

工业供水工程PVC-UH 管道结构计算 及深覆段处理方案比选

——以巴州库尔勒石油石化产业园为例

李定钟

乌鲁木齐诚汇合鑫工程设计有限公司

摘要：文章介绍了库尔勒石油石化产业园工业供水工程的概况，针对PVC-UH管道进行结构计算，对深覆土段的处理方案进行了比选，选择较为经济合理的措施。为其他类似深覆土管道项目提供参考。

关键词：巴州库尔勒石油石化产业园工业供水工程；PVC-UH管道结构计算；深覆土段处理方案比选

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.21.118

一、项目概况

(一) 工程概况

巴州库尔勒石油石化产业园工业供水工程是为了解决巴州库尔勒市石油石化产业园工业用水的用水需求。工程主要由输水管道、管道附属设施（包括3万方清水池、减压池、镇墩、排气阀井、放空阀井、流量计井、检修阀井及检查井）、管道附件（包括排气阀、放空阀、伸缩节、流量计及检修阀）及自动化系统组成。

本工程供水对象为石油石化产业园，供水规模为14.41万m³/d，即0.53×10⁸ m³/年，且该工业园区为大型企业，确定保护对象为非常重要，确定本工程属于I等大（1）型工程；主要建筑物级别为1级（输水管道及3万m³清水池），次要建筑物级别为2级（包括管道附属设施及管道附件）。

(二) 管线布置

管线从东环路与北环路路口水厂出水管为起点，从桩号0+000到桩号8+335沿东环路西侧布设，从桩号8+335到桩号16+770沿鼎兴路南侧向西布设，桩号16+770至桩号34+540段沿规划道路中的南北向西环路布设，桩号37+050至末端沿规划建设道路库铁大道进行布设，最后进入3万m³清水池后，通过泵站向园区供水。在管道桩号44+037处，接入汇水支管1条，水源为该桩号南侧2km处的兰干乡污水处理厂，通过DN800钢管水泵加压汇入输水主管道。在桩号45+138处，设置分水支管1条，向北分水至预留上库综合产业园清水池。在桩号87+724处，设置分水支管1条，向南分水至预留铁门关双丰工业园清水池。根据水力计算及工程总体布置，在工作压力超过0.4Mpa的管段采用Q345C级DN1200壁厚为12.5mm的钢管，其余管段采用PVC-UHDe1200PN1.0。

(三) 工程地质

拟建管线沿线工程地质分为雀河冲洪积古三角洲区、孔雀河冲洪积三角洲区及霍拉山山前冲洪积扇下缘区。场地地势总体由北向南、由东向西倾微斜，地形较为平坦。

1、K0+000~K17+700段，地层以第四纪全新世

(Q₄)及第四纪上更新世(Q₃)冲洪积形成的角砾、粉土、中砂、细砂、砾砂及圆砾为主。

2、K17+700~K34+200段，地层以第四纪全新世(Q₄)及第四纪上更新世(Q₃)冲洪积形成的圆砾、粉土、细砂、砾砂为主。

3、K34+200~K53+300段，地层以第四纪全新世(Q₄)冲洪积形成的粉土、黄土状粉土及细砂为主。

4、K53+300~K88+600段，地层以第四纪全新世(Q₄)冲洪积形成的粉土、黄土状粉土、细砂、中砂、粉砂为主。

5、K88+600~K97+003段，地层以第四纪全新世(Q₄)冲洪积形成的粉土、细砂、粉砂为主。

二、管道结构计算

本工程采用的De1200的PVC-UH管道，在全国尚无案例可查。对于PVC-UH管材管道，目前仅有生产制造标准，无专门的结构设计规程。本项目设计过程中参照《埋地塑料给水管道工程技术规程》(CJJ 101-2016)中PVC-U管进行结构设计。施工过程中PVC-UH管道的安装、施工质量检验、验收参照《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268-2008)中硬聚氯乙烯管执行。本论文只针对工程中采用的PVC-UH管道进行结构计算。

(一) 埋地管道结构计算条件

管道管材为PVC-UHDe1200PN1.0时；管道外径为1200mm，壁厚为45.9mm；管材拉伸强度设计值 $f_p=15.6\text{Mpa}$ ；管材弯曲强度设计值 $f_m=20.3\text{Mpa}$ ；管道弹性模量 $E_p=3000\text{N/mm}^2$ ；管道的泊松比 $\nu_p=0.4$ 。

根据地质报告，0+000~26+500段，管道位于粉质黏土层，土壤容重 19kN/m^3 ，变形模量 18Mpa 。26+500~31+400段、37+000~95+950段，管道位于粉土层，土壤容重 18kN/m^3 ，变形模量 9Mpa 。31+400~37+000段，管道位于圆砾层，土壤容重 22kN/m^3 ，变形模量 30Mpa 。

管道两侧土综合变形模量取 $E_d=5\text{Mpa}$ ，计算覆土容重选用各种地层中的最大值，即 22kN/m^3 。

本论文阐述管道工作压力 0.3Mpa ，覆土深度为 4.5m 时详细计算过程，其余工况计算过程类似，不再赘述，计算结果已在计算结论中论述。

(二) 一般规定

根据《埋地塑料给水管道工程技术规程》(CJJ101-2016)，设计内水压力标准值应按式计算：

$$F_{wd,k}=1.5F_{wk} \quad (4.1.7-1)$$

式中: $F_{wd, k} = 1.5 \times 0.3 = 0.45 \text{Mpa}$

F_{wk} —该计算断面工作压力为0.3Mpa。

管道系统设计内水压力不应大于管材最大工作压力。管道的最大工作压力应按下式计算:

$$MOP = PN \cdot f_t \quad (4.1.6)$$

式中: MOP—管道的最大工作压力 (Mpa); PN—管道的公称压力 (Mpa); 选用管材公称压力为1.0Mpa。

f_t —本工程水温取20℃, 折减系数为1;

计算得MOP=1.0Mpa, 大于管道设计内水压力0.45Mpa, 满足要求。

(三) 结构计算

1、极限承载力强度按下式计算:

$$\gamma_0(\psi_c \sigma_p + \alpha_f r_c \sigma_m) \leq f_t f_p \quad (4.4.4-1)$$

$$\alpha_f = f_p / f_m \quad (4.4.4-2)$$

$$r_c = 1 - F_{wk} / 3 \quad (4.4.4-3)$$

式中: γ_0 —取1.0;

ψ_c —取0.9。

σ_p —根据后续计算为7.92Mpa;

$\alpha_f = 15.6 / 20.3 = 0.77$;

$r_c = 1 - 0.3 / 3 = 0.9$;

σ_m —根据后续计算为12.07Mpa;

f_t —本工程水温取20℃, 折减系数为1;

f_p —本次为PVC-UH管道, 为15.6Mpa;

f_m —本次为PVC-UH管道, 为20.3Mpa;

$$\gamma_0(\psi_c \sigma_p + \alpha_f r_c \sigma_m) = 1 \times (0.9 \times 7.92 + 0.77 \times 0.9 \times 12.07) = 15.48 \text{Mpa}$$

$$f_t f_p = 1.0 \times 15.6 = 15.6 \text{Mpa}$$

根据计算可知, $15.48 < 15.6$,

即 $\gamma_0(\psi_c \sigma_p + \alpha_f r_c \sigma_m) \leq f_t f_p$, 满足规范要求。

管道内设计内水压力产生的管壁环向拉应力按下式计算:

$$\sigma_p = \frac{\gamma_Q \eta F_{wd, k} D_0}{2t} \quad (4.4.5)$$

式中: γ_Q —取1.4;

η —PVC-UH管道可取1.0;

$D_0 = 1200 - 45.9 = 1154.1$;

t —管壁计算厚度 (mm), 45.9mm;

$$\sigma_p = \frac{1.4 \times 1 \times 0.45 \times 1154.1}{2 \times 45.9} = 7.92 \text{Mpa}$$

管道在外压力作用下, 管壁最大的环向弯曲应力按下式计算:

$$\sigma_m = 0.88 D_f E_p \frac{t(\gamma_G q_{sv, k} + \gamma_Q q_{v, k}) D_1 K_d}{D_0^2 (8SN + 0.061 E_d)} \quad (4.4.6-1)$$

$$SN = \frac{E_p I_p}{D_0^3} \quad (4.4.6-2)$$

式中: D_f —环刚度为15.76kN/m², 查表取3.5。

E_p —取3000 Mpa;

γ_G —取1.27;

$q_{sv, k} = \gamma_s HD_1 / D_0 / 1000$

$$= 22 \times 4.5 \times 1200 / 1154.1 / 1000 = 0.103;$$

γ_Q —取1.40;

$q_{v, k}$ —取值为10kN/m²即0.01N/mm²;

D_1 —取1200mm;

E_d —取5Mpa;

K_d —查表取0.096。

SN—管道的刚度等级 (N/mm²);

$I_p = 1/12 t^3 = 8058.55$;

$$SN = \frac{E_p I_p}{D_0^3} = \frac{3000 \times 8058.55}{1154.1^3} = 0.01573 \text{ (N/mm}^2\text{)}, \text{ 即 } 15.73 \text{ kN/m}^2.$$

$$\sigma_m = 0.88 \times 3.5 \times 3000 \times \frac{45.9 \times (1.27 \times 0.103 + 1.4 \times 0.01) \times 1200 \times 0.096}{1154.1^2 \times (8 \times 0.01573 + 0.061 \times 5)}$$

= 12.07 (Mpa)

2、管壁截面的环向稳定性验算:

$$F_{cr, k} \geq K_{st}(F_{sv, k} + q_{v, k} + F_{v, k})$$

式中 $F_{cr, k}$ ——管壁截面的临界压力 (N/mm²);

$F_{sv, k}$ ——根据前述章节计算取0.103;

K_{st} ——不应小于2.0;

$q_{v, k}$ ——根据前述章节计算取0.01;

$F_{v, k}$ ——取0.1;

$$F_{cr, k} = \frac{2\eta_E E_p (n^2 + 1)}{(SDR - 1)(1 - \nu_p^2)} + \frac{E_d}{2(n^2 - 1)(1 + \nu_s^2)}$$

η_E ——PVC-U管材可取0.45;

E_p ——取3000 Mpa;

n ——其取值应使 $F_{cr, k}$ 为最小并为不小于2的正整数;

$$SDR = 1200 / 45.9 = 26.14$$

E_d ——取5 Mpa;

ν_s ——根据地质参数取0.4。

ν_p ——取0.40。

根据试算, $n=2$ 时, $F_{cr, k}$ 最小,

$$\text{此时 } F_{cr, k} = \frac{2 \times 0.45 \times 3000(2^2 + 1)}{(26.14 - 1)(1 - 0.4^2)} + \frac{5}{2(2^2 - 1)(1 + 0.4^2)} = 1.10 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{st} \text{ 取 } 2 \text{ 时, } K_{st}(F_{sv, k} + q_{v, k} + F_{v, k}) = 2 \times (0.1 + 0.103 + 0.01) = 0.426 \text{ N/mm}^2$$

根据计算可知, $1.1 > 0.426$, $F_{cr, k} \geq K_{st}(F_{sv, k} + q_{v, k} + F_{v, k})$, 管壁截面稳定满足要求。

3、竖向变形按下式计算:

$$\omega_{d, \max} \leq 0.05 \text{ m}$$

D_0 —管道计算直径 (mm), 即管道外径减壁厚 = 1200 - 45.9 = 1154.1;

$$\omega_{d, \max} = \frac{D_L (q_{sv, k} + \psi_q q_{v, k}) D_1 K_d}{8\eta_E SN + 0.061 E_d}$$

式中 D_L ——本工程取1.45;

$$q_{sv, k} = \gamma_s HD_1 / D_0 = 22 \times 4.5 \times 1200 / 1154.1 = 102.93;$$

$q_{v, k}$ —取值为10kN/m²;

ψ_q —取0.5。

η_E ——取0.45;

D_1 ——取1.2m;

K_d —查表取0.096。

E_d ——取5Mpa;

SN—根据前节计算为0.01573 N/mm²。

$$\omega_{d, \max} = \frac{D_L (q_{sv, k} + \psi_q q_{v, k}) D_1 K_d}{8\eta_E SN + 0.061 E_d} = \frac{1.2 \times (102.93 + 0.5 \times 10) \times 1.45 \times 0.096}{8 \times 0.45 \times 0.01573 + 0.061 \times 5} = 49.89$$

(mm)

$$0.05D_0 = 0.05 \times 1154.1 = 57.71 \text{ (mm)}$$

49.89 < 57.71, $\omega_{L,max} \leq 0.05D_0$, 管道在作用效应永久组合下的最大长期竖向变形满足规范要求。

根据计算, 管道工作压力为0.3Mpa, 管顶覆土为4.5m时, 管道稳定性满足要求。

同理可计算其他工况管道稳定性。

(四) PVC-UH管道结构计算结论

不同管段地质条件、工作压力、覆土深度结构计算成果表如下:

根据上表计算结果可知, 在表中给出的工作压力

PVC-UH管道结构计算成果表 ($E_d=5\text{Mpa}$)

设计工作压力 (Mpa)	覆土深度	管道极限承载强度 (Mpa)		管壁临界压力 (Mpa)		竖向变形 (mm)	
		计算值	允许值	计算值	允许值	计算值	允许值
0.2	5.7	15.50	15.60	0.48	1.10	62.58	57.71
0.3	4.5	15.48	15.60	0.43	1.10	49.89	57.71
0.35	3.9	15.53	15.60	0.40	1.10	43.55	57.71
0.4	3.2	15.45	15.60	0.37	1.10	36.15	57.71

下, 覆土深度已基本达到极限。本次管道覆土深度不应超过表中给出数值, 若超出应采取措施对管道进行保护。

三、深覆土段处理方案比选

针对不同压力管段覆土深度超过上述计算值的管段, 拟采用混凝土包封和采用中粗砂掺水泥两个方案对报道进行保护。比选如下:

方案一: 采用混凝土包封, 并由混凝土承受全部外荷载。包封尺寸为1.8m×1.8m, 每米混凝土用量为2.1m³, 价格约为1155元/米。

方案二: 在管腔两侧采用中粗砂掺水泥。根据深圳市北线引水工程中的实验, 当中粗砂掺12%水泥时, 管侧土的综合变形模量可达12Mpa, 由于深圳市北线引水工程中实验段地层条件和本工程深覆土段地层基

本相同, 故可引用该实验数据, 并在本工程施工时进行相关实验进行验证。为保守起见, 中粗砂掺12%水泥时, 管侧土的综合变形模量取10Mpa。每米使用水泥量约为450kg, 中粗砂用量为2.35m³, 价格约为340元/米。

经过比选, 最终采用中粗砂掺水泥的方案

四、管腔两侧采用中粗砂掺水泥情况的管道结构计算结论

本次采用管道两侧填土采用中粗砂掺12%水泥的方法提高管道两侧土的综合变形模量。根据试验中粗砂掺12%的水泥后, 综合变形模量可达11Mpa, 本次计算采用10Mpa。经过计算采用中粗砂掺12%的水泥后, 管道允许覆土深度增加, 管道埋深均在允许覆土深度以内, 可以满足要求。

管道在不同工作压力下结构计算表 (管两侧中粗砂掺12%水泥, $E_d=10\text{Mpa}$)

设计工作压力 (Mpa)	覆土深度	管道极限承载强度 (Mpa)		管壁临界压力 (Mpa)		竖向变形 (mm)	
		计算值	允许值	计算值	允许值	计算值	允许值
0.2	9.8	15.21	15.60	0.67	1.56	57.41	57.71
0.3	8.1	15.54	15.60	0.59	1.56	47.67	57.71
0.35	7	15.52	15.60	0.54	1.56	41.36	57.71
0.4	5.9	15.53	15.60	0.49	1.56	35.06	57.71

经过计算, 管道两侧填土采用中粗砂掺12%水泥后, 管道强度均满足要求。需要采用中粗砂掺12%水泥回填管侧土的管道共有2796.64m, 其中左线管段共有1291.73m, 右线管段共有1504.91m。

五、结论及建议

本论文通过对PVC-UH管道进行结构计算, 对覆土较深的管段对比了混凝土包封和中粗砂掺12%水泥的方案, 经过比选, 混凝土包封方案每米价格远高于采用中粗砂掺水泥方案, 最终推荐采用管腔土回填采用中粗砂

掺12%水泥。在设计过程中应针对不同覆土深度进行结构计算, 并采用合适的措施提高管侧土综合变形模量, 可以有效提高管道的承载力。在施工过程中也应严格按照规范及设计要求进行施工, 才能保证管道能够达到设计的承载力, 不发生破坏。为其他类似深覆土管道项目提供参考。

参考文献

[1] 余俊云. 山西省阳湾则水库工业供水工程管线设计[J]. 山西建筑, 2009, 35(35): 2.