

佛山市顺德区中心沟西堤水闸混凝土结构检测与分析

罗素芬 王立华 陈理达

(广东省水利水电科学研究院, 广州 510610)

摘要: 本文介绍了佛山市顺德区中心沟西堤水闸安全鉴定混凝土结构检测结果, 分析了钢筋锈蚀对混凝土梁承载力的影响, 提出了锈蚀钢筋混凝土梁的承载力计算取用的系数, 对水闸混凝土结构安全状况进行了评价。

关键词: 混凝土检测 钢筋锈蚀 强度

1 工程概况

佛山市顺德区中心沟西堤水闸位于横琴岛中部, 建于 1972 年, 设计五孔, 每孔净宽 6m, 闸长 14.1m, 闸顶高程 3.62m, 闸底板高程-2.0m, 西堤水闸中孔采用双掩梁板式人字门, 外加一对提升截流门, 边孔采用提升上、下闸板, 固定胸墙。它的主要功能是关闸防潮, 开闸排水。经过三十多年运行, 水闸实际流量远大于原设计流量, 水闸钢筋混凝土结构存在明显的老化现象, 钢筋锈蚀混凝土出现裂缝, 结构承载力大大下降, 交通桥梁实际配筋数量远小于原设计, 对工程安全运行造成重要影响。为确保水闸的安全运行, 受业主委托, 我们对西堤水闸进行现场检测以评价水闸混凝土结构的安全状况。

2 检测依据与方法

根据《水闸安全鉴定规定》SL214-98, 本次检测用回弹法检测交通桥梁、启闭机梁柱的强度(《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T 23-2001); 钻芯法检测水闸闸墩、胸墙、交通桥桥面板、水闸底板的强度(《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS03:88); 并对混凝土碳化深度、裂缝、钢筋混凝土构件配筋状况和钢筋锈蚀状况进行了现场检测。

3 检测结果及分析

- 3.1 西堤水闸交通桥梁混凝土设计标号 200#, 用回弹法检测 4 条梁, 单个构件抗压强度推定值 16.1~23.8MPa, 最小值 16.1MPa, 平均值 21.0MPa, 标准差 3.50MPa; 建议按 C15 进行复核计算;
- 3.2 启闭机梁柱混凝土无设计资料, 中孔(右 3 孔)用回弹法检测 1 个柱, 抗压强度推定值 35.4MPa, 建议按 C25 计算; 右 2 孔启闭机下游梁、右 4 孔启闭机下游梁用回弹法检测, 抗压强度推定值为 13.3 和 16.7 MPa, 建议按 C14 计算。
- 3.3 水闸闸墩混凝土设计标号 150#, 用钻芯法检测右 2 孔右闸墩、右 2 孔左闸墩、右 4 孔左闸墩、右 1 孔右闸墩下部(水下)、右 1 孔左闸墩下部(水下), 每墩取芯 1 个, 单个芯样试件抗压强度换算值 26.2~38.1MPa, 建议按 C25 进行复核计算;
- 3.3 胸墙混凝土设计标号 200#, 用钻芯法检测, 右 2 孔胸墙、右 4 孔胸墙, 右 2 孔胸墙各取芯 1 个、右 4 孔胸墙取芯 2 个, 单个芯样试件抗压强度换算值 33.8~45.6MPa, 按组评定, 平均抗压强度换算值为 39.6MPa; 建议按 C25 进行复核计算;
- 3.4 交通桥桥面板混凝土设计标号 200#, 用钻芯法进行检测, 取样 3 个, 单个芯样试件抗压强度换算值 24.9~45.3MPa, 平均抗压强度换算值为 33.6MPa; 建议按 C25 进行复核计算;
- 3.5 水闸底板混凝土设计标号 200#, 取样 2 个, 单个芯样试件抗压强度换算值 43.4~45.5MPa, 平均抗压强度换算值为 44.4MPa; 建议按 C30 进行复核计算;
- 3.6 混凝土梁裂缝共检测 5 个构件, 均开裂, 裂缝最多的构件达到 20 条, 裂缝宽度 0.10mm~3.50mm, 远大于规范要求;

3.7 钢筋混凝土构件配筋状况检测：右 2 和右 4 孔交通桥梁设计梁底受拉钢筋 5 25+4 19，光圆钢筋，现场实测配筋数量为 3 22+2 16，光圆钢筋；右 3 孔交通桥梁设计梁底受拉钢筋 4 22+4 22，光圆钢筋，现场实测配筋数量为 2 18（变形钢筋）+1 14（光圆钢筋）。可见交通桥梁实际配筋数量远小于原设计；钢筋锈蚀严重，混凝土保护层开裂剥落；

右 3 孔启闭机排架梁梁底受拉钢筋无设计资料，实测配筋数量为 4 22，光圆钢筋；启闭机架柱配筋为 6 22，光圆钢筋，内外侧各 3 条。钢筋锈蚀严重，混凝土保护层开裂剥落；

交通桥面板底部钢筋实测为 20@100；钢筋锈蚀较严重，混凝土保护层开裂剥落。

3.8 钢筋锈蚀露筋状况检查共 9 个构件：右 2 孔交通桥上下游梁、右 4 孔交通桥上下游梁、右 3 孔交通桥下游梁共 5 条，右 3 孔闸门启闭机排架梁、右 2 孔和右 4 孔胸墙，均发现受拉钢筋锈蚀、保护层混凝土开裂、脱落的现象，状况严重。

4 钢筋锈蚀对混凝土梁承载力的影响

筋混凝土结构的耐久性评估及剩余寿命预测已经成为国内外结构工程学科的重要研究领域。而锈蚀钢筋混凝土构件的承载力计算则是混凝土结构耐久性评估的关键问题。国内外的学者和专家通过在锈蚀构件承载力试验结果基础上，对锈蚀梁的结构性能退化和破坏特征进行分析，提出了锈蚀梁的受弯承载力计算方法和模型，为混凝土结构耐久性评估提供了科学依据。

4.1 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能

4.1.1 锈蚀钢筋的力学性能

钢筋锈蚀不仅造成钢筋截面损失，而且导致钢筋力学性能、钢筋与混凝土之间粘结性能退化，影响钢筋与混凝土的共同工作。大量试验表明，钢筋的屈服强度、极限抗拉强度及延伸率随钢筋锈蚀程度增大而降低，当锈蚀率小于 10% 时，锈蚀钢筋仍有明显的屈服台阶，当锈蚀率大于 20% 时，屈服台阶已基本丧失。对现有的锈蚀钢筋屈服强度与极限强度计算公式进行分析验证，锈蚀钢筋的屈服拉力 F_{yt} 与极限拉力 F_{ut} 的计算公式如下：

$$F_{yt} = f_{y0} A_{s0} (1 - 1.077 \eta_s) \quad (1)$$

$$F_{ut} = f_{u0} A_{s0} (1 - 0.805 \eta_s) \quad (2)$$

式中， f_{y0} 和 f_{u0} 分别为未锈蚀钢筋的屈服强度和极限强度； A_{s0} 为未锈蚀钢筋截面面积； η_s 为钢筋锈蚀截面损失率(%)。

根据有关资料的结论，建议当 $\eta_s \leq 15\%$ 时，按照式 1 计算钢筋的屈服拉力；当 $\eta_s > 15\%$ 时则按无屈服点的热轧钢筋处理。

4.1.2 钢筋的粘结性能退化

当混凝土中的钢筋锈蚀后，在钢筋与混凝土界面上生成疏松的锈层，破坏钢筋表面与混凝土之间的化学胶着力 and 机械咬合力，导致钢筋与混凝土之间的粘结性能退化。

试验研究表明，(1) 锈蚀量较小 ($\eta_s < 1\%$) 时，粘结强度随锈蚀量增大而增大，在锈胀开裂前，仍高于无锈钢筋；(2) 锈胀开裂后，粘结力随裂缝宽度增大而降低，当裂缝宽度约为 0.1mm 时，粘结力相当于无锈钢筋的粘结力；(3) 在刚出现锈胀裂缝时，光圆钢筋的粘结强度高于无锈钢筋，而变形钢筋的粘结强度则低于无锈钢筋；(4) 对光圆钢筋，当裂缝宽度大于 1.5mm ~ 2.0mm 时，粘结力约为未裂钢筋试件的 3.5% ~ 5.5%，对变形钢筋，当裂缝宽度为 2.0mm ~ 3.0mm 时，粘结力为未锈钢筋的 3% ~ 10%。

4.2 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力计算

4.2.1 锈蚀钢筋混凝土梁承载力计算模型

目前,在锈蚀梁承载力计算中,有关钢筋截面损伤与力学性能退化的考虑人们已经取得了共识,但粘结性能退化如何考虑,尤其是在承载力计算模式中如何处理是未能解决的难题。限于目前的研究水平,人们从工程应用角度出发,立足于现行计算理论,提出实用的锈蚀梁承载力计算模型为

$$M_{su} = k_s \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) \quad (3)$$

$$x = \frac{f_{y1} A_{s1} + F_{yt}}{\alpha_1 f_c b} \quad (4)$$

式中, M_{su} 为锈蚀钢筋抗弯承载力; $f_{y1} A_{s1}$ 为未锈钢筋的屈服拉力; F_{yt} 为锈蚀钢筋的屈服拉力,由式

(1)计算; f_c 为混凝土轴心抗压强度; α_1 为受压区混凝土矩形应力图所取应力与混凝土抗压强度设计值的比值; b 为截面宽度; h_0 为截面的有效高度; k_s 为协同工作系数,主要考虑粘结性能退化导致梁受力模式改变对承载力的影响。

与受拉区相比,梁的受压区混凝土碳化速度慢,受压钢筋锈蚀程度较小,由此产生的混凝土界面损伤也比较小,且由于梁正截面承载力计算时一般不考虑受拉区混凝土的作用,因此式(3)中未考虑钢筋锈蚀引起的混凝土截面损伤。若实际工程中发现受压区混凝土碳化较为严重,则应考虑受压区混凝土损伤进行承载力计算。

4.2.2 锈蚀钢筋混凝土梁协同工作系数 k_s 的确定

协同工作系数是反映粘结性能退化对受弯构件承载力影响的一个重要参数,协同工作系数的确定应主要体现锈蚀引起的粘结力降低对钢筋与混凝土共同工作能力的影响。

根据锈胀裂缝宽度对粘结性能退化的影响,通过分析简化后,协同工作系数的计算模式为:

$$k_s = \begin{cases} 1.0 & \omega \leq \omega_a \\ 1.0 - \beta(\omega - 0.25) & \omega_a \leq \omega \leq \omega_b \\ k_{s,\min} & \omega \geq \omega_b \end{cases} \quad (5)$$

模型参数的确定

(1) $k_{s,\min}$ 的确定, $k_{s,\min}$ 的下限值对应无粘结钢筋混凝土梁的受力状况,其受力特征更象带拉杆的拱。根据文献的结论,全无粘结构件的承载力与正常构件之比为 0.70~0.90;另有模拟试验给出的结果为 0.76。然而,在实际工程中,由钢筋锈蚀引起的粘结力丧失并不是沿梁全长的,而经常是在梁的某一段长度锈蚀严重,混凝土保护层脱落,其它则锈蚀较轻。因此,协同工作系数下限值还应考虑粘结力丧失区段长度的影响。

ω_b 的确定, ω_b 的物理意义为锈胀裂缝宽度超过其值时,即可认为钢筋与混凝土之间的粘结力基本丧失。有关资料建议对光圆钢筋取 ω_b 为 2.5mm,变形钢筋取 ω_b 为 3.5mm。

ω_a 的确定, ω_a 的物理意义为锈胀裂缝宽度超过这一限值时,粘结力退化将开始影响钢筋与混凝土之间的协同工作性能。 ω_b 的确定涉及两个问题:一是粘结力下降多少开始影响钢筋与混凝土的协同工作性能;二是粘结力随锈胀裂缝宽度的下降规律。参考有关文献,建议对光圆钢筋和变形

钢筋均取 ω_b 为0.25mm。

为系数，取值见下表。

系数 的取值表

开裂长度	$l_w < (1/3)l$	$(1/3)l \leq l_w \leq (2/3)l$	$l_w \geq (2/3)l$
光圆钢筋	0.022	0.067	0.111
变形钢筋	0.015	0.046	0.077

式5适用于所有受拉钢筋锈蚀程度相同(相同)的情况，而实际上，受拉钢筋的锈蚀程度轻重不一，此时，协同工作系数如何确定更是一个难题，但又是必须解决的问题。建议取各条钢筋的协同工作系数 $k_{s,\min}$ 的平均值进行计算。

本工程交通桥梁右2孔和右4孔交通桥梁设计梁底受拉钢筋5 25+4 19，光圆钢筋，现场实测配筋数量为3 22+2 16，光圆钢筋；右3孔交通桥梁设计梁底受拉钢筋4 22+4 22，光圆钢筋，现场实测配筋数量为2 18(变形钢筋)+1 14(光圆钢筋)。可见交通桥梁实际配筋数量远小于原设计；钢筋锈蚀严重，混凝土保护层开裂剥落。梁底两侧的2条钢筋在整个跨度范围内锈蚀裂缝宽度均超过2.5mm，且部分剥落，可认为钢筋与混凝土之间的粘结力已基本丧失，中间的3条钢筋锈胀裂缝部分长度范围内超过2.5mm，综合考虑梁底受拉钢筋的锈蚀状况、混凝土的碳化、脱落和钢筋直径的差异等因素，建议交通桥梁总的协同工作系数取0.82。

右3孔闸门启闭机排架梁底受拉钢筋为4条20mm光圆钢筋，两侧的2条钢筋在整个跨度范围内锈蚀裂缝宽度均超过2.5mm，且靠左柱处混凝土剥落露筋，锚固区亦存在混凝土剥落露筋现象，可认为钢筋与混凝土之间的粘结力已基本丧失，中间的2条钢筋锈胀裂缝部分长度范围内超过2.5mm，综合考虑4条钢筋的锈蚀状况、箍筋的锈蚀等，建议钢筋与混凝土的协同作用系数取0.83。

胸墙底部梁钢筋锈蚀严重，导致全部长度范围内混凝土保护层开裂剥落，梁以上的胸墙部分钢筋锈蚀露筋，建议胸墙钢筋与混凝土的协同工作系数取0.92。

5 水闸混凝土结构安全状况评价与建议

该工程始建于1971年，已经运行34年，期间经历多次台风暴潮的侵袭。东堤水闸3孔堵塞后，排洪仅余2孔，实际排洪能力减小60%，西堤水闸所承担的排洪任务增加60%，水闸运行的条件大大改变，对水闸的安全运行造成危害；

现场检测发现，交通桥梁实际配筋数量远小于设计配筋数量。

现场检查发现，左岸内河侧和右岸外海侧存在较大管涌，检查时冒清水，是一个安全隐患，对工程安全运行构成威胁。

交通桥梁抗压强度仅C15，启闭机下游梁抗压强度仅C14，远小于《水工混凝土结构设计规范》SL/T191-96要求的C25。混凝土构件碳化深度32.0mm~67.0mm，均超过混凝土保护层的厚度，对钢筋的保护作用大大减弱。其余构件强度均达到设计要求。

交通桥梁和右3孔闸门启闭机排架梁裂缝较多，裂缝宽度大大超过规范要求。

交通桥梁、胸墙和闸门启闭机排架梁钢筋锈蚀严重，混凝土保护层普遍开裂、剥落，部分钢筋外露，使构件承载力大大降低，且实际配筋数量远小于原设计；

不均匀沉降造成桥面板分缝拉开、错台；左岸浆砌石墩和边墙开裂，有压碎迹象。

本水闸钢筋混凝土结构存在明显的老化现象，已耐久性不良，承载力大大下降，交通桥梁实际配筋

数量远小于原设计，对工程安全运行造成重要影响。水闸实际流量远大于原设计流量，管涌可能淘空底板，破坏水闸稳定性。可见影响本工程安全运行的因素较多，复核计算时应充分考虑这些因素的影响，恰当评价其安全状况。