

卢育霞、石玉成、袁道阳等,2011,关于兰州市“刘家堡断裂”的地震勘探研究,中国地震,27(3),309~317。

关于兰州市“刘家堡断裂”的地震勘探研究

卢育霞^{1,2)} 石玉成¹⁾ 袁道阳¹⁾ 陈永明^{1,2)}
秋仁东³⁾ 孙军杰^{1,2)} 徐舜华^{1,2)}

1) 中国地震局兰州地震研究所,甘肃省兰州市东岗西路450号 730000

2) 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地,甘肃省兰州市东岗西路450号 730000

3) 中国建筑科学研究院地基基础研究所,北京 100013

摘要 各种地质调查方法的综合研究证明,兰州市所谓的“刘家堡断裂”实际上应该是兰州七里河向斜盆地的北部边界。采用适合于百米以内地震勘探的观测系统,主要探测“刘家堡断裂”沿线浅部岩层变化情况,通过分析4个场地的浅层地震剖面,阐述了勘探场地附近地震图像的特征及其所反映的七里河向斜盆地西北边缘的构造趋势。地震勘探认为,向斜构造界线两侧岩层物理性质差异明显,地震反射剖面对比反映出“刘家堡断裂”与“深沟桥断裂”交汇的部位褶皱变形非常剧烈。总之,兰州盆地内部地质构造复杂,地震勘探的正确解释是建立在地质构造正确认识的基础上的。

关键词: 兰州盆地 刘家堡断裂 地震勘探 地质构造

[文章编号] 1001-4683(2011)03-0309-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2004年起,“兰州市活断层探测与地震危险性评价”项目开始实施,中国地震局兰州地震研究所广泛利用地球物理勘探、地球化学探测、大型槽探、钻探、测年技术及地质构造解释等各类地质调查方法综合研究了兰州地区的地震地质构造,取得了重要的进展,尤其是重新认识了兰州盆地的构造性质,并且否定了刘家堡断裂、深沟桥断裂的存在(袁道阳等,2008)。在该项目执行中,浅层地震勘探作为探测隐伏断层最有效的方法发挥了不可替代的作用,由于刘家堡断裂对兰州市区地震安全性评价具有重要影响,研究人员对该断裂进行了多方位地震勘探研究。不可否认,刘家堡断裂的认识过程即是兰州盆地构造性质的认识过程,本文选择几例针对刘家堡断裂的浅层地震勘探成果,进一步讨论浅层地震反射剖面在认识兰州盆地构造环境中的一些贡献。

1 刘家堡断裂的认识过程

1.1 基于钻探与电法勘探的认识

20世纪80年代初,根据电法勘探和水文钻探等形成了兰州是一个存在多条活断裂的

[收稿日期] 2009-11-12

[项目类别] 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(No. 2009A25)

[第一作者简介] 卢育霞,女,1978年生,副研究员,2003年获中国地震局兰州地震研究所硕士学位,主要从事浅层地震勘探及工程地震方面的研究。E-mail: yuxial@163.com

断陷盆地的认识,并在盆地内确定了金城关、刘家堡、雷坛河、深沟桥、寺儿沟和西津村等6条晚第四纪活动断裂(袁道阳等,2008);其中,刘家堡断裂(又名孔家崖断裂)是兰州市一条规模较大的全新世隐伏活动断裂,它横穿兰州市区,对市区工程建设有重要影响(王金宝等,1998)。

据前人给出的资料,刘家堡断裂第四系垂直断距达100~185m左右,其北侧为新近系紫红色泥岩,南侧为第四系青灰色、土黄色半胶结砂砾石或砾岩,两侧岩性的巨大差异是判定它为断裂的主要依据^{①②}。王金宝等(1998)根据兰州某工程场址(位于黄河I级阶地上)横跨断裂的钻探资料认为,刘家堡断裂北盘黄河阶地卵石层顶面埋深一般为5m左右,基岩顶面埋深一般7m左右,断裂南盘阶地卵石层顶面埋深约3m,其下部为半胶结的五泉砾石层,顶面埋深10m左右,因此,推测I级阶地下部可能有断错,即全新世早、中期可能有活动。

1.2 基于槽探、钻探、浅层地震勘探、电法勘探、测年技术以及地质经验等的认识

2005年,“兰州市活断层探测与地震危险性评价”项目基于浅层人工地震探测和电成像探测等物探工作,选择了4处场地进行钻探和一个场地的槽探验证(何文贵等,2009)。钻探和槽探表明,前人提出的刘家堡断裂实际上是第三系上新统泥岩与第四系下更新统砾岩之间的岩性界线,而非断裂(袁道阳等,2008;何文贵等,2009)。其中最直观的文华嘉苑探槽剖面(图1)揭露:场地上部盖层为水平的黄河一级阶地堆积,下部南西为早更新统地层(Q_p^1),北东为上新统地层(N_2),岩层倾角具从北向南逐渐变缓的特征,表明其具生长地层的性质,内部存在多处挠曲现象,是岩层褶皱变形过程中的产物;而在上新世泥岩和早更新世半胶结砂砾岩接触面上无任何错动痕迹,并可以发现风化壳的存在,整体显示为高角度不整合接触,产状均60~70°(袁道阳等,2008)。“刘家堡断裂”实际上应该是兰州向斜盆地的北部边界,该向斜盆地边界见图2中紫红色点线所示。

2 利用浅层地震勘探对刘家堡断裂的研究

“刘家堡断裂”是否存在对认识兰州七里河盆地的形成、发展及其演化过程以及兰州地区的构造活动等都具有重要意义。为了探查刘家堡断裂的活动性质和延伸位置,兰州市活动断裂探测项目曾在兰州盆地内布设了多条地震测线^{③④}(主要包括由煤炭科学研究总院西安分院和中国地震局地球物理勘探中心承担的控制性浅层地震勘探),并获得丰富的地震资料。但是据这些测线得到的地震剖面侧重于中深目标层,而对第四纪覆盖层内部的情况涉及较广,特别是与钻孔和探槽可探及的深度范围存在很大差别。因此,在以上工作的基础上,本文将目标放在百米以内,并利用更适于百米内的地震勘探的观测系统,主要研究包括第四纪沉积层在内的岩层变化情况。图2给出了4个主要探测场地的位置及其所探查的刘家堡推测断裂的位置,本文通过分析这4个场地的浅层地震勘探成果,阐述刘家堡断裂沿线反射地震图像特征及其所反映的地层界面信息(实际地震勘探工作中,在SS1及SS4测线处

① 甘肃省地质矿产局第一水文地质工程地质队,1987年,兰州市区环境地质勘察报告。

② 甘肃省地质矿产局,1988年,地质构造与区域稳定性分区图说明书(兰州市幅、西固城幅)。

③ 煤炭科学研究总院西安分院,2006,兰州市活断层探测与地震危险性评价-控制性浅层地震探测报告。

④ 中国地震局地球物理勘探中心,2006,兰州市活断层探测与地震危险性评价-控制性浅层地震探测报告。

采用了纵波、横波联合探测,本文为了方便比较,仅给出纵波地震勘探成果。)

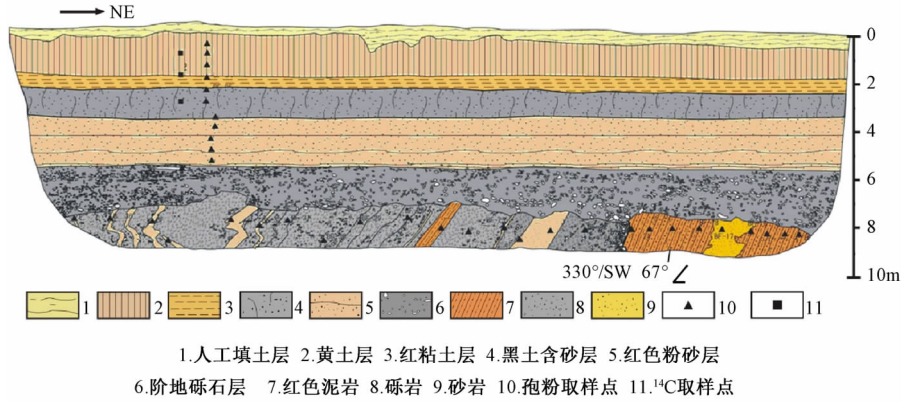
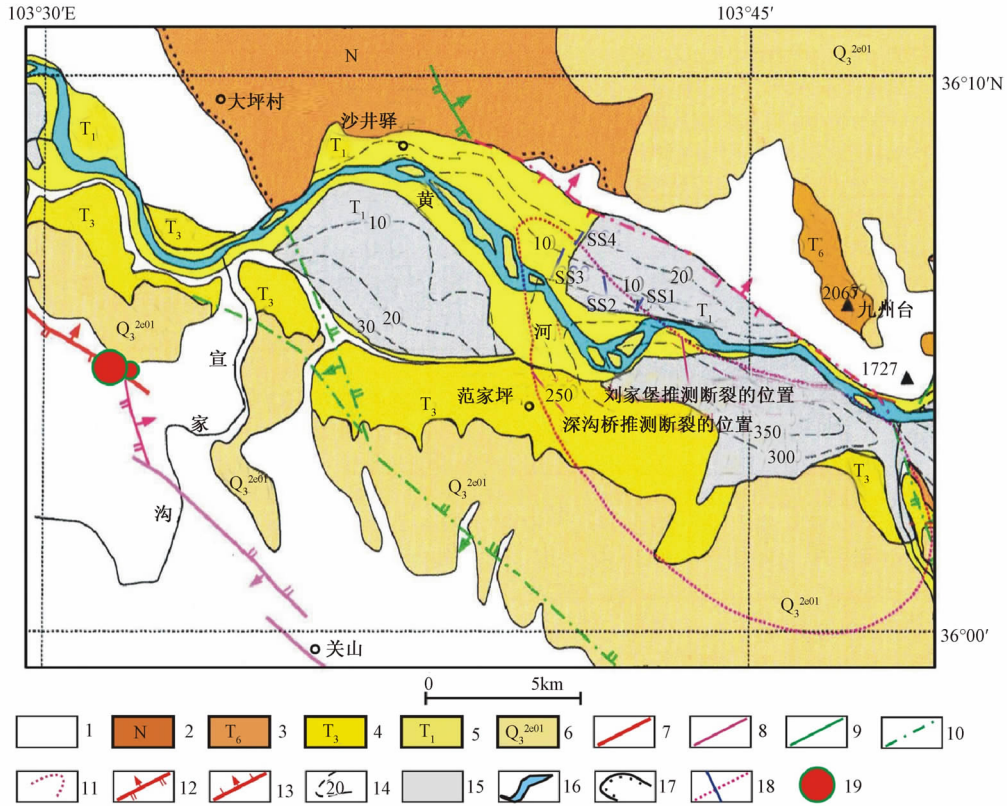


图1 刘家堡断裂文华嘉苑场地探槽(袁道阳,2008)



1.前第三系 2.第三系 3.VI级阶地 4.III级阶地 5.I级阶地 6.黄土 7.全新世断裂 8.晚更新世断裂 9.活动时代不明断裂 10.隐伏断裂 11.岩性界线 12.逆断裂 13.正断裂 14.第四纪覆盖层厚度 15.城区 16.河流 17.不整合界线 18.地震勘探探测位置 19.地震震中(M=7)

图2 “刘家堡推测断裂”沿线地震勘探场地位置分布

2.1 浅层地震勘探场地及其成果图

2.1.1 SS1 地震勘探场地

SS1 地震勘探测线布置于拟建安宁文华嘉苑小区的工程场地上(图2)。2005年12月袁道阳等(2008)在此场地上进行了探槽开挖,最后得出结论:所谓刘家堡断裂实际上是第三系上新统泥岩与第四系下更新统砾岩之间的岩性界线(图1)。图3为本研究在该场地布设纵波测线的地震时间剖面及其地质解释,数据采集使用48道地震勘探仪,10kg锤击震源,道间距2m,炮间距2m,最小偏移距2m,所布设测线总长160m。从地震剖面可见,50ms以上反射波组基本水平,50ms以下地层反射界面丰富,反射界面整体倾向南西,反射较强,并且纵波剖面CMP58处两侧反射波组特征明显不同,结合该场地横波地震反射(1m道间距,1m最小偏移距)图像^⑤以及图1中探槽剖面位置可知,“刘家堡断裂”应从CMP58附近通过,接近“断裂”部位的波组从浅部到深部两侧倾角相对,“断裂”倾向南西,倾角大于60°。

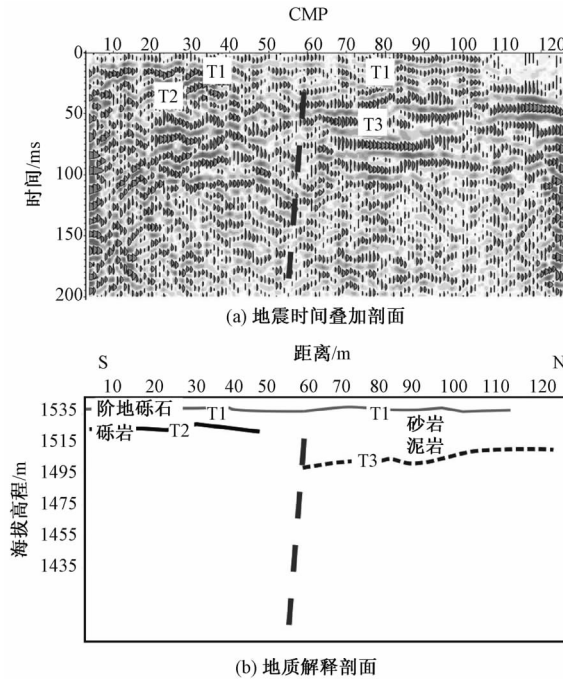


图3 SS1 场地地震勘探结果与解释

2.1.2 SS2 地震勘探场地

图2中地震测线SS2布置处,为拟建“安宁世纪大道”的工程场址,此处场地开阔,地势平坦,对开展浅层人工地震探测非常有利。根据现场地震扩展排列试验,测线震源采用36.3kg电动落锤,道距1m,炮间距4m,最小偏移距10m,测线总长度为337m。图4(a)为最终叠加时间地震剖面,地震剖面主要显示了30~50ms间和70ms左右两组比较明显的水平反射波组,两组反射波连续性均较好,除了CMP340和CMP480处有些小的波组扰

^⑤ 卢育震等,2009,中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目报告:纵波横波浅层地震勘探技术在探查复杂活动构造中的联合应用。

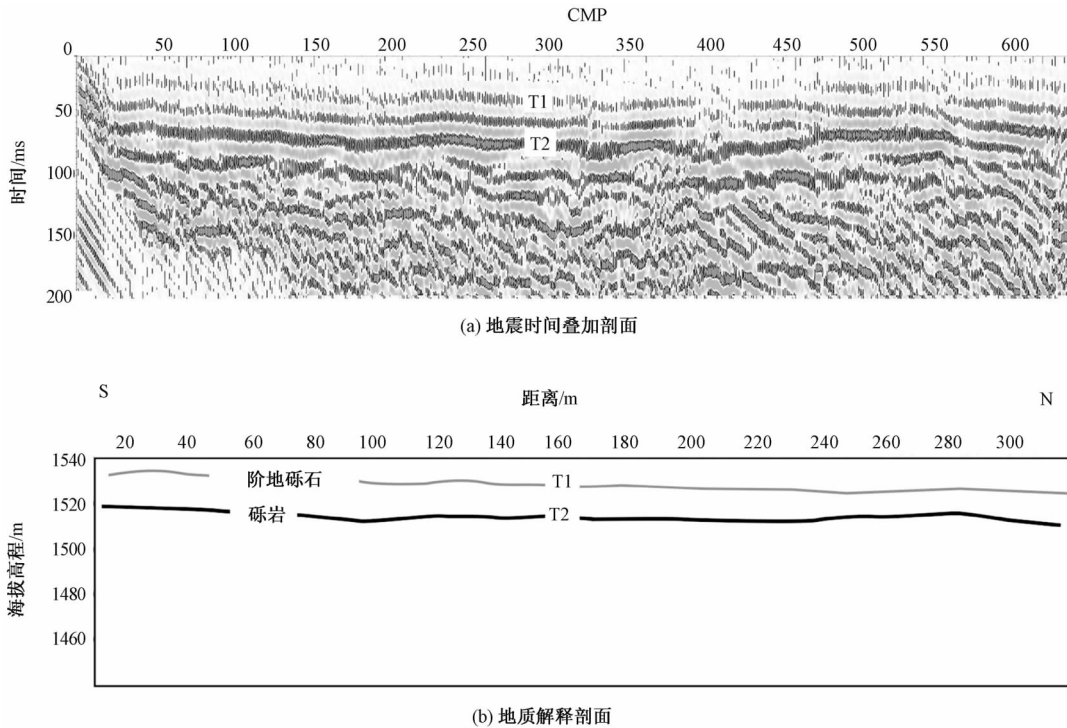


图4 SS2 场地地震勘探结果与解释

动外,整个地震图像并没有显著的垂直断错迹象或物性差异,因此,认为“刘家堡断裂”并不在该测线控制范围内,波组扰动可能是盆地形成时的褶皱挠曲的反映。从后期确定的刘家堡地层分界线的位置来看,测线 SS2 整体位于界线南西侧,属黄河 I 级阶地,根据 I 级阶地沉积特征判断上述两组反射波应分别来自浅部 I 级阶地砾石层和早更新世砾岩顶界(图 4(b))。

2.1.3 SS3 地震勘探场地

地震测线 SS3 位于兰州市桃林路西侧大片桃林里,属黄河 II 级阶地,探测时地表农田处于冬天休闲期,上覆耕作土。根据现场试验和场地覆盖层厚度调查,地震数据采集使用 10kg 锤击震源,道距 2m,炮间距 2m,最小偏移距 10m,测线总长 580m,测线自北向南布设。图 5(a)中 SS3 测线地震时间剖面中可分辨反射波组有两组:50ms 和 120ms,推测其分别与 II 级阶地浅部阶地砾石层和早更新世砾岩顶界对应,其最浅处理深分别约为 18m 和 35m。图 5(a)中的两组反射波组横向变化突出,在 CMP140、CMP260 和 CMP400 均有明显的波组扰动现象,根据文华嘉苑探槽揭露“刘家堡断裂”岩性特征判断,这些波组扰动可能是由于盆地形成时期的褶皱挠曲现象的反映,而并非构造断裂。SS3 地震剖面地质解释见图 5(b)。

2.1.4 SS4 地震勘探场地

鉴于对文华嘉苑场地及其地震剖面的认识,排除了“刘家堡断裂”从 SS2 测线和 SS3 测线位置通过的可能性,并且根据煤炭研究院西安分院的物探资料^③推测“刘家堡断裂”向北西方向延伸很可能从兰州师范学校北西侧通过,随后,布置于兰州师范学校北侧的钻探结果

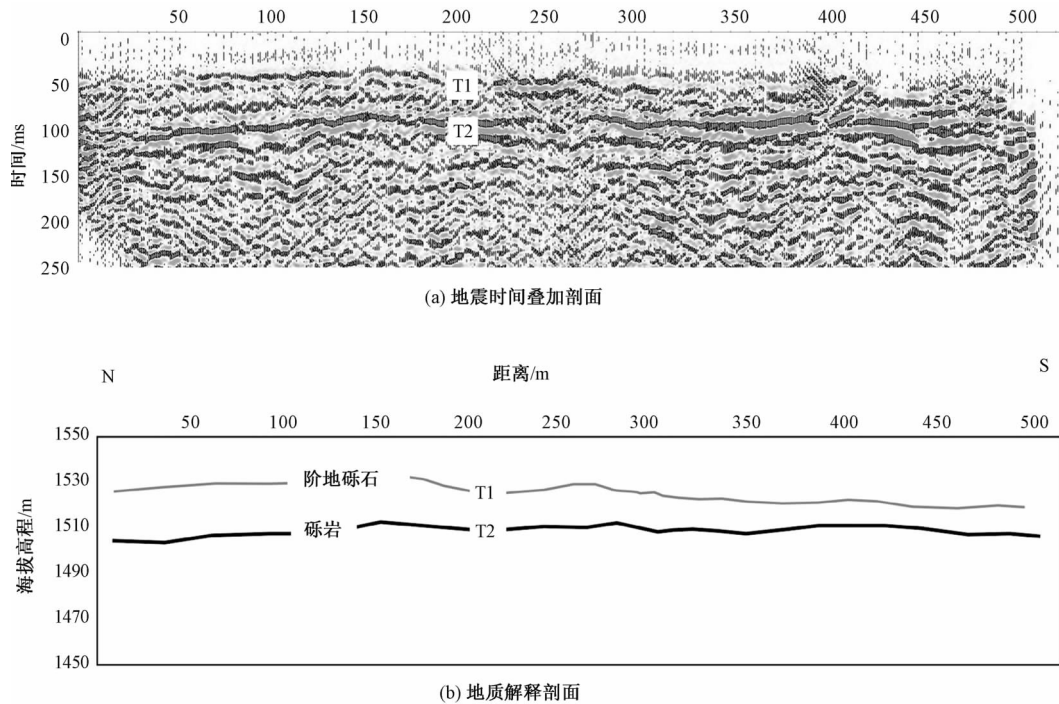


图5 SS3场地地震勘探结果与解释

(图6(a))验证了“刘家堡断裂”岩性界线的通过位置。因此,我们在兰州师范学校附近选择适宜的场地布置SS4地震测线,该场地位于安宁桃林路西侧,属黄河级Ⅱ阶地,地形平坦开阔,地表为亚砂土或砂砾石层(图2)。纵波地震数据采集使用36.3kg电动落锤震源,道距2.5m,炮间距2.5m,最小偏移距25m,测线总长152.5m。整个勘探过程中由于近旁建筑工地的施工,个别地震数据受到干扰。

图6(b)是SS4师范学校西场地地震时间剖面,图中以CMP35为界,两侧地层特征明显不同,南侧深部并无良好的反射界面,可能是该测线处巨厚卵砾石层内部无明显反射界面。其北侧地层反射波组丰富,波组倾向南西,根据钻孔资料,其对应深度应为第三系砂岩、泥岩沉积界面(图6(c))。综合文华嘉园探槽剖面特征与所得横波(1m道间距,1m最小偏移距)^⑥、纵波地震剖面,可知褶皱变形形成的高角度不整合接触在地震剖面上也显示出多组断裂特征,单从近地表地震剖面波组特征很难区分断裂和高角度不整合地层界面,“刘家堡断裂”在师范学校场地的主分界面应位于CMP35左右。

2.2 地震剖面图的综合解释

综合对比以上4个物探场地的地震地质解释剖面,除SS1、SS4以外,另外两条地震测线SS2、SS3均被认为没有明显的断裂波组特征,尤其是没有探测到能和刘家堡断裂特征吻合的地层差异。在SS1、SS4的地质解释图中,刘家堡地层界线两侧的地震反射波组特征差异

^⑥ 卢育震等,2009,中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目报告:纵波横波浅层地震勘探技术在探查复杂活动构造中的联合应用,

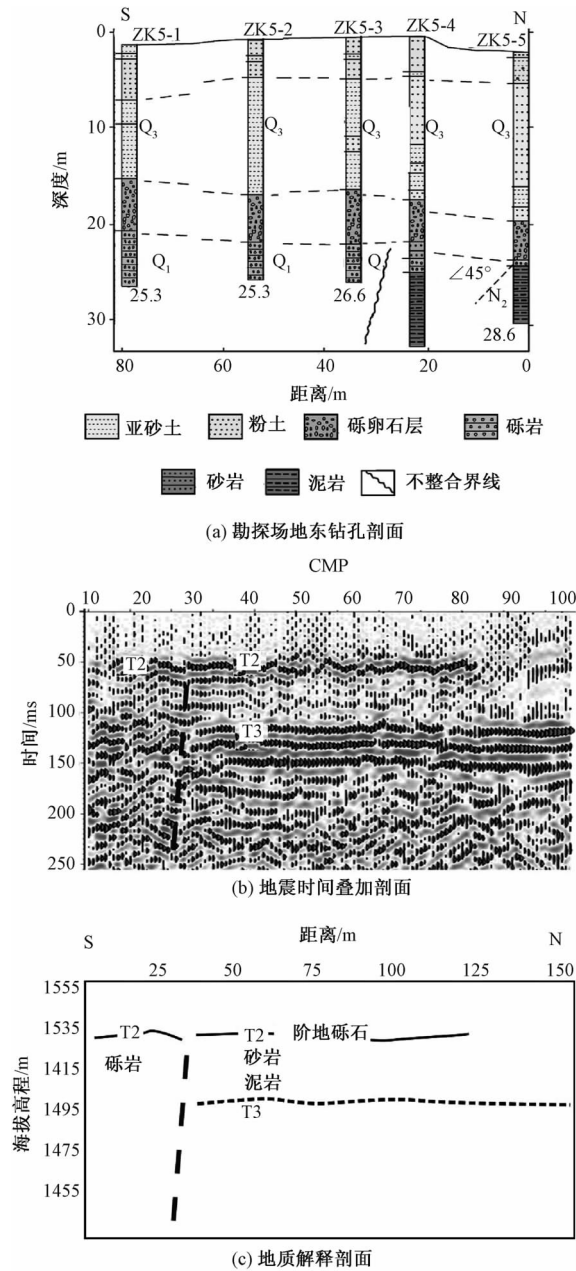


图6 SS4 场地地震勘探结果与解释

比较明显,界线南西侧的砾卵石层较厚,两条测线处的反射波组均显得有些凌乱,而界线北东侧的第三系地震反射波组丰富,岩层总体呈现南西倾向,可见岩性差异特征在地震图像上反映很明显。由于 SS2、SS3 两条测线整体位于刘家堡界线南西侧,从地震解释图像上分析,SS2、SS3 两条测线均探测到了两组比较清晰的地震波组,结合探槽、钻孔资料等可以确定,这两组反射波主要是来自阶地砾石层上部(T1)和其下覆胶结程度较好的砂砾岩顶部(T2)。

4条地震测线中,SS1、SS2位于I级阶地,SS3、SS4位于II级阶地,根据地震解释剖面可计算得到阶地砾石层和砂砾岩的埋深和高程。

若沿的SS1~SS3这3条地震测线作一条东西向剖面线,可见“刘家堡断裂附近阶地覆盖层厚度的分布特点是西厚(SS3测线)东薄(SS1测线),而其基底岩层西低东高(图7(a));若沿SS3~SS4测线做南北向剖面线,兰州黄河北岸II级阶地河流堆积层南厚北薄,其基底岩层向南倾斜(图7(b)),上述黄河阶地沉积层的特征一方面反映了七里河褶皱向斜盆地西北边缘的构造特征,另一方面,也印证了兰州盆地构造变形的力源主要来自南西侧,并逐渐向东北方向传递(刘兴旺等,2007),其挤压形成的漏斗状盆地在“刘家堡断裂”与“深沟桥断裂”交汇的部位褶皱变形剧烈。其中深沟桥断裂被认为是构成兰州七里河凹陷的西部边界,在深沟桥铁道边发现一天然剖面,见上新世泥岩与下更新世“范家坪砾岩”均发生了明显的褶皱变形,但二者之间为假整合接触,并不是断裂(袁道阳等,2008)。“刘家堡断裂”与“深沟桥断裂”的被否定,实际上支持了兰州七里河凹陷盆地的存在形态。

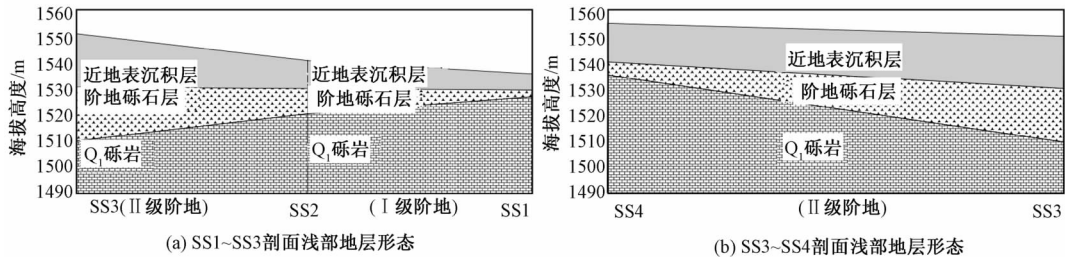


图7 “刘家堡断裂”沿线的浅部地层形态

3 结论

(1)对兰州盆地及其构造特征前后认识上的巨大反差主要缘于兰州地区地质构造复杂。

兰州盆地是一个狭长的北西西向河谷盆地,处在祁连山地震带与南北地震带的复合部位,区域上受两组活动构造(北西西向马衔山-兴隆山左旋逆走滑活动断裂系和北北西向拉脊山北缘断裂、庄浪河断裂等弧形逆冲断褶带)交汇部位的应力控制,历史上曾多次遭受过强震袭击,其中有历史记载的最大地震为1125年7级地震(袁道阳等,2002)。兰州地区区域性活动断裂多为半隐伏状,一方面由于普遍存在的黄土覆盖层较厚,造成对一些区域性断裂的新活动性尚认识不清(戴聚昌等,2002),另一方面,由于城市发展规模的限制,其复杂的整体构造探测受到局限。因此,长期以来对兰州盆地及其构造特征的正确认识缺乏清晰可靠的证据。“兰州市活断层探测与地震危险性评价”的结果澄清了过去对兰州市地震构造环境的一些模糊认识(袁道阳等,2008)。

(2)地震勘探的正确解释是建立在对地质构造正确认识的基础上的。

首先,就地质调查方法本身而言,早期钻探结果对新生界地层产状不易判别,而且由于不平整河流侵蚀面的存在,在进行钻孔对比时误认为I级阶地砾石层有断错,故将向斜地层误认为是全新世断层。其次,地震剖面上反映的界面是指地震波传播时波速变化的界面或

波阻抗不同的界面,而地质界面是岩性不同的界面。这两种界面,有时是一致的,有时却不完全一致。“刘家堡断裂”两侧褶皱互层结构高角度不整合接触在地震剖面上也会显示出多组断裂特征,单从近地表地震剖面波组特征很难区分断层和高角度不整合地层界面。另外,值得注意的是曾有纵波深长剖面的地震勘探资料显示了兰州断陷盆地向斜构造的地层趋势(卢育霞等,2008),但由于城市发展规模限制,清晰的整体构造获得还有困难,需要进一步调查研究。总之,探查浅层地下构造的空间展布还需要深部构造资料的佐证。所以,地震剖面的正确解释,必须依赖于其他地球物理资料、地质调查结果及查明相应的深部构造联系等,以进行对比验证。

(3)“刘家堡断裂”沿线浅层地震勘探剖面的进一步分析,对认识兰州黄河谷地的形成、发展、演化过程及市区工程建设都具有重要作用。

研究表明,所谓的“刘家堡断裂”实际上就是早更新世砾石层与上新世砂、泥岩地层的高角度地层界线,本文浅层地震勘探剖面,进一步反映了这一向斜构造界线两侧具有明显岩性差异的特征。在这条向斜盆地的西北部边界附近,阶地覆盖层厚度的分布特点是西厚东薄,其基底岩层西低东高;兰州黄河北岸Ⅱ级阶地河流堆积层基本上南厚北薄,其基底岩层具有向南倾斜的特征。由此可见,在“刘家堡断裂”与“深沟桥断裂”交汇的部位,向斜盆地褶皱变形非常剧烈,这一点从图2中紫红色点线的轮廓也可以看得出来。本文地震反射剖面中反映的浅部地层横向岩性变化,为认识兰州盆地构造环境提供了证据,为兰州市区工程建设选址提供了参考。

参考文献

- 戴聚昌、袁道阳,2002,兰州地区活动构造的基本特征,高原地震,14(3),35~40。
何文贵、袁道阳、葛伟鹏等,2009,对兰州市刘家堡断裂的新认识,西北地震学报,31(1),40~45。
刘兴旺、袁道阳、葛伟鹏,2007,兰州黄河阶地高精度GPS测量与构造变形研究,西北地震学报,29(4),341~346。
卢育霞、王振明、王兰民等,2008,兰州盆地活断层的高分辨率浅层地震勘探技术,西北地震学报,30(4),344~353。
王金宝、戴华光、丁伯阳等,1998,兰州市孔家崖断裂活动特征,西北地震学报,20(3),92~94。
袁道阳、雷中生、刘百箴等,2002,兰州1125年7级地震考证与发震构造分析,中国地震,18(1),67~75。
袁道阳、王兰民、何文贵等,2008,兰州市地震活断裂探测新进展,地震地质,30(1),236~249。

Study on the seismic exploration of Liujiabu fault in Lanzhou

Lu Yuxia^{1,2)} *Shi Yucheng*¹⁾ *Yuan Daoyang*¹⁾ *Chen Yongming*^{1,2)} *Qiu Rendong*³⁾ *Sun Junjie*^{1,2)} *Xu Shunhua*^{1,2)}

1) Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China

2) Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, CEA, Lanzhou 730000, China

3) Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China

Abstract The integration of the various techniques of geological survey has proved that Liujiabu fault is not a fault actually, but a northern boundary of the Qilihe syncline basin in Lanzhou city. In order to get the deformation of the shallow stratum along the Liujiabu fault, a set of observing system, which is suit for seismic reflection above one hundred meters, is used in the survey. There are four survey lines discussed in this paper, and we delineate the structure of the Qilihe syncline basin by analyzing the characteristics of the four seismic images. Comparison of the seismic images shows that the obvious physical differences are on two sides of the syncline structure, meanwhile, the intersection of Liujiabu fault and Shengouqiao fault is deformed greatly. This study suggests that the geological structure under the Lanzhou basin is quite complicated and the correct interpretation of seismic exploration is based on a correct understanding of the geological structure.

Key words: Lanzhou basin Liujiabu fault Seismic exploration Geological structure