

doi: 10.11720/wtyht.2018.1154

刘明辉,薛建,王者江,等.工程场地隐伏断裂的探测与地震活动性评价[J].物探与化探,2018,42(4):839-845.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1154>

Liu M H, Xue J, Wang Z J, et al. The detection of buried faults in engineering sites and the evaluation of seismic activity[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 839-845. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1154>

工程场地隐伏断裂的探测与地震活动性评价

刘明辉¹, 薛建², 王者江², 王元新², 申文斌¹

(1. 吉林省第六地质调查所, 吉林 延吉 133001; 2. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘 要: 工程场地隐伏断裂等地质构造的探测主要采用浅层地震勘探、电联合剖面法、电阻率测深、高密度电阻率法、地质雷达和瞬变电磁等物探方法, 从介质的电性、弹性波速度及相对介电常数的变化上, 获得地质构造的分布特征, 通过研究物探资料上地质构造的分布关系, 结合地质资料、遥感资料 and 同位素或热释光测年等方法, 对断层的活动性做出科学的评价, 对场地的合理利用, 工程的安全布局都具有重要的作用。文中以长春某水泥生产线工程场地的物探勘查为例, 讨论了物探方法在隐伏断裂的探测与地震活动性评价等应用问题。

关键词: 地球物理方法; 隐伏断裂; 岩溶; 近场区断裂调查; 断层年代鉴定

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)04-0839-07

0 引言

长春市某拟建水泥生产线工程场地位于磐石县明城厚层石灰岩地区。在前期工程地质勘查中, 在多个钻芯中发现大量的红褐色蚀变物以及碳质页岩, 表面碳化的石灰岩挤压成透镜体, 灰岩中的小透镜体出现黄铁矿化现象; 这些现象表明灰岩受溶蚀的程度较重, 溶洞、溶隙现象及为普遍, 隐伏断裂构造发育。为了查明场区内断裂构造的分布特征, 采用物探方法对该场区进行了详细勘察, 对推测断层进行了开挖验证; 开展了近场区断裂构造和地震活动的背景调查, 对场地断层的盖层岩土和断层泥进行了采样和测年分析, 对场地断层的地震活动性做出了科学的评价。

1 场区地层、地质构造与断裂

现场踏勘及前期钻探结果显示, 工程场区出露地层主要为石炭系中石炭统磨盘山组厚层灰岩, 由厚层灰岩、含燧石灰岩组成, 其下部由黑色页岩夹灰

绿色砂岩及千枚岩构造的页岩、砂页岩和含燧石条带状灰岩组成。

航磁和遥感等资料显示, 区域地质受北西向烟筒山—黑石断裂影响, 场区位于两个北西向斜翼部组成的挤压背斜核部, 即两个正地形之间的低地。场区及近场区主要断裂为: F_1 分布于烟筒山—柳杨一线, 是烟筒山—黑石大断裂的一部分, F_2 分布于上桃山—四间房一线, F_4 分布于东古城—上鹿—新粗榆一线, 三者均为北西向断裂; F_3 、 F_5 为北东向断裂, 分布于黄河屯—猪场一线及上鹿—东兴隆川一线。其中, F_4 断裂由 3~4 条逆断层组成, 对工程场地构成直接影响。图 1 为工程场地近场区断裂构造分布。

2 物探方法选择与布设

物探方法是隐伏断裂勘查的主要手段, 通过选择合适的物探方法, 可以确定断层的空间位置、走向、埋深及其产状, 为断层的地震活动性评价提供资料。近地表的物探方法有电阻率剖面法、高密度电阻率法、直流电测深法、浅层人工地震方法、探地雷

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2018-03-17

作者简介: 刘明辉(1962-), 吉林省扶余人, 高级工程师, 从事地球物理工程物探工作。

通讯作者: 薛建(1958-), 吉林省榆树人, 研究员, 从事工程与环境地球物理教学和研究工作。

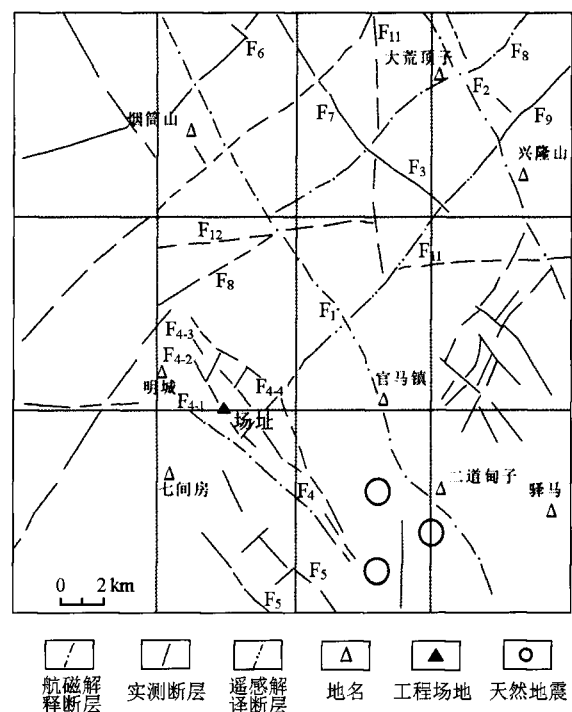


图 1 工程场区近场区断裂构造分布

达和瞬变电磁法等^[1-2],其中,电剖面法的联合剖面装置对近于直立的低阻介质具有较高的灵敏度,在断层上方正交点特征明显,对确定断层位置较为准确^[3];人工地震通过对反射波同相轴的横向追踪确

定断层的空间位置及断层的上断点,为研究断层的最新活动时代^[4-5]提供依据;探地雷达在近水平介质分布的情况下,在覆盖层较浅的地区探测隐伏断层也具有较好的效果,对于确定断层的上断点具有重要意义^[6];高密度电阻率法通过反演处理获得接近“真实”的电阻率断面,通过研究断面图上的高、低阻分布关系可以确定断层的空间位置^[7-8],并对研究断层的活动性提供佐证资料。

针对场地内断裂和岩溶非常发育的实际情况,选定用电剖面联合剖面装置和浅层地震方法进行构造普查,确定场地断层的空间分布,以高密度电阻率法和探地雷达对已经发现的异常作进一步验证,并从介质的电性分布和电磁波特征上进一步分析断层的规模、产状及其埋深。根据区域断裂构造分布规律,通过对场区周围断裂出露的考查分析,结合场地空间情况进行了物探工作布置(图 2)。

北东向布置电联合剖面测线 3 条,线距为 50 m, AO 为 70 m, MN 为 20 m,点距 10 m,每条测线有效数据长度 320 m;东西向布置电联合剖面测线 2 条,线距为 35 m, AO 为 35 m, MN 为 10 m,点距 10 m,有效数据长度为 160 m 和 140 m。

布置地震测线 2 条,北东向,测线长度为 380 m,采用单点地震影像观测方式,测点间距 1 m。

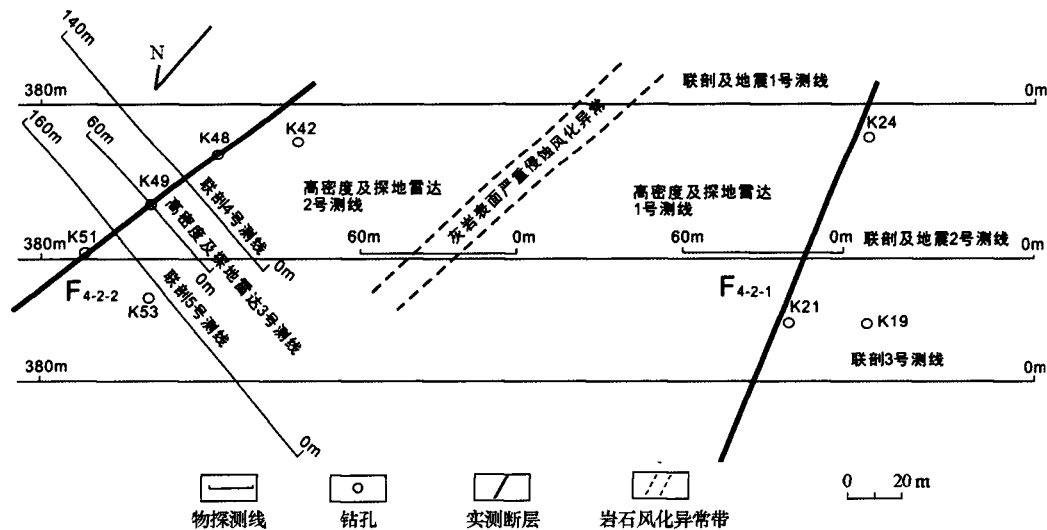


图 2 物探测线分布和探测成果

高密度电阻率测线和探地雷达测线布置在联合剖面法和地震勘探发现异常部位,高密度电阻率探测采用温纳装置,电极距为 1 m;探地雷达探测采用 LF360CM 低频天线剖面法测量,测点间距 1 m。

电法探测使用重庆地质仪器厂生产 DUK-2A 高密度电法测量系统,地震勘探使用美国 GEOMETRICS 公司生产 NZ-24 浅层地震仪;探地雷达探测使

用美国 GSSI 公式生产 SIR 系列探地雷达。

3 物探资料的异常特征

3.1 联合剖面法电阻率曲线特征

北东向联合剖面(图 3)1 号测线的 70 m,2 号测线的 83 m 和 3 号测线的 110 m 出现交点,交点左

侧 $\rho_s^A>\rho_s^B$,交点右侧 $\rho_s^A<\rho_s^B$,为低阻正交点,交点两翼张开基本对称;根据异常特征,推断为断层 F_{4-2-1} 。

东西向联合剖面(图4)4号测线的108 m,5号测线的68 m出现交点,交点左侧 $\rho_s^A>\rho_s^B$,交点右侧 $\rho_s^A<\rho_s^B$,为低阻正交点,交点两翼张开基本对称。根据异常特征,推断为断层 F_{4-2-2} 。

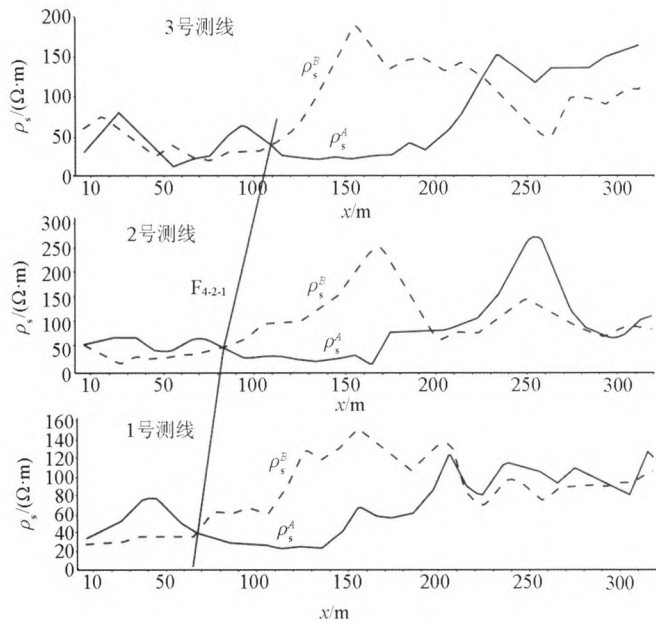


图3 北东向测线联合剖面曲线

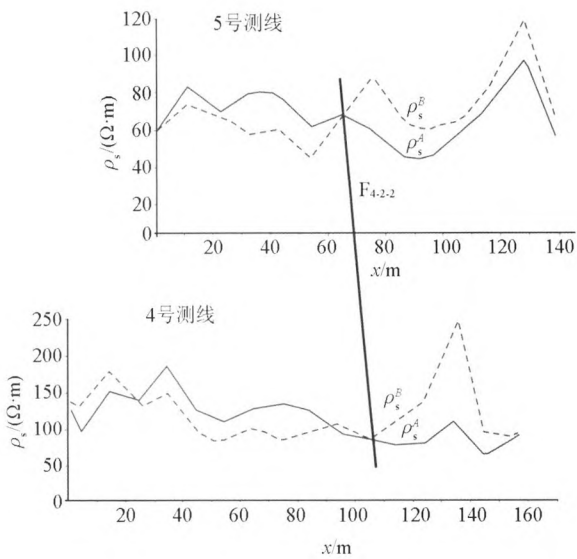


图4 东西向测线联合剖面曲线

3.2 地震勘探剖面特征

地震勘探1号测线(图5a)的35~50 m、155~180 m和260~280 m出现形态为漏斗状异常,推断为断层 F_{4-2-1} 、 F_{4-2-3} 和 F_{4-2-2} 。2号测线(图5b)的90~130 m、225~240 m和346~358 m出现形态为漏斗状异常,推断为断层 F_{4-2-1} 、 F_{4-2-3} 和 F_{4-2-2} 。

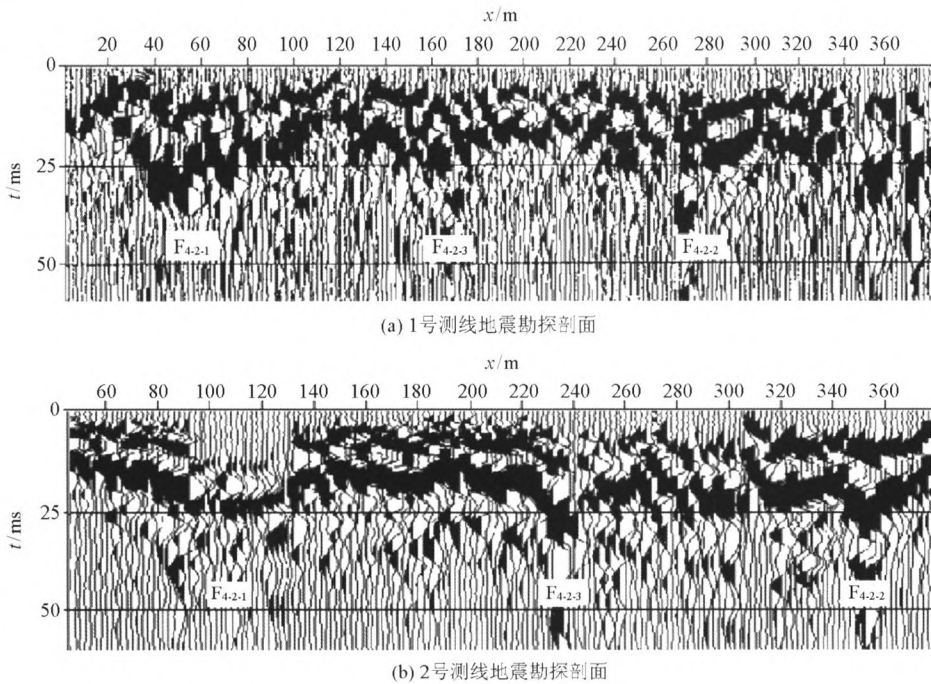


图5 施工场地地震勘探剖面

3.3 高密度电阻率剖面特征

高密度电阻率1号测线位于联合剖面 and 地震勘探推断的 F_{4-2-1} 断层上方(图6a)。图中,电阻率由上至下由高向低变化,在解释深度的13 m以下电阻率最低,推断为断层破碎带。

2号测线位于地震勘探推断的 F_{4-2-3} 断层上方

(图 6b)。图中,电阻率由上至下由低阻向高阻变化,在解释深度的 4~16 m 之间,高阻异常(T)为直立产状,15 m 以下为连续的高阻体,推断为灰岩顶部受到严重的侵蚀风化。

3 号测线位于联合剖面 and 地震勘探推断的 F_{4-2-2} 断层上方(图 6c)。图中,高阻异常(T)为直立产状,在剖面的 25~30 m 处,低阻异常为漏斗状向深部延伸,推断为直立状断层。

3.4 探地雷达剖面特征

探地雷达 1 号测线位于联合剖面 and 地震勘探推断的 F_{4-2-1} 断层上方(图 7a)。图中,水平距离的 13~25 m 处,在 130~300 ns 出现低频强振幅异常,推断为断层破碎带。

2 号测线位于地震勘探推断的 F_{4-2-3} 断层上方(图 7b)。图中,水平距离的 5~12 m、18~24 m 和 28~35 m,在 100~160 ns 出现强振幅绕射波异常,呈锯齿状分布,表明灰岩表层受到严重侵蚀风化。

3 号测线分布在联合剖面 and 地震勘探推断的 F_{4-2-2} 断层上方(图 7c)。图中,水平距离的 23~33 m 在 110 ns 以下出现强振幅异常,形态为漏斗状向下延伸,推断为直立状断层。

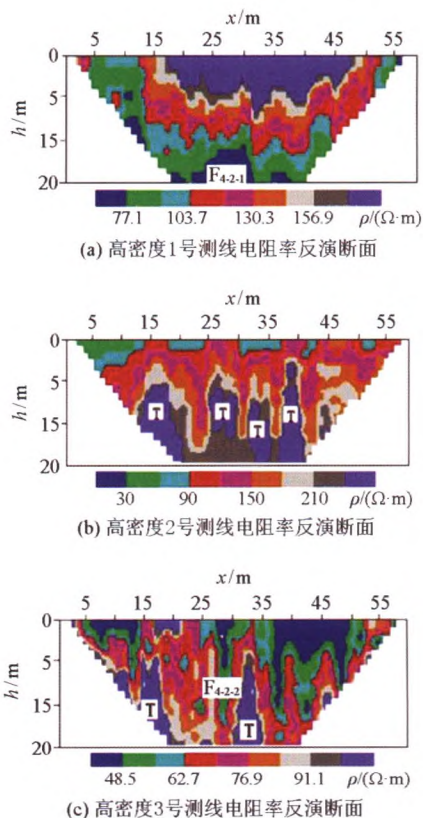


图 6 高密度电阻率法探测反演电阻率断面

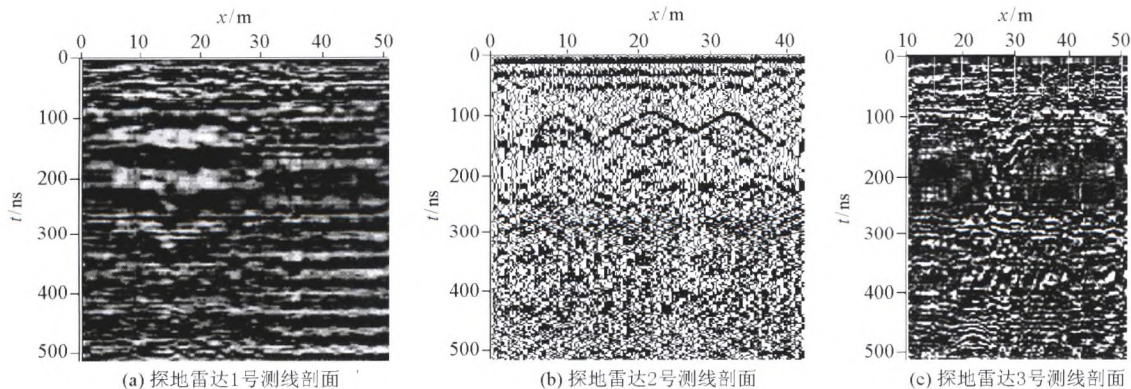


图 7 施工场地探地雷达探测剖面

岩溶构造的宽度约 10~15 m,覆盖层埋深约 5~7 m。

4 物探资料的综合解释

由联合剖面、地震勘探、高密度电阻率法和探地雷达探测结果综合分析,拟建工程场区内存在两条隐伏断层 F_{4-2-1} 和 F_{4-2-2} 。其中, F_{4-2-1} 断层走向为 $NW340^\circ$,产状近直立,异常的宽度约 20 m,覆盖层埋深约 8 m; F_{4-2-2} 断层走向近 SN ,产状近直立,异常的宽度约 8~10 m,覆盖层埋深约 7 m。

地震勘探剖面上的断层 F_{4-2-3} ,在高密度电阻率剖面 and 探地雷达剖面上表现为非常发育的岩溶构造特征,推断为灰岩表层受到较严重的侵蚀风化所致。

5 场地断层的地震活动性评价

工程场地隐伏断层地震活动性评价包括如下几部分:①通过物探和钻探等方法查明场地内断层的空间分布、产状、规模和埋深,分析异常的地球物理特征;②开挖验证、取样和测年;③开展近场区及场区断裂构造和地震活动调查,确定场地断层与区域断裂之间关系,特别是与发震断裂之间关系;④根据物探资料、钻探资料、构造背景资料、地震活动资料和测年资料分析和确定场地断层的地震活动性。

5.1 近场区断裂特征

场地及其周围的地质构造特征是研究和评价场地断层及其活动性的背景依据。前文所述,场区周围的断裂有 F_1 、 F_5 、 F_8 、 F_9 和 F_4 等(见图 1),根据相关资料^[9-10]及实地调查,其中 F_1 断裂在新立屯北出露,切割了东西向花岗微晶岩脉,但晚更新世 II 级阶地及冲洪积相砂砾层及黄土堆积物未受到扰动; F_5 断裂北端于上桃山南沟花岗闪长岩中见 20 m 宽挤压破碎带; F_8 断裂发育在上三叠统地层及华力西晚期—早印支期—燕山期花岗岩体内; F_9 断裂发育在晚古生代地层和华力西晚期—早印支期花岗岩内,西南段入场区内; F_4 断裂的西北段展布在工程场地两侧,对工程场地构成直接影响,其中,明城东一场地南端—腰鹿断裂的北段出露在明城东山坡上,中段被 Q_3 地层覆盖,场地段由物探探测证实为隐伏地裂。

对近场区断裂构造背景调查分析可见:①近场区以北西向断裂规模大、数量多,并与北东向断裂组成区内基本构造格架;②北西及北东向断裂活动时较新,多处切割南北向断裂;③没有发现断裂错动或扰动第四系地层,特别是晚第四系地层露头。

5.2 近场区地震活动调查

断裂活动的重要方式之一是在地应力作用下发生脆性破裂或再次位错,并伴随有地震发生,因此,研究地震活动及其空间分布特征的实质是分析断裂的现今活动性,也是场地稳定性评价的重要因素之一。

通过近场区地震活动调查等发现^[11-14],1972 年以来,近场区发生过 17 次地震,最大震级为 1990 年 10 月 20 日大旺 4.6 级地震,距工程场地 23 km。近场区内没有发生过 $M_s \geq 5.0$ 级地震。近场区的地震活动集中在场区西南部,分布在幸福—大旺一线的西南侧,呈北西向展布,这一特征表明,地震活动主要沿辉南—伊通北西向断裂发生,而黑石—烟筒山北西断裂在近场区的烟筒山—柳杨段没有地震活动,说明近场区的北西向断裂 F_1 和 F_4 在该时段是性对稳定的。沿场地发现的 F_{4-2-1} 和 F_{4-2-2} 断层延伸方向追踪调查,地貌形态及现代冲沟与断层走向无关,没有显示出最新活动断层信息。

5.3 场地断层的开挖验证

为了确定物探方法推断的断层的真实性,对 F_{4-2-1} 和 F_{4-2-2} 断层进行了探槽验证。其中, F_{4-2-1} 断层地面开槽 16 m×5 m,槽底 12 m×1.5 m,槽深 9 m,长轴方向 NE75°; F_{4-2-2} 断层地面开槽 12 m×5 m,槽底 8 m×4 m,槽深 8 m,长轴方向 SE100°。

开挖结果证实场地 F_{4-2-1} 断层走向 352°,为一条已经固结和风化的老断层,倾向西南,倾角 80°,为近场区 F_4 断裂带的分支断裂 $F_{4.2}$ (见图 1)。 F_{4-2-1} 断层两侧岩层的产状明显不同,断层顶部形成的漏斗状碎裂岩带保留完好,在探槽底部断层两侧见强风化辉绿岩脉和以风化成黄土的灰岩透透镜体,断裂带内的砂岩、泥质板岩和薄层灰岩片理化严重,岩层碎裂扭曲,表明该断裂为挤压破碎带。图 8 为 F_{4-2-1} 断层素描。

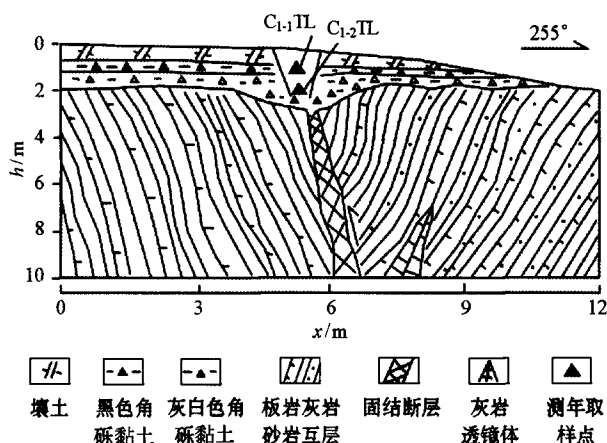


图 8 F_{4-2-1} 断层探槽素描(东南壁)

F_{4-2-2} 断层走向 352°,产状 262°,为近南北向,推断为近场区 F_4 断裂带的一组破裂面。 F_{4-2-2} 断层的断层蚀变物发育,其中重度碳化黑色断层蚀变带宽约 0.8 m,有碳质片理化,黄铁矿化,糜棱岩化,灰岩挤压透透镜体,断层角砾岩等,断层面上断层泥厚约 20 cm,下盘灰岩断面为波状,具逆冲性质,表明该断层的活动具有重复性和多期性。图 9 为 F_{4-2-2} 断层素描。

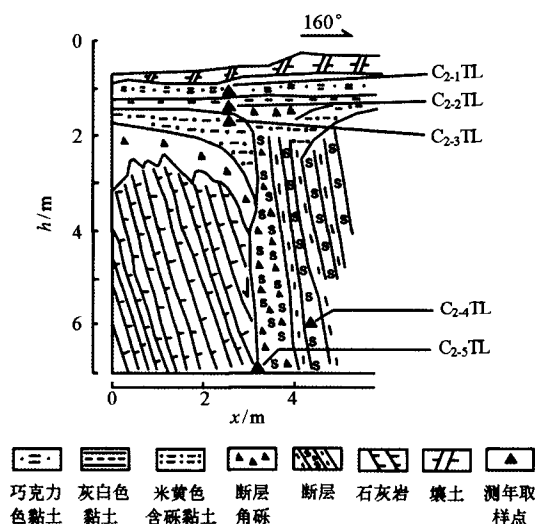


图 9 F_{4-2-2} 断层探槽素描(东壁)

5.4 场地断层的地球物理特征与活动性评价

场地内隐伏灰岩表面溶蚀严重,高倾角齿状溶隙发育,无法利用地震勘探和探地雷达剖面研究该场地断层的活动性,只能借助高密度电阻率断面的电性特征研究断层的活动性。

从高密度电阻率断面图可以发现,在图 6a 上,在埋深 12 m 以上,电性结构层近水平状,12 m 以下显示为低阻特征,说明该断层的顶部已经固化,沿断裂带没有地下水活动,开挖结果证实了这种结论,推断 F₄₋₂₋₁ 断层属于不再活动且固化的老挤压破碎带;在图 6c 上,电性结构层以近直立的垂向条带为主,位于 25~30 m 处为低阻,下延深度较大,沿断裂带有地下水活动,开挖结果证实了这种结论,推断

F₄₋₂₋₂ 断层具有相对较强的活动性。

5.5 场地断层的样品测年

目前常用的断层年代鉴定方法有放射性碳(¹⁴C)法、热释光法(TL)、电子自旋共振法(ESR)、光释光法(OSL)等,这些方法尽管测年的精度不同,但都可以给出断层最新活动年龄。本场地断层测年采用热释光测年法^[15]。

在 F₄₋₂₋₁ 断层的探槽内采集 2 组样品,为 C₁₋₁ TL 和 C₁₋₂ TL,取样位置见图 8 所示。

在 F₄₋₂₋₂ 断层的探槽内采集 5 组样品,为 C₂₋₁ TL、C₂₋₂ TL、C₂₋₃ TL、C₂₋₄ TL 和 C₂₋₅ TL,取样位置见图 9 所示。热释光测年结果见表 1。

表 1 热释光样品测年结果

样品名称	样品编号	年龄/10 ⁴ a	备注
黑灰色含角砾亚黏土	C ₁₋₁ TL	10.48±0.82	F ₁ 断层盖层
灰白色含角砾亚黏土	C ₁₋₂ TL	13.07±1.02	F ₁ 断层盖层
巧克力色黏土	C ₂₋₁ TL	10.58±0.89	F ₂ 断层盖层
黑灰色黏土	C ₂₋₂ TL	25.71±1.98	F ₂ 断层盖层
米黄色亚黏土	C ₂₋₃ TL	26.98±2.16	F ₂ 断层盖层
断层泥	C ₂₋₄ TL	29.44±2.47	F ₂ 断层泥
断层泥	C ₂₋₅ TL	26.29±2.08	F ₂ 断层泥
黏土	C ₃₋₁ TL	14.99±1.20	K48 钻孔探槽顶部盖层

热释光测年结果表明,F₄₋₂₋₁ 断层盖层中层黑灰色含角砾亚黏土的年龄为 $(10.48 \pm 0.82) \times 10^4$ a,底层灰白色含角砾亚黏土的年龄为 $(13.07 \pm 1.02) \times 10^4$ a,表明该断裂带在第四系中更新世晚期以来或 13 万年以来没有活动过;F₄₋₂₋₂ 断层盖层中断层泥的最新年代为前 26 万年,米黄色亚黏土的上部形成年代也是 26 万年左右,该层的中、下部形成年代大于 26 万年,所以受到断层活动的牵引,说明 F₄₋₂₋₂ 断裂晚更新世以来或 10 万年以来没有活动过^[16]。根据工程场地地震安全性评价相关资料及技术规范规定^[17],场地 F₄₋₂₋₁、F₄₋₂₋₂ 断层不是活动断层。

6 结论

- 1) 几种物探方法在该工程场地都取得了较好的探测成果,比较而言,联合剖面法、地震勘探和高密度电法更加适合该场地条件下的探测。其中,联合剖面法和地震勘探对确定断层的空间分布较准确,高密度电法对分析该场地断层的相对活动性具有一定的意义。
- 2) 根据对近场区断裂构造背景分析,确定出场地断层属近场区 F₄ 断裂带的分支断裂。
- 3) 根据对近场区地震活动分析表明,近场区地

震活动主要沿辉南—伊通北西向断裂发生,而黑石—烟筒山北西断裂在近场区的烟筒山—柳杨段没有地震活动,说明近场区的北西向断裂 F₁ 和 F₄ 在该时段是性对稳定的,也说明场地 F₄₋₂₋₁ 和 F₄₋₂₋₂ 断层是稳定的。

4) 沿场地 F₄₋₂₋₁ 和 F₄₋₂₋₂ 断层延伸方向追踪调查,地貌形态及现代冲沟与断层走向无关,没有显示出最新活动断层信息,属于不活动断层。

5) 热释光测年结果及近场区出露断层调查结果表明,没有发现中晚更新世晚期以来该场地断层有活动的迹象。

致谢:对吉林省地震局张良怀研究员对本文的细心指导表示衷心感谢。

参考文献:

[1] 陈仲候,王兴泰,杜世汉. 工程与环境物探教程[M].北京:地质出版社,1993,100-127.

[2] 曾昭发,刘四新. 工程与环境地球物理[M].北京:地质出版社,2009,7-141.

[3] 易兵,曾昭发,薛建,等.地球物理方法对城市活断层探测与研究[J].地球物理学进展,2008,23(2):599-603.

[4] 何正勤,潘华,胡刚,等.核电厂址隐伏断裂探测中的地震勘探方法研究[J].地球物理学报,2010,53(2):326-334.

[5] 高景华,徐明才.地震方法确定活动断裂上断点的影响因素分

析[J].地震地质,2012,34(2):338-146.

[6] 薛建,黄航,张良怀.探地雷达方法探测与评价长春市活动断层[J].物探与化探,2009,33(1):63-66.

[7] 李俊杰,何建设,严家斌,等.超高密度电阻率法在隐伏断层探测中的应用[J].物探与化探,2016,40(3):624-628.

[8] 董浩斌,王传雷,曾佐勋,等.高密度电法在信阳市燃气混气站场地隐伏断裂探测中的应用[J].地质科技情报,2003,22(1):101-103.

[9] 毕守业,王德荣,贾大成,等.吉林省地体构造的基本特征[J].吉林地质,1995,14(1):1-13.

[10] 李中根,李承雪,孙旭丽.磐石-伊通地区地震活动性与断裂构造的相关性研究[J].防灾减灾学报,2013,29(1):16-21.

[11] 李恩泽,刘财,张良怀,等.松辽盆地构造与地震活动相关性研究[J].地球物理学进展,2012,27(4):1337-1349.

[12] 王兆国,刘财,冯珏,等.中国东北地区地震空间分布与主要断裂带、深部构造及应力场关系[J].世界地质,2009,28(4):513-519.

[13] 于龙伟.东北中强震和强震的时空分布特征[J].东北地震研究,1987,3(1):11-22.

[14] 李起彤.断层活动性定量评价之现在与展望[J].国际地震动态,1994,05:1-5.

[15] 张克旗,吴中海,吕同艳,等.光释光测年法——综述及进展[J].地质通报,2015,34(1):183-203.

[16] 薛建,王者江,张良怀,等.吉林亚泰水泥公司明城水泥厂5000T/d工程场地物探勘查及断层活动性评价[R].吉林大学地球探测科学与技术学院物理模型实验室,2001.

[16] 常廷改.断层活动性评价中关于测年资料的引用[J].工程地质学报,2006,4(2):190-195.

[17] 工程场地地震安全性评价技术规范 GB17741-1999 宣贯教材[M].北京:中国标准出版社,1999.

The detection of buried faults in engineering sites
and the evaluation of seismic activity

LIU Ming-Hui¹, XUE Jian², WANG Zhe-Jiang², WANG Yuan-Xin², SHEN Wen-Bin¹

(1. The Sixth Geological Survey of Jilin Province, Yanji 133001, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The geological exploration methods for geological faults include shallow seismic exploration, electrical joint section method, resistivity sounding, electrical resistivity tomography, geological radar and transient electromagnetic method. The distribution of geological structure can be detected from the velocity and relative permittivity. From the distribution of activities of faults, geological data, remote sensing data and isotope or thermoluminescence dating techniques, a scientific evaluation can be made. The above research would be important for the rational use of the site and the safety of the layout of the project. In this paper, the geophysical prospecting of a cement production line in Changchun serves as an example to discuss the exploration and activity evaluation of geophysical methods for concealed ruptures.

Key words: geophysical methods; concealed rupture; karst; field fault investigation; identification of fault age

(本文编辑:沈效群)