

論文 32年材齢高強度コンクリートパイルの耐久性

水沼 達也*1・正中 雅文*2・元木 信二郎*3・池上 由洋*4

要旨：32年経過後のプレストレストコンクリートの諸物性に及ぼす添加剤の影響を SEM 及び X-RD により水和物構造を検討すると共に、PC 鋼棒への影響を検討した。PC 鋼棒の錆は、無添加及び高性能減水剤添加コンクリートにおいて殆ど観察されないが、塩化カルシウム 0.5% 添加以上で急激に増加している。しかし、材齢 5 年以降、錆は殆ど進行しておらず、また、十分な機械特性を有している。また、中性化は内面のノロ相に確認されたが、外面からの中性化は殆ど確認されない。SEM 観察から、無添加では針状結晶が多く観察されたが、塩化カルシウムを添加すると針状結晶が少なくなり、添加剤の影響を受けている。

キーワード：高性能減水剤、塩分、プレストレストコンクリート、鉄筋、長期耐久性

1. はじめに

1964 年に服部らにより開発されたナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物²⁾はその優れた分散性能によりコンクリートの高強度化に大いに貢献し、プレストレストコンクリートパイルやボールの製造を可能とし、広く実用化されている。これらのコンクリート製品は自然界で長期間、重要な構造部材として使用されているが、高性能減水剤を使用したコンクリート製品の屋外暴露における長期耐久性についての報告がほとんどない。

前報告⁵⁾に引き続き、32 年屋外暴露条件下での高性能減水剤を使用した遠心成形プレストレストコンクリートの長期耐久性及び耐久性におよぼす塩分の影響を検討し、既存プレストレストコンクリート製品の信頼性を確認すると共に、高強度コンクリートの耐久性に関する研究の一資料とすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16）、細骨材は荒川産砂（密度 2.62, FM2.97）、粗骨材は荒川産玉砕石（密度 2.65, FM6.97, 5号/6号=8/2 混合）を使用した。添加剤はナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物 Na 塩（標準型；MY150, 遅延型；MY150R と略す）、リグニンスルホン酸 Na 塩（LS と略す）を使用し、塩分量の調整には塩化カルシウム（CL と略す）を使用した。

PC 鋼棒には JIS G 3137 規定の異形 PC 鋼棒 D 種 1 号 9.2mm（JIS 規格：0.2%耐力=1275 N/mm², 引張強さ=1420 N/mm², 破断伸び \geq 5%）を使用した。

2.2 コンクリート配合と養生条件

使用したコンクリートの配合を表 1 に示す。遠心成形時の成形状態はスランプにより異なる為、添加剤添加によるスランプの変動は単位水量により調整した。養生は、成形後、常圧蒸気養生（昇温 20°C/hr→保持 65°C, 3hr→自然放冷）を行った。コンクリートの圧縮強度は、16 年材齢で 90-100N/mm²である⁵⁾。

*1 花王（株）化学品研究所室長 工修（正会員）

*2 花王（株）化学品研究所グループリーダー 工修

*3 高周波熱錬（株）製造事業部製造部課長 工修

*4 高周波熱錬（株）製造事業部営業部課長（正会員）

表-1 コンクリート配合表

種類 と記号	添加量%対C		W/C %	s/a %	単位量 kg/m ³					スラブ ^o cm
	分散剤	CL			水	セメント	川砂	砕石 5号	砕石 6号	
無添加	—	—	38.8	44	163	420	797	825	205	4.0
MY150	0.6	—	35.2	43	148	420	791	862	216	5.5
MY150R	0.4	—	35.2	43	148	420	791	862	216	4.0
LS	0.25	—	35.2	43	148	420	791	862	216	3.5
CL0.05	—	0.05	38.8	43	163	420	782	839	211	2.0
CL0.5	—	0.50	38.8	43	163	420	782	839	211	4.5
CL1.0	—	1.00	39.3	43	165	420	775	838	210	4.0
CL2.0	—	2.00	39.8	43	167	420	770	838	210	4.5
CL4.0	—	4.00	40.3	43	169	420	769	834	208	3.0

2.3 試験体の保管条件

材齢 16 年の試験の際に、遠心プレストレストコンクリートパイプ (30φ×230cm) を 2 つに切断し、一方を PC 鋼棒の物性測定などに使用した。残った半分は切り口をエポキシでコーティングし、16 年間屋外暴露後、今回の試験に供した。なお、暴露期間中の気温、湿度、及び降雨量を表-2 に示す。

表-2 屋外暴露条件

	1968-1972	1973-1984		1984-2000
	熊谷	熊谷	和歌山	和歌山
平均気温 °C	14.9	14.2	16.9	16.6
平均湿度 %	69.4	66.4	69.2	66.6
平均雨量 mm	1023	96.6	108.9	110.3

2.4 試験概要

試験体はエポキシコーティングした前回の切断面から 43cm で切断し、今回の試験に供した。残りのコンクリート片は再びエポキシコーティングを行い屋外暴露を継続する。

それぞれのコンクリートパイプから対角の PC 鋼棒を 2 本ずつ取り出し、発錆率を測定した。発錆率は PC 鋼棒の錆部分をポリプロピレンフィルムに転写し、画像解析装置 (ニレコ製

LUZEX FS) にて測定し、(錆部分面積/鋼棒表面積)×100 として求めた。その後、JIS Z 2241”金属材料引張試験方法”に従って引張試験を行い、機械的性質 (降伏値、引張強さ、破断伸び) を測定した。

一方、コンクリートの耐久性は、コンクリート断面に 1%フェノールフタレイン水溶液を噴霧し、中性化の進行度を観察すると共に、写真-1 に示すように断面を 4 分割し、粉末 X 線回折装置 X-RD (テクノス社製 EXAC-820) 及び走査型電子顕微鏡 SEM (日立製 S-4000) によりセメント水和物の観察を行った。

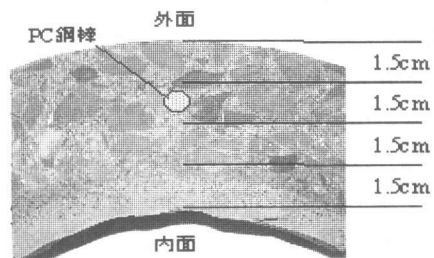


写真-1 コンクリート断面

3. 結果及び考察

3.1 PC 鋼棒の発錆率及び機械的性質

材齢 5 年及び 16 年のデータに加え、材齢 32 年の PC 鋼棒の発錆率と機械的性質 (降伏点、引張強さ、破断伸び) に及ぼす各種添加剤の影

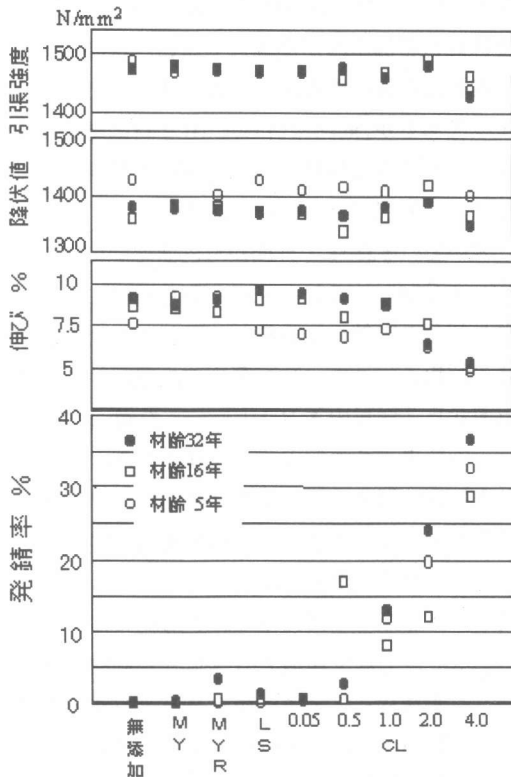


図-1 PC鋼棒の発錆率及び機械的性質に及ぼす添加剤の影響

響を図-1に示す。

塩化カルシウムを添加していない無添加、MY150、MY150R及びLSのPC鋼棒の発錆率は殆ど無視できる程度である。MY150Rの発錆率が若干増加しているのは、錆の発生状況からエポキシによるシーリングが不十分だった為と考えられる。

一方、塩分の影響を見ると、セメント質量に対して塩化カルシウム添加量が0.05%では殆ど無視できる程度であったが、0.5%以上では添加量の増加と共に直線的に発錆率が増加している。これは、PC鋼棒の発錆限界量が0.05%（塩素イオン量； 0.13kg/m^3 ）と0.5%（塩素イオン量； 1.3kg/m^3 ）の間にある。この結果は、コンクリート中の塩素イオンによる鋼材の発錆限界量が

$0.25\sim 0.5\text{kg/m}^3$ であり、 $0.5\sim 1.0\text{kg/m}^3$ で急増するとの報告⁴⁾と一致する。

しかし、経年で見ると発錆率は5年材齢以降、32年材齢に至ってもほとんど進行していないという興味深い結果が得られている。これは、初期にコンクリート中の溶存酸素及び塩分により腐食が進行したが、その後、コンクリート部の緻密な組織形成により酸素及び水分の供給が遮断され、錆の進行が停止した物と考えられる。

材齢32年後の機械的特性は錆が観察されたPC鋼棒においてもほぼJIS規格を満足しており、ここで観察されたPC鋼棒の錆は極表層部に限られていると考えられる。しかし、破断伸びは塩化カルシウム量が1%を越えると低下する傾向にあり、前回の報告とほぼ同様な結果が得られた。

3.2 コンクリートの中性化度

中性化度は、PC鋼棒取り出した後の断面をフェノールフタレイン法により観察すると共に、特に、PC鋼棒付近の中性化と錆の關係に着目した。フェノールフタレインにより着色すると

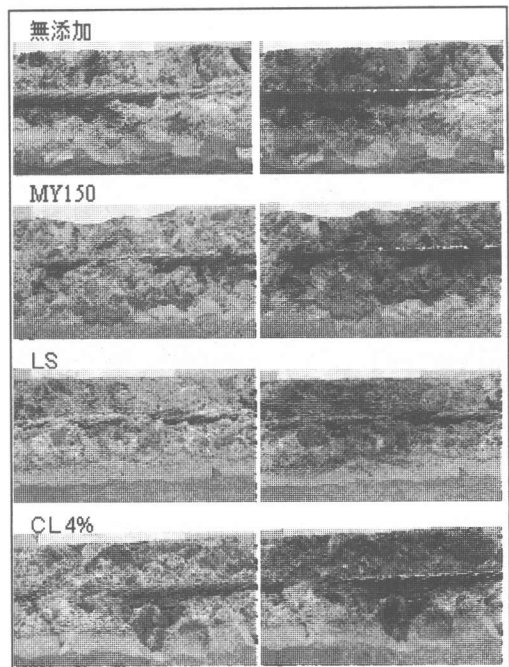


写真-2 コンクリート断面の中性化状況

PC 鋼棒の錆の状況が見にくくなるため、フェノールフタレイン噴霧前後の**写真-2**を示した。

中性化速度を岸谷らの式¹⁾を用いて求めると、本試験体 W/C=0.4 の 32 年後での中性化深さは 2mm 以下と小さくなる。また、飛坂らは促進試験条件下での AE コンクリートの中性化速度を検討し、W/C=0.35 以下では中性化が殆ど認められないと報告している⁷⁾。今回の結果は全体的にパイル内面のノロ層部の中性化は確認されたが、外面からの中性化はほとんど進行しておらず、従来の理論式や促進試験による耐久性検討の結果と一致する。

また、中性化と PC 鋼棒の錆との関連であるが、PC 鋼棒、特に、錆の発生している部分でもフェノールフタレインと反応して赤色を呈しており、中性化のと因果関係は確認できなかった。

3.3 コンクリート硬化体の組織観察

コンクリート硬化体中の水和物の観察を SEM、及び X-RD を用いて行った。添加剤の影響が反映されやすい無添加、MY150、LS、CL4.0 についての硬化体の SEM による観察結果を**写真-3**に示す。

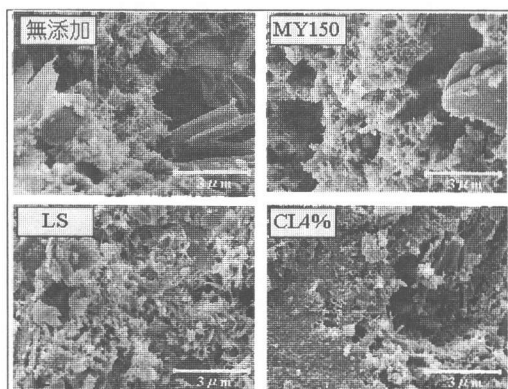


写真-3 セメント水和物のSEM写真

針状結晶はほぼすべてに観察されたが、結晶の大きさ及び量は添加剤によって異なり、無添加、MY150、LS、CL4.0 の順に結晶が小さく

なり、量も少なくなる傾向にある。特に、CL4.0 では針状結晶の量が極端に少ない。この様に添加剤は硬化体の微細構造には影響を与えているようであるが、前回報告した 16 年材齢時のコンクリートの強度特性には添加剤の影響がほとんど無く、無視できる範囲である。

続いて、**写真-1**の外面から内面方向に 1.5cm ずつ 4 分割し、コンクリートから採取したモルタル部分を乳鉢にて粉碎し、X-RD により硬化体の解析を行った。PC 鋼棒が設置されている表面から 2 層目の X-RD チャートを**図-2**に示す。

この結果より下記のことを確認した。

- (1) 未水和セメントは殆ど検出されなかった。
- (2) トバモライトなどの水和鉱物についても殆ど検出できなかった。
- (3) 4 層全ての部分から、水酸化カルシウムだけでなく炭酸カルシウムが同時に検出された。フェノールフタレイン法で赤色反応した部分も炭酸化が進んでいることを示している。

フェノールフタレイン法で着色した部分からも炭酸カルシウムが検出されることは既に福島らにより報告されており、その中性化深さはフェノールフタレインで測定される未着色部分の 2 倍の深さにあると報告している^{6) 8)}。

中性化の程度を定量化する為に、水酸化カルシウムによる主回折ピーク $2\theta=34.1^\circ$ (2.63 Å) と炭酸カルシウムによる主回折ピーク $2\theta=29.4^\circ$ (3.04 Å) を用いて、炭酸カルシウム/水酸化カルシウム量比を求めた。

炭酸カルシウムの比率は、外面に比べて内面の方に多く検出される傾向にあり、フェノールフタレイン反応の結果と一致する。しかし、その差は小さく、むしろ添加剤の影響の方が大きい。深さ方向にあまり濃度勾配が出来なかったのは肉厚が約 6cm と薄いため炭酸ガスの拡散が全体に起こったと考えられる。興味深いことは**表-3**に示すように添加剤により炭酸化度が異なった事である。炭酸カルシウムの比率は無

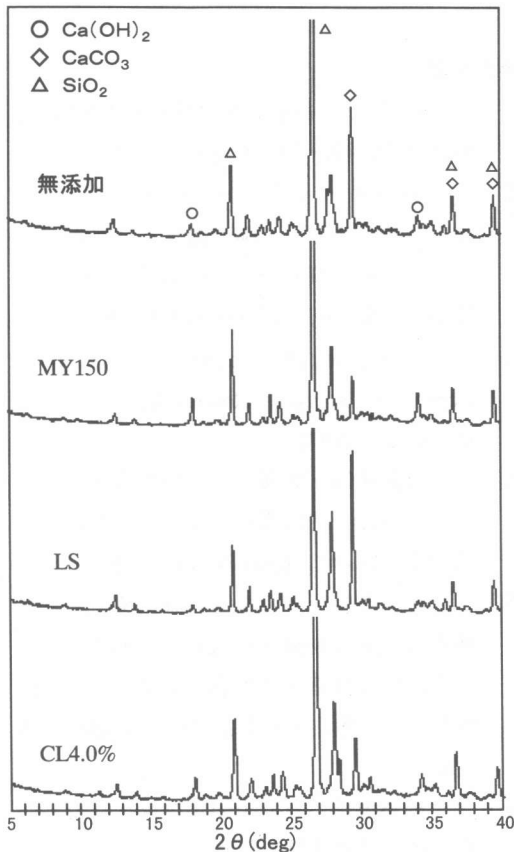


図-2 無添加系のX線回折チャート

添加及びLSが高く、CL4.0、MY150の順に減少している。炭酸化の程度は、無添加系とMY150とで1.8倍程度の違いがあり、これは単にコンクリート配合に由来する物だけでなく、添加剤の影響が考えられる。

長瀧らは中性化予測の検討の中でコンクリート配合と共に初期養生条件の影響を受けることを指摘している⁴⁾。今回の結果では、W/Cの小さいMY150が、そして、初期の水和反応の速いCL4.0及びMY150が炭酸化の進行が遅くなる傾向にあり、長瀧らの結果と同様な傾向を示した。

また、中性化の評価方法として簡便なフェノールフタレイン法が多く用いられるが、福島らが指摘している様にフェノールフタレインで着色した部分でも着実に炭酸化は進行しており、今

後、炭酸化の程度と耐久性の関連も検討する必要があると考える。

表-3 中性化度

	CaCO ₃ /Ca(OH) ₂
無添加	0.55
MY150	0.31
LS	0.55
CL 4%	0.44

4. まとめ

以上の結果から、PC鋼棒及びコンクリートの耐久性に関して以下の知見を得た。

- (1) 無添加、MY150、MY150R、LS、及びCL0.05コンクリートから採取したPC鋼棒は32年後において、防錆率も無視できる範囲であり、十分な機械的強度を維持していることを確認した。
- (2) PC鋼棒への塩分の影響を見ると、塩化カルシウム0.5%以上では添加量の増加と共に発錆率が增大する傾向にあるが、十分な機械的強度が維持されている事が確認された。しかし、破断伸びは塩分量の増加と共に低下する傾向にある。
- (3) 全てのコンクリート中のPC鋼棒は16年測定時以降ほとんど劣化が進行していない。
- (4) フェノールフタレイン法によるコンクリート断面の中性化は内面のノロ相で一部観察されたが、パイルの外側及びPC鋼棒近傍ではほとんど進行していない。しかし、X線回折による観察では、フェノールフタレインで赤色に呈色した部分からも炭酸カルシウムが検出された。無添加ではMY150に対してが1.8倍量の炭酸カルシウムが検出され、炭酸化が進行している事を確認した。
- (5) 硬化体モルタル部のSEM観察から、針

状結晶が多数観察されたが、針状結晶の大きさ及び量は添加剤により異なっている。無添加では大きい結晶が多く、量も多いが、その程度はMY150, LS, CL4.0の順に減少する傾向にある。前報において、それぞれのコンクリートの強度特性は充分得られていることが確認されているが、これらの添加剤はセメント水和生成物の形状などに若干の影響を及ぼしていると考えられる。

最近、トンネルの崩落事故などが報じられてコンクリートの信頼性が失墜しようとしている中、良い施工により緻密なコンクリートを作れば、コンクリートの耐久性が長期間保たてることをプレストレストコンクリートパイルを通して確認できたことは有意義な事である。これらの結果は、ナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物を使用したプレストレストコンクリートパイルの信頼性を確認するとともに、コンクリート本来の信頼性復権の一役を担えるものと信じている。

今後、残りのコンクリート片を用いて、さらに屋外暴露環境下での耐久性の調査を継続する。

本論文をまとめるに当たり、ご協力を頂きました花王株式会社研究所 代田研究員、及び真砂研究員に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岸谷孝一:鉄筋コンクリートの耐久性, 鹿島建設技術研究所出版部, 1963
- 2) 服部健一, 谷野幸雄: β -ナフタリンスルホン酸ホルマリン縮合物ナトリウム塩の水溶液中の性質と分散性, 工業化学雑誌, Vol.67, No.10, pp1576-1582, 1964
- 3) Erlin, B. et al.: Corrosion of Metals in Concrete Needed Research, ACI SP-49, pp39-46, 1975
- 4) 長瀧重義, 大賀宏行, 佐伯竜彦: コンクリートの中性化深さの予測, セメント技術年報, No.41, pp343-346, 1987
- 5) 山下英治, 池上由洋, 岡田英三郎, 大浦昭治: 16年材齢プレストレストコンクリート中のPC鋼棒の性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp345-350, 1987
- 6) 福島敏夫, 友澤史紀: コンクリートの中性化の物理化学的意味, セメント・コンクリート論文集, No.43, pp424-429, 1989
- 7) 飛坂基夫, 笠井芳夫, 飯塚正則, 水沼達也: 高性能 AE 減水剤によるコンクリートの耐久性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp651-656, 1990
- 8) 吉崎芳郎, 福島敏夫, 高橋幸一: コンクリートの中性化深さと炭酸カルシウム-水酸化カルシウムの濃度分布, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp404-409, 1996