

# 一条断裂的活动性鉴定及其工程意义\*

王华林<sup>1</sup>, 王纪强<sup>1</sup>, 杜历英<sup>1</sup>, 盖殿广<sup>1</sup>, 葛孚刚<sup>1</sup>, 张昊<sup>1</sup>, 王一鹰<sup>2</sup>

(1. 山东省地震工程研究院, 山东 济南 250021; 2. 青岛理工大学, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 拟建的某水利工程场地存在一规模较大的北北东向断裂, 定名为  $F_1$  断裂。通过对  $F_1$  断裂的地质雷达探测、工程地质资料分析、地震地质调查、断裂断错和上覆第四纪地层年代测试等工作, 鉴定了此断裂的活动性, 评价了断裂对工程的影响, 提出了工程选址和设计建议, 为断裂活动性鉴定在工程选址和设计中的实际应用提供了一个范例。

**关键词:** 活动性鉴定; 断裂探测; 工程选址; 应用价值

**中图分类号:** P315

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2011)03-0331-06

## 0 引言

断层活动性鉴定是地震危险性分析和工程选址工作中的一项重要内容(李起彤, 1991; 马宗晋, 1992)。1976年唐山7.8级地震(国家地震局, 1982)、1995年日本阪神7.2级地震(韩竹军等, 1996)、1999年土耳其伊兹米特7.6级地震(韩竹军, 苗崇刚, 2000)、1999年台湾集集7.3级地震(王彦斌等, 2000; 俞言祥, 高孟潭, 2001; 周任勇, 陈晓非, 2006)和2008年汶川8.0级地震(付碧宏等, 2009; 谢富仁, 2009; 郭婷婷等, 2010; 姜纪沂等, 2009; 张宇翔, 袁志祥, 2010)的震害经验告诉人们, 地震断裂带不仅是地震发生的“元凶”, 也是地震破坏最严重的区域。因此, 在工程场地直接跨越断层的情况下, 必须对断层的活动性进行深入细致的研究, 评价断裂的地震危险程度及其对工程的影响, 以便在工程选址和抗震设计上采取相应的对策措施。

拟建的某水利工程场地经工程地质勘探和基础开挖发现一规模较大的北北东向断裂, 定名为  $F_1$  断裂, 它引起了建设单位和设计部门的高度重视。为了提供工程选址和设计依据, 建设单位委托山东省地震工程研究院对该断层进行了活动性鉴定。鉴定技术报告已经被山东省地震安全性评定委员会审定通过。笔者以该断裂的活动性鉴定

为基础, 讨论了断层活动性鉴定在工程设计和建设中的作用。

笔者在收集和整理本地区以往地质构造、场地工程地质勘探资料的基础上, 开展了地质雷达探测、工程地质资料分析、地震地质调查、断裂断错和上覆第四纪地层年代测试, 通过这些工作鉴定了该断裂的活动性, 评价了该断裂的地震危险程度及其对工程的影响, 提出了断层避让、工程设计和建设上采取相应的对策措施。

## 1 断裂存在的地质构造依据

### 1.1 断裂两侧地层分布不同

地震地质调查确定,  $F_1$  断裂走向  $20^\circ \sim 30^\circ$ , 倾向 W, 倾角  $70^\circ \sim 80^\circ$ , 其性质为正断层。我们收集和整理工程场地及其附近以往地质构造研究资料后发现,  $F_1$  断裂控制着花岗岩和金矿矿化带以及第四系和第三系的分布, 断层破碎带宽达几十米至上百米。断裂及其附近地区结晶基底岩系由晚元古代之前的粉子山群(辽河群)、胶东群(宽店群)和鞍山群组成, 固结时期发生在距今约17亿年的中岳运动期间; 出露的岩浆岩主要为玲珑期花岗岩。结晶基底岩系和岩浆岩分布在断裂的东侧。断裂以西为第四系松散沉积, 沉积相有陆相和海相两种类型, 陆相为残积物、坡积物、洪积物和冲积物, 海相为滨海堆积物。 $F_1$  断裂构

\* 收稿日期: 2010-12-14.

基金项目: 中国活断层综合探查—华北构造区: 安丘—莒县断裂 1: 5 万条带状活动断层填图(022929)和山东省自然科学基金青年基金项目(Q97E01142)共同资助。

成了不同岩性和地层的分界线。

1.2 断裂存在的地质剖面证据与断裂活动性初步分析

收集、整理和分析中华人民共和国区域地质调查报告（比例尺 1: 5 万，辛庄幅和朱桥幅）发现，F<sub>1</sub> 断裂在朱桥—辛庄段地质剖面（图 1）和姜家—姚家段地质剖面（图 2）显示，断裂南东盘为结晶基底岩系和岩浆岩，北西盘为第四系松散沉积物和第三系砂岩、砂砾岩，第三系岩层与上覆第四系松散沉积物呈不整合接触，从岩石物质成分、硬度、颜色等分析，第三系与第四系显著不同，胶结程度存在差异。第三系主要由紫色含砾长石砂岩、含砾硬砂岩组成，其间夹有紫色含砾粘土质砂岩。

断裂碎裂岩带宽 10 ~ 50 m。从地质剖面分析，断裂控制着第四系沉积，并断错了第四系地层，说明断裂为第四纪活动断裂。朱桥—辛庄段地质剖面和姜家—姚家段地质剖面为我们对断裂活动性和运动性质做详细研究提供了重要线索和依据。

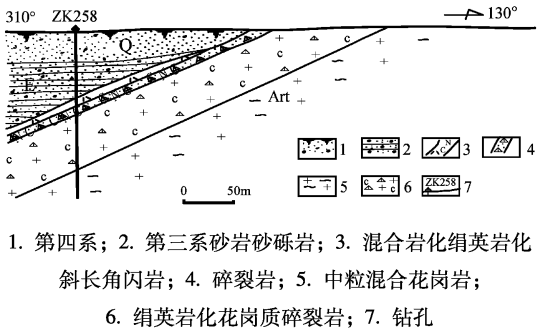


图 1 F<sub>1</sub> 断裂在朱桥—辛庄段地质剖面图  
Fig. 1 Geological section of F<sub>1</sub> fault in Zhuqiao-Xinzhuang segment

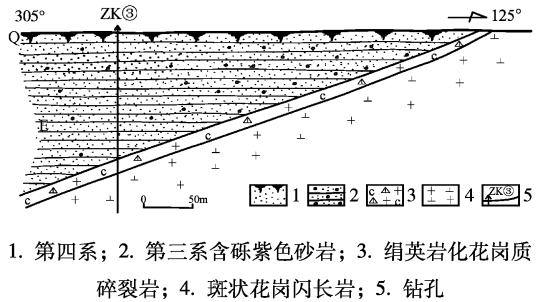


图 2 F<sub>1</sub> 断裂在姜家—姚家段地质剖面图  
Fig. 2 Geological section of F<sub>1</sub> fault in Jiangjia-Yaojia segment

2 断裂探测

2.1 地质雷达探测

(1) 设备、场地和工作概况

我们采用美国 GSSI 公司研制的 SIR - 2000 型地质雷达。经现场试验对仪器各参数进行优化选择。中心频率采用 20 MHz 的天线点测，采样时窗设置为 400 ns，发射和接收天线间距 4.0 m，测点距 1 m。为了相互映证，在跨 F<sub>1</sub> 断裂我们还布设了 2 条测线（图 3），测线总长度 490 m。

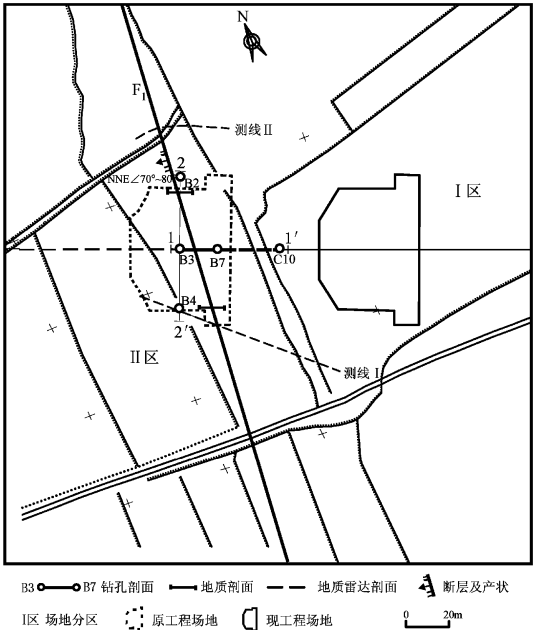


图 3 F<sub>1</sub> 断裂场地工作布设、断裂平面分布和工程地质分区图

Fig. 3 Arrangement of engineering site of F<sub>1</sub> fault, plan distraction of fault and engineering geological zoning

探测场地地形地貌为丘陵地区，出露地层为花岗闪长岩、浅棕红色粘土和褐黄色亚粘土。根据钻探资料分析，地下水位较深，在 20 m 深度内没有见到地下水。断裂构成了花岗闪长岩与粘土和亚粘土分界。从场地地形地貌、地下水和岩性分布分析，选择高精度地质雷达探测方法是行之有效的。

处理工作包括预处理和后处理两部分。预处理阶段主要采用了频率域滤波方法，目的是提高数据采集质量。后处理部分则建立在美国 GSSI 公司的 RADAN 数据处理软件包上，用 TOSHIBA - 2400 笔记本实现，处理过程主要包括数字化滤波、速度分

析、能量均衡等一般性处理和反褶积、偏移等特殊处理，旨在最大限度地压制随机干扰，提高信噪比，突出目标信息，为资料解释工作构筑成果图。

(2) 资料分析与解释

地质雷达所采集的数据经处理后，各测线地下基于介质电性差异的地质结构的变化特征在地质雷达探测（GPR）剖面上得以再现，探测结果见图4，5。在地质雷达探测时间剖面图上，横坐标为相对于剖面零点的距离，其单位为米（m）；纵坐标为反射波的双程垂直到时 $T_0$ ，单位为纳秒（ns）。从2条测线地质雷达勘探剖面图（图4，5）上可以看出：

测线1：跨越断裂沿东西向布置的地质雷达勘探剖面（图4）显示，在100 m处，地层反射界面不连续，发生了断错和弯曲，判断为断层。断裂东盘（下盘）地层较为连续；断裂西盘（上盘）地层较为凌乱，显示了断裂破碎带的特征。

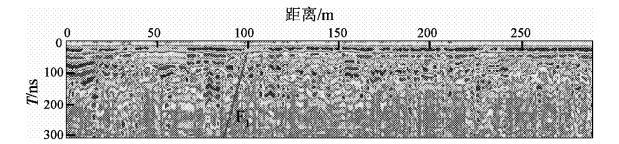


图4 测线1地质雷达剖面图（剖面方向：右手指向东）

Fig. 4 Profile of geological rader of survey line 1

测线2：跨越断裂沿东西向布置的地质雷达勘探剖面（图5）显示，在68 m处，地层反射界面不连续，有一明显错断和牵引现象，为断层显示。断裂东盘（下盘）地层较为连续；断裂西盘（上盘）地层发生了位错和弯曲，结构面较为凌乱，显示了断裂破碎带的特征。

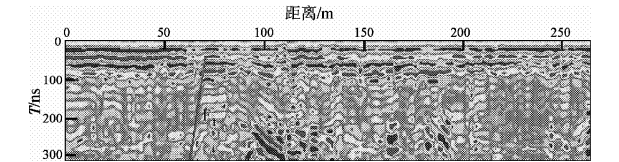


图5 测线2地质雷达剖面图（剖面方向：右手指向东）

Fig. 5 Profile of geological rader of survey line 2

跨越 $F_1$ 断裂布置的2条测线地质雷达勘探剖面显示，断裂错断了第四系 $Q_3$ 覆盖层，断裂下盘的地层发生了明显断错，出现牵引现象。断裂下盘破碎现象较上盘更为明显。在地质雷达勘探剖

面范围内，地层结构较为混乱，显示了断裂破碎带和影响带的影像特征。

2.2 工程勘探与断层探测

为了确定断裂的地层断错和位移量，笔者进行了钻孔揭露与资料分析，通过断裂两侧地层对比，确定了断裂两侧基岩面和第四纪地层的位移情况。为了相互映证，笔者沿 $F_1$ 断裂选取了2条工程探测剖面（图6）。

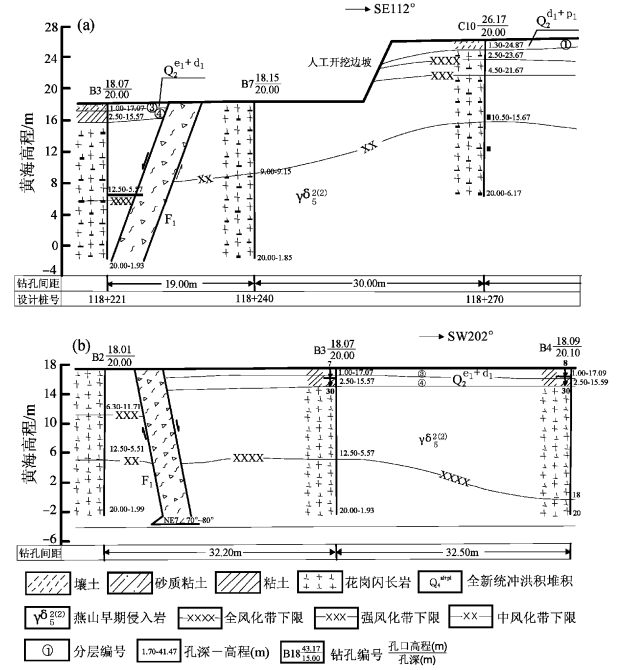


图6 1-1'剖面（a）和2-2'剖面（b）工程探测剖面图

Fig. 6 Engineering exploration profiles of 1-1' (a) and 2-2' (b)

剖面1：跨越断裂沿东西向布置的工程探测剖面（图6a）显示，断裂东盘（下盘）的两个钻孔的第四系底部界面高度为24.87 m，花岗闪长岩全风化带的下限深度为23.67 m，断裂西盘（上盘）钻孔的第四系底部界面高度为15.57 m，花岗闪长岩全风化带的下限深度为5.57 m。断裂两侧第四系底部界面高差达9.3 m，花岗闪长岩全风化带的下限深度差为18.1 m。

剖面2：跨越断裂布置的工程探测剖面（图6b）显示，断裂东盘（下盘）钻孔的第四系被剥离，没有揭露到第四系，花岗闪长岩强风化带的下限深度为11.71 m，断裂西盘（上盘）的两个钻孔的第四系底部界面高度为15.57 m，花岗闪长岩

全风化带的下限深度为 5.57 m。断裂两侧第四系底部界面高差大于 2.5 m，花岗闪长岩全风化带的下限深度差为 12.44 m。

两条跨越断裂的工程探测剖面显示，断裂两侧的风化程度存在明显差异，断裂东盘（下盘）基岩相对完整，抗风化能力较强，断裂西盘（上盘）基岩相对破碎，抗风化能力较弱。根据断裂产状和断裂两侧的第四系底部界面高差和风化带的下限深度差分析，断裂西盘（上盘）为下降盘，显示 F<sub>1</sub> 断裂为正断活动，中更新世以来的垂直断距为 8~10 m。

3 地震地质调查与活动性鉴定

为了获取断裂活动的定量数据，笔者开展了地震地质调查、地质剖面测量、断裂断错和上覆第四纪地层年代测试，确定了断裂活动时代、垂直位移量和垂直位移速率。

沿断裂在场地人工开挖基坑北壁和南壁可见 F<sub>1</sub> 断裂清晰的断裂活动剖面（图 7，8）。断裂发育在花岗闪长岩和花岗片麻岩与 E 强风化紫红色砂砾岩、Q<sub>2</sub> 棕红色含砾粘土和 Q<sub>3</sub> 褐黄色亚粘土地层之间。

3.1 场地人工开挖基坑北壁断层剖面

工程场地人工开挖基坑北壁 F<sub>1</sub> 断裂剖面（图 7）显示，断裂产状为 300°∠70°。东盘为破碎的花岗闪长岩，西盘为 Q<sub>3</sub><sup>1</sup> 浅棕红色粘土和 Q<sub>3</sub><sup>2</sup> 褐黄色亚粘土地层。断裂破碎带由灰绿色、褐黄色和灰黑色断层破碎岩、碎粉岩和断层泥组成，具有分带性。断层破碎岩、碎粉岩和断层泥未胶结。断裂将 Q<sub>3</sub><sup>1</sup> 浅棕红色粘土和 Q<sub>3</sub><sup>2</sup> 褐黄色亚粘土地层垂直断错 4.2 m。断裂之上覆盖有厚 1 m 左右的 Q<sub>4</sub>

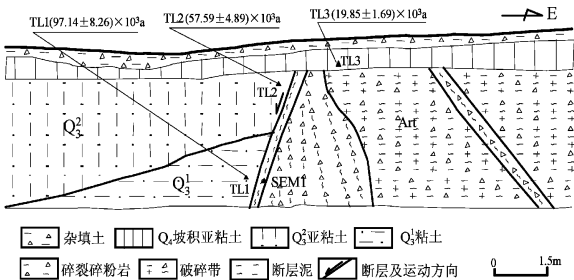


图 7 工程场地人工开挖基坑北壁 F<sub>1</sub> 断裂剖面  
Fig. 7 F<sub>1</sub> fault section of north wall of manual excavating foundation pits in engineering site

土黄色亚砂土地层，且没有被断错。

为了鉴定断裂活动性，笔者在断裂断错 Q<sub>3</sub><sup>2</sup> 褐黄色亚粘土地层、Q<sub>3</sub><sup>1</sup> 褐黄色粘土地层和坡积亚粘土地层分别取释光样品 TL1、TL2 和 TL3（图 7）。TL1、TL2 和 TL3 释光样年龄分别距今  $(97.14 \pm 8.26) \times 10^3$  a、 $(57.59 \pm 4.89) \times 10^3$  a 和  $(19.85 \pm 1.69) \times 10^3$  a。断裂断错了  $(57.59 \pm 4.89) \times 10^3$  a 地层，被  $(19.85 \pm 1.69) \times 10^3$  a 地层覆盖，说明 F<sub>1</sub> 断裂为晚更新世活动断裂。

3.2 工程场地人工开挖基坑南壁断层剖面

人工开挖基坑南壁 F<sub>1</sub> 断裂剖面（图 8）显示出与图 7 相似的断层结构特征，所不同的是，本剖面在断裂西盘见到 Q<sub>2</sub> 棕红色含砾粘土。断裂产状为 300°∠70°。东盘为破碎的花岗闪长岩，西盘为 Q<sub>2</sub> 棕红色含砾粘土、Q<sub>3</sub><sup>1</sup> 浅棕红色粘土和 Q<sub>3</sub><sup>2</sup> 褐黄色亚粘土地层。断裂破碎带由灰绿色、褐黄色和灰黑色断层破碎岩、碎粉岩和断层泥组成，具有分带性。断层破碎岩、碎粉岩和断层泥未胶结。断裂将 Q<sub>3</sub><sup>1</sup> 浅棕红色粘土和 Q<sub>3</sub><sup>2</sup> 褐黄色亚粘土地层正向断错 6.0 m。断裂之上覆盖有厚 1 米左右的 Q<sub>4</sub> 土黄色亚砂土地层，且没有被断错。

从断层带物质固化胶结程度、地形地貌特征、断层与第四系的关系和样品测定年代分析，笔者认为 F<sub>1</sub> 断裂最新活动时代发生在  $(57.59 \pm 4.89) \times 10^3$  a 和  $(19.85 \pm 1.69) \times 10^3$  a 之间，晚更新世期以来曾发生过明显的断错地表的活动，但全新世期以来没有发生断错地表的活动。

F<sub>1</sub> 断裂晚更新世期以来垂直断错量为 4.2~6 m。最新活动时代发生在  $(57.59 \pm 4.89) \times 10^3$  a 和  $(19.85 \pm 1.69) \times 10^3$  a 之间，取其平均值为  $38.72 \times 10^3$  a，计算获得晚更新世断裂垂直位移速率为 0.11~0.16 mm/a。

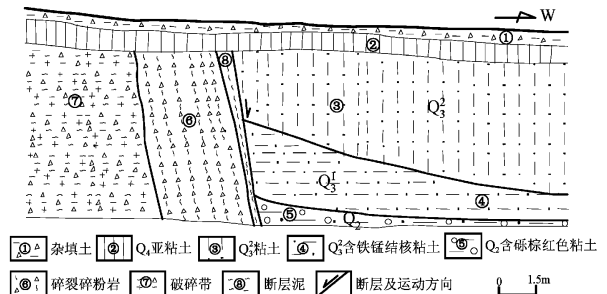


图 8 工程场地人工开挖基坑南壁 F<sub>1</sub> 断裂剖面  
Fig. 8 F<sub>1</sub> fault section of south wall manual excavating foundation pits in engineering site

## 4 $F_1$ 断裂的工程意义

上述研究结果表明,  $F_1$  断裂走向  $20^\circ \sim 30^\circ$ , 倾向 W, 倾角  $70^\circ \sim 80^\circ$ 。 $F_1$  断裂在工程场地通过处破碎带宽度数十米至上百米。中更新世以来断裂垂直位移量  $9 \sim 10$  m, 晚更新世的垂直位移量  $4.2 \sim 6$  m。 $F_1$  断裂是一条较为典型的北北东向晚更新世活动断裂。断裂性质为右旋走滑正断层。断裂最新活动时代发生在  $(57.59 \pm 4.89) \times 10^3$  a 和  $(19.85 \pm 1.69) \times 10^3$  a 之间, 垂直断错量为  $4.2 \sim 6$  m, 晚更新世断裂垂直位移速率为  $0.11 \sim 0.16$  mm/a。

根据《泵站设计规范》(GB/T50265-97) 的有关规定, 泵站水利工程宜选择在岩石坚硬、抗震性能良好的天然地基上, 不应设在大的和活性的断裂构造带以及其它不良地质地貌单元上。由此, 这一泵站工程不能跨  $F_1$  断裂的主断层, 应对其作适当避让。根据《山东省地震活动断层调查管理规定》<sup>①</sup> 有关规定, 沿该断裂不得建设重大工程、可能发生严重次生灾害的工程以及核电站和核设施。因此, 这一水利工程不能跨  $F_1$  断裂的主断层, 应对其作适当避让。

经综合分析我们提出了工程选址和建设的意见, 认为  $F_1$  断裂在第四纪晚更新世曾发生过明显的断错地表的活动, 属工程抗震危险地段。因此, 根据《泵站设计规范》(GB/T50265-97) 和《山东省地震活动断层调查管理规定》<sup>①</sup> 的有关规定, 这一水利工程应由  $F_1$  断裂的主断层向东移动适当距离, 避开  $F_1$  断裂的主断层。

建设单位和设计部门采纳了我院提出的工程选址和建设意见, 将这一水利工程场地向东移动 90 m (图 3), 避开了  $F_1$  断裂的主断层。工程选址在  $F_1$  断裂的东盘, 避开了工程抗震危险地段, 避免了工程场地地基不均性问题, 消除了工程建设和使用的地震安全隐患。

## 5 结论与认识

(1)  $F_1$  断裂走向  $20^\circ \sim 30^\circ$ , 倾向 W, 倾角

$70^\circ \sim 80^\circ$ 。 $F_1$  断裂在工场场地通过处破碎带宽度数十米至上百米。断裂自更新世以来垂直位移量  $9 \sim 10$  m, 晚更新世垂直位移量  $4.2 \sim 6$  m。 $F_1$  断裂是一条较为典型的北北东向晚更新世活动断裂。

(2)  $F_1$  断裂性质为右旋走滑正断层。断裂最新活动时代发生在  $(57.59 \pm 4.89) \times 10^3$  a 和  $(19.85 \pm 1.69) \times 10^3$  a 之间, 垂直断错量为  $4.2 \sim 6$  m, 晚更新世垂直位移速率为  $0.11 \sim 0.16$  mm/a。

(3) 根据《泵站设计规范》(GB/T50265-97) 和《山东省地震活动断层调查管理规定》<sup>①</sup> 的有关规定, 认为  $F_1$  断裂属建筑抗震危险地段, 这一水利工程不能跨  $F_1$  断裂的主断层, 应对其作适当避让。

(4) 建设单位和设计部门采纳了山东地震工程研究院提出的工程选址和建设意见, 将这一水利工程场地向东移动 90 m (图 3), 避开了  $F_1$  断裂的主断层。工程选址在  $F_1$  断裂的东盘 (断裂下盘), 避开了建筑抗震危险地段, 避免了工程场地地基不均性问题, 消除了工程建设和使用的地震安全隐患。

我们对  $F_1$  断裂进行了较为深入的调查和研究, 获得了一些有价值的成果和认识。这些成果和认识在工程选址和建设中得以应用。本次工作提供了断裂活动性鉴定在工程选址和设计中实际应用的一个范例, 取得了良好的效果。

### 参考文献:

- 付碧宏, 王萍, 孔屏, 等. 2009. 中国汶川“5·12”8.0 级大地震地震地质灾害图集[M]. 北京: 地震出版社.
- 郭婷婷, 徐锡伟, 于贵华, 等. 2010. 基于汶川地震建筑物破坏的抗震设防要求分析[J]. 地震研究, 33(3): 345-352.
- 国家地震局. 1982. 1976 年唐山大地震[M]. 北京: 地震出版社.
- 韩竹军, 苗崇刚. 2000. 伊兹米特地震地表破裂带和发震构造特点[J]. 国际地震动态, (1): 8-12.
- 韩竹军, 任伏虎, 小川雄二郎, 等. 1996. 1995 年 1 月 17 日日本阪神 7.2 级地震的构造条件研究[J]. 地震学报, 18(4): 523-528.
- 姜纪沂, 迟宝明, 谷洪彪, 等. 2009. 汶川 8.0 级地震北川县城震害原因分析[J]. 地震研究, 32(4): 382-386.
- 李起彤. 1991. 活新层及其工程评价[M]. 北京: 地震出版社.
- 马宗晋. 1992. 活动构造基础与工程地震[M]. 北京: 地震出版社.
- 王彦斌, 王永, 李建成, 等. 2000. 1999 年台湾集集大地震的地表断层

<sup>①</sup> 山东省人民政府第 159 号令. 2003.

破裂特征[J]. 地震地质,22(2):97-103.

地震研究,33(4):329-335.

谢富仁. 2009. 汶川 8.0 级地震地壳动力学研究专辑[M]. 北京:地震出版社.

周仕勇,陈晓非. 2006. 近震源破裂过程反演研究——9·12 中国台湾集集地震破裂过程的近场反演[J]. 中国科学(D 辑),36(1):49-58.

俞言祥,高孟潭. 2001. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应[J]. 地震学报,23(6):616-621.

GB/T50265-97. 泵站设计规范[S].

张宇翔,袁志祥. 2010. 汶川 8.0 级地震陕西灾区震灾特征分析[J].

Age Determination of a Fault and its Engineering Significance

WANG Hua-lin<sup>1</sup>, WANG Ji-qiang<sup>1</sup>, DU Li-ying<sup>1</sup>, GAI Dian-guang<sup>1</sup>,  
GE Fu-gang<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, WANG Yi-ying<sup>2</sup>

- (1. *Shandong Institute of Earthquake Engineering, Jinan 250014, Shandong, China*)
- (2. *Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China*)

Abstract

A NNE fault named  $F_1$  was found on the site of a proposed irrigation project. Through geological radar detection, seismo-geological investigation, the analysis of the engineering geological data, and the test of dislocation fault and overlying chronology of quaternary strata, we identify the activity, vertical displacement and slip rate of  $F_1$  fault. Then we assess the influence of  $F_1$  fault on the project and put forward the selection of sites and the design plan for the project. In this way, we provide a good example of the practical application of the identification of fault's activity to the selection of sites and the design plan for the construction project.

**Key words:** identification of active fault; fault detection; site selection of project; application value