

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.006

刘明维, 李辉, 阿比尔的, 等. 深填斜坡中基桩受力变形规律[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 40-47. (LIU Mingwei, LI Hui, ABI Erdi, et al. Deformation of pile foundation in deep filling slope based on ANSYS[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 40-47. (in Chinese))

## 深填斜坡中基桩受力变形规律

刘明维<sup>1,2</sup>, 李 辉<sup>1,2</sup>, 阿比尔的<sup>1,2</sup>, 高俊升<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 高桩码头在我国西南地区港口建设中应用愈来愈广泛, 码头基桩受桩后回填土作用容易发生水平变形, 尤其是在深厚回填土情况下基桩变形更加严重, 影响基桩的正常使用甚至安全稳定。结合斜坡基桩室内模型试验, 通过建立深填斜坡中桩-土精细化数值分析模型, 研究深填斜坡中回填土厚度及内摩擦角、桩截面尺寸等设计参数对基桩内力、变形的影响。研究表明: 随着回填深度的增加, 桩身位移分布由直线型逐渐变为 S 型, 桩身最大位移由桩顶逐渐下移至回填区, 回填土厚度越大, 桩身受力越大。当回填土材料的抗剪强度逐步提高时, 能有效控制桩身变形, 但当回填土抗剪强度提高到一定值后, 桩顶位移基本保持不变, 提高回填土抗剪强度对控制桩身变形的作用有限。支护桩径较小时, 桩身呈 S 型变形, 增大桩径, 桩身弯曲变形减小, 但过分使用大直径基桩反而使桩顶产生较大位移。同时提出了深填斜坡 h 型双桩优化支护方案, 为内河港口码头桩基设计建造提供技术支撑。

**关 键 词:** 深填斜坡; 高桩; 桩顶位移; 变形控制

**中图分类号:** U656.11

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2018)03-0040-08

随着高桩码头<sup>[1-2]</sup>在我国西南地区港口建设中应用愈来愈广泛, 码头基桩的变形和稳定性逐渐成为工程界重点关注问题。在桩后回填土作用下, 桩顶会发生较大的水平位移, 尤其是在深填斜坡情况下桩顶变形更为明显, 导致码头变形过大甚至失稳破坏。当前国内外学者对水平荷载作用下基桩受力特性做了诸多研究。刘志刚<sup>[3]</sup>通过有限元方法计算了在水平荷载作用下复合地基中桩体应变和位移的分布规律以及断桩位置; Shahu<sup>[4]</sup>采用室内模型试验与数值模拟相结合的方法研究碎石群桩对地基的加固效果; 劳伟康<sup>[5]</sup>在大直径柔性靠船桩现场试验的基础上对桩的水平承载力特性进行了计算分析; 李侠<sup>[6]</sup>通过建立物理力学模型, 考虑多种短期荷载的不利组合, 对软土地基中桩的水平承载力进行验算; 管人地等<sup>[7]</sup>利用 ANSYS 数值模拟高桩码头在水平力作用下基桩应力、位移变化, 进而分析码头结构稳定性, 表明水平力在高桩码头计算中不能忽视; 王梅等<sup>[8]</sup>试验研究了水平荷载作用下单桩非线性 m 法; 谢剑铭等<sup>[9]</sup>通过斜坡基桩水平承载特性模型试验定性研究临坡距对桩身应变变化规律影响; 蒋鑫等<sup>[10]</sup>对抗滑桩加固斜坡软弱地基路堤的数值分析, 表明斜坡中填土厚度是影响基桩稳定性的主要因素之一。

目前对于基桩的研究更多关注基桩稳定性问题, 而对基桩变形控制上关注不够。码头深填斜坡基桩由于桩后回填土存在坡度, 桩后土体水平力作用更明显, 极易导致桩身变形过大, 上部结构或装卸机械无法正常使用, 或者导致基桩失稳破坏。因此研究深填斜坡中基桩变形规律并进行稳定性控制对内河码头桩基设

**收稿日期:** 2017-09-11

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51479014); 重庆市科委项目(cstc2015jcyjA30015); 四川省交通运输科技项目(2015B1-3)

**作者简介:** 刘明维(1972—), 男, 贵州遵义人, 教授, 博士, 主要从事港口工程设计计算理论方面的教学研究工作。

E-mail: mingwei\_liu@126.com

计建造及安全营运十分必要。

本文结合室内模型试验,建立深填斜坡中桩-土数值分析模型,研究不同回填土材料厚度及内摩擦角、桩径等设计参数对基桩内力和变形的影响,并提出了减小位移和提高性能的具体措施,为内河港口码头基桩的设计建造提供参考。

## 1 模型试验建立

### 1.1 土工模型试验

为验证数值模型的可靠性,本文首先进行室内物理模型试验研究,对比验证所建数值模型的可靠性。

物理试验模型槽尺寸为 230 cm×135 cm×140 cm,岸坡坡度为 1:3。试验选取砂岩和泥岩质量比为4:1 的砂泥岩混合料,斜坡地基采用分层回填并压实,材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数  
Tab. 1 Material parameters

| 岩土类型  | 重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 弹性模量 $E/\text{MPa}$ | 泊松比  | 黏聚力 $c/\text{kPa}$ | 内摩擦角 $\varphi/^\circ$ |
|-------|---------------------------------------------|---------------------|------|--------------------|-----------------------|
| 中风化泥岩 | 25                                          | 500                 | 0.30 | 1 000              | 37                    |
| 回填土   | 19                                          | 25                  | 0.30 | 35                 | 35                    |

试验模型桩采用 C30 混凝土,桩长 100 cm,桩径 10 cm,悬臂长度为 20 cm,沿斜坡共分 3 排,每排布置 2 根,共计 6 根。桩的竖向力和横向力加载均通过液压千斤顶、荷载传感器、反力梁来控制。采用逐级加载,每级荷载 0.1 kN(约为单桩承载能力的 10%)。试验装置如图 1 所示,基桩加载示意图如图 2。

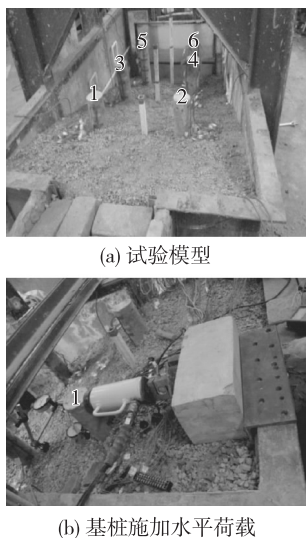


图 1 试验模型  
Fig. 1 Experimental model

试验采用 DH3810 数据采集器采集桩顶水平位移,1 号桩桩顶位移随荷载变化曲线如图 3 所示。

通过桩顶荷载-位移曲线可以看出:随着桩顶水平推力的增加,桩顶位移呈现近似线性增大趋势,但加载后期桩顶变形速度有所加快,但变形整体仍表现为近似线性。

### 1.2 ANSYS 有限元模型建立与验证

运用 ANSYS 软件,按 1:1 比尺建立试验模型的有限元模型如图 4 所示。为了提高计算精度,模型采用六

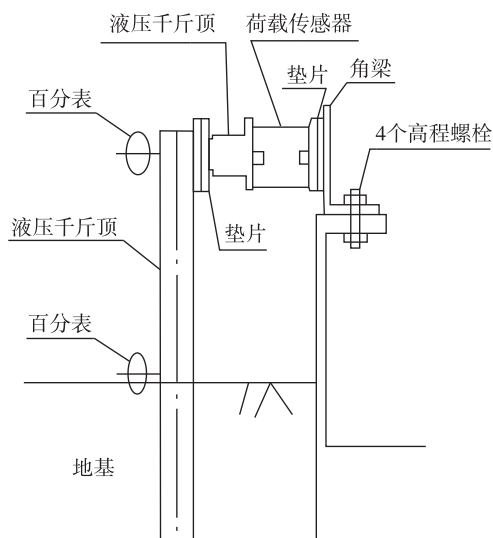


图 2 基桩施加水平荷载  
Fig. 2 Loads applied to pile foundation

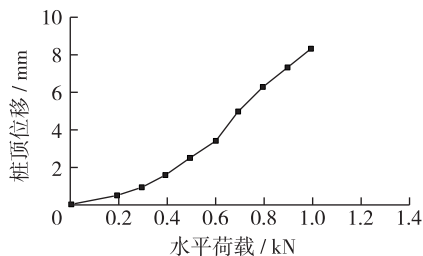


图 3 物理模型试验桩顶荷载-位移曲线  
Fig. 3 Load-displacement curve of pile top of physical model

面体网格划分,用 Solid95 单元模拟桩土结构,桩土之间采用 contact173,contact174 面-面接触单元模拟。

通过逐级加载获得有限元模型荷载和桩顶位移曲线,如图 5 所示。通过物理模型试验与 ANSYS 模拟对比发现,物理模型与有限元模拟结果基本一致,桩顶位移均随荷载线性增加,二者的数值差异在 10% 之内。二者存在差异部分可能是试验卸荷后,桩前土被压密产生塑性变形而使基桩不能完全恢复原状,造成模型数据与理论不一致。但从整体来看,依据模型实验建立的 ANSYS 有限元分析模型能满足分析要求。

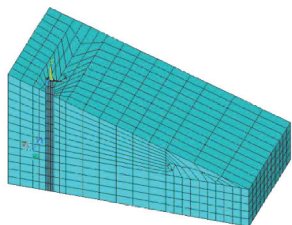


图 4 ANSYS 有限元模型

Fig. 4 Finite element model of ANSYS

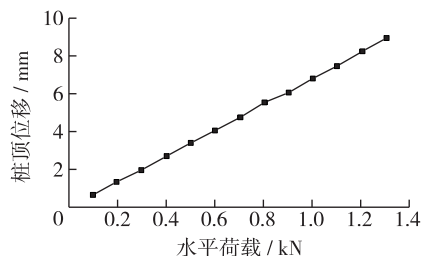


图 5 有限元模型计算桩顶荷载-位移曲线

Fig. 5 Pile top load-displacement curve of finite element model

## 2 深填斜坡中基桩受力变形影响因素分析

为分析深填斜坡中基桩受力变形特征的影响因素,以长江三峡库区重庆万州某架空码头工程为例,建立的计算模型中,基岩为中风化砂岩,原斜土坡坡度 1:6,码头岸坡采用砂泥岩混合料回填,回填土坡度 1:2,材料参数如表 1 所示。桩基码头基桩嵌岩深度 8 m,回填土厚度为  $a$ ,单桩的水平支护范围为 30 m,结构示意图如图 6 所示。

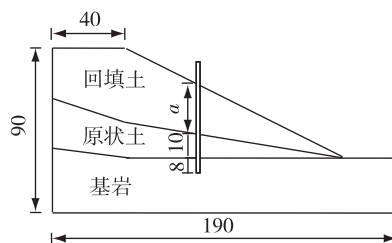


图 6 回填斜坡中桩土结构示意图(单位: m)

Fig. 6 Schematic diagram of pile soil in backfill slope (unit: m)

深填斜坡基桩设计中,基桩的稳定性主要受基桩弯矩控制,而基桩变形主要受桩顶水平位移控制,因此主要分析桩体弯矩和桩顶水平位移。

### 2.1 填土厚度的影响

基桩的半径 1.0 m,嵌岩深度 8 m,设基桩支撑处回填土厚度为  $a$  (如图 6 所示),保持其他参数不变,研究回填土厚度对基桩受力变形的影响。填土厚度  $a$  分别取 27, 22, 17 和 12 m,分别获得不同深度下桩身弯矩和水平位移变化曲线。回填厚度 27 m 时位移云图见图 7,桩身的弯矩、位移随填土厚度变化曲线如图 8 和图 9。

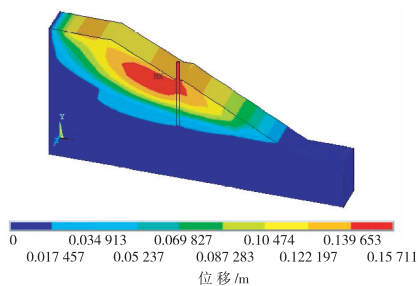


图 7 填土厚度 27 m 时位移云图

Fig. 7 The displacement cloud map when the soil is 27 m thick

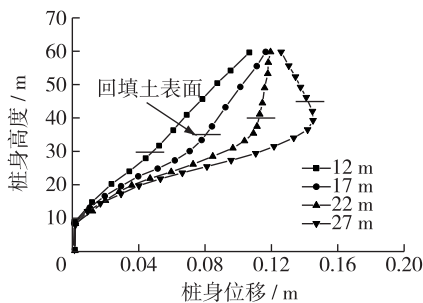


图 8 不同填土厚度的桩身高度-位移曲线

Fig. 8 Height of pile height-displacement curve of different filling thicknesses

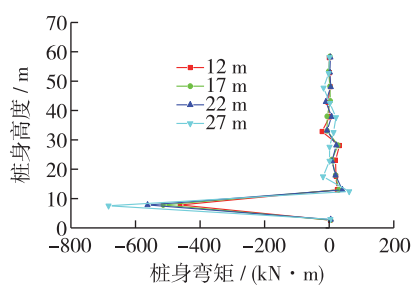


图 9 不同填土厚度的桩身弯矩分布

Fig. 9 The moment distribution of piles with different filling thicknesses

由图7可知,由于深填斜坡受基桩支挡作用,坡体最大位移位于坡面以下,原状土与回填土接触面以上,而非普通边坡的最大位移一般在坡面和坡脚。

由图8可知,当回填土厚度为12 m时,沿桩身的位移基本呈线弹性增长,最大位移位于桩顶;当回填土厚度为17 m时,在回填土上下交界面附近桩身开始弯曲,产生塑性变形,悬臂段不受外荷载作用保持线性延伸,因而最大位移仍在桩顶,约为0.1 m。随着回填厚度的增大,桩身塑性弯曲更加明显;当回填土厚度达到27 m时,回填土上下交界面附近桩身明显弯曲,呈S型,此时回填土上表面附近桩身位移最大,达到0.15 m,而桩顶位移为0.12 m,桩身位移加速增长。可见填土厚度的增大会导致回填土段桩身水平位移非线性增大,桩身由线弹性变形转变为S型弯曲变形,桩身最大位移由桩顶逐渐转变为至回填土区,但由于悬臂段线性延伸,桩顶水平位移差异不大。

由图9可见,基桩在岩土分界面处会发生应力突变现象,最大弯矩均出现在基桩与岩土接触面位置,回填土厚度越大,接触面弯矩越大,而桩身其余段的弯矩基本相同。由图10可见,当填土厚度超过22 m时,填土厚度增大,最大弯矩快速增加,桩身弯曲变形快速增大。

## 2.2 回填土内摩擦角的影响

在回填厚度 $a$ 为27 m的情况下,取桩半径0.8 m,保持其他参数不变,研究回填土内摩擦角对受力变形的影响。分别取内摩擦角 $\varphi$ 为 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 共4种土体,分析回填斜坡桩身弯矩和水平位移变化曲线。回填土内摩擦角 $\varphi$ 为 $30^\circ$ 时,模型水平方向位移云图如图11所示,不同回填土内摩擦角下的桩身水平位移和弯矩如图12和图13。

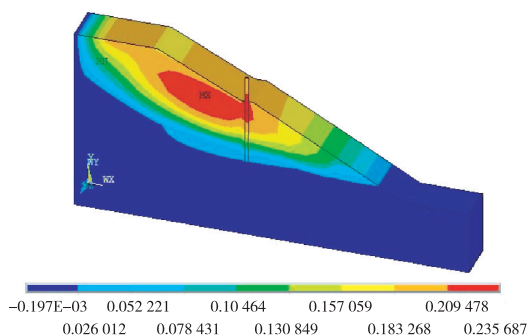


图11 回填土内摩擦角 $30^\circ$ 时位移云图

Fig. 11 Displacement cloud image at 30 degrees of internal friction angle of backfill soil

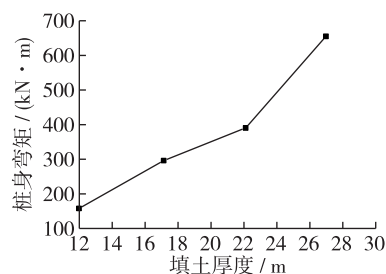


图10 桩身最大弯矩值随回填土厚度的变化

Fig. 10 Changes in the maximum bending moment of the pile with the thickness of backfill soil

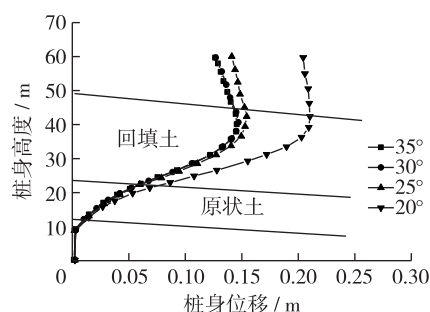


图12 不同填土内摩擦角的桩顶位移-荷载曲线

Fig. 12 Pile top displacement-load curve of different filling internal friction angles

由图11可知,土体最大位移仍然位于坡面以下,回填土中部位置,与上文一致。

由图12可知,当回填土内摩擦角为 $25^\circ$ 时,回填区范围内桩身因受桩后填土的水平推力作用,位移随着桩身高度的增加而增大,回填区上面因桩受到桩前土较大的抗力作用略有回弯,而桩身悬臂段则线性延伸,桩最大位移位于回填区上表面附近。当回填土内摩擦角大于 $25^\circ$ 时,桩身变形差异不大,当回填土内摩擦角为 $20^\circ$ 时,桩身位移明显增大。可见,回填土强度过低时,桩体变形较大,易造成大变形破坏,但当回填土强度达到一定值后,桩顶位移不再随着回填土内摩擦角的增大而减小,可见回填土的内摩擦角对桩身变形的控制范围有限。

由图13可知,基桩在岩土分界面处会发生应力突变现象,最大弯矩均出现在基桩与岩土接触面位置,但



回填不同摩擦强度的土体,其接触面的最大弯矩差异不大。可见,桩径设计中回填土内摩擦角对基桩弯矩不敏感,而对桩身的变形较为敏感。

### 2.3 桩截面尺寸的影响

在回填厚度  $a$  为 27 m、回填土内摩擦角  $\varphi$  为  $25^\circ$  工况下,保持其他参数不变,仅调整桩身截面尺寸,建立桩身半径为 0.8, 1.0, 1.4, 2.0 m 共 4 种计算模型,分别获得桩身弯矩和水平位移变化曲线如图 14 和 15。

图 14 为不同桩径下桩身水平位移曲线。由图可知,回填区范围内桩身因受桩后填土的水平推力作用,桩身水平位移沿桩的高度逐渐增大,而回填土坡表面因桩身变形大,受到桩前土较大的抗力作用而反向弯曲,呈 S 型变形。其中桩径较小时( $r=0.8$  m),回填区的水平位移和回填坡面的反向弯曲程度均较大,桩身最大位移位于回填区上侧;桩径增大,回填区的水平位移和回填坡面反向弯曲程度逐渐减小,导致桩顶位移增大,桩身最大位移逐渐发展到桩顶;当桩径增大到 2.0 m 时,回填区下表面附近桩身弯曲变形产生较大的水平位移,但由于桩的刚度足够大,回填坡面土体的抗力不足以使桩身反向弯曲,此时桩顶水平位移最大。可见,深填斜坡中基桩受到回填土较大的水平推力作用,导致桩身反向弯曲呈 S 型变形。但随着桩径增大,基桩刚度增大,回填坡面桩身反向弯曲程度减小,桩顶位移最大。

由图 15 可知,基桩最大弯矩同样出现在岩土分界面处,且桩径越大,桩身最大弯矩越大,但桩身其余位置的弯矩差异不大。由图可知,桩径为 1.0 m 时,最大弯矩 2 500  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ,桩径为 2.0 m 时,最大弯矩为 20 000  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ,桩径增大 2 倍,弯矩增大达 8 倍。工程实践中,在深回填土情况下,为了控制基桩顶水平位移,一味增大桩截面直径并不一定能满足变形要求,反而增加工程成本。因此应该选取满足强度要求的最小桩径即可,这可通过试验或者有限元数值模拟确定最佳桩径。

## 3 深填斜坡优化支护

深填斜坡基桩应满足强度要求和变形控制要求。其中强度条件可以通过调整桩材料强度和桩径满足设计要求,假设实际工程桩身轴力为 10 MPa,弯矩 2 500  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ,若桩径为 2 m,桩身最大应力 13.2 MPa,而 C30 混凝土抗压强度设计值为 14.3 MPa,能够满足承载力要求。然而从前文的分析可以看出,深填斜坡基桩的水平位移较大(约 0.15~0.25 m),且通过提高回填土的强度或者增加桩截面尺寸对桩顶水平位移的控制有限,因此考虑采用 h 型复合桩进行深厚填土斜坡的变形控制。

h 型桩由主桩(全长 60 m,其中悬臂段长 12 m)、副桩(全长 32 m)及水平支撑横梁(最大水平位移处)组成。取桩径为 0.8 m,主副桩距 10 m,嵌岩深度 8 m,回填厚度  $a$  为 27 m,回填岸坡的坡度为  $30^\circ$ ,回填土重度为  $19 \text{ kN/m}^3$ ,内摩擦角  $25^\circ$ ,模型其余参数与上文一致。

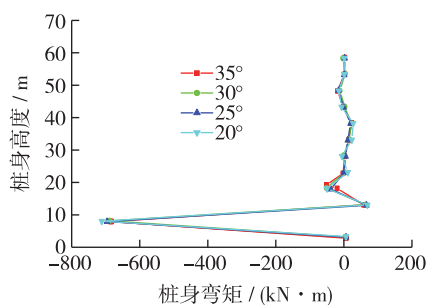


图 13 不同填土内摩擦角的桩身弯矩分布

Fig. 13 The moment distribution of the pile with different filling interior friction angles

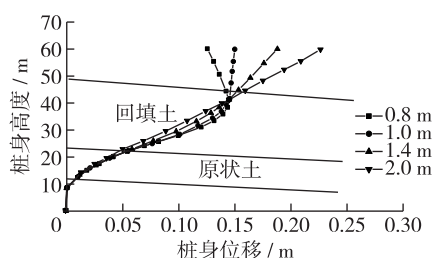


图 14 桩身高度-位移曲线

Fig. 14 Height-displacement curves of pile height

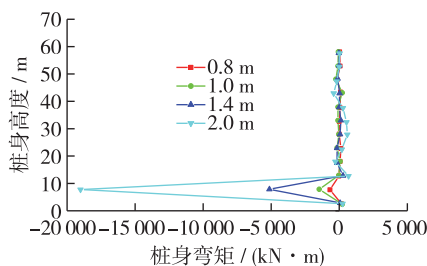


图 15 桩身高度-弯矩曲线

Fig. 15 Height-bending moment curves of pile height

h型桩支护下深填斜坡的水平位移云图如图16所示,主桩沿深度方向水平位移和桩身弯矩变化曲线见图17和图18。

由图16可以看出,h型桩支护下坡体最大位移位于桩后原状土与回填土接触面上,土体的横向位移最大值为17.4 cm,而单桩支护时坡体的最大位移位于回填土中部,最大位移23.6 cm,可见,坡体的最大位移位置下移,最大位移值减小。主要是回填土体受到h型桩水平支撑作用,导致桩后回填土的水平位移减小,可见h型桩能够有效控制回填土坡的水平位移。

由图17可见,主桩同样在原状土与回填土接触面产生最大位移15.6 cm,桩顶水平位移3.6 mm,而副桩在桩顶处产生最大位移13.6 cm。可见,h型支护方式可以明显减小主桩桩顶的水平位移,但是主桩横梁以下部位水平位移还是较大。

由图18桩身弯矩图可知,相比于单桩的岩土分界面弯矩突变(最大弯矩700 kN·m),h型桩的桩身弯矩分布比较复杂,分别在基岩与原状土分界面位置、原状土与回填土接触面位置以及主桩与横梁接触位置出现弯矩突变,最大弯矩位于基桩与横梁接触面,最大弯矩值806 kN·m;副桩桩身弯矩分布相对简单,只有两个反弯点,表现为上半部分桩前受拉,下半部分桩后受拉,底部出现反弯点,最大弯矩84.8 kN·m。与单桩支挡相比,h型桩多段受力,荷载更加均匀化,最大弯矩有一定增加,但弯矩增加量不大,约15%。

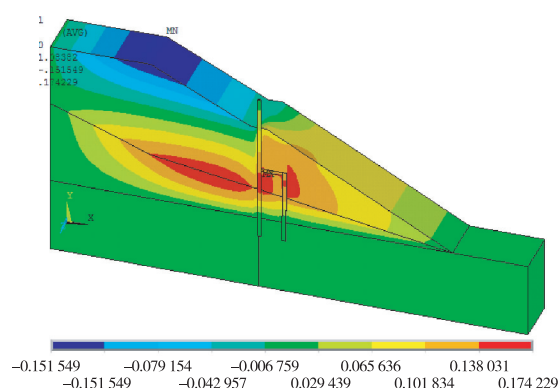


图16 采用h型支撑时模型位移云图

Fig. 16 Displacement of the model with h-type support

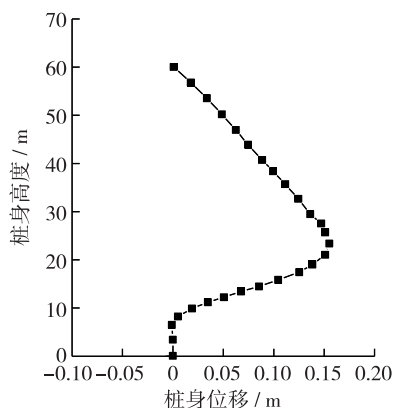


图17 采用h型支撑时桩身高度-位移曲线

Fig. 17 Height-displacement curve of pile height with h-type support

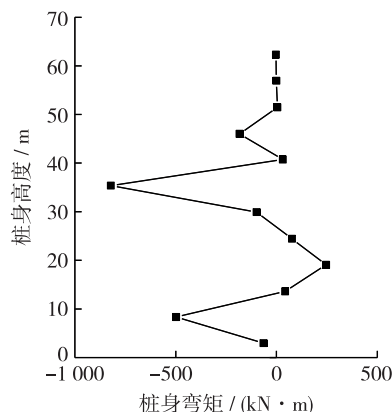


图18 桩身高度-弯矩曲线

Fig. 18 Height-bending moment curve of pile height

可见h型桩能够有效控制回填土和桩顶位移,结构受力更均匀,是深填斜坡支挡中的一种优选方案,但主副桩和横梁连接处结构复杂,局部受拉,基桩与横梁接触位置需要进行抗拉强度验算,必要时增加配筋。

## 4 结 语

(1)进行了斜坡基桩室内模型试验研究,获得桩顶荷载-位移曲线。建立1:1的数值模型,数值模拟结果与室内试验结果接近,表明所建立的数值分析模型合理可靠。

(2)深填斜坡中回填土体内摩擦角、桩身横截面尺寸、填土厚度等对基桩的稳定和变形控制影响显著。

(3)回填深度较浅时,沿桩身的位移基本呈线弹性增长,最大位移位于桩顶;随着回填深度的增加,桩身位移分布由直线型逐渐变为S型,桩身最大位移由桩顶逐渐下移至回填区,回填土厚度越大,桩身受力越大。

(4) 当回填土材料的抗剪强度由小逐步提高时,能有效控制桩身变形,但当回填土抗剪强度提高到一定值后,桩顶位移基本保持不变,提高回填土材料抗剪强度对控制桩身变形的作用有限。

(5) 支护桩径较小时,桩身呈 S 型变形,桩身最大位移位于回填区;增大桩径时,桩身弯曲变形减小。但过分使用大直径基桩反而使桩顶产生较大位移。

(6) 针对深填斜坡,提出 h 型复合桩支护方案,h 型桩能够有效控制桩顶和桩身位移,且结构受力均匀,是深填斜坡支挡优选方案,但主副桩和横梁连接处结构复杂。

## 参 考 文 献:

- [1] 王多垠,宋成涛,温焰清,等. 三峡库区变动回水区架空直立式码头结构形式研究[J]. 水运工程, 2011(3): 54-58. (WANG Duoyin, SONG Chengtao, WEN Yanqing, et al. On overhead wharf structural pattern in fluctuating backwater area of Three Gorges Reservoir area[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(3): 54-58. (in Chinese))
- [2] 刘明维,李鹏飞,陈刚,等. 内河框架码头构件重要性评价[J]. 水利水电工程学报, 2015(1): 1-6. (LIU Mingwei, LI Pengfei, CHEN Gang, et al. Importance evaluation and weak link analysis for members of overhead vertical wharfs located at inland rivers[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1): 1-6. (in Chinese))
- [3] 刘志刚. 水平荷载作用下刚性桩复合地基的变形性状[D]. 四川: 四川大学, 2005. (LIU Zhigang. The deformation properties of the rigid pile composite foundation acted by the horizontal load[D]. Sichuan: Sichuan University, 2005. (in Chinese))
- [4] SHAHU J T, REDDY Y R. Clayey soil reinforced with stone column group: model tests and analyses[J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011(137): 1265-1274.
- [5] 劳伟康. 大直径柔性嵌岩桩水平承载力试验与计算方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (LAO Weikang. Research on horizontal bearing capacity test and calculation method of large diameter flexible rock embedded pile [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [6] 李侠. 软土地基中桩基水平承载力验算和加固措施研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (LI Xia. Study on the calculation and reinforcement of the horizontal bearing capacity of pile foundation in soft soil foundation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [7] 管人地,夏高响,刘汉霞. 水流力作用下高桩码头基桩有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(21): 5206-5212. (GUAN Rendi, XIA Gaoxiang, LIU Hanxia. Finite element analysis of the high-piled wharf foundation pile under current forces [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(21): 5206-5212. (in Chinese))
- [8] 王梅,楼志刚,李建乡,等. 水平荷载作用下单桩非线性 m 法试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 23-26, 30. (WANG Mei, LOU Zhigang, LI Jianxiang, et al. Study on the nonlinear m method of horizontal loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 23-26, 30. (in Chinese))
- [9] 谢剑明,徐锡昌,陈善雄,等. 斜坡桩基水平承载变形特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(17): 5031-5036. (XIE Jianming, XU Xichang, CHEN Shanxiang, et al. Preliminary experimental study on development of horizontal bearing capacity of pile adjacent to slope[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(17): 5031-5036. (in Chinese))
- [10] 蒋鑫,邱延峻,魏永幸. 基于强度折减法的斜坡软弱地基填方工程特性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 622-627. (JIANG Xin, QIU Yanjun, WEI Yongxing. Engineering behavior of subgrade embankments on sloped weak ground based on strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 622-627. (in Chinese))

## Deformation of pile foundation in deep filling slope based on ANSYS

LIU Mingwei<sup>1, 2</sup>, LI Hui<sup>1, 2</sup>, ABI Erdi<sup>1, 2</sup>, GAO Junsheng<sup>1, 2</sup>

(1. *National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 2. *Key Laboratory of the Ministry of Education on Hydraulic & Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*)

**Abstract:** High-piled wharf is widely used in port construction in the southwest region of China. The pile foundation pile is liable to be deformed horizontally after pile back filling, especially in the case of deep backfill pile deformation, which is more serious, thus affecting the normal use of foundation piles and even security and stability. Based on the model test of the slope foundation pile, a pile-soil refinement numerical analysis model for the deep filling slope pile is established to study the effects of the filling thickness, internal friction angle, pile cross-section size and other design parameters on the internal force and deformation in the deep filling slope. Research shows: with the increase of the backfill depth, the displacement distribution of the pile gradually changes from straight to S, and the maximum displacement of the pile gradually moves down from the pile top to the backfill, and the pile body force is increasing with the thickness of backfill. When the shear strength of the backfill material is increased little by little, the pile body deformation can be effectively controlled. However, when the shear strength of the backfill is increased to a certain extent, the displacement of the pile remains basically unchanged. Increasing the shear strength of backfill material has a limited effect on controlling the deformation of pile. When the support pile diameter is small, the pile body has S-shaped deformation, thus increasing the pile diameter and decreasing the pile bending deformation, but excessive use of large-diameter pile may cause the pile to produce a large displacement. The paper puts forward a h-type double-pile optimal support scheme, which provides technical support for the design and construction of the pile foundation of the inland port.

**Key words:** deep filling slope; high-piled; displacement of pile-top; deformation control