

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202010001



高强灌浆料加固既有 RC 梁 抗弯性能分析

冷玉坤, 刘均利, 余文成, 王子恒

(桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为研究高强灌浆料加固钢筋混凝土(RC)梁在不同设计参数下的抗弯性能,对 5 根高强灌浆料加固梁和 2 根对比梁进行试验研究和理论分析.测量梁的裂缝分布、挠度变形、应变发展及破坏形态.试验结果表明:采用高强灌浆料加固 RC 梁能有效提高 RC 梁的抗弯承载力、截面刚度;适当的植筋间距对新老混凝土间黏结性能有较好的影响,但采取不同的植筋间距对加固梁的抗弯性能影响不大;梁底加固厚度的增加也只能在有限范围内改善新老纵筋受力差异,对加固梁抗弯承载力提高并不明显;高强灌浆料加固梁的抗弯承载力计算公式计算的结果与试验结果吻合较好.

关键词: 桥梁工程; 抗弯性能; 增大截面法加固; 高强灌浆料

中图分类号: TU 375.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)01-0051-08

Flexural Performance Analysis of Existing RC Beams Strengthened Using High-Strength Grouting Material

LENG Yukun, LIU Junli, YU Wencheng, WANG Ziheng

(College of Civil and Construction Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to study the flexural performance of reinforced concrete (RC) beams strengthened using high-strength grouting material under different design parameters, the experimental research and theoretical analysis of five beams strengthened with high-strength grouting material and two contrast beams were carried out. The crack distribution, deflection, strain development and failure modes of beams were measured. The test results show that the high-strength grouting material can effectively improve the flexural capacity and section stiffness of the RC beams strengthened. Influence of appropriate planting bar spacing on the bonding performance between new and original concrete is significant, but different planting bars spacing has little effect on the flexural performance of the concrete beams strengthened. The increase in the strengthening thickness of the beam bottom can only improve the stress difference between the old and the new longitudinal bars within a certain range, the flexural bearing capacity of beams strengthened is improved little. The results of flexural capacity formula of the beam strengthened with high-strength grouting material agree well with the experimental ones.

Keywords: bridge engineering; flexural performance; strengthening of enlarging cross-section; high-strength grouting material

随着我国基础设施建设日趋完善,大量在役年限较长的桥梁受自然、人为等因素影响功能退化,无法满足使用要求^[1],亟需对其进行加固改造处理.增大截面法作为一种常用的加固方法^[2-3],具有施工简

收稿日期: 2020-10-02

通信作者: 刘均利(1978-),男,副教授,博士,主要从事桥梁加固与桩基施工的研究. E-mail:1332646295@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51468013);广西科学与技术开发计划项目(桂科攻 14251012)

便、适用性强且技术成熟等特点,在桥梁加固领域得到较好的应用^[4-6].若采用普通混凝土进行加固,不仅易开裂,影响结构耐久性,也不利于新老混凝土之间的粘结,从而产生较大的相对滑移^[7].高强灌浆料作为一种高强胶结材料,早期主要用于设备基础的二次灌浆和桥梁、堤坝的抢险等工程中^[8],它不仅具有优异的力学性能、良好的耐久性能、快硬早强、无收缩、微膨胀和自流平等特点,而且与旧混凝土粘结较强,近年来被广泛应用于加固领域中^[9],具有较大的科研价值和广阔的应用前景.

在加固梁抗弯性能影响因素方面,一些专家学者已经开展了部分研究,也取得了一些初步成果. Chaliotis 等^[10]制作 20 根自密实混凝土加固梁,研究在不同初始损伤下自密实混凝土的加固性能. 卜良桃等^[11]制作 6 根钢纤维水泥砂浆钢筋网加固梁和 1 根对比梁,研究加固配筋率和受力形态对加固梁受弯性能的影响,认为采用钢纤维水泥砂浆加固钢筋混凝土(RC)梁是一种有效的加固方法,能显著提高混凝土梁的抗弯性能. 罗素蓉等^[12]针对二次受力下自密实混凝土加固 RC 梁的受弯性能进行试验研究,共设计 7 根自密实混凝土加固梁和 2 根对比梁,通过改变初始受力水平、加固厚度及界面处理方式,有效提高 RC 梁的抗弯承载力、截面刚度等性能. 然而,目前在加固厚度和植筋间距的共同影响下,尚未有采用高强灌浆料加固混凝土梁抗弯性能方面的研究.

基于此,本文在充分考虑工程实际应用的基础上,对 RC 梁进行高强灌浆料增大截面加固,并针对加固梁的抗弯性能进行试验研究.

1 试验概况

1.1 试验材料

原梁均采用商品混凝土浇筑,并采用常规振捣密实的方法.混凝土设计标号为 C30,每立方米混凝土中的水泥、水、砂、石子、粉煤灰、矿粉、减水剂的质量分别为 203.00,162.00,972.00,916.00,50.00,70.00,7.11 kg,水泥为 P.O 52.5 级普通硅酸盐水泥.加固用的高强灌浆料选用广西柳州市汉西鸣建材公司生产的 HCM-H80 型高强无收缩灌浆料.

试验梁浇筑的同时制作普通混凝土和高强灌浆料的立方体试块,立方体试块与试验梁采取相同的养护措施,按照试验标准程序测得的普通混凝土抗压强度平均值为 37.26 MPa,高强灌浆料抗压强度平均值为 70.15 MPa.纵向钢筋和箍筋均采用 HRB400 级钢筋,钢筋材性试验结果,如表 1 所示.表 1 中: f_y 为屈服强度; f_u /MPa 为极限强度.

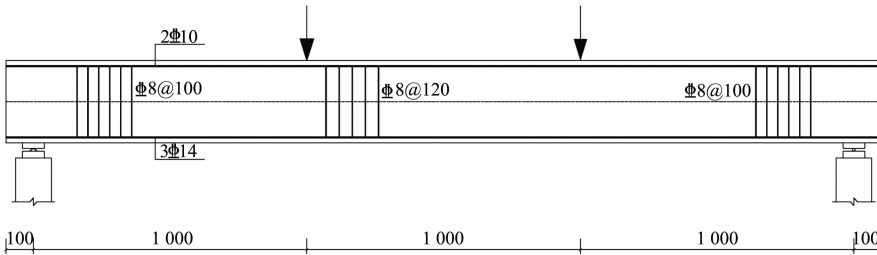
表 1 钢筋材性试验结果
Tab.1 Test results of steel reinforcement properties

参数	Φ 8	Φ 10	Φ 14	Φ 16	Φ 18
f_y /MPa	456.8	451.2	446.3	439.7	435.7
f_u /MPa	588.2	593.5	597.4	598.1	600.2

1.2 试件设计与加固方法

试验共设计制作 7 根 RC 矩形梁,其中,A1,A2 为未加固的对比梁,B1~B5 为高强灌浆料加固梁.梁跨度均为 3 200 mm,净跨均为 3 000 mm,梁宽为 250 mm,原梁高为 300 mm.原梁的纵向受拉钢筋为 3 Φ 14,纵向受压钢筋为 2 Φ 10,箍筋均为 Φ 8 钢筋,且箍筋在梁端 1 000 mm 内为 Φ 8@100,中间 1 200 mm 内为 Φ 8@120.试验梁基本参数及配筋,如图 1 所示.图 1 中: a 为试验梁加固厚度.

对原梁养护 28 d 后开始加固,为防止新老混凝土界面发生剥离破坏,在加固过程中,沿梁长按一定



(a) 试验梁

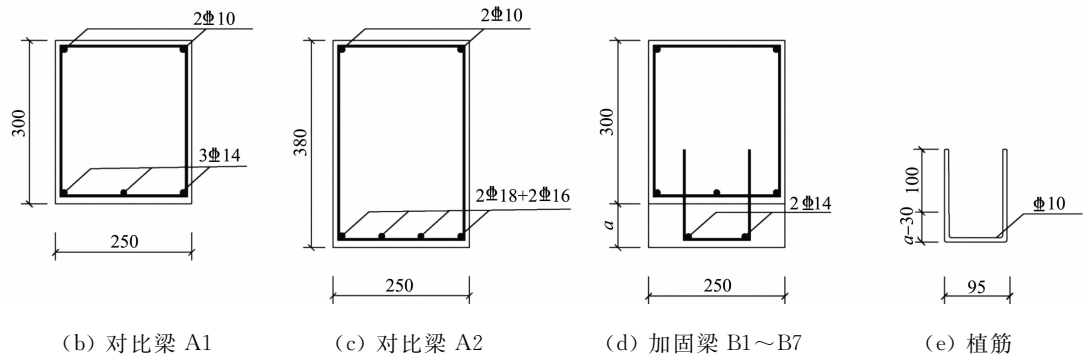


图 1 试验梁基本参数及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Basic parameters and reinforcement of test beams (unit: mm)

间距植入 $\Phi 10$ 的 U 形箍, 植入的深度为 100 mm, 钻孔的孔径为 14 mm. 试件均依据 GB 50367—2013《混凝土结构加固设计规范》^[13]的要求进行设计.

- 另外, 将高强灌浆料作为新增加固材料时应注意如下 6 点:
- 1) 灌浆前应对原梁梁底进行凿毛处理, 并清洁梁底表面;
 - 2) 灌浆前 24 h 应充分润湿梁底表面, 并于灌浆前 1 h 清除积水;
 - 3) 灌浆时, 浆料应从一侧或相邻两侧多点灌入, 直至从另一侧溢出为止, 以利于灌浆过程中的排气, 避免对灌浆层表面质量造成影响;
 - 4) 当灌浆层厚度大于 100 mm 时, 应采取分层灌浆方法, 浇筑完第一层后, 在确保第一层浆料达到初凝前, 进行第二次浇筑, 并尽可能缩短灌浆时间;
 - 5) 灌浆过程中严禁振捣, 必要时可借助灌浆助推器沿灌浆层底部推动浆料, 以确保灌浆层匀质性;
 - 6) 在灌浆层终凝后, 应立即洒水保湿养护.

试验考虑不同加固层厚度及植筋间距对加固构件受弯性能的影响. 试验梁基本参数, 如表 2 所示. 表 2 中: s 为植筋间距.

表 2 试验梁基本参数
Tab. 2 Basic parameters of test beams

试验梁 编号	原梁截面 尺寸/mm×mm	试验梁截面 尺寸/mm×mm	原梁设计 纵筋	试验梁的 设计纵筋	a /mm	s /mm
A1	250×300	—	3 $\Phi 14$	—	—	—
A2	250×380	—	2 $\Phi 18$ +2 $\Phi 16$	—	—	—
B1	250×300	250×380	3 $\Phi 14$	2 $\Phi 14$	80	100
B2	250×300	250×420	3 $\Phi 14$	2 $\Phi 14$	120	100
B3	250×300	250×450	3 $\Phi 14$	2 $\Phi 14$	160	100
B4	250×300	250×380	3 $\Phi 14$	2 $\Phi 14$	80	150
B5	250×300	250×380	3 $\Phi 14$	2 $\Phi 14$	80	200

1.3 加载装置

试验采用 1 000 kN 组合结构反力架对试件进行加载, 为观测梁纯弯段的弯曲性能, 试验采用三分点对称加载方式, 跨中纯弯段长度为 1 m. 正式加载之前, 预加载以检查试验装置、量测仪表工作是否正常, 消除接触面间的空隙.

卸荷后, 按照 GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》^[14], 采用分级加载制, 并开始正式加载. 将挠度变形增长迅速, 而荷载增长缓慢或不增长的状态作为试验梁的屈服状态, 对应的荷载即为屈服荷载^[15].

1.4 测试内容

通过千分表测量每级荷载下梁跨中、加载点及支点处的挠度变形值; 通过静态应变采集系统测量原梁纵筋及加固纵筋、原梁混凝土及加固混凝土表面的应变; 通过力传感器测量试验荷载; 通过裂缝综合测试仪测定裂缝分布、发展及宽度, 测量精度为 0.01 mm. RC 梁应变片布置图, 如图 2 所示.

对于 RC 梁表面的应变, 在试验梁侧跨中位置自上而下沿试验梁高粘贴 5 个应变片, 用以验证梁在

受弯过程中是否符合平截面假定;在试验梁底纯弯段沿轴线方向粘贴 6 个应变片,用以测定梁底部混凝土拉应变;在梁纯弯段顶部粘贴 2 个应变片,用以测定混凝土的压应变.

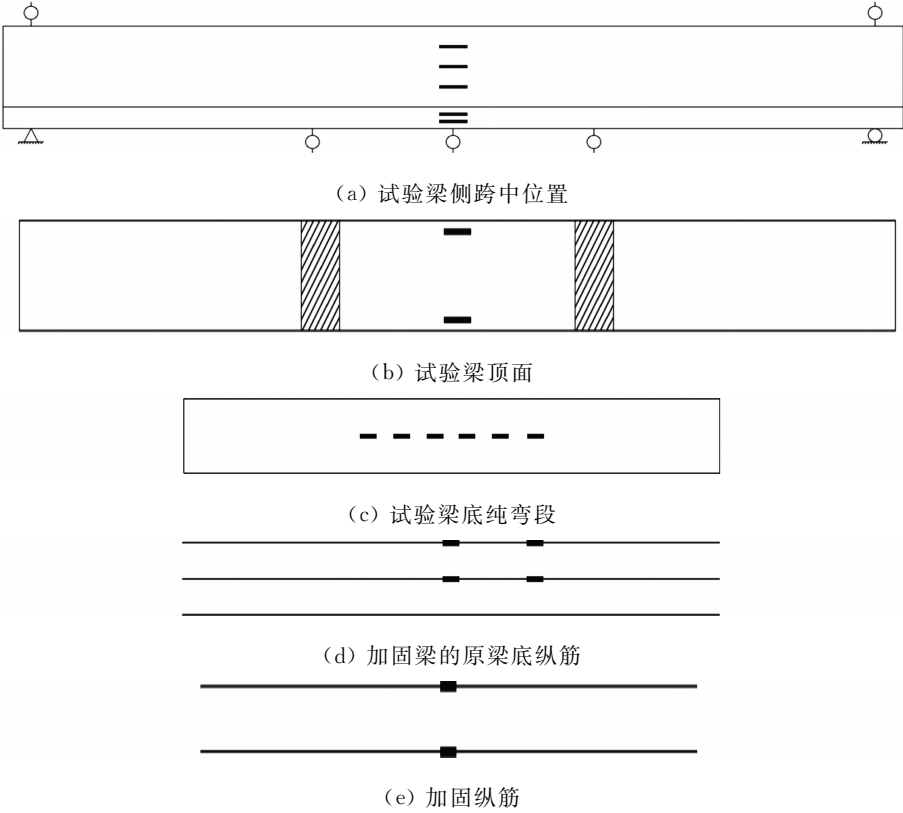


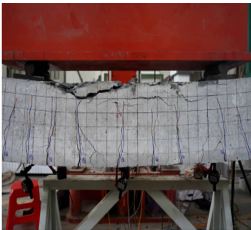
图 2 RC 梁应变片布置图

Fig. 2 RC beam strain gauge layout

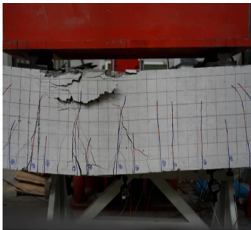
2 主要试验现象及结果

2.1 破坏形态

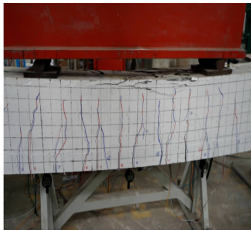
试验梁破坏形态及裂缝分布,如图 3 所示.由图 3 可知:对比梁的破坏形态为典型的适筋梁破坏,纵向钢筋屈服后,跨中挠度有明显突变,混凝土表面出现大量裂缝并快速向梁顶延伸,直至受压区混凝土被压碎剥落;对比梁破坏时,跨中纯弯段裂缝数目较加固梁少,裂缝宽度也明显大于加固梁.



(a) 对比梁 A1



(b) 对比梁 A2



(c) 加固梁 B1

5 根加固梁在加载过程中,当试验荷载 $P < 0.2P_u$ (P_u 为试验梁极限荷载) 时,受拉区混凝土尚未开裂,此时,纵筋应变远未达到屈服应变,加固梁基本呈弹性状态.加固梁跨中截面的纵向应变沿加固梁高分布曲线,如图 4 所示.图 4 中: H 为应变片距离加固梁的距离; ϵ 为应变.

由图 4 可知:加固梁破坏前,加固梁跨中截面纵向应变沿梁高方向近似呈直线分布,基本符合平截面假定;随着试验荷载的增加,加固梁首先在梁底纯弯段出现弯曲裂缝,并缓慢向上扩展,当老混凝土梁底拉应变达到开裂应变时,裂缝延伸至老混凝土区域;混凝土开裂后,加固梁刚度有一定程度的下降,在这一阶段,新混凝土区域的裂缝在达到一定宽度后就开始缓慢增长;随着试验荷载的继续增加,弯剪段随之出现斜向裂缝,斜向裂缝的宽度很小,宽度变化不大,对加固梁的正常使用性能并不构成直接影响;

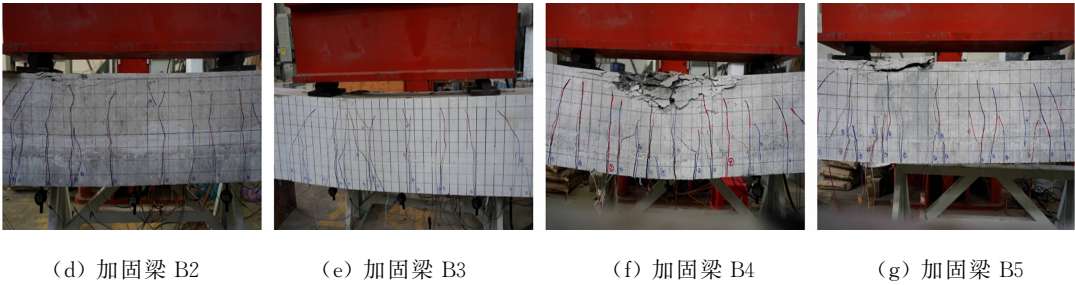


图 3 试验梁破坏形态及裂缝分布

Fig. 3 Test beam failure modes and crack distribution

当 $P>0.8P_u$ 时,加固梁进入塑性阶段,纯弯段裂缝不断向梁顶扩展,挠度急剧增长,裂缝宽度迅速发展,弯剪段斜向裂缝也不断出现,跨中荷载-挠度曲线发生明显转折,加固纵筋和原梁纵筋相继屈服;当受压区混凝土达到极限压应变时,加固梁开始发生破坏.与对比梁相比,加固梁底裂缝数量明显增多,且裂缝宽度变小.在整个加载过程中,新老混凝土间黏结界面未发生剥离破坏,也没有发生明显滑移,破坏状态均呈适筋梁破坏,表现出较好的延性特征.

2.2 试验结果

所有试验梁均加载至极限破坏状态,试验梁的开裂荷载(P_{cr})、屈服荷载(P_y)和极限荷载(P_u)实测值如表 3 所示.表 3 中: R 为各加固梁与对比梁 A1 的开裂荷载比值; $\Delta P_y, \Delta P_u$ 分别为各加固梁与对比梁 A1 的屈服荷载差值和极限荷载差值.

表 3 试验梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载实测值

Tab. 3 Measured values of cracking load, yield load and ultimate load of test beams

试验梁编号	P_{cr}/kN	R	P_y/kN	$\frac{\Delta P_y}{P_y}/\%$	P_u/kN	$\frac{\Delta P_u}{P_u}/\%$
A1	8.7	—	41.2	—	58.8	—
A2	10.2	—	88.3	—	126.4	—
B1	22.1	2.5	82.2	99.5	110.4	87.8
B2	23.8	2.7	85.7	108.0	118.7	101.9
B3	25.9	3.0	86.8	110.7	120.2	104.4
B4	22.5	2.6	80.8	96.1	107.2	82.3
B5	21.6	2.5	78.2	89.8	105.5	79.4

试验梁的荷载-跨中挠变形度曲线及荷载-跨中试验梁底纵筋应变曲线分别如图 5,6 所示.图 5,6 中: w 为挠度.

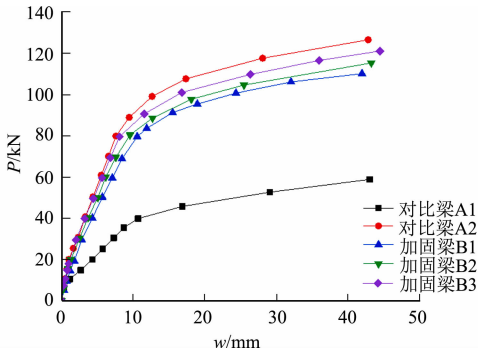


图 5 荷载-跨中挠度变形曲线

Fig. 5 Curves of load-midspan deflection

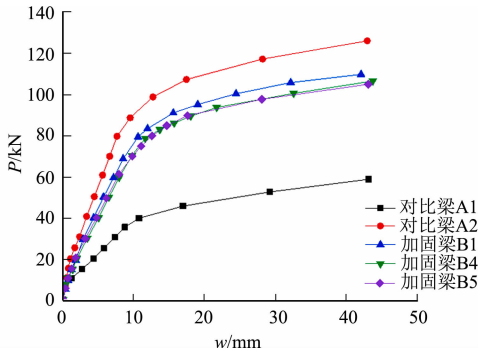


图 6 荷载-跨中试验梁底纵筋拉应变曲线

Fig. 6 Curves of load-midspan bottom reinforcement tensile

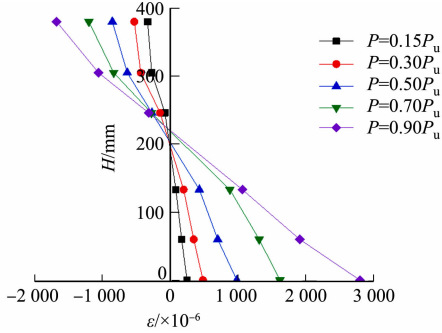


图 4 纵向应变沿加固梁高分布曲线

Fig. 4 Longitudinal strain distribution curves along strengthened beam height

3 试验结果分析

3.1 加固梁与整浇梁的对比分析

与对比梁 A1 相比,各加固梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载值均有不同程度的提高,且屈服荷载的提高幅度更为明显,约为 89.8%~110.7%,表明采用高强灌浆料进行增大截面加固 RC 梁的加固效果较好,能有效提高梁的抗弯承载力,而且可以保证新老混凝土的整体工作性;相较于对比梁 A1,加固梁的开裂荷载最大提高约 2 倍,最小也提高约 1.5 倍,说明高强灌浆料具有良好的抗裂性能,对裂缝的发展起到较好的抑制作用(表 3).各加固梁在同级荷载下的纵筋拉应变均小于对比梁 A1,表明加固纵筋参与了原梁的协同工作,并承担了部分荷载(图 6).与整截面对比梁 A2 相比,加固梁的抗弯承载力整体均低于整浇梁,这是因为加固梁的原梁底纵筋较对比梁 A2 更靠近截面中和轴,受拉钢筋应力较小,因此,对梁体承载力的贡献较小.

3.2 加固层厚度对加固梁受弯性能的影响

对于梁底加固层厚度为 80 mm 的加固梁 B1,其加固后的屈服荷载较加固前增大 99.5%;而对于梁底加固层厚度分别为 120,160 mm 的加固梁 B2,B3,其加固后的屈服荷载较加固前分别增大 108.0%,110.7%,极限荷载也从 110.4 kN 增大到 120.2 kN(表 3),表明随着梁底加固层厚度的增大,加固梁的抗弯承载力仅有略微的提高.另外,加固层厚度较大的加固梁 B2,B3 的挠度较加固梁 B1 小(图 5),表明加固层厚度越大,刚度越大,挠度越小.

由于各组试验梁梁底保护层设置相同,梁底混凝土厚度的增加使梁截面的有效高度在一定程度上有所增大,进而提高试件的抗弯承载力.但加固层厚度较大的加固梁 B2,B3 的新老纵筋应变差值较加固梁 B1 小,但加固梁 B2,B3 的新老纵筋应变值相差甚微,说明加固层厚度只能在一定范围内改善新老纵筋的受力差异(图 6).加固梁 B3 的抗弯承载力也仅比加固梁 B2 提高了 1.3%,但其加固自质量却增大约 33.3%,所以在实际加固工程中应根据结构自质量和下部净空综合考虑.

3.3 植筋间距对加固梁受弯性能的影响

在实际工程中,常常会由于各种因素的影响,使新老混凝土间的黏结性能达不到预期效果.在保证其他条件相同的前提下,设计加固梁 B1,B4 及 B5,分别采用不同的植筋间距,探究植筋间距对新老混凝土间黏结性能的影响,比较不同植筋间距下加固梁受弯承载力的差异.

从试验梁的破坏形态上来看,所有加固梁均表现为延性破坏,几乎不存在滑移等影响新老混凝土整体工作性的现象.3 根不同植筋间距加固梁的抗弯承载力差异并不大,加固梁 B1 的极限荷载较加固梁 B4 仅提高约 3.0%,较加固梁 B5 也仅提高 4.6%(表 3).植筋间距为 100 mm 的加固梁 B1 刚度略大于植筋间距为 150 mm 和 200 mm 的加固梁 B4 和 B5;而加固梁 B4 和 B5 荷载-跨中挠度变形曲线则基本重合(图 5),所以在实际加固工程中,不建议过分减小植筋间距来提高结构的承载力.

4 抗弯承载力计算

基于试验结果,5 根加固梁具有典型的适筋梁受力特征,根据纵向钢筋的实测应变,混凝土破坏时,原试件纵筋和新增钢筋均已屈服,受压区混凝土压应变达到极限压应变,其基本假定与普通 RC 梁正截面受弯承载力计算的基本假定相同,根据试验结果推导的承载力计算简图,如图 7 所示.图 7 中: $h_{0,m}$ 为加固梁的截面有效高度; h_0 为加固前梁的截面有效高度; x_c 为截面受压区高度; ϵ_{cu} 为混凝土的压应变; $\epsilon_{y,m}$ 为加固后下部纵筋整体拉应变; ϵ_y 为加固前下部纵筋整体拉应变; M_u 为加固梁的抗弯承载力; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; F 为合压力; T 为加固前的纵筋拉应力; T_m 为加固后的纵筋拉应力.

由图 7 的几何关系,可得混凝土的压应变,即

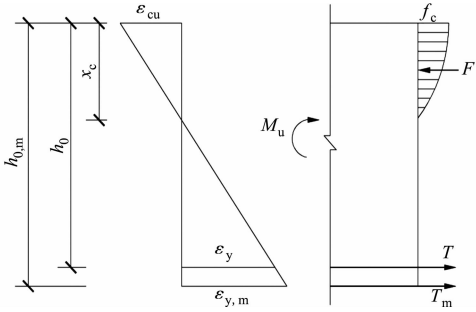


图 7 承载力计算简图
Fig. 7 Calculation diagram of bearing capacity

$$\epsilon_{cu} = \frac{x_c}{h_{0,m} - x_c} \epsilon_{y,m}.$$

(1)

混凝土受压区的合压力为

$$F = \int_0^{x_c} \sigma(\epsilon) b dy = \int_0^{x_{c,0}} \sigma_0 \left[\frac{2\epsilon_{cu} y}{\epsilon_0 x_c} - \left(\frac{\epsilon_{cu} y}{\epsilon_0 x_c} \right)^2 \right] b dy + \int_{x_{c,0}}^{x_c} \sigma_0 b dy.$$

(2)

式(2)中: ϵ_0 为混凝土压应力达到 f_c 时混凝土的压应变; $x_{c,0}$ 为合压力作用点距截面中和轴的距离,且 $x_{c,0} = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_{cu}} x_c$; b 为矩形梁宽度.

由于文中采用高强灌浆料作为新增材料加固钢筋混凝土矩形梁,不同于一次浇筑整截面梁,混凝土压应力由两部分组成,故混凝土受压区的合压力为

$$F = (f_{c,0} + f_{c,m}) b x_c \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_{cu}} \right).$$

(3)

式(3)中: $f_{c,0}$ 为原梁混凝土的轴心抗压强度; $f_{c,m}$ 为高强灌浆料的轴心抗压强度.

考虑试验过程中对加固层界面的处理并非能达到理论中的理想状态,并且受二次施工影响,新增混凝土在连接构造和受力状态上不可避免地要受到各种影响因素的综合作用,从而导致其强度难以充分发挥,故应对其作出适当调整.因此,引入修正系数 η , $\eta \leq 1.0$. 根据试验结果并参考现行相关规范建议,对高强灌浆料加固构件, $\eta = 0.7$.

混凝土受压区合压力计算公式经修正后为

$$F = (f_{c,0} + \eta f_{c,m}) b x_c \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_{cu}} \right).$$

(4)

由力的平衡条件可知 $F = T + T_m$, 即

$$(f_{c,0} + \eta f_{c,m}) b x_c \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_{cu}} \right) = f_y A_s + \alpha_s f_{y,m} A_{s,m}.$$

(5)

则加固梁的抗弯承载力为

$$M_u = \alpha_s f_{y,m} A_{s,m} \left(h_{0,m} - \frac{x_c}{2} \right) + f_y A_s \left(h_0 - \frac{x_c}{2} \right).$$

(6)

式(6)中: α_s 为新增钢筋强度利用系数,取 $\alpha_s = 0.9$; $f_y, f_{y,m}$ 分别为原构件受拉纵筋及加固纵筋的抗拉强度; $A_{s,m}$ 和 A_s 分别为加固纵筋和原受拉纵筋的截面面积.

极限承载理论计算与试验结果对比,如表 4 所示.表 4 中: $P_{u,0}$ 为极限荷载理论值.由表 4 可知:试件破坏时的极限荷载与试验结果较为吻合.

表 4 极限承载理论计算与试验结果对比

Tab. 4 Comparison of ultimate bearing capacity theoretical calaulation and test results

试验梁编号	P_u/kN	$P_{u,0}/\text{kN}$	$P_u/P_{u,0}$
A1	58.8	59.39	0.99
A2	126.4	123.92	1.02
B1	110.4	121.32	0.91
B2	118.7	124.95	0.95
B3	120.2	127.87	0.94
B4	107.2	116.52	0.92
B5	105.5	115.93	0.91

5 结论

- 1) 采用高强灌浆料增大截面法对普通 RC 梁进行加固,新老混凝土间的黏结性能较好,可以保证新老混凝土间的整体工作,可显著提高梁的抗弯性能,与对比梁 A1 比较,各加固梁极限荷载的提高幅度约为 79.4%~104.4%.
- 2) 采用高强灌浆料对 RC 梁进行抗弯加固,试验梁开裂后的抗弯刚度明显提高,且对裂缝的产生和发展起到较好的抑制作用,具有良好的抗裂性能,能提高构件的延性.

3) 不同的植筋间距对梁的抗弯性能影响程度不大,植筋间距为 150,200 mm 的加固梁 B4,B5 的极限承载力分别仅比植筋间距为 100 mm 的加固梁 B1 降低了 3.0%和 4.6%;梁底加固厚度的增加只能在有限范围内改善新老纵筋的受力差异,对加固梁的抗弯承载力提高并不明显。

4) 根据试验结果,在平截面假定的基础上推导了高强灌浆料加固 RC 梁的受弯承载力计算公式,由此公式计算的极限荷载值与试验结果较为吻合。

参考文献:

- [1] 孙业昂. 钢板-混凝土组合加固矩形梁施工阶段力学性能研究[D]. 西安:长安大学,2017.
- [2] KARAMLOO M, MAZLOOM M, PAYGANEH G. Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 508-515. DOI: 10. 1016/j. constr. buildmat. 2016. 07. 061.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁加固设计规范: JTJ/T J22—2008[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [4] 黄建锋,朱春明,龚治国,等. 增大截面法加固震损钢筋混凝土框架的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2012, 45(12): 9-17. DOI: 10. 15951/j. tmgcxb. 2012. 12. 008.
- [5] DOMONE P L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 28(2): 197-208. DOI: 10. 1016/j. cemconcomp. 2005. 10. 003.
- [6] 王国杰,郑建岚. 二次受力下自密实混凝土加固梁抗剪性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2014, 11(4): 51-57. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-7029. 2014. 04. 009.
- [7] 邓宗才,张戊晨. 混杂纤维增强 RPC 加固混凝土梁抗弯性能[J]. 哈尔滨工程大学学报,2015, 36(9): 1199-1205. DOI: 10. 11990/jheu. 201404065.
- [8] 叶显,吴文选,周壮,等. 玄武岩纤维对高强灌浆料耐高温性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用,2020, 34(1): 71-73, 84. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-8249. 2020. 01. 017.
- [9] 成煜,谢剑,于敬海. 二次受力下 UHPC 加固钢筋混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 硅酸盐通报,2019, 38(7): 2295-2301. DOI: 10. 16552/j. cnki. issn1001-1625. 2019. 07. 049.
- [10] CHALIORIS C E, THERMOU G E, PANTAZOPOULOU S J. Behaviour of rehabilitated RC beams with self-compacting concrete jacketing-analytical model and test results[J]. Construction and Building Materials, 2014, 55: 257-273. DOI: 10. 1016/j. constr. buildmat. 2014. 01. 031.
- [11] 卜良桃,李为,彭超. 钢纤维水泥砂浆钢筋网加固 RC 梁受力性能研究[J]. 建筑结构,2010, 40(5): 16-19. DOI: 10. 19701/j. jzjg. 2010. 05. 005.
- [12] 罗素蓉,吴文达,陈彪. 二次受力下自密实混凝土加固 RC 梁受弯性能研究[J]. 工程力学,2015, 32(4): 62-68. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2013. 10. 1002.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [15] 张建仁,罗育明,张旭辉,等. 不同持荷下自密实混凝土加固既有 RC 梁抗弯性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2019, 39(4): 62-72. DOI: 10. 19721/j. cnki. 1671-8879. 2019. 04. 008.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)