

# 外海大回淤沉管隧道沉降影响因素敏感性分析

岳夏冰<sup>1</sup>, 吴定意<sup>1</sup>, 王奕丁<sup>1</sup>, 江黎<sup>2</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安公路研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 深海沉管隧道的地基沉降受到多种因素影响,地基沉降过大会直接影响沉管隧道的安全,因此对影响地基沉降的各类施工偏差进行敏感性分析是十分有必要的。以港珠澳沉管隧道地基为研究对象,采用离心模型试验和有限元软件模拟的方法,揭示了天然地基回填再压缩量变化及地基刚度变化的特点,确定了影响港珠澳沉管隧道天然地基纵向沉降的单因素敏感性大小。结果表明:对沉管隧道沉降影响最大的施工偏差因素为基槽超挖与欠挖偏差,影响最小的因素为基槽单边宽度偏差;有基槽超挖与欠挖偏差存在时,组合工况对地基刚度的影响程度达到近50%,且当基槽超挖与欠挖偏差达到极限值时,该因素无论与其他何种敏感因素组合,对沉管隧道沉降特性的影响程度至少为20%;通过对敏感性因素的合理组合,发现纵向区段内最不利工况的分布形式是断面两侧取恒定极值,即非线性变化分布。研究成果可为其他类似工程提供借鉴和参考。

**关键词:** 外海沉管隧道; 离心模型试验; 有限元计算; 地基沉降; 沉降影响因素; 敏感性分析

中图分类号: U459.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)06-0164-09

## Sensitivity analysis of settlement influencing factors of offshore large siltation immersed tunnel

YUE Xiabing<sup>1</sup>, WU Dingyi<sup>1</sup>, WANG Yiding<sup>1</sup>, JIANG Li<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Highway Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** There are multiple factors influencing the foundation settlement of deep-sea immersed tunnels, and excessive settlement will directly affect the safety of the tunnel. Therefore, it is necessary to analyze the sensitivity of various construction deviations affecting the foundation settlement. Taking the foundation of the Hong Kong - Zhuhai - Macao immersed tunnel as the research object, the centrifugal model test supplemented by the finite element verification method was used to reveal the variation characteristics of the backfill recompression amount and the foundation stiffness, according to which the single factor sensitivity of the longitudinal settlement of the natural foundation of the Hong Kong - Zhuhai - Macao immersed tunnel was determined. The results show that the most influential factor of the settlement of immersed tunnel is the overbreak and underbreak deviation of foundation trench, and the least influential factor is the unilateral width deviation of foundation trench. When the overbreak and underbreak excavation deviation of foundation trench is present, its influencing degree on the foundation stiffness under the combined working condition can reach 50%, and when it reaches the limit value, its influencing degree on the settlement characteristics of the immersed tunnel is no less than 20%, no matter what other sensitive factors are combined. Based on the analyses of multiple combinations of sensitivity factors, it is found that the most unfavorable working condition distribution in the longitudinal section is the constant extreme value on both sides of the section, i. e., the nonlinear variation distribution. The research results can provide some reference for other similar projects.

收稿日期:2022-10-12; 修回日期:2023-03-01

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-379);道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室项目(石家庄铁道大学)(STKF201905);中央高校基本科研业务费项目(自然科学类)(300102210115)

作者简介:岳夏冰(1987—),女,河南安阳人,博士,硕士生导师,研究方向为特殊土力学性质及工程应用、沉管隧道地基沉降等。

通讯作者:吴定意(1999—),女,四川攀枝花人,硕士研究生,研究方向为冻土水-热-力耦合分析。

**Key words:** offshore immersed tunnel; centrifugal model test; finite element calculation; foundation settlement; settlement influencing factor; sensitivity analysis

## 1 研究背景

随着水下施工技术的发展,沉管隧道已经成为跨江、跨海工程的一种重要选择。对于长大深海回淤隧道来说,由于其地基所处的环境复杂,土层差异变化较大,隧道和地基土极易产生不均匀沉降变形<sup>[1]</sup>,造成隧道漏水等病害。而在沉管隧道的施工过程中,地基会经历卸载、回弹、再压缩过程<sup>[2-4]</sup>,这也是地基产生不均匀沉降的主要原因,所以对在不同因素影响下的回弹再压缩特性及地基刚度变化特点进行研究,准确评估沉管隧道基底的沉降情况,对于深海沉管隧道来说具有重要意义。

目前岩土工程界对于沉管隧道的沉降问题,主要关注沉管隧道沉降控制标准<sup>[5-6]</sup>、沉管隧道沉降的组成和机理以及结构长期性能演化规律<sup>[7-11]</sup>、沉管隧道在反复清淤回淤作用下的沉降计算<sup>[12-16]</sup>、潮汐荷载作用下沉管隧道的竖向位移<sup>[17-18]</sup>等方面,但在影响地基沉降和刚度变化的施工偏差的敏感性方面尚无具体研究。而在实际工程中,充分掌握不同施工偏差对地基沉降特性的定性和定量影响,有助于在施工中规避风险,提高沉管隧道的安全性。

离心模型试验由于能再现土的应力及应变状态<sup>[19-21]</sup>,故被广泛应用于岩土工程各领域的研究。有限元计算方法能更进一步验证离心模型试验的准确性,同时对离心模型试验不能模拟的工况进行补充分析,从而进一步揭示施工偏差等外界不确定因素对沉降的影响敏感性大小。本文依托港珠澳沉管隧道工程,在离心模型试验的基础上,使用 ADINA (automatic dynamic incremental nonlinear analysis) 有限元计算软件,充分考虑各种施工偏差对地基沉降的定量影响,然后根据敏感性大小选取关键敏感因素进行工况组合,并选取特殊区段进行最不利工况组合分析,得到对地基沉降影响最大的组合工况,便于在实际施工中规避风险。

## 2 施工偏差纵向沉降分析

### 2.1 模型建立

根据《港珠澳大桥沉管隧道施工及质量验收标准》规定的施工偏差考虑方法,天然地基段的主要施工偏差包括:基槽超挖与欠挖偏差、块石层和碎石层铺设厚度及模量差异、回淤厚度偏差等方面。根据各个项目评价标准方案,采用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 概率有限

元计算方法,分析各影响因素敏感性的大小。

在有限元计算中,整个模型为连续介质模型。地基土层选用 Drucker - Prager 本构模型来模拟,块石和碎石采用弹塑性材料,根据地基的实际情况,建立二维弹塑性计算模型,在模型左、右两侧和底部分别施加水平和竖直向上的约束。计算模型的网格划分如图 1 所示,图中不同颜色表示土的性质不同。

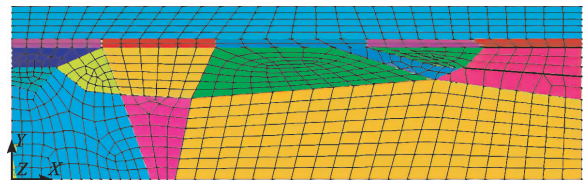


图 1 地基横断面有限元计算模型网格划分图

所选特殊断面地基土层分布由上到下依次为淤泥、黏土、粉质黏土、粗粒砂、粗砾砂,各土层参数如表 1 所示。

表 1 不同土层的力学参数

土层名称	厚度/ m	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	浮密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )
淤泥	14.65	0.43	6	2	0.68
黏土	8.20	0.40	26	21	0.84
粉质黏土	15.50	0.35	22	22	0.94
粗粒砂	23.60	0.30	22	32	1.10
粗砾砂	2.00	0.30	16	33	1.18

### 2.2 单因素敏感性分析

敏感度是沉降分析的重要参数之一,对影响沉降的各个因素的敏感性进行分析,有助于为施工过程提供控制标准,提高整体施工质量。各施工偏差对纵向沉降特性影响的分析工况具体见表 2。

根据非确定性有限元 Spearman 秩相关系数进行灵敏度分析,取显著性水平为 0.025,得到施工偏差单因素敏感性条形图,如图 2 所示。

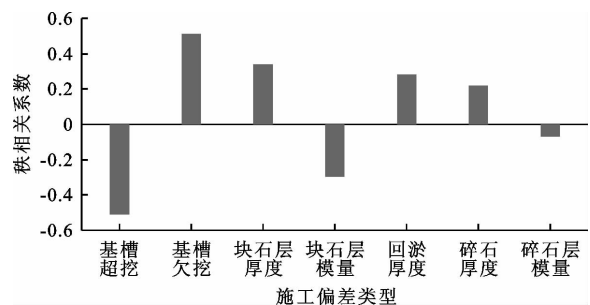


图 2 影响地基沉降的施工偏差单因素敏感性分析

图2中若条形图位于横坐标轴以上,则表明地基沉降受该因素的正向影响,反之,则为负向影响。其中基槽超挖偏差、块石层模量及碎石层模量偏差对地基沉降产生负向影响,其余因素均对地基沉降产生正向影响。条形图的秩相关系数越大,表明该因素对地基沉降的影响的灵敏度越大,图2中从左

至右依次为敏感度由大到小的影响因素,敏感性最大的因素是基槽超挖与欠挖偏差,敏感性最小的因素是碎石层模量偏差。

根据上述单因素的敏感性大小,对各个影响因素分别设置试验工况,进行离心模型试验以及有限元模拟的综合分析,施工偏差具体计算工况见表3。

表2 施工偏差单因素分析工况

序号	施工偏差计算工况	序号	施工偏差计算工况
1	基槽底标高由超挖85 cm至欠挖60 cm	4	碎石整平后回淤厚度由0增加至30 cm
2	块石层顶面标高由高出30 cm至降低30 cm	5	块石层模量由减小20% (96 MPa)至增大20% (144 MPa)
3	碎石层顶面标高由高出4 cm至降低4 cm	6	碎石层模量由减20%至增20%

表3 各施工偏差的横断面计算工况

偏差类型	计算工况	试验与计算方案
基槽宽度偏差	工况1:基槽宽度无偏差;工况2:基槽宽度右边增宽2.5 m;工况3:基槽宽度两边均增宽2.5 m	离心模型试验和有限元计算
回淤质厚度偏差	工况1:无回淤;工况2:块石底层回淤30 cm,块石层模量折减到原来的87%;工况3:块石底层回淤30 cm,块石层模量折减到原来的77%;工况4:在工况3的基础上,碎石层顶部回淤8 cm,碎石层模量折减到原来的94%	离心模型试验
块石层模量偏差	工况1:块石层模量为120 MPa;工况2:块石层模量为96 MPa;工况3:块石层模量为144 MPa;工况4:块石层轴线左侧模量为96 MPa,右侧模量为144 MPa	离心模型试验
基槽底标高偏差	工况1:基槽底标高无偏差;工况2:均匀超挖85 cm;工况3:均匀超挖60 cm;工况4:均匀欠挖40 cm;工况5:均匀欠挖65 cm	有限元计算
块石层顶面标高偏差	工况1:块石层施工无偏差;工况2:块石层顶面标高为+0.3 m;工况3:块石层顶面标高为-0.3 m;工况4:块石层轴线左侧标高为+0.3 m,右侧标高为-0.3 m	有限元计算
碎石层施工偏差	工况1:碎石层标高无偏差;工况2:碎石层顶部标高为+0.04 m;工况3:碎石层顶部标高为-0.04 m;工况4:碎石层轴线左侧标高为+0.04 m,右侧标高为-0.04 m	有限元计算

### 3 离心模型试验

离心模型试验能模拟土体的体积力,因而能把原型建筑物的变形、应力及破坏过程在模型中直观地呈现出来,从而为设计方案的选择提供判断依据。为了揭示各个敏感因素对沉管隧道天然地基开挖的回填再压缩变形及地基刚度的影响,选取典型断面进行离心模型试验。

#### 3.1 试验方案

施工偏差对于沉管隧道的地基沉降会产生影响,利用离心模型试验对基槽单边宽度偏差、回淤质厚度偏差以及块石层的模量偏差这3类因素进行地基沉降模拟分析。

试验采用最大容量为60 g·t的TLJ-3型土工离心机,试验模型箱尺寸为70 cm×40 cm×50 cm(长×宽×高), $n$ 取100,即离心加速度为100g。试

验过程主要包含分层装置土样、吊装模型箱、固定模型箱、放置沉管、直剪试验几部分,详细的试验流程如图 3 所示。

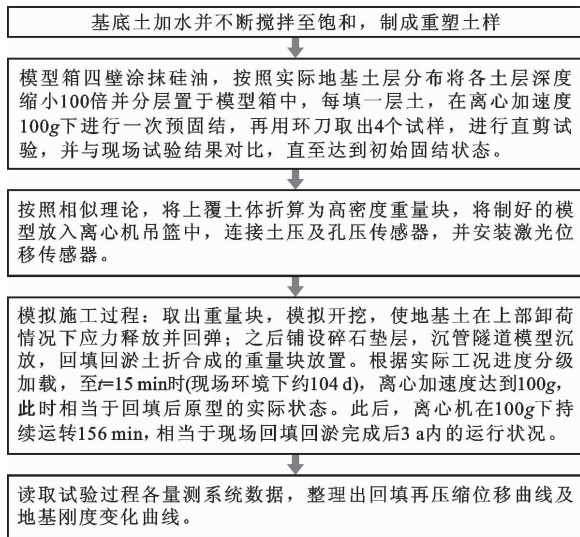


图 3 离心模型试验流程图

为监测试验过程地基土应力、应变的变化以及基底竖向回填再压缩量等指标,将应变片布置在沉管两侧和底部,同时将激光位移传感器安装在模型箱顶部,将土压力及孔隙水压力盒布置在地基土中,所有的试验数据由 DDS(direct digital synthesizer)数

据采集系统自动完成。根据试验测得的数据,通过公式换算得到地基刚度的分布曲线。

### 3.2 试验结果与分析

3.2.1 基槽宽度偏差 图 4 是根据离心模型试验数据进行刚度换算之后,得到的基槽宽度偏差在 3 种不同工况下的回填再压缩基底变形曲线和地基刚度分布曲线。

由图 4(a)可知,3 种不同工况下基底回弹再压缩变形曲线呈马鞍形分布,由于开挖面积越大,回填荷载越大,其再压缩量也会增大,故两边均增宽 2.5 m 的工况 3 产生的再压缩量最大,工况 2 次之,工况 1 最小,工况 2、3 所产生的再压缩变形量分别比工况 1 偏大约 5.4%、8.7%。由图 4(b)可以看出,3 种工况下地基刚度分布曲线变化规律相似且差值较小。随着开挖宽度的增加,开挖面积增大,回填量也随之增加,所产生的应力和再压缩位移也相应增大,但是由于应力的增幅比位移的增幅小,故工况 1、2、3 对应的地基刚度依次减小,工况 3 的地基刚度比工况 1 减小约 3.3%。

3.2.2 回淤质厚度偏差 图 5 是根据离心模型试验数据进行刚度换算之后,得到的回淤质厚度偏差在 4 种不同工况下的回填再压缩基底变形曲线和地基刚度分布曲线。

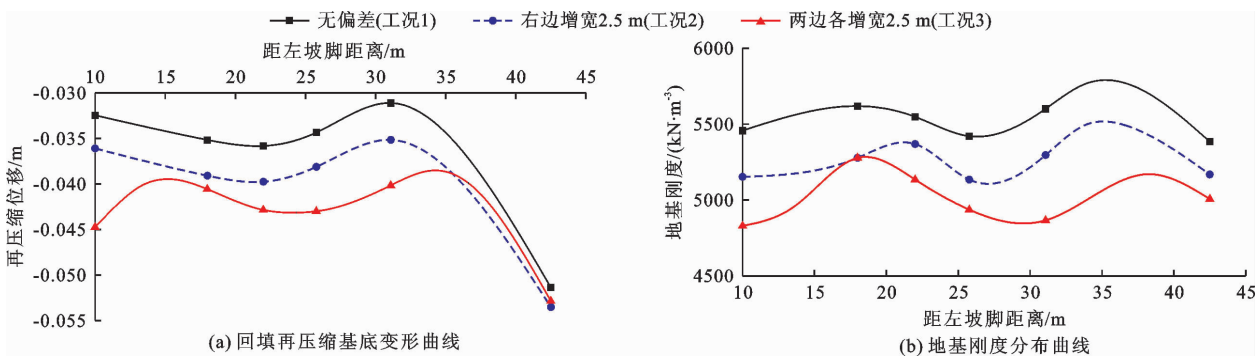


图 4 基槽宽度偏差 3 种工况下回填再压缩基底变形与地基刚度分布曲线

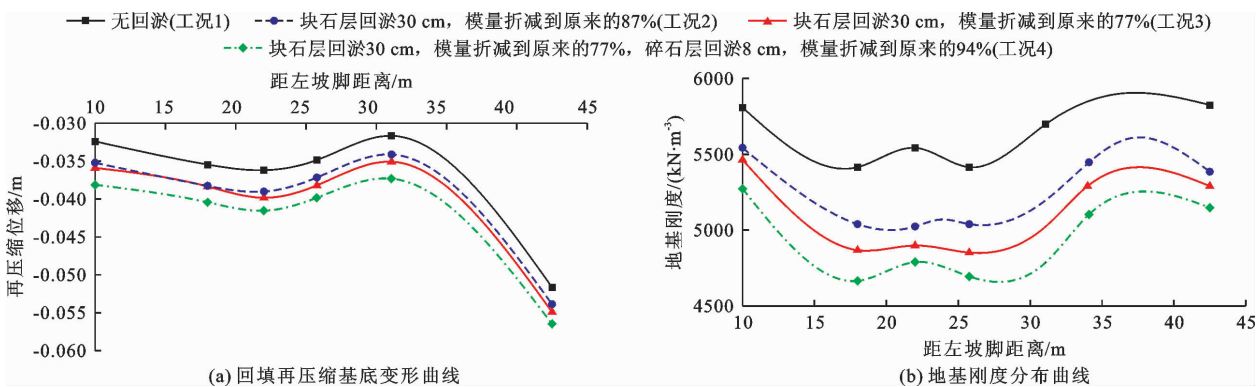


图 5 回淤质厚度偏差 4 种工况下回填再压缩基底变形与地基刚度分布曲线



由图5(a)可以看出,4种工况下的回填再压缩基底变形曲线呈马鞍形分布,回淤层的存在以及模量的折减,会增加基底的再压缩变形,故工况1~4再压缩量逐渐增大,其中,工况4下的再压缩量比无回淤工况增加约13.3%。由图5(b)可以看出,从工况1至工况4,地基刚度逐渐减小,工况4下的地基刚度比工况1减小了约11.5%。这是由于地基刚度与所用材料的种类(即材料的模量)有关,模量

是材料的微观性质,刚度是物质的宏观性质。模量折减越大,在外力的作用下其变形就越大,相应的地基刚度就越小。

3.2.3 块石层模量偏差 图6是在不同块石层模量工况1~4的情况下进行室内离心模型试验后,根据试验数据进行刚度换算得到的块石层模量偏差在4种不同工况下回填再压缩基底变形曲线和地基刚度分布曲线。

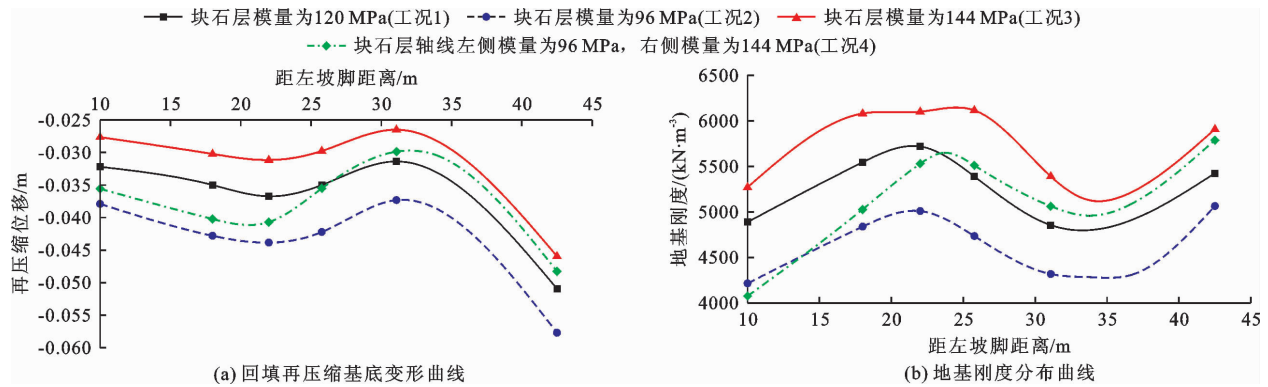


图6 块石层模量偏差4种工况下回填再压缩基底变形与地基刚度分布曲线

由图6(a)可知,除工况4之外,工况1~3的回填再压缩基底变形曲线均呈对称的马鞍形分布。基底回填再压缩量与块石层模量成负相关关系,即模量越大,再压缩量越小,故工况2的再压缩量最大,工况3的再压缩量最小,而工况4由于两侧模量不同,导致模量大的右侧所产生的再压缩量小于左侧再压缩量。由图6(b)可知,工况1~3的地基刚度分布曲线变化规律一致且基本平行。由于地基刚度与所用材料的种类(即材料的模量)有关,模量越大,所对应的地基刚度就越大,所以工况2地基刚度最小,工况3地基刚度最大,工况4的地基刚度左侧小、右侧大。工况2下的地基刚度比工况1小7.4%,而工况3下的地基刚度比工况1大6.0%。

## 4 有限元计算

在前节离心模型试验中已对基槽宽度偏差、回淤质厚度偏差以及块石层模量偏差这3类施工偏差对基底回填再压缩变形的影响进行了试验分析。本节将采用有限元计算软件ADINA对离心模型试验无法模拟的基槽底标高偏差、块石层顶面标高偏差以及碎石层施工偏差这3类影响因素进行分析,同时对基槽宽度偏差的试验结果进行验证,对敏感性较强的关键影响因素进行组合,在地基刚度变化较大的两个典型区段进行最不利工况组合下的压缩变形分析。

### 4.1 基槽底标高偏差

图7是在有限元模拟软件ADINA内按照各工况进行基槽开挖之后,得到的基槽底标高偏差在5种不同工况下的回填再压缩基底变形曲线和地基刚度分布曲线。

由图7(a)可以看出,5种工况下的回填再压缩基底变形曲线均呈马鞍形分布。超挖工况减少了黏性土层的厚度,而欠挖工况保留了较厚的黏土,这就导致超挖状态下的再压缩量比其他两种状态下的再压缩量小,且超挖得越多,再压缩量越小,欠挖得越多,再压缩量越大。超挖85cm工况下的再压缩量比无偏差下的再压缩量减小15.0%,而欠挖65cm工况下的再压缩量比无偏差工况下的再压缩量增大13.6%。由图7(b)可以看出,超挖、欠挖与无偏差工况下的地基刚度曲线线型不同,无偏差工况下地基刚度分布较为均匀,只有中隔墙的部分略大;超挖工况下行车道部分刚度较大,中隔墙部分次之,两侧最小,欠挖状况与之相反;地基刚度与超挖量呈正相关关系,而与欠挖量呈负相关关系。整体看来,与无偏差工况相比,欠挖工况下的地基刚度普遍偏小12%~15%,超挖工况下的地基刚度普遍偏大14%~16%。

### 4.2 块石层顶面标高偏差

图8是在有限元模拟软件内按照各工况进行不同厚度的块石层填筑后,得到的块石层顶面标高偏

差在 4 种不同工况下的回填再压缩基底变形曲线和地基刚度分布曲线。

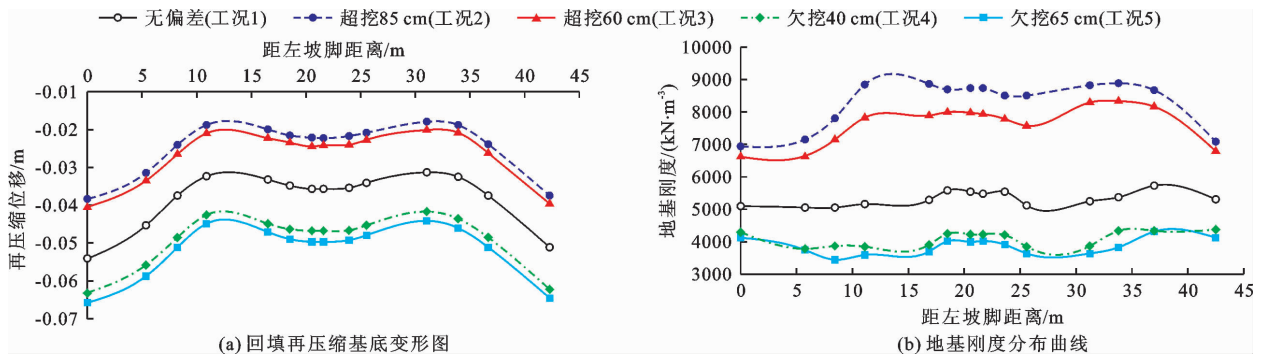


图 7 基槽底标高偏差 5 种工况下回填再压缩基底变形与地基刚度分布曲线

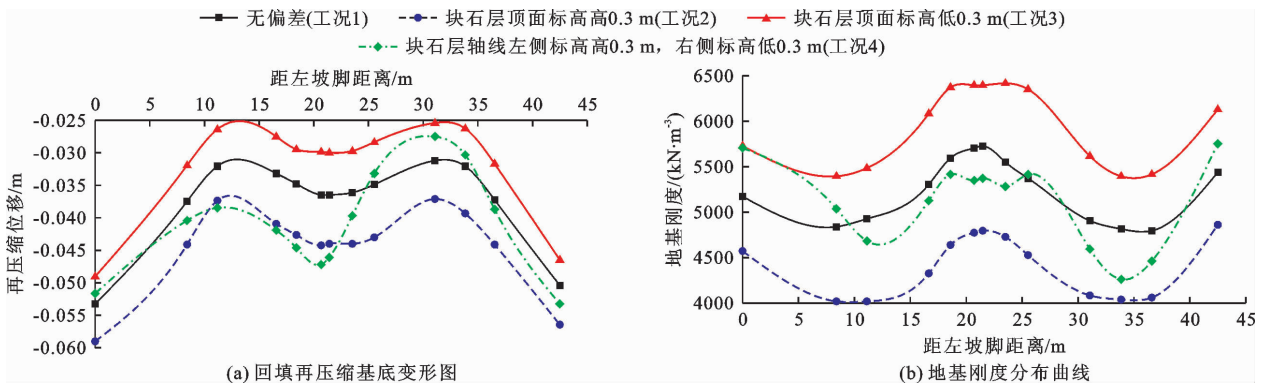


图 8 块石层顶面标高偏差 4 种工况下回填再压缩基底变形与地基刚度分布曲线

由图 8(a)可知,除了工况 4 以外,工况 1~3 的基底变形曲线均以中轴线为对称轴呈马鞍形分布。由于再压缩量与块石层模量呈负相关关系,所以当块石层顶面标高变化时,模量也会有适当的变化。与标准工况(无偏差)相比,工况 2 的块石层顶面标高偏大,模量偏小,导致其再压缩量偏大,而工况 3 与之相反;工况 4 由于块石层顶面标高左高右低,导致回填再压缩量左侧大而右侧小。整体来看,与标准工况相比,工况 2 的再压缩量普遍偏大 11.0%,工况 3 的再压缩量普遍偏小 9.7%。由图 8(b)可知,工况 1~3 的地基刚度分布曲线的变化规律基本一致,均表现为中隔墙和两边墙部分的地基刚度较大,行车道部分地基刚度最小。与标准工况相比,工况 2 的地基刚度普遍偏小约 10%,而工况 3 的地基刚度普遍偏大约 10%。

### 4.3 碎石层施工偏差

图 9 是通过有限元模拟得到的碎石层施工偏差在 4 种不同工况下的回填再压缩基底变形曲线和地基刚度分布曲线。

由图 9(a)可知,除了工况 4 外,工况 1~3 的基底变形曲线均呈对称马鞍形分布。与上述块石层顶面标高偏差对再压缩变形的影响类似,再压缩量与

碎石层模量呈负相关关系。与标准工况(无偏差)相比,工况 2 的碎石层顶面标高偏大,模量偏小,导致其再压缩量偏大,而工况 3 与之相反;工况 4 由于碎石层顶面标高左高右低,碎石层模量左侧小右侧大,导致回填再压缩量左侧大而右侧小。整体来看,与标准工况相比,工况 2 的再压缩量普遍偏大 3.6%,工况 3 的再压缩量普遍偏小 4.0%。由图 9(b)可知,除了工况 4 外,工况 1~3 的地基刚度分布曲线变化规律基本一致。与标准工况相比,工况 2 的地基刚度普遍偏小 2%~4%,工况 3 的地基刚度普遍偏大 3%~4%。

### 4.4 基槽宽度偏差验证分析

图 10 是在基槽宽度标准工况(无偏差)和基槽两侧各增宽 2.5 m 工况下,离心模型试验与有限元计算得到的回填再压缩基底变形曲线的对比。

由图 10 可以看出,两种工况下通过离心模型试验和有限元模拟得到的回填再压缩基底变形曲线基本一致,两者变化规律相同,从而验证了离心模型试验所得结果是正确的。在沉管隧道中,应力大的部位会产生较大的应变,所产生的沉降量也更大,因此两边墙端点处产生的沉降量最大,中隔墙部分次之,行车道部分最小。

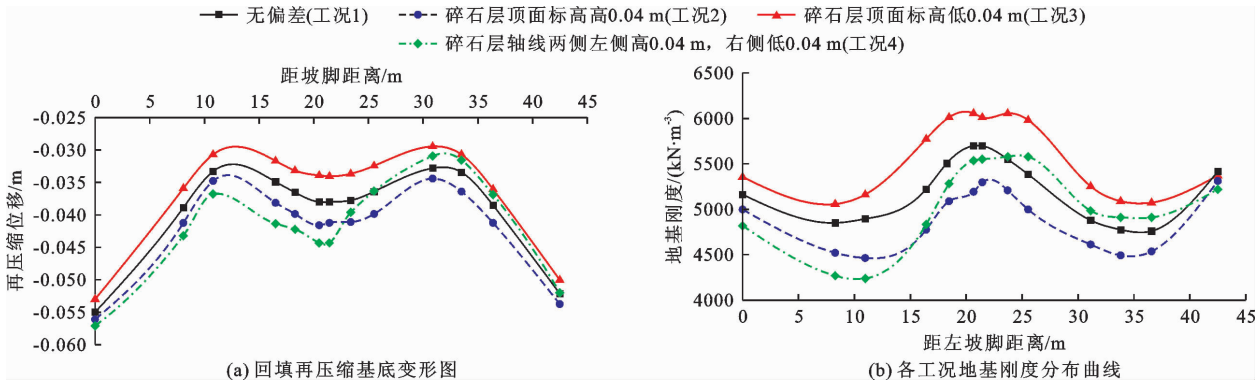


图9 碎石层施工偏差4种工况下回填再压缩基底变形与地基刚度分布曲线

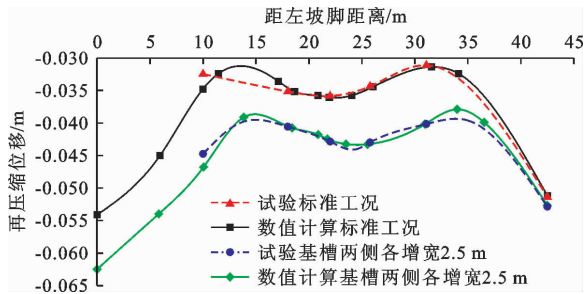


图10 基槽宽度偏差两种工况下试验与有限元计算的回填再压缩基底变形曲线对比

与无偏差的标准工况相比较,将上述各施工偏差对基底再压缩量和地基刚度的影响汇总于表4。

由表4可以看出,综合6天偏差对再压缩量和

地基刚度的整体作用,影响最大的因素是基槽超挖和欠挖偏差,影响最小的因素是基槽单边宽度偏差,块石层顶面标高偏差、块石层模量偏差、回淤厚度偏差、碎石层顶面标高偏差这4类偏差影响程度适中且逐渐减小。

#### 4.5 最不利因素组合分析

选取工程中地基刚度变化幅度较明显的典型区段 K8 + 544 ~ K8 + 724 及 K8 + 904 ~ K9 + 084,并以节段为单位,结合前文的单因素敏感性大小分析,将各个施工偏差因素进行最不利组合,对该两个典型区段进行最不利工况组合的研究。具体组合工况如表5所示,计算结果见图11。

表4 各施工偏差影响程度汇总表

偏差部位	偏差类型	偏差工况	影响程度/%	
			再压缩量	地基刚度
基槽施工偏差	开挖基槽底标高偏差	超挖 85 cm	↓ 15.0	↑ 14 ~ 16
		欠挖 60 cm	↑ 13.6	↓ 12 ~ 15
	基槽宽度偏差	右侧增宽 2.5 m	↑ 5.4	↓ 2.1
		两端各增宽 2.5 m	↑ 8.7	↓ 3.3
回淤质厚度 30 cm	回淤质厚度 30 cm	模量折减到 87%	↑ 7.0	↓ 4.0
		模量折减到 77%	↑ 7.4	↓ 6.7
		碎石层再回淤 8 cm	↑ 13.3	↓ 11.5
块石层施工偏差	块石层顶面的标高偏差	+0.3 m	↑ 11.0	↓ 10.0
		-0.3 m	↓ 9.7	↑ 10.0
	块石层模量偏差	增大 20% (144 MPa)	↓ 6.4	↑ 6.0
		减小 20% (96 MPa)	↑ 7.1	↓ 7.4
碎石层施工偏差	碎石层顶面的标高偏差	+0.04 m	↑ 3.6	↓ 2.0 ~ 4.0
		-0.04 m	↓ 4.0	↑ 3.0 ~ 4.0



表 5 施工偏差最不利组合工况表

项目	组合工况 1		组合工况 2		组合工况 3	
	超挖 60 cm	欠挖 40 cm	超挖 60 cm	欠挖 40 cm	无偏差	无偏差
基槽开挖深度	超挖 60 cm	欠挖 40 cm	超挖 60 cm	欠挖 40 cm	无偏差	无偏差
块石层顶面标高	-0.3 m	+0.3 m	-0.3 m	+0.3 m	-0.3 m	+0.3 m
块石层模量	减小 20%	增大 20%	减小 20%	增大 20%	减小 20%	增大 20%
回淤质厚度	全回淤	全回淤	全回淤	全回淤	全回淤	全回淤
碎石层顶面标高	-0.04 m	+0.04 m	-0.04 m	+0.04 m	-0.04 m	+0.04 m
纵向分布方式	两侧分别线性变化		两侧各取恒定极值		两侧各取恒定极值	

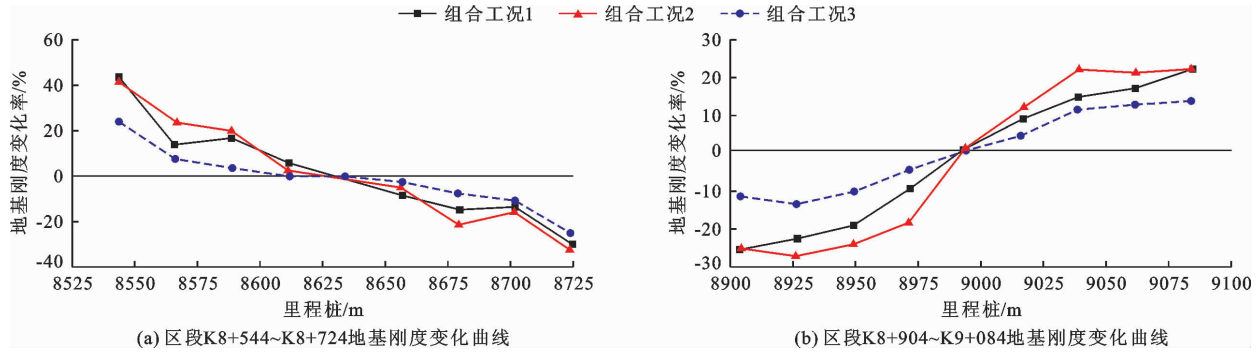


图 11 各不利组合工况下两个典型区段地基刚度沿程变化曲线

分析图 11 可知,在最不利工况组合下,地基刚度变化率平均增加 18%,地基刚度比只有超挖与欠挖偏差这一个因素影响时增大 23%。与组合工况 3 相比,组合工况 1 和 2 由于有基槽超挖与欠挖偏差的影响,导致其对地基刚度的影响程度达到近 50%,几乎是组合工况 3 影响程度的 2 倍。当超挖与欠挖施工偏差达到极限值时,这一因素与其他任一种敏感因素进行组合,隧道地基刚度受到的影响至少为 20%,如若没有基槽超挖与欠挖偏差,则其他敏感因素任意组合时,对地基刚度的影响不大,故施工时要确保基槽开挖深度的准确性。另外,对比组合工况 1 和 2 的地基刚度变化曲线可以看出,组合工况 2 条件下的地基刚度变化更大,表明这种非线性分布方式(两侧取极值)在实际工程中会产生更大的隐患。

### 5 讨论

目前,水下通道工程建设的发展日新月异,我国多个沿海城市都已建设了沉管隧道,无论是浅埋中短沉管隧道还是长大深埋沉管隧道,地基沉降都是工程中无法避免的一个重要问题,对影响沉管隧道地基不均匀沉降的因素进行科学、具体的分析是非常必要的。

有学者早在 2003 年就对沉管隧道的沉降问题进行了初步探讨<sup>[22]</sup>,认为沉管隧道沉降的本质是隧

道地基土的再压缩变形和基础层的压缩变形。Wei 等<sup>[23]</sup>通过案例分析和数据总结,提出了导致沉管隧道沉降的 7 种因素,分别为施工荷载、车辆和行人荷载、淤泥和疏浚扰动、潮汐作用、区域地下水变化、地震荷载和施工过程中的不足,并从固结度随施工过程变化的角度分析了地基层和原状土的沉降机理。王勇<sup>[5]</sup>也对长大深埋沉管隧道的沉降影响因素(外部荷载和结构自重两方面)和控沉问题进行了系统的研究。可见,前人的研究中也指出施工过程中的误差对沉管隧道的沉降有着重要影响,基于此,本文通过离心模型试验和有限元模拟相结合的方法,重点对施工偏差这一类影响因素进行定性和定量分析,研究不同类别的施工偏差对地基土的再压缩量和刚度的影响程度。结果发现对地基土再压缩变形和刚度影响最大的施工偏差因素为基槽超挖与欠挖偏差,其余因素的影响程度由大到小依次为块石层顶面标高、块石层模量、回淤厚度、碎石层顶面标高、基槽宽度偏差,同时通过最不利因素的组合分析,确定了最不利的工况组合纵向分布形式为两侧各取恒定极值。

本文从施工阶段的具体施工偏差入手,对各类施工偏差的敏感性大小进行了分析,以明确其对地基土再压缩量和刚度的影响程度。尽可能避免由于施工误差这一施工因素导致的地基沉降变形过大问题,有利于减小深大沉管隧道产生的不均匀沉降。



本研究成果可为其他海底隧道工程提供参考。

## 6 结 论

本文在离心模型试验的基础上,结合有限元计算方法,分析了不同类型施工偏差对地基沉降和刚度变化的定性、定量影响,得到以下结论:

(1)采用蒙特卡罗概率有限元计算方法,同时基于 Spearman 秩相关系数对各类型施工偏差的分析表明,基槽超挖与欠挖偏差对地基沉降影响的敏感性最大,碎石层模量的敏感性最小。

(2)通过离心模型试验和 ADINA 有限元计算及其相互验证,得出对地基再压缩沉降量和刚度变化影响最大的因素是基槽超挖与欠挖偏差,影响最小的是基槽单边宽度偏差,块石层顶面标高、块石层模量、回淤厚度、碎石层顶面标高这 4 类偏差影响程度适中且逐次递减。

(3)有基槽超挖与欠挖偏差存在时,最不利组合工况下对地基刚度的影响程度达到近 50%,且当基槽超挖与欠挖偏差达到极限值时,无论该因素与其他何种敏感因素组合,对沉管隧道沉降特性的影响程度至少为 20%,故需要保证基槽开挖深度的准确性。

(4)通过对敏感性因素的合理组合,发现纵向区段内最不利的工况分布形式是断面两侧取恒定极值,即非线性变化分布。

### 参考文献:

- [1] 穆保岗,穆腾飞,龚维明,等. 沉管隧道大开挖回弹再压缩问题试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(5):1172-1178.
- [2] 张嘉莹,李斌,袁方龙. 海底沉管隧道深基槽软土回弹再压缩特性试验研究[J]. 中国港湾建设,2019,39(11):32-37.
- [3] 李景. 外海大回淤沉管隧道地基回弹再压缩机理与特性研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- [4] 岳夏冰. 外海大回淤沉管隧道软基沉降特征与控制计算研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [5] 王勇. 深埋长大沉管隧道沉降分析及控制措施研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
- [6] 胡指南,冯怀平,马超超,等. 沉管隧道节段接头剪力键受力阶段与沉降控制标准研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(4):132-138.
- [7] 李斌,高潮,张嘉莹. 港珠澳大桥沉管隧道瞬时沉降规律分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):263-266.
- [8] 史志想,吴华勇,文水兵. 运营期沉管隧道沉降变形分析[J]. 城市道桥与防洪,2022(6):233-237+27.
- [9] 陈海军,孙志彬,张聚文. 淤泥层中沉管隧道基础形式选型及沉降数值分析[J]. 公路交通技术,2022,38(3):95-102.
- [10] 谢雄耀,张乃元,周彪,等. 滨海软土沉管隧道结构性能演化规律及成因分析[J]. 工业建筑,2021,51(7):1-5+24.
- [11] LI Bin, HOU Jinfang, MIN Kaiyi, et al. Analyzing immediate settlement of Hong Kong - Zhuhai - Macao Bridge immersed tunnel based on monitoring data[J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 16(2): 100 - 109.
- [12] 薛建设. 反复清淤回淤荷载作用下海底沉管隧道软土固结变形特征及地基沉降计算研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
- [13] 王延宁,周桓竹,俞缙. 沉管隧道运营期回淤影响下的长期沉降模型[J]. 岩土工程学报,2023,45(2):292-300.
- [14] 李剑,李清富,李冰. 沉管隧道沉降控制的计算分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2002,23(3):94-97.
- [15] LIU Peng, CHEN Ji, CHEN Yanhong. Mechanical model for joints of immersed tunnel considering the influence of joint differential settlement[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2020, 6(4): 57.
- [16] WEI Gang, SU Qinwei. Application of three-parameter model in settlement calculation of immersed tube tunnel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 470:298-303.
- [17] 周桓竹,王延宁,寇晓强. 考虑潮汐荷载作用的沉管隧道竖向位移计算[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(3):790-797.
- [18] 魏纲,陆世杰. 考虑管土效应的潮汐荷载引起沉管隧道管节沉降研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S2):4329-4337.
- [19] 岳夏冰,谢永利,张宏光,等. 沉管隧道离心模型试验及数值模拟[J]. 工业建筑,2013,43(6):84-89.
- [20] 姜彦彬,何宁,周彦章,等. 复合地基离心模型试验变形测试[J]. 哈尔滨工程大学学报,2021,42(4):514-520.
- [21] 杨家新,王耀,王小华,等. 悬臂支挡基坑开挖的离心模型试验研究[J]. 铁道建筑,2022,62(1):158-162.
- [22] 邵俊江,李永盛. 沉管隧道沉降问题的探讨[J]. 地质与勘探,2003,39(Z2):178-181.
- [23] WEI Gang, QIU Huijie, WEI Xinjiang. Analysis of settlement reasons and mechanism in immersed tunnel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 238: 803 - 807.