

汶川地震地表破裂影响带调查与建筑场地避让宽度探讨*

张永双^{①②} 孙萍^{①②} 石菊松^{①②} 姚鑫^{①②} 熊探宇^{①②}

(^①国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室 北京 100081)

(^②中国地质科学院地质力学研究所 北京 100081)

摘要 5.12汶川Ms8.0级地震沿龙门山中央断裂带形成长度约270km的地表破裂带,破裂带垂直和水平位移一般为1.0~5.0m,最大可达9.8m。在地表破裂带附近,建筑物破坏严重。笔者系统调查了龙门山中央断裂带地表破裂的垂直和水平位移以及地震地表破裂影响带宽度,并采用物探测试方法对部分影响带宽度进行了验证。统计结果表明,汶川地震地表破裂影响带宽度主要集中在16~60m,影响带宽度(D)与垂直位移(H)具有较好的线性关系,即 $D=10.11H+16.0$ 。对于逆冲性质为主的地震地表破裂而言,上盘影响带宽度与下盘的比值一般为3:1~2:1,据此可确定地表破裂带上、下盘的避让带宽度。笔者根据现场调查并借鉴国外经验提出,上盘避让宽度下限一般不应低于15m,下盘避让宽度下限不应低于10m。本项研究对于汶川地震灾后重建场地选址具有重要的实际意义。

关键词 汶川地震 地震地表破裂 影响带 场地选址 避让宽度

中图分类号:P65 文献标识码:A

INVESTIGATION OF RUPTURE INFLUENCED ZONES AND THEIR CORRESPONDING SAFE DISTANCES FOR RECONSTRUCTION AFTER 5.12 WENCHUAN EARTHQUAKE

ZHANG Yongshuang^{①②} SUN Ping^{①②} SHI Jusong^{①②} YAO Xin^{①②} XIONG Tanyu^{①②}

(^①Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081)

(^②Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081)

Abstract The Wenchuan earthquake occurred along the Longmenshan thrust fault belt. The Longmenshan central fault is the earthquake causing fault. The total rupture length along the Longmenshan central fault caused by the Wenchuan earthquake is about 270 km and the average vertical and horizontal displacement range from 1.0 m to 5.0 m, up to about 9.8 m in local parts. A lot of buildings were broken in the area where the ruptures passed through. In this paper, the authors report the investigation results of the vertical and horizontal displacements, as well as the width of rupture influenced zones which were confirmed by the geophysical survey methods, in different locations along the Longmenshan central fault. It is indicated that the influenced scopes of the earthquake ruptures mainly range from 16 m to 60 m, and the relationship between the influenced scopes (D) and the vertical displacement (H) is $D=10.11H+16.0$. For the earthquake ruptures with strike-slip or thrust nature, the ratio of the influenced zone width of the upper plate to the lower plate is generally 3:1~2:1, according to which the safe distance of the upper and lower plates can be determined. According to the field investigation and the foreign experience, the lower limit of the safe distance of the upper plate should not be less than 15 m, and the lower limit of the safe distance of the lower plate should not be less than 10 m. This study has an important practical significance for the site selection of the reconstruction after the Wenchuan earthquake.

* 收稿日期:2010-01-07;收到修改稿日期:2010-03-20.

基金项目:中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010914025, 1212011014035)资助.

第一作者简介:张永双,从事工程地质与地质灾害研究工作. Email: zhys100@sohu.com

ment(H) is obvious linearity, which can be expressed as: $D=10.11H+16.0$. Due to the Longmenshan central fault being a mainly thrusting fault, the influenced zone ratio between the hanging wall side and the foot wall side is generally from 3:1 to 2:1, which can help to determinate the safe distance for building site. On the basis of field investigation and using overseas experience for reference, the limit of the safe distance on the hanging wall side should be not less than 15 m, and that on the foot wall side should be not less than 10 m. This research work has important significance for safe site selection in Longmenshan region during reconstruction after the earthquake.

Key words Wenchuan earthquake, Earthquake rupture, Rupture influenced zone, Site selection, Safe distance

1 引言

地震地表破裂是汶川地震地质研究的重点内容之一。龙门山构造带主体由三条主要断裂组成,从西到东分别为后山断裂、中央断裂和前山断裂,在2008年5月12日汶川 $M_s 8.0$ 级地震时,沿龙门山断裂带的中央断裂及前山断裂分别形成总长度约为270km和70km的地震地表破裂带(图1),在地表破裂带经过之处,山脊水系和建筑物大多被错断毁坏^[1, 2],且表现出沿发震断层呈狭窄带状分布的特征(图2),这与其他历史地震具有相似之处,如1999年台湾集集 $M_s 7.6$ 级地震,沿着发震断层及两侧十几米范围内几乎所有建筑物都被夷为平地,而十几米之外的建筑结构则基本完好^[3, 4, 5, 6]。

如何在汶川地震灾后重建和今后重大工程选址

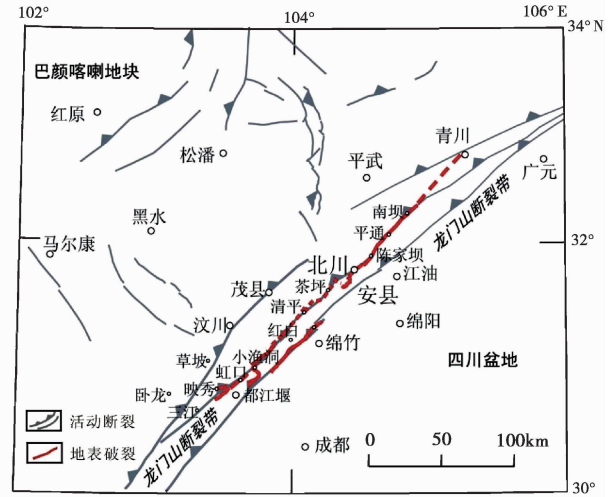


图1 汶川地震地表破裂分布图
(据徐锡伟等, 2009)

Fig. 1 Simplified map of co-seismic rupture distribution of Wenchuan earthquake



图2 汶川地震地表变形特征及建筑物破坏情况

Fig. 2 Photos of surface deformation characteristics and building damages caused by Wenchuan earthquake

- A. 映秀镇地表破裂(镜向W); B. 虹口乡高原村褶曲形成的反向陡坎(镜向S); C. 红白镇四坪村地震断坎(镜向SW);
D. 小海洞镇罗元村地表破裂造成上盘建筑物倒塌(镜向SE)

过程中避开地震断层、选取最小安全避让距离,是目前地震工程地质研究的热点问题,受到国内有关部门和研究者的重视。例如,中华人民共和国建设部及时修订了《建筑抗震设计规范》(2008)^[7];周庆等(2008)在野外调查的基础上,初步探讨了汶川地震极震区地震断层两侧的避让带宽度问题^[8],然而由于受调查资料的限制,仅得出初步的结果。笔者在汶川地震之后,系统调查和统计了中央断裂带地表破裂的水平位移和垂直位移以及地震地表破裂的影响带宽度,揭示出地表破裂影响带宽度与垂直位移具有较好的线性关系,对于汶川地震灾后重建场地选址和选择合理避让宽度具有重要的实际参考价值。特别是,笔者在野外调查中发现,某些地震灾后重建工程忽视地震地表破裂带,在不采取特殊处理措施的情况下在地震地表破裂带上兴建,这促使我们有必要强调活动断裂的避让问题。

2 地震地表变形的表现形式

2.1 地震地表变形的基本类型

野外调查表明,汶川地震地表变形的基本类型

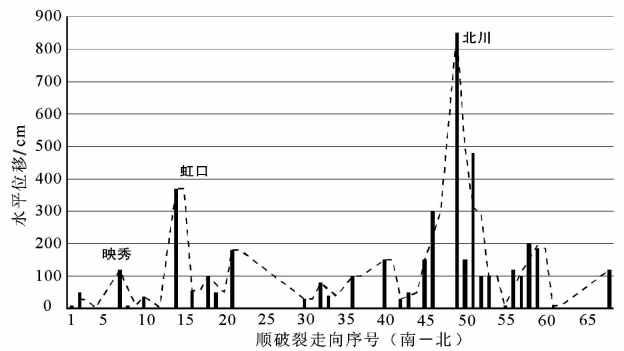
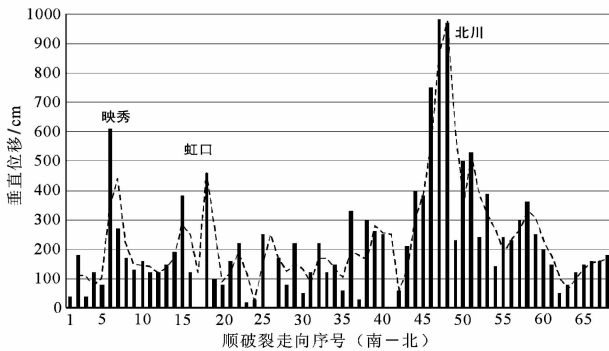


图3 中央断裂带地震地表破裂垂直和水平位移分布图

Fig. 3 Along-strike distribution of co-seismic vertical offsets and horizontal offsets along the center rupture

3 地震地表破裂影响带的确定

3.1 地震地表破裂影响带的含义

地震地表破裂影响带是指由于地震作用造成地表破裂及其引发的地表明显变形的区域。通常在现场可以观察到地表形成明显的陡坎。有的研究者认为“垂直断层走向有明显变形的地面的宽度”可以作为破裂带宽度,也就是地震断层作用在地表形成的有可能引起建筑物破坏的地面隆起带或凹陷带的

主要表现为地表破裂和褶皱挠曲(图2),地表破裂作用过程中,可以导致地表出现断崖(断坎)、脊状隆起等,并且在地表断裂的上盘可能出现挠曲变形或呈现出波状起伏。地表破裂可以是单条出现,也可以是两条或多条型,它们在深部可能都收敛于同一条断裂带。在山间谷地或山前松散土层中,地表破裂通常表现比较明显,在坚硬的基岩山体中多以弹性变形为主,而在软弱岩层如须家河组地层中可出现破裂,甚至表现出很大的断距。在地表破裂带附近,建筑物破坏严重,且上盘建筑物毁坏程度远高于下盘。

2.2 地震地表破裂的位移分布特征

笔者在前人^[2]地震地表破裂调查的基础上,对汶川地震时沿龙门山中央断裂带形成的地表破裂进行了更系统的调查,又新发现了20余处典型的地表破裂或地表变形点。综合统计地震地表破裂调查结果表明,沿中央断裂带走向方向(SW-NE)地表破裂垂直和水平位移一般为1.0~5.0m,最大可达9.8m(图3,表1)。

宽度,其界线标志通常为两侧最外边的一条张裂缝或没有明显变形的原始地面^[8]。笔者认为上述定义基本概括了地震地表破裂影响带的内涵,但是,在地表破裂影响带宽度确定时,还应充分考虑可能遭受地震破裂影响的原始地表的宽度。因此,我们在地震地表破裂影响带确定时,不仅测量有明显地形变化范围的斜长(沿地表的曲线长度),还同时考虑因为地表遭受挤压缩短及重叠产生的缩短量(图4)。

对于地表缩短量而言,有时单纯通过地表测量很难准确获得。笔者在野外调查过程中,对部分地表破裂带进行了探槽开挖,发现在松散土体地带的

表 1 中央断裂带地震地表破裂垂直和水平位移及影响带宽度调查表

Table 1 Questionnaire of co-seismic vertical and horizontal offsets and the rupture influenced scopes along the center rupture

序号	野外点号	纬度/(°)	经度/(°)	位置	垂直位移/cm	水平位移/cm	破裂性质	影响带宽度/m
1	B021	30.929	103.407	水磨镇南西	40	10	逆冲-右旋	5
2	B026	30.988	103.403	映秀镇桂子坪	180	50	逆冲-右旋	15
3	B039	31.055	103.540	紫坪铺镇龙溪南	40	2	逆冲-右旋	10
4	B031	31.064	103.487	映秀镇变电所	120		逆冲	32
5	B029	31.064	103.488	映秀镇变电所北	80		逆冲	15
6	B028	31.065	103.489	映秀镇变电所北	610		逆冲	50
7	B027	31.066	103.490	映秀镇变电所北	270	120	逆冲-右旋	40
8	B041	31.083	103.564	龙池镇晏家坪	170	10	逆冲-右旋	30
9	B042	31.083	103.565	龙池镇晏家坪	130		逆冲	22
10	B050	31.084	103.609	虹口乡深溪村观音寺西	160	37	逆冲-右旋	25
11	B049	31.085	103.610	虹口乡林家磨子	120	5	逆冲-右旋	15
12	B048	31.086	103.610	虹口乡林家磨子	120		逆冲	20
13	B047	31.088	103.614	虹口乡林家磨子	150		逆冲-右旋	30
14	B046	31.090	103.616	虹口乡林家磨子	190	370	逆冲-右旋	40
15	S04	31.120	103.650	虹口周家坪	380		逆冲	80
16	B051	31.128	103.674	虹口乡高原村	120	55	逆冲-右旋	42
17*	B052	31.129	103.676	虹口乡高原村大寨墙东	240	50		130
18	B054	31.146	103.693	虹口乡八角庙干休所	460	100	逆冲-右旋	45
19	B001	31.186	103.768	小鱼洞桥东南	100	50	逆冲-右旋	25
20	B005	31.193	103.758	小鱼洞镇中心街道	80		逆冲	30
21	B003	31.194	103.754	小鱼洞镇罗阳村	160	180	逆冲-左旋	40
22	B004	31.195	103.753	小鱼洞镇西	220		逆冲	35
23	B064	31.199	103.734	小鱼洞镇杨坪煤矿东	20		逆冲	10
24	B063	31.201	103.728	小鱼洞镇杨坪煤矿西	30		逆冲	12
25	B065	31.201	103.750	小鱼洞镇太子村	250		逆冲	55
26*	B059	31.212	103.749	中坝村花花庙	180		逆冲	110
27	B057	31.213	103.741	中坝村东南	170		逆冲	40
28	B058	31.213	103.742	中坝桥东岸	80		逆冲	20
29	B056	31.214	103.740	小鱼洞镇中坝村	220		逆冲	60
30	B066	31.257	103.785	龙门山镇回龙沟	50	30	逆冲-右旋	15
31	B069	31.284	103.817	龙门山镇九峰村	120		逆冲	25
32	B068	31.285	103.817	龙门山镇九峰村洗澡坡	220	80	逆冲-右旋	42
33	B078	31.408	103.945	红白镇青牛沱	120	40	逆冲-右旋	40
34	B075	31.461	103.999	红白镇头道金河	150		逆冲	35
35	B088	31.522	104.092	清平乡磷矿	60		逆冲	18
36	B085	31.570	104.109	清平乡北西公路	330	100	逆冲-右旋	42
37	B084	31.584	104.128	清平乡北	30		逆冲	10
38	B108	31.622	104.160	安县高川乡泉水村	300		逆冲	40
39	B109	31.629	104.173	高川乡泉水村	260		逆冲	46.5
40	B110	31.629	104.226	高川乡泉水村	250	150	逆冲-右旋	20
41*	B112	31.630	104.177	高川乡泉水村	170		逆冲	130
42	B105	31.642	104.264	安县晓坝镇双电小学	60	30	逆冲	25
43	B115	31.780	104.421	北川县擂鼓镇	210	50	逆冲-右旋	60
44	B116	31.782	104.420	擂鼓镇柳林村	400		逆冲	90

续表 1

序号	野外点号	纬度/(°)	经度/(°)	位置	垂直位移/cm	水平位移/cm	破裂性质	影响带宽度/m
45	B101	31.799	103.878	擂鼓镇坪上村	380	150	逆冲-右旋	90
46	B091	31.817	104.448	北川县任家坪	750	300	逆冲-右旋	130
47	B118	31.837	104.466	北川曲山镇后山	980		逆冲	100
48	B120	31.838	104.468	北川曲山镇后山	970		逆冲	100
49	B121	31.839	104.469	北川曲山镇后山	230	850	逆冲-右旋	60
50	B122	31.840	104.470	北川曲山镇后山	500	150	逆冲-右旋	60
51	B124	31.861	104.504	曲山镇海光村	530	480	逆冲-右旋	70
52	B126	31.871	104.524	曲山镇洽新村	240	100	逆冲-右旋	30
53	B128	31.873	104.533	曲山镇黄家坝村	390	100	逆冲-右旋	38
54	B130	31.898	104.557	陈家坝乡西河村	140		逆冲	15
55	B131	31.907	104.564	陈家坝乡老场村	240	10	逆冲-右旋	60
56	B136	31.995	104.622	北川桂溪凤凰村	230	120	逆冲-右旋	50
57	B139	32.053	104.677	平通镇南平通河右岸	300	100	逆冲-右旋	25
58	B140	32.055	104.678	平通镇南平通河	360	200	逆冲-右旋	40
59	B141	32.060	104.688	平通镇场镇	250	185	逆冲-右旋	44
60	B142	32.102	104.735	响岩坝镇中锋村	200		逆冲	35
61	B143	32.172	104.800	南坝镇南涪江右岸	150	10	逆冲-右旋	40
62	B145	32.190	104.824	南坝镇南古龙村	50		逆冲	30
63	B146	32.191	104.825	南坝镇南古龙村	80		逆冲	30
64	B147	32.204	104.838	南坝镇北东	120		逆冲	30
65	B149	32.233	104.875	南坝镇石坎-建康村	150		逆冲	30
66	B150	32.235	104.876	南坝镇石坎-建康村	160		逆冲	30
67	B153	32.276	104.940	平武水观乡平溪村	160		逆冲	30
68	B154	32.277	104.941	平武水观乡平溪村	180	120	逆冲-右旋	35

* 褶皱引起的地表陡坎

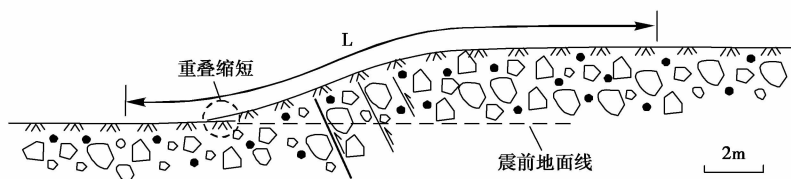


图4 地震地表破裂影响带示意图

Fig. 4 Sketch map showing the surface rupture influenced scopes of earthquake

陡坎,当垂直位移大于3m时,常出现地表开合运动形成的卷曲重叠现象。在平武县平通镇I级阶地,中央断裂带地震断坎探槽揭示的地表缩短量至少为3.0m(图5),缩短率可达12%;这与“根据地面构筑物错断、重叠迹象计算得到的擂鼓镇柳林村一带最大缩短率约为9.2%”的认识是基本吻合的^[9]。因此,地震地表破裂影响带宽度可近似地用式(1)表示:

$$D = (1 + c)L \quad (1)$$

式中: D 为地表破裂影响带宽度(m); L 为有明显地形变化的地面斜长(m); c 为地面缩短率(%),建议

当垂直位移大于3m时取10%。

3.2 地表变形影响带宽度调查及物探验证

笔者沿中央断裂带及其分支断裂自南向北对汶川地震地表破裂影响带进行了系统调查,获得68处较典型的地震陡坎数据(表1),其中除3处为地震断裂上盘由于软弱岩土层褶曲形成的陡坎外,其余皆为地震破裂形成的断坎。为了验证影响带宽度的准确性以及了解变形带浅部的物性变化特征,在地面调查的基础上,分别采用高密度电法和浅层地震法对汶

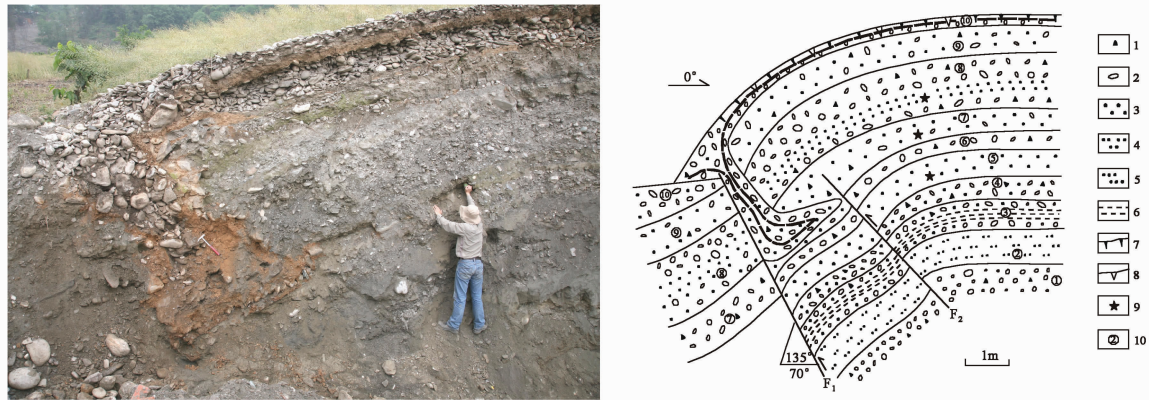


图5 平武县平通镇南地表破裂影响带探槽剖面(左:照片;右:剖面图)

Fig. 5 Trench section showing an earthquake-rupture influenced zone on south of Pingtong town, Pingwu county

1. 角砾; 2. 圆砾; 3. 粗砂; 4. 中砂; 5. 细砂; 6. 粘土; 7. 耕植土; 8. 纵向裂缝; 9. 取样点; 10. 分层及编号

川地震典型地表变形带进行了浅层物探测量,物探成果较好地验证了所调查地表破裂带的影响带宽度(图6),为保证统计结果的准确性奠定了基础。

3.3 地表破裂影响带与垂直位移之间的关系

地表破裂影响带的确定直接关系到建筑物选址

避让宽度的选取,但是,目前尚无理想的方法进行活断断裂或地表破裂影响带范围的确定和预测。根据野外地质调查结果统计,龙门山中央断裂带沿线地震地表破裂的垂直位移与影响带宽度具有较好的线性关系(图7)。从图7可以看出,在龙门山中央断裂带沿线破裂影响带宽度的最小平均值为16m左右,

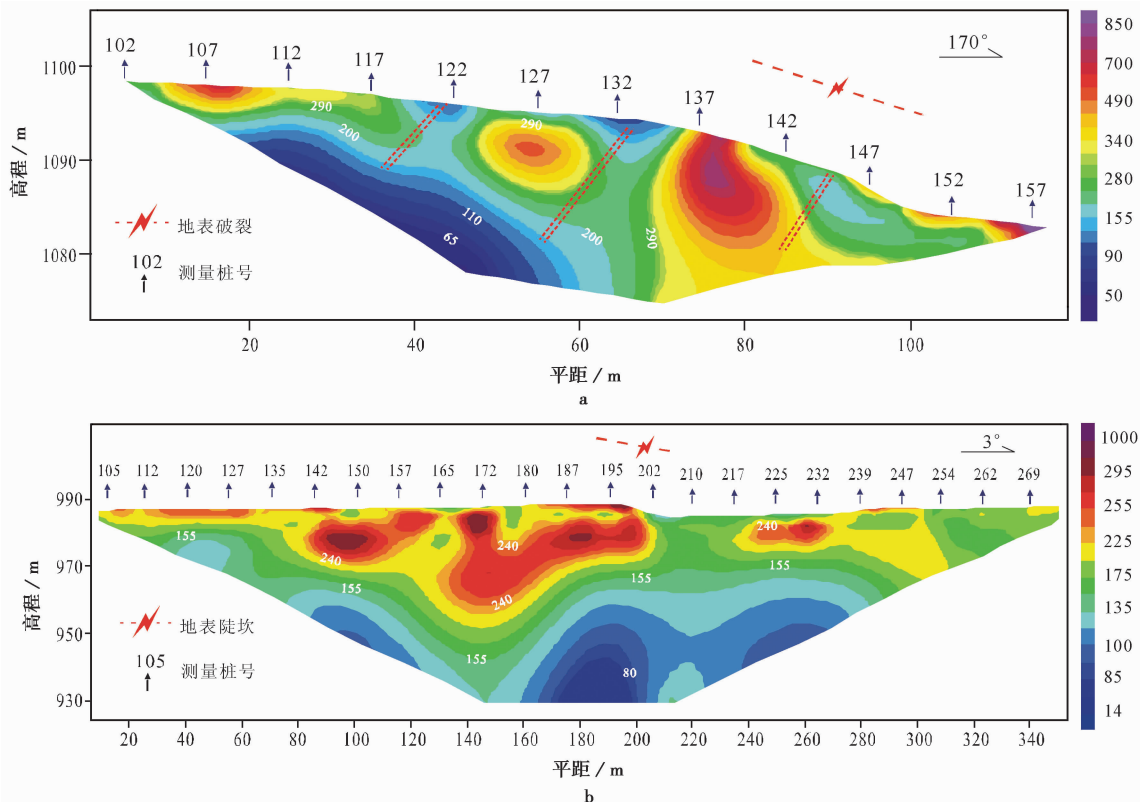


图6 汶川地震地表变形带浅层物探成果

Fig. 6 Geophysical surveying sections of rupture influenced zones caused by Wenchuan earthquake

a. 虹口乡八角庙高密度视电阻率反演地电断面图; b. 虹口乡高原村高密度视电阻率反演地电断面图

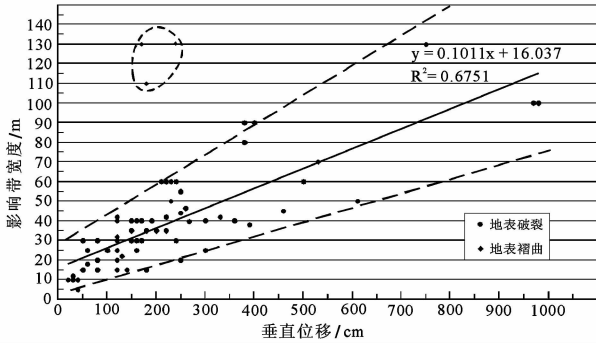


图7 地震破裂垂直位移与影响带宽度的关系

Fig. 7 Relationship curve between vertical displacement and width of rupture influenced zones

约90%调查点的地表破裂影响带宽度小于60m,即地震地表破裂影响带的宽度主要集中分布在16~60m。这可以由地震破裂影响带宽度的频数分布图清晰地反映出来(图8)。

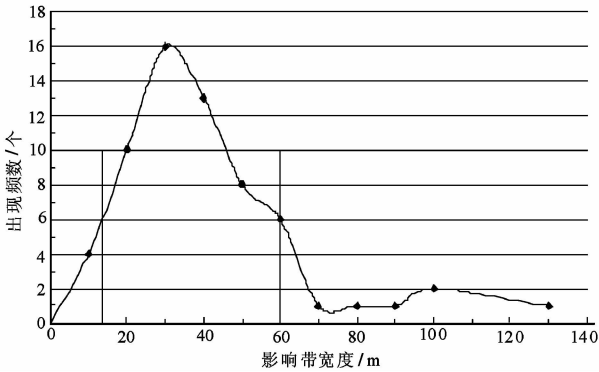


图8 地震破裂影响带宽度的频数分布图

Fig. 8 Frequency distribution map of the width of rupture influenced zones

值得指出,当地震地表陡坎为断裂上盘所引起的褶曲陡坎(波状起伏变形)时,其影响带范围通常较大,不符合上述线性分布规律。例如,在都江堰市虹口乡高原村一带,地震断裂上盘所引起的褶曲影响带宽度可达130m,甚至更大,该类型的变形特征及其与影响带宽度的关系有待进一步研究。

4 场地选址避让宽度探讨

我国《建筑抗震设计规范》GB50011-2001(2008修订版)规定,丙类建筑(一般工业、民用建筑)在抗震设防烈度为Ⅷ度时,发震断裂的最小避让距离为200m;设防烈度为Ⅸ度时,发震断裂的最小避让距离为300m。显然,该规范适合于土地资源比较丰富

的平原地区,对于汶川地震所在的龙门山断裂带通过地区,由于可用于灾后重建的土地资源极其有限,建设用地只能安排在山谷坡地之上,除了地震断裂之外,还要考虑滑坡、崩塌、泥石流等其它地质灾害类型的影响,上述最小避让距离于此显然是不适用的^[8]。而美国加州活动断裂法案修订版(1997)将50英尺(15.24m)作为发震断裂的避让宽度^[10],并且给出了较详细、具体的规定,无疑对我国地震破裂避让宽度的确定有很大的启示。

图7基本反映了龙门山地表破裂影响带的实际情况,揭示出地震地表变形的趋势和总体变化规律。因此地震地表破裂垂直位移与影响带宽度的统计结果为建设场地避让活动断裂或地震地表破裂宽度的选择提供了参考依据。地表破裂垂直位移与影响带宽度的关系式可用式(2)近似表示:

$$D = 10.11H + 16.0 \quad (2)$$

式中: D 为地表破裂影响带宽度(m); H 为地表破裂垂直位移(m)。

龙门山中央断裂带主要表现为逆冲或逆冲-走滑性质,根据现场调查,上盘影响带宽度与下盘的比值一般为3:1~2:1。也就是说,对于影响带宽度为60m的地表破裂,其上盘的避让宽度应为40~45m,下盘的避让宽度应为15~20m。在震后新址规划时,可参照图7所给出的地震破裂垂直断距与影响带宽度之间的关系曲线选取避让带宽度,并根据建筑物的重要程度,在所对应的上限和下限之间取值。建议丙类建筑在中间线与下限之间取值,乙类建筑则在中间线与上限之间取值。

根据现场调查并借鉴国外经验,对于确认的地震地表破裂带,其上盘的避让宽度下限一般不应低于15m,下盘的避让宽度下限不应低于10m。也就是说,对于影响带宽度为20m的地表破裂,其上盘的避让宽度应为15m,下盘的避让宽度应为10m。

值得指出,在避让带之外所建各类建筑均应达到新的抗震设防标准;在地表破裂影响带之内,宜作为绿化带或广场、街道,一般不宜作为建设用地。在特殊情况下,且可避免其他灾害(如山洪、滑坡、泥石流、崩塌等)时,只能建造高于抗震设防标准的2层以下建筑物,但在此范围内应明确禁止兴建学校、医院等公共建筑。

5 结语

合理的避让可以达到避免或者减轻地震灾害的

目的^[10, 11]。笔者在野外调查过程中发现,某些灾后重建工程忽视地震地表破裂带、在不采取特殊处理措施的情况下在震地表破裂带上兴建,这促使我们有必要进一步强调活动断裂和地震地表破裂带的避让问题。笔者认为我国的地震活动断裂研究和防震设计、法规建设等需要在以下方面进一步加强:

(1) 尽快提出较大比例尺的汶川地震地表破裂分布图(比例尺至少为 1:5 万),以指导灾后重建,这是一项非常迫切的工作。

(2) 我国活动断裂相关图件需要定期修订,如美国加州法案从 1973 年首次发布,至 1999 年已经修订了 11 次,可见其重视程度。与其相比,我国的相关图件更新频率偏低。

(3) 加州法案中规定^[10]: ①地质学家负责进行活动断裂的厘定; ②政府部门用法规或条例规范活动断裂避让带标准,以法规的形式指导和约束建筑规划; ③及时发布官方的地震断裂分布及相应的危险性预测图件; ④在售卖房屋前,应向购房人公布建筑所在地的工程地质条件,特别是活动断裂的发育分布情况。这些国外经验或做法在一定程度上值得我们借鉴。

(4) 加强多学科联合科技攻关,加强隐伏区或潜在活动断裂的研究工作。对于近代尚未造成地震的活动断裂,可以根据历史地震震级大体预计或推算未来地震地表破裂断距,由此间接获得避让带宽度。此外,活动断裂的避让还需要考虑断裂性质。

值得指出,本文给出的地震地表破裂避让宽度建议方案是在龙门山中央断裂带调查统计基础上得出的,在目前阶段避让选址中,可以参照该建议方案进行避让宽度选择。当然,由于地震断裂类型的差异,该方案还需要进一步研究和验证,并加以修正和完善。

参 考 文 献

- [1] Dong Shuwen, Zhang Yueqiao. Surface rupture and co-seismic displacement produced by the M_s 8.0 Wenchuan earthquake of May 12th, 2008, Sichuan, China; Eastwards growth of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, **82**(5): 938 ~ 948.
- [2] Xiwei Xu, Xueze Wen, Guihua YU. Coseismic reverse-and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*[J], 2009, **37**(6): 515 ~ 518.
- [3] 李锡堤, 郑锦桐, 廖启雯. 9.21 集集大地震的地盘变形现象及断层禁限建问题[A]. 见: 第八届台湾地区地球物理研讨会论文集. 2000, pp669 ~ 675.
- Li Xidi, Zheng Jintong, Liao Qiwen. Ground deformation of the Chi-Chi Earthquake and problems of no or limited construction on active faults. In: *Collection Papers of the 8th Taiwan Geophysics Meeting*, Taipei. 2000, pp669 ~ 675.
- [4] 徐锡伟, 于贵华, 马文涛等. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法[J]. *地震地质*, 2002, **24**(4): 470 ~ 483.
- Xu Xiwei, Yu Guihua, Ma Wentao, et al. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault. *Seismology and Geology*, 2002, **24**(4): 470 ~ 483.
- [5] Kelson K I, Kang K H, Page W D, et al. Representative styles of deformation along the Chelungpu Fault from the 1999 ChiChi (Taiwan) Earthquake: Geomorphic characteristics and responses of man made structures. *Bull Seism Soc Am*, 2001, **91**(5): 930 ~ 952.
- [6] Lee J C, Chen Y G, Sieh K, et al. A vertical exposure of the 1999 surface rupture of the Chelungpu Fault at Wufeng, Western Taiwan: structural and paleoseismic implications for an active thrust fault [J]. *Bull Seism Soc Am*, 2001, **91**(5): 914 ~ 929.
- [7] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 2001. 建筑抗震设计规范(GB50011-2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- Ministry of Construction of the Peoples Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the Peoples Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings (GB50011-2001). China Architectural Industry Press, Beijing. 2001.
- [8] 周庆, 徐锡伟, 于贵华等. 汶川 8.0 级地震地表破裂带宽度调查[J]. *地震地质*, 2008, **30**(3): 778 ~ 788.
- Zhou Qing, Xu Xiwei, Yu Guihua, et al. Investigation on Widths of Surface Rupture Zones of The M8.0 Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, China. *Seismology and Geology*, 2008, **30**(3): 778 ~ 788.
- [9] 张永双, 雷伟志, 石菊松等. 四川省北川县擂鼓盆地地壳稳定性与城镇选址[J], *地质学报*, 2008, **82**(12): 1758 ~ 1768.
- Zhang Yongshuang, Lei Weizhi, Shi Jusong, et al. Crustal stability of the Leigu Basin in Beichuan County, Sichuan province and its possibility for a new town site. *Acta Geologica Sinica*, 2008, **82**(12): 1758 ~ 1768.
- [10] Earl W H and William A B. Fault-Rupture Hazard Zones in California: Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act with Index to Earthquake Fault Zones Maps[S]. California Department of Conservation Division of Mines and Geology. 1997.
- [11] 刘云华, 张晓帆. 乌鲁木齐市活断层避让带多层建筑物三维动力反应分析[J]. *华南地震*, 2007, **27**(1): 86 ~ 97.
- Liu Yunhua, Zhang Xiaofan. 3-D dynamic response analysis of the buildings near fault site in Urumqi. *South China Journal of Seismology*, 2007, **27**(1): 86 ~ 97.