

延安市凤凰山东北麓滑坡危险斜坡的变形特征及稳定性分析

高德彬, 倪万魁, 郭社锋

(长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 通过对凤凰山东北麓工程地质特征的分析, 指出该区存在的不良地质问题有滑坡(滑塌)以及危险斜坡等, 并对各滑坡(滑塌)以及危险斜坡的变形破坏特征进行了分析, 最后运用斜坡(滑坡)稳定性计算中常用的瑞典法、毕肖普法和剩余推力法对其进行了稳定性验算, 为凤凰山东北麓后期的治理设计提供了依据。

[关键词] 凤凰山; 滑坡; 危险斜坡; 变形特征; 稳定性; 延安

[中图分类号] P642.2 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)04-0054-04

[作者简介] 高德彬(1974—), 男, 陕西渭南人, 讲师, 博士研究生, 现从事岩土工程教学与研究工作。

延安市为典型的山间河谷型城市, 三山(清凉山、宝塔山和凤凰山)两川(延河川和南川)的地形决定了城市可利用土地资源紧缺, 城市建设必将向河谷和斜坡地带发展。特殊的地形地貌条件, 脆弱的地质环境和人类工程经济活动的加剧, 导致了市区斜坡大量失稳。仅在凤凰山东北麓电影院至市场沟2.2 km的斜坡段就发育滑坡7处、滑塌5处以及具有潜在危险的斜坡, 这些都将直接威胁下方居民的生命和财产安全, 并给城市规划、建设、文物保护、交通等构成了严重地威胁, 成为延安城市发展建设和防灾急需解决的问题。针对该段斜坡存在的地质问题, 通过分析和稳定性计算, 为治理方案设计提供了可靠的依据。

1 滑坡(危险斜坡)区工程地质特征

1.1 地形地貌

研究区以峁为主, 沟谷切割较为破碎, 边缘地带为 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的陡坡。这些地带崩塌、滑坡和滑塌极为发育。凤凰山东北麓电影院至市场沟口段斜坡体, 被棉土沟和礼堂沟分割为3段, 坡脚普遍发育高约20~40 m, 坡度 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的陡坡或陡坎, 并

逐渐以缓坡向梁顶过渡。高陡斜坡为其变形破坏提供了非常有利的临空条件, “圈椅状”滑坡地貌和危险坡体在该区段随处可见。

1.2 地层岩性及其物理力学性质

研究区地层岩性主要为离石黄土(Q_2^{col}), 厚约70~90 m, 可见5~10层古土壤, 结构致密, 发育北西和南西向两组垂直节理。顶部覆盖厚约3~19 m的马兰黄土(Q_3^{col}), 结构疏松, 根系、虫孔发育。离石黄土之下为侏罗系延安组宝塔山段(J_{1Y2})砂岩, 倾向北西, 倾角 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$, 顶面高程980~985 m, 仅在局部地段出露(图1, 图2)。

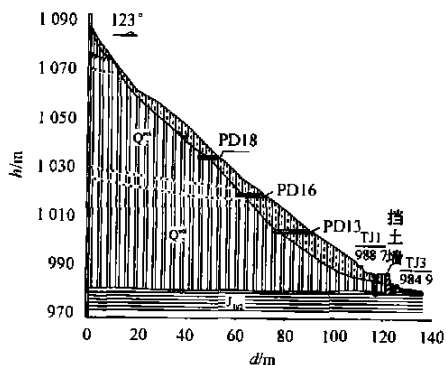


图1 滑坡工程地质剖面

Fig. 1 Geological section of landslides

根据野外观察和室内试验发现, 马兰黄土结构疏松、具大孔隙, 垂直节理发育, 颗粒组成以粉粒为

主, 孔隙比平均为 0.94, 天然强度指标平均值为 $c=33.54\text{ kPa}$, $\varphi=24.1^\circ$; 饱和强度指标 $c=10.53\text{ kPa}$, $\varphi=16.85^\circ$ 。离石黄土的天然强度指标平均值为 $c=45.41\text{ kPa}$, $\varphi=29.81^\circ$; 饱和强度指标 $c=14.87\text{ kPa}$, $\varphi=14.12^\circ$ 。

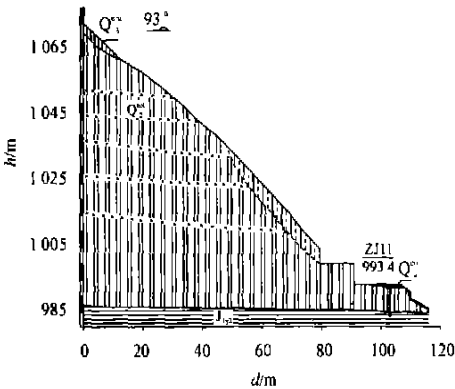


图 2 危险斜坡工程地质剖面

Fig. 2 Geological section of hazard slopes

1.3 水文地质条件

本区地下水按水力特性及埋藏条件可分为松散堆积层孔隙潜水和基岩孔隙裂隙潜水、承压水。松散层的孔隙潜水主要分布于河谷区, 局部存在于黄土梁峁区, 主要接受大气降水补给和周围山地潜水的侧向补给, 其排泄通道为延河及其支流, 在极个别地段有下降泉出露。承压水主要分布于下侏罗系延安组宝塔山段砂岩, 但是该区承压含水补给条件差, 径流缓慢, 水量较小。

1.4 人类工程经济活动状况

由于城市建设的不断发展, 位于市中心的凤凰山东北麓斜坡段已成为市区人口聚居地。目前, 斜坡坡脚密集分布有 464 孔窑洞, 致使坡脚形成 20~40 余米高的陡崖, 远远超过黄土的自立高度, 因而许多窑顶开裂甚至破坏, 坡面局部崩塌和掉块现象时有发生。由于人工开挖坡脚一般很快, 有时是一次进行的, 斜坡自身的应力状态往往来不及调整就已经达到极限状态。因此, 人工开挖对斜坡的影响要比自然冲刷和气象等因素的影响强烈而明显得多。

2 滑坡及危险斜坡变形破坏特征

2.1 滑坡变形破坏特征

研究区共发育滑坡 7 处、滑塌 3 处, 主要分布在凤凰村沟、棉土沟及礼堂沟沟口两侧的高陡斜坡

段, 均属黄土滑坡和滑塌。滑坡的共同特点是滑体边界轮廓清晰并保留滑体位移产生的各种变形、变位现象和整体滑移特征, 滑床、滑带完全保留或部分保留。而滑塌的共同特点是滑体边界轮廓清晰, 变形、变位现象较显著, 前缘保留部分滑床, 后缘因土体崩落形成陡壁, 滑体不完整。各滑坡及滑塌的变形破坏特征详见表 1。

表 1 各滑坡变形破坏特征

Table 1 The deformation character of landslides

编号	变形破坏特征
SL1	凤凰山西北侧的高陡黄土斜坡上, 呈“圈椅状”凹形坡, 具有典型滑坡地貌特征, 滑面为高陡的圆弧形, 滑体厚度平均约 1.5 m, 最大 2 m, 方量约 6 300 m ³ , 属浅层黄土滑坡
SL2	凤凰山北侧, 形成“圈椅状”, 前缘滑体被人工开挖成平台, 仅保留后缘部分滑体。滑体长约 35 m, 宽约 30 m, 滑体坡度约 47°, 高差约 42 m。滑体厚度平均约 1.5 m, 最大 2 m, 体积 1 600 m ³ , 属浅层黄土滑坡
SL3	棉土沟沟口西侧, 属老滑坡体局部复活。前后缘高差 32 m。滑面为上陡下缓的圆弧形, 滑体最大厚度 7 m, 平均厚度约 5 m, 总体积约 6 000 m ³
SL4	棉土沟西侧的高陡黄土斜坡上, 斜坡高程 990~1 040 m, 坡高约 50 m。滑坡周界清晰, 后壁为高约 3~5 m 的陡崖, 北壁高约 4 m, 南壁与高陡斜坡相连, 滑体坡度 60°, 形成“圈椅状”凹形坡, 具典型滑坡地貌特征
SL5	该滑坡位于棉土沟沟脑, 为一规模较大的黄土老滑坡, 滑坡周界清楚, 前缘高程 1 020 m, 后缘高程 1 075 m, 东西长约 85 m, 南北宽约 80 m, 滑体总体积约 68 000 m ³ 。滑体受坡面雨水冲蚀, 冲沟发育, 滑体破碎
SL6	位于礼堂沟口南侧高陡黄土斜坡上, 前后缘高差 85 m。滑面为上陡下缓呈弧形, 滑体最大厚度 2.5 m, 平均厚度约 2 m, 体积约 2 700 m ³ , 属浅层黄土滑坡
SL7	前后缘高差 85 m, 滑体坡度 36°。滑坡主要发育在离石黄土层中, 滑坡轮廓清晰, 滑面为上陡下缓呈弧形, 滑体最大厚度 10 m, 平均厚度约 7 m, 总体积约 32 200 m ³ , 剪出口位于砂岩顶面, 属黄土滑坡
SCL1	滑体周界清晰, 呈“圈椅状”, 坡高约 54 m, 滑体长约 55 m, 宽约 66 m, 总体积约 7 600 m ³ , 现仅残留一部分, 其余均被人工搬运或改造为平台, 前缘保留一高约 15 m 近于直立的陡壁, 滑体处于临空状态
SCL2	位于 2 号滑坡东侧的高陡黄土斜坡上, 前后缘高差约 40 m, 周界清楚, 滑体长约 30 m, 宽约 50 m, 滑体已被下方居民改造为平台, 仅保留完整的后壁, 壁高约 40 m, 坡度 65°
SCL3	位于棉土沟口西侧高陡黄土斜坡上, 滑体周界清晰, 呈“圈椅状”, 坡高约 64 m。滑体长约 60 m, 宽约 66 m, 体积约 44 000 m ³ , 现仅残留一部分, 其余均被人工搬运或改造为平台。后缘保留一高约 40 m 近于直立的陡壁

2.2 危险斜坡的变形破坏特征

所谓危险坡体系指具有潜在破坏可能的高陡斜坡, 一般坡度 $>50^\circ$, 坡高 $>30\text{ m}$, 坡面土体因卸荷及节理控制而成临空块体, 局部有随时崩塌的危险。按此标准, 研究区存在 5 处危险斜坡体。其共同特点是斜坡总高度达 40~60 m, 平均坡度多在

50°以上,坡脚为人工开挖或天然陡壁,坡度大于70°,高度10~15 m,陡壁上常发育有沿黄土垂直节理和构造节理张开的卸荷节理,局部有随时崩塌的危险。各区段危险斜坡的变形破坏特征详见表2。

表2 危险斜坡变形破坏特征

Table 2 The deformation character of the hazard slopes	
编号	危险边坡特征
危险坡体 A	坡长约 30 m, 高约 50 m, 坡度约 60°~70°, 高程 985~1 035 m, 属高陡黄土斜坡。坡体内发育走向北西和南西两组垂直节理, 其中北西向节理与斜坡走向近于一致, 坡面土体被垂直节理和卸荷裂隙切割成片状
危险坡体 B	坡长约 100 m, 高约 50 m, 坡度 65°~80°, 高程 995~1 045 m, 属高陡黄土斜坡。坡体内发育走向北西和南西两组垂直节理, 两组节理把坡面土体分割成直立条块或土片, 雨季常有掉块或局部崩塌发生
危险坡体 C	坡长约 380, 高约 50 m, 坡度 45°~80°, 坡脚处近乎直立, 高程 1 000~1 050 m, 属高陡黄土斜坡。坡体内发育走向南西节理, 雨水沿节理冲蚀张开形成裂缝, 常有掉块或局部崩塌发生
危险坡体 D	坡长约 130 m, 高约 70 m, 坡度 50°~82°, 坡脚处近乎直立, 高程 985~1 055 m, 属高陡黄土斜坡。坡体内发育走向南西和北西两组垂直节理, 两组节理把坡面土体分割成直立条块或土片, 雨季常有掉块或局部崩塌发生
危险坡体 E	坡长约 110 m, 高约 35 m, 坡度 55°~80°, 坡脚处近乎直立, 高程 997~1 030 m, 属高陡黄土斜坡。坡段内发育崩塌 1 处, 在雨水作用及人为因素的影响下, 坡体处于危险状态

3 滑坡(滑塌)及危险斜坡稳定性评价

3.1 滑坡(滑塌)稳定性评价

勘测区内的滑坡、滑塌均产生于黄土中, 根据现场调查及平硐和探井勘探资料确定的滑面基本为一圆弧面, 因此选用毕肖普法(Bishop 法)和剩余推力法进行分析计算, 计算模型如图 3。计算参数

的选取是依据大量室内试验结果, 经反算综合取值, 其中天然状态和饱和状态时的计算参数分别以残剪、饱和重塑剪试验结果为依据经反算确定的。各滑坡的计算参数及结果详见表 3。

上表可以看出, 两种方法计算的安全系数都很接近, 因此选用平均值来判断其稳定性。根据现场调查并结合稳定性计算, SL3 号滑坡和 SL4 号滑坡变形破坏强烈、位移显著, 并具有很好的临空条件, 现处于危险状态, 灾害性事件随时可能发生; SL5 老滑坡在天然状态下处于基本稳定状态, 只要做好地表排水工程, 其稳定性可以得到保证, 而其余滑坡在天然条件下虽然处于基本稳定状态, 但其在强降雨或人工不合理开挖条件下存在复活的可能性。SCL2, SCL3 号滑塌的后壁、后缘可见张裂缝, 坡体变形显著, 并具有很好的临空条件, 目前处于极限平衡状态。

3.2 危险斜坡稳定性评价

对危险斜坡稳定性评价通常是先假定最危险滑面形状, 然后采用能自动搜索最危险滑面的极限平衡法计算其安全系数。根据已有斜坡破坏的实

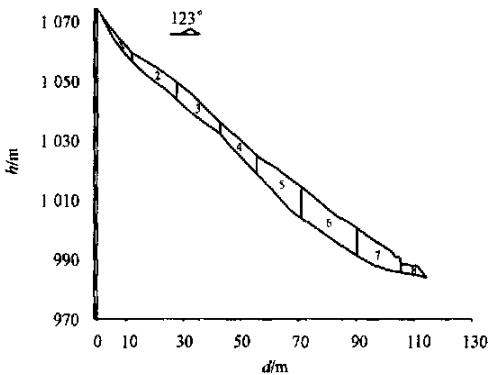


图3 滑坡计算简图

Fig. 3 Calculating section of landslides

表3 各滑坡的计算参数及结果

Table 3 The parameter and result of the landslides							
滑坡编号	状态	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	安全系数 k		
					毕肖普法	剩余推力法	平均
SL1	天然/ 饱水	15. 4/ 21. 0	15. 0/ 12. 5	14. 2/ 10. 3	1. 22/ 1. 02	1. 18/ 0. 90	1. 20/ 0. 96
SCL1	天然/ 饱水	16. 3/ 18. 7	15. 5/ 10. 0	17. 3/ 14. 0	1. 13/ 0. 85	1. 11/ 0. 81	1. 12/ 0. 83
SL2	天然/ 饱水	14. 4/ 18. 6	12. 5/ 10. 0	13. 6/ 10. 1	1. 16/ 0. 96	1. 14/ 0. 89	1. 15/ 0. 93
SL3	天然/ 饱水	13. 9/ 18. 3	15. 0/ 12. 5	17. 7/ 13. 5	1. 08/ 0. 92	1. 06/ 0. 88	1. 07/ 0. 90
SL4	天然/ 饱水	14. 2/ 18. 2	15. 5/ 10. 0	20. 7/ 15. 6	1. 04/ 0. 70	1. 02/ 0. 67	1. 03/ 0. 69
SL6	天然/ 饱水	17. 0/ 18. 5	15. 0/ 10. 0	19. 2/ 14. 8	1. 14/ 0. 92	1. 12/ 0. 81	1. 13/ 0. 87
SL7	天然/ 饱水	16. 5/ 19. 6	16. 5/ 10. 5	23. 5/ 15. 7	1. 21/ 0. 68	1. 19/ 0. 65	1. 20/ 0. 67

际情况, 计算时假定滑面为圆弧, 选用瑞典法和毕肖普法进行其稳定性计算, 其中毕肖普法安全系数计算式为:

$$k = \frac{W_t}{W_s}, \quad W_s = \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i,$$
$$W_t = \sum_{i=1}^n \frac{c_i h_i \cos \alpha_i + W_i \operatorname{tg} \varphi_i}{\cos \alpha_i + \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_i / k^\circ}$$

危险斜坡代表性剖面的计算模型见图 4, 各区段代表性剖面计算参数及计算结果详见表 4。根据

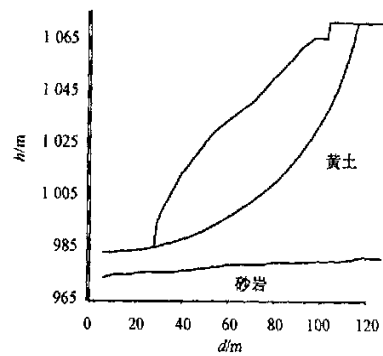


图 4 危险斜坡计算简图

ig. 4 Calculating section of hazard slopes

表 4 危险斜坡稳定性计算参数及计算结果

Table 4 The parameter and result of hazard slopes

剖面号	参 数			安全系数 <i>k</i>		
	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	<i>c</i> /kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	瑞典法	毕肖普法	平均值
5—5′	18.8	50.0	32.0	1.03	1.14	1.09
6—6′	18.7	49.0	32.0	1.04	1.15	1.09
10—10′	18.9	48.2	31.9	1.02	1.14	1.08
13—13′	18.9	48.2	31.9	1.04	1.11	1.08
17—17′	18.8	48.1	31.0	1.12	1.21	1.17
19—19′	18.7	49.0	31.0	1.04	1.15	1.09

现场调查并结合稳定性计算, 危险斜坡 A, B, C, D, E 坡高壁陡, 坡脚应力集中, 土体压裂现象显著, 表面小规模崩塌时有发生, 安全系数接近 1.0, 处于极限平衡状态, 且具整体滑移、滑塌的可能。

4 结论

由于凤凰山东北麓斜坡段位于正在开发建设的凤凰山旅游区和市中心这一特殊地段, 且斜坡大面积处于不稳定状态或危险状态, 并存在多处滑坡、滑塌和崩塌, 给城市规划、建设、文物保护、交通等构成了严重地威胁。通过对各滑坡、滑塌以及潜在危险斜坡的变形特征分析和稳定性计算, 结果表明, 它们基本上都处于极限平衡状态, 且具整体变形破坏的可能。因此, 建议对其采取以削坡减重为主、生态防护和排水工程为辅的综合治理措施。

[参 考 文 献]

[1] 崔中兴, 杨作东. 黄土地区滑坡机理分析及防治政策[J]. 水土保持学报, 1994, 14(6): 48~52.

[2] 邓学禄, 王学平. 黄土坡滑坡的发育历史: 坠覆—滑坡—改造[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2000, 25(1): 44~50.

[3] 卢全中, 郭相利, 赵法锁, 等. 略阳县地质灾害发育特征及其危险性初步评价[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(1): 52~56.

[4] 彭晓云, 高德彬, 毕选生, 等. 高陡边坡稳定性概率分析[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(3): 67~70.

[5] 刘玉海, 张骏, 倪万魁, 等. 延安城市工程地质[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.

[6] 倪万魁, 高德彬, 王朝阳, 等. 延安市凤凰山东北麓滑坡(危险斜坡)工程地质勘察报告[R]. 西安: 长安大学工程勘察研究院, 2003.

Analysis of deformation features and stability of landslides and hazardous slopes in the Northeast part of Fenghuang mountain in Yanan

GAO De-bin, NI Wan-kui, GUO She-feng

(School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054 China)

Abstract: By analyzing the features of engineering geology of Northeast part Fenghuang mountain in Yanan, the adverse geological problems including landslides slumps, collapse and hazardous slopes are presented and their stability is assessed by virtue of Bishop's method and surphas thrust method commonly used in limit equilibrium analysis, in order to supply the reliable basis for future design schemes.

Key words: Fenghuang Mountain; landslide; hazardous slope; deformation features; stability; Yan'an

[英文审定: 苏生瑞]