

引用本文:阎西康,贾云飞,梁琳霄,等.混凝土植筋梁双筋间距对锚固性能的影响[J].建筑科学与工程学报,2023,40(5):89-98.

YAN Xikang, JIA Yunfei, LIANG Linxiao, et al. Influence of double bar spacing on anchorage performance of concrete planting bar beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 89-98.

DOI:10.19815/j.jace.2021.12002

混凝土植筋梁双筋间距对锚固性能的影响

阎西康^{1,2}, 贾云飞¹, 梁琳霄³, 刁然治¹, 王士达¹, 谢函霖¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;
3. 北华航天工业学院 建筑工程学院, 河北 廊坊 065000)

摘要:为研究双植筋锚固间距对受弯植筋梁锚固性能的影响,对植筋间距 $2d$ (d 为植筋直径)的双筋植筋梁进行了受弯加载试验,结合单植筋拉拔试验结果,对比了双植筋与单植筋构件的差异;在试验基础上,利用ABAQUS有限元软件分析了植筋梁在不同植筋间距下力学性能的差异;通过植筋的平均黏结应力和混凝土的等效塑性应变云图,找到了植筋梁的双筋界限间距;通过不同植筋间距下黏结应力的关系,提出了与植筋间距系数相关的基本锚固深度计算公式。结果表明:由于2根植筋在混凝土中应力重叠作用的影响,当植筋间距较小时会导致植筋应力发展不充分,削弱植筋的锚固性能;随着植筋间距增大,两植筋的应力重叠作用减弱,当植筋间距大于 $6d$ 时可忽略植筋应力重叠作用带来的影响,故工程中梁式受弯构件的植筋间距建议大于 $6d$;针对实际工程中因原构件尺寸限制,植筋间距无法设计为 $6d$ 以上的问题,建议适当增加锚固深度。

关键词:混凝土植筋梁;加固;植筋间距;锚固性能

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)05-0089-10

Influence of double bar spacing on anchorage performance of concrete planting bar beams

YAN Xikang^{1,2}, JIA Yunfei¹, LIANG Linxiao³, DIAO Ranzhi¹, WANG Shida¹, XIE Hanlin¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. Hebei Civil Engineering Technology Research Center, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
3. Architectural Engineering Institute, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: In order to study the effect of the anchorage spacing of double planting bars on the anchorage performance of bent planting bar beams, bending loading tests were conducted on double planting bar beams with a spacing of $2d$ (d is the diameter of planting bar) between planting bars. Based on the results of the single planting bar pull-out test, the differences between the double planting bar component and the single planting bar were compared. On the basis of experiments, the differences in mechanical properties of reinforced beams with different spacing of planting bars were analyzed using ABAQUS finite element software. The boundary

收稿日期:2021-12-05

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2017202111);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2023245);

河北省住建厅建设科技研究项目(2023-2155);廊坊市科学技术研究与发展计划项目(2022011042)

作者简介:阎西康(1966-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:tjsyxk@163.com.

通信作者:梁琳霄(1990-),女,工学博士,讲师,E-mail:15131429280@163.com.

spacing between the double bars of the reinforced concrete beam was found through the average bond stress of the planting bars and the equivalent plastic strain nephogram of the concrete. A basic anchoring depth calculation formula related to the spacing coefficient of planting bars was proposed based on the relationship between bonding stress under different spacing of planting bars. The results show that due to the impact of stress overlap between two planting bars in concrete, when the spacing between planting bars is small, it can lead to insufficient stress development and weaken the anchoring performance of planting bars. As the spacing between planting bars increases, the stress overlap between the two planting bars weakens. When the spacing between planting bars is greater than $6d$, the impact of overlapping stress of planting bars can be ignored. Therefore, it is recommended that the spacing between planting bars for beam bending components in engineering should be greater than $6d$. In response to the problem that the spacing between planting bars cannot be designed to be more than $6d$ due to the size limitations of the original components in practical engineering, it is recommended to increase the anchorage depth appropriately.

Key words: concrete planting bar beam; reinforcement; planting bar spacing; anchorage performance

0 引言

植筋锚固技术在中国建筑工程领域中的各类结构加固与改造中有广泛的应用^[1-2]。目前国内外植筋技术的研究大多集中在钢筋混凝土块体基材上的拉拔试验及抗剪试验,总结了植筋的锚固承载力计算方法以及破坏模式^[3-6],并分析了植筋结构中各界面之间的荷载传递机理和黏结滑移机理^[7-10]。然而植筋在实际工程结构中的受力状态与在基材上的单向受力状态还是有很大不同^[11]。例如,由于受弯植筋梁构件中的混凝土相较于基材混凝土会处于更复杂的应力状态,因此导致受弯植筋梁中的植筋抗拉锚固性能会与混凝土基材上的植筋抗拉锚固性能有所差异。

同时,国内外对于植筋的研究还是集中在单根植筋的锚固性能分析及拉拔承载力计算上^[12-15],对于双植筋或多植筋的理论分析并不多,而且目前关于双植筋或多植筋的试验研究依然是建立在混凝土块体基材上的拉拔试验^[16-19]。虽然在已有的双植筋锚固理论中得到了当植筋间距较小时会对锚固强度有所削弱的结论,但关于植筋加固的现行相关规范^[20]仍仅对植筋的基本锚固深度做了规定,对于植筋构件中的植筋间距以及多植筋之间的相互影响尚无明确界定。

为此本文在试验的基础上结合 ABAQUS 有限元模拟分析,探讨双植筋受弯植筋梁在不同锚固深度下植筋间距对植筋梁锚固性能的影响。

1 植筋梁受弯试验

1.1 试件概况

共设计制作 4 根混凝土植筋试验梁,为使双植筋在梁式试件中承担拉力,分别进行了集中力跨中加载与双集中力四分点加载(以下简称跨中加载、四分点加载)。按照《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[20]进行钻孔植入钢筋。先浇段养护完成后在设计位置打孔注入植筋胶(采用 FISEM390S 植筋胶),将钢筋植入,待胶体固化后对新旧混凝土交界面进行凿毛浇水处理,随后完成后浇段混凝土制作。试件参数见表 1,所用材料性能见表 2、3,试件尺寸及截面配筋见图 1,试件浇筑及植筋锚固现场见图 2。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	受拉植筋直径/mm	植筋埋置长度/mm	植筋间距	加载方式
S15	25	375	$2d$	跨中加载
S20	25	500	$2d$	跨中加载
S25	25	625	$2d$	跨中加载
W25	25	625	$2d$	四分点加载

注: d 为植筋直径。

表 2 钢筋强度

Table 2 Strength of rebar

钢筋型号	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
HPB300	310.3	404.1	210
HRB400	418.5	534.7	204

表 3 混凝土强度

Table 3 Strength of concrete

混凝土强度等级	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
C30	34.1	1.96	29.5

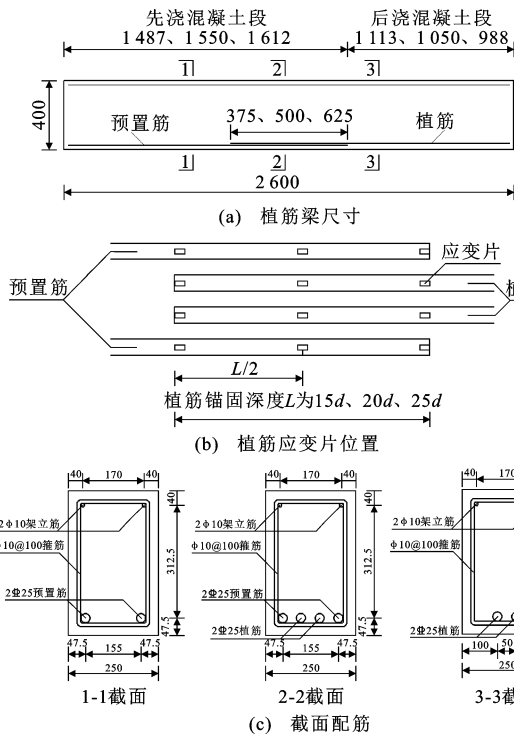


图 1 试件尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Size and reinforcement of specimens (unit:mm)

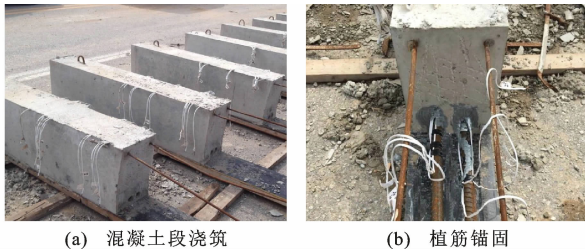


图 2 试件浇筑及植筋锚固现场

Fig. 2 Site of specimens pouring and planting bar anchorage

1.2 加载方式

试验梁在距梁两端 150 mm 处设支座, S15、S20、S25 梁在跨中设置钢垫块进行跨中加载, W25 梁通过分配梁在距梁两端 725 mm 处设置 2 个钢垫块, 进行四分点加载, 在跨中 1 150 mm 长度内形成受弯区段。开始时控制加载速率为 $10 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$, 临近开裂时改为 $5 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$, 当受拉纵筋即将接近屈服时改用位移控制加载, 速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 加载至梁破坏。

1.3 破坏特征

4 根试验梁加载过程中的第 1 条裂缝位置均在

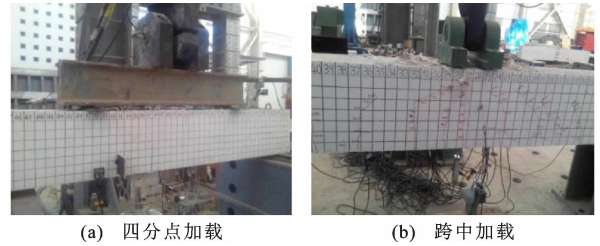


图 3 试验加载现场

Fig. 3 Site of test loading

新旧混凝土交界面处。S15、S20 试验梁破坏过程较为类似, 荷载加至 30 kN 时出现第 1 条裂缝。加载中期, 植筋端头处出现竖向裂缝并逐渐斜向发展, 跨中段也出现了较宽的竖向裂缝。加载后期, 跨中裂缝与斜裂缝交汇增宽变为主裂缝并迅速贯穿梁高导致破坏。S15 试验梁极限荷载为 191 kN, S20 试验梁极限荷载为 262 kN, S25 试验梁开裂荷载为 35 kN。加载中期, 植筋端头处出现竖向裂缝, 随着荷载增大, 竖向裂缝开始斜向发展。加载后期, 跨中段靠近植筋端头处斜裂缝发展至全梁高, 同时受拉纵筋达到屈服强度, 极限荷载为 320 kN。W25 试验梁开裂荷载为 55 kN。加载中期跨中纯弯段出现 4 条较为明显的竖向裂缝, 随着荷载增加, 竖向裂缝逐渐向受压区扩张。加载至 260 kN 时, 剪切段出现斜裂缝并发展较快; 加载后期, 梁两侧的剪切斜裂缝和新旧混凝土交界面处竖向裂缝延伸至梁顶受压区, 同时受拉钢筋屈服, 极限荷载为 521 kN。植筋梁裂缝分布见图 4。

1.4 试验结果分析

根据试验中的荷载和跨中位移数据, 图 5 给出了植筋间距为 $2d$ 的植筋梁在不同锚固深度和加载方式下的荷载-挠度曲线。在开裂之前 4 根梁的荷载-挠度曲线近似为直线且几乎重合, 在开裂后曲线的斜率发生变化。S15 梁由于锚固深度较短, 破坏时钢筋、胶体、混凝土发生了混合黏结破坏, 导致锚固失效; S15 和 S20 曲线均只有未裂和开裂后两个阶段, 没有挠度迅速增长的水平段, 破坏时受拉纵筋未屈服, 呈现脆性破坏特征; S25 和 W25 梁的曲线趋势相似, 有明显的 3 个阶段, 在达到极限荷载后, 曲线有明显的水平段, 破坏时受拉纵筋屈服, 呈现塑性破坏特征。W25 因跨中为纯弯段, 剪切斜裂缝只出现在梁两侧支座附近且延伸较慢, 曲线上表现为 W25 梁较 S25 梁有更长的挠度快速增长段。

表 4 列出了植筋梁的试验结果(由于 S25 和 W25 梁钢筋屈服后变形较大, 故应力取值为测点处钢筋临近屈服时的应力), 结合与本试验材料相同的

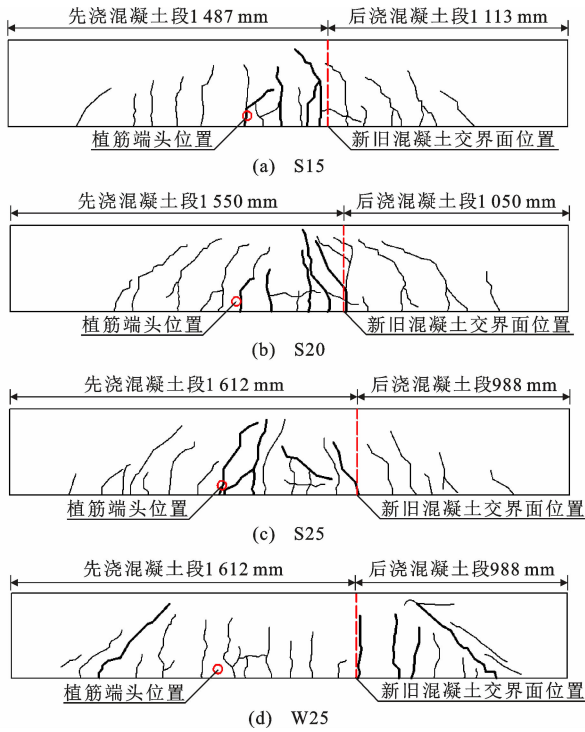
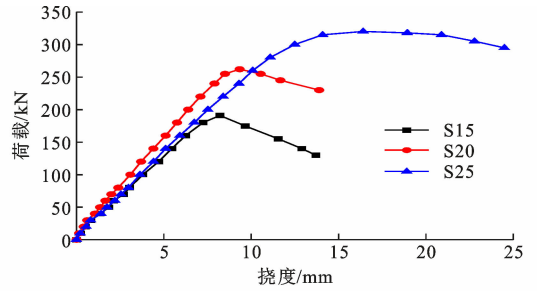
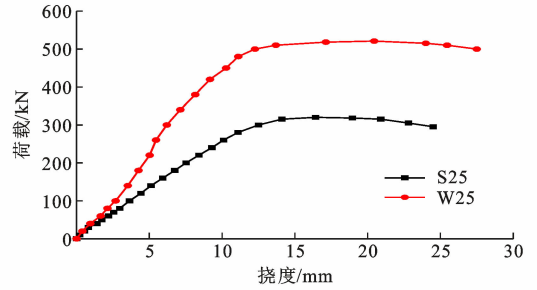


图4 植筋梁裂缝

Fig. 4 Cracks of planting bar beams



(a) S15、S20、S25



(b) S25、W25

图5 植筋梁荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curves of planting bar beams

单植筋受拉试验^[15]可以发现,在混凝土强度、钢筋以及植筋胶均相同的情况下,单植筋与双植筋结果

表4 试验结果

Table 4 Test results

试件编号	极限荷载/kN	极限挠度/mm	开裂荷载/kN	植筋搭接段最大应力/MPa	破坏特征
S15	191	8.20	30	287	脆性破坏
S20	262	9.34	30	359	脆性破坏
S25	320	16.41	35	442	塑性破坏
W25	521	20.45	55	451	塑性破坏

存在较大差异。单植筋拉拔试验在锚固深度为 $10d$ 时发生锥体黏结混合破坏且植筋达到屈服强度,在 $15d$ 、 $20d$ 和 $25d$ 时发生植筋屈服后拉断破坏,说明在单植筋锚固深度大于 $10d$ 时静力黏结性能可靠。由植筋间距 $2d$ 的双筋植筋梁通过试验结果可知,在锚固深度 $25d$ 时植筋才达到屈服强度,发生塑性破坏。

规范^[20]中给出了植筋锚固长度的计算公式,即

$$l_d \geq \Psi_N \Psi_{ac} l_s \quad (1)$$

$$l_s = 0.2 \alpha_{spt} d f_y / f_{bd} \quad (2)$$

式中: l_d 为锚固长度设计值; l_s 为基本锚固长度; Ψ_N 为考虑各种因素影响需加大锚固深度的修正系数; Ψ_{ac} 为考虑植筋位移延性要求的修正系数; α_{spt} 为混凝土劈裂影响系数; f_y 为钢筋屈服强度; f_{bd} 为植筋胶黏结强度。

根据试验^[15]实测材料强度取值, f_y 取 418.5 MPa, f_{bd} 取 9.17 MPa,代入公式得出 $l_d = \Psi_N \Psi_{ac} l_s = 334$ mm,植筋锚固长度约为 $13d$,与单根植筋拉拔

试验结果一致,即试验中锚固长度大于 $10d$ 时黏结性能可靠。将式(1)、(2)用于植筋间距 $2d$ 的双筋植筋梁,代入 f_{bd} 实测值 5.6 MPa,得出 $l_d = \Psi_N \Psi_{ac} l_s = 546$ mm,计算结果小于双筋植筋梁 625 mm 时发生塑性破坏的结果,说明此计算方法用于双筋植筋梁不安全。

根据上文单植筋拉拔和双植筋在受弯梁中的受拉结果对比,结合已有研究^[16-18]分析,认为双植筋构件中的两植筋会在混凝土中产生应力叠加作用从而降低其锚固性能,而植筋间距越小此作用越明显,造成双筋构件的锚固性能低于单筋构件。由此可以认为植筋间距会对双筋植筋梁的锚固性能造成影响。下文将利用 ABAQUS 有限元软件,模拟分析双筋植筋梁在不同植筋间距下锚固性能的差异。

2 ABAQUS 有限元对比验证

2.1 植筋梁建模

利用 ABAQUS 对上述 4 根试验植筋梁进行建

模,混凝土和钢筋分别采用实体单元 C3D8R 和桁架单元 T3D2 模拟。新旧混凝土交界面用 15 mm 厚的薄板进行模拟,除抗拉强度外,其余材料属性与其他部分混凝土相同。经尝试当薄板的单轴抗拉强度为普通部分混凝土的 65% 时模拟和试验数据相吻合。普通钢筋与混凝土之间的黏结利用钢筋嵌入混凝土单元(Embedded)模拟,植筋搭接段钢筋与混凝土的黏结滑移利用非线性弹簧进行模拟。建模时将植筋与混凝土共节点,在公共节点处采用 Spring2 弹簧单元模拟两点间的黏结滑移,由于 ABAQUS 不支持 Spring 单元的非线性定义,需在 inp 文件中修改为非线性弹簧。非线性弹簧参数通过力-相对位移($F-S$)曲线来确定, $F-S$ 曲线由黏结应力-黏结滑移($\tau-S$)本构关系曲线来确定。

观察试验现象,4 根植筋梁均发生了不同程度的钢筋、胶体、混凝土黏结破坏(混合界面破坏),根据文献[7]的理论可近似认为发生了胶混界面破坏,故 $\tau-S$ 曲线采用文献[8]的本构模型,得到适用于本试验的胶混界面破坏 $\tau-S$ 曲线[式(3)]。

$$\tau(S) = \begin{cases} 56.3S & 0 < S < S_e \\ -7.8S^2 + 15.6S + 10.7 & S_e \leq S < S_0 \\ -0.6S + 19.1 & S \geq S_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_e 和 S_0 分别为弹性黏结应力和极限黏结应力对应的滑移值。

$\tau-S$ 曲线通过式(4)转化成 $F-S$ 曲线,其中 A_1 为植筋胶的表面积, $A_1 = \pi dl_1$, l_1 为弹簧单元长度。

$$F = \tau(S)A_1 \quad (4)$$

2.2 模拟结果与试验结果对比

为验证建模方法的准确性,需对植筋梁的模拟结果与试验结果进行比对。受拉损伤因子云图可以反映模型的受拉损伤位置与程度,当损伤因子数值超过 0.9 时,可认为该位置发生开裂破坏。以 S25 和 W25 试件的模拟受拉损伤因子云图(图 6)为例进行分析,可以发现模拟植筋梁的开裂损伤情况与试验植筋梁的裂缝分布基本一致。

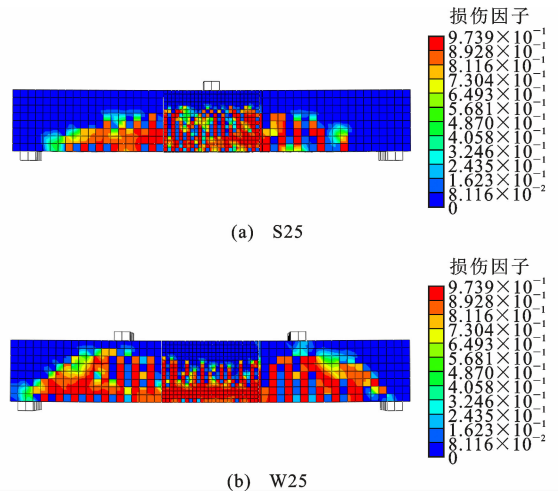


图 6 植筋梁的模拟损伤云图

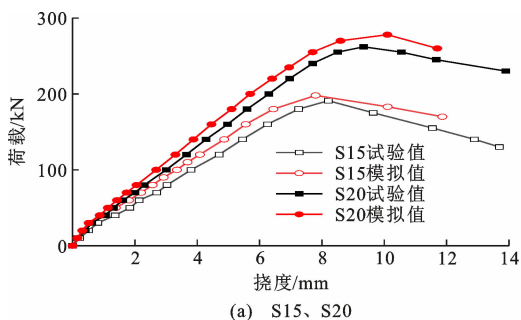
Fig. 6 Simulated damage nephogram of planting bar beams

将模拟计算的荷载-挠度曲线、植筋应力、极限荷载、极限挠度数据与试验数据进行了比对,如表 5 和图 7 所示。可以发现模拟数据与试验数据的相对

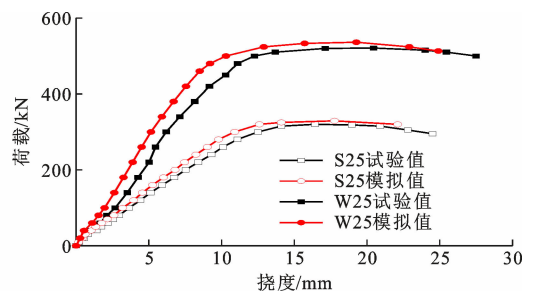
表 5 试验值与模拟值对比

Table 5 Comparison of experimental values and simulated values

梁编号	极限荷载			最大挠度			植筋搭接段最大应力		
	试验值/kN	模拟值/kN	相对误差/%	试验值/mm	模拟值/mm	相对误差/%	试验值/MPa	模拟值/MPa	相对误差/%
S15	191	198	3.7	8.20	7.80	4.9	287	271	5.6
S20	262	278	6.1	9.34	10.10	8.1	359	336	6.4
S25	320	329	2.8	16.41	17.75	8.2	442	428	3.2
W25	521	536	2.9	20.45	19.26	5.8	451	430	4.7



(a) S15、S20



(b) S25、W25

图 7 荷载-挠度曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-deflection curves

误差均在 10% 以内,且破坏模式相同。根据以上模拟和试验的对比结果,验证了本文有限元模型的可靠性,可进行下一步分析。

3 不同植筋间距的植筋梁有限元模拟

3.1 有限元模型建立

由于试验梁尺寸条件所限,无法进一步增大植筋间距,故在上述试验和有限元分析的基础上,改变了模拟植筋梁的横截面面积(由之前的 $250\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 改为 $350\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,经计算改变后仍满足配筋率和构造要求),目的是便于分析不同植筋间距对植筋梁锚固性能的影响。原试验梁的植筋间距为 $2d$,在此基础上建立了 $2d$ 、 $3d$ 、 $5d$ 、 $6d$ 植筋间距的模拟梁,建模方法和材料参数同上。模拟梁参数见表 6。图 8 为不同植筋间距的植筋梁钢筋单元示意图。

3.2 模拟结果分析

3.2.1 荷载-挠度曲线及承载力

图 9 为上述 6 组梁的荷载-挠度曲线。从图 9 可知:随着植筋间距的增加,植筋梁的极限承载力均

有所上升;植筋间距 $2d$ 、 $3d$ 、 $5d$ 的曲线相互差异明显,但植筋间距 $5d$ 与 $6d$ 的曲线差异较小。

AS-15、AW-15、AS-25、AW-25 组梁的荷载-挠度曲线走势相似:AS-15、AW-15 组梁曲线未出现水平段,均表现为脆性破坏;AS-25、AW-25 组梁在达到极限荷载后,曲线有明显的水平段,此时模拟的受拉植筋应力也超过其屈服应力,呈现塑性破坏特征。随着植筋间距的增加,曲线水平段更长,极限挠度略有增大,说明植筋间距的增加让植筋梁在屈服到破坏阶段展现出了更好的塑性。

AS-20、AW-20 组梁的荷载-挠度曲线走势有所差异:AS-20 组梁在植筋间距 $2d$ 、 $3d$ 时曲线未出现水平段,而植筋间距为 $5d$ 、 $6d$ 时曲线出现了不太明显的水平段,从模拟结果来看,间距 $5d$ 和 $6d$ 的植筋梁破坏时植筋接近屈服应力;AW-20 组梁在植筋间距 $5d$ 、 $6d$ 时与 $2d$ 、 $3d$ 时的曲线也有明显差异,间距 $2d$ 和 $3d$ 的植筋梁曲线呈现脆性破坏特征,而间距 $5d$ 和 $6d$ 的植筋梁曲线则出现了较为明显的水平段,此时模拟的植筋应力达到其屈服应力,可以认为发生了塑性破坏。

表 6 模拟植筋梁参数

Table 6 Parameters of simulated planting bar beams

梁组号	模拟梁编号	植筋间距	锚固深度
AS-15	S15-2d, S15-3d, S15-5d, S15-6d	2d, 3d, 5d, 6d	15d
AS-20	S20-2d, S20-3d, S20-5d, S20-6d	2d, 3d, 5d, 6d	20d
AS-25	S25-2d, S25-3d, S25-5d, S25-6d	2d, 3d, 5d, 6d	25d
AW-15	W15-2d, W15-3d, W15-5d, W15-6d	2d, 3d, 5d, 6d	15d
AW-20	W20-2d, W20-3d, W20-5d, W20-6d	2d, 3d, 5d, 6d	20d
AW-25	W25-2d, W25-3d, W25-5d, W25-6d	2d, 3d, 5d, 6d	25d

注:梁编号中 S 表示跨中加载, W 表示四分点加载, 15、20、25 表示锚固深度, $2d$ 、 $3d$ 、 $5d$ 、 $6d$ 表示植筋间距。

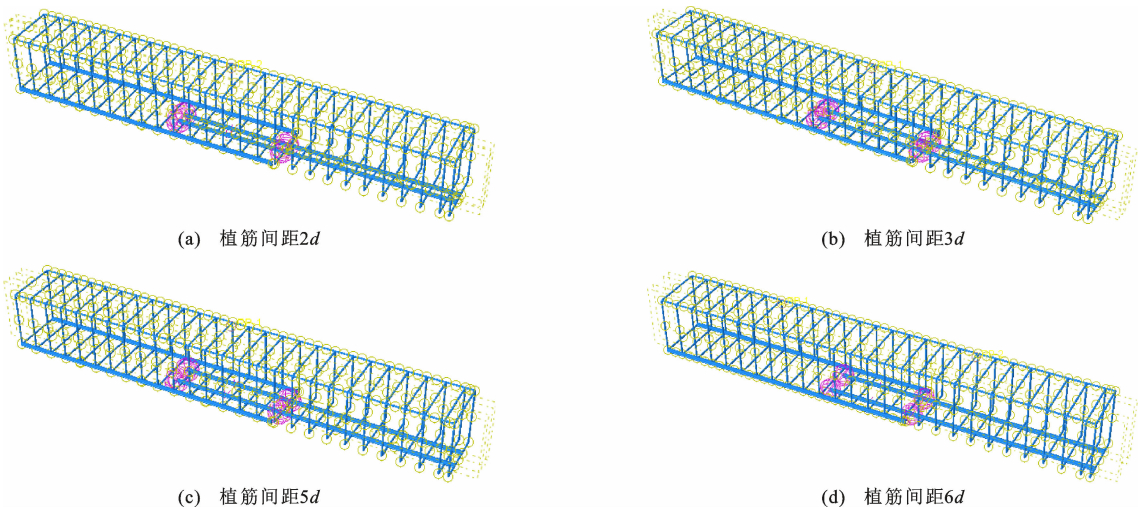


图 8 不同植筋间距的钢筋单元示意图

Fig. 8 Schematic diagram of reinforcement unit with different planting bar spacing

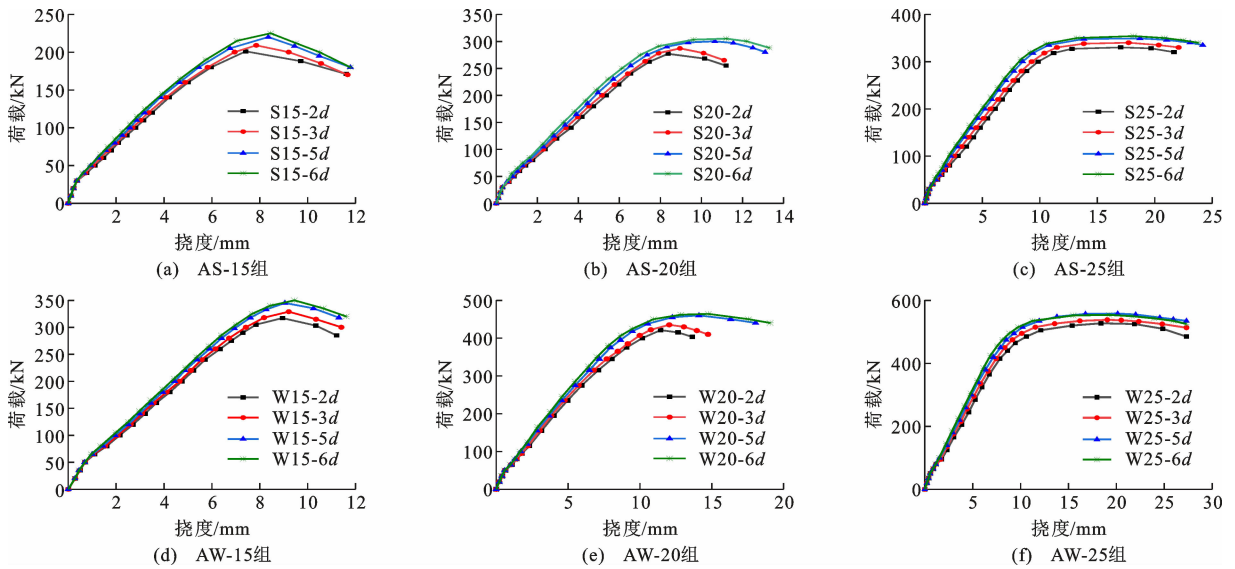


图 9 不同植筋间距下的荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curves with different planting bar spacing

图 10 为 6 组模拟植筋梁极限承载力随植筋间距的变化。图 10(a)为跨中加载,经计算植筋间距从 2d 到 6d,锚固深度 15d 的植筋梁极限承载力提升约 11.9%,锚固深度 20d 的植筋梁极限承载力提升约 10.9%,锚固深度 25d 的植筋梁极限承载力提升约 7.2%。图 10(b)为四分点加载,当植筋搭接段为纯弯段时,植筋间距从 2d 到 6d,锚固深度 15d 的植筋梁极限承载力提升约 10.4%,锚固深度 20d 的植筋梁极限承载力提升约 10.2%,锚固深度 25d 的植筋梁极限承载力提升约 5.5%。锚固深度 25d 时,极限承载力提升的百分比相较于 15d 和 20d 的植筋梁有明显降低,说明当植筋深度较深时植筋间距对承载力的影响小于植筋深度较浅时;当植筋间距达到 6d 后,间距继续扩大对于其极限承载力影响不大。

3.2.2 搭接段植筋应力

以 AS-20、AW-20 组梁为例进行分析,2 组植筋梁在各自的极限荷载下植筋搭接段内的植筋应力变化如图 11 所示。可以看出,植筋间距 5d、6d 的梁植筋应力发展相较于植筋间距 2d、3d 的梁更充分,与图 9 和图 10 的结果相对应,即锚固深度相同的条件下,植筋梁随着植筋间距的增大,其变形能力和极限承载力均得到提升。从植筋的搭接段应力来看,认为植筋间距较小的植筋梁在受力时 2 根植筋会在混凝土中产生应力叠加作用,从而使混凝土对植筋的锚固作用降低,也导致 2 根植筋的应力发展不充分。

3.3 双筋植筋梁植筋界限间距

上述模拟结果显示,当双筋植筋梁植筋间距较

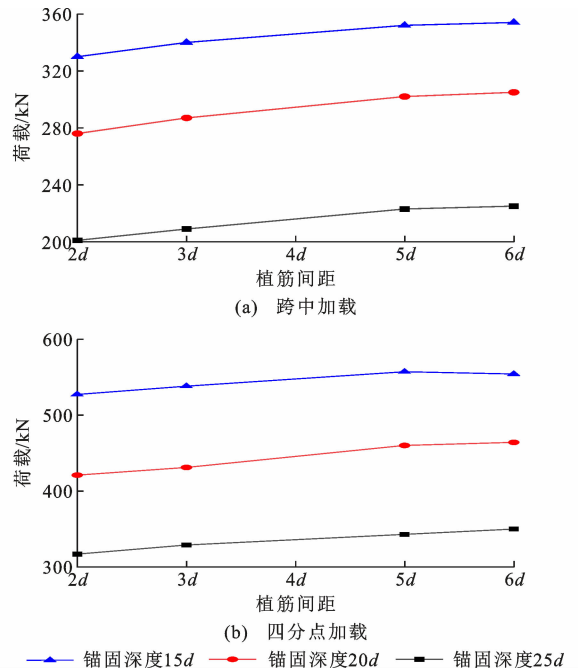


图 10 不同植筋间距下极限承载力变化

Fig. 10 Variation of ultimate bearing capacity with different planting bar spacing

小时,2 根植筋会由于应力场叠加作用而降低植筋梁的锚固性能,表现为植筋梁的极限承载力、延性有所降低,植筋的应力发展受限。以 AW-20 组植筋梁的模拟云图为例,探讨双筋植筋梁的植筋界限间距。

等效塑性应变反映了模拟梁在整个受力过程中塑性损失的累计情况,其一定程度上反映了植筋对混凝土的应力作用区域。因此,图 12 用植筋搭接段混凝土的等效塑性应变来反映不同植筋间距下植筋

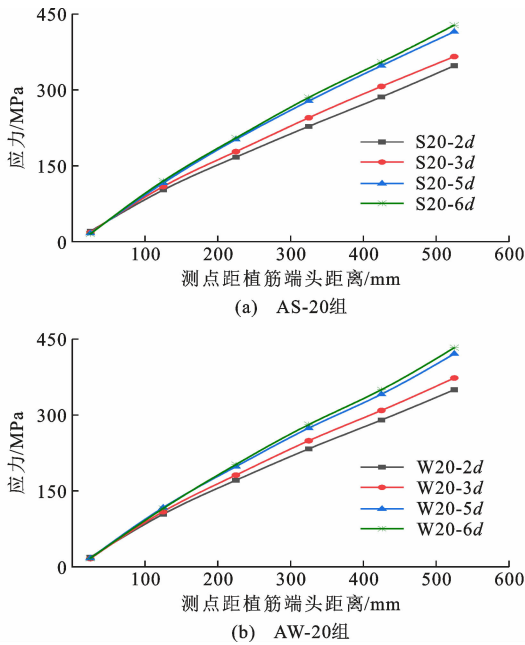


图 11 不同植筋间距下的植筋应力变化

Fig. 11 Variation of planting bar stress with different planting bar spacing

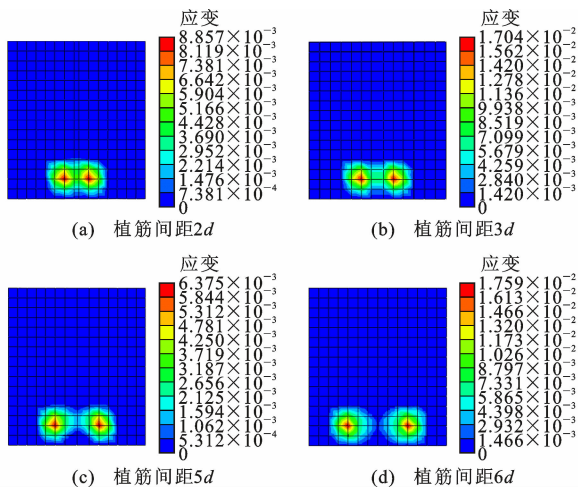


图 12 植筋搭接段混凝土等效塑性应变云图

Fig. 12 Equivalent plastic strain nephogram of concrete in lapped segments of planting bar

在混凝土中的应力叠加现象。

对搭接段混凝土做切片处理以便观察,图 12 中深色区域为植筋对周围混凝土应力影响范围。可以观察到植筋间距 $2d$ 时,两植筋在混凝土中的应力作用重叠区域约占总区域的 60% 以上;植筋间距

$3d$ 时,重叠区域约占总区域的 35%;植筋间距 $5d$ 时,重叠区域约占总区域的 15%;植筋间距 $6d$ 时,两植筋在混凝土中的应力作用区域几乎没有重叠部分,说明可以忽略植筋在搭接段混凝土中由于应力重叠作用而降低植筋锚固性能的影响。

通过上文试验和模拟结果可知,由于植筋在混凝土中的应力场重叠作用,植筋间距会影响植筋应力的发展,从而也会影响植筋在锚固段的黏结应力,而植筋的黏结应力又是规范^[20]中锚固深度计算的重要指标。根据模拟结果,当锚固深度较浅($15d$)时,无论植筋间距如何变化,植筋梁均发生脆性破坏;当锚固深度较深($25d$)时,植筋间距带来的影响明显小于 $20d$ 的锚固深度,故以锚固深度 $20d$ 的 AS-20、AW-20 组梁为参考,分析不同间距的双植筋在各自极限荷载下黏结应力的变化情况。

根据文献[4]中的结论,由于植筋系统内力分布较为复杂,植筋黏结应力可简化为平均黏结应力考虑,即可近似认为黏结应力在锚固段均匀分布。理论上得到植筋应力在锚固范围内的变化规律,即可确定黏结应力,故可利用公式(5)计算得出表 7 结果。

$$\tau = \frac{\sigma_y A_s}{\pi d l_e} \quad (5)$$

式中: σ_y 为植筋应力; A_s 为植筋截面积; l_e 为锚固深度。

图 13 为植筋黏结应力随间距的变化关系,图中横坐标为植筋间距 l_z 与钢筋直径的比值,纵坐标中 τ_6 为植筋间距在 $6d$ 时的黏结应力, τ_i 为植筋间距 $l_z/d=i$ 时的黏结应力。

因上述分析中当植筋间距达到 $6d$ 时,2 根植筋的应力重叠作用可忽略,故以 $l_z/d=6$ 时的黏结应力为标准,用 $1 - (\tau_6 - \tau_i)/\tau_6$ 来反映 $l_z/d=i$ 时黏结应力的变化情况。基于 Origin 的线性拟合,二者关系式为: $1 - (\tau_6 - \tau_i)/\tau_6 = 0.72 + 0.048(l_z/d)$,调整后的判定系数 $R^2 = 0.992$,说明线性拟合合适。在得到双植筋黏结应力随植筋间距变化的规律后,即可对上文公式(2)进行修正,提出与植筋间距系数相关的基本锚固深度计算公式(6)。

$$l_s = \frac{0.2\alpha_{\text{spt}} d f_y}{(0.72 + 0.048 l_z/d) f_{\text{bd}}} \quad l_z/d \leq 6 \quad (6)$$

表 7 不同植筋间距下的植筋黏结应力

Table 7 Bond stress of planting bar with different planting bar spacing

梁组号	AS-20	AS-20	AS-20	AS-20	AW-20	AW-20	AW-20	AW-20
植筋间距	$2d$	$3d$	$5d$	$6d$	$2d$	$3d$	$5d$	$6d$
黏结应力/MPa	4.35	4.58	5.18	5.35	4.38	4.66	5.26	5.41

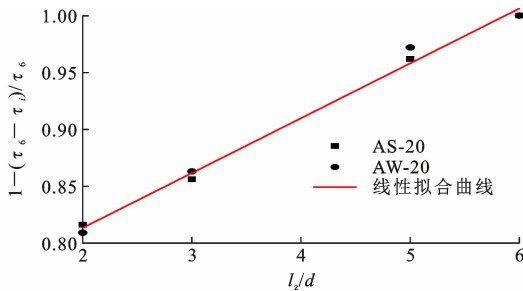


图13 黏结应力随植筋间距变化

Fig. 13 Variation of bond stress with different planting bar spacing

将试验^[15]得到的材料强度代入公式(6)中,对模拟和试验的植筋梁进行验证。通过对比试验可以得到植筋间距为 $2d$ 时基本锚深 $l_s = 481$ mm, $l_d = \Psi_N \Psi_{ac} l_s = 669$ mm,约等于 $26.7d$,略大于本次植筋间距 $2d$ 的植筋梁受弯试验结果,即植筋间距 $2d$ 时,试验植筋梁锚固深度达到 $25d$ 时发生塑性破坏,相较于修正前的公式(2),修正后的公式计算更偏于合理安全;通过对比模拟可以得到植筋间距为 $5d$ 时基本锚深 $l_s = 408$ mm, $l_d = \Psi_N \Psi_{ac} l_s = 568$ mm,约等于 $22.7d$,略大于植筋间距 $5d$ 的植筋梁模拟结果,即植筋间距 $5d$ 时,模拟植筋梁锚固深度达到 $20d$ 后发生塑性破坏。通过试验和模拟结果的验证,说明当植筋间距小于等于 $6d$ 时,可通过修正后的公式适当增加锚固深度来满足设计要求。

4 结语

(1)植筋间距的增加可以使植筋梁的极限承载力得到提升,且锚固深度越小承载力提升越明显。但锚固深度过小时,无论植筋间距如何变化依然会发生脆性破坏,说明植筋梁的锚固深度依然是决定其锚固性能的主要因素。

(2)双筋植筋梁植筋间距较小时,在受弯状态下2根植筋会在混凝土中产生应力重叠作用,使钢筋的应力发展不充分,导致混凝土对钢筋的锚固作用降低。本文的模拟结果显示,当植筋间距达到 $6d$ 后,可忽略由于应力重叠作用而降低植筋锚固性能的影响。因此,实际工程中梁式受弯构件的植筋间距建议大于 $6d$ 。

(3)对于工程中由于原构件尺寸限制,无法增大植筋间距的问题,本文提出了与植筋间距系数相关的基本锚固深度修正公式,当植筋间距小于 $6d$ 时建议适当增加锚固深度,修正后的公式可以对增加锚固深度的范围提供参考。

(4)因试验条件有限,本文只讨论了植筋直径为25 mm的双筋植筋梁的界限间距,后续工作中需对不同直径的植筋进行进一步分析,研究本文的界限间距和基本锚固深度修正公式是否普遍适用于不同直径的双筋植筋梁。

参考文献:

References:

- [1] LI Z L, YANG J M, KANG F L, et al. Mechanical property study on the planting bar strengthening structure based on MIDAS/Civil solid element [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(4): 042092.
- [2] 李悦, 张国胜, 刘雄飞. 混凝土加固植筋技术研究进展[J]. 建筑技术, 2017, 48(3): 302-304.
LI Yue, ZHANG Guosheng, LIU Xiongfei. Research progress of post-installed rebar technology of concrete reinforcement [J]. Architecture Technology, 2017, 48(3): 302-304.
- [3] DOYLE J M. Behavior of chemically bonded anchors [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(2): 386-388.
- [4] 阎锋, 张惠英. 在钢筋混凝土基材上植筋的拉拔试验研究[J]. 建筑技术, 2003, 34(6): 442-444.
YAN Feng, ZHANG Huiying. The research on the drawing test of planting bars in the reinforced concrete [J]. Architecture Technology, 2003, 34(6): 442-444.
- [5] 张建荣, 石丽忠, 杨建华, 等. 混凝土化学植筋锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(3): 17-21.
ZHANG Jianrong, SHI Lizhong, YANG Jianhua, et al. Experimental research on the behavior of chemical adhesive steel bar in concrete under tensile load [J]. Building Structure, 2006, 36(3): 17-21.
- [6] 刘羽纶, 徐福泉, 谢剑, 等. 连接锚固钢筋受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增2): 374-379.
LIU Yulun, XU Fuquan, XIE Jian, et al. Experimental study on shear behavior of anchor steel connections [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S2): 374-379.
- [7] 舒睿彬. 植筋系统粘结滑移性能及受力机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
SHU Ruibin. Study on the bond-slip performance and load-transfer mechanism of bonded rebars system [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [8] 郑晓芬, 张建荣, 艾永江, 等. 植筋胶与混凝土界面结合性能的试验研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(5):

- 139-145.
ZHENG Xiaofen, ZHANG Jianrong, AI Yongjiang, et al. Experimental study on bonding behavior of adhesive and concrete interface [J]. Structural Engineers, 2016, 32(5): 139-145.
- [9] 程麦理, 张立, 李青宁. 植筋混凝土界面剪切性能试验与数值模拟[J]. 建筑结构, 2019, 49(15): 104-109.
CHENG Maili, ZHANG Li, LI Qingning. Experiment and numerical simulation of shear performance of concrete interface for bonded rebars [J]. Building Structure, 2019, 49(15): 104-109.
- [10] YAN X K, LIANG L X. Fatigue performance of post-installed anchorage beams [J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 116597.
- [11] 黎群, 张建荣, 吴进. 钢筋混凝土梁纯弯段植筋试验研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(增1): 1265-1269.
LI Qun, ZHANG Jianrong, WU Jin. Experimental research on pure bending of concrete beam with adhesive reinforcing rods under static load [J]. Industrial Construction, 2007, 37(S1): 1265-1269.
- [12] COOK R A, KUNZ J, FUCHS W, et al. Behavior and design of single adhesive anchors under tensile load in uncracked concrete [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(1): 9-26.
- [13] 张建荣, 石丽忠, 吴进, 等. 植筋锚固拉拔试验及破坏机理研究[J]. 结构工程师, 2004, 20(5): 47-51.
ZHANG Jianrong, SHI Lizhong, WU Jin, et al. Experimental research on the behavior of adhesive reinforcement under tensile load [J]. Structural Engineers, 2004, 20(5): 47-51.
- [14] 刘启真, 唐兴荣. 约束拉拔植筋锚固性能的试验研究[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2020, 33(2): 18-22.
LIU Qizhen, TANG Xingrong. Experimental study on anchorage performance of restrained pull-out planting bars [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2020, 33(2): 18-22.
- [15] 阎西康, 梁琳霄, 梁琛. 疲劳荷载作用下植筋锚固粘
结的滑移性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 149-156.
YAN Xikang, LIANG Linxiao, LIANG Chen. Bond slip behavior of post-installed anchorage under fatigue load [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 149-156.
- [16] 何勇, 徐远杰, 林涛. 混凝土结构的双筋粘结锚固性能试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(2): 88-91.
HE Yong, XU Yuanjie, LIN Tao. Experimental study on performance double adhesive anchors for strengthening concrete structure [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(2): 88-91.
- [17] 淳庆, 邱洪兴, 黄志诚, 等. 钢筋混凝土结构双筋植筋的锚固性能试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(2): 98-100, 74.
CHUN Qing, QIU Hongxing, HUANG Zhicheng, et al. Experimental study on anchorage performance of double adhesive anchors for RC structures [J]. Industrial Construction, 2006, 36(2): 98-100, 74.
- [18] 司伟建, 周新刚, 黄金枝, 等. 混凝土结构植筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2001, 31(3): 9-12.
SI Weijian, ZHOU Xingang, HUANG Jinzhi, et al. Experimental research on the bonding and anchoring behaviours of reinforced bars inserted in concrete structure [J]. Building Structure, 2001, 31(3): 9-12.
- [19] 赵军, 唐兴荣, 刘启真, 等. 混凝土结构双筋植筋的锚固性能试验研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(9): 106-111.
ZHAO Jun, TANG Xingrong, LIU Qizhen, et al. Experimental study on anchorage property of double adhesive anchors for concrete structures [J]. Building Science, 2019, 35(9): 106-111.
- [20] 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, 2014.
Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.