

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.09.008

# 钢绞线网加固 RC 柱抗震性能影响因素分析

黄华<sup>1,2</sup>, 田轲<sup>1</sup>, 史金辉<sup>1</sup>, 刘伯权<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 通过建立钢绞线网加固 RC 柱的有限元模型, 分析了反复荷载作用下加固 RC 柱的力学性能, 验证了有限元模型的正确性。再根据有限元计算得到不同情况下加固柱的滞回曲线、骨架曲线、应变曲线、刚度和延性的变化等, 进一步研究了轴压比、箍筋配箍率、纵筋配筋率、混凝土强度、钢绞线数量以及偏心受压等因素对加固柱抗震性能的影响。结果表明: 随着轴压比的增大, 加固柱的极限承载力提高 9%~17%, 延性降低 9%~15%; 随着箍筋配箍率、纵筋配筋率、混凝土强度和钢绞线用量的增大, 加固柱的极限承载力和延性提高 2%~28%; 随着竖向压力的偏心距的增大, 加固柱的箍筋和钢绞线应变发展加快, 极限承载力降低 2%~13%, 耗能能力降低 35%, 柱的刚度和延性同样减小。

**关键词:** 桥梁工程; 影响因素; 有限元模拟; 钢绞线网加固柱; 抗震性能

中图分类号: U442.5<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2013) 09-0043-10

## Analysis of Influencing Factors of Seismic Performance of RC Columns Strengthened with Steel Wire Mesh

HUANG Hua<sup>1,2</sup>, TIAN Ke<sup>1</sup>, SHI Jin-hui<sup>1</sup>, LIU Bo-quan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710061, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** By establishing the finite element model of RC columns strengthened with steel wire mesh, the mechanical properties under cyclic loading is analyzed, and the correctness of the finite element model is verified. The hysteretic curves, skeleton curves, strain curves, and the change of stiffness and ductility of strengthened RC columns of the columns under different strengthening conditions are calculated by FE model to research the influence of axial compression ratio, stirrup ratio, longitudinal reinforcement ratio, concrete strength, steel wire quantity and eccentric compression on the seismic behavior of the strengthened columns. The results show that (1) with the increasing of axial compression ratio, the ultimate bearing capacity of the strengthened columns increased by 9% - 17%, while the ductility reduced by 9% - 15%; (2) with the increasing of stirrup ratio, longitudinal reinforcement ratio, concrete strength, and steel wire quantity, the ultimate bearing capacity and ductility of the strengthened columns increased by 2% - 28%; (3) with the increasing of vertical pressure eccentricity, the stirrup and steel wire strain of the strengthened columns developed quickly, the ultimate bearing capacity reduced by 2% - 13%, their ability of energy consumption reduced by 35%, and their stiffness and ductility decreased.

**Key words:** bridge engineering; influencing factor; finite element analysis; column strengthened with steel wire mesh; seismic performance

收稿日期: 2013-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51308065); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20090205120008); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (CHD2012JC026); 中国博士后科学基金项目 (2012M511956); 陕西省自然科学基金项目 (2012JQ7024)

作者简介: 黄华 (1979-), 男, 江苏常州人, 副教授, 博士后. (huanghua23247@163.com)

## 0 引言

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术具有耐腐蚀性能和耐久性能强、对结构外观影响不大、抗裂、无毒环保等特点,近年来在工程加固领域得到推广和应用。目前对此类加固结构的研究主要集中在梁式加固柱方面<sup>[1-3]</sup>,而加固柱的抗震性能研究相对较少,试验资料不足。清华大学陈亮等进行了2组8根钢绞线网加固柱的低周反复荷载试验,研究了轴压比为0.24和0.48条件下加固柱的滞回曲线、骨架曲线、箍筋和钢绞线的应变曲线、滞回面积、刚度变化曲线等,认为加固柱的极限承载力、延性、耗能能力都得到了明显的提高<sup>[4]</sup>。中国建筑科学研究院钟聪明等对采用该技术加固的6根钢筋混凝土柱进行低周反复荷载试验,研究了轴压比为0.6、0.7、0.8条件下加固柱的力学性能,认为加固柱承载力平均提高50%左右,耗能能力平均增加1.6倍左右,延性系数平均提高30%左右,并提出了加固柱正截面承载力的计算方法<sup>[5]</sup>。张立峰等进行了高强钢绞线网加固的6组18根偏心受压柱试验,分析了加固柱的破坏形态、裂缝分布、荷载-挠度曲线、箍筋和钢绞线应变、极限承载力、受力机理等,认为大、小偏心受压柱承载力提高幅度为16%~81%,加固柱整体工作性能良好<sup>[6]</sup>。该试验存在以下不足:一方面,没有考虑各加固柱在偏心受压下的抗震性能;另一方面,没有考虑长细比对柱加固效果的影响。以上研究仅考虑了轴压比等少量因素对柱加固效果的影响。此外,实际工程中绝大部分钢筋混凝土柱都处于偏心受压状态,地震作用完全可能垂直于偏心受压面,此种情况下加固柱的抗震性能必须进行研究。

因此,本文在已有试验研究的基础上,采用ANSYS有限元程序,建立高强钢绞线网-聚合物砂浆加固RC柱的有限元模型,分析反复荷载作用下轴压比、箍筋配箍率、纵筋配筋率、混凝土强度、钢绞线用量等因素对加固柱抗震性能的影响,突出分析了偏心受压对加固柱的影响,结果可为工程实践提供参考。

## 1 试验测试的数值模拟

### 1.1 试验研究

现以清华大学陈亮等所做高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土柱反复荷载试验<sup>[4]</sup>为基础,建立有限元分析模型,并与试验结果进行对比验证。

试验共分为2组:1组为低轴压比(0.24)加固柱,其中1根为对比柱RCC1-1,3根为加固柱

RCC1-2、RCC1-3、RCC1-4;另1组为高轴压比(0.48)加固柱,其中1根为对比柱RCC2-1,3根为加固柱RCC2-2、RCC2-3、RCC2-4。加固柱的尺寸均为250 mm×250 mm,加固层厚度为25 mm,箍筋均为 $\Phi 6@150$ ,屈服强度为317 MPa,纵筋均为4 $\Phi 16$ ,屈服强度均为385 MPa。试件尺寸及加载见图1。

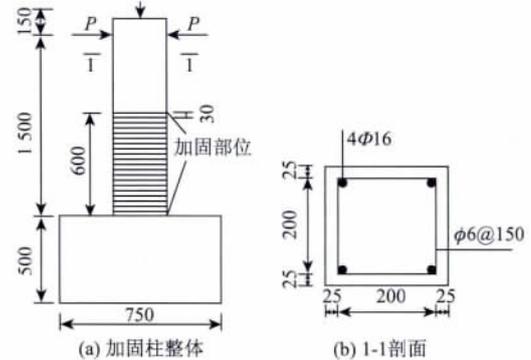


图1 加固柱尺寸及配筋图(单位: mm)

Fig. 1 Dimensions and reinforcement of strengthened column (unit: mm)

### 1.2 数值模拟

有限元模型以RCC1-1、RCC1-3、RCC2-3共3根试验柱为原型,主要参数见表1。有限元模型中:混凝土采用Solid65单元和Willam-Warnke 5参数破坏准则,采用约束混凝土的本构关系<sup>[7]</sup>;钢筋采用Link8单元和多线性随动强化准则(KINH)<sup>[8]</sup>;为避免加载点应力集中,在加载端设置钢垫板,用Solid45单元模拟,采用理想弹塑性本构关系。为简化建模,柱底部固定混凝土台座,采用整体式建模,其他部分采用分离式建模,并完全固定柱底混凝土台座,以满足试验约束条件。

表1 模拟加固柱的参数

Tab. 1 Parameters of simulation strengthened columns

构件编号	轴压比	混凝土强度/MPa	砂浆强度/MPa	配筋量	钢绞线极限抗拉强度/MPa
RCC1-1	0.24	31.7	—	—	1 535
RCC1-3	0.24	28.9	62.1	$\Phi 3.2@30$	1 535
RCC2-3	0.48	30.1	58.3	$\Phi 3.2@30$	1 535

### 1.3 计算与试验结果分析

荷载为低周反复荷载,采用位移加载,开始每级荷载4 mm;柱顶位移达到20 mm后,每级荷载5 mm。为节省计算时间,每级荷载均循环2次。加固柱的计算结果与试验结果的对比见图2和表2。由图2可以看出,滞回曲线的计算值与试验值基本吻合,在初始阶段,计算值和试验值模拟得很好,随着加固柱裂缝的发展,计算曲线的捏拢现象和恢复

变形滞后现象比试验曲线更加明显, 同级加载位移下, 计算值比试验值更低, 可能有以下 2 个原因: 一方面, 有限元分析时混凝土和聚合物砂浆的本构关系和试验有差别; 另一方面, ANSYS 认为混凝土开裂后, 在与裂缝垂直方向上的混凝土刚度为零,

而实际上混凝土开裂后受力复杂, 即使形成了微细裂缝, 由于粗细骨料之间的咬合作用, 截面刚度的降低并不像有限元模型降低得这样快。由表 2 可以看出, 极限荷载计算值和试验值吻合, 加固柱的计算值和试验值误差都在 10% 以内。

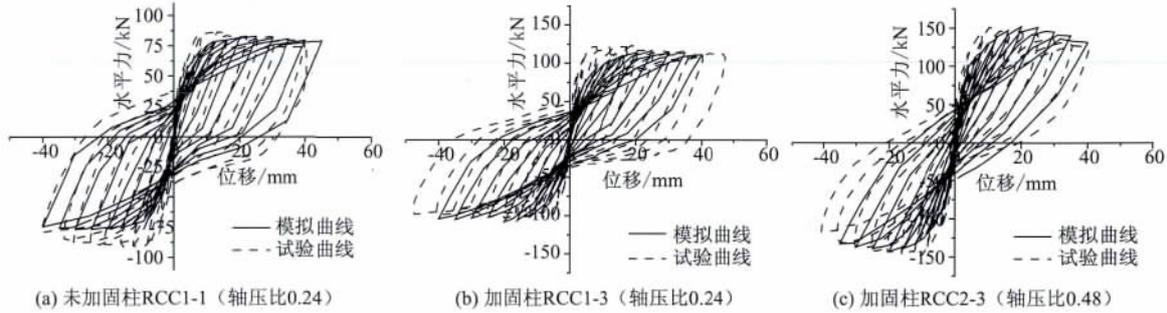


图 2 加固柱滞回曲线

Fig. 2 Hysteretic curves of strengthened columns

表 2 加固柱数值计算值与试验值对比表

Tab. 2 Comparison between numerical values and experimental results of strengthened columns

柱子编号	轴压比	试验值/kN		计算值/kN		计算值/试验值	
		反向	正向	反向	正向	反向	正向
RCC1-1	0.22	-77	82.8	-90.07	95.4	1.17	1.15
RCC1-3	0.24	-109	116	-110	124	1.01	1.07
RCC2-3	0.46	-142	153	-148	151	1.04	0.99

## 2 抗震加固性能的影响因素分析

在以上有限元分析基础上, 研究轴压比、箍筋配箍率、纵筋配筋率、混凝土强度、钢绞线数量对混凝土加固柱抗震性能的影响。

### 2.1 轴压比对抗震性能的影响

轴压比对加固柱抗震性能的影响分析主要考虑轴压比为 0.24、0.36、0.48 的 3 种情况, 构件编号为 RC-1、RC-2、RC-3。为方便分析, 3 种情况下混凝土强度均为 30.1 MPa, 聚合物砂浆强度均为 58.3 MPa, 其余参数同 1.1 节试验。

不同轴压比下加固柱的滞回曲线、骨架曲线、极限承载力和延性分别见图 3 (a) ~ (b)、表 3。可以看出, 随轴压比的增加, 加固柱 RC-2, RC-3 与 RC-1 相比, 极限承载力分别提高 9.4% 和 17.3%; 随轴压比的增大, 同级荷载下, 加固柱滞回曲线的捏拢现象增强, 但滞回环面积略有增加, 耗能能力提高; 同级荷载下, 随着轴压比增大, 加固柱的刚度增大, 但加固柱屈服后的承载力下降加快, 加固柱的延性降低, 其幅度为 9% ~ 15%。

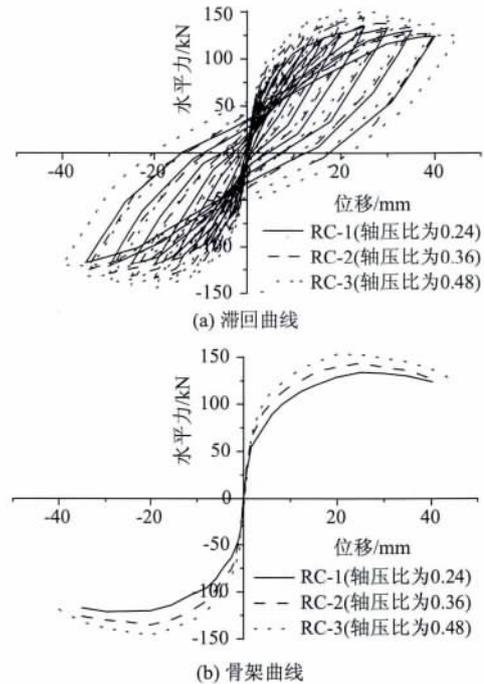


图 3 不同轴压比的加固柱曲线

Fig. 3 Curves of strengthened columns in different axial compression ratios

表 3 不同轴压比下加固柱的极限承载力和位移

Tab. 3 Ultimate bearing capacity and displacement of strengthened columns in different axial compression ratios

构件编号	极限承载力/kN		承载力平均值/kN	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数
	正向	反向				
RC-1	134	-121	127.5	5.47	48.8	8.92
RC-2	144	-135	139.5	5.21	42.2	8.10
RC-3	153	-146	149.5	5.67	43	7.58

表4 不同轴压比下材料的应变

Tab.4 Material's strain in different axial compression ratios

特征位移/mm		2	8	16	20	25	30	35
箍筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-1	4	32	74	113	153	204	256
	RC-2	7	41	90	133	180	251	322
	RC-3	8	48	97	146	201	283	370
纵筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-1	-1	64	225	336	459	605	763
	RC-2	-16	41	151	219	286	378	440
	RC-3	-32	24	147	240	320	423	476
钢绞线 应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-1	6	47	96	139	180	249	302
	RC-2	8	89	160	238	318	458	578
	RC-3	10	94	159	235	309	431	593

注:特征位移为每个加载循环的反向最大加载位移,应变为其对应值。

不同轴压比下材料的应变见表4。由表4可以看出:箍筋、钢绞线、纵筋的应变随着加载位移的增大而增大;同级荷载下,轴压比增大,纵筋的应变减小,箍筋和钢绞线的应变增大,但钢绞线应变的增大幅度更明显。

2.2 配箍率对抗震性能的影响

箍筋对加固柱抗震性能的影响,主要考虑配箍率为0.09、0.25、0.49的情况,加固柱编号为RC-4、RC-5、RC-6。为方便分析,3种情况下箍筋屈服强度均为317 MPa,柱轴压比为0.48,混凝土强度为30.1 MPa,聚合物砂浆强度为58.3 MPa,其余参数同1.1节试验。

不同配箍率下加固柱的滞回曲线、骨架曲线、极限承载力和延性分别见图4(a)~(b)、表5。可以看出:随着配箍率的增大,加固柱极限承载力的提高幅度不到2%,同级荷载下,滞回曲线捏拢现象减弱,滞回环面积略有增加,耗能能力增强;加固柱屈服以后,在同级荷载下,随着配箍率的增加,承载力下降速度变慢,加固柱的延性和抗震性能提高,其幅度为1.7%~3.1%。

表5 不同配箍率下加固柱的极限承载力和位移

Tab.5 Ultimate bearing capacity and displacement of strengthened columns in different stirrup ratios

构件 编号	极限承载力/kN		承载力平 均值/kN	屈服位移/ mm	极限位移/ mm	延性 系数
	正向	反向				
RC-4	153	-146	149.5	4.67	43.1	9.229
RC-5	153	-147	150	4.69	44	9.382
RC-6	153	-147	150	4.15	39.5	9.518

不同配箍率下各材料的应变见表6。可以看出:箍筋、纵筋和钢绞线的应变均随着加载位移的增大而增大;同级荷载作用下,随着配箍率增大,箍筋

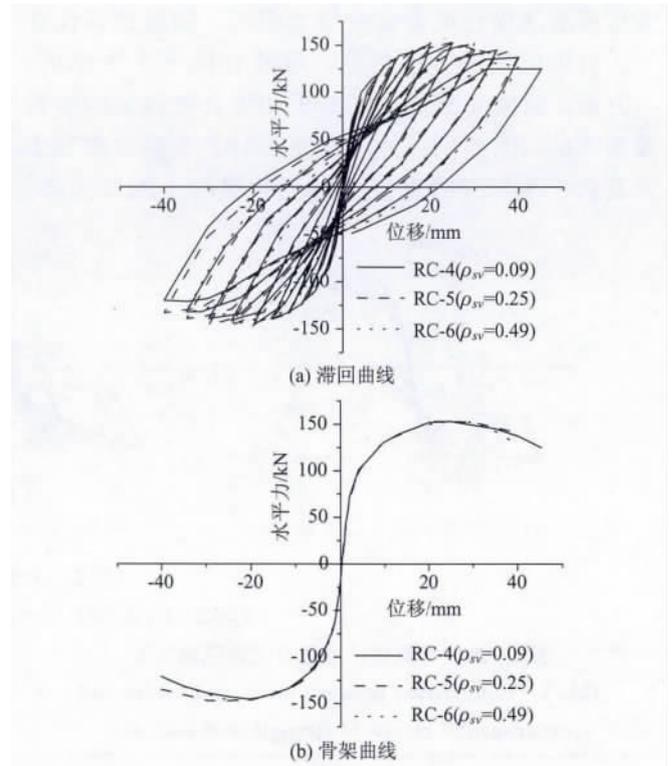


图4 不同配箍率的加固柱曲线

Fig.4 Curves of strengthened columns in different stirrup ratios

和纵筋应变均减小,且加载位移越大,减小的幅度越大,但钢绞线的应变变化不大。

2.3 纵筋配筋率对抗震性能的影响

纵筋对加固柱抗震性能的影响,主要考虑配筋率为0.32、0.50、0.79,加固柱编号为RC-7、RC-8、RC-9。为方便分析,3种情况下纵筋屈服强度均为385 MPa,柱轴压比均为0.48,混凝土强度均为30.1 MPa,聚合物砂浆强度均为58.3 MPa,箍筋均为 $\Phi 10@150$ ,其余参数同1.1节试验。

表6 不同配箍率下材料的应变

Tab.6 Material's strain in different stirrup ratios

特征位移/mm		2	8	16	20	25	30	35
箍筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-4	8	48	146	201	283	370	448
	RC-5	8	34	97	123	166	217	269
	RC-6	7	24	62	79	96	100	101
纵筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-4	2	191	730	967	1282	1485	1561
	RC-5	2	190	722	925	1202	1440	1541
	RC-6	2	189	659	844	1089	1205	1181
钢绞线 应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-4	10	94	235	309	431	593	679
	RC-5	10	105	261	355	461	568	820
	RC-6	10	94	230	314	412	568	679

注:特征位移为每个加载循环的反向最大加载位移,应变为其对应值。

不同配筋率下加固柱的滞回曲线、骨架曲线、极限承载和延性分别见图 5 (a) ~ (b)、表 7。可以看出: 随纵筋配筋率的增加, 加固柱 RC-8, RC-9 与 RC-7 相比, 极限承载力分别提高了 12% 和 28%; 随纵筋配筋率的增大, 同级荷载下, 加固柱滞回曲线的捏拢现象减弱, 所以滞回环和总的滞回面积逐渐增大, 加固柱的耗能能力大幅度提高; 同级荷载下, 纵筋配筋率越大, 加固柱屈服后的刚度越大, 加固柱的承载力下降越慢, 加固柱的延性提高幅度为 10% ~ 17%; 随着纵筋配筋率的增大, 柱顶的极限位移  $\Delta y$  变大, 延性系数  $\mu = \Delta y / \Delta u$  变大。

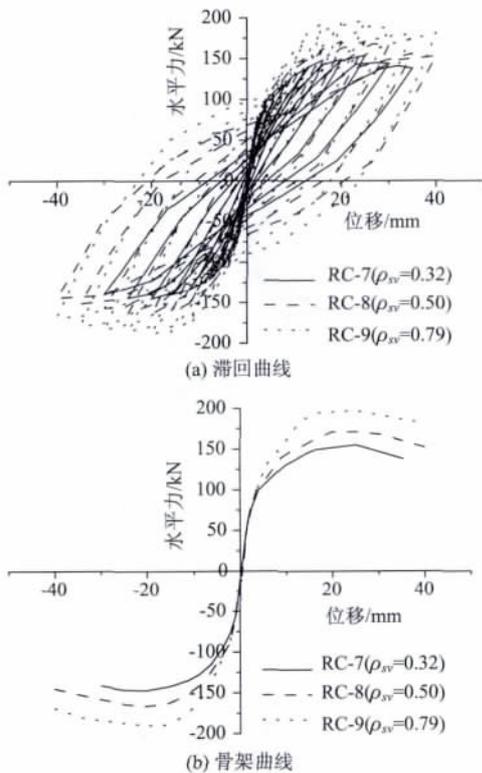


图 5 不同配筋率的加固柱骨架曲线

Fig. 5 Curves of strengthened columns in different reinforcement ratios

表 7 不同配筋率下加固柱的极限承载力和位移

Tab. 7 Ultimate bearing capacity and displacement of strengthened columns in different reinforcement ratios

构件编号	极限承载力/kN		承载力平均值/kN	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数
	正向	反向				
RC-7	155	-147	151	6.11	34.1	5.58
RC-8	171	-166	168.5	6.31	38.7	6.13
RC-9	197	-190	193.5	6.49	42.5	6.55

不同配筋率下材料的应变见表 8。可以看出: 加固柱屈服以前, 纵筋的应变随着加载位移的增大而增大, 同一级荷载下, 配筋率增大, 纵筋的应变减

小; 加固柱屈服以后, 纵筋的应变随加载位移和配筋率的变化不大; 箍筋和钢绞线的应变随着加载位移的增大而增大, 同级荷载作用下, 配筋率增大, 钢绞线的应变略有增大, 但箍筋的应变变化不大。

表 8 不同配筋率下材料的应变

Tab. 8 Material's strain in different reinforcement ratios

特征位移/mm	2	8	16	20	25	30	35
箍筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-7	8	34	97	123	169	212
	RC-8	7	36	104	133	175	218
	RC-9	7	36	96	129	179	214
纵筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-7	2	191	709	922	1 196	1 365
	RC-8	3	174	824	1 093	1 428	1 734
	RC-9	7	152	619	871	1 226	1 368
钢绞线 应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-7	10	96	231	303	402	511
	RC-8	10	113	292	390	529	629
	RC-9	9	99	228	333	483	692

注: 特征位移为每个加载循环的反向最大加载位移, 应变为其对应值。

### 2.4 混凝土强度对抗震性能的影响

混凝土强度对加固柱抗震性能的影响, 主要考虑 C25、C35、C45 这 3 种情况, 加固柱编号为 RC-10、RC-11、RC-12。为方便分析, 3 种情况下聚合物砂浆的强度均为 60 MPa, 柱轴压比均为 0.48, 其余参数同试验 1.1。

不同混凝土强度下加固柱的滞回曲线、骨架曲线、极限承载力和延性分别见图 6 (a) ~ (b)、表 9。可以看出: 随着混凝土强度的增加, 加固柱 RC-11、RC-12 与 RC-10 相比, 极限承载力分别提高了 4.4% 和 6.8%; 随着混凝土强度的增加, 同级荷载下, 加固柱滞回曲线的捏拢现象变得越来越明显, 滞回曲线的面积逐渐增大, 耗能能力有一定程度的提高, 但是幅度不大; 在同级加载位移下, 随着混凝土强度增加, 加固柱的承载力下降变慢, 延性提高, 其幅度为 3% ~ 28%。

表 9 不同混凝土强度下加固柱的极限承载力和位移

Tab. 9 Ultimate bearing capacity and displacement of strengthened column in different concrete strengths

构件编号	极限承载力/kN		平均值/kN	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数
	正向	反向				
RC-10	150	-144	147.0	4.99	36.2	7.25
RC-11	155	-152	153.5	4.81	36.1	7.51
RC-12	161	-153	157.0	4.5	41.8	9.29

不同混凝土强度下各材料的应变见表 10。可以看出: 箍筋、纵筋、钢绞线的应变随着加载位移的增大而增大; 在同级加载位移下, 箍筋和钢绞线的

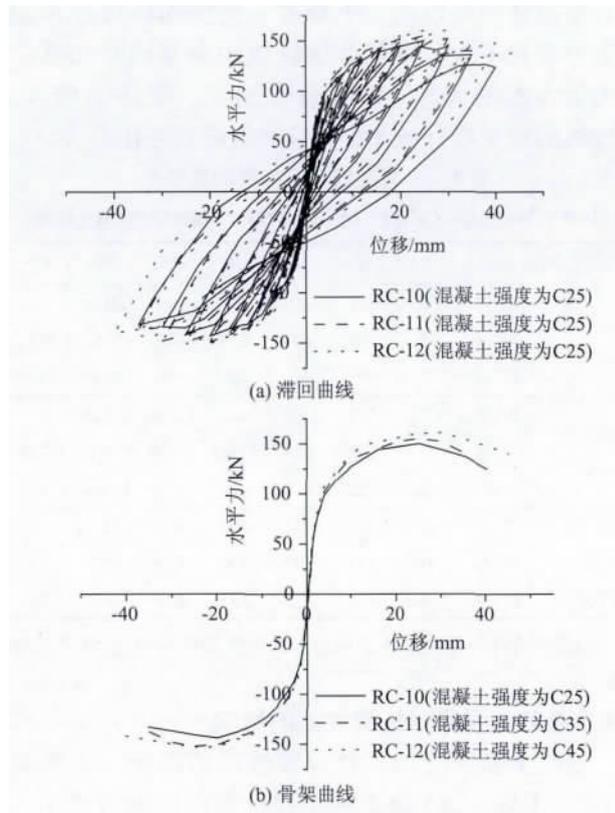


图6 不同混凝土强度的加固柱曲线

Fig. 6 Curves of strengthened columns in different concrete strengths

应变随混凝土强度的增大逐渐减小，而纵筋的应变随混凝土强度的增大逐渐增大。

表10 不同混凝土强度下材料的应变

Tab. 10 Material's strains in different concrete strengths

特征位移/mm	2	8	16	20	25	30	35
箍筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-10	10	53	143	204	292	402
	RC-11	8	45	141	196	278	358
	RC-12	7	42	138	187	258	334
纵筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-10	0	172	548	722	936	1 133
	RC-11	7	187	781	1 034	1 438	1 939
	RC-12	13	186	727	959	1 253	1 503
钢绞线 应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-10	11	133	349	453	610	734
	RC-11	9	105	267	357	470	558
	RC-12	9	96	257	335	456	620

注：特征位移为每个加载循环的反向最大加载位移，应变为其对应值。

### 2.5 钢绞线用量对抗震性能的影响

钢绞线对加固柱抗震性能的影响，主要考虑钢绞线直径为2.5、3.2、4.5 mm这3种情况<sup>[9]</sup>，加固柱的编号分别为RC-13、RC-14、RC-15。为方便分析，3种情况下钢绞线的极限抗拉强度均为1 535 MPa。模型的轴压比均为0.48，混凝土强度均为30

MPa，聚合物砂浆的强度均为60 MPa，其余参数同试验1.1。

不同钢绞线用量下加固柱的滞回曲线、骨架曲线、极限承载力和延性分别见表11、图7(a)~(b)。可以看出：随着钢绞线直径增大，加固柱RC-14、RC-15与RC-13相比，极限承载力分别提高了8.1%和27.3%；随钢绞线直径增加，滞回曲线的捏拢现象迅速减弱，同级荷载下，加固柱卸载后的残余变形增大，滞回环面积增大，加固柱耗能能力有一定程度的提高；随着钢绞线直径增大，加固柱承载力下降速度变慢，加固柱延性增大；随着钢绞线直径增大，加固柱的屈服位移、极限位移、

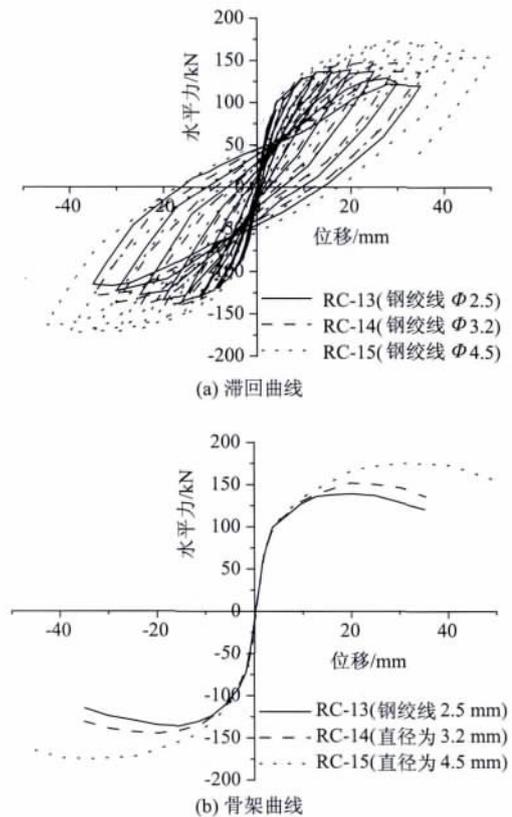


图7 不同钢绞线直径的加固柱曲线

Fig. 7 Curves of strengthened columns in different steel wire diameters

表11 不同钢绞线直径下加固柱的极限承载力和位移

Tab. 11 Ultimate bearing capacity and displacement of strengthened column in different steel wire diameters

构件 编号	极限承载力/kN		承载力 平均值/kN	屈服位移/ mm	极限位移/ mm	延性 系数
	正向	反向				
RC-13	139	-136	137.5	4.78	36.8	7.70
RC-14	152	-145	148.5	4.92	41.2	8.37
RC-15	175	-175	175	5.26	53.1	10.10

极限荷载位移都明显增大, 且极限位移提高幅度远大于屈服位移提高幅度。

不同钢绞线直径下各材料的应变见表 12。可以看出: 箍筋、纵筋、钢绞线的应变随着加载位移的增大而增大; 同级加载位移下, 箍筋和钢绞线的应变随着钢绞线直径的增加而减小, 纵筋的应变随钢绞线直径的增加变化不大。

表 12 不同钢绞线直径下材料的应变

Tab. 12 Material's strain in different steel wire diameter

特征位移/mm	4	12	20	25	30	35	40
箍筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-13	16	106	235	326	402	494
	RC-14	16	98	205	290	377	436
	RC-15	14	83	159	217	285	347
纵筋应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-13	69	557	1 164	1 425	1 530	1 706
	RC-14	69	486	1 001	1 291	1 501	1 461
	RC-15	67	479	902	1 174	1 484	1 699
钢绞线 应变/ ( $\times 10^{-5}$ )	RC-13	26	191	406	613	917	1 114
	RC-14	22	189	377	471	633	838
	RC-15	22	142	267	347	427	491

注: 特征位移为每个加载循环的反向最大加载位移, 应变为其对应值。

### 3 偏心受压柱加固抗震性能影响分析

#### 3.1 加固柱的模拟加载

偏心受压对加固柱抗震性能的影响, 主要考虑轴压比为 0.24 的加固柱 RC1-0、RC1-1、RC1-2、RC1-3, 偏心距分别为 30、30、60、90 mm, 其中 RC1-0 为未加固柱; 轴压比 0.48 的加固柱 RC2-0、RC2-1、RC2-2、RC2-3 的偏心距分别为 30、30、60、90 mm, 其中 RC2-0 为未加固柱。模拟加固柱的混凝土强度为 30 MPa, 聚合物砂浆的强度为 60 MPa, 其余参数同试验 1.1。加固柱的加载方式见图 8。

#### 3.2 加固柱的滞回曲线分析

不同偏心受压下轴压比为 0.24 的加固柱滞回曲线和骨架曲线见图 9 (a) ~ (b)。可以看出, 当偏心距相同时, 加固柱和未加固柱相比, 刚度和极限承载力有明显提高; 加固柱屈服以后, 同级荷载下, 加固柱的刚度退化和承载力下降速度比未加固柱慢, 这说明了加固柱的延性比未加固柱大; 加固柱在初始阶段, 滞回曲线呈线性变化, 加固柱屈服以后, 刚度退化加快, 加固柱的非线性逐渐明显, 随着偏心距的增大, 加固柱线性阶段的加载循环减少, 非线性阶段的加载循环的增加; 随着偏心距的增大, 加固柱的极限承载力逐渐减小, 其幅度为 2% ~ 4%,

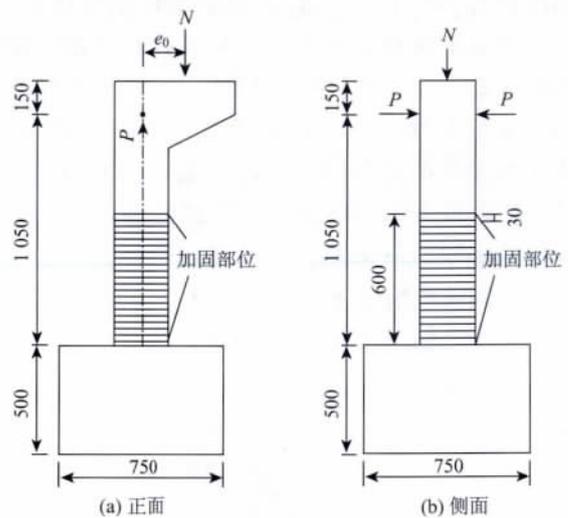


图 8 加固柱加载示意图 (单位: mm)  
Fig. 8 Loading on strengthened column (unit: mm)

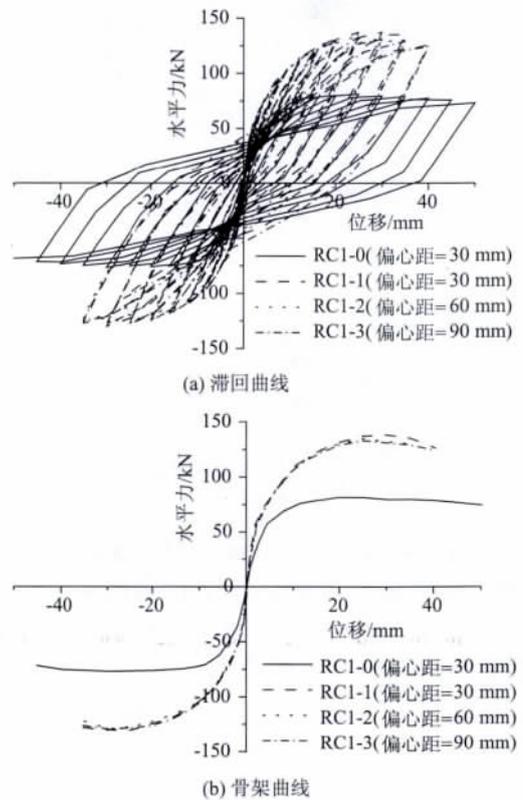


图 9 轴压比 0.24 时加固柱的曲线  
Fig. 9 Curves of strengthened column in axial compression ratio of 0.24

同级荷载下, 加固柱的承载力下降加快, 延性降低, 但是不明显; 随着偏心距的增大, 加固柱在同级加载位移下的残余变形增大, 加固柱的恢复变形滞后现象越来越不明显。

不同偏心受压情况下轴压比 0.48 的加固柱滞回曲线和骨架曲线见图 10 (a) ~ (b)。可以看出: 与

低轴压比加固柱相比,加固柱的初始刚度变大了,加固柱的极限承载力提高了,加固柱滞回曲线的捏拢现象逐渐严重,加固柱的屈服以后,加固柱刚度的退化速度加快,加固柱的承载力下降速度加快,这说明加固柱的延性减小。随着偏心距的增大,加固柱的极限承载力逐渐减小,其幅度为6%~13%,加固柱的极限位移减小,延性逐渐降低,加固柱屈服以后,同荷载情况下,轴压比0.48的加固柱承载力下降速度比轴压比0.24的加固柱快。

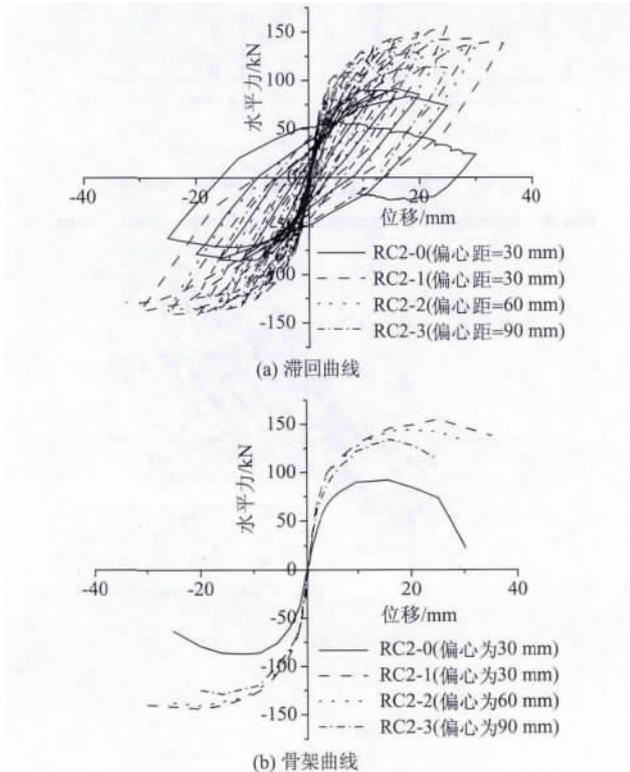


图10 轴压比0.48时加固柱的曲线

Fig. 10 Curves of strengthened column in axial compression ratio of 0.48

将各加固柱极限承载力列于表13。可以看出:不论轴压比为0.24或0.48,当偏心距相同时,加固柱的承载力比未加固柱有明显的提高;随着偏心距的增大,加固柱承载力逐渐减小,且轴压比越高,承载力降低的速度越大。

### 3.3 箍筋和钢绞线的应变分析

取每个加载循环下反向最大位移处距柱底150 mm处的箍筋应变,将其绘于图11。可以看出:箍筋应变随着加载位移的增大而增大,且增大速度加快;加固柱屈服前,不同轴压比加固柱的箍筋应变相差不大,加固柱屈服以后,轴压比高的加固柱箍筋应变增长速度比轴压比低的加固柱快;随着加固柱偏心距的增大,加固柱屈服以后,在同荷载作

用下,箍筋应变增大,且轴压比高的加固柱应变增大速度更快。

表13 加固柱平均极限承载力

Tab. 13 Average ultimate bearing capacity of strengthened columns

构件编号	极限承载力/kN		承载力平均值/kN	提高系数	
	正向	反向			
RC1-0	81.5	-77	79.25	1	—
RC1-1	138	-130	134	1.691	1
RC1-2	135	-129	132	—	0.985
RC1-3	133	-129	131	—	0.978
RC2-0	92.2	-87.1	89.65	1	—
RC2-1	155	-144	149.5	1.668	1
RC2-2	144	-141	142.5	—	0.953
RC2-3	134	-129	131.5	—	0.880

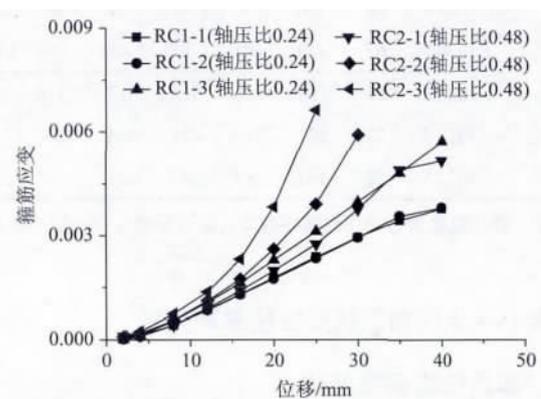


图11 加固柱的箍筋应变

Fig. 11 Stirrup strains of strengthened columns

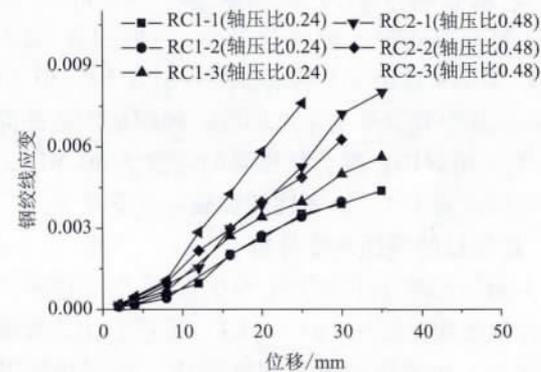


图12 加固柱的钢绞线应变

Fig. 12 Steel wire strains of strengthened columns

取每个加载循环下反向最大位移处距柱底100 mm处的钢绞线应变,将其绘于图12。可以看出:钢绞线的应变随着荷载增加而增大,高轴压比加固柱的钢绞线应变增长速度比低轴压比加固柱快;钢绞线的应变最大不超过0.009,而钢绞线的极限抗拉应变为0.0196<sup>[10]</sup>,所以钢绞线没有被拉断,这主要

是因为外围聚合物脱落导致有限元计算分析停止, 对于核心混凝土的开裂和钢绞线应变的急速发展不能模拟; 高轴压比加固柱的钢绞线极限应变比低轴压比加固柱大, 这说明高轴压比加固柱钢绞线的约束效率高; 同级加载位移下, 钢绞线应变随着偏心距的增大而增大, 且高轴压比加固柱钢绞线应变的增大速度更快。

### 3.4 加固柱的延性分析

计算各加固柱的延性系数<sup>[11]</sup>, 列于表 14。可以看出: 对于偏心距相同时的低轴压比加固柱, 加固柱的延性小于未加固柱, 主要原因是有限元模型计算时, 混凝土破坏准则中关闭了压碎选项, 使得加固柱破坏推迟, 加固柱屈服后的加载循环次数增大, 进而使极限位移显著增大; 高轴压比加固柱与低轴压比加固柱相比, 屈服位移、极限位移、延性系数都降低了; 随着偏心距的增大, 延性系数减小, 且轴压比越高, 延性系数的减小速度越快。

表 14 各加固柱的延性系数

Tab. 14 Ductility coefficients of strengthened columns

构件编号	轴压比	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数	提高系数
RC1-0	0.24	6.83	44	6.442	—
RC1-1	0.24	7.21	37.5	5.201	1.000
RC1-2	0.24	8.18	41.8	5.110	0.982
RC1-3	0.24	7.51	37.8	5.033	0.968
RC2-0	0.48	5.53	18.3	3.309	—
RC2-1	0.48	5.42	29.7	5.480	1.000
RC2-2	0.48	5.66	27.9	4.929	0.900
RC2-3	0.48	5.79	20.4	3.523	0.643

### 3.5 加固柱的滞回面积分析

现有研究表明, 加固柱的滞回面积越大, 其耗能能力越强。各加固柱的总滞回面积见表 15。可以看出: 随着偏心距的增大, 加固柱滞回曲线包围的面积迅速减小, 约能降低 30% 左右, 表明加固柱的耗能能力减小, 抗震性能变差。

表 15 各加固柱总的滞回面积

Tab. 15 Hysteretic area of strengthened column

构件编号	RC1-1	RC1-2	RC1-3	RC2-1	RC2-3	RC2-4
滞回面积 / (kN · mm)	12 394	8 221	8 700	8 991	6 881	6 145
提高比例	1	0.663	0.702	1	0.765	0.683

### 3.6 加固柱的总体刚度分析

取每级加载位移下滞回环正向和反向最高点连线的斜率为加固柱的总体刚度<sup>[12]</sup>, 而加固柱的屈服

刚度由几何法求得。记总体刚度为  $B$ , 屈服刚度为  $B_y$ , 现将各值列于表 16 和表 17。

表 16 不同循环荷载下加固柱的总体刚度

Tab. 16 Overall stiffness of strengthened columns under different cyclic loadings

构件编号	屈服刚度 / (kN · mm)	加固柱屈服后各级循环位移荷载下的刚度 / (kN · mm)					
		12 mm	16 mm	20 mm	25 mm	30 mm	35 mm
RC1-1	12.79	9.25	7.55	6.38	5.31	4.45	3.74
RC1-2	11.77	9.22	7.46	6.29	5.19	4.33	—
RC1-3	12.3	9.18	7.54	6.35	5.21	4.32	—
RC2-1	19.72	11.2	8.84	7.29	5.92	4.69	—
RC2-2	18.75	11	8.66	7.09	5.58	—	—
RC2-3	17.17	10.4	8.18	6.3	—	—	—

表 17 不同循环荷载下加固柱的  $B/B_y$  值

Tab. 17  $B/B_y$  of strengthened columns under different cyclic loadings

构件编号	屈服刚度比 $B/B_y$	各级循环位移荷载下的刚度比 $B/B_y$					
		12 mm	16 mm	20 mm	25 mm	30 mm	35 mm
RC1-1	1.00	0.72	0.59	0.50	0.42	0.35	0.29
RC1-2	1.00	0.78	0.63	0.53	0.44	0.37	—
RC1-3	1.00	0.75	0.61	0.52	0.42	0.35	—
RC2-1	1.00	0.57	0.45	0.37	0.30	0.24	—
RC2-2	1.00	0.59	0.46	0.38	0.30	—	—
RC2-3	1.00	0.61	0.48	0.37	—	—	—

由表 16 和表 17 可以看出, 加固柱的刚度随着位移的增大迅速减小, 且减小的速度随着位移的增大逐渐变慢; 当偏心距相同时, 在同级加载循环下, 高轴压比加固柱的刚度比低轴压比加固柱大; 加固柱屈服后, 在屈服后紧接着的 2 级加载位移中, 加固柱的刚度退化速度最快, 过了这 2 级加载后, 刚度退化速度逐渐变慢; 随着偏心距的增大, 低轴压比加固柱的刚度退化速度相差不大, 高轴压比加固柱的刚度退化速度加快。

## 4 结论

(1) 随着箍筋配箍率、纵筋配筋率、混凝土强度、钢绞线用量的增大, 加固柱极限承载力和延性都有不同程度的提高, 其中极限承载力的提高幅度为 2% ~ 28%。随着纵筋配筋率和钢绞线用量的增加, 加固柱滞回面积和极限位移有很大程度的提高, 提高幅度为 7% ~ 30%。

(2) 随着偏心距的增大, 加固柱极限承载力和延性都降低, 加固柱总滞回面积减小, 耗能能力降

低,柱的抗震性能变差,且轴压比越高,柱抗震性能降低的速度越快;加固柱箍筋和钢绞线的应变也随偏心距的增大显著增加,在高轴压比加固柱中,应变增长的速度更快;同级荷载作用下,低轴压比加固柱的刚度退化速度随偏心距变化不大,高轴压比加固柱的刚度退化速度随偏心距增大而增大。

(3) 加固柱屈服前,刚度变化不大;屈服后,随着加载位移的增加,柱刚度明显退化,且在屈服后紧接着的2级加载位移中,刚度的退化速度最快。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 聂建国,王寒冰,张天申,等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗弯加固的试验研究 [J]. 建筑结构学报,2005,26(2):1-9.  
NIE Jian-guo, WANG Han-bing, ZHANG Tian-shen, et al. Experimental Study on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Stainless Steel Wire Mesh and Permeability Polymer Mortar [J]. Journal of Building Structures,2005,26(2):1-9.
- [2] 聂建国,蔡奇,张天申,等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗剪加固的试验研究 [J]. 建筑结构学报,2005,26(2):10-17.  
NIE Jian-guo, CAI Qi, ZHANG Tian-shen, et al. Experimental Study on Shear Behavior of RC Beams Strengthened with Stainless Steel Wire Mesh and Permeability Polymer Mortar [J]. Journal of Building Structures,2005,26(2):10-17.
- [3] 黄华,刘伯权,邢国华,等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆加固的T型梁桥试验 [J]. 中国公路学报,2007,20(4):84-90.  
HUANG Hua, LIU Bo-quan, XING Guo-hua, et al. Experiment on RC T-type Beam Bridge Strengthened with High Strength Stainless Steel Wire Mesh and Permeability Polymer Mortar [J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(4):84-90.
- [4] 陈亮,高强不锈钢绞线网用于混凝土柱抗震加固的试验研究 [D]. 北京:清华大学,2004.  
CHEN Liang. Experimental Study of Seismic Behavior of RC Column Strengthened with High Strength Stainless Steel Wire [D]. Beijing: Tsinghua University,2004.
- [5] 钟聪明. 约束混凝土柱加固技术研究 [D]. 北京:中国建筑科学研究院,2004.  
ZHONG Cong-ming. Study on Reinforcement Technology of Confined Concrete Column [D]. Beijing: China Academy of Building Research,2004.
- [6] 张立峰,姚秋来,程绍革,等. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固偏压柱的试验研究 [J]. 四川建筑科学研究,2007,33(增1):146-151.  
ZHANG Li-feng, YAO Qiu-lai, CHENG Shao-ge, et al. Experimental Investigation on Columns Strengthened with High-strength Steel Wire Mesh and Polymer Mortar under Eccentric Loading [J]. Sichuan Building Science,2007,33(S1):146-151.
- [7] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(8):1804-1826.
- [8] 司炳君,孙治国,艾庆华,等. 钢筋混凝土桥墩滞回性能的有限元参数敏感性分析及模型改进 [J]. 工程力学,2009,26(1):174-186.  
SI Bing-jun, SUN Zhi-guo, AI Qing-hua, et al. Sensitive Analysis and Model Modification for Finite Element Analysis of R/C Bridge Piers under Cyclic Loading [J]. Engineering Mechanics,2009,26(1):174-186.
- [9] 黄华,刘伯权,贺拴海,等. 高强钢绞线网加固RC梁抗剪性能的数值分析 [J]. 公路交通科技,2012,29(9):50-57.  
HUANG Hua, LIU Bo-quan, HE Shuan-hai, et al. Numerical Analysis on Shear Performance of RC Beam Strengthened with High Strength Stainless Wire Mesh [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2012,29(9):50-57.
- [10] 周正茂,龚振球,王素娟. 倒退分析法确定拉索中钢绞线的张拉力 [J]. 公路交通科技,2009,26(4):74-77.  
ZHOU Zheng-mao, GONG Zhen-qiu, WANG Su-juan. Tension Control for Strands in Cables Based on Reverse Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2009,26(4):74-77.
- [11] 崔海琴,贺拴海,宋一凡. 空心矩形薄壁墩延性抗震性能试验 [J]. 公路交通科技,2010,27(6):59-63.  
CUI Hai-qin, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Experimental Study on Antiseismic Ductility of Hollow Rectangular Thin-walled Pier [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2010,27(6):59-63.
- [12] 周丕健,杨勇,李慧静. 钢板-混凝土组合桥面板弯曲刚度计算方法研究 [J]. 公路交通科技,2010,27(9):64-67.  
ZHOU Pi-jian, YANG Yong, LI Hui-jing. Study on Calculation Method of Flexure Rigidity of Steel Plate-concrete Composite Bridge Decks [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2010,27(9):64-67.