

DOI: 10.11779/CJGE2021S2062

港珠澳大桥沉管隧道瞬时沉降规律分析

李斌^{1, 2, 3, 4}, 高潮^{1, 2, 3}, 张嘉莹^{1, 2, 3}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室 天津 300222;
3. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222; 4. 中交第一航务工程有限公司, 天津 300461)

摘要: 跨海通道沉管隧道的沉降对其施工质量和运行安全的影响非常大。针对港珠澳大桥沉管隧道的深水载荷试验、现场模型试验及现场实测数据进行, 对沉管隧道沉降现象及规律进行了总结归纳, 探讨沉降的组成及机理。并结合不同管节理论计算成果, 论证了沉管隧道瞬时沉降的关键影响因素。通过对监测数据分析及论证, 明确瞬时沉降是海底沉管隧道沉降的重要组成部分, 分析了其对沉管隧道工程的影响, 建议了瞬时沉降计算方法, 为今后沉管隧道工程设计施工提供借鉴。

关键词: 瞬时沉降; 深水载荷板试验; 沉降监测; 沉管隧道

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0263-04

作者简介: 李斌(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程专业的研究工作。E-mail: lee_binbin@163.com。

Instantaneous settlement of immersed tube tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

LI Bin^{1, 2, 3, 4}, GAO Chao^{1, 2, 3}, ZHANG Jia-ying^{1, 2, 3}

(1. Tianjin Port Engineering Institute Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., 300222, China; 2. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Communications, 300222, China; 3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin 300222, China; 4. CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: The settlement of immersed tube tunnel is very important to its construction quality and safety. The definition and mechanism of instantaneous settlement of immersed tube tunnel are summarized by deep-water load plate tests, model tests and field measurements. The key influencing factors and mechanisms are demonstrated by combining the theoretical results of different pipe joints. Through the analysis of the monitoring data, the main role of instantaneous settlement in the settlement and its influences on the immersed tube tunnel are clarified. The research results may provide reference for the design and construction of immersed tunnel projects in the future.

Key words: instantaneous settlement; deep-water load plate test; settlement monitoring; immersed tube tunnel

0 引言

在土木工程领域对基础沉降计算有数百年历史, 而瞬时沉降也由来已久。地基土体在承受加载过程中, 短时间内土体来不及排水, 而由地基形状的变化引起的附加沉降为瞬时沉降, 也被称为瞬时弹性变形^[1]。目前, 对于主固结沉降、次固结沉降研究得较多, 但对瞬时沉降的研究却相对较少^[2]。本文结合港珠澳大桥工程实例, 通过对理论计算、模型试验和现场监测数据进行系统分析, 论证了沉管隧道发生瞬时沉降的关键影响因素和机理, 确定了瞬时沉降计算方法和对隧道工程的影响程度, 可为今后类似工程设计施工提供宝贵经验。

1 工程概况

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域, 是连接香港

特别行政区、广东省珠海市、澳门特别行政区的大型跨海通道, 桥隧主体工程总长约 35 km, 采用桥隧组合方案。沉管隧道总长 6.7 km, 其中沉管段长 5.6 km。

综合工程地质剖面, 沉管隧道临近人工岛暗埋段的地基下部地层主要为流塑—软塑黏土层, 厚度大, 地基经预压后采用高压旋喷改良地基方式进行处理。沉管隧道 E1S3~E6、E30S4~E33S6 隧道底板埋深由浅至深, 底板下地层分布有能满足承载力要求的土层, 采用挤密砂桩方案进行地基处理。沉管隧道 E7~E30S3 隧道底板埋深起伏变化相对较小, 底板下地层均为满足承载力要求的非软土层, 采用天然地基基础方案。在地基处理完成后沉管隧道设置了组合基床基础——即采用抛填块石, 然后利用带有液压振动锤的

整平船对块石进行夯平, 以消除开挖基槽时的施工扰动, 最后在此夯平层上铺设带垄沟的碎石垫层形成组合基床后安放沉管, 组合基床断面布置如图 1 所示。

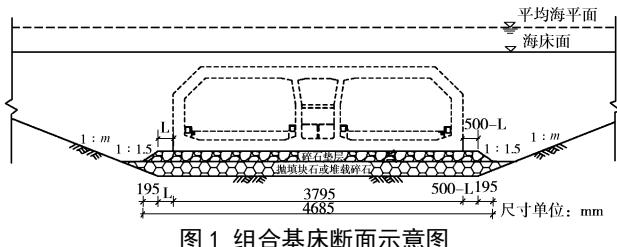


图 1 组合基床断面示意图

Fig. 1 Section diagram of combined foundation bed

2 沉管隧道瞬时沉降现象及定义

2.1 瞬时沉降现象

沉管安放完成后, 经过锁定回填、管顶回填和压舱混凝土等施工过程, 根据港珠澳大桥沉管隧道沉降监测数据显示, 在沉管安放完成后, 每当沉管上部施工导致荷载增加时, 在沉管监测的沉降-时间曲线上都会有明显沉降发生, 而当沉管隧道无工程作业时, 沉管隧道沉降相对保持稳定。图 2 所示为部分管节沉降-时间曲线, 从不同管节的沉降监测资料上看, 每当沉降量明显增大时都是沉管进行回填或上部荷载增加的工况, 根据这一现象, 可以判定沉管安放以及回填施工时, 有瞬时沉降发生。

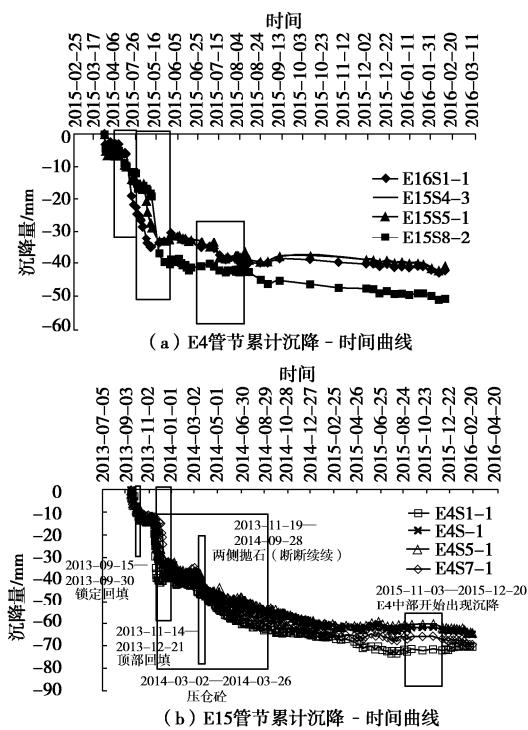


图 2 部分管节累计沉降-时间曲线

Fig. 2 Cumulative settlement-time curves of part of section

2.2 沉管隧道瞬时沉降理论计算

沉管隧道地基在荷载作用下, 对于地基的弹性变

形所引起的瞬时沉降比较成熟, 而对于地基塑性区的扩展导致产生的侧向位移扩大所引起的研究还在发展中^[3-4]。

日本交通省地基规范中规定, 对于长方形均布荷载作用下的地基基础沉降, 可仿照长方形的四角点地表产生的沉降量进行计算。如下式所示:

$$P_z = PB \frac{1-V^2}{E} I_p , \quad (1)$$

式中, I_p 为对沉降量的影响值, 是长方形尺寸比(L/B)的函数, 取值查表如图 5(b)所示。 P 为均布荷载(kN); V 为泊松比; E 为土的弹性模量(kPa)。

中华人民共和国交通部《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》^[5]采用弹性理论计算非弹性形变, 与日本交通省瞬时沉降计算公式类似。

3 沉管隧道瞬时沉降规律分析

根据沉管隧道瞬时沉降现象, 考虑沉管安放时间对沉管隧道沉降量的影响, 选取沉降已较为稳定的 E15 之前管节, 选取管节从安装到 2016 年 1 月 31 日沉降数据进行分析。由于 E1 和 E2 管节地质情况和上部荷载变化复杂, 本次计算先不考虑 E1 和 E2 管节的瞬时沉降情况。按照施工日志的施工顺序, 将施工期内管节沉降数据进行剥离, 各管节选取前、中、后代表节段 S1、S5、S8 进行分析。

当组合基床上部承受荷载时, 由于块石夯平层经过激振力约为 3000 kN, 影响深度达 6~8 m 的液压振动锤的压密, 弹性模量较大, 产生的瞬时沉降较小, 可忽略; 在对各个管节瞬时沉降量进行统计时, 按照施工工艺, 沉管隧道沉放安装完成后先后经历锁定回填、顶部回填、压舱混凝土以及部分管节防撞回填施工。为便于沉降量分析, 将施工期内沉管隧道产生的沉降量按瞬时沉降考虑, 由于施工工期持续时间较长, 此种考虑方法将导致瞬时沉降量偏大。

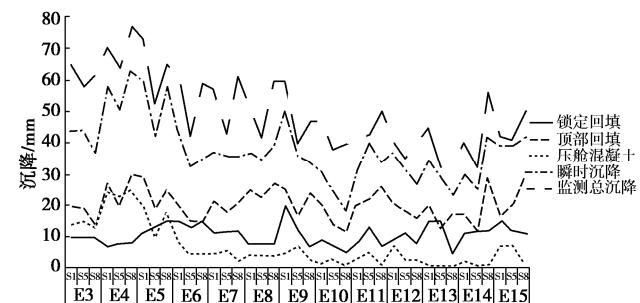


图 3 沉管隧道各节段施工期瞬时沉降量折线示意图

Fig. 3 Diagram of instantaneous settlement during construction

图 3 是根据沉管隧道各节段施工期瞬时沉降量折线图, 可知隧道瞬时沉降量和监测总沉降量的变化趋势大体一致, 天然地基段总沉降量略小于挤密砂桩段,

这也是由于挤密砂桩段底部下卧黏土层较厚导致。

图 4 为沉管隧道各节段施工期内监测的瞬时沉降量与总沉降量的比例关系, 结果显示, 天然地基段瞬时沉降占总沉降比例稍大, E9S5、E11S5、E12S1、E12S5、E13S5、E15S1 和 E15S5 占比达到总沉降的 90% 左右。E3S8、E6S5、E7S8 和 E10S8 所占比例较小, 占比不到总沉降的 60%。天然地基段瞬时沉降占比稍大是由两方面原因造成, 首先是天然地基段黏土层较薄, 在上部荷载未超过前期固结压力时, 地基沉降主要表现为瞬时沉降。另外一方面, 由于天然地基段沉管安放时间较短, 除瞬时沉降外的回弹再压缩以及蠕变、次固结等还未充分发生, 随着时间的增加, 沉降量会逐渐增大, 瞬时沉降量所占比例将逐渐下降。

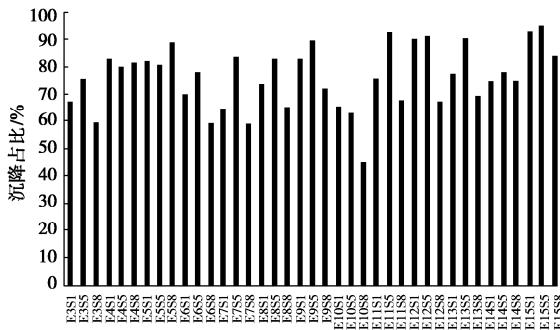


图 4 沉管隧道各节段施工期瞬时沉降量占比柱状图

Fig. 4 Proportion of instantaneous settlement during construction

4 沉管隧道瞬时沉降机理分析

本节将利用港珠澳大桥沉管隧道沉降监测数据、沉管隧道深水载荷试验以及碎石垫层物理模型试验, 对瞬时沉降的组成和影响。

4.1 碎石垫层物理模型试验

为获取组合基床设计参数以及沉降特性, 进行碎石垫层荷载试验, 本次试验考虑了碎石级配、碎石垫层铺设厚度、碎石垫层构造尺寸、碎石垫层基底材料、等因素对碎石垫层沉降的影响。

综合考虑沉管隧道碎石基床上部荷载以及碎石垫层荷载试验 $s-t$ 曲线, 根据施工记录可推导不同管节碎石垫层在不同荷载下的沉降量。各沉管隧道管节的碎石垫层沉降量如表 1 所示, 统计典型沉管隧道管节安放第 1 年内沉降量以备分析。

由计算结果可知, 碎石垫层的沉降量是沉管隧道沉降的主要组成部分。沉管隧道碎石垫层的沉降量随荷载的增大呈线性增加。通过对沉管隧道碎石垫层沉降量以及沉管安放 1 a 后沉降量的分析, 组合基床中碎石垫层的沉降量占挤密砂桩段沉管安放 1 a 内沉管隧道监测总沉降量的 49% 左右, 占天然地基段沉管

安放 1 a 期内沉管隧道监测总沉降量的 61% 左右。

表 1 沉管隧道碎石垫层沉降汇总表

Table 1 Summary of settlement of gravel cushion

管节	节段	荷载 /kPa	碎石垫层沉降/mm	沉管安放 1 a 内监测总沉降量/mm	所占比例/%
E4	S1-S3	47.2	26.01	53.0	49.1
	S4-S8	47.2	26.01	52.0	49.5
E6	S1-S8	47.2	26.01	52.5	49.1
E12	S1-S8	47.2	26.01	40.0	65.0
E15	S1-S8	47.2	26.01	42.0	61.9

4.2 沉管隧道深水载荷试验

为研究不同处理方式的沉管隧道基础沉降特性, 进而为沉管隧道施工提供沉降变形数据依据, 进行了港珠澳大桥沉管隧道基础深水载荷试验^[6]。试验采用 4.5 m×9.0 m 承压板, 通过自主设计的试验系统, 进行了若干组水下载荷试验, 试验深度最深位于水下 40 m 深处。试验获得了不同荷载级别作用下 (60 kPa/100 kPa) 不同处理方式的隧道基础沉降量。同时获得了沉降时程曲线。

根据沉管隧道深水载荷试验沉降时程曲线统计分析发现, 试验总沉降量的 80% 是在荷载施加后的 10~15 min 内完成的, 沉降量的 90%~95% 是在荷载施加之后的 2 h 时间内完成的且沉降速率很快。最后 5% 的沉降量也在荷载施加后的 5~6 h 内基本完成。

沉管隧道地基基础瞬时沉降可由日本交通省地基规范规定公式计算获得。根据计算, 压板在承受 60 kPa 荷载作用下 E4 和 E12 相应管节地基土瞬时沉降量分别为 1.62 mm 和 1.78 mm。可按此方法计算承压板在承受 100 kPa 荷载作用下地基基础土体瞬时沉降量。

碎石垫层在不同荷载作用下的瞬时沉降量可以根据碎石垫层物理模型试验 $s-t$ 曲线推求。综合沉管隧道深水载荷试验沉降数据, 各试验点沉降数据如表 2 所示。根据表 2 计算结果可知, 沉管隧道瞬时沉降由对应荷载作用下的碎石垫层沉降量与地基基础瞬时沉降量共同组成。也验证了利用碎石垫层模型试验以及利用日本交通省地基规范规定公式推求港珠澳大桥沉管隧道瞬时沉降的可行性。

表 2 沉管隧道深水载荷试验沉降汇总表

Table 2 Settlements of deep-water load tests

荷载 /kPa	管节	水下载荷试验总沉降量/mm	碎石垫层模型试验沉降量/mm	地基基础瞬时沉降量/mm
60	E12	32.58	33	1.78
	E4	44.99	33	1.62
	E6	32.13	33	1.62
100	E15	68.2	55	3.0
	E12	83.6	55	3.0
	E4	72.8	55	2.7
	E6	77.1	55	2.7

4.3 沉管隧道瞬时沉降计算

根据沉管隧道深水载荷板试验, 可知沉管隧道沉降可分为两部分, 一部分是荷载施加后短时间内沉降, 此段时间内沉降速率很快, 沉降量较大, 可以称为沉管隧道瞬时沉降。沉管隧道瞬时沉降由碎石垫层沉降和地基基础瞬时沉降共同作用导致。另一部分沉降随时间增长而缓慢增加, 沉降速率随时间增长持续减慢, 最终趋于稳定, 根据土体前期固结压力分析, 此沉降应为地基基础的回弹再压缩沉降。

选取港珠澳大桥单一管节为研究对象, 沉管隧道管节的组合基床上部荷载为 47.2 kPa, 依此计算其碎石垫层沉降和荷载的附加应力作用下地基基础的瞬时沉降。沉管隧道监测沉降量为组成管节的各节段沉降量的均值。港珠澳大桥沉管隧道部分管节瞬时沉降量统计表如表 3 所示。

表 3 沉管隧道各个管节瞬时沉降量统计表

Table 5 Instantaneous settlements

管节	瞬时沉降 /mm	沉管隧道 计算瞬时 沉降/mm	监测总沉 降量 /mm	计算瞬 时沉降 占比/%
E3	41.7	30.6	62.7	48.8
E4	57.3	30.5	67.0	45.5
E5	53.3	30.7	58.6	52.4
E6	37.0	30.8	59.7	51.6
E7	36.3	30.4	49.1	63.0
E8	37.0	31.5	48.8	64.6
E9	40.0	31.7	48.9	64.8
E10	24.3	31.8	47.5	67.0
E11	35.0	31.5	47.3	66.6
E12	32.0	31.8	47.2	67.4
E13	29.0	31.6	47.1	67.1
E14	32.3	31.4	47.2	66.5
E15	40.0	32.7	47.5	68.9

在施工荷载 47.2 kPa 作用下碎石垫层发生 26.01 mm 沉降, 地基基础产生 4.9~6.7 mm 左右瞬时沉降。计算瞬时沉降量占监测总沉降量的 48.8%~68.9%, 监测沉降量中的瞬时沉降部分占监测总沉降量的 70%~80%, 究其原因首先是因为监测瞬时沉降量时选取的是施工期内的一段时间, 这段时间内不可避免的存在一定程度的回弹再压缩、下卧层的固结沉降或者次固结沉降, 使得监测瞬时沉降量取值稍大。另外一点就是瞬时沉降的理论计算时, 由于理论存在一定的假设, 加上计算参数的选取也存在一定程度的误差, 这些也

会导致理论计算值偏小^[6]。

5 结语

沉管隧道瞬时沉降是港珠澳大桥沉管隧道总沉降的重要组成部分, 因此在隧道地基基础设计时应给予高度关注。根据计算分析, 沉管隧道瞬时沉降主要由沉管隧道碎石垫层沉降和地基基础瞬时沉降组成。碎石垫层沉降量可由物理模型试验获取, 而沉管隧道地基基础瞬时沉降可由日本交通省地基规范规定公式计算获得。

参考文献:

- [1] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 76-93. (YIN Zong-ze. Geotechnical Theory[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 76 - 93. (in Chinese))
- [2] 陈祥福. 沉降计算理论及工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (CHEN Xiang-fu. Settlement Calculation Theory and Engineering Examples[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [3] 刘亚平, 肖新伟, 魏红波, 等. 港珠澳大桥深水地基载荷试验技术[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 2): 487 - 492. (LIU Ya-ping, XIAO Xin-wei, WEI Hong-bo, et al. Loading test technology in deep water for Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 487 - 492. (in Chinese))
- [4] 姚丽娜. 基于 $e-p$ 曲线的软土地基非线性沉降实用计算方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. (YAO Li-na. Study on A Practical Method for Calculating Nonlinear Settlement of Soft Groud Based on $e-p$ Curve[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [5] 公路软土地基路堤设计与施工技术规范 JTGT D31-02-2013[S]. Technical Specifications for Design and Construction of Highway Embankment on Soft Ground: JTJ 017—1996[S]. (in Chinese))
- [6] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Geotechnical Theory and Calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)