

重庆武隆“五一”滑坡成因分析

王建锋, 李世海, 燕琳, 董大鹏

(中国科学院力学研究所工程科学研究部, 北京 100080)

[摘要] 分析了边坡工程地质条件和地质成因机制; 根据现场调查数据建立了滑坡地质剖面, 反演了滑坡发生时滑动面的抗剪强度参数; 分析了原坡形及降雨所引起孔隙水压力对其稳定性的影响, 并以反演获得的强度参数结合类似边坡岩体结构面强度试验统计结果, 对原边坡进行了可靠度分析, 获得了原边坡的潜在破坏概率, 从而又在定量角度上获得了滑坡发生的原因。

[关键词] 武隆滑坡; 可靠度; 反分析; 剩余推力法; 边坡稳定性

[中图分类号] V475; V476 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)04-0022-07

2001年5月1日晚8时30分左右, 重庆市武隆县县城江北西段发生山体滑坡, 造成一幢9层居民楼房垮塌、死亡79人。阻断了319国道新干道, 几辆停靠和正在通过的汽车也被掩埋于滑坡体中。据现场调查, 该滑塌体长约40 m, 宽约50 m, 剪出口部位滑塌体厚度约20 m, 但整体滑塌体平均厚度仅约3 m, 体积约5 000 m³, 主滑方向为垂直乌江河谷(正南), 其现场特征见图1。虽然这起滑坡规模并不大, 造成的危害却很大, 因此深入分析其成因, 对避免类似灾害的发生具有借鉴意义。

本文基于已掌握的资料, 从工程地质角度进行了滑坡成因的定性分析; 同时, 根据现场实测数据, 反演得到的滑动面强度参数并类比类似边坡岩体结构面强度参数的统计结果, 对滑坡的成因进行了定量的反分析。研究工作表明: 除了滑坡发生地地质环境脆弱外, 这场灾难的直接诱因与不合理的工程活动密切相关。

另外需要说明的是, 从工程地质观点看, 武隆滑坡似称为“崩滑”更合适, 但鉴于对该滑坡称谓已定, 本文仍沿用“滑坡”一词。

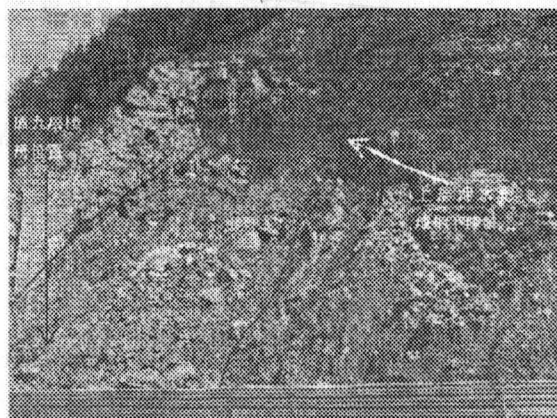


图1 武隆滑坡远景

Fig. 1 Overview of Wulong landslide

1 边坡工程地质条件

武隆滑坡处出露的地层为三叠系上统须家河组(T_{3xj})灰黄色厚层块状细-中粗粒长石石英砂岩、岩屑长石砂岩, 并夹有5~6层灰黄色泥页岩、粉砂岩等。砂岩单层厚度一般为1~3 m, 泥岩类夹层厚度一般为0.5~1 m。岩层厚度和成分等岩相

特征在横向上有一定变化。夹层构成边坡岩体中相对软弱层，易于风化，且在上层滞水作用下易于泥化。砂岩岩块强度较高，但垂层节理和卸荷裂隙较为发育。

从区域地质构造看，该段边坡恰位于紧密背斜的核部，岩层平缓，其层面倾向为 $NE70^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ，倾角 15° 左右，产状不甚稳定。大部分坡体岩层与临空面构成逆向平叠坡。

滑坡发生地位于呈东西走向的乌江右岸，岸坡地势陡峻，河谷深切，具有典型的川盆边缘峡谷丘陵地貌特征。原人工边坡坡度 $55^{\circ} \sim 64^{\circ}$ ，坡高高达 50 m。

构成边坡岩体主要部分的厚层块状砂岩，不但裂隙发育，而且贯通性强，是良好的含水层。但斜坡顶部及上部表层因处于坡顶张应力卸荷带，裂隙张开，地下水不易储存，地下水埋藏较深或基本不含地下水。在砂岩中的泥质岩夹层为相对隔水层，可形成暂时性的上层滞水。

上述这些条件构成了滑坡形成的基本地质背景。

2 成因的地质分析

2.1 不合理开挖

图 2 是原边坡开挖过程及滑坡形成示意图。边坡形成顺序：①在自然坡度为 $42^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的基础上，首先开挖了坡度为 $64^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 、高为 6~10 m 的公路边坡，②之后，在公路内侧开挖拓展建筑场地，形成 $55^{\circ} \sim 64^{\circ}$ 高陡边坡，③为了进一步拓宽建筑物地

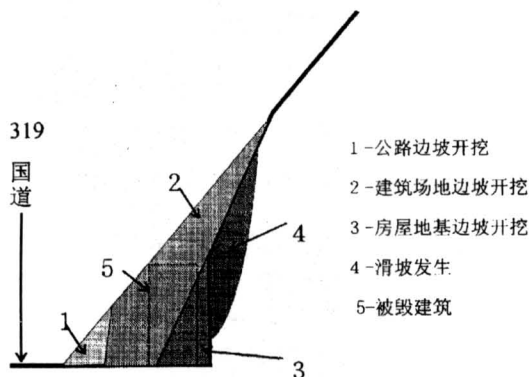


图 2 边坡开挖历史分析

Fig.2 Excavation history for the man-made slope

基，进一步开挖形成了高约 27 m 的直立高边坡，④自此直立边坡形成之后，以及距离直立边坡 1 m

处修建 26 m 高的 9 层居民住宅楼过程中，边坡上就一直发生掉块现象，显示人工直立边坡一形成即已接近临界状态。

2.2 存在不利的地质不连续面组合

该段边坡位于隔挡式构造的紧密背斜核部，当这类构造部位被河流横切时，通常形成深切峡谷，峡谷两侧边坡岩体崩滑现象多为发育，常酿成灾害。在川东地区，发生在类似构造部位的崩塌滑坡现象并不少见，如与本段边坡地质结构极为相似的著名风景区重庆北温泉后山坡，就发生过多次灾害性的崩塌滑坡现象，并造成了不同程度的人员伤亡和财产安全损失。换言之，该段边坡属于典型的平叠坡，其地质结构决定这类边坡易于形成高陡的自然斜坡。由于这类坡体中近乎水平的层面易于构成潜在滑动面，陡倾角的节理面易于构成滑坡后缘切割面，这两类地质不连续面的组合又极易于构成了坡体分离体边界条件，使得坡体具有潜在的破坏性。某些情况下，高陡边坡表层附近还发育以不同倾向倾向坡外的卸荷裂隙，卸荷裂隙也极易构成崩塌体的下伏滑动界面。然而，在自然状态下，具有较高潜在势能的这类边坡多处于平衡稳定状态。仅当对此类自然边坡实施人工开挖后，才易于失去稳定，形成突然的崩塌性的滑坡地质灾害。

现场测量到坡面 S_0 倾向为正南，坡角 63° 。砂岩层面产状为 $80^{\circ} \angle 25^{\circ} \sim 120^{\circ} \angle 15^{\circ}$ ，产状不稳定，大部分坡段形成逆向平叠坡。两套共轭“X”节理为： $J_1 230^{\circ} \angle 65^{\circ}$ 和 $J_2 150^{\circ} \angle 80^{\circ}$ ， $J_3 52^{\circ} \angle 60^{\circ}$ 和 $J_4 330^{\circ} \angle 72^{\circ}$ ，此外还有一组 $220^{\circ} \angle 70^{\circ}$ 。图 3 是这些地质不连续面的赤平投影分析，其中考虑到产状为 $220^{\circ} \angle 70^{\circ}$ 的节理对形成分离体的作用与产状为 $J_1 230^{\circ} \angle 65^{\circ}$ 的节理效果相同，且这一局部发育的节理与滑坡东侧公路畔局部断层有关，仅为局部发育，故未予将其画入。由此判断，滑坡位于的这一背斜构造至少受到两期地质构造运动作用。此外，还有一组对滑坡的形成起关键作用的后生卸荷节理 L_0 ，其产状为 $175^{\circ} \sim 185^{\circ} \angle 60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ，这一组裂隙呈弧形倾向坡外，在该坡段人工高陡切坡的纵剖面上清晰可见，它容易构成崩滑体的下部滑动面（见封面）。

由图 3 可以看出，坡面 S_0 和节理 J_1 、 J_2 ，以及岩层层面可以组合形成“平顶-平底楔体分离体”，当这一分离体与卸荷节理组合在一起时，从空间角度看，很明显将再次构成由上凹弧形卸荷节

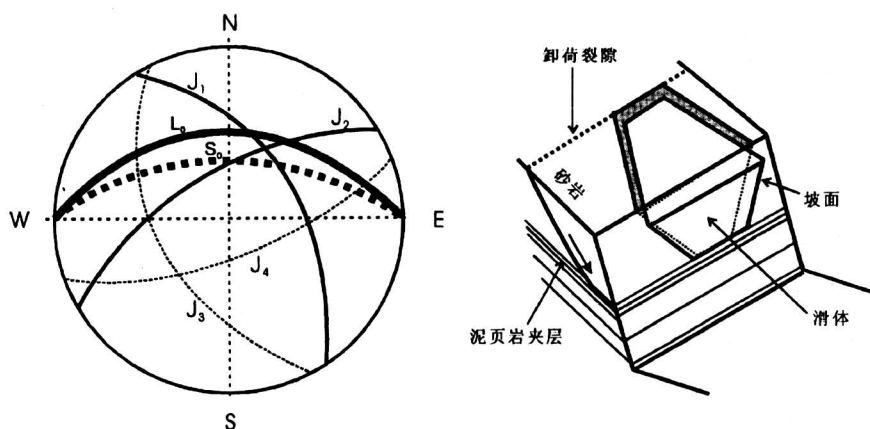


图3 边坡岩体中构造节理、层面不连续面、卸荷节理赤平投影分析

Fig.3 Indirect geo-structural survey data, stereo-graphic projection

理构成下部滑动面的典型“崩滑分离体”。就现场附近人工高切坡上卸荷节理特征观察类比推测，这组卸荷节理 L_0 在滑前并未完全贯通，因此当崩滑体上部重载传递到崩滑体脚部时，剪出口处卸荷节理的剪断贯通将不可避免，这预示着崩滑体的失稳破坏将具有突发性。滑坡发生后，出露的剪出口附近的弧形滑坡床上细粒化岩粉足以佐证上述分析（图1）。还可以注意到，由于另外两组构造节理倾向坡内，因此它们对边坡稳定将没有明显影响。总的来说，边坡中具备滑动分离体的几何边界条件。

经现场观察和分析，认为该滑坡应为“平顶—平底楔形体”与更为重要的一组卸荷节理复合所形成的，有一定典型性的小型“平顶—弧底”的“崩滑体”。在具有崩塌性破坏的同时，滑动破坏的特征还是明显的，这是因为该滑坡滑动面极为陡峻，以致于上部滑动面几乎不存在有摩擦特征，但滑坡的下部滑动面因受巨大的滑坡剩余推力而具有极为明显的统一完整的滑动面。该滑坡体的局部滑动面在现场是清晰可见的，即滑坡体下部剪出口部位可见滑动面上岩体剧烈滑动形成的岩粉物质。

2.3 降雨

武隆县是川东强暴雨中心，降水丰沛，且多强暴雨过程。每年的4月底开始，这一地区就进入了雨季，边坡浅层岩土体在经过一个自然年中降雨较少的干旱季节，岩土体中具有泥质物充填的节理、层理面、卸荷节理等地质不连续面的抗剪强度在经过相应的强度自然恢复后，突遇较充沛的降雨时，对滑坡稳定起关键作用的各种软弱面的强度将会突降，由此可导致边坡中某些软弱部位首先发生破

裂，并进而诱发较大规模的滑坡发生。

此外，由于这类岩体裂隙发育，易于接受大气降水补给，呈浅层短途径循环，形成上层滞水，以下降泉形式排泄。5月5日现场观察，滑坡床上有一处下降泉，5月5日晚降雨后，次日滑坡床上的下降泉增加为二处，且水量增大（图1）。由于开挖卸荷作用增加边坡岩体微裂隙的发展，使这类上层滞水有更多的机会与滑体物质接触；反之，水的作用结果又促使了边坡岩体微裂隙的发育及潜在滑动面的形成。这类暂时性的上层滞水往往对潜在滑动带的作用又使得其强度普遍降低。

据了解，4月26日和30日武隆县有降雨，其中30日整天有雨。降雨快速入渗于边坡岩体中，如果边坡排水不利，可以形成静水压力以致于增加潜在滑体的剩余下滑力，并软化具有泥质物充填的节理、层理面的抗剪强度。降雨的这两方面作用是诱发这次滑坡的直接原因。

3 成因的力学反分析

由前所述，可以看出该崩滑体空间上具备通常意义上的滑坡体几何特征，因而也可以按通常的滑坡力学模型进行分析。

采用“剩余推力法”进行滑坡稳定分析^[1]。该方法的基本假定是：①平面应变问题，②滑体为刚塑性体，③滑动面上的强度符合 Mohr-Coulomb 准则，④滑动面上作用的所有力均以正应力 σ 、剪应力 τ 形式考虑，⑤滑坡条块的推力作用方向平行于该条块的底滑面。其算法原理与广义的条分法相同，即将滑体离散化，并建立各个条块的静力平

衡方程，在满足边界（力）的条件下求解此方程组，最后可得到滑体系统稳定性的表达：稳定系数 F_s 。

图 4 为实测的滑坡纵剖面，以其作为反分析的计算剖面，该图中还包括了在给定不同稳定系数情况下反演得到的对应直立边坡高度 H 所对应的坡形线，这些坡形线对应于后面图 7 中所示的计算结果数据。图 5 是应用 Microsoft Excel Spreadsheet 进行确定性和概率分析所对应的计算配置，所有的计算和反演均可在这张表中方便完成。关于图 5 的计算配置说明参见文献 [1]。

取本文第一作者曾经做过的具有与本段边坡类似工程地质条件的重庆北温泉危岩带岩体结构面抗剪强度试验结果（图 6），作为本滑坡滑动面抗剪强度参数反演的参考，其中， c 与 ϕ 相关结构数据将用于后面的破坏概率分析。假定滑坡发生瞬间滑坡体的稳定系数 F_s 为 1，输入图 6 中抗剪强度参数 c ， ϕ 的均值作为初始值，对该滑体滑动面强度参数进行规划求解，得反演结果为 $c = 150$ kPa， $\phi = 32.8^\circ$ 。可以看出，反演结果与试验结果较为接近（图 5）。以后的计算分析均以此参数为该滑坡滑动面的真实参数。

由图 6 还可以看出，内聚力 c 存在较大分散性。为此，以反算得到的 ϕ 值为基础，分析内聚力 c 的变化对该滑坡体稳定性的敏感性。计算结果表明，滑动面内聚力 c 与稳定系数 F_s 之间呈线性关系： $F_s = 0.0039c + 0.3862$ ($R = 0.9989$)，滑动面内聚力 c 每降低 100 kPa，稳定系数 F_s 就降低 0.39。可见内聚力 c 对该滑坡体稳定性是极为敏感的。因此，只要滑动带含有泥质物，那么，滑坡的稳定性将对降雨反应十分敏感。从现场观察可以看出，节理、裂隙中多含有不定量的风化物夹泥。这也使得降水入渗岩体将极大降低边坡稳定性。另外，未贯通的滑动面上的岩桥对内聚力 c 的影响也较大。

图 7 是固定前述已确定的滑动面位置，仅仅改变直立段边坡顶点的高度变化，用以分析直立段边坡开挖高度变化对潜在滑动面稳定性的影响。需加注意的是，在滑动面固定情况下，直立段边坡高度 H 增高的话，上部人工边坡（坡面）坡度 α 必将减小。图 7 展示了这种情况下，直立边坡高度 H （同时上部人工边坡坡度 α 也随之变化）对边坡稳定性的影响。可以看出，当边坡前部人工开挖

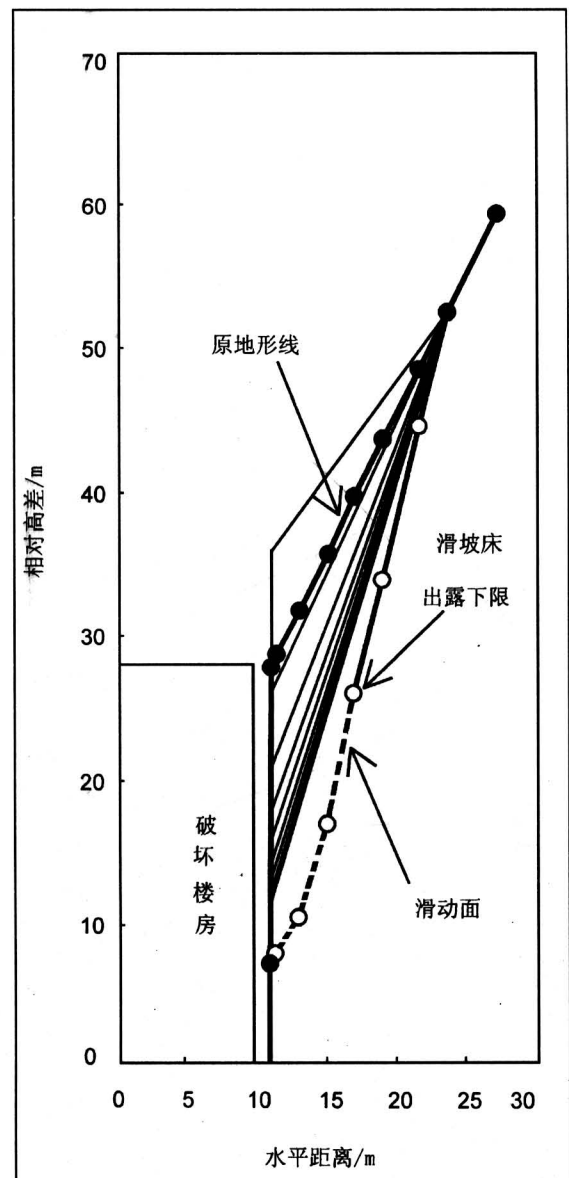


图 4 滑坡计算剖面

Fig.4 Deterministic slip surfaces with given different the factor of safeties located by spreadsheet search, including the practical critical slip surface measured in the field

的垂直段高度小于 20 m（与之对应，上部人工边坡坡度 α 大于 68° 时，或滑体体积小于 $3\ 844\ m^3$ 时），边坡稳定系数将会得到很大提高；相反，直立边坡高度 H 大于 20 m 时，边坡稳定性将会恶化，但此时其对 H 的变化已不敏感。因此，稳定可靠的直立边坡高度 H 应当小于 20 m，而不是滑坡前的 27 m。从这一分析可以看出，原坡形恰处于危险范围内。

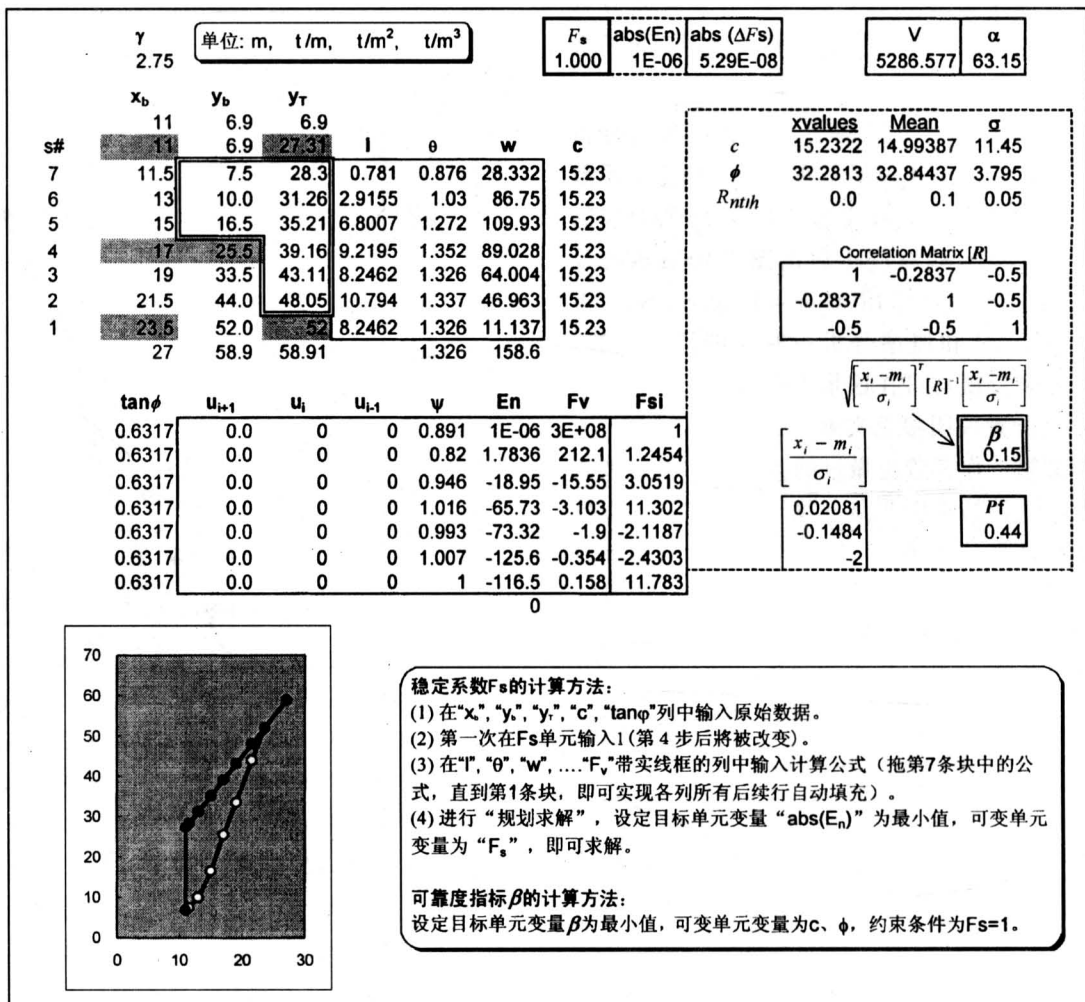


图5 用 Spreadsheet 求解滑坡问题的计算配置

Fig.5 Spreadsheet setup for both deterministic and probabilistic analysis of Wulong landslide by Microsoft Excel

图8为该滑坡各个条块地下水位与自身条块高度之比 $R_{ht/h}$ 与边坡整体稳定系数 F_s 之间的关系。可以看出, 两者呈完全的线性关系; 仅考虑地下水静水压力作用时, 如边坡体 20% 饱水则边坡稳定系数 F_s 将会降低 0.2。显然, 仅仅静水压力的作用, 就会对边坡稳定性产生很大影响。

综合分析, 导致武隆滑坡的主要因素包括: 直立边坡高度 27 m 处于危险坡形敏感区内; 边坡中存在不利的结构面组合; 不良软弱结构面内含有泥质物, 受降雨影响其强度将会降低, 从而降低原有边坡的稳定性; 边坡局部岩体排水不畅, 可导致暂时性孔隙水压力的升高, 从而诱发滑坡发生。

4 原有人工边坡可靠性分析

一般地, 反演所得参数本质上是在平均化假定的基础上得到的, 实际滑动面上的强度参数将会有很大的不确定性。边坡稳定系数大于 1, 并不能绝对认为边坡是稳定的, 关键是要看边坡获得这一稳定系数的概率是多少。因此, 边坡稳定性的正确表达应当以确定性分析基础上的概率分析为宜。因此, 这里将进一步回答原有人工边坡的潜在破坏概率有多大, 或其安全余度有多大。

在可靠度分析中, 一个合理的方法是计算二阶矩可靠度指标。Hasofer-Linder 可靠度指标 β 的矩阵表达^[2-4]为:

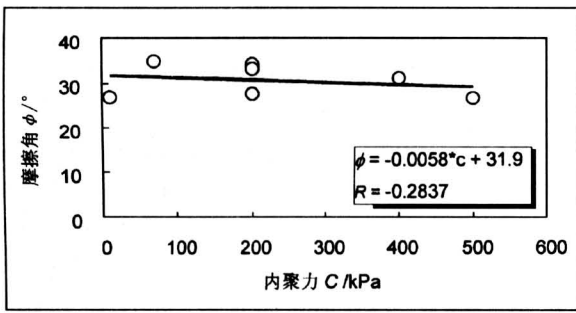


图 6 类似危岩带岩体结构面抗剪强度参数 c 与 ϕ 相关性分析

Fig.6 Relationship between cohesion c and internal frictional angle ϕ for geological discontinuity to the steep slope of North Warm Spring Park, Chongqing, PR China

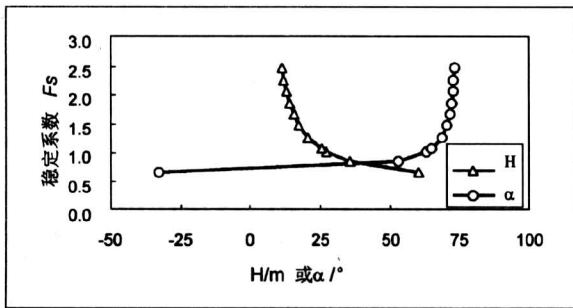


图 7 直立边坡高度 H 、上部人工边坡坡度 α 变化对边坡稳定性的影响

Fig.7 Calculated variation in factors of safety with the height H of the vertical excavated slope of man-made and upper cut-slope dip α

$$\beta = \min_{x \in F} \{ [x - m]^T [C]^{-1} [x - m] \}^{1/2}, \quad (1)$$

式中： x 是代表一组随机变量的向量， m 是随机变量的均值， C 是协方差矩阵， F 是破坏域。上式中的可靠度指标传统上解释为变换后的正态变量空间中原点 to 破坏面的最短距离。

实现式 (1) 的计算相当于取代了座标旋转和对旋转后的座标轴无量纲化，而直接将相关的随机变量简单地视为原始空间中所形成的倾斜椭球^[5]。因此，逐步扩大椭球就相当于逐渐减小概率密度等值线。对于正态变量，最小化方程 (1) 中的 β 相当于最大化多维正态变量的概率密度函数，或者说是找到与破坏面相切的最小椭球相当于求出最可能

的破坏点。

方程 (1) 也可以重写为：

$$\beta = \min_{x \in F} \left\{ \left[\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right]^T [R]^{-1} \left[\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right] \right\}, \quad (2)$$

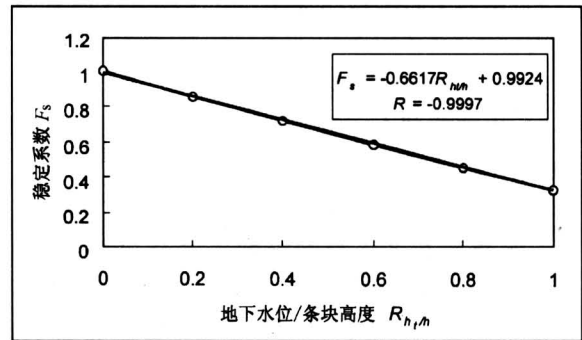


图 8 地下水位高度变化对边坡稳定性的影响

Fig.8 Variation of factors of safety with groundwater table

式中： $[R]^{-1}$ 是相关矩阵的逆矩阵，由于随机变量的相关矩阵 R 比协方差矩阵 C 能更清楚地反映随机变量间的相关结构，因此这里用式 (2) 建立多维椭球。其中，强度随机变量 c 与 ϕ 的均值取反演结果，其相关性取图 6 分析结果。破坏概率 P_f 用下式计算：

$$P_f = 1 - \Phi(\beta), \quad (3)$$

式中： $\Phi(\beta)$ 是标准正态分布函数。

如图 5 所示，取滑动面抗剪度参数的反演结果： $c = 150$ kPa， $\phi = 32.8^\circ$ 作为均值 m_i (即 Mean) 和各自随机变量的初始值 x_i (即 x values)，各自标准差为 $\sigma_c = 11.5$ ， $\sigma_\phi = 3.795^\circ$ 。而高度比 R_{ht}/h 的均值和标准差分别为 0.1 和 0.05。这三类随机变量间的相关结构见图中的相关结构矩阵 $[R]$ 。对该滑体可靠度指标进行目标求解，得最终计算结果为： $\beta = 0.15$ ， $P_f = 44\%$ 。可以看出，原始边坡是高度危险的。

4 结论

通过地质成因和力学分析，得出如下结论：

1) 重庆武隆“五一”滑坡为两组高倾角近乎直交构造节理，近于水平的岩层层面，以及陡倾卸荷节理复合所形成的，具有连续滑动面的崩塌性滑坡现象；

2) 建筑场址选择不当，人工边坡设计直立墙

高度过高 (27 m) 是导致这场灾害的主要原因;

3) 滑坡发生的内因是边坡岩体中存在地质不连续面的不利组合, 以及不连续面内含有泥质物;

4) 滑坡发生前的降雨是诱发因素;

5) 该人工边坡坡形恰处于对稳定性敏感的范围之内;

6) 原人工边坡破坏概率为 44%;

7) 边坡前部人工开挖的垂直段稳定高度应小于 20 m (假定稳定系数 F_s 为 1.25 时)。

致谢 本项工作是在郑哲敏院士直接指导下进行的, 并获得了中科院力学所创新项目经费的支持, 在此深表感谢! 作者也感谢刘广润院士对初稿深入细致的评阅和指导。同时, 作者也感谢张咸恭教授、崔政权勘察大师、李智毅教授、许兵研究员、刘传正研究员、顾小芸研究员、吴树仁研究员对本项工作的肯定和支持。

参考文献

- [1] 王建锋, Wilson H Tang, 崔政权. 边坡稳定性分析中的剩余推力法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(3): 70~78
- [2] Veneziano D. Contributions to second moment reliability [R]. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Research Report No. 1974. R74-33
- [3] Ditlevsen O. Uncertainty modeling: with applications to multi-dimensional civil engineering systems [M]. McGraw-Hill, New York. 1981
- [4] Madsen H O, Krenk S, Lind, N C. Methods of structural safety [M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N J. 1986
- [5] Low B K, Tang W H. Probabilistic slope analysis using Janbu's generalized procedure of slices [J]. Computer and geotechnics, 1997, 21(2):21~142

Preliminary Analysis on the May 1st Landslide at Wulong

Wang Jianfeng, Li Shihai, Yan Lin, Dong Dapeng

(*Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

[**Abstract**] A 9-story brick-concrete building rapidly collapsed due to a landslide in Wulong County, China, on May 1st, 2001. The failure took place at the beginning of the rainy season. This paper discusses a number of scenarios to highlight the background geology, possible causes and mechanisms of the rapid movement, as well as the possible perched water conditions and the influence of man-made changes in the morphology. Of particular importance are preceding some related back analyses. For this, at first, a 2-D rigid-body limit equilibrium analysis is carried out in the present paper considering various related loads applied on the slope. Then, based on the geometric data investigated in the field and assuming the slide mass holding limit equilibrium, the shear strength parameters are back calculated out. The parameters are further used for back analyses of the landslide in order to explore the cause of landslide occurred through changing the cut-slope shape and groundwater table. The presented spreadsheet method is another contribution from this paper. Through the work, the authors conclude that apart from possible defects in the structure, it is certain that the landslide initiated the building collapse. Intense rainfalls must have increased water content, and hence fluidity of sandy clay intersected in the beds and layers of the sandstone. The process of excavation prior to building construction may have participated in the loss of stability.

[**Key words**] Wulong landslide; reliability; back analysis; the residual thrust method; slope stability