

开孔钢板铰缝连接构造推出试验与数值模拟

赵 秋,陈美忠,陈孔生

(福州大学土木工程学院,福建 福州 350108)

摘 要 目的 针对公路空心板混凝土铰缝易损坏现象,提出了开孔钢板连接构造,从而解决混凝土铰缝破坏后单板受力的安全问题. 方法 通过铰缝结构的推出试验,并观察试件的破坏过程和破坏形态,分析开孔板铰缝连接构造的破坏机理;针对铰缝结构的抗剪性能,采用有限元与推出试验相结合的方法,对开孔板铰缝连接构造进行数值模拟. 结果 在试验荷载刚开始作用于试件时,由于本身静摩擦力存在,结合面未发生滑移;随着荷载增加,结合面内部开始产生微裂纹,并逐步形成较大裂缝,开孔板、贯穿钢筋、混凝土樁及铰缝结合面共同承受外荷载;铰缝结合面产生贯穿裂缝,界面剪力完全由开孔板、钢筋混凝土樁承担,直至完全破坏. 结论 推出试验荷载-滑移曲线及试件的破坏形态验证了数值模拟方法的正确性,可为进一步对该新型结构抗剪性能及计算方法研究提供依据.

关键词 空心板;推出试验;数值模拟;开孔钢板;抗剪承载力;铰缝

中图分类号 TU318;U442

文献标志码 A

The Push-out Experiment and Numerical Simulation Study on Perforated Steel Plate Connection Construction of Hinge Joint

ZHAO Qiu, CHEN Meizhong, CHEN Kongsheng

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, China, 350108)

Abstract: Set perforated steel plate in the original concrete hinge joints, rebar penetrate the hole similar to the method of mechanical hinge, so as to solve the safety problem of concrete hinge joints after single plate loading, and the push-out test and numerical simulation are carried out for the shear performance of the hinge joint structure. In view of the phenomenon of the damage of the concrete hollow slab concrete hinge joints, the test is carried out aiming at the hinge joint structure. The failure mechanism of the joint is analyzed by observing the failure process and failure mode. Finite element method is used for the numerical simulation of the joint test of the perforated plate joints. First stage, when the experimental load started acting on the specimen, there was no slip on

收稿日期:2016-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51478120)

作者简介:赵秋(1976—),男,副教授,主要从事桥梁工程研究.

interface because of static friction;second stage,with the increasing of load,the crack began to develop in the interior of the interface and gradually form a larger cracks,perforated steel plate、re-bar、concrete mortise and joint surface bear external load together;three stage,crack penetrate the hinge joint interface,the interface shear was entirely bored by perforated steel plate、reinforced concrete mortise,until completely destroyed. The validity of the numerical simulation method is verified by the load-slip curve and the failure mode of the specimen,which can provide a basis for further study on the shear performance and calculation method of the new structure.

Key words: hollow slabs; push-out experiment; numerical simulation; perforated steel plate; shear capacity; hinge joint

我国中小跨径桥梁广泛采用预制装配式混凝土空心板梁桥,中小桥占有桥梁总数的90.3%,而空心板桥又占绝大多数^[1]. 为了使装配式空心板组成整体共同承受车辆荷载,板块之间通过铰缝保证装配式空心板块之间横向连接的整体性. 由于铰缝本身构造上的缺陷,经常出现一些病害,铰缝病害发展到一定程度会导致单板受力现象单板受力危害很大,不但可以引起主梁病害,还可引起桥梁附属设施的病害,比如造成铺装层反射裂缝,形成桥面错台等,最终影响到桥梁的适用性和耐久性,甚至危及行车的安全. 因此,国家每年都不得不投入巨资对大量装配式板梁桥进行维修加固. 为了改善铰缝的受力情况,避免铰缝病害发生,林静^[2]在铰缝设置了一上一下相互错开的阻裂钢板提高铰缝的抗剪强度及结合面粘结强度,但同样没有从根本上解决问题. 在较大横向弯矩作用下,虽然铰缝横向抗弯能力得到加强能够满足要求,但预制板的横向抗弯能力就会变得比较突出,将成为主要矛盾. 笔者将原有的混凝土铰缝中增加开孔钢板,孔中贯穿钢筋,类似于机械铰,从而解决混凝土铰破坏后单板受力的安全问题,并针对于铰缝结构最为关心的抗剪性能进行推出试验和数值模拟研究,为该新型结构的推广提供参考.

1 开孔钢板铰缝连接构造提出

早期根据“铰接板法”假定,装配式板桥铰缝只传递剪力,铰缝尺寸做得比较小但在

车轮荷载作用下铰缝竖向抗剪能力不足,经过十余年的运营,小铰缝桥梁病害十分明显,单板受力特别严重. 从20世纪90年代开始,装配式板桥设计采用了单一的深铰缝构造^[3],注重通过铰缝钢筋的配置来改善铰缝的受力,但深铰缝往往就不符合铰接板梁法理论,将承受横向弯矩作用,但现有铰缝设计往往横向抗弯承载力不足^[4-7]. 笔者提出在空心板梁中按一定间距在横断面内连续预埋开孔钢板,在铰缝部分的钢板开一个圆孔,并在孔内贯穿钢筋,形成钢结构铰,从而提高铰缝的抗剪承载力,受力模式更加接近铰接板梁法基本假定,结构形式如图1所示. 预制板内钢板在满足受力要求情况下沿厚度方向开设有贯穿孔,从而保证了预制板混凝土的连通性,增加了预制板的整体性. 预制板内的纵向钢筋和预应力钢筋可以从孔中穿过,特别在钢横隔板的边缘处开设的缺口既方便钢筋安装又增强结构的整体性.

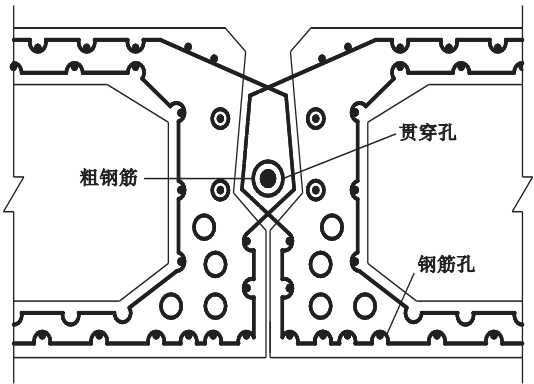


图1 钢横隔板布置图

Fig. 1 Layout of steel diaphragm plate

2 试件设计

空心板梁桥在建造过程中,空心板为预制,铰缝为现浇,空心板梁和铰缝混凝土存在龄期差,二者粘结关系属于新旧混凝土粘结关系^[8-9]. 该类型结构抗剪试验没有固定的构件形式. 铰缝推出试验的结果偏安全,且容易操作,受力较为明确,国外对于该类型结构抗剪性能研究,大部分也是采用推出试验形式^[10-14]. 试验试件主要可以分为两种:一种是类似 Z 字型的试验试件, A. H. Mattock^[11]的试验试件都属于这一类;另外一种为凸字形的试验试件,其余的试件形式都属于这一类^[12-14]. 对于第一种试件形式,由于其形状

相对于后者来说属于异型构件,从试件制作和加载容易程度来说,该类型试件相对后者比较麻烦. 另外,后者试件形式更接近于实际桥梁形式,因此,笔者采取第二种试件形式.

以《中华人民共和国交通部公路桥涵通用图》中 13 m 空心板为参考,将钢板开孔设置在板中心轴,并尽可能减小铰缝高度. 试验模型按 1:2 的比例进行缩尺,试验试件尺寸如图 2 所示. 为了避免误差对试验结果的影响,试件共制作 3 组. 试件高分别为 350 mm (中间混凝土预制块)和 400 mm (边混凝土预制块),横向宽 570 mm (平行于纸面的方向),纵向长度为 500 mm (垂直于纸面的方向).

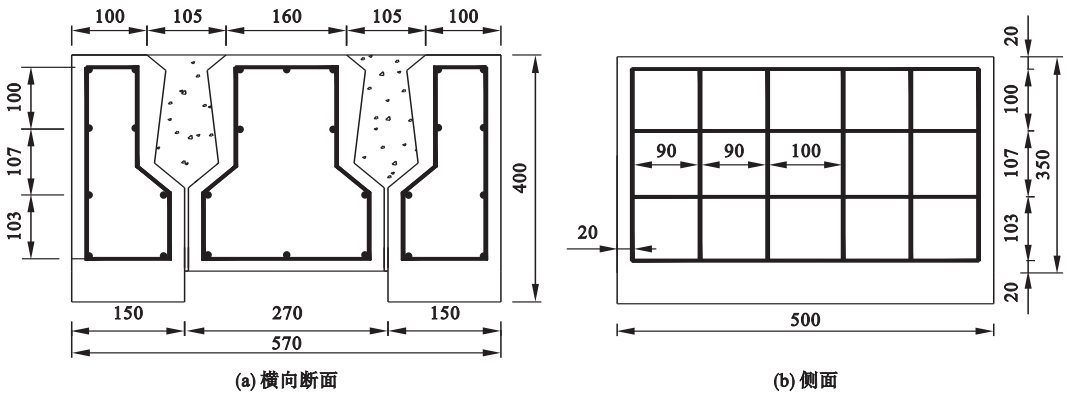


图 2 试验试件尺寸示意图

Fig. 2 Dimension sketch of experimental specimen

为了获得开孔钢板在铰缝处的抗剪承载力,试验试件排除了铰缝连接钢筋的影响. 图 3 为原构造,试验试件需去除标准图中剪刀筋

N1、门式钢筋 N2、接缝底部的连接钢筋 N3.

试件均采用相同的配筋率,箍筋和纵向钢筋根据整个界面的配筋率按比例进行缩尺. 原标准图中整个截面的配筋率为 0.52%,经缩尺后,纵向钢筋和箍筋所用钢筋直径均为 8 mm.

开孔钢板设置示意图如图 4 所示. 试件开孔钢板采用 Q345 钢材,厚度为 20 mm. 图 5 为开孔钢板图片,开孔 K₁ 设置在铰缝内,供贯穿粗钢筋形成机械铰用;开孔 K₂ 便于空心板内纵向钢筋的布置,也使得开孔钢板能与钢筋骨架连接成整体,保证钢横隔板与各自所在的混凝土预制块共同受力;开孔 K₃ 为了减小因设置钢板而对混凝土产生的隔断

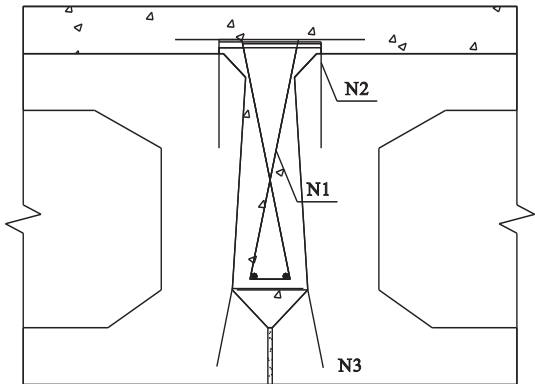


图 3 原铰缝钢筋示意图

Fig. 3 Rebar sketch of the original hinge joints

作用,混凝土在孔内连通,保证开孔钢板能与混凝土更好的组成共同受力整体。

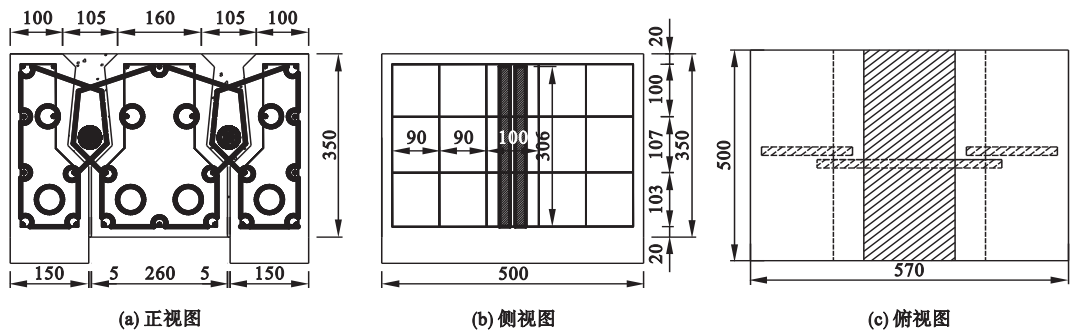


图 4 设置开孔钢板试件示意图

Fig. 4 Sketch of the specimen with perforated steel plate

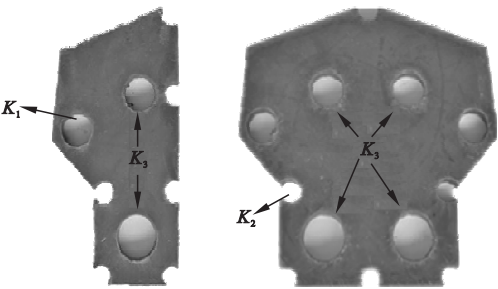


图 5 开孔钢板图片

Fig. 5 Picture of perforated steel plate

3 试件制作与加载方案

3.1 试件制作

试件浇筑前和成型后如图6所示。首先

加工开孔钢板(见图 5),将其与钢筋一同进行绑扎,并固定形成钢筋骨架之后进行模板支护、混凝土浇筑及养护,形成 3 块预制构件,最后进行铰缝周边混凝土凿毛、铰缝混凝土浇筑与养护。目前,对于结合面凿毛程度还没有明确规定,国外相关规范也仅要求对结合面进行简单的凿毛并清洗干净^[15]。根据文献[2]研究成果,结合面粗糙程度对结合面的粘结强度影响较大。笔者在混凝土预制块人工拆模后进行凿毛处理,使用灌沙法来测量试件混凝土预制块的结合面粗糙度,实测粗糙度为 2 mm 左右。



(a)浇筑前试件



(b)成型后试件

图 6 试件模型

Fig. 6 Experimental model

3.2 试验加载和测点布置

根据抗剪推出试验研究的目的,在试验过程中需要测得数据有:试件结合面开裂荷载值(或应变值)、裂缝发展历程、破坏形态、试件极限荷载、结合面应变值以及试件位移值。试件测点主要有应变测点和位移测点,测点布置如图

7 所示。试件表面的应变片是为了测得试件在结合面处拉应变和开裂应变,当跨过界面的应变片因为结合面的相对滑移导致断裂时,可得到对应的开裂荷载^[2],贴在结合面内表面的应变片可以测得铰缝界面相对剪切应变,位移计用于测量中间块与铰缝的相对位移。

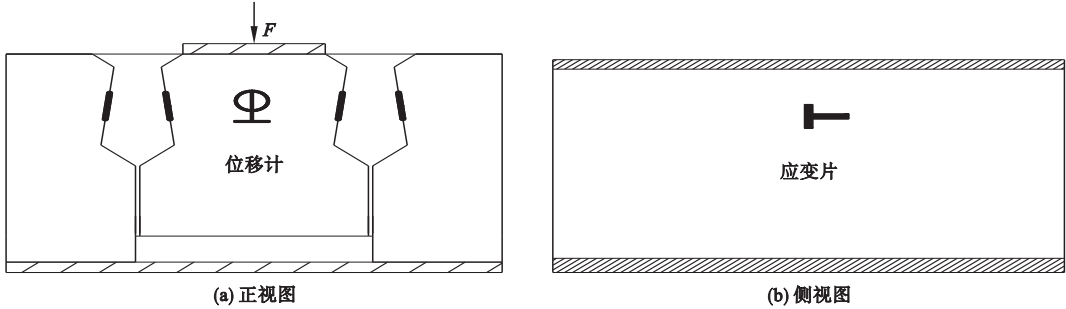


图 7 试件测点布置图

Fig. 7 Layout of the measure point in specimen

3.3 试验加载制度

采用油压千斤顶进行推出试验,单点集中加载方式如图 8 所示. 试验加载以 5 kN 递增或递减,且每次施加荷载稳定后恒定 3 min. 试验首先需要预加载,分级加载到 40% 预估极限荷载,以同样速度分级卸载,如此重复 2 次. 该阶段是为了检查仪表读数是否正常并调平,然后正式加载,加载至破坏第二个试件,预加载和正式加载的加载方案与第一个试件相同,不同的是预估极限荷载取第一个试件测得的极限荷载,第三个试件在第一个和第二个测得极限荷载基础上进行加载.

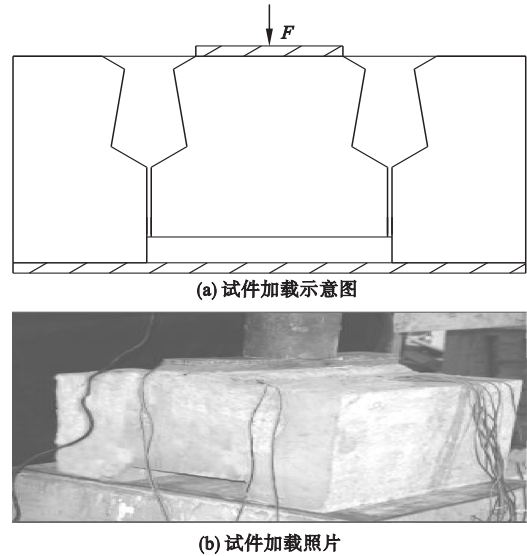


图 8 构件加载示意图

Fig. 8 Sketch map of component loading

4 试验现象与结果分析

4.1 试验现象分析

试件 LGG - 1 破坏形态如图 9 所示.

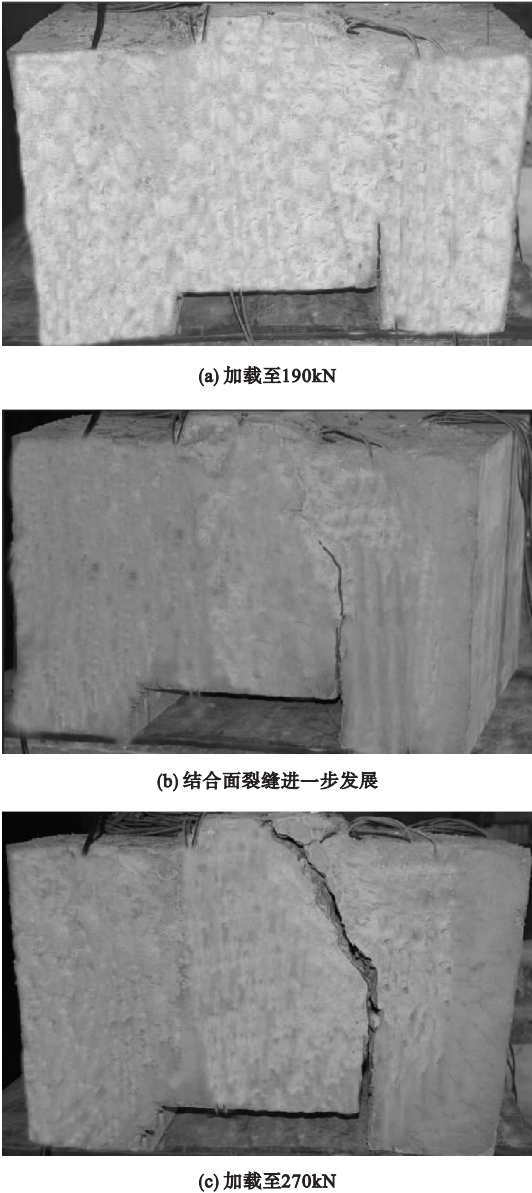


图 9 试件 LGG - 1 破坏形态

Fig. 9 The failure mode of specimen LGG-1

当加载到 175 kN 时,试件内部产生微裂纹而发出清晰的吱吱声;当试验荷载值为 190 kN 时,试件沿结合面产生明显裂缝(见图 9(a));随着试验荷载的继续增大,裂缝沿结合面逐渐向上发展(见图 9(b));当试验荷载为 270 kN 时,试件沿结合面产生贯穿整个结合面的通缝但试件未沿结合面分离,试件保持连接状态(见图 9(c)).

试件 LGG-2 破坏形态及结合面状态如图 10 所示.

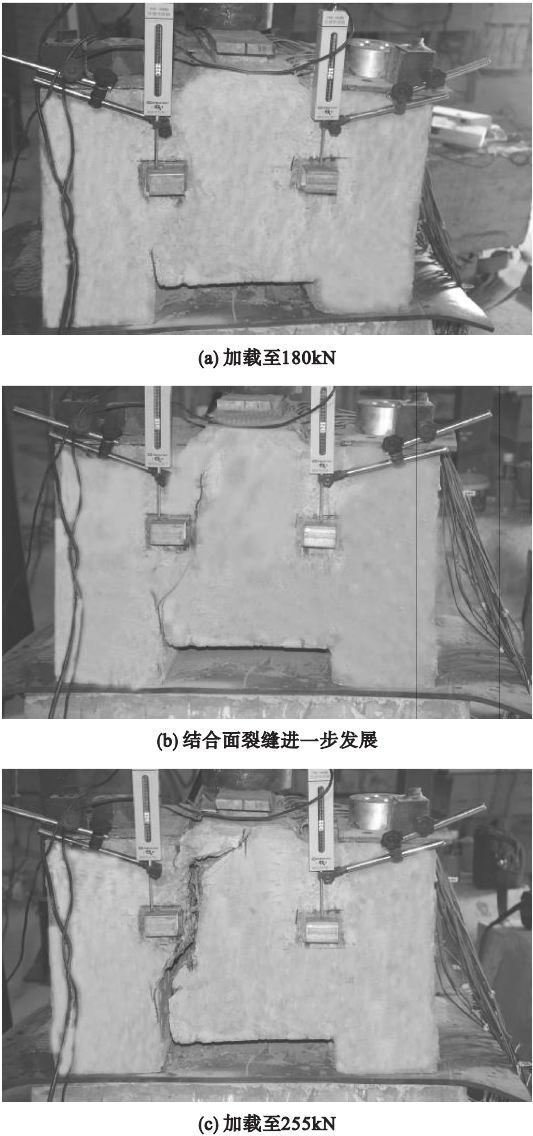
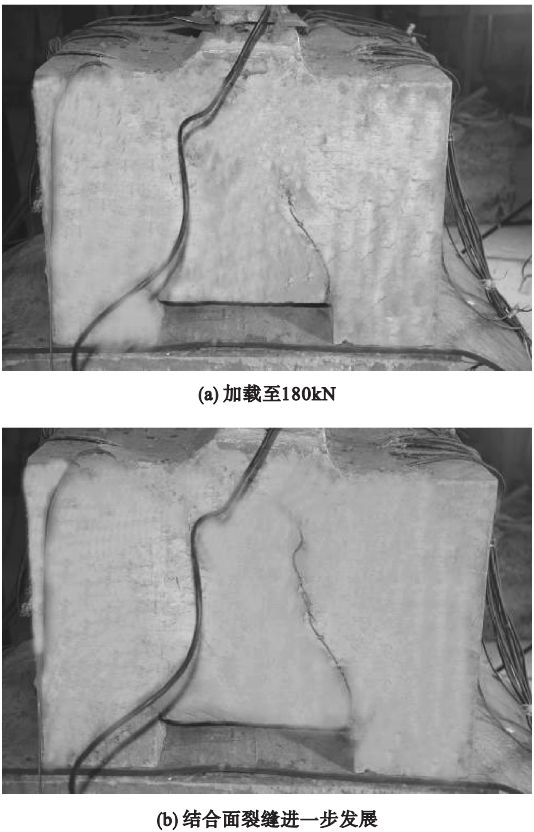


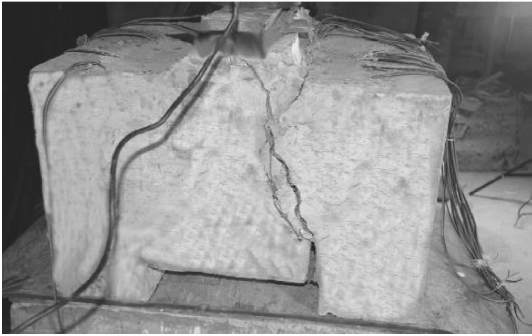
图 10 试件 LGG-2 破坏形态及结合面状态

Fig. 10 The failure mode and interface state of specimen LGG-2

试件试验荷载为 170 kN 时,试件内部产生微裂缝而发出清晰的吱吱声;当试验荷载值为 180 kN 时,试件沿结合面产生明显裂缝(见图 10(a));随着试验荷载的继续增大,裂缝沿结合面逐渐向上发展(见图 10(b));当试验荷载为 255 kN 时,试件沿结合面产生贯穿整个结合面的通缝,但试件未沿结合面分离成两个部分,试件保持连接状态(见图 10(c)).

试件 LGG-3 破坏形态及结合面状态如图 11 所示. 试验加载到 165 kN 时,试件内部产生微裂缝而发出清晰的吱吱声;当试验荷载值为 180 kN 时,试件沿结合面产生明显裂缝(见图 11(a));随着试验荷载的继续增大,裂缝沿结合面逐渐向上发展(见图 11(b));当试验荷载为 245 kN 时,试件沿结合面产生贯穿整个结合面的通缝,但试件未沿结合面分离,试件保持连接状态(见图 11(c)).





(c) 加载至245kN

图 11 试件 LGG-3 破坏形态及结合面状态

Fig. 11 The failure mode and interface state of specimen LGG-3

从图 9 图、图 10、图 11 可以看出,结合面破坏大致可以分为以下 3 个阶段:第一阶段,在试验荷载刚开始作用于试件时,由于本身静摩擦力存在,结合面未发生滑移;第二阶段,随着荷载增加,结合面内部开始产生微裂纹,并逐步形成较大裂缝,开孔板、开孔钢筋、混凝土樁及铰缝结合面共同承受外荷载;第三阶段,铰缝结合面产生贯穿裂缝,界面剪力完全由开孔板、钢筋混凝土樁承担,直至完全破坏。

4.2 结果分析

试验结果如表 1 所示,其中铰缝试验抗剪强度为试件极限荷载与铰缝结合面面积之比^[16]。

表 1 试件试验结果
Table 1 The test results

| 试件 | 开裂荷载/kN | 破坏荷载/kN | 开裂抗剪强度 σ_c /MPa | 破坏抗剪强度 σ_u /MPa |
|-------|---------|---------|------------------------|------------------------|
| LGG-1 | 190 | 270 | 0.950 | 1.350 |
| LGG-2 | 180 | 255 | 0.900 | 1.275 |
| LGG-3 | 180 | 245 | 0.900 | 1.225 |
| 均值 | 183 | 256 | 0.917 | 1.280 |

对于结合面粘结强度的评价,Huckelbridge 以空心板与铰缝相对位滑移值作为评价指标^[17]。叶见曙^[14]也以同样的方式测得了平均剪应力-滑移曲线($\tau-s$),其中平均剪应力是试验过程中的试验荷载除以铰缝结合面积。

平均剪应力-滑移($\tau-s$)曲线如图 12

所示。由上升直线段(弹性段)和上升的曲线段(弹塑性段)两段组成。弹性阶段滑移值较小,抗剪承载力增长较快。平均剪应力-滑移曲线线性变化当 τ 在 0.90~0.95 MPa 时,平均剪应力-滑移曲线出现了拐点,同时也是试验过程中结合面出现初始裂缝所对应的时间点。裂缝出现后,整个结构抗剪承载力增长速度放缓,滑移值开始快速增大直至结构破坏。

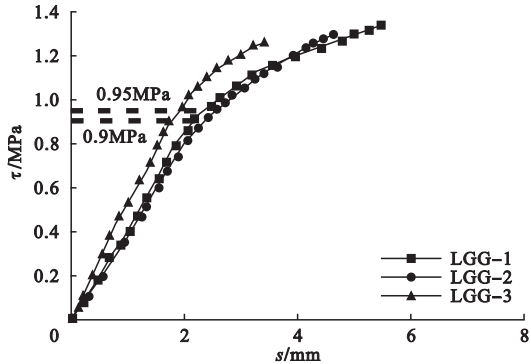


图 12 平均剪应力-滑移曲线

Fig. 12 The average shear stress-slip curves

5 数值模拟分析

5.1 ABAQUS 有限模型建立

选用合适的单元类型是有限元能否正确有效模拟实际模型的关键。单元类型的选用应该考虑单元的力学特性是否与实际构件受力性能相统一。如果能满足计算精度的要求,应尽量选择简单即低阶单元。按照文中数值模拟的需要,笔者选取八结点线性六面体缩减积分单元(C3D8R)模拟铰缝混凝土^[18]和开孔钢板,采用三维二节点桁架单元(T3D2)来模拟钢筋。

有限元程序对于混凝土力学性能的模拟主要是根据用户输入的混凝土本构关系来确定,因此,正确选用混凝土本构模型是数值模拟的重要一环。由于损伤塑性模型适用静力问题,且单项加载的收敛性好^[19-20],笔者选择损伤塑性模型开孔,钢横隔板其材性本构采用双折强化弹塑性模型,钢筋本构关系采用理想弹塑性模型。

有限元模型如图 13 所示. X 为沿试件横向宽度方向, Y 为沿试件高度方向, Z 为沿试件厚度方向;模型边界为简支约束,一端释放 Y 方向约束,一端固结.

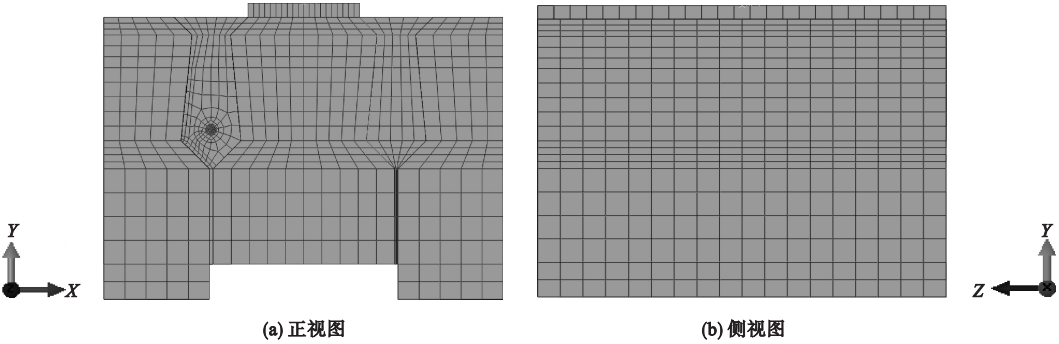


图 13 模型示意图
Fig. 13 Sketch of the model

5.2 有限模型验证

试验和有限元方法计算的抗剪强度滑移曲线比较如图 14 所示. 从图中可以看出,两

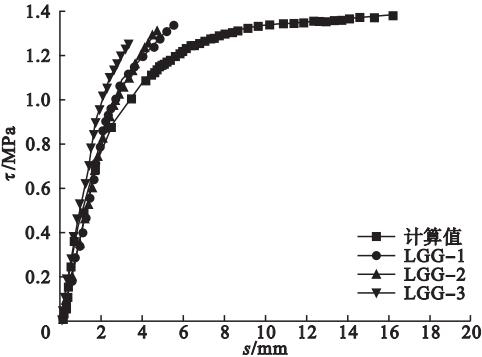


图 14 试验与有限元方法荷载-滑移曲线对比
Fig. 14 Comparison of load-slip curves between experiment and finite element method

曲线基本吻合. 试验承载力均值为 1.30 MPa, 有限元计算的承载力值为 1.32 MPa, 计算值与试验值偏差为 1.5%, 说明试验与有限元模拟所得试件抗剪承载力结果吻合度较好.

有限元和试验方法得到的试件破坏形态对比如图 15 所示. 从图中可以看到, 试验破坏形态与有限元计算结果一致, 破坏形态均为试件沿结合面破坏, 开孔钢板未脱离铰缝, 验证了有限元模拟的正确性.

通过数值模拟分析, 铰缝内贯穿钢筋在不同阶段的变形图如图 16 所示. 结合图 15 和图 16 可知, 结合面未分离时贯穿钢筋基本没有发生变形, 图 16(b) 说明当结合面未分离时, 主要是结合面间的粘结力承受外荷载

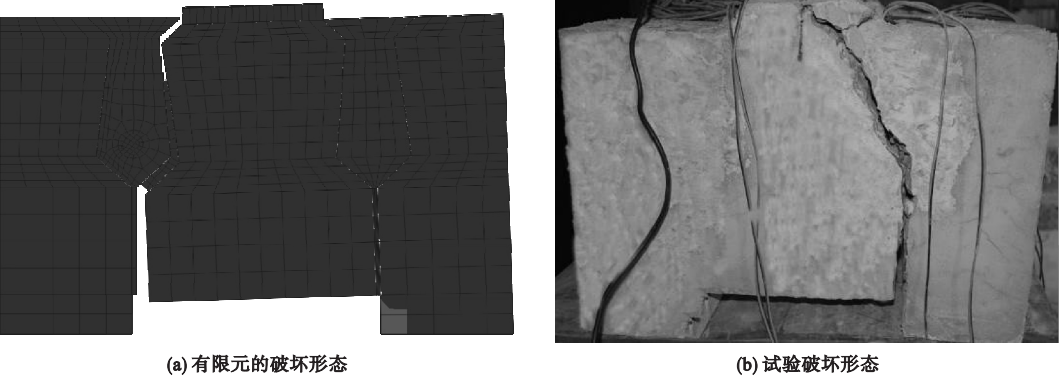


图 15 试验与有限元方法破坏形态对比

Fig. 15 Comparison of failure mode between experiment and finite element method

结合面发生较大相对滑移时, 贯穿钢筋发生了明显变形; 从图 16(c) 由此可知, 此时是由结合面粘结力、贯穿钢筋与开孔板三者共同受力, 与前文的试验现象相吻合.

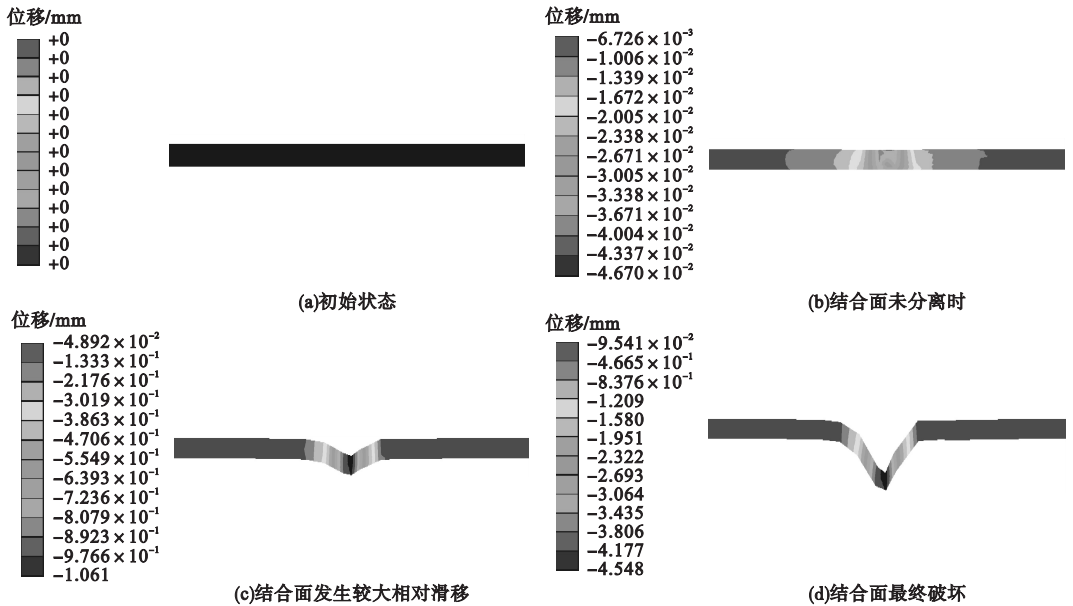


图 16 贯穿钢筋在不同阶段的变形图

Fig. 16 Deformation pattern of different stage for throughout rebar

6 结 论

(1)在空心板梁中按一定间距在横断面内连续预埋开孔钢板,并在铰缝部分的钢板开一个圆孔,然后在孔内贯穿钢筋,形成钢结构铰,从而提高铰缝的抗剪承载力,受力模式更加接近铰接板梁法基本假定。

(2)新型空心板铰缝连接构造推出试验在结合面破坏大致可分为 3 个阶段:在试验荷载刚开始作用于试件时,由于本身静摩擦力存在,结合面未发生滑移;随着荷载增加,结合面内部开始产生微裂纹,并逐步形成较大裂缝,开孔板、开孔钢筋、混凝土榫及铰缝结合面共同承受外荷载;铰缝结合面产生贯穿裂缝,界面剪力完全由开孔板、钢筋混凝土榫承担,直至完全破坏。

(3)通过对推出试验荷载 - 滑移曲线及试件的破坏形态验证了笔者采用的数值模拟方法的正确性,可为进一步对该新型结构抗剪性能及计算方法研究提供依据。

参考文献

[1] 杜红静. 装配式空心板桥横向加固结构分析

方法研究[D]. 西安:长安大学,2012.

(DU Hongjing. Study on structural analysis method of assembly hollow slab bridge with transverse strengthening [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.)

[2] 林静. 装配式板梁桥铰缝粘结抗剪性能研究 [D]. 合肥:安徽工业大学,2014.

(LIN Jing. Study on shear bonding behavior of hinge joint for fabricated plate girder bridge [D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2014.)

[3] 杨继新. 装配式空心板桥铰缝受力性能研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2009.

(YANG Jixin. Study on mechanical properties of fabricated hollow slab bridge hinge joints under the load [D]. Huhehaote: Inner Mongolia University of Technology, 2009.)

[4] 董海航. 装配式板桥铰缝受力机理与耐用性能研究 [D]. 西安:长安大学,2010.

(DONG Haihang. Study on force mechanism and durability of fabrication slab bridge hinge joint [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.)

[5] 季秋成. 空心板铰缝破坏机理及防治措施研究 [D]. 西安:长安大学,2010.

(JI Qiucheng. Study by failure mechanism and controlling measures of reinforced concrete hollow plank hinged joints [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.)

[6] 王渠, 吴庆雄, 陈宝春. 装配式空心板桥铰缝破坏模式试验研究 [J]. 工程力学, 2014

- (31):115-120.
(WANG Qu, WU Qingxiong, CHEN Bao-chun. Experimental study on failure mode of hinged joint in assembly voided slab bridge [J]. Engineering mechanics, 2014 (31):115-120.)
- [7] 乔学礼. 空心板铰缝破坏机理及防治措施研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
(QIAO Xueli. Study on hinged joint destruct reasons of hollow plank girder bridge and the preventable measures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.)
- [8] 于春江, 俞博, 王文刚, 等. 采用自密实混凝土铰缝的空心板桥应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010(8):15-17.
(YU Chunjiang, YU Bo, WANG Wengang, et al. Application research of hollow slab bridge using self-compaction concrete hinge joints [J]. Journal of highway and transportation research and development (application technology), 2010(8):15-17.)
- [9] 韩相东. 空心板铰接形式的对比分析及其应用[D]. 西安:长安大学, 2010.
(HAN Xiangdong. Analyze, comparison and application on the hinged joint forms of hollow plank girder bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.)
- [10] 李平先, 张雷顺, 赵国藩, 等. 新老混凝土粘结面的抗冻剪切性能试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(3):339-344.
(LI Pingxian, ZHANG Leishun, ZHAO Guofan, et al. Experimental study on influence of cyclic freeze-thaw on shear strength of bonding interface between fresh and old concrete [J]. Journal of hydraulic engineering, 2005, 36(3):339-344.)
- [11] MATTOCK A H, HAWKIN S. Shear transfer in reinforced concrete-recent research [J]. PCI journal, 1972, 17(2):55-75.
- [12] ANNAMALAIG B. Shear strength of post-tensioned grouted keyed connections [J]. PCI journal, 1990, 35(3):64-73.
- [13] GASTON J R, KRIZ L B. Connections in precast concrete structures-scarf joints [J]. PCI journal, 1964, 9(3):37-59.
- [14] 叶见曙, 刘九生, 俞博. 空心板混凝土铰缝抗剪性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2013 (6):33-39.
(YE Jianshu, LIU Jiusheng, YU Bo. Experiment on shear property of hinge joints of concrete hollow slab [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2013 (6):33-39.)
- [15] DBRQOS M. Behaviour of thin-walled steel box sections with or without internal restraint [J]. Journal of constructional steel research, 1998:47 (1):73-91.
- [16] 张婷. 混凝土空心反铰缝病害及防治措施研究[D]. 南京:东南大学, 2011.
(ZHANG Ting. Study on shear key diseases of precast concrete slab and preventive measures [D]. Nanjing: Southeast University, 2011.)
- [17] HUCKELBRIDGE J. Hassan El-Esnawi FM shear key performance in multi beam box girder Bridges [J]. Journal of performance of constructed facilities 1995(4):271-285.
- [18] 彭小婕, 于安林, 方有珍. 混凝土损伤塑性模型的参数分析 [J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2010, 23(3):40-43.
(PENG Xiaojie, YU Anlin, FANG Youzhen. An analysis on parameter for concrete damage plasticity model [J]. Journal of Suzhou university of science and technology (engineering and technology), 2010, 23(3):40-43.)
- [19] 方秦, 还毅, 张亚栋, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型的静力性能分析 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(3):254-260.
(FANG Qin, HUAN Yi, ZHANG Yadong, et al. Investigation into static properties of damages plasticity model for concrete in ABAQUS [J]. Journal of PLA university of science and technology, 2007, 8(3):254-260.)
- [20] 尧国皇, 黄用军, 宋宝东, 等. 采用塑性损伤模型分析钢-混凝土组合构件的静力性能 [J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(3):12-18.
(YAO Guohuang, HUANG Yongjun, SONG Baodong, et al. Analysis for static behavior of steel and concrete composite members with plastic-damage model [J]. Progress in steel building structures, 2009, 11(3):12-18.)