

DOI: 10.7511/jslx20190409001

基于三维接触有限元分析的 管片等效抗弯刚度和错台研究

冉春江, 付强, 杨海天*

(大连理工大学 工程力学系, 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘要:针对盾构隧道管片接头等效抗弯刚度预测研究中,对梁-弹簧与三维模型整体等效性考虑的不充分,以三维接触有限元计算结果作为测量信息,借助基于挠度等效的反问题求解,提出了一种确定管片接头等效抗弯刚度的新方法;并利用不同轴力-偏心距组合下的反演结果,建立了基于 Kriging 代理模型的轴力-弯矩-等效抗弯刚度的非线性关系,提出了由此关联的管片结构非线性问题的数值求解方法。与三维有限元结果相比,所提方法可较为准确地预测管片结构的内力和变形,表现出良好的整体等效性。此外,借助三维接触有限元分析,进一步深入探讨了螺栓孔间隙与衬垫本构关系对管片纵向错台量的影响。

关键词:管片接头;等效抗弯刚度;代理模型;纵缝错台;三维接触有限元

中图分类号:U451+.4;O343.3

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2020)05-0535-10

1 引言

盾构法是目前穿越江海大型隧道建设的主要施工方法^[1]。作为盾构隧道的主要承力结构,管片衬砌的力学行为直接影响着整个隧道的安全与使用^[2]。管片接头部分是盾构管片衬砌环的薄弱部位,其受力/变形状态是设计中必须计及的重要因素之一^[3],其相关研究一直受工程界和学者们关注^[4-9]。

越江海隧道防水设计尤为重要,防水失效可引起隧道渗漏和隧道不均匀沉降,影响到隧道结构的安全及运营。大量工程实践表明^[10],盾构隧道的渗漏主要发生在管片接缝处,而接头张开与错台^[11]是导致接缝防水性能下降的重要因素^[12]。相关研究表明^[11,13],当接头张开量大于 6 mm,或者接头错台量大于 8 mm 时,接头抗渗性能会受到较大影响。此外,管片错台可导致错台处内力显著增加,李宇杰等^[11]对已有 10 mm 纵缝错台管片进行三维有限元分析,得到管片错台轴力最大增加幅度为 281%,弯矩最大增加幅度为 275%。

本文从两方面对接头张开与错台开展研究。

(1) 管片结构计算中常采用梁-弹簧模型,其在接头处以旋转弹簧模型来等效接头对管片抗弯刚度的削弱作用^[4],但弹簧等效抗弯刚度的取值一般很难确定^[14],不仅与管片和接头处螺栓以及衬垫部件的几何尺寸、材料性质、接头的构造形式和螺栓预紧力等因素有关,还与接头处的内力存在非线性关系^[4,5,15-17]。这些因素不仅增加了相关实验研究的经济与时间成本,也使得目前各种接头刚度的理论分析模型和经验公式都难免有一定的局限性^[1]。本文利用高精度有限元数值解模拟实验结果,借助基于挠度等效的反问题求解,提出了一种确定管片接头等效抗弯刚度的新方法。另一方面,利用不同轴力-弯矩组合下反演的结果,建立了基于 Kriging 代理模型的轴力-弯矩-等效抗弯刚度的非线性关系,提出了由此关联的管片结构非线性问题的数值求解方法。

(2) 李宇杰等^[11]指出,通过有限元计算得到的错台量较一些现场监测和室内试验结果偏小,这可能是由有限元仿真中施工情况模拟不充分所致。而作为影响管片接头错台重要因素^[18]的螺栓孔间隙和橡胶衬垫变形,在已有的数值模型^[9,11,19-25]中考虑不够充分,文献^[19-21]直接将螺栓简化为梁单元,将橡胶衬垫简化为法向弹簧单元处理,文献^[9]则将衬垫作为垫片单元处理,文献^[11,22-25]虽然将螺栓和衬垫考虑为三维实体单元,但并没有考虑螺栓孔间隙和衬垫变形对接头错台的影响。

收稿日期:2019-04-09;修改稿收到日期:2019-06-12.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)
(2015CB057804);国家自然科学基金
(11572068)资助项目.

作者简介:杨海天*(1956-),男,博士,教授
(E-mail:haitian@dlut.edu.cn).

为此本文建立了考虑螺栓/螺栓孔间隙以及橡胶衬垫的三维有限元接触计算模型,通过数值分析,着力探讨了螺栓间隙及衬垫对管片接头错台的影响。

2 管片接头等效抗弯刚度的反演模型

本文基于目前模型实验和数值仿真中常采用的直管片-接头模型^[4,9,15,26-28]进行研究,如图1所示。管片一端为固定铰支座,另一端为可水平移动的铰支座,两端施加轴向荷载 N , 在距两端 $a = L/2$ 处施加竖向荷载 P 。

在梁-弹簧模型中,接头处的等效抗弯刚度 k_θ 定义为在给定轴向压力作用下,相邻管片在接头处产生单位相对转角所需要的弯矩^[4]。

$$k_\theta = M/\theta \quad (1)$$

目前,接头等效刚度的确定主要有两类方法,

(1) 通过试验或三维有限元数值仿真,获取如图2所示的接缝转角,或通过张开量计算相应的转角,再利用式(1)计算等效抗弯刚度^[4,9,27,28]; (2) 通过假定管片接缝处的受力形态^[14,25,29-33]或将管片接头面的相关部分简化为弹簧和刚性板或梁等结构^[8,34-36],利用接头处的平衡和变形协调关系^[5]导出弯矩-转角的关系,从而得到管片接头抗弯刚度的显式或隐式表达。

以上处理方法的优点是物理意义明确,便于直接操作,但利用信息比较局部。另一方面,由于接头处的情况比较复杂,如何将这些信息有效地等效为与梁-弹簧模型相适应的转角是一个值得进一步深入探讨的问题。

准确预测等效刚度的最主要目的,是为了使梁-弹簧等效模型更有效地等效三维管片-接头问

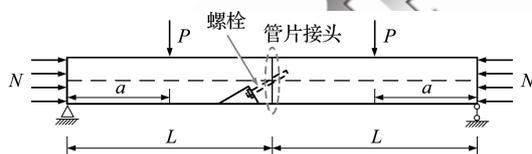


图1 管片接头受载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a loaded segment-joint

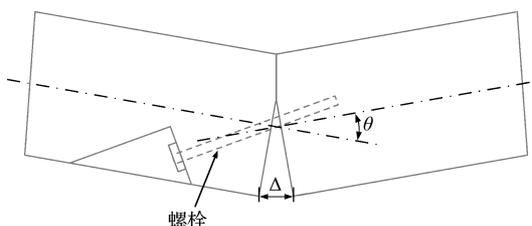


图2 管片接头变形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of deformation at segment joint

题的变形和受力分析。为此,本文基于三维管片-接头模型与梁-弹簧模型的整体挠度等效,建立了一个确定等效抗弯刚度的反问题求解方法。

将图1所示模型按梁模型等效,管片在接头处位移(挠度)连续,接头处的转角-弯矩关系为 $M = PL/2 = k_\theta \theta$ (本文限于 θ 为有限值),由此可得梁的挠度曲线方程为

$$w_\theta(x, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{6EI} P(x^3 - 6aLx + 3a^2x) + \frac{1}{2}\theta x & (0 \leq x \leq a) \\ \frac{1}{6EI} Pa(a^2 + 3x^2 - 6Lx) + \frac{1}{2}\theta x & (a \leq x \leq L) \end{cases} \quad (2)$$

式中 x 为梁的轴向坐标, θ 是未知的并与载荷相关的相对转角。

若将三维管片-接头有限元分析获取的位移,作为参数 θ 未知的梁弹簧模型的挠度测量信息,则 θ 的确定可以看作一个参数辨识反问题,并可通过下列以式(2)为约束条件的优化问题求解。

$$\min_{\theta} [\omega_\theta(x, \theta) - \omega^*]^2 \quad (3)$$

式中 $\omega_\theta(x, \theta)$ 由式(2)给出, ω^* 由三维管片-接头有限元分析给出。

本文利用 ANSYS 对图1的结构进行三维接触有限元分析,将其相关结果作为等效梁弹簧模型的纵向挠度,利用 MATLAB 软件中的 fminsearch 函数实现式(3)的极小化。 θ 值确定后,由式(1)计算相应的 k_θ 作为管片接头的等效抗弯刚度。

3 管片接头的三维接触有限元模型

图3为直管片接头的三维有限元模型,单个直管片的长度为4 m,宽为2 m,厚度为0.7 m。管片主体部分选用8节点空间六面体单元,螺栓孔和手孔附近采用4节点四面体单元,六面体单元和四面体单元连接处采用5节点五面体单元过渡;管片部分的有限元模型包含64622个单元和38113个节点。两管片间由三颗M36螺栓连接,螺栓有限元

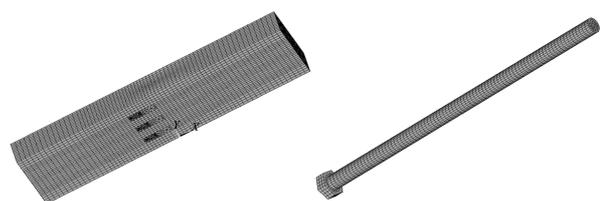


图3 管片和螺栓的有限元网格

Fig. 3 FE mesh of the segment and bolt

模型包含 16986 个 8 节点六面体单元,每个螺栓中间添加了 PRETS179 预紧力单元,并通过 SLOAD 命令施加了 150 kN 的预紧力。

两管片之间,以及管片与螺栓之间存在接触关系,如图 4 所示。其中 A 处采用的是面-面接触单元模拟,用单元高斯积分点来判断接触状态,接触类型为粗糙;不考虑螺栓螺纹的影响,螺栓与管片混凝土在 B 处考虑为绑定接触;螺栓与螺栓孔壁有 2 mm 的间隙,在 C 处螺栓与螺栓孔壁间设置了接触单元以处理可能发生的接触;由于预紧力的存在,螺帽与管片之间不会发生滑移,故 D 处考虑为绑定接触。

混凝土管片和螺栓考虑为线弹性材料,弹性模量分别为 37.5 GPa 和 210 GPa,泊松比分别为 0.17 和 0.30,建模不考虑管片配筋的影响。

为确保数值结果对网格的稳定性,将网格数量加密到原来的两倍后,以轴力 10000 kN 和偏心距为 4000 kNm 试算,两种网格下中点位移仅相差 2.61%,表明采用的网格尺寸可以保证数值结果的稳定性。

4 反演结果及接头刚度的 Kriging 代理模型

利用以上反演模型,对 164 组载荷组合进行等效抗弯刚度预测。轴力 N 取 10000 kN, 20000 kN, 30000 kN 和 40000 kN 四组,每组轴力下弯矩 M 取 41 组,弯矩 = 偏心距 × 轴力,偏心距在 -0.4 m ~ 0.4 m 以间隔 0.02 m 均匀取值。

图 5(a)为不同轴力下等效抗弯刚度-偏心距曲线。图 5(b)为不同轴力下接头端面张开量随偏心距的变化,张开量为三维有限元模拟所得的两个管片接头端面上的最大张开距离。

从图 5 可以看出,(1) 等效抗弯刚度是载荷相关的。在相同轴力作用下,当偏心距小于 0.18 m 时,弯矩的效应很小,整个接缝面几乎都处于受压状态,因此接头端面的张开很小,从而导致接头等

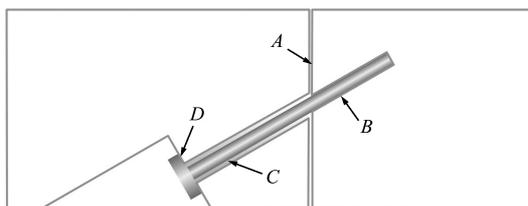


图 4 接触面
Fig. 4 Contact interfaces

效抗弯刚度变得很大;当偏心距大于 0.18 m 后,随偏心距的增加,弯矩的效应逐渐增强,接缝面张开也随之增大,从而导致等效抗弯刚度减小。(2) 轴力对等效刚度的反演影响较小,如图 5 所示,四条曲线虽然轴力变化很大,但反演得到的接头刚度变化却很小,说明等效刚度的变化主要是轴力偏心引起的弯矩所致。

为建立抗弯刚度与载荷之间关系,本文利用以上 164 组计算结果作为测量信息,应用 DACE 工具箱^[37]提供的 Kriging 模型来近似(代理)接头刚度和接头张开量与轴力及偏心距(弯矩)之间的近似非线性关系。Kriging 代理模型作为估计方差最小的无偏估计模型,在解决非线性程度较高的问题时较易取得理想的拟合结果^[38]。

所建代理模型的性态如图 6 所示。表 1 给出了样本点以外的四种载荷组合下反演的等效刚度与代理模型预测值之间的比对,表明 Kriging 模型代理可提供精度合用的代理预测。

在后续的计算分析过程中,若给定接头处的轴力和弯矩,可通过代理模型便捷地获取相应的接头抗弯刚度。

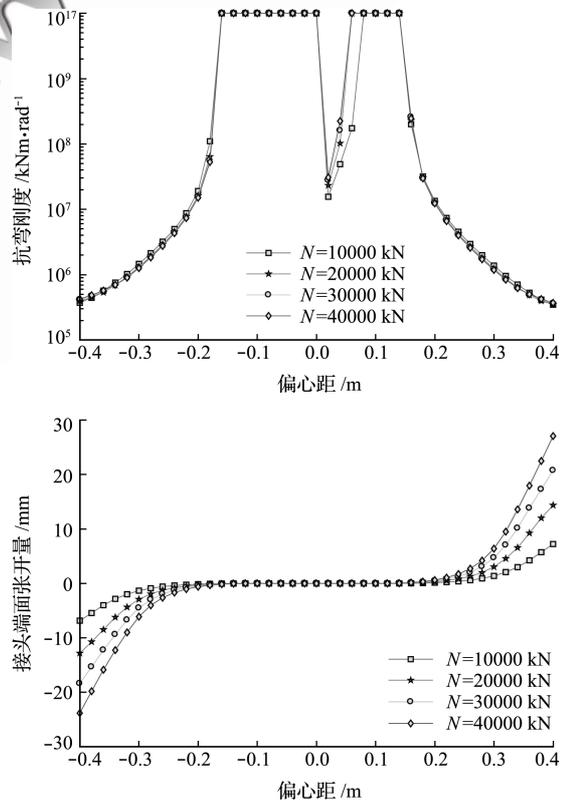


图 5 不同轴力下等效刚度和接头端面张开量随偏心距变化
Fig. 5 Variation of equivalent rigidity and opening gap with different axial forces

5 管片-接头的非线性分析

借助以上建立的 Kriging 代理模型,可进行基于梁-非线性弹簧模型的管片衬砌结构的计算分析,计算流程如图 7 所示。

取管片截面厚为 0.7 m,宽为 2.0 m;管片外径为 15.5 m,内径为 14.1 m,计算模型包含一环管片衬砌,由十片管片构成;管片材料为 C70 混凝土,弹性模量取 37 GPa,泊松比取 0.17,密度取 2300 kg/m³;载荷采用水土合算,水深为 80 m,埋深为 40 m;土层容重为 19600 N/m³;侧压力系数为 0.65,土层抗力系数取 5000 kN/m³;螺栓预紧力设为 150 kN。所建代理模型包含了算例中轴力和偏心距的变化范围。

三维管片-螺栓-接触有限元计算所得管片位移云图如图 8 所示。可以看出,管片环变形最大的地方在衬砌底部和顶部,其次是衬砌的两侧,变形最小的地方在衬砌的上下左右 45°位置,整个衬砌

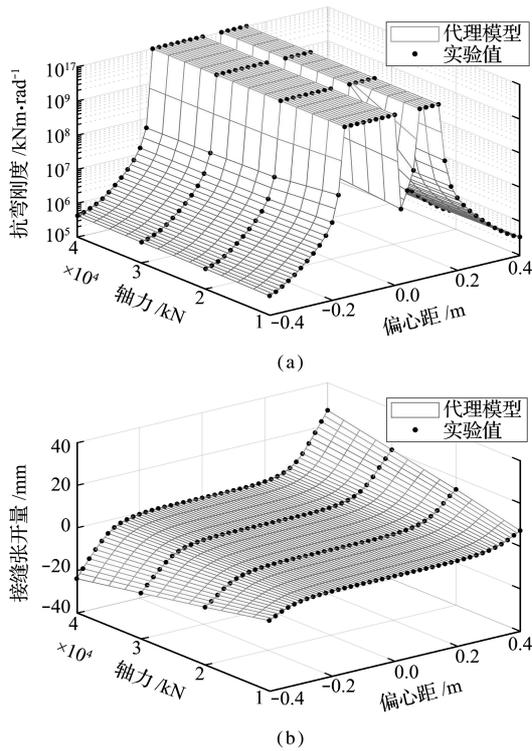


图 6 代理模型性能
Fig. 6 Behavior of surrogate model

表 1 等效抗弯刚度比较

Tab.1 Comparison of equivalent flexural rigidity

算例	轴力 /kN	偏心距 /m	刚度/kNm·rad		
			预测值	代理值	误差/%
1	15000	-0.3	1.37e+06	1.40e+06	1.95
2	20000	0.37	4.32e+05	4.42e+05	2.31
3	25000	-0.36	5.44e+05	5.59e+05	2.73
4	32000	0.2	1.24e+07	1.25e+07	0.42

变形后呈上下压扁的椭圆形状。

图 9~图 12 分别是梁-非线性弹簧模型计算得到的管片轴力、弯矩、剪力和位移与三维有限元计算结果的对比,表 2 是轴力、弯矩、剪力和位移结果

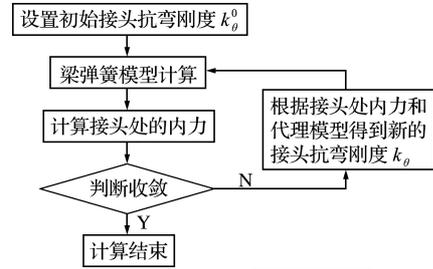


图 7 迭代计算流程
Fig. 7 Flowchart of iteration

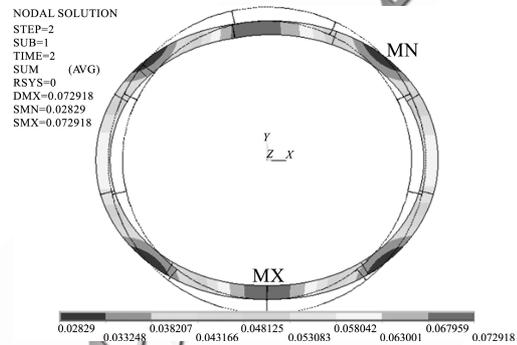


图 8 管片变形云图(放大系数:10)
Fig. 8 Contour map of the segment deformation

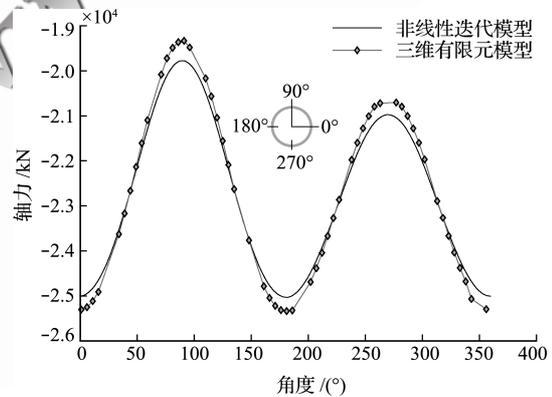


图 9 轴力结果对比
Fig. 9 Comparison of axial force

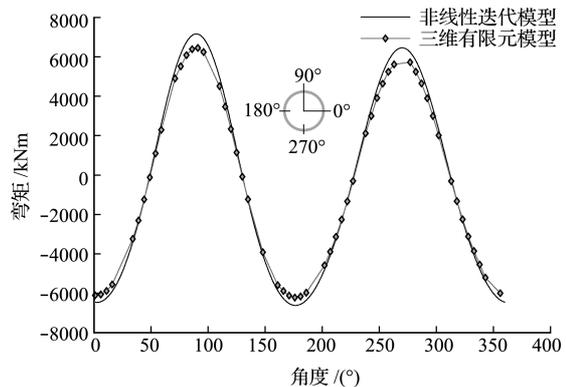


图 10 弯矩结果对比
Fig. 10 Comparison of the moment

的最大偏差。三维有限元分析的内力计算结果,由相关截面上的应力通过数值积分得到。

结果表明,梁-非线性等效弹簧模型所计算的内力和变形与三维管片接触有限元模型的计算结果基本一致,等效效果良好。在 0°,90°,180°和 270°个别位置处两者偏差较大,一方面是用一维模型来近似三维模型会有一定的误差,虽然用非线性接头弹簧考虑了接头对管片刚度的削弱作用,但并不能完全考虑手孔和螺栓孔等部件的影响;另外,三维结构的内力是由相关截面上的应力通过数值积分等效的,会产生数值误差。

6 基于三维接触有限元计算的管片错台分析

6.1 三维数值计算模型

参照原型实验^[39],管片尺寸取为 667 mm ×

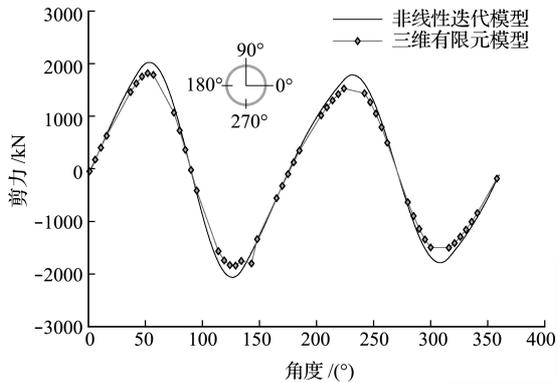


图 11 剪力结果对比
Fig. 11 Comparison of the shear force

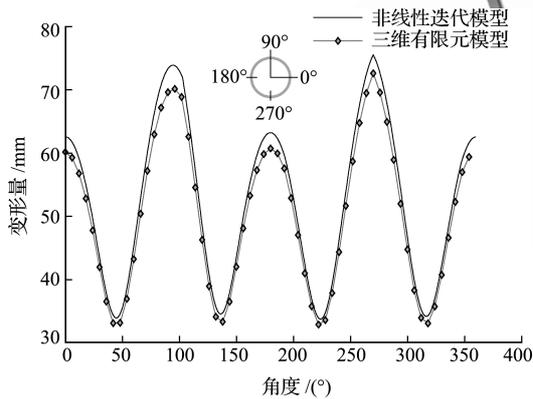


图 12 位移结果对比
Fig. 12 Comparison of the deformation

表 2 两种算法计算结果最大偏差对比
Tab.2 Comparison of the results

	最大偏差	偏差/%
轴力	446.2 kN	2.31
弯矩	823.1 kNm	14.64
剪力	304.7 kN	20.2
变形量	3.96 mm	5.84

700 mm × 2000 mm,管片两端约束条件为简支,采用 1/3 幅宽进行数值模拟。以顺剪的形式加载,如图 13 所示。轴力 N 取 2000 kN,剪力 Q 取 2000 kN,斜螺栓预紧力取 100 MPa。

斜螺栓采用 M30 螺栓,考虑到螺栓与螺栓孔之间存在间隙,根据《盾构隧道管片设计》^[40],M30 螺栓孔直径可取范围为 35 mm ~ 38 mm,本文取 36 mm,衬垫厚度取 3 mm。

螺栓侧面分为含螺纹部分与不含螺纹的光滑部分,如图 14 所示。含螺纹部分与管片接触采用绑定连接,不含螺纹的光滑部分采用法向硬接触和切向光滑的接触模式。管片与衬垫之间采用法向硬接触和切向摩擦的接触模式。

计算模型中包含管片、螺栓和衬垫,均采用三维实体单元。管片和衬垫采用四节点线性四面体单元(C3D4),斜螺栓采用八节点线性六面体单元,非协调模式(C3D8I),有限元模型如图 15 所示,其中管片和螺栓包含 150628 个单元,超弹性的衬垫则由程序自适应加密网格以降低大变形引起的单元畸变。所采用的计算模型通过网格加密验证了有限元网格的独立性。

混凝土与螺栓均采用线弹性材料本构模型,本构参数列入表 3。

盾构隧道管片的软木橡胶衬垫以橡胶和软木粉粒为主要原料,其应力应变关系具有较强的非线性特征^[42]。本文采用 Mooney-Rivlin 一阶本构模型^[43],如式(4)所示。

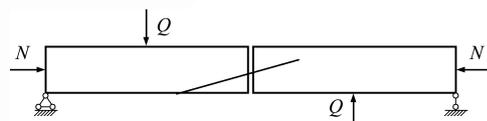


图 13 加载方式
Fig. 13 Shear load for segment joint

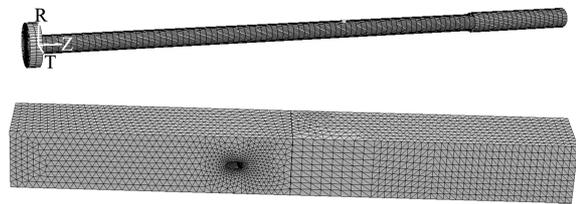


图 14 接头螺栓及管片有限元网格
Fig. 14 FE mesh of joint bolt and segment

表 3 混凝土与螺栓材料参数
Tab.3 Material parameters of the concrete and bolt

材料	杨氏模量/GPa	泊松比
混凝土管片	30	0.2
螺栓	210	0.3

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (4)$$

式中 I_1 和 I_2 为变形张量不变量,

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (5)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (6)$$

λ_1, λ_2 和 λ_3 为主伸长比。本文计算中,以三元乙丙橡胶^[44-45]为参考, $C_{10} = 561$ kPa, $C_{01} = 225$ kPa。

6.2 计算结果与分析

考虑螺栓与螺栓孔壁之间存在间隙,表4为衬垫材料采用线弹性(弹性模量取 150 MPa,泊松比取 0.32^[24])与超弹性本构模型所得错台量的比较。与线弹性情况相比,衬垫材料为超弹性时的错台量增加幅度为 111%。

考虑衬垫为超弹性材料,表5给出螺栓孔间隙对接头错台量的影响,与不考虑情形相比,增加幅度为 197%。螺栓孔间隙的存在,使得受载时螺栓与孔壁接触需要一个过程,在此期间螺栓的不完全参与会导致错台量的增加。图15给出了加载过程中接头错台量的变化历程,图16给出了A,B和C三个时刻螺栓与螺栓孔壁间的接触情况,可以看出,接头错台主要发生在A-B和B-C阶段,总计达到了 6.78 mm,这两个阶段是螺栓与两边的螺栓孔壁接触的过程;C-D阶段产生的错台量约为 2.24 mm,

表4 衬垫本构模型对错台量的影响

Tab.4 Impact of constitutive model of rubber liner on the longitudinal dislocation of segment joint

衬垫本构	弹性	超弹性
接头错台量/mm	4.21	9.02

表5 螺栓孔间隙对接头错台的影响

Tab.5 Impact of bolt hole clearance on the longitudinal dislocation of segment joint

螺栓孔间隙	不考虑间隙	考虑间隙
接头错台量/mm	2.99	9.02

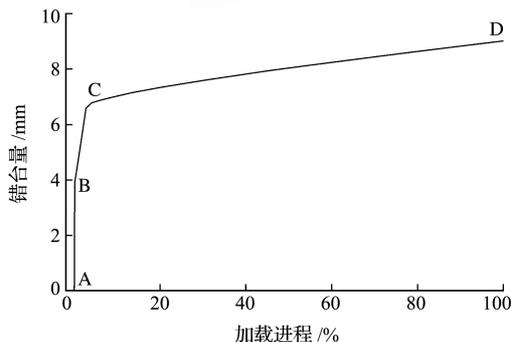


图15 接头错台量变化历程

Fig.15 Variation of longitudinal dislocation with loading

与不考虑螺栓孔间隙时的错台量相当,此时螺栓与螺栓孔壁已经完全接触,这部分错台主要由螺栓、管片和衬垫的变形产生。

综上所述可以看出,螺栓孔间隙和橡胶衬垫本构关系对管片纵缝错台量有着显著影响。

以上计算中的摩擦系数根据文献^[41]取 0.3,当摩擦系数取为 0.4 和 0.5 时,得到的最大错台量分别为 8.91 mm 和 7.62 mm,表明摩擦系数对错台量也有影响,但影响较小。

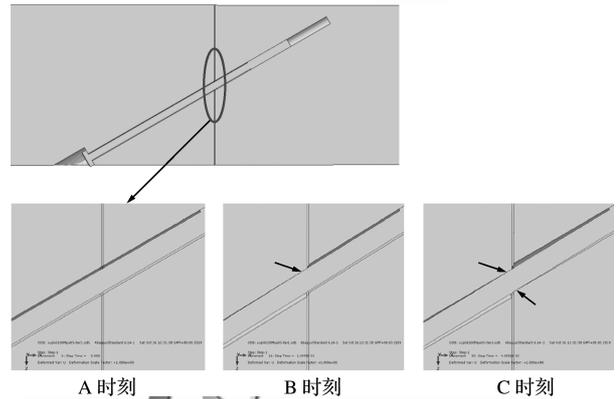


图16 不同加载时刻螺栓接触情况

Fig.16 Contact state of bolt at different loading stages

7 结论

首先,本文提出了一种以三维接触有限元模拟结果作为测量信息,借助基于挠度等效的反问题求解确定管片接头等效抗弯刚度的方法;利用所提方法,通过不同轴力-偏心距组合下的反演结果,建立基于 Kriging 代理模型的轴力-弯矩-等效抗弯刚度的非线性关系,并提出了一个由此关联的管片结构非线性问题的数值求解模型。

准确预测等效刚度的主要目的是使梁-弹簧模型更有效地等效三维管片-接头问题的变形和受力行为。因此,从两个模型整体的等效效果出发确定等效抗弯刚度,比利用局部信息更为合理。本文基于这个思路,给出了一种基于整体挠度等效的预测方法。梁-弹簧模型将管片作为梁处理,是为便捷计算的一种近似,为更准确地描述管片的力学特性,还可考虑基于壳模型的等效方法研究。

管片接头等效抗弯刚度是载荷相关的^[4,5,15-17],由于实际问题中截面载荷是预先未知的,这种相关性导致了结构分析的非线性。利用基于代理模型的载荷-等效抗弯刚度的非线性关系,可方便地预测不同载荷下接头的等效抗弯刚度,因而可将此非线性关系用于管片衬砌的非线性分析。与三维有限元结果相比,所提管片结构非线性计算模型可较

为准确地预测管片结构的内力和变形,表现出良好的整体等效性。

其次,本文建立了考虑螺栓孔间隙和橡胶衬垫超弹性本构的三维有限元接触计算模型,着力探讨了螺栓孔间隙与衬垫本构关系对管片纵向错台量的影响。

就数值结果而言,本文错台量计算值与文献[39]同尺度同载荷无衬垫错台实验结果 10 mm 很接近。文献[11]在总结一些文献后曾指出,一些有限元模拟计算得到的错台量约为 1.5 mm,而现场观测与室内试验的结果约为 10 mm。由于研究的具体问题/模型不同,数值结果相近的原因需进一步深入分析。但从本文数值模拟的结果来看,在管片纵缝错台的研究中需充分考虑螺栓孔间隙和衬垫本构模型的影响。

参考文献(References):

- [1] 何川,张建刚,苏宗贤.大断面水下盾构隧道结构力学特性[M].北京:科学出版社,2010.(HE Chuan, ZHANG Jian-gang, SU Zong-xian. *Structural Mechanical Characteristics of Large Section Underwater Shield Tunnel*[M]. Beijing: China Science Publishing & Media LTD, 2010. (in Chinese))
- [2] 王志云,李守巨,李雨陶.隧道混凝土管片接头极限状态抗弯刚度的计算模型[J].黑龙江科技大学学报, 2017, **27**(6): 646-652. (WANG Zhi-yun, LI Shou-ju, LI Yu-tao. Computational models for bending stiffness of concrete segment joints in subway tunnel[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science & Technology*, 2017, **27**(6): 646-652. (in Chinese))
- [3] Do N A, Dias D, Oreste P, et al. 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, **37**: 115-127.
- [4] 郭瑞,何川,封坤,等.大断面水下盾构隧道管片接头抗弯刚度及其对管片内力影响研究[J].中国铁道科学, 2013, **34**(5): 46-53. (GUO Rui, HE Chuan, FENG Kun, et al. Bending stiffness of segment joint and its effects on segment internal force for underwater shield tunnel with large cross-section[J]. *China Railway Science*, 2013, **34**(5): 46-53. (in Chinese))
- [5] 朱伟,钟小春,秦建设.盾构衬砌管片接头力学分析及双直线刚度模型研究[J].岩土力学, 2006, **27**(12): 2154-2158. (ZHU Wei, ZHONG Xiao-chun, QIN Jian-she. Mechanical analysis of segment joint of shield tunnel and research on bilinear joint stiffness model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(12): 2154-2158. (in Chinese))
- [6] 张建刚,何川,杨征.大断面宽幅盾构管片三维内力分布分析[J].岩土力学, 2009, **30**(7): 2058-2062. (ZHANG Jian-gang, HE Chuan, YANG Zheng. Analysis of 3D internal forces distribution of wide segment lining for large-section shield tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(7): 2058-2062. (in Chinese))
- [7] 张建刚,何川.不同承压衬垫的管片接头力学性能分析[J].铁道学报, 2013, **35**(12): 101-105. (ZHANG Jian-gang, HE Chuan. Analysis on mechanical properties of segment joints with different pressure pads [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, **35**(12): 101-105. (in Chinese))
- [8] 张建刚,何川.管片接头力学解析法:改进条带算法[J].铁道学报, 2013, **35**(3): 102-107. (ZHANG Jian-gang, HE Chuan. Mechanical calculation method of segmental joints: Improved Strip Method [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, **35**(3): 102-107. (in Chinese))
- [9] 张建刚,何川.复杂接缝面管片接头的力学性能数值分析[J].地下空间与工程学报, 2013, **9**(6): 1350-1354. (ZHANG Jian-gang, HE Chuan. Numerical analysis of mechanical property of shield tunnel segmental joint with complex interface [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, **9**(6): 1350-1354. (in Chinese))
- [10] 朱祖熹.城市隧道防水技术的现状与展望[J].地下工程与隧道, 1995(4): 18-24. (ZHU Zu-xi. Current research and prospect on waterproofing technology for urban tunnels [J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 1995(4): 18-24. (in Chinese))
- [11] 李宇杰,何平,秦东平.盾构隧道管片纵缝错台的影响分析[J].工程力学, 2012, **29**(11): 277-282. (LI Yu-jie, HE Ping, QIN Dong-ping. Influence analysis on longitudinal dislocation for shield tunnel segment [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, **29**(11): 277-282. (in Chinese))
- [12] GB 50010-2010(2015版).混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社, 2015. (GB 50010-2010(2015). Code for Design of Concrete Structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015. (in Chinese))
- [13] 王如路,肖同刚,朱妍.上海地铁盾构隧道渗漏水治理与变形控制[J].地下工程与隧道, 2011(s2): 102-108. (WANG Ru-lu, XIAO Tong-gang, ZHU Yan. Water leakage treatment and deformation control if shield tunnel in shanghai metro [J]. *Underground En-*

- gineering and Tunnels*, 2011(s2):102-108. (in Chinese))
- [14] 陈必光, 陈卫忠, 郭小红. 盾构隧道纵缝接头抗弯计算模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(s1): 2953-2959. (CHEN Bi-guang, CHEN Wei-zhong, GUO Xiao-hong. Study on calculation model of flexural behavior of shield segment joint [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(s1): 2953-2959. (in Chinese))
- [15] 何川, 周济民, 封坤, 等. 基于接头非线性抗弯刚度的盾构隧道迭代算法的实现与应用[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(3): 166-173. (HE Chuan, ZHOU Ji-min, FENG Kun, et al. An iterative algorithm based on segment joint stiffness nonlinearity and application for shield tunnel structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, **45**(3): 166-173. (in Chinese))
- [16] 徐国文, 王士民, 汪冬兵. 基于接头抗弯刚度非线性的壳-弹簧-接触-地层模型的建立[J]. 工程力学, 2016, **33**(12): 158-166. (XU Guo-wen, WANG Shi-min, WANG Dong-bing. Shell-spring-contact-grand model based on segment joint stiffness nonlinearity [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, **33**(12): 158-166. (in Chinese))
- [17] 徐国文, 卢岱岳. 接头抗弯刚度非线性及渗水影响下盾构隧道力学行为分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(7): 1202-1211. (XU Guo-wen, LU Dai-yue. Mechanical behavior of shield tunnel considering nonlinearity of flexural rigidity and leakage of joints [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(7): 1202-1211. (in Chinese))
- [18] 钟志全. 盾构管片错台分析及措施[J]. 建筑机械化, 2006, **27**(9): 43-45. (ZHONG Zhi-quan. Analysis and measures about slab staggering of duct piece on shield machine [J]. *Construction Mechanization*, 2006, **27**(9): 43-45. (in Chinese))
- [19] 欧阳文彪. 盾构隧道管片接头受力的精细化三维有限元分析[J]. 中国市政工程, 2014(4): 58-61, 65. (OUYANG Wen-biao. A fine 3D finite element analysis of joint stress of shield tunnel segments [J]. *China Municipal Engineering*, 2014(4): 58-61, 65. (in Chinese))
- [20] 曾东洋, 何川. 地铁盾构隧道管片接头抗弯刚度的数值计算[J]. 西南交通大学学报, 2004, **39**(6): 744-748. (ZENG Dong-yang, HE Chuan. Numerical simulation of segment joint bending stiffness of metro shield tunnel [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2004, **39**(6): 744-748. (in Chinese))
- [21] 张厚美, 张正林, 王建华. 盾构隧道装配式管片接头三维有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2003, **37**(4): 566-569. (ZHANG Hou-mei, ZHANG Zheng-lin, WANG Jian-hua. 3D FEM analysis on prefabricated segment joints of shield tunnel [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, **37**(4): 566-569. (in Chinese))
- [22] 许倩倩, 王媛. 非均匀注浆盾构隧道管片纵缝错台量三维有限元分析[J]. 隧道建设, 2013, **33**(7): 567-572. (XU Qian-qian, WANG Yuan. 3D FEM analysis on longitudinal dislocation of segments of shield-bored tunnels under non-uniform grouting pressure [J]. *Tunnel Construction*, 2013, **33**(7): 567-572. (in Chinese))
- [23] 陈俊生, 莫海鸿, 黎振东. 盾构隧道管片接头三维有限元分析[J]. 建筑结构, 2006, **36**(10): 85-87. (CHEN Jun-sheng, MO Hai-hong, LI Zhen-dong. 3D FEM analysis on segment joints of shield tunnel [J]. *Building Structure*, 2006, **36**(10): 85-87. (in Chinese))
- [24] 俞涛, 何川, 曾东洋. 地铁盾构隧道管片接头的三维有限元分析[J]. 市政技术, 2004, **22**(s): 168-171. (YU Tao, HE Chuan, ZENG Dong-yang. Analysis of 3D FEM on segment joint of metro shield tunnel [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2004, **22**(s): 168-171. (in Chinese))
- [25] 张雪健, 庄晓莹, 朱合华. 盾构隧道管片接头三维数值模型边界条件研究[J]. 隧道建设, 2014, **34**(s): 153-158. (ZHANG Xue-jian, ZHUANG Xiao-ying, ZHU He-hua. Study on boundary conditions of three-dimensional numerical models for segment joints [J]. *Tunnel Construction*, 2014, **34**(s): 153-158. (in Chinese))
- [26] 曾东洋, 何川. 地铁盾构隧道管片接头刚度影响因素研究[J]. 铁道学报, 2005, **27**(4): 90-95. (ZENG Dong-yang, HE Chuan. Study on factors influential in metro shield tunnel segment joint bending stiffness [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2005, **27**(4): 90-95. (in Chinese))
- [27] 吴兰婷, 兰宇, 曾东洋. 盾构隧道衬砌接头刚度有限元分析[J]. 山西建筑, 2013, **39**(10): 181-183. (WU Lan-ting, LAN Yu, ZENG Dong-yang. Finite element analysis on masonry joint rigidity of shield tunnel [J]. *Shangxi Architecture*, 2013, **39**(10): 181-183. (in Chinese))
- [28] 贾永刚, 王明年. 装配式衬砌接头的接触力学模型研究[J]. 都市轨道交通, 2004, **17**(1): 38-41. (JIA Yong-gang, WANG Ming-nian. A study on the contact mechanics model of fabricated lining connections [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2004, **17**(1): 38-41. (in Chinese))

- [29] 师永翔,赵武胜.大直径盾构隧道管片接头抗弯性能研究[J].现代隧道技术,2013,50(1):115-122,133. (SHI Yong-xiang, ZHAO Wu-sheng. Research on flexural rigidity of the segment joint of a large-diameter shield tunnel[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2013, 50(1):115-122,133. (in Chinese))
- [30] Iftimie T. Prefabricated lining, conceptional analysis and comparative studies for optimal solution[A]. Ita International Congress Tunnelling and Ground Conditions[C]. 1994.
- [31] 孙文昊,焦齐柱,薛光桥,等.盾构隧道管片无衬垫接头抗弯刚度研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(5):973-978. (SUN Wen-hao, JIAO Qi-zhu, XUE Guang-qiao, et al. Study on bending stiffness of no-liner segment joint in shield tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, 4(5):973-978. (in Chinese))
- [32] 孙文昊,焦齐柱,兰宇.盾构管片接头抗弯刚度影响因素研究[J].铁道工程学报,2008(1):66-71. (SUN Wen-hao, JIAO Qi-zhu, LAN Yu. Research on the factors influencing flexural rigidity of duct piece joint of shield tunnel[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008(1):66-71. (in Chinese))
- [33] 黄钟晖.盾构法隧道管片衬砌纵缝接头受力模型的研究[J].地下空间,2003,23(3):296-301,305. (HUANG Zhong-hui. Study on loading model of joints at longitudinal seam of lining segments in shield tunnel[J]. *Underground Space*, 2003, 23(3):296-301,305. (in Chinese))
- [34] 张厚美,过迟,付德明.圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究[J].岩土工程学报,2000,22(3):309-313. (ZHANG Hou-mei, GUO Chi, FU De-ming. A study on the stiffness model of circular tunnel prefabricated lining [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3):309-313. (in Chinese))
- [35] 晏启祥,陈行,吴聪,等.盾构隧道管片环向接头刚度的解析分析法[J].中国铁道科学,2018,39(2):52-60. (YAN Qi-xiang, CHEN Hang, WU Cong, et al. Analytical method for circumferential joint stiffness of segment ring in shield tunnel[J]. *China Railway Science*, 2018, 39(2):52-60. (in Chinese))
- [36] 蒋洪胜,侯学渊.盾构法隧道管片接头转动刚度的理论研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1574-1577. (JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. Theoretical study of rotating stiffness of joint in shield tunnel segment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(9):1574-1577. (in Chinese))
- [37] Lophaven S N, Nielsen H B, Søndergaard J. A Matlab Kriging Toolbox, Version 2.0[R]. Technical University of Denmark, 2002.
- [38] 梁焯,程小全,酆正能,等.基于代理模型的气动外形平面参数多目标匹配设计[J].航空学报,2010,31(6):1141-1148. (LIANG Yu, CHENG Xiao-quan, LI Zheng-neng, et al. Multi-object aerodynamic configuration parameter design using Kriging approximation [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(6):1141-1148. (in Chinese))
- [39] 郭瑞,何川,苏宗贤,等.盾构隧道管片接头抗剪力性能研究[J].现代隧道技术,2011,48(4):72-77. (GUO Rui, HE Chuan, SU Zong-xian, et al. Study of shearing mechanical properties of segment joints of shield tunnels[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2011, 48(4):72-77. (in Chinese))
- [40] 小泉淳.盾构隧道管片设计—从容许应力设计法到极限状态设计法[M].官林星,译.北京:中国建筑工业出版社,2012. (Koizumi A. *Shield Tunnel Design-From Allowable Stress Design Method to Limit State Design Method*[M]. GUAN Lin-xing, translated, Beijing: China Building Industry Press, 2012. (in Chinese))
- [41] GB/T 31061-2014.盾构法隧道管片用软木橡胶衬垫[S]. 2014. (GB/T 31061-2014. Cork-Rubber Gasket for Shield-Driven Tunnel[S]. 2014. (in Chinese))
- [42] 黄建龙,解广娟,刘正伟.基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J].橡胶工业,2008,55(8):467-471. (HUANG Jian-long, XIE Guang-juan, LIU Zheng-wei. FEA of hyperelastic rubber material based on Mooney-Rivlin model and Yeoh model[J]. *China Rubber Industry*, 2008, 55(8):467-471. (in Chinese))
- [43] 陈家照,黄阔翔,王学仁,等.几种典型的橡胶材料本构模型及其适用性[J].材料导报,2015,29(s1):118-120,124. (CHEN Jia-zhao, HUANG Min-xiang, WANG Xue-ren, et al. Typical constitutive models of rubber materials and their ranges of application[J]. *Material Reports*, 2015, 29(s1):118-120,124. (in Chinese))
- [44] 李晓芳,杨晓翔.橡胶材料的超弹性本构模型[J].弹性体,2005,15(1):50-58. (LI Xiao-fang, YANG Xiao-xiang. A review of elastic constitutive model for rubber materials[J]. *China Elastomerics*, 2005, 15(1):50-58. (in Chinese))
- [45] JTG 3362-2018.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 2018. (JTG 3362-2018. Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts[S]. 2018. (in Chinese))

Investigation on the equivalent flexural rigidity and the longitudinal dislocation of segment joint based on 3D contact finite element analysis

RAN Chun-jiang, FU Qiang, YANG Hai-tian*

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Regarding the insufficient consideration of overall equivalency between the 3D-model and equivalent beam-spring model for the segment joint of a shield tunnelling machine, a new method is proposed to evaluate the equivalent flexural rigidity by solving a deflection equivalence based inverse problem, in which the result of 3D contact FE simulation is taken as an alternative of experiment. A Kriging surrogate model is constructed to describe the nonlinear relationship between the equivalent flexural rigidity and internal force, and is employed to develop a numerical algorithm for the structural analysis of the segment-joint with nonlinear joint flexural rigidity. In comparison with 3D FE simulation, the proposed method can effectively predict the internal force and deformation in the view on a whole. In addition, a deeper investigation is given to the impacts of the bolt hole clearance and liner constitutive model on the longitudinal dislocation of the segment joint via the 3D contact FE simulation.

Key words: segment joint; equivalent flexural rigidity; surrogate model; longitudinal dislocation;
3D contact finite element

<http://www.cjcm.net>

引用本文/Cite this paper:

冉春江,付强,杨海天.基于三维接触有限元分析的管片等效抗弯刚度和错台研究[J].计算力学学报,2020,37(5):535-544.

RAN Chun-jiang, FU Qiang, YANG Hai-tian. Investigation on the equivalent flexural rigidity and the longitudinal dislocation of segment joint based on 3D contact finite element analysis[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, 37(5): 535-544.