

考虑桩土粘结效应的抗拔桩承载力分析

鄢文杰, 高福平, 李小均

(中国科学院力学研究所 水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190)

摘 要

抗拔桩的极限承载力与岩土体强度以及桩土界面特性等多种因素密切相关。提出了一种模拟桩土相互作用的二维轴对称有限元数值模型, 并与已有实验结果进行了验证分析; 研究了桩土粘结效应对抗拔桩极限承载特性的影响。计算结果表明, 桩体侧阻不仅与桩土界面滑动摩擦阻力相关, 而且受桩土粘结力的影响; 随着岩土体抗剪强度(特别是粘聚力)的增大, 桩土粘结作用对极限承载力的影响愈加显著。

关 键 词: 抗拔桩; 桩土相互作用; 承载力; 界面粘结效应; 数值模拟

0 引 言

海洋浮式平台、水中悬浮隧道(又称“阿基米德桥”)等浮式结构需要基础提供抗拔承载力。抗拔桩是抗拔基础的主要型式之一^[1]。在不同地质条件下, 抗拔桩的极限承载力差异较大, 有时可达一个数量级以上。为保证浮式结构的稳定性, 需合理预测抗拔桩的极限承载力。

在桩顶荷载达到极限荷载时, 桩身侧表面所发生的岩土阻力称为极限侧阻力。对于抗拔桩而言, 极限桩侧阻力是其极限承载力的控制因素^[2]。目前对于抗拔桩的研究针对砂土的较多。在砂土中, 一般假设桩土之间为库伦滑动摩擦, 即桩侧阻力与界面法向压力成正比; 在此假设下的承载力预测值与试验值较为接近^[3-5]。而对于粘聚强度较大的岩石或粘土, 采用上述假设将导致桩侧阻力的预测值远低于实测值^[6]。在灌注桩施工过程中, 灌浆体与岩土体形成粘结作用; 土体粘聚强度越大, 桩土界面粘结作用越强。现场观测表明, 在岩石和粘土体中, 灌浆体与岩土体之间的粘结强度已经接近甚至超过了其滑动摩擦应力^[7], 此时界面粘结力与滑动摩擦力相比已不可忽略。因此, 当岩土体的粘聚强度较大时, 抗拔桩极限承载力分析应同时考虑桩土滑动摩擦力和桩土粘结作用。

在桩土相互作用的数值模拟中, 桩体与岩土体两种性质材料界面的接触问题是一个难点。已有研究多采用无粘结的摩擦模型^[8,9]或桩土共节点模型^[10,11]; 前者不能反映桩土粘结作用, 而对于后者, 桩土之间不能发生相对滑动, 与实际情况相差较大。目前已有的接触模拟方法还不能同时模拟界面的粘结与摩擦效应。

本文提出了一种模拟桩土相互作用的二维轴对称有限元数值模型, 可实现桩土界面粘结和滑动摩擦的同时模拟。基于该数值模型, 研究了桩土粘结效应对单桩抗拔极限承载特性的影响。

1 数值计算模型

图 1 为抗拔桩示意图, 本文以此为对象进行研究

1.1 二维轴对称模型

等截面单桩的竖向加载为轴对称问题, 可建立轴对称二维模型进行分析。计算软件采用 ABAQUS 有限元分析软件(Version 6.8-1), 模型划分及边界条件如图 2 所示。模型主要分为桩体和岩土体两部分, 桩土界面采用接触对建立接触关系(详见 2.2 节)。模型左边界为沿桩轴线的对称边界, 右边界限制

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(10532070); 中国科学院知识创新工程重大项目(KJXC2-YW-L07)

水平向位移, 下边界限制水平及竖向位移, 上边界为自由边界。通过试算, 岩土体水平向计算宽度取为桩体半径的 10 倍, 竖向计算深度取为桩体长度的 2 倍, 可消除侧边界和下边界对计算结果的影响。

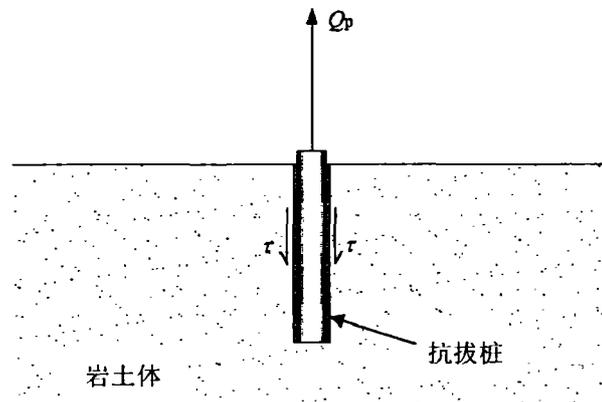


图 1 抗拔桩承载示意图

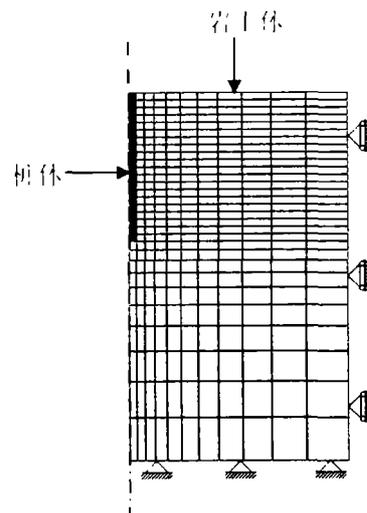


图 2 有限元模型示意图

在桩体上拔过程中, 桩体变形近似为线弹性, 故桩体采用线弹性材料模型。岩土体由于桩土界面的剪切作用, 可能发生塑性变形。在计算中采用扩展 Drucker-Prager 模型以反映材料的塑性。扩展 Drucker-Prager 模型能较好地模拟岩土体材料屈服与围压相关的特性, 同时其光滑的屈服面有利于计算的收敛。

在扩展 Drucker-Prager 模型中, 剪切破坏面的屈服准则为

$$q - p \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

式中, q 和 p 分别是 Mises 等效应力和等效围压应力, β 和 d 分别是 p - q 平面上剪切屈服面的倾角和与 q 轴的截距, 如图 3 所示。它们与岩土体的粘聚力 c 和内摩擦角 ϕ 具有如下关系:

$$\tan \beta = \sqrt{3} \sin \phi \quad (2)$$

$$d = \sqrt{3} \cos \phi \cdot c \quad (3)$$

此模型的详细描述可见文献[12]。

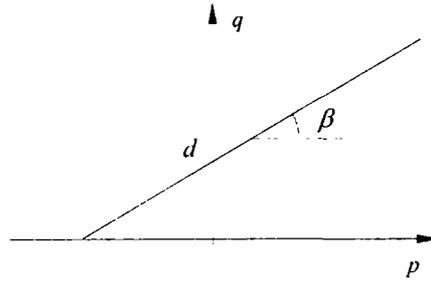


图3 扩展 Drucker-Prager 模型在 p - q 平面的屈服轨迹

1.2 桩土界面模拟方法

桩土之间接触边界的模拟是桩体抗拔模拟的关键。已有研究中,大多采用接触单元模拟接触关系。此方法存在一定的缺陷,即接触单元参数不易确定,且由于单元参数变化导致的界面特性误差较大。

在本文提出的数值模型中,利用 ABAQUS 软件提供的接触对算法将桩土界面设置为接触面,通过编程自定义接触对之间的本构关系,从而实现同时模拟界面的粘结和摩擦两种效应。

界面节点的接触状态分为闭合和分离两种状态,如图 4 所示。在初始状态下,界面法向距离小于一定值 w_n 则判定为闭合状态,否则节点为分离状态。分离状态下界面节点为自由面节点,不存在法向和切向应力。

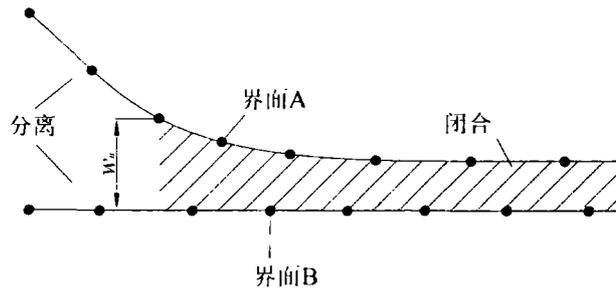


图4 接触界面节点的两接触状态

对于闭合状态的接触对,其本构关系包含切向和法向两个方面:

① 切向接触属性:何思明等^[6]分析试验数据,认为考虑粘结和摩擦作用的情况下,界面最大剪切应力为

$$\tau_{\max} = c_i + \sigma_n \tan \delta \quad (4)$$

式中, τ_{\max} 为界面最大剪切应力, c_i 为界面的粘结强度, σ_n 为界面的法向压应力, δ 为桩土界面摩擦角。当界面切向相对变形达到一定程度 w_t 后,粘结作用破坏,其后界面剪切应力即为滑动摩擦力 $\tau_{res} = \sigma_n \tan \delta$ 。接触对切向剪切应力与切向变形的关系如图 5(a)所示,图中, w_t 为粘结状态下最大切向变形。

② 法向接触属性:粘结作用使得桩土之间能承受一定的法向拉应力,其大小为界面粘结强度。在达到最大拉应力后,法向拉应力开始降低直至为零,并发生粘结破坏,此后界面处于分离状态。法向接触属性如图 5(b)所示,图中, w_n 为粘结状态下最大法向变形, K_s 为土体弹性模量, K_i 为界面弹性模量。

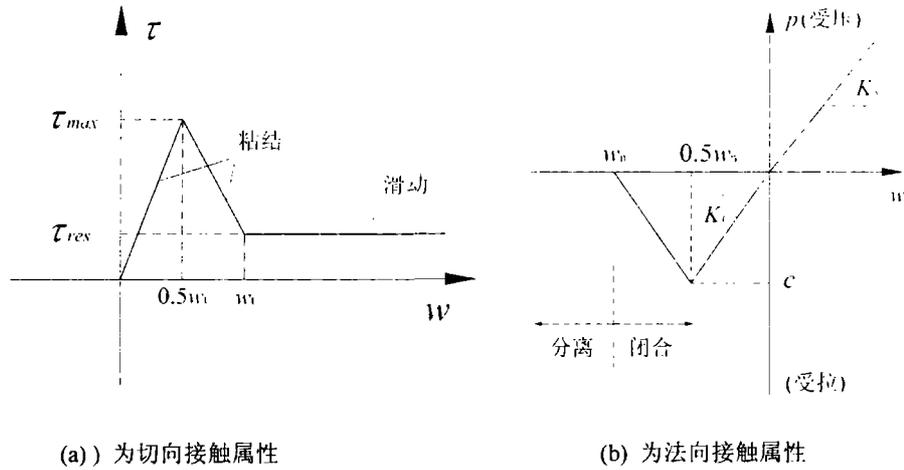


图5 本文提出的界面本构关系

1.3 模型验证

采用 Sowa(1970)^[13]砂土中灌注桩抗拔试验以及何剑(2004)^[14]嵌岩灌注桩抗拔试验参数进行数值计算, 得到荷载位移曲线如图 6 所示。图中, Q 为桩顶上拔荷载, s 为桩顶位移变形。

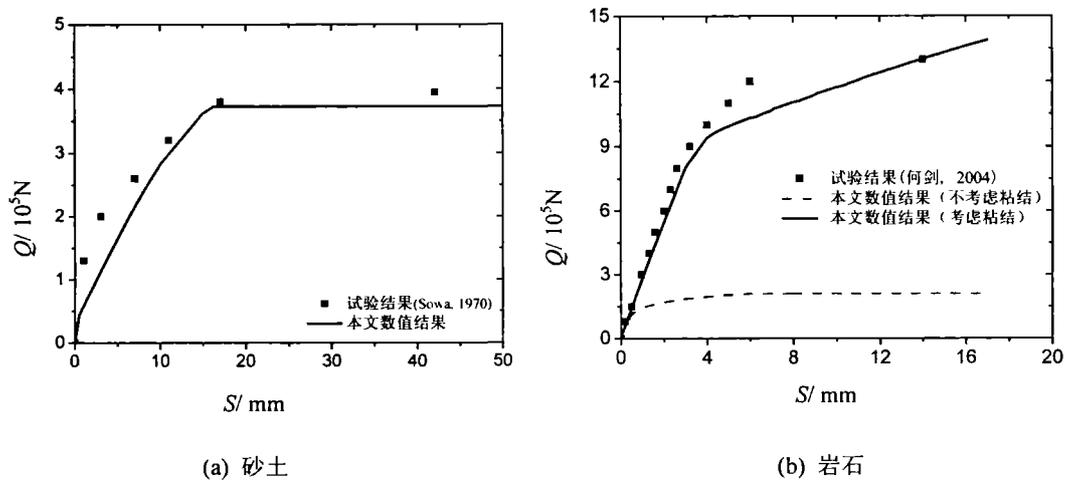


图6 数值计算与试验结果的对比

在数值计算中, 砂土中的桩土接触采用不考虑粘结的摩擦模型。由图 6(a)可见, 此假设下数值结果与试验结果比较接近。而对于嵌岩桩, 由图 6(b)可看出, 仅考虑摩擦所得承载力计算值远低于实测值, 二者差异较大。在考虑界面粘结和摩擦后, 计算结果与试验值比较接近。

2 计算结果及讨论

2.1 计算参数

桩侧阻力的发挥受桩体和岩土体性质共同影响。桩体类型的不同主要影响界面的粘结强度, 而不同岩土体的主要影响在于土体粘聚强度的不同。在对比计算中, 选取三种典型岩土样, 改变界面粘结强度以分析桩体性质对承载力的影响; 然后改变土体粘聚强度, 分析粘结效应对不同岩土体的影响。桩体及岩土样参数见表 1。在计算中, 桩体选用相同的计算参数, 桩土摩擦角与土体内摩擦角相等, 以消除对比分析中岩土体内摩擦角对承载力的影响。

表1 对比计算参数

	长 L/m	直径 D/m	密度 kg·m ⁻³	弹性模量 E/Pa	泊松比	粘聚强度 c/Pa	内摩擦 角 / (°)	桩土摩擦系 数 tan
桩体	10	1	2.3×10 ³	2.8×10 ¹⁰	0.17	/	/	/
土样1 (砂土)	/	/	1.8×10 ³	1.5×10 ⁷	0.35	1.0×10 ²	30	0.58
土样2 (粘土)	/	/	1.8×10 ³	3.0×10 ⁸	0.25	8.0×10 ⁴	20	0.36
土样3 (岩石)	/	/	2.1×10 ³	2.0×10 ¹⁰	0.20	1.5×10 ⁶	45	1.00

2.2 承载特性分析

2.2.1 界面粘结强度影响

图7给出了三种岩土样中不同界面粘结强度对承载力的影响关系。图中， Q_p 为考虑粘结作用下的承载力， Q_{p0} 为不考虑粘结作用下的承载力。

不同土体样本中承载力随界面粘结强度的变化呈现如下变化规律：在界面粘结强度与土体粘聚强度相比很低时，桩土界面接近为无粘结摩擦状态，承载力主要由摩擦阻力构成。随着界面粘结强度的增加，承载力显著增长，并在界面粘结强度与土体粘聚强度相等时达到最大值。此后进一步增加界面粘结强度所引起的承载力变化很小。

不同岩土样的承载力变化规律反映了界面粘结力对承载力的影响程度有所不同。对于砂土样本，由于其粘聚强度很低，可以看到界面粘结强度的变化对承载力影响很小，且采用两种界面模型所得到的承载力很接近。而对于粘土样本和岩石样本，考虑粘结和摩擦所得到的承载力远大于仅考虑摩擦情况下的承载力。

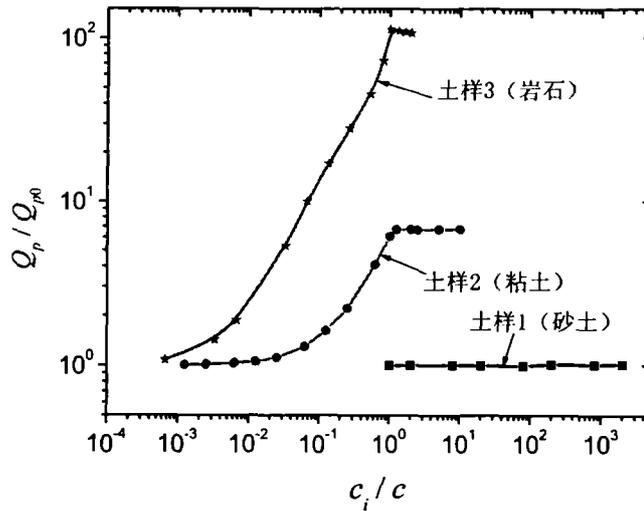


图7 不同土体下界面粘结强度对承载力的影响

下文基于桩侧阻力的发展过程分析上述承载规律。在接触界面中，界面抗剪强度为 τ_i ：

$$\tau_i = c_i + \sigma_n \tan \delta; \tag{5}$$

式中， δ 为桩土摩擦角， σ_n 为界面法向压应力。自重状态下，桩侧土体抗剪强度为

$$\tau_s = c + \sigma_s \tan \phi; \tag{6}$$

式中， σ_s 为土体水平应力。初始状态下，土体水平应力与桩土界面的法向压应力大致相等。因此，在桩土摩擦角与岩土体内摩擦角相近的前提下，界面与土体抗剪强度的差异主要反映为粘结强度的差异。

如图8所示，所发挥的桩体侧阻 τ 与界面抗剪强度和土体抗剪强度相关。当桩体上拔荷载逐渐增加时，桩体侧阻逐渐增大；在界面或岩土体发生屈服时达到最大值 τ_{max} 。其破坏过程可分为以下两种

情况。

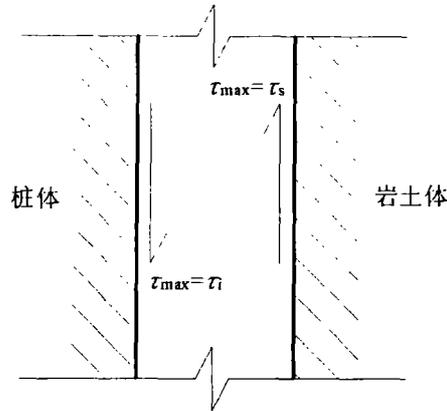


图 8 桩土界面摩擦阻力示意图

在 $\tau_i < \tau_s$, 即界面抗剪强度较弱时, 桩侧剪应力 τ 首先达到界面抗剪强度。此时发生界面粘结破坏, 桩侧剪应力开始降低直至残余摩擦应力。此后发生桩土界面的相对滑动, 而土体尚未屈服。在这种情况下, 桩侧剪应力 τ 取决于界面抗剪强度 τ_i 。因此, 在粘聚力较大的岩土体中, 增加界面粘结强度能显著提高极限承载力。

在 $\tau_i > \tau_s$, 即岩土体抗剪强度较弱时, 桩侧剪应力 τ 首先达到土体抗剪强度。此时土体发生剪切屈服破坏, 而界面粘结作用使得桩土还相互粘结在一起, 不发生界面相对滑动。此时, 桩侧剪应力 τ 取决于土体抗剪强度 τ_s , 增加界面粘结强度对承载力影响很小。

2.2.2 土体粘聚强度影响

由图 7 可发现, 不同岩土样本下, 界面模型的不同对极限承载力影响程度有所不同。对于土体粘聚强度对承载力的影响, 根据相关文献^[7], 考虑界面粘结时, 其粘结强度取 400kPa。在此粘结作用下, 界面抗剪强度远大于土体抗剪强度。

图 9 给出了不同界面模型下承载力随土体粘聚强度的变化规律。图中, 横坐标为无量纲化土体粘聚强度, γ_s 为土体容重, 纵坐标为无量纲化极限承载力。实线所示为施加界面粘结的情况, 承载力取决于土体强度, 且随着土体粘聚强度的增加近似为线性增长。虚线所示为不施加界面粘结的情况, 承载力主要由摩擦阻力构成, 与界面法向压应力水平 σ_n 有关; 而土体粘聚强度的增加并不会明显导致 σ_n 的变化, 因此承载力随土体粘聚强度的增加变化很小。随着土体粘聚强度的增大, 不同界面处理方法将导致承载力差异逐渐增大。

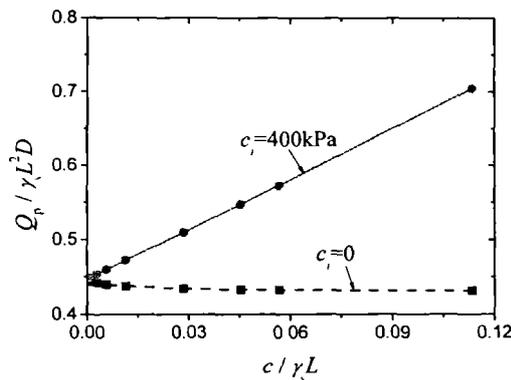


图 9 土体粘聚强度对承载力影响

3 结 语

本文提出了一种模拟桩土相互作用的二维轴对称有限元数值模型,并与已有实验结果进行了验证分析。研究了桩土界面粘结效应对单桩抗拔承载力的影响。计算结果表明,桩体侧阻不仅与桩土界面滑动摩擦阻力相关,而且受桩土粘结力的影响。随着岩土体抗剪强度(特别是粘聚力)的增大,桩土粘结作用对极限承载力的影响愈加显著。

参考文献:

- [1] 刘祖德. 抗拔桩基础 [J]. 地基处理, 1995, 6(4): 1-12.
- [2] 中华人民共和国建设部. JGJ94-2008, 建筑桩基技术规范 [S], 2008.
- [3] MEYEHOF G G, ADAMS J I. The ultimate uplift capacity of foundations [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5(44): 225-244.
- [4] DAS B M. A procedure for estimation of uplift capacity of rough piles [J]. Soils and Foundations, 1983, 23(3):122-126.
- [5] CHATTOPADHYAY B C, PISE P J. Uplift capacity of piles in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(9): 888-904.
- [6] 何思明, 吴永, 李新坡. 嵌岩抗拔桩作用机制研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 333-344.
- [7] 韩军, 陈强, 等. 锚杆灌浆体与岩(土)体的粘结强度 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3482-3486.
- [8] NICOLA A D, RANDOLPH M F. Tensile and compressive shaft capacity of piles in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(12): 1952-1973.
- [9] 孙学先, 张慧, 田明. 考虑多年冻土蠕变特性的抗拔桩非线性有限元分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 3101-3106.
- [10] 陈斌, 卓家寿, 吴天寿. 嵌岩桩承载性状的有限元分析 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 51-55.
- [11] 杨强, 任继承, 张浩. 岩石中锚杆拔出试验的数值模拟 [J]. 水力学报, 2002, 12: 68-73.
- [12] HIBBITT, KARLSSO and SORENSON Inc. ABAQUS Theory Manual, Version6.8-1 [M]. USA HKS Co., 2008.
- [13] SOWA V A. Pulling capacity of concrete cast in situ bored piles [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1970, 7:482-493.
- [14] 何剑. 嵌岩灌注桩抗拔承载性状试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 315-319.

Pile-Soil Interfacial Bonding Effects on Uplift Bearing Capacity of Tension Pile

YAN Wen-jie, GAO Fu-ping, LI Xiao-jun

(Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract

The uplift bearing capacity of tension pile is related to the strength of soils or rocks, pile-soil/rock interfacial properties, etc. This paper proposes a two-dimensional axisymmetric FEM model for the pile-soil interaction simulation, which is verified with the existing experimental results. The pile-soil interfacial bonding effects on the uplift bearing capacity is further investigated. Numerical simating results indicate that

pile lateral resistance is dependent on not only the interfacial sliding friction but also the soil adhesive strength. With increasing soil adhesive strength, the pile-soil interfacial bonding effects on the uplift bearing capacity become more significant.

Key words: tension pile; pile-soil interaction; bearing capacity; interfacial bonding effects; numerical analysis

作者简介

鄢文杰 男, 1985 年生, 硕士研究生。主要从事岩土工程和海洋工程力学研究。

高福平 男, 1973 年生, 研究员。主要从事岩土工程和海洋工程力学研究。

李小均 男, 1984 年生, 硕士研究生。主要从事海洋岩土力学研究。