

文章编号:1671-8879(2015)02-0075-08

钢-混组合结构开孔波折板剪力件静载推出试验

李淑琴, 万 水

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘 要:剪力件是组合梁桥中钢腹板和混凝土上下翼缘板连接的关键构造,研究开孔波折板剪力件的力学性能是该种连接件设计的关键环节。通过 38 个开孔波折板剪力件试件及 8 个开孔板(PBL)剪力件对比试件的静载推出试验,研究考虑不同参数影响的开孔波折板剪力件静载作用下的受力性能,并给出开孔波折板剪力件屈服承载力及极限承载力计算公式。研究结果表明:开孔波折板剪力件推出试验过程可以划分为外荷载达到屈服承载力之前的线性阶段、荷载由屈服承载力增加到极限承载力的塑性阶段以及破坏阶段;影响开孔波折板剪力件抗剪承载能力的主要参数为混凝土强度等级、开孔孔径、贯穿钢筋面积、开孔板厚度等。同等条件下,开孔波折板剪力件抗剪承载力比 PBL 剪力件提高约 1.5 倍;给出的计算公式物理意义明确,其计算结果与本文试验结果吻合较好,可用于开孔波折板剪力件的设计计算。

关键词:桥梁工程;钢-混组合结构;开孔波折板剪力件;推出试验;承载能力;破坏机理

中图分类号:U441;TU398 **文献标志码:**A

Push-out test of the perforated corrugated plate shear connectors in steel-concrete composite structure

LI Shu-qin, WAN Shui

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: Shear connector is the key structure to connect the steel girder to concrete flange plate in composite girder bridge, the key link in the design of the corrugated rib connector is the study of its mechanical properties. In order to investigate the mechanical properties of perforated corrugated plate shear connectors influenced by different parameters under static load, 38 specimens and 8 PBL contrast specimens were tested in the push-out test under static load. The results show that the test process of the perforated corrugated plate shear connectors can be approximately divided into the elastic stage, the plastic stage and the failure stage; the main factors influencing the carrying capacity of the perforated corrugated plate shear connectors are concrete strength, the open area of the steel plate, perforated rebar cross-sectional area, and the thickness of perforated plate. Under the same conditions, perforated corrugated plate shear connectors ultimate shear capacity of is improved about 1.5 times than that of PBL shear connectors; new bearing capacity formula of perforated corrugated plate shear connectors on the basis of the experiments gives definite physical meaning, and the calculated results got from the

收稿日期:2014-10-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”计划项目(2012CB026200);国家自然科学基金项目(50078014)

作者简介:李淑琴(1982-),女,安徽怀宁人,讲师,工学博士,E-mail:123-lishuqin@163.com。

formula is close to test results. The formula can be used for the design and calculation. 2 tabs, 9 figs, 14 refs.

Key words: bridge engineering; steel-concrete composite structure; corrugated rib connector; push-out test; bearing capacity; failure mechanism

0 引言

钢-混组合结构的受力性能取决于混凝土和钢梁结合部处剪应力的有效传递^[1]。结合部的设计十分关键,必须考虑到钢材和混凝土材料两者之间发生的纵向水平剪力能否得到有效控制,以确保结构运营时 2 种不同材料之间不产生相对位移,因此需要合理地设计剪力连接件^[2]。目前,钢-混组合结构中使用较多的为开孔板剪力件(PBL 剪力件)^[3],其构造形式为由带孔钢板组成,钢板孔内可以放入贯穿钢筋。PBL 剪力件的应用形式主要有 2 种^[4]:一种为翼缘型开孔板剪力件,即将带孔钢板焊接在钢梁翼缘板上,作用机理是依靠孔中混凝土楔的抗剪作用抵抗钢板的纵向剪力,依靠钢板受压承担面外的横向剪力^[5-8];另一种是嵌入型开孔板剪力件,即直接在钢梁的腹板顶端开孔并埋入混凝土中形成 PBL 键传递剪力,取消了钢梁的上翼缘板,节省了钢材,纵向的抗剪主要依靠圆孔中的混凝土与波形腹板的斜板段所包围的混凝土齿键提供,焊接的圆钢能够承担腹板面外弯矩的作用,并依靠圆孔中的混凝土和贯穿钢筋承担掀起力^[9]。为此,本文依据上述 2 种 PBL 剪力连接件受力原理考虑构造参数的变化,通过试验的方法对一种具有中国自主知识产权的新型 PBL 连接件——开孔波折板剪力连接件的受力原理及性能进行研究,并给出其抗剪承载力计算公式^[10]。

1 开孔波折板剪力件作用原理

开孔波折板剪力件(图 1)是一种新型连接件,综合了翼缘型和嵌入型开孔板剪力件两者的优势,充分利用两者抵抗外荷载的作用机理,其连接的技术特征为:在翼缘板上沿钢腹板的方向焊接单块或 2 块及以上的开孔波折钢板,钢筋穿过波折钢板上的孔,波折钢板孔中的混凝土和钢筋一起形成钢筋混凝土抗剪销,水平剪力由波折钢板的斜折板以及钢筋混凝土销共同抵抗,钢筋混凝土销还起抵抗拉拔力的作用。前期已有学者对该剪力件力学性能进行了初步研究^[11-13],本文主要研究其抗剪承载力影响因素及计算公式。

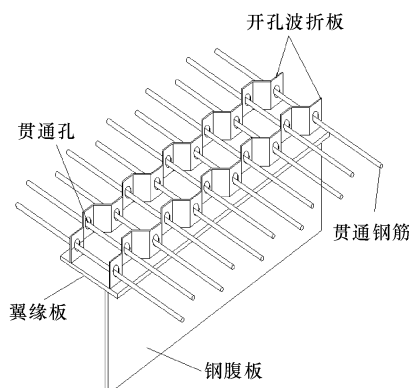


图 1 开孔波折板剪力件

Fig. 1 Perforated corrugated plate shear connector

2 开孔波折板剪力件试验方案

2.1 试件的设计与制作

根据本次试验目的,同时参考欧洲钢结构协会 ECCS 推荐的受剪试件尺寸及配筋要求以及开孔波折板剪力件的特殊性,共设计制作了 8 类 23 组(每组 2 个试件完全相同)共 46 个推出试件,试件参数见下页表 1。其中第 A、B 类 8 个试件为 PBL 剪力件;C~F 5 类为开孔波折板剪力件。其中 C~E 类为单开孔波折板剪力件试件,其变化参数为孔径和开孔个数以及贯穿钢筋面积等;F~H 类为双开孔波折板剪力件,变化的参数为开孔位置及个数。代表性单开孔波折板剪力件试件 E1 的尺寸布置见下页图 2。

试件制作时,采用专门设计的钢模作为模具,钢模设计已留出放置剪力件适合的宽度高度缺口,正好夹住剪力件,且不影响混凝土块的浇筑(下页图 3);为确保试件两侧混凝土底面完全平整,提前平整场地,并且每 3 个试件一排底部放置一块平整的厚木板作为底模。混凝土浇筑见下页图 4。

2.2 试验方法

本次试验在 500×10^3 kg 的电液伺服万能试验机上进行(下页图 5),为确保混凝土板与底座接触良好,在混凝土板底与万能试验机的底座间用细沙座底。试验数据采用 DH3815 静态应变测试仪连接到计算机自动采集。试验中主要测量混凝土板和钢梁之间的滑移、贯穿钢筋的应变。推出件的前后两面各布置 2 个位移传感器,共计 4 个(下页图 5)。

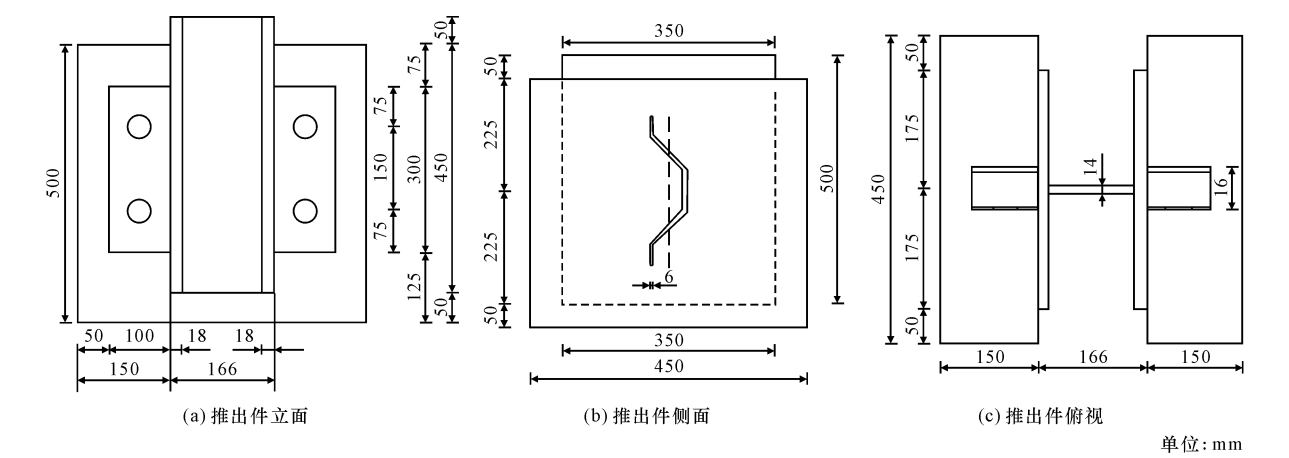


图 2 E1 推出件的构件尺寸

Fig. 2 Structure size of E1 specimen

表 1 推出件的参数设计及试验结果

Tab. 1 Parameter design and test results of push-out specimens														
编号	f_{cu} / MPa	开孔板 厚/mm	孔径 d /mm	穿筋直 径/mm	开孔板 波长 l /mm	开孔板 弯折 角/(°)	开孔 个数/个	单孔屈 服承载 力/kN	单孔极 限承载 力/kN	抗剪刚度/ ($kN \cdot mm^{-1}$)	弹性滑 移量 S_y /mm	塑性滑 移量 S_u /mm	最大滑 移 S_{max} / mm	延性系数 S_{max}/S_y
A1	50	6	60	0			2	212.5	438.5	561.0	0.35	8.1	23.21	66.3
A2	50	6	60	14			2	221.2	519.5	758.7	0.25	5.9	24.81	99.2
A3	50	6	60	20			2	250.6	575.3	412.5	0.34	9.3	21.01	61.8
B1	50	6	60	14			4	195.0	476.6	994.6	0.16	7.9	21.75	135.9
C1	50	6	60	0	300	45	4	308.0	773.8	1020.6	0.37	9.2	24.97	67.5
C2	50	6	60	14	300	45	2	340.0	845.0	862.9	0.40	9.6	15.85	39.6
C3	50	6	60	20	300	45	2	357.1	860.0	1 138.7	0.28	5.7	22.74	81.2
C2-1	50	6	40	14	300	45	2	310.7	708.0	1 056.1	0.26	7.8	26.09	100.3
C3-1	50	6	60	20	300	45	2	287.8	659.3	641.6	0.35	6.6	13.92	39.8
C3-2	40	6	60	20	300	45	2	293.8	750.0	805.0	0.33	7.3	17.61	53.4
C2-2	50	10	60	14	300	45	2	421.5	1055.0	635.2	0.63	5.2	19.25	30.6
C2-3	50	6	60	14	300	60	2	360.7	970.0	1 629.0	0.21	3.4	12.03	57.3
C3-3	50	6	60	20	200	45	2	355.1	935.0	1 511.1	0.23	7.0	17.25	75.0
D1	50	6	60	20	300		2	350.6	869.0	1 161.3	0.28	8.5	23.91	85.4
E1	50	6	60	20	300		2	223.9	445.3	314.1	0.49	8.8	23.27	47.5
F1	50	6	60	0	300		4	271.0	644.6	700.6	0.45	3.7	9.45	21.0
F2	50	6	60	14	300		4	285.0	691.9	1 875.6	0.13	4.3	17.80	136.9
F3	50	6	60	20	300		4	295.0	727.3	1 387.8	0.18	3.5	18.06	100.3
F2-1	50	10	60	14	300		4	337.4	815.0	1 119.6	0.25	3.5	7.01	28.0
F2-2	50	6	60	14	300	60	4	331.3	802.4	1 077.3	0.25	3.6	9.41	37.6
F3-1	50	6	60	20	200		4	332.7	847.3	1 351.3	0.17	3.0	8.30	48.8
G1	50	6	60	20	300		4	303.1	732.8	1 338.3	0.23	4.1	8.85	38.5
H1	50	6	60	20	300		4	176.0	362.8	482.4	0.29	6.0	17.01	58.6

注: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。

3 试验结果分析

3.1 荷载-滑移曲线

推出试验结果见表 1,表中为每组 2 个试件数

据的均值(C2-2、C2-3、C3-1 这 3 组试件中,有 1 个试件由于试验过程中出现异常破坏,其数据已经剔除不用,故表中数值为单个试件试验值)。由表 1 可知,试验结果比较离散,这主要是由于剪力件的抗剪



图3 钢模及厚木垫板
Fig. 3 Steel templates and wooden blocks



图4 混凝土浇筑
Fig. 4 Pouring concrete



图5 试验机及位移计布置

Fig. 5 Loading equipment and displacement gage arrangement
承载能力受到多种因素影响,且试件制作时存在施

工误差、材料性能差异(不同批次浇注的构件混凝土力学性能存在差异,即使是同一批次浇注的试件由于混凝土振捣存在随机性导致骨料分布不同,亦会使得构件的力学性能存在差异)、测量仪器的误差等原因。以试件测得钢与混凝土相对位移的平均值为横坐标,以施加的外荷载为纵坐标,得到推出试件的荷载-滑移曲线,限于篇幅,本文仅给出部分试件荷载-滑移曲线,如下页图 6 所示(每类试件共设计 2 组,如图 6(a)所示,A1 和 A1(2)分别为第 1 组 2 个试件的试验结果,图 6(b)~图 6(i)依次类推,分别为同一类 2 组试件的试验结果)。其中图 6(a)、图 6(c)曲线出现差异,通过后期砸开全部破坏试件观察发现:A1 组试件曲线差异主要是由于混凝土振捣不均匀导致两试件贯穿孔中粗细骨料分配不均匀所致,B1 组试件则是由于其中的贯穿钢筋出现倾斜不居中所致。

分析图 6 可知,推出试件的荷载-滑移曲线($P-S$ 曲线)由 3 个阶段组成。

(1)线性阶段($P \leq (0.3 \sim 0.5)P_u$):钢梁与混凝土之间滑移很小, $P-S$ 曲线接近直线,开孔钢板剪力件表现出很大的抗剪刚度,对构件的整体 $P-S$ 曲线进行分析,得出在这个阶段推出件的荷载-滑移曲线近似线性关系,对其曲线进行线性回归可知具有相当高的相关系数,定义这一阶段为推出件的线性阶段,其最大荷载定义为推出件的屈服承载力 P_y ,图 6(g)~图 6(i)为部分试件线性阶段荷载-滑移关系曲线(其中拟合曲线 y_1 、 y_2 分别为第 1 组和第 2 组试件试验结果)。

(2)塑性发展阶段(P 由 $(0.3 \sim 0.5)P_u$ 增大至 P_u):该阶段荷载增加缓慢,但滑移却大幅增加,剪力件的抗剪刚度不断退化,表现为图 6(a)~图 6(f)的平滑段。

(3)下降段(P 由 P_u 下降至构件破坏):除未设置横向贯通钢筋的试件外,其他试件在达到极限荷载后, $P-S$ 曲线有一个缓慢变化的过程,此时荷载缓慢下降,滑移持续增长,直至试件破坏,表现为图 6(a)~图 6(f)的下降段。

3.2 抗剪承载力影响因素分析

由本文试验结果可知,影响开孔波折板剪力件抗剪性能的因素较多,主要有:混凝土强度、贯通钢筋直径、孔径、普通钢筋配筋率、开孔位置、开孔间距、钢板厚度、开孔波折板参数(波折角度、波长等)等。其中影响较大的参数有:混凝土强度、孔径、贯通钢筋、开孔波折板参数等。每一种因素又有很多

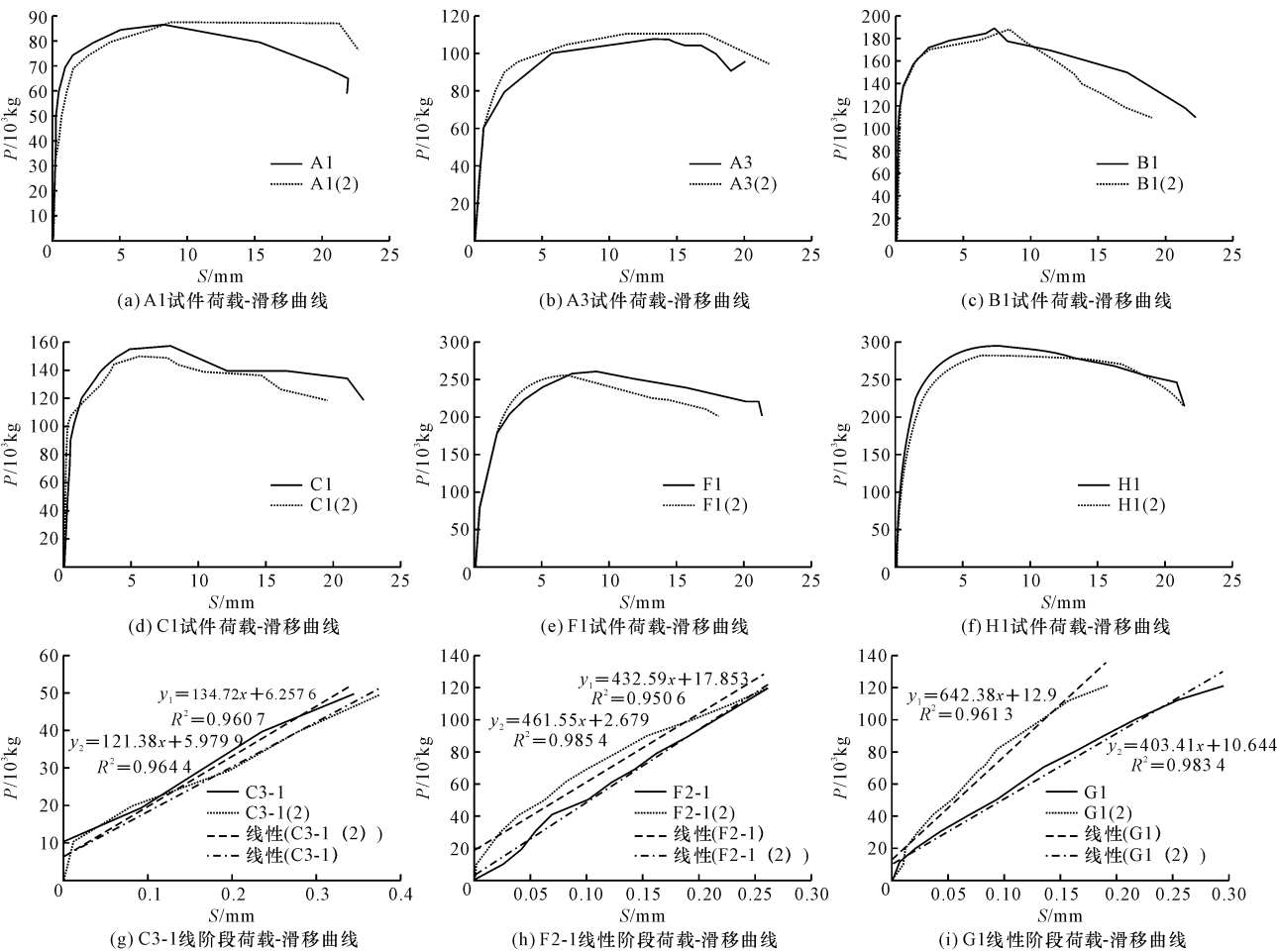


图 6 推出件荷载-滑移曲线
Fig. 6 Push-out specimens' load-slip curve

变化,同时某些参数之间还存在耦合现象,如孔洞直径与贯通钢筋直径之间。本文就以下几个主要影响参数进行分析。

3.2.1 开孔波折板剪力件与 PBL 剪力件

为研究开孔波折板剪力件受力性能,共制作了 4 组开孔直钢板剪力件(即 PBL 剪力件,分别为表 2 中 A1、A2、A3、B1)对比试件,对比试件除开孔板为直钢板外其他构造参数与相应开孔波折板剪力件试件(对

应 A1、A2、A3、B1 的开孔波折板剪力件试件分别为 C1、C2、C3、F2)完全相同。对比试验结果见表 2,虽然数据存在离散型,但开孔波折板剪力件试件的抗剪承载力比 PBL 剪力件有明显提高。3 组单开孔板的屈服承载力均提高了 1.45 倍以上,极限承载力提高达到 1.5 倍以上;双开孔板试件提高系数亦达到 1.46 倍。由以上分析可以得出,同等条件下开孔波折板剪力件的抗剪承载能力比 PBL 剪力件有较大的提高。

表 2 开孔波折板剪力件与 PBL 剪力件承载力对比

变 量	屈服承载力/kN								极限承载力/kN							
	A1	C1	A2	C2	A3	C3	B1	F2	A1	C1	A2	C2	A3	C3	B1	F2
PBL 剪力件	212.5		221.2		250.6		195.0		438.5		519.5		573.3		476.6	
开孔波折板剪力件		308.0		340.0		379.2		285.0		773.8		845.0		860.0		691.9
承载力提高系数(开孔波折板剪力件/ PBL 剪力件)	1.45		1.54		1.51		1.46		1.76		1.63		1.50		1.45	

3.2.2 混凝土强度

C3-2 试件混凝土强度等级为 C40,C3 试件混凝土强度等级为 C50,2 组试件的其他构造参数均相

同。对线性阶段 2 组试件数据进行回归,见下页图 7(a)。同时参考表 1 可知,当混凝土强度等级提高时,2 组试件屈服承载力分别为 293.8 kN 及 357.1 kN,

提高幅度达到 21.5%;极限承载力从 750 kN 提高到 860 kN,提高幅度为 15%;抗剪刚度由 805 kN/m 提高到 1 138.7 kN/m,提高幅度为 41%。可以得出,混凝土强度等级提高可明显改善开孔波折板剪力件的受力性能,其中抗剪刚度提高最为明显,达到 40%以上;屈服承载力和极限承载力的提高基本为混凝土强度等级提高系数的一半以上。

3.2.3 开孔板孔径

C2-1 试件开孔板孔径为 40 mm,C2 试件孔径为 60 mm,构件的线性阶段荷载滑移见图 7(b),同时参考表 1 可知当孔径由 40 mm 增加到 60 mm 时,2 组试件屈服承载力由 310.7 kN 增大到 340 kN,提高了 9.7%;极限承载力为 708 kN 增大到 845 kN,提高了 19.4%;抗剪刚度由 1 056 kN/m 降低为 862 kN/m,降低 18%。由此得出,开孔板孔径增大,进入孔洞中的混凝土面积增大,可相应提高构件的抗剪承载能力,且对试件极限承载力的影响比屈服承载力更大,但随着孔径的增大,试件的抗剪

刚度相应降低。

3.2.4 贯穿钢筋面积

C1、C2、C3 以及 F1、F2、F3 这 6 组试件分别为未配置贯穿钢筋、贯穿钢筋直径为 14 mm 及 20 mm。图 7(c)~图 7(d)显示了这 6 组试件在线性阶段的荷载-滑移关系(其中拟合曲线 y_1 、 y_2 、 y_3 分别对应 C1、C2、C3 及 F1、F2、F3 拟合曲线)。单开孔板试件屈服承载力:直径 14 mm 贯穿钢筋试件比未配置贯穿钢筋试件提高 10%,直径 20 mm 贯穿钢筋试件比直径 14 mm 贯穿钢筋试件提高 5%;极限承载力相应提高 9.2%和 1.8%;双开孔板试件屈服承载力分别提高 5.1%和 3.5%;极限承载力分别提高了 7.3%和 5.1%。可以得出:在开孔板内配置贯穿钢筋可以明显提高推出件的承载能力,且其承载力随着贯穿钢筋直径的增加相应增大,但是贯穿钢筋的直径不是无限增大的,孔径与钢筋直径之间的空隙必须保证能使混凝土的最大骨料能够顺利通过,并且双开孔板试件比单开孔板试件提高幅度小。

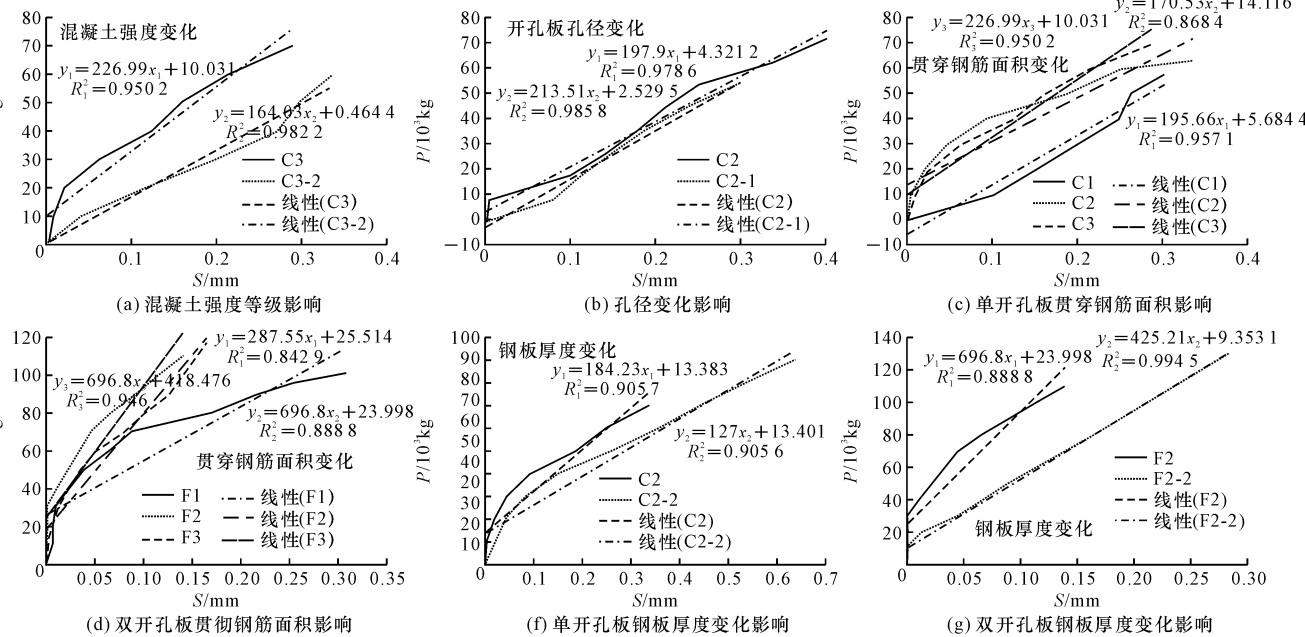


图 7 各参数影响下试件荷载-滑移曲线

Fig. 7 Load-slip curve of specimens influenced by different parameters

3.2.5 开孔钢板厚度

C2、C2-2 以及 F2、F2-2 这 4 组试件仅开孔钢板厚度由 6 mm 增大为 10 mm。图 7(f)~图 7(g)显示了这 2 组试件在线性阶段的荷载-滑移关系,结合这 2 个图及表 1 得出:随着钢板厚度增加,单开孔板试件 C2-2 屈服承载力比 C2 增加 30%,极限承载力增加 24.9%;双开孔板试件 F2-2 屈服承载力比 F2

增加 16.3%,极限承载力增加 16%。分析国内外 PBL 剪力件研究数据以及本文的研究成果表明,当开孔钢板比较薄时,圆孔中的混凝土受到的作用力比较集中,容易使混凝土发生割裂破坏。至于钢板多薄时会发生割裂破坏,详细的研究还比较少,特别是在不设置贯通钢筋时一定要确保开孔钢板的厚度,本次试件中就有一个 6 mm 的开孔钢板试件(C3

试件)破坏形态为开孔板发生破坏。

4 计算公式分析

为了取得合理、可靠、适用的计算公式,本文将开孔波折板剪力件的计算公式分成若干部分,对公式进行细化,公式的推导采用对多因素,单水平的方式设计,由于前文已分析了主要参数对剪力件受力性能的影响,从而能够准确测得每种因素对剪力件抗剪承载力的贡献值,然后根据对试验数据的整理分析,回归开孔波折板剪力件抗剪承载力计算公式。

假定开孔波折板剪力件抗剪承载力(P_u)由两部分提供,即类似如 PBL 剪力件承载力计算的部分(P_{u1})以及波折板嵌入混凝土中形成的混凝土齿键提供的承载力计算部分(P_{u2}),即

$$P_u = P_{u1} + P_{u2} \quad (1)$$

采用多元回归分析方法^[14],找出开孔波折板剪力件极限承载力与其影响因素之间关系的数学表达式,经整理后得开孔波折板剪力件极限承载力计算公式为

$$P_u = 49.2 \times 10^3 + \alpha(1 + \beta \sqrt{\frac{d_w}{h_w}})(\phi^2 - \phi_s^2)f_{cu} + \gamma\phi_s^2 f_y + \lambda h_w d_w f_{cu} \quad (2)$$

式中: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度(MPa); f_y 为贯穿钢筋屈服强度(MPa); ϕ 为开孔波折板开孔直径(mm); ϕ_s 为贯穿钢筋直径(mm); h_w 为开孔波折板高度(mm); d_w 为开孔波折板的波高(mm); α 为系数, $\alpha=1.327$; β 为波折板对混凝土樁增强系数, $\beta=-0.145$,当开孔板为直钢板时 β 取 0; γ 为贯穿钢筋抗剪系数, $\gamma=1.245$; λ 为波折板所围成的混凝土齿板抗剪系数, $\lambda=1.219$,当开孔板为直钢板时 λ 取 0。

该公式物理意义明确,指出开孔波折板剪力件单孔极限承载力主要由混凝土樁部分、贯穿钢筋部分以及混凝土齿键 3 部分提供,且指出混凝土齿键与贯穿孔有耦合作用。根据本次试验试件相关构造参数,利用式(2)计算出本次推出试件的抗剪承载力值,并将计算值与实测值进行比较,见图 8,可知公式的符合度较高。

将表 1 中各试件的屈服承载力与极限承载力试验值作为纵横坐标形成各散点见图 9,用以分析开孔波折板剪力件屈服承载力与极限承载力之间的关系,对图 9 中各散点进行拟合,得到开孔波折板剪力件屈服承载力与极限承载力之间为线性关系,相关系数为 0.966 7,屈服承载力 P_y 计算公式为

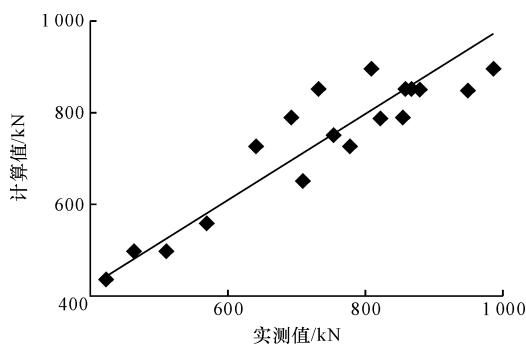


图 8 试验实测值计算值曲线

Fig. 8 Tested value and calculated value correlation

$$P_y = 0.330 2P_u + 59.569 \quad (1)$$

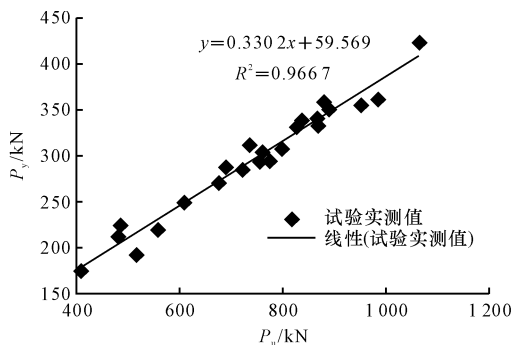


图 9 开孔波折板剪力件屈服强度

Fig. 9 Yield strength of corrugated rib connector

5 结 语

(1)开孔波折板剪力件工作阶段可分为荷载达到屈服承载力之前的线性阶段、荷载由屈服承载力增加到极限承载力的塑性阶段以及破坏阶段。

(2)开孔波折板剪力件的抗剪作用形式与 PBL 剪力件基本相同,但开孔波折板剪力件具有更优异的抗剪性能,其抗剪承载力比同等条件 PBL 剪力件提高约 1.5 倍。

(3)影响开孔波折板剪力件抗剪性能的参数较多,其中影响较大的参数有:混凝土强度、孔径、贯通钢筋、波折板参数。

(4)给出开孔波折板剪力件极限承载力与屈服承载力计算公式,较全面地考虑了混凝土强度、孔径、贯穿钢筋等主要因素,公式物理意义明确,且计算结果与本文实测结果相吻合。该公式可用于开孔波折板剪力件的设计计算。

(5)开孔波折板剪力件是一种具有较大应用前景的新型连接件。本文虽然通过模型试验对考虑参数变化的抗剪承载能力进行了研究,但对其结构的有限元理论分析及试验研究仍不够充分,尤其是在重复荷载作用下的疲劳问题等还需要进行进一步深

人的研究,以期提出统一的承载力计算公式。

参考文献:

References:

- [1] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
LIU Yu-qing. Steel-concrete hybrid bridge[M]. Beijing:China Communications Press,2005. (in Chinese)
- [2] 李淑琴,万 水,张长青. 波形钢腹板设计与制造[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
LI Shu-qin, WAN Shui, ZHANG Chang-qing. Design and manufacture of corrugated steel webs[M]. Beijing:China Communications Press,2011. (in Chinese)
- [3] 胡建华,侯文崎,叶梅新. PBL 剪力键承载力影响因素和计算公式研究[J]. 铁道科学与工程学报,2007,4(6):12-18.
HU Jian-hua, HOU Wen-qi, YE Mei-xin. Study of influence factors and formula for the bearing capacity of PBL shear connectors[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2007,4(6):12-18. (in Chinese)
- [4] 赵 晨,刘玉擎. 开孔板连接件抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学,2012,29(12):349-354.
ZHAO Chen, LIU Yu-qing. Experimental study of shear capacity of perfobond connector[J]. Engineering Mechanics,2012,29(12):349-354. (in Chinese)
- [5] Al-Darzi S Y K, Ai R C, Yu Q L. Finite element simulation and parametric studies of perfobond rib connector[J]. American Journal of Applied Science,2007,4(3):122-127.
- [6] Kito H, Yamaoka S, Sonoda K. Shear transfer mechanism of perfobond strip in steel-concrete composite[J]. System-based Vision for Strategic and Creative Design,2003(1/3):1369-1374.
- [7] Nam J H, Yoon S J. Perforated FRP shear connector for the FRP-concrete composite bridge deck[J]. Key Engineering Materials,2007,334/335(2):381-384.
- [8] 程 高,刘永健,邱洁霖,等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土不等宽 T 型节点应力集中系数分析[J]. 建筑科学与工程学报,2014,31(4):74-79. (in Chinese)
CHENG Gao, LIU Yong-jian, QIU Jie-lin, et al. Analysis of stress concentration factor on concrete-filled rectangular steel tube t-joints stiffened with PBL[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2014,31(4):74-79. (in Chinese)
- [9] 李现辉,李国强. 腹板嵌入式组合梁抗剪连接件拔出试验[J]. 建筑科学与工程学报,2009,26(1):43-48.
LI Xian-hui, LI Guo-qiang. Pull-out experiment on shear connector in embedded composite with notched web[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2009,26(1):43-48. (in Chinese)
- [10] 万 水. 一种翼缘型抗剪连接件:中国,CN201053146[P]. 2008-04-30.
WAN Shui. A new type of shear connector: China, CN201053146[P]. 2008-04-30. (in Chinese)
- [11] 李淑琴,万 水,陈建兵. 一种新型抗剪连接件试验研究[J]. 桥梁建设,2009(4):17-19.
LI Shu-qin, WAN Shui, CHEN Jian-bing. Test study of a new type of shear connector[J]. Bridge Construction,2009(4):7-19. (in Chinese)
- [12] 苏庆田,汪 瑞,王 巍. 波折开孔板连接件基本力学性能试验[J]. 中国公路学报,2012,25(2):46-52.
SU Qing-tian, WANG Rui, WANG Wei. Experiments on the mechanical properties of corrugated rib connector[J]. China Journal of Highway and Transport,2012,25(2):46-52. (in Chinese)
- [13] Liu X G, Fan J S, Nie G, et al. Behavior of composite rigid frame bridge under bi-directional seismic excitations[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering:English Edition,2014,1(1):62-71.
- [14] 冯士雍. 回归分析方法[M]. 北京:科学出版社,2002.
FENG Shi-yong. Regression analysis method[M]. Beijing:Science Press,2002. (in Chinese)