· 地基与基础 ·

人造基床在沿海码头桩基工程中的应用

方州恩，林　军，雷　森
（舟山鼠浪湖码头有限公司，浙江 舟山 316000）

摘要：以宁波舟山港域某沿海码头项目引桥基础施工为背景，针对覆盖层薄弱水域引桥桩基的施工难题，深入研究了人造碎石基床的稳桩工艺。通过建立人造碎石基床，改善软弱地基承载力，提高桩基的稳定性，确保引桥结构的安全可靠。采用现场试验和数值模拟相结合的方式，对不同厚度的人造碎石基床在不同荷载作用下的承载力进行了分析，并通过工程实例验证了该工艺的可行性。结果表明：人造碎石基床能够有效提高软弱地基的承载力，显著增强桩基的稳定性，满足工程设计要求，可为类似工程提供借鉴。

关键词：人造基床；覆盖层；桩基；稳桩工艺
中图分类号：U655.54+4.1；TU473　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)05-0129-07

Application of artificial foundation bed in pile foundation engineering of coastal wharf

FANG Zhouen, LIN Jun, LEI Sen
(Zhoushan Shulanghu Terminal Co., Ltd., Zhoushan 316000)

Abstract: Based on the foundation construction of an approach bridge for a coastal wharf project in Zhoushan Port area of Ningbo, this study focuses on the construction challenges of pile foundations for the approach bridge in areas with weak overburden layers, an in-depth study is conducted on the pile stabilization technology of artificial crushed stone bedding layers. By constructing an artificial crushed stone bedding layer, the bearing capacity of the weak foundation can be improved, the stability of the pile foundations can be enhanced, and the safety and reliability of the approach bridge structure can be ensured. The bearing capacity of artificial crushed stone bedding layers with varying thicknesses under different loading conditions is analyzed by combining field tests and numerical simulations, and the feasibility of this process is verified through engineering examples. The results show that the artificial crushed stone bedding layer can effectively improve the bearing capacity of weak foundations, significantly enhance the stability of pile foundations, meet engineering design requirements, and provide valuable references for similar projects.

Keywords: artificial foundation bed; overburden; pile foundation; stabilizing pile process

我国港口建设已进入深水化、大型化的新阶段。随着沿海优质港址资源逐渐枯竭，地质条件复杂的岸线成为港口开发的重点区域[1-4]。桩基码头作为常见的港口工程结构，在软弱地基、覆盖层薄、岩面陡峭等复杂地质条件下施工时，常面临桩基侧移、溜桩、桩身不稳等问题，严重影响工程质量和安全[5-6]。

国内外学者对桩基在软弱地基中的承载力、稳定性等问题进行了广泛研究[7-9]，并提出了多种改进措施，如采用桩端扩径、预制桩、高压喷射桩等方法来提高桩基承载力[10-11]。然而，对于覆盖层薄弱、岩面陡峭等特殊地质条件下的桩基施工，现有的研究成果仍相对较少，且缺乏针对性的施工技术。

本文以宁波舟山港域某沿海码头项目引桥基础施工为背景，针对覆盖层薄弱水域引桥桩基的施工难题，深入研究了人造碎石基床的稳桩工艺，将人造碎石基床应用于覆盖层薄弱水域的桩基施工，通过改善地基承载力，提高桩基稳定性，为类似工程提供一种新的解决方案。

收稿日期：2024-07-11
作者简介：方州恩（1982—），男，硕士，高级工程师，从事港口工程建设方面的工作。

水运工程

1　工程概况

宁波舟山港域某沿海码头项目引桥区域覆盖层较薄，且具有岩面倾斜度大的特点，选用碎石稳桩方案，通过船机设备及人工在水上抛填袋装碎石以及护脚块石，在裸露基岩或淤泥层较薄的自然海床上形成一定厚度的覆盖层，以满足施工期和使用期工程位置处钢套筒在风、浪、流作用下的稳定要求。

工程引桥约长 106 m、宽 20 m。采用高桩梁板式结构，排架间距 18 m，每个排架桩基采用 4 根 ϕ1 400 mm 嵌岩桩。上部结构为现浇横梁、预应力空心板。通过前期对地质及水文资料分析，考虑本项目水域风、浪、流作用影响，发现人造碎石基床原设计堤身存在自身稳定性不足的缺陷，继而在保障桩基覆盖层厚度的前提下，对堤身结构以及抛填工艺进行优化改进，并通过堤身稳定性、桩基稳定性验算对原堤身和优化堤身进行对比分析，最终采用优化后堤身结构见图 1。

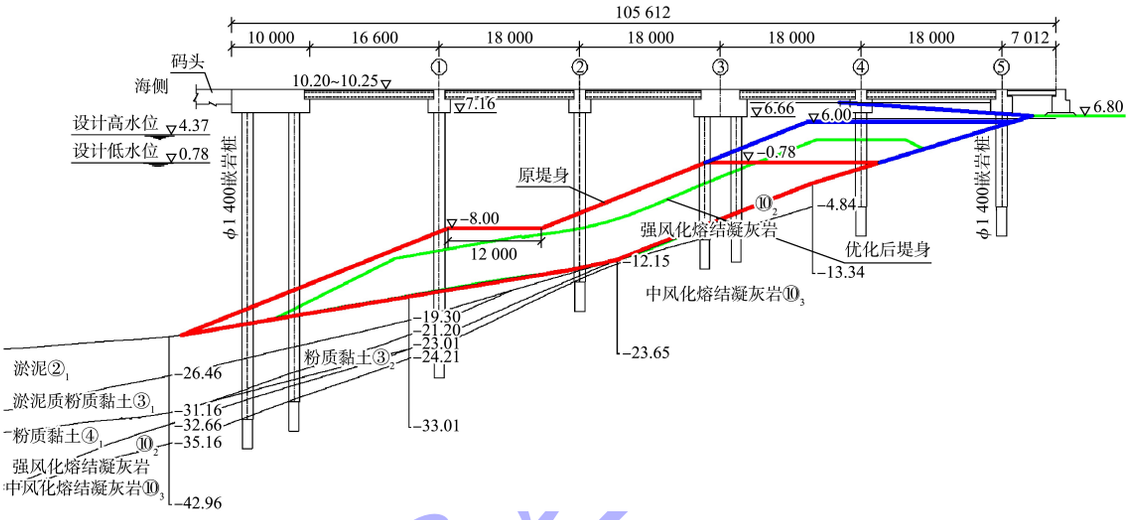
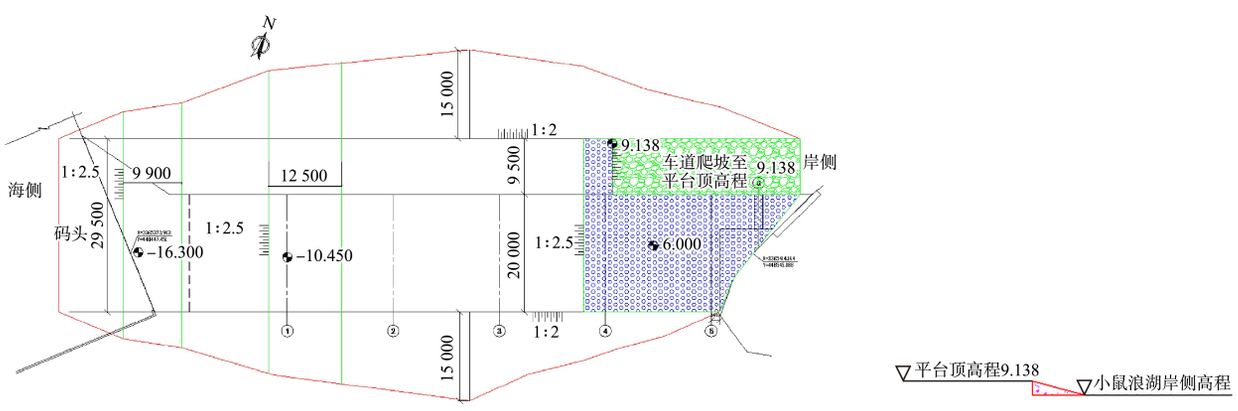


图 1　人造基床堤身纵断面（尺寸：mm；高程：m）

Fig. 1　Longitudinal section of artificial foundation bed embankment（dimension：mm；elevation：m）

优化后的工程人造基床抛填区域位于引桥转角平台至 6#排架桩位处，顺桥向分三级放坡，总长度约 115 m，顶面宽度 29.5 m(其中沿桥面宽 20 m 为陆上嵌岩桩施工区，施工区北侧外扩 9.5 m 作为临时施工便道)。水上袋装碎石抛至 0.78 m，陆上回填宕渣抛填顶高程 6.000～9.138 m，优化后人造基床平面布置见图 2。



a) 平面　　b) 车道爬坡断面

图 2　人造基床优化布置（尺寸：mm；高程：m）

Fig. 2　Optimized Layout of artificial foundation bed（dimension：mm；elevation：m）

坡顶距离 4#排架桩边约为 3.0 m，同时为保证结构自身稳定性，分三级放坡，计划将人造基床按顺桥向 1∶2.5 放坡至−10.45 m(二级平台)，设置宽 12.5 m 的平台，再 1∶2.5 放坡至−16.30 m(三级平台)，设置宽 9.9 m 平台，最后 1∶2.5 放坡至原泥面高程；两侧按 1∶2 放坡至原地面高程，见图 3。

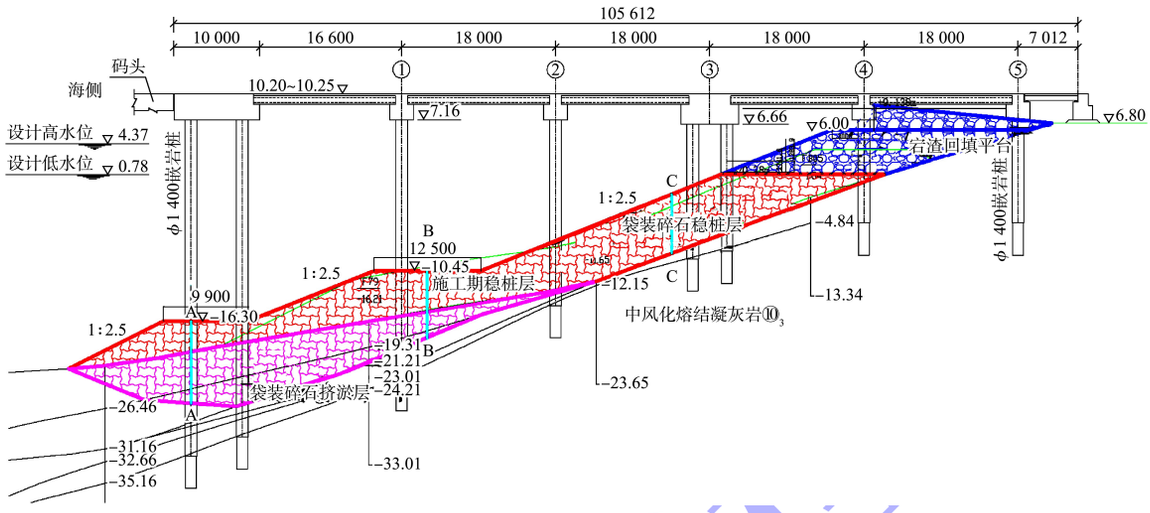


图 3　人造基床优化后纵剖面（尺寸：mm；高程：m）

Fig. 3　Optimized longitudinal section of artificial foundation bed (dimension: mm; elevation: m)

引桥转角平台桩位原始覆盖层厚度为 12.55 m；1#排架桩位原始覆盖层厚度为 7.47 m，2#排架桩位原始覆盖层厚度为 1.41 m。为了对引桥海上嵌岩桩施工起到足够稳桩作用，须确保桩位处覆盖层厚度，同时为保证结构自身稳定性，先抛填三级平台作为镇压层，并将坡脚淤泥挤除，以提高自稳性。

2　基床结构优化与验算

2.1　堤身稳定性验算

2.1.1　稳定计算安全允许系数 F

计算采用总应力法和瑞典条分法的稳定性安全系数，结合快剪指标，抗剪稳定计算安全系数取 $F=1.10$，计算公式为：

$$F=\frac{\sum S_i}{P_r} \tag{1}$$

$$S_i=W_i\cos\alpha_i\tan\varphi_{qi}+c_{qi}L_i \tag{2}$$

式中：S_i 为地基土内第 i 个条块滑体的抗剪力，kN，不考虑固结作用；P_r 为下滑力；W_i 为地基土内第 i 个土条滑体重力，kN；φ_{qi}、c_{qi} 分别为当第 i 土条的滑裂面处于地基内时，土条滑裂面所在处地基土层的快剪(直剪)内摩擦角(°)及快剪(直剪)内聚力，kPa；L_i 为第 i 个条块滑体长度。

采用有效固结应力法[12]，结合快剪与固结快剪指标，抗剪稳定计算安全系数取 $F=1.20$，计算公式为：

$$F=\frac{\sum(S_i+\Delta S_i)}{P_r} \tag{3}$$

$$S_i=W_i\cos\alpha_i\tan\varphi_{qi}+c_{qi}L_i \tag{4}$$

$$\Delta S_i=W_iU_i\cos\alpha_i\tan\varphi_{gi} \tag{5}$$

式中：ΔS_i 为考虑路基土在路堤填料的作用下固结，强度提高的抗剪力，kN；U_i 为地基的固结度，包括竖向及水平向固结度；φ_{gi} 为当第 i 土条的滑裂面处于地基内时，该土条滑裂面所处地基土层的固结快剪(直剪)内摩擦角。

2.1.2　主要计算参数

1）水文参数：由于引桥处验算仅针对钢护筒成桩后的临时结构，因此计算时选取设计高水位 4.37 m，两年一遇 $H_{1\%}$ 波浪要素按照潮流(表 1)波浪矢量叠加进行计算波浪荷载，即波高 3.19 m、波周期 7 s、波长 75 m。

表 1　潮流参数

Tab. 1　Parameters of tidal current

泊位		涨潮流		落潮流	
		流速(m·s^{-1})	流向/(°)	流速/(m·s^{-1})	流向/(°)
东侧泊位	流况 1	1.80	305	1.20	125
	流况 2	1.15	298	1.20	125
西侧泊位		1.50	322	1.30	137

地质参数：由引桥桩位(图 4)可知与第Ⅰ组钢护筒位置相近的钻孔为 F66；与第Ⅱ组钢护筒位置相近的钻孔为 F79、FB1；与第Ⅲ组钢护筒位置相近的钻孔为 FB02、FB03；第Ⅳ组钢护筒位于钻孔 FB02、FB03、FB04、FB05 之间。图 4 中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ组为钢护筒，桩径 1.4 m、壁厚 16 mm、斜桩斜率 7:1。

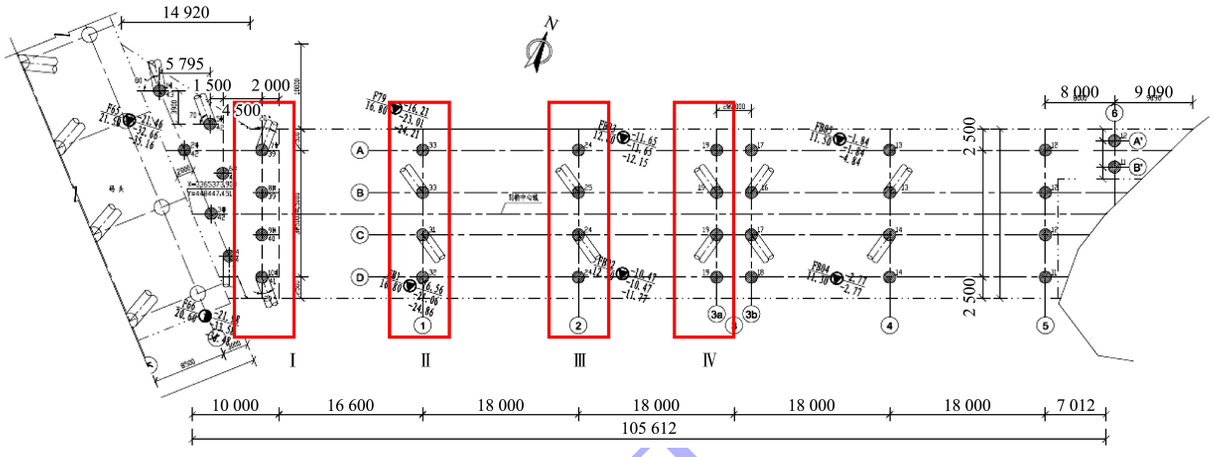


图 4　引桥桩位

Fig. 4　Location of approach bridge piles

根据地勘报告，抛填区域裸露岩层为⑩$_2$ 强风化熔结凝灰岩，地勘报告中未提供土强度指标，参考《工程地质手册》中变形模量最大的粗砂，黏聚力 c 取 0、内摩擦角 ϕ 取 33°；袋装碎石黏聚力 c 取 0.1、内摩擦角 ϕ 取 30°。

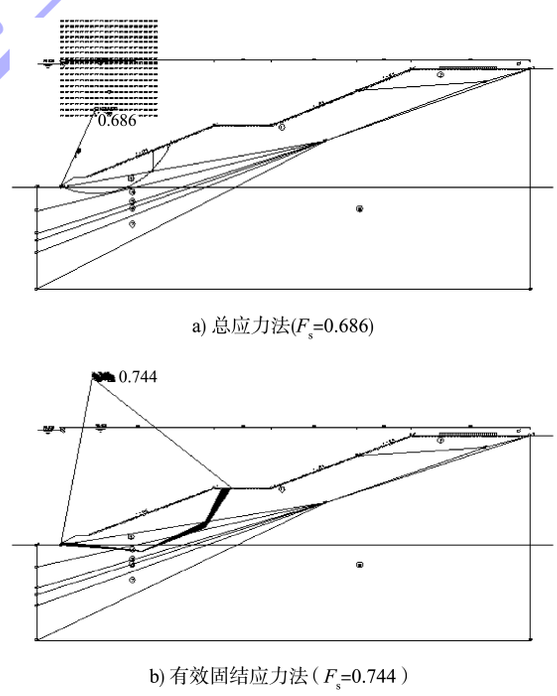
3）荷载：按照坡顶施工荷载 $p=10$ kPa，分布宽度 $l=12$ m 考虑，荷载距坡顶前缘 $a=3.7$ m。

2.1.3　计算结果

1）原堤按照总应力法和有效固结应力法计算结果见图 5。

2）优化结构竖直向对原始地层②$_1$ 淤泥、③$_{1\text{-}1}$ 淤泥质粉质黏土层挤淤换填袋装碎石，进行稳定性分析。

根据设计最新断面计算多级平台的人工基床稳定性，分别按照总应力法和有效固结应力法计算。计算结果见图 6。

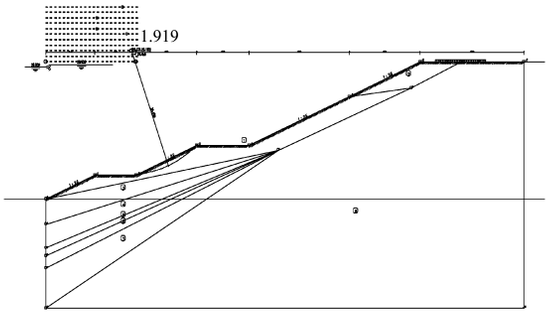


a) 总应力法(F_s=0.686)

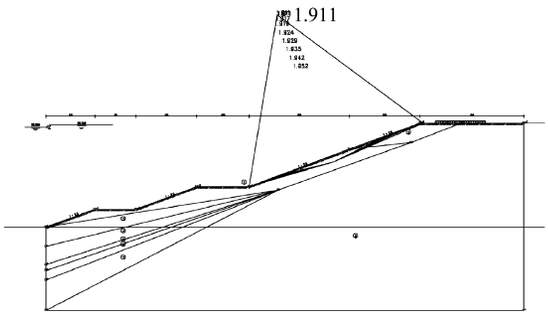
b) 有效固结应力法(F_s=0.744)

图 5　原堤稳定性计算结果

Fig. 5　Stability calculation results of former embankment



a) 总应力法(F_s=1.919)



b) 有效固结应力法(F_s=1.911)

图 6　优化堤身稳定性计算结果

Fig. 6　Stability calculation results of optimized embankment

结果表明，人工基床底部软弱土在挤淤换填的工况下，挖泥换填袋装碎石工况计算结果表明，总应力法和有效固结应力法均显示人工基床处于稳定状态。

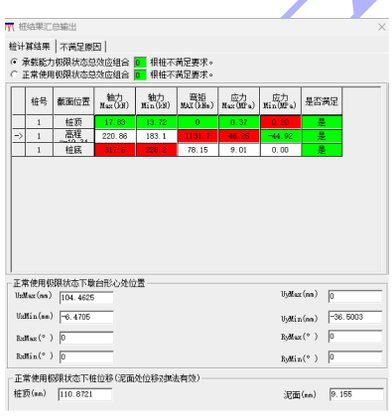
2.2　钢护筒水平抗力验算

根据水文地质信息，引桥钢管桩按照悬臂考虑；强风化岩层按最多打入 500 mm。根据人工基床纵断面考虑各组钢护筒位置的地层分布，结合水文地质条件整理得到钢护筒位置水深及碎石垫层厚度见表 2。由易工水运工程结构 CAD 集成软件 V3.0 计算得到波流荷载下结果见图 7。M 法计算得到正常使用极限状态下桩位移见表 3，验算结果均满足要求。

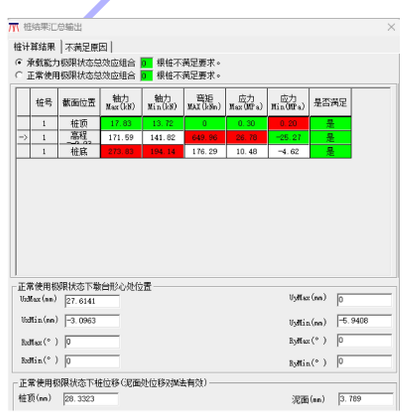
表 2　碎石垫层厚度

Tab. 2　Thickness of gravel bed layer

钢护筒代号	设计高水位/m	水深/m	袋装碎石表面高程/m	袋装碎石层厚度/m
Ⅰ	4.37	22.18	−17.81	1.99
Ⅱ	4.37	12.37	−8.00	7.72
Ⅲ	4.37	12.37	−8.00	5.05
Ⅳ	4.37	7.80	−3.43	5.43

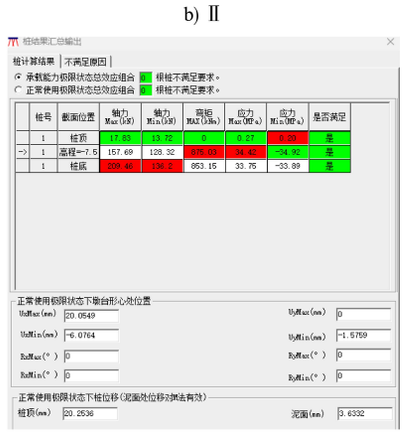


a) Ⅰ



b) Ⅱ

c) Ⅲ



d) Ⅳ

图 7　Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ组钢护筒斜桩计算结果

Fig. 7　Calculation results of inclined piles for steel casing in groups Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ and Ⅳ

表 3　正常使用极限状态下桩位移

Tab. 3　Displacement of piles under serviceability limit state

钢护筒代号	正常使用极限状态下桩顶位移/mm	正常使用极限状态下泥面处位移/mm	桩验算是否满足要求
Ⅰ	110.87	9.16	是
Ⅱ	28.33	3.79	是
Ⅲ	26.63	3.29	是
Ⅳ	20.25	3.63	是

此外，从计算软件中直接提取泥面处弯矩与水平力，按照《建筑地基基础设计规范》中悬臂桩倾覆稳定验算比较倾覆力矩与被动土压力产生的抗倾覆力矩的比较见表 4。计算的抗倾覆安全系数均大于 1.3，人造基床抛填厚度能满足稳桩要求。

表 4　悬臂桩倾覆稳定性验算结果

Tab. 4　Results of overturning stability check for cantilever piles

钢护筒代号	软件计算作用效应总组合泥面处弯矩/(kN·m)	土压力抗倾覆作用力矩/(kN·m)	抗倾覆稳定安全系数
Ⅰ	1 017	27 681	27.2
Ⅱ	536	44 975	83.9
Ⅲ	536	6 096	11.4
Ⅳ	627	5 428	8.7

3　施工工艺和方法

3.1　施工工艺

采用平板驳四锚定位结合袋装碎石抛填工艺，流程为：1）定位驳现场锚定；2）运输驳装载石料并靠泊定位驳进行灌包；3）潮水平稳后启动抛填，自海侧向岸侧分层推进，同步控制覆盖层厚度及坡度；4）边角补抛及宕渣回填。

3.2　施工方法

3.2.1　水下地形测量与基床高程控制

采用 HD310 单波束测深仪与 GPS 动态定位系统，对人造基床区域(长 115 m，宽引桥+通道)进行无验潮水深扫测及障碍物探摸。施工中实时监测潮位，通过水尺观测与水深反演计算基床高程。

3.2.2　袋装碎石抛投控制

1）定位与漂距修正：将设计坐标导入抛投船定位系统，结合 GPS 实时调整驳船平面位置。通过试抛测定漂距(绑绳法测定 3~5 次均值)，修正抛投提前量，确保精准落位。

2）抛填分区与厚度控制：将基床划分为 5 m×5 m 网格，录入坐标及高程至船载系统。关键桩位(如转角平台、2#排架)按设计厚度抛填(1.99~7.72 m)，纵向按 1:2.5 自然放坡。抛填后采用单波束测深仪复测，对比设计断面数据。

3.2.3　质量保障措施

1）边角补抛：基于水深扫测结果，对厚度不足区域进行补抛，确保基床断面完整性。

2）护面施工：南侧坡脚及坡面抛填大块石护坡，通过试抛确定漂移距并动态调整船位，台风期于基床中部非桩位增抛块石以增强稳定性。

3）验收标准：基床高程偏差及抛填方量需满足设计要求，验收合格后方可进行钢护筒沉设。

4　实施效果验证

4.1　人造基床稳定性验证

人造碎石基床完工后，定期对人造基床水域水深数据进行测量并对比，以验证人造基床稳定性。观测范围为人造基床轮廓线向外延伸各 50 m 范围，仪器设备采用中海达 HD310 单波束测深仪，观测频率为 1 次/3 d，每次测量数据在水深图中以不同颜色进行标注便于数据对比。经观测分析发现，人造基床抛填完成后早期受风浪流作用影响会出现轻微位移变化；抛填完成一个月时，人造基床基本达到结构自稳，符合方案设计预期目标。

4.2　稳桩效果验证

引桥嵌岩灌注桩钢护筒打设完成后在钢护筒顶设置监测点，在岸上引桥端头处控制点对桩顶平面位置进行定期监测，记录并对比桩顶平面位移变化情况，测量仪器采用全站仪，测量周期 1 次/3 d。经监测数据对比分析，沉桩后 15 d，钢护筒平面位置基本保持稳定，变化较小，满足嵌岩灌注桩施工前桩顶平面位置要求。

5　结语

1）通过现场试验和数值模拟，证实了人造碎石基床可以显著提高地基的承载力，为桩基提供

水运工程

更加稳定的支撑。

2）人造碎石基床稳桩工艺适用于地质条件复杂的岸线工程。特别是对于覆盖层薄弱、岩面陡峭的施工水域，人造碎石基床是一种值得推广的稳桩技术。

3）应根据工程地质条件、施工工艺等因素，对人造碎石基床的设计进行优化，以适应更加复杂的施工环境。

参考文献：

[1] 徐志栓, 尹海卿. 洋山深水港区一期工程深水裸露基岩嵌岩桩施工技术[J]. 中国港湾建设, 2005, 25(6): 56-58.
XU Z S, YIN H Q. Technique to construct piles socketed in deep-water bare bedrock for phase I of Yangshan deep-water port[J]. China harbour engineering, 2005, 25(6): 56-58.

[2] 余振刚, 吕小勇. 外海深水裸露基岩大直径嵌岩桩施工关键技术研究[J]. 港工技术与管理, 2007(4): 20-29, 43.
YU Z G, LYU X Y. Key construction technologies for large-diameter socketed piles in deep-water exposed bedrock in open seas[J]. Technology & management of port & harbor engineering, 2007(4): 20-29, 43.

[3] 戴勇. 浅覆盖层大直径嵌岩桩及稳桩方案设计[J]. 中国水运(下半月), 2011(9): 228-230.
DAI Y. Design of large-diameter socketed piles and stabilization schemes for shallow overburden layers[J]. China water transport (the second half of the month), 2011(9), 228-230.

[4] 王伟明, 吕小勇. 外海深水裸露基岩大直径嵌岩桩套筒稳桩技术[J]. 水运工程, 2007(11): 133-138.
WANG W M, LU X Y. Large-diameter offshore deepwater exposed bedrock-socketed pile stabilizing technique[J]. Port & waterway engineering, 2007(11): 133-138.

[5] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2018.
Editorial Committee of Geologcal Engineering Handbook. Geologcal engineering handbook[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.

[6] 张皓彦. 大型高桩梁板式码头嵌岩桩施工重点难点分析及对策[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(7): 248-249, 252.
ZHANG H Y. Analysis and countermeasures for key challenges in construction of socketed piles for large-scale high-pile wharf with beam-slab structure[J]. China water transport (the second half of the month), 2016, 16(7): 248-249, 252.

[7] 胥为捷. 软土地基桩基负摩阻力简化计算方法[J]. 水运工程, 2011(11): 222-226.
XU W J. Simplified calculation method for negative friction on piles in soft soil foundation[J]. Port & waterway engineering, 2011(11): 222-226.

[8] 赵晖, 刘军. 人造基床单桩稳定性的二维离散元模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3407-3411.
ZHAO H, LIU J. Two-dimensional simulation with DEM of stability of single pile in man-made bedding[J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(12): 3407-3411.

[9] 张小龙, 刘明维, 陶晶晶. 施工期码头桩基承载特性影响因素有限元分析[J]. 水运工程, 2015(6): 156-161, 202.
ZHANG X L, LIU M W, TAO J J. Finite element analysis of influential factors of pile foundation's bearing characteristics[J]. Port & waterway engineering, 2015(6): 156-161, 202.

[10] 孔友南, 陈谦, 曹凯平, 等. 中美欧日桩基承载力设计规范比较[J]. 水运工程, 2018(6): 231-236.
KONG Y N, CHEN Q, CAO K P, et al. Design code comparison of pile foundation bearing capacity in China, the United States, Europe and Japan[J]. Port & waterway engineering, 2018(6): 231-236.

[11] 王君辉, 冯建国, 张华平. 开口钢管桩桩基承载力桩端部分计算方法探讨[J]. 水运工程, 2012(1): 49-53.
WANG J H, FENG J G, ZHANG H P. Calculation method for vertical bearing capacity of open-type steel cylinder pile[J]. Port & waterway engineering, 2012(1): 49-53.

[12] HAN G, ZHANG H, WANG Z R, et al. Bearing behavior of rock socketed pile in limestone stratum embedded with a karst cavity beneath pile tip[J]. Case studies in construction materials, 2023, 18: e02203.

（本文编辑　赵娟）

水运工程