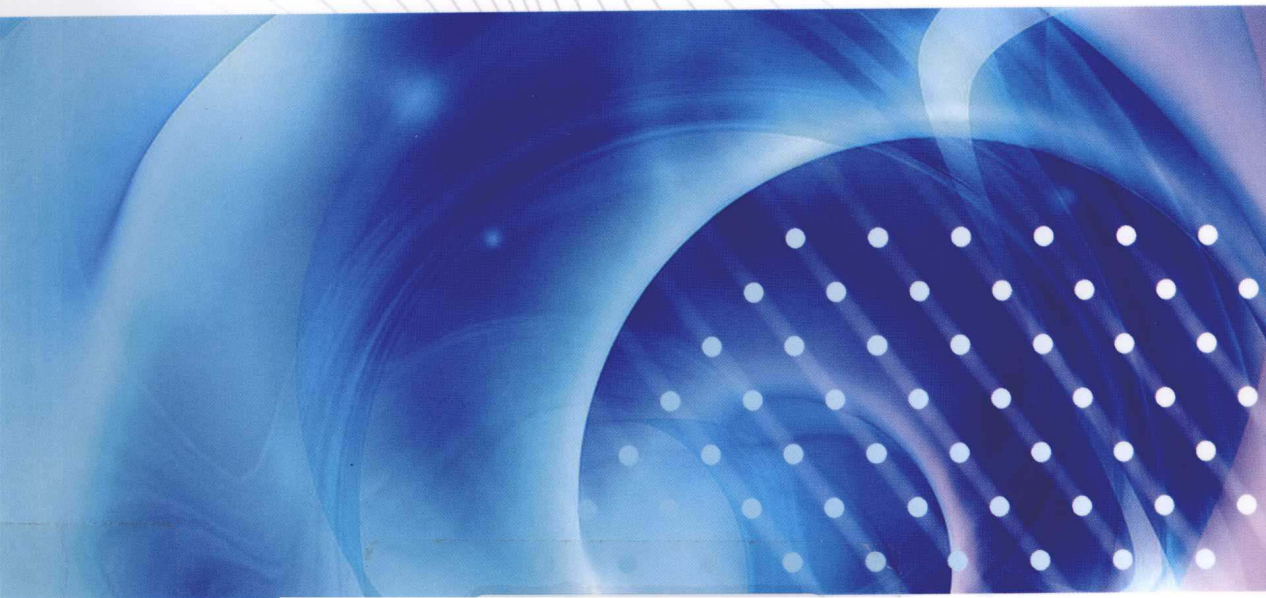


土力学研究与探索

邵龙潭 著



科学出版社

土力学研究与探索

邵龙潭 著

科学出版社

北 京

前 言

本书汇集了作者在土力学领域的部分研究成果,主要集中在基础研究和应用基础研究两个方面,涉及土力学的基本方程、三轴试验土样变形数字图像测量方法和边坡稳定计算方法,其中有一部分内容是尚未公开发表的。

作者借鉴连续介质力学,从土力学的物理力学量的定义出发,提出了土体代表性微元的概念,阐释了土体内一点的密度、应力及土体内任意“平面”、任意“直线”上的孔隙率等概念的物理内涵。强调土力学研究的“宏观”视角,赋予土体断面孔隙率(面孔隙率)和线孔隙率以物理意义。

从宏观力学分析的角度,基于将土体混合多相体的每一相作为独立的力学分析对象的思想,提出了相间力相互作用原理,明确了作用于土骨架脱离体上的两组平衡力系,导出了土骨架和孔隙流体的平衡微分方程,由此得到土骨架应力方程,即有效应力方程,说明有效应力方程的物理本质是土骨架和孔隙水之间力的相互作用。通过进一步的讨论,说明饱和土的太沙基有效应力方程是准确的表达式,一些研究者提出的修正公式都是不恰当的。

在流动的孔隙水与土骨架之间的相互作用力为线性的假定下,由孔隙水的动量平衡微分方程导出达西定律,表明达西定律反映了土骨架和孔隙水之间力的相互作用关系。

不仅如此,按照上述思想,还导出了非饱和土的土骨架应力(有效应力)方程、非饱和土的导水系数(渗透系数)公式等。当然,这些推论还需要试验验证。

验证上述公式,需要可信的试验数据。由于受到试验仪器条件的限制,作者与合作者在10年前开始土工测试设备的研制工作,主要是土工三轴、非饱和土土水特性和导水系数测试仪器等。这方面的研究目前已经成为作者一个主要的研究方向,而且测试仪器的研发也已经不局限于上述两种仪器。书中介绍了作者带领研发团队开发的三轴试验土样变形数字图像测量系统,它对三轴试验条件下土的力学行为研究的作用和意义将会逐渐显现。

在边坡稳定计算方法方面, 作者的学术贡献主要体现在两个方面: 一是明确了土体滑动稳定安全系数定义的物理意义; 二是发展了一种以滑动面上离散节点垂直坐标为搜索变量的滑动面求解方法. 其意义在于表明以有限元应力分析为基础, 基于安全系数求解的土体滑动稳定分析方法与传统的极限平衡法及有限元强度折减法是一致的, 它有可能发展成为一种有效的、统一的稳定分析方法. 这部分的内容也见于《土工结构稳定分析——有限元极限平衡法及其应用》一书, 其中还有大量的算例说明方法的有效性和结果的可比性.

本书的内容大体属于作者的研究工作报告, 书中的观点也仅反映作者本人对土力学研究的视角, 或许这是一个具有新意的视角. 正是基于这样的认识, 作者整理出版了这本书, 希望以此引起对土力学基础理论研究的争鸣和讨论, 吸引更多有兴趣的同行参与研究, 共同推动土力学基本理论体系的发展和完善.

本书的读者对象是从事土力学和岩土工程教学、研究的人员及土力学和岩土工程及其相关专业的学生. 具有理论力学和材料力学基础, 甚至只有基本力学知识的读者都可以阅读.

本书中非饱和土的骨架应力和非饱和土的渗透系数的研究工作是作者 1998~1999 年在德国 Karlsruhe 大学做访问学者时独立完成的, 访德得到德国 KRUPP 基金会的资助, 在此致谢! 本书能够出版, 要感谢郭晓霞博士, 她作为作者的助手, 在文稿的整理和校改方面作了大量的工作, 还要向刘士乙、刘港和于斯滢等研究生表示感谢, 他们帮助作者完成了部分图形和文稿的校对工作.

由于时间仓促, 书中难免有疏漏及不妥之处, 期待读者的批评与指正.

邵龙潭

2010 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 相间力相互作用原理和土力学平衡微分方程	1
1.1 土体状态变量的定义及其连续性	1
1.1.1 连续介质的概念	1
1.1.2 土力学物理力学量的定义方法	3
1.2 土体应力	6
1.2.1 干土的土骨架应力	6
1.2.2 饱和土的土骨架应力	8
1.2.3 非饱和土的土骨架应力	10
1.3 相间力相互作用原理	11
1.4 土力学的平衡微分方程	11
1.4.1 孔隙流体引起的土骨架应力	11
1.4.2 饱和土体平衡微分方程	12
1.4.3 非饱和土体平衡微分方程	14
参考文献	16
第 2 章 土的有效应力原理	17
2.1 饱和土的土骨架应力方程	18
2.2 非饱和土的土骨架应力方程	19
2.3 关于有效应力原理的讨论	20
2.3.1 有效应力原理的正确表述	20
2.3.2 有效应力方程是否需要修正	20
2.3.3 A.W. Skempton 的修正公式为什么不当	20
2.3.4 土体体积变化或强度等效应力	23
2.3.5 非饱和土土骨架应力公式的正确性	24

2.4 含气泡饱和土的应力分析	25
2.4.1 含气泡饱和土的土骨架应力方程	26
2.4.2 封闭气泡的逸出条件	27
2.5 地表水入渗时孔隙气体的逸出条件	29
参考文献	31
第 3 章 达西定律与土的渗透系数	33
3.1 达西定律的导出与饱和土的渗透系数	33
3.2 非饱和土的渗透系数	34
3.2.1 非饱和土土骨架与孔隙水的相互作用力	34
3.2.2 非饱和土的导水系数	36
参考文献	37
第 4 章 三轴土样变形数字图像测量方法及其应用	38
4.1 三轴土样变形数字图像测量方法	39
4.1.1 第一代三轴土样变形数字图像测量系统	39
4.1.2 三轴土样变形测量的基本假定	41
4.2 第二代三轴土样变形数字图像测量系统	43
4.2.1 角点识别算法	43
4.2.2 测量系统组成	44
4.3 测量误差修正及精度检定	45
4.3.1 误差来源分析	47
4.3.2 图像测量的精度分析	50
4.4 土样表面位移 (变形) 场和应变场	52
4.4.1 曲面展开	52
4.4.2 环向应变场和轴向应变场	55
4.4.3 环向应变与径向应变关系	60
4.4.4 三轴土样全表面位移场和应变场	61
4.5 数字图像测量技术应用举例	64
4.5.1 三轴试验土样的端部影响问题研究	64

4.5.2 膜嵌入问题研究	71
4.5.3 基于数字图像测量的 Duncan-Chang 模型参数研究	78
4.5.4 三轴试验土样剪切破坏带研究	82
参考文献	86
第 5 章 土工结构滑动稳定分析的有限元极限平衡法	89
5.1 安全系数的定义	89
5.1.1 土体沿滑动面的极限平衡状态	89
5.1.2 滑动面上土体极限平衡的充分必要条件	90
5.1.3 滑动稳定安全系数的定义	92
5.1.4 关于安全系数的讨论	93
5.2 最危险滑动面搜索方法	94
5.2.1 稳定分析问题的数学表述	95
5.2.2 安全系数计算	96
5.2.3 最危险滑动面搜索	97
5.3 有限元极限平衡法应用举例	98
5.3.1 自重作用下边坡的稳定分析	98
5.3.2 存在软弱夹层边坡的稳定分析	99
5.3.3 极限承载力作用下边坡和地基的稳定分析	102
5.3.4 土钉支护基坑边坡的稳定分析	104
5.3.5 重力式挡土墙的稳定分析	106
5.3.6 基于确定性随机地震响应分析的有限元边坡稳定分析	109
5.4 三维滑动稳定分析	113
5.4.1 三维有限元极限平衡法的安全系数定义	113
5.4.2 滑动面搜索	114
5.4.3 应用举例	115
参考文献	120

第1章 相间力相互作用原理和土力学平衡微分方程

土是由土骨架和孔隙流体组成的多相体,土的变形和强度实际上是指土骨架的变形和强度.本章由土体物理力学量的定义及土体的内力平衡分析给出土力学的基本平衡方程,为构建饱和与非饱和土力学统一的理论体系奠定基础.本章的要点内容包括:土体代表体积的概念,土骨架和孔隙流体微元体的受力与平衡分析,相间力相互作用原理,土骨架和孔隙流体的平衡微分方程.

1.1 土体状态变量的定义及其连续性

土力学是把土体作为结构材料研究其物理性质及力学性能和行为的工程科学学科.土体状态变量是描述或标定土的物理性质、力学特性和行为的物理力学量,如体积、密度、应力、变形、孔隙率等,是建立土力学学科的基础.

土体是多相体,其中的每一相,无论是土骨架、水,还是空气在空间分布上都是不连续的.因此,当我们应用连续介质力学方法于土力学时,首先遇到的困难是如何定义其物理力学量并满足空间连续性.例如,当我们说土体中一点的密度或者一点的应力,是什么含义呢?在土体中的任意表面,孔隙率有意义吗,其含义又是什么?

在这里,我们参考连续介质的概念^[1]和孔隙介质力学物理力学量的定义^[2],说明和讨论土体状态变量的定义及其连续性.

1.1.1 连续介质的概念^[1]

物质是在空间中存在的.在经典力学的意义下,空间是不依赖于其中物质而存在的客观实在,并为其中存在的物质状态和运动提供度量的根据.

在数学上,物质存在的空间可以用以实数集表示的坐标系来度量.正如数学中的实数系是一个连续集一样,直觉中的三维空间和时间也是一个连续集,可以用实数系 x, y, z, t 来表示.为了在这种数学意义上的连续时空内研究物质的状态和运

动, 在连续介质力学中将连续集的概念推广到物质, 即认为物质在空间上是连续分布的. 以连续介质力学中物质质量密度的定义为例来说明.

假定一定的物质充满一定的空间 V_0 , 如图 1-1 所示, 考察 V_0 中的一点 P 及收敛于 P 点的子空间序列 $V_0, V_1, V_2, \dots$, 令

$$V_n \subset V_{n-1}, \quad P \in V_0 \quad (n = 1, 2, \dots)$$

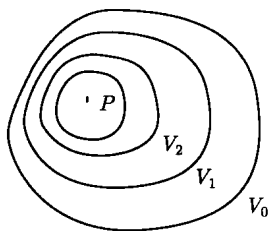


图 1-1 收敛于 P 点的空间域序列

设 V_n 中所含物质的质量是 M_n , V_n 代表子空间的体积, 那么 P 点的物质质量密度 $\rho(P)$ 定义为

$$\rho(P) = \lim_{V_n \rightarrow 0} \frac{M_n}{V_n} \quad (1-1)$$

这样的定义实际上是一种数学上的抽象. 对于真实的物质, 当 V_n 的尺度逼近到原子半径的量级时, 上述定义会遇到明显的困难. 此时, 随着物质原子基本粒子不停地运动, 式 (1-1) 的极限要么不存在, 要么随时间和空间波动.

为了摆脱这种困难, 需要对式 (1-1) 的极限表达式附加限制条件. 当考察比值 M_n/V_n 的极限时, 对于无限的子空间序列 $V_1, V_2, \dots, V_n, \dots$, 若令 V_n 变得越来越小直至趋近于零时, 要求 V_n 总是保持足够大, 可使得在其中能够包含足够多数目的粒子. 如果比值 M_n/V_n 在这个附加的限制条件下趋于一个确定的极限值 $\rho(P)$, 则定义 $\rho(P)$ 为物质的质量密度.

这实质上是一种修匀过程, 即附加了限制条件的物质质量密度的定义实质上并不是 P 点子空间无限序列的极限, 而是在包含 P 点的有限的微小空间上物质宏观质量与宏观体积比值的平均值. 换句话说, 当设想在微小空间上将物质质量均布于其中时, 对于真实物质, 我们便给出了一个连续介质的数学模型, 它既具有式 (1-1) 所严格定义的质量密度, 又可以克服对物质进行力学分析时在数学处理上可能带来

的困难. 当所研究的问题不涉及物质的微观结构时, 应用上述修匀过程不会遇到任何困难. 与质量密度一样, 在这样修匀的意义上, 我们可以定义其他所有的物理力学量.

1.1.2 土力学物理力学量的定义方法^[2]

对于土体, 即使在宏观条件下也会遇到同在连续介质微观条件下相似的困难. 由于土骨架在宏观条件下其空间分布是不连续的, 所以当我们试图用式 (1-1) 定义土体密度时, 会发现一旦 V_n 趋近小于骨架颗粒或微团的体积时, $\rho(P)$ 将失去原有的物理意义: 它不再代表宏观土体的密度, 而是变成骨架颗粒 (质点) 或其孔隙中一点气体或液体物质的质量密度, 这意味着此时式 (1-1) 的极限不存在.

因此, 如果要用式 (1-1) 定义土体的质量密度, 我们必须在更大的空间尺度上附加限制条件. 也就是说, 我们必须在绕 P 点包含足够数目骨架颗粒 (质点) 的有限空间上进行修匀, 即设想在这样的有限空间内, 固体物质微元和孔隙均布其中. 这样, 我们才可以给出土体质量密度的定义.

假设在一定的空间域 V_0 内充满着孔隙介质, 对于该空间域内任意一点, 考察收敛于 P 点的子空间序列 $V_0, V_1, V_2, \dots, V_n, \dots$, 令

$$V_n \subset V_{n-1}, \quad P \in V_0 \quad (n = 1, 2, \dots)$$

而 V^* 是包含 P 点的这样一个微元空间: 它足够小直至趋近于零, 同时又保持足够大使得其中包含足够数目的土骨架颗粒 (质点), 称 V^* 为 P 点的代表性微元体积, 简称代表体积.

设 V_n 中包含的土骨架的质量是 M_{sn} , 孔隙液体的质量是 M_{wn} . 忽略孔隙气体的质量, 那么, 若极限

$$\rho(P) = \lim_{\substack{V_n \rightarrow V^* \\ V^* \rightarrow 0}} \frac{M_{sn} + M_{wn}}{V_n} \quad (1-2)$$

和

$$\rho_d(P) = \lim_{\substack{V_n \rightarrow V^* \\ V^* \rightarrow 0}} \frac{M_{sn}}{V_n} \quad (1-3)$$

存在, 则分别称之为 P 点土体的质量密度和质量干密度.

同样地, 称极限

$$\rho_s(P) = \lim_{\substack{V_n \rightarrow V^* \\ V^* \rightarrow 0}} \frac{M_{sn}}{V_{sn}} \quad (1-4)$$

为土骨架的质量密度.

从另一个角度分析上述定义, 如果抛开在绕 P 点有限微小区域内物质均化的思想, 而只把定义的物理力学量看成是表征该微小区域内与之相对应的不连续物理力学量的平均值, 那么在概念上就会更加清晰.

正如在本节开始时曾经提到的, 连续的自然空间仅仅为我们提供了度量土体(土骨架和孔隙流体)状态的参照系. 土骨架(质点)在空间中分布不连续是客观实在, 但是当我们关心空间一点颗粒集合体的受力和运动状态时, 则对应空间某一点的物理力学量应该是反映该点处颗粒集合体状态的平均值.

如图 1-2 所示, 如果在土体占据的空间 V 内任意一点的物理力学状态变量都表征 P 点的代表体积的平均值, P 点可以连续移动, 则该物理量在空间 V 上严格满足数学上的连续条件. 在这样的意义下, 土骨架或孔隙流体空间分布的连续性不再成为特征量空间连续性的必要条件.

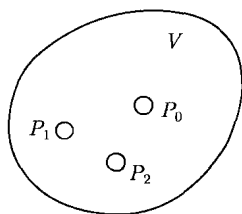


图 1-2 代表体积

由此可以理解, 当采用宏观方法处理土力学问题时, 描述其空间任意一点土的状态的特征量都是以该点为质心的一定区域内的平均值. 这个区域就是该点的代表体积, 在宏观意义上, 也就是我们研究土力学问题时的“质点”.

对于不同的土体, 或在同一土体中的不同点, 代表体积的大小都可能不同. 实际上, 代表体积 V^* 不能取得太大, 否则平均的结果不能代表 P 点的值, 同时也不能太小, 必须包含有足够数目的孔隙或土骨架颗粒, 这样才能得出有意义的统计平均值^[3].

虽然一般情况下并无必要准确地给出代表体积的尺寸, 但是代表体积的选择应满足以下条件:

- (1) 特征量的平均值不依赖于它的大小和形状;
- (2) 特征量的平均值在空间和时间上连续可微;
- (3) 如果 l 是代表体积的特征长度, d 是固体骨架颗粒的特征长度, 则

$$l \gg d \quad (1-5)$$

- (4) 如果 L 是特征量发生变化的土的区域特征长度, 则

$$l \ll L \quad (1-6)$$

实际上, 式 (1-5) 和式 (1-6) 保证了代表体积 (REV) 的选取能够消除土体在微观上的不均质性, 又不影响其宏观上的均质性或非均质性。

同样地, 土体内任一平面, 是指该平面对应的具有代表体积厚度的柱体; 土体内任一直线, 是指该直线对应的具有代表体积面积的柱体。简单地说, 代表性微元体积的特征长度就是孔隙介质的代表性长度, 代表性长度意义下的有限面积就是代表性面积。下面说明孔隙面积和孔隙长度的概念。

在土体内任取一平面 xOy , 如图 1-3 所示。在垂直于该平面方向上取一微元长度 δ , 当 δ 越来越小, 但始终保持足够大以保证在以 xOy 平面和 δ 形成的体积内含有合理数量的骨架颗粒 (质点) 时, 取极限

$$A_v = \lim_{\substack{\Delta z \rightarrow \delta \\ \delta \rightarrow 0}} \frac{\int_{z_0}^{z_0+\Delta z} \left[\iint A n dx dy \right] dz}{\Delta z} \quad (1-7)$$

为 $z = z_0$ 处 xOy 平面上的孔隙面积。其中, A_v 为 xOy 平面的孔隙面积; n 为孔隙率; A 为 xOy 平面的面积。

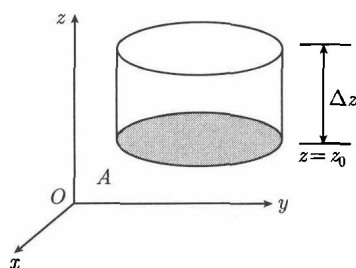


图 1-3 孔隙面积的定义

当 Δz 很小时, 可以认为孔隙率的变化与 z 无关, 则式 (1-7) 可以变为

$$A_v = \iint_A n dx dy \quad (1-8)$$

式 (1-8) 就是土体任意一平面上孔隙面积的表达式. 当 n 为常量时, 有

$$A_v = nA \quad (1-9)$$

同样地, 取当 $\Delta x, \Delta y$ 同时趋近于代表长度时的极限

$$L_v = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow \delta \\ \Delta y \rightarrow \delta}} \frac{\int_{x_0}^{x_0+\Delta x} \int_{y_0}^{y_0+\Delta y} \int_{z_1}^{z_2} n dx dy dz}{\Delta x \Delta y} = \int_{z_1}^{z_2} n dz \quad (1-10)$$

为 $x = x_0, y = y_0$ 处 z_1 到 z_2 上土体线元的孔隙长度. 设空间 (x_0, y_0, z_1) 与 (x_0, y_0, z_2) 两点间直线的长度为 L , 当土体为均质时有

$$L_v = nL \quad (1-11)$$

同理可以得到骨架面积与骨架线长度的积分表达式, 这里不再写出. 在均质条件下

$$A_s = (1 - n)A \quad (1-12)$$

$$L_s = (1 - n)L \quad (1-13)$$

其中, A_s 为骨架面积; L_s 为骨架长度; A 为土体面积; L 为土体代表线元的长度; n 为孔隙率.

1.2 土体应力

为了明确起见, 在谈到土体应力时, 我们把土体混合体的应力称为土体总应力, 把土体骨架作为独立分析对象的应力称为土骨架应力.

1.2.1 干土的土骨架应力

在连续介质力学中, 一点的应力通常定义为微元面积 Δs 上平均受力的极限^[4]. Peck^[5] 讨论了土力学中干土中应力的定义, 并指出在讨论土中一点的应力时, 通常必须包含一个相当大的点 (可以理解为前面所说的代表体积).

为了更明确地说明应力的定义, 取一个具有有限体积并包含足够数目骨架颗粒 (质点) 的微元体, 如图 1-4(a) 所示. 对于微元体骨架中的每一个颗粒 (质点), 它受到重力和来自与之相接触的颗粒质点的作用力. 当土体处在稳定状态时, 重力和接触点作用力的共同作用使骨架质点处于静力平衡状态. 就微元体骨架整体而言, 骨架质点接触点上的作用力在微元体内的分布是“杂乱无章”的. 接触点作用力的变化决定骨架质点本身弹性内能的变化, 而微元体骨架总体的变形和运动状态则取决于接触点应力的综合作用效果.

可以证明, 对于单个的骨架颗粒 (质点), 颗粒剖开平面上的内力与剖开部分所有接触点的作用力相平衡, 如图 1-4(b) 所示. 由此, 我们可以定义孔隙介质的骨架应力. 在孔隙介质内任意一点 P , 取包含点 P 的一系列微小平面 ΔA_{ns} ($n = 0, 1, 2, \dots$), 土体代表体积的底部面积为 ΔA_n , 高度是 Z_r . 如图 1-5 所示.

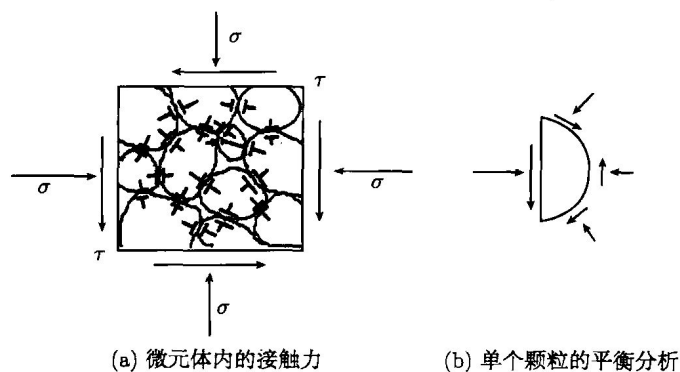


图 1-4 微元体内的接触力和单个颗粒的平衡分析

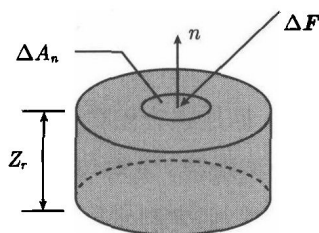


图 1-5 作用在面积 $\Delta A_n, \Delta A_{ns}$ 上的面力

设在剖开平面 ΔA_n 上暴露的内力为 ΔF , 将 ΔF 分解成沿 ΔA 的法线方向和平行于 ΔA 平面的分力 ΔN 和 ΔT . 若 S_p 为 P 点的代表面积, 如果极限

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \lim_{\substack{\Delta A_n \rightarrow S_s \\ S_s \rightarrow 0}} \frac{\Delta N_n}{\Delta A_n} \\ \tau &= \lim_{\substack{\Delta A_n \rightarrow S_s \\ S_s \rightarrow 0}} \frac{\Delta T_n}{\Delta A_n} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

存在, 则称 σ 和 τ 为 P 点土体骨架的正应力和剪应力, 统称为土骨架应力。

需要注意的是, 真实的土骨架应力是内力 ΔN 和 ΔT 在土骨架面积上的平均值 (这一点对土的应力应变本构关系研究可能比较重要)。因袭传统并且为了研究方便, 这里仍仅以内力 ΔN 和 ΔT 在整体面积上的平均值定义土骨架应力。

1.2.2 饱和土的土骨架应力

对于饱和土的土骨架而言, 其上作用两种平衡力系: 一是外荷载 (不包含孔隙水压力) 及其引起的骨架颗粒间的相互作用力; 二是孔隙水压力及其引起的颗粒间的相互作用力。

取饱和土体微元的土骨架为脱离体。作用在土骨架颗粒上的力包括重力、孔隙水压力、孔隙水和土骨架间的相互作用力, 以及颗粒间的作用力。孔隙水和土骨架间的相互作用力在这里专指由于孔隙水压力分布改变引起的作用力 (反言之, 此作用力引起孔隙水压力分布的改变)。对于土体微元体的土骨架脱离体而言, 孔隙水压力及孔隙水与土骨架间的相互作用力都可以认为是土骨架的外力。

颗粒间的作用力决定着土骨架应力。正如上面对干土所做的讨论: 脱离体表面的面力反映颗粒间所有接触力的作用效果, 它与作用在脱离体上的所有外力平衡。

根据其来源和作用效果, 饱和土的接触力可分为由孔隙水压力引起和其他外力引起的两部分, 即前面说的两种平衡力系。在孔隙连通的假定下, 孔隙中每一点孔隙水的压强具有静水压强的性质, 即压强方向垂直指向受压面并且数值在同一点的各个方向上相等。对任意一土骨架颗粒, 由均匀水压力引起的骨架接触点 (面) 上的压力强度与该点的静水压强相等 (假定静水压强引起的接触点应力均匀分布), 如图 1-6 所示。这样, 如果单纯考察静水压强的作用效果, 那么无论骨架颗粒接触面的性质如何, 对于每一个骨架颗粒都如同置于水 (气) 中的孤立质点一样承受静水压强的作用。这同时也说明, 孔隙水压力只引起颗粒的体积变形。

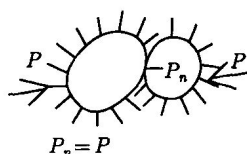


图 1-6 骨架接触点上的平衡力

为了说明孔隙水压力在骨架脱离体表面的作用效果, 可以考察如图 1-7 所示的土骨架体系. 设骨架颗粒表面各点水体压强均为 p , 脱离体表面 ab 的面积为 ΔA , 骨架质点面积 $\Delta A_s = (1 - n)\Delta A$. 以被脱离体表面剖开的骨架质点 C 为例, 孔隙水压强在 C 的剖开面上引起的应力强度 $\sigma_{pn} = p$.

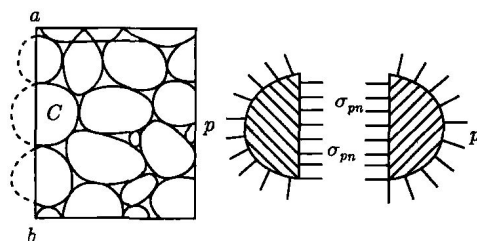


图 1-7 土骨架体系

很容易证明, 对于整个土骨架来说, 因孔隙水压力引起的作用在土骨架上的面力平均值一定等于孔隙水压力, 如图 1-8 所示. 它具有静水压强的性质, 即作用在骨架上的孔隙水压力 and 它所引起的接触力只对骨架的体积改变起作用, 而不引起土骨架的剪切变形. 因此, 对于土骨架而言, 孔隙水压力是一组在骨架内自平衡的体积力, 如果可以忽略骨架颗粒的体积变形, 则它不引起任何土体变形.

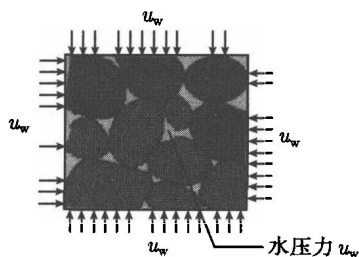


图 1-8 孔隙水压力引起的土骨架面力

因此, 令 S_r 为 P 点的代表面积, 设在土骨架脱离体表面 ΔA_n 上暴露的内力

为 ΔF , 将 ΔF 分解成沿 ΔA 的法线方向和平行于 ΔA 平面的分力 ΔN 和 ΔT , ΔN_u 表示孔隙水压力引起的面力的合力, ΔN_s 表示骨架颗粒间相互作用力的合力. 类似于干土, 我们定义土骨架应力

$$\sigma = \lim_{\substack{\Delta A_n \rightarrow S_r \\ S_r \rightarrow 0}} \frac{\Delta N_s}{\Delta A_n} = \lim_{\substack{\Delta A_n \rightarrow S_r \\ S_r \rightarrow 0}} \frac{\Delta N_n - \Delta N_u}{\Delta A_n} \quad (1-15)$$

1.2.3 非饱和土的土骨架应力

一般来说, 土中的孔隙可以是全部连通或部分被土骨架封闭的. 为简明起见, 这里仅考察所有孔隙都连通的土. 所谓的非饱和土也特别指具有连通孔隙且被水和气充满的土, 如图 1-9(a) 所示.

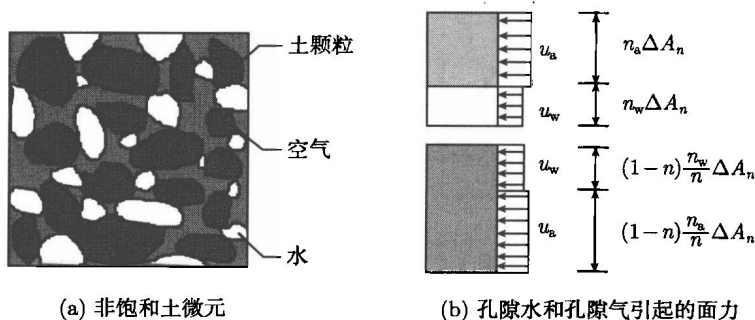


图 1-9 非饱和土单元及其面力分布

被孔隙气和孔隙水填充的孔隙空间可分为三种类型: ① 气相和液相各自连通; ② 孔隙水连通, 但孔隙气体不连通; ③ 孔隙气体连通, 但孔隙水不连通. 无论孔隙水和孔隙气以何种形式占据孔隙空间, 非饱和土骨架正应力均可定义为

$$\sigma = \lim_{\substack{\Delta A_n \rightarrow S_r \\ S_r \rightarrow 0}} \frac{\Delta N_n - \Delta N_{u_w} - \Delta N_{u_a}}{\Delta A_n} \quad (1-16)$$

其中, ΔN_{u_w} , ΔN_{u_a} 分别表示由孔隙水压力和孔隙气压力引起的骨架面力.

对于均匀各向同性的非饱和土, 有

$$N_{u_w} = (1-n) \Delta A_n \frac{n_w}{n} u_w \quad (1-17)$$

$$N_{u_a} = (1-n) \Delta A_n \frac{n_a}{n} u_a \quad (1-18)$$

其中, u_w 和 u_a 表示孔隙水压力和孔隙气压力; n_w 和 n_a 表示孔隙水和孔隙气体对