型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁抗弯性能研究

苏 栋* 李广昊 周高军 王 振 史立强 孙衍臣
（山东省公路桥梁建设集团有限公司，济南 250014）

摘 要 本文提出一种型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁，对其抗弯性能进行了有限元分析和试验研究。在跨中荷载作用下，与未配置型钢的连续螺旋箍筋混凝土T型梁进行对比，研究了型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁的受力状态、破坏机理和损伤演化规律。分析了混凝土强度等级、型钢翼缘宽度以及螺旋箍筋间距对型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁受力性能的影响。结果表明，相较于未配置型钢的连续螺旋箍筋混凝土T型梁，即使混凝土损伤状态较严重，型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁依然能够保持极限承载力，而且能够大幅提升T型梁的延性。同时在峰值荷载状态下，配置型钢的连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁的极限位移较小。

关键词 螺旋箍筋，抗弯性能，破坏形态，性能分析
中图分类号：TU375.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0001

Study on Flexural Performance of Profile Steel-Continuous Spiral Stirrup Concrete Composite T-Beams

SU Dong* LI Guanghao ZHOU Gaojun WANG Zhen SHI Liqiang SUN Yanchen
（Shandong High-Speed Road and Bridge Group Co., Ltd., Jinan 250014, China）

Abstract This paper proposes a kind of profile steel-continuous spiral stirrup concrete composite T-beam. Finite element analysis and experimental studies are conducted on this composite T-beam. Compared with the spiral stirrup concrete T-beam without profile steel, the stress state, failure mechanism, and damage resistance behavior of the profile steel-concrete composite T-beam with continuous spiral stirrups are investigated under mid-span loading. The effects of concrete strength grade, steel flange width, and spiral stirrup spacing on the mechanical performance of the composite T-beam are analyzed. The results show that, compared with the spiral stirrup concrete T-beam without profile steel, the profile steel-concrete composite T-beam with continuous spiral stirrups maintains its ultimate bearing capacity even when the concrete is severely damaged. Furthermore, the ductility of the T-beam is significantly improved. Under peak loading conditions, the profile steel-concrete composite T-beam with continuous spiral stirrups exhibits superior damage resistance.

Keywords spiral stirrup, flexural performance, failure pattern, performance analysis

收稿日期：2024-11-29
基金项目：山东省自然科学基金(ZR2021QE173)，山东省企业技术创新项目
*联系作者：苏 栋(1990-)，男，高级工程师，主要从事特大型桥梁施工技术、桥梁施工装配化和智能化研究。E-mail：176519710@qq.com

0 引 言

箍筋是钢筋混凝土梁的关键构件，普通分离式箍筋接头需要弯折135°弯钩，弯钩的直线长度不应小于5倍的箍筋直径，大量的箍筋弯钩容易造成钢筋的浪费。在现场施工中，传统的钢筋混凝土梁的箍筋制作和绑扎通常由人工操作，耗费大量的劳动力，机械化程度较低。为解决传统箍筋在现场施工等方面的不足，近年来国内外学者对钢筋混凝土构件中的螺旋箍筋进行了大量的研究和分析，已有较多应用，如图1、图2所示。与传统箍筋相比，螺旋箍筋具有以下优点：螺旋箍筋由一根钢筋连续弯折形成，取代了多个传统的箍筋，减少大量传统箍筋弯钩，节省钢筋用量；螺旋箍筋在工厂采用可旋转式螺旋箍筋弯箍机加工生产，箍筋可自动旋转和弯折，制作质量较高。国内外有关螺旋箍筋的研究大部分集中于钢筋混凝土柱，主要针对螺旋箍筋钢筋混凝土柱的抗震性能和轴压性能开展分析[1-5]，研究结果表明：与普通钢筋混凝土柱相比，螺旋箍筋约束混凝土柱的强度、延性、抗倒塌能力和耗能能力均有显著提高。

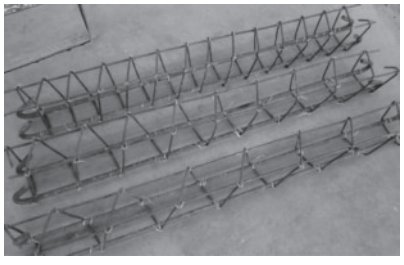


图1 螺旋箍筋矩形梁

Fig.1 Spiral stirrups embedded in rectangular beams



图2 螺旋箍筋圆形柱

Fig.2 Spiral stirrups embedded in circular columns

目前关于配置螺旋箍筋钢筋混凝土梁的力学性能研究较少。齐共成等[6]进行了螺旋箍筋约束混凝土梁的抗剪性能试验研究。李丽等[7]对螺旋箍筋形式UHPC梁受扭性能进行了试验研究。刘坚等[8]分析了矩形螺旋箍筋混凝土梁在弯矩作用下的破坏过程和破坏形态。肖锦等[9]分析了部分包覆钢-混凝土组合T型梁的抗弯刚度和承载力。史燚等[10]对预埋型钢的钢筋混凝土梁钢柱转换节点进行了抗震性能研究。

本文结合螺旋箍筋和型钢的性能优势，提出了一种型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁，对其进行力学性能研究。与未配置型钢的螺旋箍筋混凝土T型梁进行了对比，分析了在跨中荷载作用下，型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁的受力状态、破坏机理和耐损伤性能。研究了构件参数对型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁受力性能的影响，并给出了相应的抗弯承载力计算公式。

1 有限元模型建立

1.1 模型参数及材料本构模型

本研究依托济南市绕城高速公路二环线北环段项目。螺旋箍筋绕制形式为四边绕制，如图3所示，型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁尺寸如图4所示。

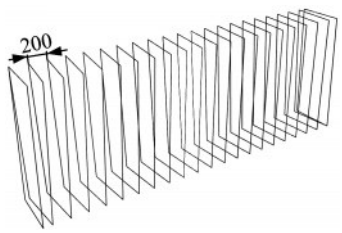


图3 连续螺旋箍筋(单位：mm)

Fig.3 Continuous spiral stirrup (Unit: mm)

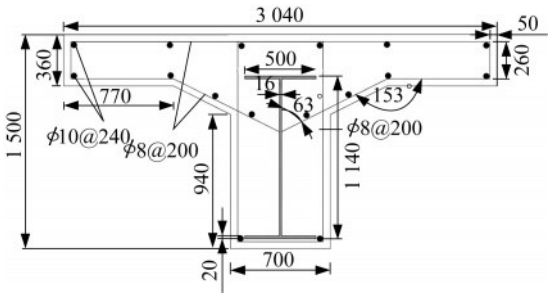


图4 组合T型梁截面尺寸(单位：mm)

Fig.4 Section size of the composite T-beam (Unit: mm)

为准确模拟型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁在受力过程中混凝土的损伤情况，有限元模型中混凝土的本构模型采用塑性损伤模型。混凝土弹性模量为3×10^4 MPa，轴心抗压强度标准值为20.1 MPa。各钢筋及型钢构件屈服强度和极限强度等见表1。

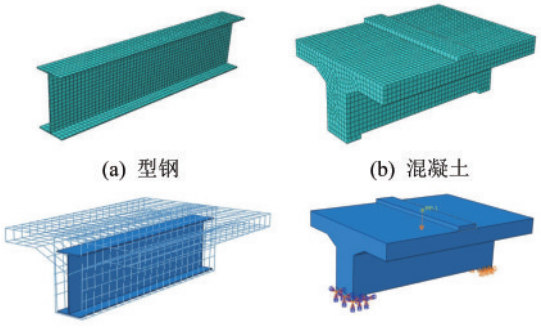
表 1　组合 T 型梁材料参数

Table 1　Material parameters of the composite T-beam

构件名称	屈服强度 f_y/(N·mm^{-2})	极限强度 f_u/(N·mm^{-2})	弹性模量 E/(N·mm^{-2})
螺旋箍筋	335	455	206 000
纵筋	335	455	206 000
型钢	345	490	210 000

1.2　单元选择与边界条件

有限元模型中混凝土和型钢采用 C3D8R 实体单元进行模拟，纵筋和螺旋箍筋采用 T3D2 单元，网格尺寸为 50 mm。加载模式为位移加载，加载位移幅值为 170 mm，梁跨中位置设有钢性垫板，作为位移荷载的作用位置，避免应力集中而导致加载初期的局部破坏，钢性垫板与 T 型梁为绑定连接。型钢与混凝土、螺旋箍筋与混凝土之间为嵌入连接。T 型梁有限元模型中，设定 T 型梁的左侧端为固定约束，右侧端为铰接约束。约束 T 型梁左侧端 x、y 和 z 方向的线位移和转角，约束 T 型梁右侧端 x、y 和 z 方向的线位移。型钢连续螺旋箍筋混凝土组合 T 型梁有限元模型如图 5 所示。



(a) 型钢　(b) 混凝土　(c) 型钢与螺旋箍筋骨架　(d) 组合T型梁整体

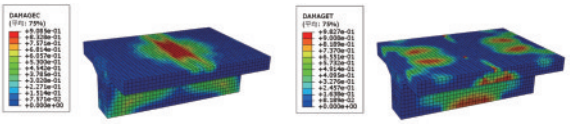
图 5　组合 T 型梁有限元模型

Fig.5　Finite element model of the composite T-beam

2　螺旋箍筋 T 型梁抗弯性能分析

2.1　破坏特征

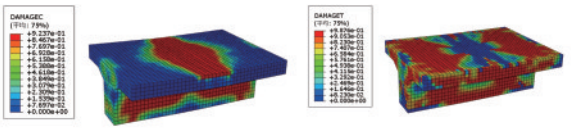
图 6 和图 7 分别为跨中荷载作用下，加载位移为 18 mm 和 100 mm 时的型钢连续螺旋箍筋混凝土组合 T 型梁的损伤形态。加载位移为 18 mm 时，组合 T 型梁上翼缘跨中区域混凝土主要表现为受压损伤，沿着梁长度方向受压损伤逐渐减小。组合 T 型梁跨中腹板处混凝土呈现为受拉损伤。随着荷载的继续增大，加载位移为 100 mm 时，翼缘中部和腹板支座处混凝土受压损伤区域逐渐扩大，翼缘端部受拉损伤分布不断扩大，由梁翼缘端部向翼缘中部持续发展。梁跨中腹板受拉损伤逐渐扩大，由梁腹板底部向腹板内部不断发展。



(a) 组合T型梁受压损伤云图　(b) 组合T型梁受拉损伤云图

图 6　加载位移 18 mm 组合 T 型梁损伤形态

Fig.6　Damage modes of the composite T-beam loaded to 18 mm displacement

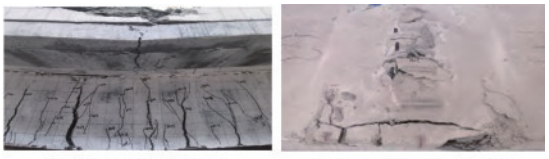


(a) 组合T型梁受压损伤云图　(b) 组合T型梁受拉损伤云图

图 7　加载位移 100 mm 组合 T 型梁损伤形态

Fig.7　Damage modes of the composite T-beam loaded to 100 mm displacement

对型钢连续螺旋箍筋混凝土组合 T 型梁进行了试验研究，梁翼缘截面尺寸为 3 040 mm×360 mm，腹板截面尺寸为 1 140 mm×700 mm，混凝土强度等级为 C30，纵筋型号为 HRB335，直径为 10 mm；螺旋箍筋型号为 HPB335，直径为 8 mm；型钢为 Q345 工字钢，截面尺寸为 1 140 mm×500 mm×20 mm，厚度为 16 mm。通过加载梁和油压千斤顶对 T 型梁进行加载，图 8 为 T 型梁的试验破坏形态。可以看到，T 型梁腹板跨中受拉区域首先出现混凝土竖向和斜向裂缝，随着加载的进行，腹板裂缝数量和裂缝宽度逐渐加大，并且裂缝逐渐向 T 型梁上部发展。当加载至峰值荷载的 0.5~0.6 时，型钢开始进入塑性受力状态，T 型梁的荷载增速减缓。随着挠度持续增加，T 型梁试件的翼缘受压区混凝土压溃破坏，最终 T 型梁失去承载力。



(a) 梁腹板跨中裂缝　(b) 梁翼缘混凝土压碎

图 8　T 型梁试验破坏形态

Fig.8　Failure mode of T-beam test

对有限元模拟结果和试验结果进行了对比，荷载位移曲线对比如图 9 所示。其中，试验得到

的T型梁屈服荷载和峰值荷载分别为318.52 kN和489.86 kN，有限元模拟得到的T型梁屈服荷载和峰值荷载分别为347.72 kN和514.66 kN，误差分别为9.1%和5.1%。有限元模拟和试验得到的T型梁弹性工作阶段和弹塑性工作阶段的力学性能基本一致。由于试验中T型梁工作阶段型钢和混凝土接触处存在界面粘结传力作用，而在有限元模型中不能充分考虑其界面传力影响，将其简化设置为摩擦接触，因此有限元模拟得到的T型梁初始弹性刚度、屈服荷载以及峰值荷载略高于试验结果。

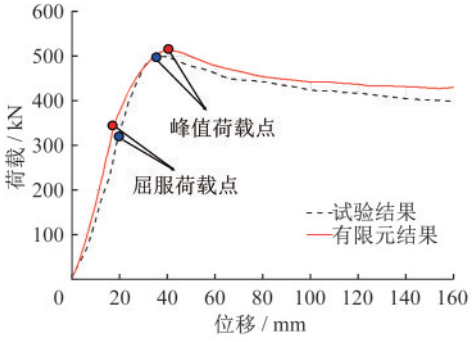


图9 试验与有限元荷载-位移曲线

Fig.9 Load-displacement curve of test and FEM

2.2 应力分布

图10和图11分别为型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁的混凝土应力分布和螺旋箍筋骨架应力分布。在跨中荷载作用下，组合T型梁混凝土受到的应力主要集中在翼缘跨中区域，逐渐达到混凝土标准强度，翼缘两端区域混凝土应力较小。在组合T型梁的弹性受力阶段，即加载位移小于18 mm时，翼缘跨中和腹板处螺旋箍筋和纵筋应力为195~307 MPa。当荷载位移加载超过18 mm时，翼缘跨中区域螺旋箍筋骨架达到屈服强度，腹板处螺旋箍筋骨架出现较大程度的塑性变形，T型梁翼缘和腹板处螺旋箍筋和纵筋已经进入屈服状态，T型梁跨中区域螺旋箍筋骨架进入极限状态。

图12为组合T型梁的型钢应力分布。在组合T型梁加载过程中，型钢发生的破坏形式是屈服。型钢腹板首先发生屈服；随着荷载的增加，型钢下翼缘发生受拉屈服；最后混凝土压碎后，型钢上翼缘发生受压屈服。当梁翼缘处混凝土达到屈服强度时，型钢上翼缘压应力逐渐增大，此时T型

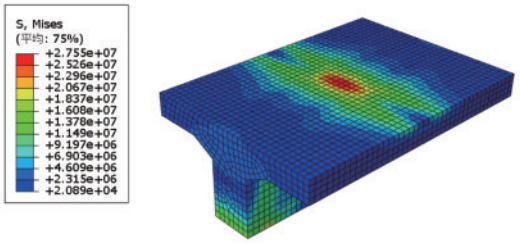


图10 混凝土应力分布

Fig.10 Stress distribution of concrete

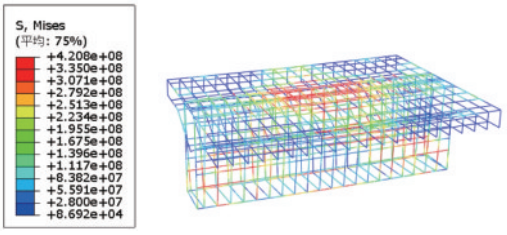


图11 螺旋箍筋骨架应力分布

Fig.11 Stress distribution of spiral stirrup

梁应力主要由螺旋箍筋骨架、型钢下翼缘和型钢腹板承担。当T型梁达到极限承载力时，型钢上下翼缘处已经达到屈服强度，型钢腹板处应力最大，塑性变形明显并且达到塑性极限强度，说明型钢的材料性能得到了充分利用，能够进一步增强组合T型梁的受力性能。

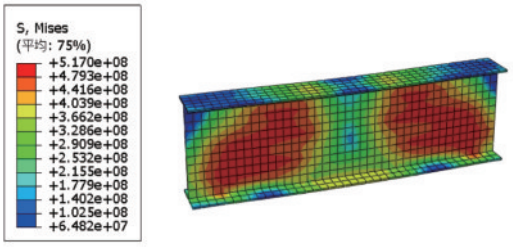


图12 型钢应力分布

Fig.12 Stress distribution of steel

2.3 性能对比

图13为螺旋箍筋混凝土T型梁荷载-位移曲线。根据荷载-位移曲线计算得到T型梁的特征点性能指标，结果见表2，其中SHRB为未配置型钢的螺旋箍筋混凝土T型梁，SSHRB为型钢螺旋箍筋混凝土组合T型梁，屈服荷载和屈服位移采用等效弹塑性能量法[11]确定，极限位移取荷载降低至峰值荷载85%时的位移值，采用下式计算延性系数：

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

式中：Δ_u为极限位移；Δ_y为屈服位移。

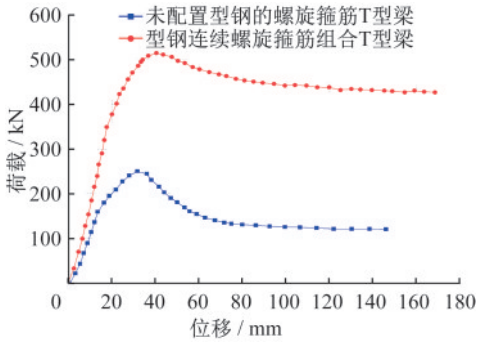


图 13　荷载-位移曲线

Fig.13　Load-displacement curves

与未配置型钢的螺旋箍筋 T 型梁相比，配置型钢后的连续螺旋箍筋混凝土组合 T 型梁的屈服荷载从 162.32 kN 提高至 347.72 kN，提高幅度为 114%；峰值荷载从 254.96 kN 提高至 514.66 kN，提高幅度为 102%。未配置型钢的螺旋箍筋 T 型梁延性系数为 3.32，型钢连续螺旋箍筋混凝土组合 T 型梁的延性系数为 6.91。可以看出配置型钢后，连续螺旋箍筋混凝土 T 型梁的承载力有明显的提高，同时延性性能得到有效改善。根据 T 型梁的荷载位移曲线，在达到峰值荷载前的非线性工作阶段，由于螺旋箍筋对混凝土的约束作用，T 型梁的刚度退化较为缓慢。与型钢螺旋箍筋混凝土组合 T 型梁相比，未配置型钢的螺旋箍筋混凝土 T 型梁的荷载在达到峰值后下降较快，下降段曲线斜率较大。配置型钢后，螺旋箍筋混凝土 T 型梁的荷载达到峰值后下降较少且平稳，下降段曲线斜率较小。

表 2　特征点性能指标

Table 2　The performance indexes of feature points

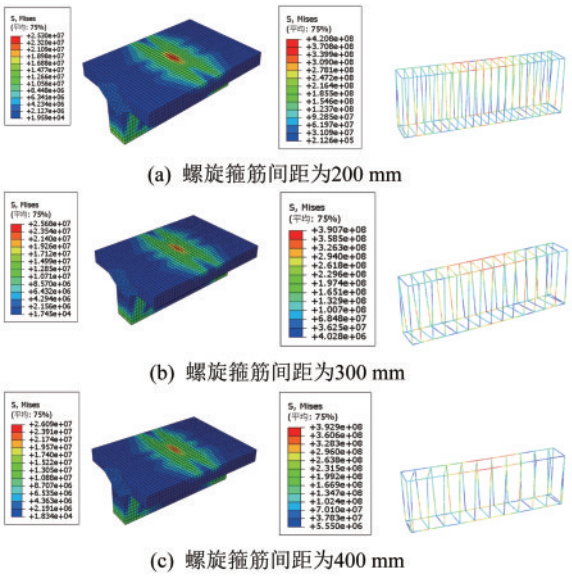
构件类别	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 P_u/kN	极限位移 Δ_u/mm	延性系数 μ
SHRB	162.32	13.22	254.96	43.91	3.32
SSHRB	347.72	17.34	514.66	119.86	6.91

3　承载力影响因素分析

3.1　螺旋箍筋间距

图 14 为螺旋箍筋间距为 200 mm、300 mm 和 400 mm 的 T 型梁混凝土和螺旋箍筋应力分布图。各试件的应力分布规律几乎一致，翼缘中部区域和腹板支座区域应力较大，不同间距螺旋箍筋应力分布形态几乎一致。

图 15 为不同螺旋箍筋间距组合 T 型梁的荷载-位移曲线。各 T 型梁的初始弹性刚度基本相同。随着荷载的增加，螺旋箍筋间距 400 mm 的 T 型梁首先进入弹塑性工作阶段，并且由于螺旋箍筋间距增大，梁的刚度退化较为明显。随着螺旋箍筋间距的增大，T 型梁的极限承载力逐渐降低，峰值荷载分别为 514.66 kN、494.42 kN 和 474.67 kN。当荷载超过 T 型梁的极限承载力处于下降段时，由于此时螺旋箍筋已经大范围进入屈服状态，型钢成为 T 型梁主要受力部件，因此各 T 型梁最后逐渐稳定的荷载相差较小。综上，建议组合 T 型梁的螺旋箍筋间距不宜大于 400 mm，宜为 200 mm。



(a) 螺旋箍筋间距为200 mm

(b) 螺旋箍筋间距为300 mm

(c) 螺旋箍筋间距为400 mm

图 14　不同箍筋间距的梁混凝土和螺旋箍筋应力分布

Fig.14　Stress distribution of concrete and spiral stirrups with different stirrup spacing

3.2　型钢翼缘宽度

图 16 为型钢翼缘宽度为 500 mm、300 mm 和 150 mm 的 T 型梁型钢应力分布图。各 T 型梁的型钢应力分布特性基本一致，翼缘宽度对 T 型梁型

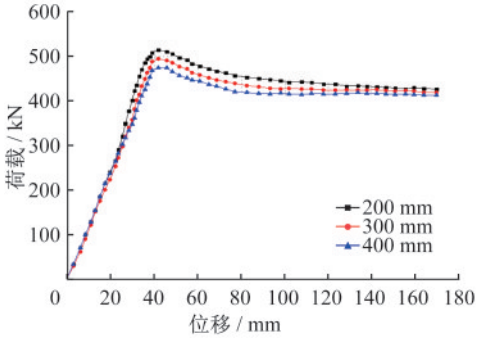
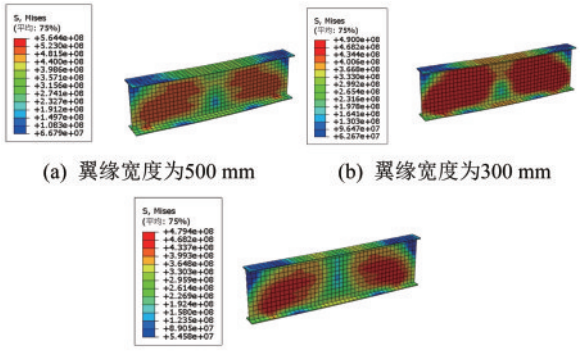


图 15 不同螺旋箍筋间距的梁荷载-位移曲线

Fig.15 Load displacement curves with different stirrup spacing

钢的应力分布影响很小，应力分布基本呈左右对称形式。型钢上翼缘跨中区域已经进入屈服状态，型钢腹板应力较大并且已经达到极限应力，型钢整体塑性变形显著。



(a) 翼缘宽度为500 mm (b) 翼缘宽度为300 mm

(c) 翼缘宽度为150 mm

图 16 不同翼缘宽度的梁型钢应力分布

Fig.16 Stress distribution of steel with different flange width

图 17 为不同型钢翼缘宽度的组合 T 型梁的荷载-位移曲线。型钢翼缘宽度对组合 T 型梁的承载力具有一定的影响。T 型梁弹性工作阶段的刚度基本相同。与翼缘宽度为 500 mm 的 T 型梁相比，翼缘宽度为 300 mm 和 150 mm 的 T 型梁，其峰值荷载分别降低了 3.88% 和 6.81%。

3.3 混凝土强度等级

图 18 为不同混凝土强度等级的组合 T 型梁的荷载-位移曲线。可以看出，混凝土的强度对 T 型梁的承载力具有较大的影响。随着混凝土强度的提高，T 型梁的承载力逐渐提高，屈服荷载分别为 347.72kN、419.25 kN 和 479.25 kN，峰值荷载分别为 514.66 kN、578.09 kN 和 664.52 kN。

图 19 为混凝土强度等级为 C30、C35 和 C40 的 T 型梁应力分布图。不同混凝土强度等级 T 型

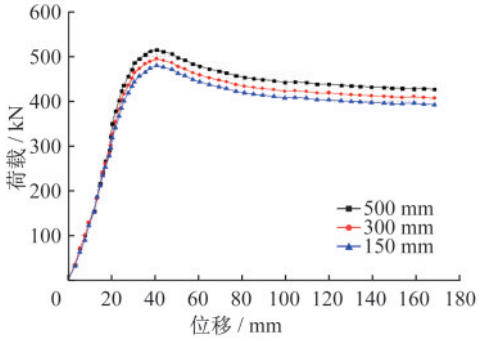


图 17 不同型钢翼缘宽度的梁荷载-位移曲线

Fig.17 Load-displacement curves with different steel flange width

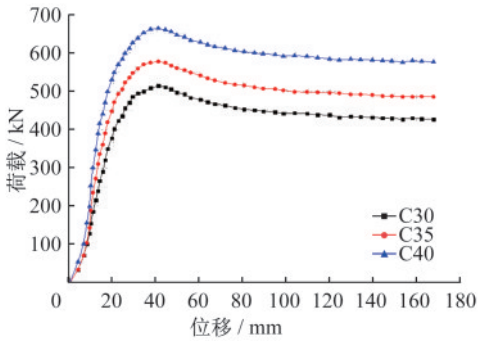
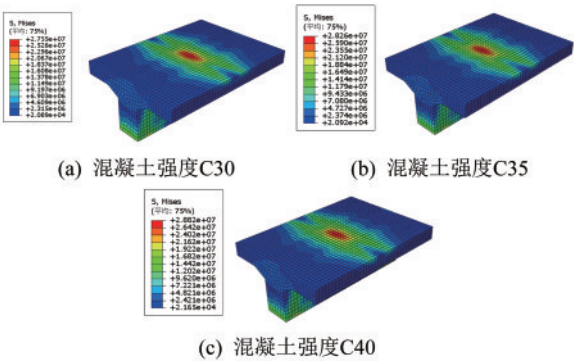


图 18 不同混凝土强度等级的梁荷载-位移曲线

Fig.18 Load-displacement curves with different concrete strength grade

梁的应力分布基本一致，混凝土翼缘跨中区域应力较大，翼缘端部区域应力较小，腹板支座区域应力较大。



(a) 混凝土强度C30 (b) 混凝土强度C35

(c) 混凝土强度C40

图 19 不同混凝土强度等级的梁应力分布

Fig.19 Stress distribution of beam with different concrete strength grade

4 损伤分析

4.1 损伤指标计算

结合荷载-位移曲线表示的 T 型梁的刚度变

化，采用式(2)计算螺旋箍筋混凝土T型梁的损伤指标[12]，如图20所示。加载初期，T型梁为无损伤状态，因此定义损伤指标 $D=0$。当螺旋箍筋混凝土T型梁由于损伤累积导致承载力下降至峰值荷载的85%时，判定T型梁失去继续承载能力，损伤指标定义为 $D=1.0$。

$$D=\frac{K_u(K_0-K_i)}{K_i(K_0-K_u)} \tag{2}$$

式中：K_0 为T型梁荷载-位移曲线的弹性阶段刚度；K_i 为T型梁荷载-位移曲线的任意点和初始点的切线刚度，即加载过程中任意时刻的T型梁刚度；K_u 为T型梁荷载-位移曲线中荷载下降至峰值荷载85%（$P_m=0.85P_u$）对应点与初始点的切线刚度。

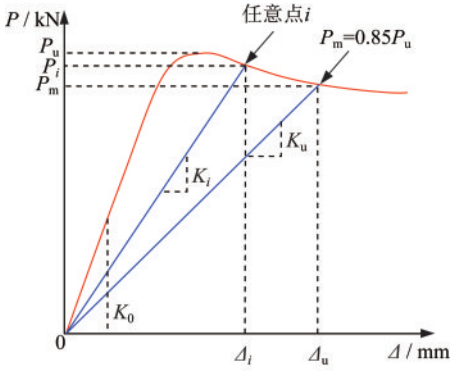


图20　损伤指标计算模型

Fig.20　Model of damage variable

4.2　损伤发展

根据损伤指标的计算模型分析得到螺旋箍筋T型梁的损伤指标与挠度关系曲线，如图21所示。未配置型钢的螺旋箍筋T型梁峰值荷载点的损伤指标为0.39，而同等条件下配置型钢的螺旋箍筋T型梁峰值荷载点的损伤指标为0.21，表明型钢对T型梁裂缝的发展具有较好的控制作用，限制了T型梁峰值荷载点前的损伤发展。

螺旋箍筋间距对T型梁的损伤发展具有一定的影响。随着螺旋箍筋间距的增大，T型梁的损伤速率逐渐增大。200 mm、300 mm和400 mm螺旋箍筋间距的T型梁峰值荷载点的损伤指标分别为0.21、0.28和0.36。当T型梁处于弹塑性工作阶段时，由于此时大范围螺旋箍筋已经达到屈服强度，因此螺旋箍筋间距较大的T型梁损伤累积最大。随着T型梁挠度逐渐增大，此时型钢起受力主导作用，因此不同螺旋箍筋间距的T型梁损伤指标逐渐趋近同一数值。

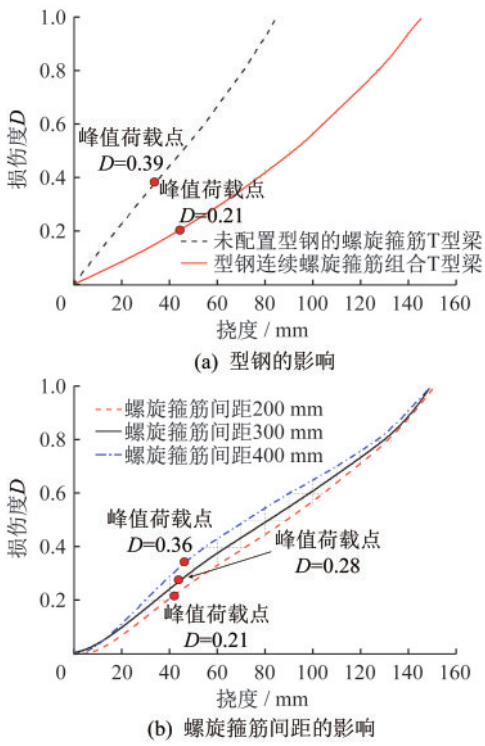


图21　损伤发展影响因素

Fig.21　Influencing factors of damage development

5　抗弯承载力计算

根据研究结果，型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁具有良好的整体性能，参考《组合结构设计规范》等相关标准规范，基于塑性理论和平截面假定，忽略型钢与混凝土之间相对滑移，忽略受拉区混凝土的作用，混凝土压应力呈矩形分布，型钢在受拉或受压区的应力均达到钢材的抗拉或抗压屈服强度，给出抗弯承载力的计算公式，受力简图如图22所示。

中和轴在T型梁翼缘板内且高于型钢上翼缘，T型梁的抗弯承载力采用式(3)计算：

$$M_u=\alpha_1 f_c b_e \frac{x^2}{2}+f_a A_a y_1+ f_y A_s\left(h_c+h_a-x-t_f-a_s\right) \tag{3}$$

中和轴在T型梁翼缘板内且通过型钢上翼缘，T型梁的抗弯承载力采用式(4)计算：

$$M_u=\alpha_1 f_c b_e h_c\left(x-\frac{h_c}{2}\right)+f_a S_{at}+f_a' S_{ac}+ f_y A_s\left(h_c+h_a-x-t_f-a_s\right) \tag{4}$$

中和轴在T型梁腹板内且通过型钢腹板，T型梁的抗弯承载力采用式(5)计算：

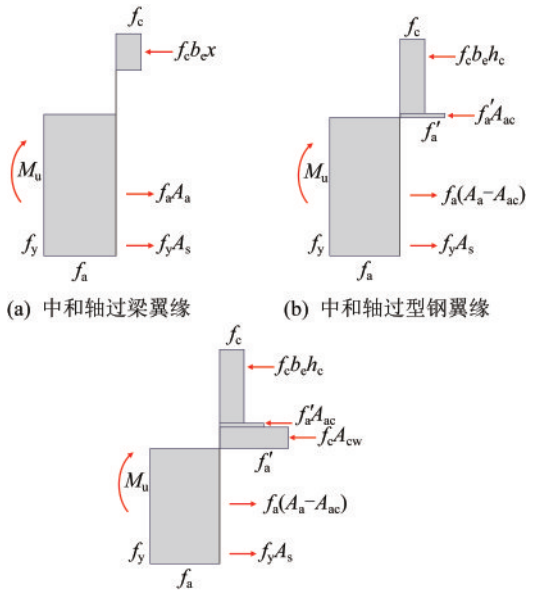


图22 受力简图

Fig.22 Mechanical diagram

$$M_u = \alpha_1 f_c b_e h_c \left(x - \frac{h_c}{2} \right) + f_a S_{at} + f_a' S_{ac} + f_y A_s \left(h_c + h_a - x - t_f - a_s \right) + \alpha_1 f_c A_{cw} \frac{(x - h_e - t_f')}{2} \quad (5)$$

式中：x为混凝土受压区高度；b_e为T型梁翼缘宽度；h_c为T型梁翼缘高度；h_a为型钢高度；b_f为型钢翼缘宽度；A_s为受拉纵筋面积；A_a为型钢截面面积；A_{cw}为T型梁腹板混凝土受压截面面积；a_s为纵筋保护层厚度；t_f为型钢翼缘厚度；f_a为型钢抗拉强度；f_a'为型钢抗压强度；f_y为受力纵筋屈服强度；f_c为混凝土强度；α_1为受压区混凝土压应力影响系数；S_{at}为型钢受拉区对中和轴的面积矩；S_{ac}为型钢受压区对中和轴的面积矩。

将型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁弯矩承载力的理论公式计算结果与数值模拟结果进行对比，见表3，其中M_{lu}为理论公式结果，M_{su}为数值模拟结果。可以发现二者吻合较好，理论公式结果与数值模拟结果误差为8.91%，由于理论计算公式简化了螺旋箍筋对混凝土的约束效应，因此理论公式结果略小于数值模拟结果。

表3 理论公式与数值模拟对比

Table 3 Comparison between theoretical formulas and numerical simulation results

构件类别	M_{lu}/(kN·m)	M_{su}/(kN·m)	误差
SSHRB	243.72	265.44	8.91%

6 结 论

通过对型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁承载力进行研究，分析了螺旋箍筋T型梁的破坏机理、受力性能和耐损伤性能，主要结论如下：

（1）配置型钢和螺旋箍筋能够有效提高T型梁的弹塑性承载力，大幅提升螺旋箍筋T型梁的屈服荷载和极限荷载。

（2）型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁具有较强的塑性变形和延性能力，但由于螺旋箍筋对混凝土的约束作用，T型梁的刚度退化较弱。

（3）峰值荷载状态下，型钢连续螺旋箍筋混凝土组合T型梁耐损伤性能较好，对裂缝的发展具有较好的控制作用。

（4）建立了抗弯承载力计算公式，计算结果与数值模拟结果吻合良好，可为相关工程设计提供参考。

参 考 文 献

[1] 常亚峰，张俊旗，戴军，等.螺旋箍筋约束UHPC加固混凝土柱大偏心受压性能试验研究[J].建筑结构，2024，54(11)：133-139.
Chang Yafeng, Zhang Junqi, Dai Jun, et al. Experimental study on performance of concrete large eccentric compressed columns strengthened by UHPC constrained by spiral stirrups[J]. Building Structure, 2024, 54(11): 133-139.(in Chinese)

[2] 郑文忠，张洁，王刚，等.螺旋箍筋约束高强混凝土柱轴心受压性能试验研究[J].中国公路学报，2022，35(6)：22-35.
Zheng Wenzhong, Zhang Jie, Wang Gang, et al. Experimental study on axial compression behavior of high-strength concrete columns confined by spiral stirrups[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(6): 22-35.(in Chinese)

[3] 覃龙寿，陈健伟，周济，等.四螺箍约束钢筋混凝土方形柱抗震性能研究[J].地震工程与工程振动，2023，43(3)：106-117.
Qin Longshou, Chen Jianwei, Zhou Ji, et al. Study on seismic performance of square reinforced concrete columns with four interlocking spirals[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(3): 106-117.(in Chinese)

[4] Qian Z H, Song Q Y, Huang H Y, et al. Axial compressive behavior of spiral stirrup-reinforced concrete-filled cold-formed steel built-up box stub

columns [J]. Engineering Structures, 2024, 308: 118017.

[5] Chen Z P, Zhou J, Jin C G. Experimental and numerical investigations on seismic behavior of spiral stirrup-confined square concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 78: 107691.

[6] 齐共成,蒋济同,高瑜,等.BFRP筋增强螺旋箍筋区域约束混凝土梁的抗剪性能试验研究[J].复合材料科学与工程,2023(2):115-121.
Qi Gongcheng, Jiang Jitong, Gao Yu, et al. Experimental study on shear performance of BFRP bars concrete beams with regional constraints [J]. Composites Science and Engineering, 2023(2): 115-121.(in Chinese)

[7] 李丽,熊云峰,全勇鹏,等.不同箍筋形式UHPC梁受扭性能试验[J].广西大学学报(自然科学版),2024,49(5):917-929.
Li Li, Xiong Yunfeng, Quan Yongpeng, et al. Experimental study on torsional behavior of UHPC beams with different stirrup configurations [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2024, 49(5): 917-929.(in Chinese)

[8] 刘坚,柏宇翔,刘长江,等.装配式型钢混凝土螺旋箍筋梁的抗弯性能研究[J].混凝土,2022(2):155-158.
Liu Jian, Bai Yuxiang, Liu Changjiang, et al. Study on bending behavior of prefabricated steel reinforced concrete spiral stirrup beams [J]. Concrete, 2022(2): 155-158.(in Chinese)

[9] 肖锦,李杰,陈以一.T形截面部分包覆钢-混凝土组合梁抗弯刚度及承载力试验研究[J].结构工程师,2020,36(2):149-156,5.
Xiao Jin, Li Jie, Chen Yiyi. Experimental study on flexural rigidity and bearing capacity of T-section partially encased composite beams [J]. Structural Engineers, 2020, 36(2): 149-156, 5.(in Chinese)

[10] 史燚,王伟,汪士也,等.预埋型钢的钢筋混凝土梁-钢柱转换节点抗震性能与设计方法研究[J].建筑结构学报,2024,45(7):212-225.
Shi Yi, Wang Wei, Wang Shiye, et al. Seismic performance and design method of steel column-reinforced concrete beam transfer joint with pre-embedded steel [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(7): 212-225.(in Chinese)

[11] 姚谦峰.土木工程结构试验[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
Yao Qianfeng. Civil engineering structural tests [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.(in Chinese)

[12] 伍凯,徐超,曹平周,等.型钢-钢纤维混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J].土木工程学报,2019,52(9):41-52.
Wu Kai, Xu Chao, Cao Pingzhou, et al. Experimental study on the flexural behavior of profile steel-steel fiber reinforced concrete composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9): 41-52.(in Chinese)