

引用本文:刘 贝,张继文,李 星,等.钢绞线的黏结性能试验研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(6):91-100.
LIU Bei, ZHANG Jiwen, LI Xing, et al. Experimental study on bond performance of steel strands[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 91-100.

DOI:10.19815/j.jace.2022.02056

钢绞线的黏结性能试验研究

刘 贝¹, 张继文^{1,2}, 李 星¹, 郝天择¹

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096;
2. 东南大学 混凝土及预应力混凝土教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:为研究钢绞线在混凝土中的黏结性能,设计制作了16组钢绞线-混凝土拉拔试件,进行了钢绞线的单调拉拔试验,分别从破坏模式、峰值荷载、峰值滑移等方面对比分析了锚固方式(直线型锚固及90°弯折锚固)和锚固长度(总锚固长度及竖直锚固段长度)对钢绞线黏结性能的影响规律。结果表明:16组试件的破坏分为2类破坏模式(钢绞线的拔出破坏、钢绞线的断裂破坏),在设计中应该将钢绞线的断裂破坏作为极限状态;钢绞线的直线型锚固方式难以保证钢绞线强度的充分利用,与直线型锚固试件相比,90°弯折锚固试件的峰值荷载更大,峰值滑移更小;总锚固长度 $l_e \geq 500$ mm是保证钢绞线强度充分利用的前提,在此条件下,总锚固长度 l_e 取600 mm对于限制90°弯折钢绞线的峰值滑移最有效;在保证一定水平锚固段长度的前提下,钢绞线的竖直锚固段长度 l_v 越大,试件的峰值滑移越小;当钢绞线竖直锚固段长度 l_v 取 $10d$ (d 为钢绞线公称直径)时,峰值滑移的下降最明显,非线性滑移阶段锚固刚度的退化最小;实际工程中,当钢绞线采用90°弯折锚固方式时,总锚固长度宜取600 mm,竖直锚固段长度宜取 $10d$ 。

关键词:钢绞线;锚固方式;锚固长度;黏结性能

中图分类号:TU378.8

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)06-0091-10

Experimental study on bond performance of steel strands

LIU Bei¹, ZHANG Jiwen^{1,2}, LI Xing¹, HAO Tianze¹

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of C&PC Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the bond performance of steel strands, 16 groups of steel strand-concrete pull-out specimens were designed and manufactured. A monotonic pull-out test was conducted on steel strands, and the influence of anchoring form (linear anchoring and 90° bending anchoring) and anchoring lengths (total anchoring length and vertical anchoring section length) on the bonding performance of steel strands was compared and analyzed from the aspects of failure mode, peak load, and peak slip. The results show that the failure of 16 groups of specimens is divided into two types of failure modes (pull-out failure of steel strands and fracture failure of steel strands), and the fracture failure of steel strands should be considered as the limit state in the design. The linear anchoring method of steel strands is difficult to ensure the full

utilization of steel strand strength. Compared with the linear anchoring specimen, the 90° bending anchoring specimen has a larger peak load and smaller peak slip. The total anchoring length $l_e \geq 500$ mm is a prerequisite to ensure the full utilization of the strength of the steel strand. Under this condition, taking a total anchoring length l_e of 600 mm is the most effective way to limit the peak slip of the 90° bending steel strand. On the premise of ensuring a certain length of horizontal anchoring section, the larger the anchoring length l_v of the vertical section of the steel strand, the smaller the peak slip of the specimen. When the length l_v of the vertical anchoring section of the steel strand is taken as $10d$ (d is the nominal diameter of the steel strand), the decrease in peak slip is the most significant, and the degradation of anchoring stiffness during the nonlinear slip stage is the smallest. In practical engineering, when the steel strand adopts 90° bending anchoring method, the total anchoring length should be taken as 600 mm, and the length of the vertical anchoring section should be taken as $10d$.

Key words: steel strand; anchoring form; anchoring length; bond performance

0 引言

预制预应力梁装配整体式结构体系(简称PPAS体系)^[1]是大跨工业建筑如物流仓库、工业厂房中广泛应用的结构形式之一^[2-3]。PPAS体系的预制梁为先张法预制预应力梁(图1),主要由高强混凝土、高强钢绞线组合而成,该体系具有以下优点:①高标号混凝土、钢材可以有效降低梁高,节省材料用量;②柱帽可以作为临时受力体系承受施工荷载,施工过程中无需搭设支撑^[4],能降低安全风险,提升作业效率;③框架梁、非框架梁均可在工厂内生产后运至施工现场,采用机械化作业方式进行施工,能较好地控制建设成本,缩短项目周期^[5-6]。



图 1 PPAS 体系预制预应力梁

Fig. 1 Precast prestressed beams of PPAS system

与采用普通钢筋的装配式混凝土结构不同^[7-8],PPAS体系在预制梁中采用了大量的钢绞线,由于钢绞线强度较普通钢筋更高,其锚固长度是普通钢筋的2倍~3倍^[9],如采用直线型锚固方式,柱截面尺寸往往无法满足要求。为此,采用一种附加锚固措施,对预制梁端伸出的钢绞线弯折一定角度,形成

末端带 90° 弯折的竖直锚固段。这种锚固方法不仅能节约施工成本,简化施工工艺,还妥善解决了PPAS体系预制梁钢绞线采用直线型锚固方式时锚固长度不足的问题,具备推广应用的价值。现有《混凝土结构设计规范》^[9]主要对普通钢筋采用 90° 弯折锚固方式时的锚固长度(包括水平锚固段、竖直锚固段的长度)进行了规定,而未对钢绞线采用 90° 弯折锚固方式时的锚固长度提出相应的规定。实际工程中,PPAS体系预制梁钢绞线 90° 弯折锚固长度的取值依据仍为普通钢筋 90° 弯折时的锚固长度。已有研究表明,普通钢筋和钢绞线的黏结性能存在差异^[10],普通钢筋 90° 弯折时锚固长度的规定是否适用于钢绞线仍有待进一步研究。

20世纪90年代以来,国内外学者对于钢绞线与混凝土间的黏结性能开展了系统的研究。徐有邻等^[11]对钢绞线在混凝土中的黏结性能进行了研究,分析了锚固长度等因素对黏结性能的影响规律,并基于可靠度分析给出了钢绞线采用直线型锚固方式时锚固长度的设计建议;谢新莹等^[12]针对15.2、17.8、21.6 mm三种公称直径钢绞线的黏结性能开展了研究,通过回归分析给出了钢绞线黏结强度计算公式;Salmons等^[13]研究了钢绞线直径、锚固长度等因素对拉拔承载力的影响,并结合试验结果描述了钢绞线的荷载-滑移特征;Su等^[14]研究了混凝土密度、钢绞线外形等因素对钢绞线黏结性能的影响,结果表明钢绞线外形的改变对峰值荷载影响显著;Dang等^[15]研究了钢绞线的应力分布,得出了黏结应力沿锚固长度的变化规律;Marti-Vargas等^[16]对钢绞线黏结滑移本构关系进行了研究,建立了考虑黏结应力沿锚固长度不均匀分布的黏结滑移本构

关系。

上述研究中, 钢绞线在混凝土中主要采用直线型锚固方式。然而, 受制于 PPAS 体系梁、柱的实际尺寸, PPAS 体系预制梁钢绞线在混凝土柱中需采用 90°弯折锚固, 关于钢绞线 90°弯折锚固方式的可行性, 以及采用这种锚固方式时, 不同锚固长度对钢绞线黏结性能的影响规律都缺乏专门的研究。值得注意的是, 虽然普通钢筋和钢绞线的黏结性能存在差异, 但是钢绞线采用 90°弯折锚固方式时的传力方式与普通钢筋类似^[17], 即黏结应力传至钢绞线水平段末端时, 靠弯弧段周围混凝土的径向反力承担锚固作用, 故相关研究结果对于 90°弯折钢绞线的黏结性能研究具有一定参考意义。国内外学者对 90°弯折钢筋黏结性能的研究结果表明, 90°弯折钢筋的总锚固长度和竖直锚固段长度对黏结性能的影响最为显著^[18]。为此, 本文设计了 16 组钢绞线-混凝土拉拔试件, 分析钢绞线采用直线型锚固方式和 90°弯折锚固方式时黏结性能的差异, 以及钢绞线采用 90°弯折锚固方式时不同锚固长度(总锚固长度和竖直锚固段长度)对破坏模式、极限承载力及荷载-滑移关系等的影响规律。在此基础上, 提出采用钢绞线 90°弯折锚固方式时总锚固长度和竖直锚固段长度的取值建议, 为 90°弯折锚固方式在 PPAS 体系梁-柱连接中的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

钢绞线黏结性能试验采用拔出试验, 采用屈服强度标准值为 1 860 MPa 的七丝钢绞线, 钢绞线的公称直径 d 为 15.24 mm。试验设计制作了 16 组钢绞线-混凝土拉拔试件, 均为 500 mm(长度)×300 mm(宽度)×700 mm(高度)的长方体。试件内部由 8 丝 25 纵筋和 10@150 的 4 肢箍形成钢筋笼骨架, 钢绞线水平锚固段的保护层厚度均为 150 mm。各试件弯弧段的曲率半径均为 $2d$ (30 mm)。试件的尺寸及配筋见图 2(a), 其中 F 为竖向荷载。90°弯折钢绞线锚固段的总长即总锚固长度 l_e 包括水平锚固段长度 l_h 、90°弯弧段长度和竖直锚固段长度 l_v , 水平锚固段和竖直锚固段分别沿着试件的长度和高度方向布置[图 2(b)]。

考虑到实际工程中, 现浇钢筋混凝土结构的受拉钢筋基本锚固长度为 400~700 mm(C40 混凝土, HRB400 级钢筋, 直径范围 14~25 mm), 如果普通钢筋采用 90°弯折, 弯折后的竖直锚固段长度不应

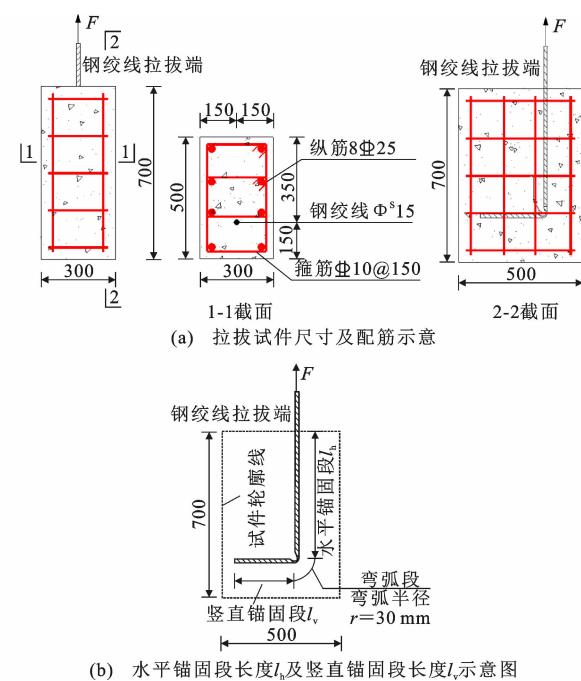


图 2 试件构造(单位:mm)

Fig. 2 Details of specimen (Unit:mm)

小于 $12d$ 。据此, 16 组钢绞线-混凝土拉拔试件的钢绞线总锚固长度设计为 400、500、600、700 mm 四个长度等级, 弯折后的竖直锚固段设计为 0(直线型锚固)、 $5d$ (75 mm)、 $10d$ (150 mm)、 $15d$ (225 mm) 四个长度等级。试件尺寸参数见表 1。

表 1 试件尺寸参数

Table 1 Size parameters of specimens

试件编号	总锚固长度/mm	竖直段长度/mm	水平段长度/mm
L4-0d	400	0	400
L4-5d	400	76(5d)	275
L4-10d	400	152(10d)	200
L4-15d	400	228(15d)	125
L5-0d	500	0	500
L5-5d	500	76(5d)	375
L5-10d	500	152(10d)	300
L5-15d	500	228(15d)	225
L6-0d	600	0	600
L6-5d	600	76(5d)	475
L6-10d	600	152(10d)	400
L6-15d	600	228(15d)	325
L7-0d	700	0	700
L7-5d	700	76(5d)	575
L7-10d	700	152(10d)	500
L7-15d	700	228(15d)	425

1.2 材料性能

试件所用混凝土、普通钢筋以及钢绞线的实测力学性能见表 2。

表 2 材料的特性参数

Table 2 Characteristic parameters of material

材料	d/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	$E_s/10^5 \text{ MPa}$	$\delta/\%$
钢筋 Φ25	25.0	524	669	2.1	23.3
钢筋 Φ10	10.0	487	598	2.1	32.8
钢绞线	15.2	1 764	1 963	2.0	4.9
材料	标号	试件尺寸		f_c/MPa	$E_c/10^4 \text{ MPa}$
混凝土	C40	500 mm×300 mm×700 mm		48.3	3.23

注: f_y 为普通钢筋(钢绞线)的屈服强度; f_u 为普通钢筋(钢绞线)的极限强度; E_s 为普通钢筋(钢绞线)的弹性模量; δ 为断后伸长率; f_c 为混凝土的极限抗压强度; E_c 为混凝土的弹性模量。

1.3 试验装置及加载制度

本次试验采用拔出试验的方式,加载装置、锚固装置与测量装置如图 3 所示。钢绞线拉拔端的竖向荷载 F 通过千斤顶(额定荷载 650 kN)施加,并由千斤顶上安装的压力传感器(量程为 500 kN)测得。钢绞线通过顶部锚固装置(锚具)固定。钢绞线的绝对位移 x 由撑脚上对称设置的 2 个位移计(量程为 50 mm)测得,位移计的指针与角铁(与钢绞线上固定的锁扣相连)平面接触。钢绞线的滑移值 s 计算公式为

$$s = x - \frac{Fl_e}{E_s A_s} \quad (1)$$

式中: l_e 为钢绞线的总锚固长度; A_s 为钢绞线的公称截面面积。

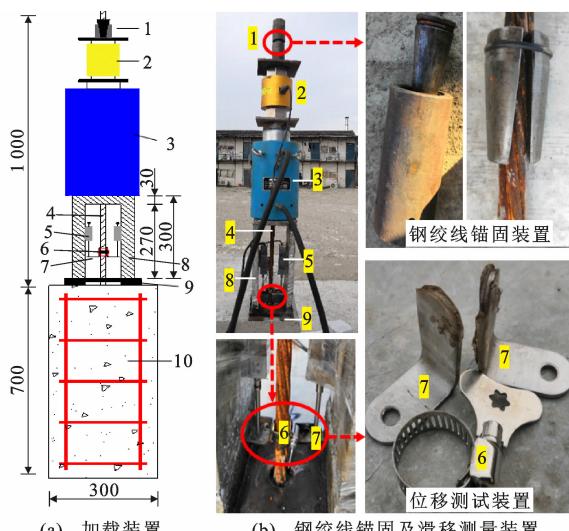


图 3 试验装置(单位:mm)

Fig. 3 Test device (unit:mm)

加载按照《混凝土结构试验方法标准》的要求进行。首先进行预加载,加载到 30 kN 后卸载,以消除各部分之间的空隙。然后以 10 kN 为一级进行

分级加载,在加载过程中记录下钢绞线在每一级荷载对应的滑移值。当加载至荷载无法继续增加或者钢绞线拔断时,停止试验。

2 试验现象与分析

试验结果表明,依据钢绞线的抗拉强度是否得到充分利用,试件的破坏模式主要分为钢绞线拔出破坏(图 4)和钢绞线断裂破坏(图 5)两类,其中直线型锚固试件和总锚固长度 $l_e=400 \text{ mm}$ 的 90°弯折锚固试件均发生钢绞线拔出破坏,钢绞线的极限拉应力约为抗拉强度的 64%;总锚固长度 $l_e \geq 500 \text{ mm}$ 的 90°弯折锚固试件均发生钢绞线断裂破坏,钢绞线的极限拉应力约为抗拉强度 95%,抗拉强度得到了充分利用。钢绞线断裂破坏为主要破坏模式,占 62.5%。

2.1 钢绞线拔出破坏

直线型锚固试件和总锚固长度 $l_e=400 \text{ mm}$ 的 90°弯折锚固试件均可能发生钢绞线的拔出破坏,锚固承载力缓慢下降,为延性破坏。

对于总锚固长度 $l_e=400 \text{ mm}$ 的 90°弯折锚固试件 L4-5d,当钢绞线的滑移为 3 mm 时,试件表面靠近弯弧段起点位置开始出现竖向裂缝①,宽度约为 0.2 mm;在弯弧段的影响下,当钢绞线的滑移为 6 mm 时,试件表面靠近弯弧起点位置开始出现剪切斜裂缝②,宽度约为 0.3 mm;随着加载持续,裂缝开始沿水平锚固段向拉拔端延伸,且宽度不断增大;当钢绞线的滑移为 20 mm 时,试件达到峰值荷载,裂缝延伸至试件拉拔端[图 4(b)],宽度约为 0.5 mm。对于采用直线型锚固方式的试件 L4-0d,仅在加载过程中出现了少量沿水平锚固段方向发展的裂缝,当钢绞线的滑移达到 27.29 mm 时,试件达到峰值荷载[图 4(a)]。此外,对于钢绞线拔出破坏的试件,当试件达到峰值荷载时,还能观察到钢绞线有沿着捻制方向转动的趋势[图 4(c)],且直线型锚固试件钢绞线的转角较 90°弯折锚固试件更大,说明 90°弯折锚固钢绞线的弯弧段和竖直锚固段可以有效限制钢绞线水平锚固段的扭转。

2.2 钢绞线断裂破坏

不同于直线型锚固试件,对于总锚固长度 $l_e \geq 500 \text{ mm}$ 的 90°弯折锚固试件,当钢绞线水平锚固段黏结失效后,弯弧段和竖直段仍能对水平段形成有效的约束,限制水平段钢绞线的拔出。因此,试件不会发生拔出破坏,而是在钢绞线拉应力达到极限抗拉强度后发生钢绞线断裂破坏;破坏时试件表面均

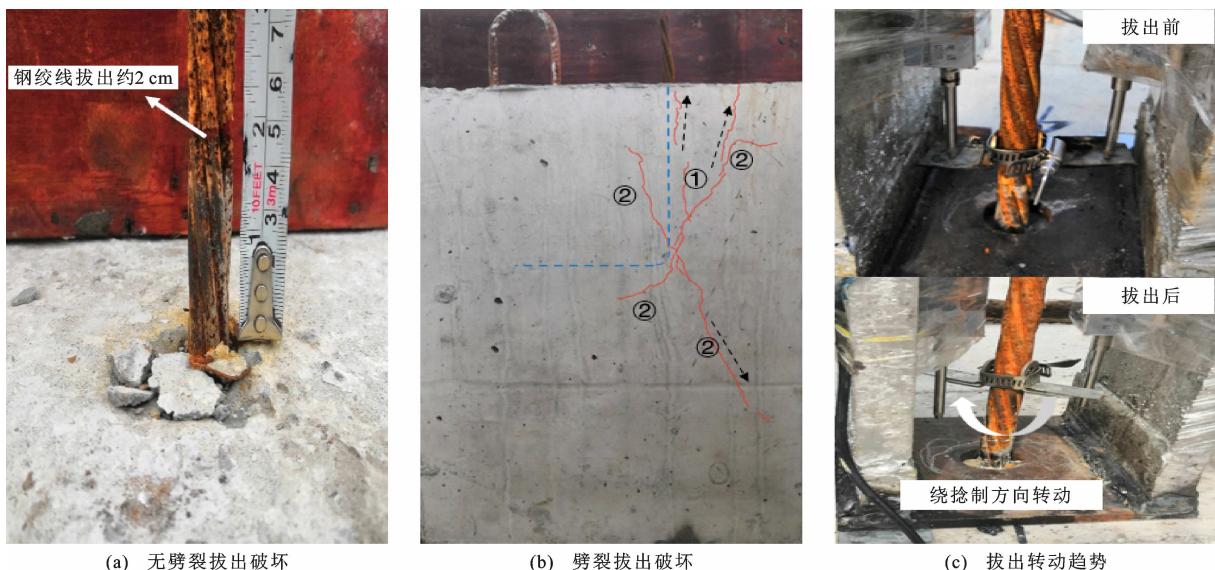


图4 钢绞线拔出破坏现象

Fig. 4 Pull-out failure phenomenon of steel strands

无明显剪裂裂缝,试件锚固承载力迅速丧失,为脆性破坏。

对于试件L6-5d,当拉拔端荷载为250.53 kN时,位于试件表面位置的钢绞线外丝突然断裂,随即产生应力释放,断丝在断口上方蓬松散开[图5(a)],这是钢绞线断裂破坏中最主要的断裂破坏,在所有钢绞线断裂破坏的试件中约占44%。对于试件L7-10d,当拉拔端荷载为245.23 kN时,由于钢绞线外层钢丝和锚具夹片咬合的位置处于拉-剪复合受力状态,最后先于其他位置断裂,并在撑脚内侧蓬松散开[图5(b)]。对于试件L5-5d,当拉拔端荷载为263.37 kN时,钢绞线整根断裂,并在试件外部距离

表面约15 mm的位置形成一个尖锥状的断口,断口附近有明显的颈缩现象[图5(c)]。对于试件L4-10d,当拉拔端荷载为224.23 kN时,钢绞线外丝在弯弧锚固段起点位置附近断裂,断丝沿水平锚固段滑向钢绞线拉拔端,并在撑脚内侧散开[图5(b)]。

3 荷载-滑移关系曲线

16组试件钢绞线的荷载-滑移($F-s$)关系曲线如图6所示。由图6可知:对于90°弯折锚固试件,其 $F-s$ 曲线的峰值荷载平均值为251.01 kN,而对于直线型锚固试件,其 $F-s$ 曲线的峰值荷载平均值则相对90°弯折锚固试件降低了33.4%。这是因为对于

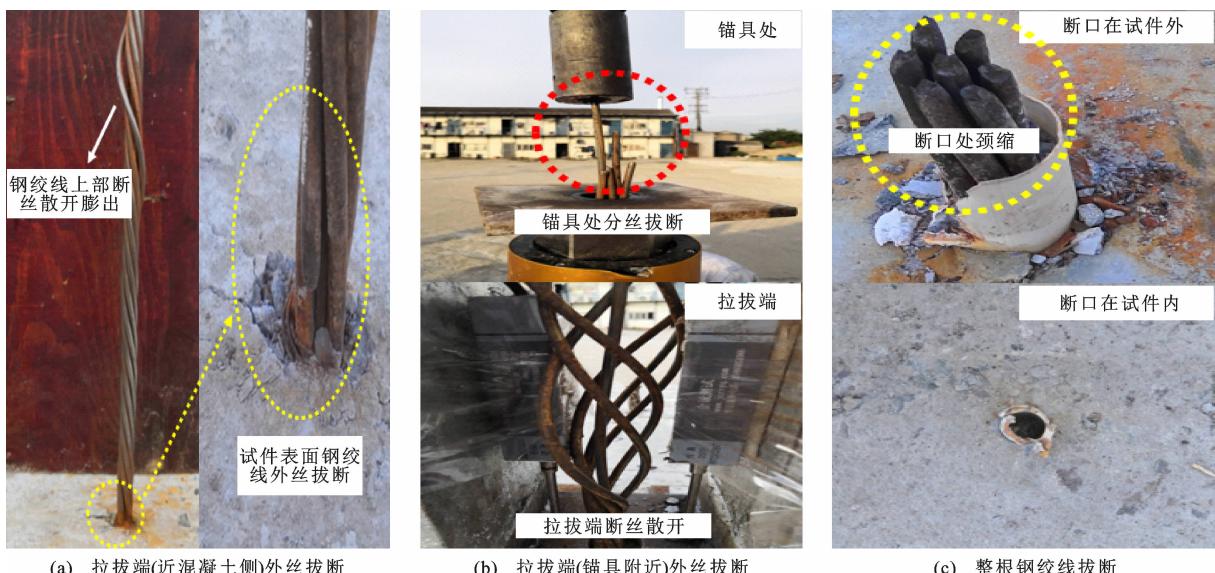
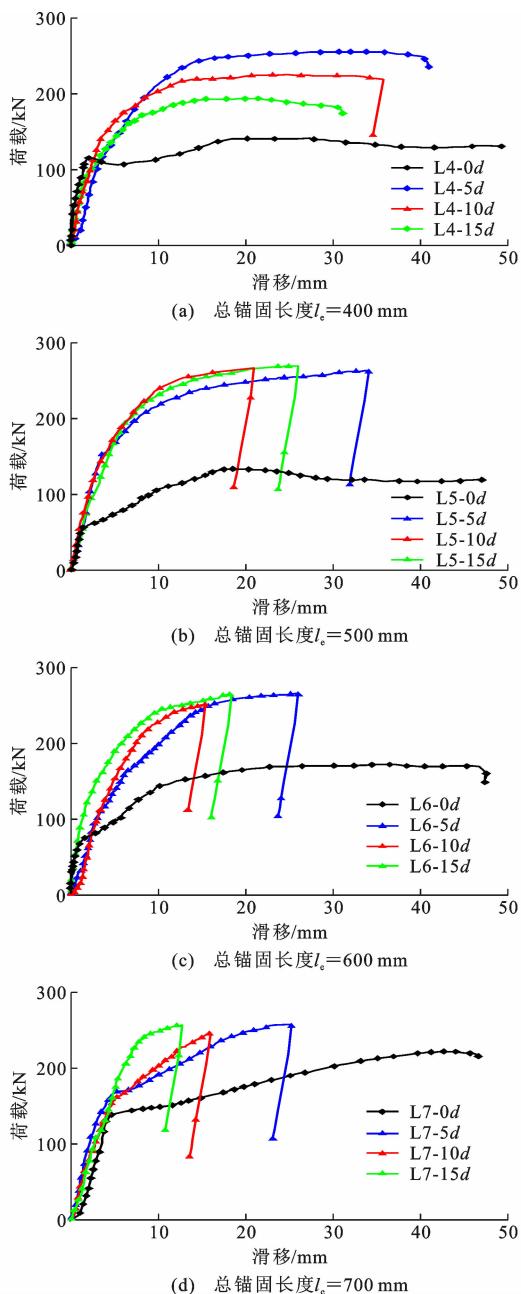


图5 钢绞线断裂破坏现象

Fig. 5 Fracture failure phenomenon of steel strands

图 6 试件的 F - s 曲线Fig. 6 F - s curves of specimens

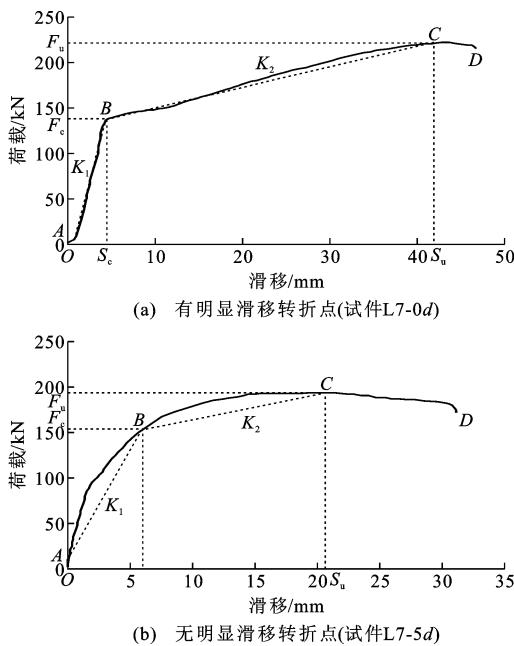
直线型锚固试件,钢绞线的拉力完全由钢绞线和混凝土间的黏结力承担,而对于90°弯折锚固试件,除了沿锚固长度的黏结作用,钢绞线弯弧段内侧混凝土的挤压反力还能提供额外的黏结作用。此外,对于总锚固长度 $l_e=400\text{ mm}$ 的90°弯折锚固试件,由于钢绞线水平锚固段承担主要黏结作用,且总锚固长度 l_e 一定时,水平锚固段长度随竖直锚固段长度 l_v 的增大而减小,故其 F - s 曲线的峰值荷载随竖直锚固段长度 l_v 的增大而减小,峰值荷载平均值为224.33 kN。对于总锚固长度 $l_e \geq 500\text{ mm}$ 的90°弯折锚固试件,破坏模式均为钢绞线断裂破坏,峰值荷

载随竖直锚固段长度 l_v 的变化幅度不大,平均值为261 kN,与钢绞线的抗拉强度相当。总锚固长度 $l_e=400\text{ mm}$ 的90°弯折锚固试件峰值荷载平均值较总锚固长度 $l_e \geq 500\text{ mm}$ 的90°弯折锚固试件峰值荷载平均值降低了23.4%。以上研究结果表明,受制于实际工程中的梁、柱尺寸,钢绞线的直线型锚固方式难以保证钢绞线强度的充分利用,需采用90°弯折锚固方式。对于采用90°弯折锚固方式的钢绞线,必要的总锚固长度($l_e \geq 500\text{ mm}$)是保证钢绞线强度充分利用的前提。

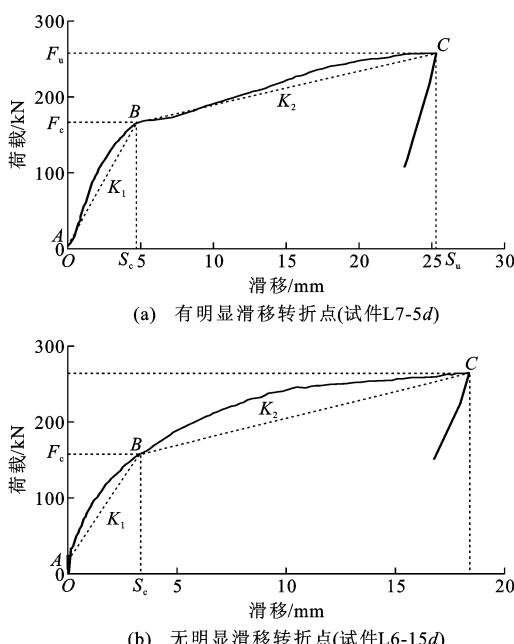
此外,由图6还可知:对于总锚固长度 $l_e=400\text{ mm}$ 的90°弯折锚固试件,当钢绞线的滑移为10 mm(钢绞线均未拔出)时,各试件的荷载均随竖直锚固段长度 l_v 的增大而减小;对于总锚固长度 $l_e \geq 600\text{ mm}$ 的90°弯折锚固试件,当钢绞线的滑移为10 mm(钢绞线均未断裂)时,各试件的荷载均随竖直锚固段长度 l_v 的增大而增大;对于总锚固长度 $l_e=500\text{ mm}$ 的90°弯折锚固试件,当钢绞线的滑移为10 mm(钢绞线均未断裂)时,各试件荷载的变化规律为 $F(L5-10d) > F(L5-15d) > F(L5-5d)$,这是由于钢绞线的水平锚固段长度 l_h 不足导致的。对于试件L4-5d、L4-10d、L4-15d、L5-15d,其水平锚固段长度 l_h 均小于300 mm,在这种情况下,竖直锚固段长度 l_v 越长,总锚固长度 l_e 相同的条件下水平锚固段长度 l_h 越短,在拉拔过程中周围混凝土更易被拔出,导致试件破坏前相同滑移条件下的荷载即锚固刚度更小。以上研究表明,对于采用90°弯折锚固方式的钢绞线,在保证水平锚固段长度 $l_h > 300\text{ mm}$ 的前提下,钢绞线的竖直锚固段长度 l_v 越大,90°弯折钢绞线的锚固刚度就越大,锚固性能越优。

4 等效荷载-滑移关系曲线

为进一步研究16组试件钢绞线的黏结滑移过程,给出了典型试件的等效荷载-滑移关系曲线(等效 F - s 曲线)。试件等效 F - s 曲线的特征可分为2类:①有荷载下降段的等效 F - s 曲线(图7,其中 F_c 、 F_u 分别为B点和C点处的荷载, S_c 、 S_u 分别为 F_c 、 F_u 对应的滑移, K_1 、 K_2 分别为直线段AB和BC的割线斜率),试件破坏模式均为钢绞线拔出破坏,其中直线型锚固试件等效 F - s 曲线有明显滑移增速转折点,90°弯折锚固试件等效 F - s 曲线没有明显滑移增速转折点,这一类等效 F - s 曲线可划分为无滑移段(OA段)、荷载上升段(AB段)、非线性滑移段(BC段)和荷载下降段(CD段)4个阶段;②无荷载

图 7 有荷载下降段的等效 F - s 曲线Fig. 7 Equivalent F - s curves with load drop section

下降段的等效 F - s 曲线(图 8), 试件破坏模式均为钢绞线断裂破坏, 其中试件 L7-5d、L7-10d 等效 F - s 曲线有明显滑移增速转折点, 其他试件等效 F - s 曲线没有明显滑移增速转折点, 这一类等效 F - s 曲线可划分为无滑移段(OA段)、荷载上升段(AB段)和非线性滑移段(BC段)3个阶段。

图 8 无荷载下降段的等效 F - s 曲线Fig. 8 Equivalent F - s curves without load drop section

对于有明显滑移增速转折点以及没有明显滑移增速转折点的等效 F - s 曲线, 分别使用线性拟合法

和几何作图法计算滑移增速转折点 B , 并在此基础上, 得到滑移增速转折点 B 和荷载峰值点 C 处的荷载 F_c 、 F_u 及对应的滑移 S_c 、 S_u (峰值滑移), 以及直线段 AB 和 BC 的割线斜率 K_1 、 K_2 。为了考察滑移量增速和锚固刚度的折减情况, 分别计算试件在点 B 、 C 滑移的比值 S_c/S_u , 以及试件在第二阶段(AB 段)和第三阶段(BC 段)割线斜率的比值 K_1/K_2 , 如表 3 所示。

由表 3 可知: 对于直线型锚固试件, S_c/S_u 均小于 10%, 平均值为 7.1%, 而对于 90°弯折锚固试件, S_c/S_u 均小于 40%, 平均值为 36.1%, 说明所有试件钢绞线的滑移主要集中在第三阶段(非线性滑移段); 对于直线型锚固试件, F_c/F_u 平均值为 56.3%, 而 90°弯折锚固试件 F_c/F_u 平均值为 85%。上述研究结果说明, 90°弯折锚固试件在钢绞线滑移非线性快速增长(第三阶段)之前, 已充分利用了钢绞线的抗拉强度。因此, 90°弯折锚固是一种更为理想的锚固方式。

此外, 由表 3 还可知: 对于直线型锚固试件, K_1/K_2 平均值为 22.21, 而对于 90°弯折锚固试件, K_1/K_2 平均值为 8.17, 说明和 90°弯折锚固试件相比, 直线型锚固试件在第三阶段锚固刚度的退化更显著; 对于 90°弯折锚固试件, 在总锚固长度 l_e 相同、竖直锚固段长度 l_v 不同的条件下, K_1/K_2 在竖直锚固段长度 $l_v = 10d$ 时达到最小; 以总锚固长度 $l_e = 700$ mm 为例, 竖直锚固段长度 $l_v = 10d$ 的 90°弯折锚固试件 L7-10d 的 K_1/K_2 较试件 L7-5d ($l_v = 5d$)、L7-15d ($l_v = 15d$) 分别减小了 27.4%、30.6%。上述研究结果说明, 对于 90°弯折锚固试件, 当竖直锚固段长度 $l_v = 10d$ 时可最大程度减小试件非线性滑移阶段锚固刚度的退化。

5 试验结果分析

5.1 锚固方式影响分析

图 9 给出了直线型锚固试件的峰值滑移-总锚固长度($S_{uz}-l_e$)变化曲线、90°弯折锚固试件的平均峰值滑移-总锚固长度($S_{uw}-l_e$)变化曲线, 并取比值 S_{uz}/S_{uw} 以评估总锚固长度 l_e 对减小滑移峰值的作用($S_{uz}/S_{uw}-l_e$ 曲线)。需要特别指出的是, 90°弯折锚固试件的 S_{uw} 为试件各总锚固长度 l_e 下峰值滑移的平均值。

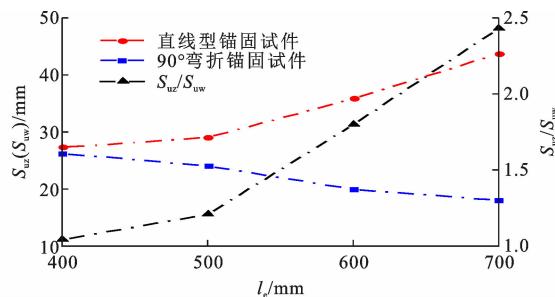
由图 9 可知: 对于直线型锚固试件和 90°弯折锚固试件, 其峰值滑移随总锚固长度 l_e 的增加呈现相反的变化趋势; 直线型锚固试件峰值滑移 S_{uz} 随总锚

表 3 试验结果

Table 3 Experimental results

试件编号	滑移增速转折点 B		荷载峰值点 C		K_1	K_2	F_c/F_u	S_c/S_u	K_1/K_2	破坏模式
	F_c/kN	S_c/mm	F_u/kN	S_u/mm						
L4-0d	114.971	2.061	140.825	27.298	28.847	1.024	0.816	0.076	28.171	S
L4-5d	224.581	11.411	255.208	34.512	19.743	1.326	0.880	0.331	14.889	S
L4-10d	179.626	6.734	224.232	23.391	26.068	2.678	0.801	0.288	9.134	F
L4-15d	157.554	6.296	193.559	20.733	23.476	2.494	0.814	0.304	9.713	S
L5-0d	56.122	1.419	133.346	29.271	40.514	4.326	0.421	0.074	13.365	S
L5-5d	217.895	10.136	263.367	34.062	20.920	1.901	0.827	0.298	11.005	F
L5-10d	217.165	7.838	266.843	20.924	26.867	3.796	0.814	0.375	7.078	F
L5-15d	224.852	9.048	268.807	26.045	24.551	2.586	0.836	0.347	9.494	F
L6-0d	67.277	0.981	171.801	35.841	40.776	2.998	0.392	0.027	13.601	S
L6-5d	221.338	12.249	265.939	26.057	17.869	3.230	0.832	0.470	5.532	F
L6-10d	225.565	9.668	250.534	15.344	23.536	4.399	0.900	0.630	5.350	F
L6-15d	232.413	8.843	264.372	18.395	22.907	3.346	0.879	0.481	6.846	F
L7-0d	138.262	4.626	221.786	43.719	31.425	2.137	0.623	0.106	14.705	S
L7-5d	168.283	5.207	257.474	25.291	31.992	4.441	0.654	0.206	7.204	F
L7-10d	157.282	4.942	245.235	15.925	32.775	8.008	0.641	0.310	4.093	F
L7-15d	239.238	8.281	256.568	12.735	28.645	3.891	0.932	0.650	7.362	F

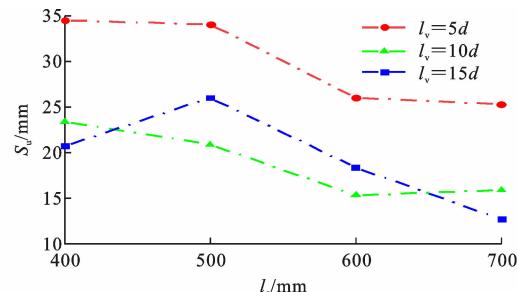
注:S 表示钢绞线拔出破坏;F 表示钢绞线断裂破坏。

图 9 不同锚固方式的 S_u-l_e 曲线Fig. 9 S_u-l_e curves of different anchoring forms

固长度 l_e 的增大而增大,最大为 43.72 mm,这是由于直线型锚固试件钢绞线的总锚固长度不足导致的;90°弯折锚固试件平均峰值滑移 S_{uw} 随总锚固长度 l_e 的增大而减小,最小为 17.98 mm。需要指出的是, S_{uw} 与 S_{uz} 的比值始终小于 1,说明总锚固长度 l_e 相同的条件下,90°弯折锚固试件的峰值滑移较直线型锚固试件更小,且减小的幅度随总锚固长度 l_e 的增大而增大,最大为 57.8%。

5.2 总锚固长度 l_e 影响分析

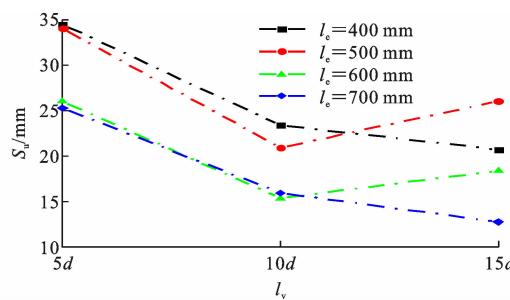
90°弯折锚固试件峰值滑移 S_u 随锚固长度 l_e 的变化曲线如图 10 所示。由图 10 可以看出:当总锚固长度 $l_e \geq 500$ mm 时,各试件的峰值滑移 S_u 均随总锚固长度 l_e 的增加而减小;与总锚固长度 l_e 为 500、700 mm 时各试件的峰值滑移 S_u 相比,当总锚固长度 $l_e=600$ mm 时,各试件峰值滑移 S_u 的下降

图 10 不同 l_v 时的 S_u-l_e 曲线Fig. 10 S_u-l_e curves with different l_v

率最大,平均值为 26.9%;对于 90°弯折锚固试件,钢绞线总锚固长度 $l_e=600$ mm 对减小峰值滑移 S_u 最有效,对钢绞线黏结性能的改善更明显。

5.3 竖直锚固段长度影响分析

90°弯折锚固试件峰值滑移 S_u 随竖直锚固段长度 l_v 的变化曲线如图 11 所示。总体上看,各试件的峰值滑移 S_u 基本满足随竖直锚固段长度 l_v 增加而减小的变化规律;与竖直锚固段长度 $l_v=5d$ 时各试件的峰值滑移 S_u 相比,当竖直锚固段长度 $l_v=10d$ 时,各试件峰值滑移 S_u 的下降率最大,平均值为 37.2%。需要特别指出的是,当竖直锚固段长度 $l_v=15d$ 时,试件 L5-15d、L6-15d 的峰值滑移 S_u 并未出现进一步下降,结合前述分析可知,这仍与钢绞线的水平段锚固长度 l_h 不足有关;在水平段锚固长度 l_h 的影响下,试件 L6-15d 的峰值滑移 S_u 仍大于

图 11 S_u-l_v 曲线Fig. 11 S_u-l_v curves

试件 L6-10d。

6 结语

(1) 试件分为 2 类破坏模式,对于直线型锚固试件和总锚固长度 $l_e=400\text{ mm}$ 的 90°弯折锚固试件,破坏模式均为钢绞线的拔出破坏;直线型锚固试件破坏时试件表面完好,没有明显裂缝,总锚固长度 $l_e=400\text{ mm}$ 的 90°弯折锚固试件破坏时试件表面有明显劈裂裂缝。对于总锚固长度 $l_e \geq 500\text{ mm}$ 的 90°弯折锚固试件,破坏模式均为钢绞线的断裂破坏,破坏时试件表面完好,没有明显裂缝。钢绞线断裂破坏能够充分利用钢绞线的抗拉强度,在确定 PPAS 体系梁端钢绞线的锚固方式与锚固长度时,应将钢绞线断裂破坏作为极限状态进行设计。

(2) 采用 90°弯折锚固方式能解决钢绞线采用直线型锚固方式时锚固承载力不足及滑移发展较快的问题。在钢绞线总锚固长度 l_e 相同的条件下,90°弯折锚固试件峰值荷载平均为 251.01 kN,较直线型锚固试件提高了约 33.4%,峰值滑移平均值为 22.72 mm,约为直线型锚固试件的 0.65 倍。此外,钢绞线滑移非线性快速增长之前,90°弯折锚固试件拉拔端荷载即已达到峰值荷载的 85%,对于锚固承载力的利用主要集中在荷载上升段而不是非线性滑移段。与钢绞线的直线型锚固方式相比,钢绞线 90°弯折锚固方式更优。

(3) 当钢绞线采用 90°弯折锚固方式时,总锚固长度 $l_e \geq 500\text{ mm}$ 是保证钢绞线强度充分利用的前提,在此条件下,总锚固长度 l_e 取 600 mm 对于限制 90°弯折钢绞线的峰值滑移最有效。实际工程中,PPAS 体系钢绞线伸出预制梁的总锚固长度 l_e 宜选定为 600 mm。

(4) 当钢绞线采用 90°弯折锚固方式时,在保证一定水平锚固段长度的前提下,钢绞线的竖直锚固段长度 l_v 越大,试件的峰值滑移越小。当钢绞线竖

直锚固段长度 l_v 取 10d 时,各试件 $F-s$ 曲线第二阶段(荷载上升阶段)割线斜率与第三阶段(非线性滑移阶段)割线斜率的比值 K_1/K_2 最小,峰值滑移 S_u 的下降率最大,对于减小钢绞线非线性滑移阶段锚固刚度的退化最为有效。实际工程中,PPAS 体系梁端钢绞线 90°弯折锚固段的竖直锚固段长度 l_v 宜取 10d。

(5) 由于试件数量有限,本文仅对公称直径为 15.24 mm 的七丝钢绞线的黏结性能进行了试验研究,对于钢绞线直径、混凝土强度、弯弧段内径等参数对钢绞线黏结性能的影响规律仍有待进一步通过试验、有限元方法验证。

参考文献:

References:

- [1] 武江传,张继文,蔡小宁,等.新型装配整体式梁柱节点低周反复荷载试验研究[J].施工技术,2017,46(4):9-12.
WU Jiangchuan, ZHANG Jiwen, CAI Xiaoning, et al. Experimental research on innovative concrete frame joint assembled with precast concrete beam under low cyclic loading [J]. Construction Technology, 2017, 46(4):9-12.
- [2] 钟修华,杨基亮.先张法预应力预制整浇结构体系在多层物流仓库中的应用实践[J].安徽建筑,2020,27(9):69-70.
ZHONG Xiuhua, YANG Jiliang. Application practice of pretensioned prestressed precast integral casting structure system in multi-storey logistics warehouse [J]. Anhui Architecture, 2020, 27(9):69-70.
- [3] 傅斌.预应力施工方法在大型工业物流建筑中的应用[J].建筑施工,2019,41(8):1453-1455.
FU Bin. Application of prestressed construction method in large industrial logistics building [J]. Building Construction, 2019, 41(8):1453-1455.
- [4] 武江传.新型预制预应力梁装配整体式框架抗震性能研究[D].南京:东南大学,2018.
WU Jiangchuan. Seismic behavior study on a new precast prestressed assembled structural system [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [5] 王莉莉,张继文.新型预制预应力混凝土梁装配框架节点受弯试验研究[J].工业建筑,2015,45(8):73-77,98.
WANG Lili, ZHANG Jiwen. Experimental investigation on flexural behavior of innovative concrete frame joint assembled with precast prestressed concrete beam [J]. Industrial Construction, 2015, 45(8):73-77,98.

- 98.
- [6] 王莉莉. 新型预制 PC 梁装配整体式框架节点相关技术研究[D]. 南京:东南大学,2012.
WANG Lili. Investigation of innovative concrete frame joint assembled with precast prestressed concrete beam[D]. Nanjing:Southeast University,2012.
- [7] XIN G T,XU W B,WANG J,et al. Seismic performance of fabricated concrete piers with grouted sleeve joints and bearing-capacity estimation method [J]. Structures,2021,33:169-186.
- [8] 闫维明,王文明,陈适才,等. 装配式预制混凝土梁-柱-叠合板边节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(12):56-61.
YAN Weiming, WANG Wenming, CHEN Shicai, et al. Experimental study of the seismic behavior of precast concrete layered slab and beam to column exterior joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(12):56-61.
- [9] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.
- [10] 徐有邻. 各类钢筋粘结锚固性能的分析比较[J]. 福州大学学报(自然科学版),1996,24(增1):71-77.
XU Youlin. Analysis and comparison of bonding and anchorage properties of various steel bars[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Sciences Edition), 1996,24(S1):71-77.
- [11] 徐有邻,宇秉训,朱 龙,等. 钢绞线基本性能与锚固长度的试验研究[J]. 建筑结构,1996,26(3):34-38,53.
XU Youlin, YU Bingxun, ZHU Long, et al. Essential properties of strand and experimental study of its anchoring lengths[J]. Building Structure, 1996, 26 (3): 34-38,53.
- [12] 谢新莹,周 威,王宇扬. 钢绞线混凝土黏结性能试验与锚固长度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(12):81-88.
XIE Xinying, ZHOU Wei, WANG Yuyang. Experimental analysis of bond property and anchorage length for strands[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2018,50(12):81-88.
- [13] SALMONS J R, MCCRATE T E. Bond characteristics of untensioned prestressing strand[J]. PCI Journal,1977,22(1):52-65.
- [14] SU H S. Pullout bond characteristics of untensioned prestressing strand[J]. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2008, 12(5):101-108.
- [15] DANG C N, MURRAY C D, FLOYD R W, et al. Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by Standard Test for Strand Bond [J]. Engineering Structures,2014,72:152-159.
- [16] MARTI-VARGAS J R, HALE W M, GARCIA-TAENGUA E, et al. Slip distribution model along the anchorage length of prestressing strands[J]. Engineering Structures,2014,59:674-685.
- [17] LI X,ZHANG J W,LIU B,et al. Pull-out behavior of non-prestressed steel strands in novel beam-to-column connection[J]. Construction and Building Materials, 2021,282:122538.
- [18] 白绍良,傅剑平,汤 华. 框架中间层端节点梁筋直角弯折锚固端设计概念及方法的改进[J]. 重庆建筑工程学院学报,1994,16(3):1-12.
BAI Shaoliang, FU Jianping, TANG Hua. Improvements for the design concept and approach of the anchorage end 90-degree bent beam reinforcement in frame exterior joints[J]. Journal of Chongqing Architecture University,1994,16(3):1-12.