

文章编号: 1000-7598-(2008) 09-2319-04

散粒体间接接触面单剪试验及数值模拟

胡黎明^{1,2}, 马 杰³, 张丙印^{1,2}

(1. 清华大学 水利水电工程系 北京 100084; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点试验室, 北京 100084;
3. 山东省交通规划设计院, 济南 250031)

摘 要: 完成了两种散粒体间接接触面的单剪试验, 对试验过程进行了有限元数值模拟, 对比了刚塑性、理想弹塑性和 Clough-Duncan 接触面本构模型对计算结果的影响, 并分析了计算模型的破坏过程。计算取得了与试验基本一致的接触面破坏规律。结果表明, 用刚塑性模型描述两种散粒体间接接触面的本构关系是合理的。

关 键 词: 接触面; 单剪试验; 数值模拟; 刚塑性模型

中图分类号: TU 413.5

文献标识码: A

Simple shear test and numerical simulation of interfaces between granular materials

HU Li-ming^{1,2}, MA Jie³, ZHANG Bing-yin^{1,2}

(1. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Shandong Provincial Communications Planning & Designing Institute, Jinan 250031, China)

Abstract: Simple shear tests for the soil-soil interface are conducted; and numerical simulation is performed to model the testing process. The different interface constitutive models, such as rigid-plastic, elastoplastic and Clough-Duncan nonlinear elastic models, are used in the numerical analysis; and the failure mode of interfaces is investigated. The calculation results agree well with the test results; and it is shown that the rigid-plastic model is suitable to describe the soil-soil interface.

Key words: interfaces; simple shear test; numerical simulation; rigid-plastic model

1 引 言

心墙堆石坝中一般广泛存在着两类接触面: 一种为筑坝材料与基岩间接触面, 即散粒体-连续体接触面; 另一类为心墙料与反滤料间接触面, 即散粒体-散粒体接触面。对于第 1 类接触面, 已经有较多可靠的研究成果, 而对于第 2 类接触面, 试验及数值研究均比较少^[1-3]。

建设中的糯扎渡高心墙堆石坝采用直心墙方案, 为了研究心墙土料与周围土体的相互作用规律, 本文采用糯扎渡工程现场土料, 进行了心墙土料与反滤料间接接触面的单剪试验, 求取了不同接触面模型的参数, 并对接触面破坏过程进行了数值模拟分析。

2 接触面单剪试验

试验仪器为在清华大学大型循环加载基础上改

进的单剪试验系统^[3], 根据实际工程条件采用不同的法向应力, 试验过程中法向应力保持不变。

心墙土料与反滤料接触面单剪试验中, 心墙土料置于单剪代下盒, 反滤料置于单剪代上盒。为了观察土料变形情况, 沿相对位移方向在混合土料中布置一组软线标记, 试验完成后, 可根据标记线的变形考察土样的变形情况。

图 1 为两组不同法向应力作用下单剪试验完成并去除上部反滤料之后心墙土料试样内部的软线变形剖面图。由图可以看出, 法向应力较低时($\sigma_n = 300$ kPa), 软线在不同材料接触面处相对位移较大, 而在心墙土料内部变形较均匀; 法向应力较大时($\sigma_n = 900$ kPa), 心墙土料试样的中下部出现了较大的相对位移, 说明接触面破坏时相对位移主要发生在心墙土料内部。

为了解单种土料力学特性, 还针对混合土料和

收稿日期: 2006-10-08

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (No. NCET-07-0408); 北京市科技新星计划 (No. 2005A46)。

作者简介: 胡黎明, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 主要从事土工建筑物和环境岩土工程方面的研究。E-mail: gehu@tsinghua.edu.cn

反滤料分别进行了单剪试验。试验表明, 由于心墙土料有一定黏聚力, 但内摩擦角较小, 因此, 在法向应力较低时, 其强度高于反滤料; 当法向应力变大, 其强度弱于反滤料。

综合分析上述试验结果可知, 接触面法向应力较低时, 变形主要发生在接触面或上层反滤料中, 此时接触面剪切强度接近于反滤料; 当法向应力较大时, 变形主要发生在下部的心墙土料中, 破坏位置发生了转移, 接触面破坏强度与心墙土料相近。研究中还将心墙土料和反滤料的相对位置倒置进行试验, 也得到了相同的结论。

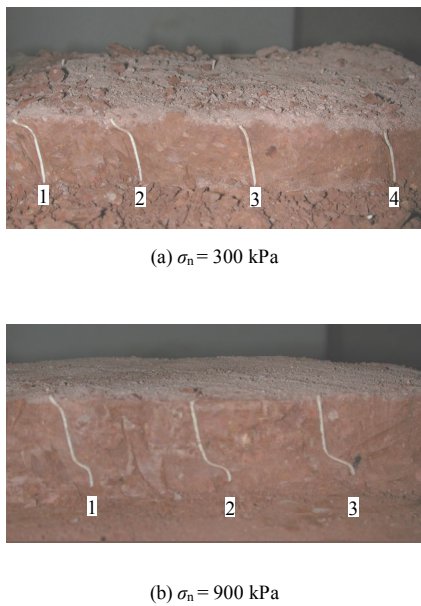


图1 单剪试验结束后心墙土料内部变形情况
Fig.1 Deformation of core soil mass after shear tests

3 接触面单剪试验的数值模拟

为深入了解接触面的力学特性, 对上述接触面试验进行有限元数值模拟, 分析不同本构模型的适用性。目前, 常用刚塑性模型、理想弹塑性模型和 Clough - Duncan 非线性弹性模型等 3 种本构模型来描述土与结构物接触面的力学特性。对于本文所述的散粒体间接触面, 采用类似的本构模型进行有限元数值分析, 接触面采用 Goodman 单元模拟, 散粒体本构关系采用 Duncan - Chang 的 E-B 模型。

3.1 模型参数

根据试验结果求得的上述 3 个接触面本构模型参数如表 1 所示, 心墙土料和反滤料的 Duncan-Chang E-B 模型参数如表 2 所示。模型参数拟合曲线如图 2 所示 (以法向应力 $\sigma_n = 100$ kPa 和 $\sigma_n = 600$ kPa 为例)。

表 1 单剪试验接触面模型参数

Table 1 Model parameters for simple shear tests

本构关系	c/kPa	$\delta/(\text{^\circ})$	K_1	n_1	R_f
刚塑性模型	117	26	—	—	—
理想弹塑性模型	117	26	10 588	0.494 4	—
非线性模型	117	26	10 588	0.494 4	0.809

注: c 为接触面凝聚力, δ 为接触面摩擦角, K_1 为接触面劲度系数, n_1 为劲度指数, R_f 为破坏比。

表 2 土料 Duncan-Chang E-B 模型参数

Table 2 Duncan-Chang E-B model parameters for soils

坝料	c/kPa	$\phi/(\text{^\circ})$	K_2	n_2	K_b	m	R_f
反滤料	60	43	1 000	0.115	400	0.1	0.78
心墙土料	147	23.4	264	0.49	134	0.4	0.78

注: K_2 为变形模量参数, n_2 为模量指数, K_b 为体积变形模量参数, m 为体变模量指数, R_f 为破坏比。

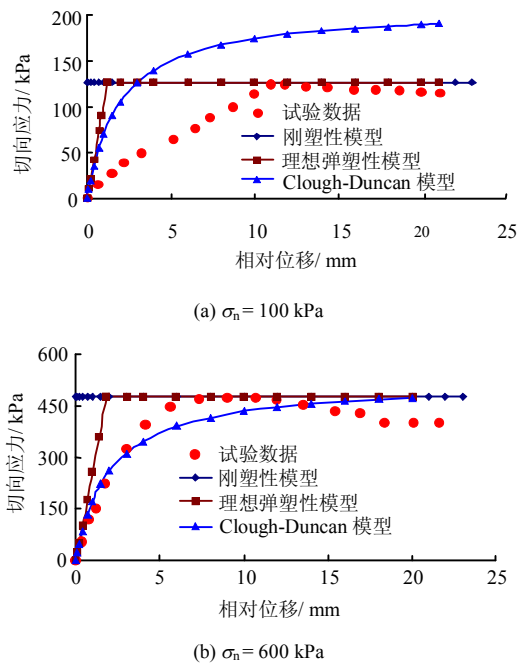


图2 单剪试验结果与本构模型拟合曲线
Fig.2 Results of simple shear tests and simulation curve by constitutive models

3.2 计算模型

根据不同土体接触面单剪试验条件, 建立有限元计算模型如图 3 所示, 计算过程中保证土样同一高度节点的水平位移相同, 顶层节点水平位移为 0。计算模型共划分 500 个单元, 561 个节点, 其中接触面单元 50 个。计算中逐步施加相对位移, 可得到接触面剪应力-相对位移关系曲线。

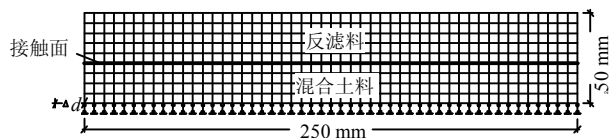


图3 有限元计算模型
Fig.3 Calculation model for FEM analysis

3.3 计算结果及分析

3.3.1 计算模型破坏情况

本文有限元计算中,单元的破坏与否以其应力水平值 S_1 来表示。当 $S_1 = 0.99$ 时,认为单元发生破坏,如果破坏单元构成连通左右的高应力水平区,即认为所计算的模型整体破坏。土体单元应力水平的定义为

$$S_1 = \frac{(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \quad (1)$$

对于刚塑性模型和理想弹塑性模型,接触面单元的应力水平的定义为

$$S_1 = |\tau| / (\sigma \tan \delta + c) \quad (2)$$

非线性模型接触面单元的应力水平的定义为

$$S_1 = R_f |\tau| / (\sigma \tan \delta + c) \quad (3)$$

有限元计算得到了各种法向应力单剪试验中土体和接触面的力学响应,反映出了基本一致的规律。下面将以法向应力分别为 100 kPa 和 600 kPa 时的典型结果为例进行分析。

图 4 给出了法向应力 $\sigma_n = \text{kPa}$ 时采用刚塑性接触面模型时的单剪试验破坏过程,图中等值线为应力水平等值线。

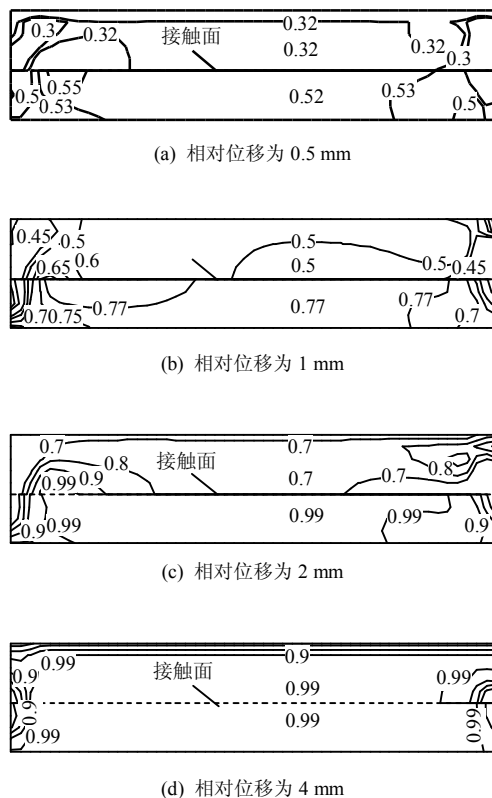


图 4 采用刚塑性模型试样破坏过程($\sigma_n = 600 \text{ kPa}$)

Fig.4 Failure progress simulated by rigid-plastic interface model ($\sigma_n = 600 \text{ kPa}$)

图 5 给出法向应力 $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ 情况下计算模型破坏时的应力水平分布,显然破坏发生在上面的反滤料中。由此可知,计算模型的破坏位置随法向应力的改变而发生了变化。对计算所用参数分析可以发现,低法向应力时由于心墙土料凝聚力较大,强度较高,破坏发生在强度相对较低的反滤料中;反滤料内摩擦角较大,高法向应力时其强度高于心墙土料,导致计算模型在心墙土料中发生破坏,这与试验结果是一致的。

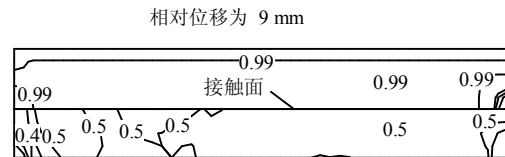


图 5 采用刚塑性模型试样应力水平分布($\sigma_n = 100 \text{ kPa}$)

Fig.5 Distribution of stress level of soil model simulated by rigid-plastic interface model ($\sigma_n = 100 \text{ kPa}$)

3.3.2 接触面单元破坏情况

本部分以法向应力 $\sigma_n = 600 \text{ kPa}$ 接触面单剪试验为例分析接触面单元破坏情况。当接触面单元采用刚塑性模型时,随着相对位移的增加,接触面单元应力水平增长如图 6 所示。由图可知,当相对位移达到 4 mm 时,接触面单元应力水平已经接近 1,说明接触面发生整体破坏,并且与下层混合土料的破坏基本同步发生。

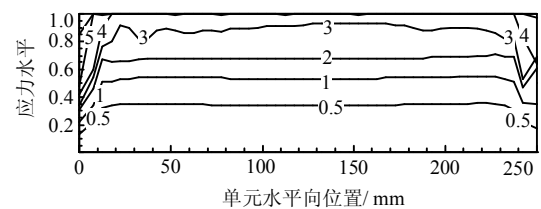


图 6 接触面单元应力水平随相对位移变化($\sigma_n = 600 \text{ kPa}$)

Fig.6 Stress level of interface element with increase of relative displacement ($\sigma_n = 100 \text{ kPa}$)

根据图 4 和图 6 还可以看出,无论是土料破坏还是接触面破坏,最初都是从计算模型左侧开始的,这与计算时边界条件的设定有关,而边界条件的设定又参考了试验时的实际情况。为分析边界条件对接触面应力不均匀变化的影响,考察了接触面附近混合土料单元的法向应力和剪应力随相对位移的变化情况,如图 7 所示。可以看到,数值模拟全过程中,大部分单元的正应力和剪应力都比较均匀,在模型边部有不均匀的应力突变,但范围很小,而且是在相对位移较大后才发生,可以认为,有限元计算可以较好地模拟接触面破坏过程。

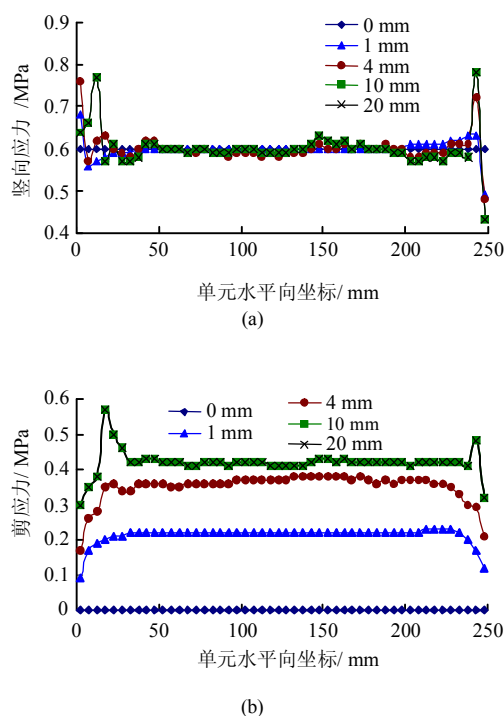


图7 接触面附近心墙土料应力发展过程 ($\sigma_n = 600$ kPa)
Fig.7 Development of normal stress and shear stress for core soil mass near interface ($\sigma_n = 600$ kPa)

3.3.3 接触面应力-位移关系

不同接触面本构模型计算得到的接触面平均剪应力-相对位移关系曲线如图8所示。可以看出,采用刚塑性模型、理想弹塑性模型和非线性模型计算得到的接触面总的应力-变形曲线与试验结果均相差不大,达到相同的剪应力,采用刚塑性模型需要发生的相对位移最小,理想弹塑性模型次之,非线性Clough-Duncan模型最大,显然这与3种模型的劲度系数的定义方式有关。

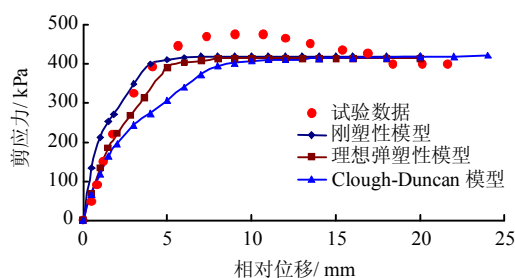


图8 不同本构模型的得到的接触面剪应力-相对位移关系曲线($\sigma_n = 600$ kPa)

Fig.8 Relationship between interface shear stress and relative displacement by different constitutive model ($\sigma_n = 600$ kPa)

如前所述,采用刚塑性模型时,计算模型中有部分单元首先破坏,随着位移增加,破坏区域逐渐扩大,最终接触面单元全部破坏。破坏前应力-位移曲线中的位移实际是土体单元水平变形的综合体现,因此得到整体呈曲线型的接触面应力-变形关系。

上述计算表明,刚塑性模型可以较好地反映接触面破坏的机制,而且参数少、物理意义明确,因此,在工程应用中具有一定的优越性。

4 结 论

本文进行了两种散粒体间的接触面单剪试验及数值模拟分析,结果表明:

(1) 对于两种散粒体及其间接触面构成的复合体系,发生破坏的位置与附近散粒体的本身强度特性有关。

(2) 数值模拟结果表明,接触面单剪试验中由于边界约束的影响,边部应力与变形分布不均匀,但土体大部分区域应力与变形均匀,单剪试验是模拟两种散粒体间接触面力学特性的有效试验手段。

(3) 刚塑性模型可以较好地描述两种散粒体间接触面的破坏机制和力学特性。

参 考 文 献

- [1] 陈愈炯, 刘杰, 俞培基. 土的接触面抗剪强度[C]// 中国土木工程学会第三届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981: 117—123.
- [2] 刘开明, 余静. 不同材料间接触面特性的实验研究[C]// 中国土木工程学会第四届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 109—114.
- [3] 张丙印, 付建, 李全明. 散粒体间接触面力学特性的单剪试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1 522—1 526. ZHANG Bing-yin, FU Jian, LI Quan-ming. Experimental study on mechanical behavior of interface between two granular materials [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(10): 1 522—1 526.
- [4] 马杰, 孙逊, 胡黎明. 糯扎渡高心墙堆石坝接触面试验研究[C]// 第24届全国土工测试学术研讨会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 94—97.