

# 岩石 - 混凝土相互作用力学行为的数值模拟研究

刘小然<sup>1</sup>, 周宏伟<sup>1</sup>, 李 洪<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京校区) 岩石力学与分形研究所, 北京 100083; 2. 四川大学, 四川 成都 610065)

**摘要:** 针对大坝与坝基、坝肩与库岸相互作用机理, 在总结了几种典型接触单元基础上, 根据谢和平提出的两体力学模型, 采用有限差分程序 FLAC, 对岩石 - 混凝土接触界面在直剪作用下的力学性能进行了数值模拟, 研究了两体力学模型的破坏过程及不同接触面粗糙度对其整体力学性能的影响。结果表明, 两体力学模型破坏过程具有几个明显的不同阶段, 节理面粗糙度对其力学性能具有明显的影响。

**关键词:** 岩石力学; 岩石 - 混凝土界面; 接触单元; 两体力学模型; 节理面粗糙度

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)增 2 - 5648 - 04

## NUMERICAL SIMULATION OF INTERFACE BEHAVIOR IN ROCK-CONCRETE INTERACTION PROBLEM

LIU Xiao-ran<sup>1</sup>, ZHOU Hong-wei<sup>1</sup>, LI Hong<sup>2</sup>

(1. *Institute of Rock Mechanics and Fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;*

*2. Sichuan University, Chengdu 610065, China)*

**Abstract:** Based on the review of some classic interface elements, a twin-body model is offered for research on mechanical performance of interface between rock and concrete for the assessment of stability of concrete dam foundation. In this paper, FLAC, a finite difference program, is utilized to model the mechanical behaviors of rock-concrete and rock-rock interface with the action of compressive and shear loads. The stress, displacements and plastic zone distribution are obtained to explain the model failure and the effect of interface. Results show that some different stages happen in the damage process and the interface roughness has an obvious effect on the mechanical behaviors of the model.

**Key words:** rock mechanics; rock-concrete interface; interface elements; a twin-body model; interface roughness

## 1 引 言

工程体和地质体之间的相互作用一直是工程界研究的重要课题。高层建筑与地基基础的相互作用、大坝与坝基、拱坝与坝肩的相互作用等无不是各自领域研究的热点和难点。工程体和地质体的相互作用主要是通过接触界面来实现的, 因此接触界面的力学效应对地质体以及建立在地质体上的工程结构

的稳定性和安全性有较大影响。目前针对混凝土 - 岩石胶结面所进行的主要是试验研究。文[1]对三峡大坝建基面进行了 5 组混凝土与弱风化带下部岩石胶结面现场抗剪试验研究, 结果表明当剪切面起伏差从 0.2~0.3 cm 增加至 0.5~0.8 cm 时, 抗剪强度增加约 31%。文[2]通过现场试验, 比较系统的研究了粗糙度、混凝土强度和正应力对混凝土与基岩胶结面抗剪强度的影响。试验结果表明, 粗糙度不论对总的抗剪强度还是对摩擦系数  $f$  值均有显著影

**收稿日期:** 2005 - 02 - 23; **修回日期:** 2005 - 03 - 24

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707); 国家自然科学基金资助项目(10372112, 50221402); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目

**作者简介:** 刘小然(1979 - ), 女, 硕士, 2002 年毕业于石家庄铁道学院土木工程专业, 主要从事岩石力学数值计算方面的研究工作。E-mail: liuranny@163.com.

响。文[3, 4]通过室内试验研究了混凝土 - 软岩结构面的剪切行为。在试验中, 混凝土 - 岩石接触面被加工成一系列具有规则锯齿形及基于分形几何概念的非规则齿形糙度<sup>[5]</sup>, 而后进行常法向刚度下的直接剪切试验, 特别研究了混凝土 - 岩石及岩石 - 岩石结构面粗糙度对剪切强度及剪切特性的影响, 并根据试验中的观察及对试验结果的分析, 提出了模拟剪切行为的理论模型。

目前, 通常的研究中是将地质体与工程体的相互作用界面简化为平面接触问题, 然而实际工程中存在的接触面则为不规则曲面(图 1(a))。同时, 在以往的研究中多采用一体多介质模型进行研究, 即在数值计算中仅考虑材料的不同属性(图 1(b)), 然后进行模拟分析, 忽视了接触面对其附近一定区域力学性能的影响。为了更加真实地描述两体共同作用中的接触界面, 针对地质体和结构体的相互作用, 在谢和平提出的两体力学模型(图 1(c))的基础上, 利用有限差分程序 FLAC(fast Lagrangian analysis of continua)<sup>[6]</sup>进行数值模拟, 以系统研究两体接触面附近的应力、位移分布, 探索其在共同承载过程中的力学特征。

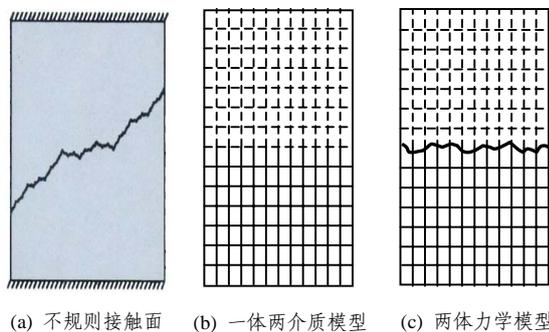


图 1 岩石 - 混凝土接触面类型  
Fig.1 Modes of interface between rock and concrete

## 2 不规则接触面力学性能研究

### 2.1 力学模型

两体力学模型如图 2 所示, 试样尺寸为 50 mm×100 mm(长×宽), 网格划分视实际情况而定, 接触面面貌则根据激光表面仪对真实粗糙表面测试所获得的数据构建而成, 其维数则利用覆盖法进行估算<sup>[7]</sup>。接触面采用 Goodman 节理单元进行模拟, 破坏准则则采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。模拟中网格划分如图 3 所示。

### 2.2 边界条件

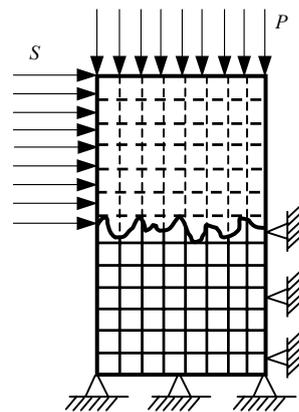


图 2 简化模型图  
Fig.2 Simplified model

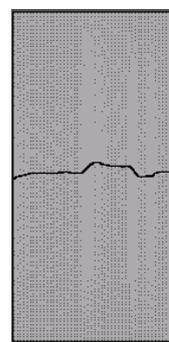


图 3 FLAC 网格划分  
Fig.3 FLAC mesh

在进行模拟计算时, 由于试件本身的尺寸很小, 边界条件与加载方式的变化对剪切面上应力和变形的大小、分布形态影响较大。根据实验室剪切实验装置, 将边界约束条件简化为位移约束边界, 即试件的下边界以及与侧边界的下半部分假定为固定铰支座。

### 2.3 加载方式

在模拟剪切试验的计算中, 采用的加载程序是: 首先施加法向载荷  $P = 10\ 000\ \text{kN}$ , 然后再从 0 开始分 30 级施加剪切载荷, 直至 60 MPa。

### 2.4 材料参数

模拟采用的材料参数见表 1。在结构面中, 法向刚度为 2.0 GPa/m, 切向刚度为 1.0 GPa/m。

表 1 数值模拟采用的材料参数  
Table 1 Parameters of materials

材料	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	粘聚力 $c/\text{MPa}$	抗拉强度 $T/\text{MPa}$	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
混凝土	26	0.167	25	3.0	1.8	24.5
岩体	35	0.220	35	2.0	5.5	27.0

### 3 结果分析

#### 3.1 节理的剪胀效应

岩石节理在切向载荷的作用下，将产生不同程度的剪胀效应，在模拟直剪试验中，计算得到试件的法向位移如图 4 所示。可见，当切向载荷较小时，法向位移随载荷的增加并没有明显的变化；当载荷达到一定值后，法向位移值随着载荷的增大而增加，说明仅当载荷较大时才产生剪胀效应，岩石节理的这种剪胀特性可用图 5 所示的微凸体接触模型来解释<sup>[8]</sup>。图中用两个正弦形状的微凸体来模拟一对接触的节理面，在法向力  $P$  保持不变的情况下，当剪切力  $S$  沿水平方向作用时，可沿其接触面的法线和切线方向分解  $S_n$  为和  $S_t$ 。当  $S$  较低时，切向力  $S_t$  还不足以克服接触处的粘接力，使微凸体产生滑移。此时在力  $P$  和  $S$  的共同作用下，微凸体沿法线方向产生变形，形成水平和垂直方向的位移，其垂直方向的位移也就是节理面的法向闭合量。随着剪切力  $S$  的增加，其切向分力  $S_t$  逐渐增加，引起接触面的

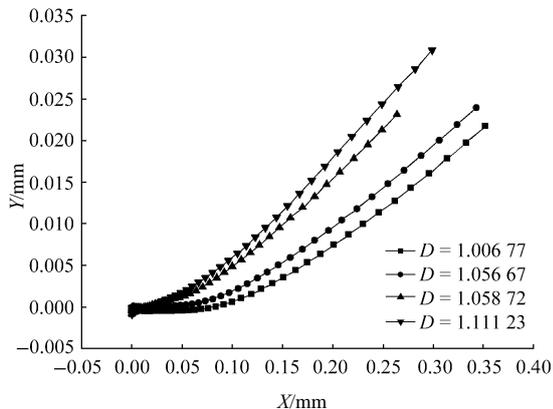


图 4  $P = 10 \text{ MPa}$  时的节理法向位移  
Fig.4 Normal displacement of joint

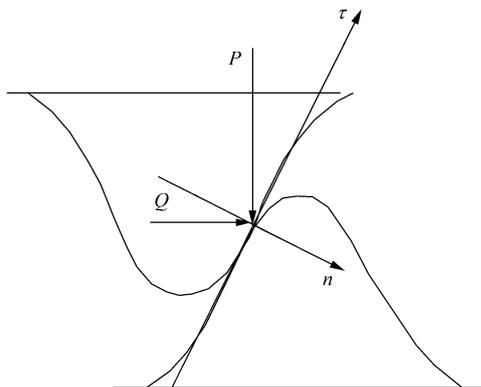


图 5 微凸体接触模型  
Fig.5 Model of convex-plane contact

剪应力增加，当剪应力超过接触面上的粘接力时，则开始产生剪胀效应。

#### 3.2 节理面的应力集中

图 6 给出了  $P = 8000 \text{ kN}$  时不同分形维数节理面的峰值剪应力  $\tau_{\max}$  与分形维数  $D$  间的变化关系曲线。对它们作回归分析，得到近似变化关系为

$$\tau_{\max} = \frac{1}{P_3 D^3 + P_2 D^2 + P_1 D + P_0} \quad (1)$$

式中： $P_0, P_1, P_2, P_3$  均为与外载荷有关的参数。

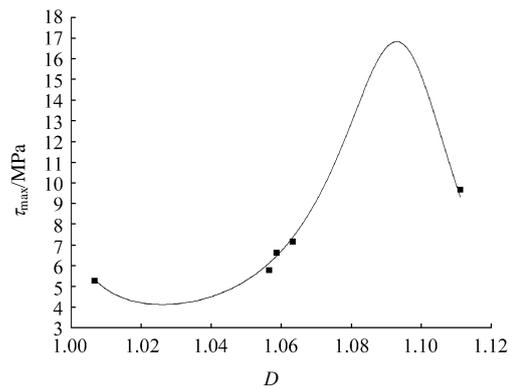


图 6 节理峰值剪应力与分形维数  $D$  的关系

Fig.6 Relationship between the  $\tau_{\max}$  of compression-shear joint and the dimension  $D$

由图 6 可知，曲线可分为 3 部分：

- (1) 在  $1.00 < D < 1.03$  段， $\tau_{\max}$  随着分形维数  $D$  的增加而缓慢减小；
- (2) 在  $1.03 < D < 1.09$  段， $\tau_{\max}$  随着分形维数  $D$  的增加而增加，并在  $D = 1.09$  左右取得最大值；
- (3) 在  $D > 1.09$  段， $\tau_{\max}$  随分形维数  $D$  的增加逐渐下降。事实上，随着分形维数  $D$  的增加，表面微凸体的分布密度越来越大，在剪切作用下，一些小的微凸体产生相互合并，形成较大的接触点，使接触处的曲率半径增大，从而使应力得到释放，导致峰值剪应力  $\tau_{\max}$  下降。

#### 3.3 外加载荷对节理剪切强度特性的影响

对模拟所得数据进行回归分析得到  $\tau_{\max}$  与法向压力  $P$  的关系，如表 2 所示。

由表 2 可知， $\tau_{\max}$  与  $P$  符合线性关系，其函数可写成通式： $\tau_{\max} = AP + B$ 。随着分形维数从 1.058 72 增至 1.078 96，方程斜率越来越小，说明  $\tau_{\max}$  随  $P$  增加的速度要小于较光滑节理对其的影响；当分形维数从 1.078 96 增至 1.013 839 时，其方程斜率又开始增大，说明节理的最大剪应力对外加载荷的变化更为敏感，和文[9]中所得结论较为一致。

表 2 最大剪应力和法向载荷关系数据表

Table 2 Correlation between  $\tau_{max}$  and the normal load

分形维数 $D$	拟合方程 $\tau_{max} = f(P)$	误差 $R$
1.058 72	$\tau_{max} = 0.215 1P + 5.013 8$	0.976
1.063 39	$\tau_{max} = 0.104 0P + 6.361 0$	0.989
1.078 96	$\tau_{max} = 0.171 3P + 4.558 8$	0.996
1.111 23	$\tau_{max} = 0.305 7P + 7.290 8$	0.981
1.138 39	$\tau_{max} = 0.407 1P + 6.561 3$	0.967

## 4 结 论

本文针对地质体和工程体的相互作用，建立了一体和一体相对应的具有锯齿形接触面的两体力学模型，并利用有限差分程序 FLAC 进行模拟，得到以下一些结论：

(1) 随着剪应力的逐渐增加，法向位移先减小后增大，产生剪胀现象。同时岩石 - 混凝土界面上产生相对位移，试块沿着接触面滑动；

(2) 通模拟直剪试验得到了峰值剪应力  $\tau_{max}$  与分形维数  $D$  之间的关系，变化呈非线性规律，并且在 1.09 左右取得最大值；

(3) 对于较光滑节理，分形维数  $D$  对  $\tau_{max}$  影响较大；随着  $D$  的增加，法向载荷对  $\tau_{max}$  的影响则逐渐占主导地位。

### 参考文献(References):

[1] 周火明. 三峡大坝混凝土与弱风化带下部建基面抗剪强度研究[J]. 长江科学院院报, 1994, 11(3): 52 - 56.(Zhou Huoming. Study of shear strength on dam foundation surface between concrete and substratum of weakly weathered zone at Three Gorges Damsite[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1994, 11(3):

52 - 56.(in Chinese))

[2] 林伟平, 田开圣, 曾广平. 混凝土与基岩胶结面抗剪强度的主要因素研究[J]. 水利学报, 1985, (10): 8 - 17.(Lin Weiping, Tian Kaisheng, Zeng Guangping. Study on main factors influencing shear strength of concrete-rock interface[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, (10): 8 - 17.(in Chinese))

[3] Seidel J P, Haberfield C M. Laboratory testing of concrete-rock joints in constant normal stiffness direct shear[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, 25(4): 1 - 14.

[4] Seidel J P, Haberfield C M. A theoretical model for concrete-rock joints subjected to constant normal stiffness direct shear[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39: 539 - 553.

[5] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. New York: W. H. Freeman, 1982. 16 - 32.

[6] Itasca Consulting Group, Inc.. Fast Lagrangian analysis of continua[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 1995.

[7] 谢和平. 分形 - 岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 291 - 358.(Xie Heping. Introduction to Fractal Rock Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996. 291 - 358.(in Chinese))

[8] 王金安, 谢和平, Kwasniewski M A. 剪切过程中岩石节理粗糙度分形演化及力学特征[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 2 - 9.(Wang Jin'an, Xie Heping, Kwasniewski M A. Fractal evolution of surface roughness and mechanical behavior of rock joints under shearing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 2 - 9.(in Chinese))

[9] 谢卫红, 谢和平, 李世平, 等. 分形节理力学性能试验研究[J]. 工程力学, 1997, 14(4): 128 - 138.(Xie Weihong, Xie Heping, Li Shiping, et al. Experimental study on mechanical properties of the fractal joints[J]. Engineering Mechanics, 1997, 14(4): 128 - 138.(in Chinese))