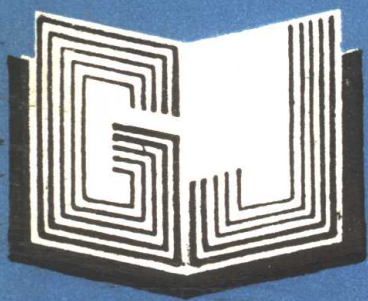


984499



高等学校教材



# 水工建筑物专题

(复杂坝基和地下结构)

武汉水利电力大学 陆述远 主编



984499

高等学校教材

---

# 水工建筑物专题

(复杂坝基和地下结构)

武汉水利电力大学 潘述远 主编

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

### 内 容 提 要

本书系高等学校水工专业本科生和研究生选修课的通用教材。全书共分5章,其内容包括:岩基重力坝抗滑稳定分析,拱坝和坝座的抗滑稳定,岩基稳定的可靠性分析,地下结构及其喷锚支护,水工隧洞衬砌结构计算等。

本书主要供有关院校水工专业选修课教学用书,也可作为相近专业的教学参考书,还可供有关工程技术及科研人员学习和参考。

### 高 等 学 校 教 材

#### 水工建筑物专题

(复杂坝基和地下结构)

武汉水利电力大学 陆述远 主编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 11.75印张 273千字

1995年9月第一版 1995年9月北京第一次印刷

印数 001—580册

ISBN 7-120-02234-2/TV·893

定价 9.20 元

## 前 言

本教材是根据水利部制定的第三轮教材编审出版规划及高等学校水利水电类专业教学委员会会议讨论通过的教学大纲编写的。全书限于篇幅，仅选编了对复杂坝基和地下结构设计有代表性的五个专题，通过对这五个专题的深入分析研究，使学生学到一些基本概念、基本理论和基本知识。在着重讲述比较成熟的理论和经验的同时，还尽可能多地介绍一些事物的发展过程、最新成就、当前动态、存在问题和今后的发展方向，以利于开拓学生视野和思路、培养学生独立思考和独立分析解决实际问题的能力。

本教材由武汉水利电力大学陆述远主编。第一章由陆述远编写；第二章由上海勘测设计研究院汝乃华编写；第三章由天津大学郭怀志编写；第四章由西安理工大学刘景翼编写；第五章由西安理工大学陈尧隆编写。

本教材由清华大学陈兴华主审，他为本书付出了辛勤劳动，提出了许多宝贵的修改意见。在编写大纲讨论会上，到会的兄弟院校代表也提出了不少宝贵意见。在编写、审稿和出版过程中，又得到了水利部科教司、水利电力出版社许多同志的热情支持和帮助。在此一并致谢。

由于水平所限，书中难免存在一些错误和不妥之处，诚恳地希望广大读者批评指正。

编 者

1993. 11.

3A6 10/03

# 目 录

## 前 言

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第一章 岩基重力坝抗滑稳定分析.....        | 1   |
| 第一节 概述 .....                | 1   |
| 第二节 沿坝基面的抗滑稳定分析.....        | 2   |
| 第三节 沿坝基岩体的抗滑稳定分析 .....      | 22  |
| 第二章 拱坝和坝座的抗滑稳定 .....        | 36  |
| 第一节 问题的发生和演进 .....          | 36  |
| 第二节 马尔帕塞冲击 .....            | 42  |
| 第三节 60~80 年代拱坝稳定研究的动向 ..... | 53  |
| 第四节 太沙基的观点 .....            | 63  |
| 第五节 拱坝的上滑稳定和安全准则 .....      | 68  |
| 第三章 岩基稳定的可靠性分析 .....        | 74  |
| 第一节 工程可靠性 .....             | 74  |
| 第二节 随机变量 .....              | 79  |
| 第三节 可靠度分析方法.....            | 88  |
| 第四节 系统可靠度分析.....            | 95  |
| 第五节 可靠度方法展望 .....           | 102 |
| 第四章 地下结构及其喷锚支护.....         | 111 |
| 第一节 概述 .....                | 111 |
| 第二节 喷锚技术及新奥法 .....          | 113 |
| 第三节 地下洞室力学状态分析 .....        | 120 |
| 第四节 地下洞室的围岩稳定特性.....        | 130 |
| 第五节 地下结构的喷锚支护设计.....        | 135 |
| 第五章 水工隧洞衬砌结构计算.....         | 145 |
| 第一节 概述 .....                | 145 |
| 第二节 圆拱直墙形隧洞衬砌计算的力法 .....    | 149 |
| 第三节 水工隧洞衬砌边值问题数值解法 .....    | 161 |
| 第四节 水工隧洞衬砌计算的有限单元法 .....    | 172 |
| 参考文献.....                   | 182 |

# 第一章 岩基重力坝抗滑稳定分析

## 第一节 概 述

半个多世纪以来,工程技术人员对抗剪、抗剪断等的试验方法,有关抗剪强度参数的选择,以及抗滑稳定计算等方面,做了大量研究工作。在运用于工程实践方面积累了丰富的经验,抗滑稳定分析方法在实践中得到不断总结改进。致使重力坝的体积逐渐减小而趋于合理。如 30、40 年代,重力坝的底宽与坝高之比人们多采用 0.9 左右,有的用到 1.0 以上;50、60 年代降到 0.8 左右;到了 70 年代,已减小到 0.7 左右。例如美国 1972 年建成的利贝 (Libby) 重力坝,坝高 136.6m,坝底宽 91m,宽高比为 0.666。美国 1973 年建成的德沃歇克 (Dworshak) 重力坝,坝高 219m,底宽 152m,宽高比为 0.696。宽高比的减小意味着工程量的减少,从 30 年代到 70 年代约减少 20%~30%。

抗滑稳定问题涉及的因素较多,问题比较复杂,截至目前,并没有得出有充分理论依据的研究成果,还主要依赖于经验、半经验公式和经验判断。正如 1979 年 6 月 25 日,在卡特总统指示下,美国总统科学技术政策办公室,对 70 年代美国发生的一系列大坝失事进行调查,写给卡特总统的报告中指出的:“虽然人类筑坝已有几千年历史,但是直到目前,坝工技术并不是一门严密的科学,而更恰当地说是一种‘技艺’。不论是建造新坝还是改建老坝,在每一个规划和实施阶段都还需要依赖于经验判断”。而对于坝基稳定问题的研究尤其如此。

衡量坝基是否稳定,需要规定标准,即失稳(或稳定)准则。目前已经提出来的有:点破坏准则、整体破坏准则、极限变形准则和稳定临界准则。点破坏准则以坝基面和坝基内任一点都不出现剪切破坏作为稳定的标准。整体破坏准则以坝体沿坝基面或连同一部分坝基不出现整体滑移作为稳定的标准。极限变形准则以保证坝体或坝基能正常工作的极限变形值作为稳定的标准。稳定临界准则指的是,随着荷载的增加,坝基出现由点破坏到整体失稳破坏的破坏过程。研究表明,在这一破坏过程中,有一临界点。在这点之前,坝处于稳定阶段,表现在随荷载增加坝基屈服区的扩展是缓慢的稳定的。过了这点以后,屈服区的扩展极不稳定,迅速发展直至整体失稳破坏。本准则就是以这一临界点作为衡量稳定的标准。

整体破坏准则,因其简单易于掌握而最早被采用,并一直广泛应用到现在。如习用的纯摩公式(或摩擦公式)、剪摩公式、抗剪断强度公式等,所依据的均为整体破坏准则。以整体破坏作为设计标准,显然是不允许的。为了保证安全,必须使用较大的安全系数,或采用经过打了折扣的抗剪强度参数。可见,其所遵循的已经不是整体破坏准则了。点破坏准则,像抗拉、抗压强度审查采用点破坏准则一样,属于抗剪强度审查,适用于坝身和坝基面,但不适用于坝基。因为坝基岩体存在不同程度的节理裂隙甚至断层破碎带,个别点出现屈服破坏是难以避免的,而个别点甚至局部区域出现屈服并不一定影响大坝的安全和

正常工作。极限变形准则是设计必须遵循的,但坝或坝基究竟变形到多大才不能正常工作,很难定量。这种第二极限状态的审查只能和第一极限状态即强度极限状态的审查同时进行,而不能互相取代。也就是说,不能以它作为唯一的破坏准则,因此,这一准则在工程实践中还很少应用。稳定临界准则则是在分析了点破坏准则和整体破坏准则的不合理性之后,在研究坝基岩体的破坏过程、破坏机理的基础上,从理论分析入手提出来的一个准则。用这个准则提出来的稳定计算公式,已经不再是经验或半经验公式,而是属于理论公式。

下面分别讲述沿坝基面和沿坝基岩体深部的抗滑稳定分析原理和方法。

## 第二节 沿坝基面的抗滑稳定分析

### 一、抗滑稳定分析方法的历史回顾

重力坝是世界上最早出现的一种坝型。公元前 2900 年,在埃及首都孟非斯城(Memphis)附近尼罗河上修建的一座高 15m,顶长 240m 的挡水坝,是世界上第一座坝。从那时算起,筑坝已有 5000 年的历史。但直到 1853 年,即至今 140 年前,法国工程师塞兹利(Sazilly)对砌石重力坝安全提出了两条基本设计准则,即沿用至今的强度准则和抗滑准则,使设计才开始有了理论依据。作为两条基本设计准则之一的抗滑稳定准则,指的是坝体的一部分不允许沿着其下面的坝体滑动,或者整个坝体不允许沿着坝基面滑动。以不等式表示为

$$\Sigma F_H \leq f \Sigma F_V \quad (1-1)$$

式中  $\Sigma F_H$  ——作用于滑动面以上坝体的力在平行滑动面方向投影的代数和;

$\Sigma F_V$  ——作用于滑动面以上坝体的力在垂直滑动面方向投影的代数和;

$f$  ——滑动面的摩擦系数。

当时,由于对材料的抗剪断强度知之甚少,而库仑已在此之前提出了静摩擦理论,所以公式中只考虑用摩擦力抵抗滑动,这就是开始的纯摩公式(或摩擦公式)。

到 1887 年,人们已经开始认识到阻滑力包括摩擦力和凝聚力两部分。提出计算式为  $\Sigma F_H \leq f \Sigma F_V + cA$ ; 式中  $c$  为凝聚力,MPa;  $A$  为滑动面面积,  $m^2$ ; 其它符号同前。但是,由于当时对  $c$  值大多数人都认为不可靠,且难以精确确定,所以,只能仍不计凝聚力部分,而把它当作潜在安全度。式中摩擦系数  $f$  采用经过仔细修琢加工的光面试件由室内试验求得。虽然上述公式并未计入安全系数的概念,但采用光面摩擦试验的  $f$  值与现场开挖后的粗糙基岩面的实际  $f$  值相比,已具有相当 2 倍以上的安全系数,再加上忽略凝聚力的影响,实际的安全系数会更高。

从 1853 年到现在,纯摩公式在形式上并无重大变化。只是在 1910 年以前,绝大多数坝在计算  $\Sigma F_V$  时不计扬压力。因为当时人们还不知道有扬压力存在,或知道存在但尚不知如何用于工程实际。扬压力的概念是 1882 年由英国工程师迪肯(G. F. Decon)通过实验和实践提出来的,并用以指导过凡威(Vyrnwy)坝的建造。1900~1906 年,美国建造了世界上第一座考虑扬压力的瓦丘塞特(Wachusett)坝,坝高 62.5m。计入扬压力是使用纯摩公式的一个重要变化。1910~1938 年间,各国以不同方式计入扬压力后,运用纯摩公式陆

续建成了 30m 以上的坝超过 200 座，其中有不少已超过 100m 高。如美国的沙斯塔 (Shasta) 坝，高 185m，大苦力 (Grand Coulee) 坝，高 168m 等。计入扬压力后建造的坝，已经没有沿着坝与地基接触面滑动失事的事例，证明这个公式虽然简单属经验公式，但却是可以信赖的，可以用这个公式建造更高的坝。例如，1960 年建成的当今世界上最高的重力坝，瑞士的大狄克逊 (Grand Dixence) 坝，高 285m，也是用这个公式评价抗滑稳定的。

30 年代是美国筑坝的全盛时期，胡佛 (Hoover) 坝高达 221m，是当时世界上最高的重力坝。坝越筑越高，人们就担心阻滑力中原来作为潜在安全度的凝聚力部分所占比重将越来越小。针对 30 年代混凝土坝已占绝大多数，施工工艺水平已有较大提高的实际情况，从安全可靠、经济合理出发，美国垦务局退休总工程师亨尼 (D. C. Henny) 于 1934 年提出了考虑凝聚力  $c$  的剪摩公式

$$K_1 = \frac{f_1 \Sigma F_V + c_1 A}{\Sigma F_H} \quad (1-2)$$

并建议摩擦系数  $f_1$  取 0.7；凝聚力  $c_1$  取混凝土的纯剪强度，考虑到坝基面剪应力呈抛物线分布，最大剪应力约为平均剪应力的 2 倍，故再乘 0.5，建议采用 2.8MPa；抗滑稳定安全系数  $K_1$  定为 4。这是亨尼在与有长期使用经验的纯摩公式对比，并考虑剪摩公式中已经包括了全部可能的阻滑力情况下建议的。这就是开始的剪摩公式，这个公式首先被美国垦务局采纳， $f_1$  和  $c_1$  值大多数采用混凝土试件的试验值，即  $f_1 = 0.65$ ， $c_1 = 2.8\text{MPa}$ ，只有基岩强度低于混凝土强度的少数例外。

30 年代以后，受美国科学技术的影响，剪摩公式被日本、印度、加拿大、澳大利亚等国家相继采用。用剪摩公式设计建成了许多高坝：如日本的佐久间坝，坝高 150m；印度的巴克拉坝，坝高 226m；美国的德沃歇克坝，坝高 219m 等。实践证明，按剪摩公式设计的坝，安全是有保证的。

纯摩公式已经使用了一百多年，由于它的安全可靠，即使在出现剪摩公式以后，仍被欧洲各国（如德、法、瑞士等国家）采用至今。剪摩公式曾被许多国家使用迄今已有近 60 年的历史，现在美国、加拿大、日本等国仍在使用。在美国，纯摩、剪摩公式曾长期同时使用，美国垦务局直到 1967 年才在规范中删去了纯摩公式。在长期使用过程中，两个公式的表达形式从未改变过，但内容却有很多改进。各国都根据自己的实践经验制定了符合本国实际的规程规范。

内容的改进主要表现在  $f$ 、 $K$  和  $f_1$ 、 $c_1$ 、 $K_1$  等参数值的选取上。如对纯摩公式中  $f$  值的选取，主张把镜面摩擦试验改为反映实际情况的粗面摩擦试验，使用较大尺寸的试件，在工程现场进行。但粗面究竟粗糙到什么程度才能反映实际，仍是人们认识难以一致的问题。我国不少工程曾采用先进行抗剪断试验，再在剪断面上进行抗剪试验的方法确定摩擦系数  $f$ 。根据统计， $f$  值各国一般在 0.4~0.8 之间选取。对于剪摩公式中的  $f_1$ 、 $c_1$  和  $K_1$  值的选取，则存在两种完全不同的观点和方法，形成了形式相同而含义完全不同的两个公式，即剪摩公式和抗剪断强度公式。

亨尼提出的剪摩公式 (1-2) 认为，坝与基岩之间处于“胶结”状态。当这个“胶结”面上没有正应力作用时，就只存在着纯剪强度  $c_1$ ， $c_1$  乘以滑动面面积  $A$  得总的纯剪阻滑力

$c_1 A$ 。在有正应力作用后，又增加了一项摩擦力  $f_1 \Sigma F_v$ ，总阻滑力为  $f_1 \Sigma F_v + c_1 A$ ，故抗滑稳定安全系数  $K_1$  由式 (1-2) 表示。式中  $f_1$  多采用纯摩公式中的  $f$  值。如前所述， $f$  值有个改进和发展过程， $c_1$  值考虑坝基面凹凸不平，而坝体混凝土与基岩胶结良好，受力后一般在混凝土内部或基岩内部剪断。因此，采用混凝土的或基岩的纯剪强度，取两者中的较小值。据统计， $c_1$  值各国一般在 2~4MPa 范围内选取。70 年代以后，美国垦务局重力坝设计准则已将摩擦系数  $f_1$  提高到 1.0， $c_1$  值仍取混凝土抗压强度的 10%，即纯剪强度，安全系数也减到正常情况为 3.0，特殊情况加地震时为 1.0。

到 50 年代，苏联学者对剪摩公式作了改进，认为由摩擦试验和纯剪试验这两个不同试验获得的参数  $f_1$  和  $c_1$  值组成阻滑力，物理概念不明确，这是剪摩公式的缺点。因此，建议用抗剪断试验所求得的两个参数  $f'$  和  $c'$ （即库仑—奈维抗剪强度表达式  $\tau = f' \sigma + c'$  中的  $f'$  和  $c'$  值）分别代替剪摩公式中的  $f_1$  和  $c_1$  值，即得到所谓的抗剪断强度公式

$$K' = \frac{f' \Sigma F_v + c' A}{\Sigma F_H} \quad (1-3)$$

式中  $K'$ ——抗滑稳定安全系数；

$f'$ ——抗剪断摩擦系数或抗剪断强度比例系数；

$c'$ ——抗剪断凝聚力或抗剪断强度常数；

其余符号同前。

抗剪断强度公式比剪摩公式在理论上有更合理的一面。但如前所述它依据的是整体破坏准则，整体破坏作为设计标准是不允许的。为了安全必须给予较大的安全系数，这又主要依靠经验，因此，它只能属半经验公式。值得指出的是，大量试验研究表明，抗剪断摩擦系数  $f'$  是个比较稳定的数值，而抗剪断凝聚力  $c'$  则是对各种因素反映敏感、稳定性差、变幅较大的数值。因此，在使用试验值时，常给  $f'$  值以较小的安全系数，而给  $c'$  值以较大的安全系数。这在国内外坝工界已取得一致认识。

自新中国成立以来，我国长期同时使用纯摩公式和抗剪断强度公式。随着实践经验的积累和试验研究的深入，已经制定了符合我国实际的规程规范。如对纯摩公式 (1-1) 引入了安全系数的概念，并根据坝的等级和荷载组合情况规定了不同的安全系数。此时式 (1-1) 改写为

$$K = \frac{f \Sigma F_v}{\Sigma F_H} \quad (1-4)$$

式中  $K$ ——抗滑稳定安全系数，在 1.0~1.10 内选用（详见规范）；

其余符号同前。

$f$  值的选取，应参考野外试验成果的屈服极限值（塑性破坏型）或比例极限值（脆性破坏型）以及室内试验成果，经地质、试验和设计人员共同分析研究确定。对抗剪断强度公式 (1-3) 中的  $f'$  和  $c'$  值，规范规定选用野外试验的峰值的小值平均值或野外试验和室内试验的峰值的小值平均值。选取时应以此值为基础，结合现场实际情况，参照地质条件类似的工程经验，并考虑工程处理效果，由地质、试验和设计三方面人员共同分析研究确定。 $K'$  值不分级别，基本组合采用 3.0；特殊组合 (1) 采用 2.5；特殊组合 (2) 地震情况不小于

2.3. 规范规定, 核算坝体抗滑稳定时, 可选用式 (1-3)、式 (1-4) 的任一公式进行, 即要求只满足一个公式即可。

抗滑稳定分析方法的历史主要是上述式 (1-1) 至式 (1-3) 三个公式产生和发展的历史, 但人们一直不满足这一经验和半经验状况, 希望能从理论上解决这一课题。岩石力学、断裂力学、弹塑性有限元、数值计算方法和计算机科学等的发展, 为理论上解决这一课题提供了可能条件。先后出现了点抗剪强度公式和稳定临界准则公式。下面将重点介绍它们的原理和方法。

## 二、点抗剪强度公式

理论与实践都已证明, 混凝土与基岩是能够胶结良好的。因此, 只要坝体和坝基各点的剪应力不超过相应点材料的允许抗剪强度 (即允许剪应力), 就认为大坝应该处于稳定状态, 即抗滑问题实质上是抗剪问题, 点抗剪强度公式就是以此为根据提出来的。

根据试验成果得知, 材料的抗剪强度  $\tau_0$  常常是该点剪切面上正应力  $\sigma$  的函数, 而且可以近似地以一线性关系表示, 即所谓库仑—奈维 (Coulomb-Navier) 抗剪强度表达式  $\tau_0 = f_0 \sigma + c_0$ , 当剪应力  $\tau$  达到  $\tau_0$  时, 就会沿剪切面发生剪切破坏。因此, 点抗剪强度公式即为

$$K_0 = \frac{f_0 \sigma + c_0}{\tau} \quad (1-5)$$

式中  $\sigma$ ——某计算点剪切面上的正应力;

$\tau$ ——某计算点剪切面上的实际剪应力;

$f_0$ ——计算点处材料的抗剪断摩擦系数或抗剪断强度比例系数;

$c_0$ ——计算点材料的抗剪断凝聚力或抗剪断强度常数;

$K_0$ ——点抗剪强度安全系数。

1948 年, 苏联 B. И. 雪尔康诺夫, 根据试验室和现场的试验成果及理论分析, 提出了按抗剪强度计算大坝稳定的公式。即过去我们常称的雪尔康诺夫公式, 就是早期的点抗剪强度公式。

点抗剪强度公式遵循的是点破坏准则。如前所述, 点破坏准则适用于坝身, 也可用于坝基面。这是因为抗滑就是抗剪, 抗剪强度审查就是抗滑稳定审查, 抗剪强度审查应该和抗拉、抗压强度审查一样。而重力式坝的抗拉、抗压强度审查所依据的就是点破坏准则。但点破坏准则不适用于坝基内, 因为坝基岩体结构复杂, 存在不同程度节理裂隙甚至断层破碎带, 个别点出现屈服破坏 (如拉裂、剪断) 是难以避免的。如果按点破坏准则设计, 要么过于浪费, 要么难以做到。下面主要介绍点抗剪强度公式在沿坝基面的抗滑稳定分析中的具体应用。

### (一) 抗剪强度的取值标准

使用点抗剪强度公式 (1-5), 首先遇到的是公式中  $f_0$ 、 $c_0$  的取值标准问题。因此, 首先要研究剪切破坏准则, 确定剪切破坏的设计标准。

大量的试验研究表明, 尽管剪切破坏的形式很多, 差异也很大, 但概括起来, 大体可归纳为两种类型。其典型的剪应力位移曲线如图 1-1 所示。一为脆性破坏型, 较为坚硬完整岩体的破坏多属此类; 另一为塑性破坏型, 半坚硬或软弱破碎岩体的破坏多属此类。

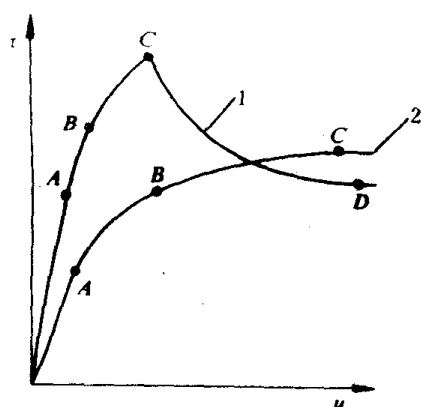


图 1-1 剪应力-剪位移  
关系曲线图

1—脆性破坏型；2—塑性破坏型

脆性破坏型按其破坏机理和剪应力剪位移曲线的性状，可大体分为三个发展阶段。第一阶段可称为弹性工作阶段。根据测表的反映，这一阶段的剪应力位移曲线基本上呈直线变化，而且荷载解除后，试块可以恢复到原来的位置。说明在这一阶段内，即使胶结面和基岩内的个别地点有可能出现塑性状态，但范围极小，不影响试块与基岩这一受力整体仍处于弹性状态的特点。这一阶段相当于大坝蓄水后，在各种荷载作用下，坝体连同地基一起向下游位移，当水库放空、荷载去掉后，坝体又由于弹性而恢复到原来位置的情况。曲线 1 上的 A 点为此阶段的终点，常称为比例极限。这一特征点对研究大坝的抗滑稳定性具有重要意义。

剪应力继续加大，即进入第二阶段，此时试块与基岩（主要是基岩或完全是基岩）的塑性变形开始加大，位移速率较第一阶段有所增加，剪应力剪位移关系曲线逐渐偏离直线段向横轴弯曲而成为非线性。当荷载解除后，试块在基岩和试块的弹性作用下，位移立即恢复一部分（属瞬时弹性变形），经过一定时间又恢复一部分（属后效弹性变形），其余的就不能恢复了，即塑性变形部分。这一阶段可称为塑性工作阶段，在图 1-1 曲线 1 上，它始于 A 点，终于 B 点。B 点常称为屈服极限或屈服点。

剪应力继续增加，即进入第三阶段，此时，剪位移速率明显增大，试块出现滑移。剪应力到达峰值后骤然下降，有时并伴有巨响，试块至此全部剪断。此阶段可称为剪断阶段，它始于 B 点，终于 C 点。C 点常称为破坏极限，其抗剪强度常称为极限强度或峰值。过了 C 点，剪应力骤降到某一值后，在荷载维持不变的情况下，以一定速度沿剪断面向前滑移，此时的强度称为残余强度。

重力式坝的设计，要求在正常和非常运行情况下大坝能保持在弹性或基本上在弹性状态下工作。因此，应取弹性范围内的抗压、抗拉和抗剪强度作为大坝设计的取值标准。重力坝设计规范规定的容许压应力和容许拉应力都能满足这一要求。因此，在抗剪方面也应按这一要求，取比例极限值即直线段终点 A 作为抗剪强度的取值标准，即遵循比例极限强度准则。苏联罗查 (Rocha) 曾于 1960 年提出，并于 1971 年再度推荐以比例极限值作为设计计算的取值标准。我国长科院岩基研究室经过比较全面的分析论证，建议对脆性破坏型取比例极限强度准则，对塑性破坏型取屈服极限强度准则。这一建议已被我国坝工界所接受，因此，点抗剪强度公式 (1-5) 中的  $f_0$  和  $c_0$  值应按比例极限强度选用。

## (二) 在弹性工作状态下混凝土试块与基岩胶结面上的应力分布

从 1933 年由克伦第一次对混凝土块与岩石间水泥砂浆胶结缝进行抗剪强度试验，以及对砂岩、石灰岩与花岗岩进行直剪试验时算起，60 年来，国内外已进行了大量试验研究工

作,积累了丰富的资料。但在整理试验成果时,却都把试块与基岩胶结面(即剪切面)上的正应力 $\sigma$ 和剪应力 $\tau$ 按均匀分布来处理,以此来求算极限强度(峰值)似乎还有一定道理,若以此来求算比例极限强度就不符合实际了。为了探讨这一问题,60年代武汉水利电力学院坝基稳定科研组做过光弹试验。80年代又对矩形、梯形、法国式、葡萄牙式等四种试块的七种弹模比情况(指试块混凝土与基岩的弹模之比)作了平面有限元计算,对梯形试块的七种弹模比情况作了三维空间有限元计算。试验和计算成果都指出,在弹性工作状态下,胶结面上的正应力和剪应力分布是极不均匀的,而且随着混凝土与基岩弹模比的改变,其应力分布也有很大变化,如图1-3所示。图1-2为计算用的梯形标准试块及加荷方式图。图1-3为用三维弹性有限元法对有代表性的七种弹模比所算得的胶结面应力分布图。据统计,岩基上的混凝土坝,其混凝土与基岩的弹模比一般变动在 $E_d/E_f=5\sim0.2$ 范围内。因此,选择了 $E_d/E_f=5.0、2.0、1.25、1.0、0.8、0.5、0.2$ 七种弹模比作为分析研究的典型代表。胶结面上的应力分布可以用弹性或弹塑性有限元法求得,也可以用我们编制的专用数表(表1-1就是其中的一种)求得。

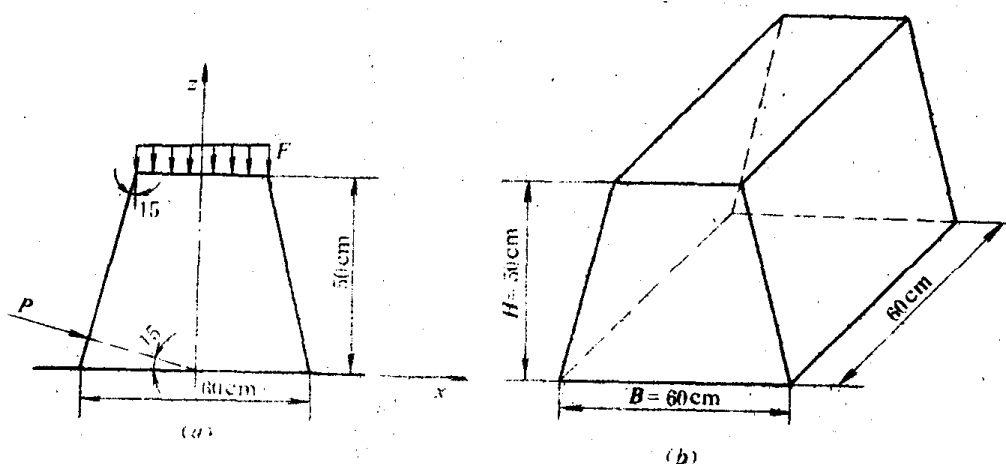


图 1-2 梯形试块尺寸及加荷方式图

### (三) 真实抗剪比例极限强度

如前所述,为了保证大坝在正常和非常运转情况下始终在弹性或基本上在弹性状态下工作,设计时,应取比例极限强度作为抗剪强度的设计取值标准。在弹性工作状态下,试块混凝土与基岩胶结面上的正应力和剪应力分布是极不均匀的。研究它的破坏过程和破坏机理可以发现,在胶结面(剪切面)上必有一点的应力状态对抗剪最为不利。即此点的抗剪强度安全系数 $K_0$  [ $K_0 = (f_0\sigma + c_0) / \tau$ ] 最小,此点常称为抗剪最不利点。该点在剪力作用下首先达到弹性极限(即比例极限强度)而进入塑性状态。按该点刚好达到弹性极限时的正应力和剪应力求得的抗剪强度才是真正的抗剪比例极限强度。过去工程界所说的比例极限强度是指由平均正应力和平均剪应力所整理出来的成果,但它只是近似的并不是真实的。为了与过去的相区别,才加了真实二字,称为真实抗剪比例极限强度,其参数由 $f$ 和 $c$ 表示。 $f$ 称为真实抗剪比例极限强度摩擦系数, $c$ 称为真实抗剪比例极限强度凝聚力。

如果试验能提供到达比例极限强度时剪切面(即胶结面)上的正应力和剪应力分布,则

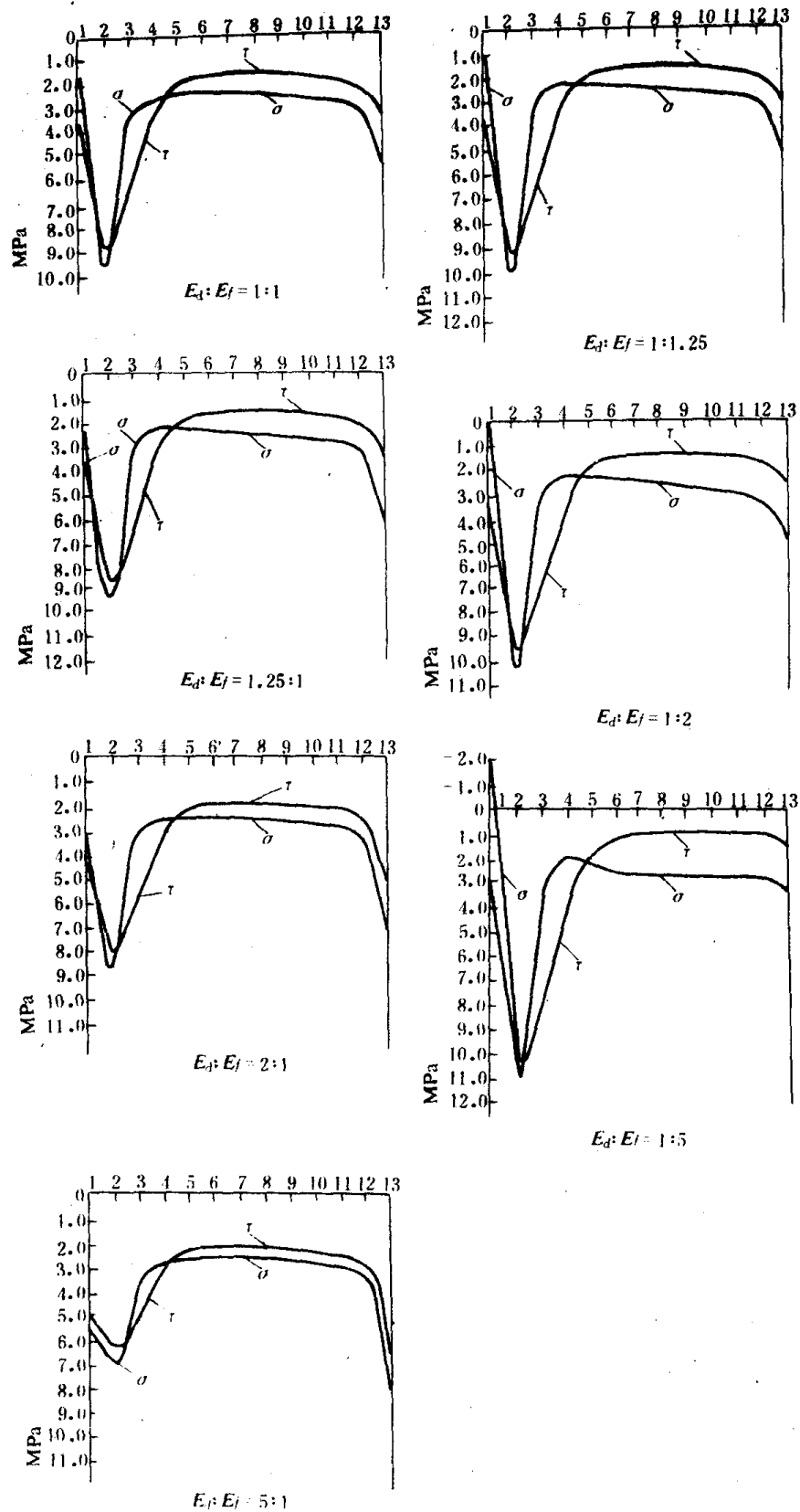


图1-3 梯形试块混凝土与基岩胶结面应力分布图

可直接用试验数据求得真实抗剪比例极限强度。考虑到我国目前的模型试验一般还不能提供剪切面上的应力分布这一实际情况，我们建议通过以下步骤求得。

(1) 求出平均抗剪比例极限强度公式。通过现场或室内抗剪断模型试验，求出按平均正应力和平均剪应力整理试验成果所获得的平均抗剪比例极限强度公式  $\tau_A = f_A \sigma_A + c_A$ 。式中  $f_A$ 、 $c_A$  分别表示平均抗剪比例极限强度摩擦系数和平均抗剪比例极限强度凝聚力， $\tau_A$  表示平均正应力为  $\sigma_A$  时的平均抗剪比例极限强度。

(2) 求试块到达比例极限强度值时胶结面上的应力分布。任选两个  $\sigma_A$ ，用  $\sigma_{A1}$  和  $\sigma_{A2}$  表示，代入上式可分别求得相应的  $\tau_{A1}$  和  $\tau_{A2}$ ，根据  $\sigma_{A1}$ 、 $\tau_{A1}$  和图 1-2 可求得作用在试块上的铅直荷载  $F_{A1}$  和倾斜荷载  $P_{A1}$ 。同理，根据  $\sigma_{A2}$ 、 $\tau_{A2}$  可求得相应的铅直荷载  $F_{A2}$  和倾斜荷载  $P_{A2}$ ，并分别求得在荷载  $F_{A1}$ 、 $P_{A1}$  作用下和在荷载  $F_{A2}$ 、 $P_{A2}$  作用下胶结面（剪切面）上的正应力和剪应力分布。

(3) 求抗剪最不利点。根据点抗剪强度安全系数  $K_0$  [ $K_0 = (f_0 \sigma + c_0) / \tau$ ] 最小的原则，找出抗剪最不利点及该点的正应力和剪应力。

(4) 求真实抗剪比例极限强度。根据两组荷载分别求得的两个最不利点的正应力和剪应力，求出胶结面材料的真实抗剪比例极限强度参数  $f_r$  和  $c_r$  值。

下面用算例具体说明计算胶结面（剪切面）各点应力以及计算真实抗剪比例极限强度参数的步骤和方法。

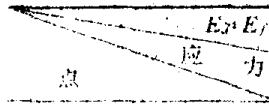
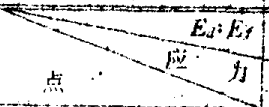
(1) 求平均抗剪比例极限强度公式。本算例选用苏联克拉斯诺雅尔斯克坝的抗剪断试验成果，其平均抗剪比例极限强度公式为  $\tau_A = 0.94 \sigma_A + 0.1 \text{MPa}$ 。

(2) 求试块到达比例极限强度时胶结面上的应力分布。弹性状态可采用叠加原理，因此，只要我们求出某一组荷载  $F_1$ 、 $P_1$  作用下胶结面上的应力分布，其它任一组荷载  $F_j$ 、 $P_j$  作用下胶结面上的应力分布即可按荷载增大的倍数放大办法求得。根据这一思路，我们编制了表 1-1。表 1-1 中表示的是，对图 1-1 所示的梯形试块，当胶结面上的平均正应力为 1MPa，平均剪应力为 1MPa 情况下，用三维弹性有限元算得的胶结面上 1~13 各点的正应力和剪应力值。与其相应的铅直荷载  $F_0$  和倾斜荷载  $P_0$  可按下述方法求得：试块与基岩胶结面面积  $A = 600 \times 600 = 360000 \text{ (mm}^2\text{)}$ ；倾斜荷载  $P_0$  的水平分力  $P_H = A \times 1 \text{ (N/mm}^2\text{)} = 360 \text{ kN}$ ，铅直分力  $P_V = P_H \text{tg} 15^\circ = 96.462 \text{ kN}$ ， $P_0 = 372.699 \text{ kN}$ ；铅直荷载  $F_0 = A \times 1 \text{ (N/mm}^2\text{)} - P_V = 360 \text{ kN} - 96.462 \text{ kN} = 263.538 \text{ kN}$ 。

表 1-1  $\sigma_m = 1 \text{MPa}$ 、 $\tau_m = 1 \text{MPa}$  时三维弹性有限元法算得的胶结面上各点应力值

| 点 | $E_s, E_f$<br>应 力 | 1 : 1                        |                            |                              |                            | 1.25 : 1                     |                            |                              |                            |
|---|-------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
|   |                   |                              |                            |                              |                            |                              |                            |                              |                            |
|   |                   | $[\sigma_{F_0}]_{1 \sim 13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1 \sim 13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1 \sim 13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1 \sim 13}$ | $[\sigma_{F_0}]_{1 \sim 13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1 \sim 13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1 \sim 13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1 \sim 13}$ |
| 1 |                   | -0.9634                      | 0.3747                     | 0.5040                       | -1.6380                    | -1.0310                      | 0.4059                     | 0.4043                       | -1.7001                    |
| 2 |                   | -0.7649                      | 0.2330                     | -2.5838                      | -3.4006                    | -0.7682                      | 0.2350                     | -2.4911                      | -3.2943                    |
| 3 |                   | -0.8031                      | 0.1683                     | -0.2759                      | -2.4469                    | -0.8067                      | 0.1634                     | -0.2604                      | -2.3569                    |
| 4 |                   | -0.8257                      | 0.1071                     | -0.0824                      | -1.2466                    | -0.8237                      | 0.1033                     | 0.0640                       | -1.2174                    |
| 5 |                   | -0.8464                      | 0.0609                     | 0.0600                       | -0.7292                    | -0.8428                      | 0.0595                     | 0.0553                       | -0.7422                    |
| 6 |                   | -0.8488                      | 0.0223                     | 0.0508                       | -0.5991                    | -0.8445                      | 0.0218                     | 0.0501                       | -0.6277                    |
| 7 |                   | -0.8487                      | 0.0000                     | 0.0376                       | -0.5691                    | -0.8443                      | 0.0000                     | 0.0381                       | -0.5990                    |
| 8 |                   | -0.8586                      | -0.0224                    | 0.0243                       | -0.5390                    | -0.8442                      | -0.0219                    | 0.0260                       | -0.5703                    |

续表 1-1

|    |  | 1 : 1                   |                       |                         |                       | 1.25 : 1                |                       |                         |                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
|                                                                                     |  | $[\sigma_{F_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{F_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1-13}$ |
| 点                                                                                   |  |                         |                       |                         |                       |                         |                       |                         |                       |
| 9                                                                                   |  | -0.8459                 | -0.0609               | -0.0105                 | -0.4975               | -0.8423                 | -0.0595               | -0.0069                 | -0.5290               |
| 10                                                                                  |  | -0.8246                 | -0.1070               | -0.0687                 | -0.4849               | -0.8227                 | -0.1032               | -0.0626                 | -0.5200               |
| 11                                                                                  |  | -0.8026                 | -0.1678               | -0.1507                 | -0.4704               | -0.8063                 | -0.1629               | -0.1431                 | -0.5101               |
| 12                                                                                  |  | -0.7581                 | -0.2299               | -0.2272                 | -0.4470               | -0.7613                 | -0.2317               | -0.1951                 | -0.4868               |
| 13                                                                                  |  | -0.9670                 | -0.3783               | -0.9707                 | -0.7585               | -1.0346                 | -0.4096               | -1.0344                 | -0.8746               |
|    |  | 2 : 1                   |                       |                         |                       | 5 : 1                   |                       |                         |                       |
|                                                                                     |  | $[\sigma_{F_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{F_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1-13}$ |
| 点                                                                                   |  |                         |                       |                         |                       |                         |                       |                         |                       |
| 1                                                                                   |  | -1.1995                 | 0.4869                | 0.1753                  | -1.8708               | -1.6201                 | 0.6422                | -0.2901                 | -2.3864               |
| 2                                                                                   |  | -0.7664                 | 0.2323                | -2.2519                 | -3.0364               | -0.7108                 | 0.1852                | -1.6570                 | -2.3428               |
| 3                                                                                   |  | -0.8136                 | 0.1475                | -0.2816                 | -2.1445               | -0.8233                 | 0.0991                | -0.2072                 | -1.6930               |
| 4                                                                                   |  | -0.8164                 | 0.0925                | 0.0181                  | -1.1522               | -0.7872                 | 0.0638                | -0.0829                 | -1.0223               |
| 5                                                                                   |  | -0.8320                 | 0.0552                | 0.0363                  | -0.7774               | -0.7976                 | 0.0423                | -0.0342                 | -0.8255               |
| 6                                                                                   |  | -0.8318                 | 0.0203                | 0.0384                  | -0.6883               | -0.7931                 | 0.0153                | -0.0249                 | -0.7780               |
| 7                                                                                   |  | -0.8317                 | 0.0000                | 0.0294                  | -0.6622               | -0.7930                 | 0.0000                | -0.0279                 | -0.7581               |
| 8                                                                                   |  | -0.8316                 | -0.2040               | 0.0204                  | -0.6361               | -0.7930                 | -0.0154               | -0.0309                 | -0.7382               |
| 9                                                                                   |  | -0.8315                 | -0.3530               | -0.0070                 | -0.5958               | -0.7972                 | -0.0424               | -0.0460                 | -0.7032               |
| 10                                                                                  |  | -0.8154                 | -0.0924               | -0.0546                 | -0.5951               | -0.7863                 | -0.0638               | -0.0694                 | -0.7168               |
| 11                                                                                  |  | -0.8133                 | -0.1471               | -0.1305                 | -0.5975               | -0.8231                 | -0.0991               | -0.1378                 | -0.7503               |
| 12                                                                                  |  | -0.7595                 | -0.2286               | -0.1253                 | -0.5678               | -0.7049                 | -0.1812               | 0.0284                  | -0.6534               |
| 13                                                                                  |  | -1.2029                 | -0.4848               | -1.1605                 | -1.1782               | -1.6223                 | -0.6461               | -1.3195                 | -2.0070               |
|  |  | 1 : 1.25                |                       |                         |                       | 1 : 2                   |                       |                         |                       |
|                                                                                     |  | $[\sigma_{F_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{F_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1-13}$ |
| 点                                                                                   |  |                         |                       |                         |                       |                         |                       |                         |                       |
| 1                                                                                   |  | -0.9036                 | 0.3469                | 0.5960                  | -1.5863               | -0.8015                 | 0.2990                | 0.7608                  | -1.5049               |
| 2                                                                                   |  | -0.7599                 | 0.2297                | -2.6632                 | -3.4939               | -0.7464                 | 0.2205                | -2.7904                 | -3.6513               |
| 3                                                                                   |  | -0.7994                 | 0.1718                | -0.2916                 | -2.5288               | -0.7917                 | 0.1754                | -0.3225                 | -2.6732               |
| 4                                                                                   |  | -0.8269                 | 0.1101                | 0.0983                  | -1.2713               | -0.8280                 | 0.1141                | 0.1241                  | -1.3263               |
| 5                                                                                   |  | -0.8493                 | 0.0619                | 0.0623                  | -0.7155               | -0.8531                 | 0.0630                | 0.0617                  | -0.6919               |
| 6                                                                                   |  | -0.8523                 | 0.0226                | 0.0489                  | -0.5717               | -0.8573                 | 0.0230                | 0.0396                  | -0.5210               |
| 7                                                                                   |  | -0.8522                 | 0.0000                | 0.0347                  | -0.5403               | -0.8572                 | 0.0000                | 0.0239                  | -0.4867               |
| 8                                                                                   |  | -0.8521                 | -0.0227               | 0.0205                  | -0.5089               | -0.8571                 | -0.0230               | 0.0082                  | -0.4523               |
| 9                                                                                   |  | -0.8487                 | -0.0619               | -0.0157                 | -0.4671               | -0.8526                 | -0.0630               | -0.0295                 | -0.4094               |
| 10                                                                                  |  | -0.8259                 | -0.1020               | -0.0755                 | -0.4511               | -0.8270                 | -0.1139               | -0.0904                 | -0.3870               |
| 11                                                                                  |  | -0.7988                 | -0.1713               | -0.1584                 | -0.4322               | -0.7910                 | -0.1748               | -0.1731                 | -0.3606               |
| 12                                                                                  |  | -0.7531                 | -0.2267               | -0.2424                 | -0.4085               | -0.7298                 | -0.2178               | -0.2724                 | -0.3358               |
| 13                                                                                  |  | -0.9072                 | -0.3503               | -0.9097                 | -0.6587               | -0.8051                 | -0.3021               | -0.7929                 | -0.4951               |
|  |  | 1 : 5                   |                       |                         |                       |                         |                       |                         |                       |
|                                                                                     |  | $[\sigma_{F_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{F_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1-13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1-13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1-13}$ |
| 点                                                                                   |  |                         |                       |                         |                       |                         |                       |                         |                       |
| 1                                                                                   |  | -0.5906                 |                       | 0.2014                  |                       | 1.1298                  |                       | -1.3621                 |                       |
| 2                                                                                   |  | -0.6950                 |                       | 0.1371                  |                       | -3.0029                 |                       | -3.9672                 |                       |
| 3                                                                                   |  | -0.7681                 |                       | 0.1701                  |                       | -0.5982                 |                       | -2.9904                 |                       |
| 4                                                                                   |  | -0.8253                 |                       | 0.1146                  |                       | 0.1682                  |                       | -1.4592                 |                       |
| 5                                                                                   |  | -0.8574                 |                       | 0.0613                  |                       | 0.0368                  |                       | -0.6517                 |                       |

| 点  | $E_d : E_f$<br>应 力 | 1 : 5                      |                          |                            |                          |
|----|--------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
|    |                    | $[\sigma_{F_0}]_{1\sim13}$ | $[\tau_{F_0}]_{1\sim13}$ | $[\sigma_{P_0}]_{1\sim13}$ | $[\tau_{P_0}]_{1\sim13}$ |
| 6  |                    | -0.8640                    | 0.0223                   | -0.0121                    | -0.4061                  |
| 7  |                    | -0.8639                    | 0.0000                   | -0.0294                    | -0.3602                  |
| 8  |                    | -0.8637                    | -0.0224                  | -0.0466                    | -0.3142                  |
| 9  |                    | -0.8568                    | -0.0614                  | -0.0806                    | -0.2634                  |
| 10 |                    | -0.8345                    | -0.1144                  | -0.1342                    | -0.2242                  |
| 11 |                    | -0.7672                    | -0.1697                  | -0.2035                    | -0.1834                  |
| 12 |                    | -0.6892                    | -0.1852                  | -0.2944                    | -0.1599                  |
| 13 |                    | -0.5938                    | -0.2037                  | -0.5022                    | -0.1896                  |

注  $\sigma_m$ 、 $\tau_m$  分别表示平均正应力和平均剪应力； $[\sigma_{F_0}]_{1\sim13}$ 、 $[\sigma_{F_0}]_{1\sim13}$ 、 $[\sigma_{P_0}]_{1\sim13}$ 、 $[\tau_{P_0}]_{1\sim13}$  分别表示在荷载  $F_0$ 、 $P_0$  作用下胶结面上 1~13 各点的正应力和剪应力； $F_0$ 、 $P_0$  分别表示与  $\sigma_m=1\text{MPa}$ 、 $\tau_m=1\text{MPa}$  相应的铅直荷载和倾斜荷载。

任选两个胶结面上的平均正应力  $\sigma_{A1}$ 、 $\sigma_{A2}$ ，分别代入上述平均抗剪比例极限强度公式，可求得相应的平均抗剪比例极限强度  $\tau_{A1}$ 、 $\tau_{A2}$ 。选取  $\sigma_{A1}$ 、 $\sigma_{A2}$  时，考虑到国内外修建在岩基上的混凝土坝，其高度多在几十米到三百米左右，其相应的坝底最大压应力大致在 1~8MPa 范围内，因此， $\sigma_A$  应考虑在这个范围内选取。本算例以  $\sigma_{A1}=2\text{MPa}$ ， $\sigma_{A2}=3\text{MPa}$  为例，则相应的  $\tau_{A1}=0.94\times2+0.1=1.98\text{MPa}$ ， $\tau_{A2}=2.92\text{MPa}$ 。用上述求  $F_0$  和  $P_0$  的方法，可求得与胶结面上平均应力  $\sigma_{A1}=2.0\text{MPa}$ 、 $\tau_{A1}=1.98\text{MPa}$  相应的铅直荷载  $F_1=529.006\text{kN}$ ，倾斜荷载  $P_1=737.945\text{kN}$ 。求得与  $\sigma_{A2}=3.0\text{MPa}$ ， $\tau_{A2}=2.92\text{MPa}$  相应的  $F_2=798.332\text{kN}$ ， $P_2=1088.282\text{kN}$ 。令  $K_{F1}$  表示在铅直荷载  $F_1$  作用下的应力折算系数， $K_{F1}=F_1/F_0=2.01$ ； $K_{P1}$  表示在倾斜荷载  $P_1$  作用下的应力折算系数， $K_{P1}=P_1/P_0=1.98$ 。同理， $K_{F2}=F_2/F_0=3.03$ ， $K_{P2}=P_2/P_0=2.92$ 。令  $[\sigma_{F_0}]_{1\sim13}$ 、 $[\tau_{F_0}]_{1\sim13}$  分别表示在荷载  $F_0$  作用下胶结面上 1~13 点的正应力和剪应力值， $[\sigma_{P_0}]_{1\sim13}$ 、 $[\tau_{P_0}]_{1\sim13}$  分别表示在荷载  $P_0$  作用下胶结面上 1~13 点的正应力和剪应力值，均可由表 1-1 直接查得。如令  $[\sigma_{F_1}]_{1\sim13}$ 、 $[\tau_{F_1}]_{1\sim13}$ 、 $[\sigma_{P_1}]_{1\sim13}$ 、 $[\tau_{P_1}]_{1\sim13}$ ， $[\sigma_{F_2}]_{1\sim13}$ 、 $[\tau_{F_2}]_{1\sim13}$ 、 $[\sigma_{P_2}]_{1\sim13}$ 、 $[\tau_{P_2}]_{1\sim13}$  分别表示在  $F_1$ 、 $P_1$ 、 $F_2$ 、 $P_2$  作用下胶结面上 1~13 点的正应力和剪应力，则其值可按下式计算： $[\sigma_{F_1}]_{1\sim13}=K_{F1}[\sigma_{F_0}]_{1\sim13}$ ， $[\tau_{F_1}]_{1\sim13}=K_{F1}[\tau_{F_0}]_{1\sim13}$ ； $[\sigma_{P_1}]_{1\sim13}=K_{P1}[\sigma_{P_0}]_{1\sim13}$ ， $[\tau_{P_1}]_{1\sim13}=K_{P1}[\tau_{P_0}]_{1\sim13}$ ； $[\sigma_{F_2}]_{1\sim13}=K_{F2}[\sigma_{F_0}]_{1\sim13}$ ， $[\tau_{F_2}]_{1\sim13}=K_{F2}[\tau_{F_0}]_{1\sim13}$ ； $[\sigma_{P_2}]_{1\sim13}=K_{P2}[\sigma_{P_0}]_{1\sim13}$ ， $[\tau_{P_2}]_{1\sim13}=K_{P2}[\tau_{P_0}]_{1\sim13}$ 。令  $[\sigma_1]_{1\sim13}$ 、 $[\tau_1]_{1\sim13}$  分别表示在  $F_1$ 、 $P_1$  作用下胶结面上 1~13 点的正应力和剪应力； $[\sigma_2]_{1\sim13}$ 、 $[\tau_2]_{1\sim13}$  分别表示在  $F_2$ 、 $P_2$  作用下胶结面上 1~13 点的正应力和剪应力。于是，在  $F_1$ 、 $P_1$  及  $F_2$ 、 $P_2$  两组荷载分别作用下，其胶结面上的应力分布值可由下式求得

$$\left. \begin{aligned} [\sigma_1]_{1\sim13} &= K_{F1} [\sigma_{F_0}]_{1\sim13} + K_{P1} [\sigma_{P_0}]_{1\sim13} \\ [\tau_1]_{1\sim13} &= K_{F1} [\tau_{F_0}]_{1\sim13} + K_{P1} [\tau_{P_0}]_{1\sim13} \\ [\sigma_2]_{1\sim13} &= K_{F2} [\sigma_{F_0}]_{1\sim13} + K_{P2} [\sigma_{P_0}]_{1\sim13} \\ [\tau_2]_{1\sim13} &= K_{F2} [\tau_{F_0}]_{1\sim13} + K_{P2} [\tau_{P_0}]_{1\sim13} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 等号右边均为已知，可求得胶结面上各点应力 (见表 1-2)。表中应力是在  $E_d : E_f = 1 : 1$ ，以及在上述  $F_1$ 、 $P_1$  和  $F_2$ 、 $P_2$  两组荷载分别作用下求出来的。同理，可求得其它

表 1-2

试块混凝土与基岩胶结面上各点应力

(MPa)

| 位置<br>应力   | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      | 11      | 12      | 13      |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma_1$ | -0.9385 | -6.6534 | -2.1605 | -1.8228 | -1.5825 | -1.6055 | -1.6314 | -1.6777 | -1.7211 | -1.7935 | -1.9116 | -1.9736 | -3.8657 |
| $\tau_1$   | -2.4901 | -6.2649 | -4.5066 | -2.2490 | -1.3214 | -1.1414 | -1.1268 | -1.1122 | -1.1075 | -1.1752 | -1.2687 | -1.3472 | -2.2622 |
| $\sigma_2$ | -1.4474 | -9.8623 | -3.2390 | -2.7425 | -2.3894 | -2.4235 | -2.4618 | -2.5306 | -2.5937 | -2.6991 | -2.8719 | -2.9605 | -5.7645 |
| $\tau_2$   | -3.6476 | -9.2238 | -6.6350 | -3.3097 | -1.9447 | -1.6818 | -1.6618 | -1.6418 | -1.6372 | -1.7401 | -1.8820 | -2.0018 | -3.3611 |

注 1. 正应力拉为正、压为负,剪应力沿滑动方向为正,反滑动方向为负。

2.  $E_d : E_f = 1 : 1$ 。