

交河故城的裂隙特征研究

孙满利^{1, 2}, 王旭东^{2, 3*}, 李最雄^{2, 3}, 谌文武²

(1. 西北大学文博学院, 陕西 西安 710069; 2. 兰州大学文物保护研究中心, 甘肃 兰州 730001; 3. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200)

摘要: 用地质工程和建筑学的理论与方法研究交河故城文物本体和载体裂隙(缝)的分布规律和特性。结果表明: 交河故城裂隙(缝)主要包括卸荷裂隙、构造裂隙、变形裂隙、建筑工艺裂缝。交河故城发育三组优势节理, 卸荷裂隙主要分布在崖体东边和一些宽大的文物本体台地上, 具有张开度大, 延伸长的特点, 其破坏性最大。建筑工艺裂缝是墙体最主要病害, 变形裂隙是窑洞的主要破坏形式, 崖体裂隙形成与台地微地形地貌及地质条件关系密切, 卸荷裂隙和节理共同作用是崖体裂隙的主要特征。

关键词: 交河故城; 裂隙; 土遗址; 病害

中图分类号: TU18

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)04-0612-06

作者简介: 孙满利(1968-), 男, 陕西富平人, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程和土遗址保护方面的研究。E-mail: sunm168@sohu.com。

Study on cranny characteristics of the ruins of Jiaohe

SUN Man-li^{1, 2}, WANG Xu-dong^{2, 3*}, LI Zui-xiong^{2, 3}, CHEN Wen-wu²

(1. College of Culture and Museology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Research Center of Conservation Culture, Lanzhou University, Lanzhou 730001, China; 3. Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China)

Abstract: The cranny of noumenon and carrier of the ruins of Jiaohe was studied using the theory and method of geological engineering and architecture. The cranny included the unloading cranny, tectonic cranny, deformation cranny and construction cranny. There were three groups of preponderant joint plane. The unloading cranny was distributed primarily in the east precipice and wide noumenon with large aperture and long extension as well as largest destructibility. The construction cranny was the main morbidity of wall, and the deformation cranny was the shape of failure of cave. The cranny of carrier was closely related with tiny geography and geological condition, and the characteristics of cranny of precipice were the common effect of the unloading cranny and the joint plane.

Key words: the ruins of Jiaohe; cranny; earthen site; issues

0 引言

交河故城遗址是第一批全国重点文物保护单位, 在自然和人为环境的影响下, 已经遭受了严重的破坏, 它的主要病害有风蚀、雨蚀、裂隙、崩塌等。裂隙在交河故城遗址分布较广, 在各种遗迹都有不同形式的表现, 研究裂隙的分布规律和特征对保护工程有重要意义, 它的裂隙基本上包含了西部土遗址裂隙病害的主要形式, 是西部干旱区土遗址裂隙病害的典型代表, 选择交河故城的裂隙研究对干旱区土遗址具有借鉴作用, 目前, 对于干旱区土遗址裂隙的研究还没有系统地进行, 仅作过零散的工作^[1-2]。

1 地质环境

交河城址座落在雅尔乃孜沟两条河之间的 30 m 高的黄土台上, 长约 1650 m, 两端窄, 中间最宽处约

300 m, 呈柳叶形半岛, 大致走向 310°, 台地西北高而东南低。地层岩性主要是粉土、粉质黏土、粉细砂互层和砂砾石层, 地层向东南倾斜, 倾角为 3°, 生土墙基及台体是第四纪冲湖积物, 呈层状不均匀结构, 含沙量大, 强度较低。

交河故城位于吐鲁番盆地中央隆起构造带肯德克逆断裂-背斜的背斜东北段, 构造带呈 100°~110°走向的狭窄条带状展布, 由肯德克山前逆断裂及其上盘的肯德克背斜组成, 是一条活动的断层扩展背斜带。

2 裂隙的特征

2.1 土遗址本体的裂隙特征

裂隙(缝)是指土遗址内不同原因形成的裂隙或

收稿日期: 2006-04-10

*通讯作者

裂缝。它往往是坍塌或冲沟病害发生的条件。主要包括卸荷裂隙、构造裂隙、变形裂隙、建筑工艺裂缝^[3]。

交河故城的裂隙成因比较复杂, 风、雨、温度、地震、构造、建筑工艺及应力分布特征都有可能产生或促进裂隙。在长期的内外营力作用下, 建筑物裂隙密布, 四种裂隙在交河故城皆有反映。

2.1.1 卸荷裂缝

卸荷裂隙是指土遗址由于应力重分布向临空面释放引起土体变形而形成的裂隙, 如陡峭土体的边坡卸荷裂隙。在交河故城土遗址本体上, 卸荷裂隙主要分布在一些宽大、高耸的土台上, 土台一般近直立, 裂缝宽, 破坏性大 (见图 1)。卸荷裂隙在崖体上表现更为强烈, 下文将详细论述。



图 1 官署区卸荷裂隙

Fig. 1 The unloading cranny of government offices

2.1.2 构造裂隙

构造裂隙是指由于构造活动产生的裂隙, 或者沿构造活动遗留的裂隙或薄弱结构面形成的裂隙, 象节理面, 地震作用产生的裂隙都属此类。

交河故城的构造裂隙主要有两种表现形式。一种是新构造活动的结果, 延伸长, 分布广。还有一种是生土墙基的节理构造以及受其影响发育在上部墙体的构造裂隙。

(1) 新构造裂隙

由于交河故城位于强烈活动构造带, 因此在台地地面形成许多次级新构造裂隙, 这些裂隙有两种表现形式, 一种为早期新构造活动遗留的裂隙 (见图 2), 该裂隙走向 $NW319^\circ$, 倾向 $SW230^\circ$, 倾角 87° , 裂隙张开宽度较稳定, 宽 2 cm, 充填物为粉质黏土, 已固结, 裂隙切穿粉土和粉沙层, 裂隙两边地层在垂直方向没有位移, 水平位移没有观察到, 裂隙延伸较长, 经过不同的建筑物, 总长度超过为 200 m。第二种裂隙为建筑物形成后新产生的新构造活动裂隙 (见图 3), 这类裂隙形成时代晚, 走向为 $NW300^\circ \sim NW320^\circ$, 倾角一般为 $80^\circ \sim 90^\circ$, 宽度不一, 大者可到 20 cm, 小者有 1 cm。一般切穿不同的建筑物。

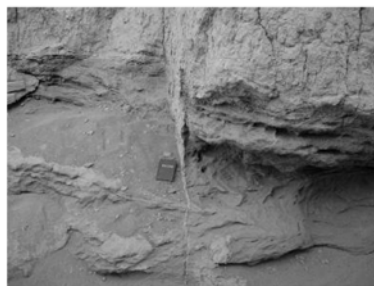


图 2 构造裂隙 (官署区街道旁)

Fig. 2 The tectonic cranny (street side of the government offices)



图 3 交河故城东南部

Fig. 3 The southeast of the ruins of Jiaohe

(2) 垂直节理

垂直节理多分布于地下坑、穴及崖岸边坡地带, 它的形成机理类似于黄土节理, 多不受构造活动控制, 但多和构造活动裂隙伴生 (见图 4), 垂直节理是由于坑、穴开挖后土体的收缩形成的, 一般不切穿地层, 长度短, 间距均匀, 一般为 50 cm, 对遗址的危害较小, 但如果在顶部可能成为其它病害的发育的通道。



图 4 节理 (官署)

Fig. 4 The joint plane (government offices)

2.1.3 变形裂隙

变形裂隙是指由于应力的重分布引起土遗址开裂变形, 产生的裂隙, 象窑洞顶部、脸部的变形裂隙, 基础的不均匀沉降产生的变形裂隙。

交河故城的变形裂隙主要有两种形式。一种是由于窑洞的开挖, 引起应力重分布导致的洞顶纵向裂隙和洞口变形裂隙。另一种是由于基础的不均匀沉降引起的变形裂隙。

(1) 窑洞裂隙

洞顶裂隙是窑洞病害常见的形式, 交河故城的窑洞顶部多为穹隆顶、拱顶, 少数为平顶, 其主要有拱形洞顶裂隙和平顶洞顶裂隙两种形式, 穹隆顶兼有两种形式存在。

a) 拱形洞顶裂隙

拱形窑洞是我国黄土地区窑洞的主要形式, 由于应力的重分布, 拱形窑洞的最大竖向位移发生在洞底中部和拱顶中部^[4], 在自重压力下, 土体处于受压状态, 不会出现裂隙, 但在与洞室轴线垂直方向的地震动条件下, 拱顶易于产生地震应力集中, 在顶部易产生纵向裂隙^[5], 造成土体开裂、坍塌。交河故城的拱形洞顶裂隙一般从洞口开始发育, 宽度不等, 洞口位置较大, 向里逐渐变小, 面较粗糙, 充填物较少 (见图 5)。



图 5 拱形窑洞洞顶裂隙(官署地道)

Fig. 5 The cranny of vaulted cave

b) 平顶洞顶裂隙

平顶窑洞在交河故城分布较少, 多为矩形, 但相对拱形窑洞洞型较小, 平顶窑洞由于受力条件不同, 其破坏形式也不一样, 竖向应力的集中现象以矩形洞室为最为明显, 其次为拱形和圆形洞室, 矩形洞室在距离洞顶和洞底大约 1 m 处时, 开始发生应力集中^[6], 在集中应力的作用下, 顶部荷载重力使洞顶产生向下的变形, 洞顶两肩部位形成裂隙, 裂隙宽度一般较小 (图 6), 无充填物, 结构面粗糙。



图 6 洞顶变形裂隙(东城区)

Fig. 6 The deformation cranny of cave top

c) 洞口变形裂隙

窑洞口变形裂隙是由于窑洞的开挖, 引起应力重分布, 在长期的应力作用下, 土体产生塑性变形, 形成八字形裂隙 (见图 7, 8), 裂隙形状和窑洞洞口

形状吻合, 距洞口近裂隙宽, 宽度不等, 距洞口远裂缝窄, 宽度有 1 cm, 裂隙沿洞口两边对称分布, 由洞口上部逐渐向下部扩展, 裂隙上宽下窄, 距离洞口近的裂隙长, 距离远的裂隙短, 部分裂隙下端有树状分枝, 裂隙间距与洞形及大小有关, 图 7 所示裂隙间距为 0.5~1.0 m, 裂隙面粗糙, 无充填物。



图 7 瞭望台西侧

Fig. 7 The west side of observation platform



图 8 洞口变形裂隙(台地南端)

Fig. 8 The deformation cranny of cave gateway

(2) 不均匀沉降变形裂隙

交河故城许多建筑的建造工艺以夯土作为找平层。如塔林大金刚塔, 基础是对自然地面略加整理, 然后用夯土层进行找平。由于自然地面的起伏, 夯土层厚度不一, 夯土层厚的达 1.5 m, 最薄不足 10 cm, 由于自然土层和夯土压缩性的不同, 在上覆遗址的重压下, 地基产生不均匀沉降, 引起遗址的变形拉裂破坏 (见图 9)。这种病害主要发育在有夯土找平层的土遗址。



图 9 不均匀沉降引起的变形裂隙(金刚佛塔)

Fig. 9 The deformation cranny induced by differential settlement

2.1.4 建筑工艺裂缝

建筑工艺裂缝是指由于建筑工艺的原因, 沿建筑

工艺的接槎缝、结构缝、施工缝等产生的裂缝。如交河故城的垛泥缝, 长城版筑墙体的版筑缝。

垛泥建筑是交河故城地面建筑的主要形式, 交河故城建筑工艺裂缝主要有墙体之间的接槎缝和垛块之间的施工缝, 主要分布在垛泥墙体上。

(1) 施工缝

垛泥施工时每一层垛泥的厚度是均匀的, 但层与层之间略有差异, 每层的厚度 0.4~0.9 m, 以 0.7 m 的层厚多见, 层与层之间有一层细干土, 每层可分为细层, 细层厚 10~15 cm, 每垛长 45~60 cm, 建筑时一往一反进行^[7], 相邻两层泥块的垛垒方向相反, 立面裂痕呈“人”字型, 组成垛的泥片厚约 3~5 cm, 略呈倾斜堆砌, 泥片之间界限分明, 其断面细腻而坚硬。由于垛泥施工后失水收缩, 垛与垛之间形成施工缝, 在风蚀和雨蚀作用下, 裂缝不断加宽, 大部已经贯通, 有的被风吹成风洞, 有的被雨冲成冲沟, 同时, 细层之间的细干土, 由于材料性能的差异, 在长期的风、雨和温度的作用下, 胶结力明显减少, 形成水平方向的裂缝 (见图 10)。



图 10 人字型裂缝 (东北佛寺南墙)

Fig. 10 The herringbone cranny

(2) 接槎缝

交河故城垛泥墙施工时的垛缝以及墙间互不接槎, 墙体干燥收缩产生裂缝, 在风、雨、温度及地基的不均匀沉降作用下, 裂缝不断加宽, 这类裂缝一般较垛缝宽, 而且沿整个墙体贯穿, 危害性较大 (见图 11, 12)。



图 11 垛泥墙接槎缝 (东北佛寺西墙入口 10 m 处)

Fig. 11 The joint of mud stacking wall



图 12 墙体接槎缝 (东城区)

Fig. 12 The joint of wall

2.2 土遗址载体 (崖体) 的裂隙特征

交河故城崖体主要有两类破坏裂隙: 构造裂隙—节理、次生卸荷裂隙。

(1) 卸荷裂隙

崖边卸荷裂隙属次生结构面, 为岩体重力卸除时岩体向自由空间膨胀而产生, 也称减压裂隙, 常与坡面平行。卸荷作用是由于外力剥蚀、侵蚀冲刷等造成的, 裂隙与崖坡近于平行, 称为坡面裂隙, 交河故城的坡面裂隙较陡, 其优势破坏产状: 走向 NW, 均值 328° (图 13), 倾角近直立, 为 $80^\circ \sim 90^\circ$ 平行崖体走向, 向河谷方向倾斜, 裂隙发育深度可达 10 m, 张裂宽度不一, 但相对其它裂缝为宽, 较宽达 20~40 cm, 裂隙面较粗糙, 大部未完全充填, 充填物主要是碎块和台面风积物。结构体有柱状 (见图 14) 和板状 (见图 15)。平面上一般沿边坡顶部展开, 距崖边一般为 1~3 m, 延伸长度较大, 部分地段有三道裂缝, 第三级裂缝距崖边 10~20 m, 裂缝呈之字形展布 (见图 16), 大致走向为 $SE147^\circ$, 之字形裂缝夹角 90° , 两边走向分别为 $NW36^\circ$ 和 $NE93^\circ$ 。

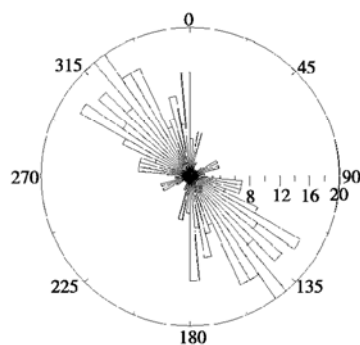


图 13 卸荷裂隙走向玫瑰图

Fig. 13 Rosette of the strike of unloading cranny



图 14 柱状结构体 (东崖)

Fig. 14 Columnar structural bodies



图 15 板状结构体 (东崖)

Fig. 15 Sheet structural bodies



图 16 崖边卸荷裂隙 (台地北部东崖)

Fig. 16 The unloading cranny of precipice margin

(2) 节理

整个崖体区,发育三组节理(见图 17): NE 向组,走向 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 均值 25° , 倾角近直立; NNW 向组,走向 $310^{\circ} \sim 330^{\circ}$, 均值 325° , NWW 向组,走向 $275^{\circ} \sim 295^{\circ}$, 均值 285° , 倾角近直立, $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的占 97%。其中以走向 25° 和走向 325° 两组发育,走向 285° 组次之。

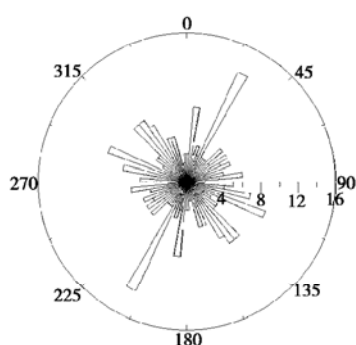


图 17 节理走向玫瑰图

Fig. 17 Rosette of the strike of joint plane

交河故城崖体裂隙总体特征是: 张开度较大, 一般张开以 $5 \sim 15 \text{ cm}$ 居多, $>20 \text{ cm}$ 者占总裂隙的 25%, 而张开度大于 5 cm 的裂隙占总数 80% 以上, 某些裂缝局部张开达 120 cm ; 裂隙延伸长, 以 $1 \sim 10 \text{ m}$ 为主, 占总裂隙的 88%, 最长可达 50 m ; 小于 1 m 者仅占 1%, 多数延伸长度大者为与崖体边缘平行追踪节理发育的卸荷裂隙, 两组节理长度多在 $1 \sim 5 \text{ m}$, 侧切崖体; 裂缝以部分充填为主, 占总数的一半以上, 完全充填占到 27%, 主要充填物为松散土, 偶有裂隙中生长植物的裂隙, 无充填达 10%; 裂隙多切穿粉土层, 深度小的止于粉砂层, 粉砂层埋深一般 $4 \sim 8 \text{ m}$, 深度大者止于砂砾层, 砂砾层埋深一般 18 m , 为裂隙破坏控制层位。裂缝切割崖体深度以 $4 \sim 8 \text{ m}$ 最多, 切穿深达 10 m 以上者占 13%, 少数裂隙立面出露深度达 18 m , 已超过崖体高度的 $1/2$ 。所有裂隙, 倾角近直立, 有良好的垂直渗透性, 利于地表水下渗移。

受地层向东南微倾影响, 崖体东边裂隙较西边发育、密集, 对崖体的切割破坏严重。卸荷裂隙和节理共同作用, 将崖体切割为三面临空的板状、柱状体, 其发育与台地微地形地貌关系密切, 台地转弯处裂缝明显密集。

3 结 论

(1) 交河故城裂隙(缝)主要包括卸荷裂隙、构造裂隙、变形裂隙、建筑工艺裂缝。

(2) 卸荷裂隙主要分布在崖体东边和一些宽大的文物本体台地上, 走向受地形控制, 优势破坏产状为走向 NW, 均值 328° , 倾角近直立, 为 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 卸荷裂隙具有张开度大, 延伸长的特点, 其破坏性最大。

(3) 交河故城发育三组节理: NE 向组, 走向 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 均值 25° , 倾角近直立; NNW 向组, 走向 $310^{\circ} \sim 330^{\circ}$, 均值 325° , NWW 向组, 走向 $275^{\circ} \sim 295^{\circ}$, 均值 285° , 倾角近直立, $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的占 97%。其中以走向 25° 和走向 325° 两组发育, 走向 285° 组次之, 节理长度一般为 $1 \sim 5 \text{ m}$ 。

(4) 交河故城的变形裂隙主要有两种形式。一种是由于窑洞的开挖, 引起应力重分布导致的洞顶纵向裂隙和洞口变形裂隙。另一种是由于基础的不均匀沉降引起的变形裂隙。

(5) 建筑工艺裂缝是墙体最主要病害, 有墙体之间的接槎缝和垛块之间的施工缝, 主要分布在垛泥墙体上。

(6) 崖体裂隙形成与台地微地形地貌及地质条件

关系密切, 卸荷裂隙和节理共同作用是崖体裂隙的主要特征。

参考文献:

- [1] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (LI Zui-xiong. Conservation of ancient sites on the Silk Road[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 桂雄三. 交河故城台地崩塌和遗址的物理化学分析的现状、原因以及对策[M]//解耀华. 交河故城保护与研究. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1999: 131 - 137. (KATSURA Yuzo. Collapse of the plateau of ancient ruins of Jiaohe and physical and chemical analysis of soil as protection countermeasures[M]//XIE Yao-hua. Preservation and research of the ancient ruins of Jiaohe. Urumchi: Xinjiang People's Publishing House, 1999: 131 - 137. (in Chinese))
- [3] 孙满利. 吐鲁番交河故城保护加固研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006. (SUN Man-li. A study of the protection and reinforcement about the Ruins of Jiaohe of Turpan[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. (in Chinese))
- [4] 任 侠. 黄土窑洞弹塑性有限元分析[J]. 兰州铁道学院学报, 1993, 12(4): 1 - 7. (REN Xia. Elastic-plastic finite element analysis of loess cave dwellings[J]. Journal of Lanzhou Railway Institute, 1993, 12(4): 1 - 7. (in Chinese))
- [5] 陈国兴, 张克序, 谢君斐. 黄土窑洞抗震性能分析[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1995, 28(1): 15 - 22. (CHEN Guo-xi, ZHANG Ke-xu, XIE Jun-fei. Aseismic performance analysis of the cave dwelling on the loess precipice[J]. J Harbin Archit and Civ Eng Inst 1995, 28(1): 15 - 22. (in Chinese))
- [6] 毕继红, 丛 蓉. 各种形状洞室的围岩压力分析[J]. 地下空间, 2004, 24(1): 23 - 26. (BI Ji-hong, CONG Rong. Analysis on pressure of surrounding rock of tunnel with different shapes[J]. Underground Space, 2004, 24(1): 23 - 26. (in Chinese))
- [7] 田 琳. 交河故城生土建筑遗存保护加固试验报告[M]//交河故城保护与研究[M]. 解耀华. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1999: 138 - 141. (TIAN Lin. A test report of preservation and reinforcement of earthy constructions in Ancient Ruins of Jiaohe[M]//XIE Yao-hua. Preservation and Research of the Ancient Ruins of Jiaohe. Urumchi: Xinjiang People's Publishing House, 1999: 138 - 141. (in Chinese))

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究所承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国有自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, 大 16 开, 双栏排版, 160 页, 每月中旬出版, 每期定价 15 元, 全年 180 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 BM520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)