



邻近既有桥梁的海域大面积 筑岛填砂施工技术 *

祝阿龙¹, 侯禹辰¹, 罗风权¹, 卢金栋², 王浩然¹

(1. 中铁隧道集团三处有限公司, 广东深圳 518000; 2. 中铁隧道勘察设计研究院有限公司, 广东广州 511458)

摘要: 针对临近既有桥梁结构的大面积填砂施工存在的效率低、控制变形难等问题, 结合深中通道东人工岛工程, 基于数值模拟确定了桥下填筑顺序及方法, 阐述回填筑岛关键施工技术, 并通过监测数据、拱淤扫测验证施工效果。结果表明, “桩内-砂被-横桥向左/右交替”回填原则结合分砂器等装置可将既有桥梁变形控制在±5 mm 内, 降低 66.7% 的拱淤量; 堆载反压、反方向卸载的变形纠偏效果显著; 回填砂工程量须重点考虑回填料密实、含泥量、岛壁滤层流失等因素, 本工程试验段回填砂流失率为 4.21%。

关键词: 深中通道; 邻近既有桥梁; 大面积筑岛; 填砂

中图分类号: U615.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0165-06

Construction technology of large-area island construction and sand filling in sea adjacent to existing bridges

ZHU Along¹, HOU Yuchen¹, LUO Fengquan¹, LU Jindong², WANG Haoran¹

(1. China Railway Tunnel Group Three Co., Shenzhen 518000, China;

2. China Railway Tunnel Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)

Abstract: In view of the problems of low efficiency and difficult deformation control in the construction of large-area sand filling near the existing bridge structure, combined with the east artificial island project of Shenzhen-Zhongshan Link, this paper determines the sequence and method of filling under the bridge based on numerical simulation, explains the key construction techniques of backfilling island construction, and verifies the construction effect by monitoring data and arch silt sweeping. The results show that the backfilling principle of “pile-sand quilt-cross-bridge left/right alternating”, combined with sand splitter and other devices can control the deformation of the existing bridge within ±5 mm and reduce 66.7% of arch siltation. The deformation correction effect of pile back pressure and unloading in the opposite direction is significant. The backfill sand volume needs to focus on the backfill density, mud content, and the loss of the filter layer of the island wall. The backfill sand loss rate in the test section of this project is 4.21%.

Keywords: Shenzhen-Zhongshan Link; adjacent to existing bridges; large-area island construction; sand filling

随着滨海城市的基建工程开始向海域发展, 逐渐出现了使用岛域(天然岛域和人工岛)将桥梁和隧道连接起来的桥岛隧组合式越江、跨海通道^[1]。近海侧人工岛作为桥隧结合的互通枢纽,

难免会邻近既有运营结构, 再加上深厚淤泥、黏性土等软土地层物理性质差的特性, 如何在满足接近极敏感建(构)筑物控制变形高要求的基础上, 实现大面积快速筑岛填砂施工, 已成为工程

收稿日期: 2023-03-09

*基金项目: 中铁股份公司重大科研课题项目(20190703); 中铁隧道局重大科研课题项目(201824)

作者简介: 祝阿龙(1988—), 男, 工程师, 从事轨道交通工程及市政工程施工与研究。

界的一项难题^[2]。

戴国亮等^[3]研究边载作用下桩身沉降、轴力以及负摩阻力之间的规律,提出计算中性点位置的公式;杜仕朝等^[4]利用有限元模型研究软土地层的沉降对临近桥梁的影响,得出周边地基沉降会引起桩基产生负摩阻力,而软土地区次固结沉降会使桩基继续沉降;赵晓波^[5]基于数值模拟对既有桩基在不同荷载作用形式下的响应规律展开研究,得出单、双侧堆载对桩基的影响规律;李志伟等^[6]研究不对称堆载以及行车荷载对既有桩基的影响,验证了堆土反压对桩基有一定的保护作用。可以看出,目前针对以上问题的研究大多停留在理论建模上,并未涉及具体的工程实例。

本文以深中通道东人工岛工程为依托,通过数值模拟分析、关键工序技术控制、多工艺结合等措施实现海域大面积筑岛填砂的快速施工以及对既有桥梁的变形控制,旨在为类似工程提供一定的参考。

1 工程概况

深中通道工程由东向西分别为东人工岛、海中隧道、西人工岛、伶仃洋悬索桥、中山大桥以及非通航孔桥,建设条件复杂、工程规模宏大、综合技术难度非常高,是世界级的集“桥-岛-隧-水下枢纽互通”于一体的超大型跨海交通基础设施工程^[7]。其中作为水下互通枢纽的东人工岛工程位于深圳侧岸滩,且同时与机荷高速、沉管隧道以及沿江高速机场衔接,用海面积为 47.63 万 m²,人工岛陆域面积为 34.38 万 m²。

东人工岛位于既有桥梁结构下方(图 1),涉及 41 组桥墩(36#~76#)、南北纵穿 1 180 m,在填砂施工前对下穿桥梁基坑开挖范围共计 15 组桥墩采用钢管桩+内支撑体系进行保护,其余桥墩采用钢板桩+内支撑的保护措施,既有桥梁的水平、竖向变形均需要控制在 5 mm 以内。陆域以挡浪墙内边为界,一共需要回填 270 万 m³ 中粗砂,桥下填筑厚度达 7 m,场区内存在深厚淤泥(厚 8~15 m)、

黏性土(厚 0~9 m)等软土地层。

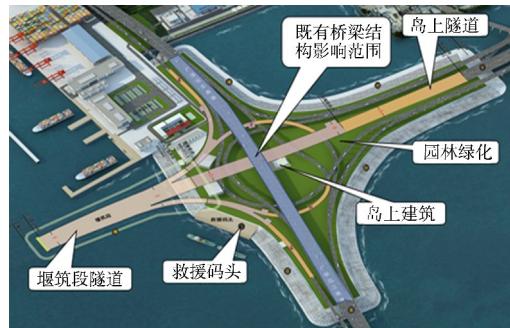


图 1 东人工岛布置

2 施工方案确定

2.1 总体施工顺序

海域淤泥地层含水量高、承载力低、易触变、易流变、压缩性高等特点会导致在回填施工时出现大面积拱淤、翻涌等现象,进而导致既有结构产生附加内力、变形沉降等问题。为了确保大面积回填施工的安全性和可控性,本工程采用多种回填工艺结合、分区分层回填的施工方式:1) 将 1#、2# 区(浅水区)分层回填至高程 2.5 m,其中 1# 区主要采用泵砂船吹填,2# 区(浅水区)采用分砂器吹填;2) 采用“7 字形”开孔管分层吹填 2# 区(深水区)至 2.5 m,将淤泥挤压至回填 3# 区;3) 采用泵砂船吹填+运砂船直卸的方式将 3# 区回填至 2.5 m;4) 待排水板施工完成后,采用陆运、直卸以及吹填的方式大面积分层回填至设计堆载高程。填砂施工区域见图 2。

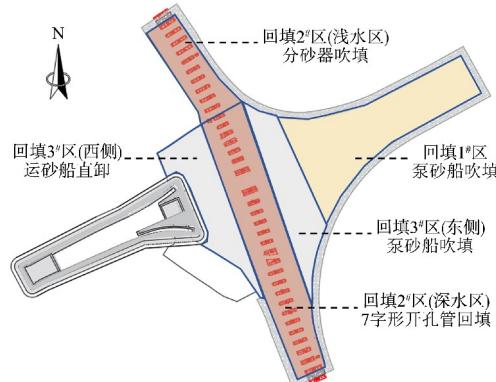


图 2 东人工岛筑岛填砂施工区域

2.2 桥下填筑方案

2.2.1 数值模型建立

选取岛上段主线隧道下穿既有桥梁区域的 54#桥墩作为研究对象, 该区域淤泥层厚 8.2 m、黏土层厚 8.5 m, 桥墩保护措施主要采用的是钢管桩+导梁+内支撑的形式。从单次填筑厚度、填筑方向 2 个方面展开研究, 本文仅考虑回填砂先填满钢管桩保护措施内部的情况, 计算工况见表 1。

表 1 计算工况

计算工况	填筑方向	左/右单次填筑厚度/m
1	顺桥向	1.0
2	横桥向	0.5
3	横桥向	1.0

有限元计算模型尺寸为 100 m(x 轴)×80 m(y 轴)×60 m(z 轴), 因本工程存在深厚淤泥等软土地层, 土体材料选用修正摩尔-库仑本构模型更为适用^[8], 其余结构类构件均选用弹性本构模型, 地层原始土体、回填砂、桥墩以及承台等均采用实体单元, 内支撑、桥桩采用梁单元, 基于刚度等效原则将钢管桩保护措施转换为平面板单元进行模拟, 在桥桩单元上添加桩界面和桩端单元实现桩-土的相互作用。桥梁上部结构转化为均布面荷载施加于桥墩顶部, 计算模型四周施加位移约束, 顶部为自由面, 按照表 1 的工况分别模拟顺、横桥向左/右交替回填至 7 m 时既有桥梁的变形情况。计算模型见图 3。

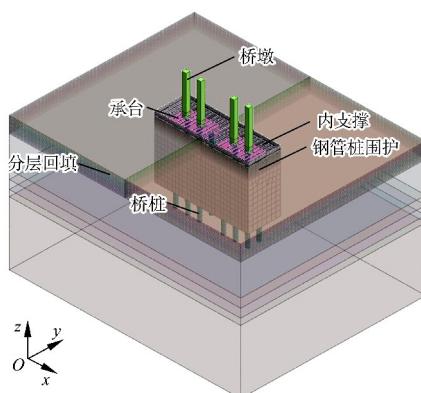


图 3 计算模型

2.2.2 计算结果分析

桥桩最大水平变形的数值模拟结果见图 4。可

以看出, 桥桩的最大水平变形随着回填施工的进行整体上呈现出波动性增长的趋势, 主要表现为最大变形增加→降低→增加的 W 形, 这说明左/右交替的填筑方式可有效地平衡非对称填筑引起的应力差, 有利于减少施工过程引起的既有桥梁变形。工况 1~3 引起的最大桥桩变形值分别为 8.5、3.7、4.7 mm, 横桥向的填筑方向对既有桥梁的影响更小, 同等填筑厚度下桥桩水平变形比顺桥向填筑降低了 44.71%。另外, 单次填筑厚度与桥梁变形波动范围值也呈现正比关系, 工况 2 与 3 最大波动范围差值为 1.1 mm。

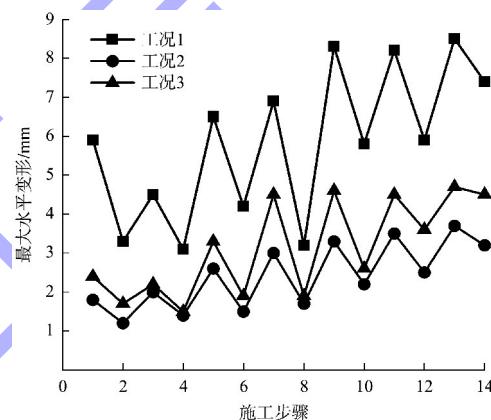


图 4 桥桩最大水平变形计算结果

2.2.3 桥下填筑方案确定

根据上述分析结果, 为降低填筑施工对既有桥梁的影响可以尽可能地降低单次填筑厚度, 避免出现非对称填筑, 但实际施工过程中由于各种因素的影响, 一般不会存在完全对称回填, 两侧因回填速度不一必然存在一定的高差, 而较小的单次填筑厚度不利于提高施工效率。因此, 经过综合考虑, 拟定的桥下填筑方案为: 1) 首先对桥梁保护桩内按单层回填厚度不大于 1 m 进行回填施工, 使其形成一定的整体以抵抗后续外侧的填土侧压力; 2) 对回填 2# 区(深水区)施工 2 层砂被覆盖在深厚淤泥层上, 形成板效应; 3) 整体沿着原海床面由低向高进行逐跨回填施工, 单跨按照横桥向左/右交替回填原则, 水下回填单层厚度不大于 1 m, 陆上回填单层厚度不大于 0.5 m, 左右回填高差不大于 1 m。

3 填砂施工

3.1 施工方法

3.1.1 泵砂船吹填

回填 1#区水下回填主要采用泵砂船+扁形出砂口。皮带运砂船将回填砂卸入泵砂船料斗中，再由泵砂船远距离泵送至回填区域，出砂口进行扁平处理，可较为均匀、分散地出砂回填，施工过程中利用水上挖机拖动泵管以控制分层厚度、调整回填区域，并设置标尺对回填厚度进行实时控制。该方式施工效率较高，但对于分层填筑厚度可控性差，适用于非敏感区域的水下回填施工。

3.1.2 分砂器吹填

回填 2#区(浅水区)主要采用自主研发的分砂器装置。由绞吸船+2 根 $\phi 300$ mm 主管道对回填砂进行长距离的输送，在接近回填区域时，每根主管道各分支为 2 根 $\phi 240$ mm 副管道对砂料进行分流，在副管道管口处安装分砂器装置，装置两侧均为宽 200 mm 的出砂口，中间为 2 个宽 100 mm 的出砂口，可有效地保证回填施工的均匀稳定性，减小堆积厚度。所有泵管底部均采用浮排架设便于转换回填工作面，单个分砂器吹填范围可达 2.5 m。该方式虽然施工速度较慢，但可较为精准控制单次填筑厚度，对既有桥梁结构周边的回填施工适用性强，施工现场见图 5。

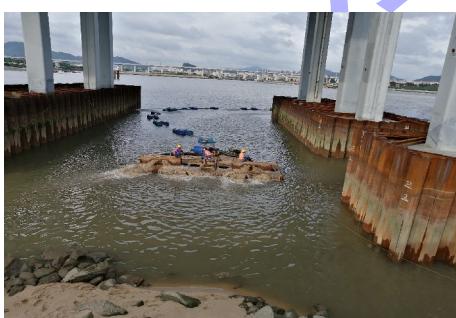


图 5 分砂器吹填

3.1.3 “7”字形开孔管吹填

回填 2#区(深水区)主要采用泵砂船+“7”字形开孔管吹填。由泵砂船将回填料泵送至桥下回填区域，吹砂管头处采用 4 根 $\phi 550$ mm 开孔管，每节管道开 4 个 $\phi 150$ mm 出砂口，孔洞喷砂距离为 3~5 m，

管头采用缆绳固定，防止左右摆动。该方式与分砂器吹填相比，虽施工效率有所提高，但分层厚度可控性较差，施工过程中需要人工经常性实时测量才能控制回填的均匀性，施工现场见图 6。



图 6 “7”字形开孔管吹填

3.1.4 运砂船直卸

运砂船直卸回填主要是利用皮带运输船运输回填材料，直接卸至回填部位，水下采用水上挖机、水陆两用挖机等设备整平，陆上采用挖机、装载机、推土机进行整平。该方法回填功效高、成本少，但需要预留航道或围堰外侧具备运输船施工位置，且水下回填时分层厚度难以控制。

3.1.5 运输车回填

利用自卸式汽车运输回填材料，同时挖掘机和推土机配合施工，在陆上采用分层逐步推进的方式回填^[9]。该方法不受水域条件限制，施工方便，在回填露出水面后即可施工，但须考虑道路条件及运输距离。施工时使用皮带船将砂直接卸载至运输车辆上，采用运输车将砂运输至回填区域进行回填，挖机及装载机进行推平。皮带船无法将砂直接抛到运输车辆时，则由皮带船将砂卸料至卸砂点，再由挖机或装载机抛至运输车辆上。

3.2 桥下回填施工

回填施工前对既有桥梁打设钢管桩保护措施，采用免共振工艺对称、分节沉桩，待封蔽好再施作导梁、内支撑等，桥下回填施工顺序及主要方法为：1) 钢管桩保护措施内部区域采用绞吸船+吹砂管回填，由中间向两边按单层厚度不大于 1 m 逐渐扩散吹填，利用人工打水砣进行实时测量分层厚度；2) 分 2 次对桥下区施工宽度 100 m、厚 (0.5 ± 0.05) m 的砂被，首先将膜袋平坦铺展开，

再利用抽砂泵将回填砂通过灌砂孔填充入膜袋中, 每个灌砂孔等时间充填以保证回填的均匀性, 完成后通过水下扫测对不足之处进行补充回填; 3) 采用分砂器装置、7字形开孔管在对应区域进行横桥向分层回填, 单层厚度和两侧高差均不大于 1 m; 4) 施工排水板进行固结沉降后, 再通过吹填、陆运、直卸多工艺结合的方式堆载至设计高程。桥下回填施工顺序见图 7。

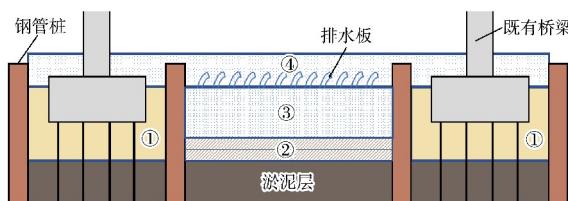
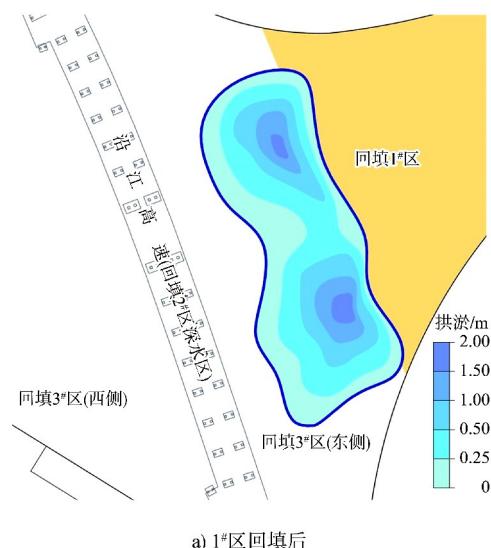


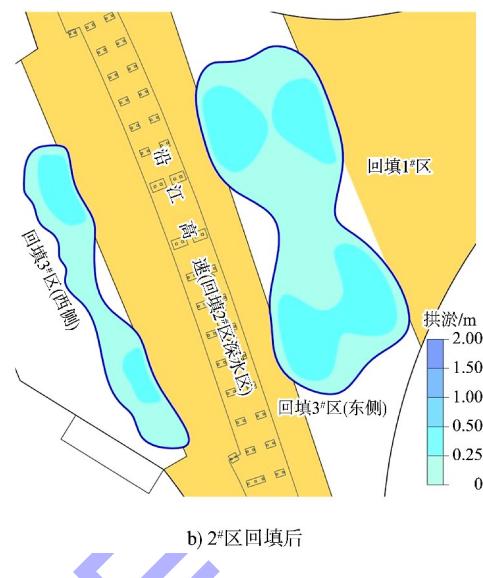
图 7 桥下回填施工

3.3 拱淤情况

回填施工后根据扫测图绘制而成的拱淤云图见图 8。由图 8a) 可看出, 1#区回填完成后在回填3#区东侧出现了明显的拱淤现象, 主要集中于靠近回填施工的方向, 大部分区域拱淤高度在 0.25~1.50 m 范围, 局部区域拱淤高度达到了 2.00 m。由图 8b) 可看出, 在桥下回填2#区施工完成后在其两侧均出现了不同程度的拱淤现象, 其中3#区东侧影响范围较大, 拱淤高度主要集中于 0.25~0.50 m 范围, 少部分区域拱淤高度达到了 1.00 m, 总体来说在桥下采取的回填施工方法使拱淤情况得到了明显改善, 较常规吹填方式拱淤量降低了 66.7%。



a) 1#区回填后

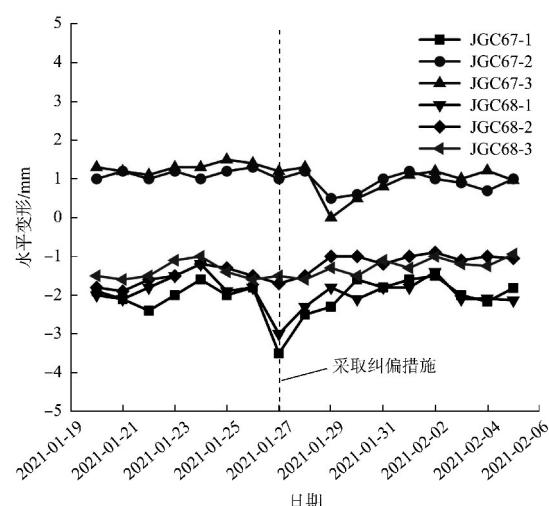


b) 2#区回填后

图 8 拱淤云图

3.4 纠偏技术

在回填施工过程中若出现桥墩水平变形值大于 3.5 mm 且有继续增大的趋势时, 须立即在其主动变形方向利用砂土进行堆载反压, 或者采取反方向卸载的方式平衡应力差以达到纠偏的效果, 反压和卸载纠偏的单层厚度均为 0.5 m, 每次采取措施后须及时观测桥墩实时变形趋势和数值。本工程在施工过程中 67#、68# 桥墩因西侧局部回填略快, 东西两侧存在较大高差, 桥墩出现了水平变形突变并有继续增大的趋势, 现场立即进行采取纠偏措施, 由于图 9 可以看出水平变形向原位有明显的恢复。



注: JGC67-1~3、JGC68-1~3 分别对应 67# 桥墩 3 根桥墩柱、68# 桥墩 3 根桥墩柱的水平变形监测点。

图 9 桥墩水平变形曲线

4 回填砂流失问题

因近海侧岸一般存在深厚欠固结软土地层, 海中陆域形成过程中影响回填工程量的主要包括先期吹填原滩面与成陆高程之间的方量差、后期原状基面处理中固结沉降产生的高差^[10]。另外, 根据本工程的实际施工情况, 还包括回填砂自密实压缩、振冲过程回填砂密实沉降以及回填砂流失等, 总结出的回填砂工程量计算公式为:

$$V = V_s + \sum_{i=1}^n S_i H_i + V_m + V_l \quad (1)$$

式中: V 为实际回填总量, m^3 ; V_s 为须补充的原滩面与成陆高程之间设计方量差, m^3 ; S_i 为网格 i 区域的平面面积, m^2 ; H_i 为网格 i 区域的沉降厚度, m ; V_m 为回填砂密实沉降总量, m^3 ; V_l 为回填砂流失量, m^3 。

对回填 1# 区局部区域数据进行分析, 根据原泥面数据、岛壁结构内侧设计等情况采用网格法计算出须补充的回填方量差 $V_s = 25.51 \text{ 万 m}^3$; 根据回填前淤泥面高程、沉降后补勘数据以及岛壁内侧开挖断面得出固结沉降断面, 然后采用网格法计算出 $\sum_{i=1}^n S_i H_i = 9.83 \text{ 万 m}^3$; 基于室内模拟试验得到密实计算系数为 0.21, 则可推算出因回填砂密实沉降总量 $V_m = 7.42 \text{ 万 m}^3$; 而该区域最终实际回填总量 $V = 44.64 \text{ 万 m}^3$ 。将上述已知数据代入式(1)可得回填砂流失量为 1.88 万 m^3 , 流失占比达 4.21%。认为主要是回填料中含泥部分遇水流失、施工过程中的损耗所造成的, 另外在靠近岛壁结构的回填不宜采用细砂, 可能会导致细砂料透过滤层流失至岛壁外部, 在岛壁未合龙处的回填施工也容易出现回填砂流失加剧的现象。因此, 在前期筹备阶段应充分考虑以上各项影响因素, 在保证回填施工正常进行的基础上最大程度地降低流失率。

5 监测数据分析

54# 桥墩在砂被施工、回填砂施工期间变形数值最大时的曲线见图 10(东北向为“+”, 西南向为“-”; 向上为“+”, 向下为“-”)。可以看出, 砂

被施工引起的桥墩水平变形主要在 $0.2 \sim 1.7 \text{ mm}$ 范围波动, 2 个方向的变形数值最大相差 88.54%, 沉降值最大为 1.5 mm ; 回填施工期间桥墩东西向变形、南北向变形、沉降波动范围分别为 $0.8 \sim 2.8 \text{ mm}$ 、 $-3.1 \sim -1.8 \text{ mm}$ 、 $1.9 \sim -0.9 \text{ mm}$, 2 个方向的变形数值最大相差 61.29%, 可以看出整个施工过程均满足 $\pm 5 \text{ mm}$ 的控制变形要求。

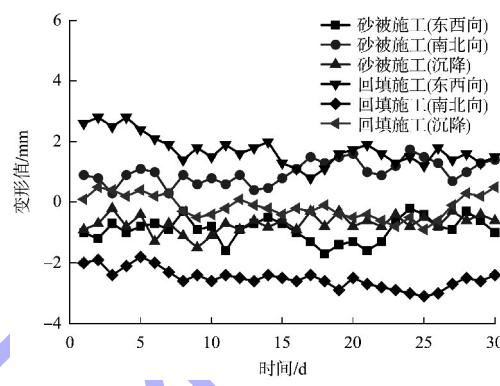


图 10 桥墩变形曲线

6 结论

1) 基于数值模拟确定的“桩内-砂被-横桥向左/右交替”回填原则平衡应力差效果显著, 结合分砂器等装置可将既有桥梁结构变形控制在 $\pm 5 \text{ mm}$ 以内, 拱淤量降低 66.7%, 回填过程中须严格控制单层厚度且高差不宜大于 1 m 。在桥下回填原则的基础上, 通过分区控制、多工艺结合的施工方式可实现海域邻近既有桥梁结构的大面积快速筑岛。

2) 堆载反压、反方向卸载对既有桥梁结构的变形纠偏效果显著, 后续类似工程应做好实时监测并及时采取纠偏措施, 保证回填施工过程中既有运营结构安全可控。

3) 回填砂工程量除常规影响因素外, 还应重点考虑回填料密实、含泥量、岛壁滤层流失等因素, 本工程试验段的回填砂流失率为 4.21%。

参考文献:

- [1] 朱伟, 王璐, 钱勇进, 等. 水下隧道中人工岛建设现状及主要问题[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 72-83, 120.

(下转第 197 页)