

日本滑坡和边坡稳定的设计与处理工程

刘 颖

(水利电力部第九工程局)

本文就日本的天然滑坡和开挖边坡(或天然陡斜地)的主要问题,综述其稳定对策和设计。日本列岛处于欧亚大陆和太平洋之间的岛弧,其地质构成主要分四部分:(1)古生代到中生代的地向斜堆积物形成的变质或非变质岩层;(2)中生代后期海陆相堆积物和火山岩、花岗岩等;(3)新第三纪至第四纪火山喷出岩或火山碎屑岩类;(4)冲积层。环岛弧尚有地震带和火山带分布,地质构造复杂。兼以近代山地开发利用等人为活动,滑坡较多。

一、滑坡防止计划的制定

防止计划的制定,应使滑坡灾害减轻或防患于未然。对滑坡的影响范围和紧迫程度进行研究,以确定每项处理对策相应的计划安全系数、方法、规模和施工安排。日本的滑坡规模平均20公顷左右,通常分为若干片区处理。一般较大规模的滑坡,往往需数年的时间。正确地划分区段和选择关键地段,决定有效的对策和顺利地实施计划,进行先期处理是至关重要的。若定案有误,则使煞费苦心的工程由于其它地段的滑动牵连而前功尽弃,起不到应有效果。必须使确定的计划方案在实施后使整个滑坡区域的安全度得到提高。考虑到施工中和施工后滑坡区域环境和地下水活动状况的变化,可能会有修正原计划的必要。还要在施工中和施工后应有计划地监测以保证对策计划的实际效果。

处理工程效果判定:排泄地下水使滑动面的间隙水压降低程度;抗滑桩断面(存在的强度)能承受附加的抗滑能力。在计划中对各种处理效果都应有确认原则。无论是孔隙水压力或附加抗滑能力都是处于地下状态,直接观测尚有困难。日本大多用地下水位观测了解孔隙水压力大小,用岩体内的倾斜计观测滑坡盛衰状况。滑坡的变形是很缓慢的,观测成果在短时间内,或一时中止都容易发生误差,至少应有一年以上的细心观测判定时间。

二、滑坡处理的设计安全系数 F_{SP}

为确保滑坡达到某种程度的安全度,应采取相应的处理工程标准。现场临界安全系数 F_s 是指滑坡体刚好处于临界平衡稳定状态时的安全系数。一般在滑坡稳定分析中假定以 $F_s=1$ 来考虑。基于现场临界安全系数考虑到滑坡的重要性,将现场临界安全系

*本文系作者赴日考察后编写—编者注。

数增加适当比例，以达到如上预期目的的处理措施计划。如果因人为活动原因发生滑坡，使安全系数降低，应采取处理工程（控制法和阻止法），保证使其回复到与原地形同等程度的安全度。

以往道路开挖或堆填土所造成的滑坡实例调查分析表明：施工前原地形临界安全系数假定 $F_s = 1$ ，后因边坡下部开挖或上部堆土，若边坡安全系数降低 5%，即安全系数降低到 0.95 以下，这样发生滑坡是很多的。如滑坡处于极限平衡状态采取坡脚堆压土的应急措施，假定原边坡地形的安全系数 $F_s = 1$ ，坡脚压土后，安全系数可望增加大约 5%（即安全系数达到 1.05），移动量将会急剧减少。

从地形变化观点看待滑坡或边坡稳定时，安全系数 $\pm 5\%$ 的变化范围是表示移动或停止的界限值。对于滑坡处理措施计划，用安全系数 1.05 决定工程数量的最低限目标，仅能确保大致的安定度。安全系数提高 5% 也不一定能使滑坡完全停止，若边坡条件变化和气象异常时还会发生再移动。从滑坡状况对地区影响的重要性等综合考虑，必须将设计安全系数提高到 1.10~1.15。

考虑到滑坡机制的复杂性和滑动面分析结果未必百分之百正确，究竟达到哪种程度的设计安全系数就能完全防止滑坡是难以断言的。从经济的可能性考虑，日本学者的研究和工程实践认为：一般设计安全系数上限在 1.25~1.30 下限在 1.05 范围为好。

三、滑坡稳定分析

1. 作分析断面 分析断面以主测线（断面）为代表，必要时辅以副断面分析作参考。沿主测线断面作成地质剖面图，将推测的滑动面和裂缝位置等标记在图上。地质剖面图必须是在钻孔岩心和其他调查结果充分研究基础上决定的。断面图的推测有误，可能使根据设计安全系数采取处理措施的工程量不足，则滑坡不能稳定；反之，处理措施工程量过大又使投资浪费。

2. 稳定分析 稳定分析计算出滑坡所具有的推力和阻滑力，确保预先决定的设计安全系数所需要的处理工程规模和数量。

一般用垂直条分法，由下面公式分析。日本学者认为滑动面不规则形状的情况下，Janbu 法等是适用的。安全系数为：

$$F_s = \frac{\sum \{(N-u)\tan\phi\} + c\sum l}{\sum T}$$

这种方法系 Sweden 式，经过 Fellenius 发展，滑坡土体用垂直的平行线分割成细条进行计算。

3. c 、 ϕ 的取值 土质强度系数 c 、 ϕ 值原则上是参考滑坡形态和土质状况由 c - ϕ 图设滑坡处于临界状态下的安全系数 $F_s = 1.00$ 来确定。

滑坡的地质结构极为复杂，沿滑动面的强度也变化多样，在有限地点采取的试样进行室内土质试验和现场试验结果作为平均的滑动面强度是有风险的。对某一强度试样在滑动面的分布位置、在哪个位置占多少百分比的分析是必要的。为此，欲求出滑动面的

平均土质强度，根据其滑动面分析的临界安全系数用反算法求出 c 、 ϕ 值。

通常、当滑坡刚刚好保持稳定状态，如果因地形、地下水稍微变化很容易引起再活动，临界情况下假定 $F_s = 1.00$ 是可能的。当 $F_s = 1.00$ ，稳定分析式 c 和 ϕ 是一次式，对每一个滑动面都能得到一个 c - ϕ 图。由图上即可求

出其他值。只要有合适的试样，由土质试验求出 c 、 ϕ 值中的某一个值，从图中即可求出另一个值。经验表明，由于滑动面的粘着力 c 值与滑坡层厚有关。若缺少适当试验资料时，可由表 1 中定出 c 值为参考，再由图中求出相应 ϕ 值。

表 1 滑坡层厚与滑坡面粘土的粘着力

滑坡的垂直层厚 (m)	粘着力 c (kN/m^2)
5	0.5
10	1.0
15	1.5
20	2.0
25	2.5

四、滑坡的防止工程

根据滑坡的范围、深度、规模的推断情况和地质调查来研究和确定处理对策。最重要的资料是作出地质断面图、平面地质图，据此来设计处理方法和计算安全系数。滑坡的防治措施和边坡的稳定方法主要分为控制法 (control works) 和阻止法 (prevention works)。

控制法 是指根据滑坡地形、地质、地下水等变化状态使其运动停止或缓和为目的所采取的工程措施。将构成滑坡发生的诱因的地表、地下水排除，或使滑动面粘土的土质强度改良、边坡平衡回复等。

阻止法 是采用阻止建筑物使滑坡运动的一部份或全部阻止，即用外加力增加抗滑动自然力的工程措施。措施为，控制工程：地表水排除工程（水沟、防止浸透）；地下水排除工程（浅层地下水，如明渠、暗渠、水平钻孔、地下水遮断，深层地下水如水平排水孔、集水井、排水隧洞）；压坡（压重）；河川结构（堰堤、固床、水制、护岸）；阻滑工程：桩、深基础、锚索、挡土墙、钢筋混凝土框架。

下面仅将其中几种主要工程措施的使用条件和作用简述如下。这些主要措施在日本的滑坡处理和人工开挖高边坡稳定对策中均有普遍的应用。

1. 削坡（减载） 将滑坡体上部土体挖除，是滑坡或边坡稳定处理对策中确实可靠的方法之一。图 1 阴影部份为日本龟の瀬滑坡在上部采取的削坡。采用这种方法时，正确把握滑坡范围是至关重要的。龟の瀬滑坡全部面积 53 公顷，滑坡体层厚 30~40 m。属于风化岩（安山岩、角砾凝灰岩）滑坡。全部削坡约 170 万 m^3 。

2. 压坡堆土（压重） 在滑坡末端进行堆土压住坡脚。当压坡段临近河水面时，做好表面保护以防止水流冲刷和水位变幅影响。

3. 地表水的排除 由于降雨引起的滑坡情况是很多的。为了不使雨水渗入滑坡体内，修造排水沟渠，使坡面上降水集中引出滑坡体区域以外。区域以外的水亦不让进入滑坡体范围内。

4. 地下水的排除 浅层地下水，用水平钻孔（孔径 ϕ 66 mm、向上 5°）做排水孔，排入沟内引走。

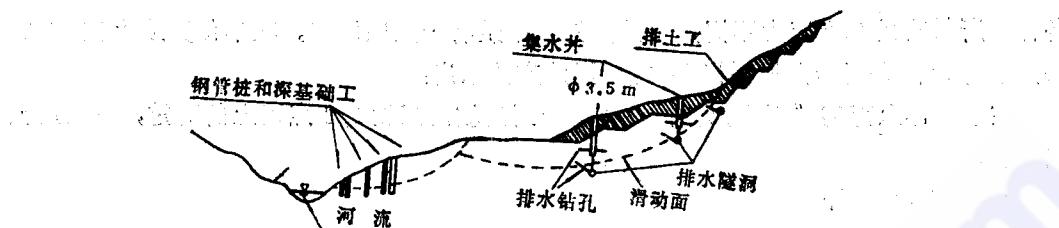


图 1 日本龟の瀬滑坡防止工程

深层地下水，日本相当普遍地采用集水井和排水隧洞（如图 2 所示）。当地下水层厚度较大，或含水层数较多时，也采用立体排水系统。如龟瀬滑坡分层布置排水隧洞由洞内向不同高程方向钻排水孔。将地下水引入洞内再排至滑坡体外。一般在使用集水井施工深度困难和滑坡体范围大的情况下用排水隧洞是有效的。排水隧洞应设置在滑坡体下坚硬的稳定岩层中。水平钻孔一般直径 $\phi 66 \sim 100\text{mm}$ ，钻孔深度 $50 \sim 60\text{m}$ 。孔中插入花管（焊接管或聚乙烯塑料管）。



图 2 集水井工程剖面

5. 集水井 当滑坡规模较大，水平排水钻孔要达到含水层需钻深 100m 以上时，则开挖直径 $3 \sim 5\text{m}$ 的集水井用来排水。若在集水井内的排水钻孔长度仍超过 100m 时，中间可再增设中继集水井。

集水井间隔不大于 100m ，直径多用 3.5m ，深度在 $30 \sim 50\text{m}$ 之间。井内布置水平集水钻孔（孔径 $\phi 66\text{mm}$ 以上、长度 50m ）和排水钻孔（孔径 $\phi 80 \sim 100\text{mm}$ 、长度不大于 100m ）。井底在滑动面以上 2m 。滑坡面积较大时平面上可以布置多个井点。集水井直径应考虑土质、岩层和钻孔作业条件。井内钻孔位置、方向、间距，由地质和地下水调查结果确定。

6. 深基础 在滑坡面较深的情况下，如地质条件恶劣，通常的钢管桩施工困难，当滑动土压力大，用铁管桩很难确保所定的设计安全系数 F_{SP} 值时，将采用深基础。井壁四周在开挖过程中，日本采用特制的波型钢衬圈板支护，多用人工风镐开挖提升吊斗出渣。每下挖 1m 左右深度即用人工安装圈板支护井壁。

深基础自身的安全条件：（1）应具有足够的抗剪强度；（2）能承受由水平力产生的弯矩；（3）深基础部位的基岩不能被剪坏。深基础直径多用 $2 \sim 3.5\text{m}$ 。

深基础设计时，每单宽滑动土体所负担的阻滑力由下式求得：

$$P_R = F_{SP} \cdot \sum T - \sum \{(N-u)\tan\phi + cl\}$$

式中 F_{SP} 是设计安全系数； P_R 是深基础单宽承受的阻滑力； u 为空隙水压 (kN/m) 其它为稳定分析中的参数。

7. 桩 桩应穿过滑动面固定在稳定的岩基上，以阻止滑坡土体的移动。用它自身的抗剪强度附加在滑动面上从而提高滑坡的安定性。但是，实际桩的阻滑效果在很多场合下都取决于桩自身的强度。即根据桩的施工位置，可分为抗剪桩和抗弯桩两种。由于

各种桩所具有的允许应力不同，桩的阻滑效果是有一定限度的。在单位宽成上桩的必要阻滑力 P_R 可用同深基础计算公式相同的方法求出。

在滑坡体上部的“引张部”，桩将承受到滑坡面深度 $2/3$ 点以上的荷重，形成所谓抗弯桩。

抗弯桩应满足下式：

$$\sigma_{\max} > \frac{V}{A_p} + \frac{M_{\max}}{\tau_p}$$

式中 σ_{\max} 为钢管的允许弯曲应力； V 是桩的轴力； M_{\max} 是桩的最大弯矩； A_p 是桩的钢材部份断面积； τ_p 是桩的钢材部份截面系数。

在滑坡体中部以下滑坡体坡度较缓的部位，即滑坡体的“压缩部”设置桩时，它主要承受滑动面上的剪力。抗剪桩应满足下式：

$$S_{\max} < \tau_p \cdot A_p + \tau_s \cdot A_s$$

式中 S_{\max} 是桩的最大剪力； τ_p 是钢管的允许应力； A_p 是钢管的断面积； τ_s 是加强钢材的容许剪力； A_s 是加强钢材的断面积。

抗剪桩根部嵌入基岩的深度，考虑基岩强度情况采用桩全长的 $1/4 \sim 1/3$ 。一般对第三纪岩层的泥岩和凝灰岩，采用桩全长的 $1/3$ 。若为坚硬的结晶片岩、砂岩、花岗岩、安山岩时用 $1/4$ 。

抗弯桩根部嵌入基岩深度，按弯矩的第一个零点长的 1.5 倍以上，用下面公式计算

$$h_b > 1.5\pi/\beta \quad \beta = 4\sqrt{\frac{Kd}{4EJ}}$$

式中 h_b 为嵌入深度； K 为滑动面下部的横向岩层系数； d 为桩外径； E 为桩材弹性系数； J 是桩的断面惯性矩。

为了增强桩的自身抗剪断能力，日本多采用复合型断面的钢管桩。即在钢管中插入 H 型钢、二重管或其它补强材料等（图 3.4）。

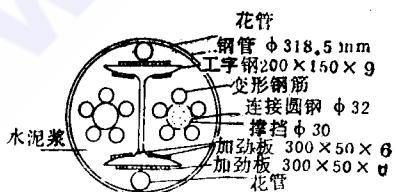


图 3 滑坡用钢管桩



图 4 复合型钢管桩

日本在滑坡处理工程中多采用钢管桩，工业技术也规格定型化。造孔机械是钢管桩施工时的关键设备，其种类很多，能在覆盖层、崩积土层、风化或新鲜岩层中造孔。为了防止在穿过滑坡体的覆盖层、崩积土层钻进时坍孔和保护孔壁，钻进时均用护壁套管，套管可随钻深向下延伸。钻孔机械均能用回转和冲击两种方式工作。

8. 锚索 滑坡处理中，锚索的应用也非常普遍，设计原理和施工实践均较成熟，是一种通用的防止措施——阻止法。

边坡表面的稳定保护方法，多在坡面上布置格状钢筋混凝土框架，锚索（或锚筋、锚杆）则固定在框架垫梁上，并对坡面施加一定的预应力使其稳定。

锚索每m单宽施加边坡表面的力可达1 000 kN以上，尤其是多采用预应力锚索。使用材料主要是预应力钢束（PC钢线）、PC钢绞线、和变截面钢筋等。钻孔直径为Φ76~116mm，现多用Φ100~145mm。

锚索多用于处理挡土墙防倾加固、滑坡、矢板式护岸反面加固、急陡坡开挖、稳定加固、坝基开挖高边坡处理、公路边坡处理等。1969年至今多使用Φ100~145mm的套管钻头式旋转钻机可对一切岩层均能顺利钻孔，特别能在崩坏性地层中钻锚索孔或排水孔等。在钻孔中防止坍孔和堵孔，尤其在穿过滑坡体崩碎岩层时，使用护壁套管钻进。这是日本较为成功的二重管钻进方法。

9. 钢筋混凝土框架 高边坡开挖后，坡面采用预制或现浇混凝土，以及不用模板的喷混凝土方法作成格状框架敷设坡面上。框架内填铺块石或植被，用以防止坡面风化、侵蚀和崩坏剥落，其本身有防止坡面滑动的效果。在框架交叉部分，有锚杆或锚索加固。框架断面20~50cm，按弹性支承集中荷载设计。

五、边坡稳定处理

边坡分为人工开挖边坡和天然边坡（日本称急陡斜地）的稳定问题。

边坡稳定分析研究主要是稳定解析、危险安全度判定、崩坏形态的假定、处理工程施工等。日本是按三种方式进行：（1）用以往经验和实际形态对照标准坡度准则进行稳定性分析（表2）；（2）根据现场调查研究其稳定性；（3）用计算分析其稳定性。

表2 标准坡度表

土 质		开挖坡高	坡 度
硬岩			1:0.3~1:0.8
			1:0.5~1:1.2
			1:1.5~
砂质土	密实的	5m以下	1:0.8~1:1.0
		5~10 m	1:1.0~1:1.2
砂质土	不密实的	5m以下	1:1.0~1:1.2
		5~10 m	1:1.2~1:1.5
碎石，或夹块石砂质土	密实的，或粒度分布均匀	10m以下	1:0.8~1:1.0
		10~15 m	1:1.0~1:1.2
粘质土和粘土		10m以下	1:1.0~1:1.2
		10~15 m	1:1.2~1:1.5
夹块石或卵石粘质土		0~10 m	1:0.8~1:1.2
		5m以下	1:1.0~1:1.2
		5~10 m	1:1.2~1:1.5

“急陡斜地”多发生在深成岩类之中，且地形大于 30° 度的坡地。发生崩坏的占全部滑坡的30.9%。突发性很强，且开始迹象很少。移动速度在 $10\text{m}/\text{d}$ 以上，常与降雨有关。基于已有经验和资料来研究“急陡斜地”稳定问题是一般的方法，但也是不可缺少的方法。对照已发生的崩坏实际形态进行对比研究，参照表2的标准初步给定坡度，结合地质地形条件，现场勘查和钻孔勘探资料，对形成“急陡斜地”进行成因解释。按上述两点假定滑动面，再用滑弧法计算安全系数。由于边坡是非均质各向异性，不可能进行精密计算。对重要的边坡和“急陡斜地”稳定分析要用有限元方法计算。

日本对边坡稳定处理设计主要考虑的原则：(1)最少限度地清除不稳定岩体；(2)边坡形态改善，参照表2削缓边坡；(3)开挖削坡后，部分不稳定部位设置阻滑工程；(4)边坡表面防止风化、侵蚀和剥落崩坏需进行防护处理工程；(5)受地下水影响时设置排水钻孔；(6)防止边坡以外的地表水进入本区域；(7)技术经济工期比较。

由于边坡崩坏成因、形态和经济性不同，防止处理工程计划仅采用某几项实施。其中，开挖削缓边坡的处理方法是一项很重要的措施。边坡削坡后的表面保护，主要是喷混凝土或砂浆、铺杆锚索加固、钢筋混凝土框架和绿化植被工程。要防止坡面侵蚀风化、崩坏失稳和地表水渗入。日本的朝日小川坝、二濑坝和栗地坝，都是因坝基开挖引起了高边坡稳定问题。二濑坝，坝高95m，系混凝土重力坝。坝基开挖左岸发生滑坡，在上部多处发生裂缝，最大移动量 $133\text{mm}/\text{d}$ 。从坝体工程安全考虑，边坡上部进行开挖减载和钢管桩加固，使边坡处于稳定。

东西关水电站简介

东西关水电站位于嘉陵江中游武胜县境内，是一个电、航结合的水利工程。该工程系对嘉陵江在东关附近以裁弯取直方式进行开发（河道长22.6km，河湾颈部直线距离仅420m，天然落差7m）。为了利于航运，电站渠道与船闸分开布置。

坝址以上控制流域面积 77299km^2 ，占嘉陵江干流部分的92.4%。坝址处多年平均流量 $879\text{m}^3/\text{s}$ ，年水量277.2亿 m^3 ，主要集中在6~10月，占年水量的74.24%。武胜水文站（控制流域面积 78850km^2 ）历年实测最大流量 $289000\text{m}^3/\text{s}$ ，最小流量 $115\text{m}^3/\text{s}$ ，调查历史最大洪水流量 $38100\text{m}^3/\text{s}$ 。五十年一遇洪水流量 $30500\text{m}^3/\text{s}$ ，五百年一遇洪水流量 $41700\text{m}^3/\text{s}$ 。流域内植被覆盖率低，是长江各大支流中水土流失较严重的地区之一，致使电站入库泥沙较多，多年平均含沙量 $2.71\text{kg}/\text{m}^3$ ，多年平均输沙量7470万t，几乎全部集中在汛期（5~10月）占多年平均输沙量的98.7%；推移质年输沙量约9.6万t。

坝址区岩层属上侏罗纪重庆统砂溪组砂岩、砂质粘土岩，岩层平缓，没有大的构造断裂。砂岩湿抗压强度 $500\sim700\text{kg}/\text{cm}^2$ ，摩擦系数 $0.56\sim0.6$ ，砂质粘土岩湿抗压强度 $150\sim200\text{kg}/\text{cm}^2$ ，摩擦系数 $0.3\sim0.44$ 。坝址处河床覆盖层一般深为5~6m，基岩为砂岩，厚达11.5m，较完整，可以满足建坝要求。

工程所需的各种天然建筑材料丰富，卵砾石、土料、石料可就近开采（上、下游1~10km）；砂料虽有一定数量，但其质量不够理想。

库区无漏水通道，也无重要矿藏、大型企事业单位和公路受淹。当正常蓄水位248.5m时，回水至青居街，回水长度50余km，水库仅淹没常年洪水位以下的河滩地约4600亩，库区居民搬迁很少（约260人）。