

不同龄期混凝土回弹强度推定值的修正探讨

李 阳

哈密市锐敏建设工程质量检测有限公司 新疆 哈密 839000

【摘 要】：由于回弹法操作简单、检测速度快，所以被广泛应用到混凝土结构强度检测中，但是混凝土龄期的变化会导致表层硬度、碳化程度以及水化状态的不同，从而造成回弹值和抗压强度之间的误差。本文主要针对不同的龄期混凝土回弹强度推定值进行修正的问题展开研究，分析龄期对于回弹值和测强曲线适用性的影响，并结合试件回弹值和抗压强度的结果来比较不同龄期下推定强度和实测强度的偏差规律，进而提出建立龄期修正系数和修正模型的方法。研究目的就是提高回弹法对各种龄期混凝土的检测适用性以及推定精度，给结构强度评定赋予可靠的支撑。

【关键词】：混凝土龄期；回弹法；强度推定值；抗压强度；龄期修正

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.063

引言

回弹法属于混凝土结构强度检测当中应用较为广泛的无损检测手段，它的推定成果主要是依靠回弹值、碳化深度以及测强曲线来决定。工程中混凝土检测龄期不是固定的，不同的龄期混凝土水化程度、表层硬度、碳化状况不一样，会造成同一个测强曲线出现系统性的误差。忽略龄期的影响会造成结构强度的误判。本文以不同的龄期混凝土为研究对象，分析回弹强度推定值和实测抗压强度之间的差别规律，探究龄期修正的方法，从而提高检测结果的准确性和工程适用性。

1 不同龄期混凝土回弹强度推定的理论基础

1.1 回弹法强度推定的基本原理

回弹法主要是用回弹仪敲击混凝土表面，根据弹击杆回弹的距离和弹簧的初始长度之比来得到回弹值，从而反映混凝土表面硬度。混凝土抗压强度提高的时候，表层密实度以及抗冲击性能一般都会随之变好，回弹值也会跟着变大。实际检测时要依照规定的测区安排测点，把异常值去掉之后求出测区平均回弹值，再联系碳化深度这些参数查找或者计算测区混凝土强度换算值。由于回弹法检测的是表层力学性质，所以推定的结果不是直接测得的抗压强度，而是在回弹值和标准抗压强度之间建立统计相关关系后得到的。

1.2 混凝土龄期与表层硬度的变化关系

混凝土浇筑成型后，水泥持续发生水化反应，内部孔隙结构、浆体密实度及骨料与水泥浆界面性能均随龄期增长发生变化。早龄期阶段水化产物数量较少，毛细孔隙较多，混凝土表层硬度和抗压能力相对较低；随着龄期增加，水化硅酸钙凝胶等产物不断生成，孔隙逐渐被填充，表层结构趋于致密，回弹值随之上升。进入较长龄期后，强度增长速率逐步降低，但混凝土表面受环境作用会产生碳化，使表层硬度可能高于内部实际硬度^[1]。此时回弹值的增长并不完全代表整体抗压强度同比提高，龄期与表层硬度之间呈现明显的阶段性变化特征。

1.3 龄期差异对回弹强度推定结果的影响机制

不同的龄期下，混凝土表层硬度和内部抗压强度之间存在着一定的对应关系，但是用同一个测强曲线来推定容易出现误差。早龄期混凝土内部水化反应还未完成，表层硬度的发展同整体强度的增长存在不一致的情况，回弹值对于实际抗压强度的体现可能会出现偏低或者较大波动的情形。龄期增大以后，表面碳化、失水以及环境干湿改变都会加大局部硬度，导致回弹值增加幅度比内部强度增加幅度大得多，进而造成推定强度过高。不同的养护条件、环境温湿度、碳化程度都会使这种差别扩大，使得同一个回弹值在不同的龄期所对应的实际情况下的抗压强度也有所不同，呈现出有龄期特点的系统误差。



图1 混凝土浇筑施工现场作业图

2 不同龄期混凝土回弹强度试验设计

2.1 试验材料与试件龄期设置

试验材料应选用工程中常见的普通硅酸盐水泥、天然砂、连续级配碎石及符合要求的拌合用水，按照统一配合比制备混凝土试件，以减少材料差异对回弹结果的干扰。试件成型后采用相同振捣和养护条件，并结合混凝土强度发展规律设置7d、

14 d、28 d、60 d、90 d 及较长龄期等测试节点。各龄期均保留足够数量的平行试件,用于回弹检测和抗压强度试验。龄期划分既要覆盖早期强度快速增长阶段,也要考虑后期强度趋稳及表层碳化逐渐增强的阶段,为分析不同龄期下回弹值与实际强度之间的对应关系提供连续数据。

2.2 回弹值与抗压强度测试方法

回弹测试应在试件达到规定龄期后进行,检测前清理测试面浮浆、疏松层和明显缺陷,使测区表面保持平整、干燥。测点布置应具有代表性,并避开边缘、气孔和外露骨料位置,回弹仪保持与测试面垂直,每个测区取得规定数量的有效回弹值,对明显异常数据按检测要求剔除后计算平均值^[2]。完成回弹检测后,对同批试件进行标准抗压强度试验,记录破坏荷载并换算实际抗压强度。回弹测试与抗压试验应在较短时间内间隔内完成,保证两类数据对应同一龄期状态,使回弹值、推定强度与实测强度具备可靠的比较基础。

2.3 试验数据处理与推定偏差计算

试验数据处理以各龄期测得的有效回弹值和抗压强度为基础,对同组平行试件数据进行整理,计算回弹平均值、实测抗压强度平均值及离散程度,并依据相应测强曲线获得回弹强度推定值。推定偏差可采用推定强度与实测强度之差表示,同时计算相对误差,以判断不同龄期下误差的大小和变化方向。对各龄期数据进行横向比较,可观察误差是否随龄期增长呈连续变化或阶段性变化,并通过回归分析考察龄期、回弹值与强度偏差之间的相关关系。对异常离散点需结合试件表面状态、测试位置及养护情况进行核查,避免个别测试误差影响后续修正系数的确定。



图2 建筑工程混凝土振捣作业现场

3 不同龄期混凝土回弹强度推定值的偏差分析

3.1 不同龄期回弹值的变化规律

混凝土回弹值随龄期增长呈现较为明显的阶段性变化。早期龄期阶段,水泥水化反应速度较快,浆体结构不断形成并逐渐

密实,回弹值通常提升较为明显;达到标准龄期后,水化反应趋缓,回弹值增长幅度逐渐减小。较长龄期条件下,表层水分持续散失并受到二氧化碳侵入影响,碳化反应会进一步提高表面硬度,使回弹值仍可能维持上升趋势。不同龄期回弹值的变化速度与内部强度增长速度并不完全一致,尤其在后期阶段,表层硬化效应更加突出,回弹值对内部强度变化的敏感程度会发生改变。

3.2 推定强度与实测抗压强度的差异

依据统一测强曲线得到的回弹强度推定值,在不同龄期下与实测抗压强度之间可能存在不同程度的偏差。早期龄期混凝土内部结构尚处于快速形成阶段,回弹值反映的表层状态与整体承载能力之间对应关系相对不稳定,容易出现推定值与实测值离散较大的现象^[3]。随着龄期延长,内部强度增长逐渐趋缓,而表面干燥、碳化等作用可能继续提高回弹值,导致推定强度增长幅度超过实测抗压强度。由此形成的正偏差或负偏差具有一定龄期特征,不同龄期数据之间还可能表现出偏差幅度扩大或方向变化的现象。

3.3 龄期对回弹强度推定精度的影响

龄期变化会改变回弹值与实际抗压强度之间的统计对应关系,从而直接影响强度推定精度。标准测强曲线通常依据一定龄期范围内的试验数据建立,当检测对象超出其适用龄期时,原有相关关系可能发生偏移。早期龄期阶段受含水状态、水化程度和表层弹塑性影响,回弹数据波动相对明显;中期龄期阶段内部结构逐步稳定,推定结果通常具有较好的相关性;长期龄期阶段则更容易受到碳化深度、环境湿度和表面干燥程度影响,使回弹值产生附加增量。龄期越偏离测强曲线建立时的基准条件,推定误差产生的可能性越高。

4 不同龄期混凝土回弹强度推定值的修正方法

4.1 龄期修正系数的确定

龄期修正系数应依据各龄期回弹强度推定值与对应实测抗压强度之间的偏差关系进行确定。可将28 d作为基准龄期,对7 d、14 d、60 d、90 d及更长期龄期试验数据进行分组统计,计算各龄期推定强度与实测强度的比值、相对误差及离散程度,从中识别随龄期变化的系统性偏差。对于偏差稳定且重复性较好的龄期区间,可采用平均比值或回归拟合方式确定修正系数;对于离散性较大的数据,则应结合碳化深度、含水状态和表面硬化程度进行筛选。修正系数的取值还需控制适用强度范围,避免低强度区和高强度区采用同一系数造成新的推定误差。

4.2 回弹强度修正模型的建立

回弹强度修正模型应以龄期、回弹值和实测抗压强度之间的对应关系为基础,将原测强曲线得到的推定值作为初始量,再引入龄期影响参数进行校正。模型构建可采用线性回归、多

元回归或分龄期拟合方式,将龄期修正系数与回弹强度推定值组合形成修正表达式,并通过决定系数、平均相对误差和均方误差评价拟合效果^[4]。当不同龄期之间偏差变化较为平缓时,可采用连续函数描述龄期影响;若早龄期与长龄期偏差特征差异明显,则宜分阶段建立修正关系。模型参数应来源于足够数量的试验样本,并保留部分数据用于独立验证,以降低过度拟合对工程应用造成的影响。

4.3 修正参数与测强曲线的优化

修正参数的优化应结合不同龄期数据分布特征,对原测强曲线中回弹值与强度之间的对应关系进行重新校准。处理过程中可将实测抗压强度作为目标值,对各龄期样本的残差进行分析,重点调整偏差集中区间对应的参数权重,使修正后的曲线能够兼顾早龄期、中龄期和长龄期数据。对于碳化明显的试件,应将碳化深度作为辅助变量参与参数修正,降低表层硬度异常增大对强度推定的干扰。曲线优化后还需比较修正前后的误差分布、相关系数及离散程度,并根据不同强度等级和龄期范围设置适用边界,使测强曲线在实际检测条件下保持较稳定的推定精度。

5 龄期修正方法的效果验证与工程应用

5.1 修正前后强度推定误差对比

修正效果可通过不同龄期试件的原始推定强度、修正后推定强度与实测抗压强度进行对比判断。数据分析时,应分别统计各龄期样本的绝对误差、相对误差、平均误差及离散程度,并观察误差分布是否由集中偏高或偏低逐渐向实测值附近收敛。若未经修正的长龄期试件因表层碳化造成回弹值偏大,修正后应明显削弱由表面硬化引起的强度高估;对于早龄期试件,则需关注修正模型能否降低水化程度不足带来的波动影响。除平均误差外,还应结合最大误差和标准差进行比较,避免仅依靠平均值掩盖局部异常。通过同龄期、同强度等级条件下的对应分析,可判断龄期修正对推定精度改善的实际幅度。

5.2 龄期修正模型的适用性评价

龄期修正模型的适用性应从龄期范围、强度等级、材料组

成及环境条件等方面进行评价。模型建立所采用的试验数据具有一定边界,当实际检测对象的龄期或强度超出样本范围时,直接套用修正参数可能导致误差增加^[5]。评价过程中可选取未参与模型拟合的试件作为验证样本,将修正结果与实测抗压强度进行独立对照,重点考察不同龄期区间内的误差稳定性。对于长期处于潮湿、干燥或碳化较强环境中的构件,还应分析环境作用是否改变回弹值与强度之间的对应关系。若不同批次混凝土在水泥品种、骨料类型或配合比方面差异较大,则需要检验现有参数能否保持较好的相关性,防止模型适用范围被过度扩大。

5.3 不同龄期混凝土回弹检测的应用建议

工程应用中应根据构件实际龄期合理选择回弹测强方法,避免在不同龄期条件下机械采用同一推定关系。对于早龄期混凝土,可加强测区数量和测点布置控制,并结合养护温度、湿度及表面含水状态判断回弹数据的稳定性;达到标准龄期后的构件,可按常规测强曲线进行推定,同时核对材料类型和检测条件是否符合适用要求。对于服役时间较长的混凝土结构,应重点检测碳化深度及表层劣化情况,对回弹值偏高区域采用龄期修正参数进行校正。遇到强度等级较高、龄期过长或环境作用明显的构件,可结合钻芯法等检测结果进行验证,使回弹检测结果与结构实际强度状态保持较好的对应关系。

6 结语

混凝土龄期变化会使表层硬度、水化程度及碳化状态不断改变,进而影响回弹值与实际抗压强度之间的对应关系。试验与偏差分析表明,直接采用统一测强曲线对不同龄期混凝土进行强度推定,容易产生具有规律性的系统误差。通过引入龄期修正系数、建立回弹强度修正模型并优化测强曲线参数,可有效降低推定值与实测值之间的偏差,提高检测结果的稳定性和准确性。工程检测中还需结合混凝土实际龄期、强度等级、碳化深度、养护条件及环境影响合理选取修正参数,并对特殊龄期或复杂条件下的检测结果进行必要验证,为既有混凝土结构强度评定和质量控制提供更加可靠的数据依据。

参考文献:

- [1] 王迎军,郝朝伟,梅波,等.回弹法测试超长龄期混凝土强度的修正方法[J].公路交通科技,2023,40(11):164-171.
- [2] 李彬,何晓刚,刘建荣,等.回弹法检测早龄期混凝土抗压强度方法研究[J].沙洲职业工学院学报,2022,25(4):23-27+32.
- [3] 刘延涛,林志斌,李东旭,等.混凝土早龄期回弹强度影响因素数值分析[J].云南水力发电,2019,35(S2):179-183.
- [4] 胡良军.混凝土回弹法与钻芯法检测结果比对研究[J].实验室检测,2025,3(22):70-72.
- [5] 黄勤,金环.隧道衬砌混凝土早期强度回弹法时效性研究[C]//中国智慧工程研究会.2025 工程新技术与新方法经验交流会论文集.[出版者不详],2025:375-377.