

土应力方向依赖性的数力机理与等效应力法研究

董彤

(陆军勤务学院 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 重庆 400041)

博士学位论文摘要: 土的应力方向依赖性是指土的力学特性随应力方向改变而改变的性质, 包含材料的方向性(即土的各向异性)和应力的方向性(即应力主轴偏转)两层含义。然而, 目前对上述两方面及其协同作用的机制尚不明确, 致使已有模型大都采用假设各向异性参数、修正已有模型、拟合确定参数的建模思路, 所建模型形式复杂、理论不严谨且适用性较差。虽然采用变换应力建模已付诸实践, 但对变换应力的刻画及组构的取值缺乏严格的理论基础, 致使其数学拟合成分多于力学模型成分。本文在前人的研究成果的基础上, 通过试验研究、机理分析、方法提出和实践验证 4 个方面, 对岩土材料应力方向依赖性进行了较为深入而系统的研究, 取得了以下主要研究成果:

(1) 完善了空心圆柱扭剪试验方法, 开展了土的应力方向依赖性的宏观试验。应力不仅包含大小而且存在方向, 推导了四种广义应力力系之间的两两映射关系, 完善了空心圆柱扭剪仪外荷载控制方式。针对目前制备饱和和重塑黏土空心圆柱试样比较困难的问题, 研制了相应的压样装置和饱和装置。考虑压样过程中上覆土对下层土的二次压实作用, 提出了质量控制的分层欠压法, 提高了制样的均匀性和可重复性。最后, 采用重塑砂土与重塑黏土开展了定轴剪切试验和纯主应力轴旋转试验, 结果表明试样的强度、变形、应力路径(孔压)、破坏形态等宏观力学特性均具有显著的应力方向依赖性。在大主应力方向角为 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 时, 试验所积累的孔压最大、峰值偏应力比最小、应变积累最快, 试样所表现出的密实程度最低。试样的宏观力学特性由材料的各向异性与应力的加载方向共同决定。

(2) 深入探讨了应力方向依赖性的数力机理。① 材料的方向性是土体应力方向依赖性的内在原因。应力的大小与方向决定了潜在滑动面的位置, 激发了沿滑动面土的固有强度, 不同位置土的固有强度可以通过组构-应力联合不变量进行刻画, 进而建立了考虑应力方向依赖性的强度准则, 较为精确地预测了强度的极小值点和滑动面位置随应力方向的变化规律。② 应力的方向性是土应力方向依赖性的外在原因, 切应力-正应力的比值和主应力方向角均可以刻画应力的方向性。根据切正应力比-切应变之间的双曲线关系, 从增量的角度得到了一个非线性模型, 较好地反映了复杂应力路径下黏土与砂土的剪切变形规律。③ 各向异性与压硬性均会改变柔度张量各分量的比例关系, 进而改变了由主应力张量计算得到主应变增量张量的三次坐标变换关系, 最终导致岩土材料具有非共轴现象。

(3) 建立了土体微观结构与宏观力学特性的定量关联, 提出了等效应力张量。有效应力原理描述了饱和土总应力的分配法则。为了刻画微观结构差异所导致的不均匀内应力, 在细观力学和连续介质力学框架内, 分别推导了宏观应力同细观接触应力以及骨架应力之间的关系。以各组分有效承载面积为权重, 完善了各向异性多相混合物的应力分配法则。在此基础上, 以组构张量反映材料的方向性、以应力张量反映应力的方向性并特别考虑了组构-应力的方向关系, 确立了等效应力张量的具体表达。

(4) 提出了“方向化”改造的一般性方法——等效应力法。有效应力原理表明土的变形与强度都只取决于有效应力的变化。以等效应力刻画骨架的真实应力, 以现有本构模型刻画骨架的力学特性, 提出了对现有土的各向同性破坏准则与本构模型进行“方向化”改造的一般性方法——等效应力法。采用等效应力法相继建立了等效非线性模型、等效 Lade 准则以及等效 UH 模型, 同试验结果对比表明, 采用等效应力法对已有各向同性本构模型进行“各向异性化”改造的方法可行、结果可靠, 所建模型有较强的预测能力和适应能力。

关键词: 土力学; 各向异性; 应力方向; 等效应力; 数力机理; 本构模型;

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2018)12-2856-01

Mathematical and mechanical mechanisms of the stress directional dependence of soils and the equivalent stress method

DONG Tong

(Chongqing Key Laboratory of Geomechanics Geoenvironmental Protection, Army Logistics University, Chongqing 400041, China)

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572165, 51778311)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 11572165 and 51778311)

作者简介: 董彤(1990-), 男, 2018 年于陆军勤务学院岩土工程专业获博士学位, 导师为郑颖人院士和孔亮教授, 现任工程师, 主要从事室内土工试验、岩土本构关系和工程防爆减灾等方面的研究工作。E-mail: dt0706@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0813