

氯离子阈值分布与钢 - 混凝土界面关系的统计分析

Amit Kenny^{1,*}, Amnon Katz²

1 以色列 阿什杜德 沙蒙工程学院土木工程系

2 以色列 海法 以色列理工学院 Technion 土木与环境工程学院

摘要: 在文献中可以发现氯化物阈值的广泛变化。上述变化的可能原因包括: 阈值测定方法、水泥化学和混凝土微观结构。无论这些变化的原因是什么, 都可以使用概率方法来确保钢筋混凝土结构在特定时期的耐久性。概率方法给出了给定所需置信度的设计阈值。先前的研究通过 BSE 自动图像分析和氯化物阈值分析了钢筋周围混凝土的微观结构。研究发现, 钢筋周长上钢筋与最近混凝土实体之间的最大距离与氯化物阈值之间存在统计上的显著相关性。极值统计理论表明, 最大值数据的分布是一般极值分布 (GEVD)。对上述研究数据的重新分析发现, 正如统计理论所预期的, 最大钢 - 混凝土距离根据 GEVD 分布。因此, 由于氯化物阈值取决于钢 - 混凝土距离, 其分布与 GEVD 有关。本文的分析表明, 所接收的氯化物阈值是理论预测的 GEVD。从理论角度来看, GEVD 可能是许多其他腐蚀过程的分布。将 GEVD 识别为描述钢筋混凝土 (RC) 结构中腐蚀起始的正确分布, 可以实现更准确的防腐规划。

关键词: 钢筋混凝土; 概率设计; 氯化物阈值; 统计分析; 腐蚀

A Statistical Analysis of the Distribution of the Chloride Threshold with Relation to Steel-concrete Interface

Amit Kenny^{1,*}, Amnon Katz²

1Department of Civil Engineering, Shamoon College of Engineering, Ashdod, Israel

2Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

Abstract: A wide variation of chloride thresholds can be found in the literature. Possible causes for this variation, which were mentioned are: method of threshold determination, cement chemistry, and concrete microstructure. Regardless of the reasons for these variations, a probabilistic method can be used to ensure the durability of reinforced concrete structures for a specific period. A probabilistic method gives a threshold for design for given required confidence. A former research analyzed the micro-structure of concrete around steel rebar, by means of BSE automated image analysis, and the chloride threshold. The research found a statistical significant correlation between the maximal distance of steel from the closest concrete solid on the rebar perimeter and the chloride threshold. Theory of statistics of extreme values state, that the distribution of maxima data is bonded to be general extreme value distribution (GEVD). Re-analysis of the data from the abovementioned research found that as expected from the theory of statistics, the maximum steel-concrete distance distributed according to GEVD. Therefore, since the chloride threshold depends on the steel-concrete distance, its distribution is bonded to the GEVD. The analysis in this paper show that the received chloride threshold is GEVD as the theory predicted. From the theoretical point of view, GEVD may be the distribution of many other corrosion processes. The recognition of GEVD as the correct distribution for describing corrosion initiation in reinforced concrete (RC) structures, can enable more accurate planning for corrosion protection.

Keywords: Reinforced concrete; Probabilistic design; Chloride threshold; Statistical analysis; Corrosion

1. 引言

当钢筋表面附近的氯化物含量超过某一限值时, 称为氯化物腐蚀浓度限值 (CCCL, 在下文中也称为“阈值”), 钢发生脱钝化, 钢易受腐蚀; 事实上, 嵌入钢筋的腐蚀危险在该水平以上急剧增加^[1]。

嵌入混凝土中的钢的去钝化氯化物阈值是计算钢筋混凝土开始腐蚀之前预计经过的时间的一个重要参数。

氯化物阈值的变化会对钢筋混凝土的使用寿命以及混凝土的运输特性或覆盖混凝土厚度产生重大影响。因此, 例如, 根据 LIFE-365 模型^[2], 对于特定情况^[3], CCCL 增加 20% 将使腐蚀开始时间增加 28%, 而扩散系数减少 20% 仅使腐蚀开始的时间增加 10%。

文献中可以找到的氯化物阈值在数量级上变化^[3-4]。氯化物阈值范围的修订发现, 砂浆中总氯化物与水泥的比例为 0.2%^[5] 至 8.34%^[6]。当仅测量游离氯化物时, 阈

值范围为水泥的 0.03%^[7] 至水泥的 4%^[6]。当 Cl-/OH 用于表示氯化物阈值时, 文献^[6]中可以找到 0.12 至 20 的范围。这些变化归因于几个原因, 包括 (a) 阈值确定方法^[4], (b) 水泥化学^[8], 以及 (c) 混凝土微观结构^[3, 9-10]。无论用于氯化物阈值测定的方法或具体的水泥化学性质如何, 氯化物阈值可变性仍然很高^[4-3, 8-9]。已经证明, 氯化物阈值取决于微观结构, 浓度极化的局部腐蚀机制强化了这种依赖性^[3, 11-12]。尽管已知微观结构是影响氯化物阈值的因素, 但它目前是一个不可控因素^[13]。

然而, 概率方法可用于确保具有预定义置信度的预计腐蚀时间。换言之, 即使无法计算腐蚀的确切时间, 因为控制腐蚀的变量值分布广泛, 也可以计算具有确切置信区间的腐蚀时间^[14]。例如, 50 年内没有腐蚀的概率为 1%, 或 50 年内结构的腐蚀率低于 1%。必须知道覆盖混凝土、混凝土有效扩散系数和氯化物阈值的变化, 以便为氯化物引发腐蚀的持续时间建立完整的概率模型。覆盖混凝土的分布发表在几篇论文中^[15]。尽管如此, 尽管许多论文报告了氯化物阈值的发现, 但关于氯化物阈值分布的数据仍然不足。

对于使用概率方法, 需要有关氯化物阈值等于或大于特定值 (累积分布函数 -CDF) 的概率的信息。通过使用参数分布来创建该信息, 需要氯化物阈值的大型数据库, 特别是对于较低概率的尾部, 即对于概率为 1% 的尾部, 需要至少 100 个样本用于氯化物阈值测定。通过使用与数据拟合的已知分布来估计氯化物阈值, 可以使用较少的数据来找到尾部概率。

正态分布、对数正态分布和 Weibull 分布已用于估计氯化物阈值的分布^[4, 16-17]。Weibull 分布是由 Weibull 开发的, 用于描述依赖于过程中随机参数极值的过程结果的分布。后来, Weibull、Gumbel、Frechet、Leadbetter、Lindgren、Rootzen 和其他数学家对数学进行了改进, 以创建广义极值分布 (GEVD) 并建立其理论^[18]。GEVD 是一种代表结果组极值的分布, 即代表具有相同分布^[19-18]的不同测量集的极值, 并已用于描述各种现象, 包括点蚀^[20]、混凝土渗透性^[21]和钢筋混凝土的可靠性分析。

假设氯化物阈值由钢 - 混凝土界面中的最大缺陷决定, 即最大钢 - 混凝土距离^[3], 氯化物阈值分布由 GEVD 很好地表示。结果证实了界面的可变性是氯化物阈值的主要贡献这一假设。这意味着应使用 GEVD 来确定设计和监督的氯化物阈值。

本文提出使用 GEVD 来表示氯化物阈值的分布。GEVD 是腐蚀引发的结果, 腐蚀不是一次遍及整个钢, 而是通常观察到的最脆弱点, 即极值。

2. 方法

2.1. 混合料制备

使用以下变量生产了 16 种不同的混凝土混合物: (1)

w/c 比在 0.40 和 0.65 之间; (2) 在 0.45 或 0.52 的恒定 w/c 比下, 水 / 粉末比为 0.91 至 1.36, 其中粉末包括骨料、水泥和石灰石填料中小于 0.15mm 的所有颗粒。通过加入细石灰石粉末来调节粉末的量。混合料的设计可产生不同的 ITZ 性能。表 1 给出了混凝土混合物的组成。混凝土按照以下程序进行混合: 粗骨料与 70% 的总水预混合 1 分钟, 并在静止状态下再吸水 5 分钟。然后加入细骨料、水泥、粉末、其余水和外加剂, 再混合 3 分钟。所有混合物的坍落度均为 80mm 或更高。其他与主题无关的混合特性在其他地方详细描述^[13]。

Mix	Water	CEM I 52.5	Aggregates		Filer	HRWR
			Coarse	Fine		
W45	207	475	1384	287	0	4
W45C20	212	470	1384	184	94	5
W60	221	367	1393	355	0	0
W40	211	527	1360	249	0	5
W40B2	211	525	1356	249	0	5
W45C16	213	473	1373	204	76	5
W50	199	428	1396	339	0	2
W45C12	224	496	1374	187	60	5
W45C08	221	491	1348	223	39	4
W45C04	211	468	1360	299	19	5
W55	210	381	1352	400	0	2
W65	235	362	1390	335	0	0
W52C12	214	411	1378	279	50	4
W52C08	218	419	1378	300	34	4
W52C17	205	393	1386	325	68	6
W52C54	179	345	1163	496	208	6

表 1. 每 1m³ 的混凝土混合物成分

2.2. 试样制备

为了减少非钢 - 混凝土微观结构引起的可变性, 应特别注意确保钢筋制备均匀。所有钢筋在浇筑前都进行了类似的处理, 如下所示: 在 10% 的 H3PO4 中浸泡两小时, 在热水下清洗和刷洗, 热空气干燥, 在饱和 Ca(OH)² 溶液中浸泡 24 小时, 干燥, 并在模具中定位和固定。

为了形成不同类型的 ITZ, 为每种混凝土混合物准备了两种类型的模具, 相对于浇筑方向, 钢筋处于水平或垂直方向。试样尺寸为 150 mm x 150 mm x 230 mm, 钢筋之间的净距离为 65 mm (图 1)。为每个钢筋方向准备两个副本。所有试样在 20° C 的水中固化一周, 并在 20° C/100%RH 的条件下再固化 21 天。

浇筑和养护后, 暴露的钢筋尖端在混凝土中 20 mm 深度处进行防腐保护, 并用电线进行腐蚀测量。钢筋尖端保护方案如图 2 所示。

通过在距其中一根钢筋表面 10 ± 2 mm 处切割混凝土, 实现均匀的混凝土保护层。该钢筋暴露于盐的渗透, 而另一钢筋用作参考。靠近断面的混凝土侧表面涂有室温硫化 (RTV) 硅树脂, 以确保溶液的单向渗透 (图 1c)。

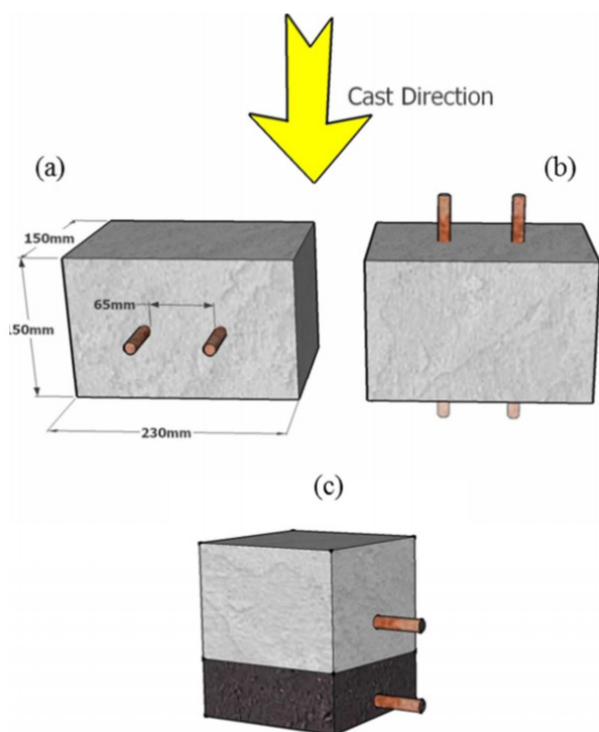


图 1. 腐蚀测量用试样的尺寸。(a) 垂直钢筋方向。(b) 水平钢筋方向。(c) 切割一个边缘后的试样, 使暴露面和受试钢筋之间的距离为 10mm。

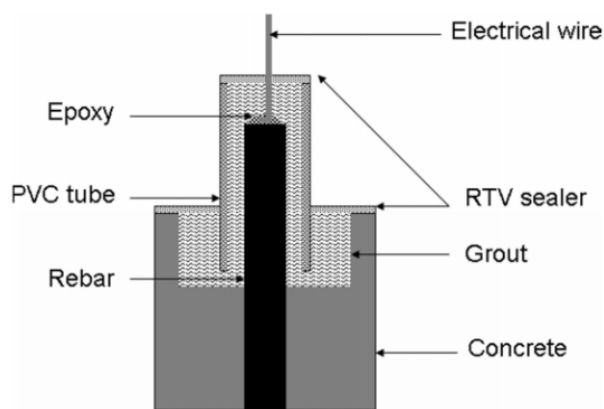


图 2. 钢筋尖端保护方案。

2.3. 腐蚀和氯化物阈值测量

对试样的切面进行循环, 包括在 6% (w/w) NaCl 溶液中浸泡两周, 深度为 5mm (图 3), 然后在 30℃、30%RH 下风干两周。通过测量每个混凝土试样的上部和下部钢筋之间的电位差来监测腐蚀起始。下部钢筋靠近氯化物源, 因此预计腐蚀将在该处开始。上部钢筋用作内部参照。针对 Ag/AgCl 半电池测量电势以进行验证。一天内的电位变化超过 100mV, 表明保护钢的钝化层破裂。

通过使用电化学阻抗谱 (EIS) 分析几个试样, 验证了表明腐蚀开始的电位偏移, Ann 和 Song^[23] 认为这是提供腐蚀最准确信息的方法。两种测量方法之间获得了良好的相关性, 验证了潜在位移结果。值得一提的是,

发现 100mV 电位降比 ASTM G109^[17] 更准确。

在检测到活性腐蚀后, 沿与腐蚀钢筋平行的线在每个试样上钻取 16 个直径为 4mm 的孔, 距离暴露表面 10mm。收集钻孔中的粉末并干燥。干燥后, 将 2g 混凝土粉末与 40ml 蒸馏水混合, 摇动 2 小时, 再静置 24 小时。通过加入 1ml 1M HNO₃ 酸化 20ml 上清液, 并使用离子选择电极装置测量溶液的氯化物浓度。氯化物含量首先确定为混凝土重量的‰ (1/1000)。

测量干燥和饱和空气中的含水量, 计算氯化物阈值为 [Cl⁻]₀。通过在干燥循环结束时称量约 300 克的混凝土 (不包括钢筋), 在水中浸泡两周, 再次称重, 在 105℃ 烘箱干燥, 测量含水量 ℃ 下放置 24 小时, 然后再次称重。相对于烘箱干重计算含水量。

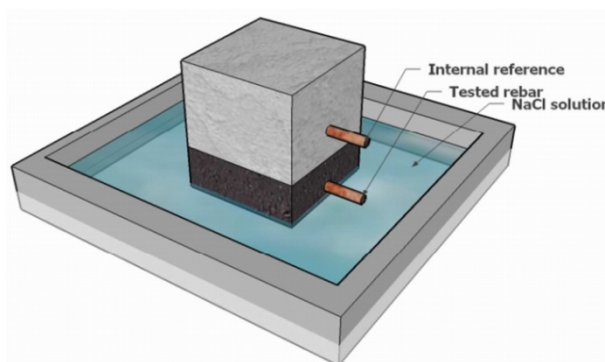


图 3. 腐蚀试验设置。

2.4. 微观结构测量

背散射电子 (BSE) 图像取自每种混合物和每种钢筋方向钢筋周围的区域。如 Kenny 和 Katz 所述, BSE 图像被自动分析^[24]。简而言之, 为每个混合 / 定向制备两个 30mm × 30mm × 5mm 的切片。垂直于钢筋纵轴制备的切片, 以显示其横截面和周围混凝土。环氧树脂浸渍和抛光后, 以 x100 倍放大率扫描整个周边, 以产生高分辨率图像, 其中每个像素对应约 0.65μm。使用改进的平均位移算法对 16 个混合料和 2 个钢筋方向的总共 1300 张 BSE 图像进行扫描和分析, 以将像素正确地聚类到正确的阶段 (混凝土、钢或空隙)。

通过使用 MATLAB 图像分析工具箱上的欧几里得距离, 计算了每个钢周边像素的钢 - 混凝土距离, 即钢筋表面到最近混凝土颗粒的距离。注意, 钢 - 混凝土距离表示从钢表面到最近的混凝土实体的距离, 包括钢表面上的固体沉积物。

2.5. 分布分析

在分离试样中发现的氯化物阈值分布以及最大钢 - 混凝土距离符合不同的已知分布。使用 MATLAB R2009b 进行分布拟合。

3. 结果和讨论

钢 - 混凝土距离的分布不同于常用的分布, 与指数分布最为相似, 不包括其极值 (图 4)。忽略钢 - 混凝土

土距离的分布, 图像中最大钢-混凝土间距的分布, 或钢筋周围可找到的最大钢筋-混凝土间距, 具有广义极值分布 (分别见图 5 和图 6)。与根据 GEVD 分布的另一变量线性相关的变量也具有 GEVD^[19]。因此, 由于钢筋周围的最大钢-混凝土距离预计将决定氯化物阈值^[2], 因此氯化物阈值本身预计将具有广义极值分布。

发现的氯化物阈值分布如表 2 所示。氯化物阈值最好用极值分布表示 (图 7 和图 8)。这在低累积概率范围内最为明显 (图 9)。如果期望的目标是确保腐蚀风险的上限, 那么低累积概率是最重要的。

例如, 如果风险水平设置为 5%, 则使用正态分布得出的氯化物阈值约为 0.9 gr Cl-/kg 混凝土, 而广义极值分布和参数分布得出的阈值分别约为 1.35 和 1.45 gr Cl-/kg 混凝土 (图 9)。

由于气候和不同的水泥成分可能会影响氯化物阈值, 因此此处给出的阈值不应直接应用, 因为它是针对特定的水泥和环境条件获得的。

对于其他影响因素, 如覆盖混凝土厚度和混凝土渗透性, 应采用相同的统计数据进行分析和确定腐蚀引发风险。由于在任何实际结构中, 由于钢的波纹、铸造框架的弯曲以及一些时间的不良实践, 覆盖混凝土的厚度是不同的, 因此腐蚀风险取决于覆盖混凝土最小的地方。GEVD 描述了特定建筑中出现这种最小厚度的概率。混凝土的渗透性也是可变的, 高度依赖于局部缺陷, 如裂缝和振动不足。临界渗透率 (即最差渗透率) 为最大渗透率; 因此, 其发生由 GEVD 描述。腐蚀起始的整个过程取决于几种特性的最大值和最小值, 每次腐蚀起始测量都会产生 GEVD。

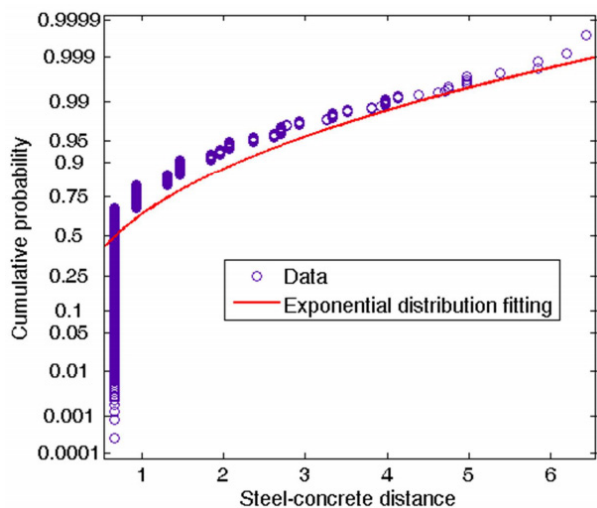


图 4. 一幅图像的钢-混凝土距离分布的概率图, 符合指数分布。

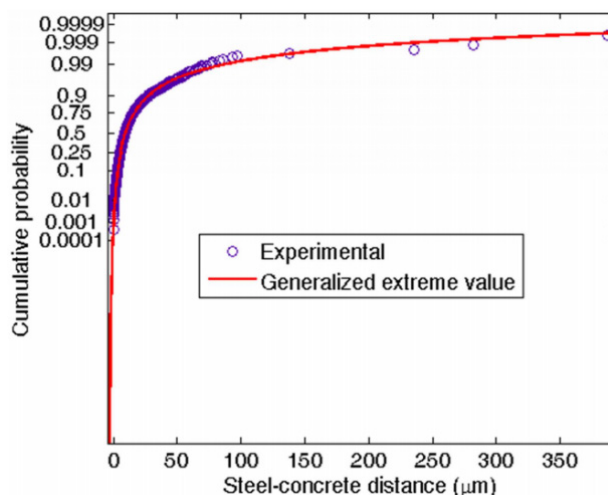


图 5. GEVD 拟合的每个图像中最大钢-混凝土距离的概率图。

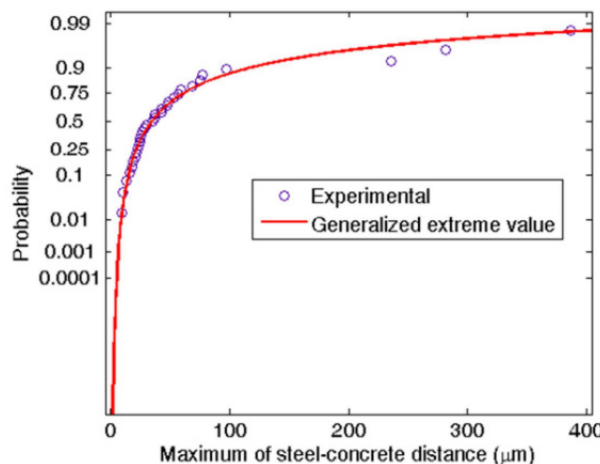


图 6. GEVD 拟合钢筋周围最大钢-混凝土距离的概率图。

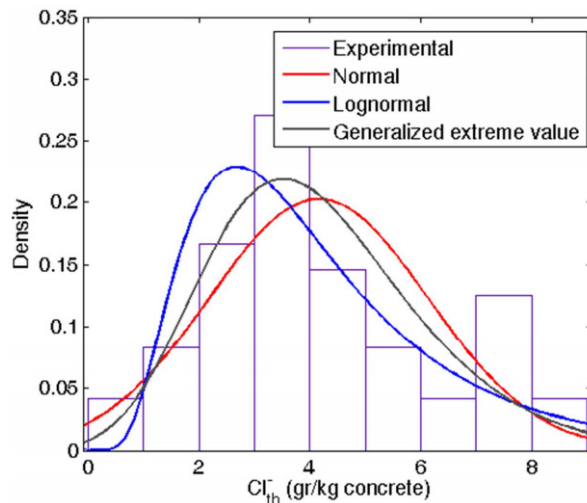


图 7. 实验 Cl_{th} 分布与一些分布相吻合。

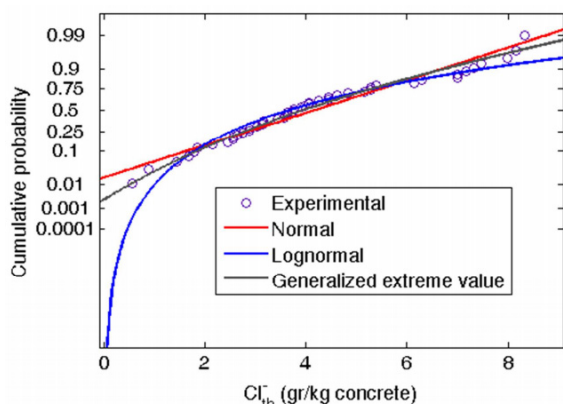


图 8. 实验值的概率图, 某些分布与之相符。

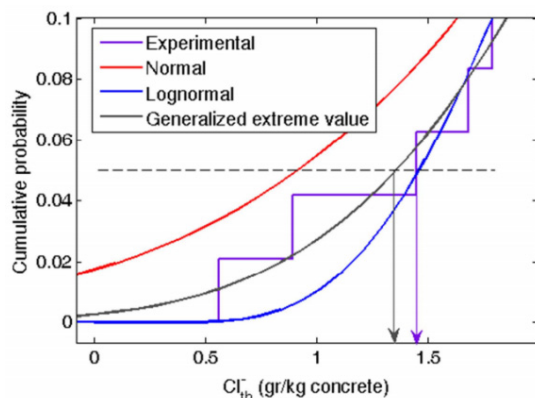


图 9. 氯化物阈值的累积概率和低概率拟合的分布。

Mix	Orientation	Repetition	% concrete (w/w)	% of cement (w/w)	[CT] (molar)
W40	H	1	4.44	1.982	1.666
W40	H	2	7.16	3.197	2.686
W40B2	H	1	2.46	1.098	0.944
W40B2	H	2	3.91	1.746	1.500
W45	H	1	2.56	1.272	1.013
W45	H	2	0.56	0.278	0.222
W45C04	H	1	5.39	2.718	2.114
W45C04	H	2	7.31	3.686	2.867
W45C08	H	1	1.79	0.848	0.644
W45C08	H	2	2.65	1.256	0.954
W45C12	H	1	4.07	1.925	1.374
W45C16	H	1	3.16	1.566	1.186
W45C16	H	2	7.47	3.701	2.804
W45C20	H	1	5.29	2.621	1.986
W45C20	H	2	1.68	0.840	0.646
W45C20	H	2	5.28	2.639	2.032
W50	H	1	0.75	0.414	0.309
W50	H	2	0.2	0.110	0.075
W52C08	H	1	2.88	1.618	1.048
W52C08	H	2	2.88	1.618	1.048
W52C12	H	1	3.73	2.120	1.398
W52C12	H	2	0.89	0.506	0.405
W52C17	H	1	0.31	0.188	0.124
W52C17	H	2	0.36	0.218	0.144

Mix	Orientation	Repetition	% concrete (w/w)	% of cement (w/w)	[CT] (molar)
W52C54	H	2	3.64	2.533	2.084
W55	H	1	1.45	0.892	0.558
W55	H	2	2.76	1.699	1.063
W60	H	1	3.03	1.928	1.077
W60	H	2	4.62	2.939	1.643
W65	H	1	7.8	5.003	2.646
W40	V	1	3.56	1.590	1.336
W40	V	2	2.56	1.143	0.960
W40B2	V	1	2.89	1.290	1.108
W40B2	V	2	3.15	1.406	1.208
W45	V	1	6.86	3.408	2.716
W45	V	2	0.31	0.154	0.123
W45C04	V	2	3.64	1.836	1.428
W45C04	V	2	3.97	2.002	1.557
W45C04	V	2	4.84	2.441	1.898
W45C08	V	1	4.07	1.929	1.465
W45C12	V	1	5.06	2.393	1.708
W45C12	V	2	3.44	1.627	1.161
W45C16	V	1	6.29	3.117	2.361
W45C16	V	2	3.59	1.779	1.348
W45C20	V	1	4.44	2.219	1.708
W45C20	V	2	4.25	2.124	1.635
W50	V	1	3.44	1.900	1.290
W50	V	2	3.75	2.071	1.406
W52C08	V	1	1.86	1.045	0.677
W52C08	V	2	7	3.932	2.547
W52C12	V	1	5.16	2.933	1.934
W52C12	V	2	5.16	2.933	1.934
W52C17	V	1	3.14	1.902	1.253
W52C17	V	2	6.14	3.719	2.450
W52C54	V	2	2.16	1.303	1.237
W55	V	1	8.33	5.127	3.207
W55	V	2	7	4.308	2.695
W60	V	2	1.42	0.903	0.505
W60	V	2	2.91	1.851	1.035
W65	V	1	7.98	5.118	2.707
W65	V	2	8.15	5.228	2.765

表 2. 测量的氯化物阈值 (游离氯化物为混凝土重量

的%)，并根据其他常用阈值表示进行计算。

4. 结论

本文给出的结果可能比钢筋混凝土的耐久性具有更广泛的应用。许多腐蚀引发过程可能表现类似，因此可以采用以下结论。

i. 混凝土中氯化物阈值的分布 (可在现场或实验室中找到) 应解释为广义极值。

ii. 通过调整 GEVD 分布，可以更准确地评估腐蚀风险。这可用于：

- 建筑物测量
- 在设计阶段评估腐蚀风险
- 标准的制定

致谢

这项工作得到 GIF I - 786-94.10/2003 的支持

参考文献

[1] Schiessl, P.; Raupach, M., "Influence of concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete," in Corrosion of Reinforcement in Concrete, London, Elsevier Applied Science, 1990, pp. 49-58.

[2] M. Ehlen, "Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides," Concrete Corrosion Inhibitors Association, the National Ready Mix Concrete Association, the Slag Cement Association, and the Silica Fume Association, 2009.

[3] Kenny, The micro structure of concrete around embedded steel influence on the chloride threshold for chloride induced corrosion, Haifa: Technion - Israel Institute of Technology, 2012.

[4] M. Alonso and M. Sanchez, "Analysis of the variability of chloride threshold values in the literature," Materials and Corrosion, vol. 60, no. 8, p. 631-637, 2009.

[5] L. Bertolini, F. Bolzoni, T. Pastore and P. Pedferri, in Corrosion of Reinforcement in, Cambridge, SCI, 1996, p. 389.

[6] C. Alonso, M. Castellote and C. Andrade, "Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements," Electrochimica Acta, vol. 47, no. 21, 2002.

[7] S. S. Y. O. B. Jang, "Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures," Magazine of Concrete Research, vol. 55, no. 2, 2003.

[8] Andrade, C.; Keddarn, M.; Novoa, X. R.; Perez, M. C.; Rangel, C. M.; Takenouti, H., "Electrochemical behavior of steel rebars in concrete: influence of environmental factors and cement chemistry," Electrochimica Acta, vol. 46, no. 24-25, pp. 3905-3912, 2001.

- [9] Glass, G. K.; Reddy, B., “The Influence of the Steel Concrete Interface on the Risk of Chloride Induced Corrosion Initiation,” *Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures*, COST 521, Final Workshop, pp. 227–232, 18–19 February 2002.
- [10] T. Vidal, A. Castel and R. Francois, “Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment,” *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 11, pp. 1551–1561, 2007.
- [11] J. Galvele, “Transport processes and the mechanism of pitting of metals,” *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 123, no. 4, pp. 464–474, 1976.
- [12] Alonso, C.; Andrade, C.; Rodriguez, J.; Diez, J. M., “Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 31, no. 211, pp. 435–441, 1996.
- [13] Kenny, Amit; Katz, Amnon, “Statistical relationship between mix properties and the interfacial transition zone around embedded rebar,” *Cement & Concrete Composites*, vol. 60, pp. 82–91, 2015.
- [14] C.-h. LU, W.-l. JIN and R.-g. LIU, “Probabilistic Lifetime Assessment of Marine Reinforced Concrete with Steel,” *Chinese Ocean Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 305–318, 2011.
- [15] F. Lollini, E. Redaelli and L. Bertolini, “Analysis of the parameters affecting probabilistic predictions of initiation time for carbonation - induced corrosion of reinforced concrete structures,” *Materials and Corrosion*, vol. 63, no. 12, pp. 1059–1068, 2012.
- [16] R. Polder, “Critical chloride content for reinforced concrete and its relationship to concrete resistivity,” *Materials and Corrosion*, vol. 60, no. 8, p. 623–630.
- [17] X. S. W. H. H. B. L. Hu Yu, “Laboratory investigation of reinforcement corrosion initiation and chloride threshold content for self-compacting concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 10, pp. 1507–1516, 2010.
- [18] S. Coles, *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Verlag London Berlin Heidelberg: Springer, 2001.
- [19] S. N. Kotz, *Extreme Value Distributions: theory and applications*, London: Imperial College Press, 2000.
- [20] Darmawan, M. S; Stewart, M. G., “Effect of pitting corrosion on capacity of prestressing wires,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 59, no. 2, pp. 131–139, 2007.
- [21] Alarcon-Ruiz, L. A.; Brocato, M. B., “Size effect in intrinsic permeability measurements,” in *Conference of American Nuclear Society – International Congress on Advances in Nuclear Power Plants*, 2005.
- [22] Liang, M.-T.; Lan, J.-J., “Reliability analysis of an existing reinforced concrete wharf laden in a chloride environment,” *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A/ Chung-kuo Kung Ch’ eng Hsueh K’ an*, vol. 26, no. 5, pp. 647–658, 2003.
- [23] Ann, K. Y.; Song, H.-W., “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete,” *Corrosion Science*, vol. 49, pp. 4113–4133, 2007.
- [24] Kenny and A. Katz, “Characterization of the interfacial transition zone around steel rebar by means of the mean shift method,” *Materials and Structures/Materiaux Et Constructions*, vol. 45, no. 5, pp. 639–652, 2012.
- [25] T. Luping and J. Gulikers, “On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 37, pp. 589–595, 2007.