

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB/T 50470 – 2017

# 油气输送管道线路工程抗震技术规范

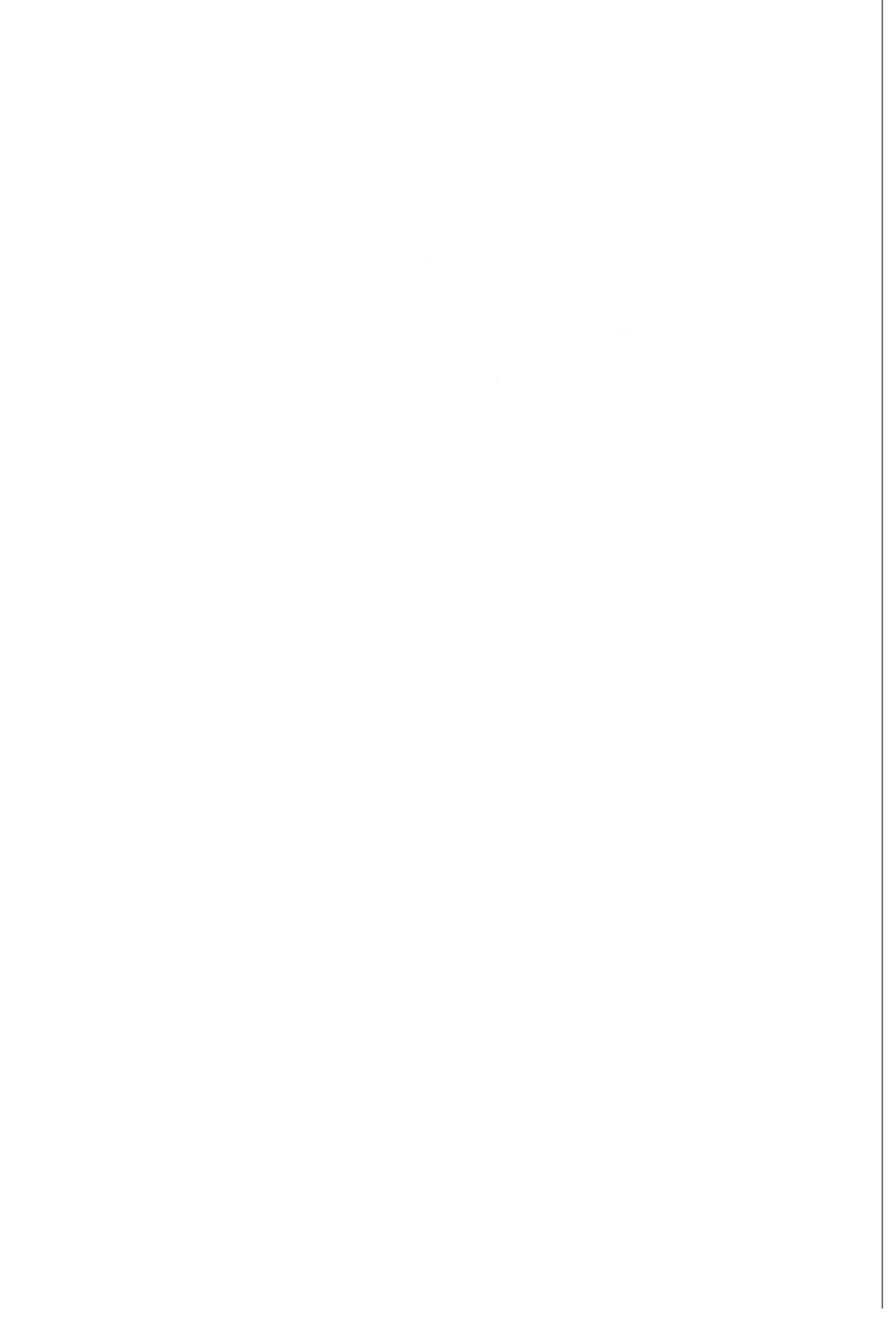
Seismic technical code for oil and  
gas transmission pipeline engineering

2017 – 05 – 27 发布

2018 – 01 – 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/T 50470 - 2017**

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 1 8 年 1 月 1 日

中国计划出版社

2017 北 京

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/T 50470-2017

☆

中国计划出版社出版发行

网址:www.jhpress.com

地址:北京市西城区木樨地北里甲11号国宏大厦C座3层

邮政编码:100038 电话:(010)63906433(发行部)

北京市科星印刷有限责任公司印刷

---

850mm×1168mm 1/32 5印张 124千字  
2017年10月第1版 2017年10月第1次印刷

☆

统一书号:155182·0145

定价:30.00元

版权所有 侵权必究

侵权举报电话:(010)63906404

如有印装质量问题,请寄本社出版部调换

# 中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 1580 号

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准 《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/T 50470—2017，自 2018 年 1 月 1 日起实施。原国家标准《油气输送管道线路工程抗震技术规范》GB 50470—2008 同时废止。

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

2017 年 5 月 27 日



## 前 言

根据住房城乡建设部《关于印发 2015 年工程建设标准规范制订、修订计划的通知》(建标[2014]189 号)的要求,由中国石油管道局工程有限公司会同设计、勘察、研究和相关院校对《油气输送管道线路工程抗震技术规范》50470—2008 进行修订。

在修订过程中,编制组总结了近年来油气输送管道抗震设计、施工和交工的经验,特别是基于应变设计方法的最新成果,借鉴了国内相关的国家标准、行业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,反复修改,最后经审查定稿。

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、基本规定、抗震设防要求、工程勘察及场地参数、管道抗震设计、抗震措施、管道抗震施工和管道抗震交工等。

本次修订的主要技术内容是:

1. 增加了抗震设防目标;
2. 取消了原规范适用范围中的设防参数  $0.05g \sim 0.40g$  的限制;
3. 修订了抗震设防标准;
4. 细化了管道与活动断层的并行敷设间距的具体要求;
5. 修订了场地类型划分及场地参数调整的规定;
6. 补充、修订了管道抗震校核的规定;
7. 修订了断层位移作用下的管道容许应变的确定方法;
8. 增加了液化区侧向位移作用下的管道校核要求;
9. 增加了管道穿越工程结构抗震设计的相关规定;
10. 修订了管道跨越工程地震组合及承载力抗震调整系数,增加了大型跨越工程结构防倒塌校核要求;

11. 补充、修订了管道抗震措施和抗震施工的相关规定；
12. 删除了原附录 B 滑坡稳定性校核部分,边坡稳定验算改为执行现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330；
13. 补充、修订了附录 C 的管材性能参数。

本规范由住房和城乡建设部负责管理,由石油工程建设专业标准化委员会负责日常管理,由中国石油管道局工程有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送中国石油管道局工程有限公司质量管理部(地址:河北省廊坊市广阳道 87 号,邮政编码:065000,联系电话:0316-2171407,传真:0316-2171407)。

本规范主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人:

**主编单位:**中国石油管道局工程有限公司

**参编单位:**中国石油管道局工程有限公司设计分公司

中国石油工程设计有限责任公司西南分公司

中国地震局地球物理研究所

中国地震局工程力学研究所

中国地震局地质研究所

中国海洋大学

中油朗威工程项目管理有限公司

**主要起草人:**余志峰 史航 张文伟 许杰 高剑锋

张振永 詹胜文 佟雷 胡道华 李国辉

刘爱文 郭恩栋 冉勇康 李强 续理

代炳涛 高惠英 刘玉卿

**主要审查人:**李小军 郑玉刚 孔庆哲 杨铁荣 房茂立

王平化 贾光明 庞鑫峰 童伟 刘志田

祁哲



# 目 次

1	总 则 .....	( 1 )
2	术语和符号 .....	( 2 )
2.1	术语 .....	( 2 )
2.2	符号 .....	( 3 )
3	基本规定 .....	( 10 )
4	抗震设防要求 .....	( 11 )
4.1	抗震设防标准 .....	( 11 )
4.2	地震安全性评价 .....	( 12 )
5	工程勘察及场地参数 .....	( 14 )
5.1	工程勘察 .....	( 14 )
5.2	场地类别和地震动参数调整 .....	( 15 )
6	管道抗震设计 .....	( 18 )
6.1	一般埋地管道抗震设计 .....	( 18 )
6.2	通过活动断层的埋地管道抗震设计 .....	( 21 )
6.3	液化区埋地管道抗震设计 .....	( 25 )
6.4	震陷区埋地管道抗震设计 .....	( 26 )
6.5	管道穿越工程抗震设计 .....	( 27 )
6.6	管道跨越工程抗震设计 .....	( 30 )
7	抗震措施 .....	( 35 )
7.1	通用抗震措施 .....	( 35 )
7.2	专项抗震措施 .....	( 35 )
8	管道抗震施工 .....	( 41 )
8.1	一般规定 .....	( 41 )
8.2	材料检查与验收 .....	( 41 )

8.3	管道焊接安装与试压 .....	( 41 )
8.4	埋地管道抗震施工 .....	( 42 )
8.5	穿跨越管道抗震施工 .....	( 45 )
9	管道抗震交工 .....	( 48 )
附录 A	管道场地地段划分 .....	( 50 )
附录 B	饱和砂土和饱和粉土的地震液化判别 .....	( 51 )
附录 C	管材性能参数和轴向拉伸曲线 .....	( 54 )
附录 D	通过活动断层埋地管道极限应变计算 .....	( 57 )
附录 E	通过活动断层埋地管道有限元方法的 弹簧参数 .....	( 62 )
附录 F	管道抗震施工检查报告表 .....	( 66 )
	本规范用词说明 .....	( 72 )
	引用标准名录 .....	( 73 )
	附:条文说明 .....	( 75 )

# Contents

1	General provisions .....	( 1 )
2	Terms and symbols .....	( 2 )
2.1	Terms .....	( 2 )
2.2	Symbols .....	( 3 )
3	Basic requirements .....	( 10 )
4	Seismic precautionary requirements .....	( 11 )
4.1	Seismic precautionary criteria .....	( 11 )
4.2	Evaluation of seismic safety .....	( 12 )
5	Engineering investigation and site parameters .....	( 14 )
5.1	Engineering investigation .....	( 14 )
5.2	Site classification and seismic motion parameters adjustment .....	( 15 )
6	Seismic design of pipeline .....	( 18 )
6.1	Seismic design of buried pipeline in general section .....	( 18 )
6.2	Seismic design of buried pipeline in active fault crossing section .....	( 21 )
6.3	Seismic design of buried pipeline in liquefaction soil area .....	( 25 )
6.4	Seismic design of buried pipeline in subsidence area .....	( 26 )
6.5	Seismic design of underground crossing section .....	( 27 )
6.6	Seismic design of aerial crossing section .....	( 30 )
7	Seismic measures .....	( 35 )
7.1	General seismic measures .....	( 35 )
7.2	Specific seismic measures .....	( 35 )
8	Seismic measure construction .....	( 41 )

8.1	General requirements .....	( 41 )
8.2	Inspection and acceptance of materials .....	( 41 )
8.3	Pipeline welding, installation and pressure test .....	( 41 )
8.4	Seismic measure construction of buried pipeline .....	( 42 )
8.5	Seismic measure construction of crossing section .....	( 45 )
9	Hand-over of seismic measures .....	( 48 )
Appendix A	Section division of pipeline site .....	( 50 )
Appendix B	Method for identifying liquefaction of saturated sand and saturated silt .....	( 51 )
Appendix C	Pipe mechanical properties and longitudinal tensile curve .....	( 54 )
Appendix D	Strain limit of buried pipeline in active fault crossing section .....	( 57 )
Appendix E	Soil spring parameters for buried pipeline in active fault crossing section by finite element method .....	( 62 )
Appendix F	Tables of checking results for seismic measure construction .....	( 66 )
	Explanation of wording in this code .....	( 72 )
	List of quoted standards .....	( 73 )
	Addition; Explanation of provisions .....	( 75 )

# 1 总 则

**1.0.1** 为保障油气输送管道线路工程地震安全,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** 本规范适用于陆上新建、扩建和改建钢质油气输送管道线路工程的抗震勘察、设计、施工及交工。

**1.0.3** 管道线路工程的抗震设防目标应符合下列规定:

1 在基本地震动作用下管道主体可继续使用;在罕遇地震动作用下管道主体不破裂。

2 管道通过活动断层及地震时可能发生液化、软土震陷等地质灾害地段,当发生设防位移时,管道主体不破裂。

3 在基本地震动作用下穿跨越结构不发生损坏或经一般性修复可继续使用;在罕遇地震动作用下跨越结构主体不倒塌。

4 对于有特殊要求的线路工程,可采用基于性能的抗震设计。

**1.0.4** 管道线路工程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,对已开展地震安全性评价的工程应根据评价结果确定地震动参数。

**1.0.5** 油气输送管道线路工程勘察、设计、施工及交工,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

管道轴线两侧各 200m 宽的范围。

#### 2.1.2 穿跨越工程结构 structures for pipeline crossing

在穿跨越工程中,用于支撑、保护管道或为管道提供敷设空间的结构。

#### 2.1.3 洞埋式 pipeline laid in structures(such as tunnels, case pipes, etc)

管道在隧道、套管等结构内的架空、地面或覆土敷设方式。

#### 2.1.4 重要区段 important section for pipeline

水域大中型穿跨越段、输气干线管道经过的四级地区以及输油干线管道经过的人口密集区。

#### 2.1.5 一般区段 general section for pipeline

除重要区段以外的油气输送管道区段。

#### 2.1.6 活动断层 active fault

晚第四纪(10 万年)以来有过活动,且经评价在工程使用年限内可能继续活动的断层。

#### 2.1.7 危险地段 dangerous area

活动断层及地震时可能发生地裂、崩塌、滑坡、严重液化、地面塌陷等的地段。

#### 2.1.8 地震动参数 seismic ground motion parameters

表征特定地震引起的地面运动的物理参数,包括峰值加速度、峰值速度、反应谱特征周期、地震动时程曲线等参数。

#### 2.1.9 设计地震动参数 seismic ground motion parameters for

design

管道线路工程抗震设计中采用的地震动参数。

**2.1.10 基本地震动** basic ground motion

相应于 50 年超越概率 10% 的地震动。

**2.1.11 罕遇地震动** rare ground motion

相应于 50 年超越概率 2% 的地震动。

**2.1.12 管道与断层交角** intersection angle between pipeline and fault

管道与断层水平位错方向的夹角。

## 2.2 符 号

$A$ ——管道横断面面积；

$a$ ——地震动峰值加速度；

$a_d$ ——环焊缝表面缺欠高度或内部缺欠高度的一半；

$c$ ——土的黏聚力；

$c_d$ ——环焊缝缺欠长度的一半；

$D$ ——管道外径；

$D_L$ ——土弹簧间距；

$d$ ——场地覆盖层厚度；

$d_0$ ——场地土层计算深度；

$d_0^L$ ——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；

$d_d$ ——环焊缝内部缺欠的缺欠深度；

- $E$ ——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；
- $F$ ——作用于等效非线性弹簧的外力；
- $F_a$ ——抗震工况组合的容许应力系数；
- $F_{LD}$ ——极限压缩应变的调整系数；
- $F_{DP}$ ——内压调整系数；
- $F_{YT}$ ——应变强化调整系数；
- $F_{GI}$ ——几何尺寸调整系数；
- $F_{NF}$ ——轴向力调整系数；
- $f_u$ ——沿管轴方向管土之间的滑动摩擦力；
- $f_{ak}$ ——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；
- $f_p$ ——承压系数；
- $f_{pc}$ ——临界承压系数；
- $f_g$ ——几何尺寸偏差与壁厚的比率；
- $f_n$ ——轴向应力与屈服强度的比率；
- $g$ ——重力加速度；
- $h_g$ ——钢管表面波浪缺欠的波峰至谷底的高度；
- $H$ ——管道中心线埋深；
- $H'$ ——挡土墙或翼墙的高度；
- $I$ ——管道横断面惯性矩；
- $I_{IE}$ ——液化指数；
- $I_P$ ——塑性指数；
- $K_s$ ——地基反力模量；
- $k_0$ ——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；



- $L_t$ ——断层一侧的管道滑动长度；  
 $L_y$ ——管道在液化区中的长度；  
 $N_0$ ——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；  
 $N_{ch}$ ——水平横向考虑土体黏聚力的计算参数；  
 $N_{cr}$ ——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；  
 $N_{cvd}$ ——垂直向下考虑土体黏聚力的计算参数；  
 $N_{cvu}$ ——垂直向上考虑土体黏聚力的计算参数；  
 $N_i^L$ —— $i$  点标准贯入锤击数的实测值；  
 $N_q$ ——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；  
 $N_{qvd}$ ——垂直向下与土体内摩擦角有关的计算参数；  
 $N_{qvu}$ ——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；  
 $n_1$ ——强化指数，是反映管材强化能力的参数；  
 $n_t$ ——7m 深度范围内每一个钻孔标准贯入试验点的总数；  
 $P$ ——管内压力；  
 $P_u$ ——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；  
 $R$ ——结构承载力设计值；  
 $r$ ——弹性敷设的弯曲半径；  
 $S$ ——结构内力组合的设计值，包括组合的弯矩、轴向力和剪力设计值；  
 $S_{Ehk}$ ——水平地震作用标准值的效应；

- $S_{GE}$ ——重力荷载代表值的效应；  
 $S_{G_i,k}$ ——第  $i$  个永久作用代表值的效应；  
 $S_{LK}$ ——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；  
 $T_g$ ——地震动反应谱特征周期；  
 $t$ ——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间；  
 $t_u$ ——土壤作用在管道单位长度上的摩擦力；  
 $V_s$ ——岩土剪切波速；  
 $V_{se}$ ——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；  
 $v$ ——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；  
 $W_p$ ——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；  
 $\alpha$ ——管材屈服偏移量；  
 $\beta$ ——管道与断层交角；  
 $\gamma_{Eh}$ ——水平地震作用分项系数；

- $\gamma_{G_i}$ ——第  $i$  个永久作用分项系数；
- $\gamma_{RE}$ ——承载力抗震调整系数；
- $\chi$ ——试样厚度和韧带的较小值；
- $\eta$ ——缺欠高度与壁厚比率；
- $\xi$ ——缺欠长度与壁厚比率；
- $\delta$ ——管道壁厚；
- $\delta_T$ ——表观韧性；
- $\delta_{T_{max}}^{HC}$ ——标准三点弯曲试验数值中最大有效 CTOD 值；
- $\lambda$ ——模量系数；
- $\lambda_T$ ——屈强比；
- $\phi$ ——土壤的内摩擦角；
- $\varphi_{ec}$ ——压缩应变承载系数；
- $\varphi_{et}$ ——拉伸应变承载系数；
- $\mu$ ——土壤与管道外表面之间的摩擦系数；
- $\rho$ ——输送介质的密度；
- $\rho_m$ ——管道材料的密度；
- $\rho_s$ ——回填土的密度；
- $\rho_{sl}$ ——管道周围场地土的密度；
- $\rho_c$ ——黏粒含量百分率；
- $\epsilon$ ——应变；
- $\epsilon_a$ ——由于内压和温度变化产生的管道轴向应变；
- $\epsilon_1$ ——管道应力-应变简化折线中弹塑性变形起点处的应变；
- $\epsilon_2$ ——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；
- $\epsilon_{max}^L$ ——管道在上浮位移反应最大时的附加应变；
- $\epsilon_{max}$ ——地震动引起管道的最大轴向拉、压应变；
- $\epsilon_{new}$ ——管道内的拉伸应变；
- $\epsilon_e$ ——弹性敷设时管道的轴向应变；
- $\epsilon_L$ ——屈服平台结束时的应变；

- $\epsilon_m$ ——弯矩引起的弯管最大弯曲应变；
- $\epsilon_n$ ——轴向力引起的弯管轴向应变；
- $\epsilon_u$ ——钢管的均匀延伸率；
- $\epsilon_{\max}^S$ ——管道在场地竖向震陷位移作用下的最大附加弯曲应变；
- $\epsilon_{\max}^b$ ——地震动引起的弯管最大轴向应变；
- $\epsilon_{\max}^{Ft}$ ——断层位错引起的管道最大拉伸应变；
- $\epsilon_{\max}^{Fc}$ ——断层位错引起的管道最大压缩应变；
- $\epsilon_c^{\text{crit}}$ ——在位移荷载作用下管段的极限压缩应变；
- $\epsilon_t^{\text{crit}}$ ——在位移荷载作用下管段的极限拉伸应变；
- $\epsilon_r$ ——极限压缩应变的计算值；
- $[\epsilon_t]_v$ ——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；
- $\sigma$ ——应力；
- $\sigma_0$ ——Ramberg-Osgood 应力-应变曲线中的管材轴向屈服应力；
- $\sigma_1$ ——管道应力-应变简化折线中弹塑性变形起点处的应力；
- $\sigma_2$ ——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；
- $\sigma_a$ ——由于内压和温度变化产生的管道轴向应力；
- $\sigma_a^c$ ——极限压缩应变计算中的轴向应力；
- $\sigma_a^L$ ——液化上浮校核中，由于内压和温度变化产生的管道初始轴向压应力；
- $\sigma_N$ ——组合的轴向应力；
- $\sigma_h$ ——组合的环向应力；
- $\sigma_s$ ——管道材料的标准屈服强度；
- $\sigma_y$ ——管道轴向屈服强度；

$[\sigma_c]$ ——管道在地震等组合荷载作用下的容许压应力；  
 $\tau$ ——组合的剪应力；  
 $\Delta$ ——管道在液化土层中最大上浮位移；  
 $\Delta_L$ ——在外力作用下等效非线性弹簧的伸长量；  
 $\Delta L_1$ ——断层位错引起的管道几何伸长；  
 $\Delta L_2$ ——管道轴向应变引起的物理伸长；  
 $\Delta H$ ——水平方向的断层位移；  
 $\Delta X$ ——平行于管道轴线方向的断层位移；  
 $\Delta Y$ ——管道法线方向的断层位移；  
 $\Delta Z$ ——垂直方向的断层位移；  
 $\psi$ ——缺欠深度与壁厚的比率；  
 $\psi_{LK}$ ——横向地震作用组合值系数；  
 $\psi_{PK}$ ——纵向地震作用组合值系数；  
 $\psi_T$ ——温度作用组合值系数；  
 $\psi_{VK}$ ——竖向地震作用组合值系数；  
 $\psi_w$ ——风荷载组合值系数；  
 $\psi_Y$ ——内压作用组合值系数。

### 3 基本规定

**3.0.1** 油气输送管道线路工程设计文件中,应明确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采取防止或减少地震次生灾害的措施。

**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、工程地质条件以及发生地震灾害的影响程度综合确定。

**3.0.4** 油气输送管道线路工程勘察时,应掌握沿线地震活动性和地震构造资料,按本规范附录 A 的规定划分管道场地地段,并给出综合评价。

**3.0.5** 油气输送管道线路应选择抗震有利场地,宜避让不利和危险地段。对难以绕避的不利或危险地段应按照本规范的规定进行抗震设计并采取相应的抗震措施。

**3.0.6** 通过活动断层的管道应按本规范的规定进行抗震设计。与活动断层并行的管道,宜将其敷设在活动断层破裂影响范围外。

**3.0.7** 油气输送管道穿跨越位置应选择在地基良好和稳定地段。当难以避开液化土、震陷软土等不良地基时,宜选择短距离通过。

**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,对施工工艺应提出相应的要求。

## 4 抗震设防要求

### 4.1 抗震设防标准

#### 4.1.1 管道抗震设计和校核应符合下列规定：

1 管道应按基本地震动参数进行抗震设计,其中重要区段内的管道应按 1.3 倍的基本地震动峰值加速度及速度计算地震作用；

2 管道应采用罕遇地震动参数进行抗震校核。

#### 4.1.2 穿跨越工程结构抗震设计和校核应符合下列规定：

1 穿跨越工程结构应按基本地震动参数进行抗震设计,大型穿跨越工程结构应按 1.3 倍的基本地震动峰值加速度计算地震作用；

2 穿跨越工程结构主体应按高于本地区基本地震动参数一级的要求采取抗震措施,当位于基本地震动峰值加速度  $0.40g$  地段时,应按比  $0.40g$  地段更高的要求采取抗震措施；

3 大型跨越工程结构应采用罕遇地震动参数进行防倒塌校核；

4 当基本地震动峰值加速度大于  $0.40g$  时,应进行专题设计。

#### 4.1.3 管道穿越或并行活动断层的设防应符合下列规定：

1 当管道通过基本地震动峰值加速度小于或等于  $0.30g$  地区的活动断层,且管底至基岩的土层厚度大于或等于  $60m$  时,或管道通过基本地震动峰值加速度大于  $0.30g$  以上地区的活动断层,且管底至基岩的土层厚度大于或等于  $90m$  时,可不分析断层潜在的地表断错影响。

2 对不符合本条第 1 款规定的穿越活动断层管道,其设防位移应按下列要求选取：

1)位于重要区段的管道,其设防位移应为预测的最大位移;

2)位于一般区段的管道,其设防位移应为预测的平均位移。

3 对不符合本条第 1 款规定的并行活动断层管道,管道与活动断层的并行距离应符合表 4.1.3 的规定,否则应采取措施,采取措施后的并行间距不应小于 20m。

表 4.1.3 管道与活动断层的并行距离(m)

基本地震动 峰值加速度	断层覆盖土层厚度		
	<60	60~90	>90
$\leq 0.30g$	$\geq 50$	—	—
0.40g	$\geq 100$	$\geq 50$	—
$> 0.40g$	专项研究确定		

4.1.4 管道通过地震地质灾害导致的地面位移地段,其设防位移应为预测的最大位移。

4.1.5 场地勘察和稳定性评价应采用基本地震动参数。

## 4.2 地震安全性评价

4.2.1 场地地震安全性评价应包括下列内容:

- 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发震能力及其对管道的影响;
- 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 管道通过活动断层或位于其附近时,应调查活动断层特征,并应给出下列参数:

1 断层的性质和产状、最新活动年代、滑动速率、破裂带的宽度和断层(段)长度;

2 断层与管道交汇的位置和交角,或断层与管道的并行距离;



- 3 断层覆盖土层厚度,以及断层两侧和破裂带的土体黏聚力、内摩擦角和平均剪切波速;
- 4 断层在地表引起的最大、平均同震水平和竖向位错量。

## 5 工程勘察及场地参数

### 5.1 工程勘察

**5.1.1** 对于管道线路场地,应在初步勘察和详细勘察阶段开展地震及地震效应、活动断层的勘察评价工作。

**5.1.2** 对于一般区段中的线路,可利用搜集已有地质资料、踏勘和适当的补充钻探工作,确定岩土剪切波速和场地类别。

**5.1.3** 对于重要区段中的线路,初勘阶段可按一般区段的管道场地进行勘察,详勘阶段应结合前期勘察成果布置勘探点,勘探点间距宜为 200m~300m,勘探深度不宜小于 15m,应查明场地土的工程地质特性,确定场地类别。

**5.1.4** 对于场地勘察中识别的潜在地震地质灾害应进行包括地震工况在内的稳定性评价,并应明确其对管道的影响。

**5.1.5** 当场地的基本地震动峰值加速度大于或等于  $0.10g$ ,且初步判定可能存在液化土层时,应按本规范附录 B 的规定对液化土层分级,并应评价其对管道的危害。经判定场地为中等或严重液化土层时,应查明液化土层的空间位置以及覆土类型等参数。

**5.1.6** 对基本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。

**5.1.7** 当线路通过或并行活动断层时应对活动断层进行勘察,并应符合下列规定:

1 勘察范围不宜小于拟交叉位置向外半径 500m 或管道轴线两侧各 500m;

2 查明活动断层展布位置、类型、产状、覆盖土层厚度、岩性和沉积相特征,平面误差宜小于 10m;

3 查清活动断层的位错性质、破碎带宽度和影响带宽度,当管道线路与活动断层相交时,应明确管道与断层交角,断层未来发生的最大、平均水平和竖向位错量;

4 查清活动断层与管道相交位置及附近场地的地形地貌特征、地质特征、地震特征、场地岩土剪切波速、黏聚力和内摩擦角;

5 预测断层活动诱发的崩塌、滑坡、地面塌陷、泥石流等地质灾害对管道可能造成的影响。

5.1.8 管道工程的地震及地震效应、活动断层勘察评价,尚应符合现行国家标准《油气田及管道岩土工程勘察规范》GB 50568、《岩土工程勘察规范》GB 50021 和《建筑抗震设计规范》GB 50011 的相关规定。

## 5.2 场地类别和地震动参数调整

5.2.1 管道场地类别应根据岩土层剪切波速和覆盖层厚度按表 5.2.1 的规定划分。

表 5.2.1 管道场地类别划分

岩石剪切波速 $V_s$ 或 土层等效剪切波速 $V_{sc}$ (m/s)	场地类别				
	I <sub>0</sub> 类	I <sub>1</sub> 类	II类	III类	IV类
$V_s > 800$	$d = 0$	—	—	—	—
$800 \geq V_s > 500$	—	$d = 0$	—	—	—
$500 \geq V_{sc} > 250$	—	$d < 5$	$d \geq 5$	—	—
$250 \geq V_{sc} > 150$	—	$d < 3$	$3 \leq d \leq 50$	$d > 50$	—
$V_{sc} \leq 150$	—	$d < 3$	$3 \leq d \leq 15$	$15 < d \leq 80$	$d > 80$

注:  $d$  为覆盖层厚度(m)。

5.2.2 岩土层剪切波速的测量应符合下列规定:

1 重要区段,每段用于测量岩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,岩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 岩土的类型划分和剪切波速范围

岩土的类型	岩土名称和性状	岩土层剪切波速范围(m/s)
岩石	坚硬、较硬且完整的岩石	$V_s > 800$
坚硬土或软质岩石	破碎和较破碎的岩石或软和较软的岩石,密实的碎石土	$800 \geq V_s > 500$
中硬土	中密、稍密的碎石土,密实、中密的砾、粗、中砂, $f_{ak} > 150$ 的黏性土和粉土,坚硬黄土	$500 \geq V_s > 250$
中软土	稍密的砾、粗、中砂,除松散外的细、粉砂, $f_{ak} \leq 150$ 的黏性土和粉土, $f_{ak} > 130$ 的填土,可塑新黄土	$250 \geq V_s > 150$
软弱土	淤泥和淤泥质土,松散的砂,新近沉积的黏性土和粉土, $f_{ak} \leq 130$ 的填土,流塑黄土	$V_s \leq 150$

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

### 5.2.3 管道场地覆盖层厚度应按下列规定确定:

1 应按地面至剪切波速大于 500m/s,且其下卧各层岩土的剪切波速均不小于 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其上部各土层剪切波速 2.5 倍的土层,且其下卧岩土层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 场地土层的等效剪切波速应按下列公式计算:

$$V_{se} = d_0 / t \quad (5.2.4-1)$$

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

式中： $V_{se}$ ——场地土层等效剪切波速(m/s)；

$d_0$ ——场地土层计算深度(m)，取覆盖层厚度和 20m 二者的较小值；

$t$ ——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** 场地的设计地震动参数应根据场地类别，按现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 的规定调整。罕遇地震的设计特征周期应大于相应的基本地震动特征周期，其增加值不宜低于 0.05s。

## 6 管道抗震设计

### 6.1 一般埋地管道抗震设计

6.1.1 对位于基本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验算。

6.1.2 地震作用下管道轴向的组合应变应包括地震动引起的管道最大轴向应变和内压、温差等操作荷载引起的轴向应变,并按下列公式进行组合计算:

1 当  $\epsilon_{\max} + \epsilon_a \leq 0$  时,

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

2 当  $\epsilon_{\max} + \epsilon_a > 0$  时,

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

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

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

$\epsilon_a$  ——由于内压和温度变化产生的管道轴向应变;

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

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

$\sigma_a$  ——由于内压和温度变化产生的管道轴向应力(Pa),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 的有关规定计算;

$E$  ——管道材料的弹性模量(Pa)。

### 6.1.3 埋地管道轴向容许应变应按下列规定确定。

#### 1 直管段容许拉伸应变可按表 6.1.3 选取。

表 6.1.3 直管段容许拉伸应变

钢 级	设计容许拉伸应变	校核容许拉伸应变
L450(X65)及以下	0.5%	1.0%
L485(X70)和 L555(X80)		0.9%
L625(X90)		0.8%

#### 2 直管段容许压缩应变可按下列公式计算：

##### 1) 设计容许压缩应变：

$$\text{L450(X65)及以下钢级: } [\epsilon_c]_v = 0.28 \times \frac{\delta}{D} \quad (6.1.3-1)$$

$$\text{L485(X70)、L555(X80)及 L625(X90): } [\epsilon_c]_v = 0.26 \times \frac{\delta}{D} \quad (6.1.3-2)$$

##### 2) 校核容许压缩应变：

$$\text{L450(X65)及以下钢级: } [\epsilon_c]_v = 0.35 \times \frac{\delta}{D} \quad (6.1.3-3)$$

$$\text{L485(X70)、L555(X80)及 L625(X90): } [\epsilon_c]_v = 0.32 \times \frac{\delta}{D} \quad (6.1.3-4)$$

式中： $[\epsilon_c]_v$  ——容许压缩应变；

$\delta$  ——管道壁厚(m)；

$D$  ——管道外径(m)。

#### 3 弯管容许应变应采用直管段的校核容许应变。

### 6.1.4 埋地直管道在地震动作用下的最大轴向应变可按下列公式计算,并应取较大值。

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

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

式中： $a$ ——地震动峰值加速度 ( $\text{m/s}^2$ )；

$T_g$ ——地震动反应谱特征周期 ( $\text{s}$ )；

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

$v$ ——地震动峰值速度 ( $\text{m/s}$ )。

**6.1.5** 埋地弯管在地震动作用下的最大轴向应变可按下列公式计算：

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

$$\epsilon_n = \epsilon_{\max} - \frac{t_u L}{AE} \quad (6.1.5-2)$$

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

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

$$t_u = \frac{\pi}{2} D \rho_s g H (1 + k_0) \tan \phi \quad (6.1.5-5)$$

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

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

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

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

坚硬场地： $y_u = 0.02 \sim 0.03(H + D)$  (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： $\epsilon_{\max}^b$ ——地震动引起的弯管最大轴向应变；

$\epsilon_n$ ——轴向力引起的弯管轴向应变；

$\epsilon_m$ ——弯矩引起的弯管最大弯曲应变；

$t_u$ ——土壤作用在管道单位长度上的摩擦力 ( $\text{N/m}$ )；



$L$ ——摩擦力  $t_0$  作用的有效长度(m);  
 $A$ ——管道横断面面积( $m^2$ );  
 $\lambda$ ——模量系数( $m^{-1}$ );  
 $I$ ——管道横断面惯性矩( $m^4$ );  
 $K_s$ ——地基反力模量(Pa);  
 $\rho_s$ ——回填土密度( $kg/m^3$ );  
 $g$ ——重力加速度,取  $9.8m/s^2$ ;  
 $H$ ——管道中心线埋深(m);  
 $k_0$ ——土壤压力系数,一般取 0.5;  
 $\phi$ ——土壤的内摩擦角( $^\circ$ );  
 $p_u$ ——场地土屈服抗力(N/m);  
 $y_u$ ——土壤屈服位移(m);  
 $N_q$ ——计算管道法向土壤压力的参数。

## 6.2 通过活动断层的埋地管道抗震设计

**6.2.1** 通过活动断层的埋地管道应采用应变设计方法进行抗拉伸和抗压缩验算。

**6.2.2** 管道抗震验算应获得下列资料:

- 1 管道轴向力学性能参数,包括应力-应变曲线,可根据本规范附录 C 的规定确定;
- 2 本规范第 4.2.2 条和第 5.1.7 条规定的断层、场地等参数;
- 3 防腐涂层的类型;
- 4 管道焊接接头参数。

**6.2.3** 通过活动断层的管道抗震计算应符合下列规定:

1 对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)通过重要区段的管道;

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 $90^\circ$ 两种情况。

2 对不符合本条第1款规定的情况,可按本规范第6.2.5条对通过活动断层的管道进行抗震计算。

**6.2.4 管道通过活动断层的容许应变应符合下列规定:**

1 管道轴向容许拉伸应变应按下式计算:

$$[\epsilon_t]_F = \varphi_{et} \epsilon_t^{crit} \quad (6.2.4-1)$$

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

$[\varphi_{et}]$ ——拉伸应变承载系数,当环向应力小于或等于标准屈服强度的40%时,取0.9,当环向应力大于标准屈服强度的40%时,取0.7;

$\epsilon_t^{crit}$ ——管段的极限拉伸应变,应根据断裂力学分析和物理试验确定,并应分析裂纹、缺欠、焊缝和热影响区性能,以及温度、应变速率、初始应变、应变时效等因素的影响。当资料缺乏时,可按本规范附录D的公式估算。

2 管道轴向容许压缩应变应按下式计算:

$$[\epsilon_c]_F = \varphi_{ec} \epsilon_c^{crit} \quad (6.2.4-2)$$

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

$[\varphi_{ec}]$ ——压缩应变承载系数,取0.6;

$[\epsilon_c^{crit}]$ ——管段的极限压缩应变,应根据有效的分析方法或物理测试确定,或二者同时采用,当资料缺乏时,可按本规范附录D的公式估算。

**6.2.5 满足本规范第6.2.3条第2款条件的管道抗震计算宜按下列步骤进行分析。**

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:

$$f_s = \mu(2W + W_p) \quad (6.2.5-1)$$

$$W = \rho_s D H g \quad (6.2.5-2)$$

$$W_p = \left[ \pi(D - \delta)\delta\rho_m + \frac{\pi}{4}(D - 2\delta)^2\rho \right] g \quad (6.2.5-3)$$

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)；

$\mu$ ——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；

$W$ ——管顶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)；

$\rho_m$ ——管道材料的密度(kg/m<sup>3</sup>)；

$\rho$ ——输送介质的密度(kg/m<sup>3</sup>)。

2 由断层错动引起的管道几何伸长  $\Delta L_1$  应按下列公式计算：

1) 当  $\epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1$  时，

$$\Delta L_1 = \Delta X + \frac{(\Delta Y^2 + \Delta Z^2) f_s}{4\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}} \quad (6.2.5-4)$$

2) 当  $\epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1$  时，

$$\Delta L_1 = \Delta X + \frac{(\Delta Y^2 + \Delta Z^2) f_s}{4\pi D \delta [E_1 \epsilon_1 + E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1)]} \quad (6.2.5-5)$$

$$\Delta X = \Delta H \cos \beta \quad (6.2.5-6)$$

$$\Delta Y = \Delta H \sin \beta \quad (6.2.5-7)$$

式中： $\epsilon_{\text{new}}$ ——管道内的拉伸应变；

$\epsilon_1$ ——管道应力-应变简化折线中弹塑性变形起点处的应变，按本规范附录 C 选取；

$\Delta L_1$ ——断层位错引起的管道几何伸长(m)；

$\Delta X$ ——平行于管道轴线方向的断层位移(m)；

$\Delta Y$ ——管道法线方向的断层位移(m)；

$\Delta Z$ ——垂直方向的断层位移(m)，应由地震地质工程勘察确定；

$E_1$ ——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 C 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 C 选取;

$\Delta H$ ——水平方向的断层位移(m),应由地震地质工程勘察确定;

$\beta$ ——管道与断层交角( $^\circ$ ),应由地震地质工程勘察确定。

3 管道轴向应变引起的物理伸长  $\Delta L_2$  可按下列公式计算:

1) 当  $\epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1$  时,

$$\Delta L_2 = \frac{\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}^2}{f_s} \quad (6.2.5-8)$$

2) 当  $\epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1$  时,

$$\Delta L_2 = \frac{\pi D \delta [E_1 \epsilon_1^2 + E_2 (\epsilon_{\text{new}}^2 - \epsilon_1^2)]}{f_s} \quad (6.2.5-9)$$

式中: $\Delta L_2$ ——管道轴向应变引起的物理伸长(m)。

4 管道拉伸应变可采用迭代法按下式计算:

$$\Delta L_1 = \Delta L_2 \quad (6.2.5-10)$$

5 由断层位错引起的管道最大拉伸应变应按下式计算:

$$\epsilon_{\text{max}}^{\text{Ft}} = 2\epsilon_{\text{new}} \quad (6.2.5-11)$$

式中: $\epsilon_{\text{max}}^{\text{Ft}}$ ——断层位错引起的管道最大拉伸应变。

6 计算的管道最大拉伸应变  $\epsilon_{\text{max}}^{\text{Ft}}$  应小于或等于容许拉伸应变  $[\epsilon_t]_F$ , 且应明确相应的抗震措施。

6.2.6 当采用有限元方法进行通过活动断层的管道抗震计算时,应符合下列规定:

1 应反映几何大变形和材料非线性。

2 可采用梁单元、管单元、弯管单元或者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满足下列要求:

- 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、长度不小于 60 倍管径的管段进行有限元分析,可按本规范附录 E 中的公式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 中的公式。当采用其他管土作用模型时,应经过相应的验证。

5 抗震计算应包括无内压和有内压(设计压力)两种工况。

6 有限元分析得到的管道轴向最大拉伸应变 $\epsilon_{\max}^{Ft}$ 和最大压缩应变 $\epsilon_{\max}^{Fc}$ 应分别小于或等于管道容许拉伸应变 $[\epsilon_t]_F$ 和容许压缩应变 $[\epsilon_c]_F$ ,且应明确相应的抗震措施。

### 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趋势时,宜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。当液化场地位于坡地时,还应进行侧向位移作用下的管道应变校核。

6.3.2 管道抗液化上浮校核应符合下列规定:

1 当通过液化区的管段长度小于或等于 30m 时,可不采取措施;当通过液化区的管段长度大于或等于 180m 时,应采用抗漂浮措施;当通过液化区的管段长度为 30m~180m 时,应根据第 4 款和第 5 款的校核结果,采取相应措施。

2 液化土层中管道的最大上浮位移 $\Delta$ 可按下式计算:

$$\Delta = -1.0545 + 0.0254L_y + 0.00327\sigma_a^l + 0.13(L_y - 85)\tan(10D - 4.20) \quad (6.3.2-1)$$

式中： $\Delta$ ——管道在液化土层中最大上浮位移(m)；

$L_y$ ——管道在液化区中的长度(m)，若管道一端或两端与建(构)筑物相连接，应将实际管道长度[至建(构)筑物外表面]分别乘以修正系数 0.9 或 0.8；

$\sigma_a^L$ ——管道由压力和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 的规定计算，当初始轴向应力为拉应力时， $\sigma_a^L$  取值为 0。

3 液化区管道附加应变应按下式计算：

$$\epsilon_{\max}^L = [-1422.7 + 7835.5L_y / (0.167L_y^2 - 8.36L_y + 282.4) + 1465D + 6.16\sigma_a^L] \times 10^{-6} \quad (6.3.2-2)$$

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

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  $\epsilon_{\max} + \epsilon_a + \epsilon_{\max}^L \leq 0$  时，

$$|\epsilon_{\max} + \epsilon_a + \epsilon_{\max}^L| \leq [\epsilon_c]_v \quad (6.3.2-3)$$

当  $\epsilon_{\max} + \epsilon_a + \epsilon_{\max}^L > 0$  时，

$$\epsilon_{\max} + \epsilon_a + \epsilon_{\max}^L \leq [\epsilon_t]_v \quad (6.3.2-4)$$

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：

$$H - D/2 - \Delta \geq 0.5 \quad (6.3.2-5)$$

6.3.3 在侧向位移作用下管道的应变应采用有限元方法进行计算，并应符合本规范第 6.2.6 条的规定。

## 6.4 震陷区埋地管道抗震设计

6.4.1 当管道穿越的场地具有竖向震陷时，应进行震陷位移作用下的最大附加弯曲应变的校核。

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  $\epsilon_{\max}^S$

可按下式计算：

$$\epsilon_{\max}^S = 0.648y_0D \sqrt{k_s D/4E_1 I} \quad (6.4.2)$$

式中： $\epsilon_{\max}^S$ ——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)，可通过土样实验确定。

**6.4.3** 管道的应变状态应按本规范第 6.3.2 条的规定校核，当不满足要求时，应采取抗震陷措施。

## 6.5 管道穿越工程抗震设计

**6.5.1** 当水域大中型穿越管道位于基本地震动峰值加速度大于或等于 0.10g 场地，其他穿越管道位于基本地震动峰值加速度大于或等于 0.20g 场地时，应进行抗拉伸、抗压缩验算。

**6.5.2** 直埋式穿越管道应采用应变准则验算，其应变应按本规范第 6.1.2 条的规定进行组合。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： $\epsilon_e$ ——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，并应符合本规范第 6.1.3 条的规定。

**6.5.4** 洞埋式穿越中的架空或地面敷设管道应采用应力准则验算，架空时应按跨越梁式管桥进行抗震设计和校核，地面敷设时按连续支撑进行抗震设计和校核，覆土敷设时应按直埋式管道进行抗震设计和校核，穿越套管或箱涵内的管道应按地面敷设进行抗震设计和校核。

**6.5.5** 洞埋式穿越中的架空和地面敷设管道承受自重、输送介质重量、内压、温差及地震动作用产生的轴向应力、环向应力与剪应

力,应分别进行叠加组合计算,组合应力应按下式验算:

$$\sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_h^2 - \sigma_N \sigma_h + 3\tau^2} \leq F_a \sigma_s \quad (6.5.5)$$

式中: $\sigma_N$ ——组合的轴向应力(MPa);

$\sigma_h$ ——组合的环向应力(MPa);

$\tau$ ——组合的剪应力(MPa);

$F_a$ ——抗震工况组合的容许应力系数,对于基本地震动引起的应力组合, $F_a$ 取 0.8,对于罕遇地震动引起的应力组合, $F_a$ 取 1.0;

$\sigma_s$ ——管道材料的标准屈服强度(MPa)。

**6.5.6** 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:

$$[\sigma_c] = \frac{N_c}{A} \quad (6.5.6)$$

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(MN),应按现行国家标准《输油管道工程设计规范》GB 50253 的规定计算。

**6.5.7** 管道穿越工程结构应进行抗震设计。水域隧道,当基本地震动峰值加速度大于或等于 0.10g 时,管道穿越工程结构应进行地震作用计算;山岭隧道,当基本地震动峰值加速度大于或等于 0.20g 时,管道穿越工程结构应进行地震作用计算。

**6.5.8** 管道穿越工程结构的抗震结构体系应符合下列规定:

- 1 应有明确、可靠的地震能量耗散部位;
- 2 应有明确、合理的地震作用传递路线;
- 3 结构构件的截面刚度不应有突变而形成薄弱区域;
- 4 应通过合理选择截面尺寸、配置钢筋等措施,增加钢筋混凝土构件的延性,防止剪切先于弯曲破坏和钢筋锚固黏结先于构件破坏;
- 5 应采用有利于提高结构整体性的连接方式,构件连接应合



理、可靠,应适应地震作用下结构产生的应力与变形,避免结构产生破坏或大的裂缝。

#### 6.5.9 管道穿越工程结构地震作用计算应符合下列规定:

1 隧道、圆形竖井应计算横截面的水平地震作用,矩形竖井、管道支墩或支架应计算两个主轴水平方向上的地震作用,当地质条件沿隧道轴向变化较大、软硬不均或遇有液化地层时,还应分析地震对隧道轴向的影响,当管道穿越场地基本地震动峰值加速度大于或等于  $0.20g$  时,宜验算竖井与隧道交界处的变形;

2 地震作用可采用静力法或反应位移法计算;

3 在横向地震作用下,管道与管道支墩或支架之间可视为无滑移,在纵向地震作用下,应依据管箍张紧情况分析管道支墩或支架的地震作用,未箍紧的管道宜考虑在管道支墩或支架上纵向滑移的影响;

4 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。

#### 6.5.10 管道穿越工程结构抗震设计应符合下列规定:

1 结构承载力抗震验算应符合下列规定:

1) 结构应进行弹性抗震计算,并采取相关抗震措施;

2) 地震作用重要性系数应取  $1.0$ ;

3) 结构水平地震作用效应和永久作用效应的基本组合,应包括各种永久效应的最不利组合并按下式计算:

$$S = \sum_{i=1}^n \gamma_{G_i} S_{G_i,k} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} \quad (6.5.10-1)$$

式中: $S$ ——结构内力组合的设计值,包括组合的弯矩、轴向力和剪力设计值等;

$\gamma_{G_i}$ ——第  $i$  个永久作用分项系数,应取  $1.2$ ,当永久作用效应对构件承载能力有利时,不应大于  $1.0$ ;

$S_{G_i,k}$ ——第  $i$  个永久作用代表值的效应;

$\gamma_{Eh}$ ——水平地震作用分项系数,应取 1.3;

$S_{Ehk}$ ——水平地震作用标准值的效应。

4) 结构抗震验算应满足下式:

$$S \leq R/\gamma_{RE} \quad (6.5.10-2)$$

式中: $R$ ——结构承载力设计值;

$\gamma_{RE}$ ——承载力抗震调整系数,应按表 6.5.10 采用。

表 6.5.10 承载力抗震调整系数

材 料	结 构 构 件	受 力 状 态	$\gamma_{RE}$
钢	支架构件、节点板件、螺栓、焊缝	强度	0.75
	支架构件	稳定	0.80
混凝土	支架横梁	受弯	0.75
	支架柱、支墩	偏压	0.80
	隧道结构	偏压	0.85
	各类构件	受剪、偏拉	0.85
—	预埋件锚筋	强度	1.00

2 需要维持检修通道功能的顶管结构、盾构结构应进行抗震变位验算,其验算应按现行国家标准《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》GB 50032 的有关规定执行,接头位移量不应超过满足接缝防水材料水密性要求的允许值。

3 地基及基础的抗震验算应按现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 的有关规定执行,坡体的稳定性应按现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330 的规定进行验算。

## 6.6 管道跨越工程抗震设计

6.6.1 跨越工程结构应进行抗震设计,当场地基本地震动峰值加速度大于或等于  $0.10g$  时,跨越工程结构应进行地震作用计算。

6.6.2 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后确定。管道跨越工程的抗震结构体系应符合下列规定:

- 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,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,应采取相应措施提高抗震能力。

**6.6.3 管道跨越工程抗震计算应符合下列规定:**

- 1 对悬索、斜拉索等柔性跨越结构进行抗震计算时,应采用考虑几何非线性影响的分析模型;
- 2 在抗震计算中,应考虑非结构构件、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,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,宜考虑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验算方法除应满足本规范及有关标准的规定外,尚应对计算结果分析判断,确认其合理、有效性后方可用于工程设计。

**6.6.4 管道跨越工程的抗震计算可采用下列方法:**

- 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,可取多条(至少 3 组实际地震动加速度记录或人工模拟加速度时程曲线)时程曲线计算结果的平均值与反应谱振型分解法计算结果的较大值作为设计依据,设计时程曲线应基于地震安全性评价结果,并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。

6.6.5 在计算地震作用时,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 组合值系数

可变荷载种类	组合值系数
雪荷载	0.5
裹冰荷载	0.5
温度荷载	0.6

6.6.6 管道跨越工程的地震作用效应和其他荷载效应组合,其设计值应按下式计算:

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

式中:  $S$ ——管道跨越工程结构内力组合的设计值,包括组合的弯矩、轴向力和剪力设计值;

$S_{GE}$ ——重力荷载代表值的效应;

$\psi_{LK}$ ——横向地震作用组合值系数,见表 6.6.6;

$S_{LK}$ ——横向地震作用标准值的效应;

$\psi_{VK}$ ——竖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;

$\psi_{PK}$ ——纵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;

$\psi_W$ ——风荷载组合值系数,风荷载起控制作用的大型跨越结

构采用 0.2,其他取 0.0;

$S_{WK}$ ——风荷载标准值的效应;

$\psi_Y$ ——内压作用组合值系数,可取 1.0;

$S_{YK}$ ——内压作用标准值的效应;

$\psi_T$ ——温度作用组合值系数,见表 6.6.5;

$S_{TK}$ ——温度作用标准值的效应。

表 6.6.6 不同工况的地震作用组合值系数

地震作用工况	$\psi_{LK}$	$\psi_{VK}$	$\psi_{PK}$
仅计算横向地震作用	1.3(1.0)	0.0	0.0
仅计算竖向地震作用	0.0	1.3(1.0)	0.0
仅计算纵向地震作用	0.0	0.0	1.3(1.0)
同时计算横向与竖向地震作用(横向为主)	1.3(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	1.3(1.0)	0.0
同时计算横、竖、纵向地震作用	1.3(1.0)	0.5	0.5

注:括号内数值为油气输送管道及缆索抗震计算时选用。

**6.6.7** 结构抗震验算应符合本规范式(6.5.10-2)的规定,承载力抗震调整系数应按表 6.6.7 选用。当仅计算竖向地震作用时,各类结构构件承载力抗震调整系数均应采用 1.0。

表 6.6.7 承载力抗震调整系数

材 料	结 构 构 件	受 力 状 态	$\gamma_{RE}$
钢	梁、柱、支撑、节点板件、螺栓、焊缝	强度	0.75
	柱、支撑	稳定	0.80
混凝土	梁	受弯	0.75
	轴压比小于 0.15 的柱	偏压	0.75
	轴压比不小于 0.15 的柱	偏压	0.80
	各类构件	受剪、偏拉	0.85

**6.6.8** 管道在地震工况下的组合应力(内力)应符合本规范第 6.5.5

条的规定。

**6.6.9** 下列跨越工程结构应进行罕遇地震作用下的弹塑性变形验算：

- 1 主跨长度超过 150m 的悬索、斜拉索跨越结构；
- 2 基本地震动参数为 0.20g 及以上的大型跨越结构。

**6.6.10** 梁式直跨、桁架式、轻型托架、拱式等刚性跨越结构在罕遇地震作用下的弹塑性变形验算，应按现行国家标准《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 的有关规定执行。

**6.6.11** 悬索、斜拉索、悬缆等柔性跨越结构在罕遇地震作用下的弹塑性变形验算应符合下列规定：

- 1 墩柱应按现行行业标准《公路工程抗震规范》JTG B02 和《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02—01 的要求进行塑性变形能力和抗剪验算；

- 2 索塔截面和桩基础应按现行行业标准《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65—05 的要求进行截面弯矩验算，桥面结构、主索、吊索强度应按现行行业标准《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65—05 的相关要求进行验算；

- 3 悬索或斜拉索跨越的风索主索和风索拉索，其验算方法和验算内容与主索及吊索一致。

## 7 抗震措施

### 7.1 通用抗震措施

7.1.1 管道抗震措施的选用应与抗震验算相结合,优先采用降低计算应变的措施。当抗震验算不满足要求时,可适当增加钢管壁厚或采用大应变钢管。

7.1.2 在需要设防的地面位移地段不应设置三通、阀门、固定墩等部件。当需要设置热煨弯管时,其曲率半径不应小于6倍管道外径。

7.1.3 在管道穿过刚性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,并用柔性减振材料填塞。

7.1.4 管道通过地震动峰值加速度大于或等于 $0.40g$ 区段的大中城市、大型穿跨越工程两侧宜结合线路阀室分布情况设置截断阀。

7.1.5 敷设于地震危险地段的管道宜设置报警系统。

### 7.2 专项抗震措施

7.2.1 对通过活动断层的管道,应采取下列抗震措施:

1 宜选择断层位移和断裂宽度较小的地段通过。

2 管道与水平走滑为主的断层错动方向的交角宜为 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。

3 对于以水平走滑为主的断层和正断层,应增大断层及其两侧影响范围内的管沟宽度,管沟宽度宜大于沿管道法线方向的断层水平位移,管沟边坡坡度不宜大于 $30^{\circ}$ ,并应采用疏松材料浅埋。对于逆冲断层应专门研究。

4 三通、旁通、阀门、固定墩等部件与断层的距离应大于1.5倍的同侧管道滑动长度 $L_1$ , $L_2$ 宜按下式计算,在滑动长度内,宜采

用相同直径或壁厚的管道。

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

式中： $L_t$ ——断层一侧的管道滑动长度(m)；

$\sigma_2$ ——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 C 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，宜将管道敷设于地面或架空，并采取相应的安全保护措施。

6 通过活动断层段管道的对接焊口应进行 100% 射线检测和 100% 超声波检测，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 级及以上要求，且应符合应变设计的缺欠尺寸限定要求。

7.2.2 埋设于液化区较长的管道，可分段采取抗液化措施。严重液化区的管道可采用换填非液化土、配重、抗浮桩及衬铺压土等措施。

7.2.3 通过震陷区的管道，有条件时可采用地面或地上(跨越)敷设。

7.2.4 确需在难以绕避的滑坡区内敷设的管道，应采取减载、支挡、锚固或排水等措施控制滑坡。

7.2.5 采用直埋式穿越水域或沟壑的管道，其斜坡角不应大于  $30^\circ$ ，如图 7.2.5 所示。

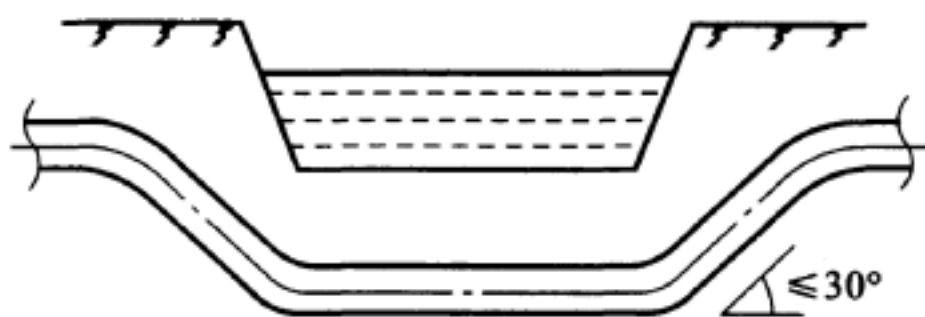


图 7.2.5 直埋式穿越管道示意图

7.2.6 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。

**7.2.7** 洞埋式穿越管道地面敷设时,应保证地震发生时管道轴向与横向自由位移,并不得失稳。

**7.2.8** 管道穿跨越工程结构抗震采用的材料应符合下列规定:

1 混凝土强度等级不应低于 C25,且不应高于 C60;

2 纵向受力钢筋选用普通钢筋时,钢筋的抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值不应小于 1.25,屈服强度实测值与屈服强度标准值的比值不应大于 1.3,且钢筋在最大拉力下的总伸长率实测值不应小于 9%,宜选用符合上述抗震性能指标的不低于 HRB400 级的热轧钢筋,也可选用符合上述抗震性能指标的 HRB335 级的热轧钢筋,箍筋宜选用符合上述抗震性能指标的不低于 HRB335 级的热轧钢筋,也可选用 HPB300 级的热轧钢筋;

3 所选用钢材的屈服强度实测值与抗拉强度实测值的比值不应大于 0.85,应有明显的屈服台阶且伸长率不应小于 20%,应有良好的焊接性和合格的冲击韧性,宜选用 Q235 等级 B、C、D 的碳素结构钢及 Q345 等级 B、C、D、E 的低合金结构钢,当有可靠依据时,可选用其他钢种和钢号;

4 砌筑砂浆强度等级不应低于 M10,片石混凝土的强度等级不应低于 C20;

5 管道穿越工程结构的材料种类和强度等级不应低于表 7.2.8 的要求。

**表 7.2.8 管道穿越工程的材料种类和最小强度等级**

管道穿越工程类别	部 位	基本地震动峰值加速度	
		0.20g、0.30g	0.40g
水下钻爆隧道	Ⅲ、Ⅳ级围岩衬砌	混凝土 C25 或 钢筋混凝土 C30	钢筋混凝土 C30
	Ⅴ、Ⅵ级围岩衬砌,竖井	钢筋混凝土 C30	

续表 7.2.8

管道穿越 工程类别	部 位	基本地震动峰值加速度	
		0.20g、0.30g	0.40g
山岭隧道	洞门墙	混凝土 C25	钢筋混凝土 C30
	洞门挡土墙(翼墙), $H' \leq 10\text{m}$	混凝土 C25	混凝土 C25 或 钢筋混凝土 C30
	洞门挡土墙(翼墙), $H' > 10\text{m}$	钢筋混凝土 C30	
	Ⅲ、Ⅳ级围岩衬砌	混凝土 C25 或钢 筋混凝土 C30	钢筋混凝土 C30
	Ⅴ、Ⅵ级围岩衬砌	钢筋混凝土 C30	
	明洞	钢筋混凝土 C30	
管道支墩或支架	主体结构	钢筋混凝土 C25	
锚固墩	主体结构	混凝土 C25	

注:表中  $H'$  为挡土墙或翼墙的高度。

### 7.2.9 管道穿跨越工程结构地基的抗震措施应符合下列规定:

1 地基为软土、液化土、新近填土或严重不均匀土时,应考虑地震时不均匀沉降、地基失效或其他不利影响对管道穿越工程可能造成的破坏,并应采取相应措施;

2 液化等级为中等和严重时的古河道、现代河滨、海滨,当存在液化侧向扩展或流滑可能时,在距常水位线 100m 以内修建的管道穿越工程,应进行抗滑动验算,必要时应采取防止滑动的措施。

### 7.2.10 山岭隧道和 underwater 矿山法施工隧道的抗震措施应符合下列规定:

1 洞口不应设在浅薄山嘴处、防治困难的不良地质处及不稳定的悬崖峭壁下,洞口应采取控制边坡和仰坡的开挖高度及其他防止坍塌震害的措施,位于悬崖峭壁下的洞口,宜采取设置明洞或其他防止崩塌、落石的措施;

2 洞门形式不应采用端墙式,采用翼墙式洞门时,基本地震动峰值加速度大于或等于  $0.20g$  的地区,洞门端墙与衬砌环框间、端墙与洞口挡土墙或翼墙间的施工接缝处应采取加设短筋或设置榫头等抗震连接措施;

3 隧道洞口、浅埋、偏压地段和断层破碎带地段宜采用带仰拱的曲墙式衬砌断面,设防长度应根据地形、地质条件及抗震情况确定,并不应小于 2.5 倍的结构跨度,基本地震动峰值加速度大于或等于  $0.20g$  的地区或洞口为 IV ~ VI 围岩时,设防长度不应小于 15m;

4 衬砌结构的设防范围宜根据地质、抗震设防情况向两端围岩质量较好的地段延伸,延伸长度宜为 5m~10m;

5 明暗洞交界处、软硬岩交界处及断层破碎带地段,宜结合沉降缝、伸缩缝综合设置抗震缝,对于基本地震动峰值加速度为  $0.20g \sim 0.40g$  的地区,抗震缝的纵向间距可取 10m~15m;

6 衬砌背后严禁存在空洞,衬砌背后的空洞应压注水泥砂浆进行填充。

**7.2.11** 顶管结构、盾构结构的抗震措施应符合下列规定:

1 接头构造应有利于减小地震时接头的错动和因地震位移引起的破坏;

2 接头的防水应保证地震后接缝防水性能符合设防要求;

3 在软弱地层或地震后易产生液化的地层,接头宜设置凹凸榫槽;

4 基本地震动峰值加速度大于  $0.20g$  且穿越土层严重不均匀的地区时,可对隧道周围的土层进行注浆处理;

5 盾构管片间的连接螺栓,在满足常规受力要求的前提下,宜采用小的刚度;

6 盾构管片宜采用错缝拼接方式。

**7.2.12** 管道支墩或支架、锚固墩的抗震措施应符合下列规定:

1 管道支墩、锚固墩周围回填时应回填粗颗粒土并应夯实,

当基坑为基岩时,宜采用素混凝土原槽浇注;

2 管道支墩的箍筋间距不应大于 100mm,按素混凝土构件设计的锚固墩,其表面应配置构造钢筋;

3 预埋件的锚固破坏不应先于连接件,与非抗震设计时相比,预埋件的直锚钢筋截面面积可增加 25%,锚固长度应增加 10%;

4 按压杆设计的钢支架长细比,基本地震动峰值加速度小于或等于  $0.20g$  时不应大于 150,基本地震动峰值加速度大于  $0.20g$  时不应大于 120;

5 管道支墩或支架顶面的设计应满足管道抗震计算模型,并采取防止管道滑落的措施。

**7.2.13** 管道跨越结构的抗震措施应符合下列规定:

1 梁、桁架等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;

2 位于软弱黏性土层、液化土层和严重不均匀地层上的梁、桁架等刚性跨越结构,不宜采用高次超静定结构;

3 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 的有关规定进行设计。

**7.2.14** 对出入锚固墩部位的管道宜局部加强。

## 8 管道抗震施工

### 8.1 一般规定

8.1.1 管道抗震施工除应执行本规范的规定外,尚应满足批准后的抗震设计文件要求。施工中如有变更,应征得原抗震设计部门的确认,并应出具设计更改文件。

8.1.2 管道线路工程施工方案中应明确抗震措施的施工要求。

8.1.3 施工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,应对抗震设计部分进行专项交底,并做好会审记录;

2 承担管道线路抗震施工的单位应对各级施工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标准的规定。

8.2.2 管道抗震工程施工所使用的专项材料需代用时,应经原设计部门复核,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 管道焊接安装与试压

8.3.1 焊接施工前,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进行焊接工艺评定,制订焊接及返修工艺规程。

8.3.2 在活动断层、液化引起的侧向位移等地表位移地段,应进

行现场环焊缝拉伸性能测试,测试结果应符合设计要求。

**8.3.3** 抗震设防管段施工应减少连头焊口数量,连头短管的长度应大于3倍管道外径且不应小于0.5m。

**8.3.4** 抗震设防管段的对接焊口应逐一进行外观检查。焊缝外观检查合格后应按设计要求进行射线或超声波检测,并满足验收要求。

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

**8.3.6** 重要区段应单独试压,试压介质宜采用洁净水,并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 的规定。

#### **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,采取截排水等措施;

2 应按设计要求设置临时或永久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进行施工,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 的相关规定,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 的相关规定,锚杆喷射混凝土支护工程应符合现行国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086 的相关规定,砌体工程应符合现行国家标准《砌体结构工程施工质量验收规范》GB 50203 的相关规定,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 的相关规定。

**8.4.3** 液化地段的施工应满足下列要求:

1 管沟下部液化层的地质条件应根据设计要求进行改良。

2 对施工过程中应严格进行检查,应按设计要求做好规定的试验,宜换填非液化土,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、注泥浆施工后应沿管道方向每 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	说明
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	注入黏土泥浆	粉土的黏粒(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 当采用配重抗漂浮时,应符合国家现行标准《油气输送管道线路工程水工保护施工规范》SY/T 4126 的有关规定。

5 在设置抗浮卡桩时应按设计要求设置锚固桩,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 抗浮卡桩的检查项目

序号	检查项目	要求	说明
1	桩顶高度偏差	$<0.1\text{m}$	—
2	桩顶位置偏差	$<0.1\text{m}$	—
3	桩的长度偏差	$<1\text{m}$	—
4	桩的垂直度偏差	$<1\%$	—
5	桩径偏差	$<50\text{mm}$	—
6	管卡焊接安装	符合设计	—
7	管道电火花检查	无漏电	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

6 当采用管堤敷设时,应达到设计要求的高度、宽度和几何形状,以及覆土的密实度。当穿越河流或道路时,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 通过活动断层的管沟回填宜采用不易固结的疏松材料,当采用疏松砂土回填施工时,应符合下列规定:

- 1 应对选用的每处土源进行一次实验室检验;
- 2 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%;
- 3 应在管底下预填 300mm 疏松砂土,二次回填为全部疏松砂土;
- 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。

8.4.5 管道与断层交角应符合设计要求,施工过程应对交角进行测量、记录、复核和认签,与设计图纸规定的角度偏差应小于 3°。

8.4.6 应对管线上安装的弯管、弹性敷设、固定墩、截水墙,以及水工保护构筑物等进行检查,检查内容应按表 8.4.6 执行,并应符合设计规定。

表 8.4.6 安装检查内容

序号	管线设置	检查内容
1	热煨弯管	位置、方向、角度、壁厚
2	冷弯弯管	位置、方向、角度、壁厚
3	弹性敷设	曲率半径
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



续表 8.4.6

序号	管线设置	检查内容
5	刚性截水墙穿管处	穿管处保证 25mm 以上的缝隙,填塞柔性减震材料 管线防腐层
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、《砌体结构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** 穿越段管道抗震工程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,还应符合下列规定:

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组织设计的有关要求。

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 当采用套管穿越时,应检查内管的支撑和防腐绝缘是否完好。若使用钢套管,则应检测内管与套管的电绝缘性能。检查或检测合格后,应按设计要求进行填充或密封套管两端。

4 采用洞埋式穿越时,应确保钢筋混凝土施工质量符合设计要求,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** 跨越段管道抗震工程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,设计应给定焊缝的检测要求,要求全焊透的一、二级焊缝应采用超声波进行内部缺欠的检验,超声波不能对缺欠进行判断时,应进行射线检验。其内部缺欠分级及探伤方法应符合现行国家标准《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》GB/T 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欠分级应符合表 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欠分级要求

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 钢结构的 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  $\delta$  的  $1/4$ ,如图 8.5.2 所示。

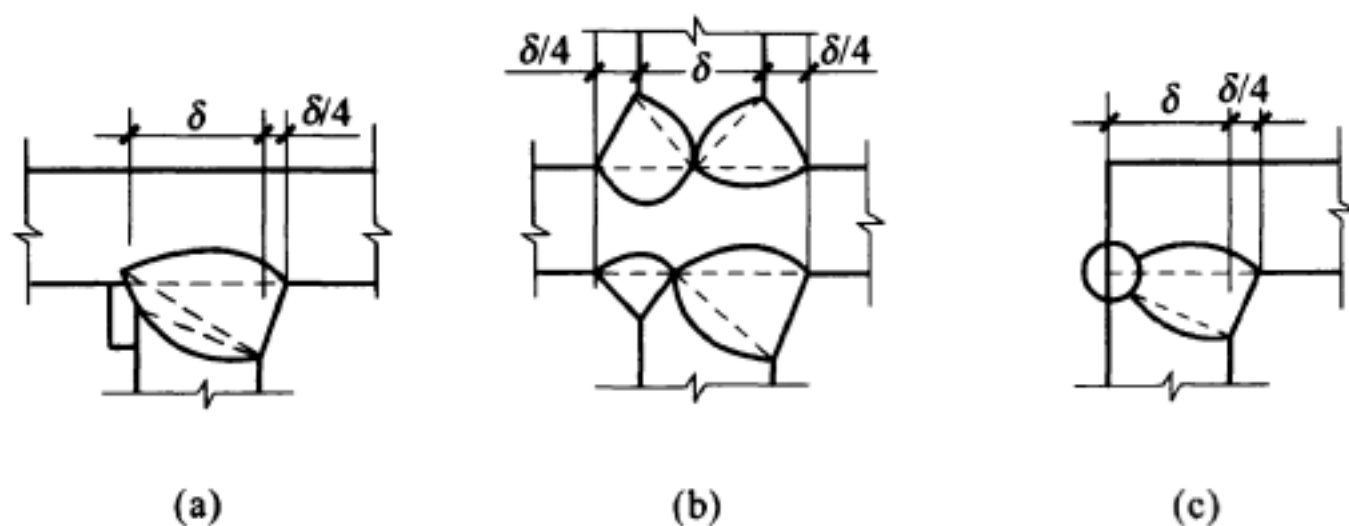


图 8.5.2 焊脚尺寸示意

**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 50459 的相关规定。

## 9 管道抗震交工

**9.0.1** 当施工单位按照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和设计单位、监理单位共同对管道线路工程进行检查和验收,内容应包括抗震施工验收。

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

**9.0.3** 管道线路工程场地地震安全性评价的验收资料应包括下列内容:

- 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 非埋地管段的场地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,施工单位的资料尚应包括下列内容:

- 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(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 管道线路工程抗震施工竣工图；
- 11 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** 选择管道场地时,应按表 A.0.1 划分对管道抗震有利、不利和危险的地段。

**表 A.0.1 地段的划分**

地段划分	地质、地形、地貌
有利地段	一般是指无活动断裂、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,有活动性断裂及地震时可能发生断裂、滑坡、崩塌、地陷、地裂等的地段

## 附录 B 饱和砂土和饱和粉土的地震液化判别

**B.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考虑液化影响:

1 地质年代为第四纪晚更新世(Q<sub>3</sub>)及以前时,Ⅶ度、Ⅷ度时可判为不液化土;

2 粉土的黏粒(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:用于液化判别的黏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条件之一时,可不分析液化影响:

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

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

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

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;

$d_0^l$  ——液化土特征深度(m),可按表 B.0.1 采用;

$d_b$  ——管道底部埋置深度(m),不超过2m时应采用2m;

$d_w$  ——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。

**表 B.0.1 液化土特征深度(m)**

饱和土类别	设防烈度		
	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
粉土	6	7	8
砂土	7	8	9

**B.0.2** 当饱和砂土、粉土的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下式计算:

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

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 B.0.2 选用;

$d_s$  ——饱和土标准贯入试验点深度(m);

$\rho_c$  ——黏粒含量百分率,当小于 3 或为砂土时,均应采用 3。

表 B.0.2 液化判别标准贯入锤击数基准值  $N_0$

设计地震加速度	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	0.40g
标准贯入锤击数基准值	7	10	12	16	19

**B.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:

$$I_{IE} = \sum_{i=1}^{n_1} \left(1 - \frac{N_i^L}{N_{cri}}\right) d_i^L w_i \quad (\text{B.0.3-1})$$

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

式中:  $I_{IE}$  ——液化指数;

$n_1$  ——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;

$w_i$  ——  $i$  土层考虑单位土层厚度的层位影响权函数 ( $m^{-1}$ ), 按式 (B. 0. 3-2) 计算;

$d_{si}$  —— 第  $i$  个标准贯入点的深度 (m);

$Z_{0i}$  —— 第  $i$  层土中点的深度 (m)。

**B. 0. 4** 存在液化土层的场地, 应根据其液化指数按表 B. 0. 4 划分其液化等级。

**表 B. 0. 4 液化等级划分**

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

## 附录 C 管材性能参数和轴向拉伸曲线

**C.0.1** 管材性能参数和轴向拉伸曲线宜采用工程用管轴向拉伸试验的实际值确定。在确定轴向设计拉伸曲线时,宜采用下式的 Ramberg-Osgood 方程拟合。

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n_1 - 1} \quad (\text{C.0.1})$$

式中: $\epsilon$  ——应变;

$\sigma$  ——应力(MPa);

$E$  ——钢管弹性模量(MPa),取  $2.1 \times 10^5$  MPa;

$\alpha$  ——屈服偏移量,当无实测数据时,可按表 C.0.1 选取;

$\sigma_0$  ——管材的屈服应力(MPa),当无实测数据时,可按表 C.0.1 选取;

$n_1$  ——强化指数,当无实测数据时,可按表 C.0.1 选取。

**表 C.0.1 Ramberg-Osgood 方程参数**

序号	钢级	$\sigma_0$ (MPa)	$\alpha$	$n_1$
1	B、X42	350	2.004	17.72
2	X52	389	1.699	14.14
3	X56	417	1.519	17.79
4	X60	437	1.403	15.85
5	X65	459	1.288	19.90
6	X70	470	1.234	14.58
7	X80	530	0.981	20.12

**C.0.2** 为了简化计算,在初步设计阶段,管材的轴向拉伸曲线可按照本规范第 C.0.3 条或第 C.0.4 条应力-应变简化折线取值;

在详细设计阶段,可按照本规范第 C.0.4 条应力-应变简化折线取值。

**C.0.3** 管材的常用钢级 B、X42、X52、X56、X60、X65、X70 和 X80 的材料性能参数如表 C.0.3 所示。

**表 C.0.3 常用钢级的管材的性能参数**

序号	钢级	弹性区			弹塑性区		
		应变 $\epsilon_1$	模量 $E_1$ (MPa)	应力 $\sigma_1$ (MPa)	应变 $\epsilon_2$	模量 $E_2$ (MPa)	应力 $\sigma_2$ (MPa)
1	B、X42	0.0018	$2.1 \times 10^5$	370	0.069	647	414
2	X52	0.0020	$2.1 \times 10^5$	419	0.069	954	483
3	X56	0.0021	$2.1 \times 10^5$	438	0.056	962	490
4	X60	0.0022	$2.1 \times 10^5$	453	0.040	1611	513
5	X65	0.0023	$2.1 \times 10^5$	473	0.040	1325	523
6	X70	0.0023	$2.1 \times 10^5$	480	0.030	2547	550
7	X80	0.0026	$2.1 \times 10^5$	541	0.030	2061	597

注: $\epsilon_1$ 为管道应力-应变简化折线中塑性变形起点处的应变,如图 C.0.4 所示, $\epsilon_2$ 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值。

**C.0.4** 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,等效的原则如下:

1  $E_1$  等于实际应力-应变曲线中弹性阶段模量;

2 在拉伸应变 $\epsilon_2$ 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如图 C.0.4 所示。

**C.0.5** 国标管材与 API X 级管材对应关系如表 C.0.5 所示。

**表 C.0.5 国标管材与 API 5L 级对应关系表**

API	A	B	X42	X46	X52	X56	X60	X65	X70	X80
GB/T 9711	L210	L245	L290	L320	L360	L390	L415	L450	L485	L555

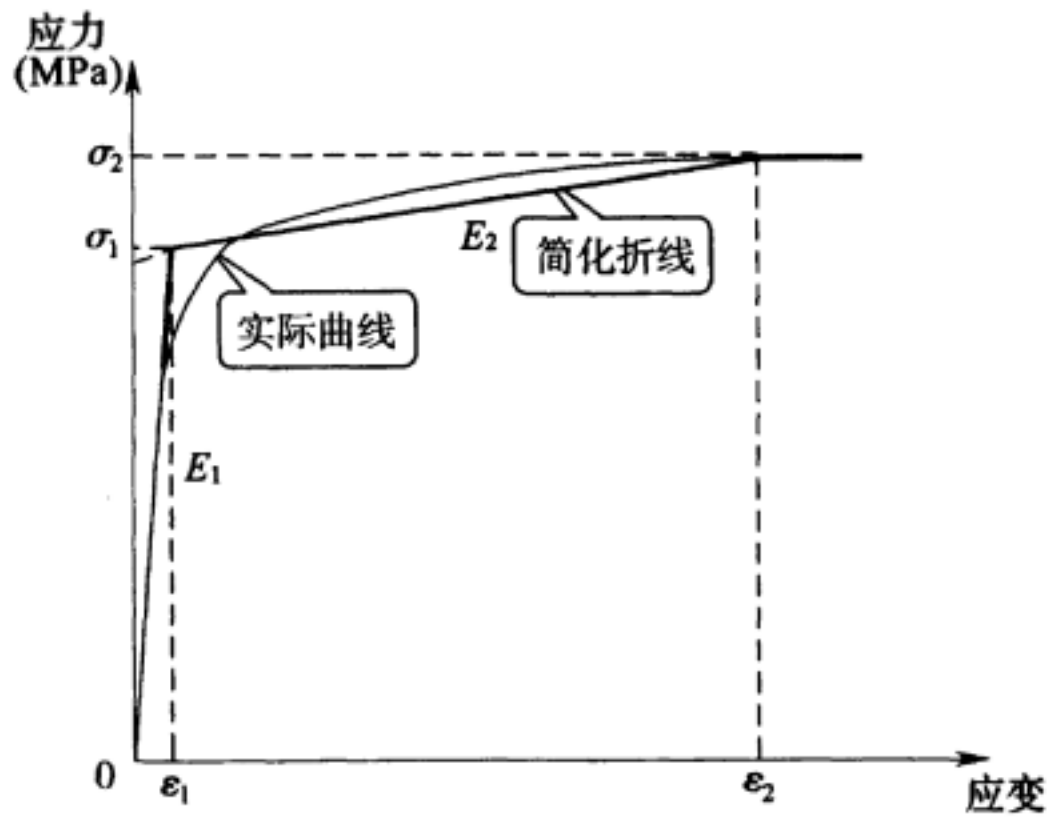


图 C. 0. 4 应力-应变简化折线示意图

## 附录 D 通过活动断层埋地管道极限应变计算

**D.0.1** 管段拉伸极限应变计算应符合下列规定：

1 环焊缝的缺欠类型应分为表面缺欠和内部缺欠，如图 D.0.1 所示。

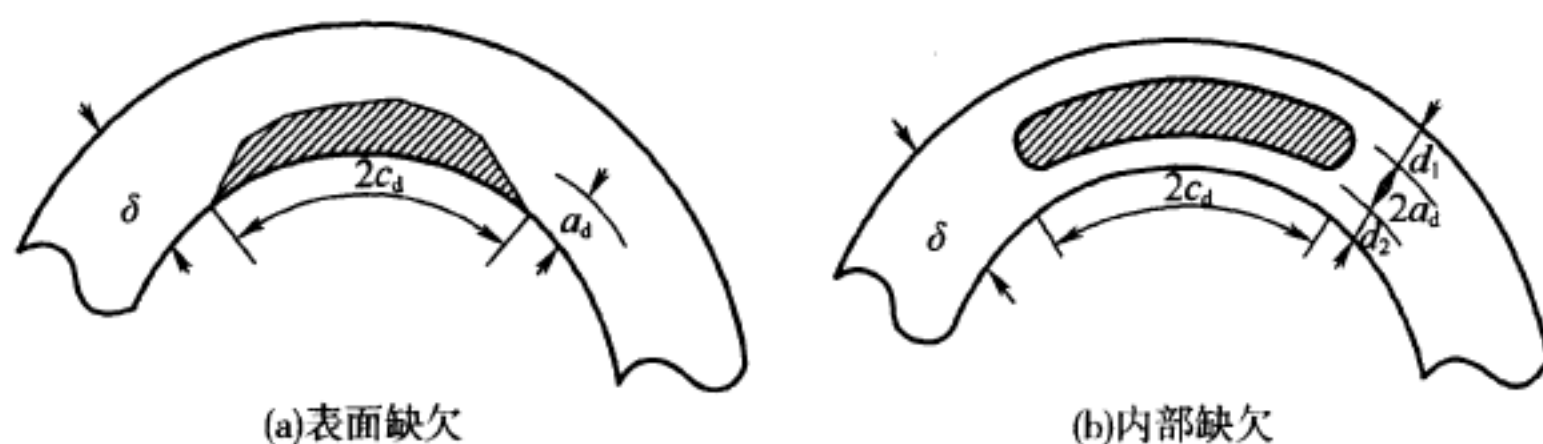


图 D.0.1 环焊缝缺欠类型

$a_d$  ——表面缺欠高度(mm)，或内部缺欠高度的一半(缺欠高度等于  $2a_d$ )；

$c_d$  ——缺欠长度的一半(mm)

2 含表面缺欠的管段的极限拉伸应变应按下式计算：

$$\epsilon_t^{\text{crit}} = \delta_T^{(2.36-1.58\lambda_T-0.101\xi\eta)} (1 + 16.1\lambda_T^{-4.45}) (-0.157 + 0.239\xi^{-0.241}\eta^{-0.315}) \quad (\text{D.0.1-1})$$

3 含内部缺欠的管段的极限拉伸应变应按下式计算：

$$\begin{aligned} \epsilon_t^{\text{crit}} = & \delta_T^{(1.08-0.612\eta-0.0735\xi+0.364\psi)} (12.3 - 4.65\sqrt{\delta} + 0.495\delta)(11.8 \\ & - 10.6\lambda_T)(-5.14 + \frac{0.992}{\psi} + 20.1\psi)(-3.63 + 11.0\sqrt{\eta} \\ & - 8.44\eta)(-0.836 + 0.733\eta + 0.0483\xi \\ & + \frac{3.49 - 14.6\eta - 12.9\psi}{1 + \xi^{1.84}}) \end{aligned} \quad (\text{D.0.1-2})$$

式中： $\epsilon_t^{\text{crit}}$  ——极限拉伸应变(%)；

$\delta_T$  ——表观韧性(mm)， $0.1 \leq \delta_T \leq 0.3$ ；

$\lambda_T$  —— 屈强比,  $0.7 \leq \lambda_T \leq 0.9$ ;

$\xi$  —— 缺欠长度与壁厚比率 ( $2c_d/\delta$ ),  $1 \leq \xi \leq 10$ ;

$\eta$  —— 缺欠高度与壁厚比率,  $a_d/\delta$  (表面缺欠时) 或  $2a_d/\delta$  (内部缺欠时),  $\eta \leq 0.5$ ;

$\psi$  —— 缺欠深度与壁厚的比率 ( $d_d/\delta$ ),  $d_d = \min(d_1, d_2)$ ;

$\delta$  —— 管道壁厚 (mm),  $\delta \leq D/32$ 。

4 公式(D. 0. 1-1)、(D. 0. 1-2)的应用条件如下:

1) 材料性能参数屈强比和表观韧性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、应变速率和应变失效等影响;

2) 极限拉伸应变不应超过均匀延伸率的 1/3;

3) 不应存在焊缝强度低匹配;

4) 最小和平均的夏比冲击功分别不低于 30J 和 45J。

5 采用公式(D. 0. 1-1)、(D. 0. 1-2)计算管道的极限拉伸应变能力时, 尚应考虑下列影响因素:

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精度有一定影响;

3) 应确定实际材料的应力-应变曲线, 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) 热影响区软化可能导致应变集中, 软化区的强度降低不应超过母管强度的 15%, 软化区宽度不应超过管道壁厚的 15%;

6) 公式中未考虑管道内压的影响, 内压的影响可通过调整安全系数来体现;

7) 当轴向应力与横向应力存在差异时, 屈强比应采用全壁厚轴向应力计算, 在计算屈强比时, 应合理确定屈服强度, 当管材的应力-应变曲线为无明显平台的曲线时, 常

规定的屈服强度  $\sigma_{0.5}$  可能比实际的屈服强度低, 过低的屈强比可能导致偏危险的应变极限估计, 合理屈服点对应的斜率(即变形模量)应小于  $1 \times 10^4$  MPa。

6 表观韧性宜通过轴向受拉荷载状态下的低约束试验取得, 也可通过标准三点弯曲试验或夏比冲击试验并按下列要求校正后取得:

1) 应在标准三点弯曲试验结果中按式(D. 0. 1-3)规定的条件选取有效样本, 并应确定有效样本的最小值( $\delta_{\min}$ )和平均值( $\delta_{\text{avg}}$ ), 取  $3\delta_{\min}$  和  $2\delta_{\text{avg}}$  中的较小者为表观韧性值。

$$\delta_{T_{\max}}^{\text{HC}} \leq 0.04\chi \left[ 3.69 \left( \frac{1}{n_1} \right)^2 - 3.19 \left( \frac{1}{n_1} \right) + 0.882 \right] \quad (\text{D. 0. 1-3})$$

式中:  $\delta_{T_{\max}}^{\text{HC}}$  ——标准三点弯曲试验结果中的最大有效裂纹尖端位移(CTOD)值(mm);

$\chi$  ——试样厚度和韧带的较小值(mm);

$n_1$  ——Ramberg-Osgood 应力-应变关系中的强化指数。

2) 应确定夏比冲击功的最小值( $CVN_{\min}$ )和平均值( $CVN_{\text{avg}}$ ),

并取  $\frac{0.2}{30}CVN_{\min}$  和  $\frac{0.2}{45}CVN_{\text{avg}}$  之中的较小值为表观韧性值。

**D. 0. 2 管段的极限压缩应变应按下列公式计算:**

$$\epsilon_c^{\text{crit}} = \min(\epsilon_u, F_{\text{LD}} \times \epsilon_r) \quad (\text{D. 0. 2-1})$$

当应力-应变曲线有屈服平台时,

$$F_{\text{LD}} = 1 - 0.50 \times (1 - 0.75\epsilon_r^{-0.23}) \left[ 1 + \tanh(8.0 \frac{\epsilon_L}{\epsilon_r} - 8.2) \right] \quad (\text{D. 0. 2-2})$$

当应力-应变曲线为圆拱形时,

$$F_{\text{LD}} = 1 \quad (\text{D. 0. 2-3})$$

$$\epsilon_r = F_{\text{DP}} \cdot F_{\text{YT}} \cdot F_{\text{GI}} \cdot F_{\text{NF}} \quad (\text{D. 0. 2-4})$$

$$f_{\text{pc}} = 1.8 \times 10^{-4} \times \left( \frac{D}{\delta} \right)^{1.6} \quad (\text{D. 0. 2-5})$$

$$f_p = \frac{PD}{2\delta\sigma_y} \quad (\text{D. 0. 2-6})$$

当  $f_p < f_{pc}$  时,

$$F_{DP} = 980 \times \left[ 0.5 \left( \frac{D}{\delta} \right)^{-1.6} + 1.9 \times 10^{-4} \right] \quad (\text{D. 0. 2-7})$$

当  $f_p \geq f_{pc}$  时,

$$F_{DP} = 980 \times (1.06 f_p + 0.5) \left( \frac{D}{\delta} \right)^{-1.6} \quad (\text{D. 0. 2-8})$$

$$F_{YT} = 2.7 - 2.0\lambda_T \quad (\text{D. 0. 2-9})$$

$$F_{GI} = 1.84 - 1.6f_g^{0.2} \quad (\text{D. 0. 2-10})$$

$$f_g = \frac{h_g}{\delta} \quad (\text{D. 0. 2-11})$$

$$f_n = \frac{\sigma_a^c}{\sigma_y} \quad (\text{D. 0. 2-12})$$

当  $f_n \geq 0$  时,

$$F_{NF} = 1.2f_n^2 + 1 \quad (\text{D. 0. 2-13})$$

当  $f_n < 0$  时,

$$F_{NF} = 1 \quad (\text{D. 0. 2-14})$$

式中:  $\epsilon_c^{\text{crit}}$  —— 极限压缩应变(%);

$\epsilon_u$  —— 钢管的均匀延伸率(%);

$F_{LD}$  —— 极限压缩应变的调整系数;

$\epsilon_r$  —— 极限压缩应变的计算值(%);

$\epsilon_L$  —— 屈服平台结束时的应变(%),  $\epsilon_L \leq 2\%$ ;

$F_{DP}$  —— 内压调整系数;

$F_{YT}$  —— 应变强化调整系数;

$F_{GI}$  —— 几何尺寸调整系数;

$F_{NF}$  —— 轴向力调整系数;

$f_{pc}$  —— 临界承压系数;

$D/\delta$  —— 钢管径厚比,  $20 \leq D/\delta \leq 104$ ;

$f_p$  —— 承压系数,  $0 \leq f_p \leq 0.80$ ;



- $P$  ——管内压力(MPa);
- $\sigma_y$  ——管道轴向屈服强度(MPa),当无法获得时,可取为钢管的规定最小屈服强度;
- $\lambda_T$  ——屈强比, $0.70 \leq \lambda_T \leq 0.96$ ;
- $f_g$  ——几何尺寸偏差与壁厚比率, $0.01 \leq h_g/\delta \leq 0.30$ ;
- $h_g$  ——钢管表面波浪缺欠的波峰至谷底的高度(mm),无实测资料时,可取  $0.13\%D$  和  $8\%\delta$  二者中的较大值;
- $f_n$  ——轴向应力与屈服强度的比率, $\sigma_a^c/\sigma_y \leq 0.40$ ;
- $\sigma_a^c$  ——轴向应力(MPa),可通过应力分析获得,当无法获得时,可设置为 0。

## 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下式计算:

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

式中:  $F$  ——作用于等效非线性弹簧的外力(N);

$f_s$  ——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(6.2.5-1)计算;

$A$  ——管道横截面面积( $\text{m}^2$ );

$E$  ——管道材料的弹性模量(Pa),按本规范附录 C 选取;

$\Delta_L$  ——在外力作用下等效非线性弹簧的伸长量(m)。

**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如图 E.0.2-1 和图 E.0.2-2 所示,其参数可按下列公式计算:

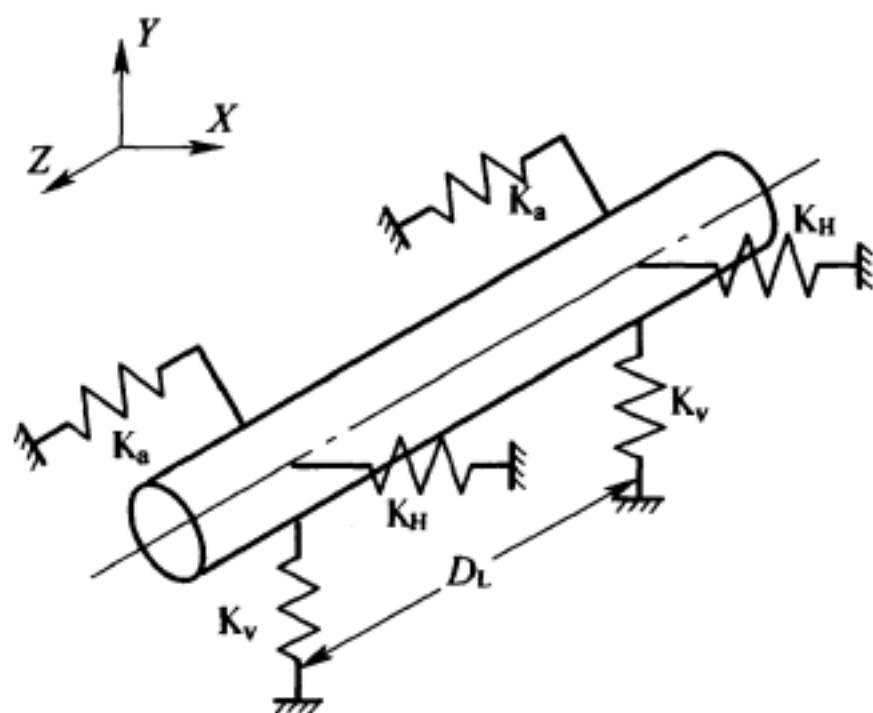


图 E.0.2-1 埋地管道的有限元模型

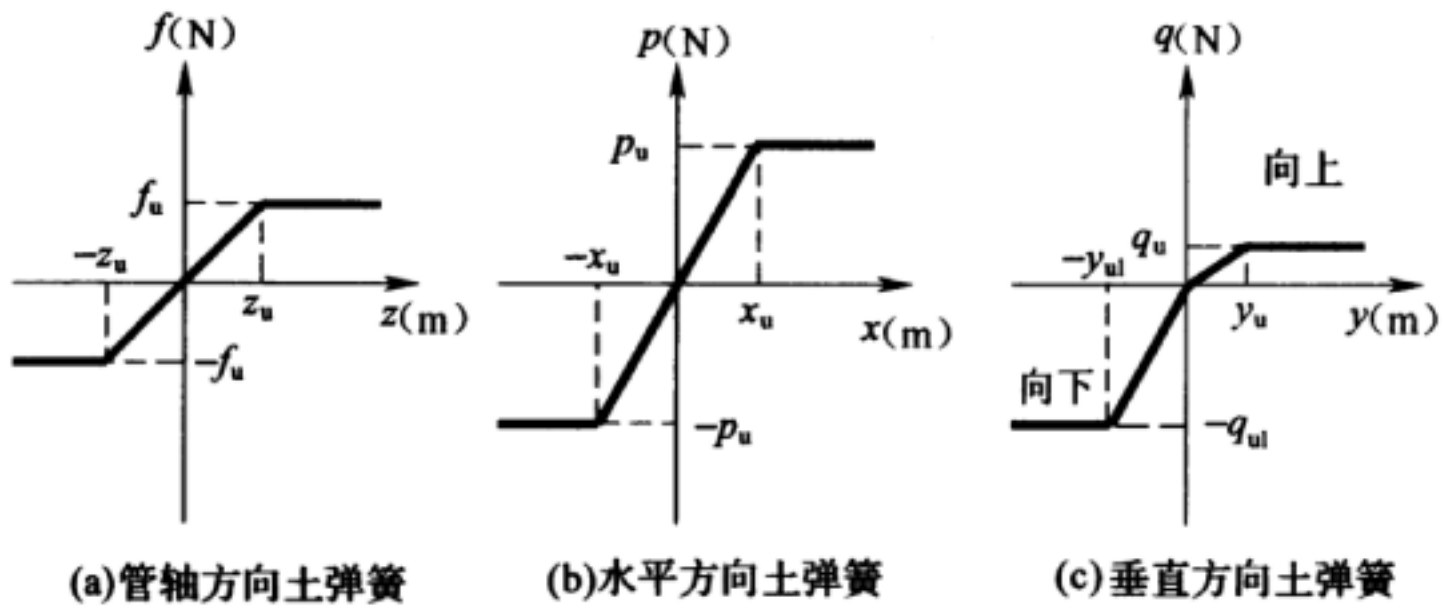


图 E.0.2-2 土弹簧的非线性模型(三个方向)

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)。

图 E.0.2-2(a)中管轴方向土弹簧的屈服位移  $Z_u$ , 对于密砂、松砂、硬黏土和软黏土分别取值 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:

$$P_u = (N_{ch}cD + N_{qh}\rho_{sl}gHD)D_L \quad (\text{E.0.2-2})$$

$$X_u = 0.04(H + D/2), \text{ 且应小于 } 0.10D \sim 0.15D \quad (\text{E.0.2-3})$$

$$N_{ch} = 6.752 + 0.065H/D - \frac{11.063}{(H/D + 1)^2} + \frac{7.119}{(H/D + 1)^3} \quad (\text{E.0.2-4})$$

$$N_{qh} = C_0 + C_1(H/D) + C_2(H/D)^2 + C_3(H/D)^3 + C_4(H/D)^4 \quad (\text{E.0.2-5})$$

式中:  $P_u$  ——埋设场地土沿水平横向对管道的压力(N);

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

$c$  ——土的黏聚力(kPa);

- $D$  ——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,当  $\phi = 0^\circ$  时,  $N_{qh} = 0$ ,  $\phi$  为土的内摩擦角( $^\circ$ );
- $\rho_{s1}$  ——管道周围场地土的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $H$  ——管道中心线的埋深(m);
- $X_u$  ——水平横向土弹簧的屈服位移(m)。

表 E.0.2  $N_{qh}$  的系数取值表

$\phi$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
$20^\circ$	2.399	0.439	-0.030	0.001059	-0.0000175
$25^\circ$	3.332	0.839	-0.090	0.005606	-0.0001319
$30^\circ$	4.565	1.234	-0.089	0.004275	-0.0000916
$35^\circ$	6.816	2.019	-0.146	0.007651	-0.0001683
$40^\circ$	10.959	1.783	0.045	-0.005425	-0.0001153
$45^\circ$	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 $K_v$ 应按下列公式计算:

#### 1) 垂直向上土弹簧应按下列公式计算:

$$q_u = (N_{cvu}cD + N_{qv u}\rho_{s1}gHD)D_L \quad (\text{E.0.2-6})$$

从密砂到松砂:  $Y_u = (0.01 \sim 0.02)H$ , 且应小于  $0.1D$   
(E.0.2-7)

从硬黏土到软黏土:  $Y_u = (0.1 \sim 0.2)H$ , 且应小于  $0.2D$   
(E.0.2-8)

$$N_{cvu} = 2(H/D) \quad (\text{E.0.2-9})$$

$$N_{qv u} = \tan(\phi)(\phi/44)(H/D) \quad (\text{E.0.2-10})$$

式中:  $q_u$  ——垂直向上土对管道的压力(N);

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

$N_{qv u}$  ——垂直向上与土体内摩擦角有关的计算参数,  $N_{qv u} \leq N_{qvd}$ ;

$Y_u$  ——垂直向上土弹簧的屈服位移(m)。

2)垂直向下土弹簧应按下列公式计算:

$$q_{ul} = (N_{cvd}cD + N_{qvd}\rho_{s1}gHD + N_r\rho_{s1}gD^2/2)D_L \quad (\text{E. 0. 2-11})$$

砂土:

$$Y_{ul} = 0.1D \quad (\text{E. 0. 2-12})$$

黏土:

$$Y_{ul} = 0.2D \quad (\text{E. 0. 2-13})$$

$$N_{cvd} = [\cot(\phi + 0.001)] \left\{ e^{\pi \tan(\phi + 0.001)} \left[ \tan\left(45 + \frac{\phi + 0.001}{2}\right) \right]^2 - 1 \right\} \quad (\text{E. 0. 2-14})$$

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

$$N_r = e^{0.18\phi - 2.5} \quad (\text{E. 0. 2-16})$$

式中:  $q_{ul}$  ——垂直向下土对管道的压力(N);

$N_{cvd}$  ——垂直向下考虑土体黏聚力的计算参数;

$N_{qvd}$  ——垂直向下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;

$Y_{ul}$  ——垂直向下土弹簧的屈服位移(m)。

## 附录 F 管道抗震施工检查报告表

### F.0.1 防滑坡工程检查报告(表 F.0.1)。

**表 F.0.1 防滑坡工程检查报告**

资料编号:F.0.1		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	挡墙外型尺寸		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			

**F.0.2 换填液化土施工报告(表 F.0.2)。**

**表 F.0.2 换填液化土施工报告**

资料编号:F.0.2	换填液化土施工报告	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:	
换填液化土 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		
粉土的黏粒 (小于 0.005mm)含量		
换填土截面尺寸		
换填土数量		
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:	现场代表:	
年 月 日	年 月 日	

**F.0.3 标准贯入试验记录(表 F.0.3)。**

**表 F.0.3 标准贯入试验记录**

资料编号:F.0.3		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:			现场代表:		
年 月 日			年 月 日		



**F.0.4 回填疏松砂土施工报告(表 F.0.4)。**

**表 F.0.4 回填疏松砂土施工报告**

资料编号:F.0.4	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:		现场代表:	
年 月 日		年 月 日	

**F.0.5 管道柔性接头、管道隔震部件安装记录(表 F.0.5)。**

**表 F.0.5 管道柔性接头、管道隔震部件安装记录**

资料编号:F.0.5		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:  年 月 日				现场代表:   年 月 日			

**F.0.6 通过活动断层的管道与断层交角记录(表 F.0.6)。**

**表 F.0.6 通过活动断层的管道与断层交角记录**

资料编号:F.0.6	通过活动断层的管道与断层交角记录				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位置和里程	断层的名称	断层两侧的场地类型	断层周围的地形情况	断层的方位角	管道的方位角	管道与断层交角
	管道的外径和壁厚	管道的埋设深度	管沟回填土的土性描述	管沟底部的宽度	管沟的深度	管沟的坡度
管沟断面示意图						
管道与断层相交情况示意图						
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			

## 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:

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:

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:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

**2** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《岩土工程勘察规范》GB 50021
- 《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》GB 50032
- 《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086
- 《铁路工程抗震设计规范》GB 50111
- 《构筑物抗震设计规范》GB 50191
- 《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202
- 《砌体结构工程施工质量验收规范》GB 50203
- 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
- 《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205
- 《输气管道工程设计规范》GB 50251
- 《输油管道工程设计规范》GB 50253
- 《建设工程文件归档规范》GB/T 50328
- 《建筑边坡工程技术规范》GB 50330
- 《油气长输管道工程施工及验收规范》GB 50369
- 《油气输送管道穿越工程施工规范》GB 50424
- 《油气输送管道跨越工程设计规范》GB 50459
- 《油气输送管道跨越工程施工规范》GB 50460
- 《油气田及管道岩土工程勘察规范》GB 50568
- 《金属熔化焊焊接接头射线照相》GB/T 3323
- 《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》GB/T 9711
- 《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》GB/T 11345
- 《中国地震动参数区划图》GB 18306
- 《公路工程抗震规范》JTG B02

《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02—01

《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65—05

《石油天然气钢质管道无损检测》SY/T 4109

《油气输送管道线路工程水工保护施工规范》SY/T 4126

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/T 50470 - 2017**

条文说明





## 编制说明

《油气输送管道线路工程抗震技术规范》GB/T 50470—2017 经住房和城乡建设部 2017 年 5 月 27 日以第 1580 号公告批准发布。

本规范是在《油气输送管道线路工程抗震技术规范》GB 50470—2008 的基础上修订而成,上一版的主编单位是中国石油天然气管道局,参编单位是中国海洋大学、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。主要起草人是: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。

本规范在修订过程中,编制组根据国内外管道抗震技术的最新成果,参照其他行业先进的抗震思想,结合近年来的科研成果和工程实践,对原版本进行了重新梳理,使之系统化,体现了具有管道特点的抗震理念和方法,同时兼顾与国家相关法律法规、标准规范的协调,如《中华人民共和国防震减灾法》、《中国地震动参数区划图》GB 18306、《工程场地地震安全性评价》GB 17741、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《输气管道工程设计规范》GB 50251、《输油管道工程设计规范》GB 50253 等。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定,《油气输送管道线路工程抗震技术规范》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明,对条

文规定的目的、依据以及执行过程中需注意的有关事项进行了说明。但是,本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

# 目 次

1	总 则 .....	( 81 )
2	术语和符号 .....	( 85 )
2.1	术 语 .....	( 85 )
3	基本规定 .....	( 89 )
4	抗震设防要求 .....	( 90 )
4.1	抗震设防标准 .....	( 90 )
4.2	地震安全性评价 .....	( 92 )
5	工程勘察及场地参数 .....	( 95 )
5.1	工程勘察 .....	( 95 )
5.2	场地类别和地震动参数调整 .....	( 97 )
6	管道抗震设计 .....	(100)
6.1	一般埋地管道抗震设计 .....	(100)
6.2	通过活动断层的埋地管道抗震设计 .....	(108)
6.3	液化区埋地管道抗震设计 .....	(129)
6.4	震陷区埋地管道抗震设计 .....	(130)
6.5	管道穿越工程抗震设计 .....	(130)
6.6	管道跨越工程抗震设计 .....	(134)
7	抗震措施 .....	(138)
7.1	通用抗震措施 .....	(138)
7.2	专项抗震措施 .....	(138)
8	管道抗震施工 .....	(143)
8.1	一般规定 .....	(143)
8.2	材料检查与验收 .....	(143)

8.3	管道焊接安装与试压 .....	(144)
8.4	埋地管道抗震施工 .....	(144)
8.5	穿跨越管道抗震施工 .....	(145)

# 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。我国是世界上地震灾害最重的国家之一,在我国国土上,每年都会会有多次六、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。在修订本规范时,不仅考虑了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:水域大中型穿跨越段、输气干线管道经过的四级地区,以及输油干线管道经过的人口密集区。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年限,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活动断层、液化区以及不良地质区段的抗震设计方法,以便保障这些薄弱环节的安全性。

**1.0.2** 根据《中华人民共和国防震减灾法》第三十五条的规定,新建、扩建和改建工程都要进行抗震设计,达到抗震设防要求。因此,规范的适用范围规定为陆上新建、扩建和改建工程。本规范中的油气管道线路工程与其他工程的界面执行现行国家标准《输气管道工程设计规范》GB 50251 和《输油管道工程设计规范》GB 50253 的规定。

原条文根据 GB18306 的设防参数范围、各组成部分的抗震动校核起始值要求,将适用范围限定在  $0.05g \sim 0.40g$ ,容易造成设

计者理解不一致,因为后续的校核方法、准则、抗震措施等与设防参数的获得没有直接相关,对于重大管线工程一般都有地震安全评价,即使超出 0.40g 也会在评价报告中给出各个管段的地震设防参数(即专项评价),只是对没有开展地震安全评价的项目才会有此限制,管道不同组成部分的抗震要求可以体现在相应部分的设计和校核、措施要求中。目前欧美、苏联的管道抗震指南或相关标准中均没有采用设防参数的取值范围作为标准的适用范围,故取消以设防参数的取值范围来限制规范的适用范围的规定。

**1.0.3 管道输送的主要特点有:**①管道输送的介质多为高压、易燃介质,一旦泄漏或破裂,往往导致重大的人员伤亡、环境破坏或财产损失;②管道输送介质为工业或民用的主要原料,与国民经济和社会生活紧密相关,需要震后尽快恢复功能;③管道为线性工程,可能经过各种地段,包括活动断层、其他地震地质灾害等区段,如滑坡、液化、震陷等,不仅要考虑地震动的作用,还要考虑地质灾害位移的作用;④管道为钢质材料,具有良好的强度和韧性,连接形式为焊接,抗震能力强;⑤管道大部分地段埋地敷设,局部通过结构提供敷设空间进行地面或架空敷设,不仅要考虑管道自身的抗震设计,还要考虑结构的抗震设计;⑥不同管段的失效后果不同,需要根据后果大小区分不同的管段,不同管段失效后维修成本相差很大,需要提高维修难度大的地段的设防要求。

地震对管道线路工程的作用分为直接作用和间接作用。直接作用为地震波的振动作用,间接作用为地震地质灾害引起的位移作用。根据以往的地震灾害分析结果,地震直接作用对不同地段、不同敷设方式的管道的响应不同。地震直接作用对埋地管道的响应小,而对地面或架空敷设的管道和结构的响应大;地震地质灾害位移作用的效果与之相反,位移作用对埋地管道破坏力大,而对地面或架空敷设的管道破坏力小。因此需要分类确定设防要求。

根据管道的特点以及震害分析可知,管道抗震设计的性能要求有两类:①震后基本不用维修就可以正常运行,继续使用;②不

要发生破裂,从而避免重大的次生灾害。

对于地表稳定的埋地管道,在基本地震动作用下应该避免发生类似墨西哥城地震的周期性局部屈曲,否则维修量大、投资高,因此管道在设计地震动作用下要达到基本不用维修就可以正常运行的性能要求。对于弯头由于应变集中,将发生较大变形,可能影响正常运行,但是不能发生破裂,考虑到埋地管道破裂会产生重大的次生灾害,因此要求进行罕遇地震动作用下的校核,并要求管道达到不破裂的性能要求。

对于通过活动断层、地震诱发的地面位移地段的埋地管道,由于地震动作用与位移作用一般不是同时的,而且在地震动作用下管道响应与在地面位移作用下的管道响应相比要小的多,所以只考虑位移作用。与稳定地段相比,地面位移地段相对较短,而且管道的变形大,如果要求不维修就可以正常运行,设防的技术难度大,需要增加大量的投资,因此要求不发生破裂,允许发生变形,并根据变形的情况适当修复后,管道很快就能恢复输送。对于活动断层中既有水平向又有竖向位移的情况,其设防位移分为水平向和竖向。任何一个方向或两个方向同时超出设防位移,都认为是超过设防位移。

对于用于支撑管道的结构,其抗震性能目标一般不低于管道,即在设计地震动作用下结构主体不发生损伤,附属结构可能发生损伤,但经过简单修复后就可以正常使用。对于跨越结构主体,如果发生倒塌,敷设在结构上的管道往往会发生破裂,后果严重,所以,要求跨越主体结构达到罕遇地震作用下不能倒塌的性能目标。

目前各种结构抗震设计的设防目标是以安全性能为主的,但是由于不同管道或管道构成部分的重要性、维修难度、失效后的财产损失均不相同,使用者可以根据需要提出基于使用的性能要求,为了体现管道或其构成部分的不同性能要求,本规范允许采用基于性能的抗震设计方法,以便明确其设防要求,并采用相应的设计和校核方法。基于性能的抗震设计理论是 20 世纪 90 年代由美国

科学家和工程师首先提出的,最早应用于桥梁抗震设计,并逐步应用于其他结构的抗震设计中,其基本思想是使被设计的结构在使用期间满足各种预定功能或性能目标要求。基于性能的抗震设计主要包括三个步骤:

(1)根据结构的用途、业主和使用者的特殊要求,采用投资-效益准则,明确结构的目标性能(可以是高出规范要求的“个性化”目标性能);

(2)根据以上目标性能,采用适当的结构体系、材料和设计方法等(而不仅仅限于规范规定的方法)进行结构设计;

(3)对设计出的结构进行性能评估,如果满足性能要求,则明确给出设计结构的实际性能水平,从而使业主和使用者了解(这是区别于目前常规设计的),否则返回第一步和业主共同调整目标性能,或直接返回第二步重新设计。

本规范允许采用基于性能的抗震设计旨在鼓励使用新材料、新结构体系以及新的设计方法,以不断推动管道抗震技术的发展。

**1.0.4** 为了防御和减轻地震灾害,保护人民生命和财产安全,国务院地震工作主管部门制定了全国地震动参数区划图,是管道抗震设计的重要依据,因此一般情况下应根据现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 规定的参数进行抗震设计和校核。但是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,而且该区划图是区域地震动参数的综合值,对于地震动作用敏感的大型跨越管段,或失效后果严重的管段,应进行地震安全性评价,并根据审定的评价结论进行抗震设计和校核。这样可以兼顾国家对工程场地地震安全性评价工作的规定,又可以体现距离很长的管线工程沿线场地不可能处处都做工程场地地震安全性评价工作的特点,达到安全和经济的目的。



## 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** 为了区分管道结构,进行了此定义。穿跨越工程结构不包括管道结构,其作用是支撑、保护管道,或为管道敷设提供空间,包括水域隧道的顶管结构和盾构结构、水下钻爆隧道衬砌结构、竖井结构;河流岸坡结构;山岭隧道衬砌结构,洞门、洞口边坡和仰坡;隧道或竖井内的管道支墩或支架;固定墩;跨越管桥等。

**2.1.3** 为了区分定向钻、开挖等直埋穿越管道,进行了此定义。定义中的隧道主要包括山体隧道、水下隧道、盾构隧道、顶管隧道,也包括穿越公路、铁路套管,穿越公路、铁路箱涵等。

**2.1.4** 对于输油管道而言,重要区段的划分主要考虑环境保护的要求。原油管道的泄漏会污染所经的河流、湖泊、水库等水域,在人口密集区则会破坏居住环境,并可能聚集在密闭空间中成为安全隐患,所以将这些区段划为重要区段。

对于输气管道而言,重要区段的划分主要考虑气体可能泄露或爆炸等安全因素。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,其中四级地区建筑为楼房、人口密集,交通频繁和地下设施多,容易发生事故,且后果严重,应划为重要区段。

对于输油和输气管道,水域大中型穿跨越工程具有事故后果严重、维护困难、修复工期长等特点,因此将其划为重要区段。原条文规定“经过河流、湖泊、水库设置的管道两端截断阀之间的输

油气干线管道区段”为重要区段,以提高其设防标准,降低其在地震工况下失效的概率,执行中存在两点问题:一是不能完全体现经过河流、湖泊、水库穿跨越工程的难度;二是容易扩大设防范围,因为无论是专门针对穿跨越设置的截断阀,还是按照线路设计规范设置的截断阀,河流、湖泊、水库的两端都会有截断阀,所以导致只要有河流、湖泊、水库穿跨越就是重要区段,但实际上有的穿跨越段长度很短(几公里),而截断阀之间的长度很长(几十公里)。本次修订中的油气管道穿跨越工程,统一执行现行国家标准《油气输送管道穿越工程设计规范》GB 50423 和《油气输送管道跨越工程设计规范》GB 50459 的规定。上述规范将河流、湖泊、水库均称为水域,此外,水域还包括沼泽、水塘、养殖塘、水渠等,并对水域穿跨越工程进行等级划分,工程等级划分标准中考虑了穿跨越对象的重要性、工程实施难度等属性,其中大中型穿跨越工程指的是水文条件复杂、工程实施困难、运行维护难度大的情况,与抗震设计考虑管道失效后果严重程度的思想是一致的,而且在管道行业内已有共识,便于执行。

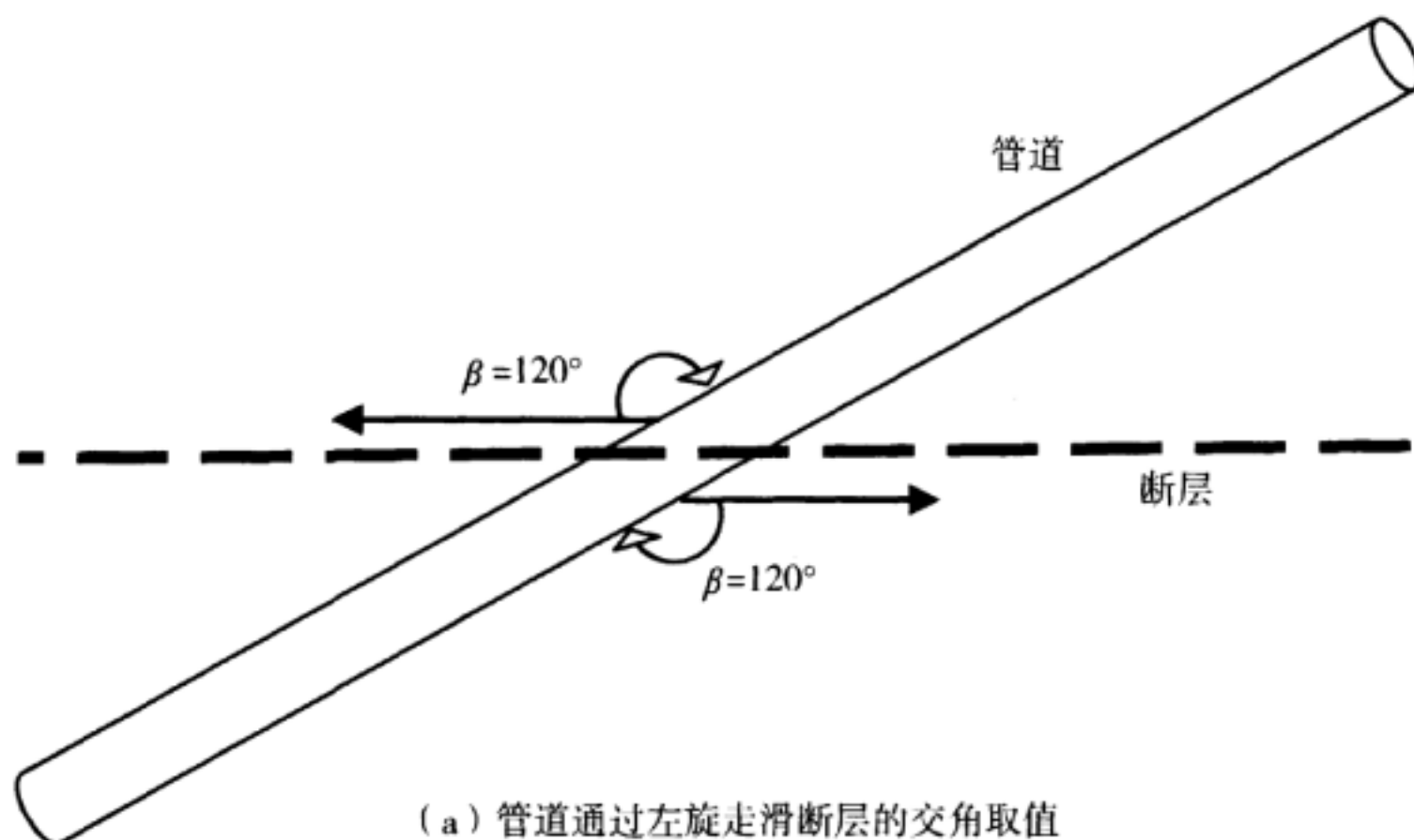
原来定义中的“人口密集区设置的两端截断阀室之间的输油气干线管道区段”,包含了输气管道四级地区,有重复部分,所以为了更加明确,将油气管道分开描述。阀室是根据场地的具体情况执行设计规范设置的,局部人口密集区两侧不一定都有阀室,按原来定义将扩大设防范围,本次修订取消阀室的限制,允许根据场地的具体情况确定重要设防区段。

**2.1.6 管道抗震设计中的活动断层**目前的共识为全新世以来发生过活动的断层。为了与现行国家标准《工程场地地震安全性评价》GB 17741 的规定一致,将地质年代延伸到晚第四纪。将活动断层的年代扩展到晚第四纪,提高了抗震水准,有利于管道安全,由此增加的活动断层的数量有限,经济上可以承受,所以本次进行了修订,并在术语中增加了此定义,给予强调。另外,应注意的是活动断层只是设防的前提之一,活动断层对工程的影响还需要专

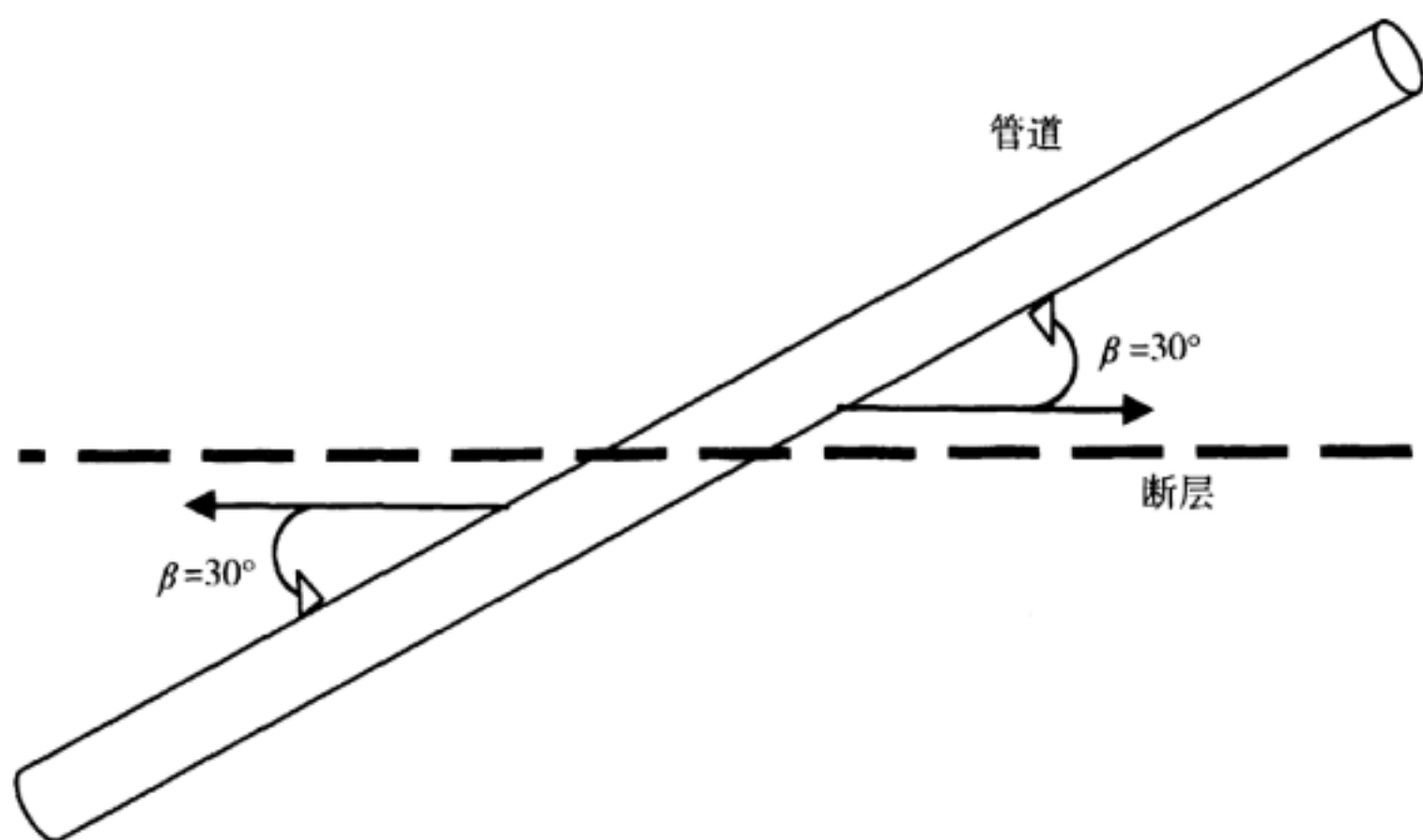
业人员评价,以明确在工程使用年限内是否会继续活动,如果会继续活动,则应该设防;如果不会继续活动,则不用设防。

**2.1.8~2.1.10** 为了方便描述,并与设防标准对应,修订了原来术语第 2.1.5 条,将其分为第 2.1.8 条和第 2.1.9 条,新增第 2.1.10 条和第 2.1.11 条。

**2.1.12** 管道与断层交角是穿越活动断层管道抗震设计中很重要的概念。为了充分利用钢管的良好抗拉伸能力,在设计中应根据断层的活动性质调整管道与断层的交角,使管道处于拉伸状态。断层的类型可以分为正断层、逆断层和走滑断层。正断层和逆断层主要是以竖直方向位错方式为主;走滑断层以水平方向位错方式为主。以走滑断层为例,根据断层的位错方式又可分为左旋走滑断层和右旋走滑断层。如图 1 所示,管道以相同的方式通过某断层,如果该断层为左旋走滑断层,如图 1(a)所示,管道受压,管道与断层的交角应该为  $120^\circ$ ;如果该断层为右旋走滑断层,如图 1(b)所示,管道受拉,管道与断层的交角则应该为  $30^\circ$ 。



(a) 管道通过左旋走滑断层的交角取值



(b) 管道通过右旋走滑断层的交角取值

图 1 管道通过走滑断层的交角取值

## 3 基本规定

**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《中国地震动参数区划图》GB 18306 附录 A 的规定,或者取自某工程的《工程场地地震安全性评价报告》的审定结果,将审定的结论摘抄下来等。

**3.0.6** 根据震后管道事故调查结果,地震对埋地管道的破坏主要是由地表位移引起的,其中通过活动断层段的破坏尤为严重,故这里强调对于穿越活动断层要按规范要求设计。当管道与活动断层并行时,应考虑断层破裂对其的影响,由于断层地表破裂的范围与地震级别、覆盖土层厚度、断层活动类型等因素有关,所以应根据具体情况确定并行距离,将管道布置在其破裂影响范围外,以避免断层破裂引起管道的破坏。

**3.0.7** 由于软土的范围很广,不同类型的软土的地震响应也有所差异,而本条强调的是受地震影响较大的软土,所以规定对震陷软土应尽量避让,如避让不了,应缩短通过距离。

## 4 抗震设防要求

### 4.1 抗震设防标准

**4.1.1** 抗震设防标准的确定需要兼顾安全与造价,参考国内外管道以及其他建(构)筑物的设防标准,本次修订的设防标准采用两个水准。第一水准:一般区段的设防标准延续上版规范规定的 50 年超越概率 10%,即按基本地震动参数进行抗震设计,并满足震后能正常使用的性能要求。重要区段需要适当提高设防标准,该设防标准延续上版规范规定的 50 年超越概率 5%。50 年超越概率 5%对应的地震动加速度和速度,根据国家地震局最新的研究成果确定,约为 1.3 倍的 50 年超越概率 10%的地震动加速度和速度。第二水准:所有区段的埋地管道都要按 50 年超越概率 2%的水准进行校核,即在罕遇地震动参数作用下管道不破裂。这与日本油气管道抗震设计的做法是一致的,1995 年日本阪神地震之后,日本管道协会对规范进行了修订,将埋地油气管道按照两级地震动水平设计,其第二级地震动水平 GML2 规定为直接发生在管道场地的 M6.8 地震,相当于阪神地震那种情况。欧美国家针对重要建(构)筑物,如核电站管道、海洋平台等,也都按两个水准进行校核。应该注意的是,对于基本地震动峰值加速度  $0.40g$  的区段,现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 没有进一步划分,所以必须进行地震安全性评价以获得可靠的设计和校核地震动参数。

上版规范规定重要区段中的大型跨越和埋深小于 30m 的大型穿越的设防标准采用 50 年超越概率 2%,其设防目标是不破裂。本次修订规定重要区段的管道设防标准采用 50 年超越概率 10%的水准设计,50 年超越概率 5%的地震动峰值加速度计算地

震作用,其设防目标是可继续使用;50年超越概率2%的水准校核,其设防目标是不破裂。上版规范采用的设计标准与本次修订的校核水准,以及设防目标完全一致。因此,本次修订的设防标准延续了上版规范,而且更加完备。

**4.1.2** 穿跨越工程结构的抗震设防标准一般不低于管道,其设防标准规定为50年超越概率10%。对于大型穿跨越结构,考虑到投资高、震后修复困难,所以必须进一步提高其抗震设防的水准,按50年超越概率5%的地震动加速度计算地震作用,约为1.3倍的基本地震动峰值加速度。穿跨越结构大部分设置在重要的江河、水域或冲沟地段,这些特殊部位的结构发生破坏可能危及管道,特别是大型跨越主体结构,因此要求穿跨越结构提高等级来采取抗震措施,同时要求大型跨越主体结构进行防倒塌校核,即使发生罕遇地震水准的地震,结构不发生倒塌。由于穿跨越结构抗震设计参考的是建筑、公路、铁路等类似工程的标准,而这些标准的适用范围为0.40g,故规定当基本地震动峰值加速度大于0.40g时应专题研究。

**4.1.3** 本条规定了穿越或并行活动断层的要求。

**1** 本款依据的是国内研究资料的主要结论:当地震动峰值加速度为0.10g~0.30g且地表土层厚度至基岩土大于或等于60m或地震动峰值加速度大于0.30g且地表土层厚度至基岩大于或等于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,将不会对地表管道设施产生破坏,故可以不用设防。

**2** 本款考虑到需要设防的活动断层短则几公里,长则几十至几百公里。当发生地震时,每处的地表破裂情况并不相同。在设计时一般都会有一定的地质资料基础上合理选择通过位置,所以一般地段的设防位移取预测的平均位移,但是对于重要区段,考虑到事故后果严重,所以提高设防标准,采用预测的最大位移进行设防。

**3** 本款是参考现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011

中应避开主断裂带距离的规定制定的。考虑到管道抗震性能明显优于建筑结构,按相当于丙类建筑规定距离的一半选用。受地形地质条件限制,确实难以满足时,应对断层进行详细勘察,明确破裂范围后减小距离。根据以往的震后调查,断层破裂范围一般在20m以内,所以规定不应小于20m。由于跨越结构是随着线路布置的,其与断层的距离一般执行线路的规定,但考虑到跨越结构的抗震性能相比管道要低一些,所以在有条件时,应适当加大距离。

## 4.2 地震安全性评价

**4.2.1** 本条是依据现行国家标准《工程场地地震安全性评价》GB 17741 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,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,类似于地震安全性评价Ⅰ级工作中的能动断层鉴定。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 $0.10g$ 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是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: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进行评估,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,如地震地质灾害图上所表示的砂土液化、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。

地震安全性评价工作宜在可行性阶段进行,可为管道线路选线和抗震设防提供科学依据,也为初步设计提供决策依据,同时为项目进行社会和经济效益分析提供基础依据。

**4.2.2** 对于需要设防的活动断层应评价活动断层对所建设管道的影 响,并按照本条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。要求给出第 1 款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,当勘察选址时可考虑不通过此地段,若避让不开,则为设计提供了采取 措施的依据。第 2 款要求给出断层与管道交汇的位置和交角,或断层与管道的并行距离,因断层位移的大小和断裂带宽度在处于一条断层上时并不相同,且断层线附近地表运动十分复杂,形成宽度不一的错乱地带,因而应明确断层位移和断裂带宽度,设计选线时可通过影响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。正确选择断层与管道的夹角,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。要求给出第 3 款内容的目的是,当明确了断层的覆盖土层厚度,将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黏聚力、内摩擦角和平均剪切波速,是因为当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。当给出第 4 款后,即断层的地表最大、平均水平和竖向位错量以及错动方向,根据本规范的第 6.2 节,经过分析计算可以得到管道在断层位移引起的管道拉伸应变、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,为管道跨断层的抗震设防和采取相应的抗震措施提供基础依据。应注意,根据设防标准要求,本次修订增加了明确断层平均位错量的要求。

原条文第 1 款是设防的前提,本次修订放在第 4.1.3 条中。

## 5 工程勘察及场地参数

### 5.1 工程勘察

**5.1.1** 为满足设计需要,对于管道线路场地应在初步勘察和详细勘察阶段开展地震及地震效应、活动断层的勘察评价工作,其工作深度和精度可按勘察阶段逐步加深。一般可研阶段项目将进行地震安全评价工作,勘察可依据此资料及搜集其他相关资料,必要时开展工程地质测绘和调查、遥感解译等工作进行地震及地震效应、活动断层的评价;初步勘察阶段应根据前期成果资料,开展工程地质测绘与调查工作,必要时采用勘探手段验证;详细勘察阶段应在前期工作成果基础上视情况开展勘探和测试工作,精度应满足抗震设计的要求。

**5.1.2、5.1.3** 这两条规定了管道线路段地震及地震效应、岩土剪切波速和场地类别的勘察方法和要求。对于一般区段的管道线路段可通过资料分析、现场调查或适当的钻探工作,即可基本确定岩土的剪切波速和场地类别;对于重要区段可进一步通过勘探手段查明。第5.1.3条规定的勘探点间距与现行国家标准《油气田及管道岩土工程勘察规范》GB 50568 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考虑的。

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,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(崩塌、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。勘察时应调查和收集各

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。

**5.1.4** 地震地质灾害是指在地震作用下地质体变形或破坏所引起的次生地质灾害。地震地质灾害类型主要有地基土液化、软土震陷、崩塌、滑坡、地裂缝、地面塌陷和泥石流等。管道线路通过地段如果有可能发生地震地质灾害,应按基本地震动参数进行地基和地质灾害体的稳定性验算,并评价其对管道线路工程的影响。

**5.1.5** 关于管道沿线地基土液化判别,是引用现行国家标准《油气田及管道岩土工程勘察规范》GB 50568 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。在斜坡地段,还应根据液化层的空间位置,如埋深、厚度、沿管道的长度、坡度,以及覆土类型等参数,判定是否发生侧向位移,给出预测的位移量。

**5.1.6** 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,当满足表 1 中任一条件时,也可不考虑震陷影响,否则应明确其影响。

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)	等效剪切 波速(m/s)
$0.20g$	$\geq 80$	$\leq 10$	$\geq 120$
$0.30g$	$\geq 100$	$\leq 6$	$\geq 140$
$0.40g$	$\geq 120$	$\leq 2$	$\geq 150$

**5.1.7** 本条规定了活动断层勘察内容及要求。

根据国内外已发生的地震破坏情况统计分析资料,地震地表破裂带宽度在活动断层两侧一般不超过 500m,地表破裂带宽度主

要取决于震级、断层性质和覆盖层厚度等因素,一般正断层和走滑断层的破裂带宽度较小,逆推断层破裂带宽度较大,覆盖层厚度越大,地表破裂带宽度越小,所以本规范规定管道线路段活动断裂勘察范围不小于 500m。

活动断层所在场地的工程地质测绘和调查内容除按现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 相关内容执行外,还应包括:

(1)地形地貌特征: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。

(2)地质特征:近期断裂活动留下的第四系错动,地下水和植被特征;断裂带的破碎和胶结特征;断裂最新的活动时代等。

(3)地震特征: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。

## 5.2 场地类别和地震动参数调整

**5.2.1** 表 5.2.1 引自现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011—2010 中的表 4.1.6。本条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。

当有可靠的剪切波速和覆盖层厚度,且其值处于表 5.2.1 所列场地类别的分界线附近时(指相差 15% 的范围),可按插值方法确定地震作用计算所需的设计特征周期  $T_g$  值。图 2 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  $d_{ov}$  和等效剪切波速  $V_{sc}$  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。

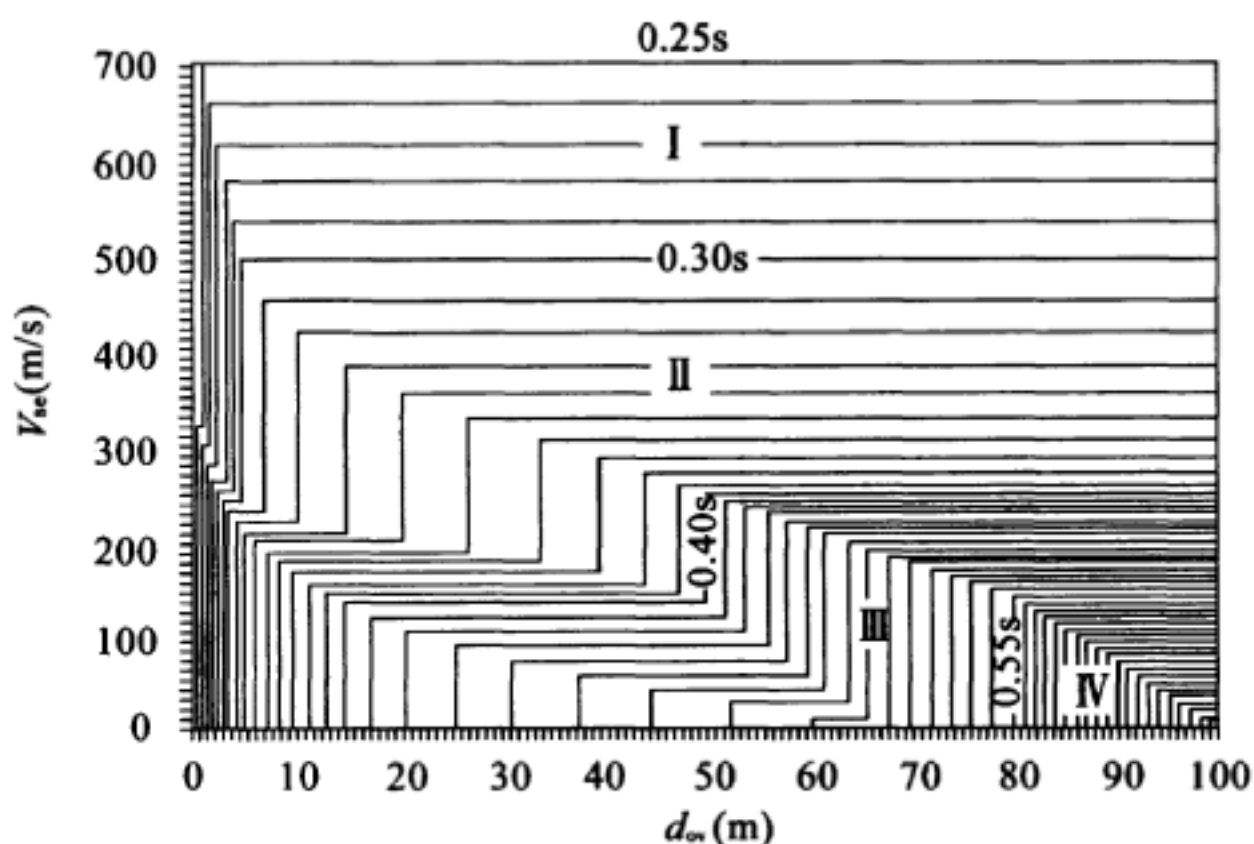


图 2 在  $d_{ov}$ - $V_{sc}$  平面上的  $T_g$  等值线图

注：用于设计特征周期一区，图中相邻  $T_g$  等值线的差值均为 0.01s。

**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；对于其他地段，无条件实测剪切波速且无法收集到邻近地点实测数据时，可根据岩土名称和性状按表 5.2.2 估算剪切波速。参照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 相关内容，修订了表 5.2.2 的内容。

**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均大于 500m/s，则覆盖层厚度按地面至该层顶面的距离确定，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有物理意义的等效剪切波速的公式计算，即：

$$V_{si} = \frac{d_0}{t} \quad (1)$$

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)。

**5.2.5** 场地的地震动参数与场地类型、设防标准等有关，需要根据现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 的规定对各类场地和设防标准下的场地地震动参数进行调整。

## 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震动抗拉伸和抗压缩的验算。

**6.1.2、6.1.3** 这两条对应变组合和容许值做出规定。

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 $\epsilon_{\max}$ 应与操作条件下(内压、温差)引起的管道轴向应变 $\epsilon_a$ 组合。

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整体屈服破坏、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,弹性整体屈曲不可能产生。另外,脆性破坏需要有龟裂或有裂纹缺欠或在钢管脆转温度以下才能发生,通过控制钢管质量和施工焊接质量,可予以避免。

疲劳破坏是材料在循环荷载作用累积损伤的结果。材料抗疲劳破坏能力通常采用循环荷载的幅值与循环次数的关系来体现。当应力或应变幅较小时,材料处于弹性状态,累积损伤小,可以抵抗循环次数多,其疲劳破坏往往要经  $10^7$  次以上的反复作用才能



发生；而当应力或应变幅较大时，材料进入塑性状态，每次循环都有较大的累积损伤，很多就会导致破坏。

地震荷载是典型的循环荷载，但是作用过程是短期的，日本根据 19 次强烈地震记录得到的振动反复次数为 10 次~100 次。为了保证在设防地震下管道能正常服役，要求不能有较大的累积损伤，所以地震导致的应变应在屈服强度对应的应变范围以内，而对于罕遇地震，管道可能发生较大的应变，甚至超出屈服应变，所以为了保证管道不发生破裂，需要根据地震的循环次数来控制应变幅值。应变幅与循环次数的关系采用 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 3 所示。

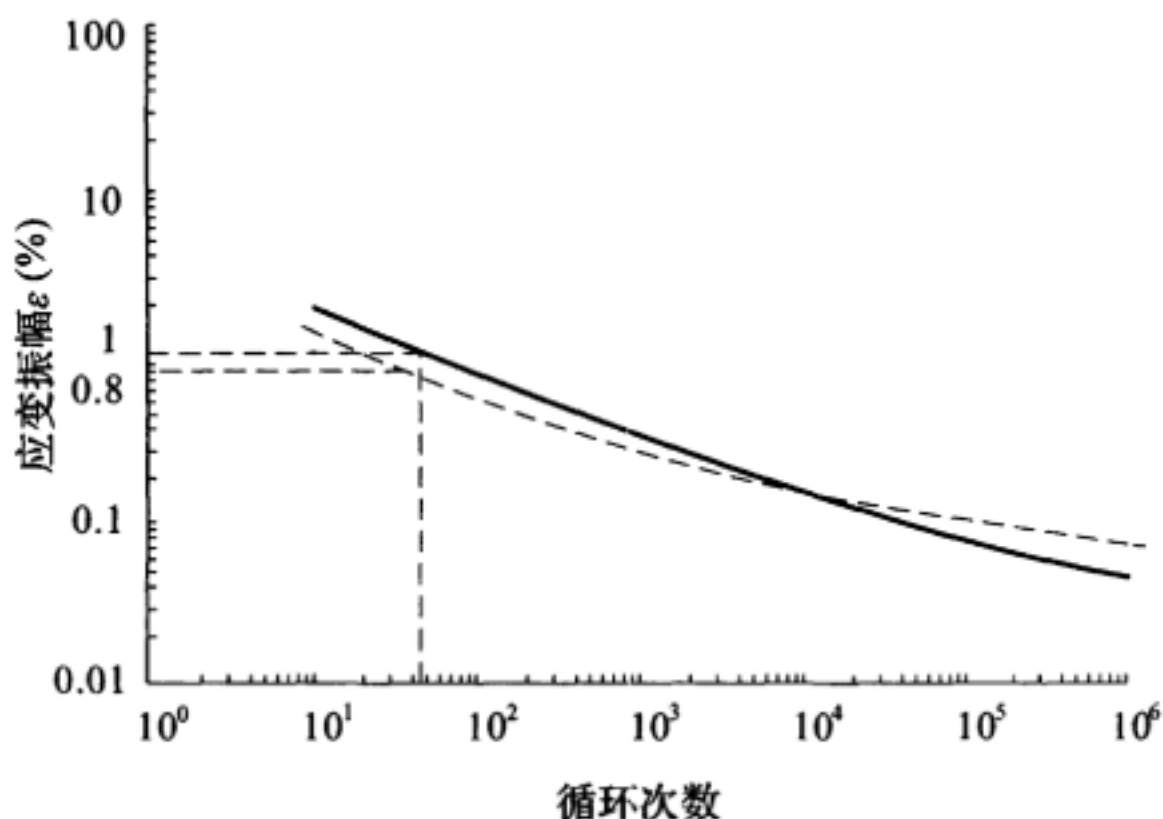


图 3 设计疲劳曲线

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 次~50 次的应变值为管段在地震中的容许应变，见式(2)：

$$[\epsilon_t]_v = 0.8\% \sim 1.0\% \quad (2)$$

原来规范采用极限抗拉强度来选取容许应变，为了使用方便，本次修订采用管标和 API 5L 标准的钢级来对应。

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,当发生罕遇地震时,在管子的局部区域可能产生轴向压缩屈曲。因此,对直管段管道还应该进行局部屈曲校核。压缩屈曲开始的应变如式(3)所示:

$$\epsilon_c = \frac{4}{3} \sqrt{n_1} \frac{\delta}{D} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_c$ ——压缩屈曲应变;

$n_1$ ——应变强化参数,L450(X65)及以下钢级取 0.11,L485(X70)及以上钢级取 0.09;

$\delta$ ——管道壁厚(m);

$D$ ——管道外径(m)。

安全系数采用 1.25 时,压缩屈曲的容许应变值见式(4):

$$[\epsilon_c]_v = \begin{cases} 0.35 \times \frac{\delta}{D} & \text{L450(X65) 及以下钢级} \\ 0.32 \times \frac{\delta}{D} & \text{L485(X70)、L555(X80) 和 L625(X90) 钢级} \end{cases} \quad (4)$$

在设防地震下,为了满足正常服役的要求,直管段管道必须避免发生上述的局部屈服,故需要在式(4)的基础上提高安全系数,即式(4)的值乘以 0.8 来确定容许应变值。

埋地弯头在地震作用下,除了承受与直管段管道一样的荷载外,还要承受附加弯矩的作用,应变更大,可能发生局部屈曲,从而影响正常运行,但是不能发生破裂,其容许应变值与罕遇地震的容许应变值相同。

**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,然后按照这三种波产生的应力组合综合考虑;第三种观点认为虽然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,但是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,因为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”。

不管是哪种地震波,在计算管道应变时都要考虑地震动参数的大小以及场地的类型,有的场地地震波衰减快,周期短;有的场地地震波衰减慢,周期长;有的场地会明显放大地震动参数。此外,还要考虑管土作用,当管道周围土壤对管道约束强时,会带动管道一起振动;而土壤约束弱时,土体与管道会发生滑移,管道变形滞后土体变形。为了简化计算,国内外学者做出了如下的假定:

(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)当地震动作用时,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,当地震动通过土壤时,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,其波动方程见式(5):

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

式中:  $A$  ——地震波的振幅(m);

$t$  ——时间(s);

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

$x$  ——地震波传播方向的位移(m);

$L$  ——地震波的波长(m)。

倾斜的剪切波对管道轴线方向波动的影响如图 4 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  $w$ ,分别见式(6)和式(7):

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

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

式中: $\phi$  ——剪切波传播方向与管道轴线的夹角( $^\circ$ );

$x'$  ——倾斜剪切波带动管道波动在管轴方向上的位移(m)。

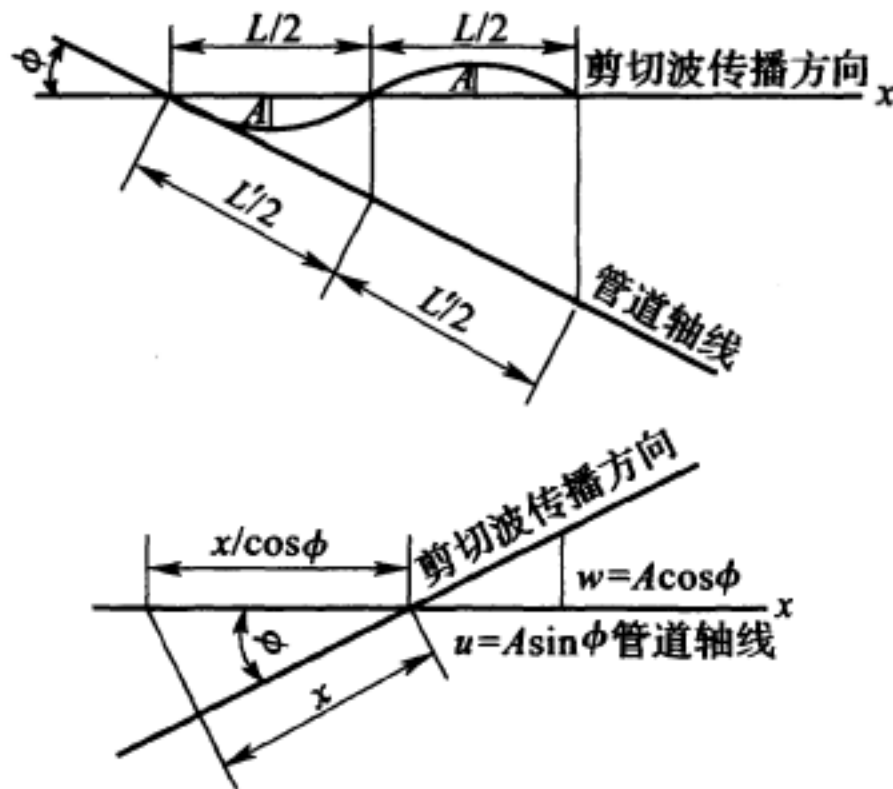


图 4 倾斜的剪切波对管道轴线方向波动的影响

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。管道轴线方向应变见式(8):

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

管道最大轴线方向应变见式(9):

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

$$L = CT \quad (10)$$

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

式中:  $C$ ——地震波的传播速度(m/s),取场地剪切波速;

$a$ ——地震动峰值加速度( $m^2/s$ )。

将式(10)和式(11)代入式(9)得:

$$\epsilon_{\max} = \pm \frac{aT}{4\pi C} \quad (12)$$

其他更多关于地震波作用下直管道的响应可参见科学出版社出版的《生命线工程抗震-基础理论及应用》和 ASCE 出版的 *Seismic design of pipeline systems*。

按照上述同步变形假设,对于变形较小的地震动,结果与实际基本吻合,但是变形较大时,计算结果过于保守,因此为了更加切合实际,鼓励采用其他合理的计算模型,但是必须经过充分论证。

**6.1.5** 该条适用于地下直埋刚性弯头在地震波作用下的最大轴向应变的计算。

本条所采用分析方法是由 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。本条中计算公式采用的基本假设包括:①管道敷设在均匀土质的场地上,管道与土体间相互作用满足弹性地基梁假设;②弯管视为理想刚体节点,可传递弯管两侧管道内力,但忽略弯管本身的几何形状及变形;③地震波动沿纵向支管方向传播,弯管角度为  $90^\circ$ ,且两侧支管具有足够长度(大于  $\frac{3\pi}{4\lambda}$ ,  $\lambda$  是模量系数);④在远离弯管位置,管道与土体同步变形,无相对滑动,在纵向支管虚拟锚固点附近土体与管道应变取极值  $\epsilon_{\max}$ 。

主要推导过程如下:

图 5 为地震动作用下弯管附近管道受力简图。 $L$  为摩擦力  $t_u$  作用在纵向支管上的有效长度,  $\Delta S$  为  $L$  长度范围内土体的变形量,  $\Delta P$  为  $L$  长度范围内管道的拉伸长度,  $\Delta$  为弯管的相对位移挠度,  $S_1$  为弯管处横向支管的剪力, 也是纵向支管在弯管处的轴力,  $S_2$  为弯管处纵向支管的剪力, 也是横向支管在弯管处的轴向力,  $M$  为弯管处的弯矩。

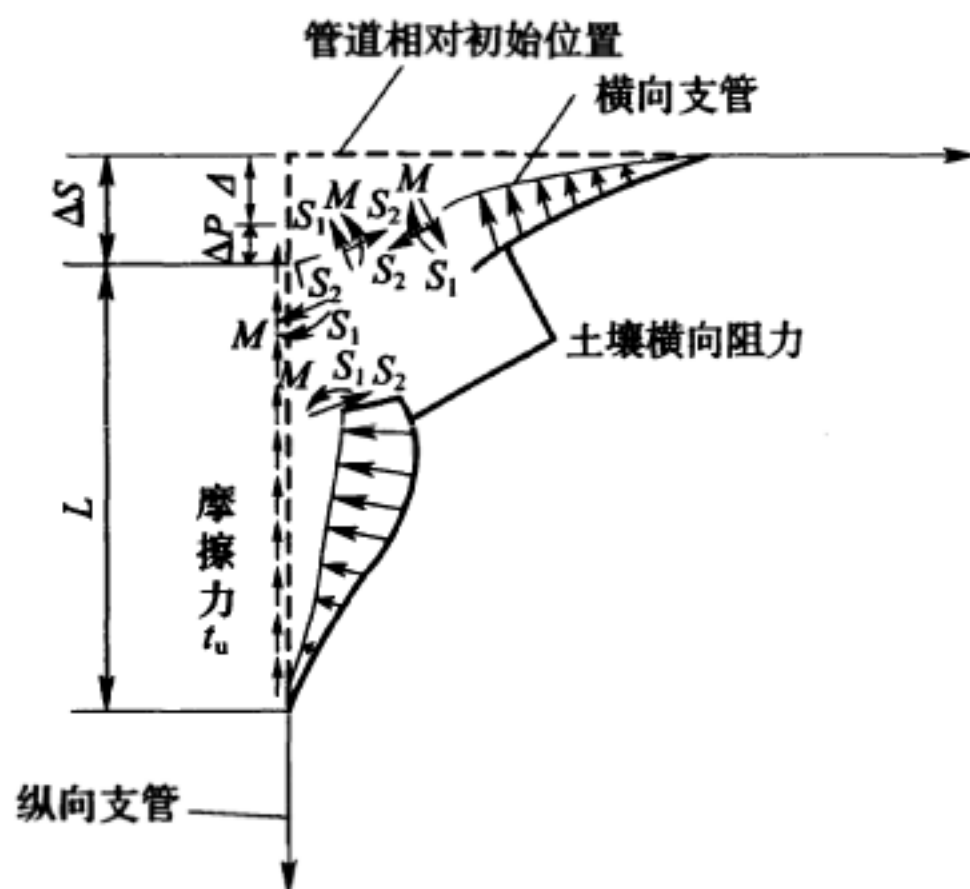


图 5 弯管附近管道受力简图

根据纵向支管受力平衡条件, 存在关系式(13):

$$S_1 = \epsilon_{\max} AE - t_u L \quad (13)$$

根据纵向支管变形和土体变形的几何关系, 存在关系式(14):

$$\Delta = \Delta S - \Delta P \quad (14)$$

其中:

$$\Delta S = \epsilon_{\max} L \quad (15)$$

$$\Delta P = \frac{S_1 L}{EA} + \frac{t_u L^2}{2EA} \quad (16)$$

根据弹性地基梁理论, 该弯管结构中挠度  $\Delta$  与轴力  $S_1$  之间存在关系式(17):

$$\Delta = \frac{S_1}{3EI\lambda^3} \quad (17)$$

联立方程(13)、(14)和(17),可得过渡段长度  $L$ :

$$L = \frac{4AE\lambda}{3K_s} \left( \sqrt{1 + \frac{3K_s \epsilon_{\max}}{2t_u \lambda}} - 1 \right) \quad (18)$$

以下对关系式(17)进行简要论证。

首先,假设横向支管在弯管处与纵向支管断开,弯管处管道的挠度为  $\Delta$ ,转角为  $\phi$ ,对于横向支管,根据半无限长弹性地基梁理论,横向支管管端处的弯矩和剪力应为:

$$M = 2EI\lambda^2 \Delta + 2EI\lambda \phi \quad (19)$$

$$S_1 = 4EI\lambda^3 \Delta + 2EI\lambda^2 \phi \quad (20)$$

对于纵向支管,弯管处管道横向挠度相对于横向支管挠度  $\Delta$  为高阶小量,忽略不计,弯管处管道转角为  $\phi$ ,同样根据半无限长弹性地基梁理论,纵向支管管端处弯矩应为:

$$M = -2EI\lambda \phi \quad (21)$$

联立公式(19)和公式(21)可得挠度  $\Delta$  与转角  $\phi$  之间的关系:

$$\phi = -\frac{\lambda}{2} \Delta \quad (22)$$

将公式(22)代入公式(20)可得:

$$S_1 = 3EI\lambda^3 \Delta \quad (23)$$

即关系式(17)。

联立公式(21)、(22)、(23)得:

$$M = \frac{S_1}{3\lambda} \quad (24)$$

弯头处的应变为纵向支管的轴向力  $S_1$  和弯矩  $M$  产生的应变之和。

纵向支管的轴向力  $S_1$  产生的应变  $\epsilon_n$  根据公式(13)的两边同时除以  $AE$  得:

$$\epsilon_n = \epsilon_{\max} - \frac{t_u L}{AE} \quad (25)$$

弯矩  $M$  产生的应变  $\epsilon_m$ , 根据公式(24)得到:

$$\epsilon_m = \frac{MD}{2IE} = \frac{S_1 D}{6\lambda IE} = \frac{\epsilon_n AED}{6\lambda IE} = \frac{\epsilon_n AD}{6\lambda I} \quad (26)$$

由上述分析可知, 本条计算方法不能反映的一些因素包括: ①将弯管假设为节点, 不能反映弯管几何尺寸对校核结果的影响, 包括不同的曲率半径、弯管壁厚等; ②将弯管假设为刚体, 不能反映弯管柔性影响, 包括制管椭圆度及弯曲椭圆化等; ③假设弯管角度为  $90^\circ$ , 不能反映角度对校核结果的影响。

尽管本计算方法存在上述诸多不能反映的因素, 目前规范中仍推荐此方法, 主要原因如下:

(1) 相对而言, 该计算方法所需的输入信息较少, 而计算结果总体上偏于保守, 从简单实用的角度考虑, 推荐此方法。保守的原因是分析中输入的最大应变  $\epsilon_{\max}$  为地震波作用下管道可能产生的最大应变, 实际管道与土体相对滑动情况下, 其应变值会大幅降低; 分析中未考虑弯管柔性, 实际弯管柔性的存在会大幅降低弯管附近应力应变水平。当弯管的角度不是  $90^\circ$  时, 有些弯管角度的计算应变水平可能有所增高, 但考虑到上述的保守因素, 总体而言此方法还是偏保守。

(2) Goodling 在随后的修正方法中考虑了弯管的柔性、椭圆化等影响因素, 可以更精确反映地震波作用下弯管的力学响应, 但相对而言计算步骤更加复杂。如要综合考虑弯管的几何尺寸、弯管柔性、两支管道长度、管道内压、材料塑性等因素的影响, 则必须采用数值分析方法才能解决, 设计者可以根据需要选用合适的分析方法。

(3) 在具体的设计过程中, 可以将本方法作为地震波作用下弯管受力的初步条件。当计算结果满足规范要求时, 可以不再进一步核算。如果计算结果不能满足规范要求, 或者某工程对弯管分析提出更高的精确要求, 可考虑采用其他分析方法。

## 6.2 通过活动断层的埋地管道抗震设计

### 6.2.1 本条要求对通过活动断层管道进行断层位移作用下的验



算,以满足不破裂的性能要求,避免发生重大安全事故。由于在断层位移作用下,管道的应变较大,往往都会超出屈服应变(0.5%),所以应采用应变设计方法。

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,如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,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105km,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,是抗震设计的重点内容之一。

### 6.2.2 本条规定了应变验算需要的基础资料。

应变设计是在位移控制为主或部分以位移控制为主的状态下,为了保证管道在塑性变形下(应变大于0.5%)能够满足特定目标而进行的设计,适合于强震区、活动断裂带、砂土液化引起的

侧向位移、采空沉陷区、冻土地区等地段。

应变设计的准则是当管道计算应变大于容许应变时,失效;管道计算应变小于容许应变时,安全。

在进行管道应变计算中,涉及地层变形预测模型、管土作用模型、材料强化能力等方面。在确定管道容许中,要考虑管材的性能(屈强比、硬化指数、均匀延伸率等)、管道的几何尺寸( $D/t$ 、椭圆度、壁厚公差等)、焊接接头性能(高强匹配)、焊缝容许缺欠大小(CTOD、宽板拉伸试验等)、温度引起的应变时效等方面。总的来说,需要4个方面的基础资料:

1 管材的性能参数,其中应力-应变曲线是材料强化能力的体现,会影响计算应变和容许应变的确定,所以予以强调。附录C是根据国内已建管道的管材统计数据,在上个版本的基础上进行完善和补充的结果,可参考使用。

2 断层位移参数,其准确性直接影响计算应变的大小,是应变验算的重要输入。国内的做法是依据地震安全评价的结论,所以要求按第4.2.2条的内容提供给设计人员计算。

3 防腐层参数,防腐层的表面粗糙程度会影响计算应变,其涂敷条件会影响管材性能,同时在容许应变下涂层要适应,不能发生龟裂、剥离等不良效果,因此,在计算中要明确防腐层类型及其涂敷条件,以及性能要求。

4 焊接接头性能参数,焊接接头的几何尺寸、强度、韧性、缺欠大小都会影响管道容许应变的确定,所以在验算前必须明确。

**6.2.3** 本条规定了通过活动断层的管道抗震计算应符合的规定。

断层位移作用下管道会产生拉伸或压缩。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。为了均衡管道的拉伸和压缩应变,需要调整管道与断层交角。埋地管道与断层交角一般应小于 $90^\circ$ 。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,可按第6.2.5条

对通过活动断层的管道进行抗震计算。由于第 6.2.5 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或等于  $0.30g$  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。

#### 6.2.4 本条规定了管道容许应变的计算要求。

1 本款规定延续上一版的计算模型,来源于 CSA Z662—2007 标准。尽管目前 ExxonMobile 和 CRES 都提出了新的计算模型,ExxonMobile 模型验证试验的结果一直没有公开,无法评估其适用性,CRES 模型验证试验较少,其中错边、壁厚等影响拉伸应变的主要因素没有通过试验验证,所以本版规范没有采纳,仍然采用上版的模型,但是与这些新的模型相比,上版模型明显趋于保守,所以针对无内压工况下安全系数取 0.9,并将原来对模型的条文说明放入附录 D 中。

2 压缩极限应变计算模型来源于 CRES 于 IPC2014 公布的模型。该模型通过数值模拟,考虑了更多的影响压缩应变的参数,并根据收集到的公开发表的实物弯曲试验结果 61 组进行验证。实物试验的参数范围:管径从 168mm 到 1219mm,壁厚从 3.2mm 到 23.7mm,压力从 0MPa 到 17.2MPa,钢级从 X52 到 X100,基本能涵盖目前的设计工况。为了比较常用 Alberta 大学 Dorey 模型、CRES 模型、CSA Z662—07 版模型以及上一版国标的模型,编写组根据上述同样的试验参数,采用 4 种模型计算极限应变,并采用不同的安全系数来确定容许应变,其结果如图 6 所示。

从图 6 可得,上一版规范给出的容许应变保守程度最大,其次是 CSA Z662—07 标准的结果。Dorey 模型和 CRES 模型预测的趋势基本是一致的,Dorey 模型的离散都相对大一些,为了保证预测结果都小于实物试验的结果,需要更大的安全系数。因此,最后选用 CRES 模型计算极限应变,并取安全系数 0.6。

压缩容许应变常用公式对比-所有数据

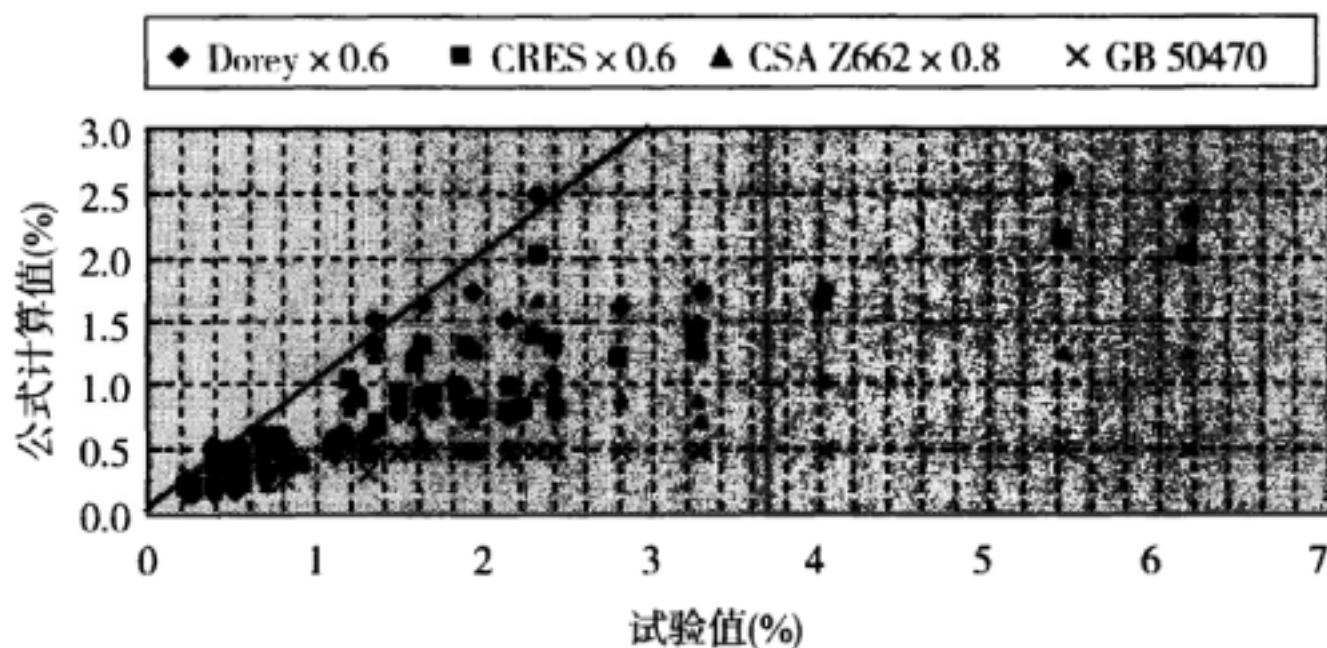


图 6 常用压缩容许应变确定模型与实物试验结果的对比情况

**6.2.5** 本条通过活动断层的管道抗震计算的方法延续了上版规范的方法,即采用 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,但是进行了两个方面的修订:①管道校核的方式由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,改为直接比较由断层错动引起的管道最大应变与管材的容许应变,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泊松

应力的代数和；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。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做纵向运动，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 由于断层运动使管道相对周围土壤做纵向位移运动，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 7(a) 所示，为方便计算，通常按图 7(b) 简化。

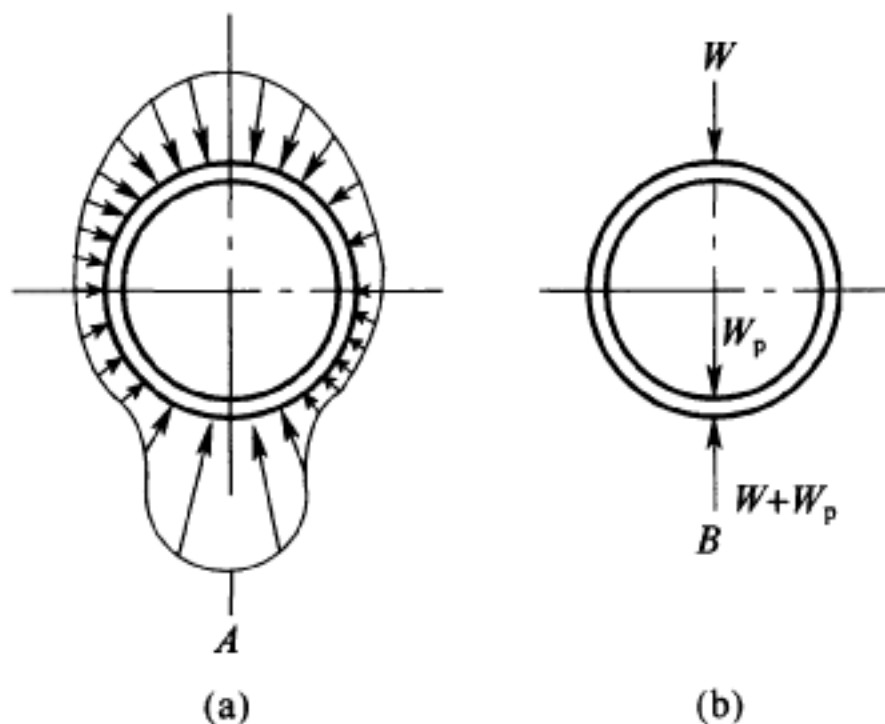


图 7 土压力分布及简化计算图

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计算：

$$f_s = \mu(2W + W_p) \quad (27)$$

为简化计算,式(27)可写为如下形式:

$$f_s = \mu \left[ 2\rho_s DH + \pi(D - \delta)\delta\rho_m + \frac{\pi}{4} (D - 2\delta)^2 \rho \right] g \quad (28)$$

式中:  $f_s$ ——纵向摩擦力(N/m);

$\mu$ ——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);

$\rho_s$ ——土壤的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$D$ ——管道外径(m);

$H$ ——管道中心线埋深(m);

$\delta$ ——管道壁厚(m);

$\rho_m$ ——管道材料的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho$ ——管内介质的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$g$ ——重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ )。

2 设走滑断层运动如图 8 所示,管道与断层间的夹角为  $\beta$ , 断层的水平错动总位移为  $\Delta H$ , 将其分解为两个分量。

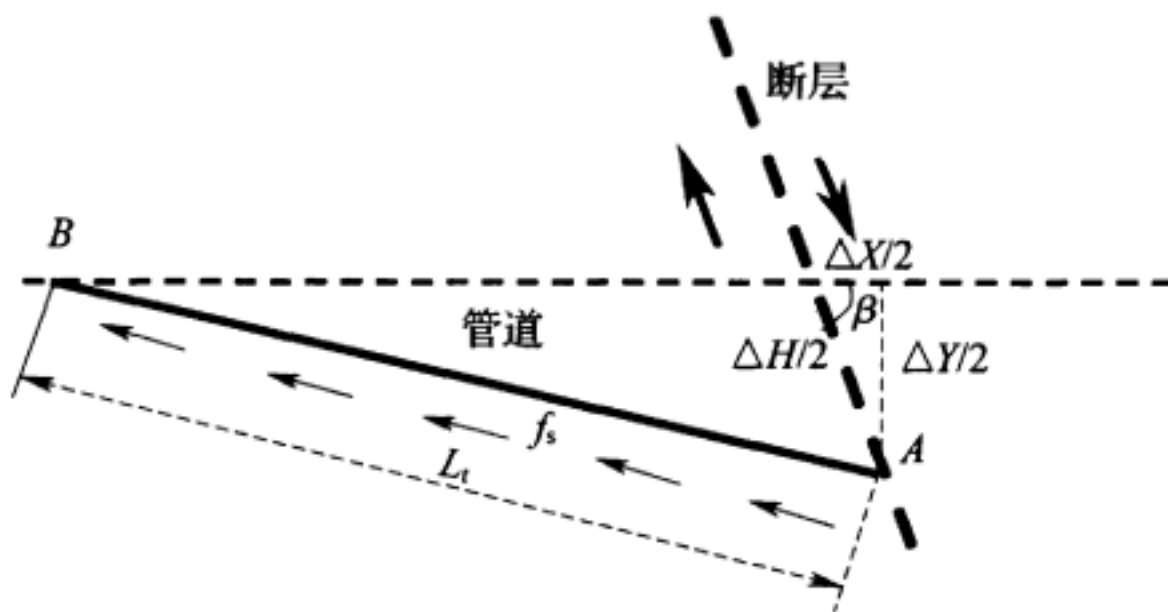


图 8 断层位移对管道的影响

平行于管轴线的位移分量:

$$\Delta X = \Delta H \cos \beta \quad (29)$$

垂直于管轴线的位移分量：

$$\Delta Y = \Delta H \sin \beta \quad (30)$$

$\Delta X$  使管子产生轴向应变，平均应变量为：

$$\epsilon_a = \frac{\Delta X}{2L_1} \quad (31)$$

式中： $L_1$ ——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  $\Delta Y$  和  $\Delta Z$ ，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近似为：

$$\epsilon_b \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta Y}{2L_1} \right)^2 \quad (32)$$

过渡段管子总的平均轴向应变为：

$$\epsilon_{\text{总}} = \frac{\Delta X}{2L_1} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta Y}{2L_1} \right)^2 \quad (33)$$

由于断层错动引起管道的长度变化为：

$$\Delta L_1 = \epsilon_{\text{总}} \times 2L_1 = \Delta X + \frac{\Delta Y^2}{4L_1} \quad (34)$$

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

$$\sigma_{\text{new}} = \begin{cases} E_1 \epsilon_{\text{new}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ E_1 \epsilon_1 + E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1) & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases} \quad (35)$$

由管道的力学平衡方程  $f_s L_1 = \sigma_{\text{new}} A = \sigma_{\text{new}} \pi D \delta$ ，可以得到计算断层错动引起的管道几何伸长  $\Delta L_1$  的公式：

$$\Delta L_1 = \begin{cases} \Delta X + \frac{\Delta Y^2 f_s}{4\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ \Delta X + \frac{\Delta Y^2 f_s}{4\pi D \delta [E_1 \epsilon_1 + E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1)]} & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases} \quad (36)$$

3 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：

$$\Delta L_2 = 2 \times L_t \times \frac{\epsilon_{\text{new}}}{2} = \frac{\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}^2}{f_s} \quad (37)$$

假设 A 点管道内的应变  $\epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1$ , 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:

$$\begin{aligned} \Delta L_2 &= 2 \times \left[ L_{t-\text{弹性}} \times \frac{\epsilon_1}{2} + L_{t-\text{弹塑性}} \times \frac{(\epsilon_{\text{new}} + \epsilon_1)}{2} \right] \\ &= \frac{\pi D \delta E_1 \epsilon_1^2}{f_s} + \frac{\pi D \delta E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1) (\epsilon_{\text{new}} + \epsilon_1)}{f_s} \end{aligned} \quad (38)$$

**6.2.6** 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、弯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外径。

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小于 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,可以参照本规范埋地管道通过活动断层带的抗震计算例题进行初步确定,宜根据土的力学特性通过现场试验确定。随着计算机技术的发展,目前越来越多的学者采用实体单元来模拟土壤,并通过接触单元与管体作用,这样能体现土弹簧模型无法模拟的管土脱离等问题,所以规范鼓励采用别的土壤模型,但是在使用前,必须经过充分的验证。

内压对管道的计算应变和容许应变都有影响。相对于有内压工况,当无内压时,计算的管道拉伸应变减小、压缩应变会增大;与之相反,当有内压时,计算的管道拉伸应变增大、压缩应变会减小。在容许应变上,有无内压,其计算值明显不同,所以要求分别对有、无内压两种工况都进行验算。

例:一条材料为进口钢材 X60 的  $529 \times 6$  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  $2.062\text{m}$ ),管道与断层错动方向的交角为  $\beta = 30^\circ$ ,如图 9 所示。管顶至地表的埋深为  $2\text{m}$ ,设计压力为  $6.4\text{MPa}$ 。断层带覆盖土层为密实的干黏土,土的密度  $\rho_s = 1800\text{kg}/\text{m}^3$ ,内摩擦角  $\phi = 20^\circ$ ;黏聚力  $c = 10\text{kPa}$ 。

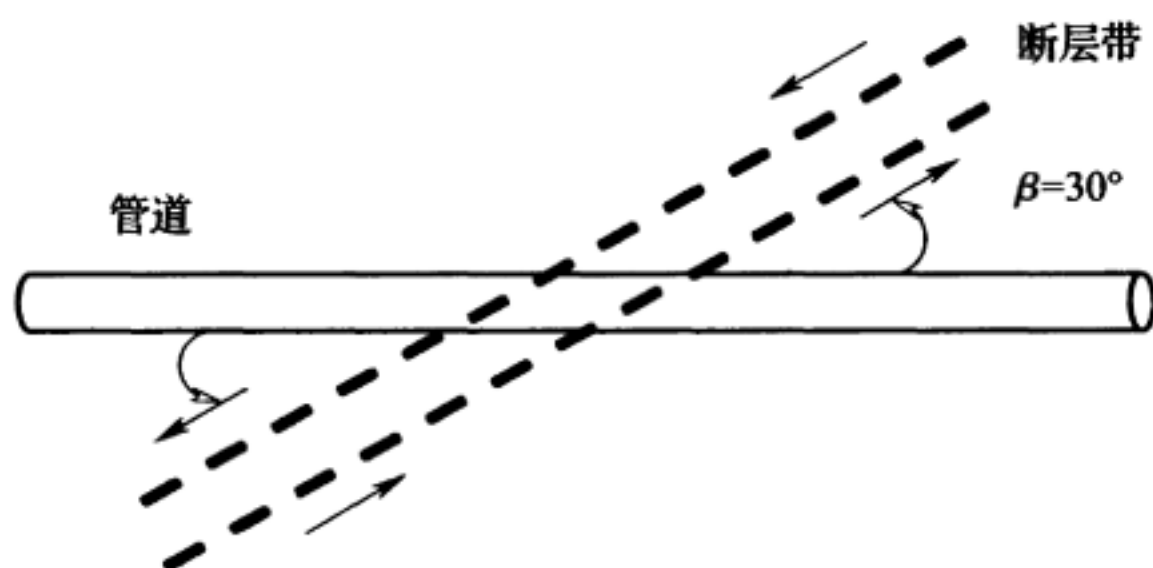


图 9 断层带与管道在平面上的相对位置

1) 管材的性能指标满足下列要求:

屈服强度: 大于 415MPa, 小于 535MPa;

屈强比: 不大于 0.85;

均匀延伸率: 不小于 10%;

应力-应变曲线: 圆顶形。

2) 管道外防腐层为 3PE。

3) 采用半自动焊工艺, 要求环焊缝高强匹配, 环焊缝采用 100% 射线检测, 验收标准执行现行行业标准《石油天然气钢质管道无损检测》SY/T 4109 规定的 II 级。

计算该管道是否需要抗震加固, 并分别采用本规范第 6.2.5 条和第 6.2.6 条两种方法进行验算。

(1) 管道容许应变的确定。

1) 拉伸容许应变。

环焊缝常见的缺欠类型有未焊透、未熔合、夹渣、气孔、裂纹、咬边、内凹、烧穿等。根据 SY/T 4109 的射线 II 级, 不允许裂纹和外表面未熔合, 所以表面缺欠可能是根部未焊透、咬边和内凹等, 内部缺欠可能是层间未焊透、层间未熔合、气孔、夹渣等。一般表面缺欠比内部缺欠更危险, 本例子只考虑表面缺欠。查射线 II 级标准, 单个表面缺欠的长度要求小于 25mm。由于射线检测体现不出缺欠高度, 所以根据焊道厚度估计, 对于 6mm 壁厚, 其焊道厚度不会超过 2.5mm, 所以在确定拉伸容许应变时, 按表面缺欠 25mm×2.5mm 计算。

环焊缝的表观韧性最好采用 CTOD 试验结果确定, 本例子按 CVN 要求确定, 要求环焊缝的 CVN 值平均不小于 60J, 单值不小于 45J, 所以确定的表观韧性不小于 0.267mm。

将上述参数代入附录 D 的公式(D.0.1-1)中, 计算得到的极限拉伸应变为 0.745%, 所以无内压工况的容许应变为 0.67% (0.745%×0.9), 有内压工况的容许应变为 0.52% (0.745%×0.7)。

2) 压缩容许应变。

①设计压力工况：

$$f_p = \frac{PD}{2\delta\sigma_y} = \frac{6.4 \times 529}{2 \times 6 \times 415} = 0.68$$

$$f_{pc} = 1.8 \times 10^{-4} \times \left(\frac{D}{\delta}\right)^{1.6} = 1.8 \times 10^{-4} \times \left(\frac{529}{6}\right)^{1.6} = 0.23$$

因为  $f_p > f_{pc}$ ，所以

$$\begin{aligned} F_{DP} &= 980 \times (1.06f_p + 0.5) \left(\frac{D}{\delta}\right)^{-1.6} \\ &= 980 \times (1.06 \times 0.68 + 0.5) \times \left(\frac{529}{6}\right)^{-1.6} = 0.92 \end{aligned}$$

$$F_{YT} = 2.7 - 2.0\lambda_T = 2.7 - 2.0 \times 0.85 = 0.70$$

由于没有管体波浪度要求，所以采用规范推荐值，即  $\max(0.13\%D, 8\%\delta)$ ， $h_g$  取 0.69，

$$f_g = \frac{h_g}{\delta} = \frac{0.69}{6} = 0.70$$

$$F_{GI} = 1.84 - 1.6f_g^{0.2} = 1.84 - 1.6 \times 0.70^{0.2} = 0.80$$

为了保守估计，不考虑轴向应力的调整系数，即  $F_{NF} = 1$

$$\epsilon_r = F_{DP} \cdot F_{YT} \cdot F_{GI} \cdot F_{NF} = 0.92 \times 0.70 \times 0.80 \times 1.00 = 0.52\%$$

由于应力-应变曲线为圆顶形，所以  $F_{LD} = 1.00$

$$\begin{aligned} \text{极限压缩应变 } \epsilon_c^{\text{crit}} &= \min(\epsilon_u, F_{LD} \times \epsilon_r) \\ &= \min(10, 1.00 \times 0.52) = 0.52\% \end{aligned}$$

$$\text{压缩容许应变} = 0.6 \times 0.52 = 0.31\%$$

②无内压工况：

$$f_p = \frac{PD}{2\delta\sigma_y} = \frac{0 \times 529}{2 \times 6 \times 415} = 0.00$$

$$f_{pc} = 1.8 \times 10^{-4} \times \left(\frac{D}{\delta}\right)^{1.6} = 1.8 \times 10^{-4} \times \left(\frac{529}{6}\right)^{1.6} = 0.23$$

因为  $f_p < f_{pc}$ ，所以

$$\begin{aligned} F_{DP} &= 980 \times \left[ 0.5 \left(\frac{D}{\delta}\right)^{-1.6} + 1.9 \times 10^{-4} \right] \\ &= 980 \times \left[ 0.5 \times \left(\frac{529}{6}\right)^{-1.6} + 1.9 \times 10^{-4} \right] = 0.56 \end{aligned}$$

其他调整系数与设计内压工况相同,所以,

$$\epsilon_r = F_{DP} \cdot F_{YT} \cdot F_{GI} \cdot F_{NF} = 0.56 \times 0.70 \times 0.80 \times 1.00 = 0.31\%$$

由于应力-应变曲线为圆顶形,所以  $F_{LD} = 1.00$

$$\begin{aligned} \text{极限压缩应变 } \epsilon_c^{\text{crit}} &= \min(\epsilon_u, F_{LD} \times \epsilon_r) \\ &= \min(10, 1.00 \times 0.31) = 0.31\% \end{aligned}$$

$$\text{压缩容许应变} = 0.6 \times 0.31 = 0.19\%$$

(2)按本规范第 6.2.5 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  $\Delta L_1$  :

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

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

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

查附录 C 的表 C.0.3 得 X60 的  $E_1 = 2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$ ,  $E_2 = 1.611 \times 10^9 \text{Pa}$ ,  $\epsilon_1 = 0.0022$

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &= \begin{cases} \Delta X + \frac{(\Delta Y^2 + \Delta Z^2) f_s}{4\pi D \delta E_1 \epsilon_{\text{new}}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ \Delta X + \frac{(\Delta Y^2 + \Delta Z^2) f_s}{4\pi D \delta [E_1 \epsilon_1 + E_2 (\epsilon_{\text{new}} - \epsilon_1)]} & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases} \\ &= \begin{cases} 1.732 + \frac{(1^2 + 0.5^2) \times 24115}{4\pi \times 0.529 \times 0.006 \times 2.1 \times 10^{11} \times \epsilon_{\text{new}}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ 1.732 + [(1^2 + 0.5^2) \times 24115] / \{4\pi \times 0.529 \times 0.006 \times \\ [2.1 \times 10^{11} \times 0.0022 + 1.611 \times 10^9 \times (\epsilon_{\text{new}} - 0.0022)]\} & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases} \end{aligned}$$

3)管道内轴向应变引起的物理伸长  $\Delta L_2$  :

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

$$= \begin{cases} \frac{\pi \times 0.529 \times 0.006 \times 2.1 \times 10^{11} \times \epsilon_{\text{new}}^2}{24115} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ \{\pi \times 0.529 \times 0.006 \times [2.1 \times 10^{11} \times 0.0022^2 + 1.611 \times 10^9 \times (\epsilon_{\text{new}}^2 - 0.0022^2)]\} / 24115 & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases}$$

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  $\epsilon_{\text{new}}$  可采用迭代法求解变形协调方程  $\Delta L_1 = \Delta L_2$  得到:

$$\begin{cases} 86835 \times \epsilon_{\text{new}}^2 = 1.732 + \frac{3.599 \times 10^{-6}}{\epsilon_{\text{new}}} & \epsilon_{\text{new}} \leq \epsilon_1 \\ 666.148 \times \epsilon_{\text{new}}^2 + 0.417 = 1.732 + (3.014 \times 10^4) / (1.829 \times 10^7 + 6.426 \times 10^7 \times \epsilon_{\text{new}}) & \epsilon_{\text{new}} > \epsilon_1 \end{cases}$$

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  $\epsilon_{\text{new}} = 0.0445$ 。

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:

$$\epsilon_{\text{max}} = 2 \times \epsilon_{\text{new}} = 0.0890$$

6) 结论:

因为  $\epsilon_{\text{max}} > [\epsilon_t]_F$  (按无内压容许拉伸应变, 为 0.0067), 故需要采取抗震措施。

(3) 按本规范第 6.2.6 条的有限元方法。

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的参数, 包括场地的平均密度、黏聚力和内摩擦角等, 因此需要对管道穿越的断层附近进行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。对于无黏性土(砂土), 黏聚力  $c=0\text{kPa}$ , 内摩擦角  $\phi=20^\circ \sim 45^\circ$  (从松砂到密砂); 对于黏土, 黏聚力  $c=10\text{kPa} \sim 100\text{kPa}$  甚至更高, 内摩擦角  $\phi=0^\circ \sim 30^\circ$ 。

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 10 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,这里以此题为例,介绍如何使用这些公式。

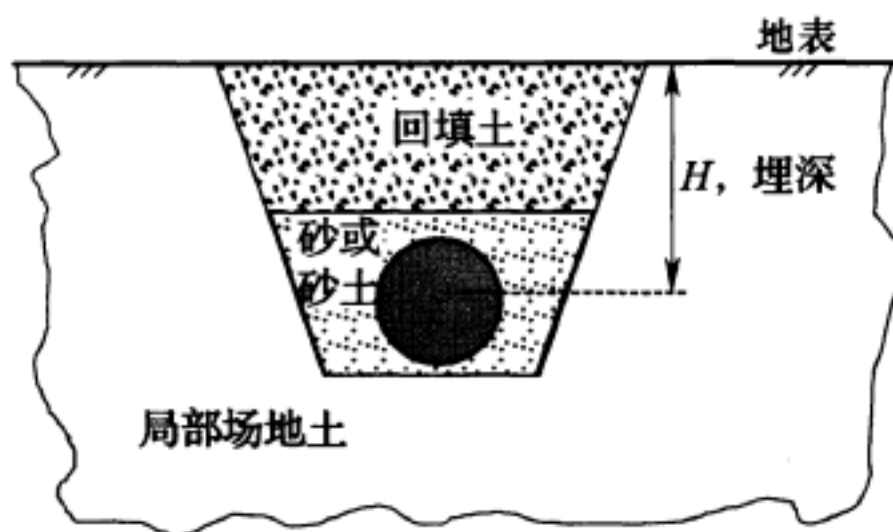


图 10 埋地管道的横向剖面图

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(6.2.5-1)计算,与上文相同:

$$f_s = \mu(2W + W_p) = 2.4115 \times 10^4 \text{ (N/m)}$$

由第 E.0.2 条第 1 款的规定得到密实干黏土的屈服位移  $Z_u = 0.008\text{m}$ 。

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:

$$\begin{aligned} N_{qh} &= C_0 + C_1 (H/D) + C_2 (H/D)^2 + C_3 (H/D)^3 + C_4 (H/D)^4 \\ &= 2.399 + 0.439 \left(\frac{H}{D}\right) - 0.03 \left(\frac{H}{D}\right)^2 + 1.059 \times 10^{-3} \left(\frac{H}{D}\right)^3 \\ &\quad - 0.175 \times 10^{-4} \left(\frac{H}{D}\right)^4 = 3.684 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_u &= N_{ch}cD + N_{qh}\rho_{sl}gHD \\ &= 6.759 \times 10 \times 10^3 \times 0.529 + 3.684 \times 1800 \times 9.81 \times 2 \times 0.529 \\ &= 1.036 \times 10^5 \text{ (N/m)} \end{aligned}$$

由式(E. 0. 2-3)计算水平横向土弹簧的屈服位移:

$$X_u = 0.04(H + D/2), \text{ 且应小于 } 0.125D, \text{ 得 } X_u = 0.066\text{m}.$$

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:

$$\begin{aligned} N_{cv} &= 2(H/D) = 7.561 \\ N_{qv} &= \tan[\phi(\phi/44)(H/D)] \\ &= \tan[20 \times (20/44) \times (2/0.529)] = 0.625 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_u &= N_{cv}cD + N_{qv}\rho_{sl}gHD \\ &= 7.561 \times 10 \times 10^3 \times 0.529 + 0.625 \times 1800 \times 9.81 \times 2 \times 0.529 \\ &= 5.165 \times 10^4 \text{ (N/m)} \end{aligned}$$

由式(E. 0. 2-8)计算垂直向上土弹簧的屈服位移:

$$Y_u = 0.15H, \text{ 且应小于 } 0.2D, \text{ 得 } Y_u = 0.11\text{m}.$$

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:

$$\begin{aligned} N_c &= [\cot(\phi + 0.001)] \left\{ e^{\pi \tan(\phi + 0.001)} \left[ \tan\left(45 + \frac{\phi + 0.001}{2}\right) \right]^2 - 1 \right\} \\ &= 14.8 \end{aligned}$$

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

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

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

$$\begin{aligned}
&= 14.8 \times 10^4 \times 0.529 + 6.4 \times 1800 \times 9.81 \times 2 \times \\
&\quad 0.529 + 3 \times 1800 \times 9.81 \times \frac{0.529^2}{2} \\
&= 2.055 \times 10^5 \text{ (N/m)}
\end{aligned}$$

由式(E.0.2-12)计算垂直向下土弹簧的屈服位移:

$$Y_{u1} = 0.2D = 0.106\text{m}$$

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)	$f_s = 2.4115 \times 10^4$	$P_u = 1.036 \times 10^5$	$q_u = 5.165 \times 10^4$	$q_{u1} = 2.055 \times 10^5$
屈服位移(m)	$Z_u = 0.008$	$X_u = 0.066$	$Y_u = 0.11$	$Y_{u1} = 0.106$

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,但是能够更好地模拟管道作为一个中空薄壳结构的实际情况,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 11 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。

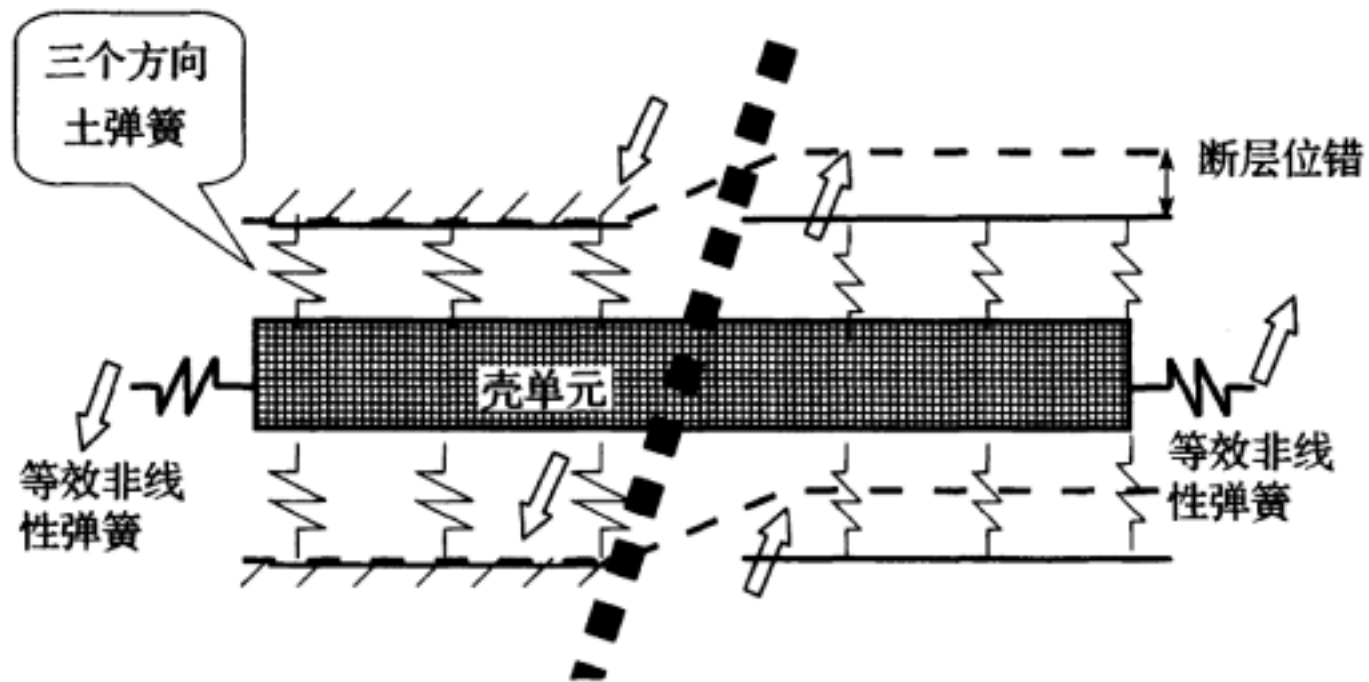


图 11 壳有限元分析模型简图

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的关系采用式(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(0.67%),需要采取抗震措施。

#### (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为 70°。

###### ①按本规范第 6.2.5 条推荐的方法。

重新计算 $\epsilon_{\text{new}} = 0.020$ ,于是得到在断层错动作用下管道的最大应变为 $\epsilon_{\text{max}} = 2 \times \epsilon_{\text{new}} = 0.040$ ,大于管材的容许拉伸应变 0.0067,不满足抗震要求。

###### ②按本规范第 6.2.6 条的有限元方法。

壳有限元方法得到管道应变整体为拉伸应变,无内压下的管轴方向最大拉伸应变为 0.0369,最小拉伸应变为 0.0019;设计压力下的管轴方向最大拉伸应变为 0.0287,最小拉伸应变为 0.0019,分别大于管材的容许拉伸应变 0.0067 和 0.0052,不满足抗震要求。

##### 2)调整角度为 70°后,再改变管道的埋设深度为 0.9m。

###### ①按本规范第 6.2.5 条推荐的方法。

将管道的埋设深度改为 0.9m,重新计算 $\epsilon_{\text{new}} = 0.002$ ,于是得到在断层错动作用下管道的最大应变为 $\epsilon_{\text{max}} = 2 \times \epsilon_{\text{new}} = 0.004$ ,小于管材的容许拉伸应变为 0.0067,满足抗震要求。

###### ②按本规范第 6.2.6 条的有限元方法。

管道的埋设深度更改为 0.9m,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:

$$f_s = \mu(2W + W_p) = 1.1784 \times 10^4 \text{ (N/m)}$$

密实干黏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：

$$\begin{aligned} N_{ch} &= 6.752 + 0.065H/D - \frac{11.063}{(H/D+1)^2} + \frac{7.119}{(H/D+1)^3} \\ &= 6.752 + 0.065 \times \frac{0.9}{0.529} - \frac{11.063}{(0.9/0.529+1)^2} + \frac{7.119}{(0.9/0.529+1)^3} \\ &= 5.707 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} N_{qh} &= C_0 + C_1(H/D) + C_2(H/D)^2 + C_3(H/D)^3 + C_4(H/D)^4 \\ &= 2.399 + 0.439\left(\frac{H}{D}\right) - 0.03\left(\frac{H}{D}\right)^2 + 1.059 \times 10^{-3}\left(\frac{H}{D}\right)^3 - \\ &\quad 0.175 \times 10^{-4}\left(\frac{H}{D}\right)^4 = 3.064 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_u &= N_{ch}cD + N_{qh}\rho_{sl}gHD \\ &= 5.707 \times 10 \times 10^3 \times 0.529 + 3.064 \times 1800 \times 9.81 \times 0.9 \times 0.529 \\ &= 5.587 \times 10^4 \text{ (N/m)} \end{aligned}$$

水平横向土弹簧的屈服位移变为：

$$X_u = 0.04(H + D/2), \text{ 且应小于 } 0.125D, \text{ 得 } X_u = 0.047\text{m}.$$

(c) 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：

$$N_{cv} = 2(H/D) = 3.403$$

$$\begin{aligned} N_{qv} &= \tan[\phi(\phi/44)(H/D)] \\ &= \tan[20 \times (20/44) \times (0.9/0.529)] = 0.281 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_u &= N_{cv}cD + N_{qv}\rho_{sl}gHD \\ &= 3.403 \times 10 \times 10^3 \times 0.529 + 0.281 \times 1800 \times 9.81 \times 0.9 \times 0.529 \\ &= 2.036 \times 10^4 \text{ (N/m)} \end{aligned}$$

由式(E.0.2-8)计算垂直向上土弹簧的屈服位移：

$$Y_u = 0.15H, \text{ 且应小于 } 0.2D, \text{ 得 } Y_u = 0.11\text{m}.$$

(d) 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：

$N_c$ 、 $N_q$ 、 $N_r$  没有变化,

$$\begin{aligned} q_{ul} &= N_c cD + N_q \rho_{sl} gHD + N_r \rho_{sl} gD^2 / 2 \\ &= 14.8 \times 10^4 \times 0.529 + 6.4 \times 1800 \times 9.81 \times 0.9 \\ &\quad \times 0.529 + 3 \times 1800 \times 9.81 \times \frac{0.529^2}{2} \\ &= 1.395 \times 10^5 \text{ (N/m)} \end{aligned}$$

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 0.9m 时,三个方向土弹簧参数汇总如表 3 所示。

表 3 埋深为 0.9m 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)	$f_s = 1.1784 \times 10^4$	$P_u = 5.587 \times 10^4$	$q_u = 2.036 \times 10^4$	$q_{ul} = 1.395 \times 10^5$
屈服位移(m)	$Z_u = 0.008$	$X_u = 0.047$	$Y_u = 0.11$	$Y_{ul} = 0.106$

(e)有限元方法的结果。

当埋深更改为 0.9m,壳有限元方法得到管道应变以拉伸应变为主,无内压下的管轴方向最大拉伸应变为 0.0094,最小拉伸应变为 0.0009;设计压力下的管轴方向最大拉伸应变为 0.0077,最大压缩应变为 0.000075。无内压和设计压力下的最大拉伸应变分别都大于管材的容许拉伸应变 0.0067 和 0.0052,不满足抗震要求。

3)调整角度为  $70^\circ$ 后,再改变管道的埋设深度为 0.9m,将管道壁厚加大到 8mm。

①壁厚改变后,容许应变也相应变化,重新按本例的第(1)款过程计算,壁厚修改为 8mm,计算结果如下:

无内压下的容许拉伸应变为 0.96%,设计内压下的容许拉伸应变为 0.74%;

无内压下的容许压缩应变为 0.28%,设计内压下的容许压缩应变为 0.47%。

②按本规范第 6.2.5 条推荐的方法。

将管道的壁厚改为 0.9m,重新计算 $\epsilon_{\text{new}} = 0.0017$ ,于是得到在断层错动作用下管道的最大应变为 $\epsilon_{\text{max}} = 2 \times \epsilon_{\text{new}} = 0.0034$ ,小于管材的容许拉伸应变 0.0096,满足抗震要求。

③按本规范第 6.2.6 条的有限元方法。

土弹簧参数除了管轴方向外,其他参数不变,根据公式  $f_s = \mu(2W + W_p)$ ,计算得  $f_s = 11915 \text{ (N/m)}$ 。

有限元计算的结果为:无内压下的管轴方向最大拉伸应变为 0.0067,最小拉伸应变为 0.00024;设计压力下的管轴方向最大拉伸应变为 0.0061,最大压缩应变为 0.000046。无内压和设计压力下的最大拉伸应变和最大压缩应变都小于管材的容许应变,满足抗震要求。

4)结论:管道通过断层的交角调整为  $70^\circ$ ,并进行浅埋,埋设深度改为 0.9m,并增加壁厚到 8mm,可满足抗震要求。

### 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露出地表时,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。当液化发生在倾斜坡体时,还可能产生侧向位移,所以还应考虑侧向位移引起的管道变形。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》，冶金工业部建筑研究总院防灾抗震工程研究所，1991年11月）。本次修订对简化公式中的有关参数均有取值范围的限制，对其进行了调研、复核，除了温度应力过大的特殊情况外，原条文中对液化域长度、温度应力和管径取值范围的其他限制可以不做要求，因此做了相应修改。在使用中应注意，式(6.3.2-1)正切函数中的变量计算结果的单位为度数，初始轴向应力为压应力时才计算，而且代入计算的是代数值，不带负号。

第5款的规定主要是考虑到管线埋深一般在1.5m~2.0m，以及要同时满足保温、耕地作业和不发生整体静力失稳的最小覆土深度(地表至管顶距离一般不小于0.65m)。

**6.3.3** 液化引起的侧向位移与位移的范围、大小、方向都有关，一般采用有限元模拟计算。有限元模拟计算和结果验算可以参照第6.2.6条的规定执行。

## **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陷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(侯忠良主编，地下管线抗震，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** 应按本规范第6.3.2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 管道穿越工程抗震设计**

**6.5.1** 本条对穿越管道设防提出要求。穿越水域(河、湖、沟、渠)

的管道埋设方式有直埋式(含挖沟埋设与定向钻)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。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,即当地震动峰值加速度大于或等于  $0.20g$  的地区才需要抗震校核。穿越公路铁路的管段,可参照考虑。

**6.5.2** 直埋式穿越管道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,应采用应变准则。因此,本条规定按埋地管道的规定进行应变组合。在穿越管道设计中,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道,故本条规定应变组合应计入弹性弯曲应变。本规范式(6.5.2)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:

$$\sigma_e = \frac{ED}{2r} \quad (39)$$

由  $\sigma_e$  引起的弹性应变为:

$$\epsilon_e = \frac{\sigma_e}{E} = \frac{D}{2r} \quad (40)$$

**6.5.3** 直埋式穿越管道如同埋地管道,因此本条规定其容许应变值按埋地管道选用,见本规范第 6.1.3 条。

**6.5.4** 洞埋式穿越管道在大洞内(如隧道)往往设有支墩将管道架空支于其上,有时将管道搁置于洞中的底板上,有时会覆土埋设,因此应根据实际情况进行抗震计算。本条规定了有支墩架空的穿越管道按梁式跨越管桥计算,搁置于洞底板上的穿越管道按地面敷管进行抗震计算,覆土埋设按埋设进行抗震计算。对于带支撑块的管道可视为地面敷设。地面及地上管道的地震响应表现为荷载控制,应采用应力准则。

**6.5.5** 本条规定了洞埋式穿越管道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。

需要指出的是,地震动峰值加速度随地面下的深度渐减。苏联《地震区建筑法规》СНиП 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  $1/2 \sim 1/3$ 。因此在计算洞埋式管道地震作用时,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。

按照现行国家标准《输气管道工程设计规范》GB 50251 与《输油管道工程设计规范》GB 50253,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。而洞埋式穿越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。架空管道采用梁式跨越计算,存在剪切应力,所以在组合中增加剪应力。组合应力的容许应力系数,对于基本地震动作用组合,参照 ASME B31.4 的偶然组合容许应力系数,即 0.8;对于罕遇地震动作用组合,则取 1.0。

**6.5.6** 洞埋式管道由于温度升高(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—2014 附录 K 的计算式时,注意去除土壤的约束作用,如压重。

**6.5.7** 本条规定了穿越工程结构抗震设计的基本要求。

结构抗震设计包括抗震计算和采取的抗震措施。参考公路、铁路行业抗震设计标准,规定了基本地震动峰值加速度大于或等于  $0.10g$  时才进行地震作用计算。



穿跨越工程结构抗震设计的范围包括：水域隧道的顶管结构和盾构结构、水下钻爆隧道平巷和斜巷衬砌结构、竖井结构；河岸坡结构；山岭隧道洞口段、浅埋段、偏压段、深埋段内软弱围岩段和断层破碎带等地段的衬砌结构，洞门墙和洞门挡土墙（翼墙）、洞口边坡和仰坡；隧道或竖井内的管道支墩或支架；固定墩等。

**6.5.9** 本条规定了管道穿越工程结构地震作用的计算原则。

1 “隧道”一词指的是顶管、盾构、钻爆隧道衬砌等结构。矩形竖井、管道支墩等单轴对称结构两个方向的刚度和抗力是不一样的，因此需要计算两个主轴水平方向上的地震作用。当地质条件沿隧道轴向变化较大、软硬不均或遇有液化地层时，地震作用引起的隧道纵向拉压应力和挠曲应力可能会成为结构受力的主要因素，尤其是盾构结构的纵向连接螺栓，应能承受地震产生的拉力，故需要分析地震对隧道轴向的影响。震害实例（如 1985 年墨西哥米却肯 M8.1 级地震、1995 年日本兵库县南部 M7.2 级地震）表明，顶管、盾构结构的震害还表现为竖井与隧道的变位不协调，从而导致水的渗漏、环向接头损坏和构件端部破坏，因此要求穿越场地基本地震动峰值加速度大于或等于  $0.20g$  时，验算竖井与隧道交界处的变形影响。

2 目前铁路和公路行业的隧道工程均采用静力法计算地震作用，按照该法设计与宏观震害调查结果接近且计算简便，所以建议采用静力法计算地震作用，具体算法可参照现行国家标准《铁路工程抗震设计规范》GB 50111。另外，现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB 50909 均推荐采用反应位移法计算，《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB 50909 中详细规定了计算方法，故也将此计算方法列入，计算时可借鉴上述规范。

3 考虑目前设计的管道支墩多采用凹型顶面或采用管箍将管道置于管道支墩上，所以在横向考虑为无滑移，而在纵向，管箍箍紧程度对管道滑移有很大影响，箍紧情况下，管道等恒荷载引起

的地震作用全部作用于支墩顶面,未箍紧时,墩顶所受地震作用则为管道等永久荷载产生的摩擦力,所以应区分不同的受力情况进行设计。

4 结构设计中采用计算机分析日趋普遍,无论采用什么样的商业或自编的电算软件都应该保证其计算的可靠性,并且还需要对每一项电算结果做必要的判断和校核,这样才能保证工程安全和符合相关国家标准,故提出本条。

**6.5.10** 本条对管道穿越工程结构在基本地震动作用下的荷载组合和抗震验算做了规定。

1 本款对基本地震动作用下的结构抗震承载能力验算做了规定。

2) 地震作用重要性系数铁路、公路两个行业抗震标准不一致。为避免混淆,特规定地震作用重要性系数的取值。

3) “永久作用”包括的内容见现行国家标准《油气输送管道穿越工程设计规范》GB 50423;分项系数来源见现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191。公式(6.5.10-1)中仅列出了水平地震作用与永久作用的组合,如需要考虑竖向地震作用,其组合可按照现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 的规定计算。

4) 本项来自于现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191。对支架柱、支墩,没有考虑轴压比范围,偏于安全地将承载力抗震调整系数统一取为 0.80;隧道衬砌的受力状态为“偏压”,所以参考抗震墙,将承载力抗震调整系数设定为 0.85。

2 不被水或土充填的顶管、盾构隧道,为了维持检修通道功能,应防止地震作用导致的变形过大而大量进水,具体可参照现行国家标准《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》GB 50032 的规定验算无填充的顶管结构、盾构结构的抗震变位。

## 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。上一版规范规

定起始设防烈度Ⅵ度的地震动峰值加速度为 $0.05g$ 。对于地震动峰值加速度等于 $0.05g$ (Ⅵ度)的地区,可不计算地震作用。但现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 中最小的地震动峰值加速度为 $0.10g$ ,故为了与现行标准一致,将原来规定的 $0.05g$ 修订为 $0.10g$ 。

**6.6.2** 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。

**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,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两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,合理的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。本条文根据现行建、构筑物抗震设计规范,给出了地震作用效应和其他荷载效应的组合表达式。

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确定。

**6.6.7** 采用抗震调整系数对结构构件的承载能力进行调整,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确定的。

**6.6.9** 本条写法上参照了国家现行标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191—2012 第 5.5.1 条及《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02—01—2008 第 3.1.1 条及第 3.1.2 条的规定,《构筑物抗震设计规范》GB 50191 中规定 8 度及以上的比较特殊的构筑物应进行罕遇地震作用下的弹塑性变形验算;《公路桥梁抗震设计细则》

JTG/T B02—01 规定除了三、四级公路的中小型桥梁外均进行罕遇地震作用下的弹塑性变形验算。根据管道跨越的特点,大型跨越采用悬索或斜拉索等柔性结构的比较多,桥面结构、索系或塔架倒塌之后,管道将随之破坏,故对高地震烈度区的大型跨越工程规定进行罕遇地震作用下的弹塑性变形验算。

**6.6.10** 现行国家标准《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 中规定的桥梁均是梁式桥梁,此规范中没有悬索或斜拉索等桥梁的抗震分析方法,对于管道桁架、托架等刚性跨越,其抗震验算原理与其相似,故对于此类跨越,按照现行国家标准《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 中规定的要求进行核算即可。

**6.6.11** 本条规定了悬索、斜拉索、悬缆等柔性跨越结构在罕遇地震作用下的弹塑性变形验算要求。

1 现行行业标准《公路工程抗震规范》JTG B02 和《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02—01 中对桥梁的墩柱有明确的抗剪强度验算和顶部位移和转角的变形验算,故墩柱的塑性变形能力和抗剪验算按照上述规范进行验算即可。

2 现行行业标准《公路工程抗震规范》JTG B02 和《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02—01 对于主缆,只说了在罕遇地震作用下不发生损伤,塔架、主梁和基础只说了在罕遇地震作用下可发生可修复的损伤。现行行业标准《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65—05 中规定在罕遇地震作用下索塔截面弯矩应小于等效抗弯屈服弯矩,塔架、主梁和基础应整体保持弹性。

3 风索主索及风索拉索是管道悬索跨越特有的结构,由于管道桥面结构往往只作为检修通道,故其截面一般较小,提供的刚度较小,风索系统破坏之后,在罕遇地震作用下,桥面结构可能产生大变形,可导致管道破坏,故在罕遇地震作用下,风索系统也是不能完全破坏的,需要按与主索及吊索同样的水准进行验算。

## 7 抗震措施

### 7.1 通用抗震措施

**7.1.1** 合理的抗震措施有利于增强管道抵抗地震动或地表位移的能力。根据抗震措施效果不同,可将抗震措施分为降低计算应变的措施、提高容许应变的措施或者是既降低计算应变,又提高容许应变的措施。一般来说,采用降低计算应变的措施效果好、成本低,所以首先要考虑这类措施。确实难以满足验算要求时,可以提高壁厚或采用大应变钢管,这类措施既降低计算应变,又提高容许应变,效果好,但是成本相对较高。

**7.1.2** 在地表位移作用下,管道的变形容易集中在弯管、三通、阀门、固定墩等部件,所以不宜设置这些部件。但是由于地形限制或为了补偿地表变形,需要在变形段的两侧设置弯头时,为了降低变形集中程度,宜适当加大弯管的曲率半径。规定  $6D$  弯曲半径可改善弯头的受力。

**7.1.3** 为避免管道嵌固在墙或基础中,特制订本条规定。执行时,对于整体模筑结构可预留孔洞,对于散体砌筑结构可增加套管,最后再使用沥青麻丝填塞。

**7.1.4** 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,特制订本条措施。

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

### 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,尽可能查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地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,则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能自由地做横向和纵向运动以及离开支座向上升起。

6 通过断层段管道一般要求采用应变设计,而应变设计的能力与焊缝的缺欠直接相关,为了保证实施的效果满足设计要求的缺欠尺寸,要求进行超声波检测,以便确定缺欠的位置和尺寸。

7.2.2 由于地震时基土的液化会造成管道上浮失稳,故制订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,以形成一种经济有效的压重措施,如图 12 所示。

长距离敷设在液化区内的管道,为节省处理费用、保证管道不失稳而制订,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

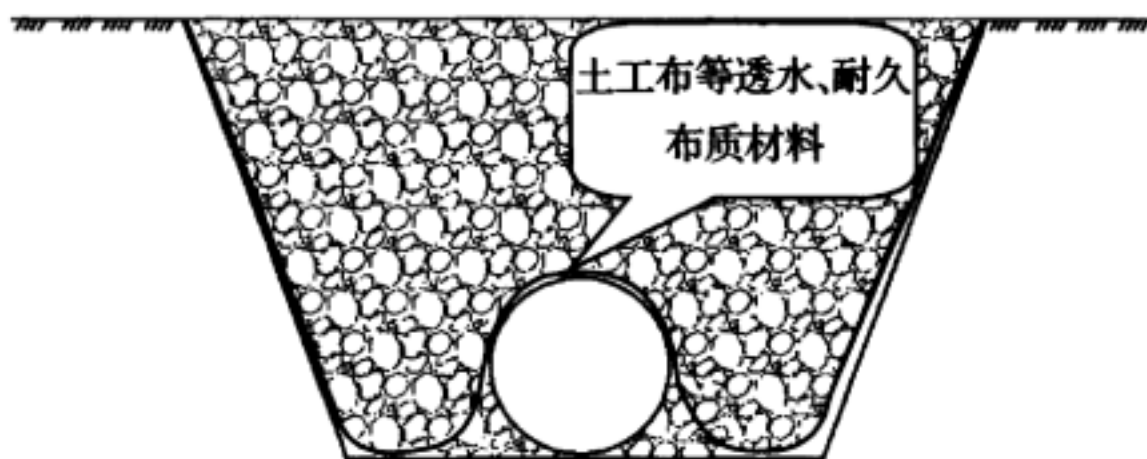


图 12 衬铺压土管沟示意图

了研究,得到的研究结果表明: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。

**7.2.3** 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,证明实用有效而制订的。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。

**7.2.4** 由于各种客观环境条件,管道又必须在局部边坡非稳定区段通过,特制订本条措施,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。

**7.2.5** 穿越管段应尽可能采用弹性埋地敷设,若埋深与两侧场地限制采用了弯头埋地敷设,为确保安全提出本条规定。

**7.2.6、7.2.7** 为防止洞埋式管道因地震造成管段滑落损坏,或变位移动受限而致受损,制订这两条措施,设计时应注意。

**7.2.8** 本条是从抗震角度对穿跨越结构材料选用提出的基本要求。

**1** 对混凝土强度等级的要求。过低,强度不足;过高,脆性增加。

**2、3** 对结构用钢的要求。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,Q235A、Q345A 不能保证冲击



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能力。

5 采用混凝土结构的盾构和顶管其强度等级目前为 C50 左右,因此不再提出盾构和顶管的材料最低要求。

**7.2.10** 本条仅列出了隧道的主要抗震措施,细部抗震构造措施执行国内现行的标准、规范。

1 本款所列的不良地质现象地震时可能会产生严重灾害,导致隧道洞口受损甚至破坏,难以修复,所以应尽量避免。

3 带仰拱的曲墙式衬砌断面抗震能力强,有明确的地震作用传递路线,易形成地震能量耗散部位,所以隧道在抗震设计范围内尽量采用,尤其是洞口、浅埋和偏压地段。

6 衬砌背后存在空洞与衬砌计算模型不符,可导致衬砌受力不均、恶化受力条件,地震时易降低抗震能力,严重时丧失承载力而破坏。

**7.2.11** 本条仅列出了顶管、盾构的原则性抗震措施,目的是保证顶管、盾构隧道抗震的整体性、安全性,并具有良好的变形能力。

4 研究表明,对隧道周围的土层进行注浆处理可以提高隧道周围土体的刚度和与隧道的协同工作能力,有利于隧道抗震能力的提高。

**7.2.12** 本条规定了管道支墩或支架、锚固墩限制侧移、主体配筋、埋件锚固等措施要求。

1 回填土对保证管道支墩、锚固墩地震时的整体稳定、限制位移尤为重要,因此提出要求。同时更需注意的是满足本规范第 7.2.9 条规定的地基抗震措施,要避免将管道支墩、锚固墩设置在震陷或液化土层上,保证抗震的地基稳定。

2 由于管道支墩高度较小,所以管道支墩刚度较大,承受地

震作用引起的剪力相对较大。为使管道支墩的抗剪能力有较大的安全储备,混凝土延性得以提高,故规定了最大箍筋间距。为防止锚固墩地震时可能产生局部的应力集中导致混凝土破坏,同时也考虑其耐久性,因此建议表面配置构造钢筋。

5 防止管道滑落的措施主要是将管道支墩或支架顶面设计成阻止管道滑落的凹面、设置侧向挡滑块或管卡等。

**7.2.13** 本条规定了跨越结构的措施要求。

1 本款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。其他附属于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。

2 位于软弱黏性土层、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。

3 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。

**7.2.14** 跨越结构的管道在出入锚固墩部位是发生地震时的应力集中处,因此宜局部加强。

## 8 管道抗震施工

管道工程抗震施工涉及多方面内容,其基础工作应在国家现行标准《油气长输管道工程施工及验收规范》GB 50369、《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 一般规定

**8.1.1** 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,并按照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,应征得原抗震设计部门的同意,并出具设计更改文件。

**8.1.2** 本条强调用有抗震内容的施工组织设计中应包含抗震措施的专项施工方案来指导抗震工作的实施。

**8.1.3** 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,要防止此方面的疏漏。根据以往施工经验提出施工准备的基本要求,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、规格应符合设计要求,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。

**8.2.2** 本条是对抗震材料代用的严格规定,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,应针对其特殊性制订专项焊接方法和工艺要求,是保证抗震管道焊接质量的基础条件。

**8.3.2** 在活动断层、液化引起侧向位移等地表位移地段的抗震验算中,设计应变一般都较大,可能超过 0.5%,需要采用基于应变的设计方法。使用此方法需要与设计应变匹配材料、环焊缝焊接性能要求,为此需要进行单独的工艺评定,但是工艺评定一般在实验室环境中进行,与现场的环境条件不同,为了保证工艺的适用性,增加现场环焊缝的补充试验,以明确其性能是否满足设计要求。现场环焊缝取样、判定可以参照百口磨合的程序执行。

**8.3.3** 对抗震施工区域内管道安装限定连头短管的长度,有利于减少焊口,故做此规定。

**8.3.4** 本条是根据近年来建设的多项重点管道工程实践基础上提出的,设计对抗震的重点地段会增加无损检测比率、采用全自动超声波检测、射线要求至少 II 级标准等要求,因此强调要按设计要求执行,以保证抗震效果。

**8.3.5** 尽管多次返修不会导致材料的恶化,但是返修的条件不如正常焊接,如果控制不好,容易留下隐患,所以本条强调返修次数不宜超过 1 次。

### 8.4 埋地管道抗震施工

**8.4.1** 砂土回填时,可保证缝隙填满,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规定。

**8.4.3** 本条依据现行行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79

的规定对液化地段的施工及验收做出规定。

**8.4.4、8.4.5** 这两条对管道通过活动断层的施工及验收做出规定。

**8.4.6** 本条依据有关设计标准(例如 GB 50253)对管线上弯管、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,以及防腐绝缘做出了规定,可以有效控制抗震段跨越管道工程的质量要素。





S/N:155182·0145



9 78155182014503

统一书号: 155182·0145

---

定 价: 30.00 元