

文章编号: 1000-4750(2014)06-0145-06

沉管隧道接头力学模型及刚度解析表达式

禹海涛^{1,2}, 袁 勇³, 刘洪洲⁴, 李贞新⁴

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200030;

3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

摘 要: 接头刚度是表征沉管隧道接头性能的最重要参数。目前沉管隧道接头刚度的取值既无现成的解析表达式或图表可循, 也无接头力学性能试验数据支持。该文根据接头构造设计特点提出力学假定, 将接头GINA止水带抽象为弹簧, 接头板则假定为不产生挠曲变形的刚性板, 在此基础上建立了接头的力学模型。根据受力平衡方程和变形协调方程, 推导出接头刚度的解析表达式。通过与所设定的接头三维精细化基准模型在相同设计参数下的结果对比, 验证了接头力学模型及刚度解析解的合理性。最后应用该力学模型进行了接头参数敏感性分析, 预测了各种因素对接头刚度的影响规律。

关键词: 沉管隧道; 接头刚度; 力学模型; 解析解; 敏感性分析

中图分类号: TU93 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.012.0987

MECHANICAL MODEL AND ANALYTICAL SOLUTION FOR STIFFNESS IN THE JOINTS OF AN IMMERSED-TUBE TUNNEL

YU Hai-tao^{1,2}, YUAN Yong³, LIU Hong-zhou⁴, LI Zhen-xin⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4. CCCC Highway Consultants CO., Ltd, Beijing 100088, China)

Abstract: Stiffness is one of the most important parameters in representing the performance of joints of an immersed tunnel. At present, neither analytical solutions nor experimental data are available to study joint stiffness in immersed tunnels. A mechanical model for element joints is proposed with assumptions based on the design characteristics of immersed joints, in which springs are assumed to model behaviors of GINA rubber and non-deformable rigid plates are assumed for segments. An analytical solution for joint stiffness is derived according to equations of stress equilibrium and deformation compatibility. A benchmark model, a three-dimensional refined model of an immersed joint, is used to calibrate the presented model and the derived closed-form solution for joint stiffness. Comparison under the same geometrical and material parameters shows a high degree of consistency between the two, which verifies both the presented model and analytical solution. Finally sensitivity analyses of parameters for joints are carried out using the proposed model, and potential influences of parameters on joint stiffness are predicted.

Key words: immersed tunnel; joint stiffness; mechanical model; analytical solution; sensitivity analysis

收稿日期: 2012-12-19; 修改日期: 2013-01-26

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2012M510113); 国家自然科学基金项目(51208296); “十一五”国家科技支撑计划项目(2011BAG07B01); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1029)

通讯作者: 禹海涛(1983—), 男, 河南人, 博士后, 从事地下结构动力学问题研究(E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn).

作者简介: 袁 勇(1963—), 男, 云南人, 教授, 博士, 从事地下结构抗震研究(E-mail: yuany@tongji.edu.cn);

刘洪洲(1968—), 男, 河北人, 教授级高工, 博士, 副总工, 从事水下隧道结构设计(E-mail: liuhongzhou@sina.com);

李贞新(1979—), 男, 河南人, 高工, 博士, 从事水下隧道抗震设计(E-mail: zhenxinli1999@gmail.com).

沉管接头是沉管管段之间的连接构件。由于接头部位的刚度比正常管段小得多,整个沉管隧道的不均匀沉降等变形都集中到接头部位,使接头部位成为受力和变形的焦点。正常管段的强度和刚度大,耐久性、安全性均较好,因此接头成为整个沉管隧道中最薄弱且非常关键的环节,同时也是制约沉管隧道结构抗震设计的关键。

表征沉管隧道接头性能的最重要的参数是接头刚度^[1-5]。目前,接头刚度的取值尤其是抗弯刚度取值尚无现成的公式或图表可循,一般是通过经验估计或建立三维数值模型计算得到,如严松宏等^[6]针对南京沉管隧道采用多质点-弹簧模型进行纵向抗震分析,计算中基于经验估计分别考虑接头刚接、铰接和弹性连接三种情况;Anastasopoulos 等^[7]对强震区深水条件下某沉管隧道建立了三维精细化接头模型并进行非线性抗震分析;丁峻宏等^[8-9]提出了基于显式有限元和高性能计算上的大规模数值模拟仿真方法,建立了包括地基土、沉管隧道以及柔性接头在内的全三维分析模型。一方面,经验估计的方法缺乏理论依据^[10-11];另一方面,所建立的三维数值计算模型严格地取决于计算参数的选取,而且由于沉管隧道接头构造复杂,如果要精确地反映接头力学性能,需要建立庞大的接头三维精细化模型,从而费时费力。即便如此,由于沉管隧道接头抗弯刚度是随弯矩、轴力变化的,因而还需考虑偏心距的影响。因此,如何建立合理的沉管隧道接头力学模型及解析表达式是指导沉管隧道结构设计的坚实基础。

本文基于沉管隧道接头的构造特点,提出合理的接头模型简化假定,建立合理的沉管隧道接头力学模型。根据受力平衡原理和几何方程,推导出能够表征沉管隧道接头刚度的解析表达式。以接头三维精细化有限元模型作为基准模型,通过在相同设计条件下的接头刚度对比来验证所建立的接头力学模型。在此基础上,结合建立的力学模型分析不同参数对接头刚度的影响规律。

1 沉管隧道接头构造及力学模型

20 世纪 60 年代以来随着橡胶止水带的出现,柔性接头在沉管隧道中的运用越来越广泛。柔性接头适用于地质条件差、地震活动频繁、抗震设防烈度高的地区,我国采用沉管法施工的大型公路隧道如宁波常洪隧道、上海外环线沉管隧道、广州仓头-生

物岛沉管隧道以及生物岛-大学城沉管隧道等均采用了这种形式的接头。柔性接头主要由端钢壳、GINA 止水带、 Ω 止水带、剪切键等组成,如图 1 所示。其中 GINA 止水带是沉管隧道接头密封防水及安全的重要屏障,其工作状态是反映接头结构寿命和沉管隧道止水安全性能的关键。GINA 止水带能很好的适应管段不均匀沉降所产生的变形,具有良好的止水效果。柔性接头的轴向压力由 GINA 止水带来抵抗,因此压缩量是描述和评价 GINA 止水带状态最敏感的参数,接头的压缩刚度和压缩量可以通过对 GINA 橡胶止水带的特性、形状以及高度等指标进行设计来调整。

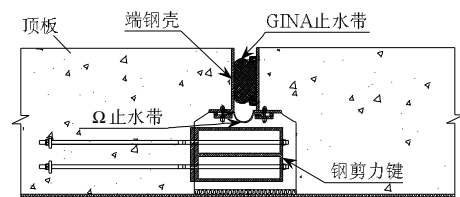


图 1 柔性接头构造示意图

Fig.1 Configuration of the flexible joint

根据沉管隧道接头的构造和受力特点进行简化,即沉管隧道接头的轴向压力由 GINA 止水带来抵抗,假定:1) 由于沉管隧道接头管节位置顶底板及侧墙厚度、刚度远大于接头处的 GINA 止水带,将接头断面假定为不产生挠曲变形的刚性板;2) 沿周边布置的 GINA 止水带可看作分布于顶、底板和侧墙位置处的四个只受压不抗拉的弹簧。根据上述简化计算假定,以钢板和弹簧元件建立沉管隧道接头结构力学模型,如图 2 所示。图中, K_A 为接头断面顶板布置 GINA 止水带简化后的只受压不受拉弹簧; K_B 为接头断面中性轴上部侧墙布置 GINA 止水带简化后的只受压不受拉弹簧; K_C 为接头断面底中性轴下部侧墙布置 GINA 止水带简化后的只受压不受拉弹簧; K_D 为接头断面底板布置 GINA 止水带简化后的只受压不受拉弹簧; a 、 b 、 c 、 d 分别为弹簧 $K_A \sim K_D$ 到中性轴的距离。

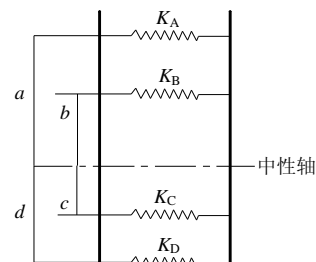


图 2 接头结构力学模型

Fig.2 Mechanical model of the flexible joint

沉管隧道接头具有两个方向的抗弯刚度,即竖直平面内和平面外抗弯刚度,如图3所示。上述建立的接头力学模型具有通用性,可以用来描述两个方向的抗弯受力,差别仅在于弹簧位置的不同。如果表征竖直平面内的接头抗弯刚度,则图中 K_A 和 K_D 分别为接头断面顶、底板处GINA止水带简化后的只受压不受拉弹簧; K_B 和 K_C 分别为接头断面两侧墙在中性轴上部、下部布置GINA止水带简化后的只受压不受拉弹簧。

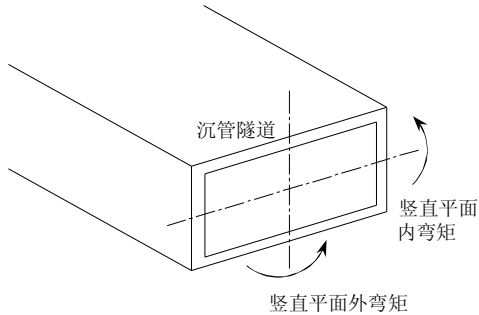


图3 接头弯矩示意图

Fig.3 Moment schematic of the flexible joint

2 沉管隧道接头刚度解析解

根据所建立的接头结构力学模型,并考虑初始条件的影响,即在所建立的接头力学模型中,将由水力压接引起的轴向压力 N_0 作为外部力施加在离中性轴距离为初始偏心距 e_0 的位置上,从而可以得出如图4所示的接头结构受力分析模型。需要说明的是,目前沉管隧道施工中均采用水力压接技术^[12],即依靠管节水下对接排水后作用在后端封墙上的巨大水压力将管段推向前方,使GINA止水带产生压缩变形,起到止水作用。由于通常水力压接引起的轴向压力 N_0 巨大(约 $10^7 \sim 10^8 \text{N}$),因此沉管隧道接头始终保持在压紧状态,即接头上各点的位移始终为压缩。

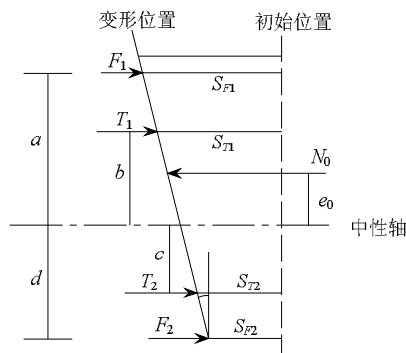


图4 接头结构分析模型

Fig.4 Analytical model of the flexible joint

接头两个方向的抗弯刚度解析解推导基本相同,以下仅介绍竖直平面内(如图3)接头抗弯刚度的推导过程,对于竖直平面外刚度可参照推导。

依据受力平衡方程和变形协调方程推导出接头抗弯刚度 K_q 的力学解析表达式。具体推导过程如下:首先,沉管隧道接头在初始轴向压力 N_0 作用下处于压紧状态,计算中考虑了初始外力的偏心距 e_0 。在 N_0 作用下接头GINA止水带处于压紧状态,产生位移 S_0 和转角 q ,因 q 很小, $\tan q \approx q$ 。则顶底板和侧墙处的GINA止水带压缩量分别为:

$$\begin{cases} S_{F1} = S_0 + (a+d)q \\ S_{T1} = S_0 + (b+d)q \\ S_{T2} = S_0 + (d-c)q \\ S_{F2} = S_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: S_{F1} 为接头断面顶板布置GINA止水带的压缩量; S_{T1} 为接头断面中性轴上部侧墙布置GINA止水带的压缩量; S_{F2} 为接头断面底板布置GINA止水带的压缩量; S_{T2} 为接头断面中性轴下部侧墙布置GINA止水带的压缩量; a 、 b 、 c 、 d 分别为弹簧 $K_A \sim K_D$ 到中性轴的距离(如图2),由断面中性轴和GINA布置的相对位置来确定。

GINA止水带是一种典型的非线性超弹性材料,其力学特性曲线由试验获得。GINA止水带加载变形曲线一般可表示为指数关系:

$$F_d = E_r d^a \quad (2)$$

式中: F_d 为加载压力大小; d 为对应的GINA压缩量; E_r 为系数; a 为指数。

如果采用式(2)来推导接头刚度表达式,则所建立的力学模型中涉及求解非线性方程组的困难,接头刚度无法显式表示,而采用数值解将导致计算量增加。为解决这一难题,GINA止水带的加载变形曲线常被简化为两阶段的双折线模型,如图5所示。这种简化做法已被国内外学者公认和试验证实^[13],并被广泛用于不同的数值计算中^[7]。

因此,沿接头断面周边布置的GINA止水带所受压力为:

$$\begin{cases} F_1 = k_{G1} S_{F1} = k_{G1} [S_0 + (a+d)q - f] \\ F_2 = k_{G2} S_{F2} = k_{G2} (S_0 - f) \\ T_1 = k_{G3} S_{T1} = k_{G3} [S_0 + (b+d)q - f] \\ T_2 = k_{G4} S_{T2} = k_{G4} [S_0 + (d-c)q - f] \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_{G1} 、 k_{G2} 、 k_{G3} 和 k_{G4} 分别为顶、底板和侧墙处GINA止水带产生相应压缩量所对应的刚度,

由 GINA 止水带的压缩特性曲线来确定(如图 5); f 为 GINA 止水带压缩量两阶段的调整参数, 对应压缩量在第一阶段时 $f=0$, 在第二阶段时 f 由阶段变化拐点的位置和 GINA 第二阶段刚度共同控制。假设 GINA 压缩特性曲线阶段变化拐点处对应的压缩量和力分别为 d 和 F , GINA 第二阶段刚度为 k_G^{II} , 则式(3)中 GINA 压缩量位于第二阶段时对应的 f 可表示为:

$$f = d - \frac{F}{k_G^{\text{II}}} \quad (4)$$

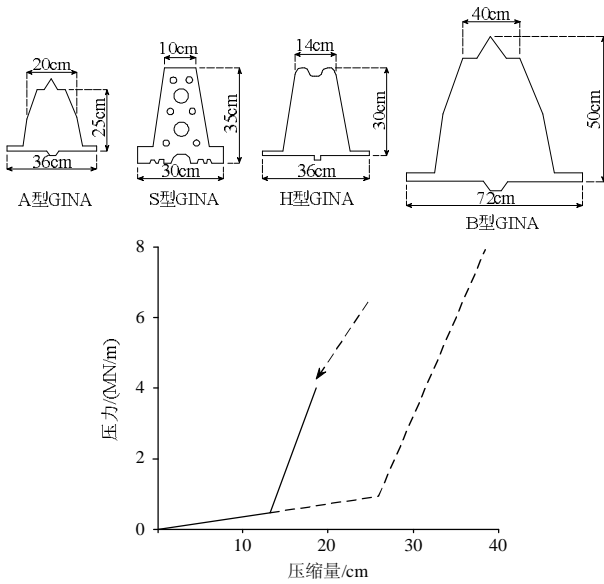


图 5 不同类型 GINA 止水带压缩特性曲线^[7]

Fig.5 Compressive behaviors of different GINA types^[7]

由力平衡条件:

$$F_1 + F_2 + T_1 + T_2 = N_0 \quad (5)$$

由力矩平衡条件:

$$F_1 a + T_1 b = T_2 c + F_2 d + N_0 e_0 \quad (6)$$

解得:

$$\begin{cases} S_0 = \frac{DN - BM}{AD - BC} \\ q = \frac{AM - NC}{AD - BC} \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{cases} A = k_{G1} + k_{G2} + k_{G3} + k_{G4} \\ B = k_{G1}(a+d) + k_{G3}(b+d) + k_{G4}(d-c) \\ C = k_{G1}a + k_{G3}b - k_{G2}d - k_{G4}c \\ D = k_{G1}a(a+d) + k_{G3}b(b+d) - k_{G4}c(d-c) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} N = N_0 + (k_{G1} + k_{G2} + k_{G3} + k_{G4})f \\ M = N_0 e_0 + (k_{G1}a + k_{G3}b - k_{G2}d - k_{G4}c)f \end{cases} \quad (9)$$

从而可推得沉管隧道接头抗弯刚度为:

$$K_M^E = \frac{M_w}{q} = \frac{N_0 e_0}{q} = \frac{N_0 e_0 (AD - BC)}{AM - NC} \quad (10)$$

在具体计算的过程中, 考虑 GINA 两阶段刚度变化的迭代计算流程如下:

1) 将已知的 N_0 、 e_0 、 $k_{G1}-k_{G4}$ 和 $a-d$ 代入式(7)~式(9)中, 并令 $f=0$, 从而求得 S_0 和 q ;

2) 根据 GINA 两阶段压缩特性曲线, 判断压缩量 S_0 处于哪个阶段;

3) 如果是第一阶段, 则继续求解, 将各参数代入式(10)中最终求得接头刚度 K_M^E ;

4) 如果是第二阶段, 根据式(4)求得 f , 并重新代入式(7)~式(10), 最终求得接头刚度。

3 模型验证

为了验证所建立的接头力学模型和推导的接头刚度解析解, 根据文献[7]设定了能够表征接头三维精细化构造的基准模型, 如图 6 所示。为尽量模拟实际情况, 管节每个端面沿接头周长方向每米设置一个节点, 采用两组节点框架模拟管节接头, 每组节点与管节端点刚性连接。相邻两组节点框架则根据 GINA 止水带的位置和特性采用非线性弹簧连接, 其力学特性如图 5 所示。所建立的基准模型采用有限元方法计算, 单元总数 162 个, 其中 GINA 非线性弹簧单元 98 个, 管节梁单元 64 个。

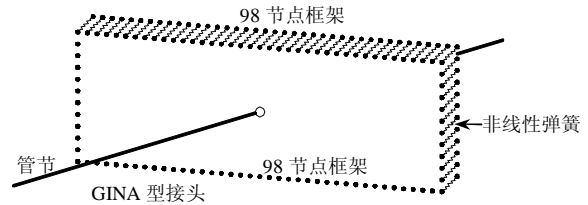


图 6 三维精细化接头模型

Fig.6 Three-dimensional refined model of joint

以在建的港珠澳沉管隧道工程为应用背景, 基于相同的设计参数通过接头刚度计算结果对比来验证所建立的力学模型。港珠澳大桥是列入《国家高速公路网规划》的重要交通建设项目, 其海底隧道采用沉管隧道方案, 全长 6.753km, 为目前世界上最长的沉管隧道。该隧道管节横断面长 38m, 宽 11.4m, 顶底板及侧墙厚度为 1.5m, 接头构造设计如图 1 所示。接头的基本计算参数见表 1, 包括初始轴向压力 N_0 、初始偏心距 e_0 、断面中性轴和简化弹簧的相对位置 $a-d$ 等。该隧道接头拟采用四种具有不同压缩特性曲线的 GINA 止水带, 如图 7 所示。不同类型 GINA 接头的计算参数见表 2, 表中

GINA 止水带所示刚度均为第二阶段刚度 k_G^{II} 。

表 1 基本参数

Table 1 Fundamental parameters

参数	N_0/N	e_0/m	a/m	b/m	c/m	d/m
平面内	1.76×10^8	0.235	5.5	3.93	3.67	5.3
平面外	1.76×10^8	0.235	18.7	11.67	11.67	18.7

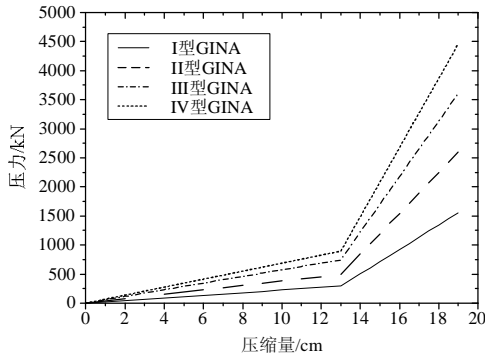


图 7 不同类型 GINA 止水带的压缩特性曲线

Fig.7 Compressive characteristics of different GINA types

表 2 不同类型 GINA 接头的计算参数

Table 2 Parameters of different GINA types

参数	$k_{G1}/(N/m)$	$k_{G2}/(N/m)$	$k_{G3}/(N/m)$	$k_{G4}/(N/m)$	$f/(N/m)$
I 型 平面内	7.98×10^8	7.98×10^8	1.85×10^8	1.68×10^8	0.103
GINA 平面外	2.39×10^8	2.39×10^8	7.98×10^8	7.98×10^8	0.103
II 型 平面内	1.33×10^9	1.33×10^9	3.09×10^8	2.81×10^8	0.114
GINA 平面外	4.00×10^8	4.00×10^8	1.33×10^9	1.33×10^9	0.114
III 型 平面内	1.81×10^9	1.81×10^9	4.20×10^8	3.82×10^8	0.118
GINA 平面外	5.44×10^8	5.44×10^8	1.81×10^9	1.81×10^9	0.118
IV 型 平面内	2.26×10^9	2.26×10^9	5.24×10^8	4.76×10^8	0.121
GINA 平面外	6.78×10^8	6.78×10^8	2.26×10^9	2.26×10^9	0.121

根据所建立的力学模型和所设定的三维精细化接头基准模型，分别计算四种不同 GINA 参数对应的竖直平面内和平面外的接头刚度如表 3 所示。从表 3 可以看出两种模型在相同条件下计算结果的最大误差较小，约为 10%，表明两种模型的计算结果基本一致，从而验证了所建立接头力学模型及推导的刚度解析解的合理性。

表 3 接头刚度对比

Table 3 Comparisons of joint stiffness

	抗弯刚度/ $(\times 10^{11} N \cdot m)$							
	I 型 GINA		II 型 GINA		III 型 GINA		IV 型 GINA	
	平面内	平面外	平面内	平面外	平面内	平面外	平面内	平面外
解析解	1.25	3.85	2.09	6.43	2.85	8.74	3.55	10.9
数值解	1.20	3.91	2.25	6.82	2.98	8.63	3.89	11.8
误差分析/ (%)	4	2	8	6	5	1	10	8

4 接头参数敏感性分析

在以上验证接头力学模型合理性的基础上，采

用推导得到的接头刚度解析表达式可以清晰地描述各种因素对接头力学性能的影响规律。以竖直平面内接头抗弯刚度为例来阐述多因素变化对接头刚度的影响，平面外接头抗弯刚度具有与其相同的变化规律。需要说明的是，以下参数分析均是基于港珠澳沉管隧道工程，在保证其余参数不变的基础上仅改变某一个独立参数，从而直观地得到该参数变化对接头力学性能的影响规律。

4.1 GINA 止水带压缩特性的影响

GINA 压缩特性对接头刚度的影响见图 8。可以看出，接头刚度随着 GINA 止水带压缩刚度的增大而线性增加。在实际工程中，如果 GINA 止水带刚度过小，则接头张开量会比较大，对接头止水不利；如果 GINA 止水带刚度过大，虽然接头张开量会变小，但接头受力会增加很多。因此选取合理的 GINA 止水带压缩刚度应建立在同时满足接头受力和变形的基础上。

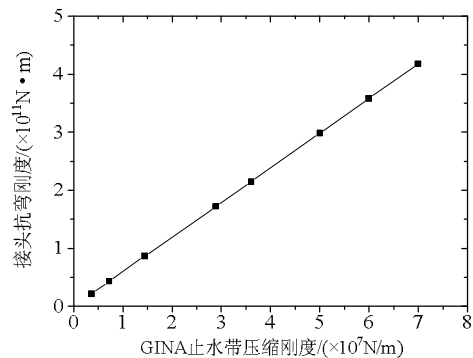


图 8 不同 GINA 压缩特性对接头刚度的影响

Fig.8 Effects of GINA compression on joint stiffness

4.2 GINA 止水带位置的影响

图 9 为 GINA 止水带位置的变化对接头刚度的影响规律。可以看出，当 GINA 止水带位置距离中性轴较小时，接头刚度近似为线性增大且增加缓慢；随着 GINA 止水带位置距离中性轴越远，接头刚度变化呈抛物线上升趋势。这说明接头刚度对距

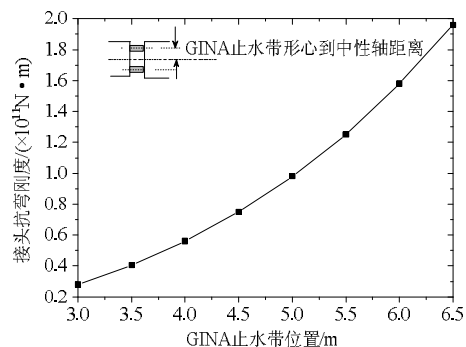


图 9 GINA 止水带位置对接头刚度的影响

Fig.9 Effects of GINA locations on joint stiffness

离中性轴较远时的 GINA 止水带位置变化较为敏感。

4.3 偏心距 e_0 的影响

不同偏心距 e_0 对接头刚度的影响如图 10 所示。接头刚度随着偏心距增加而减小。在偏心距较小的情况下, 接头刚度对偏心距的变化比较敏感, 随着偏心距的增加接头刚度快速减小; 而在偏心距较大时, 偏心距的变化对接头刚度几乎没有影响。

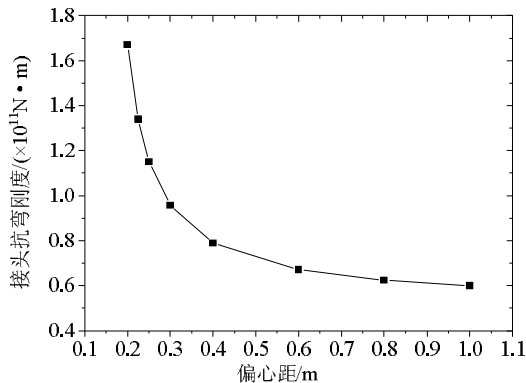


图 10 不同偏心距 e_0 对接头刚度的影响

Fig.10 Effects of eccentricity on joint stiffness

5 结论

针对目前沉管隧道接头刚度无图表和公式可依的现状, 建立表征接头构造特点的力学模型, 基于受力平衡和变形协调方程, 推导出接头刚度解析表达式。通过与所设定基准模型的计算结果对比, 以及接头参数的敏感性分析, 得出以下结论:

(1) 通过对比验证了所建立的接头力学模型和推导的接头刚度解析解的合理性, 从而为沉管隧道接头设计提供了一条新的途径;

(2) 接头刚度随着 GINA 压缩刚度的增大而线性增加;

(3) 随着 GINA 位置距离中性轴越远, 接头刚度越大, 且接头刚度对距离中性轴较远时的 GINA 位置变化较为敏感;

(4) 接头刚度随着偏心距增加而减小, 在偏心距较小时, 接头刚度变化比较敏感, 而在偏心距较大时, 偏心距的变化对接头刚度几乎没有影响;

(5) 本文所建立的接头力学模型简便实用, 还可以应用于其它类似的装配式结构接头中。

参考文献:

[1] Abrahamson N A, Schneider J F, Stepp J C. Empirical spatial coherency functions for application to soil-structure interaction analyses [J]. *Earthquake Spectra*, 1991, 7(1): 1-28.

[2] Glerum A. Developments in immersed tunnelling in Holland [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1995, 10(4): 455-462.

[3] 严松宏, 高波, 潘昌实. 地震作用下沉管隧道接头力学性能分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(2): 286-289.

Yan Songhong, Gao Bo, Pan Changshi. Dynamic property analysis on joint for submerged tunnel under earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 286-289. (in Chinese)

[4] Ingersel L C F. Considerations and strategies behind the design and construction requirements of the Istanbul Strait immersed tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(6): 604-608.

[5] Anastasopoulos I, Gerolymos N, Drosos V, et al. Behaviour of deep immersed tunnel under combined normal fault rupture deformation and subsequent seismic shaking [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2008, 6(2): 213-239.

[6] 严松宏, 高峰, 李德武, 等. 沉管隧道地震响应分析若干问题的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(5): 846-850.

Yan Songhong, Gao Feng, Li Dewu, et al. Studies on some issues of seismic response analyses for submerged tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 846-850. (in Chinese)

[7] Anastasopoulos I, Gerolymos N, Drosos V, et al. Nonlinear response of deep immersed tunnel to strong seismic shaking [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2007, 133(9): 1067-1090.

[8] 丁俊宏, 金先龙, 郭毅之, 等. 沉管隧道地震响应的三维非线性数值模拟方法及应用[J]. *振动与冲击*, 2005, 24(5): 18-22.

Ding Junhong, Jin Xianlong, Guo Yizhi, et al. 3D numerical simulation method and its application in calculation of seismic response of immersed tunnel [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(5): 18-22. (in Chinese)

[9] Ding J H, Jin X L, Guo Y Z, et al. Numerical simulation for large-scale seismic response analysis of immersed tunnel [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(10): 1367-1377.

[10] 苏宗贤, 何川. 盾构隧道管片衬砌内力分析的壳-弹簧-接触模型及其应用[J]. *工程力学*, 2007, 24(10): 131-136.

Su Zongxian, He Chuan. Shell-spring-contact model for shield tunnel segmental lining analysis and its application [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(10): 131-136. (in Chinese)

[11] 张建新, 何川. 盾构隧道衬砌整环力学机理模型[J]. *工程力学*, 2013, 30(7): 136-141, 146.

Zhang Jianguang, He Chuan. Model of mechanical behavior with whole segmental lining of shield tunnel [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(7): 136-141, 146. (in Chinese)

[12] 禹海涛, 袁勇, 徐国平, 等. 超长沉管隧道抗震设计及其关键问题分析[J]. *上海交通大学学报(自然科学版)*, 2012, 46(1): 94-98.

Yu Haitao, Yuan Yong, Xu Guoping, et al. Issues on the seismic design and analysis of ultra-long immersed tunnel [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2012, 46(1): 94-98. (in Chinese)

[13] Kiyomiya O. Earthquake-resistant design features of immersed tunnels in Japan [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1995, 10(4): 463-475.