

基于现场检测数据的海工混凝土强度 经时变化规律研究

杨帅^{1,2,3}, 应宗权^{1,2,3}, 李嘉民^{1,2}, 王翔^{1,2}

- 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
- 水工构造物耐久性技术交通运输行业重点实验室, 广东 广州 510230;
- 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 混凝土的强度是直接影响结构承载力的重要参数, 其经时变化规律是建立结构抗力变化模型的基础。针对海洋环境下混凝土结构受环境和荷载共同作用, 随服役时间推移而出现的劣化损伤问题, 本文共收集 110 例中国南方沿海服役 1~35 a 港口码头的检测案例, 以混凝土实测数据为基础, 采用相关分析和回归分析对海工混凝土强度随时间变化规律开展研究, 明确了回弹法和钻芯法检测混凝土强度的相关性, 获得了混凝土强度经时变化的计算模型, 为海工混凝土结构安全性评估提供重要参考依据。

关键词: 海工混凝土; 时变规律; 强度; 检测数据

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0039-04

Strength time-varying law of marine concrete based on field test data

YANG Shuai^{1,2,3}, YING Zongquan^{1,2,3}, LI Jiamin^{1,2}, WANG Xiang^{1,2}

- CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
- Key Laboratory of Hydraulic Structure Durability Technology for Transportation Industry, Guangzhou 510230, China;
- Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: The strength of concrete is an important parameter that directly affects the bearing capacity of structure, and its warp time-varying law is the basis of building the model of structural resistance variation. For concrete structure under the marine environment by environment and load combination, along with the service time, and the degradation of injury problems. This paper has collected 110 cases of 1-35 years serving in the southern Chinese coastal ports test cases, based on the experimental data of concrete, using correlation analysis and regression analysis of marine engineering concrete strength time-varying law. The correlation between the rebound method and the drilling core method is clarified, and the calculation model of the time-varying concrete strength is obtained, which provides an important reference for the safety evaluation of marine engineering concrete structures.

Keywords: marine concrete; time-varying law; strength; test data

海工混凝土结构所处的自然环境及使用条件较为严酷, 随结构服役时间的推移, 易出现材料老化, 或因使用不当导致的结构开裂、破损等现象, 使结构承载力下降, 严重的将影响结构的运营安全。因此需开展海工混凝土结构长期服役性

能评估, 以监测混凝土的强度。

国内众多学者研究了混凝土性能的劣化规律, 得出混凝土平均强度起初逐渐增大, 然后增长缓慢, 最后逐渐下降的规律。牛荻涛等^[1-2]收集了日本一般大气环境以及海洋环境下长期暴露试验数

收稿日期: 2022-07-21

作者简介: 杨帅 (1986—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为混凝土结构长期性能。

据和既有建筑物混凝土的强度，利用回归分析方法得出平均值和标准差的时变数学模型。颜迎迎和高向玲^[3-4]总结归纳了混凝土强度的经时变化规律，收集上海地区服役年限1~60 a民用建筑混凝土强度的检测数据，通过回弹法和钻芯法得出混凝土强度经时变化模型。李燕兵^[5]、程婷等^[6]收集华南地区珠江流域的码头检测数据进行统计分析，获得了该地区内河以及沿海的混凝土强度经时变化规律。王磊等^[7]分别采用钻芯法和回弹法对快速锈蚀钢筋混凝土构件和实桥构件的混凝土强度进行检测，探讨了两种方法测得强度的相关性。本研究采用数理统计的方法对中国南方沿海服役1~35 a港口码头的检测数据进行分析，探讨海洋环境下在役水工结构混凝土强度指标的经时变化规律，为海工混凝土结构安全性评估提供参考依据。

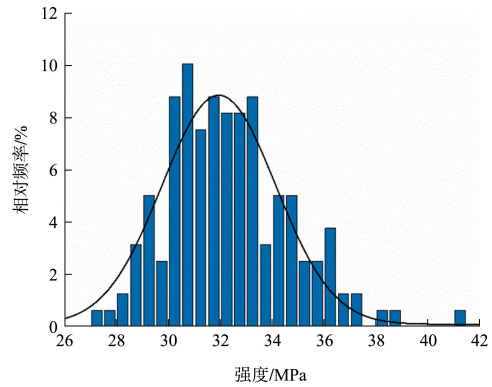
1 检测数据分析

根据不同的检测原理，混凝土的现场检测技术分为有损检测和无损检测。有损检测技术如钻芯法，得到的结果相对于无损检测更为可靠，但需进行一定程度的破损作业，对现场检测要求限制较多、工作量大，且影响后期混凝土结构的发展和维护；无损检测技术如回弹法、超声回弹法等，其现场操作性强、实用性高、快速，可直接在混凝土表面进行全面检测，较准确地判断混凝土质量状况，因此混凝土结构强度的现场检测以回弹法为主，必要时采用钻芯法。本文收集了浙江、福建、广东、广西等省份沿海港口码头检测资料共110例，包括高桩码头梁、板、桩和重力式码头胸墙等构件的混凝土检测数据，利用现场实测资料中回弹法及钻芯法的数据分别进行统计分析。

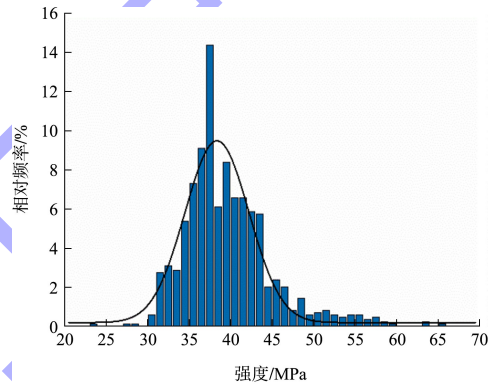
1.1 回弹法数据

现场实测资料中回弹法测得各等级混凝土强度频率分布见图1。由于回弹法测得的各混凝土等级样本数较多，用Kolmogorov-Smirnov检验法(K-S检验法)对其数据进行正态性检验，见表1。分析结果表明：在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 情况下，其渐进显著性 P 值均大于0.05，回弹法测得各等级混

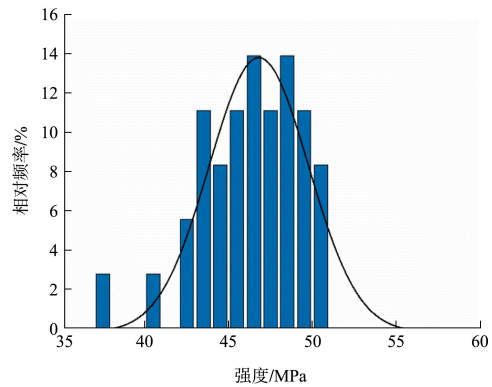
凝土强度均服从正态分布，且检测数据的期望值均大于混凝土设计强度值，数据的离散程度不大。



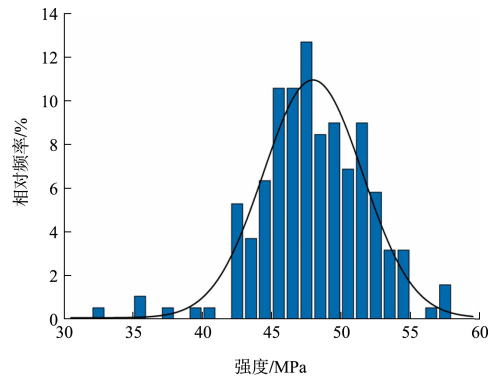
a) C25混凝土



b) C30混凝土



c) C35混凝土



d) C40混凝土

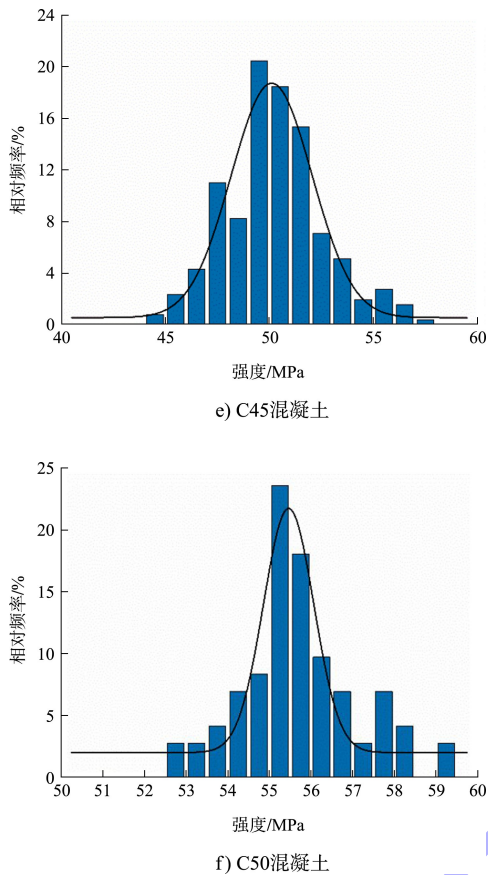


图1 回弹法各等级混凝土强度分布和正态拟合曲线

表1 回弹法数据正态性检验结果

混凝土强度等级	样本数	平均值/MPa	标准差/MPa	渐进显著性P值
C25	159	32.30	2.360	0.088
C30	834	39.63	5.367	0.101
C35	36	46.21	2.978	0.200
C40	189	47.94	3.901	0.200
C45	254	50.20	2.357	0.200
C50	72	55.71	1.382	0.123

1.2 钻芯法数据

由于实测资料中钻芯法的强度样本数相对较少, 所以采用W检验法(一种正态分布检验法)对钻芯法中各等级混凝土强度进行概率分布类型的检验, 钻芯法测得混凝土强度W检验法计算结果见表2。

根据检验水平 $\alpha = 0.05$, 得统计量W的 α 分位数 $W_{0.05} = 0.767$, 各混凝土强度等级计算得出W值均大于0.767, 且接近于1, 表明由钻芯法得到的混凝土强度服从正态分布, 进一步说明其符合正态分布的概率分布类型。

表2 钻芯法数据W检验法计算结果

混凝土强度等级	样本数	平均值/MPa	标准差/MPa	W值
C25	30	38.60	4.26	0.818
C30	193	43.04	7.71	0.861
C35	21	49.86	2.57	0.965
C40	21	61.90	3.46	0.917

1.3 强度相关性

回弹法是基于混凝土表面硬度和强度之间的相关性, 推定混凝土的抗压强度。钻芯法是对检测对象随机钻芯取样进行强度试验, 结果更为直观可靠, 但由于该方法对结构或构件造成无法逆转型破坏, 其测点数受到严格限制。对于在役海工混凝土结构, 建立回弹法和钻芯法检测强度之间的关系, 是全面掌握工程结构混凝土强度的必要条件。混凝土表面随时间劣化程度的不同, 按照 $0 a < t \leq 10 a$ 、 $10 a < t \leq 20 a$ 和 $20 a < t \leq 35 a$ (t 为混凝土龄期) 3个阶段对检测数据分类, 各龄期段的混凝土回弹法-钻芯法数据分布见图2。

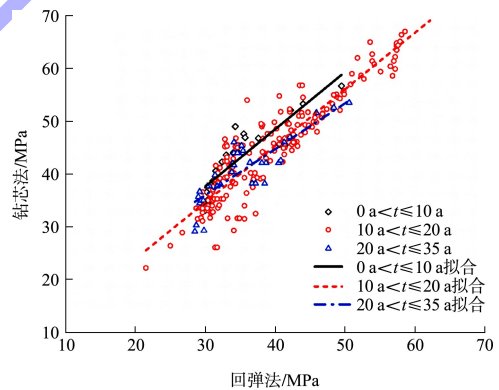


图2 混凝土回弹法-钻芯法数据分布

由图2可知, 长期服役的钢筋混凝土构件由回弹法和钻芯法测得的混凝土强度存在明显的正相关性。采用线性函数拟合各龄期段混凝土回弹法-钻芯法, 表达式为:

$$\begin{cases} f_{\text{钻芯}} = 1.08 f_{\text{回弹}} + 5.11 & (0 a < t \leq 10 a) \\ f_{\text{钻芯}} = 1.07 f_{\text{回弹}} + 2.54 & (10 a < t \leq 20 a) \\ f_{\text{钻芯}} = 0.86 f_{\text{回弹}} + 9.99 & (t > 20 a) \end{cases} \quad (1)$$

相关系数分别为0.8901、0.9238和0.8448, 表明回弹与钻芯之间具有较好的线性关系, 该回归方程是相对准确和有效的。由式(1)得出, 龄期

0~35 a 的海工混凝土结构，回弹法测得的混凝土强度普遍小于钻芯法强度，需依据使用年限加以修正。

2 强度时变规律

2.1 时变特征

以中国沿海在役海工混凝土结构为研究对象，其服役时间跨度达 35 a，且同一年限、同一类型构件的混凝土等级种类较少，混凝土绝对强度难以表征其经时变化规律。因此采取归一化处理的方式，基于回弹法的强度数据推算均值除以构件的混凝土等级，获得各服役年限下海工结构的混凝土强度归一化比值，见表 3。

表 3 海工混凝土强度归一化经时比值

服役年限/a	归一化比值	服役年限/a	归一化比值
1	1.097 1	16	1.226 0
2	1.141 4	17	1.218 9
3	1.169 5	18	1.139 0
4	1.109 8	19	1.152 7
5	1.181 6	20	1.164 0
6	1.185 2	21	1.174 0
7	1.146 0	22	1.142 9
8	1.128 6	25	1.112 2
9	1.190 1	26	1.109 0
10	1.127 9	27	1.107 3
11	1.248 0	28	1.107 0
12	1.193 5	29	1.105 0
13	1.373 0	30	1.099 3
14	1.293 7	34	1.075 0
15	1.232 0	35	1.092 4

由表 3 可知，龄期 35 a 的混凝土强度均满足设计强度要求。混凝土在初期强度逐渐增大，龄期 12~15 a 时到达峰值，较设计强度提高约 37%，随后开始下降。

2.2 时变规律

依据表 3 中龄期 1~35 a 的海工混凝土强度统计数据，使用多项式来拟合混凝土强度时变特征 $\xi(t)$ ，得回归函数如式(2)，牛荻涛和 CEB-FIP^[8] 得出的计算模型分别见式(3)(4)。

$$\xi(t) = -0.000 4t^2 + 0.011 5t + 1.117 0 \quad (2)$$

$$\xi(t) = \{ 1.248 8 \exp[-0.034 7(\ln t - 0.346 8)^2] \} \quad (3)$$

$$\xi(t) = \exp \left[s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{365t}} \right) \right] \quad (4)$$

式中： t 为时间； s 为参数，普通水泥取 0.25。

分别对式(2)的二次函数模型和牛荻涛模型、CEB-FIP 模型进行对比，见图 3，3 种模型计算的相关系数分别为 0.655 6、0.219 3 和 0.050 2，多项式拟合较好地反映了我国南方沿海海工混凝土强度的时变规律，结果表明二次函数相关性更好。不同于程婷仅以华南沿海高桩码头处于大气区或浪溅区的横、纵梁等构件为研究对象，本文的混凝土强度数据来源于南方沿海港口码头的检测数据，包括处于大气区、浪溅区、水变区及水下区的高桩码头梁、板、桩和重力式码头胸墙等构件，综合考虑了华南沿海高温、高湿和华东沿海昼夜温差大等环境因素，以及不同区域对混凝土强度的影响。

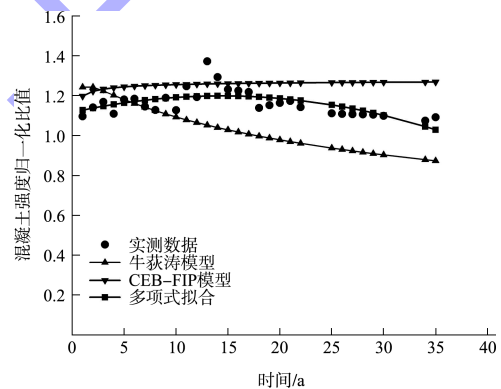


图 3 混凝土强度归一化比值拟合

3 结论

1) 1~35 a 龄期混凝土实测强度均满足强度设计要求，混凝土强度峰值出现在龄期 12~15 a，增大的峰值约为设计强度的 37%，之后随时间逐渐降低。

2) 由回弹法和钻芯法测得的混凝土强度之间存在明显的正相关性，混凝土龄期为 1~35 a，回弹法测得的混凝土强度普遍小于钻芯法。

3) 采用统计回归方法建立的海工混凝土强度经时变化模型，为海洋环境下的混凝土结构长期服役性能评估提供了依据。