

超高性能混凝土-混凝土组合梁抗剪承载力计算方法

刘超, 吉赫

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于极限平衡理论, 并考虑尺寸效应, 采用简化的混凝土破坏准则和超高性能混凝土(UHPC)层破坏理论得到了超高性能混凝土-混凝土(UHPC-NC)矩形截面组合梁斜截面抗剪承载力计算方法. 设计了相应的组合梁抗剪试验. 试验数据与理论计算结果的对比分析表明, 该计算方法既能准确计算组合梁的抗剪承载力, 又能有效反映 UHPC 层、UHPC 层内配筋、尺寸效应等各个参数对于 UHPC-NC 组合梁抗剪承载力的影响. 试验结果反映出 UHPC 层可以大幅提高整体结构的抗剪承载力和延性.

关键词: 超高性能混凝土; 抗剪承载力; 极限平衡; 尺寸效应

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

Shear Resistance of Ultra-High Performance Concrete-Concrete Composite Beam

LIU Chao, JI He

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

Abstract: Based on the ultimate equilibrium theory, the size effect, simplified concrete failure criterion, and failure condition of ultra-high performance concrete (UHPC) overlay were considered, and the calculation method of the UHPC-NC ultimate shear resistance was proposed. A shear resistance test was conducted. The on-site measurement and data analysis indicate that this calculation method not only accurately predicts the shear resistance, but also the shows the influence of UHPC overlay, the reinforcement in UHPC overlay, and size effect. The result also shows that the UHPC overlay could improve the ultimate shear resistance and ductility of the overall structure.

Key words: ultra-high performance concrete (UHPC); ultimate shear resistance; ultimate equilibrium; size effect

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种新型混凝土材料, 它具有超过 150 MPa 的抗压强度, 大于 5 MPa 的开裂应力, 同时拥有极大的延性和极低的孔隙率. 与传统混凝土(NC)和高强混凝土(HSC)相比, 超高性能混凝土能够实现高强度、高延性和高致密性, 是混凝土材料具有重大意义的突破^[1].

为了解决混凝土桥梁暴露于复杂环境状况下的耐久性问题或者处于高应力区域等受力问题, 组合结构 UHPC-NC 应运而生, 这种结构能充分利用两种材料的长处, 使桥梁结构具有更长的使用寿命、更大的跨径、更轻盈的造型和更低的养护费用^[2].

Prem 等^[3]研究了不同厚度的 UHPC 层位于钢筋混凝土矩形梁受拉区时对于抗弯极限承载力的影响, 根据厚度不同, 组合结构的抗弯极限承载力可提高 30%. Lampropoulos 等^[4]通过数值模拟和试验, 研究了 UHPC 层位置对钢筋混凝土梁的影响, Al-Osta 等^[5]在此基础上, 又针对在钢筋混凝土梁上用树脂胶黏接 UHPC 预制板和凿毛浇筑 UHPC 层两种情况进行了对比, 研究了不同的结合方式对于 UHPC-NC 组合梁抗弯承载力的影响. 结果证明, 黏接 UHPC 预制板与凿毛现浇 UHPC 层两种方式均能有效提高组合结构的承载力, 但凿毛现浇方式优于预制板黏接. Hussein 等^[6]研究了 UHPC 层位于受拉区时, 不同的 UHPC 层与钢筋混凝土梁连接件对组合结构抗剪承载力的影响. 试验结果显示, UHPC 层与钢筋混凝土层黏结性能十分优异, 是否设置连接件以及连接件的种类对组合结构的抗剪承载力几乎没有影响. Mohammed 等^[7]研究了不同 UHPC 层位置对于钢筋混凝土梁抗扭性能的影响, 并通过试验验证了 UHPC 薄层能够有效提高组合结构的抗扭承载力.

综上所述, UHPC-NC 组合结构具有良好的力

收稿日期: 2018-07-31

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. E-mail: lctj@tongji.edu.cn

通信作者: 吉赫(1995—), 男, 博士生, 主要研究方向为超高性能混凝土. E-mail: 1910007@tongji.edu.cn

学性能和工程价值,但是关于 UHPC-NC 组合梁的受力性能研究并不多见,特别是在斜截面抗剪承载力方面还没有系统有效的计算方法.瑞士规范^[8]提出的组合梁抗剪承载力计算方法以桁架模型为基础,但是模型中各项参数的取值范围变化很大,计算得到的抗剪承载力是在一个区间内,难以选取合适的数值进行估算,这会给实际的设计和计算带来不便.

本文基于极限平衡理论推导出 UHPC 层位于受拉区时 UHPC-NC 矩形截面组合梁的抗剪承载力计算方法,同时考虑尺寸效应进行修正,并配合试验进行验证.

1 计算理论

斜截面极限平衡理论是通过隔离体(被主裂缝以及通过主裂缝顶端的垂直截面将梁体分开)极限状态下的平衡关系进行受力分析,形成构件的上、下两部分,分析时考虑平面应力状态下的混凝土强度准则,通过建立内力平衡方程和变形方程来求解.该理论可以直观描述混凝土梁的破坏机理,并且具有较高的精度^[9].

对于 UHPC-NC 组合梁来说,其抗剪承载力由 UHPC 层与钢筋混凝土梁两部分的叠合而成.极限平衡理论假设钢筋混凝土梁的斜截面破坏形式为弯剪破坏,即裂缝发展形态一般为首先在受拉区形成弯曲裂缝,之后随着外荷载的持续提高,在剪力和弯矩的共同作用下,初始的弯曲裂缝不断地斜向进一步发展,形成弯剪斜裂缝,并且在梁的顶端形成一定高度的剪压区.同时,极限平衡理论假设腹筋钢筋混凝土梁的抗剪承载力主要由未开裂的混凝土剪压区剪力 V_c 和箍筋提供的竖向力 V_s 组成^[10],隔离体受力关系如图 1 所示.

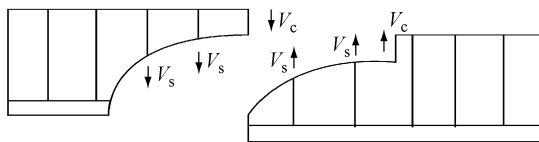


图 1 隔离体受力关系

Fig.1 Force distribution of free-body

钢筋混凝土梁剪压区由于受到正应力和剪应力的共同作用,需要考虑两种应力的相互影响,即要确定相应混凝土剪压区的破坏准则.大量的试验与研究给出了很多混凝土剪压区的破坏准则曲线,为了方便计算,需进行简化,得出实用的混凝土破坏准

则.有关研究^[11]提出利用剪压区混凝土的应力关系与破坏准则试验曲线联立,对所需要区间的破坏准则曲线进行线性回归,得出混凝土剪压区的简化破坏准则.具体过程如下:

混凝土剪压应力关系为

$$\frac{\tau}{f_c} = \left(\frac{1.06875}{\lambda} - 0.06875 \right) \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (1)$$

混凝土强度试验准则为

$$\frac{\tau}{f_c} = \sqrt{0.0089 + 0.095 \frac{\sigma_c}{f_c} - 0.104 \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^2} \quad (2)$$

式(1)和(2)中: σ_c 和 τ 分别为极限状态下混凝土的正应力和剪应力; f_c 为混凝土棱柱体抗压强度标准值; $\lambda = a/d_v$ 为混凝土梁的剪跨比, a 为跨中到支点的水平距离, d_v 为截面有效区高度.

当剪跨比取不同值的时候,会形成一簇剪压应力关系直线与混凝土强度试验准则曲线进行相交,代表着不同剪跨比情况下斜截面破坏时的剪应力和压应力值,如图 2 所示.其中剪跨比为 2~5 时对于工程设计具有重要的意义,将此范围混凝土强度试验曲线进行线性回归可以得到相应的混凝土强度简化破坏准则为

$$\frac{\tau}{f_c} = A \frac{\sigma}{f_c} + B \quad (3)$$

式中: $A = -0.12$; $B = 0.24$.

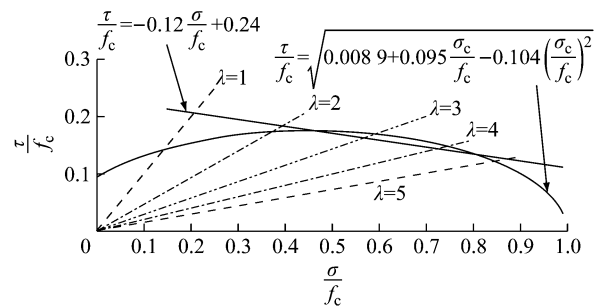


图 2 破坏准则曲线

Fig.2 Failure criterion

在极限状态下,钢筋混凝土梁剪压区的正应力分布情况如图 3a 所示,根据混凝土破坏准则,如果已知剪压区截面的正应力分布 $\sigma(x)$,就可以得到以中性轴为原点的剪压区混凝土提供的抗剪极限承载力 V_c , $V_c = b_w \int \tau_c(x) dx$,其中 $\tau_c(x)$ 为剪压区的剪应力分布, b_w 为腹板宽度.剪压区的正应力分布呈曲线分布,其应力函数关系难以确定,为了便于计算分析,采用平均正应力 $\bar{\sigma}_c = \int_0^{\xi d_v} \sigma(x) dx / \xi d_v$ 表示,简化为图 3b,其中 ξd_v 为极限受压区高度, ξ 为受压区高

度系数. 所以剪压区剪力为

$$V_c = b_w \bar{\tau}_c \xi d_v \quad (4)$$

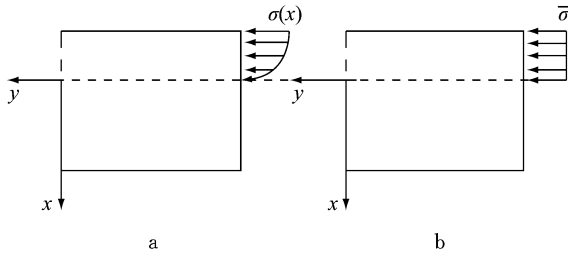


图 3 剪压区正应力简化

Fig.3 Simplified normal stress of shear-compression zone

由于 UHPC 层完全处于受拉区边缘, 并且厚度相较于整体梁的高度来说很小, 所以 UHPC 层最终破坏形态可以认为是由正应力导致的弯曲受拉破坏, 其 UHPC 层隔离体受力图如图 4 所示. 根据 Noshiravani 等^[12] 的试验以及论文中模型梁试验现象的研究, 对于由 UHPC 薄层构成的 UHPC-NC 组合结构来说, UHPC 层的破坏形式为在 UHPC 层与钢筋混凝土梁的交界处形成铰点, UHPC 层绕铰点受拉开裂导致破坏.

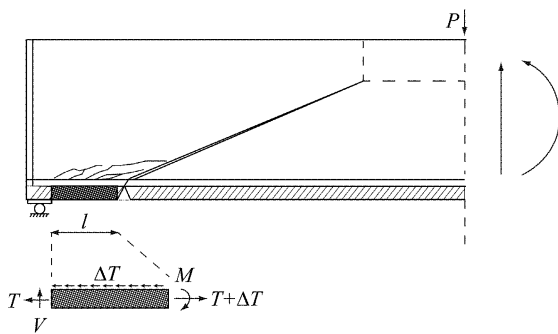


图 4 UHPC 层破坏示意图
Fig.4 UHPC overlay failure

2 计算方法

2.1 计算公式

UHPC-NC 组合梁的抗剪承载力由钢筋混凝土梁和 UHPC 层两部分组成, 其计算公式如下:

$$V = V_U + V_{cs} \quad (5)$$

式中: V 为组合梁抗剪承载力; V_U 为 UHPC 层提供的抗剪贡献; V_{cs} 为混凝土剪压区和箍筋提供的抗剪贡献.

2.1.1 V_{cs} 计算公式

极限状态下 UHPC-NC 组合截面梁的隔离体受力情况如图 5 所示. 由平衡条件可以得到

$$\sum X = 0 \Rightarrow \sigma b_w \xi d_v = \rho_s b_w d_v f_s + \sigma_U b_w h_U \quad (6)$$

$$\sum Y = 0 \Rightarrow V_{cs} = \tau \xi b_w d_v + \rho_V f_V b_w c \quad (7)$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow V_{cs} a = \sigma b_w \xi d_v \left(d_v - \frac{\xi d_v}{2} \right) + \rho_V f_V b_w c \frac{c}{2} \quad (8)$$

由式(6)可得

$$\xi = \frac{1}{\sigma} \left(\rho_s f_s + \frac{\sigma_U h_U}{d_v} \right) \quad (9)$$

令

$$H = \left(\rho_s f_s + \frac{\sigma_U h_U}{d_v} \right) \quad (10)$$

所以

$$\xi = \frac{1}{\sigma} H \quad (11)$$

式(6)~(11)中共有 $\sigma, \tau, \xi, V_{cs}$ 四个未知数, 所以将式(3), (7), (8)和(11)联立得

$$V_{cs} = \Phi b_w d_v f_c \quad (12)$$

其中

$$\Phi = \left(2B + \frac{0.36\lambda^2 \rho_V f_V B}{H} + \frac{0.6\rho_V f_V \lambda}{f_c} + \frac{AH}{f_c} \right) / \left(\frac{2\lambda B f_c}{H} + 1 \right) \quad (13)$$

式(6)~(13)中: ρ_s 为纵筋配筋率; f_s 为极限状态下纵筋屈服应力; ρ_V 为箍筋配筋率; f_V 为极限状态下箍筋屈服应力; h_U 为 UHPC 层高度; σ_U 为 UHPC 极限抗拉强度; $c = 0.6\lambda d_v$ 为斜裂缝的水平投影长度, λ 为系数.

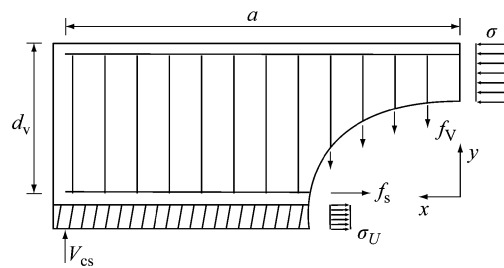


图 5 极限平衡计算图示

Fig.5 Calculation model of ultimate equilibrium condition

2.1.2 V_U 计算公式

根据前述假设, UHPC 的抗剪贡献可以用等效剪力的方法求出.

$$V_U = \frac{M_U}{a - c} \quad (14)$$

其中

$$M_U = \frac{1}{2} \sigma_U b_w h_U^2 \quad (15)$$

总抗剪承载力为

$$V = \Phi b_w d_v f_c + \frac{M_U}{a-c} \quad (16)$$

2.2 尺寸效应

尺寸效应对钢筋混凝土梁的抗剪承载力有着重要的影响^[13-18]. 对于有腹筋混凝土梁来说在剪跨比小于 3 时, Bazant^[16]认为抗剪钢筋的存在使钢筋混凝土梁的抗剪承载力对构件尺寸的变化不太敏感, 但当剪跨比大于 3 时, 构件尺寸的影响则不能忽略. 由于构件尺寸的影响, 不同尺寸构件的承载力会存在一定量的差别, 也就会引起计算理论与计算公式的误差.

Zararis 等^[17]认为剪跨比大于 3 时钢筋混凝土梁的剪切破坏过程可以分为两部分, 第一部分是在弯曲裂缝基础之上发展出来的剪切斜裂缝, 第二部分是在剪切斜裂缝顶端形成穿过剪压区向加载点发展的斜拉裂缝, 最后的破坏形式为该裂缝导致的斜拉破坏, 裂缝发展示意图如图 6 所示.

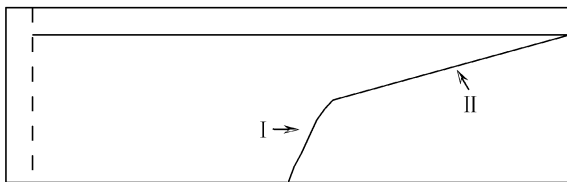


图 6 梁体破坏过程

Fig.6 Failure procession of beam

Zararis 等^[17]分析了第二部分裂缝的隔离体受力情况, 认为该部分应力分布状态类似于混凝土圆柱体沿裂缝劈裂破坏, 如图 7 所示. 这一部分破坏的应力状态直接受尺寸效应影响. Hasegawa 等^[18]为研究混凝土圆柱体尺寸效应做了大量混凝土圆柱体(直径 10~300 cm)劈裂试验, 得到混凝土名义强度 σ_N 与圆柱体直径 D (m) 和混凝土抗拉强度 f_{ct} 之间的关系为

$$\sigma_N = (1.20 - 1.30D) f_{ct} \quad (17)$$

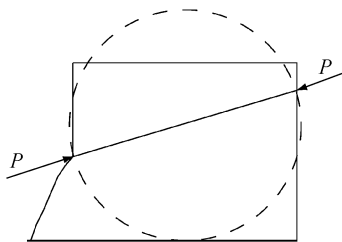


图 7 劈裂破坏

Fig.7 Splitting failure

Zararis 近似取劈裂直径 $D=0.16a$, 得到钢筋混

凝土梁考虑尺寸效应的应力计算公式为

$$\sigma_N = (1.20 - 0.20a) f_{ct} \quad (18)$$

其中 $(1.20 - 0.20a) \geq 0.65$, 根据数十根剪跨比在 3 以上的梁承载力进行验证, 结果十分理想. 本文也采用 $(1.20 - 0.20a)$ 作为梁的抗剪极限承载力尺寸效应的折减系数.

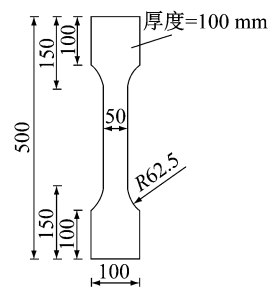
综上所述, 抗剪承载力计算公式为

$$\begin{cases} \Phi b_w d_v f_c + \frac{M_U}{a-c} & \lambda < 3 \\ (1.20 - 0.20a) \left(\Phi b_w d_v f_c + \frac{M_U}{a-c} \right) & \lambda \geq 3 \end{cases} \quad (19)$$

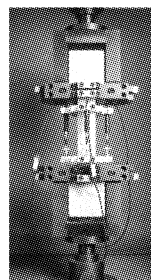
3 试验验证

为了验证本文提出的 UHPC-NC 组合梁抗剪极限承载力计算方法的准确性, 设计了相应的简支梁抗剪试验. 由于本试验主要研究抗剪承载力计算方法的准确性和 UHPC 层、尺寸效应等参数对承载力的影响, 所以在试验设计中各组试件的钢筋强度、混凝土强度、UHPC 强度、截面形式等参数均保持不变.

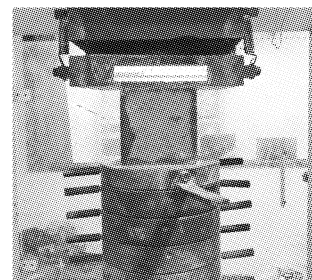
本试验所采用的 UHPC 材料通过轴拉和轴压试验对该材料的抗拉和抗压性能进行试验研究. 抗拉强度试验采用狗骨试件, 试件中间段横截面尺寸为 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 抗压强度试验采用 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的立方体, 如图 8 所示. 测试结果表明, 其抗压极限强度为 150 MPa, 其抗拉极限强度



a 狗骨试件平面尺寸(单位: mm)



b 轴拉试验



c 抗压试验

图 8 UHPC 试件

Fig.8 UHPC specimen

为 12 MPa.

按照剪跨比、有无 UHPC 层、UHPC 层内是否配筋等因素,共设计了 5 根 UHPC-NC 简支梁试件. 1 号梁为未增加 UHPC 层的钢筋混凝土梁,作为试验参照梁,梁长 2.7 m;2 号试验梁在 1 号梁的截面底部增加 UHPC 层,梁长也为 2.7 m;3~5 号试验梁横截面尺寸与 2 号梁相同,不同的是 UHPC 层内均配有纵向钢筋,梁长分别为 2.7、2.4 和 3.1 m,截面形式如图 9 所示,具体的试件参数见表 1. 其中钢筋混凝土梁和 UHPC 层内纵向受力钢筋均为 HRB 400,箍筋为 HRB 300,钢筋材料性能加载试验如图 10 所示. 钢筋材料性能见表 2,C50 混凝土的立方体抗压强度为 58.5 MPa.

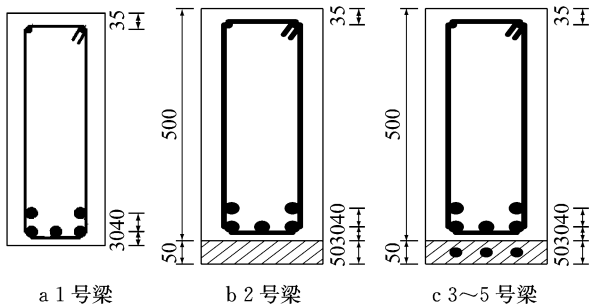
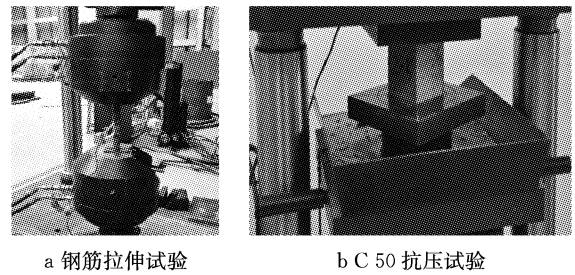


图 9 试件横截面尺寸(单位:mm)

Fig.9 Cross-section of specimens(unit:mm)

试验采用跨中单点加载方式,如图 11 所示. 加载过程分为三个阶段:预压、力控制加载、位移控制加载. 最终所有试件的破坏形式均为斜截面剪切破

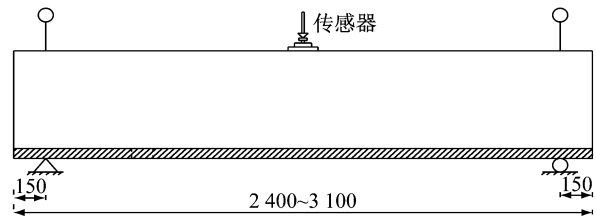
坏,如图 12 所示.



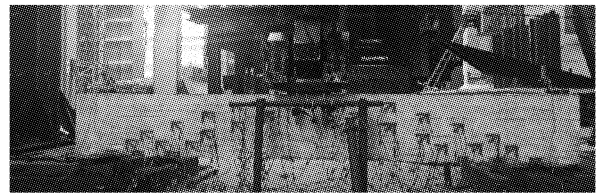
a 钢筋拉伸试验 b C 50 抗压试验

图 10 材料性能试验

Fig.10 Material property test



a 加载示意图(单位:mm)



b 加载照片

图 11 试验加载方式

Fig.11 Test loading

表 1 试件设计参数

Tab.1 Parameters of testing specimens

试件编号	截面尺寸/(mm×mm)	混凝土纵筋直径/mm	UHPC 钢筋直径/mm	剪跨比	钢筋肢数	箍筋间距/mm	箍筋直径/mm	混凝土类型	简支梁总长度/m	UHPC 层高度/mm
1	200×500	25		2.7	11	250	8	C 50	2.7	
2	200×550	25		2.7	11	250	8	C 50	2.7	50
3	200×550	25	20	2.6	11	250	8	C 50	2.7	50
4	200×550	25	20	2.2	9	250	8	C 50	2.4	50
5	200×550	25	20	3.2	11	250	8	C 50	3.1	50

表 2 钢筋性能

Tab.2 Steel reinforcement properties

强度等级	平均直径/mm	极限强度/MPa	屈服强度/MPa
HRB 400	25	634	487
HRB 400	20	703	530
HRB 300	18	619	443

由于 2 号梁 UHPC 层没有配筋,可以更加清晰地观察到 UHPC 层的破坏形式. 根据试验结果,UHPC 层破坏裂缝在 UHPC-NC 交界处并未完全分离,在此处形成了铰点,如图 13 所示,符合前述假设. 对于 3~5 号梁,由于 UHPC 层内的钢筋会阻碍

裂缝发展,导致 UHPC 破坏处裂缝宽度较小,但裂缝形成铰点的模态依然成立.

4 试验结果分析

4.1 抗剪承载力

根据本文所提出的 UHPC-NC 组合梁抗剪承载力计算公式,对 5 根试验梁进行计算并与试验值进行对比,结果见表 3.

由表 3 可知,极限承载力理论计算值与试验值

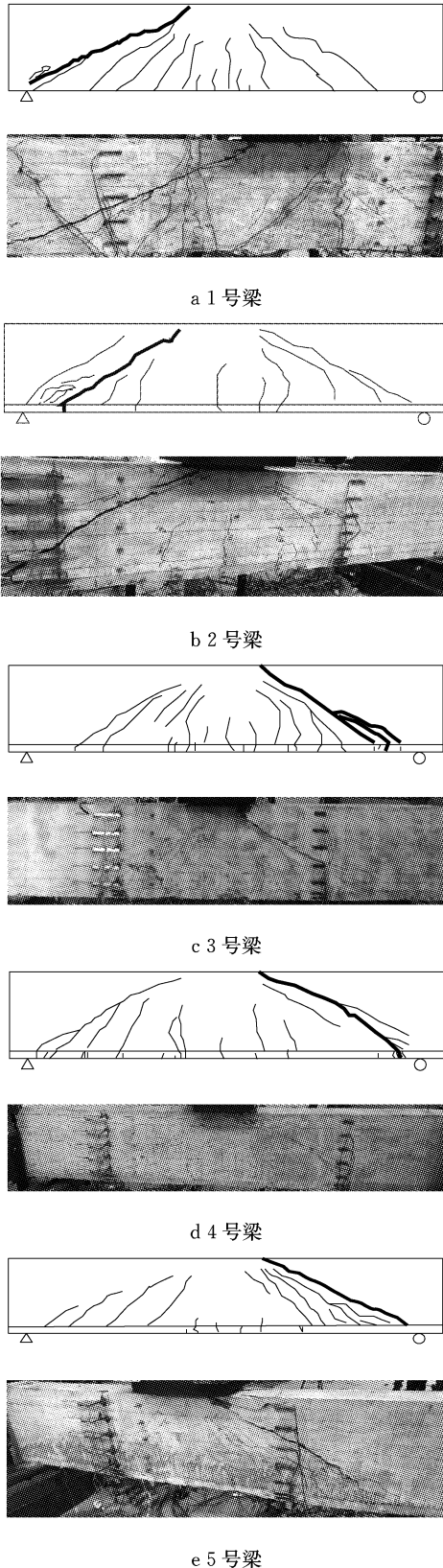


图 12 试验破坏主裂缝图
Fig. 12 Crack diagram of test

较为吻合,误差均在 5%左右. 试验值均略高于理论计算值,可能与极限平衡理论忽略混凝土接触面之间传递的剪力等假设有关.

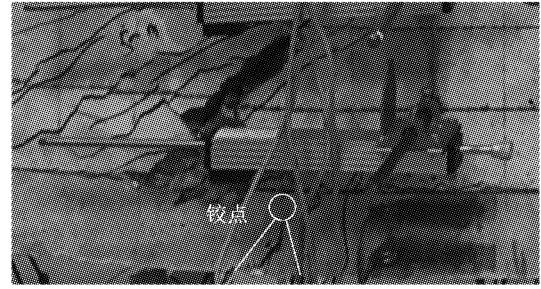


图 13 UHPC 层破坏形式
Fig. 13 UHPC layer failure

表 3 理论计算与实测值对比

Tab. 3 Theory calculation and measured value

试验梁	极限承载力/kN		偏差/%
	试验值	计算值	
1	655	610	6.8
2	717	675	5.9
3	922	878	4.7
4	955	917	3.9
5	761	727	5.3

4.2 结果对比分析

4.2.1 UHPC 层的影响

表 4 为 1 号梁与 2 号梁(有无 UHPC 层)的抗剪承载力的理论值与试验结果的对比.

表 4 1 号梁和 2 号梁的抗剪承载力

Tab. 4 Shear resistance of NO. 1 and NO. 2 beams

试件	抗剪承载力/kN	
	试验值	计算值
1	655	610
2	717	675
变化量/kN	62	65
变化比例/%	9.50	10.70

由表 4 可知,理论值与试验结果的抗剪承载力增加比例较吻合. 增加 UHPC 层后,梁的抗剪承载力提高了 10%左右. 因此,单独增加 UHPC 层可以使梁的抗剪承载力有一定的提高.

4.2.2 UHPC 层内配筋的影响

表 5 为 2 号梁和 3 号梁(UHPC 层是否配筋)的理论值与试验结果的对比.

表 5 2 号和 3 号梁抗剪承载力

Tab. 5 Shear resistance of NO. 2 and NO. 3 beams

试件	抗剪承载力/kN	
	试验值	计算值
2	717	675
3	922	878
变化量/kN	205	203
变化比例/%	28.60	30.10

由表 5 可知,UHPC 层配筋梁与不配筋梁相比,抗剪承载力提高比例约为 30%,可见 UHPC 层内配

筋对于 UHPC-NC 组合梁抗剪承载力的提高具有很大的作用。

4.2.3 尺寸效应的影响

为了验证尺寸效应的影响,将 3 号梁分别与 4 号梁和 5 号梁的抗剪承载力进行对比(截面形式相同,试件长度不同)。如表 6 和表 7 所示。

表 6 3 号梁和 4 号梁抗剪承载力

Tab.6 Shear resistance of NO.3 and NO.4 beams

试件	抗剪承载力/kN	
	试验值	计算值
3	922	878
4	955	917
变化量/kN	33	39
变化比例/%	3.50	4.40

表 7 3 号梁和 5 号梁抗剪承载力

Tab.7 Shear resistance of NO.3 and NO.4 beams

试件	抗剪承载力/kN	
	试验值	计算值
3	922	878
5	761	727
变化量/kN	-161	-151
变化比例/%	-17.50%	-17.20%

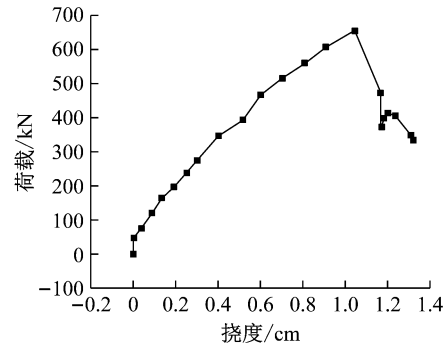
由表 6 和表 7 可知,本文计算方法可以较好地反映剪跨比的影响。根据 3 号梁(2.7 m)和 4 号梁(2.4 m)的结果对比,可见在横截面完全相同的情况下,当梁的长度变化 0.3 m 时,梁的抗剪承载力只变化了 4% 左右,因此在剪跨比为 2~3 时梁的抗剪承载力对尺寸效应不敏感。但是根据 3 号梁(2.7 m)与 5 号梁(3.1 m)的结果对比,抗剪承载力发生了 17% 的变化。说明当梁的剪跨比大于 3 之后,在增加相近的梁长情况下,剪跨比大于 3 的梁的承载力发生大幅度变化,尺寸效应十分显著,与前述观点一致。因此,对于剪跨比大于 3 的梁,必须进行尺寸效应的折减,才能得出准确的抗剪承载力。

4.3 UHPC 延性作用

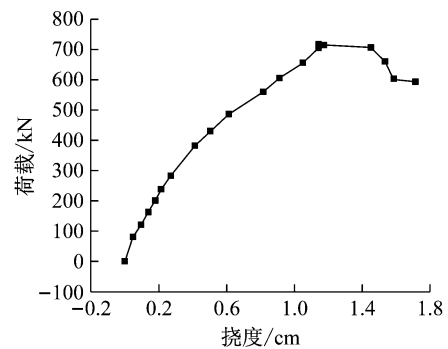
UHPC 材料本身具有传统混凝土材料所无法比拟的延性特点,将 1 号梁和 2 号梁的荷载-位移曲线进行对比,如图 14 所示。可见,增加 UHPC 层的 2 号梁挠度在达到极限承载力之后没有急剧下降反而出现一定程度的平台段,与之相对应的未增加 UHPC 层的 1 号梁挠度在达到极限承载力之后急剧下降,表现出了极大的脆性。

5 结论

(1) 基于极限平衡理论的 UHPC-NC 组合梁斜



a 1 号梁



b 2 号梁

图 14 荷载-位移曲线

Fig.14 Load-flex

截面抗剪承载力计算方法采用了简化的混凝土破坏准则和尺寸效应折减系数,能够准确计算受拉区 UHPC-NC 组合梁的抗剪承载力。同时,该方法能够有效地反映 UHPC 层,UHPC 层内钢筋、尺寸效应等各个参数对于抗剪承载力的影响。

(2) 试验表明,UHPC 层不仅能够有效地提高梁的抗剪承载力,同时显著提高其整体延性,从而提高梁的安全性,充分彰显出 UHPC 材料性能的优异。

(3) 论文仅针对 UHPC 位于受拉区的矩形截面钢筋混凝土梁进行研究,对于 I 形、T 形、箱形等不同截面组合梁以及 UHPC 位于受压区组合截面梁的计算方法具有参考意义,但还需要进一步研究。

参考文献:

[1] GRAYBEAL B. Ultra-high performance concrete [J]. Technote, 2011, 19(10):848.
 [2] HABEL K, DENARIE E, BRUHWILER E. Time dependent behavior of elements combining ultra-high performance fiber reinforced concretes (UHPRC) and reinforced concrete[J]. Materials & Structures, 2006, 39(5):557.
 [3] PREM P R, MURTHY A R. Acoustic emission and flexural behaviour of RC beams strengthened with UHPC overlay[J].

- Construction & Building Materials, 2016, 123(1):481.
- [4] LAMPROPOULOS A P, PASCHALIS S A, TSILOULOU O T, *et al.* Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Engineering Structures, 2016, 106(1): 370.
- [5] AI-OSTA M A, ISA M N, BALUCH M H, *et al.* Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. Construction & Building Materials, 2017, 134(1):279.
- [6] HUSSEIN L, AMLEH L. Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members[J]. Construction & Building Materials, 2015, 93(1):1105.
- [7] MOHAMMED T J, BAKAR B H A, BUNNORI N M. Torsional improvement of reinforced concrete beams using ultra high-performance fiber reinforced concrete (UHPFC) jackets-experimental study[J]. Construction & Building Materials, 2016, 106(1):533.
- [8] Main Construction Security. Ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHPC) [S]. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology, 2016.
- [9] 莫小宁. 高强钢筋混凝土梁受剪性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- MO Xiaoning. Study on shear behavior of high strength reinforced concrete beams [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [10] 瓦希耶夫. 钢筋混凝土构件抗剪承载力[M]. 北京: 人民交通出版社, 1992.
- VASIVEY. Shear bearing capacity of reinforced concrete members[M]. Beijing: China Communication Press, 1992.
- [11] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- GU Xianglin. Basic principle of concrete structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004.
- [12] NOSHIRAVANI T, BRUHWILER E. Experimental investigation on reinforced ultra-high-performance fiber-reinforced concrete composite beams subjected to combined bending and shear [J]. Aci Structural Journal, 2013, 110(2):251.
- [13] KIM S W, JEONG C Y, LEE J S, *et al.* Size effect in shear failure of reinforced concrete beams with recycled aggregate [J]. Journal of Asian Architecture & Building Engineering, 2013, 12(2):323.
- [14] 王景全, 戚家南. 有腹筋与无腹筋钢筋混凝土梁抗剪承载力统一计算方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7):47.
- WANG Jingquan, QI Jia'nan. Unified shear strength computation model for reinforced concrete beams with and without stirrups[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7):47.
- [15] 周宏宇, 李振宝. 钢筋混凝土梁抗弯性能尺寸效应试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(6):113.
- ZHOU Hongyu, LI Zhenbao. Experimental study on the size effect on RC beam flexural behaviors [J]. Structural Engineers, 2012, 28(6):113.
- [16] BAZANT Z P. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams[J]. Aci Journal, 1984, 81(5):456.
- [17] ZARARIS P D, PAPADAKIS G C. Diagonal shear failure and size effect in rc beams without web reinforcement[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7):733.
- [18] HASEGAWA T, SHIOYA T, OKADA T. Size effect on splitting tensile strength of concrete [C] // JCI Conference. Tokyo: Japan Concrete Institute, 1985:309-31.

~~~~~

(上接第 1122 页)

- [16] 樊学平, 刘月飞, 吕大刚. 桥梁极值应力的改进高斯混合粒子滤波器动态预测 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(11): 1660.
- FAN Xueping, LIU Yuefei, LÜ Dagang. Improved gaussian mixed particle filter dynamic prediction of bridge monitored extreme stress [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(11): 1660.
- [17] FAN X P, LIU Y F. Dynamic extreme stress prediction of bridges based on nonlinear mixed gaussian particle filtering algorithm and structural health monitoring data [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(6): 1.
- [18] XIONG X, NAVON I M, UZUNOGLU B. A note on the particle filter with posterior gaussian resampling [J]. Dynamic Meteorology and Oceanography, 2006, 58(4): 456.
- [19] 陈莹, 郑金荣. 基于观测迭代的插值粒子滤波算法 [J]. 信号处理, 2010, 26(1): 146.
- CHEN Ying, ZHENG Jinrong. Improved divided difference particle filter based on observation interaction [J]. Signal Processing, 2010, 26(1): 146.
- [20] 于金霞, 刘文静, 汤永利. 粒子滤波重采样算法研究 [J]. 微计算机信息, 2010, 26(16): 44.
- YU Jinxia, LIU Wenjing, TANG Yongli. Study on the resampling algorithms of particle filter [J]. Microcomputer Information, 2010, 26(16): 44.
- [21] 郭晓松, 李奕芑, 郭君斌. 粒子滤波算法及其应用研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(9): 2264.
- GUO Xiaosong, LI Yipeng, GUO Junbin. Research on particle filter algorithm and its applications [J]. Computer Engineering & Design, 2009, 30(9): 2264.
- [22] DHOTE V, SATANANDMISHRA, SHUKLA J P, *et al.* Runoff prediction using big data analytics based on ARIMA model [J]. Indian Journal of Geo-marine Sciences, 2018, 47(11): 2163.