

混凝土与混凝土接触摩擦试验 及其数值计算模型

张振宇^{1,2}, 贾长恒^{1,2}, 李豪杰^{1,2}, 曹春晖^{1,2}, 冯吉利^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点试验室, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要 目的 研究混凝土与混凝土接触摩擦特性, 得到混凝土与混凝土接触面剪切应力与剪切位移变化关系, 为相似剪切破坏问题的数值计算提供依据. 方法 采用直剪试验和数值计算两种方法对混凝土与混凝土间的接触摩擦响应进行分析, 对试验进行数值计算, 并与试验结果进行了对比分析, 利用 PPR 内聚力模型来描述接触面的接触摩擦响应. 结果 接触面剪切应力随剪切位移变化过程可分为弹性变形阶段、塑性硬化变形阶段和理想塑性变形阶段; 剪切应力达到峰值后, 接触面仍处于较高的应力状态, 局部位置会出现应力集中态和局部破坏. Archard 非线性摩擦幂次准则能够较好地描绘出混凝土与混凝土接触面剪切应力峰值与轴向应力的关系. 结论 数值计算剪切应力随剪切位移变化关系曲线与试验结果基本吻合. 在轴向荷载较小时数值结果与试验结果存在较小差异. PPR 内聚力模型能够较准确地反映剪切破坏问题中剪切应力随剪切位移变化中各阶段的响应, 可用于描述相似剪切破坏过程.

关键词 接触摩擦; 混凝土; 剪切强度; PPR 内聚力模型

中图分类号 TU501; U452

文献标志码 A

Experimental and Numerical Calculation Model of the Friction Contact between Concrete and Concrete

ZHANG Zhenyu^{1,2}, JIA Changheng^{1,2}, LI Haojie^{1,2}, CAO Chunhui^{1,2}, FENG Jili^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, China, 100083; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, China, 100083)

Abstract: The friction contact between concrete and concrete is studied, and the relationships between shear stress and shear displacement of concrete and concrete are obtained, which is helpful for the numerical calculation of similar shear failure problem. The direct shear test and numerical

收稿日期: 2017-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51134005, U1261212)

作者简介: 张振宇(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事地下结构稳定性研究.

calculation methods were adopted to analyze the friction contact between concrete and concrete, and the PPR cohesive zone model is used to describe the friction contact between concrete and concrete in numerical modelling. The numerical calculation was carried out and compared with the experimental results. The experimental results and numerical results show that the shear stress can be divided into elastic deformation phase, plastic hardening deformation phase and theoretical plastic deformation phase. The contact surface is still in a high stress state after the shear peak stress, and stress concentration state the damages will appear in local position of concrete structures. Archard nonlinear power law of friction can describe the relationship between the shear peak stress and the axial stress. The numerical results show that the shear stress is in good agreement with the experimental results, and there is only small difference between results when the axial load is small. The PPR cohesion model can accurately reflect the shear stress in the shear failure problem and can be used to describe the failure process of similar conditions.

Key words: contact and friction; concrete; shear strength; PPR cohesive zone model

混凝土结构以其较好的可塑性、整体性、耐久性等优点在工程得到了广泛应用,混凝土与周围介质间的接触摩擦作用对混凝土结构的稳定性有重要影响。许多学者采用室内试验对不同混凝土与不同介质间的接触摩擦特性进行了相关研究。S. R. MAITRA 等^[1]通过试验研究了典型混凝土路面混凝土板与路基在不同接触条件下的(光滑接触和粗糙接触)接触摩擦作用。白润波等^[2]通过三维接触有限元数值试验和物理模型试验对水工钢闸门轨道底板与混凝土基础间的接触摩擦进行了研究,并探讨了轨道截面尺寸、砟基础厚度及砟强度等对轨道-砟基础接触压应力的影响效应。张启灵等^[3]从静力学分析的角度定性解释了钢衬-混凝土间出现脱空状态的潜在原因,而后采用数值方法研究了影响二者间接触状态的结构因素。张国栋等^[4]利用大型直剪仪和单剪切仪对土石混合物-混凝土接触面力学性能进行了试验研究。李炎隆等^[5]采用接触单元模拟混凝土面板与垫层之间的接触面,对混凝土面板堆石坝面板应力变形进行了仿真计算。D. M. SHAW 等^[6]通过直剪试验研究了不同时期全轻混凝土-砂轻混凝土接触面接触特性,并分析了混凝土重度、压缩强度和接触面处理情况对接触面剪切特性的影响。曹卫平等^[7]通过大型直剪试验仪对密砂-混凝土接触面进行

了剪切实验,分析了剪切面剪应力和体应变的变化特征,建立了密砂-混凝土接触面剪切的数学模型。吕鹏等^[8]利用土工粗颗粒直剪试验系统进行了一系列接触面直剪试验,研究了冻土与混凝土接触面的力学性能。H. Jiang 等^[9]研究了新旧混凝土加固沟槽接触面的剪切摩擦特性,并分析了混凝土强度、沟槽几何形状和配筋率等参数对剪切摩擦特性的影响。袁勇等^[10]根据沉管隧道接头构造,开展了几何比例 1:10 的管片接头压剪试验,研究接头在低调低周往复剪切荷载下的力学性能。肖杰等^[11]为利用大型多功能界面剪切仪,进行了砂土与被硫酸加速腐蚀的混凝土板之间接触面剪切试验,研究了作用对桩-土接触面剪切特性的影响,测量了不同腐蚀时间的混凝土与砂土接触面的剪切应力和剪切位移关系。

多数的研究是关于混凝土与其周围介质间的接触摩擦响应的,而对混凝土与混凝土接触摩擦的相关研究非常少。笔者通过直剪试验研究混凝土与混凝土接触摩擦特性,得到混凝土与混凝土接触面剪切应力与剪切位移变化关系,并采用 Archard 非线性摩擦幂次准则描绘剪切峰值应力与轴向应力的关系,为相似接触条件问题剪切峰值应力预测提供依据。笔者还利用 PPR 内聚力模型来描述接触面的接触摩擦响应,对试验进行数值

计算,并与试验结果进行了对比分析,为相似接触问题的研究提供参考.

1 试 验

1.1 试验仪器

试验仪器主要由加载装置和剪切盒组成.加载装置采用中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点试验室的深部岩石非线性力学试验系统(见图1),该加载系统可同时在X、Y、Z方向进行加载,3个方向最大加载值为50、45、45kN.试验过程中通过顶部和两侧位移和荷载监测装置可得出试验过程试件的荷载、位移与时间的关系曲线.剪切盒由上下两部分组成,长宽高为320 mm×160 mm×145 mm,剪切盒上部和下部的内部长宽高均为110 mm×110 mm×50 mm(见图2).

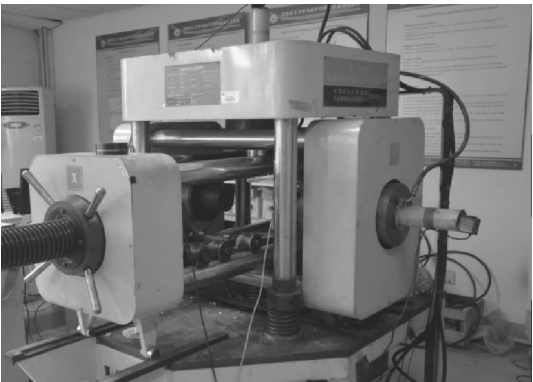


图1 试验加载装置
Fig. 1 Testing setup

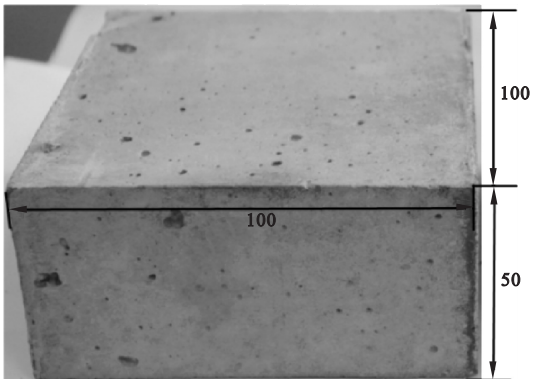


图2 混凝土试件
Fig. 2 Concrete specimen

试验过程中将试件放入剪切盒内,并在剪切盒内添加薄钢垫块将试验试件固定.试验混凝土块体长宽高为100 mm×100 mm×50 mm(误差为±1 mm),强度标号为C50.混凝土试件浇筑完成后将混凝土试件在温度(20±3)℃、湿度为90%以上的标准养护室养护28 d,混凝土试件如图2所示.

1.2 试验设计

试件表面基本为干燥状态,混凝土试件直接接触,试验接触模式如图2所示.为研究轴向应力对接触面剪切性能的影响,采用8种不同轴向应力条件进行剪切试验,轴向应力值由小到大分别为1.5、2.5、4、7、10、13、17、21 MPa,每种轴向应力条件均做2组平行试验.

1.3 试验过程

试验过程中采用荷载控制法使轴向应力保持不变,通过在切向施加匀速位移使试件产生剪切作用.直剪试验分为以下步骤:①根据直剪试验规范要求,将试样装入剪切盒内,通过添加垫块固定试件.并在剪切盒上部和下部安装承压板和滑动滚排,在最顶部安装球形压头.②分别在X和Y方向施加2 kN荷载,对剪切盒进行卡持,并保载2 min.③采用荷载控制加载方式进行轴向(Y方向)荷载加载,加载速率为0.5 kN/s,加载完成后,保载3 min.④采用位移控制加载方式进行水平(X方向)加载,加载速率为0.02 mm/s,当水平位移达到10~12 mm时,试验可终止.⑤分别将X和Y方向荷载进行卸载操作,先取下剪切盒上半部分,记录试件之间的相对错动及接触面处的试件损形式等,然后将试件再取出,结束试验.⑥改变接触条件和轴向应力条件,重复上述①~⑤步骤进行剪切试验.

2 试验结果分析

2.1 剪切应力与剪切位移

当混凝土与混凝土表面直接接触时,两

组试验结果基本相同,剪切应力与剪切位移关系曲线如图3所示.提取轴向应力、峰值应力以及残余应力等试验结果进行分析(见表1).

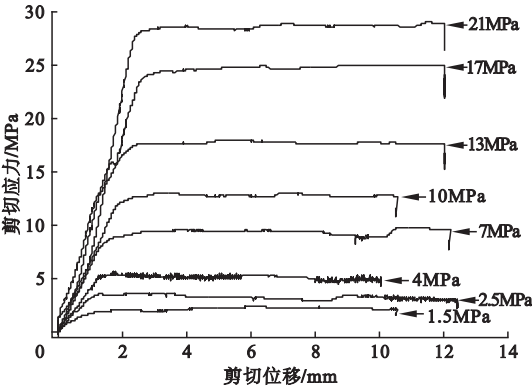


图3 不同轴向应力条件下剪切应力与剪切位移关系

Fig. 3 Shear stress via shear displacement under different axial stress conditions

表1 试验结果
Table 1 Test result

试验工况	轴向应力/MPa	第1组试验峰值应力/MPa	第2组试验峰值应力/MPa
1	1.5	1.78	1.70
2	2.5	3.46	3.57
3	4	5.60	5.54
4	7	9.29	8.99
5	10	12.87	13.27
6	13	18.02	17.91
7	17	23.76	23.25
8	21	28.46	28.65

分析试验结果可发现,不同轴向应力条件下剪切应力与剪切位移关系曲线形式基本相同:当剪切位移较小时,剪切应力随剪切位移的增加呈线性增长,剪切应力-剪切位移关系处于弹性变形阶段;随着剪切位移的增加,剪切应力-剪切位移关系进入塑硬化变形阶段,在剪切位移为1~2 mm,各工况剪切应力均达到峰值.在剪切应力达到峰值后,在试验设计的剪切范围内,剪切应力随剪切位移变化很小,基本保持不变,呈现理想塑性变

形形态.剪切应力随剪切位移变化过程可分为弹性变形阶段、塑性硬化变形阶段和理想塑性变形阶段.

剪切应力达到峰值后,接触面仍处于较高的应力状态,接触面局部位置有可能会出 现应力集中现象.并且混凝土材料属于脆性材料,当局部应力值超过混凝土强度时,混凝土结构会产生裂纹,甚至产生局部破坏,从而对结构的稳定性构成威胁.工程中应尽量避免混凝土结构与刚度较大介质(钢铁、混凝土、花岗岩)直接接触.

在对岩石、混凝土等材料的强度特性研究中,通常采用破坏模型来描述对剪切峰值应力与轴向应力关系.只要轴向应力值范围足够大,二者通常呈非线性关系^[12-13]. 试验中剪切峰值应力随轴向应力的增大而增大,采用 Archard 非线性摩擦幂次准则^[14]分析了轴向应力与剪切峰值应力的关系.

$$\tau_p = k\sigma_n^m.$$
 (1)

式中: σ_n 和 τ_p 分别为轴向应力和剪切峰值应力; k 和 m 均为常数,通常由室内试验测定.

轴向应力与剪切峰值应力关系的拟合曲线如图4所示.在混凝土表面直接接触条件下,非线性摩擦幂次准则能够较好地描述轴向应力与剪切峰值应力的关系,准则中的常数 k 和 m 值分别为 1.29、1.02.

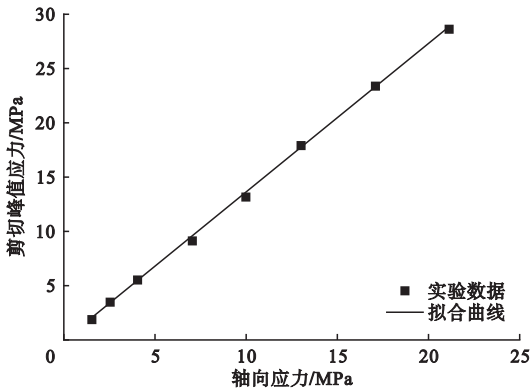
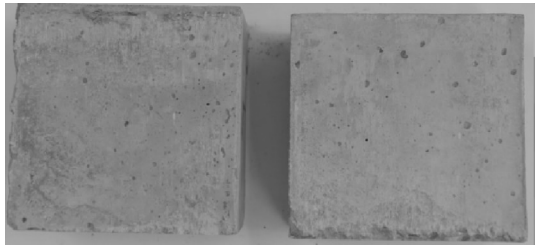


图4 轴向应力与剪切应力拟合曲线

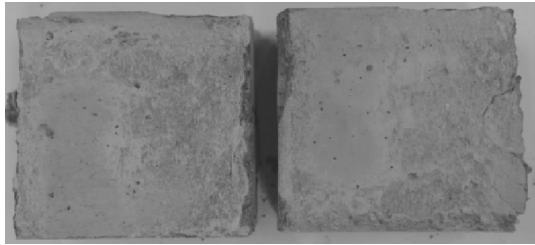
Fig. 4 Axial stress via shear peak stress

2.2 试件表面破损

混凝土试件接触面破损如图5所示。混凝土表面与混凝土表面直接接触时,由于混凝土试件表面会存在一定粗糙度,并且混凝土材料属于准脆性材料,因此在剪切作用下试件表面会产生一定的擦痕和局部破坏。当轴向应力较小时,剪切应力在剪切位移很小时就已达到峰值,上部和下部试件接触面表面擦痕不明显,只有在试件边缘位置出现很小的局部损伤(见图5(a))。随着轴向应力的增大,由于混凝土试件本身平整度不足,试件有可能产生裂纹和局部破坏。而且接触面产生相对滑动的剪切应力增大,试件接触面表面的微观粒子间相互作用增强,甚至会超过微观粒子间的内聚力,使得试件表面会产生一定的磨损。宏观表现为在上部和下部试件接触面表面产生较为明显擦痕,并且在试件许多边缘位置均出现局部破坏(见图5(b))。



(a) 轴向应力为4MPa



(b) 轴向应力为17MPa

图5 混凝土试件接触面破损

Fig. 5 Damages of contact surface of concrete specimens

3 PPR 内聚力模型

3.1 基于势能的 PPR 内聚力模型

为更好地描述宏观的断裂情况,参考文

献[15-17]提出了基于势能函数的 PPR 内聚力模型(简称 PPR 模型)。模型中牵引-分离关系由势能函数对裂纹张开位移的导数确定,并且切矩阵能够通过势能函数二次导数得出,保证了矩阵的对称性,更优于其他非势能内聚力模型。PPR 模型中共包括8个参数,分别为法向和切向断裂能(ϕ_n, ϕ_t)、法向和切向的强度($\sigma_{\max}, \tau_{\max}$)、形函数(α, β)和初始斜率指标(λ_n, λ_t),每个指标均存在物理意义,并且均由宏观断裂的边界条件决定^[18-19]。各输入参数的宏观物理意义如下:

(1)当法向位移或切向位移达到某一张开位移($\delta_n, \bar{\delta}_t$)时,此时法向应力为0,并且在法向方向产生完全断裂,此时的法向位移和切向位移分别称之为法向最终位移和切向最终共轭位移。

$$T_n(\delta_n, \Delta_t) = 0, T_n(\delta_n, \bar{\delta}_t) = 0. \quad (2)$$

式中: T_n 为法向应力; δ_n 为法向最终位移,即使得法向应力为0时的法向位移; $\bar{\delta}_t$ 为切向最终共轭位移,即当法向位移为0时,对应的切向位移; Δ_t 为切向张开位移。

(2)同样当切向位移或法向位移达到某一张开位移($\bar{\delta}_n, \delta_t$)时,此时切向应力为0,在切向方向产生完全断裂,此时的法向位移和切向位移分别称之为法向最终共轭位移和切向最终位移。

$$T_t(\bar{\delta}_n, \Delta_t) = 0, T_t(\Delta_n, \delta_t) = 0. \quad (3)$$

式中: T_t 为切向应力; δ_t 为切向最终位移,即使得切向应力为0时的切向位移; $\bar{\delta}_n$ 为法向最终共轭位移,即当切向位移为0时,对应的法向位移; Δ_n 为法向张开位移。

(3)在法向和切向应力与法向和切向位移曲线中,粘聚作用阶段的面积分别对应着法向断裂能(ϕ_n)和切向断裂能(ϕ_t)为

$$\phi_n = \int_0^{\delta_n} T_n(\Delta_n, 0) d\Delta_n, \quad (4)$$

$$\phi_t = \int_0^{\bar{\delta}_t} T_t(0, \Delta_t) d\Delta_t. \quad (5)$$

(4)当法向和切向位移达到临界张开位移时,法向和切向牵引力达到最大值.

$$\frac{\partial T_n}{\partial \Delta_n}|\Delta_n = \delta_{nc}, \frac{\partial T_t}{\partial \Delta_t}|\Delta_t = \delta_{tc}. \quad (6)$$

式中: δ_{nc} 和 δ_{tc} 分别为法向和切向的临界张开位移.

(5)法向和切向的最大牵引应力分别对应着粘聚单元的法向和切向最大应力(σ_{\max} ,

$$\Psi(\Delta_n, \Delta_t) = \min(\phi_n, \phi_t) + [\Gamma_n(1 - \frac{\Delta_n}{\phi_n})^\alpha (\frac{m}{\alpha} + \frac{\Delta_n}{\delta_n})^m + <\phi_n - \phi_t>] \times$$

$$[\Gamma_t(1 - \frac{|\Delta_t|}{\delta_t})^\beta (\frac{n}{\beta} + \frac{|\Delta_t|}{\delta_t})^n + <\phi_t - \phi_n>]. \quad (8)$$

式中: Ψ 为总势能; Γ_n 和 Γ_t 分别为法向和切向断裂常数.

将势能函数分别对法向张开位移和切向

$$T_n(\Delta_n, \Delta_t) = \frac{\partial \Psi}{\partial \Delta_n} = \frac{\Gamma_n}{\delta_n} [m(1 - \frac{\Delta_n}{\delta_n})^\alpha (\frac{m}{\alpha} + \frac{\Delta_n}{\delta_n})^{m-1} - \alpha(1 - \frac{\Delta_n}{\delta_n})^{\alpha-1} (\frac{m}{\alpha} + \frac{\Delta_n}{\delta_n})^m] [\Gamma_t(1 - \frac{|\Delta_t|}{\delta_t})^\beta (\frac{n}{\beta} + \frac{|\Delta_t|}{\delta_t})^n + <\phi_t - \phi_n>], \quad (9)$$

$$T_t(\Delta_n, \Delta_t) = \frac{\partial \Psi}{\partial \Delta_t} = \frac{\Gamma_t}{\delta_t} [n(1 - \frac{\Delta_t}{\delta_t})^\beta (\frac{n}{\beta} + \frac{|\Delta_t|}{\delta_n})^{n-1} - \beta(1 - \frac{\Delta_t}{\delta_t})^{\beta-1} (\frac{n}{\beta} + \frac{|\Delta_t|}{\delta_t})^n] [\Gamma_n(1 - \frac{\Delta_n}{\delta_n})^\alpha (\frac{m}{\alpha} + \frac{\Delta_n}{\delta_n})^m + <\phi_n - \phi_t>] \frac{\Delta_t}{|\Delta_t|}. \quad (10)$$

式中: $<.>$ 为麦考利托公式,其表达式为

$$<\chi> = \begin{cases} 0, \chi < 0 \\ \chi, \chi \geq 0. \end{cases} \quad (11)$$

法向和切向断裂能分别对应着断裂力学中的一型断裂能和二型断裂能,并且当法向和切向断裂能不同时,法向和切向断裂能常数可分别为

$$\Gamma_n = (-\phi_n)^{<\phi_n - \phi_t>/(\phi_n - \phi_t)} (\frac{\alpha}{m})^m, \quad (12)$$

$$\Gamma_t = (-\phi_t)^{<\phi_t - \phi_n>/(\phi_t - \phi_n)} (\frac{\beta}{n})^n. \quad (13)$$

而当法向和切向断裂能相同时,断裂能常数可分别简化为

$$\Gamma_n = -\phi_n (\frac{\alpha}{m})^m, \Gamma_t = (\frac{\beta}{n})^n. \quad (14)$$

式中: m 和 n 为无量纲参数,可根据形函数和起始斜率指标按照下式计算得:

τ_{\max})为

$$T_n(\delta_{nc}, 0) = \sigma_{\max}, T_t(0, \delta_{tc}) = \tau_{\max}. \quad (7)$$

(6)形参数(α, β)用来描述材料的软化响应作用,如脆性材料、准脆性材料等.

基于宏观物理意义的断裂参数,内在PPR内聚力模型的势能函数可表示为

张开位移进行求导计算,得出相应地牵引-分离关系中法向应力和切向应力,如下式:

$$m = \frac{\alpha(\alpha-1)\lambda_n^2}{(1-\alpha\lambda_n^2)}, n = \frac{\beta(\beta-1)\lambda_t^2}{(1-\beta\lambda_t^2)}. \quad (15)$$

式中: λ_n 和 λ_t 分别为法向和切向牵引力与法向和切向张开位移曲线中起始斜率指标值,其值分别为法向和切向临界张开位移与最终张开位移的比值,如下式:

$$\lambda_n = \delta_{nc}/\delta_n, \lambda_t = \delta_{tc}/\delta_t. \quad (16)$$

两条曲线的起始斜率指标分别控制着法向和切向应力与位移在弹性阶段的响应作用.当初始斜率指标较小时,牵引-张开关系曲线中的起始斜率较大,弹性变形阶段较短.

法向和切向的裂纹最终张开位移(δ_n, δ_t)可分别由断裂能公式和法向和切向强度式求得:

$$\delta_n = \frac{\phi_n}{\sigma_{\max}} \alpha \lambda_n (1 - \lambda_n)^{\alpha-1} (\frac{\alpha}{m} + 1) (\frac{\alpha}{m} \lambda_n + 1)^{m-1}, \quad (17)$$

$$\delta_t = \frac{\phi_t}{\tau_{\max}} \beta \lambda_t (1 - \lambda_t)^{\beta-1} \left(\frac{\beta}{n} + 1 \right) \left(\frac{\beta}{n} \lambda_n + 1 \right)^{n-1}. \tag{18}$$

形函数 (α, β) 控制牵引-分离关系中软化阶段的形状. 如果形函数值大约为2, 法向

和切向牵引力呈直线递减; 若形函数值小于2, 则势能函数梯度在软化阶段呈凹形, 若形函数值大于2, 则势能函数梯度在软化阶段呈凸形(见图6).

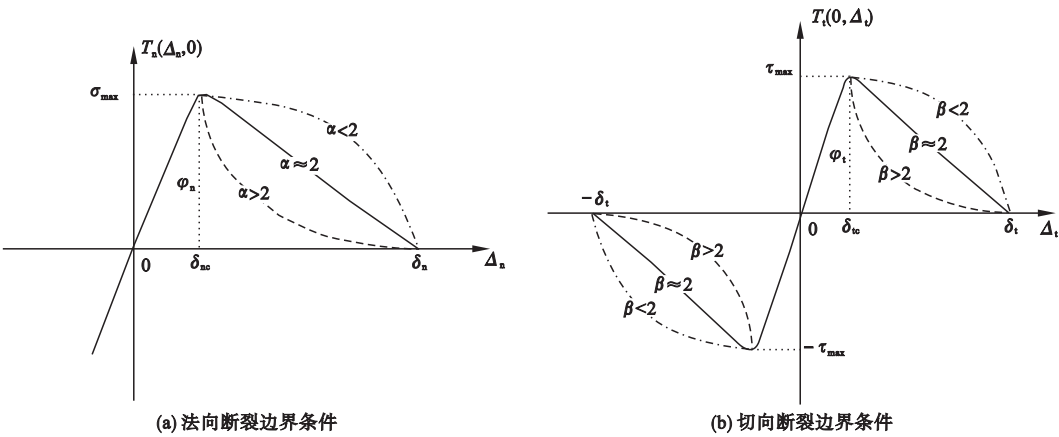


图6 混合模型势能函数断裂边界条件

Fig. 6 Fracture boundary conditions for the unified mixed-mode potential

3.2 接触摩擦作用

PPR 内聚力模型采用罚函数法来模拟质点间的摩擦接触作用^[20]. 当一个单元变形向临近单元侵入时, 二者间产生抵抗相互渗透的抵抗力, 并随着接触刚度成线性增加. 刚度模量为张开位移接近为0 时内聚力单元应力位移关系曲线的斜率. 模型中采用混合形式的接触摩擦关系来描述牵引力与接触摩擦的耦合作用. 耦合作用下的摩擦力可由下式计算得:

$$D_0 = \frac{\Gamma_t}{\delta_t} \left[n(1 - \chi_t)^\beta \left(\frac{n}{\beta} + \lambda_t \right)^{n-1} - \beta(1 - \lambda_t)^{\beta-1} \left(\frac{n}{\beta} + \lambda_t \right)^n \right] \times \left[\Gamma_n \left(\frac{m}{\alpha} + < \phi_n - \phi_t > \right] \frac{1}{\lambda_t \delta_t}. \tag{21}$$

将摩擦力应力张量与粘聚应力张量进行耦合:

$$\mathbf{T} = \left\{ \begin{array}{l} T_n \\ T_t \frac{\Delta_2}{\Delta_t} + T_f \left(\frac{|\Delta_2|}{\Delta_t} \right) \frac{\dot{\Delta}_2}{|\dot{\Delta}_2|} \\ T_t \frac{\Delta_3}{\Delta_t} + T_f \left(\frac{|\Delta_3|}{\Delta_t} \right) \frac{\dot{\Delta}_3}{|\dot{\Delta}_3|} \end{array} \right\}. \tag{22}$$

$$T_f = \mu_f \kappa(\Delta_t) |T_n|. \tag{19}$$

式中: μ_f 摩擦系数; $\kappa(\Delta_t)$ 可称为是破坏形态参数, 其值在0-1内单调变化,

$$\kappa(\Delta_t) = \left(1 - \frac{T_t(0, \Delta_t)}{D_0 \Delta_t} \right)^s. \tag{20}$$

式中: s 为模型中需要输入的参数, 调节内聚力与摩擦力之间转换关系. $T_t(0, \Delta_t)$ 为当法向裂纹张开位移为0 时粘聚单元的切向应力, D_0 为初始产生破坏时的接触刚度:

式中: Δ_2 和 Δ_3 均为破坏剪切面上的裂缝张开宽度; (\cdot) 符号代表裂缝张开宽度的变化量; 切向裂纹张开宽度通过两个切向位移按式 $\Delta_t = \sqrt{\Delta_2^2 + \Delta_3^2}$ 耦合合成.

切向张开位移与粘聚-摩擦牵引力的关系曲线如图7 所示. 从图7 中可发现在内聚力出现软化现象时开始产生摩擦力, 并且切应力与切向张开位移关系曲线由软化阶段单

调光滑过渡到摩擦接触阶段.

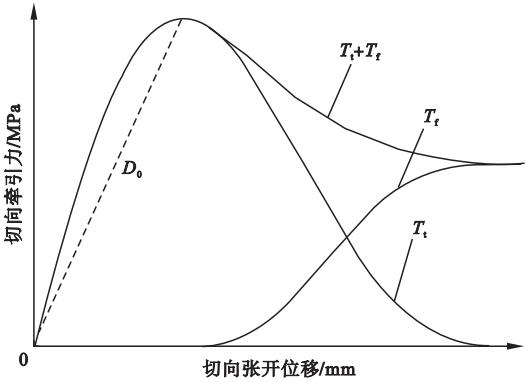


图 7 典型切向牵引力与切向张开位移曲线
Fig. 7 Typical curve of tangential traction and tangential displacement

4 模型验证和对比分析

4.1 计算模型

在对试验的模拟过程中,采用 PPR 内聚力模型来描述试件间的接触摩擦响应,混凝土试件应力-应变关系可用弹性变形准则进行描述,试验计算模型如图 8 所示. 试验模型中上下两部分试件长宽高为 100 mm × 100 mm × 50 mm, 对此部分进行网格划分时,均采用六面体实体单元,单元长宽高均为 2 mm,每个部分划分 62 500 个单元. 模型中共包括 2 551 个无厚度内聚力单元,在试件有限元网格划分完成后,将内聚力单元嵌入到两个试件网格模型中.

试验过程分两步:第一步为在施加顶部应力荷载过程;第二步为在第一步的基础上,在下部试件左侧面上施加位移条件,使得上

下两部分试件间产生相对错动. 模拟过程中,按照试验步骤也可成两步进行计算. 首先,在下部试件底面上施加 Y 方向约束,在上部试件顶部施加不同的应力荷载 P;然后在第一步的基础上,在上部试件右侧面上施加 Z 方向约束,并且在下部试件左侧面上施加一定的位移作为边界条件. 采用计算模型分别对不同轴向应力条件试验进行数值计算.

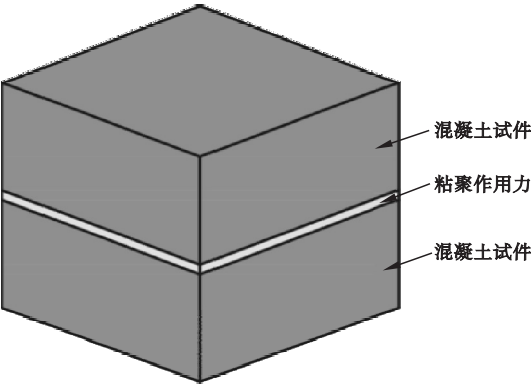


图 8 试验的三维数值验证

Fig. 8 3D numerical verification of the tests

4.2 数值计算结果与试验结果对比分析

根据试验剪切应力与剪切位移关系曲线,依据 PPR 模型物理意义及边界条件,计算不同轴向应力条件下 PPR 模型参数见表 2. 利用 PPR 模型来描述混凝土与混凝土接触面处接触摩擦响应,对试验进行数值计算,提取数值计算结果中接触面内聚力单元剪切应力随剪切位移变化关系与试验结果进行对比分析.

表 2 PPR 内聚力模型参数

Table 2 Mechanical properties of the PPR's cohesive zone model

轴向荷载/MPa	$\phi_n /$ ($N \cdot mm^{-1}$)	$\phi_t /$ ($N \cdot mm^{-1}$)	$\sigma_{max} /$ MPa	$\tau_{max} /$ MPa	α	β	χ_n	λ_t	s	μ_t
1.5	1.2	7.20	2.0	2.0	2.5	2.5	0.35	0.35	2.6	1.266
2.5	1.4	8.60	3.5	3.5	2.5	2.5	0.35	0.35	2.5	1.360
4	2.7	15.90	5.3	5.3	2.5	2.5	0.40	0.40	2.4	1.250
7	5.0	29.90	9.3	9.3	2.5	2.5	0.40	0.40	2.2	1.280
10	10.0	61.00	12.9	12.9	2.5	2.5	0.40	0.40	2.2	1.280
13	14.0	85.50	18.0	18.0	2.5	2.5	0.40	0.40	2.4	1.320
17	17.0	104.00	24.5	24.5	2.5	2.5	0.50	0.50	1.9	1.420
21	19.0	116.00	28.8	28.8	2.5	2.5	0.50	0.50	1.9	1.375

PPR 模型计算结果与试验结果对比如图 9 所示。通过对比分析不同轴向应力条件下数值计算结果和试验结果可发现,数值

计算结果与试验结果基本吻合,能够较准确地反映剪切应力随剪切位移变化过程关系。

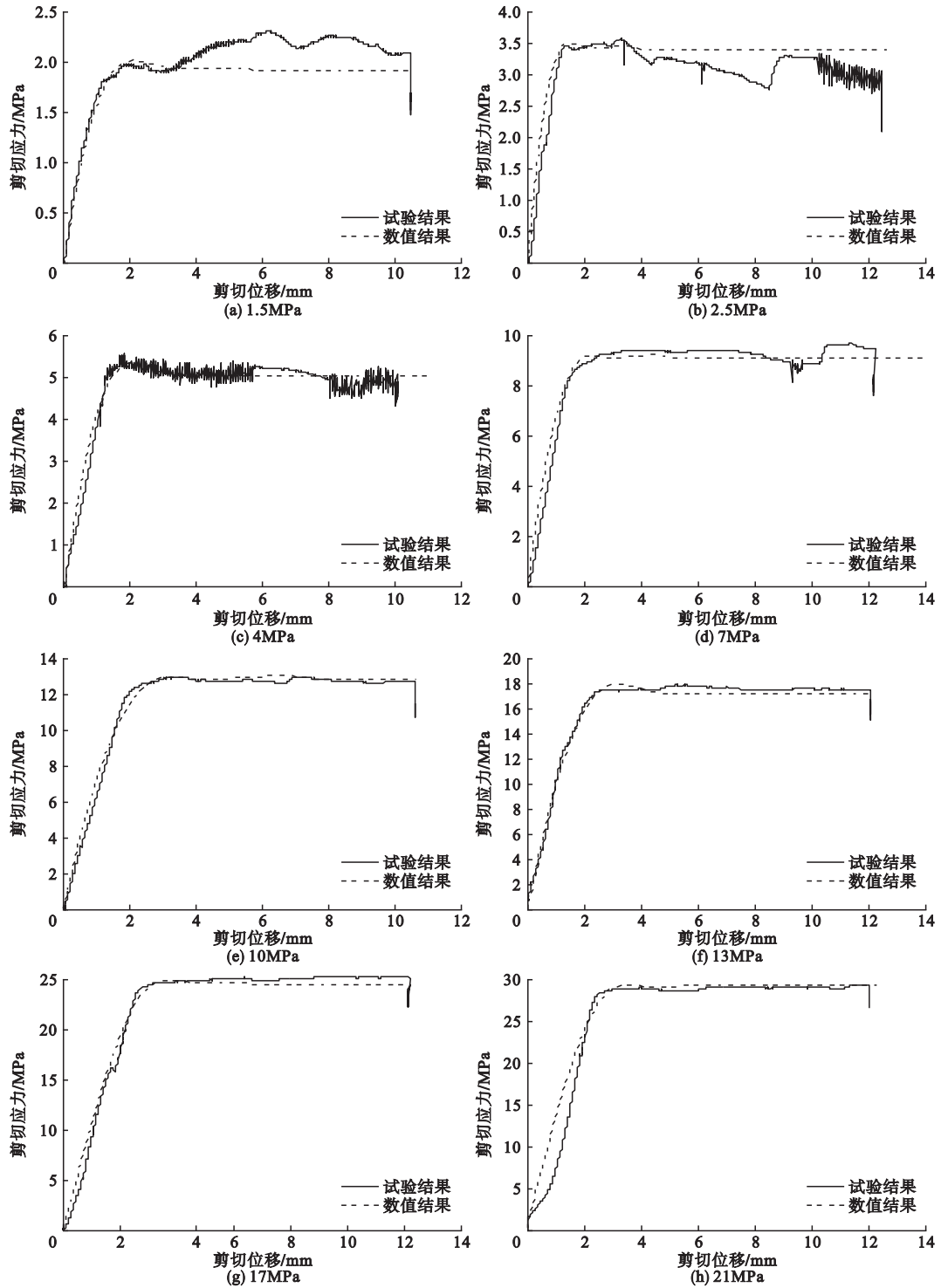


图 9 数值计算结果与试验结果对比

Fig. 9 Compared the numerical results of PPR's modelling with the tests results

由试验结果可知,剪切应力在达到峰值前,接触面处基本处于弹性变形阶段。PPR模型中采用切向裂纹临界张开位移与裂纹最终张开位移的比值来控制着切向应力与位移在弹性阶段的响应作用,此值可由试验剪切应力与位移关系曲线确定。由PPR模型计算结果可发现,计算得出的剪切应力随剪切位移的变化趋势基本与试验基本一致,剪切应力峰值及此时的剪切位移也基本相同,PPR内聚力模型能较好地描述此阶段的受力变形特性。

当应力值达到峰值后,剪切应力随剪切位移的增加基本保持不变,接触面受力状态呈现理想塑性状态。在PPR模型中,当剪切应力达到峰值后,切向牵引力逐渐减小,而摩擦力逐渐增大,二者之和为剪切应力值。当剪切位移达到一定位移时,切向牵引力减小到0,剪切应力值仅为摩擦力,并且随剪切位移的增加基本保持不变。利用上述牵引力与摩擦力之间的转化关系以及函数的边界条件确定相应控制参数。PPR模型计算的理想塑性阶段与试验结果相应阶段曲线基本一致,剪切应力值也基本相同。

但是试验中混凝土表面与混凝土表面直接接触,由于混凝土表面存在一定的粗糙度,在剪切过程中产生一定的磨损破坏,使得剪切应力在理想塑性阶段出现一定的跳跃,尤其在轴向荷载较小时表现得更为明显,这使得PPR模型计算结果与试验结果有一定的差异。

5 结 论

(1)接触面为混凝土与混凝土接触时,接触面剪切应力随剪切位移变化过程可分为弹性变形阶段、弹塑硬化变形阶段和理想塑性变形阶段。

(2)剪切峰值应力随轴向应力的增大而增大,采用Archard非线性摩擦幂次准则描绘出剪切应力峰值与轴向应力的关系,并且

给出了准则中的相关参数,为相似接触条件问题剪切应力峰值的估计和预测提供依据。

(3)剪切应力达到峰值后,接触面仍处于较高的应力状态,接触面局部位置有可能会发生应力集中现象,工程中应尽量避免混凝土结构与刚度较大介质直接接触。

(4)数值计算剪切应力随剪切位移变化关系曲线与试验结果基本吻合。在轴向荷载较小时数值结果与试验结果存在较小差异。PPR内聚力模型能够较准确地反映剪切破坏问题中剪切应力随剪切位移变化中各阶段的响应,可用来描述相似剪切破坏过程。

参考文献

- [1] MAITRA S R, REDDY K S, RAMACHANDRA L S. Experimental evaluation of interface friction and study of its influence on concrete pavement response[J]. Journal of transportation engineering, 2009, 135(8): 563-571.
- [2] 白润波,曹平周,曹茂森.大型钢闸门轨道与混凝土基础接触问题分析[J].水利水运工程学报, 2009(1): 10-16.
(BAI Runbo, CAO Pingzhou, CAO Maosen. Analysis of contact problem between large steel gate track and concrete foundation[J]. Hydro-science and engineering, 2009(1): 10-16.)
- [3] 张启灵,伍鹤皋.垫层蜗壳结构中钢衬-混凝土间的接触状态:有限元分析[J].水利学报, 2013, 44(12): 1468-1474.
(ZHANG Qiling, WU Hegao. Contact between steel lined and concrete in cushioned volume structure: finite element analysis[J]. Journal of hydraulic engineering, 2013, 44(12): 1468-1474.)
- [4] 张国栋,罗雯,杜鹏.三峡库区典型土石混合体与混凝土接触面大型剪切试验研究[J].水利水电技术, 2014, 45(8): 149-152.
(ZHANG Guodong, LUO Wen, DU Peng. Large shearing test on interface between typical earth-rock aggregate and concrete in Three Gorges reservoir area[J]. Water resources and hydropower engineering, 2014, 45(8): 149-152.)
- [5] 李炎隆,涂幸,王海生,等.混凝土面板堆石坝面板应力变形仿真计算[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(9): 211-

218.
(LI Yanlong, TU Xing, WANG Haisheng, et al. Stress and deformation properties of concrete face[J]. Journal of northwest A & F university (natural science edition), 2014, 42(9): 211 – 218.)
- [6] SHAW D M, SNEED L H. Interface shear transfer of lightweight aggregate concretes cast at different times [J]. Pci journal, 2014, 59 (3): 130 – 144.
- [7] 曹卫平, 陆清元, 梁鹏. 常/变法向应力作用下密砂-混凝土接触面剪切力学性状试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(1): 82 – 86.
(CAO Weiping, LU Qingyuan, LIANG Peng. Experimental study on shear mechanical properties on dense sand-concrete interface under constant and varying normal stress [J]. Building structure, 2015, 45(1): 82 – 86.)
- [8] 吕鹏, 刘建坤. 冻土与混凝土接触面直剪试验研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 106 – 110.
(Lü Peng, LIU Jiankun. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface [J]. Journal of the China railway society, 2015, 37(2): 106 – 110.)
- [9] JIANG H, FANG Z, MA Z J, et al. Shear-friction behavior of groove interface in concrete bridge rehabilitation [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(11): 1 – 15.
- [10] 袁勇, 禹海涛, 萧文浩, 等. 沉管隧道管节接头混凝土剪力键压剪破坏试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 149 – 154.
(YUAN Yong, YU Haitao, XIAO Wenhao, et al. Experimental failure analysis on concrete shear keys in immersion joint subjected to compression-shear loading [J]. Engineering mechanics, 2017, 34(3): 149 – 154.)
- [11] 肖杰, 屈文俊, 朱鹏, 等. 砂土与硫酸腐蚀混凝土接触面剪切试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 1001 – 1008.
(XIAO Jie, QU Wenjun, ZHU Peng, et al. Experimental study of interface shear test between sand and concrete after sulfuric corrosion [J]. Rock and soil mechanics. 2017, 38(9): 1001 – 1008.)
- [12] MA Y. Constitutive modeling of joints and interfaces by using disturbed state concept [D]. Tucson: The University of Arizona, 1990.
- [13] DESAI C S. Disturbed state concept as unified constitutive modeling approach [J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2016, 8(3): 277 – 293.
- [14] ARCHARD J F. Elastic deformation and the laws of friction [J]. Proceedings of the royal society a mathematical physical & engineering sciences, 1957, 243(4369): 190 – 205.
- [15] PARK K, PAULINO G H. Cohesive zone models; a critical review of traction-separation relationships across fracture surfaces [J]. Applied mechanics reviews, 2011, 64(6): 681 – 700.
- [16] CERRONE A, WAWRZYNEK P, NONN A, et al. Implementation and verification of the Park-Paulino-Poesler cohesive zone model in 3D [J]. Engineering fracture mechanics, 2014, 120(4): 26 – 42.
- [17] SPRING D W, PAULINO G H. A growing library of three-dimensional cohesive elements for use in ABAQUS [J]. Engineering fracture mechanics, 2014, 126: 190 – 216.
- [18] PARK K. Potential-based fracture mechanics using cohesive zone and virtual internal bond modeling [D]. Dissertations & theses-gradworks, 2009: 48 – 56.
- [19] PARK K, PAULINO G H, ROESLER J R. A unified potential-based cohesive model of mixed-mode fracture [J]. Journal of the mechanics and physics of solids, 2009, 57(6): 891 – 908.
- [20] SPRING D W, PAULINO G H. Computational homogenization of the debonding of particle reinforced composites; The role of interphases in interfaces [J]. Computational materials science, 2015, 109: 209 – 224.