

地下管线抗震

侯忠良 主编

学术书刊出版社

86.369
9010899

地下管线抗震

主 编：侯忠良

副主编：王伉龙
姚伯英



学 术 书 刊 出 版 社

内 容 提 要

本书为80年代地震工程界中外学者有关地下管线抗震方面的专著。本书集中反映了国内外地下管道震害实例；分析了中外几次典型的大地震给地下管线带来的危害；详细论述了地震作用下管线的应力应变分析及其计算方法；介绍了有关地下管线性能的模拟地震试验研究成果，以及地下管线可靠度评价与管网震害预测方法；阐述了地下管线的抗震措施、震后修复和抗震设计方法。本书可供从事地震工程研究和工程设计、施工的技术人员以及大专院校有关专业师生、厂矿中有关技术人员参考。

地 下 管 线 抗 震

主 编： 侯忠良
副 主 编： 王优龙 姚伯英
编 委： 侯忠良 王优龙 姚伯英
陈冠卿 李康祺 刘 昆
责任编辑： 刘 昆 张成科

学术书刊出版社出版（北京海淀区学院南路86号）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销
北京怀柔渤海印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：25

字数：550千字 印数：1—6000

1990年7月第一版 1990年7月第一次印刷

全国统一书号

ISBN 7-80045-673-0/P.25

定价：13.00元

前 言

随着社会经济的发展,地下管道在输水、油、气(汽)、煤以及在通信、供电、交通和排水等方面得到广泛地应用,成为现代工业生产和城镇生活的大动脉,因此人们通常称它为地下生命线工程。地下管线,除了腐蚀问题外,最大的天敌是地震。地震不仅直接破坏地下管线的正常功能,而且可产生次生灾害(水灾、火灾、爆炸等),给国计民生带来重大损失和人员伤亡。1975年中国海城地震(7.3级),营口市(8度区)150多公里管道破坏372处,平均震害率为2.4处/km,经一个多月抢修才恢复正常供水;盘锦地区(7度区),直埋大口径钢管66.5公里,焊口断裂21处,破坏率达0.31处/km;丝扣联结的小口径管道破坏率为16处/km;铸铁管道为0.8处/km。1976年唐山地震(7.8级),唐山市给水系统全部瘫痪,经一个月的抢修才基本恢复供水。1906年美国旧金山地震(8.3级),三条主要输水管线遭到破坏,全市起火50余处;因消防用水断绝,14平方公里的市区被烧毁,火灾造成的损失比地震直接损失高达3倍。1923年日本关东地震(7.9级),由于供水中断,大火连续烧了三天两夜,约36平方公里市区被烧毁,3.2万人被烧死或窒息而死,占该次地震死亡人数的三分之一。1971年美国圣费尔南多地震,地下煤气管道发生450处破坏事故,给居民生活和工业生产带来严重危害。1976年唐山地震时,秦京输油管线发生五处破坏,其中一处因滦河大桥倒塌而造成跨越管线破坏外,其余四处破坏均发生在7度区,经一个多月抢修方恢复运行。由此可见,地震对地下管线系统的破坏,不仅在高烈度区可对国计民生造成灾难性的危害,在低烈度区也可带来重大经济损失。这不仅仅是由于它的重要性决定的,而且是因为难以检查和修复。因此,对处于地震区的新建地下管线,必须进行抗震验算,并采取相应的抗震措施;对于未抗震设防的已有地下管线,应进行抗震鉴定。

近十年国内外的地震工程学者在这方面做了大量的研究工作。但国内有关地下管线抗震的专著甚少,为此我们收集了国内外的最新研究成果和标准,编著了《地下管线抗震》一书,奉献给工程界的广大读者,以推动我国在该领域的科研、设计、施工、勘察方面的技术进步。此外,本书选入了许多国外比较成熟的计算方法和抗震措施,供我们在抗震设计和抗震鉴定中借鉴,以弥补我国现行规范中的不足。

本书系八十年代中外地震工程学者们研究的成果和标准。全书共收入39篇,分别编排在六个部分中:一、地下管线震害;二、地下管线地震反应分析与计算方法;三、地下管线的实验研究;四、地下管线可靠性评价与管网震害预测;五、地下管线的抗震措施及震后修复;六、地下管线抗震设计。本书内容丰富,涉及面广,既有新的探索又有较大的实用价值。我们深信,本书定会受到学术界和工程界同行们的欢迎。

本书在出版过程中得到了中国石油天然气总公司抗震办,冶金工业部抗震办,中国金属学会有关领导和技术人员的支持和大力帮助,在此表示由衷的感谢。对编著过程中给予指导和参与译校的技术人员深表谢意。日本神户大学工学部高田至郎副教授,为本书提供了许多论文、资料,并写了序言,在此表示衷心的感谢和良好的祝愿。

由于时间有限,书中难免有误和疏漏,敬请读者批评指正。

编者 1987年11月10日

序

地下管道在现代城市的工业生产和人民生活中占有相当重要的位置，随着城市的高密度化和人口集中，地下管道的作用将会更加重要。

在日本，15年前地下管道工程尚不进行抗震设计，对于重要管线用震度法进行设计。在关东大地震(1923年)、新泻地震(1964年)中有很多地下管道遭到了破坏。因此，迫切需要地震工程学家们建立一种切合实际的抗震设计方法，特别是在近年来宫城县地震(1978年)，日本海中部地震(1983年)中地下管道遭到了很大破坏，给城市机能带来了极大的影响。

1978年启用的东京新国际机场建设时，为了建造输送燃料的石油地下管线，进行了抗震设计法的研究。当时引用了作为深埋隧道抗震设计方法而刚刚确立的反应位移法，确定了现在的地下管道抗震设计法的基础。至今已完成的《水道设施抗震设计指针》、《煤气管道设计指针》和《共同沟设计指针(要领)》等标准都是基于反应位移法。

在上述的设计指针中，都是着眼于地震波动作用下管道的安全性，但最近的震害表明，由于地基液化、沉陷、滑坡等地基变形而产生的破坏占大多数。因此，在日本目前研究的方向大都集中在地基变形时地下管道的地震对策方面。与此同时，还有地下管线的抗震诊断法的研究也很活跃。

另一方面，对于大量的城市地下管道，使其在任何地震作用下都不遭受破坏是根本不可能的，在经济上也不会合算。因此，在日本建立能够使地下管线功能损失达到最小的管网系统和遭到破坏后的系统恢复方法的计算机分析，也进行了多方面的研究。

本书集中国、美国、日本、苏联诸国关于地下管道抗震的研究成果，在这个领域的研究是一件非常有意义的大事，特别是对于在以唐山地震为代表的众多地震中出现大量管道震害的中国。令人高兴的是，中国学者们在城市防灾方面积极进行了关于地下管道的调查、研究等方面的工作，我相信拥有丰富震害资料的中国研究者们在这个领域的研究会取得极大的成功。

中国冶金工业部建筑研究总院工程抗震研究室和我的研究室从几年前开始进行研究交流，并交换了从1988年开始为期4年的管线和管网抗震技术方面的合作研究意向书。作为其中的一环，在本书中刊登了我在目前为止的一些研究成果，令我感到非常高兴。能够对中国的研究者和技术人员起到一些参考作用是我最大的希望。热情祝愿日中两国的地下管道抗震技术的合作研究取得更大进展。

日本国神户大学工学部
土木工学科耐震研究室

高田至郎

1988年1月

目 录

地下管线的震害

中国地下管道的震害·····	(1)
1971年圣费尔南多地震对地下管道的影响·····	(12)
1976年加兹拉地震对地下管道的破坏·····	(16)
1982年浦河海上地震时给水管线的震害·····	(19)
1983年日本海中部地震造成的下水管道的破坏·····	(31)

地下管线地震反应分析与计算方法

地面大位移时地下管道的屈曲·····	(37)
穿越活断层的地下管道的屈曲·····	(50)
地下管线的液化分析·····	(59)
液化土中地下管线的上浮反应·····	(72)
土参数对地下管线地震反应的作用与研究·····	(77)
地面变形与地下管线·····	(93)
地震行波作用下埋设管线的反应计算·····	(97)
核电站地下管线与受力部件的地震反应·····	(104)
地下管线、暗渠、共同沟地震反应计算(反应位移法)·····	(123)
地下管线地震应力与热应力的手算·····	(130)
地下管道新的分析方法·····	(145)
连续或非连续地下管线的三维地震反应分析·····	(162)
地下管道地震分析的不定性·····	(174)

地下管线的实验研究

地下管线的拉拔和弯曲试验·····	(179)
关于液化过程中地下管道应变特性的试验研究·····	(192)
土沉陷时聚氯乙烯管道力学性能的试验研究·····	(204)
地下管线地震反应的超声模拟研究·····	(215)

地下管线可靠性评价与管网震害预测

地下管线地震时的可靠性评价Ⅰ·····	(228)
地下管线地震时的可靠性评价Ⅱ·····	(244)
地下管线地震时的可靠性评价Ⅲ·····	(259)
地下管线系统的地震危险度分析·····	(272)

地下管线震害预测的地震动推算法.....	(296)
有接头装置的小直径管网的震害预测.....	(310)

地下管线的抗震措施及震后修复

地下管线与抗震对策.....	(317)
油气储运系统的特点及其地震对策.....	(324)
用软管内衬修复地下管线.....	(327)
遭受震害的煤气供应系统恢复工程的模拟模型.....	(335)
供水系统的震后修复规划.....	(345)
供水系统震后修复及抗震对策.....	(347)

地下管线抗震设计

地震区地下管道的计算.....	(350)
地下管道经过活动断层的设计方法.....	(358)
管道抵抗大的断层运动的抗震设计.....	(366)
受地基沉降影响的地下管线的设计公式及应用.....	(374)
输油管道系统抗震总体设计.....	(390)

中国地下管道的震害

孙绍平

(北京市政工程研究所)

1966年3月8日我国邢台发生的6.8级地震, 3月22日发生的7.2级地震, 以及1967年3月27日河间发生的6.5级地震和1969年7月18日渤海发生的7.4级地震, 地下管道并未发生明显的震害, 其原因主要是这些地区没有工业设施。但在1975年海城地震和1976年唐山地震期间, 地下管道发生了严重震害。下面就这两次地震从地震地质情况、震害情况、破坏特征作典型介绍。

1. 1975年辽宁省海城地震

1.1 地震地质概况

1.1.1 地震参数

发震时间: 1975年2月4日19:36;

震级: 7.3级;

震中位置: 东经 $122^{\circ}48'$, 北纬 $40^{\circ}39'$, 位于辽宁省海城县英落公社赵家堡子附近;

震源深度: 约12km。

1.1.2 海城、营口地区的地质构造

以沈阳到大连的铁路为界, 其东是辽东山地, 属古老变质岩和火成岩隆起区; 其西是下辽河冲积平原, 属下辽河中、新古代断陷盆地。该区有三组构造带, 东西向、北西西向及北东向构造带。地壳岩体被北东向断裂切割成条, 并由其他方向断裂切割成块, 形成了大小、深浅不等的块体所组成的构造格架。

1.1.3 烈度分布

烈度按12等级划分, 根据宏观震害反映区划的烈度分布。

烈度的分布与上述地质构造有关, 并受到该地区工程地质条件的显著影响。古老的变质岩和火成岩组成的低山丘陵, 中间分布有小型的山间盆地, 其覆盖层一般不厚, 属于Ⅰ、Ⅱ类场地土; 辽河冲积平原, 其间分布有洪积扇、古河道、沼泽地等沉积层, 属于Ⅱ、Ⅲ类场地土。由于地质构造、场地土质的条件不同, 烈度在两个方向上差别较大。向东衰减快, 延伸短; 向西则衰减较慢, 延伸较远。

场地土的划分分类标准为:

Ⅰ类: 微风化和中等风化的基岩;

Ⅱ类: 除Ⅰ、Ⅲ类场地土外的一般稳定土;

Ⅲ类: 饱和松砂、淤泥和淤泥质土、冲填土、杂填土等。

根据烈度分布情况,尚有不少烈度异常点和异常区,各烈度区内均有不同的异常情况,八度区内出现海城九度异常;七度区内出现营口市八度异常等。海城出现九度异常,可能与该地正位于北东、北西、东西向三条断裂带交汇处有关;营口市等地区出现烈度异常,可能与场地、地基、土质有关,浅层地基土层中多含有海滨相、河漫滩相、牛轭湖相的粉细砂层,砂土液化加重了宏观震害反映。

1.2 给水管道震害

地震对城镇生命线工程设施中的给水管道的影 响,波及到海城县、营口县、营口市、盘山镇和鞍山市等地区。这些地区的供水管道,主要由铸铁管敷设,约占总数的90%以上,其余有钢管、预应力混凝土管、石棉水泥管和钢筋混凝土管。大口径的钢管主要用于输水管穿越河道处,另外直径75mm以下的配水管及进户管多采用钢管。

1.2.1 海城县

海城县位于辽宁省南部,城区座落在海城河阶地和山前洪积扇交接带上,地下水位较高,地表以下约5m深度内多系回填土层,给水管网大部分埋设在该层回填土内。

给水管网中,有些管道埋设年代较久,使用期达六十多年,震前受到腐蚀较重。城区管网总长约21.35km,震时遭受破坏216处,平均震害率达10处/km;其中直径50mm的配水钢管,长约1.14km,破坏18处,震害率高达15.7处/km;直径75~200mm的铸铁管共长16.7km,青铅接口的管道长约15.2km,破坏144处,平均震害率为9.8处/km;水泥砂浆接口的管道长约1.5km,破坏19处,平均振害率高达13处/km;直径50~100mm的石棉水泥管长约3.5km,破坏35处,平均震害率约为9处/km。

1.2.2 营口县(大石桥)

营口县的场地覆盖土层较薄,大部分属于Ⅱ类场地土;东部邻近山区,基岩露头,属于Ⅰ类场地土。地下水位距地面较深。

给水管网中,直径75mm以上的干管总长约26.10km,破坏26处,平均震害率为1.0处/km;直径50mm以下的配水钢管总长约31km,破坏65处,平均震害率为2.1处/km。

1.2.3 营口市

营口市位于渤海东北岸,辽河口南岸,沿辽河湾呈带状城市,属退海冲积平原,第四纪覆盖层厚约300m。表层土厚约3~5m,多为砂质粘土和砂质垆,市区西部多为炉渣回填土;15m深度以下才有相对坚硬的土层。地下水位高,约在地表以下0.5~1.0m处,场地土属于Ⅱ类,在遭受八度烈度影响时,市区西部地基土砂土液化,喷水冒砂现象较多,相应管道破坏也较严重。

营口市的给水管网中,检查的直径为50mm以上的管道,总长约158.5km,破坏372处,平均震害率为2.35处/km;其中直径75~139mm石棉水泥管,总长约4km,破坏12处,平均震害率3处/km。输水管道总长约65km,除直径600mm石棉水泥砂浆接口的铸铁管在穿越铁路填方路基下破坏5处外,其余长约17km、直径700mm的铸铁干管和长约23km、直径500~600mm的预应力混凝土管,均完好无损。此外,尚有722m穿越河底底部的钢管,直径159mm,震后完好。

1.2.4 盘山镇

盘山镇位于辽河以西、双台子河岸边，属退海冲积平原。地表以下3—4m深度内多为砂粘土和砂质垆，其下层为流松粉砂，该粉砂层深达100m以上，属于Ⅲ类场地土。地势较低，海拔在2.5~4.0m，地表以下0.5m左右即见地下水位。震时砂土液化严重，喷水冒砂，地基失效，管道震害相应加重。

盘山镇直径100mm以上的给水管道长约25.9km，破坏35处，震害率为1.60处/km。

1.2.5 鞍山市

鞍山市地质条件较好，属于Ⅱ类场地土，地下水位较低，因此管道震害轻微。

鞍山市的给水管，直径75~100mm的铸铁管长500多km，震时破坏仅3处。一处是直径350mm的直管纵裂1.2m，系因震时停泵产生水锤所致；一处是在直径150mm直管段上管身纵裂0.8m；另一处是直径200mm管自水表连接处拔脱，系该处附近发生地裂缝。

1.3 管道破坏特征

1.3.1 烈度（地震影响强度或地面位移量）和场地土的影响

根据上区不同烈度区内，城镇给水管网的震害率不等，见表1。

表1 不同烈度区给水管道的震害率

场 地	烈度	场地土类	管径 (mm)	管道长度 (km)	破坏数 (处)	平均震害率 (处/km)	备 注
鞍山市	7	Ⅱ	≥100	537.40	3	0.006	不包括输水管
盘山镇	7	Ⅲ	≥100	25.90	35	1.60	
营口市	8	Ⅲ	≥50	158.50	372	2.35	
营口市(大石桥)	9	I、Ⅱ	≥75	26.10	26	1.00	
海城县	9	Ⅲ	≥50	21.35	216	10.00	

从表1所列的管网震害情况可以看到场地土的影响占显著地位。海城与营口县(大石桥)同样遭受九度烈度影响，盘山与鞍山市同样遭受七度烈度影响，但由于海城、盘山的场地土质较差；海城多回填土，盘山砂土液化、地基土震陷严重，因之加剧了管道的破坏。

遭遇烈度的大小，在一般情况下是反映了地面位移和幅度，对管道震害同样也有影响的。例如同样属于Ⅲ类场地土的盘山、营口市和海城县，遭受影响烈度分别为七、八、九度，相应管道的震害率是随烈度影响强弱而增加的。但烈度影响与场地土的影响比较居第二位，盘山镇及营口市的管道震害率较之营口县(大石桥)更高，就是很好的实际反映。

1.3.2 地形、地貌的影响

地形、地貌的影响对管道震害也是很重要的。营口市位于辽河岸边的管道破坏严重，过河管的震害同样严重。例如市内直径200mm铸铁管穿越河床处，位于河岸斜坡上的刚性接头被拔出错位200mm；另一条直径200mm铸铁管通过旱沟，也遭到了严重破坏。同样鞍山市的直径200mm铸铁管，从水表连接处拔出，也是由于该处位于水坑回填土内。

地形、地貌的影响，主要在地震动时岸坡明显位移，回填土与原状土间震陷显著差异，

这些地方常可见到相应的地表裂缝。

1.3.3 管材、接口与管道震害

不同管材的管道震害情况,在不同场地、烈度影响地区内,其震害率是差异很大的,如表2所示。

表2 不同管材管道的震害率(处/km)

烈 度		九 度		八 度	七 度
管 料 类 型	场 地	海 城	营 口 县	营 口 市	盘 山 镇
钢管		15.70	2.10	11.40	0.70
铸铁管		9.80	0.92	1.06	1.60
预应力混凝土管		—	—	0	—
石棉水泥管		9.00	3.00	2.00	1.30

表2中所示九度区钢管的震害率较高,主要与使用年代长、管道遭到严重腐蚀有关。营口市和海城县的配水钢管,直径50mm,丝扣连接,使用期约在40~60年之久,致使丝扣锈蚀严重,在强烈地震动影响下易遭破坏。

实际上如果不考虑管材的腐蚀因素,以管材本身强度与接口强度对比,接口将是弱点。接口的构造做法将对管道震害影响更为显著,例如接口构造的允许位移可以改善管道的受力,适应地震动时的土层位移;当接口处的允许位移量不足时,接口也是易受震害的部位。不同接口构造与管道的震害关系,如表3所示,柔性接口的震害率相对明显地减少。

表3 不同接口构造管道的震害率(处/km)

管 材		钢管		铸铁管		石棉水泥管		预应力砼管
场地	接口构造	焊接	丝扣	青铅	石棉水泥	自应力水泥	橡胶圈	橡胶圈
海城县		—	15.70	7.50	13.70	—	9.0	—
营口市		—	2.10	0.89	0.34	5.0	2.0	—
营口市		0	11.40	0.85	1.28	4.5	1.5	0
盘山镇		—	0.70	—	1.60	1.3	—	—

1.3.4 管径与震害率

根据实际震害调查资料,不同管径管道的震害率不等,一般的现象是管径越大,其震害率越低。例如排水管道与给水管道相比,营口市圆形排水管道,无论是水泥砂浆管或普通钢筋混凝土管,其接口均采用水泥砂浆抹带,对比铸铁给水管道,管材本身强度及接口强度都要低得多,而在遭受同一烈度影响时,排水管道的震害率很小,仅为0~0.08处/km,相应铸铁管道的震害率明显地高得多。在营口市给水管网中,以管径大小比较齐全的石棉水泥接口铸铁管道为例,直径400mm以上的管道震害很少,直径700mm的输水管道震后完好无损,而小管道的震害率却很高。石棉水泥接口的铸铁管道的震害率随管径大小的统计情况,如表4所列。从中可以看出震害率随管径增大而减少。

表4 营口市石棉水泥接口铸铁管道的震害率(处/km)

管径 (mm)	75	100	150	200	250	300	350	400~700
震害率	3.03	2.65	0.60	0.68	0.48	0.43	0.39	0.30

2. 1976年河北省唐山地震

2.1 地震地质概况

2.1.1 地震参数

发震时间: 1976年7月28日凌晨3:42;

震级: 7.8级;

震中位置: 东经118°06', 北纬39°24', 即在河北省唐山市铁路以南的市区;

震源深度: 12~16km。

2.1.2 地质构造

唐山震区位于冀鲁拗陷带北部与燕山褶断带结合和交接部位,是历史地震活动的多发地区。唐山四周被不同方向的新老断裂所包围,东西的构造系有韩家庄、沙河驿断裂、宁河—昌黎断裂;北西向构造系有滦县—乐亭断裂、蓟运河断裂,北东向构造系有唐山断裂,如图1所示。



图1 管道产生弯曲变形

唐山断裂位于唐山隆起的东南一侧,南部为北东向,北部向东偏移,转为北东向,这个断裂带是7月28日唐山大地震的主要断裂。

2.1.3 烈度分布

7级、8级主震的极震区位于山前平原,烈度从极震区向外逐步衰减,发震断层是唐山—丰南边界,震害从平原地区穿过低山丘陵,波及到山区,震害的分布情况也反映了地质背景的

影响。唐山市的极震区达十一度；唐山市大部、丰润县达十度；唐山郊区九度。滦县、丰润、滦南均为八度；而宁河为九度；天津市区及塘沽区属于七度区中的八度异常；远效汉沽区属于八度区中的九度异常；武清、宝坻为七度；北京市大部分为六度，局部为七度和八度。

2.2 给水管道的震害

2.2.1 唐山市

唐山市位于冀东平原，市区以京山铁路（北京至山海关）为界，分为路南、路北两大区；另外设有东矿区及东南郊开平区。

唐山市岩土分布基本上可分为三部分：

① 荆各庄坳陷沉积

沉积厚度300~400m。由于陡河分割，一部分的上部为塑性砂质粘土，下部为粉细砂，地震时易发生液化，属于Ⅲ类场地土；另一部分上部为可塑—硬塑砂质粘土，下部为密实、均匀的细中砂，属于Ⅱ类场地土。

② 唐山隆起

是基岩裸露或浅坦区，以大城山、凤凰山等不连续的小丘为主体，形成唐山隆起区。覆盖层厚约0~20m砂质粘土和粘土，密实，属于Ⅰ类场地土。

③ 开平坳陷沉积

在唐山市的东南郊，为唐山断裂的下降点，沉积约为150m，有3~5m厚的砂质粘土或砂质垆的覆盖表层，其下则是密度较低的砂层，为Ⅲ类场地土。

唐山市的城市给水管网，总长约220km，在强烈地震中遭到了严重破坏。管网敷设以灰口铸铁管为主，部分管道采用了钢管、自应力水泥混凝土管和预应力混凝土管。接头形式除钢管外多为承插式，小部分采用法兰连接。承插接头内的填料以石棉水泥居多，部分接头采用青铅和胶圈柔性连接。

调查了唐山市区直径为75~600mm的铸铁管道干线、支线111km，遭到破坏444处，平均震害率为4处/km；极震区管道震害率达10处/km，面积约占5km²。

此外还调查了自应力混凝土管，9km长破坏17处；小口径钢管0.9km，破坏10处。

2.2.2 天津市

天津市属于海河水系入海口的滨海平原。地势平坦，多沼泽洼地，震前已填平的主要水坑约40~50个，一般坑深2~4m，少数深达10m以上。市区傍海河南岸中心地区为海河填土，厚度自地表起约5~6m，属于砂质垆一类性质，塑性指数在10~11左右，在地震动作用下液化现象普遍。市区其他地区，一般在地表以下20m深度内，自上而下大致可分为三种类型土层：人工填土层，多为炉渣、废墟土，厚度2~5m；黄褐色砂质粘土或粘土，局部有泥质夹层，中等程度压缩性，厚度在5.0m左右；灰色砂质粘土间或夹有砂质垆、粉砂，局部有泥质透镜体，底部普通沉积有灰黑色有机质薄层，一般厚度在10m左右。此外贯穿天津市的海河河道，在变迁过程中有四处改道，旧河道多为河沙堆填，在地震作用下液化，震陷严重。

天津市的远郊汉沽、塘沽区，位于海河水系的入海口，均属退海平原。地表以下1~1.5m深度内一般为人工填土，属于Ⅲ类场地土。地下水位在地表以下0.5~1.0m，在强烈地震作用下，局部地区出现大面积沉降。

天津市区的给水管网，主要由承插式铸铁管敷设，接头系属石棉水泥填料，调查直径75~1000mm的干管870km，震时破坏161处，平均震害率为0.18处/km。直径50mm的支管均采用丝扣连接钢管，722km长度内遭到破坏815处，平均震害率为1.13处/km。

天津市塘沽区和汉沽区的给水管网震害，由于地基土液化和震陷的影响，比市区破坏严重。塘沽区长79km、管径75~600mm的铸铁管道，破坏332处，平震均害率为4.18处/km；管径为100~200mm的刚性连接（套箍、石棉水泥填料）石棉管，长3.4km，破坏102处，震害率高达30处/km。汉沽区总长约20km、管径75~150mm的铸铁管管网，震后全部瘫痪，震害率在10处/km以上。

2.3 管道震害特征

2.3.1 由于构造性地裂对管道震害的影响

构造性地裂与深部发震构造不直接贯通，但其形式却受主断裂带活动所控制，有强烈的方向性和规律性。

与主断裂带平行的管道：唐山市复兴路直径200mm铸铁管道及和平路直径100mm铸铁管道，这两条管道基本上是和断裂带平行的，地震时基本上无损坏，反复兴路南端有少量震害；吉祥路南段管道，由于地基土为淤泥质土，地下水位高，场地条件差，致使局部管段的管子接头拔脱15cm，错口10cm。

与断裂带相跨越的管道：韩家后街铺设的直径150mm铸铁管，地震后地面产生裂缝、错动，高差达60~70cm。此外管道的裂缝南北拉开1.2m，上下错口量0.3m，与断裂带相垂直的管道由于受到剪切作用，大量接头发生断裂，承口掰裂。胜利路直径100mm的铸铁管，全长1070m，大部分是接头连接断裂。

实际震害反映了在一般情况下凡与断裂带相交或跨越的管道，不论其口径大小或接头方式如何，全部遭到破坏。小山东街以南，复兴路以西这一带管道全部破坏。小山东街、胜利路、花园街都是直径100mm铸铁管，与断裂带相交全部折断。吉祥路土产库南直径300mm铸铁管，由于地裂马路向南错位1.5m，路旁有三棵树也随之位移1.5m，路面下沉错位40cm，路下铺设的管道也随之断裂位移，在长达10多米的距离内管道垂直变位40cm，水平错位1.2m，并使管道承口整个掰断。

又如染织厂门前直径150mm铸铁管的干支管三通掰裂，水平错位3cm，垂直变位2.8cm，总之与断裂相交或跨越部位的管道，遭受破坏明显严重。

吉祥路水泥管道被地面断裂切断错开0.4m。牛马库地下管道被地面断裂扭曲、水平错位0.9m。

2.3.2 岸边滑移对管道的震害影响

岸边滑移对地下管道破坏的影响极为严重。唐山地震时，唐山市的陡河、滦河和天津市的海河、月牙河等河流两岸引起的向河心滑移现象是极为普遍的，尤其是临近震中的陡河流域更为严重，岸边滑移使河岸岸坡向河心发生大规模滑移，在滨河20m宽的范围内形成大规模的顺河裂缝，使河道变窄，床基升高，导致管道破坏，建筑和桥梁倾斜、倒塌。

陡河胜利桥由于两岸向河心滑移，使河宽缩短2.0m，塌落两跨，桥侧管道也塌落折断，此外过河管由于向河心滑移而折断。

天津市田庄海河过河管和沿月牙河岸边敷设的给水管网，均遭受严重破坏。

2.3.3 塌陷区对管道震害影响

地面塌陷是强烈地震引起的一种地面垂直变形,若按其成因,(1)不外乎区域性沉陷与年青拗带的区域下沉有关;(2)局部沉陷即通常由砂层增密和软土流变引起的震陷变形;(3)洞穴塌落震陷。唐山市的塌陷系指采矿区地下采空较多的地方。唐山南郊礼尚庄煤田区地震后形成深1.0~1.5m、面积0.33km²的水坑,这种塌陷是明显的,但对一般矿区采空区地面较小的变位对管道震害同样将有极大的影响。

如开滦煤矿塌陷区,大部为直径100mm铸铁管,承插式水泥接头,震后管道均断裂错位。人民公园至地方煤矿管线破坏多处,在人民公园北边有一处管道断裂,并上下错位50cm,有三处接头漏水;公园小学管子断裂,上下错位6m;地方煤矿东墙外管线断裂,上下错位60cm;劳保商店处直径150cm三通断开,水平错位2.7cm,并在距三通1.5m处直管折断。

2.3.4 场地土对管道震害影响

不同类别的场地土对管道震害的影响在海城地震已经有所反映。唐山市大部分属Ⅱ类场地土;天津市、塘沽、汉沽属Ⅲ类场地土,并且地下水位浅,土质松软,砂层液化。当地震波通过软弱场地土时,其波速减小,地基土壤卓越周期增大,管道所受的地震应力也大。天津市(七~八度区)在唐山地震中地基土液化严重,喷砂冒水,地面下陷,海河、月牙河两岸移动开裂,地下给水管网损坏较多,大量漏水,影响工业生产和居民正常生活。塘沽是天津市的一个区,遭受八度影响,由于土质条件差,地震后水源井破坏,干管损坏300多处,导致供水中断。汉沽是属于天津的远郊区,为九度区,场地条件差,冒砂喷水严重,地面下陷,井管弯曲,井室倒塌,地下水管网破坏极为严重,管道震害率高达10处/km。从7月地震发生至10月中旬仍主要依靠地面临时明管供水,部分地区用水车定点,定时送水。

三个地区的场地土不同,其震害率也不相同,唐山的烈度是十~十一度,而管道平均震害率是4处/km,汉沽烈度虽是九度,而管道平均震害率竟达10处/km,详如表5所示。

表5 不同场地管道的震害率

地 址	烈度	场地土	管道平均震害率 (处/km)	附 记
天 津	七~八	Ⅱ	0.18	地质土壤条件比天津差 地质土壤条件比塘沽还恶劣
塘 沽	八	Ⅲ	4.18	
汉 沽	九	Ⅲ	10.00	
唐 山	十~十一	Ⅱ	4.00	

除了唐山和天津等地比较之外,唐山市路南区 and 路北市的震害也有很大差异。路南区震害严重,它的覆盖层厚达100余米,在石炭纪、二迭纪煤系地层上有一层卵石,上面为粘土及砂的互迭层;路北区覆盖层较薄,在大城山、凤凰山一带还有石灰岩露出,有的地方5~6m深也可以看到灰岩,所以,路北区震害较轻和场地情况是分不开的。

唐山市有不少的柔性接头管道被拉开,刚性接头管道拉断或松裂,这种现象必须进一步

与场地应变联系起来分析,才有助于宏观分析。以震中为中心,连接成为三角网,然后以每个三角形作为一单元,算出三角形边长和方位角,再求出每条边的应变值,最后绘成唐山场地应变等值线图。

2.3.5 管道材料、接头型式与管道震害的关系

唐山市给水管网以铸铁管为主,其次是钢管、自应力水泥混凝土管、预应力混凝土管。从管材本身破坏的形式有:管体强度较低处开裂;管体折断;纵向裂缝;环向裂缝;剪切裂缝;管体爆裂。从接头破坏的形式有:接头拉开;接头松动漏水;承口掰裂;接头剪裂。

地震区均采用灰口铸铁管,这种管材延性差,强度低。承插口内填料为石棉水泥或自应力水泥,可伸性、可挠性均较差。钢管一般说来强度、延性均高,但是唐山接户线的钢管防腐处理不善,年代久,腐蚀严重,经不起地震波的冲击,管身有的断裂,丝扣接头破裂。自应力混凝土管是较好的管材,无论从管体强度或柔性接头方式,其抗震性能均比较好,承插式接头用橡胶圈密封,所以在唐山地震中这种管道基本完好,震害较轻。如在唐山市北郊水厂沿唐马公路铺设的直径 $\phi 300\text{mm}$ 及直径 $\phi 500\text{mm}$ 两条自应力混凝土管,长约1000多米,全线仅在水厂东北侧穿越水沟处6个接口破坏,其原因是水沟附近公路塌陷30cm而影响了管线,其破坏现象是胶圈被拉出,承口掰裂。此外尚有8km震害极微。

平口式预应力混凝土管是早期的水泥制品,它的接头是套环形式,石棉水泥填料,属于刚性,直径为 $\phi 600\text{mm}$,长度6km,在接头处破坏严重。例如唐山市西北邻水厂一段直径 $\phi 600\text{mm}$ 、长度1100m的管段内,震后破坏9处;其破坏现象是管口断裂,管口拔出。但这种管材现在按承插式管芯缠丝预加应力或振动挤压预加应力工艺生产,在地震中都反映了是抗震最好的管材,很少遭到破坏。

天津市承插式铸铁管道的破坏形态,以接头处拔脱和接头附近管身折断为主,后者以小管径管道居多,与使用年久、管材震前遭受明显腐蚀有关;大管径管道的破坏形态均为接头脱出,详见表6及表7所示。

天津市除铸铁管道以外的其他管材敷设的管道,同样以胶圈柔口接头的预应力混凝土管抗震性能较好,在遭受三度烈度影响下保持完好。刚性填料接口的石棉水泥管道破坏最重,详见表8所示。

2.3.6 管径与震害率

唐山地震中,地下管道的震害率与海城地震中的反映相似,小管径管道的震害率较大口径管道高。如以天津市区的给水管网的破坏统计,管径 $\phi 75\text{mm}$ 以上的干管,平均震害率为0.18处/km;管径 $\phi 50\text{mm}$ 以下的支、户线的震害率高达1.13处/km。以天津市区管径75mm以上的铸铁管道的震害率对比,从表6统计同样的规律是随管径增大而震害率有下降的趋势。天津市塘沽区铸铁管道的震害反映,情况也是类似,如表7所示。以不同管材的管道对比,反映了管径大、管截面刚度大的管道,震害率明显低。

表6 天津市区给水管道的震害统计

震害数(处) 管径(mm) 破坏类型		75	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800~ 1000	小计 (处)	占震害百分率%	
														分项	小计
接口	接口拔脱		16	10	8		2	1	7	5		1	50	31	
	套筒断裂		1	1						1			3	2	39
	承口开裂	1	1	2	1		2		1	2			10	6	
管身	折断	1	21	10	3		6	1					42	26	
	纵裂		4	3	2								9	6	32
附件	弯头、三通、四通			4		1	2		1	1			9	6	
	闸门		6	2	2		1	2					13	8	29
	其他	4	10	6	2				2			1	25	15	
小件(处)		6	59	38	18	1	13	4	11	1		2	161		100
管道长度(km)		302.7		379.9			146.3			41.1			870		
震害率(处/km)		0.21		0.18			0.16			0.07			0.18		