

高烈度地震区油气管道隧道抗震分析

付开伟 胡文君 胡道华 陈菡清 严 鹏 谷 勇

中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘 要:中亚天然气管道 D 线工程(简称中亚 D 线)隧道众多,隧道全部处于 9 度及以上的高烈度地震区,部分隧址区地震加速度峰值达 0.6 g ,超出目前国内所有设计规范规定的地震加速度峰值,在设计过程中没有相应的规范及工程实例可参考,为解决该问题,开展了高烈度地震区油气管道隧道抗震分析,以作为设计依据。为了验证设计阶段拟选复合式衬砌支护参数的准确性,通过对国内外隧道抗震计算方法及国内现行隧道抗震规范的研究,结合中亚 D 线实际特点,提出了适用于油气管道隧道抗震分析的简化方法,并以 VI 级围岩为例,采用简化方法对中亚 D 线隧道工程进行了抗震计算。计算结果显示,拟选的复合式衬砌支护结构安全性系数满足相关隧道设计规范规定的稳定性及构造要求。综合分析表明,本文选取的抗震分析简化方法操作性强,拟选的 VI 级围岩复合式衬砌支护参数合理,可为类似油气管道隧道的抗震分析及规范修订提供参考。

关键词:中亚天然气管道 D 线工程;油气管道隧道;高烈度;简化方法;抗震分析

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.04.001

0 前言

中亚天然气管道 D 线工程(简称中亚 D 线)是我国引进中亚天然气能源的一条大动脉,也是丝绸之路经济带关键工程,对满足国内快速增长的用气需求,保障我国能源供应安全具有重大意义。管道途经土库曼斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦止于中国新疆乌恰县,全长约 970 km。本工程有 3 个隧道群,均位于塔吉克斯坦境内,共设 43 座隧道,总长约 67 km,工程总投资约 8 亿美元。隧道处于高烈度地震区,部分隧道处于高海拔严寒地区,存在滑坡、崩塌、泥石流、岩溶、地质构造破碎带等大量不良地质作用及冻土、风化岩及残积土的特殊性岩土,诸多难点使中亚 D 线隧道工程成为中国天然气长输管道建设史上难度最大的隧道工程^[1]。

1 场地地震效应

本工程位于印度板块与欧亚板块碰撞形成的帕米

尔构造结附近,为印度板块与欧亚板块碰撞的缝合带,地壳运动强烈,第四系活动断裂广泛发育,地震活动频繁。本工程在塔吉克斯坦分为 A 段(西段)与 B 段(东段),A 段近场区自 1907 年以来曾记载到 $M \geq 3.0$ 级地震 434 次,其中 4.0~4.9 级地震 227 次、5.0~5.9 级地震 36 次、6.0~6.9 级地震 1 次(1907 年 10 月 27 日 6.5 级地震);B 段近场区自 1907 年以来曾记载到 $M \geq 3.0$ 级地震 1 260 次,其中 4.0~4.9 级地震 640 次、5.0~5.9 级地震 86 次、6.0~6.9 级地震 6 次、7.0~7.9 级地震 1 次(1949 年 7 月 10 日 7.6 级地震)。本工程隧址区均为 9 度地震烈度带,50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度大于 0.4 g ,隧道工程需要进行抗震设计。

50 年超越概率 10% 平均场地水平向地震动峰值加速度区划图,见图 1。根据图 1 本工程 1#~4#隧道地震动峰值加速度为 0.4 g ,7#~13#、15#、23#~46#隧道地震动峰值加速度为 0.5 g ,14#、16#~20#隧道地震动峰值加速度为

收稿日期:2015-02-05

基金项目:中国石油天然气集团公司重大专项资助项目“恶劣环境下中亚天然气管道 D 线的安全环保节能核心技术与工程应用”(6995-HT-XEX-04-2013-0125)

作者简介:付开伟(1973-),男,四川大邑人,高级工程师,学士,主要从事石油天然气长输管道工程的设计及研究工作。

0.6 g^[2],超出目前国内所有设计规范^[3]的规定。油气管道隧道一般采用复合式衬砌,按照新奥法原理进行设计和施工,衬砌支护参数的选取采用工程类比法,并通过理论计算进行验证^[4]。由于本隧道工程地震动峰值加速度已

超出现行规范的相关规定,加之无工程经验可借鉴,为避免衬砌支护参数的盲目选取,填补石油天然气行业管道隧道工程高烈度地区抗震设计的空缺,有必要以本工程为依托,对高烈度地震区油气管道隧道的抗震进行研究。

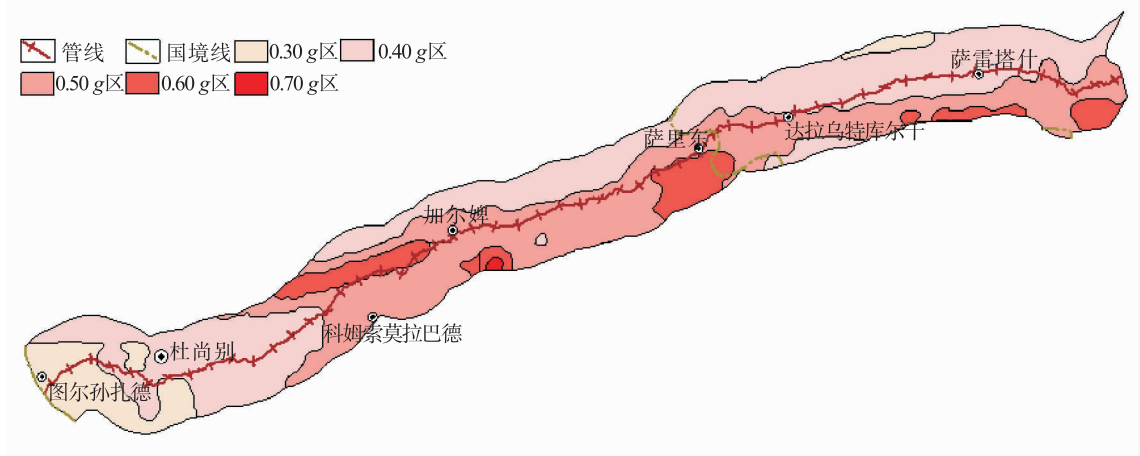


图 1 50 年超越概率 10 % 平均场地水平向地震动峰值加速度区划图

2 隧道结构抗震的研究方法

2.1 发展历程

20 世纪 50 年代前,国内外隧道及地下结构的抗震设计都是以日本学者大森房吉^[5]提出的静力理论为基础来计算地下结构的地震作用力。60 年代初,苏联学者在抗震研究中将弹性理论用于地下结构(拟静力法)计算,得出了地下结构地震力的精确解和近似解。随着科技的发展,日本学者从地震观测资料着手,通过现场观测、模型试验,建立了数学模型,并结合波的多重反射理论,提出了反应位移法、应变传递法、地基抗力法等实用计算方法,使隧道抗震研究取得重大进展^[6]。自 70 年

代后期,上述研究成果逐步在隧道抗震设计规范中得到了应用。

2.2 研究现状

国内外隧道抗震研究方法主要有三种:地震观测、试验研究以及理论计算。由于隧道抗震问题的复杂性,目前还没有哪一种手段能够完全实现对隧道地震动力反应进行全面而真实的解释和模拟。目前国内外学者对地震的常用研究流程框图,见图 2。

图 2 的研究方法是研究和评价隧道抗震性能较合理的有效途径,但存在一定的局限性,优缺点分析详见表 1。

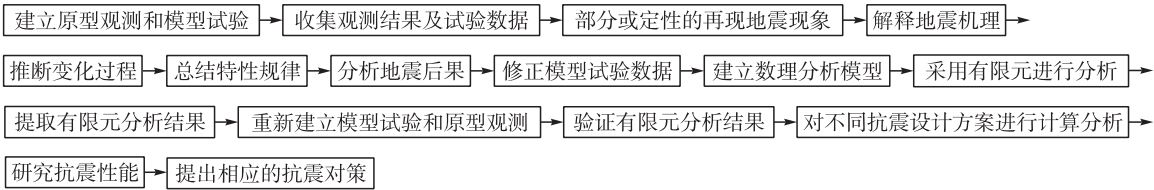


图 2 地震的常用研究流程框图

表 1 抗震研究方法优缺点分析

研究方法	优点	缺点
地震观测法	能客观反映规律,真实可靠,是隧道结构抗震研究中必不可少的手段之一	观测机会难得,费用昂贵,在实际应用中受到很大的限制
试验研究法	是目前研究隧道地震动力响应最有效、最直观的方法	试验费用较高,在材料动力特性的模拟、相似关系比的确定和模型边界条件等方面存在困难
理论计算法	理论成熟,易操作,被广泛采用,费用小	需对计算模型、参数、地震波等进行简化,其计算结果难以完全反映地震的复杂特性,精度低

2.3 国内现行的隧道抗震规范现状

我国的石油天然气长输管道行业管道专用隧道相比公路铁路行业起步较晚,现行的设计规范

GB 50470 - 2008《油气输送管道线路工程抗震技术规范》^[7]、GB 50423 - 2013《油气输送管道穿越工程设计规范》^[8]及 Q/SY 1444 - 2011《油气管道山岭隧道穿越设

计规范》^[4]涉及隧道抗震方面的内容很少,或缺乏足够的重视,只有定性说明,缺乏明确、深入的研究。具体的工程建设过程中参照的隧道抗震规范主要有 JTG B02-2013《公路工程抗震规范》^[9]、GB 50157-2013《地铁设计规范》^[10]以及 GB 50111-2006《铁路工程抗震设计规范》^[3]。

3 本参照规范虽然在隧道结构具体的抗震计算方法方面涉及较少,但对隧道的抗震强度和稳定性验算范围以及隧道结构的抗震构造措施做了较详细的定性规定,均能满足实际工程的需要,定性规定包括:

1) 对地震区隧道洞口位置的规定:应结合洞口段的地形和地质条件确定,并采取控制洞口边坡和仰坡的开挖高度以及其他防止坍塌震害的措施。位于悬崖陡坡下的洞口,宜采取接建明洞或其他防止落石的措施。

2) 对地震区隧道洞门的规定:隧道必须修建洞门,根据洞口段的实际地质情况选择桩柱式或者拉锚式洞门形式,不应采用端墙式结构。

3) 对地震区隧道抗震设防区段的规定:在隧道的洞口、浅埋和偏压地段以及断层破碎带地段应进行抗震设防,洞口段的设防段长度可根据地形、地质条件及设防烈度确定,并不宜小于 2.5 倍的结构跨度,且不小于 12 m。隧道宜避开近期活动的断层破碎带,必须通过时,应进行充分的技术论证,并有切实可行的工程措施。

4) 对地震区隧道结构及抗震措施的规定:抗震设防段的隧道宜采用复合式衬砌结构,并采用带仰拱的曲墙式断面形式,其隧道衬砌结构应加强。对通过活动断裂带的区段应同时采取圆形断面、增大隧道断面尺寸、预留补强空间及加密设置全环变形缝等有利的抗震构造措施。

通过对已发地震震害的调查和隧道结构的试算,3 本参照规范在条文说明中对隧道的抗震强度和稳定性验算范围做了相应的定量规定,定量规定包括:

1) 对隧道的抗震设防区段及计算方法的规定:在Ⅲ级及以上围岩条件较差的洞口、浅埋、偏压隧道和明洞,以及穿越不良地质地带的区域,地震烈度大于 7 度时,需要进行抗震设计。

2) 对抗震计算荷载组合及安全系数的规定:验算隧道的结构抗震强度和稳定性时,地震荷载只与恒载和活载力组合。规定了隧道衬砌和明洞结构强度的安全系数,且提出了相应的地基土容许承载力等相关数值。

3) 抗震计算方法的规定:由于地震系数法方便、简明,操作性强,基本能综合反映隧道工程的地震响应特性,规定隧道的抗震计算方法为地震系数法。但同时指出,由于地震系数法沿用了地面结构抗震设计的理念,隧道埋深是否对地震惯性力影响较大,对于深埋隧道及地震加速度较大工况下,采用地震系数法的计算结果与工程实际具有一定的误差。由于隧道的洞径不一致,致

使各类洞径的隧道对深埋隧道的划分不一致,因此,需针对不同的工程、不同的地质条件对地震系数法进行合理的简化修正,以提高其适应性。

3 隧道结构抗震计算

3.1 隧道结构抗震简化计算方法

目前,隧道结构的简化抗震方法主要有 Wang 法、响应位移法、St. John 法、等代水平地震加速度法、拟静力法等^[11-12]。本文将采用现行主要规范推荐的地震系数法进行抗震计算,地震系数法是一种附加地震力的拟静力计算方法,在地震引起的荷载中只考虑水平地震力的作用,作用大小与水平地震系数有关,水平地震系数通过水平地震动峰值加速度表示,地震引起的水平地震力 f_1 :

$$f_1 = \eta \cdot A_g \cdot m_i \quad (1)$$

式中: η 为综合影响系数,岩质隧道取 0.2,土质隧道取 0.25; A_g 为地震动峰值加速度,0.4、0.5、0.6 g; m_i 为恒载质点质量,kg。

同时文献^[3]强调:由于采用地震系数法计算的隧道抗震计算结果与一些宏观震害调查情况较为接近,其抗震加强措施与非地震区隧道衬砌比较较为合理,其计算精度能满足工程要求;同时地震系数法计算较为简便,采用更精确的计算方法,其实际意义不大,故本文采用地震系数法进行抗震计算。

3.2 横向水平地震加速度分布简图

根据文献^[3],中亚 D 线需在隧道洞口段、浅埋、偏压、岩溶、软硬岩接触带、危岩接触带、松散堆积体及断层破碎带等地段衬砌予以抗震设防,只考虑横向水平地震力对结构的影响,不考虑沿隧道纵向水平地震力及竖向地震力的作用,横向水平地震加速度分布见图 3。

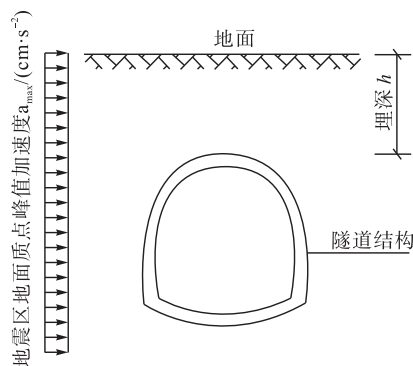


图3 隧道结构横向水平地震加速度分布图

3.3 抗震计算

中亚 D 线隧道内敷设 1 根 $\Phi 1\,219\text{ mm}$ 输气管道,预留 1 根 $\Phi 1\,219\text{ mm}$ 输气管道通道,考虑管道安装、焊接、排水、维护、施工等空间要求及施工机械、运输、通风等因素,隧道净空断面尺寸为 $4.5\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ (宽 $\times$ 高),需抗震计算部分隧道横断面采用曲墙形式,隧道净横断面尺寸见图 4。

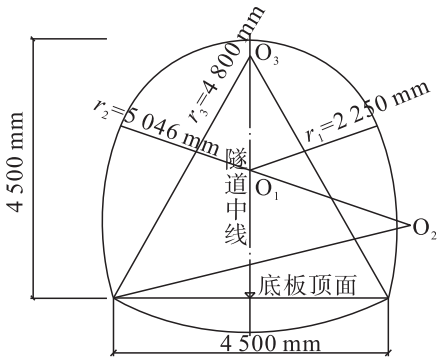


图 4 隧道净横断面示意图

目前隧道抗震分析领域中较通用的有限元软件主要有:FLUSH、SASSI、FLAC、ABAQUS 以及 ANSYS 等。本文采用 ANSYS 进行抗震计算,初期支护的验算采用地层-结构模型将围岩与初支作为整体分析,二衬采用考虑围岩弹性反力的荷载-结构模型进行计算^[13]。本隧道工程采用复合式衬砌,考虑到工程的特殊性,需加强初期支护,初期支护承受全部围岩荷载,二次衬砌作为安全储备。本次计算选取最不利的Ⅵ级围岩曲墙式断面作为算例,地震加速度按 0.6 g 计,Ⅵ级围岩拟选取的复合式衬砌支护参数见表 2。

表 3 围岩物理力学指标值

围岩级别	弹性抗力系数 / (MPa · m ⁻¹)	弹性模量 / MPa	围岩重度 γ / (kN · m ⁻³)	内摩擦角 Φ / (°)	内聚力 c / kPa	泊松比 ν
Ⅵ级	80	800	17	21	100	0.4

表 4 喷射混凝土力学参数

喷射混凝土 强度等级	弹性模量 / GPa	泊松比 ν	重度 γ / (kN · m ⁻³)
C 20	21	0.2	22

表 5 型钢力学参数

围岩级别	型钢种类	弹性模量 / GPa	泊松比 ν	间距 / m
Ⅵ级	I 16	200	0.3	0.5

初期支护参数采用喷射混凝土与型钢共同作用的等效参数;锚杆按围岩级别设计参数计算。

表 6 锚杆参数

锚杆型号	直径 /mm	材料	锚杆抗拉刚度 EA / (kN · m ⁻¹)
砂浆锚杆	22	HRB 400	76 020

钢架和喷射混凝土形成整体,采用刚度折减法得到等效后均质材料抗弯刚度,等效公式如下:

$$EI = E_s I_s + E_c I_c \quad (2)$$

式中: E 、 I 分别为等效后均质材料弹性模量, GPa 和惯性矩, cm⁴; E_s 、 I_s 分别为型钢的弹性模量, GPa 和惯性矩, cm⁴; E_c 、 I_c 分别为喷射混凝土的弹性模量, GPa 和惯性矩, cm⁴。

表 2 Ⅵ级围岩复合式衬砌支护参数

项目	数量
初期支护	
C 20 素砼厚度 /mm	200
Φ 22 锚杆长度 /m	3
Φ 22 锚杆间距 /m	1
Φ 6 钢筋网 /mm ²	200 × 200
I 16 工字钢 /m	0.5
二衬	
C 30 钢筋砼厚度 /mm	450

3.3.1 初期支护计算

3.3.1.1 围岩物理力学参数

Ⅵ级围岩物理力学参数的选取主要根据设计规范、设计手册以及中亚 D 线岩土工程勘察报告,具体取值见表 3。

3.3.1.2 材料参数

喷射混凝土、型钢的力学参数见表 4~5。根据工程经验,Φ 22 砂浆锚杆仅考虑钢筋极限强度作为破坏标准,抗拉刚度采用钢筋抗拉刚度 EA , E 为钢筋弹性模量, A 为钢筋面积,见表 6。

Ⅵ级围岩:喷层厚度为 20 cm,等效后厚度不变。喷层, $E_c = 21$ GPa, $I_c = bh^3/12$, $b = 50$ cm, $h = 20$ cm,故 $I_c = 33\,334$ cm⁴; I 16 型钢, $E_s = 200$ GPa, $I_s = 1\,127$ cm⁴;等效参数,令 $I = I_c$,则 $E = 27.76$ GPa。

3.3.1.3 计算模型及边界条件

有限元计算的相关条件、初始地应力、屈服准则及计算步骤参照文献^[14]执行。

计算范围:由工程经验得知,计算模型左右边界取隧道跨度的 3~4 倍,本文计算模型左右水平计算范围均取 20 m(大于 3 倍隧道跨度),垂直计算范围向上取至地表,向下取 20 m(大于 3 倍隧道高度)。

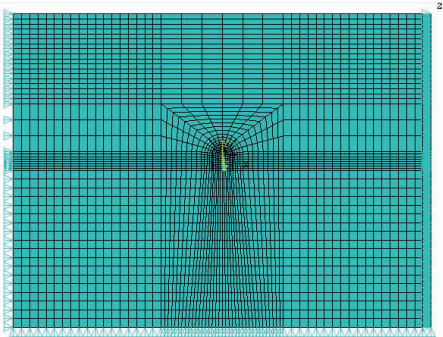


图 5 初期支护有限元计算模型

边界条件:模型上侧为自由边界,两侧约束水平方向自由度,初期支护有限元计算模型见图 5。

单元类型:由于隧道断面较小,采用全断面进行开挖,模拟选取的单元见表 7。

表 7 模拟选取的单元

项目	单元类型
围岩	平面 42
锚杆	杆 1
初期支护	梁 3

3.3.1.4 计算结果

1)隧道位移:隧道洞壁水平方向最大位移量 48.9 mm,发生于隧道曲墙中部,隧道洞壁垂直方向最大位移量 23.6 mm,发生在隧道拱顶。

2)隧道围岩主应力与塑性区:隧道脚部直角部位出现剪应力集中,第一主应力最大值为 0.56 MPa,围岩塑性区主要分布在底板直角处、边墙和拱顶部位,初期支

护中的锚杆、钢拱架、喷射混凝土未发生屈服破坏。

3)隧道整体稳定性:隧道围岩仅在洞壁表层出现屈服松动,支护结构完好无屈服,因此,隧道整体稳定。以支护结构发生屈服为失稳标准,根据文献^[15],C 20 喷射混凝土轴心抗压强度设计值为 10 MPa,轴心抗拉强度设计值为 1.13 MPa。因此,定义最危险断面上初期支护结构安全系数为: $K = \frac{\text{喷射混凝土强度设计值}}{\text{混凝土最大拉应力值}} = \frac{1.13}{0.56} =$

2.02 > 1.8,支护结构安全。

3.3.2 二衬结构计算

3.3.2.1 荷载等效高度及浅埋隧道分界深度

荷载等效高度及浅埋隧道分界深度按照文献^[15]推荐公式计算,通过计算,试验段 VI 级围岩荷载等效高度 h_q 为 2.99 m;深埋、浅埋隧道分界深度为 7.5 m。

3.3.2.2 荷载计算

二衬作为安全储备,二衬荷载的导入按文献^[3,15]进行计算,计算结果见表 8。

表 8 VI 级围岩二衬荷载计算

断面位置	等效荷载高度 / m	竖向向荷载 / (kN · m ⁻¹)	水平侧向荷载 / (kN · m ⁻¹)	地震引起的侧向荷载 / (kN · m ⁻¹)
VI 级围岩	2.99	51	17	11.3

3.3.2.3 结果分析

采用荷载-结构模型进行二衬结构抗震计算,采用

抗压弹簧模拟地层抗力,梁单元模拟衬砌结构,各控制断面内力与应力计算结果见表 9。

表 9 控制断面内力与应力计算结果

截面位置	轴向力 N / kN	剪力 Q / kN	弯矩 M / (kN · m)	外缘应力 $s_{压}$ / kPa	内缘应力 $s_{拉}$ / kPa	裂缝宽度 / mm
曲墙	30.3	-46.3	-5.7	777.45	-550.55	0.18
底部	47.4	-107.2	-35.8	1 172.47	-204.86	0.16
拱部	40.4	-15.1	23.8	1 674.26	-477.59	0.172

二衬采用 C 30 混凝土,轴心抗压强度设计值为 15 MPa,轴心抗拉强度设计值为 1.47 MPa。因此,定义最危险断面上初期支护结构安全系数为^[15]: $K = \frac{\text{二衬混凝土强度设计值}}{\text{混凝土最大拉应力值}} = \frac{1.47}{0.55} = 2.67 > 1.8$,裂缝宽度小于 0.2 mm,支护结构安全。

4 隧道抗震设防措施

隧道抗震设防只注重结构的强度,而忽视了结构的变形能力,因此,根据抗震概念设计原则,需对衬砌结构各细部采取必要的抗震构造措施,以确保衬砌结构的变形协调能力,本隧道工程采取以下主要抗震措施:

1)隧道位置应选择在稳定的地层中,不宜穿越工程地质、水文地质极为复杂和溶洞、暗河、煤层采空区等严重不良地质地段。当必须通过时,应有充分的理由和可靠的工程措施,同时建议隧道采用圆形断面,衬砌内缘预留结构变形

及补强空间,预留变形及补强空间采用泡沫混凝土填充。

2)洞口应避免建在滑坡、岩堆和泥石流等处。在施工方面,尽量降低洞口段边仰坡开挖高度,在洞门端墙与衬砌环框间及端墙与锚固桩连接处均设置连接钢筋或设置榫头等抗震连接措施。

3)采用有利于抗震的桩柱式或者拉锚式洞门形式,其端墙结构采用模筑钢筋混凝土整体灌注,洞门与洞口段衬砌同时施工,混凝土强度等级不低于 C 30。洞口设防段的长度可根据地形、地质条件及设防烈度确定,且不得小于 12 m。

4)抗震设防段采用钢筋混凝土结构,并满足耐久性相关要求;采用带仰拱的曲墙断面能确保既具有较好的承载能力和变形能力,又具有合适的刚度;抗震设防段与一般地段之间应设置过渡段,过渡段的长度一般不小于 10 m,以确保衬砌刚度的连续性。

5)为诱导衬砌结构的整体变形,以减轻结构开裂或

错台等震害,抗震设防段每隔 20 m、洞口段每隔 6 m 设置一道全环变形缝。

5 结论

1)油气管道隧道可采用简化的地震系数法进行隧道结构的抗震分析,该方法易被工程技术人员接受,故在具体工程抗震设计中具有很强的实用性。

2)通过对中亚 D 线隧道工程拟选复合式参数的抗震分析,在 9 度(地震加速度峰值为 0.6 g)地震作用下,Ⅵ级围岩塑性区主要分布在底板直角处、曲墙和拱顶部位,初期支护中的锚杆、钢拱架、喷射混凝土未发生屈服破坏,隧道最大变形量为 48.9 mm,初支安全系数为 2.02,二衬最大裂缝为 0.18 mm,二衬安全系数为 2.67,满足 GB 50111-2006《铁路工程抗震计规范》中的相关要求,拟选的Ⅵ级围岩复合式衬砌参数合理,但二衬与初支之间的预留变形量需大于 50 mm。

3)对衬砌结构各细部采取必要的抗震构造措施,使衬砌结构具有更好的变形协调能力。

4)本文的研究成果填补了石油天然气行业隧道工程高烈度地区抗震设计的空缺,可以为类似石油天然气管道隧道工程的抗震分析及规范修订提供参考。但隧道抗震计算受隧道埋深、结构构造、地质条件等因素影响,建议通过现场的监控量测数据不断修正计算参数,在实践中积累资料以趋完善。

参考文献:

- [1] 胡文君,陈菡清,谷 勇,等. 中亚天然气管道 D 线隧道及伴行道路工程隧道总说明[R]. 成都:中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司,2014.
Hu Wenjun, Chen Hanqing, Gu Yong, et al. Central Asia Natural Gas Pipeline Line-D Tunnel and Along-route Road Engineering Tunnel General Specification[R]. Chengdu: China Petroleum Engineering Southwest Company, 2014.
- [2] 冉洪流,蒋 伟,张志中,等. 中亚天然气管道 D 线(境外段)工程场地地震安全性评价报告[R]. 北京:中国地震局地质研究所,中国地震局地球物理研究所,2014.
Ran Hongliu, Jiang Wei, Zhang Zhizhong, et al. Central Asia Natural Gas Pipeline Line-D (overseas Part) Engineering Site Seismic Safety Evaluation Report[R]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration.
- [3] GB 50111-2006, 铁路工程抗震计规范[S].
GB 50111-2006, Code for Seismic Design of Railway Engineering[S].
- [4] Q/SY 1444-2011, 油气管道山岭隧道设计规范[S].
Q/SY 1444-2011, Code for Design on Mountain Tunnel of the Oil & Gas Pipeline Project[S].
- [5] 郑建中. 日本著名地震学家大森房吉学术生平简介[J]. 国际地震动态, 1985, (10): 27-28.
Zheng Jianzhong. A Brief Introduction to the Academic Life of Oomori Boyoshi, A Famous Japanese Earthquake Scientist[J]. Recent Developments in World Seismology, 1985, (10): 27-28.
- [6] 耿 萍. 铁路隧道抗震计算方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
Geng Ping. Research on the Seismic Calculation Method of Railway Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [7] GB 50470-2008, 油气输送管道线路工程抗震技术规范[S].
GB 50470-2008, Seismic Technical Code for Oil and Gas Transmission Pipeline Engineering[S].
- [8] GB 50423-2013, 油气输送管道穿越工程设计规范[S].
GB 50423-2013, Code for Design of Oil and Gas Transportation Pipeline Crossing Engineering[S].
- [9] JTG B02-2013, 公路工程抗震规范[S].
JTG B02-2013, Specification of Seismic Design for Highway Engineering[S].
- [10] GB 50157-2013, 地铁设计规范[S].
GB50157-2013, Code for Design of Metro[S].
- [11] 余 行. 隧道结构横向地震响应数值分析与简化抗震设计方法[D]. 上海:同济大学, 2009.
Yu Xing. The Numerical Analysis on Seismic Response of the Tunnel and Simplify the Seismic Design Method[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [12] 郑永来,刘曙光,杨林德,等. 软土中地铁区间隧道抗震设计研究[J]. 地下空间, 2003, 23(2): 111-114.
Zheng Yonglai, Liu Shuguang, Yang Linde, et al. A Study on Seismic Design of Subway Tunnel in Soft Clay[J]. Underground Space, 2003, 23(2): 111-114.
- [13] 胡文君,陈海鹏,马 红,等. 管道隧道Ⅵ级围岩试验段支护结构的稳定性分析——以“西气东输”二线东江水下隧道为例[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 85-89.
Hu Wenjun, Chen Haipeng, Ma Hong, et al. Stability Analysis of the Supporting Structure of Class VI Surrounding Rocks in Pipeline Tunnel Experimental Section: A Case Study of Dongjiang Underwater Tunnel of the Line Two of the West-to-East Gas Pipeline[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 85-89.
- [14] 胡文君,马 红. 管道隧道开挖过程数值模拟分析[J]. 天然气与石油, 2010, 28(1): 49-53.
Hu Wenjun, Ma Hong. Analysis on Numerical Simulation of Pipeline Tunnel Excavation Process[J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28(1): 49-53.
- [15] JTG D 70-2004, 公路隧道设计规范[S].
JTG D 70-2004, Code for Design of Road Tunnel[S].