

汶川 $M_s8.0$ 地震中央断裂北段地表破裂特征

乔宝成, 李 勇, 董顺利, 闫 亮, 陈 浩, 马博琳

(成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要:研究了2008年汶川大地震的发震构造龙门山构造带的北段,即北川—南坝—林庵寺断裂的地表破裂。通过黄家坝、桂溪、平通、南坝、石坎子等地的考察和测量,显示该段地表破裂沿断裂带连续分布,走向为 $N45^\circ\sim 65^\circ E$ 。垂直位错与水平位错比值从西南段黄家坝的2.8:1逐渐降低到北东段南坝、石坎子的0.9:1。地表破裂特征表明,断裂以右旋走滑分量为为主,并具有较高的逆冲分量。余震分布表明,青川断裂与北川—南坝—林庵寺断裂之间可能存在隐伏活动断裂。

关键词:汶川 $M_s8.0$ 地震; 龙门山构造带; 中央断裂; 地表破裂; 同震位移

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)04-0333-06

The Surface Rupture of the $M_s8.0$ Wenchuan Earthquake on the Northern Segment of Central Fault

QIAO Bao-cheng, LI Yong, DONG Shun-li, YAN Liang, CHEN Hao, MA Bo-lin

(College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Surface rupture of Beichuan—Nanba—Linanshi Fault, which is the northern segment of Longmenshan tectonic belt is studied. Observation at Huangjiaba, Guixi, Pingtong, Nanba and Shikanzi suggests that the surface ruptures on this segment spread continuously along the trend of the fault with $N45^\circ\sim 65^\circ E$ in general. The rate of vertical offset and horizontal offset become small from Huangjiaba (2.8:1) to Shikanzi (0.9:1). Features of surface rupture indicate that the fault movement is thrusts with dextral strike-slip. Distribution of aftershocks indicates that the area between Beichuan—Nanba—Linanshi Fault and Qingchuan Fault probably have a buried active fault.

Key words: $M_s8.0$ Wenchuan earthquake; Longmenshan tectonic belt; Central fault; Surface rupture; Coseismic displacement

0 引言

2008年5月12日发生在四川省汶川县的 $M_s8.0$ 大地震,是新中国建国以来强度最大、影响范围最广、受灾人数最多的一次破坏性的大地震。震后笔者参加了《汶川特大地震地表破裂与变形特点研究》课题的野外调查工作,于2008年7月9—21日期间先后调查了中央断裂及彭罐断裂的地表破裂与变形,并进行详尽的实地测量。本文根据此次实际考察资料对中央断裂北段地区地表破裂特征进行分析。

1 龙门山构造带的基本特征

龙门山地区位于青藏高原东缘,主要包括岷山断块和龙门山构造带。岷山断块东、西边界为虎牙断裂和岷江断裂,南、北界分别被龙门山构造带和东昆仑断裂所截接,呈东西宽约50~60 km、南北延伸150 km的南北向新隆起。龙门山构造带是青藏高原东缘边界山脉,北起广元,南至天全,长约500 km,宽约30 km,呈NE—SW向展布,北东与大

收稿日期: 2008-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(49803013, 40372084, 40841010); 中国地质调查局应急项目; 中石化前瞻性项目

作者简介: 乔宝成(1984—),男(汉族),内蒙古巴盟人,在读硕士,第四纪地质学专业。

巴山相交,南西被鲜水河断裂相截。该构造带由一系列大致平行的叠瓦状冲断带构成,具典型的逆冲推覆构造特征,具有前展式发育模式,自西向东发育

龙门山后山断裂、中央断裂、前山断裂和山前隐伏断裂^[1-2](图 1)。

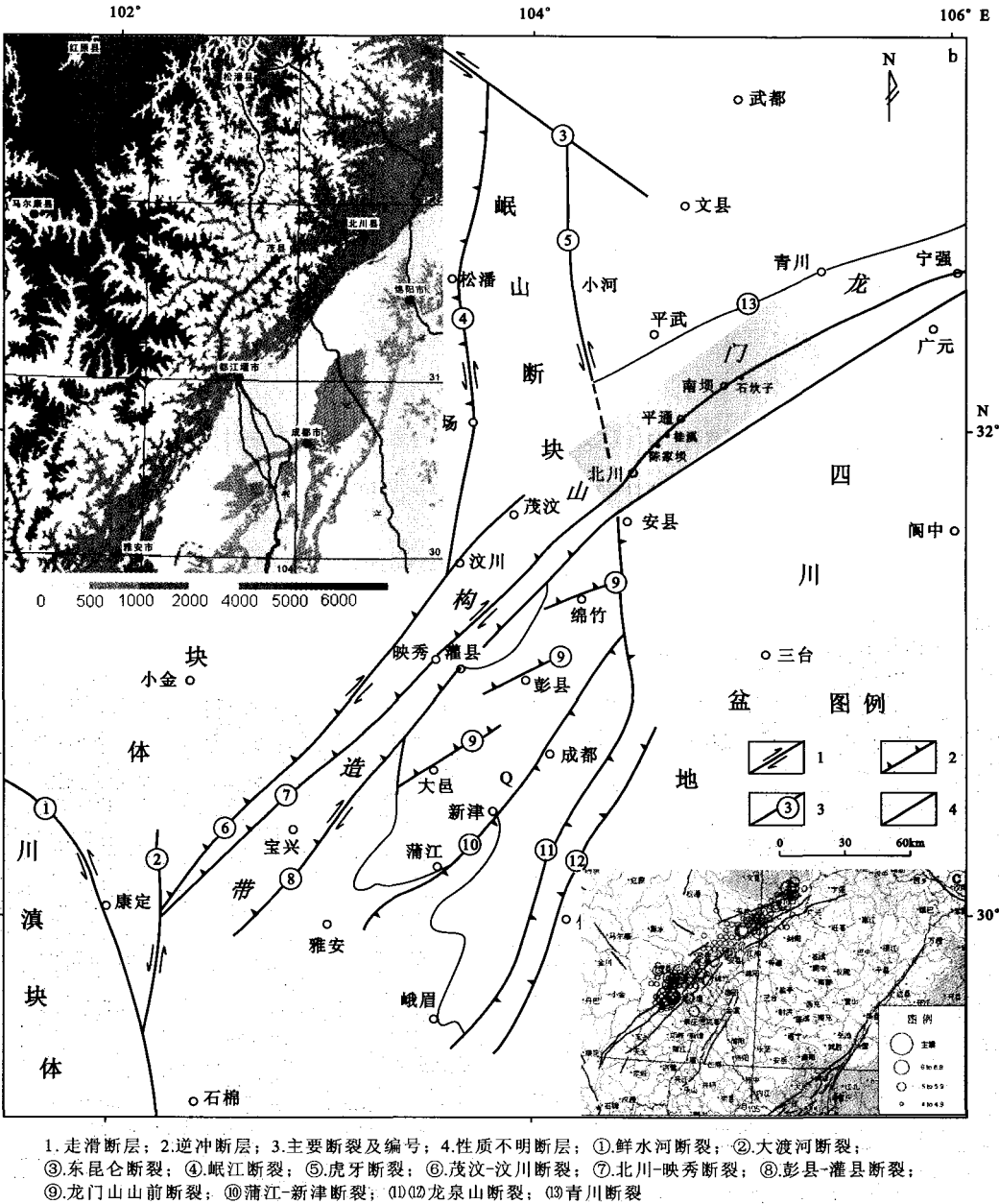


图 1 龙门山地区地质构造简图及汶川地震余震分布图

Fig. 1 The sketch of geological structure in Longmenshan region and the distribution of aftershocks of Wenchuan M_s8.0 earthquake.

龙门山后山断裂又称汶茂断裂,其西南端在泸定冷碛附近与南北向的大渡河断裂相交,向北东经陇东、耿达、草坡、汶川、茂汶、平武,进入陕西境内,分别由北段青川断裂、中段汶茂断裂和南段耿达—陇东断裂组成,总体走向 N30°~50°E,倾向 NW,倾角 50°~70°。该断裂在空间上和活动时间上有明显的分段性,其中茂汶—汶川段在晚更新世以来活动

最强^[3]。青川断裂在第四纪早、中期有过活动,但晚更新世以来已不再活动^[4]。

龙门山中央断裂又称映秀—北川断裂,西南始于泸定附近,向 NE 经盐井、映秀、北川、茶坝进入陕西境内与勉县—阳平关断裂相交,由北段北川—南坝—林庵寺断裂(茶坝—林庵寺断裂)、中段北川—映秀断裂和南段盐井—五龙断裂组成,总体走向

$N45^\circ E$, 倾向 NW, 倾角约 60° 。中央断裂是晚三叠纪印支造山运动期间形成的大活动逆断裂^[5], 也是一条晚更新世活动断裂。Densmore^[6] 认为中央断裂在第四纪末是活动的, 主要为右旋走滑运动; 通过对北川断裂带活动构造的地貌标志的分析, 李勇^[1] 认为在晚新生代时期该断裂总体上具有逆冲和走滑性质; 北川—南坝—林庵寺断裂由多条次级断裂组成, 晚更新以来不活动^[4]。

龙门山前山断裂又称彭灌断裂, 北东起于陕西宁强、勉县一带, 向南西经广元、江油、灌县至天全。由北段江油—广元断裂、中段灌县—江油断裂和南段双石—大川断裂组成, 总体走向呈 $N35^\circ \sim 45^\circ E$, 倾向 NW, 倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$ 。前山断裂主要发育在中生代地层中, 在第三纪末和早更新世有过明显活动, 中晚更新世以来仍有活动, 属中晚更新世活动断裂^[3]。通过对中南段彭灌断裂带活动构造的地貌分析, 认为在晚新生代时期该断裂总体上具有逆冲和走滑性质^[1,7]; 北段江油—广元断裂顶部被晚更新世—全新世地层覆盖, 最晚活动时代应在第四纪以前^[4]。

山前隐伏断裂是龙门山最前缘的断裂, 分布于成都盆地的西部, 走向呈 $N60^\circ \sim 70^\circ E$, 主要由大邑断裂、竹瓦铺—什邡断裂和绵竹断裂呈左阶羽列组成。通过对山前隐伏断裂带活动构造的地貌标志的研究, 认为在晚新生代时期该断裂总体上具有逆冲和走滑性质。

龙门山与山前盆地的高差近 5 000 m, 是青藏高原边缘山脉中最陡峭的, 反映了新构造活动的强烈。

自有史料记载以来, 龙门山东缘地区共发生过 $M_s \geq 4.7$ 地震 66 次, 主要集中于岷山断块和龙门山构造带南段, 而龙门山构造带北段尚未发生过 6 级以上地震。龙门山构造带中南段曾发生过 1657 年汶川 6.5 级、1958 年北川 6.2 级和 1970 年大邑 6.2 级三次 6 级以上强震和 19 次 4.7~5.9 级地震。 $M_L = 2.0 \sim 4.6$ 级小震亦沿龙门山构造带南段形成一条 NE 向的小震密集活动条带。北川以北地震主要沿近 SN 走向的岷山断块, 而龙门山构造带北段小地震活动相对稀疏。

据中国地震台网中心测定(图 1C), 截止到 10 月 09 日 12 时, 汶川大地震后共发生 $M_s 4.0$ 以上余震 268 次, 最大余震震级为 $M_s 6.4$ 。其中 $M_s 6.0$ 以上强余震有 4 次发生在青川、平武地区, 包括最大余震也发生在青川。黄绥^[8] 采用双差定位法对汶川地

震余震进行重新定位后, 基本分布在龙门山中央断裂上盘, 地震断层大致与中央断裂一致, 但大约在东经 105° 以北的余震分布偏离中央断裂向西发展, 并斜切青川断裂; 余震震源深度的优势分布在 5~20 km 之间, 平均震源深度为 13.3 km。震源深度剖面图显示余震主要分布在地表破裂带的西侧, 但在余震带的北段附近, 地表破裂的两侧均有余震分布^[8-9]。通常逆冲型地震的余震主要分布在上盘, 下盘余震较少, 而走滑型地震在断层两侧的余震分布相对均匀^[5]。

2 中央断裂北段地表破裂实测数据

中央断裂的北段主要存在一条地震地表破裂带。从北川以北, 经黄家坝、桂溪、平通、南坝、石坎子等地区, 一直延伸到石坎北东方向的山体中。本文以野外测量获得的数据重点对龙门山中央断裂的北段进行详细的论述, 用定量数据说明龙门山中央断裂北段逆冲和右旋走滑现象。

2.1 曲山镇黄家坝

在从北川县城去陈家坝的公路上, 靠近曲山镇海光村(邓家村)可见一地震陡坎, 沿该陡坎走向追索约 1 km 处, 在黄家坝村可见一河道被断层错断, 垂直位错为 3.8 ± 0.2 m, 水平位错为 1.2 ± 0.2 m。在黄家坝村内水泥公路上发现地震陡坎, 走向 $N50^\circ E$, 逆冲作用造成的路面变陡, 水泥板叠置, 兼有右旋走滑现象, 垂直位错为 3.6 ± 0.2 m, 水平位错为 1.3 ± 0.2 m。黄家坝的地表破裂约长 0.5 km, 其垂直位错取平均值为 3.7 ± 0.2 m, 右旋水平位错平均值为 1.3 ± 0.2 m。

2.2 桂溪乡凤凰村五组

桂溪乡凤凰村五组位于都贯河的阶地上, 此处断裂走向为 $N55^\circ \sim 65^\circ E$, 切过河流阶地、河漫滩和山体等, 向 NE 方向延伸, NW 盘隆升并伴有明显的右旋走滑现象。地震形成的破裂构造主要有地表拱曲(伴随着平行张裂缝)、地震陡坎、公路右旋断错等。破裂带上的建筑物受到了严重的毁坏。陡坎走向 $N60^\circ E$, 其垂直位错为 2.3 ± 0.2 m(图 2(a)), 以路边为标志水平位错为 1.7 ± 0.2 m(图 2(b))。在该公路 SW 方向 100 m 处可见农田拱曲, 其垂直位错为 2.6 ± 0.2 m, 再向 SW 200 m 处可见一河道被错断, 垂直位错为 1.7 ± 0.2 m。凤凰村的地表破裂约 1 km, 垂直位错平均值为 2.2 ± 0.2 m; 右旋水平位错为 1.7 ± 0.2 m。

2.3 平通镇

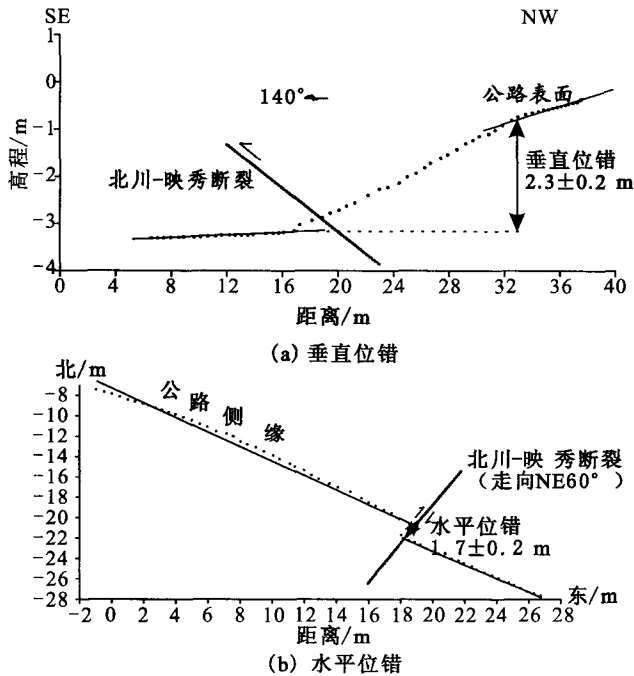


图2 桂溪乡凤凰村五组公路位错实测剖面图

Fig. 2 The offsets of highway at Fenghuang village, Guixi township.

平武县平通镇位于东坪河的Ⅱ级高阶地上,断裂从东坪河西岸小村中央通过。村子北面的农田、房屋已被泥石流所覆盖,而村子南面阶地上的农田里有许多沿断裂走向的裂缝。此处观察到近1 km的地表破裂带,走向为 $N50^{\circ}\sim 60^{\circ}E$,断裂切过阶地、河漫滩和河床,使东坪河形成跌水。在河流的东侧Ⅰ级阶地上发现田间小路被右旋错断,水平位错为 0.5 ± 0.1 m;附近一鱼池被断裂所错断,其池底垂直位错为 1.7 ± 0.2 m(图3(a));以池墙为标志的右旋水平位错为 2.2 ± 0.2 m(图3(b))。

平通镇上水泥公路发生拱曲,断裂走向约 $N60^{\circ}E$,其垂直位错为 2.1 ± 0.2 m;路沿右旋水平位错为 2.2 ± 0.5 m。在公路的NE方向约200 m,平通河Ⅱ级阶地上有一中国地震局开挖的探槽,位于地面变形拱起部位,地表垂直位错为 1.1 ± 0.2 m。探槽并没有揭露出明显断裂面,可能与地表疏松层较厚有关。再向NE方向约200 m处田间小路发生垂直错断,其垂直位错为 1.8 ± 0.2 m,水平位错不明显。平通镇的地表破裂带长度约1.5 km。平均垂直位错为 1.7 ± 0.2 m;平均右旋水平位错为 2.2 ± 0.2 m。

2.4 南坝镇何家坝

何家坝位于涪江阶地,断裂切过河流,造成河床明显跌水;穿过公路时形成陡坎;沿NE方向从何家

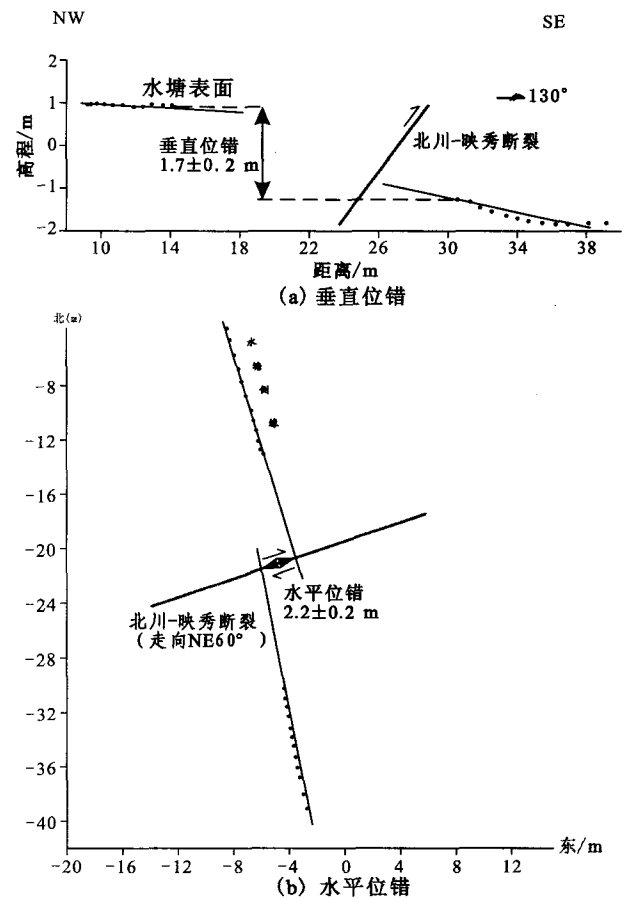


图3 平武县平通镇鱼塘位错实测剖面图

Fig. 3 The offset of fish pond at Pingtong town, Pingwu county.

坝村里经过,使断裂带附近建筑物大部分倒塌,尤其位于断裂上盘的房屋几乎夷为平地。该段破裂带走向为 $N55^{\circ}\sim 60^{\circ}E$,为典型的斜冲挤压型,兼有逆冲挤压与右行走滑现象。靠近涪江的水泥公路垂直位错为 1.7 ± 0.2 m(图4(a)),右旋水平位错为 2.4 ± 0.2 m。村里小路被错断形成陡坎,垂直位错为 1.5 ± 0.1 m;由于路旁房屋倒塌路面被覆盖,使得路面水平位错不明显。何家坝村东的公路也被断裂错断,路面垂直位错为 1.5 ± 0.1 m;以路面中缝为标志获得右旋水平位错为 1.4 ± 0.1 m(图4(b))。何家坝观察到的地表破裂约1 km,该段断裂平均垂直位错为 1.6 ± 0.2 m;平均右旋水平位错为 1.9 ± 0.2 m。

2.5 南坝镇文家坝

在何家坝北东的文家坝,发现由断裂逆冲形成的地震陡坎和地表拱曲,拱曲之上有与其平行的张裂缝。该段断裂走向大致为 $N55^{\circ}E$ 。文家坝村位于河流阶地上,田间小路形成明显的地震陡坎,垂直位

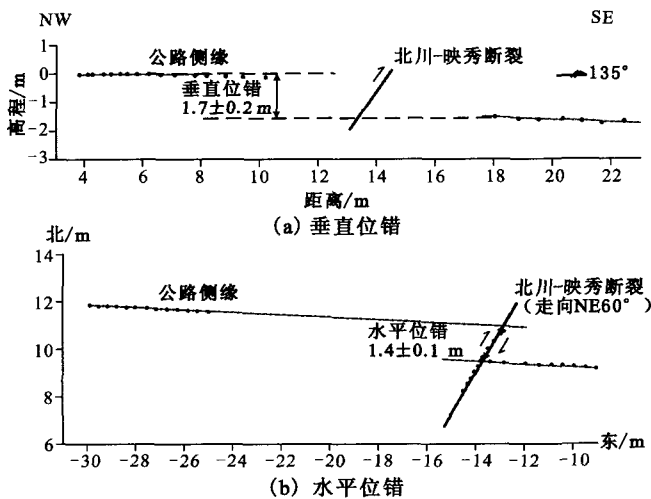


图4 南坝镇何家坝村公路位错实测图

Fig. 4 The offsets of highway at Hejiaba village, Nanba town.

错为 0.7 ± 0.1 m(图5),水平位错不明显。小路北面有块玉米地,震后耕地中央明显拱起(图6)。玉米地与小路之间可以看到多组走向 $N57^\circ E$ 的裂缝,基本与破裂带走向一致,宽度为 $15 \sim 20$ cm。村北也有地表拱曲和陡坎及裂缝分布。

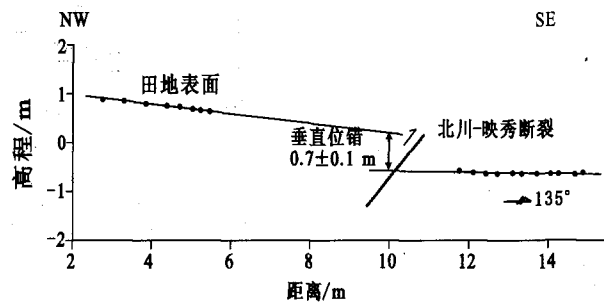


图5 南坝镇文家坝村田间小路上垂直位错实测剖面图

Fig. 5 The vertical offset of trail road at Wenjiaba village, Nanba town.

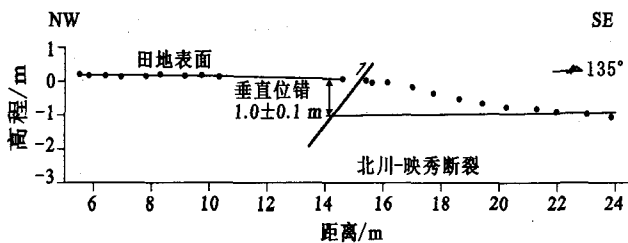


图6 南坝镇文家坝村田间地震拱曲实测剖面图

Fig. 6 The hogging in farmland at Wenjiaba village, Nanba town.

2.6 平武县石坎子

从文家坝北东到石坎子之间的破裂带被文家坝

堰塞湖淹没。在石坎子发现由地震造成公路陡坎和地表拱曲。位于石坎子加油站旁的公路上,地震逆冲作用造成地表破裂、公路错断,其垂直位错约 1.7 m(图7),水平位错不明显。



图7 平武县石坎子公路上地震陡坎垂直位错照片

Fig. 7 The photo of vertical offset on highway at Shikanzi village, Pingwu county.

3 中央断裂北段地表破裂的基本特征

根据实地调查,地表破裂带的表现形式多样,主要有断裂陡坎、公路错断、地表拱曲、构造裂缝、地震鼓包、河流跌水、断塞塘等类型,其中以公路上的断层陡坎最为明显,易于识别。该段地表破裂特征充分揭示了中央断裂北段的活动特性:垂直方向上的断层陡坎、地表拱曲显示了断裂的逆冲作用;水平方向上的公路水平错断显示了断裂的右旋走滑作用。

综合以上对中央断裂带北段地区地表破裂的描述,通过各地测点(平均值)垂直位错与水平位错对比和分析,发现该段破裂带垂直位错与水平位错的变化趋势不同(图8,表1)。垂直位错从黄家坝的 3.7 m,逐渐下降到北东段南坝、石坎子的 1.7 m;水平位错从黄家坝的 1.3 m,缓慢增至北东段南坝的

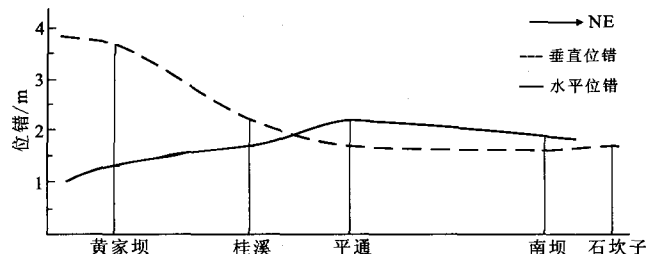


图8 黄家坝—石坎子同震位错分布图

Fig. 8 Distribution of coseismic displacements from Huangjiaba to Shikanzi.

1.9 m。同时随破裂带向东北方向延伸,垂直位错与水平位错都在减小。经计算该段地表破裂带垂直位错与水平位错比值从西南段的 2.8:1 逐渐降低到北东段的 0.9:1。这一野外观测到的数据与地震波

反演结果一致:汶川 $M_s 8.0$ 地震向东扩展过程中触发北川—南坝段以右旋走滑分量为主兼逆冲分量^[10]。

表 1 汶川 $M_s 8.0$ 地震中央断裂北段地表破裂带基本参数一览表

地点	经纬度		同震位错量		旋性
			垂直位错/m	水平位错/m	
黄家坝五组	N31°52'25.4"	E104°31'56.8"	3.8±0.2	1.2±0.2	右旋和北西盘上冲
黄家坝村	N31°52'27.8"	E104°32'00.6"	3.6±0.2	1.3±0.2	右旋和北西盘上冲
桂溪乡凤凰村五组	N31°59'44.1"	E104°37'18.3"	2.3±0.2	1.7±0.2	右旋和北西盘上冲
	N31°59'41.9"	E104°37'16.5"	2.6±0.2	—	北西盘上冲
	N31°59'38.2"	E104°37'11.7"	1.7±0.2	—	北西盘上冲
平通镇	N32°03'45.2"	E104°41'15.4"	1.7±0.2	2.2±0.2	右旋和北西盘上冲
	N32°03'48.6"	E104°41'19.4"	2.1±0.2	2.2±0.5	右旋和北西盘上冲
	N32°03'51.5"	E104°41'24.5"	1.1±0.2	—	北西盘上冲
	N32°03'54.1"	E104°41'26.3"	1.8±0.2	—	北西盘上冲
南坝镇何家坝村	N32°12'05.1"	E104°50'17.1"	1.7±0.2	2.4±0.2	右旋和北西盘上冲
	N32°12'05.8"	E104°50'18.4"	1.5±0.1	—	北西盘上冲
	N32°12'09.2"	E104°50'22.0"	1.5±0.1	1.8±0.1	右旋和北西盘上冲
南坝镇文家坝村	N32°13'05.6"	E104°51'35.5"	0.7±0.1	1.2±0.2	右旋和北西盘上冲
	N32°13'06.5"	E104°51'35.2"	1.0±0.1	—	北西盘上冲
石坎子	N32°14'43.6"	E104°53'13.7"	1.7±0.2	—	北西盘上冲

4 主要认识和思考

(1) 中央断裂北段地表破裂以右旋走滑为主,并具有较高的逆冲分量。徐锡伟^[11]认为中央断裂地表破裂以逆冲推覆为主兼有右旋走滑分量,其垂直位移大于右旋走滑位移。而作者认为中央断裂地表破裂具有明显的分段性,不同地段的逆冲作用与走滑作用有所不同,不能一概而论。在中央断裂的北段,垂直位错与水平位错的比值从南西向北东逐渐减小,并在接近末端时其比值小于 1:1。这表明断裂主体从逆冲运动为主逐渐转变为端部以右旋走滑为主。

(2) 在地貌特征方面,龙门山北段海拔相对较低,地形高差变化也比较小。通过前人对青藏高原东缘第四纪以来活动构造的研究,同龙门山构造带南段和岷山断块相比,龙门山北段活动构造较弱。这可能与龙门山构造带南段和岷山断块构成青藏高原东缘的地形屏障有关。而此次汶川地震对中央断裂北段也造成强烈的地表破裂,岷山断块并没有对龙门山北段起到屏障作用,这与前人对该区的认识不相符。汶川地震很可能影响了龙门山构造带北段原有的格局和活动状态,还有待于进一步研究。

(3) 通过龙门山构造带北部历史地震可知,龙门山南段和岷山断块构成现今青藏高原东缘的活动

边界,而龙门山北段活动性相对小得多(北川以北历史上未发生过 6 级以上地震)。从汶川地震余震分布看,龙门山北段的余震无论是次数还是强度都不逊于龙门山南段。大约在东经 105°以北,余震分布偏离龙门山中央断裂向西发展,并斜切青川断裂;余震带北段附近,震源分布在地表破裂的两侧(中央断裂中南段震源分布在地表破裂带的西侧),从而推测龙门山断裂带东北缘青川断裂与北川—南坝—林庵寺断裂之间可能存在隐伏活动断裂。

(4) 汶川 $M_s 8.0$ 地震沿龙门山中央断裂形成近 190 km 的地震地表破裂带^[12],当务之急应该利用此次地震所揭示地质现象和物理数据开展震构造动力学、运动学研究。鉴于对龙门山北段的地质构造认识不清楚,更应该给予重视,应重点调查龙门山构造带北段各断裂的活动性、确切走向以及它们之间的相互关系。

[参考文献]

- [1] 李勇,周荣军, Densmore A L,等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 北京:地质出版社, 2006.
- [2] 陈国光,计凤桔,周荣军,等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质, 2007, 29(3): 657-673.
- [3] 唐荣昌,文德华,黄祖智,等. 松潘—龙门山地区主要活动断裂带第四纪活动特征[J]. 中国地震, 1991, 7(3): 64-71.

作用下各测点处主拉和主压应力的峰值。数据表明支座应力分布较为均匀,未出现局部应力过大等现象,且均远小于支座钢构件的设计许用应力。由此可说明支座安全可靠,工作性能良好。

4 结论

由网架减震球型钢支座模拟地震振动台试验的结果可得如下结论:该支座有效阻隔了地震动向上部结构中的传递,减小了上部结构的动力响应,隔震效果好;支座的滞回环饱满,等效阻尼比大,减震耗能能力强;试验加载过程中支座应力反应小而均匀,安全储备高;全部试验结束后,支座模型外观无异常,未见四氟乙烯滑板挤出及其它构件变形或开裂,支座的工作稳定性良好。

网架减震球型钢支座能够有效实现结构的减隔震控制,且构造简单、造价经济,因此是一种值得推

广的网架结构减隔震技术装置。

[参考文献]

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社,1997.
- [2] 杜永峰,李慧,程选生,等. 隔震结构系列研究及在甘肃的工程应用[J]. 西北地震学报,2005,27(4):312-316.
- [3] 董石麟. 我国大跨度空间钢结构的发展与展望[J]. 空间结构,2000,6(2):3-13.
- [4] 球型支座技术条件(GB/T17955-2000)[S]. 北京:中国标准出版社,2000.
- [5] 姚振纲,刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海:同济大学出版社,1996.
- [6] 建筑抗震设计规范(GB50011-2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [7] R 克拉夫, J 彭津. 结构动力学[M]. 北京:科学出版社,1981.
- [8] 孙训芳,等. 材料力学 I [M]. 北京:高等教育出版社,2002.

(上接 338 页)

- [4] 李全友,宋方敏,冉勇康,等. 龙门断裂带晚第四纪活动性讨论[J]. 地震地质,2004,26(2):248-258.
- [5] Chien H C, Yih M W, Tzay C, et al. Relocation of the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan. TAO, 2000, 11(3): 581-590.
- [6] Densmore, Michael Ellis, A L, Li Yong, et al.. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 2007, 26: TC4005, doi:10.1029/2006TT001987.
- [7] 邓起东,陈社发,赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质,1994,16(4):389-403.
- [8] 黄缘,吴建平,张天中,等. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2008,38(10):1242-1249.
- [9] 张瑞青,吴庆举,李永华,等. 汶川中强余震震源深度的确定及其意义[J]. 中国科学(D辑),2008,38(10):1234-1241.
- [10] 陈运泰,许力生,张勇,等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告[R/OL]. 2008. <http://www.csi.ac.cn>.
- [11] 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质,2006,30(3):597-629.
- [12] 李勇,周荣军,董顺利,等. 汶川特大地震的地表破裂与逆冲—走滑作用[J]. 成都理工大学学报,2008,35(4):405-413.
- [13] 周荣军,李勇, Densmore A L, Ellis M A, 何玉林, 王凤林, 黎小刚. 青藏高原东缘活动构造[J]. 矿物岩石,2006,26(2):40-51.
- [14] Chen S, C J L. Wilson. Emplacement of the Longmen Shan Thrust—Nappe Belt along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Struct. Geol.,1996,18:413-430.
- [15] 张彬,杨选辉,陆远忠. 地震动态应力触发研究进展[J]. 西北地震学报,2008,30(3):299-301.
- [16] Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al.. The Geology of the Eastern Margin of the Qinghai—Tibet Plateau[M]. 北京:地质出版社,2006.
- [17] 刘旭宇,姚凯,何新社,等. 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s8.0$ 地震甘肃强震记录与初步分析[J]. 西北地震学报,2008,30(3):266-269.
- [18] 中国地质调查局发展研究中心情报室. 科学家提出汶川地震两阶段模式[EB/OL]. 2008. <http://www.cgs.gov.cn>.