

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.12.008

钢筋混凝土 T 形柱在压 - 弯 - 剪 - 扭复合 作用下的抗压试验研究

喻志刚, 单德山

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 钢筋混凝土构件在复合受力状态下承载力是互相影响的, 因此复合受力研究在混凝土结构设计中一直是重要的研究课题。为了研究 T 形混凝土柱在压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力作用下的抗压性能, 对 12 根钢筋混凝土柱平分为 4 组在复合受力状态下进行了试验研究。以剪力、弯矩和扭矩为变量, 讨论了在不同工况下的复合受力对钢筋混凝土柱抗压承载能力、裂缝发展及破坏模式、混凝土和纵向钢筋关键点应变的影响。根据对 4 组 T 形钢筋混凝土柱的试验分析, 总结了复合受力情况下钢筋混凝土柱抗压承载能力的变化趋势。根据裂缝的破坏过程描述和破坏形态的分析, 总结了偏心受压破坏模式向压弯破坏模式转折点和从受压弯破坏到受压弯扭的破坏模式转折点, 并且通过比较试验和计算结果, 验证了塑性损伤模型的可靠性, 同时也说明了试验值的可靠性。在试验数据和已有公式的基础上, 扩展了压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力情况下的抗压承载能力计算公式和相互作用关系图。得出了在压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力情况下不同破坏模式对应的转折点。试验结果表明: 抗压承载力随着弯矩、剪力和扭矩的增大而减小。通过试验数据得到 T 形截面钢筋混凝土柱的抗压承载力公式, 能够为复合受力的混凝土抗压承载能力计算提供参考。

关键词: 桥梁工程; 抗压承载能力; 抗压试验; T 形钢筋混凝土柱; 压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力

中图分类号: U442.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)12-0052-11

Experimental Study on Compression Behaviour of RC T-shaped Columns under Combined Loads of Compression-bending-shear-torsion

YU Zhi-gang, SHAN De-shan

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: The bearing capacity of RC members affects each other in the state of composite stress, so the research of composite stress has always been an important research topic in the design of concrete structures. In order to study the compressive performance of T-shaped RC columns under the combined loads of compression-bending-shear-torsion, 12 RC columns are equally divided into 4 groups and tested under the combined stress state. Taking shear, bending moment and torsion as variables, the influences of combined loads on the compressive bearing capacity, crack propagation and failure mode of RC columns, and the strain of key points of concrete and longitudinal reinforcement under different working conditions are discussed. According to the experimental analysis of 4 groups of T-shaped RC columns, the trend of the compressive bearing capacity of RC columns under the combined load is summarized. According to the description of the failure process of the crack and the analysis of the failure mode, the turning point from eccentric compression failure mode to compression bending failure mode and the turning point from

收稿日期: 2020-03-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802202); 国家自然科学基金项目(51678489, 51978577); 云南省科技厅科技计划项目(2017(A)03)

作者简介: 喻志刚(1978-), 男, 四川新都人, 博士研究生, 高级工程师。(527668569@qq.com)

compression bending failure to compression bending and torsion are summarized, the reliability of the plastic damage model is verified by the comparison test and calculation result, and the reliability of the test value is also illustrated. On the basis of the test data and the existing formula, the calculation formula of the compressive bearing capacity and the interaction diagram under the condition of the combined loads of compression-bending-shearing-torsion are extended. The corresponding turning points under different failure modes under the combined loads of compression-bending-shear-torsion are obtained. The test result shows that the compressive bearing capacity decreases with the increase of bending moment, shear force and torsion. The formula of the compressive bearing capacity of T-shaped RC column obtained from the test data can provide a reference for the calculation of the compressive bearing capacity of the concrete columns subjected to combined loads.

Key words: bridge engineering; compressive bearing capacity; compression test; T-shaped reinforced concrete column; combined loads of compression-bending-shear-torsion

0 引言

曲线斜拉桥是在受到复杂的地质、地形、地貌条件下发展起来的一种斜拉桥。与直线斜拉桥相比, 曲线斜拉桥主梁受拉索曲率半径和径向力分量的影响, 不仅要承受轴向力和剪力, 还要承受扭矩和竖向弯矩的作用。国外学者^[1-5]对复合受力进行了大量的试验和理论研究, 并提出了相应的计算方法和设计方法。Ersoy 等^[1]得到了 25 根无腹筋的 RC 梁的剪力和扭矩能力相关关系的 1/4 圆弧曲线。Elfren^[3]和 Badawy 等^[4]分别使用来自多个试验的数据拟合了弯曲 - 剪力 - 扭矩相互作用曲线。Hsu^[6]发现钢筋混凝土梁结构与弯扭相关, 相关模型可简化为三折线。在此基础上, Lampert^[7]通过对前人的试验和理论研究, 认为钢筋混凝土梁的弯矩和扭转是相互影响的, 并提出了钢筋混凝土矩形截面梁弯矩和扭转的两个相关方程。此外, Hsu 等^[8]总结了拉 - 剪 - 弯相互作用的公式。国内学者陈溪^[9]从理论的高度统一分析了钢筋混凝土构件在复合受力情况下的破坏行为, 对矩形截面钢筋混凝土构件受拉压弯时的剪力和扭矩相互作用达到极限状态的情况进行了分析。Wang 等^[10]使用试验研究和理论推导的方法对受到压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力的矩形构件进行了极限承载力的研究, 得出了矩形截面的钢筋混凝土构件四相关性的压 - 弯 - 剪 - 扭承载能力计算关系式。因此, 就复合受力相互作用而言, 钢筋混凝土构件在组合受力作用下的强度承载力相关性一直是一个重要的研究课题。

通过以上文献仔细研究发现, 对压 - 弯 - 剪 - 扭组合受力的研究在截面形式上局限于矩形截面, 而未对 T 形截面进行研究。另一方面, 即使关于 T

形截面梁的力学行为研究, 以前学者^[11-16]的工作只集中在纯剪力、纯弯曲、纯扭矩、组合剪力和弯矩、或组合弯矩和扭矩下的 T 形截面梁研究。到目前为止, 在压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力情况下在抗压的分析方法和设计规范中还没有充分考虑相互作用。特别是对 T 形截面钢筋混凝土在压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力作用下的抗压研究更是少之又少。1991 年至 1994 年, Mallikarjuna^[17]对 T 形、L 形截面双向偏压钢筋混凝土异形柱的力学性能进行了研究, 提出了异形柱的设计方法。2001 年以来, 郭棣等^[18]编制了适用于任意截面的钢筋混凝土压弯构件截面数值程序, 研究了翼缘、轴压比等因素对 T 形柱强度和延性的影响。虽然我国出台了行业标准《混凝土异形柱结构设计规程》(JGJ149—2006), 但是正如 Kaminski 等^[19]指出的那样, 梁柱在复合受力作用下的许多问题仍未得到解决, 对于非矩形横截面的梁柱复合受力研究仍有待探索。

此外, Kaminski 等^[19]指出对于受到压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力的钢筋混凝土 T 形截面梁柱在设计上没有统一方法。在达到统一方法以前, 首先要进行试验研究来确定复合受力相互作用对极限承载能力的影响程度。因为对比于数值模型分析, 试验仍然是最可靠的研究方法^[19]。试验测试可以提供被研究系统行为的物理知识和有关信息^[20-21], 试验结果对于验证有限元和有限差分数值模型等解析模型是必不可少的^[22-25]。

鉴于上述文献研究的空白和试验测试的重要性, 本研究采用试验测试的方法, 对钢筋混凝土 T 形柱在压 - 弯 - 剪 - 扭组合作用下的抗压性能进行研究。试验分为 4 组, 其中包含 12 根混凝土柱, 对其进行不同剪力或扭矩情况下的抗压试验。采用混凝土

和钢筋的应变分析和裂缝观测方法,分析组合荷载作用下钢筋混凝土柱的抗压强度和破坏模式。通过对试验数据的分析,拓展T形钢筋混凝土构件在复合受力作用下的抗压强度计算公式和相互作用关系图。

1 试验概况

1.1 T形混凝土柱的选取

基于以往复合受力模型^[11-16,26]几何尺寸和混凝土强度的分析而选择本试验钢筋混凝土柱的强度和尺寸。由于本研究的重点是剪力、弯矩和扭矩的变化下的抗压承载能力,因此根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[27]和《结构混凝土建筑规范要求及说明》(ACI 318-08)^[28]设计了纵向钢筋和箍筋。所有的12个钢筋混凝土柱的混凝土尺寸和钢筋强度都保持在不变的状态。

1.2 钢筋混凝土柱的尺寸和配筋图

整个钢筋混凝土柱由固定底座、T形柱身和柱帽3部分组成,其中柱帽的作用主要是为了避免顶部在加载时发生局部破损和保障千斤顶和顶部完全接触。表1为钢筋混凝土柱的钢筋设计参数,未考虑固定底座的参数,其中直径为8 mm和6 mm的钢筋均为带肋钢筋。图1(a)所示为试验柱、固定底座和柱帽的高度。每根柱的总高度为1 000 mm,柱身高度为800 mm。固定底座高度为400 mm,柱帽高度为200 mm。箍筋在柱身和柱帽中的间距分别为60 mm和70 mm。图1(b)为柱身的截面尺寸和纵向钢筋配置。纵向钢筋直径为8 mm,在腹板上间距为42 mm,翼缘板上间距为32 mm。所有钢筋混凝土柱的截面翼缘板长度为300 mm,翼缘宽度为90 mm,腹板宽度为120 mm,腹板长度为210 mm。腹板和翼缘板的混凝土覆盖层为29 mm。图1(c)为柱帽的外形尺寸及钢筋配筋图。

表1 钢筋设计参数

Tab. 1 Design parameters of reinforcement

编号	直径/mm	数量/根	屈服强度/MPa
N1(1)	8	8	400
N1(2)	8	10	400
N1(3)	8	12	400
N2	6	15	400
N4	6	15	400
N6	6	3	400

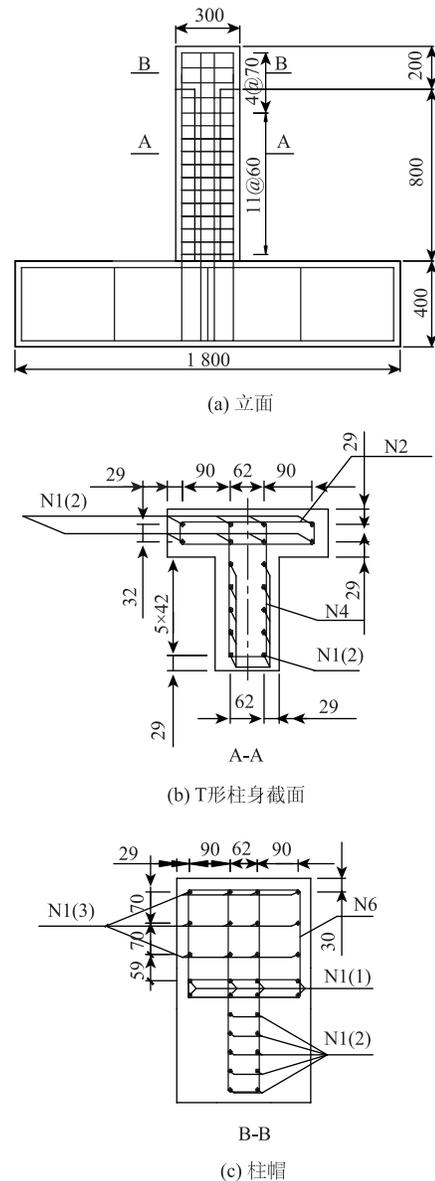


图1 钢筋混凝土柱尺寸和配筋图(单位: mm)

Fig. 1 Dimensions and reinforcement of RC column (unit: mm)

1.3 材料特性

试验中的12根钢筋混凝土柱用C30商用混凝土浇筑而成,并分成4组,分别为T1~T4。混凝土的轴压抗压强度按照要求在28 d对T1~T4组进行测试。混凝土标准抗压强度结果为3个立方体混凝土样本的平均值,如表2所示。纵筋和箍筋的性能如表3所示。每个强度和应变都是3个试验样品试验结果的平均值。本研究通过试验记录的屈服应变来确定试验中钢筋是否达到最大屈服。

1.4 试验装置和仪器设备

在试验之前,根据试验需求专门设计了一个可以提供压-弯-剪-扭复合受力的试验装置,如图2

表 2 混凝土性能指标

Tab. 2 Concrete performance indicators

性能指标	T1	T2	T3	T4
抗压强度/MPa	34.56	34.63	35.01	35.23
弹性模量/MPa	30 235	30 361	30 574	30 702

注: T 为截面形式。

表 3 钢筋力学性能

Tab. 3 Properties of reinforcement

型号	直径/ mm	屈服应变/ $\mu\epsilon$	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ ($\times 10^5$ MPa)
HRB400	8	2 026	420	510	2.1
HRB400	6	2 102	435	504	2.1

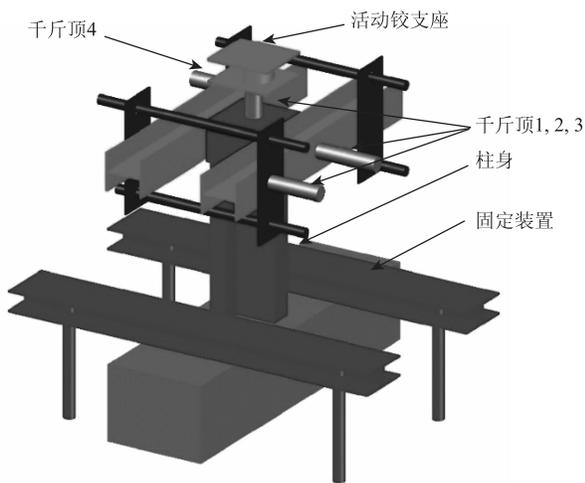


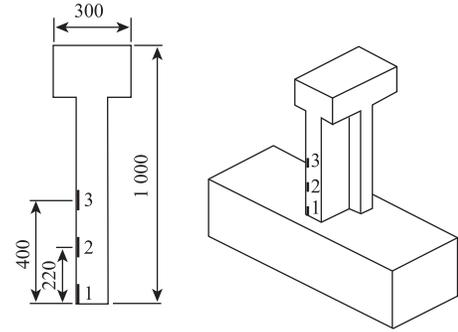
图 2 加载装置

Fig. 2 Loading device

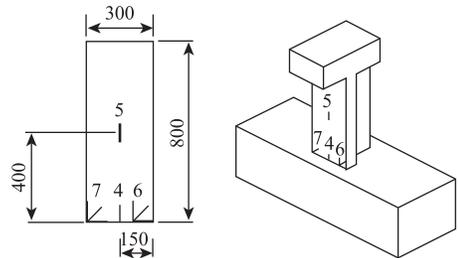
所示。所有荷载由液压千斤顶实现，千斤顶 - 1 施加压力，千斤顶 - 2 同时施加弯矩和剪力，千斤顶 - 3 和千斤顶 - 4 施加扭矩。为了保证测试柱的自由移动和旋转，在千斤顶 - 1 顶部安装了活动铰支座。根据混凝土应变计算结果，安装在腹板中心到底部和翼缘板底部位置的应变片如图 3 所示。应变片位于纵向钢筋和箍筋上，用于测量纵向钢筋和箍筋在不同位置的应变，如图 4 所示。图 5 显示了位移计在测试柱上的位置。所有应变仪和位移计都安装在所有测试柱的同一位置。

1.5 加载方案

钢筋混凝土柱在复合受力情况下的加载方案如表 4 所示。在荷载控制模式下进行了压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力试验，直至混凝土应变达到峰值应变。首先，根据轴压比先期施加轴向压力。其次，施加剪力和弯矩，再施加扭矩。最后，逐步施加压力，保持弯矩、剪力和扭矩不变，直至构件破坏。在整



(a) 腹板应变片



(b) 翼缘板应变片

图 3 柱身上的应变片 (单位: mm)

Fig. 3 Strain gauges on column (unit: mm)

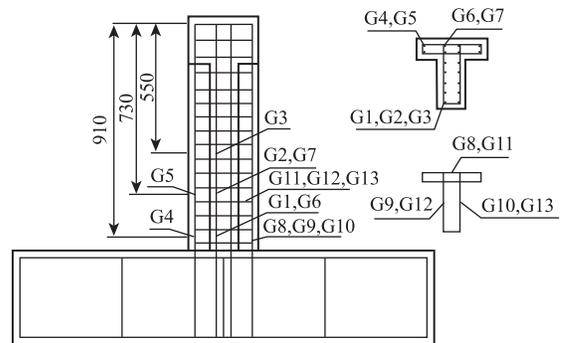
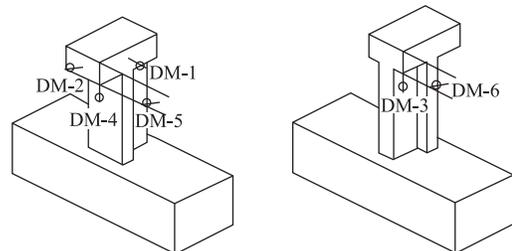


图 4 钢筋上的应变片 (单位: mm)

Fig. 4 Strain gauges on reinforcement (unit: mm)

注: G 为钢筋应变片。



(a) 正面图

(b) 背面图

图 5 位移计的布置

Fig. 5 Layout of displacement meters

注: DM 为位移计。

表4 加载方案
Tab.4 Loading scheme

组号	轴压比	先期轴力/kN	压力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	扭矩/(kN·m)
T1	0.16	252	1 037	14.0	12.6	3.2
T2	0.21	324	957	18.0	16.2	5.9
T3	0.25	391	942	21.7	19.6	5.9
T4	0.25	391	879	21.7	19.6	6.5

表5 测试结果
Tab.5 Test result

编号	压力/kN	平均值/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	扭矩/(kN·m)
T1-2	1 104	1 076	12.61	14.01	3.15
T1-3	1 044				
T2-1	977				
T2-2	926	979	16.21	18.01	5.88
T2-3	1 035				
T3-1	788				
T3-2	798	792	19.57	21.75	5.88
T3-3	790				
T4-1	721				
T4-2	765	739	19.57	21.75	8.81
T4-3	732				

个试验过程中，未考虑其他加载路径对抗压承载力的影响。压力荷载按照 100 kN 分级进行施加，最后达到预估抗压承载力的 80% 后，按照 50 kN 施加竖向荷载。在加载 5 min 后的每个加载步骤中，观察并记录混凝土和钢筋的应变、测试点的位移和裂缝的发展情况。

2 试验结果

2.1 抗压承载能力

当混凝土达到峰值应变 2 000 $\mu\epsilon$ 时，可以找出所施加在相应钢筋混凝土柱上的轴力，即 T 形混凝土柱在复合受力情况下的抗压承载能力。表 5 给出

注：T1 工况下，T1-1 为整个试验的调试柱，因此在本工况测试时没有考虑 T1-1 的测试数据。

了钢筋混凝土柱的测试结果，其中包括组数、荷载类型、每组混凝土达到峰值应变时的抗压承载力。图 6 为 T1 ~ T4 的荷载 - 应变曲线。

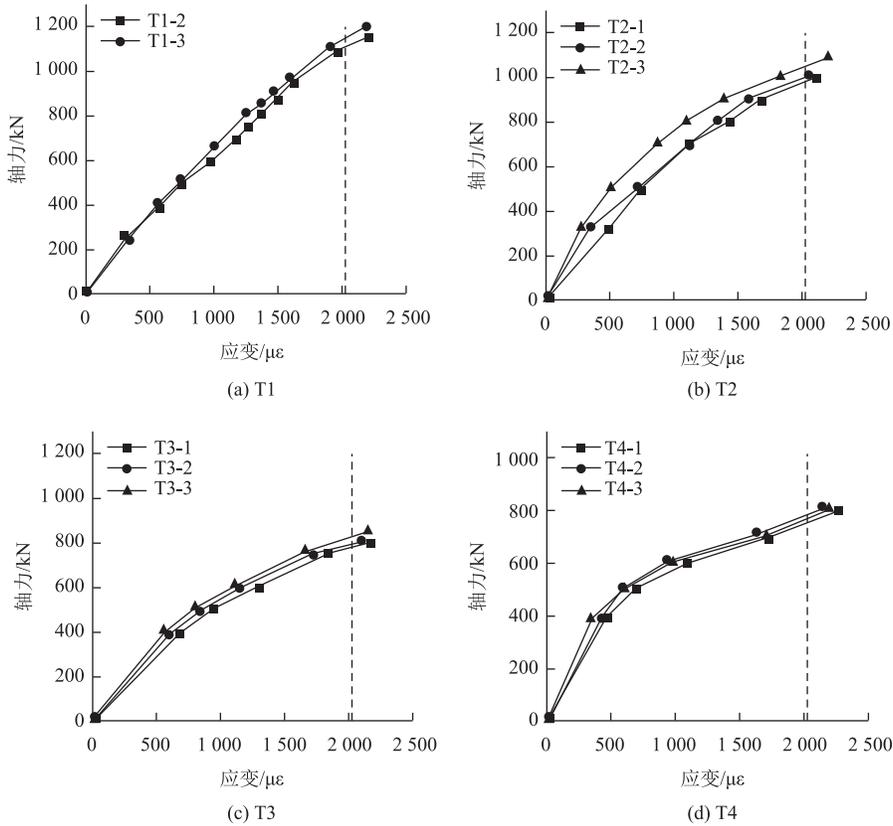


图6 荷载 - 应变曲线

Fig.6 Load-strain curves

注：T1 工况下，T1-1 为整个试验的调试柱。

2.2 裂缝的发展和破坏形态描述

为了便于描述裂缝, 对每个柱的表面进行编号, 如图 7 所示。因为每组构件的加载荷载和方式一样, 裂缝的发展过程基本一致, 因此每组取 1 个构件为代表进行裂缝描述和破坏模式分析。

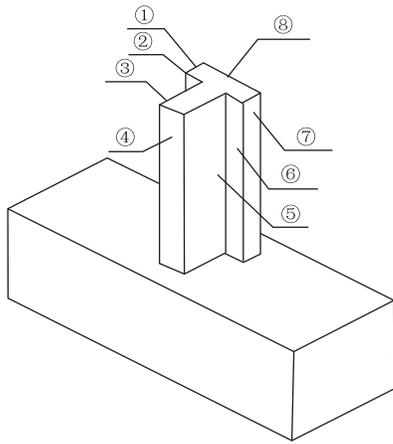


图 7 T 形柱表面编号

Fig. 7 Numbers of surfaces of T-shaped column

2.2.1 混凝土柱 T1-2

先对试件施加 252 kN 的轴压力、14 kN 的剪力、3.1 kN·m 的扭矩, 随后试验进入力控阶段, 然后按每级 100 kN 施加竖向荷载, 最后达到预估抗压承载力的 80% 后, 按照 50 kN 施加竖向荷载。图 8 (a) 为轴力施加到 1 100 时的试件裂缝图。当轴力施加到 600 kN 时, 表面①上出现两条裂缝。其中第 1 条裂缝距离左边缘 15 mm, 方向为竖直方向, 宽度为 1 mm, 长度为 150 mm; 第 2 条裂缝距离左边缘 81 mm, 竖直方向, 宽度为 1 mm, 长度为 120 mm。当轴力施加到 950 kN 时, 表面①上的第 1 条裂缝宽度延伸至 1.1 mm; 第 2 条裂缝宽度延伸至 1.2 mm, 长度延伸至 150 mm。当轴力加载到 1 100 kN 时, 表面①裂缝宽度都有所增大; 表面④上距底部 420 mm 处出现新的裂缝, 宽度为 0.3 mm, 长度为 50 mm; 表面③上距离底部 450 mm 处也出现新的裂缝; 表面⑧上左下角混凝土被压溃, 同时伴随劈裂声, 构件被压坏。

2.2.2 混凝土柱 T2-1

先对试件施加 324 kN 的轴压力、18 kN 的剪力、5.8 kN·m 的扭矩, 随后试验进入力控阶段, 然后按每级 100 kN 施加竖向荷载, 最后达到预估抗压承载力的 80% 后, 按照 50 kN 施加竖向荷载。图 8 (b) 为轴力施加到 1 150 kN 时的试件裂缝图。当轴力施加到 500 kN 时, 表面①上出现两条裂缝。其

中, 第 1 条裂缝距离左边缘 10 mm, 方向为竖直方向, 宽度为 0.08 mm, 长度为 120 mm; 第 2 条裂缝距离左边缘 80 mm, 方向为竖直方向, 宽度为 0.12 mm, 长度为 100 mm。表面④上出现 4 条裂缝。其中, 第 1 条裂缝距底部 180 mm, 方向为水平方向, 宽度为 0.1 mm, 长度为 220 mm; 第 2 条裂缝距底部 330 mm, 方向为水平方向, 宽度为 0.1 mm, 长度为 150 mm; 第 3 条裂缝距底部 70 mm, 方向为水平方向, 宽度为 0.15 mm, 长度为 70 mm; 第 4 条裂缝距底部 550 mm, 方向为水平方向, 宽度为 0.05 mm, 长度为 140 mm。当轴力施加到 1 150 kN 时, 表面④上形成多条贯穿整个腹板的横向裂缝, 并且表面①翼缘底部和表面⑧翼缘板底部混凝土被压溃, 同时伴随有劈裂声, 随后构件破坏, 呈现出典型的偏压破坏。

2.2.3 混凝土柱 T3-3

先对试件施加 391 kN 的轴压力、21.7 kN 的剪力、5.8 kN·m 的扭矩, 随后试验进入力控阶段, 然后按每级 100 kN 施加竖向荷载, 最后达到预估抗压承载力的 80% 后, 按照 50 kN 施加竖向荷载。图 8 (c) 为轴力施加到 1 100 kN 时的试件裂缝图。当轴力施加到 600 kN 时, 表面①上出现两条裂缝。其中, 第 1 条裂缝距离左边缘 30 mm, 方向为竖直方向, 宽度为 0.2 mm, 长度为 120 mm; 第 2 条裂缝距离左边缘 90 mm, 方向与水平方向夹角 80°, 宽度为 0.12 mm, 长度为 120 mm。表面④上出现 5 条裂缝。其中, 第 1 条裂缝距底部 180 mm, 方向为水平方向, 宽度为 0.16 mm, 长度为 100 mm; 第 2 条裂缝距底部 350 mm, 方向为水平方向, 宽度为 0.15 mm, 长度为 140 mm; 第 3 条裂缝距底部 100 mm, 方向为水平方向, 宽度为 0.15 mm, 长度为 80 mm; 第 4 条裂缝距底部 510 mm, 方向与水平方向夹角 20°, 宽度为 0.2 mm, 长度为 240 mm; 第 5 条裂缝距底部 720 mm, 方向为水平方向, 宽度为 0.13 mm, 长度为 160 mm。表面⑦上出现两条裂缝。其中, 第 1 条裂缝距离左边缘 20 mm, 方向为竖直方向, 宽度为 0.12 mm, 长度为 120 mm; 第 2 条裂缝距离左边缘 40 mm, 方向为竖直方向, 宽度为 0.15 mm, 长度为 120 mm。表面⑧上底部出现数条细微裂缝。当轴力施加到 1 100 kN 时, 表面①, ⑦, ⑧上底部裂缝宽度不断扩展, 且表面④上形成数条贯穿腹板的横向裂缝, 最后构件呈现压弯破坏形态。

2.2.4 混凝土柱 T4-2

先对试件施加 391 kN 的轴压力、21.7 kN 的剪

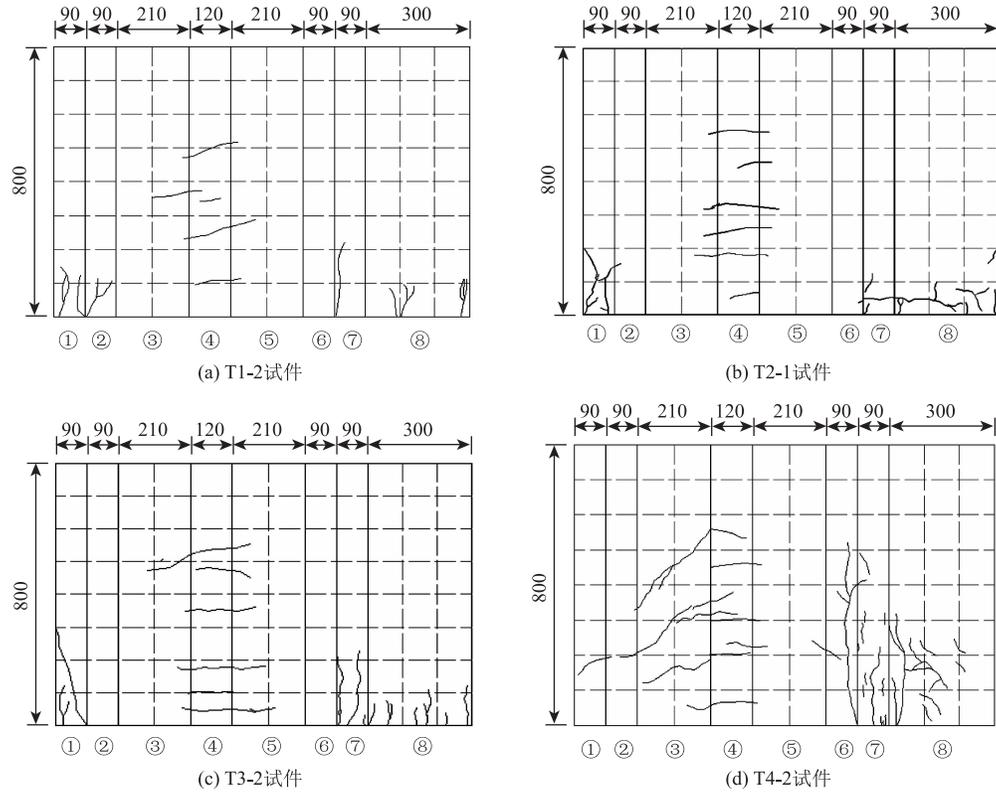


图8 试件裂缝图 (单位: mm)

Fig. 8 Diagrams of cracks on specimens (unit: mm)

力、 $8.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 的扭矩, 随后试验进入力控阶段, 然后按每级 100 kN 施加竖向荷载, 最后达到预估抗压承载力的 80% 后, 按照 50 kN 施加竖向荷载。图 8 (d) 为轴力施加到 1000 kN 时的试件裂缝图。当剪力和扭矩施加完成后, 首先在表面④上出现两条裂缝。其中第 1 条裂缝距离底部 80 mm , 方向为水平方向, 宽度为 0.08 mm , 长度为 130 mm ; 第 2 条裂缝距离底部 200 mm , 方向为水平方向, 宽度为 0.1 mm , 长度为 80 mm 。当轴力施加到 600 kN 时, 表面④上的裂缝继续扩展, 表面③, ⑥, ⑦, ⑧均出现新的裂缝。特别是表面③上出现 3 条斜向裂缝, 具体如下: 第 1 条裂缝距底部 130 mm , 方向与水平方向夹角 30° , 宽度为 0.2 mm , 长度为 150 mm ; 第 2 条裂缝距底部 250 mm , 方向与水平方向夹角 45° , 宽度为 0.2 mm , 长度为 170 mm ; 第 3 条裂缝距底部 450 mm , 方向与水平方向夹角 45° , 宽度为 0.12 mm , 长度为 230 mm 。当荷载达到 1000 kN , 表面③上形成数条贯穿整个腹板的斜裂缝, 表面④上形成数条贯穿整个腹板的横向裂缝, 表面⑦上底部混凝土被压溃, 构件呈压弯扭组合破坏形态。

所有混凝土柱在压-弯-剪-扭组合受力作用下的抗压试验中, 首先翼缘板底部附近出现受

压裂缝, 然后随着荷载的增大向两侧发展。由于受到弯矩和扭矩的作用, 随着压力的增大, 在腹板上也出现受拉裂缝。并且, 在弯矩和扭矩增大的情况下, 在弯矩和扭矩加载完成后, 腹板上就出现受拉裂缝和斜裂缝。从裂缝的发展来看, 这说明整个破坏形态由受压破坏向受压弯扭组合破坏发展。

2.3 混凝土和钢筋应变

为准确描述构件在复合受力状态下钢筋受拉和混凝土受压在随着荷载增大情况下的受力状态, 取构件柱体底面截面的关键点进行分析。对于关键点而言, 取应变增长最快点进行对比, 试件钢筋应变增长最快点发生在 G1 点上, 受压混凝土应变增长最快点发生在 C7 点上。图 9 展示了随着荷载增大, 混凝土和钢筋关键点应变的变化情况。可以看出, 当混凝土受压应变达到 $2000 \mu\text{s}$ 时, 钢筋应变小于屈服应变 $2026 \mu\text{s}$, 说明了混凝土柱是受压破坏。

3 试验结果与计算结果的对比

3.1 有限元模型建立和参数设定

基于弹塑性损伤法^[29-30]采用 ABAQUS 中的

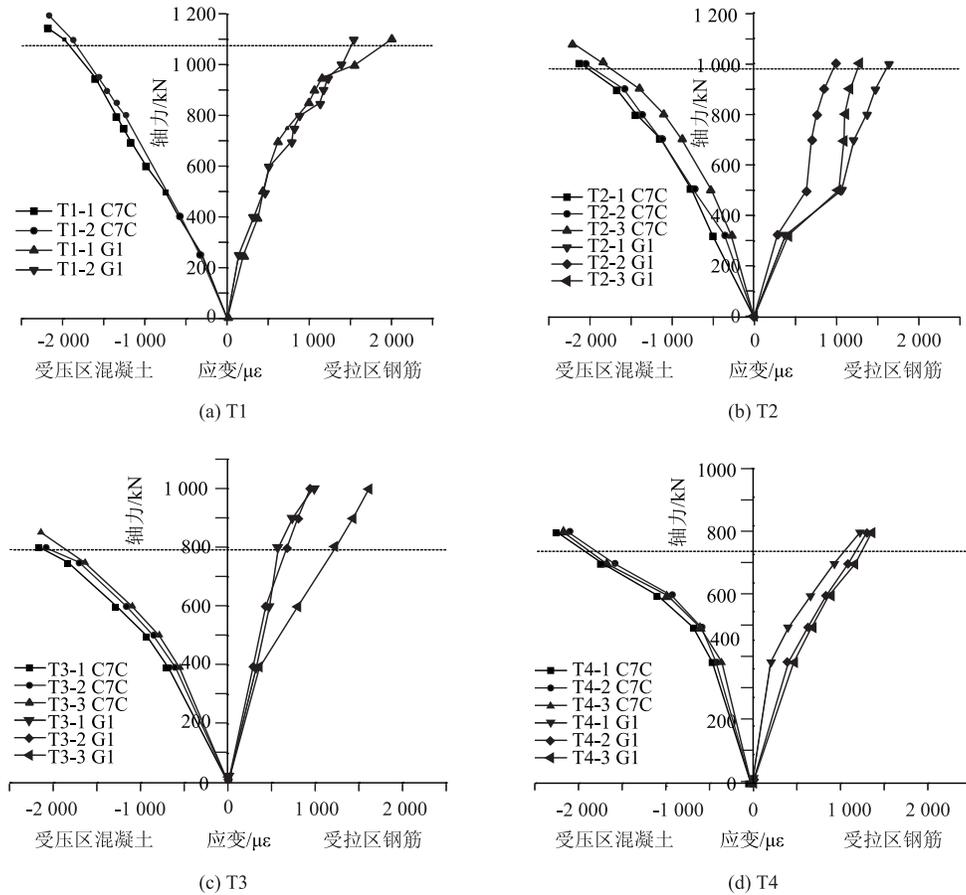


图 9 混凝土和钢筋关键点荷载 - 应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of key points of concrete and reinforcement

注: C 和 G 分别为混凝土和钢筋应变计。

C3D8R 实体单元和 T3D2 桁架单元对混凝土和钢筋进行了模拟, 并通过嵌入约束对钢筋和混凝土的共同作用进行了模拟。有限元模型的设计只考虑了柱的有效高度, 如图 10 所示。

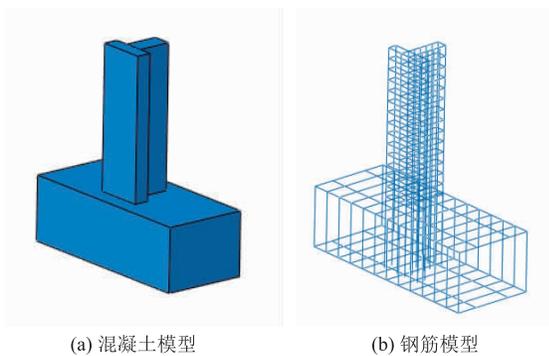


图 10 有限元模型

Fig. 10 FE model

有限元计算参数需要输入损伤因子, 因此根据损伤因子的计算方法^[27,31], 分别计算出受压和受拉的损伤因子, 如图 11 所示。

3.2 抗压承载能力的对比

从表 6 可以看出, 计算得到的抗压承载力与试验得到的承载力标准差为 0.12, 两者的变异系数为 11%, 进一步验证了塑性损伤模型的可靠性, 同时也说明了试验值的可靠性。

4 试验结果分析

4.1 抗压承载能力分析

根据各柱的试验值, 得到各组抗压承载力平均值, 如表 6 所示。根据设计规范分别计算得到单一压力 N_0 、单一纯弯矩 M_0 、单一纯剪力 V_0 和单一纯扭矩 T_0 的值。并结合表 5 得到压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力状态下, 各力与单独纯单一受力状态的无量纲比值, 如表 7 所示。可以看出, 总体来说, 在压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力情况下, 相对于纯受压, 抗压承载力均减小。在 T1 ~ T3 工况下, 抗压承载力随着剪力或弯矩的增大而减小, 从 T1 ~ T3 工况 1 076 kN 到 792 kN, 抗压承载力相对减小了 24%。

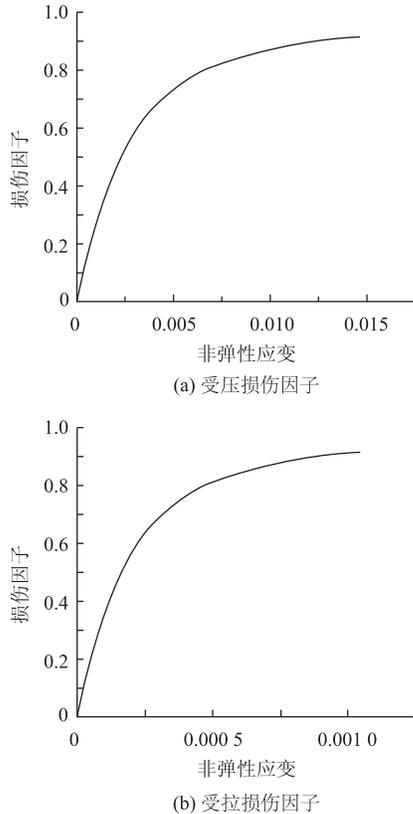


图 11 混凝土损伤因子曲线

Fig. 11 Curves of concrete damage factor

表 6 计算值与试验值对比

Tab. 6 Comparison between calculation and experiment values

编号	计算值/ kN	试验值/ kN	试验平均值/ kN	计算值/ 试验值	平均值
T1-2		1 104		0.94	
T1-3	1 037	1 044	1 076	0.99	0.96
T3-1		977		0.98	
T3-2	957	926	979	1.03	0.98
T3-3		1 035		0.92	
T5-1		788		1.20	
T5-2	942	798	792	1.18	1.19
T5-3		790		1.19	
T7-1		721		1.22	
T7-2	879	765	739	1.15	1.19
T7-3		732		1.20	
—		(计算值/试验值) 平均值			1.09
—		(计算值/试验值) 标准差			0.12
—		(计算值/试验值) 变异系数			0.11

将 T3 与 T4 相比较, 剪力和弯矩保持不变, 但扭矩增加, 抗压承载力相对降低 4%, 说明扭矩对压

表 7 压-弯-剪-扭力的无量纲值

Tab. 7 Dimensionless values of compression-bending-shear-torsion

组号	N_0 / kN	M_0 / (kN·m)	V_0 / kN	T_0 / (kN·m)	无量纲比值			
					N/N_0	M/M_0	V/V_0	T/T_0
T1	1 566	33.2	88.0	9.5	0.69	0.38	0.16	0.33
T2	1 566	33.2	88.0	9.5	0.63	0.49	0.20	0.62
T3	1 566	33.2	88.0	9.5	0.51	0.59	0.25	0.62
T4	1 566	33.2	88.0	9.5	0.47	0.59	0.25	0.93

力影响不大。

4.2 破坏过程和模式分析

根据以上 2.2 节和 2.3 节中裂缝的观察和破坏形态描述及应变的结果, 混凝土首先到达受压峰值应变, 而钢筋并未达到屈服应变。结合表 7 可知, M/M_0 为 0.59, V/V_0 为 0.25, T/T_0 为 0.62 时, 混凝土开始出现斜向裂缝, 破坏形态受到明显影响。当第 4 组试验 M/M_0 为 0.59, V/V_0 为 0.25, T/T_0 为 0.93 时, 出现明显的斜裂缝, 最后混凝土被压溃, 构件呈压弯扭组合破坏形态。可以得出: M/M_0 为 0.59 时为受压破坏模式向压弯破坏模式转变点; T/T_0 为 0.62 时为受压破坏向扭曲破坏转变点。

4.3 复合受力相互作用关系

根据文献 [8-32] 中的一些公式, 本研究中 T 形截面构件在压-弯-剪-扭转复合受力作用下的抗压承载力公式为:

$$\left(\frac{N}{N_0}\right)R_1 + \left(\frac{M}{M_0}\right)^2 R_2 + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 R_3 + \left(\frac{T}{T_0}\right)R_4 = 1, (1)$$

式中, M , N , V , T 分别为构件在复合受力作用下所承受的弯矩、压力、剪力、扭矩; M_0 , N_0 , V_0 , T_0 分别为纯弯矩、纯压力、纯剪力、纯扭矩; $R_1 \sim R_4$ 分别为抗压承载力公式中压、弯、剪、扭无量纲比值的系数。

根据表 7 中的数据, 将数据代入式 (1) 进行拟合, 得到式 (2):

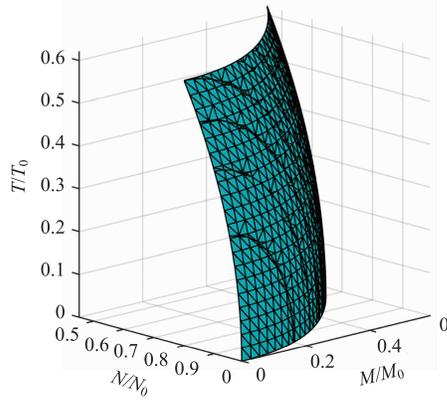
$$1.01\left(\frac{N}{N_0}\right) + 1.01\left(\frac{M}{M_0}\right)^2 + 0.5\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + 0.5\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 = 1. (2)$$

由式 (2) 得出式 (3):

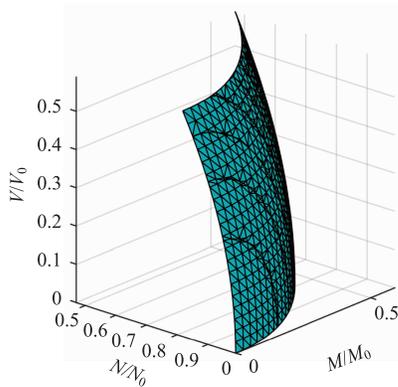
$$N = \left[1 - \left(\frac{M}{M_0}\right)^2 - 0.5\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 - 0.5\left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right]N_0. (3)$$

本试验主要目的是研究 T 形截面在压-弯-剪-扭复合受力作用下的抗压承载能力。由以上分析可知, 抗压承载能力随着弯矩的增大而减小, 随着扭矩的增加而减小。T 形钢筋混凝土柱在复合受

力情况下的抗压承载能力随着扭转的增大而减小, 且 T/T_0 为 0.62 是复合受力作用下受压弯模式向压弯扭模式的转折点; M/M_0 为 0.59 为受偏心受压破坏模式向压弯破坏模式的转折点。根据复合受力相互影响性, 结合转折点, 分别做出压 - 弯 - 扭、压 - 弯 - 剪形式下的相互作用图, 如 12 所示。



(a) 压-弯-扭的相互作用



(b) 压-弯-剪的相互作用

图 12 相互作用

Fig. 12 Interactions

5 结论

本研究对 T 形混凝土构件在压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力作用下进行了抗压性能试验研究。对试验结果与数值模拟计算结果进行比较, 验证了模拟值的准确性和可靠性。根据本研究的发现, 得出以下结论:

(1) 在受压破坏的情况下, 抗压承载力随着弯矩、剪力和扭矩的增大而减小。

(2) 在受压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力情况下, 通过试验数据得到 T 形截面的抗压承载力公式, 它能为复合受力的抗压强度计算提供参考。

(3) 在受压 - 弯 - 剪 - 扭复合受力情况下, T/T_0 为 0.62 是复合受力作用下受压弯模式向压弯扭模式的转折点; M/M_0 为 0.59 是受偏心受压破坏模

式向压弯破坏模式的转折点。

(4) 弹塑性损伤模型能够在合理的建模和参数设置下准确地模拟混凝土的力学行为。

参考文献:

References:

- [1] ERSOY U, FERGUSON P M. Concrete Beams Subjected to Combined Torsion and Shear-experimental Trends [J]. Symposium Paper, 1968, 18: 441 - 460.
- [2] SYAMAL P K, MIRZA M S, RAY D P. Plain and Reinforced Concrete L-beams under Combined Flexure, Shear, and Torsion [J]. ACI Structural Journal, 1971, 68 (11): 848 - 860.
- [3] ELFGREN L. Reinforced Concrete Beams Loaded in Combined Torsion, Bending and Shear; A Study of the Ultimate Load-carrying Capacity [J]. Gastroenterology, 1972, 134 (4): A - 486.
- [4] BADAWY H, JORDAAN I J, MCMULLEN A E, et al. Effect of Shear on Collapse of Curved Beams [J]. Journal of the Structural Division, 1977, 103 (9): 1849 - 1866.
- [5] ZHOU C J, LIU H X. Experimental Research on Axial Compression Performance of Square Section Concrete Column Confined by FRP [C] // 2011 International Conference on Multimedia Technology. Hangzhou: IEEE, 2011: 3955 - 3958.
- [6] HSU T T. Torsion of Structural Concrete-interaction Surface for Combined Torsion, Shear, and Bending in Beams Without Stirrups [J]. ACI Journal & Proceedings, 1968, 65 (1): 51 - 60.
- [7] LAMPERT P, COLLINS M P. Torsion, Bending, and Confusion: An Attempt to Establish the Facts [J]. ACI Journal & Proceedings, 1972, 69 (8): 500 - 504.
- [8] HSU T T, MO Y L. Unified Theory of Concrete Structures [M]. Chichester, UK: Wiley, 2010.
- [9] 陈溪. 复合受力下钢筋混凝土构件承载力的统一表达 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
CHEN Xi. Unified Expression of Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Composite Stress [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [10] WANG P, HUANG Z. A Unified Approach for Determining the Ultimate Strength of RC Members Subjected to Combined Axial Force, Bending, Shear and Torsion [J]. Plos One, 2017, 12 (4): 0175834.
- [11] FARMER L E, FERGUSON P M. T-beams under Combined Bending, Shear, and Torsion [J]. ACI Journal & Proceedings, 1967, 64 (11): 757 - 766.
- [12] KIRK D W, LASH S D. T-beams Subject to Combined

- Bending and Torsion [J]. *ACI Structural Journal*, 1971, 68 (2): 150 – 159.
- [13] VICTOR D J, ARAVINDAN P K. Prestressed and Reinforced Concrete T-beams under Combined Bending and Torsion [J]. *ACI Journal & Proceedings*, 1978, 75 (10): 526 – 532.
- [14] MIRZA S A, FURLONG R W. Serviceability Behavior and Failure Mechanisms of Concrete Inverted T-beam Bridge Bentcaps [J]. *ACI Journal & Proceedings*, 1983, 80 (4): 294 – 304.
- [15] KARAYANNIS C G. Torsional Analysis of Flanged Concrete Elements with Tension Softening [J]. *Computers & Structures*, 1995, 54 (1): 97 – 110.
- [16] CLADERA A, MARI A, RIBAS C, et al. Predicting the Shear-flexural Strength of Slender Reinforced Concrete T and I Shaped Beams [J]. *Engineering Structures*, 2015, 101: 386 – 398.
- [17] MALLIKARJUNA P M. Computer-aided Analysis of Reinforced Concrete Columns Subjected to Axial Compression and Bending. Part II: T-shaped Sections [J]. *Computers & Structures*, 1994, 53 (6): 1317 – 1356.
- [18] 郭隼, 吴敏哲, 田炜. T形截面钢筋混凝土柱偏心受压分析 [J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2001, 33 (2): 138 – 143.
GUO Di, WU Min-zhe, TIAN Wei. The Analysis of T Shaped Column Eccentric Compression [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition*, 2001, 33 (2): 138 – 143.
- [19] KAMIŃSKI M, PAWLAK W. Load Capacity and Stiffness of Angular Cross Section Reinforced Concrete Beams under Torsion [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2011, 11 (4): 885 – 903.
- [20] DEIFALLA A, AWAD A, ELGARHY M. Effectiveness of Externally Bonded CFRP Strips for Strengthening Flanged Beams under Torsion: An Experimental Study [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 2065 – 2075.
- [21] DEIFALLA A, HAMED M, SALEH A, et al. Exploring GFRP Bars as Reinforcement for Rectangular and L-shaped Beams Subjected to Significant Torsion: An Experimental Study [J]. *Engineering Structures*, 2014, 59: 776 – 786.
- [22] KARAYANNIS C G, CHALIORIS C E. Experimental Validation of Smeared Analysis for Plain Concrete in Torsion [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126 (6): 646 – 653.
- [23] MOZOS C M, APARICIO A C. Numerical and Experimental Study on the Interaction Cable Structure during the Failure of a Stay in a Cable Stayed Bridge [J]. *Steel Construction*, 2011, 33 (8): 2330 – 2341.
- [24] SADEGHIAN P, RAHAI A R, EHSANI M R. Experimental Study of Rectangular RC Columns Strengthened with CFRP Composites under Eccentric Loading [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14 (4): 443 – 450.
- [25] MULLAPUDI T R S, AYOUB A. Analysis of Reinforced Concrete Columns Subjected to Combined Axial, Flexure, Shear and Torsional Loads [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139 (4): 561 – 573.
- [26] DEIFALLA A, GHOBARAH A. Behavior and Analysis of Inverted T-shaped RC Beams under Shear and Torsion [J]. *Engineering Structures*, 2014, 68: 57 – 70.
- [27] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范 [S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures [S].
- [28] ACI 318 – 08, Building Code Requirements for Structure Concrete and Commentary [S].
- [29] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A Plastic-damage Model for Concrete [J]. *International Journal of Solids & Structures*, 1989, 25 (3): 299 – 326.
- [30] NETO, EDUARDO DE SOUZA. Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications [M]. Chichester, UK: Wiley, 2008.
- [31] 田连波, 侯建国. ABAQUS 中混凝土塑性损伤因子的合理取值研究 [J]. *湖北大学学报: 自然科学版*, 2015, 37 (4): 340 – 345, 358.
TIAN Lian-bo, HOU Jian-guo. Reasonable Plastic Damaged Factor of Concrete Damaged Plastic Model of ABAQUS [J]. *Journal of Hubei University: Natural Science Edition*, 2015, 37 (4): 340 – 345, 358.
- [32] EWIDA A A, MCMULLEN A E. Torsion-shear-flexure Interaction in Reinforced Concrete Members [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1981, 33 (115): 113 – 122.