

管道的抗震设计 施工与监护

A.C.格赫曼 X.X.扎伊涅特季诺夫 著
刘 昆 张宗理 译

地震出版社

1992



钢部分停产。1976年唐山大地震(7.8级),市区给水系统全部瘫痪,经两个多月抢修仍主要依靠地面临时供水,部分地区采用水车定点定时送水,给人民生活带来诸多困难;秦皇岛—北京油管线发生5处破坏,除一处因滦河大桥倒塌而造成桥上跨越管线破坏外,其余4处基本上发生在7度区(管材为质量很好的16Mn钢管),造成原油流失1万吨,污染了农田和滦河,经过一个多月抢修才恢复生产。由此可见,地震能够在较大范围内造成各种管线的破坏,这不能不引起人们的关注。

近十年来国内外不少地震工程学者对管道的抗震分析方法、震害预测和提高管道抗震性的措施方面,开展了震害调查和分析,建立各种力学模型和计算方法,进行了模拟试验和现场测试。国内外著名学者发表了大量论著,并在国际学术研讨会上进行学术交流。原苏联的学者在这方面也做了大量的工作,但交流甚少,为此我们翻译了《РАСЧЕТ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРУБОПРОВОДОВ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ》一书,奉献给我国学术和工程界的广大读者,以推动该领域的科研、设计、施工、监护方面的技术进步。

本书共分五章:一、地震作用下管道性状的实际资料分析;二、管道损坏的强震标志;三、干管地震作用的计算;四、提高管道的抗震性;五、干管的施工组织、施工实施和使用的特点。本书内容丰富、涉及面广,实用性强。如果本书能受到我国学术和工程界同行们的欢迎,我们将感到欣慰。

本书中译文由范小明同志负责校对,北京市政工程研究所所长孙绍平教授、冶金部建筑研究总院防灾抗震工程研究所所长侯忠良教授等审定。在此我们表示衷心的感谢和敬意。

由于多方面的原因,书中难免有误或不当,敬请读者谅解和批评指正。

译者

1992年7月1日

(京)新登字095号

内 容 提 要

本书论述了国外几次典型的大地震给管道带来的危害;分析了造成管道损坏的强震标志;例举了现代干管的结构和抗震措施;介绍了管道抗震计算和抗震设计的实用方法;提出了地震区管道施工组织设计和施工的特点,以及管道技术状态实施监护的措施。本书可供从事地震工程研究和工程设计、施工,以及管理部门的工程技术人员、大专院校有关专业的师生参考。

管道的抗震设计施工与监护

A·C·格赫曼 X·X·扎伊涅特季诺夫 著

刘 昆 张宗理 译

责任编辑:肖承邨

责任校对:肖 昆

地质出版社 出版

北京民族学院南路9号

北京市通县永乐印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 5.5印张 140千字

1992年8月第一版 1992年8月第一次印刷

印数 0001—3500

ISBN 7-5028-0619-9/TU·52

(1009)定价:8.50元

前 言

管道在现代化的工业生产和人民生活中占有相当重要的位置。管道（包括地上、地面和地下）在输水、油、气（汽）、煤以及通信、供电、交通、运输和排水等方面得到广泛地应用，成为现代工业和城镇生活的大动脉，因而被称之为生命线工程。如何确保这些生命线工程在未来地震中安全可靠地运行，是当前工程设计和管理部门迫切需要解决的难题，也是近几年来国际地震工程界的一个热门课题。

众所周知，地震不仅直接破坏管道的正常使用功能，而且还可能产生严重的次生灾害（火灾、爆炸、泄毒），致使城市和工矿企业处于瘫痪状态，其经济损失和人员伤亡往往高于建筑物倒塌所造成的直接后果。例如：1906年美国旧金山地震（8.3级），3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，导致14km²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36km²的市区被烧毁，3.2万人被烧死或窒息而死，占该地震死亡人数的1/3。1971年美国圣费尔南多地震，地上煤气管道发生450处破坏，给居民生活和工业生产造成严重的危害。在中国，1975年海城地震（7.3级），营口市（8度区）150多km的管道有372处破坏，平均破坏率为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66.5km，焊口断裂21处（破坏率为0.31处/km），丝扣连接的小口径管道破坏率为16处/km，铸铁管道的破坏率为0.8处/km，辽河油田14条输油管线，破坏29处，因中断供油迫使鞍

目 录

第一章 地震作用下管道性状的实际资料分析..... (1)

1.1 管道调研所需的原始资料..... (1)

1.2 不同地震烈度作用下管道性状的分析 (3)

1.3 管道抗震性实验研究结果..... (37)

第二章 管道损坏的强震标志..... (43)

2.1 管道损坏形式..... (43)

2.2 确定造成管道损坏烈度最小的地震作用..... (46)

2.3 按口径不同材质的管道抗震性的比较..... (49)

2.4 管道损坏与其空间方位的关系..... (51)

2.5 地下管道埋深对其抗震性的影响..... (52)

2.6 评价施工场地地震烈度用的管道损坏系统分类 (55)

第三章 干管地震作用的计算..... (62)

3.1 现代化的干管结构..... (62)

3.2 管道对地震作用的反应..... (66)

3.3 地下干管课题的研究与计算..... (70)

3.4 地上干管和管桥的计算..... (93)

第四章 提高管道的抗震性..... (105)

4.1 干管工程危险性的评定 (在地震作用下可靠性概率的评定)..... (105)

4.2 提高干管抗震性的基本措施..... (116)

4.3 提高地下管道的抗震性..... (117)

4.4 提高地上管道的抗震性..... (124)

4.5 保护性挡土墙的计算..... (133)

第五章 干管的施工组织、施工实施和使用的特点..... (139)

5.1 施工组织和实施的特点..... (139)

5.2 干管技术状态的检查和监护系统..... (144)

第一章 地震作用下管道性状的
实际资料分析

1.1 管道调研所需的原始资料

根据已有的专题研究所获得的实际资料，可以判断管道的工作特性。在确定不同管径管道损坏或破坏时，要考虑到场地的土质条件、管道埋深、管道与地震波的传播方向，以及所采用的管道构造方案。

地震烈度和构筑物，首先是管道破坏的详细数据是研究震害的主要依据。收集烈度7—11度的地震资料可用于研究不同敷设条件下的各种构造管道对地震的反应，以及确定管道非破坏的某些相对的界限（表1.1）。

表1.1 地震特征

地 震 区	日 期	震 级	极震区烈度值 (按MSK-64 地震烈度表)
圣费尔南多(加利福尼亚 州, 美国)	1971年2月9日	6.7	10—11
福井(日本)	1948年6月28日	7.3	9—10
克思郡(加利福尼亚州, 美国)	1952年7月21日	7.7	9—10

续表

地 震 区	日 期	震 级	极震区烈度值 (按MSK—64 地震烈度表)
墨西哥城(墨西哥)	1985年9月19日	7.8	9—10
旧金山(加利福尼亚州,美国)	1976年4月18日	8.3	9
东京(关东地区,日本)	1923年9月1日	8.2	9
阿什哈巴德(土库曼共和国)	1948年10月6日	7.3	9
安克雷奇(阿拉斯加,美国)	1964年3月28日	8.6	9
新潟(日本)	1964年6月16日	7.5	9
十胜川(日本)	1968年3月16日	7.9	9
马那瓜(尼加拉瓜)	1972年12月23日	6.5	9
弗留利(意大利)	1976年5月6日	6.5	9
阿斯南(阿尔及利亚)	1980年10月10日	7.2	9
加兹拉(乌兹别克共和国)	1976年4月8日	7.2	9
	1976年5月17日	7.3	7—8
	1984年3月18日	7.2	8
凯拉库姆(塔吉克共和国)	1985年10月13日	6.1	8

续表

地 震 区	日 期	震 级	极震区烈度值 (按MSK—64 地震烈度表)
塔什干(乌兹别克共和国)	1966年4月26日	5.1	7~8
库姆达格(土库曼共和国)	1983年3月14日	5.7	7~8
伊兹梅尔(阿塞拜疆共和国)	1981年10月30日	5.5	7

注：按MSK-64地震烈度表近似地评估苏联境内发生的地震强度，是以不同类型建筑物震害资料分析为依据的。

1.2 不同地震烈度作用下管道性状的分析

阿什哈巴德地震 1948年10月5日夜间到10月6日在阿什哈巴德地区发生了地震。地震波及到土库曼加盟共和国整个区域，乌兹别克加盟共和国和塔吉克加盟共和国大部分地区，以及伊朗北部地区。震源位于阿什哈巴德东南方20—25km处，即科彼特山麓。震源深度为20—30km。按MSK-64地震烈度表，阿什哈巴德地区的地震烈度为9度（据P·M·穆库尔杜莫夫、H·O·奥拉兹姆别多夫等提供的资料）。

城市大部分土质为均质的黄土类亚粘土，亚粘土下面为基岩。地下水位深10—15m。阿什哈巴德的大部分建筑物和地上构筑物因地震而破坏或毁坏。由市政供水管网和火车站、一些企业供水系统构成的城市供水管网也出现破坏（表1.2）。

从表1.2可以看出，不同口径的钢管道长度占供水管网总长度的21%，而口径300mm的钢管管道总长为2800m（占供水管总长的2.5%）。铸铁管道和石棉水泥管道长度分别为管网总长

表1.2 阿什哈巴德供水管网（按1943年10月6日状态）特点

管 径 (mm)	管道敷设长度 (m)			总 长 (m)
	石棉水泥管	铸 铁 管	钢 管	
50	1100	—	3200	4300
63	—	—	1350	1350
75	230	600	6810	7640
100	6800	21830	12100	40810
125	—	—	2820	2820
150	7600	6200	200	14000
175	—	4000	—	4000
200	5720	6800	3600	16210
250	—	1150	—	1150
300	15320	1750	2800	19870

度的38%和33%。阿什哈巴德的大部分供水管道的口径为50—100mm。在阿什哈巴德，除了石棉水泥管道、铸铁管道、钢管道之外，还有钢筋混凝土管道（占供水管网总长的6%）。钢筋混凝土管道口径为200、300和400mm。供水管网压力不超过0.3—0.4Mpa。

钢管道的连接为螺口、套管、法兰盘（小口径管道）或焊接（大口径管道）。钢筋混凝土管道的连接采用可移式套管。铸铁管道的连接为承插式接口并用含铅的水泥封口或“жибо”型套管。石棉水泥管道用“сиплекс”型和“жибо”型套管接口。管道埋深（距管子上部）浮动于0.7—1.8m之间。阿什哈巴德供水管网陈旧（部分管段由1894年起启用）。因许多陈旧的管道严重腐蚀，在地震前供水管网事故已屡见不鲜。

1948年地震时管道大部分破坏发生在阿什哈巴德北部较小的区域内，该区域土质条件不良，震后在土层中出现明显的变形。城市大部分土层是由黄土类亚粘土构成，具有匀质性和密度大的特点，而当时地下水位深10—15m，管道实际上未发生破坏。

震后立即出现管网失效和局部很严重的损坏。例如，1948年10月仅城市管线就发现有24处破坏，而1949年—1951年亦仅有51处破坏。

根据调查可以证实，主要受损管线是其走向与地震波(西南—东北)传播方向一致的管线，而且大多数损坏发生在主干管与支管的连接部位，以及管道与其它结构物、检查井等的连接处。震时地面出现明显裂缝的地带，常常发现管道遭到破坏。

钢管道破坏的典型实例是对接套管和法兰盘的破坏，螺口连接处的螺口断裂。阿什哈巴德火车站内部的小口径钢管管网实际上没有发生损坏。

在口径300mm的钢筋混凝土管道中有13处损坏。在口径250mm的钢筋混凝土管道中有36处损坏。其连接部位破坏是一种很典型的形式，并在多处发现管壁横向开裂，以及管道与贮水备用井连接部位的非金属管子断裂等(图1)。

铸铁管道和石棉水泥管道遭到明显的破坏(接口破坏，石棉水泥管折断)。口径100mm的石棉水泥管道的破坏是最典型的。在发生事故的管段内，其管道是敷设在壕沟内，该沟的底部为新填土的沟槽(沟槽宽约2m)。管道敷设在设计位置上之后，壕沟即用土回填。发生地震时管道因回填土压力和地基沉陷(沟槽中新填土沉陷)而断裂。这个例子证实了设置密实地基的重要性，尤其对于脆性材料的管道或刚性接口连接的管道更为重要。实际上，对于大部分管段，在其施工时不能保证其地基的匀质性。

阿什哈巴德管网最典型的震害是由下列原因造成的：

1) 管子开裂和折断(非金属管)；

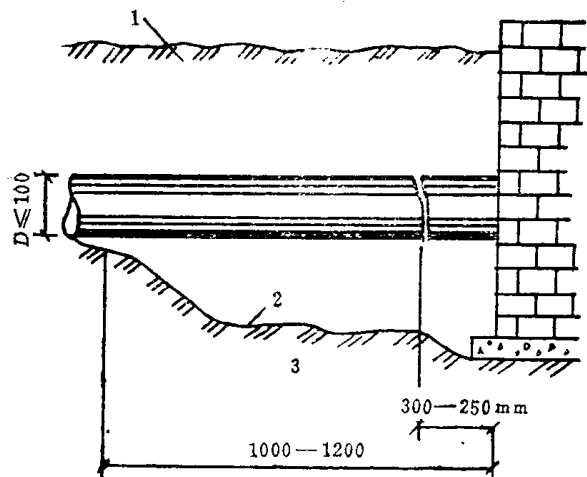


图1 与构筑物连接的石棉管道典型的破坏实例
1——真土；2——构筑物（井）基底；3——非扰动土
（黄土类亚粘土）

2) 接口破坏（承口或套管连接的管端破坏，铅或水泥封口破坏等）；

3) 异型管拉断或接头螺口断裂。

可见，大多数损坏和破坏是由于地震行波沿管道轴向方向产生的拉力作用而引起的。管道基础不均匀沉降和地震作用引起的很大竖向荷载是管道产生裂缝和折断的原因。应该着重指出，地下管道破坏集中在土层出现较大变形和伴随着地表出现裂缝的附近区段。

钢筋混凝土管道的事故（每公里管道的损坏数量）最多，为3.82起，铸铁管道和石棉水泥管道事故为0.3起，钢管道事故最少，为0.073起。阿什哈巴德市钢管道震害轻、事故少，主要是因为地震拉力小，管道柔性好和强度高（整个管道强度均匀，其中也包括接口）。

根据阿什哈巴德市管网调查资料确定了管道损坏程度与其埋深的关系（图2）。就阿什哈巴德的具体情况来看，管道破坏的

数量和特点实际上与其埋深无关。管道破坏与埋深之间没有发现明显的关联。然而应该指出，钢管道的事故随着埋深增加而增多，在埋深为1.7m处事故达0.34起。这可以解释为土体对管道的约束增大，即与管周土共同变形所致。

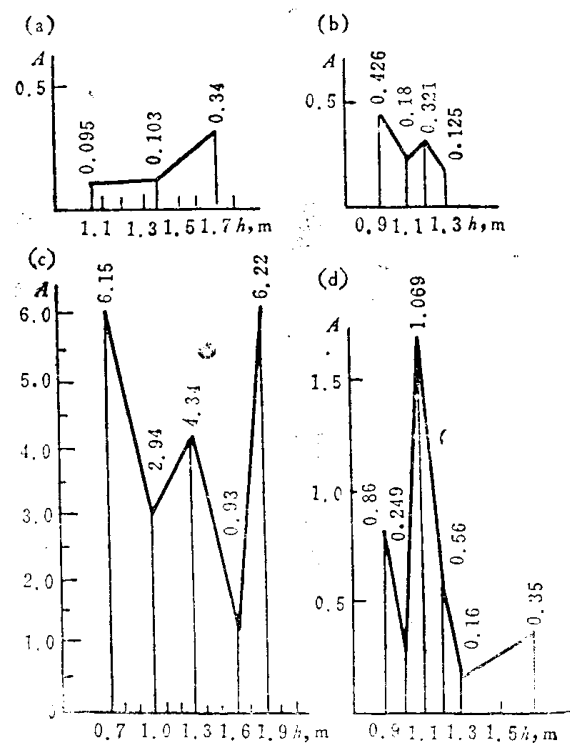


图2 管道事故A曲线图

(a) ——钢管；(b) ——铸铁管；(c) ——钢筋混凝土管；
(d) ——石棉水泥管

埋深在1.3—1.6m时，铸铁管道、石棉水泥管道和钢筋混凝土管道事故有明显的波动。这可能是因为管周土的密度不同，以及相邻管段和与其连接的构筑物有明显沉降，而且主要是不均匀沉降。承插口和螺口接头的铸铁管、钢筋混凝土管和石棉水泥管对这类变形特别敏感。对这些管道来说，沿管道纵轴法线方向，特

别是垂直作用的地震行波是很危险的。在埋深增加到1.4—1.6m时，任何材质的管道事故都明显增多。这可以解释为，是由于管周土约束程度增加（即由土传递到管道上的地震作用增大）和较大的土层变形。

塔什干地震 塔什干地震发生在1966年4月26日。在塔什干，按MSK-64地震烈度表，记录的地震烈度为7—8度（震级5.1）。震源位于市中心。据塔什干地震观测站数据分析，震源深度约8 km。观测到的最大强震位于市中心，面积近10km²。在震中以外的地区，地震烈度降低很快。在距城市7—8 km处，地震烈度为4—5度。在震中地区主要为垂直振动。水平加速度（特别是在震中以外地区）是不明显的。在市中心地表发现几处宽约2 cm，长约20 m的地裂缝。在1966年4月至5月间发生700多起有感地震，其中有几起达到7度地震。5月10日记录了震源深度为2—3 km的7度地震。与4月26日地震相同，地震烈度在震中之外地区降低很快。1968年4月4日在塔什干发生了类似的破坏性地震，同时伴有短周期的垂直振动。

城市范围内的地貌是稳定的，在塔什干调查的地区，冲积土层的上层土具有压缩刚度较低的特点，主要为黄土类亚粘土，其厚度在2—55 m之间，亚粘土的下卧层为基岩或砾石。在5—20 m深处发现地下水。

管道的大部分震害发生在亚粘土构造的场地，亚粘土层厚度为20 m以上。该地区的地震烈度为7—8度。但也有个别震害发生在地震烈度为6度的地区（据B·T·拉斯卡诺夫斯基、T·P·拉什多夫、K·C·阿勃杜拉什多夫等提供的资料）。

在震中地区发现管道有7处损坏。基勃拉伊斯克供水管道的损坏最为严重。该管道建于1965年，为口径900 mm的钢筋混凝土管，埋深为3.35 m。地震时该管道承口破坏。

1952年在那沃伊街建成的口径400 mm的自来水铸铁管道（埋深2.4 m）出现类似性质的破坏。有两处破坏（在管体和接口处

发生裂缝)发生在配水钢管线上。这些管道口径为200和150mm,埋深1.5—1.6m。应该指出,这些管道使用了15年以上且锈蚀严重。

在震中地区,口径150—200mm埋深1.4—1.6m的铸铁管道、石棉水泥管道发生了破坏(接口破损)。震中以外的区域,共发生了4起事故。

1966年在塔什干离震中相当远的地区,大口径煤气干管、自来水钢管道使用正常。在塔什干中心区有一条煤气钢支管。调查表明,所有的钢管道经受起地震的考验。不论是主管线还是支管与检查井、建筑物、煤气供应站的连接部位,均未发生破坏。城市煤气供应管网的地上钢管道,很好地经受了地震的考验,而固定在建筑物墙面上的管道是属于管网中额外加强的部件,然而在多数情况下局部管段出现了明显的变形。

从震害调查分析得出以下结论:在地震烈度不大于7—8度和地震沿管道纵轴法线方向作用时,地下管道(特别是钢管道)实际上几乎没有遭受破坏。铸铁管道和非金属管道事故是由垂直和水平地震共同作用下造成接口破坏而引起的。可见,塔什干地区非金属管道和铸铁管道破坏较少和钢管干线无破坏的情况说明,地震作用强度较低,以及沿管道纵轴方向作用力较小是其主要的原因。

加兹拉煤气工业区地震(乌兹别克共和国)^[17] 1976年4月8日和5月17日及1984年3月18日在加兹拉地区发生了几次地震。在这种情况下可以评价相同方向不同地震力作用于同样的一些构筑物(管道、空气压缩站和其他工艺设备)的工作特点。苏联科学院施米特地球物理研究所的科研人员获得了有关该地震的数据(H·B·谢巴林, B·B·什吉伊别克等)。

加兹拉煤气工业区和住宅区距布哈拉约100km。1976年4月8日在该地区发生了震级为7.0级的地震。工业区的地震烈度近8度。4月10日至5月16日期间,临时的地震观测站记录了100多次

地震,但地震烈度均不大于6度。

1976年5月17日在同一地区记录了一次新的地震,震级为7.2级,震源深度为20—25km,震中位于加兹拉住宅区30—40km处。震源在断裂的垂直平面上,其断裂是以交错正断层的方式发生错动。建筑物和其他一些构筑物在第一次地震时损坏较为严重,在后来的地震(烈度不小于8度)中则遭到完全破坏。通过土体裂缝观测到致密的岩石被挤裂并成块喷出现象。在沥青路面上出现了2—3cm宽的纵向裂缝。直接铺设在土基上的混凝土板出现了龟裂和几厘米的沉陷。

1976年5月17日在震中(卡拉基尔水井)获得的加速度记录表明,在振动周期约为0.05s时,其垂直加速度达1.3g。在较长的周期段,其水平方向的加速度值也不超过0.5—0.65g。而且最大加速度是由剪切波的传播所决定的。既然周期为0.10s的地震对建筑物和构筑物没有危害,所以震中的地震烈度按水平加速度进行评估,为9度。有趣的是,最大的地震水平加速度(0.8g和0.62g)发生在东西方向。

1984年3月18日深夜到3月19日凌晨发生了一起新的大地震。震中位于北纬40.7°、东经63.3°的地区,即1976年地震震中附近。震时在震中地区未能取得地震记录。7.2级的地震震源位于约30km深处,距生产现场和重建的加兹拉城西北方向几十公里处。据测报数据分析,震源的地震烈度超过9度(按MSK—64地震烈度表),在加兹拉地区为8—9度,而在布哈拉为7度。地震的主要作用方向为垂直方向。这个结论是根据建筑物、构筑物和管道支架现状,以及管道的断裂和变形推断得出的。

煤气工业区为空旷地。工业区和城市(1976年时为镇)的场地比较平坦,虽然还有些丘陵和谷地,但该地区地表下的砂土已由植被所复盖,是稳定的。空压站、工艺设备和其他构筑物所在场地的最典型的工程地质剖面具有以下特点:地表至0.5m深为细颗粒粉砂,0.5—2.0m深为含有亚砂土的强粘合砂砾层,2.0—

3.0m深为强风化的粘土质泥灰岩，该泥灰岩在各个方面都有许多裂隙；3.0m深度以下为弱风化密实的泥灰岩。在设计勘察阶段钻孔中未见地下水。

在管道敷设的部分区段，以及一些工业构筑物的场地，地质剖面特点与上述的略有不同。例如，亚粘土下面的细颗粒砂层的厚度在某些部位达2—3m。1976年地震后发现地下水上升，这可能与地震期间加兹拉地区出现十分明显的沉降有关。1984年工业区未见地下水位上升。在加兹拉煤气生产区和工业场区，地形未见明显变形。然而在管道和其它结构施工时因地基土和回填土未经充分夯实的地段发生了沉降，然而与其他地段一样，地表变形亦很小或者根本没有变形。

在加兹拉和布哈拉地区有多支钢管煤气管网（工业管道、主管、支管）、供热管网、给水管网。由此通往各地的煤气管道有：中亚—中央，布哈拉—乌拉尔，加兹拉—塔什干—伏龙芝—哈拉木图。管网主要走向为由南向北。用高强合金钢制作的干管口径为720—1020mm。干管的煤气计算压力为5.5Mpa。在1976和1984年地震时煤气压力为4Mpa。

1976年4—5月间进行的调查，以及后来调查表明，地下管道经受了地震的考验。在震后未经任何特殊的检修仍能正常使用。可见，设计时强度储备大（假定安全系数约等于2），土质条件非常良好和大部分管段的管周土是均匀的，以及由于管道的柔性大，为变形和承受附加地震应力提供了补偿能力。

还应指出，如上所述，确定加兹拉地区管道工作特性的一个重要因素是具有最大加速度的地震剪切波为东西方向。假定震源位于加兹拉西北方向约30—40km处，那么具有最大加速度的地震波传播方向大致与南北走向的干线管道相垂直。此外竖向地震作用占优势，这一点由口径700mm的地下管道钢筋混凝土支墩破坏特性和相应的加速度记录所证实。只有经过一段时间的观察，根据地震前后相等时间内的事故次数对比和分析，才能获得管网和