

· 港口 ·



高桩承台结构对岸壁出土高度的适应性分析

王 珏, 韩 洁

(上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 高桩承台结构是上海地区常见的水工结构形式, 近年来在使用过程中由于墙前泥面冲刷、墙后堆载等问题导致结构失稳的问题时有发生。结合实际工程, 在理论计算的基础上, 利用Ansys有限元分析软件, 分析得出了影响高桩承台结构对岸壁出土高度适应性的因素, 并提出断面设计优化方案。

关键词: 高桩承台结构; 岸壁出土高度; 适应性; 有限元

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0091-06

Adaptability to elevated pile foundation structure of quay unearthed height

WANG Yue, HAN Jie

(Shanghai Municipal Engineering Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The elevated pile foundation structure is a common hydraulic structure type in Shanghai region. In recent years, structural instability problems often happened due to foundation scour in front of the retaining wall and heaped load behind the retaining wall. Based on the practical engineering and theoretical calculation, and using ANSYS finite element analysis software, the paper analyzes factors which influence the adaptability to elevated pile foundation structure of quay unearthed height, and proposes optimization schemes of the section design.

Key words: elevated pile foundation structure; quay unearthed height; adaptability; finite element

高桩承台结构是上海地区常见的水工结构形式, 能适应上海地区软土地基条件。高桩承台结构的前排桩为板桩墙, 后排桩为方桩(钻孔灌注桩、PHC管桩)。其具有施工方便、占地少等优点, 在黄浦江及其支流沿岸和大芦线、苏州河等内河沿岸的护岸工程中被广泛采用。近年来关于这种结构对于不同岸壁出土高度的适应性争论较多。岸壁出土高度变化在高桩承台结构中反应出的破坏形式为高桩承台结构随着出土高度的不断加大, 结构顶部出现了很大的水平变位, 最终会导致结构失稳。

用来计算高桩承台结构的传统方法为竖向弹性地基梁法。竖向弹性地基梁法是一种较好的计算方法, 其中 m 法应用较广, 但 m 法在计算高桩

承台结构时, 假设了承台刚度为无穷大, 承台上部荷载简化为承台底部中点受到的集中力和弯矩^[1-3], 而本文研究的高桩承台结构中承台刚度与桩的刚度为同一数量级, 所以用此种假设简化计算的结果跟实际情况误差较大。相比之下有限单元法则具有以下优势: 1) 能模拟实际的结构及荷载作用情况; 2) 能考虑到结构由于变形引起的刚度变化; 3) 通过专业的有限元分析软件建立的有限元模型修改方便, 使得大量重复的计算得到简化。因而本文采用有限单元法来计算分析。

本文结合老港固体废弃物综合利用基地内河工程, 选取其码头段的推荐结构形式, 利用有限元分析软件Ansys进行数值模拟, 并通过与用传统 m 法计算的结果进行比较, 验证模型的合理性; 而

收稿日期: 2012-07-19

作者简介: 王珏(1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事码头结构的设计。

后用该有限元模型,计算并分析各因素对高桩承台结构岸壁出土高度适应性的影响,提出科学、实用的断面设计优化方案。

1 计算方法简介

以文克尔假定为基础的弹性地基梁法从土力学观点看是不够严密的,但其基本概念明确、方法简单,所得结果一般较安全,在国内外工程界得到广泛应用。

当地下墙柱内有外荷载 q_y 作用时,地下墙柱轴线受力挠曲时的基本微分方程为:

$$EI \frac{d^4 x_y}{dy^4} + N \frac{d^2 x_y}{dy^2} + \sigma_y = q_y \quad (1)$$

式中: E 、 I 分别为梁的弹性模量及截面惯性矩; y 为距顶端(地面处)任一点的距离,以向下为正; x_y 为任一点 y 处的水平挠曲变形,以向右为正; N 为轴向力,以压力为正; σ_y 为反力(抗力); q_y 为任一点 y 处的外荷载,与 x_y 的方向相同时为正。

通常由于压屈临界荷载大大超过作用在地下墙柱上的实际轴向荷载,因此除了在临界条件之外,常将 N 的影响略去不计,且当地基系数 k 随深度 y 按 $k=my$ 的规律变化时,式(1)就成为一个四阶线性变系数其次微分方程,即:

$$EI \frac{d^4 x_y}{dy^4} + mb_0 y x_y = q_y \quad (2)$$

式中: b_0 为桩的计算宽度。这一方程为四阶线性变系数非齐次微分方程。若桩露出地面长 l_0 ,桩顶为自由端,其上作用有 M 及 Q ,顶端的位移 x_1 可应用叠加原理计算。桩顶转角 φ_1 则由地面处的转角 φ_0 ,水平力 Q 作用下引起的转角 φ_Q 及弯矩作用引起的转角 φ_m 组成有限元模型合理性验证。

本文采用Ansys有限元计算软件对高桩承台结构的桩-土-承台体系进行数值模拟。有限元中模拟桩-土体系一般有实体模拟跟弹簧模拟两种方法。实体模拟即把土体用实体单元划分,定义其材料属性,利用地应力平衡法施加初始土压力,通过设置接触面来传递桩土间作用力;弹簧模拟则是把土对桩的抵抗力简化为弹簧的弹力,通过设置弹簧的刚度来反映土的性质,初始土压力为

预先通过计算得出,直接施加在结构上。相比两种方法,实体模拟能更真实地反映桩土间的相互作用,但较多的接触面容易产生应力集中和收敛困难等问题,且土的变形模量、泊松比等材料属性也较难确定,计算时占用的计算机资源较大。考虑到在土的弹性阶段内用弹簧模拟土与实际情况相差不大,土地基反力系数可以有规范可查,且本文的计算量较大,所以采用弹簧来模拟桩土间的相互作用。

本文结合老港固体废弃物综合利用基地内河工程,高桩承台结构的有限元模型根据其码头段结构推荐方案建立有限元计算模型(图1)。承台、前排板桩和后排PHC桩均采用2节点梁单元beam188,弹簧采用2节点的弹簧单元combin39。考虑到泥面以上结构水平位移较大,所以计算中不计泥面以上后排PHC桩前土抗力。同时考虑到整个结构埋入土中,且桩的入土较长,所以也不计结构的竖向位移与变形。用Ansys有限元分析软件建立的模型以及计算结果如图2~5(图中所示弯矩、剪力值为计算宽度内结构内力的总和),前板桩内力和位移见表1。

由表1,2可以看出,本文中用Ansys有限元分析软件计算的结果与传统的 m 法计算结果比较接近,笔者认为所得结果的差别主要是由于有限元计算方法考虑了承台刚度的影响,比 m 法更符合实际情况。所以本文建立的有限元模型是合理可行的。

2 高桩承台结构对岸壁出土高度适应性的影响因素分析

在以往的使用过程中发现,高桩承台结构随着岸壁出土高度的加大,表现出的主要破坏形式是结构顶部出现大的水平变位,最终导致结构失稳。所以结构对岸壁出土高度的适应性主要反映在结构顶部位移随着岸壁出土高度增加而变化上。

2.1 后排PHC桩刚度对结构岸壁出土高度适应性的影响

令其它参数均为工程实际值,只改变后排PHC桩的刚度,PHC桩不同刚度下结构顶部位移

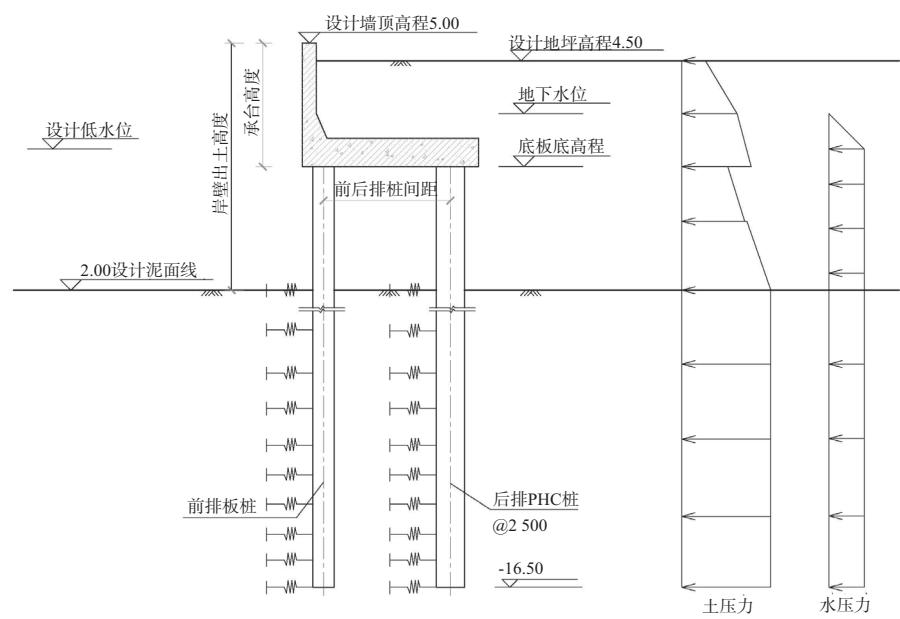


图1 有限元计算模型

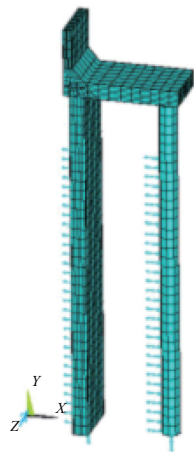


图2 用Ansys建立的有限元模型

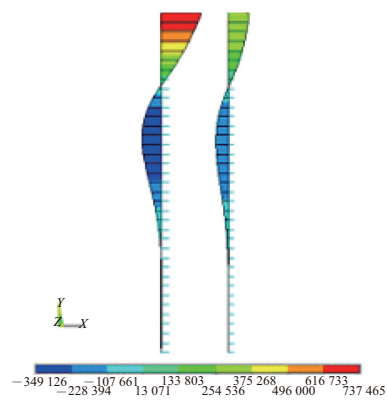


图4 弯矩 (单位:N·m)

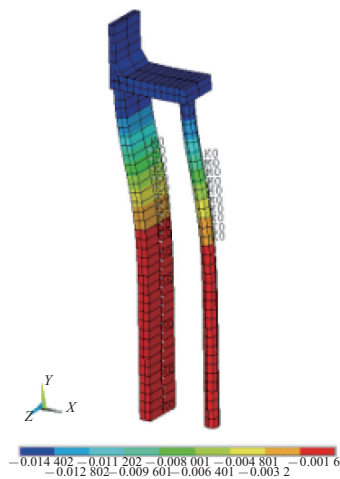


图3 位移变形(单位:m)

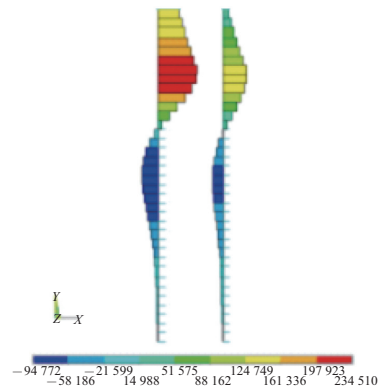


图5 剪力(单位:N)

与岸壁出土高度的关系曲线见图6。

从图6可以看出提高后排PHC桩的刚度可以减小结构顶部的水平位移，且刚度越大，结构顶部位移随着岸壁出土高度的增加而增长的速度也越

表1 前板桩计算内力值对比

高程/m	板桩弯矩/(kN·m)		板桩剪力/kN		板桩位移/mm	
	A	M	A	M	A	M
1.5	-294.99	-256.56	51.04	51.48	13.90	13.76
-2.0	-32.22	-24.78	91.28	93.16	8.27	8.19
-3.5	92.65	93.71	46.00	61.67	4.97	4.93
-5.0	138.12	143.81	-7.36	8.10	2.46	2.31
-6.5	102.38	126.46	-35.07	-27.39	0.99	0.67
-8.0	52.99	77.95	-36.02	-35.45	0.36	-0.07
-9.5	16.73	32.19	-24.15	-25.94	0.21	-0.26
-11.0	-0.64	4.62	-12.24	-12.28	0.23	-0.20
-12.5	-5.20	-5.38	-5.57	-2.45	0.26	-0.09
-14.0	-5.00	-5.21	-3.35	1.87	0.26	-0.02
-15.5	-3.01	-1.88	-2.11	2.21	0.22	0.01
-16.5	-0.90	0.00	-0.91	0.00	0.16	0.03

注：A表示用Ansys有限元分析软件计算所得结果，M表示用m法计算所得结果。

表2 后PHC桩计算内力值对比

高程/m	PHC桩弯矩/(kN·m)		PHC桩剪力/kN		PHC桩位移/mm	
	A	M	A	M	A	M
1.5	-377.72	-346.38	30.34	41.26	13.74	13.76
-2.0	-64.88	-60.14	138.03	157.70	8.36	8.32
-4.0	180.30	167.00	104.21	119.65	4.38	5.07
-6.0	218.89	267.27	19.54	19.57	1.77	2.42
-8.0	128.40	151.62	-44.01	-48.52	0.67	0.74
-10.0	40.19	65.19	-62.23	-65.99	0.41	-0.05
-12.0	0.00	11.42	-39.75	-49.79	0.40	-0.26
-14.0	-8.63	-9.24	-18.95	-24.54	0.38	-0.21
-16.5	-4.46	-5.13	-10.78	-5.61	0.30	-0.10

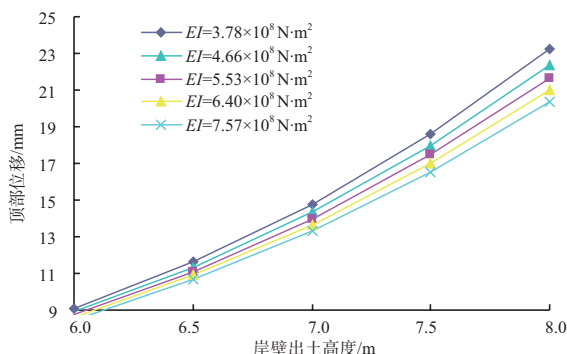


图6 PHC桩不同刚度下结构顶部位移与岸壁出土高度的关系

慢，即结构对岸壁出土高度的适应性越强。由于曲线较平缓，近似用曲线首尾两点连线斜率 K 的大小来反映结构顶部位移增长的快慢，且 K 越大说明结构对岸壁出土高度的适应性越差。本文令各参

数取工程实际值时的结构顶部位移与岸壁出土高度关系曲线的斜率为 K_0 ，其它情况下所求得的关系曲线的斜率为 K_x ，用 $S = \frac{K_0}{K_x}$ 来表示结构对岸壁出土高度的适应能力，那么各参数取工程实际值时的结构对岸壁出土高度的适应能力为 $S = \frac{K_0}{K_x} = 1$ 。

将后排PHC桩取不同刚度时的结构顶部位移与岸壁出土高度关系曲线对应的 S 求得后，见图7。

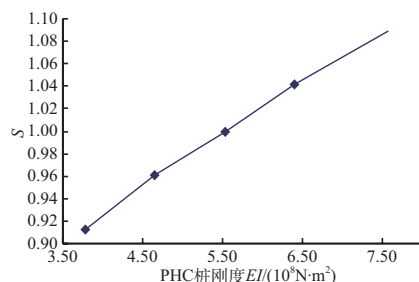


图7 适应能力 S 与后排PHC桩刚度关系

从图7可以看出，后排PHC桩的刚度与结构对岸壁出土高度的适应能力 S 几乎呈线性关系，且桩的刚度越大，适应性越强。

2.2 前排板桩刚度对结构岸壁出土高度适应性的影响

令其它参数均为工程实际值，只改变前排板桩的刚度，板桩不同刚度下结构顶部位移与岸壁出土高度的关系曲线见图8。结构对岸壁出土高度的适应能力 S 与对应的板桩刚度见图9。

从图9中可以看出，板桩的刚度与结构的岸壁出土高度的适应能力 S 也几乎呈线性关系。同样，板桩的刚度越大，结构对岸壁出土高度的适应性越强。

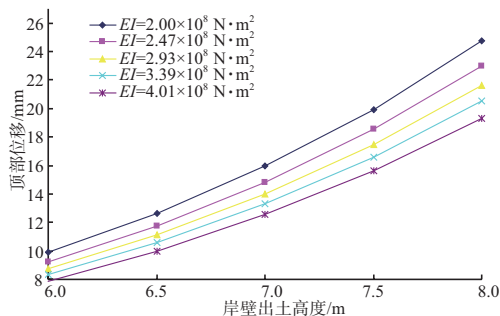
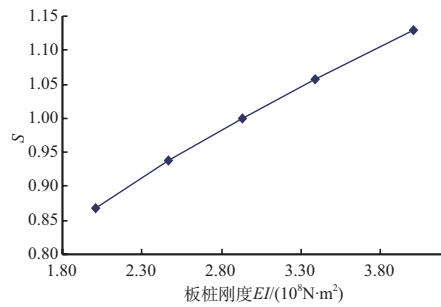


图8 前排板桩不同刚度下结构顶部位移与岸壁出土高度关系

图9 适应能力 S 与前排板桩刚度关系

2.3 承台高度对结构岸壁出土高度适应性的影响

承台不同高度下桩顶位移与岸壁出土高度的关系曲线见图10, 结构对岸壁出土高度的适应能力 S 与对应的承台高度见图11。

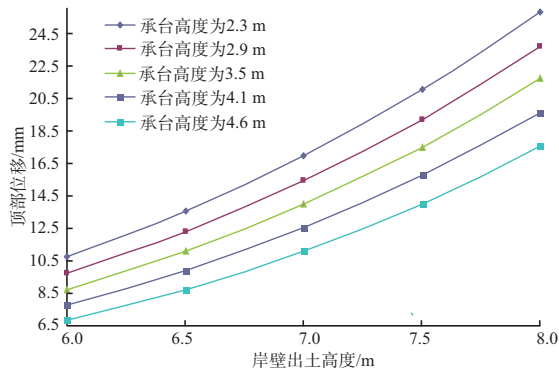
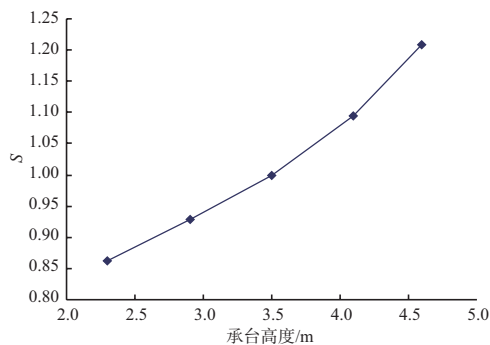


图10 承台不同高度下桩顶位移与岸壁出土高度关系

图11 适应能力 S 与承台高度关系

从图11可以看出, 承台的高度与结构对岸壁出土高度的适应能力 S 呈现非线性关系, 并且当承台高度越大时, 再增加相同的承台高度, 结构对岸壁出土高度的适应能力提高得越多。

2.4 前后桩间距对结构岸壁出土高度适应性的影响

不同的前后桩间距下桩顶位移与岸壁出土高度的关系曲线见图12, 结构对岸壁出土高度的适应能力 S 与对应的前后桩间距见图13。

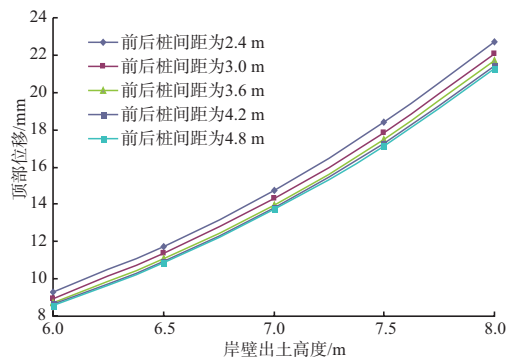
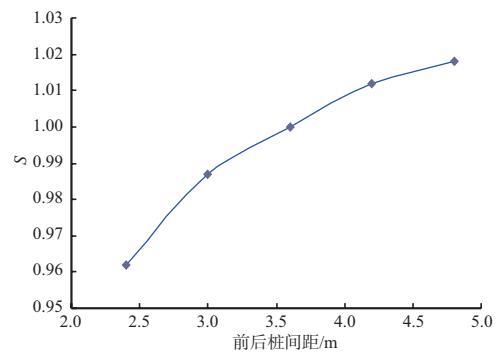


图12 不同的前后桩间距下桩顶位移与岸壁出土高度关系

图13 适应能力 S 与前后桩间距关系

从图13可以看出, 前后桩间距与结构对岸壁出土高度的适应性呈现非线性关系, 并且当前后桩间距越大时, 再增加相同的桩间距, 结构对岸壁出土高度的适应性提高得越少。

2.5 后方增加一排桩对结构岸壁出土高度适应性的影响

前面的研究是在前板桩、后一排PHC桩（或方桩）的结构形式基础上进行的, 本节将往岸侧方向增加一排PHC桩（或方桩），成为前板桩、后双排PHC桩（或方桩）的高桩承台形式。并研究该结构对岸壁出土高度适应性的影响。

两种结构在不同岸壁出土高度情况下的桩顶位移见图14, 两种结构对岸壁出土高度的适应能力见表3。

表3 两种结构对岸壁出土高度的适应能力

结构类型	适应能力 S
两排桩	1.000
三排桩	1.461

从图14可知, 在不同岸壁出土高度情况下, 三排桩高桩承台结构的桩顶位移都比双排桩减少约30%, 从表3可知, 三排桩结构对岸壁出土高度

的适应能力比双排桩提高了近45%。

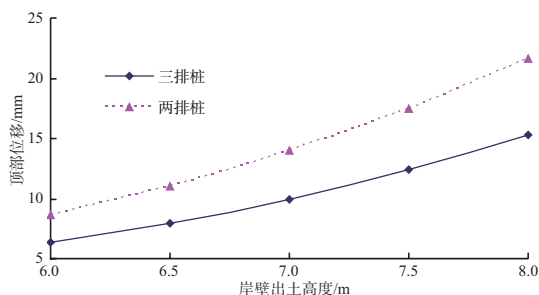


图14 两种结构的岸壁出土高度与桩顶位移关系

3 结果分析

由于各影响因素的变化均在该工程实际所选值附近范围内，并以工程实际取值为中间值，且各因素选取的最大值均为最小值的2倍。为了综合分析各因素对结构岸壁出土高度适应性影响的相对程度，本文假设任一因素取最小值，其它因素取实际值时为工况 C_0 ，任一因素取最大值，其它因素取实际值时为工况 $2C_0$ ，以结构对岸壁出土高度的适应能力 S 为纵坐标，以工况为横坐标，将原前板桩后单排PHC桩（或方桩）结构各因素与结构对岸壁出土高度适应能力的关系曲线，绘制在同一张图中（图15）。

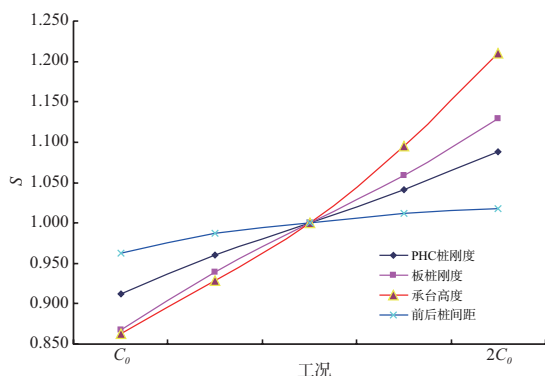


图15 结构各因素与结构对岸壁出土高度的适应能力关系

在图15中，4条曲线的交点即为工程实际情况。从各曲线的分布中可以很清楚地看到，承台高度的取值对结构岸壁出土高度适应性的影响程度最大，因为改变承台高度事实上改变了桩头的出土，对结构岸壁出土高度适应性的影响程度最小。并且，当各因素的值越大时，提高等量该因素的

值对结构岸壁出土高度适应性的提高程度也不相同。其中，承台高度越大时，在增加等量的承台高度条件下，结构对岸壁出土高度适应性的提高程度增加得越多；而前后桩间距越大，再增加等量的间距后，结构对岸壁出土高度适应性的提高程度增加的越少，板桩和PHC桩刚度增加对结构岸壁出土高度适应性的提高程度则几乎不受其本身取值大小的影响。

4 结论

高桩承台结构随着岸壁出土高度的增加，结构顶部将出现很大的水平变位，最终会导致结构失稳。结构对岸壁出土高度的适应性与哪些因素有关以及如何提高其适应性成了设计者们关心的问题。本文通过有限元分析软件Ansys，利用有限元计算方法，计算了各因素对高桩承台结构岸壁出土高度适应性的影响，经过对计算结果的分析得出以下结论：

1) 对于高桩承台结构形式（前板桩、后PHC桩或方桩），对结构岸壁出土高度适应性的影响因素，按影响程度由大到小依次为承台的高度、前排板桩的刚度、后排PHC桩的刚度和前后桩间距。

2) 为了更经济合理地提高结构对岸壁出土高度的适应性，当结构尺寸较大时，宜选择提高承台的高度，当结构尺寸偏小时，宜选择提高前排板桩的刚度。

3) 在结构后方增加一排PHC桩（或方桩）将显著提高结构对岸壁出土高度的适应性。

参考文献:

- [1] 朱丽娟.前板桩后方桩高桩承台护岸结构的断面优化[J]. 科技论坛, 2002(12):32-33.
- [2] 徐昌奎.前板桩后高桩支护结构的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [3] 向黎. 前板桩后高桩支护结构受力特性分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.

（本文编辑 武亚庆）