

論文 50年材齢高強度コンクリートパイルの耐久性

中村 圭介*1・川上 博行*2・岩永 謙介*3・實藤 俊晃*4

要旨：50年材齢高強度コンクリートパイルにおいて、5、16、32年に引き続き、高性能減水剤、塩化物がPC鋼棒とコンクリートの物性に及ぼす影響を確認した。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では殆ど観察されなかったが、塩化物を添加したコンクリートでは塩化物量増加と共に発錆率が増加する傾向が確認され、塩化物量4.0%(CL4.0)においてはPC鋼棒の破断も確認された。各機械的性質は、CL4.0以外は50年経過後もJISを満足していた。コンクリートの解析において、中性化試験では中性化は確認されず、組織観察では高性能減水剤、塩化物による水和生成物の違いは確認できなかった。

キーワード：高性能減水剤、塩化物、プレストレストコンクリート、鉄筋、PC鋼棒、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レンスルホン酸ホルマリン高縮合物¹⁾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、高強度プレストレストコンクリートパイルやボールの製造に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長期耐久性についての報告が殆どない。

本研究では、コンクリートの構成材料である高性能減水剤や、製造時に不可避な混入を伴う塩化物が遠心力成形プレストレストコンクリートパイル中のPC鋼棒の腐食や機械的性質、コンクリートの諸物性及びパイル特性に与える影響を明確にすることを目的としている。高性能減水剤、または塩化物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プレストレストコンクリートパイル供試体(以下、供試体とする)を作製し、屋外で暴露を50年間継続した後、供試体中のPC鋼棒の腐食や機械的性質、コンクリートの解析を行い、過去の報告²⁾³⁾に引き続き、コンクリート中の高性能減水剤や製造時

に不可避な混入を伴う塩化物が、供試体の長期耐久性に及ぼす影響を検討したので報告する。

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2.62、FM6.97、5号/6号=8/2混合)を使用した。添加剤は、ナフタレ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、塩分量の調製には塩化カルシウム(CLと略す)を使用した。

PC鋼棒には、旧JISG3137規定の異形PC鋼棒D種1号9.2mm(JIS:0.2%耐力=1275N/mm²,引張強さ=1420N/mm²,破断伸び≧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配合を表-1に示す。遠心力成形時の成形状態はスランプにより異なる為、添加剤添加量は一定とし、スランプの変動は単位水量により調整し

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 | | | | | スランプ c m |
|-----------|--------|------|----------|----------|-----------------------|------|-----|----------|----------|-------------|
| | 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 | 38.8 | 43 | 165 | 420 | 775 | 838 | 210 | 4.0 |
| CL2.0 | - | 2.00 | 38.8 | 43 | 167 | 420 | 770 | 838 | 210 | 4.5 |
| CL4.0 | - | 4.00 | 38.8 | 43 | 169 | 420 | 769 | 834 | 208 | 3.0 |

*1 花王株式会社 テクノケミカル研究所 (正会員)

*2 花王株式会社 テクノケミカル研究所 (正会員)

*3 高周波熱錬株式会社 製品事業部 第一製造部

*4 高周波熱錬株式会社 製品事業部 第一製造部

た。養生は、成型後、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²⁾。

2.3 試験体の保管条件

材齢 32 年の試験の際に、PC 鋼棒の物性測定等に使用した残りのコンクリート片を、18 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、及び降水量を表-2 に示す。

表-2 屋外暴露条件

| | 1968-1972 | 1973-1984 | | 1984-2000 | 2001-2018 |
|------------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|
| | 熊谷 | 熊谷 | 和歌山 | 和歌山 | 和歌山 |
| 平均気温 °C | 14.9 | 14.2 | 16.9 | 16.6 | 16.9 |
| 平均湿度 % | 69.4 | 66.4 | 69.2 | 66.6 | 65.2 |
| 平均雨量 mm | 1,023 | 966 | 1,089 | 1,103 | 1,433 |

2.4 試験概要

供試体作製時の形状寸法を図-1 に示す。本供試体は、昭和 43 年に PC 鋼棒を 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プレストレストコンクリートパイル製造工程に従って作製した。供試体の一方の端部から 35cm までの部分を試験体とし、PC 鋼棒の腐食や機械的性質、コンクリートの解析を行った。

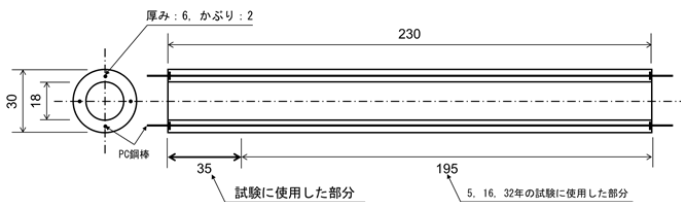


図-1 供試体パイル寸法

写真-1 に示す位置で試験体を切断し、PC 鋼棒を含むコンクリート片(a, c)とコンクリート片(b)を試験体サンプルとして採取し、今回の試験に供した。残りのコンクリート片は、屋外暴露を継続する。

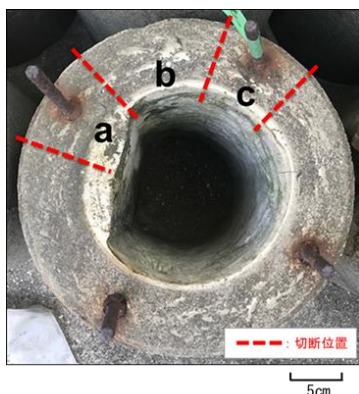


写真-1 試験体サンプル採取

それぞれの試験体サンプルから PC 鋼棒を取り出し、発錆率を測定した。暴露期間中の端部シーリングの劣化による発錆率への影響を除外するため、測定位置は、両端部から約 30~50mm を除いた中央部の 200mm とした。発錆面積は、PC 鋼棒の錆部分をポリプロピレンフィルムに油性マーカーで転写し、画像解析装置 (VHX-2000, キーエンス製) にて測定した。発錆率は、発錆面積を元の PC 鋼棒面積で除して、その百分率とした。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 (引張強さ、破断伸び) を測定した。試験片は 2 号試験片とし、発錆率測定後のサンプル (全長約 300mm) を用いた。鋼材表面にひずみゲージを貼り付け、荷重-変位関係を測定した。荷重-変位関係より、0.2% 永久伸びに相当する荷重及び最大引張荷重を読み取り、当該材の公称断面積 (64.0mm²) を用いて、引張強さと降伏強度 (0.2%耐力) を算出した。伸びは、標点距離を公称直径の 8 倍 (8*9.0=72.0mm) として、破断後の突合せ法で、原標点距離からの伸び量の割合として算出した。

一方、コンクリートの耐久性は、JISA 1152 “コンクリートの中酸化深さの測定方法”に従って、中性化の進行度を観察すると共に、写真-2 に示すように断面の 3 層 (ノロ層は除く) からサンプルを採取し、X 線回析装置 (XRD, Mini Flex 600, Rigaku 製)、及び走査型電子顕微鏡 (SEM, JSM-IT500HR, JEOL 製) により、セメント水和物の観察を行った。

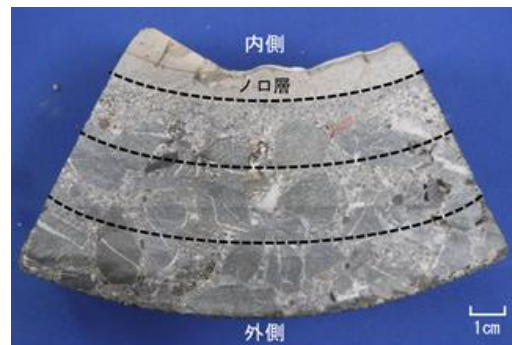


写真-2 試験体コンクリート断面

3. 結果及び考察

3.1 50 年暴露試験中破断の原因推定

塩化カルシウム 4.0%試験体 (以下 CL4.0) は、暴露中にパイル軸方向に亀裂が生じており、取り出した PC 鋼棒にも破断が認められた。写真-3 は、PC 鋼棒取り出し前に、亀裂内部を紙面側に開いて上下に並べた外観を示す。上側のコンクリート片に PC 鋼棒があり、PC 鋼棒の腐食は認められるものの、破断部は亀裂面になく、コンクリートに覆われており、写真からは確認できなかった。下側のコンクリート片には、錆を伴った PC 鋼棒の痕跡

が認められた。

PC 鋼棒破断部の近傍写真を写真-4に、破断した PC 鋼棒の破面写真を写真-5に示す。破断した PC 鋼棒は 絞りを伴わず脆性的に破断し、破面全体は厚い錆に覆われていた。破断時期の特定は難しいが、破断後長期間経過していることが推察できる。破断した PC 鋼棒の破面を SEM 観察するために薬品洗浄を試みたが、錆の進行程度が大きく、除錆しきれなかったため起点部の破壊形態を観察することはできなかった。

これらの状況から、CL4.0 の PC 鋼棒破断は以下のようなプロセスで生じた可能性が考えられる。

(1)腐食進行に伴う錆により、鉄筋界面が膨張、コンクリート側には膨張による力が生じたため、軸方向のコンクリートクラックが生じ始めた。同時に、腐食の化学反応により生じた水素の一部がPC鋼棒表面から内部へ浸入、放出を繰り返していた。

(2)腐食による減肉や孔食の切り欠き作用によって、局部的に応力集中が起こっていた。さらに、腐食による水素侵入のみが継続し、侵入水素量と応力集中が遅れ破壊の条件を満足した際、PC 鋼棒側にもクラックが発生し、PC 鋼棒破断に至った。

(3)破断後も腐食状態が続き、錆による膨張が続き、ある時期にコンクリート剥離が生じた。

コンクリートのクラックや剥離の発生によって緊張力が抜けるため、遅れ破壊の条件を満たさなくなるが、今回の試験品において PC 鋼棒破断とコンクリート剥離のどちらが先に発生したかは正確には推定できなかった。

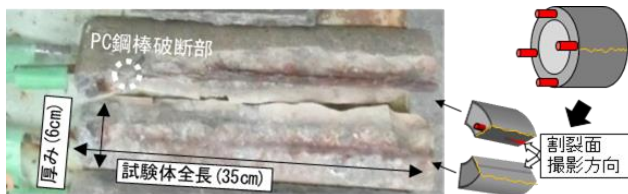


写真-3 CL4.0 試験体の採取後の状態



写真-4 材齢 50 年 PC 鋼棒破断部 (CL4.0)



写真-5 材齢 50 年 PC 鋼棒破断面 (CL4.0)

3.2 PC 鋼棒の外観観察結果

材齢 50 年の PC 鋼棒の外観代表例として、無添加、MY150、LS、CL4.0 の外観を写真-6に示す。外観写真の白い箇所はコンクリートが残存している箇所である。無添加、MY150 は PC 鋼棒表面に錆は殆ど確認できず、LS では局所的な錆が散見された。CL4.0 では PC 鋼棒表面の広範囲にわたって程度の大きい錆が確認できた。適切な添加剤を選定すると、50 年経過しても PC 鋼棒は発錆しないことを確認した。

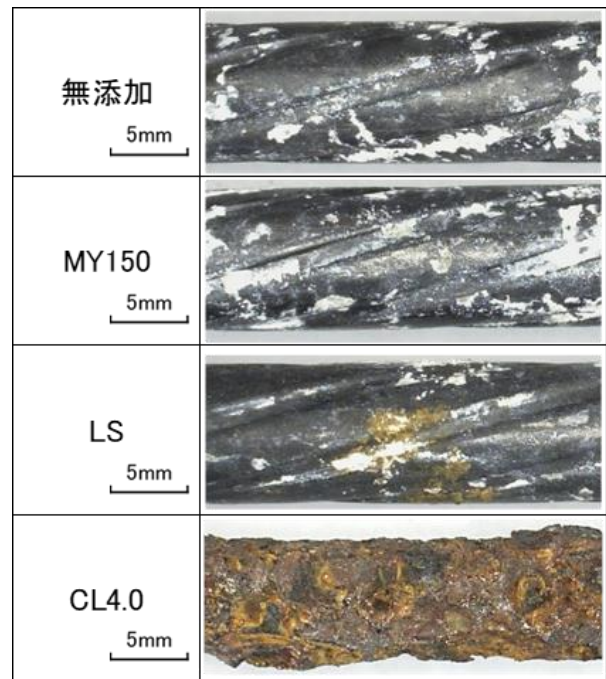


写真-6 材齢 50 年 PC 鋼棒腐食状況

3.3 PC 鋼棒の発錆率及び機械的性質

材齢 5 年、16 年及び 32 年のデータに加え、材齢 50 年の PC 鋼棒の発錆率と機械的性質 (降伏強度、引張強度、破断伸び) におよぼす各種添加剤の影響を図-2に示す。

塩化物の影響をみると、塩化カルシウム添加量が最も低い CL0.05 では、発錆量は殆ど無視できる程度であったが、0.5%以上のサンプルでは発錆率が材齢 32 年と比較し増加しており、添加量の増加と共に発錆率の増加程

度も大きくなる傾向にある。試験体サンプルの外観観察結果より、表面から PC 鋼棒表面に通じるクラックはなく、腐食は試験体サンプル内部から発生したと推定された。塩化物には、鋼棒の不動態皮膜を破壊する作用があるといわれており⁴⁾、50 年経過した現在でも、腐食と皮膜破壊が繰り返されることにより、腐食が継続しているものと考えられた。また、外観観察結果より、塩化物量の多さは、腐食速度を速める効果があると推察した。

PC 鋼棒の機械的性質については、材齢 50 年の各試験品とも降伏強度、引張強度、伸びの全てで JIS を満足している。材齢 50 年のこれらの特性値と発錆率との間に目立った対応関係はみられず、また経時変化に対する目立った特徴もみられない。これは、材齢 32 年と比較して発錆率が高くても断面積減少への影響が小さく、機械的性質に影響をおよぼすような大きな錆までは成長していなかったためと考えられる。なお、CL4.0 は暴露試験中に破断したため、機械的性質は測定できなかった。以上の結果から、塩化物 2%以下の条件では、機械的性質は塩

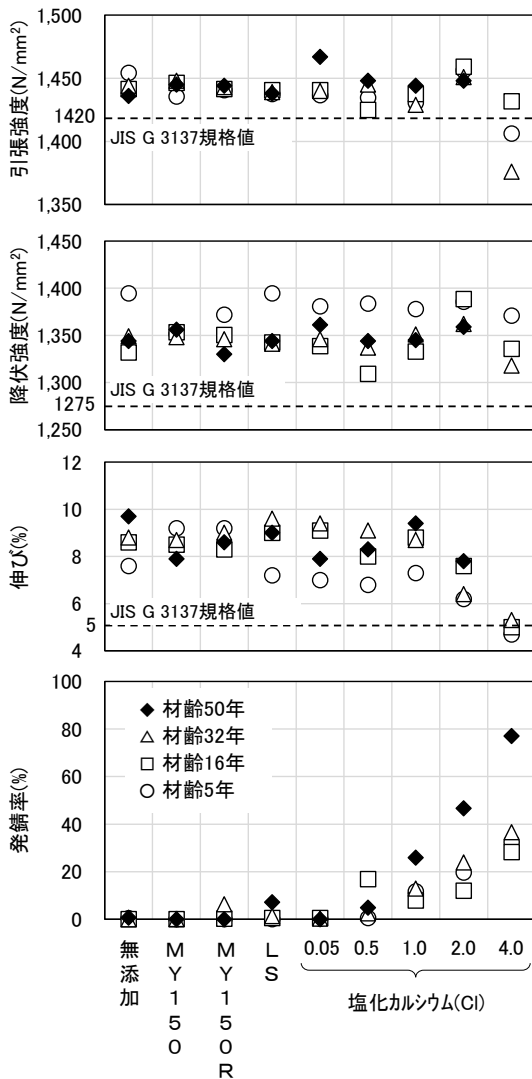


図-2 PC 鋼棒の機械的性質及び発錆率

化物量や高性能減水剤の影響を受けないことが確認された。また、塩化物量を 0.05%以下の条件では、PC 鋼棒の発錆率が非常に低く、50 年経過しても健全に保たれることが分かった。

3.4 コンクリートの中性化度

中性化度は、切り出したコンクリート断面をフェノールフタレイン法により観察した。フェノールフタレイン噴霧前後の状態を写真-7に示す。

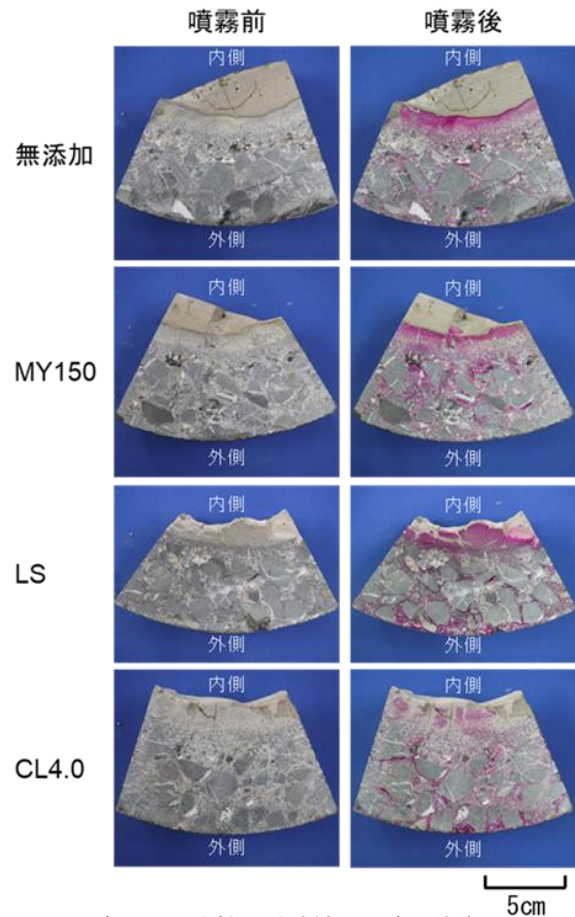


写真-7 中性化試験結果(噴霧前後)

全体的に試験体サンプル内面のノロ層部分の中性化は確認されたが、外面からの中性化は殆ど進行しておらず、コンクリートの物理的、機械的性質に殆ど影響がないと考えられる。

また、32 年時と同様に、中性化と PC 鋼棒の腐食との関連についても確認した。本検討の場合、PC 鋼棒の錆の要因としては、大きく 2 つ考えられる。1 つ目は、コンクリートが中性化し、pH が 10 程度以下に低下すると、不動態皮膜の破壊が生じ易くなり、鉄筋腐食が進行する。もう 1 つが、コンクリート中に含まれる塩化物によって鉄筋表面の不動態皮膜が破壊され、鉄筋腐食が進行する

5)。錆の発生要因を明確にすべく、錆が発生している部分のコンクリートに対しても中性化試験を実施した。結果、フェノールフタレインと反応し赤色を呈したことから、PC 鋼棒の腐食は中性化によるものではなく、塩化物の影響によるものと推察される。

3.5 コンクリートの組織観察

各層のコンクリート硬化体中の水和物の観察を SEM、及び XRD を用いた。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-8に示す。

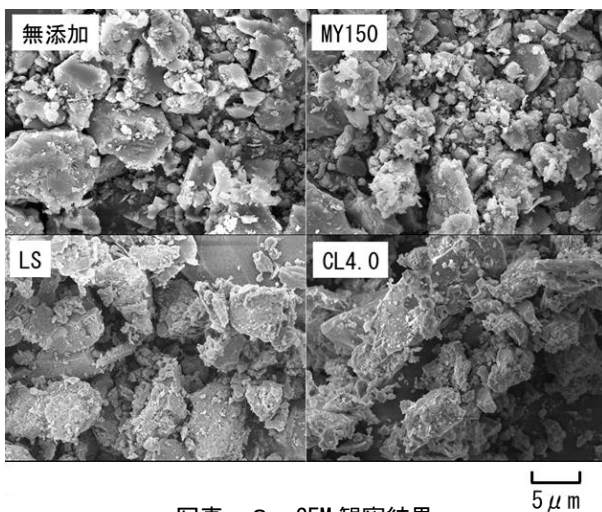


写真-8 SEM 観察結果

SEM 観察の結果、すべてのサンプルで針状結晶等の特徴的な形状を持つ水和物は確認できなかった。骨材表面を層状水和物が覆っており、層状水和物はセメント水和生成物であると考えられる。SEM の結果から、添加剤による違いは観察されなかった。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殆どないことから、組織としてはあまり大きな違いはないと考えられる。

続いて、写真-3に示す3層のコンクリートから、モルタル部分を粉砕し XRD により硬化体の解析を行った。中心部分である2層目の XRD チャートを図-3示す。この結果より下記の事を確認した。

- (1)未水和セメントは殆ど検出されなかった。
- (2)水酸化カルシウム、炭酸カルシウム以外の水和生成物は殆ど検出されなかった。
- (3)3層すべての部分から、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。

前項の中性化試験において、フェノールフタレインで着色した部分でも炭酸カルシウムが検出された。これは、水酸化カルシウムと炭酸カルシウムが混在する部分炭酸化領域にあると考えられ⁹⁾、炭酸化が進行しているものの中性化には至っていないと考えられる。

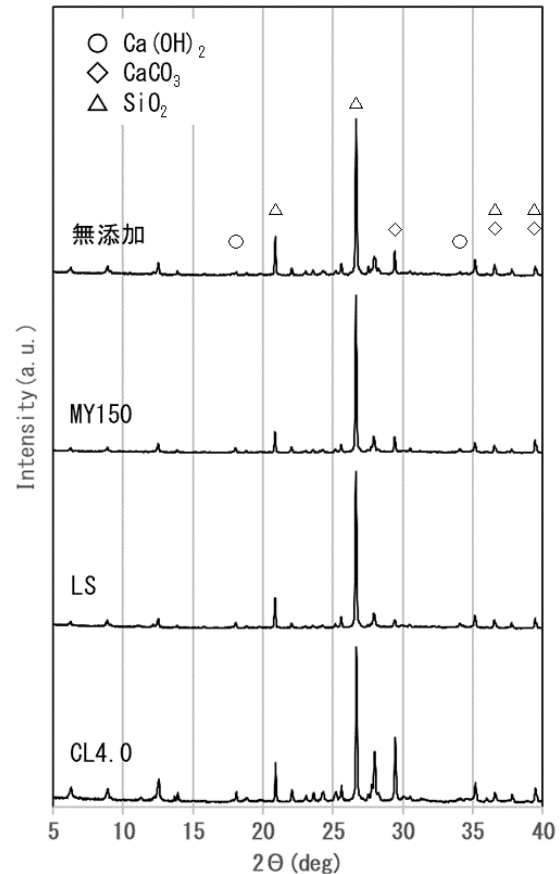


図-3 XRD 測定結果

4. まとめ

以上の結果から、50年材齢高強度コンクリートパイルにおける 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)50年材齢高強度コンクリートパイルにおいて、塩化物が存在することで、発錆することが判った。その発錆率は、時間経過と共に増加していくことを確認した。また、塩化物量が非常に高い CL4.0 においては、PC 鋼棒が腐食の進行により破断していた。
- (2)無添加、MY150 では、PC 鋼棒表面に錆が殆ど確認されず、LS では局所的な錆が確認された。
- (3)CL4.0 を除く、他のサンプルの PC 鋼棒の機械的性質は、降伏強度、引張強度、伸び全てで JIS を満足している。機械的性質の長期耐久性において、高性能減水剤による影響はなく、塩化物のみに影響されることが分かった。
- (4)PC 鋼棒への塩化物の影響を見ると、塩化カルシウム 0.5%以上では、添加量増加と共に発錆率が増大傾向にあった。その差は、32年時よりも顕著な差として確認された。

(5)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、内面のノロ層で一部観察されたが、パイル外面からの中性化は殆ど進行していなかった。コンクリートが中性化していないことから、発錆の要因は塩化物の影響のみであると考えられる。

(6)SEMによる組織観察においては、添加剤による差は確認されなかったが、XRDより部分炭酸化を確認した。

暴露期間 50 年という非常に長い期間の高強度コンクリートパイルの耐久性を確認したが、JIS を遵守し、塩化物の影響を受けなければ、PC 鋼棒及びコンクリートの耐久性は長期間保てることが確認できた。これらの結果は、ナフタレンスルホン酸ホルマリン高縮合物を使用した高強度コンクリートパイルの信頼性を確認すると共に、高強度コンクリートパイルが人々の生活の安心・安全の一躍を担えるものであると信じている。

今後、残りのコンクリート片の屋外暴露環境下での耐久性の調査を継続する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 水沼達也，正中雅文，元木信二郎，池上由洋：32 年材齢高強度コンクリートパイルの耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp667-672，2001
- 4) 三沢俊平：鉄鋼の湿食形態と腐食生成物，日本金属学会会報，24 卷，3 号，P201-210，1985
- 5) 大濱壽彦：鉄筋コンクリートの構造物の劣化対策技術，テクノシステム，1994
- 6) 福島敏夫，吉崎芳郎，友澤史紀，高橋幸一：コンクリート中性化深さと炭酸化フロント深さとの関係－促進中性化試験，屋外暴露試験，実態調査，理論的解析の結果からの考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp805-810，1997