

沉管隧道接头三维非线性刚度力学模型

刘 鹏^{1,2}, 丁文其^{1,2}, 金跃郎^{1,2}, 刘洪洲³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100010)

摘要: 根据沉管隧道接头的构造特征, 在接头静力平衡关系的基础上, 建立了沉管隧道接头力学模型. 该模型可以计算接头的轴向位移、切向位移以及转角, 考虑了沉管隧道接头变形协调几何关系、GINA 止水带和 OMEGA 止水带的应力-应变关系, 并依据剪力键的相对位移对接头处不同工作模式进行了识别与划分. 对不同工作模式下剪力键的受力作用机理进行了分析. 利用此计算模型, 得到了沉管隧道接头的位移和力的关系曲线, 并对沉管隧道接头处不同构件的材料选取给出了建议.

关键词: 沉管隧道; GINA 止水带; 管节接头; 接头模型; OMEGA 止水带

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Three-dimension Nonlinear Stiffness Mechanical Model of Immersed Tunnel Joints

LIU Peng^{1,2}, DING Wenqi^{1,2}, JIN Yuelang^{1,2}, LIU Hongzhou³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Highway Planning and Design Institute Consultants, Inc., Beijing 100010, China)

Abstract: According to the structural characteristics and static equilibrium of the joints, immersed tube tunnel three-dimension nonlinear stiffness mechanical model was established, with which the joints' displacement in all degrees of freedom could be calculated. Furthermore, the harmonious relation for deformation and stress-strain relations of GINA and OMEGA gasket were considered. The different operating modes of the joints were divided and identified by the relative displacement of the shear key. With this model, the joints' mechanical characteristic was analyzed and the nonlinear relation between the joint displacement and the joint's internal force was also obtained.

Key words: immersed tube tunnel; GINA gasket; immersed tunnel joints; joint model; OMEGA gasket

作为水下隧道的一种施工方法, 沉管法目前正在世界各大都市、沿海地区被广泛采用. 沉管隧道是由多节位于水下的管段拼接而成, 这对管段接头的性能有着非常苛刻的要求^[1]. 从沉管隧道自身的结构特点和埋设位置来看, 其一般都修建在软弱地层中, 埋设位置比较浅. 最容易出现的问题并可能导致整条隧道丧失功能的薄弱环节在于其接头连接处. 同时沉管隧道由于其重要性及在水下的特殊性, 一旦破坏将产生灾难性后果, 且难于修复. 因此对于沉管隧道接头处的受力和位移分析十分重要.

修建在软土地基上的沉管隧道均存在不同程度的沉降, 在已运营的沉管隧道中, 管节的不均匀沉降会导致管节与管节之间接头的错动和张开, 使接头部位 GINA 止水带的止水效果降低甚至丧失, 给沉管隧道的安全运营带来很大威胁^[2-5]. 沉管隧道的荷载、荷载组合及施工工况有其特殊性, 但到目前为止, 对沉管隧道的研究集中于沉降因素分析与预测控制. 邵俊江等^[6]认为沉管隧道沉降受多种因素的综合作用. 从内因看, 沉管隧道的沉降主要是由隧道基础层的压缩变形特性及地基土的卸载再加载变形特性决定的; 而从外因看, 沉管隧道的沉降还受潮汐、河床的淤积和冲刷、区域地下水位的下降、车辆周期性动荷载、地震荷载等外部环境变化的影响. 李永胜等^[7]建立了双层土地基模型和单层土地基模型, 引入潮汐荷载函数, 预估和描述了潮汐作用引起沉管隧道的沉降规律. 管敏鑫等^[8]分析了考虑水压、土压、淤泥、列车等作用下的各种不同荷载组合, 同时将管体结构简化为平面框架, 桩基加固点简化为

收稿日期: 2013-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(51378388); 国家“九三七”重点基础研究发展计划(2011CB013800)

第一作者: 刘 鹏(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为计算土力学. E-mail: liupengreal@sina.com

通讯作者: 丁文其(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为隧道及地下工程施工力学, 动态反馈与控制.

E-mail: dingwq2004@263.com

支撑点,研究了沉管隧道地基沉降规律.目前尚无针对沉管隧道接头处的受力与位移方面的研究,大大制约了对运营沉管隧道安全状况的认识和评价.

本文根据沉管隧道接头变形协调的几何关系、GINA 止水带、OMEGA 止水带和剪力键应力-应变关系以及接头静力平衡关系,建立沉管隧道接头力学模型.

1 接头力学模型的建立

接头的力学模型总是和接头的构造相联系.图1是沉管隧道接头构造示意图.由于接头处管节刚度远比止水带大,可将接头假定为不产生挠曲变形的刚性板,将GINA 止水带看成只受压不抗拉的弹簧,OMEGA 止水带看成既受拉又抗压的弹簧,剪力键的等效弹簧上串联有阈值,表示当相对位移值超过阈值时,等效弹簧才开始起作用.沉管隧道接头部位,按各区域位置和结构的不同可以分为两大区域:含剪力键区域和不含剪力键区域.其力学模型如图2,3所示.

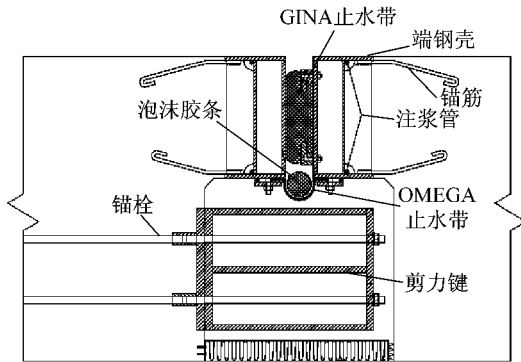


图1 沉管隧道接头构造示意图

Fig.1 Details of immersed tube tunnel joints

接头处在6个自由度方向上都存在位移(即 x 方向位移、 y 方向位移、 z 方向位移和绕 x, y, z 轴的转角),其中 x 方向位移和 y 方向位移均属切向位移, z 方向位移属轴向位移.

虽然接头处可能存在绕 x, y, z 轴3个方向的转角,但是在实际中沉管隧道接头处主要可能发生的是绕 x 轴的转角.绕 y, z 轴转动的力学组合在实际中很难存在,为了公式简洁高效,本文不做讨论.所以,接头处位移为:隧道中心处的轴向位移 $u(u=u_z, \text{即 } z \text{ 方向上的位移})$;隧道中心处的切向位移 $v(v=u_y, \text{即 } y \text{ 方向上的位移})$;沉管隧道接头面整体转动的角度 $\theta(\theta \text{ 即绕 } x \text{ 轴的转角})$.假设接头处管节断面变形前后均为平截面,则接头上任一点处

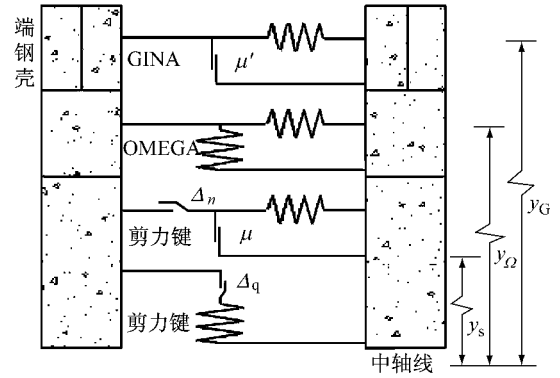


图2 含剪力键区域接头力学模型

Fig.2 Mechanical model of joint with shear key

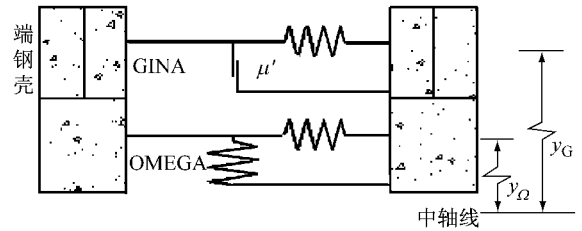


图3 不含剪力键区域接头力学模型

Fig.3 Mechanical model of joint without shear key

GINA, OMEGA 和剪力键的位移值为

$$\begin{cases} u_G = u + \theta y_G \\ u_\Omega = u + \theta y_\Omega \\ u_s = u + \theta y_s \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_G = v \pm |y_G| (1 - \cos \theta) \\ v_\Omega = v \pm |y_\Omega| (1 - \cos \theta) \\ v_s = v \pm |y_s| (1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (2)$$

式(1), (2)中: u_G, u_Ω, u_s 分别为GINA 止水带、OMEGA 止水带和剪力键的轴向位移; v_G, v_Ω, v_s 分别为GINA 止水带、OMEGA 止水带和剪力键的切向位移; y_G, y_Ω, y_s 分别为沉管隧道接头上任意处GINA 止水带、OMEGA 止水带和剪力键的坐标;“+”表示转动引起的切向位移增大,“−”表示转动引起的切向位移减小.图4为沉管隧道接头截面图.

1.1 接头材料的力学参数

1.1.1 GINA 止水带

GINA 止水带^[9]是沉管隧道防水的主要防线,由橡胶制成,其应力-应变关系见图5.对其进行拟合,公式为

$$N_G = \begin{cases} 0.003 \ 2U_G^2 + 0.864 \ 7U_G + 0.777 \ 2 & 0 \text{ mm} \leq U_G \leq 80 \text{ mm} \\ 0.215 \ 4U_G^2 - 48.227U_G + 2 \ 859.8 & 80 \text{ mm} \leq U_G \leq 200 \text{ mm} \end{cases} \quad (3)$$

式中: N_G 为GINA 橡胶止水带轴向承受的荷载; U_G

为 GINA 止水带的压缩量。

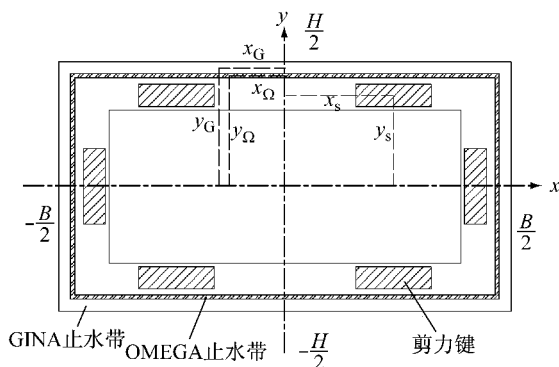


图 4 沉管隧道接头截面

Fig.4 Section of the immersed tube tunnel joints

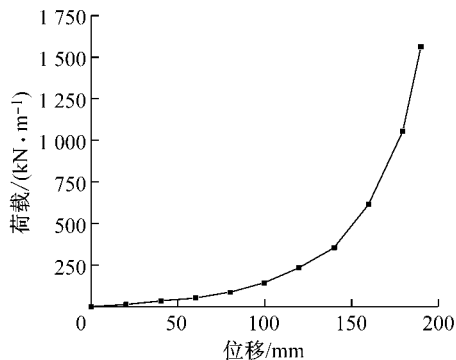


图 5 GINA 止水带的应力-位移关系

Fig.5 The stress-displacement curve of GINA gasket

1.1.2 OMEGA 止水带

OMEGA 止水带^[10]是由高强度合金钢弯制成 Ω 形状的部件,它安置在接头处的外环面上,被螺栓固定在相邻管节上,其刚度计算公式为

$$\begin{cases} k_{n\Omega} = \sum E_n B_i r_{ui}^2 \\ k_{q\Omega} = \sum E_n B_i r_{vi}^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $k_{n\Omega}$, $k_{q\Omega}$ 分别为 OMEGA 止水带的轴向刚度和切向刚度; E_n 为 OMEGA 止水带材料的模量; B_i 为 OMEGA 止水带第 i 部分的宽度; r_{ui} , r_{vi} 分别为 OMEGA 止水带的总形心与每块 OMEGA 部件的距离在轴向和切向上的投影。则 OMEGA 止水带的应力-应变关系为

$$\begin{cases} N_\Omega = k_{n\Omega} U_\Omega = k_{n\Omega} (u_\Omega + u_{\Omega 0}) \\ Q_\Omega = k_{q\Omega} V_\Omega = k_{q\Omega} (v_\Omega + v_{\Omega 0}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: N_Ω , Q_Ω 分别为 OMEGA 止水带的轴力和切向力; U_Ω , V_Ω 分别为 OMEGA 止水带在轴向和切向变形量; $u_{\Omega 0}$, $v_{\Omega 0}$ 分别为 OMEGA 止水带轴向预紧变形量和切向预紧变形量。

1.1.3 端钢壳

端钢壳材料为钢材,按理想弹性材料考虑,弹性

模量为 $E_b = 2.1 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

$$N_E = E_b b_E u_E \quad (6)$$

式中: N_E 为端钢壳受到的压力; b_E 为端钢壳的宽度; u_E 为端钢壳的轴向位移。

1.1.4 剪力键之间的橡胶垫板

剪力键是保证相邻管节之间不发生相互错动的关键部件,剪力键与榫之间在轴向与切向都留有间隙,允许少量的变形,起到“变形缝”的作用。

剪力键在切向的空隙中往往安装有橡胶垫板,起到缓冲防水的作用;在轴向的空隙中,也经常填满防水材料,但往往只起防水作用不考虑其力学性质。橡胶垫板按理想弹性材料考虑,弹性模量为 $E_r = 0.73 \text{ GPa}$ 。

1.2 接头力学行为分析

在实际中,沉管隧道管节先承受轴力作用,即施工中的水力压接力 N_0 ,接头处的 GINA 止水带在轴向产生压缩位移,待 GINA 止水带轴向压缩完毕后,再安装 OMEGA 止水带。接下来在运营中,接头可能受到因基础不平整、淤积土回淤、施工因素引起的轴力 N 、剪力 Q 和弯矩 M 。轴力、剪力和弯矩的组合 (N, Q, M) 会引起接头处的轴向位移、切向位移和转角。当轴向位移足够大,超过剪力键与榫之间在轴向的空隙时,会引起剪力键在轴向的压缩,同理,切向亦然。

与之对应的工作状态,可以归纳成以下 5 种:① 在水力压接的作用下,GINA 止水带被压紧,此时轴力完全由 GINA 止水带承担 ($v_s + \theta l \leq \Delta_q$, $u_s \leq \Delta_n$);② 当轴力过大以致 GINA 止水带的压缩量超过剪力键与榫之间的轴向间隔时,剪力键与榫直接接触,提供轴力 ($v_s + \theta l \leq \Delta_q$, $u_s > \Delta_n$);③ 因基础不平整、淤积土回淤、水力压接以及施工因素等引起的弯矩或剪力的影响,在接头处发生相对位移,此时靠 GINA 止水带和管节之间的摩擦以及 OMEGA 止水带来抵抗变形 ($v_s + \theta l \leq \Delta_q$, $u_s \leq \Delta_n$);④ 随着接头处相对位移增加,OMEGA 止水带不足以抵抗不均匀力,剪力键逐步发挥作用,阻止相对位移的增大 ($v_s + \theta l > \Delta_q$, $u_s \leq \Delta_n$);⑤ 剪力键在轴向和切向两个面上均与榫紧密接触,既提供轴力也提供切向力 ($v_s + \theta l > \Delta_q$, $u_s > \Delta_n$)。剪力键处的位移如图 6 所示。

根据沉管隧道接头处不同的相对位移值,剪力键存在不同的工作模式,对其进行受力分析得

当 $v_{si} + \theta l \leq \Delta_q$, $u_{si} \leq \Delta_n$ 时,

$$\begin{cases} N_s = 0 \\ Q_s = 0 \\ M_s = 0 \end{cases} \quad (7)$$

当 $v_{si} + \theta l > \Delta_q, u_{si} \leq \Delta_n$ 时,

$$\left\{ \begin{aligned} N_s &= 0 \\ Q_s &= \sum_{i=1}^W \int_0^l E_r b_s [v_{si} + \theta(l-l') - \Delta_q] dl' \\ M_s &= \sum_{i=1}^W \int_0^l E_r b_s [v_{si} + \theta(l-l') - \Delta_q] \cdot \\ &\quad (l-l') dl' \end{aligned} \right. \quad (8)$$

当 $v_{si} + \theta l \leq \Delta_q, u_{si} > \Delta_n$ 时,

$$\left\{ \begin{aligned} N_s &= \sum_{i=1}^W A\sigma_{ci} = \sum_{i=1}^W A\sigma_{ci}(u_{si} - \Delta_n) \\ Q_s &= \mu \sum_{i=1}^W A\sigma_{ci} = \mu \sum_{i=1}^W A\sigma_{ci}(u_{si} - \Delta_n) \\ M_s &= \sum_{i=1}^W [A\sigma_{ci}(u_{si} - \Delta_n)y_i + \mu A\sigma_{ci} \cdot \\ &\quad (u_{si} - \Delta_n)l] \end{aligned} \right. \quad (9)$$

当 $v_{si} + \theta l > \Delta_q, u_{si} > \Delta_n$ 时,

$$\left\{ \begin{aligned} N_s &= \sum_{i=1}^W A \sigma_{ci} \\ Q_s &= \sum_{i=1}^W \left[\int_0^l E_r b_s [v_{si} + \theta(l-l') - \Delta_q] \right. \\ &\quad \left. dl' + \mu A \sigma_{ci} \right] \\ M_s &= \sum_{i=1}^W \left\{ A \sigma_{ci} y_i + \mu A \sigma_{ci} l + \int_0^l E_r b_s [v_{si} + \right. \\ &\quad \left. \theta(l-l') - \Delta_q] (l-l') dl' \right\} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式(7)~(10)中: N_s , Q_s , M_s 分别为剪力键受到的轴力、剪力和弯矩; W 为剪力键的个数; l 为剪力键的长度; Δ_n 为剪力键与樁之间的轴向间隔; Δ_q 为剪力键与樁之间的切向间隔; b_s 为剪力键的宽度; σ_{ci} 为第 i 个剪力键因压缩产生的应力; y_i 为第 i 个剪力键的切向位移; μ 为剪力键与混凝土之间的摩擦系数; A 为剪力键的截面积。

1.3 沉管隧道接头的计算

因为水力压接的缘故,GINA 止水带存在初始压缩量 u_{G0} (水力压接力为 $N_0 = SH_w r$, S 为沉管隧道管节的截面积; H_w 为沉管隧道所在处的水深; r 为水的重度). 又因为 GINA 止水带是安装在端钢壳上,从受力上来看,二者是串联的关系,因此

$$N_G = N_E \quad (11)$$

$$U_G = u_G + u_{G0} - u_E \quad (12)$$

根据接头处的静力平衡条件可得

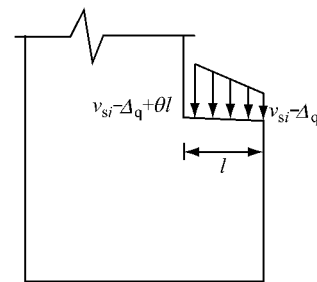


图 6 剪力键位移

Fig.6 The internal force sketch of the shear key

$$\left\{ \begin{aligned} N &= \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} N_G dx_G dy_G + \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} N_\Omega dx_\Omega dy_\Omega + \\ &\quad \langle N_s \rangle \\ Q &= \mu' \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} N_G dx_G dy_G + \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} Q_\Omega dx_\Omega dy_\Omega + \\ &\quad \langle F_s \rangle \\ M &= \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} N_G y_G dx_G dy_G + \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} N_\Omega y_\Omega dx_\Omega dy_\Omega + \\ &\quad \langle M_s \rangle \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中: x_G, x_n 为沉管隧道接头上任意处 GINA 止水带、OMEGA 止水带的截面坐标; μ' 为 GINA 止水带与混凝土之间的摩擦系数; $\langle N_s \rangle, \langle F_s \rangle, \langle M_s \rangle$ 表示当剪力键处的相对位移值超过剪力键和对应榫之间的空隙时, 剪力键开始发挥作用, 不同工作状态时对应的不同力学关系即体现在此处。

求解时,首先假设接头处的位移符合工作模式

$$\textcircled{1}(v_s + \theta l \leq \Delta_q, u_s \leq \Delta_n), \text{代入} \begin{cases} N_s = 0 \\ Q_s = 0 \\ M_s = 0 \end{cases} \text{进行计算,求}$$

得 u, v, θ 后, 再检验其是否满足 $v_s + \theta l \leq \Delta_q, u_s \leq \Delta_n$ 的条件. 如果满足, 则即为所求; 如果不满足再代入其他的工作模式求解, 直至符合要求. 在求解的过程中, 要时时注意判断接头所处的力学状态, 不断调整 N_s, Q_s 和 M_s 的取值. 利用上面的方法进行求解, 便可以得到在任一组轴力、剪力和弯矩的组合 (N, Q, M) 作用下, 接头处的位移, 即 u, v, θ .

2 模型讨论

以港珠澳沉管隧道工程为研究对象。港珠澳海底隧道采用“两孔一管廊”横断面,如图 7 所示,全宽 37.95 m,高 11.4 m。两侧为行车道孔,设计净宽 14.25 m,净高 5.1 m,中间为综合管廊;上部为专用

排烟通道;中部为安全横通道,限界高 2.2 m;下部为电缆沟和泵房。管节结构采用钢筋混凝土预制,管节形式采用节段式管节,每个节段的长度为 22.5 m,8 个节段组成 1 个管节,管节的长度为 180 m。在此处的计算中,轴力的建议取值范围为(0, 200 MN);剪力的建议取值范围为(0, 400 MN);弯矩的建议取值范围为(0, 9 000 MN·m)。计算模型和管节接头的结构详细参数如表 1 所示。

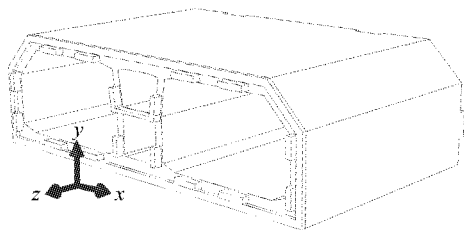


图 7 港珠澳沉管隧道接头示意图

Fig.7 Sketch of Hongkong-Zhuhai-Macau tube tunnel joints

表 1 沉管隧道接头的结构及材料性能参数

Tab.1 Structure of tunnel and parameters of material performance

Δ_n/m	Δ_q/m	μ'	μ	H/m	l/m	W	b_s/m	S/m^2
0.15	0.1	0.7	0.5	35	0.8	8	2	420

图 8~10 为接头处受到的力和位移的关系曲线。从图中可以看出,因为 GINA 和 OMEGA 止水带的作用,接头处的相对位移和力的关系曲线都呈现明显的非线性,止水带可以起到很好的缓冲作用,对接头处的各种构件是一种保护。当轴向相对位移在 15 cm 左右而切向相对位移在 10 cm 左右时,接头处的刚度增大趋势明显,这是因为剪力键与榫之间的空隙在轴向为 15 cm,在切向为 10 cm。所以随着相对位移的增大,剪力键逐渐接触并且压紧,和 GINA,OMEGA 止水带一起发挥抵抗作用,而且作用更加显著。

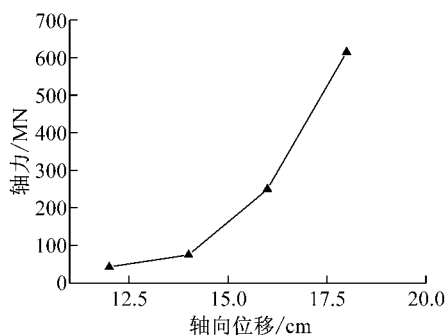


图 8 接头处的轴向位移和轴力的关系

Fig.8 Axial displacement-force curve of the joint

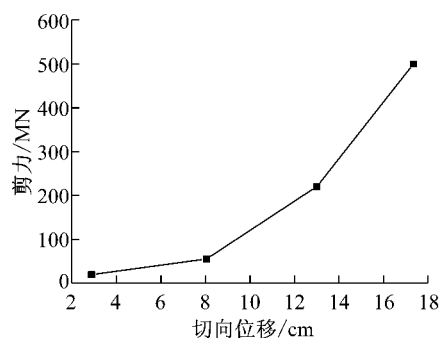


图 9 接头处的切向位移和剪力的关系

Fig.9 Tangential displacement-force curve of the joint

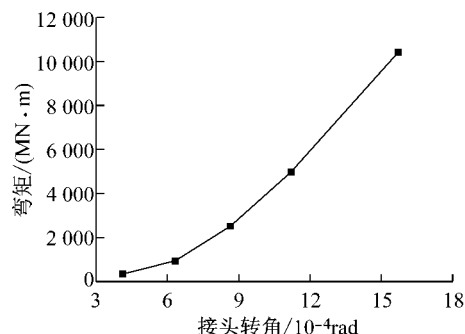


图 10 接头处的相对转角和弯矩的关系

Fig.10 Relative angle-moment curve of the joint

图 11,12 分别为 OMEGA 止水带和剪力键当采用不同刚度值时所对应的接头转角和位移值的关系曲线。从中可以看出,受到因基础不平整、淤积土回淤、施工因素引起的轴力 N 、剪力 Q 和弯矩 M 时,在接头处会产生相对错动,接头处的抵抗力主要由剪力键提供。因此接头处剪力键的位移-刚度关系就至关重要,在设计中必须保证剪力键能提供足够的刚度,保证接头处止水带的正常工作,以达到防水要求。

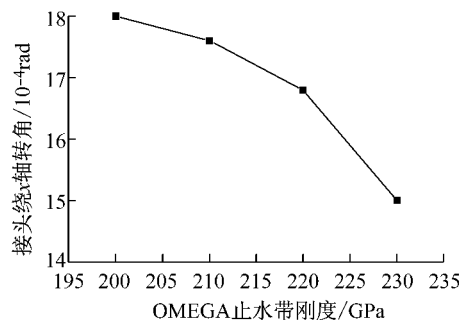


图 11 OMEGA 刚度不同时对应的转角位移

Fig.11 Relative angle curve with various stiffness of OMEGA gasket

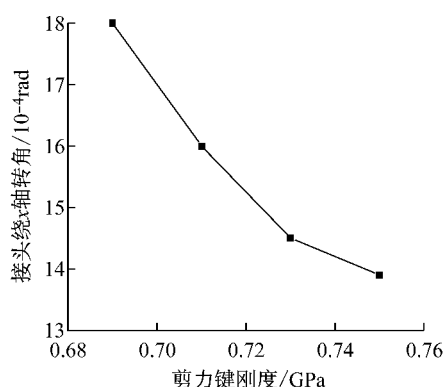


图12 剪力键刚度不同时所对应的转角位移

Fig.12 Relative angle curve with various stiffness of the shear key

3 结 语

根据沉管隧道接头变形协调的几何关系,GINA止水带、OMEGA止水带和剪力键的非线性应力-应变关系,在接头静力平衡的基础上,建立了沉管隧道三维非线性刚度接头力学模型.该模型可以计算接头处的轴向位移、切向位移以及转角,并根据剪力键的相对位移划分了接头的不同工作模式,根据不同工作模式下的力学关系,可以计算出任意一组组合力所对应的位移值.通过分析讨论,此模型基本上可满足工程分析要求.

参考文献:

- [1] 于洪丹,陈卫忠,郭小红,等.潮汐对跨海峡隧道衬砌稳定性影响研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增1):2905.
YU Hongdan, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong, et al. Research on effect of tide on stabilities of channel tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Supplement 1): 2905.
- [2] 刘正根,黄宏伟.沉管隧道GINA止水带性能评估与安全预警[J].地下空间与工程学报,2009,5(2):347.
LIU Zhenggen, HUANG Hongwei. Performance evaluation and safety pre-warning of GINA in immersed tube tunnel[J]. Chinese Journal of Under-ground Space and Engineering, 2009, 5(2): 347.
- [3] 刘正根,黄宏伟,赵永辉,等.沉管隧道实时健康监测系统[J].地下空间与工程学报,2008,4(6):1110.
LIU Zhenggen, HUANG Hongwei, ZHAO Yonghui, et al. Immersed tube tunnel real-time health monitoring system [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4 (6): 1110.
- [4] 张旭,赵国勇,叶冠林,等.沉管接头简化方法及三维抗震有限元分析[J].地下空间与工程学报,2011,7(增1):1292.
ZHANG Xu, ZHAO Guoyong, YE Guanlin, et al. Simplified method and three-dimensional finite element analysis of quake-proof for immersed tube tunnel joints[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Supplement 1): 1292.
- [5] 刘正根,黄宏伟,张冬梅.沉管隧道接头三维非线性数值模拟[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):692.
LIU Zhenggen, HUANG Hongwei, ZHANG Dongmei. 3D nonlinear numerical simulation on immersed tunnel joint[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 692.
- [6] 邵俊江,李永盛.沉管隧道沉降问题的探讨[J].地质与勘查,2003,39(增):178.
SHAO Junjiang, LI Yongsheng. Study on settlement of immersed tunnel [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39 (Supplement): 178.
- [7] 邵俊江,李永盛.潮汐荷载引起沉管隧道沉降计算方法[J].同济大学学报:自然科学版,2003,31(6):657.
SHAO Junjiang, LI Yongsheng. Calculation methods for settlements of immersed tunnels induced by tidal load [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(6): 657.
- [8] 万晓燕,管敏鑫,唐英.沉管隧道段的结构计算和分析[J].世界隧道,1999(3):19.
WAN Xiaoyan, GUAN Minxin, TANG Ying. Constitutive calculation and analysis of immersed tube element [J]. World Tunnel, 1999(3): 19.
- [9] 樊庆功.隧道接缝橡胶密封垫防水性能试验及有限元分析[D].上海:同济大学土木工程学院,2002.
FAN Qinggong. Tunnel joints rubber gasket waterproof performance tests and finite element analysis [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2002.
- [10] 陈鸿,贺春宁,乔宗昭.上海外环沉管隧道设计(十一)——管段接头设计[J].地下工程与隧道,2006(1):15.
CHEN Hong, HE Chunyu, QIA Zongzhao. Discussion on several design points of East Fuxing Road River Crossing Tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2006(1): 15.