠的水力计算采用谢才公式,其中流速 V 、粗糙系数 n 直接关系到以后运行的能耗,流速 V 值取决于过水断面大小,设计中 V 值应尽量小,小到在近期低水量运行时能达到不

淤流速即可,粗糙系数 n 值取决于过水断面的表面粗糙程度,为降低 n 值,设计中规定渠道两内壁必须用钢模,底板上和顶板下必须用水泥砂浆抹光抹平,采取这些措施后,经过黄浦江上游引水一期工程实际运行后实测 n 值为 0.0115~0.012,比原设计采用的 0.013 下降了近 10%,估计以后长期运行后其 n 值也不会增高,但为了留有余地,在设计二期引水工程或在设计其它工程时仍采用 0.013。

管渠承受的最高经济内压,随着设计技术不断进步,已由 70 年代的 0.09MPa 发展到 80 年代的 0.135MPa,最近设计黄椒温引水工程时提高到 0.17MPa。这当然与断面尺寸大小也有关系。为了节约,一般长距离输水视距离长短可分为三、四级内压进行结构设计,如金山工程共分为 0.09, 0.06, 0.03MPa 三级,黄浦江上游引水共分为 0.135, 0.11, 0.09MPa 三级,黄椒温引水工程共分为 0.17, 0.14, 0.11MPa 三级,上海合流污水治理工程共分为 0.12, 0.10, 0.08MPa 三级。

渠道内水体是否需要投氯以杀除可能生长的藻类要视原水情况而定,在金山工程中设置了投氯设备,而在黄浦江上游引水工程中未设置投氯设备,但留有以后设置的场所。

为便于计量,在黄浦江上游引水工程中每个渠道进口处设置了矩形压力渠道的超声波流量计。

(二)结构设计

钢筋混凝土低压输水管渠的孔数及其尺寸按输水量、工作压力、流速、水力坡降等因素可分为单孔、双孔、三孔和四孔四种。如上海石化总厂黄浦江引水工程及黄椒温联合供水工

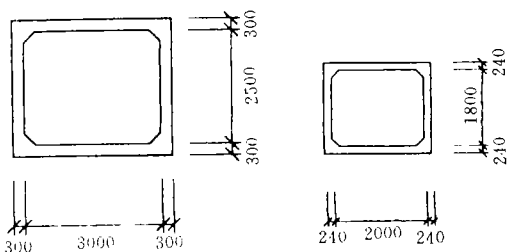


图3 上海石化单孔渠道

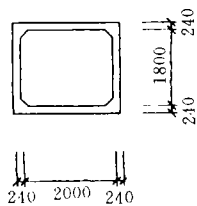


图4 黄浦江单孔渠道

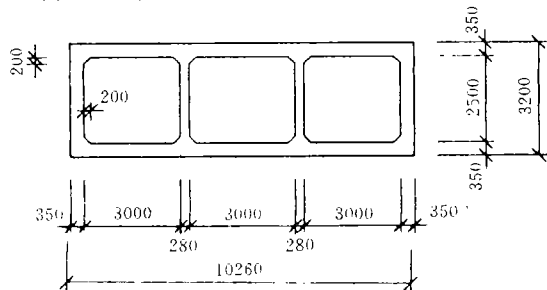


图5 黄浦江三孔管渠

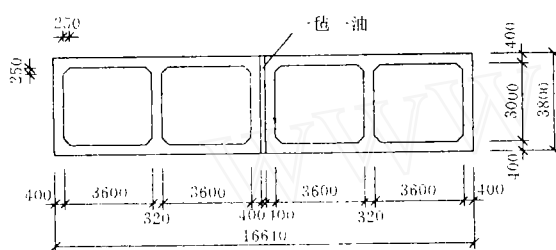


图6 黄浦江四孔管渠

程为单孔管渠,黄浦江上游引水工程为三孔和四孔管渠,单孔管渠尺寸应大于2m。以便于拆模和检修。详见图3、图4、图5、图6。

1. 结构计算

(1) 荷载和荷载组合

管渠承受内水压力、土压力、地面活载和外水压力四种荷载。

内水压力在直管段按常压分段计算。

土压力在直管段按覆土1.5m计,个别特殊地段按2.0m计算。倒虹管覆土按实际分别计算,一般按1.0、1.5m计,最大按5m计,但最小覆土厚度不少于0.5m。

地面活载在平直地段假定为40MPa,并考虑汽-10或汽-15车重,其它与公路等交叉处特殊地段按实际分别确定其活荷载值,一般按双列汽-20加重车计算。

外水压力在直段按地下水为地面下0.5m

计。

荷载组合按管外无覆土,管内承受内水压力(管道试压试验时)和管外已覆土、管内无水(施工完毕,尚未运行或检修、清理时)两种情况进行。

(2) 内力计算

管渠横向按弹性地基上框架和均布反力的框架两种情况进行计算,按其不利组合配筋。现以1985年设计的上海黄浦江上游引水工程三孔渠道为例,其内力计算结果详见图7、图8、图9、图10、图11。

① 渠外有土、水、活载,渠内无水

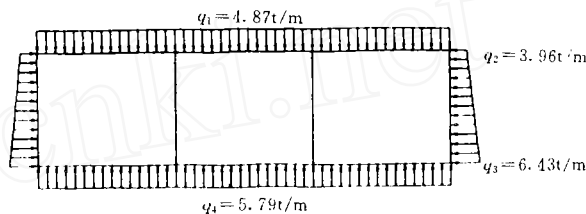


图7 计算图式

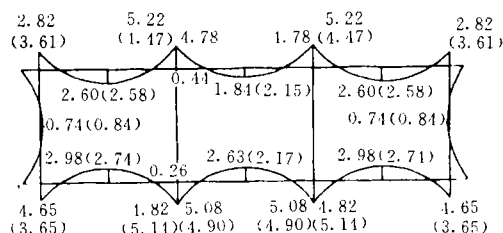


图8 弯矩图

注:图中括号内数字均为弹性地基框架计算内力值。

② 渠内有水,渠外无水、土及活载

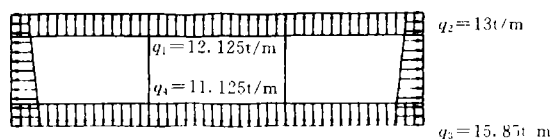


图9 计算图式

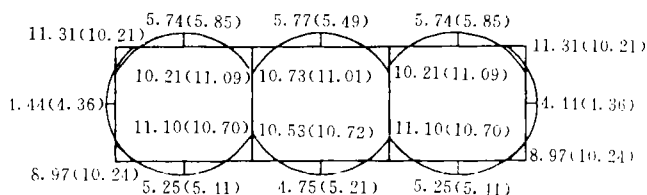


图10 弯矩图(注同前)

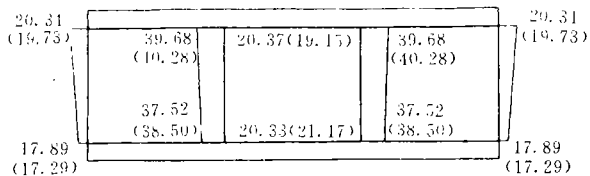


图 11 轴力图(注同前)

横向强度计算时,因管壁厚度较厚,尤其是周壁,直段有 32、35、40cm 三种,倒虹管段有 40、45、50cm 三种。按框架计算时,计算跨度以中-中进行内力计算和配筋,是过于安全的。为更合理设计,减少用钢量,采用将支座弯矩减去峰值,并取其内侧之弯矩值作为配筋依据,节省了钢材。

纵向按构造配筋,其配筋率一般应 $\geq 0.35\%$,即与外界接触处的顶、壁及底板上层纵向钢筋 $\geq 0.2\%$,其余 $\geq 0.15\%$ 。穿越公路的管渠、预制浮运倒虹管渠按文氏弹性地基梁考虑,一般中小型倒虹管渠纵向配筋率为 $0.4 \sim 0.45\%$ 。

2. 构造设计

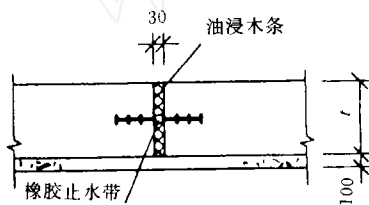


图 12 沉降伸缩缝甲

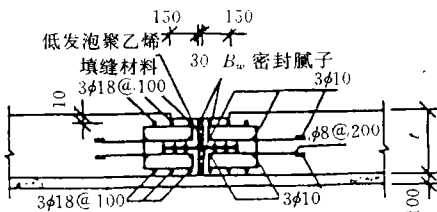


图 13 沉降伸缩缝乙(底板)

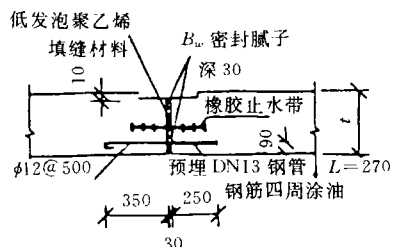


图 14 沉降伸缩缝乙(壁板)

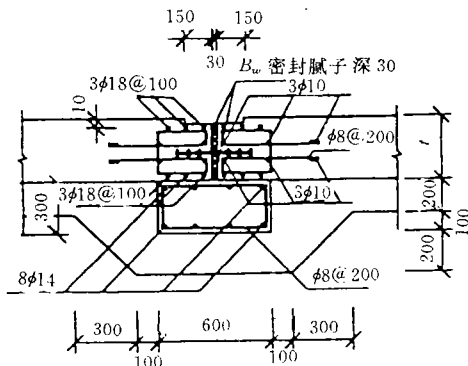


图 15 沉降伸缩缝丙(底板)(用于倒虹管渠)

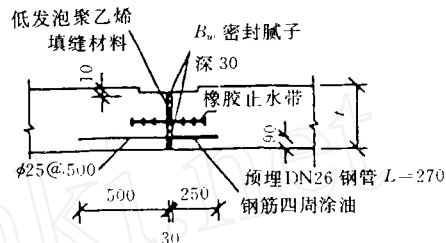


图 16 沉降伸缩缝丙(壁板)(用于倒虹管渠)

(1) 沉降伸缩缝

缝的间距按有关公式计算约为 23m,实际常取为 25m,预制倒虹管渠可降为 22m,管渠转折处可视地质情况降为 15~20m。倒虹渠两侧设有透气井的管渠,缝间距为 10m。

沉降缝的形式按壁、底部位和有无枕梁的不同情况常分为甲、乙、丙三种,见图 12、图 13、图 14、图 15、图 16。甲型用于 1986 年以前的工程,乙型、丙型为改进型,该两种型式区别是丙型适用于过河、过路的倒虹管渠。

(2) 止水带

①接缝止水材料采用特制橡胶止水带,近几年,用于盛水构筑物、输水渠道的止水带有下列两种型式,见图 17、图 18,宽为 320mm,其物理机械性能指标是:扯断力 $> 22\text{MPa}$,伸长率 $> 520\%$,永久变形 $< 25\%$,硬度(邵氏) $55^\circ \pm 5^\circ$,老化系数 $\geq 0.85(100^\circ\text{C}, 24\text{h})$ 。

除物理机械性能外,对外观质量也有要求:止水带中心部位 120mm 范围内不允许有缺陷、浮胶、气泡存在;在其它部位不允许有折裂现象,可允许有加工硫化时的气泡,限 5m 长度一个,但需经修复确保止水带的质量。

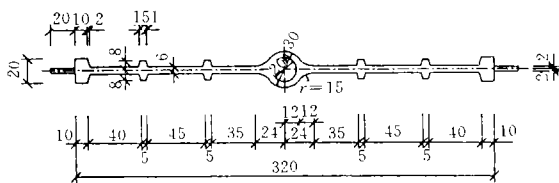


图 17 止水带甲

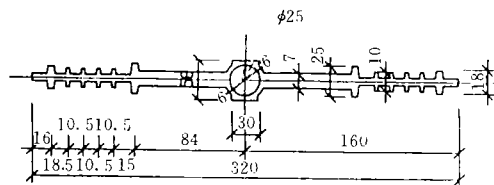


图 18 止水带乙

②氯丁橡胶内贴止水带,为确保渠道使用的百年大计,在黄浦江上游引水工程的部分倒虹管和过路管渠以及某些沉降伸缩缝施工时,其接缝止水带质量有较严重弊病处,增设了第二道内贴氯丁橡胶止水带,见图 19。粘结剂为环氧树脂砂浆。氯丁橡胶内贴止水带物理机械性能为:扯断强度 $>18\text{MPa}$,伸长率 $>600\%$,永久变形 $<20\%$,硬度(邵氏) $60^{\circ}\pm 5^{\circ}$,老化系数 $0.85(70^{\circ}\text{C}, 144\text{h})$ 。

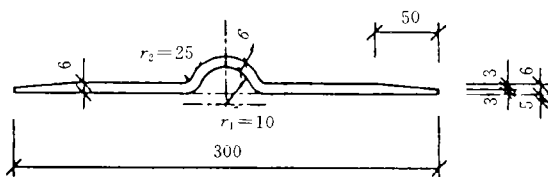


图 19 氯丁橡胶内贴止水带

(3) 枕梁

设置枕梁的目的是改善因地面活载过大或地基土质不均匀,造成沉降伸缩缝处止水带变形过大,使其与混凝土结合削弱,甚至脱开,导致渠道渗漏的措施之一。为降低工程造价,经济合理设置枕梁,特在过河倒虹管渠、过路和沉降明显差异的管段底板沉降伸缩缝处,设置 $600\times 300\text{mm}$ 枕梁一道,以调整不均匀沉降差。

3. 特殊管段处理

过去常采用转折井来连接管渠的转折点,增加工程量和造价。若改用管渠转折,尽量使转弯半径大,折角小。对不可避免需出现较小半径

时,控制折角不大于 45° ,此时管段除承受直管段所需承受的荷载外,还需外加水的推力。经计算分析,若折角小于 45° ,在渠道转折处加设翼墙,增加侧壁刚度和纵向钢筋等构造措施,并利用转折处管道的直线长度的管渠底的地基土摩擦力来确保。管渠竣工时对未覆土管渠加压泵验结果证明,上述观点其理论与实际相符,结构稳定可靠。

4. 粉煤灰新技术的应用

经试验与实践,决定在渠道中掺加 18% 磨细粉煤灰,其符合给排水构筑物的抗渗抗裂要求。既便于施工,又使工程质量明显提高,节约了水泥,降低了成本,充分体现了其技术经济效益。

(三)辅助构筑物设计

1. 透气井设计

由于渠道断面很大,单设管道排气阀来不及排除渠道内已存的或产生的气体(特别是刚启用时),为此设置较大断面的透气井。透气井设置在渠道的隆起点,在倒虹吸的两端以及在每隔 800~1000m 的平直段(溢流井也可作为透气井)。设计透气井尺寸时采用渠道断面的 1/10 左右。多孔渠道合并建造透气井。为便于施工,一般透气井在 1.0×1.0m 以上。

2. 溢流井设计

为调节上下游的流量差,避免各段管渠超过设计压力,在渠道中设置溢流井。溢流量按上游水泵机组 1.5 台流量计算。溢流水量排到就近可以承受的河道中。溢流口视需要进行块石护坡予以保护。

3. 检修井设计

为便于渠道检修设置压力检修井,检修井间距为 1km 左右,检修井大小考虑能进出各种小型检修设备,一般要大于 $2 \times 2\text{m}$,黄浦江上游引水工程中采用 $3.5 \times 2.8\text{m}$ 。井口高出地面 0.6m,用钢盖板封住,并在其上设置口径为 100mm 的自动排气阀。

4. 排水井设计

渠道低洼处设置排水井,在平直段做 0.08 ‰的坡度坡向排水井,以便于管渠排空进行检

修。排水井设在河道附近。

5. 穿越障碍物设计

穿越铁路的管渠委托铁路部门设计单位进行,其断面尺寸与输水管渠尺寸相同,不宜缩小,其标高根据总体竖向设计决定。至于是顶进还是扣轨施工由铁路部门决定。

穿越公路的管渠为大开挖施工,但由于施工工期较长,需设临时道路作过渡。

穿越河道皆为倒虹吸,渠顶覆土视河道等级而定,一般取 1.0~1.5m。设计倒虹吸时流速大于不淤流速。倒虹吸与平直段连接坡度为 1:6。采用就地围堰、井点降水和大开挖施工。

三、施工

(一)基坑开挖、堆土与回填土

1. 基坑开挖与排水

直管管渠开挖深度一般为 4.0~5.0m,过江倒虹管渠为 8~10m。考虑施工操作空间与基坑排水,需在管渠每侧加宽 1.5~2.0m。

若设井点降水,直段管渠边坡常取为 1:1.5,边坡上端靠近地面的 1.0m,其边坡可视土质情况降为 1:1.25~1:1。倒虹管边坡坡度下端取为 1:1.75~1:2,上端为 1:1.5。凡设边坡均需设置马道。

管渠基坑采用大开挖施工,以蟹斗挖泥和人工挖土结合。车辆外运土。一般应保留开挖到设计标高前 25cm 基土,以免扰动基土和长期暴露,待浇垫层前一次挖除,基坑开挖平整,严禁超挖。

2. 堆土与回填

基坑开挖的土方应堆放在稳定边坡线 3m 以外,堆土高度不得超过 2m,余土应及时外运以免超载,造成滑坡和坑底隆起。

基坑未覆土回填前应控制地下水位,并控制在管渠顶以下 80cm,以免管道浮动。

渠道回填土应两侧同时进行,避免因高差过大而滑动,渠道顶面覆土应均匀摊铺,避免因集中过载造成不均匀沉降。填土应在管渠试水泵验合格后方可进行,回填应分层轻夯。

(二)支模、拆模

采用组合钢模板,转角内腋角处,局部使用

木模。采用 $\varnothing 14$ 对拉螺栓,间距为 80~100cm,拉杆中间满焊钢板止水片。

管渠混凝土分两次浇捣,第一次浇至底板腋角以上 20~30cm 处,第二次是墙体和顶板一起连续捣制。为避免第二次浇捣墙体时错位,应将第一次最上层模板保留。

拆模时间,渠壁为 3~5d,顶板需在混凝土达到 70% 强度才可拆除。

(三)混凝土浇筑

渠道施工只设一道施工缝,分二次捣成。捣制时预先嵌上木条,使施工缝留成凹槽。渠壁墙体混凝土浇捣每 30cm 为一层,依次逐层到顶。底板、顶板浇筑从两端向中间分层浇筑,不留施工缝。

(四)沉降伸缩缝施工

止水带是浇筑在管渠结构缝处连接分段管渠的唯一止水承压材料,止水带中间圆环,应安装准确,保证模板与中心圆环的密贴,否则混凝土浆液可能流失,使止水带周围的混凝土形成蜂窝、空洞和麻面等,导致渗漏。一般来说,渠道顶板止水带施工较为困难,不如底板和壁板能达到密贴。其主要原因是底和壁板的止水带安装定位易保证,混凝土浇捣饱满,便于检查。顶板常由于止水带下面混凝土沉落和产生气泡、空洞、易使结构渗水。为确保止水带运输、储存、安装和混凝土捣制等质量,在施工过程中必须加强质量管理和监督检查,以确保管渠的整体质量。

(五)施工质量检验

为检验管渠的设计和施工质量,确保其使用安全,必须对管渠逐段进行试水泵验。以黄浦江引水工程为例,每段泵验长度为 200~800m。泵验时水荷载应逐级缓慢递增,管渠最大泵验压力,按相应管渠的渠顶设计工作压力为准,其最大值约为设计工作压力的 1.1 倍,直线管渠为 0.135MPa,倒虹管渠为 0.17MPa。

△作者通讯处:200092 上海市国康路

上海市政工程设计院

电话:(021)65026288 65026848-3207

收稿日期:1996-8-22