

预制拼装混凝土节段梁弯剪性能研究

李 鹏^{1,2}, 赵海川^{1,2}

[1. 锡澄中车(无锡)城市轨道交通工程有限公司, 江苏 无锡 214400; 2. 江苏中车城市发展有限公司, 江苏 无锡 214000]

摘 要: 为明确预制拼装节段梁的弯剪性能和传力机理,通过建立相应的非线性有限元模型并结合实验数据进行验证,分析了不同构造参数对节段梁剪力键接缝弯剪性能的影响。研究表明:剪力键的布置位置和剪力键键块深度对节段梁抵抗弯剪荷载的性能具有显著影响;键齿位于梁截面中部的剪力键能更有效地传递剪力,提高整体承载能力;布置在较长节段上的剪力键承载能力和延性均优于布置在短节段上;剪力键键块深度增加可提高结构抗弯剪性能,但提升效果在剪力键键块深度为键高0.4倍时趋于饱和,过深反而可能增加加工难度和局部压碎风险。建议在设计中取剪力键键块深度为键高的0.4倍,以兼顾节段梁的承载性能和施工可行性。

关键词: 预制拼装节段梁;弯剪性能;桥梁工程;非线性有限元分析;剪力键接缝

中图分类号: U441;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0090-06

Research on Flexural Shear Performance of Prefabricated Concrete Segmental Beams

LI Peng^{1,2}, ZHAO Haichuan^{1,2}

[1. Xicheng-CRRC (Wuxi) Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd., Wuxi 214400, China; 2. Jiangsu CRRC Urban Development Co., Ltd., Wuxi 214000, China]

Abstract: To elucidate the flexural shear performance and load-transfer mechanism of prefabricated segmental beams, by establishing nonlinear finite-element models and verifying them with the experimental data, the influence of different construction parameters on the flexural shear performance of shear key joints in segmented beams is analyzed. The results indicate that the layout position of shear key and the block depth of shear key have a significant impact on the performance of segmented beams in resisting flexural shear loads. The shear keys with key teeth located in the middle of the beam section can more effectively transfer shear force and enhance the overall load-bearing capacity. The load-bearing capacity and ductility of shear keys arranged in longer segments are both superior to those arranged in shorter segments. Increasing the depth of shear key block can improve flexural shear performance of structure, but the enhancement effect tends to saturate when the depth of the shear bond block is 0.4 times the key height. The excessive depth may increase the processing difficulty and the local crushing risk. It is recommended that in the design, the depth of the shear key block be 0.4 times the key height to take into account both the load-bearing performance and the construction feasibility of the segmented beam.

Keywords: prefabricated segmented beam; flexural shear performance; bridge engineering; nonlinear finite element analysis; shear key joints

0 引言

预制拼装节段梁是指桥梁主梁沿纵向分成的多个节段。节段梁由工厂匹配预制,养护完成后再通过张拉预应力筋将其组装成完整的桥梁结构。随着现代桥梁工程的快速发展,预制拼装技术通过工厂化生产、现场拼装的方式在提高施工效率、降低成

本,减少对环境 and 交通影响等方面具有显著优势,从而受到广泛关注。预制拼装节段梁在跨海桥梁、河谷桥梁及城市高架桥等桥梁建设中优势明显,是桥梁产业化发展的重要方向。

然而,预制拼装节段梁作为桥梁结构的重要组成部分,节段间的接缝处理是关乎结构整体性能的关键技术难题,尤其对结构抵抗弯矩和剪力耦合荷载的性能有着不可忽视的影响,直接关系到桥梁的安全性和耐久性。深入研究预制拼装节段梁的抗弯剪性能,对于提高桥梁结构的可靠性和延长其使用

收稿日期: 2025-10-07

作者简介: 李鹏(1988—),男,硕士,高级工程师,从事轨道交通工程建设管理及技术研究工作。

寿命有着重要意义^[1]。

国内外学者已对预制拼装节段梁进行了大量研究。Li 等^[2]对 9 个预制混凝土节段梁试件进行了实验研究。结果显示,牛腿接头能有效阻止裂缝完全张开,承载力和延性均优于传统直缝接头,能够可靠传递剪力。Jiang 等^[3]对节段梁和整体梁的样本进行了 4 点弯曲试验。结果表明:节段梁在极限状态下的钢束应力均超过 1 500 MPa;全节段梁的抗弯强度比整体梁低 30% 左右,但延性表现良好。李立峰等^[4]对整体梁和 3 根体外预应力超高性能混凝土(UHPC)节段梁进行了 4 点弯曲试验。结果表明:胶接缝 UHPC 梁的破坏主要由胶层控制。Duan 等^[5]对包括 2 种接缝的节段梁、2 种传统节段梁和 1 根整体梁进行了 4 点弯曲试验。结果表明:传统节段梁的接头是薄弱环节,而贯通钢筋显著提高了裂缝抵抗力和极限承载力,接近甚至优于整体梁。Hu 等^[6]对 8 个体外预应力预制混凝土节段梁进行了剪切试验。结果表明:其破坏过程表现为剪压区混凝土压碎、外置钢束收缩、梁段沿斜裂缝滑移并导致箍筋断裂,提出的桁架-拉杆模型能够较好地预测节段梁的抗剪承载力。Zheng 等^[7-8]对预制拼装混凝土节段梁进行了抗弯性能试验。结果显示:节段梁的抗弯承载力比整体梁低 9%~15%,拼缝形式对其抗弯性能有着显著影响,双齿拼缝比单齿拼缝低 4.5%,平缝比双齿拼缝低 5.7%。Chen 等^[9]对 2 个预应力超高性能混凝土节段梁和传统混凝土节段梁进行了抗弯试验,发现 2

种梁在加载全过程中表现相似,干接缝主要影响开裂后的刚度下降,但对极限承载力影响不大。

综上所述,尽管已有研究为预制拼装混凝土节段梁抗弯或抗剪性能提供了宝贵的经验和数据,但对预制装配式混凝土节段梁的弯剪耦合性能研究相对较少。此外,剪力键作为节段接缝的关键受力构造,其几何尺寸和布置直接决定了节段梁的弯剪承载能力和变形特征。然而既有研究多集中于剪力键数量和接缝类型,对齿形尺寸及其在梁截面中布置位置的影响关注不足。因此,为明确预制拼装混凝土节段梁的弯剪性能和传力机理,本文采用 ABAQUS 软件,建立了预制拼装混凝土节段梁的干接缝模型,再对通过试验数据验证的模型进行剪力键布置位置、所在节段及其深度的参数分析研究,以期对预制拼装混凝土节段梁的优化设计和规范修订提供理论依据。

1 非线性有限元模型

本文采用 ABAQUS 软件来模拟预制拼装混凝土节段梁的弯剪破坏过程。采用的试验数据均来自于文献[1]中已完成的预制拼装混凝土节段梁桥模型试验,分段梁横截面为 T 形单片梁,其 T 形截面高度为 0.4 m,宽度为 0.6 m,长度为 3.5 m;试件腹板和顶翼缘的厚度分别为 0.11、0.06 m。节段梁具有互锁的干接缝,每个接缝处有 3 个高度为 0.50 m、宽度为 0.2 m 的键齿。试验梁模型尺寸图见图 1。

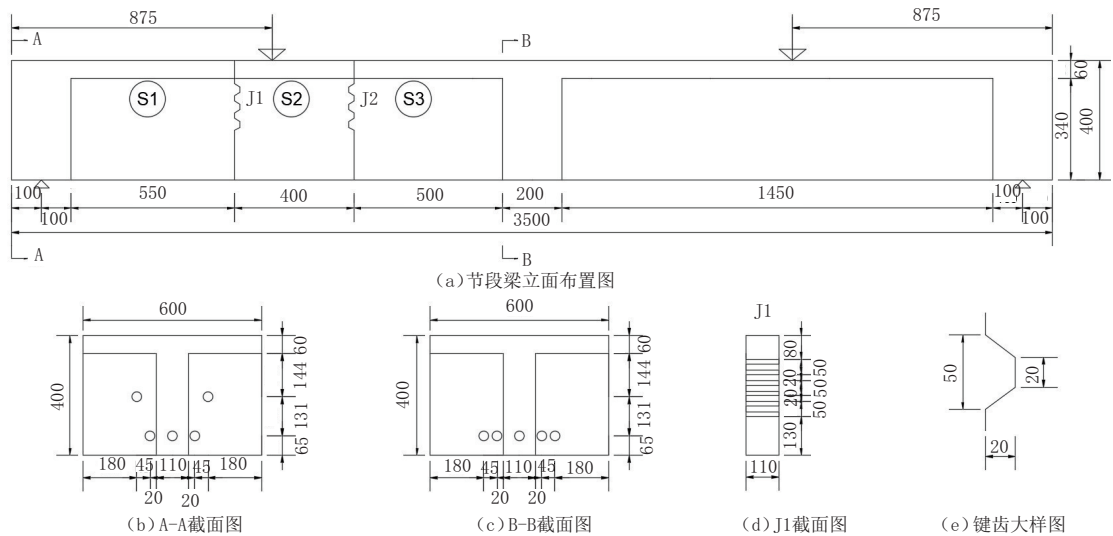


图 1 试验梁模型尺寸图^[1](单位:mm)

1.1 单元类型、接触方式和边界条件

预制拼装节段梁梁体混凝土、垫块和加载板采用三维八节点线性减缩积分单元 C3D8R 模拟,其有

限元模型见图 2;网格划分见图 3。普通钢筋和预应力钢筋采用三维二节点桁架单元(T3D2)模拟;节段梁混凝土、接缝处和普通钢筋实体单元大小设为

30 mm。有限元模型共计 17 677 个单元,其中 C3D8R 类型网格共 14 000 个,T3D2 类型网格共 3 677 个。

在加载板的上表面中心位置设置参考点(RP),并将参考点与加载板进行耦合连接(Coupling);加载板与节段梁表面之间采取绑定(Tie)连接,节段梁接缝处、键块与键槽之间的接触采取干接缝。对于干接缝的接触需要分别考虑切向行为和法向行为。其中法向行为采取硬接触来处理;切向行为采用 Coulomb 接触摩擦模型中的罚函数模拟,该模型的特点是:当剪应力未达到临界剪应力 T_c 前被允许在接触面之间传递,达到临界值后,剪应力保持恒定,接触面之间产生相对滑动,摩擦系数 μ 取 0.6。

根据试验模型采用简支梁边界条件,节段梁下部左右对称设置 2 个垫块,与节段梁下部表面采用绑定操作,边界条件设置在垫块中心线处,约束有限元模型固定铰支座位置处竖向、纵桥向和横桥向 3 个方向的平动自由度,以及滑动铰支座位置处竖向和横桥向平动自由度^[10]。

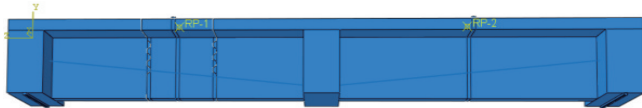


图2 有限元模型

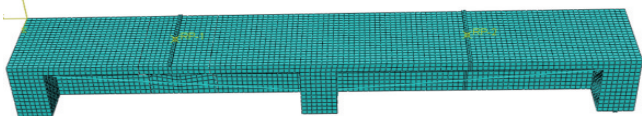
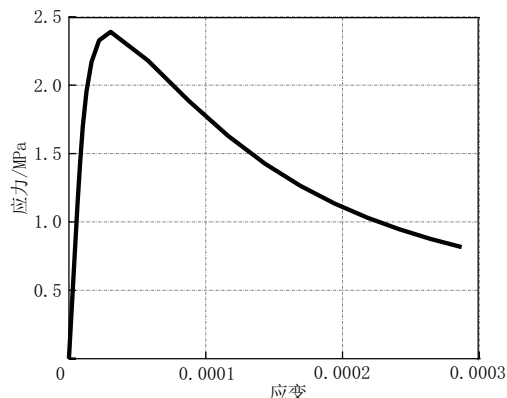


图3 有限元网格划分

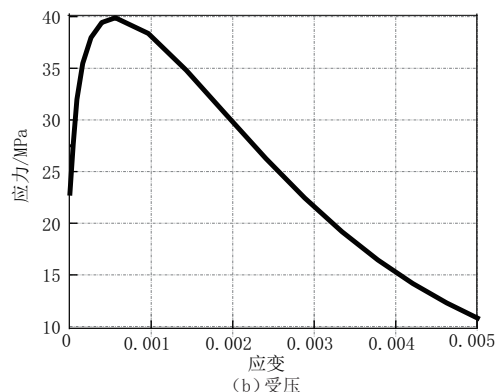
1.2 材料本构关系

本文模拟中所采用的车辆荷载形式是静力单调荷载,因此混凝土未考虑循环荷载作用下损伤演化的影响,而是采用不考虑损伤因子的塑性损伤模型,即对于混凝土的拉裂破坏,当混凝土的断裂能达到限定值时,混凝土随即开裂、退出工作。普通混凝土在单轴荷载作用下的应力-应变关系采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中建议公式计算,所得曲线如图4所示。

有限元模型中混凝土采用 C40,其轴心抗压强度为 52.5 MPa,弹性模量为 32.5 GPa,泊松比为 0.2。钢筋和钢板本构关系均采用理想弹塑性模型,符合试验需求。预应力钢筋的弹性模量为 195 GPa,普通钢筋的弹性模量分别为 210、200 GPa。垫块和加载板的弹性模量为 2.1 GPa,泊松比均为 0.3;预应力钢绞线的屈服应力为 1 860 MPa。



(a) 受拉



(b) 受压

图4 单轴状态下混凝土应力-应变曲线

1.3 预应力钢筋建立

预应力钢筋在整个节段梁的加载试验中起着至关重要的作用。试验中预应力钢筋分为 1 根体外预应力钢筋和 1 根体内预应力钢筋,钢筋部件采用三维平面可变形的线体,钢筋的应力-应变关系假定为在拉伸和压缩下均为理想弹塑性,忽略外部钢筋和转向器之间的摩擦。预应力钢筋端部与混凝土表面接触处采用点与面的绑定操作,且混凝土表面作为主表面,钢筋节点作为从属节点。同时采用初定义预应力场的方法完成对钢筋预应力的施加,外部和内部钢筋的预应力控制应力为 f_k ,其中 f_k 被假设为 1 860 MPa,张拉控制应力取 $0.5f_k$,因此,在施加预应力时 ABAQUS 中预应力场的 sigma11(沿钢筋轴向方向的正应力)大小为 930 MPa,其余为 0 MPa。

2 模型正确性验证

2.1 节段梁整体挠度-荷载曲线

根据文献[1]的实验描述,在 2 个加载板上施加竖直向下的均布荷载。本文模型计算结果与文献[1]中试验梁在不同大小荷载作用下梁的挠度-荷载曲线结果对比见图 5。由图 5 可见,模型模拟曲线与试验曲线吻合程度良好,模拟结果与试验结果吻合良好,说明本文提出的带有剪力键干接缝的节段梁

三维精细有限元模型能够很好地预测节段梁缩尺模型在荷载作用下的挠度曲线。

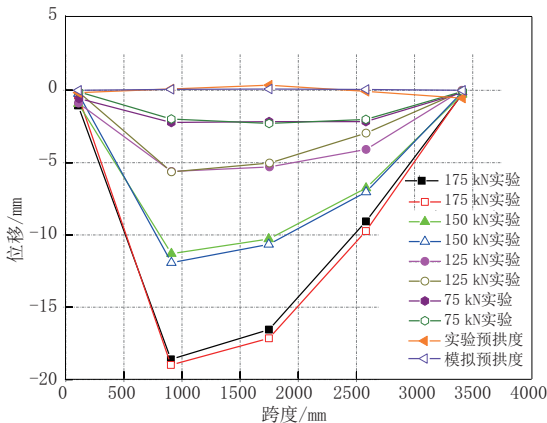


图5 节段梁整体挠度-荷载曲线

2.2 加载点处荷载-位移曲线

本文模型计算结果与文献[1]中试验梁在荷载作用下加载点处的荷载-位移曲线结果对比见图6。

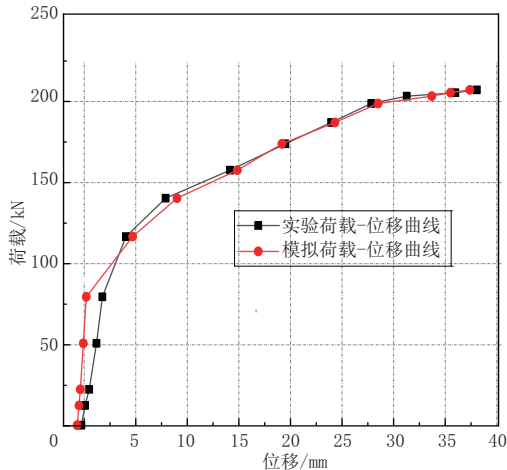


图6 加载点处节段梁的荷载-位移曲线

模型中由于预应力钢筋的张拉,节段梁上部有一定预拱度,因此曲线的起点不在零点。由图6可知,在未加载时,模拟节段梁加载点处的预拱度大于试验梁。这是因为在实际施工中,预应力筋的张拉控制与模拟中的理想状态有所差异。例如,张拉过程中的摩擦损失、预应力筋的松弛和徐变等会导致节段梁的实际预拱度小于模拟结果。加载初期模拟节段梁的位移随着荷载的增大,增幅小于试验梁,分析原因可能是模型建立时未考虑体外预应力筋在转向块位置处的滑移,从而导致试验节段梁的位移增量在初期略大于模拟节段梁。总体来看模拟曲线与试验曲线吻合良好,说明本文建立的节段梁三维精细有限元模型能很好地预测节段梁缩尺模型在荷载作用下的位移曲线^[11]。

2.3 破坏模式

根据文献[1]的试验结果和本文的数值模拟结

果,对模型预测的试件破坏模式准确性进行验证,并分析节段梁剪力键接缝试件在弯剪荷载组合效应下不同阶段典型的变形和破坏情况。

试验节段梁破坏情况与模型节段梁的破坏模式对比见图7。

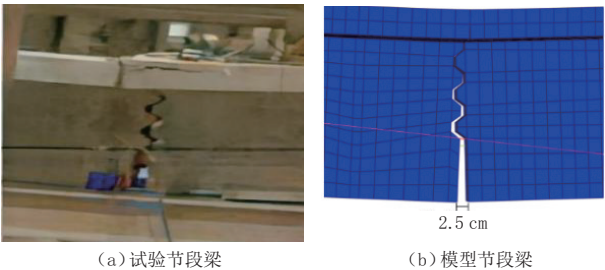


图7 试验节段梁与模型节段梁的破坏模式对比

由图7可知:当加载到峰值荷载的38%时,节段梁剪力键接缝处开始出现张开现象,且由最底部开始向上发展,张开宽度十分微小;加载到峰值荷载时,节段梁剪力键接缝处已发生较大张开,其宽度已达2.5 cm。模型节段梁的弯剪破坏过程和最终的破坏特征与文献[1]的试验结果吻合良好。

3 构造参数分析

在上述有限元模型基础上,本文开展了一系列数值参数化分析。模型包含2个分别在纯弯荷载作用下和弯剪荷载共同作用下的不同类型接缝。而本文的侧重点在于通过一系列的数值参数分析,来研究不同构造形式对于节段梁剪力键接缝处抗弯剪性能的影响^[11],因此忽略模型纯弯段的接缝而着重研究位于弯剪区的接缝。研究参数包括:当键块位于节段梁横截面上不同高度时的影响、当键块位于不同长短节段上时的影响、键块深度的影响。

3.1 键块竖向位置

为了研究键块在梁截面不同高度位置对节段梁剪力键接缝处抵抗弯剪能力的影响,共设计了3种剪力键布置形式,包括单个键块位于距梁截面底部3/4、1/2、1/4梁高。

剪力键在梁横截面不同位置的布置形式见图8;不同布置形式剪力键在梁接缝处的应力云图见图9。

3.2 键块纵桥向位置

为了研究键块位于不同长短节段时对剪力键接缝处抗弯剪能力的影响,分别建立键块位于靠近支座的短节段、位于远离支座的长节段时,接缝处带剪力键的节段梁模型^[12]。

剪力键位于不同长短节段时的示意图见图10。

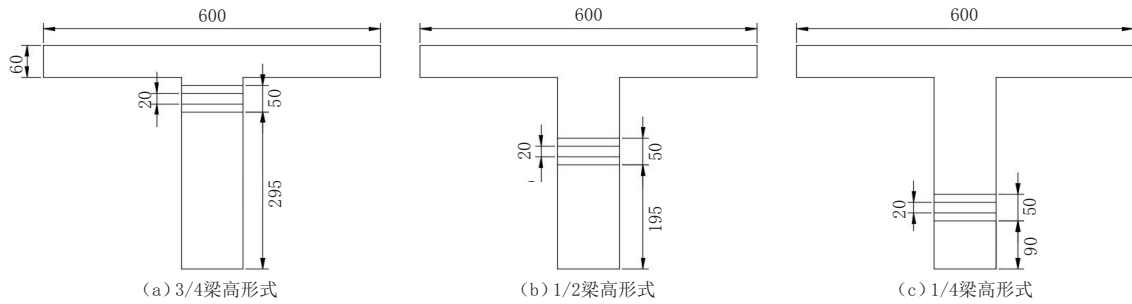


图8 剪力键在梁横截面不同位置的布置形式(单位:mm)

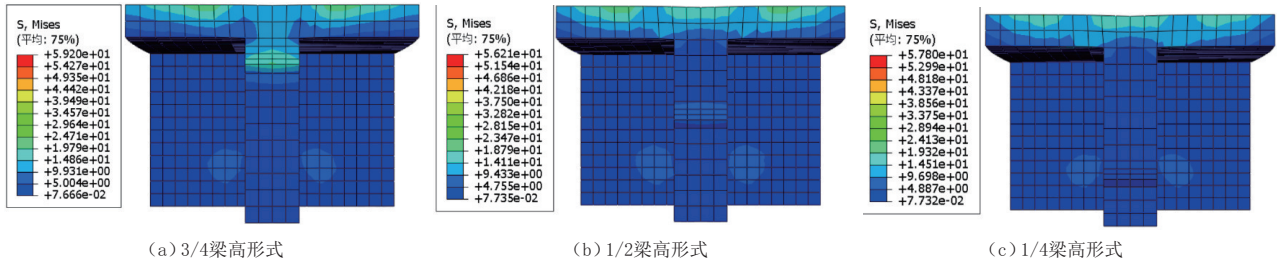


图9 不同布置形式剪力键在梁接缝处的应力云图(单位:MPa)

整段梁接缝均处在荷载作用下,键块位于不同长短节段时的梁裂缝宽度-位移曲线见图11。

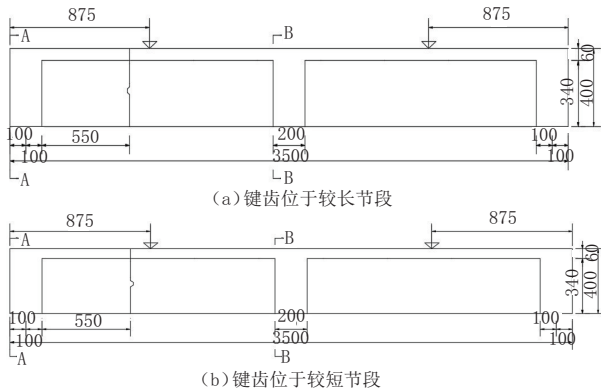


图10 剪力键位于不同长短节段时的示意图(单位:mm)

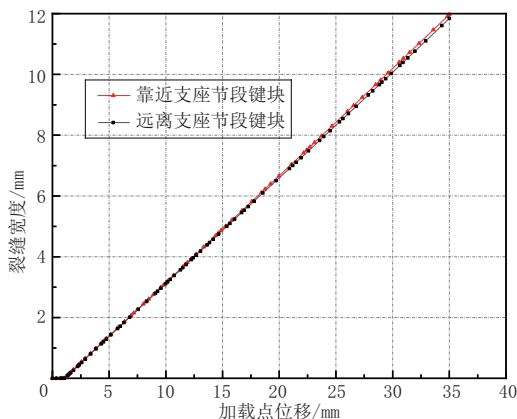


图11 键块位于不同长短节段时的梁裂缝宽度-位移曲线

由图11可知,同一接缝处的剪力键位于不同长短节段时对于接缝在弯剪组合荷载作用下的裂缝宽度开展情况影响不大,键块位于较长节段时,对裂缝的展开有轻微的削弱作用。

图12所示为剪力键位于不同长短节段加载点处

时,节段梁的荷载-位移曲线。

由图12可知,当剪力键分别位于2个节段时,在位移施加的初始阶段,其荷载增加速度的区别较小^[13];然而随着位移的持续施加,位于远离支座节段上的剪力键承载力逐渐高于位于靠近支座节段上的剪力键,说明其抵抗弯剪荷载的能力更强。在达到峰值荷载后,曲线显示出反力的下降,这表明材料开始屈服并进入软化阶段,并且尽管峰值承载力存在差异,但2种配置下试件在屈服后表现出了相似的软化特性和脆性特征。下降段的平行趋势反映了二者在材料损伤累积和破坏模式上具有一致性,脆性特征未见显著区别。

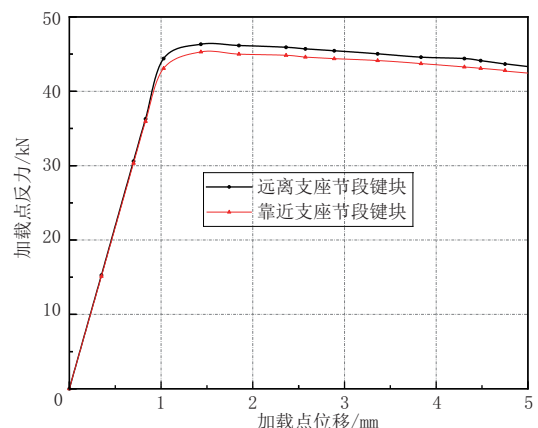


图12 键块位于不同长短节段加载点处的节段梁荷载-位移曲线

剪力键位于不同长短节段上的应力云图见图13。由图13可知,位于较长节段梁上的剪力键主应力大于位于较短节段上的剪力键主应力,且更集中于剪力键的下部。因此,在不影响装配和施工的情况下,建议在较长节段上布置键块而在较短节段上

布置键槽^[14]。

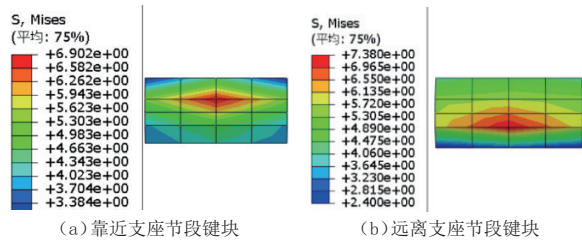


图 13 剪力键位于不同长短节段上的应力云图(单位:MPa)

3.3 剪力键键块深度

剪力键三视图见图 14。其中剪力键键块长度固定为 110 mm;高度固定为从 50 mm 渐变至 20 mm; a 为剪力键键块深度。为了研究剪力键键块深度对剪力键接缝处抗弯剪性能的影响,共设计了 5 种剪力键键块深度,单个键深 a 分别取 10、15、20、30、50 mm。

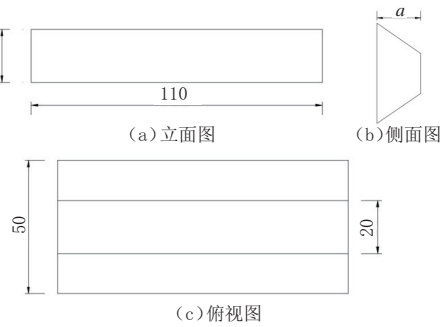


图 14 剪力键三视图(单位:mm)

不同深度键块放在相同节段上的相同位置处。

不同键深对节段梁剪力键接缝处的裂缝展开影响模拟结果见图 15。

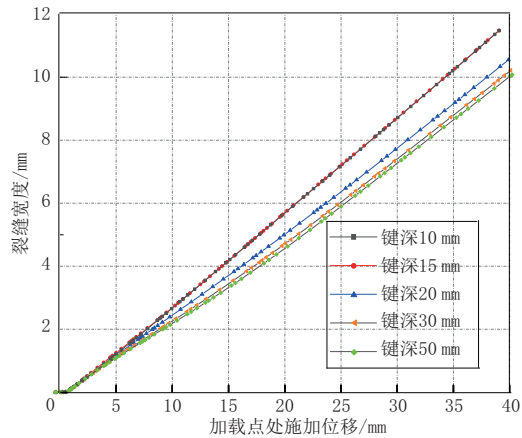


图 15 不同键深下节段梁剪力键接缝处的裂缝宽度-位移曲线

由图 15 可知,在位移加载的初始阶段,裂缝的开展速度相差不大,但随着荷载的进一步施加,不同键深对裂缝展开的影响逐渐有所区别。节段梁剪力键接缝在弯剪组合荷载作用下的裂缝宽度随着键深的增加而逐渐减小^[15],且在键深小于 20 mm 时这一影响较显著;但随着键深的进一步增加,这一影响逐渐微小。

不同键深下节段梁剪力键接缝处的荷载-位移曲线见图 16。

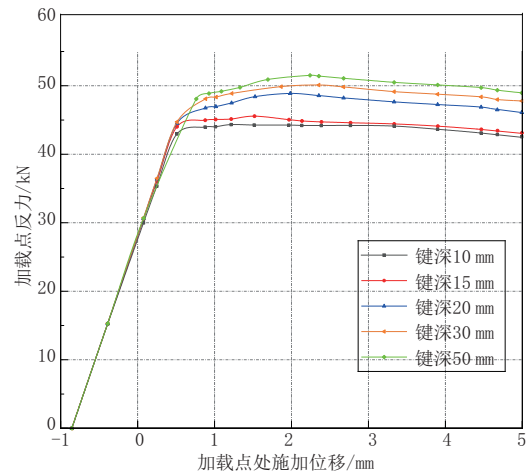


图 16 不同键深下节段梁剪力键接缝处的荷载-位移曲线

由图 16 可知:随着键深的不断增加,结构整体的承载能力不断增加;尤其是当键深接近 20 mm 时,这一变化尤其明显,这与裂缝展开的规律相似。因此在施工时,应适当考虑将剪力键键块深度设置为 20 mm 左右,同时剪力键又不至于过大而导致制造困难。

4 结 语

(1)本文建立的有限元模型能够较为准确地反映节段梁在荷载作用下的受力变形规律,模拟得到的跨中荷载-位移曲线与试验结果吻合良好,验证了模型预测弯剪破坏过程的可靠性。

(2)剪力键布置位置对节段梁受力性能影响显著。当剪力键位于梁截面中部时,其剪力传递效率最高,承载力和延性均优于上部或下部布置,推荐在设计中优先采用中部布置方案。

(3)剪力键所在节段对其受力性能亦有影响。布置在较长节段上的剪力键承载能力和延性均优于布置在短节段上;布置在短节段上的键块在破坏时表现出更大脆性。建议在长节段布置键块而在短节段布置键槽。

(4)剪力键深度增加可提高结构抗弯剪性能,但提升效果在剪力键键块深度为键高 0.4 倍时趋于饱和,过深反而可能增加加工难度和局部压碎风险。本研究仅基于剪力键键高为 50 mm 的模型,所提出的剪力键键块深度与键高比例建议仅适用于本研究所涉及的几何尺寸范围,在不同键高或尺度条件下的适用性尚需进一步研究和验证。

参考文献:

[1] 邱云.节段预制体外预应力干接缝混凝土梁桥模型试验研究[D].

(下转第 100 页)