

东南土木
青年教师
科研论丛

砂性土宏细观特性 数值分析研究

赵学亮 著

Numerical Study of
Soil Response at Multiscale

东南土木·青年教师·科研论丛

中央高校基本科研业务费专项资金资助

砂性土宏细观特性数值分析研究

赵学亮 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内 容 提 要

本书主要是对砂性土在不同应力条件下宏细观特性的数值进行分析和探讨,从细观角度对宏观力学行为进行分析解释。全书共分8章,内容包括绪论,研究现状,数值模型,不同荷载条件下试样的宏、细观结构及特性分析,试样的体视学数值模拟分析,以及研究内容的讨论分析总结和进一步研究建议。

本书可供从事岩土工程领域的科研人员、工程师和研究生使用,研究方法可供从事颗粒材料相关的制药、环境等相关领域人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

砂性土宏细观特性数值分析研究/ 赵学亮著. —南京:
东南大学出版社, 2017. 2

(东南土木青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-7031-8

I. ①砂… II. ①赵… III. ①砂土—数值分析
IV. ①TU441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 019413 号

砂性土宏细观特性数值分析研究

著 者 赵学亮

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d. d. 00@163. com

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

版 次 2017 年 2 月第 1 版

印 次 2017 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 12

字 数 270 千

书 号 ISBN 978-7-5641-7031-8

定 价 48.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

序

作为社会经济发展的支柱性产业,土木工程是我国提升人居环境、改善交通条件、发展公共事业、扩大生产规模、促进商业发展、提升城市竞争力、开发和改造自然的基础性行业。随着社会的发展和科技的进步,基础设施的规模、功能、造型和相应的建筑技术越来越大型化、复杂化和多样化,对土木工程结构设计理论与建造技术提出了新的挑战。尤其经过三十多年的改革开放和创新发展,在土木工程基础理论、设计方法、建造技术及工程应用方面,均取得了卓越成就,特别是进入 21 世纪以来,在高层、大跨、超长、重载等建筑结构方面成绩尤其惊人,国家体育场馆、人民日报社新楼以及京沪高铁、东海大桥、珠港澳桥隧工程等高难度项目的建设更把技术革新推到了科研工作的前沿。未来,土木工程领域中仍将有许多课题和难题出现,需要我们探讨和攻克。

另一方面,环境问题特别是气候变异的影响将越来越受到重视,全球性的人口增长以及城镇化建设要求广泛采用可持续发展理念来实现节能减排。在可持续发展的国际大背景下,“高能耗”“短寿命”的行业性弊病成为国内土木界面临的最严峻的问题,土木工程行业的技术进步已成为建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需求。以利用预应力技术来实现节能减排为例,预应力的实现是以使用高强高性能材料为基础的,其中,高强预应力钢筋的强度是建筑用普通钢筋的 3~4 倍以上,而单位能耗只是略有增加;高性能混凝土比普通混凝土的强度高 1 倍以上甚至更多,而单位能耗相差不大;使用预应力技术,则可以节省混凝土和钢材 20%~30%,随着高强钢筋、高强等级混凝土使用比例的增加,碳排放量将相应减少。

东南大学土木工程学科于 1923 年由时任国立东南大学首任工科主任的茅以升先生等人首倡成立。在茅以升、金宝楨、徐百川、梁治明、刘树勋、方福森、胡乾善、唐念慈、鲍恩湛、丁大钧、蒋永生等著名专家学者为代表的历代东大土木人的不懈努力下,土木工程系迅速壮大。如今,东南大学的土木工程学科以土木工程学院为主,交通学院、材料科学与工程学院以及能源与环境学院参与共同建设,目前拥有 4 位院士、6 位国家千人计划特聘专家和 4 位国家青年千人计划入选者、7 位长江学者和国家杰出青年基金获得者、2 位国家级教学名师;科研成果获国家技术发明奖 4 项,国家科技进步奖 20 余项,在教育部学位与研究生教育发展中心主持的 2012 年全国学科评估排名中,土木工程位列全国第三。

近年来,东南大学土木工程学院特别注重青年教师的培养和发展,吸引了一批海外知名大学博士毕业青年才俊的加入,8 人入选教育部新世纪优秀人才,8 人在 35 岁前晋升教授或博导,有 12 位 40 岁以下年轻教师在近 5 年内留学海外 1 年以上。不久的将来,这些青年学

者们将会成为我国土木工程行业的中坚力量。

时逢东南大学土木工程学科创建暨土木工程系(学院)成立 90 周年,东南大学土木工程学院组织出版《东南土木青年教师科研论丛》,将本学院青年教师在工程结构基本理论、新材料、新型结构体系、结构防灾减灾性能、工程管理等方面的最新研究成果及时整理出版。本丛书的出版,得益于东南大学出版社的大力支持,尤其是丁丁编辑的帮助,我们很感谢他们对出版年轻学者学术著作的热心扶持。最后,我们希望本丛书的出版对我国土木工程行业的发展与技术进步起到一定的推动作用,同时,希望丛书的编写者们继续努力,并挑起东大土木未来发展的重担。

东南大学土木工程学院领导让我为本丛书作序,我在《东南土木青年教师科研论丛》中写了上面这些话,算作序。

中国工程院院士: 吴志清

2013.12.23

前言

无黏性砂土是自然界广泛存在的一种土体,通过实验室试验对不同应力状态下颗粒土试样的宏观特性如强度、体积变化、破坏形式等进行分析是传统的方法。对称三轴压缩试验、直剪试验和平面应变试验是岩土工程中最常用来模拟工程现场条件的三种室内试验。由于三个主应力对土的应力—应变—强度—体积变化特性都发挥重要作用,土体或试样在不同的现场条件或不同室内试验中会有不同的表现。实际岩土工程中,平面应变工程条件比轴对称三轴压缩和直剪条件更为普遍。但在工程设计中,轴对称三轴试验和直剪试验却是用来获得土体强度、变形特性等设计参数的最常用最主要的方法。因此,用轴对称三轴压缩试验或直剪试验所得参数来进行平面应变工程条件设计是一个普遍存在的问题,研究不同应力状态下试样的不同特性及关系对岩土工程设计具有重要的现实意义。

由于砂性土是由离散的颗粒组成的土体,其宏观特性是由颗粒之间相互作用的细观结构和细观力学特性所决定和控制的。沈珠江院士曾提出土体结构性模型及理论是 21 世纪土力学的核心问题之一。而颗粒物质由于其非连续和接触耗散等复杂性,在 2005 年与湍流一起被 Science 并列为 100 个科学难题之一。因此,研究颗粒土在不同应力状态细微观结构特性,从细微观力学角度分析解释不同应力状态下土体的不同宏观力学行为对土力学及颗粒物质力学的发展具有重要的理论意义。

本书对颗粒土在三种典型应力状态下的不同宏微观特性进行分析,采用颗粒流离散元数值模拟方法,对试样细观结构和微观力学进行分析,从细微观角度解释试样不同应力状态下的不同宏观力学行为,以期对土力学的理论研究及实践工程设计提供基础理论依据。

本书的主要工作是笔者在美国北卡州立大学攻读博士学位期间完成的,从选题到研究内容的完成都是在导师 T. M. Evans 的悉心指导下完成的,在此对 T. M. Evans 教授表示衷心谢意,并对北卡州立大学的培养表示感谢。博士生栾阳对书稿的修改和校对做了大量工作,在此表示感谢。

由于笔者水平有限,对研究方法和结果希望能与同行探讨分析,对书中的诸多不足之处,希望广大读者批评指正。

赵学亮

2016 年 9 月于东南大学

目 录

1	绪 论	1
2	研究现状	4
2.1	简介	4
2.2	宏观特性研究:不同荷载条件下土体力学行为.....	4
2.2.1	平面应变试验和三轴压缩试验的比较	4
2.2.2	平面应变试验、直剪试验和三轴压缩试验的关系	6
2.2.3	总结	8
2.3	细观结构分析研究:试验法.....	8
2.3.1	三轴压缩试验	8
2.3.2	平面应变试验	11
2.3.3	直剪试验.....	12
2.3.4	总结	13
2.4	细观结构的研究:数值模拟	13
2.4.1	三轴试验.....	14
2.4.2	平面应变试验	15
2.4.3	直剪试验.....	17
2.4.4	总结	18
2.5	讨论.....	18
3	数值模型.....	19
3.1	离散单元法简介.....	19
3.2	离散单元法原理.....	20
3.3	模型特性.....	21
3.3.1	模型建立	21
3.3.2	薄膜模拟	22
3.3.3	数值模型参数的确定	24
3.3.4	模型特性	26

3.4 参数分析..... 27

3.4.1 模型参数分析 27

3.4.2 物理参数分析 30

3.5 总结..... 32

4 不同荷载条件试样宏观特性分析..... 33

4.1 简介..... 33

4.2 数值模型特性..... 33

4.3 试验名称和坐标系定义..... 34

4.4 数值模拟试验结果..... 35

4.5 小应变力学特性..... 42

4.5.1 理想材料小应变特性 42

4.5.2 数值模拟结果 43

4.6 抗剪强度..... 44

4.7 体积变化..... 47

4.8 总结..... 49

5 不同荷载条件试样细观结构分析..... 50

5.1 简介..... 50

5.2 试样集合体特性..... 51

5.2.1 破坏变形..... 51

5.2.2 孔隙比 53

5.2.3 颗粒配位数 64

5.3 颗粒特性..... 67

5.3.1 颗粒旋转..... 67

5.3.2 颗粒位移..... 74

5.4 试样数据统计分析..... 78

5.4.1 方法介绍..... 78

5.4.2 颗粒方向分布图 78

5.4.3 接触参数分析 88

5.5 总结 112

6 体视学分析 114

6.1 简介 114

6.2 图像生成方法 115

6.2.1 试验分析法模拟 115

6.2.2	RENCI 三维切片法	116
6.2.3	几何切片算法	116
6.3	局部孔隙比分布	118
6.3.1	综述	118
6.3.2	局部孔隙比统计分析	119
6.3.3	局部孔隙比统计模型	120
6.3.4	不同荷载条件下的局部孔隙比分布	122
6.4	区域分析	128
6.4.1	介绍	128
6.4.2	区域孔隙比	128
6.4.3	区域平均自由程	129
6.4.4	区域分析讨论	131
6.5	颗粒方向	131
6.5.1	简介	131
6.5.2	颗粒方向分析方法	132
6.5.3	颗粒方向分布圆形统计分析	132
6.5.4	颗粒方向分布圆形统计模型	134
6.5.5	两种方法关系	138
6.5.6	不同荷载条件下颗粒方向分布	138
6.6	总结	144
7	讨论和分析	146
7.1	介绍	146
7.2	抗剪强度和剪切应变	146
7.2.1	抗剪强度	146
7.2.2	剪切应变	147
7.3	应变局部化	148
7.3.1	应变局部化形式	148
7.3.2	剪切带形状	149
7.4	临界状态或大应变状态	151
7.4.1	临界状态模型参数	151
7.4.2	宏观性质	153
7.4.3	试样孔隙比和配位数	154
7.5	熵分析	156
7.6	直剪试验统计分析	157
7.7	总结	164

8 结论和建议 165

8.1 结论 165

8.1.1 数值模拟 165

8.1.2 宏观分析 166

8.1.3 细观分析 166

8.1.4 立体图像分析 167

8.1.5 综合分析 167

8.2 建议 168

参考文献..... 169

1 绪 论

对于固体材料和颗粒材料(Kjellman, 1936),三个方向主应力对其应力—应变—强度—体积变化特性起决定性作用。在岩土工程中,测量土体参数最常用的室内试验有传统三轴压缩试验(Conventional Triaxial Compression, CTC)、平面应变试验(Plane Strain, PS)和直剪试验(Direct Shear, DS)。众所周知,土体或试样在不同荷载条件下表现不同。比如,从直观破坏变形形式上,平面应变条件下,试样一般会产生应变局部化从而沿剪切带发生滑动破坏,而轴对称三轴压缩试样一般发生相对均匀的鼓胀破坏。在实际工程中,平面应变条件最为普遍,比如挡土墙后土体、坝体中的土体、路堤或江堤中的土体的受力均为平面应变条件。但是,轴对称三轴试验和直剪试验却是用来获得土体强度、变形特性等设计参数最常用的方法。这两种试验虽然不能更真实地模拟现场工程条件,但因为轴对称三轴和直剪试验操作相对简单,而平面应变试验比较复杂与繁琐,所以三轴试验和直剪试验应用更加广泛。

由于一般传统三轴压缩试验中测得的摩擦角比平面应变试验小(Cornforth, 1964; Henkel and Wade, 1966; Rowe, 1969; Lee, 1970),所以根据轴对称三轴压缩试验或直剪试验的结果来进行平面应变工程条件设计一般被认为偏于保守。首先,平面应变试验条件和传统三轴压缩试验条件下试样屈服前后的表现不同(Lee, 1970),比如:平面应变试验初始刚度更大;平面应变试验峰值强度对应的轴应变比传统三轴压缩试验小;破坏应力路径不同。这些不同特性导致不同应力状态时临界状态下的 $p'-q$ 曲线也不同(Mooney et al., 1998; Evans, 2005)。有些学者(Ramamurthy and Tokhi, 1981)认为平面应变试验中第二主应力方向颗粒运动被限制是造成平面应变试验和传统三轴压缩试验差异的主要原因。而在直剪试验中,由于破坏面由仪器决定,剪切过程主应力轴发生旋转,且无法忽略边界条件对试样特性的影响(Jacobson et al., 2007; Wu, 2008)。这一系列的原因导致传统三轴压缩和直剪试验结果无法直接应用于平面应变条件下的土体。

很多学者研究了不同荷载条件(平面应变试验、传统三轴压缩试验、直剪试验)对土体应力—应变—强度—体积变化特性的影响(Cornforth, 1964; Finn et al., 1967; Lee, 1970; Hanna, 2001)。有的学者提出了平面应变条件和传统三轴压缩或直剪条件下试样剪切强度参数之间的关系(Rowe, 1969; Ramamurthy and Tokhi, 1981, 1989; Bolton, 1986; Hanna, 2001),但是,这些研究很少从控制宏观特性的细观力学和细观结构的角度进行分析和解释,特别是对非本构破坏(如局部集中应变过大造成的破坏)的破坏机理的研究还很缺乏。目前还没有被广泛接受的根据传统三轴压缩试验或直剪试验的结果推算平面应变试验应力—应变—强度参数的理论和算法。为解决这一问题,重要的是建立符合现场实际土体宏观行为的特性的模型,进一步研究影响土体宏观特性的细观力学和细观结构。

颗粒土的宏观特性是由土体的细观结构和细观力学决定的。不同荷载条件下的试样具有不同的破坏模式。平面应变试验破坏时一般有一个明显的破坏面,称之为应变局部化或剪切带,传统三轴压缩试验通常是扩散破坏,而直剪试验的破坏面由仪器决定。试样(尤其是剪切带和破坏面)受剪时的细观力学和细观结构的不同,决定了试样破坏方式的不同。很多研究表明,试样发生应变局部化的部分的细观结构与试样其他部分截然不同(via regions of high localized strain),应变局部化的部分与其他部分相比孔隙比一般比较大。剪切带的形成和受力机理及剪切带构造(倾角和厚度)决定了试样宏观特性。为进一步理解试样的宏观行为特性,需要对试样的细观颗粒尺度的特性,如颗粒旋转和位移、颗粒方向、局部孔隙比、应变局部化部分的配位数和整个试样配位数等进行深入研究。有一些学者对这些细观特性进行过研究,但是很少考虑不同荷载条件对试样宏观特性的影响。

在研究土体的宏、细观特性时,最常用的方法是试验分析法,即通过试验研究观察分析试样应力—应变—强度—体积的行为和特性。研究试样细观结构的试验法有 X 射线断层图像法(Desrues et al. , 1996)和固化切片法(Kuo and Frost, 1996)等。但这些试验法有很多缺点,从操作角度看,试验法一般耗时、昂贵,而且操作比较复杂繁琐;从研究角度看,一些重要的参数如法向接触力、切向接触力等,试验很难或者无法测得。数值分析可以弥补试验分析法的这一缺点。Cundall 和 Strack 在 1979 年提出了离散单元法(Discrete Element Method, DEM),该方法被广泛应用于颗粒材料力学行为和特性的研究。采用离散单元法,可以获得试样很多细观参数(如局部孔隙比、配位数等)和颗粒特性(如颗粒旋转、颗粒位移、颗粒方向等)。对一些很难或无法通过试验测得的参数,如接触方向、法向接触力、切向接触力等也可以通过离散元数值模拟获得。除此以外,还可以通过离散元数值模拟研究试样的空间特性(如剪切带构造、局部孔隙比分布等)和时间特性(如剪切带的开展、局部孔隙比随加载过程的发展等)。同时,数值试验可以模拟实验室中比较复杂的固化切片法,并采用体视学法和统计法对颗粒材料的行为特性做进一步研究,模拟的结果甚至比试验结果更加精确。之前已经有学者采用离散元模型对平面应变试验(O'Sullivan and Bray, 2004)、传统三轴压缩试验(Thornton, 2000; Cui et al. , 2015)和直剪试验(Ni et al. , 2000)进行了模拟,但这些学者都只对一种荷载条件进行模拟,而对不同荷载条件下土体特性进行比较的研究较少。

本书主要介绍了采用离散元模拟不同荷载条件土性试验,即平面应变试验、传统三轴压缩试验、直剪试验,从宏观细观不同尺度对不同荷载条件下颗粒土的行为特性进行分析研究,特别是从颗粒尺度的细观角度对土体的宏观行为进行分析,从物理机理上对土体的宏观行为进行解释。本书的主要内容如下:

第二章 回顾相关文献,对不同荷载条件下土体的宏观行为进行比较,总结平面应变试验、传统三轴压缩试验、直剪试验抗剪强度参数的关系,以及颗粒土细观结构试验、颗粒土细观结构数值模拟等研究成果。

第三章 介绍离散单元法的理论基础,建立离散元数值模型,并对参数进行分析,定量分析不同参数对试样宏观特性的影响。

第四章 讨论平面应变试验、传统三轴压缩试验、直剪试验荷载条件下模型试样的宏观力学行为特性,研究不同荷载条件下小应变时试样的抗剪强度和体积变化等行为特性。

第五章 从细观角度分析试样力学行为和颗粒特性,采用统计方法分析试样颗粒方向和接触特性。

第六章 模拟实验室中切片法对数值模型试样进行切片,采用体视学法研究试样局部孔隙比和颗粒方向的分布。

第七章 综合采用宏观分析法、细观分析法、体视学法以及统计学法,对不同荷载条件下的试样性质进行进一步分析研究。

第八章 总结本书的成果,对未来进一步的研究内容给出建议。

2 研究现状

2.1 简介

土体在不同的荷载条件下(传统三轴压缩、平面应变、直剪),会表现出不同的应力—应变—强度—体积变化等力学行为特性。很多学者对于不同荷载条件下土体宏观特性进行了分析研究。在实际工程中,轴对称三轴试验和直剪试验应用广泛,平面应变试验因为相对较为繁琐而使用较少,一些学者提出了根据轴对称三轴试验或直剪试验结果计算平面应变条件下试样强度参数的公式。由于土体的宏观性质是由其细观结构和细观力学决定的,很多学者对颗粒材料细观特性对土体宏观特性的影响进行了研究。对不同荷载条件下土体力学行为特性的分析研究,采用的方法主要可以分为两大类:室内试验法和数值模拟法。本章主要对相关研究内容和结果进行分析和总结。

2.2 宏观特性研究:不同荷载条件下土体力学行为

由于三个方向主应力对土体的应力—应变—强度—体积变化特性起决定性作用,因此土体或试样在不同的荷载条件下表现不同,很多学者对这一内容进行了试验研究。在实际工程中,很多问题都属于平面应变问题(如挡土墙后土体),但因为平面应变试验比较复杂繁琐,而轴对称三轴和直剪试验相对简单,因此轴对称三轴试验和直剪试验是用来获得土体强度参数最常用的方法,即使是平面应变条件,很多设计也采用三轴或直剪试验所得参数。因此很多学者对轴对称三轴压缩试验或直剪试验结果与平面应变试验结果进行了比较分析,提出了根据轴对称三轴压缩试验或直剪试验结果计算平面应变条件下土体抗剪强度参数的计算方法和公式。

2.2.1 平面应变试验和三轴压缩试验的比较

很多学者对第二主应力(中主应力)对抗剪强度的影响进行了研究。在分析第二主应力对抗剪强度的影响时,有的学者采用了棱柱形试样来控制三向主应力,也有学者采用空心圆柱试样来控制第二主应力的大小,但是比较普遍的研究方法是对传统三轴压缩试验的结果与平面应变试验的结果进行比较。

Bishop (1966)和 Cornforth (1964)对不同密度的砂土在相同的围压下进行了一系列的

排水固结试验。发现在试样比较密实的情况下,平面应变试验试样的内摩擦角比进行三轴压缩试验的试样大 4° 左右。但是,在试样比较松散的情况下,两种试验的结果非常接近。三轴压缩试验中,试样破坏时的应变是平面应变试验试样破坏时应变的两倍以上,且破坏时三轴压缩试样的体积膨胀远大于平面应变试样。

Bishop 和 Wood (1958)发明了一套平面应变试验仪器,Henkel 和 Wade (1966)使用该仪器对饱和重塑黏土进行了一系列的试验。试验结果表明,在围压较小的情况下,平面应变条件下试样的不排水抗剪强度比三轴压缩条件下试样大 8%。平面应变条件下试样大约在轴应变为 2% 达到峰值强度,而三轴压缩条件下这一数值为 6%。试验结果表明,试样的抗剪切角在平面应变条件下比三轴压缩条件下要大。根据研究结果发现,相较于八面体应力破坏标准,试样的破坏状态与摩尔库仑破坏标准比较接近。

Finn 等(1967)对由球形颗粒组成的六面体模型试样进行了一系列的三轴压缩试验和平面应变的试验。他们认为,基于一定假设条件,理论上平面应变条件下试样应变应该小于三轴压缩条件,这一推论得到了室内试验的证实。他们提出,由于平面应变条件下试样体积的膨胀趋势小于三轴压缩条件,所以平面应变条件下试样的临界围压要比三轴压缩条件下的试样小。

Lee (1970)对砂土的三轴压缩试验和平面应变试验进行比较。结果发现,平面应变试验试样具有明显的剪切破坏面。在三轴压缩试验中,当试样较密且围压较小时,试样将会沿着剪切面破坏;当试样比较松散或围压较大时,试样发生扩散膨胀破坏。Lee 还发现,平面应变条件下试样的泊松比一般大于三轴压缩条件。无论是在平面应变还是三轴压缩条件下,试样的弹性模量都会随着围压的增加而呈指数型增加,且峰值强度也与围压有关。当围压较小时,平面应变条件下试样的峰值强度比较小,但是在围压较高的时候,平面应变条件下试样的峰值强度远大于轴对称三轴试验。当围压中等时,两种荷载条件下试样的峰值强度相差不大。在排水条件下,三轴压缩试样的膨胀率大于平面应变条件下试样的膨胀率;在不排水条件下,平面应变试样的孔隙水压力比三轴压缩试验大,而临界围压比三轴压缩试验小,这一结论与 Finn 等(1967)的研究结果相一致。

大多数学者在研究时使用的试样都是重塑土,而 Vaid 和 Campanella (1974)对敏感度较高的饱和海相原状黏土进行了一系列的试验。在不排水试验中,平面应变和三轴压缩条件下试样峰值偏应力对应的应变基本相等,这一结论与 Henkel (1966)的研究结果相悖。Henkel (1966)认为三轴压缩条件下的峰值偏应力对应的应变大于平面应变条件。Vaid 和 Campanella (1974)的研究发现平面应变条件下不排水强度与竖向固结应力的比值要大于三轴压缩试验,也就是说,用三轴压缩试验的结果来推测平面应变条件下土体短时间内的稳定性会偏于保守。并且,无论是在压缩还是拉伸条件下,平面应变条件下试样的内摩擦角会比三轴压缩条件下内摩擦角大 $0.5^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 。试验结果还发现,平面应变条件下试样孔隙水压力的变化比相应三轴压缩条件下的试样要大。在排水试验中,当应变相同时,平面应变条件下有效应力比(即抗剪强度)比三轴压缩条件下要大,而且平面应变试验中试样的内摩擦角比相应的三轴压缩试验大。

局部应变(特别是剪切带)对颗粒土有重要影响,甚至决定了试样的力学行为特性。一些学者利用分叉(Bifurcation)理论解释局部应变现象,他们认为塑性区局部化是由于土体

分叉不连续造成的。Peric 等(1992)比较了平面应变条件和三轴压缩条件下的塑性分叉,结果表明,由于三轴压缩条件下的硬化阶段对塑性分叉具有抑制作用,所以平面应变条件比三轴压缩条件更容易发生塑性分叉。他们认为,无论平面应变还是三轴压缩条件下,中主应力分量在三维解中都是平面外主应力分量。中主应力的不断变化会提高分叉发生的可能性,而三轴压缩条件对中主应力的抑制阻碍了分叉的形成。

Finno 等(1996)对松散饱和细砂进行了一系列完全不排水试验。对三轴压缩和平面应变条件下试样稳态线进行了比较。结果表明,三轴压缩试验试样的稳态线一般位于平面应变试验试样稳态线的下方,说明三轴压缩试验和平面应变试验不仅具有不同的峰值强度,而且稳态强度也不同。这表明,当孔隙比相同时,三轴压缩试验的平均有效应力比平面应变试验低,相应三轴压缩试验的最小剪应力会比平面应变试验低,说明三轴试验结果所得强度参数更偏于保守。

2.2.2 平面应变试验、直剪试验和三轴压缩试验的关系

由于平面应变试验复杂繁琐,一些学者根据三轴压缩试验、直剪试验和平面应变试验的数据结果,分析了三种试验所得强度参数之间的关系,提出了根据轴对称三轴压缩或直剪试验结果计算平面应变条件下试样强度参数的公式。

Rowe (1962)分析了试样膨胀性和强度的关系,认为试样的膨胀和强度与试样吸收和消耗的能量有关,并以该理论为基础,提出了直剪试验和平面应变试验峰值强度的关系公式:

$$\tan \phi_{ds} = \tan \phi_{ps} \cos \phi_{cv} \tag{2.1}$$

式中, ϕ_{ds} 和 ϕ_{ps} 分别为直剪试验和平面应变试验中的峰值摩擦角, ϕ_{cv} 是体积不变(稳态)时的摩擦角。需要注意该公式的假设前提是主应力方向和主应变的方向相一致。

Ramamurthy 和 Tokhi (1981)假设 $\sigma'_2/(\sigma'_1+\sigma'_3)$ 是一个常数,然后根据平面应变试验和三轴压缩试验结果提出了下面公式:

$$\frac{1}{\sin \phi'_{ctc}} = \frac{1}{\sin \phi'_{ps}} + \frac{2}{3}b \tag{2.2}$$

式中, $b = (\sigma'_2 - \sigma'_3)/(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ 。此外,Ramamurthy 根据 Reades (1972), Lade 和 Duncan (1973), Bishop (1966)和 Green (1972)等人的室内试验结果,推导出了下面两个公式:

$$\sin \phi'_p + 3\left(\frac{1}{\sin \phi'_c} - \frac{1}{\sin \phi'_p}\right) = 1 \tag{2.3}$$

$$3\sin \phi'_p - \sin \phi'_c (\sin \phi'_p + \cos \phi'_p) = 2\sin \phi'_c \tag{2.4}$$

式(2.3)适用于土体体积变化比较小的情况,而式(2.4)更适用于体积膨胀较大的情况。

Hanna (2001)提出了一种根据三轴压缩试验结果推算砂土在平面应变条件下的抗剪强度的方法。该方法以 Rowe (1962)的剪胀理论为基础,Rowe 的剪胀理论以估算试样受剪时能量的损失为基础,提出了以下公式:

$$R = DK = D \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_f}{2} \right) \quad (2.5)$$

式中, R 为主应力比, D 为膨胀系数, K 是材料参数。

$$R = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (2.6)$$

$$D = 1 - \frac{d\nu}{d\epsilon_1} \quad (2.7)$$

$$K = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_f}{2} \right) \quad (2.8)$$

式中, $d\nu$ 和 $d\epsilon_1$ 分别是体积应变和轴应变的塑性分量, ϕ_f 是 Rowe 法中的摩擦角。

Rowe 假设对于非常松散的砂土 D 为 1, 对非常密实的砂土 D 为 2。所以, 使用非常松散试样进行三轴压缩试验时有:

$$R = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{cv}}{2} \right) \quad (2.9)$$

使用非常松散的试样进行平面应变试验时:

$$R = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_u}{2} \right) \quad (2.10)$$

使用极度密实的试样进行平面应变试验时:

$$R = 2 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{cv}}{2} \right) \quad (2.11)$$

式中, ϕ_{cv} 为剪切体积不变条件(稳态)下的库仑抗剪切角, ϕ_u 是土粒间的摩擦产生的抗剪切角。

Hanna (2001) 对 Rowe 的剪胀理论进行了一系列的室内试验验证, 并以剪胀理论为基础提出了根据三轴压缩试验结果推断平面应变条件下抗剪切角计算公式:

$$\tan \phi_{ps} \cos \phi_{cv} = \frac{(KD - 1)\sqrt{12D - 3D^2}}{4KD - KD^2 + 3D} \quad (2.12)$$

式中, ϕ_{cv} 同样为剪切体积不变条件(稳态)下的库仑抗剪切角, 它和参数 K 、 D 都由三轴压缩试验确定。

Bolton (1986), Schanz 和 Vermeer (1996), Geordiadis 等(2004)研究了不同荷载条件下的土体抗剪强度的大小, 发现松砂或试样达到临界状态时, 临界状态剪切角与荷载条件无关:

$$\phi'_{ps} = \phi'_{dc} \quad (2.13)$$

Bolton (1986) 根据这一结论及大量试验数据, 提出了平面应变条件下剪切角的计算