

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.013

# UHPC加固钢筋混凝土简支梁后可靠度分析

张杰, 蔺鹏臻\*

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**为了研究超高性能混凝土(UHPC)加固后的可靠性,提出UHPC加固截面后的抗弯承载力计算模型,并结合现存试验结果验证模型的适用性。通过UHPC增大截面加固RC简支梁算例,结合误差传递公式,考虑各种因素的不确定性,最后运用JC验算点法获得加固前后的可靠度大小,深入分析UHPC加固对结构可靠度的提升效果以及相比于普通混凝土加固后可靠度的提升,并且考虑了加固厚度及配筋的影响。研究表明:UHPC加固可对结构可靠度有大幅的提升;相对于普通混凝土加固,可靠度性能也有明显的提升;加固层厚度在一定范围内对可靠度指标呈正相关提升,且UHPC层中添加适量的配筋可以有效地提升可靠度指标。

**关键词:**UHPC加固;承载力模型;误差传递公式;JC法;可靠度

**中图分类号:**U441

**文献标志码:**A

## 0 引言

由于交通量迅速增加及超载的时常发生以及桥梁所处较为恶劣的环境影响,导致桥梁承载力下降甚至出现桥梁垮塌<sup>[1-2]</sup>。因此,混凝土结构在性能不满足要求后必须进行加固,加固后使用性能的提升对桥梁的安全非常重要。超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete,简称UHPC)具有优异的力学性能和耐久性<sup>[3-4]</sup>。与传统混凝土相比,UHPC拥有高强度、高负荷能力、突出的耐久性能及优异的抗弯拉性能等优势,能够满足未来建筑物实现更加高层化、大跨化以及高耐久性的发展趋势<sup>[5]</sup>。而且由于其优异的自流平性能,成型时间很短,因而在加固和改造中不会长时间施工,对交通影响较小<sup>[6]</sup>。UHPC加固层与旧混凝土有良好的黏结性能,且加固后抗渗性能提升明显<sup>[7]</sup>,应用UHPC加固是一种非常好的方法。

中国对于UHPC的研究主要集中在材料影响及力学性能方面,史才军等<sup>[8]</sup>研究发现水胶比对UHPC

性能影响巨大,强度随水胶比的增大而减小;于涛涛<sup>[9]</sup>用2根UHPC梁与3片板做试验,发现UHPC梁韧性要高出RC梁很多;曹霞等<sup>[10]</sup>对8根无黏结预应力UHPC梁做试验,结果表明抗裂性能可以通过钢纤维作用而提高;张彭成等<sup>[11]</sup>用特殊的碳纤维分散工艺代替原来的部分钢纤维来配置UHPC,发现这种UHPC对抗压强度会有所提升。

目前UHPC应用于加固领域后抗力模型以及可靠度性能的研究很少。为此,本文建立钢筋混凝土简支梁加固前后承载能力抗力模型,利用JC验算点法,分析UHPC加固后可靠度的提升量和相对于普通混凝土加固的提升效果,讨论加固厚度和加固层中配筋情况对可靠度指标的影响程度。

## 1 UHPC加固RC简支梁后的承载力计算模型

### 1.1 加固前抗弯承载力计算模型

依照规范<sup>[12]</sup>,钢筋混凝土构件可简化为等效矩形应力图形进行计算,不考虑混凝土的拉应力,拉应

收稿日期:2022-10-13

基金项目:国家自然科学基金重大项目(编号:11790281);国家自然科学基金高铁联合项目(编号:U1934205);甘肃省住建厅建设科技项目(编号:JK2019-4)

作者简介:张杰,男,硕士研究生.E-mail:646714218@qq.com

\*通信作者:蔺鹏臻,男,博士,教授.E-mail:pzhlin@mail.lzjtu.cn

力主要由受拉区受拉钢筋提供,压应力由受压区混凝土及受压区钢筋提供。如图1所示。

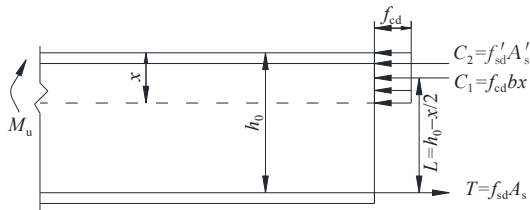


图1 加固前构件等效矩形应力图

不考虑预应力的影响,由截面上水平方向内力之和为零的平衡条件,得:

$$f_{sd} A_s = f_{cd} b x + f'_{sd} A'_s \quad (1)$$

结合弯矩平衡条件进而可知:

$$M_u = (f_{sd} A_s - f'_{sd} A'_s) \left( h_0 - \frac{f_{sd} A_s - f'_{sd} A'_s}{2 f_{cd} b} \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) \quad (2)$$

式中: $M_u$ 为未加固时梁的抗弯承载力; $A_s$ 、 $A'_s$ 为构件受拉、受压区钢筋的面积; $f_{sd}$ 、 $f'_{sd}$ 为构件受拉、受压钢筋的屈服强度; $f_{cd}$ 为构件混凝土的抗压强度; $h_0$ 为构件有效高度值; $b$ 为构件的宽; $a'_s$ 为混凝土外表面至受压区钢筋间的距离。

## 1.2 UHPC加固后受弯构件抗弯承载力模型

结合钢筋混凝土结构受弯结构承载力计算模型及钢纤维混凝土受弯结构承载力计算模型,为了便于弯矩的计算,在加固后梁为适筋梁的情况下,设加固后结构处于承载能力极限状态,原钢筋混凝土与加固UHPC部分同时失效。UHPC的拉力为UHPC

受拉区等效矩形应力图的拉应力设计值 $\sigma_{ut}$ 和其面积 $bd$ 的乘积。加固后拉应力由原受拉钢筋、UHPC加固层、加固层中新增受拉钢筋三部分提供,压应力由原受压钢筋及混凝土提供,如图2所示。

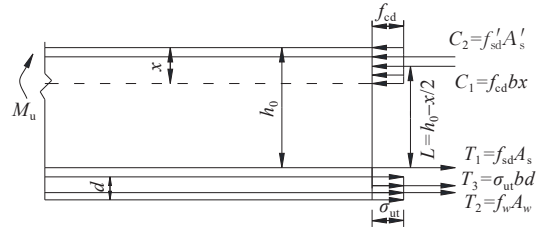


图2 UHPC加固后构件等效矩形应力图

采用UHPC加固后,基于水平力与弯矩的平衡条件,可得:

$$f_{sd} A_s + f_w A_w + \sigma_{ut} b d = f_{cd} b x + f'_{sd} A'_s \quad (3)$$

$$M_u = f_{sd} A_s h_0 + f_w A_w (h + d - a) + \sigma_{ut} b d (h + d/2) - \frac{(f_{sd} A_s + f_w A_w + \sigma_{ut} b d - f'_{sd} A'_s)^2}{2 f_{cd} b} - f'_{sd} A'_s a'_s \quad (4)$$

式中: $f_w$ 为加固后新增钢筋屈服强度; $A_w$ 为加固后新增钢筋截面面积; $\sigma_{ut}$ 为加固采用UHPC的受拉等效矩形应力设计值,其值取UHPC抗拉强度设计值的0.8倍; $d$ 为加固UHPC层的厚度; $a$ 为UHPC层中钢筋到UHPC层边缘的距离。其余参数意义同前。

为了验证上述承载力计算模型的可行性,本文从文献[13-16]中选出11组数据进行验证。相关参数值以及计算值与试验值对比如表1所示。

将UHPC加固钢筋混凝土梁的相关参数带入

表1 构件主要参数、加固后抗弯承载力计算值与试验值比较

编号	数据来源	截面宽度 $b/\text{mm}$	截面高度 $h/\text{mm}$	配筋率	钢筋屈服 强度/MPa	加固UHPC 层厚度/mm	UHPC抗拉 强度/MPa	新增钢筋 面积/ $\text{mm}^2$	新增钢筋屈服 强度/MPa	抗弯承载力计 算值/试验值
1	BEAM-2 <sup>[13]</sup>	150	250	0.013 2	470	50	41.0	—	—	0.971
2	BEAM-4 <sup>[13]</sup>	150	250	0.013 2	470	50	41.0	151.0	460	0.815
3	OV-25 <sup>[14]</sup>	300	100	0.037 7	502	25	27.4	—	—	0.865
4	OV-25a <sup>[14]</sup>	300	100	0.037 7	502	25	27.4	392.5	475	1.201
5	OV-50 <sup>[14]</sup>	300	100	0.037 7	502	50	27.4	—	—	1.056
6	OV-50a <sup>[14]</sup>	300	100	0.037 7	502	50	27.4	392.5	475	1.107
7	ST-UHPER-TS <sup>[15]</sup>	150	250	0.012 1	500	50	12.0	—	—	0.970
8	A2 <sup>[16]</sup>	100	200	0.007 9	415	15	22.6	—	—	0.908
9	A3 <sup>[16]</sup>	100	200	0.007 9	415	20	22.6	—	—	0.956
10	B2 <sup>[16]</sup>	100	200	0.010 7	415	15	22.6	—	—	0.911
11	B3 <sup>[16]</sup>	100	200	0.010 7	415	20	22.6	—	—	0.965

式(4),可得加固后计算弯矩值。表中所有加固后梁受弯承载力计算值与试验值之比的均值为0.975,方差为0.122。由此可见,加固后试件受弯承载力计算值与试验值相比而言,其值有良好的精确度,可以满足工程要求的计算精度。

## 2 RC筒支梁加固前抗力模型

### 2.1 RC筒支梁加固前抗力模型

结合误差传递公式及加固前承载力方程式(2),可得加固前的抗力模型。

加固前抗力均值表达式为:

$$\mu_{M_u} = \mu_{k_p} (\mu_{f_u} \mu_{A_s} - \mu'_{f_{sd}} \mu'_{A_s}) \left( \mu_{h_0} - \frac{\mu_{f_u} \mu_{A_s} - \mu'_{f_{sd}} \mu'_{A_s}}{2\mu_{f_u} \mu_b} \right) + \mu'_{f_{sd}} \mu'_{A_s} (\mu_{h_0} - \mu_{a'_s}) \quad (5)$$

加固前抗力标准差表达式为:

$$\sigma_{M_u}^2 = \left[ \frac{\partial M_u}{\partial k_p} \right]_u^2 \sigma_{k_p}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial f_{cd}} \right]_u^2 \sigma_{f_{cd}}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial f_{sd}} \right]_u^2 \sigma_{f_{sd}}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial A_s} \right]_u^2 \sigma_{A_s}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial f'_{sd}} \right]_u^2 \sigma_{f'_{sd}}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial A'_s} \right]_u^2 \sigma_{A'_s}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial h_0} \right]_u^2 \sigma_{h_0}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial b} \right]_u^2 \sigma_b^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial a'_s} \right]_u^2 \sigma_{a'_s}^2 \quad (6)$$

式中: $\mu_{M_u}$ 、 $\sigma_{M_u}$ 为未加固时抗弯承载力均值与标准差; $\mu_{k_p}$ 、 $\sigma_{k_p}$ 为受弯构件计算模式不确定性系数均值与标准差; $\mu_{A_s}$ 、 $\mu'_{A_s}$ 、 $\sigma_{A_s}$ 、 $\sigma_{A'_s}$ 为构件受拉、受压钢筋面积的均值与标准差; $\mu_{f_u}$ 、 $\mu'_{f_{sd}}$ 、 $\sigma_{f_u}$ 、 $\sigma_{f'_{sd}}$ 为构件受拉、受压钢筋的屈服强度均值与标准差; $\mu_{f_{cd}}$ 、 $\sigma_{f_{cd}}$ 为构件混凝土抗压强度均值与标准差; $\mu_{h_0}$ 、 $\sigma_{h_0}$ 为构件有效高度值均值与标准差; $\mu_b$ 、 $\sigma_b$ 为构件宽度的均值与标准差; $\mu_{a'_s}$ 、 $\sigma_{a'_s}$ 为混凝土外表面至受压区钢筋间距离的均值与标准差。

### 2.2 UHPC加固RC筒支梁后抗力模型

结合误差传递公式及UHPC加固后抗弯承载力方程(6),可得加固后的抗力模型。

UHPC加固后抗力均值表达式为:

$$\mu_{M_u} = \mu_{k_p} \left[ \frac{\mu_{f_u} \mu_{A_s} \mu_{h_0} + \mu_{f_u} \mu_{A_s} (\mu_h + d - a) + \sigma_u b d (\mu_h + d/2)}{\mu_{f_u} \mu_{A_s} + \mu_{f_u} \mu_{A_s} + \sigma_u b d - \mu'_{f_{sd}} \mu'_{A_s}} \right] \quad (7)$$

抗力标准差表达式为:

$$\sigma_{M_u}^2 = \left[ \frac{\partial M_u}{\partial k_p} \right]_u^2 \sigma_{k_p}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial f_{cd}} \right]_u^2 \sigma_{f_{cd}}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial f_{sd}} \right]_u^2 \sigma_{f_{sd}}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial A_s} \right]_u^2 \sigma_{A_s}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial f'_{sd}} \right]_u^2 \sigma_{f'_{sd}}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial A'_s} \right]_u^2 \sigma_{A'_s}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial h_0} \right]_u^2 \sigma_{h_0}^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial b} \right]_u^2 \sigma_b^2 + \left[ \frac{\partial M_u}{\partial a'_s} \right]_u^2 \sigma_{a'_s}^2 \quad (8)$$

式中: $\mu_{f_u}$ 为加固后新增钢筋屈服强度均值; $\mu_{A_s}$ 为加固后新增钢筋截面面积均值。其余参数意义同前。

## 3 算例分析

### 3.1 算例

本算例设计了16片RC筒支梁以研究UHPC以及普通混凝土加固梁前后的可靠度指标,试验梁截面尺寸 **$b \times h = 300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$** ,原钢筋混凝土梁混凝土型号为C30,纵向钢筋为6根 $\phi 18$ 的HRB335钢筋,箍筋型号为 $\phi 8 @ 150$ HPB300;加固所采用的UHPC性能如表2所示。

表2 UHPC材料性能

抗压强度设计值/ MPa	抗拉强度设计值/ MPa	弹性模量/ GPa	极限拉应变/ $10^{-6}$
177	12	47	3 700

UHPC层中钢筋为 $\phi 12$ HRB335及 $\phi 16$ HRB335两种。原试件经过表面凿毛处理以后,在RC筒支梁梁底用UHPC加固,加固厚度30 mm、60 mm、80 mm及100 mm。30 mm厚度只采用UHPC加固,其他厚度既有只采用UHPC加固组也有UHPC搭配钢筋组。为得出UHPC加固相比于普通混凝土加固可靠度的提升量,设有C30普通混凝土加固对照组,对照组为在梁底用C30混凝土搭配钢筋加固,加固厚度分别为60 mm、80 mm、100 mm、加固层中钢筋也分别采用 $\phi 12$ HRB33以及 $\phi 16$ HRB335两种钢筋。试验梁的具体几何尺寸及参数如图3所示,图中 **$h$** 在未添加钢筋时为30 mm、60 mm、80 mm及100 mm,添加钢筋时不考虑30 mm厚度。

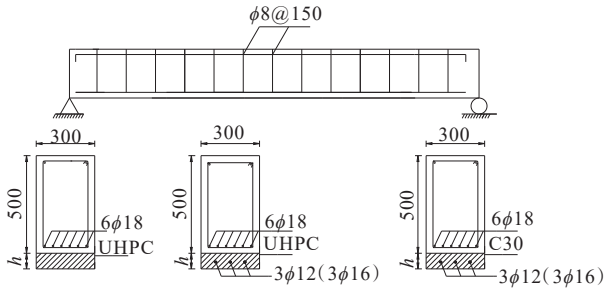


图3 试验梁几何尺寸及参数图(单位:mm)

### 3.2 可靠度计算方法

结构的功能函数为:

$$Z = R - S \quad (9)$$

式中: $R$ 表示抗力,分布类型为对数正态分布; $S$ 为作用效应,分布类型为正态分布。

加固前后抗力的均值以及标准差通过式(5)~(8)求得。试验梁作用效应取两点对称加载,两点对称加载荷载为 $F=500$  kN。

试验梁加固前后的荷载效应均值与方差取:

$$M_s = \mu_M = 0.4F \quad (10)$$

$$\sigma_M = 0 \quad (11)$$

结合利用之前所建立的均值和均标准差的计算模型、可靠指标计算的结构功能函数以及各种参数的不确定性,采用JC验算点法确定加固后的可靠度指标。

### 3.3 不确定性参数统计

结构抗力计算通常受到不确定性参数的影响,材料性能的不确定性、几何参数的不确定性及计算

模式的不确定性都会对结构抗力计算产生影响。材料性能差异主要是由于标准试验条件与实际情况存在差异而产生。由于施工顺序的不同以及施工技术的时间差别,几何尺寸也会产生一定的差异。如果采用了一些近似性假设以及简化了实际的边界条件,会导致分析计算模式的不确定性。根据文献[17],材料性能、几何参数以及计算模式的不确定性,如表3所示。

表3 各种参数的不确定性

参数	分布	均值	变异系数	标准差
C30	正态分布	1.450	0.190	0.275 5
Ⅱ级钢筋	正态分布	1.140	0.070	0.079 8
截面高度	正态分布	1.000	0.020	0.020 0
截面宽度	正态分布	1.000	0.020	0.020 0
纵筋截面面积	正态分布	1.000	0.030	0.030 0
截面有效高度	正态分布	1.000	0.030	0.030 0
箍筋平均间距	正态分布	0.990	0.070	0.069 3
受弯时计算模式	正态分布	1.000	0.040	0.040 0

### 3.4 普通混凝土加固可靠度计算结果分析

采用JC法计算普通混凝土加固前后结构可靠度指标,计算采用式(5)~(8),普通混凝土加固后可靠度计算中应去除式中有关UHPC影响的项,结合各种参数的不确定性计算均值与方差以及运用可靠度计算的功能函数计算出普通混凝土加固的可靠度指标如表4所示。

表4 普通混凝土加固梁前后可靠度指标

编号	加固厚度/mm	混凝土类型	新增受拉钢筋	加固前可靠度计算的参数		加固后可靠度计算的参数		可靠度	
				均值/(kN·m)	标准差/(kN·m)	均值/(kN·m)	标准差/(kN·m)	加固前	加固后
C-1	60	C30	3φ12	219.59	12.85	269.69	14.30	1.57	5.62
C-2	60	C30	3φ16	219.59	12.85	306.78	15.61	1.57	8.39
C-3	80	C30	3φ12	219.59	12.85	272.01	14.38	1.57	5.79
C-4	80	C30	3φ16	219.59	12.85	310.91	15.76	1.57	8.68
C-5	100	C30	3φ12	219.59	12.85	274.33	14.46	1.57	5.97
C-6	100	C30	3φ16	219.59	12.85	315.03	15.91	1.57	8.98

由表4可知:普通混凝土配合钢筋加固RC简支梁对可靠度指标有一定的提升,在一定范围内随着新增配筋率的增高,其可靠性也在提高,但是混凝土加固厚度对可靠性的提高几乎没有影响。

### 3.5 UHPC加固可靠度计算结果分析

通过式(7)、(8)结合各种参数的不确定性计算出均值与方差,结合可靠度指标计算的功能函数,运用JC法计算加固后可靠度指标结果如表5及图4所示。

表5 UHPC加固梁前后可靠度指标

编号	加固厚度/mm	混凝土类型	新增受拉钢筋	加固前可靠度计算的参数		加固后可靠度计算的参数		可靠度		
				均值/(kN·m)	标准差/(kN·m)	均值/(kN·m)	标准差/(kN·m)	普通混凝土加固后	UHPC加固后	提升量/%
UH-1	30	UHPC	—	219.59	12.85	256.18	14.00	—	4.51	—
UH-2	60	UHPC	—	219.59	12.85	294.16	15.46	—	7.32	—
UH-3	60	UHPC	3 $\phi$ 12	219.59	12.85	341.01	17.11	5.62	10.62	89
UH-4	60	UHPC	3 $\phi$ 16	219.59	12.85	375.58	18.48	8.39	12.79	52
UH-5	80	UHPC	—	219.59	12.85	320.24	16.58	—	9.07	—
UH-6	80	UHPC	3 $\phi$ 12	219.59	12.85	368.34	18.29	5.79	12.28	112
UH-7	80	UHPC	3 $\phi$ 16	219.59	12.85	403.87	19.78	8.68	14.33	65
UH-8	100	UHPC	—	219.59	12.85	346.94	17.79	—	10.72	—
UH-9	100	UHPC	3 $\phi$ 12	219.59	12.85	396.27	19.66	5.97	13.77	131
UH-10	100	UHPC	3 $\phi$ 16	219.59	12.85	432.77	21.16	8.98	15.77	76

由表5可知:UHPC加固RC简支梁后可靠性能提升效果明显。由图4可以看出:与普通混凝土加固相比,UHPC加固对可靠度指标有着更明显的提升效果。在同样新增3 $\phi$ 12纵向钢筋的情况下,当加固厚度60 mm、80 mm、100 mm时,UHPC加固相比普通混凝土加固,可靠度分别提升了89%、112%、131%;在同样新增3 $\phi$ 16纵向钢筋的情况下,加固厚度为60 mm、80 mm、100 mm时,可靠度分别提升了52%、65%、76%。

加固厚度也对UHPC加固后可靠度效果产生了

较为明显的影响,随着加固厚度的增长,可靠度指标也在增长。当UHPC层中无配筋时,随着加固厚度由30 mm加到100 mm,可靠度指标由4.51增加到7.32、9.07、10.72,分别增加了62.3%、101.1%、137.7%。相比于普通混凝土加固厚度几乎对可靠度没有影响,UHPC可以利用其优异的抗拉性能提高可靠度指标。

一定范围内,随着加固所采用的UHPC层中配筋量的增长,加固后可靠度也有增长,UHPC层中新增3 $\phi$ 12钢筋时,加固层为60 mm、80 mm、100 mm的

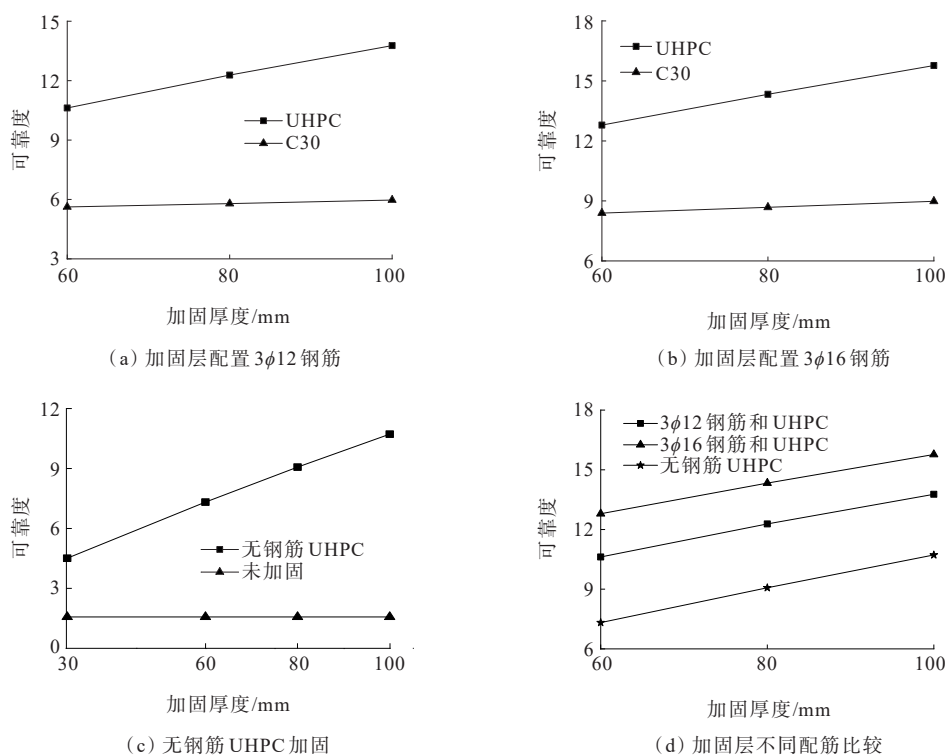


图4 可靠度指标与加固厚度关系图

情况下,可靠度指标相对于未增加钢筋的情况分别提升了47.4%、35%、28.5%,UHPC层中新增钢筋为 $3\phi 16$ 时,可靠度指标分别提升了74.7%、57.9%、47.1%。可见加固层中配筋量的增长对可靠度指标有良好的提升效果,但这种提升百分比会随着UHPC加固层厚度的增大而有所降低。

## 4 结论

本文提出了采用UHPC加固后抗弯承载力计算公式,并且用现有学者的试验结果验证了模型的合理性。依据误差传递公式和承载力计算公式得出了UHPC加固前后抗力的均值和方差的计算模型。考虑各种不确定性因素的影响,运用JC验算点法,结合算例研究了UHPC加固厚度和UHPC层钢筋对结构可靠度提升量的影响效果以及相对于普通混凝土加固可靠度的提升效果。

(1) UHPC加固后相对于原钢筋混凝土结构,可靠度产生了很大的提升。

(2) 对于只采用UHPC加固的梁而言,随着加固厚度由30 mm增加到60 mm、80 mm及100 mm、可靠度指标由4.51分别增加到7.32、9.07、10.32,可靠度分别提升了62.3%、101.1%、137.7%,结构可靠度随着UHPC加固层厚度的增加而增加。

(3) UHPC层中增配适量的钢筋,可有效提高加固后的可靠度,但随着UHPC层厚度的增加,钢筋影响百分比有所降低。

(4) UHPC加固相对于普通混凝土加固,在加固厚度分别为60 mm、80 mm、100 mm时,加固层配合 $3\phi 12$ 钢筋时可靠度分别提升了89%、112%、131%;加固层配合 $3\phi 16$ 钢筋时可靠度分别提升了52%、65%、76%。可见UHPC加固相比较于传统的普通混凝土加固,可靠度性能的提升明显。

### 参考文献:

- [1] 谌润水,胡钊芳,帅长斌.公路旧桥加固技术与实例[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [2] 张雷顺,韩菊红,郭进军,等.新老混凝土粘结补强在某钢筋混凝土桥面板加固整修中的应用[J].土木工程学报,2003,36(4):82-85.
- [3] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6): 997-1009.
- [4] RICHARD, P, CHEYREZY, M. H. Reactive powder concretes with high ductility and 200~800 MPa compressive strength [J]. Am. Concr. Inst., 1994.
- [5] 张云升,张文华,刘建忠.超高性能水泥基复合材料[M].北京:科学出版社,2014.
- [6] BRÜHWILER E, DENARIÉ E. Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete [J]. Structural Engineering International, 2013, 23(4): 450-457.
- [7] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A, et al. 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.
- [8] 史才军,肖江帆,曹张,等.材料组成对UHPC性能的影响[J].硅酸盐通报,2013,32(6):1005-1011.
- [9] 于涛涛.钢筋活性粉末混凝土受弯构件正截面承载力的研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [10] 曹霞,常婧,王艳俊.高强钢筋RPC梁受弯构件正截面承载力试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(1):109-115,123.
- [11] 张彭成,康青,沈志强,等.钢纤维与碳纤维混合增强活性粉末混凝土力学性能实验研究[C]//中国仪器仪表学会仪表材料分会,重庆仪表材料研究所,中南大学,《功能材料》期刊社.第七届中国功能材料及其应用技术学术会议论文集(第5分册).国家仪表功能材料工程技术研究中心,2010.
- [12] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [13] TANARSLAN H M. Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates [J]. Engineering Structures, 2017, 151: 337-348.
- [14] YIN H, TEO W, SHIRAI K. Experimental investigation on the behaviour of reinforced concrete slabs strengthened with ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 463-474.
- [15] LAMPROPOULOS A P, PASCHALIS S A, TSIIOULOU O T, et al. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Engineering Structures, 2016, 106: 370-384.
- [16] PREM P R, MURTHY A R. Acoustic emission and flexural behaviour of RC beams strengthened with UHPC overlay [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 481-492.
- [17] 贡金鑫,魏巍巍.工程结构可靠性设计原理[M].北京:机械工业出版社,2007.