

文章编号:1673-2049(2019)01-0101-11

薄壁空心钢箱混凝土墩抗震性能参数分析

张国靖¹, 刘永健¹, 侯蓓蓓², 王 灿³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 人民交通出版社股份有限公司, 北京 100011;
3. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要:为了研究薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能,借助 OpenSees 软件建立有限元模型进行分析计算,将计算结果与试验结果进行比较以验证模型的有效性。在此基础上,建立薄壁空心钢箱混凝土桥墩模型,分析了不同轴压比、长细比、截面空心率、截面含钢率、混凝土抗压强度以及钢材屈服强度对该类型桥墩滞回曲线、刚度退化曲线以及滞回骨架曲线的影响规律。结果表明:薄壁空心钢箱混凝土墩具有良好的抗震性能;轴压比和长细比对薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能影响较大,建议薄壁空心钢箱混凝土墩轴压比控制在 0.5 左右,并且在合理范围内尽量减小长细比;截面空心率和截面含钢率对薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能有一定影响;在一定范围内,增大空心率与含钢率可提高桥墩抗震性能;材料强度等级对薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能影响相对较小,削弱混凝土强度并增大钢材屈服强度可小幅提高其抗震性能;研究成果对薄壁空心钢箱混凝土墩在工程实践中的应用具有一定的指导意义。

关键词:薄壁空心钢箱混凝土墩;抗震性能;滞回曲线;刚度退化曲线;滞回骨架曲线

中图分类号:TU312 **文献标志码:**A

Parameter Analysis of Seismic Performance of Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier

ZHANG Guo-jing¹, LIU Yong-jian¹, HOU Bei-bei², WANG Can³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. China Communications Press Co., Ltd, Beijing 100011, China; 3. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: In order to clarify the seismic performance of hollow thin-walled steel-box concrete pier, the finite-element software OpenSees was used to establish finite element model and the calculation results were compared with the test results to verify the validity of the model. On the basis of the work above, the hollow thin-walled steel-box concrete pier models were established, the changing laws of hysteresis curve, stiffness degradation curve and hysteresis skeleton curve of those models were analyzed with different axial compression ratio, length-diameter ratio, hollow ratio and steel ratio of the section, compressive strength of concrete and yield strength of steel. The results show that the hollow thin-walled steel-box concrete pier has good seismic performance. The axial compression ratio and length-diameter ratio have great influences on the seismic performance of hollow thin-walled steel-box concrete pier. It is suggested that the axial compression ratio of hollow thin-walled steel-box concrete piers should be controlled at about 0.5

收稿日期:2018-06-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701202);国家自然科学基金项目(51778058);青海省重点研发计划项目(2017-SF-137)

作者简介:张国靖(1992-),男,陕西榆林人,工学博士研究生,E-mail:izhangguojing@126.com。

通信作者:刘永健(1966-),男,江西玉山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lyj_chd@gmail.com。

and the length-diameter ratio should be minimized within a reasonable range. The section hollow ratio and section steel content have certain influence on the seismic performance of hollow thin-walled steel-box concrete piers. Within a certain range, increasing the hollow ratio and steel content can improve the seismic performance of pier. The influence of material strength grade on the seismic performance of hollow thin-walled steel-box concrete pier is relatively small. The seismic performance of hollow thin-walled steel-box concrete pier can be improved slightly by weakening the compressive strength of concrete and increasing the yield strength of steel. The research results have certain guiding significance for the application of hollow thin-walled steel-box concrete pier in engineering practice.

Key words: hollow thin-walled steel-box concrete pier; seismic performance; hysteresis curve; stiffness degradation curve; hysteresis skeleton curve

0 引言

在地震动荷载作用下,桥墩最易遭到破坏,桥墩结构的滞回性能和耗能能力对桥梁的整体抗震性能有很大影响^[1-2]。相对于传统的钢筋混凝土桥墩,钢管(箱)混凝土结构具有较好的延性和塑性,桥梁墩柱采用此结构可充分发挥其优势^[3]。薄壁钢箱混凝土墩柱是一种新型钢管混凝土桥梁墩柱结构形式,其钢箱宽厚比大于钢结构局部屈曲的控制限值。与普通钢管混凝土结构类似,薄壁钢箱混凝土结构通过钢箱实现对核心混凝土的套箍作用,使混凝土达到三向受压状态,混凝土强度提高,结构塑性和韧性大为改善;核心混凝土对钢箱的支承作用可延缓甚至避免钢箱的局部失稳破坏^[4]。目前针对该新型墩柱抗震性能的研究开展较少,多针对普通钢管混凝土柱。Zhao 等^[5]分析了方钢管混凝土梁在大变形下的滞回性能,并制作 12 个试件进行试验研究,结果表明钢管内填混凝土后具有更好的抗震性能。Sakino 等^[6]制作了 36 个矩形钢管混凝土中、短柱试件,研究其动力性能,结果表明在低周往复荷载作用下,轴压比和截面宽厚比越大,矩形钢管混凝土中、短柱的强度退化现象越明显。El-hewity^[7]对损伤方钢管混凝土进行了拟静力试验,分析得出方钢管混凝土柱在损伤后,其延性和滞回耗能性能下降不大,抗震性能良好。Nakanishi 等^[8]对比分析了空钢管桥墩、方钢管混凝土桥墩以及空心方钢管混凝土桥墩的滞回性能。空心方钢管混凝土结构采用双层钢管,在钢管夹层中填充低强度混凝土。试验结果表明试件进入全面塑性时,空钢管桥墩的刚度迅速退化,而钢管混凝土桥墩的刚度退化现象不明显。

仅有少量学者对大宽厚比或径厚比的薄壁试件

进行过研究。Han 等^[9]制作了 30 个薄壁矩形钢管混凝土柱试件并施加轴向压弯荷载,通过试验研究其在低周往复荷载作用下的滞回性能,并对骨架曲线和位移延性系数进行参数敏感性分析。该研究仅针对实心薄壁钢管混凝土构件,实心桥墩中过多的混凝土会降低构件的延性,在薄壁钢箱内部挖空部分混凝土形成空心钢箱混凝土结构可以在保证薄壁钢箱受力优势的基础上提高桥墩延性,并减轻桥墩自重。本文采用 OpenSees 有限元分析软件建立空心薄壁钢箱混凝土墩纤维模型,并分析轴压比 n 、长细比 λ 、截面空心率 ϕ 、截面含钢率 α 、混凝土抗压强度 f_c 以及钢材屈服强度 f_y 六个参数对其滞回性能的影响规律,研究其抗震性能。

1 有限元模型

OpenSees 有限元分析软件具有丰富的材料模型、单元模型分析选项和较强的非线性地震响应模拟能力,本文采用该软件建立空心薄壁钢箱混凝土桥墩纤维模型,模拟拟静力试验,模型采用平截面假定^[10],并且不考虑截面钢材与混凝土之间的黏结滑移因素^[11]。

1.1 材料本构关系

1.1.1 混凝土应力-应变关系

模型中混凝土采用韩林海^[12]提出的混凝土应力-应变(σ - ϵ)关系(图 1,其中 σ_0 为峰值应力, ϵ_0 为峰值应力对应的峰值应变, ξ 为套箍系数, ξ_0 为峰值应力对应的套箍系数),在达到峰值应力 σ_0 之前,应力-应变为二次正比关系;达到峰值应力之后,应力-应变关系根据套箍系数 ξ 的不同分为 3 种趋势。

1.1.2 钢材应力-应变关系

模型中钢材采用 OpenSees 软件提供的 Steel02 材料应力-应变关系^[13-15],考虑了钢材等向应变硬化

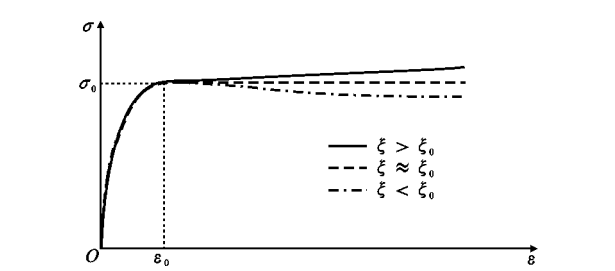


图 1 核心混凝土应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain Curves of Core Concrete

的影响及包辛格效应,骨架曲线为双线性模型。

1.2 单元划分及边界条件

模型选用分布塑性理论的非线性梁柱单元,定义高斯积分点为 5 个。截面纤维划分如图 2 所示,界面按照数量均匀划分。为更好模拟拟静力试验,模型墩底边界条件采用固结约束,墩顶无约束。

1.3 接触关系

钢管与混凝土界面性能沿切线方向采用库仑摩擦模型,其中摩擦因数取 0.3,剪应力界限取 0.462,沿法线方向采用“硬”接触模拟^[16]。

1.4 模型有效性验证

应用 OpenSees 软件对矩形钢管混凝土模型进

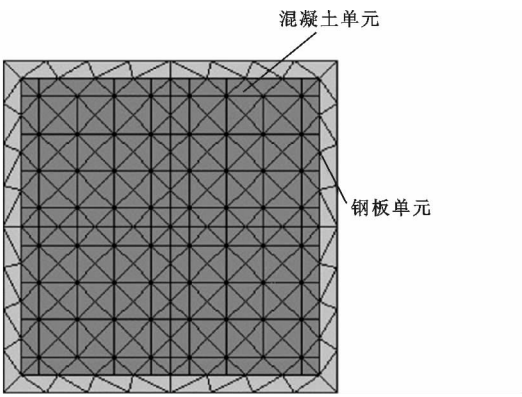


图 2 截面纤维划分

Fig. 2 Section Fiber Division

行非线性分析,按照第 1.1 节和第 1.2 节定义的本构关系及单元类型等参数,参照文献[12]中试验加载方式和构件尺寸,建立有限元模型并对其进行数值模拟,试件设计参数如表 1 所示。

试验结果^[12]和有限元计算的滞回曲线对比见图 3,骨架曲线对比见图 4。通过对比可知,应用 OpenSees 软件建立的模型计算结果与试验结果的荷载-位移($P-\Delta$)滞回关系曲线及骨架曲线总体吻合较好。

表 1 矩形钢管混凝土试件 S100-1 设计参数

Tab. 1 Design Parameters of Rectangular Concrete Filled Steel Tube Specimen S100-1								
试件编号	截面长度 D/mm	截面宽度 B/mm	截面厚度 t/mm	钢材屈服极限 f_y/mm	钢材弹性模量 E_s/MPa	混凝土轴心抗压强度 f_{cu}/MPa	混凝土弹性模量 E_c/MPa	轴向力 N_o/kN
S100-1	100.00	100.00	2.65	340.00	2.07×10^5	20.10	3.53×10^4	23.00

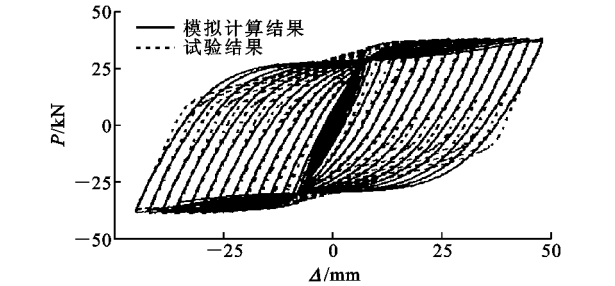


图 3 试件 S100-1 的试验与模拟计算 $P-\Delta$ 滞回曲线

Fig. 3 Test and Simulation $P-\Delta$ Hysteresis Curves of Specimen S100-1

1.5 抗震性能分析参数选取

薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能受轴压比 n 、长细比 λ 、截面空心率 Φ 、截面含钢率 α 、混凝土抗压强度 f_c 以及钢材屈服强度 f_y 的影响,利用 OpenSees 有限元软件建立 59 个数值模型对薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能影响规律进行参数分析。薄壁空心钢箱混凝土墩数值模型截面见图 5,其中, b_s 为加劲肋宽, A_s 为钢箱截面面积, A_c 为混

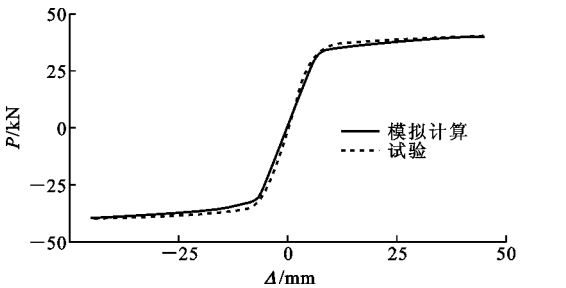


图 4 试件 S100-1 的试验与模拟计算 $P-\Delta$ 滞回骨架曲线

Fig. 4 Test and Simulation $P-\Delta$ Hysteresis Skeleton Curves of Specimen S100-1

凝土截面面积, A_k 为中间空心面积。定义钢箱混凝土墩长细比 $\lambda=L/D$ (L 为钢箱混凝土墩高),截面空心率 $\Phi=A_k/(A_s+A_c+A_k)$,截面含钢率 $\alpha=A_s/(A_s+A_c+A_k)$,取截面长度 $D=275\text{ mm}$,截面宽度 $B=140\text{ mm}$ 。

根据实际工程确定各参数水平的变化范围:轴压比 $n=0\sim 0.8$,长细比 $\lambda=6\sim 14$,截面空心率 $\Phi=50\%\sim 80\%$,截面含钢率 $\alpha=6\%\sim 12\%$,混凝土抗

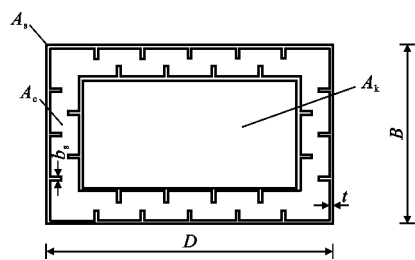


图 5 薄壁空心钢箱混凝土墩数值模型截面

Fig. 5 Section of Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier Numerical Model

压强度 f_c 为 C30~C70, 钢材屈服强度 f_y 为 200~400 MPa, 具体参数见表 2。

2 滞回曲线参数分析

滞回曲线形状是体现构件抗震性能的综合表现, 它可以反映出构件的弹性、非弹性性质及水平承载力、刚度退化等抗震性能^[17-19]。滞回曲线越饱满, 包络面积越大, 表明构件消耗震动能量的能力越强, 抗震性能好。图 6~11 给出了不同参数水平下一部分具有代表性的 $P-\Delta$ 滞回曲线。

表 2 薄壁空心钢箱混凝土墩模型设计分析参数

Tab. 2 Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier Model Design Analysis Parameters

构件编号	轴压比 n	长细比 λ	截面含钢率 $\alpha/\%$	截面空心率 $\Phi/\%$	混凝土抗压强度 f_c/MPa	钢材屈服强度 f_y/MPa
K-n-1	0.0	8	8	75	32.40	345
K-n-2	0.1	8	8	75	32.40	345
K-n-3	0.2	8	8	75	32.40	345
K-n-4	0.3	8	8	75	32.40	345
K-n-5	0.4	8	8	75	32.40	345
K-n-6	0.5	8	8	75	32.40	345
K-n-7	0.6	8	8	75	32.40	345
K-n-8	0.7	8	8	75	32.40	345
K-n-9	0.8	8	8	75	32.40	345
K- λ -1	0.2	6	8	75	32.40	345
K- λ -2	0.2	8	8	75	32.40	345
K- λ -3	0.2	10	8	75	32.40	345
K- λ -4	0.2	12	8	75	32.40	345
K- λ -5	0.2	14	8	75	32.40	345
K- λ -6	0.6	6	8	75	32.40	345
K- λ -7	0.6	8	8	75	32.40	345
K- λ -8	0.6	10	8	75	32.40	345
K- λ -9	0.6	12	8	75	32.40	345
K- λ -10	0.6	14	8	75	32.40	345
K- α -1	0.2	8	6	75	32.40	345
K- α -2	0.2	8	8	75	32.40	345
K- α -3	0.2	8	9	75	32.40	345
K- α -4	0.2	8	10	75	32.40	345
K- α -5	0.2	8	12	75	32.40	345
K- α -6	0.6	8	6	75	32.40	345
K- α -7	0.6	8	8	75	32.40	345
K- α -8	0.6	8	9	75	32.40	345
K- α -9	0.6	8	10	75	32.40	345
K- α -10	0.6	8	12	75	32.40	345
K- Φ -1	0.2	8	8	50	32.40	345
K- Φ -2	0.2	8	8	60	32.40	345
K- Φ -3	0.2	8	8	70	32.40	345
K- Φ -4	0.2	8	8	75	32.40	345
K- Φ -5	0.2	8	8	80	32.40	345

续表 2

构件编号	轴压比 n	长细比 λ	截面含钢率 $\alpha/\%$	截面空心率 $\Phi/\%$	混凝土抗压强度 f_c/MPa	钢材屈服强度 f_y/MPa
K- Φ -6	0.6	8	8	50	32.40	345
K- Φ -7	0.6	8	8	60	32.40	345
K- Φ -8	0.6	8	8	70	32.40	345
K- Φ -9	0.6	8	8	75	32.40	345
K- Φ -10	0.6	8	8	80	32.40	345
K- f_c -1	0.2	8	8	75	20.10	345
K- f_c -2	0.2	8	8	75	26.80	345
K- f_c -3	0.2	8	8	75	32.40	345
K- f_c -4	0.2	8	8	75	38.50	345
K- f_c -5	0.2	8	8	75	44.50	345
K- f_c -6	0.6	8	8	75	20.10	345
K- f_c -7	0.6	8	8	75	26.80	345
K- f_c -8	0.6	8	8	75	32.40	345
K- f_c -9	0.6	8	8	75	38.50	345
K- f_c -10	0.6	8	8	75	44.50	345
K- f_y -1	0.2	8	8	75	32.40	200
K- f_y -2	0.2	8	8	75	32.40	235
K- f_y -3	0.2	8	8	75	32.40	300
K- f_y -4	0.2	8	8	75	32.40	345
K- f_y -5	0.2	8	8	75	32.40	400
K- f_y -6	0.6	8	8	75	32.40	200
K- f_y -7	0.6	8	8	75	32.40	235
K- f_y -8	0.6	8	8	75	32.40	300
K- f_y -9	0.6	8	8	75	32.40	345
K- f_y -10	0.6	8	8	75	32.40	400

对比不同轴压比作用下的滞回曲线(图 6)可知:当轴压比为 0 时,滞回曲线包络面积较小,小幅度施加轴压比($n=0.1\sim 0.3$)可以使构件的滞回曲线较为饱满,并且极限承载力也略微增加。当轴压比过大时,随着轴压比的增大,模型滞回曲线包络面积不升反降,滞回性能下降,其原因是过大的轴压比会使薄壁钢箱混凝土墩强化阶段的承载力退化速度加快。

对比不同长细比作用下的滞回曲线(图 7)可知:对于不同的轴压比作用下,构件滞回曲线斜率与长细比均呈负相关,说明构件的初始刚度随着长细比的增大而减小,极限承载力随之降低,顶部极限位移增大;当轴压比较大时,构件滞回曲线包络面积随着长细比的增大而减缩,滞回性能下降,承载能力降低。

对比不同截面空心率下的滞回曲线(图 8)可知:截面空心率与构件滞回性能呈正相关,当轴压比较小时,随着截面空心率的增大,滞回曲线下降幅度减小;当轴压比较大时,随着截面空心率的增大,滞回曲线单次循环包络面积增大。

对比不同截面含钢率下的滞回曲线(图 9)可知:对于不同的轴压比作用下,构件初始刚度与截面含钢率均呈正相关,随着截面含钢率的增大,构件承载能力明显提高;构件滞回曲线包络面积也随着截面含钢率的增大明显膨胀,抗震性能好,在屈服阶段承载力下降较慢。

对比不同混凝土强度下的滞回曲线(图 10)可知:混凝土强度等级对于构件滞回性能的影响较小,对于不同的轴压比作用下,混凝土强度的增大均使得滞回曲线出现捏缩现象,抗震性能减弱。

对比不同钢材屈服强度下的滞回曲线(图 11)可知:对于不同的轴压比作用下,钢材屈服强度增大,可明显减弱滞回曲线的捏缩现象,抗震性能提升。

不同参数水平下薄壁空心钢箱混凝土墩模型的滞回曲线有以下特点:

(1)各模型滞回曲线饱满,说明构件具有良好的抗震性能。在弹性范围内,反复加载后构件刚度变化不大,无显著退化现象,曲线包络面积基本为 0;

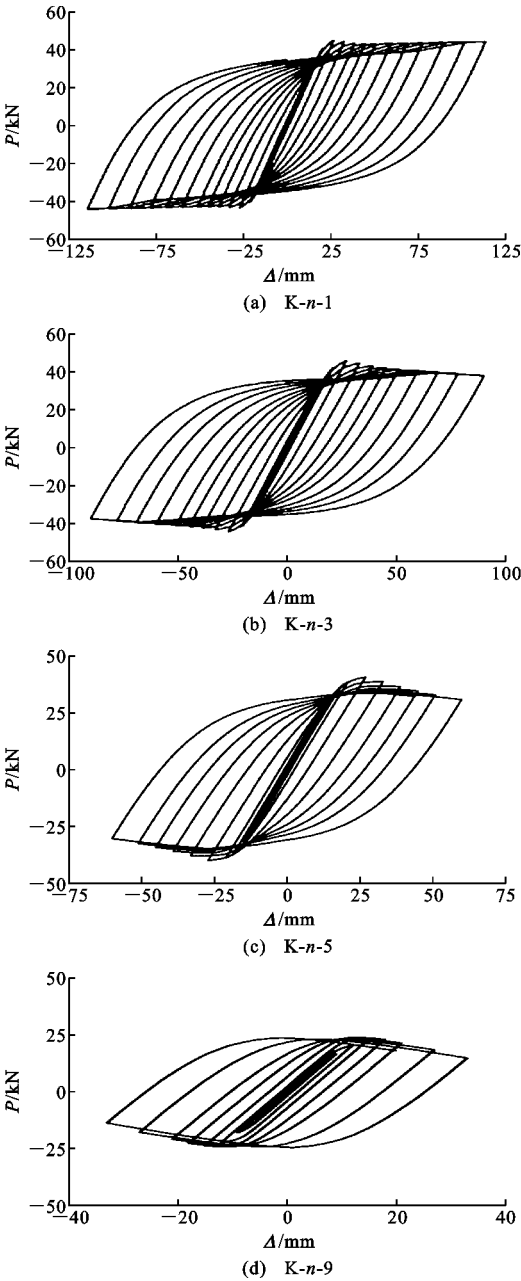


图6 轴压比对薄壁空心钢箱混凝土墩模型滞回曲线的影响
Fig. 6 Influence of Axial Compression Ratio on Hysteresis Curves of Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier Model

在塑性范围内,反复加载后构件发生明显的刚度退化现象,相同位移下对应的构件承载力下降,发生强度退化现象。

(2)构件轴压比对模型滞回性能的影响大致符合抛物线规律,轴压比过大或过小均会使模型滞回性能下降,曲线包络面积减小;小幅增加轴压比可以提高薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能,超过一定限值后,轴压比的增大反而会使构件强化阶段的承载力退化速度加快。构件长细比与滞回性能呈反比

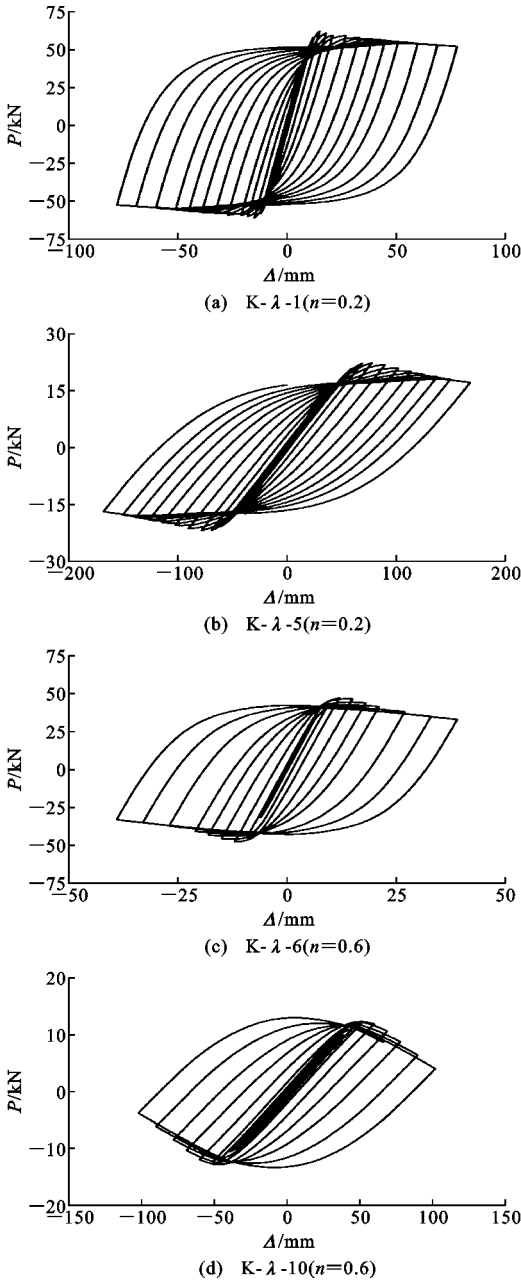


图7 长细比对薄壁空心钢箱混凝土墩模型滞回曲线的影响
Fig. 7 Influence of Length-diameter Ratio on Hysteresis Curves of Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier Model

关系,随着长细比的减小,构件的初始刚度增大,极限承载力升高,滞回性能提升。

(3)截面空心率及截面含钢率与模型滞回性能呈正相关,随着截面空心率及截面含钢率的增大,滞回曲线包络面积增大,模型滞回性能上升。

(4)提高混凝土强度可以提高构件承载力,但同时会减弱构件的滞回性能;提高钢材屈服强度可同时提升构件的承载力和滞回性能。在一定范围内,削弱混凝土强度等级并增大钢材强度可以小幅提高

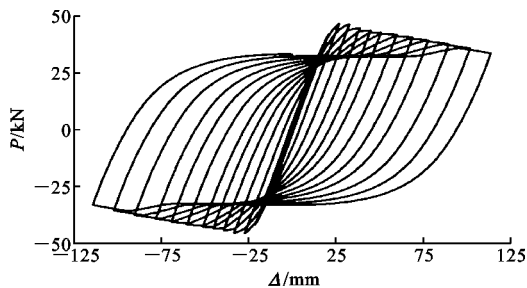
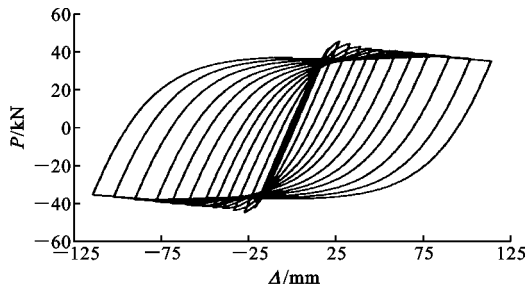
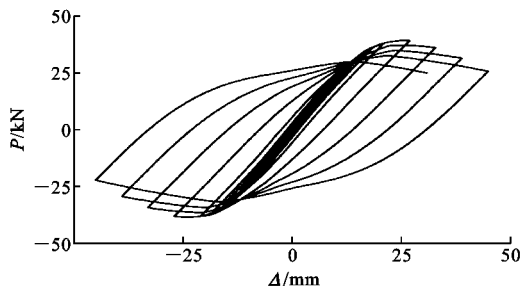
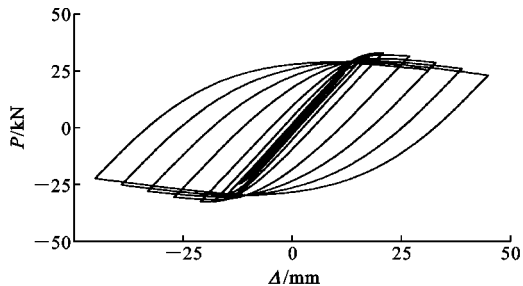
(a) K- Φ -1($n=0.2$)(b) K- Φ -5($n=0.2$)(c) K- Φ -6($n=0.6$)(d) K- Φ -10($n=0.6$)

图 8 截面空心率对薄壁空心钢箱混凝土墩模型滞回曲线的影响

Fig. 8 Influence of Section Hollow Ratio on Hysteresis Curves of Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier Model

构件抗震性能。

3 刚度退化曲线参数分析

从滞回曲线可以看出,构件刚度随着滞回环在变化,滞回环出现了明显的刚度退化现象。为了研究薄壁空心钢箱混凝土墩在循环荷载作用下刚度退化的特点及各参数对退化曲线的影响规律,引入初始刚度与等效刚度进行分析。

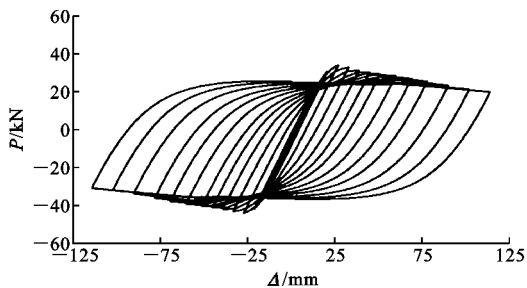
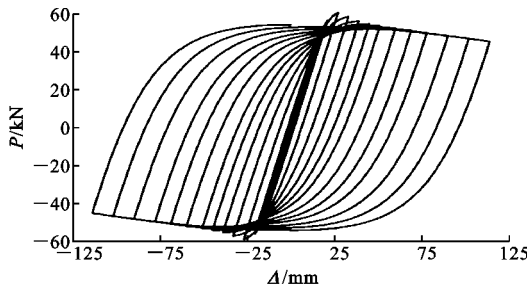
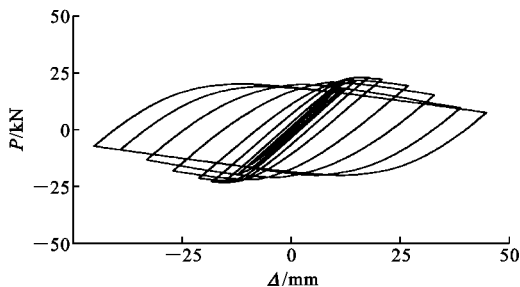
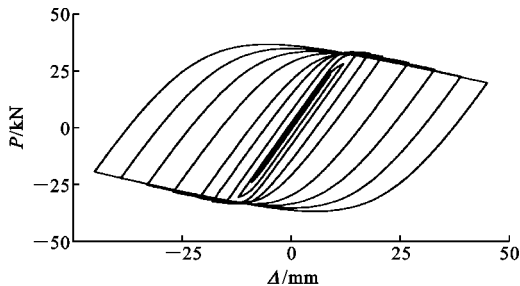
(a) K- α -1($n=0.2$)(b) K- α -5($n=0.2$)(c) K- α -6($n=0.6$)(d) K- α -10($n=0.6$)

图 9 截面含钢率对薄壁空心钢箱混凝土墩模型滞回曲线的影响

Fig. 9 Influence of Steel Ratio on Hysteresis Curves of Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier Model

(1)初始刚度 K_0 。

初始刚度 K_0 为荷载-位移曲线在原点的切线,图 12 中初始刚度主要针对构件处于弹性时的情况。

(2)等效刚度 K_i 。

等效刚度 K_i 也可以称为割线刚度,图 12 中割线刚度为线段 OA 的斜率,按式(1)计算^[20]

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 个水平荷载; Δ_i 为水平荷载 P_i 对应

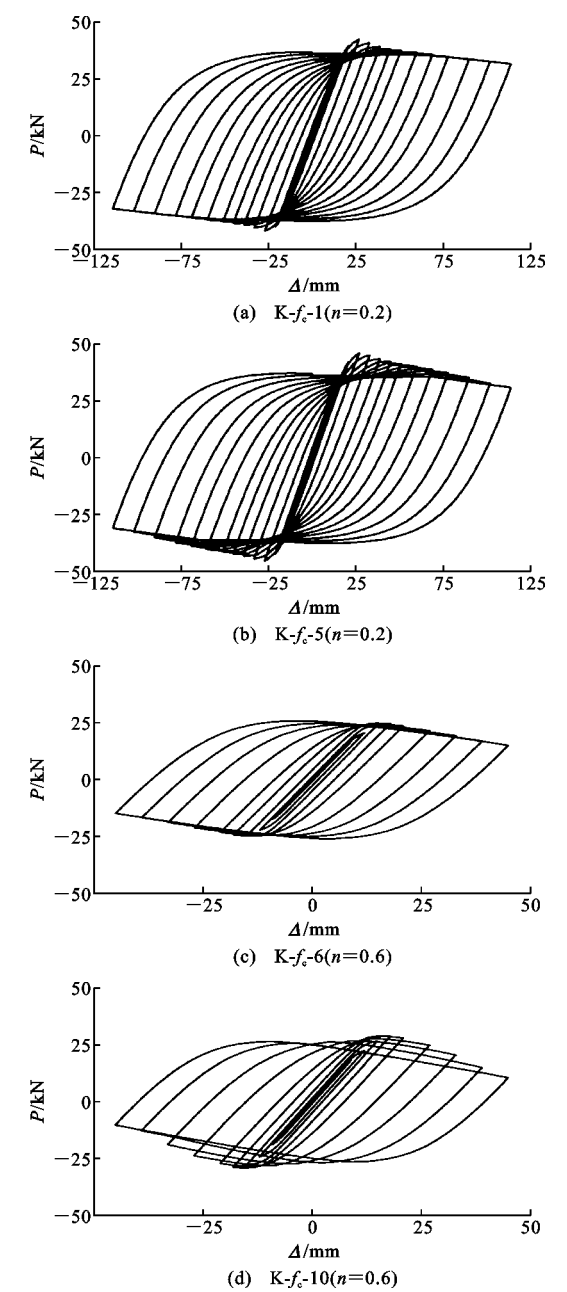


图 10 混凝土强度对薄壁空心钢箱混凝土墩模型滞回曲线的影响

Fig. 10 Influence of Concrete Strength on Hysteresis Curves of Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier Model

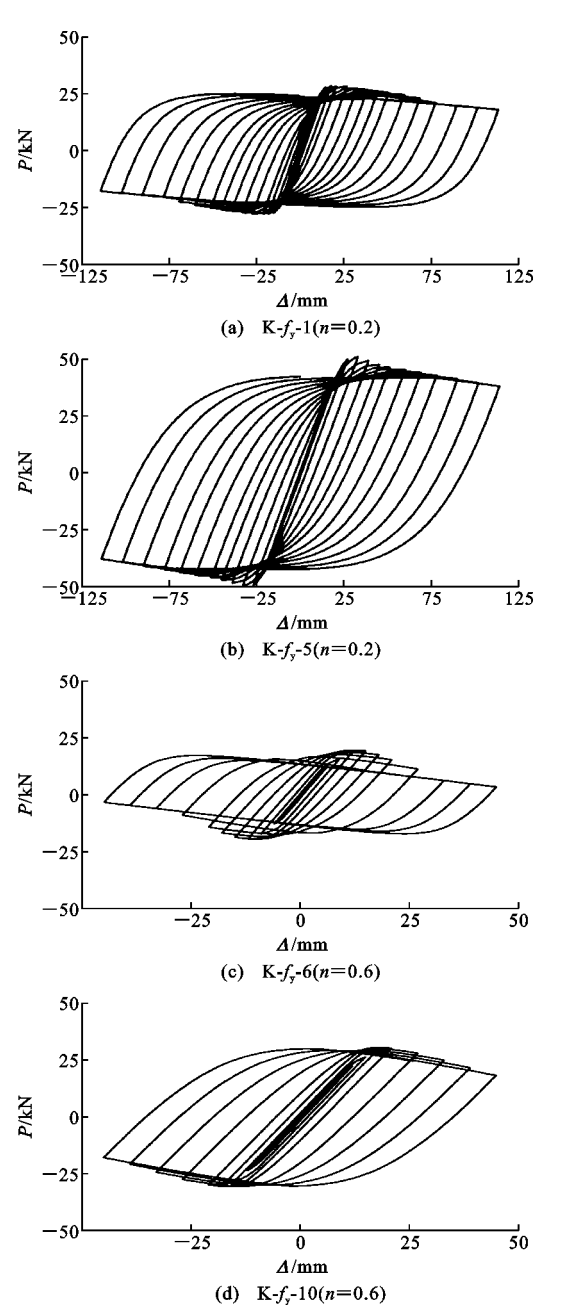


图 11 钢材屈服强度对薄壁空心钢箱混凝土墩模型滞回曲线的影响

Fig. 11 Influence of Steel Yield Strength on Hysteresis Curves of Hollow Thin-walled Steel-box Concrete Pier Model

的位移。

当 $i=0$ 时, K_i 即为初始刚度 K_0 。

薄壁空心钢箱混凝土墩在不同参数水平下的刚度退化规律如图 13 所示,其中 μ 为位移 Δ 与屈服位移 Δ_y 的比值, $K_i/K_0-\mu$ 曲线数值均为量纲一的系数,排除了模型参数影响。

由图 13 可知,刚度退化曲线整体趋势差别不大,在达到屈服位移时刚度退化明显。轴压比对刚

度退化速度有较大影响,随着轴压比的增大,刚度退化速度加快,在小位移阶段,曲线刚度随轴压比的变化幅度较小;当位移达到一定数值后,曲线刚度随轴压比的变化幅度明显增大,刚度退化明显,说明在大位移荷载情况下,单次循环荷载对大轴压比构件破坏更大。长细比对刚度退化速度也有影响,在小位移阶段,长细比较小的构件刚度退化较快;当位移达到一定数值后,长细比较大的构件刚度退化较快。

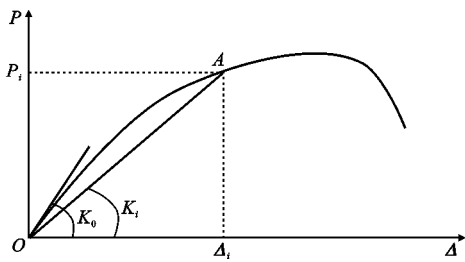
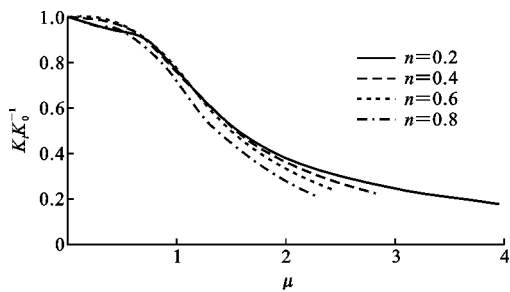
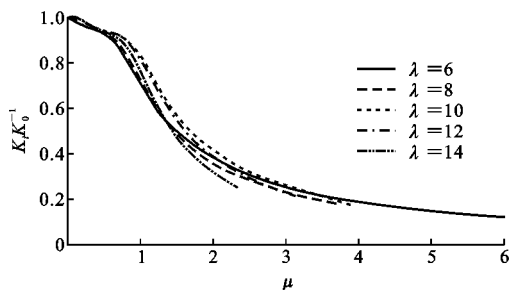


图 12 初始刚度和等效刚度

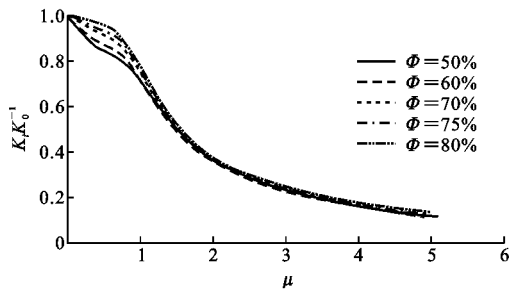
Fig. 12 Initial Stiffness and Equivalent Stiffness



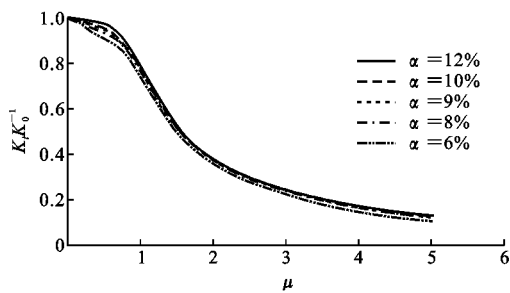
(a) 轴压比对刚度退化的影响



(b) 长细比对刚度退化的影响



(c) 截面空心率对刚度退化的影响



(d) 截面含钢率对刚度退化的影响

图 13 模型刚度退化曲线

Fig. 13 Stiffness Degradation Curves of Model

截面空心率和截面含钢率均影响刚度退化出现时间,随着截面空心率的减小,明显的刚度退化延后出

现,速度减缓;随着截面含钢率的减小,明显的刚度退化提前出现,速度加快。

4 滞回骨架曲线参数分析

在循环加载拟静力试验中,骨架曲线由 $P-\Delta$ 滞回曲线的每一次循环峰值点连接而成,可表达出滞回曲线每级循环峰值点的轨迹,是研究结构塑性地震响应的重要参数。薄壁空心钢箱混凝土墩在不同参数水平下的变化规律如图 14 所示。

由图 14 可知,在参数变化范围内,随着轴压比的增大,初始刚度变化不大,构件极限承载力表现为先增大后减小的趋势,极限位移减小,延性越来越差。相同轴压比条件下,在参数变化范围内,随着长细比的减小,构件初始刚度增大,极限承载力增大,极限位移减小;当轴压比较大时,长细比较小的构件刚度退化明显。截面空心率对滞回骨架曲线的影响与轴压比有关,在轴压比较小时,截面空心率对骨架曲线影响较小;在轴压比较大时,截面空心率的减小会提高构件承载能力,但在后期降幅较大,有明显的刚度退化现象。不同截面含钢率下,骨架曲线的变化规律大致相同,随着截面含钢率的增大,模型初始刚度增大,承载能力提高;不同截面含钢率的构件刚度退化规律基本一致。混凝土抗压强度对滞回骨架曲线的影响与轴压比有关,轴压比较小时,混凝土抗压强度对骨架曲线整体变化规律影响较小;在轴压比较大时,随着混凝土强度等级的增大,构件承载能力上升,但刚度退化严重。钢材强度对构件滞回骨架曲线的整体变化规律影响较小,对初始刚度和刚度退化几乎无影响,但随着钢材强度等级的增大,构件承载能力增大。

5 结 语

(1)薄壁空心钢箱混凝土墩模型滞回曲线饱满,说明其具有良好的抗震性能。薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能对轴压比变化较为敏感:小幅增大轴压比可以提高构件的极限承载能力和抗震性能;超过一定限值后,轴压比的增大反而削弱构件的滞回性能。在大位移阶段,滞回曲线刚度随轴压比的变化幅度明显增大,刚度退化明显,单次循环荷载对大轴压比构件有较大破坏。因此,建议对于薄壁空心混凝土构件,轴压比的取值应控制在 0.5 左右。

(2)薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能受长细比的影响较大:长细比的增大对抗震性能有削弱作用,构件初始刚度及承载能力均明显减弱,墩顶位移

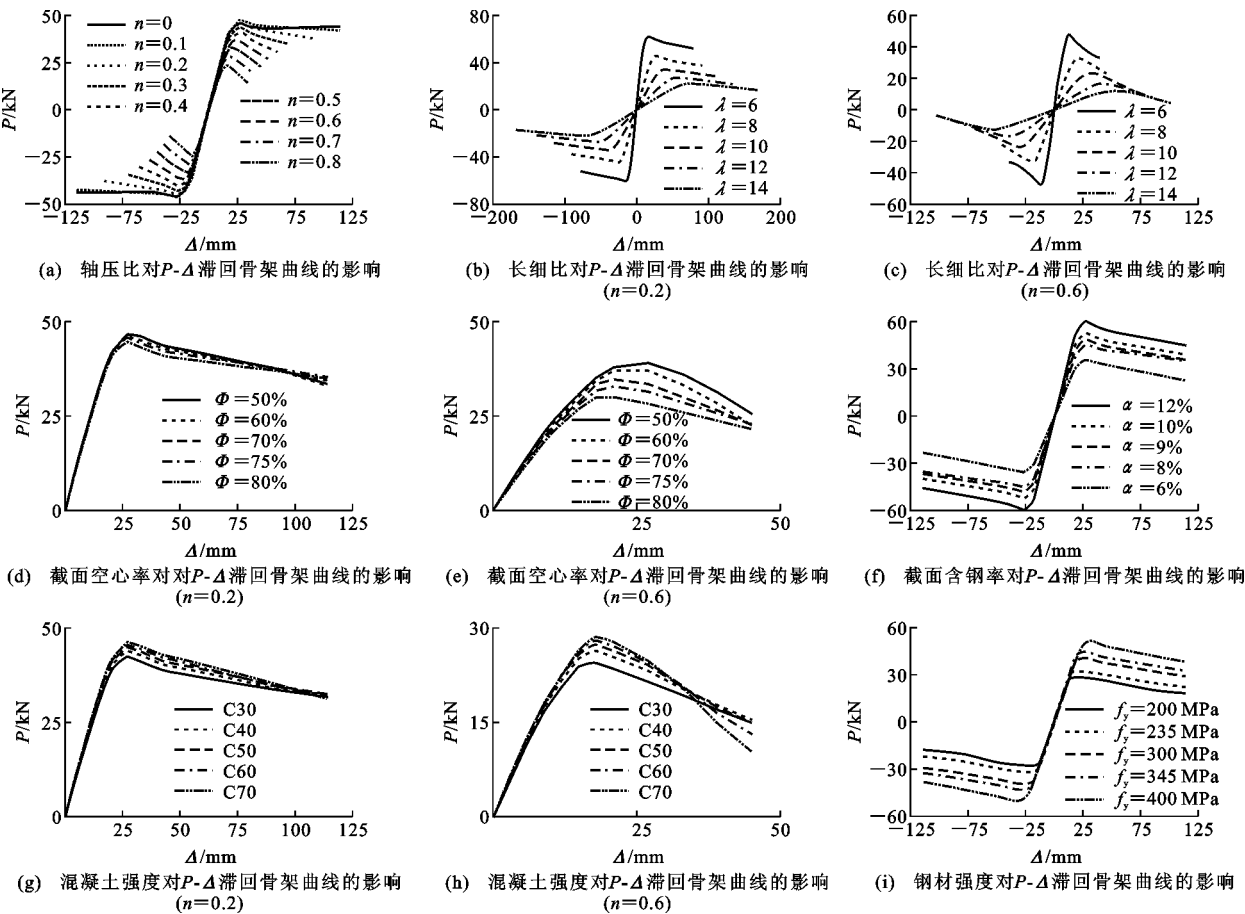


图 14 模型滞回骨架曲线

Fig. 14 Hysteresis Skeleton Curves of Model

增大。截面空心率和截面含钢率对薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性能有一定影响:在不改变桥墩截面的基础上,增大截面空心率对承载能力有一定的削弱,但可以提高构件的滞回性能;增大截面含钢率可同时提高构件的承载能力和抗震性能。材料强度等级对薄壁空心钢箱混凝土墩的抗震性影响相对较小,在一定范围内,削弱混凝土强度并增大钢材屈服强度可小幅提高其抗震性能。

参考文献:

References:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's Bridge Engineering Research: 2014 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(5): 1-96.

[2] 王 灿. 基于 OpenSees 的薄壁钢箱混凝土墩柱抗震性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.
WANG Can. Seismic Behaviors Analysis of Concrete-filled Thin-walled Square Steel Box Piers Based on

OpenSees[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.

[3] 蒲北辰, 周绪红, 刘永健, 等. 钢管混凝土组合桁梁桥近、远场抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(5): 118-127.
PU Bei-chen, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, et al. Anti-seismic Performance of CFST Composite Trussed Bridge Caused by Near-field and Far-field Earthquakes[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2018, 35(5): 118-127.

[4] 武旭升, 彭育芬, 张晓飞. 干海子大桥非标准尺寸管径钢管现场卷制技术[J]. 铁道建筑技术, 2010(9): 74-76.
WU Xu-sheng, PENG Yu-fen, ZHANG Xiao-fei. Site Rolling Production Technique of Nonstandard Size Caliber Steel Tube in Ganhaizi Bridge[J]. *Railway Construction Technology*, 2010(9): 74-76.

[5] ZHAO X L, GRZEBIETA R. Void-filled SHS Beams Subjected to Large Deformation Cyclic Bending[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(9): 1020-1027.

[6] SAKINO K, TOMMI M. Hysteretic Behavior of Con-

- crete Filled Square Steel Tubular Beam-columns Failed in Flexure[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1981, 3(6): 439-446.
- [7] EL-HEWEITY M M. On the Performance of Circular Concrete-filled High Strength Steel Columns Under Axial Loading[J]. Alexandria Engineering Journal, 2012, 51(2): 109-119.
- [8] NAKANISHI K, KITADA T, NAKAI H. Experimental Study on Ultimate Strength and Ductility of Concrete Filled Steel Columns Under Strong Earthquake[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 51(3): 297-319.
- [9] HAN L H, YANG Y F, TAO Z. Concrete-filled Thin-walled Steel SHS and RHS Beam-columns Subjected to Cyclic Loading[J]. Thin-walled Structures, 2003, 41(9): 801-833.
- [10] 叶爱君, 管仲国. 桥梁抗震[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- YE Ai-jun, GUAN Zhong-guo. Seismic Design of Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [11] TAO Z, HAN L H, WANG D Y. Experimental Behaviour of Concrete-filled Stiffened Thin-walled Steel Tubular Columns[J]. Thin-walled Structures, 2007, 45(5): 517-527.
- [12] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [13] 陈学伟, 林哲. 结构弹塑性分析程序 OpenSEES 原理与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- CHEN Xue-wei, LIN Zhe. Structural Nonlinear Analysis Program OpenSEES Theory and Tutorial [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [14] KIM D K. Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Wall Structure Using Macro Model[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2016, 10(1): 99-112.
- [15] SPACONE E, FILIPPOU F C, TAUCER F F. Fiber Beam-column Model for Non-linear Analysis of R/C Frames; Part I. Formulation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 25 (7): 711-725.
- [16] 周绪红, 刘永健, 姜磊, 等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土结构力学性能研究综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(11): 45-62.
- ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, JIANG Lei, et al. Review on Mechanical Behavior Research of Concrete Filled Rectangular Hollow Section Tube Stiffened with PBL[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11): 45-62.
- [17] 韩林海, 游经团, 杨有福, 等. 往复荷载作用下矩形钢管混凝土构件力学性能的研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(11): 11-22, 77.
- HAN Lin-hai, YOU Jing-tuan, YANG You-fu, et al. Behavior of Concrete-filled Steel Rectangular Hollow Sectional Columns Subjected to Cyclic Loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(11): 11-22, 77.
- [18] 何文辉, 范云蕾, 肖岩, 等. 高强螺栓端板连接钢梁-方钢管混凝土框架结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 18-29.
- HE Wen-hui, FAN Yun-lei, XIAO Yan, et al. Seismic Behaviors of High-strength Bolted End-plate Connected Composite Steel Beam and Square Concrete Filled Steel Tube Column Frames [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4): 18-29.
- [19] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [20] 叶家喜. 钢管约束钢筋高强混凝土短柱抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- YE Jia-xi. Experimental Research on Seismic Behavior of Steel Tube Confined Reinforced High-strength Concrete Short Columns [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.