

目 录

摘要	2
前 言	3
1. 工程地质条件	4
1.1 工程概况	4
1.2 地层岩性	5
1.3 地质构造	6
1.4 场地气象及水文条件	6
1.5 坝体现状	7
1.5.1 坝体土描述	7
1.5.2 存在的问题及工程地质评价	9
2. 边坡稳定性分析基本理论	10
2.1 概述	10
2.2 条分法分析原理	11
2.2.1 瑞典条分法	11
2.2.2 简化毕肖普法	12
2.2.3 简布法	14
2.2.4 摩根斯坦——普莱斯法	16
2.3 SLIDE 边坡稳定性分析计算原理	21
3. 坝坡的抗滑稳定分析	23
3.1 计算剖面的选取	23
3.2 工况选取	23
3.3 计算参数的选取	24
3.4 坝坡稳定计算	26
3.4.1 稳定计算步骤	26
3.4.2 计算图表	26
3.5 计算结果分析	30
4. 结论及建议	32
4.1 结论	32
4.2 建议	32
参考文献	34

城子水库大坝坝坡稳定性分析

摘 要

边坡稳定性分析的主要任务是通过对边坡的岩土工程条件及边坡稳定系数的分析，评价边坡的稳定性，并提出解决岩土工程问题的方法和建议。边坡稳定性分析要坚持与施工紧密结合，贯彻于工程建设的全过程，确保工程安全施工。

山东省费县城子水库为一座小一型病险水库，论文主要论述了现状大坝坝坡稳定性情况。文中采用刚体极限平衡法分析其抗滑稳定性，选取坝体最高横剖面 0+150 剖面与一般性剖面 0+300 剖面，介绍了如何概化模型，工况的选取，详细介绍了参数的选取，通过计算得出在不同工况下迎水坝坡，背水坝坡的具体的安全系数。在此基础上，分析了大坝的稳定性，对比不同方法的计算结果，论述各结果异同并阐述其原因。最后得出大坝的病险程度，提出了对该边坡的稳定性评价与除险加固建议，为今后该水库的运行管理和除险加固打下良好的基础。

论文利用 Rocscience/slide 软件，采用了 Fellenius 法、简化 Bishop 法、Janbu 法和 Morgenstern-price 法计算了稳定渗流、水位骤降、地震荷载等工况下的安全系数，文中对此四种方法的假设及适用条件等作了详细介绍。

关键词： 稳定性分析 条分法 安全系数

The dam slope stability analyses of ChengZi reservoir

Abstract

The main purpose of stability analyses of slopes is to evaluate the stability of slopes and put forward the methods and suggestions to resolve the geotechnical engineering problem through the analyses of the geotechnical engineering condition and the stability factor. The stability analyses of slopes should be closely related to constructions and carried out through the whole process of construction, thus insure the safety of engineering constructions.

The paper mainly discussed the dam slope stability of the damaged dam—ChengZi dam, which located at FeiXian country of ShanDong province. The highest horizontal profile 0+300 and the typical profile 0+150 are picked up as study object . The stability analyses is carried out by adopting “Rigid body critical equilibrium analysis”. The simplify of models, the determine of use conditions and corresponding parameters are all presented .Then the safety factors under various conditions of the dam slope are obtained by calculating .On the basis of calculation , the paper analyzes present slope stability and makes a comparison on the safety factors which are obtained by using different methods of slices . Finally the paper shows us the damaged degree of the dam . Then the paper puts forward evaluations and suggestions, which is very useful for operating , managing and remedial of the dam.

The calculating of the safety factor under steady seepage 、 rapid dropdown 、 under seismic load and other conditions of the dam slope is carried out by using the software “Rocscience/slide” in term of Fellenius method 、 simplified bishop method、 Janbu method and Mogenstern-price method. The assumptions and requirement of the above four methods is presented in details.

Key Words: stability analyses method of slices safety factor

前言

随着社会的进步和国民经济的发展，人们对大坝的安全，尤其是五六十年代建成的土石坝的运行安全愈来愈关注。这些大坝在国民和社会发展中已经而且正在发挥着重要作用。但是，由于各种原因（如当时的水文资料的短缺、筑坝技术的限制、施工质量的影响、自然环境的作用等），加之运行年龄已达 40~60 年，因此，许多大坝存在不同程度的安全隐患，大坝安全问题越来越受到国家的重视和人们的关注。一些调查资料显示，我国 20 世纪 50~60 年代修建的许多土石坝已成为“病坝”或“险坝”，由此造成的经济损失数以亿计，亟待进行安全论证和安全改造。

已建的土石坝存在着不同程度的渗流破坏、滑坡、裂缝、地震液化等问题。其中滑坡主要是在岩土体边界上产生剪切破坏的结果。一定抗滑力时，滑动力增加到等于或大于此一定力抗滑力时，就产生滑坡。另一方面，一定滑动力时，抗滑力减小到等于或小于此一定滑动力时，就引起滑坡。重力与地震力都属于滑动力，所以滑坡产生的外因主要是重力，但偶然的地震力也是产生滑坡的因素。滑坡的外部条件有：水的作用、坝坡尺寸、坝坡中的马道、坝坡内的软弱土层、坡脚的不合理开挖、坡顶加载、地震等。滑坡的内部条件与组成坝坡的坝料性质有关。

本论文主要通过山东省费县城子水库大坝坝体稳定性分析实例，论述了目前边坡稳定性分析中常用的计算方法，以及 Rocscience / slide 在边坡稳定性分析中的应用，在分析计算结果的基础上，对坝坡稳定性做出了评价，并提出了自己的一些在加固过程中建议。

1. 工程地质条件

1.1 工程概况

城子水库位于沂河系沭河支流，费县方城镇丁旺村南，水库于 1965 年 4 月建成，控制流域面积 6.28 平方公里，总库容 248 万立方米，其中兴利库容 150.4 万立方米，灌区设计灌溉面积 0.4 万亩，有效灌溉面积 0.3 万亩，实灌面积 0.25 万亩。水库是一座集防洪、兴利、灌溉、养殖等为一体的综合效益型小一型水库，水库可保护下游两个村，0.7 万人口，1 万亩耕地。

1.1.1 工程现状

水库枢纽由大坝、放水洞、溢洪道组成。

1、大坝：全长 480 米，坝型为粘土心墙砂壳坝，最大坝高 19 米，坝顶高程 161.34 米，坝顶宽 4 米，防浪墙顶高程 162.14 米，大坝迎水坡坡比为 1:2.8，背水坡坡度为 1:3，坝后排水体损坏严重。

2、溢洪道：位于大坝左侧，底宽 32 米，底高程 159.27 米，为开敞式，基础为风化片麻岩,最大泄量 149.5m³/s。

3、放水洞：位于大坝主河槽右边，为砌石无压涵洞，尺寸 0.8×1.2m，出口底高程 144.94 米，洞长 95 米，最大放水流量 2.98 立方米/秒，闸门型式为拉杆式铁闸门，尺寸 Φ60cm，采用 3 吨手摇式启闭机。

1.1.2 枢纽工程组成及主要特性指标

枢纽工程组成及主要特性指标如下表：

表 1—1 枢纽工程组成及主要特性指标

工程等级		IV 级	防洪标准	设计	30 年一遇
				校核	300 年一遇
水 位	死水位(m)	145. 27	库 容	死库容(万 m ³)	2
	兴利水位(m)	159. 27		兴利库容 (万 m ³)	150. 4
	校核水位(m)	162. 11		总库容(万 m ³)	248
大 坝	坝型	粘土心墙 砂壳坝	放 水	断面形式	矩形

	坝长(m)	480	洞	断面尺寸(m)	0.8×1.2
	最大坝高(m)	19		洞长(m)	95
	坝顶宽(m)	4		材料结构	砌石无压涵洞
	坝顶高程(m)	161.34		过水流量 (m ³ /s)	2.98
	防浪墙顶高程 (m)	162.14		闸门型式	斜拉式
	内坡坡比	1:2.8		闸门尺寸(m)	Φ60cm
	外坡坡比	1:3.0		启闭机型号	
溢洪道	堰顶高程(m)	159.27	下游影响	人口	0.7万人
	型式	无控制宽顶堰		耕地	1万亩
	底宽	32		城镇	6km
	泄量(m ³ /s)	149.5		公路	

1.2 地层岩性

城子水库坝基主要由第四系松散层及火成岩组成。第四系松散层主要为沂河组（QY）的砾质粗砂、残坡积粉土质砾砂。火成岩主要为早元古代吕梁期傲徕山超单元松山单元中粗粒二长花岗岩。

1.2.1 第四系地层

根据野外坑探，揭露的第四系地层仅有2层，简述如下：

砾质粗砂（Q4al+pl）：褐黄色，松散，湿～饱和，含少量砾石，砾石成分为石英长石。分布于大坝桩号 0+220～0+320，原主河床及其两侧，厚度 1.0～4.3m，层底高程约为 139.30～142.50m。

粉土质砾砂：褐黄色，松散，湿～饱和，含较多粉粒，局部为砂壤土，混杂风化岩块，局部为砂壤土，分布于大坝桩号 0+040～0+220，原左岸山坡，厚度约 0.3～0.7m，层底高程约为 142.50～156.80m。

参考周围中型水库资料，采用工程地质类比法，坝基砂土层的物理力学指标建议值如下表：

表 1—2 坝基砂土层的物理力学指标建议值

岩土类别	湿密度	含水率	压缩系数	压缩模量	快剪(Q)		固快(R)		总应力(CU)		有效应力(CU)		渗透系数
					C	φ	C	φ	C_{cu}	Φ_{cu}	C'	φ'	
	g / cm ³	%	MPa ⁻¹	MPa	kPa	度	kPa	度	kPa	度	kPa	度	
砾质粗砂	1.78	12.0	0.12	11.0	0	26	0	26	0	27	0	30	4.0E-02
粉土质砾砂	1.87	15.0	0.14	9.9	0	27	0	27	0	27	2	28	8.0E-03

1.2.2 基岩

坝基出露的基岩主要为二长花岗岩：灰白色、浅肉红色，中—中粗粒结构，块状构造，局部弱片麻状构造，主要组成矿物有斜长石、钾长石、石英和少量黑云母。强风化岩石节理裂隙一般发育，但局部由于受韧性剪切带的影响存在囊状风化沟槽，具中等透水性，在大坝桩号 0+040~0+220 段较为明显。

1.3 地质构造

城子水库在大地构造上属鲁中南台隆。由于历次构造运动，特别是燕山运动的作用，分割成许多凸起和凹陷单元，产生了横亘东西的蒙山大断裂。蒙山前倾斜平原被第四系松散堆积层覆盖，库区周围为山脉，高差不大，倾角 15~20°，山脊线相连构成一个相对低洼地带，水库由地表径流汇成。

1.4 场地气象及水文条件

城子水库流域属暖温带季风气候区，具有显著的大陆性气候特征，四季变化明显，光照充足。冬季干冷，雨雪稀少，风向多偏北；春季干燥易发生春旱，风向多偏西；夏季高温潮湿，雨量集中；秋季天高气爽，少雨干旱。多年平均最大风力 7 级，风速 15m/s，多年平均气温在 13.5℃，极端最高气温 39.1℃，极端最低气温为-18.3℃。多年平均降雨量为 819.3 毫米，6 月下旬至 8 月上旬的主汛期约占全年降雨量的 75%，年际间降雨量不平衡，丰水、枯水年比较悬殊，最大年降雨量模比系数为 1.45—1.76，最小年降雨量模比系数为 0.48—0.66，年降雨量变差系数为 0.25 左右。

年平均日照时数为 2532.1 小时，最多年为 2825.2 小时，最少年为 2294.7 小时，年水量蒸发量为 1857.9 毫米，其中以 5、6 月蒸发量最大，12 月和 1 月蒸发量最小。

年无霜期平均为 197 天，最长为 213 天，最短为 178 天。

坝址区地下水按埋藏条件为基岩裂隙水和第四孔隙水两种；裂隙水主要分布在风化层岩石裂隙中，补给来源主要是大气降水，孔隙水主要分布在河床中岩层中，补给来源除大气降水外，还接受基岩裂缝渗水的补给。

1.5 坝体现状

1.5.1 坝体土描述

城子水库坝型为粘土心墙砂壳坝，根据野外坑探、调查了解及室内试验结果，将坝体质量简述如下：

1.5.1.1 心墙土

心墙土料来源主要为第四系残坡积物，坝体土质不均匀，坝体土一般呈黄褐~红褐色，可塑~硬可塑，岩性以砂质壤土为主，含砂量较大，近于砂壤土，含较多中粗砂。填筑质量较差，具中等压缩性，局部为高压缩性土，压实度为 0.78~0.89。

勘察发现大坝桩号 0+000~0+488 段坝体心墙顶部高程 160.05~160.29m 以上为风化山皮土，含较多风化岩块，以粉土质砾砂为主，稍密，混杂砂壤土块，该层土的渗透系数约为 $6.0E-03\text{cm/s}$ ，具中等透水性，造成防浪墙未于心墙紧密结合。

大坝坝体土按《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》防渗体土料质量指标评价如下：

(1)填土为砂质壤土的，其塑性指数、粘粒含量基本符合规范技术要求，但渗透系数不符合规范技术要求，坝体土压实度偏低，不满足规范要求。

(2)填土为粉土质砾砂的，不能做为防渗体。

按《碾压式土石坝设计规范》粘性土填筑标准，坝体土的压实度实测 12 点（样），为 0.78~0.89，均小于 0.97，总体认为填筑质量较差。

1.5.1.2 齿槽

根据调查了解，结合现场查勘，该水库主河床清基较彻底，齿墙位于坝体中部，齿墙填土为砂质壤土，填筑质量一般，分布范围约 0+220~0+320。

左岸山坡桩号 0+040~0+220 段未清基，坝基存在基岩风化残积的粉土质砾砂，含较多粉粒，局部为砂壤土，混杂风化岩块，渗透性稍大；且该层下部为强风化二长花岗岩，由于受韧性剪切带的影响，该段岩石节理裂隙较为发育，强风化带具中等透水性，该段是粉土质砾砂和基岩强风化带共同渗漏。

为防止高水位时该段发生接触冲刷，影响坝体安全，建议对该段坝后坡脚做好反滤处理，也可采取灌浆措施进行彻底处理。

1.5.1.3 坝前区

大坝迎水坡为干砌石护坡，护坡石料为风化片麻岩、灰岩、花岗岩等多种石料，坡比为 1:2.8，砌石宽度在 0.15—0.3 之间，经过 40 年的运行，以及风浪及冰块冲击，很

多块石已风化破碎，经挖坑探明护坡下垫层厚薄不等，甚至有很多地方无垫层，局部沉陷量较大，严重影响坝体质量，不能抗御风浪淘刷，这对工程安全十分不利。

城子水库迎水坡护砌质量较差，不能抵抗风浪淘刷和撞击，对工程安全不利，建议翻修石护坡重做反滤层。

上游砂壳主要为风化山皮土、砂壤土、风化岩混杂的砾质粗砂，黄褐色，局部为灰褐色，湿~饱和，呈稍密状态。

上游砂壳质量评价按《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》（SL 251-2000）附录 A 表 A.1.3 土石坝坝壳填筑砂砾料质量指标评价为：砾石含量、渗透系数基本符合坝壳砂砾料质量要求，但含泥量稍偏高，含较多砂壤土。

综合分析，坝前砂壳颗粒组成、透水性基本符合设计要求，但颗粒组成变化不均一，含泥量稍偏高，呈稍密，填筑质量较差，同时考虑到场地为 7 度区，坝前砾质粗砂的相对密度为 0.37~0.54，小于 0.70，存在液化可能，建议采取工程措施进行加固处理。

1.5.1.4 坝后区

大坝背水坡为草皮护坡，边坡为 1:2—1:3，经过多年运行，整个坝面高低不平，多处沉陷，冲刷破坏严重。

坝后砂壳主要为风化山皮土、砂壤土、风化岩混杂的砾质粗砂，黄褐色，局部为灰褐色，湿~饱和，呈稍密状态。混杂较多块石，局部混杂砂壤土夹层。

下游砂壳质量评价按《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》（SL 251-2000）附录 A 表 A.1.3 土石坝坝壳填筑砂砾料质量指标评价为：砾石含量、渗透系数基本符合坝壳砂砾料质量要求，但含泥量偏高，含较多砂壤土为主，填筑质量一般。

坝脚为贴坡排水体，护坡石因年久失修，毁坏严重，反滤层没有，建议重做排水体。

根据野外坑探和室内实验资料，同时参考周围石岚水库资料，综合分析，提出城子水库坝体土的物理力学指标建议如下表：

表 1—3 城子水库坝体土物理力学指标建议值表

岩土类别	湿密度	含水率	压缩系数	压缩模量	快剪(Q)		固快(R)		总应力(CU)		有效应力(CU)		渗透系数
					C	φ	C	φ	C _{cu}	Φ _{cu}	C'	φ'	
	g / cm ³	%	MPa ⁻¹	MPa	kPa	度	kPa	度	kPa	度	kPa	度	
心墙砂质壤土	1.90	24.0	0.48	3.80	18	14	22	17	25	16	20	18	5.0E-04
坝前砾质粗砂	1.85	12.0	0.52	4.62	0	26	0	26	0	26	0	27	2.0E-02
坝后砾质粗砂	1.80	10.0	0.72	4.15	0	27	0	27	0	27	0	28	8.0E-03
坝顶砾砂	1.85	10.0	0.46	4.32	0	25	0	25	0	25	0	26	6.0E-03

1.5.2 存在的问题及工程地质评价

1、大坝桩号 0+000~0+488 段坝体心墙顶部高程 160.05~160.29m 以上为风化山皮土，含较多风化岩块，以粉土质砾砂为主，稍密，混杂砂壤土块，该层土的渗透系数约为 $6.0E-03\text{cm/s}$ ，具中等透水性，造成防浪墙未于心墙紧密结合。

2、左岸山坡桩号 0+040~0+220 段未清基，坝基存在基岩风化残积的粉土质砾砂，含较多粉粒，局部为砂壤土，混杂风化岩块，渗透性稍大；且该层下部为强风化二长花岗岩，由于受韧性剪切带的影响，该段岩石节理裂隙较为发育，强风化带具中等透水性，该段是粉土质砾砂和基岩强风化带共同渗漏。为防止高水位时该段发生接触冲刷，影响坝体安全，建议对该段坝后坡脚做好反滤处理，也可采取灌浆措施进行彻底处理。

3、大坝心墙填筑土料以砂质壤土为主，顶部为粉土质砾砂，含沙量偏大，近于砂壤土，造成坝体土的渗透性偏大，不满足要求，坝体土的压实度偏低，全部小于 0.97，坝体填筑质量较差。

4、大坝砂质壤土土料质量指标基本符合规范技术要求，但填筑质量较差，渗透系数和压实度不满足要求；坝顶粉土质砾砂不能做为防渗体。

5、坝前砂壳含泥量稍偏高且存在液化可能；坝后砂壳填筑不密实、填料混杂较多土块且存在砂壤土夹层，质量一般。

6、大坝坝体砂质壤土渗透变形类型为流土，粉土质砾砂、砾质粗砂的渗透变形类型为管涌。土的允许水力比降砂质壤土、粉土质砾砂、砾质粗砂分别建议为 0.40、0.12、0.10。

7、水库迎水坡护砌质量较差，不能抵抗风浪及冻块淘刷和撞击，对工程安全十分不利。

8、大坝坝后坡脚排水体质量较差，反滤层不符合要求，建议重做 9、坝基砾质粗砂的相对密度约为 0.36~0.52，呈稍密状态，判为可能液化土，建议加固。

9、坝基砾质粗砂的相对密度约为 0.36~0.52，呈稍密状态，判为可能液化土，建议加固。

10、坝基砾质粗砂渗透变形类型判定为管涌，其允许水力比降建议为 0.10。

11、坝基岩石为二长花岗岩，强风化，大部分地段节理裂隙一般发育，具弱透水性，但局部由于受韧性剪切带的影响存在囊状风化沟槽，具中等透水性，在大坝桩号 0+040~0+220 段较为明显。总体评价坝基工程地质条件右岸较好，左岸较差。

2. 边坡稳定性分析基本理论

2.1 概述

边坡稳定性分析是确定边坡是否处于稳定状态，是否需要对其进行加固与治理，防止其发生破坏的重要决策依据。

边坡发生破坏失稳是一种复杂的地质灾害过程。出于边坡内部结构的复杂性和组成边坡岩石物质的不同，造成边坡破坏具有不同模式。对于不同的破坏模式就存在不同的滑动面，因此应采用不同的分析方法及其公式来分析其稳定状态。目前用于边坡稳定性分析的方法大体上可分为定性分析方法和定量分析方法两大类。定性分析方法包括工程类比法和图解法(赤平极射投影、实体比例投影、摩擦圆法等)，定量分析方法主要有极限平衡法、极限分析法(有限元(FEM)，边界元(BEM)，离散元(DEM)等)及可靠度分析方法(蒙特卡罗法和随机有限元法等)。其他诸如模糊数学分析法、灰色理论分析法及神经网络分析法等还处于研究阶段。根据上述分析方法的实用性和有效性，再结合该边坡工程地质条件，本次设计应采用极限平衡法的条分法进行边坡稳定性分析，因此只对条分法加以详细论述。

极限平衡法是依据边坡上的滑体或滑体分块的力学平衡原理(即静力平衡原理)分析边坡各种破坏模式下的受力状态，以及边坡滑体上的抗滑力和下滑力之间的关系来评价边坡的稳定性。极限平衡法是边坡稳定性分析计算的主要方法，也是工程实践中应用最多的一种方法。就极限平衡法本身，又细分成很多方法。目前工程中用到的极限平衡稳定性分析方法有：Fellenius 法、Bishop 法、Taylor 法、Janbu 法、Morgenstern—Price 法、Spencer 法、Sarma 法、楔形体法、平面破坏计算法、传递系数法、以及 Baker-Garber 临界滑面法等。在工程实践中，主要是根据边坡破坏滑动面的形态来选择极限平衡法。例如平面破坏滑动的边坡，可以选择平面破坏计算法来计算，圆弧形破坏的滑坡可以选择 Fellenius 法或 Bishop 法来计算；复合破坏滑动面的滑坡可以采用 Janbu 法、Morgenstern—Price 法、Spencer 法来计算；对于折线形破坏滑动面的滑坡可以采用传递系数法、Janbu 法等来分析计算；对于楔形四面体岩石滑坡可以采用楔形体法来计算，对于受岩体控制而产生的结构复杂的岩体滑坡可选择 Sarma 等方法来计算，此外还可采用 Hovland 法和 Leshchinsky 法等对滑坡进行三维极限平衡分析。

根据组成边坡的土层性质的不同，可以将边坡分为无粘性土土坡和粘性土土坡，由于组成物质的不同，使得对这两类边坡稳定性的分析要采用不同的分析方法。根据该边坡工程地质条件，边坡属于土质边坡，分析所选取的边坡计算断面的工程地质剖面图，在选取的 2 个计算断面中，滑动面可能为圆弧形滑动面或者复合形的滑动面。在计算边坡稳定性时，本次设计选取的条分法为：瑞典条分法、毕肖普条分法、简布法与摩根斯坦——普莱斯法。以下对各条分法的计算原理进行简要介绍。

2.2 条分法分析原理

2.2.1 瑞典条分法

瑞典条分法适用于圆弧形破坏滑动面的边坡稳定性分析。该条分法将滑动土体竖直接分成若干个土条，把土条看成是刚体，分别求出作用于各个土条上的力对圆心的滑动力矩，然后由

$$F_s = \text{抗滑力矩} / \text{滑动力矩}$$

得出土坡的稳定安全系数。瑞典条分法的力学模型如下图所示：

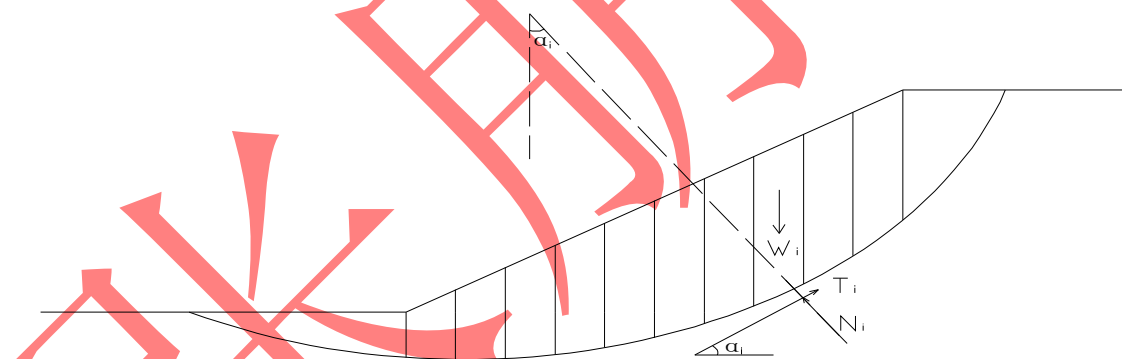


图 2-1 瑞典条分法受力分析

(1) 基本假设

- ① 滑动面为圆弧形；
- ② 不考虑条块间的相互作用；

(2) 力学分析

由图分析可知，滑体任一条块上的作用力有：条块自重 $W_i = g_i b_i h_i$ ；滑面上的抗剪力 T_i 和法向力 N_i 。

根据土条 i 的静力平衡条件有：

$$N_i = W_i \cos \alpha_i \quad (2-1)$$

设安全系数为 F_s ，根据库伦强度理论有：

$$T_i = \frac{1}{F_s} \times T_{fi} = \frac{c_i l_i + N_i \tan j_i}{F_s} \quad (2-2)$$

整个滑动土体对圆心 O 取力矩平衡得：

$$\sum (W_i R_i \times \sin a_i - T_i R_i) = 0 \quad (2-3)$$

将式 2-1 代入 2-2 后再将式 2-2 代入式 2-3 得如下瑞典条分法计算公式：

$$F_s = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos a_i \tan j_i)}{\sum W_i \sin a_i} \quad (2-4)$$

当已知土条 i 在滑动面上的孔隙水应力 m_i 时，瑞典条分法的公式 (2-4) 可改写为如下有效应力进行分析的公式：

$$F_s = \frac{\sum [c_i l_i + (W_i - m_i b_i) \cos a_i \tan j'_i]}{\sum W_i \sin a_i} \quad (2-5)$$

(3) 主要特点及适用条件

瑞典条分法是条分法中最古老而又最简单的方法，该法由于忽略了条件力的作用，不能满足所有静力平衡条件，计算安全系数一般比其他较严格的方法偏低 10%~20%。在滑弧圆心角较大，并且孔隙水应力较大时，计算安全系数可能会比其他方法小一半。该法适用于均质粘性土斜坡形成的圆弧形滑动滑坡。

2.2.2 简化毕肖普法

简化 Bishop 法是一种适合于圆弧形破坏滑动面的边坡稳定性分析方法。但它不要求滑动面为严格的圆弧，而只是近似圆弧即可。Bishop 法的力学模型如图 2-2 所示：

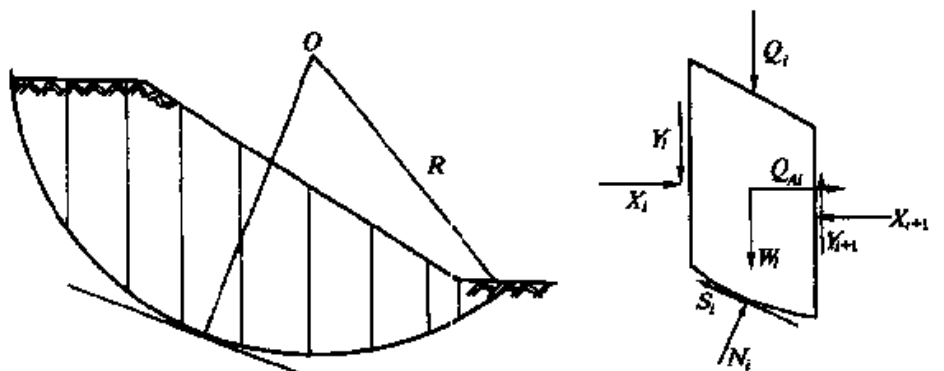


图 2-2 简化 Bishop 法力学模型

(1) 基本假设

①滑动面为圆弧形或近似圆弧形；

②采用简化 Bishop 法时假定条块侧面的垂直剪力 $(Y_i - Y_{i+1}) \tan f_i = 0$ ；

(2) 力学分析

由图 2-2 可知，滑体的条块上作用力有：分块的重量 W_i ；作用在分块上的地面荷载 Q_i ；作用在分块上的水平作用力(如地震力) Q_{Ai} ；条间作用力的水平分量 X_i ；条间作用力的垂直分量 Y_i ；条块底面的抗剪力(抗滑力) S_i ；条块底面的法向力 N_i 。由条块的垂直方向的平衡方程 $\sum \dot{Y} = 0$ 得

$$W_i - N_i \cos a_i + Y_i - Y_{i+1} - S_i \sin a_i + Q_i = 0$$

由库仑破坏准则得：

$$S_i = \frac{1}{F} [c_i l_i + (N_i - m_i l_i) \cdot \tan f_i]$$

由上面两式可得：

$$N_i = \frac{1}{m_i} \left(W_i + Q_i - \frac{1}{F} c_i l_i \cdot \sin a_i + Y_i - Y_{i+1} + \frac{1}{F} m_i l_i \cdot \tan f_i \sin a_i \right) \quad (2-6)$$

式中， $m_i = \cos a_i + \frac{1}{F} \sin a_i \cdot \tan f_i$

由滑体绕圆弧中心 O 点的力矩平衡 $\sum M_0 = 0$ ，得

$$\sum (W_i + Q_i) \cdot R \cdot \sin a_i - \sum S_i \cdot R + \sum Q_{Ai} \cdot \cos a_i \cdot R = 0 \quad (2-7)$$

联合公式且取 $b_i = l_i \cos a_i$ 可得稳定性系数

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m} [c_i l_i + (W_i + Q_i - m_i b_i) \cdot \tan f_i + (Y_i - Y_{i+1}) \cdot \tan f_i]}{\sum_{i=1}^n (W_i + Q_i) \cdot \sin a_i + \sum_{i=1}^n Q_{Ai} \cdot \cos a_i} \quad (2-8)$$

用简化 Bishop 法时，令 $(Y_i - Y_{i+1}) \tan f_i = 0$ ，则

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m} [c_i l_i + (W_i + Q_i - m_i b_i) \cdot \tan f_i]}{\sum_{i=1}^n (W_i + Q_i) \cdot \sin a_i + \sum_{i=1}^n Q_{Ai} \cdot \cos a_i} \quad (2-9)$$

式中， F 为稳定系数； m_i 为作用在分块滑面上的孔隙水压力(应力)； l_i 为分块滑面

长度($l_i = b_i / \cos a_i$); b_i 为岩土条分块宽度; a_i 为分块滑面相对于水平面的夹角; c_i 为滑体分块滑动面上的粘结力; f_i 为滑面岩土的内摩擦角; R 为圆弧形滑面的半径; i 为分析条块序数($i=1, 2, \dots, n$), n 为分块数。

(3) 主要特点及适用条件

Bishop 法稳定性系数的计算考虑了条块间作用力, 是对 Fellenius 法的改进, 计算较准确, 但要采用迭代法。分割条块时要求垂直条分。此方法适用于均质粘性土及碎石堆土等斜坡形成的圆弧形或近似圆弧形滑动滑坡。此法当 $m_i \geq 0.2$ 时计算误差较小。当 $m_i < 0.2$ 时, 计算误差大。

2.2.3 简布法

对于松散均质的边坡, 由于受基岩面的限制而产生两端为圆弧、中间为平面或折线的复合滑动。分析具有这种复合破坏面的边坡稳定性可用 Janbu 法。Janbu 法的力学模型如图 2-3 所示:

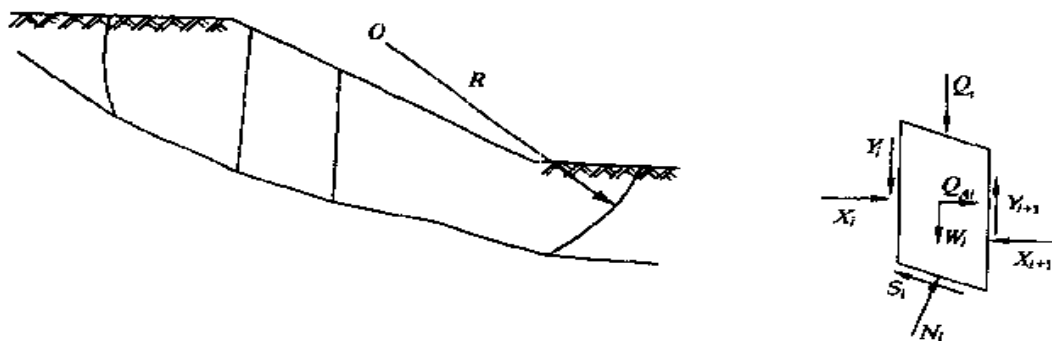


图 2-3 Janbu 法力学模型

(1) 基本假设

- ①垂直条块侧面上的作用力位于滑面之上 $1/3$ 条块高处;
- ②作用于条块上的重力、反力通过条块底面的中点。

(2) 力学分析

由图 2-3 可知, 条块上作用力有: 分块的重量 W_i ; 作用在分块上的地面荷载 Q_i ; 作用在分块上的水平作用力(如地震力) Q_{Ai} ; 条间作用力的水平分力 X_i ; 条间作用力的垂直分力 Y_i ; 条块底面的抗剪力(抗滑力) S_i ; 条块底面的法向力 N_i 。

Janbu 法满足平衡的条件有: ①条块水平方向力平衡; ②条块垂直方向力平衡; ③条块绕分块底滑面点力矩平衡。因此, 由垂直方向力平衡 $\sum \dot{Y} = 0$, 得

$$W_i - N_i \cos \alpha_i + Y_i - Y_{i+1} - S_i \sin \alpha_i + Q_i = 0 \quad (2-10)$$

由水平方向力平衡 $\sum \dot{X} = 0$ ，得

$$X_i + Q_{Ai} - N_i \sin \alpha_i - S_i \cos \alpha_i - X_{i+1} = 0 \quad (2-11)$$

由库仑破坏准则可得

$$S_i = \frac{1}{F} [c_i b_i + (N_i - m_i l_i) \cdot \tan f_i] \quad (2-12)$$

由(2-12)式，(2-13)式和(2-14)式可得

$$F = \frac{\sum \frac{1}{n_{a_i}} \{c_i b_i + [(W_i + Q_i - m_i b_i) + (Y_i - Y_{i+1})] \cdot \tan f_i\}}{\sum \{[W_i + (Y_i - Y_{i+1}) + Q_i] \cdot \tan \alpha_i + Q_{Ai}\}} \quad (2-13)$$

$$n_a = \cos^2 \alpha_i (1 + \tan \alpha_i \cdot \tan f_i / F)$$

若令 $Y_i - Y_{i+1} = 0$ ，并引入修正系数 f_0 ，将(2-15)式改为

$$F = f_0 \frac{\sum \{c_i b_i + [(W_i + Q_i - m_i b_i) \cdot \tan f_i] / n_{a_i}\}}{\sum \{[W_i + Q_i] \cdot \tan \alpha_i + Q_{Ai}\}} \quad (2-14)$$

这个公式称为简化的 Janbu 法其中符号意义同 Bishop 法， f_0 在 $c > 0$ ， $j > 0$ 时可用下列公式求得

$$f_0 \approx (50d/L)^{1/33.6}$$

当 $d/L < 0.02$ 时， $f_0 = 1.0$ ， d 和 L 的取法见图 2-4， f_0 的图解法见图 2-5

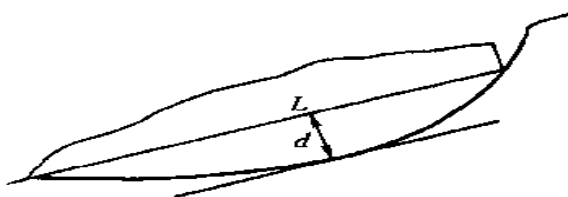


图 2-4 Janbu 法修正系数中 d 和 L 的量测方法

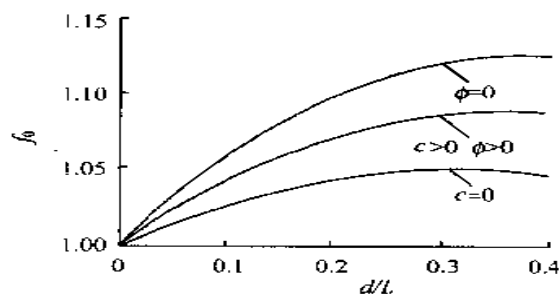


图 2-5 Janbu 法 f_0 与 d/L 的关系曲线

Janbu 法的精确解要利用条块底面中点的力矩平衡条件、滑块条块间侧面力作用线倾角以及逐步递推法来求解，具体步骤如下：

- (1) 假设 $\sum \dot{Y} = 0$ ，即 $Y_i - Y_{i+1} = 0$ ，用(2-14)式求得稳定系数 F_0 (用递推法求取)；
- (2) 假定滑坡块条间作用力合力位于条块侧面滑面以上 $1/3$ 处。并将各条间作用点连

成线，在条块侧面与作用力交点处做切线，求出各作用力的作用点的作用角 α_i 。根据假定条件以及分块的底面中间力矩平衡 $\sum \dot{M}_p = 0$ 。可得

$$Y_i / X_i = -\tan \alpha_{li}$$

即

$$Y_i = -X_i \cdot \tan \alpha_{li}$$

(3) 计算条块侧面竖向作用力，今 $F = F_0$ ，且

$$\Delta Y_i = Y_i - Y_{i+1}$$

$$B_i = (W_i + \Delta Y_i + Q_i) \tan \alpha_{li} + Q_{Ai}$$

$$A_i = [c_i l_i + (W_i + Q_i + \Delta Y_i - m_i b_i)] \cdot \tan f_i / n_a \quad (2-15)$$

$$Y_{i+1} = -\tan \alpha_{li} \cdot \sum (B_i - A_i / F)$$

由此逐步计算 Y_{i+1} 值，且 $Y_0 = 0, Y_n = 0$ 。

(4) 用(2-14)式计算稳定系数 F_1 ，重复第二步且令 $F=F_1$ ，如此往复，直至的精度达到要求为止。

(3) 主要特点及适用条件

Janbu 法计算稳定系数的特点是，计算准确但计算复杂。主要适用于复合破坏面的边坡，既可用于圆弧滑动，也可用于非圆弧滑动，但条块分割时要求垂直条分。

2.2.4 摩根斯坦——普莱斯法

(1) 适用性及假定条件

摩根斯坦——普莱斯法对任意形状的滑裂面进行了分析，导出了满足力的平衡和力矩平衡条件的微分方程，并且假定：

(1) 每个土条均与土坡具有相同的安全系数，当土坡处于稳定状态时，任意土条其滑动面上的抗剪力只发挥了一部分，并于此时的滑动力相平衡，即 $dT_{si} = \frac{dT_{fi}}{K_s}$ ；

(2) 推力（即条间的合力）作用方向与条间面法线的夹角 θ 为某一已知函数，即 $\tan \theta = \frac{X}{E} l f(x)$ ， l 为任意选择的一个常数。

在做了上述两点假定之后，对整个滑动体可建立 $(2n-2)$ 个条件方程，使土坡的稳定分析成为静定问题，可根据整个滑体的边界条件求出问题的解答。

(2) 计算公式

图 2-6 中表示任意形态的土坡，其坡面线、侧向孔隙水应力和有效应力的推力线及滑裂面分别以函数 $y = z(x)$ ， $y = h(x)$ ， $y = y'_i(x)$ 及 $y = y(x)$ 表示，2 为滑动土体中任意微分土条。其上作用有重力 dW ，土条滑动面处的有效法向反力 dN' ，切向阻力 dT ，孔隙水应力 dU_s ，土条两侧有效法向条间力 $E' + dE'$ 及切向条间力 X 、 $X + dX$ ，作用于土条两侧条间面上的孔隙水应力 U 、 $U + dU$ 。

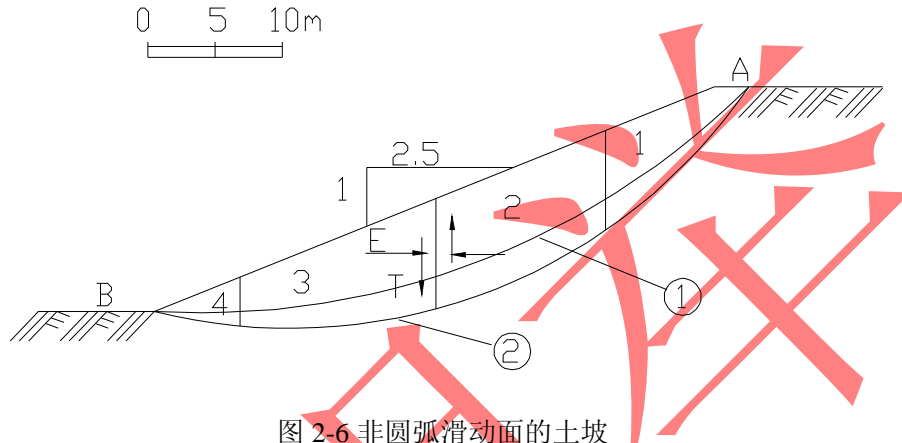


图 2-6 非圆弧滑动面的土坡

对土条底部滑动面的中点取力矩，作用于土条上的各力应满足力矩平衡条件，因 dT 、 dN' 作用于滑动面的中点力矩为 0，故有：

$$E'[(y - y'_i) - (-\frac{dy}{2})] - (E' + dE')[y + dy - (y'_i + dy'_i) + \frac{-dy}{2}] \\ = X \frac{dx}{2} - (X + dX) \frac{dx}{2} + U[(y - h) - (-\frac{dy}{2})] - (U + dU)$$

$$\text{而 } [(y + dy) - (h + dh) + (\frac{dy}{2})] - g dU_s = 0$$

将上式整理化简，并略去高阶微量，且假定 dU_s 的作用点与 dT 、 dN' 的作用点重合（即 $g=0$ ）上式变为

$$X = \frac{d}{dx}(E' y'_i) - y \frac{dE'}{dx} + \frac{d}{dx}(Uh) - y \frac{dU}{dx} \quad (2-16)$$

将作用于土条的各力分别沿土条底部滑动面的法向和切向投影。应满足力的平衡条件，有

$$dN' + dU_s = dW \cos a - dX \cos a - dE' \sin a - dU \sin a \quad (2-17)$$

$$dT = dE' \cos a + dU \cos a - dX \sin a + dW \sin a \quad (2-18)$$

由假定的条件，有

$$dT = \frac{dN' \tan j' + C'}{K_s \cos a} \quad (2-19)$$

同时引用毕肖普关于孔隙应力比的定义，得

$$dU_s = g_u \frac{dW}{\cos a} \quad (2-20)$$

式中 r_u ——孔隙应力比, $r_u = \frac{u}{gh}$, kPa;

u ——土条滑动面中点的孔隙应力, kPa;

h ——土条滑动面中点至坡面的铅直距离, m;

g ——土的重度, KN/m^3 。

将式 2-17、2-18、2-19 和 2-20 代入式消去 dT 及 dN' , 经整理后得到每一土条满足力的平衡微分方程

$$\begin{aligned} \frac{dE'}{dx} \left[1 - \frac{\tan j'}{K_s} \frac{dy}{dx} \right] + \frac{dX}{dx} \left[\frac{\tan j'}{K_s} + \frac{dy}{dx} \right] &= \frac{C'}{K_s} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] + \frac{dU}{dx} \left[\frac{\tan j'}{K_s} \frac{dy}{dx} - 1 \right] \\ &= \frac{dW}{dx} \left\{ \frac{\tan j'}{K_s} + \frac{dy}{dx} - g_u \frac{\tan j'}{K_s} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (2-21)$$

式中 K_s ——土坡的稳定安全系数。

通常 $y = z(x)$, $y = h(x)$ 是已知的, $y = y(x)$ 为所选定的滑动面, 也是已知的, 两个基本微分方程式和式中的 $\frac{dW}{dx}$, $\frac{dU}{dx}$ 和 $\frac{dy}{dx}$ 都可以求出, 同时土性指标 c' , $\tan j'$ 及孔隙应力比 r_u 也是给定的。因此, 需要求解的未知量为 E' , X , K_s 及函数 $y = y_i(x)$ 。

以土条侧面总的法向力 E 代替有效法向力 E' 有

$$E = E' + U \quad (2-22)$$

起作用点位置 y_i 可用下是求得

$$Ey_i = E'y_i' + Uh \quad (2-23)$$

由假定条件 (2) 可知 E 和 X 之间必定存在着一个对 x 的函数关系, 即

$$X = If(x)E \quad (2-24)$$

式中, I 为任意选择的一个常数。

对每一个土条来说, 由于土条宽度 dx 可以取得很小, 使 $y = z(x)$, $y = h(x)$, 及 $y = y(x)$ 的土条范围内也可以视为直线, 所以土条内有

$$y = Ax + B \quad (2-25)$$

$$\frac{dW}{dx} = px + q \quad (2-26)$$

$$f = kx + m \quad (2-27)$$

式中, A 、 B 、 p 、 q 、 k 、 m 均为任意常数, 可通过几何条件及所选的 $f(x)$ 的类型来确定。

将式 2-22、2-23 式代入式 2-16，得到

$$X = \frac{d}{dx}(Ey_t) - y \frac{dE}{dx} \quad (2-28)$$

式中 $K = Ik(\frac{\tan j'}{K_s} + A)$

$$L = Im(\frac{\tan j'}{K_s} + A) + 1 - A \frac{\tan j'}{K_s}$$

$$N = p[\frac{\tan j'}{K_s} + A - r_u(1 + A^2) \frac{\tan j'}{K_s}]$$

$$p = \frac{C'}{K_s}(1 + A^2) + q[\frac{\tan j'}{K_s} + A - r_u(1 + A^2) \frac{\tan j'}{K_s}]$$

取土条两侧的边界条件为 $E = E_i(x = x_i)$ 及 $E = E_{i+1}(x = x_{i+1})$

对式 2-32 从 x_i 到 x_{i+1} 进行积分，可以求得

$$E_{i+1} = \frac{1}{L + K\Delta x}(E_i L + \frac{N\Delta x^3}{2} + P\Delta x) \quad (2-29)$$

利用式 2-29 依次求出各土条的法向条间力 E ，然后根据式 2-14 求出土条的条间力 X ，当滑动土体外部没有其他外力作用时，最后一土条必须满足条件

$$E_n = 0 \quad (2-30)$$

土条侧面的力矩可用式 2-28 积分求出，有

$$M_{i+1} = E_{i+1}(y - y_t)_{i+1} = \int_{x_i}^{x_{i+1}} (X - E \frac{dy}{dx}) dx = 0 \quad (2-31)$$

对最后一土条，也必须满足条件：

$$M_n = \int_{x_0}^{x_n} (X - E \frac{dy}{dx}) dx = 0 \quad (2-32)$$

此时，各推力（条件力合力）作用点的位置可由式 2-29 求出。

为了找到满足所有平衡方程的 I 及 K_s 值，计算时，可先假设一个 I 及 K_s ，然后逐条积分得到 E_n 和 M_n ，如果不为零，再用一个有规律的迭代步骤不断修正 I 及 K_s ，直至式 2-30 式 2-32 得到满足为止。

关于 $f(x)$ 的选择。可利用弹性理论理论的解答算出，也可以在直观假设的基础上指定。摩根斯坦等人的研究认为，对于接近圆弧的滑裂面，安全系数对内力分布的反应是很不灵敏的，往往取完全不同的 $f(x)$ ，得到的安全系数却相当接近。另外，采用本法计

算出的条间力必须满足和理性条件，即条间面上抗剪安全系数大于稳定安全系数及条间面不存在拉力，否则，可通过修正 $f(x)$ 来进行调整。

摩根斯坦——普莱斯是对土坡进行极限平衡分析计算的最一般的方法，如取 $f(x)=0$ ，则相当于简化毕肖普法。取 $f(x)=\text{常数}$ ，则计算结果与斯宾塞法相同。

我国陈祖煜对此法进行了改进。他从静力平衡微分方程出发，结合相应的边界条件，推导出了具有普遍意义的极限平衡方程。

对力的平衡有

$$\int_a^b p(x)s(x)dx = 0 \quad (2-33)$$

对力矩平衡有

$$\int_a^b p(x)s(x)t(x)dx = 0 \quad (2-34)$$

其中

$$p(x) = \frac{dW}{dx} \sin(j'_e - a) + q \sin(j'_e - a) - r_u \frac{dW}{dx} \frac{\sin j'_e}{\cos a} + c'_e \frac{\cos j'_e}{\cos a} \quad (2-35)$$

$$s(x) = \frac{1}{\cos j'_e} \exp\left[-\int_a^x \tan y'_e \frac{db}{dx} dx\right] \quad (2-36)$$

$$t(x) = \int_a^x (\sin b - \cos b \tan a) \exp\left[\int_a^x \tan y'_e \frac{db}{dx} dx\right] dx \quad (2-37)$$

上述各式中， q 为坡面垂直荷载， r_u 为孔隙应力比， b 为土条推力（侧向作用力合力）对 x 轴的倾角， a 、 b 为滑弧两端德 x 坐标 x 微积分变量， c'_e ， j'_e ， y'_e 分别用下列各式求出。

$$c'_e = \frac{c}{K_s}$$

$$\tan j'_e = \frac{\tan j}{K_s}$$

$$y'_e = j'_e = 2a + b$$

显然，在式 2-33、式 2-34 中， $p(x)$ 表示土条底部滑动面上各作用力在滑动面合力垂直方向的分量； y'_e 表示此方向与土条推力（侧向作用力合力）方向的交角，而 $\int p(x)s(x)dx$ 是在土条推力方向上力的平衡， $t(x)$ 则是垂直于土条推力方向的力臂。

在式 2-33、式 2-34 中仅 $b(x)$ 及 K_s 是未知量，可任意假定 $b(x)$ 代入两式中，求出 K_s 。所求出的解答都是满足静力极限平衡条件的解答，但需注意， $b(x)$ 在滑动土体两个端部的土条上是一个确定值，应满足端部土条力的平衡条件。根据陈祖煜的研究，如果端部土条形状式各三角形，且宽度取得足够小的话， $b(x)$ 应等于端点处土坡面的倾角，即端部土条推力应平行于该土条土坡面的方向。

本法在计算求解时，先假定一个 $b(x)$ 的分布形状，代入式 2-33 及 2-34，求出满足方程组的解答 $b^*(x)$ 和 K_s^* 。陈祖煜对该法的电算程序作了改进，加入了相应的功能，使端点的 $b(x)$ 能满足确定的要求，并采用了多种数值计算的技巧，以保证解的收敛性。在求出 $b^*(x)$ 和 K_s^* 后，还可以求出满足式 2-33 即式 2-34 的邻近解 $b^*(x) + \Delta b$ 和 $K_s^* + \Delta K_s$ ，即有意识的改变 $b^*(x)$ 的形状分布，使原来满足合理性要求的解过渡到不满足合理性要求的解，已发现合理性解的边界，然后变换过渡方向，用同样的步骤，求出另一方向满足合理性要求的边界，相应于这两个边界的 K_s 值，就是安全系数的上下限，两者两个值非常接近，就求出了相应于这个滑动面的土坡稳定安全系数的精确解。

2.3 slide 边坡稳定性分析计算原理

本章稳定计算采用的是 roscience 系列中的 slide 程序进行。稳定分析程序 slide 是一款应用极限平衡理论来计算土质或岩质边坡安全稳定性系数的软件。它是一款二维边坡稳定分析程序，可以计算岩土边坡中的圆弧与非圆弧滑动面滑动。Slide 简单易用，可以构建复杂模型，计算快捷。此程序可以在给定边坡的几何特性和物理力学参数条件下，在给定范围内搜索滑弧，从而得出最小安全系数。本程序的特点是：

(1) 程序可以使用于任何土质或岩质边坡，任何复杂的层状结构，其复杂的构成使得它能够分析任何复杂的边坡；

(2) 本程序能够用一系列多种方法考虑计算边坡的稳定安全系数，能够采用自动搜索的功能搜索滑弧，也能够指定任意形状的滑动面的情况下计算其安全系数；

(3) 孔隙水对边坡稳定性的影响可以通过多种方法来考虑，水面线、等压线、总水头线等等，本程序还能计算渗流。

(4) 本程序能够选择切向条间力与法向条间力之间的函数 $f(x)$ ，充分精确的考虑条间力作用对稳定安全系数的影响；

(5) 程序能够考虑多种荷载作用下的稳定性，包括分布荷载、集中荷载以及地震荷载；

(6) 程序能够考虑诸如土钉、土工织物、桩之类的加固措施对安全系数的影响。

利用非饱和渗流场分析结果，考虑非饱和土体基质吸引力的影响，抗剪强度公式为：
$$t_f = c' + (s_f - u_a)_f \tan f' + (u_a - u_w)_f \tan f^b$$

其中：

$(u_a - u_w)_f$ ——破坏时在破坏面上的基质吸力；

f^b ——表示抗剪强度虽基质吸力 $(u_a - u_w)_f$ 所增加的速率。

粘聚力可表示为：

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \tan f^b$$

将基质吸力作为抗剪强度中粘聚力项的一个组成部分考虑进去，提高了边坡的安全系数。降雨时随着雨水的不断下渗，基质吸力不断减小，因此边坡的稳定安全系数会大幅度降低。

slide 软件对于综合问题公式化的特征使得它可以同时用九种方法分析计算简单的或复杂的边坡稳定问题，还可以利用 **slide** 软件对简单或者复杂的滑移面形状改变、孔隙水压力状况、土体性质、不同的加载方式等岩土工程问题进行分析。

slide 软件使用极限平衡理论对不同土体类型、复杂地层和滑移面形状的边坡中的孔隙水压力分布状况进行建模分析，**slide** 提供多种不同类型的土体模型，并使用确定性的和随机的输入参数方法来进行分析，可以对边坡做随机稳定性分析。除用极限平衡理论计算土质和岩质边坡的安全性外，**slide** 软件还使用有限元应力分析法来对大部分边坡稳定性问题进行有效计算和分析。

slide 软件的计算原理可以概括为：

- (1) 极限平衡理论的应用：包括 **Morgenstern-Price**、**Spencer**、**Bishop**、**Ordinary**、**Janbu**、**Sarma** 等，共九种方法；
- (2) 土体强度模型：包括莫尔—库仑准则、双线性准则、不排水准则、各向异性强度准则、切向/法向函数准则及其它各种类型的强度准则等；
- (3) 指定条块间切向-法向力函数类型；
- (4) 孔隙水压力模型包括：**Ru** 系数、压力线、等压力线、水力梯度值、有限元计算的压力和压力水头；通过同心圆栅格和半径线、滑移面前端的块体或全部指定的形状定义的可能滑移面；
- (5) 用针对各种土体特性和加载条件的正态分布函数来进行随机近似分析。**Slide** 软件使用蒙特卡罗逼近法，可以计算除传统的安全系数之外的随机失稳问题。

3. 坝坡的抗滑稳定分析

3.1 计算剖面的选取

大坝沿轴向有两个代表性断面：0+300 断面，0+150 断面，具体断面见附图。坝长约 480m。其中 0+200~0+330 段坝体高度最高，坝高约 19m，坝底宽约 110m。0+150 为一般性断面，坝高约 10m，坝底宽约 85m。两断面大坝迎水坡坡比为 1:2.8，背水坡坡度为 1:3，模型边界宜取足够远，两断面计算模型自坝体向外，向下延展 1~2 倍坝高。两断面心墙为砂质壤土，坝壳为砾质粗砂，坝顶为砾砂，坝基为二长花岗岩，其中 0+150 断面坝体与坝基之间夹一层粉土质砾砂。两断面的模型概化图如下图所示。

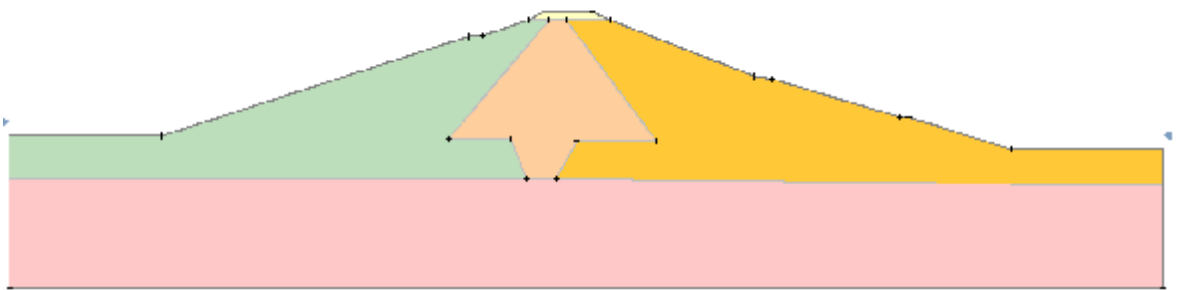


图 3-1 0+300 断面计算模型概化图

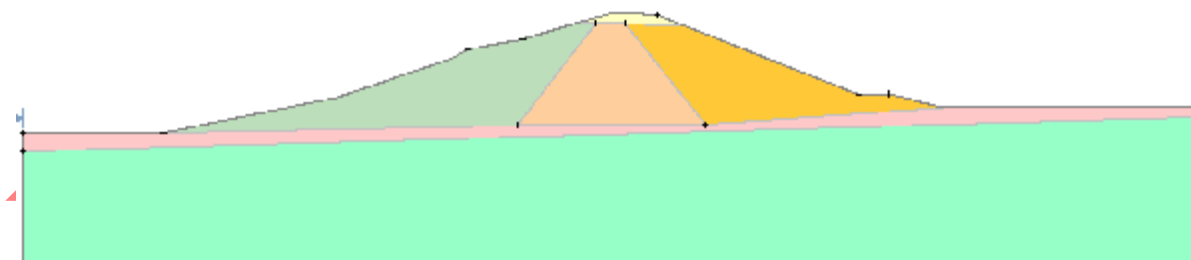


图 3-2 0+150 断面计算模型概化图

3.2 工况选取

依据有关规范及《费县城子水库安全状况排查综合评价报告》考虑以下几种工况。
对于 0+300 断面考虑：

- (1) 坝前水位为兴利水位，即水面高 12m，坝后无水时背水坝坡的稳定性；
- (2) 坝前水位为校核水位，即水面高 16m，坝后水面 2m 时背水坝坡的稳定性；
- (3) 坝前水位由兴利水位，即水面高 12m，骤降至 1/3 坝高，即 5.3m，坝后无水时临水坡的稳定性；

- (4) 坝前水位为兴利水位，即水面高 12m，坝后无水，考虑地震作用时背水坝坡的稳定性；
- (5) 在第（3）种情况下并且考虑地震作用时，背水坝坡的稳定性。

其中(1)属于正常运用条件；(2)、(3)、(4)属于非正常运用条件 I；(5)属于非正常运用条件 II。

对于 0+150 断面考虑：

- (1) 坝前水位为兴利水位，即水面高 8m，坝后无水时背水坝坡的稳定性；
- (2) 坝前水位为校核水位，即水面高 12m，坝后水面 1m 时背水坝坡的稳定性；
- (3) 坝前水位由兴利水位，即水面高 8m，骤降至 3m，坝后无水时临水坡的稳定性；
- (4) 坝前水位为兴利水位，即水面高 8m，坝后无水，考虑地震作用时背水坝坡的稳定性；
- (5) 在第（3）种情况下并且考虑地震作用时，背水坝坡的稳定性。

其中(1)属于正常运用条件；(2)、(3)、(4)属于非正常运用条件 I；(5)属于非正常运用条件 II。

我国土石坝设计规范对坝坡稳定分析的方法作了如下规定：
“对于均质坝、厚斜墙坝和厚心墙坝,宜采用计及条块间作用力的简化毕肖普法,对于无粘性土以及有软弱夹层、薄斜墙坝的坝坡稳定分析及任何坝型，可采用满足条块间作用力和力矩平衡的摩根斯坦—普赖斯法等方法，计算坝坡抗滑稳定安全系数。”

土石坝设计规范对允许安全系数作了如表 3-1 的规定。采用不计及条间力的瑞典圆弧法，其允许安全系数对 1 级坝正常运用条件为 1.3，其余情况在表 3-1 的基础上降低 8%。

表 3—1 坝坡抗滑稳定最小安全系数

运用条件	工程等级			
	1	2	3	4, 5
正常运用条件	1.50	1.35	1.30	1.25
非正常运用条件 I	1.30	1.25	1.20	1.15
非正常运用条件 II	1.20	1.15	1.15	1.10

3.3 计算参数的选取

依《费县城子水库安全状况排查综合评价报告》与《城子水库初设工程地质概况》知：

对于 0+300 断面，坝体土物理力学指标建议值如下表

表 3—2 0+300 断面坝体土物理力学指标建议值

岩土类别	湿密度	快剪(Q)		固快(R)		总应力(CU)		有效应力(CU)		渗透系数
		C	φ	C	φ	C_{cu}	Φ_{cu}	C'	φ'	
	g/cm^3	kPa	度	kPa	度	kPa	度	kPa	度	Cm/s
心墙砂质壤土	1.90	18	14	22	17	25	16	20	18	5.0E-04
坝前砾质粗砂	1.85	0	26	0	26	0	26	0	27	2.0E-02
坝后砾质粗砂	1.80	0	27	0	27	0	27	0	28	8.0E-03
坝顶砾砂	1.85	0	25	0	26	0	26	0	26	6.0E-03
坝基花岗岩	2.60							30	35	3.0E-05

对于 0+150 断面，坝体土物理力学指标建议值如下表

表 3—3 0+150 断面坝体土物理力学指标建议值

岩土类别	湿密度	快剪(Q)		固快(R)		总应力(CU)		有效应力(CU)		渗透系数
		C	φ	C	φ	C_{cu}	Φ_{cu}	C'	φ'	
	g/cm^3	kPa	度	kPa	度	kPa	度	kPa	度	Cm/s
心墙砂质壤土	1.90	18	14	22	17	25	16	20	18	5.0E-04
坝前砾质粗砂	1.85	0	26	0	26	0	26	0	27	2.0E-02
坝后砾质粗砂	1.80	0	27	0	27	0	27	0	28	8.0E-03
坝顶粉土质砾砂	1.85	0	27	0	27	0	27	2	27	6.0E-03
坝底粉土质砾砂	1.87	0	27	0	27	0	27	2	28	6.0E-03
坝基花岗岩	2.60							30	35	3.0E-05

在测定土的强度时，原则上应使试验的模拟条件尽量符合土在现场的实际受力与排水条件，使试验指标具有较好的代表性。在土石坝设计规范中，曾对各适用期应采用的抗剪强度试验方法作出规定，如下表所示。

表 3—4 稳定计算时抗剪强度指标的选用

控制稳定的时间	强度计算方法	土类	使用仪器名称	试验方法	采用的强度指标	试样初始状态
稳定渗流期和水库水位降落期	有效应力法	无粘性土	直剪仪	慢剪	C' , φ'	填土用填筑含水率和填筑密度，地基土用原状土，但要预先饱和
			三轴仪	排水剪		
		粘性土	直剪仪	慢剪		
水库水位降落期	总应力法	粘性土	三轴仪	固结不排水剪测孔隙应力	C_{cu} , Φ_{cu}	

据 GB18306-2001 《中国地震动参数区划图》(1:400 万)工程区地震动峰值加速度为

0.1g，对应的地震基本烈度为Ⅶ度。属基本稳定区。采用拟静力法进行地震作用下的边坡稳定计性分析，水平地震系数 K 取 0.1。地震工况时，参数选取如下：对于压实粘性土，可采用三轴饱和固结不排水剪参数，如用直剪试验，可用饱和固结快剪指标，对于紧密的砂、砂砾则采用固结快剪指标再乘以折减系数 0.7~0.8。

对于有地下水和稳定渗流时，水面上下土的重度及渗流力的解决通常用“代替法”，即用浸润线以下坡外水位以上所包围的同体积水重对滑动圆心的力矩来代替渗流力对圆心的滑动力矩。有时直接将坡外水压力加在坡面上。

在 **slide** 软件中用户只需输入坡外水位的坐标值和浸润线信息，至于等效置换的种种处理方法，程序均自动进行，无需用户操心。另外，在骤降分析时，此软件采取直接将坡外水压力加在坡面上的方法。

3.4 坝坡稳定计算

3.4.1 稳定计算步骤

对于工况一，计算坝前为设计水位，坝后为正常水位时的稳定性。首先利用程序中的渗流分析功能，依据材料边界、外部边界条件以及坝体土体的水力参数求出此条件下稳定渗流情况，然后再计算稳定渗流情况下背水坝坡的安全系数。

对于工况二，计算坝前为校核洪水位，坝后为正常水位与死水位之间的各种水位时的稳定性。方法与工况一一样，不过是水位变动一下。

对于工况三，计算坝前水位由兴利水位骤降至某水位时的稳定性。此计算用的是“骤降分析”中的“骤降至某水位”的分析，此计算中按程序手册要求，首先为模型加上骤降前的水位线，然后加上骤降后的水位线与浸润线，其中骤降后临水坝面水压力用三角形均布荷载代替。此计算中，假设骤降后壤土心墙中的浸润线位置不变，而砾质粗砂坝壳的渗透系数比心墙高 2 个数量级，由此假设骤降后坝前砂壳中浸润线为水平线，与骤降后水位齐平。在砾质粗砂坝壳与壤土心墙之间，它们的交界面即为浸润线位置。

对于工况四，在工况二的基础上加上地震荷载即可。

对于工况五，在工况三的基础上加上地震荷载即可。

3.4.2 计算图表

通过计算下面给出了两断面在各种工况下的计算图表，从中可以看出滑弧形状、深度、滑弧半径、滑弧圆心及安全系数等。

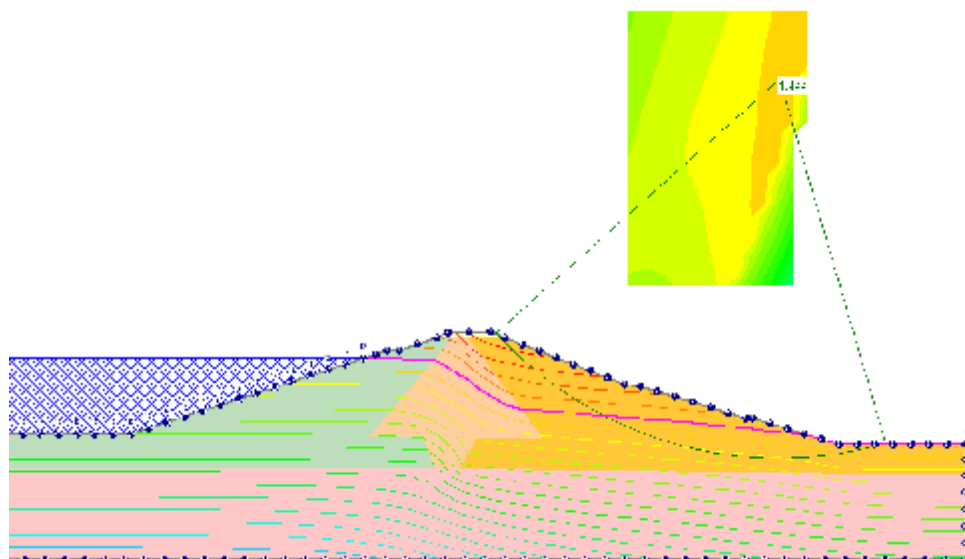


图 3—3 0+300 断面工况 (1) 计算图

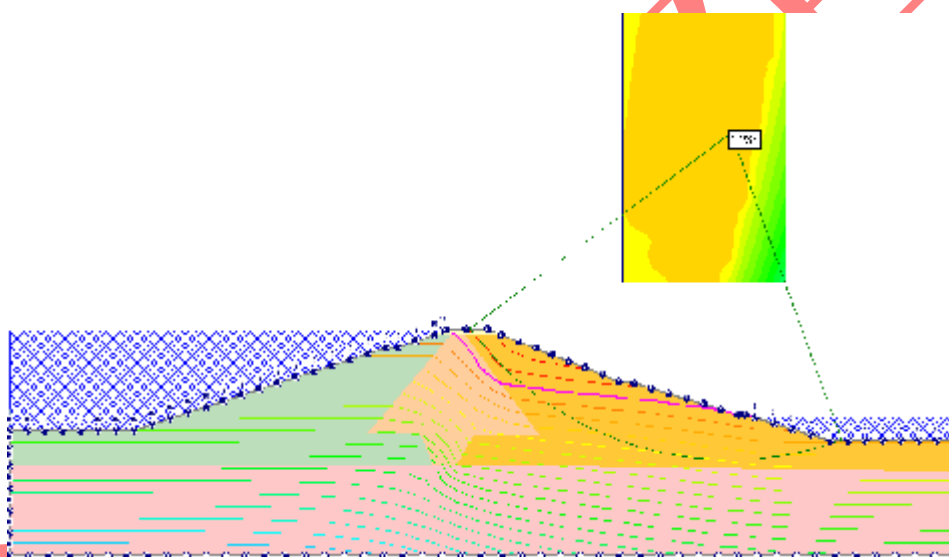


图 3—4 0+300 断面工况 (2) 计算图

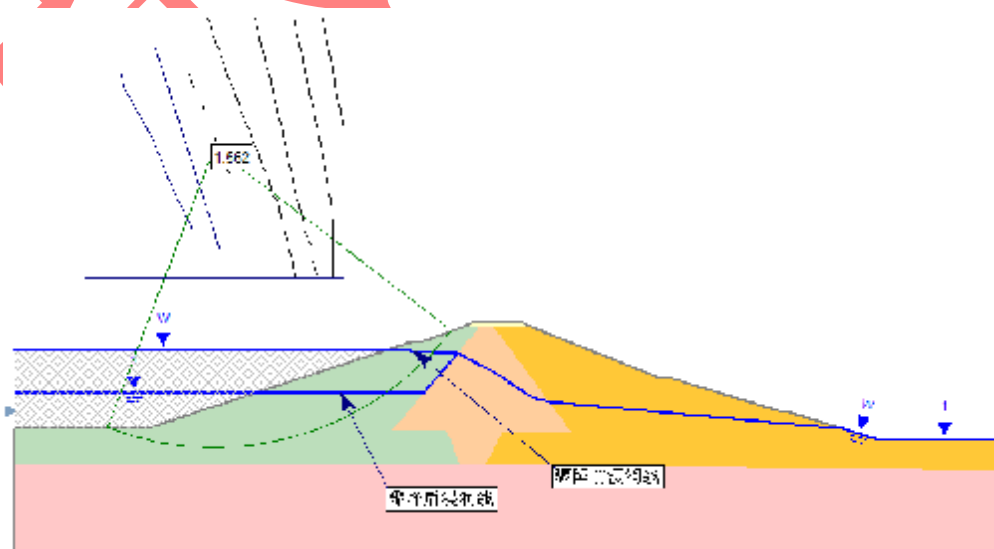


图 3—5 0+300 断面工况 (3) 计算图

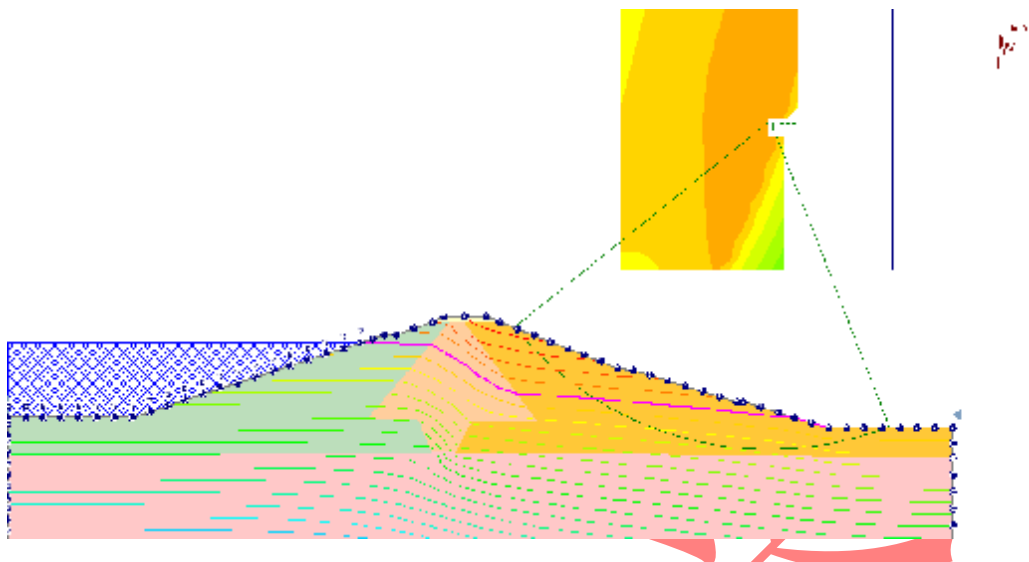


图 3—6 0+300 断面工况 (4) 计算图

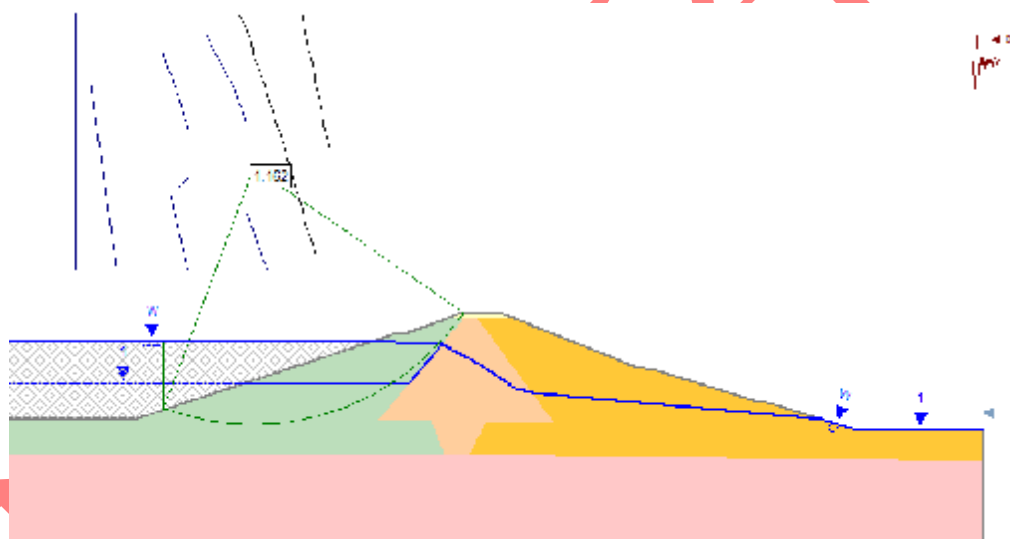


图 3—7 0+300 断面工况 (5) 计算图

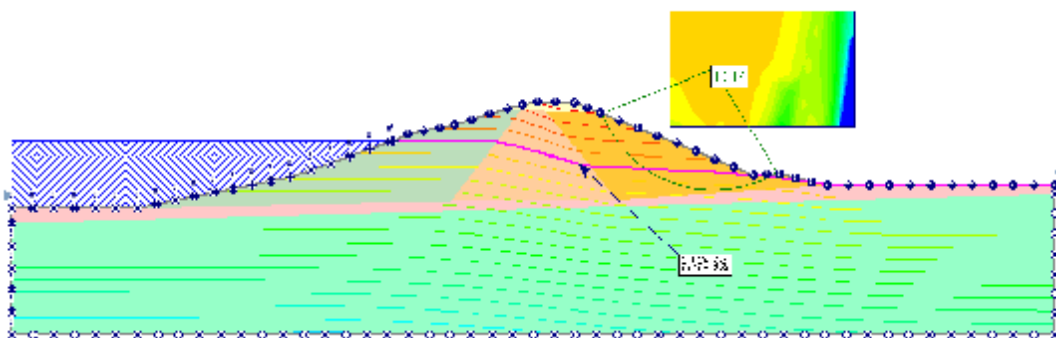


图 3—8 0+150 断面工况 (1) 计算图

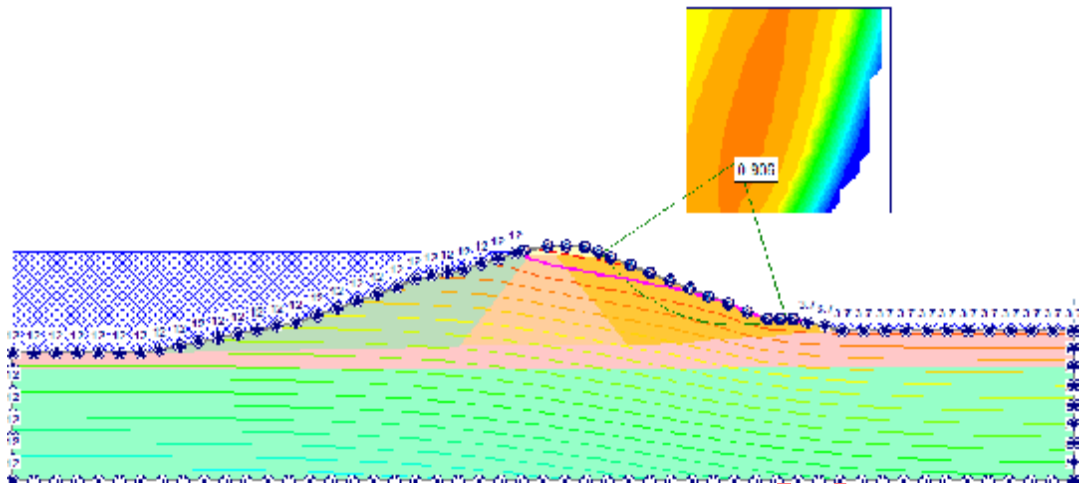


图 3—9 0+150 断面工况 (2) 计算图

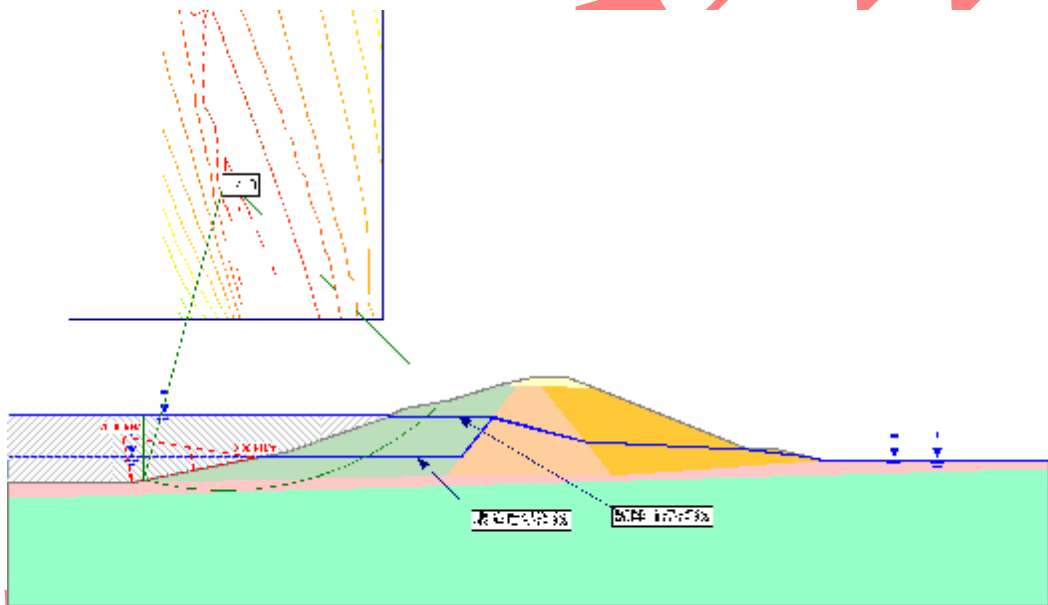


图 3—10 0+150 断面工况 (3) 计算图

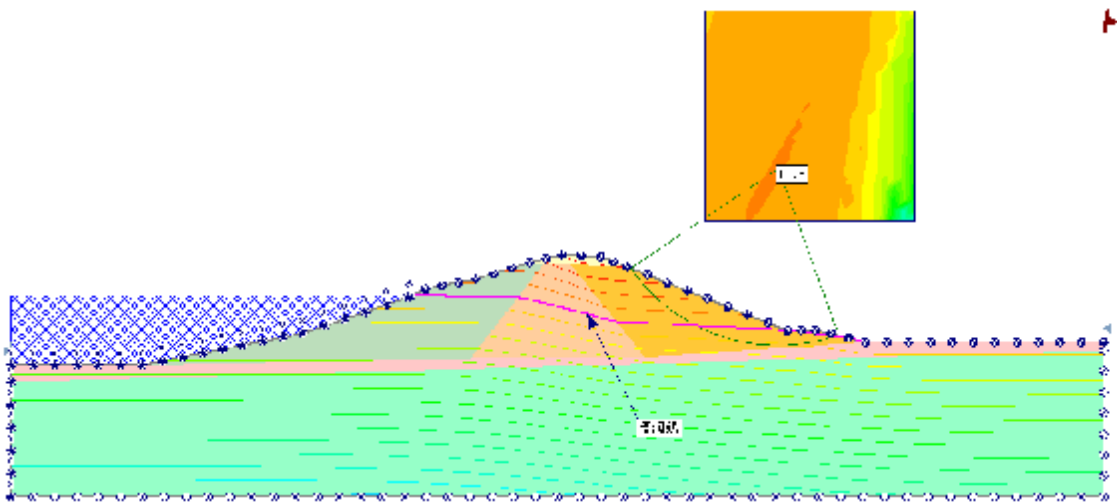


图 3—11 0+150 断面工况 (4) 计算图

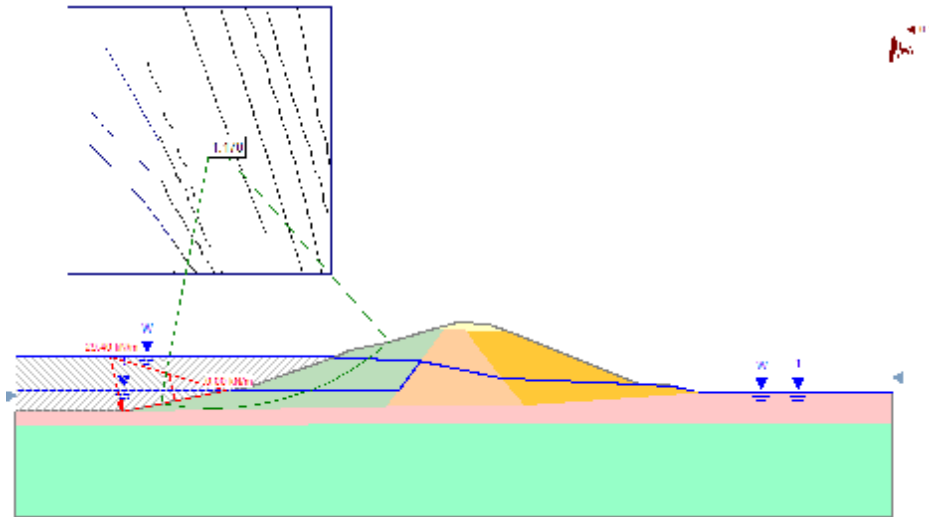


图 3—12 0+150 断面工况（5）计算图

表 3—5 计算结果表

计算断面	计算工况	滑弧深度 (m)	安全系数			
			瑞典圆弧	简化毕肖普	简布	摩根斯坦~普赖斯
0+300 断面	(1)	7.4	1.297	1.445	1.352	1.446
	(2)	10.0	1.133	1.234	1.204	1.270
	(3)	10.2	1.562	1.576	1.570	1.579
	(4)	7.1	0.924	1.035	0.961	1.037
	(5)	9.6	1.162	1.167	1.162	1.165
0+150 断面	(1)	5.0	1.279	1.416	1.317	1.419
	(2)	5.1	0.906	0.909	1.038	1.038
	(3)	4.2	1.410	1.423	1.418	1.421
	(4)	3.5	0.966	1.027	0.990	1.028
	(5)	4.9	1.170	1.174	1.170	1.173

3.5 计算结果分析

(1) 由以上分析可以看出：

对于 0+300 断面，在坝前水位为兴利水位，即水面高 12m，坝后无水时，考虑地震作用时背水坝坡的抗滑安全系数约为 0.98 小于规范要求的 1.15。此情况都属于非正常运用条件 I，在此情况下背水坝坡不满足安全要求。

对于 0+150 断面，坝前水位为校核洪水位，即水面高 12m，坝后水面 1m 时，背水坝坡的安全系数小于 1.00，与规范要求的 1.15 相差甚大；坝前水位为兴利水位，即水面高

8m，坝后无水时，考虑地震作用时，背水坝坡的安全系数小于规范要求的 1.10。以上两种情况都属于非正常运用条件 I，在此两种情况下背水坝坡不满足安全要求。

由坝坡稳定计算可以看出两断面上游坝坡在各种运用条件下的安全系数都满足规范要求，而两断面的下游坝坡在非正常运用条件下不完全满足安全要求，在某些工况下甚至比允许安全系数低 0.1~0.15，可见下游坝坡不满足稳定要求，亟待加固。总体来看，整个大坝的抗滑安全系数，无论临水，背水坝坡安全储备都不算太高，可见现状大坝在非正常运用情况，可能会发生滑动破坏，因此，除险加固意义重大。

(2) 将以上各种工况下各种方法进行对比可以得出以下结论：

由表 3-4 可以看出，瑞典条分法结果总比毕肖普法小，原因在于该法忽略了条间力的作用。在某些工况下，尤其孔隙水压力较大时，由软件经过自动搜索得出最危险滑弧圆心及滑弧半径后，可以看出得出的最危险滑弧的圆心角较大，而此时得出的最小安全系数明显比其他方法偏低许多，此时瑞典法将导致一个错误结果，安全系数远低于正确值。

由表 3-4 可以看出，在滑裂面为圆弧形的前提下，毕肖普法与摩根斯坦—普赖斯法求得的临界滑裂面位置与相应的最小安全系数很接近。

由表 3-4 可以看出，在地震荷载作用下安全系数有明显的降低。0+300 断面在正常运用下由于地震作用降低约 0.37，在水位骤降作用下由于地震作用安全系数降低大于 0.4；0+150 断面在正常运用下由于地震作用降低约 0.38，在水位骤降作用下由于地震作用安全系数降低大于 0.25。

4. 结论及建议

4.1 结论

论文针对山东费县城子水库大坝,开展了大坝特征断面 0+300、0+150 断面在校核洪水位、兴利水位下背水侧,水位骤降时迎水侧的稳定性分析,得出了各工况下的安全系数,每种工况的安全系数分别采用了瑞典圆弧法、毕肖普法、简布法及摩根斯坦—普赖斯法计算,本文还对几种方法作了简要对比,得出的主要结论如下:

1、对于 0+300 断面,在坝前水位为兴利水位,即水面高 12m,坝后无水时,考虑地震作用时背水坝坡不满足安全要求。

2、对于 0+150 断面,坝前水位为校核洪水位,即水面高 12m,坝后水面 1m 时,背水坝坡不满足安全要求。

3、对于 0+150 断面,坝前水位为兴利水位,即水面高 8m,坝后无水时,考虑地震作用时,背水坝坡不满足安全要求。

4、两断面的迎水侧在各运用条件下安全系数均满足规范要求。

5、由计算结果看出一般情况下四种方法得出的安全系数大小有如下关系:瑞典条分法<简布法<简化毕肖普法<摩根斯坦—普赖斯法,其中简化毕肖普法与摩根斯坦—普赖斯法得出的结果较为接近。瑞典条分法忽略了条间力的作用,不能满足所有的静力平衡条件,结果一般比其他方法小 10%~20%;简化毕肖普法假定切向条间力为 0,避开了计算条间力及其作用点位置,它同样不能满足所有的平衡条件,还不是一个严格方法,误差一般约为 2%~7%;简布法基本可以满足所有的静力平衡条件,但其推力线的假定必须满足土条间不产生拉力和不产生剪切破坏,有时还存在严重的收敛困难问题;摩根斯坦—普赖斯法采用数值计算分析,满足所有静力平衡条件,是一个严格方法,结果比较准确。

4.2 建议

由于该水库安全隐患较多,属病险库,为确保该水库工程安全运行和综合效益的发挥,建议尽快进行除险加固,有关坝体处理的具体建议如下:

1、坝顶加高,迎水坡护坡重新护砌,坝后覆土,重建排水体,整修防浪墙。

2、大坝桩号 0+000~0+488 段坝体心墙顶部高程 160.05~160.29m 以上为粉土质砾砂,该层土的渗透系数约为 $6.0E-03\text{cm/s}$,具中等透水性,造成防浪墙未于心墙紧密结合,建议做防渗处理。

3、左岸山坡桩号 0+040~0+220 段未清基，该段是粉土质砾砂和基岩强风化带共同渗漏。为防止高水位时该段发生接触冲刷，影响坝体安全，建议对该段坝后坡脚做好反滤处理，也可采取灌浆措施进行彻底处理。

4、大坝坝体砂质壤土渗透变形类型为流土，粉土质砾砂、砾质粗砂的渗透变形类型为管涌。土的允许水力比降砂质壤土、粉土质砾砂、砾质粗砂分别建议为 0.40、0.12、0.10。

5、坝前砂壳颗粒组成、透水性基本符合设计要求，但颗粒组成变化不均一，含泥量稍偏高，呈稍密，填筑质量较差，同时考虑到场地为 7 度区，坝前砾质粗砂的相对密度为 0.37~0.54，小于 0.70，存在液化可能，建议采取工程措施进行加固处理。

6、坝体迎水坡护砌质量较差，不能抵抗风浪淘刷和撞击，对工程安全不利，建议翻修石护坡重做反滤层

7、大坝坝后坡脚排水体质量较差，反滤层不符合要求，建议重做。坝脚为贴坡排水体，护坡石因年久失修，毁坏严重，反滤层没有，建议重做排水体。

8、坝基砾质粗砂的相对密度约为 0.36~0.52，呈稍密状态，判为可能液化土，建议采用振动水冲法进行加固，其渗透变形类型判定为管涌，其允许水力比降建议为 0.10。

参考文献

- [1] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2005 年.
- [2] 陆兆溱. 工程地质学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008 年.
- [3] 刘汉东. 岩土工程数值计算方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1995 年.
- [4] 罗谷怀, 甘明辉. 土石坝安全论证理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001 年.
- [5] 汝乃华, 牛运光. 大坝事故与安全·土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001 年.
- [6] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003 年.
- [7] 中国水利学会岩土力学专业委员会. 土石坝与岩土力学[M]. 北京: 地震出版社, 2001 年.