

[1061] 16年材令プレストレストコンクリート中のPC鋼棒の性質

山下 英治 (高周波熱錬 製品事業部)  
 正会員 ○ 池上 由洋 (高周波熱錬 製品事業部)  
 正会員 岡田 英三郎 (花王 化学品本部)  
 大浦 昭治 (東扇アサノポール)

1. 緒言

コンクリートの高強度・高品質化は高性能減水剤や流動化剤など種々の優れた混和剤の使用により実現されているが、その反面コンクリート中に含まれる塩分に起因した鋼材の腐食が大きな問題となっている。元来、多孔性であるコンクリートに塩分 (Cl<sup>-</sup>イオン) が侵入すると鋼材の不動態被膜破壊や濃度差による局部腐食を生じて、鋼材の劣化を招くことがよく知られており [1],[2]、こうした問題は高強度コンクリートとPC鋼材を用いた遠心力成形プレストレストコンクリート (PC) パイルの場合においても例外ではない。

しかしながら、コンクリートの構成材料である混和剤や、製造時に不可避的な混入を伴う塩分の混入量がPCパイル中の鋼棒の腐食や機械的性質、コンクリートの諸物性およびパイル特性に与える影響を長期的に調査した例は少ない。そこで本研究は、これらの知見を得ることを目的として 9.2 mm のPC鋼棒と、減水剤や塩化カルシウムを意図的に添加した数種類のコンクリートを用いて遠心力成形PCパイル供試体を作製し、大気中での暴露を16年間継続した後、供試体パイル中のPC鋼棒の発錆状況観察、引張試験、SEM (走査型電子顕微鏡) による破面解析およびパイルの曲げ強度試験を行い、コンクリート中の混和剤や塩分がPC鋼棒の性質やコンクリートの諸物性に及ぼす影響を調査したものである。

2. 実験方法

2・1 PC鋼棒

本実験に用いたPC鋼材は JIS G 3109 に規定する異形PC鋼棒D種1号 9.2 mm であり、その機械的性質を表-1に示す。その特徴は、低合金炭素鋼の熱間圧延線材に異形引抜加工を加えた後、適切な熱処理を施して所定の機械的性質を与えるために、均質微細な金属組織や高い弾性限が得られることである。そのために優れた靱性や、良好な耐リラクセーション性をもっている [3]。

表-1 PC鋼棒の機械的性質

	降伏点 (Kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
JIS規格値	130	145	5
実測値	142	149	9

2・2 コンクリート配合および供試体パイル

各供試体パイルにおけるコンクリート配合、スランブ値および作製数量を表-2に示す。本実験の目的から同表に示した供試体パイルは、コンクリートへの添加物により次の3種類の系列に区別した。すなわち、1)無添加系 2)混和剤添加系 3)塩化カルシウム添加系 である。

1)の無添加系は、いわゆるプレーンコンクリートであり混和剤や塩化カルシウムの添加は行っていない。2)の混和剤添加系は、コンクリート中に市販される3種類の減水剤をそれぞれ加えたものである。減水剤の種類は、NaM：ナフタリン系高性能減水剤 (標準形)、NaMR：ナフタリン系高性能減水剤 (遅延形)、そしてNaP：リグニン系減水剤 (標準形) である。

表-2 供試体パイルのコンクリート示方配合一覧

供試体 パイル	添加系	添加量 (%)		W/C (%)	S/A (%)	単 位 量 (Kg/m <sup>3</sup> )						スパン (cm)	作製数量
		対 セメント	対 コンクリート			水	セメント	細骨材	5号砕石	6号砕石	湿和剤		
No. 0	無添加系	-	-	38.8	44	163	420	797	825	205	-	3.8	2
No. M	湿和剤 添加系	0.6	0.10	35.2	43	148	420	791	862	216	2.52	5.5	2
No. MR	〃	0.4	0.07	35.2	43	148	420	791	862	216	1.68	4.2	2
No. P	〃	0.25	0.04	35.2	43	148	420	791	862	216	1.05	3.4	2
NaC-0.05	塩化カルシウム 添加系	0.05	0.009	38.8	43	163	420	782	839	211	0.21	2.2	2
NaC-0.5	〃	0.5	0.09	38.8	43	163	420	782	839	211	2.10	4.7	2
No. C-1	〃	1.0	0.17	39.3	43	165	420	775	838	210	4.20	4.2	2
No. C-2	〃	2.0	0.35	39.8	43	167	420	770	838	210	8.40	4.5	2
No. C-4	〃	4.0	0.70	40.3	43	169	420	769	834	208	16.80	3.0	2

NaMおよびNaMRには塩分は含まれないが、NaPには極微量の塩分が含まれている。また、3)の塩化カルシウム添加系では、各コンクリートのセメント重量に対して塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>・2H<sub>2</sub>O)の添加量が0.05%から4%までの5水準の塩分量をもつ供試体パイルを作製した。

表-2に示したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は荒川産砂(比重2.62, FM 2.97)、粗骨材は荒川産玉砕石(比重 2.65, FM 6.97 : 5号/6号=8/2混合)を使用した。そして、2・1に示した 9.2 mm のPC鋼棒を供試体パイル中に4本ずつ等間隔に配置し、各添加系のコンクリートと共に通常の遠心力成形PCパイル製造工程にしたがって供試体パイルを作製した。それらの形状寸法を図-1に示す。また、同時に直径10cm、高さ20cmの円柱

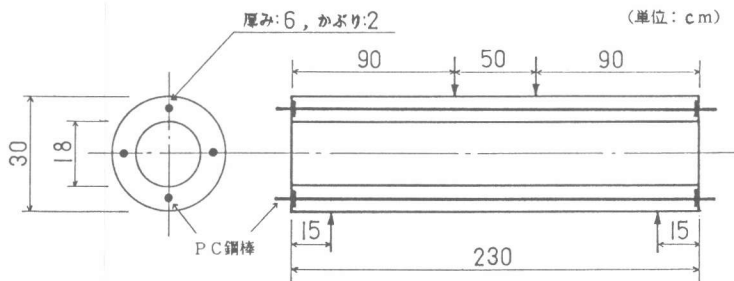


図-1 供試体パイル寸法および曲げ強度試験概要

供試体も各添加系毎に作製し、コンクリートの圧縮強度試験に供した。なお、供試体パイルにおけるPC鋼棒のプレストレス導入時の緊張応力は規格引張強さの70%とし、養生は常圧蒸気養生(昇温20℃/hr→保持65℃, 3hr→自然放冷)を行った。そして、PC鋼棒の腐食挙動を主体に調査する前提から、すべての供試体にはらせん筋を使用していない。

以上から得られた各供試体パイルおよび円柱供試体は、飛来塩分などの影響を受けない内陸市街地にすべて屋外暴露し、材令5年時において作製数量の半分を次に示すそれぞれの試験に供し、さらに材令16年時において残りの半分を同様に各試験に用いた。なお、暴露期間中の気温と湿度は16年を通し、それぞれ-3~34℃および40~80%の範囲であった。

### 2・3 パイル曲げ強度試験およびPC鋼棒の腐食状況観察

表-2に示した各添加系の供試体パイルは材令が5年と16年において、円柱供試体によるコ

ンクリート圧縮強度試験および図-1の矢印が示す載荷方法によってパイル曲げ強度試験を実施し、コンクリートの力学特性とパイルの曲げ特性を確認した。そしてフェノールフタレイン溶液による中性化試験を行った後、各供試体パイル毎に4本のPC鋼棒すべてを取り出し、定着部を除く長さ2200mmにわたって鋼棒表面の発錆部分を透明なビニールシートに直接トレースし、自動面積計を用いて測定したそれらの面積を同観察部分の鋼棒表面積で除して発錆率を求めた。なお各供試体パイルでの発錆率は鋼棒4本の平均値とした。

#### 2・4 PC鋼棒の引張試験およびSEMによる破面解析

発錆率を求めたそれぞれのPC鋼棒は観察部分より長さ600mmの試験片を2本ずつ採取し、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」にしたがって引張試験を行い、機械的性質（降伏点、引張強さ、伸び）を測定した。

また、鋼棒の破断面には破壊形態を示す特徴的な模様が現れ、これを観察することでその破壊機構や物性を推察出来る[4]。そこで材令16年のPC鋼棒において、発錆が著しく引張試験での機械的性質が低下していたものについては、こうした破面解析手段を用いて引張り破断面を観察し、破断形態からその低下原因を調べた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3・1 コンクリート強度とパイル曲げ特性に及ぼす混和剤および塩分量の影響

表-2に示した各添加系における円柱供試体から求めたコンクリートの力学特性値とパイル曲げ試験の結果を表-3に示す。なお、表中のヤング係数は円柱供試体破壊荷重の1/3での値を用いた。また、No.C-0.5の材令16年時でのパイル曲げ試験は供試体破損のため実施していない。

表-3 コンクリートの力学特性とパイル曲げ特性

供試体 パイル	円柱供試体						供試体パイル			
	圧縮強度 (Kgf/cm <sup>2</sup> )		ヤング係数 (x10 <sup>5</sup> Kgf/cm <sup>2</sup> )		最大ひずみ量 (x10 <sup>-4</sup> )		ひび割れ曲げ モーメント (tf・m)		破壊曲げ モーメント (tf・m)	
	5年	16年	5年	16年	5年	16年	5年	16年	5年	16年
No. O	918	907	4.77	4.64	26.6	27.4	2.83	2.69	4.74	5.14
No. M	1001	1065	5.28	5.27	24.5	25.0	2.58	2.80	4.65	5.33
No. MR	1042	1084	5.10	5.19	25.2	24.9	3.07	2.78	4.76	5.12
No. P	1016	973	4.90	4.76	27.2	26.2	2.74	2.74	4.69	5.35
No. C-0.05	966	992	4.84	4.81	26.6	26.6	2.58	3.10	4.63	4.15
No. C-0.5	951	931	4.62	4.75	28.3	25.8	2.48	NT	4.63	NT
No. C-1	943	960	4.74	4.78	26.7	27.6	2.57	2.97	4.65	5.32
No. C-2	931	984	4.69	4.64	27.7	26.5	2.42	2.89	4.86	5.31
No. C-4	1008	980	4.73	4.85	27.3	27.5	2.57	2.78	4.52	5.07

注<sup>1</sup>) 表中NTは未試験であることを示す。

注<sup>2</sup>) JIS A 5335 によるひび割れ曲げモーメントの規格値は  
2.5 tf・m 以上。

表-3からもわかるように、材令が16年を経過してもコンクリート強度やそれぞれの曲げモーメントで示したパイル曲げ特性の低下は見られず、さらに、どの供試体についてもコンクリートの中性化は何ら認められなかった。これらは本実験に用いた減水剤や塩分の添加がコンクリート強度やパイル特性の長期的な維持に対し悪影響を及ぼさなかったことを示している。

#### 3・2 PC鋼棒の発錆と機械的性質に及ぼす混和剤および塩分の影響

2・3および2・4に示したそれぞれの試験から得られた材令5年と16年におけるPC鋼棒の発錆率と機械的性質（降伏点、引張強さ、伸び）の変化を、各混和剤と塩分添加量に対する関係で整理した。それらの結果を図-2に示す。同図から、表-2において区別されたコンクリート中の混和剤と塩化カルシウム添加量に対するPC鋼棒の発錆率および機械的性質には次のような特徴があげられる。

(1) 無添加系Na<sub>2</sub>Oおよび塩分を含有しない混和剤添加系Na<sub>2</sub>M, Na<sub>2</sub>MRの鋼棒では、材令16年においても発錆は無視出来る程にわずかである。

(2) 極微量の塩分を含有する混和剤添加系Na<sub>2</sub>PとNa<sub>2</sub>C-0.05（塩化カルシウム添加系）の鋼棒においても、Na<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>MおよびNa<sub>2</sub>MRと同様に発錆率そのものの値は無視出来る程度に小さい。

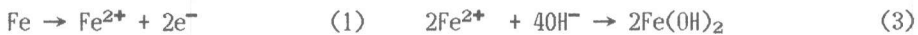
(3) 塩化カルシウム添加系では、その添加量に比例して鋼棒の発錆率も増加しており、Na<sub>2</sub>C-0.5では材令5年と16年の値にバラツキが見られるものの、Na<sub>2</sub>C-1で約10%、Na<sub>2</sub>C-4では約30%前後となり、塩分量と発錆率はよく対応した関係にある。

(4) 鋼棒の、降伏点と引張強さは材令5年と16年においてもJIS規格値を満足しており、発錆率が最も高いNa<sub>2</sub>C-4の場合でも著しい強度の低下は見られていない。

(5) しかしながら、塩化カルシウム添加量が1%（対セメント）を越えると、発錆率の増加に加えて、鋼棒表面には孔食（＝鋼棒断面の欠損）が認められ、これに対応した伸びの低下が見受けられる。

(6) そして興味深いことに、材令5年から16年にかけての11年間ではどの添加系においても鋼棒の発錆率の増加（＝腐食の進展）は見られていない。

こうした腐食の進展が見られなかった理由として、コンクリート中の鋼棒に対する水分と溶存酸素の作用が考えられる。一般に、鋼材の腐食は次の反応式で表される。



すなわち、鋼材に水分と溶存酸素が作用して(1)式のアノード反応と(2)式のカソード反応が進行し、腐食電池を形成して(3)式の水酸化第一鉄を生じ、これがさらに(4)式の反応を起こしてFe(OH)<sub>3</sub>、つまり赤サビを生じる。Cl<sup>-</sup>イオンはこれらの反応を促進させて鋼材の腐食を助長する。本実験における初期の腐食は以上の反応がCl<sup>-</sup>イオンの反応量を決定する塩化カルシウムの添加量に比例して生じたと推察される。しかしながら(1)式から(4)式までの反応式を見て

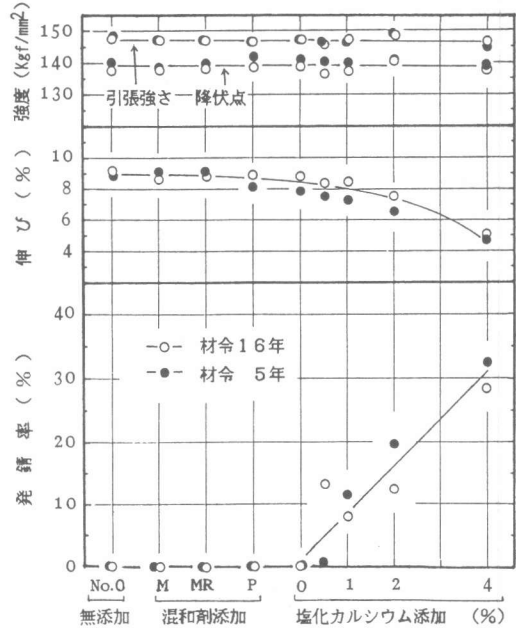


図-2 PC鋼棒発錆率および機械的性質に及ぼす混和剤、塩分の影響

も明らかのように、鋼材の腐食は水分の存在がなければ進行せず、したがってコンクリートが密実で透水性が小さいならば外部からの水分の供給はなく、 $Cl^-$  イオンが存在しても(1)～(4)式の反応は起こらず鋼材の発錆はないことがわかる [5]。本実験において、コンクリート中に塩分が存在しながらも材令5年以降に鋼棒の発錆が進展しなかった主な理由は、コンクリートの密実性が良好で腐食の反応に必要な水分の継続的な侵入がなかったためと考えられる。

### 3・3 PC鋼棒の腐食と破断形態の特徴

本実験においてPC鋼棒の発錆量増加に対し、降伏点や引張強さなどの強度は十分保持されていたものの、鋼棒の延性を示す伸びの値が低下していた。高強度に加え高い延性が求められるPC鋼棒にとってその低下原因を把握することは「腐食に起因した延性の低下」という立場から重要である。すなわち、コンクリート中でのPC鋼棒にはRC鉄筋と異なり引張応力が作用しており、鋼棒が腐食環境下であれば応力と腐食が同時作用的に働き、いわゆる応力腐食を生じる。これに起因した鋼棒の破断は伸びや絞りを伴わず脆性的であり、PCパイプに限らずこうしたPC鋼棒の応力腐食は避けなければならない。そして、応力腐食における鋼棒の破断形態はその破断が開始された部分（起点）を拡大すると、粒界割れと呼ばれる金属の結晶粒界に沿って分離破壊した割れが観察される [6]。また、応力腐食のない健全なPC鋼棒を引張り破断させると伸びや絞りを伴う延性破壊となり、その破断面には材料の塑性変形に伴い材料中の析出物や介在物の微粒子などが核となって微小空洞が多数形成され、これらが合体したディンプルと呼ばれる破断形態が現われる [4]。それぞれの破断形態モデルを図-3に示すが、このような破面解析から破断形態の特徴をとらえ、鋼棒の機械的性質の変化と対応させることにより、腐食に起因する鋼棒内質の状態を把握することが出来る。

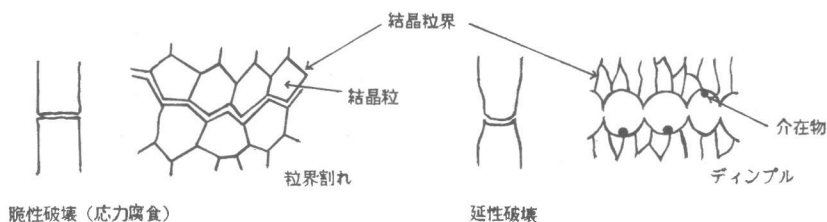


図-3 引張変形によるPC鋼棒の破断形態

そこで本実験結果から、発錆量が大きく、伸びの低下が見受けられた塩化カルシウム添加系のNaC-2とNaC-4、さらに表面の発錆がなく健全な機械的性質を維持した無添加系NaOのPC鋼棒について、それぞれ材令16年における引張試験後の試験片破断面をSEMによって観察し、特にその破断起点における破壊形態から伸びの低下原因を調べた。それらの結果を表-4、および写真-1に示す。

表-4から、塩分の添加量に対応して発錆が大きく、鋼棒の延性を示す伸びの低下が見受けられたNaC-2やNaC-4の破断起点部分には

表-4 破面観察結果

PC鋼棒	発錆率 (%)	伸び (%)	破面形態 (起点)
No. 0	0.476	9	ディンプル破面
No. C-2	11.98	7.5	ディンプル破面
No. C-4	28.26	5	ディンプル破面

NaOと同様、すべて延性破壊を示すディンプルが観察され、それらの特徴である粒界割れは全く見られなかった。したがって、本実験におけるコンクリート中での塩分作用によるPC鋼棒の腐食は、鋼棒断面の欠損と腐食生成物の発生にとどまり、鋼棒の内質的な変化を伴う応力腐食ではないこと、あるいはそれらに起因した潜在的な割れはなかったことがわかった。そして応力腐食を生じなかった理由として、それらを生じるためのアノード反応やカソード反応に必要な水分の供給がある一定期間後には、なかったためと推察される。また、伸びの低下した原因は以上の観察結果から、鋼棒自身の脆化が生じたためでなく、引張試験時の負荷応力に対する鋼棒の有効断面積の減少と腐食欠損部への応力集中によるものと考えられる。

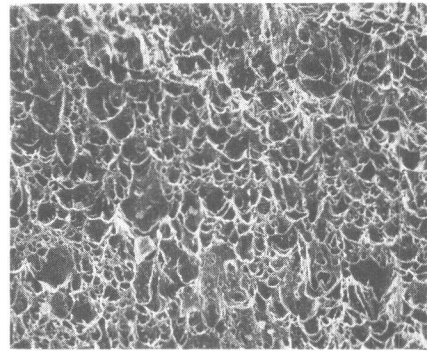


写真-1 No.C-4の破断起点部(フィカ 破面)

#### 4. 結 論

以上の試験結果から材令5年および16年におけるコンクリートの諸物性およびプレストレストコンクリート中のPC鋼棒について次のような知見を得た。

(1) 各配合のコンクリート供試体の圧縮強度およびヤング係数などは材令16年後でも十分な性能を維持し、中性化も起こっていなかった。

(2) コンクリート中に塩分を含まないPCパイルにあっては材令16年でもPC鋼棒の発錆はなく、また鋼棒の機械的性質の低下も認められなかった。

(3) PC鋼棒の腐食に対し、減水剤の使用は材令16年においても何ら影響を与えないが、塩化カルシウム( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )がセメント重量に対し1%以上含有された場合にはその添加量に比例して発錆量が増加し、鋼棒の強度は維持されるものの伸びは低下する。

(4) 塩分を含むコンクリート中でのPC鋼棒の発錆は、材令5年以降11年間での増加は見られなかった。

(5) SEMによる破面解析から、発錆が著しく伸びが低下したPC鋼棒においても、鋼棒自身の脆化はなかった。

(6) 各供試体パイルは鋼棒発錆の有無にかかわらず材令16年後でも十分な曲げ特性を維持していた。

本論文をまとめるにあたり、京都大学工学部 六車 熙先生および服部 健一博士はじめ、関係各位に多くの御指導を賜った。ここに、厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- [1] P. Heiligenstaedt und K. Bohenkamp : Arch. Eisenhuettenwes, 47,107,1976
- [2] N. Exel : Second Intern. Congress on Hydrogen in Metals, 3E7, 1977 Paris
- [3] 山崎隆雄、山下英治 : PC鋼棒の熱処理、熱処理、20,4, 1980
- [4] 小寺沢良一 : フラクトグラフィとその応用、日刊工業新聞社、P.P 25-68,1981
- [5] 工藤矩弘 : コンクリート用鉄筋の腐食と防錆剤のはなし、表面、20,7, 1982
- [6] 北川英夫、小寺沢良一 : フラクトグラフィ、培風館、P.P 125-130,1977