

钢筋网高性能水泥复合砂浆 加固圆柱的轴压性能研究

蒋隆敏¹, 尚守平², 刘方成¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412008; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 通过对9根圆柱单调加载的对比试验, 研究了钢筋网高性能水泥复合砂浆加固混凝土圆柱的轴压性能。在试验研究和理论分析的基础上, 揭示了此种加固薄层使柱各项性能得以改善或增强的作用机理, 建立了加固混凝土圆柱的承载力计算模型与计算公式。

关键词: 钢筋(丝)网高性能水泥复合砂浆; 加固圆柱; 抗压性能; 作用机理; 承载力计算公式

中图分类号: TU375.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2009)01-0012-07

Research on Axially Compressed Behavior of RC Strengthening Round Columns Using High Performance Composite Cement Mortar Reinforced with Mesh Reinforcements

Jiang Longmin¹, Shang Shouping², Liu Fangcheng¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The axially compressed behavior of RC strengthening round columns using high performance composite cement mortar reinforced with mesh reinforcements was studied by monotonic loading comparison experiment of nine round columns. Based on the experimental research and theory analysis, the acting mechanism of the CMMR laminates improving or increasing various performances of strengthening columns was exposed, the simple and suitable model and formulas were concluded for calculating the load-bearing capacity of the strengthening round columns.

Key words: high performance composite cement mortar reinforced with mesh reinforcements; strengthening of round columns; compressed behavior; acting mechanism; calculation formulas of the load-bearing capacity

钢筋网高性能水泥复合砂浆(CMMR)加固法以其加固效果显著、施工质量易保证、造价低廉、与原构件混凝土相容性和工作协调性好等特征获得了大范围推广使用^[1,2]。由于构造和性能上的差异, 在进行CMMR约束加固柱的设计计算中不能直接套用传统约束混凝土柱的计算模型。笔者通过对9根圆柱的对比试验, 研究了CMMR约束加固圆柱的抗压性能, 并在试验研究与理论分析的基础上, 建立了简单适用的被

加固圆柱的承载力计算模型与计算公式。

1 CMMR 加固圆柱的轴压性能试验研究

1.1 原柱试件与加固方案

本试验共制作了9根圆柱试件。为了消除附加弯矩的影响, 试件长细比选用0.3, 试件尺寸及所用钢筋

收稿日期: 2008-11-24

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目(03C580), 湖南省自然科学基金资助项目(02JJY3043)

作者简介: 蒋隆敏(1963-), 女, 湖南常德人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为新型材料及其在结构加固中的应用,

E-mail: nniinnaa2008@yahoo.com.cn;

尚守平(1953-), 男, 山东黄县人, 湖南大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型材料及其在结构加固中的应用。

见图1。为防止柱端局部承压破坏,在每根柱的端部各设钢筋网片2层,柱混凝土采用C30。每根柱试件留有同条件养护的立方试块2组(共6块),原柱及加固层构造详见图1。

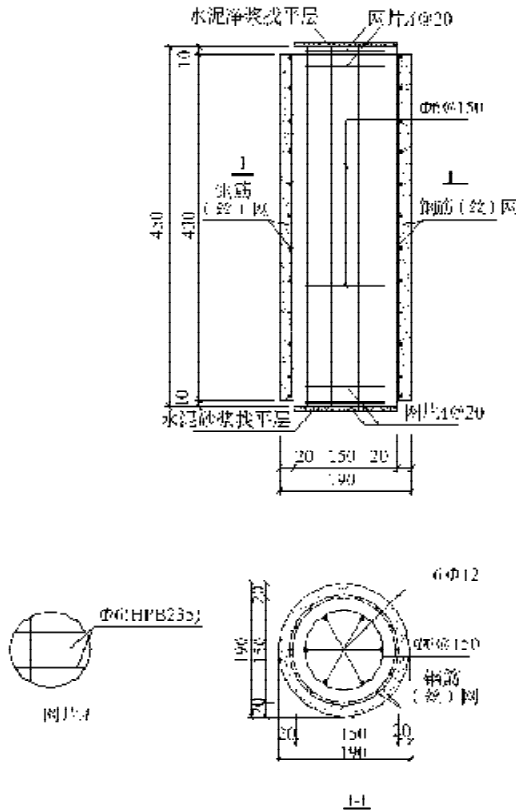


图1 原柱及加固层构造详图

Fig. 1 The details of round specimens and strengthening specimens structure

加固层材料基相及界面剂选用高性能复合砂浆和AB组分界面剂^[3],加固层网筋选用点焊热镀锌钢丝网和点焊冷拨丝网^[1]。为防止不良破坏形态,加固层的顶、底端与原柱顶、底端留有1 cm左右的间隙。圆柱试件加固方案见表1。

表1 圆柱试件加固方案

Table 1 The strengthening scheme of round specimens

试件编号	加固情况	加固层钢筋(丝)网			
		种类	规格	层数	搭接方法
C1	未加固	-	-	-	-
C2	素砂浆加固	-	-	-	-
C3	CMMR加固	热镀锌点焊铁丝网	网孔25×5	1	绑扎
C4				2	
C5				3	
C6				4	
C7	冷拨丝网	网孔25×25	Φ4	1	点焊
C8				1	
C9				1	

1.2 加固施工方法及步骤

- 1) 将柱身表面凿毛至露出粗骨料。
- 2) 用压力水冲洗混凝土新面的同时用钢丝刷刷净松动粉层。
- 3) 将横断面呈圆形的钢筋(丝)网笼就位后辅以搭接处的氩氟焊接(试件C5为绑扎搭接)使其紧靠试件,注意将纵向网筋放内层,横向网筋放外层且保证其搭接长度不小于50 mm,各层搭接头彼此错开。
- 4) 待试件风干至颜色变成深灰色时,用毛刷将已调成极稀糊状的界面剂涂刷在混凝土的毛面,直至毛面上看不到斑点为止。
- 5) 将复合砂浆分2层涂抹到试件上,第1层涂抹时用力揉搓,以保证砂浆与界面及钢筋(丝)网的紧密结合。加固层厚度控制在20 mm。试件置于常温潮湿环境下养护28 d以上。
- 6) 试件两端面采用高强水泥净浆找水平。

1.3 试验装置、加载制度及量测内容

试验在2 000 kN压力试验机上进行,试验装置参见图2。

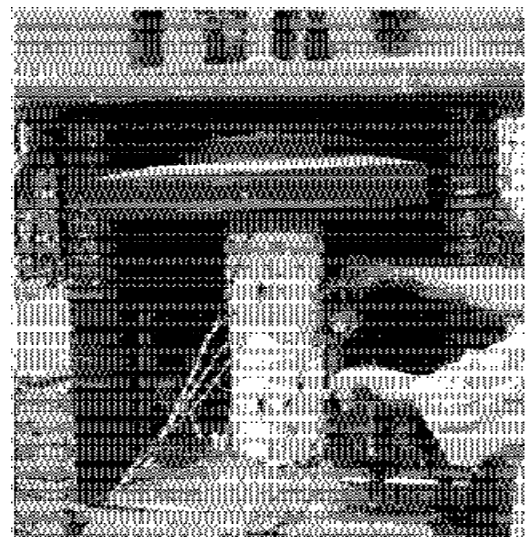


图2 试验装置

Fig. 2 Test installation

试验采用分级加载制度:在裂缝出现以前每级加载20 kN,开裂后每级加载40 kN,当加至理论估算的峰值荷载的80%~90%后,级差减半,每次持荷5 min后采集数据。到达试验峰值荷载后,持续加载至极限破坏。

试验的量测内容有原柱纵向主筋的应变与横向箍筋的应变、原柱混凝土表面与加固层中钢筋(丝)网及砂浆表面的横向应变与纵向应变。各瞬时应变试验值通过DH3816信号测试系统与计算机自动采集,手持式应变仪并行测定各时刻柱表纵向应变,以作校验之用。荷载由试验机直接读出。

1.4 试验结果与分析

1.4.1 承载力及应变试验结果的比较与分析

表2为各试件主要试验结果,图3为原柱混凝土轴力-应变全曲线。

由表2或图3可知:与未加固柱比,被加固圆柱的开裂压应力、峰值压应力、峰值压应变均有不同程度的提高,全曲线下降段也明显要平缓,延性得到了

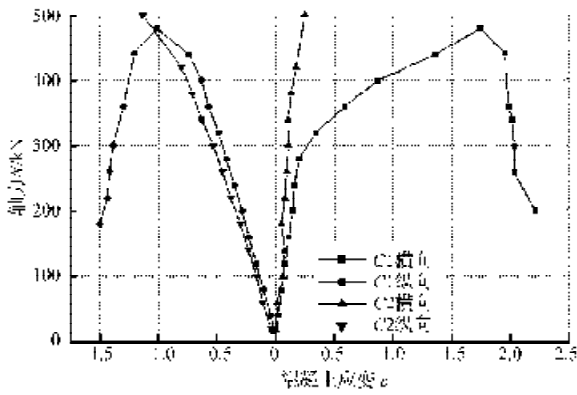
不同程度的改善。其中峰值压应力和峰值压应变的提高幅度随横向网筋体积配筋率的增大而增大,随横向网筋抗拉强度的提高而提高;延性的提高幅度大致随横向网筋体积配筋率的增大而增大,随钢丝网层数的增加而增大,随网丝直径的增大而减小,这与采用其它加固材料加固柱的研究结论类似^[4]。

表2 主要试验结果

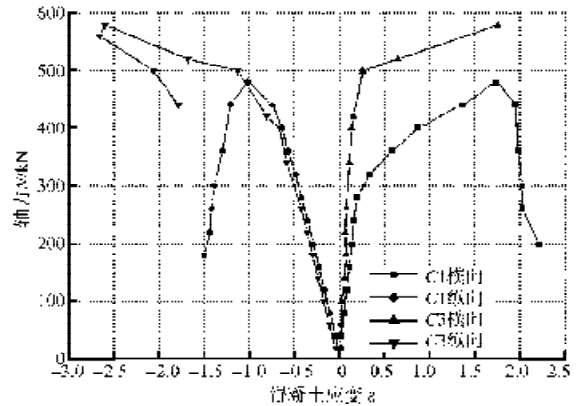
Table 2 Main testing results

试件编号	f_{cu}/MPa	$\rho_w/\%$	f_{cr}/MPa	n_{cr}	f_{cc}'/MPa	n_c	$\varepsilon_{cc}' \times 10^{-6}$	n_ε	f_{cr}/f_{cc}'
C1	31.42	-	22.51	1.00	27.18	1.00	1014	1.00	0.86
C2	31.61	0	23.78	1.11	28.30	1.04	1135	1.12	0.84
C3	32.44	0.16	26.04	1.21	32.72	1.20	2598	2.56	0.80
C4	33.65	0.33	28.31	1.32	38.50	1.42	3100	3.06	0.74
C5	33.65	0.33	28.31	1.32	36.23	1.33	2375	2.34	0.78
C6	32.71	0.49	30.57	1.42	41.90	1.54	1848	1.82	0.73
C7	33.11	0.66	35.10	1.63	44.16	1.62	3078	3.04	0.79
C8	34.47	0.84	30.57	1.42	54.35	2.00	3861	3.81	0.73
C9	33.54	1.34	35.10	1.63	60.01	2.21	4159	4.10	0.58

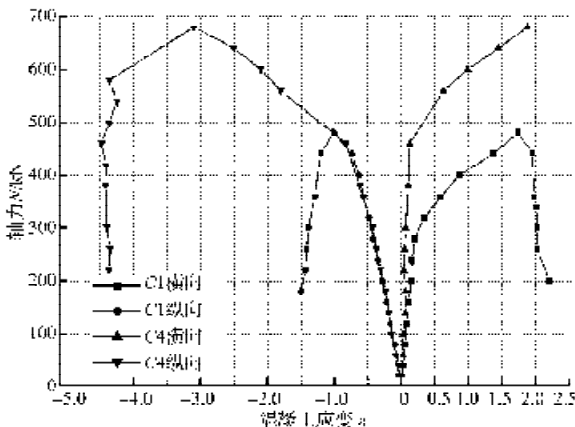
注: f_{cu} 为实测混凝土立方体抗压强度平均值; ρ_w 为横向网筋体积配筋率; f_{cr} 为被加固柱初裂时轴向压应力; n_{cr} 为各柱与未加固柱初裂时柱轴向压应力之比值; f_{cc}' 为实测峰值轴压应力即抗压强度; n_c 为各柱与未加固柱峰值压应力之比值; ε_{cc}' 为对应峰值应力的核心柱纵向应变即峰值应变; n_ε 为各柱与未加固柱峰值应变之比值。



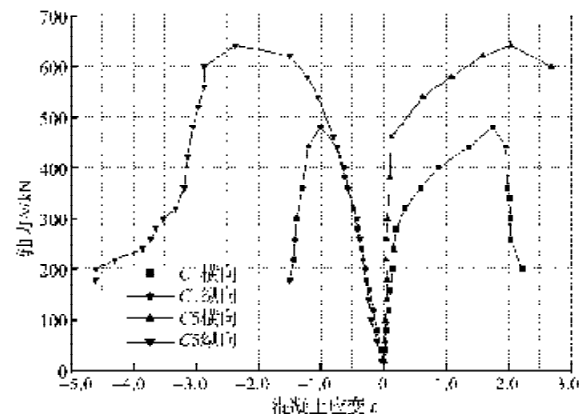
a) C1和C2混凝土轴力-应变对比图



b) C1和C3混凝土轴力-应变对比图



c) C1和C4混凝土轴力-应变对比图



d) C1和C5混凝土轴力-应变对比图

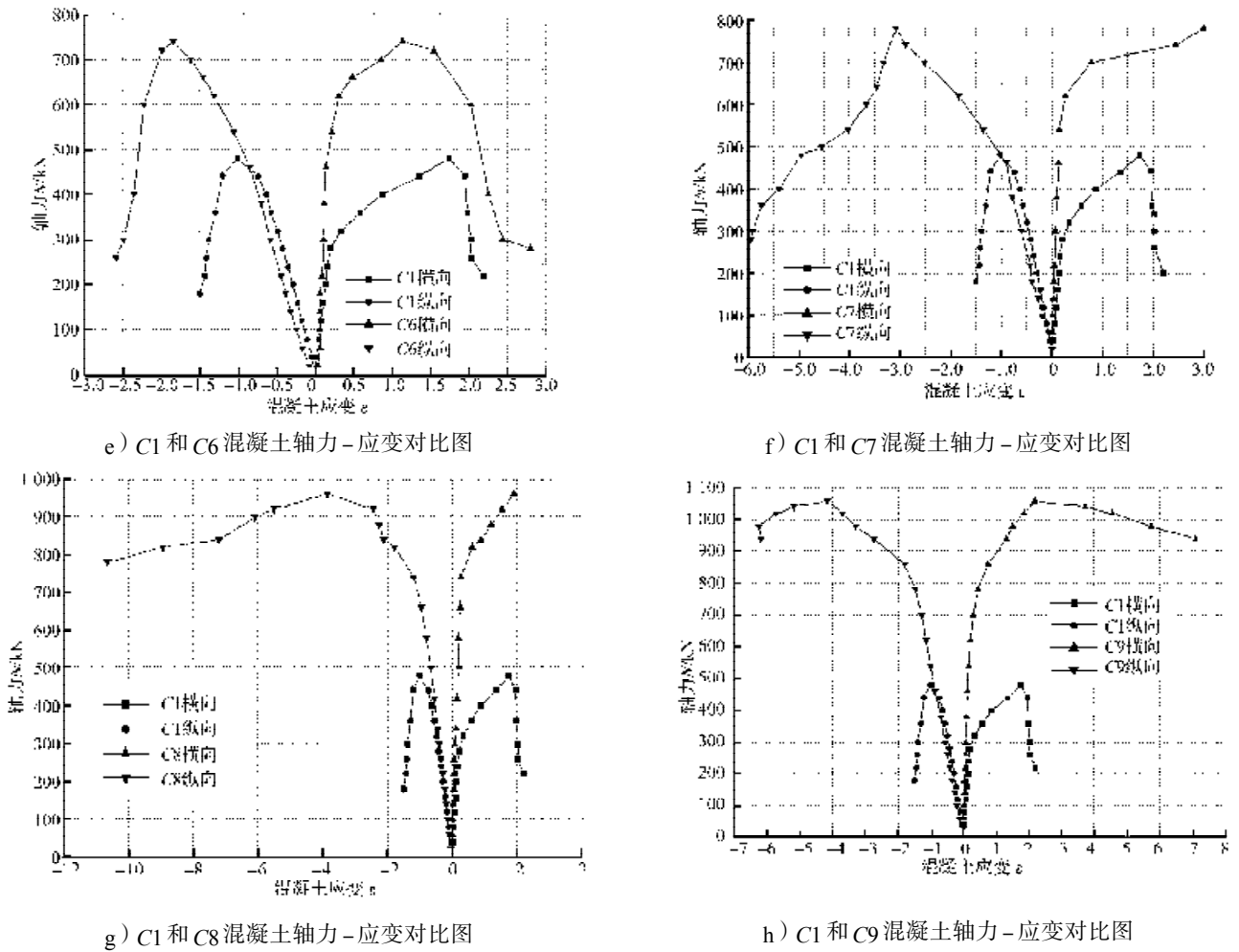


图3 原柱与加固柱混凝土轴力-应变比较

Fig. 3 Comparison of axial force-strain total curves of concrete for strengthening columns and round specimens

开裂应力的提高率随横向网筋体积配筋率的增大而增大, 但网筋直径越大, 网孔尺寸越大即加固层网筋分散性越差, 其提高幅度越小。

仅用与 CMMR 同条件的素砂浆加固的 C2, 其峰值压应力和峰值压应变及延性与未加固的原柱相比均有所提高, 说明这种高性能的砂浆对原柱具有间接分担轴力的作用和一定的径向约束作用。由于加固薄层的厚度总是被控制在 20 mm 左右, 所以, 对于加固小柱, 这部分作用所占的比例大; 但对于加固大柱, 这部分作用所占比例则较小。

同样含有 2 层钢丝网但横向网丝采用焊接搭接的 C4 与采用绑扎搭接的 C5 几乎能承受相等的峰值荷载, 后者加固层的主要拉裂部位并非沿绑扎处, 说明当加固层横向网筋配筋率较低, 且分散性较好时, 横向网筋采用焊接与绑扎搭接无多大区别, 但横向网筋强度较高或配筋率较高, 且采用 1~2 层直径较粗的钢筋网片时, 绑扎搭接是不可靠的。

试验结果还表明: 加固层中的横向网筋能有效约束混凝土的横向膨胀变形, 为纵向网筋提供可靠的锚

固作用, 有效阻止加固层的粘结滑移; 加固层中的纵向网筋除了因界面剪应力的传递具有与核心柱同步的纵向变形而间接承担轴向应力外, 还为横向网筋提供了很好的分布筋作用; 加固层中的复合砂浆除了对闭合式钢筋网笼有良好的粘结、握裹作用外, 还与表面经过凿毛、清洗处理再涂刷有粘结性能优良的界面剂的柱混凝土具有牢固的粘结作用, 从而通过界面的协调变形间接参与受压和产生一定的侧向约束作用。这种被加固柱表现出了优良的整体工作性能。

1.4.2 裂缝分布和破坏形态的比较与分析

未加固的 C1 脆性破坏特征明显, “一裂即坏”。因原柱配有少量箍筋, 故内核混凝土未完全散落, 见图 4 中 a)。

仅用砂浆加固的 C2, 在加载至柱峰值荷载的 85% 之前, 砂浆层靠其与原柱界面上较高的粘结强度使其与原柱变形同步。但在此之后, 由于砂浆的环向抗拉强度较低, 极其微弱的径向约束作用未能阻止 C2 纵向裂缝的迅速发展, 使 C2 的破坏也显脆性, 破坏形态类于 C1, 见图 4 中 b)。

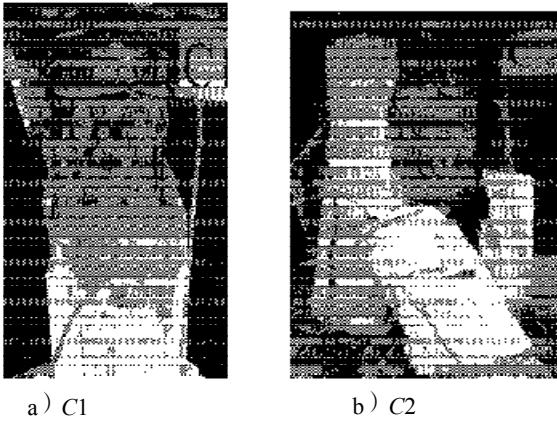


图4 C1和C2裂缝分布与破坏形态

Fig. 4 Cracks distribution and disruption mode of C1 and C2

用CMMR加固的圆柱,在加载初期,由于原柱的径向变形很小,加固层还未能发挥作用,试件外观上也无明显变化。当各柱所受压应力达到各自峰值应力的80%左右时,加固层环向拉应变增长显著,加固层表面可见纵向或略显斜向的裂缝开始形成,并逐渐延长和增多。此外,随加固层网筋配筋形式的不同及横向网筋体积配筋率的不同,还分别具有下述特征:1)采用1层或多层钢丝网复合砂浆加固的C3~C7,横向网筋体积配筋率中等偏少,但由于其网丝分散性好,使被加固柱的裂缝分散性也较好,即裂缝多而细,见图5中a)。2)采用1层冷拔丝网复合砂浆加固的C8、C9网筋体积配筋率较高,由于其网筋分散性不如C3~C7,故同样荷载等级作用下,裂缝也比C3~C7的要宽和疏;由于其加固层环向抗拉强度高及受拉横向网筋的硬钢特征,试件临近破坏时能间隙听到横向网筋崩断的尖脆声。对于C8、C9,破坏前加固层约束作用已很高,核心柱混凝土微裂缝的开展达到了较高程度,所以破坏后原柱的混凝土呈碎散状,而不是象约束作用较弱的柱混凝土呈块裂状,见图5中b)。

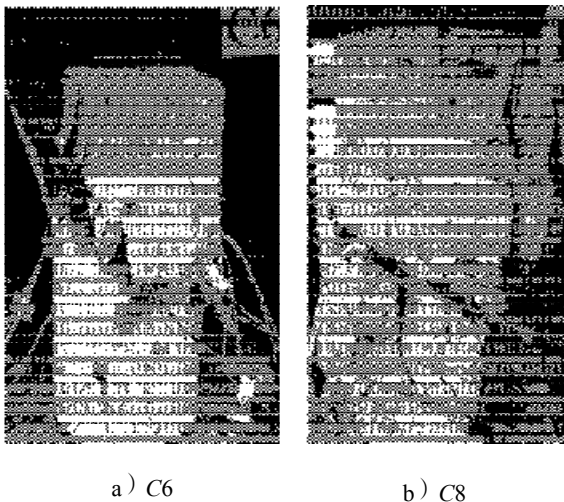


图5 C6和C8裂缝分布与破坏形态

Fig. 5 Cracks distribution and failure mode of C6 and C8

2 被加固圆柱工作机理及正截面承载力计算方法研究

2.1 加固层对圆柱的约束机理

轴向受压的混凝土柱如果同时受被动侧向压力作用,已开裂部位有重新闭合的趋势。大量的研究成果表明,这是因为柱混凝土的破坏是微裂缝不断产生和扩展的结果。随着应力的增加,微裂缝不断沿应力方向扩展,在破坏区段(如柱跨中)产生的许多裂缝将试件分成许多小柱,自由面处的小柱向外鼓出^[5]。Vppal.J.Y^[6]根据这种破坏形态提出了混凝土破坏的失稳理论。所以,约束混凝土中的约束层实际上是对柱提供了一系列的弹性支撑,在逐渐增大的各级荷载作用下,泊松比逐渐增大的小柱单元相互靠拢挤压,结构对应地处于各随遇的平衡状态,从而增加了结构的刚度、强度和延性。设想无约束混凝土自由面处小柱单元的失稳和结构刚度的减小,自然对应的是结构较低的破坏荷载和较差的延性。

2.2 加固圆柱的承载力计算方法

对于加固圆柱承载力分析作如下基本假定:1)被加固圆柱变形后截面仍保持平截面;2)不考虑CMMR加固层与混凝土之间的相对滑移;3)CMMR加固层对混凝土柱的径向约束应力仅由横向网筋来提供;4)忽略原柱间距为200mm以上的箍筋的约束作用。

先取加固层中横向网筋(圆形或螺旋形筋)为隔离体,如图6所示。

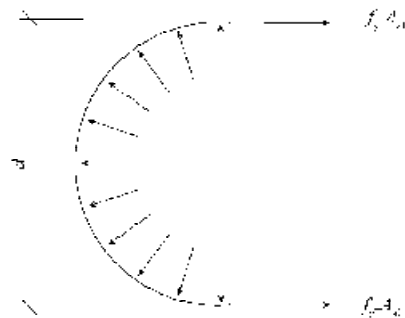


图6 横向网筋受力情况

Fig. 6 Force-bearing state of horizontal mesh reinforcement

假设CMMR加固层对原柱的径向约束作用在原柱侧面上均匀分布,根据静力平衡条件: $2f_{yt}A_{s1}n = \sigma_r s_t n d$,即 $2f_{yt}A_{s1} = \sigma_r s_t d$ 。(1)

式中: f_{yt} 为横向网筋的抗拉强度;

A_{s1} 为横向网筋的单肢截面面积;

n 为横向网筋的圈数;

σ_r 为横向网筋的径向有效约束应力;

s_t 为横向网筋的间距;

d 为原圆柱截面直径。

考虑式(1)中系数“2”和原柱混凝土强度等级

的影响, 引入系数 ψ 。

当混凝土立方强度 $f_{cu,k} \leq 50$ MPa 时, 取 $\psi = 2.0$;

当 $f_{cu,k} = 80$ MPa 时, 取 $\psi = 1.7$;

当 $50 \text{ MPa} < f_{cu,k} < 80 \text{ MPa}$ 时, 按直线内插法确定, 则式 (1) 变为

$$\psi f_{yt} A_{s1} = \sigma_r s_c d, \quad (2)$$

定义横向网筋的体积配筋率为 ρ_w , 则

$$\rho_w = \frac{A_{s1} \pi d n}{\pi d^2 n S_T} = \frac{4 A_{s1}}{S_1 d}, \quad (3)$$

故由式 (2)、(3) 有:

$$\sigma_r = \frac{\psi f_{yt} A_{s1}}{S_1 b} = \frac{\psi f_{yt}}{4} \rho_w \quad (4)$$

实际上, 钢筋网复合砂浆对原柱的径向约束作用在柱侧面上的分布并不是均匀的, 这是由于在忽略砂浆较小的径向约束作用后, 由置于内层的纵向网筋和置于外层的横向网筋形成的拱效应使施加的有效约束作用在紧靠网筋的部位最大, 在远离网筋的部位 (如网格中心处) 最小, 网格尺寸越大, 这一现象越明显。如图 7 所示, 图中斜线阴影部分为横向网筋的有效约束区, 细点阴影部分为纵向网筋的有效约束区, 二者的重叠部分 A_c 为 CMMR 的有效约束面积, 故有效约束率为: $K_c = A_c / A_c$ 。

式中: A_c 为对原柱混凝土的有效约束面积;

A_c 为原柱横截面上混凝土净面积, 对于圆柱:

$$A_c = \pi d^2 / 4 - A_s';$$

A_s' 为原柱纵向主筋的截面积。

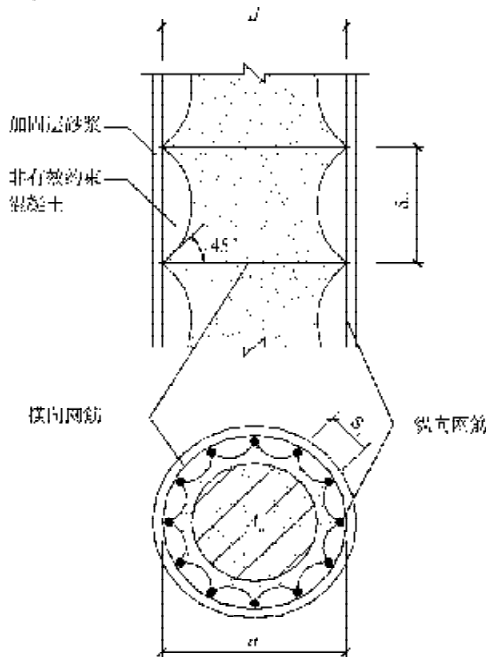


图 7 混凝土的有效约束范围

Fig. 7 Valid confined scope of concrete

在图 7 中, 假设拱作用线为二次抛物线, 其起始

点切线坡度为 45° , 则有 $A_c = \frac{\pi}{4} \left(d - \frac{S_T}{2} \right)^2$ 。用式 (5) 对

式 (4) 修正得到有效约束应力的计算公式为:

$$\sigma_r = \frac{1}{4} K_c \psi f_{yt} \rho_w \quad (6)$$

试验所测得各部分应变结果表明, 被加固柱的承载力由原柱直接受压承载力、加固层间接受压承载力和加固层横向网筋的约束作用 3 部分组成, 故 CMMR 加固混凝土圆柱的承载力计算公式为:

$$f_{cc} = f_{cor} + k f_{jac} + 4 \sigma_r \quad (7)$$

式中: $f_{cor} = \frac{f_c A_c + f_y' A_s'}{A}$, 即原混凝土柱的抗压强度;

$$f_{jac} = \frac{f_{yt}' A_{s1} - 20 \pi d f_m}{A}, \text{ 即加固层砂浆和纵向网筋}$$

为原柱提供的抗压强度;

k 为加固层抗压强度有效利用系数, 对于上下端横向网筋加密的加固圆柱取 0.3;

f_c 、 A_c 分别为原柱混凝土轴心抗压强度及混凝土净截面面积;

f_y' 为原柱纵向主筋的抗压强度;

A 为原柱横截面积;

f_{yt}' 、 A_{s1}' 分别为纵向网筋的抗压强度和全部纵向网筋的截面面积之和;

f_m 为加固层砂浆的轴心抗压强度。

表 3 将各柱轴心受压承载力实测值 f_{cc}' 与按式 (7) 的计算值进行了比较。

表 3 承载力实测值与理论计算值的比较

Table 3 Comparison between test value and calculating results of the load-bearing capacity

试件编号	f_{cc}' / MPa	f_{cc} / MPa	f_{cc}' / f_{cc}
C1	27.18	28.35	0.96
C2	28.31	39.79	0.75
C3	32.72	40.28	0.81
C4	38.50	41.66	0.92
C5	36.23	41.66	0.87
C6	41.90	42.60	0.98
C7	44.16	43.51	1.01
C8	54.35	44.80	1.21
C9	60.01	48.54	1.24

从表 3 可以看出, f_{cc}' / f_{cc} 比值在 0.75~1.24 范围内变化, 平均值为 0.99, 说明了上述计算方法具有较好的可靠性。与实测值比较, 配有 1~4 层 $\phi 1.4$ 铁丝网的加固柱, 其承载力计算值稍稍偏高, 这可能是计算中按所有横向网丝同时达到抗拉强度考虑, 而忽略了横向网丝承受环向拉应力时是被陆续拉断、其总抗拉强度取决于第 1 根钢丝拉断时各层网承担的总拉应力这

一情况造成的误差。配冷拔丝网片的加固柱,其承载力计算值比实测值稍稍偏低,这可能是单丝抗拉强度高、层数与根数少,接近同步达到抗拉强度,致使上述现象造成的误差小之故。所以,事先对20~25 mm厚且配有不同层数网片的复合砂浆片材进行抗拉试验,再将测得的强度值代入式(7)计算,将会减小这一误差。

3 结语

本文通过对9根圆柱的对比试验,得出如下结论:

1)用CMMR加固的RC柱,其抗压承载力、峰值应变、延性、刚度都得到了明显提高,这些性能指标随横向网筋体积配筋率的增大而增大;

2)被加固柱的裂缝分布形态及破坏形态有明显改善,即裂缝由原柱的疏而宽变得密而细,极限破坏形态由原柱的脆性转为延性,改善程度除了随横向网筋体积配筋率的增大而提高外,也随网筋的分散性提高而提高;

3)横向网筋可对核心柱提供有效的约束作用,未直接受压的加固层中的复合砂浆及纵向网筋通过界面变形协调及剪应力的传递可分担轴力;

4)将原柱表面凿毛,涂刷高效界面剂,上下端部横向网筋加密,按界面粘结抗剪强度配置较少的纵向网筋均为防止发生界面粘结破坏的有力措施;

5)本文所建立的加固柱承载力计算公式的计算结果与试验结果吻合较好。

本文所建立的加固混凝土圆柱的承载力计算公式较为简便,可供工程人员参考使用。在工程实践中,加固层的横向网筋可螺旋形布置,也可采用焊接搭接的封闭式圆形筋。下一步还应通过一定的足尺柱试验,研究尺寸效应的影响,改进其计算精度。

参考文献:

[1] 蒋隆敏. 钢筋网高性能水泥复合砂浆加固RC柱在静载与

低周反复荷载作用下的性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.

Jiang Longmin. The Research on the Performance of RC Columns Strengthened with High Performance Composite Cement Mortar Laminates Reinforced by Mesh Reinforcements under Monotonic Loading and Laterally Cyclic Loading[D]. Changsha: Hunan University, 2006.

[2] 尚守平. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构设计与施工指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

Shang Shouping. Guide of Design and Construction for Strengthening RC Structures Using High Performance Composite Cement Mortar Reinforced with Mesh Reinforcements[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[3] 蒋隆敏, 尚守平, 黄政宇. 一种适用于钢丝(筋)网水泥加固RC结构的纤维增强复合砂浆和界面剂[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 41-47.

Jiang Longmin, Shang Shouping, Huang Zhengyu. Fiber Reinforced Composite Mortar and Interfacial Adhesive for Strengthening of RC Structures with Ferrocement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 41-47.

[4] 叶列平, 叶燕华. 箍筋约束高强混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994, 31(4): 67-72.

Ye Lieping, Ye Yanhua. Experimental Study on the Complete Stress-Strain Curves of High Strength Concrete Confined by Stirrups[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1994, 31(4): 67-72.

[5] Uppal J Y. An Instability Theory of Failure for Concrete[J]. Magazine of Concrete Research (London), 1973, 25(82): 21-30.

(责任编辑: 张亦静)