

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³³,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	Aggregates		Filer	HDWD
		52.5	Coarse	Fine	rner	
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。





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AglAgCl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1ml1MHNO3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-]。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 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 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)	[Cl ⁻] (molar)	
W40	Н	1	4.44	1.982	1.666	1.915
W40	Н	2	7.16	3.197	2.686	3.088
W40B2	Н	1	2.46	1.098	0.944	1.089
W40B2	Н	2	3.91	1.746	1.500	1.730
W45	Н	1	2.56	1.272	1.013	1.207
W45	Н	2	0.56	0.278	0.222	0.264
W45C04	Н	1	5.39	2.718	2.114	2.462
W45C04	н	2	7.31	3.686	2.867	3.339
W45C08	н	1	1.79	0.848	0.644	0.776
W45C08	н	1	2.65	1.256	0.954	1.150
W45C12	н	2	4.07	1.925	1.374	1.566
W45C16	н	1	3.16	1.566	1.186	1 347
W45C16	н	1	7 47	3 701	2 804	3 184
W45C16	н	2	5.29	2 621	1.986	2 255
W45C20	н	1	1.68	0.840	0.646	0.756
W45C20		2	5.28	2.630	2.022	2 277
W50	u	1	0.75	0.414	0.281	0.309
W50	u	2	0.75	0.110	0.075	0.082
W52C08	u u	ĩ	2.89	1.618	1.048	1.206
W52C08	n u	2	2.00	1.618	1.048	1.200
W52C08	n	2	2.00	1.018	1.048	1.200
w52C12	н	1	3.73	2.120	1.398	1.697
w52C12	н	2	0.89	0.306	0.334	0.405
wszci7	н	1	0.31	0.188	0.124	0.141
W52C17	н	2	0.36	0.218	0.144	0.164
Mix W52C54	Orientation	Repetition	% concrete (w/w)	% of cement (w/w)	[CT] (molar)	2.256
W55	 u	1	1.45	0.892	0.558	0.645
WEE			0.76	1.600	1.062	1.007
W 55 W 60	n u	2	2.70	1.099	1.003	1.227
W60		2	4.62	2.020	1.642	1.230
WOO		-	4.02	2.939	1.045	1.873
W65	н		7.8	5.003	2.040	2.885
W40		1	3.30	1.590	1.330	1.555
W40	v	2	2.56	1.143	0.960	1.104
W40B2	v	1	2.89	1.290	1.108	1.279
W40B2	V	2	3.15	1.406	1,208	1.394
W45	v	1	6.86	3.408	2.716	3.236
W45	v	2	0.31	0.154	0.123	0.146
W45C04						
W45C04	v	2	3.64	1.836	1.428	1.663
1140004	v v	2 2	3.64 3.97	1.836 2.002	1.428 1.557	1.663 1.813
W45C04	v v v	2 2 2	3.64 3.97 4.84	1.836 2.002 2.441	1.428 1.557 1.898	1.663 1.813 2.211
W45C04 W45C08	v v v v	2 2 2 1	3.64 3.97 4.84 4.07	1.836 2.002 2.441 1.929	1.428 1.557 1.898 1.465	1.663 1.813 2.211 1.765
W45C04 W45C08 W45C12	v v v v v	2 2 2 1	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947
W45C04 W45C08 W45C12 W45C12	V V V V V V	2 2 2 1 1 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323
W45C04 W45C08 W45C12 W45C12 W45C16	V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681
W45C04 W45C08 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16	V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29 3.59	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530
W45C04 W45C08 W45C12 W45C16 W45C16 W45C16 W45C20	V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29 3.59 4.44	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.348	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.999
W45C04 W45C08 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20	V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29 3.59 4.44 4.25	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.708 1.635	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.999 1.913
W45C04 W45C08 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50	V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29 3.59 4.44 4.25 3.44	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.124 1.900	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.708 1.635 1.290	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.999 1.913 1.417
W45C04 W45C08 W45C12 W45C16 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W50	V V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29 3.59 4.44 4.25 3.44 3.75	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.219 2.124 1.900 2.071	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.708 1.635 1.290 1.406	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.999 1.913 1.417 1.545
W45C04 W45C08 W45C12 W45C16 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W50 W52C08	V V V V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29 3.59 4.44 4.25 3.44 3.75 1.86	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124 1.900 2.071 1.045	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.708 1.635 1.290 1.406 0.677	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.999 1.913 1.417 1.545 0.779
W45C04 W45C08 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W50 W50 W52C08 W52C08	V V V V V V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29 3.59 4.44 4.25 3.44 3.75 1.86 7	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124 1.900 2.071 1.045 3.932	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.708 1.348 1.708 1.348 1.708 1.635 1.290 1.406 0.677 2.547	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.993 1.913 1.417 1.545 0.779 2.932
W45C04 W45C08 W45C12 W45C16 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W50 W50 W50 W52C08 W52C08	V V V V V V V V V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29 3.59 4.44 4.25 3.44 3.75 1.86 7 5.16	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124 1.900 2.071 1.045 3.932 2.933	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.708 1.635 1.290 1.406 0.677 2.547 1.934	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.999 1.913 1.417 1.417 1.454 0.779 2.932 2.348
W45C04 W45C02 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C12	V V V V V V V V V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.44 6.29 3.59 4.44 4.25 3.44 4.25 3.44 3.75 1.86 7 5.16 5.16	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124 1.900 2.071 1.900 2.071 1.045 3.932 2.933	1.428 1.557 1.587 1.465 1.708 1.465 1.708 1.548 1.708 1.635 1.290 1.406 0.677 2.547 1.934 1.934	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.999 1.913 1.417 1.545 0.779 2.932 2.932 2.348
W45C04 W45C08 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W50 W50 W50 W52008 W52C08 W52C08 W52C08 W52C12 W52C12	V V V V V V V V V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	3 64 3 97 4 84 4 407 5 06 3 44 6 29 3 50 4 44 4 25 3 44 3 75 1 86 7 5 16 5 16 5 16 5 16	1836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.2124 2.124 1.900 2.071 1.045 3.932 2.933 2.933 2.933	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.635 1.200 1.406 0.677 2.547 1.934 1.934 1.934 1.934	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.999 1.913 1.417 1.545 0.779 2.932 2.348 2.348 2.348
W45C04 W45C02 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W45C20 W50 W52008 W52C08 W52C08 W52C08 W52C12 W52C12 W52C17	V V V V V V V V V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	3.64 3.97 4.84 4.06 3.06 5.06 6.29 3.59 4.44 4.25 3.44 4.25 3.44 4.45 3.75 1.86 7 5.16 3.14 6.14	1.836 2.002 2.241 1.929 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124 2.190 2.124 1.900 2.901 2.901 2.933 1.902 2.933 1.902 3.719	1.428 1.557 1.557 1.465 1.708 1.61 2.361 1.548 1.635 1.200 1.406 0.677 2.547 1.934 1.934 1.934 1.253 2.450	1.663 1.813 2.211 1.765 1.323 2.681 1.530 1.530 1.530 1.530 1.999 1.913 1.417 1.545 1.417 1.545 2.932 2.348 2.348 1.431 2.799
W45C04 W45C04 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W50 W50 W50 W52C08 W52C08 W52C08 W52C12 W52C12 W52C17 W52C17 W52C17	V V V V V V V V V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	3.64 3.97 4.87 5.06 6.29 3.59 4.84 4.25 3.54 4.84 3.75 1.86 7 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124 1.045 3.933 2.934 2.934 2.935 2.933 2.933 2.933 2.933 2.935 2.935 2.935 2.935 2.933 2.9355 2.9355 2.9355 2.93555 2.93555555555555555555555555555555555555	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.348 1.348 1.358 1.390 1.406 0.677 2.547 1.934 1.934 1.253 2.450 1.273	1.663 2.211 2.211 1.947 1.947 2.681 1.949 1.913 1.913 1.417 1.545 0.779 2.932 2.348 2.348 2.348 1.431 2.799
W45C04 W45C04 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W50 W50 W50 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C12 W52C17 W52C17 W52C17 W52C54 W55	v v v v v v v v v v v v v v v v v v v	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.84 6.29 4.84 6.29 4.84 4.25 3.84 4.25 3.75 1.86 7 5.16 3.14 5.16 3.14 2.16 2.16 2.16 2.16 3.14	1.836 2.002 2.441 1.929 1.627 3.1627 2.193 1.627 2.193 2.124 2.124 2.124 2.000 2.071 1.045 3.932 2.933 1.902 3.719 1.503 5.127	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.708 1.635 1.290 1.406 0.677 2.547 1.934 1.934 1.934 1.934 1.934 1.253 2.450 1.237 3.907 3.	1.663 1.813 2.211 1.947 1.347 1.347 1.347 1.347 1.545 0.779 2.932 2.348 1.417 1.545 0.779 2.932 2.348 1.431 2.799 1.339 3.703
W45C04 W45C02 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C12 W52C12 W52C17 W52C17 W52C17 W52C54 W555		2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.54 4.25 3.44 4.25 3.44 4.25 3.44 4.25 3.45 3.75 1.86 7 5.16 5.16 5.16 5.14 2.16 5.14 2.16 5.14 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124 1.045 3.932 2.933 2.934 2.939 2.939 2.939 2.219	1.428 1.557 1.557 1.888 1.465 1.708 1.161 2.361 1.348 1.708 1.635 1.635 1.635 1.635 1.635 1.635 1.635 1.290 0.677 2.547 1.934 1.253 2.450 1.257 2.450	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.510 1.913 1.417 1.545 0.779 2.348 2.348 2.348 2.348 2.348 1.431 2.799 3.703 3.703
W45C04 W45C08 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C12 W52C17 W52C17 W52C17 W52C17 W52C17 W52C17 W52C54 W55 W55	v v v v v v v v v v v v v v v v v v v	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 2	3 64 3 97 4 84 4 807 5 06 3 34 4 82 3 34 4 82 3 34 4 44 3 34 3 34 3 34 3 34 3 34 3 34 3 34 3 34 3 16 3 34 3 16 3 34 3 16 3 34 3 16 3 34 3 16 3 34 3 16 3 34 3 33 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 779 2.219 2.124 1.900 2.2124 2.071 1.045 2.2071 1.045 2.933 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 1.902 2.903 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.903 2.902 2.902 2.903 2.902	1.428 1.557 1.898 1.465 1.465 1.708 1.707 1.753 2.450 1.233 2.450 1.237 2.655 1.207 2.655 1.207 2.655 1.207 2.657 1.253 2.450 1.255 2.655 1.207 2.655 1.207 2.655 1.207 2.655 1.207 2.655 1.207 2.655 1.207 1.255 1.207 1.255 1.207 1.255 1.207 1.255 1.207 1.255 1.	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.347 1.347 1.545 1.530 1.999 1.913 1.417 1.545 2.932 2.348 1.431 2.799 1.339 3.703 3.112 0.556
W45C04 W45C04 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W45C20 W50 W5208 W52C08 W52C08 W52C08 W52C12 W52C17 W52C17 W52C17 W52C17 W52C17 W52C54 W55 W60	V V V V V V V V V V V V V V V V V V V	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.54 4.25 3.44 4.25 3.44 4.25 3.44 4.25 3.75 1.86 7 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16	1836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124 1.900 2.124 2.933 1.902 2.934 1.929 2.194 1.929 2.194 2.193 2.194 2.194 2.194 2.194 2.194 2.193 2.194 2.193 2.194 2.193 2	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.601 1.708 1.635 1.290 1.406 0.677 1.934 1.406 0.677 1.934 1.293 2.547 1.934 1.253 2.450 1.934 1.253 2.450 0.505	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.999 1.913 1.417 1.545 0.779 2.932 2.348 2.348 2.348 1.431 2.799 3.703 3.703 3.712
W45C04 W45C04 W445C12 W445C12 W445C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W50 W50 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C17 W	v v v v v v v v v v v v v v v v v v v	2 2 2 1 1 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 2 2	3.64 3.67 4.84 4.07 5.06 3.84 4.25 3.84 4.25 3.84 3.84 4.25 3.84 3.84 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16 5.16	1.836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 2.219 2.124 1.900 2.219 2.124 1.900 2.219 2.124 1.900 2.219 2.933 1.902 2.933 2.933 1.902 2.933 2.933 1.902 2.933 2.933 2.934 2.9355 2.9355 2.9355 2.9355 2.93555 2.9355555555555555555555555555555555	1.428 1.557 1.858 1.465 1.708 1.708 1.708 1.708 1.301 1.406 1.708 1.431 1.635 1.635 1.635 1.635 1.635 1.635 1.635 1.934 1.934 1.230 1.934 1.233 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.934 1.235 1.255 1.2355 1.235 1.2355 1.2355 1.2355 1.2355 1.2355 1.2355 1.2355 1.25	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.323 2.681 1.530 1.913 1.417 1.545 0.779 2.348 2.348 1.431 2.799 1.339 3.705 3.
W45C04 W45C08 W45C12 W45C12 W45C16 W45C16 W45C20 W45C20 W50 W50 W52C08 W52C08 W52C08 W52C08 W52C12 W52C17 W	v v v v v v v v v v v v v v v v v v v	2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 1 2 2 2 1 2 2 2 1 2 2 2 2 1 2	3.64 3.97 4.84 4.07 5.06 3.59 4.44 4.25 3.44 4.25 3.44 4.25 3.44 3.75 1.86 7 5.16 3.14 2.16 5.16 3.14 2.16 4.23 7 7 4.23 7 7 4.23 7 7,85 5.16 3.14 2.16 3.14 2.16 3.14 2.16 3.14 2.16 3.14 2.16 3.14 3.14 3.14 3.14 3.14 3.14 3.14 3.15 3.14 3.15 3.15 3.15 3.15 3.15 3.15 3.15 3.15	1836 2.002 2.441 1.929 2.393 1.627 3.117 1.779 2.219 2.124 1.900 2.124 2.901 1.645 3.932 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 1.903 2.933 2.933 2.933 2.933 2.933 2.9355 2.9355 2.9355 2.9355 2.93555 2.93555555555555555555555555555555555	1.428 1.557 1.898 1.465 1.708 1.161 1.708 1.655 1.290 1.635 1.290 1.406 0.677 1.934 1.635 2.457 1.934 1.253 2.450 1.237 3.207 3.207 3.207 3.207 2.665 0.605 2.707	1.663 1.813 2.211 1.765 1.947 1.223 2.681 1.530 1.999 1.913 1.91417 1.543 2.924 2.348 2.348 2.348 2.348 2.349 3.703 3.112 0.575 1.181 2.954

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:

a. 建筑物测量

b. 在设计阶段评估腐蚀风险

c. 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 andLife-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. Pedeferri, 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.; Keddam, 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," Electrochemica 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 Hsuch 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– 5958, 2007.