第43卷 第10期
2011年10月

哈 尔 滨 工 业 大 学 学 报
JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Vol. 43 No. 10
Oct. 2011

方钢管混凝土中钢管屈曲承载力研究

郭兰慧,戎 芹,张素梅

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨, guolanhui@hit.edu.cn)

摘 要: 钢管混凝土中钢管的高厚比越大,用钢量越少越经济,但当高厚比超过一定限值后钢管仍不可避免地产生局部屈曲;因此研究钢管混凝土中钢管的屈曲性能对于薄壁钢管混凝土设计具有重要指导意义. 本文对24根空钢管和钢管填充混凝土后钢管的力学性能进行试验研究,试件的宽厚比为50~125;同时采用有限元软件Abaqus分析了钢管混凝土中钢板的屈曲性能,数值分析结果和理论分析结果进行对比,两者吻合较好. 结果表明:钢管填充混凝土后改变了钢管的屈曲模式,明显提高了钢管的屈曲承载力,承载力的提高幅度随截面宽厚比的增加而增大.

关键词: 方钢管;填充;屈曲应力

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)10-0006-06

Buckling strength of square hollow section steel filled with concrete

GUO Lan-hui, RONG Qin, ZHANG Su-mei

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, guolanhui@hit.edu.cn)

Abstract: It is very important for the design of composite columns to accurately evaluate the maximum depth-to-thickness ratio for which local buckling can be ignored and to determine the actual bearing capacities of slender columns which are influenced by local instabilities. This paper studied the behavior of bare steel tube and steel tube filled with concrete subjected to axial load. A total of 24 specimens were tested. The main parameter is breadth-to-thickness ratio, which varies from 50 to 125. Also, the finite element software Abaqus was applied to analyze the behavior of hollow steel tube filled with concrete, whose accuracy were validated by comparing with the corresponding experimental results. The results showed that the concrete in the steel tube can increase the buckling bearing capacity evidently with the increase of breadth-to-thickness ratio.

Key words: square hollow section; filled with; buckling stress

钢管混凝土是在空钢管中填充混凝土而形成的构件,根据截面形式的不同可分为:圆钢管混凝土、矩形钢管混凝土和多边形钢管混凝土. 方钢管混凝土是矩形钢管混凝土的一种特殊形式,方钢管混凝土的承载力虽然没有圆钢管混凝土高,但是由于其截面相对开展,抗弯刚度大,抗弯能力好,节点构造简单及易于装修等优点,在实际工程中逐渐得到应用.

钢管中填充混凝土后,内部混凝土的存在使得钢管的屈曲模式与空钢管有所不同,钢管内部混凝土的存在将会阻止钢管向内产生凹曲. 已有关于薄壁钢管混凝土分析,大都分析钢管混凝土中钢管的屈曲承载力,在分析过程中假定钢管中的钢板发生屈曲时为四边固接的边界条件,产生屈曲时钢板只能向一侧鼓曲. 对钢管混凝土,当钢管越薄时,用钢量越少,柱子越经济;另一方面,在高层建筑中底层柱的钢管壁往往较厚,给焊接带来一定困难,因此在实际应用时也倾向于采用薄壁钢管混凝土;而随着钢板厚度的减小,对应宽厚比增大,当壁厚超过一定限值后,不可避免的会出现局部屈曲,因此有必要对钢管混凝土中钢管的屈曲性能进行研究.

目前各国对轴压构件宽厚比限值的规定有所不同. 当采用Q235钢材时,规程LRFD、EC4、AIJ和《矩

收稿日期: 2010-06-09.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59808004).
作者简介: 郭兰慧(1978—),男,博士,副教授;
张素梅(1963—),女,教授,博士生导师.

形钢管混凝土结构技术规程》对应轴心受压构件中钢板的宽厚比限值分别为 50.5、52、71.6、60. 可以看出各国对矩形钢管混凝土的宽厚比限值还存在一定差别,本文将对此进行试验研究和理论分析.

对于钢管混凝土中钢管屈曲性能的研究主要集中在澳大利亚,Wright、Uy 和 Liang 等分别采用能量法、有限条法和有限元法分析了钢板弹性屈曲承载力[1-5]. 国内,杨晓冰[6]采用能量法和有限条法计算了矩形钢管混凝土中钢板的弹性临界屈曲应力;郭兰慧等[7]采用有限条法分析了钢管混凝土中钢板的弹塑性屈曲承载力;现有的能量法和有线条法不能考虑材料的非线性和钢板的初始几和缺陷,不能考虑钢板的屈曲后性能,而钢板的屈曲后强度能明显提高钢板的屈曲承载力. 本文对不同宽厚比下的空钢管及钢管填充混凝土后的力学性能进行试验研究,同时采用有限元法分析钢管混凝土中钢板的临界屈曲承载力,理论分析结果和试验结果对比,验证了理论分析的正确性,在此基础上回归给出了钢管混凝土中不考虑钢管屈曲时的最大宽厚比限值,同时给出了大宽厚比下钢管混凝土中钢板的临界屈曲承载力.

1　试　验

试验时主要参数截面宽厚比在 50 ~ 125 变化,同时对比空钢管和钢管内部填充混凝土后构件力学性能的异同.

试验中钢管采用厚度为 1.6 mm 的钢板加工制作,在试件加工时采用 2 块折成 L 形的钢板通过对接焊缝连接成矩形钢管,这种制作方法也减小了钢板上焊缝残余应力对构件力学性能的影响. 对于空钢管在加工完后直接在钢管两端各焊接一个 10 mm 厚的端板;对于需要浇筑混凝土的试件来说,由于核心混凝土并不受力,因此在混凝土浇筑前在钢管和混凝土之间设置了一层塑料薄膜,并在塑料薄膜的两侧涂油. 在浇筑混凝土时使混凝土表面比钢管表面低 20 ~ 40 mm (在加载过程中可以保证核心混凝土不受力),由于钢管顶部混凝土与端板之间存在很大的空隙,为了避免端部的空钢管在受力过程中过早产生局部屈曲,因此在试件两端对称布置了纵向加劲肋,加劲肋尺寸按照 GB50017—2003《钢结构设计规范》进行设计,加劲肋厚度为 4 mm. 对于截面高度为 80 和 110 mm 的试件,钢管每一侧面两端各设置一个纵向加劲肋;对于截面宽度为 160 和 200 mm 的试件,钢管每一侧面两端各设置 2 个加劲肋,试件养护一个月以后,焊好另一端端板. 试验时测得钢材的平均屈服强度为 279.9 MPa. 试件的具体尺寸见表 1.

表 1　试件设计尺寸及材料设计强度

截面种类	序号	编号	B/mm	t/mm	L/mm	B/t	f_{ck}/(N · mm^{-2})	f_y/(N · mm^{-2})	N_{cr}/kN
	1	S-80-1-1	79.85	1.600	240	50.3	38.5	235	120.40
1	2	S-80-1-2	79.88	1.600	240	50.2	38.5	235	123.30
	3	S-80-1-3	80.00	1.600	240	50.0	38.5	235	102.15
	4	S-80-2-1	80.49	1.600	240	71.0	38.5	235	131.80
1	5	S-80-2-2	80.24	1.600	240	69.6	38.5	235	146.80
	6	S-80-2-3	80.04	1.600	240	72.0	38.5	235	152.20
	7	S-110-1-1	109.36	1.524	330	100.3	38.5	235	87.97
2	8	S-110-1-2	109.86	1.524	330	102.1	38.5	235	88.20
	9	S-110-1-3	109.97	1.524	330	100.1	38.5	235	100.00
	10	S-110-2-1	109.98	1.550	330	122.2	38.5	235	142.10
2	11	S-110-2-2	109.66	1.575	330	125.0	38.5	235	139.70
	12	S-110-2-3	109.82	1.525	330	122.6	38.5	235	143.50
	13	S-160-1-1	160.01	1.600	480	50.3	38.5	235	95.30
3	14	S-160-1-2	159.54	1.600	480	50.2	38.5	235	90.29
	15	S-160-1-3	160.20	1.600	480	50.0	38.5	235	90.84
	16	S-160-2-1	160.51	1.600	480	71.0	38.5	235	200.65
3	17	S-160-2-2	159.66	1.563	480	69.6	38.5	235	134.97
	18	S-160-2-3	160.10	1.600	480	72.0	38.5	235	187.12
	19	S-200-1-1	199.85	1.600	600	100.3	38.5	235	86.25
4	20	S-200-1-2	199.79	1.600	600	102.1	38.5	235	104.01
	21	S-200-1-3	200.04	1.600	600	100.1	38.5	235	106.42
	22	S-200-2-1	200.14	1.550	600	122.2	38.5	235	215.40
4	23	S-200-2-2	199.98	1.575	600	125.0	38.5	235	239.90
	24	S-200-2-3	200.03	1.525	600	122.6	38.5	235	228.30

注: B 为钢管宽度;t 为钢管壁厚;f_{ck} 为混凝土立方体标准试块的强度;f_y 为钢材的屈服强度.

试验在1 000 kN的压力试验机上进行,试验前在每个试件的中部沿纵向各贴一应变片,在试件两对面中部沿环向各贴一应变片,同时在纵向布置了两个位移传感器来测量试件的纵向变形,用数据采集箱实时采集荷载、应变及位移.

试件采用分级加载制,弹性范围每级荷载为预计极限荷载的1/10,当荷载达到预计极限承载力的80%时,每级荷载为预计极限荷载的1/15,每级荷载持荷2 min,接近峰值承载力慢速持续加载.

2　试验现象及试验结果分析

2.1　试验现象

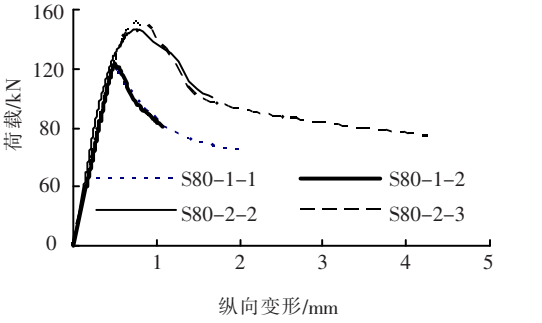
图1给出了空钢管受力后试件的变形,可以看出空钢管中两对面向内发生凹曲变形,与之相邻的钢管两对面发生凸曲变形,相当于钢板可以绕构件角部轴线转动,这与在简化空钢管受力时,钢板可以看成四边简支板的假设相符合.还可以看出,受力之前在钢管壁上画的竖向直线,产生变形以后在平面内仍为直线,说明受力过程中钢板没有产生平面内的变形,钢板只在平面外产生了明显的鼓曲和凹陷变形.在试验过程中钢管的一面产生凹陷或者凸曲变形,其他3面也随之产生明显的变形,4个面产生鼓曲或者凹陷的位置基本上在同一水平面上,鼓曲出现时,试件达到极限承载力,此后承载力随着变形的增加而逐渐降低.对于钢管内部填充混凝土的构件来说,在钢管中部产生了外凸鼓曲变形,当试件一个面出现外凸鼓曲变形时,其他3个面的鼓曲变形也随之产生,此后承载力随着变形的增加而逐渐降低,4个面的鼓曲位置基本上在同一水平面内.试验现象见图2.

2.2　试验结果分析

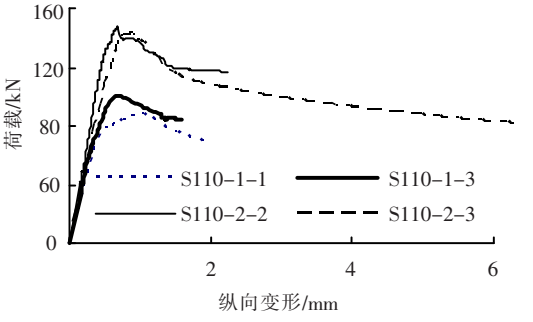
图3对比了尺寸相同的空钢管和内部填充混凝土后钢管的荷载-位移关系曲线.可以看出,在空钢管达到极限承载力前,钢管的荷载-纵向变形关系曲线和内部填充混凝土后的曲线基本重合,说明在钢管内部涂油并设置塑料薄膜可以有效的消除钢管和混凝土之间的粘结力.在本文的试验范围内,截面宽厚比在50~125变化时,钢管内部填充混凝土以后可以有效提高钢管的承载力,而且随着截面宽厚比的增加,截面宽厚比为50时,对应钢管混凝土中钢管的承载力是空钢管承载力的1.227倍,当截面宽厚比提高到125时,对应的承载力比值为1.753,说明相对宽厚比越大,内部填充混凝土后钢管承载力的提高幅度越大.对于空钢管和内部填充混凝土的钢管来说,在达到极限承载力之后,荷载随位移的增加而降低的趋势基本相同.

图1　空钢管试验现象

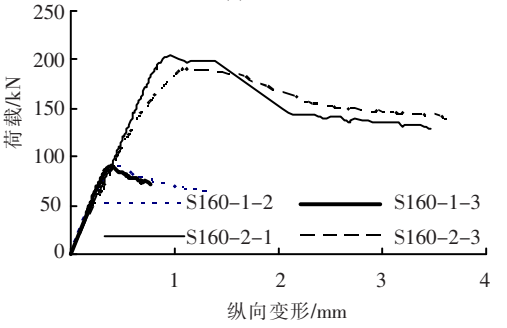
图2　钢管内部填充混凝土后试验现象



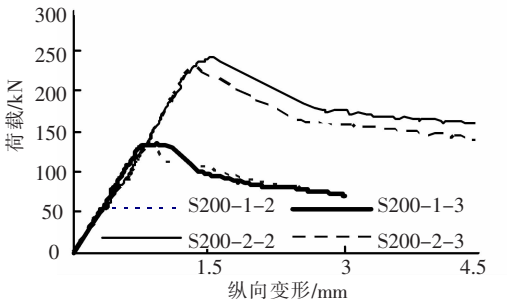
(a)高厚比50



(b)高厚比70



(c)高厚比100



(d)高厚比 125

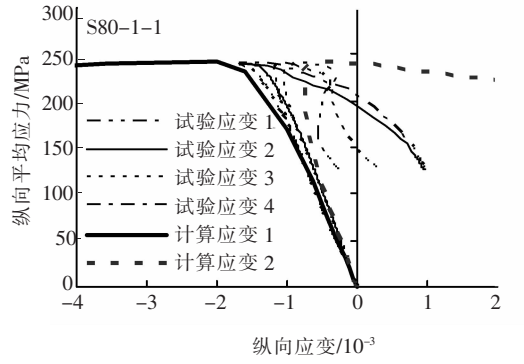
图 3　荷载 - 纵向变形关系曲线对比

3　理论分析与试验结果对比

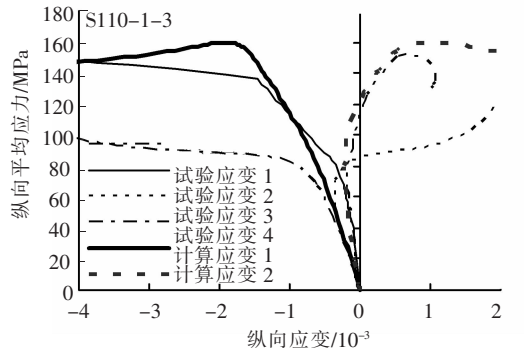
钢管内部填充混凝土后受力模型,采用接触元模拟钢管和混凝土之间的相互作用,当宽厚比较大时,采用接触元模拟会使计算结果收敛比较困难. 文献[4 - 6]的研究表明,对于内部填充混凝土后的钢管,混凝土可以近似看成刚性材料,由于混凝土的支撑作用,钢管只能产生外凸变形,不能向内凹曲,横向出现一个屈曲半波,纵向出现连续波状凸起变形,钢板屈曲时与混凝土接触点处钢板变形曲线的一阶导数为零,2 个一阶导数等于零的点之间板件可看成两边固定的边界条件(即加载边固定),同时由于钢管截面相邻的板件也受核心混凝土的支承不能产生内凹变形,此时板的纵向边不能转动,纵边的边界条件可以看成固接,钢管混凝土中的钢板可以近似简化成四边固接板进行分析. 已有的分析表明可以近似采用四边固接板进行分析,因此在以下分析中采用四边固接板的力学性能来近似代替钢管内部填充混凝土后钢管的力学性能. 用钢板中心的纵向应变来代替钢管内部填充混凝土后钢管中部的纵向应变.

本文采用 Abaqus 有限元软件分析了空钢管及钢管混凝土中钢板的力学性能,钢管采用 S4R 壳单元来模拟. 对于空钢管,采用壳单元建立了空钢管的有限元分析模型;对于钢管混凝土中的钢管则简化成四边固接板进行受力分析. 分析中考虑了钢板的初始几何缺陷,按照构件一阶初始模态的方式施加,最大的变形幅度为板宽的千分之一;采用位移控制的方式在板的两对边施加荷载. 同时分析中考虑了残余应力对钢板屈曲性能的影响,钢板的残余应力假定沿钢板宽度矩形分布,残余拉应力达到钢材的屈服强度,残余压应力和残余拉应力的比值 R 为 0.2. 分析中采用文献[8]给出的钢材本构关系,应力 - 应变关系曲线分为弹性段、弹塑性段和塑性水平段.

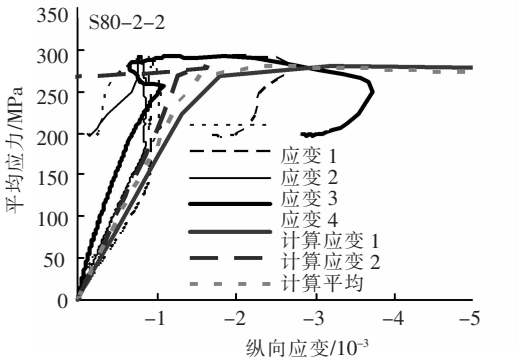
图 4 给出了有限元计算结果和本文试验结果的对比,图中的计算应变 1 指钢板中心正面(正面指向内凹陷的面)的应变,计算应变 2 指钢板中心负面(向外鼓曲的面)的应变,平均应变是钢板中心正面和负面应变的均值.



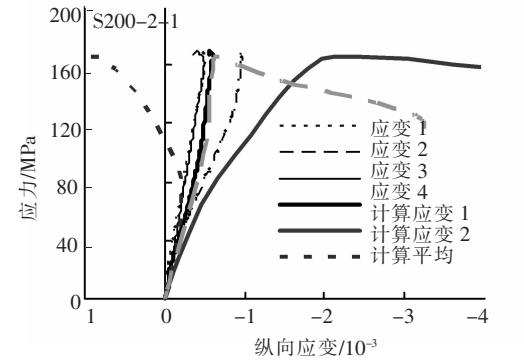
(a)宽厚比 50 的空钢管



(b)宽厚比 69 的空钢管



(c)宽厚比 50 的钢管填充混凝土



(d)宽厚比 160 的钢管填充混凝土

图 4　理论分析结果和试验结果对比

从图 4 可以看出,计算结果和试验结果吻合较

好,计算结果能够反映钢管的实际受力情况. 计算应变 1、2 和试验结果存在一定的差别,但均值吻合较好,产生这种差别的主要原因可能是钢管实际存在的缺陷和计算时所施加的缺陷之间存在一定差别造成的. 对于四边固接板,当截面宽厚比为 50 ~ 125 时,达到极限承载力之前钢管上的应变均为压应变,这与空钢管的受力不同;空钢管中截面宽厚比为 100 和 125 时,在达到极限承载力之前,钢管上则出现了拉应变,试验结果表明四边固接边界条件比四边简支边界条件能明显提高板的屈曲应力. 图 5 为荷载 - 纵向变形关系曲线理论计算结果和试验结果的对比. 二者基本吻合.

4　钢管混凝土中钢管承载力计算方法

文献[9]在理论分析基础上给出了矩形钢管混凝土中大宽厚比钢管承载力的计算式(1),当钢板的相对高厚比低于 50 时,钢管能达到其屈服强度;当钢板的相对宽厚比超过 50 以后,随着钢板高厚比的增加,钢板的屈曲承载力不断降低,此时要考虑钢板局部屈曲对承载力的影响.

采用本文试验结果,同时结合文献[10 - 12]的试验结果和式(1)的计算结果进行对比,具体见表 2. 二者吻合相对较好,计算结果和试验结果比值的均值为 0.969,说明计算结果偏于保守.

$$\begin{cases} \dfrac{f_{cr}}{f_y} = \dfrac{B_e}{B} = 1, & 若 B/t \leqslant 50\sqrt{235/f_y}; \\ \dfrac{f_{cr}}{f_y} = \dfrac{B_e}{B} = 7.4\left(\dfrac{B}{t}\sqrt{\dfrac{f_y}{235}}\right)^{-0.51}, & 若 B/t > 50\sqrt{235/f_y}. \end{cases} \tag{1}$$

表 2　计算结果与试验结果对比

编号	B/mm	t/mm	L/mm	B/t	f_y/(N·mm^{-2})	f_{ck}/(N·mm^{-2})	N_u/kN	f_u/(N·mm^{-2})	f_c/(N·mm^{-2})	f_c/f_u	来源
1	80.49	1.600	240	50.3	279.9	31.2	131.8	261.0	266.7	1.022	本文试验
2	80.24	1.600	240	50.2	279.9	31.2	146.8	291.7	267.4	0.917	
3	80.04	1.600	240	50.0	279.9	31.2	152.2	303.2	267.7	0.883	
4	109.98	1.550	330	71.0	279.9	31.2	142.1	211.4	223.9	1.059	
5	109.66	1.575	330	69.6	279.9	31.2	139.7	205.2	226	1.102	
6	109.82	1.525	330	72.0	279.9	31.2	143.5	217.2	222.2	1.023	
7	160.51	1.600	480	100.3	279.9	31.2	204.1	200.7	187.5	0.934	
8	159.66	1.563	480	102.1	279.9	31.2	133.4	135.0	185.8	1.377	
9	160.10	1.600	480	100.1	279.9	31.2	189.8	187.1	187.8	1.004	
10	200.14	1.638	600	122.2	279.9	31.2	215.4	165.6	169.5	1.023	
11	199.98	1.600	600	125.0	279.9	31.2	239.9	189.0	167.6	0.887	
12	200.03	1.631	600	122.6	279.9	31.2	228.3	176.4	169.2	0.959	
13	82.00	2.142	278	37.30	182.0	16.6	182.1	272.50	225.8	0.829	文献[9]
14	122.00	2.142	418	56.70	182.0	16.6	183.8	260.30	182.3	0.700	
15	162.00	2.142	555	75.10	182.0	16.6	184.2	197.90	157.8	0.798	
16	202.00	2.142	693	93.50	182.0	18.7	210.9	183.70	141.1	0.768	
17	242.00	2.142	830	112.10	182.0	18.5	222.2	164.10	128.6	0.784	
18	282.00	2.142	966	130.70	182.0	21.6	226.1	151.90	118.9	0.783	
19	360.00	3.000	900	120.00	265.0	20.0	650.0	151.73	164.3	1.083	文献[11]
20	420.00	3.000	900	140.00	265.0	20.0	825.0	164.87	151.8	0.921	
21	480.00	3.000	900	160.00	265.0	20.0	750.0	131.03	141.8	1.082	
22	540.00	3.000	900	180.00	265.0	20.0	850.0	131.91	133.5	1.012	
23	126.00	3.000	360	42.00	300.0	40.0	450.0	304.88	308.2	1.011	文献[10]
24	156.00	3.000	600	52.00	300.0	50.0	304.9	265.80	276.3	1.040	
25	186.00	3.000	540	62.00	300.0	32.0	265.8	235.43	252.6	1.073	
26	246.00	3.000	480	82.00	300.0	38.0	235.4	193.07	218.9	1.134	

注:f_u为钢管的峰值应力;f_c为利用式(1)得到钢管的峰值应力;f_c/f_u的均值为 0.969.

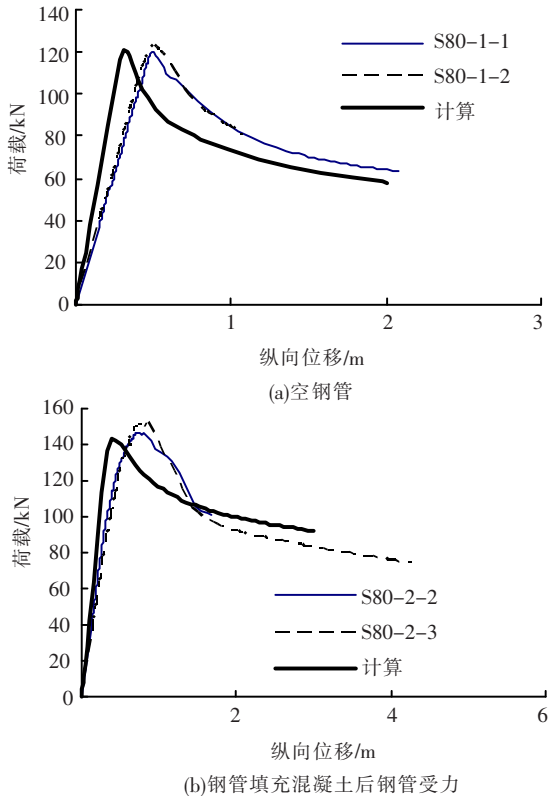


图 5　荷载 – 纵向位移关系曲线对比

5　结　论

1)对空钢管及内部填充混凝土的钢管进行试验研究,结果表明,随着宽厚比的增加,钢管内部填充混凝土后能够明显提高钢管的屈曲承载力,宽厚比为 50 时承载力的提高幅度为 23% ,宽厚比为 160 时的承载力提高幅度为 75%.

2) 采用有限元方法分析了空钢管及钢管混凝土中钢板的力学性能,考虑了初始几何缺陷、残余应力、屈曲后强度等因素的影响,同时和试验结果进行了对比,两者吻合较好,验证了理论分析的正确性.

3) 试验结果和已有的考虑钢管屈曲的承载力计算公式进行对比,验证了公式的合理性;当钢管相对宽厚比高于 50 时,应当考虑钢管局部屈曲对承载力的降低.

参考文献:

[1] WRIGHT H D. Buckling of plates in contact with a rigid medium [J]. The Structural Engineer, 1993, 71 (12): 209 – 215.

[2] WRIGHT H D. Local stability of filled and encased steel sections [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(10):1882 – 1888.

[3] UY B. Inelastic local buckling behaviour of thin steel plates in profiled composite beams [J]. The Structural Engineer, 1994, 72(16):259 – 267.

[4] UY B, BRADFORD M A. Elastic local buckling of steel plates in composite steel-concrete members [J]. Engineering Structures, 1996, 18(3):193 – 200.

[5] LIANG Q Q, UY B. Parametric study on the structural behavior of steel plates in concrete-filled fabricated thin-walled box columns [J]. Advanced in Structural Engineering, 1998, 2(1):57 – 71.

[6] 杨晓冰. 矩形钢管混凝土柱局部屈曲性能研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2002.

[7] 郭兰慧,张素梅, WHA-JUNG K. 钢管填充混凝土后弹性与弹塑性屈曲分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1350 – 1354.

[8] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2002.

[9] 郭兰慧,梅洪元,远芳. 钢管填充混凝土后屈曲承载力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009, 41(4): 27 – 32.

[10] BRIDGE R Q, O'SHEA M D. Behaviour of thin – walled steel box sections with or without internal restraint [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 47(1):73 – 91.

[11] UY B. Local and post-local buckling of concrete filled steel welded box columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 47(1):47 – 72.

[12] UY B. Local and postlocal buckling of fabricated steel and composite cross sections[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(6):666 – 677.

(编辑　赵丽莹)