

新老桥间超高性能混凝土拼接接缝性能试验

刘超¹, 黄钰豪¹, 陆元春²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市城市建设设计研究总院, 上海 200125)

摘要: 依托上海市济阳路高架新老桥拼接项目进行了基于高应变强化超高性能混凝土(UHPC)材料的拼接缝试验。试验采用非对称加载, 目的是模拟新老桥的不均匀沉降。试验结果表明, UHPC 拼缝整个受力破坏的过程大致可以分为 3 个阶段: 弹性阶段、裂缝发展阶段、持荷至破坏阶段。在 UHPC 板下缘首先出现裂缝, 之后 UHPC 板侧面出现大量微小裂缝, 裂缝均以微裂缝簇的方式呈现, 裂缝宽度发展缓慢, 且沿着板高向上发展。UHPC 转角为 1.2% 时裂缝宽度仅为 0.16 mm, 具有出色的裂缝控制能力。最终, UHPC 板底出现主裂缝, 横向钢筋和门筋屈服, 钢筋布置方式满足试件破坏形态要求, 说明试件的配筋合理。结合有限元模型对试验进行模拟, 吻合度较高。利用有限元进行参数分析, 发现增加接缝自由长度和减小接缝厚度可以有效增强接缝弯曲性能。由于 UHPC 材料进行接缝施工具有方便、快捷、性能优越等优点, 提出基于上下部构造不连接类型的接缝形式, 并给出具体配筋方案。

关键词: 超高性能混凝土(UHPC); 接缝; 有限元模拟; 试验

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

Experimental Study on the Performance of the UHPC Stitching Joint Between New and Original Bridges

LIU Chao¹, HUANG Yuhao¹, LU Yuanchun²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute, Shanghai 200125, China)

Abstract: Based on the bridge-stitching project of Jiyang viaduct, Shanghai, an experiment was conducted on high-strain hardening ultra-high-performance concrete (UHPC) stitching joints. Asymmetrical loading was used to simulate the bridge uneven settlement in the experiment. The experiment results show that the entire process can be divided into three stages: elastic stage, cracks developing stage and failure stage. First, cracks appear under the UHPC panels;

then, many micro cracks appear on the side of the UHPC panels. The cracks appear in the form of micro-crack clusters, and the crack width slowly increases. When the UHPC panel rotation is 1.2%, the crack width is 0.16 mm, so the UHPC has excellent crack-control ability. In the end, the main crack appears at the bottom of the UHPC panels, and the transverse reinforcements yield because the reinforcement layout satisfies the requirements of the failure mode of the specimen. Thus, the reinforcement arrangement of the specimen is reasonable. The experiment was simulated using the finite-element model, and the results were coordinated with experiment results. The parameter analysis was carried out by the finite element method, and the results show that increasing joint free length and reducing joint thickness can effectively enhance the bending performance of joints. Because the advantages of the UHPC joint are convenience, rapidity, and excellent performance, a joint form based on the type of non-connection of upper and lower structures is put forward. What's more, a detailed reinforcement scheme is given, which will serve as a reference for similar projects in the future.

Key words: ultra-high-performance concrete (UHPC); stitching joint; finite-element simulation; experiment

为了满足经济发展的需要, 每年对大量原有公路进行扩建, 扩建过程中常需要旧桥拓宽, 而拓宽所产生的新老桥拼缝的连接便成为了一项难题^[1]。目前, 针对 T 梁桥来说, 新旧桥梁拼接主要连接构造类型有^[2-5]: 一、上下部构造不连接。代表的形式为采用沥青和木条填充或者混凝土连续铺装, 这种方式施工难度低, 新老桥各自受力明确互不影响, 但是在活载和新旧桥梁的不均匀沉降作用下, 易引发横向错台问题, 成桥不美观, 养护成本高。二、上下部均构造连接。在新旧 T 梁桥翼缘板间建立相应的横隔板刚性连接, 并在旧 T 梁处进行膨胀螺栓固定加强。但该

方法缺点很明显,施工难度大且容许变形能力差,在不均匀沉降下极易导致连接处开裂.三、上部构造连接,下部构造不连接.这种方式是以上2种方式结合的产物,代表的形式为在拼缝梁板处大量布置连接钢筋,并进行焊接,最后进行浇筑.这种方式为国内拼宽桥梁常用连接方式^[6],新老桥下部结构不连接,内力相互影响较小,对不均匀沉降也有一定抵抗力,但是施工复杂,工期长,由于上部构造连接后,连接处的内力也较大.在接缝材料研究方面,针对构造类型一,国外应用较多的有 Britflex 系列人造橡胶伸缩缝^[7],变形能力好,但其造价较高且需要日常养护,在国内还没有推广.针对构造类型二与三,大部分国内拼宽桥仍使用普通混凝土进行新旧桥梁主梁和下部构造连接.同时,左永辉^[8]提出,针对构造类型三,可以将超强韧性纤维混凝土(ECC)和甲基丙烯酸甲酯(MMA)应用于上部结构连接,这2种材料具有高变形能力、低弹性模量的性质,但目前仅处于理论阶段,尚未开展适用于接缝的试验研究,且国内还尚未有拼接桥梁采用该形式接缝.在桥梁工程中,超高性能混凝土(UHPC)凭借着优异的力学性能^[9],可以在保证安全性的前提下,有效降低梁高^[10],减轻结构自重,同时也具备出色的抗裂性能^[11-12].若将UHPC取代传统处理方式应用于拼缝,可以节省大量人力和物力,同时由于UHPC出色的变形性能,可以应对新桥沉降带来的较大转角而不开裂,或裂缝宽度小于规范规定的限值^[13].本文采用常温养护高应变强化型UHPC材料,依托济阳路新老T梁高架桥拼接实际工程项目,将拼接段连续混凝土铺装替换为UHPC,进行试验及有限元模拟和参数分析,以期今后类似新老桥拼接工程应用有较好的技术支撑和借鉴作用.

1 工程概况

上海市济阳路高架的部分路段拓宽拼接工程,采用桥面铺装层连接方案,目的是保证拓宽桥面的行车平顺性,新老T梁靠近的两翼缘间距为100 mm.新老桥拼接的相对沉降导致拼缝处受力复杂,要求拼缝材料具有很好的变形性能和抗弯曲能力.由于UHPC具有出色的变形性能,强化阶段极限拉应变可以超过 $3\ 800 \times 10^{-6}$,上部结构的纵桥向拼缝采用80 mm厚的UHPC薄板.设计的控制指标为新老桥相对沉降值小于10 mm,偏安全地按照10 mm的相对沉降值计算接缝处转角约为1.2%,故新旧桥

梁纵向拼接接缝的基本要求为:接缝在达到1.2%转角时,裂缝宽度不超过0.2 mm,且裂缝不贯穿UHPC.工程示意图见图1,现场照片如图2所示.

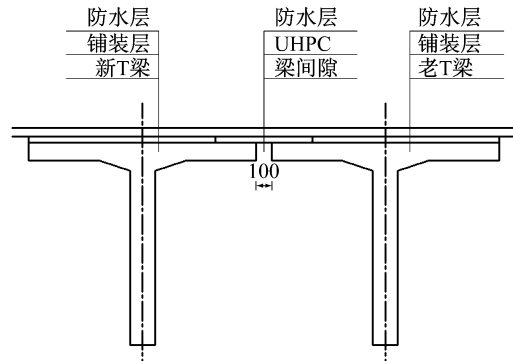


图1 工程示意(单位:mm)

Fig.1 Engineering presentation drawing(unit:mm)



图2 实桥照片

Fig.2 Existing bridge pictures

主要施工过程为:①老T梁桥板部分切除(去除防撞护栏),新T梁安装(新老T梁桥面板缝隙100 mm);②新老T梁端横隔板连接(普通混凝土);③新老桥混凝土铺装(C50混凝土,除UHPC范围);④UHPC与新老T梁铺装层间布置连接钢筋,新老桥T梁拼缝连接(UHPC);⑤防水层施工,沥青混凝土摊铺.

2 试验概况

2.1 材料性能

试验材料采用的应变强化UHPC基于最紧密堆积原理由计算机精确设计,可将宏观缺陷降到最低,形成高度致密的无机质基体.在常温养护条件下,具备超高强、应变强化、高耐久性、优异的施工性能.本试验采用的UHPC密度为 $2\ 600\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,弹性模量约为50 GPa,泊松比为0.2,极限抗拉强度为12 MPa,强化阶段极限拉应变为 $3\ 800 \times 10^{-6}$,极限抗压强度为150 MPa.参考Lampropoulos等^[14]的试验,轴拉试件为狗骨头形,测试段尺寸为 $50\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$,轴拉试件见图3a、3b,轴拉试验曲线见图3c.试验试件及现场加载见图4.同时,对

本试验所采用的同一批次的钢筋进行了材性试验, 抗拉强度为 500 MPa.

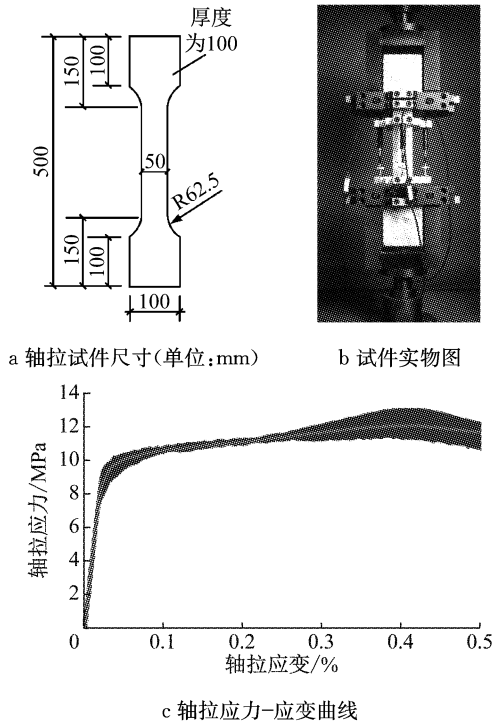


图 3 轴拉试验
Fig.3 Axial experiment

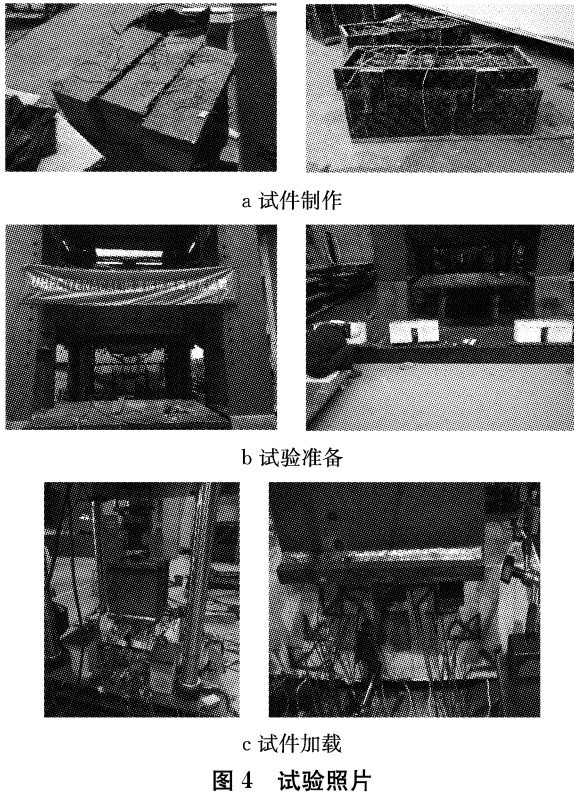


图 4 试验照片
Fig.4 Photos of experiment

2.2 试验设计

对全桥构造缩尺模型显然不是经济的办法, 在

保证准确性的前提下, 又兼顾经济性, 设计如图 5 所示的试验模型, 图中 F 代表加载力. 这种试件设计可以让 UHPC 板充分受弯, 更好地利用其变形性能, 从而利用转角控制设计状态. 图中, 中间 2 个尺寸为长 300 mm、宽 200 mm、高 250 mm 的 C50 混凝土块模拟新老桥的翼缘, 下部 UHPC 薄板尺寸为长 700 mm、宽 200 mm、高 80 mm, 模拟 UHPC 拼缝. 采用非对称加载, 加载比例为 3:7, 目的是模拟新老桥不均匀沉降造成的受力不均. 为防止局部应力集中, 加载时两边各预留 50 mm. 在横筋、纵筋、门筋和 UHPC 板底部设置应变片, UHPC 与钢筋应变片布置如图 6. UHPC 板内布置双排横筋 $\Phi 16@50$ 、单排纵筋 $\Phi 10@50$. 同时, 为了保证 UHPC 板有良好的连

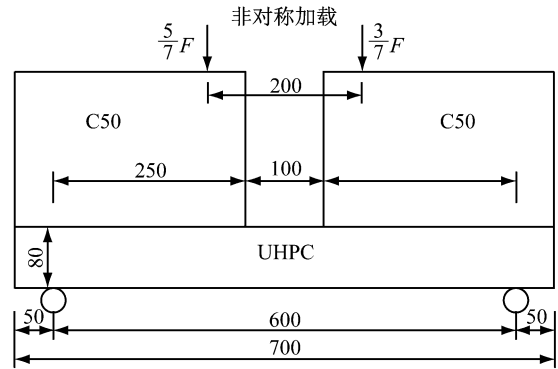


图 5 试验加载模型(单位:mm)
Fig.5 Experimental model(unit:mm)

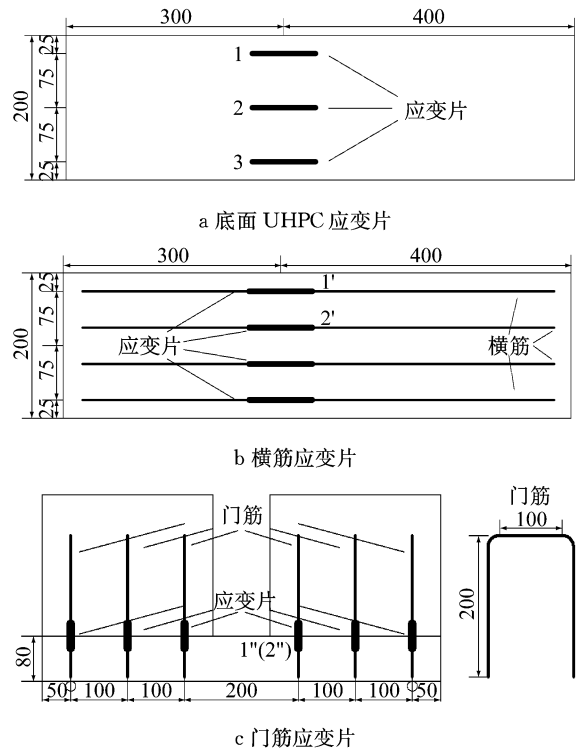


图 6 应变片布置(单位:mm)
Fig.6 Arrangements of strain gauge (unit:mm)

接性,在 C50 和 UHPC 板间增设门筋 $\phi 12@100$,钢筋布置图见图 7.

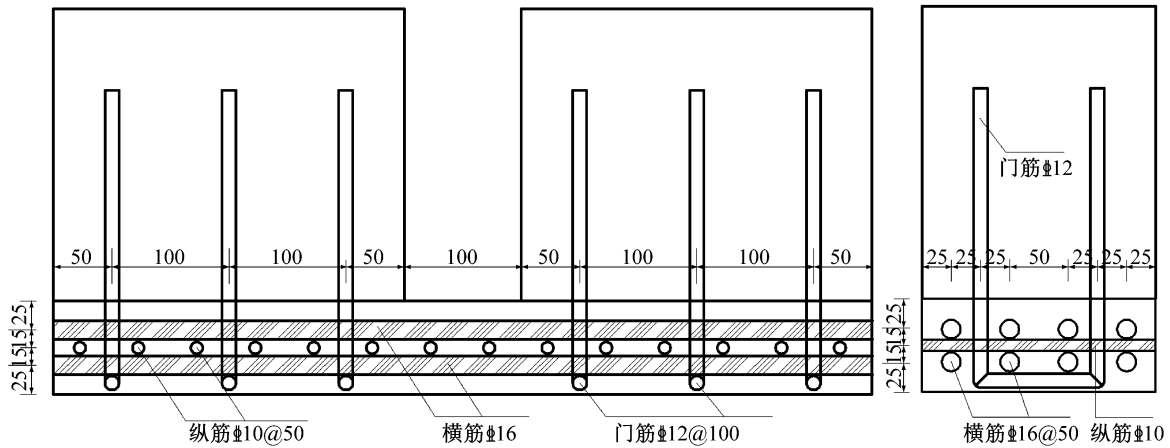


图 7 钢筋布置(单位:mm)

Fig. 7 Arrangement of reinforcement (unit:mm)

2.3 试验目的

对于新老桥 UHPC 拼缝来说,主要不利受力状态是不均匀沉降下的转角.设计要求在极限转角(1.2%)下,裂缝宽度不超过 0.2 mm,且裂缝不贯穿 UHPC 板,即构造能达到不漏水的正常使用状态,防水层、沥青铺装也能保持正常的正常使用状态.利用位移计测得弯矩最大处 UHPC 板位移和边缘 UHPC 板位移,通过式(1)可计算得 UHPC 板转角,计算图示如图 8 所示.

$$\theta = (y_B - y_A)/l_{AB} + (y_B - y_C)/l_{BC} \quad (1)$$

式中: θ 为 UHPC 板转角; y_A 、 y_B 、 y_C 分别为 A、B、C 三点处的竖向位移; l_{AB} 、 l_{BC} 分别为 AB、BC 间距.

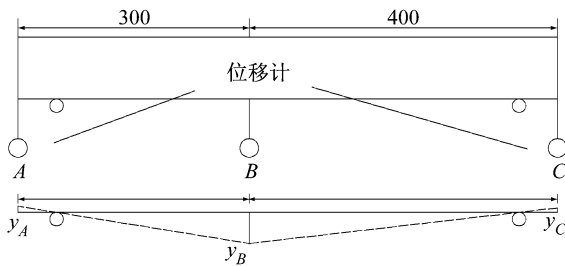


图 8 转角计算图示(单位:mm)

Fig. 8 Rotation calculation diagram (unit:mm)

2.4 试验过程

试验共制作了 3 个试件,第 1 个试件在大加载机上加载时由于初期荷载不易控制,发生类似冲切的迅速破坏,不计试验结果.其余 2 个试件转到小加载机上进行试验,将后 2 组 UHPC 拼缝试验的荷载-位移曲线(位移取图 8 中 B 处位移计读数)绘制于图 9,从曲线可知 UHPC 拼缝的整个受力破坏过程大致可分为 3 个阶段:弹性阶段、裂缝发展阶段、持荷至破坏阶段.

(1) 阶段 I:弹性阶段.在试验加载初期,UHPC 板弯矩较小,受力形态与均匀弹性体基本一致,荷载-挠度曲线呈直线.

(2) 阶段 II:裂缝发展阶段.随着荷载的增加,首先在 UHPC 板下缘出现裂缝,后 UHPC 板侧面出现大量微小裂缝,以微裂缝簇的方式呈现,裂缝宽度发展缓慢,且沿着板高向上发展,受拉区进入塑性阶段的部分逐渐增多,荷载-挠度曲线斜率逐渐减小.

(3) 阶段 III:持荷至破坏阶段.随着荷载的增加,UHPC 板中横向钢筋屈服,跨中附近裂缝沿梁高迅速发展且宽度增大,荷载-挠度曲线斜率逐渐趋于零.当荷载-挠度曲线斜率为负时,UHPC 板挠度增加迅速,试验板出现明显的主裂缝.同时图 6c 中门筋 1'、2'屈服,门筋所在处 UHPC 板和 C50 脱开.

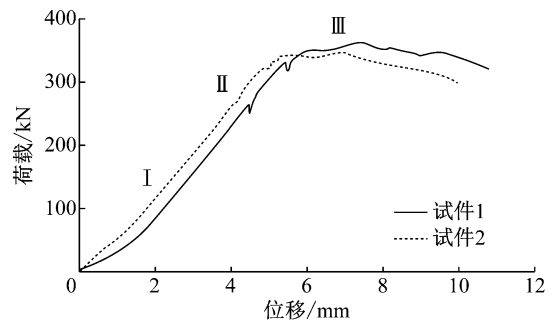


图 9 荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curve

最终破坏时,裂缝高度为 2~3 cm,尚未超过 UHPC 薄板厚度的一半,即裂缝尚未贯通 UHPC 板.

3 试验结果分析

3.1 荷载-转角曲线

图 10 为两试件的荷载-转角曲线,在加载初期,

位移与荷载呈现很好的线性关系,在达到 1.2% 转角时,试件 1 和试件 2 荷载约为 170 kN 和 200 kN,此时 UHPC 板出现裂缝,裂缝宽度均为 0.16 mm 左右。之后随着荷载的增加,结构逐渐进入塑性,结构的极限荷载分别为 363 kN 和 346 kN。

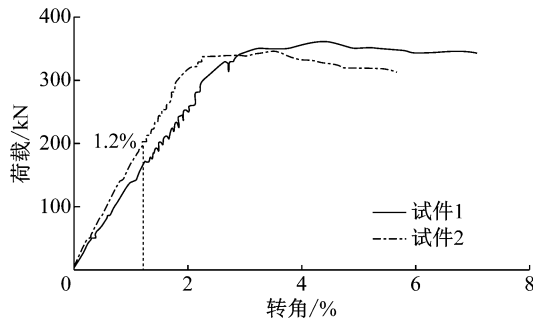


图 10 荷载-转角曲线

Fig.10 Load-rotation curve

3.2 横筋荷载-应变曲线

图 11 为两试件横筋荷载-应变曲线,从曲线可以看出,在加载前中期,应力-应变曲线基本为线性,在微应变为 2.600×10^{-6} 左右,曲线斜率发生变化,而后钢筋进入屈服阶段直至试件破坏。

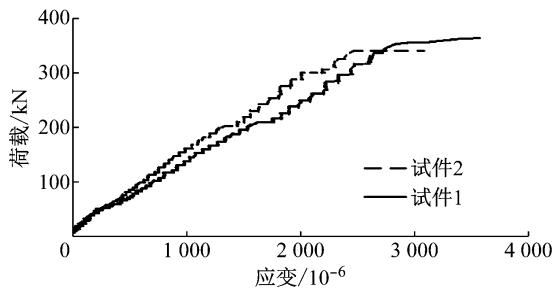


图 11 横筋荷载-应变曲线

Fig.11 Load-strain curve of the bottom transverse reinforcement

3.3 门筋荷载-应变曲线

图 12 为门筋荷载-应变曲线,从曲线可以看出,在微应变为 2.600×10^{-6} 前,曲线基本呈线性,而后

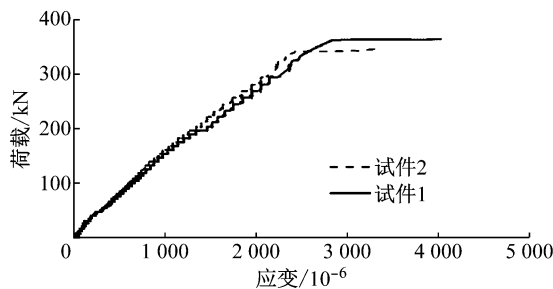


图 12 门筋荷载-应变曲线

Fig.12 Load-strain curve of the door reinforcement

钢筋进入屈服阶段直至试件破坏,门筋起到了抗拔的作用,限制了 UHPC 与 C50 混凝土界面之间的脱开。

3.4 荷载-裂缝关系

将试件 1 和试件 2 的荷载-裂缝关系列于表 1 中,可以发现,在对应转角小于 2.0% 时,裂缝宽度小于 0.20 mm,且裂缝未贯穿 UHPC 板,说明高应变强化型 UHPC 具有出色的裂缝控制能力。

表 1 试件荷载与裂缝关系

Tab.1 Load-crack relationship of specimens			
试件	荷载/kN	裂缝宽度/mm	转角/%
1	50	0.02	0.30
	70	0.04	0.40
	120	0.12	0.80
	170	0.16	1.20
	200	0.18	1.50
	260	0.20	2.00
2	50	0.02	0.26
	70	0.03	0.40
	120	0.10	0.70
	170	0.14	1.00
	200	0.16	1.20
	310	0.20	2.00

4 有限元模拟

4.1 模型的建立

高应变强化型 UHPC 材料有着类金属的非线性特点,利用 ABAQUS 软件建立 UHPC 拼缝模型进行有限元仿真,模型示意图如图 13 所示。模型中尺寸完全根据试验确定。模型中采用的材料为钢、C50 混凝土和 UHPC,由于 C50 混凝土仅仅为了传力,而不是重点研究对象,为了计算收敛,将其应力应变关系设置为全过程线弹性,钢和 UHPC 则设置非线性,本构关系见图 14。混凝土弹性模量为 34.5 GPa,钢的弹性模量为 210 GPa,UHPC 弹性模量为

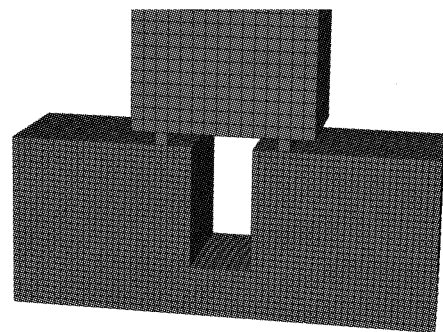


图 13 有限元模型

Fig.13 Finite element model

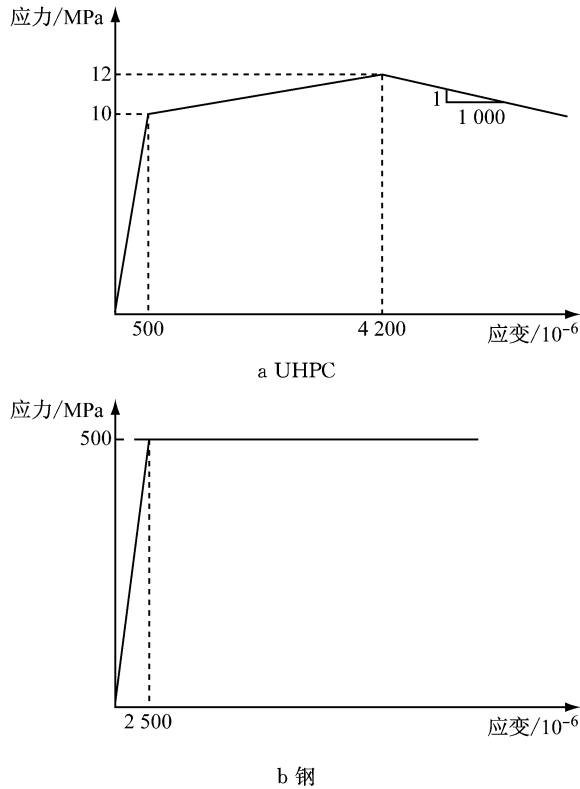


图 14 材料本构关系

Fig.14 Material constitutive relationship

50 GPa. C50 和 UHPC 间接触设为硬接触. 同时, 定义 C50 混凝土、UHPC 和钢为各向同性材料. 模型网格划分采用扫略划分, C50 块和 UHPC 板均采用空间六面体 C3D8 网格, 钢筋采用桁架单元, 共计 6 896 个节点, 5 126 个单元. 各参数设置见表 2.

表 2 参数选取

Tab.2 Parameter selection

材料	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	单元类型
C50	2 600	34.5	0.2	C3D8
UHPC	2 600	50.0	0.2	C3D8
钢	7 800	210.0	0.3	Truss

4.2 结果分析

4.2.1 荷载-位移曲线

将有限元模拟的荷载-位移曲线、荷载-转角和试验曲线作对比, 见图 15 和 16. 在弹性阶段, 有限元模拟和试验较为接近, 有限元结果较试验大, 原因是有限元中, 材料为理想材料, 材料间不存在空隙, 跳过了试验中压实阶段. 在经过塑性阶段后, 有限元结果的极限荷载为 375 kN, 较试验结果大, 原因有二: ①有限元结果不存在初始缺陷, 材料可以发挥最大性能; ②试验难以避免存在偏载, 而有限元加载方式为完全对称, 因此极限荷载较高. 但从整体来看, 有限元结果和 2 次试验曲线吻合程度高, 在有限元结果中, 转角为 1.2% 时对应的荷载为 185kN, 介于 2

次试验结果之间, 说明有限元模拟较为准确.

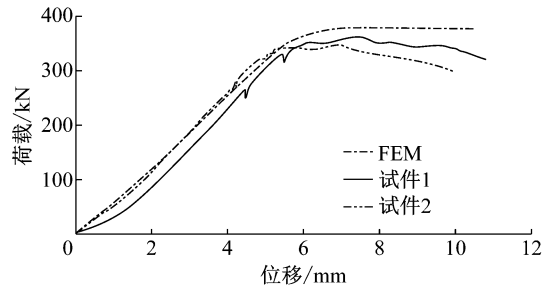


图 15 荷载-位移对比曲线

Fig.15 Load-displacement curve

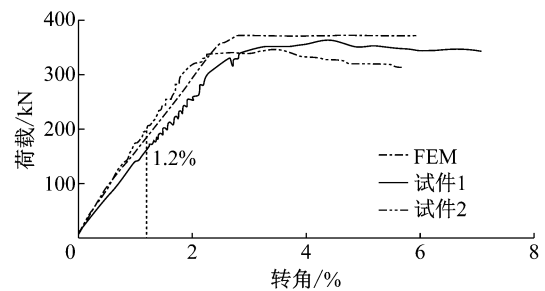


图 16 荷载-转角对比曲线

Fig.16 Load-rotation curve

4.2.2 破坏形态

将有限元模拟的破坏形态和试验破坏形态作对比, 见图 17. 在有限元结果中, 浅色代表出现裂缝, 裂缝出现在千斤顶作用点正下方的 UHPC 板底, UHPC 板的挠度最大处和裂缝出现处为同一位置. 该破坏形态的出现是因为, 在模拟不均匀沉降的非对称加载下, 加载点正下方转角不断增大, UHPC 层应变不断增加, 最终达到极限拉应变而开裂. 同时, 门筋所在处 UHPC 板和 C50 脱开, 该破坏形态的出现是因为, 在非对称加载作用下, 作用力大的一侧下挠挠度大于受力小的一侧, 而两侧 C50 块体受到 UHPC 板的连接作用, 从而使受力小的一侧 C50 块体和 UHPC 有脱开的趋势. UHPC 板和 C50 块体靠门筋进行连接, 门筋屈服时即会出现脱开现象. 有限元破坏形态和试验吻合.

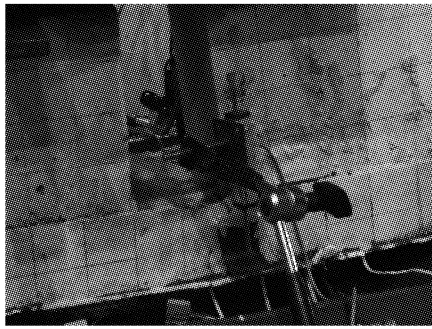
4.2.3 应力和应变分析

将 UHPC 板底应力和钢筋应力绘制于图 18 中. 图 18a 中浅色区域表示该处出现塑性应变, 根据图例, 塑性应变已大于开裂应变, 说明 UHPC 开裂. 图 18b 中, 裂缝出现处横向钢筋与门筋屈服, 与试验结果吻合.

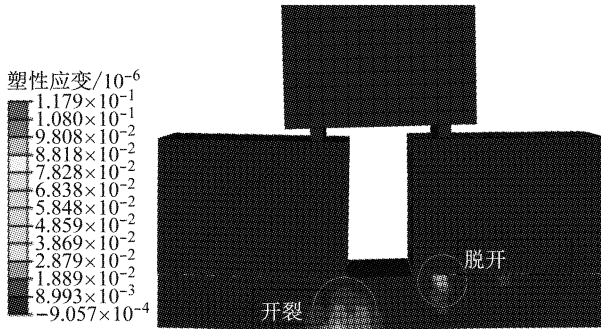
4.3 参数分析

4.3.1 接缝自由长度

考虑到某些地基土质较差的地区相对沉降可能



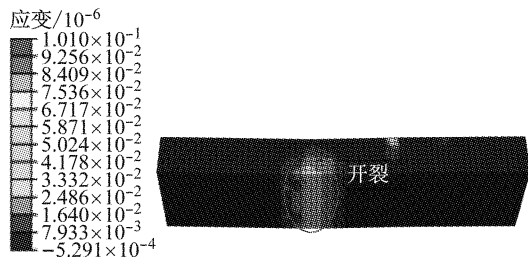
a 试验破坏形态



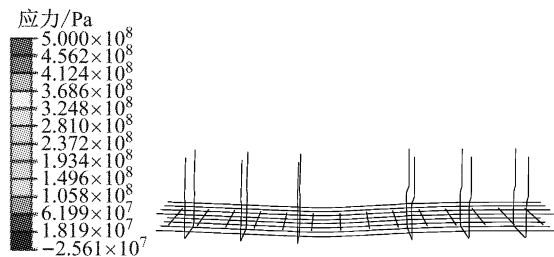
b 有限元破坏形态

图 17 破坏形态对比

Fig. 17 Contrast of destruction form



a UHPC 板塑性应变



b 钢筋应力

图 18 应力和应变分析

Fig. 18 Stress and strain analysis

较大,在 UHPC 接缝和 T 梁翼缘间加橡胶,使 UHPC 和主梁分离,从而使 UHPC 达到最佳的弯曲能力.如图 19 所示,保持其他参数不变,取橡胶厚度为 20 mm,长度分别为 $L=0$ mm(实际试验参数)、 $L=30$ mm、 $L=50$ mm,进行有限元模拟,并将结果与试验结果进行对比.由于工程重点看重在一定转

角下 UHPC 的工作状态,故绘制转角-UHPC 应变曲线于图 20,UHPC 应变取 UHPC 板中下缘最大应变.

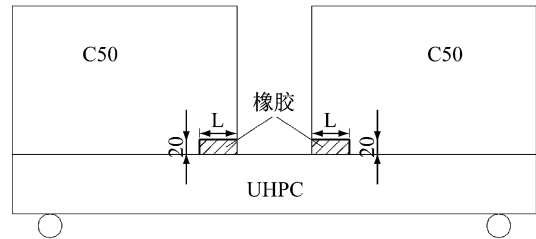


图 19 接缝自由长度示意(单位:mm)

Fig. 19 Diagram of the free length of the joint (unit:mm)

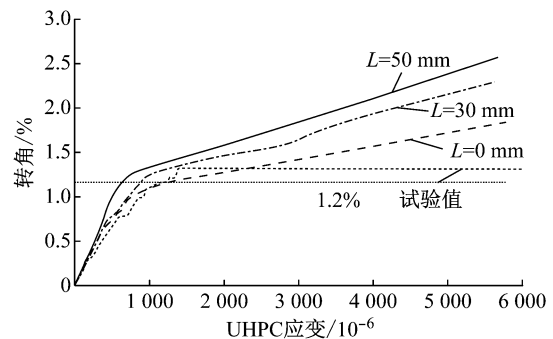


图 20 不同自由长度下转角与 UHPC 应变

Fig. 20 Rotation - UHPC strain curve under different free length

从图 20 可以看出, $L=0$ 时自由长度曲线结果与试验吻合得较好,试验数据在应变 1800×10^{-6} 之后为水平段是因为应变片处突然开裂所致.在相同转角下(试验规定的最大转角为 1.2%), $L=50$ 、30、0 mm 时,UHPC 应变分别为 520×10^{-6} 、 770×10^{-6} 和 1180×10^{-6} .随着转角的增加,在相同转角下,UHPC 的应变由小到大分别为: $L=50$ mm 时、 $L=30$ mm 时、 $L=0$ mm 时.从原理上考虑,随着自由长度的增加,跨中 UHPC 的刚度减小,刚度减小有助于提高 UHPC 的弯曲性能.因此,自由长度的增加有利于提高 UHPC 接缝的弯曲能力.

4.3.2 UHPC 接缝厚度

考虑 UHPC 接缝厚度对其弯曲能力的影响,如图 21 所示,保持其他参数不变,变量取定为 UHPC 接缝厚度,分别在对照组厚度 $H=80$ mm(实际试验参数)、 $H=100$ mm、 $H=120$ mm 情况下进行有限元模拟,并将结果与及试验结果进行对比.由于工程重点是在一定转角下 UHPC 的工作状态,故绘制转角-UHPC 应变曲线于图 22,UHPC 应变取 UHPC 板中下缘最大应变.

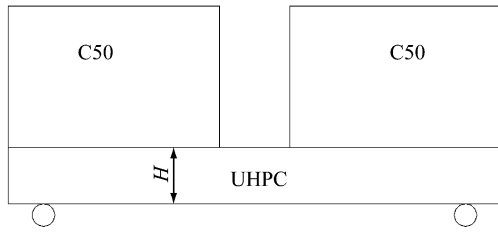


图21 接缝厚度示意

Fig. 21 Joint thickness diagram

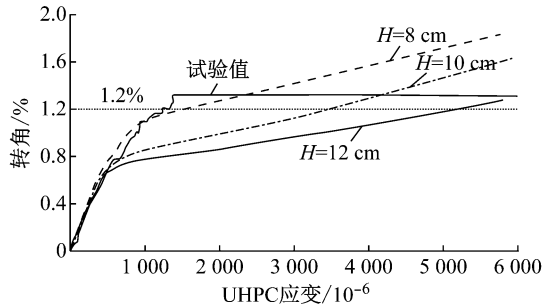


图22 不同接缝厚度下转角与UHPC应变曲线

Fig. 22 Rotation-UHPC strain curve under different joint thickness

从图22可以看出,在相同转角下(试验规定的最大转角为1.2%),接缝厚度 $H=8\text{ mm}$ 、 $H=10\text{ mm}$ 和 $H=12\text{ mm}$ 的UHPC应变分别为 $1\ 180\times 10^{-6}$ 、 $3\ 130\times 10^{-6}$ 和 $5\ 110\times 10^{-6}$ 。随着转角的增加,在相同转角下,UHPC的应变由小到大分别为: $H=8\text{ mm}$ 时、 $H=10\text{ mm}$ 时、 $H=12\text{ mm}$ 时。从原理上考虑,本工程接缝属于柔性接缝,需具备优异的弯曲能力,增加UHPC接缝厚度,即增加了跨中UHPC的刚度,不利于UHPC的弯曲。可见,接缝厚度的增加不利于UHPC接缝的弯曲能力。

5 结论

(1) 在最终破坏时,裂缝高度为 $2\sim 3\text{ cm}$,尚未超过UHPC薄板厚度的一半,即裂缝尚未贯通UHPC板。在此极限状态下,此拼缝构造依然可以达到正常使用不漏水的功能状态。防水层、沥青铺装也能保持正常的使用状态,说明拼缝的材料选择和形式是合理的。

(2) 从试验结果可以看出,UHPC在整个试验过程中体现了非常好的发展状态,具有很长的塑性平台强化段。在UHPC板达到转角为1.2%时,裂缝宽度仅为 0.16 mm ,满足规范要求。裂缝发展方式为微裂缝簇—主裂缝,说明高应变强化UHPC具有出色的裂缝控制能力。

(3) 根据参数分析,结果显示增加接缝的自由长度和减小接缝的厚度可以有效提高接缝的弯曲性能。意味着,在特定转角的情况下,UHPC板的应变可以更小,可以拥有更强的裂缝控制能力。

(4) 根据试验结果,远离加载点一侧的门筋屈服甚至拉断,同时,加载点下UHPC板内横向钢筋屈服,有限元结果和试验吻合较好,充分说明试验配筋方式的合理性和结果的有效性。

(5) 作为拼缝材料,UHPC有着施工便捷、快速的优势,同时具有出色的变形和弯曲能力。对于其他不同的新老桥拼接工程项目,拼缝的厚度、长度等参数可根据具体桥梁拼接情况确定,同时应考虑沉降量等参数的影响,如转角过大时可考虑两边加橡胶(将UHPC与主梁分离)等做法。

参考文献:

- [1] 刘桂琴,崔展. 新技术新材料在桥梁改建工程中的应用[J]. 桥梁建设, 2000, 65(4):65.
LIU Guiqin, CUI Zhan. The application of new technics and new materials in the rehabilitation of the existing bridges[J]. Bridge Construction, 2000, 65(4):65.
- [2] 吴文清,叶见曙,鞠金炎,等. 高速公路改扩建中桥梁拓宽现状与方案分析[J]. 中外公路, 2007, 27(6):100.
WU Wenqing, YE Jianshu, JU Jinying, et al. Current situation and scheme analysis of bridge widening in expressway expansion[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(6):100.
- [3] 王宗华. 高速公路桥梁加宽拼接技术优化研究[D]. 长安: 长安大学, 2009.
WANG Zonghua. Study on optimization of highway bridges broaden splicing technology [D]. Changan: Chang' an University, 2009.
- [4] 周明利. 高速公路桥梁拓宽中的问题[J]. 交通世界, 2017, 58(1):136.
ZHOU Mingli. Problems in the widening of highway bridges [J]. Transpo World, 2017, 58(1):136.
- [5] 刘东明. 高速公路改扩建工程新旧桥梁拼缝施工工艺[J]. 交通世界, 2018, 63(1):136.
LIU Dongming. Construction technology for widening old and new bridges in expressway reconstruction project[J]. Transpo World, 2018, 63(1):136.
- [6] 宗周红,夏樟华,陈宜言,等. 既有桥梁拓宽改造纵向接缝研究现状与实例分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009, 37(2):248.
ZONG Zhouhong, XIA Zhanghua, CHEN Yiyang, et al. State-of-the-art and engineering example analysis of longitudinal connection joints between the new bridges and existing old bridges during bridge widening and reconstructions [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2009, 37(2):248.
- [7] 马春生,宋神友. 广佛高速公路湖洲大桥主桥新旧结构连接设

- 计[J]. 公路, 2003, 63(8): 63.
- MA Chunsheng, SONG Shenyong. Design of connection between new beam and old one of huzhou bridge on guangfo expressway [J]. Highway, 2003, 63(8): 63.
- [8] 左永辉. 新材料在桥梁拼接中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- ZUO Yonghui. Research the application of new materials in a bridge concatenation [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [9] GRAYBEAL B A. UHPC in the US highway infrastructure[J]. Indian Concrete Journal, 2014, 88(4): 84.
- [10] PERRY V H, SEIBERT P J. The use of UHPFRC (Ductal®) for bridges in North America: The technology, applications and challenges facing commercialization [C]//Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel: University of Kassel, 2008: 815-822.
- [11] 王俊颜, 郭君渊, 肖汝诚, 等. 高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 10.
- WANG Junyan, GUO Junyuan, XIAO Rucheng, *et al.* Crack control mechanism and research on high strain reinforced super high performance concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 10.
- [12] 王俊颜, 耿莉萍, 郭君渊, 等. UHPC 的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 165.
- WANG Junyan, GENG Liping, GUO Junyuan, *et al.* Experimental study on crack width control ability of ultra-high performance concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 165.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Concrete structure design code: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] LAMPROPOULOS A P, PASCHALIS S A, TSIIOULOU O T, *et al.* Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Engineering Structures, 2016, 106: 370.

(上接第 314 页)

- [6] 韩强, 刘卫刚, 杜修力, 等. 多球面滑动摩擦隔震支座计算模型及其试验确认[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 82.
- HAN Qiang, LIU Weigang, DU Xiuli, *et al.* Computational model and experimental validation of multi-spherical sliding friction isolation bearings[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 82.
- [7] 夏修身, 陈兴冲, 王希慧, 等. 剪力键对隔震桥梁地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 104.
- XIA Xiushen, CHEN Xingchong, WANG Xihui, *et al.* Effect of shear key on seismic responses of bridge using isolation bearing [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(6): 104.
- [8] FILIPOV E T, REVELL J R, FAHNESTOCK L A, *et al.* Seismic performance of highway bridges with fusing bearing components for quasi-isolation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(9): 1375.
- [9] BOZORGZADEH A, MEGALLY S, RESTREPO J I, *et al.* Capacity evaluation of exterior sacrificial shear keys of bridge abutments [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(5): 555.
- [10] SMITH M, FISHER F, ROMIOS M, *et al.* On the redesign of a shear pin under cyclic bending loads[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(1): 138.
- [11] 马永忠, 崔小朝. 大直径安全销单面剪切变形试验方法研究[J]. 机械管理开发, 2010, 25(2): 25.
- MA Yongzhong, CUI Xiaochao. Study on single-sided shear deformation experiment method for large-diameter safety pin [J]. Mechanical Management and Development, 2010, 25(2): 25.
- [12] 张梦玫, 许文耀, 王双胜. 剪切销断裂过程的仿真研究[J]. 科技通报, 2012, 28(4): 212.
- ZHANG Mengmei, XU Wenyao, WANG Shuangsheng. Simulation and analysis of the rocket shear pin rupture process [J]. Bulletin of Science and Technology, 2012, 28(4): 212.
- [13] INFANTI S, PAPANIKOLAS P, THEODOSSOPOULOS G. Rion-antirion bridge: Full-scale testing of seismic devices[C]//Proceedings of fib Symposium Concrete Structures in Seismic Regions. Athens: Technical Chamber of Greece, 2003: 498-499.
- [14] INFANTI S, PAPANIKOLAS P, CASTELLANO M G. Seismic protection of the Rion-Antirion Bridge[C/OL]. [2003-10-06]. <https://www.gefyra.gr/images/user/Publications/Rion-Antirion%20-%20Yerevan%20-%20-%20Oct%202003.pdf>.
- [15] 丁富连. 大尺寸安全销实物单面剪切试验装置及方法[J]. 理化检验(物理分册), 2006, 42(1): 26.
- DING Fulian. Single plane shear test for large dimension shear pin[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Phys. Test), 2006, 42(1): 26.
- [16] 张利国, 程岩松, 王巍. 基于不同成型工艺的几种高强度螺栓疲劳性能的研究[J]. 机械工程师, 2017(5): 3.
- ZHANG Liguang, CHENG Yansong, WANG Wei. Fatigue properties research on several kinds of high strength bolt based on different molding technique[J]. Mechanical Engineer, 2017(5): 3.