

[1070] オートクレーブ養生コンクリートにおける鉄筋防食に関する一実験

正会員 ○福地 利夫 (日本大学工学部)
 立山 創一 (安藤建設(株)技術部)
 臼井 悟 (日本大学大学院)

1. はじめに

オートクレーブ養生コンクリート (AC) は、ごく早期に高強度が得られ、かつ耐衝撃性等にも優れる⁽¹⁾ことから、ACパイルを中心に、高性能コンクリート製品として広く用いられている。

筆者らは、AC製品の一層の性能向上を図るため、各種の研究を行っているが、ここでは、ACの鉄筋の防せい策として行った実験結果について述べる。^{(2),(3),(4)}

ACは周知のように、高温高压下におけるCa(OH)₂とSiO₂との水熱反応であるため、pH値が減少して、鉄筋防せい上不利となる。鉄筋の防せい方法については、JIS A 6205 (鉄筋コンクリート用防せい剤) が実用上便利であるが、当該防せい剤は、高温高压を伴うACを除外している。そこで、容易、かつ安価に行えることから、あらかじめ鉄筋の周囲に、セメントペーストをコーティング (PC) し、これをACに用いようとするものである。こうして、作製した供試体は、促進試験の意味合いもあって、海中に暴露した。暴露期間は、未だ4年と短い、PCを施さない供試体に比較して、さびの発生に顕著な相異が生じたので、ここに報告する。なお、暴露前のACのpH値は11.0、セメントペーストのそれは12.3である。

2. 使用材料

(1) 鉄筋 鉄筋はφ22 (SR24) を使用した。

(2) セメント コンクリート用及びコーティング用セメントは、O社製普通ポルトランドセメントを使用した。その化学成分及び物理試験結果を表1に示す。

(3) シリカ シリカは、ガラス製造用高純度シリカを使用した。その化学成分及び物理試験結果を表2に示す。

表1 セメントの化学成分及び物理試験結果

| 化 学 成 分 (%) | | | | | | | | |
|--------------------|------------------|-------------------------------|---|--|------------------|-------------------|--|------|
| 強熱減量 (ig. loss) | 不溶残分 (insol.) | 二酸化ケイ素 (SiO ₂) | 酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃) | 酸化第二鉄 (Fe ₂ O ₃) | 酸化カルシウム (CaO) | 酸化マグネシウム (MgO) | 三酸化イオウ (S ₂ O ₃) | 合 計 |
| 0.5 | 0.2 | 22.2 | 5.3 | 3.1 | 65.4 | 1.2 | 1.7 | 99.6 |

| 比 重 | 粉 末 度 | | 凝 結 | | 安定性 | 強 さ [kgf/cm ² (N/cm ²)] | | | | | |
|------|------------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----|--|----|-----|---------|-----|-----|
| | 比表面積 (cm ² /g) | 88 μm 残分 (%) | 始発 時一分 | 終結 時一分 | | 曲 げ 強 さ | | | 圧 縮 強 さ | | |
| | | | | | | 3日 | 7日 | 28日 | 3日 | 7日 | 28日 |
| 3.17 | 3280 | 1.2 | 2-29 | 3-31 | 良 | 35 | 51 | 71 | 141 | 237 | 429 |

表2 シリカの化学成分及び物理試験結果

| 化 学 成 分 (%) | | | | | | |
|--------------------|-------------------------------|--|---|------------------|------------------------------|-------------------|
| 強熱減量 (ig. loss) | 二酸化ケイ素 (SiO ₂) | 酸化第二鉄 (Fe ₂ O ₃) | 酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃) | 酸化カルシウム (CaO) | 酸化カリウム (K ₂ O) | 酸化マグネシウム (MgO) |
| 0.07 | 99.8 | 0.008 | 0.01 | 微量 | 微量 | 微量 |

| 比 重 | pH | 粒 度 (μ) | 比表面積 (cm ² /g) | 熱膨張率 (1/°C × 10 ⁴) | 白色度 | 水 分 (%) |
|-----|-----|---------|------------------------------|-----------------------------------|-----|---------|
| 2.6 | 6.9 | 3.5 | 4620 | 5 | 95 | 0.5 |

(4) 骨材 粗骨材は、いわき市久の浜産で、最大粒径20mmのものを使用した。細骨材は、会津大川産で、最大粒径2.5mmのものを使用した。それぞれの物理試験結果を表3及び表4に示す。

表3 粗骨材の物理試験結果

| 通過百分率 (%) | | | | | 粗粒率 | 比重 | | 単位容積重量 (kg/l) | 実積率 (%) | 吸水率 (%) |
|-----------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|---------------|---------|---------|
| 2.0 | 1.5 | 1.0 | 0.5 | 2.5 | | 表乾 | 絶乾 | | | |
| 100 | 79 | 24 | 1 | 0 | 6.96 | 2.58 | 2.56 | 1.45 | 56.9 | 1.09 |

表4 細骨材の物理試験結果

| 通過百分率 (%) | | | | | 粗粒率 | 比重 | | 単位容積重量 (kg/l) | 実積率 (%) | 吸水率 (%) |
|-----------|-----|-----|-----|------|------|------|------|---------------|---------|---------|
| 2.5 | 1.2 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | | 表乾 | 絶乾 | | | |
| 100 | 68 | 40 | 16 | 6 | 2.70 | 2.57 | 2.46 | 1.59 | 64.0 | 4.12 |

(5) 減水剤 減水剤は、ポリアルキルアリルスルホン酸塩系高性能減水剤を使用した。

3. 試験方法

3.1 暴露供試体

暴露供試体は、図1に示すような10×10×40cmの角柱供試体である。鉄筋のかぶり厚さは、鋼製のスペーサーを使用し、タイプIでは、10及び15mmに、タイプIIでは、5及び

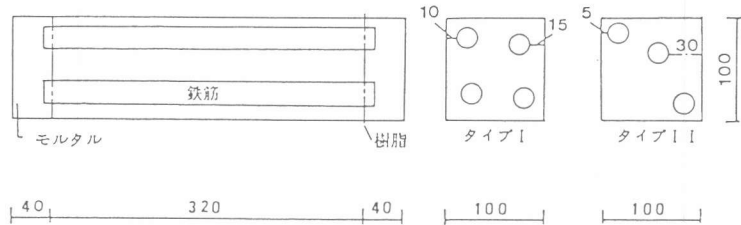


図1 暴露供試体 (単位mm)

30mmになるように配置した。これらは、かぶり厚さ30mmのものを除いて、対角線上に同じかぶり厚さのものとなるように配置してある。供試体数は、タイプI及びタイプIIについて各3個、これに、比較用(ペーストコーティングを行なわないもの)各3個を加え、合計12個である。なお、供試体の両端40mmは、コンクリート打込み6時間後にスペーサーを除去し、モルタル(W/C=35%、セメント:細骨材=1:2、減水剤:対セメント重量の1%)でキャッピングを行なった。打継ぎ面は、エポキシ樹脂によって、シールした。

3.2 調査及び養生

ACの調査は、表5に示す通りである。シリカは、セメント重量の内割で40%混入した。この量は、CaO/SiO₂モル比0.79に相当する。減水剤は、セメントとシリカの合計重量の0.6%混入した。

供試体の養生は、前養生24時間後、図2に示すオートクレーブ養生装置を用い、図3に示すダイヤグラムに従い、オートクレーブ養生を行なった。

表5 コンクリートの調査

| コンクリートの種類 | W/C (%) | スランブ (cm) | 単位水量 (kg/m ³) | シリカ混入率 (%) | 重量 (kg/m ³) | | | | s/a (%) | 減水剤 (kg/m ³) |
|-----------|---------|-----------|---------------------------|------------|-------------------------|-----|------|-----|---------|--------------------------|
| | | | | | セメント | シリカ | 粗骨材 | 細骨材 | | |
| A C | 4.0 | 8.0 | 169 | 4.0 | 254 | 169 | 1201 | 544 | 31.2 | 2.5 |

3.3 ベーストコーティング法

鉄筋の周囲にペーストをコーティングする方法（PC法）は、図4に示す通りである。PC法に用いるセメントペーストの調合は、水セメント比35%で、減水剤をセメント重量の1%混入した。なお、コーティング厚は1mmである。打込みは、テーブル型パイプレーターの上で行った。打込み6時間後にガラス管を抜き取り、4週間湿空中（室温20℃、湿度80%RH以上）で養生した。なお、鉄筋の表面は、コーティング前に研磨紙で磨いた。

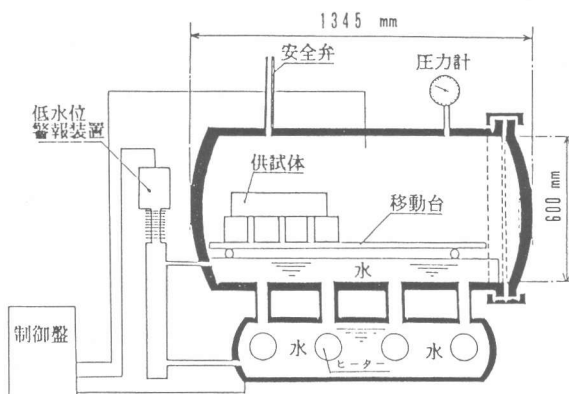


図2 オートクレーブ養生装置

3.4 暴露試験

海中暴露試験は、福島県いわき市、勿来常磐火力発電所、小名浜取水口にて行った。当該取水口における暴露状況は、写真1に示す通りで、供試体は、常時海水の流れの中に侵せきされている。この暴露条件は、JCI規準案(4)の暴露試験場の環境区分B（試験体が常に海水中に没している状態）に準じたものである。

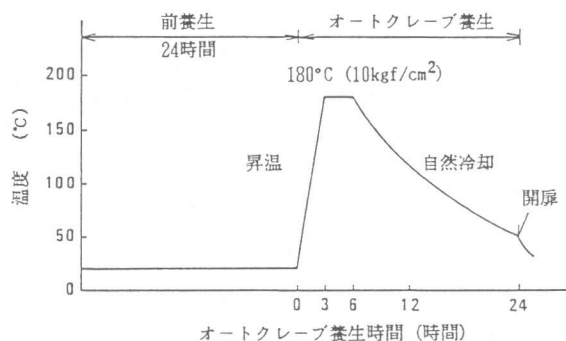


図3 オートクレーブ養生ダイアグラム

鉄筋の腐食の程度は、発せい面積を測定することによって調べた。発せい面積の測定方法は、JIS A 6205（鉄筋コンクリート用防せい剤）附属書2に従い、以下の手順で行った。初めに、暴露試験後の供試体を割裂して鉄筋を取り出し、次に鉄筋の表面に1mmのトレース方眼紙を当て、さび部分を写し取った後、プランメーターを用いて、さび部分の面積を測定した。なお、測定範囲は、鉄筋の長さ方向の中心から両端へ80mm、合計160mmの部分とした。また、発せい状況については、目視により行い、写真に納めた。

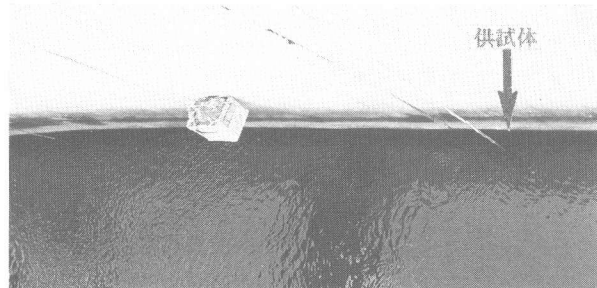


写真1 暴露試験状況

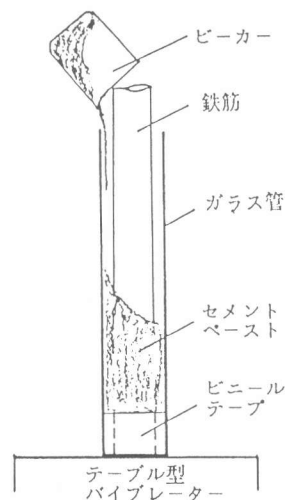


図4 ベースト・コーティング法

4. 試験結果及び考察

4.1 発せい状況

写真2から5は、4年間海中暴露した鉄筋の発せい状況を示したものである。これらの写真からわかるように、ペーストコーティングをした鉄筋（PC鉄筋）と、コーティングしない鉄筋（NON鉄筋）とでは、発せい面積に明らかな相違が認められる。すなわち、さびの発生は、NON鉄筋では多く、PC鉄筋では少ない。NON鉄筋の場合、かぶり厚さの少ない5及び10mmのものは、鉄筋表面のほとんど全面にわたって、厚みのあるさびが発生している。また、これらよりかぶり厚さを厚くした15及び30mmにおいても、かなり広い面積にわたりさびが発生している。それに対してPC鉄筋では、かぶり厚さ5及び10mmの場合、鉄筋の周囲全体にわたるさびではなく、外部に面している部分にのみ帯状のさびが発生している程度である。また、かぶり厚さ15及び30mmでは、さびは鉄筋表面に薄く斑点状にとどまっている。これは、ペーストコーティングを行うことによって、鉄筋周囲のpH値が暴露前と同じpH値（12.3）に保たれていたために、腐食の進行速度が遅くなったものと考えられる。

4.2 発せい面積測定結果

表6は、NON鉄筋及びPC鉄筋のかぶり厚さ5、10及び15mmのもの各6本、かぶり厚さ30mmのもの各3本について、

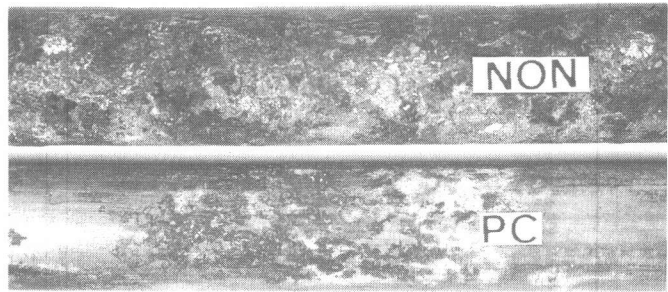


写真2 4年間暴露後の鉄筋（かぶり厚さ5mm）

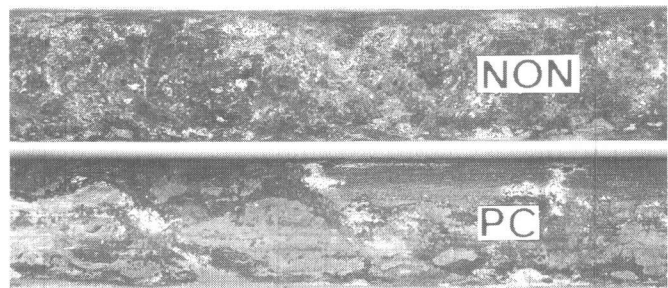


写真3 4年間暴露後の鉄筋（かぶり厚さ10mm）

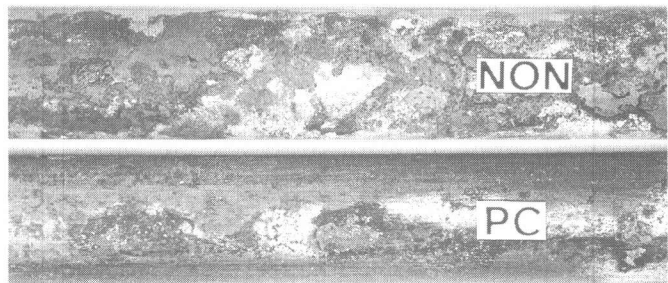


写真4 4年間暴露後の鉄筋（かぶり厚さ15mm）



写真5 4年間暴露後の鉄筋（かぶり厚さ30mm）

表6 鉄筋の発せい面積の測定結果

| 鉄筋の処理 | 暴露期間 | かぶり厚さ (mm) | 発せい面積 (cm ²) | | | | | | | 合計 | 平均 |
|-------|------|------------|--------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | |
| NON | 4年 | 5 | 108.4 | 91.7 | 108.6 | 110.6 | 105.1 | 107.8 | 632.2 | 105.4 | |
| | | 10 | 108.3 | 96.6 | 100.7 | 109.5 | 99.6 | 94.7 | 609.4 | 101.6 | |
| | | 15 | 105.3 | 89.1 | 61.4 | 100.0 | 36.5 | 78.0 | 470.3 | 78.4 | |
| | | 30 | 76.1 | 43.8 | 6.5 | — | — | — | 126.4 | 42.1 | |
| PC | 4年 | 5 | 84.9 | 79.4 | 79.9 | 72.2 | 60.7 | 63.8 | 440.9 | 73.5 | |
| | | 10 | 94.7 | 84.2 | 77.5 | 39.0 | 46.5 | 50.1 | 392.0 | 65.3 | |
| | | 15 | 64.3 | 8.0 | 76.1 | 7.6 | 45.7 | 49.5 | 251.2 | 41.9 | |
| | | 30 | 53.6 | 2.1 | 10.9 | — | — | — | 66.6 | 22.2 | |

それぞれの鉄筋表面に発生したさびの面積を測定した結果を示したものである。NON鉄筋及びPC鉄筋において、かぶり厚さが厚くなるにつれ、発せい面積が少なくなっている。

表7は、表6に示した鉄筋の発せい面積の測定結果から、NON鉄筋及びPC鉄筋について、発せい率を求め、さらに、PC法を施したことによる防せい効果を評価する値として、防せい率を求め、それらを示したものである。ここで、発せい率とは、測定範囲における鉄筋表面積に対する発せい面積の割合であり、防せい率については、JIS A 6205 (鉄筋コンクリート用防せい剤) 附属書2で規定されている下式に準じて求めた。

表7 鉄筋の発せい率及び防せい率

| 鉄筋の処理 | | NON | P C | |
|------------|----|----------|----------|----------|
| 暴露期間 | | 4年 | 4年 | |
| | | 発せい率 (%) | 発せい率 (%) | 防せい率 (%) |
| かぶり厚さ (mm) | 5 | 95 | 66 | 30 |
| | 10 | 92 | 59 | 36 |
| | 15 | 71 | 38 | 47 |
| | 30 | 38 | 20 | 47 |

$$\text{防せい率} = \frac{\Sigma \text{NON} - \Sigma \text{PC}}{\Sigma \text{NON}} \times 100 \quad (\%)$$

ここに、

ΣNON : NON鉄筋6本 (または3本) の合計発せい面積 (cm²)

ΣPC : PC鉄筋6本 (または3本) の合計発せい面積 (cm²)

表7より、NON鉄筋のかぶり厚さ5及び10mmの発せい率は、90%以上であり、写真2及び3でも示した様に、ほとんどの鉄筋表面にさびが発生した状態である。対して、PC鉄筋の発せい率は総じて少なく、NON鉄筋の2/3から1/2程度にとどまっており、PC法がさびの発生防止に有効に働いたと言える。また、防せい率は、かぶり厚さが厚くなるほど高い値を示し、かぶり厚さ15及び30mmでは、47%である。

図5は、鉄筋のかぶり厚さと発せい率との関係を示すものである。この図より、かぶり厚さが増すにつれ、発せい率が減少し、また、PC鉄筋の発せい率が、NON鉄筋に比べ低くなっているのがわかる。さらに、かぶり厚さと発せい率との間には、高い相関性が認められ、図中に示す実験式で表すことができる。これによれば、例えば、NON鉄筋かぶり厚さ30mmにおける発せい率は、PC鉄筋かぶり厚さ15mmのものにほぼ等しく、すなわち、経済的なかぶり厚さの推定が期待できる。

図6は、鉄筋のかぶり厚さと防せい率との関係を示すものである。防せい率についても、かぶり厚さとの間に高い相関性が認められ、図中に示す実験式で表すことができる。これによれば、かぶり厚さ5mmから30mmまでは、かぶり厚さの増加に伴い、防せい率も増加する傾向にあるが、それ以後については、防せい率50%程度に落ち着くものと予想される。

5. むすび

以上4年間の海中暴露試験の結果をまとめると、つぎのようである。

(1) PC法は、これを行なわないものに比較して、鉄筋表面のさびの発生をかなり抑制する。

(2) PC法による防せい効果は、かぶり厚さ5mmから30mmにおいて、防せい率が30%から50%である。

(3) かぶり厚さと発せい率及び防せい率との間には、相関性がみられる。

最後に、長期にわたり暴露試験場を提供していただいている常磐共同火力株式会社に対して、心から謝意を表します。

(参考文献)

- [1] 西 晴哉：オートクレーブ養生と超高強度コンクリート，コンクリート工学，Vol.18，No.5，May，1980，p.p. 9~18
- [2] 福地，渡沢，立山：オートクレーブ養生コンクリートにおける鉄筋の防食に関する一実験 その1・付着性能について，日本建築学会東北支部研究報告集，第40号，Nov. 1982，p.p. 185~188
- [3] 福地，立山，竹村：同一その2・防食性能について，日本建築学会東北支部研究報告集，第41号，Mar. 1983，p.p. 129~132
- [4] 福地，立山，本間：同一その3・2年までの防食性能について，日本建築学会東北支部研究報告集，第44号，Oct. 1984，p.p. 281~284

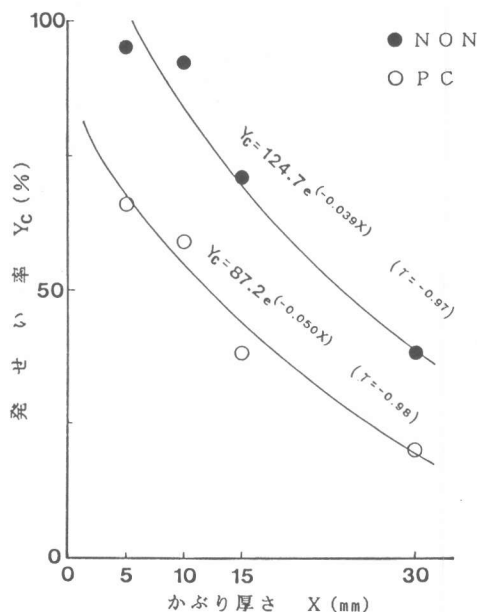


図5 鉄筋のかぶり厚さと発せい率

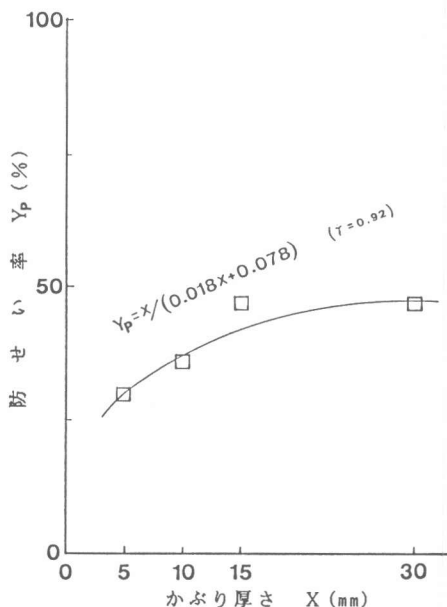


図6 鉄筋のかぶり厚さと防せい率