

钢管初应力对钢管混凝土压弯构件承载力的影响研究

韩林海 尧国皇

(福州大学)

摘要 钢管初应力对钢管混凝土力学性能影响一直是众所关注的问题之一。首先进行了钢管初应力对方钢管混凝土压弯构件力学性能影响的试验研究, 然后对考虑钢管初应力影响时, 圆形和方形钢管混凝土压弯构件的荷载-变形关系曲线进行了理论分析, 计算结果得到试验结果的验证。在此基础上, 分析了初应力系数、构件长细比、截面含钢率, 荷载偏心率、钢材和混凝土的强度等因素的影响规律, 最终提出考虑初应力影响时, 圆形和方形钢管混凝土压弯构件承载力的实用验算方法。

关键词 钢管混凝土 初应力 压弯构件 承载力

中图分类号: TU528.59 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2003) 04-0009-10

EFFECT OF INITIAL STRESS ON BEARING CAPACITY OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR BEAM-COLUMNS

Han Linhai Yao Guohuang
(Fuzhou University)

Abstract

The effect of initial stress on the bearing capacity of concrete-filled steel tubular (CFST) beam-columns are studied in the paper. It is found that these members are susceptible to the effect of initial stress during construction. The load-deformation curve of a CFST beam-column is proposed. The computing results are shown in good agreement with that of the test. Based on the theoretical model, influence of the initial stress ratio, slenderness ratio, strength of the materials, and sectional steel ratio are discussed. At last, formulas for the ultimate strength of a CFST beam-column considered the effect of initial stress are developed.

Key words: concrete-filled steel tube, initial stress, beam-column, ultimate strength

1 概 述

多、高层建筑中采用钢管混凝土柱时, 往往是先安装空钢管, 然后安装梁, 并进行楼板的施工。为了加快施工进度, 提高工作效率, 通常是先安装若干层空钢管柱, 然后再在空钢管中浇灌混凝土。图 1 所示为一种典型的多、高层建筑中钢管混凝土柱施工方式示意图。这样, 在混凝土凝固、与其外包钢管共同组成钢管混凝土构件之前, 由于施工荷载和湿混凝土自重等因素, 可能会在钢管内产生沿纵向的初压应力 (以下简称钢管初应力)。此外, 钢管混凝土拱桥施工时, 往往也是先安装空钢管拱肋, 然后再浇筑钢管内的混凝土, 同样也会产生钢管初应力。上述初应力对钢管混凝土构件力学性能的影响

问题一直是工程界关注的热点问题之一。合理确定钢管初应力对钢管混凝土构件力学性能的影响将对更安全合理地应用钢管混凝土结构和施工组织具有重要意义。

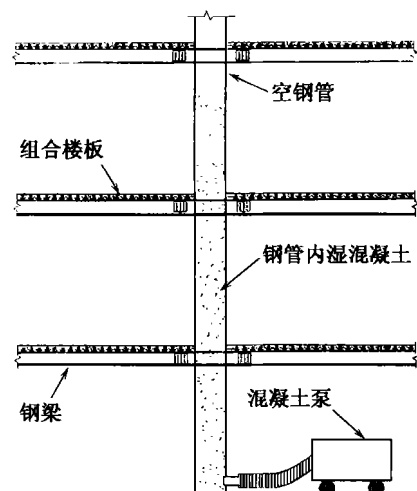


图 1 钢管混凝土柱施工示意图

Fig. 1 Concrete-filled steel tube in construction

收稿日期: 2001-09-15

本项目得到福建省科技计划重大项目 (2002H007) 的资助

钢管初应力对钢管混凝土构件力学性能和承载力的影响的验算方法在各国规程中都没有合理地反映^[1]。文献 [2] 进行了钢管应力对圆钢管混凝土轴压力学性能影响的理论分析和试验研究, 结果表明钢管初应力对圆钢管混凝土轴压力学性能有一定影响, 但对轴压强度承载力影响不大。文献 [3] 进行了 29 个圆钢管混凝土偏压构件的试验研究, 结果表明, 初应力对圆钢管混凝土偏压构件的承载力有较大影响。文献 [4] 对钢管带初应力的钢管混凝土压弯扭构件的荷载-变形关系进行了非线性有限元分析, 较为深入地认识了这类构件的力学性能。文献 [5] 研究了钢管初应力对圆钢管混凝土短柱极限承载力的影响。

以上研究成果为进一步深入研究该课题创造了条件。但存在的不足在于: 没有系统深入考察影响该问题的各个可能因素, 所提供的验算方法也没有很好地考虑这些因素的影响, 例如我国设计规程中 DL5085/T-1999 中仅规定钢管初应力限值为 $0.6f$ (f 为钢材屈服强度设计值) 就过于简化^[6], 文献 [4] 提供的方法则又很复杂, 不便于实际应用。而对方钢管混凝土构件中钢管初应力的影响问题, 目前则尚未见报道。

本文拟首先进行考虑钢管初应力影响时方钢管混凝土压弯构件力学性能的试验研究, 然后对圆形

和方形钢管混凝土压弯构件的荷载-变形关系曲线进行计算分析。在此基础上, 分析初应力系数、构件长细比、截面含钢率, 荷载偏心率、钢材和混凝土的强度等因素的影响规律, 最终推导考虑初应力影响时圆形和方形钢管混凝土压弯构件承载力的实用验算方法。

2 试验研究

2.1 试验概况

共进行了 19 个方钢管混凝土试件的试验, 试件详细参数见表 1。本次试验考虑的因素主要有: 构件长细比 ($\lambda = 2\sqrt{3}L/B$, 其中, L 为试件长度, B 为截面外边长)、荷载偏心率 (e/r , 其中, e 为荷载偏心距; $r = B/2$)、混凝土强度 (f_{cu}) 和初应力系数 (α), 按下式计算:

$$\alpha = \sigma_0 / (f_y) \quad (1)$$

其中, σ_0 为钢管初应力 $\sigma_0 = N_p/A_s$, N_p 为施加在钢管上的初应力, 其值大小见表 1; A_s 为钢管横截面积, η 为空钢管构件轴心受压稳定系数, 按《钢结构设计规范》的有关规定确定^[7]。 f_y 为钢材的屈服极限。

表 1 中, t 为钢管壁厚度。

表 1 试件一览表

Table 1 List of test specimens

序号	试件编号*	$B \times t \times L$ (mm)	e (mm)	e/r	N_p (kN)	f_{cu} (MPa)	E_c (MPa)	N_{ue} (kN)
1	S-1	120 × 2.65 × 360	10	0	0	0	20.1	640
2	SP-1	120 × 2.65 × 360	10	0	211	0.5	20.1	664
3	S-2	120 × 2.65 × 360	10	14	0	0	20.1	533
4	SP-2	120 × 2.65 × 360	10	14	211	0.5	20.1	538
5	S-3	120 × 2.65 × 360	10	0	0	0	36.0	816
6	SP-3	120 × 2.65 × 360	10	0	211	0.5	36.0	812
7	S-4	120 × 2.65 × 360	10	14	0	0	36.0	600
8	SP-4	120 × 2.65 × 360	10	14	211	0.5	36.0	622
9	SP-5	120 × 2.65 × 360	10	14	127	0.3	36.0	650
10	SP-6	120 × 2.65 × 360	10	31	198	0.5	36.0	500
11	L-1	120 × 2.65 × 1400	40	14	0	0	36.0	590
12	LP-1	120 × 2.65 × 1400	40	14	194	0.5	36.0	560
13	L-2	120 × 2.65 × 1400	40	0	0	0	36.0	769
14	LP-2	120 × 2.65 × 1400	40	0	194	0.5	36.0	730
15	LP-3	120 × 2.65 × 1400	40	14	272	0.7	36.0	552
16	LP-4	120 × 2.65 × 1400	40	31	194	0.5	36.0	452
17	L-5	120 × 2.65 × 1400	40	31	0	0	30.0	412
18	LP-6	120 × 2.65 × 1400	40	31	117	0.3	30.0	397
19	LP-7	120 × 2.65 × 1400	40	31	272	0.7	30.0	390

注: *S—表示短试件; P—表示有钢管初应力; L—表示长试件

2.2 试件制作

方钢管由四块钢板拼焊而成, 焊缝按《钢结构设计规范》进行设计^[7]。加工钢管时, 首先按所要求的截面形式和长度加工空钢管, 并保证钢管两端截面平整。对每个试件加工两个厚度为 3mm 的钢板作为试件的盖板, 先在空钢管一端将盖板焊上, 另一端等混凝土浇灌之后再焊接。盖板及空钢管的几何中心对中。钢材材性由标准拉伸试验确定: 将钢板做成三个标准试件进行拉伸试验, 可测得平均屈服强度 (f_y)、抗拉强度 (f_u)、弹性模量 (E_s) 和泊松比 (μ_s)、弹性模量 (E_s) 和泊松比 (μ_s) 分别为: $f_y = 340\text{MPa}$, $f_u = 439.6\text{MPa}$, $E_s = 2.07 \times 10^5\text{MPa}$, $\mu_s = 0.267$ 。

混凝土水灰比为 0.39, 配合比按重量比为水 水泥 砂石 = 195 500 480 1225, 单位为 kg。混凝土 28 天抗压强度 (f_{cu}) 由与试件同条件下成型养护的 150mm × 150mm × 150mm 立方试块测得; 弹性模量 (E_c) 由棱柱体轴心受压试验测得。 f_{cu} 和 E_c 的实测值如表 1 所示。混凝土用料如下: 普通硅酸盐水泥 (对于 $f_{cu} = 20\text{MPa}$ 的情况采用了 325 #, 其它情况采用了 425 #); 中粗砂, 砂率为 0.28; 卵石, 最大粒径为 25mm。

浇灌混凝土时, 先将钢管竖立, 使未焊盖板的一端位于顶部, 从开口处灌入混凝土。采用了分层灌入法, 同时用 $\phi 50$ 振捣棒伸入钢管内部进行完全振捣, 还在试件底部用振捣棒在钢管的外部进行侧振, 以期保证混凝土的密实度。最后将核心混凝土顶部与钢管上截面抹齐平。试件自然养护两周后, 用高强水泥砂浆将混凝土表面与钢管抹齐平, 然后焊上另一盖板, 以期尽可能保证钢管与核心混凝土在试验施荷初期就能共同受力。

在试件顶部和底部分别设置两块厚度为 20mm 的承力端板, 并在其上沿斜对角方向焊有高 100mm、厚 8mm 的加劲肋, 以保证钢承力板有足够的刚度。每块钢承力板上各设有 4 个直径为 22mm 的螺栓孔, 用来穿对试件施加初应力的钢螺丝杆。螺丝杆直径为 20mm, 施加荷载即通过拧紧与螺丝杆相连的螺母进行。施荷采用对称加载办法, 即先将试件行几何对中, 然后依次拧紧各钢拉杆螺丝杆上的螺母, 同时观测设置在试件上的千分表和纵向应变片读数的变化, 保证试件在加载过程中始终处于轴心受压状态。当各拉杆提供的拉力之和达到 N_p 后结束加载。随着时间的推移当试件产生变形后, 试件整体缩短, 拉杆将会产生松弛现象, 从而使施加到试件上的荷载

不断减小, 为了保持试件所受荷载值的恒定, 需不定期通过拧紧拉杆上螺母对试件进行荷载补加。荷载大小由和拉杆相连的拉压传感器控制。初应力施加完毕后的前三天每天补一次荷载, 之后每隔一天补一次荷载, 本次试验过程中发现荷载施加 4 天左右后基本稳定。施荷 6 天后浇灌管内混凝土。混凝土养护过程中, 经测量发现施加在钢管上的初应力基本不会变化。钢管初应力施加后, 试件的情景如图 2 所示。

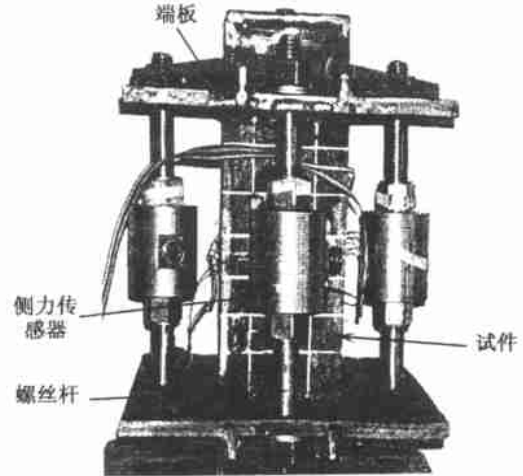


图 2 钢管初应力施加后试件的情景

Fig. 2 General view of the steel tube subjected to initial stress

2.3 试验结果

混凝土养护 28 天后即进行一次压缩实验。试验在福州大学结构中心实验室进行。试验开始时先不撤除施加初应力的螺丝杆, 以期尽可能模拟钢管混凝土柱实际的受力情况。

试件两端采用刀口铰加载以模拟铰接的边界条件。由于各试件的截面尺寸和设计荷载偏心距不尽相同, 为此在试件的两端设置了加荷板, 加荷板由高强钢材制成, 在其上按预定偏心距设置相应条形凹槽。试验过程中压力机的荷载通过刀口铰传到试件上, 刀口铰的刀口与设置在试件两端的加荷板的条形凹槽相吻合, 刀口铰通过螺栓固定在压力机的两端板上。为保证试验安全及试验过程中试件的对中准确, 在加荷板的中心位置处设置一孔径为 21mm、深为 13mm 的圆孔。试验时在试件两端板中心各焊一直径为 20mm、长为 10mm 的凸榫, 和加荷板上的圆孔相吻合。

为了测量试件的变形, 除在每个试件中截面钢板中部沿纵向和环向粘贴 8 片电阻应变片外, 还在试件弯曲平面内沿柱高四分点处, 设置了三个电测位移计, 以测量试件侧向挠度变化, 同时在柱端设置

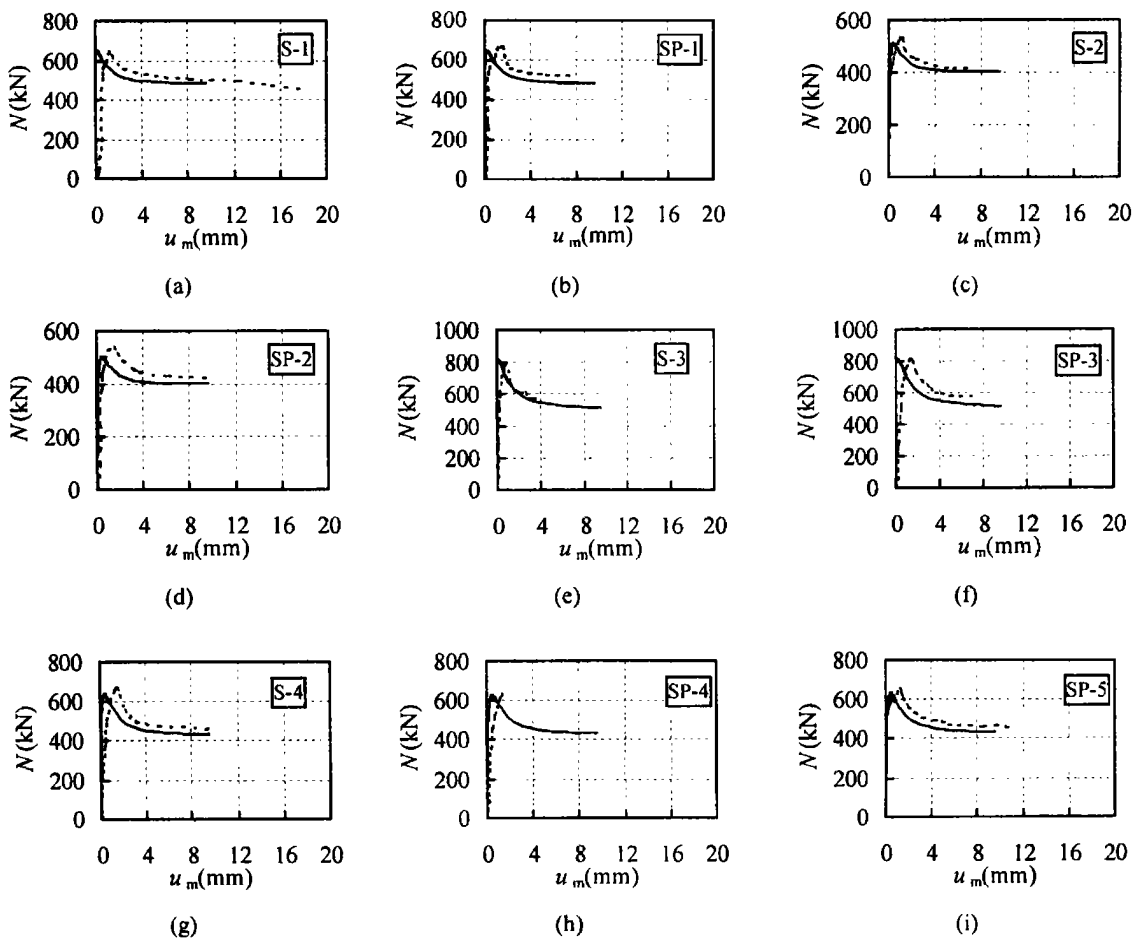
两个电测位移计，以监测试件的纵向变形。数据由 IMP 自动采集系统采集。试验采用分级加载制，弹性范围内每级荷载为预计极限荷载的 1/10，当钢管压区纤维屈服后每级荷载约为预计极限荷载的 1/15，每级荷载的持荷时间约为 1~2 分钟。在承载力试验过程中，发现传感器中的力在不断减小，该力完全消失后即撤除螺丝杆，并继续进行承载力试验。当接近破坏时慢速连续加载，同时连续记录各级荷载所对应的变形值，直至试件最终破坏时停止试验。

对试验全过程观测表明，轴压短柱试件破坏时钢管表面出现若干处局部凸曲，且沿四个方向的凸曲程度基本相同。而轴压长柱和偏压试件破坏均表现为柱子发生侧向挠曲，最终丧失稳定而破坏。当荷载较小时候，跨中挠度变化不大，当达极限荷载的 60%~70% 左右时，跨中挠度明显增加。当跨中挠度达某一临界值后，荷载开始下降，而变形迅速增大。试件在达到破坏状态时，局部出现鼓曲和褶皱，鼓起主要位于试件压区，侧面也有较轻微的鼓起，柱中截面鼓起最为严重，且主要分布在柱中截面上下四分之一区段内。在试件的变形过程中，其

挠曲上下基本对称。从有、无钢管初应力的试件破坏过程和破坏特征的对比可以看出，对于短试件，有无初应力的试件的极限荷载和破坏特征基本相同，对于长试件，有初应力的试件的极限荷载比无初应力试件有所降低，而且跨中挠度增长也比无初应力试件的情况要快。

图 3 中虚线所示为试件实测的荷载 (N) 与中截面挠度 (u_m) 关系。实测的极限承载力 (N_{uc}) 列于表 1。

图 4 所示为实测的不同初应力系数情况下钢管混凝土构件的轴力 (N) 与纤维最大拉应变和最大压应变 (ϵ) 之间的关系 (由于篇幅所限，只给出两组典型的曲线)。结果表明，除个别试件例外，其它条件相同时，初应力的存在有使钢管混凝土构件达极限承载力状态时对应的受压区极限应变增大的趋势，且初应力系数越大，增长的幅度越大。在本次试件参数范围内，对于无初应力的情况，极限荷载对应的压应变在 $4150\mu \sim 8580\mu$ 范围内变化，拉应变在 $33\mu \sim 3961\mu$ 范围内变化；对于有初应力的情况，极限荷载对应的压应变在 $3687\mu \sim 9022\mu$ 范围内变化，拉应变在 $80\mu \sim 6854\mu$ 范围内变化。



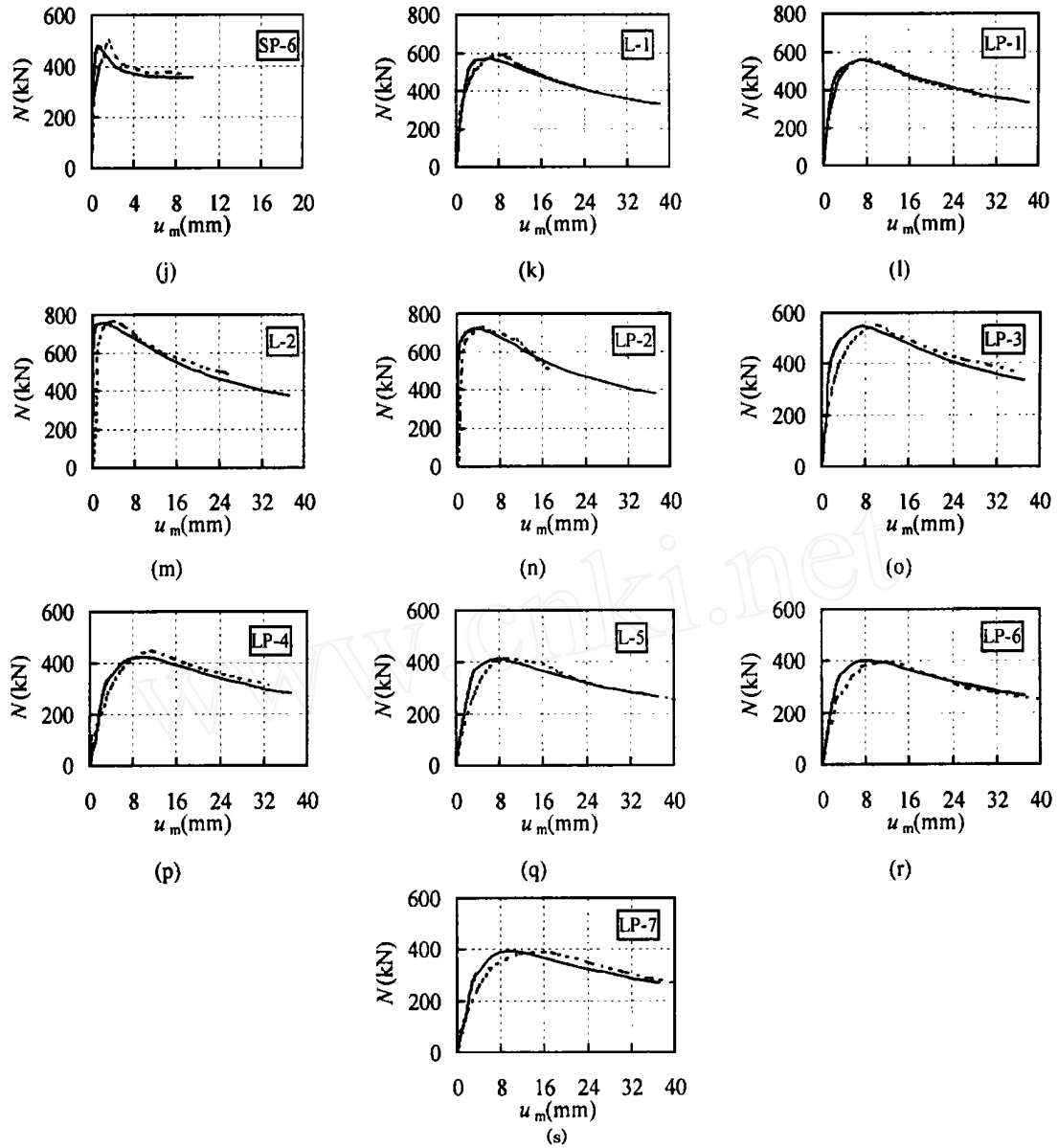


图 3 荷载-挠度关系曲线

Fig. 3 Load (N) versus midspan deflection (u_m) curves

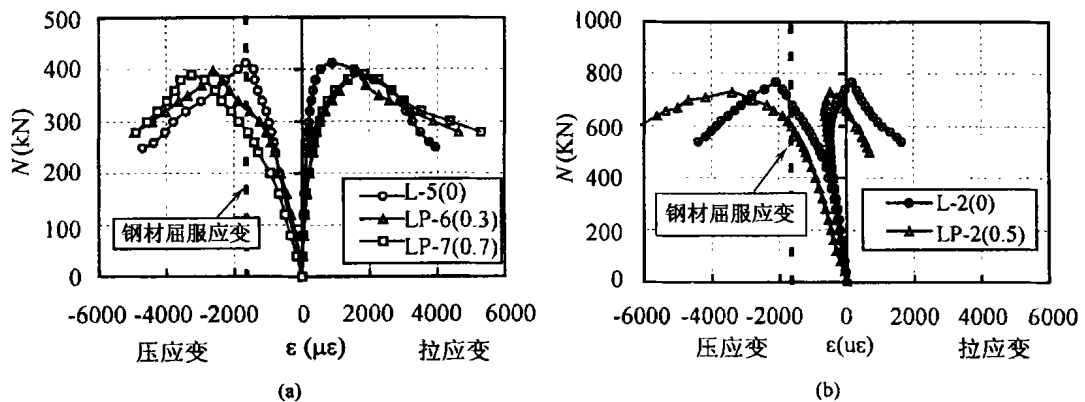


图 4 不同初应力系数情况下的 N - ϵ 关系

Fig. 4 N - ϵ relation for various initial stresses

3 考虑钢管初应力影响时钢管混凝土压弯构件荷载—变形关系的计算

在文献 [8] 对钢管混凝土压弯构件一次加载情况下荷载 (N)—中截面挠度 (u_m) 关系分析的基础上,可方便地计算分析钢管初应力对钢管混凝土构件承载力的影响,计算时采用如下基本假设:

(1) 钢材和混凝土的应力—应变关系模型按照文献 [8] 介绍的有关方法确定。

(2) 钢和混凝土之间无相对滑移,钢管混凝土构件在变形过程中始终保持为平截面。

(3) 构件在变形过程中始终保持为平截面。

(4) 忽略剪力对构件变形的影响。

(5) 构件挠曲线符合正弦半波曲线,杆件存在千分之一杆长的初挠度。

(6) 钢管初应力 (σ_0) 沿钢管横截面均匀分布。

$N-u_m$ 关系的计算过程如下:

(1) 与文献 [8] 计算钢管混凝土压弯构件一次加载时荷载—变形全过程关系的方法类似,先对构件横截面进行单元划分;

(2) 确定钢管初应力 σ_0 对应的应变 ϵ_{s0} ;

(3) 假定一挠度增量 u_m ,总挠度为 $u_{mi} + u_m$,由平截面假定可计算出跨中截面钢材和混凝土各单元对应的应变分别为 ϵ_{si} 和 ϵ_{ci} ,则钢材单元的总应变为 $\epsilon_{si} + \epsilon_{s0}$;

(4) 根据钢管和混凝土的应力计算内力 N_s 和 N_c ,求得 N 值,由此得到 N 和 u_m 的一组值,依此类推,可计算出有初应力的圆钢管混凝土轴心受压时的荷载—变形曲线。

(5) 重复步骤 (3) 和 (4),最终可计算出考虑钢管初应力的影响时,钢管混凝土压弯构件的 $N-u_m$ 关系曲线。

图 5 所示为考虑钢管初应力影响与否时,钢管混凝土压弯构件典型的 $N-u_m$ 关系曲线,其中, N_u 和 u_{mu}

分别为不考虑钢管初应力影响时构件的极限承载力及其对应的挠度; N_{up} 和 u_{mup} 分别为考虑钢管初应力影响时构件的极限承载力及其对应的挠度。由图 5 见,两种情况下构件 $N-u_m$ 关系曲线的变化规律基本类似,只是在考虑钢管初应力的影响时,构件的极限承载力有所降低、对应的变形值也有所增大,构件在弹性阶段的刚度也有所降低。

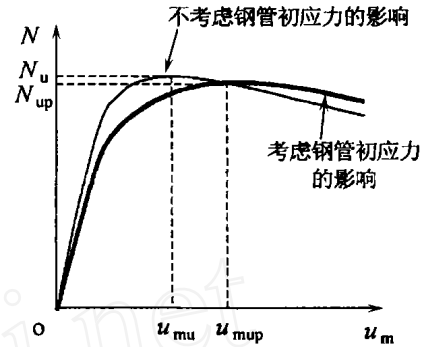


图 5 典型的 $N-u_m$ 关系曲线

Fig. 5 Typical $N-u_m$ curves

分析结果还表明,考虑钢管初应力的影响时,在如下参数范围,即 $\sigma_0/f_y \leq 0.9$, $f_y = 235 \sim 390\text{MPa}$, C20~C80 混凝土,截面含钢率 ($\rho = A_s/A_c$, A_s 和 A_c 分别为钢管和核心混凝土横截面面积) 取 $0.04 \sim 0.20$, 构件长细比 (λ , 对于方钢管混凝土构件:

$\lambda = 2\sqrt{3}L/B$; 对于圆钢管混凝土构件: $\lambda = 4L/D$, 其中, D 为钢管外直径) 取 $10 \sim 160$, 荷载偏心率 (e/r , 对于方钢管混凝土, $r = B/2$; 对于圆钢管混凝土, $r = D/2$) 取 $0 \sim 3.0$ 的情况下,极限荷载降低的幅度最大在 20% 左右,极限荷载对应的变形值,比不考虑钢管初应力影响时的情况大两倍左右。

图 3 和图 6 分别给出了数值计算 $N-u_m$ 关系曲线与本文进行的方钢管混凝土构件试验结果,以及文献 [2、3] 进行的圆钢管混凝土试件部分试验结果的比较。图 7 给出数值计算极限承载力 (N_{uc}) 与试验结果 (N_{ue}) 的对比情况。可见二者吻合较好。

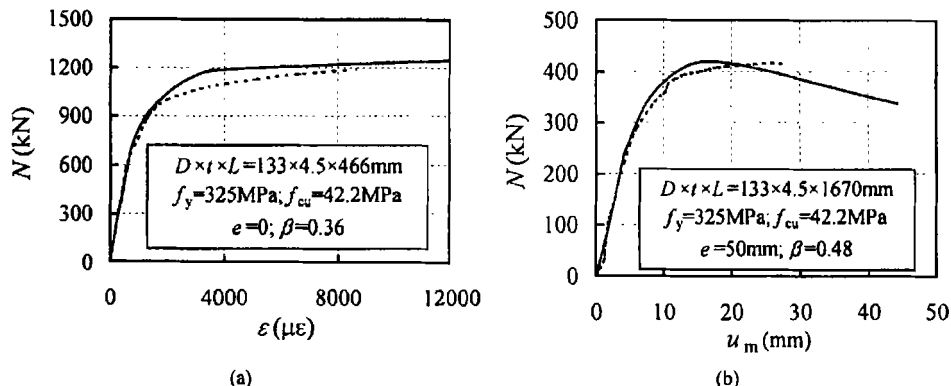


图 6 理论计算荷载—变形关系曲线与试验结果 [2,3] 比较

Fig. 6 Comparison of the theoretical $N-u_m$ curve and test results

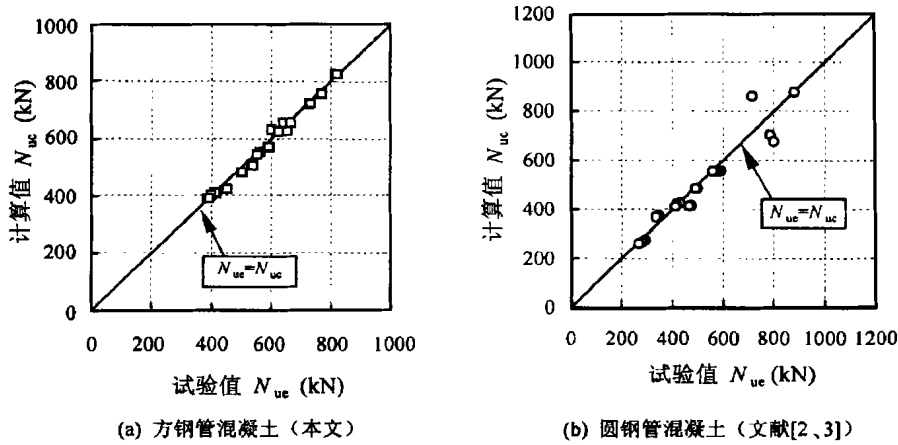


图7 极限荷载试验值 (N_{ue}) 与数值计算结果 (N_{uc}) 对比
 Fig.7 Comparison of ultimate values of tested N_{ue} and calculated N_{uc}

4 参数分析

为便于分析, 定义承载力影响系数 k_p 的表达式如下:

$$k_p = \frac{N_{up}}{N_u} \quad (2)$$

其中, N_{up} 和 N_u 分别为考虑钢管初应力影响与否时, 钢管混凝土构件的极限承载力, 如图5所示。

分析结果表明, 各参数对圆钢管混凝土和方钢管混凝土 k_p 的影响规律基本类似。下面以圆钢管混凝土构件为例进行论述。

(1) 钢管初应力系数 (β) 和构件长细比 (λ)

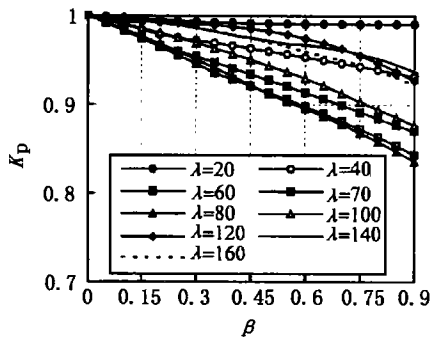


图8 β 和 λ 对 k_p 的影响
 Fig.8 Effects of β and λ on k_p

图8所示为钢管混凝土构件在不同长细比 (λ) 情况下其承载力影响系数 (k_p) 随钢管初应力系数 (β) 的变化规律。本算例中钢管混凝土构件的计算条件是: $D = 600\text{mm}$, $e/r = 0.1$, Q345 钢, C40 混凝土, $e/r = 0$ 。由图8可见, k_p 随 β 的增大而逐渐降低。由图8还可以看出, 对于 λ 小于80的情况, 当一定时, k_p 值随 β 的增大总体上呈减小的趋势, 也即 λ 的影响在逐步显著; 对于 λ 大于80的情况, 当一定时, k_p 值随 β 的增大呈逐步增加的趋势, 也即

的影响在逐步减小的趋势。产生这种现象的原因在于: β 较小时, 钢管混凝土构件受力时其跨中截面受压区域大, 钢管中的初压应力会加剧“二阶效应”的影响, 且 λ 越大, 这种影响越明显, 因此一定时的 k_p 值会随 λ 的增大总体上呈减小的趋势; 而当构件长细比较大时, 钢管混凝土构件受力其跨中截面受拉区域大, 钢管中的初压应力又可能延缓截面受拉区域的发展, 从而可能延缓构件发生破坏, 表现为一定时的影响有逐步减小趋势。

分析结果还表明, 对于构件长细比 λ 小于20的情况, k_p 的变化对 k_p 的影响在1%左右, 可以忽略钢管初应力对钢管混凝土构件承载力的影响。

(2) 含钢率 (α)

图9所示为含钢率 (α) 对 k_p 的影响。本算例中钢管混凝土构件的计算条件是: $D = 600\text{mm}$, $\lambda = 40$, Q345 钢, C40 混凝土, $e/r = 0$ 。由图9可见, 一定时, k_p 随 α 变化的幅度很小。

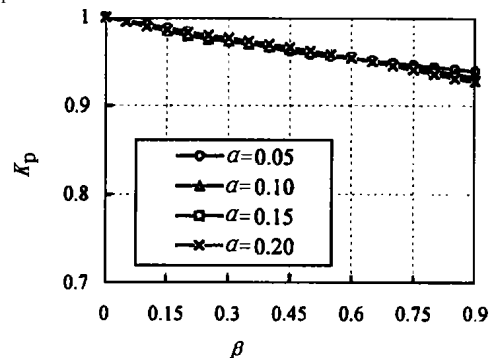


图9 含钢率 (α) 对 k_p 的影响
 Fig.9 Effects of α on k_p

(3) 荷载偏心率 (e/r)

图10所示为钢管混凝土构件在不同荷载偏心率 (e/r) 情况下其承载力影响系数 (k_p) 随钢管初应力系数 (β) 的变化规律。本算例中钢管混凝土构件的计算条件是: $D = 600\text{mm}$, $\lambda = 0.1$, Q345 钢, C40

混凝土， $\lambda = 40$ 。由图 10 可见，对于 e/r 小于 0.4 情况，当 β 一定时， k_p 值随 e/r 的增大总体上呈减小的趋势，也即 β 的影响在逐步显著；对于 e/r 大于 0.4 的情况，当 β 一定时， k_p 值随 e/r 的增大有逐步增加的趋势，也即 β 的影响在逐步减小的趋势。产生这种现象的原因在于： e/r 较小时，钢管混凝土构件受力时其跨中截面受压区域大，钢管中的初压应力会加剧“二阶效应”的影响，且 β 越大，这种影响越明显，因此 β 一定时的 k_p 值会随 e/r 的增大总体上呈减小的趋势；而当 e/r 较大时，钢管混凝土构件受力其跨中截面受拉区域大，钢管中的初压应力又可能延缓截面受拉区域的发展，从而可能延缓构件发生破坏，表现为 e/r 一定时 β 的影响有逐步减小趋势。

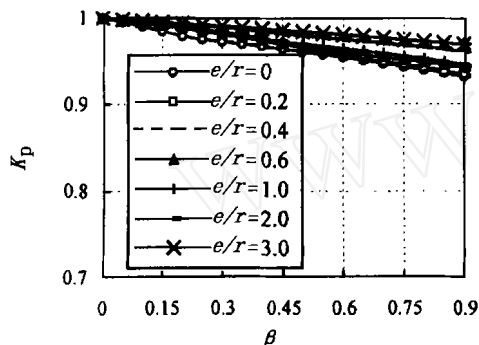


图 10 荷载偏心率 (e/r) 对 k_p 的影响
Fig. 10 Effects of (e/r) on k_p

(4) 钢材屈服极限 (f_y)

图 11 所示为钢材屈服极限 (f_y) 对 k_p 的影响。本算例中钢管混凝土构件的计算条件是： $D = 600\text{mm}$ ， $\lambda = 40$ ， $\beta = 0.1$ ，C40 混凝土， $e/r = 0$ 。从图 11 可见， β 一定时， k_p 随 f_y 的增大有减小的趋势。原因在于：钢材屈服极限越高，意味着钢管对钢管混凝土构件的“贡献”越多，钢管初应力的影响也就会越显著。分析结果表明，在工程常用参数范围内， f_y 的变化对 k_p 的影响在 3% 左右，总体不大。

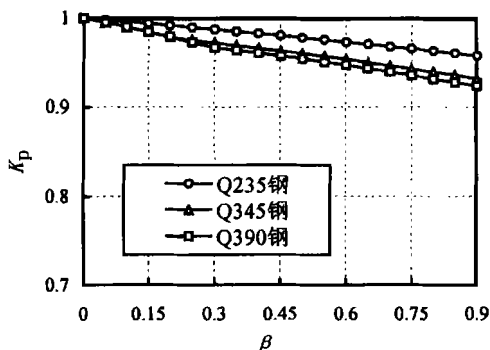


图 11 钢材屈服极限 (f_y) 对 k_p 的影响
Fig. 11 Effects of f_y on k_p

(5) 混凝土强度 (f_{ck})

图 12 所示为混凝土抗压强度 (f_{ck}) 对 k_p 的影响。本算例中钢管混凝土构件的计算条件是： $D = 600\text{mm}$ ， $\lambda = 40$ ， $\beta = 0.1$ ，Q345 钢， $e/r = 0$ 。从图 12 可见， β 一定时， k_p 随 f_{ck} 的增大有减小的趋势。原因在于：混凝土强度越高，意味着混凝土对钢管混凝土构件的“贡献”越大，钢管初应力的影响也就会越小。分析结果表明，在工程常用参数范围内， f_{ck} 的变化对 k_p 的影响很小，在 1% 左右变化。

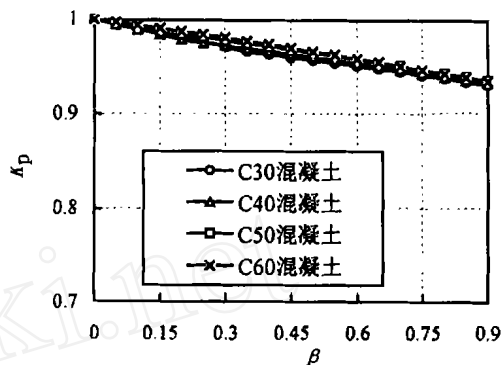


图 12 混凝土强度 (f_{ck}) 对 k_p 的影响
Fig. 12 Effects of f_{ck} on k_p

以上分析结果表明：影响钢管混凝土构件承载力影响系数 k_p 变化的主要参数是，钢管初应力系数 (β)、构件长细比 (λ) 和荷载偏心率 (e/r)。在进行有钢管初应力的钢管混凝土构件承载力验算时，应当充分考虑这三个参数的影响。

5 承载力实用验算方法

5.1 承载力影响系数

数值分析和试验结果均表明，钢管初应力对钢管混凝土构件的承载力有影响。钢管初应力的存在可使钢管混凝土构件的极限承载力最大降低 20% 左右，因此应合理考虑钢管初应力对钢管混凝土构件承载力的影响。

参数分析结果表明，影响承载力系数 k_p 变化的主要参数是钢管初应力系数 (β)、构件长细比 (λ) 和荷载偏心率 (e/r)。通过对计算结果的分析 and 整理，可用回归分析法推导出如下参数范围，即 $\beta = 0 \sim 0.9$ ， $f_y = 235 \sim 500\text{MPa}$ 、C20 - C80 混凝土、 $\lambda = 0.04 \sim 0.20$ 、 $\lambda = 10 \sim 160$ 、 $e/r = 0 \sim 3.0$ 情况下的 k_p 的计算公式如下：

$$k_p = 1 - f(\lambda) \cdot f(e/r) \cdot \beta \quad (3)$$

式中， $f(\lambda)$ 为考虑构件长细比 (λ) 影响的函数，可按下式确定：

对于方钢管混凝土：

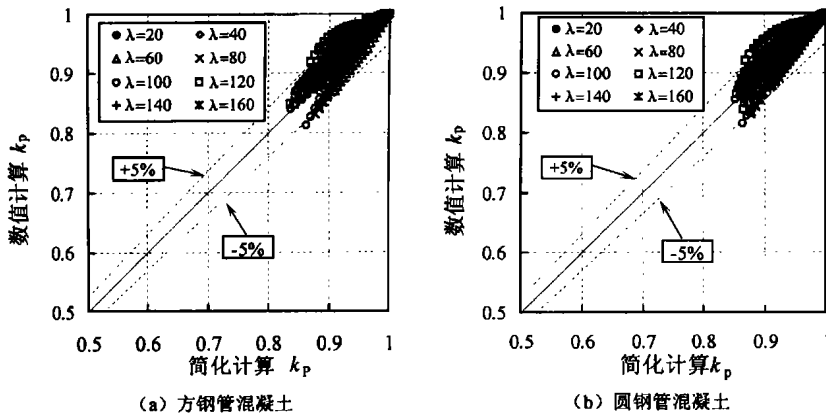


图 13 k_p 简化公式计算结果与数值计算结果对比 ($f_y = 345\text{MPa}$, $f_{cu} = 41\text{MPa}$, $e/r = 0 \sim 3.0$, $\rho = 0.10$)

Fig. 13 Comparison of k_p between simplified formula and numerical results

$$f(\rho) = \begin{cases} 0.14 \rho + 0.02 & (\rho \leq 1) \\ -0.15 \rho^2 + 0.42 \rho - 0.11 & (\rho > 1) \end{cases} \quad (4a)$$

对于圆钢管混凝土:

$$f(\rho) = \begin{cases} 0.17 \rho - 0.02 & (\rho \leq 1) \\ -0.13 \rho^2 + 0.35 \rho - 0.07 & (\rho > 1) \end{cases} \quad (4b)$$

其中, $\rho = \lambda/80$ 。

$f(e/r)$ 为考虑构件荷载偏心率 (e/r) 影响的函数, 可按下式确定:

对于方钢管混凝土:

$$f(e/r) = \begin{cases} 1.35(e/r)^2 - 0.04(e/r) + 0.8 & (e/r \leq 0.4) \\ -0.2(e/r) + 1.08 & (e/r > 0.4) \end{cases} \quad (5a)$$

对于圆钢管混凝土:

$$f(e/r) = \begin{cases} 0.75(e/r)^2 - 0.05(e/r) + 0.9 & (e/r \leq 0.4) \\ -0.15(e/r) + 1.06 & (e/r > 0.4) \end{cases} \quad (5b)$$

k_p 简化公式计算结果与数值计算结果吻合良好, 图 13 给出二者部分结果的对比情况。

5.2 承载力计算方法

确定了 k_p 的简化公式后, 即可利用式 (2) 方便地计算出考虑钢管初应力影响时, 钢管混凝土构件的承载力。计算时, 式 (2) 中不考虑钢管初应力影响时, 钢管混凝土构件的极限承载力 N_u 可按照有关设计规程中的方法计算, 例如文献 [6, 8] 等。

文献 [9] 根据钢管混凝土结构发展的需要, 利用数值方法对钢管混凝土压弯构件的极限承载力进行更大范围的参数分析, 在此基础上对文献 [6, 8] 中的有关计算方法进行了发展和完善, 最终提出一

种实用计算公式, 简化计算结果得到大量实验结果的验证。

文献 [9] 提出的钢管混凝土压弯构件承载力计算公式如下:

当 $N/N_u \geq 2^{-3} \cdot \rho$ 时

$$\frac{1}{N_u} \cdot \frac{N}{N_u} + \frac{a}{d} \cdot \left(\frac{M}{M_u}\right) = 1 \quad (6a)$$

当 $N/N_u < 2^{-3} \cdot \rho$ 时

$$-b \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - c \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right) + \frac{1}{d} \cdot \left(\frac{M}{M_u}\right) = 1 \quad (6b)$$

式中:

$$\rho = \begin{cases} 0.18 \cdot \rho^{-1.15} + 1 & (\text{圆钢管混凝土}) \\ 1 + 0.14 \cdot \rho^{-1.3} & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases}$$

$$= \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{ck}}$$

A_s 和 A_c 分别为钢管和核心混凝土横截面面积;

f_{ck} 为混凝土抗压强度指标^[8], 对于普通强度混

凝土, $f_{ck} = 0.67f_{cu}$;

$$\rho = \begin{cases} \begin{cases} 0.5 - 0.2445 \cdot \rho & (\rho \leq 0.4) \\ 0.1 + 0.14 \cdot \rho^{-0.84} & (\rho > 0.4) \end{cases} & (\text{圆钢管混凝土}) \\ \begin{cases} 0.5 - 0.3175 \cdot \rho & (\rho \leq 0.4) \\ 0.1 + 0.13 \cdot \rho^{-0.81} & (\rho > 0.4) \end{cases} & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases}$$

$$a = 1 - 2^{-2} \cdot \rho; \quad b = \frac{1 - \rho}{3 \cdot \rho^2}; \quad c = \frac{2 \cdot (\rho - 1)}{\rho}$$

$$d = \begin{cases} 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{N}{N_E}\right) & (\text{圆钢管混凝土}) \\ 1 - 0.25 \cdot \left(\frac{N}{N_E}\right) & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases}$$

$N_E = \pi^2 \cdot E_{scm} \cdot I_{scm} / L^2$ 为欧拉临界力^[6~8];

对于轴心受压强度承载力, 文献 [9] 给出了的计算公式如下:

$$N_u = A_{sc} \cdot f_{scy} \quad (7)$$

式中: $f_{scy} = (1.14 + 1.02 \rho) \cdot f_{ck}$ (圆钢管混凝土);

$f_{scy} = (1.18 + 0.85 \rho) \cdot f_{ck}$ (方钢管混凝土)。

对于抗弯强度承载力, 文献 [9] 给出的计算公式如下:

$$M_u = m \cdot W_{scm} \cdot f_{scy} \quad (8)$$

其中,

$$m = \begin{cases} 1.1 + 0.48 \ln(\rho + 0.1) & (\text{圆钢管混凝土}) \\ 1.04 + 0.48 \ln(\rho + 0.1) & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases}$$

W_{scm} 为截面弯模量, 对于圆钢管混凝土, $W_{scm} = \pi \cdot D^3 / 32$, 对于方钢管混凝土, $W_{scm} = B^3 / 6$ 。

式 (6) 中, 钢管混凝土轴压稳定系数 可按

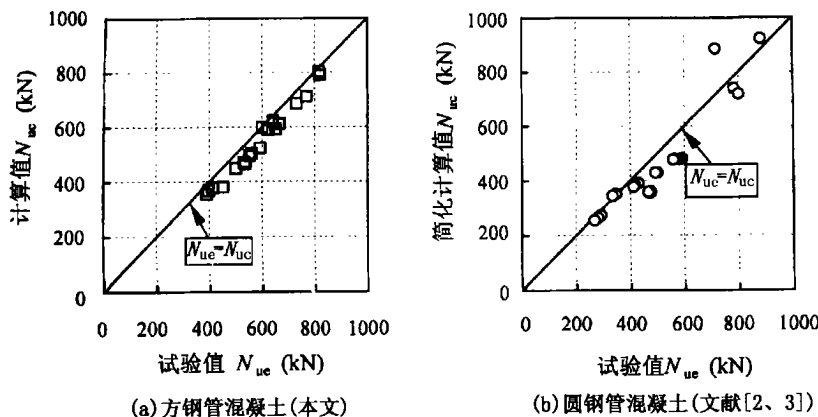


图 14 简化计算结果与试验结果对比

Fig. 14 Comparison between simplified formula and numerical results

(1) 本文建议的分析钢管初应力影响的理论模型计算结果与试验结果吻合较好。

(2) 在工程常用参数范围内, 钢管初应力的存在, 可使钢管混凝土构件的极限承载力最多降低 20% 左右。

(3) 影响钢管混凝土构件承载力影响系数 k_p 变化的主要参数是钢管初应力系数 ()、构件长细比 () 和荷载偏心率 (e/r)。

(4) 本文基于参数分析结果推导出的承载力影响系数 k_p 的验算方法可供有关工程设计时参考。

本文的试验工作得到杭州杭萧钢构股份有限公司的资助, 特此致谢!

式计算:

$$= \begin{cases} 1 & (\leq 0) \\ a \cdot \sigma^2 + b \cdot \sigma + c & (0 < \sigma \leq p) \\ \frac{d}{(\sigma + 35)^2} & (> p) \end{cases} \quad (9)$$

式中, 系数 $a = \frac{1 + (35 + 2 \cdot p - \sigma) \cdot e}{(p - \sigma)^2}$; $b = e - 2 \cdot$

$a \cdot p$; $c = 1 - a \cdot \sigma^2 - b \cdot \sigma$;

$$d = \begin{cases} [13000 + 4657 \ln(\frac{235}{f_y})] \cdot (\frac{25}{f_{ck} + 5})^{0.3} \cdot (\frac{d}{0.1})^{0.05} & (\text{圆钢管混凝土}) \\ [13500 + 4810 \ln(\frac{235}{f_y})] \cdot (\frac{25}{f_{ck} + 5})^{0.3} \cdot (\frac{d}{0.1})^{0.05} & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases};$$

$$e = \frac{-d}{(p + 35)^3};$$

p 和 σ 分别为构件弹性失稳和弹塑性失稳的界限长细比^[6,8]。

图 14 所示为按简化计算方法获得的承载力与本文及文献 [2、3] 进行的试验结果的对比情况, 可见二者吻合较好, 且计算结果总体上稍偏于安全。

基于本文研究结果可得到如下结论:

韩林海 博士, 福州大学特聘教授, 博士生导师。从事组合结构和建筑结构防火等方面的研究工作。在国内外学术刊物上发表论文 80 多篇。曾获国家教育委员会科学技术进步一等奖等科技奖励。通讯地址: 350002 福建省福州市工业路 523 号福州大学土木建筑工程学院

尧国皇 硕士研究生, 从事钢管混凝土方面的研究工作, 发表论文 4 篇。

参 考 文 献

[1] ASCCS (1997). Concrete Filled Steel Tubes-A Comparison of International Codes and Practices [R]. ASCCS Seminar Report, Innsbruck, September

[2] 黄世娟. 初应力对圆钢管混凝土轴压构件承载力影响的实验研究 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995

[3] 张晓庆. 初应力对圆钢管混凝土偏压构件承载力影响的实验研究 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995

[4] 查晓雄. 钢管初应力对钢管混凝土压弯扭构件工作性能影响的理论分析与试验研究 [D]. 哈尔滨建筑大学, 1996

[5] 李少云等. 管壁初始应力对钢管混凝土柱承载能力的影响 [J]. 工程力学 (增刊), 1998: 155 ~ 163

[6] DL/T 5085-1999 钢-混凝土组合结构设计规程. 北京: 中国电力出版社, 1999

[7] GB50017 钢结构设计规范 (送审稿) [S]. 北京: 《钢结构设计规范》国家标准管理组, 2001

[8] 韩林海. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2000, 101 ~ 118

[9] 韩林海, 尧国皇, 陶忠. 钢管混凝土构件实用设计方法研究 [R]. 福州: 福州大学科研报告, 2002