

文章编号:1673-9469(2023)03-0070-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.03.010

波形钢组合桥面板受力性能分析

庞学冬¹,张德强¹,于长兴²,刘传奇^{3,4*},孔凡磊³

(1. 山东高速股份有限公司,山东 济南 250000;2. 临沂市市政工程建设管理服务中心,山东 临沂 276007;
3. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;4. 青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266033)

摘要: 为研究波形钢组合桥面板的受力性能,首先设计了3组9个试件进行推出试验,分析其破坏形态、极限荷载值和滑移量,然后建立了有限元模型,分析了波形钢组合桥面板在跨中集中荷载下挠度、界面滑移、波形钢板和剪力连接件应力及其分布。研究表明:开孔板PBL剪力连接件破坏分为弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段3个阶段,试件为混凝土剪切破坏,破坏时有着良好的延性,贯穿钢筋和粘结摩擦力对剪力连接件的承载力和滑移量有着重要的作用,5 m跨径的波形钢组合桥面板极限承载力为630 kN,桥面板在荷载作用下经历弹性阶段、裂缝发展阶段、屈服阶段、破坏阶段4个阶段,开孔板PBL剪力连接件可以有效地将两种结构组合在一起,波形钢板和剪力连接件屈服区域均集中在跨中,其中波谷区域最明显。

关键词: 波形钢组合桥面板;受力性能;推出试验;有限元;极限承载力

中图分类号: U443.37

文献标识码: A

Mechanical Performance Analysis of Corrugated Steel Composite Bridge Deck

PANG Xuedong¹, ZHANG Deqiang¹, YU Changxing², LIU Chuanqi^{3,4*}, KONG Fanlei³

(1. Shandong Hi-speed Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China; 2. Linyi Municipal Engineering Construction Management Service Center, Linyi, Shandong 276007, China; 3. Highway College, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710064, China; 4. Civil Engineering College, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: In order to investigate mechanical performance of corrugated steel composite bridge decks, three groups with 9 specimens were designed and tested based on the push-out tests, and the failure pattern, ultimate load and slip were analyzed. Then the finite element models were established and the deflection, interface slippage, corrugated steel plate stress and its distribution, shear connector stress and its distribution were analyzed under the concentrated load of the middle-span of the corrugated steel composite bridge deck. The results show that the failure of perfobond (PBL) shear connectors are divided into three stages: elastic stage, plastic stage and failure stage. The specimens are failed by concrete shear failure and showed good ductility when failure occurred. The transversal reinforcement and bonding friction have an important effect on the bearing capacity and slippage of shear connectors. The ultimate bearing capacity of the 5 m span steel-concrete composite bridge deck is 630 kN. The bridge deck undergoes four stages under load: elastic stage, crack development stage, yield stage and failure stage. PBL shear connectors can effectively combine the two structures together, and the yield areas of corrugated steel plates and shear connectors are concentrated in the mid span, with the valley region being the most obvious.

Key words: corrugated steel composite bridge deck; mechanical performance; push-out test; finite element; ultimate bearing capacity

收稿日期:2023-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778059)

作者简介:庞学冬(1975-),男,山东济南人,硕士,高级工程师,从事公路桥梁养护研究。

* 通讯作者:刘传奇(1985-),男,山东济宁人,博士,讲师,从事钢混组合结构桥梁研究。

压型钢-混凝土组合楼板在工业与民用建筑中应用广泛,与传统的混凝土结构相比,压型钢板在施工时可以作为浇筑混凝土的永久模板,施工完成后免去拆除的工序,同时压型钢板在结构中也可以作为受拉钢筋,提高结构的抗弯剪能力。压型钢-混凝土组合楼板从 20 世纪 20 年代开始就已经在建筑楼板体系中应用,目前仍有很多学者对此进行了相关的研究^[1-2]。

目前,应用在建筑上的压型钢-混凝土组合楼板的钢与混凝土的组合作用相对较弱,如果能保证压型钢板与混凝土结构相结合,两者组成一个整体,共同参与受力,会使承载能力大大提高。通过借鉴建筑中压型钢-混凝土组合楼板,在桥梁中提出波形钢组合桥面板这种新型的结构形式^[3-5]。

剪力连接件用来承担钢与混凝土结构之间的剪力作用,包括横向剪力和纵向剪力,将两种结构结合成一个整体共同受力^[6]。同时,剪力连接件还有抗掀起的作用。目前国内外常用的剪力连接件主要有焊钉连接件和开孔板 PBL 连接件,PBL 连接件与焊钉连接件相比,具有承载力高、抗疲劳性能好等优点,应用更为广泛^[7-10]。

目前,国内外已有学者对波形钢组合桥面板展开研究,但相对较少^[11-14],为研究波形钢组合桥面板的受力性能,采用 PBL 剪力连接件作为抗剪构件,首先设计了 3 组试件,对 PBL 剪力连接件进行了推出试验,根据试验结果分析 PBL 连接件在波形钢板中的破坏机理和极限荷载值。然后采用有限元软件 ANSYS 建立有限元模型,对 5 m 跨径的波形钢组合桥面板进行了受力分析计算,分析了波形钢组合桥面板在荷载作用下的跨中挠度变化、波形钢板的应力曲线及分布、波形钢板与混凝土之间的相对滑移、剪力连接件的应力曲线及分布,从而为波形钢组合桥面板的设计和应用提供参考。

1 PBL 连接件推出试验

1.1 试件设计

本文设计了 3 组 9 个试件进行推出试验,试件中 PBL 剪力连接件主要参数如表 1 所示。PBL 剪力连接件的尺寸为 513 mm×140 mm,厚度为 14 mm,贯穿钢筋采用直径为 16 mm,圆形开孔间距为 2.25d(113 mm),d 为圆形开孔的直径,圆孔距离连接件端部距离为 87 mm,见图 1。推出试件的构造尺寸如图 2 所示。试件中波形钢底板厚度

为 6 mm,试件混凝土表面设置间距为 100 mm 的钢筋网,钢筋直径均为 12 mm。试件混凝土强度等级均为 C50。

表 1 PBL 剪力连接件试件参数
Tab. 1 Parameters of PBL connector specimens

试件名称	孔径/mm	钢筋直径/mm	有无粘结作用
P-NB-NR	50	—	无
P-NB-R	50	16	无
P-B-R	50	16	有

注:试件编号中 P 表示有粘结,NB 表示无粘结;R 表示有贯穿钢筋,NR 表示无贯穿钢筋。

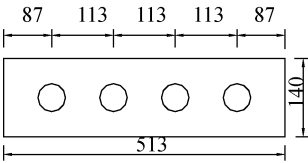


图 1 剪力连接件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of shear connectors (unit: mm)

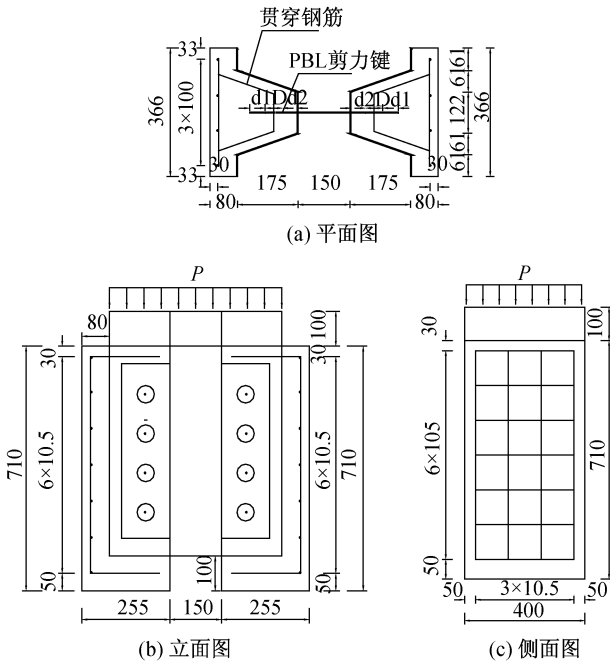


图 2 试件构造尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Structural dimensions of specimens

试件制作过程如图 3 所示。根据《欧洲规范 4:钢与混凝土组合结构设计》规定,试件在制作的过程中,先单个波形钢板水平放置浇筑混凝土,待混凝土养护完毕后,在竖向通过 16 mm 钢板焊接在一起。同时为了剪力连接件端部混凝土的承压作用,在 PBL 剪力连接件下端黏贴长度为 5 cm 的泡沫板。除试件 P-B-R-3 外,其余试件均在钢板与混凝土接触面上涂抹黄油,来消除钢板与混凝土



图3 试件制作图

Fig. 3 Diagram of specimen fabrication

土之间的粘结作用。

试件浇筑的混凝土原材料有水泥、砂、碎石、外加剂和水。碎石分为直径 5~10 mm 和 10~25 mm 两种。每立方米混凝土材料用量分别为:水泥 484 kg,砂 706 kg,碎石 1 105 kg,水 155 kg,外加剂 5.81 kg。质量配合比水泥:砂:碎石:水:减水剂为 1:1.46:2.28:0.32:0.012。混凝土搅拌后现场测得坍落度约为 220 mm。浇筑时制作 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土立方体试块,经养护 28 d 后,测得各试块均值大于 50 MPa。

1.2 加载装置

本次试验加载装置采用 500 t 微机控制的电液伺服压力机,试件加载布置如图 4 所示。正式加载前,首先进行 3 次预加载,目的是消除非弹性变形,同时也可以检查设备的正常运行情况。试验正式加载采用位移加载的方式,加载速率为 0.2 mm/min。试件的两侧各放置两个位移传感器测量波形钢板与混凝土之间的相对滑移。通过在压力机的承台上铺一层细砂达到调平的效果。数据采集采用 DH3820 高速静态应变测试分析系统。



图4 试件加载装置图

Fig. 4 Diagram of loading setup of specimens

2 试验结果分析

2.1 PBL 连接件传力破坏机理

对 3 组试件进行推出试验,试件的破坏形态如图 5 所示。根据参考文献[15],试件从加载到破坏大致经历了 3 个阶段,即弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段。



(a) 试件底面裂缝



(b) 试件顶面裂缝

图5 混凝土破坏形态

Fig. 5 Failure mode of concrete

根据试验现象,弹性阶段,试件无明显现象,此时可以通过位移传感器观察到混凝土与波形钢板之间有少量滑移。试件进入塑性阶段后,滑移量开始增大,此时在试件的底部首先出现裂缝,随着荷载的增加,裂缝逐渐扩大,并向上延伸。塑性阶段初期,荷载由混凝土榫抵抗逐渐转变为混凝土榫和贯穿钢筋共同抵抗。破坏阶段,试件裂缝迅速发展,试件底部出现多条裂缝,混凝土有不同程度的剥落。内部贯穿钢筋出现变形,混凝土榫完全失去作用。

PBL 剪力连接件破坏可分为开孔钢板变形破坏和混凝土剪切破坏。开孔钢板变形破坏主要在钢板过薄时发生,当开孔钢板较厚时,试件表现为 PBL 剪力连接件圆形开孔双面剪切破坏。本试验中,开孔钢板厚度为 14 mm,试件破坏时为混凝土剪切破坏,且为延性破坏。

2.2 极限荷载值与滑移量

试件的极限荷载值和相应的滑移量如表 2 所

示。表中各值均为各试件的平均值。根据参考文献[12],贯穿钢筋对剪力连接件的抗剪承载力有着重要的作用。由表2可知,试件P-NB-R的极限荷载值平均值比试件P-NB-NR高了716.5 kN,约73.8%,两者的区别在于有无贯穿钢筋。原因是贯穿钢筋、混凝土和圆形开孔会共同作用,使得圆形开孔内的混凝土处于三轴受压的状态,提高混凝土抗压强度。需要注意的是,贯穿钢筋会减少粗骨料进入圆形开孔内部,所以设计时应考虑圆孔大小与贯穿钢筋直径之间的协调。

表2 推出试验结果

Tab. 2 Results of push-out tests

试件名称	极限荷载值 /kN	单孔荷载值 /kN	极限滑移量 /mm
P-NB-NR	970.7	121.3	4.12
P-NB-R	1 687.2	210.9	6.96
P-B-R	1 790.1	223.8	7.54

试件P-B-R的极限荷载值平均值比试件P-NB-R高了102.9 kN,两者的区别在于波形钢板和混凝土之间是否有粘结摩擦作用,所以,粘结摩擦力也可以提高PBL剪力连接件的极限荷载值。目前,剪力连接件的计算中并未考虑两者之间的粘结摩擦力,各学者的研究中也把粘结摩擦力作为安全储备去考虑。

对于极限滑移量,有贯穿钢筋的试件P-NB-R比无贯穿钢筋的试件P-NB-NR平均值高了2.84 mm,滑移量越多说明试件的延性越好,所以贯穿钢筋可以提高试件的延性。试件P-B-R比试件P-NB-R的极限滑移量提高了0.58 mm,说明粘接摩擦作用也可以提高延性,但是效果不明显。

3 有限元模型的建立

为分析波形钢组合桥面板受力性能,利用有限元软件ANSYS对5 m跨径的组合桥面板进行非线性分析。有限元模型如图6所示。

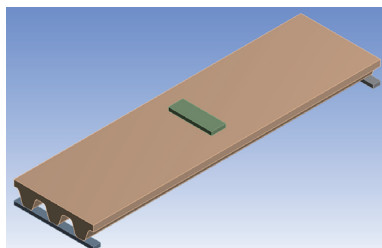


图6 结构有限元模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of structural finite element model

3.1 单元类型

混凝土结构采用三维8节点Solid185单元来模拟,其可采用增强应变方法来防止“剪切锁定”和“体积锁定”。波形钢板采用Shell181单元,其积分方法选择其默认的有沙漏控制的缩减积分。混凝土表面构造钢筋采用三维2节点的Beam188单元,其优点是可以任意地布置钢筋并可以直观地获得钢筋的内力。

3.2 本构关系

混凝土材料采用多线性等向强化模型混凝土单轴应力应变关系上升段采用《GB 50010—2002》中相关规定,混凝土应力-应变曲线如图7(a)所示。

混凝土应力-应变曲线可以由公式(1)确定:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right] & \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ f_c & \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_c 为混凝土单压应力值; ε_c 时应变曲线段参数值; f_c 为混凝土单轴抗压强度代表值; n 为系数, $n = 2 - 1/60(f_{cu,k} - 50)$,当计算值大于2.0时,取为2.0。

有限元模型中波形钢板、剪力连接件、贯穿钢筋均采用双线性等向强化模型模拟,并采用Mises屈服准则。钢材应力-应变曲线如图7(b)所示。

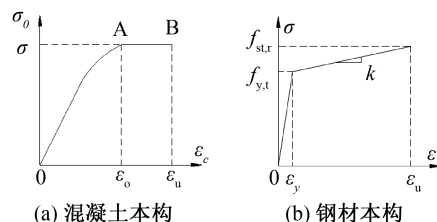


图7 材料本构关系

Fig. 7 Constitutive relations of materials

钢材的应力-应变曲线由式(2)确定:

$$\sigma_p = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_{y,r} + k(\varepsilon_s - \varepsilon_y) & \varepsilon_y < \varepsilon_s < \varepsilon_u \\ 0 & \varepsilon_s > \varepsilon_u \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_s 为钢材的弹性模量; $f_{st,r}$ 为钢材的极限强度代表值; $f_{y,r}$ 为钢材的屈服强度代表值; k 为钢材硬化段斜率。

3.3 边界条件

模型中混凝土、波形钢、钢筋、剪力连接件之间的接触问题属于边界条件定义的范畴,是计算结果是否可靠的关键问题。本模型中采用界面单元来模

拟构件间的接触,即 TARGE170 单元模拟目标面, TARGE174 模拟接触面。把刚度较大的波形钢和 PBL 剪力连接件、钢筋表面定为目标面,混凝土定为接触面。具体为波形钢板与混凝土之间、PBL 连接件与混凝土之间设置均采用 Friction,摩擦系数取 0.2。混凝土棒与 PBL 剪力连接件之间采用 Frictionless。

3.4 网格划分

有限元模型中网格的划分方式对计算结果收敛有较大影响,尤其是对于混凝土结构。单元划分过小会造成计算量过大,而单元划分过大又会造成计算不准确。本模型中,PBL 剪力连接件与混凝土的接触问题尤为关键,划分单元时采用相同的大小及方法。划分时选择多区域扫描(Multi-zon)方法。

4 受力性能分析

4.1 荷载-挠度分析

波形钢组合桥面板跨中荷载-挠度曲线如图 8 所示。根据有限元模型计算,5 m 跨径的组合桥面板极限承载力为 630 kN。根据参考文献[16],波形钢组合桥面板在荷载作用下经历 4 个阶段:(1)线弹性阶段,在本阶段内,荷载和挠度为线性关系,斜率为组合桥面板的刚度,此时刚度保持不变;(2)裂缝发展阶段,随着荷载的增加,在组合桥面板的侧面会观察到细小的裂缝,并且裂缝逐渐扩大;(3)屈服阶段,裂缝的宽度和长度迅速增加,但数量基本保持不变,此时组合桥面板顶部混凝土会被压碎;(4)破坏阶段,荷载基本保持不变,但挠度迅速增加,波形钢板和混凝土达到屈服状态,破坏前 PBL 剪力连接件可以有效地将两种结构组合在一起,共同受力。

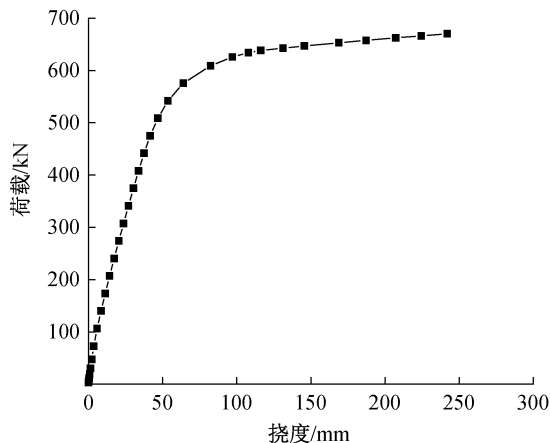


图 8 荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curve

4.2 波形钢板荷载-应力分析

波形钢板在荷载下的应力曲线如图 9 所示。由曲线可知,曲线前期可分为直线段和曲线段,当荷载达到 440 kN 时,随着荷载的增加,应力增加缓慢,此时波形钢板进入屈服强化阶段。当荷载达到 610 kN 时,应力迅速增加,而荷载增加缓慢,此时,组合桥面板进入破坏阶段。

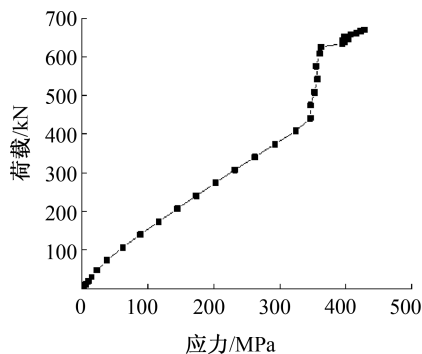


图 9 波形钢板荷载-应力曲线

Fig. 9 Load-stress curve of corrugated steel plate

波形钢板在荷载作用下的应力云图如图 10 所示。由图 10 可知,波形钢板的屈服位置发生在跨中波谷处,而跨中波峰处的屈服面积较小。波形钢板的应力由跨中向两端逐渐减小。

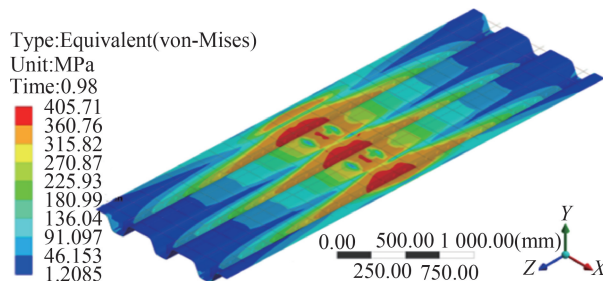


图 10 波形钢板荷载-应力云图

Fig. 10 Load-stress cloud map of corrugated steel plate

4.3 界面滑移分析

波形钢板与混凝土在荷载作用下的相对滑移曲线如图 11 所示。由图 11 可知,当达到极限荷载时,波形钢板与混凝土之间的滑移量为 0.337 mm,相对滑移量很小,这也表明 PBL 剪力连接件可以有效地将波形钢板和混凝土组合在一起。达到极限荷载后,两者之间的滑移迅速增加,此后,连接件逐渐失去作用。

波形钢板与混凝土在荷载作用下的滑移量分布云图如图 12 所示。由云图可知,滑移量主要分布在跨中段,组合桥面板两端也有少量滑移。由此设计时应考虑加强跨中段的组合作用。

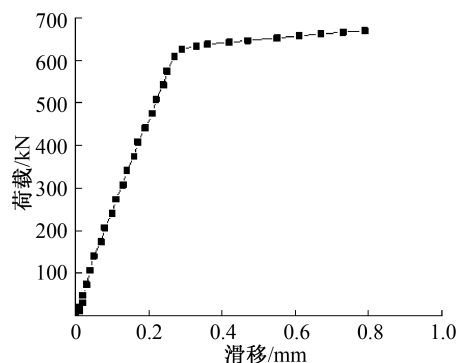


图 11 波形钢板-混凝土相对滑移曲线

Fig. 11 Relative slip curve between corrugated steel plate and concrete

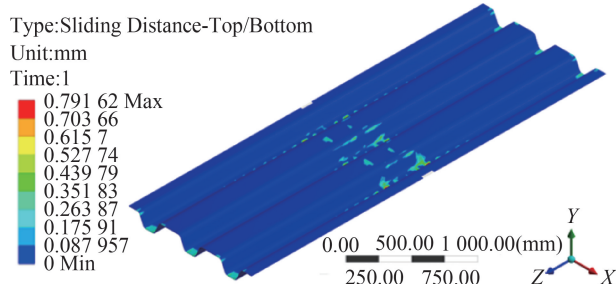


图 12 波形钢板-混凝土相对滑移量分布云图

Fig. 12 Relative slip distribution cloud map between corrugated steel plate and concrete

4.4 PBL 剪力连接件荷载-应力分析

PBL 剪力连接件在荷载作用下的应力曲线如图 13 所示。由图 13 可知,屈服阶段之前,曲线可分为直线段和曲线段。当组合桥面板达到屈服阶段后,剪力连接件钢板发生屈服强化,即随着荷载的增加,连接件钢板的应力增加不明显。达到极限荷载时,剪力连接件应力不再增加,此时混凝土和波形钢板发生分离,剪力连接件不再发挥作用。

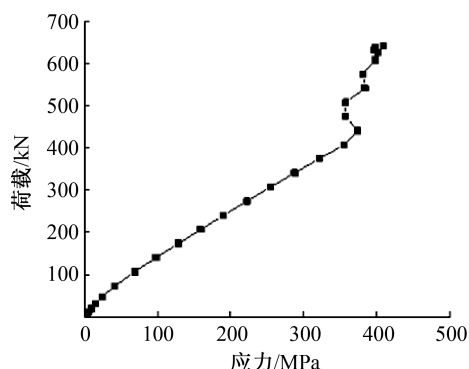


图 13 剪力连接件荷载-应力曲线

Fig. 13 Load-stress curve of shear connectors

PBL 剪力连接件在荷载作用下应力云图如图 14 所示。由图 14 可知,剪力连接件应力主要分布

在跨中段,剪力连接件两端应力很小。跨中段应力主要集中在连接件的底部,即连接件和波形钢板结合处。

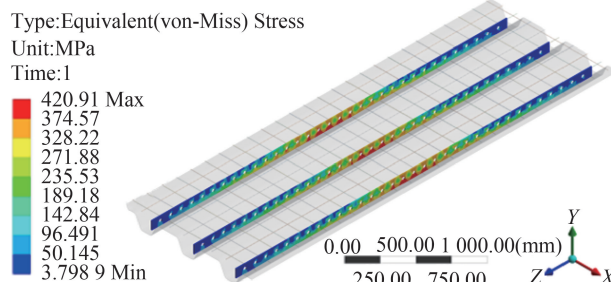


图 14 剪力连接件荷载-应力云图

Fig. 14 Load-stress cloud map of shear connectors

5 结论

本文在推出试验的基础上,结合有限元数值模拟,分析了带 PBL 剪力连接件的波形钢组合桥面板的受力性能,得到以下结论:

1) 推出试验结果表明,试件的破坏大致经历了弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段,试件的破坏形态为混凝土剪切破坏,且为延性破坏,破坏时试件出现多条竖向裂缝。

2) 贯穿钢筋对剪力连接件的抗剪性能有着重要的作用,承载力可提高约 73.8%,粘结摩擦力也可提高其承载力,但一般作为安全储备,计算时不考虑。贯穿钢筋和粘结摩擦力同样也可以提高连接件的极限滑移量。

3) 有限元数值模拟结果表明,5 m 跨径的波形钢组合桥面板极限承载力为 630 kN,桥面板在荷载作用下经历弹性阶段、裂缝发展阶段、屈服阶段、破坏阶段 4 个阶段。

4) 荷载达到 440 kN 时,组合桥面板进入屈服阶段,波形钢板的屈服位置发生在跨中波谷处;剪力连接件应力主要分布在跨中段,主要集中在连接件的底部。PBL 剪力连接件可以有效地将波形钢板和混凝土组合在一起。

参考文献:

- [1] ALVAREZ R F P, GUERRERO-MUÑOZ J, ALONSO-MARTINEZ M, et al. Bending and Shear Experimental Tests and Numerical Analysis of Composite Slabs Made up of Lightweight Concrete [J]. Journal of Engineering, 2016;1-10.
- [2] 贺小项,李帼昌,杨志坚,等.大跨度缩口型压型钢板-混凝土组合板纵向抗剪承载能力试验研究[J].工业

- 建筑,2019,49(5):159-165.
- [3] 胡 苏,苏庆田,吴 冲.正交异性钢-混凝土组合桥面板截面优化研究[J].结构工程师,2015,31(2):131-137.
- [4] KIM H Y, JEONG Y J. Steel-concrete Composite Bridge Deck Slab with Profiled Sheeting[J]. Journal of Constructional Steel Research,2009,65(8-9):1751-1762.
- [5] 郭 敏,张 静,任伟新.波形钢-混凝土组合桥面板受力性能研究[J].世界桥梁,2016,44(3):73-77.
- [6] 朱伟庆,崔 越,刘永健,等.开孔板连接件受剪承载力研究[J].建筑结构学报,2017,38(7):129-136.
- [7] KONG F L, HUANG P M, HAN B, et al. Experimental Study on Behavior of Borrugated Steel-concrete Composite Bridge Decks with MCL Shape Composite Dowels[J]. Engineering Structures,227(2021):111399.
- [8] 安 然,王有志,周 磊,等.剪力钉连接件拉剪复合作用试验及计算模型[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(3):42-52.
- [9] 孔凡磊,黄平明,梅葵花,等.改进螺旋线型组合销剪力连接件承载力试验研究[J].桥梁建设,2020,50(2):43-48.
- [10] 蒋洪波,邱洪兴,杨 原,等.钢-混凝土组合螺栓连接件极限强度及剪力-位移关系[J].东南大学学报:自然科学版,2020,50(1):56-63.
- [11] 苏庆田,田 乐,曾明根,等.正交异性折形钢板-混凝土组合桥面板基本性能研究[J].工程力学,2016,33(S1):138-142.
- [12] 张清华,程震宇,廖贵星,等.波形顶板-UHPC 组合桥面板优化设计[J].西南交通大学学报,2018,53(4):14-22.
- [13] 徐宙元,赵人达,牟廷敏.带开孔钢板剪力连接件的钢-混凝土组合桥面板受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(S1):382-388.
- [14] KIM H Y, JEONG Y J. Ultimate Strength of a Steel-Concrete Composite Bridge Deck Slab with Profiled Sheeting[J]. Engineering Structures, 2010, 32(2):534-546.
- [15] 王 涛,方淑君.PBL 剪力键静承载能力试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(6):1249-1254.
- [16] 杨梦月.波形顶板-UHPC 组合桥面板正弯矩作用下的受力性能研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- (责任编辑 王利君)

(上接第 63 页)

- [17] 张艳博,梁 鹏,孙 林,等.单轴压缩下饱水花岗岩破裂过程声发射频谱特征试验研究[J].岩土力学,2019,40(7):2497-2506.
- [18] 张艳博,于光远,田宝柱,等.花岗岩破裂过程声发射主频多元前兆信息识别[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):355-362.
- [19] 张艳博,梁 鹏,田宝柱,等.花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2248-2258.
- [20] 赵 奎,杨道学,曾 鹏,等.单轴压缩条件下花岗岩声信号频域特征分析[J].岩土工程学报,2020,42(12):2189-2197.
- [21] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Characterization of Strange Attractors[J]. Physical Review Letters, 1983, 50(5):346.
- [22] 张艳博,梁 鹏,孙 林,等.基于 HHT 的粉砂岩破裂声发射信号频率特性研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):179-184.
- (责任编辑 王利君)

(上接第 69 页)

- [9] 唐晨景,杨 贵,许建宝.玻璃球模拟堆石料强度和变形特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(6):861-865.
- [10] 孔德志,张丙印,孙 逊.人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(3):464-469.
- [11] 何森林,黄 昕,张子新.石膏试件的力学特性研究[J].地下空间与工程学报,2016(S1):7.
- [12] 杨 贵,许建宝,孙 欣,等.颗粒形状对人工模拟堆石料强度和变形特性影响的试验研究[J].岩土力学,2017,38(11):3113-3118+3153.
- [13] 周泳峰,王俊杰,王爱国,等.缩尺效应对堆石料颗粒破碎特性的影响[J].水电能源科学,2021,39(8):165-168+65.
- [14] 杨少博,邱珍锋,王爱国,等.考虑缩尺效应对颗粒破碎影响的堆石料临界状态研究[J].长江科学院院报,2022,39(2):122-128.
- [15] 魏 巍,姜程程,覃燕林,等.人工模拟堆石料颗粒破碎的分形特性[J].人民黄河,2014,36(12):126-129.
- (责任编辑 王利君)