

刘亚峰,刘高,陈小军,等.黑方台台塬斜坡变形破坏的结构面效应研究[J].地震工程学报,2019,41(4):908-915.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.908
LIU Yafeng, LIU Gao, CHEN Xiaojun, et al. Structural Plane Effect on the Deformation and Failure of the Heifangtai Tableland Slope[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 908-915. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.908

黑方台台塬斜坡变形破坏的结构面效应研究

刘亚峰¹, 刘高², 陈小军^{2,3}, 黄迪², 赵栋¹

(1. 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;

3. 四川省煤田地质工程勘察设计院, 四川 成都 610031)

摘要: 结构面对于黑方台台塬斜坡变形破坏的影响研究成果较多,但以单方面研究为主,较少进行系统研究,因此通过对黑方台台塬结构面类型及其组合特征以及斜坡变形破坏类型和特征的分析可知:研究区结构面类型主要包括节理裂隙、层面、接触面、断层和临空面,结构面组合类型分2大类8小类,各类型具有自身的结构特征和分布特征;结构面及其组合对黑方台台塬斜坡变形破坏类型选择和空间分布选择控制效应明显,特别是对滑坡类型选择和空间分布的影响。

关键词: 台塬斜坡; 结构面; 组合结构面; 变形破坏特征; 类型选择; 空间分布

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)04-0908-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.908

Structural Plane Effect on the Deformation and Failure of the Heifangtai Tableland Slope

LIU Yafeng¹, LIU Gao², CHEN Xiaojun^{2,3}, HUANG Di², ZHAO Dong²

(1. China Energy Construction Group Gansu Electric Power Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. Sichuan Institute of Coal Field Geological Engineering Exploration and Designing, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The structural plane effect on the deformation and failure of the Heifangtai tableland slope has been well studied; however, such studies mainly focus on a single side, and only few systematic studies have been conducted. Therefore, based on the analysis of the structural plane types and the combination characteristics, the deformation and failure types, and the characteristics of the slope, in this work, it was found that the structural surface types in the study area mainly include joint fissures, layers, interfaces, faults, and free face; the combination types of structural planes are divided into two classes and eight subclasses, and each type has its own structural characteristics and distribution characteristics. The slope deformation and failure types and the spatial distribution selection of Heifangtai tableland slopes are significantly affected by the structural planes and their combination.

收稿日期: 2018-10-21

基金项目: 国家重大基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB744701); 中国能建甘肃省电力设计院科技攻关项目(20120405002)

第一作者简介: 刘亚峰(1971-), 男, 博士, 教授级高工, 从事工程地质等方面等工作。E-mail: liuyafeng67f@163.com。

通信作者: 刘高(1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土体力学、地质灾害等领域的教学和科研工作。E-mail: liugaocf@lzu.edu.cn。

Keywords: tableland slope; structural plane; composite structural plane; features of deformation and failure; type selection; spatial distribution

0 引言

黑方台自 1968 年安置刘家峡、盐锅峡和八盘峡移民并开展灌溉工程以来,台塬斜坡发育了类型多样、数量多、频次高、集中发育程度高、影响范围广和危害大的不良地质现象,其中滑坡最为突出^[1-2]。黑方台台塬斜坡变形破坏已经从地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件、微结构等方面开展了大量研究,但如何根治黑方台斜坡不断发生的地质灾害是一直以来研究但又未解决的问题。

大量研究表明,结构面对于斜坡的变形破坏的影响较大。结构面是滑坡发生的控制性因素,主要包括宏观节理裂隙、接触面和层面。岩土体内的卸荷裂隙、构造裂隙、风化裂隙和湿陷裂隙的存在,以及黄土内落水洞的存在,造成岩土体完整性和土体强度降低,并且裂缝和落水洞的存在为地下水渗流提供通道,为斜坡的变形破坏提供边界条件^[3-9],并加速斜坡的演化。接触面的类型、形态以及力学性质对于斜坡的演化影响较大,刘东生^[10]提出现今的黄土地貌是古地形(喀斯特式古地形、波状起伏丘陵及开阔盆地古地形、单斜平面古地形以及河谷阶地古地形)的继承;赵法锁^[11]认为基底形态影响后期黄土的堆积地形以及斜坡的变形破坏方式;众多学者探究了黄土与基岩的接触面对于斜坡变形破坏的影响^[12-15];张雷^[16]探究了接触面的形态和性质对于黄土斜坡的影响;吴万炯^[17]探索了构造作用形成的沉积界面对于黑方台黄土斜坡变形破坏的影响;层面产状以及性质是控制基岩稳定以及整个黄土-基岩斜坡稳定的关键因素,杨柳^[18]探究了基岩产状对于黑方台黄土-基岩滑坡的影响。

结构面对于黑方台台塬斜坡变形的破坏影响从单方面的研究较多,但是进行系统的研究较少,所以本文在收集已有资料和现场实地调查的基础上,采用定性分析的方法,探究各类型结构面特征及组合特征,并分析其对于斜坡变形破坏(以滑坡为主)类型、特征以及空间分布的影响,以为黑方台台塬斜坡的变形破坏的形成机制机理和科学防治研究提供一定的指导。

1 研究区工程地质环境

1.1 研究区基本概况

黑方台位于甘肃省永靖县盐锅峡镇,地处黄河

和黄河一级支流湟水河交会处的黄河左岸。黑方台台面上人类工程活动强烈。

研究区全年降水量的 70%~80%集中在 7—9 月,除常水河黄河、湟水河外,还有山城沟、磨石沟、虎狼沟、野狐沟等季节性流水沟存在。

1.2 研究区工程地质环境

(1) 地质构造

研究区属青藏新构造区,距离研究区最近的活动断裂为河西断裂系,构造带沿 NWW~NNW 方向展布。下伏白垩系地层产状 $120^{\circ}\sim 200^{\circ}\angle 6^{\circ}\sim 25^{\circ}$,局部褶皱和断层构造发育。受构造运动的影响,砂泥岩中发育产状为 $65^{\circ}\angle 72^{\circ}$ 和 $335^{\circ}\angle 65^{\circ}$ 两组节理。

(2) 地层岩性

出露地层从老到新分别为下白垩统河口群砂泥岩($K_1hk_3^2$),中更新统卵石、黏性土、砂土(Q_2^{al}),晚更新统风积疏松黄土(Q_3^{col}),全新统崩滑堆积物和 II 级阶地冲积层(Q_4^{al})。地层分布如图 1。

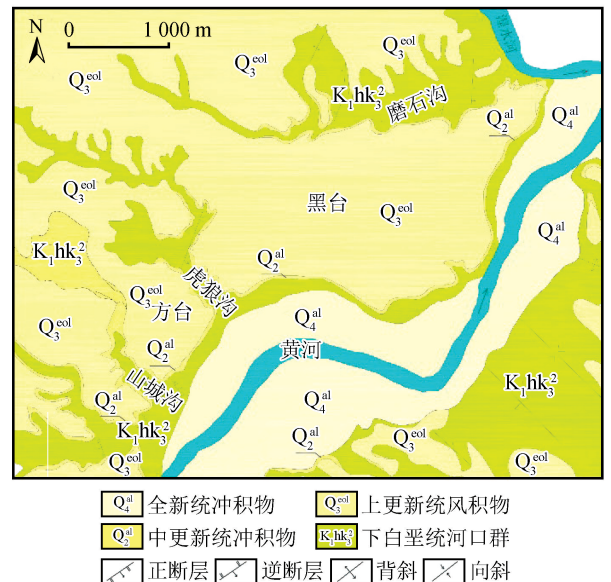


图 1 研究区地质构造纲要图

Fig.1 Geological tectonic map in the study area

(3) 地形地貌

地貌上属于黄土高原西部丘陵沟壑区,但受构造和河流侵蚀切割作用局部形成了黄土台塬地貌。台塬受四周黄河、湟水河、磨石沟、虎狼沟等沟谷影响形成半岛形台地,另外虎狼沟将黑方台分成西部的方台和东部的黑台两部分,磨石沟与山城沟构成黑方台北侧和西侧边界沟。区内地势总体由西北向

东南倾斜,相对高差约 200 m。地貌类型可分为黄土台塬地貌、重力堆积地貌和河(沟)谷地貌三类,台塬地貌又分为台面和台塬斜坡。

(4) 新构造运动

研究区新构造运动强烈,运动形式以差异性抬升为主,晚更新世以来本区地壳的抬升速度为 37 cm/ka。

(5) 水文地质条件

地下水类型包括黄土层潜水、卵石层承压-无压水、基岩裂隙水。黄土层潜水和卵石层承压-无压水是研究区的主要类型。黄土层潜水水位变化与地表水入渗量具有相同的季节周期变化规律,变化幅度较地表水小,但地下水位的周期变化滞后于地表水的入渗。

(6) 物理地质现象

黑方台地区存在物理地质现象类型多样,主要包括湿陷、冲沟、潜蚀、滑坡、崩塌、裂缝等,滑坡是最常见以及研究最热的一种地质灾害,其规模大、数量多、类型多样、危险程度高。

(7) 人类工程活动

人类工程活动主要有:对斜坡体进行不同程度改造;重载车辆对坡体的加载和震动作用;长期大面积大水漫灌方式的落后以及个别地段灌渠和管道破裂漏水;采砂活动。

2 结构面及组合特征

2.1 结构面类型

(1) 层面

台塬斜坡出露的基岩呈单斜构造,产状为 $120^{\circ} \sim 200^{\circ} \angle 6^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。层面类型包括泥岩层内层面、砂岩层内层面、砂泥岩分界面,层面近平直。砂泥岩分界面作为物质分界面,其是易滑结构面,黑方台发育的黄土-基岩滑坡受砂泥岩分界面的影响很大。单斜岩层的形成特别是岩层倾向与斜坡坡向一致或相近时斜坡稳定性较差,易发生黄土-基岩滑坡,特别是黄土-基岩顺层滑坡,黄茨滑坡就是典型实例。

(2) 接触面

因区域的构造抬升以及河流侵蚀切割和沉积作用,黑方台地区存在多种接触面,其实质为岩土体的物质分界面,包括基岩与卵石层的接触面、卵石层与黏土层接触面和粉质黏土层与黄土接触面。研究区整体的接触面向东侧缓倾角倾斜,山城沟左岸为反向,虎狼沟右岸为顺向,虎狼沟接触面为反向以及焦家村为顺向,另外在黑台的陈家村滑坡-党川滑坡东侧的南北向成凸形,使得在党川向斜坡和陈家村

侧斜坡的接触面为顺向。由于部分区域地形被冲沟切割,层面与临空面的交切关系多变,部分斜坡表现为多向临空。

基岩与卵石层的接触面是白垩系砂泥岩与第四系卵石层在古剥蚀面的基础上形成的不整合接触面,或称基岩顶面,整体形态呈平面型,且向东侧呈小角度倾斜,即高程呈现西高东低(图 2),但局部起伏。

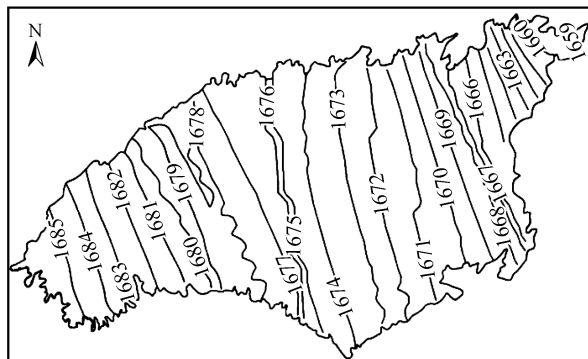


图 2 基岩顶面高程等值线图^[23]

Fig.2 Elevation contour map of bedrock top surface^[23]

粉质黏土层在卵石层顶面沉积形成的物质分界面为卵石层顶面,整体形态呈平面型,向东侧呈小角度倾斜,即高程分布呈现西高东低(图 3)。

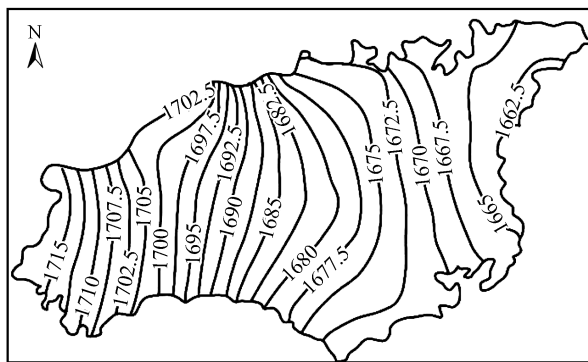


图 3 粉质黏土层顶面高程等值线图^[9]

Fig.3 Elevation contour map of silty clay top surface^[9]

(3) 节理裂隙

斜坡中存在的节理裂隙主要分布在黄土、粉质黏土层和基岩中。滑坡体上的节理裂隙不作讨论。

基岩中节理裂隙比较发育,充填型节理优势走向为 310° 和 60° ,锐角平分线为 185° ,无充填型节理优势走向为 86° 和 30° ,锐角平分线为 53° 。黄土层中节理弱发育但裂隙很发育,贯通性裂缝数量很少。作者对黑方台台塬区的裂缝特征进行了统计,在统计的 114 条裂缝中有直线型裂缝 16 条,弧形裂缝 98 条,弧形裂缝的比例达到 86%;114 条裂缝总长

为 8 552.2 m,单条裂缝最长达 769.9 m,张开度最大为 110 cm,错距最大为 180 cm,距离台边最远距离为 71.9 m;114 条裂缝中有 74 条与滑坡相关,呈

锯齿状,表现为拉张特点。根据张开度、错距、台边距以及裂缝长度进行分布规律分析,可得如图 4 的结果。

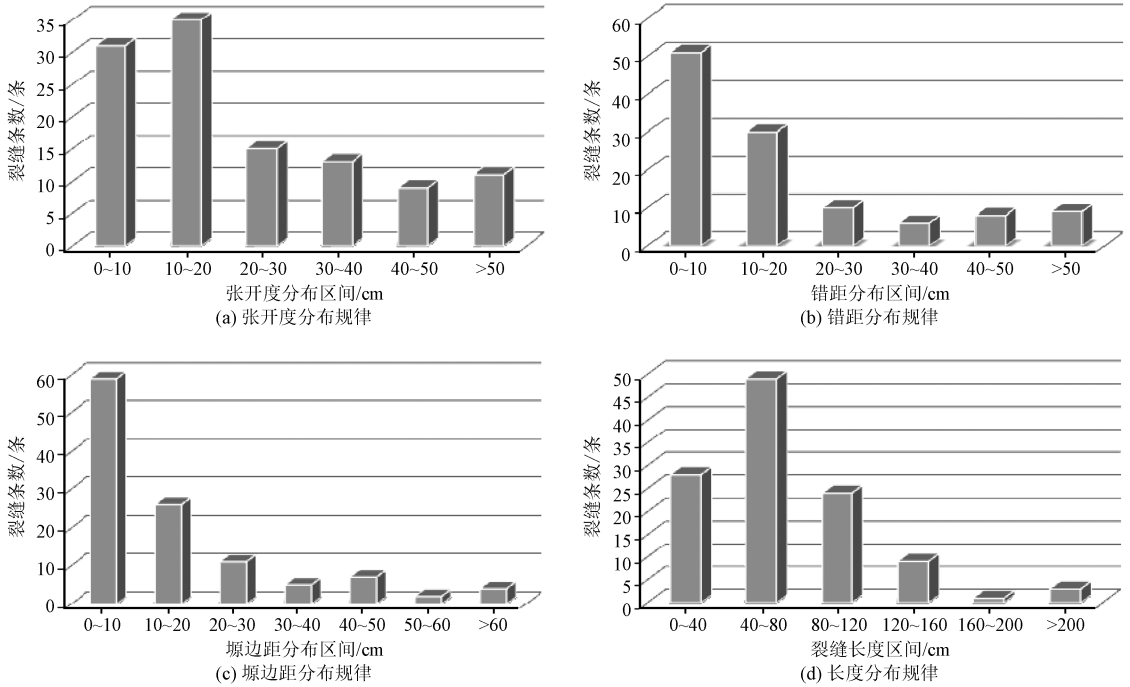


图 4 裂缝特征分布规律

Fig.4 Distribution law of crack characteristics

(4) 断层

区内存在 7 条断层(图 1)都为正断层,走向主要为 NNE 向。7 条断层中 5 条断层切穿基岩,1 条切穿冲积层,1 条切到黄土层但未延伸到顶部。

(5) 临空面

临空面作为一种特殊的结构面,其对斜坡的稳定性影响较大。台缘周边斜坡形态包括直线型、凹型、凸型、阶梯型以及复合型,其中以上陡下缓型斜坡占主导,其次为复合型。斜坡坡度集中在 30°~60°,平均坡度 35°。山城沟、磨石沟、磨石沟、野狐沟等深切沟谷两侧沟缘线及侵蚀严重的焦家崖头一带坡度陡峻。黑方台台面与黄河 II 级阶地直接以陡坡接触,二者之间高差约 100~120 m。整个斜坡坡向变化较大,南缘斜坡坡向大致分为四段:湟水河到扶河桥头之间斜坡走向 NE26°;扶河桥头至黄茨斜坡走向 NE44°;黄茨到虎狼沟口斜坡走向 EW98°;方台南缘斜坡走向约 NE30°。

2.2 组合特征

由于黄土中节理数量少,作为次生产物的裂隙中贯通型的很少,以及粉质黏土层中节理裂隙很难发现;另外基岩中节理主要发育在基岩的表部,其主

要对基岩局部变形破坏产生一定影响,对整个斜坡的稳定性影响小,所以结构面组合中不考虑黄土、粉质黏土和砂泥岩中的节理裂隙,而将节理裂隙考虑为一种斜坡变形破坏。

通过层面、接触面组合可得自上而下为粉质黏土层顶面、卵石层顶面、基岩顶面、层面的最常见结构面组合形式(图 5)。

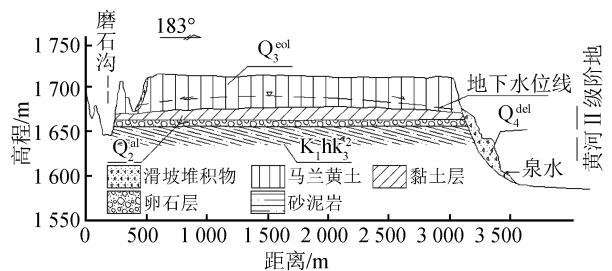


图 5 陈家滑坡—黄茨滑坡剖面图

Fig.5 Profile of Chenjia landslide—Huangci landslide

黑方台台塬斜坡结构面按接触面产状可划分为 2 个大类、8 个小类(图 6)。

两大类分别为接触面顺向型(I 型)和接触面反向型(II 型),前者包括 5 小类(I₁型、I₂型、I₃

型、 I_4 型和 I_5 型),后者包括3小类(II_1 型、 II_2 型和 II_3 型)。 I_1 型、 I_2 型、 I_3 型和 I_4 型对应于基岩出露接触面顺向型, I_5 型对应基岩不出露接

触面顺向型, II_1 型和 II_2 型对应基岩出露接触面反向, II_3 型对应基岩不出露接触面反向型。组合类型的分区图如图7所示。

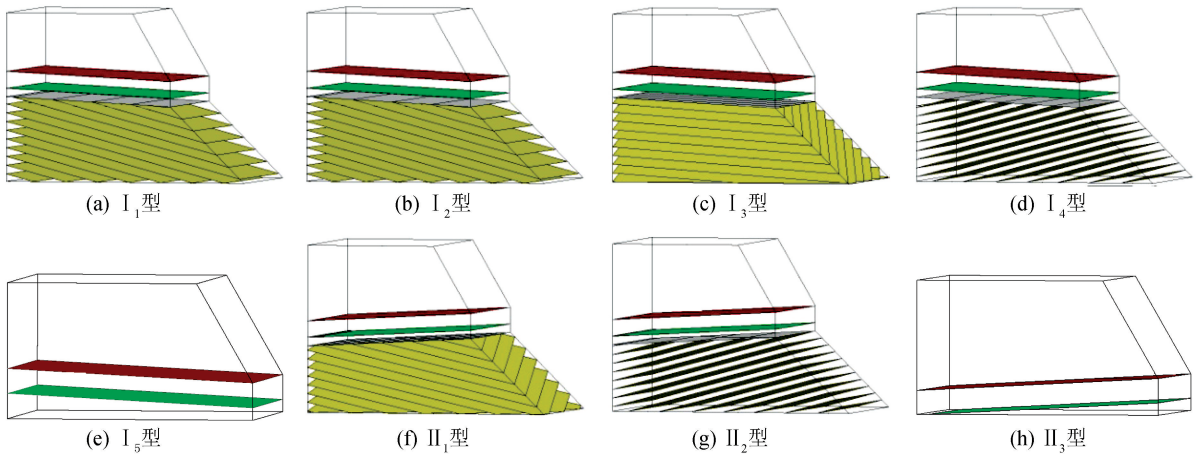


图6 组合结构面与临空面的交切关系示意图

Fig.6 Sketch diagram of intersection relation between composite structural plane and free face

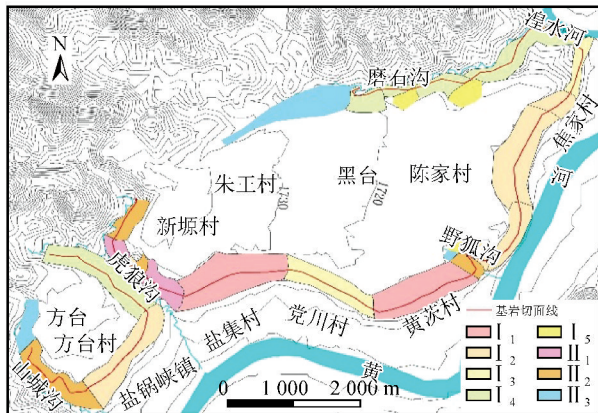


图7 组合结构面分区图

Fig.7 Partition map of composite structural plane

坏的影响进行分开讨论。各类型结构面的影响如表1所列,组合结构面的影响如表2所列。

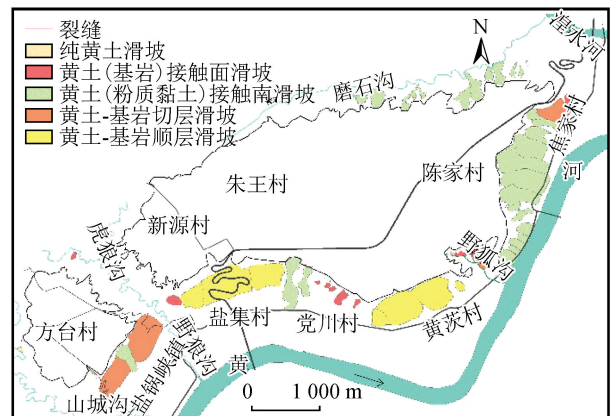


图8 滑坡分布图

Fig.8 Distribution of landslides

3 结构面对台塬斜坡变形破坏的影响

3.1 对类型及特征选择的影响

区内变形破坏类型主要为滑坡和崩塌。根据岩土体类型、结构面与临空面的交切关系以及滑面的特征可将滑坡分为纯黄土滑坡、黄土(基岩)接触面滑坡、黄土(粉质黏土)接触面滑坡、黄土-基岩切层滑坡和黄土-基岩顺层滑坡(图8)。崩塌按物质分类分为黄土型崩塌、黄土-粉质黏土型崩塌和基岩崩塌(图8)。滑坡是区内最主要的变形破坏类型,崩塌主要是在滑坡后缘发育。

各类型结构面对于斜坡变形破坏的影响不同,且存在组合时各组合类型产生的影响也都会不一样,因此本文对各结构面及其组合对于斜坡变形破

3.2 对空间分布选择的影响

台塬斜坡的变形破坏空间分布主要包括群集性、选择性和取向性。

研究区存在方台滑坡群、虎狼沟—野狐沟滑坡群、焦家滑坡群和磨石沟滑坡群4个滑坡群。滑坡成群发育的特征明显,滑坡呈现新老迭置、彼此相连、左右镶嵌、大小相套特点。同种类型滑坡整体上呈现集中发育,个别呈现特殊分布。裂缝集中分布于野狐沟左岸、黑台前缘、方台前缘、方台的东北台塬段以及磨石沟右岸的斜坡后部,在其他地段零星分布。崩塌在黑方台台塬斜坡段集中发育的程度高,特别是在沟谷两侧以及滑坡后部的群集性明显。

表 1 各类型结构面影响

Table 1 Effect of each type of structural plane

结构面类型	变形破坏特征
节理裂隙	节理裂隙的存在直接改变岩土体的完整性和降低岩土体的强度;节理裂隙作为地表水入渗的通道间接影响岩土体强度、改变岩土体的结构、加大岩土体自重、增加下滑力和减小抗滑力。黄土中节理裂隙的存在易引发纯黄土滑坡和黄土(粉质黏土)接触面滑坡以及黄土型崩塌形成;粉质黏土层中节理裂隙的发育会促进黄土层潜水向下渗,降低接触面和岩土体的强度,易引发黄土(基岩)接触面滑坡;基岩中节理裂隙的存在主要影响基岩上部稳定性,对整个斜坡的影响较小,但两组优势节理的发育可能引发黄土-基岩切层滑坡,另外节理裂隙的存在易引发基岩崩塌。节理裂隙影响的斜坡变形涉及黑方台台塬所有区域。
层面	基岩为砂泥岩,层面受水的影响较大。当层面产状顺向时,在地下水的影响下,斜坡易发生黄土-基岩切层滑坡和黄土-基岩顺层滑坡,黄茨滑坡和方台前缘滑坡就是典型实例。
接触面	接触面产状影响地下水的流向,从而影响滑坡发生的频率,尤其当接触面顺向易发生黄土接触面滑坡;接触面的力学性质影响斜坡变形破坏的程度,例如磨石沟支沟右岸为顺向,变形破坏的程度、频率、规模等明显高于左岸。
临空面	临空面为斜坡的变形破坏提供临空条件,临空条件好的地段变形破坏的成果更高。

表 2 组合结构面影响

Table 2 Effect of composite structural plane

组合结构面类型	变形破坏特征
I ₁	该类斜坡的变形破坏类型主要为黄土-基岩顺层滑动以及黄土崩塌。黄土-基岩顺层滑动具有体积大、滑体厚、部分多次滑动、滑体稳定性差、受基岩产状与临空面的交切关系影响大、滑体裂缝很发育、复活性、继承性等特点。黄土崩塌主要为滑坡高陡后壁的拉张破坏,崩塌数量较小,后退式发展明显。此类斜坡的稳定性极差,发生大规模滑动以及老滑坡复活的可能性大。
I ₂	该类斜坡的变形破坏类型主要为黄土(粉质黏土)接触面滑坡、黄土-基岩切层滑坡以及黄土崩塌。黄土(粉质黏土)接触面滑坡具有滑动速度大、距离远、发育集中程度高、演化速度快、危害性大、位置选择等特点,主要受接触面和黄土的岩性的控制。黄土-基岩切层滑动具有体积大、滑体厚、滑动距离较长、复活可能性大、继承性强等特点,该类型受地质构造的影响大。黄土崩塌集中在滑坡后壁以及磨石沟沟坡上,该区域分布的崩塌发育模式较多,数量多。该类斜坡的稳定性一般,在临空条件改变时稳定性会降低。
I ₃	该类斜坡的变形破坏类型主要为黄土(基岩)接触面滑坡。滑坡具有滑面近似成圆弧形、体积较小、平面形态成圈椅状、后壁陡立等特点,其发生主要受顺向接触面和土体岩性影响。黄土崩塌体积小、数量相对较多,黄土型和黄土-粉质黏土型崩塌都发育。此类斜坡的稳定性较好,极少发生大体积、远距离、大规模的破坏。
I ₄	该类斜坡的变形破坏类型主要为滑坡和崩塌。滑坡主要为黄土(基岩)接触面滑坡和黄土(粉质黏土)接触面滑坡,黄土(粉质黏土)接触面滑坡具平面上呈圈椅状、后壁陡立且上部粗糙下部光滑、运动呈现显著的流体的、滑动距离远、发育数量较多等特点;黄土(基岩)接触面滑坡具有滑动距离短、体积较小、渐进性发展特征明显等特点。崩塌主要发育于滑坡后壁和部分高陡斜坡地段,具有体积小、数量较多、分布集中性较强等特点。此类斜坡在灌溉作用下稳定性较差,受接触面和岩性的影响大,磨石沟右岸斜坡就是典型实例。
I ₅	该类斜坡的变形破坏类型主要为滑坡和崩塌。滑坡主要为黄土(粉质黏土)接触面滑坡和黄土(基岩)接触面滑坡,前者具滑动距离远、平面形态为圈椅状、滑面近似圆弧形、数量较多等特点。崩塌主要为滑坡后壁的黄土崩塌,崩塌体积小、数量多,后者具有滑动距离短、体积较小、渐进性发展特征明显等特点。该类斜坡天然条件下基本稳定,灌溉条件下地下水位不断上升使得斜坡稳定性急剧减小。
II ₁	局部出现崩塌
II ₂	局部出现崩塌
II ₃	斜坡较为稳定,有少量滑坡和崩塌发生。滑坡为纯黄土滑坡,滑坡的滑动距离短、体积小、长度一般小于宽度。崩塌主要发育在沟谷较为发育和人类工程活动较为强烈的地区。

表 3 滑坡类型与组合结构面类型对应关系

Table 3 The relation between landslide type and composite structural plane

滑坡类型	黄土(粉质黏土)接触面滑坡	黄土(基岩)接触面滑坡	黄土-基岩切层滑坡	黄土-基岩顺层滑坡
组合结构面类型	I ₂ 型、I ₄ 型、I ₅ 型	I ₂ 型、I ₃ 型、I ₄ 型、I ₅ 型	I ₂ 型	I ₁ 型

黄土(粉质黏土层)接触面滑坡主要在焦家崖头、焦家河湾段以及磨石沟右岸发育;黄土(基岩)接触面滑坡主要在三姓庄后部斜坡段和野狐沟段发育;黄土-基岩切层滑坡在方台前缘和焦家村东侧发育;黄土-基岩顺层滑坡在盐集村和黄茨村后部斜坡

发育;部分滑坡在虎狼沟和山城沟两岸发育。裂缝发育及其位置的选择与落水洞、崩塌以及滑坡的发育相关。滑坡的后部和黄土冲沟的中后部发育大量的黄土型崩塌。滑坡在接触面顺向型斜坡内广泛发育,集中于方台前缘、黑台前缘以及磨石沟右岸的滑

坡的接触面顺向。黄土型崩塌与沟谷主要分布于滑坡后缘以及黄土冲沟内,黄土滑坡(按物质组成划分)后部发育的崩塌数量明显较多;黄土-粉质黏土型崩塌分布于冲沟两侧,但冲沟两侧的发育程度不同,虎狼沟左岸明显高于右岸;崩塌主要发育在野狐沟右岸;在黄土冲沟内两侧的崩塌发育差异也较大。

滑坡成群出现的斜坡段接触面都为顺向,顺向有利于地下水的运移和排泄以及产生沿着接触面的滑移;滑坡的选择性由区段的斜坡的结构决定,顺向型接触面和基岩顺向型斜坡最易发生滑坡;取向性由区域环境影响,局部环境控制,例如野狐沟的取向性就是区域影响沟谷形成,沟谷两岸在局部环境的影响又有不同的变形破坏分布。

对比滑坡分布图(图 8)与组合结构面分区图(图 7)分析可知,不同类型滑坡分布和发育位置的选择与坡体结构有很好的对应性和相关性,结合上述的分析认为,研究区滑坡呈现的群集性和选择性受结构面的影响很大。

斜坡变形破坏的空间分布受组合结构面的影响,斜坡变形破坏严重的区域的组合结构面类型主要为 I₁ 型、I₂ 型、I₃ 型、I₄ 型、I₅ 型。

4 结 论

本文以黑方台台塬黄土斜坡为研究对象,在分析研究区地质环境的基础上,分析了结构面及其组合特征,研究了台塬斜坡的变形破坏类型和空间分布特征及其与结构面的关系。研究得到以下几点结论:

(1) 结构面类型主要包括节理裂隙、层面、接触面、断层和临空面。组合结构面类型共 2 大类 8 小类。

(2) 区内主要的变形破坏类型为滑坡和崩塌,崩塌主要发育在滑坡后缘。滑坡类型主要包括纯黄土滑坡、黄土(基岩)接触面滑坡、黄土(粉质黏土)接触面滑坡、黄土-基岩切层滑坡和黄土-基岩顺层滑坡。滑坡具有明显的群集性、选择性和取向性。

(3) 结构面对斜坡变形破坏类型选择和空间分布选择影响巨大,特别是对滑坡的影响。结构面不仅对滑坡的类型选择产生影响,而且对滑坡群集性、选择性和取向性等空间特征也产生影响。单一结构面只能产生一定的影响,而组合结构面决定斜坡结构和斜坡主要的变形破坏方式。

参考文献(References)

[1] 张茂省.引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术:以黄河

三峡库区甘肃黑方台移民灌区为例[J].地质通报,2013,32(6):833-839.

ZHANG Maosheng. Formation Mechanism as Well as Prevention and Controlling Techniques of Loess Geo-Hazards in Irrigated Areas: A Case Study of Heifangtai Immigration Area in the Three Gorges Reservoir of the Yellow River[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(6): 833-839.

[2] 陈小军.黑方台台塬斜坡演化特征研究[D].兰州:兰州大学,2017.

CHEN Xiaojun. Study on Evolution Features about Loess Slope of Heifangtai[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.

[3] ZENG R Q, MENG X M, ZHANG F Y, et al. Characterizing Hydrological Processes on Loess Slopes Using Electrical Resistivity Tomography—A Case Study of the Heifangtai Terrace, Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 742-753.

[4] 毛举.黄土裂隙对斜坡变形破坏的控制作用[D].兰州:兰州大学,2016.

MAO Ju. Controlling Effects of Loess Fissure on the Slope Deformation and Failure[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.

[5] 卢全中,彭建兵,陈志新,等.黄土高原地区黄土裂隙发育特征及其规律研究[J].水土保持学报,2005,19(5):191-194.

LU Quanzhong, PENG Jianbing, CHEN Zhixin, et al. Research on Characteristics of Cracks and Fissures of Loess and Their Distribution in Loess Plateau of China[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(5): 191-194.

[6] 彭建兵,李庆春,陈志新,等.黄土洞穴灾害[M].北京:科学出版社,2008.

PENG Jianbing, LI Qingchun, CHEN Zhixin, et al. Loess Cave Disaster[M]. Beijing: Science Press, 2008.

[7] 许领,戴福初,邝国麟,等.台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J].地质评论,2009,55(1):85-90.

XU Ling, DAI Fuchu, Kuang Guolin, et al. Characteristics and Forming Mechanisms of the Plateau-Edge Cracks and Their Significance to Loess Landslides[J]. Geological Review, 2009, 55(1): 85-90.

[8] 武彩霞,戴福初,闵弘,等.台塬顶缘裂缝对黄土斜坡水文响应的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(5):1512-1519.

WU Caixia, DAI Fuchu, MIN Hong, et al. Influence of Cracks at the Platform on Hydrologic Response of Loess Slope[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1512-1519.

[9] XU L, DAI F C, THAM L G, et al. Investigating Landslide-Related Cracks along the Edge of Two Loess Platforms in Northwest China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(10): 1023-1033.

[10] 刘东生.中国的黄土堆积[M].北京:科学出版社,1965.
LIU Dongsheng. The Accumulation of loess in China. Beijing: Science Press, 1965.

[11] 赵法锁.基底形态对黄土斜坡的形成及稳定性的影响[J].西

- 北地质,1994,27(3):70-73,69.
- ZHAO Fasuo. Influence of Basement Morphology on the Formation and Stability of Loess Slope[J]. Northwestern Geology, 1994, 27(3): 70-73, 69.
- [12] WEN B P, WANG S J, WANG E Z, et al. Deformation Characteristics of Loess Landslide along the Contact between Loess and Neocene Red Mudstone[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2005, 79(1): 139-151.
- [13] 吴玮江, 宿星, 刘伟, 等. 黄土-泥岩接触面滑坡的特征与成因[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1167-1175.
- WU Weijiang, SU Xing, LIU Wei, et al. Loess-Mudstone Interface Landslides: Characteristics and Causes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1167-1175.
- [14] PENG J B, LENG Y Q, ZHU X H, et al. Development of a Loess-Mudstone Landslide in a Fault Fracture Zone[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 658.
- [15] 贾雪梅, 梁收运. 黄土-基岩不整合面与滑坡的关系[J]. 地球科学期刊(中英文版), 2013(3): 88-94.
- JIA Xuemei, LIANG Shouyun. Relations between Loess-Bedrock Unconformity Surface and Landslide[J]. Scientific Journal of Earth Science, 2013(3): 88-94.
- [16] 张雷. 黄土斜坡地质灾害的接触面效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- ZHANG Lei. Study on Contact Surface Effect of Geological Disasters Occurred in Loess Slopes Area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [17] 吴万炯. 黑方台构造地貌条件及其灾害效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- WU Wanjiang. Tectonic Landform Conditions and Its Hazard Effect in Heifangtai Area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [18] 杨柳. 黑方台岩层产状对黄土-基岩滑坡的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- YANG Liu. Effects of the Attitude of Bedrock on the Loess-Bedrock Landslide in Heifangtai Area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [19] 马建全. 黑方台灌区台缘黄土滑坡稳定性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- MA Jianquan. Stability Analysis of Loess Landslide in Loess Tableland Edge of Heifangtai Irrigation Area [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [20] XU L, DAI F C, TU X B, et al. Landslides in a Loess Platform, North-West China [J]. Landslides, 2014, 11(6): 993-1005.