

# 施工期码头桩基承载特性 影响因素有限元分析\*

张小龙<sup>1,2</sup>, 刘明维<sup>1,2</sup>, 陶晶晶<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:** 内河库区码头后方陆域陡峭且地形条件复杂, 码头的建造常常面临大水位差、高填方回填岸坡的施工特点, 因此施工期的桩基不仅承受上部结构传来的施工荷载, 还要承受岸坡回填施工对桩基造成的影响。采用有限元软件 PLAXIS, 在先建桩和先回填两种方式下, 通过桩基承载力的分析, 得出了增加回填土厚度、增加岸坡坡度、增加岸坡回填材料密度、减小回填材料内摩擦角、减小嵌入深度均不利于回填岸坡桩基承载力的改善, 并揭示了其敏感性。为内河库区港口工程桩基设计提供理论依据。

**关键词:** 岸坡回填; 施工顺序; 桩基; 承载特性; 有限元

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0156-06

## Finite element analysis of influential factors of pile foundation's bearing characteristics

ZHANG Xiao-long<sup>1,2</sup>, LIU Ming-wei<sup>1,2</sup>, TAO Jing-jing<sup>1,2</sup>

- (1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The land behind the inland reservoir pier is steep and with complex terrain conditions and the construction of pier often faces a large water level difference and large backfilling. So, the pile foundation bears both the construction load from the upper structure and the effect from the bank slope's backfilling construction during the construction period. Using the finite element software plaxis, we analyze the pile foundation's bearing capacity under two modes including building pile foundation first and backfilling first, and get the conclusion that all measures including increasing the thickness of backfill, increasing the slope gradient, increasing the severe of slope backfill material, reducing the friction angle within the backfill material, reducing the depth of rock-socketed, are not conducive to the improvement of the backfill slope pile's bearing capacity. It provides a theoretical basis for the pile foundation design of wharf engineering in inland reservoir.

**Keywords:** bank slope backfill; construction consequence; pile foundation; bearing characteristic; finite element

在高桩码头中, 桩基的作用不仅是传递上部结构所承受的荷载, 而且还起着增加岸坡稳定的

抗滑作用和阻止或减小岸坡侧向变形的遮帘作用。根据桩基与回填土的相互作用, 可以将桩基分为

收稿日期: 2014-10-22

\*基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAB05B04); 交通运输部应用基础研究项目(2014329814070); 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2014B08)

作者简介: 张小龙(1981—), 男, 博士研究生, 从事水利工程方面的研究。

两大类。一种是直接承担外荷载并主动向土体传递荷载,为主动桩;另外一种是不直接承担外荷载,只是由于桩周土体在自重或外荷载下发生变形或运动而被动的受到土体传来的影响,称为被动桩<sup>[1]</sup>。在施工的过程中,先建桩后回填岸坡这种工况中桩基属于被动桩,在先回填岸坡后建桩的工况中的桩基属于主动桩。桩基有利于提高岸坡抗滑稳定性,但是经验表明,在桩基的施工过程中,岸坡不能过分依靠桩基的抗滑稳定作用,否则会引起桩基上部码头的位移甚至整体结构的破坏<sup>[2-4]</sup>。因此,如何减小岸坡回填土对桩基的不利作用,在高桩码头的施工设计中是一个极其重要的环节。要解决这个难题,首先要评估岸坡回填土对桩基的作用及其影响因素。遗憾的是,迄今尚缺少针对施工中回填岸坡对桩基承载特性的研究。

本文采用有限元软件 PLAXIS 建立数学模型,分析在不同施工顺序下(先建桩后回填岸坡,简称工况 1;先回填岸坡后建桩,简称工况 2),改变回填岸坡特性(如改变岸坡回填厚度、岸坡回填坡度、回填材料内摩擦角)以及桩基嵌入深度的桩基承载特性。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 本构模型

PLAXIS 是国际流行的岩土有限元分析软件,PLAXIS 中包含 5 种土体本构模型,分别是:线弹性模型(Linear elastic)、摩尔-库伦模型(Mohr-Coulomb)、软土模型(Soft-Soil)、硬土模型(Hardening-Soil)、软土蠕变模型(Soft-Soil Creep)。

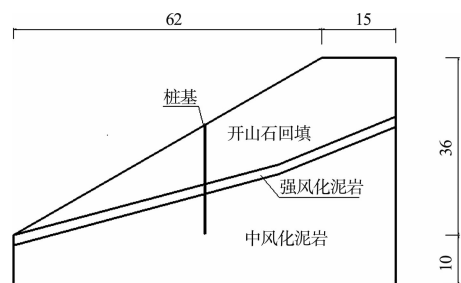
Mohr-Coulomb 在岩土问题分析中应用最为广泛,是一种理想弹塑性模型,是对岩土行为的一种“一阶”近似描述,这种模型被推荐用于问题的初步分析,对于每个土层,可以估计出一个平均刚度常数,由于这个刚度系数是常数,计算往往会相对较快。该模型共有 5 个基本参数,包括表示土体弹性的泊松比  $\nu$  和杨氏模量  $E$ 、表示土体塑性的内摩擦角  $\varphi$  和粘聚力  $c$ 、剪胀角  $\psi$ ,除了前

面的 5 个参数以外,初始的土体条件在许多土体变形问题中也起着关键的作用,通过选择适当的  $K_0$  值,可以生成初始水平土应力,因此  $K_0$  值的选择也很重要。

Hardening-Soil 模型是一种改进的模拟岩土模型,对于 Mohr-Coulomb 模型来说,极限应力状态是由内摩擦角  $\varphi$ 、粘聚力  $c$  和剪胀角  $\psi$  来描述的。但是,采用 3 个不同的输入刚度可以将土体刚度描述得更为准确:三轴加载刚度  $E_{50}$ 、三轴卸载刚度  $E_{ur}$ 、固结仪加载刚度  $E_{oed}$ 。对比 Mohr-Coulomb 模型,模型可以用来解决模量依赖于应力的情况,这意味着所有的刚度随着压力的增加而增加,施加给“被动桩”的荷载也会减小,采用该模型的计算结果比 Mohr-Coulomb 模型更加安全。但 Hardening-Soil 模型是一个硬化模型,不能说明由于岩土剪胀和崩解效应带来的软化性质,因此,不能用来准确地模拟滞后或者反复循环加载情况。描述 Hardening-Soil 模型土体刚度的 3 个参数的取值也具有很大的不确定性,从而影响模型的结果,本文拟针对施工期码头桩基承载特性展开初步研究,故采用 Mohr-Coulomb 模型对地基土体进行模拟。

### 1.2 计算模型

以内河大水位差框架码头桩基<sup>[5]</sup>为基本模型,回填岸坡中的桩采用圆形钢筋混凝土桩,混凝土桩直径为 2 m、桩长为 22 m,嵌入深度为 8 m;模型建模分析域水平宽 77 m、高 46 m,岸坡回填区高差为 36 m、回填坡度为 30°。模型边界按照 PLAXIS 自带的标准固定边界,即模型的两侧受水平向约束、底部受水平及竖直方向的约束。图 1~3 为有限元计算模型及网格划分模型。



a) 一次性回填岸坡

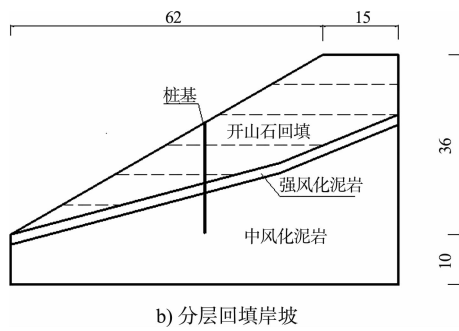
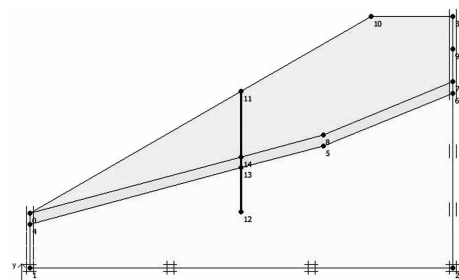
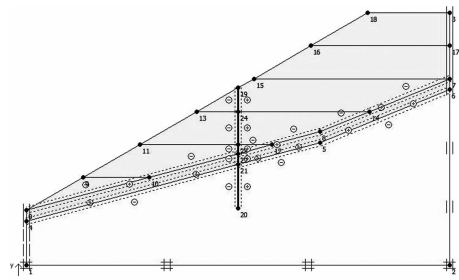


图 1 计算模型断面 (单位: m)

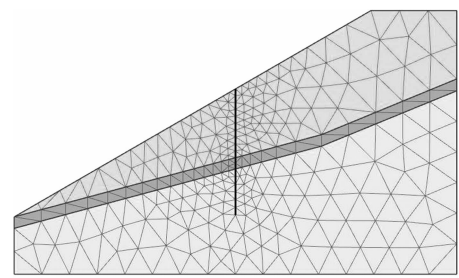


a) 一次性回填岸坡

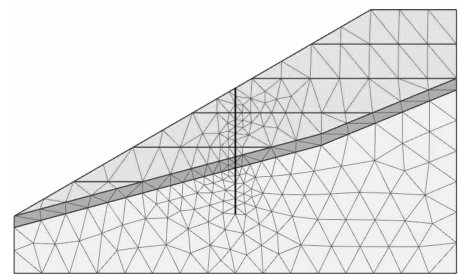


b) 分层回填岸坡

图 2 有限元模型



a) 一次性回填岸坡



b) 分层回填岸坡

图 3 有限元模型网格划分结果

### 1.3 模型计算参数

不同材料之间设置界面,按照 PLAXIS 建议选取界面折减系数  $R_{inter} = 0.8$ 。各土体计算参数见表 1。

表 1 回填岸坡各土层参数

岩土类型	密度/ ( $t \cdot m^{-3}$ )	弹性模量 $E/MPa$	泊松比 $\nu$	粘聚力 $C/kPa$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
强风化泥岩	2.4	100	0.28	500	35
中风化泥岩	2.5	500	0.30	1 000	37
开山石(回填)	1.9	25	0.30	0	35

结合重庆内河库区高桩码头的特点,在两种工况下,考虑岸坡回填厚度、岸坡回填坡度、回填材料内摩擦角以及桩基嵌入深度等 4 种因素的变化对桩基的承载特性的影响,各因素取值见表 2。

表 2 影响因素参数

回填厚度/m	岸坡坡度/ $(^\circ)$	回填材料密度/ $(t \cdot m^{-3})$	回填内摩擦角/ $(^\circ)$	桩基嵌入深度/m
4	20	1.7	31	5
8	25	1.8	33	6
<u>12</u>	<u>30</u>	<u>1.9</u>	<u>35</u>	7
16	35	2.0	37	<u>8</u>
20	40	2.1	39	9

注:标有下划线数字为基本模型参数。

## 2 有限元的分析结果

### 2.1 回填岸坡厚度对桩基承载特性的影响

为了分析回填岸坡厚度对桩基承载特性的影响,分别对 5 种不同回填厚度岸坡的桩基的承载特性对比分析,探讨最大弯矩和最大位移的变化规律,分析结果见表 3 和图 4。

表 3 不同回填厚度下桩基最大位移及最大弯矩

岸坡回填厚度/m	工况 1		工况 2	
	桩基最大位移/mm	桩基最大弯矩/ $(kN \cdot m)$	桩基最大位移/mm	桩基最大弯矩/ $(kN \cdot m)$
4	7.043	522	0.221	10.84
8	29.712	1 896	0.396	10.37
12	51.001	2 422	0.466	10.53
16	94.121	3 108	0.575	16.00
20	117.922	4 154	0.623	22.84

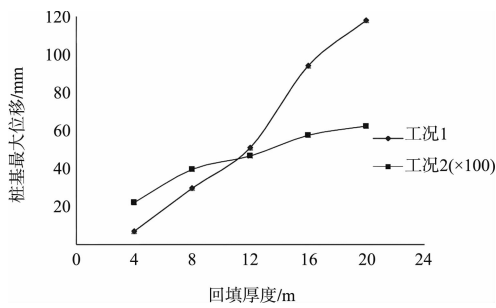


图 4 桩基最大位移随岸坡回填厚度的变化趋势

从图 4 和表 3 可看出, 在两种工况下, 随着岸坡回填厚度的增大, 桩基发生的最大位移及最大弯矩逐渐增大, 即岸坡回填厚度的增大引起桩基位移及内力的变化, 这是由于回填材料因为自重及固结沉降从而产生滑移并作用于桩基上, 使得桩基承受较大横向荷载, 从而产生了较大位移和弯矩。对于先建桩后回填岸坡, 桩基位移较大, 这是由于回填的岸坡土产生的沉降变形等作用力会

传递给桩, 此时的桩基承担了“抗滑桩”作用<sup>[6]</sup>, 并且随着回填厚度的增加, 桩基位移的增加速率在变大, 这是因为回填厚度过大时, 岸坡土已经发生塑性变形, 岸坡稳定性差, 桩基承受的力变大, 因此产生的变形也迅速增大。而对于先回填后建桩这种情况, 随着岸坡回填厚度的增加, 桩基的最大位移增加的速度放缓, 其最大位移是前者的 1/100 左右, 这是因为岸坡回填材料沉降固结变形已经基本完成, 桩基承受的横向作用力也较小, 下层回填土相对于上层回填土具有更高的强度, 所以随着回填土厚度的增加, 桩基的位移增大的速度减缓。

### 2.2 回填岸坡坡度对桩基承载特性的影响

为了分析回填岸坡坡度对桩基承载力的影响, 分析对比 5 种不同回填岸坡坡度情况下桩基的承载特性, 探讨最大弯矩和最大位移的变化规律, 结果见表 4 和图 5。

表 4 不同岸坡坡度下桩位移及弯矩

岸坡 坡度/m	工况 1			工况 2		
	桩基最大位移/mm	桩基最大弯矩/(kN·m)	边坡安全系数	桩基最大位移/mm	桩基最大弯矩/(kN·m)	边坡安全系数
20	37.190	1 826	1.829	0.363	4.14	1.820
25	43.851	2 126	1.426	0.397	6.47	1.410
30	51.001	2 422	1.140	0.466	10.53	1.137
35	57.462	2 895	1.120	0.536	23.87	1.100
40	61.433	3 260	1.100	0.570	33.48	1.050

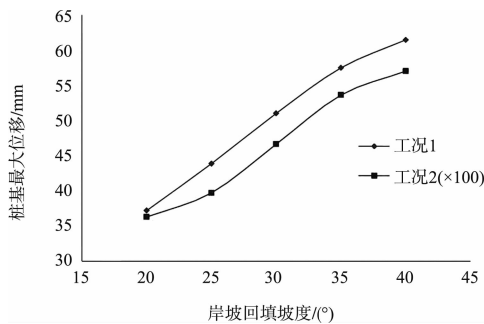
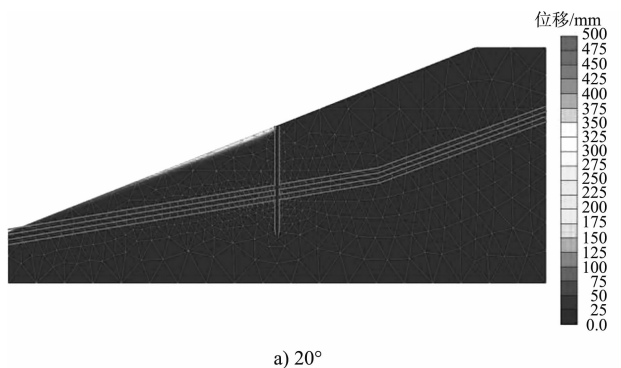


图 5 不同岸坡坡度下桩基位移曲线

图 5 表明, 在两种工况下, 随着岸坡回填坡度的增加, 桩基发生的最大位移均变大, 而对于前者, 桩基承载特性对岸坡变化的敏感性更加强烈。

从图 6 看出, 随着岸坡坡度的增大, 边坡滑动区逐渐增大, 但都发生在桩基以下位置, 说明桩起到了较好的抗滑作用<sup>[7]</sup>。从图 7 看出, 岸坡

安全系数随着坡度的增大逐渐变小, 当边坡坡度由 20° 逐渐增大到 30° 的过程中, 边坡安全性迅速降低, 但岸坡坡度从 30° 逐渐增大到 40° 的过程中, 安全系数减小缓慢, 这是由于滑动面与结构面几乎重合, 此时边坡会沿着结构面发生破坏, 因此安全性变化不大, 这也解释了当边坡增大到一定程度后, 桩基的位移和内力增加缓慢的原因。



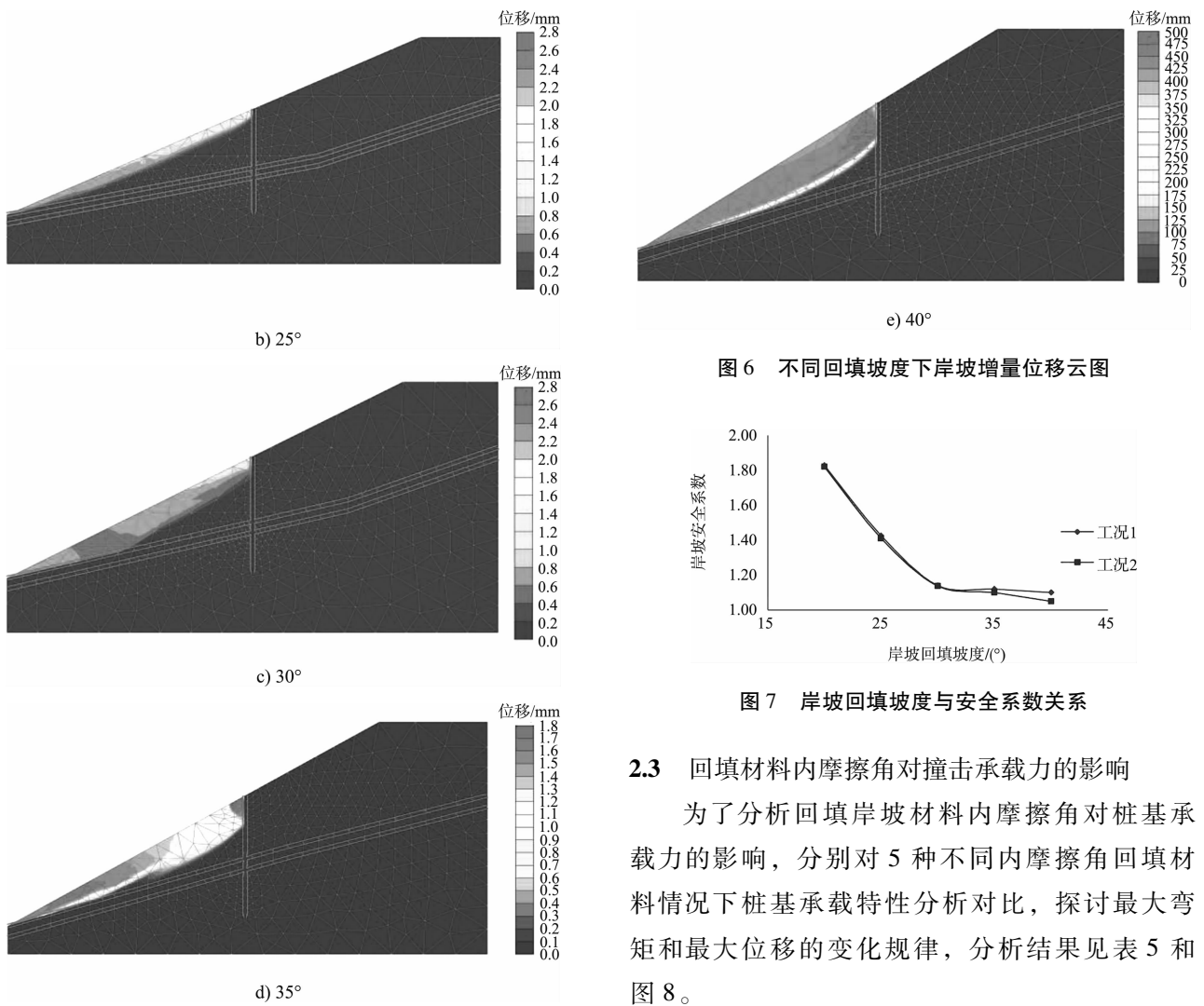


图6 不同回填坡度下岸坡增量位移云图

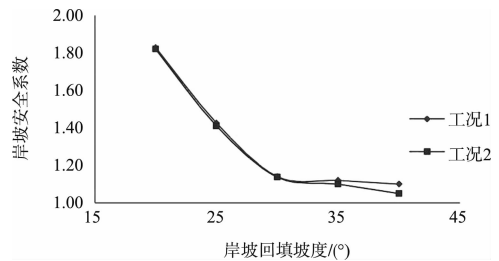


图7 岸坡回填坡度与安全系数关系

### 2.3 回填料内摩擦角对撞击承载力的影响

为了分析回填料内摩擦角对桩基承载力的影响，分别对5种不同内摩擦角回填料情况下桩基承载特性分析对比，探讨最大弯矩和最大位移的变化规律，分析结果见表5和图8。

表5 不同内摩擦角下有限元计算结果

影响因素内 摩擦角/(°)	工况1			工况2		
	桩基最大位移/mm	桩基最大弯矩/(kN·m)	边坡安全系数	桩基最大位移/mm	桩基最大弯矩/(kN·m)	边坡安全系数
31	55.240	2 905.00	1.072	0.610	26.67	1.047
33	53.550	2 761.00	1.111	0.522	17.79	1.097
35	51.001	2 422.00	1.140	0.466	10.53	1.137
37	49.630	2 364.00	1.230	0.401	7.82	1.214
39	47.790	2 220.00	1.312	0.375	6.30	1.262

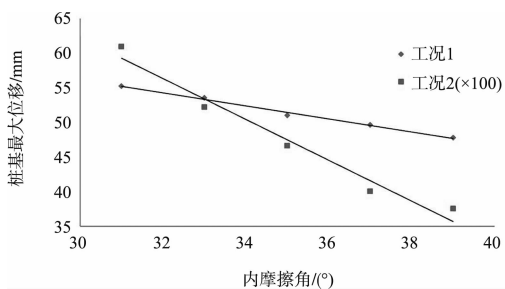


图8 不同内摩擦角下桩基位移变化趋势

从图8看出，随着回填料内摩擦角的增大，桩基发生的最大位移和弯矩逐渐变小。工况1中，桩基的最大位移由55.240 mm逐步减少为47.790 mm，减小了近8 mm，由此可见，回填料内摩擦角的变化对桩基的位移影响较明显，回填料的内摩擦角越大，桩基横向最大位移和最大弯矩越小，这是因为桩基受到的回填料岸坡土体的横向作用越小，因此增大岸坡回填料内摩擦角有利于改善桩基的承载力。

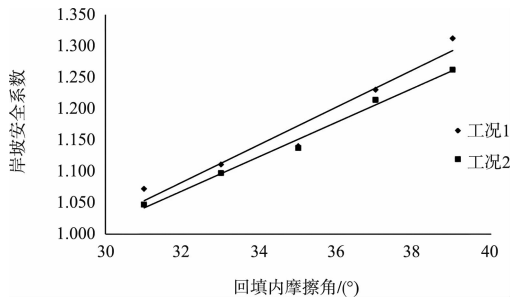


图 9 安全系数与内摩擦角关系

从图 9 看出, 其他参数保持不变, 仅增大回填材料的内摩擦角, 边坡安全系数稳定性增强, 安

全系数呈线性增大, 说明提高回填材料的内摩擦角可以有效增强边坡稳定性。这是由于边坡的破坏形式多是平面剪切滑动, 提高内摩擦角可以有效降低边坡破坏, 从而减小对桩基的作用力, 这也解释了提高内摩擦角可以减小桩基变形、提高桩基承载性<sup>[8]</sup>的原因。

### 2.4 桩基嵌入深度对桩基承载特性的影响

为了分析桩基嵌入深度对桩基承载特性的影响, 分别对 5 种不同桩基嵌入深度下桩基承载特性分析对比, 探讨最大弯矩和最大位移的变化规律, 分析结果见表 6。

表 6 不同嵌入深度下有限元计算结果

影响因素 嵌入深度/m	工况 1			工况 2		
	桩基最大位移/mm	桩基最大弯矩/(kN·m)	边坡安全系数	桩基最大位移/mm	桩基最大弯矩/(kN·m)	边坡安全系数
5.0	53.300	2 466	1.114	0.478	24.08	1.111
6.0	52.085	2 439	1.125	0.471	16.61	1.123
7.0	51.460	2 429	1.136	0.467	12.44	1.132
8.0	51.001	2 422	1.140	0.466	10.53	1.137
9.0	50.900	2 418	1.141	0.466	9.92	1.140

从表 6 看出, 当桩的嵌入深度从 5.0 m 增大到 9.0 m 时, 桩基最大位移逐渐变小, 工况 1 桩基位移从 53.300 mm 减小到 50.900 mm, 岸坡的稳定性也从 1.11 提高到 1.14。工况 2 桩基位移也逐渐变小, 但变化很小, 从总体看适当增大嵌入深度有利于改善桩基承载力。从图 10、11 可知, 在嵌入深度为 5~7 m 时, 桩基内力位移及岸坡安全系数变化相对较明显, 当嵌入深度逐渐增至 9 m 时, 桩基的位移和内力变化速率降低, 说明此时已达到桩基适宜的嵌入深度值<sup>[9]</sup>, 小于此嵌入深度时, 桩基易发生位移和变形, 再继续增大对改善桩基承载力不明显。

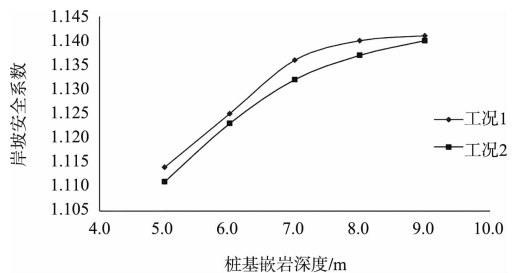


图 11 岸坡安全系数与嵌入深度关系

### 3 结论

1) 在回填岸坡桩基工程中, 相对于先建桩后回填岸坡, 先回填岸坡后建桩明显有利于改善桩基承载力。这是由于建桩后回填岸坡, 逐层回填的岸坡土产生的沉降变形等作用力会传递给桩基, 此时的桩基承担了“抗滑桩”的作用, 因而产生较大内力引起变形和位移。

2) 增加回填土厚度、增加岸坡坡度, 减小回填材料内摩擦角、减小嵌入深度均不利于回填岸坡桩基承载力的改善。

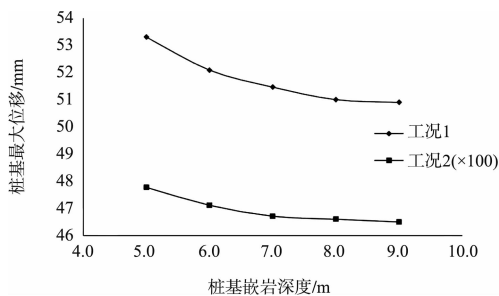


图 10 桩基位移随嵌入深度的变化趋势

(下转第 202 页)