

中英标准混凝土结构裂缝计算对比研究

田 丰

北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京

收稿日期: 2024年7月27日; 录用日期: 2024年8月18日; 发布日期: 2024年8月28日

摘 要

通过对比中英标准中关于裂缝计算的过程, 分析两种标准在混凝土结构设计中环境类别的划分, 裂缝控制等级和裂缝计算参数上的差异。对比两种标准可知: 英国标准对环境类别, 环境作用等级进行独立划分, 使其更为明确详细; 中国标准对于裂缝宽度的要求明显高于英国标准; 中国标准与英国标准关于裂缝计算都是基于粘结滑移-无滑移理论, 但英国标准中涉及到的参数最多, 各种影响因素考虑的最为全面。

关键词

中英标准, 环境类别划分, 裂缝控制等级, 裂缝计算, 计算参数

Comparative Study on Calculation of Concrete Structure Cracks Based on Chinese and British Standards

Feng Tian

Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited, Beijing

Received: Jul. 27th, 2024; accepted: Aug. 18th, 2024; published: Aug. 28th, 2024

Abstract

By comparing the crack calculation process in the Chinese and British standards, the differences in the classification of environmental categories in concrete structure design, crack control levels and crack calculation parameters in the two standards are analyzed. Comparing the two standards, it can be seen that the British standard divides environmental categories and environmental action levels independently, making them more clear and detailed; the requirements for crack

width in the Chinese standard are significantly higher than those in the British standard; both the Chinese and British standards are based on the bond slip-no slip theory for crack calculation, but the British standard involves the most parameters and considers various influencing factors most comprehensively.

Keywords

Chinese and English Standards, Environmental Classification, Crack Control Level, Crack Calculation, Calculation Parameters

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国提出的一带一路计划正在稳步实施，其中“基建”更是一带一路中重要的一张名片，这促使国内企业开始使用各国的标准进行结构设计。由于所使用规范的不同，导致结构分析结果具有明显差异。同时，随着建筑行业的日渐国际化，各国的设计标准也形成了一种无形的竞争关系，它不再仅仅是一个对安全性，适用性，耐久性，经济性的技术要求，更是一种文化输出与文化认可的渠道。因此，研究我国标准与他国现行标准之间的异同点，凸显地尤为重要。

目前英国混凝土设计标准普遍应用于东南亚和中东/非洲等地区，且在建筑设计行业拥有很高的认可度，具有成为国际化标准的潜力。故本文针对混凝土结构设计过程中，使用我国现行标准和英国现行标准的裂缝计算进行对比。在了解我国混凝土设计标准在国际化层面的建设水平的同时，更有助于我国混凝土设计标准的后续修订，更好地与国际接轨，让更多国家认可并使用我国规范。

2. 环境类别划分

众所周知，混凝土是一种抗压强/抗拉弱的材料，这也导致钢筋混凝土结构容易出现裂缝。而造成钢筋混凝土结构出现裂缝的因素有很多，其中一个重要因素就是自然环境。所以，各国在编制混凝土结构设计标准的第一步都是将混凝土结构所处的自然环境进行划分，划分为不同的环境类别，然后再根据其归属的环境类别，对裂缝的要求和计算提出不同要求。

英国标准中对于环境类别的划分方法是基于英国标准 EN206-1 所提出，并对众多因素的侵蚀作用与和间接作用进行了强调[1]。例如：酸/盐溶液，温度改变，碱 - 骨料反应等等。英国标准环境类别划分，详见表 1。而我国的规范根据不同的劣化机制，将混凝土结构所处的环境类别划分了六类[2]-[4]。中国标准环境类别划分，详见表 2。

Table 1. Classification of some environmental categories in British standards

表 1. 英国标准部分环境类别划分

| 等级符号 | 环境描述 | 暴露等级示例 |
|------|--|-----------------|
| | 1) 无腐蚀或无侵蚀风险 | |
| X0 | 无钢筋或钢材的混凝土；除冻融/磨蚀或化学侵蚀之外的暴露条件钢筋条件；非常干燥 | 空气湿度非常低的建筑室内混凝土 |

续表

| 2) 碳化引起的腐蚀 | | |
|-------------|-----------|----------------------------|
| XC1 | 干燥或长期干燥 | 空气湿度很低的建筑室内混凝土；长期浸泡在水中的混凝土 |
| XC2 | 潮湿，很少出现干燥 | 混凝土表面长期与水接触 |
| XC3 | 中等潮湿 | 空气湿度中等或很高的建筑室内混凝土挡雨的外部混凝土 |
| XC4 | 干湿交替 | 表面与水接触，但不属于 XC2 情况的混凝土 |
| 3) 氯化物引起的腐蚀 | | |
| XD1 | 中等潮湿 | 混凝土表面暴露于空氯化物环境 |
| XD2 | 潮湿，很少出现干燥 | 游泳池暴露于含氯化物的工业水中的混凝土构件 |
| XD3 | 干湿交替 | 暴露于含有氯化物喷溅区的桥体路面；停车场的板 |

Table 2. Classification of environmental categories in China's standards**表 2.** 中国标准环境类别划分

| 环境类别 | 条件 |
|------|---|
| 一 | 室内正常环境 |
| 二 a | 室内潮湿环境；非严寒和非寒冷地区的露天环境；与无侵蚀性的土或土壤直接接触的环境 |
| 二 b | 严寒和寒冷地区的露天环境；无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境 |
| 三 | 使用除冰盐的环境；严寒和寒冷地区冬季水位变动的环境；滨海室内环境 |
| 四 | 海水环境 |
| 五 | 受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境 |

由表 1 和表 2 可知，英国标准中每一个环境类别下，进一步划分环境作用程度。但环境类别与环境作用程度两者相互独立，环境类别仅说明结构所处的环境不同；环境作用等级仅说明外部环境的影响程度，它用 1~4 来代表影响程度，其数值越大，外部环境的影响程度越大。而我国对环境类别划分较为模糊，仅用不同的环境条件对环境类别进行了划分。

3. 裂缝控制等级

钢筋混凝土结构的裂缝宽度是否满足相关的标准要求，关系到该结构的适用性和耐久性。而裂缝的限值取决于建造者对此结构的需求。如果裂缝超过所规定的限值可能引起溶液的渗漏/加速结构内部钢筋的锈蚀等现象。不仅影响该结构的正常使用，还有可能造成结构的坍塌和破坏。

我国标准将构件正截面的受力裂缝控制等级分为三个级别，分别为：一级：荷载标准组合下，受拉区边缘处的混凝土无拉应力；二级：荷载标准组合下，受拉区边缘处的拉应力不大于所使用混凝土的抗拉强度标准值。三级：荷载准永久组合并考虑长期作用影响，其中一级最为严格[5] [6]。英国标准中裂缝限值的划分依据与我国类似，由环境类别和是否为预应力构件共同决定。

对比表 3 和表 4 可知，中国标准对于裂缝宽度的要求明显高于英国标准。同时英国标准规定在 X0 和 XC1 类环境下，裂缝宽度并不会影响混凝土结构的耐久性，限值只是为了满足建筑外观的需求，如果没有外观需求时，裂缝宽度限值可以进一步放宽。

Table 3. Chinese standard crack width limits
表 3. 中国标准裂缝宽度限值

| 环境类别 | 钢筋混凝土结构 | | 预应力混凝土结构 | |
|------|---------|--------|----------|--------|
| | 裂缝控制等级 | 最大裂缝宽度 | 裂缝控制等级 | 最大裂缝宽度 |
| 一 | 三 | 0.3 | 三 | 0.2 |
| 二 | 三 | 0.2 | | |
| 三 | 三 | 0.2 | | |

Table 4. British standard crack control levels and limits
表 4. 英国标准裂缝控制等级和限值

| 暴露等级 | 钢筋混凝土构件 | 有粘结预应力构件 |
|---------------------|---------|----------|
| 荷载组合 | 准永久组合 | 频遇组合 |
| X0 XC1 | 0.4 | 0.2 |
| XC2 XC3 XC4 | 0.3 | 0.2 |
| XD1 XD2 XS1 XS2 XS3 | | 消压 |

4. 裂缝计算对比

从上世纪 30 年代至今, 众多学者针对于混凝土裂缝的影响因素, 及其裂缝产生的原理进行了研究。并得到了很多混凝土裂缝计算理论。但目前被各国标准最常采用的计算理论分别为: 1) 以实验数据为基础的数理统计方法; 2) 粘结滑移理论; 3) 无滑移理论; 4) 粘结滑移 - 无滑移理论[7] [8]。

4.1. 中国标准

我国现行标准中关于裂缝宽度计算, 是以粘结滑移 - 无滑移理论为基础。该计算过程大致可以分为三个步骤: 第一步计算出平均裂缝间距, 再由平均裂缝间距得出平均裂缝宽度, 最后得到最大裂缝宽度 [9]-[12]。

1) 平均裂缝间距

基与大量实验数据和工程经验, 我国标准中提出平均裂缝间距 l_{cr} 计算公式如下:

$$l_{cr} = \beta \times \left(1.9 \times c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (1)$$

式(1)中: β : 钢筋混凝土构件的特征系数(与构件受力状态有关, 取值见表 5); c : 最外侧纵向受拉钢筋外边缘到混凝土受拉区边缘的距离, c 的取值范围为 20~65 mm; d_{eq} : 纵向受拉钢筋的等效直径(见式(2)); ρ_{te} : 有效受拉钢筋混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率(见式(3))。

Table 5. Component force characteristic coefficients
表 5. 构件受力特征系数

| 构件受力特征 | 构件受力特征系数 |
|---------|----------|
| 轴心受拉 | 1.1 |
| 偏心受拉 | 1.05 |
| 受弯或偏心受压 | 1.0 |

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i \times d_i^2}{\sum n_i \times v_i \times d_i} \quad (2)$$

式(2)中: n_i : 受拉区域第 i 种纵向钢筋的数量; v_i : 受拉区域第 i 种纵向钢筋的相对粘结特征系数(取值见表 6); d_i : 受拉区域第 i 种纵向钢筋的直径。

Table 6. Relative bond characteristic coefficients of steel bars
表 6. 钢筋的相对粘结特征系数

| 钢筋类别 | 普通钢筋 | | 先张法预应力筋 | | | 后张法预应力筋 | | |
|-------|------|------|---------|-------|-----|---------|-----|------|
| | 光圆钢筋 | 带肋钢筋 | 带肋钢筋 | 螺旋肋钢丝 | 钢绞线 | 带肋钢筋 | 钢绞线 | 光面钢丝 |
| v_i | 0.7 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.8 | 0.5 | 0.4 |

$$\rho_{te} = \frac{A_s + A_p}{A_{te}} \quad (3)$$

当 $\rho_{te} < 0.01$ 时, ρ_{te} 取 0.01。

式(3)中: A_s : 受拉区非预应力纵向钢筋的截面面积; A_p : 受拉区预应力纵向钢筋的截面面积; A_{te} : 有效受拉混凝土截面面积。

综上所述, 计算出式(2)和式(3), 代入式(1)即可得到该混凝土构件的平均裂缝间距 l_{cr} 。

2) 平均裂缝宽度

纵向受拉钢筋的平均伸长量减去混凝土纵向的平均伸长量, 即可得到两个裂缝之间的平均裂缝宽度 w_m , 具体见式(4)。

$$w_m = (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \times l_{cr} \quad (4)$$

式(4)中: ε_{sm} : 受拉钢筋的平均应变; ε_{cm} : 受拉混凝土的平均应变; l_{cr} : 裂缝平均间距。

经过公式代换并整理可得:

$$w_m = \alpha_c \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_{cr} \quad (5)$$

经过众多学者分析, 得出:

$$\psi = 1.1 - 0.65 \times \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sk}} \quad (6)$$

且 ψ 的取值范围为 0.2~1, 当 ψ 小于 0.2 时, ψ 取 0.2, ψ 大于 1 时, ψ 取 1。

3) 最大裂缝宽度

平均裂缝宽度最大裂缝宽度 w_{max} 与两个扩大系数 τ_s 和 τ_l 相乘, 即可得到最大裂缝宽度 w_{max} , 具体见式(7)。

$$w_{max} = \tau_s \tau_l w_m = \tau_s \tau_l \alpha_c \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_{cr} \quad (7)$$

式(7)中, τ_s : 最大裂缝宽度与平均裂缝宽度的比值, 经过大量实验得出 τ_s 与构件的受力状态有关, 具体取值见表 7; τ_l : 混凝土结构长期使用影响的扩大系数。

Table 7. Expansion coefficient values
表 7. 扩大系数取值

| 受力状态 | τ_s |
|---------|----------|
| 受弯/偏心受压 | 1.66 |
| 偏心受拉 | 1.9 |
| 轴心受拉 | 2.15 |

为简化计算过程，引入一个构件受力特征系数 α_{cr} ，该系数不仅与构件受力状态有关，同时与预应力构件有关，具体取值见表 8。将受力特征系数 α_{cr} 代入式(7)，可得到最大裂缝宽度 w_{\max} ，该式计算不仅简化了计算过程，同时考虑了荷载长期作用的影响。

$$\alpha_{cr} = \tau_s \tau_l \alpha_c \beta \quad (8)$$

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (9)$$

Table 8. Force characteristic coefficients α_{cr}

表 8. 受力特征系数 α_{cr}

| 受力类型 | α_{cr} | |
|-------|---------------|----------|
| | 钢筋混凝土构件 | 预应力混凝土构件 |
| 受弯/偏压 | 2.1 | 1.7 |
| 偏拉 | 2.4 | |
| 轴拉 | 2.7 | 2.2 |

4.2. 英国标准

英国现行标准中关于裂缝宽度计算也是基于粘结滑移 - 无滑移理论。但与中国标准不同的是，英国标准是采用特征裂缝宽度来验算混凝土构件的裂缝[13]-[16]。特征裂缝宽度计算公式，见式(10)。

$$w_k = s_{r,\max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (10)$$

式(10)中， w_k ：裂缝宽度特征值； $s_{r,\max}$ ：裂缝的最大间距； $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ ：钢筋平均应变与混凝土平均应变之差，可按式(11)进行计算； ε_{sm} ：相关荷载组合下的钢筋产生的平均应变，此应变已经包括了变形的影响以及拉伸硬化的影响； ε_{cm} ：裂缝间的混凝土平均应变。

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (11)$$

式(11)中， σ_s ：开裂截面受拉钢筋的应力； k_t ：与加载时间有关的系数，若为长/短期荷载，分别取 0.4/0.6； $f_{ct,eff}$ ：即将开裂时混凝土抗拉强度平均值； $\rho_{p,eff}$ ：混凝土构件的有效配筋率，具体见式(12)； α_e ：钢筋弹性模量与混凝土平均弹性模量的比值。

混凝土构件的有效配筋率：

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A_p}{A_{c,eff}} \quad (12)$$

式(12)中: $A_{c,eff}$: 混凝土构件的有效受拉区面积; ξ_1 : 考虑预应力钢筋和普通钢筋直径不同时的粘结强度调整系数; A_s : 受拉区非预应力纵向钢筋的截面面积; A_p : 受拉区预应力纵向钢筋的截面面积。

英国标准以受拉区的有粘结钢筋是否在合理的闭合中心为限值, 对裂缝最大间距 $s_{r,max}$ 进行划分。闭合中心的取值为 $5 \times \left(c + \frac{\phi}{2} \right)$, 钢筋直径和保护层厚度对其均有影响。当间距小于闭合中心, 可按照下式计算裂缝的最大间距:

$$S_{r,max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \phi}{\rho_{p,eff}} \quad (13)$$

式中: k_3 和 k_4 , 建议值为 3.4 和 0.425; c 为混凝土保护层厚度; k_1 为钢筋粘性特征系数, 该系数与钢筋类型有关。对于高粘强度钢筋, 取 0.8, 对于光面钢筋, 取 1.6; k_2 为应变分布系数, 该系数与构件的受力状态有关。构件受弯时, 取 0.5, 构件仅受拉时, 取 1.0, 构件偏心受拉或者局部受拉时, 需要另行计算。

当间距大于闭合中心限值或者受拉区采用无粘结钢筋, 裂缝最大间距 $s_{r,max}$ 按照式(14)计算。

$$S_{r,max} = 1.3(h-x) \quad (14)$$

式中: h 为构件高度; x 为构件开裂截面受压混凝土高度。

综上所述, 笔者列出了中英标准关于裂缝宽度计算公式的基础原理以及计算过程中所涉及的参数, 见表 9。观察表 9 可知, 我国标准与英国标准基础理论均为粘结滑移 - 无滑移理论, 且两者均未考虑箍筋对裂缝宽度的影响。但英国标准与我国标准相比而言, 英国标准中涉及到的参数最多, 各种影响因素考虑最为全面。

Table 9. Comparison of crack calculations in Chinese and British standards

表 9. 中英标准计算裂缝计算对比

| | 中国标准 | 英国标准 |
|-------------|--------------|--------------|
| 基础理论 | 粘结滑移 - 无滑移理论 | 粘结滑移 - 无滑移理论 |
| 箍筋 | × | × |
| 钢筋间距 | × | √ |
| 钢筋直径 | √ | √ |
| 钢筋应力 | √ | √ |
| 钢筋与混凝土的粘结性能 | √ | √ |
| 有效配筋率 | √ | √ |
| 保护层的厚度 | √ | √ |
| 构件受力特征 | √ | √ |
| 混凝土受拉变形 | √ | √ |
| 混凝土构件的受力状态 | √ | √ |

5. 结论

通过对比中英两种标准可知: 英国标准对环境类别, 环境作用等级进行独立划分, 环境类别划分的更为明确详细; 中国标准对于裂缝宽度的要求高于英国标准, 同时英国标准中明确指出如果对裂缝无要求时, 可进一步放宽限值; 中国标准与英国标准关于裂缝计算都是基于粘结滑移 - 无滑移理论, 但英国

标准中涉及到的参数最多,各种影响因素考虑最为全面。我国标准采用裂缝宽度验算进行控制,其中包括了正截面裂缝和斜裂缝。而英国标准对裂缝控制验算内容较多,包括了不需要计算的裂缝控制和裂缝宽度验算/限制混凝土和钢筋应力/最小配筋面积。

在众多工程中实际应用时,使用英国标准验算混凝土结构裂缝宽度考虑因素最全面,方法上逐渐简化。设计人只需按照工程的实际情况选择一种方法验算即可。而我国标准对裂缝验算时,采用统一的计算方法,但对裂缝要求更加严格。

参考文献

- [1] British Standards Institution (1997) *Structural Use of Concrete: Part 1: Code of Practice for Design and Construction*. BS8110-1.
- [2] 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司. GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑出版传媒有限公司, 2010
- [3] 王彭生, 曾俊杰, 范志宏, 王胜年. 海工结构混凝土耐久性设计中英标准对比及工程应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(6): 703-709.
- [4] 丁志全, 祁志华. 中英混凝土结构设计规范中耐久性对比[J]. 绿色环保建材, 2019(5): 66-67.
- [5] 李泽龙. 受弯构件短期裂缝宽度计算[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [6] 孙瑞聪. 钢筋混凝土厚板构件裂缝影响及控制研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- [7] 李馨. 钢筋混凝土构件裂缝宽度计算方法比较研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [8] 杜毛毛. 中国、美国、欧洲混凝土规范的裂缝宽度计算[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2012, 27(2): 55-58.
- [9] 戴永琪, 刘晓青. 钢筋混凝土结构裂缝宽度计算[J]. 水利水运工程学报, 2023(6): 101-108.
- [10] 徐松青. 钢筋混凝土构件在荷载作用下裂缝计算方法探讨[J]. 墙材革新与建筑节能, 2019(4): 58-60.
- [11] 糜径超, 郑平, 姚永丁. 中外规范钢筋混凝土桥梁裂缝计算对比研究[J]. 交通科技, 2022(3): 90-94.
- [12] 韩冲. 高强钢筋混凝土构件裂缝宽度与钢筋应力关系试验研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [13] 卢昭, 李新国, 胡志敏. 中英混凝土设计规范对比研究[J]. 水运工程, 2011(z1): 43-47.
- [14] 陈峰. 中英结构规范在水池设计时的对比[J]. 工程建设与设计, 2017(21): 56-58, 63.
- [15] Bhatt, P. (1997) *Reinforced Concrete: Analysis and Design*. S. S. Ray Blackwell Science, Oxford, UK (1995) ISBN 0-632-03724-5 (Hardback). *Engineering Structures*, **19**, 336-337. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)83365-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)83365-2)
- [16] 田磊. 钢筋混凝土结构国内外设计方法的对比研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2009.