

岩石坝基工程

田野 蔡斌 丁秀丽 徐春敏 著

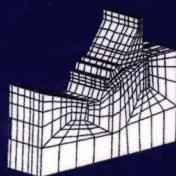
Y A N S H I

B A J I

G O N G C H E N G



YANSHI BAJI GONGCHENG



湖北科学技术出版社

岩石坝基工程

田野 蔡斌 丁秀丽 徐春敏 著

湖北科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩石坝基工程/田野著. —武汉: 湖北科学技术出版社, 2003.1

ISBN 7-5352-2812-7

I. 岩… II. 田… III. 岩石-坝基-水利工程
IV. TV64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 000863 号

岩石坝基工程

© 田野、蔡斌、丁秀丽、徐春敏著

责任编辑: 王连弟

封面设计: 王 梅

出版发行: 湖北科学技术出版社

电话: 86782508

地 址: 武汉市武昌黄鹄路 75 号

邮编: 430077

印 刷: 武汉市教育学会印刷厂

邮编: 430074

787mm×1092mm 16 开 7.25 印张

185 千字

2001 年 11 月第 1 版

2003 年 1 月第 2 次印刷

印数: 1 000

ISBN 7-5352-2812-7/TV·47

定价: 20.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

目 录

1	概述	1
1.1	重力坝坝基	1
1.2	拱坝坝基	7
2	坝基岩体的物理力学参数选择方法	8
2.1	岩体的物理力学参数取值准则	8
2.2	算术平均值法	8
2.3	线性回归法	9
2.4	概率选择法	11
3	有限元法在坝基稳定计算中的作用	16
4	重力坝抗滑稳定	21
4.1	抗剪试件的破坏机理	21
4.2	坝基破坏机理	25
4.3	坝基稳定评价方法	46
5	重力坝深层抗滑稳定	66
5.1	坝基深层滑动破坏的类型	66
5.2	坝基深层滑动稳定评价方法	67
6	坝基建基面的选择	79
6.1	高坝洲工程坝基岩体分级	79
6.2	几种分级方法的比较及变形参数预测	85
6.3	三峡坝基建基面的验收标准	88
7	拱坝坝肩岩体稳定	92
7.1	坝肩的抗滑稳定	92
7.2	坝肩的变形稳定	108
	参考文献	110

1 概 述

坝基稳定性是一个关系到水利水电建设工程安全和经济的重大问题,是岩石力学与工程学科研究方面的一个重要课题。当坝基稳定性不足时,可能发生难以想象的灾祸,使国民经济和人民生命财产遭受巨大损失;反之,假若设计过于稳定,同样会给国家造成巨大浪费,因此,研究和明确安全可靠的坝基稳定性分析方法,使坝基工程设计和施工更经济合理,将具有重要的现实意义。

人类建筑大坝至今,寻求一种可靠的判定坝基稳定性方法,始终是全球坝工界关心的焦点,尽管有许多分析计算方法已用于工程设计,但认为寻找一种最佳方法将是坝工设计和岩石力学科技工作者的前沿课题。感觉到了的东西并不理解它,只有理解了的东西才更深刻的感觉它,从岩石力学的角度看,坝基稳定性分析的关键是岩石力学参数的准确选择及其分析方法的使用。

1.1 重力坝坝基

1.1.1 传统的稳定性分析

在 18 世纪末期,坝工设计就重视大坝与基岩接触面的抗滑稳定问题,当时主要根据库伦(Coulomb)在 18 世纪 70 年代通过室内岩样试验的结果得出剪应力 $\tau = \sigma_n \tan \varphi$ 表达式,把基岩与坝体接触面的抗滑稳定安全系数用阻滑力 τ 与沿滑动方向的推力之比来表达,即通常所谓的纯摩算式为

$$K_s = \sigma_n \tan \varphi / H = f \cdot \sum V / \sum H$$

式中 $\sum H$ 为作用于滑动面上的力在滑动方向投影的代数和; $\sum V$ 为作用于滑动面的力在垂直于滑动方向投影的代数和; $f = \tan \varphi$ 为坝与基岩接触面的摩擦系数,用试验方法求得。

很显然,上式没有反映凝聚力,它与实际情况是不相符合的,既是摩擦试验也存在凝聚力。

1853 年莫尔(Mohr)通过大量的岩样试验,对库伦理论作了一些修改,提出莫尔—库伦理论的剪应力表达式为 $\tau = (\sigma_n - u) \tan \varphi + c$,认为坝体与基岩之间胶结良好,既存在凝聚力 c 值,又存在有正应力作用下的摩擦力 $f \cdot \sum V$,于是提出了另一个抗滑稳定安全系数的表达式,即通常所谓的剪摩公式为

$$K_s = \frac{f \cdot \sum V + cA}{\sum H}$$

式中 A 为坝体与基岩的实际粘结面积;其余符号同上。

长期以来,世界许多国家依据以上理论制定混凝土重力坝设计规范,用定值设计的强

度极限状态方法评价坝基的稳定性,例如:^[1,2,3]

(1) 美国的坝基稳定计算规定

美国自 20 世纪 30 年代以来,对重力坝稳定计算均采用基于库伦—摩尔强度理论的抗剪断公式。但在抗剪强度参数和安全系数的采用上,则有自己的做法。至于美国各大私人咨询公司,一般都参照陆军工程师兵团和垦务局的现行设计准则。

美国过去修建的重力坝,地基条件一般都较好。加之他们的勘探、试验上一贯讲求经济实用,因之在历史上就有偏重室内试验及小型试件的传统。一般认为,对于均一完整的基岩(包括较软弱的),室内试验是符合实际的。近 30 年来,一方面受到各国重视现场抗剪的影响,加之好坝址已愈来愈少,才转而重视现场抗剪试验。但至今不少人仍倾向于小试件试验。理由是:小试件数量大、代表性广,而且既快又经济;钻孔分布广,可深达各种深度;取样技术不断改进,一些过去不能取得的地质缺陷原样,现已可取得原样;某些室内试验的条件反而较好。垦务局在稳定计算中抗剪强度的择取,最终还要靠类比法、设计人员的判断及地质师的经验,参照试验资料来最终选定,亦有出现先后修改的现象。

美国垦务局对混凝土重力坝设计规定,基岩接触面抗滑稳定安全系数可用抗剪断公式来计算,抗剪断安全系数 K_H 是阻滑力与滑动力之比,其算式为

$$K_H = \frac{cA + (\sum N + \sum u) \operatorname{tg} \varphi}{\sum V}$$

式中 c 为凝聚力; A 为计算断面积; $\sum N$ 为正应力的总和; $\sum u$ 为扬压力总和; $\operatorname{tg} \varphi$ 为摩擦系数; $\sum V$ 为剪应力总和。

设计规范规定,对 f 、 c 值必须由基础材料和用于大坝的混凝土材料进行试验来决定。用抗剪断公式求得的抗剪断安全系数 K_H 是用来校核任一断面抗滑或剪切破坏的安全系数,对一级重力坝的抗剪断安全系数,在正常组合荷载下要求 $K_H \geq 3.0$;在非正常组合荷载下 $K_H \geq 2.0$;对极端组合荷载下 $K_H \geq 1.0$,而在坝基内沿软弱结构面的相应值为 4.0、2.7 和 1.3。

进入 80 年代后,美国的陆军工程师团将剪摩公式中的 f 值提高到 1.0 左右, c 值降低到 0.5MPa 以下,安全系数降到 1.3 ~ 2.0 之间。理由是:过去公式中的强度参数系采用完整试件的峰值,同时对不可获得岩芯的地段很少加以注意。现在由于取样及试验手段的改进,已可能更有把握地测出岩石抗剪强度,并已可能对地质缺陷进行试验,还可进行现场抗剪试验;在此之前,各地区设计院已在若干坝上采用了新的设计准则及小得多的安全系数;实际上滑裂体系呈三向受力,规范中采用二维分析,其中已具有一定的安全储备。

(2) 前苏联的坝基稳定计算规定

前苏联在 1960 年颁发的 CHN_{Π123-60} 规范中就采用了剪应力公式 $\tau = f\sigma + c$ 作为滑动计算的基础,其安全系的计算式为

$$K_H = 0.9[f \cdot V + cF]/Q$$

式中 Q 为水平推力; F 为坝基岩接触面的面积;其它符合同上。规范建议表 1-1 中的 f 、 c 值可用于所有初步设计阶段和 III、IV 级建筑物的技术设计。

表 1-1

抗剪强度建议值

岩石地基的种类	混凝土沿 岩石滑动		沿裂隙滑动			
			裂隙宽 0.5~2mm	有充填物的裂 隙宽 2~20mm		有充填物大裂隙 宽大于 20mm
	f	c/MPa	f	c/MPa	f	c/MPa
实际上不风化的块 状岩体、板状岩体 $R_c > 40\text{MPa}$	0.95	0.40	0.86	0.15	0.70	0.10
同上,但有中等裂 隙,微风化	0.85	0.30	0.80	0.15	0.70	0.10
裂隙严重的巨型岩块, R_c $\approx 40\text{MPa}$;微风化变形小 的半岩石, $R_c = 20 \sim$ 40MPa	0.75	0.20	0.70	0.10	0.65	0.05
有中等的或严重裂隙板 状半岩石, $R_c = 2.5 \sim$ 20MPa	0.70	0.10	0.65	0.05	0.50	0.05

注:对裂进行灌浆后, f 、 c 值提高的数值由试验决定。

前苏联 1974 年又颁发了修订规范 $\text{CHNII}_{n-16-74}$, 计算坝基稳定的基本公式仍然采用

$$n_c N_p \leq mR/K_H \quad \text{或} \quad K_H \geq mR/n_c N_p$$

式中 N_p 为引起滑动的合力计算值,在上述的剪摩公式中用 Q (水压力和其它水平力)来表示; R 为总的抗滑力,在剪摩公式中 $R = f \cdot V + cF$; n_c 为荷载组合系数,基本荷载组合 $n_c = 1.0$,特殊荷载组合 $n_c = 0.9$; m 为岩石地基荷载的工作条件系数等于 $0.9 \sim 0.6$,与地基种类有关; K_H 为安全系数,与建筑物的等级有关。

规范 $\text{CHNII}_{n-16-74}$ 规定 I 级建筑物 $K_H = 1.25$; II 级建筑物 $K_H = 1.2$; III 级建筑物 $K_H = 1.15$; IV 级建筑物 $K_H = 1.1$ 。

$\text{CHNII}_{n-16-74}$ 与 CHNII_{123-60} 相比, f 值提高了,而 c 值降低了(如表 1-1 所列数值)。由于采用的 c 值很小,所以采用的安全系数值和擦纯摩公式计算的安全系数接近。

(3) 中国的坝基稳定计算规定

建国初期基本上沿用前苏联的设计规范。50 年代的丹江口水电站等工程,60 年代的乌江渡和陆水水电站等工程,虽然都作了大量的岩体力学试验,取得的抗剪强度参数试验值也较高,但设计应用的强度参数只准按规范规定值取用。1978 年中华人民共和国水利电力部颁布了混凝土重力坝设计规范(SDJ_{21-78}),规范分别给出了纯摩公式和剪摩公式,规定校核坝基面上的滑动条件,可按纯摩公式计算安全系数 $K_s = f \cdot \sum W / \sum P$;也可按剪摩公式计算安全系数

$$K' = \frac{f_1 \cdot \sum W + cA}{\sum P}$$

ΣW 为坝体自重和扬压力的代数和, ΣP 为水平推力的总和, 其余符号同前。

规范规定, 采用抗剪强度(纯摩)公式时, 一级建筑物基本组合荷载要求 $K_s = 1.1$; 特殊组合荷载(1) $K_s = 1.05$; 特殊组合荷载(2) $K_s = 1.0$ 。采用抗剪断公式基本荷载组合用 $K' = 3.0$; 特殊荷载组合(1) $K' = 2.5$; 特殊荷载组合(2) $K' \geq 2.3$ 。对抗剪断摩擦系数 f_1 和凝聚力 c_1 值以及抗剪摩擦系数 f 值规定均应经试验测定, f_1 和 c_1 值的取值按现场试验测定的峰值的小值平均值; 对 f 值的选取应参考现场试验成果的屈服极限值或比例极限值, 不仅取用的摩擦系数 f 值偏小, 而且对新鲜、坚硬岩石仍建议取用 $f = 0.65 \sim 0.75$, 以 $f = 0.75$ 为限。由于对凝聚力的可靠性和在大坝运行时所能发挥的作用缺乏深刻认识, 所以在大坝设计中仍多用纯摩公式进行抗滑稳定核算。

在总结我国建坝实践经验和在进行大量野外、室内岩石力学试验研究的基础上, 1984 年 12 月 25 日颁布了混凝土重力坝设计规范 SDJ21-78(试行)补充规定, 补充规定强调了强度参数的取用应依据试验成果; 除中型工程中的中、低坝外, 在计算坝体沿建基面的抗滑稳定时, 都应采用抗剪断强度公式计算抗滑稳定安全系数。

对比美国、前苏联和中国采用同样剪摩公式, 而规定的安全系数值是不一样的。前苏联采用的 C 值比我国采用现场试验的峰值的小值平均值还要小很多, 因而在剪摩公式中 C 值起的作用不大, 再加上 f 值的提高, 使剪摩公式实际上接近于纯摩公式, 所以前苏联规范虽然不再采用纯摩公式, 但实质上它采用的安全系数的数值仍然和纯摩公式十分接近。

关于坝基深层滑动抗滑稳定的计算方法, 中国和美、苏等国在规范中也作了一些规定, 但因没有反映坝基变形问题, 因此, 除基岩属于坚硬完整的均质岩体外, 一般不宜采用刚体极限平衡公式计算坝基深层滑动稳定问题。

综上所述, 目前坝工设计规范所使用的两个抗滑稳定计算公式是借用材料力学的刚性平衡法。它是用材料力学法计算审查应力和用抗剪断公式计算审查稳定性来实施对坝基安全的控制, 这就涉及到应力计算是否准确、岩石强度参数的精确选择及安全系数的如何确定的合理性及其物理意义。从理论上讲, 采用纯摩公式计算是不符合坝基实际情况; 采用抗剪断强度公式计算除不能揭示坝基的变形、应力集中的分布规律及破坏机理外, 关键是强度参数选择值要反映坝基岩体实际情况。但由于用抗剪断强度公式计算坝基安全系数的优点是直观、明确及公式比简单以及有长期的实践经验, 所以各国设计规范仍作为设计计算的依据。

近几十年来, 由于岩石力学科学的发展, 各种勘探、测试技术及加固手段的进步, 尤其是有限单元法等数值方法的广泛应用, 为坝基稳定分析提供了条件, 广大科技工作者已从多种角度, 针对坝基工程实际, 采用各种方法, 深入细致的分析坝基破坏方式和失稳机理, 从而寻求合理的适用于工程设计的安全准则和稳定审查方法。例如除了传统的计算方法和广泛应用的有限元法之外, 虽然可靠度分析方法在国内存在各种不同看法, 但作为传统计算方法的辅助手段, 将会得到工程实践的验证和发展。

1.1.2 抗剪强度参数的选用

准确的确定或选用抗剪强度参数对工程的安全性和经济性的影响极为巨大。但是,

因为天然岩体客观上是一种不连续块体材料,岩体中含有潜在的和实在的不连续结构面,其产状、特性、形式、分布等都千变万化,并将岩体切割成为一种由大小块体组成的不连续体。这种不连续体的性质并不取决于岩石块本身,而是取决于不连续结构面和岩石块组成的混合体,并在物理力学性质上都呈各向异性。对这种工程岩体,不能置于人为的控制之下,只能通过有限的试验手段,在局部几个点或线上测定,不可能做到全面、准确的进行大量的岩石力学试验。即使进行了一定数量的试验工作,从工程范围上来看,仍是属于代表性的试验结果,对选择抗剪强度参数精确值仍感到没有把握,成为选择强度参数的最大难度。

关于摩擦系数 f 值和凝聚力 c 值的选用,有许多不同的方法,实践中多采用极限强度(峰值)打折扣的办法。由于对 f 及 c 选值方法和取值范围的不同,以及对荷载组合的规定不同,使各国规范或设计准则中规定的与之配套的安全系数也有不同,相差可达 2~3 倍,致使安全系数的意义不明确,无法从其数值大小来判断坝基的安全程度。我国自 50 年代以来,对抗剪强度选用,都习惯采用按峰值强度乘以 0.75~0.85 的修正系数,而实际设计的采用值则由设计、地质、试验人员共同研究决定。70 年代,长江委长江科学院提出了以抗剪强度的比例极限和屈服极限作为计算指标的建议,并在混凝土重力坝设计规范(SDJ-21-78)和水利水电工程地质勘察规范(SDJ-14-78)中已分别采纳了这两种办法,规定岩体抗剪断指标的选取,可用以试验峰值的小值平均值为基础,同时参考屈服极限值(塑性)或比例极限值(脆性),再由地质、设计、试验人员结合有关因素共同研究,经适当调整后作为计算指标。

长期以来,关于抗剪强度的如何确定,人们进行了众多的研究工作,所形成的方法,概括起来有以下三类:

(1) 直接分析

它是把岩石力学试验直接测定的抗剪强度参数值用各种统计分析取值的方法。包括算术平均法、小值平均法、最小平均法、保证率法、系数析减法、加权平均或变形一致的原理选值法、优选斜率法、模糊选择法及概率统计法等。

① 算术平均法,它是把试验数据集中位置最有用的代数值用平均值来代表总体的平均水平,一般是在试验组数较少的情况下采用。摩擦系数 $f = \sum_{i=1}^n f_i / n$, 凝聚力 $c = \sum_{i=1}^n c_i / n$, 式中 f_i 为各组的摩擦系数, c_i 为各组的凝聚力, n 为试验组数。

② 小值平均值,此法在国内外采用较多,也是目前我国水工规范规定的方法。计算式 $f = \sum_{i=1}^n f_i / n_f$, $c = \sum_{i=1}^n c_i / n_c$, 式中 $f_i \leq \bar{f}$ (平均值), $c_i \leq \bar{c}$ (平均值); n_f 、 n_c 分别为 f_i 或 c_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 中小于或等于 $\bar{f}$ 或 $\bar{c}$ 的个数。

③ 最小平均法,该法使用最少。计算式

$$f = \frac{\bar{f} + \min(f_1, f_2, \dots, f_n)}{2}$$

$$c = \frac{\bar{c} + \min(c_1, c_2, \dots, c_n)}{2}$$

式中

$\min(f_1, f_2, \dots, f_n)$ 表示取 $f_1, f_2, \dots, f_n$ 的最小值。

④ 保证率法,当试验组数较多时,该法得到大量应用。表达式 $f=f_\alpha, c=c_\alpha$, 其中 α 为取值的保证率,亦即 f_α, c_α 分别表示保证率为 α 的 f 值和 c 值, α 通常取 95%。

⑤ 系数折减法,是在考虑地质代表性、尺寸效应、时间效应及水的作用等因素对试验值的影响下用不同的系数加以折减,其中各种系数的确定可以通过试验研究或根据经验确定,该法也存在随决定者的经验而不同的任意性。

⑥ 加权平均或变形一致的原理选值法,是多种岩石性质组合或多种因素综合取值时常用的统计分析方法之一,它是建立在较详细的地质调查统计的基础之上,往往因试验数量和地质研究深度不够,实用难度较大。

⑦ 优定斜率法,是按岩性组合把同一岩性的抗剪强度若干组试验结果中正应力与剪应力值综合图示在一起,采用一元直线回归分析计算抗剪强度参数的方法,特点是可以同时确定上限、下限及综合值,但存在试件数量愈多其精度愈高,反之精度较差。

⑧ 模糊选择法,是考虑不确定因素如地质代表性、试验水平、尺寸效应、饱水率及粗糙度等对试验参数的影响而采用的一种选择力学参数的方法,它克服了一般选取参数方法不能定量考虑以上影响因素的缺点,但它不能单独确定力学参数,需要与其他方法进行比较。

⑨ 概率统计法,是鉴于岩体的各向异性、勘探或取样数量不足及试验过程中所带来的随机误差,把力学试验数据作为随机变量,用概率理论和数理统计进行误差处理而采取的一种选择力学参数的方法,它存在如果试验数量太少,则选择参数的可靠性较低。但因它考虑了试验参数的随机性,是一种较好的方法。

(2) 经验分析

经验分析,包括工程类比经验判断法和贝叶斯(Bayes)可靠性估计法等。

① 工程类比经验判断法,通常是在缺乏试验条件和试验数据情况下采用的方法,该法是类比已建工程的经验来选用合适的的数据,但由于各项水电工程的地质条件各异,如不充分掌握工程的具体情况,是难以选定符合工程实际的数据,不适于大、中型工程采用。

② 贝叶斯可靠性估计法,是一种半经验方法,该法在理论上的基本观点是可靠性本身是一个随机变量,假设可靠性有一个验前(或称先验)分布,根据经验数据确定验前分布,然后由验前分布和试验信息可导出验后(或称后验)分布,从验后分布可进行强度参数估计,该法的特点是把经验数据和试验数据两者结合起来,应用的关键在于验前分布的经验数据确定是否恰当,难度较大。

(3) 间接分析

包括反分析法、数值分析法及工程岩体分级法等。

① 位移反分析法源于 70 年代后期,它是利用岩体工程原位测量的位移值来反求力学参数的间接确定方法,只能提供参考值。

② 数值分析法,是把岩体视为由岩块和节理材料组成,建立计算模型,通过有限元分析来推测力学参数的间接方法,它是一种辅助手段,不能单独提供力学参数。

③ 工程岩体分级法,是根据国家标准《工程岩体分级标准》(GB50218-94)规定的岩

体基本质量分级、岩石坚硬程度及岩体完整程度的定量指标,在现场勘察和取得简单测试参数的基础上采用的一种间接估计力学参数的方法,只能提供参考值。

1.2 拱坝坝基

拱坝是一种经济指标和安全指标均为较优的坝型。自从 1854 年法国修建世界上第一座佐拉(Zola)坝至今已近 150 年,它以坝越高而经济和安全性能越显著的特点得到了很大的发展。但自 1959 年法国的马尔巴塞(Malpasset)拱坝失事后,全世界的坝工和岩石力学研究人员都认识到拱坝的危险在于两岸拱座的稳定性。由于要弄清工程地质条件、合理选择力学参数及查清影响滑动稳定的软弱结构面的产状,包括裂隙密集度、结构面不平整度、连通率、夹泥充填、错动情况等实际困难,因此,在拱坝稳定分析中,对拱座的稳定评价是拱坝设计中最困难的问题之一。拱座的稳定分析,国内区分两种情况,一是存在明显滑裂面情况下的抗滑稳定问题,二是不具备滑裂面而在下游存在较大断层或软弱带时的变形问题,对变形问题,规范明确规定应通加固措施来改善。

目前国外在实际设计中把刚性平衡法作为判断拱座稳定的最常用方法。我国在《混凝土拱坝设计规范》(SD145-85)中规定,刚性极限平衡法为评价拱座稳定的主要方法,其中规定一、二级工程及高坝应采用剪摩公式,安全系数满足 2.5~3.5;其他的坝仍可采用剪摩公式或纯摩公式,安全系数满足 1.1~1.3。

把拱座岩体作为弹性或弹塑材料,用有限元法可将应力、变形和稳定统一起来计算,了解拱座的破坏过程和机理。但有限元计算成果的正确性而取决于输入数据,即地质勘探精度、岩石力学参数选用及岩体本构关系建立的正确性,因此,规范把有限元法只作为大型工程研究拱座稳定的辅助论证手段,没有作具体规定。关于抗剪强度参数的选用方法,与上述 1.1.2 相同。

目前,国内外评价拱座稳定的方法,除了常规方法之外还有可靠度分析方法及三维非线性有限元分析方法等。虽然这些新方法的探索还存在这样那样的不足或缺点,但从科学技术发展上来看,都为拱座稳定分析提供了重要补充论证手段。

2 坝基岩体的物理力学参数选择方法

2.1 岩体的物理力学参数取值准则

① 对岩体的重力密度(简称重度)、单轴抗压(拉)强度、点荷载强度、三轴强度、变形模量或弹性模量及弹性波速度等试验值,采用算术平均值法选择标准值或设计应用值。

② 对岩体和混凝土与基岩接触面的抗剪断试件呈脆性破坏时,取峰值(极限)强度,用线性回归法或概率选择法选取标准值或设计应用值。

③ 对软弱夹层和断层试件呈弹塑性或塑性破坏时,取屈服(极限)强度或流变强度,用线性回归法或概率选择法选取标准值或设计应用值。

④ 抗剪强度参数 f 、 c 值共同组成了库伦强度准则,两个参数高度相关,不能对 f 、 c 值用分别进行算术平均统计取值的方法。

2.2 算术平均值法

① 算术平均值($\bar{X}$)可按式计算:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

式中 $\bar{X}$ ——算术平均值,因次同统计指标;

$\sum X$ ——指标测定值的总和;

N ——指标测定总次数。

② 均方差(σ)可按式计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

式中 σ ——均方差,因次同统计指标;

X_i ——测定指标值;

Σ ——总和符号;

其余符号同前。

③ 均方差的误差(m_σ)可按式计算:

$$m_\sigma = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{2N}}$$

式中 m_σ ——均方差的误差,因次同统计指标;

其余符号同前。

④ 偏差系数(C_v)可按式计算:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

式中 C_v ——偏差系数;
其余符号同前。

⑤绝对误差(m_x)可按式计算:

$$m_x = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

式中 m_x ——算术平均值的平均误差,因次同统计指标;
其余符号同前。

⑥精度指标(P_x)可按式计算:

$$P_x = \pm \frac{m_x}{\bar{X}}$$

式中 P_x 为精度指标;
其余符号同前。

2.3 线性回归法

抗剪(断)试验是在不同的法向应力 $P_1, P_2, P_3, \dots$ 作用下得到相应的剪应力值 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$ 。如果每组试件用 k 试样在 k 个不同垂直压力作用下剪切, 当一个工程地质单元体有 n 组试验, 则共有 $m = n \times k$ 对 P 、 τ 数据。在一般应力水平下, 通常假定库仑强度包络线是一条直线, 抗剪试验成果可按线性回归方程进行整理, 计算包络线上的 f 、 c 参变量, 即:

$$\tau_i = fp_i + c + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2-1)$$

式中 τ_i 为在 P_i 正应力下的剪应力值; p_i 为第 i 试块正应力值; f 为摩擦系数; c 为凝聚力; ε_i 为随机扰动量, 是相对于回归直线的误差值。采用最小二乘法求解线性回归参数 f 、 c 值要求相对于回归直线 ε_i 的绝对值的平方和为最小。同时, 假定 ε_i 相对于回归直线服从正态分布。根据线性方程相加(减)时概型不变的原理, c 及 f 的概率分布函数也应是正态分布。因此, 采用此种方法计算 c 、 f 值可不再进行概型检验, 即认为 f 、 c 的随机变量均服从正态分布。

经过线性回归方程运算后可得出如下各值:

①回归方程标准差 σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\tau_i - fp_i - c)^2}{m - 2}} \quad (2-2)$$

② τ 与 P 的相关系数 $\gamma_{\tau, P}$:

$$\gamma_{\tau, P} = \frac{m \sum \tau_i P_i - \sum \tau_i \sum P_i}{\sqrt{[m \sum \tau_i^2 - (\sum \tau_i)^2] \cdot [m \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2]}} \quad (2-3)$$

③摩擦系数 f 及凝聚力 c 的均值:

$$\bar{f} = (m \sum \tau_i P_i - \sum \tau_i \sum P_i) / \Delta \quad (2-4)$$

$$\bar{c} = (\sum \tau_i \sum P_i^2 - \sum P_i \cdot \sum \tau_i P_i) / \Delta \quad (2-5)$$

式中 $\Delta = m \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2$; m 为试件总数。

④ f 及 c 的标准差:

$$\sigma_f = \sigma \sqrt{(m/\Delta)} \quad (2-6)$$

$$\sigma_c = \sigma \sqrt{(\sum P_i^2)/\Delta} \quad (2-7)$$

⑤ f 与 c 的协方差 $\text{Cov}(f, c)$:

$$\text{Cov}(f, c) = -\bar{P}(\frac{\sigma^2}{\Delta}) \quad (2-8)$$

式中 $\bar{P}$ 为正应力的均值。

⑥ f 与 c 的相关系数 $\gamma_{f,c}$:

$$\gamma_{f,c} = \frac{\text{Cov}(f, c)}{\sigma_f \cdot \sigma_c} \quad (2-9)$$

显然, f 与 c 是一对呈负相关的变量, 它与 f, c 的协方差成正比, 而与它们各自的标准差成反比。从工程实践中也认识到, 往往是 c 值大而 f 值减小, 反之 c 值小, 而 f 会增大。 $\gamma_{f,c}$ 就是用以衡量它们相关的密切程度。据统计资料, 坝基混凝土与岩石抗剪断试验 f' 与 c' 的相关系数一般都在 0.85 以上。

把同一岩性的抗剪强度若干组试验结果中正应力 P_i 与剪应力 τ_i 值综合在一起(图 2-1), 用 2-4 式和 2-5 式计算 f, c 均值及其上、下限值。上限是用均值以上所有测点计算的; 下限是用均值线以下所有测点计算的。

按上述方法, 对三峡工程岩体本身的抗剪断强度试验参数, 采用线性回归计算列于表 2-2。对混凝土与基岩抗剪断强度试验值的选择计算线果列于表 2-3。

比较表 2-1 与表 2-2, 说明闪云斜长花岗岩的风化程度对摩擦系数的影响变化不大, 而对凝聚力影响很大, 比混凝土与基岩抗剪断强度试验的凝聚力变化范围大; 基岩本身抗剪断强度比混凝土与基岩的抗剪断强度试验的摩擦系数大^[4]。

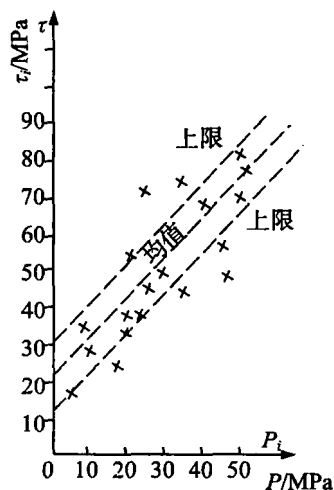


图 2-1 抗剪断强度线性回归计算

表 2-1 岩体本身抗剪断强度参数

岩石名称	风化程度	试件数量(块)	线性回归计算			
			$\bar{f}$	$\bar{c}/\text{MPa}$	$\gamma_{\tau_i, P}$	σ
闪 云	微风化	5	1.77	1.45	0.939 7	11.1
斜长花	弱风化	9	1.98	1.22	0.961 5	7.6
岗 岩	强风化(块球体)	10	1.95	2.65	0.881 7	13.7

表 2-2

混凝土与基岩抗剪断强度参数

岩石名称	风化程度	混凝土试件 抗压强度区间 R_c/MPa	试验 组数	区间强度		均值强度		线性回归	
				f	c/MPa	f	c/MPa	$\bar{f}$	$\bar{c}/\text{MPa}$
闪云斜长花岗岩	微风化	14.1 ~ 38.3	8	0.79	0.54				
				~	~	1.20	1.46		
				1.40	2.49				
	弱风化下亚带	20.1 ~ 31.4	4	1.04	0.98			1.20	1.48
				~	~	1.20	1.42	1.03	1.52
				1.43	1.96				

2.4 概率选择法

把室内或现场进行的各组试验值,用算术平均值法对 f 、 c 值分别进行统计将存在两个问题,一是 f 、 c 值是库仑包络线上的两个参变数,按线性关系用最小二乘法求得的直线角系数与截距是一个高度相关的随机变量,不能分别进行统计,而应当作联合分布按工程地质单元体综合统计;二是指标的精度问题,即参数的可靠性未与单元体的样本数量联系起来,同时也未和置信概率联系起来,使用参数的人也不知道在多大程度上可以相信这些参数^[5]。

坝基岩体有较大的变异性,这是由于岩体内部物质成份及结构构造在水平和垂直方向上都有明显的变化,因此引起岩体工程参数的不确定性。岩石抗剪强度的不确定性除了来源于岩石性质的因素以外,还由于勘探或取样数量不足以及测试过程中所带来的随机误差。目前,岩石力学参数选择正在从决定论向选择论的方向发展,力学参数的不确定性和随机性正在得到普遍承认,因此,依据概率论把试验数据作为随机变量进行误差处理的选取标准值或设计应用值的方法必然得到工程应用。

2.4.1 f 、 c 的联合分布

对于一对相关的变量,我们可以用二元随机变量的联合分布来拟合试验数据。前已述及, f 、 c 是一组抗剪试验数据经库仑方程整理出来的具有高度相关性的两个参数,而它的数值都是在一定的区间 $[a, b]$ 范围内,因此用 β 分布进行拟合较为合适。 β 分布的概率密度函数为:

$$f_{u,v}(u,v) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta + \gamma + 3)}{\Gamma(\alpha + 1)\Gamma(\beta + 1)\Gamma(\gamma + 1)} \cdot u^\alpha v^\beta (1 - u - v)^\gamma \quad (2-10)$$

$$(u, v \geq 0, \theta \leq u + v \leq 1, \alpha, \beta, \gamma > -1)$$

式中 u 和 v 是相应于变量 c 、 f 的无量纲参数,即 c 、 f 的标准化变量; $\Gamma(\cdot)$ 为 Γ 函数; α 、 β 、 γ 为尺度参数,其计算式为:

$$\alpha = (\beta + 1)(\bar{u}/\bar{v}) - 1 \quad (2-11)$$

$$\beta = -[u\bar{v}^2/(\gamma_{u,v} \cdot \sigma_u \cdot \sigma_v)] - \bar{v} - 1 \quad (2-12)$$

$$\gamma = (\beta + 1)/\bar{v} - (\alpha + \beta + 3) \quad (2-13)$$

式中

$$\begin{aligned}\bar{u} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{c} - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \\ \bar{v} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{f} - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \\ \sigma_u &= \sqrt{\frac{\sigma_c^2}{4(c_{\max} - c_{\min})}} \\ \sigma_v &= \sqrt{\frac{\sigma_f^2}{4(f_{\max} - f_{\min})}}\end{aligned}$$

式中 $\bar{c}, \bar{f}$ 为 c, f 指标的均值, $c_{\max}, c_{\min}, f_{\max}, f_{\min}$ 分别为 c, f 指标的上限和下限值; $\gamma_{u,v} = \gamma_{c,f}$ 为 c 与 f 的相关系数。

2.4.2 概率取值

在求得联合 β 分布的概率密度函数之后, 可利用累积联合分布计算某一置信水平的 u_0 和 v_0 的估值, 或在指定了估值 u_0 和 v_0 之后可计算随机变量 u 和 v 小于 u_0 和 v_0 的概率, 即:

$$F_{u,v}(u_0, v_0) = P[u \leq u_0, v \leq v_0]$$

其值定义为

$$F_{u,v}(u_0, v_0) = \int_{u_{\min}}^{u_0} \int_{v_{\min}}^{v_0} f_{u,v}(u, v) du dv \quad (2-14)$$

这是一个非常重要的公式, 累积联合分布可用于同步计算抗剪强度 c, f 指标的可靠性取值。例如, 在一个工程地质单元体内有若干组现场抗剪断试验结果, 按最小二乘法进行综合统计, 得出 c, f 的均值 $\bar{c}, \bar{f}$ 作为 u_0 和 v_0 的估值代入以上诸式计算, 求得累积联合分布 $F_{u,v}(u_0, v_0)$, 它表示随机变量 u 和 v 小于 u_0 和 v_0 的概率, 称为超越概率或风险概率, 它以 P_f 表示, 定义可靠度 $p_r = 1 - P_f$, 则:

$$p_r = 1 - F_{u,v}(u_0, v_0) \quad (2-15)$$

如果计算的可靠度 p_r 值太低, 达不到规定的目标值 (P_r), 则可以降低 c 和 f 值, 例如将均值减去一定倍数的标准差值得出“标准值”作为新的 u_0 和 v_0 的估值重复上述计算。计算结果如 $p_r > P_r$, 则计算终止; 如 $p_r < P_r$, 则可改变 α 取值重新计算, 直到满足工程上按不同设计阶段对单项参数目标可靠度指标的要求, 此时的 c, f 值即为所求, 它具有明确的概率含义。标准值按下式计算:

$$c_k = \bar{c} - k_p \cdot \sigma_c \quad (2-16)$$

$$f_k = \bar{f} - k_p \cdot \sigma_f \quad (2-17)$$

式中 k_p 为与概率有关的系数, 如取显著性水平 $\alpha = 0.20$ 分位数时, 则 $k_p = 0.842$; 如取 $\alpha = 0.15$, 则 $k_p = 1.036$ 。

2.4.3 样本容量与置信概率的关系

岩石工程实际抗剪强度的真值是难以确知的, 因为它们在各种因素影响下是随机变

量,人们只能在工程地质单元体中抽取样本进行试验,根据样本信息推断总体。样本或试验组数究竟多少比较合适,目前尚无明确标准。样本愈多,指标精度愈高是显而易见的,但试验费用大,耗时长。样本少,数据可靠性差,可能会影响到工程的安全。因此,要研究一定精度要求下的最小样本容量。从数理统计角度看,30 组以上称为大子样,才具有统计意义。这对岩石工程来说往往难于满足要求,特别是现场岩石抗剪断试验耗资大、时间长。但是,样本容量与岩石变异性、置信水平和精度要求有关,可用下式确定最小样本容量 N :

$$N \geq (\delta_x \cdot t_\alpha / \rho)^2 \tag{2-18}$$

式中 δ_x 为岩体单元抗剪强度的变异系数,反映岩体非均质特性和随机误差; t_α 为可信指标,根据置信水平 α 查表得出; ρ 为精度指标(相对偏差率), α 与 ρ 是根据设计阶段、工程等级提出的期望值。据 2-18 式绘制成图 2-2 的一组双曲线。从该图可以看出, $N > 30$ 曲线明显变缓, ρ 趋于一定值,它表明即使样本再增加,但精度提高有限。而 $N = 20 \sim 30$ 是一个过渡区, $\rho \sim N$ 曲线的曲率也比较平缓,所以,对岩石抗剪强度试验而言,大子样可定为 $N \geq 20$ 。基于岩体变异系数、可信概率及精度指标,拟定初步设计阶段岩石抗剪强度试验最小样本容量参考指标列于表 2-3。

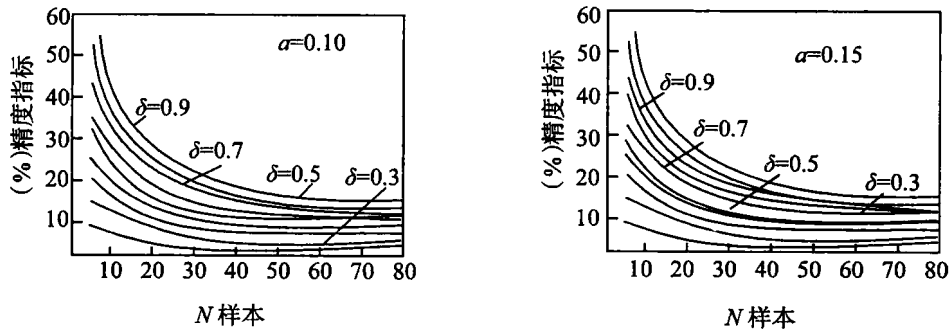


图 2-2 样本容量与精度指标的关系

表 2-3 初设阶段抗剪试验所需最小样本容量								
变异系数 δ_x	0.10		0.20		0.30		0.40	
精度指标 ρ (%)	5		10		10		10	
置信水平 α	0.15	0.10	0.15	0.10	0.15	0.10	0.15	0.10
样本容量 N	6	7	8	9	12	15	17	25

现在进一步研究样本容量(N)与可靠度(P_r)和置信概率(C)的关系。根据统计理论,要求总体包括在样本的最大、最小值之内的百分比不少于 C 的概率为 P_r 时,所需样本容量 N 由下式确定:

$$C = 1 - \exp(-N \cdot I_\alpha P_r) \tag{2-19}$$

据(2-19)式绘制成图 2-3 的诺谟图。从此图可以看出,在 $N = 10 \sim 30$ 的情况下,可以满足工程上的不同精度要求。对大型岩石工程不同设计阶段抗剪强度指标概率取值