

DOI: 10.11779/CJGE202002001

板桩结构土压力理论的创新发展

蔡正银

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 对于板桩码头, 其主要的荷载为作用于码头前墙上的土压力, 该荷载一方面是由于港池开挖引起前墙两侧土压力的不平衡产生, 另一方面是由于码头表面荷载作用于地基土, 从而增加了前墙陆侧的土压力。板桩码头深水化的关键要求必须解决港池挖深导致的前墙土压力急剧增大问题, “遮帘”和“卸荷”是减少前墙土压力的有效途径, 由于设置了遮帘桩和卸承台, 使得板桩结构的受力情况更加复杂, 涉及的关键科学技术问题是土和结构的相互作用。针对遮帘式和分离卸荷式板桩码头新结构开发过程中的土压力问题, 先后研究了土体密度与粒径对静止土压力系数的影响、遮帘式板桩结构的土压力“桶仓效应”和“遮帘效应”, 以及分离卸荷式板桩结构的土压力“卸荷效应”, 为板桩码头新结构的发展奠定了理论基础。

关键词: 板桩; 土压力; 桶仓效应; 遮帘效应; 卸荷效应; 离心模型试验



中图分类号: TU445 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)02-0201-20

作者简介: 蔡正银(1965—), 男, 二级教授, 博士生导师, 无党派人士, 江苏省第 10 届、11 届、12 届政协委员, 从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、土工离心模拟技术方面的研究工作。香港科技大学岩土工程博士毕业, 德国柏林工业大学博士后出站, 现任南京水利科学研究院岩土工程研究所所长。主要学术兼职包括: 《岩土工程学报》主编, 中国土木工程学会理事, 中国水利学会理事, 中国水利学会岩土力学专业委员会常务副主任兼秘书长, 中国土木工程学会土力学与岩土工程分会土工测试专委会主任, 中国水利学会岩土力学专委会土工测试专门委员会主任, 国际土力学与岩土工程学会土工物理模拟技术委员会(ISSMGE TC104)理事, 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室副主任。主要研究方向为土工测试、土工数值仿真技术和离心模拟技术。先后主持完成了 80 多项科研项目, 是国家重点研发计划项目“高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术”首席科学家, 国家 863 计划“现代交通基础设施建设和养护技术”项目召集人和“20 万吨级深水板桩码头关键技术”课题负责人, 水利重大专项“咸寒区灌渠冻害评估预报与处治技术”项目负责人, 国家自然科学基金“粗颗粒土剪胀理论与本构模型”和“遮帘式板桩结构的挡土机理”项目负责人。获国家和省部级科技奖 16 项, 其中国家科技进步二等奖 1 项(排名第一), 省部级科技进步特等奖 4 项、一等奖 7 项(五项排名第一)。获国家发明专利 36 项, 实用新型专利 10 项。发表学术论文 160 余篇, 主、参编著作 8 部。主编国家标准 2 部, 主编水利、交通行业标准各 1 部, 主编水利和港口工程团体标准 4 部。获全国优秀科技工作者称号, 为全国水利系统先进工作者, 享受国务院政府特殊津贴专家, 中国航海学会首届科技贡献突出人物, 江苏省“333 人才工程”中青年领军人才, 水利部“5151 人才工程”部级人选。E-mail: zycai@nhri.com。

Innovation and development of earth pressure theories for sheet-pile structures

CAI Zheng-yin

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The main loads on a sheet-pile wharf are the earth pressures acting on its front wall. On one hand, they are induced by the imbalance of earth pressures at both sides of the front wall owing to excavation of harbor basin; on the other hand, the surface loads of the wharf acting on the foundation soils further increase the landward earth pressures of the front wall. For the sharply increasing earth pressures on the front wall induced by the excavation depth of harbor basin which is required by deep-water sheet-pile wharves, the “barrier” and “unloading” measures are the effective ways to reduce the earth pressures on the front wall. The presence of barrier piles and relief platform leads to more complex forces acting on the sheet-pile structures, and the key scientific and technical problem concerned is the interaction between the soils and the structures. With regard to the earth pressure problems during the development of novel structures such as barrier and separated unloading sheet-pile wharves, a series of researches are performed to lay the theoretical foundation for the

development of the novel structure of deep-water sheet-pile wharf, including influences of soil density and grain size on earth pressures at rest, silo effects and barrier effects of earth pressures on barrier sheet-pile structures, and unloading effects of earth pressures of separated unloading sheet-pile structures.

Key words: sheet pile; earth pressure; silo effect; barrier effect; unloading effect; centrifugal model test

0 引言

码头泊位是港口建设的核心，作为国家最重要的交通基础设施之一，对于国民经济的发展至关重要^[1-2]。相比同级别的重力式和高桩承台式码头结构，板桩码头造价要节省 25%以上，特别适合粉砂质地区采用挖入式港池建港。新中国成立 70 年来，中国建设的板桩码头近 300 个，其中 200 多个是中小型码头泊位^[3]。20 世纪末在唐山港建成的 3.5 万吨级地连墙式码头，是当时国内最大的板桩码头。此后板桩码头的发展一直停滞不前，远远落后于重力式和高桩码头。

现代港口的发展要求码头泊位必须深水化，能否建成深水泊位成为板桩码头结构生存的关键^[4]。对于板桩式码头，水深的变化对其强度和稳定性的影响是极其敏感的：当码头前沿水深加大以后，作用于前墙上的土压力急剧加大，导致前墙的内力和变形随之增大，当达到某一水深时前墙由于过大的内力和变形就会发生破坏。对此单靠加大前墙的断面已不能解决上述问题，换言之，已设计不出经济合理的深水单锚式板桩码头结构，这也正是国内外板桩码头徘徊不前的主要原因。因此要发展深水板桩码头泊位，必须研发新的板桩结构。

板桩码头新结构开发的难点在于如何解决港池挖深与土压力和结构变形之间的矛盾，涉及的关键科学问题是地基土与码头结构相互作用^[5-6]。为了解决这个问题，中交第一航务工程勘察设计院有限公司、南京水利科学研究院、唐山港口实业集团有限公司、大连理工大学、天津深基工程有限公司等单位开展了产学研联合攻关，从板桩结构的土压力理论研究出发，进行了系统的理论与试验研究，基于“遮帘”和“分离卸荷”的原理，先后开发了“半遮帘式”^[7]、“全遮帘式”^[5]、“分离卸荷式”^[8]和“带肋板的分离卸荷式”^[9]4 种板桩码头新结构，如图 1 所示，将中国板桩码头结构建设水平从 3.5 万吨级提升至 20 万吨级。

2003 年起，随着板桩码头新结构的研发，研究成果在唐山港京唐港区和曹妃甸港区逐步推广应用，目前已建成深水板桩码头泊位 57 个，码头岸线达 14.7 km，年吞吐量超过 2.58 亿吨，成为粉砂质地区优先选择的码头结构型式。2012 年，板桩码头新结构从粉砂质地区推广应用到淤泥粉土质地区，在江苏盐城滨海港建设了 2 个 10 万吨级分离卸荷式板桩码头，进一步拓展了新结构的应用范围，实现了滨海港建设 10

万吨级深水码头泊位的梦想。

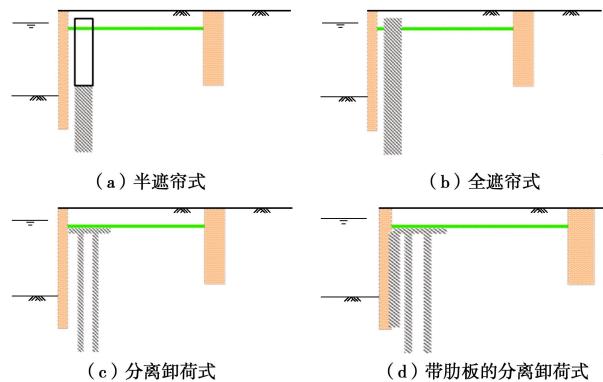


图 1 深水板桩码头新结构

Fig. 1 Innovative structure of sheet-pile wharves

深水板桩码头的发展过程就是对土压力理论的深入认识过程，先后研究了土体密度与粒径对静止土压力系数的影响、遮帘式板桩结构的土压力“桶仓效应”和“遮帘效应”，以及分离卸荷式板桩结构的土压力“卸荷效应”，为板桩码头的发展奠定了理论基础。

1 静止土压力系数 K_0

静止土压力系数 K_0 是土力学中的一个基本参数，对确定土体初始应力状态及对应的静止土压力分布具有重要意义^[10-11]。对于板桩码头，虽然研发了“遮帘式”和“分离卸荷式”等多种新的结构形式，但其土压力作用机理仍有类似之处，即均是通过依靠板桩入土部分及锚碇结构所产生的侧向土体抗力来保持码头整体结构的稳定^[3, 6]。在港池开挖前，前墙上的土压力可近似看成静止土压力，其大小取决于土体竖向应力和静止土压力系数 K_0 ，该力是板桩码头计算分析的基础。港池开挖后，前墙陆侧的土压力从静止土压力向主动土压力变化。

板桩码头结构主要适用于砂土地区，对于砂土的静止土压力系数主要影响因素有土的密度和粒径，对此国内外一些学者开展了大量的研究工作，但至今仍存在很大的争议。国内土力学教材中都有对砂土静止土压力系数 K_0 的相关描述^[12-17]，且都认为 K_0 与土体密度有关，但在 K_0 如何随土体密度变化的认识上大相径庭。河海大学卢廷浩教授主编的《土力学》教材中松砂 K_0 值在 0.4~0.45，紧砂 K_0 值在 0.45~0.5；殷宗泽教授主编的《土力学与地基》中松砂 K_0 值在 0.5~0.6，紧砂 K_0 值在 0.3~0.5；清华大学李广信教授等主编的《土力学》教材中松砂 K_0 值取 0.6，紧砂 K_0 取

0.23。还有其他许多《土力学》教材中关于砂土 K_0 与密度的关系描述都不一样，更没有定量描述砂土 K_0 值随密度和粒径变化规律的报导。

1.1 K_0 的定义及确定方式

静止土压力系数 K_0 是指土体在无侧向应变条件下水平有效应力与竖向有效应力的比值^[18]。目前获得砂土静止土压力系数 K_0 的途径大致有以下 3 种。

第一种方法是室内试验法，主要是通过在实验室条件下模拟土体的侧限状态，进而获得其对应的水平有效应力与竖向有效应力，随后计算得到相应的 K_0 值，其中比较常用是三轴仪法^[19-21]和侧压力仪（固结仪）法^[22-24]。三轴仪法是利用三轴仪，在土样加载过程中通过反馈控制围压和竖向应力，使土样始终不发生侧向变形，来获得 K_0 值。一些先进的能进行应力路径试验的三轴仪如 GDS 三轴仪、GCTS 三轴仪等都可以进行 K_0 试验。目前绝大多数试验实际上反馈控制的是土样的径向应变，而该应变是通过测量土样的体变和竖加上反馈控制带来的滞后效应，要真正控制土样侧向不发生变形很难，因此这种方法得到的 K_0 值是不太准确的。随着测试技术的进步，一些先进的三轴仪上安装了径向应变计，用来测量土样的径向应变，提高了径向变形反馈控制的准确性^[25]，但试验过程中仍然存在很多不确定的因素，如径向应变计安装等问题。侧压力仪法是将土样安装在侧压力仪中，给土样竖向加载，通过测量土样四周封闭压力室内的水压力作为水平应力，从而计算得到土体的静止土压力系数 K_0 。同样由于土样加载过程中土体的侧向变形不均匀，且封闭压力室中的水会发生一定的压缩变形（主要是很难保证压力室完全没有空气），因此该方法测到的 K_0 值也存在一定的误差。

第二种方法是原位测试法，岩土工程勘察规范^[26]中推荐了两个现场试验来确定土的静止土压力系数 K_0 ，一个是旁压试验（PMT）^[27-29]，它是利用圆柱形旁压器外的弹性膜在土中的扩张对周围土体施加均匀压力，测得压力与径向变形的关系，通过计算得到对应状态土体的 K_0 值；另一个则为扁铲侧胀试验（DMT）^[30-32]，具体是将扁铲探头贯入土中，达到指定深度后利用气压使扁铲侧面的圆形钢膜向外扩张获得对应的压力 - 变形规律，进而得到相应的 K_0 值。随着原位测试技术的进一步完善，多功能静力触探（CPTu）^[33-34]、原位土体水平压力测定仪（KSB）^[35]等新技术也被逐渐使用。上述方法均能简单、快速地获得土体的静止土压力系数 K_0 值，但在仪器安装过程中会不可避免地对土体产生扰动，同时不管用哪种方法，土体都不可避免地发生了一定的侧向变形，这与静止土压力的定义相矛盾。

第三种方法是经验公式法，主要是通过构建静止土压力系数 K_0 与土体有效内摩擦角^[36]、塑性指数 I_p ^[37] 及超固结比 OCR ^[38] 等指标之间的关系，得到可表征相应状态土体 K_0 值的经验公式，其中以 Jaky 公式^[36] ($K_0 = 1 - \sin \varphi'$ ，其中 φ' 为土体的有效内摩擦角) 的应用最为广泛。但有研究表明^[39]，对于摩擦角较大的土体，Jaky 公式计算值将明显低估其 K_0 。此外，摩擦角 φ' 是土体的基本参数，与土体的密度无关，按照该公式 K_0 一定与土的密度无关，这显然不符合实际情况。在工程计算及分析中，也常会借助弹性理论由泊松比反推确定土体的 K_0 值，但运用此方法获得的 K_0 值与实际情况相差较远。

1.2 砂土 K_0 离心模拟

纵观现有对静止土压力系数 K_0 的研究，准确获得 K_0 值的前提在于土体能否真正处于侧限状态。针对上述不足，自 2005 年起，笔者及团队将离心模型试验引入砂土静止土压力系数 K_0 的研究中，较为成功地实现了试验过程中土体处于侧限状态这一关键技术难题，在此基础上，进一步研究了土的初始相对密度和粒径对砂土静止土压力系数 K_0 的影响。

（1）模拟均质砂土层单墙 K_0 离心模型试验

土工离心模型试验是一种物理模拟技术，由于能保持模型和原型应力相似，可再现原型的反映特性，目前离心模拟技术已经应用到各行各业。将砂土模型置于离心场下试验，不但可避免室内单元试验中因试样尺寸过小导致的尺寸效应，同时可还原土体的真实应力场，是一种研究砂土静止土压力较为理想的手段。

本次离心模型试验是在南京水利科学研究院 400 g·t 大型土工离心机上进行的，如图 2 所示。该离心机的最大半径为 5.5 m，最高离心加速度 200g，相应最大负荷为 20 kN，容量（最大离心加速度与此时的最大负荷之乘积）达 400 g·t。加速度控制采用可控硅无级调速方式。该机配有 100 个银质滑环通道用于信号传输，其中 10 路电力环，1 路气压环，2 路液压环，以及 64 路高精度数据传送环。该机还配有一套 CCD 摄像系统，可随时从操作室的监视器中观察试验过程中模型的变化。试验拟采用大型平面应变模型箱，其箱体净空尺寸为 1000 mm（长）× 400 mm（宽）× 550 mm（高），模型箱的一侧侧板为透明航空有机玻璃板，是试验过程中拍摄和监视模型的窗口。

为了在离心场下近似实现土体的侧限状态，将一块高度为 360 mm、宽度为 400 mm 的铝合金板（这里称为单墙）预先竖直固定在模型箱中部，然后均匀地撒上一层细砂，则模型在被逐级加速的过程中，单墙对称承受侧向土压力，对应的墙体可视为无侧向变形，此种条件下单墙所受的侧向土压力可视作侧限状态下

的静止土压力。通过测量试验过程中单墙一侧的侧向土压力，结合测点位置的竖向应力（即自重应力）计算值，最终确定砂土静止土压力系数 K_0 。其中单墙的侧向土压力由土压力传感器直接测得，而测点位置的竖向应力根据测点处土层的深度和土样的密度计算得到。土层的深度由其初始深度结合模型箱顶部的激光位移传感器所获得的土体竖向变形进行校正。



图 2 NHRI 400 g·t 大型土工离心机

Fig. 2 NHRI centrifuge system (400 g·t)

图 3 为模型中土压力传感器和激光位移传感器的布设图。土压力传感器均布置在金属板一侧，共 10 只（编号 $pf_1 \sim pf_{10}$ ）。激光位移传感器则安装在模型箱顶部，共 5 只（编号 $S_0 \sim S_4$ ）。试验所用的土压力传感器均为定制的 BW-3 微型土压力盒，该型传感器为膜式结构，直径 16 mm，厚度 4.8 mm，量程为 0~800 kPa，具有尺寸小、灵敏度高、稳定性高等优势，具体性能参数可参考文献[40]。

试验土样选用唐山港曹妃甸港区的细砂，通过砂雨法制备成相应的地基模型。细砂的平均粒径 $d_{50}=0.129$ mm，地基模型的密度 $\rho_d=1.44$ g/cm³，相对密度 $D_r=0.45$ ，内摩擦角 $\varphi'=33^\circ$ 。

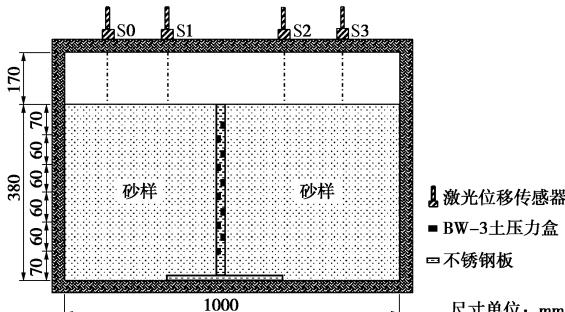


图 3 单墙模型及传感器布置图（修改自蔡正银等^[54]）

Fig. 3 Layout of single wall model and sensors (after Cai et al.^[54])

图 4 为单墙在设计加速度 75g 下的侧压力随深度分布结果。从图中可以看出， K_0 条件下单墙的侧向土压力随标高呈线性分布，符合土力学的基本常识，这也初步验证了采用离心模型试验获得静止土压力系数 K_0 方法的可行性。根据上述侧向土压力实测值和测点处的竖向自重应力计算值，通过拟合得到最佳拟合直线，其斜率等于 0.45，即此风干细砂土的静止土压力系数 K_0 为 0.45。

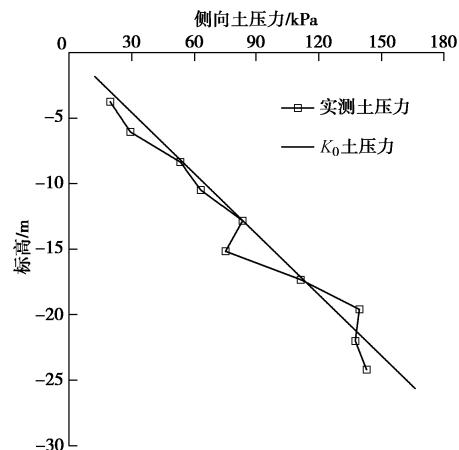


图 4 离心场下单墙侧向土压力分布（修改自蔡正银等^[54]）

Fig. 4 Lateral earth pressure profile against single wall (after Cai et al.^[54])

(2) 密度和粒径对 K_0 的影响

单墙 K_0 离心模型试验初步证实了离心模型试验是获得静止土压力系数 K_0 的一种较为理想的手段。下面将介绍笔者团队利用离心模型试验来研究干砂密度和粒径对 K_0 影响的一些最新试验结果及初步结论。

a) 试验设备

本试验是在南京水利科学研究院 60 g·t 土工离心机上进行的。该机有效半径为 2 m，最大载荷：100g 时，6 kN；200g 时，3 kN。加速度控制采用可控硅无级调速方式。该机配有 60 个银质滑环通道用于信号传输，可满足应力、应变、弯矩、位移等多种物理量的测量需要。

试验模型箱尺寸为 700 mm×350 mm×450 mm（长×宽×高）。与单墙 K_0 离心模型试验中实现土体侧限状态的思路类似，这里制作了两块不锈钢板，试验时安放在模型箱两侧。钢板高度为 450 mm，宽度 350 mm，厚度为 20 mm。将 BW-3 微型土压力盒直接嵌入钢板一侧，保持其测量表面与钢板表面平齐。每个钢板表面平行布置两排土压力盒，每排从上到下布置 4 只，间距 60 mm，具体的模型和传感器布置如图 5 所示。

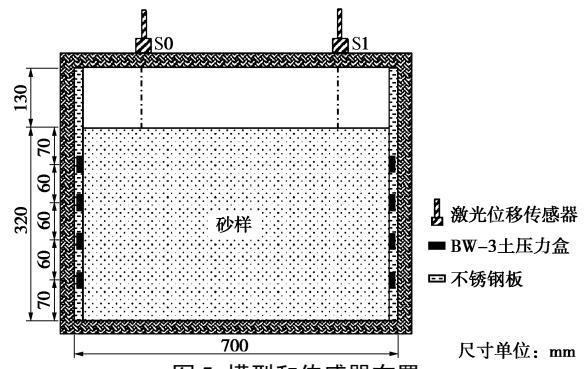


图 5 模型和传感器布置

Fig. 5 Layout of model and transducers

b) 试验土样

试验土样为福建标准砂，按不同粒径大小分为 3

种,依次记作^{#1}、^{#2}和^{#3},其中^{#1}为细砂,^{#2}为中砂,^{#3}为粗砂,3种砂的级配曲线如图6所示。根据土工试验方法标准^[41]确定上述3种砂土对应的物理力学指标为:^{#1}砂, $\rho_{d\max}=1.60 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\min}=1.40 \text{ g/cm}^3$, $d_{50}=0.183 \text{ mm}$; ^{#2}砂, $\rho_{d\max}=1.64 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\min}=1.43 \text{ g/cm}^3$, $d_{50}=0.487 \text{ mm}$; ^{#3}砂, $\rho_{d\max}=1.71 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\min}=1.46 \text{ g/cm}^3$, $d_{50}=1.609 \text{ mm}$ 。

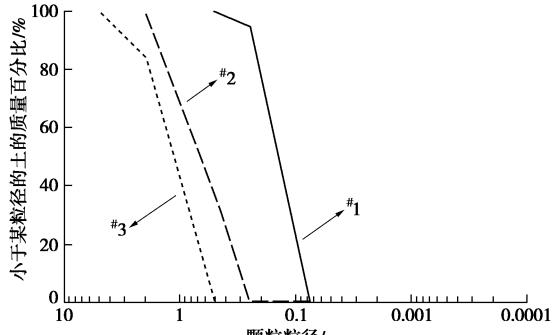


图6 土样颗粒分布曲线

Fig. 6 Grain-size distribution curve of soil

c) 制样方法

砂土的初始密度控制是本试验成功的关键,所有砂土模型均采用砂雨法制备。研究表明^[42-43],在采用砂雨法制备离心模型试样时,其密度主要受落距和出砂速率的影响。为了获得不同初始密度的砂土模型,对上述3种砂土分别进行砂雨法制备试验,通过改变砂雨法制备过程中落距、出砂孔形状及出砂孔尺寸,来控制试样的初始密度。

制样试验共设置了9种落距,依次为20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90和100 cm。出砂孔形状则分为鸭嘴式和网眼式两种,如图7所示,其中鸭嘴式的出砂孔宽度分别为3, 5 mm,而网眼式的出砂孔直径同样设为3, 5 mm。制样试验由自制的砂雨装置来实现,通过大量的试验最终得到采用不同落距、不同出砂孔形状与不同出砂孔尺寸所制备试样的密度分布规律,如图8所示。对于^{#1}和^{#2}砂土,由于采用鸭嘴式出砂孔无法制备高密度的试样,因此选择一种组合形式的制样方法,即采用鸭嘴式出砂孔来制备密度较低的试样,而对于密度较高的试样则通过网眼式出砂孔来制备,具体组合方式如图8中的制样路径所示。

d) 试验结果与分析

试验进行前在离心机上分别采用砂标和水标^[44-45]的方法对土压力传感器进行了标定,确定了合理的标定系数,为后续量测作用于不锈钢板上的侧向土压力提供依据。

为了研究密度对砂土静止土压力系数 K_0 的影响,分别就^{#1}细砂、^{#2}中砂和^{#3}粗砂进行了不同初始密度试样的离心模型试验。其中细砂和中砂都进行了6组不同初始密度的离心模型试验,粗砂进行了3组不同

密度的离心模型试验。限于篇幅,这里仅列出^{#1}砂土在不同初始相对密度下的土压力测试结果,所有试验的离心加速度为50g,模拟的土层深度为16 m。



图7 出砂口类型

Fig. 7 Types of sand rainner outlet

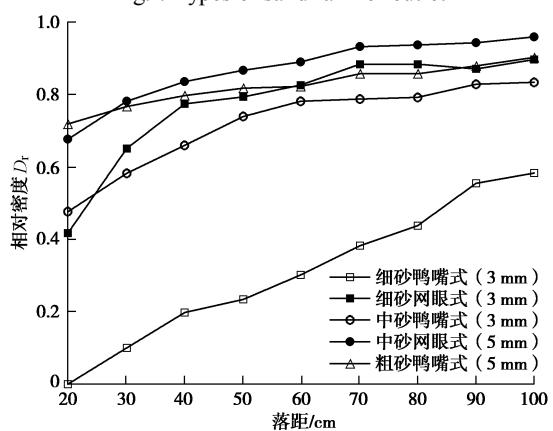


图8 不同相对密度砂土的制样路径

Fig. 8 Sample preparation paths of sand with different relative densities

图9为试验得到的不同初始相对密度下砂土作用于不锈钢板上的侧向土压力与土体竖向应力之间的关系曲线。从中可以看出,不同相对密度对应的土体竖向应力 σ_v 与侧向土压力 σ_h 的线性度较好,这也再次证明了使用离心模型试验来研究土体静止土压力系数的可行性。从图9中还可以发现,在同样的竖向应力下,土体密度越高,作用于不锈钢板上的侧向土压力越大。需要说明的是,试验采用逐级加载的方式以达到设计加速度,试样在加载过程中由于自重的增加会产生部分压缩,其压缩量可以通过安装模型箱顶部的激光位移传感器测得。通过试验,发现50g下砂土层的压缩量仅有1.735 mm,较模型高度可以忽略不计,对土体的密度基本没有影响,因此本文中的相对密度仍采用初始制样时的相对密度。

利用图9中的侧向土压力与竖向应力,通过计算可以得到不同初始相对密度下对应的静止土压力系数 K_0 ,如图10所示。对于^{#1}砂土,当相对密度从0.3增加到0.9时,静止土压系数从0.367增加到0.442。显然,土体的相对密度与其对应的静止土压力系数 K_0 呈现出明显的正相关性,即当上覆荷载一定时,地基土的相对密度越大,其所受的侧向土压力也将相应提高。相似的规律也在卢廷浩等^[16]主编的《高等土力学》

教材中得到印证。

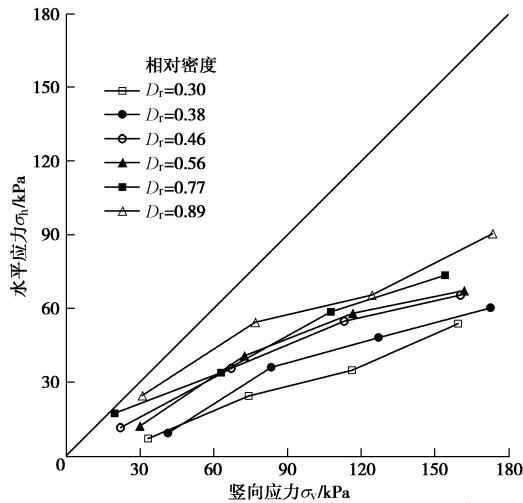


图 9 不同初始相对密度下土压力沿侧深分布 (#1 砂土)

Fig. 9 Distribution of earth pressures along side wall depth at different initial relative densities (sand No. 1)

为了与 Jaky 公式进行对比,进行了室内三轴排水试验,测得 #1 砂土的有效内摩擦角为 36.8° ,进而得到相应的 $K_0=0.401$ 。显然,采用 Jaky 公式计算得到的 K_0 较离心试验结果大得多。另外,Jaky 公式中 K_0 只与摩擦角有关,而与土的状态无关,因此无法反映密度对砂土静止土压力系数的影响。

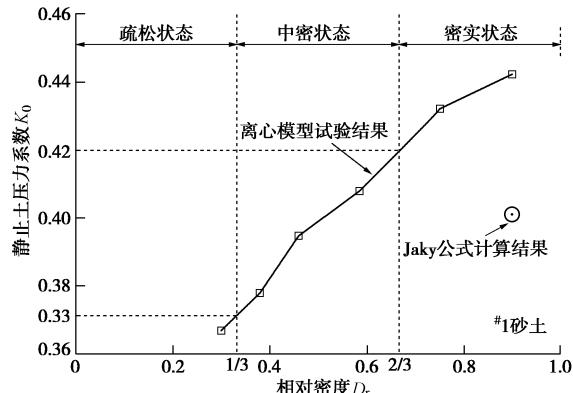


图 10 不同初始相对密度下 K_0 及 Jaky 公式计算结果 (#1 砂土)

Fig. 10 Distribution of K_0 at different initial relative densities and calculated results by Jaky formula (sand No. 1)

对 #2、#3 砂土离心模型试验结果进行同样的整理,可以得到相应的 K_0 随土体相对密度的变化规律,如图 11 所示。从图中可以发现,不管是细砂 (#1 砂土)、中砂 (#2 砂土) 还是粗砂 (#3 砂土), 离心模型试验得到的静止土压力系数 K_0 均随土体相对密度的增大而增大,呈正相关性。从得到的三条曲线来看,对于同样的相对密度,土体粒径越大(颗粒越粗), K_0 越大。当相对密度为 0.9 时,细砂、中砂和粗砂的 K_0 分别为 0.442, 0.386, 0.369。

2 板桩-遮帘桩的“桶仓”效应

前述可知,遮帘式结构、分离卸荷式结构及带肋

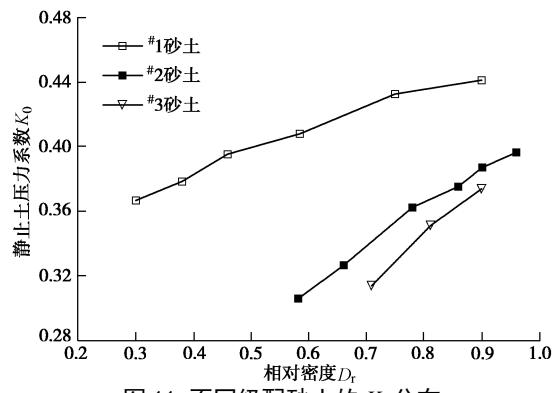


图 11 不同级配砂土的 K_0 分布

Fig. 11 K_0 distribution of different graded sands

板的分离卸荷式结构等一批新板桩结构型式的出现,成功解决了中国板桩码头深水化的问题。对于“遮帘式”板桩结构,是在原单锚板桩的前墙后侧设置一排遮帘桩,利用遮帘桩的挡土效应来分担前墙的荷载,如图 12 所示。研究表明^[46-47],与传统单锚板桩结构中的土压力分布不同,由于设置的遮帘桩,土压力的分布更加复杂,存在“桶仓”效应和“拱”效应。关于“拱”效应不少学者已经进行了大量的研究,本文不再进行讨论。

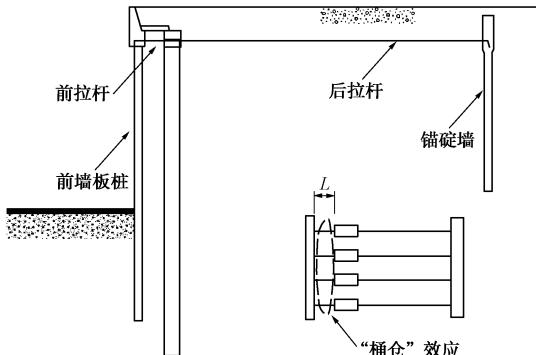


图 12 遮帘式板桩码头结构示意图 (引自蔡正银等^[5])

Fig. 12 Sheet-pile wharf with barrier piles (after Cai et al.^[5])

当散粒体中两相邻结构物间距较小时,作用于结构物上的侧向压力随深度的增加出现先增加,到某一深度后逐渐减小的变化规律,这就是典型的“桶仓”压力效应。对于遮帘式挡土结构,若将前墙后侧的遮帘桩视为一个结构面,则码头前墙与遮帘桩之间的土压力也将存在类似的“桶仓”效应,这也使得其间土压力分布变得异常复杂。

为了解决这个问题,以遮帘式板桩码头新结构为例,笔者团队自 2005 年起运用离心模型试验、数值仿真和力学分析等手段^[48-51],研究了深水板桩码头新结构中板桩(前墙)-遮帘桩体系中的土压力“桶仓”效应及其影响因素,对进一步揭示深水板桩码头的工作机理具有重要意义。

2.1 “桶仓”效应离心模型试验

图 12 为遮帘式板桩码头结构典型示意图,其中 L 表示遮帘桩与前墙之间的距离(简称为墙桩间距)。作

为机理性研究, 在进行离心模型试验前对实际遮帘桩及土层进行了简化处理, 其中遮帘挡土结构简化为一道挡土墙, 即简化为前后双墙进行离心模型试验。土层直接按均质砂土处理。因此, 桶仓效应离心模型试验实际简化为均质砂土层中模拟不同双墙间距的离心模型试验, 如图 13 (a) 所示。

a) 试验方案

本项离心模型试验是在南京水利科学研究院 400 g·t 大型土工离心机完成的, 试验采用的模型箱尺寸为 1000 mm (长) × 400 mm (宽) × 550 mm (高), 与前文介绍的单墙模型试验相同。综合考虑 10 万吨级深水码头各结构物的尺寸和模型箱的空间, 确定本试验模型相似律为 $N=75$ 。

两道模型墙均采用铝合金材料进行模拟, 其尺寸为: 360 mm (高) × 400 mm (宽) × 10 (厚) mm。与第一节离心试验类似, 模型墙的土压力仍采用定制的 BW-3 型微型土压力盒测量, 共计 10 只, 分两排布设在墙的一侧, 每排自上而下共 5 只, 间距为 60 mm。模型箱上表面框架上布置了 4 只 Wenglor 型激光位移传感器, 用来对试验过程中土体的沉降进行监测, 位移传感器的传感器量程为 50 mm, 精度 20 μm 。具体的土压力及位移传感器的布设位置如图 13 (b) 所示。

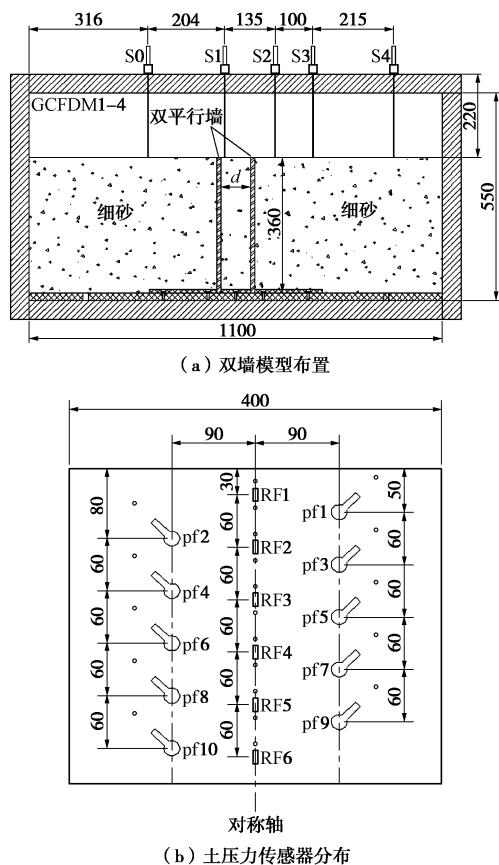


图 13 双墙模型及传感器布置 (引自蔡正银等^[54])

Fig. 13 Layout of double-wall model and sensors (after Cai et al.^[54])

试验土样也是选用唐山港曹妃甸港区的细砂, 采用砂雨法制备, 模型砂土地基相对密度为 $D_r=0.64$, 为中密状态。

为了研究墙桩间距对“桶仓”效应的影响, 共设计了 4 种墙桩间距 $L=40, 53.3, 66.7, 80 \text{ mm}$ 。安装模型相似律为 $N=75$ 计算, 分别模拟 4 种不同的原型墙桩间距: 3, 4, 5, 6 m。

b) 墙桩间距 L “桶仓”效应的影响

图 14 给出了不同墙桩间距 L 下两墙之间土压力随深度的分布规律。两墙之间的侧向土压力分布与单墙土压力分布规律完全不同。单墙条件下均质土层中侧向土压力随深度呈线性分布, 双墙情况下侧向土压力不再随深度呈线性分布, 仅在土层较浅部分, 侧向土压力随深度增加而增大。超过某一深度位置再往下, 侧向土压力值从最大峰值点陡然减小至一谷值点, 随后又随深度增加而变大, 往往又在一个较深位置, 土压力再次达到一个小峰值点, 之后继续以一大一小的往复方式向深处发展。

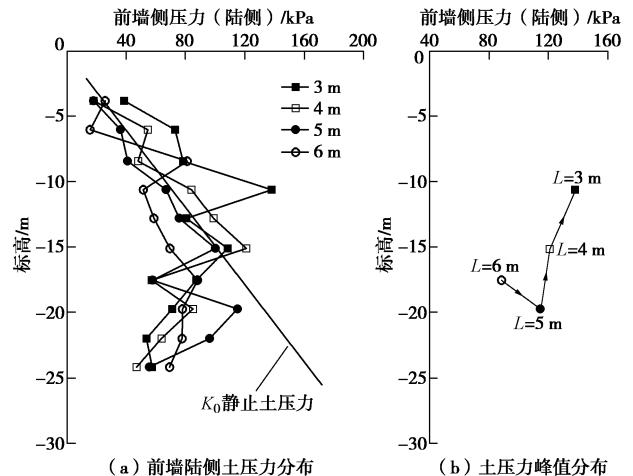


图 14 不同墙桩间距前墙陆侧土压力分布 (引自蔡正银等^[54])

Fig. 14 Distribution of earth pressures on front wall and side wall with different wall pile spacings (after Cai et al.^[54])

上述侧向土压力随墙深分布中的忽大忽小特征可用桶仓压力理论中的拱结现象予以解释。就所试验的风干细砂情况来看, 墙桩间距愈小时, 拱效应在侧向土压力分布上表现得愈突出。例如, 墙距离为 3.0 m 时, 在标高-10.6 m 处出现拱结, 侧向土压力值达到了最大; 墙桩离为 4.0 m 时, 在标高-12.8 m 处侧向土压力值达到了最大, 其值小于墙距离 3.0 m 时的最大值; 墙桩距离为 5.0 m 时, 在标高-15.1 m 处侧向土压力值达到了最大, 其值小于墙距离 4.0 m 时的最大值; 墙桩距离为 6.0 m 时, 情况有所不同, 侧向土压力值在标高-6.0 m 和-8.3 m 位置达到峰值, 但都不是最大

值，在标高-17.3 m 和-19.6 m 处侧向土压力值才达到了最大值。如果用 z 表示墙深位置，那么，在深度 $z=3L$ 左右位置处（标高为 $-z$ ）往往形成拱结，并可能是第一个拱结，此处墙体受到的侧压力会达到第一个最大峰值。

图 14 (b) 为不同墙桩间距 L 下土体拱结位置及对应的侧向土压力分布（这里将土压力达到峰值对应的深度视作拱结位置），增加墙桩间距 L 将导致其间土体拱结位置降低，这也将导致上覆土体承载能力的下降。表 1 为实测的不同墙桩间距下墙间土压力系数，可以发现，由于“桶仓”效应，所有的墙间土压力值均小于单墙测得的土压力值，即平均侧向土压力水平减小了。另外，从表 1 中平均侧向土压力系数随墙桩距离 L 增加，表现出由大到小、再到大的变化趋势，墙桩距离约在 5 m 左右时，侧向土压力系数可能最小，按此距离设置的遮帘桩，能够使前墙承受的总土压力达到最小，这个距离也许就是理论上的最佳墙桩距离。具体的最佳墙桩距离值，尚需结合现场原型的土层条件和具体的施工程序以及港池开挖等因素，综合考虑后方能合理确定。

表 1 不同墙桩间距下的墙间土压力（引自蔡正银等^[54]）

Table 1 Earth pressures between walls at different wall pile spacings (after Cai et al.^[54])

模型编号	模型墙桩距离/mm	原型墙桩距离/m	地基土密度/(g·cm ⁻³)	平均侧压 力系数 K
#1	40.0	3.0	1.46	0.41
#2	53.3	4.0	1.47	0.36
#3	66.7	5.0	1.47	0.34
#4	80.0	6.0	1.49	0.31

2.2 遮帘式板桩码头“桶仓”效应的数值模拟

上述可知，“桶仓”效应实质上是板桩码头前墙与遮帘桩之间的土压力的重分布，其中涉及墙桩间距、墙桩刚度、墙桩间土体变形特性等多个关键问题。为此，笔者及团队开展了针对唐港#32 泊位码头结构中关于板桩（前墙）遮帘桩体系土压力“桶仓”效应的数值模拟，研究了码头港池开挖情况下墙桩间距和遮帘桩刚度对墙桩间土体“桶仓”效应的影响。

(1) 遮帘式板桩码头结构方案

为了研究遮帘式板桩码头的受力与变形特性，以京唐港#32 泊位 10 万吨级板桩码头结构为背景，并对码头结构和地基土层进行了概化，模拟的码头剖面如图 15 所示。码头前墙厚 1.0 m，墙高 32.7 m。遮帘桩长 33.5 m，断面尺寸为 2 m×1 m，桩顶至码头面距离为 2.7 m，遮帘桩沿码头岸线方向等间距布置，桩心距为 2.75 m。锚定墙厚 1.2 m，墙高 19 m，墙顶至码

头面距离为 1.2 m。前墙、遮帘桩和锚碇墙均为钢筋混凝土地下连续墙结构，前墙与遮帘桩间距为 3 m，遮帘桩与锚碇墙之间间距为 35 m。前墙和遮帘桩之间、遮帘桩和锚碇墙之间用 $\phi 95$ 的钢拉杆链接，拉杆距地面 3.7 m。模拟的码头前沿港池水面距码头面为 5.73 m，港池水深为 15.47 m。

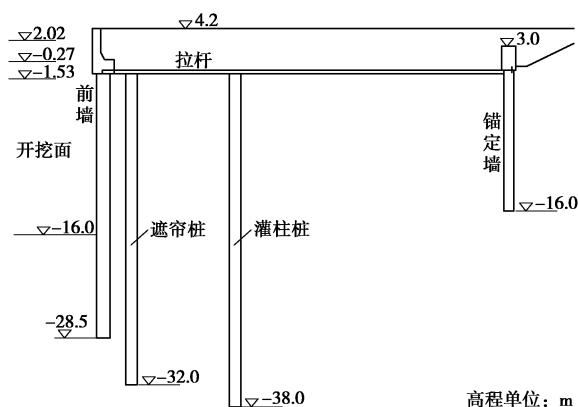


图 15 京唐港遮帘式板桩码头结构#32 泊位剖面图

Fig. 15 Sectional view of berth No. 32 of barrier sheet-pile structures in Jingtang Port

(2) 地基土与码头结构的模拟

板桩结构的主要荷载为土压力，而土压力与土体的变形密切相关，结构发生位移，土压力随之变化，这是典型的土与结构相互作用问题。因此正确描述土体的变形是解决土与结构相互作用问题的关键。考虑到 ABAQUS 本构模型库中缺少能够真正反映土体弹塑性变形特性的本构模型，利用二次开发工具 UMAT 数据接口，将邓肯-张模型、南水模型和状态相关砂土模型嵌入 ABAQUS 平台中^[52]。

研究区域地基从上到下共分为 7 个土层，主要包括细砂、淤泥和粉土 3 种土层，表 2 给出了各土层的物理力学参数。地基的数值模拟使用三维实体单元，采用的本构模型为邓肯-张模型，地基中各个土层的模型参数通过三轴固结排水剪切试验进行率定，具体参数如表 3 所示。

表 2 土层的基本物理力学参数

Table 2 Basic physical and mechanical parameters of soil layers

土层编号	土层名称	厚度 /m	天然重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	含水率 w/%
①	细砂	9.7	18.0/19.0	—
②-1	粉土	2.2	19.3	24.2
②-2	淤泥	6.6	17.6	43.1
②-3	粉土	1.1	19.1	31.2
③	细砂	10.5	19.7	21.9
④	粉土	2.8	19.7	25.0
⑤	细砂	3.4	19.7	17.4

表3 邓肯-张模型参数

Table 3 Parameters for Duncan-Chang model

参数	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	K	n
粉土	31.37	30.18	55.59	0.861
淤泥	40.37	22.68	39.26	0.618
细砂	0	30.97	476	0.886
参数	R_f	K_b	m	K_{ur}
粉土	0.640	26.18	0.722	100.0
淤泥	0.522	11.12	1.112	58.9
细砂	0.931	100.10	0.787	856.8

前墙、遮帘桩和锚碇墙为钢筋混凝土结构，采用线弹性本构模型来模拟，弹性模量为 $2.8 \times 10^7 \text{ kPa}$ ，泊松比为 0.16。拉杆为高强度钢拉杆，也采用线弹性本构模型来模拟，弹性模量为 $2.0 \times 10^8 \text{ kPa}$ ，泊松比为 0.12。

(3) 土与结构接触的模拟

遮帘式板桩码头的主要结构（前墙、遮帘桩、锚碇墙）都位于地下，存在大量的结构与土接触问题，本文基于接触力学的思想采用“接触对”来模拟。考虑到板桩码头中结构与土材料性质相差较大，相互作用过程中有可能在接触面上产生错动滑移或者开裂。为此，首先基于结构面刚度、粗糙度等确定接触面的主从关系。这里选取结构面为主控面，土的一侧为从属面；其次根据两个接触面之间的滑动或转动量大小在 ABAQUS 里选择接触面相对移动的跟踪方法，即有限滑动或小滑动。本次模拟以小滑动为主，局部滑动较大的区域可以选用有限滑动，这样可以大大降低计算成本；然后是对接触面法向行为的定义，考虑到板桩码头的接触主要为混凝土面与土体的接触，故在法向接触中选择硬接触，即压力直接传递，没有衰减；接下来是接触面切向模型的选择，这里选择 ABAQUS 里默认的库仑定律计算极限剪应力。

(4) 墙桩间距对“桶仓”效应的影响

模拟共分 5 组，墙桩间距由小到大依次为 3.0, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0 m。图 16 为这 5 种墙桩间距对应前墙的位移、单宽弯矩及土压力随深度的分布，可以看出改变墙桩间距对前墙的位移及受力形式产生较大影响，尤其是墙桩间距由 3.0 m 增至 6.0 m 过程中，前墙的最大正弯矩增大了近 20%。结合图 16 (c) 可知，墙桩间距的增加将导致遮帘桩挡土作用的减弱，对应前墙上部的土压力的增大；此外，前墙上部土压力的增大会势必会推动前墙向海侧移动，造成其位移的增大。考虑到前墙为柔性结构，上、下两端分别由拉杆及地基土限制，致使其位移主要集中在中部（见图 16(a)），即前墙埋深 10~15 m 处，此处也是出现最大正弯矩的位置。同时，土体土压力也将得到一定程度的释放，这也解释了前墙上部土压力增幅为何弱于弯矩增

幅。故墙桩间距决定着遮帘桩能否发挥替前墙挡土的作用，从而决定整体板桩码头结构是否稳定。此外，遮帘桩与前墙的距离必须保持在一定范围内才能发挥替前墙挡土的作用。

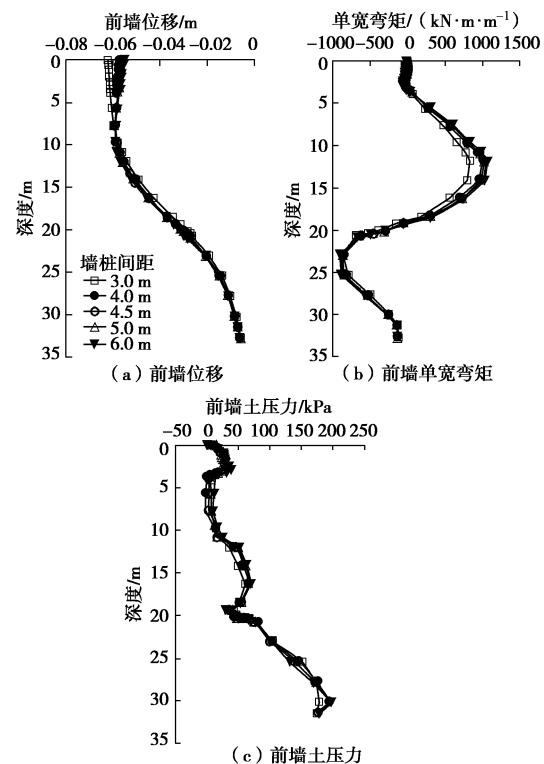


图 16 墙桩间距对遮帘桩码头结构前墙受力的影响 (修改自蔡正银等^[51])

Fig. 16 Influences of distance between wall piles on stress of front wall of barrier pile wharf structure (after Cai et al.^[51])

(5) 墙桩刚度对前墙的影响

类似的，墙桩刚度也会对前墙产生影响。模拟共分 4 组，通过改变遮帘桩和前墙混凝土杨氏模量之比（记作参数 R ）来实现对其刚度变化的模拟， R 的取值依次为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0。由图 17 可知，桩刚度会影响其替前墙挡土的能力，刚度越大越能抵抗土体变形，挡土效果越好。但较上节墙桩间距对前墙影响的结果可以看出，桩刚度对前墙受力的影响远不如墙桩距离影响大，这是因为首先桩的变形本身就十分有限，即使刚度增大了变形减小的余地也很小，不会有太大的影响，其次即使桩的刚度下降为原来的 40%，仍然远大于土的刚度，只要处在合适的位置就仍然能发挥替前墙挡土的作用。

3 遮帘式板桩结构的“遮帘”机理

遮帘式板桩码头作为中国自主开发的一种新型板桩码头结构型式，它是在传统板桩码头结构的前墙后侧设一排遮帘桩，利用遮帘桩的挡土作用及拱效应减

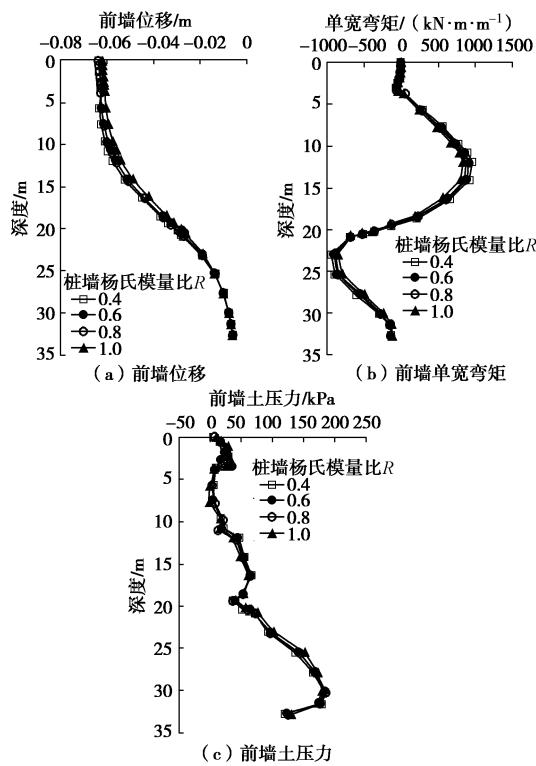


图 17 墙桩刚度对遮帘桩码头结构前墙受力的影响 (修改自蔡正银等^[51])

Fig. 17 Influences of pile stiffness on stress of front wall of barrier pile pier structures (after Cai et al.^[51])

小前墙承受的土压力,从而满足建设大型深水泊位的条件。对于遮帘式板桩码头结构的设计,目前主要是依靠离心模型试验来获得相应的设计参数^[49,53-54],并通过现场监测^[55-56]来验证设计和试验结果,同时对设计方案进行优化。而对于其工作机理,许多学者通过数值分析进行了研究^[57-59]。但这些分析中对于地基土的模拟都是采用弹性模型或理想弹塑性模型,难以正确地反映土体的变形规律。鉴于此,本文采用“南水双屈服面弹塑性本构模型”来模拟地基土的应力应变关系,采用基于接触力学思想的接触模型来模拟土与结构的相互作用关系,研究了遮帘式板桩码头中遮帘桩的“遮帘”机理,揭示了码头结构与地基土的相互作用规律。

3.1 遮帘式板桩结构的模拟方案

以京唐港#32 泊位 10 万吨级板桩码头结构作为研究对象。首先对地基土和码头结构进行了概化,其中地基土层选择均质细砂层,其基本物理力学指标如表 4 所示。码头则概化为板桩岸壁,其中前墙厚 1.0 m,墙高 32.7 m,遮帘桩长 33.5 m,锚碇墙高 19 m,前墙与遮帘桩间距为 3 m,遮帘桩与锚碇墙间距 35 m,具体结构参数可参考文献[51]。

表 4 京唐港地区细砂物理力学性质

Table 4 Physical and mechanical properties of fine sand in Jingtang Port

土层	重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	含水率 $w/\%$	孔隙比 e	三轴指标		压缩模量 E_s/MPa
				c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	
细砂	19.7	21.9	0.63	0.0	31.0	39.4

模拟地基为均质细砂层地基,模拟过程中不考虑地基土层的空间变化。地基采用空间实体单元进行模拟,土体的应力应变关系采用南水双屈服面弹塑性本构模型模拟,其模型参数见表 5。

表 5 京唐港地区细砂 NHRI 本构模型试验参数

Table 5 NHRI model parameters of fine sand in Jingtang Port

c /kPa	φ /($^{\circ}$)	R_f	K	n	C_b	n_d	r_d	K_{ur}
0	32.0	0.92	476	0.38	0.012	0.5	0.91	952

模拟的遮帘式板桩码头结构部分如图 18 所示。考虑到实际码头的前墙和锚碇墙均为地下连续墙结构,采用钢筋混凝土材料,数值模拟时仍采用实体单元进行模拟,本构模型则使用 ABAQUS 有限元平台自带的线弹性模型。钢筋混凝土的模量取为 26 GPa,泊松比 0.167。码头的前墙与锚碇墙间采用拉杆连接。拉杆采用衍架单元来模拟,计算中不考虑拉杆自重及与土体之间的摩擦力。拉杆材料本构模型也采用线弹性模型,钢材的模量取为 206 GPa,泊松比为 0.3。墙、土接触采取有限滑移接触本构,法向为硬接触,接触压力假定不衰减。拉杆与墙体之间的链接采用绑定链接,点面接触的方式。细砂的静止土压力系数根据离心模型试验结果取 0.45。港池分为 4 次开挖,开挖深度分别为 5.73, 10.0, 15.0 和 21.2 m。开挖过程采用单元的“生死”功能来模拟。

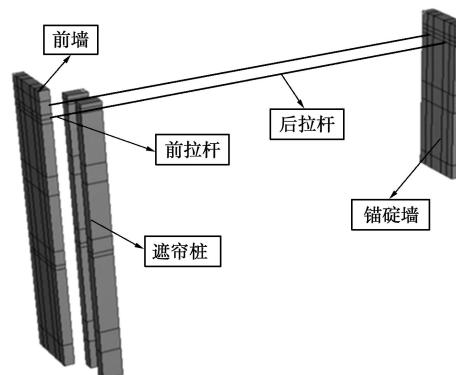


图 18 遮帘式板桩码头结构模型图

Fig. 18 Model of wharf structures with barrier piles

3.2 遮帘式板桩结构的模拟方案

(1) 遮帘式板桩结构的变形特性

图 19 为港池开挖过程中遮帘式板桩码头结构水

平位移随深度的变化规律, 从图中可以发现开挖过程中遮帘式板桩结构变形的2个基本特点: ①码头前墙的水平位移呈“弓”型分布, 特别是前墙中部距离地表12 m深度处存在最大水平位移(3.4 cm)。由于港池开挖深度的增加, 前墙海侧土压力不断消失, 则前墙在陆侧土压力下会不断向海侧移动。②遮帘桩的水平位移整体呈现出“之”型分布, 最大、最小水平位移分别位于桩顶和桩底位置。造成上述水平位移分布模式较大差异的原因可归因于前墙与遮帘桩间的较大刚度差异, 由于遮帘桩的刚度相对前墙大得多, 使得其变形形式以平移为主。

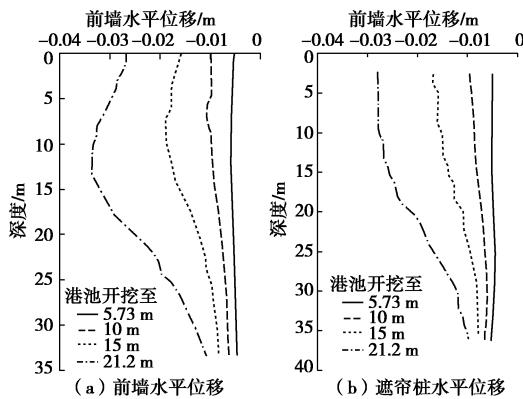


图 19 遮帘式结构水平位移分布 (修改自蔡正银等^[5])

Fig. 19 Distribution of horizontal displacement of barrio pile structures (after Cai et al.^[5])

(2) 遮帘式结构的土压力变化规律

板桩码头结构的荷载主要表现为作用于结构上土压力的变化, 产生于港池的开挖和码头面载的施加。图 20 (a) 为港池开挖过程中遮帘式结构前墙陆侧土压力分布情况。以锚碇点位置为界, 前墙陆侧土压力在锚碇点以下整体呈现出向主动状发展的变化特征, 这与前墙的位移变化规律相一致; 但在锚碇点以下结构上的土压力则逐渐向被动状态转化, 这主要是由于前墙位移小于遮帘桩位移, 造成其间土体处于受“压”状态。总体上, 前墙陆侧土压力整体仍呈典型的“R”型分布, 这与许多现场观测结果一致。与前墙陆侧土压力不同, 前墙海侧土压力相较更为复杂, 但整体仍呈现出向被动状态发展的变化趋势, 如图 20 (b) 所示, 造成这一现象的原因可归纳为以下2点: ①由于港池土层的开挖, 其竖向应力逐渐减小, 造成作用于墙体的侧向土压力降低; ②开挖造成码头结构前墙向海侧移动, 使得海侧土体产生压缩变形, 对应的土压力向被动状态发展, 从而造成侧向土压力的增加。故前墙海侧土压力的变化主要由其附近土体的变形情况决定。考虑到港池开挖完成后海侧的被动土压力特别

大, 可以认为此时海侧土层发生了局部破坏。

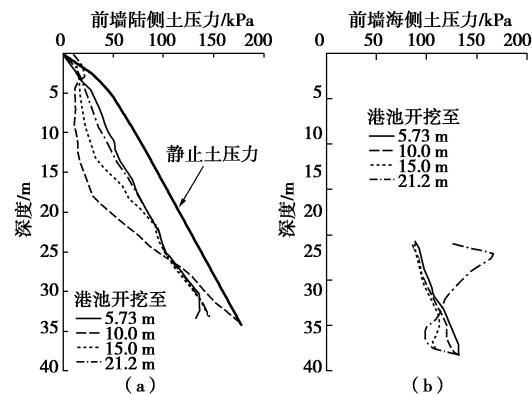


图 20 前墙土压力分布 (修改自蔡正银等^[5])

Fig. 20 Earth pressures on front wall (after Cai et al.^[5])

遮帘桩作为分担码头结构前墙侧向土压力的重要组成部分, 其上的土压力分布同样值得重视。图 21 为遮帘桩陆侧及海侧土压力随港池开挖深度的分布曲线。与前墙海侧土体的受力情况类似, 遮帘桩海侧土体同样处于两种受力状态, 即由前墙向海侧位移引起的遮帘桩海侧土压力的降低及由前墙与遮帘桩间的拉杆作用导致的遮帘桩海侧土压力的增加。前者易造成遮帘桩海侧土压力向主动状态发展, 而后者则将土压力引向被动。因此, 遮帘桩海侧土压力主要受其海侧土体变形规律的影响(压缩或伸长)。若海侧土体为伸长状态, 则对应的桩土压力为主动状态, 反之则为被动状态。由图 21 (a) 可知, 港池开挖过程中遮帘桩海侧土压力分布与前墙陆侧土压力非常相似, 大体呈现出整体向主动状态发展的变化趋势。相同深度位置处遮帘桩上的海侧土压力均小于前墙。类似的, 随着开挖深度的增加, 遮帘桩前墙陆侧的土压力也逐渐向主动方向进行转化, 但数值上要明显高于海侧, 这主要是由于遮帘桩刚度很大, 造成桩身海侧土体变形明显大于陆侧, 这也充分体现了遮帘桩的遮帘作用。

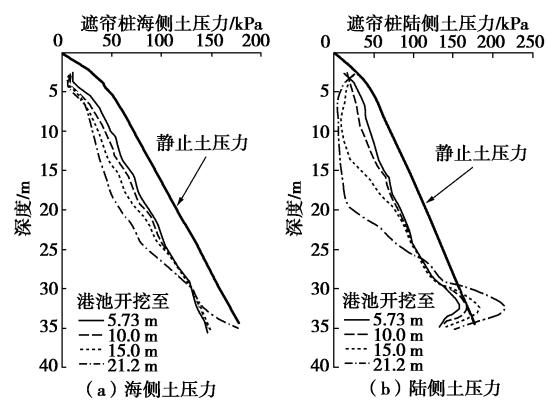


图 21 遮帘桩土压力分布 (修改自蔡正银等^[5])

Fig. 21 Earth pressures on barrier pile (after Cai et al.^[5])

(3) 遮帘式板桩结构的“遮帘”机理

下面将遮帘式结构数值计算结果与传统单锚结构进行对比,进一步揭示遮帘式板桩结构的遮帘机理。传统单锚板桩码头结构的数值模型基本条件与遮帘式相同,仅在遮帘式结构中去除遮帘桩。图22(a)为遮帘式板桩码头结构与单锚板桩码头结构港池开挖至21.2 m时位移随深度的变化规律,可以发现单锚结构的位移比遮帘式结构的位移大得多,最大值相差1.5 cm。同时,对比单锚式和遮帘式前墙陆侧土压力随深度的变化规律后发现(见图22(b)),在开挖面以上,对于前墙陆侧的土压力遮帘式比单锚式要小得多,这主要是由于遮帘桩的遮帘作用,分担了一部分土压力,从而减小了前墙的压力。此外,考虑到传统的板桩码头为薄壁结构,其抗弯能力有限。但从图22(c)中可以发现,不管是正弯矩还是负弯矩,遮帘式码头结构前墙的弯矩均比单锚式小得多。

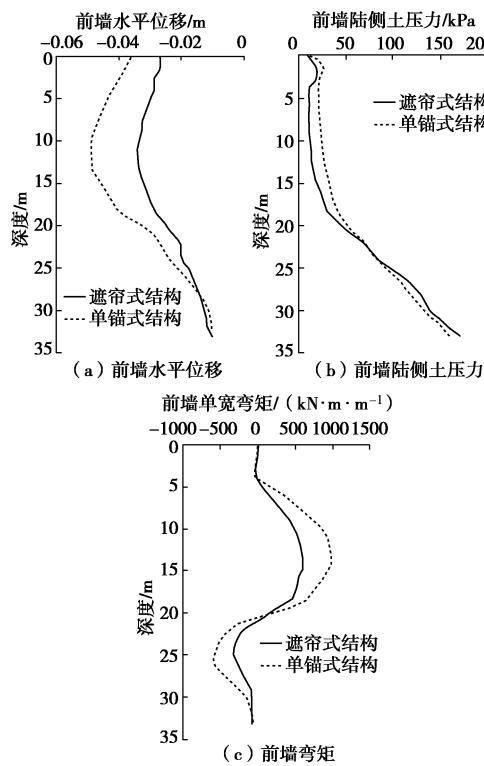


图22 遮帘式与单锚板桩结构前墙计算结果比较(修改自蔡正银等^[5])

Fig. 22 Comparison of calculated results of barrier pile wall and single anchor sheet-pile front wall (after Cai et al.^[5])

4 卸荷式板桩码头的“卸荷”机理

与遮帘式板桩结构采用遮帘桩来减小作用于前墙土压力的方式不同,卸荷式板桩码头是单锚板桩和桩基承台的混合式结构^[8, 60-62]。结构中的单锚板桩用于

抵挡地基水平作用力,桩基承台用于承担码头竖向荷载。由于承台高程适当降低,分担了部分作用于前墙的土压力,起到了卸荷作用,从而实现码头结构的深水化。对于分离卸荷式板桩码头,其前墙与卸荷承台是相分离的,导致其卸荷机理远比传统的带卸荷板重力式码头结构复杂。因此,对于这种新型的码头结构,如何正确地认识分离式卸荷承台的卸荷作用,掌握前墙上的土压力作用规律,是码头结构设计的基础。

4.1 卸荷承台的卸荷机理

卸荷式板桩码头前墙土压力主要由墙后土压力、灌注桩受压引起的桩前土体挤土压力及灌注桩桩间土体作用产生的土压力三部分构成。对于分离卸荷式板桩码头结构,卸荷承台的存在是其区别于其他板桩码头结构的主要特征,故对其作用机理进行分析研究显得尤为必要。

(1) 数值模拟方案

首先是模型尺寸及边界设置。模型参照京唐港#36泊位所采用的卸荷式板桩码头结构型式建立,如图23所示。其中前墙高为38.2 m,承台顶标高0.2 m,底标高-0.8 m,承台下横向设置3根灌注桩长37.2 m的灌注桩,海侧桩距码头前沿4.4 m,横向桩间距为5 m,前墙和锚碇墙净距为44.0 m,锚碇墙底标高为-16.0 m,墙顶标高为3.0 m。具体参数设置可参考文献[8]。此外,模拟也增设了一组单锚式板桩码头结构作为对照,其结构将分离卸荷式板桩码头的桩基承台去除即可得到。此外,数值模型的水位线设置在离地面5 m处,港池开挖面标高为-11.8 m。

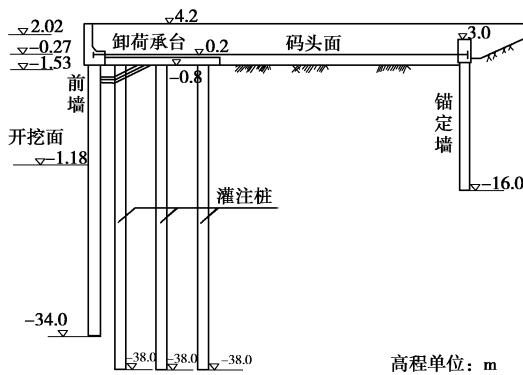


图23 京唐港分离卸荷式板桩码头结构#36泊位剖面图

Fig. 23 Sectional view of berth No. 36 of separated unloading sheet-pile structures in Jingtang Port

其次是土与结构作用的模拟。模型中将地基土假定为纯砂以消除地基土层变化对卸荷效应研究的影响,地基土采用“南水本构模型”的模型,相关参数可参考表4。而结构前墙、锚碇墙、基桩和卸荷承台实体单元模拟采用模拟其对于的钢筋混凝土结构,对

应的本构模型选择线弹性模型，钢筋混凝土结构模量取 26 GPa，泊松比为 0.167。同时，前墙与锚碇墙间的拉杆则采用衍架单元来模拟，其本构模型也采用线弹性模型，钢材模量取 206 GPa，泊松比为 0.3。前墙、锚碇墙与拉杆之间的链接采用绑定约束，在链接处具有相同的自由度；卸荷承台与灌注桩之间的链接采用耦合约束，灌注桩只能在左右方向绕参考点转动，即为铰接。此外，码头结构与地基土体之间的接触采用基于接触力学的接触模型，桩土接触采取有限滑移，法向为硬接触^[63]。

最后是施工过程的模拟，大体可分为码头结构施工、港池开挖及码头面荷载施加 3 个步骤。其中，港池开挖又分两步进行模拟，第一步开挖至-2.8 m，第二步开挖至-11.8 m，采用单元“生死”的办法来实现。码头面载的施加过程也比较简单，即在码头面上施加 20 kPa 的均布荷载；而较为复杂的是码头结构的施工过程，前墙、锚碇墙及灌注桩等结构的设置均采用地基模型中预留位置的办法，通过单元的“生死”来模拟结构的去除和施加过程。

(2) 港池开挖前考虑卸荷效应的土压力计算

对于分离卸荷式板桩码头，如何准确获得港池开挖前结构上的初始应力是后续研究的基础。考虑到码头前墙、卸荷承台及锚碇墙均处于静止，可将前墙和卸荷承台近似视为带卸荷承台的刚性结构。对于此类结构，由于卸荷承台的卸荷作用，导致卸荷承台以下土体表面的竖向应力为零，造成作用于墙身侧向土压力的重新分布。下面将重点介绍港池开挖前考虑卸荷作用的刚性挡土墙后侧向土压力计算方法。

首先计算竖向土压力。对于未设置卸荷承台的地基竖向应力 p_z ，可直接采用土体的自重压力，即 $p_z = \gamma z$ ，其中 γ 为土体的重度， z 表示计算点到土体表面的距离。而对于设置卸荷承台的地基土竖向应力，需要采用分区的方法进行计算。图 24 为考虑卸荷效应的地基土竖向应力分区示意图，共分为 4 个区域界面，从上到下依次为未卸荷区、完全卸荷区、部分卸荷区及未卸荷区。未卸荷区的竖向应力按照未设置卸荷承台的地基竖向应力进行计算，下面重点介绍完全卸荷区及部分卸荷区地基竖向应力的计算方法。完全卸荷区及部分卸荷区的影响范围分别按照图 24 (a) 所示的几何关系确定，其中 φ 为土体的内摩擦角。对于完全卸荷区，卸荷承台以下土体表面的竖向应力自零开始，以下按此区域自重应力计算方法仍按自重应力进行计算，而需要注意的是， z 为计算点到卸荷承台下表面的垂直距离；类似的，对于部分卸荷区，一般也假设该区域的土压力为线性分布，该区域土层上

表面的竖向应力按完全卸荷区算出，土层底面的竖向应力按未卸荷区算出。故刚性挡土结构上的侧向土压力计算表达式为

$$p_0 = p_z (1 - \sin \varphi) , \quad (1)$$

$$p_a = p_z \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) , \quad (2)$$

$$p_p = p_z \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) . \quad (3)$$

式中 p_0 为静止土压力； p_a 为主动土压力； p_p 为被动土压力； p_z 可通过上段考虑卸荷效应的竖向土压力分区计算方法得到。

图 25 为数值模拟得到的竖向土压力分布和理论计算结果的对比，可以看出采用上述方法所计算出的卸荷效果与理论值比较吻合，这也说明本次模拟的正确性。

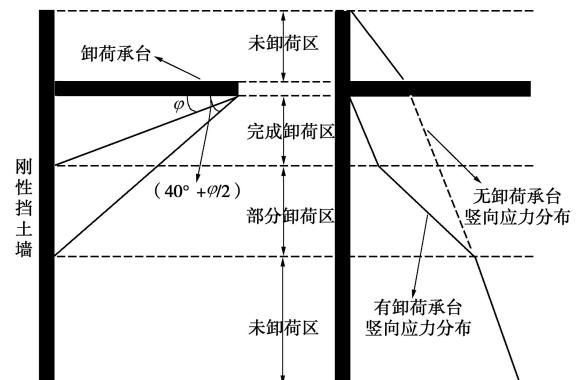


图 24 考虑卸荷效应的地基土竖向应力计算

Fig. 24 Calculation of vertical stress for soil layers with relief platform

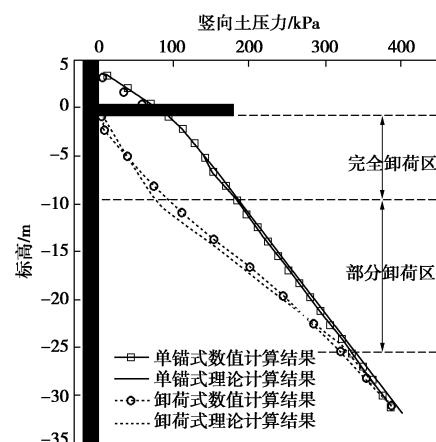


图 25 卸荷效果的数值模拟

Fig. 25 Relief effects by numerical simulation

(3) 卸荷承台对前墙土压力的影响

图 26 为计算得到的单锚式及卸荷式板桩码头两种结构在开挖至不同深度及施加码头面荷载后前墙陆侧土压力的分布，其中虚线为数值计算结果，实线

为静止土压力与主动土压力的理论计算结果。由于设置了卸荷承台，作用于前墙陆侧的土压力在完全卸荷区和部分卸荷区都有非常明显的减小，说明卸荷承台在降低前墙土压力方面发挥了很好的作用。

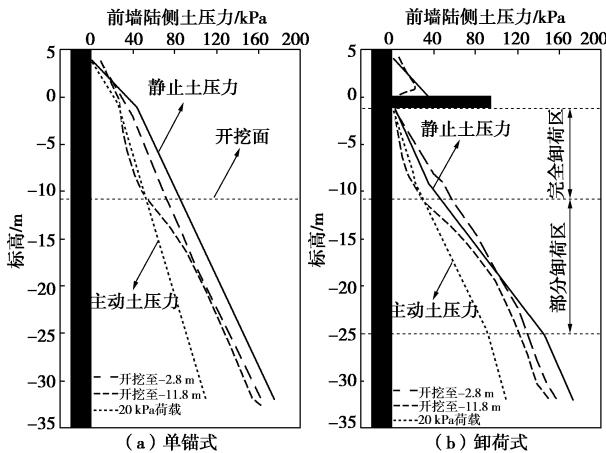


图 26 板桩码头前墙陆侧土压力分布 (修改自蔡正银等^[8])

Fig. 26 Earth pressures on front wall at landward side for sheet-pile wharf (after Cai et al.^[8])

(4) 卸荷承台的卸荷效应分析

上节可知，卸荷承台最直接的效果是降低作用于前墙陆侧的土压力，而该土压力的大小又与前墙的位移密切相关。图 27 分别为单锚式与分离卸荷式板桩码头的前墙陆侧土压力和位移分布情况，从中可以看出，不管是前墙陆侧的土压力还是前墙的位移，分离卸荷式都比单锚式小得多，这从定性上充分反映了卸荷承台对于减小作用于前墙土压力的作用。

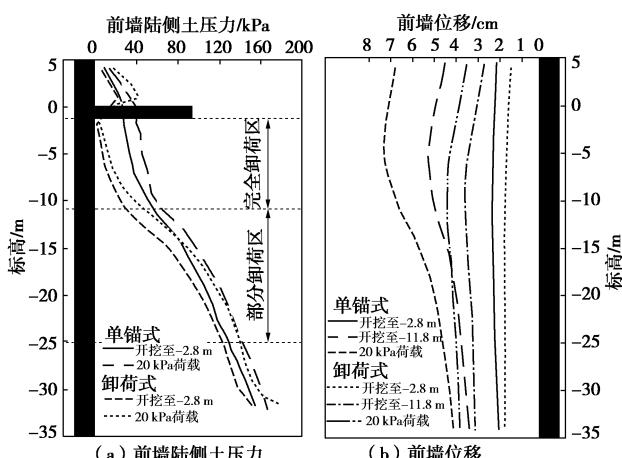


图 27 分离卸荷式码头前墙土压力及水平位移分布 (修改自蔡正银等^[8])

Fig. 27 Distribution of earth pressure and horizontal displacement in front wall of sheet-pile wharf with separated relief platform (after Cai et al.^[8])

进一步，通过定义卸荷效率(η_{ep})来定量评价卸荷承台的卸荷效应，即

$$\eta_{ep} = \frac{P_{DM} - P_{XH}}{P_{DM}} \times 100\% \quad (4)$$

式中， P_{DM} 为单锚式板桩码头前墙总土压力， P_{XH} 为分离卸荷式板桩码头前墙总土压力。这里需要说明的是， P_{DM} 及 P_{XH} 是通过对单锚式和卸荷式的土压力分布曲线所围的面积（见图 27(a)）进行积分后获得的。

由表 6 可知，开挖深度的增加将导致卸荷承台卸荷效率的提高，当开挖结束后对应的卸荷效率达到 18.6%。而随着 20 kPa 均布荷载的施加，卸荷承台卸荷效率降低至 13.5%，这是因为在施加均布荷载后，部分卸荷区域内单锚式和卸荷式的土压力分布线趋于重合，造成卸荷承台的卸荷区域变小，进而导致卸荷效率的降低。这说明对于分离卸荷式板桩码头，施加荷载后的卸荷范围要小于理论计算卸荷范围。

表 6 卸荷效率-土压力形式

Table 6 Relief efficiency with earth pressure

工况	卸荷效应		卸荷效率 $\eta_{ep} / \%$
	P_{DM} / kN	P_{XH} / kN	
开挖至-2.8 m	3063	2660	13.2
开挖至-11.8 m	2781	2263	18.6
20 kPa 均布荷载	3209	2775	13.5

类似的，延用土压力表示卸荷承台卸荷效率的方法，对前墙水平位移的最大值 U 来表示卸荷效率，计算结果如表 7 所示。用前墙水平位移最大值表示的卸荷效率要远远大于用前墙陆侧总土压力表示的卸荷效率，随着开挖深度的增加，对应的卸荷效率也逐渐增大。施加 20 kPa 的均布荷载后，用水平位移表示的卸荷效率是增加的，这与用土压力表示的卸荷效应不同。

表 7 卸荷效率 - 水平位移形式

Table 7 Relief efficiency with maximum lateral displacement

工况	水平卸荷效应		卸荷效率 $\eta_{ep} / \%$
	U_{DM} / cm	U_{XH} / cm	
开挖至-2.8 m	2.32	1.79	22.9
开挖至-11.8 m	5.24	3.58	31.7
20 kPa 均布荷载	7.29	4.42	39.4

综上所述，用前墙水平位移最大值表示的卸荷效率要远远大于用前墙陆侧总土压力表示的卸荷效率，随着开挖深度的增加，卸荷效率也是增大的。施加荷载后，用水平位移表示的卸荷效率是增加的，这与用土压力表示的卸荷效应不同。

4.2 分离卸荷式板桩码头的土压力计算

对于分离卸荷式板桩码头，由于设置了卸荷承台和灌注桩，需要考虑卸荷作用和灌注桩的遮帘作用对码头整体土压力的影响。下面主要对分离卸荷式板桩码头的土压力计算方法进行研究。

(1) 传统苏联规范法的修正

土压力大小与其对应挡土结构的位移密切相关。

研究表明^[64-65], 当挡土结构位移达到挡土墙高的一定比例时土压力才会达到主动极限状态。按苏联规范法计算的泥面以下的陆侧土压力是小于或等于主动土压力, 但大量现场监测结果显示, 实际陆侧土压力均处于主动及静止土压力之间, 故传统的直接采用苏联规范^[66]计算挡土结构土压力的方法是不合适的, 需对苏联规范进行修正。

图 28 为 Terzaghi 提出的经典土压力与挡墙位移关系曲线。众多学者通过假设各种数学表达式来反映土压力和位移间的关系, 总体思路均是通过指定函数类型来对试验结果进行拟合, 进而得出相应的土压力 - 位移计算模型。这里选择正弦型函数来对位移模型进行拟合, 具体形式如下:

$$\sigma_a = \sigma_0 - \sigma_r, \quad \sigma_p = \sigma_0 + \sigma_s, \quad (5)$$

$$\sigma_r = \sin\left(\frac{\pi \cdot \delta}{2\delta_{ocr}}\right) \sigma_{rmax}, \quad (6)$$

$$\sigma_s = \sin\left(\frac{\pi \cdot \delta}{2\delta_{per}}\right) \sigma_{smax}. \quad (7)$$

式中 σ_a 为主动土压力; σ_p 为被动土压力; σ_0 为静止土压力; δ 为开挖面以下前墙的位移值; δ_{ocr} 为达到主动土压力极限值时所需要的位移; δ_{per} 为被动土压力极限值时所需要的位移; σ_{rmax} 为当 σ_a 处于极限值 (砂土可取 $\sigma \cdot \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$) 对应的 σ_r , 而 σ_{smax} 则为 σ_p 处于极限值 (砂土可取 $\sigma \cdot \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$) 对应的 σ_s 。

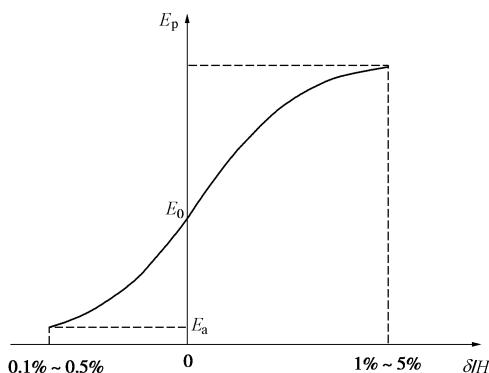


图 28 土压力与挡墙位移关系曲线

Fig. 28 Relationship between earth pressure and displacement of retaining wall

(2) 区域划分及分界点土压力的计算

前述可知, 板桩前墙变形导致其土压力呈 R 形分布。考虑到采用传统的苏联规范过程过于繁琐, 增加了土压力计算的复杂程度。这里根据分离式板桩码头的结构特点, 将计算区域简化为四段进行计算, 具体划分方法可参考文献[67]。图 29 为不同开挖深度对应的土压力分区结果, 其中卸荷平台与锚杆的高程一致,

点 a, b, c, d, e 分别为未卸荷区、完全卸荷区、部分卸荷区及未卸荷区的边界位置。港池的开挖深度对其前墙土压力分布影响显著, 且影响区域主要集中在部分卸荷区, 具体表现为对部分卸荷区上、下边界位置 (点 c, d 的竖向坐标) 的影响。

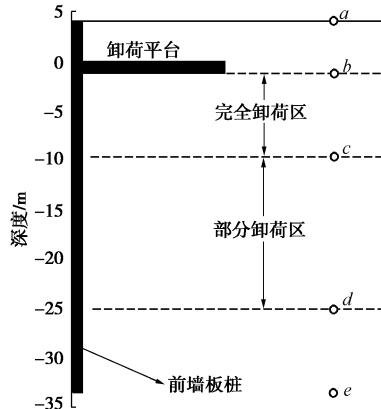


图 29 卸荷式板桩码头主动土压力计算分区图

Fig. 29 Zoning map of active earth pressure calculation for unloading sheet pile wharf

下面对边界位置的土压力进行计算, a, d, e 三点的土压力强度按照上节提出的修正苏联规范法进行计算; 考虑到 b 和 c 两点由于处于完全卸荷区域, 故其竖向应力从卸荷平台开始计算 (b 点处于卸荷平台下檐); 卸荷平台上方按修正苏联规范计算的值, 平台下方则为 0; c 点土压力强度的计算公式如下:

$$\sigma_c = (q + \gamma h_1) \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) K, \quad (8)$$

式中, h_1 为 b, c 两点的距离, K 为板桩挠曲影响系数, 通过查表获得。

以本节模拟的京唐港#36 泊位所采用的卸荷式板桩码头结构为例, 通过不同方法计算获得的两种港池深度下码头前墙的土压力分布, 如图 30 所示, 具体的计算参数见表 8。

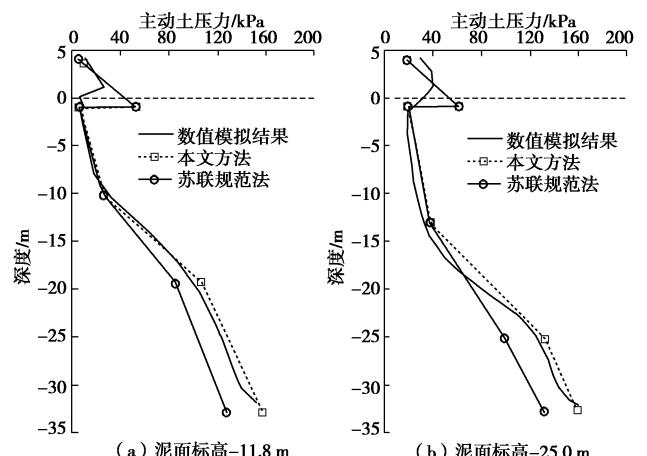


图 30 卸荷式板桩码头计算结果的对比

Fig. 30 Comparison of calculated results

表 8 土压力计算参数

Table 8 Parameters of earth pressure

参数	h/m	H/m	δ/m	$\gamma/(kN \cdot m^3)$	$\phi/(^\circ)$
取值	25	38.2	3	19.3	32

由图 30 可知,采用本文方法计算得到的前墙土压力分布与数值模拟结果吻合度较好,特别是在部分卸荷区的上下边界点位置(c, d 点),由本文方法得出的结果与数值计算结果更加吻合,可以认为本文计算卸荷式板桩码头前墙土压力的计算方法较合理。

5 结论与展望

板桩码头具有结构简单、工程造价低、施工速度快的特点,特别适合粉砂质地区港口建设,其深水化问题在于港池挖深带来的作用于码头前墙上的土压力急剧增长。为了减少土压力对码头前墙的作用,基于“遮帘”和“卸荷”的设计思想,先后开发了“半遮帘式”、“全遮帘式”、“分离卸荷式”和“带肋板的分离卸荷式”4 种板桩码头结构型式,将中国板桩码头建设水平从 3.5 万吨级提升至 20 万吨级。

在深水板桩码头的开发过程中,碰到了一系列涉及板桩结构土压力的问题,包括码头初始静止土压力、遮帘式板桩码头结构的土压力“桶仓”效应和“遮帘”效应以及分离卸荷式板桩码头的土压力“卸荷”等。本文详细介绍了板桩结构土压力理论的发展历程,主要结论如下:

(1)土工离心模型试验是研究静止土压力系数的最佳途径,试验过程中可以保持土体的侧限状态,这是别的试验方法难以做到的。本文的离心模型试验结构表明砂土的静止土压力系数与其密度和颗粒粒径有关,砂土越密实,静止土压力系数越大,颗粒粒径越大,静止土压力系数越小。

(2)遮帘式板桩结构前墙和遮帘柱之间存在土压力“桶仓”效应,该效应与墙柱间距、结构刚度等有关,且存在最佳的墙柱间距。

(3)遮帘式板桩码头结构是依靠前板桩墙和遮帘柱来共同分担地基土压力的作用,以减少作用于前板墙上的土压力,从而可以加大码头前沿港池的水深,达到建设深水大港的目的;与单锚板桩码头结构相比,由于遮帘柱的遮帘效应,遮帘式板桩码头前墙的位移、土压力、弯矩都比单锚板桩码头结构要小得多。

(4)卸荷承台可以有效地降低前墙陆侧土压力和前墙的位移,通过对卸荷承台与土体之间设置缝隙的方式,可以很好地模拟卸荷承台的卸荷效应;分离卸荷式板桩码头前墙陆侧土压力与开挖深度密切相关。

开挖深度以上,土体基本处于主动土压力状态,开挖面以下土体处于主动与静止土压力之间,且更接近于静止土压力;卸荷承台的卸荷效率可以定量地用前墙陆侧总土压力值或前墙水平位移的最大值来表示。开挖深度越大,卸荷效率越高。

致 谢:感谢《岩土工程学报》全体编委的信任,特别要感谢中国水利学会岩土力学专委会的推荐,使本人有机会作黄文熙讲座;感谢南京水利科学研究院岩土工程研究所同仁们对本项研究的大力支持和帮助:徐光明、李景林、焦志斌、范明桥、关云飞、武颖利、任国峰、顾行文等;感谢深水板桩码头新结构开发过程中战友们:刘永绣、吴荔丹、朱吉全、董文才、王成环、于泳、李元音等;感谢门下的一些博士、硕士研究生的共同努力:司海宝、蒋敏敏、崔冠辰、侯伟、朱洵、代志宇等。

参考文献:

- [1] 季则舟, 杨兴宴, 尤再进, 等. 中国沿海港口建设状况及发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1211 - 1217. (JI Ze-zhou, YANG Xing-yan, YOU Zai-jin, et al. Construction state and development trend of coastal ports in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1211 - 1217. (in Chinese))
- [2] “中国海洋工程与科技发展战略研究”海陆关联课题组. 海陆关联工程科技发展战略[J]. 中国工程科学, 2016, 18(2): 49 - 54. (Task Force for the Study on Development Strategy of China's Marine Engineering and Technology Land-Sea Integration Research Group. Land-sea integration engineering and technology development strategy[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(2): 49 - 54. (in Chinese))
- [3] 刘永绣. 板桩码头向深水化发展的方案构思和实践—遮帘式板桩码头新结构的开发[J]. 港工技术, 2005(增刊 1): 12 - 15. (LIU Yong-xiu. Design conception and practice of building sheet pile wharfs in deep waters—development of a new structure of covered type of sheet pile wharf[J]. Port Engineering Technology, 2005(S1): 12 - 15. (in Chinese))
- [4] 刘文平, 郑颖人, 雷 用, 等. 遮帘式板桩码头结构有限元数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 135 - 141. (LIU Wen-ping, ZHENG Ying-ren, LEI Yong, et al. Finite element numerical analysis of covered sheet pile wharfs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 135 - 141. (in Chinese))
- [5] 蔡正银, 侯 伟, 关云飞. 遮帘式板桩码头的工作机理[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1745 - 1750. (CAI Zheng-yin, HOU Wei, GUAN Yun-fei. Mechanism of sheet-pile wharf

- with barrier piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1745 - 1750. (in Chinese))
- [6] 刘永绣. 板桩和地下墙码头的设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (LIU Yong-xiu. The Design Theory and Method of Sheet Pile and Underground Continuous Wall[M]. Beijing: People Communication Press, 2006. (in Chinese))
- [7] 刘永绣, 吴荔丹, 李元音. 一种新型码头结构型式——半遮帘式深水板桩码头结构的推出[J]. 港工技术, 2005(增刊1): 16 - 19. (LIU Yong-xiu, WU Zhi-dan, LI Yuan-yin. A new type of wharf structure the structure of semi-covered type of deep water sheet pile wharf[J]. Port Engineering Technology, 2005(S1): 16 - 19. (in Chinese))
- [8] 蔡正银, 侯伟, 关云飞, 等. 分离卸荷式板桩码头的工作机理[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2133 - 2139. (CAI Zheng-yin, HOU Wei, GUAN Yun-fei, et al. Mechanism of sheet-pile wharf with separated relief platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2133 - 2139. (in Chinese))
- [9] 蔡正银, 刘永绣, 关云飞, 等. 20万吨级深水板桩码头结构开发[J]. 港口科技, 2016(2): 4 - 7, 19. (CAI Zheng-yin, LIU Yong-xiu, GUAN Yun-fei, et al. Development of 200 000-tonnage Sheet pile wharf structure[J]. Port Science & Technology, 2016(2): 4 - 7, 19. (in Chinese))
- [10] BROOKER E W, IRELAND H O. Earth pressures at rest related to stress history[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1965, 2(1): 1 - 15.
- [11] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (CHEN Zu-yu. Soil Slope Stability Analysis[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2003. (in Chinese))
- [12] 殷宗泽. 土力学与地基[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (YIN Zong-ze. Soil Mechanics and Foundation[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [13] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [14] 陈国兴. 土质学与土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (CHEN Guo-xing. Soil Quality and Soil Mechanics[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2002. (in Chinese))
- [15] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HUANG Wen-xi. Engineering Properties of Soil[M]. Beijing: China Water Conservancy and Electricity Press, 1983. (in Chinese))
- [16] 卢廷浩, 刘祖德. 高等土力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. (LU Ting-hao, LIU Zu-de. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese))
- [17] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (GAO Da-zhao. Soil Mechanics and Foundation Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998. (in Chinese))
- [18] BROOKER E W, IRELAND H O. Earth pressures at rest related to stress history[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1965, 2(1): 1 - 15.
- [19] 纪永志, 黄茂松. 超固结软黏土的静止土压力系数与不排水抗剪强度[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 951 - 957, 964. (JIU Yong-zhi, HUANG Mao-song. Coefficient of earth pressure at rest and undrained shear strength of overconsolidated soft clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 951 - 957, 964. (in Chinese))
- [20] MESRI G, HAYAT T. The coefficient of earth pressure at rest[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(4): 647 - 666.
- [21] SHOGAKI T, NOCHIKAWA Y. Triaxial strength properties of natural deposits at K0 consolidation state using a precision triaxial apparatus with small size specimens[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(2): 41 - 52.
- [22] VARDHANABHUTI B, MESRI G. Coefficient of earth pressure at rest for sands subjected to vibration[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(10): 1242 - 1263.
- [23] WANG J J, YANG Y, BAI J, et al. Coefficient of earth pressure at rest of a saturated artificially mixed soil from oedometer tests[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22: 1691 - 1699.
- [24] ARTHUR J R F, MENZIES B K. Inherent anisotropy in a sand[J]. Géotechnique, 1972, 22(1): 115 - 128.
- [25] 刘麟, 顾晓强, 黄茂松. 利用带弯曲元应力路径三轴仪量测静止土压力系数研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊2): 212 - 215. (LIU Lin, GU Xiao-qiang, HUANG Mao-song. K_0 -determination by stress path triaxial apparatus with bender element[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 212 - 215. (in Chinese))
- [26] 岩土工程勘察规范: GB50021—2001 (2009年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (Code for investigation of

- geotechnical engineering: GB 50021—2001 (Version 2009) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [27] 徐东升, 汪 稔, 孟庆山, 等. 黄河三角洲粉土原位力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 409 - 416. (XU Dong-sheng, WANG Ren, MENG Qing-shan, et al. Experimental research on in-situ mechanical properties of silt in yellow river delta[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 409 - 416. in Chinese))
- [28] 王 沛, 丁克胜, 杨宝珠. 自钻式旁压仪测定土的侧压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊 1): 416 - 418. (WANG Pei, DING Ke-sheng, YANG Bao-zhu. Lateral pressure of soil by self-boring pressuremeter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S1): 452 - 460. (in Chinese))
- [29] 尹 松, 孔令伟, 张先伟, 等. 基于自钻式旁压仪的残积土原位力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 688 - 695. (YIN Song, KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, et al. Experimental study on in-situ properties of residual soil by self-boring pressuremeter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 688 - 695. (in Chinese))
- [30] MARCHETTI S. In-situ tests by flat dilatometer[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1980, **106**(4): 299 - 321.
- [31] LUNNE T, POWELL J M, HAUGE E A, et al. Correlation of dilatometer readings with lateral stress in clay[J]. Transport Research Record, 1990, 1278: 183 - 493.
- [32] 赵富军. 天津地铁静止侧压力系数确定方法研究[J]. 铁道工程学报, 2016, **33**(12): 99 - 104. (ZHAO Fu-jun. Research on the method of the determination of static lateral pressure coefficient in Tianjin metro[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, **33**(12): 99 - 104. (in Chinese))
- [33] 童立元, 刘松玉, 张焕荣, 等. 应用 SCPTu 确定静止土压力系数的试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(4): 117 - 123. (TONG Li-yuan, LIU Song-yu, ZHANG Huan-rong, et al. Determination of coefficient of earth pressure at rest (K_0) using seismic piezocone tests[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(4): 117 - 123. (in Chinese))
- [34] 耿功巧, 陈 妍, 蔡国军, 等. 基于 CPTU 原位测试的深基坑工程中黏性土静止土压力系数的评价研究[J]. 工程勘察, 2019, **47**(9): 1 - 6. (GENG Gong-qiao, CHEN Yan, CAI Guo-jun, et al. Determination of static earth pressure coefficient of clay in deep excavation project based on piezocone penetration test[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, **47**(9): 1 - 6. (in Chinese))
- [35] 王国富, 曹正龙, 路林海, 等. 黄河冲积层静止土压力系数原位测定与分析[J]. 岩土力学, 2018, **39**(10): 3900 - 3906. (WANG Guo-fu, CAO Zheng-long, LU Lin-hai, et al. Measurement and analysis about coefficient of earth pressure at rest in alluvium of the Yellow river[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(10): 3900 - 3906. (in Chinese))
- [36] JAKY J. The coefficient of earth pressure at rest[J]. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 1944, **78**(22): 355 - 358.
- [37] ALPAN I. The empirical evaluation of the coefficients K_0 and K_{0R} [J]. Soils and Foundations, 1967, **7**(1): 31 - 40.
- [38] SCHMIDT B. Discussion of earth pressures at rest related to stress history[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1966, **3**(4): 239 - 242.
- [39] 沈靠山. 覆盖层砂卵石料静止侧压力系数研究[D]. 南京: 河海大学, 2009. (SHEN Kao-shan. Study of Coefficient of Earth Pressure at Rest on Gravel Soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [40] 徐光明, 陈爱忠, 曾友金, 等. 超重力场中界面土压力的测量[J]. 岩土力学, 2007, **28**(12): 2671 - 2674. (XU Guang-ming, CHEN Ai-zhong, ZENG You-jin, et al. Measurement of boundary total stress in a multi-gravity environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(12): 2671 - 2674. (in Chinese))
- [41] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Test Methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [42] 李 浩, 罗 强, 张 正, 等. 砂雨法制备砂土地基模型控制要素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1872 - 1878. (LI Hao, LUO Qiang, ZHANG Zheng, et al. Experimental study on control element of sand pourer preparation of sand foundation model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1872 - 1878. (in Chinese))
- [43] 马险峰, 孔令刚, 方 薇, 等. 砂雨法试样制备平行试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1791 - 1801. (MA Xian-feng, KONG Ling-gang, FANG Wei, et al. Parallel tests on preparation of samples with sand pourer[J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1791 - 1801. (in Chinese))
- [44] 梁波, 厉彦君, 凌学鹏, 等. 离心模型试验中微型土压力盒土压力测定[J]. 岩土力学, 2019, **40**(2): 818 - 826. (LIANG Bo, LI Yan-jun, LING Xue-peng, et al. Determination of earth pressure by miniature earth pressure cell in centrifugal model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(2): 818 - 826. (in Chinese))
- [45] 刘守华, 蔡正银, 徐光明, 等. 超深厚吹填粉细砂地基大型离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6): 846 - 850. (LIU Shou-hua, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Centrifuge modeling of the silty sand foundation of super-high fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 846 - 850. (in Chinese))
- [46] 应宏伟, 蒋波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 90 - 95. (YING Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 90 - 95. (in Chinese))
- [47] 曹卫平, 陈仁朋, 陈云敏. 桩承式加筋路堤土拱效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 129 - 134. (CAO Wei-ping, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Experimental investigation on soil arching in piled reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 129 - 134. (in Chinese))
- [48] 徐光明, 蔡正银, 曾友金, 等. 京唐港#18、#19泊位卸荷式地连墙板桩码头方案离心模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007. (XU Guang-ming, CAI Zheng-yin, ZENG You-jin, et al. Report of Centrifugal Model Tests on Sheet-Pile Wharf With Relief Diaphragm of Berth No. 18 and 19 of Jingtang Port[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [49] 李景林, 蔡正银, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头结构离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(6): 1182 - 1187. (LI Jing-lin, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Centrifuge modelling test on covered sheet-piled structure of wharf[J]. 2007, **26**(6): 1182 - 1187. (in Chinese))
- [50] 司海宝, 蔡正银, 俞缙. 遮帘式板桩码头结构与土共同作用3D数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(5): 182 - 190. (SI Hai-bao, CAI Zheng-yin, YU Jin. 3D Numerical modeling of pile-soil interaction for covered sheet-piled wharf[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(5): 182 - 190. (in Chinese))
- [51] 崔冠辰, 蔡正银, 李小梅, 等. 遮帘式板桩码头工作机理初探[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 762 - 766. (CUI Guan-chen, CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, et al. Preliminary investigation on working mechanism of covered sheet-pile wharfs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 762 - 766. (in Chinese))
- [52] 司海宝, 蔡正银. 基于ABAQUS建立土体本构模型库的研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(2): 599 - 603. (SI Hai-bao, CAI Zheng-yin. Development of static constitutive model library for soils based on ABAQUS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(2): 599 - 603. (in Chinese))
- [53] 刘永绣, 吴荔丹, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头工作机制[J]. 水利水运工程学报, 2006(2): 8 - 12. (LIU Yong-xiu, WU Li-dan, XU Guang-ming, et al. Working mechanism of sheet pile wharf with barrier piles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(2): 8 - 12. (in Chinese))
- [54] 蔡正银, 徐光明, 曾有金, 等. 遮帘式板桩码头土压力离心模型试验研究[J]. 港工技术, 2007, **26**(6): 51 - 55. (CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, ZENG You-jin, et al. Experimental study of centrifugal models to test earth pressure on covered sheet pile wharfs[J]. Port Engineering Technology, 2007, **26**(6): 51 - 55. (in Chinese))
- [55] 焦志斌, 蔡正银, 王剑平, 等. 遮帘式板桩码头原型观测技术研究[J]. 港工技术, 2005(增刊): 56 - 59. (JIAO Zhi-bin, CAI Zheng-yin, WANG Jian-ping, et al. Study on prototype observation technique of semi-covered type of sheet pile[J]. Port Engineering Technology, 2005(S0): 56 - 59. (in Chinese))
- [56] 焦志斌, 蔡正银, 徐光明, 等. 遮帘式地连墙板桩结构遮帘效应研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(增刊 2): 125 - 129. (JIAO Zhi-bin, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Barrier effect of covered sheet pile wharfs with diaphragm walls[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(S2): 125 - 129. (in Chinese))
- [57] 彭益达, 赵利平. 港池开挖对遮帘式板桩码头结构的影响[J]. 中国水运, 2014, **14**(4): 303 - 305. (PENG Yi-da, ZHAO Li-ping. The impact of harbor excavation on the covered sheet-piled wharf[J]. China Water Transport, 2014, **14**(4): 303 - 305. (in Chinese))
- [58] 黄伟, 潘泓, 王燕燕. 全遮帘式板桩码头结构遮帘桩合理桩间距确定[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(1): 129 - 134. (HUANG Wei, PAN Hong, WANG Yan-yan.

- Determination on rational spacing of barrier pile for all-covered type of sheet pile wharf[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(1): 129 – 134. (in Chinese))
- [59] 王元战, 龚晓龙, 李斌. 遮帘式板桩码头的遮帘效果及其影响因素分析[J]. 水道港口, 2014, **35**(1): 81 – 86. (WANG Yuan-zhan, GONG Xiao-long, LI Bin. Analysis on sheltering effect of covered sheet pile wharf and its influencing factors[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, **35**(1): 81 – 86. (in Chinese))
- [60] 刘进生, 刘永绣. 卸荷式板桩码头结构在汉堡港的应用[J]. 港工技术, 2005(4): 20 – 21. (LIU Jin-sheng, LIU Yong-xiu. Application of relieving type of sheet pile wharf structure to Hamburg port[J]. Port Engineering Technology, 2005(4): 20 – 21. (in Chinese))
- [61] 龚丽飞. 分离卸荷式地下连续墙板桩码头结构与土相互作用研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007. (GONG Li-fei. Researches on Structure-Soil of Sheet-Pile Wharfs with Relief Platform and Diaphragm Wall[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [62] 徐光明, 刘阳, 任国峰, 等. 20 万吨级卸荷式板桩码头离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(1): 46 – 53. (XU Guang-ming, LIU Yang, REN Guo-feng, et al. Centrifuge modeling of 200000 tonnage sheet-pile wharfs with relief platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(1): 46 – 53. (in Chinese))
- [63] 蔡正银, 关云飞. 卸荷式板桩码头数值仿真平台开发及有限元计算[J]. 港口科技, 2016(3): 1 – 5. (CAI Zheng-yin, GUAN Yun-fei. Numerical simulation platform development and finite element calculation for relieving sheet-pile[J]. Science Technology of Ports, 2016(3): 1 – 5. (in Chinese))
- [64] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [65] 梅国雄, 宰金珉. 现场监测实时分析中的土压力计算公式[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(5): 79 – 82. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min. A new formula for earth pressure[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(5): 79 – 82. (in Chinese))
- [66] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994. (CCCC First Navigation Engineering Survey and Design Institute. Harbour Engineering Design Manual[M]. Beijing: China Communications Press, 1994. (in Chinese))
- [67] 侯伟. 卸荷式板桩码头结构关键问题研究[D]. 上海: 同济大学, 2015. (HOU Wei. Research on Key Issues in the Sheet Pile Wharf with Relieving Platform[D]. Shanghai: Tongji University, 2015. (in Chinese))