

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.219

UHPC-NC 组合构件界面行为研究

欧阳娜¹, 邓舒文²

(1.江西省公路科研设计院, 南昌 330002; 2.湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:随 UHPC 材料兴起, 现已有较多研究表明将 UHPC 材料应用于结构接缝处可极大程度地增强结构的整体性能, 接缝界面处的粘结强度也逐渐引起学术界关注。然而, 如何对结合面处进行有效的有限元模拟却始终未见统一有效的方式。文章在广泛的文献调研基础上, 总结现有试验数据, 对比试验方法, 得到 3 种不同粗糙度界面粘聚力分别为 2.24 MPa, 2.37 MPa 和 2.66 MPa, 3 种界面摩擦系数分别为 1.42, 1.63 和 1.64; 提出基于粘聚力和抗剪强度的 UHPC-NC 界面强度计算式; 基于接触-分离模型分别建立适用于受拉为主构件及压剪为主构件的 3D 有限元模型, 提出适用于光滑界面、中等粗糙界面及粗糙界面的粘聚力参数、接触损伤相关参数; 为验证有限元参数有效性, 建立多个文献试验有限元模型并与结果对比较为吻合, 可为后期有限元计算提供参考。

关键词: UHPC-NC 组合构件; 界面粘聚力; 摩擦系数; 接触-分离模型

中图分类号: U442

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)03-063-12

Study on the interfacial properties of UHPC-NC composite component

OUYANG Na¹, DENG Shuwen²

(1. Jiangxi Highway Research and Design Institute, Nanchang 330002, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: With the rise of ultra-high performance concrete (UHPC), researches show that UHPC as connection elements in components can improve the performance of the overall structures. The bond strength of the joint interface has drawn increasing attention worldwide. However, there is limited information on the effect model of the interfacial properties between UHPC and normal concrete. In present study, by summarizing existing experimental results and comparing experimental methods on the basis of extensive literature research, three interfacial cohesion values with different roughness were obtained (i.e. 2.24 MPa, 2.37 MPa and 2.66 MPa), with friction coefficient of 1.42, 1.63 and 1.64, respectively. The friction coefficient calculated by direct tension test was generally larger than that obtained by splitting or bending test. The formula of UHPC-NC interface bonding strength based on cohesion and shear strength was proposed. Based on traction-separation model, a 3D finite element model suitable for tensile-dominated components and compressed-shear-dominated components was established. The cohesion and contact damage parameters suitable for smooth, medium rough and rough interface were proposed. Several finite element models of the experiments in past literature were established to verify the validity of the proposed traction-separation parameters. The finite element calculation and experimental results were well fitted,

收稿日期: 2019-10-08 网络出版日期: 2019-10-12

作者简介: 欧阳娜(1989—), 女, 工程师, 主要从事桥梁与隧道结构的设计与计算。

通讯作者: 邓舒文, 女, 博士研究生, 主要从事超高性能混凝土在桥梁结构中的应用研究, (E-mail) dengsw@hnu.edu.cn。

which can provide reference for later FEM study.

Keywords: UHPC-NC composite components; interfacial cohesion; friction coefficient; traction-separation model

超高性能纤维增强混凝土(UHPC, ultra high performance concrete)是一种纤维增强型混凝土,主要由水泥、硅灰、钢纤维、水及高效减水剂等根据最大密实度理论配合而成。不同于常规混凝土材料,UHPC 通常具有极低水灰比,极少或无粗骨料,内部掺杂高强钢制纤维等特征。UHPC 材料根据内部钢纤维掺量不同,其抗压强度可达 120~400 MPa,抗拉强度可达 6~30 MPa^[1]。其优异的力学性能引起工程界瞩目,随 1997 年第一座 UHPC 桥梁^[2]在加拿大建造而成,UHPC 的应用在世界上逐步推广^[3-6],国内对 UHPC 的应用起步于 2006 年迁曹铁路线滦柏干渠大桥的 20 m 后张预应力桥梁^[7],随后邵旭东教授提出使用 UHPC 材料增强钢桥面的应用在全国大范围推广,目前已用于多处钢结构桥梁的建设或加固^[8-9]。

然而,由于 UHPC 内部掺加昂贵的钢纤维,其价格通常是普通混凝土的数十倍,因此,较为经济的方式是将 UHPC 材料应用于常规混凝土结构中重点受压或受拉部位,例如预制结构的节点接缝处。目前,国外研究者对 UHPC 接缝性能做了较多研究^[10-14],国内的管亚萍等^[15]对应用于与 UHPC π 型桥梁的纵向接缝进行了试验研究和理论分析;Pan 等^[16]提出适用于钢-RPC 轻型组合桥梁结构的不同接缝构造形式;邵旭东等^[17]对适用于钢-RPC 轻型组合桥梁结构的 RPC 湿接头进行了不同配筋形式的弯曲试验;陈贝^[18]对不同形式、不同配筋的 UHPC 接缝连接 NC(normal concrete)面板进行了试验研究和理论分析。

上述对 UHPC 接缝的试验研究中,预制-现浇混凝土界面(新-老混凝土界面)破坏的现象较为常见,界面强度在某些情况下成为接缝强度的控制因素。国外对 UHPC 与传统混凝土界面粘结的研究较为广泛,Carbonell 等^[19]对不同粗糙程度的 NC 表层铺设 UHPC 的界面进行多种环境下的劈裂试验,同时对不同结合角度的试件进行了斜剪试验,并采用拔出试验对粘结拉伸强度进行了测试;Tayeh 等^[20-21]采用斜剪和劈裂试验研究了不同粗糙程度 NC 基体和 UHPC 表层之间的粘结能力,并于 2014 年^[22]发表了关于拔出试验相关的报导;Harris 等^[23]对 UHPC-NC 组合试件进行了不同粗糙度的斜剪和劈裂试验;Shafieifar 等^[24]对 UHPC-NC 组合试件进行了三点弯曲、直接剪切和斜剪试验,但没有对界面进行处理;国内的研究主要有廖肇乾^[25]对 UHPC-NC 组合试件进行了斜剪、劈裂和轴拉试验;张孝臣^[26]对 UHPC-NC 界面的冻融性能进行了短期加载试验;王兴旺^[27]进行了不同界面形式和混凝土等级的 UHPC-NC 抗剪性能试验研究。

高昂的研究经费促使了有限元软件的兴起,有限元计算现已成功应用于绝大多数工程设计、计算和实施中,目前对于常规结构的计算发展已十分成熟,但却鲜少见到关于接缝界面的接触模拟研究。接缝结构作为预制结构的节点,其强度几乎成为结构的控制因素,因此,对新兴材料 UHPC 加固传统混凝土进行有效的有限元计算拟合十分重要。笔者基于现有文献,总结试验结果和数据,并以其中一文试验数据为例,建立一个可以高度拟合 UHPC-NC 界面行为的 3D 有限元模型,以期为后来的计算提出可借鉴的拟合参数。

1 UHPC-NC 界面粘结强度分析

对于新老混凝土界面粘结强度的理论分析主要基于两种常规混凝土的结合面,继 Anderson^[28]根据推出试件提出的界面抗剪强度公式后,Birkeland^[29]提出了对其后研究产生深远影响的摩擦抗剪理论,该理论至今仍被各混凝土规范^[30-34]作为理论基础,其理论计算式为

$$\nu_n = \mu \rho f_y, \quad (1)$$

式中: ν_n 为截面抗剪强度; μ 为界面摩擦系数; ρ 为抗剪钢筋配筋率; f_y 为抗剪钢筋屈服强度。后来的研究均是基于上述摩擦抗剪理论计算式提出的线性或非线性的计算式,同时部分学者^[35]增加了界面粘聚力影响,式(1)基本形式变为

$$\nu_n = \tau_{\text{coh}} + \mu(\rho f_y + \sigma_n)。 \quad (2)$$

上述规范中,除 ACI 规范^[30]和 PCI 规范^[33]仍保地仅计入混凝土界面的抗剪强度外,其余规范均采用了考虑粘聚力影响的式(2),以 AASHTO 规范^[31]为例,其基本表达式为

$$\nu_u = \underbrace{cA_{cv}}_{\text{粘聚力影响}} + \underbrace{\mu(A_{vf}f_y + P_c)}_{\text{摩擦抗剪影响}}, \tag{3}$$

式中: A_{cv} 为界面处混凝土面积; A_{vf} 为抗剪钢筋面积; c 为粘聚力大小; μ 为摩擦系数; f_y 为抗剪钢筋屈服强度; P_c 为正交于抗剪界面的压力大小,若界面处受拉时, P_c 为0。值得注意的是,式中 c 和 μ 的数值取决于破坏面所在位置,若破坏面位于基体中,则 c 和 μ 为基体的粘聚力和摩擦系数。同时 AASHTO 指出,对于不同的两种材料交界面,应根据试验结果决定 c 和 μ 的大小。目前,对于 UHPC-NC 界面 c 和 μ 的大小的试验研究中,粘聚力 c 主要通过拔出、劈裂、轴拉、弯拉试验等确定;摩擦系数 μ 则主要通过斜剪、直剪试验等确定,试验方法示意如图 1 所示。

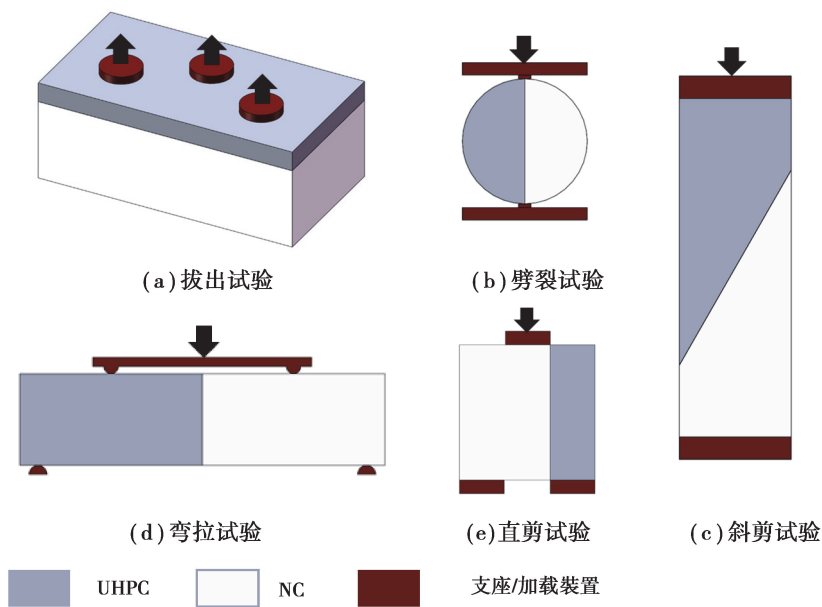


图 1 试验方法示意图

Fig. 1 Schematics of test method

1.1 粘聚力 c 的确定

过往文献中先后浇注或不同材料组合试件的试验结果基本表现为 3 种破坏模式,即破坏于较弱基体、破坏于界面及较强基体损坏。对于 UHPC-NC 界面,绝大多数破坏发生于 NC 基体上,同时 Carbonell^[19]指出劈裂试验获得的粘聚力大小大于拔出试验。对于拔出试验和轴拉试验,使用式(4)来计算粘聚力大小。

$$T = \frac{P}{A}, \tag{4}$$

式中: T 为拉伸破坏强度; P 为最大施加荷载; A 为接触界面的混凝土面积。对于劈裂试验,劈裂强度的计算式为

$$T_s = \frac{2P}{\pi A}, \tag{5}$$

式中: T_s 为试件劈裂强度; P 和 A 意义同上。对于弯拉试验,其粘结强度的计算式为

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}, \tag{6}$$

式中: L 为试件跨径; b 为试件截面宽度; d 为试件截面高度,其余同上。对上述文献中粘聚力大小、试验方式及破坏模式进行汇总,如表 1 所示。

表 1 粘聚力大小及破坏模式汇总
Table 1 Summary of cohesive strength and failure modes

| 界面形式 | 强度/MPa | 测试方法 | 文献出处 | 破坏模式 |
|------|-----------|------|----------|----------------------------------|
| 光滑 | 2.30 | 拔出 | [22] | NC 基体破坏 |
| | 1.85 | 劈裂 | [20, 21] | 界面破坏 |
| | 2.77 | 劈裂 | [25] | 粘结面失效, NC 部分脱落 |
| | 2.18 | 轴拉 | [25] | 粘结面失效, NC 部分脱落 |
| | 3.60 | 劈裂 | [19] | 粘结面失效(33%~58%), NC 基体破坏(42%~67%) |
| | 3.60 | 劈裂 | [36] | 粘结面失效, NC 部分脱落 |
| | 2.80 | 弯拉 | [24] | 粘结面失效 |
| 中等粗糙 | 2.2~2.3 | 拔出 | [19] | 绝大部分破坏于 NSC 基体 |
| | 2.32~2.34 | 拔出 | [22] | NC 基体破坏 |
| | 2.96~3.79 | 劈裂 | [22] | NC 基体破坏 |
| | 3.7~4.1 | 劈裂 | [19] | 绝大部分破坏于 NSC 基体 |
| | 3.11 | 劈裂 | [25] | 粘结面失效, NC 部分脱落 |
| | 2.50 | 轴拉 | [25] | 粘结面失效, NC 部分脱落 |
| | 3.6~4.1 | 劈裂 | [36] | 粘结面失效, NC 部分脱落 |
| 粗糙 | 3.97 | 劈裂 | [20, 21] | 粘结面失效, NC 部分脱落 |
| | 2.40 | 拔出 | [19] | NC 基体破坏 |
| | 4.10 | 劈裂 | [19] | NC 基体破坏(83%) |
| | 3.85 | 劈裂 | [25] | NC 基体破坏 |
| | 2.92 | 轴拉 | [25] | NC 基体破坏 |
| | 4.1 | 劈裂 | [36] | 粘结面失效, NC 部分脱落 |

由表 1 可见,相同测试类型时,不同测试方法得到的粘聚力分别为 2.18~2.92 MPa(拔出/轴拉),2.77~5 MPa(劈裂试验),2.8 MPa(弯拉试验)。与文献[19]所述一致,劈裂试验得到的结果普遍大于直接拉伸试验,而弯拉试验则介于二者之间。不同粗糙程度界面的拔出/轴拉试验得到的粘聚力分别为 2.24 MPa(光滑界面),2.37 MPa(中等粗糙界面),2.66 MPa(粗糙界面)。对于粗糙界面,其破坏位置均位于 NC 基体内,因此,此时得到的粘结强度也应为 NC 基体的拉伸强度,而不是界面的粘结强度。

1.2 摩擦系数 μ 的确定

与粘聚力一样,摩擦系数的确定也同样分为 3 种破坏形式及 3 种界面形式,通常采用斜剪试验经过倒推确定。法向应力和切向应力及摩擦系数可根据摩尔库伦定理(图 2)及式(7)~式(9)确定。

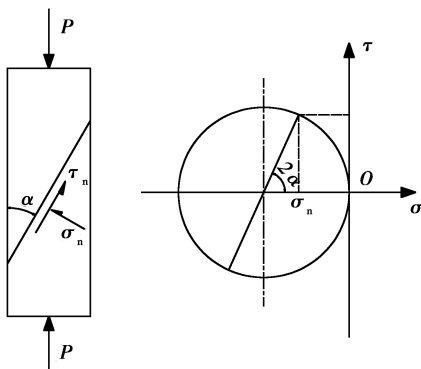


图 2 斜剪试件计算和摩尔-库伦圆

Fig. 2 Slant shear stress calculation and Mohr-Coulomb circle

$$\sigma_n = \frac{P}{A} \sin 2\alpha, \tag{7}$$

$$\tau_n = 0.5 \frac{P}{A} \sin(2\alpha), \tag{8}$$

$$\tau_n = c + \mu \sigma_n, \tag{9}$$

式中: σ_n 为界面处的法向应力; τ_n 为界面处切向应力; α 为界面斜交角; A 为加载处截面面积,其余符号同上。对文中提及文献得到的正应力、法向应力及摩擦系数汇总如表 2 所示。

表 2 摩擦系数及破坏模式汇总表

Table 2 Summary of friction coefficient and failure modes

| 界面形式 | σ_n | τ_n | 破坏模式 | c | 测试 | μ | 文献出处 |
|------|------------|----------|---------|------|------|-------|----------|
| 光滑 | 5.59 | 9.69 | 界面破坏 | 5.00 | 劈裂 | 0.84 | [36] |
| | 4.34 | 7.52 | 界面破坏 | 1.85 | 劈裂 | 1.31 | [20, 21] |
| | 6.97 | 12.07 | 界面破坏 | 2.18 | 轴拉 | 1.42 | [25] |
| | 32.28 | 28.94 | 界面、基体复合 | 2.80 | 弯拉 | 0.81 | [24] |
| 中等粗糙 | 8.90 | 15.42 | NC 破坏 | 3.97 | 劈裂试验 | 1.29 | [20, 21] |
| | 9.29 | 16.09 | 界面、基体复合 | 2.50 | 轴拉 | 1.46 | [25] |
| | 7.70 | 16.13 | NC 破坏 | 2.25 | 拔出 | 1.80 | [19] |
| | 12.30 | 21.70 | NC 破坏 | 3.70 | 劈裂 | 1.46 | [36] |
| 粗糙 | 12.32 | 21.33 | NC 破坏 | 2.92 | 轴拉 | 1.49 | [25] |
| | 6.85 | 14.60 | NC 破坏 | 2.40 | 拔出 | 1.78 | [19] |

由表 2 可见,直接拉伸试验(轴拉/拔出)得到摩擦系数普遍大于劈裂或弯拉,3 种界面摩擦系数均值分别为 1.42,1.63 和 1.64。同样,粗糙界面和部分中等粗糙界面的破坏发生于 NC 基体处,因此,此时得到的数值为 NC 基体的摩擦系数,而非界面处的。

至此,可根据上述试验结果得到基于 AASHTO 规范的 3 种界面形式的粘结强度分别为

$$\nu_u = \begin{cases} 2.24A_{cv} + 1.42(A_{vf}f_y + P_c), \\ 2.37A_{cv} + 1.63(A_{vf}f_y + P_c), \\ 2.66A_{cv} + 1.64(A_{vf}f_y + P_c). \end{cases} \quad (10)$$

2 有限元模型参数拟合

目前工程中多使用有限元方法预测结构承受荷载后的响应,而对于先后浇注或不同材料之间的界面行为的模拟却没有统一的方式。以 ABAQUS 软件为例,ABAQUS 中提供多种模拟界面行为的选项,例如,部分学者使用完全粘结(tie)对界面行为进行简化^[37-39];还有学者假设界面间存在一种粘结材料^[24, 40],通过试验拟合得到界面材料的参数;部分学者仅在界面间设置摩擦系数^[41-42];Dias-da-Costa 等^[43]设置一种零厚度的线性接触单元模拟结合面。

对于 UHPC 接缝的有限元计算研究,Chen^[44]对包含接缝的 UHPC 预应力 π 型梁进行有限元模拟,接缝界面处设置为法向硬接触、切向摩擦系数,并指出不可使用完全粘结模拟接缝和梁体之间的行为;Grace^[42]对使用 UHPC 作为剪力连接件的 5 片 T 型梁进行有限元拟合,接缝部位采用了完全连接,这个结论是基于对 UHPC-NC 组合试件的试验得到的;Steinberg 等^[45]对相邻箱梁之间的剪力键进行模拟,剪力键和箱梁之间设置 0.8 的摩擦系数和 5.5 MPa 的剪应力,同时,设置混凝土之间的接触刚度为 2.7 MPa/mm, UHPC 和普通混凝土间接触刚度为 13.6 MPa/mm,但此模型与试验结果间存在一定差异;Harris^[36]基于 UHPC-NC 组合试件的劈裂、斜剪和拔出试验结果,采用完全连接对二者的界面行为进行了拟合;Hussein 等^[46]采用接触-分离模型对 UHPC-HPC 界面行为进行拟合,并对不同光滑程度的界面进行参数拟合,得到 3 种粗糙度界面的接触-分离模型参数;Jang^[47]对 UHPC 接缝进行推出试验,并采用接触-分离模型对推出试件进行有限元拟合,得到两种界面的拟合参数。

上述方法中,完全连接为界面连接的一个上限状态,根据表 1 和表 2 的试验结果,当界面形式为粗糙时,破坏发生于 NC 基体,此时可假设界面完全连接;当界面形式为中等粗糙和光滑时,使用完全粘结会过高地估计试件的承载力而得到一个错误的结论。当仅设置摩擦系数时,即与式(1)一致,计算仅计入了界面间摩擦系数的影响,而忽略了界面间粘聚力的影响,大量的试验结果已经证明了粘结力的存在,即使是光滑界面,粘结力也不容忽视,因此,仅考虑摩擦系数时会过小地估计试件承载力。Chen^[45]采用默认系数的硬接触和切向摩擦系数相结合的方式,但此接触设置并未考虑界面形式。根据上文众多试验结果可见,光滑、中等粗糙和特别粗糙界面之间的粘聚力和摩擦系数均是不相同的,因此,此方法并不具有通用性;Steinberg 等^[45]采用的方法设置了较多参数,但结果却差强人意。

设置界面粘结材料是一种较为理想的方法,可通过试验获得界面材料的参数,Shafieifar^[24]通过弯拉、直接剪切及斜剪试验获得了 UHPC-NC 组合试件界面材料的弹性模量、泊松比及 CDP(concrete damage plastic)相关参数,并设置界面厚度为 100 μm ,但并未对此数值做出进一步解释。韩菊红等^[48-49]通过对新老混凝土粘结面破坏模式的研究中,也提出类似的结论,并将此界面层定义为“断裂过程区”,通过试验与理论分析得到断裂过程区长度为

$$l = \frac{3}{2\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{f'_t} \right)^2, \quad (11)$$

式中, K_{Ic} 为粘结断裂韧度, f'_t 为界面层抗拉强度,二者皆为界面材料的特性,需要通过试验确定,根据韩菊红^[48]的研究,新老混凝土之间的断裂过程区长度为 26.4 mm,这个结果与 Shafieifar^[24]相差巨大,且当接缝界面为异形时(例如锯齿形、燕尾型等),单独建立界面层难度较大。

Hussein^[46]及 Jang^[47]采用了接触-分离模型模拟界面的接触行为,并分别提出了适用于 UHPC-HPC 和 UHPC-UHPC 界面的模型参数,包括 3 个方向的接触刚度和初始分离强度、塑性分离距离等,该模型可根据界面粗糙度不同而设置不同的参数,且可作为常规接触方式设置于模型接触面,是一种较为理想的接触设置方式。

ABAQUS 中对接触-分离模型的定义主要有 2 种方式^[50]:一种是定义粘聚力单元(cohesive element),此单元可定义为零厚度,多用于多层复合材料间的损伤模拟,主要有 COH3D8、COH3D6 等单元;另一种为

基于面的粘聚力接触行为(cohesive behavior),是一种接触属性,其理论基础与粘聚力单元十分相似,但比粘聚力单元定义更加简单。典型的接触-分离模型响应如图 3 所示。

其中 $t_n^0(t_s^0, t_t^0)$ 分别为 3 个坐标轴方向的最大分离应力, $\delta_n^0(\delta_s^0, \delta_t^0)$ 则为对应的位移, $\delta_n^f(\delta_s^f, \delta_t^f)$ 为最大分离距离。接触-分离模型的弹性阶段可表述为

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K\delta, \quad (12)$$

式中, K 为弹性阶段的接触刚度矩阵,同样包含 3 个方向。当粘聚力达到峰值点(即图 3 中的 t^0)时,损伤

开始发生。后期的损伤演化段可表述为线性或非线形式,值得注意的是,这里的损伤是指接触属性中的损伤,而非材料特性值。ABAQUS 中对接触损伤准则的定义分为 4 种:最大应力准则,最大分离准则,二次应力准则和二次分离准则,其中最大应力准则形式简单,定义明确,为

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{\langle t_s \rangle}{t_s^0}, \frac{\langle t_t \rangle}{t_t^0} \right\} = 1. \quad (13)$$

即当任意方向的粘聚力达到设置的最大应力时,损伤开始发生。图 3 中损伤退化的部分可用线性或非线形式表示,ABAQUS 中使用 D 表示接触点的损伤,该变量由 0 增至 1,表示损伤开始发生直至完全损伤,其计算式为

$$\begin{cases} t_n = (1 - D_n) t_n^0, \\ t_s = (1 - D_s) t_s^0, \\ t_t = (1 - D_t) t_t^0. \end{cases} \quad (14)$$

为了表示 3 个方向总的分离值,引入 δ_m , 其计算式为

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2}, \quad (15)$$

而当损伤阶段设定为线性时,损伤 D 可表示为

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)}, \quad (16)$$

当损伤段定义为非线性时,损伤 D 可表示为

$$D = 1 - \left\{ \frac{\delta_m^0}{\delta_m^{\max}} \right\} \left\{ 1 - \frac{1 - \exp\left(-\alpha \frac{\delta_m^{\max} - \delta_m^0}{\delta_m^f - \delta_m^0}\right)}{1 - \exp(-\alpha)} \right\}. \quad (17)$$

式(15)和式(16)中, δ_m^0 和 δ_m^{\max} 分别表示损伤初始时的分离距离和最大损伤时对应的分离距离, α 为表示损伤演化速率的无量纲参数,可根据试验结果调整。由以上表述可见,定义接触分离模型时主要需确定 3 个方向的初始分离应力 t^0 , 线弹性段粘结刚度 K 、初始分离距离 δ^0 及最大分离距离 δ^{\max} , 若采用非线性式计算损伤 D 时,则还需确定无量纲参数 α 。

文献[25]中,作者对多组 UHPC-NC 试件进行了斜剪、劈裂、轴拉试验,并对不同界面形式、龄期、养护温度、湿润度做了详细的试验分析,本文有限元分析基于该文献中常温养护 28 d 时,3 种不同界面(光滑-钢刷-凿毛)的试验数据进行。模型中材料塑性部分定义采用混凝土损伤塑性模型(CDP, concrete damaged plasticity model),其中材料本构关系根据文献试验材性结果确定,其中 NC 本构关系参考规范^[51]中普通混凝土的应力应变计算式;UHPC 材料受拉本构参考文献[52]中 2% 纤维掺量的数据,受压本构参考文献[53]中的研究成果,其应力-应变关系如图 4 所示。

混凝土损伤塑性模型中除定义材料本构关系外,还需确定与塑性准则等相关的参数,这些参数参考文献[9]选取,即膨胀角为 36° , 偏心系数为 0.1, 双轴抗压强度与单轴抗压强度之比为 1.16, K 为 0.667, 粘性系数为 0。

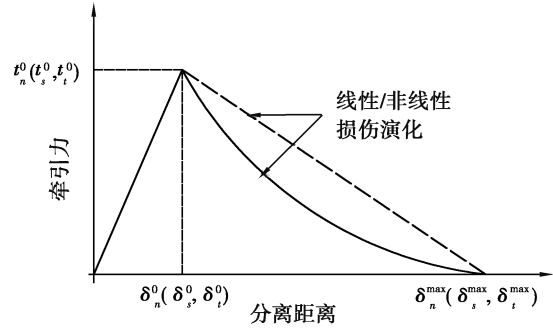


图 3 接触-分离模型

Fig. 3 Typical traction-separation response

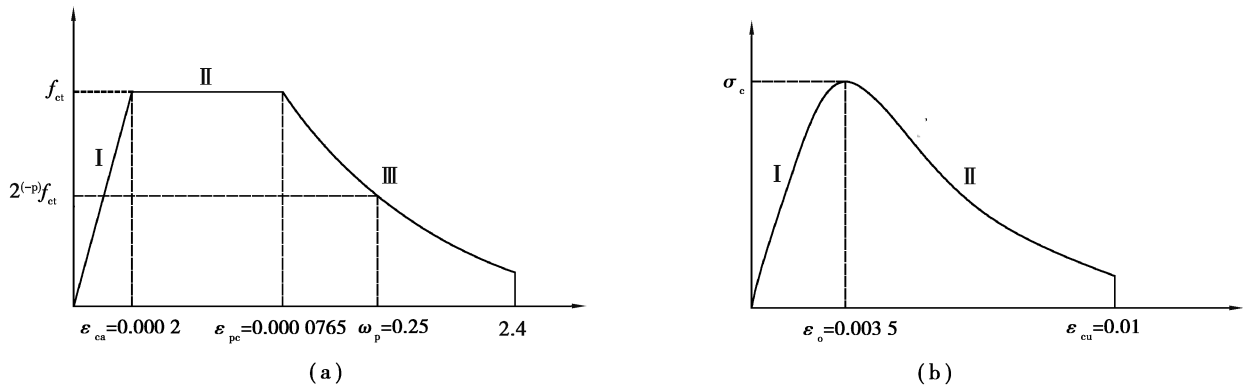


图 4 UHPC 应力-应变关系

Fig. 4 Stain-stress relationship of UHPC

2.1 拉伸构件拟合参数确定

以文献[25]中轴拉试验为基准对试验结果进行拟合以确定拉伸构件的拟合参数。文献中,光滑界面破坏荷载均值为 21.80 kN,钢刷界面(中等粗糙)为 24.98 kN,二者的破坏模式均为界面失效结合 NC 部分脱落,凿毛界面(粗糙)破坏荷载均值为 29.16 kN,破坏模式为 NC 破坏。有限元模型如图 5 所示,模型采用 C3D8R 八节点三维实体单元建立,试验中未见钢板与混凝土脱粘现象,钢板和混凝土采用完全粘结,试验机为下部向下牵引,因此,模型中也采用拉伸下部结构的加载方式。

试验中试件仅受到轴向拉力,设置 3 个方向最大分离应力相同,分别对应试验得到的拉伸强度。注意到界面凿毛时,试件破坏发生于 NC 基体而非界面处,可参考材料性能定义粗糙界面模型中的起始分离 δ_m^0 和最大分离距离 δ_m^{\max} ,研究方法如下。

当材料由弹性转为塑性时,对应一个弹性极限应变,此时也是结构损伤的起点,此时弹性极限应变为

$$\epsilon_0 = \frac{f_{ct}}{E_c} \quad (18)$$

又由应变的定义可知,应变为某一方向上微小线段因变形产生的长度增量与原长度的比值,当标距一定时,可得到长度增量为

$$\Delta l = \epsilon l \quad (19)$$

由文献[25]可知,试件长度为 300 mm,其中 UHPC 和 NC 段分别长 150 mm,可根据式(18)~式(19)计算得到模型的起始分离距离 δ_m^0 。相应地,根据上述定义同样可获得模型的最大分离距离 δ_m^{\max} 。

根据接触分离模型(图 3)可知,弹性阶段接触刚度可由式(12)得到。至此,凿毛界面的参数全部获得,由 Hussein^[46]的试验结果可见,界面粗糙度不同时,轴拉试件荷载位移曲线的刚度相差不大,因此,其他两种界面参数可参考凿毛界面参数略微调整后得到,3 种界面的拟合参数和结果见表 3,该参数适用于受拉为主的构件界面。

表 3 受拉为主构件界面拟合参数

Table 3 Interface fitting parameters of tension-dominated components

| 界面形式 | $K_m/K_{ss}/K_{tt}$ | $t_n^0/t_s^0/t_t^0$ | δ_p | 计算结果 | 试验结果 |
|------|---------------------|---------------------|------------|-------|-------|
| 光滑界面 | 69/69/69 | 2.18/2.18/2.18 | 0.02 | 21.63 | 21.80 |
| 钢刷界面 | 69/69/69 | 2.50/2.50/2.50 | 0.045 | 24.94 | 24.98 |
| 凿毛界面 | 69/69/69 | 2.92/2.92/2.92 | 0.090 45 | 29.09 | 29.16 |

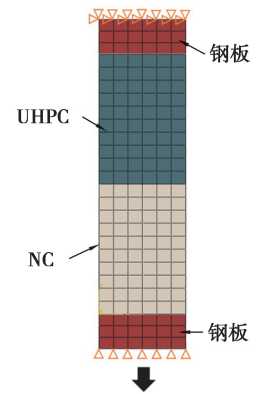


图 5 拉伸构件有限元计算图示

Fig. 5 FEM work for tensile test

2.2 压剪构件参数确定

压剪构件参数的确定参考文献[25]中斜剪试件的试验结果。模型(图6)中接触参数除定义与粘聚力、损伤相关参数外,还需定义界面间摩擦系数。试件加载初期,剪力沿界面传递,此时粘聚力模型激活,由粘聚力对抗逐渐增大的剪切滑移;加载后期随荷载逐渐增大,粘聚力达到峰值,接触损伤激活,粘聚力模型对抵抗剪力的贡献逐渐降低,此时摩擦系数被激活^[46]。根据文献[25]所述,3种界面峰值荷载分别为278.68 kN、371.70 kN及492.71 kN,经式(7)~式(9)计算得到表2中所示的法向应力和切向应力及摩擦系数。其中法向和切向应力分别对应3个方向的最大分离应力,同样地,凿毛试件破坏位于NC基体,则其接触刚度、初始分离距离等参数可通过材料性能计算并小幅调整得到。最终模型参数和拟合结果如表4所示,该参数适用于受压剪为主的构件界面。

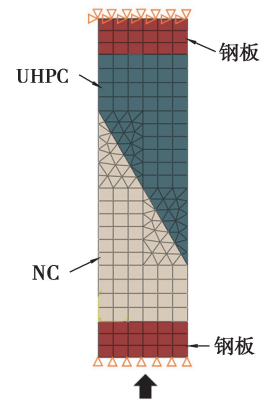


图 6 斜剪构件有限元计算图示

Fig. 6 FEM work for slant shear test

表 4 受压剪为主构件界面拟合参数

Table 4 Interface fitting parameters of compression and shear dominated components

| 界面形式 | $K_{nn}/K_{ss}/K_{tt}$ | $t_n^0/t_s^0/t_t^0$ | δ_p | μ | 计算结果 | 试验结果 |
|------|------------------------|---------------------|------------|-------|--------|--------|
| 光滑界面 | 2884/73/73 | 6.97/12.07/12.07 | 0.2 | 1.42 | 286.25 | 278.68 |
| 钢刷界面 | 2884/73/73 | 9.29/16.09/16.09 | 0.2 | 1.46 | 371.13 | 371.70 |
| 凿毛界面 | 2884/73/73 | 12.32/21.33/21.33 | 0.256 | 1.49 | 494.53 | 492.71 |

2.3 有限元参数有效性验证

为验证有限元参数的有效性,建立部分文献试验的有限元模型,将相应参数带入比较,结果如图7所示。由图可见,部分拟合结果因材料参数不完备等因素而存在较大偏差,但总体较为吻合,具备一定参考性。

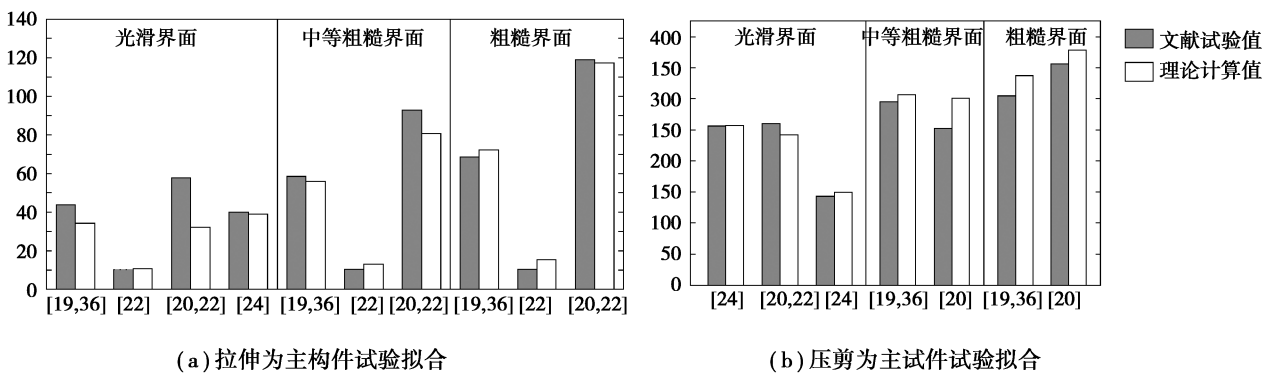


图 7 文献试验值与有限元计算值对比

Fig. 7 Comparison between test value and FEM work

3 结论

文章在广泛的文献调研基础上对3种不同粗糙度UHPC-NC界面行为进行分析研究,基于接触-分离模型建立3D有限元计算模型并提出拟合数据,主要得到结论如下:

- 1) 不同粗糙程度界面经直接拉伸试验得到的粘聚力分别为2.24 MPa(光滑界面),2.37 MPa(中等粗糙界面),2.66 MPa(粗糙界面);
- 2) 直接拉伸试验得到摩擦系数普遍大于劈裂或弯拉,3种界面摩擦系数均值分别为1.42,1.63和1.64;

3) 劈裂试验得到粘聚力的结果普遍大于直接拉伸试验,而弯拉试验得到的结果则介于二者之间,经直接拉伸试验数据计算得到摩擦系数普遍大于劈裂或弯拉试验;

4) 针对3种粗糙度不同界面提出基于粘聚力和抗剪强度的UHPC-NC界面强度计算式;

5) 基于接触-分离模型分别建立适用于受拉为主构件及压剪为主构件的3D有限元模型,提出适用于光滑界面、中等粗糙界面及粗糙界面的粘聚力参数、接触损伤相关参数,建立多个文献试验的有限元模型并与结果对比吻合较好。

参考文献:

- [1] 张哲. 钢-配筋UHPC组合桥面结构弯曲受拉性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Zhang Z. Bending behaviors of composite bridge deck system composed of OSD and reinforced UHPC layer [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [2] Blais P Y, Couture M. Precast, prestressed pedestrian bridge world's first reactive powder concrete structure[J]. PCI Journal, 1999, 44(5): 60-71.
- [3] Hajar Z, Lecointre D, Simon A, et al. Design and construction of the world first ultra-high performance concrete road bridges [C]// Proceedings of the Proceedings of the International Symposium on UHPC, Kassel, Germany, Schmidt, M, 2004:39-48.
- [4] Graybeal B A. UHPC in the U.S. highway transportation system [C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, F, 2008:11-17.
- [5] Rebstrost M, Wight G. Experience and applications of ultra-high performance concrete in Asia [C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008.
- [6] Freytag B, Heinzle G, Reichel M, et al. WILD-bridge scientific preparation for smooth realization [C]// Proceedings of Hipermat 2012 3rd international symposium on UHPC and nanotechnology for high performance construction materials. Kassel University Press, Kassel, 881-888.
- [7] 李晨光, 安明喆, 都清. 超高性能结构混凝土材料工程化应用基础研究[J]. 混凝土世界, 2010(3):28-33.
Li C G, An M Z, Du Q. Basic study of engineering application of super-high performance structure concrete material [J]. China Concrete, 2010(3):28-33. (in Chinese)
- [8] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Shao X D, Hu J H. The steel-UHPC lightweight composite bridge structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [9] 曹君辉. 钢-薄层超高性能混凝土轻型组合桥面结构基本性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Cao J H. Research on basic performance of steel-thin UHPC lightweight composite deck [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [10] Graybeal B A. Behavior of field-cast ultra-high performance concrete bridge deck connections under cyclic and static structural loading [J/OL]. National Technical Information Service accession PB2011-101995. McLean, VA: FHWA. <http://www.trb.org/AnnualMeeting/AnnualMeeting.aspx>.
- [11] Perry V, Dykstra D, Murray P, et al. Innovative field cast uhpc joints for precast bridge systems-3-span live load continuous [C]// 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada: Adjusting to New Realities, TAC/ATC 2010, Halifax, NS, Canada, 26-29 September 2010.
- [12] Aaleti S, Petersen B, Sritharan S. Design guide for precast uhpc waffle deck panel system, including connections [R]. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 2013.
- [13] Graybeal B. Ultra-high-performance concrete connections for precast concrete bridge decks [J]. PCI Journal, 2014, 59(4):48-62.
- [14] 邵旭东, 管亚萍, 晏班夫. 预制超高性能混凝土 π 形梁桥的设计与初步试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1):46-56.
Shao X D, Guan Y P, Yan B F. Design and preliminary experiments of UHPC π -shaped girder bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 1 (31): 46-56. (in Chinese)
- [15] 管亚萍. 预制超高性能混凝土 π 形梁桥的设计与初步试验 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Guan Y P. Design and preliminary experiments of UHPC π -shaped girder bridge[D]. Changsha: Hunan University,

2016. (in Chinese)
- [16] Pan W H, Fan J S, Nie J G, et al. Experimental study on tensile behavior of wet joints in a prefabricated composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin reactive-powder concrete layer [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21 (10): 04016064.
- [17] 邵旭东, 陈斌, 周绪红. 钢-RPC 轻型组合桥面结构湿接头弯曲试验[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(3):210-217.
Shao X D, Chen B, Zhou X H. Experiment on bending behavior of wet joints in light-weighted composite deck system composed of steel and rpc layer[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30 (3): 210-217. (in Chinese)
- [18] 陈贝. 预制 NSC 构件的 UHPC 湿接缝受弯性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Chen B. The Research on flexural performance of prefabricated NSC components with UHPC wet joints [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [19] Carbonell M A, Harris D K, Ahlborn T M, et al. Bond performance between ultrahigh-performance concrete and normal-strength concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 26 (8): 04014031.
- [20] Tayeh B A, Bakar B H A, Johari M A M, et al. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 36: 538-548.
- [21] Tayeh B A, Bakar B H A, Johari M A M, et al. Evaluation of bond strength between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete as a repair material [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 54: 554-563.
- [22] Tayeh B A, Abu Bakar B H, Megat Johari M A, et al. Microstructural analysis of the adhesion mechanism between old concrete substrate and UHPFC[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2014, 28 (18): 1846-1864.
- [23] Harris D K, Sarkar J, Ahlborn T M. Characterization of interface bond of ultra-high-performance concrete bridge deck overlays [J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2240 (1): 40-49.
- [24] Shafieifar M, Farzad M, Azizinamini A. Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC)[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 156:402-411.
- [25] 廖肇乾. UHPC-NC 界面粘结强度试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Liao Z Q. Experimental research on bond strength of UHPC-NC interface[D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [26] 张孝臣. 预制超高性能混凝土修复既有混凝土结构界面粘结性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Zhang X C. Study of interface bond behavior between precast ultra high performance concrete repaired layer and existing concrete structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [27] 王兴旺. UHPC 与普通钢筋混凝土结构界面抗剪性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Wang X W. Research on the interfacial shear behavior of UHPC and reinforced concrete [D]. Changsha: Hunan University 2018. (in Chinese)
- [28] Anderson A R. Composite designs in precast and cast-in-place concrete [J]. *Progressive Architecture*, 1960, 41 (9): 172-179.
- [29] Birkeland P W, Birkeland H W. Connections in precast concrete construction [J]. *Aci Structural Journal*, 1966, 63(1): 345-368.
- [30] American Concrete Institute ACI Committee. Building code requirements for structural concrete ACI 318-08 and commentary 318R-08 [S]. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2008.
- [31] AASHTO LRFD-2007, Bridge design specifications [S]. Washington D C, 2007.
- [32] CAN/CSA-S6-00 Canadian highway bridge design code[S]. CSA International, 2000.
- [33] PCI design handbook: Precast and prestressed concrete [M]. Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL. 1999.
- [34] Fib. Fib model code for concrete structures 2010 [M]. Weinheim, Germany; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [35] 刘杰, 陈娟娟. 新老混凝土界面抗剪强度研究现状综述[J]. *混凝土*, 2015, (1): 62-67.
Liu J, Chen J J. State of the art review on shear strength of interface between new and old concrete [J]. *Concrete*, 2015, (1): 62-67. (in Chinese)
- [36] Harris D K, Muñoz M C, Gheitasi A, et al. The challenges related to interface bond characterization of ultra-high-performance concrete with implications for bridge rehabilitation practices [J]. *Advances in Civil Engineering Materials*,

- 2014, 4(2): 75-101.
- [37] Júlio E N B S, Branco A B, Silva V D, et al. Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate[J]. *Building and Environment*, 2006, 41 (12): 1934-1939.
- [38] Wall J S, Ssrive N G. Factors affecting bond between new and old concrete [J]. *Materials Journal*, 1988, 85 (2): 117-125.
- [39] Ulku E, Attanayake U, Aktan H M. Rationally designed staged posttensioning to abate reflective cracking on side-by-side box-beam bridge decks [J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2172(1): 87-95.
- [40] Porter S D, Julander J L, Halling M W, et al. Flexural testing of precast bridge deck panel connections[J]. *Journal of bridge engineering*, 2010, 16(3): 422-430.
- [41] Grace N, Jensen E A, Matsagar V, et al. Use of unbonded CFRP strands in transverse post-tensioning in box beam bridges [J]. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2012.
- [42] Grace N, Ushijima K, Baah P, et al. Flexural behavior of a carbon fiber-reinforced polymer prestressed decked bulb T-beam bridge system[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 17(4): 497-506.
- [43] Dias-Da-Costa D, Alfaiate J, Júlio E.N.B.S. FE modeling of the interfacial behaviour of composite concrete members [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 26(1):233-243.
- [44] Chen L, Graybeal B A . Finite element analysis of ultra-high performance concrete: modeling structural performance of an aashto type II girder and a 2nd generation pi-girder[J]. *Durability*, 2010.
- [45] Steinberg E, Huffman J, Ubbing J, et al. Finite element modeling of adjacent prestressed concrete box-beams [C]//*Finite Element Modeling of Adjacent Prestressed Concrete Box Beams*, 2013.
- [46] Hussein H H, Walsh K K, Sargand S M, et al. Modeling the shear connection in adjacent box-beam bridges with ultrahigh-performance concrete joints. I: Model calibration and validation[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22 (8): 04017043.
- [47] Jang H O, Lee H S, Cho K, et al. Numerical and experimental analysis of the shear behavior of ultrahigh-performance concrete construction joints[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018:1-17.
- [48] 韩菊红. 新老混凝土粘结断裂性能研究及工程应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
Han J H. Study on fracture performance and engineering application of adherence of new and old concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [49] 韩菊红, 赵国藩, 张雷顺. 新老混凝土粘结面断裂损伤过程区研究[J]. *工程力学*, 2004, 21 (6): 31-35.
Han J H, Zhao G F, Zhang L S. Study on fracture process zone of adhesive interface of new and old concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21 (6): 31-35. (in Chinese)
- [50] Corp D S S. Abaqus 6.10 analysis user's manual[M]. USA: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2010.
- [51] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50010-2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [52] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. *中国公路学报*, 2015, 28 (8): 50-58.
Zhang Z, Shao X D, Li W G, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28 (8): 50-58. (in Chinese)
- [53] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J]. *混凝土*, 2008, (7): 11-15.
Yang J, Fang Z. Research on stress-strain relation of ultra high performance concrete [J]. *Concrete*, 2008, (7): 11-15. (in Chinese)