

文章编号: 1000-7598-(2008) 增-107-06

考虑破碎的堆石料颗粒流数值模拟

刘 君, 刘福海, 孔宪京

(大连理工大学 土木水利学院, 大连 116024)

摘 要: 以双江口 300 m 级高土石坝为工程背景, 根据有关资料的试验数据, 利用二维颗粒流计算机仿真技术对堆石料在一定围压下的颗粒破碎情况进行了数值模拟, 数值试样由 2 574 个簇颗粒单元组成。数值模拟与室内平面应变试验结果对比表明, 用选定的细观参数进行数值模拟与平面应变试验结果基本一致, 说明用颗粒流方法进行数值模拟能够较好的再现堆石料的颗粒破碎特性。与室内试验相比, 数值仿真模拟还能得到颗粒破碎的细观演化规律和破碎带的分布范围, 从而为进一步建立考虑颗粒破碎的堆石坝本构模型, 研究大坝填筑、水库蓄水过程以及地震情况下的颗粒破碎过程以及颗粒破碎所引起的坝体变形提供了一条途径。

关 键 词: 堆石料; 平面应变试验; 颗粒破碎; 颗粒流; 数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Particle flow code numerical simulation of particle breakage of rockfill

LIU Jun, LIU Fu-hai, KONG Xian-jing

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the related rockfill material tests, the particle flow code computer simulation technology was used to simulate the particle breakage characteristics of rockfill. 2 574 particle clusters were used in the simulation. The result of numerical simulation with the selected micro parameters was in agreement well with the result of plane strain laboratory test. So the numerical test can capture the micro phenomenon of particle breakage properly. Compared with the laboratory tests, the numerical simulation can also expose the regularity of evolution of particle breakage microscopically; and the location of the breakage zone. It can be used as the parameters and theoretical basis for the further study of building a rockfill dam model; and then observing the process of particle breakage during the expounding of the reservoir and during earthquakes. And also the displacements of the dam due to the particle breakage and the location of the breakage zone; and the influence on the strength of the rockfill can be researched furthermore.

Key words: rockfill; plane strain laboratory test; particle breakage; particle flow code; numerical simulation

1 引 言

我国拟在西南地区建设大量的高土石坝, 因此土石坝各项性质的研究尤为重要。堆石料具有压实性高、透水性强、抗剪强度高、沉降变形小、承载力高等工程特性, 广泛用于土石坝工程中。堆石料是由大小颗粒彼此充填而呈粒状结构的散粒体, 颗粒间常为点接触, 在压实和剪切等外力的作用下, 即使施加的能量和周围压力并不十分大, 也很容易发生颗粒破碎。堆石料的应力-应变关系、强度、体变和渗透性等都与应力变化引起的颗粒的完整性或

颗粒的破碎程度有关。根据一些已建的高堆石坝变形观测结果, 大坝的变形较大, 其主要原因就在于粗粒土在高压下重新分布以及颗粒破碎所引起的孔隙压缩。

本文对双江口 300 m 级高心墙堆石坝堆石材料进行研究。双江口堆石坝的堆石料经过人工爆破开采得到, 颗粒圆润度低, 颗粒多棱角, 并且坝体中最大竖向应力将达 6 MPa 以上, 横向应力也可达 3 MPa 左右, 在此情况下堆石料发生颗粒破碎的现象相对较为严重, 影响也较为显著。颗粒破碎情况是影响堆石料物理力学特性的重要因素。尤其是在高

收稿日期: 2008-07-24

基金项目: 国家自然科学基金 (No.50679093); 教育部创新团队发展计划 (No.IRT0518) 资助。

作者简介: 刘君, 男, 1972 年生, 博士, 副教授, 主要研究岩土工程的数值分析方法。E-mail: junliu@dlut.edu.cn

围压条件下, 由于堆石料的颗粒破碎使原有的级配发生变化, 代表粒径, 控制粒径、最大粒径趋于减小, 密实度或干密度增大, 孔隙率和抗剪强度降低。因此, 通过研究堆石料的颗粒破碎情况, 进而研究堆石坝在建设和运行的过程中, 特别是在发生地震条件下的颗粒破碎所引起的坝体变形, 以及破碎带的范围和破碎对堆石料强度等参数的影响是十分必要的。

国内外的一些学者都对堆石料的颗粒破碎进行了研究^[1-11], 但以往多注重于对颗粒破碎程度的影响因素及颗粒破碎对强度和剪胀特性的影响的分析, 且处于定性分析阶段, 很少考虑到对应力-应变关系等的影响。至于破碎对材料的宏观特性会产生什么样的影响, 以及如何在考虑破碎的情况下进行实际工程设计研究很少, 也成为一个新的发展趋势。

2 颗粒流模拟堆石的基本原理

二维颗粒流模拟是将每个颗粒简化成为一个圆盘状物体, 并且将若干个刚性圆盘颗粒连接形成簇颗粒单元, 通过改变圆盘颗粒的大小、数量及连接形式来得到不同大小及形状的簇颗粒单元, 组成簇颗粒单元的每 2 个接触的圆形颗粒中间赋予一定的法向与切向连接, 当颗粒所承受的法向或切向接触力大于其相应的连接力时连接便会断裂。以断裂的数目与总的连接数目的比值作为破碎率的定义。本文数值试验中簇颗粒单元由粒径相等的 7 个圆盘颗粒黏结而成, 每个簇颗粒单元具有 12 个初始黏结, 簇颗粒形状以及颗粒内部的连接情况见图 1, 图中的每个小圆代表组成簇颗粒的每个颗粒, 黑实线代表连接的存在。

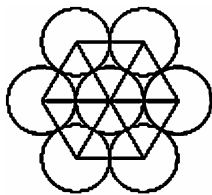


图 1 簇颗粒形状
Fig.1 Shape of cluster

3 颗粒流模拟的基本过程

3.1 数据来源

2 维颗粒流模拟从模拟的过程与性质上区分更接近于平面应变实验, 然而国内目前通常给出的是三轴试验的数据, 不能保证进行有效的数值模拟。Marsal^[12]详尽地研究了堆石料的力学性质。他对各

种岩性的堆石料进行了实验室试验研究, 其中选取的玄武岩试验试样的岩性与双江口堆石料岩性相同, 三轴试验研究结果也极为接近, 并且给出了堆石材料的平面应变与单颗粒劈裂试验以及试样破坏时破碎率的结果。平面应变试验可以为本文拟合应力-应变曲线提供数据, 而单颗粒的劈裂试验对本文选取堆石颗粒的连接力很有参考价值, 破碎率则为最终选取颗粒连接力提供依据, 本文采用 Marsal^[12]的试验数据研究双江口堆石材料的破碎特性。Marsal^[12]平面应变试验的应力-应变曲线结果如图 2 所示, 在各个围压下的应力-应变曲线均出现一定的软化现象。

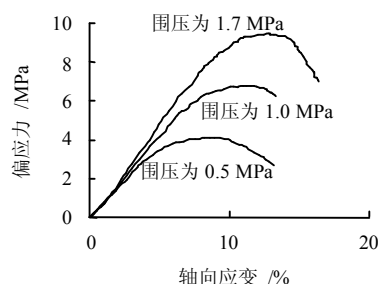


图 2 平面应变试验应力-应变曲线
Fig.2 The stress-strain curves for plane strain tests

3.2 数值模拟过程

数值模拟过程可以分为以下几个阶段:

(1) 在尺寸为 $6\text{ m} \times 15\text{ m}$ 的空间内按照均匀分布生成最小半径为 0.075 m , 最大半径为 0.1 m 的圆形颗粒, 控制初始孔隙率为 0.14 , 最终生成 $2\,574$ 个颗粒;

(2) 删除圆形颗粒, 并在原颗粒的位置生成与原颗粒粒径相等的簇颗粒;

(3) 让生成的颗粒集合在颗粒之间的相互作用下进行循环调整, 直至颗粒之间不再相互重叠并且集合体内部的平均不平衡力与最大不平衡力的比值维持在一定范围内为止;

(4) 通过伺服控制给试样施加指定的围压, 使试样在指定的围压下达达到一个稳定的初始状态;

(5) 给试样施加竖向应力, 加荷开始。

在加载的过程中, 试样的应力-应变信息将被记录下来, 发生的颗粒破碎情况也可以通过实时监测得到。

图 3 为模拟过程中生成的圆形颗粒数值试样与最终生成的簇颗粒数值试样模型图。圆形颗粒单元形状简单, 接触容易判断, 具有极高的运算效率。但是, 由于圆形与实际材料的形状相差较大, 颗粒之间的咬合作用太弱, 因此数值模拟结果很难达到

与实际材料的宏观特性相符合的结果。相对于圆形颗粒，簇颗粒单元能够产生更多的点接触，咬合作用有了很大的加强，在形状上也更接近颗粒的真实形状，比圆形单元更能直观地反应堆石材料的宏观特性，因此选择簇颗粒形状进行研究具有很大的优越性。

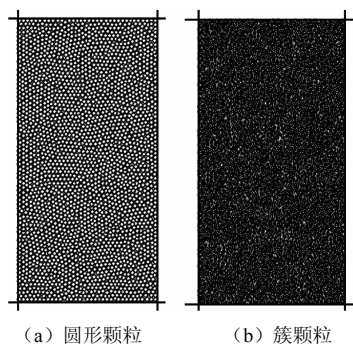


图3 数值试样模型图

Fig.3 The model of numerical sample

3.3 细观参数选取

进行颗粒流模拟时需要确定的细观参数有：墙的法向刚度 K_n ，切向刚度 K_s ，颗粒的法向刚度 k_n ，切向刚度 k_s ，摩擦系数 f ，加载速度 v ，颗粒的密度 ρ ，颗粒的法向连接力 b_n ，切向连接力 b_s 。

(1) 颗粒的法向与切向刚度主要对试样的初始弹性模量有很大影响，对试样的峰值强度也有一定影响，一般取为 1×10^8 N/m。以此为基础，在此数值附近进行调整。墙的法向与切向刚度可取与颗粒相同的数值；

(2) 摩擦系数对试样的峰值强度影响很大，并且摩擦系数越大，软化现象越明显，因此摩擦系数是使模拟试样应力-应变曲线与实际曲线的趋势和数值大小一致的主要调整因素；

(3) 加载速度对结果的影响不是很大，一般在 1.0 m/s 左右调整；

(4) 颗粒的法向连接力 b_n ，切向连接力 b_s 是影

响颗粒破碎率的主要因素，其数值大小可以运用单轴压缩试验来确定。簇颗粒间赋予一定的连接力，控制顶墙的速度使颗粒在指定的荷载下压缩，不断改变连接力的大小，直至颗粒发生破碎，记录颗粒发生破碎时的临界连接力，在这个数值附近调整连接力大小，使数值结果能够满足破碎率的要求。模型图以及压缩结束颗粒发生破坏后的图形如图 4 所示，图中的黑实线代表由于颗粒发生破碎产生的裂隙。

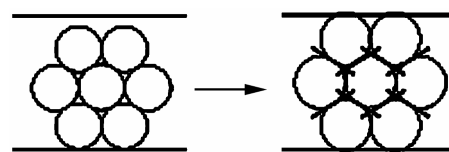


图4 压缩试验示意图

Fig.4 Demonstration for the compression test

经过反复调整发现，用一套固定的细观参数来反映多个围压下材料的宏观特性是不可能的。颗粒的刚度以及连接力随着围压的改变呈现一定的变化。由于高围压区域较多，因此优先考虑选择满足高围压的细观参数，再调整低围压下的结果。经过反复调整，最终选取的细观参数见表 1。

表1 数值模拟细观参数汇总表
Table 1 Values of micro parameters of numerical simulation

围压 /MPa	k_n /(10^8 N/m)	k_s /(10^8 N/m)	b_n /(10^2 kN)	b_s /(10^2 kN)	f	v /(m/s)	ρ /(kg/m ³)
0.5	4	4	2.5	2.5	1.0	1.5	2 070
1.0	6	6	4	4	1.0	1.5	2 070
1.7	10	10	5	5	1.0	1.5	2 070

4 数值模拟结果分析

4.1 数值模拟与平面应变实验结果对比

在选定的细观参数下进行模拟得到的应力-应变曲线对比如图 5 所示。在高围压下曲线拟合较

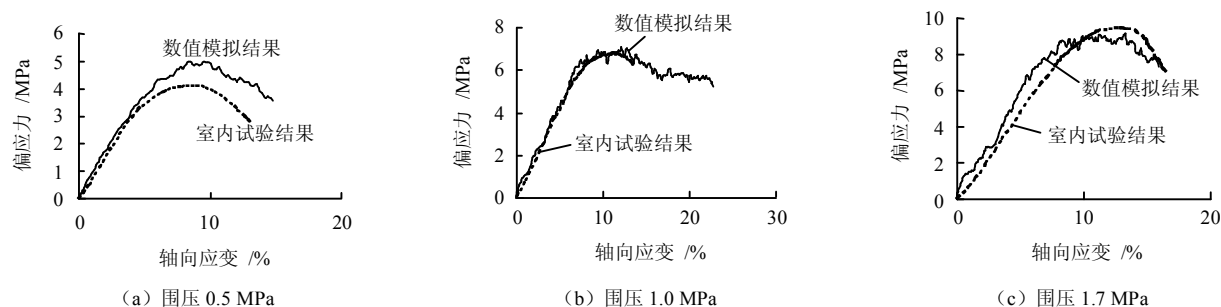


图5 数值试验与室内试验结果对比

Fig.5 Comparison of results between numerical test and lab test with confining pressure

好, 在低围压下模拟曲线与试验曲线有一定偏差, 模拟得到的曲线比室内试验得到的曲线峰值强度略高, 但是趋势基本一致。考虑到在一个堆石坝中低围压区域较少, 并且颗粒破碎大多发生在坝体中下部的高围压区域, 因此选取的微观参数可以认为能够反映双江口堆石料的宏观应力应变特性。

每种围压作用下进行数值模拟得到的试样达到峰值强度时的破碎率与室内试验得到的破碎率的对比见表 2, 表中的断裂键数代表发生破坏的连接数目, 破碎率指的是断裂的连接数目与总的连接数目的比值。由表中数据可以看出, 数值模拟得到的破碎率与室内试验得到的破碎率误差很小。

表 2 数值模拟与室内试验破碎率对比表

Table 2 Comparison of breakage rate between numerical tests and lab tests

围压 σ_3 /MPa	数值模拟结果		室内试验结果
	断裂键数	破碎率 /%	破碎率 /%
0.5	2302	7.5	7.9
1.0	2442	7.9	8.6
1.7	4347	14.1	14.4

由上述分析可知, 表 1 所提供的细观参数可以满足反映实际材料宏观特性的要求, 选择参数是合理的。

4.2 细观参数的拟合

由表 1 可以看出, 颗粒的刚度、簇颗粒内部的连接力是影响材料宏观特性的重要因素。围压与颗粒的刚度、连接力均存在一定的关系, 因此在以后的模拟中需要根据不同区域的围压来确定不同区域的颗粒刚度、连接力等。根据模拟所选取的细观参数, 围压与颗粒的刚度之间的关系以及围压与连接力之间的关系如图 6 和图 7 所示。

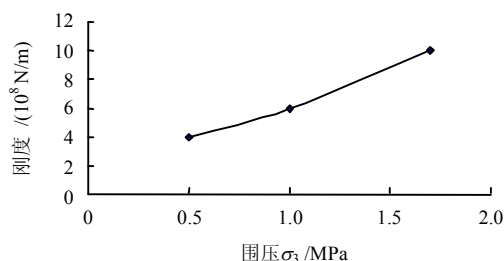


图 6 围压与颗粒刚度关系曲线

Fig.6 The curve between confining pressure and particle stiffness

根据选取的参数用 Lagrange 二次插值公式拟合曲线方程分别为

$$\left. \begin{aligned} K &= 1.43\sigma_3^2 + 1.86\sigma_3 + 2.71; \\ B &= -1.31\sigma_3^2 + 4.96\sigma_3 + 0.35 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: K 为颗粒的刚度; B 为连接力; σ_3 为围压。

经过上述分析, 可以根据式 (1) 确定整个坝体颗粒刚度和连接力, 再加上其余固参数, 就可以为土石坝颗粒流模拟提供一套完整的参数选取。

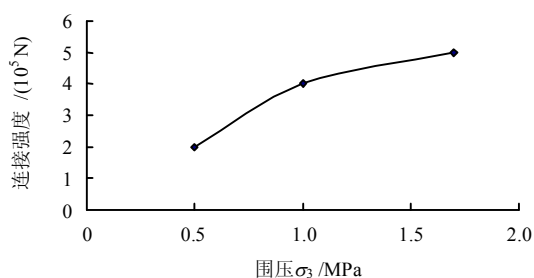


图 7 围压与颗粒连接力关系曲线

Fig.7 The curve between confining pressure and particle contact bond

4.3 拟合参数合理性验证

为了验证拟合参数的合理性, 取围压 σ_3 为 1.3 MPa 和 2.0 MPa, 利用式 (1) 计算的参数结果进行数值模拟, 最终选择的细观参数见表 3。

表 3 拟合参数合理性验证细观参数汇总表

Table 3 Values of micro parameters for the verification

围压 σ_3 /MPa	k_n /(10^8 N/m)	k_s /(10^8 N/m)	b_n /(10^2 kN)	b_s /(10^2 kN)	f	v /(m/s)	ρ /(kg/m ³)
1.3	7.54	7.54	4.58	4.58	1.0	1.5	2 070
2.0	12.2	12.2	5.03	5.03	1.0	1.5	2 070

利用选择的细观参数进行模拟的应力-应变曲线与围压为 1.0 MPa 和 1.7 MPa 曲线对比, 结果如图 8 所示。当 $\sigma_3 = 1.3$ MPa 时, 数值模拟得到的应力-应变曲线应该位于 1.0 MPa 与 1.7 MPa 之间, 当 $\sigma_3 = 2.0$ MPa 时, 数值模拟得到的曲线应该位于 1.7 MPa 曲线的上方, 并且随着围压的升高, 试样的初始刚度应该有所提高, 几条曲线的趋势也应大致相同。图 8 的结果满足这些推论。图 9 为模拟试样各个围压下得峰值强度关系图, 可见插值参数得到得围压与选定参数得到的结果有较好的线性关系。

选定的围压下试样达到峰值强度时的破碎率与 σ_3 为 1.0 MPa 和 1.7 MPa 时的破碎率的对比见表 4。当 $\sigma_3 = 1.3$ MPa 时得到的破碎率应该介于 1.0 MPa 与 1.7 MPa 之间, $\sigma_3 = 2.0$ MPa 时得到的破碎率应该大于 1.7 MPa 的破碎率, 表 4 的数据验证了这一推论。

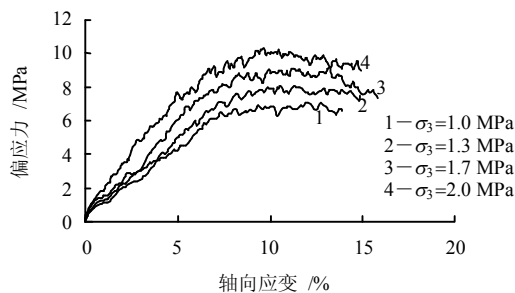


图 8 验证拟合参数结果对比

Fig.8 Comparison of results between numerical tests for the verification and lab tests

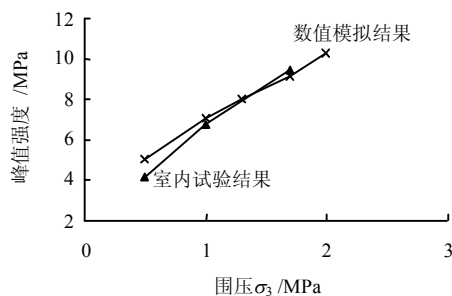


图 9 围压与试样峰值强度关系曲线

Fig.9 Curves between confining pressure and peak strength

表 4 数值模拟与室内试验破碎率对比表

Table 4 Comparison of breakage rate between numerical tests and lab tests

围压 σ_3 /MPa	断裂键数	破碎率 /%
1.0	2 442	7.9
1.3	2 844	9.2
1.7	4 347	14.1
2.0	5 356	17.3

由上述分析可知, 式(1)得到的数据在趋势上符合材料的实际属性, 拟合公式是合理的。

4.4 体积应变的变化

数值模拟过程中随着轴向应变的增加体积应变的变化与偏应力的变化对比见图 9, 可见堆石料在平面应变试验中呈现先剪胀后剪缩的趋势, 由于颗粒的咬合作用剪切时颗粒互相干扰, 为了产生相对的剪切位移, 颗粒必须相互翻越或抬起, 这是土体产生剪胀的主要原因。试样的剪胀性在强度达到峰值之前停止而后变为剪缩。

表 5 为图 10 中虚线所示几个应变时刻的破碎率统计情况。在压缩的初始阶段只发生很少的破碎, 大量的破碎开始于峰值强度出现的前刻, 之后颗粒破碎便以较大的速度持续增长。出现大量的破碎后堆石料的体积应变便由剪胀变为体积收缩, 这也是汶川“5.12”大地震中紫坪铺大坝坝体上下游边坡均向内部收缩, 坝体断面变小的原因^[13]。

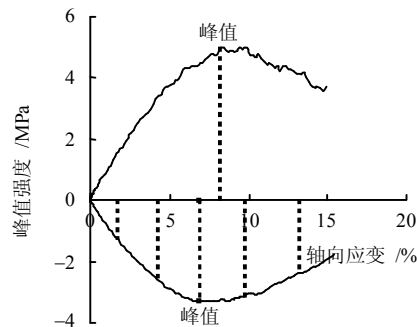


图 10 体积应变和偏应力对比曲线 (0.5 MPa)

Fig.10 Comparison of results between volume strain and deviator stress

表 5 数值模拟过程破碎率变化表 ($\sigma_3 = 0.5$ MPa)

Table 5 Variation of breakage rate during numerical test

应变 /%	断裂键数	破碎率 /%
1.7	11	0.03
4.2	531	1.71
7.0	2 103	6.8
9.7	3 356	10.8
13.2	6 158	14.8

4.5 颗粒破碎的发展过程及剪切带的形成

叶朝汉^[14]研究认为, 剪切带是应变局部化导致的变形集中区域, 是由微观变形发展到宏观变形的一个过程, 土体的损伤导致剪切带的产生, 损伤的位置决定了剪切带的形状。

在进行数值模拟的过程中, 颗粒破碎首先发生在与墙接触的位置上, 然后逐渐往中间发展, 最终破碎大多发生在一个‘X’形的区域范围内, 如图 11 所示, 图中 $\sigma_3 = 1.0$ MPa, 黑色短线表示由于切向接触力超过颗粒切向连接力而破裂, 而白色短线表示由于法向接触力超过颗粒法向连接力而破裂, 颗粒破碎以切向破裂为主。在 $\sigma_3 = 1.0$ MPa 时当试样达到峰值强度时, 总破裂数为 2 442 个, 切向破裂为 1 853 个, 占破裂总数的 75.9 %, 因此堆石料破坏以剪切破坏为主。

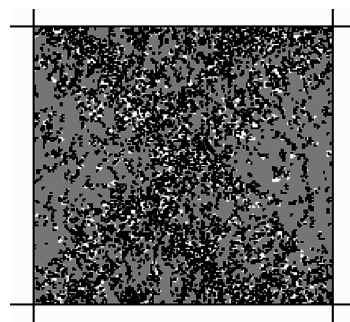


图 11 达到峰值强度时颗粒破裂的位置分布

Fig.11 Distribution of bonding breakage when reach peak strength

图 12 为试样达到峰值强度时颗粒位移场的分布情况, 图中 $\sigma_3 = 1.0 \text{ MPa}$, 黑色箭头为位移矢量。可以看到颗粒在一个‘X’形区域上发生明显的旋转和滑移。这个区域的形状与颗粒破碎所形成的‘X’形区域相同。对比叶朝汉^[14]的研究结果, 这个‘X’形区域即为剪切带, 大致呈 45° 的倾角, 这与 Marsal^[13]的结论: 堆石料在平面应变试验中大致沿 45° 角的平面发生破坏是一致的。这个剪切带的形成主要是由于应变局部化导致的变形集中, 进而引起土体严重损伤破碎所形成的。

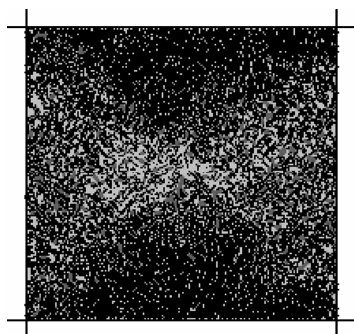


图 12 试样达到峰值强度时的位移场分布
Fig.12 Distribution of displacement vector when reach peak value

4.6 数值试样接触力的传递

数值模拟相对于室内试验的一大优势为可以直观的得到某些变量的变化过程, 例如可以追踪接触力的大小和传递路径。图 13 为与图 11 相对应时刻的接触力的传递路径, 图中 $\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$, 黑实线的粗细代表了接触力的大小。可以看出, 接触力的分布与颗粒破碎的位置呈现相同的趋势, 因此, 接触力的变化是引起颗粒发生破碎的最主要的因素。

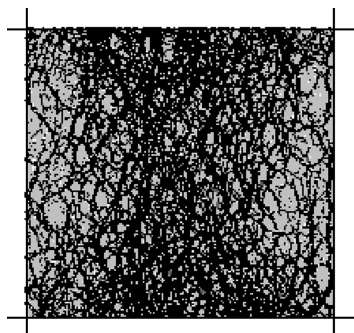


图 13 颗粒破碎时接触力分布
Fig.13 Distribution of contact force during breakage

5 结 语

以双江口 300 m 级高土石坝为工程背景, 根据文献[12]提供的相关数据, 利用颗粒流方法对堆石

料在一定围压下的颗粒破碎情况进行了数值模拟。结果表明, 选定的细观参数能够反映双江口堆石料的宏观特性, 为下一步建立堆石坝模型, 研究坝体填筑和水库蓄水过程中以及在发生地震情况下的颗粒破碎过程, 研究颗粒破碎所引起的坝体变形, 以及破碎带的范围和破碎对堆石料强度等参数的影响提供了参数依据。

本文所涉及的参数都是经过长时间反复调整的结果, 但部分结果仍存在一定的偏差, 选择其他的颗粒组合形式, 或者采用多种组合形式相混合的试样可能能够改善这种状况。

参 考 文 献

- [1] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水利学报, 1987, (5): 59—66.
- [2] 柏树田, 崔亦昊. 堆石的力学性质[J]. 水力发电学报, 1997, (3): 21—30.
- [3] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 562—566.
- [4] 郭熙灵, 胡辉, 包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 83—88.
- [5] 梁军, 刘汉龙, 高玉峰. 堆石蠕变机理分析与颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 479—483.
- [6] SEBASTIAN Lobo-Guerrero, LUIS E, Vallejo. Discrete element method evaluation of granular crushing under direct shear test conditions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(10): 1 295—1 300.
- [7] ROBERT W. Day. Significance of particle crushing in granular materials-discussion[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*
- [8] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALA K, GUPTA A K. Testing and modeling two rockfill materials[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(3): 206—218.
- [9] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 661—665.
- [10] OLIVIER Tsoungui, DENIS Vallet, JEAN-Claude Charmet. Numerical model of crushing of grains inside two dimensional granular materials[J]. *Powder Technology*, 1999, 105: 190—198.
- [11] DELUZARCHE R, CAMBOU* B. Discrete numerical modelling of rockfill dams. International journal for numerical and analysisal methods in geomechanics[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30: 1 075—1 096.
- [12] MARSAL R J. Mechanical Properties of Rockfill[M]. (Embankment-dam Engineering) Casagrande, Hirschfeld RC, Poulos SJ (eds). New York: Wiley, 1973: 109—200.
- [13] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 795—801.
- [14] 叶朝汉. 软土剪切带试验及其应用的研究[博士论文 D]. 上海: 同济大学, 2007.