

岸坡堆载对软基高桩码头力学响应影响研究

赵硕¹, 曹洋¹, 刘延波¹, 周峰²

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 天津港(集团)有限公司, 天津 300461)

摘要: 岸坡堆载会引起土体变形, 挤压高桩码头桩基, 严重威胁码头结构的安全。为了解岸坡堆载作用下岸坡及高桩码头结构的响应特性, 评估堆载对码头结构安全性的影响, 以天津港高桩码头为例, 通过有限元分析软件, 采用 Drucker-Prager 土体本构模型, 进行岸坡堆载对软基高桩码头力学响应影响研究, 并与离心机试验数据进行对比。结果表明: 堆载越大、越靠近码头结构, 则后方土体变形量越大, 且变形以沉降为主, 最大沉降量为 375.5 mm, 约为水平位移的 7 倍; 堆载越大、越接近桩基础, 桩身扭曲程度越大, 桩位移的最大值与最小值差值最大为 52.43 mm; 堆载越大、越接近靠岸侧桩, 桩中部区域的弯矩越大, 最大为 113.80 kN·m, 其中部靠海侧受拉趋势越明显, 该规律与离心机试验结果相吻合。

关键词: 高桩码头; 堆载; 有限元分析; 结构变形

中图分类号: U656.1⁺13

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)01-0016-09

Influence of Bank Slope Loading on the Mechanical Response of High Pile Wharf on Soft Foundation

ZHAO Shuo¹, CAO Yang¹, LIU Yanbo¹, ZHOU Feng²

(1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. Tianjin Port (Group) Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Bank slope loading can cause soil deformation, squeeze high pile wharf pile foundations, and seriously threaten the safety of wharf structures. In order to understand the response characteristics of bank slopes and high pile wharf structures under the action of bank slope loading, and evaluate the impact of loading on the safety of wharf structures, this work take the Tianjin Port high pile wharf as an example, the influence of bank slope loading on the mechanical response of soft foundation high pile wharf was analyzed using finite element analysis software and Drucker-Prager soil constitutive model. The results were compared with centrifuge experimental data to obtain the displacement and bending moment response laws of the wharf under different bank slope loading conditions. The results show that the larger the pile load and the closer it is to the dock structure, the greater the deformation of the rear soil, and the deformation is mainly settlement. The maximum settlement is 375.5 mm, which is about 7 times the horizontal displacement; The larger the pile load and the closer it is to the pile foundation, the greater the degree of distortion of the pile body, and the maximum difference between the maximum and minimum values of pile displacement is 52.43 mm. The larger the pile load and the closer it is to the shore side pile, the greater the bending moment in the middle area of the pile, with a maximum of 113.80 kN·m, and the more obvious the tensile trend on the middle side near the sea. This pattern is consistent with the centrifuge test results.

Keywords: high-piled wharf; surcharge load; finite element analysis; structural deformation

我国港口数量众多, 高桩码头因其独特的结构优势被广泛应用。在堆载作用下, 岸坡土体会产生

变形,进而挤压高桩码头桩基^[1]。这种桩土之间的相互作用会引起结构位移,导致构件之间错位、破损,严重影响码头结构的安全^[2]。因此,探究岸坡堆载条件下高桩码头的力学响应特性至关重要。

田双珠等^[3]对天津港码头岸坡土体变形进行观测,指出天津港码头岸坡土体处在不断运动中。从累计位移来看,岸坡土体呈现出向海运动的趋势,而造成岸坡变形的的主要因素是后方堆场的荷载作用。张强等^[4]通过对天津港码头的调查资料进行总结分析,得出结论:岸坡土体变形会使高桩码头桩基产生位移,进而造成高桩码头上部结构破损,例如构件之间错位、构件连接部位撕裂和桩基顶部开裂等。刘现鹏等^[5]采用修正的 Drucker-Prager/Cap 模型描述了土体的本构关系,并使用 Singh-Mitchell 模型模拟土体的蠕变效应,针对岸坡土体的蠕变变形对高桩码头结构影响,展开有限元分析研究,提出一种模拟桩土长期相互作用的分析方法。卢西伟^[6]利用 ANSYS 探究高桩码头在有无堆货荷载时 X、Y、Z 方向的结构变形,表明施加堆载后,土体变形量增大,码头结构发生变化。丁琼^[7]利用 ABAQUS 建立高桩码头三维有限元模型,深入探究岸坡土体在后方堆载作用下对排架结构的影响。王东^[8]针对不同临近加载条件下的土体及桩网结构路基变形,开展土工离心试验,得出结论:加载距离越近,加载量越大,桩基水平变形量越大。Yan 等^[9]结合土工离心试验和数值模拟,对斜坡上方高桩码头的侧向承载性能进行分析,指出在堆载和土体共同作用下,桩基顶部会出现较大弯矩。黄瑞堂等^[10]通过室内模型试验,研究不同堆载距离对群桩的影响,表明堆载距离越小,桩身附加弯矩增长幅度越大。

目前的研究大多局限于岸坡堆载对单排桩架的影响,少有学者深入探讨岸坡堆载对高桩码头整体结构的综合影响。该文拟利用数值模拟及离心机试验,对岸坡堆载下高桩码头的变形及内力响应进行探究,以期高桩码头设计及堆载管理提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 模型概况

模型总尺寸 120 m × 48 m × 75 m。土体按照土的一般性质简化为两层,上层为淤泥质黏土,厚 25 m,下层为粉质黏土,厚 50 m。上部结构简化为由桩帽进行连接的整体结构,码头承台尺寸为 37.4 m × 45.3 m × 1.0 m,其中前后承台分别宽 17.9 m、27.4 m,桩帽厚 1.05 m。桩基采用钢筋混凝土方形空心

桩,桩长 30 m,断面尺寸为 0.6 m × 0.6 m,桩壁厚 0.1 m。

码头结构及大部分土体选用 C3D8R 单元,插桩下方土体为保证网格质量,选用 C3D10 单元。不同部件采用不同的近似单元尺寸:土体为 2 m;上部结构为 1.5 m,桩基为 1 m。整个模型共划分网格单元 235 465 个。上部结构和桩基之间采用绑定约束,即两者不产生相对运动。桩基与土体之间建立表面与表面接触,采用主-从面接触法。选择桩基表面作为主面,土体接触桩基的表面作为从面,法向行为采用硬接触,切向行为采用罚函数,摩擦系数为 0.4^[11]。土体的前后、左后及下方均设置了位移/转角的边界条件,限制垂直于其断面方向的位移。采用 ODB 导入法进行初始地应力平衡^[12]。几何模型图如图 1 所示。

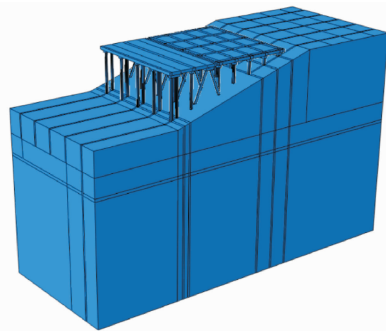


图 1 几何模型图

1.2 材料参数

高桩码头上部结构和桩基部分采用线弹性混凝土材料;第一层土体采用 Drucker-Prager 土体本构模型;第二层土体采用线弹性模拟。材料参数如表 1 所示^[7]。

1.3 桩基编号与工况设置

为了便于识别和定位桩基,采用字母和数字对每个桩基进行编号。字母编号代表不同排,数字编号代表不同列。具体编号如图 2 所示。该文就堆载荷载、堆载距离两种堆载影响因素展开研究,共设置七种工况,影响因素如图 3 所示。在探究岸坡堆载荷载对高桩码头的影响时,为了消除其他堆载因素的潜在影响,设置特定的堆载条件,假定后方堆场堆满货物,即堆载宽度为 36.9 m,堆载距离为 0 m,堆载荷载分别取 40 kPa、60 kPa、80 kPa、100 kPa^[13]。在探究岸坡堆载距离对高桩码头影响时,堆载宽度为 10 m,堆载荷载为 60 kPa,堆载距离分别取 0 m、10 m、20 m。

表 1 材料参数表

结构	材料	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	内摩擦角 /($^{\circ}$)	流应力比	屈服应力 /kPa
上部结构	C40 混凝土	2.45	32500	0.2	—	—	—
桩基	C40 混凝土	2.45	32500	0.2	—	—	—
第一层土体	淤泥质黏土	1.80	10	0.3	37.670	0.795	42.844
第二层土体	粉质黏土	1.80	20	0.3	—	—	—

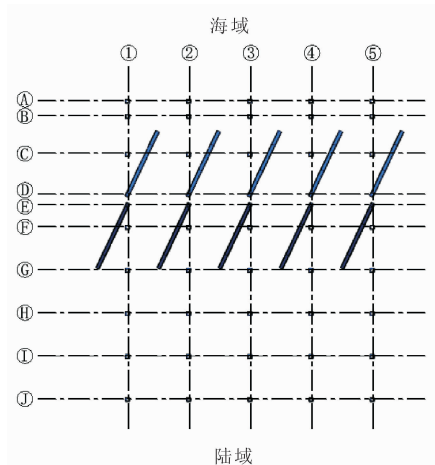


图 2 桩基编号图

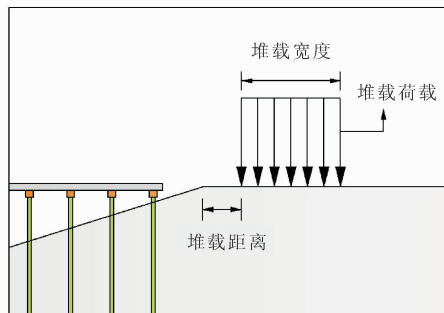


图 3 堆载影响因素示意图

2 模拟结果分析

2.1 模型整体变化

2.1.1 堆载荷载的影响

满载 60 kPa 下,模型位移云图及位移特殊值如图 4、表 2 所示。由图 4 可知,岸坡堆载作用下,发生沉降的土体主要位于后方堆场,向陆域位移的土体主要位于后方堆场表层土的前侧,向海域位移的土体主要位于后侧桩基的下方。从数值上看,土体变形以竖向沉降为主,水平位移次之,最大沉降量约为最大水平位移值的 7 至 10 倍。随着堆载的增大,沉降量及水平位移量大致呈线性增加,堆载每增大 20 kPa,沉降量约增大 74.7 mm,水平正位移约增大

12.7 mm,水平负位移约增大 10.1 mm。

岸坡堆载作用下,码头面沉降量最大的区域为后方桩台靠近陆域的位置,码头面沉降量最小的区域为前方桩台沿海区域两侧的位置。可以判断码头面产生了不均匀沉降,呈现出向岸侧倾斜的情况。随着堆载增大,沉降最小值减小,沉降最大值增大且向陆域移动,码头面倾斜程度加剧。

当岸坡堆载施加于土体时,首先会引起土体的竖向变形,对桩基产生向下的负摩擦力,导致码头结构沉降。这一过程中,由于土体竖向变形较大,引起土体侧向变形,对周围桩基施加挤压作用,码头结构产生水平位移。各桩基位移量存在差异,码头面产生不均匀沉降。

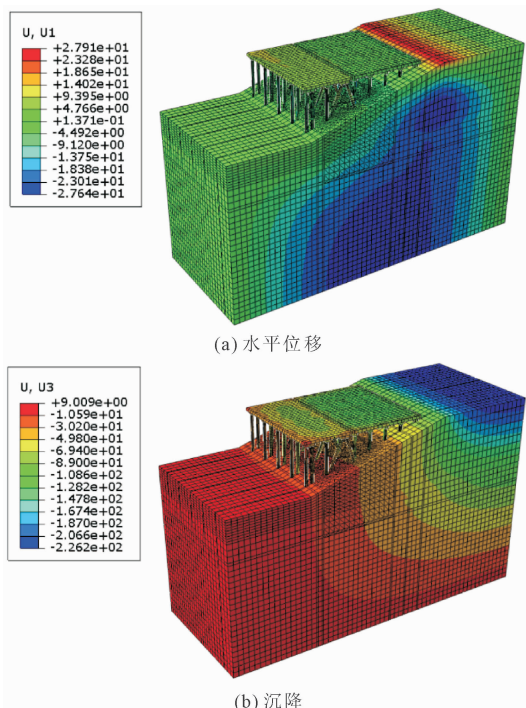


图 4 满载 60 kPa 模型位移云图(单位:mm)

2.1.2 堆载距离的影响

堆载距离 10 m 时,模型位移云图及位移特殊值如图 5、表 3 所示。由图 5 可知,岸坡堆载作用下,土体变形量依然是以竖向沉降为主,水平位移次之。

土体沉降最大值位于后方堆场施加堆载区域,随着逐渐远离该区域,沉降值减少。堆载距离增大,土体向海域位移量减小。

表 2 不同堆载荷载下模型位移表

堆载荷载 /kPa	最大沉降量 /mm	最大水平正向位移 /mm	最大水平负向位移 /mm	码头面最小沉降值 /mm	码头面最大沉降值 /mm	码头面倾斜角度 /($^{\circ}$)
40	151.4	15.21	-19.60	24.34	109.5	0.1058
60	226.2	27.91	-27.64	21.83	117.5	0.1189
80	300.9	40.58	-37.65	19.33	129.3	0.1367
100	375.5	53.20	-47.94	16.83	142.4	0.1561

码头面沉降量最大的区域为后方桩台中心位置,码头面沉降量最小的区域为前方桩台沿海区域的两侧位置。随着堆载距离增大,沉降最小值减小,沉降最大值减小且向海域移动,沉降差减小,码头面倾斜程度减弱。

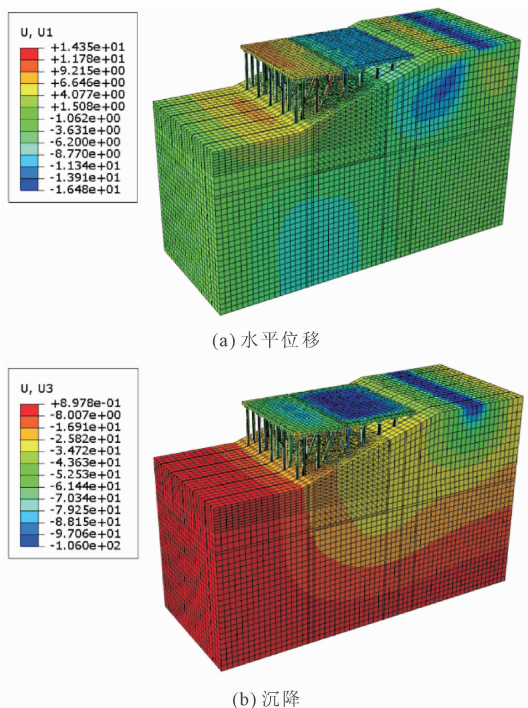


图 5 堆载距离 10 m 模型位移云图(单位:mm)

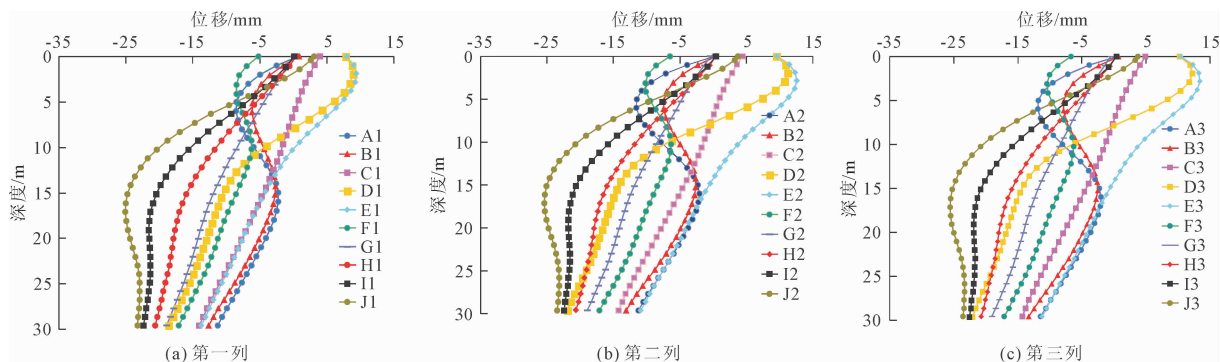


图 6 桩基水平位移曲线图

表 3 不同堆载距离下模型位移表

堆载距离 /m	最大沉降量 /mm	最大水平正向位移 /mm	最大水平负向位移 /mm	码头面最小沉降值 /mm	码头面最大沉降值 /mm	码头面倾斜角度 /($^{\circ}$)
0	108.2	14.48	-20.19	28.55	108.2	0.0990
10	106.0	14.35	-16.48	27.43	106.0	0.0977
20	109.7	14.18	-16.75	26.81	104.5	0.0966

2.2 桩基位移响应

图 6 为 60 kPa 堆载下群桩位移曲线。由图 6 可知,不同列桩基位移变化趋势一致,故该文后续相关分析均采用第三列桩基。

2.2.1 堆载荷载的影响

不同堆载荷载下桩基位移曲线图如图 7 所示。不同位置桩基呈现出不同的位移特征。分析其原因,主要是由于桩基受到土体挤压力和上部结构传递的力两种作用力,桩基位置的不同导致其所受到两种作用力占比不同。前方桩台的桩基距离后方堆场较远,其所处位置的土体变形量相对较小,上部构造向桩基传递的力作用在位移因素中占据一定比重。后方桩台桩基距离后方堆场较近,位移由土体变形产生挤压作用主导。

桩基整体呈现出向海域移动的趋势。由于堆载作用下土体变形产生的挤压作用,后方桩台桩基位移量较大,且越靠近后方堆场,位移量越大,位移量最大的为第 J 排桩基。堆载的增加,位移整体变化趋势不变,位移量发生改变。位移变化呈现出非线性特征。堆载的增大使桩基前后位移增大,加剧了桩基的扭曲程度;在桩深 3 m ~ 7 m 范围内,存在一个特定深度,在该深度堆载荷载对该深度的位移影响最小。当桩的深度逐渐远离这一特定值时,无论是向桩顶还是桩底方向,堆载荷载对位移量的影响都会逐渐增强。

2.2.2 堆载距离的影响

不同堆载距离下桩基位移曲线图如图 8 所示。

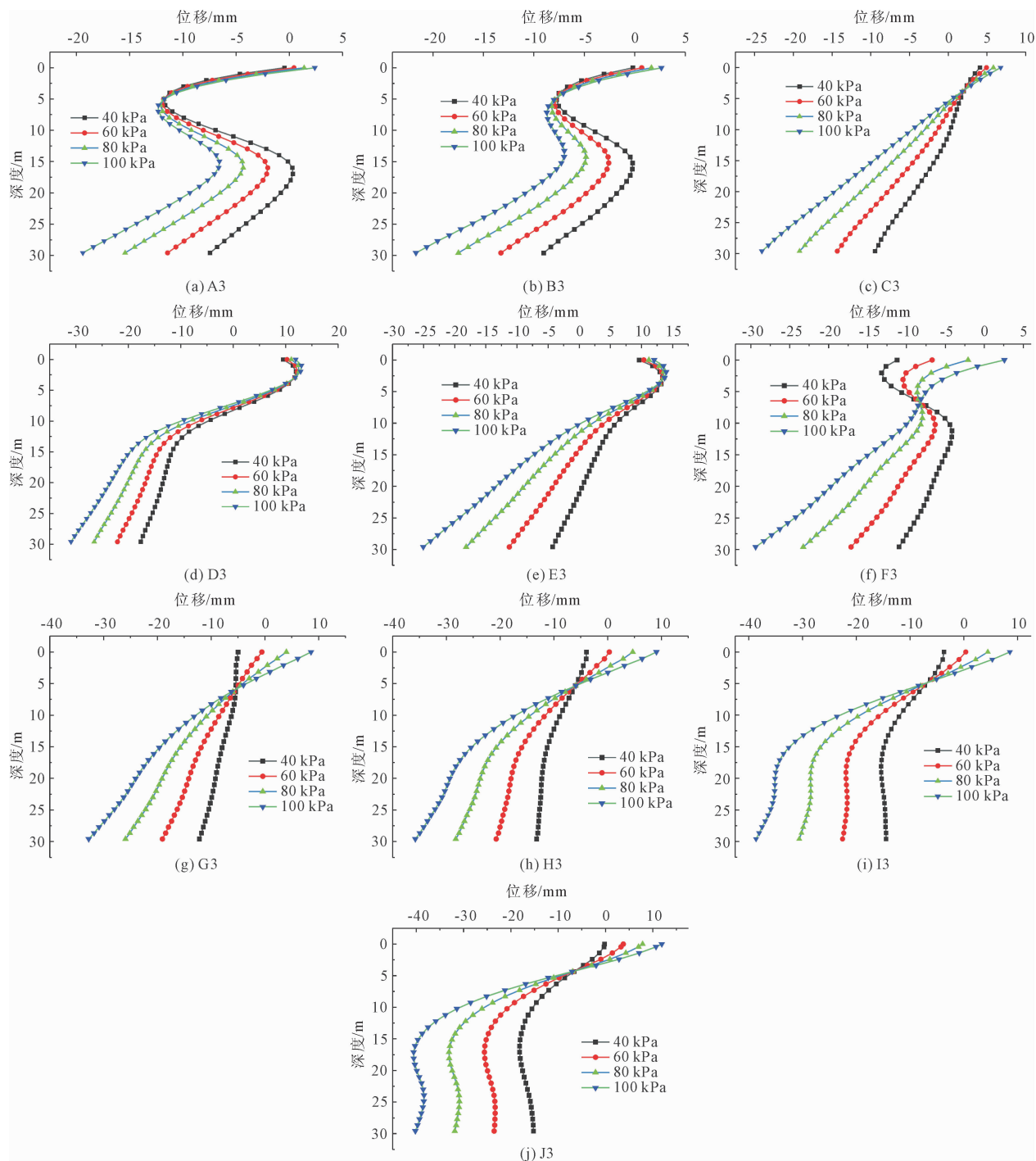


图 7 不同堆载荷载下桩基位移曲线图

不同位置桩基随深度的变化规律与前述基本一致。堆载距离增大使桩基前后位移减少,桩基的扭曲程度减轻。堆载作用于土体时,其产生的土压力不会竖直向下传递,而是沿着一定角度扩散。堆载距离桩基越远,扩散路径越长,堆载产生的土压力对桩基的作用越小且深度越深。因此堆载距离增加,位移的变化量减少,极值对应桩深增加。以 J3 桩为例,堆载距离从 0 m 增加至 10 m 时,最大位移量减少了

2.25 mm,其对应桩深由 10.25 m 增加至 14.17 m;堆载距离从 10 m 增至 20 m,最大位移量仅减少 1.63 mm,对应桩深进一步增大至 18.09 m。

2.3 桩基弯矩响应

2.3.1 堆载荷载的影响

不同堆载荷载下桩基弯矩曲线图如图 9 所示。弯矩为正表示桩基向海侧受拉而向陆侧受压。由于桩基位置及入土深度不同,桩基弯矩对堆载响应存

在差异。前侧桩基相较于后侧桩基入土深度浅且远离后方堆场,其弯矩对堆载响应不显著,故选择后侧桩基作为研究对象,进行深入分析。观察第 G 排至第 J 排桩基弯矩曲线图可以发现,桩身中部受到土体挤压作用最强,弯矩为正值,桩顶及桩身下部分别受到上部结构和地基土体约束作用,弯矩为负值;随

着堆载的增加,桩顶的负弯矩和桩中部的正弯矩均有所增大,桩深 3 m~20 m 处,弯矩变化响应最为明显。值得注意的是,桩顶部存在较大的弯矩,易导致桩基与桩帽的连接处出现损伤。在实际工程中,应特别关注并加强该部位的防护,以保证结构的稳定性及安全性。

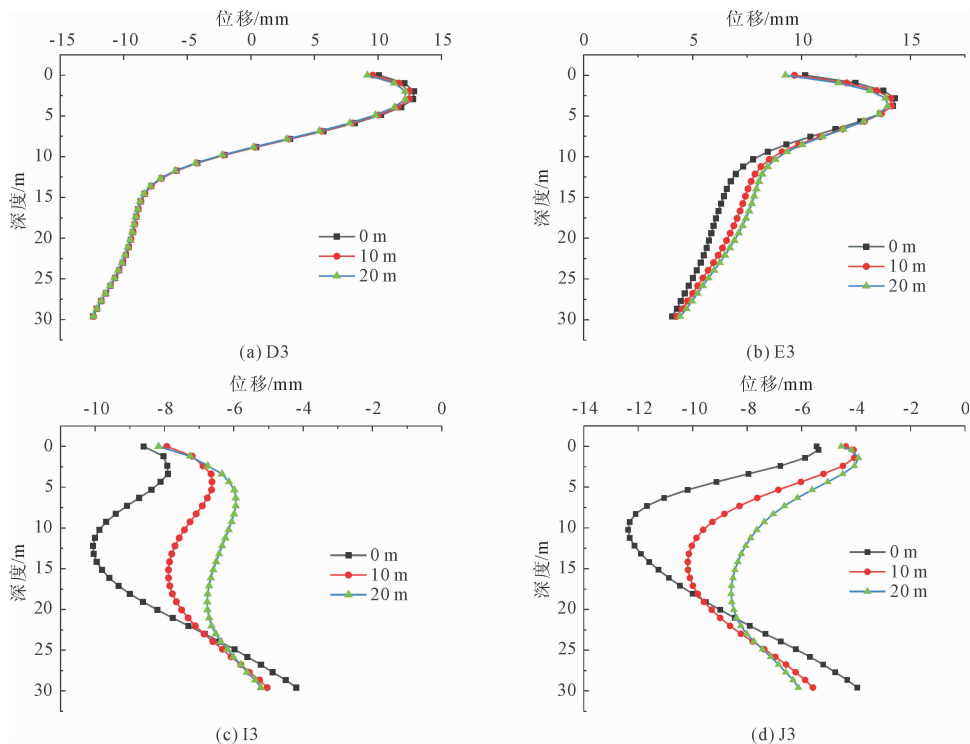


图 8 不同堆载距离下桩基位移曲线图

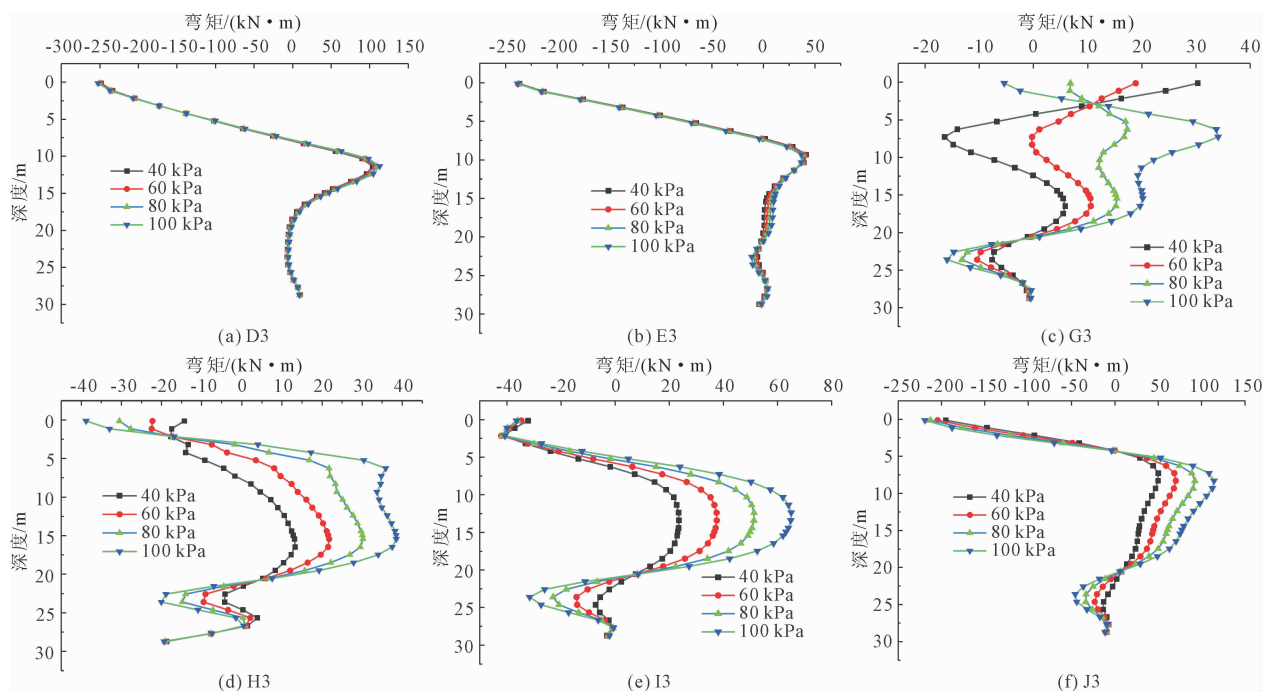


图 9 不同堆载荷载下桩基弯矩曲线图

2.3.2 堆载距离的影响

不同堆载距离下桩基弯矩曲线图如图 10 所示。由图 10 可知,堆载距离增加,桩基负弯矩及正弯矩均有所减小,桩深 3 m~20 m 处,弯矩变化响应最为明显;堆载距离改变,弯矩变化值也发生改变。以

J3 号桩基为例,堆载距离从 0 m 增加至 10 m 时,最大正弯矩减少了 25.23 kN·m,堆载距离从 10 m 增至 20 m,最大正弯矩仅减少 9.58 kN·m。堆载距离增加,弯矩的变化量减少。

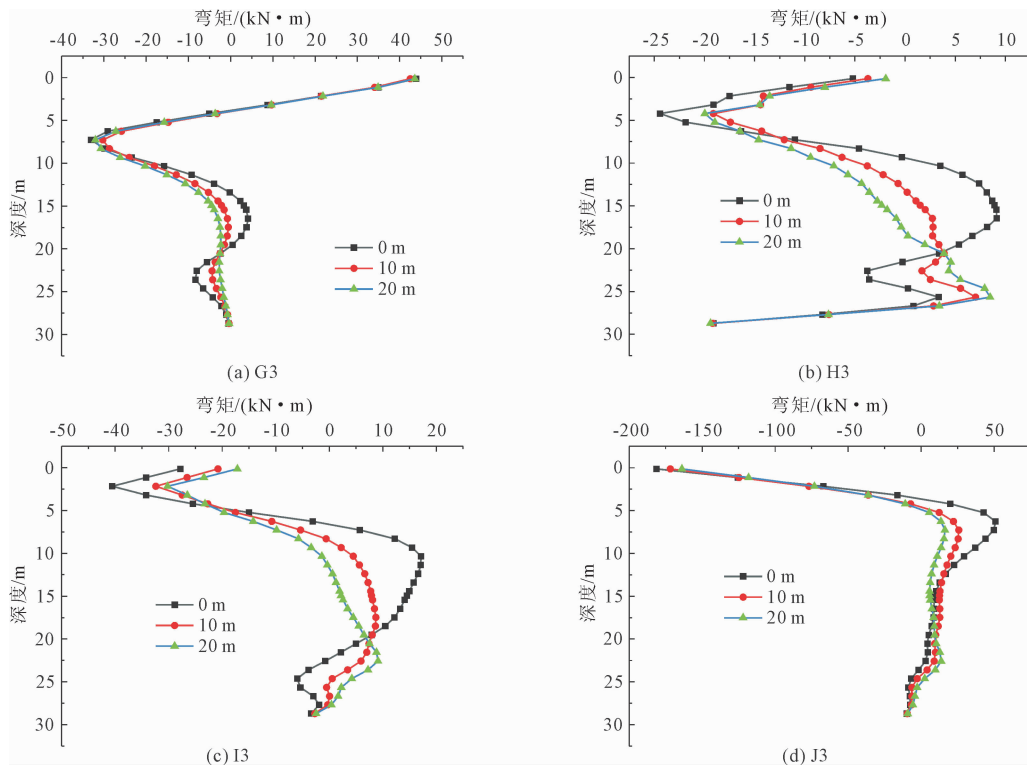


图 10 不同堆载距离下桩基弯矩曲线图

3 离心机试验与数值模拟比较

3.1 离心机试验设计

模型箱尺寸 1.2 m × 1.2 m × 0.5 m。土体为上下两层,上层为黏土层,厚 296 mm,下层土体为持力砂土层,厚 454 mm。上部结构简化为整体结构,以质量相似为设计原则,采用厚度为 10 mm 的铝板。桩基部分以抗弯刚度相似为设计原则,采用抗弯刚度 5.98 N·m² 的空心方形铝管,截面尺寸 6 mm × 6 mm,壁厚 1 mm。模型布置如图 11、图 12 所示。试验中采用液压加载装置在堆场处以位移控制加载,设置 9 种工况,分别对应 1 mm~9 mm 的堆场加载位移^[14]。

3.2 试验结果比较

将离心机试验结果量级换算为数值模拟量级,选取 I3、J3 号桩基的弯矩数据进行分析,弯矩在不同堆载工况下随深度变化曲线如图 13 所示。由图 13 可知,I3 桩基与 J3 桩基沿深度分布规律基本一

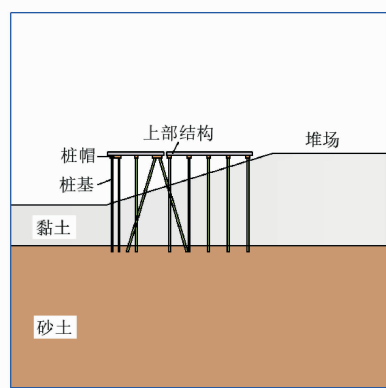


图 11 模型布置示意图(单位:mm)

致。桩基与上部结构通过桩帽进行固接,由于上部结构对桩基的约束效应,桩顶区域为负弯矩;土体向海域方向移动,挤压桩基,桩身中部为正弯矩。桩基底部插入持力砂土层,受到土体的锚固作用,桩底区域为负弯矩。对比两根桩基的弯矩值,可以发现位置因素对桩基弯矩响应具有较大影响。靠近后方堆

场的 J3 桩基弯矩明显大于远离后方堆场的 I3 桩基。以工况 9 为例, J3 桩基的弯矩峰值达到了 188.19 kN·m, I3 桩基的弯矩峰值仅为 109.47 kN·m, 后者约为前者的 58.2%。两根桩基的弯矩对堆载荷载的响应也是相同的, 堆载增大, 桩基正负弯矩值均增大。

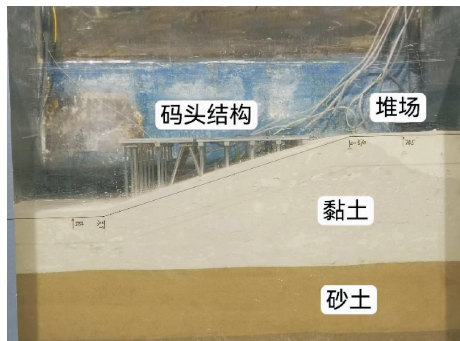


图 12 离心机模型图

在离心机试验中, 桩长为 300 mm, 上层土体厚度为 294 mm, 其内摩擦角为 10.7°。而数值模拟中的桩长为 30 m, 上层土体厚度为 25 m, 其采用摩尔库伦模型的内摩擦角为 20°。对比两者, 离心机试验中桩基嵌入上层土体的比例大于数值模拟中的比例, 且前者的土体内摩擦角也更小。已有研究表明, 当活动土层的桩长相对较小时, 土体会产生“绕流”现象, 即土体绕过桩基而不产生显著的弯矩^[15]。而较大的内摩擦角, 也会使土体的抗剪强度增大, 桩土之间相对位移减小, 桩基受到的荷载减少, 导致弯矩减小。

对比离心机试验与数值模拟结果, 虽然模型尺寸和材料参数等方面存在差异, 数值模拟和离心机试验结果有一定偏差, 但弯矩随深度及堆载荷载的变化规律呈现出一致性, 即桩基上部和底部为负弯矩, 桩基中部为正弯矩, 弯矩值随着堆载的增大而增大。

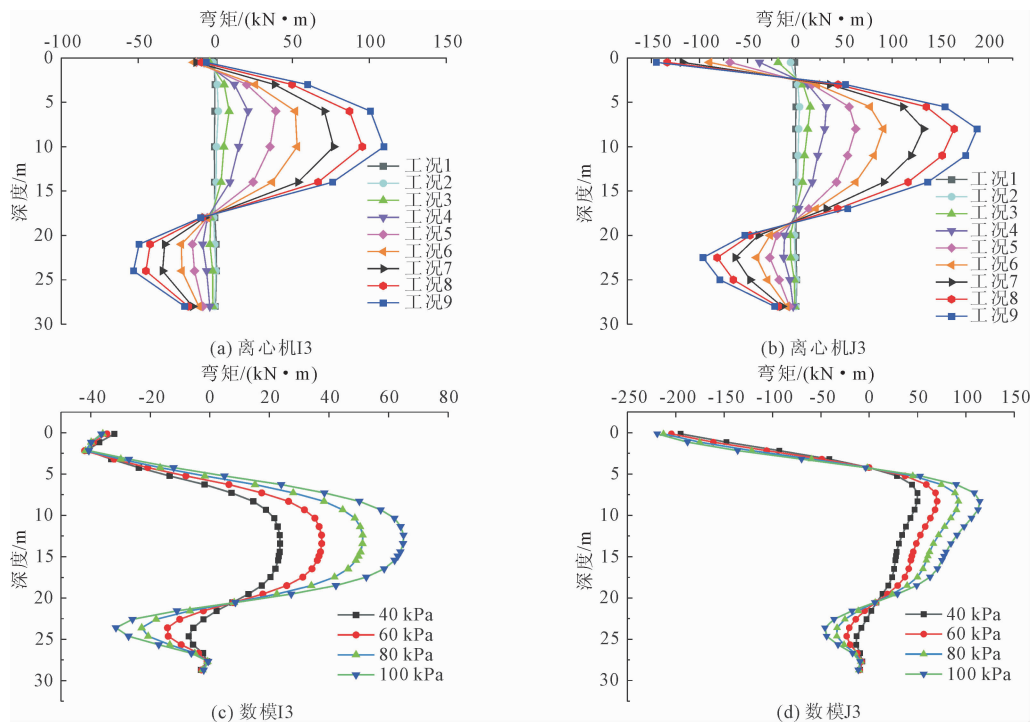


图 13 离心机与数值模拟弯矩结果比较

4 结 论

应用 ABAQUS 软件建立土体与高桩码头相互作用模型, 模拟岸坡堆载下高桩码头受力变形, 并与离心机试验结果进行比较, 探究高桩码头对岸坡堆载荷载和堆载距离的响应规律。得出结论如下:

(1) 岸坡堆载作用下, 土体变形以竖向沉降为主, 最大沉降量约为最大水平位移值的 7~10 倍, 发

生沉降的土体主要位于后方堆场; 堆载增大, 土体位移量大致呈线性增加, 堆载每增大 20 kPa, 沉降量约增大 74.7 mm, 水平正位移约增大 12.7 mm, 水平负位移约增大 10.1 mm; 堆载距离增大, 土体水平位移量减小。

(2) 岸坡堆载导致码头面产生不均匀沉降, 呈现出向岸侧倾斜的情况; 堆载荷载从 40 kPa 增至 100 kPa 时, 码头面倾斜角度增大 0.0503°, 堆载增

大,码头面倾斜程度加剧;堆载距离从 0 m 增至 20 m 时,码头面倾斜角度减少 0.0024° ,堆载距离增大,码头面倾斜程度减弱。

(3) 桩基整体呈现出向海域移动的趋势;桩基越靠近后方堆场,位移量越大,其位移最大值与最小值差值最大为 52.43 mm;堆载条件改变,桩基位移整体变化趋势不变,位移量发生变化;堆载的增大使桩基前后位移增大,加剧了桩基的扭曲程度;堆载距离的增大使桩基前后位移减少,桩基的扭曲程度减轻,位移变化量减少。

(4) 由于桩基位置及入土深度不同,桩基弯矩沿桩深的分布存在差异;堆载增大,桩基负弯矩和正弯矩均有所增大;堆载距离增加,桩基负弯矩及正弯矩均有所减小,弯矩的变化量减少;负弯矩最大值为 $218.00 \text{ kN} \cdot \text{m}$,正弯矩最大值为 $113.80 \text{ kN} \cdot \text{m}$;桩深 3 m~20 m 处,弯矩变化响应较为明显;桩顶部存在较大的弯矩,易导致桩基与桩帽连接处出现损伤。

(5) 离心机试验中,桩基顶部及底部为正弯矩,桩身中部为负弯矩。远离堆场的桩基弯矩小于靠近堆场的桩基弯矩,前者峰值小于后者峰值的 60%。随着堆载的增大,正负弯矩值均有所增加。与数值模拟结果进行比较,弯矩随堆载荷载变化规律基本一致。

参考文献:

- [1] 魏汝龙,王年香,杨守华. 桩基码头与岸坡的相互作用[J]. 岩土工程学报,1992,14(6):38-49.
- [2] 李越松,张 勇,王笑难. 天津港突堤转角处高桩码头后承台构件相对错位破损原因[J]. 中国港湾建设,2007(3):17-20.
- [3] 田双珠,张 勇,李越松. 天津港高桩码头岸坡变形规

律研究[J]. 水道港口,2006(3):180-184.

- [4] 张 强,刘现鹏,刘 娜. 岸坡土体变形对天津港高桩码头的危害[J]. 水道港口,2005(4):241-243.
- [5] 刘现鹏,韩 阳,刘红彪. 土体蠕变作用下高桩码头变形分析方法研究[J]. 水道港口,2016,37(4):432-438.
- [6] 卢西伟. 高桩码头结构变形有限元分析[J]. 中国水运(下半月),2016,16(11):233-235.
- [7] 丁 琼. 后方堆载作用下高桩码头变形研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- [8] 王 东. 邻近加载下桩网结构路基离心模型试验研究[J]. 路基工程,2021(4):83-88.
- [9] Yan Zhitao, Sun P X, Yang Zhongxuan, et al. Lateral bearing performance of a defective pile-supported wharf with batter piles[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,2020,146(5):04020035.
- [10] 黄瑞堂,李友元,王新浪,等. 邻近堆载作用下群桩变形特性的室内模型试验研究[J]. 铁道建筑,2021,61(1):35-38,60.
- [11] 李文静,别社安,武哲宇,等. 岸坡淤积对高桩码头结构受力的影响及清淤防治措施[J]. 水利水运工程学报,2024(5):31-41.
- [12] 王国斌,叶 铭,代先尧,等. 基于 ABAQUS 的斜坡桩土模型的地应力平衡方法研究[J]. 公路,2022,67(12):158-163.
- [13] 港口工程荷载规范:JTS 144-1—2010[S]. 北京:人民交通出版社,2024.
- [14] 汪 振,戴启权,张宇亭,等. 堆载引起岸坡土体与高桩码头相互作用机制试验研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(S1):254-258.
- [15] Poulos H, Chen L, Hull T. Model tests on single piles subjected to lateral soil movement[J]. Soils and Foundations, 1995,35(4):85-92.