

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB 50470 – 2008

油气输送管道线路工程 抗震技术规范

Seismic technical code for oil and gas
transmission pipeline engineering

2008 – 11 – 27 发布

2009 – 07 – 01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

中华人民共和国国家标准

油气输送管道线路工程
抗震技术规范

Seismic technical code for oil and gas
transmission pipeline engineering

GB 50470 - 2008

主编部门：中国石油天然气集团公司

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2 0 0 9 年 7 月 1 日

中国计划出版社

2009 北 京

中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 168 号

关于发布国家标准《油气输送 管道线路工程抗震技术规范》的公告

现批准《油气输送管道线路工程抗震技术规范》为国家标准，编号为GB 50470—2008，自 2009 年 7 月 1 日起实施。其中，第 4.1.1、4.1.2、6.1.1 条为强制性条文，必须严格执行。

本规范由我部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

二〇〇八年十一月二十七日

前 言

本规范是根据建设部“关于印发《2006 年工程建设标准规范制订、修订计划(第二批)》的通知”(建标〔2006〕136 号)的要求,由中国石油天然气管道局会同有关单位共同编制完成。

本规范共分 9 章和 6 个附录,主要内容包括:总则,术语和符号,一般规定,抗震设防要求,工程勘察及场地划分,管道抗震设计,管道抗震措施,管道抗震施工和管道线路工程抗震验收。

本规范在编制过程中,编制组总结了多年油气输送管道抗震设计、施工和验收的经验,借鉴了国内已有的标准以及国外先进规范,并广泛征求了国内有关单位、专家的意见,经反复修改,最后经审查定稿。

本规范中以黑体字标志的条文为强制性条文,必须严格执行。

本规范由住房和城乡建设部负责管理和对强制性条文的解释,由中国石油天然气管道局负责具体技术内容解释。本规范在执行过程中,请各单位结合工程实践,总结经验,积累资料,如发现需要修改或补充之处,请将意见和建议反馈给中国石油天然气管道局质量安全环保部(地址:河北省廊坊市广阳道 87 号,邮政编码:065000),以便今后修订时参考。

本规范主编单位、参编单位和主要起草人:

主 编 单 位: 中国石油天然气管道局

参 编 单 位: 中国海洋大学

中国石油天然气股份有限公司管道分公司

中国石油天然气管道工程有限公司

中国地震局工程力学研究所

中国地震局地球物理研究所

中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司

中油朗威监理有限责任公司

中油中州工程监理有限公司

主要起草人：马 骅 冯启民 高泽涛 王锦生 张怀法
刘根友 刘爱文 于尔捷 王玉洲 何莉娟
吴建中 佟 雷 孟国忠 杨晓秋 胡道华
高惠英 续 理 郭恩栋 戚雪疆 鲍 宇
蔡晓悦

目 次

1	总 则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(2)
3	一般规定	(9)
4	抗震设防要求	(10)
4.1	抗震设防标准	(10)
4.2	地震安全性评价	(10)
5	工程勘察及场地划分	(12)
5.1	工程勘察	(12)
5.2	管道场地划分	(13)
6	管道抗震设计	(16)
6.1	一般埋地管道抗震设计	(16)
6.2	通过活动断层的埋地管道抗震设计	(19)
6.3	液化区埋地管道抗震设计	(22)
6.4	震陷区埋地管道抗震设计	(23)
6.5	穿越管道抗震设计	(24)
6.6	管道跨越工程抗震设计	(26)
7	管道抗震措施	(30)
7.1	通用抗震措施	(30)
7.2	专项抗震措施	(30)
8	管道抗震施工	(33)
8.1	一般规定	(33)
8.2	材料检查与验收	(33)

8.3	管道的焊接安装与试压	(33)
8.4	埋地管道抗震施工	(34)
8.5	穿跨越管道抗震施工	(37)
9	管道线路工程抗震验收	(40)
附录 A	管道场地地段划分	(42)
附录 B	滑坡体的稳定性验算	(43)
附录 C	管道沿线饱和砂土和饱和粉土的地震 液化判别	(46)
附录 D	管材性能和拉伸应变	(49)
附录 E	通过活动断层埋地管道有限元方法的 弹簧参数	(51)
附录 F	管道抗震施工检查报告表	(55)
	本规范用词说明	(61)
	附:条文说明	(63)

1 总 则

1.0.1 为贯彻《中华人民共和国防震减灾法》，保障油气输送管道线路工程安全，达到经济、适用的目的，满足使用功能要求，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于地震动峰值加速度大于或等于 $0.05g$ 至小于或等于 $0.40g$ 地区的陆上钢质油气输送管道线路工程的新建、扩建和改建工程的抗震勘察、设计、施工及验收。

1.0.3 油气输送管道线路工程勘察、设计、施工及验收，除应执行本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 管道场地 pipeline site

以管道轴线为中心每侧 200m 宽的范围。

2.1.2 重要区段 important section for pipeline

输气干线管道经过的四级地区的区段以及在所经过的河流、湖泊、水库和人口密集区设置的管道两端截断阀之间的输油气干线管道区段。

2.1.3 一般区段 general section for pipeline

除重要区段以外的油气输送管道区段。

2.1.4 危险地段 dangerous area

全新世活动断层及地震时可能发生地裂、滑坡、崩塌、严重液化、地陷等地段。

2.1.5 管道线路工程设计地震动参数 seismic design parameters of ground motion for oil and gas pipeline

管道线路工程抗震设计所采用的对应于 50 年超越概率 10%、5% 或 2% 的设计地震动峰值加速度、峰值速度、反应谱特征周期、地震动时间过程曲线等参数。

2.2 符 号

A ——管道横断面面积；

a ——设计地震动峰值加速度；

C_i ——第 i 块滑坡体沿滑动面岩土粘聚力；

c ——土的粘聚力；

D ——管道外径；

D_L ——土弹簧间距；
 d ——场地土层计算深度；
 d_0 ——液化土特征深度；
 d_b ——管道底部埋置深度；
 d_i ——场地土层计算深度范围内第 i 土层的厚度；
 d_i^L —— i 点所在土层厚度；
 d_s ——饱和土标准贯入试验点深度；
 d_{si} ——第 i 个标准贯入点的深度；
 d_u ——上覆盖非液化土层厚度；
 d_w ——地下水位深度；
 E ——管道材料的弹性模量；
 E_1 ——管道应力-应变简化折线中弹性区的材料模量；
 E_2 ——管道应力-应变简化折线中弹塑性区的材料模量；
 E_i ——第 i 块滑坡体的剩余下推力；
 E_{i-1} ——第 $i-1$ 块滑坡体的剩余下推力；
 F ——作用于等效非线性弹簧的外力；
 F_i ——滑坡体第 i 土条的地震水平力；
 f_u ——沿管轴方向管土之间的滑动摩擦力；
 f_{ak} ——由载荷试验等方法得到的地基承载力特征值；
 f_s ——沿管轴方向土壤与管道外表面之间单位长度上的摩擦力；
 g ——重力加速度；
 H ——管道轴线至管沟上表面之间的埋深；
 I ——管道横断面惯性矩；
 I_{LE} ——液化指数；
 I_P ——塑性指数；
 K_s ——地基反力模量；
 K_{sl} ——滑坡体稳定系数；
 k ——滑坡体安全系数；

- k_0 ——土壤压力系数；
- k_s ——地基弹簧常数；
- L ——摩擦力 t_u 作用的有效长度；
- L_i ——滑坡体每条土的滑动弧的长度；
- L'_i ——土体滑动的长度；
- L_t ——断层一侧的管道滑动长度；
- L_y ——管道在液化域中的长度；
- N_0 ——液化判别标准贯入锤击数基准值；
- $N_{63.5}$ ——饱和土标准贯入锤击数实测值；
- N_c ——管道开始失稳时的临界轴向力；
- N_{ch} ——水平横向考虑土体粘聚力的计算参数；
- N_{cr} ——液化判别标准贯入锤击数临界值；
- N_{cri} —— i 点标准贯入锤击数的临界值；
- N_{cvd} ——垂直向下土弹簧的计算参数；
- N_{cvu} ——垂直向上考虑土体粘聚力的计算参数；
- N_i ——滑坡体每条土的法向重力；
- N_i^l —— i 点标准贯入锤击数的实测值；
- N'_i ——作用于第 i 块段滑动面上的法向分力；
- N_q ——计算管道法向土壤压力的参数；
- N_{qh} ——水平横向与土体内摩擦角有关的计算参数；
- N_{qvd} ——垂直向下土弹簧的计算参数；
- N_{quv} ——垂直向上与土体内摩擦角有关的计算参数；
- N_r ——垂直向下土弹簧的计算参数；
- n ——场地土层计算深度范围内土层的分层数；
- n_t ——7m 深度范围内每一个钻孔标准贯入试验点的总数；
- P_u ——埋设场地土沿水平横向对管道的压力；
- p_u ——场地土屈服抗力；
- q_u ——垂直向上土对管道的压力；
- q_{ul} ——垂直向下土对管道的压力；

r ——弹性敷设的弯曲半径；
 S_{GE} ——重力荷载代表值的效应；
 S_K ——跨越结构构件内力组合的标准值，包括组合的弯矩、轴向力和剪力标准值；
 S_{LK} ——横向地震作用标准值的效应；
 S_{PK} ——纵向地震作用标准值的效应；
 S_{TK} ——温度作用标准值的效应；
 S_{VK} ——竖向地震作用标准值的效应；
 S_{WK} ——风荷载标准值的效应；
 S_{YK} ——内压作用标准值的效应；
 T_g ——设计地震动反应谱特征周期；
 T_i ——滑坡体每条土的切向重力；
 T'_i ——作用于第 i 块段滑动面上的滑动分力；
 t ——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间；
 t_u ——土壤作用在管道上的单位长度的摩擦力；
 V_s ——土层剪切波速；
 V_{se} ——场地土层等效剪切波速；
 V_{si} ——场地土层计算深度范围内第 i 土层的剪切波速；
 v ——设计地震动峰值速度；
 W ——管道上表面至管沟上表面之间的土壤单位长度上的重力；
 W_i ——滑坡体第 i 土条的重量；
 W'_i ——第 i 块段岩土的重量；
 W_p ——管道和内部介质的自重；
 w_i —— i 土层考虑单位土层厚度的层位影响权函数；
 X_u ——水平横向土弹簧的屈服位移；
 Y_u ——垂直向上土弹簧的屈服位移；
 Y_{ul} ——垂直向下土弹簧的屈服位移；
 y_0 ——场地震陷量；

- y_u ——土壤屈服位移；
 Z_u ——管轴方向土弹簧的屈服位移；
 Z_{0i} ——第 i 层土中点的深度；
 β ——活动断层带与管道轴线的夹角；
 θ_i ——滑坡体第 i 土条滑动面与水平的夹角；
 θ'_i, θ'_{i-1} ——分别是第 i 块和第 $i-1$ 块滑坡体的滑动面与水平面的夹角；
 δ ——管道壁厚；
 λ ——模量系数；
 ϕ ——土的内摩擦角；
 ϕ_1 ——管道与土壤之间的内摩擦角；
 ϕ_i ——第 i 块滑坡体沿滑动面岩土的内摩擦角；
 ϕ_F ——滑动面土体的内摩擦角；
 φ_{et} ——拉伸应变承载系数；
 μ ——土壤与管道外表面之间的摩擦系数；
 ρ ——输送介质的密度；
 ρ_m ——管道材料的密度；
 ρ_s ——回填土的密度；
 ρ_{sl} ——管道周围场地土的密度；
 ρ_c ——粘粒含量百分率；
 ε ——由于内压和温度变化产生的管道轴向应变；
 ε_1 ——管道应力-应变简化折线中弹塑性变形起点处的应变；
 ε_2 ——管道应力-应变简化折线中弹塑性区与塑性区交点处的应变；
 $\varepsilon_{i, \max}$ ——管道在上浮位移反应最大时的附加应变；
 ε_{\max} ——地震动引起管道的最大轴向拉、压应变；
 ε_{new} ——管道内的拉伸应变；
 ε_e ——弹性敷设时管道的轴向应变；

- ϵ_n ——轴向力引起的弯管轴向应变；
- ϵ_m ——弯矩引起的弯管最大弯曲应变；
- ϵ_s ——管材屈服极限对应的应变；
- ϵ_{Smax} ——管道在场地竖向震陷位移作用下的最大附加弯曲应变；
- ϵ_{max}^b ——地震动引起的弯管最大轴向应变；
- ϵ_{max}^F ——断层位移引起的管道最大拉伸应变；
- ϵ_{max}^t ——断层位错引起管道内的最大拉伸应变；
- ϵ_{max}^c ——断层位错引起管道内的最大压缩应变；
- ϵ_t^{crit} ——钢管及组焊管段的极限拉伸应变；
- $[\epsilon_t]_V$ ——埋地管道抗震设计轴向容许拉伸应变；
- $[\epsilon_c]_V$ ——埋地管道抗震设计轴向容许压缩应变；
- $[\epsilon_t]_F$ ——埋地管道抗断的轴向容许拉伸应变；
- $[\epsilon_c]_F$ ——埋地管道抗断的轴向容许压缩应变；
- σ_0 ——管道应力-应变简化折线中弹塑性段延长线与应力轴相交处的应力；
- σ_1 ——管道应力-应变简化折线中弹塑性变形起点处的应力；
- σ_2 ——管道应力-应变简化折线中弹塑性区与塑性区交点处的应力；
- σ_a ——由于内压和温度变化产生的管道轴向应力；
- σ_b ——拉伸强度极限；
- σ_N ——组合的轴向应力；
- σ_h ——组合的环向应力；
- σ_s ——管道材料的标准屈服强度；
- σ_t ——管道由温度引起的初始轴向压应力；
- σ_e ——由地震动产生的管道应力；
- $[\sigma_c]$ ——管道在地震等组合荷载作用下的容许压应力；
- Δ ——管道在液化土层中最大上浮位移；

ΔL ——在外力作用下等效非线性弹簧的伸长量；
 ΔL_1 ——断层位错引起的管道几何伸长；
 ΔL_2 ——管道内轴向应变引起的物理伸长；
 ΔH ——水平方向的断层位移；
 ΔX ——平行于管道轴线方向的断层位移；
 ΔY ——管道法线方向的断层位移；
 ΔZ ——垂直方向的断层位移；
 ψ ——滑坡体各块之间的传递系数；
 ψ_{LK} ——横向地震作用组合值系数；
 ψ_{PK} ——纵向地震作用组合值系数；
 ψ_T ——温度作用组合值系数；
 ψ_{VK} ——竖向地震作用组合值系数；
 ψ_W ——风荷载组合值系数；
 ψ_Y ——内压作用组合值系数；

3 一般规定

3.0.1 油气输送管道线路工程设计文件中,应提出工程抗震设防依据和设防标准。

3.0.2 油气输送管道线路工程抗震设计应符合下列要求:

1 抗震设计应技术先进、安全可靠、经济合理。

2 应采取防止和减少地震时次生灾害发生的措施。

3.0.3 抗震措施应根据管道线路工程的重要性、设计地震动参数、场地类型、工程地质情况以及发生地震灾害的影响程度进行综合分析对比后提出。

3.0.4 当管道穿越场地在设计地震动参数下具有中等或严重液化潜势时,应分析液化对管道的影响。

3.0.5 油气输送管道线路工程勘察选址时,应收集沿线地震活动性和地震构造的有关资料,应对抗震有利、不利和危险地段做出综合评价。

3.0.6 场地地段划分应符合本规范附录 A 的规定,应选择对抗震有利的场地,宜避开不利地段和危险地段,对绕避不开的地段,应按本规范采取抗震措施,并应防止或减少地震时次生灾害的发生。

3.0.7 管道穿跨越位置应选择在良好的地基和稳定地段,滑坡体的稳定性可按本规范附录 B 进行验算。当无法避开液化土和软土地基时,管道宜选择短距离跨越。

3.0.8 在油气输送管道线路工程设计文件(图件)中,应明确抗震措施;对抗震专用材料和构件、配件应提出材质、规格、数量及安装要求。

4 抗震设防要求

4.1 抗震设防标准

4.1.1 一般区段管道抗震设计采用的地震动参数应符合现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 的规定,已进行了地震安全性评价工作的,应按审定的 50 年超越概率 10% 的地震动参数结果进行抗震设计。

4.1.2 重要区段管道抗震设计采用的地震动参数,应按地震安全性评价或经专门研究审定后的文件确定。采用 50 年超越概率 5% 的地震动参数进行抗震设计,其中大型跨越及埋深小于 30m 的大型穿越管道,应按 50 年超越概率 2% 的地震动参数进行抗震设计。

4.2 地震安全性评价

4.2.1 地震安全性评价宜在可行性研究阶段进行,其结果应包括下列内容:

- 1 管道沿线场地地震活动性评价。
- 2 管道沿线近场区主要断层活动性评价及其对管道的影响。
- 3 管道沿线地震动峰值加速度和峰值速度。
- 4 重要工程场地的地震动反应谱和时程曲线。
- 5 地震地质灾害的类型、程度及其分布。

4.2.2 油气输送管道通过全新世活动断层或位于其附近时,应分析断层对管道的工程影响,并应符合下列要求:

1 管道通过地震动峰值加速度为 $0.10g \sim 0.30g$ 的地区,且管底至基岩土层厚度大于或等于 60m 时;管道通过地震动峰值加速度大于 $0.30g$ 以上地区,且管底至基岩土层厚度大于或等于

90m 时。可不分析断层潜在地表断错的影响。

2 不符合本条第 1 款规定的情况时,应确定下列内容和参数:

- 1) 断层的性质和产状、最新活动年代、滑动速率、破裂带的宽度和长度;
- 2) 断层与管道交汇的位置和交角,或断层与管道的距离;
- 3) 断层覆盖土层厚度以及断层两侧和破裂带的土体粘聚力、内摩擦角和平均剪切波速;
- 4) 断层在地表引起的最大同震水平和竖向位错量。

5 工程勘察及场地划分

5.1 工程勘察

5.1.1 一般区段可利用搜集已有地质资料、踏勘和适当的补充钻孔工作,确定土层的等效剪切波速和场地类别。

5.1.2 对于重要区段,初勘阶段可按一般区段的管道场地进行勘察,详勘阶段应结合线路工程地质勘察,勘探点间距宜为 200~300m,勘探深度宜为 15~20m,应查明场地土的工程地质特性,并应确定场地类别。

5.1.3 当地震动峰值加速度大于或等于 $0.10g$,场地分布初步判定有可能液化土层时,应再进一步判别。液化判别可按本规范附录 C 的规定执行,并应评价对管道的危害。

5.1.4 对岩土体滑坡、崩塌、地陷、高陡边坡、地下采空区以及液化层倾向水面或临空面的倾斜场地,宜进行在地震作用下地基的稳定性评价。

5.1.5 对地震动峰值加速度大于或等于 $0.20g$ 的厚层软土分布区,宜判别软土震陷的可能性和估算震陷量,并应评价对管道的危害。

5.1.6 对线路通过或伴行的活动断裂勘察,应在已有成果和资料的基础上进行。对其中影响管道安全的活动断裂应进行详细勘察,并应评价活动断裂对管道建设可能产生的影响,同时应进行抗震分析,并应提出处理建议。

5.1.7 全新世活动断裂的勘察宜根据断裂评价报告,并宜通过工程地质调查与分析,查明下列地形地貌、地震地质特征:

1 山区或高原不断上升剥蚀或长距离的平滑分界线;非岩性影响的陡坡、峭壁,深切的直线形河谷,一系列滑坡、崩塌和山前叠

置的洪积扇；定向断续分布的残丘、洼地、沼泽、芦苇地、盐碱地、湖泊、跌水、泉、温泉等；水系定向展布或同向扭曲错动等地形地貌特征。

2 断裂活动留下的第四系错动；地下水和植被特征；断层带的破碎和胶结特征；断裂最新的活动时代；与地震有关的断层、地裂缝、崩塌、滑坡、地震湖、河流改道和砂土液化等地震地质特征。

5.1.8 与全新世活动断裂平行的线路，管道应敷设在断裂带500m以外；与断裂带相交的管道，应提供活动断裂的走向、与管道交汇的位置及交角、覆盖层的厚度、断层附近场地土的平均剪切波速、可能发生的水平和竖向位错以及活动速率等资料；以上线路并应预测滑坡、滑塌、崩塌、地陷、泥石流等对管道可能造成的影响。

5.1.9 管道穿跨越工程场地的勘察与选址，应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

5.2 管道场地划分

5.2.1 管道场地应按本规范附录 A 划分为抗震有利、不利和危险的地段。

5.2.2 土层剪切波速的测量，应符合下列要求：

1 重要区段，每段用于测量土层剪切波速的钻孔数量不宜少于 2 个，数据变化较大时可适量增加。

2 一般区段，当无实测剪切波速时，土的类型划分和剪切波速范围可按表 5.2.2 确定。

表 5.2.2 土的类型划分和剪切波速范围

土的类型	岩土名称和性状	土层剪切波速范围(m/s)
坚硬土或岩石	稳定岩石，密实的碎石土	$V_s > 500$
中硬土	中密、稍密的碎石土，密实、中密的砾、粗、中砂， $f_{ak} > 200$ 的粘性土和粉土，坚硬黄土	$250 < V_s \leq 500$

续表 5.2.2

土的类型	岩土名称和性状	土层剪切波速范围(m/s)
中软土	稍密的砾、粗、中砂,除松散外的细、粉砂, $f_{ak} \leq 200$ 的粘性土和粉土, $f_{ak} > 130$ 的填土,可塑黄土	$140 < V_s \leq 250$
软弱土	淤泥和淤泥质土,松散的砂,新近沉积的粘性土和粉土, $f_{ak} \leq 130$ 的填土,流塑黄土	$V_s \leq 140$

注: f_{ak} 为由载荷试验等方法得到的地基承载力特征值(kPa), V_s 为土层剪切波速(m/s)。

5.2.3 管道场地覆盖层厚度应符合下列规定:

1 一般情况下,应按地面至剪切波速大于 500m/s 的土层顶面的距离确定。

2 当地面 5m 以下存在剪切波速大于相邻上层土剪切波速 2.5 倍的土层,且其下卧岩土的剪切波速均不小于 400m/s 时,可按地面至该土层顶面的距离确定。

3 剪切波速大于 500m/s 的孤石、透镜体,应视同周围土层。

4 土层中的火山岩硬夹层应视为刚体,其厚度应从覆盖土层中扣除。

5.2.4 管道场地土层的等效剪切波速应按下列公式计算:

$$V_{se} = d/t \quad (5.2.4-1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}} \quad (5.2.4-2)$$

式中 V_{se} ——场地土层等效剪切波速(m/s);

d ——场地土层计算深度(m),取覆盖层厚度和 20m 的较小值;

t ——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间(s);

d_i ——场地土层计算深度范围内第 i 土层的厚度(m);

V_{si} ——场地土层计算深度范围内第 i 土层的剪切波速(m/s);

n ——场地土层计算深度范围内土层的分层数。

5.2.5 管道的场地类别,应根据土层等效剪切波速和场地覆盖层厚度确定,可按表 5.2.5 划分。当有可靠的剪切波速和覆盖层厚度且其值处于表 5.2.5 所列场地类别的分界线附近时,可按插值方法确定地震作用计算所需的设计特征周期。

表 5.2.5 各类管道场地覆盖层厚度(m)

等效剪切波速(m/s)	场 地 类 别			
	I 类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类
$V_{se} > 500$	0	—	—	—
$250 < V_{se} \leq 500$	< 5	≥ 5	—	—
$140 < V_{se} \leq 250$	< 3	3~50	> 50	—
$V_{se} \leq 140$	< 3	3~15	15~80	> 80

6 管道抗震设计

6.1 一般埋地管道抗震设计

6.1.1 位于设计地震动峰值加速度大于或等于 0.20g 地区的管道,应进行抗拉伸和抗压缩校核。

6.1.2 地震作用下管道截面轴向的组合应变计算,应将地震动引起的管道最大轴向应变与操作条件下荷载(内压、温差)引起的轴向应变进行组合,并按下列公式校核:

当 $\epsilon_{\max} + \epsilon \leq 0$ 时:

$$|\epsilon_{\max} + \epsilon| \leq [\epsilon_c]_v \quad (6.1.2-1)$$

当 $\epsilon_{\max} + \epsilon > 0$ 时:

$$\epsilon_{\max} + \epsilon \leq [\epsilon_t]_v \quad (6.1.2-2)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma_a}{E} \quad (6.1.2-3)$$

式中 ϵ_{\max} ——地震动引起管道的最大轴向拉、压应变,按第 6.1.4 条计算;对于直埋弯头,按式 6.1.5-1 计算;

ϵ ——由于内压和温度变化产生的管道轴向应变;

$[\epsilon_t]_v$ ——埋地管道抗震设计轴向容许拉伸应变,按第 6.1.3 条计算;

$[\epsilon_c]_v$ ——埋地管道抗震设计轴向容许压缩应变,按第 6.1.3 条计算;

σ_a ——由于内压和温度变化产生的管道轴向应力(MPa),应按现行国家标准《输油管道工程设计规范》GB 50253 或《输气管道工程设计规范》GB 50251 的有关规定进行计算;

E ——管道材料的弹性模量(MPa)。

6.1.3 埋地管道抗震设计轴向容许应变,应符合下列规定:

1 组焊管道材料的容许拉伸应变,可按表 6.1.3 选取。

表 6.1.3 组焊管道材料容许拉伸应变

拉伸强度极限 σ_b (MPa)	容许拉伸应变
$\sigma_b < 552$	1.0%
$552 \leq \sigma_b < 793$	0.9%
$793 \leq \sigma_b < 896$	0.8%

2 各等级钢材的容许压缩应变,应按下列公式取值:

$$\text{X65 及以下钢级: } [\epsilon_c]_v = 0.35 \times \frac{\delta}{D} \quad (6.1.3-1)$$

$$\text{X70 和 X80 钢级: } [\epsilon_c]_v = 0.32 \times \frac{\delta}{D} \quad (6.1.3-2)$$

式中 $[\epsilon_c]_v$ ——容许压缩应变;

δ ——管道壁厚(m);

D ——管道外径(m)。

6.1.4 埋地直管道在震动作用下所产生的最大轴向应变,可按下列公式计算,并应取较大值:

$$\epsilon_{\max} = \pm \frac{\alpha T_g}{4\pi V_{se}} \quad (6.1.4-1)$$

$$\epsilon_{\max} = \pm \frac{v}{2V_{se}} \quad (6.1.4-2)$$

式中 α ——设计地震动峰值加速度(m/s^2);

v ——设计地震动峰值速度(m/s);

T_g ——设计地震动反应谱特征周期(s);

V_{se} ——场地土层等效剪切波速(m/s),可按表 5.2.2 或实测数据选取。

6.1.5 埋地弯管在震动作用下的最大轴向应变,可按下列公式计算:

$$\epsilon_{\max}^b = \epsilon_n + \epsilon_m \quad (6.1.5-1)$$

$$\epsilon_n = \frac{t_u L}{2AE} \times 10^{-6} \quad (6.1.5-2)$$

$$\epsilon_m = \frac{\epsilon_n AD}{6\lambda I} \quad (6.1.5-3)$$

$$t_u = \frac{\pi}{2} D \rho_s g H (1 + k_0) \tan \phi_1 \quad (6.1.5-4)$$

$$L = \frac{4AE\lambda}{3K_s} \left[\sqrt{1 + \frac{3K_s \epsilon_{\max}}{2t_u \lambda} \times 10^6} - 1 \right] \quad (6.1.5-5)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{K_s}{4EI}} \quad (6.1.5-6)$$

$$K_s = \frac{p_u}{0.15 y_u \times 10^6} \quad (6.1.5-7)$$

$$\text{软弱场地: } y_u = 0.07 \sim 0.10 (H + D) \quad (6.1.5-8)$$

$$\text{中硬、中软场地: } y_u = 0.03 \sim 0.05 (H + D) \quad (6.1.5-9)$$

$$\text{坚硬场地: } y_u = 0.02 \sim 0.03 (H + D) \quad (6.1.5-10)$$

$$p_u = \rho_s g H N_q D \quad (6.1.5-11)$$

$$N_q = 0.38 \frac{H}{D} + 3.68 \quad (6.1.5-12)$$

式中 ϵ_{\max}^b ——地震动引起的弯管最大轴向应变；

ϵ_n ——轴向力引起的弯管轴向应变；

ϵ_m ——弯矩引起的弯管最大弯曲应变；

A ——管道横断面积(m^2)；

t_u ——土壤作用在管道上的单位长度的摩擦力(N/m)；

g ——重力加速度，取 9.8 m/s^2 ；

L ——摩擦力 t_u 作用的有效长度(m)；

I ——管道横断面惯性矩(m^4)；

λ ——模量系数(m^{-1})；

ρ_s ——回填土的密度(kg/m^3)；

y_u ——土壤屈服位移(m)；

p_u ——场地土屈服抗力(N/m)；

N_q ——计算管道法向土壤压力的参数；

K_s ——地基反力模量(MPa)；

H ——管道轴线至管沟上表面之间的埋深(m)；

k_0 ——土壤压力系数,宜取 0.5；

ϕ_1 ——管道与土壤之间的内摩擦角($^{\circ}$)。

6.2 通过活动断层的埋地管道抗震设计

6.2.1 通过活动断层的管道抗震计算应符合下列要求：

1 管道材料应符合现行国家标准《输油管道工程设计规范》GB 50253 或《输气管道工程设计规范》GB 50251 的有关规定。通过断层区的管道,应做出材料的应力-应变关系曲线。

2 通过活动断层的管道,当符合下列情况时,应采用有限元方法进行抗震计算：

1) 位于设计地震动峰值加速度大于或等于 $0.30g$ 地区的管道；

2) 通过人口稠密地区、水源保护地区的管道；

3) 在断层错动作用下管道受压缩的情况,包括管道通过逆冲断层和管道与断层交角大于 90° 两种情况。

3 不符合本条第 2 款规定的情况时,可按本规范第 6.2.3 条对通过活动断层的管道进行抗震计算。

4 对通过活动断层的管道应进行抗拉伸和抗压缩校核。

6.2.2 管道通过活动断层的容许应变应满足下列要求：

1 埋地管道抗断的轴向容许拉伸应变,应按下列公式计算：

$$[\epsilon_t]_F = \varphi_{\epsilon_t} \epsilon_t^{\text{crit}} \quad (6.2.2-1)$$

式中 $[\epsilon_t]_F$ ——埋地管道抗断的轴向容许拉伸应变；

φ_{ϵ_t} ——拉伸应变承载系数,取 0.7；

ϵ_t^{crit} ——钢管及组焊管段的极限拉伸应变,按实测值或经验公式确定。

2 埋地管道抗断的轴向容许压缩应变,应按下列公式计算，

并应取较小值:

$$[\epsilon_c]_F = 0.3\delta/D \quad (6.2.2-2)$$

$$[\epsilon_c]_F = \epsilon_s \quad (6.2.2-3)$$

式中 $[\epsilon_c]_F$ ——埋地管道抗断的轴向容许压缩应变;

ϵ_s ——管材屈服极限对应的应变。

6.2.3 通过活动断层的管道抗震计算,宜符合下列规定:

1 沿管轴方向土壤与管道外表面之间单位长度上的摩擦力,可按下列公式计算:

$$f_s = \mu(2W + W_p) \quad (6.2.3-1)$$

$$W = \rho_s DHg \quad (6.2.3-2)$$

$$W_p = \left[\pi(D - \delta)\delta\rho_m + \frac{\pi}{4}(D - 2\delta)^2\rho \right]g \quad (6.2.3-3)$$

式中 f_s ——沿管轴方向土壤与管道外表面之间单位长度上的摩擦力(N/m);

W ——管道上表面至管沟上表面之间的土壤单位长度上的重力(N/m);

W_p ——管道和内部介质的自重(N/m);

μ ——土壤与管道外表面之间的摩擦系数,应按实测值或经验确定;

ρ_m ——管道材料的密度(kg/m³);

ρ ——输送介质的密度(kg/m³)。

2 由断层错动引起的管道几何伸长,可按下列公式计算:

$$\epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \text{ 时: } \Delta L_1 = \Delta X + \frac{(\Delta Y^2 + \Delta Z^2)f_s}{4\pi D\delta E_1 \epsilon_{\text{new}}} \quad (6.2.3-4)$$

$\epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1$ 时:

$$\Delta L_1 = \Delta X + \frac{(\Delta Y^2 + \Delta Z^2)f_s}{4\pi D\delta [E_1 \epsilon_1 + E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1)]} \quad (6.2.3-5)$$

$$\Delta X = \Delta H \cos \beta \quad (6.2.3-6)$$

$$\Delta Y = \Delta H \sin \beta \quad (6.2.3-7)$$

式中 ΔL_1 ——断层位错引起的管道几何伸长(m);
 ΔX ——平行于管道轴线方向的断层位移(m);
 ΔY ——管道法线方向的断层位移(m);
 ϵ_{new} ——管道内的拉伸应变;
 ΔH ——水平方向的断层位移(m),应由地震地质工程勘察确定;
 ΔZ ——垂直方向的断层位移(m),应由地震地质工程勘察确定;
 β ——活动断层带与管道轴线的夹角($^\circ$),应由地震地质工程勘察确定;
 ϵ_1 ——管道应力-应变简化折线中弹塑性变形起点处的应变;
 E_1 ——管道应力-应变简化折线中弹性区的材料模量(Pa),按本规范附录 D 选取;
 E_2 ——管道应力-应变简化折线中弹塑性区的材料模量(Pa),按本规范附录 D 选取。

3 管道内轴向应变引起的物理伸长可按下列公式计算:

$$\epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \text{ 时: } \Delta L_2 = \frac{\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}^2}{f_s} \quad (6.2.3-8)$$

$$\epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \text{ 时: } \Delta L_2 = \frac{\pi D \delta [E_1 \epsilon_1^2 + E_2 (\epsilon_{\text{new}}^2 - \epsilon_1^2)]}{f_s} \quad (6.2.3-9)$$

式中 ΔL_2 ——管道内轴向应变引起的物理伸长(m)。

4 管道内的拉伸应变可采用迭代法按下式计算:

$$\Delta L_1 = \Delta L_2 \quad (6.2.3-10)$$

5 由断层位错引起的管道最大拉伸应变应按下式计算:

$$\epsilon_{\text{max}}^F = 2\epsilon_{\text{new}} \quad (6.2.3-11)$$

式中 ϵ_{max}^F ——断层位移引起的管道最大拉伸应变。

6 抗震校核应符合下列规定:

1) $\epsilon_{\text{max}}^F \leq [\epsilon_1]_F$ 时,可不采取抗震措施;

2) $\epsilon_{\max}^F > [\epsilon_t]_F$ 时,应采取抗震措施。

6.2.4 当采用有限元方法进行通过活动断层的管道抗震计算时,应合理确定有限单元的类型和数目,并应符合下列规定:

1 应采用能分析几何大变形和材料非线性的有限元方法。

2 管道可采用梁单元、管单元或壳单元建立有限元模型;可能发生大变形的管道部分,管道单元的长度不应大于管道的直径。

3 有限元模型分析管道的长度应符合下列要求:

1) 当采用固定边界时,分析管道的长度应满足管道在两个固定端的应变接近于 0;

2) 当采用等效边界时,应对在断层附近发生大变形、长度不少于 60 倍管径的管段进行有限元分析,可按本规范附录 E 建立等效非线性弹簧替代离断层较远的管道变形反应。

4 管土之间的相互作用宜采用管轴方向土弹簧、水平横向土弹簧和垂直方向土弹簧进行模拟。土弹簧的参数宜根据土的力学特性通过现场试验或采用计算方法确定,初步计算时可采用本规范附录 E。

5 有限元分析得到的管道轴向最大拉伸应变和最大压缩应变,应与管道容许拉伸应变和容许压缩应变进行抗震校核,并应符合下列规定:

1) $\epsilon_{\max}^t \leq [\epsilon_t]_F$ 且 $\epsilon_{\max}^c \leq [\epsilon_c]_F$ 时,可不采取抗震措施;

2) $\epsilon_{\max}^t > [\epsilon_t]_F$ 或 $\epsilon_{\max}^c > [\epsilon_c]_F$ 时,应采取抗震措施。

6.3 液化区埋地管道抗震设计

6.3.1 当管道穿越场地在设计地震动参数下具有中等或严重液化潜势时,可通过计算液化场地中管道的上浮反应及其引起的管道附加应变对管道的抗液化能力进行校核。

6.3.2 液化土层中管道的最大上浮位移,可按下式计算:

$$\Delta = -1.0545 + 0.0254L_y + 0.00327\sigma_t + 0.13(L_y - 85)$$

$$\tan(10D-420) \quad (6.3.2)$$

式中 Δ ——管道在液化土层中最大上浮位移(m);

L_y ——管道在液化域中的长度(m),当 $30 \leq L_y \leq 180$,管道一端或两端与建筑物相连接时,应将实际管道长度(至墙外皮)分别乘以修正系数 0.9 或 0.8;

σ_t ——管道由温度变化引起的初始轴向压应力(MPa),应按现行国家标准《输油管道工程设计规范》GB 50253 或《输气管道工程设计规范》GB 50251 的有关规定进行计算,且 $80 \leq \sigma_t \leq 180$;

D ——管道外直径(m), $D \geq 0.289$ 。

6.3.3 液化区管道附加应变应按下式计算:

$$\epsilon_{L\max} = [-1422.7 + 7835.5L_y / (0.167L_y^2 - 8.36L_y + 282.4) + 0.1465D + 6.16\sigma_t] \times 10^{-6} \quad (6.3.3)$$

式中 $\epsilon_{L\max}$ ——管道在上浮位移反应最大时的附加应变。

6.3.4 将管道附加应变与本规范第 6.1.2 条由地震动、内压和温度变化引起的轴向应变组合后,应按下列公式校核管道的应变状态,当不满足下列公式时,应采取抗震措施:

当 $\epsilon_{\max} + \epsilon + \epsilon_{L\max} \leq 0$ 时:

$$|\epsilon_{\max} + \epsilon + \epsilon_{L\max}| \leq [\epsilon_c]_v \quad (6.3.4-1)$$

当 $\epsilon_{\max} + \epsilon + \epsilon_{L\max} > 0$ 时:

$$\epsilon_{\max} + \epsilon + \epsilon_{L\max} \leq [\epsilon_t]_v \quad (6.3.4-2)$$

6.3.5 管道的上浮反应状态应按下式校核,当不满足下式时应采取抗液化措施:

$$H - D/2 - \Delta \geq 0.5 \quad (6.3.5)$$

6.4 震陷区埋地管道抗震设计

6.4.1 对穿过场地具有竖向震陷情况的管道,其抗震设计可通过计算管道由于震陷产生的最大附加弯曲应变对管道进行校核。

6.4.2 管道在场地竖向震陷位移作用下的最大附加弯曲应变,可

按下式计算:

$$\epsilon_{S_{\max}} = 0.648 y_0 D \sqrt{k_s D / 4 E_1 I} \quad (6.4.2)$$

式中 $\epsilon_{S_{\max}}$ ——管道在场地竖向震陷位移作用下的最大附加弯曲应变;

y_0 ——场地震陷量(m);

k_s ——地基弹簧常数(MPa/m),需通过土样实验确定。

6.4.3 管道的应变状态应按本规范第 6.3.4 条校核。当不满足要求时,应采取抗震陷措施。

6.5 穿越管道抗震设计

6.5.1 穿越管道抗震设计应符合下列要求:

1 当大中型穿越管道位于设计地震动峰值加速度大于或等于 $0.10g$ 地区时,应进行抗拉伸和抗压缩校核,并按本规范附录 D 对边坡、土堤等进行抗震稳定性校核。

2 穿越管道应避开活动断裂带,可局部调整线位。确需通过活动断裂带时,宜采用管桥跨越方式通过。

6.5.2 直埋式穿越管道的应变应按埋地管道的规定组合。对弹性敷设管道,应计入弹性弯曲应变,并按下式计算:

$$\epsilon_e = \pm \frac{D}{2r} \quad (6.5.2)$$

式中 ϵ_e ——弹性敷设时管道的轴向应变;

r ——弹性敷设的弯曲半径(m)。

6.5.3 直埋式穿越管道的容许应变值应按埋地管道选用,并按本规范第 6.1.2 条校核。

6.5.4 洞埋式穿越管道,有支墩时应按跨越梁式管桥进行抗震计算;无支墩时应按地面敷设进行抗震计算。

6.5.5 洞埋式穿越管道承受自重、输送介质重量、内压、温差及地震荷载产生的轴向应力、环向应力与弯曲应力,应分别进行叠加组合计算。

6.5.6 地震作用下洞埋式穿越管道的各项应力的组合应力,应按下式验算:

$$\sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_h^2} - \sigma_N \sigma_h \leq 0.9 \sigma_s \quad (6.5.6)$$

式中 σ_N ——组合的轴向应力(MPa);

σ_h ——组合的环向应力(MPa);

σ_s ——管道材料的标准屈服强度(MPa)。

6.5.7 洞埋式穿越管道产生轴向压应力时,轴向压应力应小于容许压应力。容许压应力应按下式计算:

$$[\sigma_c] = \frac{N_c}{A} \quad (6.5.7)$$

式中 $[\sigma_c]$ ——管道在地震等组合荷载作用下的容许压应力(MPa);

N_c ——管道开始失稳时的临界轴向力,应按现行国家标准《输油管道工程设计规范》GB 50253 的有关规定计算(MN)。

6.5.8 穿越管道在地震动作用下的计算,应符合下列规定:

1 直埋式穿越管道最大轴向应变应按本规范第 6.1.4 条计算。

2 采用套管带支撑块穿越管道的最大轴向应变应按本规范第 6.1.4 条计算,管道的应力可按下式计算:

$$\sigma_\epsilon = E \epsilon_{\max} \quad (6.5.8)$$

式中 σ_ϵ ——由地震动产生的管道应力(MPa);

ϵ_{\max} ——地震动引起管道的最大轴向拉、压应变。

3 洞埋式穿越管道采用支墩方式敷设时,地震动产生的应力计算宜按连续梁式跨越管桥计算。洞身的抗震设计应按现行国家标准《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 和国家现行标准《公路工程抗震设计规范》JTJ 004 的有关规定执行。

4 洞埋式穿越采用无支墩贴地敷设输送管道时,地震动产生的轴向应力可采用有限元方法进行计算。

6.6 管道跨越工程抗震设计

6.6.1 管道跨越工程抗震设计应符合下列要求：

1 当管道跨越场地地震动峰值加速度大于或等于 $0.05g$ 时,应进行抗震设计;当场地地震动峰值加速度等于 $0.05g$ 时,可不进行地震作用计算。

2 管道跨越工程一般区段应按本地区的地震动参数等级进行抗震设计,大型管道跨越工程应按提高一个地震动参数等级采取抗震措施,当场地地震动峰值加速度等于 $0.40g$ 时,可适当提高抗震措施;重要区段应按地震安全性评价确定的地震动参数进行抗震设计。

3 管道跨越工程的结构体系应根据场地的地震动参数等级、场地类别、水文与工程地质条件、跨度、管径、材料和施工条件等因素,经技术经济综合比较确定。

4 管道跨越工程的结构体系应符合下列要求：

- 1)结构应有明确的计算简图和合理的地震作用传递途径;
- 2)宜设置多道抗震防线;
- 3)应具备必要的强度、良好的变形能力和耗能能力;
- 4)应具有合理的刚度和强度分布,并应避免局部产生过大的应力集中或塑性变形集中;对可能出现的薄弱部位,应采取提高抗震能力的措施。

5 管道跨越工程的塔架基础、支墩、锚固墩宜设置在地质条件一致的稳定坚硬土层或基岩上;应避开地震时可能发生滑动的岸坡、地形突变的不稳定地段或软弱、可液化土层,当不能避开时,应采取相应的抗震措施。

6.6.2 管道跨越工程使用的材料应符合下列要求：

1 输送管道使用钢管、附件应根据场地地震动参数、跨度、管径、介质压力、使用要求等因素,经技术经济综合比较确定。采用的钢管和其他钢材,除应符合现行国家标准《油气输送管道跨越工

程设计规范》GB 50460 的有关规定外,尚应具有良好的冲击韧性和可焊性。

2 钢结构的钢材应采用镇静钢,宜采用 Q235 B、C、D 级的碳素结构钢, Q345 B、C、D、E 级的低合金高强度结构钢。钢材的屈服强度与极限强度的比值不应大于 0.85,伸长率应大于 20%。

3 混凝土强度等级,塔架基础和锚固墩不应低于 C25,钢筋混凝土塔架、支墩不应低于 C30,且不宜大于 C60。

4 钢筋混凝土结构中的钢筋宜采用延性、韧性和可焊性较好的钢筋;纵向受力钢筋宜选用 HRB335 级和 HRB400 级热轧钢筋,箍筋宜选用 HPB235 级和 HRB335 级热轧钢筋;钢筋代换应按钢筋受拉承载力设计值相等进行,并应满足正常使用极限状态和抗震构造措施的要求。

6.6.3 管道跨越工程抗震计算应符合下列要求:

1 对悬索、斜拉索等跨越结构进行抗震计算时,应采用能够分析几何非线性影响的模型。

2 在抗震计算中,应分析非结构构件、介质的附加质量对跨越结构抗震性能的影响。

3 跨越结构的地震作用应按沿跨越管道横向、竖向以及纵向三个方向分别计算地震作用。对地震动峰值加速度小于或等于 0.20g 的地区,小型跨越结构可不计算竖向和纵向地震作用。

4 当管道作为跨越结构的受力构件时,在地震作用下,应对跨越结构整体进行内力和位移计算。

5 当跨越结构仅作为管道的支承结构时,管道可视为支承在支座上的多跨连续梁,在横向、竖向地震作用下,管道与支座之间可视为无滑移;在纵向地震作用下,宜分析管道在支座上纵向滑移的影响。

6 跨越结构抗震计算软件所采用的模型和计算方法,除应满足本规范及国家现行有关标准的规定外,尚应对计算结果进行分析判断,并应确认其合理、有效性后用于工程设计。

6.6.4 管道跨越工程的抗震计算应符合下列规定：

- 1 一般的跨越结构宜采用反应谱振型分解法。
- 2 小型跨越以及质量和刚度分布比较均匀的中型跨越，可采用单质点简化模型进行计算。

3 复杂的大型跨越结构，宜采用时程分析法进行抗震计算，可取多组时程曲线计算结果的平均值，并应与反应谱振型分解法计算结果相比较，应取两者的较大值作为设计依据。应根据地震安全性评价结果选择地震加速度记录，并应将所选地震加速度记录的峰值调整到与场地设防地震动水准相应的设计加速度峰值，作为时程分析的设计地震加速度时程。

6.6.5 计算地震作用时，管道跨越工程的重力荷载代表值应取结构、配件以及输送介质自重标准值和可变荷载组合值之和。可变荷载的组合值系数，应按表 6.6.5 采用。

表 6.6.5 可变荷载组合值系数

可变荷载种类	组合值系数
雪荷载	0.5
覆冰荷载	0.5

6.6.6 跨越结构构件的地震作用效应和其他荷载效应的基本组合标准值，应按下式计算：

$$S_K = S_{GE} + \psi_{LK} S_{LK} + \psi_{VK} S_{VK} + \psi_{PK} S_{PK} + \psi_W S_{WK} + \psi_Y S_{YK} + \psi_T S_{TK} \quad (6.6.6)$$

式中 S_K ——跨越结构构件内力组合的标准值，包括组合的弯矩、轴向力和剪力标准值；

S_{GE} ——重力荷载代表值的效应；

S_{LK} ——横向地震作用标准值的效应；

ψ_{LK} ——横向地震作用组合值系数，见表 6.6.6；

S_{VK} ——竖向地震作用标准值的效应；

ψ_{VK} ——竖向地震作用组合值系数，见表 6.6.6；

- S_{PK} ——纵向地震作用标准值的效应；
- ψ_{PK} ——纵向地震作用组合值系数，见表 6.6.6；
- S_{WK} ——风荷载标准值的效应；
- ψ_W ——风荷载组合值系数，可取 0.0，风荷载起控制作用的大型跨越结构可取 0.2；
- S_{YK} ——内压作用标准值的效应；
- ψ_Y ——内压作用组合值系数，可取 1.0；
- S_{TK} ——温度作用标准值的效应；
- ψ_T ——温度作用组合值系数，可取 0.2。

表 6.6.6 不同工况的地震作用组合值系数

地震作用工况	ψ_{LK}	ψ_{VK}	ψ_{PK}
仅计算横向地震作用	1.0	0.0	0.0
仅计算竖向地震作用	0.0	1.0	0.0
仅计算纵向地震作用	0.0	0.0	1.0
同时计算横向与竖向地震作用(横向为主)	1.0	0.5	0.0
同时计算横向与竖向地震作用(竖向为主)	0.5	1.0	0.0
同时计算横、竖、纵向地震作用	1.0	0.5	0.5

6.6.7 跨越结构构件的抗震验算，应采用抗震增大系数对结构构件的承载能力进行调整，承载力抗震增大系数应按表 6.6.7 采用。当仅计算竖向地震作用时，各类跨越结构构件抗震增大系数宜采用 1.0。

表 6.6.7 承载力抗震增大系数

跨越结构构件	抗震增大系数
各类构件	1.25
节点板件、连接螺栓	1.15
连接焊缝	1.10

6.6.8 管道和构件的应力(内力)应符合现行国家标准《油气输送管道跨越工程设计规范》GB 50460 的有关规定。

7 管道抗震措施

7.1 通用抗震措施

7.1.1 当管道按本规范计算的应变值大于本规范第 6.1.3 条规定的轴向容许应变值时,可选用大应变钢管,应经对口焊接试验,采用满足变形要求的组焊管段。

7.1.2 现场对接焊口应通过 100%射线检测,并应达到国家现行标准《石油天然气钢质管道无损检测》SY/T 4109 规定的Ⅱ级。

7.1.3 抗震设防的埋地管道宜采用宽浅沟敷设;回填土宜采用疏松无粘性的土料。

7.1.4 在需抗震设防的埋地管段,不宜设置弯头,应采用弹性敷设,且曲率半径不得小于 $1000D$ 。当需设置热弯管时,其曲率半径不得小于 $6D$ 。当需设置冷弯管时,其曲率半径不得小于 $30D$ 。

7.1.5 敷设于地震危险地段的管道,宜设置预警系统。

7.1.6 在管道穿过截水墙或水工保护构筑物基础时,穿管处管道周边应预留不小于 25mm 的空隙,并应采用柔性减振材料填塞。

7.1.7 通过全新世活动断层带的埋地管道,抗震验算不满足要求时,宜适当增加钢管壁厚。

7.1.8 管道通过全新世活动断层或设计地震动峰值加速度不小于 $0.20g$ 的埋地管道,在大中型城市和大型穿跨越的两侧应设截断阀。

7.2 专项抗震措施

7.2.1 对通过全新世活动断层的管道,宜采取下列抗震措施:

- 1 应选择断层位移和断裂宽度较小的地段通过。
- 2 管道与断层错动方向的交角宜为 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$,不得大于 90° 。

3 以水平走滑为主的活动断层和正断层,在断裂带及其两侧 400m 内应增大管沟宽度,管沟宽度宜大于沿管道法线方向的断层水平位移,管沟坡度不宜大于 30° ,并应采用疏松砂土浅埋。逆冲断层应专门研究。

4 在设固定墩时,固定墩与活动断层的距离应为同侧管道滑动长度的 1.5~2.0 倍。

在滑动长度内,不应采用不同直径或壁厚的管道,不应设三通、旁通和阀门等部件。断层一侧的管道滑动长度宜按下式计算:

$$L_t = \frac{\pi D \delta \sigma_2}{f_s} \quad (7.2.1)$$

式中 L_t ——断层一侧的管道滑动长度(m);

σ_2 ——管道应力-应变简化折线中弹塑性区与塑性区交点处的应力(Pa),按本规范附录 D 选取。

5 通过断层的管道采用埋地敷设不能满足抗震要求时,宜将管道敷设于地上或架空,并应保证管道在轴向与横向上自由滑移,同时应采取相应的安全保护措施。

7.2.2 通过沉陷区的管道,有条件时可采用地面或地上(跨越)敷设。

7.2.3 敷设于严重液化区的管道可采取换填非液化土并夯实、抗浮桩及衬铺压土等措施。

7.2.4 埋设于液化区较长的管道,可分段采取抗液化措施。

7.2.5 确需在难以绕避的滑坡区内敷设管道时,控制滑坡可采取减载、支挡、锚固及排水措施。

7.2.6 采用直埋式穿越水域或沟壑的管道,其斜坡角不应大于 30° (图 7.2.6)。

7.2.7 洞埋式穿越管道采用支墩方式敷设时,应设置防止管道侧向滑落的管卡。

7.2.8 洞埋式穿越管道贴地敷设时,应保证地震发生时管道轴向与横向自由位移,并不得失稳。

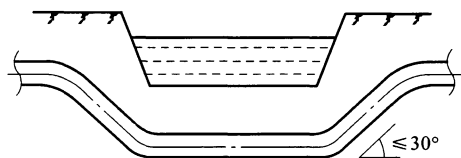


图 7.2.6 直埋式穿越管道示意

7.2.9 位于墩台上的跨越结构应采取限位措施。在跨越结构上应固定或限制管道的相对位置,可采用挡块、钢夹板、U 形螺栓等连接件。

7.2.10 位于软弱粘性土层、液化土层和严重不均匀地层上的刚性跨越结构,不宜采用高次超静定结构。

7.2.11 跨越结构下部墩台应避免布设在软弱粘性土层、液化土层和不稳定的河岸上,在难以避开时,应采取其他处理措施。

7.2.12 在管道或支承结构与支墩之间可设置隔震部件,该部件应提供必要的竖向承载力、侧向刚度和阻尼,并应便于检查和维护。隔震部件可按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 等有关规定进行设计。

7.2.13 对出入锚固墩部位的管道宜局部加强或采用柔性连接。

8 管道抗震施工

8.1 一般规定

8.1.1 管道线路工程抗震施工应符合现行国家标准《油气长输管道工程施工及验收规范》GB 50369 的有关规定。

8.1.2 管道抗震施工除应符合本规范的规定外,尚应按批准后的抗震设计文件施工。有变更时,应征得原抗震设计部门的确认,并应出具设计更改文件。

8.1.3 管道线路工程抗震施工应在施工方案中明确抗震施工措施。

8.1.4 施工前,准备工作应包括下列内容:

1 在管道线路工程设计交底及图纸会审工作中,设计部门应对设计图纸中有关抗震规定部分进行专项交底,并应做好会审记录。

2 承担管道线路抗震施工的单位应对参加施工的各级人员进行专项作业培训。

8.2 材料检查与验收

8.2.1 管道抗震工程施工所采用的管材、管件等材料的材质、规格应符合设计要求,其质量应符合国家现行有关标准的规定。

8.2.2 管道线路工程抗震施工所使用的专项材料需代用时,应经原设计部门进行复核,经复核符合抗震设计要求后,原设计部门应重新出具抗震设计修改文件,并按修改后的设计文件进行采购、检查和验收。

8.3 管道的焊接安装与试压

8.3.1 焊接施工前,焊接工艺指导书应根据管道抗震设计文件提出的钢管等级、壁厚、焊接材料、焊接方法和工艺要求制订。

8.3.2 在抗震管段施工区域内,应减少连头焊口数量,连头短管的长度应大于 $2D$ 且不应小于 0.5m 。对抗震管段的焊口应逐一进行外观检查。

8.3.3 焊缝外观检查合格后应进行 100% 的超声波和射线检测,射线和超声波检测的合格等级应达到国家现行标准《石油天然气钢质管道无损检测》SY/T 4109 规定的 II 级标准。采用自动焊接的管段可只进行 100% 全自动超声波检测。

8.3.4 同一处的非裂纹缺陷的焊缝返修次数不宜超过 1 次。裂纹缺陷和超过返修次数的焊缝应割口重焊。

8.3.5 管道在抗震设防地段应单独试压,试压介质宜采用洁净水,试验段的强度试验压力应使该试验段最低点的管道环向应力不超过相应钢级规定的最低屈服强度的 95% 。

8.4 埋地管道抗震施工

8.4.1 管道下沟时,管底应与沟底贴合,其缝隙应采用砂土回填。

8.4.2 滑坡地段的施工及验收,应满足下列要求:

1 应根据设计要求削坡或卸去坡顶部荷载。地下水与地面水的排水措施,应按设计要求执行。

2 施工过程中应设置观测点进行观测和记录。

3 抗滑挡墙、抗滑桩、锚固设施等固坡构筑物应按设计要求修筑。其中,基础工程应符合现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202 的有关规定;边坡工程应符合现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330 的有关规定;锚杆喷射混凝土支护工程应符合现行国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》GB 50086 的有关规定;砌体工程应符合现行国家标准《砌体工程施工质量验收规范》GB 50203 的有关规定;混凝土结构工程应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定。

8.4.3 液化层地段的施工及验收应满足下列要求:

1 管沟下部液化层的地质条件应根据设计要求改良,可采用下列方法:

- 1)清除液化土层,回填非液化土;
- 2)设置挤压砂桩或碎石桩;
- 3)对液化层注入粘土泥浆。

2 对施工过程应进行检查,应按设计要求做好规定的试验,宜更换非液化土,并应取土源土样分析检验,同时应达到抗液化要求。

3 挤压桩、更换土、注泥浆施工后应按管道方向每 100m 做一次随机抽检,不足 100m 时应做一次随机抽检,抽检要求应符合表 8.4.3-1 的规定。

表 8.4.3-1 挤压桩、更换土、注泥浆的检查要求

序号	检查项目	要 求	备注
1	挤压砂桩或碎石桩 (震动或震冲型)	钻孔取样检验	$N_{63.5} > N_{cr}$
2	更换非液化土	钻孔取样检验	—
3	注入粘土泥浆	粉土的粘粒(小于 0.005mm)含量大于 16%	土样分析

注: $N_{63.5}$ 为饱和土标准贯入锤击数实测值, N_{cr} 为液化判别标准贯入锤击数临界值。

4 在设置抗浮卡桩时应先按图纸要求设置锚固桩,并应在桩的上部安装管卡。抗浮卡桩的检查项目应符合表 8.4.3-2 的规定。

表 8.4.3-2 抗浮卡桩的检查要求

序号	检查项目	要 求	备 注
1	桩顶高度偏差(m)	<0.1	—
2	桩顶位置偏差(m)	<0.1	—
3	桩的长度偏差(m)	<1	—
4	桩的垂直度偏差(%)	<1	—

续表 8.4.3-2

序号	检查项目	要求	备注
5	桩径偏差(mm)	-50	—
6	管卡焊接安装	符合设计	—
7	管道电火花检查	无漏点	根据防腐等级确定检查电压
8	管卡与管道的绝缘衬垫	符合设计	检查材料厚度和尺寸

5 地上应敷设覆土保护,并应保证设计要求的覆土厚度、宽度和几何形状,以及覆土的密实度。在遇到河流或道路穿越时,应符合现行国家标准《油气输送管道穿越工程施工规范》GB 50424的有关规定。

8.4.4 管道通过活断层的施工及验收,应满足下列要求:

1 管沟回填宜采用疏松材料。

2 当采用疏松砂土回填施工时,应符合下列要求:

1)疏松砂土的塑性指数应小于或等于 3,且 0.1mm 以下的颗粒不应超过 15%;

2)应对选用的每处土源进行一次实验室检验;

3)应在管底下预填 300mm 疏松砂土,二次回填应全部为疏松砂土;

4)管顶至地面回填高度应符合设计要求,不应超过 1.1m;

5)回填的沉陷余量应超过自然地面以上 300mm,宽度应超过管沟上开口宽度 300mm。

3 当管道通过逆冲断层时,管道与断层成斜角相交的角度应符合设计要求,施工单位应对斜角角度进行测量和记录,监理应对斜角角度进行复核和认签。与设计图纸规定的角度偏差应小于 3°。

8.4.5 管线上所有特殊安装位置应进行检查,并应符合表 8.4.5 的规定。

表 8.4.5 管线特殊安装位置检查要求

序号	管线设置	检查内容	备 注
1	热弯管(限制使用)	曲率半径大于或等于 $6D$	其他要求见设计文件要求
2	弯管(限制使用)	曲率半径大于或等于 $30D$	其他要求见设计文件要求
3	弹性敷设(推荐)	曲率半径大于或等于 $1000D$	—
4	固定墩	开槽位置和尺寸 管件组装焊接 防腐和电火花检测 钢筋混凝土隐蔽工程检查 混凝土墩的防腐绝缘	固定墩与活动断层的距离应为管道滑动长度的 $1.5\sim 2$ 倍
5	截水墙穿管处	穿管处保证 25mm 以上的缝隙,填塞柔性减震材料保护管线防腐层无损坏	推荐一层 4mm 厚橡胶板,外填塞聚氨酯硬质泡沫块
6	水工保护构筑物	按现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《砌体工程施工质量验收规范》GB 50203 等检查	—

8.5 穿跨越管道抗震施工

8.5.1 抗震段穿越管道施工除应符合现行国家标准《油气输送管道穿越工程施工规范》GB 50424 的有关规定外,尚应符合下列规定:

1 大开挖管道穿越时,穿越前施工单位应对管沟的成型进行一次自检,沟长、沟直、沟深、沟宽、边坡坡度和曲线变化等情况应符合设计和施工设计的有关要求。

2 穿越管线管沟回填前,应对回填土质、深度进行检查,并应符合设计要求。

3 采用套管穿越时,应检查内管的支撑和防腐绝缘,套管两端应按设计要求进行密封,并应检测内管与套管的电绝缘性能。

4 采用洞埋式穿越时,钢筋混凝土施工质量应符合设计要求,管线构件应处于正确装配状态。当采用支墩式敷设时,防滑落管卡等结构的施工及验收应符合现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 的有关规定。

8.5.2 抗震段跨越管道施工除应符合现行国家标准《油气输送管道跨越工程施工规范》GB 50460 的有关规定外,尚应符合下列规定:

1 当跨越管道与支承结构之间采用隔震部件时,设计应提供详细的结构安装图纸。采用的隔震部件应附有竖向承载力、侧向刚度、阻尼系数等技术性能指标说明书。

2 跨越工程所有钢结构和管线构件的材料选择与焊接应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定,管线构件装配应处于正确状态。

3 跨越工程钢结构焊接应制定专项焊接工艺规程,设计应给定要求焊缝检测的检测要求,设计要求全焊透的一、二级焊缝应采用超声波进行内部缺陷的检验,超声波不能对缺陷进行判断时,应进行射线检验。其内部缺陷分级及探伤方法应符合现行国家标准《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级》GB 11345 的有关规定;焊缝射线探伤验收标准应符合现行国家标准《金属熔化焊焊接接头射线照相》GB/T 3323 的有关规定;一级二级焊缝的质量等级及缺陷分级应符合表 8.5.2 的规定。对不能采用射线和超声波探伤检验的部位应进行磁粉、渗透检验;一级、二级焊缝探伤比例的计数方法应按下列原则确定:

- 1)对工厂制作焊缝应按每条焊缝计算百分比,探伤长度不应小于 200mm,当焊缝长度不足 200mm 时,应对整条焊缝进行探伤;
- 2)对现场安装焊缝应按同一类型同一施焊条件的焊缝条数计算百分比,探伤长度不应小于 200mm,并不应少于 1 条焊缝。

表 8.5.2 一级二级焊缝的质量等级及缺陷分级要求

焊缝质量等级		一级	二级
超声波探伤	合格等级	Ⅱ	Ⅲ
	探伤比例	100%	20%
射线探伤	合格等级	Ⅱ	Ⅲ
	探伤比例	100%	20%

4 T 形接头、十字接头、角接接头等要求熔透的对接和角对接组合焊缝,其焊脚尺寸不应小于壁厚 δ 的 $1/4$ 。(图 8.5.2)。

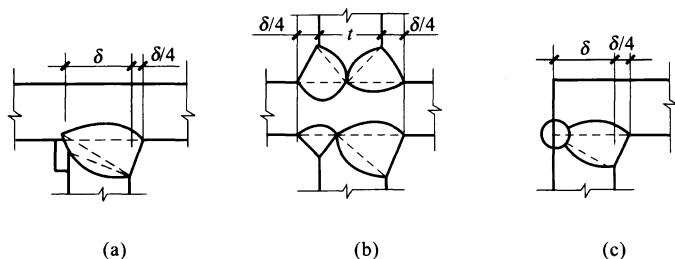


图 8.5.2 焊脚尺寸示意

5 跨越管道用于抗震的柔性连接部件、管道与支承结构之间的隔震部件安装,应符合设计和安装技术要求。

6 跨越管线和钢结构的防腐绝缘、管道保温工程应符合现行国家标准《油气输送管道跨越工程设计规范》GB 50460 的有关规定。

9 管道线路工程抗震验收

9.0.1 当施工单位按合同规定的范围完成工程项目后,应由建设单位组织施工单位、设计单位和监理单位共同对管道线路工程抗震施工进行检查和验收,验收合格后,应及时与建设单位办理交接手续。

9.0.2 交工技术资料应按现行国家标准《建设工程文件归档整理规范》GB/T 50328 等有关规定编制。

9.0.3 管道线路工程场地地震安全性评价的验收资料,应符合下列内容:

- 1 管道沿线地震危险性分析结论。
- 2 管道沿线主要断层评价结果。
- 3 重要工程场地的地震动反应谱和时程曲线。
- 4 设计地震动参数对管道沿线分区的结果。
- 5 管道沿线地震地质灾害预测结果。

9.0.4 工程交工验收除应符合现行国家标准《油气长输管道工程施工及验收规范》GB 50369 的有关规定外,施工单位尚应符合下列资料:

- 1 图纸会审涉及抗震问题的记录。
- 2 抗震措施实施项目所涉及材料、构配件等的抗震性能检测(试)验结果。
- 3 防滑坡工程检查报告。
- 4 更换液化土施工报告。
- 5 标准贯入试验记录。
- 6 回填疏松砂土施工报告。
- 7 管道柔性接头、管道隔震部件安装记录。

- 8 钢结构和管线构件检查记录。
- 9 通过活动断层的管道与断层交角记录。
- 10 大中型穿越工程纵断面图。
- 11 管道线路工程抗震施工竣工图。
- 12 管道线路工程抗震施工检查表，表格样式见本规范附录 F。

附录 A 管道场地地段划分

A.0.1 管道场地地段划分应按表 A.0.1 的规定。

表 A.0.1 管道抗震场地地段的划分

地段划分	地质、地形、地貌
有利地段	一般是指无全新世活动断裂、边坡稳定条件较好、场地属于坚硬场地或密实均匀的中硬场地等地段
不利地段	一般是指地质构造比较复杂,有全新世以来活动性断裂,场地属于软弱场地、条状突出的山脊、高耸孤立的山丘、非岩质(其中包括胶结不良的第三纪沉积)的陡坡,采空区、河岸和边坡边缘、软硬不均的场地(如故河道、断层破碎带、暗埋的塘浜沟谷及半填半挖地基等)等地段
危险地段	一般是指地质构造复杂,有全新世活动性断裂及地震时可能发生断裂、滑坡、崩塌、地陷、地裂等地段

附录 B 滑坡体的稳定性验算

B.0.1 均质斜坡体的稳定性可采用下列方法验算：

1 滑动面为圆弧形或近于圆弧形，可用条分法进行验算。通过坡脚任选一个可能的圆柱滑动面，其半径为 R (图 B.0.1)。将滑坡体分成若干等宽的铅直土条 (可分为 8~12 条)。将各土条 (宽度为 b_i ，高度为 h_i) 的重量分解为圆弧的切向力和法向力，计及水平地震力，滑坡体 ABC 的稳定系数应按下列公式计算：

$$K_{sl} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i \tan \phi_F + cL_i + F_i)}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (\text{B.0.1-1})$$

$$N_i = W_i \cos \theta_i \quad (\text{B.0.1-2})$$

$$T_i = W_i \sin \theta_i \quad (\text{B.0.1-3})$$

式中 K_{sl} ——滑坡体稳定系数；

N_i ——滑坡体每条土的法向重力 (kN/m)；

T_i ——滑坡体每条土的切向重力 (滑动方向与滑动力方向相反时，取负值) (kN/m)；

L_i ——滑坡体每条土的滑动弧的长度 (m)；

ϕ_F ——滑动面土体的内摩擦角 (°)；

θ_i ——滑坡体第 i 土条滑动面与水平的夹角 (°)；

W_i ——滑坡体第 i 土条的重量 (kN/m)；

c ——土的粘聚力 (kPa)；

F_i ——滑坡体第 i 土条的地震水平力，宜取 $F_i = W_i \times a/g$ (kN/m)。

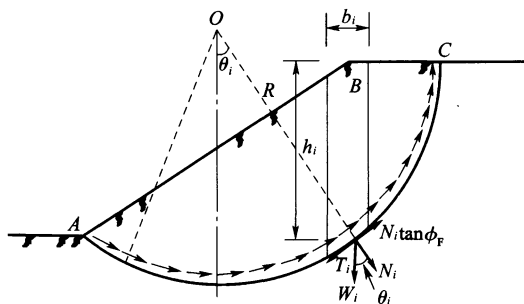


图 B.0.1 受地震作用的均质斜坡

2 对于不同的假定滑动圆心及滑动面,应依次按式 B.0.1-1、式 B.0.2-2 和式 B.0.2-3 计算,最危险的滑动面应为具有最小稳定系数的滑动面。最小稳定系数应根据工程的重要性选取,可取大于等于 1.2,重要区段可取大于等于 1.5,特别重要区段安全系数应专门研究。不满足时,则应采取抗滑措施。

B.0.2 非均质斜坡的滑动面可为折线形,滑动面为折线形的滑坡,可采用分段计算方法验算。可沿折线的转折处条分成若干块段(图 B.0.2),从上至下逐块计算推力。每块滑坡体向下滑动的力与岩土体阻挡下滑的力之差,也即剩余下滑力,逐级向下传递,应按下列公式计算:

$$E_i = kT'_i - N'_i \tan \phi_i - C_i L'_i + E_{i-1} \psi \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$\psi = \cos(\theta'_{i-1} - \theta'_i) - \sin(\theta'_{i-1} - \theta'_i) \tan \phi_i \quad (\text{B.0.2-2})$$

式中 E_i ——第 i 块滑坡体的剩余下推力(kN/m);

ψ ——滑坡体各块之间的传递系数;

E_{i-1} ——第 $i-1$ 块滑坡体的剩余下推力(kN/m),负值时不计入;

T'_i ——作用于第 i 块段滑动面上的滑动分力(kN/m);

N'_i ——作用于第 i 块段滑动面上的法向分力(kN/m);

W'_i ——第 i 块段岩土的重量(kN/m);

- ϕ_i ——第 i 块滑坡体沿滑动面岩土的内摩擦角($^{\circ}$);
 C_i ——第 i 块滑坡体沿滑动面岩土的内聚力(kPa);
 L'_i ——土体滑动的长度(m);
 θ'_i, θ'_{i-1} ——分别是第 i 块和第 $i-1$ 块滑坡体的滑动面与水平面的夹角($^{\circ}$);
 k ——滑坡体安全系数,取 1.2。

对于不同的假定滑动面,应依次按式 B.0.2-1、式 B.0.2-2 计算,具有最大剩余下滑力的滑动面即是最危险的滑动面。在计算中,当任何一块剩余下滑力为零或负值时,说明该块对下一块不存在滑动推力。若当最终一块土体的剩余下滑力为负值或零时,表示整个土体是稳定的;如为正值,则不稳定,应当按此剩余下滑力设计支挡结构。对于重要区段,按剩余推力的 110% 设计支挡结构。对于非常重要区段,应专门研究。

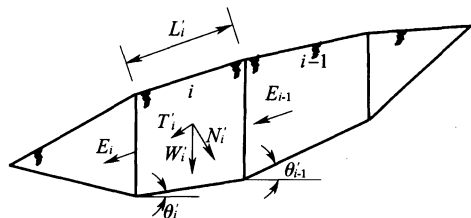


图 B.0.2 受地震作用的非均质斜坡

附录 C 管道沿线饱和砂土和饱和粉土的地震液化判别

C.0.1 饱和的砂土或粉土,当符合下列条件之一时,可初步判别为不液化或不分析液化影响:

1 地质年代为第四纪晚更新世(Q3)及其以前时,Ⅶ、Ⅷ度时可判为不液化土。

2 粉土的粘粒(粒径小于 0.005mm 的颗粒)含量百分率,Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度区分别不小于 10%、13%和 16%时,可判为不液化土。

注:用于液化判别的粘粒含量应采用六偏磷酸钠作分散剂测定;采用其他方法时应按有关规定换算。

3 当上覆非液化土层厚度和地下水位深度符合下列公式之一时,可不分析液化影响:

$$d_u > d_0 + d_b - 2 \quad (\text{C.0.1-1})$$

$$d_w > d_0 + d_b - 3 \quad (\text{C.0.1-2})$$

$$d_u + d_w > 1.5d_0 + 2d_b - 4.5 \quad (\text{C.0.1-3})$$

式中 d_u ——上覆盖非液化土层厚度(m),计算时宜将淤泥和淤泥质土层扣除;

d_w ——地下水位深度(m),宜按设计基准期内年平均最高水位采用,也可按近期年内最高水位采用;

d_b ——管道底部埋置深度(m),不超过 2m 时应采用 2m;

d_0 ——液化土特征深度(m),可按表 C.0.1 采用。

表 C.0.1 液化土特征深度(m)

饱和土类别	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
粉土	6	7	8
砂土	7	8	9

C.0.2 当初步判别认为需进一步进行液化判别时,应采用标准贯入试验判别法判别地面下 7m 深度范围内的液化;当饱和土标准贯入锤击数(未经杆长修正)小于液化判别标准贯入锤击数临界值时,应判为液化土。当有成熟经验时,也可采用其他判别方法。

在地面下 7m 深度范围内,液化判别标准贯入锤击数临界值可按式计算:

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (\text{C.0.2})$$

式中 N_{cr} ——液化判别标准贯入锤击数临界值;
 N_0 ——液化判别标准贯入锤击数基准值,应按表 C.0.2 选用;
 d_s ——饱和土标准贯入试验点深度(m);
 ρ_c ——粘粒含量百分率,当小于 3 或为砂土时,均应采用 3。

表 C.0.2 标准贯入锤击数基准值

设计地震分组	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
第一组	6(8)	10(13)	16
第二、三组	8(10)	12(15)	18

注:括弧内数值用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区。

C.0.3 凡经判定为可液化的土层,应探明各液化土层的深度和厚度,并按下列公式计算液化指数:

$$I_{LE} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i^L}{N_{cri}} \right) d_i^L w_i \quad (\text{C.0.3-1})$$

$$w_i = \begin{cases} 10 & d_{si} \leq 5 \\ 15 - Z_{0i} & 5 < d_{si} \leq 7 \end{cases} \quad (\text{C.0.3-2})$$

式中 I_{LE} ——液化指数;
 w_i —— i 土层考虑单位土层厚度的层位影响权函数(m^{-1});
 n_i ——7m 深度范围内每一个钻孔标准贯入试验点的总数;

N_i^L —— i 点标准贯入锤击数的实测值,当实测值大于临界值时应取临界值的数值;

N_{cri} —— i 点标准贯入锤击数的临界值;

d_i^L —— i 点所在土层厚度(m),可采用与该标准贯入试验点的相邻的上、下两标准贯入试验点深度差的一半,但上界不小于地下水位深度,下界不大于液化深度,中间的非液化土层应扣除;

d_{si} ——第 i 个标准贯入点的深度(m);

Z_{0i} ——第 i 层土中点的深度(m)。

C.0.4 存在液化土层的场地,液化等级应根据其液化指数按表 C.0.4 划分。

表 C.0.4 液化等级划分

液化指数	$0 < I_{LE} \leq 3.5$	$3.5 < I_{LE} \leq 10$	$I_{LE} > 10$
液化等级	轻微	中等	严重

附录 D 管材性能和拉伸应变

D.0.1 初步设计阶段,可按本规范第 D.0.2 条和第 D.0.3 条应力-应变简化折线取值;详细设计阶段,应按本规范 D.0.3 应力-应变简化折线取值。

D.0.2 常用钢材 B、X42、X52、X56、X60、X65、X70 和 X80 的材料性能和拉伸应变见表 D.0.2。

表 D.0.2 常用钢材的材料性能和拉伸应变

序号	钢号	弹性区				弹塑性区		
		应变 ϵ_1	模量 E_1 (MPa)	应力 σ_0 (MPa)	应力 σ_1 (MPa)	应变 ϵ_2	模量 E_2 (MPa)	应力 σ_2 (MPa)
1	B、X42	0.0018	2.1×10^5	369	370	0.069	647	414
2	X52	0.0019	2.1×10^5	406	407	0.069	711	455
3	X56	0.0021	2.1×10^5	436	438	0.056	962	490
4	X60	0.0022	2.1×10^5	458	461	0.040	1485	517
5	X65	0.0023	2.1×10^5	471	474	0.040	1518	531
6	X70	0.0024	2.1×10^5	498	503	0.030	2246	565
7	X80	0.0026	2.1×10^5	528	544	0.015	6210	621

注: ϵ_1 、 σ_1 分别为管道应力-应变简化折线中弹塑性变形起点处的应变和应力; ϵ_2 、 σ_2 分别为管道应力-应变简化折线中弹塑性区与塑性区交点处的应变和应力;
 E_1 、 E_2 分别为管道应力-应变简化折线中弹性区和弹塑性区的材料模量; σ_0 为管道应力-应变简化折线中弹塑性段延长线与应力轴相交处的应力。

D.0.3 管材的应力-应变简化折线可由实际的应力-应变曲线等效取得,等效的原则应符合下列规定:

- 1 E_1 等于实际应力-应变曲线中弹性阶段模量;
- 2 在容许拉伸应变 ϵ_2 前,实际应力-应变曲线与坐标轴围成的面积等于应力-应变简化折线与坐标轴围成的面积(图 D.0.3)。

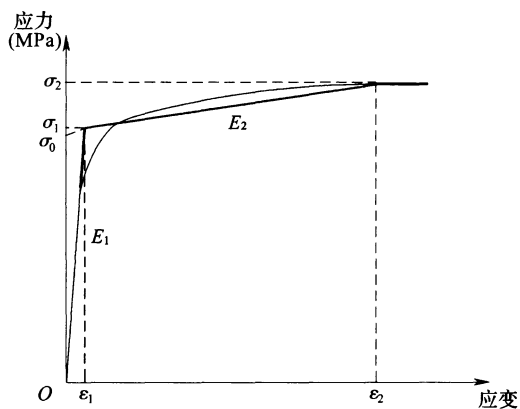


图 D.0.3 应力-应变简化折线示意

D.0.4 国产钢材与 API 5L 钢材对应关系见表 D.0.4。

表 D.0.4 国产钢材与 API 5L 钢材对应关系

API	A	B	X42	X46	X52	X56	X60	X70	X80
GB/T 9711	L210	L245	L290	L320	L360	L390	L415	L485	L555

附录 E 通过活动断层埋地管道有限元方法的弹簧参数

E.0.1 当有限元方法采用等效边界进行分析时,等效非线性弹簧的外力与伸长量关系式可按式计算:

$$F = \sqrt{2f_s AE \Delta L} \quad (\text{E.0.1})$$

式中 F ——作用于等效非线性弹簧的外力(N);

ΔL ——在外力作用下等效非线性弹簧的伸长量(m);

f_s ——沿管轴方向土壤与管道外表面之间单位长度上的摩擦力(N/m),可按式 6.2.3-1 计算;

E ——管道材料的弹性模量(Pa),按本规范附录 D 选取。

E.0.2 当采用有限元方法进行通过活动断层的管道抗震的初步计算时,土弹簧的设置和模型见图 E.0.2-1 和图 E.0.2-2,其参数可按下列公式计算:

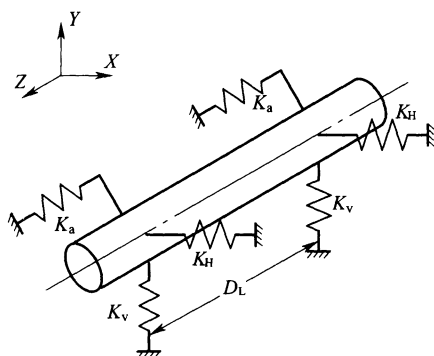


图 E.0.2-1 埋地管道的有限元模型

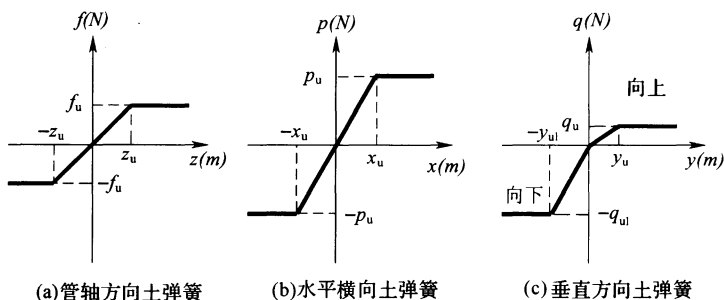


图 E. 0. 2-2 土弹簧的非线性模型(三个方向)

1 管轴方向土弹簧 K_a 可按下式计算:

$$f_u = f_s \cdot D_L \quad (\text{E. 0. 2-1})$$

式中 f_u ——沿管轴方向管土之间的滑动摩擦力(N);

D_L ——土弹簧间距(m)。

对于密砂、松砂、硬粘土和软粘土,管轴方向土弹簧的屈服位移 Z_u 分别取值为 0.003m, 0.005m, 0.008m 和 0.01m。

2 水平横向土弹簧 K_H 可按下列公式计算:

$$P_u = (N_{ch}c + N_{qh}\rho_{sl}gHD)D_L \quad (\text{E. 0. 2-2})$$

$$X_u = 0.04(H + D/2) \quad (\text{E. 0. 2-3})$$

$$N_{ch} = 6.752 + 0.065H/D - \frac{11.063}{(H/D + 1)^2} + \frac{7.119}{(H/D + 1)^3} \quad (\text{E. 0. 2-4})$$

$$N_{qh} = C_0 + C_1(H/D) + C_2(H/D)^2 + C_3(H/D)^3 + C_4(H/D)^4 \quad (\text{E. 0. 2-5})$$

式中 P_u ——埋设场地土沿水平横向对管道的压力(N);

X_u ——水平横向土弹簧的屈服位移(m);

N_{ch} ——水平横向考虑土体粘聚力的计算参数,且 $N_{ch} \leq 9$; $c = 0$ 时, $N_{ch} = 0$;

c ——土的粘聚力(kPa);

H ——管道轴线至管沟上表面之间的埋深(m);

D ——管道外径(m);

N_{qh} ——水平横向与土体内摩擦角有关的计算参数,系数

$C_0 \sim C_4$ 按表 E. 0. 2 取值; $\phi=0^\circ$ 时, $N_{qh}=0$ 。

ϕ ——土的内摩擦角($^\circ$);

ρ_{sl} ——管道周围场地土的密度(kg/m^3)。

表 E. 0. 2 N_{qh} 的系数取值

ϕ	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4
20°	2. 399	0. 439	-0. 030	0. 001059	-0. 0000175
25°	3. 332	0. 839	-0. 090	0. 005606	-0. 0001319
30°	4. 565	1. 234	-0. 089	0. 004275	-0. 0000916
35°	6. 816	2. 019	-0. 146	0. 007651	-0. 0001683
40°	10. 959	1. 783	0. 045	-0. 005425	-0. 0001153
45°	17. 658	3. 309	0. 048	-0. 006443	-0. 0001299

注:可以采用插值方法得到其他内摩擦角 $\phi(20^\circ \leq \phi \leq 45^\circ)$ 的系数值。

3 垂直方向土弹簧应按下列公式计算:

1) 垂直向上土弹簧应按下列公式计算:

$$q_u = (N_{cvu}cD + N_{quv}\rho_{sl}gHD)D_L \quad (\text{E. 0. 2-6})$$

$$\text{从密砂到松砂: } Y_u = (0. 01 \sim 0. 02)H \quad (\text{E. 0. 2-7})$$

$$\text{从硬粘土到软粘土: } Y_u = (0. 1 \sim 0. 2)H \quad (\text{E. 0. 2-8})$$

$$N_{cvu} = 2(H/D) \quad (\text{E. 0. 2-9})$$

$$N_{quv} = (\phi/44)(H/D) \quad (\text{E. 0. 2-10})$$

式中 q_u ——垂直向上土对管道的压力(N);

Y_u ——垂直向上土弹簧的屈服位移(m);

N_{cvu} ——垂直向上考虑土体粘聚力的计算参数, $N_{cvu} \leq 10$;

N_{quv} ——垂直向上与土体内摩擦角有关的计算参数, N_{quv}

$$\leq N_{qh}。$$

2) 垂直向下土弹簧应按下列公式计算：

$$q_{ul} = (N_{cvd} cD + N_{qvd} \rho_{sl} g HD + N_r \rho_{sl} g D^2 / 2) D_L \quad (E. 0. 2-11)$$

$$\text{砂土: } Y_{ul} = 0. 1D \quad (E. 0. 2-12)$$

$$\text{粘土: } Y_{ul} = 0. 2D \quad (E. 0. 2-13)$$

$$N_{cvd} = [\cot(\phi + 0. 001)] \left\{ e^{\pi \tan(\phi + 0. 001)} \left[\tan\left(45 + \frac{\phi + 0. 001}{2}\right) \right]^2 - 1 \right\} \quad (E. 0. 2-14)$$

$$N_{qvd} = e^{\pi \tan \phi} \left[\tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \right]^2 \quad (E. 0. 2-15)$$

$$N_r = e^{0. 18\phi - 2. 5} \quad (E. 0. 2-16)$$

式中 q_{ul} ——垂直向下土对管道的压力(N)；

Y_{ul} ——垂直向下土弹簧的屈服位移(m)；

N_{cvd} ——垂直向下土弹簧的计算参数；

N_{qvd} ——垂直向下土弹簧的计算参数；

N_r ——垂直向下土弹簧的计算参数。

附录 F 管道抗震施工检查报告表

F.0.1 管道抗震施工检查报告表见表 F.0.1-1～表 F.0.1-6。

表 F.0.1-1 防滑坡工程检查报告

资料编号 F.0.1-1		防滑坡工程检查报告				单位工程名称： 单位工程编号：	
施工承包商：		分部工程名称和编号：					
防滑坡地段起止桩号							
抗滑坡措施	检 查 内 容						
削坡工程	削坡前坡度		削坡后坡度		削坡面积		削坡土石方量
护坡工程	护坡形式		砌筑或 喷护质量		护坡面积		砌筑工程量
抗滑挡墙	挡墙外形 尺寸		砌筑或 混凝土质量		挡墙数量		砌筑或混凝土工程量
抗滑桩	混凝土质量		桩的垂直度		桩的尺寸		桩的数量
锚固设施	锚固结构		锚固段尺寸		拉索规格		锚固设施质量
排水措施	排水流畅 程度		排水沟 截面尺寸		砌筑质量		排水沟长度
防渗措施	防渗结构		防渗效果		砌筑质量		防渗面积
位移观测	位移观测 数量		观测点 原标高		施工后观测点原标高：		
主要断面 示意图							
平面示意图							
质量评价							
施 工 单 位					监 理 单 位		
记录人： 技术员： 技术负责人：					现场代表：		
年 月 日					年 月 日		

表 F.0.1-2 更换液化土施工报告

资料编号 F.0.1-2	更换液化土施工报告	单位工程名称： 单位工程编号：
施工承包商： 分部工程名称和编号：		
更换液化土 起止桩号和长度		
非液化土土源地点		
非液化土土样试验单位		
分散剂名称		
粉土的粘粒 (小于 0.005mm)含量		
更换土截面尺寸		
更换土数量		
分层夯实状况		
断面示意图		
平面示意图		
质量评价		
施 工 单 位		监 理 单 位
记录人： 技术员： 技术负责人： <div style="text-align: right;">年 月 日</div>		现场代表： <div style="text-align: right;">年 月 日</div>

表 F.0.1-3 标准贯入试验记录

资料编号 F.0.1-3	标准贯入试验记录				单位工程名称： 单位工程编号：	
施工承包商：		分部工程名称和编号：				
起止桩号和长度						
标准贯入器型号和规格						
测试深度						
贯入点位置	实测锤击数 (锤进 30cm)	是否合格	贯入点位置	实测锤击数 (锤进 30cm)	是否合格	
平面示意图						
质量评价						
施 工 单 位			监 理 单 位			
记录人： 技术员： 技术负责人： <div style="text-align: right;">年 月 日</div>			现场代表： <div style="text-align: right;">年 月 日</div>			

表 F.0.1-4 回填疏松砂土施工报告

资料编号 F.0.1-4	回填疏松砂土施工报告		单位工程名称： 单位工程编号：
施工承包商：		分部工程名称和编号：	
回填疏松砂土 起止桩号和长度			
疏松砂土土样试验单位			
疏松砂土土源地点	土的塑性指数 I_p	0.1mm 以下的颗粒的含量 %	是否符合要求
管底疏松砂土回填厚度			
管顶至地面疏松砂土厚度			
地面以上回填宽度和厚度			
管沟断面示意图			
质量评价			
施 工 单 位		监 理 单 位	
记录人： 技术员： 技术负责人： <div style="text-align: right;">年 月 日</div>		现场代表： <div style="text-align: right;">年 月 日</div>	

表 F.0.1-5 管道柔性接头、管道隔震部件安装记录

资料编号:F.0.1-5		管道柔性接头、管道隔震 部件安装记录			单位工程名称: 单位工程编号:	
施工承包商:		分部工程名称和编号:				
管道柔性接头						
管道柔性接头生产单位						
柔性接头型号和数量						
管道柔性 接头编号	安装位置	压力等级	预强度试验 压力(MPa)	预严密试验 压力(MPa)	安装 检查结果	管线试压时 的检查结果
管道隔震部件						
管道隔震部件生产单位						
隔震部件型号和数量						
管道隔震 部件编号	安装位置	安装标高 偏差(mm)	安装位置 偏差(mm)	安装角度 偏差(mm)	绝缘 检查结果	机械安装 检查结果
质量评价						
施 工 单 位			监 理 单 位			
记录人: 技术员: 技术负责人: <div style="text-align: right;">年 月 日</div>			现场代表: <div style="text-align: right;">年 月 日</div>			

表 F.0.1-6 通过活动断层的管道与断层交角及施工记录

资料编号:F.0.1-6	通过活动断层管道与断层交角及施工记录				单位工程名称:		
				单位工程编号:			
施工承包商:		分部工程名称和编号:					
管道通过活动断层的断层情况记录	断层名称	断层两侧 场地土类型	断层周围 地形情况	断层的 方位角	管的 方位角	管道与 断层交角	
管道通过活动断层 施工的情况记录							
	管道外径 和壁厚	管道 埋设深度	管沟回填土 的土性描述	管沟底 部宽度	管沟 深度	管沟 坡度	
管沟断面示意图							
管道与断层相交 情况示意图							
施工质量评价							
施 工 单 位		设 计 单 位:		监 理 单 位:			
记录人:		现场代表:		监理工程师:			
技术员:							
技术负责人:							
年 月 日		年 月 日		年 月 日			

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的用词:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”。

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的用词:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”。

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的用词:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

表示有选择,在一定条件下可以这样做的用词,采用“可”。

2 本规范中指明应按其他有关标准、规范执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

中华人民共和国国家标准

油气输送管道线路工程
抗震技术规范

GB 50470 - 2008

条文说明

目 次

1	总 则	(67)
2	术语和符号	(68)
2.1	术语	(68)
3	一般规定	(69)
4	抗震设防要求	(70)
4.1	抗震设防标准	(70)
4.2	地震安全性评价	(71)
5	工程勘察及场地划分	(74)
5.1	工程勘察	(74)
5.2	管道场地划分	(77)
6	管道抗震设计	(80)
6.1	一般埋地管道抗震设计	(80)
6.2	通过活动断层的埋地管道抗震设计	(87)
6.3	液化区埋地管道抗震设计	(108)
6.4	震陷区埋地管道抗震设计	(109)
6.5	穿越管道抗震设计	(109)
6.6	管道跨越工程抗震设计	(112)
7	管道抗震措施	(116)
7.1	通用抗震措施	(116)
7.2	专项抗震措施	(117)
8	管道抗震施工	(120)
8.1	一般规定	(120)
8.2	材料检查与验收	(120)
8.3	管道的焊接安装与试压	(121)

8.4	埋地管道抗震施工	(121)
8.5	穿跨越管道抗震施工	(122)
9	管道线路工程抗震验收	(123)

1 总 则

1.0.1 油气输送管道遍布我国大地,它是我国经济建设和社会发展的能源大动脉,是重要的生命线工程。我国地处环太平洋地震带与喜马拉雅-地中海地震带之间,是世界上地震灾害频发的国家之一。在我国国土上,每年都会有多次六、七级地震发生。油气输送管道常常受到地震的威胁,保障油气输送管线工程的抗震安全,是非常重要的。在制定本规范时,我们不仅考虑到油气输送管道线路工程的功能要求,经济适用,而且着重考虑了保障其抗震安全性。特别把线路工程分成重要区段和一般区段。对重要区段给出了明确的定义,写入术语中,定义为:输气管道通过的四级地区的区段,以及在所通过的河流、湖泊、水库和人口密集区设置的管道两端截断阀之间的输油气干线管道区段。对位于重要区段的管线工程的抗震设计,提高了设防标准,从而延长重要区段管道的使用寿命,减少维修量和维修成本,保障人民生命财产的安全,保护环境。

另外,根据历次大地震的管道震害经验,位于不良地震地质区的管道最易遭受破坏。因此,本规范给出了管道通过断层、液化区以及不良地质区的抗震设计方法及施工规范,以便保障这些薄弱环节的安全性。

1.0.2 由于现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 对全国区划的地震动峰值加速度上限为 $0.40g$,没有给出大于 $0.40g$ 的区划范围,因此本规范仅适用于地震动峰值加速度为 $0.05g$ 至 $0.40g$ 地区的管线工程。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 管道敷设呈带状,其场地范围应为管道轴线两侧各 200m 的带状区域。

2.1.2 对于输油气管道而言,重要区段的划分主要考虑环境保护的要求。原油和天然气管道的泄漏可能造成所经过的河流、湖泊、水库的污染,并对人口密集区造成污染和形成易燃易爆环境。所以将其经过的河流、湖泊、水库或人口密集区所设的管道两端截断阀内的区段划为重要区段。

对于输气管道而言,重要区段的划分主要考虑气体可能泄漏或爆炸等安全因素。输气管道工程设计规范从安全角度,将输气管道工程通过的地区根据沿线居民数和建筑物密集程度,划分为四个地区等级,其中四级地区建筑、人口密集,交通频繁和地下设施多。

2.1.5 本规范中提及的管线工程包括埋地管线、跨越管线、穿越管线三种类型管道。埋地管线工程或穿越管线抗震设计主要用的地震动参数有地震动峰值加速度或者峰值速度等,而跨越管线工程抗震设计主要用的地震动参数有峰值加速度,反应谱特征周期等,有时也需要地震动时程曲线,视需要而定。这些参数都和 50 年超越概率值相对应,是取 50 年超越概率 10% 还是取 50 年超越概率 5% 或 2% 相对应的值,在本规范各章中均有明确规定,可以查阅选取。

3 一般规定

3.0.1 本规范要求在设计文件中,说明地震动设计参数取值的依据和标准,例如,取自现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 的某章节的规定,或者取自“××工程场地地震安全性评价报告”的审定结果,将审定的结论作为设计的依据。

3.0.4 根据本规范第 5.1.3 条的规定,进行了场地液化判别后,当管道场地在设计地震动参数条件下可能具有中等或严重液化潜势时,应利用本规范第 6.3 节规定的方法对管道进行液化验算,并采取相应措施。在第 5.1.3 条中规定:在场地地震动峰值加速度大于或等于 $0.10g$ 的地区,应进行液化判别。对场地地震动峰值加速度小于 $0.10g$ 的地区,可不进行液化判别,因为地震动参数较小时,场地往往不会发生中等或严重液化潜势。

4 抗震设防要求

4.1 抗震设防标准

4.1.1 长输油气管道本身属柔性结构,具有一定的抗变形能力。例如:1976年唐山大地震时,秦-京输油管线沿线遭遇了相当Ⅵ~Ⅷ度不同等级的震害,但在一般直埋地段基本完好,在滦河桥跨越部位却遭到了锯齿性的严重毁坏,通过液化区的管道产生了屈曲。因此,在一般地段的管道抗震设防,采用现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 确定的地震动参数即 50 年超越概率 10% 的国际通用风险水准,以地震动峰值加速度和地震动反应谱特征周期为指标,利用《中国地震动峰值加速度区划图》和《中国地震动反应谱特征周期区划图》的参数进行抗震验算,已基本能够满足管道抗震设防要求及管道的抗震能力。对于已进行了地震安全性评价工作的地区,应按给出的本地区 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度和地震动反应谱特征周期参数进行抗震设计。

4.1.2 抗震设防标准是关系到工程安全与工程造价的关键因素,考虑到管道使用年限一般为 30~50 年,在此期间管线一旦遭遇地震破坏,不但会造成周围的环境污染,而且输送介质含有硫化氢的管道气体外溢,会给周围人民的生命财产带来严重威胁。因此,在重要区段为提高其抗震能力,应按通过地震安全性评价或经专门研究后给定的参数进行抗震计算和采取抗震措施。本条提出采用按 50 年超越概率 5% 的地震动参数进行抗震设计,目的是为提高管道的抗震设防能力,防止管道在地震动作用下出现较大的变形而产生破坏。

大型跨越结构和埋深小于 30m 的大型穿越管道,一般情况下都敷设在我国重要的江河、水域或冲沟地段,这些特殊的部位,除

了需要特别考虑地震后的安全和环境污染等次生灾害的影响问题,而且考虑到其震后修复困难,所以必须进一步提高其抗震设防的水准,要求按地震安全性评价确立的 50 年超越概率 2% 的地震动参数进行抗震设计,从而具备较强的抗变形能力。

通过比较世界各国现行的管道抗震设计规范,本规范所规定的抗震设防水准与国际上同类规范是一致的。目前保证震后管道维持其服务功能的抗震设计理念已经得到了全世界范围的认可。1995 年日本阪神地震之后,日本管道协会对规范进行了修订,将埋地供水管道按两级地震动水平设计,其第二级地震动水平规定为直接发生在管道场地的 M6.8 地震,相当于阪神地震的情况。

4.2 地震安全性评价

4.2.1 在可行性研究阶段进行地震安全性评价工作,为下一步的管道线路选线和抗震设防提供科学依据、为项目进行社会和经济效益分析提供基础依据。

本条规定了地震安全性评价应给定的 1~5 款内容,是依据现行国家标准《工程场地地震安全性评价》GB 17741—2005 和本规范第 6 章管道抗震设计的需要而确定的。根据现行国家标准《工程场地地震安全性评价》GB 17741—2005,管道沿线的地震动参数(峰值加速度或者峰值速度)分区属于地震安全性评价的Ⅲ级工作;管线重要工程场地的地震动反应谱和加速度时程属于地震安全性评价的Ⅱ级工作;当管道线路工程通过活动断层时,还应给出本规范第 4.2.2 条规定的内容和参数。鉴于活动断层对管道的危害性,管道沿线近场区主要断层活动性的鉴定及对工程场地的影响性评价是地震安全性评价工作的重要内容之一。

对于通过地震动峰值加速度大于 $0.10g$ 以上区段的管道建设工程,提出地震地质灾害评价和损失评估的目的,是因管道沿线场地的地震地质灾害,由于地震动或断层错动可能影响到管道场地的失效。震害经验表明:具不良地质条件的场地,常诱发产生各

种地质灾害。地震地质灾害主要包括三大类:①由于地震动作用导致的对工程有直接影响的工程地基基础失效,包括饱和砂土液化、软土震陷等;②由于地震动作用导致的对工程有可能间接影响的工程场地失效,包括岩体崩塌、岩体开裂、岩土滑坡等;③由地震断层作用导致的地表错动、地裂缝与地面变形等地质灾害。通过进行地震地质灾害评估,可对管道沿线场分别标明给定概率水平地震作用下的不同类型地质灾害程度指标,勾画出严重、中等、轻微和无变化四种不同等级灾害的分区界限,以图的形式表示。如地震地质灾害,将砂土液化、软土震陷、地震断层等都在一幅图中表示出来,也可以是单一类型的地震地质灾害小区划图,如砂土液化分布图等。

4.2.2 国内研究资料表明:当地震动峰值加速度为 $0.10g \sim 0.30g$ 且地表土层厚度至基岩土大于等于 $60m$,或地震动峰值加速度大于 $0.30g$ 以上且地表土层厚度至基岩大于等于 $90m$ 时,由于土壤吸收地震波能的原理,活动断裂对地面的破坏影响不大,不会对地表管道设施产生破坏。但对于不符合上述条件的,应评价活动断层对所建设管道的影响,并按本条款规定,给出相应的数据和结论,以便于为管道抗震设计提供理论依据。

当不符合本条第 1 款规定的情况,要求给出第 2 款第 1)项的内容和参数的目的是为了更准确和详细地了解沿线的地震地质情况,特别是了解破裂带的宽度和长度,以使勘察选址时确定是否通过此地段,若避让不开,则为设计提供了采取措施的依据。本条第 2 款第 2)项要求给出断层与管道交汇的位置和交角,或断层与管道的距离,是因断层位移的大小和断裂带宽度,在同一条断层上并不相同。由于断层附近地表运动十分复杂,形成宽度不一的错乱地带,因而管道铺设方向不得与断层线并行,当明确断层位移和断裂带宽度后,设计选线时可通过断裂带宽度最小的地方埋设管道,同时也为采取抗震措施提供基础依据。正确选择断层平面与管轴之间的夹角 β ,使管线在断层运动时受拉,避免受压,这是因为管

材的耐拉伸性能优于耐压缩性能。第 2 款第 3) 项要求给出断层的覆盖土层厚度, 是为设计是否考虑断层潜在地表断错的影响提供基础依据。要求给出断层两侧和破裂带的土体粘聚力、内摩擦角和平均剪切波速, 是因为计算地震动作用下的最大轴向应力时, 土壤作用在管道上的单位长度摩擦力涉及管道与土壤之间的内摩擦角。

经国内研究结果表明, 对于隐伏正断层, 地表破裂带位错量峰值随埋深线性递减, 在其他参数不变的情况下, 隐伏正断层倾角越小, 地表破裂带越偏向下盘, 并且地表破裂带的宽度也变小。而隐伏走滑断层, 地表位移差随埋深衰减更快, 随着隐伏活断层断面上位错量的增加, 地表破裂带宽度会显著变宽, 位错量也随之增大。当明确给出第 2 款第 4) 项规定的断层的地表最大水平和竖向位错量以及错动方向, 即可根据本规范第 6.2 节进行分析计算, 得到管道在断层位移引起的管道最大拉伸应变、最大压缩应变, 从而进一步验算是否超过管道的容许拉伸应变和轴向容许压缩应变, 为管道通过断层的抗震设防和采取相应的抗震措施提供了基础依据。

5 工程勘察及场地划分

5.1 工程勘察

5.1.1 钢质管道所通过各区段有关地震地质、地震活动性、工程地质、水文地质等状况差异很大。管道应选择地震活动性弱、地震地质条件好的地区建设。在同样的地震活动性和地震地质条件的地区,应选择场地条件好的场址。一般来说,场地条件包括地形地貌、地震地质灾害(滑坡、塌陷、液化、断裂等),以及地下土层的性质及特性。这三条特性是相互关联、相互影响的。

地形地貌条件对震害的影响主要是指地表形态不同对震害有不同的影响。如突出的山脊、高耸孤立的山丘、非岩质的陡坡及河岸的高边坡、土堤等地段,对地震波均有放大效应,而加剧表面的振动,甚至会产生陡坎崩塌。多次震害调查也证实了局部地形变化对震害有明显的影响。凡是在孤立、突出的山包、山梁部位,其山顶的振动加速度大于山底与山脚的振动加速度;山顶的振动持续时间也较长,幅值显著增大。发震断层是工程建设应该避开的危险地段。对于埋地管道无法绕过的断层,就必须进行详细抗震研究设计并采取相应措施。在河道两岸边坡地带,大多是新近沉积物组成,常含有饱和砂土、粉土层或软弱粘性土层。在地震时,往往由于饱和砂土或粉土产生液化,或抗剪强度大为削弱,导致两岸土体失稳向河心滑移或产生较大较长的裂缝,致使管道破坏。这方面的震害在海城、唐山等地震中是有实例的。在含有淤泥、草炭、泥炭、盐渍土、有机土和地势低平的河流新近沉积区、河流故道以及被掩埋河、湖、沟、坑等地区,受震时易产生显著沉陷,导致工程设施严重震害,应作为抗震的不利地段。

不同埋深以及软、硬程度不同的地表地层,地震波传播速度不

同,地震波的放大作用不同,产生的地表地应变和位移值均不同。强震观测结果及理论分析说明:硬场地,地震波的传播速度大,加速度放大作用大,位移幅值小,地应变小;软场地,地震波传播速度小,加速度放大作用小,位移幅值大,地应变大。位于软场地的管道地震反应大,破坏也较重。应调查和收集各方面的资料进行综合分析,划分出对管道抗震有利、不利和危险地段,以便在工程设计时尽量选择对工程抗震有利的地段,避开危险地段进行建设。

5.1.2 此条规定的勘探点间距与国家现行标准《油气田及管道岩土工程勘察规范》SY/T 0053—2004 中线路岩土工程勘察等级为甲级的勘探点间距一致。勘探深度主要从确定场地类别的角度来考虑的。

5.1.3 关于管道沿线地基土液化判别,是引用国家现行标准《油气田及管道岩土工程勘察规范》SY/T 0053—2004 的判别方法。对地震峰值加速度大于或等于 $0.10g$ 并存在可液化土的区段,应根据初判条件进行初判,对初步判定可能液化土层,应再进一步判别,并评价对管道的危害。

5.1.5 震陷是指地震作用下软弱土层塑性区的扩大或强度降低而使地面产生的附加下沉。在地震动加速度值为 $0.10g \sim 0.15g$ 时可不考虑震陷问题,当满足下表中任一条件时,也可不考虑震陷影响,否则应采取必要的抗震措施。

表 1 不考虑软土震陷影响的条件

地震动峰值加速度	地基承载力特征值 (kPa)	软弱土层厚度 (m)	平均剪切波速 (m/s)
$0.20g(0.30g)$	≥ 80	≤ 10	≥ 120
$0.40g$	≥ 100	≤ 2	≥ 150

5.1.6 当前国内外地震地质研究成果和工程实践经验都较为丰富,在工程中勘察与评价活动断裂一般通过搜集、查阅文献资料,进行工程地质测绘和调查就可以满足要求,只有在必要的情况下,才进行专门的勘探和测试工作。搜集和研究管道所在地区的地质资料和有关文献档案是鉴别活动断裂的第一步,也是非常重要的

一步,在许多情况下,只要搜集、分析、研究已有的丰富的文献资料,就能基本查明和解决有关活动断裂的问题。

在充分搜集已有文献资料 and 进行航空相片、卫星、相片解译的基础上进行野外调查,开展工程地质测绘是目前进行断裂勘察、鉴别活动断裂的最重要、最常用的手段之一。活动断裂都是在老构造的基础上发生新活动的断裂,一般说来它们的走向、活动特点、破碎带特性等断裂要素与构造有明显的继承性。因此,在对一个工程地区的断裂进行勘察时,应首先对本地区的构造格架有清楚的认识和了解。野外测绘和调查可以根据断裂活动引起地形地貌特征、地质地层特征和地震迹象等鉴别活动特征。

5.1.7 初步勘察应尽量收集已有资料进行综合分析,才能圈定具有地震地质灾害背景的区域。评价每种地震地质灾害需要综合很多因素,涉及的已有资料也较多,应包括:

1 不同大小比例尺的地形图,从 1:5 万到 1:11 万均可做参考或实际应用。

2 遥感资料的搜集与解译。不同比例尺的遥感图件与照片,尤其是一些大比例尺的航照会给活断层地表遗迹以及中新、老滑坡段的研究提供许多信息。

3 收集埋地管道沿线区域历史地震地质灾害资料,因为地震地质灾害往往有惊人的重复性。

4 区域地质图、地貌图,其比例尺应根据管线规模而定,一般为 1:5 万到 1:150 万。地貌应包括山地、平原、古河道、古湖泊、古沼泽分布。在河流区应标出河流阶地、漫滩等;对黄土区,应将黄土地貌类型、沟谷侵蚀分布表示出来。老地层分布、地质构造特点,均可从区域地质图中得到总体了解。

5 收集地层资料,尤其是第四纪松散地层分布资料,包括土层厚度、岩性和已有的土质、土力学分析资料。

6 沿线区域内已有测量资料,如跨断层位移测量、跨断层探槽、钻孔断层错动测量、断层活动年代等。

- 7 基岩埋深以上浅层地震波波速测定资料。
- 8 地震活动性、地震小区划、地震动峰值加速度划分等资料。
- 9 工程地质勘察资料。
- 10 地下水位的深度分布、地下水等位线图等资料。

在收集以上资料的基础上,分析研究地震地质灾害背景的危险区段、枯水期与丰水期地下水位埋深,圈定具有发生地震地质灾害背景的危险区段。

5.1.8 此条是参照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001 中应避开主断裂带距离的规定制定的,建筑抗震设防类别是按乙类、地震动峰值加速度为 $0.40g$ 考虑的,应该偏于安全。正确选择管道通过活动断层的位置是非常重要的,在同一条断裂上,其位移的大小和断裂带宽度并不都是一样的,在确定管道穿越活动断层的位置时,应尽可能选择断层位移和断裂带宽度最小的位置。

5.2 管道场地划分

5.2.1 抗震有利、不利和危险地段的划分是沿用了目前现行有关规范的规定。本条中地形、地貌和岩土特性的影响是综合在一起加以评价的,这是因为不同岩土构成的同样地形条件的地震影响是不同的。本条中只列出了抗震有利、不利和危险地段的划分,其他地段视为可进行建设的一般地段。

5.2.2 为了和现行有关规范统一,场地的类别划分进一步考虑了覆盖层厚度的影响,从而形成了以平均剪切波速和覆盖层厚度作为评定指标的双参数分类方法。土的类型系表层土刚度(软硬)的表征。对于重要地段提出进行剪切波速的实测;对其他地段,无条件实测剪切波速,且无法收集到邻近地点实测数据的情况时,也可根据岩土名称和性状按表 5.2.2 估算剪切波速。

5.2.3 覆盖层厚度的确定分两种情况:一是当某层面以下各土层的剪切波速皆大于 500m/s ,按地面至该土层顶面的距离确定,薄

的硬夹层和孤石应包括在覆盖层之内。二是当地下某一下卧土层的剪切波速大于或等于 400m/s 且不小于相邻的上土层的剪切波速的 2.5 倍时,覆盖层厚度可按地面至该下卧层顶面的距离取值。需要指出的是,第二种情况只适用于当下卧层硬土层顶面的埋深大于 5m 时的情况。

5.2.4 土层剪切波速的平均值采用更富有物理意义的等效剪切波速的公式计算,即:

$$V_{si} = \frac{d_0}{t} \tag{1}$$

式中 d_0 ——场地评定用的计算深度(m),取覆盖层厚度和 20m 两者中的较小值;

t ——剪切波在地表与计算深度之间传播的时间(s)。

当有充分依据时,允许使用插入方法确定边界线附近(指相差 15%的范围)的 T_g 值。图 1 给出了一种连续化插入方案,可将原有场地分类及修订方案进行比较。该图在场地覆盖层厚度 d_{0v} 和等效剪切波速 V_{se} 平面上用等步长和按线性规则改变步长的方案进行连续插入,相邻等值线的 T_g 值均相差 0.01s。

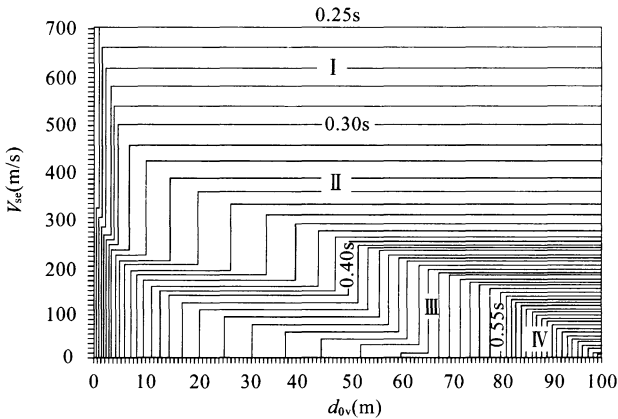


图 1 在 d_{0v} - V_{se} 平面上的 T_g 等值线

注:用于设计地震分组第一组,图中相邻 T_g 等值线的差值均为 0.01s。

5.2.5 本条中规定的场地分类方法主要适用于剪切波速随深度呈递增趋势的一般场地,对于有较厚软夹层的场地土层,由于其对短周期地震动具有抑制作用,可以根据分析结果适当调整场地类别和设计地震动参数。

6 管道抗震设计

6.1 一般埋地管道抗震设计

6.1.1 根据大量震害统计资料,一般场地的地下直埋管道地震动峰值加速度大于或等于 $0.30g$ 时才开始破坏。为了安全起见,地震动峰值加速度大于或等于 $0.20g$ 时,直埋管道应进行地震振动抗拉伸和抗压缩的校核。

6.1.2 组合应变:因为地震波引起的随机震动,没有破坏土壤的完整性和连续性。地震时,管道仍处于土壤的嵌固状态,操作状态下的全部荷载仍由管道来承受。故地震波引起的拉、压应变 ϵ_{\max} 应与操作条件下(内压、温差)引起的管道轴向应变 ϵ 组合。

6.1.3 本条是对埋地管道抗震设计轴向应变的规定。对本条说明如下:

输油输气管道的特点是,作为母材的管子具有高强度、高抗挠刚度、高耐冲击性,并且采用优良的焊接技术将管子焊接成没有接头的整体结构,因此具有良好的抗震性。

钢结构的破坏,一般分为屈服点以下的破坏和屈服点以上的塑性破坏。屈服点以下的破坏还可细分为弹性屈服破坏、脆性破坏及疲劳破坏。

由于周围土层对埋地管道有足够的约束,因此,埋地管道不可能产生弹性屈曲。另外,脆性破坏需要有龟裂或有裂纹缺陷或在钢管脆转温度以下才能发生,以现在的钢管质量和焊接质量而言,一般不存在引起脆性破坏的缺陷。

此外,疲劳破坏是材料在屈服点以下经 1×10^7 次以上应力反复作用而发生的,远远大于地震中埋地管道的应力反复次数(日本根据 19 次强烈地震记录得到的振动反复次数为 $10 \sim 100$ 次)。

管道在地震波振动中所造成的破坏,是由于材料抵抗不了土壤传来的振动变形,管道在地震中所受到的是短期反复荷载,即应变控制型的周期荷载,由此造成管材在屈服点以上的塑性破坏。

ASME(美国机械工程师协会)锅炉和压力容器第Ⅲ部分规定的设计疲劳曲线如图 2 所示。

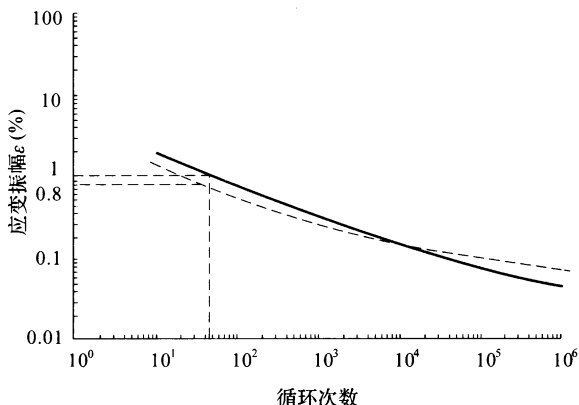


图 2 设计疲劳曲线

考虑已埋地管段不是独立的压力容器,而是连续组焊的管段,我们取相当于设计疲劳曲线应变循环总数为 40~50 次的应变值作为管段在地震中的容许应变,见式(2):

$$[\epsilon_c]_v \text{ 或 } [\epsilon_t]_v = 0.8\% \sim 1.0\% \quad (2)$$

此外,由于埋地直管段在地震中所产生的应变是全截面均匀地拉伸或压缩,故有可能当应变值小于低周疲劳容许值时,在管子的塑性区产生轴向压缩屈曲。因此,对直管段管道还应该进行屈曲校核。压缩屈曲开始的应变如下式所示:

$$\epsilon_b = \frac{4}{3} \sqrt{n} \frac{\delta}{D} \quad (3)$$

式中 ϵ_b ——压缩屈曲应变;

n ——硬化参数,X65 及以下钢级取 0.11,X70 和 X80 钢

级取 0.09;

δ ——管道壁厚(m);

D ——管道外径(m)。

采用安全系数为 1.25 时,压缩屈曲的容许应变值 $[\epsilon_c]_v$ 如下式:

$$[\epsilon_c]_v = \begin{cases} 0.35 \times \frac{\delta}{D} & \text{X65 及以下钢级} \\ 0.32 \times \frac{\delta}{D} & \text{X70 和 X80 钢级} \end{cases} \quad (4)$$

6.1.4 该条适用于土壤嵌固的地下直埋管道在地震波作用下所产生的最大轴向应变的计算。

目前,对地下管道在地震波作用下产生的应力应变分析的方法大致有三种观点:第一种观点认为剪切波是产生埋地管道最大轴向应变的主要波,我国陈冠卿教授持这一观点。第二种观点认为不可能预见哪一种地震波将起主要作用,应对各种形式的波进行单独分析,然后再综合考虑。美国的《油气管道地震设计指南》就分别计算了剪切波、膨胀波和雷利波产生的轴向应变,然后按这三种波产生的应力组合综合考虑。第三种观点认为不可能预见哪一种地震波将起主要作用,应对各种形式的波进行单独分析,两种波并不同时发生作用,应单独考虑各自的影响,这种观点得到了 Newmark 和 Rosenblueth 的认同。他们通过对剪切雷利波的地震记录观察得出这样的结论:“在破坏性地震的加速度记录中,与雷利波相关的加速度通常很小,雷利波通常被剪切波的后部所掩盖。”

不管是哪种分析方法,都做出了如下的假定:

- 1 土壤是线弹性的,是均质的。
- 2 除周围土壤之外,管道没有任何其他外部支撑。
- 3 当地震波作用时,管道相对于周围土壤没有滑动,即管道的轴向应变等于土壤的轴向应变。

根据上述假定,当地震波通过土壤时,将产生土壤质点运动,通常可用一位移矢量 f 表示,该矢量的特性将随其位置和时间而变化。如果我们只考虑一维运动,设地震波为剪切谐和波,其波动方程如下式:

$$f = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T_g} - \frac{x}{L} \right) \quad (5)$$

式中 A ——地震波的振幅(m);

T_g ——地震动反应谱特征周期,查现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 获取(s);

L ——地震波的波长(m);

V_{se} ——地震波的传播速度,取场地剪切波速(m/s);

t ——时间(s);

x ——地震波传播方向的位移(m)。

倾斜的剪切波对管道轴线方向 x' 波动的影响如图 3 所示,视波长为 $L' = \frac{L}{\cos \phi}$ 。剪切波的位移使管道在轴线方向产生纵向位移 u 及横向位移 w ,其算式如下:

$$u = A \sin \phi \sin 2\pi \left(\frac{t}{T_g} - \frac{x'}{L'} \right) \quad (6)$$

$$w = A \cos \phi \sin 2\pi \left(\frac{t}{T_g} - \frac{x'}{L'} \right) \quad (7)$$

一些中外学者认为直埋管道地震时产生的弯曲应变远小于轴向应变,因此我们只考虑剪切波对直埋管道的轴向应变。管道轴线方向应变算式如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{2\pi A}{L'} \sin \phi \cos 2\pi \left(\frac{t}{T_g} - \frac{x'}{L'} \right) \\ &= -\frac{2\pi A}{L} \cos \phi \sin \phi \cos 2\pi \left(\frac{t}{T_g} - \frac{x'}{L'} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

管道最大轴线方向应变算式如下:

$$\epsilon_{\max} = \left(\frac{\partial f}{\partial x'} \right)_{\max} = \pm \frac{\pi A}{L} \quad (9)$$

$$L = V_{se} T_g \quad (10)$$

$$A = \frac{a T_g^2}{4\pi^2} \quad (11)$$

将式(10)和式(11)代入式(9)得:

$$\epsilon_{\max} = \pm \frac{a T_g}{4\pi V_{se}} \quad (12)$$

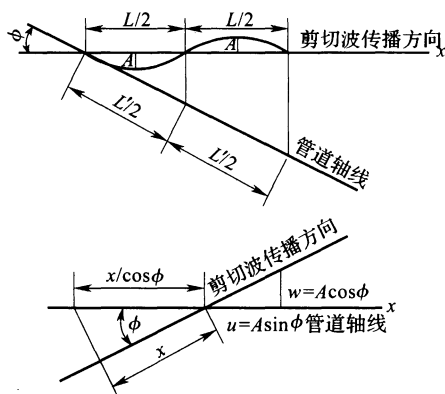


图3 倾斜的剪切波对管道轴线方向波动的影响

6.1.5 该条适用于地下直埋刚性弯管在地震波作用下的最大轴向应变的计算。

图4表示作用在弯头附近的力。每一管段和弯头都用自由体表示。 S_1 为弯头处过渡段的剪力,也是纵向管段在弯头处的轴向力。同样, S_2 为弯头处纵向管段的剪力,也是横向管段在弯头处的轴向力。力矩 M 作用在弯头上。长度 L 是管道轴向摩擦力 t_u 作用的有效滑动长度。 L 的计算是基于弹性基础上梁的理论。 L 的值将依赖于过渡段的长度和纵向段的长度,与每一管段相关的土壤特性和两管段相应的刚度有关。

公式(6.1.5-1)假定土壤是均匀的,两条管道有相同的刚度且两条管子长度大于 $\frac{3\pi}{4\lambda}$ (λ 为模量系数)。对其他情况,应使用弹性

基础上无限长梁的精确表达式来计算 L 。

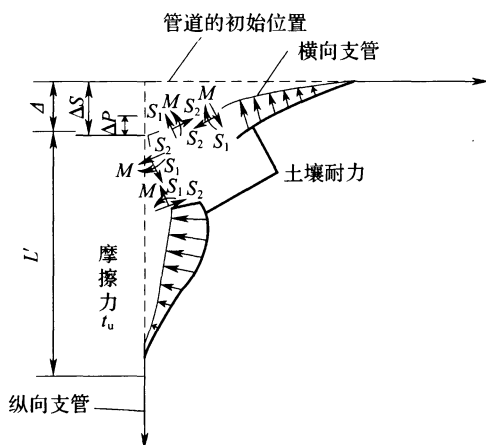


图 4 作用在弯头附近的力

该分析方法是由 Shah 和 Chu 在 1974 年提出来的, Iqbal 和 Goodling 于 1975 年又对该方法进行了论证, 他们保守地将进入弯头前和离开弯头后的管段看做柔性件, 但把弯头本身看成非柔性件, 即因为弯矩作用, 进入弯头和离开弯头的切线点之间没有相对转动。

滑动引起的位移量 $\Delta(m)$, 可用弯头处管单元的位移量 $\Delta P(m)$ 和土壤位移量 $\Delta S(m)$ 之间的差值来计算。

管道位移量的计算式如下:

$$\Delta P = \frac{S_1 L}{AE} \times 10^{-6} + \frac{t_u L^2}{2AE} \times 10^{-6} \quad (13)$$

式中 E ——管道材料的弹性模量(MPa);

A ——管道横断面面积(m^2);

式(12)中的第一项为弯头处轴向力所产生的挠度, 第二项为摩擦力沿 L 所产生的变形。

土壤变形计算式如下:

$$\Delta S = \epsilon_{\max} L \quad (14)$$

两个影响因素综合为下式：

$$\Delta = \Delta S - \Delta P = \epsilon_{\max} L - \frac{S_1 L}{AE} \times 10^{-6} - \frac{t_u L^2}{2AE} \times 10^{-6} \quad (15)$$

从纵向管段的平衡表达式,可以得到合力和剪力之间的关系如下式：

$$S_1 = \epsilon_{\max} AE \times 10^6 - t_u L \quad (16)$$

图 5 所示的相对挠度可表示为：

$$\Delta = \frac{S_1}{K} \times 10^{-6} \quad (17)$$

式中 K ——与横向管段在刚性弯头处沿轴向位移相关的弹簧常数,可按弹性基础上梁的理论计算。

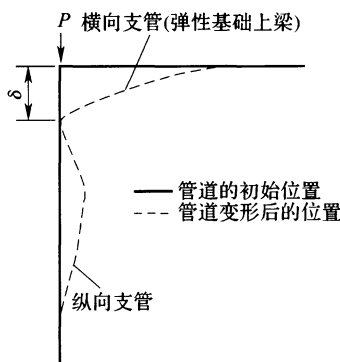


图 5 弯头处力-变形的关系

如果 L_1 和 L_2 大于 $\frac{3\pi}{4\lambda}$ 且两管段的管道横断面惯性矩值 I 相同, K 可用下式表达：

$$K = \frac{3K_0}{4\lambda} \quad (18)$$

否则, K 应用弹性基础上无限长梁的精确表达式代替式(18)。其余参数可由以下公式计算,这也是基于弹性基础上梁的理论：

$$M = \frac{S_1}{3\lambda} \quad (19)$$

$$S_2 = \frac{S_1}{3} \quad (20)$$

弯头中最大轴向应力 σ_a 可以通过下式计算：

$$\sigma_a = \frac{S_1}{A} \quad (21)$$

最大弯曲应力 σ_b 可由下式计算：

$$\sigma_b = \frac{MR}{I} \quad (22)$$

式中 R ——管子外半径(m)；

I ——管道横断面惯性矩(m^4)。

6.2 通过活动断层的埋地管道抗震设计

6.2.1 本条规定了通过活动断层的管道抗震计算应遵照的要求。

强烈地表震动是造成地面结构和城市工程中承插式埋地管道破坏的主要原因,但不是埋地油气管道(焊接钢管)破坏的主要原因。根据大量震害统计资料,埋地油气管道地震破坏一般发生在活动断层。例如,我国秦京输油管道在唐山地震中Ⅵ~Ⅸ度地震烈度区内的4处破坏,均发生于埋地管道与活动断层相交的部位。河北省香河段的皱折破坏,发生于该管道与夏垫断裂带相交的部位。天津宝坻县以西6km处的震害,发生于该管道与沧东断裂带相交的部位。昌黎站内管道的震害,则发生于该管道与昌黎—蓟县东西向活动断裂带相交的部位。跨越滦河大桥的管段,因该公路桥倒塌,致使固定于桥上的管段破坏成锯齿形,该处也有多条断裂带纵横交叉,如唐山—山海关断裂,双松门—南堡断裂,赵店子—姜各庄断裂等。又如1971年美国圣费尔南多(San Fernando)地震,使通过或接近沿美国太平洋西海岸圣费尔南多大断层的管道有25%遭到了破坏。而在该次地震中出现地面断裂的面积仅为受强烈地面震动面积的0.5%。故断层错动仅使一小部分地面结构遭受破坏,说明埋地管道在地震中因断层错动所造成的震

害比例超过了地面结构,表现出埋地管道对断层错动的敏感性。1999 年我国台湾集集地震,车笼埔断层位错引起的地表破裂绵延 105 公里,最大的垂直方向断层位错达 8m。从北到南该断层经过豊原市、太平市、雾峰乡、草屯镇、竹山镇等大小城镇,造成大量的埋地管道破坏,再次证明了管道受活动断层的影响显著。

输油管道设计基础规范是《输油管道工程设计规范》GB 50253,管材也应符合该规范的材料要求;输气管道的设计基础规范是《输气管道工程设计规范》GB 50251,管材也应符合该规范的材料要求。鉴于对通过断层区的管段的延性有一定的要求,对这部分管材则应作出材料的应力-应变曲线。

断层沿管轴的纵向运动会使管道产生拉伸或压缩。管道受拉伸超过极限,管道就会破坏;而当管道受压缩时,则会由于薄壳失稳而造成屈曲破坏。所以,管道通过活动断层应进行抗拉伸和抗压失稳校核。

为了利用钢质管道抗拉性能较好而抗压性能较差的特点,埋地管道与断层位错方向的交角一般应小于 90° 。根据管道的重要性和断层位错性质,本节采用不同的方法进行管道的抗震计算。在断层位错量较小且断层位错使管道受拉的情况下,可按 6.2.3 条对通过活动断层的管道进行抗震计算。由于 6.2.3 条采用的方法忽略了横向土压对管道的作用,为了保证管道的安全,对于重要区段输油气管道、位于设计地震动峰值加速度大于等于 $0.3g$ 地区的一般区段管道以及受压情况下的一般区段管道,应采用有限元方法对通过活动断层的管道进行抗震计算。

6.2.2 钢管及组焊管段的极限拉伸应变 ϵ_t^{crit} 应根据可靠的断裂力学分析和物理试验确定,并应考虑裂纹、缺欠、焊缝及热影响区对力学性能的影响,以及温度、应变速率、初始应变、应变时效等这些常规因素对力学性能的影响。在资料缺乏时,可采取以下公式(偏保守)估算:

表面型缺欠时:

$$\epsilon_t^{\text{crit}} = \delta^{(2.36-1.58\lambda-0.101\xi\lambda)} (1+16.1\lambda^{-4.45}) \\ (-0.157+0.239\xi^{-0.241}\eta^{-0.315}) \quad (23)$$

深埋型缺欠时:

$$\epsilon_t^{\text{crit}} = \delta^{1.08-0.612\eta-0.0735\xi+0.364\psi} (12.3-4.65\sqrt{t}+0.495t) \\ (11.8-10.6\lambda)(-5.14+\frac{0.992}{\psi}+20.1\psi)(-3.63+11.0\sqrt{\eta}-8.44\eta) \\ (-0.836+0.733\eta+0.0483\xi+\frac{3.49-14.6\eta-12.9\psi}{1+\xi^{1.84}}) \quad (24)$$

式中 ϵ_t^{crit} ——极限拉伸应变(%)；

δ ——表观 CTOD 韧性, $0.1 \leq \delta \leq 0.3(\text{mm})$ ；

λ ——屈强比, $0.7 \leq \lambda \leq 0.9$ ；

ξ ——缺欠长度与壁厚比率, $2c/t, 1 \leq \xi \leq 10$ ；

η ——缺欠深度与壁厚比率, a/t (表面缺欠时)或 $2a/t$ (深埋缺欠时), $\eta \leq 0.5$ ；

ψ ——缺欠深度与壁厚比率, d/t ；

t ——管道壁厚(mm), $t \leq D/32$ 。

表面型缺欠和深埋型缺欠的典型示意图见图 6 和图 7。

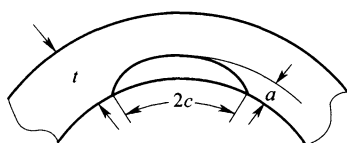


图 6 管壁表面型缺欠尺寸示意

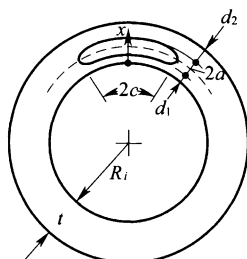


图 7 管壁深埋型缺欠尺寸示意

公式(23)和公式(24)应用的基本条件:

1)材料性能参数 λ 和 δ 的选取状态应与假定材料失效时的材料状态一致,应考虑温度、应变速率和应变时效等影响;

2)极限拉伸应变 ϵ_{crit} 不应超过1/3倍的均匀延伸率;

3)不应存在焊缝强度低匹配;

4)最小和平均夏比冲击功分别不低于30J和45J。

公式(23)和公式(24)的补充说明:

1)对于小缺欠($\eta < 0.15$ 且 $\xi < 2$)公式估计的值可能过于保守;

2)输入缺欠尺寸的精度对结果的精度有一定的影响;

3)应确定实际材料的应力-应变曲线,一般不宜采用规定的拉伸参数;

4)应进行足够的试验,涵盖材料性能可能的变化;

5)热影响区的软化化可能导致应变集中,热影响区软化应保证强度降低不超过母管强度的10%,软化区宽度不超过管道壁厚的15%;

6)公式中未考虑管道内压的影响,如果试验或检测表明内压对结果有影响则应考虑。

关于屈强比 λ 的选取说明如下:

1)当轴向应力与横向应力存在差异时,应采用全壁厚轴向应力计算。

2)在非线弹性和高强度管线钢中无明显平台应力应变曲线情况下,常规定的屈服强度 $\sigma_{0.5}$ 可能比实际的屈服强度要低,造成屈强比偏低,过低的屈强比可能导致偏危险的应变极限估计。在计算时屈服点对应的斜率(即变形模量)应小于 $1 \times 10^4 \text{ MPa}$,否则屈服强度应适当取大直到其对应斜率不大于 $1 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。

关于表观韧性CTOD的选取说明如下:

表观韧性是在“低约束”条件下试验取得或者在“高约束”条件下试验并校正取得,“低约束”条件下的值代表了轴向受拉管道的典型荷载状态。在只有“高约束”条件下数值时(如只有标准三点

弯曲试验数值), 表观韧性 CTOD 值可通过如下方法取得:

1) 标准三点弯曲试验数值中选取有效样本, 条件如下式:

$$\delta_{\max}^{\text{HC}} \leq 0.04X \left[3.69 \left(\frac{1}{n} \right)^2 - 3.19 \left(\frac{1}{n} \right) + 0.882 \right] \quad (25)$$

式中 $\delta_{\max}^{\text{HC}}$ ——标准三点弯曲试验数值中最大有效 CTOD 韧性 (mm);

X ——试样厚度和韧带的较小值 (mm);

n ——Ramberg-Osgood 应力应变关系中应变强化指数。

2) 去除数值大于 $\delta_{\max}^{\text{HC}}$ 的数据;

3) 在保留数据中确定表观 CTOD 韧性, 取 3 倍最小值和 2 倍平均值之中的较小值;

4) 根据夏比冲击功检查表观 CTOD 韧性, 不应超过 $\frac{0.2}{30}$

CVN_{\min} 和 $\frac{0.2}{45} CVN_{\text{avg}}$ 之中的较小值。

当管道遭受压缩时, 由于局部屈服, 管壁会起皱褶。薄壳起皱褶理论上开始于由下式给出的压缩应变 ϵ_c :

$$\epsilon_c = 1.2\delta/D \quad (26)$$

Wilson 和 Newmark 经试验后指出, 实际圆柱体会在理论应变的 $1/2 \sim 1/4$ 时开始起皱, 但是起皱并不意味着破坏。在无严重应力集中或焊缝缺陷的情况下, 管道能够承受 4~6 倍的理论应变值而在压缩褶皱处不发生破裂。但是应该看到, 当褶皱发生后, 进一步的应变将曲线集中于褶皱区域, 所以我们取实际薄壁管道开始起皱的压缩应变值, 即:

$$[\epsilon_c]_F = \frac{1}{4} \times 1.2\delta/D = 0.3\delta/D \quad (27)$$

再考虑到管材自身的屈服极限应变 ϵ_s , 因此, 管道的容许压缩应变 $[\epsilon_c]_F$ 应按式 (6.2.2-1) 计算, 取两者的较小值。

6.2.3 本条通过活动断层的管道抗震计算的方法与国家现行标

准《输油(气)钢质管道抗震设计规范》SY/T 0450 的方法在原理上相同的,即采用的都是 Newmark-Hall 在 1975 年提出的分析在断层作用下管道变形反应的方法。SY/T 0450 通过比较断层错动引起管道的长度变化与管道最大容许的长度变化,也即校核在断层的错动作用下管道的长度变化,判断是否需要采取抗震措施。本规范的方法与原规范 SY/T 0450 的方法有两点不同:①管道校核的方式改为直接校核由断层错动引起的管道最大应变,与管材的容许应变进行比较,这样与目前管道的应变设计理念更一致;②因为 Newmark-Hall 方法没有考虑横向土压的作用,该方法得到的管道应变结果比实际的管道应变值小,因此从安全设计的角度考虑必须进行修正,即将 Newmark-Hall 结果的 2 倍作为断层错动引起的管道最大应变反应值,再与管材的容许拉伸应变进行比较。其实由于管道埋设场地土的不确定性,即使用 2 倍的方法修正 Newmark-Hall 结果也不一定能够保证设计的管道安全。另外 Newmark-Hall 方法还存在其他的局限性。因此,对于重要区段的管道和位于强震区的一般区段管道,本规范规定应使用有限元方法进行管道的抗震校核。

Newmark-Hall 方法的基本假设包括:经过断层的管段,在地震前是被土壤嵌固着的。无地震时,管子中的轴向应力为由操作温度与回填时温度之差而引起的温度应力和由于内压引起的波桑应力之代数和;地震时,管子在断层处产生较大的位移,原先管子中的轴向应力由于管子变形而得到释放,该处管子成了新的自由端。在断层处由于地震产生的管子应变和应力均为最大值,从断层到两侧锚固点之间的管段(每侧长度为 L_A)则为地震时管子新产生的过渡段。由于断层运动,管子在断层两侧过渡段长度内相对于周围土壤作纵向运动,管子和土壤间的纵向摩擦力则阻止这种运动,假设该摩擦力在过渡段上保持为常量,管子的纵向位移由断层处的最大值逐渐被土壤与管子间的摩擦力所抵消,到锚固点处纵向位移为零。所谓锚固点,不一定有实际的锚固物体,而是指

管子的纵向位移为零处。不论地表断裂的宽度如何,将断层运动近似地考虑为两个平面的错动,忽略了断层带的宽度。

1 管道的滑动和管土间的摩擦力。

由于断层运动使管道相对周围土壤作纵向位移运动,周围土壤与管道间的摩擦力则阻止这种运动,摩擦力与土压力成正比关系。土压力沿管壁的分布大致如图 8(a)所示,为方便计算,通常按图 8(b)简化。

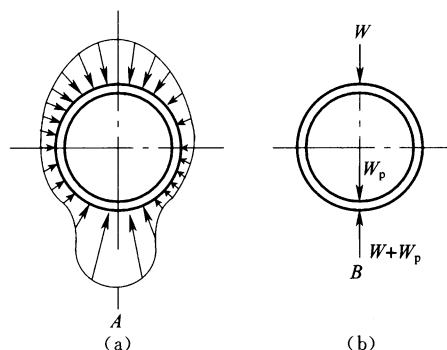


图 8 土压力分布及简化计算图

土壤与管道外表面之间单位长度上的纵向摩擦力可按下式来计算:

$$f_s = \mu(2W + W_p) \quad (28)$$

为简化计算,式(28)可写为如下形式:

$$f_s = \mu \left[2\rho_s DH + \pi(D - \delta)\delta\rho_m + \frac{\pi}{4}(D - 2\delta)^2\rho \right] g \quad (29)$$

式中 f_s ——纵向摩擦力(N/m);

μ ——土壤与管道外表面之间的摩擦系数,与管壁粗糙情况和土壤种类及其湿度有关,应按实测值或经验确定;

W ——管道上表面至管沟上表面之间的土壤单位长度上的重力(N/m);

W_p ——管道和内部介质的自重(N/m);

ρ_m ——管道材料的密度(kg/m^3)。

2 由断层错动引起的管道几何伸长。

设走滑断层运动如图 9 所示, 管道与断层间的夹角为 β 。断层的水平错动总位移为 ΔH 。将其分解为两个分量。

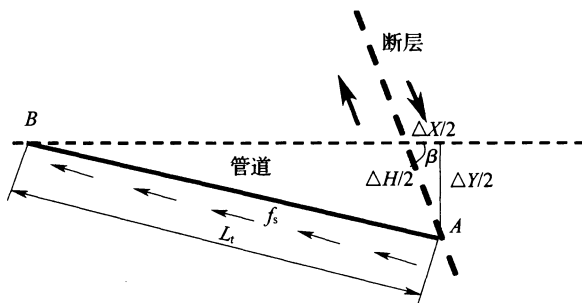


图 9 断层位移对管道的影响

平行与管轴线的位移分量：

$$\Delta X = \Delta H \cos \beta \quad (30)$$

垂直于管轴的位移分量：

$$\Delta Y = \Delta H \sin \beta \quad (31)$$

ΔX 使管子产生轴向应变, 平均应变量为：

$$\epsilon_a = \frac{\Delta X}{2L_t} \quad (32)$$

式中 L_t ——断层一侧过渡段的管长(m)。

横向断层运动, 即垂直于管轴的位移分量 ΔY 和 ΔZ , 除了引起管子弯曲外, 也会使管子产生纵向应变, 管子在断层两侧过渡段内由于横向断层运动引起的平均轴向应变 ϵ_b 近似为：

$$\epsilon_b \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta Y}{\Delta L_t} \right)^2 \quad (33)$$

过渡段管子总的平均轴向应变为：

$$\epsilon = \frac{\Delta X}{2L_t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta Y}{2L_t} \right)^2 \quad (34)$$

由于断层错动引起管道的长度变化为:

$$\Delta L_1 = \epsilon \times 2L_t = \Delta X + \frac{\Delta Y^2}{4L_t} \quad (35)$$

在管道与断层相交的 A 点, 设管道内的应变为 ϵ_{new} , 根据管材的应力应变关系, 其应力 σ_{new} 为:

$$\sigma_{\text{new}} = \begin{cases} E_1 \epsilon_{\text{new}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ E_1 \epsilon_1 + E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1) & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases} \quad (36)$$

由管道的力学平衡方程 $f_s L_t = \sigma_{\text{new}} A = \sigma_{\text{new}} \pi D \delta$, 可以得到计算断层错动引起的管道几何伸长 ΔL_1 的公式:

$$\Delta L_1 = \begin{cases} \Delta X + \frac{\Delta Y^2 f_s}{4\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ \Delta X + \frac{\Delta Y^2 f_s}{4\pi D \delta [E_1 \epsilon_1 + E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1)]} & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases} \quad (37)$$

3 管道内轴向应变引起的物理伸长。

假设 A 点管道内的应变 $\epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1$, 整个管道处于弹性状态, 则管道内轴向应变引起的物理伸长为:

$$\Delta L_2 = 2 \times L_t \times \frac{\epsilon_{\text{new}}}{2} = \frac{\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}^2}{f_s} \quad (38)$$

假设 A 点管道内的应变 $\epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1$, 则部分管道处于弹性状态, 其余管道处于弹塑性状态, 管道内轴向应变引起的物理伸长为:

$$\begin{aligned} \Delta L_2 &= 2 \times \left[L_{t-\text{弹性}} \times \frac{\epsilon_1}{2} + L_{t-\text{弹塑性}} \times \frac{(\epsilon_{\text{new}} + \epsilon_1)}{2} \right] \\ &= \frac{\pi D \delta E_1 \epsilon_1^2}{f_s} + \frac{\pi D \delta E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1) (\epsilon_{\text{new}} + \epsilon_1)}{f_s} \end{aligned} \quad (39)$$

6.2.4 由于地震中断层错动引起了土壤和管道的大位移, 管道和土壤都可能进入弹塑性或者塑性状态, 因此应采用能够分析几何大变形和材料非线性的有限元方法。采用有限元方法进行通过活动断层的管道抗震计算时, 应合理确定有限单元的类型和数目, 以保证有限元分析结果的精度。根据工程实际要求, 管道可采用梁单元、管单元或者壳单元建立有限元模型, 无论采用哪种单元模

型,要求对可能发生大变形的管道部分管道单元的长度不应大于管道的直径。

建立分析在断层错动作用下的管道有限元模型应注意管道两端边界的处理。目前有两种处理方式:①当采用固定边界时,应注意模型分析管道的长度足够长,满足管道在两个固定端的应变为 0 的要求,如果分析的管道不够长,则会造成分析结果的误差;②当采用等效边界时,要求模型分析的管道长度必须能够包括断层附近土壤和管道发生较大位移的部分。根据埋地管道跨断层的抗震实验结果,管道可以分成两部分:靠近断层的管土大变形段和远离断层的管土小变形段。Kennedy 曾经指出:在断层作用下管土之间存在较大相对位移的范围为十几米到三十米。为了保证结果的可靠性,要求模型分析管道的长度不少于 60 倍管径。

在断层的错动作用下,管道和周围场地土之间存在相互作用。一般采用三个方向的土弹簧进行模拟:管轴方向土弹簧、水平横向土弹簧和垂直方向土弹簧。管轴方向的土弹簧描述的是沿管轴方向土对管道的摩擦阻力,其参数主要由管沟内的回填土决定。水平横向土弹簧和垂直方向土弹簧描述的是管道在管轴横向受到的周围土压。垂直方向土弹簧又可分为垂直向上土弹簧和垂直向下土弹簧,其参数主要由断层附近的场地土决定。土弹簧参数的确定比较复杂,宜根据土的力学特性通过现场试验确定,可用以下抗震算例进行初步确定。

例:一条材料为进口钢材 X60 的 529×6 钢管通过活动断层带(断层为正断层,预测的最大错动量为:水平向 $\Delta H = 2\text{m}$,垂直向 $\Delta Z = 0.5\text{m}$,错动总量为 2.062m),管道与断层错动方向的交角为 $\beta = 30^\circ$ (如图 10 所示)。管道轴线至地表的埋深为 2m 。断层带覆盖土层为密实的干粘土,土的密度 $\rho_s = 1800\text{kg/m}^3$,内摩擦角 $\phi = 20^\circ$;粘聚力 $c = 10\text{kPa}$ 。计算该管道是否需要抗震加固,并分别采用三种方法进行比较:①采用 SY/T 0450—97 规范 6.4 节推荐的方法;②采用本规范 6.2.3 条推荐的方法;③采用本规范

6.2.5推荐的有限元方法。

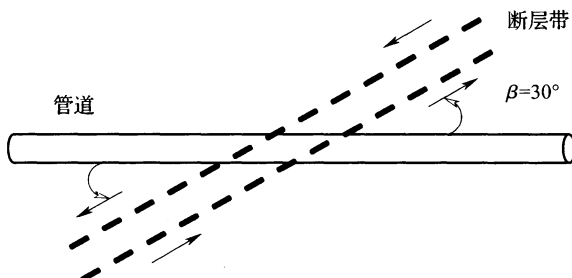


图 10 断层带与管道在平面上的相对位置

此例题与《输油(气)钢质管道抗震设计规范》SY/T 0450—97 中的例题类似,注意这里将断层的位移减小了(原例题为水平向 $\Delta H=3\text{m}$,垂直向 $\Delta Z=1.5\text{m}$)。

1 SY/T 0450—97 的方法。

1) 计算沿管轴方向的单位长度管土间摩擦力 f_s :

$$W = \rho_s D H g = 1800 \times 0.529 \times 2 \times 9.81 = 18682 (\text{N/m})$$

$$W_p = \left[\pi (D - \delta) \delta \rho_m + \frac{\pi}{4} (D - 2\delta)^2 \rho \right] g = 2827 (\text{N/m})$$

$$f_s = \mu (2W + W_p) = 0.6 \times (2 \times 18682 + 2827) = 24115 (\text{N/m})$$

2) 计算断层一侧管道的滑动长度

$$L_t = L_e + L_p = \frac{\pi D \delta \sigma_1}{f_s} + \frac{\pi D \delta (\sigma_2 - \sigma_1)}{f_s} = 213.36 (\text{m})$$

3) 计算管道最大容许的长度变化:

$$[\Delta L_t] = 2(L_e \epsilon_e + L_p \epsilon_p) = 1.31 (\text{m})$$

4) 计算由断层引起管道的长度变化:

$$\Delta X = \Delta H \cos \beta = 2 \times \cos 30^\circ = 1.732 (\text{m})$$

$$\Delta Y = \Delta H \sin \beta = 2 \times \sin 30^\circ = 1 (\text{m})$$

$$\Delta Z = 0.5 (\text{m})$$

$$\Delta L = \Delta X + \frac{\Delta Y^2 + \Delta Z^2}{4L_t} = 1.7335 (\text{m})$$

5) 结论:

因为 $\Delta L > [\Delta L_1]$, 需采取抗震措施。

2 本规范 6.2.3 条的方法。

1) 计算沿管轴方向的单位长度管土间摩擦力 f_s :

$$W = \rho_s D H g = 1800 \times 0.529 \times 2 \times 9.81 = 18682 (\text{N/m})$$

$$W_p = \left[\pi (D - \delta) \delta \rho_m + \frac{\pi}{4} (D - 2\delta)^2 \rho \right] g = 2827 (\text{N/m})$$

$$f_s = \mu (2W + W_p) = 0.6 \times (2 \times 18682 + 2827) = 24115 (\text{N/m})$$

2) 由断层错动引起的管道几何伸长 ΔL_1 :

$$\Delta L_1 = \begin{cases} \Delta X + \frac{(\Delta Y^2 + \Delta Z^2) f_s}{4\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ \Delta X + \frac{(\Delta Y^2 + \Delta Z^2) f_s}{4\pi D \delta [E_1 \epsilon_1 + E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1)]} & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases}$$

$$= \begin{cases} 1.732 + \frac{(1^2 + 0.5^2) \times 24115}{4\pi \times 0.529 \times 0.006 \times 2.1 \times 10^{11} \times \epsilon_{\text{new}}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ 1.732 + \frac{(1^2 + 0.5^2) \times 24115}{4\pi \times 0.529 \times 0.006 \times [2.1 \times 10^{11} \times 0.0024 + 1.36 \times 10^9 \times (\epsilon_{\text{new}} - 0.0024)]} & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases}$$

注: 这里若令 $\epsilon_{\text{new}} = \epsilon_2 = 0.04$, 本规范 ΔL_1 的计算公式和结果则与原 SY/T 0450—97 规范是一致的。

3) 计算管道内轴向应变引起的物理伸长 ΔL_2 :

$$\Delta L_2 = \begin{cases} \frac{\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}^2}{f_s} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ \frac{\pi D \delta [E_1 \epsilon_1^2 + E_2 (\epsilon_{\text{new}}^2 - \epsilon_1^2)]}{f_s} & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \frac{\pi \times 0.529 \times 0.006 \times 2.1 \times 10^{11} \times \epsilon_{\text{new}}^2}{24115} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ \frac{\pi \times 0.529 \times 0.006 \times [2.1 \times 10^{11} \times 0.0024^2 + 1.36 \times 10^9 \times (\epsilon_{\text{new}}^2 - 0.0024^2)]}{24115} & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases}$$

4) 因为管道的物理伸长等于断层位错引起的几何伸长, 应变 ϵ_{new} 可采用迭代法求解变形协调方程 $\Delta L_1 = \Delta L_2$ 得到:

$$\begin{cases} 86833 \times \epsilon_{\text{new}}^2 = 1.732 + \frac{3.598 \times 10^{-6}}{\epsilon_{\text{new}}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ 562.3 \times \epsilon_{\text{new}}^2 + 0.497 = 1.732 + \frac{3.014}{1997 + 5424 \times \epsilon_{\text{new}}} & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases}$$

用迭代的方法求解上面的方程,例如利用办公软件 EXCEL 的“单变量求解”工具,得到 $\epsilon_{\text{new}} = 0.0469$ 。

5)如上文所述,考虑到 Newmark-Hall 方法的局限性,需要对其结果进行修正,在断层错动作用下管道的最大应变为:

$$\epsilon_{\text{max}} = 2 \times \epsilon_{\text{new}} = 0.0938$$

6)结论:

因为 $\epsilon_{\text{max}} > [\epsilon_t]_F$ (管材的容许拉伸应变为 0.04),固需要采取抗震措施。

3 有限元方法。

与上述方法比较,有限元方法要求输入更多有关断层附近场地土的参数,包括场地土的平均密度、粘聚力和内摩擦角等,因此需要对管道穿越的断层附近进行细致详细的地震地质勘探。场地土参数可以通过在断层附近钻孔取得土样,进行三轴剪切试验或者其他试验方法得到。对于无粘性土(砂土),粘聚力 c 为 0 kPa,内摩擦角 ϕ 为 $20^\circ \sim 45^\circ$ (从松砂到密砂);对于粘土,粘聚力 c 为 10~100 kPa 甚至更高,内摩擦角 ϕ 为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。

1) 三个方向土弹簧参数的确定。

在断层的错动作用下,管道和周围场地土之间存在相互作用,一般采用三个方向的土弹簧进行模拟:管轴方向土弹簧、水平横向土弹簧和垂直方向土弹簧。管轴方向的土弹簧描述的是沿管轴方向土对管道的摩擦阻力,其参数主要由管沟内的回填土决定。水平横向土弹簧和垂直方向土弹簧描述的是管道在管轴横向受到的周围土压,又分为水平方向和垂直方向(垂直向上/垂直向下),其参数主要由断层附近的场地土决定,如图 11 所示。在本规范附录 E 中给出了确定这些土弹簧参数的公式和方法。这里以本题为

例,介绍如何使用这些公式。

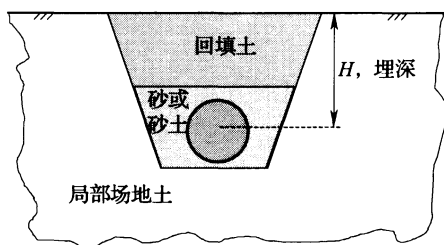


图 11 埋地管道的横向剖面图

在以下的计算中,求出的是单位长度上三个方向土对管道的最大作用力(N/m),在有限元模型中再与土弹簧的间距 D_L 相乘得到输入弹簧单元的最大作用力。

①管轴方向土弹簧。单位长度沿管轴方向的摩擦力由式(6.2.3-1)计算,与上文相同:

$$f_s = \mu(2W + W_p) = 24115(\text{N/m})$$

按式(E.0.2-2)选取密实干粘土的屈服位移 $Z_u = 0.008(\text{m})$ 。

②水平横向土弹簧。单位长度沿水平横向的土压由下列公式计算:

$$\begin{aligned} N_{ch} &= 6.752 + 0.065H/D - \frac{11.063}{(H/D+1)^2} + \frac{7.119}{(H/D+1)^3} \\ &= 6.752 + 0.065 \times \frac{2}{0.529} - \frac{11.063}{(2/0.529+1)^2} + \frac{7.119}{(2/0.529+1)^3} \\ &= 6.579 \end{aligned}$$

根据 $\phi = 20^\circ$,由表 E.0.2 选取计算 N_{qh} 的 5 个系数得到:

$$\begin{aligned} N_{qh} &= C_0 + C_1(H/D) + C_2(H/D)^2 + C_3(H/D)^3 + C_4(H/D)^4 \\ &= 2.399 + 0.439\left(\frac{H}{D}\right) - 0.03\left(\frac{H}{D}\right)^2 + 1.059 \times 10^{-3}\left(\frac{H}{D}\right)^3 - \\ &\quad 0.175 \times 10^{-4}\left(\frac{H}{D}\right)^4 \end{aligned}$$

$$= 3.684$$

$$P_u = N_{ch}cD + N_{qh}\rho_{sl}gHD$$

$$= 6.759 \times 10 \times 10^3 \times 0.529 + 3.684 \times 1800 \times 9.81 \times 2 \times 0.529$$

$$= 1.036 \times 10^5 \text{ (N/m)}$$

由式(E. 0. 2-4)计算水平横向土弹簧的屈服位移:

$$X_u = 0.04(H + D/2) = 0.091 \text{ (m)}$$

③垂直向上土弹簧。单位长度沿垂直向上的土压由下列公式计算:

$$N_{cv} = 2(H/D) = 7.561$$

$$N_{qv} = (\phi/44)(H/D) = (20/44) \times (2/0.529) = 1.719$$

$$q_u = N_{cv}cD + N_{qv}\rho_{sl}gHD$$

$$= 7.561 \times 10 \times 10^3 \times 0.529 + 1.719 \times 1800 \times 9.81 \times 2 \times 0.529$$

$$= 7.211 \times 10^4 \text{ (N/m)}$$

由式(E. 0. 2-8)计算垂直向上土弹簧的屈服位移:

$$Y_u = 0.1H = 0.2 \text{ (m)}$$

④垂直向下土弹簧。单位长度沿垂直向下的土压由下列公式计算:

$$N_c = [\cot(\phi + 0.001)] \left\{ e^{\pi \tan(\phi + 0.001)} \left[\tan\left(45 + \frac{\phi + 0.001}{2}\right) \right]^2 - 1 \right\}$$

$$= 14.8$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \left[\tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \right]^2 = 6.4$$

$$N_r = e^{0.18\phi - 2.5} = 3.0$$

$$q_{ul} = N_c cD + N_q \rho_{sl} gHD + N_r \rho_{sl} gD^2/2$$

$$= 14.8 \times 10^4 \times 0.529 + 6.4 \times 1800 \times 9.81 \times 2 \times 0.529 + 3 \times$$

$$1800 \times 9.81 \times \frac{0.529^2}{2}$$

$$= 2.055 \times 10^5 \text{ (N/m)}$$

由式(E. 0. 2-12)计算垂直向下土弹簧的屈服位移:

$$Y_{ul} = 0.2D = 0.106 \text{ (m)}$$

总结本例题三个方向土弹簧参数的确定结果如表 2 所示。

表 2 三个方向土弹簧参数汇总表

土弹簧参数	管轴方向	水平横向	垂直向上	垂直向下
最大作用力(N/m)	$f_s = 2.411 \times 10^4$	$P_u = 1.036 \times 10^5$	$q_u = 7.211 \times 10^4$	$q_{ul} = 2.055 \times 10^5$
屈服位移(m)	$Z_u = 0.008$	$X_u = 0.091$	$Y_u = 0.2$	$Y_{ul} = 0.106$

2)有限元方法介绍及其分析结果。

采用有限元方法进行通过活动断层的管道抗震计算,可以充分考虑管道在断层错动作用下的实际情况,缺点是过程比较复杂。管道在断层错动作用下材料将进入非线性状态且在断层附近管土之间会发生几何相对大变形,所以有限元方法应采用能够分析几何大变形和材料非线性的有限元解法。

管道可采用梁单元、管单元或者壳单元建立有限元模型,其中梁单元和管单元模型相对简单,而壳单元模型相对复杂,但是能够更好模拟管道作为一个中空薄壳结构的实际反应情况,特别是管道受压的情况。

这里以壳有限元方法为例,说明有限元分析的过程。

根据埋地管道跨断层的抗震实验结果,管线可以分成两部分:靠近断层的管土大变形段和远离断层的管土小变形段。在断层附近,管土之间的相对位移较大,管体破坏也是发生在这一管段,但是这一段管道并不太长。远离断层的部分,管土之间的相对位移较小,管内的应变值并不大,但是比较长,比管土大变形部分长许多。因此,建议建立如图 12 所示的壳有限元分析模型,即只需对将发生大变形的管段进行壳有限元分析。整个模型包括 6 种单元:分析管道的壳单元、管轴方向土弹簧单元、水平横向土弹簧单元、垂直向上土弹簧单元、垂直向下土弹簧单元和等效非线性弹簧单元。

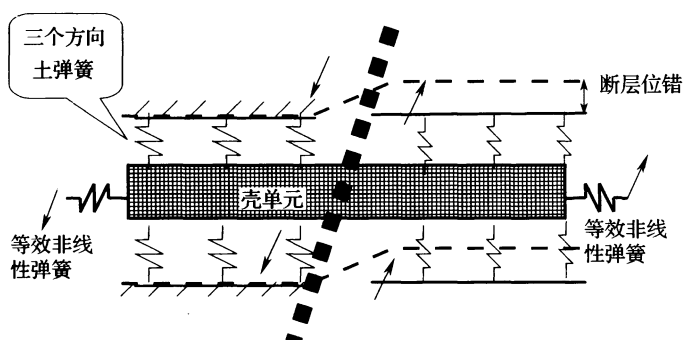


图 12 壳有限元模型分析简图

Kennedy 曾经指出：在断层作用下，管土之间存在较大相对位移的范围虽然只有十几米到三十米左右，但是从断层相交处到管内应变降为零的整个受影响管段范围比较长，需要分析长度至少为 300m 的管道才可以满足精度的要求。如果把整个 300m 长的管段都用壳单元模型进行分析将耗费大量的机时。这里引进的等效非线性弹簧单元的作用是：在保证精度的情况下代替离断层较远的管道变形反应，从而可以简化有限元模型并节约分析的机时。等效非线性弹簧的外力与伸长量关系式采用式(E.0.1)计算。

在对管道划分为壳单元网格建模时，应至少以两种不同的方式进行网格划分，当分析得到的结果趋于稳定时，才能够确定为有限元分析的最后结果。一般而言，沿管轴方向壳单元的长度选取为 0.3 倍的管径可以达到分析精度的要求。

在有限元模型中输入由上文确定的三个方向土弹簧参数、管道的相关参数、断层的位错量，进行分析得到管道应变以拉伸应变为主，沿管轴方向最大的拉伸应变为 16.45%，大于管道的容许拉伸应变，需要采取抗震措施。

壳有限元方法得到的管道轴向拉伸应变与 Newmark 方法的结果、本规范修正 Newmark 方法的结果比较如图 13 所示。

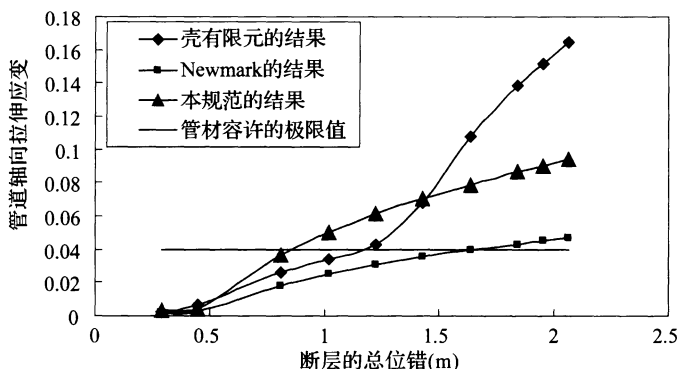


图 13 各种方法得到的管道轴向应变比较图(交角 30°)

4 抗震措施。

由于在上述情况下不能满足管道的抗震要求,需要采取抗震措施。管道的抗震措施一般包括:更改管道通过活动断层的角度、更改管道的埋设深度。

1) 改变管道通过活动断层的角度。

将管道通过活动断层的角度改为 70°,用上述的三种方法重新进行抗震验算。

①SY/T 0450—97 推荐的方法。

重新计算 $\Delta L = \Delta X + \frac{\Delta Y^2 + \Delta Z^2}{4L_t} = 0.688(\text{m})$, 小于管道最大容许的长度变化 1.31(m)。满足抗震要求。

②本规范 6.2.3 推荐的方法。

重新计算 $\epsilon_{\text{new}} = 0.0185$, 于是得到在断层错动作用下管道的最大应变为 $\epsilon_{\text{max}} = 2 \times \epsilon_{\text{new}} = 0.037$, 小于管材的容许拉伸应变为 0.04, 满足抗震要求。

③有限元方法。

改变交角为 70°, 壳有限元方法得到管道应变以拉伸应变为主, 管轴方向最大拉伸应变为 0.0385, 小于管材的容许拉伸应变为 0.04, 满足抗震要求。

壳有限元方法得到的管道轴向拉伸应变与 Newmark 方法的结果、本规范修正 Newmark 方法的结果比较如图 14 所示。

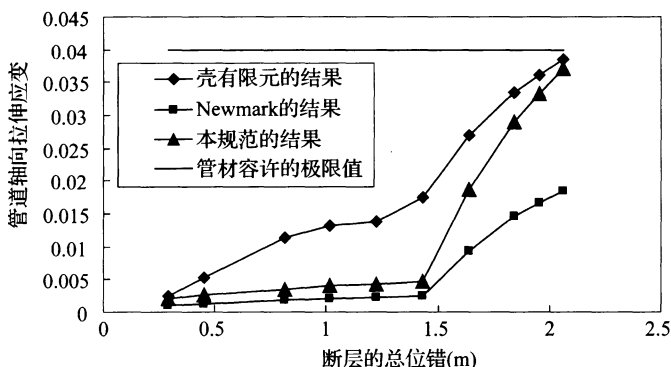


图 14 各种方法得到的管道轴向应变比较图(交角 70°)

2) 改变管道的埋设深度。用上述的三种方法重新进行抗震验算。

① SY/T 0450—97 的方法。

将管道的埋设深度改为 0.9m, 进行重新校核。

(a) 重新计算沿管轴方向的单位长度管土间摩擦力 f_s :

$$W = \rho_s D H g = 1800 \times 0.529 \times 0.9 \times 9.81 = 8398.4 \text{ (N/m)}$$

$$f_s = \mu(2W + W_p) = 0.6 \times (2 \times 8398.4 + 2827) = 11774.3 \text{ (N/m)}$$

(b) 重新计算断层一侧管道的滑动长度:

$$L_t = L_e + L_p = \frac{\pi D \delta \sigma_1}{f_s} + \frac{\pi D \delta (\sigma_2 - \sigma_1)}{f_s} = 437.0 \text{ (m)}$$

(c) 计算管道最大容许的长度变化:

$$[\Delta L_t] = 2(L_e \epsilon_e + L_p \epsilon_p) = 0.9451 \text{ (m)}$$

(d) 计算由断层引起管道的长度变化:

$$\Delta L = \Delta X + \frac{\Delta Y^2 + \Delta Z^2}{4L_t} = 0.6862 \text{ (m)}$$

(e) 结论: 按上述方法验算结果, $\Delta L < [\Delta L_t]$, 所以将管道的埋设深度改为 0.9m 即可满足抗震要求。

② 本规范 6.2.3 推荐的方法。

(a) 将管道的埋设深度改为 0.9m, 重新计算 $\epsilon_{\text{new}} = 0.025$, 于是得到在断层错动作用下管道的最大应变为 $\epsilon_{\text{max}} = 2 \times \epsilon_{\text{new}} = 0.05$, 大于管材的容许拉伸应变 0.04, 不满足抗震要求。

(b) 重新更改管道的埋设深度为 0.7m, 重新计算 $\epsilon_{\text{new}} = 0.01835$, 于是得到在断层错动作用下管道的最大应变为 $\epsilon_{\text{max}} = 2 \times \epsilon_{\text{new}} = 0.0367$, 小于管材的容许拉伸应变 0.04, 满足抗震要求。

(c) 结论: 按本规范 6.2.3 推荐的方法, 将管道的埋设深度改为 0.7m 后才满足抗震要求。

③ 有限元方法。

将管道的埋设深度更改为 0.7m, 需要重新计算三个方向的土弹簧参数。

(a) 管轴方向土弹簧。

单位长度沿管轴方向的摩擦力:

$$f_s = \mu(2W + W_p) = 9542.7(\text{N/m})$$

密实干粘土的管轴方向屈服位移不变, $Z_u = 0.008(\text{m})$

(b) 水平横向土弹簧。

单位长度沿水平横向的土压可由下式计算:

$$\begin{aligned} N_{\text{ch}} &= 6.752 + 0.065H/D - \frac{11.063}{(H/D+1)^2} + \frac{7.119}{(H/D+1)^3} \\ &= 6.752 + 0.065 \times \frac{0.7}{0.529} - \frac{11.063}{(0.7/0.529+1)^2} + \frac{7.119}{(0.7/0.529+1)^3} \\ &= 5.356 \end{aligned}$$

根据 $\phi = 20^\circ$, 由表 E.0.2 选取计算 N_{qh} 的 5 个系数得到:

$$\begin{aligned} N_{\text{qh}} &= C_0 + C_1(H/D) + C_2(H/D)^2 + C_3(H/D)^3 + C_4(H/D)^4 \\ &= 2.399 + 0.439\left(\frac{H}{D}\right) - 0.03\left(\frac{H}{D}\right)^2 + 1.059 \times 10^{-3}\left(\frac{H}{D}\right)^3 \\ &\quad - 0.175 \times 10^{-4}\left(\frac{H}{D}\right)^4 \\ &= 2.93 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_u &= N_{ch}cD + N_{qh}\rho_{sl}gHD \\
&= 5.356 \times 10 \times 10^3 \times 0.529 + 2.93 \times 1800 \times 9.81 \times 0.7 \times 0.529 \\
&= 4.749 \times 10^4 \text{ (N/m)}
\end{aligned}$$

水平横向土弹簧的屈服位移变为：

$$X_u = 0.04(H + D/2) = 0.039 \text{ (m)}$$

(c)垂直向上土弹簧。

单位长度沿垂直向上的土压可由下列公式计算：

$$N_{cv} = 2(H/D) = 2.647$$

$$N_{qv} = (\phi/44)(H/D) = (20/44) \times (2/0.529) = 0.601$$

$$\begin{aligned}
q_u &= N_{cv}cD + N_{qv}\rho_{sl}gHD \\
&= 2.647 \times 10 \times 10^3 \times 0.529 + 0.601 \times 1800 \times 9.81 \times 0.7 \times 0.529 \\
&= 1.739 \times 10^4 \text{ (N/m)}
\end{aligned}$$

由式(E.0.2-8)计算垂直向上土弹簧的屈服位移：

$$Y_u = 0.1H = 0.07 \text{ (m)}$$

(d)垂直向下土弹簧。

N_c 、 N_q 、 N_r 没有变化，单位长度沿垂直向下的土压由下式计算：

$$\begin{aligned}
q_{ul} &= N_c cD + N_q \rho_{sl} gHD + N_r \rho_{sl} gD^2/2 \\
&= 14.8 \times 10^4 \times 0.529 + 6.4 \times 1800 \times 9.81 \times 0.7 \times 0.529 + 3 \\
&\quad \times 1800 \times 9.81 \times \frac{0.529^2}{2} \\
&= 1.227 \times 10^5 \text{ (N/m)}
\end{aligned}$$

垂直向下土弹簧的屈服位移没有改变：

$$Y_{ul} = 0.2D = 0.106 \text{ (m)}$$

埋深更改为 0.7m 时，三个方向土弹簧参数汇总如表 3 所示。

表 3 埋深为 0.7m 时三个方向土弹簧参数汇总表

土弹簧参数	管轴方向	水平横向	垂直向上	垂直向下
最大作用力(N/m)	$f_s = 9.543 \times 10^3$	$P_u = 4.749 \times 10^4$	$q_u = 1.739 \times 10^4$	$q_{ul} = 1.277 \times 10^5$
屈服位移(m)	$Z_u = 0.008$	$X_u = 0.07$	$Y_u = 0.07$	$Y_{ul} = 0.106$

(e)有限元方法的结果。

当埋深更改为 0.7m,壳有限元方法得到管道应变以拉伸应变为主,管轴方向最大拉伸应变为 0.03197,小于管材的容许拉伸应变 0.04,满足抗震要求。

壳有限元方法得到的管道轴向拉伸应变与 Newmark 方法的结果、本规范修正 Newmark 方法的结果比较如图 15 所示。

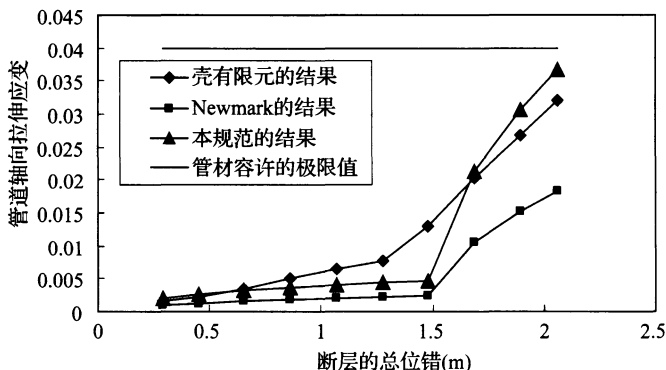


图 15 各种方法得到的管道轴向应变比较图(埋设深度 0.7m)

6.3 液化区埋地管道抗震设计

6.3.1 当管道穿越场地发生液化时,会使管道产生上浮反应,当管道距地表过浅或已经出露地表时,其正常使用功能就会受到影响。另外,由于管道的上浮变形,也会在管道中产生附加应力,因此要对管道的应力状态进行校核。轻微液化土层不会形成全层液化,不会对管道产生显著影响,因此,在管道抗震设计中不需要考虑场地轻微液化的情况。

6.3.2 液化场地中管道的上浮反应的影响因素很多,其中液化域的长度、初始轴向压应力、管道直径、土性以及管道埋藏深度等是主要影响因素。本规范给出的液化区管道最大上浮位移和附加应变简化计算公式,是由侯忠良、蔡建原和刘学杰等人采用 FROP-2 程序对 180 个有代表性的液化区管道参数工况进行计算分析,并

以计算结果为样本进行统计回归得到的《地下管线抗震——计算方法与工程应用》。因此,简化公式中的有关参数均有取值范围的限制。

6.3.5 本条主要是考虑管线埋深一般在 $1.5\sim 2.0\text{m}$,以及要同时满足保温、耕作和不发生整体静力失稳的最小覆土深度(地表至管道距离一般不小于 0.65m)等要求确定的。

6.4 震陷区埋地管道抗震设计

6.4.1 管道在砂土液化和软土震陷等因素导致的场地竖向沉降作用下的抗震设计可按本节通过计算场地中管道的附加弯曲应变反应对管道的抗沉陷能力进行校核。

6.4.2 震陷位移对管道的影响研究相对较少,还没有简便实用的计算方法。本规范给出的计算公式主要参考了日本学者高田至郎的实验研究成果(侯忠良,地下管线抗震[M],北京:学术书刊出版社,1990)。计算公式中场地土的弹簧常数 k_s 对管道抵抗震陷能力的影响很大,由于土参数的离散性非常大,对于具体工程场地,需进行场地土样实验以尽可能准确地取得所需参数。

6.4.3 按本标准第 6.3.4 条的规定校核管道的抗沉陷能力,若不满足要求,应采取抗沉陷措施。

6.5 穿越管道抗震设计

6.5.1 本条对穿越管道提出两条基本要求:

1 穿越水域(河、湖、沟、渠)的管道埋设方式有直埋式(含沟埋与定向钻)和洞埋式(含涵洞与隧道等)。只有当地震动峰值加速度大于或等于 $0.10g$ (即过去规范中地震烈度在Ⅶ度及Ⅶ度以上)的地区,大中型穿越管道应进行抗拉伸与抗压缩校核,并提出对堤防与边坡等进行抗震稳定校核。对于小型的穿越管道,由于其破坏性较小,较易于抢修,因此可按一般埋地管道要求进行抗震设计。穿越公路铁路的管段,可参照考虑。

2 本款提出穿越管道应避开活动断裂带。原因是地震时活动断裂带的位移错动比较大,管道要满足大位移的变形,必须具备足够长的轴向位移过渡段。这就要求直埋式的穿越段管周土体松散,洞埋式的洞身结构有抗大位错的能力。实际上直埋穿越管段为了抗水流冲刷,保持管道在水中的稳定,必须保证管周土体密实,因而较难保证足够长的轴向位移过渡段。洞埋式的洞身结构在地下,受周围土体的约束,也难满足大位错要求。另外,穿越管段在管线中是局部很短的一段,适当调整局部线位是可行的。再者,穿越管段一旦发生事故,抢修很困难,比一般埋地管道不受水流或行车干扰而言,穿越管道抢修耗时、耗物,甚至会发生影响环境的次生灾害。因此,本条规定管道穿越应避开活动断裂带。参照俄罗斯标准《干线输送管道》及美国阿拉斯加管道工程的经验,建议用地面敷设或管桥跨越方式通过活动断裂带,以空间三维可动来适应大的错位位移。

6.5.2 直埋式穿越管段是受管周土壤约束的,如同埋地管道一样,允许管道在地震时出现塑性变形,但不得超过极限允许的变形。实际上由于应变的自限性,也不可能无限变形,保证管道有足够延性就可安全运行。因此,本条规定按埋地管道的规定进行应变组合。在穿越管段设计中,多数采用了弹性敷设方式,因而增加了弹性弯曲应变,这点不同于埋地的直管段,故本条规定应变组合应计入弹性弯曲应变。式(6.5.2-1)是根据弹性敷设产生的弯曲应力推演出的应变值,钢管弹性弯曲产生的应力为:

$$\sigma_e = \pm \frac{ED}{2r} \quad (40)$$

由 σ_e 引起的弹性应变为:

$$\epsilon_e = \frac{\sigma_e}{E} = \pm \frac{D}{2r} \quad (41)$$

6.5.3 既然直埋式穿越管段如同埋地管道,因此本条规定其容许应变值按埋地管道取用,核算式见本规范第 6.1.2 条。

6.5.4 洞埋式穿越管段在大洞内(如隧道)往往设有支墩将管段支于其上,有时也有将管段搁置于洞中的,因此应根据实际情况进行抗震计算。本条规定了在有支墩的穿越管道按梁式跨越管桥计算,在无支墩搁置于洞底面上的穿越管段按地面敷管进行抗震计算。

6.5.5 本条规定了洞埋式穿越管段所承受的各种荷载产生的各项应力,要分别进行叠加组合计算。

6.5.6 按现行国家标准《输气管道工程设计规范》GB 50251—2003 与《输油管道工程设计规范》GB 50253—2003,埋地管道允许产生延性变形,用第三强度理论核算当量应力。而架空管道或地面管道不允许发生过大变形,因此采用第四强度理论核算当量应力,本条以式(6.5.6)作为核算式,以屈服强度 σ_s 的 0.9 倍为容许值。

6.5.7 埋地式管段由于温度升高(例如,加热输送的原油管道)会使管道轴向受压,造成穿越管道可能的轴向失稳。在地震作用于管道产生压缩时,考虑其为短暂的、偶发的,允许管道处于临界失稳状态,因此本条规定按临界轴向失稳的压力除以管截面积作为容许的压应力。在使用现行国家标准《输油管道工程设计规范》GB 50253—2003 附录 K 的计算式时,注意去除土壤的约束作用,如压重。

6.5.8 穿越管段在地震动作用下的计算:

1 直埋式穿越管道实际上与埋地管道承受的环境作用是一样的,均直接受到管周土壤的约束,故本条规定直埋式穿越管段的抗震计算应按本规范第 6.1 节的方法执行。

2 输送管道用支撑块(架)置于套管中时,当地震动引起套管变形,输送管也会发生变形,从而产生输送管的地震应力。如果套管与输送管紧固在一起,通过剪力传递,两者变形是一致的;如果套管与输送管不是紧固的,输送管与套管的变形不可能一致。本条规定是从偏于安全的角度取变形一致来计算钢管应

变的。

3 在洞内采用支墩架设输送管道,实际上是在洞内作了一个梁式管桥,因此本条规定宜按梁式跨越管桥计算。需要指出的是,地震动峰值加速度随地面下的深度渐减。前苏联《地震区建筑法规》СНП II -7-81 中规定,地面下 100m 深处设计地震加速度可取为地面的 50%;印度《结构抗震设计规范》IS:1893—1984 规定,地面下 30m 深处设计地震加速度可减少 50%;日本冈本舜三教授建议在地下几十米深处的设计地震加速度可取为地面的 $1/2 \sim 1/3$ 。因此,在计算洞中梁式管桥时,地震动峰值加速度可根据深度适当折减,建议 50m 深处取 50%,以上按内插法取用。

对于洞身的抗震设计,国内交通部与铁道部均编制了隧道的抗震设计规范。本条据此提出应按相关的标准执行。

4 敷设于洞内地面上的输送管道,相当于弹性地基梁。当地震动发生时,管道是随地面而动,而不考虑粘滞滑动,地震动产生的轴向应力用动力分析程序进行计算。

6.6 管道跨越工程抗震设计

6.6.1 本条是对跨越管道抗震设计的基本要求:

1 管道跨越结构属地面构筑物,应与现行建、构筑物抗震设计规范一致,对应于起始设防烈度 VI 度的地震动峰值加速度为 $0.05g$,因此,当跨越管道场地地震动峰值加速度大于或等于 $0.05g$ 时,应进行抗震设计;对于地震动峰值加速度等于 $0.05g$ (VI 度)的地区,参照对乙类构筑物的抗震设计要求,可不计算地震作用,但应采取相应的抗震措施。

2 油气管道跨越工程大多为柔性结构,抗震性能较好,考虑其重要性,但又不增加过多投资,对一般区段的管道跨越工程可不提高地震动参数等级。大型跨越工程因地震作用破坏产生次生灾害的危害性较大,故参照乙类构筑物进行抗震设计,按提高一个地震动参数等级采取抗震措施也是必要的;但当场地地震动峰值加

速度等于 $0.40g$ 时,地震反应增幅较大,可适当提高抗震措施。对重要区段的管道跨越工程,特别是大型跨越工程遭遇地震作用破坏时可能产生严重的次生灾害,影响较大且修复困难,为确保发生地震时油气管道跨越工程的安全,应按批准的地震安全性评价结果进行抗震设计。为便于在工程中的应用,将地震动峰值加速度值与抗震设防烈度的对应关系在表 4 中列出,此处地震动峰值加速度值,为 50 年超越概率 10% 的地震动参数。

表 4 地震动峰值加速度值与抗震设防烈度的对应关系表

地震动峰值加速度(g)	0.05	0.10(0.15)	0.20(0.30)	0.40
抗震设防烈度	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ

3 管道跨越工程结构体系的选择应考虑多方面因素,综合比较后确定。

4 对管道跨越工程结构体系的要求是概念设计内容,参照现行建、构筑物抗震设计规范的要求制定。

5 在选择建设场地时,应对抗震有利、不利和危险地段作出综合评价。宜避开不利地段,当无法避开时应采取有效措施;不应在危险地段建设管道跨越工程。

6.6.2 本条是从抗震角度对跨越结构材料选用提出的基本要求:

1 对钢管、钢材的一般要求,冲击韧性良好是抗震结构的要求。管道跨越结构采用的钢管和其他钢材,在现行国家标准《油气输送管道跨越工程设计规范》GB 50460 中有较详细的要求。

2 钢结构采用的钢材,应保证抗拉强度、屈服强度、冲击韧性合格及硫、磷、碳含量的限值;因沸腾钢脱氧不充分,含氧量较高,内部组织不够致密,硫、磷的偏析大,氮是以固溶氮的形式存在,故冲击韧性较低,冷脆性和时效倾向也大,在地震动力作用下易发生脆断,因此不应采用沸腾钢;Q235A、Q345A 不保证冲击韧性和延性的基本要求,故不宜采用。

钢材抗拉强度是决定结构安全储备的关键,伸长率反映钢材

承受残余变形及塑性变形的能力,钢材的屈服强度不宜过高,并应有明显的屈服台阶,伸长率应大于 20%,以保证构件具有足够的塑性变形的能力。

3 对混凝土强度等级的要求。过低,强度不足;过高,脆性增加。

4 为保证钢筋混凝土构件的变形和耗能能力,应优先采用韧性、延性较好的热轧钢筋。钢筋代换应按等强原则,以避免薄弱部位转移和发生脆性破坏。

6.6.3 本条是跨越管道抗震计算应符合的一般规定:

1 通过对跨越结构的抗震性能的研究,以及借鉴国内外大跨度桥梁抗震性能的研究成果,对于几何非线性效应明显的跨越结构如悬索、斜拉索结构,应采用考虑几何非线性效应的计算分析模型。

2 非结构构件、介质的附加质量对跨越结构的自振周期与模态的影响较大,从而影响跨越结构的地震效应,为了更合理地反映结构的地震特性,应考虑附加质量的作用。

3 跨越结构的抗震性能研究表明,大跨度跨越结构在竖向地震动作用下的位移反应和内力反应几乎与横向地震动作用下的反应在同一个数量级上。对地震动峰值加速度小于或等于 $0.20g$ 的地区,小型跨越结构以横向地震作用的影响为主,计算地震作用时可不计算竖向和纵向地震作用。

4 对小型跨越工程,油气输送管道可作为跨越结构的受力构件,在地震作用下,应对跨越结构整体进行内力和位移计算。

5 对大中型跨越工程,或当管道工作压力较高时,为确保油气输送管道的安全,跨越结构仅作为管道的支承结构,管道由多个支座支承在其上,管道一般由管卡限位,考虑温度作用,管道在纵向可滑动。因此在地震作用下,管道可视为支承在支座上的多跨连续梁,在横向、竖向地震作用下,管道与支座之间可视为无滑移;在纵向地震作用下,宜考虑管道在支座上纵向滑移的影响。

6 计算机技术发展很快,对推动跨越结构工程技术的发展起了很重要的作用。在用计算机进行跨越结构抗震计算时,合理的计算模型和边界条件非常重要,对计算结果也应进行分析、判断,对此应予以高度重视。

6.6.4 各类跨越结构的抗震计算,根据工程建设的规模以及跨越结构的特性,提出了可以采用简化方法、反应谱振型分解法以及时程分析法来计算与分析。

采用时程分析法时,宜按场地类别和跨越结构的基本自振周期所处的频段选用不少于二组的实际强震记录和一组人工模拟的加速度时程曲线。对复杂的大型跨越结构,合理选择地震动参数十分重要,应能使结构的反应在这样的地震动作用下处于最不利的状况。

6.6.5 参照现行建、构筑物抗震设计规范的要求,并根据油气输送管道跨越工程的特殊性,计算地震作用时,给出了重力荷载代表值中可变荷载的组合值系数,按表 6.6.5 采用。

6.6.6 跨越结构构件的地震作用组合,是一个较复杂的问题。本条文根据油气输送管道跨越工程的特点,综合考虑后,给出了地震作用效应和其他荷载效应的基本组合标准值表达式。

所谓的风荷载起控制作用,指风荷载引起的内力与地震作用引起的内力相当的情况。风荷载组合值系数的取值根据经验并参照现行建、构筑物抗震设计规范制定的。

6.6.7 采用抗震增大系数对结构构件的承载能力进行放大调整,主要考虑跨越结构承受的地震作用是短暂的、瞬时的,跨越结构承载力可以适当放大。系数的取值是参照现行建、构筑物抗震设计规范制定的。

6.6.8 管道和跨越结构构件在地震作用下的应力(内力)通过本规范计算得出后,其应力和内力的校核还应满足现行国家标准《油气输送管道跨越工程设计规范》GB 50460 的要求。

7 管道抗震措施

7.1 通用抗震措施

7.1.1 埋地管道是个柔性弹性地基上的长梁,如果在地震作用下其应变能够满足地基变形产生的管道应变,可不设防而保证管道安全。钢管的钢材应变能力很强,但受限于制管与管组对焊接的影响,使管道应变能力减弱。如果根据管材应变要求,选用大应变钢管,并经屈强比的选取及合理的焊材匹配试验,就可满足地基沉降、变形的要求。目前国内外已作了大量研究,能实现此要求,故本条作此规定。

7.1.2 为保证焊口满足强度、韧性、变形的要求,本条规定了焊口采用 100%射线检测及达到的标准要求。

7.1.3 为保证地震时埋地管道良好的受力条件和变形,制定了本条规定。

7.1.4 埋地管道中,弯管适应变形能力满足功能要求较差,故作出不宜设置弯管,应采用弹性敷设的规定。规定 $6D$ 弯曲半径的弯管可改善弯管处的受力。

7.1.5 本条是根据美国阿拉斯加管道与我国冀宁管道的抗震措施提出的,执行时可依据现有条件决定。

7.1.6 为避免管道嵌固在墙或基础中,特制定本条规定。执行时,可使用沥青麻丝填塞。

7.1.7 全新世活动断层错动时,管道受压缩的可能性很大,特别是逆断层或逆冲断层发生错动,管道受压后可能发生失稳。本规范第 6.1.3 条规定的轴向容许压缩应变是与钢管壁厚成正比的,因此本条规定了适当增加钢管壁厚,以提高容许压缩应变。另外,考虑到钢管相邻管段的壁厚相差过大,不利于施工组焊对接,需增

加过渡壁厚的管段,且在管道周期清管,特别是机械清管时,管壁厚度相差过大,难以达到清管目的。故只能适当增加钢管壁厚。

7.1.8 为了防止管道因断层错动或强地震发生事故时,可能对城市与环境产生次生灾害,特制定本条措施。

7.2 专项抗震措施

7.2.1 本条规定了通过活动断裂带管道常采取的抗震措施。

1 正确选择管道穿越活动断层的位置:在同一条断裂带上,活动断层位移的大小和断裂带宽度并不一样。在确定管道穿越活动断层的位置时,应根据历史记载,尽可能选择在找断层位移和断裂宽度最小的地方埋设管道。

2 正确选择管道与断裂带错动方向的角度:采用适当的斜角相交可以最大限度避免管道在断裂带错动时产生压屈破坏。

3 在管道通过断裂带附近采取较为宽松的管沟和疏松质的填土,有利于断层错动时管道的自由位移,从而改善管道的受力状态。

4 固定墩在嵌固管道后,会使管道失去变形能力,因此本条规定固定墩设置在管道滑动长度之外。

5 浅埋:管道适应断层运动的能力和埋深成反比。埋深越浅,作用于管子上的土压力产生纵向摩擦力越小,管子在地震时,就容易变形,免遭破坏。埋深 1m 的管子为埋深 3m 管子的抵抗断层运动能力的 3.0 倍左右。因此,在断层区管子覆盖层的厚度最好不超过 1.0m。对于预期在地震中会产生很大位移的断层,宜将该部分埋地管道改为地面敷设或地上铺设,并且使管子在地震时,可以自由地三维方向移动。

7.2.2 本条是结合美国阿拉斯加输油管道抗震措施,并经 2002 年 11 月阿拉斯加 7.9 级大地震考验,证明实用有效而制定的。由于国情不同,我国不可能都施行地面敷设或架空敷设,故提出有条件时采用。

7.2.3 由于地震时基土的液化会造成管道上浮失稳,故制定本措施来防止事故发生。衬铺压土管沟即在管道下沟后管沟回填前,衬铺一层透水、耐久的布质材料,如土工布等(如图 16 所示),以形成一种经济有效的压重措施。

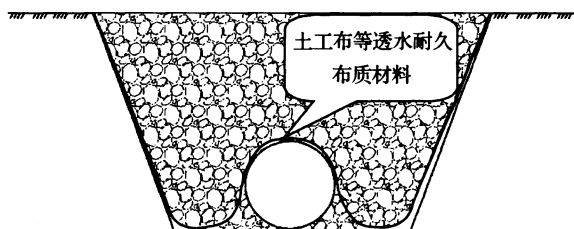


图 16 衬铺压土管沟示意图

7.2.4 本条是为液化区内长距离管道节省处理费用、保证管道不失稳而制定的。中国地震局工程力学研究所林均岐、李祚华采用数值模拟分析方法对场地土液化引起的地下管线的上浮反应特性进行了研究,得到的研究表明:当液化区长度小于 40m 时,管线上浮反应很小。因此,对于较长的液化区,可以采用分段处理的方法减小液化区的长度,这样既可以保证管道不失稳,又可以节省处理费用。

7.2.5 由于各种客观环境条件,管道必须在局部边坡非稳定区段通过时,采取本条措施,可以防止发生滑坡造成管道断裂。如有条件,管道应尽量绕避滑坡或在滑坡范围上端以外通过。

7.2.6 穿越管段应尽可能采用弹性埋地敷设,若由于埋深与两侧场地限制采用了弯头埋地敷设,为保安全提出本条规定。

7.2.7、7.2.8 洞埋式管道为防止因地震造成管段滑落损坏,或变位移动受限而致受损,制定这两条措施,设计时应注意。

7.2.9 本条是防止地震发生时结构从支承的墩台上、管道从支承结构上滑落的措施。其他附属跨越结构上的非结构构件,如栏杆、桥面板等也应与主体结构有可靠的连接。

7.2.10 位于软弱粘性土层、液化土层和严重不均匀地层上的刚

性跨越结构(如梁、桁架等),若采用高次超静定结构,当其支座发生不均匀沉降时,结构将产生较大的附加应力。

7.2.11 跨越结构的墩台基础若布置在软弱粘性土层、液化土层和不稳定的岸坡上,当发生地震时,会因地基土的过大变形、失效或失稳,危及跨越结构的安全。

7.2.12 管道跨越结构的管道或支承结构与支墩之间设置隔震部件,如橡胶垫或其他弹性衬垫可减少结构的地震反应。由于管道的隔震是油气管道跨越工程减轻地震灾害的新技术,经验不多,在管道或桁架、塔架等支承结构与支墩之间设置隔震部件时,应慎重对待,取得可靠的设计参数后进行设计。隔震部件在使用过程中需要检查和维护,因此其安装位置应便于维护人员操作。

7.2.13 跨越结构的管道在出入锚固墩部位,发生地震时是应力集中处,因此宜局部加强或采用柔性连接。

8 管道抗震施工

8.1 一般规定

8.1.1 管道工程抗震施工涉及多方面内容,其基础工作应在现行国家标准《油气长输管道工程施工及验收规范》GB 50369 和国家现行标准《钢质管道焊接及验收》SY/T 4103、《石油天然气钢质管道无损检测》SY/T 4109 及国家有关建筑施工验收规范的基础上,遵循有关抗震的专项规定。

8.1.2 本条是依据多年来施工管理和变更管理提出的,是施工管理的通用要求。管道抗震必须强调以本规范为依据,并按批准后的抗震设计文件进行施工和验收,不得擅自更改。当对管道抗震措施必须变更时,必须征得原抗震设计部门的同意,并出具设计更改文件。

8.1.3 强调用有抗震内容的施工方案来指导抗震工作的实施。

8.1.4 本条根据以往施工经验提出施工准备的基本要求。在管道工程设计交底及图纸会审工作中强调对有关抗震施工部分进行专项交底,以防止此方面的疏漏。强调对有关抗震施工部分进行专项交底和对施工人员的专项作业培训,有利于掌握技术和质量要求。

8.2 材料检查与验收

8.2.1 本条强调管道抗震工程施工所采用的管材、管件等材料的材质、规格必须符合设计要求,其质量应符合国家或行业现行有关标准的规定。例如钢管标准、管件标准和焊接材料标准等。主要内容是各种材料质量证明文件的复验,外观检验及有怀疑时应进行材料的检验。

8.2.2 本条是对抗震材料的代用的严格规定,是保证施工质量的最基本的程序和措施。

8.3 管道的焊接安装与试压

8.3.1 与一般地区的管道焊接施工比较,抗震管道使用的钢材等级、焊接材料、焊接方法有其特殊性。因此,应针对其特殊性进行专项焊接工艺评定,制订相应的焊接工艺规程、作业指导书并严格执行。这些措施是保证抗震管道焊接质量的基础条件。

8.3.2 对抗震施工区域内管道安装限定连头短管的长度,并应尽量减少连头,以连续焊接为宜。

8.3.3 本条是在近年来建设的多项重点管道工程工程实践基础上提出的。增加无损检测的比率,有利于焊口焊接质量更可靠。全自动超声波检测在西气东输自动焊的管段中得到了广泛应用,其可靠性得到了证实。Ⅱ级标准稍微严于美国 API 1104 标准的要求,可以满足抗震要求。

8.3.4 “割口重焊”涉及材料和管件的损失,“返修”涉及材质的变化,两者应兼顾。在管件价格高,订货少,没有备用件时,焊缝返修次数经业主同意可适当放宽。

8.3.5 目前管线试压最高压力依据设计规范规定,试验压力应使该试验段最低点的管道环向应力不超过相应钢级规定的屈服强度的 95%。

8.4 埋地管道抗震施工

8.4.1 砂土回填时,应保证缝隙填满,以减少抗震管道的附加应力,提高地震时的安全性。

8.4.2 本条依据现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330 等相关规范的规定对滑坡地段的施工及验收做出要求。

8.4.3 本条依据国家现行标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 的规定对液化层地段的施工及验收做出要求。

8.4.4 对管道通过活断层的施工及验收的要求,以保证地震时管道的蠕动变形能力。

8.4.5 依据有关设计标准(例如,现行国家标准《输油管道工程设计规范》GB 50253),对管线上热弯管、冷弯管、弹性敷设、固定墩、截水墙穿管以及水工保护构筑物的安装施工提出检查要求。

8.5 穿跨越管道抗震施工

8.5.1 本条对抗震段穿越管道施工强调了管沟开挖、回填、套管穿越、绝缘性能检查验收以及开挖管沟和管道穿越后的特殊检查要求。

8.5.2 本条对抗震段跨越管道工程的隔震部件、柔性连接部件、基础施工、钢结构预制和安装、管道安装以及防腐绝缘制定了要求。跨越段的塔架基础、塔架制作及安装桥面钢结构制作及安装应符合现行国家标准《油气输送管道跨越工程施工规范》GB 50460 的要求。特别是对钢结构的制作提出了特殊要求,主要内容是在塔架和桥面制作中,设计要对焊缝进行分级,以保证关键焊缝的质量可靠性,并应符合现行国家标准《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级》GB 11345 的规定;焊缝射线探伤验收应符合《金属熔化焊焊接接头射线照相》GB/T 3323 的规定。对 T 形接头、十字接头、角接接头等要求熔透的对接和角对接组合焊缝的焊脚尺寸进行了规定,这些措施可以有效控制抗震段跨越管道工程的质量要素。磁粉和渗透探伤是否合格可按国家现行标准《承压设备无损检测》JB 4730 判定。

9 管道线路工程抗震验收

9.0.1 本条规定施工单位按合同规定完成工程项目后,应由建设单位组织施工、设计和监理单位共同对管道工程的抗震施工项目的质量及符合性进行检查和验收,并按合同规定向建设单位办理交接手续。

9.0.2 本条规定了编制交工技术资料的依据。

9.0.3 根据《中华人民共和国防震减灾法》和石油天然气管道竣工验收的有关规定,应对管道工程场地地震安全性评价结果进行验收。建设单位应组织有关专家对管道工程地震地质安全性评价结果进行验收,主要考虑到评价结果应符合委托合同的规定和要求,并对是否符合现行国家标准《工程场地地震安全性评价》GB 17741 的要求进行确认。

本条规定了管道线路工程场地地震安全性评价验收资料应包括的内容。而要求给出这些内容的目的,是为下一步地质勘察和选线及初步设计文件中明确抗震设防标准和抗震措施提供基础依据、为施工图设计进行抗震验算提供准确的计算参数。

9.0.4 本条规定了抗震施工验收记录应包括的内容。目前国内用于长输油气管道施工的有关抗震施工和验收用表还不太完善,施工经验不足,考虑到在工程实施过程中可能遇到有关抗震专项施工记录和有关专项数据的填报问题,本条统一规定了记录表格的形式和内容,以便于施工时统一使用。