

引用本文:史艳莉,张文旭,贾志路,等.内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱生命周期内的力学性能[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):81-90.

SHI Yan-li, ZHANG Wen-xu, JIA Zhi-lu, et al. Life Cycle Mechanical Behavior of Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns with Encased Profiled Steel Subjected to Axial Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 81-90.

DOI:10.19815/j.jace.2019.05053

内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱生命周期内的力学性能

史艳莉, 张文旭, 贾志路, 王文达

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为了研究内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱在生命周期内的受力机理,利用有限元软件 ABAQUS 建立该类短柱的计算模型,并与已有的相关试验结果进行对比。模型中将钢管初应力和长期荷载作为生命周期内的主要因素进行考虑,分析了内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱生命周期内的荷载-变形全过程曲线、跨中截面各部件纵向应力分布和钢材与混凝土之间的相互作用力;考察了初应力系数、长期荷载比和含钢率对构件承载力和变形的影响规律。结果表明:考虑钢管初应力和长期荷载作用的内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱极限承载力与一次加载情况下相比变化不明显,但极限承载力对应的纵向应变增长 84.2%;在长期持荷阶段,核心混凝土发生卸载现象,其承担的荷载下降了 30%左右,再加载阶段又继续承载;钢管与混凝土之间的接触应力在中截面处最大,沿构件长度方向逐渐向两端减小;随着钢管含钢率增大,构件极限承载力增大,变形减小,而型钢含钢率对构件变形影响较小;随着初应力系数和长期荷载比的增大,构件纵向变形增大。

关键词:内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱;生命周期;初应力;长期荷载;力学性能

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)03-0081-10

Mechanical Behavior of Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns with Encased Profiled Steel Subjected to Axial Load in Life Cycle

SHI Yan-li, ZHANG Wen-xu, JIA Zhi-lu, WANG Wen-da

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to study the life cycle force mechanism of rectangular concrete-filled steel tubular (CFST) axial compressive stub columns with encased profiled steel, the finite element software ABAQUS was used to establish the calculation models and the models were compared with the relevant test results. The main influence factors such as initial stress of steel tube and long-term load were considered in the life cycle. The whole process load-deformation curves in life cycle, the longitudinal stress distribution of components in midspan section and the interaction between steel and concrete of rectangular concrete-filled steel tubular axial compressive stub

收稿日期:2019-07-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51768038);甘肃省高校协同创新团队项目(2018C-08)

作者简介:史艳莉(1977-),女,河北涿州人,副教授,工学博士,E-mail:ceshiyl@163.com。

通信作者:王文达(1976-),男,甘肃天水人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wangwd@lut.edu.cn。

columns with encased profiled steel were analyzed. Furthermore, the influences of initial stress coefficient, long-term load ratio and steel ratio on the bearing capacity and deformation of the component were also investigated. The results show that the ultimate bearing capacity of rectangular CFST axial compressive stub columns with encased profiled steel with the initial stress of steel tube and long-term load does not change significantly compared with the once loading, but the longitudinal strain corresponding to the ultimate bearing capacity increases by 84.2%. During the long-term sustained stage, the core concrete is unloading and the bearing capacity of concrete decreases by about 30%, but it continues to bear in the reloading stage. The maximum contact stress between steel tube and concrete appears at the middle section and the contact stress decreases gradually along the length of the member. With the increase of steel ratio of steel tube, the ultimate bearing capacity of the component increases and the deformation decreases, while the steel ratio of profiled steel has little effect on the deformation of the component. Finally, with the increase of the initial stress coefficient and the long-term load ratio, the longitudinal deformation of specimens increases.

Key words: rectangular CFST stub column with encased profiled steel subjected to axial load; life cycle; initial stress; long-term load; mechanical behavior

0 引言

在建筑工程领域,生命周期设计理念是指在结构的设计过程中,考虑结构建造和使用等阶段的各种有利或不利因素对结构产生的影响,据此来优化结构设计的过程。内配型钢钢管混凝土是指将型钢嵌入钢管内部,再浇筑混凝土,形成钢管、型钢和混凝土能够协同工作的一种组合结构形式。基于生命周期的内配型钢钢管混凝土结构设计方法需综合考虑结构建造和使用阶段的荷载作用效应^[1]。

目前对内配型钢钢管混凝土构件生命周期工作机理的研究鲜有报道,但对钢管混凝土构件生命周期各阶段的研究已有较多的成果。在建造阶段,钟善桐等^[2-7]对考虑初应力的钢管混凝土构件进行研究,初应力对钢管混凝土构件刚度、强度和变形有影响;在使用阶段,韩林海等^[8-12]对有长期荷载作用的钢管混凝土结构进行研究,提出构件承载力计算方法。对钢管混凝土构件生命周期的研究也有一些报道。Li 等^[13]对中空夹层钢管混凝土构件生命周期内的力学性能进行初步研究,提出该类构件有限元分析方法。Han 等^[14-15]对考虑钢管腐蚀和长期荷载作用的钢管混凝土构件进行试验研究,结果表明,随着腐蚀程度和长期荷载比的增大,构件的强度和延性明显降低。Hou 等^[16]对钢管混凝土柱生命周期内的力学性能进行数值研究,考虑初应力、长期荷载和横向冲击等作用,得到钢管混凝土柱在耦合荷载作用下强度退化程度大于单个荷载作用情况之

和。Li 等^[17]对钢管混凝土叠合柱在生命周期内的力学性能进行试验研究,提出该类结构的简化设计方法。

在现有研究的基础上,本文将结构建造阶段的初应力和使用阶段的长期荷载进行耦合,利用 ABAQUS 建立有限元模型,对生命周期内此类构件的变形、强度和刚度等指标的变化情况进行初步探索,分析了初应力系数、长期荷载比、钢管含钢率和型钢含钢率对构件长期持荷阶段的变形-时间曲线和生命周期过程中荷载-变形曲线的影响,以期在实际工程提供一定的参考。

1 有限元模型建立及验证

1.1 有限元模型的建立

本文运用有限元软件 ABAQUS 对内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱生命周期内的力学性能进行研究。建模时,钢材的本构模型采用二次流塑模型;一次加载时混凝土本构模型采用塑性损伤模型^[1];生命周期内,混凝土本构模型在不同的受力阶段是不同的,长期持荷阶段混凝土本构模型采用黏弹性模型,利用 ABAQUS 提供的材料子程序 UMAT 定义长期持荷阶段混凝土的本构模型^[18];长期持荷后的加载破坏阶段采用文献[1]中的方法对混凝土本构模型进行修正,即假设长期荷载作用不影响混凝土强度,只对应变有影响。参考 ACI 209,长期荷载作用时的应变 $\epsilon_t = [1 + \varphi(t, \tau_0)]\epsilon_{r0} + \epsilon_{sh}$, 其中, φ 为徐变系数, t 为长期荷载的持荷时间, τ_0 为加载龄

期, $\epsilon_{\tau 0}$ 为短期荷载下的应变, ϵ_{sh} 为混凝土的收缩应变。混凝土应力-应变($\sigma-\epsilon$)关系对比曲线如图 1 所示,其中, σ_0 为混凝土在徐变开始时的应力, ϵ_0 为长期荷载下的总纵向应变, $\sigma_{\tau 0}$ 为短期荷载下的应力。

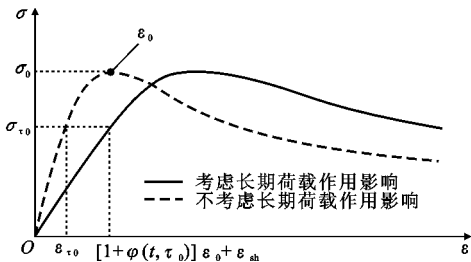


图 1 核心混凝土 $\sigma-\epsilon$ 关系曲线

Fig. 1 $\sigma-\epsilon$ Curves of Core Concrete

建模时,各部件均采用 8 节点完全积分三维实体单元(C3D8)。钢管和型钢与混凝土的界面模型由法向接触和切向黏结滑移构成:界面切向为面面接触,采用库仑摩擦模型,摩擦因数取为 0.25,界面的法向采用硬接触。钢管、型钢和混凝土与加载板之间采用“tie”绑定,即加载板与各部件之间无相对滑移。构件的简化模型如图 2 所示, U_x, U_y, U_z 分别表示 x, y, z 三个方向的约束。

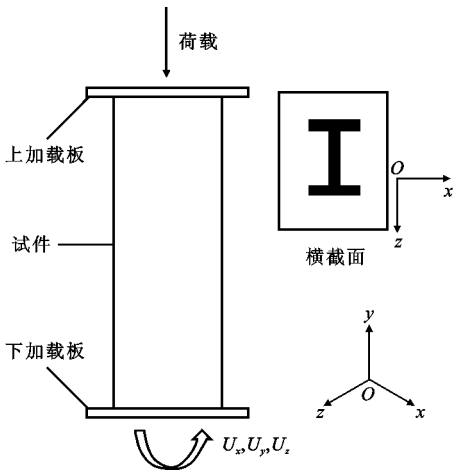


图 2 简化模型

Fig. 2 Simplified Model

1.2 模型验证

目前国内外对此类构件生命周期的试验研究较少,为了验证上述有限元建模方法的可靠性,对生命周期内各阶段的试验进行有限元模拟,即对文献[4]中 2 根考虑钢管初应力的方钢管混凝土轴压柱、文献[1]中 2 根考虑长期荷载作用的矩形钢管混凝土轴压柱和文献[13]中 1 根中空夹层钢管混凝土轴压柱生命周期的试验进行有限元模拟,试件基本参数如表 1 所示,其中, D 为矩形钢管横截面长边的外边长, B 为矩形钢管横截面短边的外边长, t 为钢管厚度, L 为构件计算长度, f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度, f_{ty} 为钢管屈服强度, N_p 为施加在钢管上的初应力, N_L 为施加的长期荷载。模拟结果与试验结果对比曲线如图 3 所示,其中, u_m 为构件中截面挠度。从整体模拟结果来看,模拟结果与试验结果吻合较好,说明此建模方法正确可靠,可用于有限元分析。由于有限元的计算过程不能完全反映试验过程,这就有可能导致两者的结果存在误差。图 3(d), (e) 的对比结果相对误差较大,可能是由于混凝土自身因素导致混凝土产生徐变变形的程度不同,或进行试验时试件的边界条件等因素的影响导致相对误差较大。

2 生命周期内的工作机理分析

运用有限元软件 ABAQUS 对内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱生命周期内的力学性能进行研究,典型算例参数为:矩形钢管截面 $D=500$ mm, $B=400$ mm,厚度 $t=10$ mm,型钢选用 I36c,高度 $H=1\,500$ mm,钢管含钢率 $\alpha_{st}=0.1$,型钢含钢率 $\alpha_{ss}=0.05$,混凝土强度 $f_{cu}=60$ MPa,钢管屈服强度 $f_{ty}=345$ MPa,型钢屈服强度 $f_{sy}=345$ MPa,初应力系数 $\beta=0.4$,长期荷载比 $n=0.4$,长期持荷时间为 3 600 d。

2.1 生命周期内的荷载-位移全过程曲线

图 4、5 分别为生命周期内的荷载-位移全过程

表 1 试件基本参数

Tab. 1 Basic Parameters of Specimens

试件编号	D/mm	B/mm	t/mm	L/mm	f_{cu}/MPa	f_{ty}/MPa	N_p/kN	N_L/kN	数据来源
SP-1	120	120	2.65	360	20.1	340.0	211		文献[4]
SP-3	120	120	2.65	360	36.0	340.0	211		
S-4-1	120	120	2.93	600	58.9	293.5		470	文献[1]
R-6	120	60	2.93	600	58.9	293.5		180	
PL	2 ϕ 60(内管) 3 ϕ 140(外管)			420	61.9	369.0(内管) 371.0(外管)	180	600	文献[13]

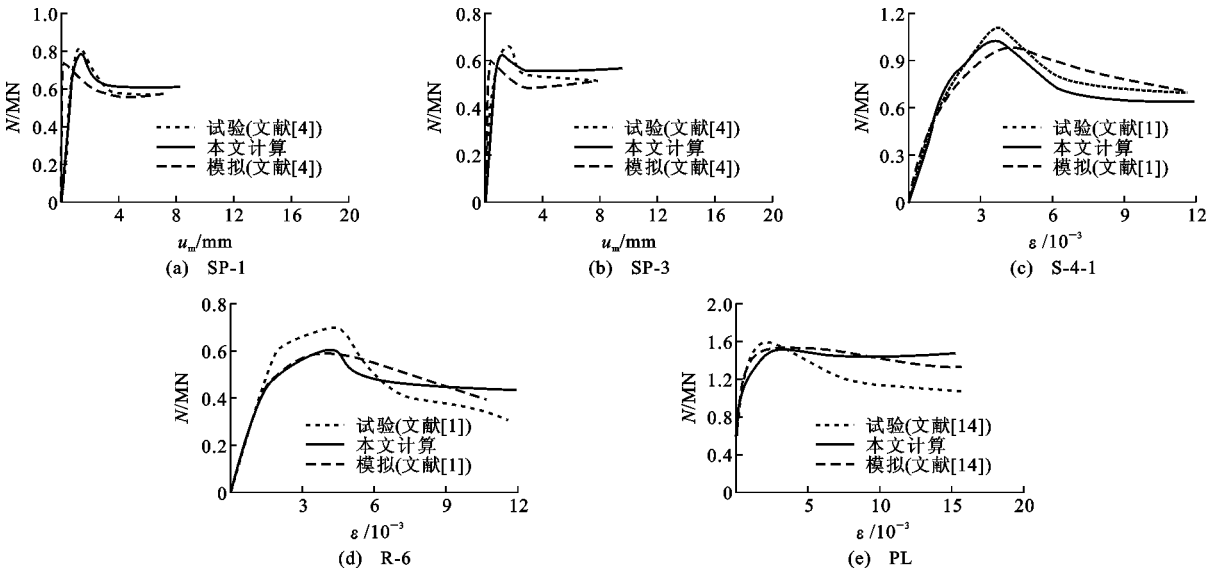


图3 试验结果与有限元计算结果对比

Fig. 3 Comparison of Finite Element Calculation Results and Test Results

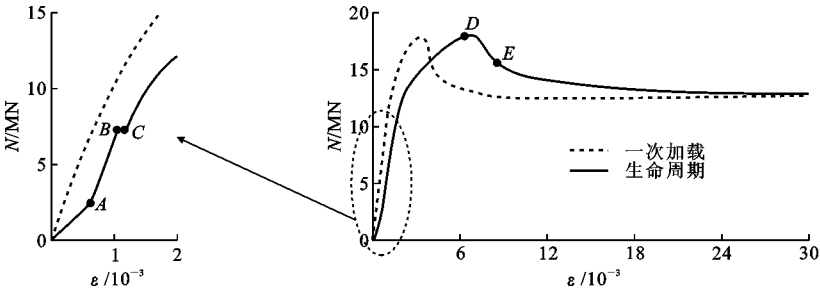


图4 轴压短柱荷载-变形全过程关系曲线

Fig. 4 Whole Process Load-deformation Curves of Axial Compression Stub Columns

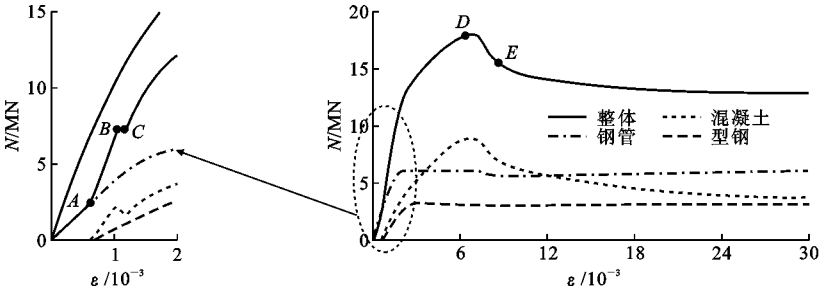


图5 生命周期内的轴压短柱荷载分配曲线

Fig. 5 Load Distribution Curves of Axial Compression Stub Columns in Life Cycle

曲线和荷载分配曲线,根据该类构件的受力特点,在曲线上取5个特征点:A点为初应力结束,即开始施加长期荷载;B点为开始持荷;C点为持荷结束;D点为构件达到极限承载力;E点为荷载下降到极限荷载的85%。

(1)初应力阶段(OA段):此阶段采用力加载的方式给空钢管施加初应力,钢管处于弹性状态,曲线呈线性增长。此时混凝土和型钢处于失活状态,OA段混凝土和型钢不承担荷载。

(2)长期荷载阶段(AB段):此阶段激活混凝土和型钢,采用力加载的方式给构件施加长期荷载,钢管、混凝土和型钢都承担荷载,从图4可知,此时构件刚度和一次加载构件刚度大致相同,由于混凝土和型钢的贡献,AB段刚度大于OA段刚度。

(3)持荷阶段(BC段):构件进行长期持荷,长期荷载值不变,应变随时间增长,BC段荷载-变形曲线呈水平直线,从图5可知,此时混凝土发生卸载,荷载下降30%左右,因为在常应力作用下混凝土产

生徐变,应力降低,混凝土所卸荷载分配给钢材,此时钢材承担的荷载持续增加。

(4)加载破坏阶段(CD段):持荷结束后,采用位移加载使构件达到极限承载力D点,由图5可知,构件达到极限承载力之前,钢材均屈服,混凝土承担的荷载继续增加,混凝土和组合构件同时达到极限承载力,与一次加载相比,构件承载力变化很小,极限承载力对应的应变增长84.2%,但此时构件刚度明显低于一次加载情况,因为初应力和长期荷载会改变混凝土和钢材的受力状态。

(5)下降段(DE段):D点之后,荷载值下降,混凝土应力降低,钢材应力略有提高,构件变形增大,最终发生破坏。

2.2 跨中截面各部件纵向应力分布

为明确该类构件生命周期过程中混凝土和钢材在各特征点处的受力状态,图6~10给出了图4各特征点处构件跨中截面纵向应力分布,拉应力为正,压应力为负。在初应力阶段,混凝土和型钢不参与受力,图6(a),(c)中混凝土和型钢的纵向应力为0。由图6可知,初应力阶段钢管有纵向应力,混凝土和型钢无纵向应力,与图5荷载分配曲线描述情况一致。由图7,8可知,B点到C点混凝土应力减小(主要在型钢翼缘周围),即混凝土发生卸载,而钢材应

力增加,因为长期荷载阶段混凝土有徐变变形,混凝土和钢材之间发生内力重分布,混凝土卸下的荷载分配给钢材,此时混凝土和钢材应力均小于材料极限应力。由图8,9可知,混凝土和钢材应力明显增大,且达到材料极限应力,三组件均屈服,构件到达极限荷载,型钢翼缘先于腹板屈服,因为BC段由混凝土卸下的荷载分配给翼缘较多,腹板较少,翼缘相对于腹板承担更多的荷载。由图10可知,极限荷载 N_u 下降到约 $0.85N_u$ 时,构件中截面处钢管和混凝土变形较大,钢管有侧向鼓曲,混凝土四周区域的应力小于中心区域,因为钢管和混凝土有脱开趋势,钢管对混凝土的约束作用减弱,混凝土中心区域应力较大,因为型钢对混凝土有约束作用,导致此处混凝土应力较大。

2.3 接触应力对比

图11为该类构件不同高度处钢管与混凝土之间相互作用力-应变($P-\epsilon$)曲线。由图11可知,2种情况下的相互作用力变化规律类似,构件 $H/2$ 处相互作用力最大,沿构件纵向向两端减小,因为端板和边界约束对构件的约束较强,限制端部的变形,端部变形小,中截面变形大,导致中截面处相互作用力最大。一次加载过程中,构件纵向应变约为 660×10^{-6} 时,构件中截面处产生相互作用力,生命周期过

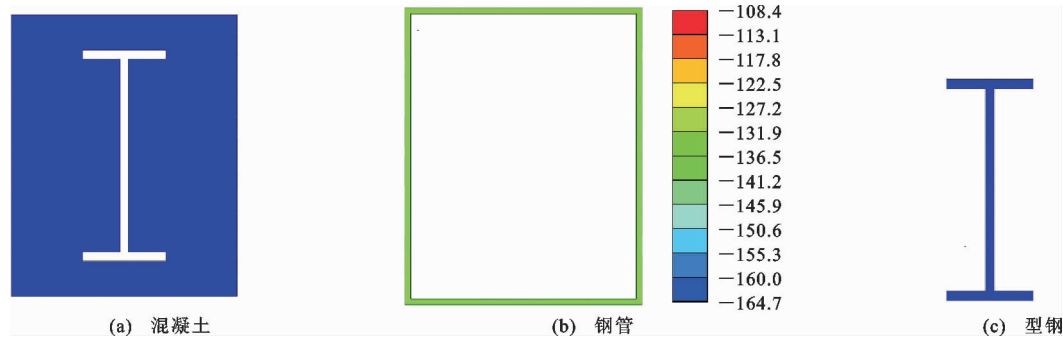


图 6 特征点 A 处各部件跨中截面纵向应力(单位:MPa)

Fig. 6 Longitudinal Stress at Mid-span Section of Each Component at Feature Point A (Unit:MPa)

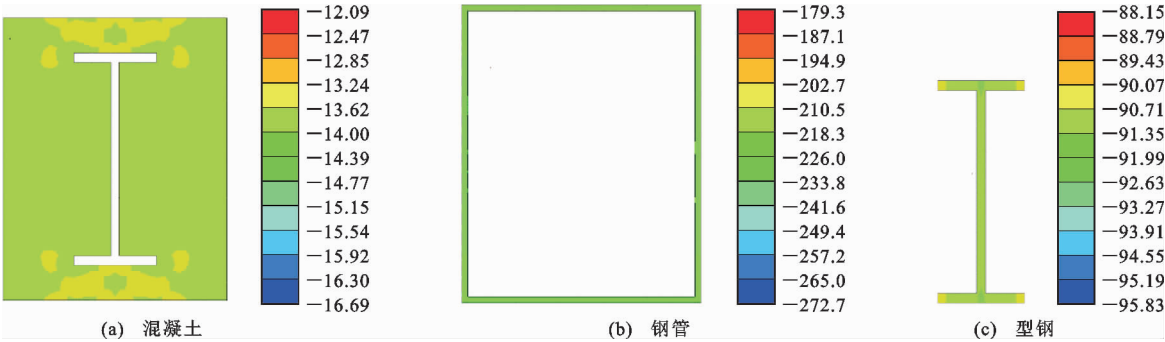


图 7 特征点 B 处各部件跨中截面纵向应力(单位:MPa)

Fig. 7 Longitudinal Stress at Mid-span Section of Each Component at Feature Point B (Unit:MPa)

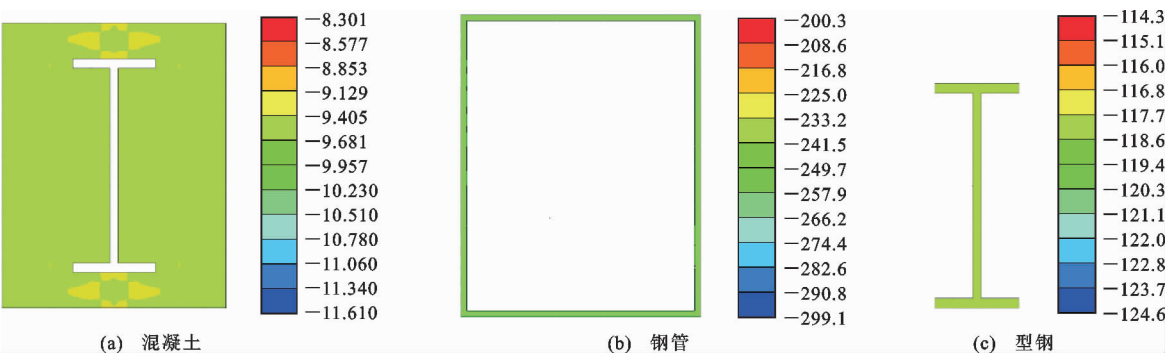


图 8 特征点 C 处各部件跨中截面纵向应力 (单位:MPa)

Fig. 8 Longitudinal Stress at Mid-span Section of Each Component at Feature Point C (Unit:MPa)

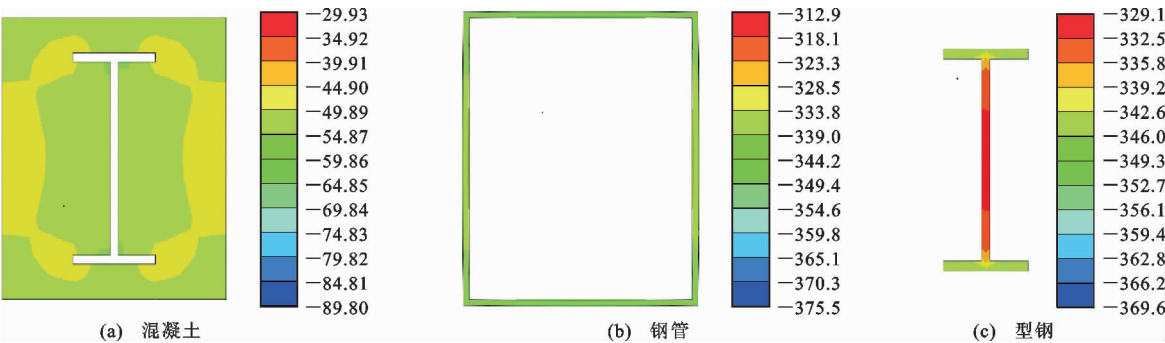


图 9 特征点 D 处各部件跨中截面纵向应力 (单位:MPa)

Fig. 9 Longitudinal Stress at Mid-span Section of Each Component at Feature Point D (Unit:MPa)

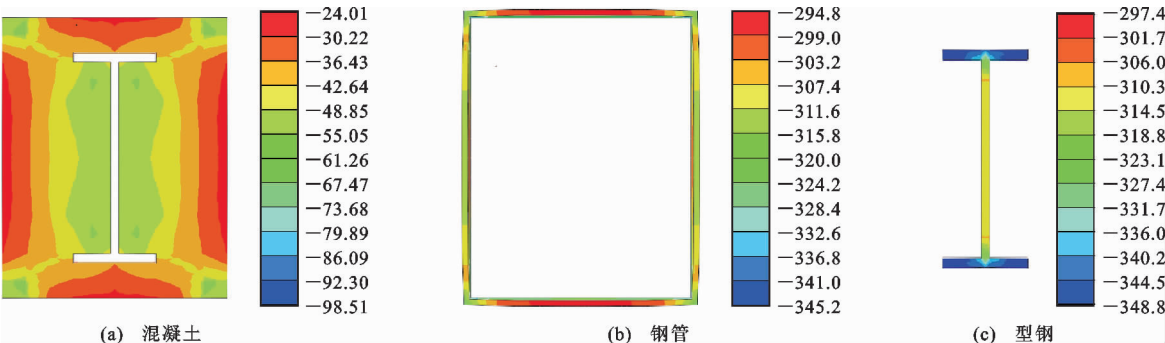


图 10 特征点 E 处各部件跨中截面纵向应力 (单位:MPa)

Fig. 10 Longitudinal Stress at Mid-span Section of Each Component at Feature Point E (Unit:MPa)

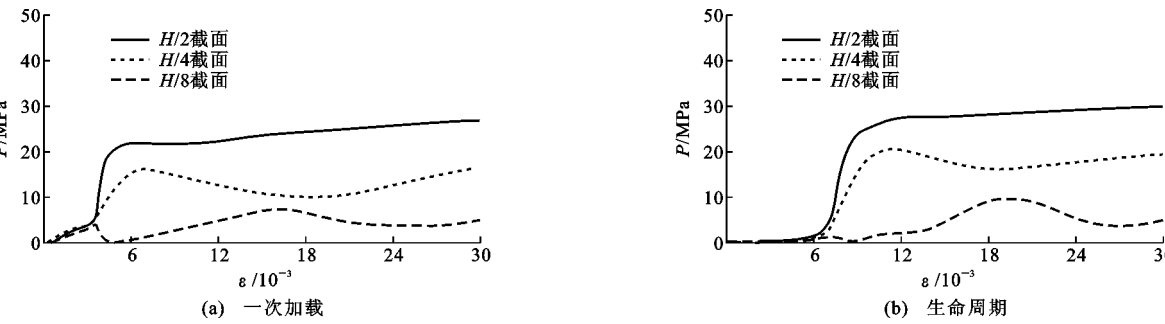


图 11 不同高度处 $P-\varepsilon$ 关系曲线

Fig. 11 $P-\varepsilon$ Curves at Different Heights

程中,构件纵向应变约为 $2\,400\times10^{-6}$ 时,构件中截面处产生相互作用力。因为生命周期过程中的初应力阶段先给钢管施加初应力,钢管产生变形,混凝土不参与受力,且混凝土泊松比小于钢材,钢管横向变形能力大于混凝土,钢管与混凝土之间有脱开趋势,当构件的变形达到一定程度,混凝土横向变形能力大于钢管时,钢管与混凝土之间才会产生相互作用力,所以在生命周期过程中,钢管与混凝土之间产生相互作用力的时间晚于一次加载的情况。

2.4 钢材与混凝土之间的接触应力

图 12 为该类构件生命周期内钢材与混凝土在各特征点处的接触应力云图,在长期持荷阶段,钢管与混凝土之间并没有接触应力的产生,所以图 12 (a),(b)中钢管与混凝土之间的接触应力为 0。初

应力阶段钢材与混凝土之间无接触应力,此时钢管承担初应力,混凝土和型钢未受力。由图 12(a),(b)可知:长期持荷结束之前,钢管与混凝土无接触应力,因为此时钢管横向变形能力大于混凝土,钢管与混凝土有脱开趋势;由 B 点到 C 点,型钢与混凝土的接触应力减小,可能由持荷时混凝土的徐变引起。由图 12(c)可知,钢管与混凝土在构件角部产生接触应力,型钢与混凝土的接触应力增大。由图 12(d)可知,钢材与混凝土的接触应力从构件端部向跨中增大,因为构件达到极限承载力之后,构件端部受到端板和外部的约束,端部变形小,跨中区域变形大,且此时混凝土横向变形能力大于钢材,但混凝土的横向变形又受到钢材的制约,所以钢材与混凝土的接触应力会增大。

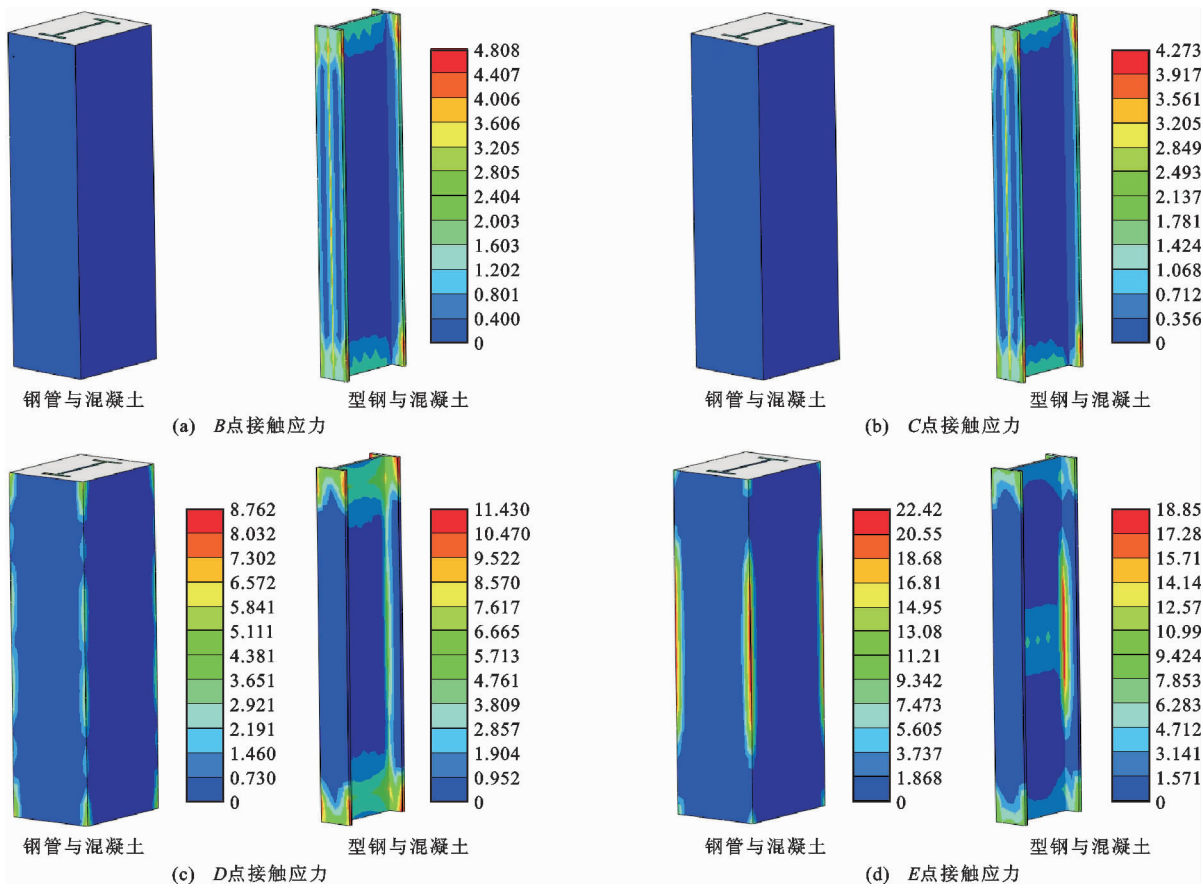


图 12 钢材与混凝土的接触应力云图(单位:MPa)

Fig. 12 Nephograms of Contact Stress Between Steel and Concrete (Unit:MPa)

2.5 生命周期内的承载力对比

表 2 为典型算例的该类构件生命周期内的承载力对比结果,其中, N_{u0} 为轴压柱一次加载时的极限承载力, N_u 为轴压柱各工况下的极限承载力。与一次加载相比,构件在各工况下极限承载力的变化不大,但极限承载力对应的应变变化较大。

图 13 为各荷载工况下构件达到极限承载力时混凝土、钢管和型钢对构件极限承载力的贡献比例。由图 13 可知:一次加载时三部件对承载力的贡献比例分别为 49.6%,33.3%,17.1%;考虑初应力时三部件的贡献比例分别为 48.2%,34.4%,17.4%;考虑长期荷载时三部件的贡献比例分别为 49.6%,

表 2 极限承载力对比

Tab. 2 Comparison of Ultimate Bearing Capacity

编号	荷载类型	N_u/kN	$\epsilon/10^{-6}$	N_u/N_{u0}
1	R	17 921.1	3 463.54	1.000
2	P	17 533.8	3 982.71	0.978
3	L	18 210.2	6 155.03	1.016
4	P+L	17 981.1	6 379.03	1.003

注:R 表示一次加载;P 表示初应力;L 表示长期荷载;P+L 表示生命周期。

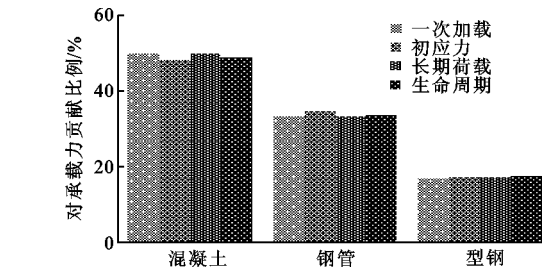
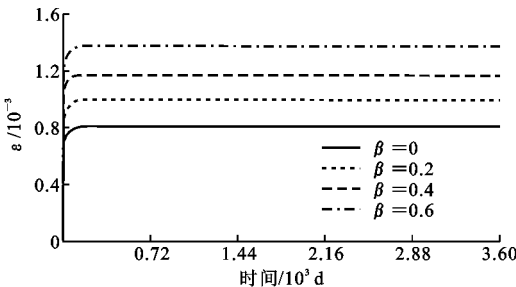
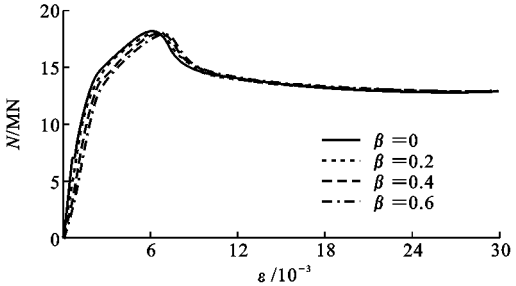


图 13 各部件荷载贡献比例



(a) 长期持荷阶段变形-时间关系曲线



(b) 荷载-变形关系曲线

图 14 初应力系数的影响

Fig. 14 Effect of Initial Stress Coefficient

33.1%,17.3%;考虑生命周期时三部件的贡献比例分别为 48.7%,33.7%,17.6%。

3 参数分析

对影响该类构件生命周期内的荷载-变形曲线和变形-时间曲线的参数进行分析,模型仍采用典型算例模型。分析的主要参数为初应力系数 β 、长期荷载比 n 、钢管含钢率 α_{st} 和型钢含钢率 α_{ss} 。

3.1 初应力系数

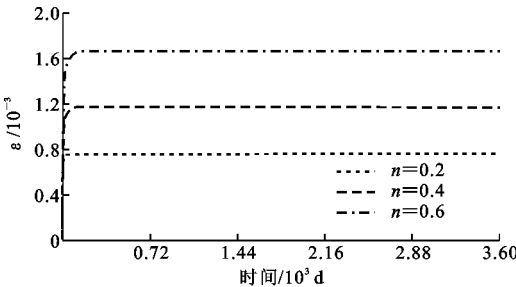
图 14 为初应力系数对变形-时间曲线和荷载-变形曲线的影响, n 为 0.4, β 为 0~0.6。由图 14(a) 可知,不同初应力系数对构件持荷阶段的变形-时间曲线影响较大,变形随着初应力系数的增大而增大。由图 14(b) 可知,不同初应力系数对荷载-变形曲线影响较小。

3.2 长期荷载比

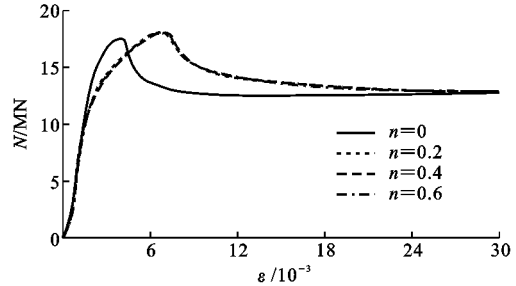
图 15 为长期荷载比对变形-时间曲线和荷载-变形曲线的影响, β 为 0.4, n 为 0~0.6。当 n 为 0 时,构件无持荷阶段,所以无变形-时间曲线。由图 15(a) 可知,长期荷载比对构件持荷阶段的变形-时间曲线影响较大,变形随着长期荷载比的增大而增大。由图 15(b) 可知,长期荷载比对荷载-变形曲线影响较小,与 n 为 0 时相比,构件承载力平均提高 2.6%,极限承载力对应的应变平均增长 66.3%。

3.3 钢管含钢率

图 16 为钢管含钢率对变形-时间曲线和荷载-变形曲线的影响, β 和 n 均为 0.4,假定钢管截面不



(a) 长期持荷阶段变形-时间关系曲线



(b) 荷载-变形关系曲线

图 15 长期荷载比的影响

Fig. 15 Effect of Long-term Load Ratio

变,改变钢管厚度,使 α_{st} 为 0.05~0.20。由图 16(a) 可知,钢管含钢率对持荷阶段的变形影响较大,变形随着钢管含钢率增大而减小,在长期持荷阶段,混凝土比钢管更容易受到长期荷载的影响,随着钢管含钢率增大,横截面混凝土的比重减小,导致构件变形减小。由图 16(b) 可知,钢管含钢率对荷载-变形曲线影响较大,随着钢管含钢率的增大,构件承载力显著增强,原因是钢管越厚,对混凝土的约束作用

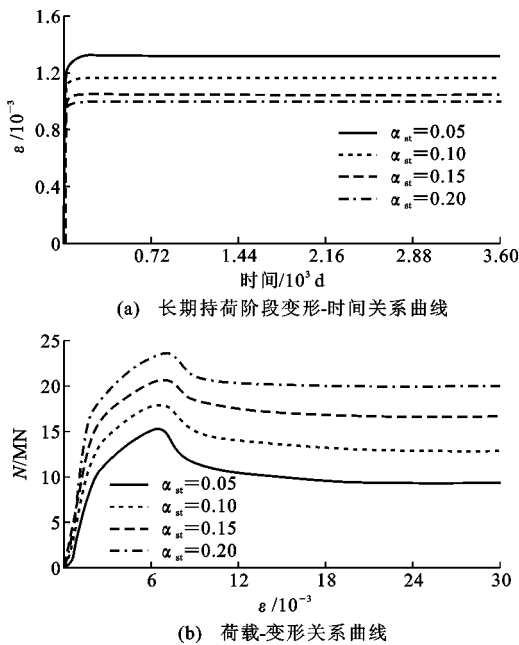


图 16 钢管含钢率的影响

Fig. 16 Effect of Steel Ratio of Steel Tube

越强。

3.4 型钢含钢率

图 17 为型钢含钢率对变形-时间曲线和荷载-变形曲线的影响, β 和 n 均为 0.4, α_{ss} 为 0.03~0.09。由图 17(a)可知,型钢含钢率对构件持荷阶段的变形影响不明显。由图 17(b)可知,型钢含钢率对构件荷载-变形曲线影响较大,随着型钢含钢率的增大,构件极限承载力显著增强。

4 结 语

(1)内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱生命周期内的极限承载力与一次加载相比变化不明显,极限承载力对应的应变增长 84.2%;在生命周期过程中的长期持荷阶段,混凝土发生卸载,其承担的荷载约下降 30%,钢管和型钢承担了混凝土卸下的荷载。

(2)生命周期内,内配型钢矩形钢管混凝土轴压短柱中型钢与混凝土之间的接触应力比钢管与混凝土之间的接触应力出现早;接触应力在跨中截面处最大,沿构件纵向向两端逐渐减小。

(3)参数分析表明:在生命周期内,初应力系数和长期荷载比对该类构件承载力影响较小;钢管和型钢含钢率对该类构件承载力影响较大,增加含钢率可以显著提高构件承载力;初应力系数、长期荷载比和钢管含钢率对构件长期持荷阶段变形影响较大,而型钢含钢率对变形影响不明显。

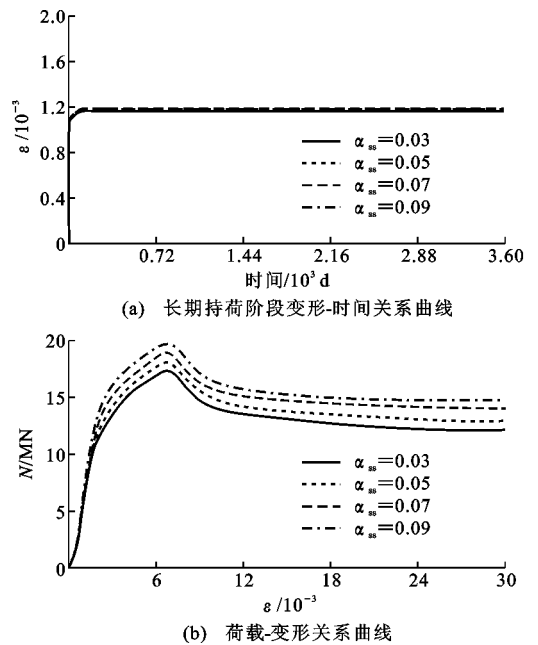


图 17 型钢含钢率的影响

Fig. 17 Effect of Steel Ratio of Profiled Steel

参考文献:

References:

- [1] 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, 2016.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 钟善桐, 查晓雄. 钢管初应力对钢管混凝土构件承载力影响的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(3): 13-22.
ZHONG Shan-tong, ZHA Xiao-xiong. Research of the Influence of Initial Stress in Steel Tube on Load Carrying Capacity for Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Members[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997, 30(3): 13-22.
- [3] 查晓雄, 钟善桐. 用有限元法分析钢管初应力对钢管混凝土轴压构件基本性能的影响[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(1): 41-49.
ZHA Xiao-xiong, ZHONG Shan-tong. The Behavior Effect on Concrete Filled Steel Tubular Members Subjected to Compression Under the Initial Stress of Steel Tube Based on the Finite Element Method[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997, 30(1): 41-49.
- [4] 韩林海, 尧国皇. 钢管初应力对钢管混凝土压弯构件承载力的影响研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 9-18.

- HAN Lin-hai, YAO Guo-huang. Effect of Initial Stress on Bearing Capacity of Concrete-filled Steel Tubular Beam-columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 9-18.
- [5] LI W, HAN L H, ZHAO X L. Axial Strength of Concrete-filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Columns with Preload on Steel Tubes[J]. Thin-walled Structures, 2012, 56: 9-20.
- [6] HUANG F Y, YU X M, CHEN B C, et al. Study on Preloading Reduction of Ultimate Load of Circular Concrete-filled Steel Tubular Columns[J]. Thin-walled Structures, 2016, 98: 454-464.
- [7] 史艳莉, 陈彦玉, 王文达. 钢管初应力对内配型钢钢管混凝土偏压柱受力性能的影响[J]. 建筑科学, 2018, 34(3): 55-62.
- SHI Yan-li, CHEN Yan-yu, WANG Wen-da. Effect of Initial Stresses on Steel Tube on the Behavior of Concrete Filled Tubular Columns with Inner Profiled Steel Subjected to Eccentric Loading[J]. Building Science, 2018, 34(3): 55-62.
- [8] 韩林海, 陶忠, 刘威, 等. 长期荷载作用对方钢管混凝土柱承载力的影响[J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 57-61, 66.
- HAN Lin-hai, TAO Zhong, LIU Wei, et al. Effects of Long-term Loads on the Strength of Concrete-filled Steel Box Columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(3): 57-61, 66.
- [9] 韩林海, 杨有福, 刘威. 长期荷载作用对矩形钢管混凝土轴心受压柱力学性能的影响研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(3): 12-18.
- HAN Lin-hai, YANG You-fu, LIU Wei. The Behavior of Concrete-filled Steel Tubular Columns with Rectangular Section Under of Long-term Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(3): 12-18.
- [10] 史艳莉, 陈彦玉, 王文达. 长期荷载作用下内置钢骨钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(9): 61-68.
- SHI Yan-li, CHEN Yan-yu, WANG Wen-da. Research on Mechanical Behavior of CFST Axial Compressive Stub Column with Encased Profiled Steel Under Long-term Loading[J]. Building Science, 2016, 32(9): 61-68.
- [11] HAN L H, LI Y J, LIAO F Y. Concrete-filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Columns Subjected to Long-term Sustained Loading[J]. Thin-walled Structures, 2011, 49: 1534-1543.
- [12] LIU H, WANG Y X, HE M H, et al. Strength and Ductility Performance of Concrete-filled Steel Tubular Columns After Long-term Service Loading[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 308-325.
- [13] LI W, HAN L H, ZHAO X L. Behavior of CFDST Stub Columns Under Preload, Sustained Load and Chloride Corrosion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 107: 12-23.
- [14] HAN L H, HOU C C, WANG Q L. Behavior of Circular CFST Stub Columns Under Sustained Load and Chloride Corrosion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103: 23-36.
- [15] HAN L H, HOU C, WANG Q L. Square Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Members Under Loading and Chloride Corrosion; Experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 71: 11-25.
- [16] HOU C C, HAN L H. Life-cycle Performance of Deteriorated Concrete-filled Steel Tubular (CFST) Structures Subject to Lateral Impact[J]. Thin-walled Structures, 2018, 132: 362-374.
- [17] LI Y J, LI G, HOU C, et al. Long-term Experimental Behavior of Concrete-encased CFST with Preload on the Inner CFST[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 155: 355-369.
- [18] 李永进. 考虑长期荷载作用影响时钢管混凝土柱的力学性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2009.
- LI Yong-jin. Effects of Long-term Sustained Loads on the Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Columns[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2009.