

# 基于 CDEM 的高桩码头在地震作用下破坏模式数值模拟研究

陆晶晶<sup>1</sup>, 李承亮<sup>2</sup>

(1.中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2.中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 将有限体积法(FVM)与基于连续介质的离散元方法(CDEM)相结合, 模拟了高桩码头在地震作用下的破坏模式。在验证了基于有限体积法的 CDEM 方法可行的基础上, 选取了实际的高桩码头模型, 采用 EL-centro 波模拟高桩码头在波动作用下的破坏演化过程, 同时提取了梁顶关键的位移进行了详细的分析, 得出了破坏过程的位移逐步变化, 为高桩码头考虑地震作用的设计提供了有价值的技术参考。

**关键词:** CDEM; 高桩码头; 地震作用; 数值模拟

## 1 研究背景

近年来我国地质灾害频发, 据最新数据统计, 2010 上半年, 全国地质灾害数量是去年同期的近 10 倍。地震由于其不可预测和破坏力大等特点, 是引发诸多地质灾害的主要因素之一, 严重影响着国民生命财产的安全。港口码头作为国内外货物进出口贸易的重要渠道, 突发性的地震往往会造成国民经济的重大损失。高桩码头是我国淤泥质海岸及河口地区普遍采用的一种码头结构形式<sup>[1]</sup>, 其承台式的结构对荷载变化的适应能力较差, 尤其是对于地震波产生的强大冲击力往往会造成灾难性的破坏, 直接影响了码头的正常使用安全。

为了能够真实地模拟破坏的渐进演化过程, 中国科学院力学研究所研究开发了 CDEM 方法<sup>[2]</sup>(基于连续介质力学的离散元方法), 将最常用的基于连续介质力学的有限元法, 与基于非连续介质力学的离散元法进行耦合, 在边坡稳定性分析、港工结构稳定性分析等很多领域都有着很好的应用。本文利用基于 CDEM 的数值模拟技术, 引入有限体积法的基本理论, 对高桩码头结构在强震作用下的破坏模式以及关键点的位移等参数进行了详细的研究与分析, 给出了一些很有意义的结论, 可供工程界参考。

## 2 有限体积法在 CDEM 中的应用

离散单元法是一种模拟非连续介质的计算方法, 自 Cundall 在 20 世纪 70 年代提出以来<sup>[3]</sup>, 在岩石力学、土力学、结构分析等领域的数值模拟中得到广泛应用, 是一种新兴的非连续体分析方法。近年来, 离散元法的应用领域已经扩展到了求解连续介质向非连续介质转化的力学问题。混凝土等脆性材料在冲击、侵蚀等动荷载作用下产生的损伤和破坏, 其实质就是力学模型从连续体到非连续体的转变过程。建立在传统的连续介质力学基础上的有限元法等数值计算方法难以直接用于计算和模拟材料具体的破坏形式和破坏的整个过程, 而 CDEM 方法在这一方面显示出了巨大的优势。

### 2.1 计算原理

设  $\Omega$  为一空间有界闭区域, 其边界曲面  $\partial \Omega$  由有限块光滑或者分片光滑的曲面组成, 并设函数  $f(x, y, z)$  在  $\Omega$  上具有一阶连续偏导数, 根据高斯散度定理可得式 (1)。

$$\iint_{\partial \Omega^+} f n_i dS = \iiint_{\Omega} \frac{\partial f}{\partial x_i} d\Omega \quad (1)$$

其中,  $n_i$  为边界曲面外法线方向单位向量。

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$  在有界闭区域内的平均值  $\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle$  可表示为式 (2),  $V$  为有界闭区域  $\Omega$  的总体积。当  $\Omega \rightarrow 0$  时, 有

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{\partial f}{\partial x_i}。$$

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{V} \iiint_{\Omega} \frac{\partial f}{\partial x_i} dV = \frac{1}{V} \iint_{\partial \Omega^+} f n_i dS \quad (2)$$

设一多面体含有  $N$  个面, 则式 (2) 可改写成式 (3):

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle \approx \frac{1}{V} \sum_{k=1}^N \bar{f} n_i^k \Delta S^k \quad (3)$$

式中:  $\Delta S^k$  为第  $k$  个面的面积, 该面的外法线方向在  $x_i$  方向的分类为  $n_i$ ,  $\bar{f}$  为  $f$  在第  $k$  个面上的平均值。

以四面体为例, 求单元内部的应力增量, 首先求四面体内速度梯度的平均值, 如式 (4) 所示:

$$\left\langle \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right\rangle \approx \frac{1}{V} \sum_{k=1}^4 \bar{v}_i n_j^k \Delta S^k \quad (4)$$

则应变增量可表示为式 (5):

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \left\langle \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right\rangle \right) \Delta t \quad (5)$$

应力增量可表示为式 (6):

$$\Delta \sigma_{ij} = C_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} \quad (6)$$

应力全量可写为式 (7):

$$\sigma_{ij} = \sum \Delta \sigma_{ij} \quad (7)$$

四面体各节点的节点力分量如式 (8) 所示。

$$f_i^N = \sum_{k=1}^3 \int_S \sigma_{ij} n_j^k ds \approx \sigma_{ij} \sum_{k=1}^3 (n_j^k \Delta S^k) \quad (8)$$

其中,  $N$  表示第  $N$  个节点,  $k$  为节点  $N$  所在面的序号 (四面体中每个节点隶属于共 3 个面),  $n_j^k$  为节点所在面的单位外法向量分量,  $\Delta S^k$  节点  $N$  在第  $k$  个面内的节点面积。

如果节点  $N$  被  $M$  个节点共用, 则总节点力的计算公式如式 (9) 所示。

$$F_i^N = \sum_{l=1}^M (f_i^N)_l = \sum_{l=1}^M [\sigma_{ij} \sum_{k=1}^3 (n_j^k \Delta S^k)]_l \quad (9)$$

## 2.2 单元混合离散技术

对于 4 节点四面体, 可直接应用上述有限体积法进行计算; 而对于 6 节点五面体、8 节点六面体, 由于含 4 个节点的面, 该面在变形过程中会发生翘曲, 采用上述有限体积法将产生应力不对称, 并产生沙漏现象。借鉴 FLAC3D 中的混合离散技术解决上述问题, 离散方式如图 1 所示。

对于图 5-1 中的五面体及六面体, 均将其离散为 2 组四面体。五面体的第一组离散体为 V0123、V03451、V1235, 第二组离散体为 V0124、V3450、V4025; 六面体的第一组离散体为 V1240、V3026、V7460、V5462、V4620, 第二组离散体为 V1052、V3027、V4570、V6752、V7025。五面体及六面体的总体积等于两组离散四面体体积的一半, 根据四面体的应力算节点力时 (式 1.8), 所有四面体对节点力的贡献应除以 2。

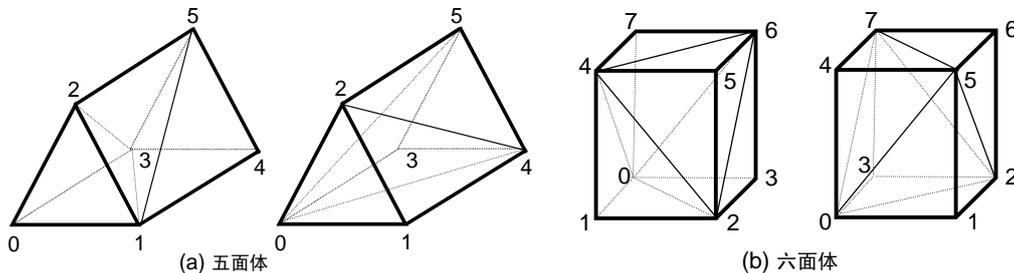


图 1 五面体及六面体的混合离散方式

## 2.3 计算验证

以 CDEM 计算源程序为基础, 采用增量方式实现上述过程, 计算流程如图 2 所示, 其中虚线框出部分即为采用有限体积法进行显示求解的迭代部分。以均质边坡的弹性位移场计算为例, 验证计算程序的正确性, 与 FLAC3D 计算结果的对比如图 3 所示, 通过对比可知, 基于有限体积法的 CDEM 程序计算结果与 FLAC3D 的计算结果完全一致。

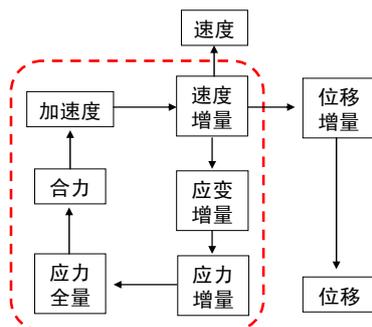


图2 有限体积法计算流程

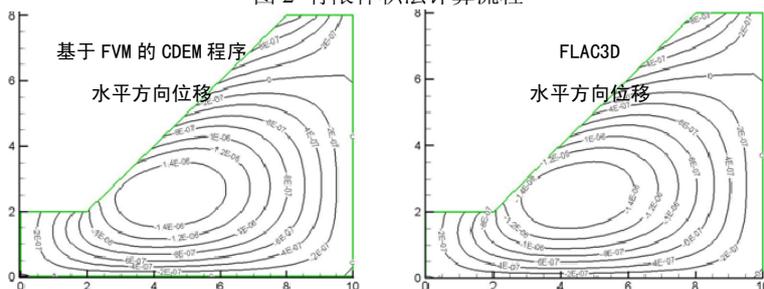


图3 边坡水平位移场对比

在每一计算时步更新四面体各面的法向量、面积及四面体的体积（以下简称几何特征），可实现单元的大转动计算。设  $i, j, k, l$  为四面体的四个节点号，则  $ijk$  面上的外法向量计算如式 (10) 所示，面积计算如式 (11) 所示，四面体的体积计算如式 (12) 所示。采用基于单刚原则及基于有限体积法的 CDEM 程序分别计算单支点作用下，矩形块体因自重产生的转动情况，各时步的网格位置如图 4、图 5 所示。图 4 中由于块体单元刚度矩阵没有实时更新，在转动过程中单元发生了畸变，网格逐渐增大；图 5 在每一时步更新四面体的几何特征，网格变形与实际情况相符，表明上述方法是可行的。

$$\begin{cases} \vec{N}_{ijk} = \vec{V}_{ij} \times \vec{V}_{jk} \\ \text{if } \vec{N}_{ijk} \cdot \vec{V}_{lj} < 0 \quad \vec{N}_{ijk} = -\vec{N}_{ijk} \\ |\vec{N}_{ijk}| = |\vec{N}_{ijk}| \end{cases} \quad (10)$$

$$S_{ijk} = |\vec{V}_{ij} \times \vec{V}_{jk}| / 2 \quad (11)$$

$$V_{ijkl} = |\vec{V}_{ij} \times \vec{V}_{jk} \cdot \vec{V}_{lj}| / 6 \quad (12)$$

表 1 给出了 1 000 个八节点六面体单元计算 100 个时步，采用实时更新刚度矩阵及实时更新四面体几何特征的耗时情况。由表 1 可得，在每步实时更新的情况下，有限体积法的耗时仅为刚度矩阵法的 1/8。

表 1 两种方法的耗时对比

计算方法	每时步不更新的计算耗时/s	每时步更新的计算耗时/s
刚度矩阵法	8	83
有限体积法	7	10

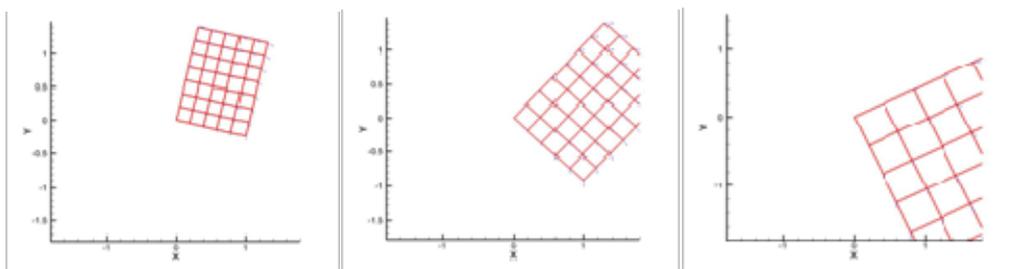


图4 基于单刚原则的典型时步块体转动图像

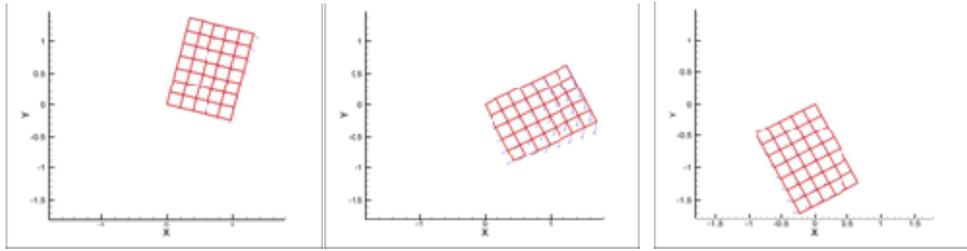


图5 基于有限体积法的典型时步块体转动图像

### 3 地震作用数值模拟

#### 3.1 计算模型的建立

本文选取渤海湾某高桩码头作为计算模型，断面由前、后承台两部分组成，岸坡土体与前、后承台梁板体系之间通过桩发生相互作用。考虑到整个码头为平面应变结构，选取一个断面建立准三维的数值分析模型。具体参数选取同文献4<sup>[4]</sup>。后承台直桩共8根，前承台直桩共5根，平均桩长24m，平均桩截面 $A=0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ ，混凝土比重皆取为 $2.5\times 10^3\text{ kN/m}^3$ ，泊松比 $\mu=0.17$ 。地质年代属于第四纪全新世新鲜层，表层数十米厚的土层属于海相沉积和河口三角洲相冲积层，从上至下地层组成为：1) 淤泥或淤泥质粘土；2) 亚粘土（粉质粘土）或粘土；3) 亚砂土(粉土)；4) 粉砂。

整个桩基—岸坡土体离散元分析模型以及力学边界条件如图6所示，底边施加X、Y、Z方向约束，左右两侧施加垂直于Z-X平面的Y方向约束。

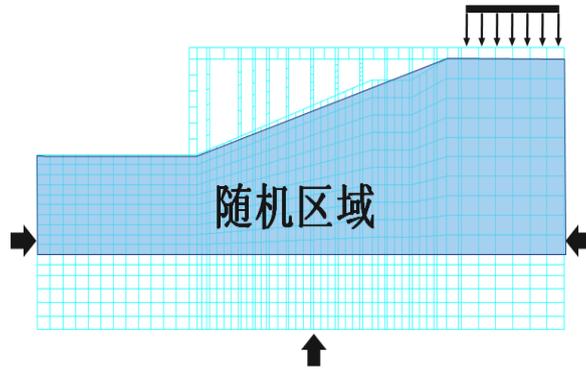


图6 桩基—岸坡离散元分析数值模型及其边界条件示意图

#### 3.2 地震作用数值模拟

利用CDEM的接触单元处理桩土之间的相互作用问题，同时模拟桩土接触面上的滑移破坏以及桩与土体自身内部的破坏情况，并且利用CDEM的随机单元技术模拟不规则抛石棱体<sup>[5]</sup>。直接利用强震记录的方法来进行地震波的模拟，所采用的地震波为EL-centro波<sup>[6]</sup>，其加速度时程曲线如图7所示。地震动持续时间为10s，时间间隔为0.02s，并沿坐标y方向以体波的方式输入，加速度峰值为0.2g。

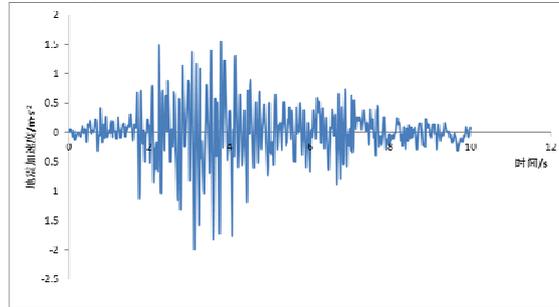


图7 水平地震加速度曲线

利用融入有限体积法的CDEM数值模拟技术分析波动作用下高桩码头的破坏模式，下图8~12(单位：m)给出了结构从弹性到破坏的整个过程，可以看出整个结构随着波的传播，从顶梁到桩逐渐产生破坏，尤其是地震作用后期，整个结构都处于完全破坏失效状态。

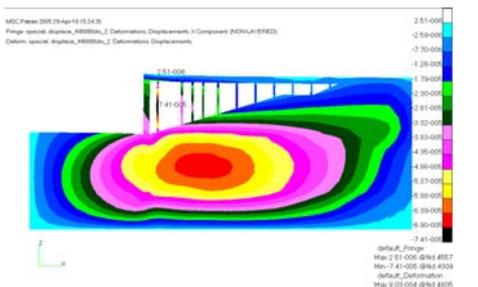


图 8 地震作用弹性阶段 X 方向位移

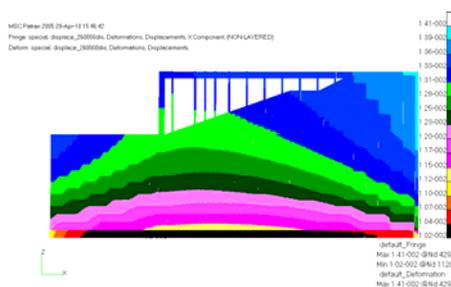


图 9 地震作用 260 000 时步 X 方向位移

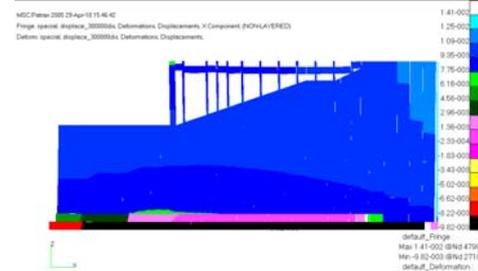


图 10 地震作用 300 000 时步 X 方向位移

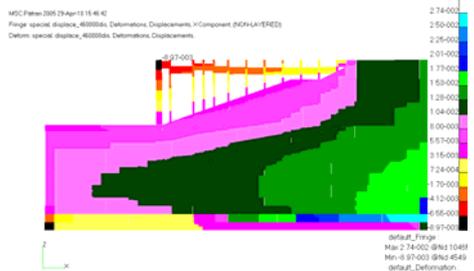


图 11 地震作用 460 000 时步 X 方向位移

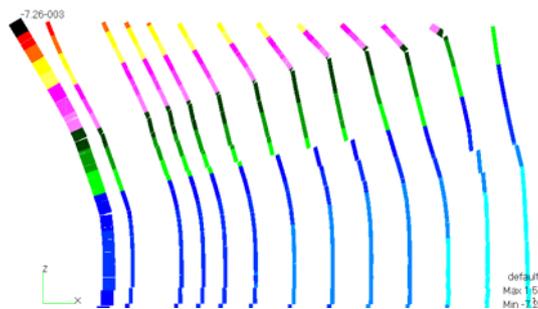


图 12 地震作用 460 000 时步桩破坏详图

### 3.3 关键点位移分析

本节提取了高桩码头桩与土相互作用结构的一组关键监测点，其布置如下图 13 所示，选取一个正弦波作用周期，每 100 个时步记录一次监测点的位移，各个点的结果曲线如下图 14~15 所示，可见梁顶部面板上每个点的 X、Y 方向位移随着波的传播，向 X、Y 的负方向逐渐增大，并且随着桩离岸越来越远，其位移的绝对值也逐渐增大，安全性降低。

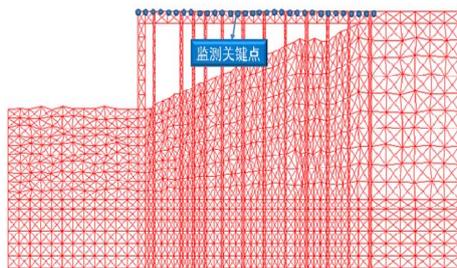


图 13 监测关键点布置示意

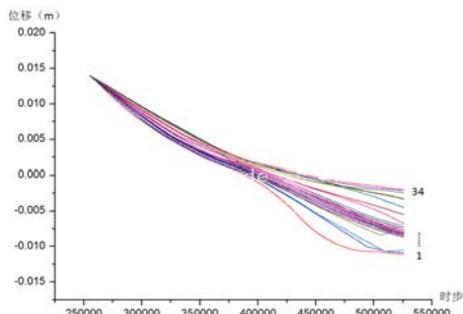


图 14 梁顶部横向位移随地震作用时间的变化

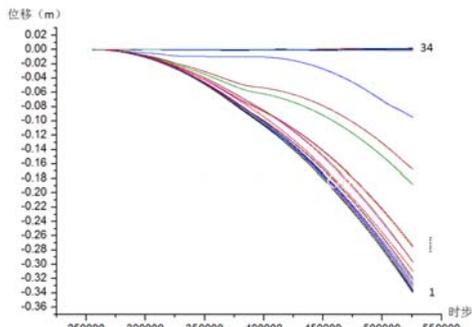


图 15 梁顶部竖向位移随地震作用时间的变化

## 4 结 语

将有限体积法与 CDEM 方法相结合,对高桩码头在地震作用下的破坏模式进行了详细的分析。从数值模拟的结果可以看出,地震载荷引起码头结构的破坏程度非常严重,整个桩与梁都发生了整体性的失稳破坏,很难进行再一次修复使用。随着地震波的传播,高桩码头会出现非常严重的梁顶部裂缝以及桩身的受剪破坏,根据结果统计发现,桩的剪切裂缝呈现一定的规律性,沿岸坡方向的破坏尤为明显,梁顶位移随着桩离岸边的距离越远越大。充分说明了将 FVM 与 CDEM 方法相结合在对高桩码头承载能力分析中有着独特的优势。

### 参考文献:

- 1 武清玺,江 泉.码头结构的健康诊断及安全性评价.土木工程学报, 2003 (11): 77-81.
- 2 Li S H, Zhao M H, Wang Y N. A New Computation Model of There-Dimension DEM-Block and Particle Model. International Journal of Rock Mechanics and Ming Science, 2004 (3): 43-63.
- 3 P A CUNDALL. Formulation of a Three-dimensional Distinct Element Model Part I. A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1988, 25(3): 107-116.
- 4 陆晶晶,刘天苹.基于 CDEM 的高桩码头承载力数值模拟研究.水运工程, 2010 (9): 41-47.
- 5 Liu Tianping, Li Shihai, Liu Xiaoyu, et al. A Continuum-based Discrete Element Method of Random Block Shape for Analyzing Stability of Cataclastic Rock Mass Slope. Proceedings of International Symposium/RCUK-China Summer School on DISCRETE ELEMENT METHODS AND NUMERICAL MODELLING OF DISCONTINUUM MECHANICS, Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008:341-354.
- 6 张小玲,栾茂田.地震荷载作用下海底管线的动力反应分析.岩石力学与工程学报, 2008 (9):3798-3806.