



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

统一强度理论在非饱和土及隧道
收敛约束法中的应用研究

姓 名：张常光

学 号：0810020151

所在院系：地下建筑与工程系

学科门类：工 学

学科专业：隧道及地下建筑工程

指导教师：张庆贺 教授

二〇一一年八月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Doctor of Philosophy

**Application of Unified Strength Theory in unsaturated
soils and the convergence-confinement method**

Candidate: Chang-guang Zhang

Student Number: 0810020151

Department: Department of Geotechnical Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Tunnel and Underground Engineering

Supervisor: Prof. Qing-He Zhang

August, 2011

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘 要

强度理论包括材料强度理论和结构强度理论, 结构强度理论及应用研究具有重要的理论意义和实用价值。一个合理又恰当的强度理论, 不仅可以提高工程的质量和耐久性, 而且还能带来巨大的经济效益和社会效益。结构的强度理论效应有时比计算方法改进的影响还大得多, 但现有的结构强度理论解析研究进展缓慢, 只采用了一、二个零散的单一准则, 有的甚至是不合理的, 并且不能在理论上给出总的变化规律。统一强度理论包括了现有的各种主要强度理论, 它可以适合于各类不同特性的工程材料, 同时统一强度理论覆盖了外凸极限面的所有区域, 可以给出一系列有序的理论解答, 为结构强度理论效应的研究提供了一个有效的手段和理论基础。统一强度理论在非饱和土强度方面的应用还是空白, 同时在隧道收敛约束法中的应用也仅仅是一个开始, 缺乏深入的系统研究。本文在连续介质理论和工程应用的框架下, 以统一强度理论为基础, 对非饱和土强度理论及工程应用和隧道收敛约束法的应用改进进行了系统的研究, 所得结论对岩土工程和隧道工程的结构设计具有重要的指导意义。主要研究内容与成果如下:

(1) 将非饱和土抗剪强度公式分为 4 类, 分析当前抗剪强度公式的特点及研究不足, 指出吸附强度表达式的不同导致了抗剪强度公式的多样性, 并总结当前非饱和土真三轴试验的研究现状以及完整真三轴试验的研究内容。

(2) 利用双剪应力概念建立了复杂应力状态的非饱和土统一强度理论, 它包括饱和土的统一强度理论和非饱和土的 Mohr-Coulomb 强度准则, 而且还包括很多其他新的强度准则。其极限线覆盖了从内边界的 Mohr-Coulomb 强度准则到外边界的双剪应力强度理论之间的所有区域, 可适用于各种不同特性的非饱和土。利用刚性和柔性真三轴仪的试验结果进行了试验验证, 同时指出外接圆 Drucker-Prager 准则不能反映非饱和土的真实强度特性, 非饱和土统一强度理论可以线性逼近拓展的非线性 SMP 准则。

(3) 拟合了高基质吸力的一个抗剪强度参数, 结合非饱和土平面应变抗剪强度统一解, 推导了非饱和土主动及被动土压力、地基极限承载力和临界荷载的解析解。所得解析解具有广泛的理论意义, 基于 Mohr-Coulomb 强度准则的结果是解析解中参数 $b=0$ 时的特例, 参数 b 取其他值可得到一系列新的解答; 当基质吸力为零时, 得到饱和土对应解; 土体侧压力系数 $k_0=1$ 时, 得到自重应力场如同静水压力时的地基临界荷载。经与主动土压力及地基极限承载力的试验结果比较, 验证了对应解析解的正确性, 并探讨了中间主应力、高低基质吸力及分布和侧压力系数的影响特性。

(4) 所得深埋圆形岩石隧道弹-脆-塑性应力和位移的解析新解是真正意义上的理论解析解, 综合反映了中间主应力、围岩脆性软化、剪胀特性、塑性区半径相关的弹性模量和不同弹性应变定义等影响, 是一系列有序有规律解的集合, 能退化为众多已有解答, 而且还包含很多其他新的解答, 具有广泛的适用性和很好的可比性。经与统一弹-塑性有限元结果以及广义 Hoek-Brown 经验强度准则半解析解的比较, 进一步验证了解析新解的正确性。

(5) 通过与其他位移释放系数、支护力系数、弹性数值模拟结果以及工程实测数据等比较, 充分说明了 Vlachopoulos 和 Diederichs(2009)以围岩塑性区最大半径 R_{\max} 为基础的位移释放系数的正确性和广泛适用性, 并得出: 以 Panet(1995)为代表的弹性位移释放系数低估了支护压力, 以 Hoek(1999)为代表的塑性位移释放系数仅适用于相对半径 $R_{\max} / r_1 = 2$ 的隧道围岩; 由支护力系数得到的支护压力偏小, 围岩稳定变形偏大。

(6) 结合代表性硬岩和软岩两种岩体, 对比分析各影响因素以及因空间效应差异、不同支护起始位置方法等所造成的收敛约束不同, 得出: 隧道结构的强度理论效应显著, 相应的支护可以减弱或改用轻型支护; 理想弹-塑性模型或不考虑围岩剪胀特性低估了隧道塑性区范围和变形, 设计偏危险; 半径相关的围岩塑性区弹性模量得到的围岩位移和特征曲线处于上、下限之间, 能体现隧道开挖卸载受扰程度的距离渐进变化; 塑性区弹性应变应优先选用更合理和准确的第三定义, 各因素之间存在相互影响; 不宜将依据距开挖面较远处得到的支护压力而设计的支护结构随意前移, 应依据围岩特性, 合理地适时进行支护。

关键词: 统一强度理论, 非饱和土强度, 收敛约束法, 解析解, 中间主应力, 基质吸力, 隧道纵向变形曲线, 支护压力

ABSTRACT

Strength theory involves material strength theory and structure strength theory. The research of structure strength theory and its application are of great theoretical and practical value. A sensible and appropriate strength criterion can improve project quality and durability, and thus bringing great economic and social benefit. Sometimes the influence of structure strength theory is greater than that of the calculation improvements. However, the existing analytical researches of structure strength theory are making progress slowly. Only one or two scattered single failure criteria are used. Sometimes even unreasonable criteria are adopted. A general variation law in structure strength theory is not given. The Unified Strength Theory (UST) includes many existing major strength theories. Covering all areas of the convex limit surface, it can be suitable for various engineering materials and gives a series of orderly solutions. Therefore, the UST provides a powerful approach and theoretical basis for structure strength theory. The application of the UST in unsaturated soil is still blank and its application in the convergence-confinement method of tunnel is only at the beginning. Systematic research is lacking in these fields and the integrated effects of more other complex factors should be considered according to specific application. In the framework of the continuum mechanics theory and engineering application, systematic studies based on the UST are carried out on the unsaturated soil strength theory and its application and the improved application of the convergence-confinement method of tunnel, which can provide important guidances for the structure design of geotechnical and tunnel engineering. The main contents and conclusions obtained in this dissertation can be summarized as follows:

(1) The shear strength formulae of unsaturated soils are divided into four categories. The characteristics and deficiencies of current research on shear strength for unsaturated soils are analyzed. It is concluded that different expressions of suction strength lead to the diversity of the shear strength formulae. The current condition and full content of true triaxial tests for unsaturated soils are summarized.

(2) The UST of unsaturated soils under multi-stresses is established by means of the concept of Twin Shear Stress. The UST of unsaturated soils not only includes the UST of saturated soils and the strength theory of unsaturated soils based on the

Mohr-Coulomb failure criterion, but also includes many other new failure criteria. The limit loci cover all regions from the lower bound of the Mohr-Coulomb failure criterion to the upper bound of the Generalized Twin Shear Stress strength theory and can be applied to a wide variety of unsaturated soils. The UST of unsaturated soils is validated by the rigid and flexible true triaxial tests. Meanwhile, the results show that the circumscribed Drucker-Prager failure criterion can not reflect the true strength of unsaturated soils and the UST of unsaturated soils can be a linear approximation of the nonlinear Spatially Mobilized Plane (SMP) failure criterion.

(3) The analytical solutions of active and passive earth pressures, ultimate bearing capacity and critical load for unsaturated soils are derived by means of adopting a shear strength parameter which is fitted by high matric suction and the unified shear strength solution of unsaturated soils under plane strain conditions. The analytical solutions obtained in this dissertation are of wide theoretical significance. The result based on the Mohr-Coulomb failure criterion is a special case of the analytical solutions with the parameter $b=0$. A series of new solutions can be obtained when the parameter b takes other values. When the matric suction is zero, the result corresponds to the solution of saturated soils; with the lateral pressure coefficient $k_0=1$, the result of critical load corresponds to the condition where weight as a hydrostatic pressure stress. The analytical solutions are verified with the corresponding test results of active earth pressure and ultimate bearing capacity. A number of parametric studies, including intermediate principal stress, high and low values and distribution of matric suction, and the lateral pressure coefficient are also carried out to investigate their effects on the analytical solutions.

(4) A new elastic-brittle-plastic analytical solution for stresses and displacements of a deep circular rock tunnel obtained in this dissertation is a true theoretical analytical solution. The integrated effects of intermediate principal stress, rock brittle softening, dilatancy, radius-dependent Young's modulus and different definitions for elastic strains in the plastic zone are all taken into consideration. Therefore, the new analytical solution is a series of results and can be simplified to a number of existing solutions; meanwhile it also contains many other new solutions. Hence this new solution has broad applicability and good comparability. The new solution agrees reasonably well with the results of a secondarily developed numerical simulation and another semi-analytical solution using the generalized non-linear Hoek-Brown failure criterion reported in the literature.

(5) Comparisons with other displacement release coefficients, support force coefficients, an elastic numerical simulation and engineering monitoring data available in the literature prove the accuracy and wide applicability of Vlachopoulos and Diederichs's (2009) displacement release coefficient, which is based on the maximum radius of the plastic zone. Moreover, the results show that the representative elastic displacement release coefficient as Panet (1995) underestimates the support pressure; the representative plastic displacement release coefficient as Hoek (1999) applies only to the tunnel with a relative radius $R_{\max} / r_i = 2$; the support force coefficient leads to a smaller support pressure and a larger stability deformation of the surrounding rock.

(6) The differences anticipated from the convergence-confinement analysis caused by the effects of different influence factors, spatial differences and different support starting positions are discussed by two typical hard and soft rock masses. It is found that the structure strength theory effect of tunnel is significant and the corresponding weak support or light support can be used; the results of an elastic-perfectly plastic model or ignorance of dilatancy will underestimate the range of the plastic zone and the tunnel deformation, and hence less safety in the design; the tunnel deformation and ground reaction curve calculated with the radius-dependent Young's modulus are between the upper and lower bounds, which reflects the gradual change of the tunnel excavation unloading affect with distance; the third definition for elastic strains in the plastic zone is preferred for its rationale and precision; there are interactions between different factors; the support designed based on the support pressure distant from the excavation face should not be arbitrarily move forward; a reasonable and timely support should be designed according to the properties of the surrounding rock.

Key Words: Unified Strength Theory (UST), unsaturated soil strength, the convergence-confinement method, analytical solution, intermediate principal stress, matric suction, tunnel longitudinal deformation profile, support pressure

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 选题背景和研究意义	1
1.2 非饱和土的强度特性	3
1.2.1 非饱和土的基质吸力和抗剪强度	3
1.2.2 非饱和土真三轴试验	5
1.2.3 非饱和土抗剪强度的非线性	7
1.3 岩石的中间主应力效应及强度理论	10
1.3.1 岩石的中间主应力效应试验及规律	10
1.3.2 岩石强度理论	12
1.4 收敛约束法的原理及研究现状	16
1.4.1 收敛约束法的原理	16
1.4.2 围岩特征曲线	18
1.4.3 开挖面的空间效应	20
1.5 本文主要研究内容、创新点及技术路线	22
1.5.1 主要研究内容	22
1.5.2 主要创新点	23
1.5.3 技术路线	24
第 2 章 统一强度理论简介	25
2.1 统一强度理论的力学模型	25
2.2 统一强度理论的表达式	27
2.2.1 双剪统一屈服准则	27
2.2.2 以拉应力为正的统一强度理论	28
2.2.3 以压应力为正的统一强度理论	30
2.2.4 平面应变状态下的统一强度理论	31
2.3 统一强度理论的极限面	32
2.4 统一强度理论的试验验证及应用发展	34
2.4.1 岩石真三轴试验验证	34
2.4.2 现有广泛应用于岩土体强度理论的缺陷	35
2.4.3 统一强度理论的应用	36
2.5 统一强度理论的意义	37
2.6 本章小结	39
第 3 章 非饱和土统一强度理论及验证	40
3.1 土-水特征曲线	40
3.2 应力状态变量	43
3.3 非饱和土的抗剪强度理论	44

3.3.1 抗剪强度公式分类.....	44
3.3.2 抗剪强度公式的特点及不足.....	51
3.4 非饱和土统一强度理论.....	52
3.5 真三轴试验验证.....	56
3.5.1 刚性真三轴仪的试验验证.....	56
3.5.2 柔性真三轴仪的试验验证.....	59
3.6 本章小结.....	63
第 4 章 非饱和土平面应变抗剪强度统一解及应用	65
4.1 平面应变抗剪强度统一解.....	65
4.2 平面应变抗剪强度统一解的应用.....	68
4.2.1 土压力.....	69
4.2.2 极限承载力.....	73
4.2.3 临界荷载.....	75
4.3 解析解的可比性及验证.....	79
4.3.1 可比性分析.....	79
4.3.2 主动土压力实测验证.....	80
4.3.3 极限承载力模型试验验证.....	81
4.4 参数影响分析.....	84
4.4.1 土压力的参数分析.....	85
4.4.2 极限承载力的参数分析.....	88
4.4.3 临界荷载的参数分析.....	91
4.5 本章小结.....	93
第 5 章 深埋圆形岩石隧道弹-脆-塑性分析.....	95
5.1 基本假定.....	95
5.1.1 轴对称开挖平面应变模型.....	95
5.1.2 弹-脆-塑性模型及剪胀特性.....	96
5.2 半径相关的塑性区弹性模量.....	98
5.3 弹-脆-塑性解析新解.....	100
5.3.1 应力解析新解.....	100
5.3.2 位移解析新解.....	101
5.4 解析新解的可比性分析及验证.....	104
5.4.1 可比性分析.....	104
5.4.2 与统一弹-塑性有限元结果比较	105
5.4.3 与广义 Hoek-Brown 经验强度准则解比较.....	106
5.5 参数影响分析.....	109
5.5.1 中间主应力影响分析.....	110
5.5.2 脆性软化影响分析.....	112
5.5.3 剪胀特性影响分析.....	113

5.5.4 塑性区弹性模量影响分析.....	114
5.5.5 塑性区弹性应变影响分析.....	116
5.6 本章小结.....	119
第 6 章 隧道开挖面空间效应及支护压力确定	121
6.1 开挖面空间效应机理.....	121
6.2 支护力系数法.....	123
6.3 位移释放系数法.....	125
6.3.1 位移释放系数公式.....	125
6.3.2 位移释放系数比较.....	127
6.4 空间效应比较.....	128
6.4.1 不同位移释放系数比较.....	128
6.4.2 与支护力系数法比较.....	132
6.4.3 弹性数值模拟及工程实测数据验证.....	133
6.5 支护压力确定及对比分析.....	135
6.5.1 隧道支护设计与空间效应的关系.....	135
6.5.2 不同的位移释放系数.....	136
6.5.3 不同的支护施作距离.....	138
6.5.4 不同的支护起始位置方法.....	139
6.5.5 与支护力系数法的对比.....	141
6.6 参数影响分析.....	142
6.6.1 中间主应力的影响.....	142
6.6.2 脆性软化的影响.....	144
6.6.3 剪胀特性的影响.....	145
6.6.4 塑性区弹性模量的影响.....	146
6.6.5 塑性区弹性应变的影响.....	147
6.7 本章小结.....	150
第 7 章 结论与展望	152
7.1 结论.....	152
7.2 展望与建议.....	154
致 谢	156
参考文献	157
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果	174

第1章 绪 论

1.1 选题背景和研究意义

强度理论是研究材料在复杂应力下屈服和破坏的规律,它包括屈服准则、破坏准则、多轴疲劳准则、多轴蠕变条件,以及计算力学和计算程序中的材料模型等^[1]。合理的材料强度是保证相应工程结构的使用安全和充分节约材料的一个基本条件,一个合理又恰当的强度理论,不仅可以提高工程的质量和耐久性,而且还能带来巨大的经济效益和社会效益。由于大多数工程结构材料和自然界的岩石、土体等材料,都处于复杂应力作用下,因此强度理论研究具有重要的理论意义和应用价值。

强度理论包括材料强度理论和结构强度理论^[2],材料强度理论研究的是各种材料的强度随复杂应力状态改变而变化的规律,并建立相应的计算准则(屈服准则、破坏准则等)。结构强度理论研究的是结构在荷载增加或减小的过程中,从弹性到塑性直到破坏的过程,以及结构在荷载作用下的强度和承载能力。从数学上讲,材料强度理论是一个六维应力空间问题,即使对于各向同性材料,也是一个三维主应力空间问题。结构强度理论则研究的是场(平面和空间)的问题,包括弹塑性应力场、应变场、滑移线场(平面应变)、特征线场(平面应力和空间轴对称)、板壳等结构的极限分析以及结构弹性区、损伤区、塑性区、破裂区等。结构强度理论与材料强度理论是紧密关联的,结构强度理论的研究也需要对材料强度理论的选用进行研究,将二者的研究相结合在理论上和工程实践中都有重要的意义。针对岩土材料及岩土工程,强度理论研究则包括岩土材料强度理论和岩土结构强度理论^[3],两者是紧密相关的,应建立二者相结合的研究方法。如孙钧将材料流变理论和结构流变理论相结合^[4],沈珠江将土力学理论与土体结构理论相结合^[5],俞茂宏将材料强度理论与结构强度理论相结合^[6],均形成了系统的研究成果。

近年来,随着国民经济的持续稳定增长,极大地带动了资源的开采和能源的开发及储存,交通体系的完善和城镇的都市化进程,以及土木水利等基础建设领域的大繁荣。在规划、勘察、设计和施工中,遇到了各式各样的复杂地质条件,给各方面均提出了更高的要求,地表非饱和土工程和深埋地下工程是其代表性工程之一。

非饱和土分布十分广泛,与工程实践密切联系的地表土几乎全都是非饱和土

[7]。干旱与半干旱地区由于蒸发量大于降水量，这些地区的表层土是严格意义上的非饱和土；路基、土坝等的压实填土和基坑开挖后的回填土也都处于非饱和状态。广义的土是指非饱和土，饱和土是非饱和土的特例，但非饱和土与饱和土在工程性质上存在很大差别，如膨胀土、残积土、湿陷性土和压实土等非饱和土^[8]，特别是膨胀土和湿陷性土，含水量或饱和度的变化常使这两种土的工程性质发生巨大变化，导致非饱和土边坡滑坡失稳，或使地表隆起或沉降，并给其上的建筑物和构筑物的安全带来威胁，每年造成的经济损失不亚于水灾、台风、地震等^[9]。

非饱和土的理论研究虽取得了一定进展，但远没有饱和土土力学理论成熟。在实际工程中常将非饱和土看成是饱和土，用传统饱和土的理论来计算强度和变形，这显然忽视了非饱和土的力学特性。如在非饱和粘土地层中，用现有的常规试验方法(不能量测吸力)所得到的粘聚力实际包含有真粘聚力和吸附强度两种不同性质的组成部分，其中真粘聚力的数值很小，而吸附强度的数值虽大却是不稳定的，随着土层含水量的变化而改变。如果设计者不加分辨地将这种不稳定的吸附强度误认作是稳定的粘聚力来设计，就可能招致工程事故和失败^[10-11]。因此，必须对非饱和土的真实强度特性进行深入研究，才可能进一步提高设计工作的精度，并有助于实际有效工程措施的制定和实施。另外，非饱和土的研究应尽量与现有的饱和土土力学的原理、方法和成果联系起来^[12]，建立既反映了非饱和土的主要特性，同时在形式上也比较简便的实用分析和计算方法，并逐渐在工程中推广应用。

资源的开采和能源的开发和储存都在向深部发展^[13]，一批大型水电工程正在兴建，还有一些大型地下洞室正在规划和设计当中，深部岩体中埋设放射性核废物也已列入国家的发展规划。如我国的铜陵狮子山铜矿开采深度为 1100m，开滦赵各庄矿开采深度为 1159m，在建的雅砻江锦屏二级水电站最大埋深达 2525m，青藏铁路隧道、南水北调西线工程许多洞段的埋深都超 1000m，拟建的高放核废料处置库埋深达 700m 等。随着地下工程埋深的不断增加，地质条件变得更为恶劣和复杂，可概括为“三高一扰动”，即高地应力、高地温、高岩溶水压，再加上开挖扰动，使得深部工程围岩的地质力学环境较浅部发生了很大变化，表现出其特有的力学特征。收敛约束法在上述深埋地下工程施工中得到了广泛的应用，与经验类比等设计方法不同^[14]，该方法将支护结构和围岩视为一个受力整体，隧道支护设计需要考虑的问题已不仅局限于支护结构本身的强度和稳定性，而是将注意力更多地投向围岩，以充分发挥围岩的自承载能力。但在采用收敛约束法施工时，也遇到了很多问题，如高地应力下岩石强度准则的选取、围岩屈服范围及变形控制、开挖扰动的描述和评估、开挖面的空间效应、支护时机和支护设计等。总之，面对高地应力作用下的深埋岩石隧道工程，采用何种强度准则描述三向不

等高地应力下的岩石强度, 开挖扰动的合理评价, 以及更好地完善改进收敛约束方法的各特征曲线, 都成了颇具挑战性的课题。

尽管岩土体一般情况下应被视为非连续介质, 但在一定条件下仍满足连续介质力学的基本假定。连续性模型是功能模型, 而不是实际的物理模型, 这种情况在岩体中更为突出^[15]。人们已经发现, 连续介质力学的弹性或弹塑性理论分析对于趋势的预测研究具有不可估量的价值, 而且有些情况完全可以采用这种分析来预测岩体的力学行为或求解岩体的极限荷载。

材料的屈服准则或强度准则对结构的强度分析有较大的影响, 即结构的强度理论效应, 有时其比计算方法的改进影响还大得多^[16], 如果计算方法的差别引起的误差为 10%, 则采用不同的强度理论计算的结果可能相差 30%之多。结构强度理论的研究需要考虑其对应材料强度理论的选用, 现有结构强度理论效应的研究只采用了一、二个零散的单一准则, 有的甚至是不合理的, 不能在理论上给出总的变化规律^[3]。统一强度理论^[6]包括了现有的各种主要强度理论, 它可以适合于各类不同特性的材料, 同时统一强度理论覆盖了外凸极限面的所有区域, 可以给出一系列有序的理论解答, 为结构强度理论效应的研究提供了一个有力的手段和理论基础。本文在连续介质理论和工程应用的框架下, 以统一强度理论为基础, 将非饱和土强度理论及其工程应用、隧道收敛约束法的应用改进作为研究对象, 进行了细致深入的系统研究, 具有重要的理论意义和实际工程应用价值。

1.2 非饱和土的强度特性

1.2.1 非饱和土的基质吸力和抗剪强度

仅从力学角度而言, 非饱和土不同于饱和土的最主要特征就是非饱和土中存在负的孔隙水压力, 负的孔隙水压力是相对于孔隙气压力而言的。非饱和土的吸力包括基质吸力和溶质吸力两部分^[9]。基质吸力通常同水的表面张力引起的毛细现象联系在一起, 其大小等于孔隙气压力 u_a 和孔隙水压力 u_w 之差, 即基质吸力 $= (u_a - u_w)$ 。对于粘性土和砂土来说, 基质吸力通常为吸力的主要组成部分, 且易受外界环境的影响。溶质吸力较小, 且随含水量的变化较小, 只有对于土中含水量和含盐量均较高的高塑性粘土, 溶质吸力才会变得较为重要。所以, 从与工程问题联系的紧密程度来说, 重点研究基质吸力即可。如: 房屋下的地基覆土因雨水积聚使其基质吸力下降, 地基土强度降低, 从而引起基础隆沉; 连续暴雨使边坡土的基质吸力下降, 危及非饱和土边坡的稳定等。实际上, 在低吸力范围内, 基质吸力控制着非饱和土的工程行为, 在高吸力时, 基质吸力几乎在数值上与总

吸力相等,因此本文主要讨论的是基质吸力。基质吸力能反映以非饱和土的结构、土颗粒成分及孔隙大小和分布形态等为特征的基质对土中水分的吸持作用,是控制非饱和土力学性状的关键因素^[17]。

非饱和土的强度是土体粒间作用力的宏观反映,是非饱和土理论研究的最主要内容之一,贯穿于非饱和土土力学发展的整个过程,在侧向土压力、地基承载力和边坡稳定分析中都具有重要作用。国内外众多学者通过试验研究或理论分析,提出了许多非饱和土的抗剪强度理论和公式,并逐步应用于岩土工程实践,其中最为著名的当属 Bishop 有效应力抗剪强度公式和 Fredlund 双应力状态变量抗剪强度公式。

Bishop 和 Blight(1963)^[18]基于饱和土有效应力原理,提出的非饱和土有效应力抗剪强度公式为

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \chi(u_a - u_w) \tan \varphi' \quad (1.1)$$

式中, c' , φ' 分别为饱和土的有效粘聚力和有效内摩擦角,与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 无关; $(\sigma - u_a)$ 为净法向应力; 参数 χ 为有效应力参数,与饱和度及其他很多因素有关,不具有单值性,因而在工程实践中 Bishop 有效应力抗剪强度公式未能得到广泛应用。

Fredlund 等(1978)^[19]在双应力状态变量 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 的基础上,基于 Mohr-Coulomb 强度理论,提出的非饱和土双应力状态变量抗剪强度公式为

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (1.2)$$

式中, φ^b 为与基质吸力相关的角, $\tan \varphi^b$ 表示基质吸力对抗剪强度贡献的速率。角 φ^b 值的大小可根据给定净法向应力 $(\sigma - u_a)$ 下,不同基质吸力 $(u_a - u_w)$ 所对应的抗剪强度曲线的斜率确定。

由式(1.1)和式(1.2)可以看出,非饱和土的抗剪强度由有效粘聚力 c' , 净法向应力 $(\sigma - u_a)$ 引起的抗剪强度,以及基质吸力 $(u_a - u_w)$ 引起的抗剪强度所组成。净法向应力引起的抗剪强度与有效内摩擦角 φ' 有关,而基质吸力引起的抗剪强度与有效应力参数 χ 或角 φ^b 有关。

非饱和土的抗剪强度与饱和土的抗剪强度相比,最大的不同就在于基质吸力对抗剪强度的贡献。如果定义由基质吸力所引起的抗剪强度为吸附强度 c_s , 则式(1.1)和式(1.2)中的吸附强度 c_s 分别为

$$c_s = \chi(u_a - u_w) \tan \varphi' \quad (1.3)$$

$$c_s = (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (1.4)$$

令式(1.3)和式(1.4)相等, 则

$$\chi = \tan \varphi^b / \tan \varphi' \text{ 或 } \tan \varphi^b = \chi \tan \varphi' \quad (1.5)$$

可见仅从非饱和土抗剪强度来看, Bishop 有效应力抗剪强度公式和 Fredlund 双应力状态变量抗剪强度公式的物理概念基本相同, 其差别仅在于分别采用了有效应力参数 χ 和角 φ^b 两种不同的参数形式。但在力学意义上却有着本质的不同, 式(1.1)属于有效应力公式, 即净法向应力和由基质吸力引起的有效法向应力能直接叠加; 式(1.2)属于双应力状态变量公式, 净法向应力和基质吸力不能叠加。

吸附强度 c_s 是一种与外力无关的摩擦强度, 它来源于基质吸力所产生的负孔隙水压力, 负孔隙水压力在土骨架的内部产生有效应力, 因而产生这种与外力无关的摩擦强度。由于吸附强度与外力无关, 当用常规试验方法进行试验时, 吸附强度与一般粘聚力的性质相似, 所以又可称之为表观粘聚力^[17]。当土的含水量发生变化时, 基质吸力和吸附强度都随之变化, 因而吸附强度又是不稳定的。吸附强度随着含水量的增加而降低, 直至接近饱和时完全消失。

当前众多学者对非饱和土的抗剪强度进行了大量的试验和理论研究, 提出了各自的抗剪强度公式, 主要差别在于吸附强度 c_s 的表达式不同, 如: 有的结合土-水特征曲线^[20-27], 有的采用双曲线、对数、幂函数等曲线拟合^[28-41], 有的则采用分段函数^[42-45], 具体表达式将在第3章中给出。提出的抗剪强度公式逐渐考虑了更多因素的影响, 如: 净法向应力对非饱和土进气值或吸附强度的影响^[42-43], 土体剪胀性对抗剪强度的影响等^[26-27]; 同时, 工程实用化的非饱和土总应力抗剪强度研究也取得了一定成果^[46-58], 但其理论基础不强, 有待更多的室内试验和实际工程现场监测数据的检验。

现有的非饱和土抗剪强度公式均是基于 Mohr-Coulomb 强度理论而建立的, 抗剪强度参数由非饱和土对称三轴压缩试验或直剪试验确定, 进而应用到其他复杂应力状态。Mohr-Coulomb 强度理论属于单剪强度准则, 只考虑了最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 , 没有考虑中间主应力 σ_2 对强度的影响, 存在先天的不足。已有非饱和土的真三轴试验结果表明, 中间主应力对非饱和土的强度影响显著^[59-60], 现有非饱和土抗剪强度公式不能反映非饱和土的真实应力状态和强度特性, 也不能充分发挥非饱和土的强度潜能和自承载能力, 应该采用更合理的强度理论, 结合非饱和土常规三轴压缩试验, 建立符合工程实际受力状况的非饱和土强度理论, 完善非饱和土的理论基础。

1.2.2 非饱和土真三轴试验

岩土工程中常常遇到三维分析问题, 量测和研究土单元在三维应力状态下的应力-应变-强度特性具有理论和实践意义, 真三轴仪的设计与试验研究一直是一