

## 条形基础嵌入问题的大变形有限元对比分析

赵燕兵, 刘海笑

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 岩土工程中, 土与结构的耦合作用通常导致土体产生极大变形, 即大变形问题, 如桩、桩靴和吸力锚的嵌入安装。传统有限元法在求解大变形问题时, 网格将产生极大变形, 导致计算误差很大, 甚至不收敛。基于条形基础嵌入问题, 对两种不同的大变形有限元法(网格重划分法和 CEL 法)进行对比分析。给出了两种大变形有限元法的实现流程, 并分析了条形基础在均质各向同性和正常固结黏土中的嵌入问题, 通过与条形基础承载力公式和 RITSS 大变形有限元法对比, 验证了两种方法的有效性; 通过用户子程序, 模拟了正常固结黏土不排水抗剪强度随基础嵌入的变化规律; 对比了条形基础嵌入过程中土体的流动机制。

**关键词:** 大变形; 网格重划分法; 耦合的欧拉-拉格朗日法; 条形基础; 嵌入

**中图分类号:** TU470.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0493-2137(2016)10-1055-07

## Comparison of Large Deformation Finite Element Methods for Penetration of Strip Foundations

Zhao Yanbing, Liu Haixiao

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In geotechnical engineering, soil-structure interactional problems always involve large deformations of soil, such as the penetration of piles, spudcans and suction caissons. Large mesh distortions can occur in the classical finite element analysis due to large deformations, which will induce a calculation error and even fail to get a convergent solution. A comparative study of two different large deformation finite element methods, i. e., the rezoned meshes method and the CEL method, on the penetration of strip foundations was carried out. The two methods were elaborated and used to analyze the penetration of strip foundations in homogeneous and normally consolidated clays. In comparison with the bearing capacity formula and the results of the RITSS approach, the efficiency of the two methods is well verified. With a user defined subroutine, the undrained shear strength of the normally consolidated clay can be updated with the penetration of strip foundations. The soil flow mechanisms during the penetration of strip foundations are also presented.

**Keywords:** large deformation; rezoned meshes method; coupled Eulerian-Lagrangian method; strip foundation; penetration

桩、桩靴和吸力锚等嵌入式海洋工程结构在安装过程中, 结构周围的土体将产生极大变形, 此即边值分析中的大变形问题。传统有限元法(小变形有限元法)在求解大变形问题时, 土体网格将严重畸形, 出现计算误差较大和不收敛等问题。因此, 寻求一种能够克服传统有限元法缺点的数值分析技术势在必行。

有限元分析中, 描述物体运动和变形的的方法有两

种: 拉格朗日(Lagrangian)法和欧拉(Eulerian)法。拉格朗日法将网格布置在材料上, 网格随材料变形而发生变形。该方法能够很好地追踪材料自由表面及不同材料接触面的变化, 但当网格发生严重变形时, 将导致计算不收敛。欧拉法对物体变形所涉及的空间区域划分网格, 随着物体变形或者时间推移, 网格形状不发生变化, 材料不断“流”过网格。该方法克服

收稿日期: 2015-04-30; 修回日期: 2015-07-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179124); 天津市应用基础与前沿技术研究计划重点资助项目(14JCZDJC39900).

作者简介: 赵燕兵(1987—), 男, 博士研究生, z\_ybmail@163.com.

通讯作者: 刘海笑, liuhx@tju.edu.cn.

了拉格朗日法网格畸变所带来的数值奇异,但不能很好地追踪材料自由表面及不同材料接触面的变化. 为了克服传统有限元法所带来的缺陷,大变形有限元分析方法不断涌现<sup>[1-2]</sup>. 大变形有限元法结合了拉格朗日法与欧拉法的优点,将拉格朗日法和欧拉法的计算模式交替使用,不仅能够避免网格的严重变形,而且能够很好地追踪材料自由表面及不同材料接触面的变化. 目前常见的大变形有限元分析方法有网格重划分法和耦合的欧拉-拉格朗日(coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)法.

网格重划分法以一定的频率重新划分网格来克服网格畸变;通过插值将旧网格上的应力场和材料参数转移至新网格. 1998 年, Hu 等<sup>[3]</sup>基于有限元软件 AFENA 提出了 RITSS (remeshing and interpolation technique with small strain) 技术,该技术属于网格重划分法的范畴,并将其应用于浅基础承载力、桩靴嵌入安装和锚板拔出破坏等问题的研究<sup>[3-5]</sup>. 于龙等<sup>[6-7]</sup>将该技术成功推广至三维,并分析了锚板承载力、基础刺入破坏和吸力式嵌入板锚旋转安装过程中的埋深损失等问题. Wang 等<sup>[8]</sup>和 Tian 等<sup>[9]</sup>基于有限元软件 ABAQUS 实现了 RITSS 技术,研究了锚板拔出破坏、T 型触探仪贯入和海管嵌入等问题. 文献调研表明,网格重划分法可以依托任意有限元软件来实现,但需要用户自行编写程序来完成整个计算流程,而计算中场变量插值的实现尤为困难. 先前的研究者们通过自行编写程序来实现场变量插值,但程序代码并未对外公布,这给网格重划分法的推广带来了障碍. 有限元软件 ABAQUS 内嵌了一种插值技术,即 MMSM (mesh to mesh solution method), MMSM 能够实现场变量(应力、温度、孔压和材料参数等)的插值而无需研究者进行干预<sup>[10]</sup>.

CEL 法最先由 Noh 提出<sup>[11]</sup>, Benson 等<sup>[11-12]</sup>对该方法做了进一步完善,并被嵌入至有限元软件 ABAQUS 中. 该方法同样克服了拉格朗日法和欧拉法所带来的缺陷. 在分析土和结构耦合作用时,土体采用欧拉算法,即网格固定不变,土体可以在网格中流动,不存在网格畸变的问题. 土体的变形通过计算欧拉材料体积分数比 (EVF) 来确定,  $EVF = 1$  表示网格被土体填满,  $EVF = 0$  表示网格中没有土体,同一个网格中允许存在多种材料. 结构采用拉格朗日算法,通过结构的边界来追踪土与结构接触面的变化. 目前,CEL 法已被广泛用于分析土和结构耦合作用的大变形问题,如桩和桩靴的嵌入安装<sup>[2,13]</sup>、锚板承载力<sup>[14-15]</sup>和拖曳锚的拖曳安装<sup>[16-17]</sup>等.

条形基础为岩土工程中典型的基础形式,本文基于条形基础嵌入问题,分别采用网格重划分法、CEL 法和小变形有限元法模拟条形基础的嵌入过程,并与理论解和已有数值解对比,验证大变形有限元法的有效性;基于 MMSM 插值技术给出网格重划分法的实现流程,克服已有 RITSS 法难以普遍应用的技术障碍;通过场变量与土体特征参数关联,实现正常固结黏土土体强度随深度及基础嵌入的变化;对比条形基础嵌入过程中土体的流动机制,探讨两种大变形有限元法在模拟土体流动机制方面的异同.

## 1 算例及数值实现

### 1.1 算例

算例为一典型条形基础,土体为均质各向同性饱和黏土. 通过该算例给出网格重划分法和 CEL 法的实现流程,并与小变形有限元法及经典的条形承载力公式进行对比. 算例的几何尺寸和边界条件如图 1 所示,其中,基础宽度  $B = 10 \text{ m}$ ,基础高度  $h = 4 \text{ m}$ ,土体模型长度  $X = 35 \text{ m}$ ,土体模型高度  $Z = 40 \text{ m}$ .

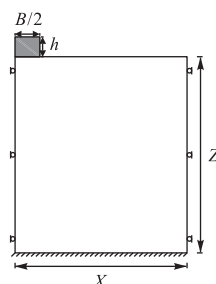


图 1 条形基础尺寸和边界条件(对称模型)

Fig.1 Dimensions and boundary conditions for strip foundation (symmetric model)

饱和黏土视为不排水条件,不排水抗剪强度  $s_u = 10 \text{ kPa}$ ,采用基于 Mises 屈服准则的理想弹塑性模型,服从相关联流动法则,弹性模量  $E = 500s_u$ ,泊松比  $\nu = 0.49$ ,为了与条形基础承载力理论对比,基础底部与土体接触设为完全粗糙,不计土体和基础质量. 条形基础在饱和黏土中的承载力为

$$p_u = N_c s_u + q \quad (1)$$

式中:  $N_c$  为承载力系数;  $q$  为基础两端旁侧压力. Skempton<sup>[18]</sup>建议取  $N_c = 5.14(1 + 0.2H/B)$ , Hansen<sup>[19]</sup>建议取  $N_c = 5.14(1 + 0.35H/B)$ ,  $H$  为基础埋深.

### 1.2 网格重划分法的数值实现

网格重划分法的数值实现可分为 4 步:①基于小变形有限元法对所分析问题建模,并施加力或位

移载荷,载荷要足够小,不能使网格产生畸变;②基于计算所得结果文件,更新计算域边界,对新计算域重新划分网格;③将旧网格中的应力场和材料参数插值到新网格中,生成新模型;④给新生成的模型施加载荷并进行计算,重复②~④直至满足指定要求. 计算流程中第③步的实现尤为困难.

有限元软件 ABAQUS 内嵌的 MMSM 插值技术,可采用关键字 MAP SOLUTION 轻易实现第③步,无需自行编写场变量插值程序. MMSM 根据新网格与旧网格的相对位置,将旧网格中的场变量插值到新网格中,如应力、温度、孔压和材料参数等. 该插值技术是基于网格节点建立的,对于节点变量(如温度和孔压)可直接进行插值;对于积分点变量(如应力和材料参数),通过相邻积分点插值得到旧网格节点

的应力和材料参数值,用于插值计算新网格节点的应力和材料参数值,最终再由新网格节点的节点变量插值得到新网格积分点变量.

Python 语言作为 ABAQUS 识别的脚本语言,可用于编写小变形有限元建模过程、提取计算结果、更新计算域、MMSM 插值和循环计算,使网格重划分法程序化,无需人为干扰计算流程. 表 1 给出了网格重划分法的 Python 实现流程. 值得注意的是,本文网格重划分法的网格重划分频率  $\Delta=0.01B$  ( $B=10\text{ m}$ ),即基础每嵌入  $0.01B$  进行一次网格重划分及场变量插值计算,用于克服网格畸变. 基础设置为刚体,土体采用 CPE6M 单元,基础周围土体采用均匀网格,网格尺寸为  $B/16$ ,小变形计算同理.

表 1 网格重划分法的 Python 实现流程  
Tab.1 Python script for the rezoned meshes method

步 骤	语 句	说 明
1	<pre>from abaqus import *;from abaqusConstants import *;from caeModules import * s = mdb.models['Model - 1'] s.rectangle(point1 = (0.0,0.0),point2 = (35.0, - 20.0)) p1 = mdb.models['Model - 1']. Part(name = 'soil',dimensionality = TWO_D_PLANAR,type = DEFORMABLE _BODY) s. Material('soil') : s. StaticStep(name = 'Load',previous = 'Initial',timePeriod = 1.0,initialInc = 0.04) s. ContactProperty('contact') s. DisplacementBC(name = 'soilLeftSide',createStepName = 'Initial',region = region1,u1 = SET) : s. DisplacementBC(name = 'loadBC',createStepName = 'Load',region = region5,u2 = - 0.1) elemType1 = mesh. ElemType(elemCode = CPE6 M,elemLibrary = STANDARD) s. parts['soil']. setElementType(regions = (s. parts['soil']. faces,),elemTypes = (elemType1,)) s. parts['soil']. generateMesh() : myjob = mdb. Job(name = 'bearingcapacity',model = 'Model - 1') myjob. submit()</pre>	初始小变形建模和计算
2	<pre>updateGeometry('soil','SOIL - 1',ancestorJobName + '. odb',12.0) s. parts['soil']. generateMesh() :</pre>	提取变形后土体并重新划分网格
3	<pre>modelBlock = whereIsLastBlock("*Step") - 1 mdb. models['Model - 1']. keywordBlock. insert(modelBlock,"""*map solution""") :</pre>	MMSM 插值
4	<pre>options = baseOptions options['job'] = remeshJodName;options['input'] = remeshJodName;options['oldjob'] = ancestorJobName remeshAnalysis = StandardAnalysis(options) remeshAnalysis. run()</pre>	再次进行小变形计算

1.3 CEL 法的数值实现

相较于网格重划分法,CEL 法已被内嵌在有限元软件 ABAQUS<sup>[10]</sup>中,无需研究者编程实现,较易使用. CEL 法中,土体采用欧拉体来模拟,土体变形和土体自由表面的追踪通过欧拉法计算,采用欧拉材

料体积分数比(EVF)表示. 基础采用拉格朗日体来模拟,通过拉格朗日法计算任意时刻土体的应力场及结构的位移或反力. 基础(拉格朗日体)和土体(欧拉体)之间的接触采用通用接触来描述. 基础与土体间的法向应力  $f = kp_p$ ,其中  $k$  为刚度系数,由基础和土

体的材料特性决定,  $p_p$  为基础和土体网格节点的相对位移; 切应力采用库伦摩擦公式  $\tau = \mu f$ ,  $\mu$  为摩擦系数. 基础与土体的接触面通过拉格朗日体来追踪, 使得拉格朗日体占据欧拉网格内部的空白区域, 确保拉格朗日体和欧拉体在物理空间中永远不会重合<sup>[10]</sup>.

CEL 法的建模方式有别于传统的有限元建模, 图 2 给出了 CEL 法的有限元模型. 土体自由表面通过欧拉材料的流动来捕捉, 因此需在土体表面构建空气层来追踪其变形, 见图 2. 条形基础的嵌入属于平面应变问题, CEL 法只提供了三维计算单元 EC3D8R, 因此, 模型厚度方向采用一个网格单元来模拟平面应变问题. 基础周围土体采用均匀网格, 网格尺寸为  $B/40$ . 模型边界条件见图 1, 值得注意的是, CEL 法属于动力分析, 边界条件采用速度控制有助于计算的稳定, 即受限边界速度设置为零. 通过考察基础嵌入速度对计算结果的影响, 发现基础承载力随着嵌入速度的减小而减小, 并逐渐收敛于  $0.025 \text{ m/s}$ , 综合考虑计算精度和计算效率, 基础嵌入速度采用  $0.025 \text{ m/s}$ .

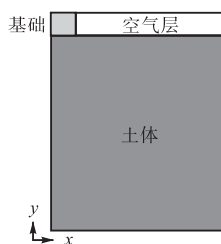


图 2 条形基础的 CEL 有限元模型

Fig.2 FE model of strip foundation for CEL method

#### 1.4 结果分析

为考察大变形有限元法在分析岩土工程中大变形问题的有效性, 算例中, 设置条形基础的嵌入深度为  $10 \text{ m}$ . 图 3 为网格重划分法、CEL 法、小变形有限元法和方程 (1) 的对比结果, 方程 (1) 中承载力系数  $N_c$  分别采用了 Skempton<sup>[18]</sup>和 Hansen<sup>[19]</sup>推荐的值. 图 3 表明, 网格重划分法和 CEL 法计算的承载力-位

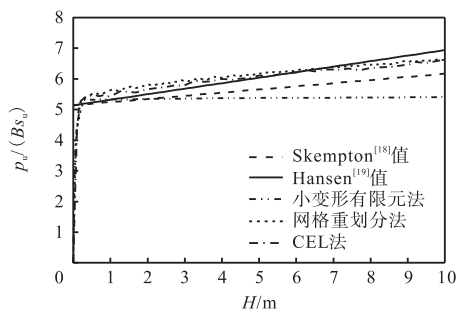
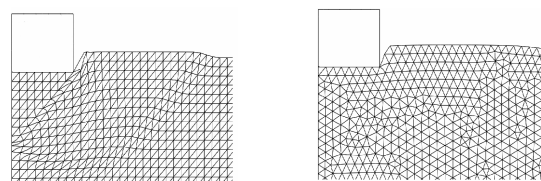


图 3 不同计算方法的承载力-位移曲线

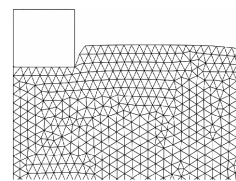
Fig.3 Load-displacement curve for different methods

移曲线基本吻合, 且承载力随着基础嵌入深度的增加而增大, 这与 Skempton 和 Hansen 给出的承载力曲线变化趋势相同, 且在数值上与 Hansen 的解更接近. 而小变形有限元法求得的基础承载力在嵌入深度达到  $1 \text{ m}$  时已不再增加, 维持一常数, 即  $p_u / B s_u = 5.3$ . 这是由于当基础发生较大位移时, 小变形有限元法的土体网格会产生畸变, 使得计算结果不再可靠.

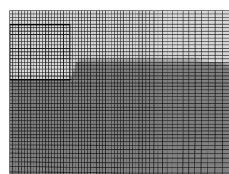
图 4 给出了基础嵌入深度  $H = 1 \text{ m}$  时不同有限元法模型网格的变形情况. 小变形有限元法中, 基础边角及土体滑裂面处土体网格产生严重变形 (见图 4(a)), 随着基础不断嵌入, 土体网格质量会严重下降, 产生计算误差, 最终导致图 3 所示的承载力曲线在  $H > 1 \text{ m}$  时为直线; 网格重划分法中, 基础每嵌入  $0.01B$  进行一次网格重划分, 因此, 网格质量得到了保证, 土体网格仅在每次小变形计算时在边角处产生轻微的变形 (见图 4(b)), 保证了计算精度; CEL 法采用欧拉网格划分土体, 土体网格不会产生变形, 土体随基础的嵌入在欧拉网格中不断流动, 并通过计算 EVF 来捕捉土体的自由表面 (见图 4(c)), 且 CEL 法求得的土体表面变形与网格重划分法求得的土体表面变形相似.



(a) 小变形有限元法



(b) 网格重划分法



(c) CEL 法

图 4 不同有限元法模型网格的变形情况

Fig.4 Deformations of meshes for different FE methods

网格重划分法计算中, 土体采用了六节点三角形单元 CPE6M (二次单元), 且可以根据计算需求选择合适的单元类型和调整网格的拓扑结构; 而 CEL 法只提供了八节点欧拉单元 EC3D8R (一次单元), 要获得精确的计算结果需要更密的网格, 对于形状比较复杂的结构, EC3D8R 单元很难获得质量较高的网格. 因此, CEL 法计算效率较低, 尤其在分析复杂的三维问题时.



## 2 正常固结黏土中条形基础嵌入

通过第 1.1 节中条形基础在均质各向同性黏土中的嵌入问题,验证了大变形有限元分析技术网格重划分法和 CEL 法的有效性. 工程实践表明,深海海底黏土多为不排水抗剪强度随土体深度近似线性增加的正常固结黏土,有时海床表面会有一层强度较高的超固结黏土或砂土,典型的海床黏土不排水抗剪强度  $s_u = s_{u0} + kz$  [6], 其中  $s_{u0}$  为海床表面不排水抗剪强度,  $k$  为不排水抗剪强度梯度. 本节将分别采用网格重划分法和 CEL 法分析条形基础在正常固结黏土中的嵌入问题.

Hu 等 [3] 基于大变形有限元分析技术 RITSS, 模拟了条形基础在正常固结黏土中的嵌入过程, 并与 Davis 等 [20] 的理论解进行了对比, 本文同样采用该算例. 算例的几何尺寸和边界条件见图 1, 其中  $B = 10$  m,  $h = 4$  m,  $X = 35$  m,  $Z = 20$  m. 土体不排水抗剪强度  $s_u = 1 + 2z$  ( $z$  为土体深度), 采用基于 Mises 屈服准则的理想弹塑性模型, 服从相关联流动法则, 弹性模量  $E = 500s_u$ , 泊松比  $\nu = 0.49$ , 基础底部与土体接触设为完全粗糙, 不计基础重量, 基础嵌入深度  $H = 2$  m. Hu 等 [3] 分别计算了土体重度  $\gamma = 0$  kN/m<sup>3</sup> (无重度) 和  $\gamma = 17$  kN/m<sup>3</sup> (饱和重度) 的承载力曲线, 本文同样计算这两种情况, 并对比土体重度对计算结果的影响.

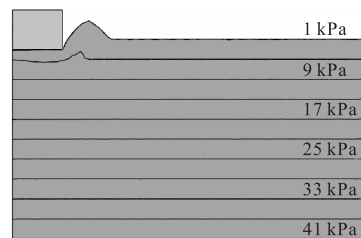
### 2.1 正常固结黏土强度的数值实现

正常固结黏土强度值随着土体深度线性变化, 即  $s_u = s_{u0} + kz$ . 网格重划分法基于拉格朗日算法, 而 CEL 法基于欧拉算法, 因此, 二者在数值计算中实现土体强度随深度线性变化的方法也不同.

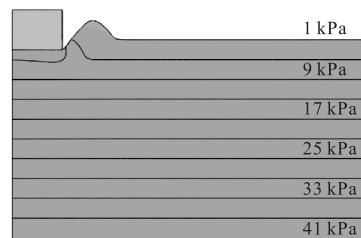
拉格朗日法将网格布置在材料上, 网格随着材料变形而产生变形. 因此, 对于网格重划分法, 可以将土体强度与场变量 (FIELD) 关联, 并通过用户子程序将场变量与土体网格节点坐标 (即土体坐标) 关联, 从而实现正常固结黏土强度随着基础嵌入而变化. 欧拉法对土体变形所涉及的空间区域划分网格, 随着土体变形或者时间推移, 网格形状不发生变化, 土体不断“流”过网格. 由于欧拉网格不随土体变形而变形, 因此材料强度与网格坐标关联已不再奏效. CEL 法中, 通过用户子程序 VUFIELD, 将土体强度与欧拉网格节点的速度关联; 或采用子程序 VUSDFLD, 将速度场设为中间状态变量, 并与土体强度关联. 从而实现正常固结黏土强度随着基础嵌入而变化, 本文

采用前者.

图 5 给出了  $\gamma = 0$  kN/m<sup>3</sup> (无重度) 条件下, 基础嵌入深度  $H = 1$  m 时, 土体强度随基础嵌入的变化规律. 从图 5 可以看出, 两种大变形有限元方法均能较好地反映土体强度的变化规律, 即随着基础嵌入, 基础底部的土体强度等值线向下运动, 而基础旁侧土体强度等值线随着土体的隆起向上移动, 该现象与物理实际相符.



(a) 网格重划分法



(b) CEL 法

图 5 正常固结黏土不排水抗剪强度等值线

Fig.5 Undrained shear strength contour for the normally consolidated clay

### 2.2 对比分析

Davis 等 [20] 给出了条形基础在正常固结黏土中的承载力公式, 即

$$p_u = F_r(5.14s_u + 0.25kB) + \gamma z \quad (2)$$

其中  $F_r$  为一无量纲常数, 与土体的相对抗剪强度梯度  $kB/s_{u0}$  相关, 可查图获取 [20]. 公式 (2) 能够反映相对抗剪强度梯度对基础承载力的影响.

图 6 给出了  $\gamma = 0$  kN/m<sup>3</sup> (无重度) 条件下, RITSS [3]、公式 (2)、小变形有限元法、网格重划分法和 CEL 法的对比结果. 由于网格畸变的原因, 小变形有限元法依旧不能得到理想的计算结果; 网格重划分法和 CEL 法的计算结果与 RITSS 和公式 (2) 的计算结果在变化趋势上完全相同, 且数值上更接近公式 (2).

图 7 给出了  $\gamma = 17$  kN/m<sup>3</sup> 条件下的对比结果. RITSS、网格重划分法和 CEL 法求得的承载力值均比公式 (2) 大, 原因在于基础嵌入使得基础旁侧土体隆起 (见图 8(c) 和 8(d)), 隆起土体的自重将产生旁侧压力, 公式 (2) 并未考虑隆起土体质量对承载力

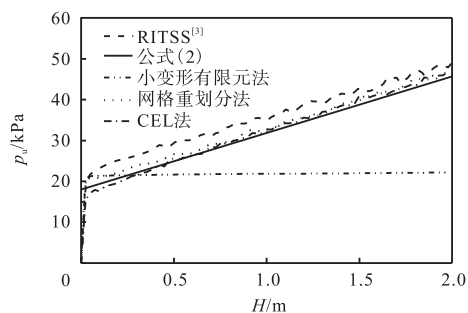


图 6 条形基础在正常固结黏土中的承载力-位移曲线 ( $\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$ )

Fig.6 Load-displacement curve of strip foundations penetrated in normally consolidated clay ( $\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$ )

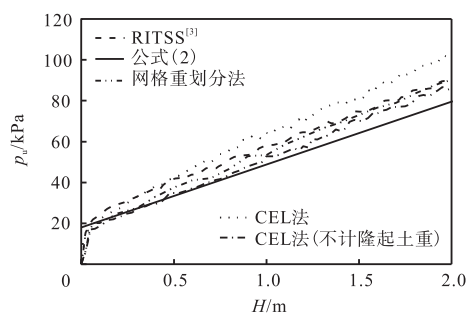


图 7 条形基础在正常固结黏土中的承载力-位移曲线 ( $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ )

Fig.7 Load-displacement curve of strip foundations penetrated in normally consolidated clay ( $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ )

的影响。网格重划分法与 RITSS 的计算结果很接近, 而 CEL 法计算结果较大, 原因在于 CEL 法计算求得的土体隆起部分较网格重划分法大 (见图 8(c) 和 8(d)), 土体隆起越大, 基础旁侧压力越大, 承载力值也越大。为表明计算结果的可靠性, 本文还采用 CEL 法计算了不计隆起土体质量的承载力值, 可以看出, 当不计隆起土体质量时, CEL 法的计算结果与公式 (2) 吻合较好。

### 2.3 土体流动机制

图 8 给出了不同条件下, 网格重划分法和 CEL 法计算的土体的流动机制。图 8(a) 和 8(b) 表明, 无重度 ( $\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$ ) 条件下, 网格重划分法和 CEL 法的土体流动机制完全一致。随着基础的嵌入, 土体向远离基础的方向运动, 形成典型的弧形滑裂面。图 8(c) 和 8(d) 表明,  $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$  条件下, 网格重划分法和 CEL 法的土体流动机制在整体趋势上一致。随着基础的嵌入, 土体向远离基础的方向运动, 但由于土重影响, 土体回流至基础旁侧; CEL 法在计算有重土土体流动性方面较网格重划分法更强, 因此, CEL 法基础旁侧土体较多, 计算所得承载力也相应较大。

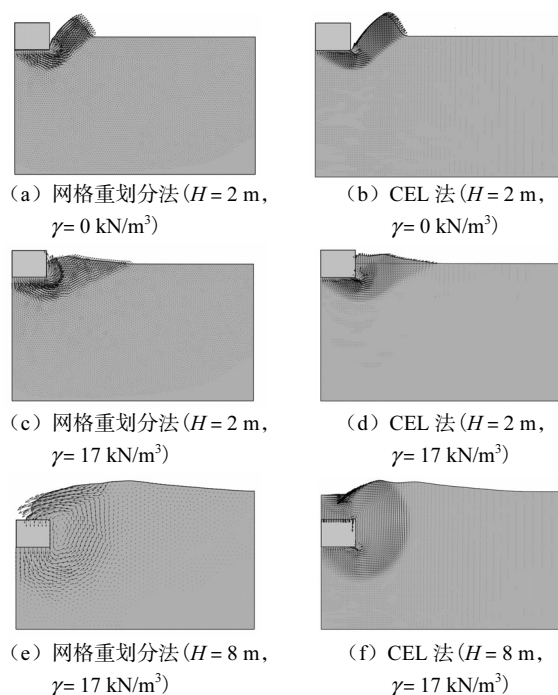


图 8 不同条件下土体的流动机制

Fig.8 Soil flow mechanisms under different conditions

为进一步说明网格重划分法和 CEL 法在有重土条件下土体流动机制的区别, 图 8(e) 和 8(f) 给出了基础嵌入深度  $H = 8 \text{ m}$  时土体的流动机制。可以看出, CEL 法在模拟重力作用下土体流动性方面较网格重划分更强。但哪种方法的模拟结果更符合物理实际, 还需通过物理试验来验证。对比图 8(c) 和 8(e) 或图 8(d) 和 8(f) 发现, 随着基础嵌入深度的增大, 土体的破坏模式由表面的整体破坏向深埋条件下的局部破坏转变。

### 3 结 论

(1) 基于条形基础嵌入问题, 给出了网格重划分法和 CEL 法的实现流程, 并对比了两种方法在分析岩土工程中大变形问题时的有效性; MSMM 插值技术在网格重划分法中的应用, 克服了已有网格重划分法难以推广的技术障碍; 通过与经典的承载力理论和大变形有限元分析技术 RITSS 对比, 验证了两种方法在分析大变形问题时的有效性。

(2) 基于拉格朗日法和欧拉法的基本原理, 借助用户子程序模拟了正常固结黏土土体强度随基础嵌入的变化规律, 该思路可被用于分析更为复杂的岩土工程问题, 如将土体强度设置为土体应变率的函数, 分析冲击载荷作用下结构在土体中的响应等。

(3) 对比了条形基础嵌入过程中土体的流动机制, 土体重度对土体流动机制有显著影响, 直接影响

基础的承载力大小;无重土条件下,两种大变形有限元法的土体流动机制完全一致;有重土条件下,CEL法较网格重划分法在模拟土体流动性方面更强,但哪种方法的模拟结果更符合物理实际,还需通过物理试验来验证。

### 参考文献:

- [1] Randolph M F, Wang D, Zhou H, et al. Large deformation finite element analysis for offshore applications [C]//*Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Goa, India: International Association for Computer Methods, 2008: 3307-3318.
- [2] Qiu G, Henke S, Grabe J. Application of a coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations [J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(1/2): 30-39.
- [3] Hu Y, Randolph M F. A practical numerical approach for large deformation problems in soil [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1998, 22(5): 327-350.
- [4] Hu Y, Randolph M F. H-adaptive FE analysis of elastoplastic non-homogeneous soil with large deformation [J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, 23(1): 61-83.
- [5] Song Z, Hu Y, Randolph M F. Numerical simulation of vertical pullout of plate anchors in clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(6): 866-875.
- [6] 于 龙. 三维 RITSS 大变形有限元方法及其在基础刺入破坏和锚板承载力问题中的应用[D]. 大连: 大连理工大学水利工程学院, 2008.  
Yu Long. A 3-Dimensional RITSS Large Deformation Finite Element Method and Its Application on the Foundation Punch-Through Failure and Plate Anchor Uplift Resistance Problems [D]. Dalian: School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, 2008 (in Chinese).
- [7] Yu L, Liu J, Kong X J, et al. Three-dimensional numerical analysis of the keying of vertically installed plate anchors in clay [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36: 558-367.
- [8] Wang D, Hu Y, Randolph M F. Three-dimensional large deformation finite-element analysis of plate anchors in uniform clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(2): 355-365.
- [9] Tian Y, Cassidy M J, Randolph M F, et al. A simple implementation of RITSS and its application in large deformation analysis [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 56: 160-167.
- [10] Dassault Systemes. *ABAQUS, Version 6.10 Documentation* [M]. Paris: Dassault Systemes Simulia Corporation, 2010.
- [11] Benson D J. Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1992, 99(2/3): 235-394.
- [12] Benson D J, Okazawa S. Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(39/40/41): 4277-4298.
- [13] Qiu G, Henke S. Controlled installation of spudcan foundation on loose sand overlying weak clay [J]. *Marine Structures*, 2011, 24(4): 528-550.
- [14] Chen Z, Tho K K, Leung C F, et al. Influence of overburden pressure and soil rigidity on uplift behavior of square plate anchor in uniform clay [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 52: 71-81.
- [15] Tho K K, Chen Z, Leung C F, et al. Pullout behaviour of plate anchor in clay with linearly increasing strength [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(1): 92-102.
- [16] Zhao Yanbing, Liu Haixiao. Numerical simulation of drag anchor installation by a large deformation finite element technique [C]//*Proceedings of the 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. San Francisco, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [17] Liu Haixiao, Zhao Yanbing. Numerical study of the penetration mechanism and kinematic behavior of drag anchors using a coupled Eulerian-Lagrangian approach [J]. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2014, 45(4): 29-39.
- [18] Skempton A W. The bearing capacity of clays [C]//*Proceedings of the Building Research Congress*. London, UK, 1951: 180-189.
- [19] Hansen J B. A revised and extended formula for bearing capacity [J]. *Danish Geotechnical Institute Bulletin*, 1970, 28: 5-11.
- [20] Davis E H, Booker J R. The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays [J]. *Geotechnique*, 1973, 23(4): 551-563.

(责任编辑:樊素英)