

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.009

方钢管超高强混凝土短柱轴压性能数值模拟分析

周凯凯¹, 李彪¹, 徐鹏²

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430000; 2. 中国人民大学, 北京 100872)

摘要: 通过有限元软件 ABAQUS 建立方钢管超高强混凝土短柱轴心受压非线性有限元计算模型, 研究了构件受力行为, 分析了混凝土强度、含钢率及钢材屈服强度对核心混凝土纵向应力-应变关系以及构件承载力的影响。结果表明: 构件均为强度破坏, 方钢管超高强混凝土短柱轴心受压全过程主要分为弹性段、弹塑性段、下降段、平稳段四个阶段; 混凝土强度及含钢率对核心混凝土纵向应力-应变关系曲线影响较大, 钢材屈服强度对其影响不明显; 提高混凝土强度、增大含钢率和提高钢材屈服强度均能显著提高构件承载力, 但构件延性随混凝土强度增加而降低, 钢材屈服强度对构件延性影响不明显。

关键词: 方钢管; 超高强混凝土; 轴压性能; 承载力

中图分类号: TU398

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0048-06

Numerical Simulation Analysis of Axial Compression Performance of Ultra-high Strength Concrete-filled Square Steel Tube Short Column

ZHOU Kaikai¹, LI Biao¹, XU Peng²

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430000, China;

2. Renmin University of China, Beijing, 100872, China)

Abstract: By using finite element analysis software ABAQUS, the nonlinear finite element model of an ultra-high strength concrete-filled square steel tube short column is developed to analyze its mechanical behavior under uniaxial compression. The influence of concrete strength, steel ratio and yield strength of steel on stress-strain relation of the core concrete and bearing capacity of component are analyzed. The results show that the failure of components are all strength failure. The whole process of ultra-high strength concrete filled square steel tube short column under uniaxial compression can be divided into 4 phases including elastic phase, elastic-plastic phase, descending phase and smooth phase. Concrete strength and steel content have great influence on longitudinal stress-strain curve of core concrete, while yield strength of steel have little influence. Improving concrete strength, steel ratio increases and steel yield strength can significantly improve the capacity of component, but the ductility decreased with increasing concrete strength, steel yield strength is not obvious influence on component ductility.

Keywords: square steel tube; ultra-high strength concrete; axial compression performance; bearing capacity

超高强混凝土(UHSC)强度高,脆性大,在一定程度上限制了其工程应用。克服其脆性大的一种有效方法是将超高强混凝土灌入钢管中,组成钢管UHSC,充分发挥两种材料的优点,有效改善脆性提高延性^[1-2]。

国内外学者对钢管超高强混凝土短柱轴压性能做了大量的相关研究,取得了重要研究成果。郎奕等^[3-4]通过冷弯型方钢管高强混凝土短柱轴心受压

试验研究,提出冷弯型方钢管高强混凝土轴心受压短柱试件荷载-应变关系曲线与普通方钢管混凝土基本相似,但由于高强混凝土的脆性较大,曲线在下降段比方钢管普通混凝土更加陡峭。李岷昌等^[5-7]通过 16 根高强方钢管高强混凝土轴压短柱有限元模型,分析混凝土与钢管受力及构件破坏过程,将受力过程分为四个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段、平缓阶段,讨论钢管屈服强度、混凝土强度、含

钢率对极限承载力的影响,提出高强方钢管高强混凝土轴压短柱组合构件受力全过程应力-应变关系曲线表达式。谭克锋等^[8]通过圆钢管超高强混凝土短柱试验研究,提出采用钢管约束可以显著地改善超高强混凝土的延性,提高核心混凝土强度,强度增长幅度与套箍指标呈线性关系。陈国灿等^[9]通过钢管超高强石渣混凝土短柱的轴心受压试验研究,发现套箍指标和混凝土强度是影响试件静力特性的主要因素。罗华等^[10-11]通过圆钢管 RPC 短柱轴压试验,将受力全过程分为弹性段、弹塑性段、下降段、强化段四个阶段,在试验数据基础上得到极限承载力的经验公式,通过理论分析提出了钢管 RPC 短柱全过程分析理论模型,能很好地预测钢管 RPC 柱试件的极限荷载及峰值应变。Liew J Y R 等^[12]通过高强方钢管超高强度混凝土短柱轴心受压试验,收集相关数据,对试件承载力进行分析,建议核心混凝土强度大于 90 MPa 钢管混凝土柱约束效应考虑 0.8 的折减,并对超高强混凝土与高强钢材组合构件提出设计指导意见。

综上,目前对钢管超高性能混凝土的研究主要集中在圆形截面,对方钢管超高性能混凝土研究尚缺。本文采用 ABAQUS 建立方钢管超高强混凝土轴心受压短柱有限元模型,分析构件破坏全过程,研究混凝土强度、含钢率及钢材屈服强度对方钢管超高强混凝土短柱轴心受力性能的影响。

1 有限元模型

1.1 材料本构关系

本模型由外部钢管和内部混凝土两部分组成。钢材采用两段式的理想刚塑模型(见图 1),简便易用、易收敛,且能较好地表达钢管后期的强化效应^[13],其中强化段的模量可取值为 $0.01E_s$, E_s 为钢材的弹性模量。超高强混凝土与普通混凝土及高强混凝土性能类似,普通的单轴应力-应变关系不能准确反映钢管约束下核心混凝土的应力应变状态,故核心混凝土采用韩林海本构关系模型^[14]。

1.2 模型建立

在 ABAQUS 建模中,接触面模型由法线方向的接触和切线方向的粘结滑移两方面组成。为了更好地模拟实际情况,钢管与混凝土之间设置为完全接触,法线方向采用“硬”接触,切线方向采用库仑摩擦模型^[15-16]。

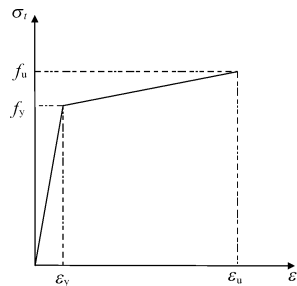


图 1 钢材本构模型

钢管、混凝土均选用三维六面体八节点 (C3D8R) 实体单元,端板采用离散刚体单元。加载方式为位移控制模式,荷载施加在钢管与混凝土上。同时,对柱底位移进行约束,仅释放柱顶的轴向位移。模型网格的划分对计算结果精度、计算效率等具有重要影响。一般情况下,在重点分析区域和应力集中区域加密种子,其他区域种子设置可相对稀疏。有限元计算模型如图 2 所示。

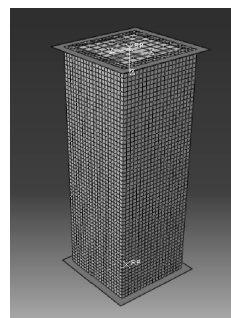


图 2 有限元计算模型

2 有限元结果分析

考虑核心混凝土强度、含钢率、钢材屈服强度三个因素对方钢管超高强混凝土短柱轴压性能的影响,建立 13 个方钢管超高强混凝土短柱 ($L = 300$ mm),有限元模型具体参数见表 1。

2.1 受力全过程分析

图 3 为方钢管超高强混凝土轴压短柱典型破坏模式,构件破坏时破坏形态呈腰鼓状,均为强度破坏。所选典型构件参数为:钢管屈服强度 $f_y = 460$ MPa,混凝土轴心抗压强度 $f_c = 120$ MPa,钢管截面外边长 $B = 100$ mm,钢管壁厚 $T = 7$ mm,构件高度 $L = 300$ mm。构件受力过程主要分为四个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段、平稳阶段(见图 4)。

(1) OA 段为弹性段。荷载-变形基本呈线性变化,比例极限荷载约为峰值荷载的 90%,钢材泊松比大于核心混凝土泊松比,钢管和混凝土近似单独受力。

表 1 构件主要设计参数及承载

编号	B /mm	T /mm	α	f_y /MPa	f_c /MPa	θ	N_u /kN
SA1T3	100	3	0.132	460	100	0.606	1594
SA1T7	100	7	0.352	460	100	1.620	2237
SA1T10	100	10	0.563	460	100	2.588	2678
SA1T12	100	12	0.731	460	100	3.364	3045
SA1T16	100	16	1.163	460	100	5.348	3609
SA2T7	100	7	0.352	460	120	1.350	2392
SA3T7	100	7	0.352	460	130	1.246	2477
SA4T7	100	7	0.352	460	150	1.080	2636
SA5T7	100	7	0.352	460	200	0.810	3032
SB1T7	100	7	0.352	420	100	1.479	2122
SC1T7	100	7	0.352	390	100	1.373	2035
SD1T7	100	7	0.352	345	100	1.215	1904
SE1T7	100	7	0.352	235	100	0.827	1570

注:表中 B 表示试件截面外边长, T 表示钢管壁厚, L 表示试件的高度, α 表示试件含钢率, θ 表示套箍系数, f_y 表示钢材屈服强度, f_c 表示核心混凝土的轴心抗压强度, N_u 表示极限承载力。

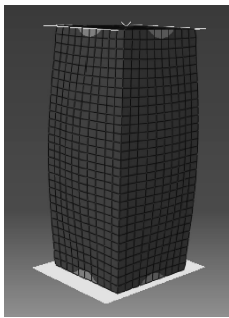


图 3 典型破坏模式

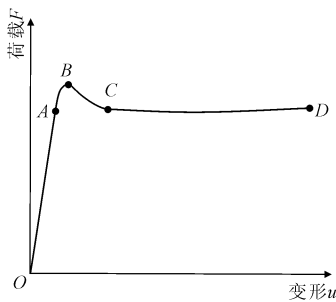


图 4 荷载-变形典型曲线

(2) AB 段为弹塑性阶段。钢管进入弹塑性状态,弹性模量不断减小,核心混凝土微裂纹不断扩展,产生塑性应变,钢管与混凝土发生相互作用,且随着泊松比不断增大,钢管对混凝土的套箍作用逐渐增强,核心混凝土处于三向受压状态,强度得到提高。

(3) BC 段为下降段。 B 点是曲线的峰值点,在此阶段,钢管进入塑流状态,钢管壁局部发生屈曲,构件中部核心混凝土失去钢管的套箍作用,核心混

凝土被压碎,荷载下降。由于超高强混凝土强度较高,达到极限强度后产生膨胀力较大,当含钢率较低,套箍系数较小时荷载急剧下降。

(4) CD 段为平稳段。经历下降段后随变形增大荷载趋于稳定,基本呈水平趋势或有一定的回升,主要是由于钢管经过塑流阶段后,进入强化阶段,且钢管重新对核心混凝土产生约束,承载力趋于稳定。套箍系数增大时,荷载会有一定的回升,回升幅度随套箍系增大而增大,延性也相应提高。

图 4 中 A 、 B 、 C 三个特征点处的混凝土和钢管纵向应力分布如图 5、图 6 所示。从图 5、图 6 中可以看出,在 A 点,方钢管超高强混凝土轴压短柱整体处于全截面受压弹性状态,压应力沿截面高度均匀分布,核心混凝土两端压应力较小,钢管尚未屈服。 B 点处,构件承受的轴向压应力最大,此时混凝土产生大量微小裂缝,压应力逐渐传递到构件中部;钢管全截面已经屈服,钢管与核心混凝土发生应力重分布,混凝土受到钢管约束作用,构件的承载力达到极限值。 C 点处,钢材经过塑流状态后进入强化工作状态,钢管对核心混凝土约束作用得到加强,构件承载力趋于稳定。

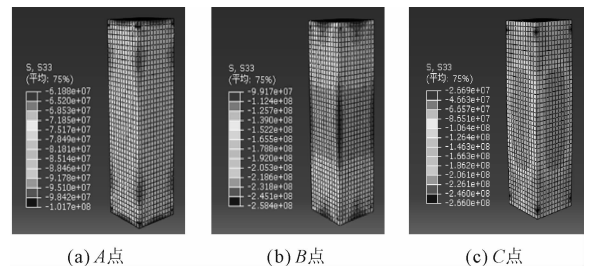


图 5 混凝土纵向应力分布图

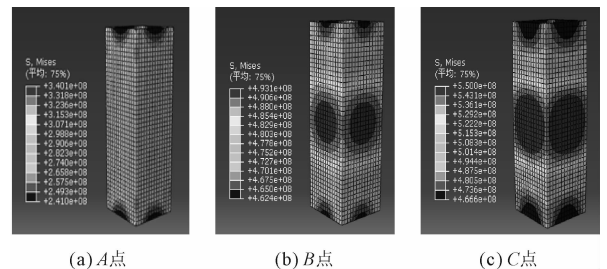


图 6 钢管表面应力分布图

2.2 核心混凝土纵向应力-应变关系分析

2.2.1 混凝土强度的影响

图 7 为钢材强度及含钢率相同情况下,方钢管超高强混凝土轴压短柱核心混凝土纵向应力-应变关系曲线在不同混凝土强度情况下的对比图。从图 7 中可以看出,随着混凝土强度提高,弹性阶段逐渐延长,这是由于在弹性阶段钢管和核心混凝土单独

受荷,两种材料不发生相互作用;混凝土强度越大,曲线峰值点越高,残余应力也越大。

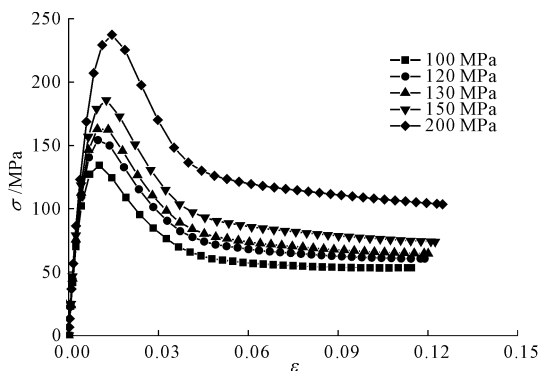


图 7 不同混凝土强度的构件核心混凝土的纵向应力 - 应变曲线

2.2.2 含钢率的影响

图 8 为不同含钢率对核心混凝土纵向应力 - 应变关系曲线的影响图。从图 8 中可以看出,随着含钢率增大,曲线峰值点逐渐提高,其提高幅度随含钢率增大而增加;同时,随着含钢率增大,曲线下降段趋于平缓,核心混凝土脆性逐渐减小。

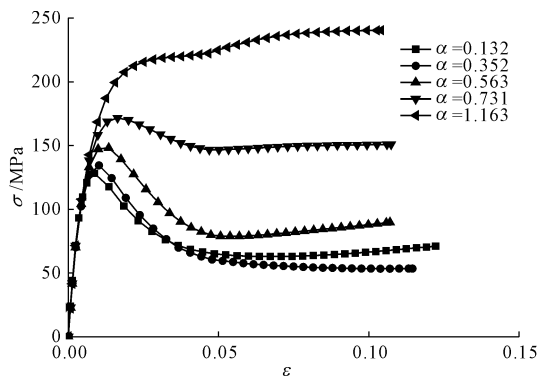


图 8 不同含钢率的构件核心混凝土的纵向应力 - 应变曲线

2.2.3 钢材屈服强度的影响

图 9 为核心混凝土纵向应力 - 应变关系曲线在不同钢材强度下的对比图。从图 9 中可以看出,钢材强度对曲线数值和形状影响均较小;随着钢材强度提高,曲线峰值强度小幅度提高,这是因为提高钢材强度增大了其约束作用。另外,钢材强度对残余应力影响不大。由此可见,钢材强度对钢管的约束作用影响不明显。

2.3 极限承载力影响因素分析

2.3.1 混凝土强度

图 10 为含钢率与钢材屈服强度不变,不同混凝土强度等级对构件荷载 - 纵向位移曲线影响对比图。混凝土强度等级设置为:100 MPa、120 MPa、130 MPa、150 MPa、200 MPa。图 11 为核心混凝土强度对

构件极限承载力影响对比图。由图 11 可知,核心混凝土强度从 100 MPa 提高到 200 MPa,构件的极限承载力分别为 2 237 kN、2 392 kN、2 477 kN、2 636 kN、3 032 kN,相对于混凝土为 100 MPa 的构件,构件极限承载力分别提高了 6.92%、10.73%、17.84%、35.54%;混凝土抗压强度对于构件初始刚度影响不大,构件极限承载力随核心混凝土强度呈线性增长趋势,构件延性略有降低。

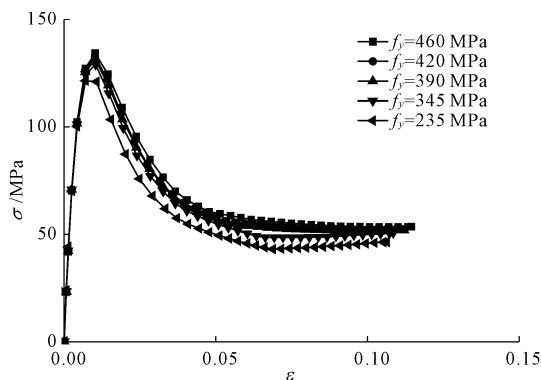


图 9 不同钢材屈服强度的构件核心混凝土的纵向应力 - 应变曲线

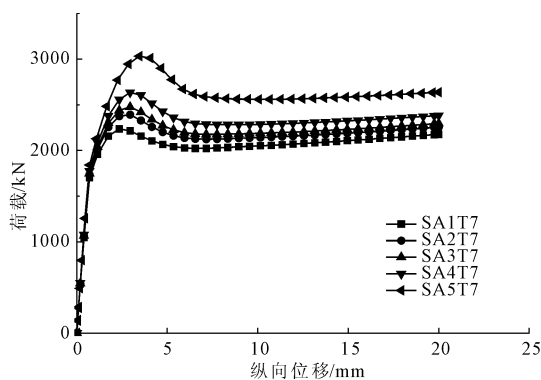


图 10 混凝土强度对荷载 - 位移曲线的影响

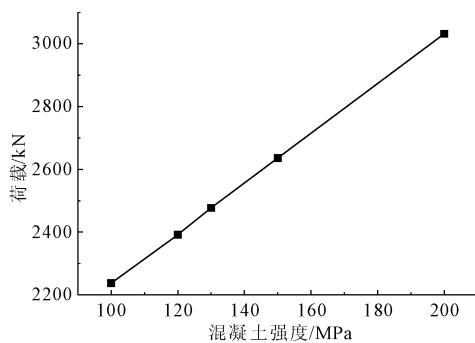


图 11 混凝土强度对极限承载力的影响

2.3.2 含钢率

图 12 为核心混凝土强度与钢材屈服强度不变,不同混凝土强度等级对构件荷载 - 纵向位移曲线影响对比图。含钢率设置五组水平:0.132、0.352、

0.563、0.731、1.163。图 13 为含钢率对构件极限承载力影响对比图。由图 13 可知,含钢率从 0.132 提高到 1.163,构件的极限承载力分别为 1 594 kN、2 237 kN、2 678 kN、3 045 kN、3 609 kN,相对于含钢率为 0.132 的构件,构件极限承载力分别提高了 40.34%、68.01%、91.03%、126.41%;随含钢率增大构件的初始刚度增大,延性变好,荷载-位移曲线下降趋势逐渐变缓,当含钢率达到 0.731 时,曲线不再下降,呈上升趋势;构件极限承载力随着含钢率增大而增大,但增大的幅度逐渐降低。

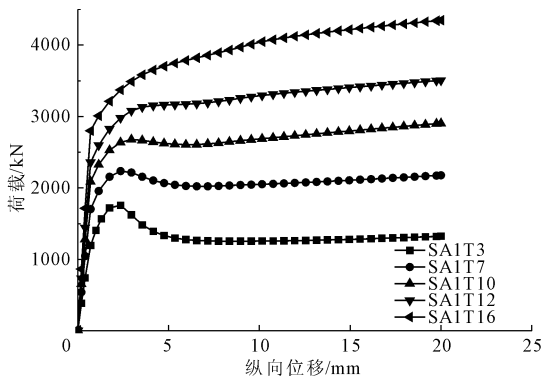


图 12 含钢率对荷载-位移曲线的影响

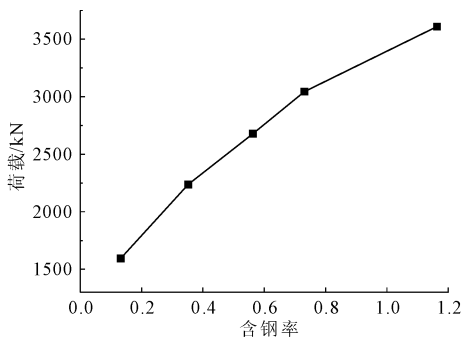


图 13 含钢率对极限承载力的影响

2.3.3 钢材屈服强度

图 14 为保持核心混凝土强度与含钢率不变,不同钢材屈服强度对构件荷载-纵向位移曲线影响对比图。钢材屈服强度设置五组水平:460 MPa、420 MPa、390 MPa、345 MPa、235 MPa。图 15 为钢材屈服强度对构件极限承载力影响对比图。由图 15 可知,钢材屈服强度从 235 MPa 提高到 460 MPa,构件的极限承载力分别为 1 570 kN、1 904 kN、2 035 kN、2 122 kN、2 237 kN,相对于钢材屈服强度为 235 MPa 的构件,构件极限承载力分别提高了 21.27%、29.61%、35.16%、42.48%;构件受力在弹性阶段,荷载与位移呈线性关系,初始刚度相同,进入弹塑性阶段后,荷载与位移呈非线性;钢材屈服强度对构件延性影响不大,构件极限承载力随钢材屈服强度呈线性增

长趋势,残余承载力也随之提高。

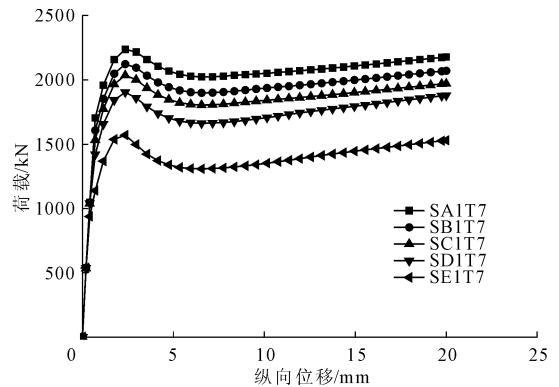


图 14 钢材屈服强度对荷载-位移曲线的影响

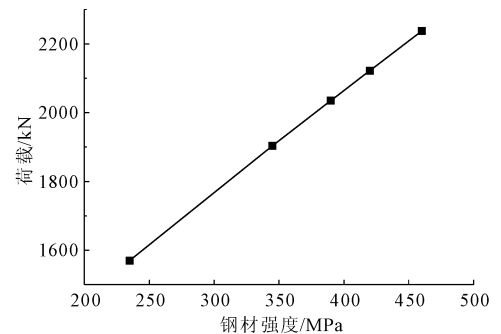


图 15 钢材屈服强度对极限承载力的影响

3 结论

通过 13 根短柱有限元模拟,研究方钢管超高强混凝土短柱在轴心受压下的力学性能,分析混凝土强度、含钢率及钢材屈服强度的影响,得出以下主要结论:

(1) 方钢管超高强混凝土短柱轴心受压均为强度破坏,破坏全过程主要分为弹性段、弹塑性段、下降段、平稳段四个阶段。

(2) 混凝土强度越大,核心混凝土纵向应力-应变关系曲线峰值点越高,残余应力越大;随含钢率增大,曲线峰值点逐渐提高,其提高幅度随含钢率增大而增加;钢材屈服强度对曲线影响不明显。

(3) 随着混凝土强度和钢材屈服强度提高,构件极限承载力呈线性增加,而随着含钢率增大,极限承载力提高幅度逐渐减小;增大含钢率能有效提高构件初始刚度,改变混凝土强度对初始刚度影响不大;构件延性随混凝土强度提高而降低,随着含钢率增大而增加,受钢材屈服强度的影响较小。

参考文献:

- [1] 王吉忠,刘连鹏,叶浩.钢管-混凝土组合柱在我国的研究进展与展望[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):143-149.

- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构(修订版)[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [3] 郎 葵,杨志坚,蒋连接. 方钢管高强混凝土短柱轴压试验研究[J]. 低温建筑技术,2011,33(11):42-45.
- [4] 郎 葵,杨志坚. 方钢管高强混凝土短柱有限元分析[J]. 江苏建筑,2011(6):36-38.
- [5] 李幅昌,闫海龙,陈博文. 高强方钢管高强混凝土轴压短柱力学性能的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(5):847-855.
- [6] 李幅昌,陈博文,刘 余. 高强方钢管高强混凝土轴压短柱有限元模型优化[C]//第 24 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册). 北京:工程力学杂志社,2015.
- [7] 陈博文,李幅昌,杨志坚,等. 高强方钢管高强混凝土短柱轴压性能[J]. 工业建筑,2017,47(3):151-156.
- [8] 谭克锋,蒲心诚,蔡绍怀. 钢管超高强混凝土的性能与极限承载能力的研究[J]. 建筑结构学报,1999,20(1):10-15.
- [9] 陈国灿,徐志胜,杨智硕,等. 钢管超高强石渣混凝土轴压短柱静力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(3):82-89.
- [10] 罗 华. 圆钢管活性粉末混凝土短柱轴压受力性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.
- [11] 罗 华. 钢管活性粉末混凝土柱受压性能试验与理论研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [12] Liew J Y R, Xiong M X, Xiong D X. Design of concrete filled tubular beam-columns with high strength steel and concrete[J]. Structures, 2016,8:213-226.
- [13] 曹思琦. 圆钢管活性粉末混凝土柱受压极限承载力的有限元分析[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2015.
- [15] 陈兰响,关 萍,刘晴晴. 基于 ABAQUS 分析型钢—圆钢管混凝土的力学性能[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(2):15-19.
- [16] 李占辉. 圆钢管约束下活性粉末混凝土本构模型有限元分析[D]. 北京:北京交通大学,2012.

(上接第 31 页)

(4) 对不同跨径下不同整体化铺装层厚度的空心板梁进行承载力极限状态和正常使用极限状态验算,均满足要求。

参考文献:

- [1] 许 莉,郑圣基. 简支空心板桥车辆荷载效应分析[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(2):7-10.
- [2] 李增锋,庄一舟,程俊峰,等. 装配式空心板斜交桥梁横向预应力的抗裂性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):44-50,81.
- [3] 李增锋,庄一舟,程俊峰,等. 横向预应力对装配整体式空心板桥纵向抗裂性能的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(3):127-133.
- [4] 王砚桐. 高等级公路中“单板受力”现象及原因分析[J]. 公路交通技术,2004(4):29-32.
- [5] 陈宝春,陈友杰,赵 秋. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2017.
- [6] Seible F, Latham C T. Analysis and design for structural concrete bridge deck overlays[J]. Journal of Structural Engineering, 1990,116(10):2711-2727.
- [7] 高鹏飞. 装配式箱梁桥整体化层合理厚度分析[D]. 西安:长安大学,2015.
- [8] 郝宪武. 装配式箱梁桥整体化层作用机理及其设计加固方法[D]. 西安:长安大学,2012.
- [9] 商允福,陈广淳. 预应力空心板桥超荷载设计方法[J]. 中国农村水利水电,2000(8):40-41.
- [10] 方 萍,万 水,叶见曙. 钢桥面铺装力学特性试验研究[J]. 公路交通技术,2002(4):7-11.
- [11] 罗立峰,钟 鸣,黄成造. 桥面铺装设计理论的研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2002,30(4):91-96.
- [12] 徐洪涛. 桥面铺装层的受力分析及承载力研究[D]. 天津:河北工业大学,2003.
- [13] 唐国斌,项贻强,管品武. 桥面铺装对中小跨径桥梁力学性能影响研究[J]. 公路交通科技,2010,27(12):94-98,104.
- [14] 邹兰林,彭 冬. 装配式板桥桥面铺装层受力特性分析[J]. 公路与汽运,2010(5):147-150.
- [15] 吴颖恒,张俊平. 桥面铺装对简支空心板桥受力行为的影响研究[J]. 广州大学学报(自然科学版),2011,10(1):60-64.
- [16] 詹华熙,王国亮,魏洪昌. 桥面补强层加固法系统研究[J]. 公路交通科技,2006,23(4):87-90,103.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 5002—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [18] 刘 健. 新老混凝土粘结的力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2000.
- [19] 刘沛林,时旭东,张天申. 装配式钢筋混凝土简支板梁桥铰缝接触面应力分析[J]. 特种结构,2010,27(4):77-80,84.
- [20] 叶见曙,刘九生,俞 博,等. 空心板混凝土铰缝抗剪性能试验研究[J]. 公路交通科技,2013,30(6):33-39.
- [21] 王 锋. 桥面整体化铺装层加固空心板受力性能研究[D]. 福州:福州大学,2015.