

中欧混凝土桥梁抗弯承载能力对比与快速设计

吴兰婷¹, 童育强¹, 陈国庆²

(1. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京市 100097; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要:该文对比中欧混凝土桥梁设计规范的可靠度指标、设计使用年限、极限状态划分、材料特性等。为实现快速设计,编制欧洲规范承载力计算程序,并辅以算例对比中欧规范正截面抗弯承载力的异同。结果表明:中国规范可靠度指标较欧洲规范更高,中欧规范混凝土抗压强度、应力应变关系差异较小,但欧洲规范钢筋最大强度比中国规范更大。中欧规范正截面抗弯承载力计算假定基本一致,但欧洲规范正截面抗弯承载力比中国规范略大。欧洲规范承载力计算软件有较好的精度,能够达到快速对比设计的目的。

关键词: 混凝土桥梁; 中欧规范; 极限承载力; 对比设计

1 引言

为了统一欧洲各国工程技术标准,消除技术壁垒,促进各国经济的共同发展。欧洲共同体委员会于1975年决定在土木领域编制一套统一的设计标准。欧洲标准化委员被任命负责欧洲规范的编制工作,欧洲规范先后经历了试行版本(ENV)和正式版本,并于2006年形成了10卷58分册欧洲规范,涵盖了建筑、桥梁、储罐、筒仓、桅杆等工程结构的设计。欧洲规范(Eurocode)作为当今土木领域最具权威性的标准之一,由于其完备性和权威性,借鉴和使用欧洲规范的国家越来越多。

目前,关于中欧规范对比研究,中国学者已经做了很多的工作。但其中大多数对比研究的结论是通过有限元模拟或具体工程算例得出的。由于结构的个体差异,对于不同的工程结构可能会得出不同的结论。如文献[1]探讨了中欧规范荷载作用下桥梁结构的内力大小,研究表明中国规范跨中弯矩比欧洲规范小10%~20%;而文献[2]结果表明中国规范弯矩值比欧洲规范小25%;文献[3]研究了中欧规范抗弯承载力的差异,结果表明中国规范普通钢筋混凝土构件承载力与欧洲规范的比值为0.93~0.97,而文献[2]表明其比值约为0.91;文献[4]表明当中欧规范采用同一标号混凝土时,欧洲规范的强度设计值比中国规范平均高15.3%,文献[5]表明欧洲规范强度设计值比中国规范

小约5%。可见这种对比较为片面,很难客观反映中欧规范的异同。该文在对比中欧规范计算理论的基础上编制欧洲规范抗弯承载力计算软件,以实现中欧规范的快速对比与设计。

2 桥梁结构设计基础

2.1 桥梁设计安全等级

由于桥梁结构的规模和重要性程度不同,中欧规范均按照桥梁结构失效后果的严重程度不同将结构分为3个等级,每个等级取用不同的安全系数,中欧规范桥梁结构重要性系数^[6-7]如表1所示。

表1 桥梁结构重要性系数对比

| 重要性系数 | | 失效后果 | 适用对象 |
|-------|------|------|------|
| 中国规范 | 欧洲规范 | | |
| 1.1 | 1.1 | 很严重 | 重要桥梁 |
| 1.0 | 1.0 | 严重 | 普通桥梁 |
| 0.9 | 0.9 | 不严重 | 其他 |

2.2 可靠度指标

结构可靠性是指在规定时间内,规定条件下完成预定功能的能力,为了统一量化结构设计需要满足的可靠性,可靠度指标被用来度量结构的可靠性^[8]。中国规范设计基准期为100年,而欧洲规范设计基准期为50年。按照欧洲规范给出的换算公式(1),可将欧洲规范可靠度指标换算成100年基准期的可靠度指

标,并将结果列于表2。

$$\Phi(\beta_n)=[\Phi(\beta_1)]^n \tag{1}$$

式中: β_1 和 β_n 分别为基准期为1年和 n 年的可靠度指标; Φ 为标准正态分布的累积分布函数。

| 表2 中欧公路桥梁100年设计基准期可靠度指标 | | | | |
|-------------------------|------|------|-------|--------|
| 中国规范 | | | 欧洲规范 | |
| 安全等级 | 延性破坏 | 脆性破坏 | 可靠度等级 | 可靠度指标值 |
| 一级 | 4.7 | 5.2 | RC3 | 4.3 |
| 二级 | 4.2 | 4.7 | RC2 | 3.7 |
| 三级 | 3.7 | 4.2 | RC1 | 3.0 |

由表2可以看出:两者都将可靠度分为3个等级,中国规范还提高了脆性破坏构件的可靠度指标,与欧洲规范相比,中国规范可靠度指标更高^[9]。

2.3 桥梁设计使用年限

任何结构都有一定的设计使用年限,合理的设计使用年限能够使结构所能发挥的社会经济效益最大化,这与桥梁全寿命周期管理的理念相符。桥梁结构的设计使用年限是指在不需要大修就能够满足预定使用功能的年限。中欧混凝土桥梁规范规定的设计使用年限如表3所示。

| 表3 桥梁结构设计使用年限对比 | | | |
|-----------------|-------------|--------|------|
| 中国规范/年 | 适用对象 | 欧洲规范/年 | 适用对象 |
| 100 | 特大桥、大桥、重要中桥 | | |
| 50 | 中桥、重要小桥 | 100 | 桥梁结构 |
| 30 | 小桥 | | |

由表3可以看出:欧洲规范桥梁设计使用年限为100年,而中国规范对于重要程度不同的桥梁采用不同的设计使用年限。

2.4 极限状态划分

结构的极限状态是结构或构件能够满足设计规定的某一功能要求的临界状态,超过这一界限状态就不能满足设计规定的某项功能要求,而进入失效状态。欧洲规范与中国规范一致,将极限状态划分为承载力极限状态和正常使用极限状态。欧洲规范承载力极限状态的标志为:①结构或结构的一部分作为刚体失去平衡;②由于过度变形,结构或结构的一部分转变为机动体系、断裂失效或支撑结构、地基失稳等;③由疲劳或其他与时间相关的效应引起的破坏。

一般而言,欧洲规范中承载力极限状态的失效

模式分为:静力平衡失稳(EQU)、强度破坏(STR)、地基破坏(GEO)、疲劳破坏(FAT)、抗浮失稳(UPL)、水力破坏(HYD)。

欧洲规范正常使用极限状态分为可逆正常使用极限状态和不可逆正常使用极限状态,主要考虑因素为:①变形:影响结构的外观、使用的舒适性、结构的功能;②振动:使人感到不适、影响结构的功能;③损坏:影响结构的外观、耐久性、结构的功能。

中欧规范承载力极限状态和正常使用极限状态的划分标志是相同的。

3 混凝土桥梁材料特性对比

钢筋和混凝土作为混凝土结构的主要材料,其材料特性决定了桥梁结构的承载力。对于承载力而言,其主要影响因素有:混凝土的强度与应力应变关系以及钢筋的强度。

3.1 混凝土强度

欧洲规范混凝土强度的表示方法为 $C_{f_{ck}/f_{ck,cube}}$,其中, f_{ck} 为抗压强度标准值; $f_{ck,cube}$ 为立方体强度的标准值^[10]。例如,C12/15表示混凝土抗压强度标准值为12 MPa,立方体抗压强度标准值为15 MPa。但值得注意的是欧洲规范中混凝土抗压强度标准值采用直径为150 mm、高度为300 mm的圆柱体试件强度,中国规范采用的是150 mm×150 mm×300 mm棱柱体试件强度^[11-12],而对于立方体强度,中欧规范均采用边长为150 mm的立方体试件。

欧洲规范混凝土抗压强度设计值 f_{cd} 、抗拉强度设计值 f_{ctd} 计算如下:

$$f_{cd}=\frac{\alpha_{cc}f_{ck}}{\gamma_c} \tag{2}$$

$$f_{ctd}=\frac{\alpha_{ct}f_{ctk,0.05}}{\gamma_c} \tag{3}$$

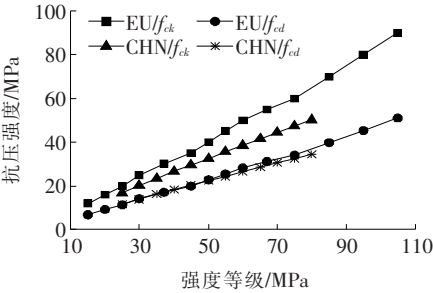
式中: α_{cc} 、 α_{ct} 分别为考虑抗压、抗拉长期效应以及加载方式不利影响的系数, α_{cc} 和 α_{ct} 取值范围为0.8~1.0,EN 1992-2中推荐 α_{cc} 取值为0.85(计算抗剪时取1.0), α_{ct} 取值为1.0; $f_{ctk,0.05}$ 为混凝土抗拉强度5%分位值; γ_c 为混凝土材料分项系数,中欧规范混凝土材料分项系数如表4所示。其中,欧洲规范对于不同的设计状况采用不同的分项系数,而中国规范采用统一的分项系数来考虑混凝土材料强度的不确定性^[13]。

针对混凝土桥梁的极限承载力问题,选取相同混

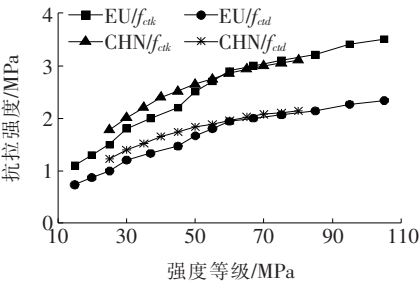
表 4 混凝土材料分项系数

| 规范 | 项目 | 分项系数 | |
|------|----------|-----------|------|
| 中国规范 | | 1.45 | |
| 欧洲规范 | 承载能力 | 持久或短暂设计状况 | 1.50 |
| | 极限状态 | 偶然设计状况 | 1.20 |
| | 正常使用极限状态 | | 1.00 |

凝土强度等级,分别计算中欧规范的混凝土强度设计值,图 1 为对比结果。由图 1(a)可知:欧洲规范混凝土抗压强度标准值更高,这是由于圆柱体强度比棱柱体强度更高。但由于材料分项系数的取值不同,两者混凝土强度设计值相差无几;由图 1(b)可知:中欧规范给出的混凝土抗拉强度基本相同,当混凝土强度等级低于 60 MPa 时,中国规范混凝土抗拉强度略大于欧洲规范。



(a) 混凝土抗压强度



(b) 混凝土抗拉强度

图 1 中欧规范混凝土强度对比

(EU 表示欧洲规范,CHN 表示中国规范)

3.2 混凝土受压应力应变关系

欧洲规范提供了抛物线形和双折线形两种应力应变关系模型用于截面设计^[14]。中欧两种规范采用了类似的抛物线形应力应变关系表达式:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cd} [1 - (1 - \epsilon_c / \epsilon_{c2})^n] & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2} \\ f_{cd} & \epsilon_{c2} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (4)$$

式中: n 为与混凝土强度等级有关的系数; ϵ_{c2} 为达到抗压强度时的压应变; ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变。各系数取值如下:

$$n = \begin{cases} 2.0 & \leq C50/60 \\ 1.4 + 23.4 [(90 - f_{ck}) / 100]^4 & > C50/60 \end{cases} \quad (5)$$

$$\epsilon_{c2} = \begin{cases} 0.002 & \leq C50/60 \\ [2.0 + 0.085 (f_{ck} - 50)^{0.53}] \times 10^{-3} & > C50/60 \end{cases} \quad (6)$$

$$\epsilon_{cu} = \begin{cases} 0.0035 & \leq C50/60 \\ 0.0026 + 0.035 [(90 - f_{ck}) / 100]^4 & > C50/60 \end{cases} \quad (7)$$

图 2 为中欧常用混凝土应力应变关系曲线。对于桥梁常用混凝土(C45、C50 与 C60)应力应变关系表达式基本一致,由于混凝土抗压强度设计值略有差别,导致其应力应变曲线极限应力有较小差异。

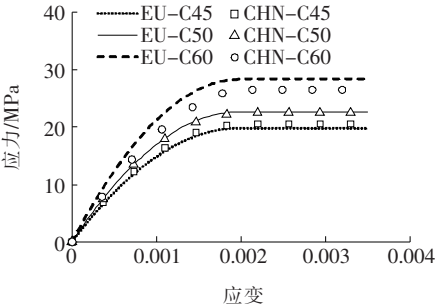


图 2 常用混凝土应力应变关系曲线对比

3.3 钢筋强度

欧洲规范普通钢筋的屈服强度为 400~600 MPa,而预应力钢筋极限强度为 1 030~2 160 MPa,相比于中国规范,欧洲规范的普通钢筋和预应力钢筋的最大强度均比中国规范大。如表 5 所示,欧洲规范钢筋的材料分项系数均比中国规范小。

表 5 钢筋材料分项系数

| 规范 | 项目 | 分项系数 | |
|------|--------------|-----------|------|
| 中国规范 | 普通钢筋、预应力螺纹钢筋 | 1.20 | |
| | 预应力钢绞线、钢丝 | 1.47 | |
| 欧洲规范 | 承载能力 | 持久或短暂设计状况 | 1.15 |
| | 极限状态 | 偶然设计状况 | 1.00 |
| | 正常使用极限状态 | | 1.00 |

4 正截面抗弯承载力计算方法

欧洲规范未明确给出正截面抗弯承载力的计算公式,但给出了计算基本假定与应力分布假设。中欧规范都采用平截面假定,不考虑受拉区混凝土拉应力,且

都采用等效矩形应力图简化受压区混凝土应力分布,但等效矩形的高度和受压区应力强度取值不同。根据截面的静力平衡条件可以推导出单筋矩形截面的抗弯承载力如下:

$$\sum N = 0 \quad \eta f_{cd} b (\lambda x) = A_s f_{yd}$$
$$\sum M = 0 \quad M_d = \eta f_{cd} (\lambda x) b (h_0 - 0.5 \lambda x)$$

(8)

式中: N 与 M 分别为轴向力与截面弯矩; x 为实际受压区高度; λ 为截面受压区高度系数; η 为等效矩形应力强度系数,其取值如下:

$$\lambda =$$
$$\begin{cases} 0.8 & f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0.8 - (f_{ck} - 50)/400 & 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases}$$

(9)

$$\eta =$$
$$\begin{cases} 1.0 & f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1.0 - (f_{ck} - 50)/200 & 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases}$$

(10)

对于更一般的截面情况,如图 3 所示,可以采用条带法的思想,将截面划分为若干个水平条带,利用二分法代入截面轴力平衡方程式(11)求解中和轴位置,代入力矩平衡方程式(12)求解截面承载力。

$$N_c + N_s = \sum E(\epsilon_i) k (y - y_0) b_i \delta_i +$$
$$\sum_{j=1}^n E_s A_s^j k (y_j - y_0) + \sum_{k=1}^m E_p A_p^k [k (y_k - y_0) - \epsilon_0] = 0$$

(11)

$$M_a = \sum E(\epsilon_i) k (y - y_0) y b_i \delta_i + \sum_{j=1}^n E_s A_s^j k (y_j -$$
$$y_0) y_j + \sum_{k=1}^m E_p A_p^k [k (y_k - y_0) - \epsilon_0] y_k$$

(12)

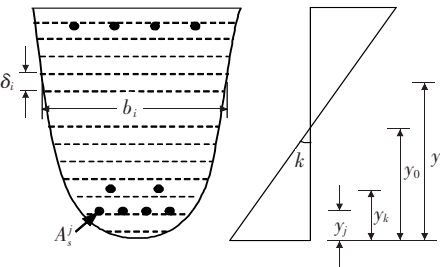


图 3 正截面抗弯承载力计算简图

5 基于 C#.NET 的承载力计算程序开发

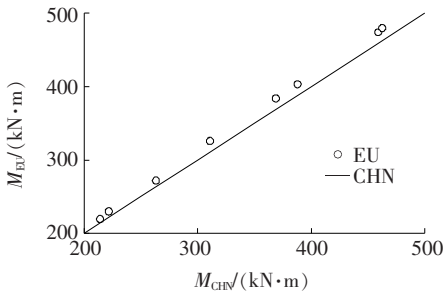
由于欧洲规范正截面承载力计算未给出计算公式,只对计算假定及基本要求进行了规定说明,对于双筋截面,受压区钢筋是否屈服需要根据平截面假定计算,求解繁琐;对于箱梁等常用变宽截面很难用公式法

较为准确计算其承载力。为了按欧洲规范进行快速设计,该文基于 C#.NET 编制了混凝土桥梁承载力计算软件。对于常用的矩形截面、T 形截面与箱形截面,可以采用常用截面功能,输入相关参数导入截面信息;基于 C#.NET 进行了 CAD 的二次开发,用于实现截面条带的自动划分并将截面从 CAD 导入。

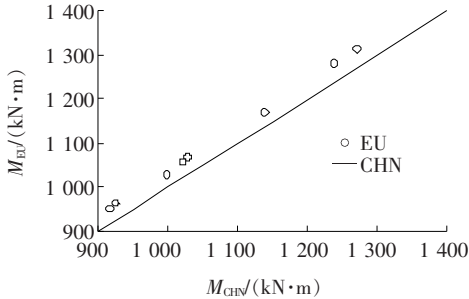
程序中钢筋和混凝土均采用欧洲规范中给出的应力应变关系,通过迭代求解式(11)、(12)获得截面的抗弯承载力。

6 算例比较

选取 16 个钢筋混凝土截面作为示例,截面受拉和受压钢筋保护层厚度均为 40 mm。分别按照中欧规范计算截面承载力^[15]并将欧洲规范承载力计算理论值与上文承载力程序计算值进行对比,结果见表 6。中欧规范单筋和双筋矩形截面混凝土梁承载力对比见图 4。



(a) 单筋矩形截面



(b) 双筋矩形截面

图 4 截面承载力对比

由于条带法程序根据平截面假定计算混凝土应力而未采用等效矩形应力图,由表 6 可知:自编欧洲规范程序计算承载力比理论计算值平均大 1.7%,表明该计算程序具有较好的准确性。由图 4 可知欧洲规范正截面抗弯承载力略大于中国规范。

7 结论

(1) 中欧规范关于极限状态划分以及桥梁安全等

表 6 正截面抗弯承载力

| 混凝土 强度 | 截面尺寸/ (mm×mm) | 受拉钢 筋/mm | 受压钢 筋/mm | 抗弯承载力 M_{CHN} / (kN·m) | 抗弯承载力 M_{EU} /(kN·m) | 欧洲规范程序计算与 理论计算偏差/% |
|-----------|------------------|-------------|-------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| C30 | 300×600 | 5C18 | — | 213.84 | 219.03 | +2.63 |
| C50 | 300×600 | 5C18 | — | 222.01 | 229.83 | +1.57 |
| C50 | 300×600 | 6C18 | — | 263.27 | 271.47 | +1.91 |
| C50 | 400×800 | 6C18 | — | 368.76 | 384.17 | +1.01 |
| C50 | 400×800 | 6D18 | — | 459.15 | 474.14 | +1.28 |
| C50 | 400×800 | 6C18 | — | 462.62 | 480.21 | +1.01 |
| C50 | 400×800 | 5D18 | — | 310.79 | 325.54 | +0.66 |
| C60 | 400×800 | 5D18 | — | 388.15 | 403.55 | +0.84 |
| C30 | 400×1 000 | 9C22 | 3C16 | 997.54 | 1 028.02 | +3.52 |
| C50 | 400×1 000 | 9C22 | 3C16 | 1 027.61 | 1 067.76 | +1.70 |
| C50 | 400×1 000 | 11C22 | 3C16 | 1 238.91 | 1 281.07 | +2.42 |
| C50 | 400×1 000 | 9C22 | 2C14 | 1 020.87 | 1 057.26 | +1.88 |
| C50 | 450×900 | 9C22 | 2C16 | 916.39 | 950.22 | +1.74 |
| C50 | 450×900 | 9D22 | 3C16 | 1 139.14 | 1 170.81 | +2.37 |
| C50 | 450×900 | 10D22 | 5D16 | 1 272.08 | 1 313.33 | +1.74 |
| C60 | 450×900 | 9C22 | 2C16 | 924.01 | 963.73 | +1.25 |

注:受拉、受压钢筋的 C 为 HRB400 钢筋,D 为 HRB500 钢筋。

级划分的规定基本相同。欧洲规范桥梁设计使用年限为 100 年,而中国规范按照桥梁规模、重要性程度不同,分别采用 30、50、100 年作为桥梁设计使用年限。中国规范可靠度指标比欧洲规范更大。

(2) 中欧桥梁规范中常用混凝土材料强度及其应力应变关系差异较小。欧洲规范普通钢筋及预应力钢筋最大强度比中国规范更大。

(3) 中欧规范正截面承载力计算都采用类似的假定。实例计算表明,欧洲规范正截面承载力略大于中国规范。

(4) 通过理论分析与算例验算可得,该文编制的欧洲规范截面承载力计算程序能够快速、准确地计算截面承载力,达到快速对比与设计的目的。

参考文献:

[1] 张聪聪,陈华婷. 国内外规范简支梁桥汽车荷载效应对比分析[C]. 第五届全国建筑结构技术交流会·暨首届全国青年结构工程师论坛,2015.

[2] 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.

[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,2017,37(2):276—280.

[4] 夏进. 中欧混凝土结构设计规范对比研究[D]. 武汉工程

大学硕士学位论文,2014.

[5] 严亚林. 欧洲混凝土规范构件设计及其与中国规范的比较研究[D]. 中国建筑科学研究院硕士学位论文,2010.

[6] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].

[7] BS EN 1990:2002 Eurocode—Basis of Structural Design [S].

[8] GB/T 50283—1999 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].

[9] 杨春. 中欧桥梁混凝土结构设计规范的若干问题研究[J]. 中外公路,2019,39(1):131—135.

[10] 陈忆前,陈艾荣,彭伟. 按欧中规范设计的预应力混凝土桥梁静力分析[J]. 中外公路,2016,36(1):163—169.

[11] 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.

[12] BS EN 1992—1—1:2004 Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1—1: General Rules and Rules for Buildings[S].

[13] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[14] BS EN 1992—2:2005 Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 2: Concrete Bridges—Design and Detailing Rules[S].

[15] 鞠秀颖,邹恩杰. 钢筋混凝土简支梁计算中法规范对比分析[J]. 中外公路,2012,32(2):168—172.