



# 基于 CDEM 的高桩码头承载力数值模拟\*

陆晶晶<sup>1</sup>, 刘天苹<sup>1</sup>, 李世海<sup>1</sup>, 李丹<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;

2. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司广州分公司, 广东 广州 511442)

**摘要:** 主要采用基于连续介质的离散元方法 (CDEM) 对高桩码头结构进行数值模拟。对 CDEM 方法在结构分析中应用验证可行的基础上, 采用随机网格的方法对不规则抛石棱体进行模拟, 根据实际的高桩码头建立数值计算模型, 分析了其在不同加载条件下承载力的大小, 得出码头结构破坏以及破坏程度的临界荷载。同时提取结构关键点的位移, 将其与相对应的不同的加载等级进行详细分析, 得出了破坏前后不同的直线型与抛物线型增长方式, 为海洋工程结构的设计与分析提供了有价值的参考。

**关键词:** CDEM; 高桩码头; 承载力; 数值模拟

中图分类号: U 656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2010)09-0041-07

## Numerical simulation of bearing capacity of high-piled wharf based on CDEM

LU Jing-jing<sup>1</sup>, LIU Tian-ping<sup>1</sup>, LI Shi-hai<sup>1</sup>, LI Dan<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Guangzhou Branch, CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511442, China)

**Abstract:** The continuum-based discrete element method (CDEM) is applied to the numerical simulation of high-piled wharf. After the feasibility of CDEM used in structure analysis is verified, we present a detailed description of the random method. Setting up a numerical model based on a real high-piled wharf, we analyze the bearing capacity under different load conditions and determine the critical load of failure. Through analyzing the relation between the displacement of key points and different load conditions, different increasing modes are concluded: one is linear type before failure, and the other is parabola type after failure. It may serve as reference for the design and analysis of ocean engineering structure.

**Key words:** CDEM; high-piled wharf; bearing capacity; numerical simulation

高桩码头是淤泥质海岸及河口地区普遍采用的一种码头结构形式, 具有造价低、施工周期短的优点。由于高桩码头承台式结构对荷载变化的适应能力较差, 码头上部构件处在水位变动和浪溅区易发生锈蚀, 同时由于码头上装卸作业中不能完全避免对构件的冲砸、过载、船舶停靠过程

中碰撞等现象, 使码头在使用过程中不断发生梁、板、桩、桩帽等构件不同程度的破坏或损坏, 直接影响了码头的正常使用<sup>[1-2]</sup>。

根据对我国已使用 7~25 年高桩码头的研究统计发现, 其中有损坏或严重损坏的比例高达 89%。从工程经验的角度讲, 高桩码头往往建成 10 年之

收稿日期: 2010-02-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731500);国家自然科学基金重点项目(10632100);中国科学院重要方向性项目(KJCX2-YW-L01)

作者简介: 陆晶晶(1985—), 女, 硕士研究生, 从事高桩码头健康监测与诊断方面的研究。

内即会出现破损现象，甚至无法正常使用<sup>[3]</sup>。

文章利用基于 CDEM 的数值模拟技术，对高桩码头结构的承载力以及破坏前后荷载与位移的关系进行了详细的分析与研究，给出了一些有意义的结论，可供工程界进行参考。

### 1 CDEM 方法简介

当前广泛使用的计算方法主要分为两类：一类是以连续介质力学模型为基础的方法，如有限元 (FEM)、有限差分(FDM)、边界元 (BEM)、无网格法(EFM)以及这类方法的耦合<sup>[4]</sup>。另一类是以非连续介质力学模型为基础的方法，如离散元 (DEM)、不连续变形分析(DDA)等<sup>[5-6]</sup>。其中，离散元法在地下工程、坝基稳定性分析以及地震研究中的应用越来越广泛。现在比较通用的离散元软件中采用的都是刚性块体单元，该假设极大地简化了离散元计算，不能反映实际介质的变形破坏情况。而单元块体在这些情况下会发生变形，因此文章在刚性块体离散元的基础上发展了基于连续介质力学的离散元方法 (CDEM)。

#### 1.1 CDEM 方法的基本假设

CDEM 方法采用非连续可变形单元，单元之间通过虚拟弹簧传递相互作用力，对于文章采用的面-面接触模型的离散元法，有如下假设：

- 1) 单元视为弹性体。
- 2) 单元之间的作用力通过法向和切向弹簧来承担，用法向力及切向力来表示，分别与法向和切向位移成正比关系。
- 3) 破坏、滑移都发生在接触上，但要满足强度条件和抗张拉破坏条件，单元本身只发生变形不发生破坏。
- 4) 允许单元分离，一旦单元分离，单元之间接触力将为零。

#### 1.2 CDEM 块体面-面接触作用计算

CDEM 方法由四面体刚度矩阵来构成各种形状单元的矩阵，其计算方法采用常用的有限元方法。在相邻两块体的界面上，位于角点和面心处的结点尽管位置相同，但分属于不同块体。它们两两构成一对邻居结点。相邻块体界面上采用离

散元面-面接触模型，接触可以分开。此类接触所产生的相互作用，通过连接于这些邻居节点之间的虚拟弹簧来实现，如图 1~2 所示。

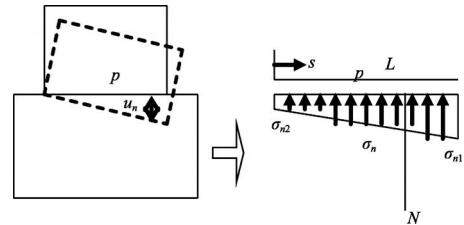


图 1 完全叠合面-面接触模型

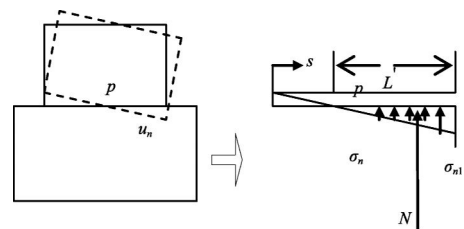


图 2 部分叠合面-面接触模型

计算接触面上的力时分两种情况：

- 1) 当相邻两块体之间完全连续时，邻居节点之间的连接弹簧，遵循线弹性本构关系

$$\begin{cases} F_n = -K_n \Delta u_n \\ F_s = -K_s \Delta u_s \end{cases} \quad (1)$$

式中： $F_n$  为弹簧的法向力； $K_n$  为弹簧的法向刚度； $\Delta u_n$  为弹簧相连单元的位移向量差； $F_s$  为弹簧的切向力； $K_s$  为弹簧的切向刚度； $\Delta u_s$  为弹簧相连两单元切向位移向量差。其中，弹簧的法向刚度和切向刚度分别由以下公式得到：

$$\begin{cases} K_n = \frac{EA_c}{L} \\ K_s = \frac{GA_c}{L} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $E$  和  $G$  分别为界面的弹性模量和剪切模量； $L$  和  $A_c$  分别为界面的等效厚度以及弹簧的代表面积。

- 2) 当材料本身存在固有破坏，为非连续介质，或者在外载作用下发生破坏，由连续介质转变为非连续介质，使得相邻两块体之间产生裂纹，即在模型计算中表现为相应弹簧的断裂，弹簧遵循如下非线性本构关系。弹簧发生剪切破坏时，剪切破坏后单元之间发生滑动，单元之间存在压力和摩擦力。

$$\begin{cases} F_n=0 \\ F_s=0 \end{cases} \quad \text{当 } u_n > 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_n=-K_n \Delta u_n \\ F_s=-K_s \Delta u_s \end{cases} \quad \text{当 } u_n \leq 0 \text{ 且 } |F_s| \leq f|F_n| \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_n=-K_n \Delta u_n \\ F_s=F_n \tan \phi \end{cases} \quad \text{当 } u_n \leq 0 \text{ 且 } |F_s| > f|F_n| \quad (5)$$

式中:  $\phi$  为界面的内摩擦角。

### 1.3 CDEM 方法计算步骤

CDEM 方法采用动态松弛法进行求解<sup>[8-9]</sup>。动态松弛法是将静力学问题转化为动力学问题进行求解的一种显式方法,其理论基础是牛顿第二定律,这一方法认为质点受到内力( $F_{内}$ )和外力( $F_{外}$ )的作用,其中内力包括块体变形引起的力和阻尼力两部分,外力包括外边界力和弹簧断开后引起的作用力。质点在上述力共同作用下的运动方程为:

$$Ma + Cv + Ku = F \quad (6)$$

基本计算步骤为:

- 1) 设定各质点的初始速度和位移;
- 2) 由  $F_{内} = Cv + Ku$  求出各点所受的内力;
- 3) 由边界条件强度准则求各点所受外力;
- 4) 由  $a = M^{-1}(F_{外} - F_{内})$  求出各质点的加速度;
- 5) 由  $v = a dt$  求出各质点的速度;
- 6) 由  $u = v dt$  求出各质点的位移;

重复 2)~6) 步,直到系统的总动能趋于零。

以上各式中:  $C$  为阻尼矩阵;  $K$  为刚度矩阵;  $M$  为节点质量;  $a$  为加速度向量;  $v$  为速度向量;  $u$  为位移向量;  $dt$  为时间步长。

与现在常用的数值分析方法相比,基于 CDEM 的数值模拟方法可以方便地处理非连续的问题,模拟介质的大变形、旋转、滑移以及分离引起的非线性特性;可以客观地描述已知介质中的既有破坏结构面,以及特定条件下介质中裂缝的产生和发展,在模拟材料的破坏时是根据界面的张开、滑移和运动速度表述的<sup>[7]</sup>。基于以上的一系列优势,文章将 CDEM 方法应用在对于高桩码头结构的承载能力分析当中,并取得了很好的结果。

## 2 CDEM 方法应用验证

为了验证 CDEM 计算方法是否适用于水工结

构的数值分析,以实际高桩码头为参考建立数值计算模型,对比其在重力荷载作用下的计算结果,从而验证此方法的正确性。

### 2.1 计算参数的选取

笔者选取的高桩码头位于渤海湾西岸,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淤泥或淤泥质黏土;②亚黏土(粉质黏土)或黏土;③亚砂土(粉土);④粉砂。海相沉积层为软土,一般分布在-14.10 m 以上,土的含水量一般大于 40%,孔隙比大于 1.0,天然含水量大于液限,具有高压缩性,呈流塑状,承载能力低,粉砂地层厚度一般大于 3.0~4.0 m,通常埋深在-20.0 m 以下,以此层作为桩基持力层。

根据工程地质勘查资料以及码头桩基结构多年来使用情况的调查研究,数值计算所需的各层土静力性能指标如表 1 所示。

表 1 各层土的静力性能指标

土层	$\phi/(\circ)$	$c/\text{kPa}$
第 2 层黏土	13.1	10.0
第 3 层黏土	16.2	18.0
第 4,5 层粉质黏土	21.0	20.0
第 6 层粉砂	33.2	20.0

根据码头后方货场两个勘察钻孔的地质资料,各层土性参数与层厚如下:-2.1~-4.3 m 为表 1 中的第 2 层黏土,层厚为 2.2 m;-4.3~-17.5 m 为第 3 层黏土,层厚取 13.2 m;-17.5~-18.7 m,-18.7~-24.5 m 为第 4,5 层粉质黏土,层厚取 1.2 m + 5.8 m;-24.6~-30.0 m 为第 6 层黏土,层厚取 5.5 m。以上土层的材料静力学指标均取表 1 中的有效强度指标。

后承台直桩共 8 根,桩长 23.5 m,面积为  $A=0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$  的方形截面,C40 混凝土,  $E_s=3 \ 250 \text{ MPa}$ ,抗弯刚度  $EI=693 \ 313 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ ,轴向变形刚度  $EA=520 \ 000 \text{ kN}$ 。

前承台直桩共 5 根,桩的截面  $A=0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,C40 混凝土,  $E_s=3 \ 250 \text{ MPa}$ ,  $EI=16 \ 927.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,  $EA=812 \ 500 \text{ kN}$ ,8 根桩的桩长为 26.0 m,其中承台前沿的 4 根集束桩简化成 1 根截面  $A=1.2 \text{ m} \times$

1.2 m, 抗弯刚度  $EI=492\,480\text{ kN}\cdot\text{m}^2$ , 轴向变形刚度  $EA=4\,104\,000\text{ kN}$  的等效桩体。2 根叉桩简化为每根桩长约为 26.0 m 的直桩, 前台横梁的截面为  $A=0.8\text{ m}\times 1.4\text{ m}$  的矩形,  $EI=466\,480\text{ kN}\cdot\text{m}^2$ ,  $EA=2\,856\,000\text{ kN}$ , 后台横梁的截面为  $A=0.8\text{ m}\times 1.2\text{ m}$  的矩形,  $EI=293\,760\text{ kN}\cdot\text{m}^2$ ,  $EA=2\,484\,000\text{ kN}$ , C40 混凝土,  $E_s=3\,250\text{ MPa}$ 。混凝土密度皆取  $0.25\times 10^3\text{ t/m}^3$ , 泊松比  $\mu=0.17$ 。

### 2.2 数值模型建立

选取的泊位由前、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。将码头岸坡土体与承台结构体系简化成平面应变问题, 岸坡土体的计算厚度取为 3.5 m。岸坡土体-桩基结构体系的整体计算范围大致取为  $80\text{ m}\times 32.9\text{ m}$  的范围。

对于抛石棱体的模拟, 采用 CDEM 的网格随机技术<sup>[10]</sup>, 从而解决规则网格可能会导致的变形不一致性。具体如图 3~5 所示。

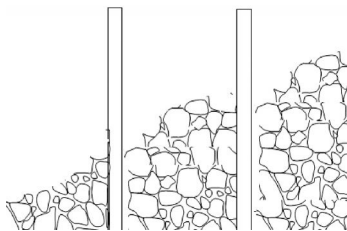


图 3 高桩码头抛石棱体

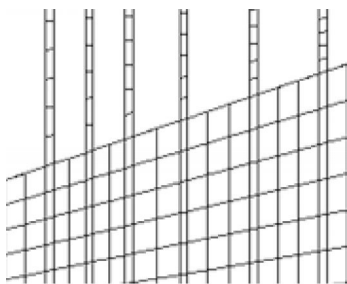


图 4 规则网格

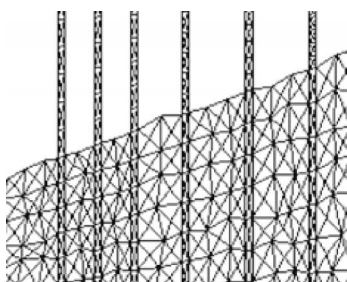


图 5 随机网格

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。

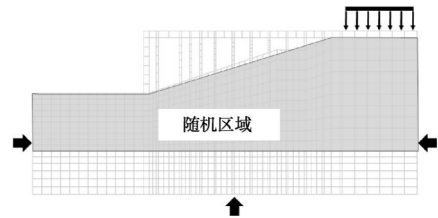


图 6 桩基-岸坡离散元分析体系数值模型及其边界条件

### 2.3 计算结果对比

#### 2.3.1 有限元与 CDEM 计算结果对比

对比在重力作用下 MSC. Patran 有限元程序与 CDEM 程序的 Z 方向位移计算结果, 如图 7~8 所示。

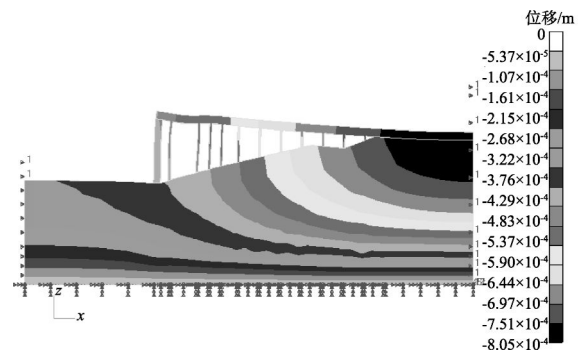


图 7 MSC. Patran 有限元程序计算结果

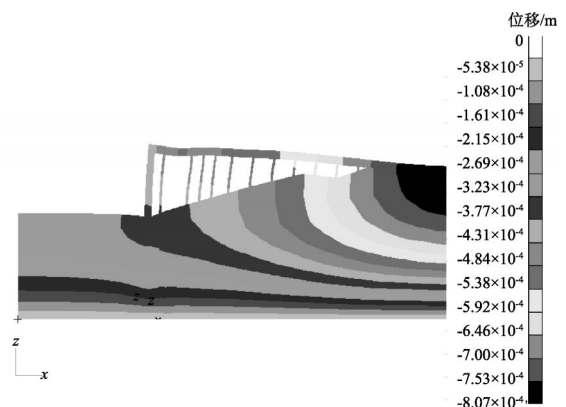


图 8 CDEM 离散元程序计算结果

由图 7, 8 的对比可知, MSC. Patran 有限元程序与 CDEM 程序计算的结果非常接近, 两者的最大值及最小值分别为  $-8.05\times 10^{-4}\text{ m}$ ,  $-5.37\times 10^{-5}\text{ m}$  以及  $-8.07\times 10^{-4}\text{ m}$ ,  $-5.38\times 10^{-5}\text{ m}$ , 两者的误差基本为 0.00。

### 2.3.2 随机方法计算验证

选用单轴拉伸的数值模拟试验, 对比节点随机与不随机的结果, 如图 9~10 所示。由对比可知, 节点随机与不随机的结果基本相同, 应力分布的误差基本为 0.00。

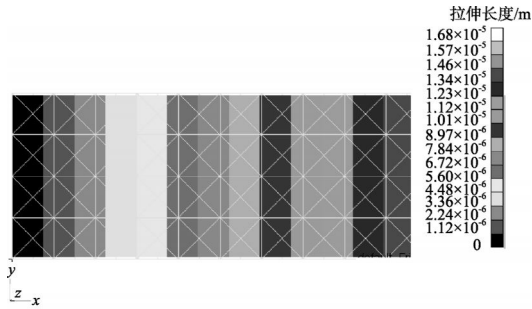


图 9 节点不随机结果

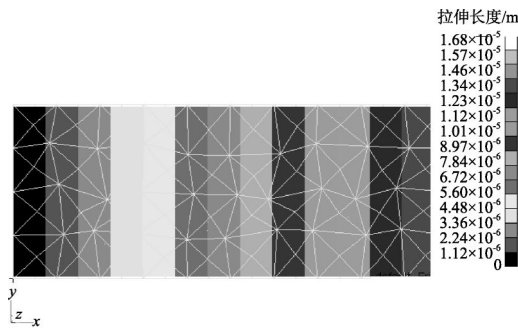


图 10 节点随机结果

以上计算的结果证明, CDEM 程序是可以进行高桩码头结构计算的。

## 3 高桩码头承载力数值模拟

导致高桩码头损伤的主要因素是不均匀沉降和水平位移, 从而产生高桩码头的整体滑移。而不均匀沉降和水平位移产生的主要原因是码头后方堆场不均匀堆载的作用, 这进一步说明荷载对不均匀沉降和水平位移的主导作用。特以渤海湾某高桩码头为原型, 对不均匀堆载及侧向力作用下的不均匀沉降及水平位移进行研究<sup>[3]</sup>。

考虑到初始地应力场的存在, 在 CDEM 计算程序中, 通过计算时步对计算流程进行阶段性控制, 将对高桩码头承载能力的模拟分为前后 3 个阶段:

- 1) 不考虑高桩码头结构的存在, 仅计算土体的自重作用至稳定, 保留节点内力, 位移清零;
- 2) 读入上一步土体的节点内力信息, 计算重

力作用下整个结构桩与土体的相互作用至稳定;

3) 在结构自重稳定的基础上, 对高桩码头施加外力作用, 进行各种工况下高桩码头的承载力计算研究。

对于桩土作用, 采用 CDEM 的三维接触面弹簧单元进行处理, 模拟桩与土体在 3 个方向不同性质的相互作用, 包括对桩所受土体作用的法向力和切向负摩阻力等的模拟。同时利用 CDEM 的接触面破坏技术可以直观地看到土体在群桩之间的滑移以及桩身受土体作用可能产生的裂缝。

### 3.1 确定荷载工况

仍然继续采用第 2 节的码头模型, 计算参数及数值模型与第 2 节完全一致。根据码头实际的荷载设计标准给出该泊位桩基-岸坡相互作用数值分析的荷载条件, 取最不利的荷载工况组合进行受力分析。共选取了 4 种工况, 如表 2 所示。

表 2 三维荷载工况

工况	土体自重	码头结构自重	前承台堆载	后承台堆载	货场堆载	撞击力	系缆力
1	✓	✓	✓	✓	✓		
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
3	✓	✓	✓	✓	✓		✓
4	✓	✓			✓		

均布堆货荷载按照前承台 30 kN/m<sup>2</sup>, 后承台 60 kN/m<sup>2</sup>, 货场堆载区 60 kN/m<sup>2</sup> 选取, 船舶撞击力取 400 kN, 系缆力取 60 kN。根据敏感性分析以工况 1 为主, 对高桩码头承载能力进行数值模拟研究与分析。

### 3.2 高桩码头承载力分析

为了详细分析高桩码头破坏前后的情况, 得出破坏与否的临界点, 对不同加载条件下高桩码头的位移情况进行统计与分析, 具体加载的数据如表 3 所示。

高桩码头在破坏前后的位移云图, 即高桩码头的整体位移如图 11~14 所示。

当  $F=440 \text{ kN/m}^2$  时, 由图 11~12 可知, 高桩码头上部的 1 根横梁发生了明显的破坏, 由于横梁与抛石体接触紧密, 抛石体仍然可以为破坏的横梁承担较大的荷载, 但是已经达到了高桩码头

表 3 高桩码头加载数据情况

序号	后承台加载/ (kN·m <sup>-2</sup> )	后承台加载/ (kN·m <sup>-2</sup> )	货场区堆载/ (kN·m <sup>-2</sup> )
1	20	40	40
2	30	60	60
3	50	90	90
4	70	140	140
5	75	150	150
6	150	300	300
7	220	440	440
8	230	460	460
9	340	680	680
10	510	1 030	1 030
11	770	1 540	1 540

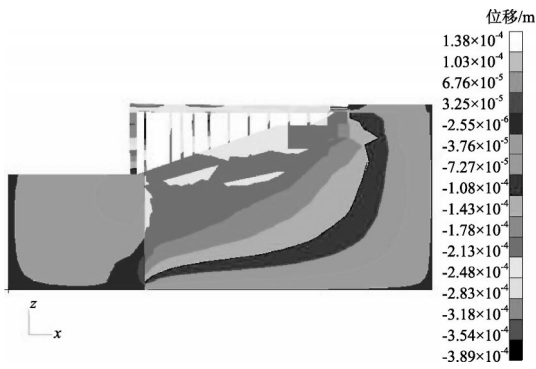


图 11 F= 440 kN/m² 时 X 方向位移云图

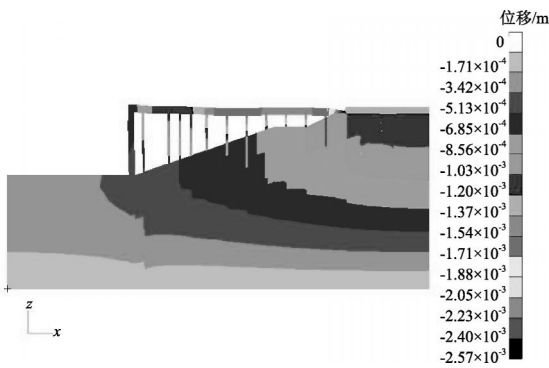


图 12 F=440 kN /m² 时 Z 方向位移云图

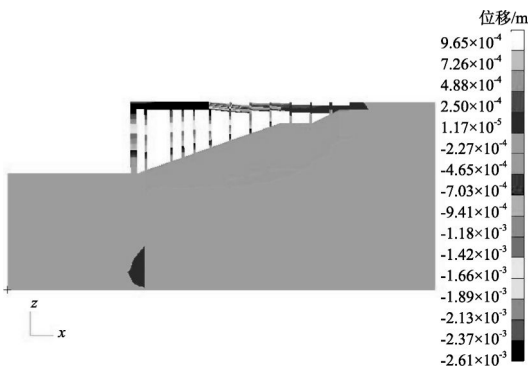


图 13 F=460 kN /m² 时 X 方向位移云图

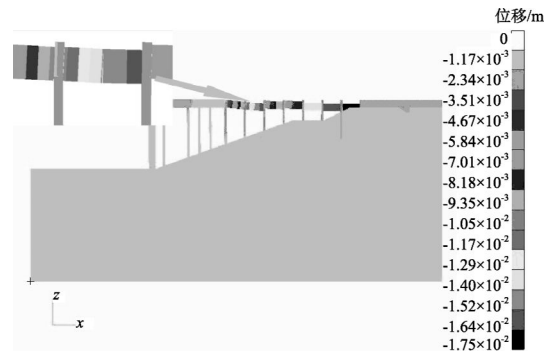


图 14 F=460 kN /m² 时 Z 方向位移云图及第 7 跨裂缝

承载能力的极限状态。

当  $F=460 \text{ kN/m}^2$  时，由图 13~14 可知，高桩码头上部的几根横梁都发生了明显的破坏，并且在第 7 跨的横梁下部有明显的裂纹出现，横梁已经失去了继续承载的能力，动能也非常不稳定，发生了剧烈的震动，如果维持在  $F=460 \text{ kN/m}^2$ ，将发生很大的变形，进而产生整体性破坏。

由以上分析可知， $F=440 \text{ kN/m}^2$  和  $F=460 \text{ kN/m}^2$  是高桩码头破坏与否及破坏程度的分界点。当高桩码头受到的荷载  $F \leq 440 \text{ kN/m}^2$ ，高桩码头处于基本安全的状态，但是已经到达了承载力的极限状态，会发生局部破坏； $F \geq 460 \text{ kN/m}^2$  时高桩码头会发生整体破坏性的损伤。

### 3.3 荷载与位移的关系

为了研究高桩码头在破坏前后结构在水平方向及竖直方向的位移与荷载的关系，特在桩基上选择了 13 个关键点，具体的分布位置如图 15 所示。

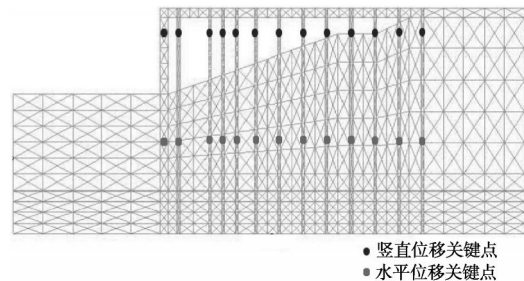


图 15 关键点布置

高桩码头破坏前后位移与结构荷载的关系如图 16~19 所示，其中 #1~#7 为破坏前高桩码头的节点位移，#8~#11 为破坏后高桩码头的节点位移。

由图 16~19 的位移分析可知，在高桩码头破坏之前，结构的水平及竖直方向的位移均为线性增长的形式，而在破坏后，位移为抛物线的增长

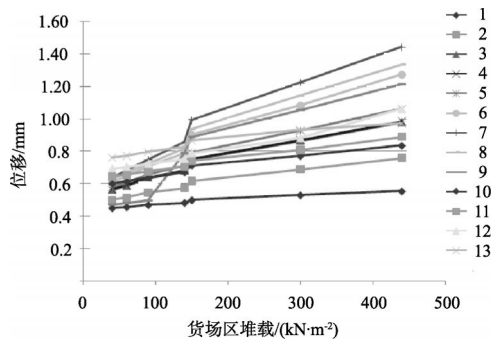


图 16 破坏前在不同堆载情况下码头桩顶竖直方向位移

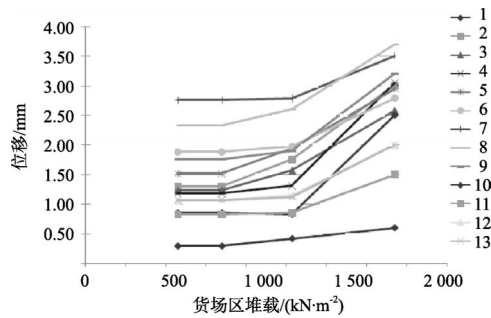


图 17 破坏后在不同堆载情况下码头桩顶竖直方向位移

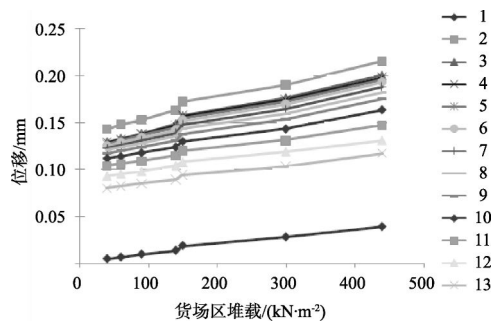


图 18 破坏前在不同堆载情况下码头桩中部水平方向位移

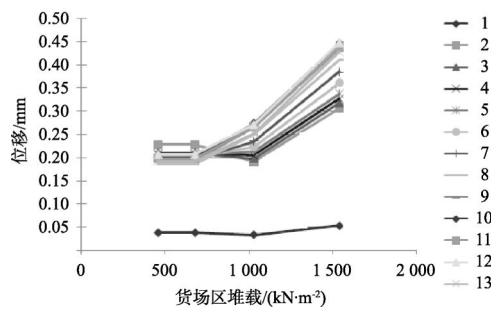


图 19 破坏后在不同堆载情况下码头桩中部水平方向位移

形式, 且增加速度越来越快。无论是在破坏前后, 结构的位移都以竖直方向位移为主。

#### 4 结论

对实际高桩码头建立离散元数值模型, 分析了不同荷载条件下高桩码头承载力的大小, 直观地得出了码头结构局部破坏与整体破坏的临界荷载。同时对荷载与结构关键点的位移进行详细的分析, 得出了其在破坏前后不同的增长方式。充分说明了 CDEM 方法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[J]. 土木工程学报, 2003 (11): 77-81.
- [2] 林小琳, 吴青青. 高桩码头梁顶裂缝原因分析及控制技术[J]. 水运工程, 2006 (9): 35-37.
- [3] 孙英学, 冉昌国. 高桩码头结构损伤机理浅析及其健康监测技术简介[J]. 水文地质工程地质, 2005 (5):110-113.
- [4] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂-数值实验 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] P A Cundall. The Measurement and Analysis of Acceleration in Rock Slopes [D]. London: University of London, Imperial College of Science and Technology, 1971
- [6] Li S H, Zhao M H, Wang Y N. A new computation model of there-dimension DEM-block and particle model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Ming Science, 2004 (3): 43-63.
- [7] Shi G H. Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis[M]. USA: Computational Mechanics, 1993: 11-20.
- [8] 李世海, 刘天莘, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(28): 3 309-3 324.
- [9] 田振农, 李世海, 刘晓宇. 可变形块体离散元在岩土工程中的研究[C]. 北京: 中国力学大会, 2005.
- [10] 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[C]// Proceedings of International Symposium. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 341-354.

(本文编辑 武亚庆)