

論文 都市高速道路のコンクリート橋脚における塩化物イオンの拡散予測

鷲見 高典^{*1}・片山 真^{*2}・梅原 秀哲^{*3}

要旨：都市高速道路のコンクリート橋脚を対象に塩化物イオン含有量の調査を実施し、環境条件、供用年数、部材、試料の採取位置等について整理し、50基の80箇所から採取した試料による調査結果からフィックの第2法則を用いて見かけの拡散係数および表面の塩化物イオン濃度を求めて、この結果を統計解析することによって都市高速道路のコンクリート橋脚における塩化物イオンの拡散予測の検討を行い、この劣化予測に必要な定数を推定した。

キーワード：コンクリート橋脚、凍結防止剤、塩化物イオン、フィックの第2法則、統計解析

1. はじめに

これまでの塩害による劣化予測の研究は、海岸等で暴露試験を行って鉄筋の劣化速度や劣化状態を観察し、それをもとに劣化予測が行われている。また、暴露試験の場合には劣化促進試験であり、年月とともに劣化が進行した実構造物とは劣化状態が異なると思われる。

これまでに都市高速道路のコンクリート橋脚50基を対象に、80箇所から試料を採取して塩化物イオン含有量の調査を実施した。この結果、最外縁の鉄筋位置で腐食の発生限界とされる 1.2kg/m^3 を超える塩化物イオンが含まれている場合があった。そこで、現存する配合報告書から練混ぜ時の塩化物含有量を調査すると、全ての橋脚にJIS A 5308が適用されており、1986年以前のものでも塩化物含有量は多くて 0.02kg/m^3 程度であった。また、使用されていた骨材の産地が揖斐・長良川、木曽川、瀬戸等とのことから多量の塩化物イオンが練混ぜ時に混入しているとは考えにくい。竣工後に塩化物イオンの侵入が考えられる要因としては、冬期に融雪あるいは路面凍結を防止するために散布される塩化物系の凍結防止剤が挙げられる。冬期路面管理のために塩化物系の凍結防止剤が散布される地域では、散布時の飛沫、伸縮装置部からの漏水等により桁端、壁高欄、橋脚天端等の鋼およびコンクリート表面にこれが付着し、やがて鋼材の腐食を招く劣化要因として懸念されている¹⁾。今回、調査を実施した都市高速道路の現地の状況および竣工図書を見ると、伸縮装置部からの漏水、本線とランプの近接箇所における構造上の隙間等から、床版、壁高欄、橋脚天端等へ凍結防止剤が飛散・浸透している可能性が推察される。

このようなことから、都市高速道路のコンクリート橋脚を対象に実施した塩化物イオン含有量の調査結果からフィックの第2法則を用いて見かけの拡散係数および表面の塩化物イオン濃度を求め、暴露試験の結果をもとに提案されている見かけの拡散係数および表面の塩化物イオン

濃度と比較を行った。そして、これに基づいて得られた結果を統計解析し、都市高速道路のコンクリート橋脚における塩化物イオンの拡散予測のために必要となる定数の定量化を行った。

2. 塩化物イオン含有量の調査

2.1 調査対象とした構造物

調査対象とした構造物は、1973～1991年に建設された鉄筋コンクリート構造による都市高速道路の橋脚で、供用期間は調査時点で13～32年経過していた。

橋脚の形状は、T型単柱あるいは π 型ラーメン柱で端支点、すなわち、桁の伸縮装置が橋脚の頭上に位置する橋脚とした。これは、構造や施工の欠陥、止水材の老朽化等により漏水の原因となる隙間が伸縮装置取付け部付近に生じやすいことからこのような橋脚を対象とした。

上部構造の構造形式は鉄筋コンクリート床版鋼鈑桁あるいは箱桁で、伸縮装置は一部フィンガージョイントもあるが、そのほとんどがゴムジョイントであった。また、適用された設計基準および竣工図からは、JIS A 5308による $\sigma_{sk}=27\text{N/mm}^2$ あるいは 35N/mm^2 、スランプ8cm、粗骨材の最大寸法25mmの普通セメントによるコンクリートが標準的に使用されていた。

2.2 採取試料と試験方法

調査した橋脚は兵庫県南部地震以前に建設されており、その全てが鋼板巻立てにより柱部分が耐震補強されている。

調査用の試料は、図—1のようにT型単柱を例に示すと梁の上面、下面、側面および端面の位置において、塩化物イオンが浸入しやすいと思われる雨水などの流下跡、浮き・はく離等の変状が認められる箇所から採取した。調査用の試料は、このような変状が認められた4つ

*1 名古屋高速道路公社 保全施設部 保全課 工修 (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科 都市循環システム専攻 (正会員)

*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 教授 Ph.D. (正会員)

の面から採取しているため、今回の計測結果の分析においては1基当たり複数の調査結果があることもある。

試料の採取箇所数と調査時点の供用期間による分布を図-2に示す。調査した橋脚の最も古い竣工年次は1973年で、最も近年に調査した年次が2007年である。試料の採取は、変状が認められた橋脚から行っており、供用期間が長くなるとともに橋脚数および箇所数が多くなる傾向にあることが解る。つまり、供用区間の有無にも関わるが、供用年数とともに変状が生じやすくなることが推察される。図-2に示す採取位置数の累積率からすると供用期間25年以下で概ね半数を占め、調査時点の供用期間13~32年の中央にあたる22年よりも中央が若干偏っている。また、供用開始時点から試料採取時点の供用期間を用いて整理しているため、データがない供用期間や必ずしも供用期間とともに採取箇所数が増えているものと思われる。

採取方法は構造物に与える影響を最小限に止めたかったため、JSCE-G573-2003「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法(案)」に準拠し、直径2cmのドリルにより0~2cm, 2~4cmおよび4~6cmの深さから削孔粉を採取した。そして、これらを深さ1cm, 3cmおよび5cmにおける試料とし、JCI-SC5に準拠して電位差滴定法により塩化物イオン含有量を計測した。

3. 表面の塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数の算出

各調査箇所の表面の塩化物イオン濃度（以下「 C_0 」という。）および見かけの拡散係数（以下「 D 」という。）の算出には、コンクリート標準示方書²⁾より式(1)の表面の塩化物イオン濃度が一定として解いたフィックの第2法則に基づく拡散方程式を用いた。ただし、見かけの拡散係数は $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7} (\text{cm}^2/\text{s})$ である³⁾とされていることから、 D の単位には cm^2/s を適用してこの範囲にあることを確認しやすくし、分析を行うものとした。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (1)$$

ここに、

$C(x, t)$: 深さ x (cm), 時刻 t (s) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_0 : 表面の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm^2/s)

erf : 誤差関数

調査対象橋脚、試料を採取した時点の供用期間、各試料の塩化物イオン含有量並びにこれらより式(1)から算出した C_0 および D を表-1に示す。

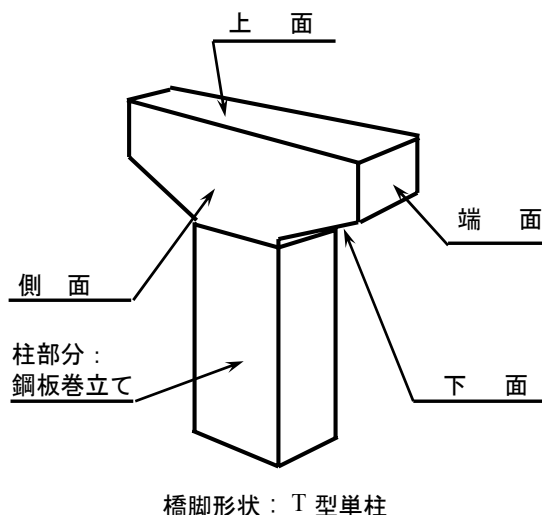


図-1 調査用試料の採取位置

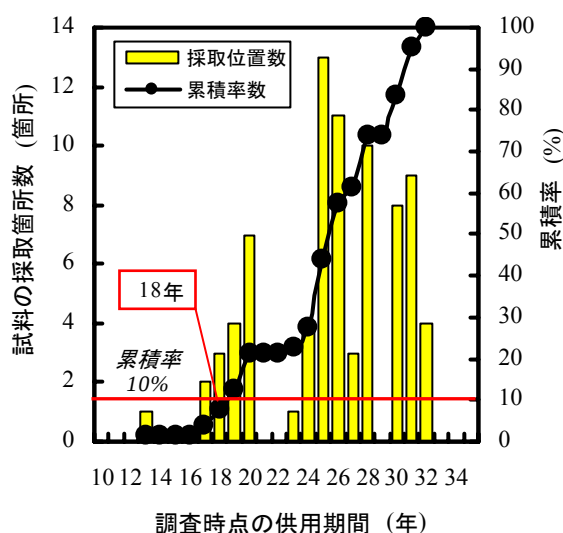


図-2 調査を実施した橋脚数と供用期間

4. C_0 あるいは D と供用期間の関係

調査結果から算出した C_0 あるいは D と供用期間の関係をそれぞれ図-3、図-4に示す。値の散布状況を見ると、試料を採取した4つの面ともに供用期間と C_0 あるいは D との関係から、相関性を見出すことは難しいものと思われる。

ここで、金谷ら⁴⁾は、供用初期では C_0 は増加し、 D は減少し、それぞれ時間と共にある値に漸近すると報告している。これは、北海道の日本海沿岸部における暴露試験の結果によるものであり、内陸部においてこのような研究報告は見あたらない。しかしながら、調査対象とした都市高速道路では、凍結防止剤の1997~2006年の平均散布量は $0.758 \text{kg}/\text{m}^2/\text{年}$ 程度であり、塩化物イオンの付着量は海水の飛沫帯やその周辺の海岸線部においても $0.01 \sim 1 \text{kg}/\text{m}^2/\text{年}$ の範囲にある⁵⁾との研究報告から、調査

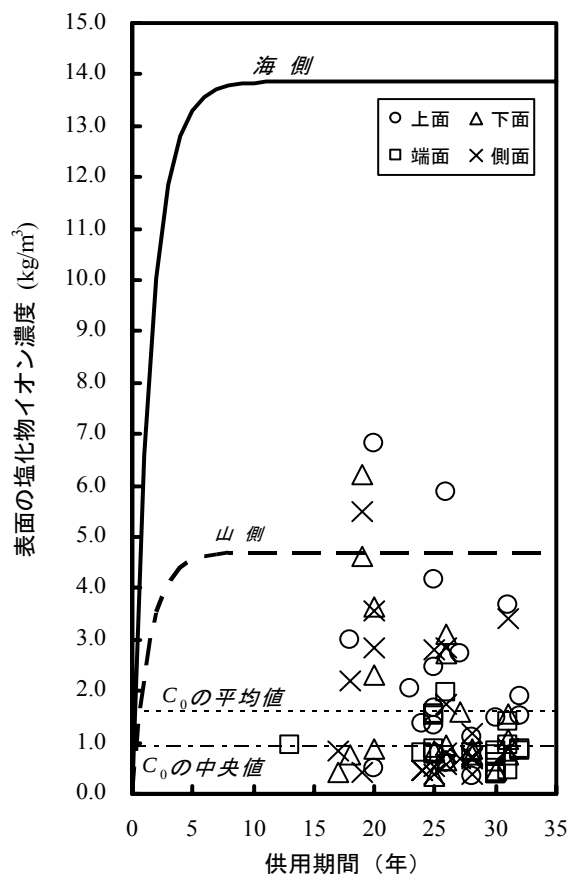
表－１ 各調査箇所の塩化物イオン濃度測定結果とこれより算出された C_0 と D

橋脚番号	供用期間	採取位置	各深さの塩化物イオン含有量 (kg/m ³)			表面の塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m ³)	見かけの拡散係数 D $\times 10^{-8}$ (cm ² /s)	橋脚番号	供用期間	採取位置	各深さの塩化物イオン含有量 (kg/m ³)			表面の塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m ³)	見かけの拡散係数 D $\times 10^{-8}$ (cm ² /s)
			1cm	3cm	5cm						1cm	3cm	5cm		
R 30	23	上面	1.953	1.304	1.277	2.049	5.321	#3 139	24	端面	0.760	0.580	0.530	0.802	7.244
R 102	18	上面	2.029	0.441	0.393	2.980	0.486	#3 165	25	端面	1.310	0.852	0.636	1.508	2.179
R 59	20	上面	0.421	0.298	0.187	0.490	2.629	#3 169	25	端面	1.326	0.882	0.538	1.558	1.764
#2 14	20	上面	5.780	4.887	2.732	6.815	3.385	#3 170	25	端面	0.790	0.610	0.460	0.878	3.845
#3 75	26	上面	0.545	0.451	0.348	0.600	5.103	#3 207	25	端面	0.663	0.586	0.363	0.766	3.726
#3 85	26	上面	5.051	2.616	2.023	5.867	1.350	#3 233	30	端面	0.770	0.720	0.540	0.850	6.984
#3 125	27	上面	1.971	0.576	0.414	2.716	0.432	#3 234	30	端面	0.620	0.340	0.220	0.739	1.062
#3 139	24	上面	1.240	1.010	0.760	1.374	4.824	#3 235	30	端面	0.370	0.250	0.240	0.390	3.998
#3 164	25	上面	3.588	2.462	1.572	4.169	2.012	#3 238	30	端面	0.460	0.160	0.120	0.594	0.534
#3 168	25	上面	1.486	1.367	0.970	1.665	6.250	#3 241	30	端面	0.350	0.270	0.200	0.391	3.045
#3 174	25	上面	1.238	1.010	0.842	1.335	6.601	#3U 248	28	端面	0.736	0.598	0.460	0.811	4.379
#3 175	25	上面	2.088	1.600	0.944	2.445	2.316	#3U 291	31	端面	0.428	0.271	0.227	0.466	2.334
#3 180	28	上面	1.043	0.453	0.421	1.102	1.732	#3U 326	32	端面	0.795	0.642	0.474	0.885	3.330
#3 241	30	上面	1.310	1.150	0.780	1.484	3.789	ON#1 k2	30	端面	0.350	0.210	0.170	0.393	1.769
#3 255	28	上面	0.310	0.270	0.200	0.344	5.125	ON#3 m15	32	端面	1.318	0.802	0.586	0.815	2.571
#3U 291	31	上面	3.110	2.239	1.206	3.664	1.548	#1 82	17	側面	0.571	0.172	0.058	0.832	0.561
#3U 332	32	上面	1.542	0.956	0.446	1.901	0.924	R 102	18	側面	1.627	0.444	0.372	2.207	0.920
ON#3 m15	32	上面	1.318	0.802	0.586	1.510	1.453	#1 88	19	側面	0.388	0.257	0.197	0.435	3.300
#1 82	17	下面	0.317	0.135	0.055	0.420	0.917	#2 52	19	側面	3.691	1.014	0.344	5.489	0.458
#1 102	18	下面	0.771	0.435	0.377	0.744	6.921	R 2	20	側面	1.653	0.098	0.056	3.566	0.148
#1 88	19	下面	2.572	0.337	0.198	4.619	0.241	#2 14	20	側面	2.094	0.607	0.502	2.830	0.627
#2 52	19	下面	3.556	0.542	0.133	6.219	0.261	#3 41	24	側面	0.347	0.185	0.046	0.460	0.737
R 2	20	下面	1.542	0.426	0.140	2.301	0.430	#3 62	26	側面	0.410	0.120	0.090	0.561	0.461
R 2	20	下面	1.807	0.146	0.056	3.650	0.170	#3 64	26	側面	2.230	0.830	0.600	2.839	0.673
#2 14	20	下面	0.781	0.550	0.251	0.884	2.017	#3 85	26	側面	1.353	0.893	0.279	1.730	0.982
#3 62	26	下面	0.510	0.210	0.120	0.656	0.675	#3 98	31	側面	2.650	0.850	0.740	3.417	0.504
#3 64	26	下面	1.450	0.160	0.070	2.726	0.156	#3 130	27	側面	0.572	0.275	0.220	0.669	1.162
#3 85	26	下面	2.636	2.193	1.200	3.121	2.418	#3 139	24	側面	0.390	0.250	0.140	0.467	1.540
#3 112	31	下面	1.290	1.080	0.550	1.545	1.858	#3 163	25	側面	0.349	0.230	0.202	0.379	3.332
#3 112	31	下面	0.830	0.440	0.180	1.059	0.686	#3 166	25	側面	0.418	0.250	0.088	0.533	0.941
#3 130	27	下面	1.232	0.543	0.275	1.585	0.672	#3 171	25	側面	2.480	1.930	1.330	2.812	3.195
#3 148	25	下面	0.307	0.258	0.160	0.355	3.212	#3 212	26	側面	0.558	0.216	0.014	0.803	0.410
#3 172	25	下面	0.792	0.612	0.530	0.848	5.951	#3 203	28	側面	0.691	0.464	0.448	0.712	5.165
#3 203	28	下面	0.637	0.631	0.488	0.767	4.190	#3 203	28	側面	1.077	0.917	0.767	1.188	5.621
#3 216	26	下面	0.719	0.684	0.105	0.961	1.234	#3 255	28	側面	0.330	0.280	0.220	0.361	5.627
#3U 248	28	下面	0.825	0.667	0.598	0.871	7.769	#3 255	28	側面	0.570	0.390	0.210	0.683	1.437
ON#3 k1	30	下面	0.420	0.290	0.250	0.455	3.123	#3 255	28	側面	0.590	0.420	0.220	0.708	1.509
#3U 291	31	下面	0.701	0.461	0.361	0.743	2.951	#3U 291	31	側面	0.763	0.517	0.347	0.864	1.879
R 123	13	端面	0.735	0.334	0.179	0.933	1.514	最大値	32.0	／	5.780	4.887	2.732	6.815	7.769
#3 64	26	端面	1.530	0.630	0.370	1.960	0.687	最小値	13.0	／	0.307	0.098	0.014	0.344	0.148
#3 112	31	端面	0.810	0.710	0.440	0.936	2.930	中央値	26.0	／	0.803	0.543	0.362	0.909	1.869
#3 112	31	端面	1.310	0.970	0.830	1.413	3.833	平均値	25.7	／	1.262	0.709	0.466	1.608	2.501

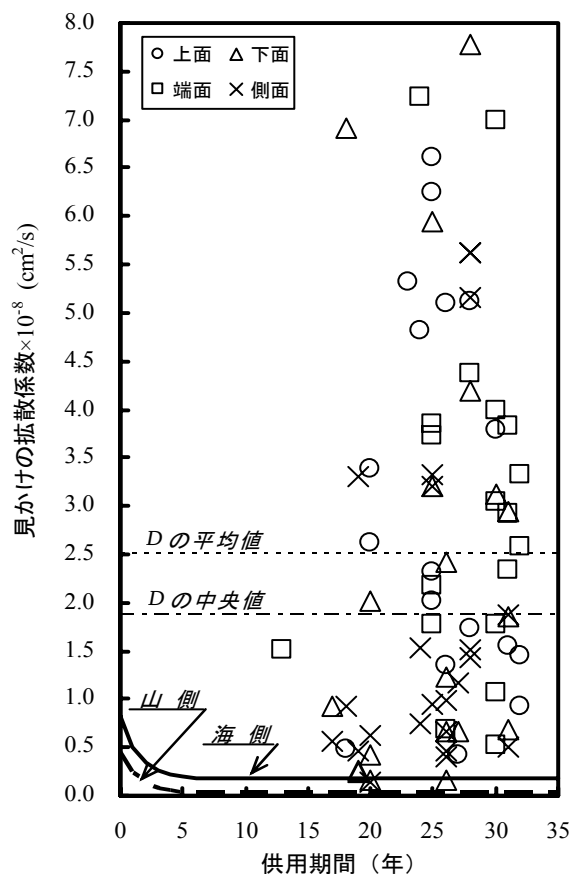
対象の橋脚は沿岸部と同程度の塩化物に曝される環境にあるものと考え、金谷らの結果を適用して考察するものとする。図－３および図－４に金谷ら⁴⁾が導き出した曲線を示す。 C_0 と D の供用期間はいずれも曲線が漸近した範囲にあり、 C_0 と D の経年変化が終わっているものと考えられる。調査結果の C_0 の中央値は曲線の値より小さく、 D の中央値は大きいことが判る。年間の付着量が同程度にも関わらず C_0 の値が曲線の値よりも比較的小くなったのは、表面の塩化物イオン濃度は構造物のおかれている環境条件などによって影響を受けるため、その増加を考慮することは難しい⁶⁾とされていることや、塩害の要因と考えられる凍結防止剤が冬期にのみ散布さ

れることによるものと思われる。また、 D は曲線の値よりも大きく塩化物イオンの拡散が比較的早いことを示している。これらの差は２章に示したように、設計基準強度は異なることもあるが、調査の対象は都市高速道路の橋脚梁部であり、使用材料、施工方法等に大差はないものと思われ、施工の条件、乾湿の繰返し等の確定することが難しい要因によるものと思われる。

しかしながら、表－１からは表面の塩化物イオン濃度の平均値が中央値の１．８倍程度であり、図－３の散布図からも一部の大きな値による差であると思われ、平均値よりも小さい値の範囲に C_0 は分布しているものと考えられること、一般に見かけの拡散係数は $1 \times 10^{-9} \sim 1$



図－３ C_0 の散布図と既往の研究による表面の塩化物イオン濃度の予測曲線



図－４ D の散布図と既往の研究による見かけの拡散係数の予測曲線

表－２ C_0 の頻度分布表

階級限界 (kg/m³)	階級値 (kg/m³)	観測 度数 (箇所)	相対 度数 (%)	期待 度数 (箇所)	χ^2 値
0.000 ~ 0.500	0.250	14	17.5	11.5	0.565
0.500 ~ 1.000	0.750	29	36.2	22.6	1.839
1.000 ~ 1.500	1.250	7	8.8	16.2	5.197
1.500 ~ 2.000	1.750	9	11.3	10.2	0.137
2.000 ~ 2.500	2.250	4	5.0	6.4	0.889
2.500 ~ 3.000	2.750	6	7.5	4.1	0.900
3.000 ~ 3.500	3.250	2	2.5	2.7	0.172
3.500 ~ 4.000	3.750	3	3.8	1.8	0.796
4.000 ~ 4.500	4.250	1	1.3	1.2	0.047
4.500 ~ 5.000	4.750	1	1.3	0.9	0.019
5.000 ~ 5.500	5.250	1	1.3	0.6	0.227
5.500 ~ 6.000	5.750	1	1.3	0.5	0.658
6.000 ~ 6.500	6.250	1	1.3	0.3	1.320
6.500 ~ 7.000	6.750	1	1.3	0.3	2.239
合 計		80	100.0	79.1	15.003

表－３ D の頻度分布表

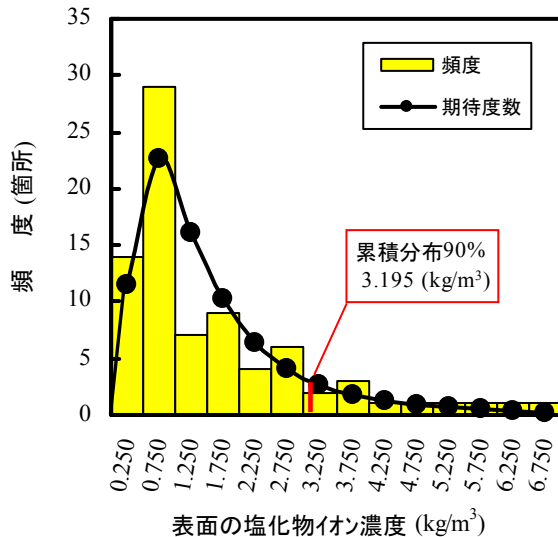
階級限界 $\times 10^{-8}(\text{cm}^2/\text{s})$	階級値 $\times 10^{-8}(\text{cm}^2/\text{s})$	観測 度数 (箇所)	相対 度数 (%)	期待 度数 (箇所)	χ^2 値
0.000 ~ 0.500	0.250	11	13.8	9.2	0.347
0.500 ~ 1.000	0.750	15	18.8	15.2	0.003
1.000 ~ 1.500	1.250	6	7.5	12.2	3.169
1.500 ~ 2.000	1.750	9	11.3	9.1	0.001
2.000 ~ 2.500	2.250	6	7.5	6.8	0.091
2.500 ~ 3.000	2.750	4	5.0	5.1	0.247
3.000 ~ 3.500	3.250	8	10.0	3.9	4.202
3.500 ~ 4.000	3.750	5	6.3	3.1	1.216
4.000 ~ 4.500	4.250	2	2.5	2.4	0.076
4.500 ~ 5.000	4.750	1	1.3	1.9	0.460
5.000 ~ 5.500	5.250	4	5.0	1.6	3.712
5.500 ~ 6.000	5.750	3	3.8	1.3	2.248
6.000 ~ 6.500	6.250	1	1.3	1.1	0.005
6.500 ~ 7.000	6.750	3	3.8	0.9	4.966
7.000 ~ 7.500	7.250	1	1.3	0.8	0.082
7.500 ~ 8.000	7.750	1	1.3	0.6	0.208
合 計		80	100.0	75.9	21.033

$\times 10^{-7}(\text{cm}^2/\text{s})$ の範囲にある³⁾とされていること、劣化予測は劣化進行速度が類似した部材群毎に行うことが基本である³⁾とされていることから、表面の塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数の変化は既に安定しているものとし、フィックの第２法則より算出した C_0 および D はほぼ同一条件の構造物から得られた値として分析する

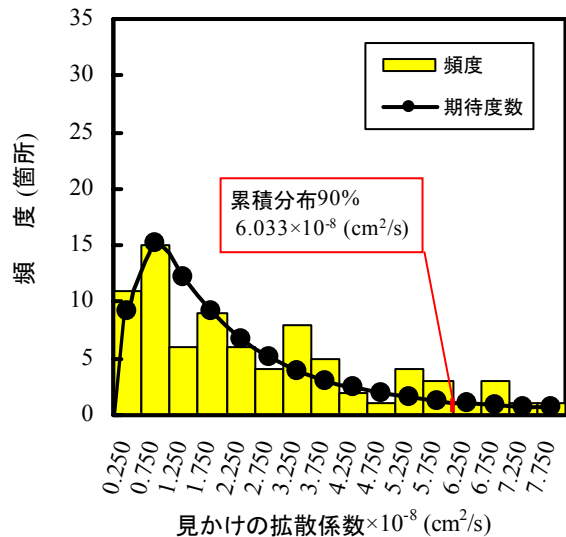
ものとした。

5. C_0 あるいは D の設定

C_0 あるいは D の傾向を要約するため、表－１からそれぞれ頻度分布表を表－２、表－３のように作成するとともに、これらの頻度分布図をそれぞれ図－７、図－８に



図－7 C_0 の頻度分布図と期待度数



図－8 D の頻度分布図と期待度数

表－4 C_0 と D の χ^2 適合度検定の結果

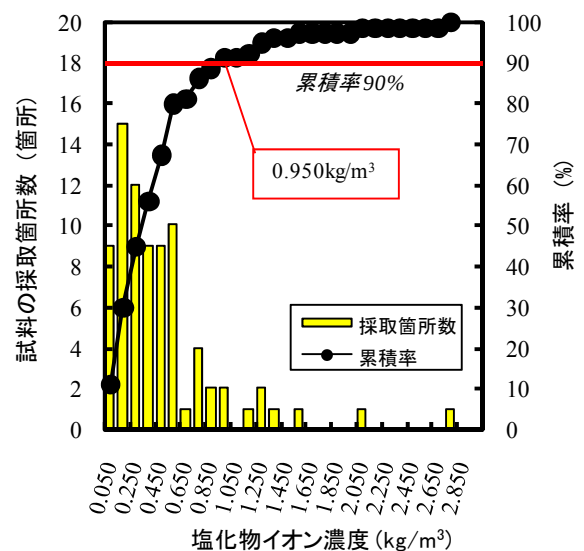
分類	自由度	χ^2	$\chi^2_{0.05}$	棄却
C_0	11	15.003	19.675	できない
D	13	21.033	22.362	できない

示す。

C_0 については、図－7から最頻値を含む階級値が 0.750kg/m^3 、中央値は表－1よりこの階級値内の 0.909kg/m^3 で、表－2よりこの階級値と 0.250kg/m^3 の相対度数を合計すると53.7%となり、データの半数がこの階級値よりも小さい範囲にある。表－2の観測度数の合計は80箇所であるのに対して期待度数は79.1箇所であり、ほぼ観測度数と一致していることから、実構造物の表面の塩化物イオン濃度は今回の計測値程度の濃度と考えられる。

D については、図－8から最頻値は階級値 $0.750 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ 内にあり、中央値は表－1より $1.869 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ で、最頻値と中央値の階級値は一致していない。表－3より階級値 $1.750 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ 以下の4つの階級値の相対度数を合計すると51.4%と半数を超え、図－8からも C_0 のように尖度が際だつてはいないことが判る。表－3の観測度数の合計は80箇所であるのに対して期待度数は75.9箇所であり、観測度数に達していないことから、実構造物の見かけの拡散係数は、 D の最大値よりも大きな $1 \times 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}$ の範囲である可能性も考えられる。

そして、これら頻度分布の形状や対数正規分布関数は保全時間の分布や機械材料の寿命などをうまく表現できる⁷⁾ことから、図－7および図－8には対数正規分布に従った場合の期待度数および対数正規分布曲線をあわせ



図－9 深さ5cmでの塩化物イオン濃度の分布

て表示した。図－7および図－8の頻度分布と対数正規曲線はほぼ一致すると思われる。そこで、これらの頻度分布が対数正規分布として扱えるか χ^2 適合度検定を行った。表－4に C_0 および D の検定結果を示す。表－4からは、 C_0 あるいは D の頻度分布が対数正規分布に従うという仮説は有意水準5%で棄却できない、すなわち、 C_0 あるいは D の頻度分布は対数正規分布に従うといえる。これは、表面の塩化物イオン濃度の場合には構造物のおかれている環境条件、気象から決まる凍結防止剤を散布する回数などの保全時間の影響から対数正規分布に従ったものと思われる。また、見かけの拡散係数は、コンクリートの材料、配合および施工に内在する潜在的な欠陥の影響により対数正規分布に従う⁸⁾とされている。

したがって、調査対象の橋脚と条件が同程度の構造物

表－５ 調査結果と予測結果の比較

分 類	調査結果の累積率より	C_0 および D より
深さ5cmの塩化物イオン含有量	$C_{90} \doteq 0.950 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$C(5, t) = 0.950 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
供用年数	$t_{10} \doteq 18 \text{ (年)}$	$t = 6 \text{ (年)}$

の劣化予測を行うために必要となる表面の塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数を決定するには、これらの対数正規分布より、不確定な要因を含む将来予測であることから、それぞれ累積分布が90%となる 3.195kg/m^3 および $6.033 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ とする。

6. 腐食の発生限界濃度に達する年限

今回調査を実施した橋脚梁部の表面から最外縁の鉄筋表面までは、最小値が68mmであった。ここで、表－1から供用期間と鉄筋の表面に最も近い深さ4～6cmから試料を採取している深さ5cmの塩化物イオン濃度の平均値を見ると25.7年および 0.466kg/m^3 で、前章で設定した C_0 と D を用いて深さ5cmでこの濃度に達する年限を式(1)より求めると3年となり、このように早く濃度が高くなるとは考えにくい。

そこで、90%程度の測定結果を包含するように、表－1より深さ5cmでの塩化物イオン含有量から累積率90%に近似する値の 0.950kg/m^3 および図－2から累積率10%に近似する供用年数の18年を求めるとともに、 C_0 および D を式(1)に代入し、深さ5cmでこの塩化物イオン濃度に達する年数を算出すると6年となる。この結果を表－5にまとめる。これらの供用年数の差、12年を予測結果に加えて評価しても、調査結果の90%程度を安全に保つことができるものと考えられる。

これらを用いることによって塩化物イオンの拡散に対応するためのLCCの算出が可能になるものと考えられる。

7. 結論

都市高速道路のコンクリート橋脚を対象に実施された塩化物イオン含有量のデータを整理・分析し、塩化物イオンの拡散予測に関して定量的評価を行った結果から、次の知見が得られた。

- (1) 調査対象の橋脚での試料の採取位置毎では、 C_0 あるいは D と供用期間に相関はないが、供用期間が13年以上経過している場合に、表面の塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数の経年変化が終わっているものとして C_0 あるいは D を統計解析すると、対数正規分布とよく一致する。
- (2) 塩化物イオンの拡散予測は、構造物のおかれている環境条件などの影響を受けるためその予測は難しい

が、構造物のおかれている環境条件、部材群、劣化外力等を勘案してデータの整理を行うことにより、拡散の状態を定量的に評価・把握するための表面の塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数を求めることができる。

- (3) 調査を実施した橋脚と条件が同程度のコンクリート構造物は、表面の塩化物イオン濃度を 3.195kg/m^3 、見かけの拡散係数を $6.033 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ と設定することができ、これらを用いて算出される深さ5cmでの任意の塩化物イオン濃度に達する年限に12年を加えても、調査結果の90%程度を安全側に評価できる。
- (4) 実構造物の塩化物イオン含有量の調査結果より、フィックの第2法則を用いて調査箇所毎に表面の塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数を算出し、これらを統計解析することによって、表面の塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数の代表的な値を決定することができ、対象構造物の塩化物イオンの拡散予測が可能となる。

参考文献

- 1) 小尾稔, 田口史雄, 嶋田久俊: 路面凍結防止剤がコンクリート橋の塩害, 凍害に及ぼす影響, 寒地土木研究所月報, No.635, pp.3-9, 2006.4
- 2) 土木学会 コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会: 2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編], (社)土木学会, pp.100-102, 2001.1
- 3) 土木学会コンクリート委員会 示方書改訂小委員会 維持管理部会: コンクリート技術シリーズNo.57 コンクリート標準示方書[維持管理編]に準拠した維持管理マニュアル(その1)および関連資料, (社)土木学会, p.75, 2003.11
- 4) 金谷光秀, 榊田佳寛, 安部道彦, 西山直洋: 海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.747-752, 1996
- 5) 前田聡, 武若耕司, 山口明伸: 塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.109-120, 2004.5
- 6) 小林一輔 編集, 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三 共著: コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ3 鉄筋腐食の診断 [POD版], 森北出版, p.181, 2005.3
- 7) 福井泰好: 入門 信頼性工学, 森北出版, p.68, 2006.7
- 8) 堤智明, 白井伸一, 安田登, 松島学: 塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量評価, 土木学会論文集, No.544/V-32, pp.33-41, 1996.8