

工程场地地震地裂灾害评价及其防治

Study on the seismic ground fracturing hazard and its prevention in engineering site

陈红旗¹, 黄润秋¹, 彭建兵²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059; 2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于工程场地岩土体破裂的观点, 采用理论解析、数值模拟和实验等手段, 开展了西安场地未来 50 年内的地震地裂灾害评价及防裂抗裂研究。研究表明: 未来 50 年内, 场地中部地震地裂危险强于东西两端, 城内地震地裂贯通、出露可能性大于城外。在满足基础安全深度的前提下, 隐伏深度大于 20 m 时, 地面地震破裂危险较小; 平行地裂段间距大于 60 m、左行雁列次级地裂段间距大于 80 m 时, 可考虑中间场地的使用; 可利用波阻抗失配, 采用柔性、刚性或刚柔结合等 3 种方案进行工程抗裂设计。

关键词: 地震; 工程场地; 地裂缝; 地震地裂; 抗裂

中图分类号: P 315. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)05-0574-04

作者简介: 陈红旗(1973-), 男, 河南人, 在站博士后, 主要从事地质灾害评价与防治的研究。

CHEN Hong-qi¹, HUANG Run-qiu¹, PENG Jian-bing²

(1. National Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Geological and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In the viewpoint of ground fracturing, this paper studied seismic ground fracture and its prevention in the coming fifty years in Xi'an. Using the method of theoretical analysis, numerical simulation and experiment, the paper drew some important conclusions as follows. In the coming fifty years, the risk of seismic ground fracturing in the middle part is greater than that in the east and west, in the city than outside the city. When safe depth of foundation is satisfied with requirements, and depth of buried fault is greater than 20 m, the seismic fracturing hazards on the ground surface is smaller. Then the middle yard can be used when the intervals of two parallel ground fissures and two left-lateral sense are bigger than 60 m and 80 m respectively. Taking advantage of mismatching of surge impedance, we can adopt the flexible project, rigid project, or their combination to design fracture resistance.

Key words: earthquake; engineering site; ground fissure; seismic ground fracture; fracturing resistance

0 引言*

西安现代地裂灾害属地下水开采主控沉裂问题。似乎地裂灾害可通过承压水开采的控制迎刃而解, 但是随着开采沉裂受控或极限态的逼近, 地震地裂灾害不容忽视, 因为不仅未来有一定地震危险(未来 50 年内超越概率为 0.1 时, 场地基本烈度高达 VIII), 而且拥有地裂缝、断层、地貌分异边界等地震地裂地质条件。地震地裂问题最早由 Leonard 于 1929 年在皮卡乔城地裂缝研究中提出, 该问题看似简单, 实则复杂, 研究的困难源于地裂力学形态非线性加之地震作用的随机性, 以往多基于静态的避让原则, 从地震地质角度开展空间避让和时间避让范围的划定。西安场地地震地裂的研究思路仍停留于 20 世纪 80 年代, 对地震地裂成生机理、扩展规律、贯通特征缺乏深入认识, 很少论及地震地裂的强度问题和变形问题, 更谈不上防裂抗裂和跨地裂建筑问题。虽有个别抗裂设计工程, 但这些快速反应措施缺乏理论依据, 只是经验积累下的强化或顺应措施。为此, 本文依据工程需求, 从防裂、抗裂角度出发, 对地震地裂灾害进行探讨, 该项研究对于南水北调等长大线型工程同样重要。

1 西安场地地震地裂行为

尽管对地裂灾害仍存在很多未知, 但似有众流溯于一源的可能, 即可统一于工程场地岩土体破裂的概念。各类小尺度破裂实验为基于破裂观点研究地裂提供了可能, 但尺度标度的不同阻碍了它在地裂研究中的直接应用; 另外地裂研究更应关注区域附加应力场的概念, 地震地裂便可被理解为地震弹性波动附加应力作用下的地表破裂行为。岩土体爆炸破裂效应为地震地裂研究提供了实验模型。隐伏断裂、已有主次级地裂缝、节理裂隙、古河道、梁洼地形地貌陡变带, 以及其他因素所形成的强度分异界面等场地缺陷, 决定了西安场地的三种不同地震地裂表现: 隐伏断裂地面破裂、已有地裂缝扩展贯通和新生地面震动破裂, 因后者属一般动力工程地质问题, 本文不予探讨。依据动态规划方法, 将地裂分为起裂、扩展和贯通三过程。场地优选最危险场地缺陷起裂, 进而以裂端扩展和裂面摩擦滑动两种行为并行发展, 形成尺度稍大线状破裂面。依据附加应力场与裂面耦合状态, 相邻破裂面首尾连

接贯通。场地渭河、泾河、泾河两侧、皂河一级阶地及河漫滩范围的土体可有效地通过塑性变形释放应力,构造应力难以集中,抑制新生地裂,而场地其他部位土层在动载作用下所表现的弹性特征和脆性破裂特征,利于新生地裂生成。地表浅部的黄土层,由于垂直节理发育和湿陷而助于开裂。对已有地裂缝而言,依据弹性波动理论,因裂面减阻和张性位移阻碍地震动量的传递,地震波动应力在裂面集中,从而导致浅部表现为松动破坏,深部易相对滑动。

2 隐伏断裂(地裂缝)活动扩展

断裂隐伏机制主要有:①断裂蠕滑在岩土层中出现的相应位移被分解吸收消化;②古地裂缝被沉积物或风化残积物充填覆盖;③地裂缝被耕地或人工活动覆盖。物探揭露隐伏深度 H 由数米到近百米^[1],考虑代表性,暂且分为 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 m 等 10 种情形。

地震作用时,只有接近失稳临界点的隐伏断裂才有能力进入活动状态,地面破裂方有可能发生。隐伏断裂活动主要以继承性正断为主,因次级断块的重力非均匀性和一级断块的边界效应,往往还伴有少量走滑位移。因深浅部应力环境差异,断裂深部扩展受限,主要表现为上断点上移,地表张剪破裂。于是,在盖层形成图 1 所示的破裂变形分带。

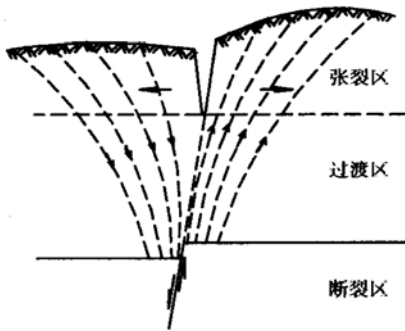


图 1 盖层破裂变形分带

Fig. 1 Zoning of deformation in the covering strata

依据土体极限平衡理论和土体最大破损剪应变原理,可给出考虑隐伏断裂破裂上展和地表形变张裂相互贯通的隐伏断裂盖层安全厚度 H' 公式:

$$H' = \frac{4c}{\gamma \tan \varphi} \left| \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right| + \frac{D}{\varepsilon_s} \quad (1)$$

式中 ε_s 为上覆土层平均破损剪应变; D 为隐伏断裂剧动位错; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; γ 为容重。

基于当前的科学认识,引入组合概率概念,西安市场地隐伏断层地裂危险 P 可表示为场地地震危险 P_1 和断层出露概率 P_2 的乘积。在西安场地,导致隐伏断

裂剧烈活动的地震以场源地震和近源地震为主,且出于安全考虑,将隐伏断裂赋以地震断裂属性,引入鸟捕食模型描述其地震断裂属性的模糊度^[2]:

$$P_2 = \frac{\delta \lambda^2}{\xi^2 + \lambda^2} \quad (2)$$

式中 δ 为极限概率, $\delta \leq 1$; ξ 为非震源特性; $\lambda = \frac{H'}{H}$ 。

式(1)、(2)联合可得

$$P = P_1 \cdot \frac{\left| \frac{4c}{\gamma \tan \varphi} \left| \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right| + \frac{D}{\varepsilon_s} \right|^2}{(\xi H)^2 + \left| \frac{4c}{\gamma \tan \varphi} \left| \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right| + \frac{D}{\varepsilon_s} \right|^2} \quad (3)$$

P_1 取值于地震危险性概率计算结果,见表 1。考虑场源地震危险概率贡献及地震灾害经验,取 $\delta = 1$, $\xi = 1$ 。依据地震地面破裂地质调查统计结果,仅考虑 VII、VIII 和 IX 度三种烈度梯度,对比国内外地震地表位错资料得出^[3],对应于烈度 VIII 时的地表位错量平均在 0.67~1.66 m,对应于烈度 IX 时的地表位错量为 2.09~3.90 m。因此,在估算隐伏断层地裂效应时,地震烈度 VIII、IX 时上断点位错可分别取为 2 和 4 m,并推演 VII 地震为 1 m。其他参数依据实验求取, $c = 49$ kPa, $\varphi = 25^\circ$, $\gamma = 18.025$ kN/m³, $\varepsilon_s = 0.1$ 。可求得遭受相当于 VII、VIII 和 IX 度地震作用时,隐伏断裂上覆土层极限破裂长度分别为 27, 37 和 57 m。不同隐伏深度断裂的地面出露危险概率见表 2。

表 1 地震危险

Table 1 Seismic risk

场地基岩加速度峰值/(cm·s ⁻²)	烈度	50 年概率/%
84	VII	63
205	VIII	10
325	IX	2

表 2 隐伏断裂地裂概率

Table 2 Risk of ground fracturing with blind fault

隐伏深度 /m	隐伏断裂地裂概率			
	VII	VIII	IX	合计
5	0.6091	0.0982	0.0198	0.7272
10	0.5540	0.0932	0.0194	0.6667
15	0.4814	0.0860	0.0187	0.5861
20	0.4068	0.0774	0.0178	0.5020
25	0.3392	0.0687	0.0168	0.4246
30	0.2819	0.060	0.0157	0.3579
35	0.2350	0.0528	0.0145	0.3023
40	0.1972	0.0461	0.0134	0.2567
45	0.1668	0.0403	0.0123	0.2194
50	0.1422	0.0354	0.0113	0.1889

由表 2 可以看出,对西安市地裂场地而言,隐伏深度小于 20 m 时,今后 50 年内地裂出露概率较高;考虑到多数地裂缝带已存出露段在地震时的位移耗能,保守认为,隐伏深度超过 20 m 的情形,可不考虑其地震地裂危险。

3 已有地裂缝的扩展贯通

地震作用附加应力场($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$),考虑单裂面存在,则破碎带的正应力和剪应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta \\ \tau &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

依据摩尔-库仑强度理论,并采用修正的 Barton 裂纹抗剪强度的一般方程式,得

$$\tau = \tan \left[JRC \cdot \lg \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma} + \varphi_r \right] \quad (5)$$

于是,裂缝失稳的破裂行为可近似按下列准则判别:

$$\left(m + n \cos 2\beta \right) \tan \left[JRC \cdot \lg \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{m + n \cos 2\beta} + \varphi_r \right] = n \sin 2\beta \quad (6)$$

式中 $m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$; $n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$; c_r, φ_r 分别为裂面的黏聚力和摩擦角。

裂缝扩展规模主要取决于地震波动应力与裂缝应力状态的耦合。依据费马原理,裂缝从裂端附近开裂。依据文献[4],裂缝将偏离长轴扩展或分支,在递进破裂扩展过程中,扩展方向与最大主应力方向的夹角逐渐减小,趋于同一方位,但裂端介质先天缺陷的存在挟持裂缝不太可能偏离地裂总体方位。对平行相间地裂段和左行雁列段分别作二维平面模型动力数值分析。结果显示,未来遭受相当于 VIII 度地震作用,平行地裂间大于 60 m 时,裂缝间相互作用已经很小(如图 2(a)所示),可考虑中间场地的工程使用;场地左行雁列次级地裂段间邻近端内侧区,将呈“<”或反“<”形交叉贯通,考虑到构造属性,段间安全间距大于 80 m(如图 2(b)所示)。

在初始应力状态松弛的裂端,难以积累地震动附加应力,将成为已有地裂缝的平面扩展优势端。就目前地裂分布来看,未来地震地裂扩展在区域中部强于东西两端。同条主裂带上各临近地裂缝段,经多次地震地裂,将逐级追踪贯通而成为场地尺度地裂缝。目前城内地裂缝出露弱于城外,而未来地震作用下城内地裂贯通、出露可能性要大于城外,这一点对于城内地裂防范意识较弱的工程建设极为不利。

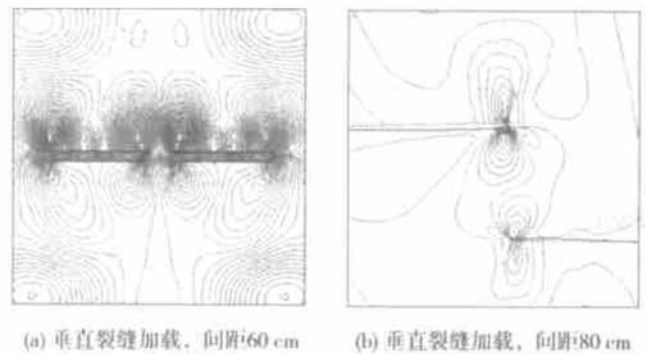


图 2 剪应力等值线图

Fig. 2 Contour map of shear stress

4 地震地裂防治

当裂缝扩展力小于扩展阻力时,裂缝就停止扩展,这就是止裂。如何防止地震荷载下裂缝扩展或使扩展裂缝停止,是个极具工程价值的课题。目前从断裂动力学角度来研究止裂问题,仍是一个高度非线性问题^[5,6],因此这里仅作定性探讨。

将裂缝简化为无限平板裂纹,从文献[7]所提供裂纹停止问题实验中可得出一些启示。其实验方法是,用环氧树脂制成预含初始裂纹 AB 的薄板试件,在平行裂纹方向加载,并在裂纹前方设置不同的障碍物 E,用以观察不同材料对裂纹止裂的功效。实验试件原理如图 3。实验结果为:①E 区为低弹性模量特性软弱介质,且 E 区有一定规模时,破裂得以阻止;②E 区采用弹性模量高于环氧树脂的大理岩和钢作为硬介质时,二者取得了完全不同的实验结果,岩石介质裂开,而钢起到终止破裂的作用。

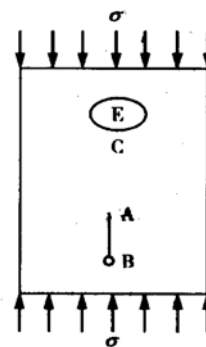


图 3 止裂实验示意图^[7]

Fig. 3 Crack resistance experiment

为对比研究,进一步做数值分析。在裂缝前端分别设置相对场地介质 1 弹模有较大正差和负差的障碍物(材料分别为混凝土 2 和表层地裂破碎带土体 3),建立平面分析模型,按平面应力求解。对模型施加同上动载,观察障碍物对裂缝未来可能扩展的反应,则有:

(1) 混凝土材料障碍物模型的剪应力等值线沿裂

缝呈纺锤形(见图4(a)),而软弱障碍体模型的剪应力等值线沿裂缝呈别针形(见图4(b))。说明裂缝遇高弹模障碍体扩展滑动位错要弱于低弹模障碍体情形。

(2) 混凝土材料障碍体有承受剪应力集中的能力(见图4(a)),裂缝扩展受阻;软弱材料障碍体模型障碍体内剪应力集中缺乏规律性,被明显扰动分散(图4(b)),表明裂缝易剪切扩展进入障碍体内。

(3) 高弹模障碍体模型的接触面最终滑动距离小于低弹模障碍体模型的接触面。

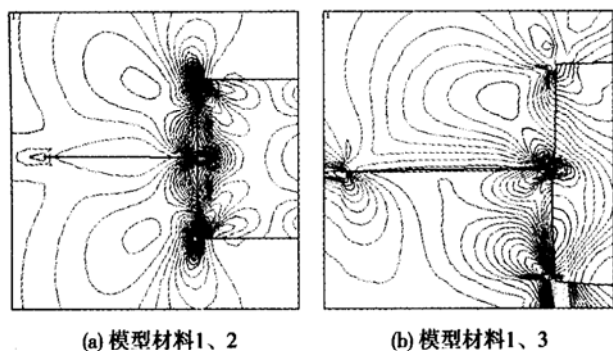


图4 剪应力等值线图

Fig. 4 Contour map of shear stress

综上所述,对西安场地止裂问题有以下认识:

a) 地裂场地的高强度地基、地下建筑等人工强化体均有可能成为止裂因素,但并非表明建筑物危险减弱,依据裂缝同强化体方位关系,裂缝将迁就低韧度部位,或转折或扭剪破坏。

b) 若地震作用强度大,那么瞬间高附加地震应变能在尖端积聚,会使断裂强度因子远超过场地所有材料断裂韧度,相对稍高韧度材料起不到止裂作用;若裂缝扩展前方遇到软弱介质,裂端应力集中瞬间得以释放,由于介质较软,裂缝欲继续扩展但无法积累扩展能量,等于裂缝扩展阻力增加,裂纹扩展可能停止。场地其他已有裂缝或断层、软弱土层或人工设置裂缝均有止裂可能。

c) 薄层高弹模低韧度介质体,如混凝土地坪,因为表面能小,不仅起不到止裂作用,而且会因其缺乏变形协调能力而优先破裂。

d) 从地震波动理论的角度,在裂缝前方设置垂直与裂缝的波阻抗失配界面,可将裂缝扩展向无害方向引导,间接止裂。

5 结 论

(1) 从工程场地岩土体破裂的角度研究地裂灾害,更有利于工程场地防裂抗裂。

(2) 未来50年内,西安地区IX度地震隐伏断层地裂概率最小,Ⅷ度中等,Ⅶ度最大,在保证基础安全深度的前提下,隐伏深度大于20m,地表地震地裂危险很小。

(3) 未来50年内,地震地裂活动会相对平静,区域集中于裂端或出露相间段。依据目前地裂缝分布,未来地震地裂扩展在区域中部强于东西两端,城内地裂贯通、出露可能性要大于城外,对于城内地裂防范意识较弱的工程建设极为不利。

(4) 遭受相当于Ⅷ度地震作用时,平行地裂段间距大于60m、左行雁列次级地裂段间距大于80m,可考虑中间场地使用。

(5) 利用不同材料障碍体与裂缝间的波阻抗失配,可进行场地工程抗裂设计,具体措施可采用柔性、刚性或刚柔结合等3种方案。设置低弹模障碍体,通过塑性功的消耗降低基础继承破裂危险,拒裂缝于外;利用高韧度材料抵抗裂缝扩展,将裂缝引向低风险区域;采用复合性措施,“先柔后刚”。

参考文献:

- [1] 宋继文,王治军,曹家泉. 西安某工程场地隐伏断裂及地裂缝勘察研究[J]. 岩土工程界,2000,2: 41-45.
- [2] 郑维敏. 正反馈[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [3] 董津城,刘守华. 发震断裂上覆土层厚度对工程影响研究报告[R]. 北京:北京市勘察设计研究院,1996.
- [4] 唐诗佳,彭恩生,孙振家. 脆性断层形成的递进连通模型[J]. 长春科技大学学报,1999,29(4): 330-333.
- [5] 黄理兴. 动载作用下岩石断裂裂纹的扩展与控制[J]. 岩土力学,1989,(1): 54-59.
- [6] 陈静曦. 带裂纹矩形板在动载作用下破裂的试验研究[J]. 岩土力学,1989,(1): 13-20.
- [7] 汤 泉,贺玉亭. 破裂终止的实验研究及地震断裂终止的讨论[J]. 西北地震学报,1983,5(3): 11-17.
- [8] 王景明,等. 地裂缝及其灾害的理论与应用[M]. 西安:陕西省科技出版社,2000.
- [9] 陈红旗. 西安地裂缝地震动效应研究[D]. 西安:长安大学,2002.