

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.03.002



高强钢绞线网加固混凝土粘结性能试验研究

毛荣一, 罗征, 王银辉, 胡晓佳

(浙江大学宁波理工学院 土木与建筑学院, 浙江 宁波 315000)

摘要:通过高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层与混凝土结构的剥离破坏试验,对加固层与混凝土界面的剥离破坏特征进行了研究。探讨了单侧加固、植筋加固及 U 型加固等不同的加固方式对加固层抗剪承载力及抗剪强度的影响。试验结果表明,采用 U 型加固等增加粘结面积的方式能有效提高加固层粘结面抗剪承载力,但同时会削弱加固层的抗剪强度,而在界面上植入抗剪钢筋后,能同时提高聚合物砂浆加固层的抗剪承载力及抗剪强度。根据试验结果,提出了最小植筋率的建议值。

关键词:高强钢绞线网;聚合物砂浆;钢筋混凝土结构;加固

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0013-07

Experimental analysis of bond performance of concrete strengthened with high strength steel wire mesh

Mao Rongyi, Luo Zheng, Wang Yinhui, Hu Xiaojia

(Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo 315100, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: Experimental research on debonding failure of concert structure with high strength steel wire mesh was conducted to investigate the failure characteristics of interface debonding between concrete and reinforcing layer. The effects of different polymer mortar reinforcing methods were discussed on Shear bearing capacity and shear strength of reinforcing layer, such as single side strengthening, plant bar strengthening and U-shaped strengthening. The results show that shear-bearing capacity can be effectively improved by means of increasing bonding area of reinforcing layer, such as U-shaped strengthening or extension length of reinforcement layer. Shear strength of reinforcing layer would be weakened at the same time. Shear strength and shear-bearing capacity of polymer mortar reinforcing layer would be substantially improved by means of planting shear reinforcement. According to the test results, the suggestion value of minimum ratio of planting bar was prevised for the reference of the application in actual application.

Keywords: high steel wire mesh; polymer mortar; reinforced concrete structure; strengthening

收稿日期:2016-11-25

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2015BAL02B03);宁波市自然科学基金(1140357B1501)

作者简介:毛荣一(1982-),男,主要从事混凝土结构与项目管理研究,(E-mail)446306715@qq.com。

罗征(通信作者),男,博士,(E-mail)13006@nit.net.cn。

Received:2016-11-25

Foundation item: National Science & Technology Pillar Program (No. 2015BAL02B03); Ningbo Municipal Natural Science Foundation (No. 1140357B1501)

Author brief: Mao Rongyi (1982-), main research interests: concrete structures and project management, (E-mail) 446306715@qq.com.

Luo Zheng (corresponding author), PhD, (E-mail) 13006@nit.net.cn.

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术具有自重增加小、施工技术简单、砂浆与混凝土之间具有良好的相容性等优点,相对其他加固方式^[1-2],备受加固界青睐,广泛应用于钢筋混凝土结构加固工程。吴刚等^[3]、聂建国等^[4]、郭彤等^[5]对钢绞线(预应力钢绞线)加固梁的抗弯性能进行了实验研究,预应力钢绞线对加固梁的开裂荷载、刚度、屈服荷载及最大承载力等均提高明显。Saatcioglu 等^[6]对预应力钢绞线加固钢筋混凝土柱的受剪性能进行了试验研究,结果表明,预应力的存在能够明显抑制斜向裂缝的开展,有效提高试件的抗剪能力;郭俊平等^[7]研发了新型预应力钢绞线加固混凝土柱张拉锚固系统,解决了钢绞线无法成批张拉的工程问题;黄华等^[8]、廖维张等^[9]对钢绞线加固后的梁的抗震性能及墩柱的冲击性能进行了研究。但众多研究^[7, 10]表明,高强钢绞线网-聚合物砂浆加固易发生砂浆加固层与旧混凝土界面剥离破坏。黄华、聂建国等^[11-12]对钢绞线(预应力钢绞线)加固板、梁的抗弯性能进行了试验研究,旧混凝土与加固层之间采用设置膨胀螺栓来固定钢绞线网,膨胀螺栓同时作为剪力键保证粘结面不发生剥离破坏。然而,随着聚合物砂浆材料性能的改善,加固层厚度要求越来越薄,加固层中设置膨胀螺栓等剪力连接件难度增大。因此,如何在去除膨胀螺栓等固定装置的前提下,保证加固层粘结面间应力有效传递,充分发挥高强钢绞线的抗拉强度成为该加固技术亟待解决的问题。

本文从高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层与旧混凝土界面粘结性能出发,通过开展加固试件的剪切粘结试验,讨论研究了在脱离钢绞线固定装置的前提下,如何改善聚合物砂浆加固层自身粘结性能,以期实现钢绞线加固层与混凝土粘结面应力的有效传递的同时降低加固层的厚度,从而为该项加固技术的工程应用提供试验依据,并为对高强钢绞线网-聚合物砂浆加固构件的粘结面处理提出合理的建议。

1 加固层粘结性能试验设计

设计了 3 个系列 8 组共 24 个加固试件(表 1),其中系列 SJ 为直接粘结试件(图 1),采用单侧高强钢绞线网-聚合物砂浆层加固,分别考虑 3 种加固层长度对剥离破坏的影响;系列 SJD 中增设植筋辅助提高粘结性能,即在 SJ 系列单侧加固的基础上,在加固层内植入钢筋,以植筋与聚合物砂浆共同提高粘结性能,分别考虑植筋率变化对粘结性能和剥离

破坏的影响;系列 SJU 为增设 U 型箍加强辅助提高粘结性能,即在 SJ 系列单侧加固的基础上,底面和两侧面增设 U 型的高强钢绞线网-聚合物砂浆,分别考虑 U 型加固区段长度变化对粘结性能和剥离破坏的影响。未加固试件均采用素混凝土方柱,试件尺寸为 90 mm×150 mm×400 mm。混凝土设计强度为 C40,加固层聚合物砂浆强度为 55 MPa,高强钢绞线网为 6×7+IWS 型镀锌钢绞线,计算截面积 9.62 mm²。

表 1 试验试件设计

Table 1 Parameters of specimens

系列	试件编号	试件数目	粘结长度/mm	加强方式
系列 1	SJ-1	3	100	
	SJ-2	3	150	
	SJ-3	3	200	
系列 2	SJD-1	3	150	植筋 $\phi 6 \times 2$
	SJD-2	3	150	植筋 $\phi 6 \times 4$
	SJD-3	3	150	植筋 $\phi 6 \times 6$
系列 3	SJU-1	3	100	U 型加强
	SJU-2	3	150	U 型加强

注: SJ 表示对比试件; SJD 表示植筋加固试件; SJ 表示 U 型加固试件。

图 1 加固示意图

Fig. 1 Strengthening design of specimens

试验装置如图 2 所示。试验中,将加固构件放入挂篮中,试验机下部安装夹具夹持钢绞线,试验机的运动方向为单向向下。试验中,由计算机自动进行加载,同时记录荷载、位移读数以及试验现象。一旦发生下列现象之一就立即停止试验: 1) 钢绞线复合筋被拔出或发生断裂; 2) 混凝土与加固层界面剥离破坏; 3) 聚合物砂浆加固层破坏。



图 2 试验装置

Fig. 2 Loading equipment

2 加固层粘结性能试验结果及分析

2.1 试验现象与破坏特征

系列 SJ 最终破坏形态为界面整体剥离破坏,如图 3 所示。钢绞线网和聚合物砂浆组成的加固层与混凝土界面仅靠底层聚合物砂浆粘结而成,界面粘结力较差,加固层在拉力作用下发生整体剥离,加固层界面一侧表面上附着有剥离下来的部分混凝土。加载过程中,加固层与混凝土界面出现一条与结合面平行的裂缝,由加载端向上发展,并最终将整个加固层连同界面上的部分混凝土一起剥离下来,构件破坏呈现脆性破坏。

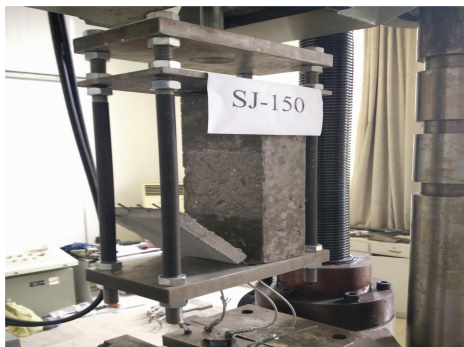


图 3 试件 SJ 粘结面剪切破坏图

Fig. 3 Shear failure of bonding layer on SJ specimen

系列 SJD 最终破坏形态为聚合物砂浆加固层压碎与端部局部剥离破坏,如图 4 所示。加载过程中,加固层下边缘出现微小裂缝并随着荷载增加向加载端开展,裂缝多为竖直方向;裂缝发展至植筋附近,裂缝沿 45° 向上、下发展,并与加固层边缘裂缝相贯通,当植筋仅为单排布置时,加载端发生局部剥离。当植筋为两排布置时,与单排植筋相比,产生的裂缝更多,裂缝开展更加均匀,且在植筋所围成的核心区,砂浆并未发生剥离,端部剥离面积较小,构件破坏时呈现出良好的延性。



图 4 试件 SJD 粘结面剪切破坏图

Fig. 4 Shear failure of bonding layer on SJD specimen

系列 SJU 最终破坏形态为聚合物砂浆加固角点区域局部剥离破坏,如图 5 所示。加载过程中,U 型加固角点区域首先出现竖向裂缝,随着荷载的发展,加固层角点区域出现轻微的错动,裂缝逐渐加大,直至加固层角点区域砂浆局部剥落,其中,部分试件出现了钢绞线的拉断。该系列试件破坏过程较为突然,为脆性破坏。



图 5 试件 SJU 粘结面剪切破坏

Fig. 5 Shear failure of bonding layer on SJU specimen

2.2 试验结果

由试验现象可以看出,高强钢绞线-聚合物砂浆加固试件最终破坏形态可以分为两种,一种为系列 SJ 的加固层整体剥离破坏,另一种为系列 SJD 及 SJU 的加固层局部损伤破坏。本文采用加固层剪切破坏荷载 P_b 评价加固层的整体粘结性能,而采用加固层剪切破坏强度 τ_c 评价加固的局部粘结性能。高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层粘结性能剪切试验结果见表 2~3,其中,加固层剪切破坏强度 τ_c 为

$$\tau_c = \frac{P_b}{A} \quad (1)$$

式中: P_b 为加固层剪切破坏荷载; $A = b_m L_m$ 为加固层粘结面积, b_m 为加固层宽度, L_m 为加固层长度。其中系列 SJU 最终破坏时,底板剪切应力均匀矩形分布,但腹板区域剪应力沿着腹板由底向上递减为零,腹板底部角点区域剪应力最大,腹板区域剪应力呈三角形分布。故式(1)中的加固层粘结面积在腹板区域应予以对半折减,系列 SJU 加固层剪应力分布如图 6 所示。

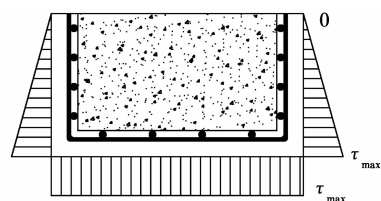


图 6 试件 SJU 加固层剪应力分布

Fig. 6 Shear stress distribution of reinforcing layer on SJU specimen

表 2 对比试件剥离破坏试验结果

Table 2 The results of compared specimens debonding failure

构件编号	L_m/mm	$P_{b,0}/\text{kN}$	$A_{ve,of}$ $P_{b,0}/\text{kN}$	加固层面 积/ mm^2	τ'_{c0}/MPa	$A_{ve,of}$ τ'_{c0}/MPa
SJ100-1	100	19.37	18.88	0.015	1.29	1.26
SJ100-1	100	20.30	18.88	0.015	1.35	1.26
SJ100-1	100	16.97	18.88	0.015	1.13	1.26
SJ150-1	150	20.96	24.72	0.023	0.93	1.10
SJ150-1	150	27.21	24.72	0.023	1.21	1.10
SJ150-1	150	26.00	24.72	0.023	1.16	1.10
SJ200-1	200	30.14	30.88	0.030	1.00	1.03
SJ200-1	200	28.92	30.88	0.030	0.96	1.03
SJ200-1	200	33.57	30.88	0.030	1.12	1.03

注： $P_{b,0}$ 为系列 1 对比试件加固层剪切破坏荷载； τ'_{c0} 为系列 1 对比试件加固层剪切破坏强度。

表 3 加固试件剥离破坏试验结果

Table 3 The results of strengthening specimens debonding failure

构件编号	植筋率	加固层长度/ mm	$P_{b,u}/\text{kN}$	$A_{ve,of}$ $P_{b,u}/\text{kN}$	$(\frac{P_{b,u}}{P_{b,0}} - 1)/\%$	加固层面 积/ mm^2	τ'_{cc}/MPa	$A_{ve,of}$ τ'_{cc}/MPa	$(\frac{\tau'_{cc}}{\tau'_{c0}} - 1)/\%$
SJD-1	0.2512	150	19.82	19.65	-20.51	0.023	0.88	0.87	-20.59
SJD-1	0.2512	150	21.02	19.65	-20.51	0.023	0.93	0.87	-20.59
SJD-1	0.2512	150	18.12	19.65	-20.51	0.023	0.81	0.87	-20.59
SJD-2	0.5024	150	25.63	27.19	9.98	0.023	1.14	1.21	9.86
SJD-2	0.5024	150	27.33	27.19	9.98	0.023	1.21	1.21	9.86
SJD-2	0.5024	150	28.61	27.19	9.98	0.023	1.27	1.21	9.86
SJD-3	0.7536	150	30.63	31.99	29.39	0.023	1.36	1.42	29.25
SJD-3	0.7536	150	31.13	31.99	29.39	0.023	1.38	1.42	29.25
SJD-3	0.7536	150	34.21	31.99	29.39	0.023	1.52	1.42	29.25
SJU-1		100	32.84	31.86	68.73	0.033	1.37	1.33	5.35
SJU-1		100	30.51	31.86	68.73	0.033	1.27	1.33	5.35
SJU-1		100	32.22	31.86	68.73	0.033	1.34	1.33	5.35
SJU-2		150	38.51	40.16	62.44	0.05	1.07	1.12	1.41
SJU-2		150	40.23	40.16	62.44	0.05	1.12	1.12	1.41
SJU-2		150	41.74	40.16	62.44	0.05	1.16	1.12	1.41

注： $P_{b,u}$ 为系列 2、3 试件加固层剪切破坏荷载； τ'_{cc} 为系列 2、3 试件加固层剪切破坏强度； ρ_{sv} 为植筋加固试件加固层植筋率， $\rho_{sv} = n \cdot A_s/A_c, n \cdot A_s$ 为植筋面积； A_c 为加固层面积。

2.3 试验结果分析

由表 2~3 可知，试件 SJ 及 SJU 的加固层剪切承载力 P_b 都随加固层长度 L_m 的增加而提高，而在相同的加固层长度条件下，试件 SJU 试件 P_b 明显大于试件 SJ 的 P_b ，原因在于试件 SJ 仅仅底板聚合物砂浆加固，而试件 SJU 在相同的加固层长度条件下，采用腹板与底板共同聚合物砂浆加固，大大提高了聚合物砂浆加固层的粘结面积，相对试件 SJ，后

者的剪切破坏荷载提高了近 60%，对比情况见图 7(a)。

由表 2~3 同时可以看出，植筋加固试件 SJD 的加固层抗剪承载力 P_b 随着植筋率的增加而提高；但在相同的加固层长度条件下，当植筋率仅有 0.25% 时，植筋加固试件 SJD 相比试件 SJ 加固层剪切破坏荷载 P_b 却下降了 20%，而当植筋率为 50%、75% 时，植筋加固试件 SJD 又比试件 SJ 加固层剪切破坏

荷载 P_b 提高了 10% 及 30%, 如图 7(b) 所示。由此可知, 采用植筋方案增大加固界面的粘结性能时, 界面植筋存在最低配筋率, 当实际植筋率小于最低植筋率时, 采用植筋增加的措施反而会降低界面的抗剪承载力。

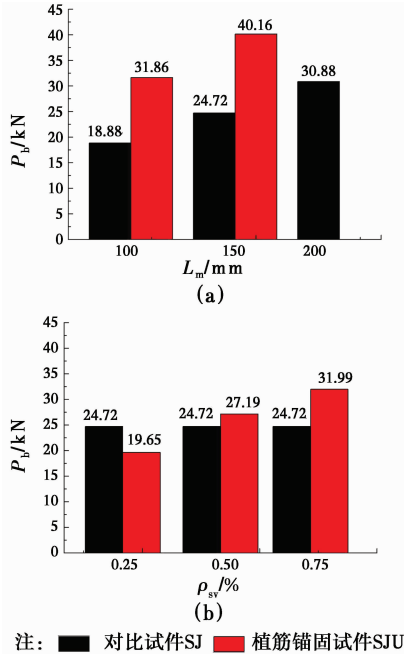


图 7 加固层抗剪承载力对比图
Fig. 7 The compared graph on shear bearing capacity of reinforcing layer

需要指出的是, 引言中, 加固层中设置膨胀螺栓等剪力连接件仅能设置在钢绞线的张拉锚固端, 其植入后与砂浆加固层的锚固厚度要求较大; 而本文中植筋是指为了加大加固层与混凝土间的粘结力而植入混凝土内, 植筋可以在混凝土构件内分布设置, 由于植筋分布区域大, 数量多, 固相对膨胀螺栓可有效的降低砂浆加固层内的植入高度。

3 加固层粘结面抗剪强度计算

文献[13-14]指出影响新老混凝土界面抗剪性能的主要因素为界面粗糙度、界面剂(也称界面胶)及界面是否植筋与植筋率的大小。文献[15]通过参考一些研究成果, 在进行理论分析后给出的界面抗剪强度计算公式为

$$\tau = \tau_c + \tau_s$$

$$\tau_c = \alpha_1 \alpha_2 0.166 \sqrt{f_c} \tau_s = 0.56 \rho_{sv} f_y \quad (2)$$

式中: 界面抗剪强度由混凝土界面抗剪摩擦力 τ_c 和植筋自身的销栓力 τ_s 两部分组成, 其中, 混凝土界面抗剪摩擦力 τ_c 的计算公式尚存在争议, 各国计算

值离散较大, 此处采用文献[16]的推荐公式, α_1 为界面粗糙度影响系数, 本文取值 1.25^[17], α_2 为界面剂影响系数, 考虑涂刷水泥净浆取值 1.5, 代入式(2), $\tau_c = 1.61 \text{ MPa}$ 。

图 8(a) 为对比试件 SJ 及 SJU 不同粘结面积下粘结抗剪强度的实测数据点及回归直线, 两系列试验数据点趋势相同, 由回归趋势线可看出, 用以代表加固层局部粘结性能的粘结抗剪强度随着粘结面积的增大而降低, 这说明加固层的粘结面积尽管能有效提高加固层剪切破坏荷载, 但却同时降低了加固层剪切破坏强度, 使得加固构件应力集中的区域趋于局部破坏; 而系列 SJU 抗剪强度趋势线位于系列 SJ 上方, 说明即使在相同的粘结面积下, 系列 SJU 抗剪强度高于系列 SJ; 而式(2)计算值又过高的估计了加固层粘结抗剪强度。

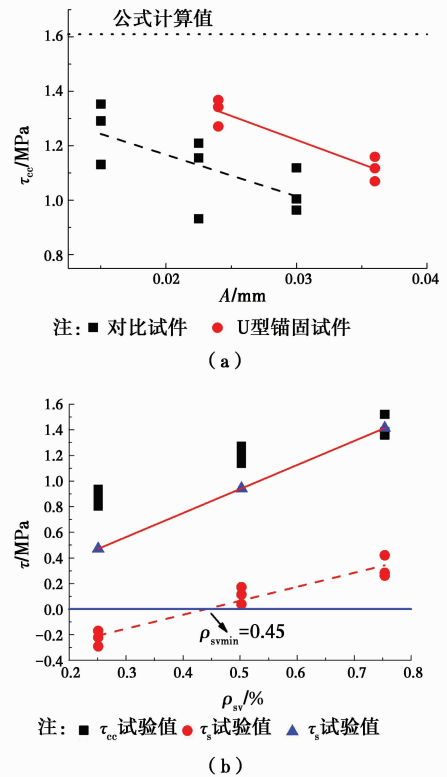


图 8 加固层剪切强度对比图
Fig. 8 The compared graph on shear strength of reinforcing layer

图 8(b) 为植筋加固试件不同植筋率下粘结抗剪强度的实测数据点及回归直线, 由回归直线可看出, τ_c 与 τ_s 都随着植筋率的增大而提高, 同时, 当植筋率过小时, 将削弱原有加固面的抗剪强度。这说明采用植筋方案不仅能提高加固层抗剪破坏荷载, 同时, 还能提高加固层抗剪强度, 但应保证植筋率大

于最小植筋率,本文根据回归线给出的最小植筋率建议值 $\rho_{sv}=0.45\%$ 。

4 结论

1)针对现有高强钢绞线-聚合物砂浆加固方法中无法摆脱钢绞线固定装置的不足,试验研究通过聚合物砂浆加固层自身的粘结性能来保障加固层粘结面间应力传递,从而达到加固的目的,并通过加大加固层粘结面积或植筋等措施改善加固层粘结性能,结果发现通过上述改善措施能在一定程度上保障聚合物砂浆加固层的有效工作。

2)通过底板加固或 U 型加固等增加加固层面积的方法能有效提高加固层粘结剪切荷载,但却降低了加固层粘结剪切强度,采用该方法并不能根本上改善加固层的粘结性能。

3)通过植筋加固的方法能有效的改善加固层的粘结性能,使得加固层剪切荷载及加固层剪切强度都得以提高,但实际工程加固时,应保证植筋率大于最小植筋率,本文给出的最小植筋率建议值为 0.45% 。

参考文献:

- [1] MEDA A. Corroded RC columns repair and strengthening with high performance fiber reinforced concrete jacket [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(5):1967-1978.
- [2] LU Y Y, LIANG H J, LI S, et al. Axial behavior of RC columns strengthened with SCC filled square steel tubes [J]. *Steel and Composite Structures*, 2015, 18(3): 623-639.
- [3] 吴刚, 吴智深, 魏洋, 等. 预应力高强钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土梁的理论分析[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(12):28-37.
- WU G, WU Z S, WEI Y, et al. Experimental study on flexural strengthening of RC beams with prestressed high strength steel wire ropes [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(12):17-27. (in Chinese)
- [4] 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 J G, WANG H B, ZHANG T S, 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. (in Chinese)
- [5] 郭彤, 李爱群, 姚秋来, 等. 钢绞线网片-聚合物砂浆加固钢筋混凝土箱梁试验[J]. *中国公路学报*, 2010, 23(2):36-42.
- GUO T, LI A Q, YAO Q L, et al. Experiment on reinforced concrete box-girder strengthened by steel stranded wire mesh and polymer mortar [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(2): 36-42. (in Chinese)
- [6] SAATCIOGLU M, YALCIN C. External prestressing concrete columns for improved seismic shear resistance [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(8): 1057-1070.
- [7] 郭俊平, 邓宗才, 林劲松, 等. 预应力钢绞线网加固混凝土圆柱的轴压性能[J]. *工程力学*, 2014, 31(3): 129-137.
- GUO J P, DENG Z C, LIN J S, et al. Axial compression performance of concrete columns strengthened with prestressed high strength steel wire mesh [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(3): 129-137. (in Chinese)
- [8] HUANG H. Calculation of axial compression capacity for square columns strengthened with HPFL and BSP [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 35(6): 113-121.
- [9] 廖维张, 张伟, 田志敏. 高强钢绞线网-高性能砂浆加固钢筋混凝土梁抗冲击性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(12):200-206.
- LIAO W Z, ZHANG W, TIAN Z M. Experimental research on impact resistance properties of RC beams strengthened with high strength steel wire mesh and high performance mortar [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(12): 200-206. (in Chinese)
- [10] 黄华. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固钢筋混凝土梁式桥试验研究与机理分析[D]. 西安:长安大学, 2008.
- HUANG H. Experimental study and theoretical analysis on strengthening RC girder bridge with steel wire mesh and polymer mortar[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [11] 黄华, 刘伯权, 贺拴海, 等. 高强钢绞线网加固 RC 梁抗弯性能的数值分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2012, 29(3):40-48.
- HUANG H, LIU B Q, HE S H, et al. Numerical analysis on flexural performance of strengthened beam with high strength stainless wire mesh [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2012, 29(3): 40-48 (in Chinese)
- [12] 聂建国, 陶巍, 张天申. 预应力高强不锈钢绞线网-高性能砂浆抗弯加固试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(8):1-7.

- NIE J G, TAO W, ZHANG T S. Experimental study on the flexural behavior of rc beams strengthened with prestressed stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(8): 1-7. (in Chinese)
- [13] 陈峰, 郑建岚. 自密实混凝土与老混凝土粘结面的抗剪试验研究[J]. 福州大学学报, 2005, 33(4): 509-512.
CHENG F, ZHENG J L. Research on shear behavior of the adhesion of self-compacting concrete and old concrete [J]. Journal of Fuzhou University, 2005, 33(4): 509-512. (in Chinese)
- [14] 王振领, 林拥军, 钱永久. 新老混凝土结合面抗剪性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 600-604.
WANG Z L, LIN Y J, QIAN Y J. Experimental research on shear properties of new-to-old concrete interface [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5): 600-604. (in Chinese)
- [15] IRSHIDAT M R, AL-SALEH M H, AL-SHOUBAKI M. Using carbon nanotubes to improve strengthening efficiency of carbon fiber/epoxy composites confined RC columns [J]. Composite Structures, 2015, 134(5): 523-532.
- [16] SEIBLE F, LATHAM C T. Horizontal load transfer in structural concrete bridge deck overlays [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(10): 2691-2710.
- [17] 聂建国, 王宇航, 樊健生, 等. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土旧桥技术中组合横梁界面受力性能研究[J]. 土木工程学报, 2012(3): 99-109.
NIE J G, WANG Y H, FAN J S, et al. Mechanical behavior of the interface of composite cross beam in old concrete bridges widened with steel-concrete composite beam [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 99-109. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)