

混凝土界面黏结性能有限元分析

李云虎, 熊 诚, 潘 诚

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 关于超高性能混凝土(UHPC)与普通混凝土(NC)黏结界面的试验研究较多,但如何在有限元软件中进行有效地模拟并进行相关参数分析的研究仍较少。利用大型有限元分析软件 ABAQUS 建立采用黏聚力单元以模拟 UHPC 与 NC 黏结界面的有限元模型,并通过修改黏聚力模型参数分析不同界面粗糙程度下 UHPC-NC 界面的黏结性能。建立直接剪切、斜剪试验有限元模型,且利用摩尔库伦强度理论反推界面摩擦系数。结果表明,通过黏聚力单元模拟 UHPC-NC 界面能很好地反应实际的受力性能。

关键词: 界面黏结;内聚力模型;有限元分析

中图分类号: TU528

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)03-0190-04

0 引言

在过去几年中,超高性能混凝土(UHPC)由于其优越的性能被广泛使用,在强度、长期稳定性和耐久性等材料性能方面都远远超过了传统混凝土^[1]。UHPC 是由细砂、研磨石英、硅酸盐水泥、减水剂和钢纤维等组成。与普通混凝土(NC)不同的是,UHPC 往往具有较低的含水量,一般不含有粗集料。UHPC 因性能优越,在实际工程中的运用也越来越广泛,然而鉴于其造价较高,故一般只在关键部位如接缝位置才会采用^[2]。因此研究 UHPC 与普通混凝土之间的界面黏结性能也就变得非常必要。如今国内外许多学者已经进行了大量的研究,Tayeh^[3]通过设计劈拉试验研究 UHPC-NC 复合界面的力学性能,并得到了界面下的三种破坏类型;Carbonell^[4]从界面潮湿情况、处理方式等方面对 UHPC-NC 的界面黏结性能进行试验研究;吴香国等^[5]采用直剪试验和斜剪实验从界面黏结材料、剪力键和混凝土强度等方面对 UHPC-NC 界面黏结强度的影响进行研究;白海言^[6]通过设计剪切试验探讨界面粗糙度对新老混凝土的黏结性能影响,并提出了新老混凝土的黏结滑移表达式。

综上所述,关于 UHPC-NC 的界面黏结试验研究较多,而关于如何进行有效地有限元建模讨论相对较少。本文将采用大型有限元分析软件 ABAQUS 对 UHPC 与普通混凝土黏结界面的相关有限元模拟

参数进行标定,并探讨相关有限元界面模拟参数对界面力学性能的影响。

1 界面理论

为了建立混凝土与混凝土的界面模型,本文采用了通过定义材料表面特性的 Traction-separation 模型。Traction-separation 模型提供了一种假设界面厚度为零的内聚力模型。Traction-separation 参数 k_{nn} 、 k_{ss} 和 k_{tt} 是损伤开始前穿过黏结界面的分别与法向和切向相关的刚度分量。 k_{nn} 为法向刚度, k_{ss} 和 k_{tt} 为切向刚度。界面处的接触应力为法向接触应力 t_n 、第一剪切方向剪切接触应力 t_s 、第二剪切方向剪切接触应力 t_t ,如图 1 所示。

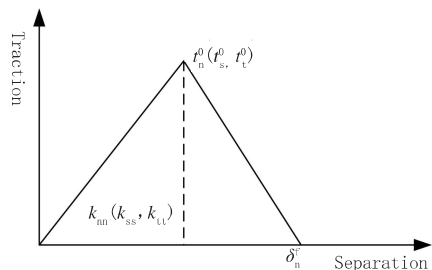


图 1 Traction-separation 本构模型

损伤的发生满足起始损伤准则,当黏性表面满足以下二次应力损伤准则时,便认为损伤开始发生:

$$\left(\frac{t_n}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

式中: t_n 、 t_s 、 t_t 分别为三个方向接触应力的最大值。在有限元模拟中,只有当上式左边和为 1 时,认定损伤开始。一旦损伤开始发生,根据总断裂能(G_c)或破坏时的总塑性位移(δ_n^f)确定损伤评估。

收稿日期: 2021-08-09

作者简介: 李云虎(1983—),男,学士,高级工程师,从事道路桥梁设计工作。

已有文献对有三种粗糙程度下的界面有限元参数进行了标定,并认为三种粗糙程度下的法向刚度和切向刚度是相同的。但考虑到在不同粗糙程度下,其法向刚度应有不同,故在其基础上按式(2)调整。

$$K_{mn}=\frac{P}{A\delta}$$

(2)

式中: P 为作用载荷, A 为黏结界面面积, δ 为黏结界面发生的位移。

$$K_{ss}=K_{tt}=\frac{K_{mn}}{2(1+v)}$$

(3)

式中: v 为泊松比,本文采用普通混凝土的泊松比0.17。

采取式(3)进行切向刚度的计算,是视UHPC-NC界面间为一均匀薄层,且切向刚度受法向刚度影响,方便了切向刚度数值的确定。

其他有限元所需参数见表1。

表1 有限元所需参数表

参数	光滑	中等粗糙	粗糙
$K_{mn}/(N\cdot mm^{-3})$	1 372	2 277	2 559
$K_{ss},K_{tt}/(N\cdot mm^{-3})$	586	973	1 093
$t_n^0,t_s^0,t_t^0/MPa$	3.02	5.01	5.63
总位移/mm	0.018	0.117	0.241

2 拉伸及斜剪试验理论

(1)直接抗拉强度

$$T=\frac{P}{A}$$

(4)

式中: T 为破坏时的抗拉强度,MPa; P 为最大载荷,N; A 为混凝土黏结面处截面积,mm²。所测抗拉强度值受材料抗拉强度的限制。对于模型有可能出现因混凝土强度不足而破坏的情况,取此时破坏载荷为最大载荷。

(2)摩擦系数确定

一个材料的最大轴向压应力关系和在破坏面上垂直和剪切应力可以由摩尔库仑理论得到,如图2所示。它可以扩展到两材料与水平呈一定夹角黏结在一起的情况。如果发生破坏时的轴向压应力 σ_0 和方向角 α 已知,则破坏面上的正应力 σ_n 和剪切应力 τ_n 分别用式(5)和式(6)来表示:

$$\sigma_n=\sigma_0\sin^2\alpha$$

(5)

$$\tau_n=0.5\sigma_0\sin(2\alpha)$$

(6)

破坏面上的剪应力根据材料界面处的黏附系数和摩擦系数定义为:

$$\tau_n=c+\mu\sigma_n$$

(7)

式中: c 和 μ 分别为黏附系数和摩擦系数。

需要注意的是,如果某一种黏结材料发生破坏,而不是发生在黏结界面处,则 c 和 μ 分别代表破坏材料的黏聚力系数和摩擦系数。利用斜剪试验结果,利用方程(5)和式(6)计算了不同粗糙度下UHPC和NC破坏面的法向应力和剪应力。然后利用计算的应力以及本研究中测量的黏附或黏聚力值来确定式(7)中的摩擦系数。

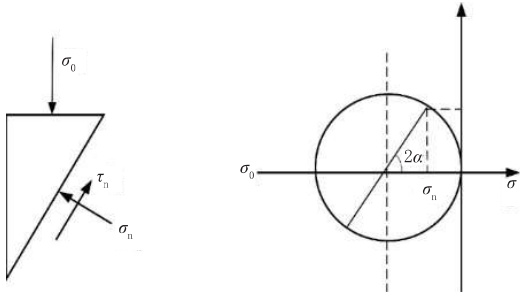


图2 斜截破坏界面应力和摩尔应力圆

3 有限元模型建立

(1)模型建立

本文采用大型有限元分析软件ABAQUS进行有限元分析,对于拉伸实验模型,建立两直径70 mm高为75 mm的圆柱体,网格尺寸为5 cm,圆柱截面沿径向扫掠划分,内圆划分网格1 cm,UHPC和普通混凝土都采用C3D8R线性缩减积分单元进行模拟。黏结界面采用黏聚力单元进行模拟,厚度为1 mm,上下表面分别与UHPC和普通混凝土界面绑定连接。为防止应力集中,分别在普通混凝土和UHPC的上和下界面增加一钢帽,混凝土与钢帽之间接触方式为绑定,钢帽属性为钢材,网格尺寸为8 cm。

ABAQUS为混凝土提供了三种模型,分别是脆性开裂模型、弥散裂缝模型和塑性损伤模型。但脆性开裂模型和弥散裂缝模型对网格划分要求较高,模型在计算过程中容易出现不收敛的情况,而塑性损伤模型通过定义损伤因子,可以相对更好地模拟混凝土在荷载作用下失效的力学性能表现,故本文采用塑性损伤模型来对普通混凝土和UHPC进行模拟,相关参数见表2。

表2 塑性损伤模型参数表

参数	UHPC	NC
弹性模量/GPa	53	35
泊松比	0.19	0.17
膨胀角	15	36
偏心率	0.1	0.1
K_c	2/3	2/3
μ	0.000	0.001

本文采用单波试验所得的UHPC受压本构模型关系。

$$\frac{\sigma}{f_c} = \begin{cases} ax + (6-5a)x^5 + (4a-5)x^6, & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{2.41(x-1)^2 + x}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ 代表应力; f_c 为 UHPC 抗压强度; ε 为应变, ε_0 为峰值应变; $x = \varepsilon / \varepsilon_0$; $a = E_c / E_s$, E_c 为 UHPC 受压应力-应变曲线初始切线模量, E_s 为峰值割线模量。本文取 E_c 、 E_s 分别为 42.8 GPa 和 39.6 GPa^[8]。

UHPC 受拉本构模型采用文献^[9]中的受拉应力-应变曲线公式, 即:

$$\sigma = \begin{cases} E, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{10} \\ f_t, & \varepsilon_{10} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{pc} \\ f_t / [1 + (\varepsilon - 0.002) \times 400]^{0.95}, & \varepsilon_{pc} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (9)$$

普通混凝土等级为 C50, 本构模型采用规范^[7]中的应力-应变曲线公式。

(2) 接触定义

利用 ABAQUS 研究 UHPC-NC 界面的关键在于如何更为准确地模拟黏结界面, 在 ABAQUS 中, 对于内聚力模型提供了两种建模方法。第一种方法是通过直接定义相关接触参数来模拟黏结界面的力学行为。这在 ABAQUS 显式和隐式计算都能够使用, 其缺点是无法定义界面失效, 随着荷载进一步增大, 即使黏结界面已经失效, 但两接触面仍表现为黏结在一起; 另一种方法则是定义内聚力单元, 分别建立 cohesive 层和其他结构部件的模型, 之后通过 tie 绑定约束, 使得 cohesive 单元两侧的单元位移和应力协调。由于第二种方法能够通过损伤达到极限时删除单元的方法来模拟界面失效, 故本文采用第二种内聚力模型建模方法。

4 有限元结果

(1) 直接拉伸有限元模型

光滑界面模型破坏位置和界面应力云图如图 3(a)所示。破坏位置在黏结界面处, 具体表现为随着模型进一步计算, 黏聚力单元由于达到极限抗拉强度而失效。通过界面应力云图可见, 黏聚力单元除只有局部应力达到极限应力, 主要原因是黏聚力单元并未充分受力便达到极限强度而失效。

中等粗糙和粗糙界面模型破坏位置和界面应力云图分别如图 3(b)、图 3(c)所示。由于界面单元具有较强的黏结强度, 且抗拉强度超过普通混凝土极限抗拉强度, 故最终表现为普通混凝土被拉坏而导

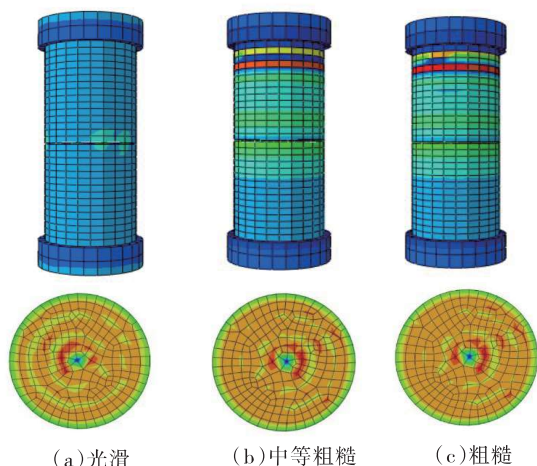


图3 不同粗糙程度粘结界面应力云图

致结构失效。对于中等粗糙和粗糙试件, 因破坏位置都在普通混凝土处, 故黏结界面应力云图几乎相同, 且相对光滑黏结界面, 整个区域应力均较高。

如图 4 所示, 有限元计算结果表明, 对于光滑界面, 由于界面的黏结强度不足, 最终破坏形式为黏结界面被拉坏, 故荷载位移曲线出现明显下降段, 极限荷载为 11.34 kN。中等粗糙界面和粗糙界面的荷载-位移曲线基本相似, 由于粗糙界面的法向刚度要比中等粗糙界面偏高, 故其荷载-位移曲线的斜率要更高, 在达到极限荷载即普通混凝土抗拉极限荷载时, 曲线快速下降, 具体原因是混凝土破坏后, 试件刚度快速降低。

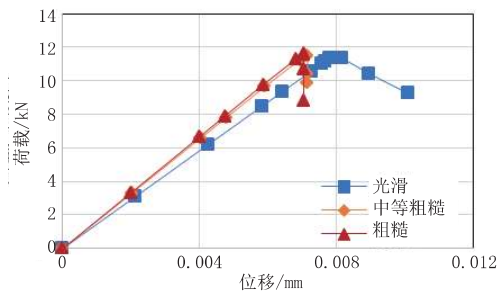


图4 不同界面粗糙程度下荷载-位移曲线

(2) 斜剪模型计算结果

斜截试验模型破坏应力云图如图 5 所示。

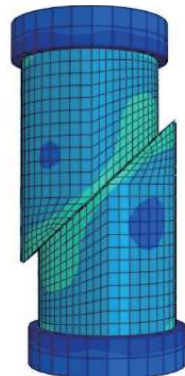


图5 斜截试验模型破坏应力云图

依据公式(7)可反推界面摩擦系数,计算结果见表3。

表3 摩擦系数反推表					
参数	σ_0	τ_n	c	σ_n	μ
数值	10.97	5.49	3.02	5.49	0.45

5 有限元参数分析

(1)极限接触应力分析

对于UHPC与普通混凝土黏结界面,其黏结强度高于普通混凝土黏结界面,但由于材料配比、施工工艺和养护条件等因素的差异,实际的黏结强度会有较大不同。为进一步探讨界面极限接触应力对界面黏结强度的影响,建立了四组有限元模型,极限接触应力分别为2.5 MPa、2.8 MPa、3.02 MPa、3.2 MPa。而不同极限接触应力分析的主要结果如图6所示。

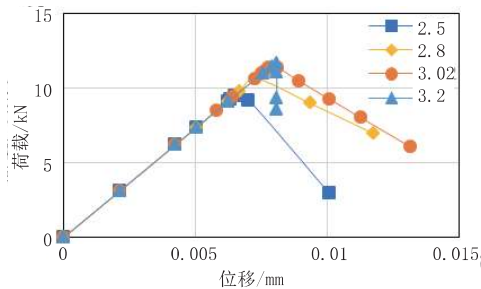


图6 应力分析荷载-位移曲线

破坏荷载随着极限接触应力提高而得到显著提高。应力为3.02 MPa是一个拐点,当接触应力超过3.02 MPa时,因为普通混凝土自身抗拉伸强度不足,而导致普通混凝土被拉坏,使得破坏荷载无法再继续得到提升,此时为提高整体抗拉强度,应更换抗拉强度更高的普通混凝土。

(2)刚度分析

影响有限元分析软件荷载位移曲线结果的另一个关键因素是刚度,其中包括法向刚度和切向刚度。在实际工程中,由于不同材料属性的差异,即使在界面接触应力相同的情况下,刚度也是互不相同的。针对刚度分析,在接触应力为3.02 MPa下,建立法向刚度大小分别为1 783、1 372、960的三组模型,有限元计算结果如图7所示。

法向刚度越大,达到极限荷载前的荷载位移曲线斜率越大,且极限荷载时的位移越小。这是因为即接触应力一定的情况下,刚度越大,模型损伤达到极

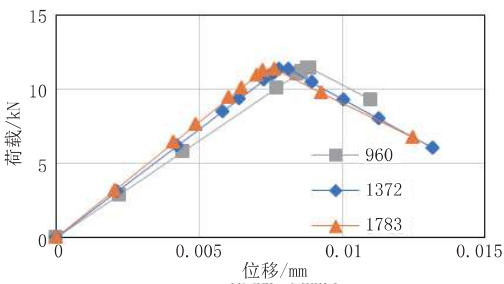


图7 刚度分析荷载-位移曲线

限时所需要的能量便越小。

6 结 论

综合分析相关理论和ABAQUS有限元结果,得到以下结论:

- (1)借助ABAQUS有限元分析软件,采用Trac-tion-separation模型,并依靠黏聚力单元能够很好地模拟UHPC-NC界面力学黏结性能。
- (2)混凝土黏结界面力学性能的有限元模拟主要通过极限接触应力和刚度来实现,模型的整体抗拉强度取决于混凝土的抗拉强度和黏结界面抗拉强度的最小值。
- (3)通过建立斜剪试验有限元模型,依照摩尔库伦理论可以有效地反推出黏结界面的摩擦系数。

参考文献:

[1] 贾胜利. UHPC在桥梁结构中的应用研究[J]. 建材世界, 2021, 42(2): 34-37, 42.

[2] 2020年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告[J]. 混凝土世界, 2021(04): 20-29.

[3] Bassam A. Tayeh, B. H. Abu Bakar. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra-high performance fiber concrete overlay[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 538-548.

[4] Miguel A. Carbonell. Bond Performance between Ultrahigh-Performance Concrete and Normal-Strength Concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(8): 04014031.1-04014031.9.

[5] 吴香国, 张孝臣. 预制超高性能混凝土修复层与既有混凝土界面黏结短期性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 156-163.

[6] 白海言, 刘志宁, 蓝宏宇, 等. 界面粗糙度对新老混凝土粘结滑移的影响[J]. 福建建设科技, 2018(3): 8-10, 63.

[7] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].

[8] 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]. 湖南长沙: 湖南大学, 2016.

[9] 李立峰, 范昕, 石雄伟, 等. 预应力UHPC梁弯曲性能分析与合理设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 38-46.