

采用新型抗剪连接件的型钢混凝土 轴压短柱有限元分析

李幅昌,曹凯奇,杨志坚,邱增美

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究轴心受压状态下采用新型抗剪连接件的型钢混凝土柱的受力性能。方法 采用 ABAQUS 对构件进行有限元模拟,分析典型构件的混凝土纵向应力、型钢与混凝土之间的接触应力,研究抗剪连接件形式、布置间距、体积配箍率等参数对型钢混凝土柱轴压承载力的影响规律。结果 随着体积配箍率以及混凝土强度的提高,布置 π 形开孔板抗剪连接件、 π 形 CR 抗剪连接件的型钢混凝土柱承载力逐渐提高,其中混凝土强度由 C70 提高至 C80,构件承载力提高幅度变小;且布置抗剪连接件的构件荷载-位移曲线下降段明显变缓,延性得到提高。结论 抗剪连接件可以提高型钢与混凝土的接触应力,从而改善型钢与混凝土之间的粘结作用。

关键词 抗剪连接件;型钢混凝土柱;轴心受压;参数分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Steel Reinforced Concrete Stub Columns with New Shear Connectors under Axial Compression

LI Guochang, CAO Kaiqi, YANG Zhijian, QIU Zengmei

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The mechanical behavior of steel reinforced concrete columns with new shear connectors under axial compression was studied. The finite element simulation of specimens was carried out by using the software ABAQUS, the longitudinal stress of concrete and the contact stress between steel and concrete of typical specimens were analyzed, and the influences of shear connector forms, layout spacing, volume stirrup ratio and other parameters on the axial compression bearing capacity of steel reinforced concrete columns were studied. With the increase of volume stirrup ratio and concrete strength, the bearing capacity of steel reinforced concrete columns with π -type perfobond shear connectors and π -type crestbond shear connectors increases gradually, in which the concrete strength increases from C70 to C80, and the increase range of component bearing

收稿日期:2021-03-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703407)

作者简介:李幅昌(1964—),女,教授,博士研究生导师,主要从事钢结构、组合结构等方面研究。

capacity decreases; Moreover the descending section of the load-displacement curve of specimens with shear connectors is obviously slowed down, and the ductility is improved. The existence of shear connectors makes the contact stress between steel and concrete higher, which can enhance the bond between steel and concrete.

Key words: shear connectors; steel reinforced concrete columns; axial compression; parameter analysis

型钢混凝土柱具有延性好、耐火、承载力高等优点,且可以满足空间需求,提高房屋有效使用面积,因此在工程中被广泛应用。目前,诸多学者已对型钢高强混凝土柱进行了轴心受压试验研究^[1-3]。为研究型钢高强混凝土短柱的轴压性能,赵根田等^[4]对具有不同型钢截面尺寸、混凝土强度和配箍率的型钢高强混凝土短柱进行了非线性分析; E. Ellobody 等^[5]通过 ABAQUS 建立了非线性有限元模型,对型钢混凝土柱进行了数值模拟。由于型钢与混凝土存在粘结滑移破坏的现象,研究人员设计了开孔板、栓钉、开孔波折板、角钢等各类抗剪连接件,并通过推出试验研究其受力性能^[6-7]。鉴于混凝土和钢材之间存在粘结滑移,为了增大混凝土与型钢之间的接触面积,增强二者的粘结作用,近年来,部分学者开始将栓钉抗剪连接件应用于型钢混凝土柱中进行试验及有限元分析。杨怡亭等^[8]对焊接栓钉的圆截面型钢混凝土柱进行了轴心受压试验以及有限元分析; 卜良桃等^[9]对布置栓钉的型钢活性粉末混凝土柱进行了轴压性能分析,并结合相关规范给出了该组合结构的近似承载力公式; 巩玉发等^[10]以轴压比、混凝土强度、栓钉间距为参数,通过 ABAQUS 对布置栓钉的型钢混凝土柱进行了滞回有限元分析。

以上分析表明,国内外学者主要对型钢高强混凝土柱轴压性能以及抗剪连接件受力性能进行研究,但在型钢混凝土柱中布置抗剪连接件,并通过有限元软件分析抗剪连接件对组合柱轴压性能是否有影响的研究较少。基于此,笔者将李峒昌等^[11-12]设计开发的 π 形开孔板、 π 形 CR 两种新型抗剪连接

件应用于型钢混凝土柱中,利用有限元软件 ABAQUS 对布置抗剪连接件的型钢混凝土轴压短柱进行数值模拟,研究了构件的应力状态并进行参数分析。研究表明:在型钢翼缘设置抗剪连接件可以增强型钢与混凝土的粘结作用,提高构件延性。

1 构件设计

笔者共设计了 22 个采用新型抗剪连接件的型钢混凝土短柱,分析不同参数对型钢混凝土短柱的影响。构件截面宽度 $b = 300$ mm,高度 $h = 400$ mm,长度 $l = 1\ 200$ mm; 构件内型钢高度 $h_1 = 200$ mm,型钢宽度 $b_1 = 150$ mm,腹板厚度 $t_w = 10$ mm,翼缘厚度 $t = 12$ mm,构件截面形式及配筋如图 1 所示,构件参数见表 1。在构件型钢翼缘处布置栓钉抗剪连接件、 π 形开孔板抗剪连接件和 π 形 CR 抗剪连接件,其中型钢与抗剪连接件均选用 Q355 钢材,抗剪连接件的形式及尺寸如图 2 所示。

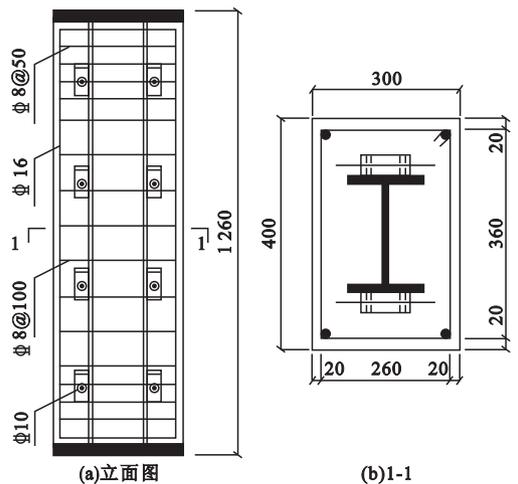


图 1 构件截面尺寸及配筋

Fig. 1 Dimensions and reinforcement details of specimens

表1 构件参数

Table 1 Parameters of specimens

构件编号	$b \times h \times l / \text{mm}$	抗剪连接件		混凝土强度	$\rho_{sv} / \%$	N_f / kN
		形式	d / mm			
SRCDC-1	300 × 400 × 1 200	TCR	100	C60	0.67	7 126
SRCDC-2	300 × 400 × 1 200	TCR	300	C60	0.67	7 032
SRCDC-3	300 × 400 × 1 200	TCR	200	C60	0.67	7 194
SRCDC-4	300 × 400 × 1 200	TCR	100	C40	0.67	5 589
SRCDC-5	300 × 400 × 1 200	TCR	100	C50	0.67	6 352
SRCDC-6	300 × 400 × 1 200	TCR	100	C70	0.67	8 147
SRCDC-7	300 × 400 × 1 200	TCR	100	C80	0.67	8 855
SRCDC-8	300 × 400 × 1 200	TCR	100	C60	0.51	6 909
SRCDC-9	300 × 400 × 1 200	TCR	100	C60	1.33	7 329
SRCDC-10	300 × 400 × 1 200	TCR	100	C60	2.66	7 711
SRCDK-1	300 × 400 × 1 200	TKK	200	C60	0.67	7 069
SRCDK-2	300 × 400 × 1 200	TKK	300	C60	0.67	7 079
SRCDK-3	300 × 400 × 1 200	TKK	100	C60	0.67	7 135
SRCDK-4	300 × 400 × 1 200	TKK	200	C40	0.67	5 631
SRCDK-5	300 × 400 × 1 200	TKK	200	C50	0.67	6 348
SRCDK-6	300 × 400 × 1 200	TKK	200	C70	0.67	8 038
SRCDK-7	300 × 400 × 1 200	TKK	200	C80	0.67	8 602
SRCDK-8	300 × 400 × 1 200	TKK	200	C60	0.51	6 624
SRCDK-9	300 × 400 × 1 200	TKK	200	C60	1.33	7 369
SRCDK-10	300 × 400 × 1 200	TKK	200	C60	2.66	7 738
SRCDs	300 × 400 × 1 200	SD	100	C60	0.67	6 997
SRCD	300 × 400 × 1 200	—	—	C60	0.67	7 199

注:SRC表示组合结构; D 表示单调荷载;TKK表示 π 形开孔板抗剪连接件;TCR表示 π 形CR抗剪连接件;SD表示栓钉; d 表示抗剪连接件的布置间距; ρ_{sv} 表示体积配箍率; N_f 表示构件承载力模拟值。

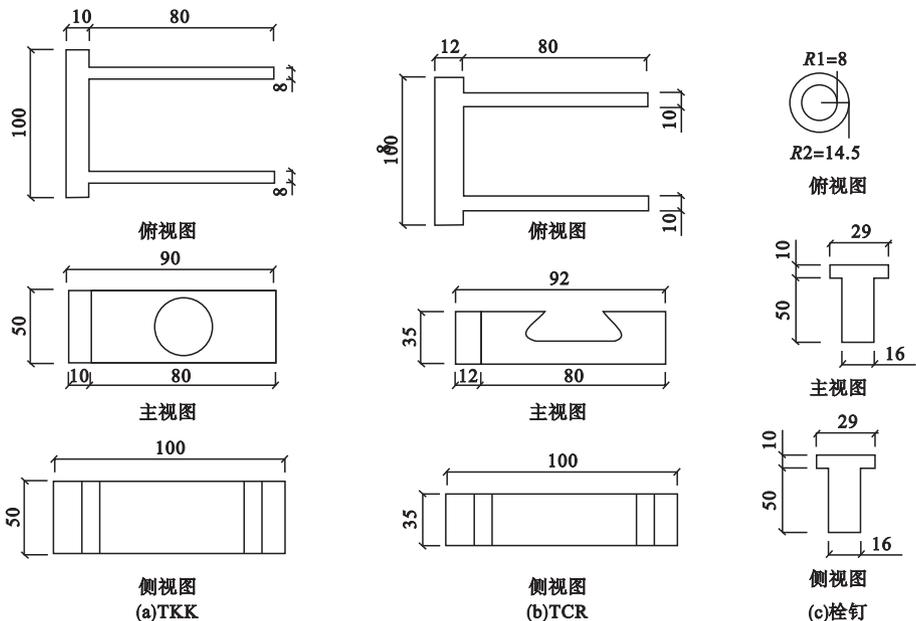


图2 抗剪连接件

Fig. 2 Shear connectors

2 有限元模型的建立

2.1 本构关系

2.1.1 混凝土本构关系

在实际受力过程中,考虑到型钢上下翼缘、腹板、箍筋对混凝土都有加强作用,导致不同区域的混凝土本构关系有所差异。因此,将截面划分为无约束区、弱约束区、强约束区3个区域^[13](见图3)。其中无约束区、弱约束区混凝土采用过镇海^[14]提出的本构关系,强约束区混凝土本构以 J. A. B. Mander^[15]模型为基础,并参考赵宪忠^[16-17]提出的模型关系进行计算。混凝土通过考虑塑性损伤来进行数值模拟,损伤因子根据文献[18]中的公式计算得到。其中混凝土膨胀角、偏心率等相关参数的设置采用 ABAQUS 默认数值。

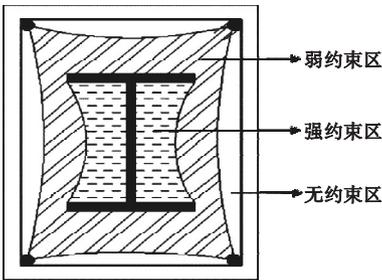


图3 混凝土约束分布图

Fig. 3 Concrete restraint distribution

2.1.2 钢材本构关系

型钢通过焊接工艺拼装在一起,在建模

过程中忽略高温焊接对钢材影响,假定钢材是各向同性的。为了简化模型以及计算方便,型钢、抗剪连接件、钢筋均采用双折线理想模型。钢材应力-应变曲线如图4所示。

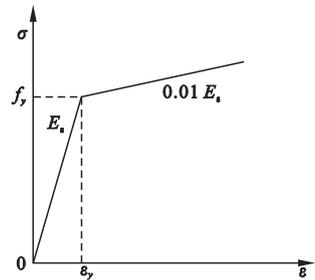


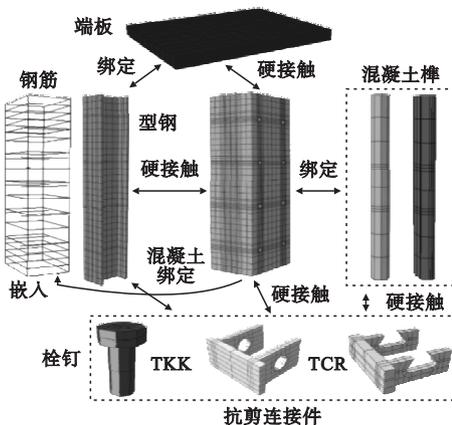
图4 钢材本构关系

Fig. 4 Constitutive relation of steel

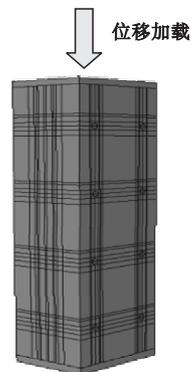
2.2 构件建模过程

模型建立过程中,型钢、混凝土、抗剪连接件(π 形开孔板抗剪连接件、 π 形 CR 抗剪连接件、栓钉)均采用 C3D8R 实体单元,纵筋、箍筋、贯穿钢筋均采用桁架单元(T3D2)。上下端板视为刚体,不考虑其变形。

为提高计算速度以及精确度,设置混凝土、型钢、混凝土榫、抗剪连接件的网格密度为40,盖板网格密度为30,钢筋为50。在建立接触关系时,混凝土与型钢、混凝土与抗剪连接件之间均采用法向硬接触、切向摩擦约束,抗剪连接件与型钢、混凝土与混凝土榫均采用 tie 接触(绑定),钢筋嵌入到整个模型中。各部件之间的接触关系如图5(a)所示。



(a)接触关系及网格划分



$$U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$$

(b)加载方式及边界条件

图5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

考虑到构件的实际受力情况,为保证柱底为固定端,边界设置为 $U_1 = U_2 = U_3 = 0, UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$;在柱顶设置参考点 RF_1 ,并将 RF_1 与端板约束在一起, $U_1 = U_2 = U_3 = 0, UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$,通过位移加载对柱顶 RF_1 处施加竖向荷载。构件加载及边界条件如图 5(b) 所示。

3 有限元计算结果

3.1 有限元计算结果的验证

为验证有限元模型的正确性,笔者对采用新型抗剪连接件的型钢混凝土短柱进行轴压试验,构件截面尺寸、抗剪连接件形式及间距见表 1,配筋形式见图 1。混凝土立方体抗

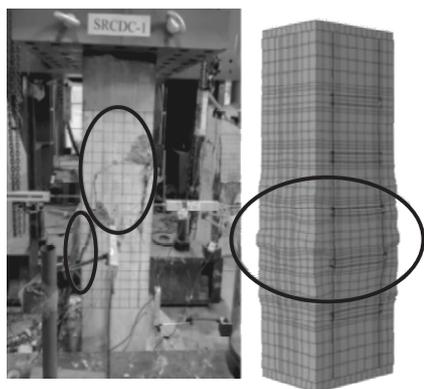
压强度为 58 MPa,钢材力学性能见表 3。其中 f_y 为屈服强度, f_u 为极限强度, E_s 为弹性模量。

表 3 钢材力学性能

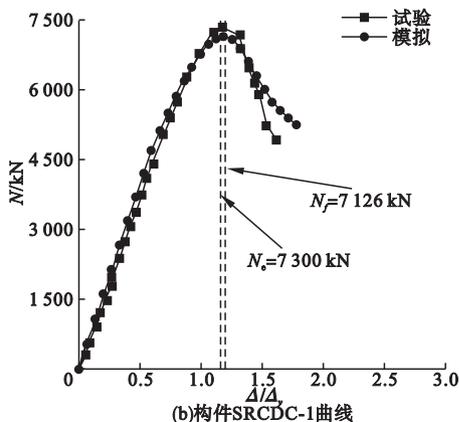
Table 3 Mechanical properties of steel

钢材	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /GPa
8 mm 厚钢板	450	605	206
10 mm 厚钢板	386	553	206
12 mm 厚钢板	360	541	206
Φ8 钢筋	445	568	213
Φ10 钢筋	423	556	199
Φ16 钢筋	416	606	201

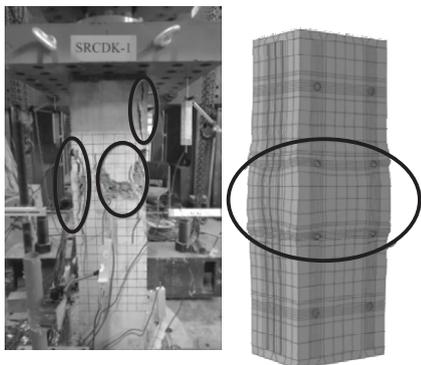
试验破坏模态及荷载-相对位移曲线与有限元模型的分析结果对比如图 6 所示,图中 N_f 为模拟结果, N_c 为试验结果。



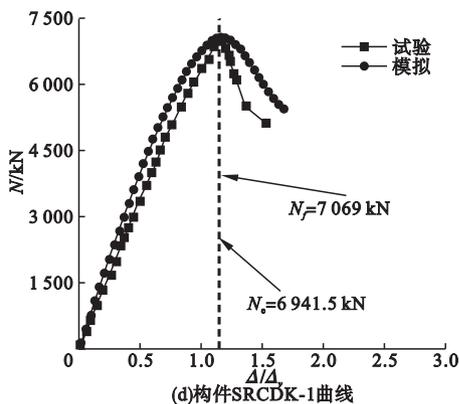
(a) 构件 SRCDC-1 破坏形态



(b) 构件 SRCDC-1 曲线



(c) 构件 SRCDK-1 破坏形态



(d) 构件 SRCDK-1 曲线

图 6 有限元模型验证

Fig. 6 Verification of finite element model

由于试验中试件底部垫板处可能存在位移或者试件浇筑过程存在一定的初始缺陷,从而导致有限元分析结果的刚度整体大于试验值,为了消除上述缺陷所带来的影响,

笔者对模拟值与试验值进行归一化处理然后再对比分析,横坐标为轴向变形与屈服位移的比值 (Δ/Δ_y) 。由图 6 可以看出,有限元模拟结果与试验结果吻合较好,两个构件峰值

荷载分别相差 2.44%、1.84%。表明此建模方法能较准确地模拟该构件的轴压性能,因此可以按照该建模方法对采用新型抗剪连接件的型钢混凝土柱进行参数分析。

3.2 典型构件应力分析

3.2.1 混凝土纵向应力

图 7 为典型构件 SRCDC-1 混凝土中截面纵向应力分布图。由图可知,构件在受力过程中混凝土的纵向应力分布均匀,型钢上下翼缘附近的应力值变化明显,说明型钢翼缘部分对混凝土的约束作用较强。从图 7(a)可以看出,加载至 $0.75 P_u$ (P_u 为峰值荷载)时,构件四角处混凝土纵向应力较大,且外围混凝土的纵向应力大于内部混凝土

土纵向应力。此时构件角部混凝土的纵向应力为 $0.81 f_c$ (f_c 为混凝土轴心抗压强度)左右,强约束区混凝土纵向应力为 0.69 左右。可以看出,混凝土纵向应力由外向内逐渐减小,说明加载初期,外围混凝土对轴力的贡献更大;除角部混凝土外,其他区域内混凝土与强约束区混凝土的纵向应力数值大小相近,说明此时型钢还没有充分发挥作用。从图 7(b)可以看出,由 $0.75 P_u$ 加载至峰值荷载时,混凝土纵向应力明显增大,强约束区混凝土纵向应力最先超过混凝土峰值应力,应力等值线由弱约束区向强约束区发展,这表明型钢发挥作用,提高了对混凝土的约束作用。

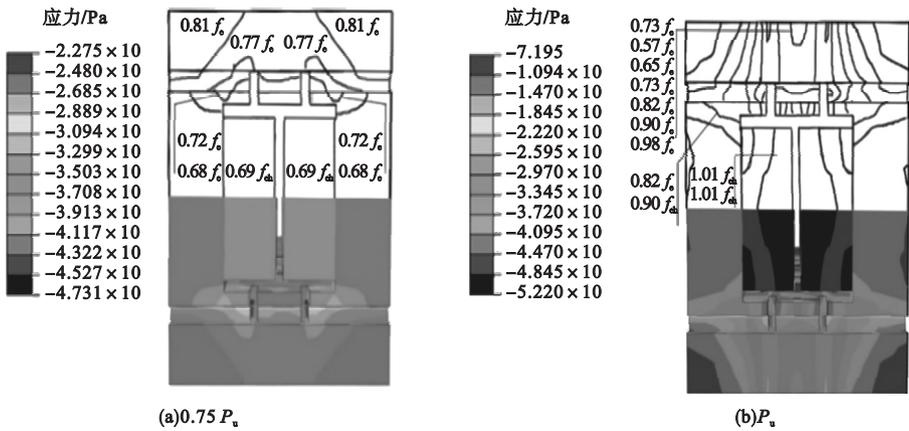


图 7 构件 SRCDC-1 混凝土纵向应力

Fig. 7 Concrete longitudinal stresses of SRCDC-1

3.2.2 接触应力

构件 SRCDC-1、SRCDC 中混凝土与型钢不同位置处的平均接触应力关系曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出,构件型钢翼缘的接触应力大于型钢腹板处的接触应力,说明在型钢混凝土柱中,型钢上下翼缘对混凝土的作用更强。在加载前期,测点 3、测点 4 处与混凝土之间的作用较小,随着继续加载,二者间的接触应力增大。加载至峰值荷载时,构件 SRCDC-1 中 1 点、2 点、3 点、4 点处的接触应力分别为 2.74 MPa、4.96 MPa、1.09 MPa、0.50 MPa; 构件 SRCDC 中相应位置处的接触应力分别为 0.60 MPa、0.77 MPa、1.47 MPa、0 MPa。峰值

荷载过后,随着混凝土的横向膨胀,此时型钢翼缘与腹板转角处接触应力变大。由图 8 可知,受力过程中,与未布置抗剪连接件的构件相比,布置 π 形 CR 抗剪连接件的构件中型钢翼缘处的接触应力更大;且布置抗剪连接件的型钢翼缘 1 点处接触应力在构件屈服时达到最大值,2 点处在峰值荷载时达到最大值,但未布置抗剪连接件的构件,在构件未屈服前翼缘处接触应力已达到最大值。布置抗剪连接件的构件型钢翼缘 3 点处接触应力在承载力达到峰值荷载后一直增长;未布置抗剪连接件构件达到峰值荷载时,型钢翼缘 3 点处接触应力达到最大值。综上可知,布置抗剪连接件可使型钢与混凝土

之间的接触应力更大,从而可以增强型钢与混

凝土之间的粘结作用。

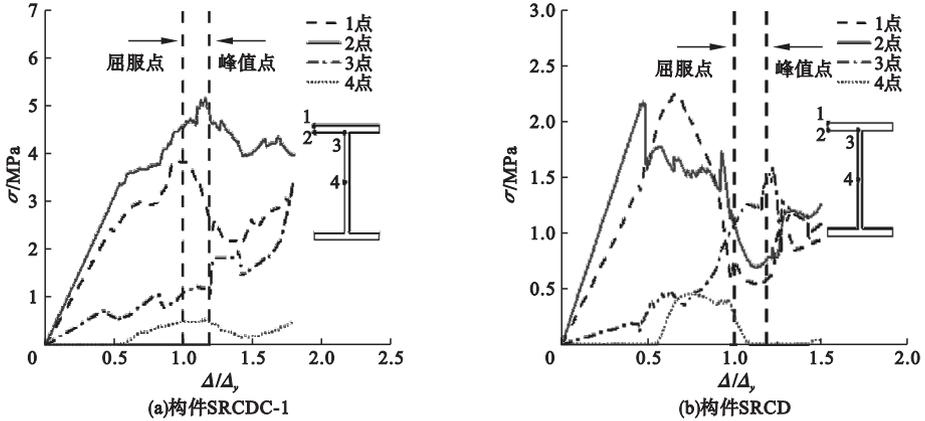


图8 型钢与混凝土的接触应力

Fig. 8 Contact stresses between steel and concrete

4 参数分析

4.1 抗剪连接件

将π形开孔板抗剪连接件、π形CR抗剪连接件分别以100 mm、200 mm和300 mm的间距布置于型钢混凝土柱中,分析抗剪连接件布置间距对构件荷载-位移曲线的影响,曲线如图9所示。由图可知,构件达到峰

值荷载前,荷载-位移曲线基本重合,表明π形开孔板抗剪连接件、π形CR抗剪连接件对构件刚度无影响;且布置不同间距的上述两种抗剪连接件对型钢混凝土柱轴压承载力基本无影响。布置抗剪连接件虽未提高构件承载力,但相较于未布置抗剪连接件的构件,布置抗剪连接件的型钢混凝土柱荷载-位移曲线下降段明显变缓,延性得到改善。

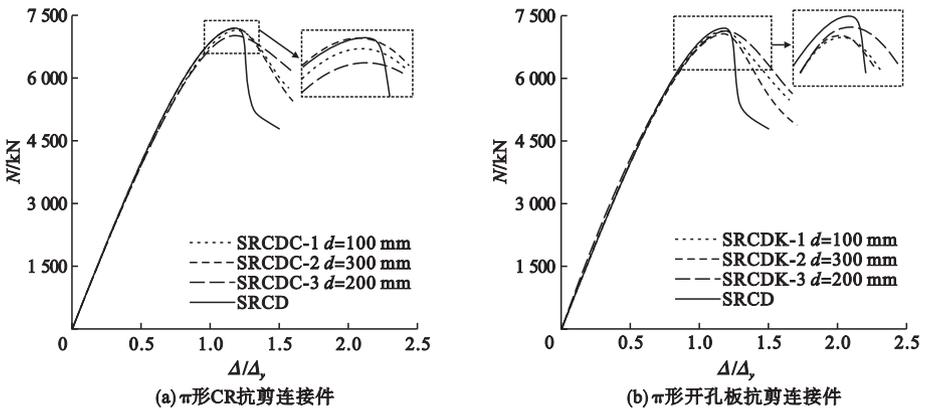


图9 抗剪连接件对构件荷载-位移影响曲线

Fig. 9 Influence of shear connectors on load - displacement curves of specimens

4.2 体积配箍率

通过改变箍筋间距研究体积配箍率对构件荷载-位移曲线的影响,曲线如图10所示。由图可知,构件承载力以及初始刚度随体积配箍率的增大而提高,主要是由于体积配箍率增大,使得箍筋增强了对混凝土的约束作用,进而混凝土的抗压强度也随之提高。

构件体积配箍率由0.51%提高至0.67%时,布置π形CR抗剪连接件的构件承载力提高幅度较小(3.14%),而布置π形开孔板抗剪连接件的型钢混凝土柱承载力提高了6.72%;体积配箍率由1.33%提高至2.66%时,各构件承载力分别提高5.21%、5.01%。

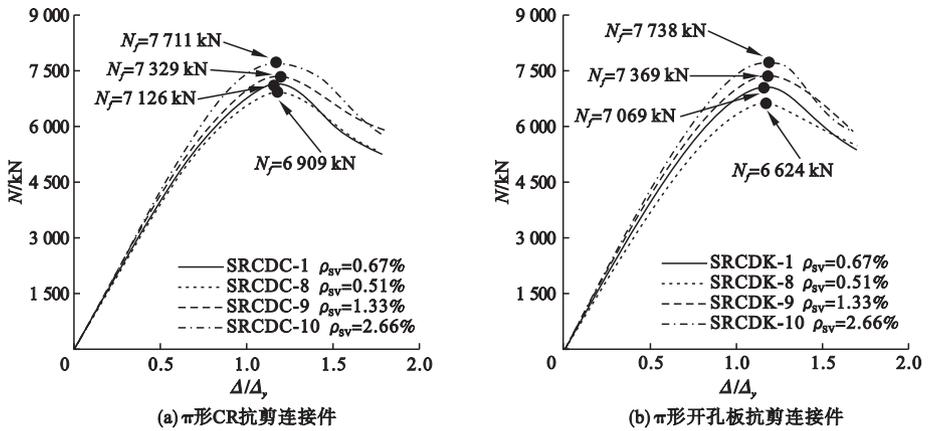


图10 体积配箍率对构件荷载-位移影响曲线

Fig. 10 Influence of volume stirrup ratio on load-displacement curves of specimens

4.3 混凝土强度

混凝土强度对构件荷载-位移影响曲线如图11所示。从图中可以看出,改变混凝土强度对构件峰值荷载影响较大,构件承载力以及初始刚度随混凝土强度的提高而提高。由图11(a)可知,混凝土强度由C40提高至C80时,布置 π 形CR抗剪连接件的型钢混凝土柱承载力分别提高13.65%、12.19%、

14.33%、8.7%。由图11(b)可知,混凝土强度由C40提高至C60时,布置 π 形开孔板抗剪连接件的型钢混凝土柱承载力分别提高12.73%、11.36%、13.71%、7.02%。可以看出混凝土强度由C70变为C80时,试件承载力增幅变小;且随混凝土强度的提高,构件荷载-位移曲线下降段明显变陡,表明混凝土等级对型钢混凝土柱的延性有一定影响。

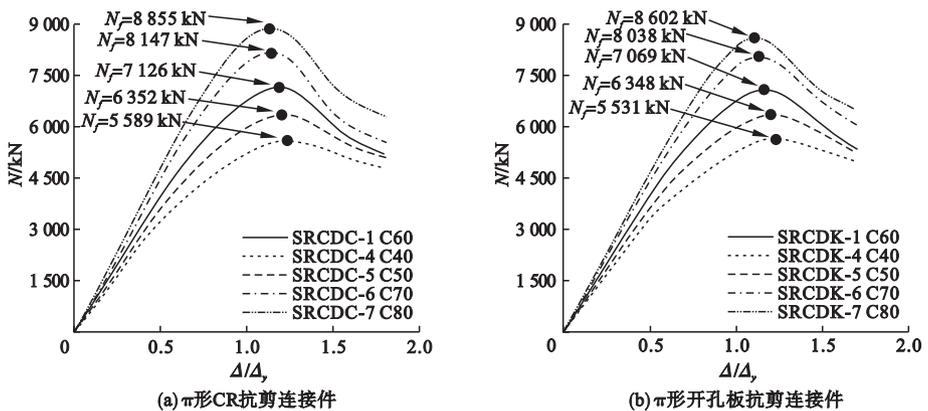


图11 混凝土强度对构件荷载-位移影响曲线

Fig. 11 Influence of concrete strength on load-displacement curves of specimens

5 结论

(1) 受力过程中,布置新型抗剪连接件的构件混凝土纵向应力变化均匀,且连接件可以提高型钢与混凝土之间的接触应力,从而增强二者之间的粘结作用。

(2) 在型钢翼缘布置 π 形开孔板抗剪连接件、 π 形CR抗剪连接件可以提高构件延性,但对轴压承载力影响较小。

(3) 随着体积配箍率和混凝土强度的提高,布置 π 形开孔板抗剪连接件、 π 形CR抗剪连接件的型钢混凝土柱承载力以及初始刚

度逐渐提高。

参考文献

- [1] LAI B, LIEW J Y R, XIONG M. Experimental study on high strength concrete encased steel composite short columns [J]. *Construction and building materials*, 2019, 228: 116640.
- [2] ZHU W Q, MENG G, JIA J Q. Experimental studies on axial load performance of high-strength concrete short columns [J]. *Structures & buildings*, 2013, 167(9): 509 - 519.
- [3] 谢吓弟, 郭子雄, 刘阳. CSRC 柱轴压性能试验及非线性全过程分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2008(4): 584 - 587. (XIE Xiadi, GUO Zixiong, LIU Yang. Experimental study and finite element analysis of CSRC columns under axial compression [J]. *Journal of huaqiao university (natural science)*, 2008(4): 584 - 587.)
- [4] 赵根田, 张雪梅, 杨包生. 型钢高强混凝土短柱承载力非线性分析[J]. *包头钢铁学院学报*, 2006(2): 200 - 205. (ZHAO Gentian, ZHANG Xuemei, YANG Baosheng. Nonlinear analysis of bearing capacity of steel reinforced high strength concrete short columns [J]. *Journal of Baotou university of iron and steel technology*, 2006(2): 200 - 205.)
- [5] ELLOBODY E, YOUNG B. Numerical simulation of concrete encased steel composite columns [J]. *Journal of constructional steel research*, 2011, 67(2): 211 - 222.
- [6] 苏庆田, 李晨翔, 王巍. 开孔板连接件剪切受力机理的试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(11): 1623 - 1629. (SU Qingtian, LI Chenxiang, WANG Wei. Experiment on shear transferring mechanics of perfobond rib connector [J]. *Journal of Tongji university (natural science)*, 2013, 41(11): 1623 - 1629.)
- [7] 邓文琴, 张建东, 刘朵, 等. 角钢剪力连接件力学性能推出试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(增刊1): 389 - 395. (DENG Wenqin, ZHANG Jiandong, LIU Duo, et al. Push out test research on mechanical property of angle connectors [J]. *Journal of building structure*, 2015, 36(S1): 389 - 395.)
- [8] 杨怡亭, 侯兆新, 李国强, 等. 圆截面 Q460 高强钢 SRC 柱轴心受压力学性能研究[J]. *钢结构*, 2016, 31(2): 24 - 31. (YANG Yiting, HOU Zhaoxin, LI Guoqiang, et al. Study on mechanical properties of Q460 high strength SRC circular column under axial compression [J]. *Steel construction*, 2016, 31(2): 24 - 31.)
- [9] 卜良桃, 刘勇. 外包活性粉末混凝土型钢柱轴压性能分析[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2017, 34(3): 245 - 251. (BU Liangtao, LIU Yong. Analysis of axial bearing capacity of encased reactive powder concrete composite steel columns [J]. *Journal of Shenzhen university (science and engineering)*, 2017, 34(3): 245 - 251.)
- [10] 巩玉发, 王晓研. 地震作用下栓钉连接型钢高强混凝土柱[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(2): 171 - 175. (GONG Yufa, WANG Xiaoyan. Under action of earthquake stud connectors of steel reinforced high strength concrete column performance [J]. *Journal of Liaoning technical university (natural science)*, 2016, 35(2): 171 - 175.)
- [11] 李幅昌, 王哲渊, 杨志坚, 等. π 形开孔板连接件受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(2): 131 - 141. (LI Guochang, WANG Zheyuan, YANG Zhijian, et al. Experimental study on shear behavior of π -type perfobond shear connectors [J]. *Journal of building structure*, 2021, 42(2): 131 - 141.)
- [12] 李幅昌, 石先硕, 许伟, 等. T-CR 连接件抗剪承载力有限元分析[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2019, 35(1): 30 - 38. (LI Guochang, SHI Xianshuo, XU Wei, et al. Finite element analysis of shear capacity of TCR shear connectors [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2019, 35(1): 30 - 38.)
- [13] CHEN C C, LIN N J. Analytical model for predicting axial capacity and behavior of concrete encased steel composite stub columns [J]. *Journal of constructional steel research*, 2006, 62(5): 424 - 433.
- [14] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系-原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (GUO Zhenhai. *Strength and constitutive relation of concrete-principle and application* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999.)
- [15] MANDER J A B, PRIESTLEY M J N. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of structural engineering*, 1988, 114(8): 1804 - 1826.
- [16] 赵宪忠, 温福平. 钢筋约束混凝土的约束机制及其应力-应变模型建立[J]. *工程力学*, 2018, 35(5): 45 - 55. (ZHAO Xianzhong, WEN Fuping. Theoretical study on confinement mechanism and stress-strain model for steel confined concrete in SRC columns [J]. *Engineering mechanics*, 2018, 35(5): 36 - 46.)
- [17] ZHAO X, WEN F, CHAN T M, et al. Theoretical stress-strain model for concrete in steel-reinforced concrete columns [J]. *Journal of structural engineering*, 2019, 145(4): 04019009.
- [18] 杨飞, 董新勇, 周沈华, 等. ABAQUS 混凝土塑性损伤因子计算方法及应用研究[J]. *四川建筑*, 2017, 37(6): 173 - 177. (YANG Fei, DONG Xinyong, ZHOU Shenhua, et al. Calculation method and application of ABAQUS concrete plastic damage factor [J]. *Sichuan architecture*, 2017, 37(6): 173 - 177.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)