

UHPC II 形梁桥设计计算中法标准对比

宋林, 吴大健, 段宝山

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要:该文基于 UHPC II 形梁桥设计计算, 对比分析计算过程中中国现有 UHPC 标准与法国 UHPFRC 标准之间的不同规定, 主要对比了 UHPC 材料力学性能、抗弯承载力、抗剪承载力和收缩徐变及相应预应力损失几大部分。结果表明: 同标号 UHPC 材料参数中国取值比法国保守, 法国标准考虑受拉区 UHPC 抗拉作用更为合适, 法国的桁架拉压杆模型计算 UHPC 抗剪比中国标准计算值小, UHPC 收缩徐变预应力损失法国计算值低于中国的 50%。

关键词: UHPC II 形梁; 抗弯承载力; 抗剪承载力; UHPC 收缩徐变

UHPC, 全名为超高性能混凝土, 中国也有称为活性粉末混凝土, 主要由水泥、矿物掺和料、石英砂、石英粉、钢纤维(不少于 2%)、减水剂和水组成。中国目前尚没有关于 UHPC 桥梁的设计计算规范, 仅有材料规范 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》和地方标准 DBJ43/T 325—2017《活性粉末混凝土结构技术规程》, 而国外相对比较成熟, 现已有部分 UHPC 桥梁设计计算的规范和标准, 比如法国标准, 即: National Addition to Eurocode 2—Design of Concrete Structures; Specific Rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete(UHPFRC), 2016—04, 以下简称法国 UHPFRC 标准。

该文所基于的 UHPC II 形梁桥设计实例, 为一座 30 m 跨简支梁桥, 应用于 G107 国道孝感市肖港至张公堤段改建公路工程项目中。UHPC II 形梁跨中标准截面及其配筋布置如图 1 所示, 计算时将 II 形梁截面等效简化为 T 形梁截面, 主要以 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》及上述两个活性粉末混凝土标准为基础, 部分参考法国 UHPFRC 标准进行设计计算。该文针对计算过程中出现的中国标准与法国标准规定的不同之处进行对比计算和分析, 旨在为日后 UHPC 桥梁结构设计计算和应用提供参考和指导。

在 UHPC II 形梁桥设计计算过程中, 中国标准与 UHPFRC 标准的不同规定主要体现在 UHPC 材料性能参数、正截面抗弯承载力计算、斜截面抗剪承载力计

算、UHPC 收缩徐变及对应预应力损失计算 4 个方面, 因此该文主要针对上述计算项目对中法标准不同规定进行对比和计算分析。

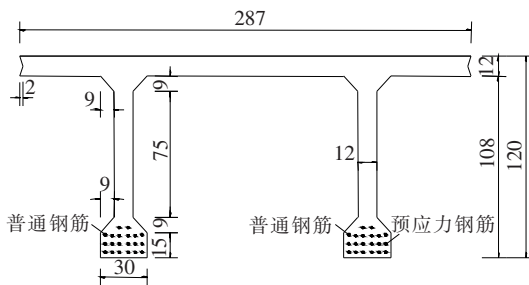


图 1 30 m 跨 UHPC II 形梁桥跨中标准截面及配筋布置图(单位: cm)

1 中法 UHPC 材料力学性能对比

同一个标号的 UHPC 混凝土, 不同国家要求的材料组成和配合比, 以及 UHPC 生产过程均存在一定的差别, 因而其物理力学性能和相关规定也有一定的差异。

1.1 材料参数对比

参考 DBJ43/T 325—2017《活性粉末混凝土结构技术规程》, 此设计 UHPC 材料选用 R140 标号, 其主要物理力学性能参数如表 1 所示。法国 UHPFRC 标准规定对于 UHPC 材料参数的真实值需要通过试验确定, 若无试验数据, 根据一般 UHPC 材料的特性, 标准中给出了部分简化的计算公式和经验值, 对应于 R140 标号 UHPC, 其具体数值如表 1 所示。

表 1 中法 UHPC 材料物理力学性能参数对比

标准来源国	强度等级	抗压强度/MPa			轴心抗拉强度/MPa		弹性模量 E_c /MPa	重度 γ_c / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
		立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$	轴心抗压强度标准值 f_{ck}	设计值 f_{cd}	标准值 f_{tk}	设计值 f_{td}		
中国	R140	140	98	68.0	7.5	5.2	45 200	27
法国	R140	140	110	62.4	9.0	5.5	50 000	27

由表 1 可知:中国标准给出的 UHPC 材料物理力学性能基本上均较法国 UHPFRC 标准小,主要由于 UHPC 材料组成配合比、钢纤维的含量和分布,以及施工精细化水平等方面的区别所致,施工过程中钢纤维的分布无法控制,而纤维取向对 UHPC 性能的影响较大,中国标准取值符合国情较为保守。法国 UHPFRC 标准对于 UHPC 抗压强度设计值的计算,在考虑混凝土分项系数基础下,还考虑了长期荷载作用对 UHPC 抗压强度的折减系数 0.85,因此其取值稍低。UHPC 结构计算时,UHPC 材料的性能参数应进行相应强度试验确定,若无试验数据,则宜根据 UHPC 制作采用的材料组成配合比及施工、养护情况进行标准规范的选择。

UHPC 的其他几个参数两国取值相差不多,剪切

模量 G_c 取其弹性模量 E_c 的 0.4 倍,抗剪强度取 $\tau_{cd} = 0.095f_{ck}$,泊松比 μ_c 取 0.2,温度线膨胀系数 α_c 取 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

1.2 UHPC 本构关系对比

DBJ43/T325—2017《活性粉末混凝土结构技术规范》中直接给出了 UHPC 的单轴受压和受拉的应力应变关系参考公式,与之相比,法国 UHPFRC 标准中强调 UHPC 的受压、受拉力学性能均需要通过试验获得,但同时也给出了简化的应力应变关系表达式,对比如表 2 所示。其中法国 UHPFRC 标准给出的 UHPC 受拉应力应变曲线公式中考虑了整体纤维取向的影响,即公式中的 K , K 取值为 1.25。根据该文 UHPC II 形梁设计数据计算得到的中法理论计算公式的 UHPC 受压、受拉应力应变曲线对比如图 2、3 所示。

表 2 中法 UHPC 本构关系对比

项目	中国	法国
单轴受压应力—应变关系	$\sigma_c = \begin{cases} f_{cd} [1 - (1 - \epsilon_c / \epsilon_{c0})^n], & (\epsilon_c < \epsilon_{c0}) \\ f_{cd}, & (\epsilon_{c0} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \end{cases}$	$\sigma_c = \begin{cases} E_{cm} \epsilon_c, & (\epsilon_c < \epsilon_{c0d}) \\ f_{cd}, & (\epsilon_{c0d} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cud}) \end{cases}$
该桥计算 ϵ_{c0} 取值	$\epsilon_{c0} = 0.002\,5 + (f_{cu,k} - 100) \times 10^{-5} = 0.002\,9$	$\epsilon_{c0} = f_{cd} / E_{cm} = 0.001\,25$
该桥计算 ϵ_{cu} 取值	$\epsilon_{cu} = 0.004\,2 - 0.3 \times (f_{cu,k} - 100) \times 10^{-5} = 0.004\,1$	$\epsilon_{cud} = [1 + 14(f_{ctfm} / f_{cm})] \epsilon_{c0d} = [1 + 14 \times 9 / 140] \times 0.001\,25 = 0.002\,38$
单轴受拉应力—应变关系	$\sigma_t = \begin{cases} E_c \epsilon_t, & (\epsilon_t < \epsilon_{t0}) \\ f_t, & (\epsilon_{t0} \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{tu}) \end{cases}$	$\sigma_t = \begin{cases} E_{cm} \epsilon_t, & (\epsilon_t < \epsilon_{t0}) \\ \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} K}, & (\epsilon_{t0} \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{tu}) \end{cases}$
该桥计算 ϵ_{t0} 取值	$\epsilon_{t0} = f_t / E_c = 5.2 / 45\,200 = 0.000\,12$	$\epsilon_{t0} = \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} K E_{cm}} = \frac{9}{1.3 \times 1.25 \times 50\,000} = 0.000\,11$
该桥计算 ϵ_{tu} 取值	$\epsilon_{tu} = 0.001$	$\epsilon_{tu} = 0.002\,5$

由表 2 和图 2、3 可知:在没有 UHPC 材料力学性能试验数据的情形下,中国标准和法国 UHPFRC 标准均假设 UHPC 材料的受拉本构关系为简单的双折线形式,两国标准在 UHPC 受拉弹性极限应变的计算取值上基本相近,但法国标准建议的极限拉应变比中国标准大。受压本构方面,中法差别较大,法国标准

假设为双折线形式,而中国标准采用的是曲线加折线的形式,且法国标准计算的弹性极限压应变和最大压应变均比中国标准小。经对比可知,法国 UHPFRC 标准更加凸显钢纤维的掺入对 UHPC 抗拉性能的提升作用,而中国标准在各方面均较为保守,中国项目应用时,应通过试验确定所用 UHPC 的拉压本构关系,

无试验数据时可参照中国标准参数进行。

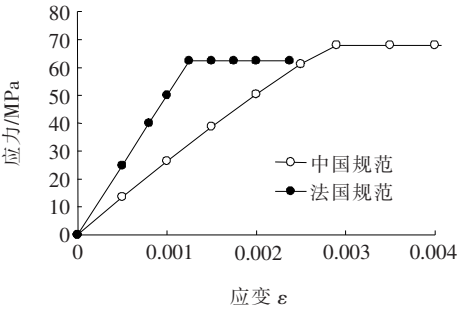


图 2 中法理论公式 UHPC 受压应力应变曲线对比

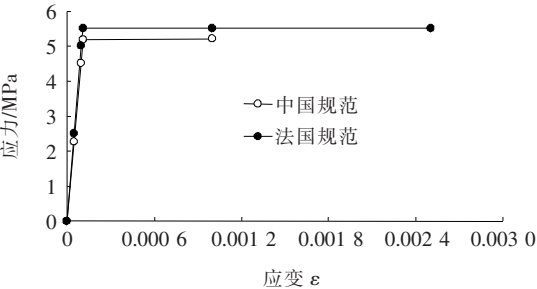


图 3 中法理论公式 UHPC 受拉应力应变曲线对比

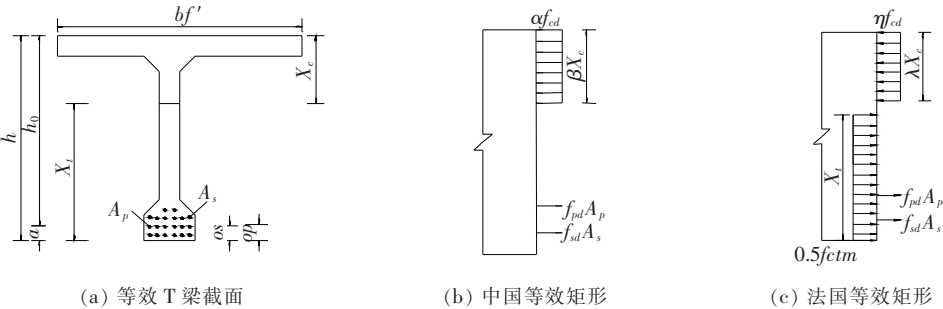


图 4 中法 UHPC 截面受压区混凝土等效矩形应力图对比

量纲系数 η, λ , 其数值参照欧洲规范 EN 1992-1-1: 2004 计算, 中法参数对比如表 3 所示。同时, 法国标准要求考虑受拉区 UHPC 的抗拉作用, 其抗拉强度取为 UHPC 轴心抗拉强度设计值的 0.5 倍, 受拉区有效高度计算公式为 $x_t = h - x_c$ 。

表 3 中法 UHPC 截面受压区高度系数和有效强度系数对比

中国		法国	
α	β	η	λ
0.92	0.73	0.8	0.7

由表 3 可知: 中国标准和法国 UHPFRC 标准计算 UHPC 截面抗弯承载力的方法基本一致, 均是根据等效矩形应力分布图和应变图进行积分得到, 将上述两国参数分别代入 UHPC II 形梁计算中, 得到计算结

2 UHPC II 形梁桥抗弯承载力中法计算对比

UHPC 梁桥的正截面抗弯承载力计算, 中国基本沿用普通钢筋混凝土结构的正截面抗弯承载力计算方法, 不考虑受拉区 UHPC 的抗拉作用, 与之相比, 法国 UHPFRC 标准中规定应考虑受拉区 UHPC 抗拉强度的作用。

基于平截面假定和 UHPC 混凝土的本构关系, 可得到 II 形梁等效的 T 梁在极限状态下的应力应变分布, 为便于计算, 中法标准均考虑将 UHPC 混凝土的曲线形应力分布等效转换为矩形分布形式, 只是各国转换系数略有不同, 如图 4 所示。

图中: x_c 为按平截面假定的中和轴高度, 在用等效矩形换算受压区 UHPC 混凝土应力图时, 中国标准引入两个无量纲系数 α, β 分别对 UHPC 轴心抗压强度设计值和中和轴高度进行折减, 并直接给出了两个系数的建议值。法国 UHPFRC 标准同样引入两个无

果对比如表 4 所示。

表 4 UHPC II 形梁截面抗弯承载力中法计算对比

项目	抗弯极限承载力/(kN · m)
中国	3 449
中国(考虑 UHPC 受拉)	3 661
法国	3 617
中国/法国	0.954

如表 4 所述, 按照法国 UHPFRC 标准考虑受拉区 UHPC 抗拉作用时, 其截面抗弯极限承载力较中国标准计算值大 4.87%, 按中国标准计算, 若考虑受拉区 UHPC 的受拉作用, 则抗弯极限承载力可提升 6.1%。由此可知, 受拉区 UHPC 的抗拉作用对 UHPC II 形梁的抗弯极限承载力有一定程度的提升作用,

只是提升比例有限。基于 UHPC 中钢纤维的掺入和其他特殊的材料组成及配比,为充分发挥 UHPC 的材料性能,不宜忽略受拉区 UHPC 的抗拉作用,抗拉强度大小的取值可参照法国 UHPFRC 标准选取,也可以通过主梁试验进行确定。

3 UHPC II 形梁桥抗剪承载力中法计算对比

UHPC II 形梁等效 T 梁的抗剪承载力计算,中国标准与法国 UHPFRC 标准的计算方法差别较大,中国标准将 UHPC 中钢纤维提供的抗剪作用纳入混凝土抗剪作用中,即混凝土和钢纤维的抗剪作为一个整体来计算,而法国标准将混凝土与钢纤维的抗剪作用分开单独进行计算。

3.1 计算方法对比

按照中国标准,UHPC 矩形、T 形和 I 形截面受弯构件的斜截面抗剪承载力,由 UHPC 混凝土自身提供的抗剪承载力 V_{fc} 、箍筋提供的抗剪承载力 V_s 、预加力提供的抗剪承载力 V_p 和弯起钢筋提供的抗剪承载力 V_{sb} 4 部分组成,即:

$$V_u = V_{fc} + V_s + V_p + V_{sb} \tag{1}$$

法国 UHPFRC 标准中,UHPC 结构斜截面抗剪承载力计算是以桁架结构模型为计算依据,主要由 UHPC 混凝土自身提供的抗剪承载力 $V_{Rd,c}$ 、抗剪钢筋提供的抗剪承载力 $V_{Rd,s}$ 钢纤维提供的抗剪承载力 $V_{Rd,f}$ 三大部分组成,即:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \tag{2}$$

当 UHPC II 形梁桥为预应力钢筋混凝土结构或普通钢筋混凝土结构时,其斜截面抗剪承载力在中国和法国不同标准下的计算方法对比如表 5、6 所示。

表 5 预应力 UHPC 梁桥斜截面抗剪承载力中法计算方法对比

中国		法国	
指标	公式	指标	公式
V_{fc}	$V_{fc} = \alpha_{cv} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0$	$V_{Rd,c}$	$V_{Rd,c} = \frac{0.24}{\gamma_{cf} \gamma_E} k_N f_{ck}^{0.5} b z$
V_s	$V_s = f_{yv} A_{sv} h_0 / s$	$V_{Rd,s}$	$V_{Rd,s} = \frac{A_{sv}}{s} z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha$
V_p	$V_p = 0.05 N_{p0}$	$V_{Rd,f}$	$V_{Rd,f} = \frac{A_{fv} \sigma_{Rd,f}}{\tan \theta}$
V_{sb}	$V_{sb} = 0.75 f_{yv} A_{sb} \sin \alpha_s + 0.75 f_{py} A_{pb} \sin \alpha_p$		

表 6 普通钢筋 UHPC 梁桥斜截面抗剪承载力中法计算方法对比

中国		法国	
指标	公式	指标	公式
V_{fc}	$V_{fc} = \alpha_{cv} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0$	$V_{Rd,c}$	$V_{Rd,c} = \frac{0.21}{\gamma_{cf} \gamma_E} k_N f_{ck}^{0.5} b d$
V_s	$V_s = f_{yv} A_{sv} h_0 / s$	$V_{Rd,s}$	$V_{Rd,s} = \frac{A_{sv}}{s} z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha$
V_{sb}	$V_{sb} = 0.75 f_{yv} A_{sb} \sin \alpha_s$	$V_{Rd,f}$	$V_{Rd,f} = \frac{A_{fv} \sigma_{Rd,f}}{\tan \theta}$

表 5、6 中: γ_{cf} 、 γ_E 均为安全系数,可取 γ_{cf} 、 $\gamma_E = 1.5$; k_N 为荷载或预应力提高系数; z 为弯矩作用下的内力臂,取 $0.9 h_0$; f_{yv} 、 f_{ywd} 为箍筋抗拉强度设计值; θ 为主压应力与梁轴线夹角,建议取 $30^\circ \sim 40^\circ$; α 为倾斜钢筋倾角; s 为箍筋间距; A_{sv} 、 A_{sb} 为箍筋截面面积; A_{fv} 为纤维作用面积,矩形和 T 形截面取 $0.9 b h_0$; λ_f 为钢纤维含量特征参数, $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$, ρ_f 为钢纤维体

积掺量百分率, l_f 为钢纤维等效长度, d_f 为钢纤维等效直径; α_{cv} 为斜截面活性粉末混凝土抗剪承载力系数,一般受弯构件取 0.6 ; β_v 为钢纤维对活性粉末混凝土抗剪能力的影响系数,可取 0.6 ; $V_{Rd,f}$ 为纤维所提供的抗剪承载力; $\sigma_{Rd,f}$ 为纤维增强截面的残余抗拉强度。

由上述中法计算公式对比可知:中国标准根据 UHPC 中钢纤维的掺量和尺寸,将钢纤维的抗剪作用

等效为一个扩大系数叠加至混凝土抗剪作用中,而法国 UHPFRC 标准根据 UHPC 的应力—裂缝图或应力—应变图计算纤维增强截面的残余抗拉强度,然后结合钢纤维作用面积计算钢纤维的抗剪作用。对于 UHPC 构件是否为预应力结构,其抗剪强度的区别,中国标准体现为预应力抗剪项的增加和弯起钢筋抗剪项的变化,而法国标准主要体现在 UHPC 自身抗剪项 $V_{Rd,c}$ 的变化,系数与用于计算的截面有效高度不同。

该文计算的 UHPC II 形梁桥为预应力简支梁桥,没有设置弯起的预应力钢筋和弯起普通钢筋,且无竖向预应力筋。UHPC 材料中所用钢纤维占比为 2%,钢纤维长度为 20 mm,直径为 0.2 mm。以 II 形梁距支座 1/2 梁高位置处截面为例,分别用上述中法斜截面抗剪计算公式进行计算,得到结果如表 7 所示。

表 7 UHPC II 形梁抗剪承载力中法计算对比 kN

中国				法国			
V_{fc}	V_s	V_{sb}	合计	$V_{Rd,c}$	$V_{Rd,s}$	$V_{Rd,f}$	合计
651.0	360.5	0	1 011.5	186.0	324.5	375.6	886.1

由表 7 可知:法国 UHPFRC 标准公式计算值较中国计算值小,总剪力为中国标准计算值的 0.876 倍。按中国标准计算,UHPC 与钢纤维共同提供的抗剪承载力为 651 kN,而法国标准计算值为 561.6 kN,是中国标准的 0.863 倍,因为法国标准将混凝土与钢纤维的抗剪作用分开单独计算,没有考虑混凝土与钢纤维之间相互作用所带来的抗剪增强效应。此外,箍筋提供的抗剪承载力,法国 UHPFRC 标准计算值也比中国标准计算值小,前者为后者的 0.9 倍。由此说明:在 UHPC 截面抗剪承载力方面,法国 UHPFRC 标准采用的桁架拉压杆模型计算公式,比中国标准的计算公式更为保守,设计计算时推荐参照法国 UHPFRC 标准进行计算。

3.2 抗剪截面对比

对于矩形、T 形、I 形及箱形截面的受弯 UHPC 构件,其受剪截面的尺寸规定,中国标准和法国 UHPFRC 标准均有相应的限制,如表 8 所示。

表 8 中法 UHPC 构件抗剪截面规定对比

中国	法国
$V \leq 0.1 f_{cd} (1 + 0.15 \lambda_f) b h_0$	$V_{Rd} \leq 2 \times 1.14 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} b_w z f_{ck}^{2/3} / (\cot \theta + \tan \theta)$

中法标准均是从 UHPC 自身抗剪承载力方面对 UHPC 抗剪截面进行规定,对应于 II 形梁计算中,中国标准计算值为 $V \leq 1\,153$ kN,法国 UHPFRC 标准计算值为 $V_{Rd} \leq 1\,507$ kN,可见,法国标准对于 UHPC 抗剪截面尺寸的限制要求比中国标准低,因为在法国 UHPFRC 标准中计算截面抗剪承载力时,将钢纤维提供的抗剪作用与混凝土抗剪作用分开计算,根据计算结果,混凝土自身抗剪占总抗剪承载力的比值较小,而钢纤维抗剪占比较大,因此法国 UHPFRC 标准对于 UHPC 构件抗剪截面尺寸的要求相对较低。

4 UHPC II 形梁桥预应力损失(收缩徐变)中法计算对比

预应力 UHPC 构件正常使用极限状态计算预应力损失时,因 UHPC 材料的收缩徐变与常规混凝土有较大不同,因此预应力筋的收缩徐变项损失计算也有较大差别,其他各项预应力损失均与常规混凝土结构相差不多,因此该文仅对比计算收缩徐变项预应力损失。UHPC II 形梁收缩徐变预应力损失计算,主要以中国计算公式为基准,如式(1)所示。中国标准与法国 UHPFRC 标准的区别主要体现在公式中的收缩应变 ϵ_{sh} 值和徐变系数终极值 ϕ 的取值。

$$\sigma = \phi \frac{\sigma_c}{E_c} E_p + \epsilon_{sh} E_p \tag{1}$$

UHPC 材料是否采用蒸养对其收缩徐变的影响非常大,当采用高温蒸养方式时,其收缩可在蒸养阶段完成大部分或全部完成,徐变也可完成大部分。因此,中国标准和法国 UHPFRC 标准均按照不考虑蒸养和考虑蒸养两种情况分别对收缩徐变进行规定,两国标准对比如表 9 所示。

如表 9 所示,中国标准给出收缩应变随计算时间变化的简化计算公式,而法国 UHPFRC 标准更简化地直接给出收缩应变终值。按照中国标准计算公式,其收缩应变终值,不蒸养时为 0.000 7,与法国标准建议终值相同,蒸养时为 0.000 5,而法国标准建议终值为 0,即法国 UHPFRC 标准认为 UHPC 构件经高温蒸养后不再发生任何收缩应变。徐变系数终极值,中法标准均直接给出了建议值,法国 UHPFRC 标准数值均低于中国标准建议值。UHPC 收缩徐变的大小,与 UHPC 材料配比、UHPC 构件的制作和养护过程均有很大关系,两个国家在这些方面的标准和控制均存在差异,由上述对比结果可知,法国的要求比中国

表 9 中法 UHPC 收缩徐变规定对比

国家	收缩应变		徐变系数终极值	
	不蒸养	蒸养	不蒸养	蒸养
中国	$\epsilon_{sh} = 0.7 \exp \left[\frac{-2.5}{\sqrt{t-0.5}} \right]$	$\epsilon_{sh} = \begin{cases} 2.5 \times 10^{-4} t & (t \leq 2 \text{ d}) \\ 0.0005 & (t > 2 \text{ d}) \end{cases}$	$\phi = 1.2$	$\phi = 0.3$
法国	$\epsilon_{sh} = 0.0007$	$\epsilon_{sh} = 0$	$\phi = 0.8$	$\phi = 0.2$

高。具体设计计算时,宜综合考虑项目所在地施工水平、养护条件等因素,选择合适的标准参数进行计算。

分别代入中国标准和法国 UHPFRC 标准建议值计算 UHPC II 形梁收缩徐变预应力损失,计算结果对比如表 10 所示。

表 10 UHPC II 形梁收缩徐变预应力损失中法计算对比

国家	收缩徐变预应力损失/MPa	
	不蒸养	蒸养
中国	278.3	133.0
法国	231.1	23.6

由表 10 可知:高温蒸养很大程度上降低了 UHPC 收缩徐变产生的预应力损失,法国 UHPFRC 标准计算出来的预应力损失比中国标准计算值小很多,尤其是经过高温蒸养后,法国计算值仅为中国的 17.7%。由此可知,法国 UHPFRC 标准计算的预应力筋有效预应力较高,符合最大程度发挥预应力筋作用的设计意图,实际项目应用中,宜参照法国 UHPFRC 标准对 UHPC 材料制作、施工和养护过程提出相应要求,以满足采用法国标准参数进行计算。

5 结论

通过 30 m 跨 UHPC II 形梁桥的设计计算,对比分析了计算过程中中国标准和法国 UHPFRC 标准的不同规定,得到以下结论:

- (1) 在没有试验数据的情形下,同一标号 UHPC 材料的力学性能参数,中国标准建议值均比法国取值小,法国更加突出钢纤维对 UHPC 抗拉性能的提升作用。工程应用时,中国项目宜参照中国标准建议值进行初步计算,且必须通过试验进行验证和确定。
- (2) 抗弯承载力计算,中国标准偏保守地将受拉区 UHPC 中钢纤维的抗拉作用当成一种安全储备,而法国标准要求必须考虑受拉区 UHPC 的抗拉作用。分析结果显示,受拉区 UHPC 的抗拉作用对梁体抗弯

承载力的提高效果显著,设计计算时宜考虑受拉区 UHPC 的抗拉强度。

(3) 抗剪承载力计算,中国标准将钢纤维与混凝土作为整体进行计算,而法国标准采用桁架拉压杆模型将钢纤维与混凝土分开计算,分析表明法国标准的桁架拉压杆模型更为合适,且法国计算值较中国更加保守。

(4) 由计算可知,UHPC 构件是否经过高温蒸养,对其收缩徐变及相应预应力损失的影响非常大,高温蒸养可降低 50% 以上预应力损失,因此,UHPC 构件应用时,宜采用高温蒸养方式。

(5) 按照法国 UHPFRC 标准计算的收缩徐变及相应预应力损失比中国标准小很多,尤其是蒸养后,仅为中国的 17.7%,有效预应力大幅提升,实际项目中,宜参照法国标准要求控制 UHPC 制作、施工和养护,以采用法国标准参数进行相应计算。

参考文献:

[1] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[2] GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S].

[3] DBJ 43/T325—2017 活性粉末混凝土结构技术规程[S].

[4] National Addition to Eurocode 2—Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete(UHPFRC)[S],2016.

[5] BS EN 1992-1-1:2004 欧洲规范 2:混凝土结构设计,一般规程与建筑设计规程[S].

[6] 张阳,王兴旺. UHPC 加固 RC 结构交界面抗剪性能试验研究[J]. 中外公路,2017(2).

[7] 李立峰,范昕,等. 大比例预应力 UHPC_T 形梁抗弯性能试验研究[J]. 土木工程学报,2018(5).

[8] 邵旭东,管亚萍,晏班夫. 预制超高性能混凝土兀形梁桥的设计与初步试验[J]. 中国公路学报,2018(1).

[9] 邓舒文,邵旭东,等. 全预制快速架设钢-UHPC 轻型组合城市桥梁[J]. 中国公路学报,2017(3).

[10] 陈宝春,黄卿维,王远洋,等. 中国第一座超高性能混凝土(UHPC)拱桥的设计与施工[J]. 中外公路,2016(1).