

岩土本构关系的特殊性和统一性

王靖涛¹

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 在阐明岩土塑性变形的基本特殊性, 特别是应力应变关系与应力路径相关性, 产生机理的基础上, 明确指出了导致这些特性的内在的共同的根源是, 岩土塑性变形中存在两个相对独立的变形, 即体积应变和剪切应变, 两者之间存在着强烈的非线性的相互作用。这种耦合作用造成岩土的力学响应不仅具有多样性和复杂性, 而且也具有内在的统一性。

关键词: 岩土本构关系; 特殊性; 统一性; 本构关系与应力路径相关性

中图分类号: TU 452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7037(2004)04-0005-04

岩土是地质介质, 处在自然状态中, 经历漫长的地质变迁, 在外部荷载和周围环境的共同作用下其力学响应十分复杂。现在岩土塑性理论已成为固体力学中最活跃的研究领域之一。

岩土塑性理论是在金属塑性理论的基础上发展起来的。后来针对岩土的特殊性做了许多重大改进。1952 年 Drucker 和 Prager^[1] 提出了 D-P 模型, 考虑了静水压力对屈服面的影响, 用圆锥形屈服面代替了圆柱形屈服面。Drucker^[2] 首先指出, 使用帽盖可考虑受压塑性体积应变。Roscoe 等^[3] 建立了剑桥粘土帽盖模型, 该小组的主要贡献是证明了体积变化对土性质的影响。随后岩土本构模型的研究日趋活跃, 提出了许多新的模型。Lade^[4] 给出了无粘性土的帽盖模型, 其中采用了双屈服面和双塑性势面及非关联的流动法则。郑颖人和沈珠江等^[5] 提出了具有三个屈服面及三个相应塑性势面的广义塑性力学理论。

1 球应力与偏应力交叉作用的实现条件

球应力与偏应力的交叉作用是指应力球张量对偏应变的作用和应力偏张量对球应变的作用, 或表现为平均正应力 p 和广义剪应力 q 分别对广义剪应变 $\bar{\epsilon}$ 和体积应变 $\bar{\epsilon}_v$ 的作用。这种交叉作用仅当同时满足下列两个条件时才能发生。

a 材料变形须进入塑性阶段。所指的相应的应变均是塑性应变, 即 p 对塑性广义剪应变 $\bar{\epsilon}^p$ 的

作用和 q 对塑性体积应变 $\bar{\epsilon}_v^p$ 的作用。弹性变形中不会出现这样的交叉作用。

b 基于本构方程公理的局部作用原理, 应力的产生与传递是通过物体内部的变形得以实现的。通过对岩土塑性变形特性产生机理的分析, 作者认为, 平均正应力 p 对 $\bar{\epsilon}^p$ 的作用不是直接的, 而是必须通过 $\bar{\epsilon}_v^p$ 对 $\bar{\epsilon}^p$ 作用才发生的。同样广义剪应力 q 对 $\bar{\epsilon}_v^p$ 的作用是通过 $\bar{\epsilon}^p$ 才实现的(图 1)。

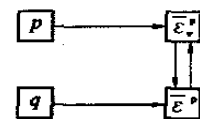


图 1 p 和 q 分别通过 $\bar{\epsilon}_v^p$ 和 $\bar{\epsilon}^p$ 所产生的交叉作用

根据上述分析可以阐明, 在金属中, 由于 $\bar{\epsilon}_v^p$ 很小, 可以忽略不计, 缺少中介, 故不能实现 p 和 q 的交叉作用。只有当 $\bar{\epsilon}_v^p$ 和 $\bar{\epsilon}^p$ 同时存在时, p 和 q 的交叉作用才能实现。因此, p 和 q 的交叉作用实质上是 $\bar{\epsilon}_v^p$ 和 $\bar{\epsilon}^p$ 之间的相互作用。

2 岩土塑性变形的特殊性和产生的根源

岩土塑性变形具有许多特殊性, 因此其本构关系显现出复杂性和多样性。Lade^[6] 对“摩擦材料”(岩石、土和混凝土等)的物理力学性质与金属的作了比较, 列举了 17 个不同点。其中最基本不同点有: 材料含有孔隙或空洞; 随着各向同性应力的增加, 会发生塑性屈服; 刚度和强度随平均正应力的增加而增加; 应力路径相关性与平均正应力的增加而增加; 稳定性与体积改变性质有关等。

2.1 体积应变和剪切应变

在金属的塑性变形中,静水压力下仅产生很小的永久变形。试验表明,在3万个大气压下,几乎不发生塑性体积应变,因此在金属塑性变形中可以忽略塑性体积变形,仅考虑单一的塑性剪切变形。然而,岩土除了包含各种矿物成分外,在岩体和土体中还充填了大量的微裂隙和微孔洞。例如一般土体中孔隙所占体积约为固体骨架体积的0.5~1.2倍,甚至在较低的压力下即可产生塑性体积变形。因此岩土塑性变形中体积应变是不容忽略的,存在两个相对独立的变形——体积变形和剪切变形。更为重要的是由此引发了体积变形和剪切变形之间的相互作用。

2.2 静水压力对剪切变形和强度的作用

岩土中晶粒或颗粒之间的连结力很低,不仅表现为抗拉强度很低,而且粘聚强度也不高,抗剪能力主要依赖与法向应力密切相关的内摩擦力,故称为摩擦材料。因此,无论剪切变形和抗剪强度均受到静水压力的控制,这已被大量的岩土三轴试验结果所证实^[7],岩土的应力应变关系试验曲线表明,围压不仅影响应力峰值强度,而且改变整个变形过程,在一定应力范围内使材料从脆性向延性转变。

如第1节中所分析,平均正应力 p 对剪应变的作用实际上是通过体积应变对剪应变的作用来实现的,故体现了塑性体积应变对塑性剪应变的作用。须注意,所指的平均正应力为有效应力。

2.3 剪缩和剪胀

岩土中存在大量的微孔隙,塑性体积变形主要是微孔隙的压缩和闭合所致。剪应力作用可以引起土中颗粒的重新排列和分布,致使微孔隙体积减小,这种现象称为剪缩。然而在金属塑性变形过程中,由于滑移不改变晶体结构,结晶集合体的总体积保持不变,塑性体积应变很小,以至可以忽略。

在岩石、超固结粘土和密实砂等的硬化过程中,一般在接近峰值应力时体积变形从压缩转变

为膨胀,这就是岩土所特有的剪胀现象。在岩石力学中也称为扩容。岩石的剪胀主要是由于岩石中原生或新生微裂隙的扩展所造成的,这已由声发射和CT试验所证实。土体中的剪胀现象比较复杂,对剪胀的机理还存在不同的认识。最近孙红和葛修润等^[8]对上海粘性土用CT技术进行了研究,上海灰色粉质粘土在三轴剪切试验中变形全过程的CT扫描照片清晰地显示出土样从压密到膨胀的全过程。在轴向应变 $\epsilon_1 = 6 \sim 10\%$ 时微裂隙开始扩展,随后裂隙继续扩展和连通产生了大的宏观裂隙,直到最后出现剪切带。这一研究结果表明,粘性土的剪胀可能也是微孔隙扩展所致。无论剪胀和剪缩的机理如何,它们在宏观上都表现为剪应力作用下的体积变化。根据第1节分析可知,它们都是塑性剪应变对塑性体积应变作用的结果。

2.4 应力应变关系和屈服轨迹与应力路径的相关性

孙岳崧等^[9]对砂土在6种应力路径下的三轴试验和刘祖德等^[10]对填土的试验结果都证实了应力路径对应力应变关系有重要影响。虽然应力路径效应已被人们所认识,然而由于该问题的复杂性,对它的机理研究还较少,至今所提出的岩土本构模型还未能充分反映出应力路径的影响。而且模型参数大都根据规定的应力路径下的试验结果确定的,而不是土体中真实发生的应力路径。最近,作者完成了在三种应力路径下中密砂的三轴压缩试验,并采用了黄文熙^[11]给出的利用三轴试验数据直接绘出屈服轨迹的方法,绘出了在每一应力路径下的两组屈服轨迹,即剪切屈服线(塑性广义剪应变 $\bar{\epsilon}$ 的等值线)和体积屈服线(塑性体积应变 $\bar{\epsilon}_v$ 的等值线)。三种应力路径是:路径A是常规三轴压缩试验(CTC), $\sigma_3 = \text{const}$;路径B是等主应力比三轴压缩试验, $k = \sigma_3/\sigma_1 = \text{const}$;路径C是三轴压缩试验(TC), $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 = \text{const}$, σ_1 增加而 σ_2 和 σ_3 相应减小,这里 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 是主应力。在图2中分别显示了这三种应力路

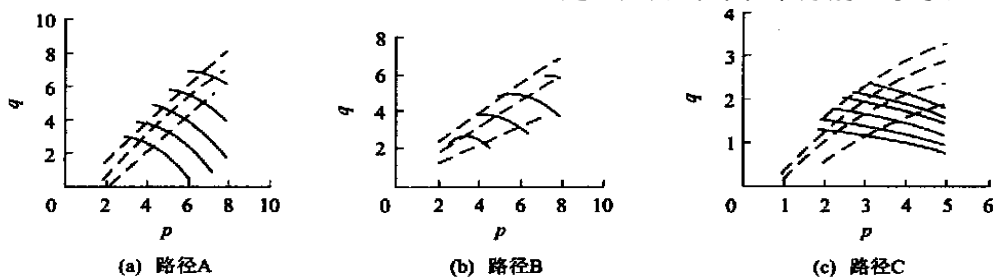


图2 三种应力路径下的屈服轨迹/100 kPa

径下的剪切和体积屈服轨迹, 没有显示剪胀发生后的体积屈服线部分。

为了阐明屈服轨迹与应力路径相关性的机理, 首先分析 p 和 q 的交叉作用对屈服线的影响。从图2可知, 一般情况下, 剪切和体积屈服线均为曲线, 如图3中曲线 AC 和 DFG 。

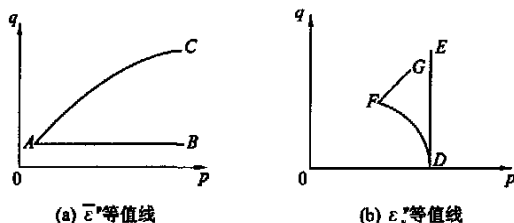


图3 p 和 q 分别对剪切和体积屈服线的交叉作用

若假设 p 和 q 分别对 $\bar{\epsilon}$ 和 $\bar{\epsilon}_v$ 都不发生作用, 则可以推断, $\bar{\epsilon}$ 和 $\bar{\epsilon}_v$ 的等值线都必为直线, 如图4中直线 AB 和 DE 。这个结论与图2中所给出的试验结果不相符合, 这就证明了 p 和 q 分别对 $\bar{\epsilon}$ 和 $\bar{\epsilon}_v$ 的作用是存在的。在图3(a)中, 沿着曲线 AC , 随着 p 值的增加, q 值相应地增加, 显示出屈服应力的增大; 在图3(b)中, 沿着曲线 DF , 随着 q 值增加, 曲线偏离直线 DE 越大, 表现出 q 对体积屈服线的作用, 致使体积应变 $\bar{\epsilon}_v$ 增大, 即是剪缩现象。曲线 DFG 在 F 点, 迅速向右偏转, 显示出了剪胀。如不考虑剪胀, 可以选择剪切屈服线和体积屈服线的平均斜率作为 p 和 q 分别对剪切和体积屈服线的交叉作用强度大小的近似度量。

从图2中两组屈服轨迹随应力路径的变化可知, 应力路径对屈服轨迹的作用明显的。当从应力路径 A 变到 B , 再变到 C 时, 剪切屈服线的平均斜率逐渐减小, 同时体积屈服线的平均斜率的绝对值也下降。根据前面分析可知, 前者反映出静水压力 p 对剪切屈服线的作用强度逐渐减弱, 而后者标志广义剪应力 q 对体积屈服线的作用强度相对增强。该结果不仅进一步证实了应力路径对屈服轨迹影响的存在, 而且表明这种影响是显著的和不可忽视的, 同时还显示出了屈服轨迹随应力路径变化的趋势。

应力路径对屈服轨迹的影响包括两部分: p 对剪切屈服线的作用和 q 对体积屈服线的作用。根据第1节的分析, 可以得到结论: 应力应变关系与应力路径的相关性实质上仍是 $\bar{\epsilon}$ 和 $\bar{\epsilon}_v$ 之间相互作用的反映。

应力路径对本构关系影响的一个重要和典型的情况是所谓的“卸荷”问题, 实际上这种“卸荷”是在复杂应力状态下的一种特殊的应力路径。一般表现为平均正应力的减小和广义剪应力的增

加。在边坡、地下工程和深基坑等岩土工程中, 开挖阶段周围岩土都处在“卸荷”过程中。至今这种开挖过程的数值分析大都采用加载条件下获得的应力应变关系。因此为了准确地模拟岩土变形的过程, 建立能够反映岩土中真实发生的应力路径效应的本构模型是非常必要的。

综上, 虽然岩土塑性变形表现出多样性和复杂性, 但是它却有一个内在的共同的根源, 即塑性体积应变与塑性剪应变之间的相互作用, 从而揭示了岩土塑性变形具有内在的统一性。

3 结 论

a 岩土塑性变形的基本特征, 诸如静水压力作用、剪缩、剪胀和应力路径效应等, 并不是彼此孤立的, 它们有一个内在的共同的根源, 就是塑性剪应变与塑性体积应变之间的耦合作用。而且这种相互作用十分强烈且高度非线性, 正是这种相互作用孕育了岩土丰富多彩的力学响应, 同时也揭示了千变万化的岩土力学性状的内在统一性。

b 试验证实岩土本构关系与应力路径是相关的。这种相关性是由于塑性剪应变与塑性体积应变之间的相互作用所引起的, 它是这种耦合作用更为复杂的和综合的表现形式。屈服线的平均斜率变化近似表示了这种相互作用的强度变化。为了准确地模拟岩土的变形过程, 建立能够反映应力路径效应的本构模型是十分必要的。

参 考 文 献

- [1] Drucker D C, Prager W. Soil mechanics and plastic analysis of limit design [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1952, 10(2): 157-165.
- [2] Drucker D C, Gibson R E, Henkel D J. Soil mechanics and work hardening theories of plasticity [J]. Transactions, ASCE, 1957, 122: 338-346.
- [3] Roscoe K H, Schofield A N, Thurairajah A. Yielding of clays in states wetter than critical [J]. Geotechnique, 1963, 13(3): 211-215.
- [4] Lade P V. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface [J]. International Journal of Solids and Structures, 1977, (13): 1 019-1 035.
- [5] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 广义塑性力学-岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [6] Lade P V. Effects of voids and volume changes on the behavior of frictional materials [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1988, (12): 351-370.

- [7] Kaman Th. Festigkeitsversuche unter allseitigem [J] Ing. 1911, (55): 1 749-1 757.
- [8] 孙红, 葛修润, 吴刚, 等. 上海粘性土变形特性的宏观细观试验研究[A]. 全国岩土与工程学术大会论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [9] 孙岳崧, 濮家骊, 李广信. 不同应力路径对砂土应力-应变关系影响[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(6): 78-87.
- [10] 刘祖德, 陆士强, 杨天林, 等. 应力路径对填土应力应变关系的影响及其应用[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 45-55.
- [11] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.

Particularity and Unity of the Constitutive Relations for Rock and Soil

WANG Jing-tao¹

(1. School of Civil Eng. & Mechanics, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: The mechanism of generating the basic characteristics of plastic deformation for rock and soil, especially the dependence of stress-strain relation on stress path, is explained. It is pointed out that the inherent and common origin leading to these characteristics is that there exist two relatively independent strains in plastic deformations of rock and soil, volumetric and shear strains, and the strong and nonlinear interaction between both ones. Just this coupling makes the mechanical responses for rock and soil not only variety and complexity but also inherent unity.

Key words: constitutive relation for rock and soil; particularity; unity; dependence of constitutive relation on stress path

(上接第 4 页)

- [24] 余岭, 陈鸿天, 罗绍湘. 用时域法和频域法识别桥面移动车载[J]. 工程力学, 2001, 18(5): 100-107.
- [25] 唐秀近. 时域识别动态荷载的精度问题[J]. 大连理工大学学报, 1990, 30(1): 31-37.
- [26] 李臣, 马爱军. 提高模态参数识别精度的分量分析新算法[J]. 计算机仿真, 2004, 21(2): 44-46.
- [27] 张平, 陈奎孚. 提高模态参数识别精度的一种方法[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(6): 5-9.

Overview of Dynamic Loading Identification for Vibratory Structure

QU Wei-lian¹ WANG Jin-wen¹

(1. College of Civil Eng. & Architecture, WUT, Wuhan 430070, China)

Abstract: The developing experience of the dynamic force identification for structural vibration is reviewed. The domestic and overseas situation of the research at present are summarized. At the same time, all kinds of pertinent methods are compared with each other in its advantages and disadvantages, and the scope that the method is applicable is described. The precision of the dynamic loading identification for structural vibration and the pivotal problems existed in the field are pointed out. By consulting many literatures that are abreast of the times, a prospect is made about the research direction in this field.

Key words: dynamic loading identification; frequency domain method; time domain method; time finite element; wavelet orthogonal operator transformation method; inverse system method