

中欧桥梁混凝土结构设计规范的若干问题研究

杨春

(上海林同炎李国豪土建工程咨询有限公司, 上海市 200437)

摘要: 根据可靠度和设计基准期之间的关系以及棱柱和圆柱混凝土试件轴心抗压强度的转换关系,揭示了在相同标准下中欧混凝土桥梁设计规范的可靠度及抗力分项系数。通过重构构件的极限承载力和抗裂弯矩、抗挠弯矩计算公式,定量剖析了随材料配置、尺寸变化条件下中欧规范构件设计承载力的差异及其变化规律。综合分析表明中国混凝土桥梁设计规范的结构安全度和裂缝控制更为严格。

关键词: 欧洲规范; 桥梁混凝土结构; 桥梁设计; 极限承载力; 裂缝宽度

1 引言

欧洲规范(Eurocode)是当今土木工程领域最具影响力和权威性的国际标准,自2010年起正式成为欧洲标准化协会(CEN)成员国的官方标准。除欧盟国家外,许多非欧盟国家也将欧洲规范作为本国的国家标准,一些涉外工程项目也要求采用欧洲规范进行设计。因此,学习欧洲规范的先进理念和研究中欧规范的内在差别,成为中国桥梁设计者实践“一带一路”战略的当务之急。

近年来,贡金鑫、杨春分别对欧洲规范中的混凝土房建结构和桥梁结构设计理论进行了系统总结,部分学者对中欧混凝土结构设计规范中的构件设计计算方法做了比较研究。关于中欧规范的异同比较,大部分文献是在罗列荷载作用及其组合、极限承载力或裂缝变形等计算公式的基础上再辅以算例,以这种以点代面的方式进行对比。这种简单对比方式很难反映中欧规范差异的全貌。鉴于此,该文将从结构可靠度、荷载及材料分项系数、汽车荷载、构件极限承载力、抗裂以及抗挠曲变形能力5方面对中欧混凝土桥梁设计规范的差异进行系统的量化对比研究,以便广大桥梁设计者更好地理解 and 掌握欧洲规范。

2 结构可靠度与分项系数

2.1 结构可靠度

可靠度是指结构在规定时间内规定条件下完成预

定功能的概率。这个“规定时间”即设计基准期,中国桥梁设计规范(以下表示为CHN)定为100年,欧洲规范(以下表示为EU)定为50年。在中欧规范各自的设计基准期内,混凝土桥梁结构承载能力极限状态和正常使用极限状态的可靠度见表1,中国规范的承载能力极限状态分延性和脆性两种破坏形式分别作了规定,欧洲规范未作区分。

表1 极限状态的结构可靠度

规范		承载能力极限状态			正常使用 极限状态
		一级	二级	三级	
CHN	延性	4.7	4.2	3.7	1.0
	脆性	5.2	4.7	4.2	
EU		—	3.8	—	1.5

由于设计基准期不同,表1中的可靠度没有直接可比性。如果将设计基准期统一到100年,欧洲规范混凝土桥梁结构承载能力极限状态的可靠度约为3.7,与中国规范延性构件三级安全等级对应的可靠度相同。中欧规范中结构安全等级为一级和三级的承载能力极限状态可靠度均通过重要性系数来反映,分别取1.1和0.9。

2.2 分项系数

荷载与抗力分项系数设计法是可靠度设计法的另一种表现形式,荷载、抗力的分项系数是由可靠度指标校准而来,它们的作用是将荷载、抗力的标准值转化成设计值。分项系数具备可比性的前提是条件荷载、抗力标准值的试验取样方法和概率保证率分别一致。中

欧规范除了混凝土材料强度的试验取样方法不同外,荷载及钢筋等材料的试验取样方法和概率保证率均一致。关于混凝土轴心抗压强度标准值,中国规范使用的试件是棱柱体,而欧洲规范使用的是圆柱体,二者之间具有近似线性的转换关系。表 2、3 分别给出了主要的荷载和材料强度的分项系数,其中混凝土的抗压强度均统一成棱柱体试件。

表 2 荷载分项系数

规范	基本组合		频遇/准永久组合
	γ_G	γ_Q	γ_G/γ_Q
CHN	1.20	1.40	1.0
EU	1.35	1.35	1.0

注:表中 γ_G 用于结构自重分项系数; γ_Q 用于汽车荷载分项系数。

表 3 材料强度分项系数

规范	基本组合			频遇/准永久组合
	γ_c	γ_s	γ_p	$\gamma_c/\gamma_s/\gamma_p$
CHN	1.45	1.20	1.47	1.0
EU	1.43(压弯)	1.15	1.34	1.0
	1.21(剪)			

注:表中 γ_c 用于混凝土强度分项系数; γ_s 用于钢筋强度分项系数; γ_p 用于预应力筋强度分项系数。

以混凝土为例,图 1 示出了立方体抗压强度等级 $f_{cu,k}$ 对应的用于受压、受弯承载力计算和受剪承载力计算的抗压强度设计值 f_{cd} 。可以看出:中欧规范用于受压、受弯计算的强度设计值比较接近,欧洲规范在 C40 以下相对较小,C40 以上超过中国规范,而用于受剪计算的强度设计值均超过中国规范。

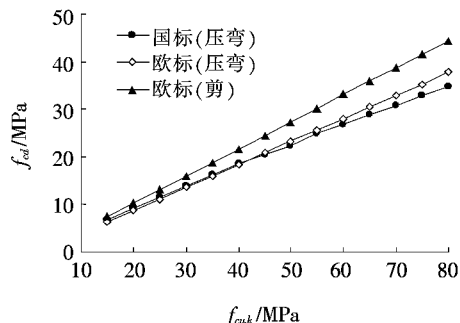


图 1 混凝土强度设计值

3 汽车荷载

汽车荷载是桥梁结构的主要可变作用。桥梁结构

的持久设计状况整体分析计算,中国规范采用线均布力和单轴集中力组合的车道荷载,欧洲规范采用面均布力和双轴集中力组合的 LM1 荷载(名义车道宽度 3 m)。中欧规范的汽车荷载形式基本相同,荷载效应计算均采用影响线加载,因此,两种汽车荷载之间的差异可以用加载范围内的车载总重来比较。考虑多车道折减和加载长度折减后的车载总重比值曲线如图 2 所示,可以看出:欧洲规范的汽车荷载明显超过中国规范,比值为 1.54~2.28,且在 50 m 加载长度内该比值呈下降趋势,超过 50 m 后呈缓慢上升趋势。

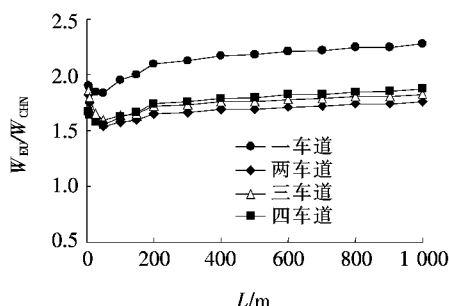


图 2 加载长度范围内汽车荷载总重比值

4 构件极限承载力

桥梁混凝土构件主要有受弯、压弯、受剪、受扭和冲切 5 种受力形式,受拉和轴压在实际工程中很难遇到。下面对这 5 种受力形式按中欧规范计算的极限承载力比值与混凝土强度等级及配筋率的关系做全面分析。一般地,采用简单截面的构件作为研究对象。

4.1 受弯构件的抗弯承载力

中欧规范的混凝土构件截面抗弯承载力均基于平截面假定推导而来。两种规范的单筋矩形截面的抗弯承载力计算公式可重构为:

$$M_{Rd,CHN}(M_{Rd,EU}) = f_{sd} \left(\rho_s - \frac{f_{sd}}{2f_{cd}} \rho_s^2 \right) b h_0^2 \quad (1)$$

式中: f_{cd} 为混凝土的抗压强度设计值; f_{sd} 和 ρ_s 分别为受拉钢筋的抗拉强度设计值和配筋率; b 和 h_0 分别为截面宽度和有效高度。

截面抗弯承载力比值与配筋率的关系见图 3。总体来说,两种规范计算的抗弯承载力差异不大,欧洲规范计算的预应力构件承载力比中国规范大 8% 左右,普钢构件承载力大 4% 左右,其差异来源于材料强度设计值和混凝土压应力—应变关系模型的不同,承载力比值随 ρ_s 的增大而减小。受相对界限受压区高度

的限制,纯预应力构件的最大配筋率不能超过 1%。

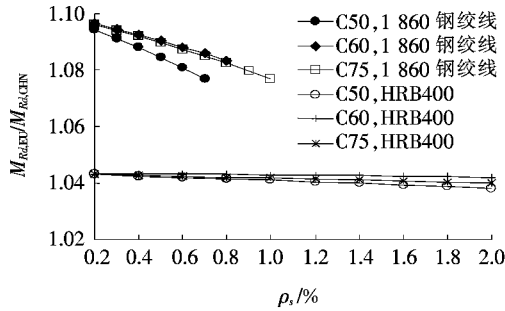


图 3 受弯构件抗弯承载力比值

4.2 压弯构件的抗弯承载力

与受弯构件不同,压弯构件的抗弯承载力还受轴压力的影响。对于大偏心受压构件,两种规范的对称配筋矩形截面抗弯承载力计算公式可重构为:

$$M_{Rd,CHN} = [0.5f_{cd}\xi(1-\xi) + \rho'_s f'_s]bh_0^2 \quad (2)$$

$$M_{Rd,EU} = [0.5\eta f_{cd}\lambda\xi(1-\lambda\xi) + \rho'_s f'_s]bh_0^2 \quad (3)$$

式中: ξ 为相对受压区高度,在这里近似等于轴压比; η 和 λ 为混凝土等效受压区参数; f'_s 和 ρ'_s 分别为受压区钢筋的强度设计值和配筋率。

图 4 为轴压力等于 $0.25f_{cd}bh_0$ 时的截面抗弯承载力比值与配筋率的关系曲线。由图 4 可见:欧洲规范计算的抗弯承载力略大,其比值随 ρ'_s 的增大而增大。

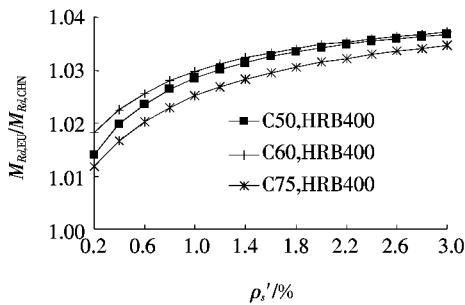


图 4 压弯构件抗弯承载力比值

4.3 受弯构件的抗剪承载力

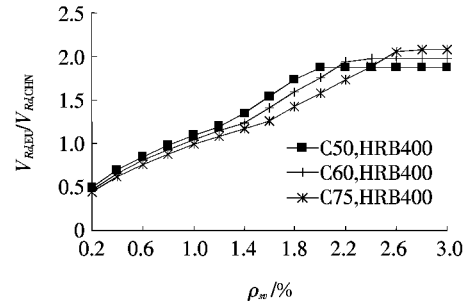
混凝土构件弯剪破坏的机理比较复杂,影响弯剪破坏的因素较多。中欧规范抗剪计算公式所考虑的因素不同,中国规范是在剪压破坏机理的基础上考虑了纵向受拉钢筋的销栓作用,欧洲规范则采用了变角桁架模型。两种规范的矩形截面构件抗剪承载力计算公式分别为:

$$\begin{cases} V_{Rd,CHN} = 0.45\alpha_1\alpha_2\alpha_3\sqrt{(2+0.6P)f_{cu,k}^{0.5}\rho_{sv}f_{svd}} \cdot bh_0 \\ V_{Rd,max,CHN} = 0.51f_{cu,k}^{0.5} \cdot bh_0 \end{cases} \quad (4)$$

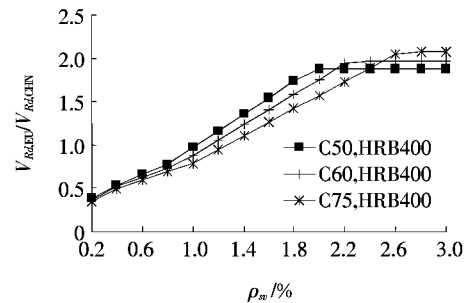
$$\begin{cases} V_{Rd,EU} = \rho_{sv}f_{svd} \cdot bh_0 \\ V_{Rd,max,EU} = 0.5\alpha_{cw}v_1f_{cd} \cdot bh_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_{svd} 和 ρ_{sv} 分别为箍筋的强度设计值和面积配箍率; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值; P 为纵向受拉钢筋的配筋百分率。

图 5、6 给出了 $P=0.25\%$ 和 $P=2.5\%$ 的抗剪承载力比值与面积配箍率的关系曲线。可以发现,中欧规范计算的抗剪承载力差异较大,其比值在 0.4~2.0 之间,随 ρ_{sv} 的增大而增大,并在 $\rho_{sv}>1.9\%$ 之后比值趋于稳定。这主要是由于欧洲规范未考虑混凝土对抗剪承载力的贡献,以及箍筋超筋后抗剪承载力受混凝土截面大小限制而引起的。



(a) $P=0.25\%$



(b) $P=2.5\%$

图 5 受弯构件抗剪承载力比值

4.4 受扭构件的抗扭承载力

通过对中欧规范混凝土受扭构件的抗扭承载力计算公式做重构变换,可以发现这两个公式均是基于空间桁架模型理论,只是系数有所不同,并且中国规范在空间桁架模型的基础上附加了混凝土对抗扭承载力的贡献。两种规范的构件抗扭承载力计算公式分别为:

$$\begin{cases} T_{Rd,CHN} = 0.35\beta_a f_{td} W_t + 1.2\sqrt{f_{sd}\rho_{s,l} \cdot f_{svd}\rho_{sv,l}} \cdot A_{cor} \\ T_{Rd,max,CHN} = 0.51f_{cu,k}^{0.5} \cdot W_t \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_{Rd,EU} = 2\sqrt{f_{sd}\rho_{s,l} \cdot f_{svd}\rho_{sv,l}} \cdot A_k \\ T_{Rd,max,EU} = \alpha_{cw}v_1f_{cd}A_k t_{ef} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\rho_{s,l} = A_s/u$ 为沿截面周边的抗扭纵筋的配筋率; $\rho_{sv,l} = A_{sv}/s$ 为沿构件长度方向的抗扭箍筋的配筋率; f_{td} 为混凝土抗拉强度设计值; W_t 为截面受扭塑性抵抗矩; A_{cor} 和 A_k 为截面核芯面积, 中国规范限定抗扭纵筋与抗扭箍筋的配筋强度比 $f_{sd}\rho_{s,l}/(f_{svd}\rho_{sv,l})$ 为 0.6~1.7。

以强度等级 C50, 边长 2 m、壁厚 0.2 m 的箱形截面构件为例, 抗扭承载力比值与配筋率 $\rho_{s,l}$ 和 $\rho_{sv,l}$ 关系的等高线见图 6, 可见中欧规范计算的抗扭承载力差异也较大, 比值范围为 0.5~2.8, 基本上随 $\rho_{sv,l}$ 的增大而增大, 随 $\rho_{s,l}$ 的增大而减小, 当配筋率 $\rho_{s,l}$ 和 $\rho_{sv,l}$ 在 $2 \text{ mm}^2/\text{mm}$ 附近时, 抗扭承载力比值较稳定。

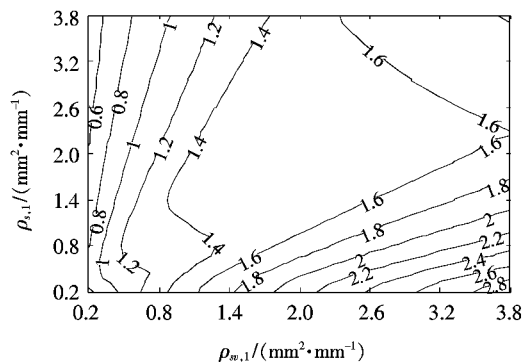


图 6 受扭构件的抗扭承载力比值等高线

4.5 板的抗冲切承载力

中欧规范板的抗冲切承载力计算均同时考虑了混凝土和抗冲切钢筋的贡献, 计算公式重构后分别为:

$$\begin{cases} F_{Rd,CHN} = 0.35\beta_h f_{td} u_m h_0 + 0.75\rho_{sv} A_m f_{svd} \\ F_{Rdmax,CHN} = 1.05\beta_h f_{td} u_m h_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} F_{Rd,EU} = 0.75C_{Rd,c} k (100\rho_1 f_{ck})^{1/3} u_1 h_0 + 1.5\rho_{sv} A_1 f_{svd} \\ F_{Rdmax,EU} = 0.24(1 - f_{ck}/250) f_{cd} u_0 h_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: ρ_{sv} 为冲切锥体范围内抗冲切箍筋的面积配箍率平均值; ρ_1 为板内两个方向受拉纵筋的几何平均配筋率; u_m 为距冲切力加载区 $h_0/2$ 处破坏锥体的周长; u_1 为距冲切力加载区 $2h_0$ 处的基本控制周长; u_0 为冲切力加载区周长; A_m 为距冲切力加载区 h_0 锥体斜面的水平投影面积; A_1 为距冲切力加载区 $2h_0$ 锥体斜面的水平投影面积。

图 7 为 3 种厚度的 C35 混凝土板抗冲切承载力比值与抗冲切钢筋面积配箍率的关系曲线。由图 7 可见: 中欧规范计算的抗冲切承载力比值的差异较大, 比值范围为 0.7~2.7, 随 ρ_{sv} 的增大呈先增后减趋势, 随板厚度 (h) 的增大而减小。

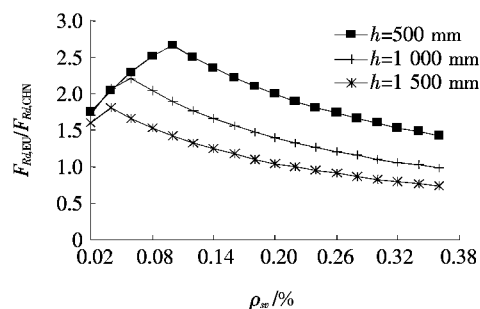


图 7 板的抗冲切承载力比值

5 抗裂和抗挠曲变形

抗裂和抗挠曲变形也是混凝土构件自身能力的一种体现形式, 为了全面反映中欧规范计算公式差异的内在规律, 下面用逆向求解的方式, 通过指定目标裂缝宽度和挠度, 反推抗裂弯矩 M_w 和抗挠弯矩 M_f 与构件材料之间的关系。

5.1 受弯构件的抗裂弯矩

经重构的中欧规范受弯构件裂缝宽度计算公式分别为:

$$w_{CHN} = C_1 C_2 C_3 \frac{M_w}{0.87\rho_s b h_0^2 E_s} \left(\frac{30 + \phi}{0.28 + 10\rho_s} \right) \quad (10)$$

$$w_{EU} = (k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \phi}{\rho_{eff}}) \cdot$$

$$\frac{\alpha_{ES} \frac{M_w (h_0 - x)}{I_{cr}} - \frac{k_t (1 + \alpha_{ES} \rho_{eff}) f_{ct,eff}}{\rho_{eff}}}{E_s} \quad (11)$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 分别为钢筋表面形状系数、荷载长期效应影响系数、构件受力性质相关系数; ρ_s 和 ρ_{eff} 分别为受拉纵筋的配筋率和有效受拉区配筋率; ϕ 为等效钢筋直径; E_s 为受拉纵筋弹性模量; α_{ES} 为钢筋与混凝土的弹性模量之比; c 为混凝土保护层厚度; I_{cr} 和 x 分别为开裂截面的惯性矩和受压区高度; $f_{ct,eff}$ 为混凝土抗拉强度平均值。

图 8 为截面尺寸 $1 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的受弯构件在裂缝宽度 $w = 0.2 \text{ mm}$ 时的抗裂弯矩与配筋率 ρ_s 的关系曲线。

由图 8 可知: 中欧规范反推的抗裂弯矩比值差异较大, 比值范围为 1.2~1.65, 随配筋率 ρ_s 的增大而增大, 随混凝土强度等级的提高而增大。

5.2 受弯构件的抗挠弯矩

经重构的中欧规范受弯构件挠度计算公式分别为:

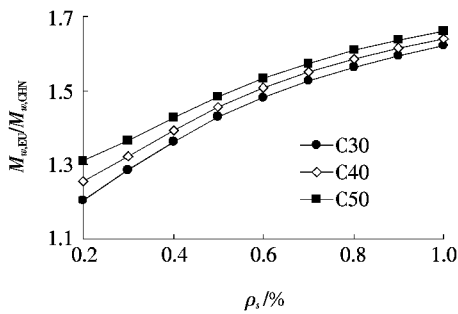


图8 受弯构件的抗裂弯矩比值

$$f_{CHN} = \eta_{\theta} k M_f l^2 \left[\left(\frac{M_{cr}}{M_f} \right)^2 \frac{1}{0.95 E_c I_0} + \left(1 - \frac{M_{cr}}{M_f} \right)^2 \frac{1}{E_c I_{cr}} \right] \quad (12)$$

$$f_{EU} = k M_f l^2 \left\{ \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_f} \right)^2 \frac{1}{E_{ce} I_0} + \left[1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_f} \right)^2 \right] \frac{1}{E_{ce} I_{cr}} \right\} \quad (13)$$

式中: E_c 和 E_{ce} 分别为混凝土的弹性模量和考虑徐变影响的有效弹性模量; M_{cr} 为混凝土构件的开裂弯矩; l 为构件的计算长度; k 为挠度计算系数; η_{θ} 为挠度长期增长系数; β 为荷载持时对平均应变的影响系数。

图9为截面尺寸 $1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 、计算长度 18 m 的受弯构件在挠度 $f = 50\text{ mm}$ 时的抗裂弯矩与配筋率的关系曲线。

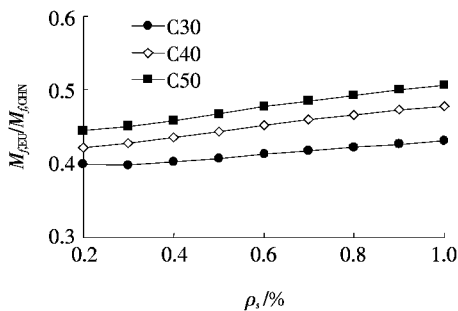


图9 受弯构件的抗裂弯矩比值

由图9可知:中欧规范反推的抗裂弯矩比值差异较大,比值范围为 $0.4 \sim 0.5$,随配筋率 ρ_s 的增大而增大,随混凝土强度等级的提高而增大。

6 结论

通过对中欧混凝土桥梁设计规范中的结构可靠

度、荷载及材料分项系数、汽车荷载、构件极限承载力、抗裂及抗挠曲变形能力的差异进行深入剖析,得到以下结论:

(1) 桥梁结构安全度控制方面,中国规范较欧洲规范更为严格。

(2) 用于桥梁持久设计状况整体分析计算的汽车荷载,欧洲规范的 LM1 荷载远超过中国规范的车道荷载。

(3) 构件极限承载能力方面,大部分条件下用欧洲规范计算的承载力高于中国规范,除受弯和压弯构件的计算抗弯承载力较接近外,其他几种受力形式计算承载力的差异较大。

(4) 由规范公式反推的抗裂弯矩和抗挠弯矩对比表明:在裂缝控制方面中国规范更为严格,在挠度控制方面欧洲规范更为严格。

参考文献:

- [1] 贡金鑫,车轶,李荣庆.混凝土结构设计(按欧洲规范)[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 杨春,张大伟.Eurocode 桥梁混凝土结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [3] 丁少凌,周国玲,易蓓,等.中欧规范混凝土构件承载力对比[J].中外公路,2017(2).
- [4] 李旭,段世明.中欧规范混凝土梁受剪承载力公式对比[J].低温建筑技术,2015(1).
- [5] 周国玲,丁少凌,易蓓,等.中欧规范混凝土构件裂缝验算对比[J].中外公路,2016(2).
- [6] 王涛.中欧钢筋及预应力混凝土梁桥设计规范对比研究[D].东南大学硕士学位论文,2015.
- [7] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [8] GB/T 50283—1999 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [9] EN 1990:2002.Eurocode; Basic of Structural Design[S].
- [10] EN 1992—1—1:2004.Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1—1: General Rules and Rules for Buildings[S].
- [11] EN 1992—2:2005.Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Concrete Bridges Design and Detailing Rules[S].
- [12] 刘照球,薛颖亮,李云贵.中欧规范高层结构侧向荷载计算参数比较[J].工程抗震与加固改造,2014(1).