



# Research Review on Seismic Test of Cross-Fault Pipeline

Xiaoqing Fan<sup>1</sup>, Aiwen Liu<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

\* Corresponding author: Aiwen Liu. Email: [Law73@126.com](mailto:Law73@126.com)

## ABSTRACT

Urban water supply and drainage pipelines, oil and gas pipelines and other buried pipelines are lifeline projects related to the national economy and people's livelihood, so their seismic performance has been concerned by scholars at home and abroad. The experience and lessons of earthquake damage at home and abroad show that the dislocation of seismic fault is one of the main causes of pipeline damage. This paper summarizes the research progress of seismic test of cross fault pipeline at home and abroad in recent 20 years. According to the pipe size used in the test, it can be divided into scale test and in-situ full-scale test; the test methods can be divided into three test methods: pseudo-static test, shaking table test and centrifuge test. In this paper, these test methods are analyzed in detail, and the advantages and disadvantages of various methods are compared, which provides a reference for the development of seismic test of buried pipeline in the future.

**Keywords:** buried pipeline, seismic behavior, pseudo-static test, shaking table test, centrifuge test.

## 跨断层管道抗震试验研究综述

范晓庆<sup>1</sup>, 刘爱文<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

\*通讯作者: 刘爱文. 电子邮箱: [Law73@126.com](mailto:Law73@126.com),

## 摘要

城市给排水管道、输油气管道等埋地管道属于关系国计民生的生命线工程, 因此其抗震性能一直受到国内外学者关注。国内外震害经验教训表明发震断层的位错作用是造成管道破坏的主要原因之一。本文总结了近 20 年来国内外跨断层管道抗震试验的研究进展。按照试验采用的管道尺寸, 可以分为缩尺试验和原位全尺寸试验; 试验的方法可以分为拟静力试验、振动台试验、离心机试验等 3 种试验方法。本文对这些试验方法进行了详细剖析, 比较了各种方法的优缺点, 为今后埋地管道抗震试验的发展提供参考。

**关键词:** 埋地管道, 抗震性能, 拟静力试验, 振动台试验, 离心机试验。

---

**基金项目** 国家自然科学基金 (0917602); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (0221901)

**第一作者** 范晓庆 (1992-), 女, 在读博士研究生, 主要从事生命线工程抗震研究。E-mail: [XiaoqingF2019@126.com](mailto:XiaoqingF2019@126.com)。

**\*通信作者** 刘爱文 (1973-), 男, 研究员, 主要从事生命线地震工程方面的研究。E-mail: [Law73@163.com](mailto:Law73@163.com)。

## 1. 引言

随着我国经济和社会的发展,城市给排水管道、输油气管道等生命线工程一旦在地震中发生破坏,将严重影响人民群众的正常生活和生产,甚至还会引发火灾、煤气中毒、爆炸等次生灾害,从而造成重大的经济财产损失和严重的人员伤亡。唐山地震、汶川地震、昆仑山地震等大量震害现场调查分析发现,地震往往是导致管道破坏的主要诱因之一。

因此,研究埋地管道的抗震性能是很必要的。近 50 年来,国内外学者针对埋地管道的抗震性能展开了很多的研究,可以分为理论解析、数值模拟和试验研究三种方法。理论解析和数值模拟两种方法开展较早,已取得了丰富的研究成果;由于加载和量测设备的发展缓慢以及实际边界条件的难以模拟,在近 20 年来国内外学者对埋地输油气管道抗震性能的试验研究取得了重要进展,因此,本文对这些管道抗震试验进行了归纳总结。

埋地输油气管道抗震性能的试验研究主要包括拟静力试验、振动台试验、离心机试验以及原位全尺寸试验等四种试验方法。基于时间线对这些试验方法进行了详细剖析,比较了各种方法的优点,指出了各种方法存在的问题,可为今后埋地管道抗震试验的研究趋势的发展提供思路。

## 2. 静力试验与振动台试验

目前,利用振动台进行结构地震模拟试验是研究工程结构抗震能力和破坏机理的重要手段。但是限于振动台的设备能力(包括台面尺寸和加载推力等),大型建(构)筑物只能以缩尺模型进行试验。为使模型试验结果能尽量真实地反映出原型结构的性状,必须考虑原型与模型的物理相似性。多年以来,基于 $\pi$ 定理建立的人工质量相似律和忽略重力相似律,在地震模拟试验中获得了广泛应用。

基于输油气管道抗震设计的需要,冯启民等<sup>[1]</sup>利用两个土箱的相对位移来模拟管道在断层错动作用下的受力状态,具体做法是采用中间有断缝的土箱(长 $\times$ 宽 $\times$ 高尺寸为

$3\text{m}\times 1.2\text{m}\times 1.5\text{m}$ ),将管道模型埋于亚粘土土层中,使土箱的两部分产生相对运动来模拟断层作用,从而观测管道的应变和变形随断层错动的变化规律,如图 1 所示。试验的管道尺寸采用 1:30 的几何相似比,试验方法包括静力试验和振动台试验。在静力试验中,将一半箱体完全固定,另一半箱体可沿 Y 轴发生横向移动,由两个总出力为 10t 的推力作动筒来推动活动箱产生横向错动以模拟走滑断层运动状态。动力试验中,将一半箱体固定在地面上,另一半箱体放置于  $5\text{m}\times 5\text{m}$  振动台台面上,控制台面产生竖向振动,来模拟正、逆断层运动状态。

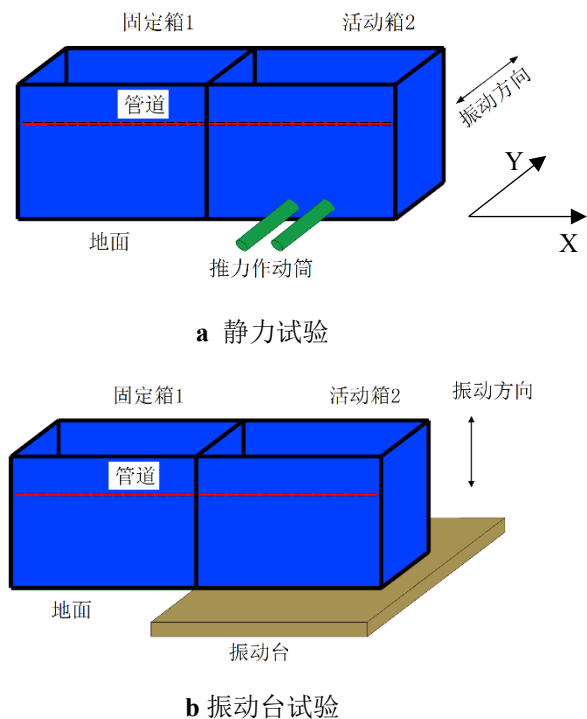


图 1 跨断层埋地管道抗震试验示意图(冯启民, 2000)

振动台试验和静力试验两种试验结果均表明:管道与断层土体之间的最大相对变形均出现在断层面附近,且随着断层位移量的增加,相对变形也增大,最终管道发生塑性变形或者土体屈服;管道变形相对断层位置沿轴向呈反对称形状,且远离断层的管段随着土体一起运动;管道最大应变值也出现在断层面附近一定距离处。这是国内外首次开展的模拟断层作用下埋地管道响应的试验,但是试验过程中并未测量土压,管道与断层的交角、管内有压以及

管-土相互作用等因素也未作深入的研究；对于管土最大相对变形位置以及管道最大应变位置也只是进行定性分析，并未定量地给出具体位置。

综合考虑断层、地震作用和管道参数等因素的影响，白文彪等<sup>[2]</sup>通过静力、拟动力单独和组合加载的方法来模拟断层位移和地震荷载，并测量了管道的应变和位移，对跨断层埋地管道的抗震性能展开试验研究。具体做法是采用槽钢、钢板等自制两个无盖箱体（长×宽×高尺寸分别为  $0.8\text{m}\times 0.6\text{m}\times 0.8\text{m}$  和  $1.2\text{m}\times 0.6\text{m}\times 0.8\text{m}$ ），再以槽钢、钢板、滚轮等制成箱体支架，箱体之间留有  $20\text{mm}$  的细缝，可相对错动，如图 2 所示。

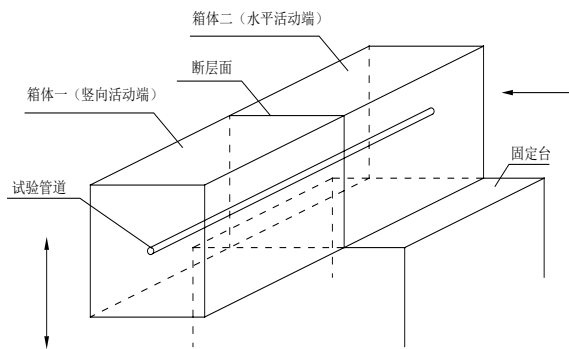


图 2 跨断层埋地管道抗震性能试验示意图  
(白文彪, 2008)

试验结果表明，穿越活断层的埋地管道，易在断层两侧先发生破坏，故应在断层两侧进行特殊处理或防护；在断层两侧，管道上下或左右位置的应变值大小相近，方向相反，即管道相反两侧分别属于受压区与受拉区；管道轴线变形大致呈反对称形状，远离断层的管段随土体一起运动；埋地管道过断层时，承受地震荷载和断层位错的共同作用，管道在断层附近处发生大变形，破坏严重，实际铺设过程中应尽量使管道避开活断层。断层活动性越强，断层错动位移越大，管道变形就越大，破坏越严重，因此，管道避不开断层时，应选择断层活动性较小处穿越。过断层的埋地管道，其管径越大，管壁越厚，越不易发生破坏，故应选择管径较大，管壁较厚的管道。管-土之间的摩擦在地震作用下约束管道的变形，可以减轻管道的破坏。

2011 年，张志超等<sup>[3][4]</sup>根据走滑断层错动作用下埋地管线的地震破坏特点，参考冯启民等<sup>[1]</sup>的思路，设计并实施了埋地管道振动台模型试验研究。试验方案的具体做法：先对试验模型体系进行了相似比设计，制作出可以模拟走滑断层实际错动作用的模型土箱（即长×宽×高尺寸为  $3.0\text{m}\times 0.7\text{m}\times 0.7\text{m}$ ），如图 3 所示。再对模型土进行力学性能试验，确定了模型土的级配曲线和抗剪强度指标；然后利用 ABAQUS 有限元软件对模型管道进行数值模拟，建立了与实际跨断层管道相符合的计算模型，从而根据数值模拟结果，合理布置传感器。接着，按照一定的步骤分层填筑模型土，埋设粘贴好传感器（应变片和土压力计）的管道，直至模型成形。最后，分两个阶段对埋地管道进行试验加载，第一阶段为弹性阶段，采用正弦波和 El Centro 波加载，考虑不同位移幅值和加速度幅值的走滑断层对埋地管道的影响；第二阶段为大变形阶段，只考虑单方向的走滑断层错动作用对埋地管道的影响。

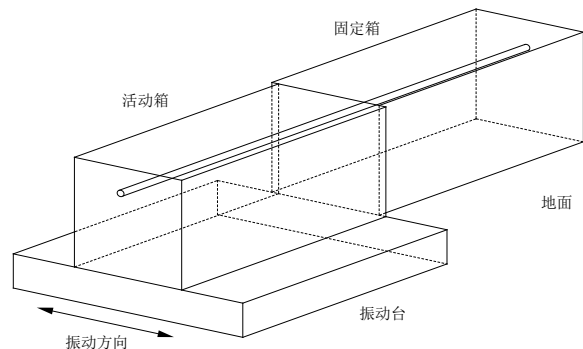


图 3 跨断层地下管线振动台试验示意图（张志超, 2011）

通过分析埋地管道在走滑断层错动作用下应变的分布规律和管土动力相互作用的变化规律，并考察埋地管道与断层的夹角以及管内水流的影响。试验结果显示：在跨断层埋地管道中，管-土系统动力效应对管道的抗震响应的影响较小，可以忽略，而管内液体的惯性力对管道应变反应有较大的影响，不可忽略；在无法避开断层区域的情况下，埋地管道应尽量垂直于断层布置；管道的轴向应变时程曲线相对于断层位置大致呈反对称，管道的最大应变发生在断层附近一定距离的位置，远离断层的管段随周围土体一起运动。

为了模拟多种断层形式对埋地管道的作用, 曾希等<sup>[5]</sup>通过自制的土箱装置(长×宽×高尺寸为3.0m×1.0m×1.1m), 对14根埋地管道的受力性能展开了试验研究。具体做法是: 模拟正、逆断层作用时, 将固定盘模型箱固定于基座上, 通过竖向千斤顶对错动盘模型箱的底部进行加载产生错动。模拟走滑断层的作用时, 错动盘和固定盘相互对调, 错动盘充当固定盘, 由门式框架支撑提供限位, 防止错动盘模型箱产生横向位移; 固定盘充当错动盘, 水平千斤顶作用于固定盘模型箱中部提供横向推力。断层处的挡土板可以旋转, 以模拟管道与断层不同的交角。管道两端的弹簧装置可以沿轴向伸缩, 来模拟远离断层处管道的轴向小变形。如图3所示。

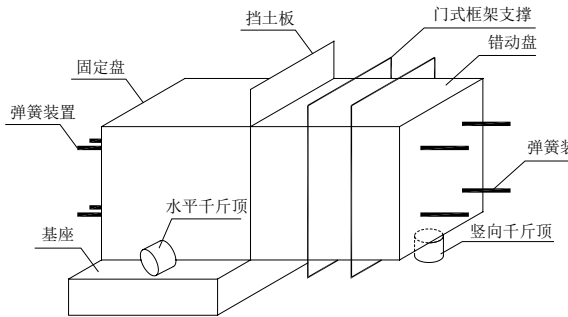


图4 跨断层埋地管道力学性能试验示意图  
(曾希, 2019)

试验结果显示, 选用大管径、浅埋深的管道, 无粘性的回填土和弹性系数较小的弹簧能够减小管道的应变和变形反应。对于正、逆断层, 当断层错动量较小时, 断层两侧管道轴向应变曲线呈中心对称; 当断层错动量较大时, 由于断层管道两侧轴向拉、压应变呈现出较大的差异, 轴向应变曲线不再呈中心对称。对于走滑断层, 管道沿轴向的应变始终呈中心对称分布, 应变峰值位于断层两侧, 远离断层处管道应变逐渐减小趋于平缓, 管道随着土体一起运动。当管道与断层的交角为锐角时, 管道轴向峰值拉应变大于峰值压应变, 此时管道以受拉为主; 当管道与断层的交角为钝角时, 管道轴向峰值拉应变小于峰值压应变, 此时管道以受压为主, 且错动盘对管道应变的影响要大于固定盘。随着埋深的增加, 受断层作用影响的管段长度变小, 应变峰值的位置也更接近于断层处。

### 3. 离心机试验

由于埋地管道处于半无限土体域中, 多为大跨度工程, 一般振动台很难模拟其缩尺模型的重力效应。离心机可通过高速旋转产生期望的离心力, 来模拟原型重力场。

基于离心机模型, O'Rourke M等<sup>[6]</sup>提出了一种测定连续埋地管道对永久地面变形响应的新方法。这是利用离心机模型确定埋地管道地震反应的首次尝试性试验。具体来说就是设计了一个分离容器来模拟水平断层偏移, 并与伦斯勒岩土离心机一起使用。

研究表明, 试验装置运行良好, 试验中所记录的应变与数值模拟所得的应变基本一致。当管道变形较小即处于弹性状态时, 用离心机测得的管道应变与有限元模拟的应变值基本吻合; 当管道变形较大时, 离心机试验值与有限元模拟值的一致性较好。而对于管道轴向应变, 离心机试验值小于数值模拟值, 这种差异可能是由于管道锚固点处的分离箱壁向内运动引起的。另外, 当埋地管道的变形处于非弹性范围内时, 需要了解管道材料的实际应力-应变行为后才可以进行有限元模拟。

为研究各种参数对走滑断层作用下埋地高密度聚乙烯(HDPE)管道性能的影响, Abdoun T H等<sup>[7]</sup>设计并实施了5组(10次)离心机试验。考虑的参数包括土体含水量、断层偏移率、相对埋深(H/D)和管径。以慢断层偏移率、湿砂回填以及适中的相对埋深(H/D=2.8, 其中H为土体表面至管道中心的埋深, D为管道外径)作为两次试验的对比标准, 采用较快的断层偏移率、干砂回填和较高的H/D值进行试验来研究各个参数的影响。

试验结果表明, 断层偏移率和土体含水量对峰值应变的大小和位置以及管道上的峰值侧向力没有显著影响。相对埋深(H/D)对管道的峰值应变的大小和位置有显著影响。管道的管径与管厚之比(D/t)也是影响管道与土体相互作用的重要因素。试验过程中采用接触式压力传感器测得了峰值侧向力, 与ASCE指南建议的值进行比较, 两者较为接近。利用应变片测得的管道轴向应变数据来计算管土界面的纵向阻

力, 计算得出的纵向阻力与 ASCE 指南中的建议值大致相同。

为了进一步研究断层破裂方向的影响, Ha Da 等<sup>[8]</sup>对高密度聚乙烯(HDPE)埋地管道进行了离心机试验研究。具体做法是: 模拟了一条管道以大约 $-60^\circ$ 和 $+60^\circ$ 的角度穿过断层, 使管道分别处于受拉和受压状态。离心机分离容器中采用的断层偏移量所模拟的原型偏移量为 1.06m。离心机试验所用土体是取自于全尺寸试验中的砂土, 并进行了修改以满足离心机模型的相似比设计。

通过压缩离心机试验发现, 管道沿轴向有两个位置发生弯曲, 断层两边各有一个。屈曲开始时偏移量约为 0.8 m, 相应的轴向应变为 2.7%, 弯曲应变为 3.6%。在断层处, 管道发生屈曲后, 轴向应变开始下降。管道弯曲区域的末端近乎一个柔性接头, 使得靠近断层处的那部分管段可以自由旋转。与压缩试验相比, 拉伸试验测得的管道端部力要大得多, 并且与管道端部测得的轴向应变一致。当 HDPE 管道受到纯拉力作用时, 轴向应变随着偏移量的增加而增大, 在断层附近出现峰值轴向应变约为 4.7%。在受拉状态下, 管道的最大弯曲应变出现在距离断层附近约 1.2m 处, 其最大值为 1.5%。在拉伸试验中, 地表面出现了明显的破裂, 在最大弯曲应变区域附近出现了被动土楔形。该被动楔形物出现在对管道产生最大侧向力的区域。试验过程中, 采用接触式压力传感器测量土体-管道的界面压力。在分析了 1999 年土耳其伊兹米特案例历史和离心机建模结果的基础上, 对管道的设计和埋设提出了建议: 应尽量避免使管道处于受压状态, 当断层方向不明确时, 管道与断层交角应尽可能地布设为  $90^\circ$ 。若管道内部压力要求不高, 管道材料优先选用 HDPE。同时, 离心机试验的结果也证实了 ASCE 指南<sup>[9]</sup>中的计算管土界面最大侧向力的方法能较好地估计埋地管道的最大侧向力, 适用于埋地管道的设计。

为研究逆断层作用下埋地管道的动力反应, 汤爱平等<sup>[10]</sup>开展了离心机试验。采用高密度聚乙烯 (HDPE) 模型管道 (外径为 33.4mm, 壁厚为 1.96mm)、中砂 (平均粒径为 0.29mm)

和 PVL 公司生产的双盒剪切模型箱 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高尺寸为 1.14m $\times$ 0.76m $\times$ 0.2m), 着重探究了五个参数 (断层与管道的交角、断层位移量、管土相互作用、管径和埋深) 对管道破坏的影响。试验结果表明: 断层的位移量、管土相互作用、埋深和管径对管道在逆断层作用的反应有显著影响, 而断层与管道交角的影响则一般。

#### 4. 原位全尺寸试验

李鸿晶等<sup>[11]</sup>以南京市供水用的高密度聚乙烯埋地管道为研究对象, 首次采用原位原型试验方法, 在粉质黏土地地上对逆冲断层作用下埋地管道的受力性能和破坏机理进行了研究。此项试验实现了对逆冲断层运动的模拟, 量测了有内压埋地管道的应力应变及周围土体的土压力。试验发现, 在逆冲断层的作用下, 距离断层附近的管段产生的位移较大, 距离土体破裂带越远, 管道的位移越小并逐渐趋近于零, 管道的应变亦如此。初始安装应力使得管道接头位置的局部变形增大。管道的位移和应变响应会受到壁厚、管径、管道与断层交角、边界条件、断层位移量以及内压等因素的影响。

为研究地基沉降对城市埋地管道的破坏, 张旭等<sup>[12]</sup>以太原市实际埋地管道为原型, 制作了 1:1 的室内土工槽试验模型。具体做法是: 在室内土工槽 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高尺寸为 9m $\times$ 4m $\times$ 3m) 底部布设操作平台, 平台上砌筑两道墙体来模拟埋地管道的侧向约束, 墙体中部断开, 用可移动拆板连接两侧墙体, 在墙体内铺设 1m 厚砂土来模拟管道下卧土体, 将管道放置于砂土上, 再填埋 0.5m 的覆土, 覆土上再布设 1m 高的砂袋载荷, 用以模拟埋地管道 1.5m 厚的覆土作用。在管道顶部垂直布设沉降标, 用位移计量测沉降标的下沉距离, 并在管道表面预设位置粘贴应变片。安装完成后在管道下方的土体人工挖洞取土, 形成地下孔洞, 同时测量孔洞的尺寸, 记录由孔洞大小变化而引起的管道变形及内力的响应。

试验结果表明: 地基沉降会导致埋地管道产生挠曲变形, 孔洞中央的管道断面上管顶及管底的应力最大, 管道截面上两侧腰的位置出现了较大的应力, 这些是管道最容易发生破坏

的区域。管道的内力和挠度随着管道下方孔洞深度、宽度的增加而增大,当孔洞深度与管道直径之比( $h/D$ )不小于2.5时,内力与挠度的变化仅与孔洞宽度 $b$ 有关,且当孔洞宽度与管道直径之比( $b/D$ )为6时,会影响管道的正常使用,甚至引发管道破坏。然后在土工槽试验结果的基础上,进行了小比例模型试验,得到如下规律:管道的应力最大值出现在孔洞中央的管道断面上,而管顶的压应力值远大于管底及管侧的拉应力,相同位置处管道的轴向应力大于管道的径向应力。当孔洞宽度由0增大到 $1D$ 时,管道的应力增加幅度很大;当孔洞宽度为 $3D$ 时,管道应力出现峰值,此时,管道易发生损坏。当径厚比相同时,管径越小,管道受到的拉应力越大;当外径相同时,壁厚越大,管道受到的压应力越大,而受到的拉应力越小。

2014年,薛娜等<sup>[13]</sup>以逆断层作用下的城市供水用高密度聚乙烯(HDPE)埋地管道为研究对象,利用原位足尺试验对其受力过程进行研究,并采用ABAQUS有限元软件对埋地管道进行数值模拟。结果显示,管道的变形关于断

层面近似成反对称分布,且均集中在断层带附近区域,土体裂缝亦如此;将数值模拟结果与原位试验结果进行对比,验证了该数值分析方法的正确性,为分析介质不连续问题提供了新的研究思路。

## 5. 考虑近断层地震动影响的振动台试验

目前所开展的埋地管道试验并未对带有永久位移的地震动进行研究,管土脱离距离(高度和长度)也未涉及。因此,基于断层位错和近断层地震动共同作用下管道的反应以及断层附近管土脱离状况等目的,笔者展开了三次埋地管道振动台试验。结合冯启民和张志超的试验思路,采用自制的模型土箱(长 $\times$ 宽 $\times$ 高尺寸为 $5.2\text{m}\times 1.6\text{m}\times 1.4\text{m}$ ),一半箱体固定在振动台上,另一半箱体放置在地面上,由钢绞线交叉穿制而成的箱体中部的软连接部分(其长度为 $320\text{mm}$ )来模拟断层带,通过输入带有永久位移的地震动,量测管道和土体的相对位移,从而探究逆断层作用下埋地管道的响应,如图5所示。

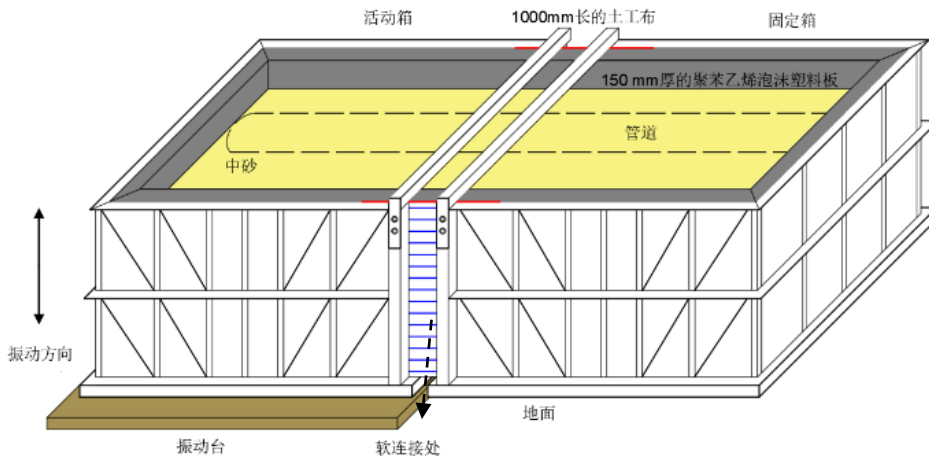


图5 埋地管道振动台试验示意图

试验过程中,笔者使用拉线位移计测出了管道和土体的相对位移,从而反演出了管道的变形特征。具体做法是:以断层面与管道轴线的交点为中心点,沿着管道轴线方向,分别在断层两侧管道的上表面按一定距离粘贴若干个

小铁片,铁片中部缠系足够长的铜丝,垂直穿过粘贴在管道上表面的细PE管(PE管的内径大于小铁片的长度),铜丝的另一端缠系至拉线位移计的拉环上,拉线位移计固定于箱体顶部的横梁上,如图6和图7所示。



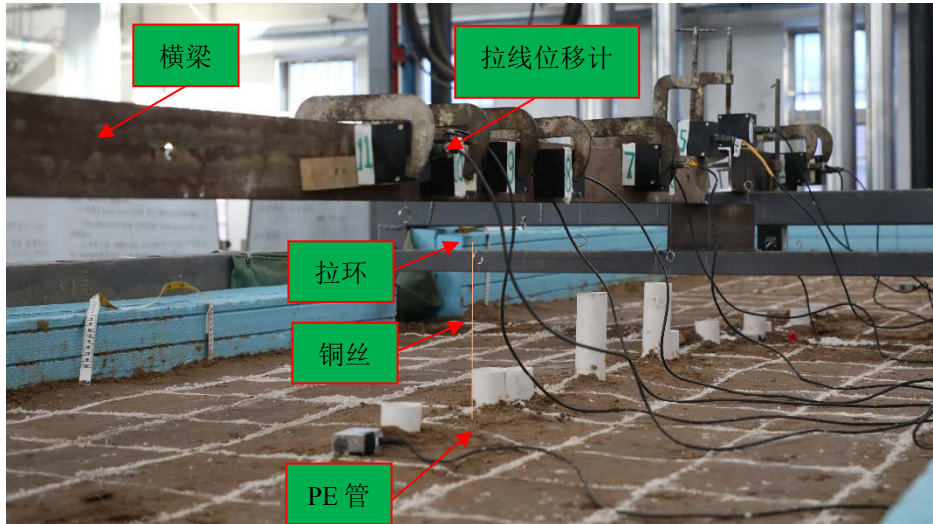


图 6 拉线位移计布置图

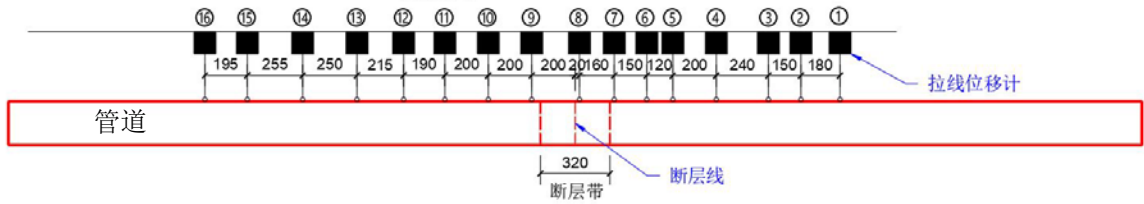


图 7 拉线位移计布置简图

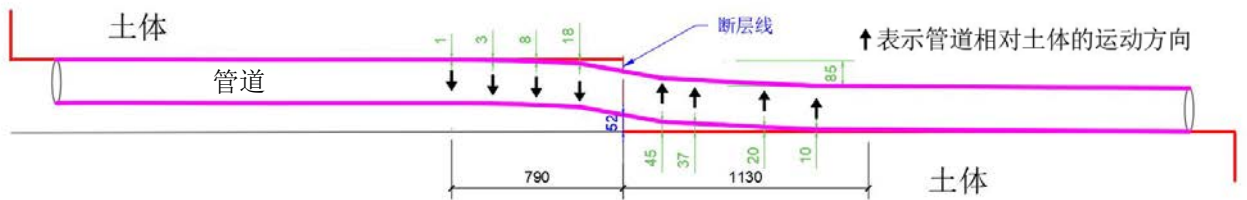


图 8 管土分离示意图-TCU052 工况 (D200-t7.7)

如图 8 所示，试验结果表明，在逆断层和近断层地震动的共同作用下，管道和土体发生了相对位移。断层两侧管道变形近似呈反对称。管土脱离的最大高度为 52mm，断层左侧最大脱离距离为 790mm，断层右侧最大脱离距离为 1130mm。

### 6. 讨论与总结

土箱振动台试验是目前研究跨断层管道的重要手段。为了避免土箱壁对管道受力产生较大的干扰影响，管道敷设的位置距离箱壁越大越好，一般要求管道距离箱壁的距离应该大于管道直径的 5 倍。回填一定厚度的土体后需要

进行压实，通过多层压实的方式模拟现实中管道在土体真实受力状态。采用土箱的振动台试验时，土箱的尺寸越大越好，但是受制于振动台台面尺寸和承载力的大小。在振动台试验中常用的相似律包括：1) 弹性相似律，适用于弹性回复力对结构反应起主要作用的情况；2) 重力相似律，适用于重力对结构动力响应起主要作用的情况。在振动台试验中，严格满足弹性和重力相似关系是非常困难的。

考虑到土体的强非线性特征，本次试验中对模型相似比的设计进行简化处理。不同于地上结构振动台试验地震动输入加速度时程，埋地管道振动台试验的地震动输入则是断层永久

位移或者断层位移时程。在断层位移（时程）作用下，试验主要关注管道的变形位移、轴向应变（包括拉伸应变和压缩应变）以及管道周围土体的动土压力，关注土体本身的变形和裂缝，也主要是考虑其对管道的影响。

## 致谢

感谢防灾科技学院中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室的郭迅研究员、李洪涛高级工程师和王波博士在振动台试验开展过程中给予课题组的技术支持。

## 参考文献

- [1] 冯启民, 郭恩栋, 宋银美, 等. 跨断层埋地管道抗震试验[J]. 地震工程与工程振动. 2000(01): 56-62.
- [2] 白文彪. 跨断层埋地管道抗震性能的试验研究[D]. 河北理工大学, 2008.
- [3] 张志超, 王进廷, 徐艳杰. 跨断层地下管线振动台模型试验研究(I)——试验方案设计[J]. 土木工程学报. 2011, 44(11): 93-98.
- [4] 张志超, 王进廷, 徐艳杰. 跨断层地下管线振动台模型试验研究II: 试验成果分析[J]. 土木工程学报. 2011, 44(12): 116-125.
- [5] 曾希. 跨断层埋地管道力学性能试验与有限元分析[D]. 长江大学, 2019.
- [6] O' Rourke M, Gadicherla V, Abdoun T. Centrifuge Modeling of Buried Pipelines [A]. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering [C]. Long Beach, 2003.757-768.
- [7] Abdoun T H, Ha D, O Rourke M J, et al. Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2009, 29(3): 415-427.
- [8] Ha D, Abdoun T H, O'Rourke M J, et al. Earthquake Faulting Effects on Buried Pipelines - Case History and Centrifuge Study[J]. Journal of Earthquake Engineering. 2010, 14(5): 646-669.
- [9] ASCE, 《Guidelines For the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline System》, 1984.
- [10] 汤爱平, 王连发, 武百超, 等. 考虑土结相互作用的逆断层作用下埋地管道性能离心机试验[J]. 地震工程学报. 2015, 37(03): 639-642.
- [11] 李鸿晶. 供水用埋地管道原位断层模拟实验[C]. 中国建筑学会抗震防灾分会、中国地震学会地震工程专业委员会、中国地震工程联合会. 第八届全国地震工程学术会议论文集(II). 中国建筑学会抗震防灾分会、中国地震学会地震工程专业委员会、中国地震工程联合会: 重庆大学期刊社, 2010: 291-294.
- [12] 张旭. 由于地基沉降引起柔性管线的内力和变形的试验研究[D]. 太原理工大学, 2013.
- [13] 薛娜. 埋地管线原位断层模拟试验及响应分析[D]. 江苏: 南京工业大学, 2014.



**Open Access** This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.

