

# 土体有效应力原理的通用公式 与基坑支护及地基计算的 实际水压力算法

蒙理明 著

Meng Liming

General Formula for  
the Principle of Effective Stress in Soils  
and Calculation of the Actual Water Pressure  
in Foundation-pit Supporting and Foundation

中国建材工业出版社

# 土体有效应力原理的通用公式与基坑 支护及地基计算的实际水压力算法

蒙理明 著

中国建材工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

土体有效应力原理的通用公式与基坑支护及地基计算的  
实际水压力算法/蒙理明著. —北京: 中国建材工业出  
版社, 2008. 8

ISBN 978-7-80227-467-9

I. 土… II. 蒙… III. ①土力学—公式②基坑—坑壁支  
撑③地基—水压力—算法 IV. TU431

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 129847 号

土体有效应力原理的通用公式与基坑  
支护及地基计算的  
实际水压力算法  
蒙理明 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 880mm × 1230mm 1/32

印 张: 2.75

字 数: 57 千字

版 次: 2008 年 8 月第 1 版

印 次: 2008 年 8 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-80227-467-9

定 价: 30.00 元

---

本社网址: [www.jccbs.com.cn](http://www.jccbs.com.cn) 联系电话: (010)88386906

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。

## 内容简介

太沙基 1923 年提出了饱和土中的有效应力原理。我国在基坑支护计算方面，对水土分算法、水土合算法以及水压率的讨论，归根结底，是讨论有效应力原理。在土力学研究中，凡是土中有水，例如地基计算、浮重度的概念，都与有效应力原理密切相关。另外，多少年来，研究人员一直致力于研究部分饱和土体的有效应力原理，至今没有满意的结果。

作者从结合水膜的形态是土体引力场作用的结果的概念出发进行探讨，得到了一系列与有效应力原理有关的新概念、新系数和新公式，特别是有效应力原理的通用公式（包括饱和土和部分饱和土）。通用公式的一个特例与太沙基公式吻合。部分饱和土体的通用公式为其研究提供了一条新的思路，希望早日得到满意的结果。

作者以通用公式导出基坑支护和地基计算的公式并应用，可以圆满解决水土分算法、水土合算法、水压率以及地基计算的问题。作者还指出了浮重度概念的不妥之处。

本书可供土力学的研究和学习人员，基坑支护及地基基础的研究、设计、施工人员参考。

## 前 言

太沙基 1923 年提出了饱和土中的有效应力原理。有效应力原理看起来简单，但它是土力学中极为重要的原理，灵活应用并不容易。八十多年来，土力学的许多重大进展都是与有效应力原理的推广和应用相联系的。至今为止，国内外公认有效应力原理可以毫无疑问地应用于饱和土，对于部分饱和土，其应用则还有许多问题尚待研究。

目前在基坑支护计算方面，对于地下水的考虑，有的用水土分算法，有的用水土合算法。但是，对于中等透水的粉土、粉质黏土的情况，用水土分算法偏于浪费，用水土合算法偏于危险。

《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2002 第 9.1.10 条要求：作用于支护结构的土压力和水压力，对砂性土宜按水土分算的原则计算；对黏性土宜按水土合算的原则计算；也可按地区经验确定。

上述方面以及目前在地基计算中的一系列内容尤其是浮重度的概念，主要依据是太沙基的有效应力原理的公式，简称太沙基公式。

笔者认为，有一个事实被忽略了：结合水膜不仅传递有

效应力，而且还占据孔隙的空间（部分或全部），使真正传递静水压力的自由水的通道减小。

结合水膜的形态是土粒引力场作用的结果。我们很熟悉从砂类土到黏土，其表示水的动态的透水性从强到弱、从弱到无的连续过程的自然规律。表示水的静态的自由水通道应该具有与动态水一样的连续的自然规律。

笔者认为，结合水膜面积应该纳入土粒接触面积（即结合水膜是土体结构的一部分），并且是不能忽略的概念。要用事实包括用球土粒方形阵列模型分析、说明这一概念。

笔者认为，在部分饱和土体中，由于结合水膜是土体引力场作用的结果，所以，其土中水应该优先形成结合水膜。

笔者引入了新的物理量自由水孔隙比  $e_f$ 。计算结果说明，在土体孔隙比  $e$  不变的情况下，随着平均土粒粒径的减小和结合水膜的增大，自由水孔隙比会变小。

笔者引入了新的物理量自由水通道率  $\beta_u$ 。通过对球土粒方形阵列模型分析，得到对角线上的  $\beta_u$  的一系列数据，并将其与很成熟的表示水的动态的渗透系数  $K$  一一对应，用参数  $t = \lg K$  表示，得到  $\beta_u = at^2 + bt + c$  及  $at^3 + bt^2 + ct$  的分段抛物线公式。进一步，推导了实用土体（包括饱和及部分饱和）有效应力原理的通用公式，简称通用公式。它的一个特例与太沙基公式（其实是水土分算法  $\beta_u = 1$ ）吻合，第二个特例是水土合算法（ $\beta_u = 0$ ）。除了这两个特例，即  $0 < \beta_u < 1$  时，应用通用公式计算的方法，称为实际水压力算法。

笔者用饱和土体的通用公式，导出了带有  $\beta_u$  的朗肯土压力公式，能定量考虑实际水压力，使计算水压力的问题简单、

明了、准确，完善了基坑支护中土压力计算的理论。

笔者用饱和土体的通用公式，结合我国规范，提出了有地下水时，进行土体自重应力、地基承载力与软弱下卧层计算的带有 $\beta_u$ 的通用公式的计算方法，同样使计算水压力的问题得到圆满解决。

本文用了大量的实例，说明通用公式的应用。同时，强调了广义水头包括一般水头、附加水头、渗流水头；还指出了浮重度概念的缺点。

$\beta_u$  和  $e_f$  应该也是动态水研究的重要参数。笔者还提及了 $\beta_u$  用实验得到的初步想法。

笔者提出的部分饱和土体有效应力原理的通用公式，为其研究提供了一条新的思路，以便圆满解决这方面存在的问题。

在本书写作过程中，北京航空航天大学黄新教授和范一锴博士给予了大量的指导和帮助，作者在这里致以诚挚的谢意。

由于本人的水平有限，本书错误及不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。在此，向参考文献中的作者表示深深的感谢。

作者

2008 年 7 月

# 目 录

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 自由水通道率 $\beta_u$ 与土体有效应力原理的通用公式 .....                                            | 1  |
| 1.1 土中水 .....                                                                          | 1  |
| 1.2 土的结构 .....                                                                         | 2  |
| 1.3 太沙基土体有效应力原理公式 .....                                                                | 4  |
| 1.4 结合水膜不仅传递有效应力还占据孔隙空间 .....                                                          | 6  |
| 1.5 球土粒方形阵列模型自由水通道率 $\beta_u$ 分析 .....                                                 | 9  |
| 1.6 $\beta_u = f(t = \lg K)$<br>$= at^2 + bt + c$ 及 $at^3 + bt^2 + ct$ (分段抛物线公式) ..... | 17 |
| 1.7 饱和土体有效应力原理的通用公式 .....                                                              | 23 |
| 1.8 部分饱和土体有效应力原理的通用公式 .....                                                            | 24 |
| 第 2 章 几个要点 .....                                                                       | 28 |
| 2.1 孔隙水压力 $u = \gamma_w H_w$ .....                                                     | 28 |
| 2.2 自由水应力 $\sigma_u$ .....                                                             | 28 |
| 2.3 通用公式在基坑支护中的应用 .....                                                                | 28 |
| 第 3 章 建筑边坡规范类似的公式 .....                                                                | 31 |
| 3.1 公式 .....                                                                           | 31 |
| 第 4 章 广义水头 $H_{wi}$ 及有渗流的计算 .....                                                      | 34 |
| 4.1 广义水头 $H_{wi}$ 和渗流公式 .....                                                          | 34 |
| 第 5 章 基坑支护的算例 (按饱和土考虑) .....                                                           | 37 |

|       |                                   |    |
|-------|-----------------------------------|----|
| 5.1   | 【例 5.1.1】粉土 .....                 | 37 |
| 5.2   | 【例 5.2.1】软黏土 .....                | 48 |
| 5.3   | 【例 5.3.1】加深对广义水头 $H_w$ 的理解 .....  | 52 |
| 第 6 章 | 地基计算 .....                        | 57 |
| 6.1   | $Z$ 方向土体有效自重应力的通用公式 .....         | 57 |
| 6.2   | $Z$ 方向土体有效自重应力的计算 .....           | 57 |
| 6.3   | 地基承载力计算 .....                     | 61 |
| 6.4   | 软弱下卧层验算 .....                     | 64 |
| 6.5   | 关于浮重度、浮力 .....                    | 66 |
| 6.6   | 水压力计算的最不利位置 .....                 | 67 |
| 第 7 章 | 由实验得到自由水通道率 $\beta_0$ 的初步想法 ..... | 69 |
| 7.1   | 自由水通道率 $\beta_0$ 测试 .....         | 69 |
| 7.2   | 自由水通道率 $\beta_0$ 简易测试仪 .....      | 71 |
| 7.3   | 测试 $\beta_0$ 的用处 .....            | 72 |
| 7.4   | 另一想法 .....                        | 72 |
| 第 8 章 | 几个重要问题的讨论 .....                   | 73 |
| 8.1   | 关于结合水膜的广义性和动态性 .....              | 73 |
| 8.2   | 关于自由水孔隙比 $e_f$ .....              | 73 |
| 8.3   | 关于计算部分饱和黏性土中的 $x = A_w/A$ .....   | 74 |
| 参考文献  | .....                             | 77 |

# 第 1 章 自由水通道率 $\beta_0$ 与土体有效应力原理的通用公式

## 1.1 土中水

土由土颗粒、水和气组成。土中水有液态水、气态水和固态水三种形式，其中液态水对土的性质影响最大。液态水即孔隙水，有结合水和自由水两种存在形态。

结合水是指表面由电分子引力吸附的土中水。研究表明，细小颗粒表面带负电荷，围绕土粒形成了电场。在土粒电场范围内的水分子以及溶液中的阳离子一起被吸附在土粒周围。水分子是极性分子，受到电场作用而成定向排列，形成结合水膜。结合水不具备普通水的性质，强结合水没有溶解盐类的能力，性质接近固体，具有极大的黏滞性、弹性和抗剪强度。弱结合水，厚度为  $5 \sim 10\mu\text{m}$ ，不能自由流动，但能从厚的水膜向薄的水膜处转移，直至平衡为止。随着与土粒表面距离的增大，吸附力逐渐减少，弱结合水从接近状态逐渐过渡为自由水。结合水都不能传递静水压力。

在土力电场影响范围以外的水称为自由水。它受重力作用，能传递静水压力和溶解盐类。

饱和土，指土孔隙充满水的土。

**部分饱和土**，指土孔隙充满水和气或孔隙充满气的土。

**黏性土**，包括粉土和黏土。

## 1.2 土的结构

土的结构是指土颗粒的大小、形状、表面特征、相互排列及其联结关系的综合特征。土一般分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种形式。

### (1) 单粒结构

粗大土粒在水和空气中在自重作用下沉落而形成单粒结构。如图 1.2.1 所示，单粒结构全部由砂土及更粗土粒组成，其特点是土粒间接触为点与点的接触。

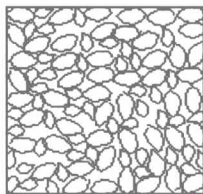


图 1.2.1 单粒结构

疏松的单粒结构，骨架不稳定，易变形，当受到外力作用或震动时，土粒易发生移动，土中孔隙减少，引起较大变形。密实的单粒结构，土粒排列紧密，结构稳定，强度较大，压缩性小。

### (2) 蜂窝结构

主要由粉粒（粒径为  $0.075 \sim 0.005\text{mm}$ ）组成的结构形式，在水中单个下沉，碰到已沉积的土粒，由于土粒间的分子引力大于颗粒自重，则下沉土粒被吸引，不再下沉，逐渐

形成链环状联结起来，便形成较大孔隙的蜂窝结构，如图 1.2.2 所示。

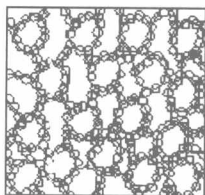


图 1.2.2 蜂窝结构

### (3) 絮状结构

絮状结构又称絮凝结构，是由黏粒（粒径为小于 0.005mm）集合组成的结构形式，黏粒在水中长期悬浮，并在水中运动形成小链环状的土集粒而下沉，这种小链环碰到另一个链环而被吸引，便形成大链环的絮状结构，如图 1.2.3 所示。

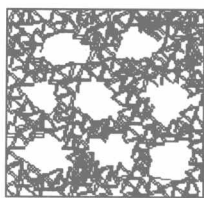


图 1.2.3 絮状结构

蜂窝结构和絮状结构的土存在大量的孔隙，压缩性高，抗剪强度低，但土粒间的联结强度会由于压密和胶结作用而逐渐得到加强，这种强度称为结构强度。

### 1.3 太沙基土体有效应力原理公式

太沙基 1923 年提出了土体有效应力原理，阐述了松散颗粒的土体与连续固体材料的区别，从而奠定了现代土力学变形和强度计算的基础。有效应力原理的概念如下：

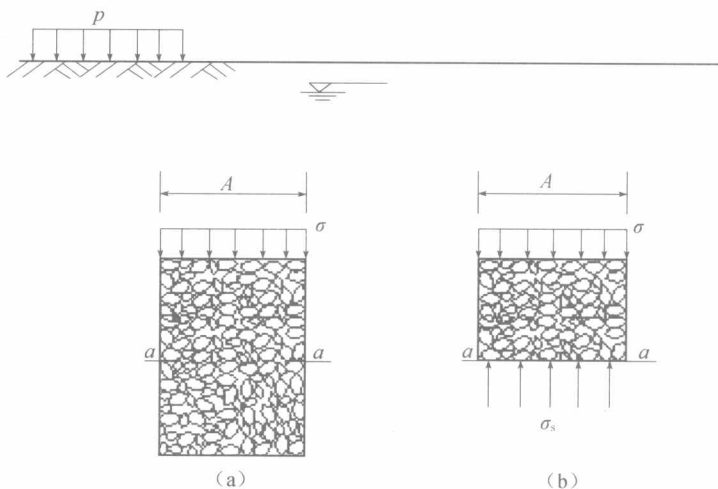


图 1.3.1 有效应力

如图 1.3.1 所示，在半无限体表面（地基土表面）作用着外荷载  $p$ ，地下水位如图所示。在土中深度  $Z$  处截取一水平截面，其面积为  $A$ ，截面上作用的应力为  $\sigma$ ，它是由上面的土体的重力、静水压力及外荷载  $p$  的作用所产生的应力，称为总应力。由于土中任取的截面面积包括土颗粒和孔隙在内，则  $\sigma$  应由土颗粒及孔隙中的水气来共同承担，其中由土颗粒承担的应力称为有效应力（粒间应力），由孔隙内的水气承担的应力称为孔隙应力（也称孔隙压力）。

如图 1.3.1 所示, 沿  $a-a$  截面截取一脱离体, 在  $a-a$  截面上, 土颗粒接触面间作用的  $Z$  方向应力为  $\sigma_s$ , 各土粒接触面积之和 ( $Z$  方向投影) 为  $A_s$ , 孔隙内, 由水所承担的压力为  $u_w$  (习惯用  $u$  表示), 其相应的面积为  $A_w$ , 由气体所承受的压力为  $u_a$ , 其相应的面积为  $A_a$ 。根据静力平衡条件

$$\sigma A = \sigma_s A_s + u A_w + u_a A_a$$

或

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{\sigma_s A_s}{A} + \frac{u A_w}{A} + \frac{u_a A_a}{A} \\ &= \frac{\sigma_s A_s}{A} + \frac{u A_w}{A} + u_a \left(1 - \frac{A_w}{A}\right) - \frac{u_a A_s}{A}\end{aligned}$$

毕肖普及伊尔顿 1950 年根据粒状土的试验结果认为,  $A_s/A$  一般小于 0.03, 有可能小于 0.01, 一般  $u_a$  的值也很小, 所以最后一项  $u_a A_s/A$  项可以忽略不计;  $\sigma_s A_s/A$  实际上是土颗粒间的接触应力在截面面积  $A$  上的平均应力, 称为有效应力, 用  $\sigma'$  来表示, 所以上式可以变换为

$$\sigma = \sigma' + u_a - \frac{A_w}{A}(u_a - u)$$

或

$$\sigma = \sigma' + u_a - x(u_a - u) \quad (\text{A})$$

式 (A) 为部分饱和土的有效应力公式, 式中  $x = A_w/A$ , 是由试验确定的参数, 取决于土的类型及饱和度。

对于饱和土 ( $S_r = 100\%$ ), 由试验知  $x = 1$ , 代入式 (A), 得

$$\sigma = \sigma' + u \quad (\text{B})$$

式 (B) 为饱和土的有效应力公式, 我们称为太沙基公

式。其中：

$\sigma$ ——作用在土中任意面上的总应力（自重应力与附加应力），即计算点上面的土体的重力、静水压力及外荷载  $p$  的作用所产生的应力；

$\sigma'$ ——有效应力，作用在同一平面的土骨架上；

$u$ ——孔隙水压力，作用在同一平面的孔隙水上，性质与普通静水压力相同。

太沙基公式是在砂类土的条件下（土颗粒间点接触）推导出来的。对于黏性土，由于颗粒之间包有结合水膜，颗粒间一般不直接接触，但是人们一直认为，粒间力仍可以通过黏滞性很高的吸附水膜传递，太沙基公式仍然适用。

#### 1.4 结合水膜不仅传递有效应力还占据孔隙空间

笔者认为，有一个事实被忽略了，那就是结合水膜不仅传递有效应力，还占据了孔隙空间（部分或全部）。先讨论饱和土体。

我们知道，孔隙水包括结合水和自由水，而真正传递静水压力的是自由水，我们把只有自由水流动的那一部分孔隙称为自由水通道。在黏性土中，结合水膜不仅传递有效应力，还占据了孔隙空间（部分或全部），这对于太沙基公式来说，结合水膜应该作为土体间接触的主体，也可以说，结合水膜是土体结构的一部分，这样，颗粒间不再是点接触，而是粒间结合水膜的面接触，所以  $A_s$  如果包括结合水膜面积，则不再接近于零，不容忽略。由于结合水占据了孔隙空间（部分或全部），使自由水的通道变小，即  $A_w = A - A_s$  不一定等于  $A$ ，

从而 $A_w/A$ 不一定等于1，所以，对于黏性土，如果我们将结合水膜面积纳入传递有限应力面积的话，应该有

$$\sigma = \sigma' + (A_w/A)u$$

其中， $0 \leq A_w/A < 1$ 。

下面，我们讨论饱和黏性土中，结合水膜的一些情况。

在黏性土的颗粒中，主要有粉粒（ $MgCO_3$  为粒状、 $CaCO_3$  为粒状与片状）和黏粒（蒙脱石、伊利石、高岭石为片状或针状）。自然界的土都是由大小不同粒径的土粒组成的。所以我们可以把黏性土看成是由大小不等，有粒状、片状、针状的土粒组成的，就像片石基础那样的集合物。只不过在粉土中，粒状的多；在黏土中，片状、针状的多。图 1.4.1、图 1.4.2、图 1.4.3 是在黏性土中，两个土粒相遇时，其结合水膜在相遇处连接的水分子及阳离子排列的例子。微小土粒带负电荷，在其周围形成电场。图中，在两个土粒很接近的地方，有阳离子（ $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Al^{3+}$  等）形成稳定连接；在两个土粒比较接近的地方，水分子分别被两个土粒吸引，呈定向排列（正极被土粒吸引），然后，阳离子介入水分

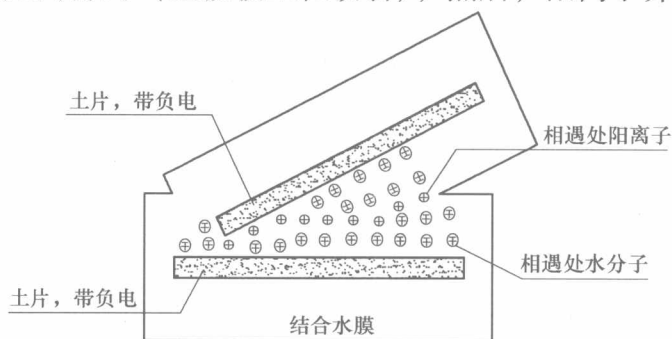


图 1.4.1 土片与土片相遇

子的负极，形成稳定连接。

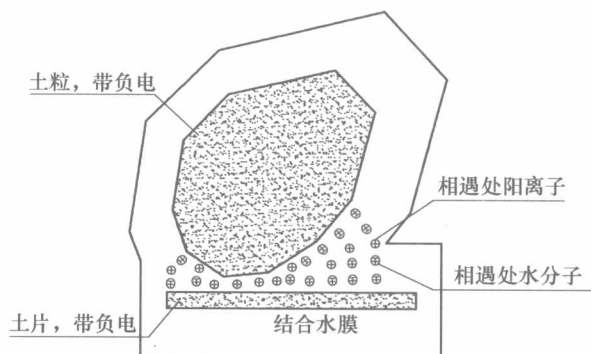


图 1.4.2 土粒与土片相遇

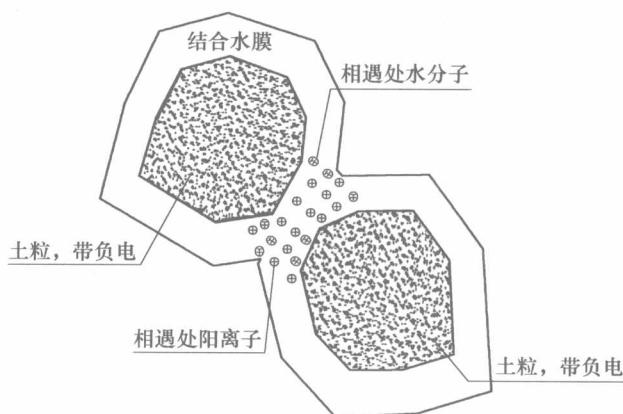


图 1.4.3 土粒与土粒相遇

下面，我们不妨将自然界中的黏性土看成是一道由片石砌筑的挡土墙。

如图 1.4.4 所示，黏性土中的土片或土粒就像是挡土墙中的片石，片石之间用砂浆砌筑，假设我们人为地将砂浆打