

Analysis of the Impact of Geological Disasters on an Oil Pipeline in Beijing and Pipeline Protection Measures

Hao Geng

Sinopec Sales Co., Ltd. Beijing Petroleum Branch, Beijing, 100022, China

Abstract

Geological disasters will damage pipelines and cause accidents. Different regions have different geological conditions and different types of geological disasters exist. In the plain area of the oil pipelines in Beijing, China, the impact of flooding is small, and there is no risk of mudslides, landslides, and underground caving disasters. Relatively speaking, the fault activities and land subsidence in Beijing, China are more prominent, and the resulting geological disasters will have an impact on the pipeline. The causes and correlations of these geological problems are worthy of analysis and research, and provide a basis for pipeline protection work.

Keywords

geological disaster; fault; ground fissure; ground subsidence; pipeline stress; protective measures

地质灾害对北京某石油管道的影响分析及管道保护措施

耿昊

中国石化销售股份有限公司北京石油分公司, 中国·北京 100022

摘要

地质灾害会破坏管道, 引发事故。不同地区有不同的地质条件, 存在不同的地质灾害类型。在中国北京地区石油管道所经均为平原地带, 水患影响很小, 也不存在泥石流、山体滑坡、地下采空灾害风险。相对来说, 中国北京地区的断裂活动和地面沉降比较突出, 由此引起的地质灾害对管道会产生何种影响, 这些地质问题的成因和相互关联是什么值得去分析研究, 给管道保护工作提供依据。

关键词

地质灾害; 断裂; 地裂缝; 地面沉降; 管道应力; 防护措施

1 中国北京地区地质灾害

1.1 地震与断裂

1.1.1 地震与断裂的关系

地球上有环太平洋、地中海—喜马拉雅(欧亚)和大洋中脊三大地震带。中国位于亚洲大陆东部、太平洋西岸, 前两个地震带之间, 地震断裂带十分活跃。华北地区是中国五大地震区之一, 中国华北平原地震带又位列中国华北地震区四大地震带之一。^[1] 中国河北省三河市、唐山市和邢台市都发生过强烈地震。

地震的成因目前有多种观点, 这些观点大多是解释地震能量来源。孕震系统中, 坚固核及周边相对软弱“环”之间因能量流和物质流相互作用在不断地动态演化。地震是地质能量释放的一种强烈表现形式, 和断裂活动、应力变化有密

切关系, 巨大能量释放会破坏甚至摧毁原有地貌及其上的设施。一个地区内主要控震活动断裂的地震活动会影响其邻近活动断裂或地区的地震发生, 其应力触发作用会导致该地区地震活动增强, 而应力抑制作用会产生地震平静期^[2]。地壳内应力变化, 在局部形成集中或分散态势, 在应力特别集中部位就会发生断裂。断裂发生的过程就是地震从孕震到发震的过程。强震发动可以突发性造就活动断裂, 应力得到迅速释放。之后, 如果断层再次受到应力影响, 断裂就会继续活动^[3]。断裂长期蠕动性活动, 两侧断盘缓慢的相对移动, 应力会逐渐释放。中国地震记录显示, 6级以上的86次地震, 只有14%发生在原活动断裂上, 说明了这一点。然而总体上, 现代断裂差异运动变化剧烈的大型隆起和凹陷的转换地带, 地震发生的可能性更大。中国活动断裂的格局基本上控制了中国强震的分布。

1.1.2 断层对管道的影响

断裂贯穿了岩层，两侧岩体沿破裂面发生相对位移，形成断层，两侧的岩体称为断盘。断层分为正断层、逆断层和平移断层三种形式。简单来说，正断层对管道产生拉力，逆断层对管道产生挤压，平移断层随管道与断层跨越角度的不同产生拉力或挤压。断层活动通常表现为多种类型同时发生，受断层形式、位移、范围等因素影响，埋地管道受到不同方向不同大小的力，表现出弯曲、拉裂、折断、压缩、屈曲等多种破坏形式^[4]。

在石油管道选址中，通常把一万年以来有过强烈地震活动或近期正在活动（每年达0.1毫米蠕变量），以及在100年左右可能继续活动的断层视为活动断裂带，相比静止断裂带具有更大危险性。而一旦发生地震，靠近断裂带的设施受到的破坏会更为严重。

1.1.3 黄庄—高丽营断裂的前世今生

石油管道在顺义区仁和镇塔河村跨越顺义断裂，在高丽营镇西王路村跨越了黄庄—高丽营断裂。

中国北京市地处中国华北平原北部，在地质构造上位于燕山沉降带西部，是华北地台上一个狭长下陷地带，燕山台褶带和华北断拗两个Ⅱ级构造单元在此交汇，是地裂缝灾害的发育区。在中生代的燕山造山运动中，西山地区褶皱隆起，平原地区相对下降，自西北至东南形成了北东—南西向展布的西山迭拗褶、北京迭断陷、大兴迭隆起和大厂新断陷四个Ⅲ级构造单元^[5]。北京迭断陷西边和西山迭拗褶之间以八宝山断裂和黄庄—高丽营断裂为界，东边和大兴迭隆起之间以南苑—通县断裂为界。在这一区域形成了一系列以北东及北西向为主的断裂构造，其中北东向5条、北西向2条，共计7条主要断裂带。北东向的断裂自西向东有八宝山断裂、黄庄—高丽营断裂、良乡—前门—顺义断裂、南苑—通县断裂和礼贤—夏垫断裂^[6]。而在Ⅳ级构造顺义迭凹陷的北缘，受南口—孙河断裂及顺义断裂活动影响，再分化出后沙峪凹陷和俸伯凹陷两个次级凹陷^[7]。详见图1。

黄庄—高丽营断裂是一条隐伏活动断裂，发现于上世纪60年代。其起点和终点在不同文献中略有不同，大致为北起怀柔或密云，经高丽营和黄庄，南至房山或涑水，总体走向北北东—北东，倾角55度—75度，全长约（100~130）km。^[8]黄庄—高丽营断裂是发育于早白垩世初期、燕山运动后期的正

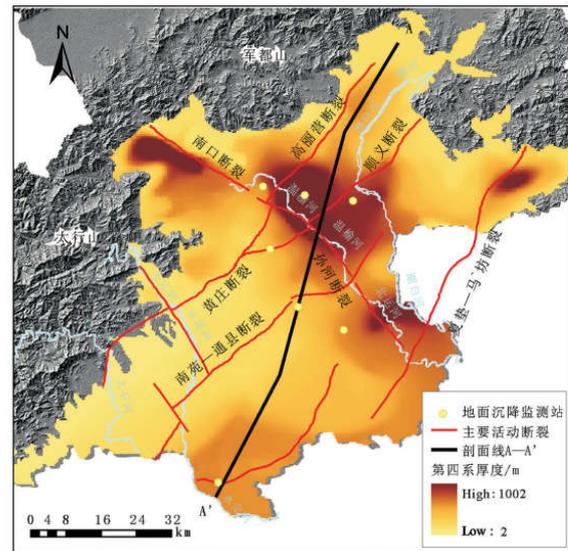


图1 北京地质构造

断倾滑性质的晚更新世活动断裂，断距最大处达到在1000m以上，切割了侏罗系及以前的地层，控制了白垩系和古近系、新近系及第四系沉积，在新生代它是控制北京迭断陷西界的主控断裂，是北京迭断陷和西山迭拗褶的分界构造，控制着第四纪盆地发育。其两盘分属两个不同Ⅱ级构造单元，西北侧为Ⅱ级构造单元燕山台褶带Ⅲ级构造单元密怀申隆断Ⅳ级构造单元昌怀申穹断，东南侧为Ⅱ级构造单元华北断拗Ⅲ级构造单元北京迭断陷Ⅳ级构造单元顺义迭凹陷。黄庄—高丽营断裂在第四纪活动性由南至北逐渐加强，其断层规模和活动强度在中国北京地区最为突出。高丽营位于断裂北段，在全新世活动强烈，平均垂直滑动速率0.11~0.17mm/a，打孔勘查表明此处两盘松散堆积厚度相差逾620m，表明断裂和沉积同生；第三系底面垂直落差最大可达800m，第四系落差达（140~280）m。

黄庄—高丽营断裂和良乡—前门—顺义断裂是地壳浅部断裂，具有铲形特征，不会延伸到地壳10km以下。有研究认为两条断裂的北段所在的顺义凹陷下方地壳内部发现有近垂直的深断裂（地下10~25km），可能成为发震构造，而两条浅部断裂是对深断裂的响应。深断裂和浅部断裂目前尽管处于“汇而未交”状态，但是具有地震孕育的深部构造条件^[9]。自二十世纪70年代末以来，顺义区发生有震感的地震10次，其中的两次4级以上地震1978年高丽营415级地震和1996年顺义区南法信410级地震，分别是高丽营断裂和顺义断裂强烈活动的结果。北京统计资料显示，4级地震平均复发周期为2a左右，5级为30a左右，6级地震为280a。上一次5

级地震距今 52a, 6 级以上地震距今 289a, 均已超过平均值。

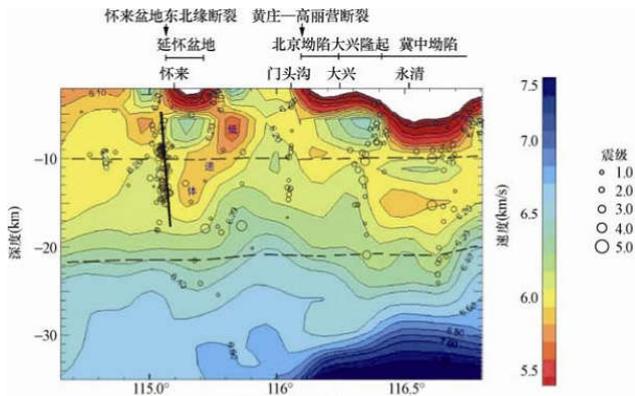


图 2 北京地区人工地震速度结构模型

1.2 地裂缝

1.2.1 地裂缝的成因

地裂缝是地表岩、土体在内外力作用下, 形成裂隙, 在地表表现为一定长度和宽度的裂缝的一种地质现象, 当其对人类生产造成影响时, 就成为一种地质灾害。按其成因, 可分为构造地裂缝、非构造地裂缝和混合成因地裂缝。构造地裂缝由地球内动力地质作用产生, 与断层、地震作用和区域应力场有直接关系, 与其下部的断层走向具有一致性, 和活断层直接相连或受到下伏活断层的控制。非构造地裂缝由各种外动力地质作用产生, 例如不均匀沉降、滑坡等。混合成因型是内、外动力地质作用共同产生的, 内动力为控制因素, 外动力为诱发因素^[10]。

1.2.2 中国北京地区地裂缝的发育

北京平原区地裂缝发育频繁, 对地上、地下设施造成严重威胁, 中国北京市平谷区、通州区、顺义区、昌平区、房山区、延庆区均有多地发现地裂缝分布。在中国华北地区几次较强地震后, 地裂缝活动开始出现, 对建筑设施、工农业发展造成危害, 引起了中国对此研究的重视。

中国北京地区地裂缝分布状况有以下几个特征: (1) 绝大多数出现在平原区和山间盆地中的第四系松散沉积物中; (2) 地裂缝的规模和分布面积与诱发地震的强烈程度有关; (3) 构造地裂缝分布在发震构造和孕震构造沿线; (4) 目前较为发育和典型的地裂缝多分布在平原地面沉降区。

1999 年, 中国北京市地面沉降进入第四个阶段——快速发展期, 与中国北京平原地区超采地下水时期重合。地裂缝活动在大周期上和地震活动有较好的对应关系。1966 年邢台

地震和 1976 年唐山地震反映出此段时间为中国华北地区应力的集中期, 为地裂缝的发生创造了良好的构造条件。1975 年以后中国北京地区发生地裂缝 25 处, 进入地裂缝的高发期, 有加速趋势。北七家—高丽营地裂缝和顺义地裂缝均发生于唐山地震后, 展布分别与黄庄—高丽营断裂和良乡—前门—顺义断裂的北段位置一致。

1.2.3 北七家—高丽营地裂缝

文献记载, 北七家—高丽营地裂缝带发生于上世纪 70 年代末期, 断续发育, 总长度约 (7 ~ 10) km^[11]。石油管道和地裂缝交叉在高丽营镇西王路村东北, 此处地裂缝走向大致接近 NE75°, 分布宽度 (30 ~ 70) m, 在持续发展。^[12] 在西王路村西南角设有地裂缝观测站。主裂缝主要表现为垂直位错, 高角度正断右旋张裂, 东南侧为上盘下降。地表错距不小于 40cm, 总影响带宽度为 30m 左右, 上盘影响带宽度平均是下盘的两倍^[13]。2009 年 8 月以来 3 年的监测数据显示, 该地裂缝的水平扭动量年平均活动率为 1.88mm/a, 水平拉张量为 4.67mm/a, 垂直差异沉降量为 8.72mm/a^[14]。垂直差异沉降活动率比多年平均值降低了 1/3。上盘变形量远大于下盘, 主要表现为垂向错动, 且上盘下降量处于增加趋势^[15]。高丽营地裂缝在空间分布上与黄庄—高丽营断裂具有继承性, 走向具有一致性, 长时间跨度上其活动大周期与地震活动有较好的对应关系。地裂缝两侧第四系厚度西北侧下盘浅, 上盘厚度迅速增加。物探发现, 主裂缝发育深度至寒武系基岩, 与下部构造断裂面呈明显重接复合关系^[16]。监测发现, 地裂缝在年际活动上具有周期性, 特别是垂向变化, 每年 4 ~ 6 月为活跃期, 活动量占全年 60% ~ 70%, 其余时间相对平静^[17]。



图 3 高丽营地裂缝探槽

1.3 地面沉降

1.3.1 地面沉降的危害

地面沉降又称地陷,是局部地面标高降低的一种地质现象或过程,由自然因素或人类工程活动引起的松散地层固结压缩所导致。地面沉降分构造沉降、失水沉降和采空沉降三种类型,导致发生不均匀沉降和地裂缝的发育。如沉降中心区地面更易开裂;在漏斗中心和漏斗边缘,易产生不均匀沉降^[18]。目前包括北美、日本、荷兰和意大利等,世界上已有150多个国家和地区发生地面沉降,成为一个全球性的地质环境问题^[19]。

1.3.2 北京地区地面沉降成因

中国北京市从1966年开始对地面沉降进行监测研究。2004年启动了地面沉降监测网站预警预报系统一期工程^[20]。近些年,除了传统地面沉降监测技术(水准测量、基岩标和分层标测量),采用GPS技术和各种基于InSAR(合成孔径雷达干涉测量)及其改进的DInSAR、PS-InSAR等技术,结合GRACE重力卫星、GIS空间分析技术,分析了地质构造运动、土层次固结沉降、工程建设、地下水下降各种因素与地面沉降的关系,建立各种地面沉降关系模型,研究沉降形成机理^[21]。在宏观和微观上得出一致结论,中国北京地区地面沉降主要是由于过量开采地下水引起的,地层岩性及结构特征是产生沉降的条件^[22]。

1.3.3 地下水和地面沉降的关系

NASA发现,包括中国在内的全世界地下含水层,有三分之一的水位在快速下降,达到或超过可持续临界点。整体上在人类活动区的地下水水位下降是全球性的。

地下水主要以潜水和承压水形式存在。地下水含在岩石的孔隙、裂隙中,或者以结合水形态存在。地下水水位比较高的时候,会支撑上部土层的重量,包括颗粒之间的支撑作用和颗粒之间的水的支撑作用。当水从含水层中被抽走时,隔水层中的水也从黏土中向含水层渗透缓慢释水,砂层中的细颗粒被带走,土粒间出现压缩空间,静水压力减小,土体中的有效应力增加,含水层和隔水层同时释水压缩,地层上下的平衡破坏,表现为地面沉降。含水层的压缩可随地下水位的回升而反弹,黏土中的水饱和度持续下降,释水压密,是一个滞后的、缓慢的、不可逆过程。黏土层越厚,沉降的持续时间越长,累计沉降量越大。

1.3.4 中国北京地区地面沉降的时空演化

中国北京平原区位于中国华北平原的北端、由拒马河、永定河、北运河、潮白河和蓟运河五大河流作用形成的冲积平原之上,含有较丰富的地下水资源。中国北京市地面沉降历史测量资料可追溯到1935年。中国建国后,随着城市建设和工农业发展,中国北京市地面沉降的范围逐步扩大。地面沉降从时序演化和空间分布两个方面分析。

地面沉降的时序演化。从上世纪60年代开始,中国北京市地下水开采量不断增加,地面沉降不断加剧。北京总用水量自2002年34.6亿立方米开始逐步增加,到2017年高峰值达39.5亿立方米,2018年略有下降1%至39.1亿立方米,在此期间地下水占比始终在60%以上。截止2013年中国北京市超采面积达6494平方公里。1960年地下水水位为3.19米。自1999年以来连续每年地下水超采5亿立方米,地下水水位以每年接近1米速度下降。据中国北京市地质工程勘察院1999年的调查统计资料显示,中国北京平原地区累计沉降量大于50mm的地区达到2815平方公里,大于100毫米的面积达到了1826平方公里,最大沉降量有722毫米。经过1999年~2007年连续9年干旱,到2010年底,中国北京市地面沉降量大于50mm的面积扩大了52%,大于100mm的面积扩大了113%。截止到2010年,中国北京市累计地面沉降量超过200mm的面积为2475平方公里,已经占到了中国北京平原面积的1/3。最大年沉降速率达137.5mm/a^[23]。中国北京地区成为超采地下水和地面沉降最为严重区域之一。各个沉降中心的沉降速率具有年度波动性和季节的周期性。与地下水水位年内变化趋同的是,二、三季度沉降速率较大,此时也是地裂缝活跃期。一、四季度沉降速率较小。

地面沉降的空间分布。目前在中国北京市已经形成了五个较大的地面沉降区,分别是东郊八里庄——大郊亭、东北郊来广营、昌平沙河——八仙庄、大兴榆垓——礼贤、顺义平各庄等地^[24]。尽管受到地面建筑载荷的影响,以截止到2010年的地下水水位等值线和地面沉降监测结果判断,地面沉降分布范围与地下水水位降落漏斗分布范围具有很高的空间相关性。而沉降中心的分布受到地质构造的控制,五个中心被主要断裂分割,且形状受断裂约束。

空间上从漏斗中心外扩,地下水水位高度和沉降速率逐渐变化,以及时间上,同一地区地下水水位动态变化和沉降速率

变化,最后总体上,地下水位持续下降和地面沉降累积量不断增加的趋势均保持一致性。

2014年底实施南水北调以来,地下水开采有所缓解,四年分别调水7亿、11亿、10亿、12亿立方米(数据来自南水北调办公室)。自南水北调开始,中国北京市三年来地下水开采量平均每年减少1亿立方米,2017年地下水占总用水量比例降至42%,同期开展了地下水回补尝试,地下水位已逐步回升,2015年以来总计回升2.72米,截止2018年地下水埋深升到23.03米。地面沉降相比地下水位的下降具有滞后性,尽管地下水位回升,有些沉降是不可逆的,沉降依然继续,中国北京市地面沉降形势依然比较严峻。

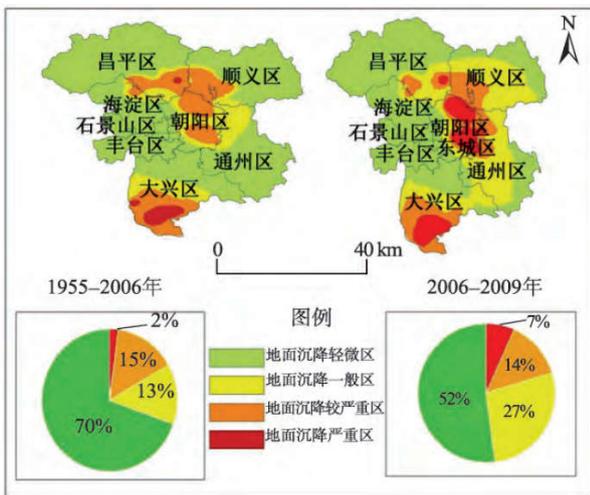


图4 北京地面沉降分布

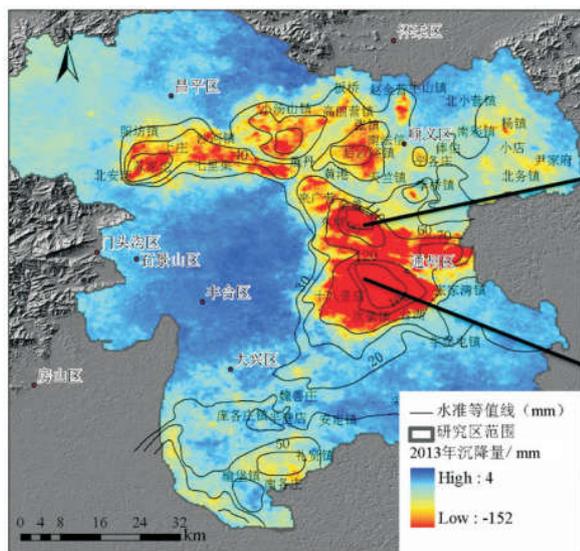


图5 地面沉降与可压缩性黏土分布

1.3.5 高丽营沉降区

高丽营沉降区存在于被南口—孙河断裂、黄庄—高丽

营断裂和前门—良乡—顺义断裂所切割的后沙峪凹陷中,其和五大沉降中心之一的昌平沙河——八仙庄连成一片又相对独立,被西面的昌平沙河——八仙庄、西南的东北郊来广营和东面的顺义平各庄所包围。高丽营沉降区属于年沉降量10~30mm/a或累计沉降量300~500mm的沉降发育较为严重区,比属于严重区的五大沉降中心情况稍好。

高丽营地区现今属于北运河水系,处于温榆河冲洪扇和潮白河冲洪扇交接地带。第四系更新统和全新统全部松散沉积土层,除去地表土分为9层,有7层为粉砂质黏土、细沙及砂质黏土、砂质黏土、黏土层或互层,黏土层累计厚度较大。

地裂缝的上盘靠近昌平沙河——八仙庄沉降中心,地下水水位下降程度高于上盘。下盘为冲洪扇顶端方向,更易接受侧向径流补给。下盘第四系厚度远大于上盘,压缩空间更大。在各种沉降因素影响下,再加上上盘构造性下降,最终在地裂缝两侧产生差异沉降,结果是上盘下降程度更大。100m以下的中深部地层压缩量占多数比例。而仅考虑地下水水位下降因素,根据中国西安地区经验,在实施控水措施和南水补给之后,地面沉降速率下降,地裂缝发展变缓,预测至2035年两侧差异沉降新增量不超过250mm。

1.4 高丽营地区地质灾害对管道的危害

在高丽营西王路村东北,石油管道与地裂缝交叉,高丽营地区为地面沉降较为严重区,地裂缝两侧存在不均匀沉降。此处地质灾害的核心是黄庄—高丽营断裂。黄庄—高丽营断裂目前处于活动期,是北七家—高丽营地裂缝带的主控因素,地面沉降是地裂缝发展的诱发因素。地裂缝两侧地面沉降速率不同,使土层发生垂直错动。地裂缝发育、地下水水位下降和地面沉降三者间具有时空关联性^[25]。

黄庄—高丽营断裂还不是发震构造,存在未来和深层断裂相交后,有发展为发震构造的可能性。在短时序内(一年),断裂以蠕动形式活动,对管道的影响主要是通过对地裂缝的发展作用投射到管道,断裂本身活动使地裂缝的上、下盘产生的错动,其微小的量值对管道的影响微不足道。断裂活动和地面沉降综合作用导致地裂缝两侧的不均匀沉降,使地裂缝持续发育,上下盘发生错动则很明显。尽管地裂缝的活动率在近些年波动变化,但是地裂缝处于活动期性质不变,依然活跃,其产生的应力会持续作用在管道上。垂直错动和水平拉张产生的轴向力较为明显,地裂缝微弱的右旋活动产生

对管道的剪应力相对较小。在长时序下（二十年），尽管断裂本身不会发动地震，而一旦中国北京地区乃至中国华北地震带范围发生足够强的地震，应力在此集中或释放，会突然间对管道产生极大应力，应力作用形式取决于上下盘相对位移的方向。在未来地下水位不再下降甚至有所回升的情况下，地面沉降本身的不可逆只会使沉降速率变小，而趋势不变，地裂缝的发育也将持续一段时间。

2 在地裂缝处的管土接触作用受力情况

2.1 建立管土接触作用模型计算管道应力

埋地管道在管土接触作用下的受力分析方法主要有三种，弹性地基梁模型、土弹簧模型和管土非线性接触模型。钢质管道可发生塑性形变，管道因管土相互作用受力是非线性的，求解非线性问题又需要基于有限元理论的 ADINA，所以埋地管道应力计算更多采用管土接触有限元模型^[26]。对于小尺寸管道，管壁最小曲率半径比壁厚大于或等于 20 时，适合采用比弹性地基梁计算精度更高的薄壳模型。钢质管道的屈服适用形状改变比能密度理论——第四强度理论来解释。管道受到地质灾害破坏的过程，是通过土体对管道的应力，在受到轴向力、径向力、剪应力的综合作用下，Mises 应力达到屈服应力值使管道发生塑性形变。基于上述框架，对于埋地直管道，构建管道和土体的三维几何模型，设定管道材质、管径、壁厚、埋深、土体刚度、管土摩擦系数等参数后，就可求解管道在不同状态下受到的应力，判断是否达到屈服状态^[27]。

在下盘抬升、上盘下降的地裂缝处，管道的远端在裂缝影响宽度以外，管道与土体无相对位移，视为固定边界。而在此区间管道只一端下沉受力，相当于局部沉降几何形态的一半，其受力分析可以参考局部沉降的管土模型。不均匀沉降及裂缝活动是一个缓慢的过程，所以管道受力作为静态考虑。在假设土体为黏土的情况下，给定模型管道总长和沉降区长度，可以给出轴向应力、剪应力在管道不同位置的数值变化以及和管道、土体结构参数的关系，管道最大 Mises 应力和模型参数的关系^[28]。

2.2 地裂缝处管道受力情况分析

管道穿越地裂缝，地裂缝两侧长时间不均匀沉降，上盘下降，在地裂缝处出现垂直、水平、扭转错距，对应管道受到压应力、拉应力和剪应力。在其他两种错距不变的条件下，

垂直错距越大，上盘处管道的管顶和管底受到的压应力越大。如果此时水平错距很小的话，这种上下盘之间的压应力差就相当于一个剪切力，作用在非常短的管段上，使得局部 Mises 应力过大，容易发生屈服。相反如果水平错距增加的话，压应力差由更长管段来承受，相比会减小 Mises 应力。如果只考虑水平错距，随着裂缝的不断发展，管道受到轴向力，缓慢地向两端拉伸。这种轴向力是管土摩擦产生的，力的大小和管土摩擦系数、土体抗拉张力、管道埋深（影响管道径向力大小）有关，随着土体和管道的相对位移而减小。扭转形成剪应力，也和管土摩擦系数及埋深有关，在旋转张裂不明显时可以不考虑。

2.3 管道应力和影响因素的关系

图 6 为管土接触作用模型的竖向位移结果为例说明管道应力情况。

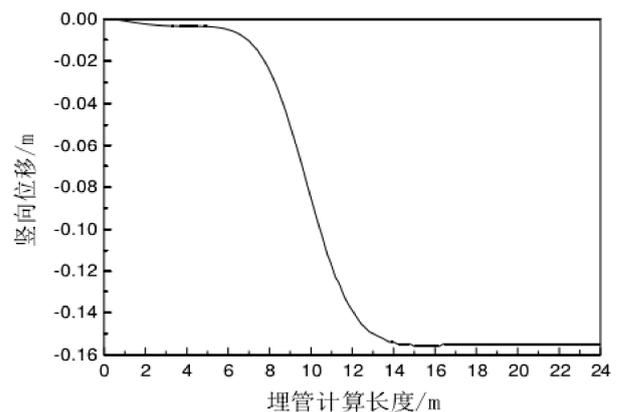


图 6 管土接触作用模型竖向位移

2.3.1 Mises 最大应力部位

在发生垂直错断的地裂缝处，管道从下盘到上盘产生竖向位移。管道 Mises 应力集中在管顶的两个转弯处，Mises 应力随管道斜度增加而增大^[29]。

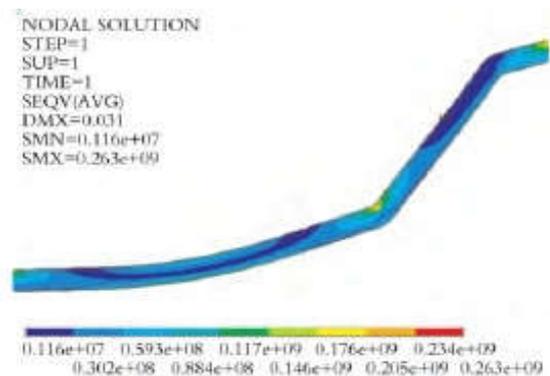


图 7 Mises 应力分布

2.3.2 轴向应力分布

在轴向应力上,管顶与管底力的方向相反,应力集中在管道受弯段,在曲率最大处达到极值。管侧中和轴同平面的轴向力为零。

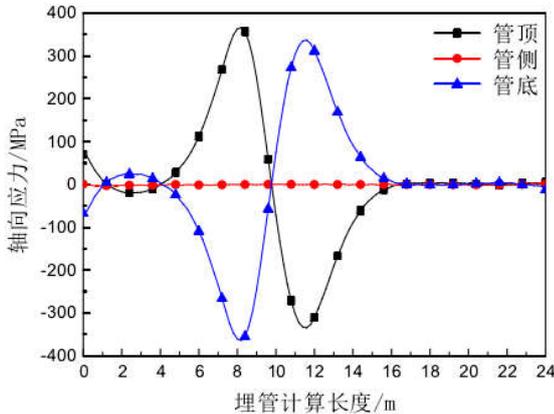


图8 轴向应力分布

2.3.3 剪应力的分布

剪应力上,管顶与管底力的方向和大小基本相同,两端均在超过曲率最大处之后达到极值,上部受弯段极值略大。而管侧中和轴同平面的剪应力在下沉段的中间处达到极值且比管顶和管底的极值大很多。

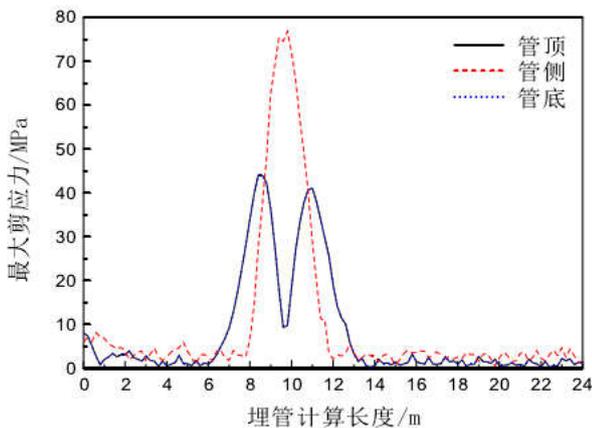


图9 剪应力分布

2.3.4 壁厚对轴向应力的影响

管道轴向应力随管壁增厚而减小,但幅度有限。当壁厚增加到一定程度后对轴向力的影响不再明显,存在一个最优值。

2.3.5 管土摩擦系数对轴向应力的影响

管土摩擦系数对管道轴向力的影响可以忽略。

2.3.6 土体刚度对轴向应力的影响

土体刚度可以改变管道局部应力状态,土体刚度增加会使轴向应力极值增大。

2.3.7 埋深对轴向应力的影响

管道埋深增加对轴向应力影响明显,埋深越大,应力极值越大。

3 关于管道穿越地裂缝处的保护措施

- (1) 建设时增加此段壁厚。
- (2) 减小正压力可以减小轴向力,因此埋深浅有利。
- (3) 土体刚度对轴向力影响显著,下盘管底宜铺垫有松散度的土体。
- (4) 把地裂缝影响宽度范围内的管道和土体情况输入模型中,计算管道受力情况。
- (5) 每年监测沉降差异和错距变化,修正管道应力数值。
- (6) 根据最大 Mises 应力设定一个安全数值,当 Mises 应力达到安全数值时,采取应力消除措施。
- (7) 对计算出的 Mises 应力值最大部位定期开挖检查。
- (8) 增加错距影响的轴向长度,即在地裂缝两侧的一定长度管段内,通过垫高上盘或削低下盘的管底土层,分散应力。
- (9) 如水平张裂速率过高,可将地裂缝两侧一定长度管道挖出释放轴向应力。
- (10) 一旦华北地区发生较强地震或者本地区发生等级地震,及时观测地裂缝变化程度,采取相应应力消减措施。

参考文献

- [1] 玄月.北京市断裂活动性研究及地震危险性分析[D].中国地质大学,2011.
- [2] 王一宽.江苏中强地震与活动断裂关系的初步探讨[C].第四届长三角科技论坛防震减灾学术分论坛论文集,2007.
- [3] 董晓光.试论活动断裂与地震活动关系.河南地质,1998(4).
- [4] 帅健,王晓霖,左尚志.地质灾害作用下管道的破坏行为与防护对策[A].焊管,2008(5),9-15.
- [5] 徐杰,汪良谋,方仲景.北京八宝山断裂和黄庄一高丽营断裂构造活动性的初步分析[J].华北地震科学,1992(3).
- [6] 张晓亮,张磊,蔡向民等.北京平原区黄庄一高丽营断裂北段结构特征及活动特点研究[A].中国地质,2016(4),1258-1265.
- [7] 张磊,何静,白凌燕等.北京凹陷北缘第四纪凹陷盆地沉积速率变

- 化特征与顺义断裂活动性的相应关系 [A]. 中国地质, 2016(2), 511-519.
- [8] 张磊, 张晓亮, 白凌燕等. 北京地区黄庄—高丽营断裂北段活动性研究与灾害效应分析 [A]. 地质力学学报, 2017(4) 548-557.
- [9] 高战武, 陈棋福, 黄金莉等. 北京地区主要活动断裂深部速度结构特征及强震构造特征. 震灾防御技术, 2010(3) 271-280.
- [10] 马超. 北京高丽营地裂缝成因研究 [D]. 中国地质大学, 2011.
- [11] 冯利斌. 北京未来科技城地裂缝成因机理及其防治对策研究 [D]. 长安大学, 2011.
- [12] 卢全中, 彭建兵, 邓亚虹. 北京北七家—高丽营地裂缝破坏特征及影响带宽度 [A]. 工程勘察, 2014(6), 5-11.
- [13] 郭萌, 王荣, 王海刚等. 北京土沟—高丽营地裂缝成因分析 [A]. 研究探讨, 2013(2), 5-8.
- [14] 刘明坤, 贾三满, 陈柘舟. 北京平原区高丽营地裂缝带活动性及灾害特征研究 [A]. 上海国土资源, 2014(4), 53-57.
- [15] 贾三满, 郭萌. 从高丽营探槽分析黄庄—高丽营断裂与地裂缝的关系 [A]. 地质灾害, 2007(4), 24-28.
- [16] 赵忠海, 朱红军. 北京市顺义平原区地质环境的主要特征及地质灾害现状 [A]. 中国地质灾害与防治学报, 2003(2), 61-66.
- [17] 杨健. 北京市顺义区地裂缝分布与地面沉降. 机场工程, 2002(1), 36-41.
- [18] 刘明坤. 京沈客专北京段地面沉降、地裂缝发育特征及其危害性研究 [D]. 吉林大学, 2015.
- [19] 杨艳, 贾三满, 王海刚等. 北京规划新城地面沉降影响分析 [B], 2013.
- [20] 张雯, 宫辉力, 陈蓓蓓. 北京典型区地面沉降演化特征与成因分析 [J]. 地球信息科学, 2015(8), 909-915.
- [21] 周丙锋, 李小娟, 李燕萍. 北京平原地区地面沉降特征和研究途径的进展与思考 [A]. 中国矿业, 2014(12), 51-56.
- [22] 王朝栋, 宫辉力, 张有全等. 北京平原区地面沉降 PS-InSAR 监测 [A]. 遥感信息, 2017(1), 17-22.
- [23] 雷坤超, 罗勇, 陈蓓蓓等. 北京平原区地面沉降分布特征及影响因素 [A]. 中国地质, 2016(6), 2216-2228.
- [24] 周超凡, 宫辉力, 陈蓓蓓等. 北京地面沉降时空分布特征研究 [A]. 地球信息科学学报, 2017(2), 205-215.
- [25] 姜媛, 王荣, 田芳等. 北京地区地面沉降与地裂缝关系研究 [A]. 研究探讨, 2014(4), 6-11.
- [26] 王联伟, 张雷, 董绍华等. 管土接触作用下管道沉陷复杂应力分析 [A]. 油气储运, 2013(11), 1179-1182.
- [27] 王联伟. 几种在役管道典型地质灾害评价方法研究 [D]. 北京科技大学, 2014.
- [28] 李冬冬. 不均匀沉降下埋地管道力学性能数值分析 [D]. 华北理工大学, 2016.
- [29] 张一楠, 马贵阳, 周玮等. 沉降土体对管道跨越结构应力影响的分析 [A]. 中国安全生产科学技术, 2015(8), 106-111.