



深中通道复杂基槽与航道搭接段 开挖质量三维可视化方法

马定强, 张 鹏, 黎 江

(中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510320)

摘要: 深中通道沉管隧道基槽与 3 条配套航道的搭接段设计结构复杂, 断面法分析基槽航道搭接段的开挖质量, 存在断面分析整体性与连续性差、分析过程复杂、三维可视化效果差等问题。针对上述问题, 建立三维基槽和航道设计界面, 二次开发定制地形塌陷工具、三维色差图工具、断面分析工具、超欠挖量计算工具。利用基槽与航道三维设计界面、工具, 建立基槽航道搭接段三维模型, 实现了三维可视化分析基槽航道搭接段的开挖质量, 包括利用三维色块与超欠挖数值分析超挖深度与欠挖厚度、任一纵横断面分析开挖质量、快速计算任一局部区域的超欠挖工程量。研究表明: 模型与断面法计算的超欠挖工程量相差在 $\pm 1\%$ 以内, 满足工程使用要求, 具有计算精度高与速度快、断面分析整体性与连续性好、三维可视化效果好等优点, 特别适用于基槽与航道或航道与航道之间存在多重叠加的复杂搭接段的施工质量分析。

关键词: 基槽与航道; 搭接段; 开挖质量; 三维可视化

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0183-05

Three-dimensional visualization method for excavation quality of complex lap section between foundation trench and channel in Shenzhong Link

MA Dingqiang, ZHANG Peng, LI Jiang

(CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510320, China)

Abstract: The design structure of the lap section between Shenzhong Link immersed tube tunnel foundation trench and 3 supporting channels is complicated. There are some problems such as poor integrity and continuity of section analysis, complicated analysis process and poor three-dimensional visualization effect in analyzing the excavation quality of base channel lap section by section method. To solve the above problems, three-dimensional foundation trench and channel design interface are established, and terrain collapse tool, three-dimensional chromatic aberration diagram tool, section analysis tool, overcut and undercut calculation tool are developed and customized for the second time. The three-dimensional model of base channel lap section is established by using three-dimensional design interface of foundation trench and channels and tools, and the quantitative three-dimensional visualization analysis of the excavation quality of base channel lap section is realized, including overall plane analysis of the overcut depth and undercut thickness by using three-dimension color block and numerical value of overcut and undercut, any vertical and horizontal section analysis of excavation quality, fast calculation of overcut and undercut engineering quantity in any local area. The results show that the overcut and undercut engineering quantity difference between the model and the section method is within $\pm 1\%$, which meets the requirements of engineering application, and has the advantages of good integrity and continuity of the section analysis, fast calculation speed and high precision, and good three-dimensional visualization effect. It is especially suitable for the construction quality analysis of complex lap section with multiple superposition between the foundation trench and channel or the channel and channel.

Keywords: foundation trench and channel; lap section; excavation quality; three-dimensional visualization

收稿日期: 2022-12-10

作者简介: 马定强 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港航、水利工程研究。

深中通道沉管隧道的基础施工内容包括基槽开挖和桂山岛沉管浮运航道、龙穴岛沉管浮运航道、机场支航道改线等 3 条配套航道开挖，疏浚量 3 594 万 m³，为目前世界上最大规模的沉管隧道疏浚工程。深中通道海底沉管隧道基槽及配套航道与道路等工程类似，均为长线性工程，利用断面法分析、控制基槽与配套航道搭接段的开挖质量，常出现基槽与航道必须单独分析、断面分析连续性与整体性差、分析过程复杂等问题。

目前国内外关于海底基槽与航道搭接段的研究较少，类似研究主要为新旧公路搭接段、公路与桥隧搭接段的研究或应用于航道结构设计与质量分析的新方法。王辉辉^[1]依托广元—陕川界高速公路新旧路堤搭接工程，研究了湿度场等不同因素对新旧路堤差异沉降的影响，指出路堤内部湿度变化对路堤变形影响大，强夯法比碾压法处理低路堤沉降效果更好，加铺土工格室比土工格栅能更有效减小高路堤的差异沉降，路堤内部特别是路肩处变形受湿度变化的影响较大。孙广臣等^[2]分析了桥隧搭接段的多源损伤机理，指出搭接段长期的汽车荷载及冲击作用易使桥梁、隧道的关键部位产生损伤，影响桥梁结构、隧道衬砌、桩基础的耐久以及洞口围岩的稳定。王伟等^[3]利用 BIM 技术实现了内河航道疏浚和护岸工程的参数化设计和可视化展示，二次开发定制横断面、标签、模板文件等，提出适用于内河航道工程三维正向设计和可视化演示的技术方法。董思远等^[4]依托山东某内河航道项目，应用 BIM 技术解决了二维设计中设计意图难以直观表达、出图量大且易出错、方案变更导致的重复工作等问题，实现航道三维可视化、协同化、参数化设计，通过 BIM 模型进行信息传递，实现设计与施工的无缝衔接。

疏浚工程常用断面法、方格网法、几何面域法计算开挖土方量^[5-7]，分析开挖质量，均为二维近似算法。断面法适用于道路、河堤、航道疏浚、基槽开挖等狭长带状线性工程的土方量计算^[8]，将场地划分为若干平行的横断面^[9]，假定相邻断面之间均匀变化，计算每相邻断面间土方量，各断面间土方量之和为总土方量，本质上是一种简

化模型。断面工程量按下式计算^[10]：

$$V = \frac{A_0 + A_1}{2} L_1 + \frac{A_0 + A_1}{2} L_1 + \cdots + \frac{A_{n-1} + A_n}{2} L_n \quad (1)$$

式中：V 为开挖区域断面工程量，m³；A₀、A₁、…、A_n 分别为各计算断面上的疏浚面积，m²；L₀、L₁、…、L_n 分别为各计算断面间的间距，m。断面法可单独全面地分析基槽、航道的开挖质量，步骤清晰直观，中间过程资料完整，但分析基槽航道搭接段开挖质量存在以下不足：1) 断面分析整体性差。整体分析基槽航道搭接段的开挖质量，需按“重合取低”原则重新绘制测线，对于同一平面范围内基槽与航道均存在多重搭接的复杂搭接段，计算过程复杂，工作量大；2) 断面分析连续性差。断面法生成的搭接段横断面图只能分析横断面测线对应桩号处的开挖质量，即上述公式中 A₀、A₁、…、A_n 的横断面开挖质量，若要分析 A₀、A₁ 之间某一横断面的开挖质量，需重新绘制横断面测线，再分析其开挖质量；3) 二维分析方法三维可视化效果差，分析过程与结果观感质量欠佳。

本文以深中通道沉管隧道基槽与配套航道搭接段的开挖质量分析为工程背景，二次开发定制地形塌陷工具、三维色差图工具、断面分析工具、超欠挖量计算工具，利用基槽与航道设计施工图、水深测量数据及工具建立基槽航道搭接段三维模型，实现三维可视化分析搭接段的开挖质量，包括超欠挖的桩号与高程分布区间、工程量、三维分布产状及利用任一纵横断面分析开挖质量、快速出图等。具有计算精度高与速度快、断面分析整体性连续性好、三维可视化效果好等优点，特别适用于基槽与航道或航道与航道之间等存在多重搭接的复杂搭接段的开挖质量分析。

1 研究区域

深中通道沉管隧道基槽全长 5 035 m，最大宽度 389 m，最大开挖深度 -38 m，由 32 个管节组成，包含 65 个参数各异的设计横断面。基槽纵横设计断面复杂，横向设置 3 级边坡、变坡线折角多；纵向设置 25 个缓坡、16 个变坡组合。

基槽附属工程包括桂山岛沉管浮运航道、龙

穴岛沉管浮运航道、机场支航道改线等3条配套航道开挖。3条配套航道均互相搭接(图1)。

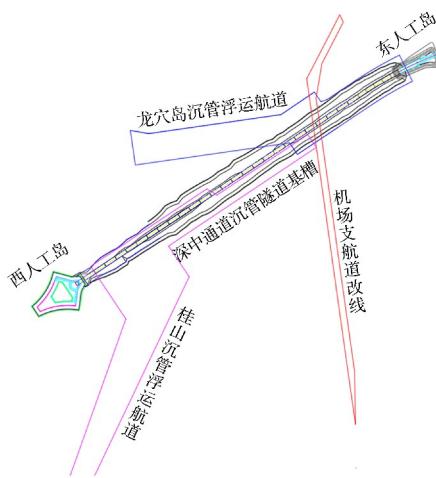


图1 基槽与3条配套航道总平面

基槽在E₁₈~E₃₂管节与龙穴岛沉管浮运航道搭接(图2), 以基槽与龙穴岛沉管浮运航道的搭接段作为研究区域, 论述基槽航道搭接段开挖质量三维可视化方法。

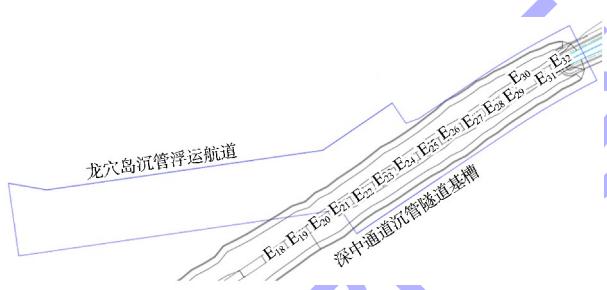


图2 基槽与龙穴岛沉管浮运航道搭接

2 研究路线

利用基槽与航道的设计施工图建立三维基槽、航道设计界面。基于基槽与航道三维设计界面, 利用地形塌陷工具, 按“重合取低”原则建立基槽航道搭接段的三维设计界面, 导入开挖形成的海底地形面, 建立基槽航道搭接段三维模型。

基于基槽与航道搭接段模型, 利用三维色差图工具, 生成贴附于开挖形成的海底地形面之上的三维色块与超欠挖数值, 用于定量分析搭接段任一区域的超挖深度与欠挖厚度; 利用断面分析工具实现任一纵横断面分析搭接段的断面开挖质量; 利用超欠挖量计算工具快速计算输出搭接段任一局部区域的超欠挖工程量。从而实现三维可视化分析基槽与航道搭接段的开挖质量(图3)。

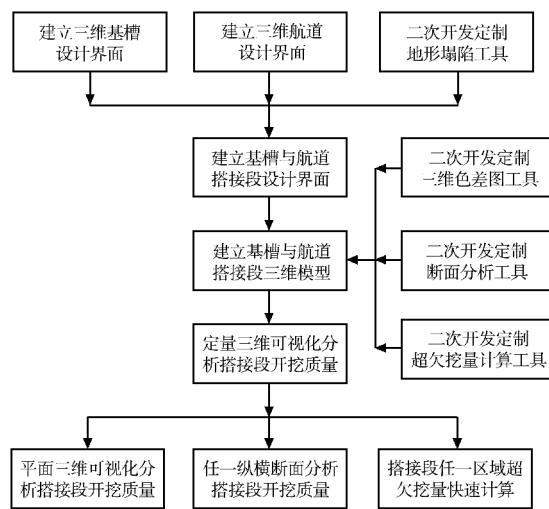
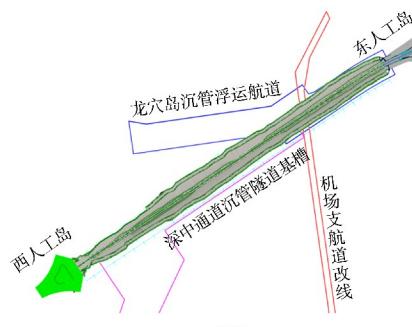


图3 研究路线

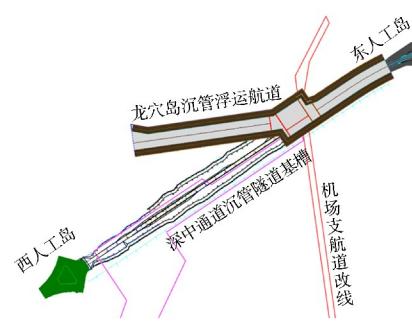
3 建立基槽与航道搭接段三维模型

3.1 建立基槽与航道三维设计界面

在每个变坡点数量相同的连续基槽区间绘制1个参数化横断面模板, 共19个模板, 将其导入三维基槽中心线, 将各参数化横断面模板沿基槽中心线拉伸, 设定各变坡点的坡比, 利用基槽总平面施工图的放坡线调整各边坡点的空间位置, 建立基槽三维设计界面, 见图4a)。同样方法建立龙穴岛沉管浮运航道的三维设计界面, 见图4b)。



a) 基槽



b) 龙穴岛沉管浮运航道

图4 基槽与航道三维设计界面

3.2 建立基槽与航道搭接段三维设计界面

导入基槽与龙穴岛沉管浮运航道的三维设计界面。利用地形塌陷工具，按“重合取低”原则，对基槽与航道搭接段的设计界面重合区域，删除高程大的部分，保留高程小的部分(图 5)，生成搭接段三维设计界面，见图 6a)，导入海底地形面，建立基槽与航道搭接段三维模型，见图 6b)。

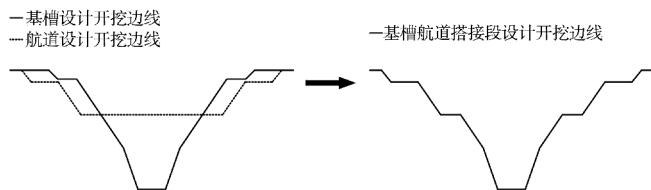


图 5 “重合取低”建立搭接段开挖设计边线

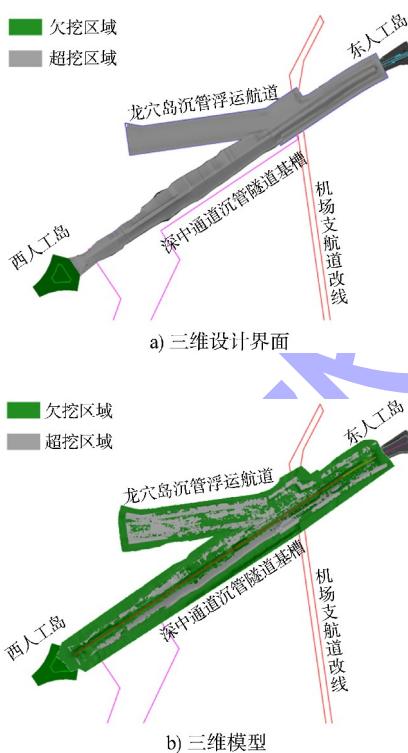


图 6 基槽与航道搭接段三维设计界面与模型

4 三维可视化分析搭接段开挖质量

基槽与航道搭接段模型无法获得局部区域的具体超挖深度与欠挖厚度。利用三维色差图工具，

将超挖深度与欠挖厚度划分为 22 个区间，每个区间赋予不同颜色，生成贴附于海底地形面之上的三维色块，标注超挖深度或超欠厚度数值，实现利用不同颜色的三维色块与超欠挖数值分析搭接段任一局部区域的超挖深度与欠挖厚度(图 7)。

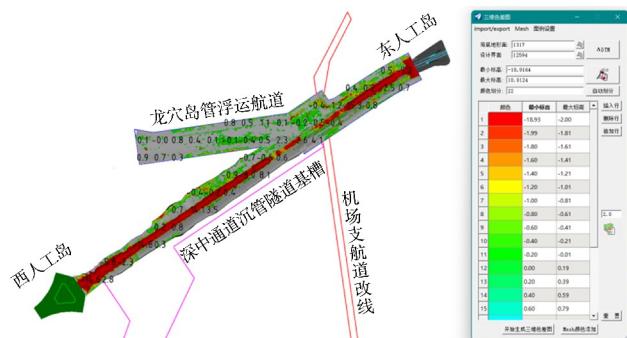


图 7 三维色块分析搭接段开挖质量

利用断面分析工具，输入平面断面分析中心线，实现任一纵横断面分析基槽航道搭接段的开挖质量(图 8)。利用超欠挖量计算工具，输入局部计算区域的边界条件，则可输出基槽航道搭接段任一局部区域的超欠挖工程量(图 9)。

利用模型按管节计算搭接区域 $E_{18} \sim E_{32}$ 管节的超欠挖工程量 a ，利用断面法按管节计算搭接区域 $E_{18} \sim E_{32}$ 管节的超欠挖工程量 b 。则模型计算的超欠挖偏差 η 为：

$$\eta = \frac{a-b}{b} \quad (2)$$

对比两种方法的结算结果，偏差均在 0.01 以内(图 10)，模型输出的结果满足工程使用要求。

同样方法，建立基槽与桂山岛沉管浮运航道、龙穴岛沉管浮运航道、机场支航道改线等 3 条配套航道搭接段的三维模型，实现三维可视化分析基槽与 3 条配套航道的搭接段的开挖质量(图 11)。

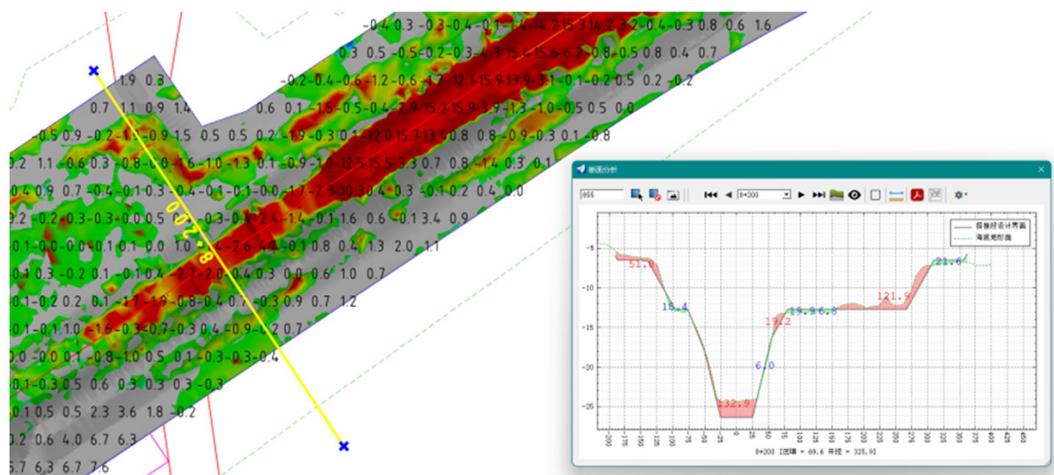


图 8 横断面分析搭接段桩号 8+200.00 的开挖质量

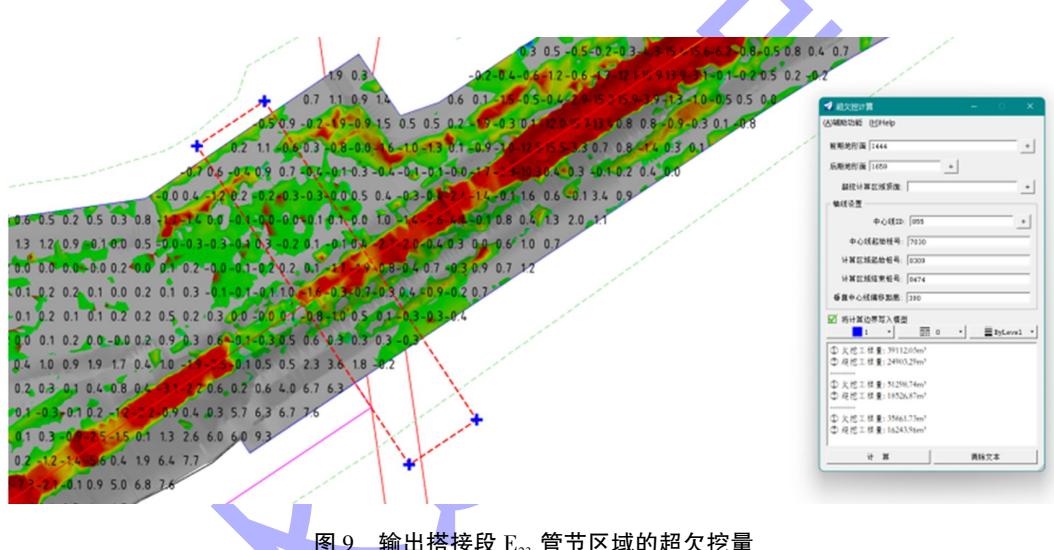
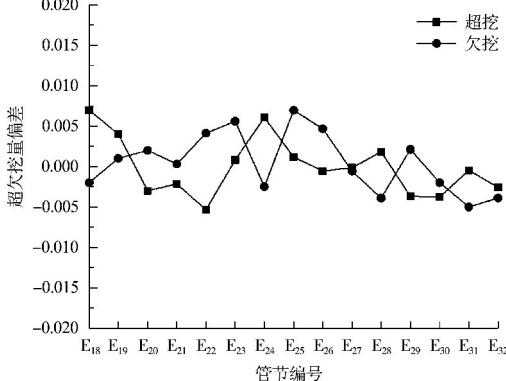
图 9 输出搭接段 E₂₃ 管节区域的超欠挖量

图 10 模型与断面法分析结果对比

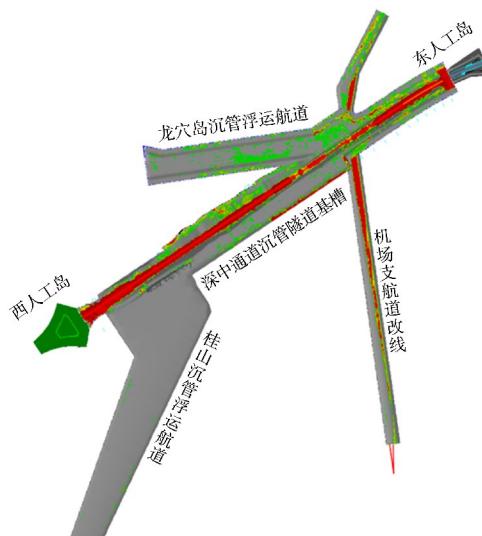


图 11 基槽与 3 条配套航道搭接段的三维模型