

考虑主应力轴旋转的土体本构 关系研究进展*

董彤^{1,2}, 郑颖人^{1,2,3}, 刘元雪^{1,2}, 阿比尔的⁴

- (1. 后勤工程学院 军事土木工程系,重庆 401311;
2. 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室,重庆 401311;
3. 重庆市地质灾害防治工程技术研究中心,重庆 400041;
4. 中国科学院武汉岩土力学研究所,武汉 430071)

(本刊编委郑颖人来稿)

摘要: 对目前国内外考虑主应力轴旋转的试验研究及本构模型研究进行了总结分析,并对进一步研究提出了相应的建议。基于不同的加载条件,从纯主应力轴旋转和耦合主应力轴旋转两个方面,较全面的描述了主应力轴旋转情况下土体的基本变形特性,并对考虑主应力轴旋转的土体变形试验提出了进一步研究的建议。较为系统地评述了当前较有代表性的考虑主应力轴旋转的土体本构模型(界面模型、多机构模型、运动硬化模型和广义塑性模型),得出了广义塑性模型更适合用来描述考虑主应力轴旋转的土体变形特性的结论。总结未来考虑主应力轴旋转的土体本构关系研究的主要方向是:把握主应力轴旋转情况下土体变形的本质特性,建立推理严密、形式简单、适用方便的本构模型,并用来指导工程实践。

关键词: 土力学; 主应力轴旋转; 试验; 本构模型; 土体

中图分类号: TU431 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.04.001

引 言

主应力轴旋转是指主应力方向在加载过程中发生偏转的现象,公路、隧道、地基等岩土工程中普遍存在这一现象,且距加载点越近,该现象越为显著。导致土体发生主应力轴旋转的因素归纳起来主要有以下3种:1)不同频率、不同历时荷载的动态变化(波浪、交通、地震荷载等),其主要作用效果是使主应力轴循环或反复旋转^[1-2];2)边界条件的改变(如堤坝修筑、边坡切削、隧道开挖等)使得岩土工程中土体应力状态发生变化,继而导致主应力轴发生旋转^[3-4];3)主应力大小和方向静态或准静态变化(如集中加压、桩基荷载等)^[5]。从考虑中间主应力与不考虑中间主应力两种屈服准则对比可见,纯Lode(洛德)角变化所产生的破坏应变占0~15.7%;纯主应力轴旋转所引起的破坏应变可达30~40%^[6],甚至会导致砂土液化破

* 收稿日期: 2013-02-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(重大工程灾变滑坡演化与控制的基础研究)资助项目(2011CB710606)

作者简介: 董彤(1990—),男,山东新泰人,硕士生(通讯作者。E-mail:dt0706@126.com)。

坏^[7-8]。对于第 1) 种情况而言,主应力轴旋转对土体的影响范围大,且会导致不可忽略的塑性变形;但对于第 2)、第 3) 种情况,只在边界或集中应力附近有影响,远处基本无影响,因此,对这两种情况,只需在特定的情况下考虑主应力轴旋转的影响,一般情况不需考虑。

关于主应力轴旋转对土体力学特性影响的研究,国内学者已取得许多有益的成果,如刘元雪、郑颖人等^[9-10]建立了考虑主应力轴旋转的广义塑性模型;沈扬^[11]对原状软粘土的变形特性进行了系统的研究;童朝霞^[12]建立了考虑应力主轴循环旋转效应的砂土本构模型;金丹^[13]系统研究了主应力方向旋转变化条件下饱和砂土的动力特性。本文在国内外已有研究成果的基础上,对考虑主应力轴旋转的相关实验和理论成果进行了较为系统的分类及评述。

1 考虑主应力轴旋转的土体变形特性研究

先进的仪器设备是研究的重要保障,传统的土工试验仪器,只有真三轴仪能实现主应力轴的 90°突变,但无法模拟主应力轴连续旋转。1977 年 Arthur 等^[14]发明了方向剪切盒(directional shear cell, 简记为 DSC),虽然通过 DSC 可以实现主应力轴的连续旋转,但是其无法控制中主应力大小,且只能采用 X 轴或外部测量,使得其在破坏点或小应变的量测上存在缺陷。尽管当前还有一些能在一定程度上实现主应力轴旋转的试验仪器,如二维一般应力状态试验仪、 $1\gamma_2\varepsilon$ 试验仪等^[12],但由于这些设备自身的缺陷,未能得到广泛的应用。目前,最适合进行主应力轴旋转试验研究的是空心圆柱扭剪仪(hollow cylinder apparatus, 简记为 HCA)。如图 1 所示, HCA 能够对试样提供独立控制的轴力 W 、扭矩 T 、内压 p_i 和外压 p_o ,从而实现绕一个应力主轴方向旋转及应力 Lode 角变化。

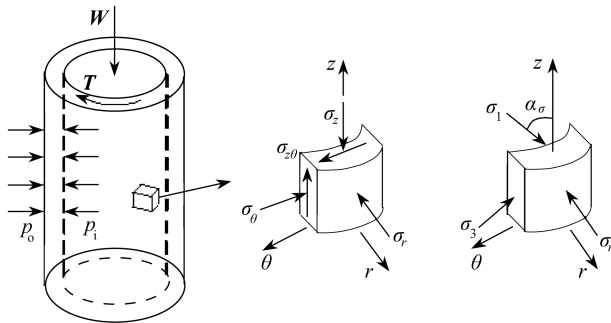


图 1 空心扭转仪试样受力及单元应力状态

Fig. 1 Sample and element stress in hollow cylinder apparatus

本文侧重研究在不同的加载条件下,主应力轴旋转对土体变形特性的影响。据此,将目前国际上主应力轴旋转条件下土体变形特性研究的室内试验进行较为系统的分类。

1.1 纯主应力轴旋转条件下土体变形特性

纯主应力轴旋转,即应力主值大小不变仅主应力轴方向变化,可以描述为一般应力空间中绕主应力轴旋转的运动。在此条件下,土体存在明显的不共轴现象,并可导致明显的剪变、体变和孔压积累,甚至破坏。Miura 等^[15]通过丰浦砂试验发现,主应力旋转条件下,塑性应变增量与应力不共轴,应变增量主轴介于应力主轴与应力增量主轴之间,且随着剪应变的增加趋近应力主轴方向;Symes 等^[7]发现,土体变形特性与主应力轴转角 α (即试样大主应力方向与试样的对称轴的夹角)有关,正向旋转(α 从 0°转到 45°)产生了可观的孔压及体变,且旋转结束时,与一开始就将大主应力轴固定在 $\alpha = 45^\circ$ 方位进行定向剪切到等 q 状态的孔压大小相近,而反向旋转(α 从 45°转到 0°)时,孔压和体变只有略微增加,在此基础上固定主轴方向进行剪切,

孔压始终小于未旋转的试样在同剪应力水平下定向剪切的值,说明了反向旋转时,孔压和体变受到土体的次生各向异性的明显抑制。

此外,大量试验表明^[11-12],在相同应力水平下,原状土的体应变大于重塑土;不排水条件下,先进行主应力轴旋转再进行定向剪切与直接进行定向剪切的孔压变化趋势相吻合,排水条件下则无法重合;主应力轴反复加卸载条件下,主应力轴转角 α 越大,孔压积累越快;主应力轴循环旋转条件下,砂土的强度,特别是抵抗液化的能力明显减弱,循环初期孔压迅速积累,但内摩擦角、轴向应变与剪应变没有明显变化,只有当孔压达到围压的50%时,应变才开始急剧增加。

1.2 耦合主应力轴旋转条件下土体变形特性

耦合主应力轴旋转,即不仅存在主应力轴的旋转,而且包含球应力 p ,广义剪应力 q ,Lode角 θ_σ 及中主应力系数 b 等应力参数的变化.由于试验仪器及试验方法等原因,目前大多数考虑主应力轴旋转的试验都耦合有其他应力参数的变化^[12]。

考虑有效球应力的变化,不排水条件下主应力轴旋转会产生超静空隙水压力并不断积累,导致砂土的液化甚至破坏;考虑砂土的密度不同,Nakata等^[16]发现,在主应力轴循环旋转条件下,剪应力值及砂土密度对孔压与应变的积累规律有所影响;考虑应力比的影响,Wijewickreme等^[17]指出,应力比的增加将致使应变增量主轴方向趋近于应力主轴方向;考虑初始应力角的影响,国内诸多学者的研究表明^[12],初始主应力方向角越大,孔压增长越快,土动强度越低;考虑初始应力状态及主应力轴转幅的影响,Symes等^[18]发现,在主应力轴转幅在某一范围内循环变化的条件下,随着转幅的增大,土的强度降低,破坏所需循环加载次数减少;考虑初始固结比 K_0 及主应力轴旋转方向的影响,Sivathayalan等^[19]发现,随 K_0 增大,主应力轴旋转导致的孔压增大。

1.3 考虑主应力轴旋转的土体变形特性研究建议

1) 就试验的研究对象而言,由于受到仪器功能和制样条件的限制,目前多以重塑砂土作为研究对象,很少采用粉土、粘土,特别是原状土,今后有必要进一步改进制样仪器与方法。

2) 就试样的应力历史而言,试样以具有分层特性的砂土居多,其原生各向异性干扰了孔压的发展;原生各向同性的试样很少,因此,尚无单独研究主应力轴旋转导致的次生各向异性的试验。

3) 就试验的应力路径而言,主应力轴单向旋转条件下直接剪切破坏的变形特性尚不明确;目前主应力轴循环旋转试验多为低频试验,有待系统研究在中、高频旋转条件下的土体变形特性。

此外,主应力轴旋转结束后对土体再加载的后续变形特性的影响目前还存在争议,其关键在于前期主应力轴旋转产生多大的应变才会对土体后续变形特性产生明显影响^[11]。

2 考虑主应力轴旋转的土体本构模型研究

传统塑性力学认为,主应力轴旋转属于中性变载^[20],土体的主应力值是不变的,不会产生塑性变形.这不符合岩土材料的变形机制,因此不能反映主应力轴旋转对塑性变形影响.为了更好地描述主应力轴旋转所产生的塑性应变,国内外学者在传统与广义塑性力学基础上采用不同的理论,建立了各式各样的模型.比较有代表性的有:界面模型、多机构模型、运动硬化模型以及广义塑性模型。

2.1 边界面模型

边界面模型认为,在应力空间里,有一个限定应力点和屈服面移动的几何边界,即为边界面,其内部通常存在一个与其形状相似的屈服面。加载过程中,应力点总是位于屈服面之上或内部,塑性模量场、加载方向和流动方向均由这两个面及其相互变化而确定。边界面模型对传统的流动法则进行了修正,建立了塑性流动与边界面对应力点外法线方向之间的关系,反映了边界面内的应力变化所产生的塑性应变,从而能建立考虑应力主轴旋转的土体本构模型。

Pastor 等^[21]在传统塑性力学基础上,通过修正塑性模量与塑性流动方向,并通过应力空间转换,使得传统的塑性理论可以很好地模拟描述主应力轴旋转条件下土体应力应变关系。Gutiérrez 等^[22-23]认为,将应力增量延伸与破坏面相交,交点处边界面的外法线方向即为由该应力增量引起的塑性应变增量的方向,并通过引入了一非共轴参数来进一步反映非共轴对砂土塑性功和应力剪胀方程的影响,建立了考虑主应力轴旋转的二维平面应变弹塑性本构模型。Li 等^[24]将应力增量分解成与当前应力张量共轴分量及正交分量,并将正交分量作为附加的旋转荷载,通过增加该旋转荷载产生的塑性变形以修正边界面模型,继而较好地反映了主应力轴旋转的影响。Yang 等^[25]认为边界面模型中,硬化模量不仅与土体应力状态有关而且与当前应力点到边界面的距离有关,通过定义不共轴硬化模量及流动方向建立了不共轴粘土和砂土模型。童朝霞^[12]基于边界面模型的建模思想,分别考虑了主应力幅值循环变化及主应力轴循环旋转产生的塑性应变,建立了考虑应力主轴循环旋转效应的砂土本构模型。

建立边界面模型的关键在于定义边界面内的流动法则,该建模方法依据特定的试验规律,适合于试验的土体(如重塑砂土)的建模。然而,由于缺乏严格的理论基础,导致目前存在大量的边界面模型的存在,而且,在考虑多应力参数变化的耦合主应力轴旋转条件下,流动法则的建立非常困难,模型参数多且不利于测定,使得边界面模型无法简便地推广到不同应力参数的土体变形预测中。

2.2 运动硬化模型

土体弹塑性变形中,各向异性现象非常明显。已有研究表明,即便不考虑土的原生各向异性,由应力诱导的次生各向异性现象也很显著^[26]。土体的各向异性是主应力轴旋转导致土体产生塑性变形的根本原因,为了在各向同性本构框架基础上描述土体的各向异性,通常做法是引入运动硬化准则。

在运动硬化模型中,屈服面在应力空间内同时发生大小或形状随应力状态变化而变化的平动或转动。在纯主应力轴旋转条件下,尽管应力主值大小不变,即主应力空间中应力状态点位置不变,但主应力轴的旋转会导致屈服面运动,因此,可以考虑主应力轴旋转所产生的塑性应变。

Lizuka 等^[27]为考虑应力诱使原生各向异性,将关口-太田模型发展到有限变形理论,使得该模型可以考虑由应力诱使次生各向异性引起的非共轴应力-应变关系。Nakai 等^[28]在各向同性硬化空间滑动面模型^[29]基础上,引入屈服面的运动硬化规律,使之可以考虑主应力轴旋转的影响。考虑主应力轴旋转的模拟效果,Lade 等^[30]在原有的非等向硬化模型基础上加入随动硬化准则,建立了砂土的随动硬化本构模型。Li 等^[31]在文献[18]的基础上,通过定义各向异性参数来修正塑性模量,继而建立了可以考虑原生各向异性的砂土模型。Yang 等^[32]在一般应力空间内引入了6个应力分量,并建立了新的流动法则和塑性模量,使得改进后的运动硬化模型可以在不同方向上计算复杂的主应力轴旋转问题。

运动硬化模型适用于各向异性显著的土体,建立运动硬化模型关键在于给出屈服面的运

动规律或土体硬化规律. 对因应力路径和应力状态的不同, 而含有复杂的原生与次生各向异性的土体, 由于其屈服面的运动规律、硬化参数及各向异性参数难以确定, 且模型参数复杂且无明确的物理意义, 致使运动硬化模型很难适用.

2.3 多机构模型

多机构模型基于滑移机构的概念, 其建模思想是: 将材料的塑性应变状态分解, 每个分解后的塑性应变状态都由一独立的虚拟活性机构产生, 将各独立产生的塑性应变状态叠加, 即可得到总的塑性应变状态^[12]. 此类模型的优点在于, 可以根据简单应力条件下土体的本构关系来建立复杂应力条件下的本构模型.

建立多机构模型的关键在于, 确定滑移面以及建立滑移面本构关系. Pande 等^[33]建立了考虑主应力轴旋转的粘土多层模型, 其假设土单元体内存在大量随机分布的滑移面, 并建立了单个滑移面上的屈服函数、流动法则和硬化规律, 当主应力轴旋转时, 各虚拟滑移面存在不同的相应机制, 综合得到其塑性变形. Nishimura 等^[34]假设土体单元内有多个不同方向的虚拟滑移面, 滑移面上分布有许多弹簧, 弹簧的应力应变关系组成了土单元应力应变关系, 继而建立了含主应力轴旋转的三维本构模型.

多机构模型认为, 宏观的塑性应变可以通过内部滑移面的滑移累加得到, 对于含确定滑移面的土体(如横观各向异性土), 这种建模思路使得复杂的加载条件下土体本构关系可以由简单的本构关系来描述. 但是, 滑移面大都是虚拟假设的, 而不是真实的微观存在, 使得其缺乏严格的理论基础.

2.4 广义塑性模型

当前岩土塑性力学一般认为只存在应力主值大小的变化, 而不存在应力主轴方向的变化, 即忽略了主应力轴旋转的影响. 为考虑主应力轴旋转产生的塑性变形, 通常的做法是将塑性应变分为共轴项与不共轴项, 进而采用不同的方法建立不共轴塑性应力-应变模型.

Matsuoka 等^[35]在试验基础上, 将主应力轴旋转转化为一般应力增量分量的变化, 通过建立应力增量与应变增量之间的关系, 来描述主应力轴旋转所产生的变形. 刘元雪等^[9-10]建立了能考虑应力增量对塑性应变增量方向的影响及主应力轴旋转影响的广义塑性位势理论, 并给出了相应的应力应变关系.

刘元雪等^[9-10]认为, 主应力轴旋转和应力 Lode 角变化对土体变形的影响都可归结于应力增量的广义剪切分量引起的剪胀与剪切变形^[9-10], 这是传统塑性力学所无法描述的. 现有的本构模型中, 塑性应变增量 $d\varepsilon_v^p, d\gamma_q^p$ 由应力增量 dp, dq 表述的方法无法反映 Lode 角增量 $d\theta_\sigma$, 主轴旋转增量 $d\theta$ (θ 为主应力轴旋转角) 对土体应力应变关系的影响, 更合理的是写成完全增量表述形式:

$$d\varepsilon_v^{p'} = Adp' + Bdq', \quad d\gamma_q^{p'} = Cdp' + Ddq', \quad (1)$$

其中

$$d\varepsilon_v^{p'} = d\varepsilon_{11}^p + d\varepsilon_{22}^p + d\varepsilon_{33}^p, \quad (2a)$$

$$d\gamma_q^{p'} = \frac{\sqrt{2}}{3} \times \sqrt{(d\varepsilon_{11}^p - d\varepsilon_{22}^p)^2 + (d\varepsilon_{22}^p - d\varepsilon_{33}^p)^2 + (d\varepsilon_{11}^p - d\varepsilon_{33}^p)^2 + 6(d\varepsilon_{12}^p + d\varepsilon_{13}^p + d\varepsilon_{23}^p)^2}, \quad (2b)$$

$$dp' = (d\sigma_{11} + d\sigma_{22} + d\sigma_{33})/3, \quad (2c)$$

$$dq' = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(d\sigma_{11} - d\sigma_{22})^2 + (d\sigma_{22} - d\sigma_{33})^2 + (d\sigma_{11} - d\sigma_{33})^2 + 6(d\sigma_{12}^2 + d\sigma_{23}^2 + d\sigma_{13}^2)}. \quad (2d)$$

通过矩阵分析,采用应力增量的分量理论,将一般应力增量分解为与应力共轴的3个共轴分量和使应力主轴旋转的3个旋转分量.将考虑主应力轴旋转的广义塑性位势理论分解为两部分^[10,20]:一部分与未考虑主应力轴旋转的广义塑性位势理论相同,称作共轴塑性势;一部分采用6个势函数,称作不共轴塑性势.继而,将含主应力轴旋转的问题转化为应力应变共轴问题和纯主应力轴旋转问题.

广义塑性模型,考虑了3个方向的主应力轴旋转,各塑性应变增量的大小与方向均由其对应的屈服面及塑性势面所决定,是对不考虑主应力轴旋转的广义塑性力学的延续与发展.上述建模理论,思路清晰、模型简单、形式规范,可以严格计算应力主轴旋转和应力 Lode 角变化导致的土体塑性变形,预测结果与试验规律较为一致,易于在有限元程序中实现,值得进一步地研究、推广.

3 结 语

本文总结与分析了考虑主应力轴旋转的土体变形特性及本构模型的研究成果,并对进一步的研究提出了建议.

1) 改进试验仪器,优化试验方法,从更广泛的角度深层次把握主应力轴旋转情况下土体变形的本质特性;系统研究主应力轴旋转条件下各种应力参数,特别是各向异性对土体性状的影响;逐渐形成标准化的试验规程,增强试验对建立本构模型的指导性.

2) 考虑主应力轴旋转的土体本构模型研究,其核心在于从土体变形的本质特性出发,建立推理严密、形式简单、适用方便的本构模型,从根本上把握、刻画主应力轴旋转对土体变形特性的影响.广义塑性模型更适合用来描述考虑主应力轴旋转的土体变形特性,如何进一步完善和推广值得深入研究.

3) 目前关于主应力轴旋转的研究还停留在试验研究与模型建立阶段,亟需建立一套成熟的理论和试验方法.并将其在有限元程序中实现,在现场试验验证的基础上指导相关工程实践.

参考文献(References):

- [1] Grabe P J, Clayton C R I. Effects of principal stress rotation on permanent deformation in rail track foundations[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(4):555-565.
- [2] Bohnhoff M, Grosser H, Dresen G. Strain partitioning and stress rotation at the North Anatolian fault zone from aftershock focal mechanisms of the 1999 Izmit $M_w = 7.4$ earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, **116**(1):373-385.
- [3] 张启辉, 赵锡宏. 主应力轴旋转对剪切带形成的影响分析[J]. 岩土力学, 2000, **21**(1):32-35. (ZHANG Qi-hui, ZHAO Xi-hong. An influence on shear band formation of the rotation of principal stress directions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, **21**(1):32-35. (in Chinese))
- [4] Diederichs M S, Kaiser P K, Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock

- during tunnelling and the influence of near-face stress rotation[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, **41**(5):785-812.
- [5] 罗强, 王忠涛, 栾茂田, 杨蕴明, 陈培震. 非共轴本构模型在地基承载力数值计算中若干影响因素的探讨[J]. 岩土力学, 2011, **32**(supp 1):732-737. (LUO Qiang, WANG Zhong-tao, LUAN Mao-tian, YANG Yun-ming, CHEN Pei-zhen. Factors analysis of non-coaxial constitutive model's application to numerical analysis of foundation bearing capacity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(supp 1):732-737. (in Chinese))
- [6] 姜洪伟, 赵锡宏. 主应力轴旋转对软土塑性变形影响分析[J]. 上海力学, 1997, **18**(2): 140-146. (JIANG Hong-wei, ZHAO Xi-hong. The impact analysis of principal stress rotation on plastic deformation[J]. *Shanghai Mechanics*, 1997, **18**(2):140-146. (in Chinese))
- [7] Symes M T, Gens A, Hight D W. Drained principal stress rotation in saturated sand[J]. *Geotechnique*, 1988, **38**(1):59-81.
- [8] Lade P V. Elasto-plastic behavior of K_0 -consolidation clays in torsion shear tests[J]. *Soils and Foundations*, 1989, **29**(2):127-140.
- [9] 刘元雪, 郑颖人. 含主应力轴旋转的土体本构模型研究进展[J]. 力学进展, 2000, **30**(4):597-604. (LIU Yuan-xue, ZHENG Ying-ren. Research development of the soil constitutive model containing principal stress axes rotation [J]. *Advances in Mechanics*, 2000, **30**(4):597-604. (in Chinese))
- [10] 刘元雪, 郑颖人, 陈正汉. 含主应力轴旋转的土体一般应力应变关系[J]. 应用数学和力学, 1998, **19**(5):407-413. (LIU Yuan-xue, ZHENG Ying-ren, CHEN Zhen-han. The general stress strain relation of soils involving the rotation of principal stress axes[J]. *Applied Mathematics and Mechanics(English Edition)*, 1998, **19**(5): 437-444.)
- [11] 沈扬. 考虑主应力方向变化的原状软粘土试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007. (SHEN Yang. Experimental study on effect of variation of principal stress orientation on undisturbed soft clay[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [12] 童朝霞. 应力主轴循环旋转条件下砂土的变形规律与本构模型研究[D]. 北京:清华大学, 2008. (TONG Zhao-xia. Research on deformation behavior and constitutive model of sands under cyclic rotation of principal stress axes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))
- [13] 金丹. 主应力方向旋转变化条件下饱和砂土的动力特性试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009. (JIN Dan. Experimental study on effect of rotation of principal stress orientation on saturated sand[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [14] Arthur J R F, Chan K S, Dunstan T. Induced anisotropy in a sand[J]. *Geotechnique*, 1977, **27**(1):13-30.
- [15] Miura K, Miura S, Toki S. Deformation behavior of anisotropic sand under principal stress axes rotation[J]. *Soils and Foundations*, 1986, **26**(1):36-52.
- [16] Nakata Y, Hyodo M. Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation[J]. *Soils and Foundations*, 1998, **38**(2):115-128.
- [17] Wijewickreme D, Vaid Y P. Behavior of loose sand under simultaneous increase in stress ratio and principal stress rotation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, **30**(6):953-964.
- [18] Symes M J, Shibuya S, Hight D W, Gens A. Liquefaction with principal stress rotation[C]// *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol 1. San Francisco, 1985:1919-1922.
- [19] Sivathayalan S, Vaid Y P. Influence of generalized initial state and principal stress rotation on

- the undrained response of sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**(1): 63-76.
- [20] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 126-142. (ZHENG Ying-ren, KONG Liang. *Geotechnical Plastic Mechanics*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 126-142. (in Chinese))
- [21] Pastor M, Zienkiewicz O C, Chan A H C. Generalized plasticity and the modelling of soil behaviour[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1990, **14**(3): 151-190.
- [22] Gutierrez M, Ishihara K, Towhata I. Model for the deformation of sand during rotation of principal stress directions[J]. *Soils and Foundations*, 1993, **33**(3): 105-117.
- [23] Gutierrez M, Ishihara K. Non-coaxiality and energy dissipation in granular materials[J]. *Soils and Foundations*, 2000, **40**(2): 49-59.
- [24] Li X S, Dafalias Y F. Constitutive modeling of inherently anisotropic sand behavior[J]. *Geotech Geoenviron Engng*, 2002, **128**(10): 868-880.
- [25] YANG Yun-ming, YU Hai-sui. A non-coaxial critical state soil model and its application to simple shear simulations[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, **30**(13): 1369-1390.
- [26] 周正明. 土坝蓄水期变形特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 1987. (ZHOU Zheng-ming. Research on deformation characteristics of earth dam during storage period[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1987. (in Chinese))
- [27] Lizuka A, Yatomi C, Yashima A, Sano I, Ohta H. The effect of stress induced anisotropy on shear band[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1992, **62**(2): 104-114.
- [28] Nakai T, Hoshikawa T. Kinematic hardening models for clay in three-dimensional stress [C]//*Proceeding of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Cairns, Australia, 1991, **1**: 655-660.
- [29] Nakai T, Matsuoka H. A generalized elastoplastic constitutive model for clay in three-dimensional stress[J]. *Soils and Foundations*, 1986, **26**(3): 81-98.
- [30] Lade P V, Inel S. Rotational kinematic hardening model for sand—part I: concept of rotation yield and plastic potential surfaces[J]. *Computers and Geotechnics*, 1997, **21**(3): 183-216.
- [31] Li X S, Dafalias Y F. A constitutive framework of anisotropic sand including non-proportional loading[J]. *Geotechnique*, 2004, **54**(1): 41-55.
- [32] YANG Yun-ming, YU Hai-sui. A kinematic hardening soil model considering the principal stress rotation[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2012. DOI: 10.1002/nag.2138
- [33] Pande G N, Sharma K G. Multi-laminate model of clays—a numerical evaluation of the influence of rotation of the principal stress axes[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1983, **7**(4): 397-418.
- [34] Nishimura S, Towhata I. A three-dimensional stress-strain model of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes[J]. *Soils and Foundations*, 2004, **44**(2): 103-116.
- [35] Matsuoka H, Sakakibara K. A constitutive model for sands and clays evaluating principal stress rotation[J]. *Soils and Foundations*, 1987, **27**(4): 73-88.

Research Progress of the Soil Constitutive Relation Considering Principal Stress Axes Rotation

DONG Tong^{1,2}, ZHENG Ying-ren^{1,2,3}, LIU Yuan-xue^{1,2}, Abi Erdi⁴

(1. *Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401311, P. R. China;*

2. *Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironmental Protection, Chongqing 401311, P. R. China;*

3. *Chongqing Engineering and Technology Research Center of Geological Hazard Prevention and Treatment, Chongqing 400041, P. R. China;*

4. *Institute of Rock and Soils, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)*

Abstract: The experiments and constitutive models considering principal stress axes rotation were analyzed, and the proposals for further study were offered. Based on different loading conditions, the basic deformation characteristics of soils considering principal stress axes rotation were described systematically and more suggestions were thrown out in terms of pure principal stress axes rotation and coupling principal stress axes rotation. The representative soil constitutive models (bounding surface model, multi-mechanism model, kinematic hardening rotation and generalized plasticity model) were commented systematically. It was concluded that the generalized plasticity model was more suitable for describing deformation characteristics of soils considering principal stress axes rotation. It shows that the major research directions of the soil constitutive relation considering principal stress axes rotation for further study are detecting the essential properties under principal stress axes rotation, building the reasoning strict, simply formed and applicable convenient model, and then guiding the engineering practice based on the achievements.

Key words: soil mechanics; principal stress axes rotation; experimental progress research; constitutive model research; soil mass