

文章编号:1671-8879(2019)02-0082-09

配筋超高性能纤维增强混凝土梁 抗冲击性能的多目标优化

樊 伟^{1,2}, 张志勇¹, 孙 洋¹, 张泽文¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘 要:为解决超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)梁的抗冲击性能和经济成本之间的主要矛盾,对其开展了多目标优化研究。首先,建立以最大冲击力和比价能为目标响应,UHPFRC 梁截面高宽比、UHPFRC 强度、受拉钢筋配筋率和体积配箍率为设计变量的多目标优化数学模型。然后,基于响应面试验设计选取样本点,通过非线性接触有限元分析,建立高阶的响应面代理模型;利用方差分析等统计分析技术进行整体拟合效果的验证及预测精度的评估,并分析参数变化的敏感性。最后,将响应面代理模型与多目标遗传算法结合,形成了 UHPFRC 梁抗冲击性能多目标优化分析方法。研究表明:在 UHPFRC 梁中适当地增加受拉钢筋配筋率及提高截面高宽比,采用强度较低的 UHPFRC 材料,能显著提高其比价能,并降低冲击瞬间的抗力;提高截面高宽比能改善梁的抗冲击性能,但也会导致接触力增大;提高 UHPFRC 强度,会增强表面接触刚度,造成冲击瞬间抗力增大,且对比价能的提升作用较小;受拉钢筋配筋率的提高不仅能改善 UHPFRC 梁的耗能能力,且对冲击力的影响甚微;箍筋用量的改变,不会对最大冲击力和比价能等响应产生明显效果;响应面代理模型可以有效用于 UHPFRC 梁冲击动力响应的预测及可靠度分析,与多目标遗传算法结合能得到满足不同设计要求的 Pareto 前沿面,并可给出每组目标函数值对应的设计参数;上述优化方法与思路能较好地应用于类似问题(如滚石撞击、车撞和船撞)的优化设计中,也可促进 UHPFRC 有效地应用于冲击防护结构中。

关键词:桥梁工程;UHPFRC 梁;抗冲击性能;最大冲击力;比价能;响应面法;多目标优化

中图分类号:U441.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.03.010

Multi-objective crashworthiness optimization of ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams with steel bars under impact loading

FAN Wei^{1,2}, ZHANG Zhi-yong¹, SUN Yang¹, ZHANG Ze-wen¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: To solve the main contradiction between the impact resistance and cost of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) beams, a multi-objective optimization study was carried out. Firstly, a multi-objective optimization mathematical model was established,

收稿日期:2018-12-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51308202);国家重点研发计划项目(2018YFC0705405);湖南省科技重大专项项目(2017SK1010)

作者简介:樊 伟(1985-),男,江西南昌人,副教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wfan@hnu.edu.cn.

where the peak crash force and the energy absorption to price ratios were regarded as the objective functions, and the cross-section aspect ratio of a UHPFRC beam, the UHPFRC strength, the longitudinal reinforcement ratio, and the volumetric ratio of the stirrup were set as the design variables. Secondly, based on the design of the response surface experiments, the sample points were selected, and a high-order response surface model was established through a nonlinear contact finite element (FE) analysis. Statistical analysis techniques, such as an analysis of variance, were used to verify the overall fitting effect and the prediction accuracy, and the sensitivity of the parameter changes was also studied. Finally, a response surface proxy model and multi-objective genetic algorithm were combined to form a multi-objective optimization analysis method for the impact-resistant performance of UHPFRC beams. The results show that increasing the longitudinal reinforcement ratio and the aspect ratio of the cross-section appropriately in the UHPFRC beam, using a UHPFRC material with a lower strength can significantly improve the energy absorption to price ratio, and reduce instantaneous impact force. Among these factors, increasing the cross-section aspect ratio improves the impact resistance of the beam, but also leads to an increase in the contact force. The increase in the UHPFRC strength leads to significant increases in the contact stiffness and instantaneous impact force, but apparently cannot improve the energy absorption to price ratio. The longitudinal reinforcement ratio increase can not only improve the energy consumption of the UHPFRC beam, but also has little effect on the impact force. The change in the amount of stirrup has a limited influence on the peakcrash force and the energy absorption to price ratio. The response surface proxy model can be effectively used to predict the dynamic response of an impact. In addition, based on a reliability analysis of ultra-high performance fiber reinforced concrete beams, when combined with the multi-objective genetic algorithm, Pareto frontier surface meeting different design requirements can be obtained, and the design parameters corresponding to each set of objective function values can be given. The above optimization methods and concepts will be better applied to the optimization design of similar problems (such as a rolling stone impact, vehicle impact, and ship collision), and will promote the effective application of UHPFRC in impact protection structures. 3 tabs, 8 figs, 25 refs.

Key words: bridge engineering; ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) beam; impact-resistant performance; peak crash force (PCF); ratio of energy absorption to price (REP); response surface method; multi-objective optimization

0 引 言

工程结构除了承受常规的固定荷载和可变荷载外,也会遭受意外的冲击荷载。传统的钢筋混凝土结构在承受冲击荷载时,往往表现得差强人意。如在山岭重丘地区很多棚洞结构受到落石冲击时达不到强度要求,被砸坏的案例屡见不鲜^[1-2]。不仅如此,普通钢筋混凝土桥墩在面临车、船碰撞时,经常会发生严重损坏甚至断裂,造成上部结构的倒塌。根据美国 1951~2000 年期间记录的桥梁失效数据^[3-4],12%的失效是由于车辆或船舶碰撞造成的,这是造成桥梁失效的第二大原因。普通混凝土具有

较低的抗冲击性能,因此,进一步研究新型高性能材料在桥梁冲击防护结构中的运用是十分必要的。

近年来,超高性能纤维增强混凝土(ultra-high performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC)经试验证明具有许多优异的性能,如高强度(抗压强度超过 150 MPa,抗拉强度超过 8 MPa)、耐久性和良好的耗能能力,可用于需要高承载力的特殊结构^[5-6]。为此,诸多学者针对 UHPFRC 构件的抗冲击性能及应用展开了较为系统的研究。Astarlioglu 等发现在相同的加载条件下,UHPFRC 柱能承受相同尺寸的普通混凝土柱 4 倍以上的破坏荷载^[7]。Aoude 等研究发现 UHPFRC 的应用能降低最大位

移和残余位移,提高损伤容限,从而显著改善增强混凝土柱的抗爆冲击性能^[8]。针对 UHPFRC 构件的影响参数也有相关的研究,如 Fujikake 等研究表明,在不设箍筋情况下,冲击荷载作用的活性粉末混凝土(RPC)梁会产生很多细小的裂缝,发生延性的弯曲破坏^[9]。Yoo 等还发现,纵筋配筋率对 UHPFRC 梁抵抗冲击能力有较为显著的影响^[10]。近年来,中国学者针对 UHPFRC 结构冲击研究发展迅速,Guo 等通过研究 UHPFRC 材料在低速冲击作用下的动力本构问题,给出了适用 UHPFRC 低速冲击模拟的连续帽盖(CSC)模型本构,并采用落锤试验进行了验证^[11]。Fan 等提出 UHPFRC 增强柱用来替代可能存在车辆碰撞事故风险的普通钢筋混凝土(RC)柱,发现其碰撞性明显优于 RC 柱^[12]。此外,Fan 等还研究了钢-UHPFRC 组合防撞装置,试验表明 UHPFRC 面板具有优异的抗冲击性能^[13]。

UHPFRC 梁具有良好的抗冲击性能和耐久性,其在桥梁的冲击防护工程中具有很好的应用前景。然而,经济性也是工程项目中需要重点考虑的因素。目前 UHPFRC 材料的单价高,投入的施工费用较大,已经成为制约其推广应用的重要障碍之一^[14]。因此,在工程实践中,如何对 UHPFRC 构件设计进行优化,以达到最优性价比,是 UHPFRC 工程应用中亟待解决的问题之一,但目前尚未见针对 UHPFRC 结构性能和经济造价进行多目标优化研究的文献报道。

本文针对 UHPFRC 梁抗冲击性能与工程造价这一矛盾,开展了 UHPFRC 梁抗冲击性能优化研究。首先,本文提出以最大冲击力和比价能为目标响应的多目标优化数学模型。然后,采用试验验证的 UHPFRC 梁冲击有限元模型和响应面试验设计方法建立响应面代理模型,分析设计参数的影响效果。最后,通过多目标遗传算法^[15-16]对 UHPFRC 梁的截面高宽比,UHPFRC 强度,受拉钢筋配筋率及体积配箍率等变量进行优化,得到对应 Pareto 优化解集,为冲击防护构件设计提供指导。

1 UHPFRC 梁抗冲击优化数学模型

1.1 UHPFRC 梁优化问题

在车辆防护设计中,通常采用比吸能(总吸能/总质量)来衡量构件的单位耗能率^[17-18],这是因为构件质量与燃油效率、经济性等相关。对于土木结构,从重量上来评价构件的单位吸能效果并不一定合理,将吸能水平与经济费用联系起来可能更符合

实际工程建设的需要。此外,在工程中常采用最大冲击力来反映碰撞发生瞬间的抗力。因此,本文采用最大冲击力(PCF)和比价能(REP)2个指标来评价 UHPFRC 梁抗冲击性能。其中,比价能(REP)定义为 UHPFRC 梁冲击过程中的单位价格所耗散能量(比价能=总吸能/总造价)。UHPFRC 梁耗能越多,成本越低,则比价能的值越大。

本文以文献^[10]中冲击试验所采用的 UHPFRC 梁为研究对象,如图 1(a)所示,优化参数主要包括:梁的截面高宽比,UHPFRC 材料强度,受拉钢筋配筋率及体积配箍率。其中梁的长度均为 2 900 mm,矩形截面的宽度为 200 mm。考虑到矩形截面构件设计规范中常用的高宽比,本文中取 1.25~2.5。由于钢纤维的高体积含量导致 UHPFRC 具有高延展性,替代部分钢筋效果^[10],且将 UHPFRC 用于梁构件中能够显著提高其承载能力、减少部分构件自重和钢筋用量^[19],受拉钢筋的配筋率取 0.4%~1.65%。为了考察体积配箍率的影响,在梁内沿一定间距布置箍筋,箍筋间距分别为 100、200 mm。基于目前中国制备 UHPFRC 材料的抗压强度,本文 UHPFRC 强度取值范围为 150~210 MPa。在计算比价能时,根据目前市场价格,假定 UHPFRC 材料价格单价为 1×10^4 元/ m^3 ,钢筋单价为 3 500 元/t。上述优化问题可以描述为

$$\begin{cases} \max I_{\text{REP}}(h/w, \rho_l, s, \rho_v) \\ \min I_{\text{PCF}}(h/w, \rho_l, s, \rho_v) \\ \text{s. t.} \\ 1.25 < h/w < 2.5 \\ 150 < s < 210 \\ 0.4 < \rho_l < 1.65 \\ 0 < \rho_v < 0.6 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{REP}}(\cdot)$ 、 $I_{\text{PCF}}(\cdot)$ 分别为比价能(REP)和最大冲击力(PCF)对应的计算参数; h/w 为截面高度 h 与宽度 w 之比; s 为 UHPFRC 强度(MPa); ρ_l 为受拉钢筋配筋率(%); ρ_v 为体积配箍率(%)。

1.2 有限元模型及参数

UHPFRC 梁冲击有限元模型如图 1(a)所示,由落锤、UHPFRC 矩形截面梁以及弹性支撑装置共同组成,其中梁采用六面体单点积分实体单元模拟,材料本构采用对 UHPFRC 材料修正的 CSC 模型^[11]。通过 UHPFRC 的典型应力状态,以单轴抗压强度为自变量,建立三轴压缩表面(TXC)、三轴拉伸(TXE)和扭转表面(TOR)的屈服面方程。TXC 的参数($\alpha, \lambda, \beta, \theta$)可表示为

$$\alpha = -2.381 \times 10^{-5} f_c'^2 + 0.806 4 f_c' + 21.78 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$\lambda = 8.333 \times 10^{-5} f_c'^2 + 0.716 8 f_c' + 18.8 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$\beta = 5.381 \times 10^{-8} f_c'^2 - 3.187 \times 10^{-5} f_c' + 6.926 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1} \quad (4)$$

$$\theta = -2.381 \times 10^{-7} f_c'^2 + 1.357 \times 10^{-4} f_c' + 0.130 6 \quad (5)$$

本文采用 3 种不同 UHPFRC 强度,主要的材料参数含义及取值如表 1 所示, $\alpha_1, \lambda_1, \beta_1, \theta_1, \alpha_2, \lambda_2, \beta_2, \theta_2$ 可通过拟合受拉子午线、剪切子午线与受压子午线的比值曲线确定。关于 CSC 模型的详细参数含义及取值见文献[11]。钢筋采用 Hughes-Liu 积分梁单元模拟,其本构模型采用 LS-DYNA 中的 MAT_PLASTIC_KINEMATIC。钢筋与 UHPFRC 梁之间用 LAGRANGE_IN_SOLID 进行连接。锤头与 UHPFRC 梁的接触设置为自动的面对面接触。

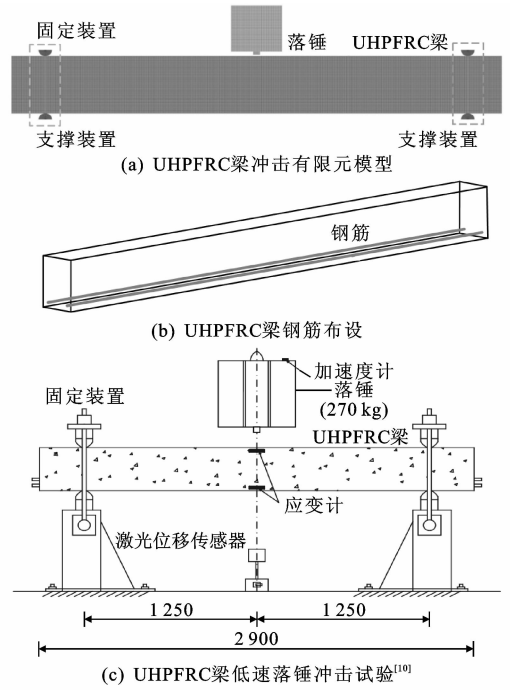
表 1 不同强度等级的 UHPFRC 在修正的 CSC 模型的参数取值

Tab. 1 Parameters of modified CSC model for different UHPFRC grades

参数		参数值		
TXC	单轴抗压强度 f_c' /MPa	150	180	210
	三轴压缩子午线常数项 α /MPa	142.2	166.2	190.1
	三轴压缩子午线非线性项 λ /MPa	128.2	150.5	173.0
	三轴压缩子午线指数 $10^{-3}\beta$ /MPa $^{-1}$	3.358	2.933	2.605
	三轴压缩子午线线性项 θ	0.145 6	0.147 3	0.148 6
TXE	三轴拉伸子午线常数项 α_2	1	1	1
	三轴拉伸子午线非线性项 λ_2	0.5	0.5	0.5
	三轴拉伸子午线指数 $10^{-3}\beta_2$ /MPa $^{-1}$	1.148 0	0.915 4	0.794 7
	三轴拉伸子午线线性项 θ_2 /kPa $^{-1}$	0	0	0
TOR	扭转子午线常数项 α_1	1	1	1
	扭转子午线非线性项 λ_1	0.422 6	0.422 6	0.422 6
	扭转子午线指数 $10^{-3}\beta_1$ /MPa $^{-1}$	1.148	0.915 4	0.794 7
	扭转子午线线性项 θ_1 /MPa $^{-1}$	0	0	0

为验证有限元仿真模型的准确性,针对 Yoo 等^[10]的低速落锤冲击试验结果,分别进行了 4 种不同配筋梁的验证。冲击试验装置如图 1(c)所示,落锤质量为 270 kg,从 1.6 m 高度自由下落。具体试

验细节可参考文献[10]。



单位: mm

图 1 UHPFRC 梁冲击试验及有限元模型

Fig. 1 Impact test and finite element model of UHPFRC beam

跨中位移时程曲线如图 2 所示,可知,有限元仿真得出的冲击位移响应与冲击试验数据匹配较好,表明本文所采用有限元冲击模型是可靠的。在此基础上,为了获得 UHPFRC 梁不同情况下的耗能能力,采用刚性锤头以相对较高能量(38 kJ)进行冲击,使 UHPFRC 梁发生完全破坏,通过计算冲击前后锤头的动能差确定 UHPFRC 梁的耗能能力。此外,需说明的是冲击速度对峰值冲击力具有一定影响。本文主要研究 UHPFRC 梁设计参数的影响,冲击速度等初始条件在实际中具有较大的不确定性,故不在本文研究范围内。本文中所有数值模拟都采用相同的冲击速度 5.6 m/s 进行。

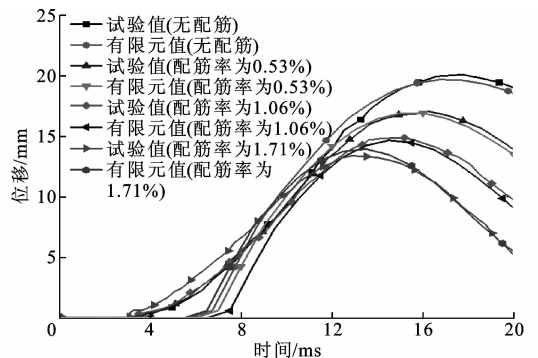


图 2 跨中位移时程曲线

Fig. 2 Time history curves of mid-span displacement

2 UHPFRC 梁冲击响应面代理模型

合理的试验设计方法是获得良好的响应面代理模型的前提。由于全因子设计要求的样本数过多,而中心组合设计需要额外设置取值范围外的样本点^[20],故选用 Box-Behnken design(BBD)确定本研究中4因素3水平的响应面试验方案^[21-22]。对应具体的截面布置形式如图3所示,按照上述建模方法,分别建立有限元模型。

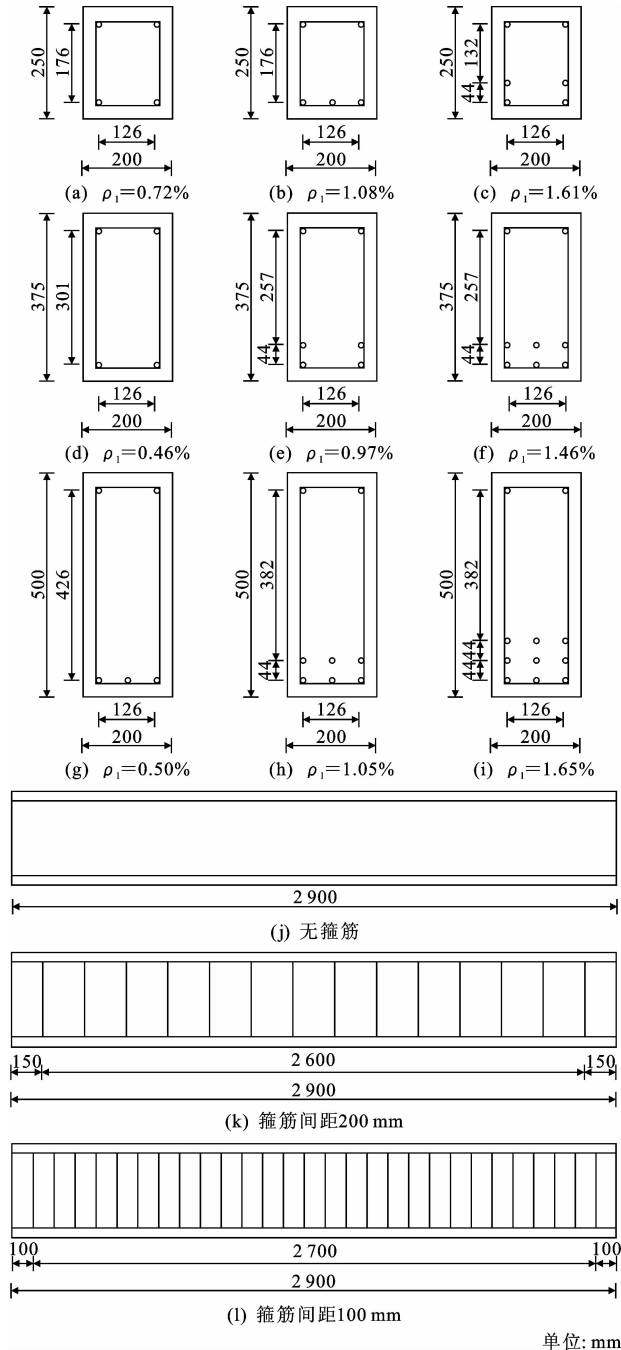


图3 UHPFRC 梁布置示意

Fig. 3 Schematic of UHPFRC beam layout

基于 LS-DYNA 计算样本点对应的目标函数值,并采用二次多项式函数构建最大冲击力(PCF)和比价能(REP)的代理模型 I_{PCF} 和 I_{REP} 如下

$$I_{PCF} = 6.0589 - 0.054781h/w - 0.048504s - 0.17356\rho_i + 0.91157\rho_i + 7.70774e^{-3}(h/w)s - 0.028014 \times (h/w)\rho_i + 0.10713(h/w)\rho_i + 5.10388e^{-4}s\rho_i - 5.6056e^{-3}s\rho_i - 3.83346e^{-2}\rho_i\rho_i - 0.30916(h/w)^2 + 1.42164e^{-4}s^2 + 0.072309 \times \rho_i^2 - 0.127984\rho_i^2 \quad (6)$$

$$I_{REP} = 23.79798 - 5.72804h/w - 0.14478s - 3.52769\rho_i - 5.5711\rho_i - 2.50155e^{-3}(h/w)s + 2.43913(h/w) \cdot \rho_i + 1.1416(h/w)\rho_i - 3.70366e^{-3}s\rho_i + 1.35964e^{-2}s\rho_i + 1.8539\rho_i\rho_i + 1.36031(h/w)^2 + 4.43070e^{-4}s^2 + 0.38152\rho_i^2 - 1.4641\rho_i^2 \quad (7)$$

为了考察响应面代理模型的精度,将检验指标平均相对误差 I_{ARE} ,最大相对误差 I_{MRE} 和判定系数 R^2 分别定义为

$$I_{ARE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(y_i^o - y_i)|}{y_i} \times 100\% \quad (8)$$

$$I_{MRE} = \max\left(\frac{|(y_i^o - y_i)|}{y_i} \times 100\%\right) \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^o - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^o - \bar{y}_i)^2} \quad (10)$$

式中: n 为样本点个数; y_i^o 、 y_i 分别为第 i 个样本点对应的响应面法拟合数据和有限元计算数据; \bar{y}_i 为 y_i 的平均值^[23]。

响应面代理模型的拟合效果如表2所示,可知,代理模型的平均相对误差、最大相对误差较小, R^2 均接近1.0。图4给出了式(6)和式(7)的拟合效果检验,可以看出,代理模型的整体拟合效果和预测能力较好^[24]。

表2 响应面代理模型的拟合效果

Tab. 2 Fitting effect of response surface model

目标函数	$I_{ARE}/\%$	$I_{MRE}/\%$	R^2
最大冲击力	1.16	4.86	0.97
比价能	1.94	7.32	0.98

根据上述多项式代理模型做出最大冲击力和比价能的响应面三维图,见图5。由图5可知,虽然不同参数组合影响效果不同,但最大冲击力在一定程

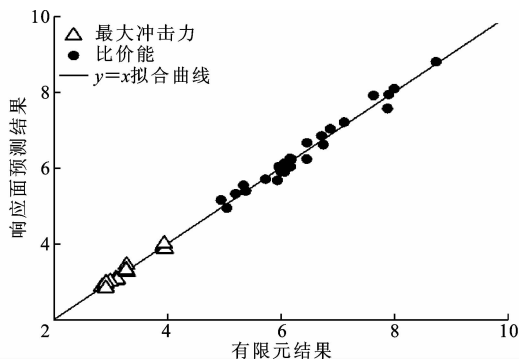


图 4 实际值与预测值对比

Fig. 4 Comparisons of experimental and real values

随着 UHPFRC 强度和截面高宽比的增大而增大,而纵筋配筋率和配箍率的改变对其影响甚微。

最大冲击力的增长主要是 UHPFRC 强度提高增加了梁的整体刚度,加入纵筋对接触刚度的改变相对较小,而配箍率的增加并不能提高梁的刚度,但能提高梁的极限挠度^[19]。

比价能(REP)响应面模型如图 6 所示。由图 6 可知,比价能在一定程度上随着截面高宽比和纵筋配筋率的提高而增大,但并没有随 UHPFRC 强度和体积配箍率的变化而发生明显变化,说明类似于普通混凝土梁,截面高度增加提高了梁的抗弯惯性矩,抗弯刚度比较大。同时配置受拉钢筋时,能够与致密的钢纤维基体紧密连接,增加了钢筋的销栓作用,有效控制裂缝发展,提高耗能能力,但增加配箍率对梁极限承载力提高不明显^[19]。

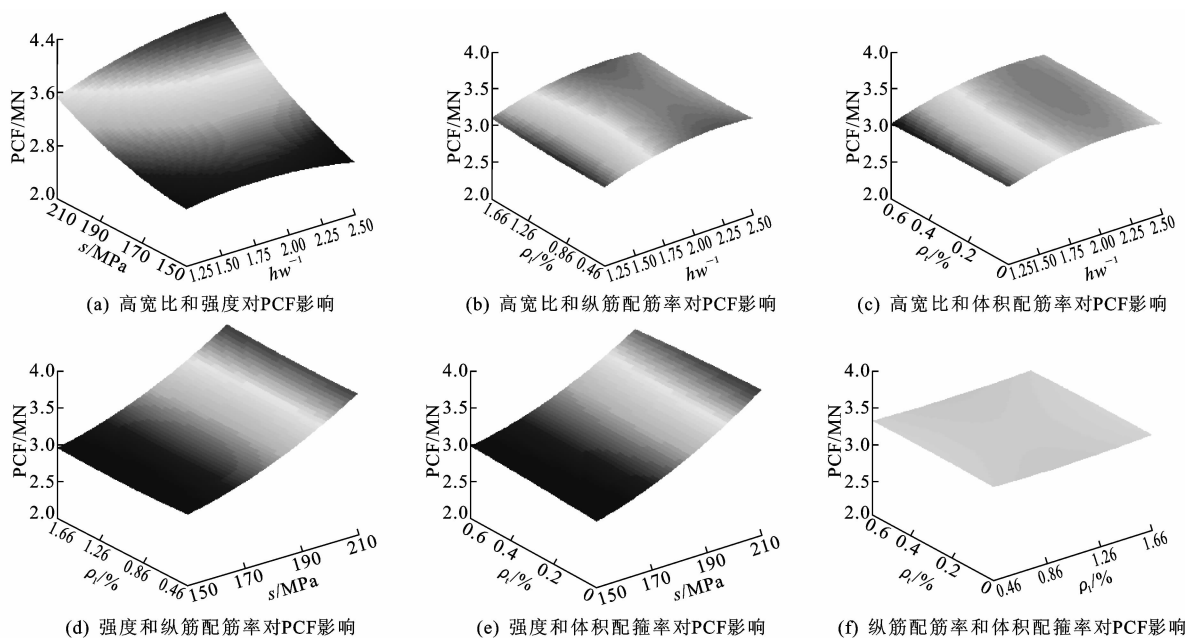


图 5 最大冲击力(PCF)响应面模型

Fig. 5 Response surface models of peak crash force (PCF)

3 UHPFRC 梁多目标优化结果

在建立的响应面基础上,采用多目标遗传算法 NSGA-II 进行优化,经过 141 次迭代,如图 7 所示, Pareto 前沿面基本成型。总体来看,如果 UHPFRC 梁的比价能更高,则最大冲击力是随之增大的。此外,获取的 Pareto 前沿面,每个点都代表一组设计变量对应的目标函数优化值^[25]。在 UHPFRC 梁的设计中,针对工程中不同的比价能和最大冲击力限值,均可选择相应的设计方案。

部分设计参数及对应目标响应的优化结果如表 3 所示。由表 3 可见,其具有明显的规律性。在参

数范围内获得 Pareto 优化解集时,无论 UHPFRC 强度和体积配箍率如何变化,截面高宽比和纵向钢筋配筋率总是取较大值。根据优化结果显示,当截面高宽比为 2.5, UHPFRC 强度取 150 MPa,纵筋配筋率为 1.65%,体积配箍率为 0.32% 时,最大冲击力为 2.8 MN,比价能为 10.25 J/元。与优化前相比,当截面高宽比为 1.25, UHPFRC 强度为 210 MPa,纵筋配筋率为 1.09,体积配箍率为 0.58% 时,对应最大冲击力为 3.28 MN,比价能为 6.25 J/元,其最大冲击力减小了 14.6%,而比价能增大了 64%。经过优化设计的 UHPFRC 梁的抗冲击性能得到明显改善。

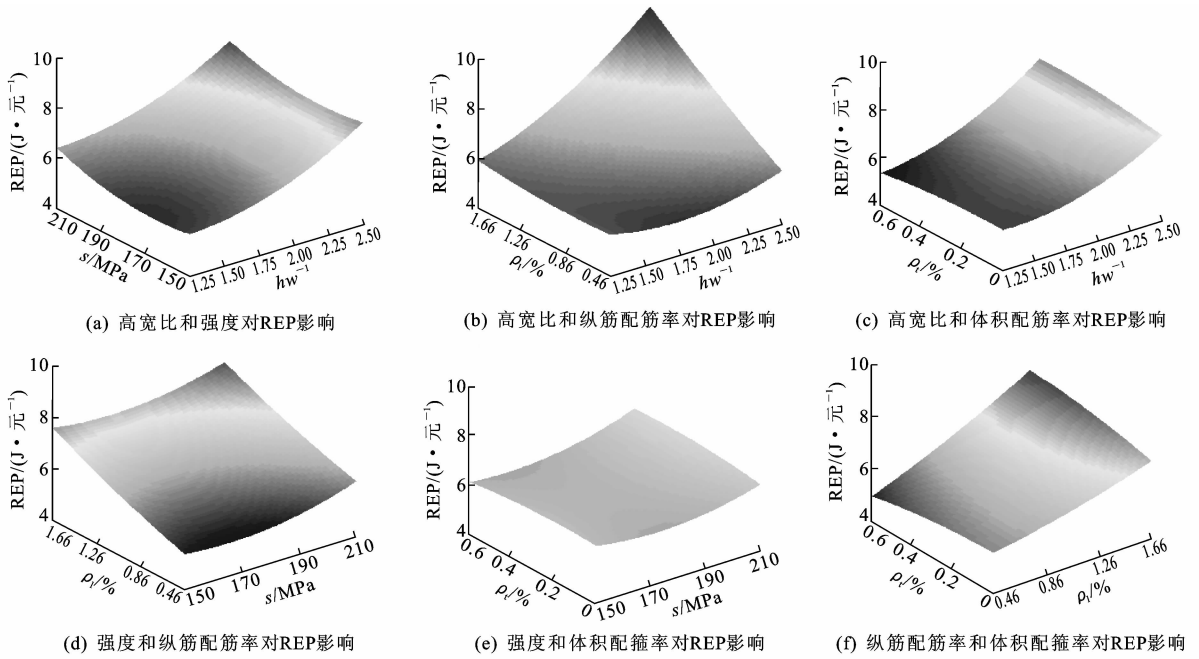


图 6 比价能(REP)响应面模型

Fig. 6 Response surface models of ratios of energy absorption to price(REP)

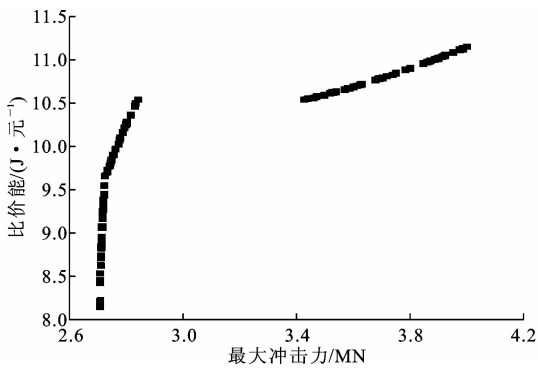


图 7 UHPFRC 梁优化的 Pareto 解

Fig. 7 Pareto solution of UHPFRC beam optimization

表 3 UHPFRC 梁抗冲击性能多目标优化部分结果

Tab. 3 Partial results of multi-objective optimization of UHPFRC beam impact resistance

序号	参数推荐				优化结果	
	截面高宽比	UHPFRC 强度/MPa	纵筋配筋率/%	体积配筋率/%	最大冲击力/MN	比价能/(J·元 ⁻¹)
1	2.50	150.09	1.65	0.32	2.80	10.25
2	2.50	188.43	1.65	0.60	3.47	10.57
3	2.50	150.08	1.65	0.33	2.80	10.28
4	2.50	190.54	1.65	0.60	3.52	10.61
5	2.50	150.08	1.65	0.06	2.74	9.78
6	2.50	150.09	1.65	0.55	2.84	10.51
7	2.50	206.54	1.65	0.59	3.91	11.03
8	2.50	150.08	1.65	0.39	2.81	10.36
9	2.50	150.08	1.65	0.31	2.80	10.24
10	2.50	186.46	1.65	0.60	3.43	10.54

为了研究设计参数的改变对多目标优化结果的影响,分别作出不同参数取值对应的 Pareto 前沿面如图 8 所示。由图 8(a)、(c)可知,随着截面高宽比和受拉钢筋配筋率增大,对应优化后的 Pareto 前沿面将沿着纵轴逐渐上升,在同样的冲击力下,对应的比价能也将迅速增大。由图 8(b)可知,随着 UHPFRC 材料强度的增大,Pareto 前沿面主要沿着横轴移动,同样的比价能下,冲击力会随着增大。由图 8(d)可知,随着箍筋体积配筋率变化,Pareto 前沿面的变化幅度很小。

4 结 语

(1)响应面代理模型能准确直观反映及预测设计参数和目标响应的关系,且其与有限元的模拟结果具有很好的一致性,说明代理模型的方法能推广应用于类似问题(如滚石撞击、车撞和船撞)的优化设计中。

(2)多目标优化过程中,比价能达到最大时,最大冲击力也相对较大,两者互相影响,并不能同时达到最优,但能取得一组相对较好的 Pareto 解集。针对不同的设计要求可以从中选择合适的方案,而且经过优化后的 UHPFRC 梁的比价能明显提高,最大冲击力进一步下降。

(3)基于有限元模拟和响应面模型,分析了 4 个参数对目标响应的影响,其中提高 UHPFRC 截面

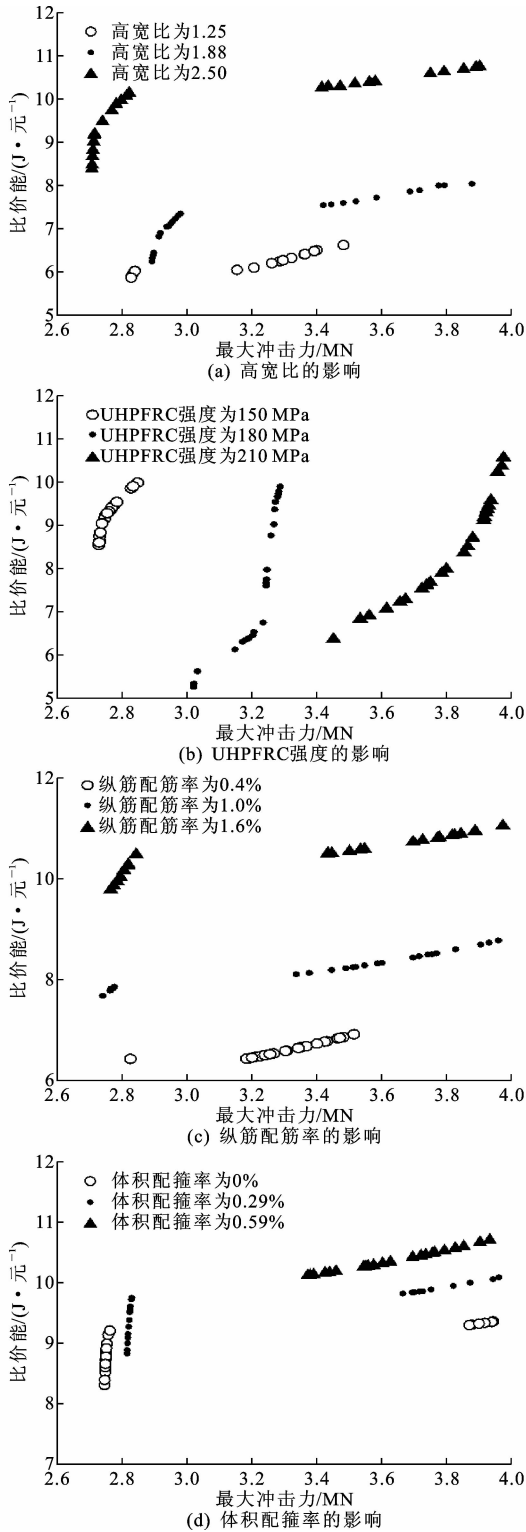


图 8 参数变化对 Pareto 优化解集的影响

Fig. 8 Influence of parameters changes on optimal Pareto solutions

高宽比能增大结构抗冲击承载能力和整体刚度,同时提高最大冲击力和比价能;提高 UHPFRC 材料强度会大幅增强接触刚度,导致冲击瞬间抗力的巨大变化;提高受拉钢筋配筋率能显著提高梁的极限

承载能力,增强耐撞性,同时对接触刚度影响较小;提高体积配箍率对 UHPFRC 梁的抗冲击性能和接触力的影响均较小。因此在满足构件设计尺寸要求前提下,在 UHPFRC 构件抗冲击应用中适当提高受拉钢筋配筋率具有明显的性能优势和经济性。

(4)为使该优化设计方法在土木结构设计中获得更广泛的推广应用,后续还需对此优化分析方法进行研究改进,使其具有更高的精度和适用性。同时需对更复杂结构作进一步优化研究和讨论。

参考文献:

References:

[1] 张群利,王全才,吴 清,等.不同结构类型棚洞的抗冲击性能研究[J].振动与冲击,2015,34(3):72-76.
ZHANG Qun-li, WANG Quan-cai, WU Qing, et al. Anti-impact performance of different kinds of shed-tunnel structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(3):72-76.

[2] 杨 璐,李士民,吴智敏,等.滚石对棚洞结构的冲击动力分析[J].交通运输工程学报,2012,12(1):25-30.
YANG Lu, LI Shi-min, WU Zhi-min, et al. Dynamic analysis of rock-fall impact on shed tunnel structure [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012,12(1):25-30.

[3] HARIK I E, SHAABAN A M, GESUND H, et al. United States bridge failures, 1951 to 1988[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1990,4(4):272-277.

[4] WARDHANA K, HADIPRIONO F C. Analysis of recent bridge failures in the United States[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(3):124-135.

[5] HABEL K, VIVIANI M, DENARIE E, et al. Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Cement & Concrete Research, 2006, 36(7):1362-1370.

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

[7] ASTARLIOGLU S, KRAUTHAMMER T. Response of normal-strength and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete columns to idealized blast loads [J]. Engineering Structures, 2014, 61(1):1-12.

[8] AOUDE H, DAGENAIS F P, BURRELL R P, et al.

- Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 80:185-202.
- [9] FUJIKAKE K, SENG T, UEDA N, et al. Study on impact response of reactive powder concrete beam and its analytical model[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006, 4(1):99-108.
- [10] YOO D Y, BANTHIA N, KIM S W, et al. Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading[J]. *Composite Structures*, 2015, 126:233-245.
- [11] GUO W, FAN W, SHAO X, et al. Constitutive model of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for low-velocity impact simulations[J]. *Composite Structures*, 2018, 185:307-326.
- [12] FAN W, XIN X, ZHANG Z, et al. Performance and sensitivity analysis of UHPFRC-strengthened bridge columns subjected to vehicle collisions[J]. *Engineering Structures*, 2018, 173:251-268.
- [13] FAN W, GUO W, SUN Y, et al. Experimental and numerical investigations of a novel steel-UHPFRC composite fender for bridge protection in vessel collisions[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 165:1-21.
- [14] 陈宝春, 季 韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. *建筑科学与工程学报*, 2014, 31(3):1-24.
CHEN Bao-chun, JI Tao, HUANG Qing-wei, et al. Review on ultra-high performance concrete[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2014, 31(3):1-24.
- [15] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. *Evolutionary Computation*, 2014, 2(3):221-248.
- [16] 武和全, 杨家兴, 辛 勇. 变截面梁的抗撞性分析及应用[J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2010, 30(1):88-94.
WU He-quan, YANG Jia-xing, XIN Yong. Analysis and application of thin-walled rail with variable section for crashworthiness[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2010, 30(1):88-94.
- [17] 谭丽辉, 谭洪武, 崔晓梅, 等. 两种不同诱导槽结构抗撞性优化设计[J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2016, 36(1):120-126.
TAN Li-hui, TAN Hong-wu, CUI Xiao-mei, et al. Crashworthiness optimization design of two kinds of different inducing grooves[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2016, 36(1):120-126.
- [18] 侯淑娟, 李 青, 龙述尧. 端部圆锥形薄壁构件的抗撞性设计优化[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2006, 33(3):37-40.
HOU Shu-juan, LI Qing, LONG Shu-yao. The crashworthiness design optimization of thin-walled component with circular tapered end[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2006, 33(3):37-40.
- [19] 陈宝春, 吴前文, 黄卿维, 等. 钢筋超高性能混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. *福州大学学报:自然科学版*, 2018, 46(4):512-517.
CHEN Bao-chun, WU Qian-wen, HUANG Qing-wei, et al. Experimental study on shear behavior of reinforced ultra-high performance concrete beams [J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2018, 46(4):512-517.
- [20] 穆雪峰, 姚卫星, 余雄庆, 等. 多学科设计优化中常用代理模型的研究[J]. *计算力学学报*, 2005, 22(5):608-612.
MU Xue-feng, YAO Wei-xing, YU Xiong-qing, et al. Research on common agent models in multidisciplinary design optimization[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2005, 22(5):608-612.
- [21] HAN H, LI B, SHAO W. Multi-objective optimization of outward convex corrugated tubes using response surface methodology[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70(1):250-262.
- [22] 李伟平, 王世东, 周 兵, 等. 基于响应面法和 NSGA-II 算法的麦弗逊悬架优化[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2011, 38(6):27-32.
LI Wei-ping, WANG Shi-dong, ZHOU Bing, et al. Macpherson suspension parameter optimization based on response surface method and NSGA-II algorithm [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2011, 38(6):27-32.
- [23] ASANJARANI A, DIBAJIAN S H, MAHDIAN A. Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled square tubes with indentations[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 116:26-36.
- [24] QI C, YANG S, DONG F. Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2012, 59(4):103-119.
- [25] FONSECA C M, FLEMING P J. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms II: Application example[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics - Part A: Systems & Humans*, 1995, 28(1):38-47.