

主干断裂上地表破裂的危险性分析及避让估计^{*}

薄景山^{1,2}, 张建毅^{1✱}, 李平¹, 沈超^{1,2}

(1. 防灾科技学院 地质工程学院, 河北 三河 065201; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 通过分析国内外3种强震地表破裂或避让风险方法及模型, 提出了主干断裂强震地表破裂危险性 & 主干断裂建筑物避让距离危险性分析方法及公式, 将其应用于华北地震区的4个潜在震源区进行计算, 所得结果可靠, 危险性分析评估方法可取代宏观定性评估方法。

关键词: 强震; 地表破裂; 危险性分析; 潜在震源区; 避让距离

中图分类号: P315.913

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0457-08

0 引言

强震地表破裂又称强震地面断裂或错动, 是发震断层突然错动, 释放弹性应变能产生强烈地震时形成的地面变形, 是人们研究发震断层破裂方式和力学性质的窗口。强震地表破裂与砂土液化、崩塌滑坡等引起的地面变形有重大差别, 它严格受发震断层控制, 出露位置、展布方向和力学性质等都与发震断层相吻合, 破坏作用巨大, 非人力所能抗拒(温瑞智等, 2002; 李山有等, 2003; 徐锡伟等, 2011; 张建毅等, 2012)。强震地表破裂灾害在国内外已引起普遍关注(Batatian, 2002; Hart, Bryant, 1999; Perrin, Wood, 2003), 我国现行的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)也明确规定了强震地表破裂的避让距离。

目前业内仍采用宏观定性方法对强震地表破裂进行评估, 工程实践表明, 宏观定性评估结果很难令人满意, 它与抗震防灾的概率理念相悖(胡聿贤, 2005), 给工程抗震设计带来了很大困扰。由于强震和强震地表破裂是随机性自然灾害事件, 目前的科学水平还无法做出准确预测, 而危险性分析评估方法比较切合当前的认识水平,

是工程界的普遍要求, 但由于强震地表破裂比强震发生的概率更低, 资料更少, 因此实现危险性概率分析的难度很大。

本文分析了国内外3种强震地表破裂或避让风险模型及方法, 在总结经验的基础上, 对强震地表破裂危险性分析的各个环节作深入研究, 简化流程, 初步建立强震地表破裂概率危险性 & 避让评估模型, 并结合4个潜在震源区的实际情况做了试算和讨论。

1 新西兰避让距离风险评价方法

在新西兰, 按照活动断层避让距离法案或评价指南(Janine *et al*, 2003)给出避让区影响范围; 同时, 考虑活断层和破裂的复杂性以及社区准备接受风险能力不同等因素, 结合避让区建筑物重要性类别, 依照活断层复发间隔(重复周期), 分析给出了可操作的避让风险评价表, 如图1和表1所示(Janine *et al*, 2003)。

按照避让风险评价表, 对于拟建建筑, 一般会在岩土工程勘察报告结论或建议中给出活断层及其破裂风险性的工程实际应用指导意见。

^{*} 收稿日期: 2019-07-06.

基金项目: 河北省自然科学基金——强震断裂带附近条形基础动力响应及避让距离研究(E2017512013)和国家自然科学基金——基于地基与基础减灾分析的强震断裂避让距离研究(51608118)联合资助。

✱ 通讯作者: 张建毅(1981-), 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事岩土地震工程和活动断层避让距离等研究。
E-mail: b532@163.com.

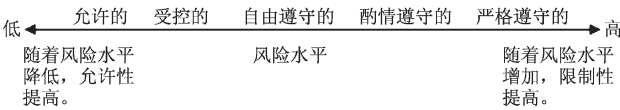


图1 新西兰活断层地震区划中避让风险水平图
Fig. 1 Setback in the regionalization of earthquake risk level of the New Zealand active faults

表1 规划区活断层避让及风险规划许可分类表

Tab. 1 Planning active fault setback and risk classification of planning permission					
	1	2a	2b	3	4
复发间隔 ($T \leq 2\,000$ 年) 等级I:					
确定的	允许的	严格遵守的	严格遵守的	严格遵守的	禁止的
分布式	允许的	酌情遵守的	严格遵守的	严格遵守的	严格遵守的
不确定 [†]	允许的	酌情遵守的	严格遵守的	严格遵守的	严格遵守的
复发间隔 ($2\,000 \text{ 年} < T \leq 3\,500$ 年) 等级II:					
确定的	允许的	严格遵守的	严格遵守的	严格遵守的	禁止的
分布式	允许的	酌情遵守的	严格遵守的	严格遵守的	严格遵守的
不确定 [†]	允许的	酌情遵守的	严格遵守的	严格遵守的	严格遵守的
复发间隔 ($3\,500 \text{ 年} < T \leq 5\,000$ 年) 等级III:					
确定的	允许的	允许的*	严格遵守的	严格遵守的	严格遵守的
分布式	允许的	允许的	酌情遵守的	酌情遵守的	严格遵守的
不确定 [†]	允许的	允许的	酌情遵守的	酌情遵守的	严格遵守的
复发间隔 ($5\,000 \text{ 年} < T \leq 10\,000$ 年) 等级IV:					
确定的	允许的	允许的*	允许的*	严格遵守的	严格遵守的
分布式	允许的	允许的	允许的	酌情遵守的	严格遵守的
不确定 [†]	允许的	允许的	允许的	酌情遵守的	严格遵守的
复发间隔 ($10\,000 \text{ 年} < T \leq 20\,000$ 年) 等级V:					
确定的	允许的	允许的*	允许的*	允许的*	严格遵守的
分布式	允许的	允许的	允许的	允许的	严格遵守的
不确定 [†]	允许的	允许的	允许的	允许的	严格遵守的
复发间隔 ($20\,000 \text{ 年} < T \leq 125\,000$ 年) 等级VI:					
确定的	允许的	允许的*	允许的*	允许的*	允许的*
分布式	允许的	允许的	允许的	允许的	允许的**
不确定 [†]	允许的	允许的	允许的	允许的	允许的**

注: 1~4 表示建筑重要性, 1 为对生命及财产有较低风险的临时建筑结构; 2a 为木结构住宅; 2b 为正常结构, 且不包括其它结构类别; 3 为人员密集场所或人员聚集成风险的社区等重要结构; 4 为灾后特殊功能的重要结构。* 表示当活断层位置为“确定”时, 允许的可能会变为受控的或自由遵守的; [†] 表示对于活断层不确定的, 若进行了专门调查变为确定或分布式时, 避让风险可依照确定或分布式来重新分类。** 表示虽然避让风险为允许的, 当建筑物重要性为“4”时, 需引起重视并可提高风险为受控的或自由遵守的。斜体印刷字表示避让风险更有灵活性, 如表示为酌情遵守的, 可能受控的风险水平更合适。

2 地震断错危险性模型

为适应工程风险设计需要, 蒋溥和梁小华 (1998) 引入了地震断错 (形变) 危险性概念。

2.1 地震断错危险性模型

地震断错危险性指发生形变的可能性大小, 可用其发生概率来表示。从工程对策来说, 不仅要了解断错的可能性, 而且更要注重其发生可能性的 大小和危害。因此, 梁小华等 (2002) 认为地震断错危险性涉及地震危险性、断错形变发生与分布特点、覆盖层厚度影响等:

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3 \tag{1}$$

式中: P 表示地震断错危险性; P_1 表示地震发生的危险性, 可由目前常用概率模型来评价; P_2 指不同震级条件下地表断错形变的概率, 见表 2 (蒋溥, 梁小华, 1998); P_3 指断错形变量值 (形变宽度) 分布概率 (表 3) (梁小华等, 2002)。

表2 震级-断错概率指数表

Tab. 2 Magnitude - dislocation probability index			
震级	概率赋值 (%)	震级	概率赋值 (%)
$M > 7.5$	100	$7.0 > M \geq 6.5$	10
$7.5 \geq M \geq 7.25$	50	$M < 6.5$	0.5
$7.25 > M \geq 7.0$	30		

表3 断错最大宽度概率指数表

Tab. 3 Dislocation probability of maximum width index		
断错宽度/m	数据个数 (中国)	给定概率指数
20 ~ 50	3	0.3
51 ~ 100	2	0.2
101 ~ 300	3	0.25
301 ~ 500	3	0.2
> 500	0	0.05

2.2 模型应用

基于地震断错危险性模型, 考虑地震事件预测的诸多不确定性, 蒋溥和梁小华 (1998) 给出了北京市规划区地表断错危害性的避让距离建议, 如表 4 所示。

表4 北京规划区内降低地表断错危害性的各类建筑工程选场措施建议

Tab. 4 Reduce the surface dislocation harmfulness of the construction projects measures in the Beijing planning

断裂名称		工程类性和避让距离/m			
		甲类	乙类	丙类	丁类
黄庄—高丽断裂	永定河—东黄家坟段	300 ~ 500	100 ~ 300	50 ~ 100	
	东黄家坟—燕丹村段	100 ~ 300	50 ~ 100	20 ~ 50	
八宝山断裂	永定河—焦家坟段	100 ~ 300	50	原则上不考虑	
	焦家坟—八宝山段	300	50	原则上不考虑	不
	八宝山—东三旗段	50 ~ 100	原则上不考虑	不考虑	考
良乡—顺义断裂	永定河—万泉寺段	50 ~ 100	原则上不考虑	不考虑	
	万泉寺—孙河段	50	原则上不考虑	不考虑	虑
南口—孙河断裂	东三旗—孙河段	100 ~ 300	50 ~ 100	原则上不考虑	
南苑—通县断裂	南苑—长营段	50 ~ 100	原则上不考虑	不考虑	
永定河断裂	芦井—卢沟桥农场段	50	原则上不考虑	不考虑	

3 强震地面断裂预测概率模型

孙平善（1994）和马东辉等（2015）给出了强震地面断裂预测的概率公式：

$$P_R = \int_{M_L}^{M_U} f(R|M) \cdot f(M) dM \quad (2)$$

式中： M_L 为震级下限，即可能产生地表破裂的最小震级，取值为6； M_U 为潜在震源区的震级上限； $f(R|M)$ 为震级 M 下产生强震地表破裂的条件概率，影响该条件概率的因素很多，如震源因素、传播途径因素、场地地质条件因素等，这些因素量化出来的地表破裂条件概率应该是有广泛代表性和可靠性的，但实际量化操作中很复杂需深入研究。 $f(M)$ 为所评价的主干断层的震级概率密度函数，可用潜在震源区所在的地震区或地震带的概率密度值由专家分配确定，并假定地震的发生在主干断层上均匀分布。

4 主干断裂地表破裂危险性模型及应用

4.1 主干断裂地表破裂危险性模型

强震地表破裂评估的宏观经验（孙平善，

1994）是其危险性（概率）分析研究的基础，而强震地表破裂的危险性分析是地震危险性概率分析的延伸，二者所使用的基础资料是一致的。

4.1.1 模型研究基础

（1）主干断裂是强震发生的主要场所

强震的发生与地质构造密切相关。我国的地震构造分布表明：历史强震分布区带分明（汪云素，1999），主要沿强烈活动的主干断裂呈线性分布。据马东辉等（2005）的研究结果，统计1900—2018年中国历史强震与发震构造部位的统计结果，如表5所示。

表5 中国历史强震的发震构造部位统计

Tab. 5 The statistics on seismogenic structure of the Chinese historical major earthquakes

分区	M	地震 次数	主干断裂		次级断裂		构造不明	
			频次	占比 (%)	频次	占比 (%)	频次	占比 (%)
东部地区	6 ~ 6.9	68	48	69	17	25	4	6
	7 ~ 7.9	18	18	100	0	0	0	0
	≥ 8	7	7	100	0	0	0	0
西部地区	6 ~ 6.9	267	203	76	37	14	27	10
	7 ~ 7.9	86	75	87	11	13	0	0
	≥ 8	18	17	94	1	6	0	0

从表 5 可见强烈活动的主干断裂是发生强震和强震地表破裂的主要场所,也是本文研究的重点。

(2) 地表破裂的统计特点

强震不一定产生地表破裂,与强震相比,强震地表破裂是更低的概率事件。

我国是多地震的国家,历史地震记载可以追溯到秦汉以前,但早期资料的完整性和准确性较差。在 1900 年之后,随着强震仪器的问世以及现场考察工作的逐渐深入,强震震级、震中位置和震中烈度及强震地表破裂等资料才比较完整可靠。1900—2018 年的百余年间,中国大陆发生 6 级以上的地震约 365 次,其中只有 35 次地震产生了规模不等的地表破裂,这种情况与国外基本相似,即只有少数地震产生地表破裂。

按震级分档和震中烈度对强震地表破裂的频率进行统计,如表 6 所示。

表 6 中国大陆强震地表破裂的频次统计
Tab. 6 The statistics on surface rupture frequency
of the Chinese major earthquakes

震级 M		地震 地表		地震破	震中 烈度	地震 地表		地震破
分档	分档	总次	破裂	裂频率		总个	破裂	裂频率
	中心	数	频次	(%)		数	频次	(%)
6 ~ 6.4	6.2	206	1	0.5	7	199	0	0
6.5 ~ 6.9	6.7	95	7	7.4	8	105	3	2.8
7.0 ~ 7.4	7.2	43	9	20	9	38	14	36.8
7.5 ~ 7.9	7.7	12	9	75	10	15	10	66.7
≥ 8	8.2	9	9	100	≥ 11	8	8	100

(3) 强震与年平均发生率

强震地表破裂的危险性分析是地震危险性概率分析的延伸。因此,强震地表破裂的年平均发生率也可以用 v_4 来表示。需要注意的是,根据表 6 及相关资料可知 $M < 6.0$ 地震几乎不发生地表破裂,所以强震地表破裂的年平均发生率 v_4 是指地震带内 6 级以上地震的年平均发生率。

利用震级 M 的概率分布函数 $F(M)$ 和概率密度函数 $f(M)$,可以对年平均发生率分配问题的计算公式作进一步推导:

$$v_{ij} = v_j f_{i,m_j} = v_4 \cdot \int_{M_{j-1}}^{M_j} f(M) dm \cdot f_{i,m_j} = v_4 [F(M_j + 0.5\Delta M) - F(M_j - 0.5\Delta M)] f_{i,m_j}$$

(3)

式中: v_j 是某一地震带内第 j 个震级分档 $[M_j - 0.5\Delta M, M_j + 0.5\Delta M]$ 内的年平均发生率; v_{ij} 是带内第 i 个潜在震源区第 j 个震级档的年平均发生率; f_{i,m_j} 是地震带内震级档 j 的年平均发生率分配到潜在震源区 i 中去的权系数,也可以称为空间分布概率函数,简称空间分布函数。

4.1.2 主干断裂地表破裂危险性模型

式(2)是强震地表破裂概率评估的积分表达式,在数学意义上,积分就是求和,在工程意义上式中 dM 并非无限小,用震级分档间隔 $\Delta M = 0.5$,对震级 M_L 到 M_U 作离散化处理后,式(2)就变成有限的几个乘积的代数和。

$$P_R = \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot R_j$$

(4)

式中: v_{ij} 可由式(3)计算, R_j 为 j 震级档地震产生地表破裂的频率; n 为潜在震源区地震的分档个数。由表 6 可见,震级分档的起算震级为 $M = 6$,分档间隔为 $\Delta M = 0.5$,分档中心震级分别为 6.2, 6.7, 7.2, 7.7 和 8.2。由此可见,当震级的下限和震级分档间隔固定时,潜在震源区的震级分档个数是震级上限 M_U 决定的, M_U 从 6.5 变化到 8.5,震级分档个数 n 由 1 变到 5。

上述分析可见,主干断裂上的强震地表破裂危险性,即发生概率可用式(4)求解。

4.1.3 地表破裂危险性模型应用实例

以华北地震区的 4 个潜在震源区为例(时振梁等, 1991),计算这些潜在震源区主干断裂发生强震地表破裂的概率,来说明危险性分析模型计算过程和计算结果的分析讨论。

(1) 基本参数

表 7 给出了唐山、三河、怀来和忻定等 4 个潜在震源区的地震活动性参数。图 2 为 4 个潜在震源区的地震年平均发生率(时振梁等, 1991)。

表7 危险性计算中使用的基本参数
Tab. 7 The basic parameters used in probability calculation

地震带	$\lg N = a - bM$	潜在震源区 M_0	由地震带分配到潜在震源区的地震年平均发生率			
			$M6.0 \sim 6.4$	$M6.5 \sim 6.9$	$M7.0 \sim 7.4$	$M7.5 \sim 7.9$
河北平原地震带	$a = 2.45, b = 0.62$	唐山潜在震源区 (8)	7×10^{-4}	3.1×10^{-4}	2.8×10^{-4}	3.5×10^{-4}
	$v_6 = 0.933$	三河潜在震源区 (8)	4.6×10^{-4}	2.2×10^{-4}	2×10^{-4}	4.4×10^{-4}
汾渭河地震带	$a = 2.93, b = 0.69$	怀来潜在震源区 (8)	1×10^{-3}	1.7×10^{-3}	1.4×10^{-3}	1.3×10^{-3}
	$v_6 = 1.626$	忻定潜在震源区 (8)	7×10^{-4}	2.4×10^{-4}	0.5×10^{-4}	8×10^{-4}
强震地表破裂的震级-频度			0.005	0.074	0.20	0.75

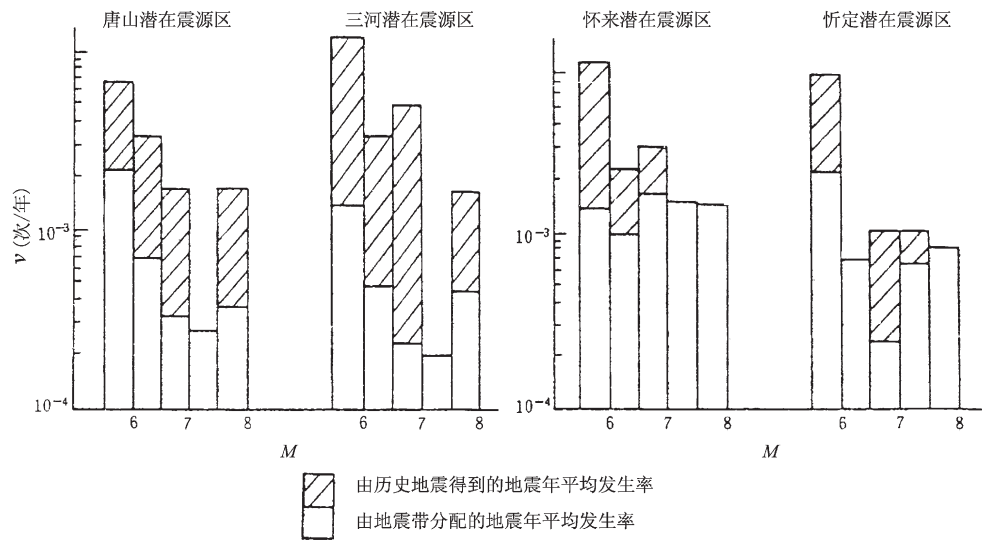


图2 潜在震源区分震级档的地震年平均发生率
Fig. 2 Annual occurrence rates of each magnitude interval of each potential seismic source area

(2) 计算结果
根据表7以及表6，利用式(4)可计算得到4个潜在震区主干断裂发生强震地表破裂的年超越概率。强震地表破裂的重现期为年超越概率的倒数，则50年超越概率为

$$P_t = 1 - (1 - P_l)^t$$

(5)

式中： P_l 为年超越概率； t 为年限； P_t 为 t 年超越概率。

参照新西兰活动断层避让距离评价指南的活断层复发间隔（重复周期），本文也给出了4个潜在震源区强震地表破裂的重现期和50年超越概，如表8所示。

表8 危险性计算结果
Tab. 8 Probability calculation results

潜源区	分档震级产生地表破裂的年超越概率				Σ	重现期 /a	50年超越概率 (%)
	$M6.0 \sim 6.4$	$M6.5 \sim 6.9$	$M7.0 \sim 7.4$	$M7.5 \sim 7.9$			
唐山	3.5×10^{-6}	22.9×10^{-6}	56×10^{-6}	262.5×10^{-6}	3.5×10^{-4}	2 857	1.74
三河	2.3×10^{-6}	16.3×10^{-6}	40×10^{-6}	330×10^{-6}	3.9×10^{-4}	2 564	1.93
怀来	5×10^{-6}	125.8×10^{-6}	280×10^{-6}	975×10^{-6}	13.9×10^{-4}	719	6.72
忻定	3.5×10^{-6}	17.8×10^{-6}	130×10^{-6}	600×10^{-6}	7.5×10^{-4}	1 333	3.68

(3) 危险性结果分析

从表 8 可以看出,高震级档对概率结果的贡献远大于低震级档,这是因为震级由小变大,地震发生强震地表破裂的频度急剧上升引起的,也就是说大震伴随地表破裂的机会远大于小震。这一特点与人们的普遍认识是一致的。

计算结果与潜在震源区所在的地震区带的地震活动性强弱有关,地震活动性越强烈,地震频度越高,分配到潜在震源区的年平均发生率越大,强震发生地表破裂的概率也越高;计算结果与潜在震区的震级上限 M_U 关系密切, M_U 越小,即使地震发生率很高,发生地表破裂的概率也很低,反之 M_U 越大,高震级档的地震影响突出,即使地震的发生率较低,发生强震地表破裂的概率也较高。

上述 4 个潜在震源区的震级上限都为 8 级地震,河北平原地震带的地震活动频度低于汾渭地震带。分配到怀来潜在震源区的地震年平均发生率大于其它潜在震源,导致该潜在震源区强震地表破裂的概率大于其它潜在震源区。忻定潜在震源区低震级档 6~6.9 级地震的年平均发生率与唐山和三河潜在震源区相近,而高震级档 7~7.9 级地震的年平均发生率明显大于唐山和三河潜在震源区,使得该潜在震源区发生强震地表破裂的概率也比较高。

参照表 1,上述 4 个潜在震源区建设建筑重要性类别“1”的结构是允许的,这和我《建筑抗震设计规范》中“避让距离范围内确有需要建造分散的、低于三层的丙、丁类建筑时,应按提高一度采取抗震措施,并提高基础和上部结构的整体性。”这一条规定的允许在风险性分析上是有一定联系的。

4.1.4 地表破裂危险性模型分析讨论

(1) 第三代、第四代《中国地震烈度区划图》和第五代《中国地震动参数区划图》,在潜在震源区划分和地震动参数选择等方面作了深入研究,在城市抗震防灾规划和重要工程场地的地震安全性评价工作中,也涉及潜在震源区划分和地震活动性参数选择,反映了当前的认识水平,所积累的经验和资料为强震地表破裂危险性评估创造了

有利条件。

(2) 在地震危险性概率分析中,潜源划分、地震活动性参数选择和衰减等环节都存在不确定性,其中有些环节的不确定性是由统计样本决定的,而有些环节如潜源划分和地震空间分布的权系数等,不但与地震和构造背景有关,而且与专家的认识能力和主观判断有关。尽管如此,在总体上是接受的。

(3) 能引起强震地表破裂的地震震级范围在 6 级以上,尤其是 7 级以上的大地震主要沿着强烈活动的主干断裂分布,因此主干断裂的强震发生率可以用潜在震源区的强震发生率近似得到,评估结果对主干断裂趋于安全。

(4) 本文提出的主干断裂地表破裂危险性计算分析方法,用于潜在震源区和主干断裂的强震地表破裂危险性概率评估是可行的;而用于场地强震地表破裂评估还需要深入研究考虑各种因素的影响。

4.2 主干断裂避让距离危险性估计

4.2.1 避让距离危险性模型

结合地震断错危险性模型、式 (1) 及表 3,按照主干断裂地表破裂危险性模型及式 (4),给出了主干断裂避让距离危险性估计模型:

$$P = \left(\sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot R_j \right) \cdot P_s \quad (6)$$

式中: P_s 是避让距离下建筑物倒塌毁坏的概率分布函数; P_R 是主干断裂发生强震地表破裂的危险性概率。表 9 统计了集集地震 (Lin, 2000)、汶川地震、玉树地震等沿主干断裂迹线上建筑物破坏情况 (张建毅, 2015),并给出避让距离下建筑物倒塌毁坏的概率分布函数 P_s ,主要成果可见图 3, 4。

表 9 不同避让距离下结构倒塌毁坏率表

Tab. 9 The structure collapsed/destruction rate

under different setback distances 单位: m

避让距离	$S > 150$	$150 \geq S$ ≥ 100	$100 > S$ ≥ 50	$50 > S$ ≥ 25	$S < 25$
概率赋值 (%)	10	20	35	55	75

注:若建筑物在上盘,表中的概率赋值统一增加 10%。

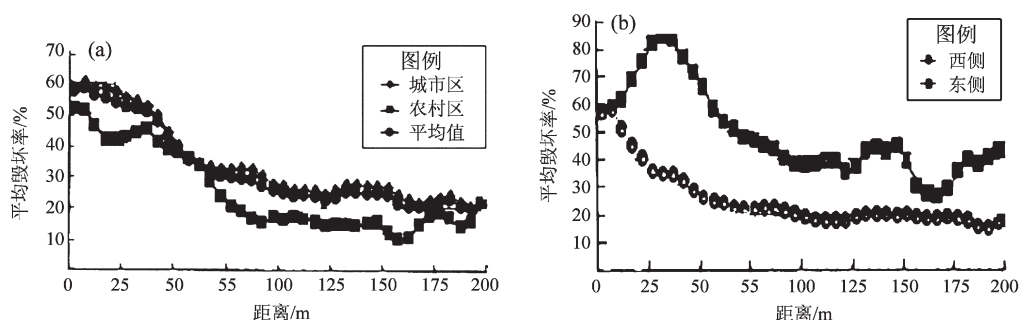


图3 集集地震主破裂迹线一定距离 (a) 和两侧 (b) 平均毁坏率

Fig. 3 Average damage rate of the Chi-chi earthquake main fault rupture trace at a certain distance (a) and at both sides (b)

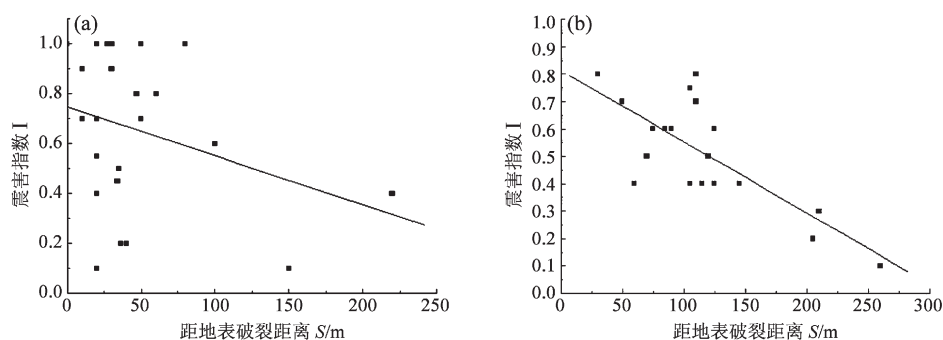


图4 汶川地震 (a)、玉树地震 (b) 迹线距离与结构震害指数图

Fig. 5 Wenchuan earthquake (a) and Yushu earthquake (b) fault trace distance and structure seismic damage index

4.2.2 避让距离危险性模型分析讨论

本文提出的不同避让距离下结构倒塌毁坏率 (表9) 是目前紧邻并沿主干断裂一定距离下样本较丰富的结构震害统计分析结果, 比断错宽度概率指数 (表3) 中的11个地表变形带样本数量大很多; 并和破裂带上建筑结构震害直接发生关系, 故危险性分析结果更可靠。

5 结论

强震地表破裂灾害是一种危害性大的低概率事件, 宏观定性评估只能给出“有”或“无”和可能性“大”或“小”的回答。由于缺少概率含义, 常常让设计工程师陷入两难的境地, 设防可能造成投资浪费, 不设防又可能导致安全隐患。同时, 对地震和强震地表破裂采用危险性分析, 符合当前人的认识水平, 对工程抗震也是十分必

要的。因此概率危险性评估方法取代宏观定性评估方法是历史发展的必然结果。

本文结合国内外学者关于强震地表破裂及避让的模型及研究方法, 总结分析提出了: ①主干断裂强震地表破裂危险性分析及式 (4)、(5), 给出重现期后可参照本文介绍的新西兰规划区地表破裂分类表1来给出风险规划许可。②主干断裂避让距离危险性分析及式 (6)。

将上述方法应用于华北地震区的4个潜在震源区进行计算, 所得结果表明: 本文提出的方法适应于6级以上地震的潜在震源区主干断裂及避让距离的危险性分析评估, 但对于震源因素、断层类型、场地特性 (覆盖层厚度)、结构类型震害等还需进一步研究。

本文在撰写过程中得到孙平善教授的帮助, 在此向他表示衷心感谢。

参考文献:

- 胡聿贤. 2005. 地震工程学(第二版)[M]. 北京:地震出版社.
- 蒋溥,梁小华. 1998. 关于工程地震实践若干问题[J]. 工程地质学报,6(1):1-26.
- 李山有,马强,武东坡,等. 2003. 断层场地地震反应特征研究[J]. 地震工程与工程振动,23(5):32-38.
- 梁小华,蒋溥,董津城,等. 2002. 断裂地震地表断错危险性评价[J]. 地震地质,24(4):495-503.
- 马东辉,李刚,孙平善. 2005. 强震地表破裂评估的概率分析研究[J]. 世界地震工程,21(1):7-11.
- 时振梁,鄢家全,高孟谭. 1991. 地震区划原则和方法的研究——以华北地区为例[J]. 地震学报,13(2):179-189.
- 孙平善. 1994. 强震地面破裂预测的宏观经验[C]//第四届全国地震工程会议论文集(一). 哈尔滨:141-144.
- 汪云素. 1999. 中国近代地震目录[M]. 北京:中国科学技术出版社.
- 温瑞智,周正华,孙平善,等. 2002. 断层场地地震动分析[J]. 地震工程与工程振动,22(1):21-31.
- 徐锡伟,赵伯明,马胜利,等. 2011. 活动断层地震灾害预测方法和应用[M]. 北京:科学出版社.
- 张建毅,薄景山,袁一凡,等. 2012. 活动断层及其避让距离研究综述[J]. 自然灾害学,21(2):9-18.
- 张建毅. 2015. 工程场地活断层避让距离研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- Batatian D. 2002. Minimum standards for surface fault rupture hazard studies[M]. Salt Lake County:Planning and Development Services Division,1-11.
- Hart E W,B William B. 1999. Fault - Rupture Hazard Zones in California:Alquist - Priolo Earthquake Fault Zoning Act with Index to Earthquake Fault Zones Maps[M]. California:Division of Mines and Geology,7-34.
- Janine K,Simon N,Russ V D,*et al.* 2003. Planning for Development of Land on or Close to Active Faults[R]. Wellington:Institute of Geological & Nuclear Science Client Report:2-50.
- Feng - TianLin. 2000. Spatial relationship between Chenlungpu fault and damage buildings areas[J]. Journal of the Chinese Institute Engineers,23(4):465-472.
- Perrin N D,Wood P R. 2003. Defining the Wellington Fault within the Urban area of Wellington City[R]. Wellington:Institute of Geological & Nuclear Science Client Report,6-49.
- GB 50011—2010. 建筑抗震设计规范[S].

The Trunk Fault Surface Rupture Risk Analysis and Setback Estimate

BO Jingshan^{1,2}, ZHANG Jianyi¹, LI Ping¹, SHEN Chao^{1,2}

(1. Department of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

(2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

Based on the analysis of three methods and models of surface rupture or fault setbacks risk for strong earthquakes at home and abroad, analysis methods and formulas of surface rupture risk for strong earthquakes at trunk faults and the fault setbacks risk for buildings at trunk faults are put forward, which are applied to the calculation of four potential seismic sources in North China seismic area. The results are reliable, therefore, the probability risk is considered. Probabilistic risk assessment method can replace qualitative seismic risk assessment method.

Keywords: Major earthquakes; Ground ruptures; Probabilistic risk assessment method; Potential seismic source; Setback distance