論文　塩害劣化したプレテンション方式 PC 桁への流電陽極材を用いた腐食緩和対策の適用性に関する検討

亀田　浩昭[*1]・青山　敏幸[*2]・石井　浩司[*3]・鳥居　和之[*4]

要旨：塩害劣化した PC 桁試験体について開発した流電陽極材を設置し，コンクリートに含まれる異なる塩化物イオン濃度が陽極材の設置間隔における腐食緩和効果に与える影響について，通電開始から 103 日までの計測結果を用いて検討した。本実験の範囲内において，陽極材の設置間隔は，塩化物イオン濃度が 5kg/m^3 の場合には 700mm 以下，10kg/m^3 の場合には 525mm 以下で腐食緩和効果が認められ，塩化物イオン濃度に影響されることが明確となった。また陽極材の設置間隔 525mm で継続通電した結果，陽極材の発生電流量は低下する傾向にあったが，復極量は確保できたことから腐食緩和効果が期待できるものと推定された。

キーワード：プレテンション方式 PC 桁，塩害，塩化物イオン濃度，流電陽極材，腐食緩和

1. はじめに

塩害劣化したコンクリート構造物の補修方法の一つに，電気化学的手法を用いた電気防食や脱塩工法など採用されているが，前者が圧倒的に多いのが現状である[1)]。しかし，前者においても不適切な設計や維持管理が原因で再劣化した事例も報告され[2)]，課題を有している。

一方，塩害劣化した大規模構造物や重要構造物への何らかの対策は実施されているものの，**写真－1** に示すように小規模橋梁などは後回しになっている場合が多く，今後，それら構造物の対策が必要と考えられる。

小規模橋梁であることから地方自治体が管理している場合が多く，対策の選定においては，補修効果はもちろんのこと維持管理を十分に考慮する必要があると考えられる。

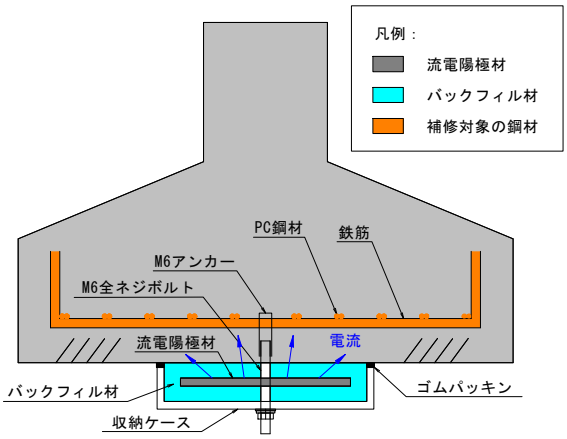
著者らはコスト縮減，容易な維持管理を可能にした流電陽極材を用いた腐食緩和対策を研究・開発している[3),4)]。そこで，本論文は，小規模橋梁としてプレテンション方式 PC 桁に注目し，コンクリートに含まれる塩化物イオン濃度およびかぶり深さを試験要因として腐食緩和対策の適用性を検討した結果の中で，前者について報告するものである。

2. プレテンション方式PC桁への流電陽極材を用いた腐食緩和対策

プレテンション方式 PC 桁に適用する腐食緩和対策の概要を**図－1** に示す。流電陽極材として直径 110mm×厚さ 5mm の亜鉛を使用する。流電陽極材と収納ケースは取替が容易となるように後施工アンカーとボルトを用いてコンクリート表面に取り付ける。更にベントナイト系バックフィル材を用いて収納ケースと流電陽極材との隙間を充填している。

なお，腐食緩和の目安として鋼材の復極量を 25～50mV 程度と考えている[3),4)]。

写真－1　小規模橋梁の概要

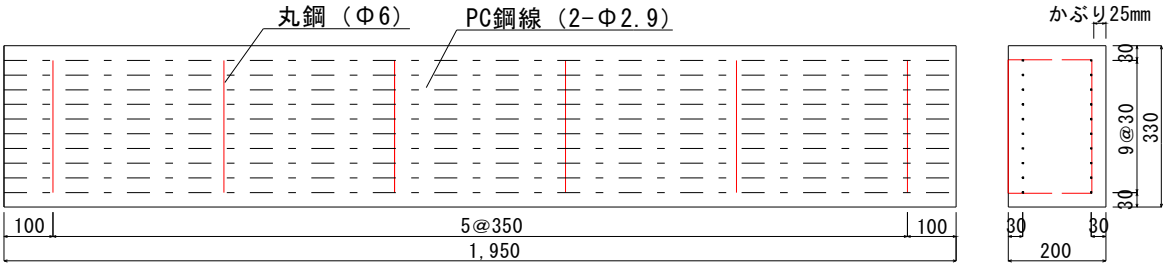


図－1　腐食緩和対策の概要

*1 金沢大学自然科学研究科環境デザイン学専攻　(正会員)
*2 （株）ピーエス三菱　技術本部技術部メンテナンス技術グループ　(博)工　(正会員)
*3 （株）ピーエス三菱　技術本部技術部　工博　(正会員)
*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）　顧問　工博　(フェロー会員)

表－1　コンクリートの示方配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20.0	18	2.0±1.0	40.0	43.6	170	425	447	991	5.1



図－2　試験体の形状・寸法

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

使用したセメントは早強ポルトランドセメントであり，コンクリートの設計基準強度が 50N/mm^2 となるように配合した。**表－1** にコンクリートの示方配合表を示す。また，コンクリートに含まれる塩化物イオン濃度の影響を検討するために，塩化物イオン濃度が 5kg/m^3，10kg/m^3 となるように NaCl を練混ぜ水に混入した。

試験体の形状・寸法を**図－2**に示す。試験体は幅0.2m×高さ0.33m×長さ1.95mとし，**図－2**に示すように2本より2.9mmのPC鋼線を試験体の両側面に設置し，配力筋として直径6mmの丸鋼を使用し350mmの間隔で設置した。なお，全てのPC鋼線と配力筋との電気的導通は確保されており，プレストレスは導入しておらず，かぶり深さは0mm，25mmである。本論文ではかぶり25mmの面について議論する。

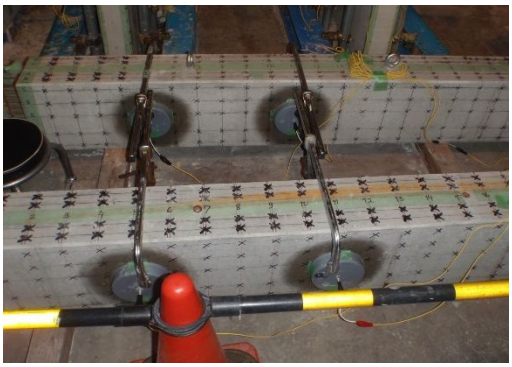
実験に使用した流電陽極材は直径110mm×厚さ5mmの防食亜鉛とし，ベントナイト系バックフィル材を介して試験体側面に設置し実験に供した。**写真－2**に流電陽極材の設置状況を示す。

3.2 通電方法と計測目的

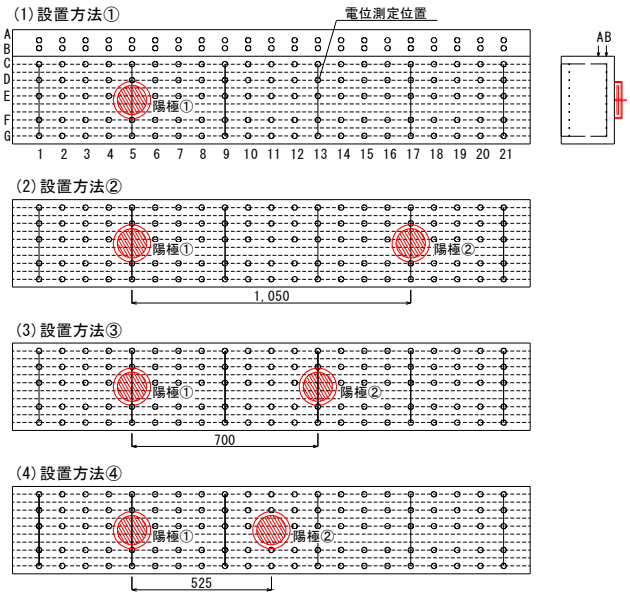
陽極材の各設置間隔における腐食緩和効果に与えるコンクリートに含まれる塩化物イオン濃度の影響を把握するために，下記および**図－3**に示すような設置間隔の通電方法で通電を行った。なお，通電は室内環境で行った。

- 通電方法①：流電陽極材1箇所で通電する方法
- 通電方法②：設置間隔1050mmの流電陽極材2箇所で通電する方法
- 通電方法③：設置間隔 700mmの流電陽極材2箇所で通電する方法
- 通電方法④：設置間隔 525mmの流電陽極2箇所で通電する方法

通電は通電方法①から順番に通電方法④へと通電方法の変更と測定を繰り返し，陽極材の各設置間隔におけ



写真－2　流電陽極材の設置状況



図－3　流電陽極材の設置間隔と通電方法

る腐食緩和効果に与える影響を把握し，その後，通電方法④で103日まで継続通電を行い，経時変化の傾向を検討した。

測定項目は，通電前の自然電位，通電後のインスタントオフ電位，通電遮断24時間後の電位，ならびに流電陽極材からの発生電流量とした。また，測定位置は**図－3(1)**に示すように試験体の幅，高さ方向に7列（A～G），試験体の長さ方向に21列の合計147箇所である。各電位は，可搬式の銀塩化銀照合電極をコンクリート表面に設置して測定した。

4. 実験結果

4.1 試験体の自然電位

通電開始直前の鉄筋自然電位の測定結果を**図－4**に示

【自然電位　塩化物イオン濃度：5kg/m^3】 (mV)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	-228	-218	-203	-207	-204	-219	-228	-220	-226	-208	-215	-220	-221	-219	-233	-218	-223	-227	-214	-210	-210
	B	-227	-220	-199	-214	-202	-213	-223	-226	-213	-231	-221	-211	-227	-221	-220	-216	-210	-223	-224	-216	-227
側面	C	-197	-211	-197	-195	-198	-200	-198	-193	-198	-164	-173	-180	-192	-194	-189	-208	-194	-183	-191	-200	-195
	D	-238	-216	-217	-215	-221	-214	-237	-237	-213	-210	-209	-221	-206	-198	-198	-209	-204	-206	-203	-195	-222
	E	-245	-223	-215	-221	-225	-229	-225	-225	-229	-226	-219	-220	-215	-203	-212	-217	-227	-219	-221	-223	-218
	F	-226	-234	-214	-211	-223	-222	-211	-213	-215	-219	-230	-215	-224	-208	-210	-213	-213	-215	-213	-221	-218
	G	-220	-205	-218	-219	-209	-206	-204	-214	-211	-206	-213	-212	-217	-202	-207	-209	-204	-204	-213	-205	-203

【自然電位　塩化物イオン濃度：10kg/m^3】 (mV)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	-322	-328	-328	-310	-281	-280	-265	-313	-315	-311	-314	-313	-316	-318	-323	-330	-293	-322	-319	-317	-316
	B	-321	-329	-321	-302	-284	-284	-284	-304	-302	-308	-318	-319	-288	-309	-319	-325	-285	-313	-326	-317	-306
側面	C	-245	-303	-280	-263	-234	-268	-285	-288	-255	-275	-271	-278	-284	-296	-323	-291	-264	-281	-278	-271	-295
	D	-325	-290	-280	-280	-227	-280	-286	-282	-284	-296	-286	-288	-321	-326	-319	-311	-260	-314	-308	-297	-299
	E	-288	-298	-264	-266	-237	-302	-297	-300	-278	-294	-286	-289	-310	-311	-337	-313	-272	-298	-317	-305	-355
	F	-268	-289	-269	-272	-264	-288	-295	-284	-313	-292	-298	-283	-287	-311	-330	-286	-279	-306	-309	-286	-302
	G	-266	-272	-268	-257	-242	-280	-286	-281	-267	-269	-287	-286	-261	-306	-290	-301	-276	-284	-292	-272	-271

凡例　：　90%以上の確率で腐食なし　：　不確定　：　90%以上の確率で腐食あり

図－4　自然電位分布図

【設置方法①】

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	0	20	35	171	115	223	141	26	1	15	-13	-3	2	5	-18	-1	-13	-13	3	12	-14
	B	6	13	36	172	196	206	144	22	12	0	0	4	-4	0	-4	-6	-4	-8	1	-2	-29
側面	C	58	2	33	176	238	209	170	50	15	57	46	23	-11	-1	0	-27	-20	-3	2	-2	-4
	D	17	19	32	269	499	325	96	23	14	31	10	-2	15	17	7	-16	-9	-13	1	-17	-14
	E	17	45	45	386	陽極①	392	174	54	14	11	5	21	3	25	3	-18	-18	0	4	-26	-5
	F	12	33	109	269	504	285	122	73	12	24	-2	19	-7	21	0	-1	1	0	9	-7	-11
	G	17	24	140	191	295	144	110	68	20	32	24	20	2	19	0	-7	-5	6	4	-7	-2

【設置方法②】(陽極設置間隔：1050mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	54	98	147	187	222	217	136	80	54	49	36	36	53	111	134	189	175	162	108	74	56
	B	47	91	142	168	195	216	135	74	58	39	39	37	36	85	122	177	158	150	97	65	35
側面	C	16	26	85	144	174	182	128	73	2	16	23	13	10	35	114	157	143	127	51	30	2
	D	10	68	96	244	462	315	109	57	19	25	11	9	36	73	120	252	484	243	81	49	23
	E	35	56	143	392	陽極①	432	139	80	33	27	22	28	28	82	145	452	陽極②	481	103	58	45
	F	43	69	145	306	437	345	152	84	56	33	37	34	34	96	135	383	458	267	121	77	35
	G	57	81	145	206	222	263	166	96	52	38	46	40	29	98	148	240	239	237	137	75	46

【設置方法③】(陽極設置間隔：700mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	61	102	148	201	217	220	161	109	87	97	124	163	176	159	145	113	86	64	60	45	43
	B	67	103	159	181	203	234	160	102	93	93	128	171	156	172	149	116	86	73	59	48	36
側面	C	69	91	126	193	193	208	159	116	64	98	148	171	153	137	144	86	62	58	77	43	21
	D	34	96	126	299	408	357	144	91	80	97	138	207	432	212	135	85	132	61	56	41	31
	E	51	97	150	372	陽極①	392	161	111	89	80	126	445	陽極②	381	127	100	112	87	44	41	23
	F	52	83	172	308	462	303	172	101	95	90	115	225	368	255	143	104	102	90	49	59	25
	G	69	101	179	220	258	252	182	130	91	105	154	186	200	228	153	108	100	97	44	59	44

【設置方法④】(陽極設置間隔：525mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	81	115	158	190	224	248	173	131	144	229	250	224	127	105	65	41	49	48	16	29	27
	B	64	107	165	180	196	223	147	123	141	220	266	218	102	91	59	28	29	37	17	30	28
側面	C	32	88	128	176	182	217	112	145	105	259	297	216	93	52	55	3	-2	-7	-7	-13	-17
	D	31	96	133	270	449	340	139	117	135	281	438	310	169	86	66	31	69	8	5	16	1
	E	54	106	159	284	陽極①	396	191	136	169	415	陽極②	399	177	116	58	58	46	34	7	2	11
	F	63	102	168	330	403	366	201	140	156	242	444	355	152	90	17	27	59	20	13	8	-2
	G	67	117	168	248	296	281	201	144	128	230	291	230	124	96	72	39	36	29	12	13	13

凡例　：100mV以上　：50～99mV　：25～49mV　：25mV未満

図－5　塩化物イオン濃度 5kg/m^{3}試験体の復極量の測定結果

す。上段が塩化物イオン濃度5kg/m³試験体，下段が塩化物イオン濃度10kg/m³試験体の自然電位を示す。塩化物イオン濃度5kg/m³試験体では，測定箇所の約95％がASTM C876[5]の鉄筋腐食判定基準のうち，自然電位-230～-80mV（不確定）な領域となった。残りの約5％が，自然電位-230mVより卑（90％以上の確率で腐食あり）な領域となった。一方，塩化物イオン濃度10kg/m³試験体では，ほぼ全ての測定箇所が，自然電位-230mVより卑（90％以上の確率で腐食あり）な領域となった。これより塩化物イオン濃度10kg/m³試験体は，塩化物イオンの影響により鉄筋の腐食が進行している可能性が確認された。

4.2 塩化物イオン濃度が及ぼす陽極材の各設置間隔における腐食緩和効果への影響

コンクリート中の塩化物イオン濃度が陽極材の各設置間隔における腐食緩和効果に与える影響を検討するため，通電方法①から通電方法④の通電を行った時の各測定位置にけるインスタントオフ電位と通電遮断24時間後の電位との差である復極量を測定した。塩化物イオン濃度5kg/m³の測定結果を**図－5**，塩化物イオン濃度10kg/m³のそれを**図－6**に示す。

復極量の測定結果は，電気防食基準である100mVシフトが確保された箇所を青色，50～99mVシフトが確保された箇所を緑色，25～49mVシフトが確保された箇所を黄色，25mV未満をピンク色で区分した。

流電陽極材1箇所で通電した場合，流電陽極材から離れるほど，復極量は小さくなる傾向にあり，その傾向は10kg/m³の塩化物イオン濃度を含む試験体の方が大きい。

次に，流電陽極材2箇所で通電した場合，5kg/m³の塩化物イオン濃度を含む試験体では，流電陽極材の設置間隔が1050mmの場合に，流電陽極間の復極量が25mV以下となる領域が存在し腐食緩和の目安を下回る傾向にあった。一方，10kg/m³の塩化物イオン濃度を含む試験体では流電陽極材の設置間隔が1050mm，700mmにおいて復極量が25mVを下回る領域が存在する傾向にあった。

以上の結果から，コンクリート中の塩化物イオン濃度は設置した流電陽極の腐食緩和効果に影響を与えることが明確となった。本実験の範囲内において，腐食緩和効果の目安となる復極量25～50mV程度を確保するための流電陽極材の設置間隔は，塩化物イオン濃度が5kg/m³の場合には，700mm以下，10kg/m³の場合には525mm以下となった。

【設置方法①】

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	9	21	-40	153	128	145	133	45	24	11	-1	-13	-8	-24	-27	-36	-22	-19	-11	-17	-18
	B	-10	11	58	142	129	149	94	44	19	17	-15	-15	-6	-16	-29	-31	-10	-22	-21	-20	-6
側面	C	2	18	81	185	65	180	99	50	19	7	4	-5	-22	-16	-14	-20	-9	-14	-4	15	-21
	D	16	39	107	353	603	294	99	48	20	-8	-8	-10	-15	-34	1	-11	8	-37	-16	-3	-19
	E	7	48	137	555	陽極①	518	118	29	55	-6	-2	-4	-20	-18	3	-2	2	-23	-22	6	-8
	F	23	64	141	319	720	300	106	51	21	4	-16	-3	-7	-22	-17	24	0	-21	-17	7	-13
	G	34	65	135	197	159	189	107	54	52	31	3	0	9	-25	-5	-7	-19	-4	-5	16	18

【設置方法②】(陽極設置間隔：1050mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	-2	45	102	133	111	131	80	35	6	-6	-5	-13	-6	26	71	115	104	102	88	47	3
	B	10	40	95	145	126	118	63	34	11	-1	0	9	12	38	81	119	125	103	81	44	3
側面	C	28	52	95	124	159	103	64	12	8	-6	-13	-10	3	14	56	114	98	100	82	51	3
	D	14	64	109	265	438	265	89	25	11	-3	1	-5	4	9	64	199	344	174	76	40	9
	E	25	63	125	356	陽極①	405	118	47	1	-6	-8	-2	9	7	89	339	陽極②	367	97	52	2
	F	10	47	132	281	403	264	112	58	45	8	8	11	28	43	96	266	367	243	82	53	25
	G	20	77	119	198	224	169	92	52	40	20	0	-6	16	53	98	171	176	143	100	67	24

【設置方法③】(陽極設置間隔：700mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	-2	60	82	112	119	123	88	37	11	35	75	72	76	91	98	54	40	21	20	12	-4
	B	20	58	101	130	113	129	76	54	35	33	76	109	107	113	104	71	37	32	16	11	-8
側面	C	26	42	93	127	162	114	72	19	23	21	45	86	390	91	73	45	25	8	18	21	-16
	D	8	41	121	342	358	240	82	33	19	14	51	145	342	154	57	23	89	11	1	-16	-32
	E	5	83	117	373	陽極①	341	108	38	18	25	76	308	陽極②	344	83	47	93	28	-20	-7	-34
	F	6	47	115	249	352	294	104	73	64	39	78	204	327	181	82	68	46	49	-10	-8	-12
	G	8	70	104	189	233	177	101	81	43	33	68	114	131	118	84	57	33	26	7	15	-15

【設置方法④】(陽極設置間隔：525mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
上面	A	0	59	100	133	137	140	96	88	84	130	175	131	39	28	38	19	-1	-2	-7	-5	-13
	B	9	59	104	117	134	133	97	71	91	121	155	146	51	59	21	29	33	9	-1	-2	-10
側面	C	33	57	102	135	153	125	75	30	64	107	178	118	45	14	6	-5	-17	-20	4	5	-23
	D	20	57	108	262	383	255	102	56	68	228	369	233	49	2	-7	-11	40	-123	-36	-29	-17
	E	37	70	138	360	陽極①	347	140	79	90	351	陽極②	358	124	24	0	11	11	0	-35	-24	-24
	F	25	58	117	320	371	264	117	85	121	258	356	253	104	34	4	4	6	-18	-35	-26	-24
	G	42	83	114	220	250	206	132	106	104	118	245	163	82	40	16	13	-8	-15	-21	1	-12

凡例　：100mV以上　：50～99mV　：25～49mV　：25mV未満

図－6　塩化物イオン濃度 10kg/m³試験体の復極量の測定結果

4.3 復極量の経時変化

設置間隔525mmの流電陽極材2箇所で通電した時の復極量の経時変化を**図－7**に示す。図中の復極量は試験体長さ方向（1から21）の同一位置における高さ方向（AからG）の平均値で代表させている。測定は，継続通電開始時（0日），通電開始後33日，103日とした。なお，通電方法①のそれもあわせてプロットしている。

流電陽極材2箇所設置した場合の流電陽極材間の中央部に注目すると，流電陽極1箇所の場合の復極量より2箇所のそれが大きい傾向にあり，2箇所の流電陽極材からの発生電流に影響されたものと考えられる。その傾向は，塩化物イオン濃度が小さいほど大きい結果となった。

設置間隔525mmの流電陽極材2箇所で継続通電した場合の経時変化は，通電開始0日と比べ33日経過時では復極量が大きくなる傾向にあり，特に塩化物イオン濃度が小さい場合にその傾向が大きい結果となった。

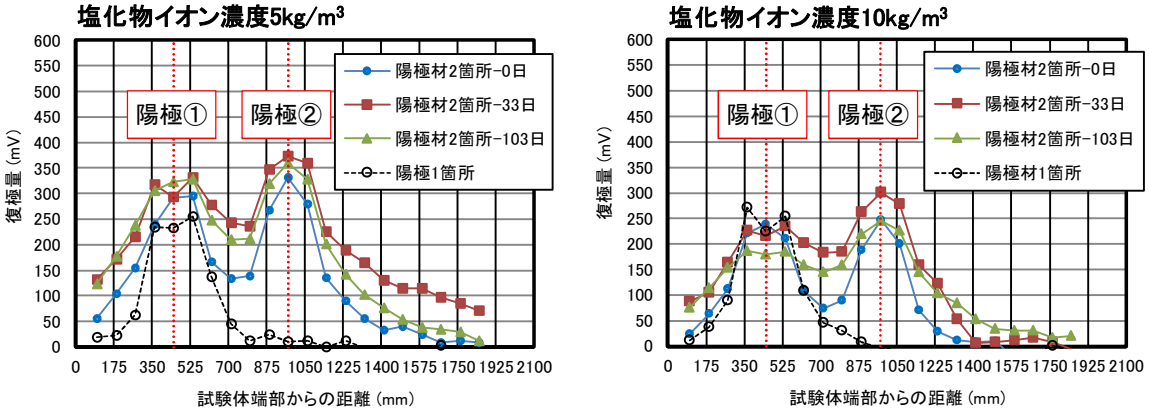
4.4 発生電流量の経時変化

図－8 に設置間隔 525mm の流電陽極材 2 箇所で継続通電した場合の流電陽極材からの発生電流量の経時変化を示す。塩化物イオン濃度 5kg/m^3 と 10kg/m^3 における 2 箇所の流電陽極材からの発生電流量は概ね同じ傾向を示しており，60 日程度までは時間の経過とともに徐々に発生電流量が低下し，60 日以降はほぼ横ばいとなっている。これより陽極材の発生電流量は低下しているものの復極量は確保できていることが確認された。

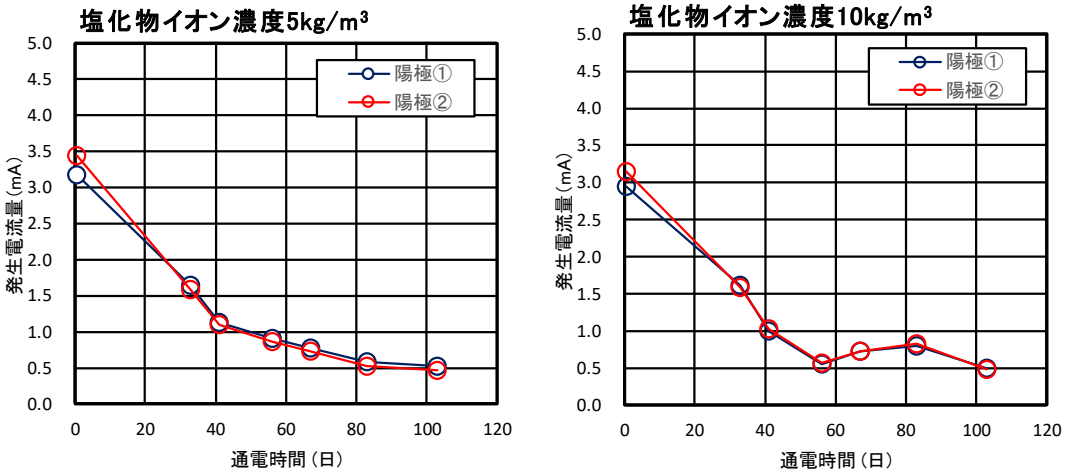
更に，発生電流量が同じであるのに係わらず，各測定位置の復極量が塩化物イオン濃度により相違している原因として，鉄筋腐食によりカソード分極特性が相違していることにあると考えられる。

4.5 陽極材との距離と復極量の関係

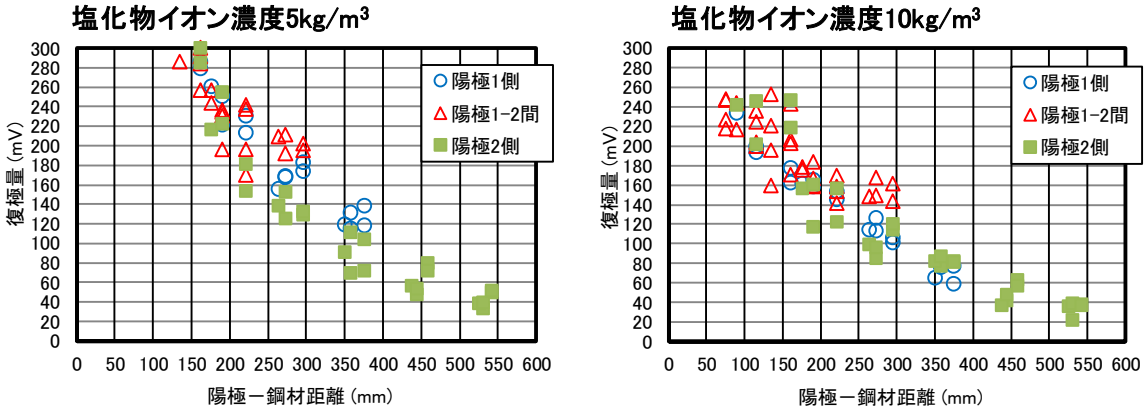
図－9 に通電開始から 103 日経過時に測定した復極量を陽極と鋼材との距離毎にプロットしたものである。図中の青○は陽極 1 側の測定点（1～4）の復極量，赤△は陽極 1～2 間の測定点（5～11）の復極量，緑□は陽極 2 側の測定点（12～21）の復極量を示している。陽極と鋼材との距離が 250mm の位置に着目すると，赤△である陽極 1～2 間の復極量が上位に分布していることが確認された。このことから，陽極 1 と陽極 2 の中間位置では



図－7　復極量の経時変化



図－8　発生電流量の経時変化



図ー9　陽極材からの距離と復極量の関係

両方の陽極から防食電流が供給され，復極量が増加したと考えられ，4.3 の結果と同じである。

また陽極からの距離と復極量の関係は概ね線形関係にあることが確認された。

5. まとめ

塩害劣化を模擬したプレテンション方式 PC 桁の試験体に流電陽極材を設置し，コンクリートに含まれる塩化物イオン濃度が陽極材の設置間隔における腐食緩和効果の影響について，通電開始から 103 日までの計測結果を用いて検討した。以下に本実験にて得られた結果を示す。

(1) 本実験の範囲内において，腐食緩和効果の目安となる復極量 25～50mV 程度以上を確保するための流電陽極材の設置間隔は，塩化物イオン濃度が 5kg/m^3 の場合には，700mm 以下，10kg/m^3 の場合には 525mm 以下と塩化物イオン濃度の影響を受ける傾向にあった。

(2) 設置間隔 525mm の流電陽極材 2 箇所で継続通電した場合の復極量の経時変化は，通電開始 0 日と比べ 33 日経過時では復極量が大きくなる傾向にあり，特に塩化物イオン濃度が小さい場合にその傾向が大きい結果となった。

(3) 通電開始から 103 日経過までの通電の結果，陽極材の発生電流量は低下する傾向にあったが，復極量は確保されており，防食効果が継続して確保されている結果を示した。

(4) 陽極材と陽極材の間の鋼材は，両側の陽極材から防食電流が供給され，復極量に影響することが明確となった。

今後も継続して陽極材の発生電流量，復極量を計測し，本実験で得られた塩化物イオン濃度と陽極材の設置間隔の関係について，長期的なデータの蓄積を行う予定である。

謝辞

本研究は，SIP 戦略的イノベーション創造プログラム，インフラ維持管理・更新・マネジメント技術，「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネージメントの開発」の一環として実施したものである。ここに関係各位に感謝申し上げる次第である。

参考文献

1) コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会：定時総会資料，2018年7月
2) 関　繭果，宇佐美　葱，小城　守，大島　高雄，峰松敏和：電気防食の維持管理における課題抽出を目的とした橋梁調査，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，pp.281-286，2016.
3) 亀田　浩昭，青山　敏幸，石井　浩司，鳥居　和之：塩害が生じた撤去RC床版への流電陽極工法を用いた鋼材の腐食緩和対策に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.753-757，2018.
4) 亀田　浩昭，青山　敏幸，石井　浩司，鳥居　和之：積雪寒冷地に建設された塩害劣化RC床版に対する流電陽極材を用いた鋼材腐食緩和の試み，第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.189-194，2018.
5) ASTM C876-91，Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete，Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02 ，pp.457-462，Jan.1999