

文章编号: 1000-7598-(2007)02-0288-05

粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型

张 嘎, 张建民

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 基于试验结果, 探讨了粗粒土与结构接触面的三维力学特性, 该接触面在三维剪切时两个方向上的剪应力-应变关系表现出较强的耦合特性, 但其主剪应变的大小只与主剪应力的大小有关。基于提出的接触面弹塑性损伤理论, 建立了描述三维条件下接触面力学特性的本构模型及其数值格式。编制了有关程序, 采用该模型对接触面的力学响应进行了预测。预测结果表明, 建立的接触面三维本构关系及数值模型是合理和可行的, 能够较好地反映包括剪切耦合特性在内的接触面主要力学特性。

关 键 词: 接触面; 本构关系; 模型; 有限元法

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Three-dimensional model of interface between structure and coarse grained soil

ZHANG Ga, ZHANG Jian-min

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The interface between structure and coarse grained soil was found to exhibit remarkable coupling of shear stress-strain relationship in both the directions due to three-dimensional shear application based on test results. The magnitude of principal shear strain is only dependent on the magnitude of principal shear stress. A three-dimensional constitutive model and its numerical scheme were then developed based on the elastoplasticity damage theory, which was programmed and used to predict the response of soil-structure interface. The model and its numerical scheme were confirmed to reasonably characterize main behaviors including the coupling of shear stress-strain relations of the interface between structure and coarse grained soil, which may have much effect on the response of interface.

Key words: interface; constitutive relationship; model; FEM

1 引 言

合理地描述土与结构接触面的静动力学特性, 对于正确地评价土体与结构物相互作用具有重要意义, 因而需要建立能够合理描述接触面力学特性的本构模型及数值分析方法。尽管目前已建立了理想模型、非线性弹性模型、弹塑性模型、损伤模型等多种接触面本构模型^[1-4], 但这些模型大多是在二维条件下建立的, 尚不能充分合理地描述三维荷载作用条件下接触面的力学特性。

笔者等较系统进行了粗粒土与结构接触面静动力学特性试验, 分析总结出该类接触面受力变形的作用机理和基本规律^[5-7]。本文结合砂土与结构接触面三维剪切试验结果^[8-10], 探讨三维条件下粗粒

土与结构接触面的力学特性, 基于接触面弹塑性损伤理论^[4], 建立描述该类接触面三维力学特性的本构模型及其数值方法。

2 接触面的三维力学特性分析

Fakharian 等^[8-10]进行了砂土与钢板接触面的三维单调和循环剪切试验, 结果表明, (1) 接触面某一方向上的剪应力分量增量会导致在其正交方向产生剪应变增量, 其大小与该方向的剪应力分量大小有关; (2) 接触面的主剪应力-应变关系及抗剪强度在常法向应力条件下是唯一的, 与剪切应力路径无关; (3) 剪切应力路径对接触面的体变响应有一定影响, 但影响程度不是很大。

在试验基础上, 笔者等分析了粗粒土与结构接

收稿日期: 2005-04-12

修改稿收到日期: 2005-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(No. 50679034); 北京市自然科学基金重点资助项目 (No. 8061003)。

作者简介: 张嘎, 男, 1976年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程的教学科研工作。E-mail: zhangga@tsinghua.edu.cn

触面受力变形机理, 认为接触面存在着明显的异向性^[5], 提出剪胀体应变可划分为可逆性和不可逆性2个分量, 并发现其主要取决于总剪应变的一部分, 从而提出了有效剪应变的概念^[4, 6]。根据上述认识, 即剪胀体应变与剪切应力路径存在一定关系, 主要是因为剪切应力路径(如主剪应力方向)的变化会造成接触面内的土颗粒发生重排列和新的转动, 从而引起不可逆性和可逆性剪胀体应变的变化。上述机理分析表明剪切应力路径变化对可逆性剪胀体应变, 特别是异向性分量的影响较大。

综上所述, 粗粒土与结构接触面的三维力学特性主要有: (1) 接触面的两个方向的剪应力-应变关系存在着较强的耦合特性, 譬如在一个方向上进行剪切, 则在其正交方向上也会引起剪应变增量, 其大小与该方向的剪应力分量大小有关; (2) 在单调剪切条件下接触面的主剪应力与其主剪应变的定量关系与主剪应力方向(两个方向的剪应力分量比例)无关, 或者说接触面的主剪应变增量的大小只与主剪应力增量的大小有关; (3) 剪切路径对接触面的剪胀体应变有一定影响, 其中对剪胀体变的异向性分量影响较大。

3 三维本构模型

3.1 接触面弹塑性损伤理论

基于接触面受力变形的宏观规律和细观机理^[5], 吸收边界面、双屈服面等模型的合理要素, 在引入新概念和基本假设基础上建立了接触面弹塑性损伤理论^[4, 7], 其基本思路是: 推广损伤概念来描述受载过程中接触面物态的演化以及由于物态演化导致的力学特性的演化。初始状态模型和最终状态模型基于同一框架建立, 从而将接触面力学特性从初始状态到最终状态的演化进程简化为某些力学特性参数的演化进程, 并采用不可逆性剪胀体应变的归一化形式作为损伤因子。初始状态模型和最终状态模型均采用双屈服面的建模思路, 分别描述剪切和压缩引起的塑性变形。采用边界面模型来描述剪切引起的塑性变形, 即用映射投影长度作为内变量, 将塑性剪切变形模量与内变量建立关系, 用映射点的变化反映应力路线的转折。基于接触面受力变形机理分析, 将接触面的剪胀体应变划分为可逆性和不可逆性剪胀体应变, 其中可逆性剪胀体应变又可分为同向性和异向性2个分量, 引入有效剪应变等概念直接建立剪胀方程。压缩引起的塑性变形用边界面模型描述, 如以主剪应力 τ 、法向应力 σ 以及相应的剪应变 γ 和体应变 ε_v 为基本变量, 基于接触面弹

塑性损伤理论的本构模型的增量数学描述为

$$\begin{Bmatrix} d\gamma \\ d\varepsilon_v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\tau\tau} & C_{\sigma\tau} \\ C_{\tau\sigma} & C_{\sigma\sigma} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{G_e} + \frac{1}{H_r} & \frac{1}{H_{rd}} \\ \frac{1}{H_r} + \frac{n_a + A_1}{\mu} & \frac{C + C_e}{\sigma} - \frac{1}{H_{rd}} + \frac{n_a + A_1}{\mu} \frac{|\tau|}{\sigma} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中各参数的物理意义及具体表达式同文[4], 本文将不再赘述。

接触面弹塑性损伤模型的所有参数均具有明确的物理意义, 只需通过一组不同法向应力的接触面往返剪切试验和一个侧限压缩试验就能够方便地完全确定。模型预测及其与试验对比结果表明该模型能够统一地描述包括应变软化、低法向应力下以剪胀为主, 而高法向应力下以剪缩为主的剪胀特性、接触面异向性、卸载体缩等在内的粗粒土与结构接触面的主要静动力学特性。

3.2 基本假设

基于对接触面三维力学特性的认识, 本文引入以下基本假设以建立三维模型:

- (1) 接触面的抗剪强度与剪应力路径无关, 只与主剪应力有关;
- (2) 接触面的两个正交方向的塑性剪应变与剪应力关系存在耦合, 但在增量意义上其主剪应变的大小只取决于主剪应力的方向, 而与剪应力路径无关, 弹性剪应变与剪应力的关系不存在耦合, 这意味着可以根据主剪应力采用接触面弹塑性损伤理论的加卸载准则^[4]。
- (3) 在增量意义上接触面的剪胀体应变的不可逆性分量和同向性可逆性分量只与主剪应力-应变关系有关。本文假设是基于主剪应力增量方向的变化对剪胀体应变影响较小的认识提出的, 并可通过有效剪应变来反映主剪应力增量方向变化的影响。
- (4) 接触面异向性^[5]与当前主剪应力与初始主剪应力方向的夹角有关, 这与接触面弹塑性损伤理论的假设是一致的。

3.3 公式

三维条件下接触面有3个应力分量, 即法向应力 σ 和两个方向的剪应力 τ_x 、 τ_y , 其增量关系可按柔度矩阵形式写成为

$$\begin{Bmatrix} d\gamma_x \\ d\gamma_y \\ d\varepsilon_v \end{Bmatrix} = [C]_{3 \times 3} \begin{Bmatrix} d\tau_x \\ d\tau_y \\ d\sigma \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中 $[C]_{3 \times 3}$ 为三维柔度矩阵。下面将基于接触面弹塑性损伤理论, 探讨该柔度矩阵的具体表达式。为了便于区别, 与上文相对应, 在建立接触面三维本构模型时将式 (1) 中的剪应力和剪应变分别记作主剪应力和主剪应变, 并规定与主剪应变相对应的相对切向位移为主相对切向位移。

根据基本假设, 首先按式 (1) 建立以主剪应力和法向应力为基本变量的接触面弹塑性损伤理论的主柔度矩阵, 然后扩展为三维本构模型的柔度矩阵。

本文引入方向角 $\bar{\theta}$ 来描述剪应力增量的方向, $\bar{\theta}$ 可由下式确定:

$$d\tau_x = |d\tau| \cos \bar{\theta}; d\tau_y = |d\tau| \sin \bar{\theta} \quad (3)$$

式中 $|d\tau|$ 为剪应力增量 $d\tau_x$ 和 $d\tau_y$ 的合力的大小。本文引入剪切耦合系数 η_0 反映塑性剪应变-剪应力关系的耦合, η_0 可根据试验结果或经验确定。显然, $\eta_0=0$ 表明无剪切耦合影响, 设

$$\left. \begin{aligned} d\gamma_x &= \eta_x d\tau_y = \eta_0 \frac{\tau_x}{\tau_f} d\tau_y; \\ d\gamma_y &= \eta_y d\tau_x = \eta_0 \frac{\tau_y}{\tau_f} d\tau_x \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据基本假设, 推导出三维模型的柔度矩阵:

$$[C]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \frac{1}{B_\eta} C_{\tau\tau} & \frac{\eta_x B' \text{sign}(\sin \bar{\theta})}{B_\eta} C_{\tau\tau} C_{\sigma\tau} \cos \bar{\theta} \\ \frac{\eta_y B' \text{sign}(\cos \bar{\theta})}{B_\eta} C_{\tau\tau} & \frac{1}{B_\eta} C_{\tau\tau} & C_{\sigma\tau} \sin \bar{\theta} \\ C_{\sigma\tau} \cos \bar{\theta} & C_{\sigma\tau} \sin \bar{\theta} & C_{\sigma\sigma} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} B' &= 1 - \frac{1}{C_{\tau\tau} G_e}; \\ B_\eta &= \sqrt{1 + \eta_x^2 B'^2 \sin^2 \bar{\theta} + \eta_y^2 B'^2 \cos^2 \bar{\theta} + (\eta_x + \eta_y) B' \sin 2\bar{\theta}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

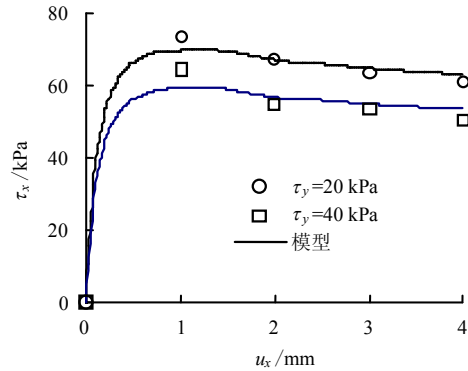
式中 G_e 为弹性剪切模量。

3.4 预测结果

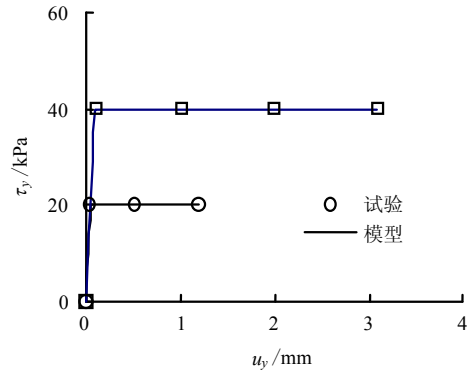
采用本文建立的接触面三维模型, 对三维单调及循环加载条件下粗粒土与结构接触面的力学响应进行了预测。为便于与试验对比, 模型预测结果均将应变换算成相对位移。

图 1 用实线给出了模型预测的法向应力为 100 kPa 时砂土与粗糙钢板接触面双向单调剪切时的应力相对位移关系曲线, 即首先逐渐施加 τ_y 至一定数值后保持不变, 按位移控制在接触面 x 方向施加相

对切向位移至 4 mm, 用点给出了相应的试验结果^[10], 可以看出模型预测的应力-应变关系与试验结果基本符合, 表明本文建立的模型能够描述粗粒土与结构接触面在三维剪切时两个方向的剪应力应变关系的耦合。



(a) x 方向的剪应力与相对切向位移关系



(b) y 方向的剪应力与相对切向位移关系

图 1 单调剪切应力-应变关系的模型预测及试验结果

Fig.1 3D monotonic shear stress-strain response

图 2 为一个较复杂应力路径作用下某均匀砾与粗糙钢板接触面力学响应的模型预测结果, 表明了剪切耦合系数的取值对接触面力学响应的影响。该工况保持所施加的相对切向位移路径是圆, 计算在剪切耦合系数 η_0 分别为 0 和 0.2 时的接触面剪应力路径, 可以看出当剪应力-应变关系不存在耦合 ($\eta_0=0$) 时计算出的剪应力路径也是一个圆, 但当剪应力-应变关系存在耦合时在剪切的初始阶段剪应力路径不再是一个圆, 整个剪应力路径表现出不对称性, 这表明剪切耦合特性对接触面的力学响应有重要影响。

4 数值模型

根据有限元变分原理, 可推得接触面三维模型的接触面单元格式, 即

$$[K]^e = \int_V [B]^T [C]^{-1} [B] dV \quad (8)$$

式中的应变矩阵 $[B]$ 根据三维接触面单元的具体形式确定。另外,在接触面单元中引入接触面脱开位移 π 这一历史变量,以描述土与结构在接触面处发生的张开和重压紧(又称作愈合)现象。具体步骤:该变量在接触面发生脱开(即法向应力小于0)后被激活,并持续记录接触面的累积脱开量(即相对法向位移),以脱开为正。显然,当该变量出现负值时,表明接触面出现愈合,又重新压紧,此时根据 π 值算出接触面的法向应力,按上文所述计算接触面的单元刚度矩阵,同时将 π 重新置零。

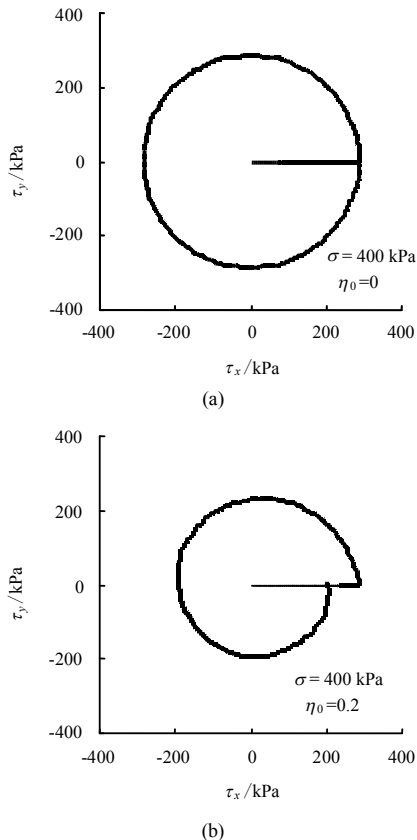


图2 三维循环剪切条件下的应力路径模型预测结果
Fig.2 3D cyclic shear stress path predicted by model

依据清华大学已有的土体与结构物三维静动力有限元分析软件,编制了相关程序,并能够较好地考虑模型弹塑性矩阵是非对称的情形。本文通过如图3所示的三维滑块试验分析模型验证数值模型的有效性。该模型基座由粗糙钢板构成,基座固支,滑块自由,滑块与基座之间为均匀砾夹层,用接触面单元模拟,从而构成均匀砾与粗糙钢板接触面问题。为了分析方便,假设钢板和滑块的重度均为0,基座和滑块均用线弹性单元模拟。先在滑块的上表面施加初始法向应力 σ ,再沿 x 轴方向按应力控制施加剪应力 τ_x ,然后保持该剪应力不变,沿 y 轴方向按位移控制往返加载,幅值为50 mm。

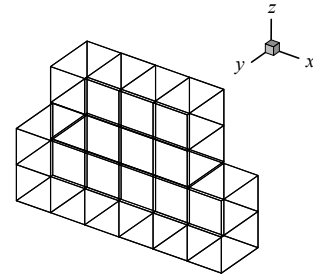


图3 三维滑块试验计算模型图
Fig.3 Schematic view of 3D slipper test model

作为示例,本文给出法向应力 $\sigma = 400$ kPa、 x 向剪应力 $\tau_x = 200$ kPa、剪应力耦合系数 $\eta_0 = 0.1$ 时计算得到的某均匀砾与粗糙钢板接触面应力相对位移关系,如图4所示。图中实线表示本构模型预测结果,点为滑块试验FEM分析结果,可以看出FEM算得的接触面应力相对位移关系与本构模型预测结果完全一致,能够反映接触面三维剪切时所表现出的耦合特性,这说明本文建立的三维数值模

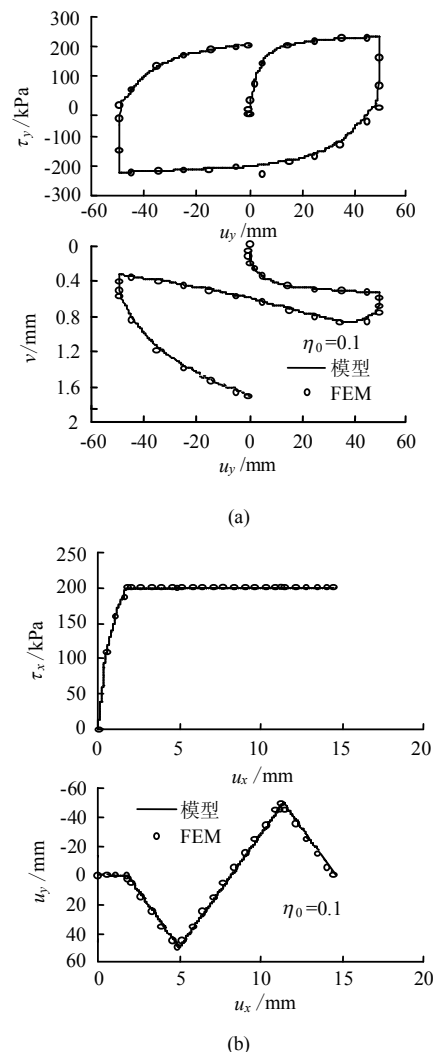


图4 三维滑块试验计算结果
Fig.4 Prediction results of 3D slipper test

型是有效的。从图 4 还可以看出, 本文接触面三维模型能够合理地预测剪切条件下接触面的剪胀体应变的主要规律, 包括卸载体缩和异向性等。

5 结 语

试验结果分析表明, 三维剪切时粗粒土与结构接触面两个方向的剪应力-应变关系表现出较强的耦合特性, 但其主剪应变的大小只与主剪应力的有关。剪切路径对接触面的剪胀体应变有一定影响。

建立了描述三维加载条件下接触面力学特性的本构模型及其数值格式。该模型能够有效地描述接触面的主要三维力学特性, 具有数值可行性。

需要指出, 由于缺乏足够的粗粒土与结构接触面三维静动力试验结果, 本文模型在模拟复杂应力路径条件下接触面响应的能力尚需进一步检验。

参 考 文 献

- [1] Clough G W, Duncan J. M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1971, 97 (SM12): 1 657—1 672.
- [2] Ghaboussi J, Wilson E L, Isenberg J. Finite element for rock joints and interfaces[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE**, 1973, 99 (SM10): 833—848.
- [3] Desai C S, Ma Y. Modeling of joints and interfaces using the disturbed-state concept[J]. **International Journal of Numerical and Analytical Method in Geomechanics**, 1992, 16: 623—653.
- [4] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. **岩土工程学报**, 2005, 27 (10): 1 175—1 179.
- [5] 张嘎, 张建民. 循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26 (2): 254—258.
- [6] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面的可逆性与不可逆性剪胀规律[J]. **岩土力学**, 2005, 26 (5): 699—704.
- [7] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面受载过程中的损伤[J]. **力学学报**, 2004, 36 (3): 322—327.
- [8] Evgin E, Fakharian K. Cyclic rotational simple-shear behavior of sand-steel interfaces[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38 (2): 191—199.
- [9] Fakharian K, Evgin E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(12): 1 096—1 105.
- [10] Fakharian K. Three-dimensional monotonic and cyclic behavior of sand-steel interfaces: testing and modeling [Ph. Thesis D]. Canada: University of Ottawa, 1996.
- [11] 何满潮, 金永军, 孙晓明, 等. 布达拉宫地基岩体稳定性研究[J]. **吉林大学学报(地球科学版)**, 2003, 33 (4): 514—518.
- [12] HE Man-chao, JIN Yong-jun, SUN Xiao-ming, et al. Study on stability of foundation rock mass of Potala Palace[J]. **Journal of Jilin University**, 2003, 33 (4): 514—518.
- [13] GB 50021—2001, 岩土工程勘察规范[S].
- [14] 李晓昭, 罗国煜, 龚洪祥, 等. 土体工程地质层组的划分[J]. **岩土力学**, 2004, (5): 759—765.
- [15] LI Xiao-zhao, LUO Guo-yu, GONG Hong-xiang, et al. The division of engineering geological strata groups of soil mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, (5): 759—765.
- [16] GB50218—94, 工程岩体分级标准[S].
- [17] Danilo Ranalli, Marco Scozzafava, Marco Tallini. Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy)[J]. **Journal of Cultural Heritage**, 2004, (5): 91—99.
- [18] 陈文胜, 黄生文, 刘辉, 等. 岩土工程计算分析的力分配方法[J]. **岩土力学**, 2005, (3): 409—515.
- [19] CHEN Wen-sheng, HUANG Sheng-wen, LIU Hui, et al. Force distribution method for numerical simulation of geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, (3): 409—515.
- [20] GB50007, 建筑地基基础设计规范[S].
- [21] 张雪东, 陈剑平, 黄润秋, 等. 用 FLAC-3D 分析呷爬滑坡的变形特征[J]. **岩土力学**, 2005, (1): 131—135.
- [22] ZHANG Xue-dong, CHEN Jian-ping, HUANG Run-qiu, et al. A study of deformation features of gapa landslide using FLAC-3D[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, (1): 131—135.

上接第 287 页