

DOI: 10.7672/sgjs2026130127

盾构隧道 C-T 型快速连接件参数化设计与应用*

巩一凡^{1,2}

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125;
2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

[摘要] 随着盾构隧道向超大直径与复杂地层发展,传统管片螺栓连接施工效率低、密封性差及截面强度损失等问题日益突出。聚焦新型 C-T 型快速连接件,通过整合国内外工程案例与试验研究,提出基于强度层级控制(C/T 型件屈服、锚固钢筋极限破坏)的结构设计原则。构建涵盖工程设计参数提取、结构初设计、参数化建模优化与试验验证的完整设计流程,成功指导隆昌路越江隧道新建工程。试验表明,该连接件轴向拉伸承载力达 8.8 级 M36 斜螺栓等效标准,破坏过程符合预设设计原则。

[关键词] 隧道;盾构;C-T 型快速连接件;参数化设计;数值模拟;试验

[中图分类号] U45

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0127-07

Parametric Design and Implementation of C-T-type Rapid Connectors for Shield Tunnels

GONG Yifan^{1,2}

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the development of shield tunnels toward large-diameter configurations and complex strata, traditional bolted segment connections increasingly reveal critical limitations including low construction efficiency, poor sealing integrity, and cross-sectional strength degradation. This paper focuses on novel C-T-type rapid connectors, proposing a structural design principle based on strength hierarchy control (yielding of C/T components and ultimate failure of anchorage rebars) through systematic integration of global engineering cases and experimental investigations. An integrated design framework encompassing engineering parameter extraction, preliminary structural design, parametric modeling optimization, and experimental validation was established. This methodology successfully guided the newly constructed Longchang Road River-crossing Tunnel. Experimental results demonstrate that the connector achieves axial tensile capacity equivalent to grade 8.8 M36 inclined bolts, with failure progression aligning precisely with predefined design principles.

Keywords: tunnels; shields; C-T-type rapid connectors; parametric design; simulation; tests

0 引言

近年来,随着城市地下空间的开发,地下公路、铁路隧道等交通基础设施建设需求持续增长,盾构隧道工程正朝着超大直径与复杂地层穿越的方向快速发展,对其施工质量控制及建造效率提出了更严苛的要求。现阶段,盾构隧道普遍采用预制管片螺栓连接技术,但传统螺栓接头存在三方面显著缺

陷:①由于螺栓安装容差较大,在复杂地质条件下易诱发接缝张开与错台,严重影响隧道结构密封性与长期服役性能;②螺栓紧固工序通常需 4~6 人协同作业,导致施工效率低^[1];③螺栓手孔造成管片截面强度损失,形成局部应力集中区,显著削弱结构承载能力^[2]。针对上述技术瓶颈,C-T 型快速连接件通过创新性设计实现了盾构机千斤顶顶推力驱动的自锁式安装,显著提高预制管片拼装效率^[3],且拼装误差可控,推动了盾构隧道的标准化建造,逐渐成为盾构隧道接头领域的热点。

* 上海市“超级博士后”激励计划(2023043)

[作者简介] 巩一凡,博士,工程师,E-mail:18917252965@163.com

[收稿日期] 2025-10-20

近年来,国内快速连接件研究呈现体系化发展趋势,形成理论研究-试验验证-工程应用的技术闭环。朱合华^[4]和岳树桥等^[5]是国内较早开展快速连接件研究的学者,指出该接头管片截面强度与施工效率更高,能够满足自动化施工的要求,后者还基于理论公式对环缝插入式快速连接件的安装和承载机理进行了分析。试验研究方面,官林星等^[6]和肖明清等^[7]分别进行了快速连接件抗拉物理试验和快速连接管片接头的足尺试验,分析了连接件本体及其在管片中的力学性能。Wu 等^[8]通过接头压弯试验和数值模拟,建立了快速接头的弯矩-转角曲线模型,分析了快速接头的抗弯刚度和破坏模式。在工程实践探索方面,上海地铁 18 号线盾构隧道区间段是国内首次应用快速连接件的工程,该盾构隧道的整环结构刚度较高,可以有效减小结构的收敛变形,提高了接缝的防水性能,取得了很好的施工效果^[9-10]。南京江心洲污水收集系统二通道建设工程为我国首次在水下隧道中大规模应用快速连接件接头,针对性开展了承插式新型接头结构力学性能、管片接缝防水体系、管片制作公差设计方法及控制标准、管片施工控制技术等多方面研究^[11]。

随着快速连接件规模化应用进程的加速,其国产化生产与标准化制造已成为亟待解决的核心问题。当前研究多聚焦于特定工程的专项试验,较少涉及普适性设计方法研究,尤其在细部构造参数优化与系统化设计准则方面尚未形成体系。本文基于快速连接件在我国日益多见的背景,通过总结现有工程案例的连接件构造,归纳出一种典型 C-T 型连接件参数化设计框架,并结合工程实例阐述具体设计流程,为同类连接件的快速建模与工程适配提供参考。

1 典型 C-T 型连接件构造与结构设计总体原则

1.1 典型 C-T 型连接件构造

一种典型盾构隧道用 C-T 型连接件为 T 型件与 C 型件组成功能耦合的系统,如图 1 所示。T 型件按功能划分为 4 个特征区段:①翼缘段,与 C 型件咬合;②腹板段,抗拉承载力控制;③衔接段,T 型件本体与锚固钢筋衔接;④锚固段,实现 T 型件与混凝土的锚固。C 型件对应形成:①咬合段,与 T 型件翼缘和腹板段咬合;②衔接段,C 型件本体与锚固钢筋的衔接;③锚固段,实现 C 型件与混凝土的锚固。

为明确参数定义,建立三维坐标系:长度方向(x 轴)、宽度方向(y 轴)、厚度方向(z 轴)。为方便

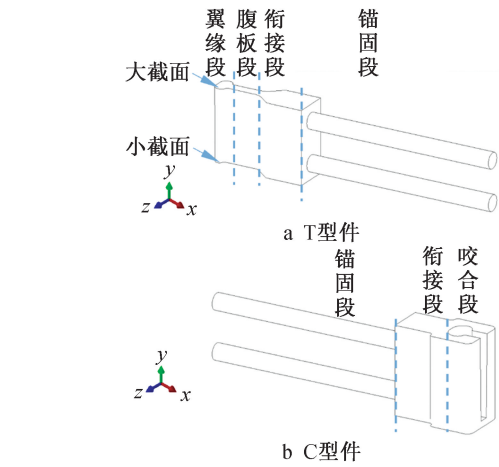


图 1 一种典型 C-T 型连接件组成
Fig. 1 A typical C-T type connector composition

连接件滑入,基于楔形几何构造,T 型件翼缘/腹板及 C 型件咬合区沿 y 轴负方向(向下)实施线性收窄设计,即整体为上大下小的楔形形态。后续参数定义中,采用上标“'”表示小截面侧参数。

1.2 设计总体原则

本设计原则基于传统螺栓接头设计思路,同时考虑了 C-T 型连接件的不同特性,具体而言:①屈服控制准则,继承螺栓接头设计原则,塑性屈服发生于 C-T 型件本体,确保与传统接头力学设计的兼容性;②极限破坏准则,基于 C-T 型件材料(球墨铸铁/低合金铸钢,断后伸长率 $\leq 18\%$)与锚筋(HRB400,断后伸长率 $\geq 16\%$)的延性梯度差异,通过锚筋极限承载力控制结构破坏模式,规避脆性断裂风险;③连接失效控制,依据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》与 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 年版)强节点设计原则,确保连接件本体与锚固钢筋连接界面强度与锚固钢筋在混凝土管片中的锚固系统性能始终高于构件本体,最终形成“母材屈服→锚筋断裂”的渐进失效序列。

总体设计原则可以总结为:结构塑性屈服发生于 C-T 型件本体,结构极限破坏发生于锚固钢筋,连接件本体与锚固钢筋、锚固钢筋与混凝土管片间的连接全阶段不应失效。

2 C-T 型连接件参数化设计方法

基于 1.2 节的设计准则,本节构建 C-T 型连接件各组成部分及细部参数的设计框架,涵盖工程设计参数提取、连接件结构初设计、参数化建模与仿真和试验研究四大递进模块,设计流程如图 2 所示。

2.1 工程设计参数提取

2.1.1 接头承载力设计

首先根据地质勘测资料和隧道设计参数,采用

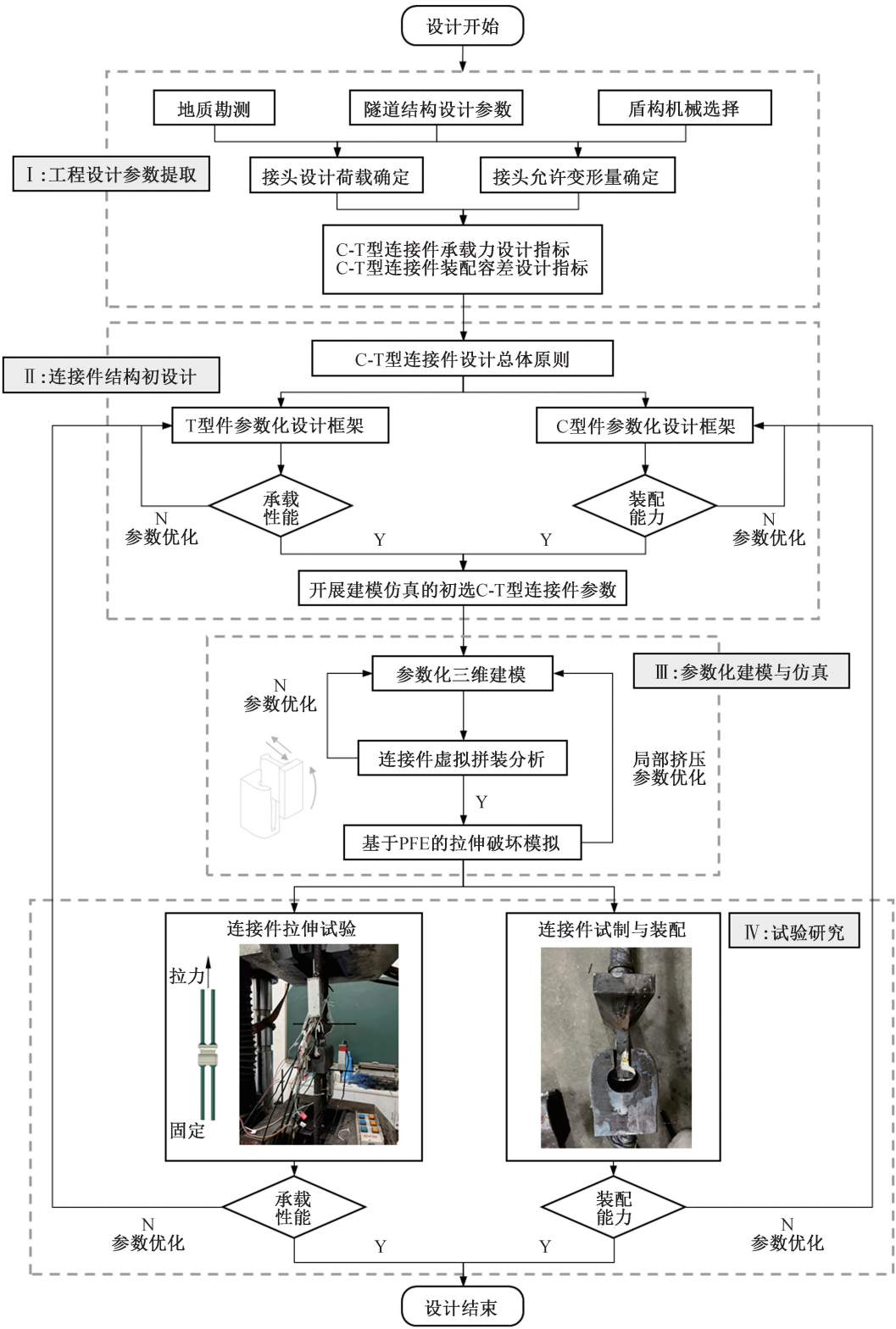


图 2 C-T 型连接件参数化设计流程

Fig. 2 Parametric design flowchart for C-T type connectors

均质圆环模型、梁弹簧模型等,确定隧道计算断面处内力,确定 C-T 型连接件的设计荷载要求,作为连接件的承载力设计指标。

2.1.2 接头装配容差设计

对于装配式盾构隧道,由于管片、连接件制作

误差和施工阶段盾构机拼装误差,接缝难免会出现张开和错台等变形。拼装过程中,C 型件与 T 型件之间的间隙(即装配容差设计)必须同时满足制作误差和装配误差下管片的顺利拼装成环^[11]。

2.2 连接件结构初设计

2.2.1 T 型件

T 型件参数化设计框架遵循“抗拉主控→咬合传力→锚固可靠”的层级化设计逻辑(见图 3),其核心参数体系如图 4 所示,具体实施流程如下。

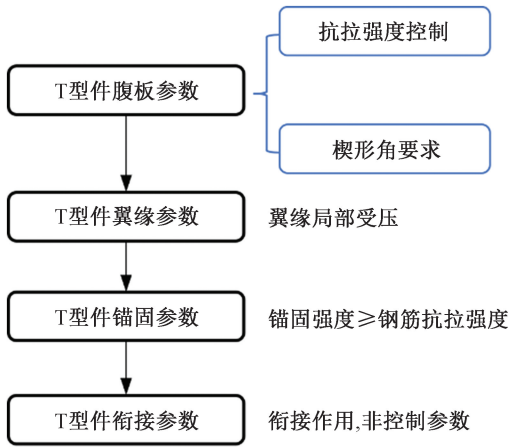


图 3 T 型件参数化设计框架

Fig. 3 Parametric design framework for T-type components

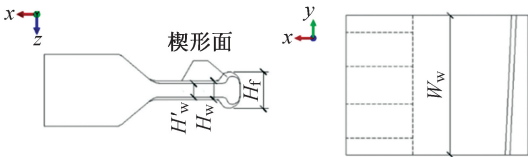


图 4 T 型件主要参数

Fig. 4 Key parameters of T-type components

1) 腹板抗拉主控区:腹板几何参数(H_w, H'_w, W_w)构成连接件抗拉承载力的核心控制要素。腹板有效截面均值厚度与宽度的乘积决定理论抗拉屈服承载力计算如下。

$$F_{CT} = f_{zg} \frac{H_w + H'_w}{2} W_w \tag{1}$$

式中: F_{CT} 为连接件的抗拉承载力; f_{zg} 为连接件用铸钢/铸铁的屈服应力,可由连接件所用铸件的材料等级确定; H_w, H'_w 分别为腹板段大截面和小截面的厚度; W_w 为连接件腹板的宽度。

除承载力控制外,腹板段参数尚应满足楔形导向角 α 的约束:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{H_w - H'_w}{2W_w}\right) \tag{2}$$

该角度控制构件滑入导向性能,根据既有设计经验,通常取 $0.8^\circ \sim 1.2^\circ$ 。

2) 翼缘咬合传力区:翼缘参数(H_f)应满足与 C 型件咬合后的局部受压要求。连接件咬合后的局部受压关系受 T 型件翼缘段与 C 型件咬合段形态、参数等多方面影响,两者接触后形成一种较为复杂

的挤压状态,设计中可采用数值仿真进行优化,并开展实体试验进行验证。按照既有及本次连接件设计经验,翼缘厚度 H_f 不宜小于腹板厚度 H_w 的 2 倍。

3) 锚固系统可靠性:为充分利用锚固钢筋的抗拉强度,参照《混凝土结构设计规范》(2015 年版),锚筋参数需满足式(3),(4)的规定:

$$l_a = \zeta_a l_{ab} \tag{3}$$

$$l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \tag{4}$$

式中: l_a 为钢筋的设计锚固长度; ζ_a 为钢筋锚固长度修正系数,对于公称直径大于 25mm 的带肋钢筋取 1.10; l_{ab} 为锚固钢筋的基本锚固长度; f_y 为锚固钢筋的抗拉强度设计值; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; d 为锚固钢筋直径; α 为锚固钢筋外形系数,对于连接件锚固段常用的带肋钢筋,取 0.14。

4) 衔接参数:衔接段仅起到衔接作用,并非连接件设计的控制因素,其设计形式、参数取值可以由设计人员参考既有案例确定。

2.2.2 C 型件

C 型件参数化设计框架遵循“强度冗余→容差控制→锚固匹配”的层级化设计逻辑(见图 5),其核心参数如图 6 所示,具体实施流程如下。

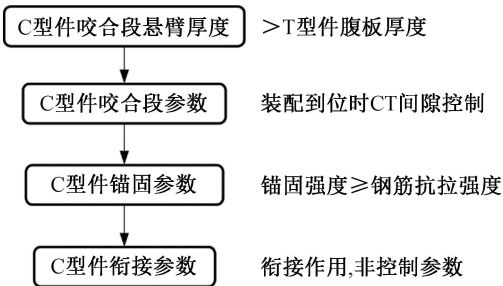


图 5 C 型件参数化设计框架

Fig. 5 Parametric design framework for C-type components

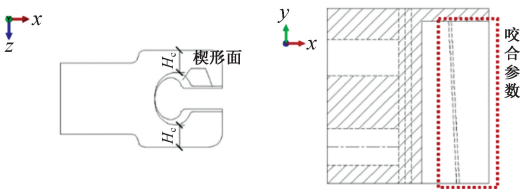


图 6 C 型件主要参数

Fig. 6 Key parameters of C-type components

1) 咬合强度冗余设计:本设计方法采用基于 T 型件腹板控制的承载力基准(F_{CT}),C 型件咬合段悬臂厚度 H_c 执行冗余系数设计。

$$H_c \geq 1.2H_f \tag{5}$$

确保 C 型件咬合界面强度较 T 型件腹板截面强度的冗余度 $\geq 20\%$,并重点强化悬臂段根部的抗弯性能。

2) 装配容差控制: C-T 型连接件装配性能主要由 C 型件参数控制,咬合段参数设计是 C 型件设计的核心。具体而言,需要考虑“3 种间隙,2 个阶段”的容差控制。

3 种间隙:①张开间隙,即沿 C-T 型连接件长度(x 轴)方向的最小间隙(图 7 中绿色线),约束管片接缝张开变形;②腹板间隙,即腹板位置沿 C-T 型连接件厚度(z 轴)方向的最小间隙(图 7 中红色线),约束管片接缝剪切错台;③最小间隙,即 C 型件咬合段和 T 型件翼缘段间的最小间隙(图 7 中黑色线),受 C-T 连接件咬合面制造精度、定位误差控制,保障设计最大误差工况下的强制装配可行性。

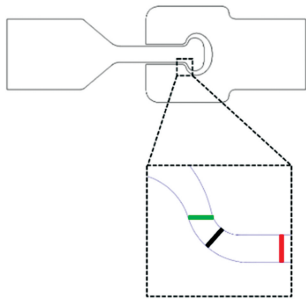


图 7 C 型件和 T 型件的间隙

Fig. 7 Gap between C-type and T-type components

2 个阶段:①连接件搭接时,即 T 型件小截面刚插入 C 型件,取 C 型件大截面和 T 型件小截面进行容差计算;②连接件装配到位时,即 T 型件完全插入 C 型件,此工况需验证连接件楔形梯度,设计中可采用多截面离散化验证法,沿连接件宽度方向(y 轴)按 10%增量步长剖分构件,确保全路径容差设计均满足控制要求。

3) 锚固匹配设计: C 型件的锚固参数和衔接参数的确定沿用 2.2.1 节所述原则,实现 C-T 型连接件锚固性能的等强匹配。

2.3 参数化建模与仿真优化

本节结合 2.2 节确立的设计框架,通过参数约束机制与脚本化建模技术构建 C-T 型连接件快速生成系统,形成“设计-建模-仿真”闭环优化链路。

2.3.1 基于 AutoCAD 的参数化建模

本文采用 C#语言开发了基于 AutoCAD 的参数化三维建模程序,具体包含以下内容。

1) 几何约束体系构建:将 2.2 节确定的 T 型腹板参数、翼缘参数等核心变量设为全局控制参数,根据几何体可成型性,建立参数约束。

2) 多自由度装配模拟:开发接触干涉检测算法,量化 T 型件平动/转动极限位移,建立装配可行性评价矩阵。

2.3.2 有限元优化仿真分析

建立 C-T 型连接件有限元分析模型,重点关注 C-T 型连接件的破坏模式以及应力分布情况,对于 T 型件翼缘段到腹板段的衔接部分与 C 型件咬合段接触挤压区域的局部应力集中进行衔接段参数优化。将优化后的参数重新输入参数化建模平台,进行虚拟拼装分析,验证优化后的参数是否满足装配要求,最终选择出局部受力较好且满足装配要求的 C-T 型连接件三维建模结果。

2.4 原型试制与试验测试

2.4.1 原型试制

基于仿真优化后的 C-T 型连接件数字模型,构建铸造模具;随后将原料熔炼,通过精密浇注系统注入模具并控制冷却速率以避免缩孔、裂纹;再通过热处理消除内应力并优化化学性能;最后进行机加工精修尺寸,配合超声波探伤、磁粉检测等质检工序确保无内部缺陷,形成高强度、耐磨损的铸钢件。

2.4.2 拉伸试验测试

开展 C-T 型连接件拉伸试验,重点考察连接件本体材性、咬合设计、组件与锚筋的连接性能,验证连接件结构设计是否满足承载力设计指标。

3 工程应用

3.1 工程概况

隆昌路越江隧道是穿越黄浦江的越江通道工程,位于上海市杨浦区与浦东新区,隧道主体工程全长约 1.76km,其中盾构段分为东西双线,长度约 1.25km。盾构段隧道结构外径 11.36m,管片厚度 500mm,中心环宽 1.5m。工程建设面临小转弯半径、超浅覆土、下穿油罐和电力隧道等复杂工况,对盾构隧道管片的拼装质量控制提出了更高的要求。为提高工程建设质量,项目试点承插式接头管片结构系统,隧道纵缝采用 16 组 C-T 型连接件连接。

3.2 设计指标

根据内力计算结果,要求每组纵缝 C-T 型连接件承载力不低于同等条件下 8.8 级 M36 斜螺栓。8.8 级 M36 螺栓屈服强度 640MPa,极限强度 800MPa,有效截面积 817mm²,斜螺栓与拉伸受力方向夹角为 30°,屈服承载力指标为 452.8kN,极限承载力指标为 566.0kN。

考虑连接件装配的容错能力,影响因素包括连接件在管片中的定位误差 $\pm 1\text{mm}$,连接件咬合面公

差 $\pm 0.5\text{mm}$,拼装过程设备和环境误差 $\pm 5\text{mm}$ 。因此,连接件搭接时,间隙 $\geq 6.5\text{mm}$,装配到位时,C-T型连接件间隙取 $\geq 1.5\text{mm}$,且应 $\leq 2.5\text{mm}$,以满足依托工程管片接缝变形控制要求。

3.3 连接件结构初设计

3.3.1 承载力设计

本项目连接件选用的材料为铸钢 ZG340-550H,其中 340 表示材料屈服强度 (MPa),550 表示材料极限强度 (MPa),H 表示焊接用铸钢件。C-T 型连接件承载力受 T 型连接件腹板截面控制,锚固钢筋设计为 $\phi 28$,连接件与锚固钢筋设计计算结果如表 1 所示。

表 1 连接件与锚固钢筋承载力计算结果
Table 1 Results of bearing capacity for connectors and anchored steel bars

锚筋承载力/kN (屈服/极限)	C-T 型连接件承载力/kN (屈服/极限)	8.8 级 M36 斜螺栓/kN (屈服/极限)
492.6/640.4	480.9/778.0	452.8/566.0

由表 1 可知,屈服时结构承载力:连接件<锚固钢筋,极限承载力:连接件>锚固钢筋,符合“结构屈服发生于 CT 件本体,结构极限破坏发生于锚固钢筋”的总体设计原则。

3.3.2 装配容差设计

连接件搭接时,容差由 C 型件大截面和 T 型件小截面尺寸控制,满足间隙 $\geq 6.5\text{mm}$ 的要求。装配到位时,间隙由 C 型件大截面、小截面以及过渡大小截面的楔形设计控制,可沿连接件宽度方向(y 轴)按 10%增量步长剖分构件,计算结果如表 2 所示,沿连接件宽度方向各装配间隙分布均匀,满足 $\geq 1.5\text{mm}$ 的要求。

表 2 装配到位时 C 型件与 T 型件装配间隙
Table 2 Assembly gap between C-type and T-type when fully assembled

计算位置	最小间隙	拉伸间隙	腹板间隙
y=0	1.508	1.621	1.694
y=11.5	1.505	1.621	1.694
y=23.0	1.505	1.621	1.694
y=34.5	1.508	1.622	1.694
y=46.0	1.514	1.622	1.694
y=57.5	1.52	1.624	1.694
y=69.0	1.523	1.625	1.695
y=80.5	1.532	1.623	1.695
y=92.0	1.536	1.628	1.695
y=103.5	1.536	1.63	1.695
y=115.0	1.531	1.628	1.695

3.4 建模与仿真优化

根据初步设计参数构建三维有限元分析模型,

如图 8 所示,模型对 C-T 型连接件的拉伸受力进行模拟。有限元模型计算的应变结果如图 9 所示,可见 T 型件翼缘与腹板的过渡段挤压较为明显,可适当优化过渡段参数,缓解应力集中现象。修改过渡段参数后需重新进行装配间隙的分析。重复上述过程,选择最优的过渡段参数。

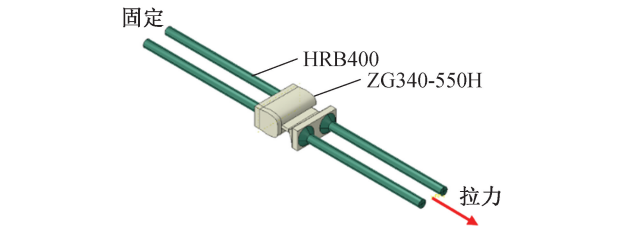


图 8 C-T 型连接件数值分析模型
Fig. 8 Numerical analysis model of C-T type connector

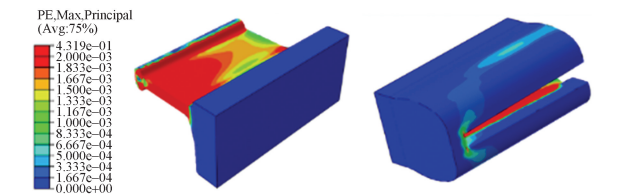


图 9 C-T 型连接件数值分析结果
Fig. 9 Numerical analysis results of C-T type connector

3.5 原型试制与拉伸试验研究

3.5.1 原型试制

试制 C-T 型连接件尺寸偏差应满足如下要求: C 型件凹槽内弧面加工精度为 $0/-0.5\text{mm}$,T 型件凸头外弧面加工精度为 $0/-0.5\text{mm}$,长度值为 $+1.0/0\text{mm}$,锥面角度误差 0.1° ,专用量具采用定制的检验工装,其制作允许偏差不得高于连接件成品允许偏差要求。

3.5.2 拉伸试验

C-T 型连接件拉伸试验结果如图 10 所示。整体上连接 C 型件的 2 根钢筋被拉断,其中一处破坏发生在钢筋,另一处破坏发生在另一根焊缝处的钢筋,破坏处断面整齐,无杂质。

连接件拉伸试验加载-位移曲线如图 11 所示。曲线存在几个明显的特征点:①连接件屈服(拉力=481kN),设计值为 480.9kN,伴随着连接件的屈服,加载-位移曲线斜率开始逐渐降低;②锚固钢筋屈服(拉力=541kN),设计值为 492.6kN,伴随着锚筋件的屈服,加载-位移曲线出现明显的平台段,位移快速增大;③锚固钢筋强化-拉断($>586\text{kN}$),锚固钢筋强化,随加载位移快速增大直至锚固钢筋拉断,破坏连接件没有显著的变化。可见,连接件在拉伸试验中显示出的破坏现象与本文 2.2 节提出的“结构



图 10 C-T 型连接件拉伸试验破坏现象

Fig. 10 Failure mechanisms of C-T type connector under tensile testing

屈服发生于 CT 件本体,结构极限破坏发生与锚固钢筋”的总体设计原则吻合,且各特征点拉力均与设计计算数值匹配,表明了连接件满足设计要求。

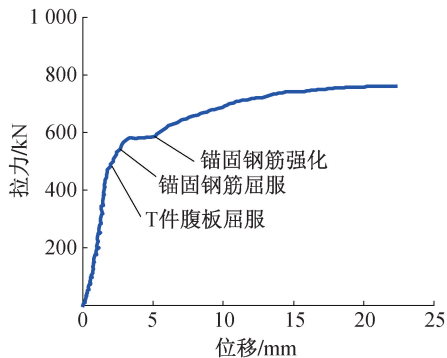


图 11 C-T 型连接件拉伸试验拉力-位移关系曲线

Fig. 11 Load-displacement response curve of C-T type connector under tensile testing

锚固钢筋应力测试结果如图 12 所示。T 型件 2 根钢筋在加载全阶段的应变相差不大,表明本次设计的 C-T 型连接件在拉伸工况下受力较均匀,不存在受力偏心问题。

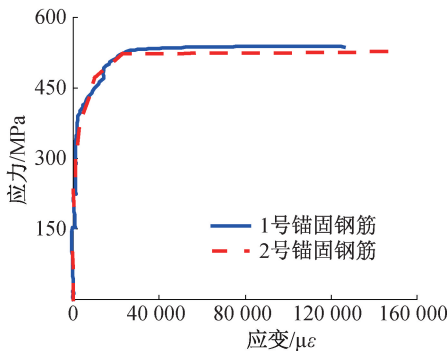


图 12 连接件锚筋应变测量结果

Fig. 12 Strain measurements of anchorage rebar in C-T type connector under tensile testing

4 结语

本文速针对快速连接件在我国盾构隧道接头

设计中日益增多的现状,通过总结现有工程案例的连接件构造,提出了一种典型 C-T 型快速连接件的设计原则,据此建立了盾构隧道典型 C-T 型快速连接件的设计方法,应用于国内首条试点采用承插式快速接头的 11m 级大直径越江盾构隧道——隆昌路越江隧道新建工程的连接件设计工作,成功指导了工程实践,具体结论如下。

1)结合连接件材料特性与既有实施案例,提出一种典型 C-T 型快速连接件设计原则:结构屈服发生于 C 型、T 型件本体,结构极限破坏发生于锚固钢筋,连接件本体与锚固钢筋、锚固钢筋与混凝土管片间的连接不应失效。

2)C-T 型连接件设计包括承载力设计和装配容差设计 2 部分:承载力主要通过 T 型件腹板参数控制;装配容差则主要通过 C 型件咬合段参数设计。

3)提出“四阶段、双指标”盾构隧道典型 C-T 型快速连接件设计方法,其“四阶段”涵盖工程设计参数提取、连接件结构初设计、参数化建模与仿真及试验研究,“双指标”指连接件在满足同等级斜螺栓承载力指标的同时,实现装配容差设计误差控制;试制 C-T 型连接件的加载-破坏历程符合总体设计原则,整体拉伸受力均匀、无偏心,满足依托工程受力要求。

参考文献:

[1] 鲁志鹏,何应道,赵明应. 盾构隧道 C-T 型快速连接件受力性能研究[J]. 现代隧道技术,2022,59(S1):542-549.
LU Z P, HE Y D, ZHAO M Y. Research on mechanical behavior of C-T type quick connector in shield tunnel [J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(S1):542-549.

[2] 巩一凡,丁文其,龚琛杰,等. 大断面类矩形盾构隧道管片接头极限抗剪承载力试验研究[J]. 土木工程学报,2019,52(11):120-128.
GONG Y F, DING W Q, GONG C J, et al. Experimental study on the ultimate shear bearing capacity of segment joint in shield tunnel with large quasi-rectangular cross-section[J]. China civil engineering journal, 2019, 52(11):120-128.

[3] 柳献,白海文,张帆,等. 运用 C-T 型快速连接件的大直径盾构隧道纵缝接头力学行为分析[J]. 中国公路学报,2025,38(4):158-170.
LIU X, BAI H W, ZHANG F, et al. Mechanical behavior analysis of longitudinal joint in large-diameter shield tunnels using C-T fast-slide connectors[J]. China journal of highway and transport, 2025, 38(4):158-170.

[4] 朱合华. 地下建筑结构[M]. 2 版. 北京:中国建筑业出版社,2011.
ZHU H H. Underground building structure[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.