

# FRP 型材-超高性能混凝土组合梁界面性能数值模拟

张普<sup>1</sup>, 李耀宗<sup>1</sup>, 钱辉<sup>1</sup>, 甘春燕<sup>2</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院, 郑州, 450001;

2. 驻马店市宇畅路桥养护工程有限公司, 驻马店, 463000)

**摘要:** 为了研究 FRP 型材-超高性能混凝土组合梁界面应力在荷载作用下的分布规律, 通过 ABAQUS 对 FRP 型材-超高性能混凝土组合梁进行了数值模拟, 选取适当的单元类型, 材料属性和网格划分, 并基于塑性损伤模型, 研究了组合梁在弹性阶段界面应力沿 Y、Z、YZ 方向的分布规律。结果表明: 混凝土塑性损伤模型能够较为准确的模拟 FRP 型材-超高性能混凝土组合梁的静载试验; 且对于 FRP 型材-超高性能混凝土组合梁界面的应力分布进行了分析, 发现界面粘结树脂的抗剪强度是组合界面承载力的控制条件, 界面最大剪应力为抗剪强度的 80.5%。

**关键词:** FRP 型材; 超高性能混凝土; 数值模拟; 界面性能

**中图分类号:** TU312+1

## Numerical Analysis of Bond Behavior of FRP Profile-Ultra-High-Performance Concrete Composite Beams

zhangpu<sup>1</sup>, liyaozong<sup>1</sup>, qianhui<sup>1</sup>, ganchunyan<sup>2</sup>

(1. Zhengzhou University civil engineering College, Zhengzhou, 450001;

2. Zhumadian Yuchang Road and Bridge Maintenance Engineering Co., Ltd., Zhumadian, 463000)

**Abstract:** In order to study the distribution law of interface stress of FRP profile-U-high-performance concrete composite beam under load, the FRP profile-Ultra-high-performance concrete composite beam was numerically simulated by ABAQUS, and the appropriate element type, material properties and meshing were selected. Based on the plastic damage model, the distribution of interfacial stress along the Y, Z and YZ directions of the composite beam in the elastic phase is studied. The results show that the concrete plastic damage model can accurately simulate the static load test of FRP profile-ultra-high-performance concrete composite beams; and for the FRP profile-ultra-high-performance concrete composite beam interface, the shear strength of epoxy resin is the combined interface bearing. The control condition of the force, the maximum shear stress of the interface is 80.5% of the shear strength.

**Key words:** FRP profile; ultra-high-performance concrete; numerical simulation; interface performance

## 0 引言

近年来, 随着我国海洋战略的实施和发展, 海工结构的大规模建设, 普通钢与混凝土组合结构由于其自重大、耐久性能差等特点, 使得结构的跨度与使用寿命收到了较大的限制。且对于非海洋环境下的钢混结构, 每年对于锈蚀钢材与混凝土的修复成本消耗巨大, 因此, 亟需新的材料与结构形式来改善此类问题<sup>[1]~[4]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51508519); 河南省产学研项目 (162107000024); 河南省教育厅高等学校重点项目 (14B560014, 15A560040)

**作者简介:** 张普, 男, 河南周口人, 郑州大学土木工程学院副教授、博士, 新材料、结构. E-mail: zhp1243@163.com

超高性能混凝土( Ultrahigh Performance Concrete, UHPC)的设计基于最大堆积密度理论(Densified Particle Packing), 按照不同的粒径颗粒, 以最佳比例形成最紧的密堆积的高性能材料。基于其材料结构特点, UHPC 具有超高强度( $\geq 150\text{MPa}$ )和良好的耐久性能; 纤维增强复合材料( Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP), 是通过一定工艺按照一定比例将树脂基体与增强纤维组合成型材料, 具有强重比高、耐腐蚀性能好的特点。UHPC 与 FRP 型材两种材料是普通混凝土和钢材解决上述问题较好的替代材料<sup>[5]~[7]</sup>。

对于 FRP 型材和 UHPC 组合梁, 其界面连接是保证两种材料协同作用的基础和保障<sup>[8]~[10]</sup>。但界面处应力数值难以测量, 对于界面性能的评估难以在试验中直接测出。有文献表明<sup>[11]~[13]</sup>, 基于有限元的数值模拟方法研究组合梁的受力性能是一种可行的研究手段。因此, 本文通过对组合梁静载试验模拟, 基于混凝土塑性损伤模型, 对组合梁界面应力进行了分析, 为组合梁界面设计与分析提供参考。

## 1 组合梁有限元模型

### 1.1 组合梁试验概述

本文研究制作一根 GFRP 型材-超高性能混凝土组合梁, 采用三分点加载方法进行四点弯曲试验, 并记录加载过程中组合梁荷载位移。型材截面尺寸如下图 1 所示; FRP 型材-超高性能混凝土组合梁参数详见表 1。

表 1 FRP 型材-超高性能混凝土组合梁参数表  
Tab.1 FRP profile-Ultrahigh-performance concrete composite beam parameter

编号	型材形式	UHPC 高度 (mm)	剪跨比	梁长度
L1	工字型	30	3.0	2300

为了使模型数值解更加精确, 组合梁中各部分的部件, 超高性能混凝土板, FRP 型材, 螺栓, 螺帽, 支座都进行了合理的建模。各部件之间的接触也能体现实际的相互作用。并合理处理 FRP 型材、超高性能混凝土材料本构属性。本文采用有限元分析软件进行梁式静载试验数值模拟, 考虑了 FRP 型材线弹性、超高性能混凝土非线性, 采用混凝土塑性损伤模型, 设置不同的接触属性。并采用合理的网格划分方法使得计算结果更加准确和有效<sup>[10]</sup>。

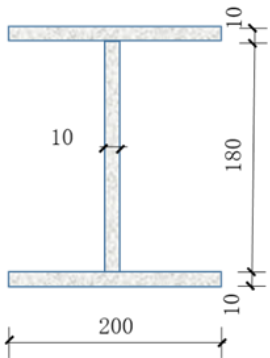


图 1 FRP 型材截面图示  
Fig.1 FRP profile cross-section

(1) 模型各部件建立如下图 2 所示

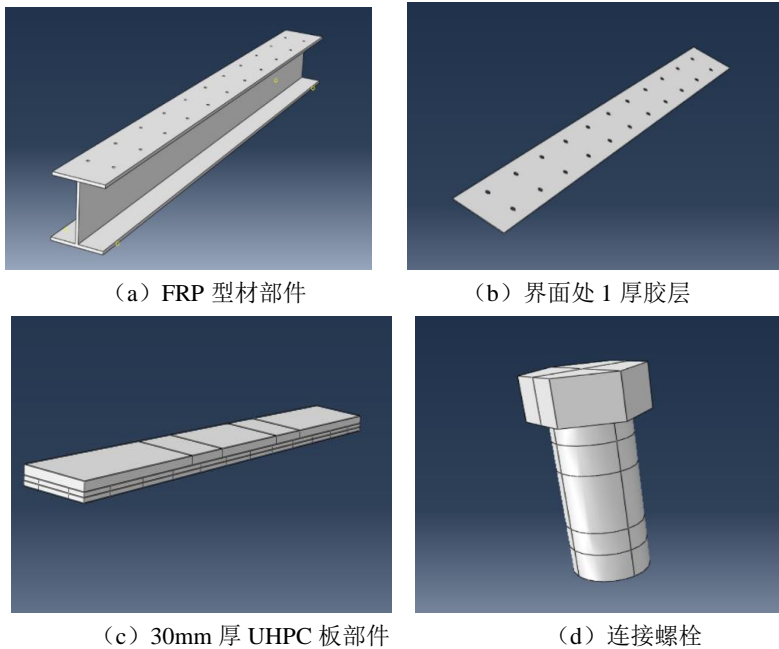


图 2 主要部件图

Fig.2 Main parts

(2) 组合梁整体模型如图 3 所示。

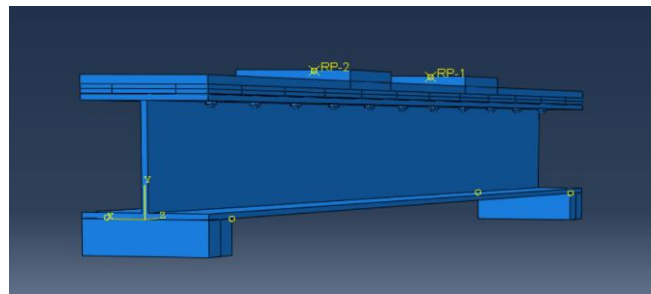


图 3 FRP 型材-超高性能混凝土组合梁有限元模型

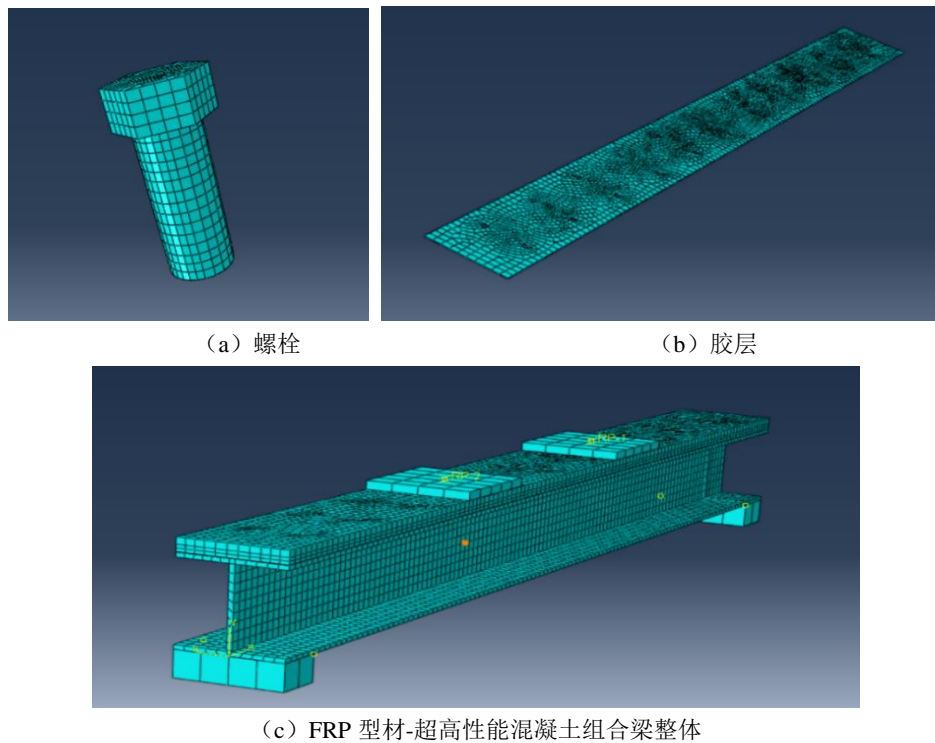
Fig.3 Finite Element Model of FRP Profile-Ultrahigh-Performance Concrete Composite Beam

## 1.2 单元类型的选择

为了得到较为精确的数值解,本次 FRP-超高性能混凝土组合梁数值模拟中,FRP 型材、超高性能混凝土板、螺栓、螺母等部件均采用 Solid 单元 C3D8R 三维实体缩减积分单元进行模拟。

## 1.3 网格划分

在本次分析中不同的部件之间的交界面处,尽量使得网格划分尺寸相近,由于螺栓内嵌贯穿于 UHPC 板、1 厚的胶层、FRP 型材上翼缘,因此在螺栓孔周围的各部件的网格划分需更加精细,本文对此部分采用二次加密的方法进行网格划分。组合梁的网格最大尺寸为 20mm,螺栓网格设置为 2mm。部分网格划分如图 4 所示。



(a) 螺栓

(b) 胶层

(c) FRP 型材-超高性能混凝土组合梁整体

图4 组合梁网格划分

Fig.4 Composite beam meshing

#### 1.4 各部分之间的接触关系

组合梁模型中, 各个界面接触关系较为复杂, 本文主要以下采用几种接触类型:

1) 螺栓和螺帽的连接: 本文组合梁模型的建立, 一个螺栓组装两个螺帽, 如图 5 所示。由于试验结果表明, 螺栓与螺帽的连接较好, 未出现大的相对位移, 因此螺栓与两个螺帽的连接均设置为 tie 约束, 由于螺栓螺帽刚度相近, 主表面于从表面分别设置为螺栓和螺帽, 与实际情况相吻合。

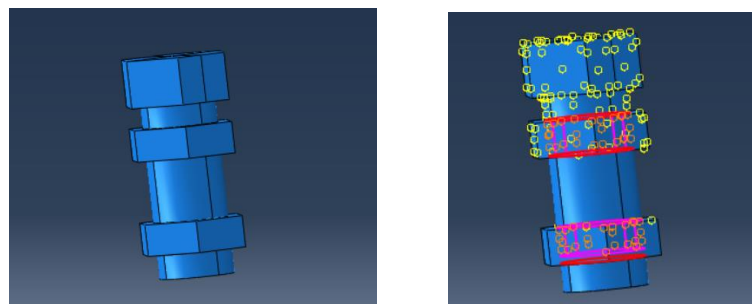


图5 螺栓螺帽界面接触

Fig.5 Bolted nut interface contact

2) 螺栓、螺帽与 UHPC 界面: 考虑到螺栓、螺帽嵌入在超高性能混凝土中, 且在试验全过程中螺栓螺帽完全固定在超高性能土基本无变化, 因此, 将螺栓螺帽与超高性能混凝土接触的部分采用 tie 捆绑约束是合理的。

3) 螺栓与 FRP 型材螺栓孔的接触: 对此部分进行 tie 约束。

4) UHPC 和 FRP 型材上翼缘的接触: 由于超高性能混凝土和 FRP 型材通过螺栓和环氧树脂组合连接, 因此本模型在建立界面关系时将胶层通过 1 厚度的实体代替, 如图 6 所示。胶层的上下表面分别和 UHPC 和 FRP 型材上翼缘 tie 连接, 通过设置胶层的粘性参数, 来模拟界面胶粘的状态。

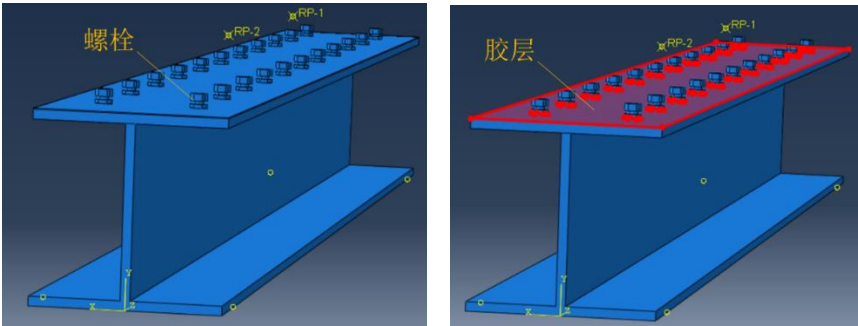


图 6 UHPC 和 FRP 型材连接方式  
Fig.6 connection of UHPC and FRP profiles

界面粘结用环氧树脂的基本力学指标如下表 2 所示。

表 2 环氧树脂基本力学性能

Tab.2 Basic mechanical properties of epoxy resin

性能指标	拉伸强度 /MPa	拉伸弹模 /MPa	抗弯强度 /MPa	层间剪切强 度/MPa	抗压强度 /MPa	伸长率/%
数值	58	2586	85	20	82.5	3.0

1.5 边界条件和加载情况

本组合梁模型加载与实际试验方案对应，采用四点弯曲试验，梁两端支座处建立支座部件，支座被分割成两部分，通过铰支约束支座中线来模拟简支梁铰接（如图 7）。梁三分点处增加两个垫片，采用集中荷载加载，加载方式如图 8 所示。

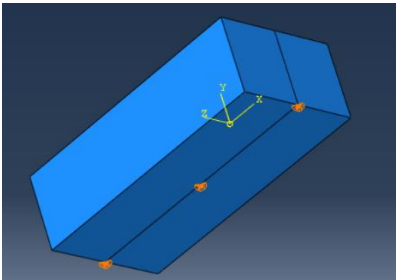


图 7 边界条件  
Fig.7 Boundary conditions

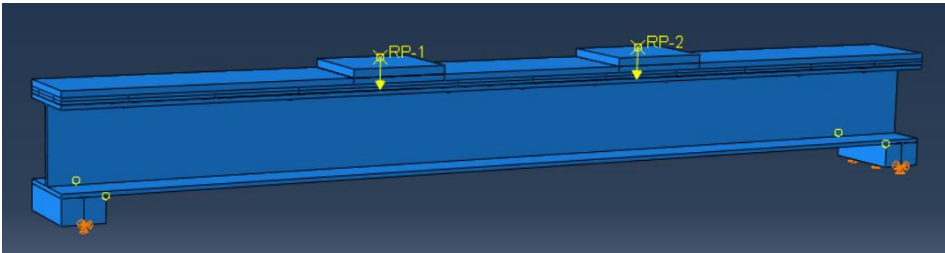


图 8 加载方式  
Fig.8 Loading method

1.6 材料本构模型选取

1.6.1 螺栓和螺帽

这两种材料采用理想弹塑性的直线模型，弹性模量即斜线斜率，拉力和压力的性能一致，钢材本构模型见图 9。

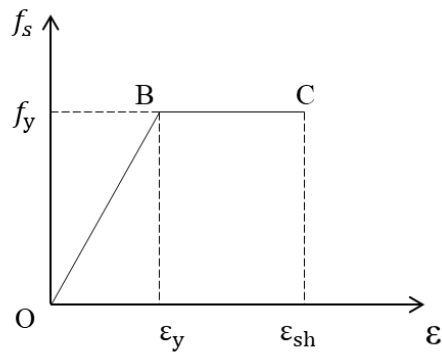


图9 螺栓理想弹塑性本构  
Fig.9 Bolt constitutive

1.6.2 超高性能混凝土本构

135 超高性能混凝土本构模型采用如图 10 所示<sup>[14]~[16]</sup>:

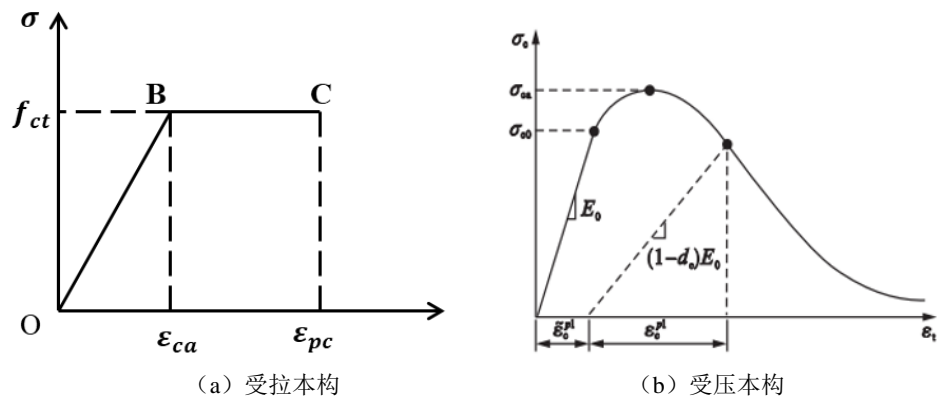


图 10 UHPC 本构模型  
Fig.10 UHPC constitutive

2 模拟结果分析

2.1 适用性验证

本节对 FRP 型材-超高性能混凝土组合梁荷载位移曲线在弹性阶段进行了对比验证(图 11)，结果表明荷载位移曲线差异较小，结果较为可靠。

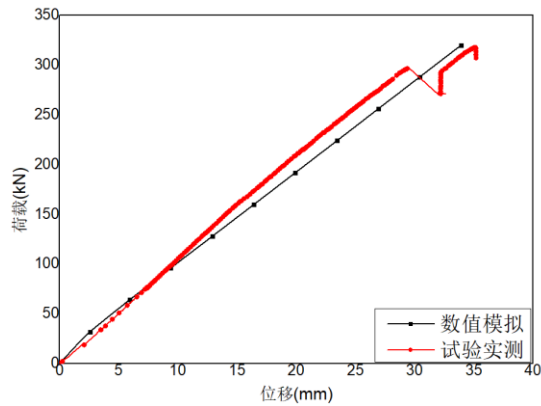


图 11 L-2 荷载位移曲线  
Fig. 11 L-2 load displacement curve



对于 FRP 型材-UHPC 组合梁, FRP 型材与超高性能混凝土界面在承载过程中受力较为复杂, 且在试验过程中试件均出现了不同程度上的界面损伤和破坏。因此, 本文对界面未出现滑移时螺栓最不利位置分布、界面胶层最不利位置分布及应力变化规律进行了分析。

150 2.2 界面应力分析

本节对三个方向界面胶层应力进行了数值模拟分析, 包括 Z 向(长度方向)、Y 向(沿高度方向)、和 YZ 向(面内剪切) 应力分布及应力水平。应力云图如图 12~图 14 所示。

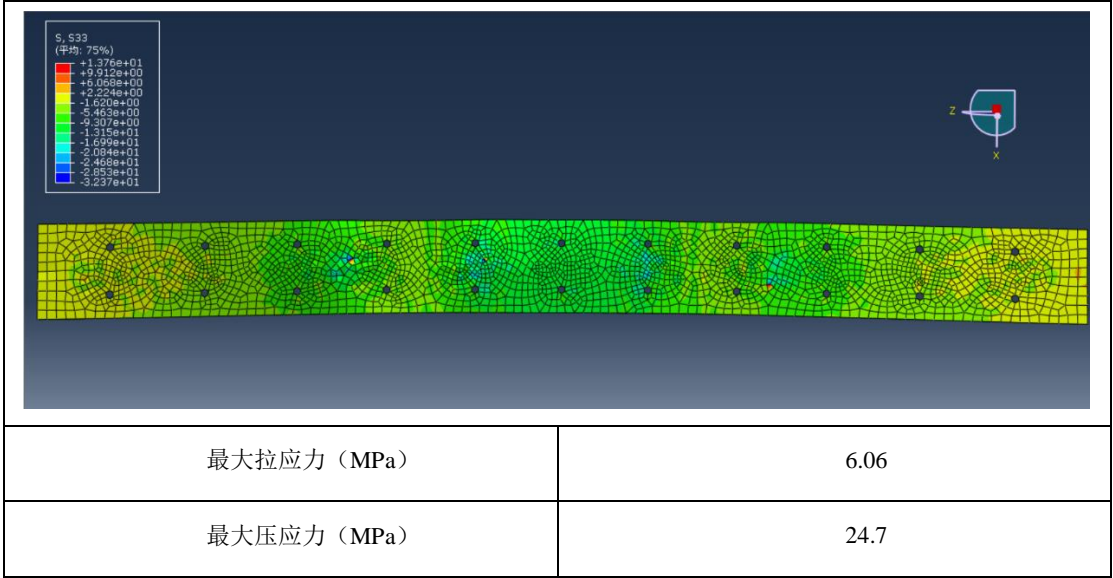


Fig.12 Z-direction adhesive layer normal stress

图 12 Z 方向胶层正应力

155 图 12 所示为 FRP 型材与 UHPC 界面胶层沿长度方向的正应力云图, 由图中结果表明, 在组合梁纯弯段界面沿长度方向应力从加载点处向梁端部压应力逐渐减小, 在接近组合梁端部的位置, 胶层应力状态从受压转变为受拉, 由于胶层界面与型材表面、UHPC 表面均为捆绑连接, 界面部分位置易出现应力集中现象, 忽略此部分的影响。因此, 界面最大拉应力取端部 6.06MPa, 为抗拉强度的 10.4%。最大压应力为加载点下方, 最大压应力值为 24.7MPa, 为抗压强度的 30.0%。

160

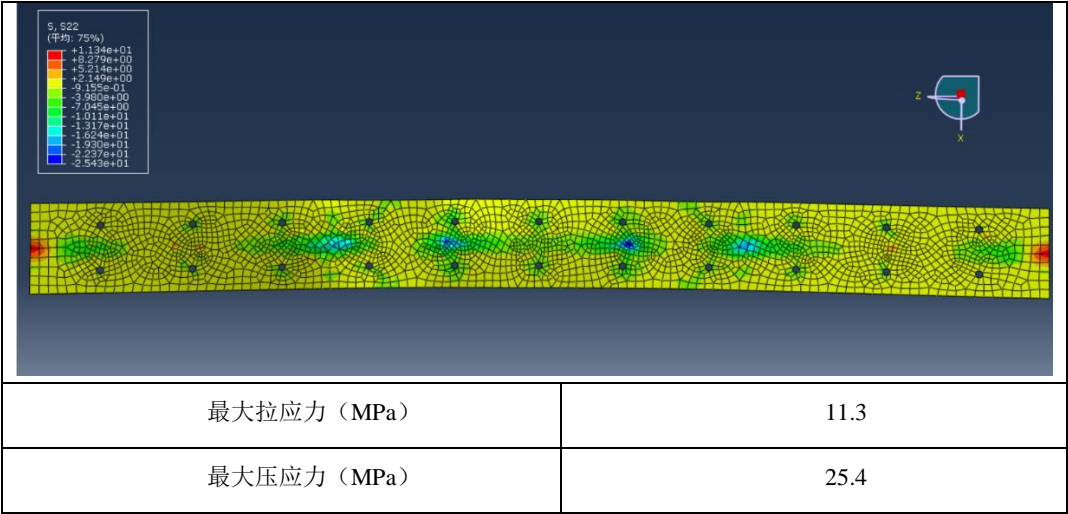


Fig.13 Y-direction interface normal stress

图 13 Y 向界面正应力

图 13 结果表明, 沿 Y 方向最大压应力位置为加载点处下方, 从加载点到支座处界面胶

层应力先减小后增大，剪跨段部分胶层有受拉区出现；在支座外侧，界面胶层出现较大的拉应力，达到 11.3MPa，为抗拉强度的 19.5%。加载点处最大压应力为 25.4，为抗压强度的 30.7%。

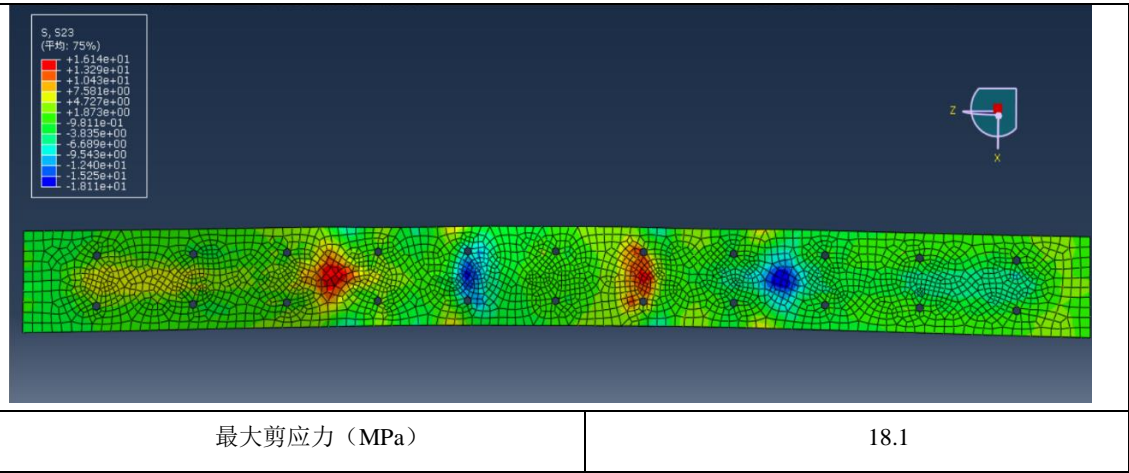


Fig.14 YZ interface shear stress

图 14 YZ 界面剪应力

图 14 结果表明，组合梁界面最大剪应力出现在加载点处下方，且较为集中，最大剪应力达到 16.1MPa，为抗剪强度的 80.5%。试验中胶层出现了剥离现象，如图 11 中荷载位移曲线上的突变位置所示。这是由于实际加载过程中，胶层与型材、UHPC 接触界面粘结强度低于 20MPa 而提前发生部分剥离，从而使组合梁刚度下降，界面部分剥离前后刚度下降 14.6%。

### 3 结论

本文建立了 FRP 型材-UHPC 组合梁数值模拟，并通过荷载位移曲线与试验结果进行了对比分析，验证了模型的合理性，结果表明，混凝土塑性损伤模型对于 FRP 型材-UHPC 组合梁具有较好的适用性。

通过在模型中实现界面的完全连接，分析了三个方向界面应力的分布规律：①沿 Z 方向的正应力从加载点到支座端部，正应力先从受压逐渐变为受拉，在本模型中最大拉应力达到抗拉强度的 10.4%，压应力达到抗压强度的 30.0%；②沿 Y 方向支座端部出现最大拉应力达到抗拉强度的 19.5%，最大压应力达到抗压强度 30.7%；③沿 YZ 方向剪应力达到抗剪强度的 80.5%。界面承载力主要受抗剪强度控制。

#### [参考文献] (References)

- [1] 吕志涛. 新世纪的土木工程与可持续发展[J]. 交通运输工程学报,2002,2(1):1-5.
- [2] 柯伟. 中国腐蚀调查报告[M]. 北京:化学工业出版社, 2003: 118-122
- [3] 侯保荣, 张盾, 王鹏. 海洋腐蚀防护的现状与未来[J].中国科学院院, 2016,31(12):1326-1331.
- [4] 陈绍聪. 海洋工程混凝土结构耐久性研究及其寿命预测[D]. 山东: 青岛理工大学, 2015
- [5] Zhu H, Zhang P, Wu G, et al. Experimental Study on Bending Performances of FRP-Concrete Composite T-Beams with Prefabricated BFRP Shell[M]. Advances in FRP Composites in Civil Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 232-236.
- [6] 邹星星, 冯鹏, 王景全. Perforated FRP ribs for shear connecting of FRP-concrete hybrid beams/decks[J]. Composite Structures 152 (2016) 267-276.



- [7] 杨森. FRP 型材-混凝土组合梁的抗剪性能试验及理论研究[D]. 河南: 郑州大学, 2018.
- [8] 金慧颖. GFRP-混凝土组合梁考虑界面滑移的力学性能研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [9] 形修正, 工字型钢-混凝土组合梁竖向抗剪性能数值分析[J]. 钢结构 DOI: 10.13206 / J.gJgZ01512008.
- 195 [10] Pu Zhang, Huana Liu, Danying Gao. Shear-Bond Behavior of the Interface between FRP Profiles and Concrete by the Double-Lap Push Shear Method[J]. American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000795.
- [11] 王一泓. 橡胶集料混凝土与钢组合梁试验研究与精细化数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- 200 [12] 马燧. 基于混凝土损伤模型的 PC 梁力学性能有限元分析 [J]. 混凝土 DOI : 10.3969/j.issn.1002-3550.2018.07.012
- [13] 张普, 高丹盈, 朱虹. FRP 板-混凝土湿黏结界面性能的试验研究与数值模拟 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(02): 108-114.
- [14] 郭晓宇. 超高性能混凝土单轴受压本构关系 [J]. 东南大学学报, DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2017.02.028.
- 205 [15] 管品武, 涂雅箐, 张普, 唐国斌. 超高性能混凝土单轴拉压本构关系研究现状 [J/OL]. 复合材料学报: 1-13 [2019-04-21]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180703.004>.
- [16] UCHIDA Y, TANAKA Y, KATAGIRI M, et al. Outlines of JSCE "Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft)" [J]. Concrete Journal, 2004, 43(3): 3-8.
- 210