

· 工程与实践 ·

詹家溪滑坡形成的力学机制与稳定性评价

雷谦荣

(重庆建筑大学建筑工程学院 630045)

TU 413.62
P642.22

摘 要 概述了詹家溪滑坡地段边坡的工程地质条件和变形破坏特征,从滑坡形成的主要影响因素与受力条件着手,以动态观点分析了边坡应力状态及滑坡形成的机制,并对滑坡进行了力学分类,用定性分析和力学计算评价了滑坡的稳定性。

关键词 滑坡、边坡应力状态,滑坡的形成机制,滑坡的稳定性

中图法分类号 TU 45

边坡稳定性

詹家溪滑坡位于重庆市沙坪坝区詹家溪河口段左岸,横宽约 180 m,纵长约 40~70 m。自滑坡形成以后,在边坡坡顶距滑坡后缘 4~7 m 的居民区、办公楼、工业厂房等的安全受到严重威胁。1994 年 6 月,东段一部分宽约 27 m 的滑体快速剧烈下滑后,紧接着便因其后壁临空面的形成而在内侧距后壁 7 m 左右的地面出现弧形裂缝,从而形成了新的潜在滑坡,即钢丝厂滑坡(现已治理,并另有专题报道,本文不再论及)。为便于叙述,并考虑到该边坡的现状,本文将詹家溪滑坡中已经快速滑动过的部分称已滑段,其余地段称未滑段。

任何滑坡的形成,皆起源于力,也是边坡各种变形破坏的内在根源,而且在时空上是易变的。但目前在实际工作中,仍多以静态的观点侧重于表观分析。本文主要针对詹家溪滑坡的特点,以动态的观点就其形成的力学机制和稳定性评价发表一些看法。

1 工程地质条件概况

该滑坡所在的边坡地段,位于嘉陵江支流詹家溪河段左岸的缓坡上,地处嘉陵江河流沉积地貌的一级阶地,属土质边坡,最大坡高近 25 m,平水期詹家溪河水面处坡角 22° ~ 35° 左右。坡面有较大起伏,主要以凹凸相间、顺坡向下延伸、相互大致平行为特点,起伏高差约 1.0~1.6 m,间距 27~38 m,与基岩面的起伏位置相当。基岩面的起伏是由于岩性差异,遭受古风剥蚀程度的不同所致,且其高差较大;坡面起伏系基岩面下凹处在土层形成中及形成后土的厚度大,而凸起处土的厚度小,在漫长的地质时期中,由于土的压密固结沉降差异及地表暂时性流水向凹面处汇集与冲刷等作用引起,其高差较小。坡面有分布不均的杂填土(Q_4^1),厚约 0~1.8 m。其下为冲积土(Q_4^2),为黄褐色含粘土质较多的粉土—粘质粉土,质地较均,属中至高压缩性土,厚度变化甚大,一般为 9~17 m,最厚达 21.2 m,与基岩面的起

收稿日期:1997-01-27

雷谦荣,男,1939年生,副教授

伏密切相关;其主要物理力学性质指标统计平均值见表 1。下伏基岩为侏罗系中统上沙溪庙组(Ⅱ)紫红色泥岩夹泥质砂岩和长石砂岩。该边坡内仅在詹家溪河枯水期坡面的两凸起段前缘河床底侧有很少的砂岩露头。地质构造简单,位居磁器口向斜西翼近轴部,岩层产状较平缓,无断层分布,裂隙不发育。土层为透水层,据类比查表,渗透系数约 $0.4 \sim 0.8 \text{ m/d}$,随深度渐减;泥岩为隔水层。包气带常有分散性过路水形成上层滞水,饱水带为孔隙潜水,由居民及工业废水、大气降水和涨水期地表河水补给,径流和排泄条件较好,地下水动态随季节性变化大,水位的升降直接与降雨量及降雨过程和河水位的涨落密切相关,但时间上有滞后。

表 1 土的物理力学性质指标平均值

天然含水量 w (%)	比重 G	天然重度 r (kN/m^3)	饱和重度 r_s (kN/m^3)	孔隙比 e	孔隙度 n (%)	粘聚力 C (kPa)		内摩擦角 φ	
						峰值	残余值	峰值	残余值
28.52	2.73	19.5	19.8	0.80	44	18.08	11.94	16°4'	9°13'

2 边坡变形破坏特征

据调查访问和有关资料,1981年7月,重庆地区嘉陵江特大洪水期间,詹家溪河水随之上涨,直达整个边坡顶。在洪水位退降至坡脚附近时,坡肩内侧的坡顶地面开始出现数条长短不等、断续分布的裂缝,总的方向顺坡面走向延伸,最宽者近 1 cm。自此以后,每当河水位上涨至坡高二分之一以上,随后又消退至坡脚附近时,地面的裂缝便有不同的发展变化,尔后日渐趋于稳定。1985年9月,嘉陵江洪水位猛涨,引起詹家溪河水位迅速上升,直到接近坡顶标高约 185 m 处,紧接着洪水位又快速消退至标高 171 m 左右时,坡肩内侧的裂缝明显发展,地面的主要裂缝被连接,向西在距洋灰桥桥墩 8.5 m 处消失,并显有位移和表层土体向下蠕动的现象,且以凹面坡段更明显,裂缝最宽处约 2~3 cm,并在坡脚附近出现较多的自地下渗出的线状水流,形成一些局部的湿地,从而构成了詹家溪滑坡的总体格局。

1994年5月,重庆地区连降大雨,詹家溪河水位几经上涨至标高 175~180 m 左右,地面裂缝又进一步发展,特别是在已滑段(属边坡面凹形段之一)部位的后缘裂缝发展、扩大较快。至6月初,再次连降大雨,加之居民区一埋于地表下的供水管道破裂,增加了渗入地下的水量,该段滑坡便进入速滑阶段,将现场观测记录的日平均位移量列于表 2。6月8日凌晨

表 2 滑坡观测位移量

观测日期	观测点 A、B 距离 (m)	位移量 (m)	累计位移量 (m)	A、B 点设于主滑线方向上, A 点置于厂房横梁, B 点固定于滑体前缘、用经纬仪观测得出的水平位移量
6月3日	10.71			
6月4日	11.84	1.13	1.13	
6月5日	12.93	1.09	2.22	
6月6日	14.06	1.13	3.35	
6月7日	15.25	1.19	4.51	
6月8日	20.80	5.55	10.09	

2 时左右, 此段滑体向詹家溪河急速滑动, 直抵河床底部。滑体呈长丘状, 横宽 27 m 左右, 长约 60 m (见图 1), 最大厚度约 7 m, 滑面近似圆弧形, 后壁顶缘与未滑前后缘主裂缝吻合, 滑床为土体, 滑体后缘处的滑床面上有一股状泉水, 水质浑浊, 最大流量近于 1 l/s, 至今终年不干, 流量随季节性变化大。

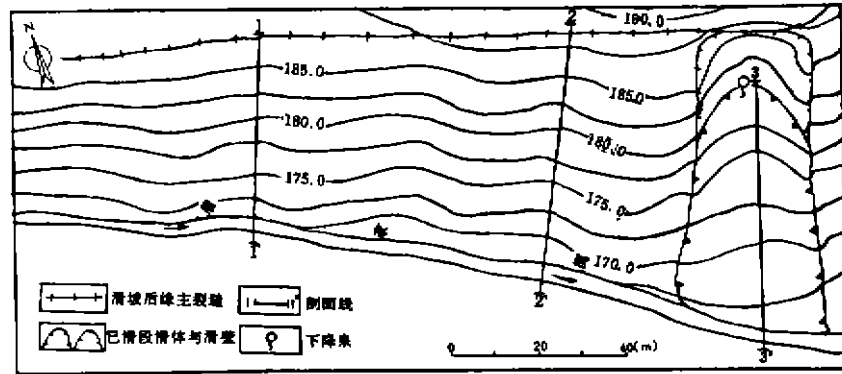


图 1 詹家溪滑坡平面图

3 滑坡的形成机制

3.1 形成滑坡的主要因素与受力条件

詹家溪滑坡的形成, 主要受边坡土体力学性质和水的影响。土体的力学强度较低, 地下水又将其软化而大大削弱; 地下水还对土体产生较大的水压力。其受力条件, 一是土体自重对潜滑体沿潜滑面的切向分力和与此力方向一致的地下水渗透压力相迭加形成下滑力, 这与其在潜滑面处形成剪应力集中直接有关; 二是土体自重对潜滑面上的法向分力和与此力方向相反的孔隙水压力之代数和通过潜滑面而起作用的滑床对其下滑的抗滑力, 这与在此处的抗剪阻力直接相关。因此, 该滑坡从孕育到逐步形成, 是由此受力条件产生的边坡应力状态, 而主要又是自重应力及其形成的剪应力和土的抗剪强度所控制的, 勿需考虑构造应力。

3.2 边坡中自重应力分布特征及力学效应

该边坡所处的河谷段, 已接近于当地局部侵蚀基准面, 垂向侵蚀已相当缓慢, 坡体内部的应力分布状态已相对较稳定。自边坡形成以来, 在长期的应力调整过程中, 因土体较均一, 无结构面分布, 在其自重应力的作用下, 坡体中的主应力方向发生偏转, 愈靠近坡面, 最大主应力愈接近平行于坡面, 其最小主应力则与坡面近于正交, 从而使坡体内的剪应力集中增高, 最大剪应力迹线变为近似于圆弧的曲线, 弧的下凹面朝向坡面。于是, 相应地使坡面的径向应力和坡顶面的切向应力转化为拉应力, 在坡顶边缘附近, 形成张应力集中带, 故容易在坡肩内侧边缘附近形成近于直立与坡面走向近于平行的张裂隙; 而在坡脚附近, 最大主应力显著增高, 愈接近坡面愈高, 最小主应力则显著降低, 使最大主应力与最小主应力的应力差达到最大值, 形成最大剪应力增高带, 这是边坡最容易变形破坏的部位之一。因此, 在坡体内, 剪应力集中增高最大处, 即是产生剪切滑动最有利的部位, 所以詹家溪滑坡的形成受最大剪应力面的控制。但是, 由于受边坡坡角和坡面形状的限制, 即使是在土体被水充分

饱和而将其力学强度降低至最小程度且同时将其自重增加到最大程度, 仅仅是自重应力是不足以使边坡产生明显的变形, 形成连通的张裂缝, 更不会使其形成的剪应力超过土体的抗剪强度形成贯通的剪裂面, 乃至发生剪切破坏。

上述自重应力分布状况, 是该边坡总的基本情况, 而不同地段的具体情况又有所不同。对于一般的边坡, 凸形坡比凹形坡的应力集中程度高。但是詹家溪滑坡所在的边坡, 由于凸形坡段(主要是坡脚附近), 因土层厚度较小, 受到基岩一定的影响, 在应力集中增高处的应力则相对较低; 而凹形坡段, 则因土层厚度大, 不受基岩的影响, 故应力集中后的应力相对较高, 所以比凸形坡段更易于变形破坏。然而, 由于整个边坡土层都比较厚, 它们又是相互联系的整体, 在其它条件相同或相似的情况下, 变形的产生与发展基本上是同步的, 只是在影响因素不同时, 变形发展的速度不同而已。

3.3 地下水压力的效用

对于詹家溪滑坡的形成与发展, 既有空隙水压力的作用, 又有渗透压力的作用。其中, 以孔隙水压力为主。

3.3.1 空隙水压力的作用

只要地下水位高于滑面的任一部位, 即对滑体产生力学效应。其中孔隙水压力减小滑体的有效正应力, 从而降低滑面处的有效抗滑力, 特别是在边坡中地下水位随地表洪水猛涨而升高之后, 这种力学效应非常明显。此外, 在已滑段速滑前, 水大量渗入地下形成的高孔隙水压力, 以及后缘宽大裂缝中来不及渗透的裂隙水产生的裂隙水压力, 对该滑段的速滑与剧滑也起了较大的作用。所以空隙水压力是詹家溪滑坡最敏感的影响因素。

3.3.2 渗透压力的作用

边坡中的渗透压力, 与水力坡度的大小紧密相关。因此只有在地下水位随地表洪水高涨而上升后又随洪水消退而将其水力坡度增大时才产生较大的力学效应, 即在坡体内增加下滑的剪应力(如前所述)。此外, 根据地下水在边坡上出露的特点, 渗透压力的潜蚀作用, 对削弱土的结构、增大土的透水性, 以及在已发生剪应变的部位产生累进性的渗透变形, 都将削弱土体的力学强度, 促使滑坡的形成与发展。

总之, 在上述受力条件和各种力学效应的综合作用影响下, 边坡上首先形成自地表向下递减的蠕变带, 使坡面表层开始向临空面方向位移, 在坡肩内侧产生张裂缝, 坡脚附近形成压制拉裂和蠕动, 进而发生程度不等的蠕滑, 将坡肩内侧裂缝逐步扩大, 地面裂缝被连通, 同时在剪应力最大部位发生一定程度的剪应变, 逐次形成了詹家溪滑坡的总体形状。只是内外影响因素的差异, 不同地段滑坡的发展、演变不同, 且一部分滑体已经发生了速滑。

4 滑坡的力学分类

根据边坡变形破坏特征和滑坡的形成机制, 詹家溪滑坡无论是从孕育到逐步形成, 还是一部分滑体的速滑到剧滑, 皆是受最大剪应力面的控制, 而且是受土体的自重、抗剪强度和地下水压力所支配的。因此, 对于尚未速滑的地段, 目前属于蠕滑挤压性剪切型滑坡; 对于已经速滑的滑坡段, 除上述作用力外, 1993年又在坡肩处建房加载及其施工用水渗入, 临滑前, 埋于地下不深的居民供水管道破裂, 水大量渗入其中, 以及在实地观察到的上部先启动

滑体上有鼓丘的现象,故属于推移式剪切型滑坡。它们都与平移式和牵引式及单一的剪切型滑坡有显著的区别。

5 滑坡稳定性评价

对该滑坡的稳定性评价,用工程地质的定性分析与稳定性计算相结合的方法。滑坡中的已经速滑段,相当于较简化的模型试验,这对未滑段稳定性类比分析和计算都是很有用的。

5.1 工程地质定性分析

近两年多以来,无论是已滑段的滑体还是未滑段的滑坡,均没有发现明显位移和裂缝增加的现象,但从整个滑坡今后的发展趋势分析,各段的稳定性又有较大的差异。对于已经快速滑动过的滑体部分,由于滑体重心大大降低,滑面倾角小于 28° ,原剪出口处滑面微向坡内倾斜,后缘处的泉水已用侧沟引入河中,滑面(带)的强度正在逐渐提高,坡面因耕耘等已变得更平缓,河流的冲刷逐步转向对岸,因而在任何自然条件下,也不至于复活,故该部分滑坡是稳定的。对于尚未速滑的地段,则情况迥然不同,根据上述滑坡受力条件和形成过程与边坡变形破坏特点,由于至今尚未采取任何治理措施,影响因素没有消除,而且河流的侧向侵蚀在日益加强,尤其是凹形坡段,边坡应力状态将在一定条件下变得对滑坡更为有利。只因近两年多来河流未涨较大的洪水,没有连降强度大、历时长的大雨、暴雨,所以目前是处于暂时的稳定状态。

5.2 稳定性计算

根据边坡工程地质条件和滑坡发育、演变过程,综合上述分析,对于未滑段,选取 $1-1'$ 和 $2-2'$ 两个剖面,已滑段选取一个即 $3-3'$ 剖面(见图1),进行稳定性计算。因其计算方法基本相同,为节省篇幅,对于计算剖面、计算公式和计算参数的确定等,本文中仅将 $1-1'$ 剖面作简要介绍。

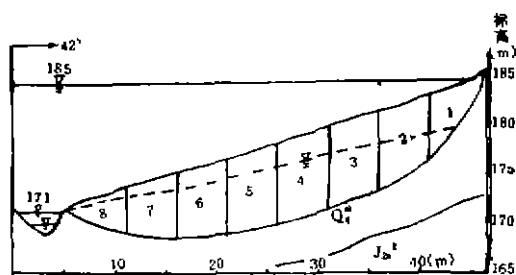


图2 $1-1'$ 计算剖面

5.2.1 计算剖面的确定

按均质土滑坡滑面通过滑坡后缘张裂缝、前缘通过坡脚压制拉裂或蠕变明显处,根据瑞典费伦纽斯(W. Fellinius)作图法,并参考已滑段滑面形状,确定其滑面的位置;模拟1985年詹家溪河最高洪水位涨至坡肩内侧标高185 m,快速消退至坡脚平水位171 m时,根据裘布依公式计算结合浸润曲线的方法,确定剖面中的地下水位线,再按条分法绘出计算剖面(图2)。

基于上述分析和实际情况,在一般情况下,滑坡是稳定的,故只按此模拟条件计算稳定系数才有实际意义,勿需再进行其他条件下的计算。

5.2.2 计算公式与参数选择

按瑞典条分法计算滑坡稳定系数 F ,其计算式为:

$$F_s = \frac{\sum [c_i l_i + (w_i \cos \beta_i - u_i l_i) \tan \varphi_i]}{\sum w_i \sin \beta_i + p_i} \quad (1)$$

式中, c_i 、 φ_i 、 l_i 分别表示各条土块滑面处的粘聚力、内摩擦角、滑弧的长度, w_i 、 β_i 、 u_i 和 p_i 分别表示各条块的重力、滑弧与水平面的夹角、承受的孔隙水压力和渗透压力。

根据刚连降大雨后取土样测定的试验指标值(见表 1), 并考虑取样和试验时的具体条件, 而且土的抗剪强度指标是用饱和快剪法测定的, 并因滑面尚未形成, 一般情况下滑坡又是稳定的, 故 c 、 φ 采用峰值强度值; 同时, 由于考虑了地下水压力, 土的天然重度与饱和重度相差很小, 故计算 w 时均用饱和重度 γ_s 。在计算孔隙水压力时, 每一条块的水头取自该条块滑面计起的平均值; 计算渗透压力时, 各条块均按其平均水力坡度计入, 且第 8 条块不考虑渗透压力。

5.2.3 计算结果

通过对上述三条剖面的计算, 其稳定系数分别为: 1-1'剖面 $F_s = 0.99$, 2-2'剖面 $F_s = 1.02$, 3-3'剖面 $F_s = 1.67$ 。其中的 2-2'剖面 and 3-3'剖面仍是采用 1-1'剖面的方法确定计算剖面 and 计算式, 按相似条件选取参数进行计算的, 如前所述。

6 结 语

1) 詹家溪滑坡的形成, 主要是土的力学强度低和地表洪水与地下水的影响, 受边坡土体自重应力形成的最大剪应力面所控制。

2) 滑坡的形成都有一个演变过程, 根据主要影响因素, 从受力条件和边坡应力状态着手, 分析各种力的作用过程和力学效应及滑坡形成的机制, 对评价、预测滑坡的稳定性与采取经济、有效的防治措施具有重要的意义。

3) 詹家溪滑坡中, 已经速滑的滑体部分, 是稳定的, 勿需治理; 对于尚未速滑的地段, 目前处于暂时稳定状态, 如不及时治理, 在连降大雨、暴雨或河水位高涨后, 又将转化为不稳定状态, 特别是其中坡角相对较大的凹形坡段, 容易产生速滑乃至剧烈滑动。治理时, 宜采用防水与支挡相结合的措施, 但也可以只采用有效的防水措施。未治理前, 切勿在滑体上加载。

参 考 文 献

- 1 张倬元等. 工程地质分析原理. 北京:地质出版社, 1981
- 2 雷 用. 复杂岩土体边坡的地基基础的弹塑性分析. 重庆建筑大学建筑工程学院硕士学位论文, 1996
- 3 雷谦荣. 谈滑坡勘察中的几个地下水压力问题. 四川地质学报, 1992(2)

Mechanical Mechanism and an Evaluation Stability of Zanjiaxi Landslide

Lei Qianrong

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 630045)

Abstract On the basis of a remarkable feature of Zanjiaxi landslide, the geological conditions and characteristics of deformation failure of the slope are simply described. At the beginning, the major factors occurred of the landslide and conditions subjected to forces, the stress state of the slope and the forming mechanism of the landslide are analysed by means of a dynamic point of view. In addition, a mechanical classification for landslides is given. The stability of the landslide is assessed by qualitative analysis and mechanical calculation.

Key Words landslide, stress state of slope, forming mechanism of landslides, stability of landslides

(编辑:陈 蓉)

科研成果

集体小水厂系列设计技术的研究

内容简介及技术水平:

本项目是在水处理研究基础上,通过对多个试点工程的应用研究,进一步探讨了小水厂的设计技术和运行规律,提出了具有国内领先水平的工艺技术,并编制了“集镇小型水厂系列设计图册”。