

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201907042



港珠澳大桥沉管隧道的 横截面承载力分析

段进涛, 董毓利, 朱三凡, 王冬晔, 雒家琪

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以港珠澳大桥沉管隧道最大埋深段为研究对象, 将沉管隧道简化为框架结构, 采用荷载结构模型对结构内力进行分析, 研究各构件的内力状态. 在内力分析的基础上, 进一步验算沉管隧道各构件的正截面承载力、斜截面抗剪承载力及结构表面混凝土裂缝宽度. 计算结果表明: 沉管隧道正常使用状态下的极限承载力由混凝土裂缝宽度控制, 正截面承载力和斜截面抗剪承载力都远大于结构的内力; 使用有限元软件 Abaqus 对沉管隧道模拟的结果与理论计算的内力状态、混凝土受拉破坏状态相吻合.

关键词: 沉管隧道; 框架结构; 港珠澳大桥; 横截面承载力; 有限元软件 Abaqus

中图分类号: U 455.46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)01-0008-11

Cross-Section Bearing Capacity Analysis of Immersed Tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

DUAN Jintao, DONG Yuli, ZHU Sanfan,
WANG Dongye, LUO Jiaqi

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Taking immersed tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge in the maximum buried depth as the research object, the immersed tunnel is simplified as a frame structure. The load-structure model is used to analyze the internal force of the structure, and the internal force state of each component is studied. On the basis of internal force analysis, the bearing capacity of normal section, shear capacity of inclined section and crack width of concrete on the surface of immersed tunnel members are checked. The calculation results show that the ultimate bearing capacity under normal service loading is controlled by the crack width of concrete, and the normal section bearing capacity and the inclined section shear bearing capacity are far greater than the internal force of the structure. The simulation results of the immersed tunnel by finite element software Abaqus are consistent with the theoretical calculation of the internal force state and the concrete tensile failure state.

Keywords: immersed tunnel; frame structure; Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; cross-section bearing capacity; finite element software Abaqus

沉管隧道是目前水下隧道的主要施工方法之一, 具有对地基承载力要求低、埋深要求浅、对水文和地质适应能力强、不影响航运交通等优点. 它的施工过程是将若干个预制沉管段分别浮运到安装现场, 依次沉放至预先处理过的基础基槽内, 通过管段接头首尾相接, 贯通后形成隧道^[1]. 2018 年, 竣工通车的港珠澳大桥沉管隧道是目前世界上最长、最大的沉管隧道工程^[2]. 沉管隧道在得到大力推广的同时,

收稿日期: 2019-07-18

通信作者: 董毓利(1965-), 男, 教授, 博士, 博士后, 主要从事结构抗火的研究. E-mail: DongYL@hqu.edu.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778250)

其安全性也越发引起人们的关注. 很多学者对沉管隧道开展了大量的理论及试验研究, 其中, 节段接头和管节接头是沉管隧道的关键部位, 而且是薄弱环节, 因此成为了研究的重点. 胡指南^[3]以 1 : 4.69 的比例进行缩尺, 研究在不均匀沉降下港珠澳大桥沉管隧道的接头剪力键的性能. Guo 等^[4]使用有限元软件 ANSYS, 模拟火灾下沉管隧道在高温下的损伤情况, 分析沉管隧道结构混凝土在无防火保护下的高温损伤深度. 王黎怡等^[5]使用 ANSYS 的壳单元, 模拟温度、混凝土收缩、不同水位对沉管隧道结构内力的影响. Wu 等^[6]使用 ANSYS 的壳单元, 模拟沉管隧道在常见荷载下的结构内力分布状况. 港珠澳大桥沉管隧道属于一级安全建筑物^[7], 对安全性和耐久性的要求很高, 设计使用年限为 120 a, 结构防水等级 ≥ 2 级, 管节结构抗渗等级 $\geq P10$. 结构的内力状况对沉管隧道的安全性和耐久性有很大的影响^[8]. Wang 等^[9]分别从宏观维度和细观维度分析了港珠澳大桥沉管隧道结构的材料. 目前, 对于沉管隧道这种复杂结构的理论计算相关成果较少, 仍未明确影响结构极限承载力的关键因素; 而数值模拟多使用简化模型, 对结构节点和钢筋骨架的分析不够详尽. 本文以港珠澳大桥沉管隧道为研究对象, 分析沉管隧道在外荷载下的结构内力分布情况, 并使用有限元软件 Abaqus 对沉管隧道进行数值模拟.

1 工程概况

港珠澳大桥沉管隧道总长度为 5 664 m, 共 33 个管节. 采用半刚性接头的设计方案, 每个管节依次沉入海底基床, 在海底完成对接, 并进行防水处理. 标准管节长度为 180 m, 由 8 个长度为 22.5 m 的节段组成, 节段之间通过防水接头组合在一起形成 1 个管节; 施加适当的预应力挤压管节接头间的止水带, 保证防水效果, 同时保留一定的柔性来适应不均匀沉降引起的变形. 沉管隧道顶部的最大水深为 33.1 m. 由于埋深大, 隧道施工完成后, 顶部的回淤速度和回淤密度无经验和类似项目参考, 设计土压力荷载按照淤泥完全回淤的厚度达到 21.79 m, 这使港珠澳大桥沉管隧道成为世界上回淤荷载最大的一条沉管隧道.

沉管隧道在建造前首先进行清淤挖槽, 在槽底回填碎石, 形成复合地基, 地基系数为 $75.0 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$. 沉管管节沉入预定槽底的位置, 与预先沉入的前一管段对接安装完成后, 进行回填. 为了避免船只抛锚时船锚钩住隧道, 在回填土外修筑较缓的护面层, 坡度为 1 : 2. 沉管隧道周围的地质地形横截面, 如图 1 所示.

港珠澳大桥的沉管隧道为两孔一管廊结构, 中间管廊的下半部设置有逃生通道, 而上半部设置有线缆通道. 沉管隧道的横截面尺寸及结构形式, 分别如图 2, 3 所示.

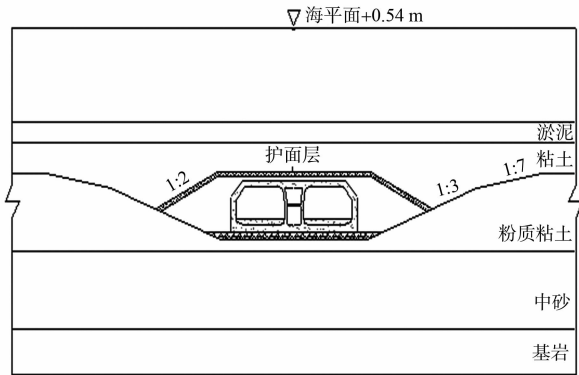


图 1 沉管隧道周围的地质地形横截面
Fig.1 Geological terrain cross section around the immersed tunnel

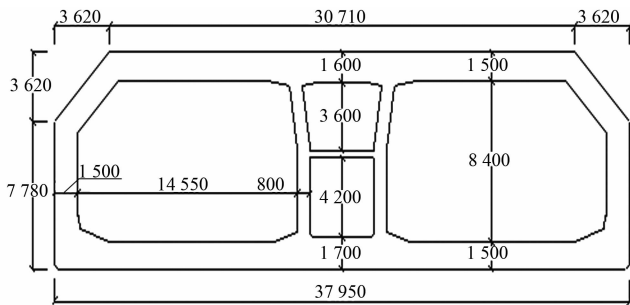


图 2 沉管隧道的横截面尺寸(单位: mm)

Fig.2 Cross-sectional dimensions of immersed tunnel (unit: mm)

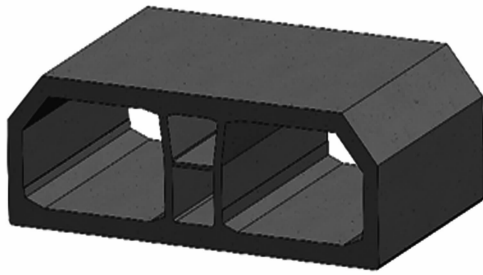


图 3 沉管隧道的结构形式

Fig.3 Structure of immersed tunnel

沉管隧道单孔跨度达到 14.55 m, 在 44.50 m 的埋深和 21.79 m 厚度的覆土荷载下, 普通的钢筋混凝土结构难以满足安全性及耐久性的要求. 因此, 港珠澳大桥沉管隧道采用了折拱式横截面形式, 减小

顶板与侧墙节点处的弯矩和剪力,使结构受力更加合理^[10]. 其中,两面中墙支撑在顶板和底板中间,可以有效减小支撑节点处的负弯矩值.

为了提高结构安全性,结构的直角节点都进行了加腋处理,保证节点有足够的强度、刚度及抗裂性能. 刘发前^[11]对某实际工程中 52 m 跨度的单箱双室矩形隧道结构进行分析,提出折拱结构和空心轻型结构,对原矩形隧道进行改进,结果表明,合理使用折拱结构可节约 35% 左右的工程量,关键点弯矩可减小约 30%.

隧道结构设计常用的方法有实际工程类比的经验设计方法、现场测量和试验为主的设计方法、用于截面理论计算的荷载结构模型、以有限元为主的数值设计方法. 相对于其他设计方法,荷载结构模型适用于理论计算,它具有理论成熟、数据可靠的特点,是目前我国隧道设计主要采用的计算方法. 沉管隧道管节的横截面结构计算宜采用荷载结构模型^[12]. 荷载结构模型^[13]是将地层对结构的作用简化为荷载,以计算结构在荷载作用下的内力和变形,其结构基础采用地基弹簧模拟,基础变形服从温克尔弹性地基梁模型假设.

以港珠澳大桥的沉管隧道最大埋深段为研究对象,采用荷载结构模型进行分析. 沉管隧道的底部水深为 44.50 m,顶部覆土厚度为 21.79 m,结构荷载主要有海水压力、回填土和泥沙回淤、结构自重及压舱混凝土,采用水土分算法计算水土压力. 沉管隧道截面的荷载分布,如图 4 所示.

研究对象的外荷载组合参数:海水重度(γ_w)为 $10.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,沉管隧道结构重度(γ_c)为 $26.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,压舱混凝土重度(γ_β)为 $23.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$;沉管隧道顶部水压($P_{\omega 1}$)为 340.68 kPa,沉管隧道底部水压($P_{\omega 2}$)为 456.96 kPa,沉管隧道保护层及覆土荷载压强(P_{V1})为 141.95 kPa,侧向回填土压强 P_{H1} , P_{H2} 分别为 63.27, 150.36 kPa,折拱下部水压($P_{\omega 3}$)为 377.6 kPa,折拱下部保护层及覆土荷载压强(P_{V2})为 181.77 kPa;地基弹性抗力系数(K)为 $75.0 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$.

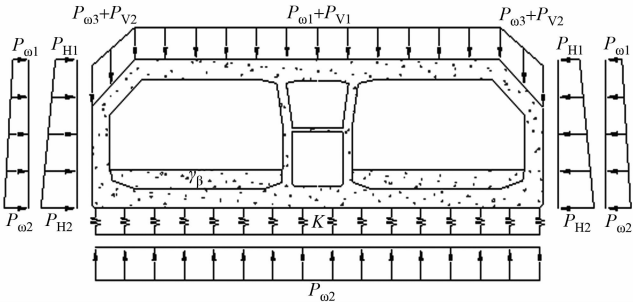


图 4 沉管隧道截面的荷载分布
Fig. 4 Sectional load distribution of immersed tunnel

2 内力及承载力分析

2.1 内力分析

沉管隧道结构一般纵向尺寸较大、横向尺寸较小,在进行横截面计算或设计时,通常不考虑结构的纵向不均匀变形. 将整体结构简化为平面应变问题,沉管隧道可以简化为多孔箱型闭合框架^[12]. 箱型闭合框架属于超静定结构,截面及配筋设计一般要经过“假定结构截面尺寸、分析内力、修正尺寸、重算内力和截面配筋”的多次循环,才能最终确定结构的截面尺寸和配筋.

在设计沉管隧道横截面^[14]时,通常沿隧道纵向取 1 m 长的节段建立二维模型;然后,将隧道的顶板、折拱、侧墙、底板和中墙全部简化为一维梁单元进行计算,结构假定为线弹性材料,地基采用温克尔弹性地基梁模型模拟. 对于沉管隧道设计或建造完成后的结构分析,简化模型需要结合结构配筋形式及结构端部混凝土的保护层厚度,使计算段的配筋率与结构的整体配筋率一致,这样计算的结果与实际工程较为吻合.

港珠澳大桥沉管隧道的结构配筋形式,如图 5 所示. 图 5 中:横截面配筋间距为 120 mm. Wang 等^[9]在对港珠澳大桥沉管隧道结构进行分析时,充分考虑了结构的配筋形式,沿隧道长度方向取 720 mm,将沉管隧道简化为箱型框架结构. 简化后的框架结构中,各构件截面的配筋形式,如图 6 所示. 720 mm 宽度可兼顾横向配筋 120 mm 的间距及端部 60 mm 的保护层厚度,在保证简化模型配筋率与隧道结构相同的同时,配筋形式也完全一致.

参考 Wang 等^[9]对港珠澳大桥沉管隧道的简化模型,取 720 mm 的隧道长度,将沉管隧道结构简化为框架模型进行结构分析,简化后的框架,如图 7(a)所示. 框架结构可以看作是梁柱框架结构,顶部和

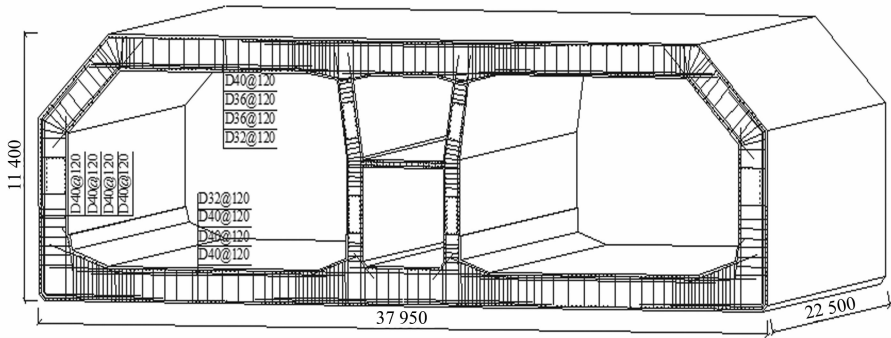


图 5 沉管隧道的结构配筋形式(单位:mm)

Fig. 5 Structural reinforcement form of immersed tunnel (unit: mm)

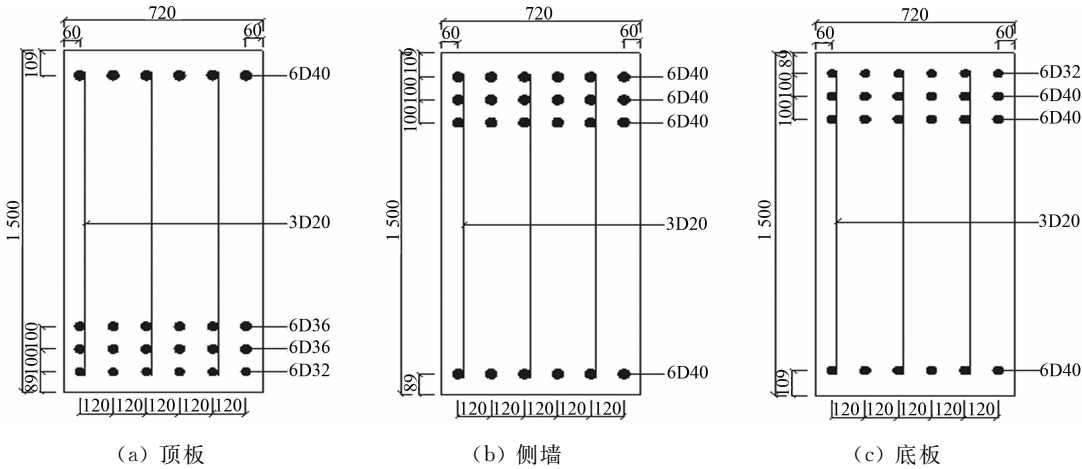


图 6 简化后的各构件截面的配筋形式(单位:mm)

Fig. 6 Reinforcement form of each simplified member section (unit: mm)

底部为连续梁构件、两侧和中间通过立柱支撑。取框架结构的中线作为计算长度,将沉管隧道框架模型简化为二维杆系模型, S1~S5 分别表示各构件的截面,具体位置如图 7(b)所示。

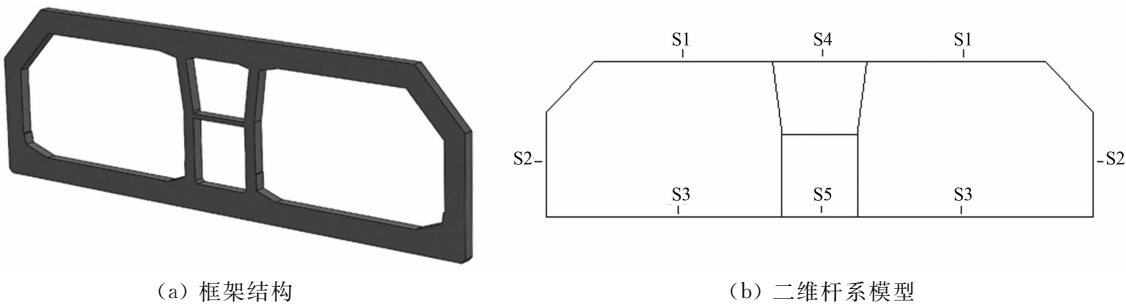


图 7 沉管隧道简化模型

Fig. 7 Simplified model of immersed tunnel

港珠澳大桥沉管隧道所用混凝土为 C50, 钢筋型号为 HRB 400, 框架结构各构件的截面材料性能参数根据截面尺寸和结构配筋等效换算得到。分别计算各构件的等效弹性模量、等效抗拉刚度和等效抗弯刚度用于内力分析, 计算结果如表 1 所示。表 1 中: l, b 分别为截面的长和宽; E_{eq}, EA_{eq}, EI_{eq} 分别为等效弹性模量、等效抗拉刚度和等效抗弯刚度。

根据图 4 的荷载分布, 采用结构力学的方法对沉管隧道进行内力分析, 绘制弯矩图、剪力图、轴力图和变形图, 如图 8 所示。

表 1 框架结构各构件的截面材料性能

Tab. 1 Cross-section material properties of each member of frame structure

参数	S1	S2	S3	S4	S5
l/m	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
b/m	1.50	1.50	1.50	1.60	1.70
E_{eq}/GPa	39.19	40.25	39.73	40.73	41.24
$EA_{eq}/\times 10^{10} N$	4.232	4.347	4.291	4.692	4.751
$EI_{eq}/\times 10^9 N \cdot m^2$	7.935	8.151	8.046	1.277	1.310

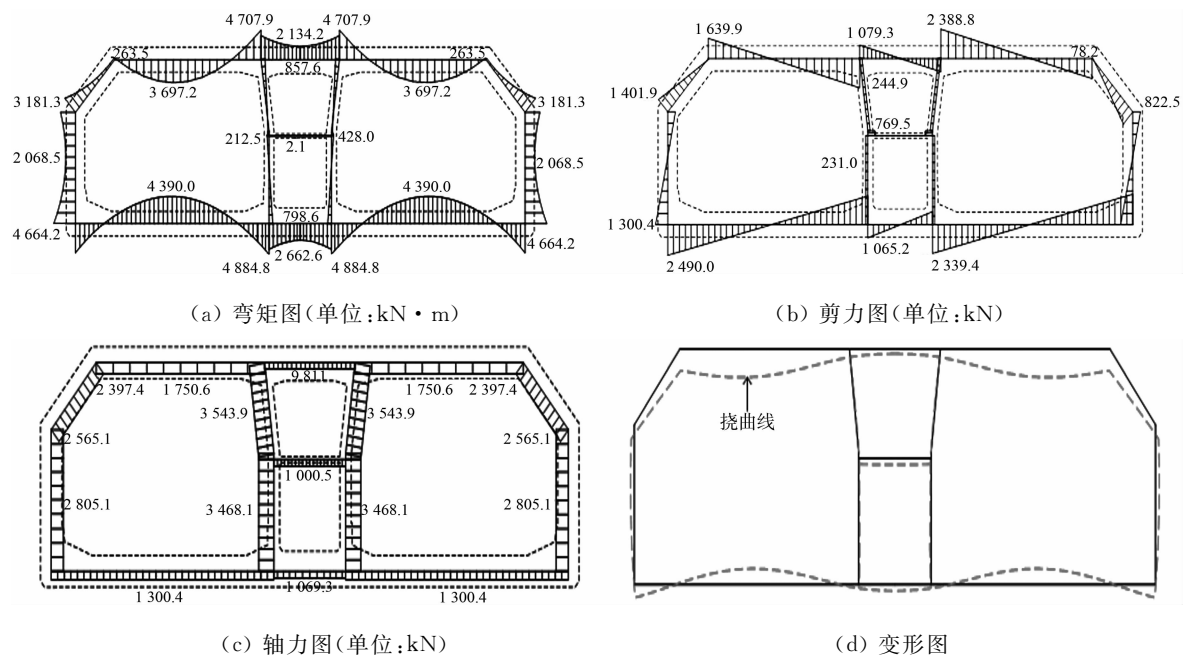


图 8 沉管隧道内力分布及结构变形图

Fig. 8 Internal force distribution and structural deformation diagram of immersed tunnel

由图 8(a)可知:沉管结构的顶板和底板的弯矩值较大,底板上的弯矩值略大于顶板;顶板和底板在节点处的负弯矩很大.这是因为沉管隧道竖直方向上的荷载和结构自重最终都会通过底板传递到地基,同时,底板的跨度也大于顶板.沉管隧道的顶板和底板可以简化为连续梁进行分析,对于顶板和底板来说,中墙就相当于支座,而连续梁一般在支座处会产生较大的负弯矩.

港珠澳大桥沉管隧道通过增大结构截面和布置负弯矩筋的方式来提高顶板和底板在负弯矩区的强度.两中墙中间的区域,顶板的厚度增大 10 cm,底板增大 20 cm,设置两个支座有助于减小连续梁在支座处的负弯矩.沉管隧道结构的直角节点处的剪力和弯矩通常都较大,也更容易出现应力集中的情况.为了减小节点处的应力集中,港珠澳大桥沉管隧道对直角节点均作了加腋处理.钢筋混凝土结构的腋角的垂直长度和水平长度比通常以 1 : 3 为宜^[12].沉管隧道底板与侧墙的节点腋角的垂直高度为 65 cm,水平长度为 195 cm;底板与中墙的节点腋角的垂直高度为 50 cm,水平长度为 150 cm,长高比均为 3 : 1;而顶板与中墙的节点腋角的水平长度为 150 cm,垂直长度为 30 cm,长度比小于 1 : 3.

顶板与侧墙通过长度为 5.1 m 的折拱连接形成的钝角节点,很大程度上降低了结构节点处的弯矩和剪力;相应地,底板与侧墙的直角节点处的弯矩和剪力却很大.

在相同荷载下,沉管隧道未作折拱处理时的弯矩和剪力分布图,如图 9 所示.对比图 8,9 可知:相对于未作折拱处理的沉管隧道,在侧墙与顶板节点处的弯矩从 4 865.1 kN·m 降低到 263.5 kN·m,剪力从 2 530.6 kN 降低到 1 639.9 kN;顶板跨中处的弯矩从 4 568.4 kN·m 降低到 3 697.2 kN·m;其他区域的内力变化较小,折拱主要降低的是顶板与侧墙节点处的剪力和弯矩,由于顶板跨度降低,顶板

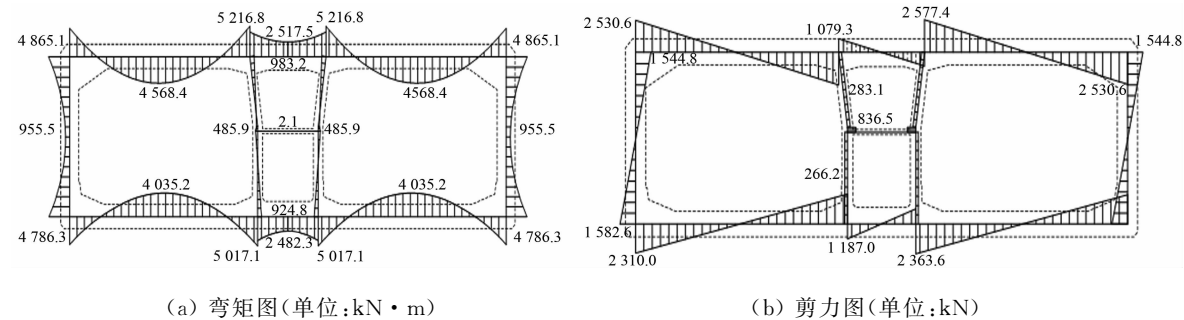


图 9 未作折拱处理时的弯矩和剪力分布图

Fig. 9 Internal force diagram of immersed tunnel without arching

跨中的弯矩降低 20%左右。

2.2 承载力分析

沉管隧道结构在外荷载作用下,所有的构件都同时承受轴向压力和弯矩,可以认为是偏心受压构件。其中,中墙所受到的轴向压力很大,弯矩很小,可以按照轴心受压进行分析。顶板、侧墙同时承受较大的轴向压力和弯矩,按照偏心受压构件分析时,轴向压力和弯矩共同控制正截面承载力的极限状态。基于平截面假定,根据正截面静力平衡方程,可以计算出各截面极限状态下的轴力弯矩图。

由截面静力平衡条件,可得

$$\left. \begin{aligned} N &= \int_0^{x_0} \sigma_c b dx + A_s' \sigma_s' - A_s \sigma_s, \\ M &= \int_0^{x_0} \sigma_c b x dx + A_s' \sigma_s' (x_0 - a_s') + A_s \sigma_s (h_0 - x_0). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: N 为轴力; M 为弯矩; x_0 为混凝土受压区高度; A_s' 、 A_s 分别为受压区、受拉区钢筋的截面面积; σ_s' 、 σ_s 分别为受压区、受拉区钢筋的应力; σ_c 为受压区混凝土距离中性轴距离为 x 处的混凝土应力; a_s' 为受压区钢筋合力点至受压区边缘的距离。

由平截面假定(图 10),可得

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \Phi x, & \epsilon_s' &= \Phi(x_0 - a_s'), & \epsilon_s &= \Phi(h_0 - x_0), \\ h_0 &= h - a, & \Phi &= 1/\rho. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: ϵ 为受压区混凝土距离中性轴距离为 x 处的混凝土应变; ϵ_s' 为受压区混凝土距离中性轴距离为 x 处的混凝土应变; Φ 为截面变形系数; ϵ_s 为受拉区钢筋的应变; h_0 为截面有效高度; ρ 为截面处的曲率; a_s 为受拉区钢筋合力点至受拉区边缘的距离; h 为构件截面高度。

采用混凝土结构设计规范^[15]中的钢筋及混凝土的本构模型,HRB 400 钢筋的弹性模量 E_s 为 206 GPa,屈服强度设计值 σ_y 为 360 MPa。假定钢筋为理想弹塑性模型,则应力(σ)-应变(ϵ)关系为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= E_s \epsilon_s, & \epsilon_s &\leq \epsilon_y, \\ \sigma_s &= \sigma_y. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= (1 - d_c) E_c \epsilon, \\ d_c &= \begin{cases} 1 - \rho_c [\alpha_a + (3 - 2\alpha_a)x' + (\alpha_a - 2)x'^2], & x' \leq 1, \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_d (x' - 1)^2 + x'}, & x' > 1, \end{cases} \\ x' &= \epsilon/\epsilon_c, & \rho_c &= f_c/(E_c \epsilon_c). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(3),(4)中: ϵ_y 为钢筋的屈服应变, $\epsilon_y = \sigma_y/E_s$; E_c 为混凝土弹性模量取 34.5 GPa; α_a 、 α_d 分别为混凝土单轴受压应力-应变曲线上段、下降段的参数值,规范中建议 C50 的混凝土分别取值 2.113,1.124; f_c 为混凝土单轴抗压强度,C50 混凝土取设计值 23.1 MPa; ϵ_c 为与单轴抗压强度 f_c 对应的混凝土峰值压应变,取 0.001 526; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化系数。根据式(4)可计算出 C50 混凝土的应力-应变曲线,如图 11 所示。图 11 中: ϵ_{cu} 为极限压应变,取 0.003 8。

分别计算出顶板、侧墙和底板在极限状态下的轴力-弯矩,如图 12 所示。图 12 中:S1,S2,S3 的坐标分别表示顶板、侧墙、底板的最大弯矩和轴力组合。由图 12 可知:各构件所受轴力远小于该构件的极限承载力,各构件均以受弯为主,在计算时应按照压弯构件计算。

为进一步验证在使用荷载下沉管隧道结构的安全性,根据平衡方程进一步计算出顶板、侧墙和底板的截面应力分布,结果如表 2 所示。表 2 中: σ_{ss} 为受拉区钢筋应力; σ_{cc} 为受压边缘混凝土应力。由表 2 可知:受拉区钢筋应力和受压区混凝土的均未达到屈服强度。

沉管隧道的顶板、侧墙和底板均承受较大的剪力,尤其是直

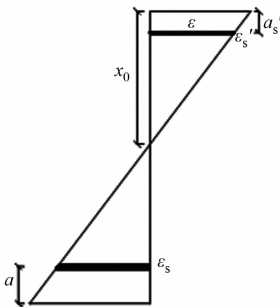


图 10 平截面假定
Fig. 10 Plane section assumption

表 2 截面钢筋与混凝土应力值
Tab.2 Sectional reinforcement and concrete stress MPa

参数	截面		
	S1	S2	S3
σ_{ss}	157.66	79.15	175.29
σ_{cc}	15.57	13.06	16.67

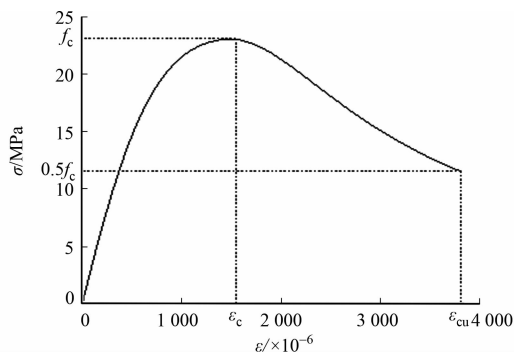


图 11 混凝土应力-应变关系

Fig. 11 Concrete stress-strain relationship

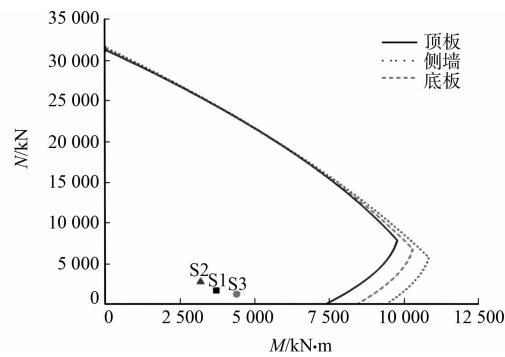


图 12 极限状态的轴力-弯矩图

Fig. 12 Axial force-bending moment diagram of limit state

角节点、中墙与底板和底板节点位置。中墙及中隔板所受剪力很小,最大处只有 769.5 kN。为了提高结构的抗剪承载力,沉管隧道各构件均布置了箍筋(图 5,6)。剪力沿构件长度方向并不一致(图 8(b)),将配置箍筋的间距进行相应的调整,共设计 4 种箍筋间距,随着剪力的增大,由疏向密逐渐过渡。以顶板为例,在跨中附近的弯矩较大、剪力较小,箍筋间距最大为 800 mm;接近节点及支座时,剪力逐渐增大,箍筋间距也逐渐减小为 600,400 mm;节点及支座处的剪力达到最大值,附近的箍筋间距为 20 mm。

一般矩形受弯构件斜截面的抗剪承载力 V_{cs} 的计算公式^[15]为

$$V_{cs} = 0.7f_tbh_0 + 1.25f_{yv}\frac{A_{sv}}{s}h_0.$$

(5)

式(5)中: f_t 为混凝土的抗拉强度设计值,C50 混凝土取值 1.89 MPa; f_{yv} 为钢筋屈服强度设计值,HRB 400 钢筋取值为 360 MPa; A_{sv} 为同一截面内箍筋总的截面积; s 为沿构件长度方向上箍筋的根间距。

根据式(5)计算各截面的抗剪承载力,结果如表 3 所示。表 3 中: V_{max} 为所受最大剪力。由表 3 可知:港珠澳大桥沉管隧道满足抗剪承载力的要求。

表 3 截面抗剪承载力计算结果

Tab. 3 Sectional shear capacity calculation results

参数	s/cm			
	80	60	40	20
V_{cs}/MN	1.954	2.187	2.653	4.050
V_{max}/MN	0.513	1.067	1.190	2.490

当沉管隧道处于海洋氯化物环境时,结构面临着氯盐侵入混凝土内部而引起钢筋锈蚀的问题,而钢筋锈蚀直接关系到结构的耐久性。港珠澳大桥沉管隧道地处珠江口的伶仃洋海域,水文勘察表明,周围海水中的化学离子成分主要为 Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , 是典型的氯盐环境^[16]。由于港珠澳大桥的重要交通地位和主体结构超长设计使用年限为 120 a,因此,对其耐久性提出了很高的要求。主要采取以下防腐蚀措施:采用防水、防开裂混凝土;对钢构件采取防锈措施;对钢筋网进行阴极保护;合理的混凝土保护层;混凝土裂缝控制。混凝土保护层的作用是保障在使用环境和荷载下,钢材与混凝土之间具有良好的黏结性能。港珠澳大桥沉管隧道内部保护层厚度为 50 mm,隧道外部保护层厚度为 70 mm。

裂缝宽度主要影响钢筋的锈蚀过程。港珠澳大桥沉管隧道要求在隧道外部(海洋氯化物环境)的最大裂缝宽度不超过 0.2 mm,隧道内部(一般环境)的最大裂缝宽度不超过 0.3 mm。对于钢筋混凝土构件,裂缝产生的原因是结构在荷载下钢筋与混凝土应变不协调,尤其是混凝土的受拉区域,混凝土材料抗拉强度较低,很小的拉应变(1×10^{-4})就可能导致混凝土结构产生裂缝^[17]。在荷载作用下,沉管隧道的承受拉(轴)力或弯矩的构件在横截面上有拉应力的存在,可能出现垂直于主拉应力方向上的裂缝。由图 8 可知:沉管隧道所用的构件都承受弯矩,其中,中墙和中隔板以轴向压力为主,弯矩很小可以忽略,而顶板和底板跨中区域承受着较大弯矩。当把顶板看作连续梁时,中墙可以看作是顶板和底板的支座,连续梁的支座处一般都会存在较大的负弯矩,在弯矩较大的区域可能出现受拉裂缝。

结合沉管隧道弯矩图,验算弯矩较大的区域的裂缝宽度。最大裂缝宽度的计算式为

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr}\phi \cdot \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \cdot \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}\right).$$

(6)

式(6)中: α_{cr} 为构件受力特征系数,受弯及偏心受压构件取值为 2.1; σ_{sk} 为按荷载效应的标准组合计算的

纵向受拉钢筋的应力, $\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0.87A_s h_0}$, M_k 为构件截面所受弯矩; c 为受拉筋外边缘至混凝土底边的距离; ρ_{te} 为混凝土有效受拉区的配筋率, $\rho_{te} = A_s / A_{te}$, 其中, A_{te} 为受拉区混凝土的截面积; ϕ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数, $\phi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sk}}$, 其中, f_{tk} 为混凝土抗拉强度的标准值, C50 混凝土的取值为 2.64 MPa; E_s 为钢筋的弹性模量, HRB 400 钢筋的取值为 206 GPa; d_{eq} 为受拉区钢筋的等效直径, $d_{eq} = \sum n_i d_i^2 / \sum n_i d_i$, 其中, d_i 为钢筋的直径, n_i 为直径为 d_i 的钢筋的个数.

在长期荷载作用下, 裂缝宽度会不断增大, 可依据式(4)计算最大裂缝宽度^[15]. 支座处的负弯矩计算值为支座中心的弯矩, 而支座中心处的截面高度较大, 所以, 危险区域一般在支座边缘, 可在计算 S4 和 S5 区域的裂缝时, 取支座边缘进行计算. 各危险区域裂缝宽度计算值与限值的对比, 如表 4 所示. 表 4 中: b_p 为保护层厚度; ω_c 为表面最大裂缝宽度计算值; ω_{lim} 为裂缝宽度限值; ω_{max} 为 30 mm 保护层下的最大裂缝宽度计算值. 由表 4 可知: 沉管隧道各危险区域的计算裂缝宽度均超过了限值, 主要是保护层厚度较大的缘故.

表 4 各危险区域裂缝宽度计算值与限值的对比
Tab. 4 Comparison between calculation value and limit value of crack width in each hazardous area mm

截面	环境类别	表面			30 mm 保护层下		
		b_p	ω_c	ω_{lim}	b_p	ω_{max}	ω_{lim}
S1	一般环境	50	0.347	0.3	50	0.287	0.3
S2	海洋氯化物环境	70	0.237	0.2	70	0.164	0.2
S3	一般环境	50	0.361	0.3	50	0.296	0.3
S4	海洋氯化物环境	70	0.216	0.2	70	0.155	0.2
S5	海洋氯化物环境	70	0.208	0.2	70	0.152	0.2

较大的保护层厚度为钢筋提供了更好的防腐蚀效果, 虽然结构表面的裂缝超过了限值, 但钢筋仍然有足够厚度的混凝土保护层. 沉管隧道设计与施工指南^[7]指出, 当对裂缝宽度无特殊外观要求时, 若保护层设计厚度超过 30 mm 时, 可将保护层厚度取为 30 mm 来计算裂缝的最大宽度. 由表 4 可知: 隧道内外表面裂缝宽度均满足裂缝宽度限值的要求. 综上可知, 港珠澳大桥沉管隧道满足在使用荷载下耐久性的要求.

3 数值模拟分析

与内力分析类似, 数值模拟是将整体隧道简化为框架结构进行分析. 采用有限元软件 Abaqus, 沿隧道长度方向上取 720 mm 作为矩形框架结构, 依据实际横截面尺寸与配筋建模; 沉管隧道基础采用温克尔弹性地基梁模型, 地基系数为 $75.0 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$. 隧道周围的荷载分布, 如图 4 所示. 混凝土强度取 C50 设计值 23.1 MPa, 采用混凝土结构设计规范中定义的本构模型, 其应力-应变关系曲线, 如图 11 所示. 钢筋型号为 HRB 400, 强度取设计值 360 MPa, 采用理想弹塑性模型.

钢筋与混凝土分离建模, 混凝土采用三维实体模型, 钢筋采用桁架模型, 将钢筋骨架嵌入混凝土中, 钢筋在混凝土内部与混凝土协同变形, 并假设不发生相对滑移. 对沉管隧道进行静力分析, 混凝土和钢筋骨架的应力云图, 如图 13, 14 所示; 结构竖向、水平位移云图, 如图 15, 16 所示; 结构变形云图, 如图 17 所示; 混凝土等效塑性应变云图, 如图 18 所示.

由图 13 可知: 混凝土在中墙区域的 Mises 应力很大. 究其原因是顶部的竖向荷载主要由中墙承担, 导致中墙的轴向压力较大, 同时中墙的截面相对于其他部件较小, 因此, 中墙的压应力较大; 而混凝土的抗压强度较好, 所以, 中墙的混凝土及钢筋没有发生任何受拉破坏. 当外部竖向荷载增大时, 如隧道顶部的沉船荷载、船舶落锚荷载, 中墙轴力会有较大增长, 这可能导致中隔墙发生轴压破坏. 所以设计配筋时, 可以考虑通过适当加密箍筋提高其延性, 或通过增大中墙截面提高其抗压承载力, 并减小轴力的偏心矩, 避免轴力增大的同时弯矩过快增长而发生受弯破坏.

钢筋骨架及结构混凝土最大应力出现在中墙与顶板节点的腋角下侧, 这主要是因为节点处的剪力

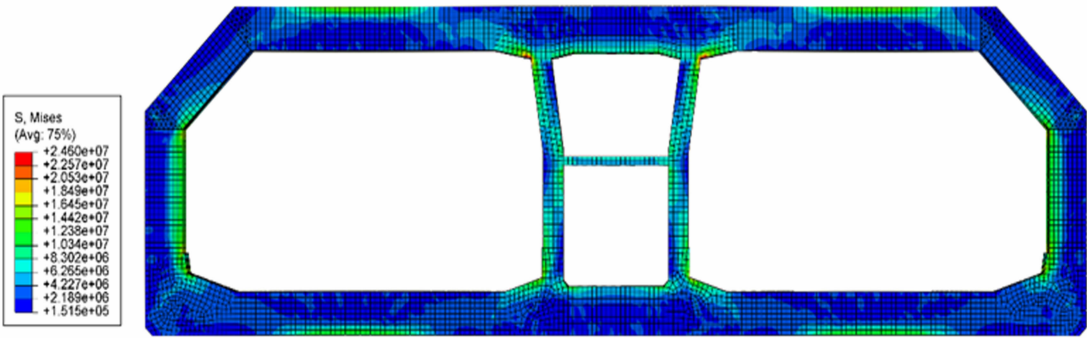


图 13 混凝土的应力云图
Fig. 13 Concrete stress nephogram

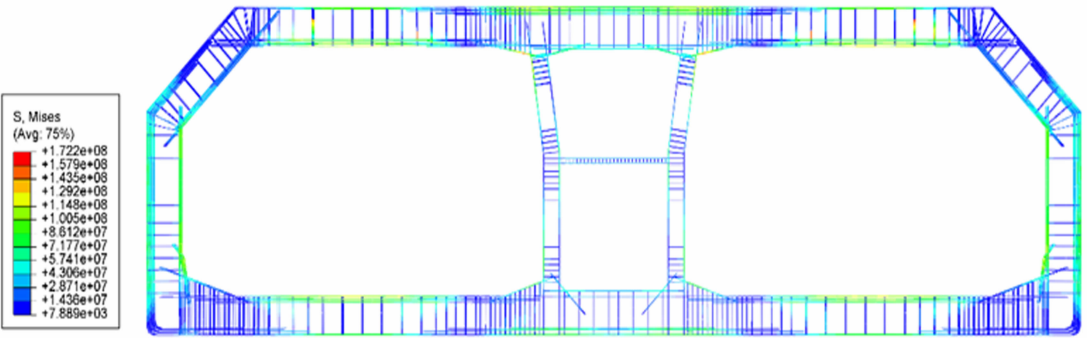


图 14 钢筋骨架的应力云图
Fig. 14 Steel bar stress nephogram

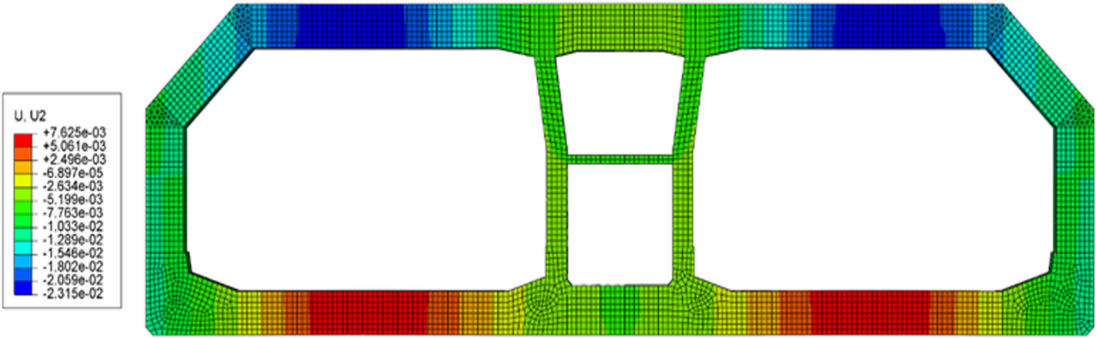


图 15 结构竖向位移云图
Fig. 15 Vertical displacement nephogram

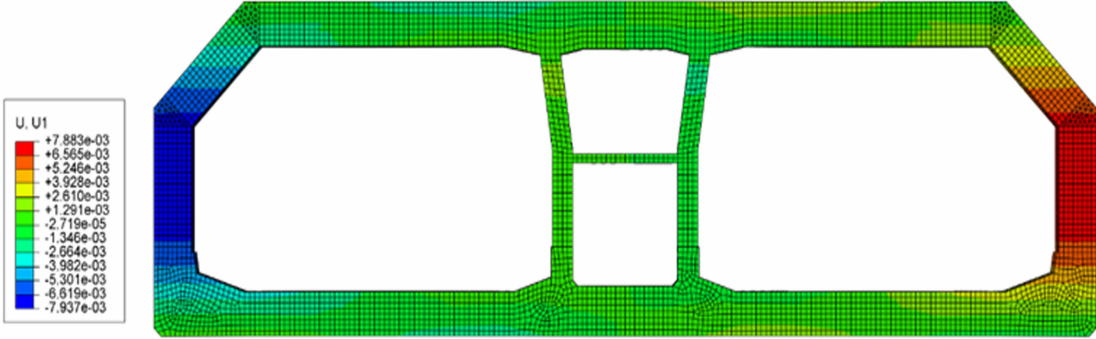


图 16 结构水平位移云图
Fig. 16 Horizontal displacement nephogram

和弯矩较大,容易出现应力集中的现象.但是此处应力为压应力,混凝土抗压强度较高,并未发生破坏.侧墙与底板的直角节点由于采取了加腋措施,均未发生屈服或破坏(图 18).沉管隧道采用折拱式横截

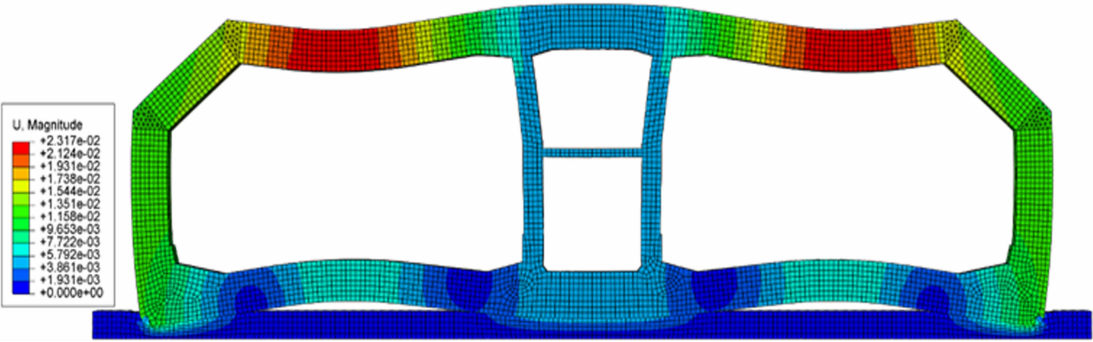


图 17 结构变形云图(×50 倍放大)

Fig. 17 Structural deformation nephogram (×50 amplification)

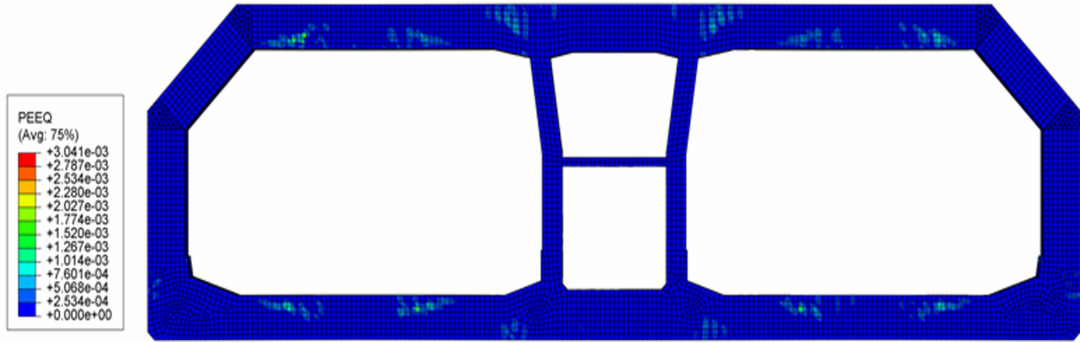


图 18 混凝土等效塑性应变云图

Fig. 18 Equivalent plastic strain nephogram of concrete

面减小节点处的弯矩和剪力,使结构受力更加合理,折拱节点的应力并不大.

沉管隧道周围的水土压力挤压隧道,竖向荷载远大于水平方向的荷载.结构的竖向变形不大,在两隧道孔洞顶板跨中区域最大变形达到 23.15 mm,其中,包括地基沉降的 7.55 mm,所以,顶板实际最大挠度为 15.62 mm,底板跨中位置挠度为 16.36 mm.底板跨中挠度略大于顶板跨中挠度主要是因为底板的荷载与跨度均大于顶板,但是底板的配筋率比顶板更高,刚度更大,所以,底板挠度仅比顶板大 0.7 mm.由于作用在隧道上的竖向荷载较大,迫使隧道侧墙向外侧变形,水平方向的水土压力对约束隧道向外侧变形也有一定的帮助.所以,隧道水平方向上变形很小,最大水平变形出现在侧墙顶部,向隧道外侧偏移 7.94 mm.中墙主要承受轴向压力,而受到的弯矩和剪力很小,所以,中墙水平方向和竖直方向上的变形都很小.从结构的总体变形上看,沉管结构的刚度足够大,地基刚度也足够大.

由图 14 可知:整个结构的钢筋最大应力为 172.2 MPa,远没有达到强度设计值 360 MPa,所以,在承载力上结构的安全性很高.混凝土属于脆性材料,抗拉强度很低,变形能力小,在受拉区域容易出现裂缝.在荷载作用下,沉管隧道的顶板、底板和侧墙均承受了较大的弯矩,很容易导致受拉一侧的混凝土发生破坏而出现裂缝.

由图 18 可知:顶板及底板的跨中受拉区都出现了受拉塑性屈服,说明混凝土达到极限受拉强度.两中墙中间区域的顶板和底板都是负弯矩区域,受拉一侧混凝土也达到受拉极限强度.相对于顶板和底板,两侧墙受到弯矩较小,受拉一侧的混凝土在弯矩较大的区域也发生了轻微受拉破坏.弯矩越大的区域,混凝土受拉破坏越明显.对比弯矩图 8(b)和图 18 可知:Abaqus 模拟中,裂缝开展区域和弯矩较大区域一致.由表 4 可知:虽然混凝土存在受拉裂缝,但裂缝宽度较小,仍然满足结构耐久性的要求.沉管隧道结构各节点处均未先于构件达到塑性状态,结构整体满足强节点、弱构件的设计要求.

4 结论

1) 由于沉管隧道的顶板和底板承受较大弯矩和轴力,中墙支撑区域出现负弯矩,所以,顶板和底板可以按照连续梁设计.两中墙可以看作顶板和底板的支座,支座节点处负弯矩较大,混凝土容易出现受

拉裂缝. 中隔墙承受很大的轴向压力, 弯矩和剪力都很小, 设计配筋时可以考虑通过适当加密箍筋提高其延性, 或通过增大中墙截面提高其抗压承载力, 并减小轴力的偏心矩, 避免轴力增大的同时弯矩过快增长而发生受弯破坏. 折拱和腋角的合理布置可以有效地减少结构节点的应力, 提高结构强度.

2) 各构件正截面的承载力均远大于所受荷载, 斜截面的抗剪承载力也远大于所受剪力. 由于沉管隧道外部环境为海洋氯化物环境, 设计使用寿命较长, 因此对耐久性要求很高. 港珠澳大桥沉管隧道要求外部混凝土裂缝宽度不能超过 0.2 mm, 裂缝宽度验算结果表明: 裂缝宽度是影响结构正常使用状态下极限承载力的关键因素.

3) Abaqus 模拟结果表明: 在使用荷载下, 港珠澳大桥沉管隧道的受压区混凝土和钢筋骨架的应力远未达到材料的极限应力, 在弯矩较大处的受拉区混凝土达到混凝土受拉强度极限而出现裂缝, 裂缝开展区域与理论分析结果一致. 此外, 节点处均未先于构件达到塑性状态, 说明折拱和加腋设计满足结构强度要求.

参考文献:

- [1] 陈韶章. 沉管隧道设计与施工[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 严金秀. 中国隧道工程技术发展 40 年[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 537-544. DOI:10.3973/j.issn.2096-4498.2019.04.002.
- [3] 胡指南. 沉管隧道节段接头剪力键作用机理与构造性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [4] GUO Jun, JIANG Shuping, ZHANG Zhuyong. Fire thermal stress and its damage to subsea immersed tunnel[J]. Procedia Engineering, 2016, 166: 296-306. DOI:10.1016/j.proeng.2016.11.552.
- [5] 王黎怡, 徐伟. 沉管隧道正常运营阶段横断面受力分析[J]. 结构工程师, 2015, 31(3): 162-168. DOI:10.3969/j.issn.1005-0159.2015.03.027.
- [6] WU Mengjun, ZHANG Qi, WU Senyang. Risk assessment of operation period structural stability for long and large immersed tube tunnel[J]. Procedia Engineering, 2016, 166: 266-278. DOI:10.1016/j.proeng.2016.11.549.
- [7] 徐国平, 吕卫清, 陈越, 等. 沉管隧道设计与施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [8] 蒋树屏, 苏权科, 周健, 等. 离岸特长沉管隧道防灾减灾关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [9] WANG Hui, BINDER E, MANG H, *et al.* Multiscale structural analysis inspired by exceptional load cases concerning the immersed tunnel of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Underground Space, 2018, 3(4): 252-267. DOI:10.1016/j.undsp.2018.02.001.
- [10] 陈韶章, 苏宗贤, 陈越. 港珠澳大桥沉管隧道新技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(5): 396-403. DOI:10.3973/j.issn.1672-741X.2015.05.002.
- [11] 刘发前. 超大跨度地下矩形隧道结构型式及经济性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 792-798.
- [12] 朱合华. 地下建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [13] 林巍, 官林星. 大断面矩形盾构法隧道设计研究与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [14] 中国交通建设股份有限公司. 沉管隧道设计施工手册[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [16] 王翩翩. 港珠澳大桥混凝土结构耐久性检测与评估研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [17] 江见鲸, 陆新征, 江波. 钢筋混凝土基本构件设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)