

基于拓扑优化和模块化组成的UHPC围护结构 受力性能研究

周芷萱¹, 蒋友宝^{1*}, 刘军², 向义², 周浩¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中路杜拉国际工程股份有限公司, 广东 广州 510627)

摘要:针对围护结构安全、美观、轻量化的需求, 该文提出一种基于拓扑优化和模块化组成的超高性能混凝土(UHPC)围护结构及其节点连接方式。首先, 基于给定材料体积约束下结构柔顺度最小化的方法, 对UHPC围护结构进行优化, 并开展优化前后受力性能对比。采用模块化设计, 取模型中受力最不利区域的优化结果作为基本构型单元, 进而提出一种可将模块简单拼装的UHPC榫卯节点。考虑节点接缝处受力较为薄弱的特性, 开展该类节点受力性能的有限元分析, 并将其与传统螺栓-钢板节点进行对比。结果表明: 基于拓扑优化和模块化组成的UHPC围护结构在保证刚度和承载性能较高的同时, 体积约减小35%; 文中榫卯节点相较于螺栓-钢板节点受力性能上较有优势, 因此能够实现与传统螺栓-钢板节点达到等强的要求; 为取得较好效果, UHPC榫卯节点接缝键齿的内倾角不宜大于60°, 外倾角不宜小于90°。

关键词:桥梁工程; 围护结构; UHPC; 拓扑优化; 模块化; 节点

中图分类号: U444

文献标志码: A

Mechanical Performance of UHPC Building Envelope Based on Topological Optimization and Modular Composition

ZHOU Zhixuan¹, JIANG Youbao^{1*}, LIU Jun², XIANG Yi², ZHOU Hao¹

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2.Zhong Lu Dura International Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510627, China)

Abstract: To ensure a safe, aesthetic, and lightweight building envelope, an ultra-high performance concrete (UHPC) building envelope and its node connection mode were proposed based on topological optimization and modular composition. Firstly, the UHPC building envelope was optimized by using the method of minimizing structural compliance subjected to given material volume constraints, and the mechanical performance before and after optimization was compared. The modular design was adopted, and the optimization result of the most unfavorable stress area in the model was taken as the basic configuration unit. Then, UHPC tenon and mortise nodes were proposed, which could be simply assembled into modules. By considering the weak mechanical performance of nodes, the finite element analysis (FEA) of the nodes was carried out, and the nodes were compared with the traditional bolt-steel plate nodes. The results show that the UHPC building envelope based on topological optimization and modular composition not only ensures high stiffness and bearing performance but also reduces the volume by around 35%. Compared with the bolt-steel plate node, the tenon and mortise node in this paper has advantages in mechanical performance, so it can achieve the same strength as the traditional bolt-steel plate node. In order to achieve better results, the inward

收稿日期: 2023-01-23

基金项目: 湖南省自然科学基金杰出青年基金资助项目(编号: 2022JJ10050)

作者简介: 周芷萱, 女, 硕士研究生. E-mail: 1452782563@qq.com

*通信作者: 蒋友宝, 男, 博士, 教授. E-mail: 45182319@qq.com

camber of the key teeth of the UHPC tenon and mortise node should not be greater than 60° , and the camber angle should not be less than 90° .

Keywords: bridge engineering; building envelope; UHPC; topological optimization; modularization; node

0 引言

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete)是一种高强度、高韧性、低空隙率的超高强水泥基材料^[1-3]。目前 UHPC 多应用于桥梁工程^[4-5],但其应用前景不限于此,如在上海音乐学院歌剧院等幕墙工程中应用良好^[6]。对于围护结构,如楼梯扶手、人行天桥护栏等,传统方式一般多采用石材、木材、钢材等,并已广泛用于市政大楼、博物馆、文化广场等各种室内或室外场所,而使用超高性能混凝土制备的围护结构可更为轻薄,造型更为美观,因此日益得到行业人员的重视。

当 UHPC 应用于围护结构时,为充分发挥其高强度、高韧等优异的力学性能,一般需对围护结构进行拓扑优化。自 Bendsøe 等^[7]建立连续体结构拓扑优化方法以来,拓扑优化研究及其应用得到了广泛关注;Querín 等^[8]提出了双向进化结构优化(BESO)方法;Huang 等^[9]提出了双向演化拓扑优化方法。目前连续体拓扑优化方法主要有均匀化方法、SIMP 法、ESO 方法、水平集方法、MMC 方法等^[10]。一般而言,基于拓扑优化的结构设计性能研究主要集中在刚度问题上,最为典型的是在给定材料体积约束下的结构柔顺度最小化问题^[11],实际上,多数工程结构优化设计还应考虑强度问题^[12]。

为此,本文通过拓扑优化方法和模块化节点设计,提出一种新型 UHPC 围护结构,实现围护结构的高性能与轻量化。在此基础上,提出一种可将模块简单拼装的 UHPC 榫卯节点,并将其与传统螺栓-钢板节点进行对比,以期围护结构实际设计与生产应用提供参考。

1 基于拓扑优化的 UHPC 围护结构设计

1.1 拓扑优化原理

本文以平板模型每个单元的密度为设计变量, UHPC 平板结构的优化目标设置为最大刚度,约束条件设置为体积约束。在已知体积约束及自重荷载下,找到满足约束的柔顺度最小的结构。故数学优

化模型定义为^[10]:

$$\begin{aligned} \min J(u, \varphi) &= \int_D \varepsilon(u) : \varepsilon(u) H(\varphi) d\Omega \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \int_D \varepsilon(u) : C : \varepsilon(u) H(\varphi) d\Omega = \int_D b \nu H(\varphi) d\Omega + \int_{\Gamma_N} \tau \nu \varepsilon H(\varphi) d\Omega & \forall \nu \in U \\ G(\varphi) = \frac{\int_D H(\varphi) d\Omega}{\int_D d\Omega} - V_{\max} = 0 \\ u = u_0 & \text{in } \Gamma_u \\ C : \varepsilon(u) \cdot n = \tau & \text{in } \Gamma_\tau \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Γ_τ 为施加荷载 τ 的几何边界; Γ_u 为施加位移约束的几何边界; J 为目标函数; u 为结构位移场, ε 为应变; C 为弹性张量; ν 为在允许位移空间 U 中的虚位移; b 为体力; G 为设计材料体积的约束函数; V_{\max} 为设计最大材料允许体积分数; D 为设计域; u_0 和 τ 分别为给定的位移约束和荷载约束条件。

$H(\varphi)$ 是 Heaviside 函数,其意义为当水平集函数值为 φ 时,该点处材料是否存在,具体定义如下:

$$H(\varphi) = \begin{cases} 0 & \varphi < 0 \\ 1 & \varphi \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 拓扑优化模型的建立

利用 Ansys Workbench 有限元软件建模,包括:材料性能、载荷及约束、划分网格。表 1 为 UHPC 材料的性能参数^[13]。

表 1 UHPC 材料特性
Table 1 Material characteristics of UHPC

f_t/MPa	f_c/MPa	E/GPa	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
7.91	130	42	2 500

根据《民用建筑设计统一标准》(GB 50352—2019)^[14],室内围护结构的高度应该为 90~100 cm,室外围护结构的高度不得低于 110 cm;在实际工程案例中,楼梯的进深一般为 3.3 m,一般民用住宅层高为 2.8~3.2 m,楼梯围护构件长度一般为 3.6~3.8 m。所以选取长度为 3.8 m,高度为 110 cm,40 mm 厚的围护结构的平板模型,并用三维建模软件建立围护结构的实体模型。平板结构的尺寸参数见图 1。

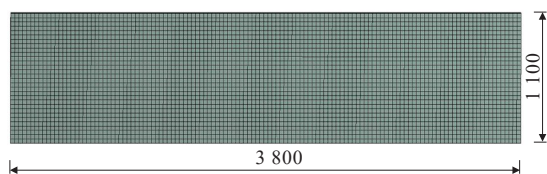
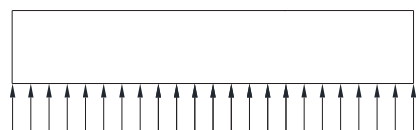


图1 模型网格与尺寸(单位:mm)

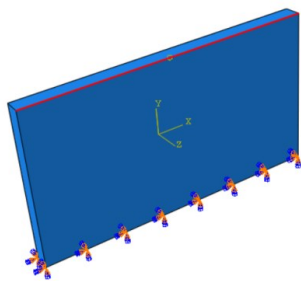
Figure 1 Model grid and dimensions(unit:mm)

拓扑优化中网格尺寸影响求解时间和拓扑结果。一般情况下,拓扑优化需要进行数次求解,网格尺寸越小,求解的时间就越长;而拓扑结果依据网格单元进行删减,网格尺寸越小,拓扑结果直观上看起来越顺滑。采用C3D8R单元划分网格,单元大小为边长3 mm,建立了基于平板结构的围护结构拓扑优化有限元模型。此模型包括六面体单元57 267个,节点56 628个,如图1所示。

若按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[15]要求,楼梯围护结构应能承受1 kN/m的水平荷载;根据《城市人行天桥与地道技术规范》(CJJ 69—95)^[16]要求,人行天桥围护结构应能承受2.5 kN/m的水平荷载。综合考虑,在围护结构最上边缘线性区域施加2.5 kN/m的水平荷载,见图2(a)。约束条件考虑为最下端面完全固定,见图2(b)。



(a) 线荷载



(b) 约束条件

图2 模型荷载与约束条件

Figure 2 Model load and constraint

1.3 拓扑优化设计过程及结果

采用Topology Optimization模块对UHPC平板结构进行优化设计,该模块通过改变UHPC平板结构的形状参数来实现轻量化。对所述围护结构指定优化区域和非优化区域,将围护结构所有边界条件

不纳入优化区域,指定需要进行优化的区域。优化区域为静力分析中所有边界条件(约束和载荷)以外的区域。优化目标的设置,方法为最小柔度(最大刚度)法,即最佳设计是目标函数最低并且接近所有约束条件的设计;设置完材料、荷载等参数后划分网格。参考文献[17],为保证材料去除率的可控性,选择体积作为约束条件,最小化柔顺度(刚度最大化)作为优化目标;避免体积优化率过大,满足不了实际围护结构的安全需求,指定Percent to Retain为50%^[10]。充分发挥保留材料的受力性能,使得结构耗材少,从而获得理想的拓扑优化结果。优化模块中的拓扑优化对该UHPC平板结构进行单工况拓扑优化分析。经过若干次迭代计算,目标函数均趋于收敛,得到的UHPC围护结构的拓扑优化结果如图3所示。



图3 拓扑优化结果

Figure 3 Topological optimization result

根据规范^[14,18],钢管护栏分为8 mm、6 mm的类型,重量为15~20 kg/m。《民用建筑设计统一标准》(GB 50352—2019)^[14]要求,室内围护结构的高度应该为90~100 cm,室外围护结构高度不得低于110 cm。对于UHPC护栏,其高度保守考虑取为110 cm。钢材与UHPC材料密度分别为7 850 kg/m³、2 500 kg/m³,两种护栏的重量对比见表2。

表2 轻量化对比

Table 2 Lightweight comparison

传统钢栏杆/kg	优化后UHPC围护结构/kg	相对减重率/%
350	209	40

由表2可见:由于超高性能混凝土制备的围护结构只需要40 mm厚度,较为轻薄。基于拓扑优化和模块化组成的超高性能混凝土(UHPC)围护结构可减少35%的体积,比传统钢栏杆轻40%。

2 优化设计前后围护结构的受力性能分析

2.1 UHPC材料本构模型

本文中的UHPC拉压本构关系采用文献[19-20]

提出的本构模型,如图4所示。

在材料本构方面,参考文献[13]定义UHPC损伤因子。文献[20]基于试验结果提出了包含应变硬化应力-应变关系和应变软化应力-裂缝宽度关系两阶段UHPC材料拉伸本构模型。受拉段UHPC材料在极限应变前 ε_{ca} 采用双线性应力-应变关系拟合^[21],如式(3)所示:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{f_{ct}}{\varepsilon_{ca}} \varepsilon & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{ca} \\ f_{ct} & \varepsilon_{ca} < \varepsilon < \varepsilon_{pc} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_{ct} 为应变硬化阶段平均应力; ε_{pc} 为极限应变; ε_{ca} 为初裂应变。

$$\sigma(\omega) = f_{ct} \frac{1}{1 + (\omega/\omega_{0.5})^p} \quad (4)$$

式中: p 为拟合参数; $\omega_{0.5}$ 为曲线应力降至 $0.5f_{ct}$ 时的裂缝宽度。

UHPC受压段应力-应变曲线^[19]方程如式(5)所示:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \frac{n\xi - \xi^2}{1 + (n-2)\xi} & \xi \leq \xi_0 \\ f_c \frac{n\xi - \xi^2}{2(\xi-1)^2 + \xi} & \xi > \xi_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\xi_0 = 3\,500\,\mu\varepsilon$, $\xi = \varepsilon/\varepsilon_0$, $n = E_c/E_s$, E_c 为初始弹性模量; E_s 为峰值点的割线模量。

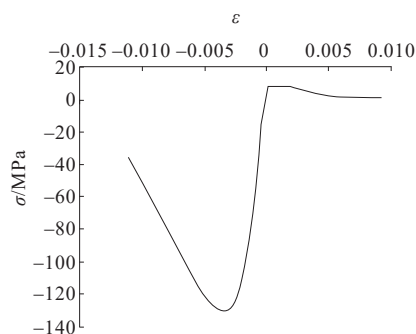


图4 UHPC拉压本构关系

Figure 4 Tensile and compressive constitutive relationship of UHPC

2.2 UHPC围护结构优化前后受力性能对比

假定围护结构上边缘区域受到 2.5 kN/m 的水平荷载,最下端固定。则优化后UHPC围护结构最大拉应力集中在中、下部区域,中、上部区域且越往上的区域受力越小。最大位移为 5.3 mm ,如图5所示。对比之下,若不进行拓扑优化,则其位移分布见图6。

此时,围护结构下端边界条件区域承担主要受力,中、上部区域且越往上的区域受力越小,最大拉应力出现在围护结构的下边缘区域,为 5.8 MPa ,最大位移出现在围护结构的上边缘区域,为 2.6 mm 。

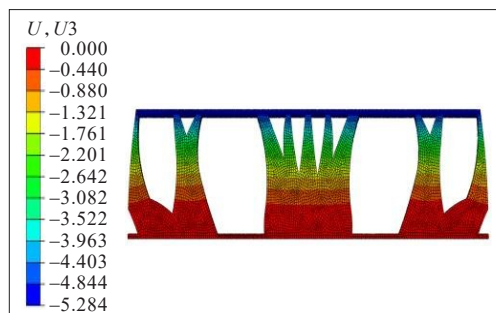


图5 优化后最大位移(单位:mm)

Figure 5 Maximum displacement after optimization(unit:mm)

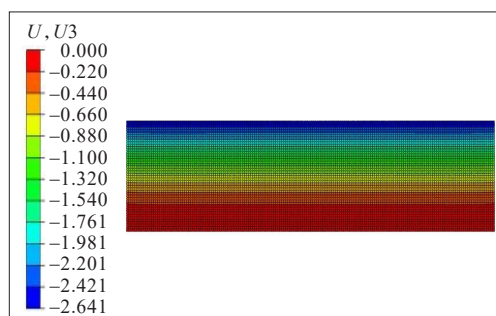


图6 优化前最大位移(单位:mm)

Figure 6 Maximum displacement before optimization(unit:mm)

UHPC围护结构优化前后强度对比结果见表3。

表3 优化前后强度对比

Table 3 Intensity comparison before and after optimization

优化状态	σ_{tmax}/MPa	U/mm
优化前	5.8	2.6
优化后	8.9	5.3

如表3所示,优化后的围护结构刚度是优化前的1.5倍左右,但最大位移仍满足相关规范^[15]规定的最大允许挠度值不应超过高度 $1/100$ 的要求。需说明的是,虽然优化后的最大拉应力超过了表1给出的强度值 7.91 MPa ,但由于该优化结果仅为后文模块单元成形提供备选基板,因此可认为该优化在体积减少 50% 的目标下,近似满足相关要求,初步实现了围护结构的轻量化。

3 围护结构模块单元受力性能

3.1 模块单元形成方案

由于拓扑优化后的结构较复杂,存在施工困难的情况,所述围护结构将采用模块化,选取受力最不利区域的优化结果作为基本构型单元,再将该单元边线圆弧化作为模块单元,整个围护结构由若干块所述模块拼成。

围护结构在受到水平横向线荷载时,下端边界条件区域承担主要受力,因此基板的开孔区域集中在中、上部。在围护结构模块选取过程中,围护结构的两端与中间为受力不利区域,因此选取左侧(940 mm)和中间部位(460 mm)受力最不利区域的优化结果作为模块单元,模块单元的成形如图7所示。此时体积减少约为35%。

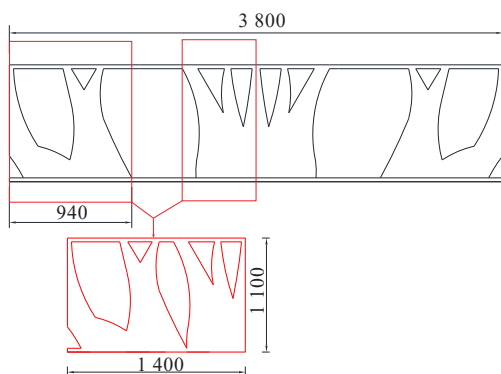


图7 围护结构模块化单元成形(单位:mm)

Figure 7 Modular unit formation of building envelope(unit: mm)

3.2 模块单元连接

考虑围护结构与主体结构连接时,在实际工程中可通过螺栓连接或其他有效途径在连接处实现围护结构与主体结构的安全连接,从而达到与主体结构完全固定约束的效果^[22-23];而对于围护结构模块化单元,可采用一种将模块简单拼装的UHPC榫卯连接节点。

对于模块单元与主体结构的连接,假定其与主体结构在连接处通过可靠连接形成固定的约束条件,端部与主体结构连接位置及个数见图8。

现考虑3种约束条件,约束条件1:采用的围护结构最下端面完全固定的约束条件;约束条件2:围护结构与主体结构在连接点处采用完全固定的约束条件,其端部与主体结构连接点位置及个数见图8(a),

两个连接点处的长度均为100 mm;约束条件3:围护结构与主体结构在连接点处采用完全固定的约束条件,其端部与主体结构连接点位置及个数见图8(b),3个连接点处的长度均为100 mm。设计荷载为2.5 kN/m时,不同约束条件对应的围护结构受力性能有限元对比结果见表4。

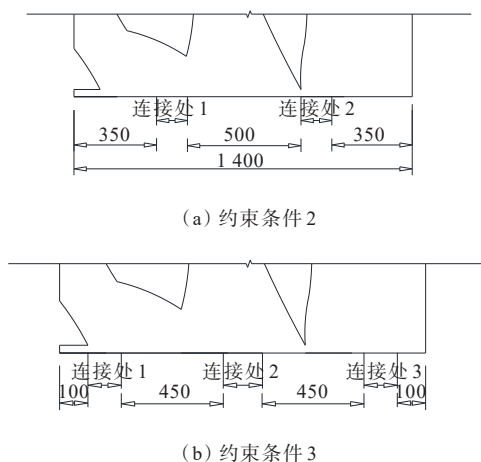


图8 端部与主体结构连接位置及个数(单位:mm)

Figure 8 Location and number of end and main structure(unit:mm)

表4 不同约束条件下对比结果

Table 4 Comparison results under different constraints

约束条件	σ_{\max}/MPa	U/mm
约束条件1	6.1	2.9
约束条件2	8.7	3.9
约束条件3	6.5	3.1

由表4可知:基于约束条件2下的围护结构最大拉应力与位移与基于约束条件1下的相差较大;基于约束条件3与约束条件1下的围护结构应力、位移结果很接近,且均满足强度和变形要求。因此,对于模块化的装配式围护结构,采用端部与主体结构连接点个数为3个的约束条件(即约束条件3),可达到围护结构最下端面完全固定约束(即约束条件1)的效果。

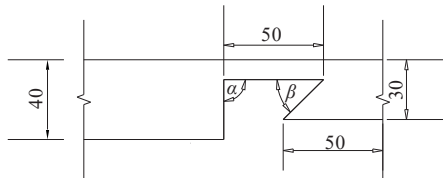
4 基于模块单元榫卯拼接的围护结构受力性能

4.1 拼接节点有限元建模

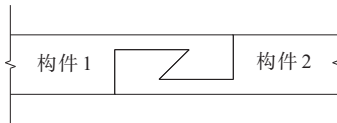
对于上述围护结构模块化单元,可通过设计榫卯节点与传统螺栓-钢板节点方式进行连接,分析对

比这两种不同节点连接方式的受力性能。

假定榫卯节点高度为 1 100 mm,宽度为 40 mm。为考虑接触效应,构件 1 和构件 2 的接触采用面-面接触的方式定义。法向为硬接触,正向通过罚函数定义^[24]。Penalty(罚函数)用于定义罚函数摩擦公式,并且参考 ACI 规范^[25],取摩擦系数为 0.6。对试件底部采用固定约束。具体尺寸如图 9 所示。



(a) 节点基本参数



(b) 节点拼接示意图

图 9 榫卯节点(单位:mm)

Figure 9 Tenon and mortise node(unit:mm)

对于传统螺栓-钢板节点,假定钢板选用 Q235,钢试件厚度为 5 mm,为避免有限元计算复杂不收敛,将钢板与 UHPC 围护结构之间的相互作用以绑定来模拟传统螺栓-钢板节点之间的约束作用,已有较多文献^[26-27]表明这种建模方式具有较好的效果。作为对比节点,建立节点模型时考虑其几何尺寸和分布的合理性,以保证两类连接节点对比的有效性。传统螺栓-钢板节点如图 10 所示。

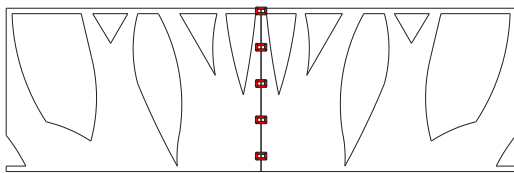


图 10 传统螺栓-钢板节点

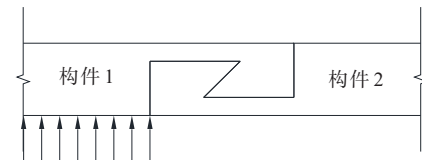
Figure 10 Traditional bolt-steel plate node

4.2 围护结构有限元分析结果

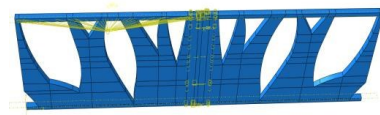
考虑节点的最不利荷载效应,采用位移加载模式。荷载施加区域为半跨围护结构(最不利位置)如图 11(a)所示,并建立与左半跨围护结构最上边缘区域绑定的参考点,如图 11(b)所示。对于榫卯节点,保持键齿高度不变,改变键齿的倾角(在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变

化)^[24],见表 5。采用位移加载,将位移施加在参考点上,输出该参考点的位移与反力,得到较为完整的力-位移曲线,如图 12 所示。

将所得结果进行对比,包括极限荷载、荷载-位移曲线。如表 6 及图 13 所示。



(a) 均布线荷载加载



(b) 约束条件

图 11 荷载最不利施加位置

Figure 11 The most unfavorable position for load

表 5 构件 1 倾角取值

Table 5 Angle values of component 1

节点	内倾角 $\alpha/(^\circ)$	外倾角 $\beta/(^\circ)$
1	90	60
2	60	90
3	60	60

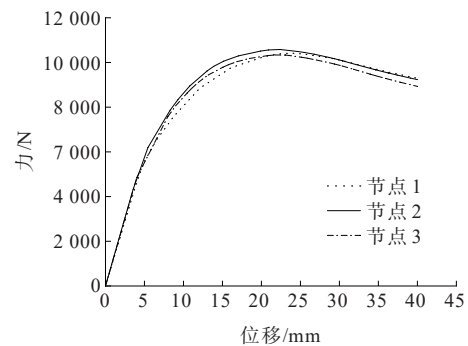


图 12 3种节点荷载-位移曲线

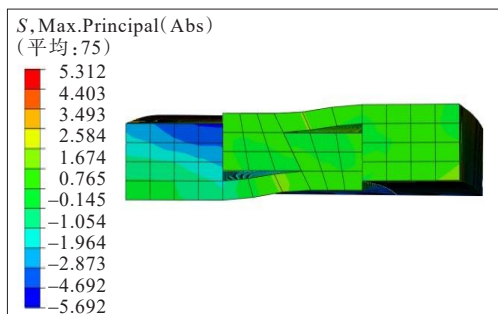
Figure 12 Load-displacement curves of three kinds of nodes

表 6 有限元分析结果对比

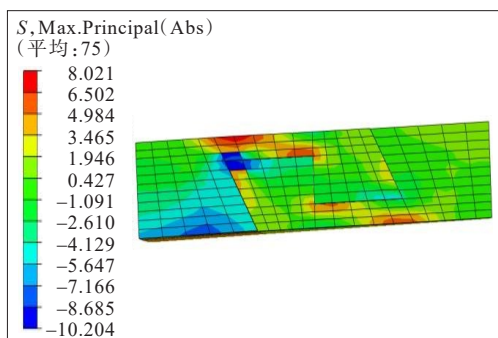
Table 6 Comparison of FEA results

节点	P_u/kN	S_u/mm
1	10.4	24.0
2	10.5	24.6
3	10.3	21.7

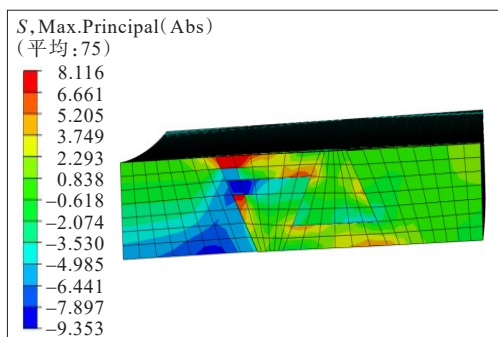
注: P_u 为有限元分析所得极限荷载; S_u 为极限荷载对应的位移。下同。



(a) 节点1



(b) 节点2



(c) 节点3

图13 极限荷载对应的3种节点应力云图(单位:MPa)

Figure 13 Stress nephogram corresponding to ultimate load of three kinds of nodes(unit:MPa)

从图12和表6可以发现:3种节点的力-位移曲线很接近,节点2的极限荷载和极限荷载所对应的位移与其余两种相差较小,但节点2的极限承载力和延性仍大于其余两种不同倾角的节点,具有一定优势。

由图13可知:从3种节点细部的端部错开距离来分析,节点1的端部错开距离最大,约5 mm,上键齿与下键齿之间错开,主要靠最内侧接触面之间的摩擦来约束错动位移;节点3的端部错开距离在5 mm以内,依靠两侧面的接触来约束错动位移,但节点处沟槽内外侧有多处应力集中,最大拉应力在沟槽外侧,为8.1 MPa;节点2只发生了轻微的错动,端部

错开距离很小,最大拉应力在沟槽外侧,为8.0 MPa,3种节点端部错开距离及最大拉应力对比见表7。

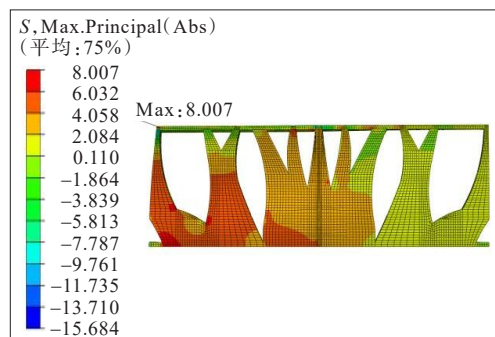
表7 3种节点对比

Table 7 Comparison of three kinds of nodes

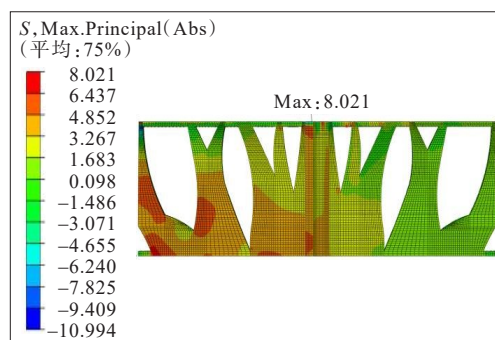
节点	端部错开距离/mm	$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$
1	5.0	5.3
2	0.0	8.0
3	2.0	8.1

在相同横向荷载作用下,当键齿内倾角 $\alpha > 60^\circ$ 、外倾角 $\beta < 90^\circ$ 时,UHPC围护结构的极限承载力有所下降。这是由于当键齿 $\alpha > 60^\circ$ 、 $\beta < 90^\circ$ 时,键齿接缝处的咬合性能发生变化,对键齿之间的相互作用产生影响,所以键齿的倾角 α 不宜大于 60° ,外倾角 β 不宜小于 90° 。

以榫卯节点2为比较基准,在同等受力条件下对比其与传统螺栓-钢板节点的受力性能,包括UHPC最大拉应力、力-位移曲线,结果见图14、15及表8。



(a) 节点2



(b) 传统螺栓-钢板节点

图14 极限荷载对应的两类节点应力云图(单位:MPa)

Figure 14 Stress nephogram corresponding to ultimate load of two kinds of nodes(unit:MPa)

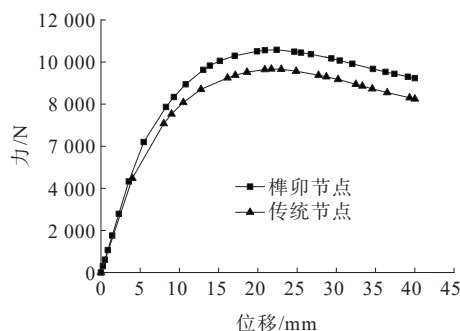


图 15 两类节点荷载-位移曲线

Figure 15 Load-displacement curves of two kinds of nodes

表 8 有限元分析结果对比

Table 8 Comparison of FEA results

节点	P_u/kN	S_u/mm
榫卯节点(节点2)	10.5	24.6
传统节点(螺栓-钢板节点)	9.0	21.7

综上可见,基于榫卯节点2连接的UHPC最大拉应力为8.007 MPa,出现在节点沟槽外侧,见图14(a);基于传统螺栓-钢板节点连接的UHPC最大拉应力为8.021 MPa,出现在围护结构左上角的顶点位置,见图14(b),其UHPC最大拉应力与基于榫卯节点2连接的很接近。两类节点的极限承载力和延性对比见图15和表8,可知榫卯节点的相关力学性能优于传统螺栓-钢板节点。

5 结论

(1) 采用给定材料体积约束下结构柔顺度最小化的方法,对UHPC围护结构进行拓扑优化,实现围护结构在刚度和承载性能较高时,体积减小了35%,造型更为轻薄、美观。

(2) 当键齿的内倾角不宜大于 60° ,外倾角不宜小于 90° 时,基于榫卯节点连接的UHPC围护结构具有较优的受力性能。

(3) 在同等受荷条件下,相较于给定几何尺寸和分布情况下的螺栓-钢板节点,榫卯节点极限承载力和延性较好,具有一定的优势,因此能够实现与传统螺栓-钢板节点达到等强的要求。

参考文献:

References:

[1] WANG D H, SHI C J, WU Z M, et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure

and properties[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 368-377.

[2] YOO D Y, BANTHIA N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 73: 267-280.

[3] ALKAYSI M, EL-TAWIL S. Factors affecting bond development between ultra high performance concrete (UHPC) and steel bar reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 412-422.

[4] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149.

WANG Dehui, SHI Caijun, WU Linmei. Research and applications of ultra-high performance concrete(UHPC) in China[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(1): 141-149.

[5] 邵旭东, 邱明红. 基于UHPC材料的高性能装配式桥梁结构研发[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2): 160-167.

SHAO Xudong, QIU Minghong. Research of high performance fabricated bridge structures based on UHPC[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(2): 160-167.

[6] 中国混凝土与水泥制品协会 UHPC 分会. 2019 年度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, 2020, 41(2): 30-43.

China Concrete and Cement Products Association UHPC branch. Technology and application development report of China UHPC in 2019[J]. China Concrete, 2020(2): 30-43.

[7] BENDSØE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2): 197-224.

[8] QUERIN O M, STEVEN G P, XIE Y M. Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm[J]. Engineering Computations, 1998, 15(8): 1031-1048.

[9] HUANG X, XIE Y M. Bidirectional evolutionary topology optimization for structures with geometrical and material nonlinearities[J]. AIAA Journal, 2007, 45(1): 308-313.

[10] 刘嘉馨. 基于参数化水平集拓扑优化方法的连续体结构自重及动力优化设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

LIU Jiaxin. Parametric level-set based topology optimization for continuous structures under self weights and dynamic topology optimization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

- [11] ROZVANY G I N. A critical review of established methods of structural topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 37(3): 217-237.
- [12] GUO X, ZHANG W S, WANG M Y, et al. Stress-related topology optimization via level set approach[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(47/48): 3439-3452.
- [13] CAO J H, SHAO X D. Finite element analysis of headed studs embedded in thin UHPC[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 161: 355-368.
- [14] 中国建筑标准设计研究院. 民用建筑设计统一标准: GB 50352—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- China Building Standards Design and Research Institute. Uniform standard for design of civil buildings: GB 50352—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [15] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- China Academy of Building Research. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] 北京市市政工程研究院. 城市人行天桥与人行地道技术规范: CJJ 69—1995[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- Beijing Municipal Engineering Research Institute. Technical specifications of urban pedestrian overcrossing and underpass: CJJ 69—1995[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996.
- [17] 张辉. 认知语义学述评[J]. 外语与外语教学, 1999(12): 4-8, 57.
- ZHANG Hui. A Critical review of cognitive semantics[J]. Foreign Languages and Their Teaching, 1999(12): 4-8, 57.
- [18] 王泽胜. 公路交通工程安全防护设施的作用与质量控制分析[J]. 中外公路, 2021, 41(S2): 245-248.
- WANG Zesheng. Function and quality control analysis of safety protection facilities in highway traffic engineering [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(S2): 245-248.
- [19] 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 Jian, FANG Zhi. Research on stress-strain relation of ultra high performance concrete[J]. Concrete, 2008(7): 11-15.
- [20] 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 Zhe, SHAO Xudong, LI Wenguang, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58.
- [21] TJIPTOBROTO P, HANSEN W. Tensile strain hardening and multiple cracking in cement-based composites containing discontinuous fibers[J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(1): 16-25.
- [22] 王瑞峰. 不同约束条件钢管混凝土构件的侧向冲击试验研究与数值分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- WANG Ruifeng. Test research and simulation analysis of steel tube-confined concrete with different restrain condition in the lateral impact[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [23] 周劲宇, 唐俊义, 黄靖云. 一种新型装配式桥梁人-车隔离防撞护栏研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 254-259.
- ZHOU Jinyu, TANG Junyi, HUANG Jingyun. Research on a new type of prefabricated bridge human-vehicle isolation anti-collision guardrail[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 254-259.
- [24] 王景全, 胡玉庆, 刘桐旭, 等. 超高性能混凝土大键齿干接缝受剪性能与承载力计算方法[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(10): 177-185.
- WANG Jingquan, HU Yuqing, LIU Tongxu, et al. Shear performance and bearing capacity calculation method for UHPC dry joints with large-keys[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(10): 177-185.
- [25] ACI Committee, American Concrete Institute. International organization for standardization building code requirements for structural concrete and commentar[S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2008.
- [26] 李帅. 钢板单面外包混凝土剪力墙极限承载力及栓钉剪力需求[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2018.
- LI Shuai. Ultimate bearing capacity and shear force demand on headed stud for the design of C-spw with concrete panel on one side of steel plate[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018.
- [27] 陈智峰, 李昌荣, 郭锦良. 基于ABAQUS的钢板与混凝土接触问题研究[J]. 城市道桥与防洪, 2013(5): 201-203, 6.
- CHEN Zhifeng, LI Changrong, GUO Jinliang. Research on contact problem about steel plate and concrete based on ABAQUS[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(5): 201-203, 6.