文章编号:1674-2974(2025)09-0091-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025090

波形腹板钢纤维PEC柱界面黏结滑移性能试验研究

王威†,唐家璇,李昱,柳国良,唐新耀,邱程宣,钱源明
(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要:PEC柱具有稳定性好、预制化程度高的优点,在其中加入钢纤维可有效抑制混凝土裂纹的发展.以锚固长度和钢纤维掺量为变量,设计了8个波形腹板钢纤维PEC柱试件并进行推出试验,研究了其界面黏结滑移性能.结果表明:钢纤维混凝土试件在荷载下降段界面裂纹贯通,试件破坏模式均为界面自然黏结力失效破坏;当钢纤维掺量一定、锚固长度为650 mm时,界面黏结性能最佳;在混凝土中加入钢纤维可提升黏结性能,随着钢纤维掺量增大,初始滑移荷载与初始强度随之增大,极限荷载先减后增,当钢纤维掺量为1.5%时,极限强度达到最小值而残余强度达到最大值;钢板翼缘应变在荷载上升段随锚固长度近似呈指数分布,波形腹板应变呈波浪形;通过线性回归拟合得出试件特征黏结强度的计算式,将计算值与试验值对比,发现误差较小,可为波形腹板钢纤维PEC柱的承载力设计及应用提供参考.

关键词:波形腹板PEC柱;钢纤维;黏结滑移;推出试验;等效应变;黏结强度
中图分类号:TU375;TU352.1 **文献标志码**:A

Experimental Study on Interface Bond-slip Properties of Corrugated Web Steel Fiber PEC Column

WANG Wei†,TANG Jiaxuan,LI Yu,LIU Guoliang,TANG Xinyao,QIU Chengxuan,QIAN Yuanming
(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Partially Encased Composite (PEC) columns offer the advantages of good stability and high precast degree. Adding steel fibers into the concrete mix can effectively restrain the development of concrete cracks. In this paper, eight steel fiber-reinforced PEC column specimens with corrugated web were designed and tested, with the anchorage length and steel fiber content as variables. The bond-slip behavior at the interface was studied. The results show that the steel fiber-reinforced concrete specimens are broken through the interface cracks in the load decreasing section, and the failure mode of the specimens is the natural bonding force failure at the interface. The interface bond performance is the best when the steel fiber content is constant and the anchoring length is 650 mm. Adding steel fiber into the concrete can improve the bond properties. With the increase of steel fiber content, the initial slip load and initial strength increase, and the ultimate load first decreases and then increases. When the steel

* **收稿日期**:2024-09-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278214,52378314), National Natural Science Foundation of China(52278214,52378314);陕西省自然科学基础研究计划重点项目(2022JZ-21), The Key Project of Nature Science Foundation Program of Shaanxi Province(2022JZ-21);土木工程防灾减灾全国重点实验室开放基金资助项目(SLDRCE23-06), State Key Laboratory Foundation of Disaster Reduction in Civil Engineering(SLDRCE23-06)
作者简介:王威(1972—),男,陕西岐山人,西安建筑科技大学教授,博士生导师
† 通信联系人, E-mail:wangwgh1972@163.com.

fiber content is 1.5%, the ultimate strength reaches the minimum value and the residual strength reaches the maximum value. The strain of the flange of the steel plate is approximately exponential with the anchorage length in the load rising section, and the strain of the corrugated web is wavy. A calculation formula of the specimen's characteristic bond strength was obtained by linear regression fitting. Comparing the calculated value with the test value, it was found that the error was small, which could provide a reference for the bearing capacity design and application of the corrugated web steel fiber PEC column.

Key words: corrugated web PEC column; steel fibers; bond-slip; push-out test; effective strain; bond strength

PEC柱是一种混凝土填充于H型钢的翼缘与腹板两侧之间的新型组合结构构件[1],其节点连接简单、预制化程度高,型钢包裹混凝土对其起到约束作用,可增强构件的局部稳定和水平抗侧刚度[2-5]. 研究发现在PEC柱中,与H型钢的平腹板相比,波形钢板与混凝土的接触更为紧密,包裹性更强,二者相互咬合嵌固能提高其组合效应[6-9],使得混凝土的延性与耗能能力更优,试件具有更大的面外刚度. 同时钢板与混凝土界面间黏结滑移性能是保证整个试件充分发挥其组合效应的基础[10-11]. 而在混凝土中加入钢纤维,能够抑制混凝土裂纹的产生和发展,提高混凝土的韧性与变形性能[12-13],进而增强钢板与混凝土界面间黏结滑移性能.

目前国内外对不同截面PEC柱的研究主要集中于轴压、偏压以及压弯下的受力情况与破坏特征、抗震性能等方面[14-16]. 郑浩等[17]对部分外包型钢混凝土的黏结机理、黏结强度和黏结滑移本构关系等关键问题进行了试验研究,推导出了部分外包型钢混凝土的黏结-滑移计算式. 王威等[18-20]提出了一种新型波形腹板部分包覆组合柱,并通过试验对其轴压、偏压及抗剪承载力进行了研究,发现波形腹板PEC柱的界面黏结性能优于平腹板PEC柱,并分别推导出自然黏结试件在轴心、偏心受压状态下以及带栓钉试件的承载力计算公式. 伍凯等[21]、Shakya等[22]研究发现加入钢纤维可有效减少钢筋用量,同时用钢纤维部分替代钢筋还可避免型钢与钢筋之间相互干扰,体现化整为零的思想. Harajli[23]、Mohod[24]对不同掺量钢纤维约束机理进行研究,发现用钢纤维约束混凝土,可提高混凝土的黏结强度、韧性与变形性能. 目前关于PEC柱中应用钢纤维及其掺量改变对构件界面黏结滑移性能影响的研究较少,相关的理论及设计方法不够完善,亟须通过相应的研究来为实际工程提供理论基础.

鉴于此,本文通过8个波形腹板钢纤维PEC柱试件的推出试验,综合考虑锚固长度和钢纤维掺量对试件界面黏结性能的影响,研究试件破坏模式、荷载-滑移曲线,通过对自然黏结试件分区分层,研究不同区段界面的滑移过程及受力机理,对试件型钢应变结果进行分析,最终提出特征黏结强度计算公式,以期为后续的工程应用提供参考.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了8个波形腹板钢纤维PEC柱试件,主要变化参数为钢纤维掺量和锚固长度. 试件设计参数见表1. 所有试件翼缘宽度均为250 mm,选取一个完整的反对称波段,其具体尺寸见图1. 试件的型钢上端突出混凝土50 mm以便推出.

表1 试件设计参数

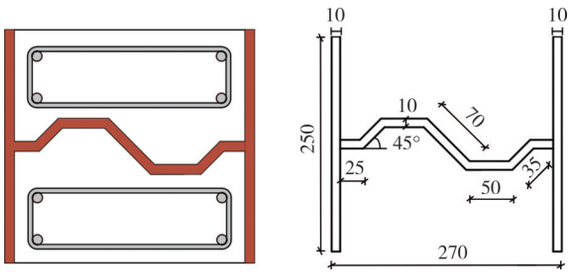
Tab.1 Specimen design parameters

试件编号	ρ_s/%	L_e/mm
PEC-1	0	550
PEC-2	1.5	550
PEC-3	0	600
PEC-4	1.5	600
PEC-5	0	650
PEC-6	1.5	650
PEC-7	1.0	600
PEC-8	2.0	600

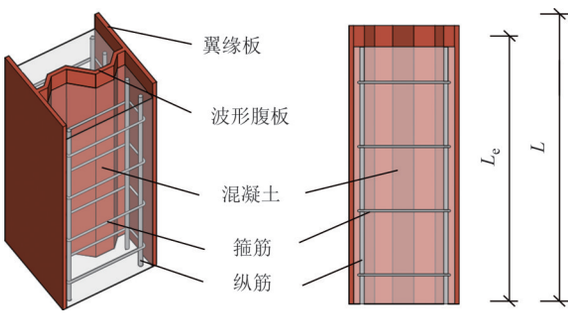
注:ρ_s为钢纤维掺量; L_e为锚固长度.

1.2 试验材料

采用加入钢纤维的C40商品混凝土,钢纤维选用国产剪切波浪形钢纤维,长度为36 mm,等效直径为0.6 mm,长径比为60,抗拉强度为380 MPa,具体参数如表2所示. 钢纤维掺量按照1.0%、1.5%与



(a)试件截面尺寸图



(b)试件三维图

图 1　典型试件示意图 (单位:mm)

Fig.1　Typical specimen diagram (unit: mm)

2.0% 的试件混凝土体积掺量配比. 混凝土按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[25]测定,钢材按照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)[26]进行拉伸试验测定. 测得力学性能见表 3 和表 4.

表 2　钢纤维参数

Tab.2　Steel fibers parameters

示意图	实物图	参数	取值
		密度/(kg·m^{-3})	7 850
		抗拉强度/MPa	380
		弹性模量/MPa	2.1×10^5
		泊松比	0.3
		等效直径/mm	0.6
		长度/mm	36
		长径比	60

表 3　混凝土力学性能

Tab.3　Mechanical properties of concrete

钢纤维掺量/%	$f_{cu,k}$/MPa	$f_{c,k}$/MPa	$f_{t,k}$/MPa	E_c/10^{4}MPa
0	41.58	33.9	3.20	3.35
1.0	30.78	23.39	2.60	3.01
1.5	19.93	15.15	2.05	2.54
2.0	24.56	18.66	2.30	2.77

注:$f_{cu,k}$为立方体抗压强度;$f_{c,k}$为轴心抗压强度;$f_{t,k}$为轴心抗拉强度;E_c为弹性模量.

1.3　加载装置与测点布置

本文采用推出试验,从试件底部将混凝土自下往上推出. 定义试件底部为加载端,顶部为自由端,在试件底部设置两块厚度为 50 mm 的钢垫板,顶部放置一块厚度为 20 mm 的方形钢垫板,试验加载装置如图 2 所示.

表 4　钢材力学性能

Tab.4　Mechanical properties of steel

钢材	屈服强度f_y/MPa	极限强度f_u/MPa	弹性模量E/GPa
10 mm 钢板	264.4	397.5	208.72
C18 纵筋	484.4	681.3	205.31
A8 箍筋	429.5	606.4	204.96

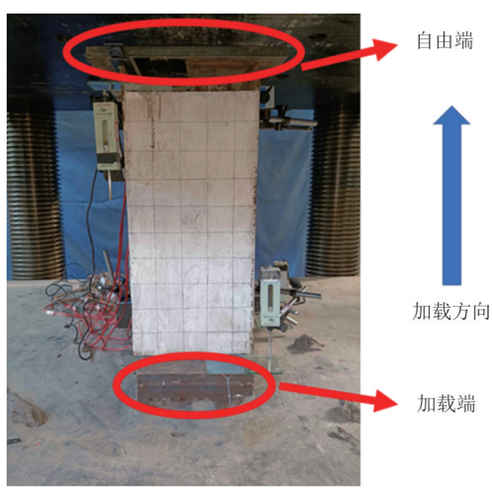


图 2　加载装置

Fig.2　Loading device

试件测量内容为加载端与自由端的滑移以及型钢腹板与翼缘应变. 两端各设置两个线性位移计,分别固定在试件的两侧以测量滑移. 波形腹板应变片沿锚固深度等间距布置在波谷与波脊处;翼缘处的应变片布置在外侧,待混凝土养护完毕后再粘贴. 具体垫板及位移计与应变片的布置如图 3 所示.

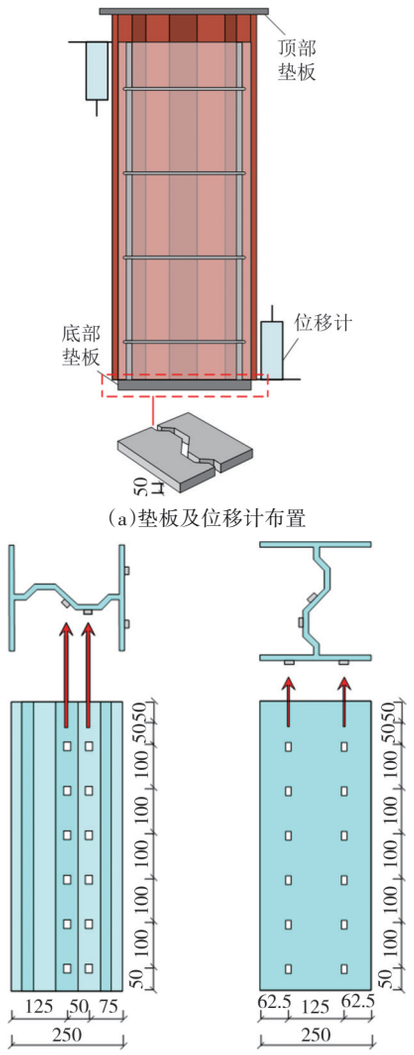
试验采用位移控制的单调加载方式,初始加载速率为 0.3 mm/min,当荷载下降至峰值荷载的 80% 左右时,适当提速至 0.5 mm/min;当到达残余荷载阶段时,加载速率提速至 1 mm/min;当位移接近 40 mm 或即将超过位移计量程时,停止加载.

2　试验结果

2.1　试验现象

典型试件破坏情况如图 4 所示.

普通混凝土试件:荷载上升段试件加载端产生界面裂纹,之后延伸至自由端,荷载下降段观察到明



(a)垫板及位移计布置

(b)腹板应变片分布 (c)翼缘应变片分布

图3 测点布置(单位:mm)

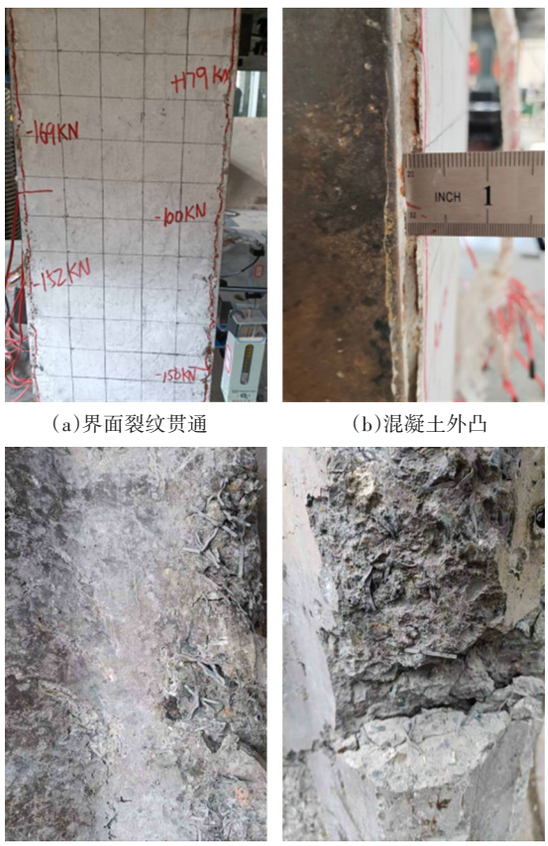
Fig.3 Measuring point arrangement (unit: mm)

显的滑移.试验过程中,偶尔发出混凝土与型钢界面的摩擦声.试验结束后观察到混凝土只有轻微的外凸现象,混凝土完整性良好.

钢纤维混凝土试件:加载前期无明显现象,试件内部发出界面摩擦声;加载到峰值荷载的80%时,试件加载端出现界面裂纹,而后迅速向自由端延伸,部分试件出现明显界面错动声;加载后期,即荷载下降段,界面裂纹贯通,界面出现肉眼可见的滑移,部分试件混凝土外凸较为明显,但所有试件的混凝土完整性良好.

2.2 荷载-滑移曲线

各试件的荷载-滑移曲线如图5所示.加载端与自由端的荷载-滑移曲线规律相同,且各荷载特征值基本相同.加载端先于自由端出现滑移,界面力逐渐由加载端传递到自由端,因此自由端存在一定滞后.



(a)界面裂纹贯通 (b)混凝土外凸

(c)整体内部破坏 (d)局部内部破坏

图4 典型试件破坏情况

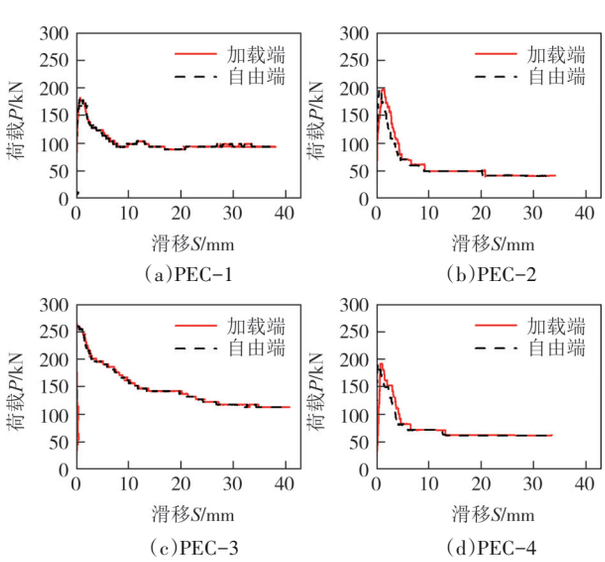
Fig.4 Failure conditions of typical specimen

由于自由端更易受试件浇筑及加载条件等因素的影响,本文对加载端曲线进行分析.

特征荷载-滑移曲线如图6所示.曲线简化后分为微滑移段OA、滑移段AB、陡降段BC、缓降段CD及荷载残余段DE.

1) 微滑移段OA

试件加载初期,界面黏结力全部由化学胶结力



(a)PEC-1 (b)PEC-2

(c)PEC-3 (d)PEC-4

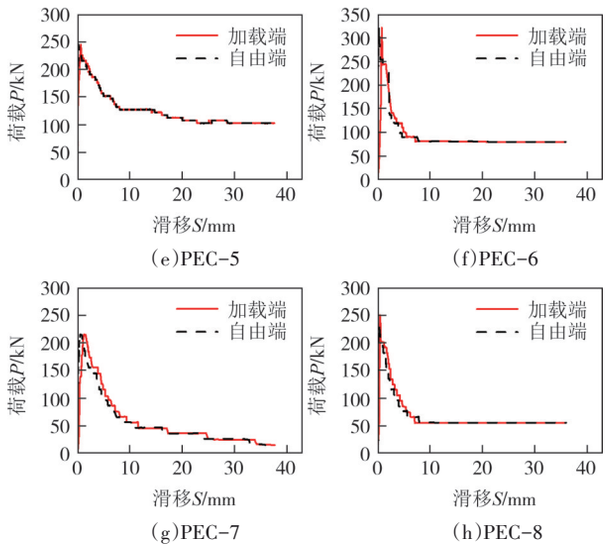


图 5　荷载-滑移曲线

Fig.5　Load-slip curve

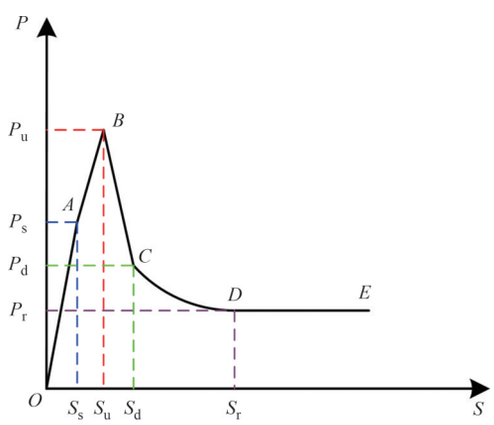


图 6　特征荷载-滑移曲线

Fig.6　Characteristic load-slip curve

承担,试件不发生滑移,界面未出现裂缝.荷载继续增大,当曲线到达初始滑移点A时,化学胶结力达到峰值,此时荷载为P_s,对应滑移为S_s.

2)　滑移段AB

A点后试件黏结界面开始逐步出现滑移,且黏结区域由两端向中部不断延伸.随着滑移的增加,化学胶结力占比逐渐降低,而机械咬合力与摩擦力的占比则逐渐增加.此时,界面黏结力以机械咬合力为主.滑移段的曲线斜率小于微滑移段.当混凝土达到其抗剪强度后,曲线到达点B,此时荷载达到峰值为P_u,对应滑移为S_u.

3)　陡降段BC

试件达到峰值荷载后,化学胶结力完全丧失,仅由机械咬合力与摩擦力起到界面黏结作用.混凝土发生剪切破坏,试件延性不足导致承载力陡降到点C,同时伴有少量滑移,此时荷载为P_d,对应滑移为S_d.

4)　缓降段CD

C点后随着滑移继续增大,机械咬合力不断减小,直至失效,界面趋于平滑.残余荷载为P_r,对应滑移为S_r.

由于界面滑移过程中钢纤维的牵拉作用,钢纤维失效后界面会产生顿挫感,曲线下降段出现轻微的锯齿波折现象.同时,界面受力分布不均匀使得局部受力超过界面黏结力时会出现卸力现象,曲线出现明显平台段.

5)　荷载残余段DE

当机械咬合力完全失效时,曲线进入荷载残余段,界面黏结力由摩擦力承担且保持不变,此时界面接触状态达到稳定,最终残余荷载趋于稳定.

3　黏结滑移性能分析

3.1　界面滑移过程分析

试件破坏模式均为界面自然黏结力失效破坏,破坏时界面裂纹贯通,界面出现明显的滑移.型钢与混凝土之间通过自然黏结力来传递荷载,自然黏结力包括化学胶结力、机械咬合力及摩擦力.

将自然黏结试件界面锚固长度分段,从黏结扩散的角度分为滑移区和无滑移区(包括黏结扩散区和协同受力区),黏结扩散区位于滑移区与协同受力区之间,存在化学胶结力.从黏结失效的角度分为完全黏结层、黏结失效层与黏结破碎层,其中黏结失效层包含于黏结扩散区内.对自然黏结试件进行的界面受力机理分析如下.

微滑移段,前期型钢与钢纤维混凝土界面滑移量较小,基本处于共同受力状态的弹性阶段,界面黏结力完全由黏结扩散区的化学胶结力承担,且随外荷载的增大而增大.在应力传递过程中,自由端处的型钢受力面积较小,将顶部加载板施加的反力传递给黏结界面;加载端处的钢纤维混凝土受力面积较大,将底部加载板施加的外力传递给黏结界面.后期界面出现少量的黏结失效层,黏结扩散区的化学胶结力部分消失.此阶段的化学胶结力类似于静摩擦力,从零增长直至极限值.界面发展情况如图7(a)、(b)所示.

滑移段,界面开始出现明显的相对滑移,前期滑移区和黏结扩散区迅速向协同受力区发展,加载端

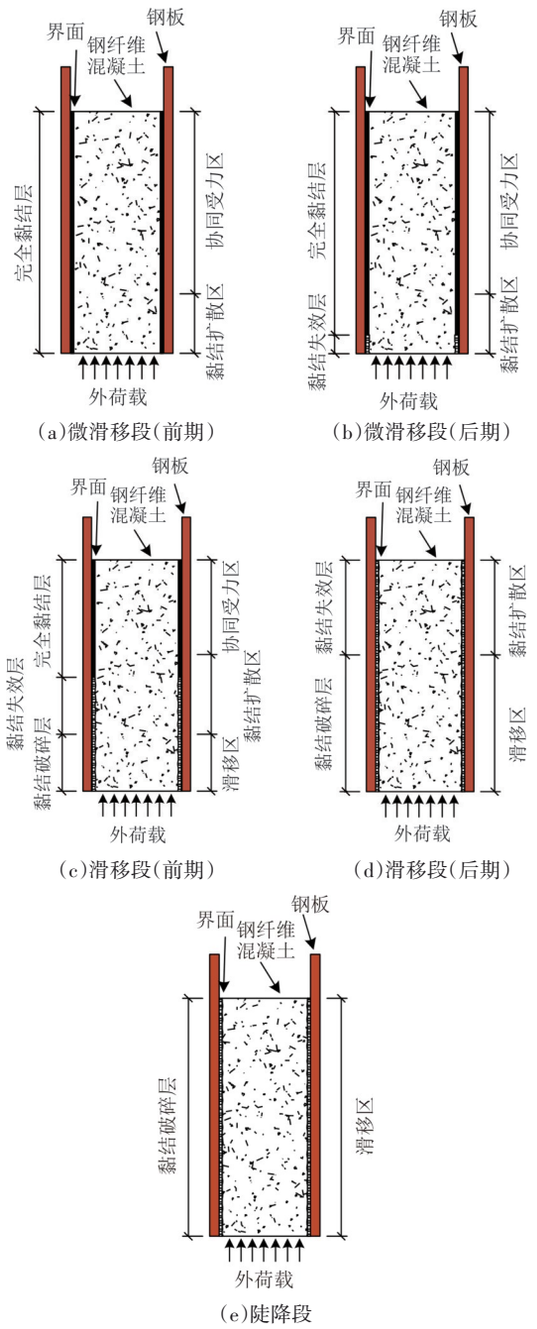


图 7 试件界面滑移过程

Fig.7 Interface slip process of the specimen

附近界面的黏结应力率先达到化学胶结应力的极限值,伴随着该区域的水泥胶体被剪断.后期界面的协同受力区逐渐消失,黏结扩散区长度逐渐增大,相应的黏结失效层也迅速扩展,界面已不存在完全黏结层,黏结破碎程度加剧.化学胶结力达到峰值后也逐渐减小,机械咬合力与摩擦力的占比迅速提升.界面发展情况如图7(c)、(d)所示.

陡降段,黏结扩散区的长度开始减小,化学胶结力降低的幅度远大于机械咬合力与摩擦力提升的幅度,因此荷载出现陡降.随后化学胶结力完全丧失,自由端开始出现滑移,此时全界面都已黏结失效,均为滑移区,界面处钢纤维混凝土凹凸不平的表面逐渐被磨平,犁沟效应[27]逐渐减弱,机械咬合力随着滑移增加而逐渐减小.界面发展情况如图7(e)所示.

缓降段,荷载较小且几乎不变,界面均为滑移区,界面黏结力由机械咬合力与摩擦力承担,机械咬合力不断减小直到消失,随着黏结界面逐渐被破坏,界面摩擦系数趋于恒定,界面黏结力仅由摩擦力提供.

荷载残余段,界面仅存在滑移段,界面黏结力仅由摩擦力承担.此时界面层的钢纤维混凝土与型钢接触面存在黏结破碎带,界面因钢纤维混凝土塑性破坏产生的部分碎屑的填充而相对平整,摩擦力保持恒定.

综上所述,自然黏结力在不同加载段的各部分组成比例不同,在微滑移段和滑移段,主要以化学胶结力为主,随着荷载上升,化学胶结力逐渐消失,机械咬合力及摩擦力占比逐渐上升;在陡降段和缓降段,主要以机械咬合力及摩擦力为主;在荷载残余段,界面仅依靠摩擦力来传递纵向黏结力.此破坏模式的主要受力部分为型钢与混凝土之间的黏结层,因此混凝土完整性较好,且残余荷载较低.

各阶段的黏结受力机理如表5所示.

3.2 界面相互作用分析

界面黏结力的传递与发展本质上是各部件之间相互作用的结果,且与各部件之间的受力状态及材料性能息息相关,波形腹板钢纤维PEC柱试件界面

表5 各阶段的黏结受力机理

Tab. 5 The bond force mechanism of each stage

整体阶段	具体分区	具体分层	黏结力
微滑移段	协同受力区+黏结扩散区	完全黏结层+少量黏结失效层	化学胶结力
滑移段	黏结扩散区+滑移区	黏结失效层+黏结破碎层	化学胶结力+机械咬合力+摩擦力
陡降段	滑移区	黏结破碎层	机械咬合力+摩擦力
缓降段	滑移区	黏结破碎层	机械咬合力+摩擦力
荷载残余段	滑移区	黏结破碎层	摩擦力

相互作用主要依靠波形腹板与混凝土之间的相互作用及混凝土与钢纤维之间的相互作用.

波形腹板与混凝土相互作用:腹板形式会对界面力的传递及相互作用产生影响.当腹板为波形时,由于截面形式不同,在波脊或波谷的尖端会产生一定的挤压应力,如图8所示.随着推出荷载的增加,混凝土与波形腹板相互挤压形成的挤压应力与界面黏结应力共同作用,挤压应力沿横截面横向发展,界面黏结应力沿锚固长度纵向发展,挤压应力是形成摩擦应力的关键,而摩擦应力同样也是界面黏结应力的重要组成部分,因此挤压应力与界面黏结应力相互影响、同步发展.由于波形截面受力不对称,在推出过程中波形腹板与混凝土出现界面分离的趋势.

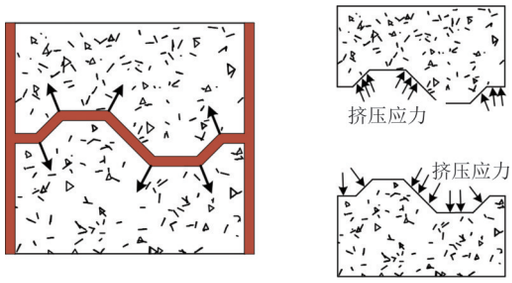


图8　波形腹板与混凝土相互作用影响

Fig.8　Interaction between corrugated web and concrete

混凝土与钢纤维相互作用:在挤压应力的影响下,混凝土在截面转折点易有尖端裂纹出现的趋势,如图9所示.在尖端裂纹可能出现的区域存在乱向分布的钢纤维,可提供与裂纹扩展方向相垂直的抗拉效果,从而在一定程度上延缓甚至阻止混凝土在该区域的开裂,即为钢纤维的桥接效应[28].由于本试验中钢纤维自身的抗拉强度远大于混凝土的开裂强度,因此除界面外其他区域基本无明显裂纹出现.界面附近存在的钢纤维主要作用是增大界面粗糙度,进而增大摩擦力,因此可不考虑该处的桥接效应.

3.3　波形钢板–混凝土黏结强度分析

为分析不同因素对黏结强度的影响,选择推出试件荷载上升段初始黏结强度τ_s、极限黏结强度τ_u与残余黏结强度τ_r,以平均黏结应力来表征波形钢板与混凝土界面间的黏结强度,计算公式为:

$$\tau = \frac{P}{DL_e} \tag{1}$$

式中:τ为平均黏结应力;P为试验荷载值;L_e为试件的锚固长度;D为混凝土与波形腹板接触面的长度.

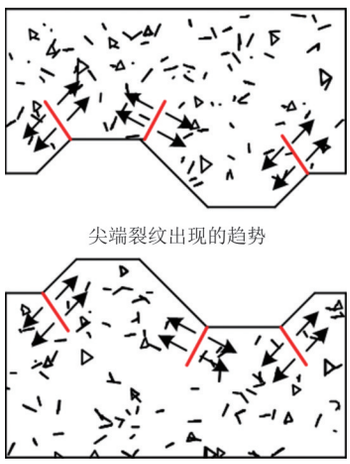


图9　混凝土与钢纤维相互作用影响

Fig.9　Interaction between concrete and steel fiber

3.3.1　锚固长度

当钢纤维掺量一定时,初始滑移荷载与残余荷载均随着锚固长度的增加而增大,极限荷载在锚固长度为550 mm和600 mm时差异较小,当锚固长度增大至650 mm时,极限荷载增长明显,如图10所示.这是由于随着锚固长度增大,界面黏结面积也随之增大,推出试件初始刚度得到提高,摩擦力受界面黏结扩散长度的影响也随之增大.

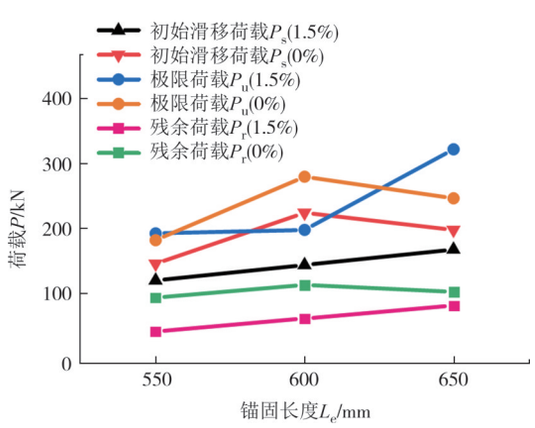


图10　试件荷载与锚固长度的相关关系

Fig.10　Correlation between the bearing capacity of specimens and the anchorage length

初始黏结强度τ_s和残余黏结强度τ_r与锚固长度呈线性增长关系,而极限黏结强度τ_u在锚固长度由550 mm增加至600 mm时略微下降,在锚固长度为650 mm时较大.这是由于随着锚固长度的增大,波形腹板与混凝土之间的有效接触面积也增大,黏结扩散长度大幅增加,黏结应力随之增强.而在极限荷载相差不大的情况下,锚固长度较大的试件黏结面积也较大,因此黏结强度略微减小.特征黏结强度与锚固长度的关系如图11所示.

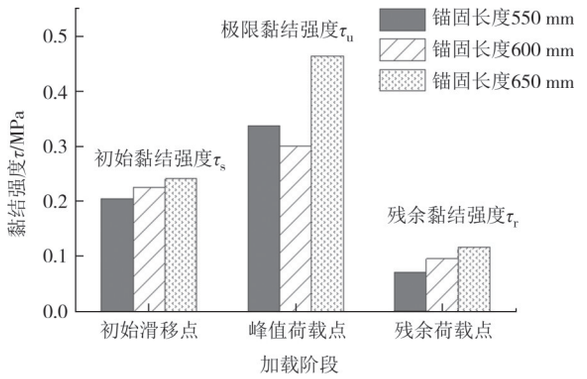


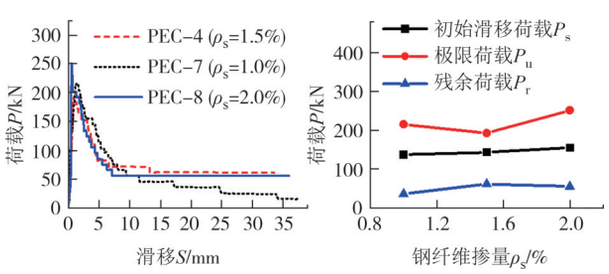
图 11 特征黏结强度与锚固长度的关系

Fig.11 Correlation between characteristic bond strength and the anchorage length

3.3.2 钢纤维掺量

随着钢纤维掺量ρ_s的增大,初始滑移荷载随之增大,极限荷载先减后增,残余荷载先增后减.且通过式(1)可知,在同一试件中L_e与D不变的情况下,黏结强度与荷载呈正比例关系,因此变化规律相同.由于剪切波浪形钢纤维主要用于提高混凝土的抗裂性,因此钢纤维掺量对界面黏结力的提升为非线性增长.

在混凝土中加入钢纤维可提升黏结性能,初始黏结强度τ_s与钢纤维掺量呈线性增长关系,极限黏结强度τ_u先减后增,残余黏结强度τ_r先增后减,与荷载变化趋势相同,当钢纤维掺量为1.5%时,极限黏结强度τ_u达到极小值,残余黏结强度τ_r达到极大值,如图12、图13所示.因为该掺量的钢纤维在混凝土中的分布并不均匀,导致混凝土强度相对较低,因此极限荷载与相应的极限黏结强度较低.而在残余阶段,界面黏结力仅靠摩擦力承担,此时1.5%钢纤维掺量的试件界面处的纤维分布更多,使界面摩擦力有一定程度的提高,因此残余黏结强度较高.



(a)加载端荷载-滑移曲线对比 (b)特征荷载对比

图 12 试件荷载与钢纤维掺量的相关关系

Fig.12 Correlation between the bearing capacity of specimens and the steel fiber content

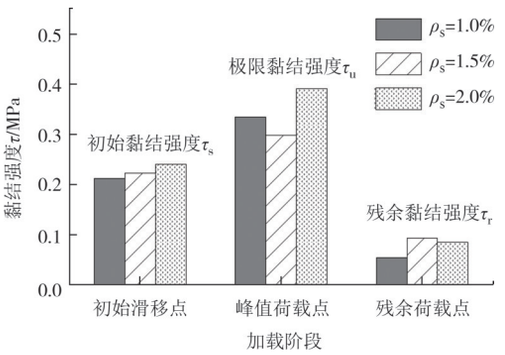


图 13 特征黏结强度与钢纤维掺量的关系

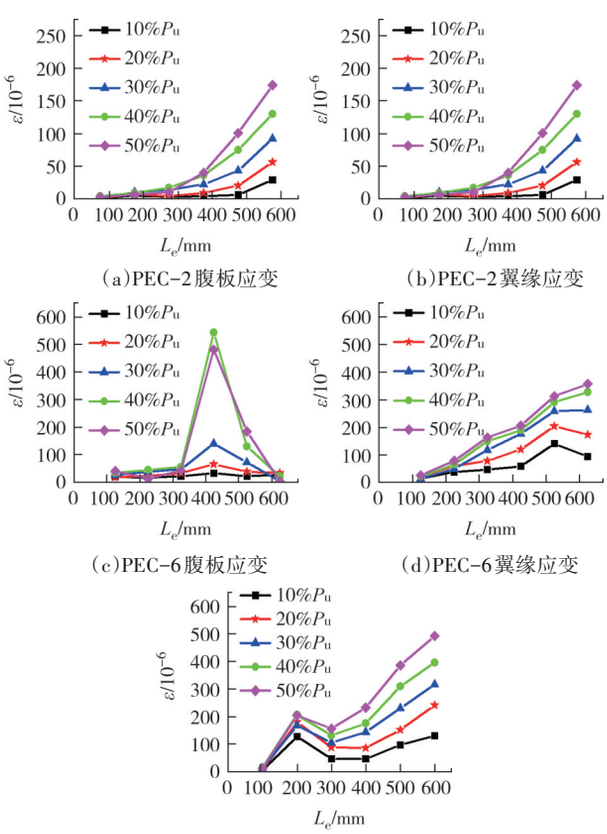
Fig.13 Correlation between characteristic bond strength and the steel fiber content

3.4 应变分析

3.4.1 真实应变

对典型试件的型钢取荷载上升段即峰值荷载的前50%进行应变分析.腹板与翼缘的应变均指同一锚固长度处应变平均值的绝对值.锚固长度L_e从加载端开始取值.试验型钢应变分布如图14所示.

由图14可以发现,同一点的型钢应变随荷载上升而不断增大.试件翼缘应变在荷载上升段随锚固长度近似呈指数分布,底部加载端应变小于顶部自



(a)PEC-2腹板应变 (b)PEC-2翼缘应变

(c)PEC-6腹板应变 (d)PEC-6翼缘应变

(e)PEC-7翼缘应变

图 14 型钢应变分布

Fig.14 Strain distribution of profile steel section steel

由端.这是因为从底部将混凝土向上推出加载,顶部与上端板接触的型钢受力后将黏结力传递给底部,因此自由端的型钢应变最大,且越靠近自由端应变越大.

试件腹板应变在荷载上升段随锚固长度增加呈现波浪形,在靠近加载端2/3锚固长度处最大,自由端与加载端的应变均较小.这是因为该处腹板受力最大且应变变化率最大,腹板处应变片受钢纤维混凝土的包裹挤压作用.

综上所述,型钢应变在数值上较小,远未达到其屈服破坏应变,试件表现为界面裂纹贯通破坏,型钢与混凝土完整性良好.

3.4.2　等效应变

因试验测得的应变是离散而非连续的,为便于分析界面黏结应力,通常忽略试件的尺寸效应,对型钢翼缘和腹板在任意截面的应变进行等效处理.取型钢的一小段微元体进行等效应变分布规律分析,其局部微元体受力过程如图15所示.

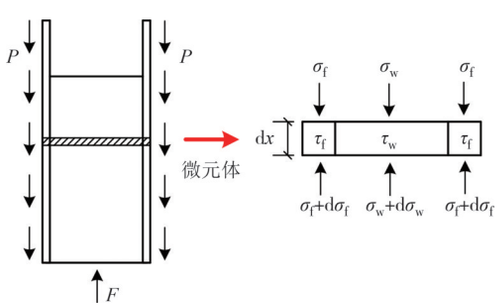


图15　型钢局部微元体受力图

Fig.15　Local microelement force diagram of section steel

在推出试验过程中,型钢并未屈服,根据受力平衡可列如下方程:

$$\tau(x)D\mathrm{d}x = 2D_{\mathrm{f}}t_{\mathrm{f}}\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{f}}(x) + D_{\mathrm{w}}t_{\mathrm{w}}\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{w}}(x) \tag{2}$$

式中:$\tau(x)$为型钢平均黏结应力;D_{f}为型钢翼缘宽度;D_{w}为型钢腹板宽度(对于波形腹板来说是腹板展开后的宽度);t_{w}为型钢腹板厚度;t_{f}为型钢翼缘厚度;$\sigma_{\mathrm{f}}(x)$为型钢翼缘平均应力;$\sigma_{\mathrm{w}}(x)$为型钢腹板平均应力.

根据应力应变关系可得:

$$\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{f}}(x) = E_{\mathrm{s}}\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{f}}(x) \tag{3}$$

$$\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{w}}(x) = E_{\mathrm{s}}\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{w}}(x) \tag{4}$$

$$\tau(x) = \frac{A_{\mathrm{s}}E_{\mathrm{s}}}{D}\frac{\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{s}}(x)}{\mathrm{d}x} \tag{5}$$

将式(3)、式(4)代入式(2),可得:

$$\tau(x) = \frac{A_{\mathrm{s}}E_{\mathrm{s}}}{D}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left[\frac{2D_{\mathrm{f}}t_{\mathrm{f}}}{A_{\mathrm{s}}}\varepsilon_{\mathrm{f}}(x) + \frac{D_{\mathrm{w}}t_{\mathrm{w}}}{A_{\mathrm{s}}}\varepsilon_{\mathrm{w}}(x)\right] \tag{6}$$

结合式(5)和式(6),可得型钢等效应变为:

$$\varepsilon_{\mathrm{s}}(x) = \frac{2D_{\mathrm{f}}t_{\mathrm{f}}}{A_{\mathrm{s}}}\varepsilon_{\mathrm{f}}(x) + \frac{D_{\mathrm{w}}t_{\mathrm{w}}}{A_{\mathrm{s}}}\varepsilon_{\mathrm{w}}(x) \tag{7}$$

式中:E_{s}为型钢弹性模量;$\varepsilon_{\mathrm{f}}(x)$为型钢翼缘截面的平均应变;$\varepsilon_{\mathrm{w}}(x)$为型钢腹板截面的平均应变;$\varepsilon_{\mathrm{s}}(x)$为型钢等效应变;$A_{\mathrm{s}}$为型钢横截面面积.

结合本文试件参数,得到这个有具体数字的公式:

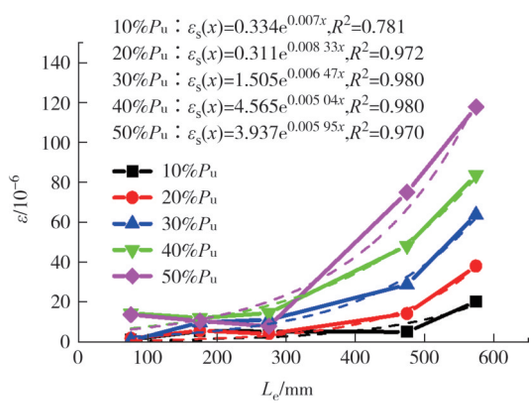
$$\varepsilon_{\mathrm{s}}(x) = 0.633\varepsilon_{\mathrm{f}}(x) + 0.367\varepsilon_{\mathrm{w}}(x) \tag{8}$$

针对翼缘与腹板应变片均完好的试件的等效应变进行分析,等效应变沿锚固长度的分布趋势大致呈指数函数形式.等效应变$\varepsilon_{\mathrm{s}}(x)$与距加载端长度$x$有如下关系:

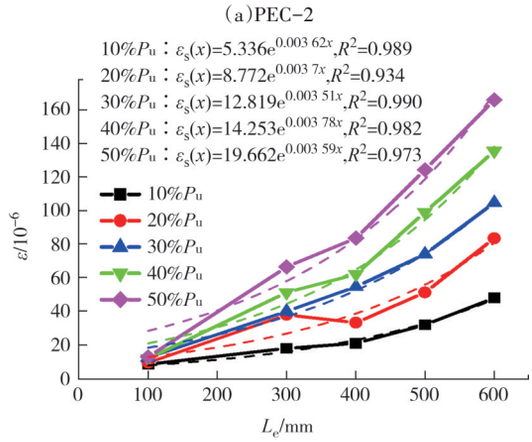
$$\varepsilon_{\mathrm{s}}(x) = \zeta\mathrm{e}^{\alpha x} \tag{9}$$

式中:ζ与荷载P相对于极限荷载P_{u}的大小有关,随P的增大而增大;α与试件的锚固长度、钢纤维掺量等影响因素有关.

拟合结果如图16所示.



(a)PEC-2



(b)PEC-7

图16　等效应变拟合

Fig.16　Equivalent strain fitting

4 特征黏结强度的计算

通过多元线性回归,充分考虑锚固长度和钢纤维掺量对黏结强度的影响,得到相关的钢纤维PEC柱界面特征黏结强度计算式.

$$\tau_s = 3.13\frac{L_e}{L} + 0.031\rho_s + 0.000\,52f_{cu} + 0.38\eta - 3.05 \tag{10}$$

$$\tau_u = 10.27\frac{L_e}{L} + 0.051\rho_s - 0.000\,78f_{cu} + 1.08\eta - 10.09 \tag{11}$$

$$\tau_r = 3.88\frac{L_e}{L} + 0.011\rho_s - 0.003\,1f_{cu} + 1.76\eta - 4.95 \tag{12}$$

通过上式计算得出表6,由表6可知,计算值与试验值较为吻合,初始黏结强度、极限黏结强度及残余黏结强度的计算值与试验值的比值平均值分别为0.988、1.001和1.038,误差均在合理范围内,公式适用性较好.

表6 特征强度计算结果与试验结果比较

Tab.6 Comparison of calculation results and test results of Characteristic intensity

试件	τ_s			τ_u			τ_r		
	计算值/MPa	试验值/MPa	比值	计算值/MPa	试验值/MPa	比值	计算值/MPa	试验值/MPa	比值
PEC-2	0.203	0.206	0.987	0.314	0.339	0.926	0.075	0.072	1.048
PEC-4	0.223	0.226	0.986	0.380	0.302	1.256	0.100	0.097	1.033
PEC-6	0.240	0.243	0.989	0.436	0.467	0.934	0.121	0.118	1.029
PEC-7	0.213	0.216	0.987	0.346	0.339	1.021	0.061	0.057	1.067
PEC-8	0.241	0.244	0.988	0.402	0.394	1.018	0.091	0.087	1.040
平均值			0.988			1.001			1.038

5 结 论

本文基于波形腹板钢纤维PEC柱的推出试验,以自然黏结试件为对照,综合考虑锚固长度和钢纤维掺量对黏结性能的影响,得到以下结论:

1)试件破坏模式均为界面自然黏结力失效破坏;对试件特征荷载-滑移曲线进行归纳分析,将受力过程分为微滑移段、滑移段、陡降段、缓降段及荷载残余段.

2)波形钢板与混凝土界面可分为滑移区、黏结扩散区和协同受力区,黏结失效分层可分为完全黏结层、黏结失效层与黏结破碎层.自然黏结力在不同加载段的各部分组成比例不同,其中化学胶结力在荷载上升段发挥作用,机械咬合力和摩擦力出现在滑移段之后.其界面相互作用主要依靠波形腹板与混凝土的相互作用及混凝土与钢纤维的相互作用.

3)在混凝土中加入钢纤维可提升黏结性能,但钢纤维掺量对界面黏结力的提升为非线性增长,随着钢纤维掺量ρ_s的增大,初始黏结强度τ_s随之增大,极限黏结强度τ_u先减后增,残余黏结强度τ_r先增后减;加入钢纤维后,初始滑移荷载与极限荷载均随着锚固长度的增加而增大,锚固长度为650 mm时界面黏结性能最佳.

4)试件翼缘应变在荷载上升段随锚固长度近似呈指数分布,腹板应变呈现波浪形,在靠近加载端2/3锚固长度处最大.对其局部微元体通过受力过程进行等效应变分布规律分析,理论推导出其等效应变公式,可为真实应变分布预测提供参考.

5)结合试验和影响因素分析,通过线性回归拟合出各参数与特征黏结强度的关系式,计算值与试验值误差较小,可为波形腹板钢纤维PEC柱的承载力设计提供参考.

参考文献

[1] 方有珍, 马吉, 陆承铎, 等. 新型卷边钢板组合截面PEC柱(强轴)滞回性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 181-190.
FANG Y Z, MA J, LU C D, et al. Test study on hysteretic behavior of pec columns (strong axis) fabricated with crimping thin-walled built-up section[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 181-190.(in Chinese)

[2] 李补拴,路瑶,赵根田,等. PEC柱-异形钢梁框架中节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2020,37(1):126-134.
LI B S, LU Y, ZHAO G T, et al. Experimental study on seismic performance of PEC column-special shaped steel beam inner-frame joints[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 126-134.(in Chinese)

[3] WU B, JIAN S M, ZHAO X Y. Structural behavior of steel-concrete partially encased composite columns containing demolished concrete lumps under axial compression [J].

Engineering Structures,2019,197: 109383.

[4] 杨文侠,方有珍,顾强,等. 薄壁钢板组合截面PEC柱抗震性能的足尺试验研究[J]. 工程力学,2012,29(8):108-115.
YANG W X,FANG Y Z,GU Q,et al. Seismic performance study of PEC columns fabricated with thin-walled built-up section by full scale[J]. Engineering Mechanics,2012,29(8):108-115.(in Chinese)

[5] 金晓飞,毛小勇,梁书亭,等. 约束PEC柱(强轴)抗火性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(9):59-65.
JIN X F,MAO X Y,LIANG S T,et al. Experimental study on the fire resistance behaviors of restrained PEC column (strong axis)[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2016,43(9):59-65.(in Chinese)

[6] 王威,王冰洁,罗麒锐,等. 波纹钢板-混凝土界面黏结滑移性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(4):141-149.
WANG W,WANG B J,LUO Q R,et al. Bond-slip behavior of interface between corrugated steel plate and concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2022,54(4):141-149.(in Chinese)

[7] 王威,李元刚,苏三庆,等. 波形钢板混凝土黏结滑移性能试验研究与数值模拟分析[J]. 土木工程学报,2019,52(11):13-24.
WANG W,LI Y G,SU S Q,et al. Experimental study and numerical simulation on bond-slip behavior between corrugated steel plate and concrete[J]. China Civil Engineering Journal,2019,52(11):13-24.(in Chinese)

[8] WANG W,REN Y Z,LU Z,et al. Experimental study of the hysteretic behaviour of corrugated steel plate shear walls and steel plate reinforced concrete composite shear walls[J]. Journal of Constructional Steel Research,2019,160:136-152.

[9] WANG W,REN Y Z,HAN B,et al. Seismic performance of corrugated steel plate concrete composite shear walls[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings,2019,28(1):e1564.

[10] SONG J L,WANG W,SU S Q,et al. Experimental study on the bond-slip performance between concrete and a corrugated steel plate with studs[J]. Engineering Structures,2020,224:111195.

[11] NIKOOMANESH M R,ALI GOUDARZI M. Experimental and numerical evaluation of shear load capacity for sinusoidal corrugated web girders[J]. Thin-Walled Structures,2020,153:106798.

[12] 伍凯,刘晓艺,陈峰,等. 不同荷载条件下型钢-钢纤维混凝土组合结构的界面失效机理研究[J]. 工程力学,2021,38(2):110-121.
WU K,LIU X Y,CHEN F,et al. Study on interfacial failure mechanism of steel and steel fiber reinforced concrete composite structure under different loading conditions[J]. Engineering Mechanics,2021,38(2):110-121.(in Chinese)

[13] 伍凯,陈峰,徐方媛,等. 型钢与钢纤维混凝土界面黏结性能及损伤耗能试验研究[J]. 土木工程学报,2019,52(3):1-11.
WU K,CHEN F,XU F Y,et al. Experimental study on interfacial bonding property and energy dissipation capacity between shape steel and steel fiber reinforced concrete[J]. China Civil Engineering Journal,2019,52(3):1-11.(in Chinese)

[14] 詹欣欣,覃祚威,陈以一,等. L形截面部分包覆钢-混凝土组合柱弱轴压弯整体稳定[J]. 建筑结构学报,2024,45(1):180-191.
ZHAN X X,QIN Z W,CHEN Y Y,et al. Stability of partially encased composite steel and concrete column with L-shaped section under eccentric compression around minor axis[J]. Journal of Building Structures,2024,45(1):180-191.(in Chinese)

[15] 毛佳月,刘用,王静峰,等. L形截面部分包覆钢-混凝土组合柱轴压性能试验与承载力计算[J]. 建筑结构学报,2024,45(10):87-96.
MAO J Y,LIU Y,WANG J F,et al. Axial compression performance test and bearing capacity calculation of L-shaped section partially encased composite steel-concrete columns[J]. Journal of Building Structures,2024,45(10):87-96.(in Chinese)

[16] 李补拴,周伟,赵根田,等. 部分包覆钢-混凝土十字形和T形截面组合柱抗震性能及轴压比限值分析[J]. 建筑结构学报,2023,44(8):99-109.
LI B S,ZHOU W,ZHAO G T,et al. Seismic performance and limit values of axial ratio for partially encased composite steel-concrete cross-shaped and T-shaped section columns[J]. Journal of Building Structures,2023,44(8):99-109.(in Chinese)

[17] 郑浩,胡夏闽,刘加荣,等. 部分外包型钢混凝土黏结滑移性能的试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(12):183-188.
ZHENG H,HU X M,LIU J R,et al. Experimental study on bond slip behavior between section steel and concrete in partially encased composite members[J]. Industrial Construction,2015,45(12):183-188.(in Chinese)

[18] 王威,甄国凯,权超超,等. 竖向梯形波纹腹板PEC柱轴压性能研究[J]. 工程科学与技术,2022,54(4):29-38.
WANG W,ZHEN G K,QUAN C C,et al. Bearing performance of PEC column with vertical trapezoidal corrugated web under axial compression[J]. Advanced Engineering Sciences,2022,54(4):29-38.(in Chinese)

[19] 王威,陈乐乐,苏三庆,等. 波形腹板部分包覆组合柱强轴偏心受压试验分析[J]. 建筑结构学报,2023,44(5):252-263.
WANG W,CHEN L L,SU S Q,et al. Eccentric compression test and analysis of partially encased composite columns strong axis with corrugated webs[J]. Journal of Building Structures,2023,

44(5): 252-263.(in Chinese)

[20] 王威,续鉴,李昱,等.带栓钉波形腹板PEC柱界面黏结滑移性能与抗剪承载力试验研究[J/OL].工程力学,1-13(2023-09-14)[2024-09-30].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230913.1928.059.html.
WANG W, XU J, LI Y, et al. Experimental study on interfacial bond-slip behavior and shear capacity of PEC columns with corrugated webs with studs[J/OL]. Engineering Mechanics, 1-13(2023-09-14)[2024-09-30].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230913.1928.059.html.(in Chinese)

[21] 伍凯, 郑惠铭, 陈峰, 等. 型钢-钢纤维混凝土组合结构的黏结破坏及传力机理研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(10):129-138.
WU K, ZHENG H M, CHEN F, et al. Bond failure and load transfer mechanism in steel and steel fiber reinforced concrete composite structures[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(10): 129-138.(in Chinese)

[22] SHAKYA K, WATANABE K, MATSUMOTO K, et al. Application of steel fibers in beam-column joints of rigid-framed railway bridges to reduce longitudinal and shear rebars[J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 482-489.

[23] HARAJLI M H. Effect of confinement using steel, FRC, or FRP on the bond stress-slip response of steel bars under cyclic loading[J]. Materials and Structures, 2006, 39(6): 621-634.

[24] MOHOD M V. Performance of steel fiber reinforced concrete[J]. International Journal of Engineering and Science, 2012, 1(12): 1-4.

[25] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.(in Chinese)

[26] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Metallic materials—tensile testing: part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese)

[27] 杨苏春, 张明义, 王永洪, 等. 基于黏着—犁沟摩擦理论的黏性土与混凝土界面受力试验与分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 1021-1030.
YANG S C, ZHANG M Y, WANG Y H, et al. Study on mechanical test of interface between clay and concrete based on the tribology theory of adhesion and ploughing[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(4): 1021-1030.(in Chinese)

[28] CHAO S H, NAAMAN A E, PARRA-MONTESINOS G J. Bond behavior of reinforcing bars in tensile strain-hardening fiber-reinforced cement composites[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(6): 897-906.