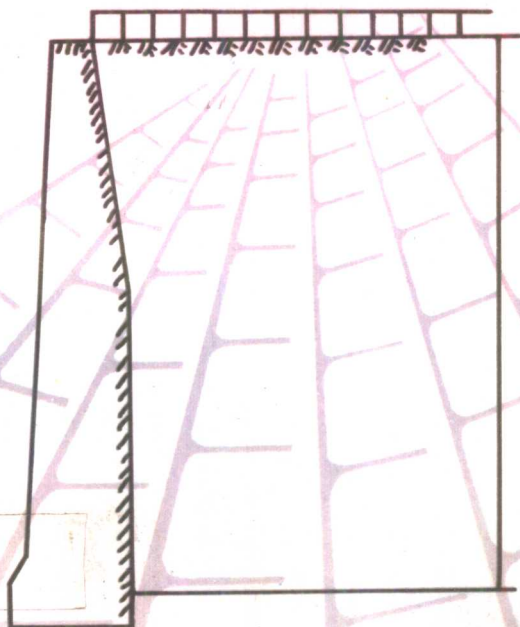


墙背土压力分布计算的新理论及其工程应用

王渭漳 吴亚中 著



人民交通出版社

墙背土压力分布计算的新理论 及其工程应用

Qiangbei Tuyali Fenbu Jisuan de
Xinlilun jiqi Gongcheng Yingyong

王渭漳 吴亚中 著

人民交通出版社

内 容 提 要

该书就国内外岩土工程力学界普遍关注的课题——墙背土压力分布和合力作用点高度问题,提出了自己的研究成果,该成果及其研究中所采用的现场、模型试验新方法,可供工程师、岩土力学工作者和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

墙背土压力分布计算的新理论及其工程应用/王渭漳,吴亚中编著. —北京:人民交通出版社,1996

ISBN 7-114-02450-9

I. 墙… II. ①王… ②吴… III. ①挡土墙-侧向土压力-压力分布②挡土墙-侧向土压力-计算 IV. TU476

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第16122号

墙背土压力分布计算的新理论及其工程应用

王渭漳 吴亚中 著

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

北京云浩印制厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张 2.75 插页:2 字数:70 千

1996年12月 第1版

1996年12月 第1版 第1次印刷

印数:0001—5000册 定价:10.00元

ISBN 7-114-02450-9

U · 01713

前 言

本书所涉及的内容是当今国内外岩土工程力学界普遍关注的课题,是作者和课题组经过长期的调查研究、理论推导、现场试验和模型试验研究验证所取得的研究成果。

专家鉴定认为该成果具有显著的社会经济效益和重要的理论意义;一致建议有关部门在挡土墙设计时,考虑该成果的内容。

该成果获 1994 年湖南省科技进步二等奖。1995 年 6 月国家科委发布的成果公报中,该成果被列为国家级成果。

自 1776 年库仑土压力计算公式问世以来,墙背土压力分布和合力作用点高度问题,一直未获圆满解决。该成果修正了库仑土压力分布计算公式,发展完善了库仑理论。理论推导和现场、模型试验验证了新理论公式的正确性和实用性。

在现场试验中研究采用的“石砌重力式挡土墙土压力现场模拟标定法”以及模型试验中研究采用的“模型挡土墙土压力自校测试系统”,可确保现场和模型试验数据的可靠性和一定的精度,为工程师、岩土力学工作者和科研人员进行土压力测试和模型试验研究提供了科学方法和有效手段。

目 录

第一章 古典库仑土压力分布理论和实践	(1)
第一节 对库仑公式的认识和分析.....	(1)
第二节 墙背土压力分布研究的历史和现状.....	(2)
第三节 岩土力学工作者应该回答的问题.....	(7)
第二章 新理论公式的推导	(8)
第一节 基本假定和计算图式.....	(8)
第二节 墙背土压力分布强度表达式的推导	(11)
第三节 合力公式和合力作用点高度的求算以及与库 仑公式的对比	(16)
第四节 破裂角及其相应的总土压力	(19)
第三章 新理论公式的现场试验验证	(26)
第一节 土压力测试新方法——现场模拟标定法	(26)
第二节 现场原型试验	(29)
第三节 验证试验数据的校核与评价	(41)
第四节 实测结果与理论计算值的对比	(45)
第四章 新理论公式的模型试验验证	(47)
第一节 模型挡土墙土压力自校测试系统	(47)
第二节 模型试验数据与理论计算值对比	(51)
第三节 试验结果分析	(62)
第五章 新理论计算公式的应用	(65)
第一节 计算步骤	(65)
第二节 计算示例及土压力分布图	(66)
第三节 计算用表	(66)
第四节 计算机程序	(72)
结语	(78)
主要参考文献	(79)

第一章 古典库仑土压力分布 理论和实践

第一节 对库仑公式的认识和分析

众所周知,古典的库仑土压力计算公式,是当挡土墙向前移位,墙后土体进入主动土压力状态时,根据墙后滑动土楔的总体平衡,假定滑动面为一平面,得出的砂性土墙背总主动土压力的解析式。试验证明,当墙背填料面为水平时,上述假定所引起的总土压力误差,一般为5%左右,对实际工程来说,一般是可以允许的。但库仑公式本身并没有解决墙背土压力的分布和合力作用点的高度问题。自库仑土压力公式1776年问世以来,工程界在进行挡土墙设计计算时,一直沿用墙背土压力成三角形直线分布的公式,合力作用点定在墙高(H)的 $1/3$ 处。但据国内外大量工程实测和模型试验数据证明,墙背土压力的分布是非线性的,其合力作用点,视墙体几何特性和填料的物理力学参数的不同,变化在 $(1/3)H \sim (4/9)H$ 之间。究其原因是因为:在由库仑总土压公式推导压力分布公式时,作了下述假定,即在墙背填料面水平的情况下,假定墙向前移动时,滑动楔体中的每一点都处于塑性平衡状态。即在墙背任意深度 z 以上侧向压力就等于高度为 z 的挡土墙的墙背上的侧向压力,其总压力的法向分量为 $P'_{An} = \frac{1}{2}rz^2K_A$,据此得出墙背深度 z 处的墙上法向土压力强度为:

$$p_{An} = \frac{dP'_{An}}{dz} = rzK_A \quad (\text{见太沙基《理论土力学》}) \quad (1-1)$$

式(1-1)表明墙背上的土压力分布好像静水压力一样,随着深度成正比的增加。这一结论,一直被设计规范采用,在工程界一直

被视为天经地义。

但若仔细分析,就不难发现,在推理想砂土主动土压力的库仑公式时,是把滑动土楔作为整体滑动对待的,而在推导土压力分布公式时又假设滑楔内的每一点都处于塑性平衡状态,这本身违反了库仑的假定。从众多的现场和模型试验观察,即使在理想砂的情况下,也未出现过滑楔内任一点都处于塑性平衡状态的情况,更不用说其它土质和粘性土了。事实上,上述假定是不能成立的,因而,其推导的分布公式也是不尽正确的。

基于此,在进行新公式的推导时,我们从库仑的基本假定出发,采用与库仑相反的计算程序来求解新的土压力计算公式,即先求出墙背土压力强度(P)表达式,然后积分求出墙背总土压力(E)表达式,并与古典的库仑土压力公式作对比,同时进行试验验证。

第二节 墙背土压力分布研究 的历史和现状

库仑土压力分布理论和实际的偏差,往往在实际工程中导致严重后果,显然,墙背土压力合力作用点实际上的提高,会对挡土墙倾覆稳定产生不利影响。重力式挡土墙失事的例子屡见不鲜,据四川建筑科学研究所对倒塌挡墙的调查分析,80%以上毁于倾覆,其余为剪切破坏和其它破坏。究其原因,除了设计

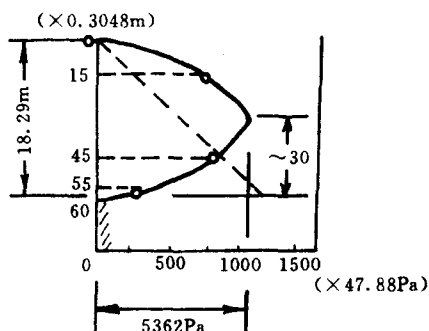


图 1-1 纽约某挡土墙实测土压力分布图

参数选用不当和施工质量等原因外,压力分布和合力作用点理论计算和实际不符,也是产生事故的重要原因。因此,它一直是国内外岩土工程力学界普遍关注的课题,并为此进行了不断的试验研

究和理论探索。

1916 年密勒在纽约弗拉特比尤什路(Flatbush)所作的挡土墙试验结果如图 1-1 所示。其结果表明,合力作用点在接近 $\frac{1}{2}H$ 处。

据湖南省交通规划勘察设计院的《航道工程通讯》第十期报道,60 年代修建的前苏联伏尔加——苏共二十大电站船闸闸墙,实测土压力分布如图 1-2 所示(闸墙外填土为砂土),其合力作用点在 $0.36H \sim 0.45H$ 处。

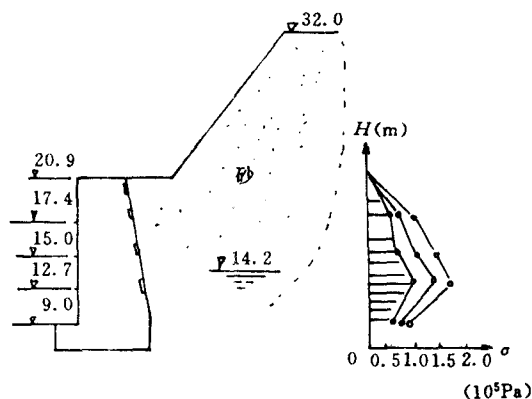


图 1-2 前苏联伏尔加——苏共二十大水电站船闸闸墙实测土压力分布图

据水电部十二工程局的丹江水利枢纽施工技术总结,丹江口混凝土坝和副坝粘土心墙接触面的土压力 1970~1971 年实测资

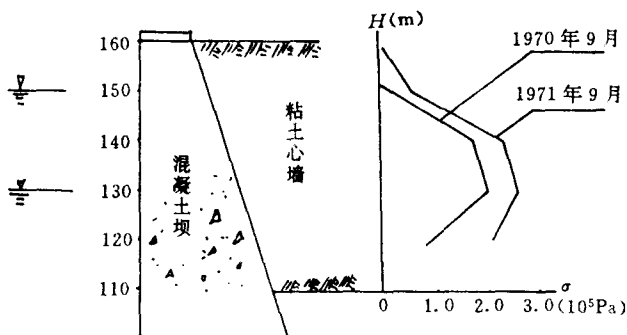


图 1-3 丹江水利枢纽混凝土坝与粘土心墙接触面实测土压力分布图

料如图 1-3 所示,其合力作用点均在 $\frac{1}{3}H$ 以上。

Г·К 克列因著的《散粒体结构力学》1977 年版中列举了 3·B 查嘎列尔 1969 年发表的模型试验资料,如图 1-4 所示,模型试验墙高 $H=4\text{m}$,填料为粗海砂,容重 17.64kN/m^3 , $\varphi=37^\circ$,观测结果为墙底处压力为零,合力作用点在 $0.42H$ 处。

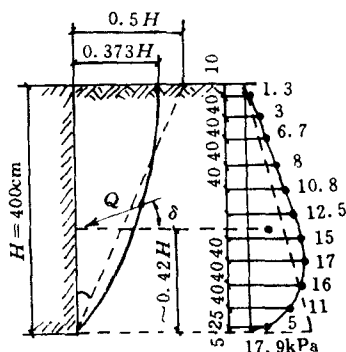


图 1-4 查嘎列尔模型试验墙
墙背土压力分布图

《水运工程》1991 年第 9 期发表的《刚性挡土墙主动土压力试验研究》的模型试验结果如图 1-5 所示。模型墙高 $H=1.4\text{m}$,填料为细砂,容重 15.1kN/m^3 , $\varphi=31.5^\circ$,合力作用点在 $0.384H$ 处。

《西南交通大学学报》1990 年第一期所载一组不同墙高、粘性土填料的重力式挡土墙的离心模型试验结果如图 1-6 所示。结果表明,其合力作用点也均在 $\frac{1}{3}H$ 以上。

一个世纪以来,工程界和学术界进行的大量试验研究结果证明重力式挡土墙墙背土压力的分布是非线性的,土压力合力作用点的位置多在 $(1/3)H$ 以上,一般在 $0.33H \sim 0.44H$ 之间。但在理论方面的研究却落后于试验研究,这是因为库仑公式对总土压力的求算在一般情况下是基本正确的、可用的。后人根据库仑公式推导的墙背土压力分布公式就自然为人们所接受,有时竟把三角形直线分布作为判断试验数据是否正确的标准,尤其对墙踵土压力

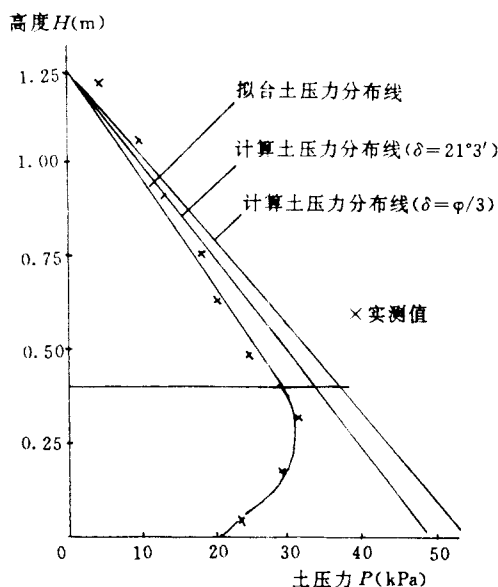


图 1-5 平板拟合试验及计算土压力分布图

为零的现象半信半疑。大量的试验研究结果无可争辩地证明了沿用的土压力分布计算方法是不尽正确的,而且这种错误曾经导致有害的后果,这就驱使工程界和学术界从理论上去研究与探索。

从国内收集的资料来看,最早见诸于文字的是黄文熙教授 1950 年在南京水利试验处的《研究试验报告》第五号上发表的《挡土墙土压力的研究》一文,该文以直立墙背、砂性土、填料面水平的简化情况,用谷仓理论导出了墙背土压力的非线性分布表达式,并建议合力作用点的位置考虑为 $0.444H$ 。

1960 年前苏联学者卡冈在《建筑力学与结构计算》杂志撰文提出了直立墙背、砂性土、水平填料面的重力式挡土墙墙背土压力的非线性分布解。

1964 年的《土木工程学报》第 10 卷第一期上蒋莼秋将卡文推广至任意墙背倾度、砂性土、填料面为任意单一斜坡的情况。

1984 年《国际地质力学数值和解析方法》杂志第 8 卷之 493~

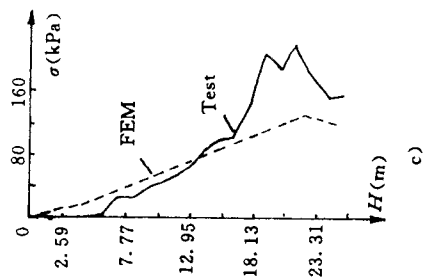
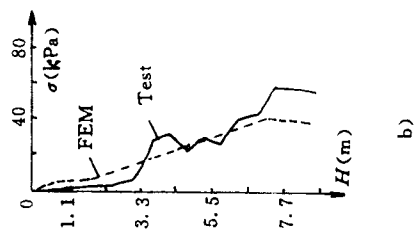
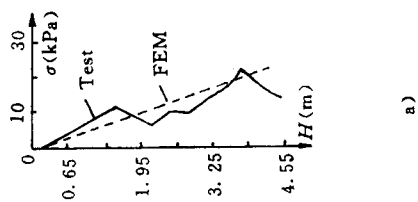


图 1-6 不同增高的水平土压力分布

502 页用微分条法求出了非粘性土的墙背土压力分布的解析式。

1983 年的《华东水利学院学报》第四期“地震土压力非线性分布”一文根据卡冈分析法考虑了填料面为水平的粘性土主动土压力的非线性分布问题。

第三节 岩土力学工作者应该回答的问题

摆在工程界和岩土力学工作者面前的任务就是要对现有理论进行分析研究,并对其进行补充修正,提出符合客观实际情况的新理论公式,以回答实践向理论提出的挑战,使理论能够更正确的指导实践,正确地解决工程中的实际问题。理论研究,应在前人研究的基础上,通过严密的数学推导和理论分析,提出一个适用于任意土质、任意墙背倾度、填料面为任意单一斜度,并包括所有计算参数在内的重力式挡土墙墙背主动土压力强度非线性分布的通用理论计算公式。

实践是检验真理的唯一标准,为检验理论是否符合客观实际,必须进行试验验证,其关键是要解决试验验证数据本身的准确性和可靠性问题。如何才能做到试验数据的准确、可靠,这是要回答的另一个问题。

首先要进行现场原型试验验证,也就是 1:1 的足尺模型试验。因为它能够最客观地反映出墙背的实际受力情况,藉以验证理论计算是否正确、适用。本课题在现场试验验证中,研究采用的“石砌重力式挡土墙土压力现场模拟标定法”,能够实现测试数据的现场校核,保证了足够的测试精度。该成果获 1978 年湖南省科学大会奖。在第三章将对该方法进行专门介绍。

由于现场变量不能任意控制,工况和荷载状态不能随意变更,还必须进行系统地模型试验研究以找出规律性的东西。由作者研究、设计、建造的“模型挡土墙土压力自校测试系统”可实现各测试数据间的互校,从而保证了模型试验数据的准确、可靠。在第四章将对该模型测试系统进行专门介绍。

第二章 新理论公式的推导

第一节 基本假定和计算图式

一、基本假定

1. 土质是单一的和各向同性的,且具有内摩擦,内摩擦角为 φ 。

2. 破裂面为平面。

3. 破裂楔体作为一个整体而移动。

4. 墙摩擦存在于墙与土的接触面上。

5. 破裂是一个平面问题。

(以上五种基本假定同库仑土压力理论。B. K. Ramiah, L. S. Chickanagappa. Handbook of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1981. P238)

6. 与填料平面平行的截面上无水平切力。

(同朗肯土压力理论。K. 太沙基《理论土力学》P37~P52)

7. 凝聚力 c 和粘结力 c' 分别沿破裂面和墙背面均匀分布。

二、计算图式

图 2-1 表示挡土墙背一楔体 ABC 处于极限平衡状态,在 ABC 中取一微分薄条 $defg$ 平行于填料面 AC ,取隔离体如图 2-2,建立静力平衡方程,则有以下计算式:

$$AB = \frac{H}{\cos \alpha}$$

$$\text{由正弦定理, } \frac{AB}{\sin C} = \frac{AC}{\sin B} = \frac{BC}{\sin A}$$

$$Ae = \frac{h}{\cos\alpha}, ef = \frac{dh}{\cos\alpha}, fB = (H - h - dh) \frac{1}{\cos\alpha}$$

由正弦定理得:

$$ed = \frac{H - h}{\cos\alpha} \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta + \beta)}$$

$$fg = \frac{H - h - dh}{\cos\alpha} \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta + \beta)}$$

$$= ed \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta + \beta)} \frac{dh}{\cos\alpha}$$

$$Bd = \frac{H - h}{\cos\alpha} \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\theta + \beta)},$$

$$Bg = \frac{H - h - dh}{\cos\alpha} \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\theta + \beta)}$$

$$\text{从而: } gd = Bd - Bg = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\theta + \beta)} \frac{dh}{\cos\alpha}$$

$$\text{另有: } h_1 = ef \cos(\alpha - \beta) = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos\alpha} dh$$

墙背作用于 ef 边的力有:

反力 $P_n = P \cos\delta$, 摩阻力 $P_\tau = P \sin\delta$, 粘结力 c'

未破裂土体作用于 gd 边的力有:

反力 $R_n = R \cos\varphi$, 摩阻力 $R_\tau = R \sin\varphi$, 凝聚力 c

上部土体作用于 ed 边的力有:

法向力 $q_{1n} = q \cos\beta$, 切向力 $q_{1\tau} = q \sin\beta$

下部土体作用于 fg 边的力有:

法向力 $q_{2n} = (q + dq) \cos\beta$, 切向力 $q_{2\tau} = (q + dq) \sin\beta$

自重 $dW = \gamma S_{\text{deig}}$

$$= \gamma \frac{1}{2} (ed + fg) h_1$$

$$= \gamma \frac{1}{2} \left[\frac{H - h}{\cos\alpha} \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta + \beta)} + \frac{H - h - dh}{\cos\alpha} \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta + \beta)} \right] \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos\alpha} dh$$

$$= \gamma(H-h) \frac{\sin(\theta+\alpha)\cos(\alpha-\beta)}{\cos^2\alpha\cos(\theta+\beta)}dh$$

(略去高阶无穷小项)

第二节 墙背土压力分布强度 表达式的推导

一、建立隔离体 $defg$ 的静力平衡方程

如图 2-1 及图 2-2 所示,可建立如下平衡:

1. 水平方向力的平衡, $\Sigma H = 0$ ($\rightarrow$), 则:

$$\begin{aligned} & (p_n \cos\alpha - p_r \sin\alpha - c' \sin\alpha)ef + (-R_n \cos\theta \\ & + R_r \sin\theta + c \sin\theta)gd + (q_{1n} \sin\beta - q_{1r} \cos\beta)ed \\ & + (-q_{2n} \sin\beta + q_{2r} \cos\beta)fg = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{即, } & (p \cos\delta \cos\alpha - p \sin\delta \sin\alpha - c' \sin\alpha) \frac{dh}{\cos\alpha} \\ & + (-R \cos\varphi \cos\theta + R \sin\varphi \sin\theta + c \sin\theta) \\ & \times \frac{\cos(\alpha-\beta)}{\cos(\theta+\beta)} \frac{dh}{\cos\alpha} + (q \cos\beta \sin\beta - q \sin\beta \cos\beta) \\ & \times \frac{H-h}{\cos\alpha} \frac{\sin(\theta+\alpha)}{\cos(\theta+\beta)} + [- (q + dq) \cos\beta \sin\beta \\ & + (q + dq) \sin\beta \cos\beta] \\ & \times \frac{H-h-dh}{\cos\alpha} \frac{\sin(\theta+\alpha)}{\cos(\theta+\beta)} = 0 \end{aligned}$$

合并且略去高阶无穷小项,则有:

$$\begin{aligned} & [p \cos(\alpha+\delta) - c' \sin\alpha] \frac{dh}{\cos\alpha} + [-R \cos(\theta+\varphi) \\ & + c \sin\theta] \frac{\cos(\alpha-\beta)}{\cos(\theta+\beta)} \frac{dh}{\cos\alpha} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{即: } & p \cos(\alpha+\delta) - c' \sin\alpha - R \cos(\theta+\varphi) \frac{\cos(\alpha-\beta)}{\cos(\theta+\beta)} \\ & + c \sin\theta \frac{\cos(\alpha-\beta)}{\cos(\theta+\beta)} = 0 \end{aligned}$$

$$\text{则: } R = \frac{\cos(\alpha+\delta)}{\cos(\theta+\varphi)} \frac{\cos(\theta+\beta)}{\cos(\alpha-\beta)} p + \frac{\sin\theta}{\cos(\theta+\varphi)} c$$

$$- \frac{\sin \alpha}{\cos(\theta + \varphi)} \frac{\cos(\theta + \beta)}{\cos(\alpha - \beta)} c', \quad (2-1)$$

2. 铅直方向力的平衡, $\Sigma V = 0$ (↑), 则:

$$\begin{aligned} & (p_n \sin \alpha + p_r \cos \alpha + c' \cos \alpha) e f + (R_n \sin \theta \\ & + R_r \cos \theta + c \cos \theta) g d + (-q_{1n} \cos \beta \\ & - q_{1r} \sin \beta) e d + (q_{2n} \cos \beta + q_{2r} \sin \beta) f g - dW = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{即, } & [p \sin(\alpha + \delta) + c' \cos \alpha] dh + [R \sin(\theta + \varphi) + c \cos \theta] \\ & \times \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\theta + \beta)} dh - q(H - h) \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta + \beta)} \\ & + (q + dq)(H - h - dh) \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta + \beta)} \\ & - \gamma \frac{H - h}{\cos \alpha} \frac{\sin(\theta + \alpha) \cos(\alpha - \beta)}{\cos(\theta + \beta)} dh = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{则: } & [p \sin(\alpha + \delta) + c' \cos \alpha] dh + [R \sin(\theta + \varphi) + c \cos \theta] \\ & \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\theta + \beta)} dh - q dh \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta + \beta)} + dq(H - h) \\ & \times \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta + \beta)} - \gamma \frac{H - h}{\cos \alpha} \frac{\sin(\theta + \alpha) \cos(\alpha - \beta)}{\cos(\theta + \beta)} dh \\ & = 0 \end{aligned} \quad (2-2)$$

3. 对 gd 边中点的力矩平衡, $\Sigma M = 0$ (), 则:

$$\begin{aligned} & [-P_n \sin(\alpha - \beta) \frac{ed + fg}{2} - P_r \cos(\alpha - \beta) \frac{ed + fg}{2} \\ & - c' \cos(\alpha - \beta) \frac{ed + fg}{2}] e f + \left\{ q_{1n} \left[\frac{ed}{2} - \frac{gd}{2} \sin(\theta + \beta) \right] \right. \\ & + q_{1r} \frac{gd}{2} \cos(\theta + \beta) \left. \right\} e d + \left\{ -q_{2n} \left[\frac{fg}{2} + \frac{gd}{2} \sin(\theta + \beta) \right] \right. \\ & + q_{2r} \frac{gd}{2} \cos(\theta + \beta) \left. \right\} f g + dW \left(\frac{ed + fg}{2} \frac{\cos \beta}{2} \right) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{即: } & [-p \sin(\alpha + \delta - \beta) - c' \cos(\alpha - \beta)] \frac{\sin(\theta + \alpha)}{2 \cos \alpha \cos(\theta + \beta)} \\ & \times (2H - 2h - dh) \frac{dh}{\cos \alpha} + q [(H - h) \sin(\theta + \alpha) \cos \beta \\ & - \cos(\alpha - \beta) \sin \theta dh] \frac{(H - h)}{2 \cos^2 \alpha} \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos^2(\theta + \beta)} \\ & + (-q - dq) [(H - h - dh) \sin(\theta + \alpha) \cos \beta \end{aligned}$$