

論文 プレストレスコンクリートポールの経年劣化に及ぼす環境条件の影響に関する研究

船本 憲治^{*1}・岩田 憲明^{*2}・下條 剛^{*3}・原 裕介^{*4}

要旨: プレストレスコンクリート (PC) ポールは、配電、通信、鉄道等の社会インフラを古くから形成しているが、近年、表面剥離、ひび割れ、合せ目開き、鋼材発錆等の劣化現象が報告され、維持管理が重要視されている。そこで、今回、環境条件として塩害・泉害等に注目し、各環境条件に対する影響に関して調査研究を行い、既往文献も踏まえ劣化特性を明らかにした。外部環境別の劣化進行度は、海浜>温泉>一般地区の順となり、補修や計画的建替えが必要と思われる PC ポールは、平均経過年数が短いにも関わらず、海浜および温泉地区が一般地区より多く存在しており、特に両地区の計画的保全の重要性が明らかになった。

キーワード: プレストレスコンクリートポール、経年劣化、塩害、泉害、維持管理

1. はじめに

プレストレスコンクリート (以下、PC) ポールは、1971 年の JIS 制定以来、配電、通信、鉄道、暴風ネット柱等の用途に用いられ、社会インフラ網の構築に欠かせないものとなっている。しかし、近年、PC ポールの劣化現象として、表面剥離、縦ひび割れ、横ひび割れ、合せ目開き、鋼材の発錆等が報告されつつある^{1,2)}。

一方、土木学会に設置された「社会インフラ維持管理・更新の重点課題特別委員会」では多くの検討がなされ、その中で「知の体系化」が重点課題として挙げられている。しかし、土木学会からコンクリート示方書「維持管理編」が制定されたのは 2001 年であり、その後も含め、社会基盤を支えるコンクリート構造物の維持管理に関する知見が十分に整備されているとは言い難い。

そこで、本検討では、インフラメンテナンス工学の一助となるべく、PC ポールの維持管理や長寿命化を目指し、PC ポールの経年劣化に及ぼす環境条件として塩害・泉害等に注目し、筆者らが長年実施してきた各環境条件に対する影響度に関する調査研究を取り纏めた。

2. PC ポールの概要

2.1 製造方法および設計法

PC ポールの形状は、テーパ 1/75 の中空せつ頭円すい体で、壁厚は 50~100 mm 程度、かぶり厚は 10 mm 程度である。コンクリートの設計基準強度は 50~80N/mm² 程度で、主筋は PC 鋼材 (緊張材および非緊張材) から成り、PC 鋼材によりコンクリート設計基準強度の 10~15% 程度のプレストレスが導入されている。また、横拘束形式としてスパイラルまたはフープ形式が用いられ、変形能力

に優れた構造となっている³⁾。

PC ポールのコンクリート配合は、コンクリート強度が高いこともあり、通常の現場打設コンクリートに比べて水セメント比が小さく、結合材量が多くなり、粘性が高い特徴を有している。

PC ポールの製造は、遠心力締固め方法により成形を行い、その日の内に常圧蒸気養生 (65℃程度) を行い、その後、オートクレーブ養生 (10 気圧, 180℃程度) または気中養生を行っている。

上記のように、遠心力締固め方法による成形のため、密度の大きいコンクリート材料が製品の外側に分布することになり、密度の小さい水が搾り出され、外側から内側に向かってコンクリート層、モルタル層、ペースト層が形成される。その時、搾り出される水により水セメント比が当初の 36% から 30% となるという報告⁴⁾や搾り出される水の影響を考慮した修正水セメント比と強度との相関が良いとの報告⁵⁾がなされている。

PC ポールの設計の一例として、JISA5373 の推奨仕様のポール 1 種があり、その場合、表-1 に示すように、使用状態性能は、ポール先端から 25 cm 下の位置に設定された設計荷重においてひび割れ制御設計を行い、終局状態性能は、その設計荷重の 2 倍以上で破壊せず、その後、曲げ圧縮破壊する設計となっている。

表-1 PC ポールの設計法

性能項目	性能
使用状態	設計荷重時に幅 0.25mm を超えるひび割れが発生しなく、荷重除荷時に幅 0.05mm を超えるひび割れが残留しない
終局状態	破壊荷重は設計荷重の 2 倍以上

*1 九州高圧コンクリート工業(株) 技術本部長 博士 (工学) (正会員)

*2 九州高圧コンクリート工業(株) 設計グループ長

*3 九州高圧コンクリート工業(株) ポール保全グループ 課長代理

*4 九州電力(株) お客さま本部配電技術グループ

2.2 既往文献による劣化機構に関する考察

コンクリート電柱を対象とした文献6)での劣化機構に関する考察では、中性化は進行しなく、塩化物イオンの浸透に対しても一定の抵抗性を有し、アルカリ骨材反応も生じにくい、反面、型枠の継ぎ目不良に起因する劣化が生じやすいと結論付けている。また、鉛直ひび割れは、初期の段階から発生し断面内での収縮性状の違いによる影響としたうえで、エフロレッセンスは、中空部に滞留した水がひび割れや型枠の継ぎ目不良箇所から流出することにより発生するとしている。

一方、近年、コンクリート電柱において、ひび割れ自然治癒機構に関する分析が文献7)等で報告されている。

従って、PCポール本体は、CO₂や塩化物イオン等の浸透に対しては一定の抵抗性を有しており、外部環境による経年劣化の進行は、型枠の継ぎ目不良を念頭に、PCポールの表面劣化に着目することにより評価できるものと考えられ、以下の検討を行った。

3. 表面劣化の経年進行に関する調査検討

3.1 調査概要

PCポールの表面劣化の進行を把握するために、4つの環境地区（都市・山間・海浜・温泉）で合計98本のコンクリート電柱をサンプル抽出し、ポール地上部の表面劣化状況を目視により調査した。4つの環境地区として、都市部は福岡・北九州から23本を、山間部は日田・阿蘇から24本を、海浜部は唐津・佐世保・壱岐から33本を、温泉地区は島原・別府から18本を抽出した。

3.2 調査方法

外観調査では、セメントペーストやモルタルの流失および骨材の露出のグレードを表-2に示す5段階で評価した。なお、グレード判定点は、グレード①で500点、②で400点、③で300点、④で200点、⑤で100点とし、観察した面積で重み付けをした。すなわち、健全で500点となり、モルタルが流出し粗骨材が表面に露出している状態で100点となっている。

3.3 調査結果

PCポールの経過年数とグレード判定点の関係を外部環境地区別に図-1(a)~(d)に示す。また、対象物の表面劣化が環境によらず経過時間に比例して拡大すると仮定し、それぞれの地区の相関式を求めるとともに、纏めて記載したものを図-2に示す。

コンクリート表面の劣化を表すグレード判定点は、外部環境の差にかかわらず年数が経つにつれ減少し、両者の相関性は高くなった。外部環境別に劣化勾配を比較すると、海浜および温泉地区の勾配が都市および山間部より大きくなる傾向にある。また、温泉地区が他の地区に比べて劣化到達年数が早くなる傾向となった。因みに、

表-2 外観グレード

グレード	PCポールの表面状況
①	異常なし
②	セメントペーストが全体的に流失し、表面に細骨材が認められるが粗骨材は認められない
③	モルタルが流失し、粗骨材が表面に認められる
④	モルタルが流失し、全体的に粗骨材が表面に現われている
⑤	モルタルが流失し、粗骨材が表面に露出している

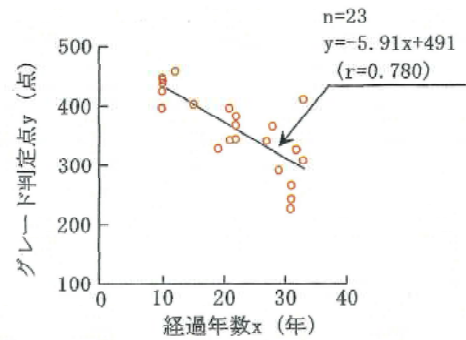


図-1(a) 経過年数とグレード判定点の関係（都市部）

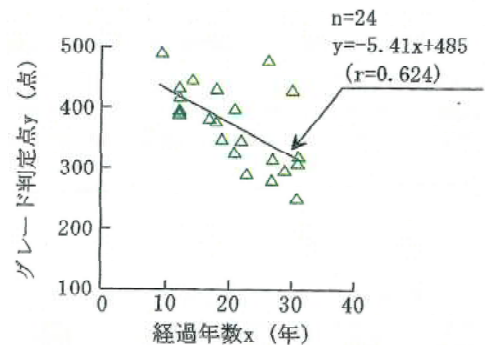


図-1(b) 経過年数とグレード判定点の関係（山間部）

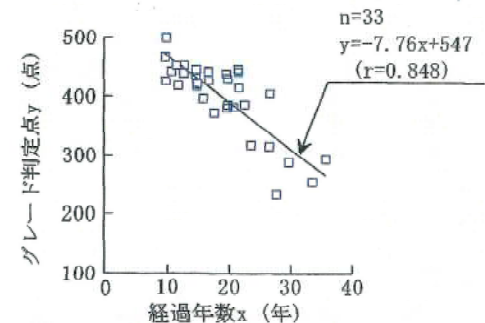


図-1(c) 経過年数とグレード判定点の関係（海浜地区）

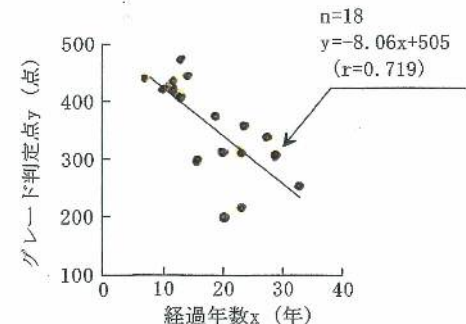


図-1(d) 経過年数とグレード判定点の関係（温泉地区）

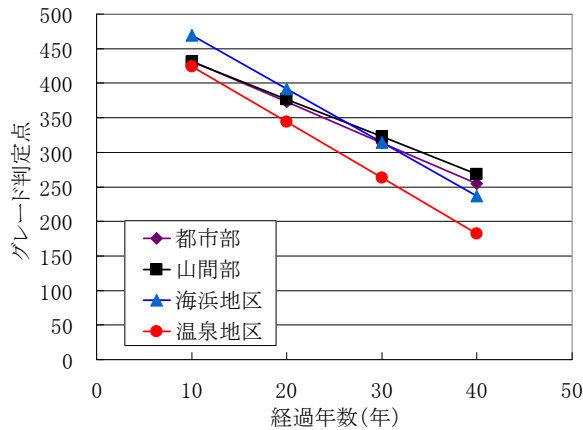


図-2 経過年数とグレード判定点の関係

グレード④の「モルタルが流出し全体的に粗骨材が表面に現われている」評価点 200 点になるのは、図-2 によると、回帰式の外挿範囲ではあるが、温泉地区ではほぼ 40 年、その他の地区ではほぼ 50 年と推定される。

4. 外部環境別劣化特性に関する調査検討

4.1 調査概要

外部環境別劣化特性を明らかにする目的で、まず、一般地区・海浜地区・温泉地区の 3 地区から建柱後 42 年以上経過（法定耐用年数超過）したコンクリート電柱を各々 20 本抽出する計画とした。しかし、海浜地区および温泉地区では建替えが早く行われているせいかすぐに調査対象とできる電柱が 20 本に満たず、建柱後 42 年以上経過してはいるができるだけ古い電柱も調査対象柱に加えた。その結果、調査対象柱は、一般地区（商業 5 本・工業 5 本、住宅 5 本、山間 5 本）の合計 20 本、海浜地区（本土 14 本・離島 6 本）の合計 20 本、温泉地区（霧島 4 本・別府 10 本・雲仙 6 本）の合計 20 本で総計 60 本とした。

調査 PC ポールの経過年数の度数分布を図-3(a)～(c)に示すが、経過年数の平均値は、一般地区が 46 年、海浜地区が 41 年、温泉地区が 40 年となっている。

4.2 調査方法および調査の着目点

劣化事象は、既応文献^{例えば、1),6)}を参考に、表面劣化、縦ひび割れ、横ひび割れ、合せ目開き、剥離・浮き、鋼材発錆とした。

表面劣化の主要因は、水酸化カルシウム等の溶脱であるが、その他に、強い酸等による化学反応的腐食があり、泉害により表面劣化が進むとコンクリート表面が白っぽくなり最後には柔らかい泥状となる。なお、今回の評価では、前述の表-2 の外観グレードを用いた。

縦ひび割れに関しては、遠心成形製造のため PC 鋼線背面に縦方向微細ひび割れが発生し巨視的ひび割れに進展することがあるとの報告⁸⁾がなされている。また、縦ひび割れは、建柱近傍の側溝等の温度収縮によりポール

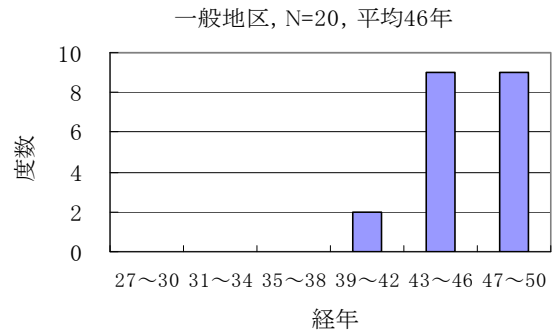


図-3(a) 調査 PC ポールの経過年数（一般地区）

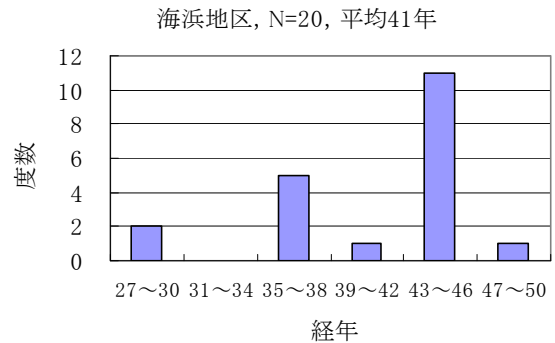


図-3(b) 調査 PC ポールの経過年数（海浜地区）

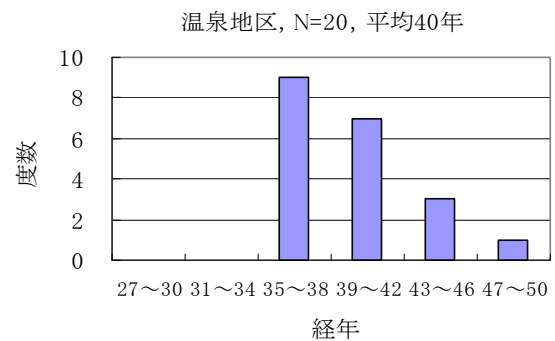


図-3(c) 調査 PC ポールの経過年数（温泉地区）

へ圧迫が加わることにより発生することもある。

横ひび割れは、風圧力や電線張力等の過大な荷重が作用した履歴を表すものであり、プレストレス力の減少を意味するひび割れであり、地表面付近の地際部に発生するのがほとんどである。しかし、支線や支柱が設置されている場合や、架線および引込線用ワイヤー等によりポール上部が拘束されている場合は、地際部以外にも発生する場合もある。なお、ひび割れ調査としては、発生位置、方向、本数、長さおよび幅を測定した。

合せ目開きは、型枠の合せ目部に発生する劣化であり、建柱後の経年による水酸化カルシウム等の溶脱により、合せ目部が浸食され、次に、ポール内部のモルタル分が流出し、極軽微な合せ目開きが発生し、その後、さらに浸食・流出が続き比較的大きな骨材だけが残った状態となる。このような状態になると、鉄筋は空気にさらされ、水や酸素等の侵入によって鉄筋が発錆し、最終的にはかぶりコンクリートの剥離・浮きに発展する。

剥離・浮きは、上記のようなモルタル流出先行型のほか、鉄筋錆先行型があり、車両接触等による外部からの過大な衝撃力や落雷も原因に挙げられる。なお、剥離・浮き調査としては、発生位置、長さ、幅および深さを測定し、鋼材発錆調査は、外観による目視により行った。

4.3 地区別劣化現象分析結果

各事象毎の劣化評価基準（○，△，▲，■）は表-3に示すとおりとし、PC ポールの各地区毎の経年劣化状況を纏めたものを表-4に示す。

また、表-3 の評価基準○以外の劣化を劣化有りとして評価し、各地区の劣化事象毎の発生割合を図-4に示す。

表面劣化は、いずれの地区においても一番発生割合が高いが、特に温泉地区は表面劣化が発生しやすい。また、表面劣化のグレードも一般地区、海浜地区、温泉地区となるにつれ悪くなっている。

縦ひび割れは、海浜地区においてその発生割合が他の地区よりも高くなっているが、これは、塩害による主鉄筋の発錆膨張によるものと思われる。なお、その劣化度は、離島の方が本土より大きくなっている。

横ひび割れは、いずれの地区においても表面劣化に次いで発生割合が高く、特に一般地区が高くなっている。これは、一般地区が海浜地区や温泉地区と異なって、ひび割れが鋼材の発錆等に発展しづらいことから、建替えの対象とはならないで長く延命化しているものが多かったためではないかと推察される。また、一般地区に関しては、住宅・山間地区の発生割合が商業・工業地区に比べて高くなっており、これは、風の遮蔽物となる建築物等がポール付近に少ないことや標高差による風圧力の増加に起因していると思われる。ただし、横ひび割れは、経年や地域特性といったものの他に、使用形態や建柱状態（受風面積の大小、不均一張力の有無、傾斜・湾曲の有無等）に左右されるところが大きいとも言える。

合せ目開きは、温泉地区が他の地区に比べて多く発生しており、これは、温泉地区では、強い酸により表面劣化が進行し、合せ目部モルタル層が流出しやすいことに

表-4 PC ポールの各地区毎の経年劣化状況

劣化環境地区	No	経年(年)	劣化状況					評価		
			表面劣化	ひび割れ		合せ目開き	剥離・浮き		鋼材発錆	
一般	商業	1	48	△	○	○	○	○	○	A
		2	46	▲	○	△	○	○	○	B
		3	46	△	○	○	○	○	○	A
		4	47	△	○	○	○	○	○	A
		5	49	△	○	○	▲	▲	△	C
	工業	6	43	○	○	○	○	○	○	A
		7	47	△	○	△	○	○	○	B
		8	42	○	○	○	○	○	○	A
		9	42	△	○	○	○	○	○	A
		10	44	▲	○	△	○	○	○	B
	住宅	11	49	△	△	▲	○	○	△	D
		12	43	△	○	△	○	○	○	B
		13	44	○	○	△	○	○	○	B
		14	44	△	○	△	○	○	○	C
		15	48	△	○	△	○	○	△	C
	山間	16	45	○	○	△	○	○	○	B
		17	47	○	○	△	○	○	○	B
		18	47	○	○	▲	○	○	○	D
		19	45	▲	○	○	○	○	○	B
		20	47	○	○	▲	○	○	○	C
海浜	本土	21	45	○	○	○	○	○	○	A
		22	43	○	○	△	○	○	○	B
		23	46	○	○	△	○	○	○	B
		24	45	△	○	○	○	○	○	A
		25	46	○	○	○	○	○	○	A
		26	45	▲	○	▲	○	○	○	D
		27	46	○	○	▲	○	○	○	C
		28	46	△	○	△	○	△	○	C
		29	44	△	○	○	○	○	○	A
		30	46	▲	○	△	○	○	○	C
	離島	31	45	▲	○	○	○	○	○	B
		32	41	▲	○	○	○	○	○	B
		33	27	○	△	○	○	○	○	B
		34	27	○	○	○	▲	○	○	C
霧島	35	47	▲	○	▲	○	○	○	D	
	36	36	△	△	○	○	○	○	B	
	37	36	△	▲	○	○	△	△	D	
	38	36	△	■	○	○	▲	▲	D	
	39	36	△	○	○	○	○	○	A	
	40	36	▲	○	○	○	■	■	D	
	41	35	■	○	○	○	○	△	D	
温泉	別府	42	36	△	○	○	○	○	△	C
		43	37	■	○	○	○	○	○	D
		44	41	△	○	△	○	○	○	B
		45	46	△	○	○	○	○	○	A
		46	45	▲	○	△	○	○	○	B
	雲仙	47	48	▲	△	△	○	○	○	C
		48	35	○	○	△	○	○	○	B
		49	35	▲	○	▲	○	○	○	C
		50	40	▲	○	○	○	○	○	B
		51	35	▲	○	○	○	○	○	B
		52	41	▲	○	△	○	○	○	B
		53	38	△	○	○	○	○	○	A
		54	41	△	○	△	▲	○	▲	C
		55	45	▲	○	○	△	○	○	C
56	37	○	○	△	○	○	○	B		
57	42	○	○	○	○	○	○	A		
58	36	△	○	○	△	○	○	C		
59	42	▲	▲	○	▲	○	○	D		
60	39	▲	○	○	○	○	○	B		

表-3 PC ポールの劣化評価基準

総合評価	事象別評価	表面劣化グレード*	ひび割れ	合せ目開き	剥離・浮き	鋼材発錆
A	○	①, ②	発生無し	発生無し		
B	△	③	ひび割れ幅0.05mm以下 ひび割れが閉塞している	モルタルの一部流出	表面のごく僅かな剥離	鉄筋腐食無しまたは面積のごく僅か
C	▲	④	ひび割れ幅0.05mm超0.25mm未満 ひび割れ幅0.05mm以下であるがその本数が多量に発生している	軽微な合せ目開きが発生	かぶり部コンクリートの断面欠損が生じている	主鉄筋腐食が軽微なものとまたは表面発錆のみ
D	■	⑤	ひび割れ幅0.25mm以上 ひび割れ幅0.25mm以下であるがその本数が多量に発生している	比較的大きな骨材だけが残った状態		主鉄筋より内側部分のコンクリートが断面欠損している
E			ひび割れ幅0.25mm以上かつ著しい錆汁を伴っている 斜めひび割れが発生している		主鉄筋が破断しているまたは地際部付近の主鉄筋に顕著な断面減少が生じている	

よるものと推察される。

剥離・浮きは、海浜地区においてその発生割合が他地区よりも高くなっているが、これは、塩害によって鉄筋腐食による膨張が生じているのではないかと推察され、特に本土より離島の方が劣化度が大きくなっている。

一方、鋼材発錆の発生割合は、海浜地区の離島で多く見られた。

次に、今回採用した PC ポールの劣化評価基準（A，B，C，D，E）を表-3 に追記するとともに、それに従って総合的に評価した各地区毎の劣化評価分析結果を図-5 に示す。

ここで、Aは、劣化が認められないもの又は劣化が極めて軽微なもの、Bは、劣化は軽微で補修の必要はないが経過観察は必要と判断されるもの、Cは、補修または計画的建替が必要と判断されるもの、Dは、現状での大幅な能力低下はないが計画的な建替が必要と判断され

るもの、Eは、早急に建替が必要と判断されるものである。なお、全事象に関して、評価■が存在すれば評価Dとし、表面劣化以外で評価▲が存在すれば評価C又はDとし、更に、各事象毎の劣化評価基準内の程度の差も考慮しながら総合的に評価した。

図-5 によると、今回、早急に建替が必要と判断される PC ポール（E評価）は無かった。しかし、計画的建替が必要と思われる PC ポール（D評価）は、平均経過年数が短いにも関わらず、海浜地区が一般地区の2.5倍、温泉地区が一般地区の1.5倍になっており、補修や計画的建替が必要と思われる PC ポール（C，D評価）も、海浜地区および温泉地区が一般地区の1.5倍となっている。これは、劣化進行に関して環境が多分に影響し、劣化進行度は、海浜地区>温泉地区>一般地区となることを示しており、海浜地区および温泉地区に対する計画的保全の重要性を示唆している。

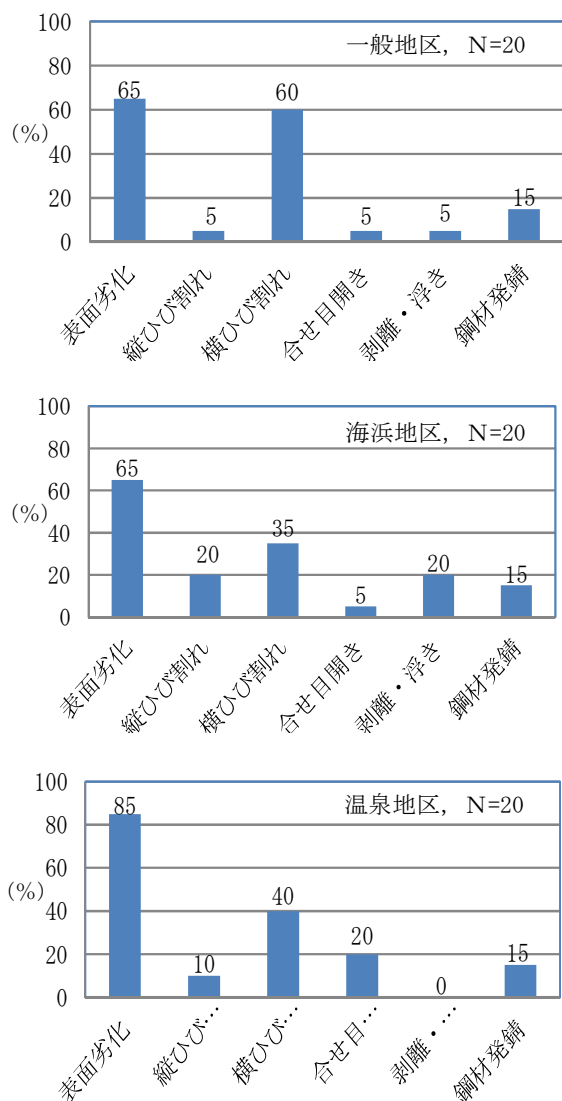


図-4 各地区の劣化事象毎の発生割合

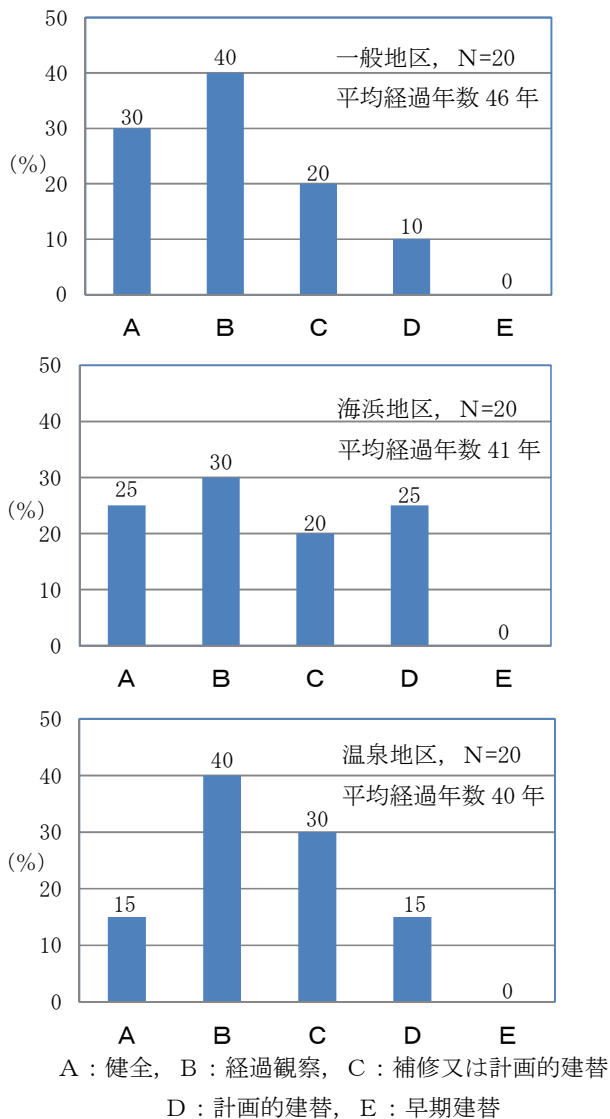


図-5 各地区の総合劣化評価結果

5. 結論

PC ポールの経年劣化に及ぼす環境条件として塩害・泉害等に着目し、それぞれの環境条件に対する影響度に関して調査研究を行い、以下の結論を得た。

- (1) コンクリート表面の劣化を表すグレード判定点は、環境の差にかかわらず年数が経つにつれ減少し、両者の相関性は高い。外部環境別に劣化勾配を比較すると、海浜および温泉地区の勾配が都市および山間部より大きくなる傾向にある。また、温泉地区が他の環境地区に比べて劣化到達年数が早くなる傾向となった。なお、モルタルが流出し全体的に粗骨材が表面に現われている状態になるのに、温泉地区でほぼ 40 年、その他の地区でほぼ 50 年かかると推定される。
- (2) 表面劣化は、いずれの地区においても一番発生割合が高いが、特に温泉地区は表面劣化が発生しやすい。また、表面劣化のグレードも一般地区、海浜地区、温泉地区となるにつれ悪くなっている。
- (3) 縦ひび割れは、海浜地区においてその発生割合が他の地区よりも高くなっているが、これは、塩害による主鉄筋の発錆膨張によるものと思われる。
- (4) 横ひび割れは、いずれの地区においても表面劣化に次いで発生割合が高く、特に一般地区が高くなっている。これは、一般地区が海浜地区や温泉地区と異なって、ひび割れが鋼材の発錆等に発展しづらいことから、建替えの対象とはならないで長く延命化しているものが多いためではないかと推察される。
- (5) 合せ目開きは、温泉地区が他の地区に比べて多く発生しており、これは、合せ目部モルタル層が流出しやすいことによるものと推察される。
- (6) 剥離・浮きは、海浜地区においてその発生割合が他地区よりも高くなっているが、これは、塩害によって鉄筋腐食による膨張が生じているのではないかとと思われる。
- (7) 今回調査した PC ポールの平均経過年数は、一般地区 46 年、海浜地区 41 年、温泉地区 40 年であったが、計画的建替えが必要と思われる PC ポールは、平均経過年数が短いにも関わらず、海浜地区が一般地区の

2.5 倍、温泉地区が一般地区の 1.5 倍になっており、補修や計画的建替えが必要と思われる PC ポールも、海浜地区および温泉地区が一般地区の 1.5 倍となっている。これは、劣化進行に関して環境が多分に影響し、劣化進行度は、海浜地区>温泉地区>一般地区であることを示しており、海浜地区および温泉地区に対する計画的保全の重要性を示唆している。

参考文献

- 1) 吉田晴亮：プレストレスコンクリート電柱の劣化状況調査，コンクリート工学，Vol.45，No.8，pp.75-78，2007
- 2) 尾花祥隆，鳥居和之：プレストレスコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1065-1070，2008
- 3) 船本憲治，藤祐介：高強度プレストレスコンクリートポールの曲げ変形性能に関する実験的研究，土木学会第 68 回年次学術講演会，V-050，pp.99-100，2013.9
- 4) 杉本六郎：鉄筋コンクリートポールおよびくいに用いるコンクリートの施工方法に関する研究，土木学会論文集，No.88，pp.29-49，1962.12
- 5) 船本憲治，藤祐介，古賀智博，井上嘉雄：遠心成形した高強度コンクリート製品の基本性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1541-1546，2006
- 6) 上田洋，工藤輝大，佐々木孝彦：コンクリート電柱の劣化診断と維持管理，鉄道総研報告，Vol.18，No.10，2004.10
- 7) 樋口隆行，江口正孝，吉田晴亮，細田暁：自然治癒したコンクリート電柱のひび割れの治癒機構，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1415-1420，2011
- 8) 榎村能成，岸利治，上田洋，魚本健人：円形プレキャスト製品における軸方向微細ひび割れの発生要因に関する検討，土木学会第 58 回年次学術講演会，V-142，pp.283-284，2003.9