

超高性能混凝土组合箱梁弯曲性能有限元分析

刘超, 陈麒阳, 袁伟杰, 马汝杰

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 采用有限元方法对 4 种超高性能混凝土(UHPC)-混凝土组合箱形截面简支梁(全截面 C60、顶板替代为 UHPC、底板替代为 UHPC、全截面 UHPC)的弯曲性能进行研究. 分析前, 为验证 ANSYS 软件对 UHPC 材料模型模拟的准确性, 对 1 根矩形 UHPC-混凝土组合梁开展试验对比分析. 根据对比分析结果确定建模方法, 得到 4 种组合箱梁的应力分布、受力性能, 总结了相应类型结构的特点. 综合考虑材料性能的利用率、裂缝发展模态、极限承载力和经济性, 提出相应的设计建议.

关键词: 超高性能混凝土(UHPC); 组合箱梁; 有限元分析
中图分类号: U448.2 **文献标志码:** A

Finite Element Analysis of Ultra High Performance Concrete Composite Box Girder

LIU Chao, CHEN Qiyang, YUAN Weijie, MA Rujie

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Finite element analysis method was used in the research to check the mechanical characteristic of the 4 kinds of UHPC-concrete composite box girders(C60 concrete total cross-section, only UHPC roof, only UHPC bottoms and UHPC total cross-section). The accuracy of ANSYS analyzing and calculating for complex model should be verified before by using the test and the contrastive analysis of a rectangular UHPC-concrete composite beam. The ANSYS modeling method is determined by the result of comparative analysis in the same time. The stress distribution, bearing performance of 4 kinds of box girder were studied in the research. The structural behavior was summarized. The utilization of material properties, ultimate bearing capacity, strain distribution and economy should be considered, and some design advices were also given in the paper.

Key words: ultra high performance(UHPC); composite box

girder; finite element analysis

在目前的桥梁结构中, 箱形截面是一种常见的截面形式. 它的抗扭刚度大, 整体稳定性好, 可有效抵抗弯剪扭效应, 是梁桥中应用最为广泛的一种截面形式. 作为应用最普遍的预应力混凝土箱梁, 在正常使用状态下, 受拉区混凝土易开裂, 混凝土的自重增加了结构负担. 钢-混凝土组合梁是将钢梁和混凝土桥面板通过抗剪连接件连接成整体并考虑共同受力的结构形式^[1], 钢-混组合箱梁有利于材料强度的充分发挥, 降低截面高度, 减轻结构自重, 实现结构的纤巧轻盈化, 但是钢主梁的耐火性和耐腐蚀性较差, 钢与混凝土连接件易破坏, 钢主梁在反复交变应力下易疲劳失效.

超高性能混凝土(UHPC)具有超高强度、高应变强化行为^[2]、高致密性、高裂纹自修复性、高耐久性以及良好施工性等突出优点, 是全新一代先进结构材料, 已成为国内外研究的热点, 欧美日韩等国均从国家战略高度将其列为 21 世纪关键结构材料. UHPC 的基本力学性能优异, 采用 UHPC 可以实现结构的轻盈化, 提高结构的安全性, 进一步延长结构的使用寿命, 达到节约材料、减轻自重、增加耐久性、降低结构维护费用的目的, 在土木工程领域有着广阔的应用前景.

UHPC-混凝土组合构件是 UHPC 在实际工程中应用的一个方向. UHPC-混凝土组合梁可以优化 UHPC 层厚度、减轻结构自重^[3], UHPC 与混凝土有良好的连接性能^[4], UHPC 的高耐久性减少了组合梁后期维护费用. 当前 UHPC-混凝土组合梁广泛应用在新建桥梁和旧桥加固领域. 日本在 2007 年建造完成了一座跨径 48 m 的箱形组合桥梁^[5], 由预应

收稿日期: 2017-10-13

基金项目: 国家大学生创新项目(0200107339)

第一作者: 刘超(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为超高性能混凝土(UHPC)结构应用. E-mail: lctj@tongji.edu.cn

通讯作者: 陈麒阳(1996—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为超高性能混凝土(UHPC)结构应用. E-mail: chenqiyang@qq.com



扫码
查看
作者
独家
介绍

力混凝土顶板和 UHPC 腹板、底板组成. 瑞士自 2004 年起率先将 UHPC 应用于混凝土桥的加固,目前已完成 10 余座桥的加固工程^[6]. 法国^[7]、美国^[8-9]等也将 UHPC 应用于混凝土桥梁的加固中.

近年来,一些学者对 UHPC-混凝土组合梁的计算方法进行探索,但基本处于初始阶段,研究成果极少. Lampropoulos 等^[10]采用有限元方法对 UHPC-混凝土矩形梁进行力学性能分析, Ferrier 等^[11]沿用传统理论保守估算 UHPC-混凝土组合梁的抗剪极限承载力等. 本文提出 UHPC-混凝土新型组合截面,采用 ANSYS 软件对组合箱形截面简支梁的弯曲性能进行研究,分析不同组合形式梁的弯曲性能,为 UHPC-混凝土组合箱梁的实际应用奠定基础.

1 ANSYS 模型的验证性试验

1.1 UHPC 材性试验

UHPC 中掺杂的纤维主要以细小的钢纤维为主(质量分数为 2.5%),它与基体间的黏结滑移、纤维的拉拔、桥接和试验构件裂缝的偏转作用以及对混凝土基体的增强机理都有其自身的特性,因此它的力学特性介于普通混凝土和钢之间. UHPC-混凝土组合梁既区别于传统的混凝土箱梁又与当前的钢-混组合结构存在差异. 当前对 UHPC-混凝土组合箱梁缺乏成熟的计算方法,为了验证本文 ANSYS 模型计算方法的合理性,对 1 根矩形 UHPC-混凝土组合梁进行试验对比分析.

试验所用 UHPC 材料由上海罗洋新材料科技有限公司提供,是一种常温养护高应变强化型超高性能混凝土,基体配合比见表 1,钢纤维特性见表 2.

表 1 UHPC 基本配合比

Tab.1 Mix proportion of UHPC matrix

| 水泥 | 硅灰 | 磨细石英粉 | 石灰粉 | 水 | 高效减水剂 |
|----|-----|-------|------|-----|-------|
| 1 | 0.3 | 0.3 | 1.34 | 0.2 | 0.005 |

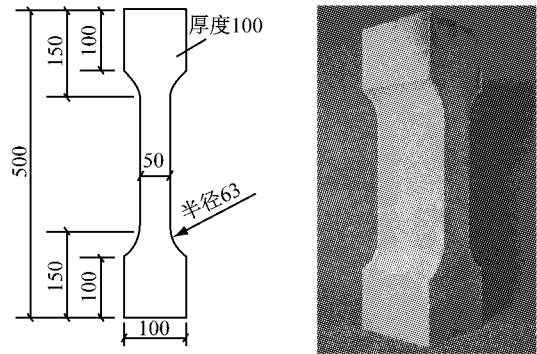
表 2 钢纤维特征参数

Tab.2 Characteristic parameters of steel fiber

| 抗拉强度/ MPa | 弹性模量/ GPa | 长度/ mm | 直径/ μm | 长径比/ 长径比 | 密度/ (kg·m ⁻³) |
|--------------|--------------|-----------|-----------|-------------|------------------------------|
| 2 500 | 200 | 13 | 200 | 65 | 7 850 |

在浇筑试验梁时,测试材料的抗压和抗拉强度以及抗拉试件(尺寸如图 1a)如文献^[12]所示. 试件中间段为 50 mm×100 mm×200 mm 的棱柱体,各方向尺寸均大于纤维长度的 3 倍,这有助于纤维在试件中的三维均匀分布,降低纤维取向分布的影响.

每组 UHPC 类型成型 6 根试件,室温下静置 24 h 后拆模,采用标准养护至 28 d 龄期后进行直接拉伸(抗压)试验.



a 构件尺寸(单位:mm) b 轴拉构件实物

图 1 轴拉试件

Fig.1 Axial tensile specimen

在立方体抗压强度试验中,浇筑养护完成 2 组(6 个)100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,按照标准养护条件(温度为 20±2 °C,湿度不小于 95%)养护 28 d 后,进行试验.

抗压强度试验结果见表 3. 在轴拉试验中,采用的轴拉试验装置有效避免了轴拉试验过程中的偏心失稳问题,对 6 根应力-应变曲线进行平均和离散性处理,如图 2 所示.

表 3 UHPC 的 28 d 抗压强度

Tab.3 28 days compressive strength of UHPC

| 立方体试块编号 | 极限荷载/kN | 抗压强度/MPa |
|---------|----------|----------|
| K-1 | 1 564.04 | 156.4 |
| K-2 | 1 674.97 | 167.5 |
| K-3 | 1 423.78 | 142.4 |
| K-4 | 1 641.95 | 164.2 |
| K-5 | 1 484.86 | 148.5 |
| K-6 | 1 488.76 | 148.9 |

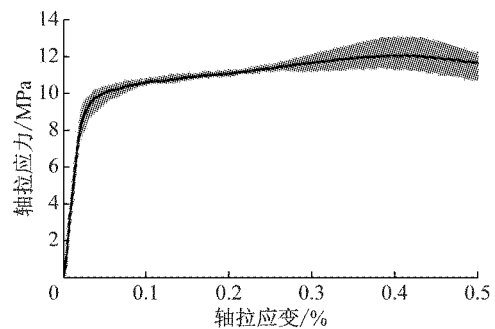


图 2 UHPC 应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of UHPC

当立方体试块被压碎时,由于钢纤维的搭接作用,试块仍保持整体. 根据试验确定的 UHPC 立方

体抗压强度标准值为(试验均值-1.645 倍的标准差) $f_{cu,k}=154.6-1.645\times 9.8=138.5$ MPa, UHPC 泊松比取 0.2.

试验采用 2 种强度的钢筋, HRB400 级钢筋的直径为 18 mm 和 16 mm, 共 2 种. 根据文献[13], 每种直径的钢筋分别预留 3 根 450 mm 长的试件做拉伸试验. 拉伸试验得到的钢筋力学特性结果见表 4.

表 4 钢筋材料力学特性

Tab.4 Mechanical properties of steel

| 直径/mm | 屈服强度/MPa | 极限强度/MPa |
|-------|----------|----------|
| 18 | 453 | 632 |
| 16 | 461 | 632 |

1.2 验证性试验梁断面

矩形 UHPC-混凝土组合梁的纵向受力钢筋为 $6\phi 18$ (HRB400, 普通混凝土层), 梁长 3 m, 跨中横断面见图 3.

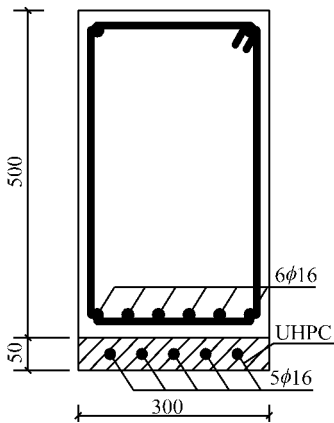


图 3 横断面尺寸(单位:mm)

Fig.3 Cross section size (unit:mm)

1.3 分析对比

2 根简支梁均按照三分点方式加载, 加载示意图见图 4. 试验加载初始阶段采用荷载控制 ($20\text{ kN}\cdot\text{级}^{-1}$, 加载速度 $10\text{ kN}\cdot\text{min}^{-1}$), 待裂缝发展到可视宽度, 卸载后转位移控制. 试验过程中通过钢筋和混凝土表面的应变片观测应变的变化, 同步记录梁体裂缝的发展情况.

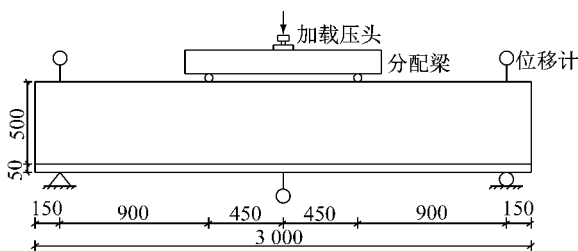


图 4 试验加载装置示意(单位:mm)

Fig.4 Schematic test loading device (unit:mm)

1.4 试验结果

加载初期按照荷载控制, 每个加载等级为 20 kN, 当加载到 240 kN 时, 跨中纯弯段位置 UHPC 表层出现极微小裂缝(强光下), 此时裂缝小于 0.02 mm; 随着荷载的增大, 初始微小裂缝跨过 UHPC 层, 在普通 C30 混凝土表面显现, 此时在 C30 混凝土表面出现新的裂缝; 当荷载值到达 460 kN 时, 裂缝宽度大于 0.1 mm, 肉眼可见; 后续开始转位移控制(先卸载再加载), 直到试验梁破坏. 破坏形态为受拉区 UHPC 拉裂、受压区普通 C30 混凝土压碎, 破坏荷载为 868 kN. 组合梁试验现场见图 5.



图 5 试验破坏图

Fig.5 Failure diagram of test

1.5 有限元模型

有限元建模依据组合梁的实际尺寸, 定义模型的纵向为 x 轴、横向为 z 轴、竖向为 y 轴, 按照非线性材料计算结构的极限承载力.

ANSYS 模型采用 SOLID65 单元来模拟混凝土、LINK8 单元来模拟钢筋, 模型的非线性分析采用分离式模型进行模拟. 在 ANSYS 软件中, 钢筋选择 BISO 模型建立本构关系, 即由弹性段和屈服段组成. 力学特性由之前的钢筋材性试验得到. UHPC 受压本构关系从实际应力应变曲线中选取相应的 8 个特征点, 采用 MISO 模型建立本构关系, 受拉本构与受压本构关于原点对称. 钢材受拉本构关系见图 6.

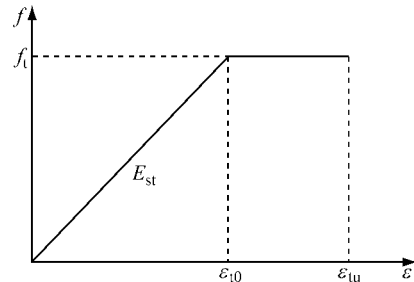


图 6 钢材应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of steel

为保证非线性计算结果收敛和准确, 在 ANSYS 软件中输入 UHPC 受拉和受压的本构关系, 本构关

系参照前述的实测材性值曲线,普通混凝土受拉受压本构关系采用实测曲线. ANSYS 模型计算中采用力收敛法则,收敛精度为 3%,共设置 100 个子步,每个子步进行 50 次迭代运算.

矩形 UHPC-混凝土组合梁的 ANSYS 有限元模型如图 7 所示.

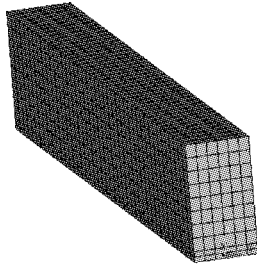
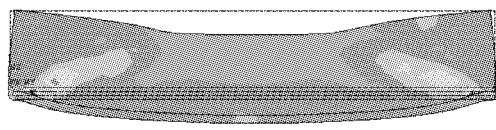


图 7 有限元模型

Fig.7 Finite element mode

1.6 结果分析

(1)应变. 在 ANSYS 模型中,裂缝的分析采用单元内部的分布裂缝模型,以分布裂缝来代替单独的裂缝. 即某一个实体单元的应力(实际上是单元中某一代表点的应力)超过了开裂的应力,则认为整个单元(或这一个应力点周围的一定区域)开裂,并且认为是在垂直于引起开裂的拉应力方向形成了无数平行的裂缝,而不是 1 条裂缝. 如果直接使用 ANSYS 模型中的裂缝结果,它与真实情况有一定的差别,直接进行分析会造成较大的误差. 因此采用读取 ANSYS 软件中的应变结果,用破坏时的极限应变来判断构件的开裂情况. 此外根据材性试验的结果,钢筋应变达到 2.300×10^{-3} 以上时基本达到了屈服时的强度,故 2.300×10^{-3} 作为判断极限承载力的标准. 最终 ANSYS 模型极限状态应变分布见图 8. 从应变中可知:跨中应变值很大,组合梁的跨中极限应变值达到 2.316×10^{-3} . 即认为裂缝由跨中出现并开始逐渐发展. 通过实际试验发现,由 ANSYS 软件的应变计算结果分析出的裂缝发展趋势与现场实际裂缝发展形态基本一致.



-2.67×10^{-3} -8.12×10^{-4} 4.27×10^{-4} 1.67×10^{-3} 2.91×10^{-3}
 -2.05×10^{-3} -1.93×10^{-4} 1.05×10^{-3} 2.29×10^{-3}

图 8 ANSYS 模型应变分布

Fig.8 Strain distribution in ANSYS

(2)抗弯极限承载能力. ANSYS 软件计算结果和试验加载结果见表 5. 达到极限状态时,组合梁荷载理论值与试验值的比值为 1.03,说明 ANSYS 模型理论值与试验值相吻合,本文采用的 ANSYS 计算方法准确性高,可用来分析更加复杂的 UHPC-混凝土组合箱梁.

表 5 组合梁试验值与有限元理论值对比

Tab.5 Comparison of experimental values with ANSYS theoretical values

| 试验加载值/kN | | 有限元理论值/kN | | HRB400 钢筋应力/MPa | 理论值 除以试 验值 |
|----------|----------|-----------|----------|--------------------|------------------|
| 开裂 荷载 | 极限 荷载 | 开裂 荷载 | 极限 荷载 | | |
| 465 | 868 | 469 | 892 | 460 | 1.03 |

2 UHPC-混凝土组合箱梁有限元模型

2.1 4 种组合截面简支梁

对某工程中的实际截面进行有限元法计算,建模时对截面进行简化处理,忽略腹板和顶底板连接处的承托构造,并且计算时忽略简支梁的自重. 4 种组合截面分别是:全截面 C60 (B-1)、顶板取代为 UHPC(B-2)、底板取代为 UHPC (B-3)、全截面 UHPC(B-4),横截面具体尺寸见图 9. 4 种组合截面梁长是 30 m,组合箱梁的纵向配筋率为 2.69%,加载方式为四点加载法.

2.2 UHPC-混凝土组合箱梁有限元模型

组合箱梁有限元模型的建立方法与 1.5 节相同,钢筋种类为 HRB335. 由钢筋的本构关系可以认为钢筋的拉应变达到 1.675×10^{-3} 时钢筋屈服,并将此时所对应的荷载定义为试验模型箱梁的极限荷载. 其中 B-2 和 B-3 组合箱梁作为优化组合截面箱梁,为防止发生斜截面剪切破坏,将这 2 种组合箱梁弯剪段的腹板更换为 UHPC 材料,纯弯段的腹板仍为 C60 普通混凝土. UHPC-混凝土组合箱梁的有限元模型如图 10 所示. 普通混凝土和钢筋本构关系参见文献[14]. C60 混凝土 f_{ck} 取 38.5 MPa, f_{tk} 取 2.85 MPa,极限拉应变取 10^{-4} ,弹性模量取 3.60×10^4 MPa. UHPC 的抗拉和抗压本构关系采用前文中得到的曲线. 受压本构输入时极限抗压强度设置为 138.5 MPa,弹性模量为 4.74×10^4 MPa. 本构关系曲线仍参照第 1 节验证性试验中的材性值曲线. UHPC 和 C60 混凝土泊松比均取 0.2.

建模方法与前文对比试验中的有限元模型保持一致.

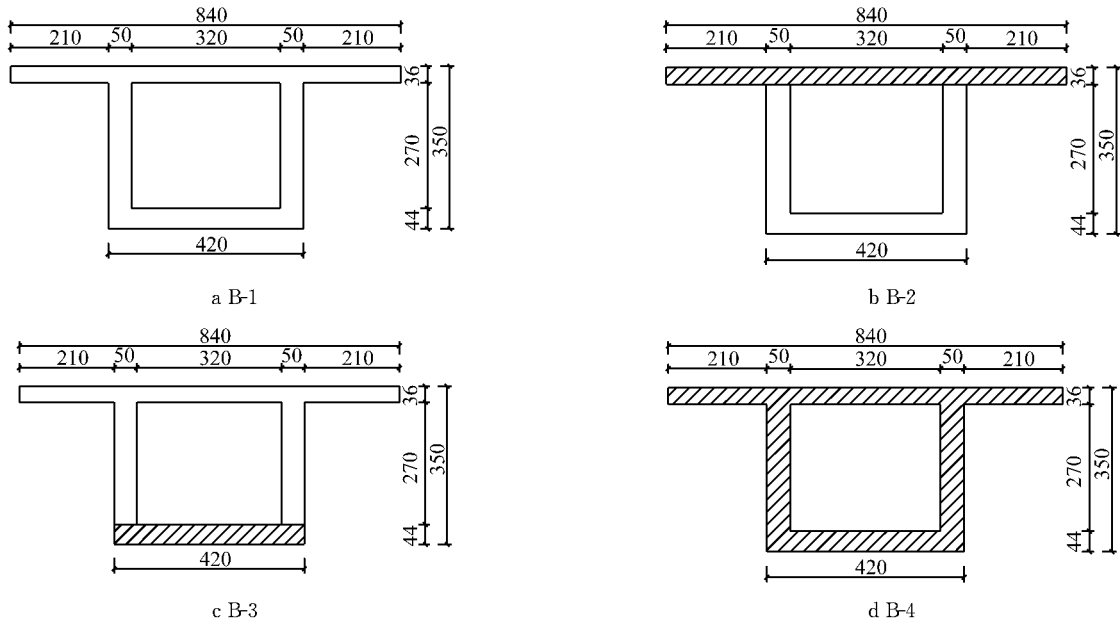


图 9 UHPC-混凝土组合箱形截面(单位:cm)

Fig.9 UHPC-concrete composite box section (unit:cm)

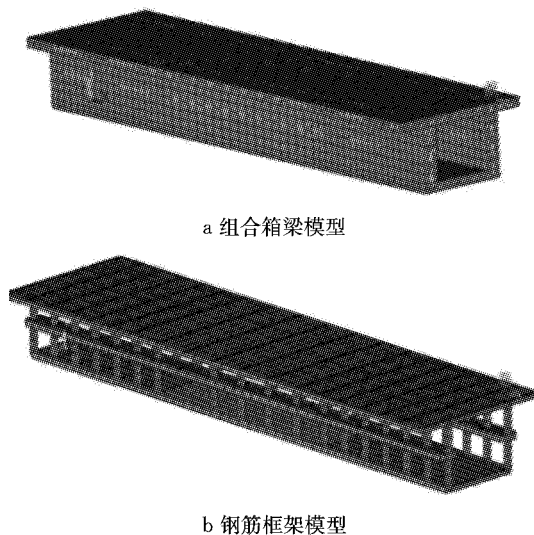


图 10 UHPC-混凝土组合箱梁有限元模型

Fig.10 Finite element mode of the UHPC-concrete composite box girder

3 ANSYS 模型计算结果分析

3.1 应力分析

在 ANSYS 模型分析中,以箱梁发生弯曲破坏时钢筋屈服为计算终点,即受拉区拉应变达到 1.7×10^{-3} ,记录此时受压区混凝土和钢筋的应力.试验梁计算结果见表 6.

由表 6 可知:B-2(顶板取代为 UHPC)与 B-1(全截面 C60)相比,在试验梁破坏时,底板、顶板和钢筋应力基本一致,UHPC 顶板的压应力只有 33.90

MPa,并未完全发挥 UHPC 的受压性能,试验梁的破坏由受拉区混凝土开裂和钢筋屈服控制;B-3(底板取代为 UHPC)在梁体破坏时,底板的拉应力达到 8.26 MPa,充分发挥了 UHPC 的受拉性能和 C60 的受压性能;B-4(全截面为 UHPC)底板极限强度为 9.65 MPa,顶板压应力为 92.30 MPa.

表 6 4 根梁极限状态下应力

Tab.6 Force value should be four beams under ultimate state MPa

| 编号 | 底板 | 顶板 | 钢筋 |
|-----|------|-------|-----|
| B-1 | 2.71 | 31.88 | 335 |
| B-2 | 2.85 | 33.90 | 335 |
| B-3 | 8.26 | 32.46 | 335 |
| B-4 | 9.65 | 90.30 | 335 |

3.2 应变分析

B-1:当施加荷载达到 22 320 kN 时,箱梁纯弯段底部的混凝土应变为 57.6×10^{-6} ,随后沿着腹板向顶板发展.当总荷载达到 89 280 kN 时,ANSYS 模型中底板处钢筋的应变值为 1.681×10^{-3} ,梁体破坏.箱梁应变的分布见图 11a.

B-2:当荷载加载达到 23 250 kN 时,底板混凝土应变为 58.8×10^{-6} ,开裂处混凝土逐渐退出工作.随着荷载的增加,裂缝继续发展.当施加荷载达到 93 000 kN 时,底板处的钢筋应变值为 1.690×10^{-3} ,宣告梁体破坏.箱梁应变的分布见图 11b.

B-3:当荷载加载至 37 200 kN 时,底板处混凝土应变为 177.9×10^{-6} .由于 UHPC 混凝土的极限抗拉强度远大于 C60 普通混凝土,荷载加载至

127 000 kN 时,底板处的 UHPC 混凝土应变值达到极限值 1.692×10^{-3} 。箱梁应变的分布见图 11c。

B-4: 当施加荷载到 66 308 kN 时,纯弯段底部出现裂缝并迅速向上发展,此时箱梁由弹性工作状态转为混凝土开裂工作状态。当施加荷载到 195 000 kN 时,底板和腹板出现新的裂缝,并且裂缝向顶板继续发展,开裂处混凝土逐渐退出工作,钢筋参与受力,钢筋的应力迅速提高。ANSYS 模型中底板处混

凝土的极限应变值为 1.701×10^{-3} ,此时箱梁破坏。箱梁应变的分布见图 11d。

由应变值的变化可以发现 B-2 与 B-1 裂缝发展速度基本一致,说明更换受压区混凝土对裂缝发展影响较小;B-3 裂缝发展速度与 B-1 相比明显缓慢,说明更换受拉区(底板)可以改善组合箱梁的裂缝发展模态;由于钢纤维的掺入,B-4 组合梁整体裂缝发展缓慢,裂缝沿梁高的发展速度明显变缓。

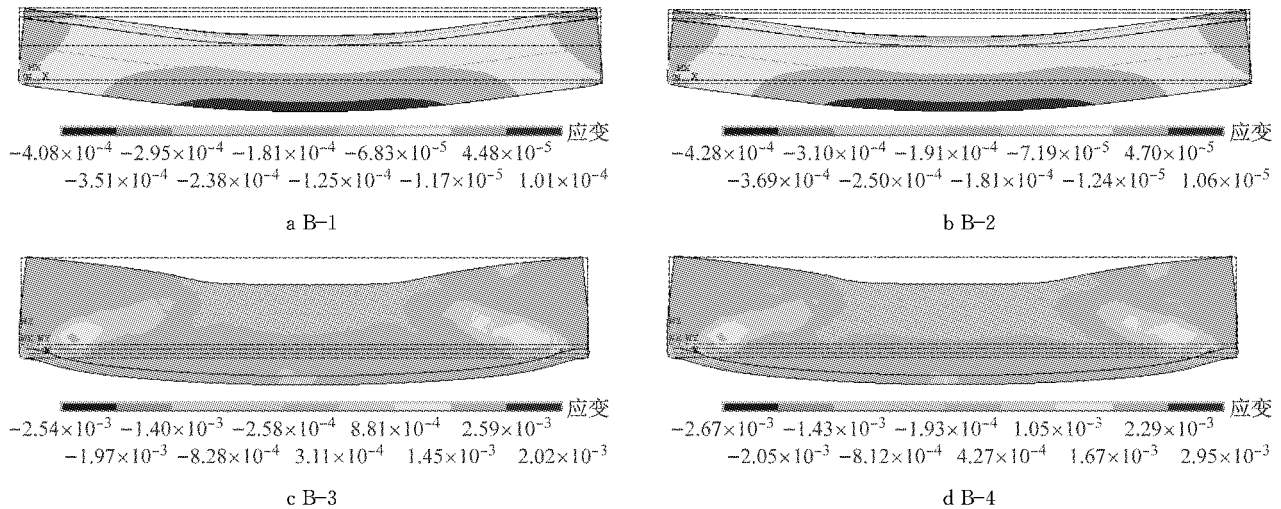


图 11 箱梁应变分布

Fig. 11 Strain distribution diagram of box girder

3.3 抗弯承载能力分析

相应梁的荷载计算结果见表 7。由表 7 可知:①开裂荷载。B-2 梁与 B-1 梁的开裂荷载基本一致,B-3 梁的开裂荷载为 B-1 梁的 1.67 倍,B-4 梁是 B-1 梁开裂荷载的 2.94 倍。B-3 梁和 B-4 梁更能体现出 UHPC 的抗拉性能优势。②极限荷载。B-2 梁与 B-1 梁的极限荷载基本一致,B-3 梁的极限荷载为 B-1 梁的 1.42 倍,B-4 梁是 B-1 梁极限荷载的 2.18 倍。全截面 UHPC 箱梁的极限承载能力最高,但仅更换底板也可大幅提高极限承载力。

表 7 4 根简支梁荷载对比分析

Tab. 7 Analysis of four beams load comparison

| 梁编号 | 开裂弯矩值/(kN·m) | 极限弯矩值/(kN·m) | 开裂荷载相对值 | 极限荷载相对值 | 极限荷载除以开裂荷载 |
|-----|--------------|--------------|---------|---------|------------|
| B-1 | 22 320 | 89 280 | 1.00 | 1.00 | 4.00 |
| B-2 | 23 250 | 93 000 | 1.04 | 1.04 | 4.00 |
| B-3 | 37 200 | 127 000 | 1.67 | 1.42 | 3.41 |
| B-4 | 66 308 | 195 000 | 2.97 | 2.18 | 2.94 |

4 结论

(1)顶板为 UHPC 组合梁的弯曲性能与 C60 箱

梁基本一致,承载能力仅为 C60 箱梁的 1.04 倍。

(2)底板为 UHPC 可以充分发挥 UHPC 的抗拉强度,提高截面的极限承载力(为 C60 箱梁极限承载力的 1.42 倍),该组合形式截面裂缝发展缓慢,梁体延性增加,可以显著改善裂缝发展模态。

(3)全截面 UHPC 箱梁极限承载能力是 C60 箱梁的 2.18 倍,其安全储备远大于普通 C60 混凝土梁,还可以通过合理配筋来充分利用 UHPC 性能。

(4)对比 C60 箱梁,底板为 UHPC 组合梁具有优异的裂缝宽度控制能力,同时 UHPC 可在钢筋屈服前与其全程协同工作,这使得钢筋在某些需要对裂缝宽度进行严格控制的结构类型中具有很高的应用价值。

(5)对于简支箱梁结构,底板为受拉区,对比全截面更换 UHPC,更换受拉区混凝土对于改善结构的受力性能效率更高。因此综合材料性能的发挥程度、裂缝发展模态、极限承载能力、普遍适用性和经济性等因素,推荐采用将受拉区混凝土代替为 UHPC 的组合截面进行设计应用。

(下转第 443 页)