



断层地表同震位错的平均位移估计方法

王龙 刘爱文 李祥秀 范晓庆 张立宝 王郁

Estimation of average displacement of fault surface co-seismic dislocations

Wang Long, Liu Aiwen, Li Xiangxiu, Fan Xiaoqing, Zhang Libao, Wang Yu

引用本文:

王龙, 刘爱文, 李祥秀, 范晓庆, 张立宝, 王郁. 2022. 断层地表同震位错的平均位移估计方法. *地震学报*[J], 44(5): 845–852. DOI: 10.11939/jass.20220122

Wang L, Liu A W, Li X X, Fan X Q, Zhang L B, Wang Y. 2022. Estimation of average displacement of fault surface co-seismic dislocations. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(5): 845–852. DOI: 10.11939/jass.20220122

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220122>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2016年日本熊本地震破裂时空过程联合反演

Joint inversion of teleseismic and co-seismic InSAR data for the rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in Japan
地震学报. 2018, 40(1): 13–23 <https://doi.org/10.11939/jass.20170097>

日本熊本 M_w 7.0地震同震位移场和震源滑动模型反演

Coseismic displacement field and slip model derived from near-source strong motion records of M_w 7.0 Kumamoto, Japan, earthquake

地震学报. 2017, 39(6): 819–830 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.001>

地震动永久位移对结构地震反应影响

Influence of permanent displacement of ground motion on seismic response of structures

地震学报. 2020, 42(4): 482–490 <https://doi.org/10.11939/jass.20200011>

基于无人机摄影测量技术的地震地表破裂带定量参数提取

Using UAV photogrammetry technology to extract the quantitative parameters of earthquake surface rupture zone: A case study of the southern Zhongwei $M7$ earthquake in 1709

地震学报. 2021, 43(1): 113–123 <https://doi.org/10.11939/jass.20200039>

基于Newmark模型的概率地震滑坡危险性分析方法研究

Probabilistic seismic slope displacement hazard analysis based on Newmark displacement model: Take the area of Tianshui, Gansu Province, China as an example

地震学报. 2019, 41(6): 795–807 <https://doi.org/10.11939/jass.20180075>

芦山地震强地面运动之阿里亚斯强度及Newmark位移特征研究

Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake

地震学报. 2021, 43(6): 768–786 <https://doi.org/10.11939/jass.20200180>

王龙, 刘爱文, 李祥秀, 范晓庆, 张立宝, 王郁. 2022. 断层地表同震位错的平均位移估计方法. 地震学报, 44(5): 845-852. doi: 10.11939/jass.20220122.
Wang L, Liu A W, Li X X, Fan X Q, Zhang L B, Wang Y. 2022. Estimation of average displacement of fault surface co-seismic dislocations. *Acta Seismologica Sinica*, 44(5): 845-852. doi: 10.11939/jass.20220122.

断层地表同震位错的平均位移估计方法^{*}

王 龙 刘爱文[†] 李祥秀 范晓庆 张立宝 王 郁

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 根据管道性能设计的理念, 现行管道抗震设计规范规定现行输油气管道重要区段和一般区段的设防断层位移分别为预测的最大位移值和平均位移值, 目前的断层位移估计方法一般给出的只是断层未来一百年的最大位移值, 而不能给出平均位移值. 针对此问题, 本文综合国内外发震断层在地表的同震位错分布调查结果, 总结分析了断层同震位错沿断层地表破裂走向的分布形态特点, 并通过对实际震例中不同计算方法得到的平均位移进行对比分析, 得到了断层的平均同震位错量与断层最大同震位错量的比值关系. 基于国内外地震断层位移的大量数据, 考虑一定的安全系数, 本文建议采用预测断层最大位移值的 2/3 作为一般区段输油气管道的设防断层位移.

关键词 断层地表破裂 同震位错 输油气管道 平均位移 设防位移
doi: 10.11939/jass.20220122 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Estimation of average displacement of fault surface co-seismic dislocations

Wang Long Liu Aiwen[†] Li Xiangxiu Fan Xiaoqing Zhang Libao Wang Yu

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the concept of pipeline performance design, the current seismic code for oil and gas pipelines stipulates that the displacement of fortified faults in important sections and general sections are the predicted maximum displacement and average displacement, respectively. However, at present, the fault displacement estimation method generally gives only the maximum displacement of the fault in the next 100 years, but not the average displacement. Therefore, based on the investigation results of co-seismic dislocation distribution of seismogenic faults on the surface at home and abroad, the distribution characteristics of co-seismic dislocations along the surface fracture trend of the fault are summarized and analyzed in this paper. And then the ratio of the average co-seismic dislocation of the fault to the maximum co-seismic dislocation of the fault is summarized by the statistical comparison and

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(51778588)和中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB22X09)共同资助.

收稿日期 2022-07-06 收到初稿, 2022-08-10 决定采用修改稿.

作者简介 王龙, 在读博士研究生, 主要从事抗震设防管理和工程地震学研究, e-mail: wangl@cea.gov.cn; [†]刘爱文, 博士, 研究员, 主要从事生命线工程和工程地震学研究, e-mail: Law73@126.com



analysis of the average displacement obtained by different calculation methods in the actual earthquake cases. Anyway, based on a large number of data of seismic fault displacement at home and abroad, considering a certain safety factor, this paper suggests that 2/3 of the maximum displacement of the predicted fault should be used as the fortification displacement of the oil and gas pipeline in general sections.

Key words: fault surface rupture; co-seismic dislocation; oil pipeline; average displacement; fortification displacement

引言

我国是一个地震多发国家,长距离输油气管道不可避免地要穿越活动断层.国内外震害调查结果显示断层位错是造成管道破坏的主要原因(Kennedy *et al.*, 1977; 刘爱文, 2002; 王龙等, 2020).因此,断层在未来地震中的位错方式和位错量成为了管道抗震设计的关键参数.断层的位错量一般是依据该断层上的古地震、断层滑动速率、断层长度以及所预测的地震震级来估计,例如:利用断层长度与地表最大位移量 D_{\max} 的统计公式,对断层可能发生的地震震级和同震位移量进行估算;也可以根据活动断层的不同震级档地震的重复间隔、滑动速率和历史强震的发生情况,综合预测评估时段内所研究的活动断层可能发生的最大震级,并根据震级与同震地表位移的统计关系,估算活动断裂的同震位移量(Bonilla *et al.*, 1984; 邓起东等, 2004).美国联邦地质调查局和南加利福尼亚大学的研究人员依据美国西部和全球的地震地表破裂资料,统计了不同断层类型的震级与破裂长度、破裂宽度、破裂面积、断层最大位移的经验关系,其中 Wells 和 Coppersmith (1994)共收集了全球含断层地表破裂的 148 个地震事件($M_s 5.2-8.1$),将断层上的地表最大永久位移描述为震级、破裂长度和破裂面积等的函数,这样既给出了不同类型断层分别对应的函数关系,又给出了所有类型断层对应的函数关系.

值得注意的是,上述研究给出的均是一次地震中断层位错的最大值.实际上,沿着地表破裂迹线各处的断层位错量并不相同.根据断层分段理论,断层中间部位的同震位错量最大,向两端逐渐衰减.此外,再加上断层发生下次破裂的不确定性,管道与断层交会处大概率不会正好是最大位错发生之处.因此,现行的管道抗震设防规范(中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017)根据破坏后果的严重程度,基于性能设计的理念提出:“位于重要区段的管道,其设防位移应为预测的最大位移;位于一般区段的管道,其设防位移应为预测的平均位移.”这是现行管道抗震设计规范首次提出预测的平均位移概念.在以往的震后地表破裂考察中,一般采用最大位移值的一半或者将野外考察所得的所有地表破裂位移的算术平均值作为平均位移,而采用最大位移值的一半作为平均位移往往带来设计风险.当采用所有考察点的位移平均值时,由于野外工作条件不同、人员不同,用位移平均值作为平均位移往往浮动很大,也容易为管道设防带来风险.鉴于此,为了满足输油气管道抗震性能设计的需求,本文将基于近些年来国内外强震后所得的详细的断层地表位错考察资料和已有的断层最大位移估计方法,开展断层平均位移估计研究,以期为现行管道抗震设计规范中平均位移概念提供依据.

1 断层平均位移常用计算方法

1.1 算术平均值 \bar{D} 方法

取所有考察点的断层同震位错的算术平均值, 按以下公式计算得到断层平均位移:

$$\bar{D} = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad i=1, 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

式中, \bar{D} 为此次断层位移的算术平均值, n 为断层位移的测量点数, D_i 为第 i 个测点的断层位移值.

对于走滑断层, D_i 为沿断层走向的水平位移; 对于正断层或逆断层, D_i 为沿断层面的倾滑位移.

1.2 面积等效平均值 D_S 方法

面积等效平均值 D_S 的计算公式如下:

$$D_S = \frac{S_{D1} + S_{D2} + \dots + S_{Dn}}{L} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n S_{Di} \quad i=1, 2, 3, \dots, n, \quad (2)$$

式中, S 为所有沿着地表破裂迹线分布的断层位移覆盖的面积, L 为地表破裂长度.

2 地震破裂分段与形态特征

根据活断层分段理论, 断层可以分成若干段落, 一次地震在地表造成破裂的总趋势往往是中间大向两边渐小(丁国瑜等, 1993). 从宏观来看, 地震断层带的中央部位或中段的位错常常最大, 而向两端逐渐减小. 实际上, 沿断层带的位错大小往往起伏, 多数反映其次级断层的位移变化. 例如, 走滑断层带可由一系列雁列式或羽列式排列的次级断层组成, 首尾相连的次级断层形成起伏. 一条次级断层的水平位移往往中间大两端小, 也有特例是一端大一端小, 垂直位移则相反, 在两条次级断层的相邻部位最大, 这表明水平位移和垂直位移因断层结构变化可产生相互转化.

国内外震后断层永久位移的详细调查显示, 一段断层的一次破裂引起的位移曲线一般是抛物线形状, 连续多段断层的破裂则会引起地表的多次起伏或不规则起伏. 为便于研究, 本文仅针对一个断层段单次破裂的情况展开研究. 单次破裂的位移曲线呈抛物线形状, 按照波峰的位置可分为三种: 左高右低、左低右高和中间高(两边对称). 依据弹性回跳理论和位错理论, 产生这样的形态主要是由于断层面受到长期的板块挤压而在断层凹凸体处形成应力集中现象所致. 当应力过大时, 在凹凸体处会形成初始破裂点, 即震源所在位置, 破裂会沿断层传播至地表, 其中, 靠近震源的破裂通常会更加严重, 远离震源的地表破裂会相对较轻, 因此, 在地表会形成中间高两边低的形态. 而当震源位于断裂不同位置时, 地表也会形成上述三种不同的波峰形态.

3 实际震例同震位错的平均位移统计对比

基于断层分段理论和断层形态分布, 采用涵盖国内外不同断层类型的大震震例, 对不同计算方法所得的平均位移进行对比分析.

3.1 玉树 $M_S 7.1$ 地震

2010年玉树 $M_S 7.1$ 地震发生于鲜水河断裂带西段的甘孜—玉树断裂. 该断裂以左旋走

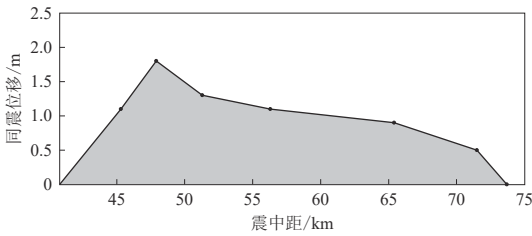


图 1 2010 年玉树地震沿断裂走向水平距离上的同震位移分布

Fig. 1 Coseismic displacement distribution of Yushu earthquake along horizontal distance of fault strike in 2010

滑运动为主, 总体走向为 NW-NNW (陈立春等, 2010). 玉树地震较清晰的同震地表破裂带由三条主破裂组成, 走向为 310°—320°, 地表破裂总长约 31 km, 地表实测水平走滑位移为 1.1—1.8 m. 如图 1 所示, 此次地震的发震断层的最大位移为 1.8 m, 经计算, 其算术平均值为 0.8 m, 面积等效平均值为 0.97 m.

3.2 昆仑山口西 $M_S8.1$ 地震

2001 年 11 月 14 日发生在东昆仑构造带的昆仑山口西 $M_S8.1$ 地震, 是中国大陆近 50 年来震级最大、地表破裂最长的地震事件 (陈杰等, 2004), 其宏观震中区位于库赛湖东北 93.0°E—93.5°E 一带的昆仑山南麓断层谷地内.

昆仑山口西地震形成了长达 426 km 的地表破裂带, 宽从数米至数百米, 总体走向为 $N90^\circ-110^\circ E$. 该地表破裂带具有明显的分段特征, 自西向东由五条次级破裂段组成 (徐锡伟, 2002). 各破裂段又由若干更次级左阶、右阶斜列的破裂组成, 具有自相似的分形结构特征. 地震破裂带以左旋走滑为主, 倾滑量很小, 表明此地震具有多点破裂特征. 根据地震现场科学考察的结果, 该次地震引起的断层破裂由西向东包括: 库水流一太阳湖段、布喀达坂峰地表破裂西段、布喀达坂峰地表破裂东段、库赛湖西破裂段、库赛湖东破裂段、昆仑山口地表破裂段 (图 2). 由于库水流一太阳湖段实测数据较少, 本文选取了后五段计算各个次级破裂段的平均位移. 如图 2 所示, 地表水平位移沿地震破裂带走向出现多个峰值, 各峰值之间存在相对独立的衰减序列, 此次地震的最大地表同震左旋水平位移为 6.5 m 左右. 根据式 (1) 和式 (2) 计算所得各个次级破裂段的平均位移如表 1 所示.

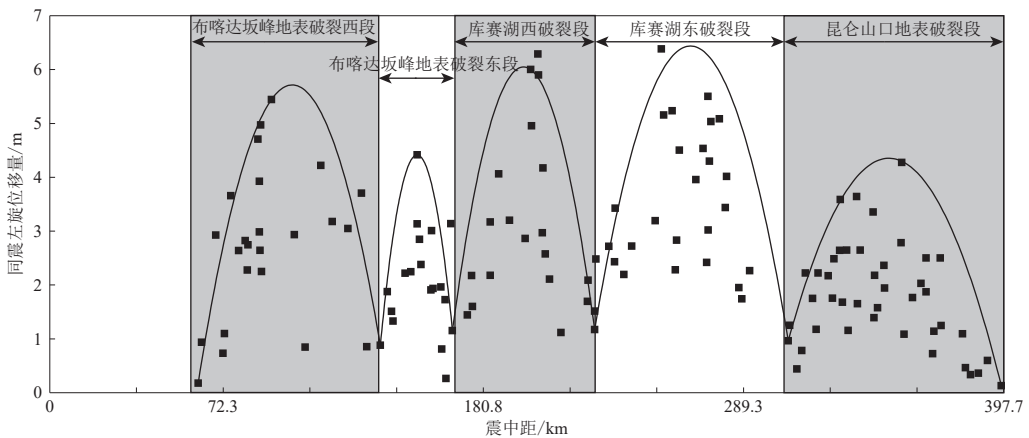


图 2 2001 年昆仑山口西 $M_S8.1$ 地震左旋水平同震位移图

Fig. 2 Coseismic displacement map of western Kunlun Mountain Pass $M_S8.1$ earthquake in 2001

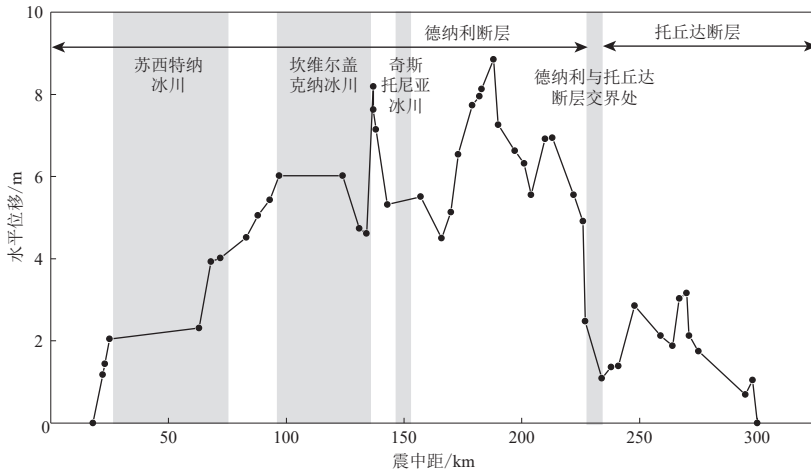
3.3 美国德纳利 (Denali) $M_W7.9$ 地震

2002 年 11 月 3 日美国阿拉斯加中部发生 $M_W7.9$ 地震, 该地震使部分德纳利 (Denali) 断层

表 1 2001 年昆仑山口西 $M_S 8.1$ 地震各次级破裂段的平均位移Table 1 Average displacement of each secondary fracture segment resulted from western Kunlun Mountain Pass $M_S 8.1$ earthquake in 2001

| 次级破裂段 | 最大位错量 D_{\max}/m | $\frac{1}{2}D_{\max}/\text{m}$ | 算术平均值 \bar{D}/m | 面积等效平均值 D_S/m | D_S/D_{\max} |
|-------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------|
| 布喀达坂峰地表破裂西段 | 5.5 | 2.75 | 2.40 | 2.33 | 0.42 |
| 布喀达坂峰地表破裂东段 | 4.5 | 2.25 | 1.83 | 2.00 | 0.45 |
| 库赛湖西破裂段 | 6.2 | 3.10 | 2.95 | 3.54 | 0.571 |
| 库赛湖东破裂段 | 6.5 | 3.25 | 3.30 | 3.67 | 0.56 |
| 昆仑山口地表破裂段 | 4.0 | 2.00 | 2.32 | 2.58 | 0.64 |

和托丘达(Totschunda)断层发生破裂(Hreinsdóttir *et al.*, 2006). GPS 测量的位移场表明该事件以沿德纳利断层右旋走滑破裂占优势;最靠近震中的 GPS 测点显示苏西特纳(Susitna)冰川断层有逆冲运动的影响,且野外地质观测与地震学理论推断的结果之间具有良好的相关性(Hreinsdóttir *et al.*, 2006). 该地震为一次超剪切破裂,在破裂传播方向上产生了异常强烈的马赫锥效应(Eberhart-Phillips *et al.*, 2003). 此次地震造成的地表破裂长达 340 km,它始于苏西特纳冰川断层的挤压,在德纳利断层上右移,并继续在托丘达断层上右移(图 3). 该地震断层的最大位移为 8.6 m,根据上文的计算方法可得,其算术平均值为 4.17 m,面积等效平均值为 4.03 m.

图 3 德纳利地震的地表水平位移(Eberhart-Phillips *et al.*, 2003)Fig. 3 Surface horizontal displacement of Denali earthquake (Eberhart-Phillips *et al.*, 2003)

3.4 汶川 $M_S 8.0$ 地震

2008 年 5 月 12 日四川汶川发生 $M_S 8.0$ 强烈地震,该地震与青藏高原东部松潘—甘孜地块东向挤压所造成的龙门山活动断裂带右旋斜向逆冲有动力学联系.如图 4 所示,汶川地震造成北川—映秀断裂和灌县—江油断裂产生破裂,该破裂带的长度超过 250 km,是由地震陡坎、地震隆起、地表破裂等组成的一个巨大的地震形变带(吴珍汉,张作辰,2008).根据式(1)和式(2),分别计算分析了北川—映秀断裂和灌县—江油断裂在汶川地震中的平均位移.表 2 和表 3 分别给出了竖向和水平两个方向同震位错的最大位移和三种平均位移计算结果,可见:北川—映秀断裂的竖向最大位错为 6.15 m,水平向最大位错为 5.0 m,灌县—江油断裂

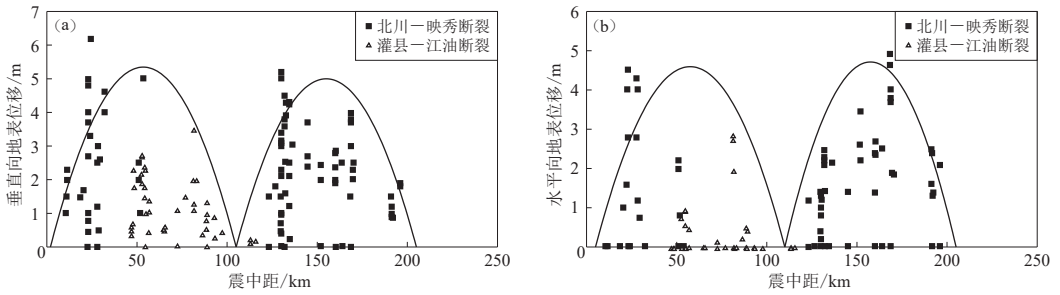


图 4 2008 年汶川地震垂向(a)和水平向(b)的地表位移分布图

Fig. 4 Vertical (a) and horizontal (b) surface displacement distribution of Wenchuan earthquake in 2008

表 2 汶川地震竖向断层同震位错的平均位移计算结果

Table 2 Average displacement of vertical fault dislocation in Wenchuan earthquake

| 断层名称 | 最大位错量 D_{max}/m | $\frac{1}{2}D_{max}/m$ | 算术平均值 \bar{D}/m | 面积等效平均值 D_S/m | D_S/D_{max} |
|-----------|-------------------|------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| 北川—映秀断裂 | 6.15 | 3.075 | 3.0283 | 3.09 | 0.50 |
| 灌县—江油断裂北段 | 2.8 | 1.4 | 1.19 | 0.983 9 | 0.35 |
| 灌县—江油断裂南段 | 3.5 | 1.75 | 1.07 | 1.13 | 0.32 |

表 3 汶川地震水平向断层同震位错的平均位移计算结果

Table 3 Average displacement of horizontal fault dislocation in Wenchuan earthquake

| 断层名称 | 最大位错量 D_{max}/m | $\frac{1}{2}D_{max}/m$ | 算术平均值 \bar{D}/m | 面积等效平均值 D_S/m | D_S/D_{max} |
|-----------|-------------------|------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| 北川—映秀断裂 | 5.0 | 2.5 | 2.210 | 2.20 | 0.44 |
| 灌县—江油断裂北段 | 0.8 | 0.4 | 0.334 | 0.5 | 0.625 |
| 灌县—江油断裂南段 | 2.9 | 1.45 | 0.525 | 0.4 | 0.14 |

北段的面积等效位移平均值与最大位错比值为 0.625, 约 2/3.

4 输油管道抗震设计中的断层设防位移

对于穿越地震活动断层的输油管道抗震设计, 目前已经由应变设计发展到性能设计. 按照管道的重要性以及管道周边的环境, 将管道划分为重要区段和一般区段. 管道的重要区段是指大中型穿跨越江河段、输气干线管道经过的四级地区以及输油干线管道经过的人口密集区, 其它区段则称为一般区段(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008). 重要区段和一般区段是从地震破坏后的风险角度, 主要以经过河流或人口密集区程度为划分依据. 现行输油管道抗震规范(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017)规定, 重要区段和一般区段的设防断层位移分别为预测的最大位移值和平均位移值. 由于大多数历史地震的断层数据只有最大位移值, 而目前输油管道场地的地震安全性评价工作一般预测的是未来一百年的断层最大位移值. 因此, 需要给出平均位移值的估计方法, 探讨确定断层的平均位移与最大位移的比值.

如表 1 和表 2 所示, 本文比较了 $D_{max}/2$, D_S 和 \bar{D} 等三种定义为断层平均位移的方法. 由于地表破裂呈抛物线形状, 通过面积积分对整个断裂进行统计, 因而更能体现地表破裂的整体分布情况, 这样看来式(2)定义的面积等效平均位移更为合理.

考虑一种理想情况: 假设断层位错在地表各点的位移值均相同, 断层的位移分布形态为一个矩形, 则断层的面积平均位移与断层的最大位移值之比为 1. 另一种理想情况: 断层位移沿着地表破裂迹线是以断层位移最大值为顶点的一个三角形分布形态, 按照式(2), 三角形的面积是矩形面积的一半, 则断层的面积平均位移与断层的最大位移值之比为 0.5. 如图 5 所示, 三角形分布范围并不能完全包括实际的位错测量点, 因此, 断层位移的分布形态以抛物线形态相对而言更能够覆盖所有的测点.

从管道设防的角度而言, 断层平均位

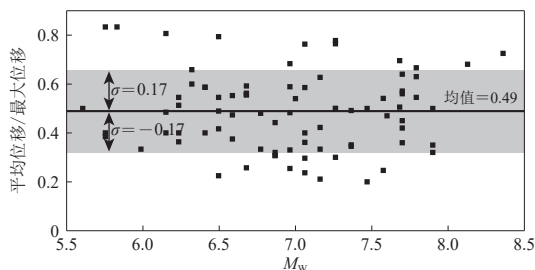


图 6 平均位错与最大位错之比与震级 M_w 关系图

Fig. 6 Relationship between the ratio of average displacement to maximum displacement and earthquake magnitude M_w

5 讨论与结论

本文基于近些年国内外地震断层位移沿地表破裂迹线的分布规律, 通过实际震例和方法对比, 提出了在输油管道的抗震设计工作中, 采用断层最大位移的 2/3 作为平均位移值, 可供输油管道一般区段穿越活动断层设防参考, 相比通常采用最大位移值的一半作为平均位移, 对于输油管道抗震设防要求提升具有重要意义. 但是, 由于地震造成的地表破裂具有很强的复杂性和随机性, 随着地表破裂研究的不断深入, 进一步收集整理实际震害资料, 对该建议进行进一步完善和验证.

参 考 文 献

- 陈杰, 陈宇坤, 丁国瑜, 王赞军, 田勤俭, 尹功明, 单新建, 王志才. 2004. 2001 年昆仑山口西 $M_S8.1$ 地表地表同震位移分布特征 [J]. 地震地质, 26(3): 378-389.
- Chen J, Chen Y K, Ding G Y, Wang Z J, Tian Q J, Yin G M, Shan X J, Wang Z C. 2004. Surficial slip distribution and segmentation of the 426 km long surface rupture of the 14 November, 2001, $M_S8.1$ earthquake on the east Kunlun fault, northern Tibetan Plateau, China [J]. *Seismology and Geology*, 26(3): 378-389 (in Chinese).
- 陈立春, 王虎, 冉勇康, 孙鑫喆, 苏桂武, 王继, 谭锡斌, 李智敏, 张晓清. 2010. 玉树 $M_S7.1$ 级地震地表破裂与历史大地

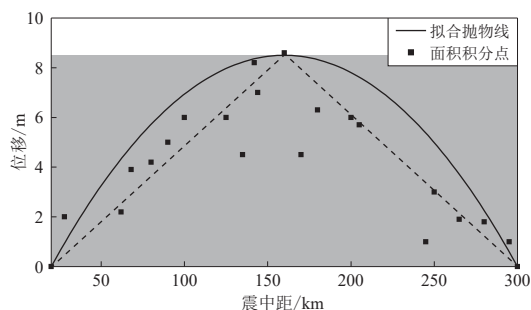


图 5 基于断层位错形态和实测数据的平均位移选取分析图

Fig. 5 Analysis diagram of average displacement selection based on fault displacement morphology and measured data

移与最大值的比值应在 0.5—1.0 之间选取值, 因此面积积分均值 D_S 相比最大值的一半作为平均位移的结果更具有合理性. 如图 6 所示, 本文收集国内外包括断层最大位移和平均位移的 70 次地震数据, 两者比值的期望平均值为 0.49, 方差为 0.17. 从统计的角度, 建议期望值加一倍方差(0.66), 这样可以囊括大多数地震事件. 考虑一定的安全系数, 建议平均位移取最大位移值的 2/3 作为输油管道一般区段的设防断层位移.

- 震[J]. 科学通报, **55**(13): 1200–1205.
- Chen L C, Wang H, Ran Y K, Sun X Z, Su G W, Wang J, Tan X B, Li Z M, Zhang X Q. 2010. The $M_s7.1$ Yushu earthquake surface rupture and large historical earthquakes on the Garzê-Yushu fault[J]. *Chinese Science Bulletin*, **55**(31): 3504–3509.
- 邓超东, 陈立春, 冉勇康. 2004. 活动构造定量研究与应用[J]. *地质前缘*, **11**(4): 383–392.
- Deng Q D, Chen L C, Ran Y K. 2004. Quantitative studies and applications of active tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, **11**(4): 383–392 (in Chinese).
- 丁国瑜, 田勤俭, 孔凡臣. 1993. 活断层分段[M]. 北京: 地震出版社: 12.
- Ding G Y, Tian Q J, Kong F C. 1993. *Active Fault Subsection*[M]. Beijing: Seismological Press: 12 (in Chinese).
- 刘爱文. 2002. 基于壳模型的埋地管线抗震分析[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 1–7.
- Liu A W. 2002. *Response Analysis of a Buried Pipeline Crossing the Fault Based on Shell-Model*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 1–7 (in Chinese).
- 王龙, 刘爱文, 贾晓辉, 李祥秀, 王晓辉. 2020. 穿越活动断层地段的现役输油气管道抗震韧性评价[J]. *地震研究*, **43**(3): 539–545.
- Wang L, Liu A W, Jia X H, Li X X, Wang X H. 2020. Evaluation of seismic resilience of oil and gas pipelines in service crossing active faults[J]. *Journal of Seismological Research*, **43**(3): 539–545 (in Chinese).
- 吴珍玟, 张作辰. 2008. 四川汶川 $M_s8.0$ 级地震的地表变形与同震位移[J]. *地质通报*, **27**(12): 2067–2075.
- Wu Z H, Zhang Z C. 2008. Seismic deformation and co-seismic displacement of the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake in Sichuan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, **27**(12): 2067–2075 (in Chinese).
- 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 马文涛, 戴华光, 张志坚, 陈永明, 何文贵, 王赞军, 党光明. 2002. 2001年11月14日昆仑山库赛湖地震($M_s8.1$)地表破裂带的基本特征[J]. *地震地质*, **24**(1): 1–13.
- Xu X W, Chen W B, Yu G H, Ma W T, Dai H G, Zhang Z J, Chen Y M, He W G, Wang Z J, Dang G M. 2002. Characteristic features of the surface ruptures of the Hoh Sai Hu (Kunlunshan) earthquake ($M_s8.1$), northern Tibetan Plateau, China[J]. *Seismology and Geology*, **24**(1): 1–13 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2008. GB 50470—2008 油气输送管道线路工程抗震技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社: 2.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2008. *GB 50470—2008 Seismic Technical Code for Oil and Gas Transmission Pipeline Engineering*[S]. Beijing: China Planning Press: 2 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2017. GB/T 50470—2017 油气输送管道线路工程抗震技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社: 12.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2017. *GB/T 50470—2017 Seismic Technical Code for Oil and Gas Transmission Pipeline Engineering*[S]. Beijing: China Planning Press: 12 (in Chinese).
- Bonilla M G, Mark R K, Lienkaemper J J. 1984. Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **74**(6): 2379–2411.
- Eberhart-Phillips D, Haessler P J, Freymueller J T, Frankel A D, Rubin C M, Craw P, Ratchkovski N A, Anderson G, Carver G A, Crone A J, Dawson T E, Fletcher H, Hansen R, Harp E L, Harris R A, Hill D P, Hreinsdóttir S, Jibson R W, Jones L M, Kayen R, Keefer D K, Larsen C F, Moran S C, Personius S F, Plafker G, Sherrod B, Sieh K, Sitar N, Wallace W K. 2003. The 2002 Denali fault earthquake, Alaska: A large magnitude, slip-partitioned event[J]. *Science*, **300**(5622): 1113–1118.
- Hreinsdóttir S, Freymueller J T, Bürgmann R, Mitchell J. 2006. Coseismic deformation of the 2002 Denali fault earthquake: Insights from GPS measurements[J]. *J Geophys Res*, **111**(B3): B03308.
- Kennedy R P, Williamson R A, Chow A M. 1977. Fault movement effects on buried oil pipeline[J]. *Trans Eng J ASCE*, **103**(5): 617–633.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacements[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(4): 974–1002.