

不同表面处理混凝土短柱的徐变试验

饶欣频¹,曹国辉²,方志²

(1.广东省建筑设计研究院,广东 广州 510010;2.湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要 通过对轴心受压素混凝土柱、表面涂胶混凝土柱和 CFRP 约束混凝土柱受力变形性能的长期观测,研究了不同表面处理混凝土轴心受压短柱在长期荷载作用下的徐变发展规律。结果表明,其他条件相同时,CFRP 约束混凝土柱的徐变与涂胶混凝土柱的相近,均较素混凝土柱小约 20%。CFRP 约束混凝土柱的徐变减小,主要是粘贴 CFRP 布时的胶层所致而非核心混凝土的约束效应。采用 ACI209R(92)和 CEB-FIR(MC90)两种徐变模型进行理论计算,并提出了基于 ACI209R(92)模型的 CFRP 约束混凝土徐变修正计算式,试验数据与理论预测模型吻合良好。

关键词 混凝土柱 徐变试验 表面处理 CFRP

中图分类号:TU375.3 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2006)05-0026-04

Experimental study on creep behavior of short concrete columns with different methods for surface treatment// RAO Xin-pin¹, CAO Guo-hui², FANG Zhi² (1. Architectural Design Institute of Guangdong, Guangzhou 510010, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the long-term observation of stress deformation behaviors of concrete columns with three different methods for surface treatment, i. e. coat free, epoxy coated and CFRP confined, the law of creep development in concrete columns under long-term loading in axial direction in above three cases is studied. The result shows that the creep coefficients of the CFRP-confined concrete column and the epoxy-coated column are close to each other, and about 20% less than that of the plain concrete column under the same condition, and that the creep reduction in the CFRP-confined concrete column is not caused by the restraint effect of core concrete but mainly caused by the existence of epoxy coating. Theoretical calculation is performed by use of the ACI209R(92) and CEB-FIR(MC90) models, and a formula for creep rectification in CFRP-confined concrete column is proposed based on the ACI209R(92) model. The predicted results of the model are in good agreement with the experimental data.

Key words: concrete column; creep experiment; surface treatment; CFRP

高强、轻质、耐腐蚀、便于施工的 FRP(fiber reinforced polymer,纤维增强复合材料)被越来越广泛地应用于新建结构和现有结构加固。FRP 约束混凝土柱短期受力性能方面的研究已较多^[1-2],但其长期受力性能却少有研究。虽然已有研究表明 FRP 约束混凝土柱的徐变小于相应的普通混凝土柱^[3-5],但 FRP 约束混凝土柱徐变的减小是由于混凝土被约束所致还是由于粘贴 FRP 布以后构件表面状态发生改变所致,却未见相应文献对此予以解释。基于此,本文对表面粘贴 CFRP(carbon fiber reinforced polymer,碳纤维增强复合材料)布、表面涂胶和混凝土自然表面这 3 种不同表面状况的混凝土轴心受压短柱的长期受力性能进行测试,以研究不同表面处理混凝土轴心受压短柱的徐变发展规律,进而提出 CFRP 约束混凝土柱徐变系数的计算公式。

1 试件设计与制作

共制作了 10 个混凝土柱体试件,包括上述 3 种不同的表面处理。混凝土潮湿养护,配合比及力学性能分别见表 1 和表 2。CFRP 材料的基本力学性能由厂家提供,其抗拉强度为 3 500 MPa,弹性模量为 235 GPa。试验在实验室自然环境中进行,徐变观测时间最多至 600 d。

表 1 混凝土材料配合比					kg/m ³
混凝土强度等级	水	水泥	砂	碎石	减水剂
C50	156.8	380	718.0	1 079.0	3.04
C60	175.8	550	669.3	1 020.8	6.60

试件中 2 个素混凝土试件 S1(强度等级为 C50)和 S2(强度等级为 C60)用于测定自然收缩和周围环境(温度、湿度)的影响,其他试件分为 4 组,第 1、第

2 组为涂胶混凝土和 CFRP 约束混凝土对比试验 ,第 3、第 4 组为素混凝土和 CFRP 约束混凝土对比试验。试件的基本参数见表 3。

表 2 混凝土力学性能								
混凝土 强度等级	抗压强度/MPa				弹性模量/GPa			
	7 d	14 d	28 d	365 d	7 d	14 d	28 d	365 d
C50	48.89	52.98	57.10	69.28	34.37	35.03	35.65	37.02
C60	59.38	64.78	69.35	80.30	35.91	36.55	37.03	37.99

表 3 试件的基本参数(加载龄期为 28 d)			
试件编号	轴压比	试件尺寸	是否涂胶
C50-1-E	0.421	∅150 mm × 300 mm	是
C50-1-C	0.421	∅150 mm × 300 mm	是
C50-2-E	0.321	∅150 mm × 300 mm	是
C50-2-C	0.321	∅150 mm × 300 mm	是
C60-3-P	0.392	100 mm × 100 mm × 300 mm	否
C60-3-C	0.392	100 mm × 100 mm × 300 mm	是
C60-4-P	0.306	100 mm × 100 mm × 300 mm	否
C60-4-C	0.306	100 mm × 100 mm × 300 mm	是
S1		∅150 mm × 300 mm	否
S2		100 mm × 100 mm × 300 mm	否

注 :试件编号第一项表示混凝土强度等级 ,中间一项表示试件组别 ,最后一项表示试件的表面状态(P 表示自然表面 ,E 表示涂胶 ,C 表示粘贴 CFRP 布 ,CFRP 布厚 0.222 mm)。

试验加载装置如图 1 所示。在试件顶部和底部分别放置 1 块圆形承力钢板 ,荷载由顶上的千斤顶施加 ,荷载大小由压力传感器进行控制。当荷载加到要求时 ,固定支架上的螺栓。表面应变由千分表和弦式应变计分别进行测量。



图 1 试验装置

2 试验结果及分析

2.1 瞬时应变

加载时刻所有混凝土柱的瞬时应变 $\epsilon_c(t_0)$ 均按线弹性体计算 ,即

$$\epsilon_c(t_0) = \frac{\sigma_c}{E_c(t_0)} \tag{1}$$

式中 : t_0 为加载龄期 ; σ_c 和 $E_c(t_0)$ 分别为加载时的应力和混凝土弹性模量。

不同表面处理的混凝土柱体试件的瞬时应变见表 4 ,从表中可以看到 :计算值与实测值基本吻合 ,不同表面处理的影响很小。在所施加的荷载作用

下 ,CFRP 的约束作用不明显 ,其核心混凝土基本处于单向受压状态。

表 4 试件的瞬时应变

试件编号	公式(1)计算值/ 10 ⁻⁶	实测值/ 10 ⁻⁶	计算值 实测值
C50-1-E	434	477	0.910
C50-1-C	434	450	0.964
C50-2-E	331	324	1.022
C50-2-C	331	347	0.994
C60-3-P	467	495	0.943
C60-3-C	467	470	0.994
C60-4-P	364	373	0.976
C60-4-C	364	380	0.958

2.2 徐变应变

混凝土的徐变系数 $\varphi(t, t_0)$ 采用式(2)进行计算^[6] :

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\epsilon_c(t, t_0)}{\epsilon_c(t_0)} \tag{2}$$

式中 : t_0 为加载龄期 ; t 为观测徐变的时间 ; $\epsilon_c(t, t_0)$ 为观测时的徐变应变 ; $\epsilon_c(t_0)$ 为加载时的瞬时应变。

图 2、图 3 为试件所处环境的温度和湿度时程图。图 4 为对比试件 S1 和 S2 的应变曲线 ,该应变包括收缩应变和温度应变。利用这两个对比试件可近似地剔除其他试件的温度和收缩影响。

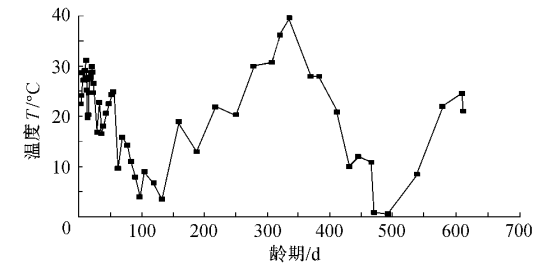


图 2 环境温度时程曲线

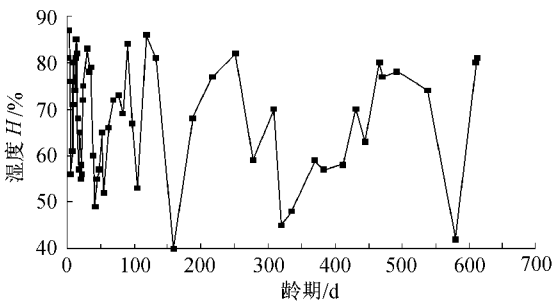


图 3 环境湿度时程曲线

2.2.1 素混凝土柱徐变

表 5 为不同加载时间素混凝土柱的实测徐变应变。从表中可以看出 ,素混凝土的徐变早期发展较快 ,2 组试件 90 d 分别完成 360 d 徐变的 74.6% 和 77.1% ;后期发展相对比较缓慢 ,徐变发展速率逐渐减小。图 5 为素混凝土柱徐变系数实测值与用不同

表 5 素混凝土柱实测徐变应变

试件编号	徐变应变/ 10^{-6}					相对值/%				
	30 d	60 d	90 d	360 d	583 d	30 d	60 d	90 d	360 d	583 d
C60-3-P	317	400	441	591	650	53.6	67.7	74.6	100	110
C60-4-P	274	336	367	476	518	57.6	70.6	77.1	100	109

注 相对值为加载时的徐变应变与 360 d 的实测徐变应变之比。

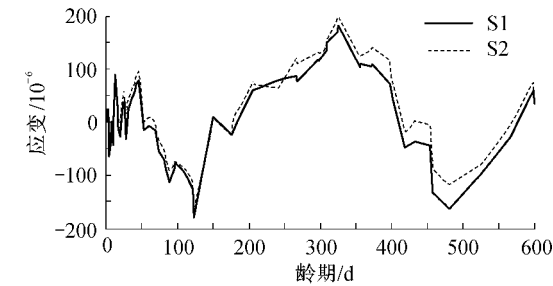


图 4 对比试件应变时程曲线

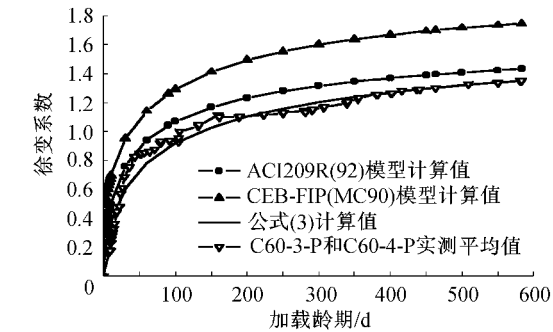


图 5 素混凝土柱徐变系数实测值与计算值对比
模型所得计算值的对比。从图中可知 ,ACI209R(92) 和 CEB-FIP(MC90) 两种徐变模型的计算值(实测年平均相对湿度为 65%) 均大于两素混凝土桩 C60-3-P 和 C60-4-P 的实测平均值 ,但 ACI209R(92) 模型的计算值与实测平均值较接近 ,因此本文采用 ACI209R(92) 模型的双曲线徐变模式对素混凝土的徐变系数进行拟合 ,得到素混凝土柱的徐变系数公式 :

$$\varphi(t,t_0)=\frac{1.81(t-t_0)^{0.6}}{15.32+(t-t_0)^{0.6}} \tag{3}$$

式中 : t_0 为加载龄期 ; t 为观测徐变的时间 ; $t-t_0$ 为加载持续时间。

采用公式 (3) 的计算值与素混凝土柱实测平均值的相关系数为 0.982。

2.2.2 涂胶混凝土柱徐变

对于表面涂胶混凝土柱 ,由于混凝土被环氧树脂胶完全包裹 ,试件的核心混凝土基本处于密闭状态 ,和周围环境没有湿度交换。本文计算时周围相对湿度取 90% 并且忽略环氧树脂胶对混凝土的约束作用 ,认为混凝土处于单向受压状态。基于公式 (3) ,表面涂胶混凝土柱的徐变系数修正公式为

$$\varphi_{\infty 2}=\frac{\varphi_{\infty 1} \gamma_{\lambda 2} \gamma_{h 2} \gamma_{s 2} \gamma_{\varphi 2}}{\gamma_{\lambda 1} \gamma_{h 1} \gamma_{s 1} \gamma_{\varphi 1}} \tag{4}$$

式中 : $\varphi_{\infty 1}$ 为拟合素混凝土柱得到的徐变终值 ; γ_{λ} ,

$\gamma_h, \gamma_s, \gamma_{\varphi}$ 分别为湿度、形状尺寸、坍落度、细集料的修正系数 ,按 ACI209R(92)模型取值计算。由此得到 C50 表面涂胶混凝土的徐变系数公式为

$$\varphi(t,t_0)=\frac{1.33(t-t_0)^{0.6}}{15.32+(t-t_0)^{0.6}} \tag{5}$$

图 6 为涂胶混凝土柱徐变系数的实测值与预测值之间的比较 ,从图中可以看出 :① 3 种模型计算的理论与实测徐变系数比较吻合 ,说明在预测涂胶混凝土柱徐变时 ,考虑胶的密封作用取相对湿度为 90% 是合理的。② 与素混凝土柱(图 5)相比 ,相对湿度对混凝土的徐变影响较大 ,相对湿度越大 ,试件的徐变越小。并且 ,在其他条件相同的情况下 ,随着相对湿度的增大 ,ACI209R(92) 和 CEB-FIP(MC90) 这 2 种徐变模型计算值的差异逐渐减小。

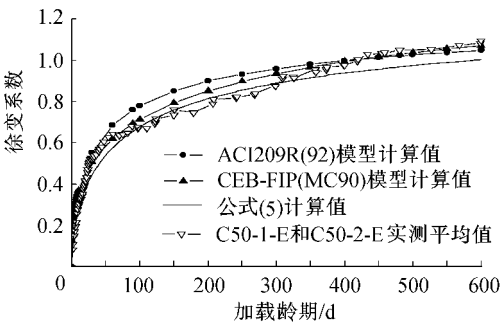


图 6 涂胶混凝土柱徐变系数实测值与计算值对比

2.2.3 CFRP 约束混凝土柱徐变

与表面涂胶时一样 ,取 CFRP 约束混凝土柱的相对湿度为 90% ,采用 ACI209R(92) 和 CEB-FIP(MC90) 这 2 种规范模型以及修正模型(C50 和 C60 修正后均为公式 (5)) 计算相应的徐变应变 ,结果如图 7 所示。从图中可以看到 ,采用 3 种模型计算的应变曲线相差不大 ,并且都略高于实测值 ,但修正模型计算值与实测值吻合更好 ,说明采用修正模型计算 CFRP 约束混凝土的徐变可以得到足够的精度。

2.3 结果比较分析

图 8、图 9 分别为素混凝土柱与 CFRP 约束混凝土柱、涂胶混凝土柱与 CFRP 约束混凝土柱徐变系数的比较 ,从图中可以看出 :在相同的长期荷载作用下 ,CFRP 约束混凝土柱与涂胶混凝土柱的徐变基本一致 ,均比素混凝土柱小约 20%。CFRP 约束混凝土柱的徐变减小 ,主要是粘贴 CFRP 布时的胶层所致而非核心混凝土的约束效应。

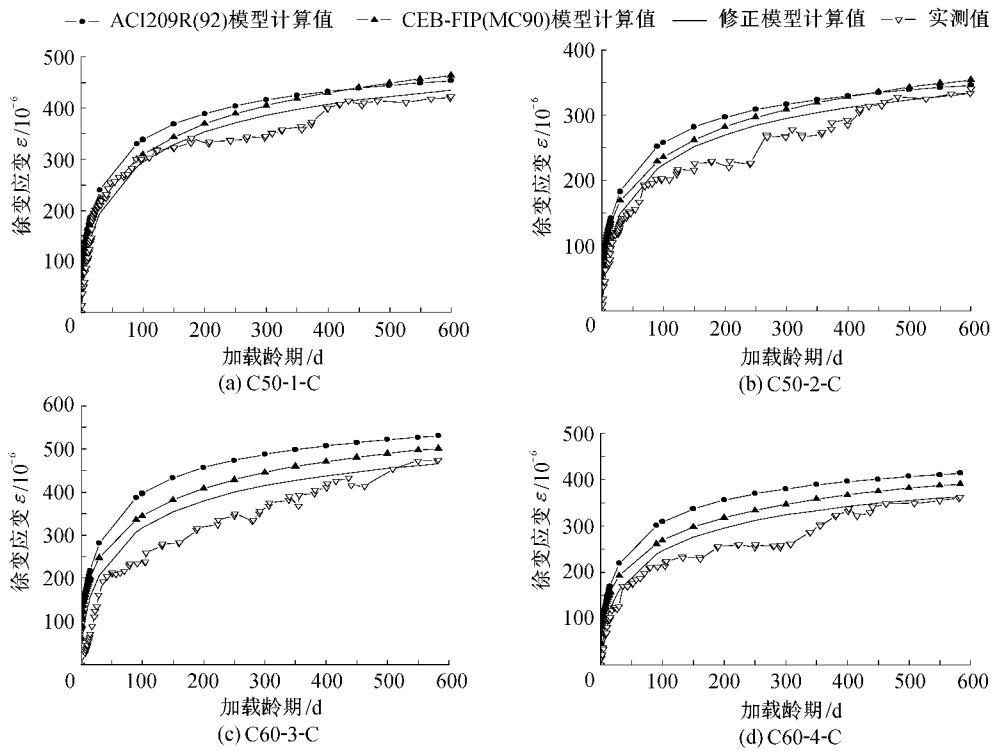


图7 CFRP约束混凝土柱实测徐变值与计算值对比

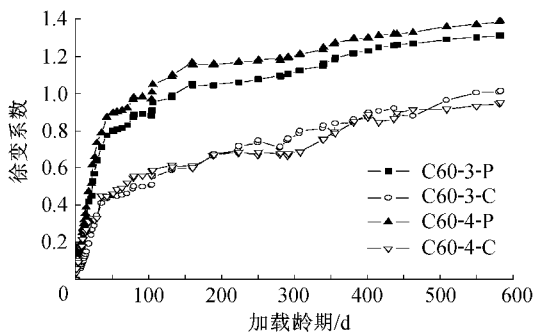


图8 素混凝土与CFRP约束混凝土徐变系数对比

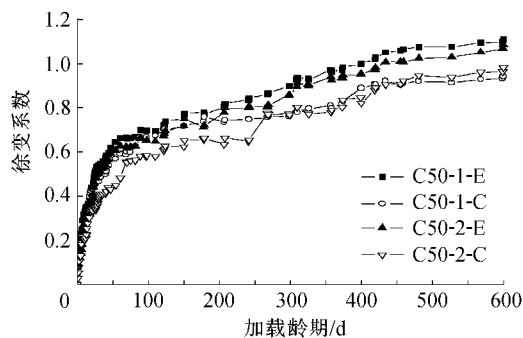


图9 涂胶混凝土与CFRP约束混凝土徐变系数对比

图10是两组轴压比基本相等而试件形状、尺寸不同的CFRP约束混凝土徐变系数的对比。从图中可以看出,虽然圆柱体试件的体表比是棱柱体的1.5倍,但是它们的徐变系数曲线非常接近。因此对于CFRP约束混凝土柱或表面涂胶的混凝土柱,由于其核心混凝土被环氧树脂胶所包裹而与周围环境的水分交换不显著,使得构件的外形、尺寸及体表比对其徐变的影响很小。

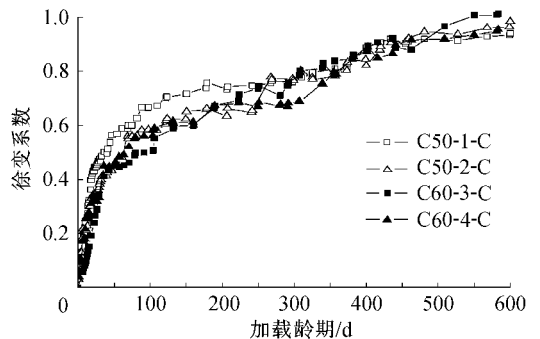


图10 不同形状CFRP约束混凝土徐变系数对比

3 结 语

a. 根据素混凝土实测数据拟合得到的徐变系数公式在进行湿度、形状、尺寸以及混凝土成分等修正后,可以对涂胶混凝土柱和CFRP约束混凝土柱的徐变给出较好的预测。

b. 其他条件相同时,CFRP约束混凝土柱和表面涂胶混凝土柱的徐变基本一致,均比素混凝土柱的徐变小约20%。在所试验的长期应力范围内,CFRP约束混凝土柱的徐变减小主要是粘贴CFRP布时的胶层所致而非核心混凝土的约束效应。

c. 对于CFRP约束或表面涂胶的混凝土柱,由于其核心混凝土被环氧树脂胶所包裹而与周围环境的水分交换不显著,使得构件的外形、尺寸及体表比对其徐变的影响很小。

(下转第33页)

$$N_{rc} = N \quad N_{sa} = 0$$

c. 当 $N_2 < N \leq N_{rc0}$ 时, 钢管部分受压($N_{sa} > 0$):

$$N_{rc} = N_2 \quad N_{sa} = N - N_{rc}$$

若计算结果 $\lambda < 0.14$ 时, 应检验是否满足 $\eta < 0.987\lambda + 0.005$, 否则重新选择截面尺寸并设计计算, N_{rc0} 为钢筋混凝土的轴压极限承载力。

d. $N_{rc0} < N \leq N_{rc0} + N_{sa0}$ 时取 $N_{sa} = N_{sa0}$, $N_{rc} = N - N_{sa0}$, 式中 N_{sa0} 为钢管的轴压极限承载力。

e. 当 $N > N_{rc0} + N_{sa0}$ 时说明截面太小, 应重新拟定截面尺寸。

2.5 试验验证

用上述简化方法对文献 [10] 中的 8 根试件进行计算(见表 1), 试验值与计算值之比的平均值为 1.059, 均方差为 0.031, 变异系数为 0.029, 可见误差不大, 计算精度能满足工程需要。从总的情况来看, 计算值略低于试验值, 这是由于计算中没有考虑对内芯混凝土的增强作用引起的, 但这种偏差对提高结构可靠度是有利的, 因而结果是偏安全的。

表 1 计算结果与试验结果的比较 kN

试件 编码	试验结果		简化方法计算结果		P_t/P_{jt}
	N_t	P_t	$N_{jt}(N_t)$	P_{jt}	
6C1-1	1000	300	1000	285.35	1.051
6B1-2	980	270	980	248.04	1.089
6A1-4	1020	280	1020	253.13	1.106
6A2-1	1100	290	1100	276.18	1.050
6A2-3	990	260	990	260.95	0.996
6B1-3	1000	280	1000	259.38	1.079
6C1-3	1000	300	1000	285.35	1.051
8A1-3a	1100	280	1100	267.02	1.049

注: N 为轴向压力, P 为该柱能抵抗的最大水平力。

3 算例

设一圆钢管增强高强混凝土组合柱, 承受设计轴力 $N = 9000$ kN, 设计弯矩 $M = 2550$ kN·m, $b = h = 850$ mm, 混凝土采用 C60, 钢管采用 Q235 级钢材, 钢筋采用 HRB335 级钢筋, 试对柱截面配筋。

解 假定核心圆钢管截面为 $\varnothing 325 \times 9$, 则

$$\lambda = \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa} h_0} = \frac{\gamma_s D}{8 h_0} (1 + \alpha^2) = 0.114$$

$$N_1 = (0.55 - \lambda) \alpha_1 f_c b h_0 = 8090.01 \text{ kN}$$

$$N_2 = (0.48 + 0.72\lambda) \alpha_1 f_c b h_0 = 10429.44 \text{ kN}$$

可知 $N_1 < N < N_2$, 取 $N_{rc} = N$, $N_{sa} = 0$, $M_{sa} = M_{sa0} = \gamma_s W_{sa} f_{sa} = 173$ kN·m, $M_{rc} = M - M_{sa} = 2377$ kN·m, $e_0 = \frac{M_{rc}}{N_{rc}} = 264.11$ mm $> 0.3 h_0$ (243 mm),

按大偏心受压计算, 对称配筋, 计算需纵筋 $A_s = A_s' = 1979$ mm², 每侧实配 8 $\varnothing 18$ ($A_s = A_s' = 2036$ mm²) HRB335 级纵筋。

4 结 语

本文基于塑性力学中的下限定理, 得出圆钢管增强钢筋高强混凝土柱正截面承载力解析解, 给出圆钢管增强钢筋高强混凝土柱正截面强度计算方法, 该方法计算结果与试验值接近, 计算过程较一般叠加法更加简捷和实用。

参考文献:

- [1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 72-73.
- [2] 李少泉, 沙镇平. 钢管混凝土柱正截面承载力计算的叠加方法 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23(3): 27-31.
- [3] 徐秉业, 陈森灿. 塑性理论简明教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- [4] 李惠. 高强混凝土及其组合结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 163-164.
- [5] 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: 230-231.
- [6] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范 [S].
- [7] 刘大海, 杨翠如. 型钢钢管混凝土高楼计算和构造 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 118-119.
- [8] YB 9082—97 钢管混凝土结构设计规程 [S].
- [9] 林拥军, 程文灏, 徐明, 等. 配有圆钢管的钢管混凝土柱轴压比限值的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 23-28.
- [10] 陈周熠, 赵国藩, 林立岩. 钢管混凝土增强高强混凝土柱的正截面强度计算 [J]. 建筑结构, 2001, 31(7): 11-13.

(收稿日期: 2005-12-16 编辑: 骆超)

(上接第 29 页)

参考文献:

- [1] MATTHYS S, TAERWE L, AUDENAERT K. Tests on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping [C]//DOLAN C W, RIZKALLA S H, NANNI A. Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures. Farmington Hills Mich: American Concrete Institute, 1998: 217-218.
- [2] SAADATMANESH H, EHSANI M R, JIN L. Seismic strengthening of circular bridge pier models with fiber composite [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(6): 639-647.
- [3] NAGUIB W, MIRMIRAN A. Time-dependent behavior of FRP-confined concrete columns under axial load [J]. ACI Structures Journal, 2002, 99(2): 142-148.
- [4] 陶忠, 于清. FRP 约束混凝土柱徐变特性的理论分析 [J]. 工业建筑, 2001, 31(4): 12-16.
- [5] 于清, 韩林海, 张铮. 长期荷载作用对 FRP 约束混凝土轴心受压构件力学性能的影响 [J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 58-63.
- [6] 周履, 陈永春. 收缩徐变 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994: 83-90.

(收稿日期: 2005-11-10 编辑: 骆超)