

· 综 合 ·



基于FEMDEM的斜坡堤护面块体破坏的数值模拟

蔡波, 任冰, 王国玉

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对斜坡堤人工护面块体发生的接触碰撞问题, 应用有限元离散元耦合法(FEMDEM)探讨了护面块体的碰撞应力、裂缝形成以及断裂过程。算例结果表明: 断裂破坏通常发生在边界转角及角点, FEMDEM能有效地模拟连续介质向非连续介质的转化过程。

关键词: FEMDEM; 护面块体; 裂缝; 断裂; 接触检索

中图分类号: U 656.2[†]

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0013-05

Numerical simulation of failure of armour blocks of breakwater based on FEMDEM

CAI Bo, REN Bing, WANG Guo-yu

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: According to the contact impact happening among the armor blocks of rubble mound breakwater, we probe into the collision stress, crack formation and fracturing process of armor blocks with the FEMDEM. It is found that the fracture and failure generally occur in the outer edges corner or angular point, and FEMDEM is an effective method for simulating the transition from continuous medium to the noncontinuous medium.

Key words: FEMDEM; armor block; crack; fracture; contact detection

人工块体护面斜坡堤是海岸工程常见结构形式, 采用抗浪性能好、稳定性高的人工混凝土大块体做护面层, 块体预制过程中一些连接部位较弱, 在风暴灾害、疲劳损伤条件下易发生大位移和滚动以致发生碰撞破坏。

国内外关于斜坡堤护面块体的研究大多基于物理模型方面, 如Hudson公式和Van Der Meer公式, 主要考虑斜坡堤整体结构的稳定性。数值模拟方面, 如高睿^[1]建立了CSPM-R和DEM耦合模型模拟波浪与斜坡堤护面块体相互间的作用, Gotoh^[2]采用DEM-MPS耦合的二维数值模型研究了沉箱抛石基床上规则排列的矩形护面块体的稳定性。数值模拟更为精细地跟踪了块体的运动, 但是难以处理块体变形甚至块体间碰撞破碎断裂问

题, 关于这方面的工作国内外开展较少。

Munjiza首次提出解决固体断裂破碎的数值方法FEMDEM(The combined Finite-Discrete Element Method)^[3], 该方法在结构断裂破碎的瞬态动力学问题取得了应用^[4-5]。

根据工程实际, 在混凝土材料的各向同性假设下, 采用FEMDEM探讨了护面块体接触碰撞时的应力分布、裂缝形成及断裂过程。在建立起的斜坡堤规则摆放护面块体, 讨论了滑移碰撞过程中的应力集中问题以及块体间碰撞破坏时裂缝扩展规律。

1 FEMDEM基本原理

1.1 运动方程

FEMDEM基于牛顿第二定律的运动方程, 考

收稿日期: 2013-04-01

作者简介: 蔡波(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事离散元及FEMDEM在斜坡堤护面块体稳定性应用的研究。

虑质点的质量阻尼，任一节点的运动方程为：

$$mu''(t)+\alpha mu'(t)=F \quad (1)$$

式中： m 为质量； α 为质量阻尼系数； u'' ， u' 分别为加速度，速度； F 为节点力。

FEMDEM采用常应变单元，节点质量取其所属单元面质量的1/3，对上式采用显式的一阶中心差分法，迭代计算得到各个时刻节点加速度、速度、位移，并得到单元应变应力。

1.2 接触力计算

单元接触对的接触力计算采用罚函数法，假定两个块体发生接触，相互渗透产生接触力。

如图1所示三角形单元接触对，每一个三角形单元定义一个势能函数 φ ， $\varphi(P)=\min\{3A_0/A, 3A_1/A, 3A_2/A\}$ ，其中单元接触时势能函数值在单元边上为0，形心处为1，不接触时势能函数恒为0。三角形单元渗透接触力采用分布接触力，表达式为：

$$f_{c,AB} = \frac{v}{v^2} \int_0^L p\varphi(x)dx \quad (2)$$

式中： p 为罚系数项； L 为GH边的长度； $\varphi(x)$ 为势函数； v 为接触边法向量。

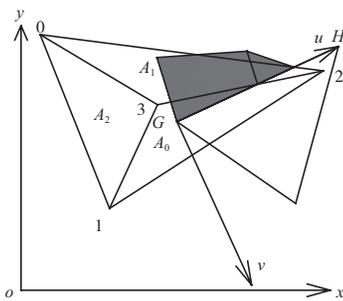


图1 罚函数分布接触力

2 虚拟裂缝模型

块体开裂采用虚拟裂缝模型，将断裂过程区

视为能传递应力的假想裂缝，在微裂缝区可以传递部分拉应力，力学效果相当于扩展裂缝受到一个起粘聚闭合作用的分布约束力，即虚拟裂缝区粘聚力 σ_c ，大小采用虚拟裂缝模型的双线性软化本构关系（即粘聚应力与裂缝张开位移关系）确定，传递的应力大小随张开位移 ω 的增加而减小（图2）。

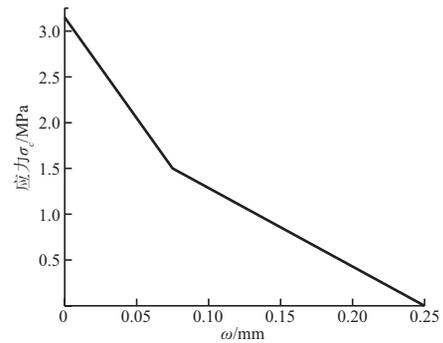


图2 双线性应变软化应力-裂缝宽度曲线

3 算例验证

3.1 模型及参数

图3所示为4点对称支撑的混凝土梁的计算模型，假定混凝土梁各向同性，正方形冲击块撞击梁中心。采用虚拟裂缝模型（相关计算参数见表1），开展两个数值试验：1）冲击块初始速度2 m/s，对比分析梁的动力响应；2）冲击块初始速度6 m/s，梁的裂缝扩展。

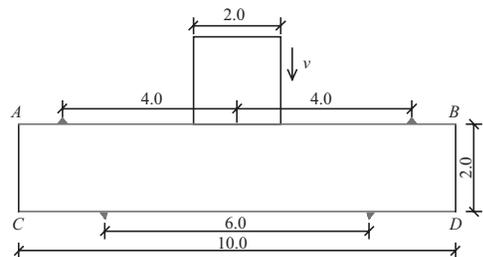


图3 4点支撑混凝土梁几何模型(单位：m)

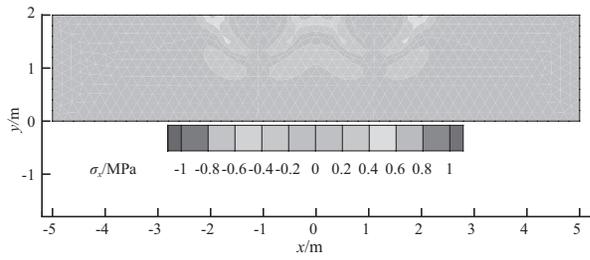
表1 模型材料参数

材料	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	Lame第一参数 λ/GPa	Lame第二参数 μ/GPa	抗拉强度 f_t/MPa	抗剪强度 f_s/MPa	断裂能 $G_f/(J \cdot m^{-1})$	罚系数 Pe/GPa	裂缝临界值 ω_{max}/mm
混凝土	2.4	5.68	11.03	3.15	3.15	3.0e+2	100	0.25
冲击块	3.0	5.68	11.03	3.15	3.15	3.0e+12	100	0.25
支座	20.0	5.68	11.03				100	

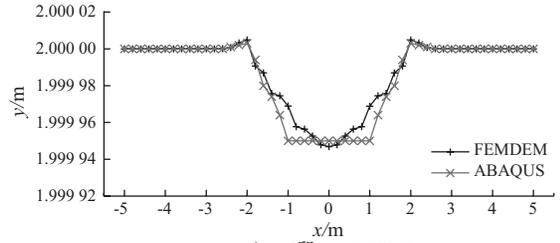
3.2 动力响应

3个时刻下的应力云图、AB和CD段挠度曲线

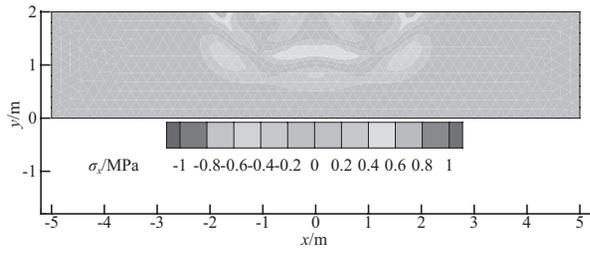
对比见图4，5。



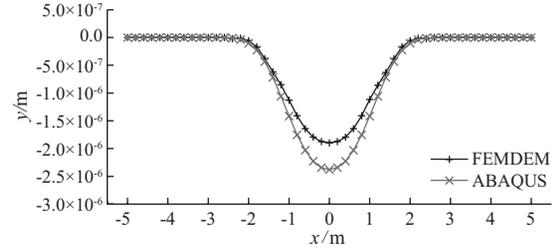
a) FEMDEM $t=0.0005\text{ s}$



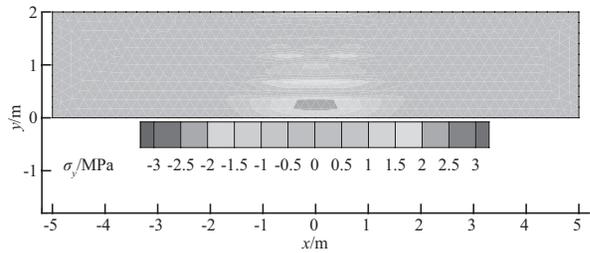
a) AB段 $t=0.0005\text{ s}$



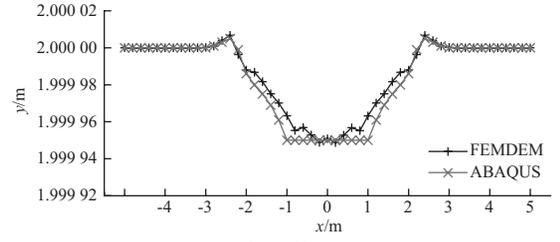
b) ABAQUS $t=0.0005\text{ s}$



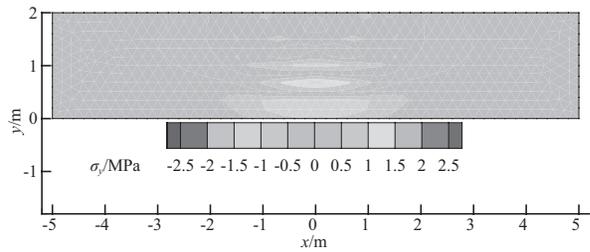
b) CD段 $t=0.0005\text{ s}$



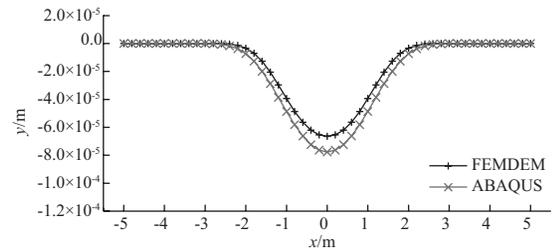
c) FEMDEM $t=0.0007\text{ s}$



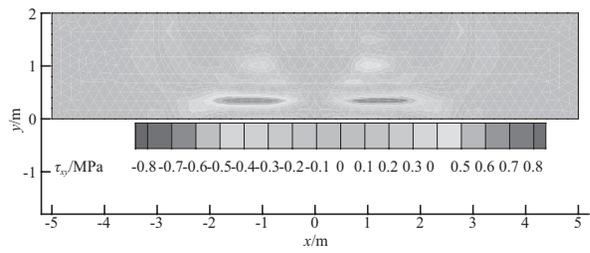
c) AB段 $t=0.0007\text{ s}$



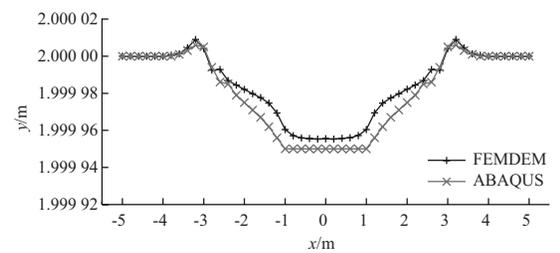
d) ABAQUS $t=0.0007\text{ s}$



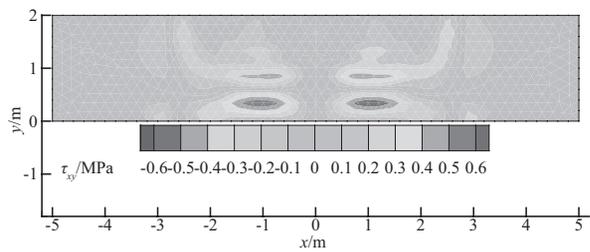
d) CD段 $t=0.0007\text{ s}$



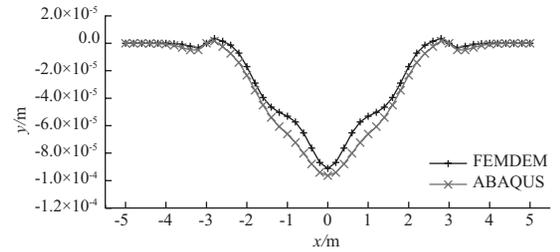
e) FEMDEM $t=0.0011\text{ s}$



e) AB段 $t=0.0011\text{ s}$



f) ABAQUS $t=0.0011\text{ s}$



f) CD段 $t=0.0011\text{ s}$

图4 不同时刻下FEMDEM和ABAQUS应力云图对比

图5 不同时刻下FEMDEM和ABAQUS的挠度曲线对比

通过数值算例分析梁应力应变的动力响应, 可知其趋势及幅值基本一致, 说明FEMDEM能有效模拟动荷载下的动力响应过程。

3.3 梁裂缝扩展

基于上文算例的验证, 梁通常在拉应力较大处首先发生裂纹并沿拉应力较大处扩展。

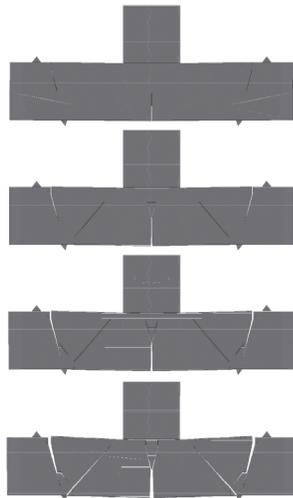


图6 裂缝扩展过程

计算结果表明, 裂缝及断裂面基本呈现左右对称, 属于拉应力破坏, 这和一般混凝土简支梁冲击荷载下的破坏形式类似。从顶部支座附近开始形成沿梁底部两支座对称发展的裂缝断裂面, 这是由于支撑点处的约束产生的反向力矩导致。冲击物块作用初始阶段, 在梁底部拉力较大处首先出现不明显的微裂缝区, 冲击的加强使微裂缝区发展越充分, 单元间传递的粘聚力也越低, 直至降为零时表现为宏观裂缝。FEMDEM引进虚拟裂缝模型有效地模拟了冲击荷载下混凝土梁的破坏过程。

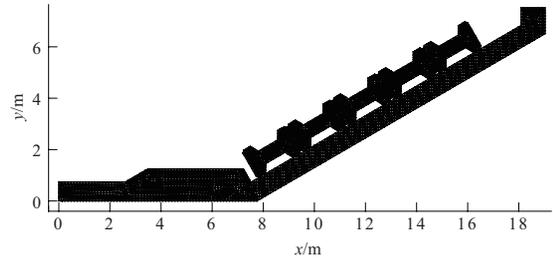
4 护面块体的FEMDEM模拟

4.1 数值算例

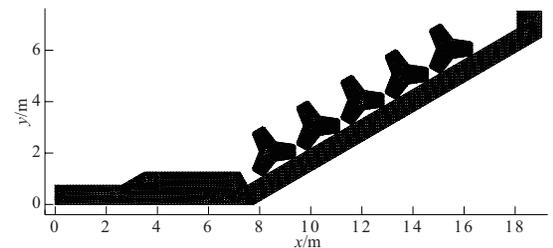
斜坡堤护面层为多个连续介质人工混凝土块体组成的离散元系统, 每个块体均可产生变形、裂缝甚至断裂。初步考察斜坡堤规则摆放块体自重下滑移过程相互碰撞时的应力集中区域; 进一步探讨块体间碰撞裂缝的形成。

如图7所示, 斜坡角 $\beta=30^\circ$, 简化的四角空心方块尺寸为 $2.0\text{ m} \times 1.2\text{ m}$, 四角锥体和扭王字块体

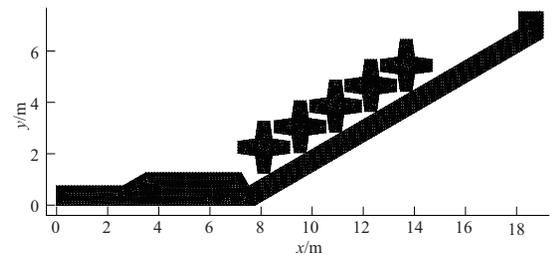
的外接圆半径均为 2.0 m , 块体初始速度为零, 自重下滑移碰撞, 计算结果见图8。



a) 四角空心方块

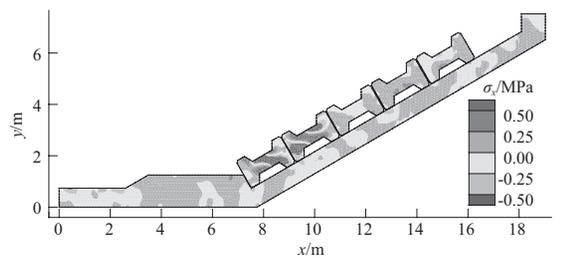


b) 四角锥体

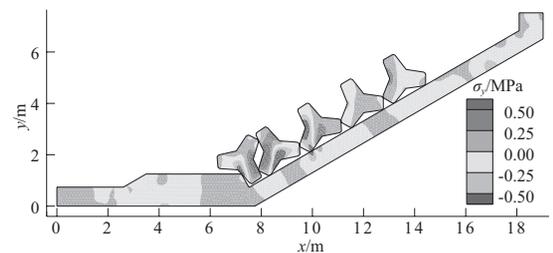


c) 扭王字块体

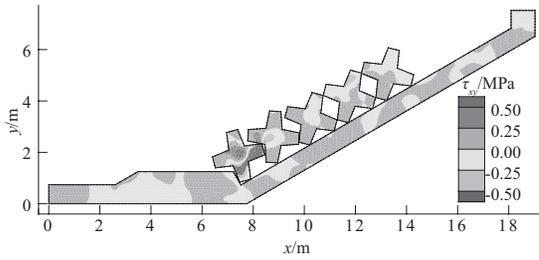
图7 斜坡堤护面层单元划分



a) 四角空心方块 $t=0.4875\text{ s}$



b) 四角锥体 $t=2.2750\text{ s}$

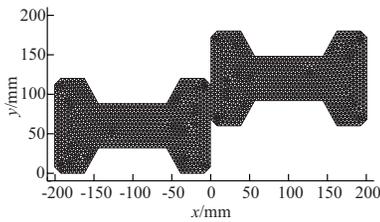


c) 扭王字块体 $t=0.9625\text{ s}$

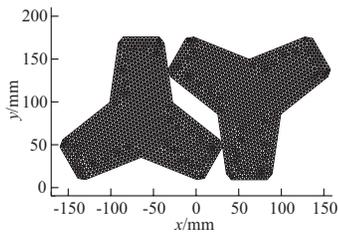
图8 块体不同时刻下的应力分布

整体的滑移碰撞过程中, 应力较大值集中在护面块体外边界转角处以及角点处。由图8可见, 四角空心方块应力集中于中段转角, 拉压应力峰值贯穿中段; 四角锥体细长部分出现拉压应力峰值大致对称分布; 扭王字块通常在细长部分连接中心处出现较大应力。

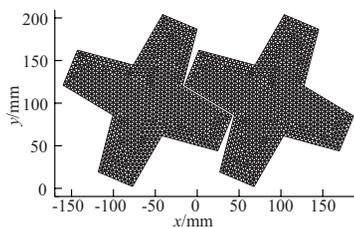
实际工程中, 可知当块体受到较大波浪荷载的冲击, 具备一定的速度发生碰撞, 会在转角处首先产生裂缝并导致断裂破坏。为了进一步考察裂缝形成及断裂破坏, 分别讨论护面块体间以3 m/s的水平相对速度碰撞情形。图9为块体的单元划分情况。



a) 四角空心方块



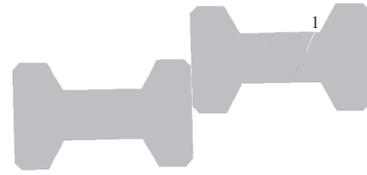
b) 四角锥体



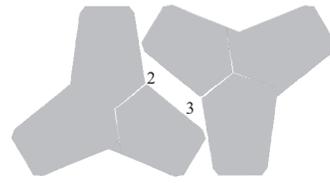
c) 扭王字块体

图9 块体单元划分

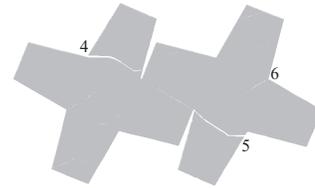
如图10所示的裂缝始点位置为1, 2, 3, 4, 5, 6, 分别取该6点位置处刚刚产生实际裂缝时的应力值, 如表2所示。



a) 四角空心方块



b) 四角锥体



c) 扭王字块体

图10 护面块体断裂破坏过程

表2 裂缝点处的应力

块体类型	裂缝始点	拉应力 f_t /kPa	剪应力 f_s /kPa
四角空心	1	3 897.046 9	109.742 4
	2	7 137.750 7	246.339 1
四角锥体	3	6 513.723 6	389.565 9
	4	7 250.263 5	3 546.124 7
扭王字块	5	6 562.698 6	3 224.269 0
	6	3 273.667 4	427.568 2

表2表明, 裂缝多为拉应力导致, 而实际混凝土件最应避免拉应力的出现, 并且与主块体连接的细长部位易出现更大剪切力, 如扭王字块发生了剪切破坏, 四角锥体较四角空心方块剪切力更大。由图8可知, 撞击过程中护面块体边界转角处应力值较大, 拉应力过大导致该部位产生局部微裂缝, 并沿着最大拉应力方向进一步扩展延伸, 当单元节点的间距达到裂缝临界值时形成可见的宏观裂缝, 体现为局部拉伸破坏; 随着冲击荷载作用的加强, 裂缝大范围延伸, 并沿着主块体朝着转角处扩展, 甚至贯穿块体, 导致断裂的子块体脱离原来护面块体主块体。

(下转第29页)