

# PC グラウトの塩分濃度が鋼材腐食に及ぼす影響

二井谷 教治 \*1・徳光 卓 \*2・山田 一夫 \*3・野島 昭二 \*4・宮川 豊章 \*5

The main roles of grout in post-tensioned prestressed concrete structures are to protect prestressing steel from corrosion and to integrate concrete and prestressing steel. Since chloride ions are generally contained in grout and may cause corrosion if the amount is excessive, some restriction is needed. Guidelines for Design and Construction of Grouting for Prestressed Concrete Structures was published by Japan Prestressed Concrete Engineering Association in 2005. In the guideline, limitation of chloride ion content in grout was provided as less than or equal to 0.08 % by mass of unit cement content based on experiments for one year. In this paper, test results of the experiments extended up to five years are described. Also, another experiment to investigate influence of stress of prestressing steel was conducted. From results of the experiments, it was confirmed that the criterion set in the guideline is safe enough to protect prestressing steel from corrosion. The stress of prestressing steel has no effect on corrosion initiation if the stress is controlled in a practical level, less than 80 % of tensile strength.

Key words : grout, prestressing steel, corrosion, chloride ion

## 1. はじめに

ポストテンション方式のプレストレストコンクリート構造物において、PC 鋼材とシースの間隙を充てんする PC グラウトは、構造物の耐荷性および耐久性の確保の両面から重要な役目を担っている。それにもかかわらず、過去には PC グラウトの充てん不良による PC 鋼材の破断などの損傷事例<sup>1)</sup>が報告されており、国外ではそれが一因となって落橋した事例<sup>2)</sup>も報告されている。

このような事態を受け、PC グラウトの重要性が再認識されるとともに、PC グラウトの材料、施工および検査に関する開発が急速に進んできた。これらの技術を効率よく有効に活用し、確実なグラウト充てんを行うためには、設計から施工に至る過程での配慮が不可欠であり、国内外で規準類の整備も進んできた。わが国においては、2005 年にプレストレストコンクリート技術協会から「PC グラウトの設計施工指針」<sup>3)</sup>が発刊された。

同指針は、PC グラウトの性能を照査して設計するという新しい概念を導入したものである。設定された性能は、PC 鋼材を腐食から守ることと、PC 鋼材と部材コンクリートとを一体化させることの 2 つであり、その照査に関して塩化物イオン含有量、有害となる残留空気の有無および圧縮強度という 3 つの指標を示している。塩化物イオン含有量については、PC グラウトに含まれる量が  $C$  (単位セメント量)  $\times 0.08$  mass % 以下であることが照査される。これまでのわが国の規準類<sup>4)</sup>では、規制値は  $0.3 \text{ kg/m}^3$  以下と総量規定であったのに対して、初めてセメントの質量に応じた量

(以下、セメント従量と記す) による規定が採用された。これは、既往の研究成果の検討と約 1 年間にわたる鋼材腐食とグラウトの塩化物イオン濃度との関係についての実験の結果をもとに定められたものである。

本論文では、その実験をさらに 5 年まで延長して検証を継続してきたので、詳細について述べる。また、並行して PC 鋼材に作用する応力状態が鋼材腐食に及ぼす影響を検討するため、べつの新たなシリーズの実験も行ってきたので、その概要について述べる。さらに、それらの結果から、規準における規制値の妥当性について検証する。なお、これらのシリーズで準備した一連の試験は、すべて終了した。

## 2. 塩化物イオンと鋼材腐食に関するレビュー

### 2.1 従来の規準類における規制

コンクリート中あるいは PC グラウト中のような高アルカリ環境下では、鋼材の表面に安定した不動態被膜が形成され、鋼材は腐食から保護される。ところが、このような環境下でも、塩化物イオン濃度がある一定以上になると、不動態被膜が破壊されて鋼材が腐食することがよく知られている。現行のコンクリート標準示方書<sup>5)</sup>では、外来塩化物イオンによる鋼材腐食に対して、鋼材腐食発生限界塩化物イオン量を一般のコンクリート中で、 $1.2 \text{ kg/m}^3$  としてよいとしている。一方、外来塩化物イオンがない場合にも確実に鋼材腐食を防止することも必要で、このためには、練混ぜ時においても塩化物イオン含有量に関する規制が必要である。2002 年制定以前のコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>では、練混ぜ時に含まれる塩化物イオンの総量は、コンクリート

\*1 Kyoji NIITANI : オリエンタル白石 (株) 技術研究所

\*2 Suguru TOKUMITSU : (株) 富士ピー・エス 技術開発部

\*3 Kazuo YAMADA : 太平洋セメント (株) 中央研究所

\*4 Shoji NOJIMA : (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部

\*5 Toyoaki MIYAGAWA : 京都大学大学院 工学研究科 教授

およびPCグラウトともに $0.3\text{kg/m}^3$ 以下に制限されていた。

この数値がPCグラウトに適用された背景は明確ではないが、昭和61年に建設省から公布された通達<sup>6)</sup>が準用されたものと思われる。このなかで、プレテンション方式のプレストレストコンクリート部材、シース内のPCグラウトおよびオートクレープ養生を行う製品における許容塩化物イオン量を $0.3\text{kg/m}^3$ 以下とすることが示されている。このように、総量規制が導入された背景には、海砂の使用によるコンクリートへの塩分の混入というわが国特有の事情があったことと、管理と検査の容易さを考慮したものであると考えられる。コンクリート中の塩化物イオンの規制値が $0.3\text{kg/m}^3$ になった経緯については、建設省総合開発プロジェクトの報告書<sup>7)</sup>に示されている。しかしながら、PCグラウト中の規制値の根拠については、あまり明確ではない。当時、コンクリートに対する規制値をPCグラウトに適用しても、実用上問題がなかったため、そのまま準用されたのではないかと考えられる。

これに対して、海外の規準では規制値がセメント従量で規定されている場合が多い。表-1は、各国のPCグラウトの塩化物イオンに関する規制値について比較したものである。わが国の2002年制定以前の示方書<sup>4)</sup>では、PCグラウト中の総量で規定されていたのに対して、米国および欧州ではセメント従量で規定されている。さらに、欧米の規制値をPCグラウト中の総量に換算すると、 $1.04\text{kg/m}^3$ および $1.30\text{kg/m}^3$ となり、わが国よりはるかに緩やかな規制値であることが分かる。

ここで、セメントに関する塩化物イオン量の規制について振り返る。1992年のJIS R 5210「ポルトランドセメント」で、初めて塩化物イオンの規格値が設けられ、含有量は0.02%以下と示された。標準的なPCグラウトの単位セメント量は $1300\text{kg/m}^3$ 程度であるため、この規格値では、セメントからもたらされるPCグラウトの塩化物イオン量は最大 $0.26\text{kg/m}^3$ となり、水や混和剤など他の材料からの量が微量であれば、 $0.3\text{kg/m}^3$ という規制値は十分満足することになる。ところが、ゴミ焼却灰使用の促進などの理由から、2003年のJIS R 5210の改定で、セメント中の塩化物イオン含有量の規格値が、0.02%以下から0.035%以下に緩

表-1 各国のPCグラウトの塩化物イオン量規制値

| 地域 | 規準類     | 規制対象     | 規制値                | 参考値                 |
|----|---------|----------|--------------------|---------------------|
| 日本 | 土木学会    | 塩化物イオン総量 | $0.3\text{kg/m}^3$ | $C \times 0.023\%$  |
| 米国 | ACI 222 | セメント従量   | $C \times 0.08\%$  | $1.04\text{kg/m}^3$ |
| 欧州 | EN 206  | セメント従量   | $C \times 0.10\%$  | $1.30\text{kg/m}^3$ |

表-2 塩化物イオン量の比較

| セメント中の塩化物イオン量 | PCグラウト中の塩化物イオン量     | $0.3\text{kg/m}^3$ の規制に対して |
|---------------|---------------------|----------------------------|
| 0.02%         | $0.26\text{kg/m}^3$ | OK                         |
| 0.035%        | $0.46\text{kg/m}^3$ | NG                         |

- ※1) 土木学会の規準は2002年以前のコンクリート標準示方書を指す(表-1)  
 ※2) Cは単位セメント量で $C=1300\text{kg/m}^3$ と仮定(※2~※5は表-1, 2共通)  
 ※3) セメント従量の場合は $C \times \text{mass}\%$   
 ※4) ACI 318では水溶性塩化物イオン量の規制値 $C \times 0.06\text{mass}\%$ である  
 ※5) PCグラウト中の塩化物イオンはセメントからもたらされるもののみを考慮

和された。そうすると、PCグラウトでは、セメントからの塩化物イオン量だけで $0.3\text{kg/m}^3$ を超える可能性が生じる。表-2に、単位セメント量を $1300\text{kg/m}^3$ としたときの、セメントからもたらされる最大塩化物イオン量の比較を示す。

こうなれば、普通ポルトランドセメントを使用した実績のあるPCグラウトを施工できなくなる。このことも、「PCグラウトの設計施工指針」<sup>3)</sup>における塩化物イオン含有量の規制値の見直しのきっかけとなった。

## 2.2 従来の塩化物イオンと鋼材腐食に関する研究

コンクリート中あるいはPCグラウト中のような高アルカリ環境下でも、塩化物イオンが限界濃度を超えると鋼材腐食が発生する。一方で、これらのセメント硬化体には、セメントをはじめとする材料由来の塩化物イオンが存在する。また、海洋環境下や融雪剤の散布される環境下におかれるコンクリート構造物では、外部からの塩分の浸入も考えられる。

これまでも塩化物イオン濃度と鋼材腐食に関する暴露実験や検証実験、理論的検討など多数の研究が行われてきた。セメント硬化体中での塩化物イオンによる鋼材の腐食は、空隙水中の水酸化物イオンによる鋼材表面保護膜の形成保持と塩化物イオンによる保護膜破壊の平衡関係に依存しており、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 $[Cl^-]_{th}$ と水酸化物イオン濃度 $[OH^-]$ との間には、比例関係が成り立つことが明らかにされている<sup>8)</sup>。このことは、実験的にも証明されており、アルカリ水溶液を用いた研究では、 $\text{pH}=12$ 程度の水溶液中における $[Cl^-]_{th}/[OH^-]$ は、およそ $0.3 \sim 0.8$ 程度であると報告されている<sup>9~11)</sup>。また、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートといったセメント硬化体中での研究も数多くなされておられ、いずれの研究結果においても、 $[Cl^-]_{th}/[OH^-]$ はアルカリ水溶液中より大きいことが報告されている<sup>12~16)</sup>。さらに、これらの理論的考察を背景とした実験により、これらの妥当性が検証されており、コンクリート、モルタルおよびPCグラウトでは、 $[Cl^-]_{th}$ は総量で表記するよりセメント従量で表記するほうが合理的であることが示されている<sup>17, 18)</sup>。

規制値の単一化は、簡便性には優れるが、コンクリートとPCグラウトでは単位セメント量が大きく異なるため、共通の規制値を適用するには限界があると考えられる。この点については実験で確認することとする。

## 3. 塩化物イオンと鋼材腐食に関する実験

### 3.1 実験の目的

先に紹介した2005年発刊の「PCグラウトの設計施工指針」<sup>3)</sup>を作成するにあたり、プレストレストコンクリート技術協会に「グラウト規準作成委員会(委員長:池田尚治, (株)複合研究機構, 横浜国立大学名誉教授)」が組織された。委員会では「実験検討WG」を組織し、照査指標のひとつである塩化物イオン含有量の規制値を設定するための検討ならびに実験を行った。同WGでは、前章で示した諸状況を考慮し、塩化物イオン含有量が鋼材腐食に及ぼす影響を明らかにするとともに、新たな規制値を設定することを目標とした。

3.2 実験概要

(1) 供試体および使用材料

PC グラウト中での鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を検討するため、PC 鋼材と塩化物イオン濃度が異なるグラウトを組み合わせた供試体を用いて実験を行った。供試体は、図 - 1 に示すように PC グラウトの中心に鋼材を配置したもので、実際の構造物での使用状態と近い形態とした。供試体の製作時は、内径 35 mm の透明ポリ塩化ビニル (PVC) 管を型枠とし、その中央にかぶり高が 6 mm になるように、PC 鋼棒 φ 23 (SBPR 930 / 1080) を設置した。供試体成形前の PC 鋼材は、10 % クエン酸二アンモニウム溶液に浸漬し、表面の黒皮を除去した後、乾燥箱にて保存し、打設直前にアセトンで脱脂した。その後、塩化ナトリウムをあらかじめ練混ぜ水に添加して練混ぜた PC グラウトを PC 鋼棒の周囲に流し込んで成型した。材齢 14 日目において、供試体中央部の PVC 管を脱型し、長さ 150 mm にわたって PC グラウトを露出させた。その後は、グラウト中の塩化物イオンの溶出および炭酸化による塩化物イオンの濃縮をできるだけ起こさないよう、温度 20 ± 3 °C、湿度 90 % RH 以上の湿気箱の中に密閉して保存した。

実験に用いた PC グラウトの配合を表 - 3 に示す。混和剤は、高粘性型のノンブリーディングタイプのものとし、水セメント比は標準の 45 % とした。これは、現在、実施工でもっとも汎用的に使用されている材料と配合を選定したものである。セメントは、代表的な 3 銘柄の普通ポルトランドセメントを等分に混合したものを使用し、特定の銘柄の特性の偏りが結果などに影響しないよう配慮した。なお、

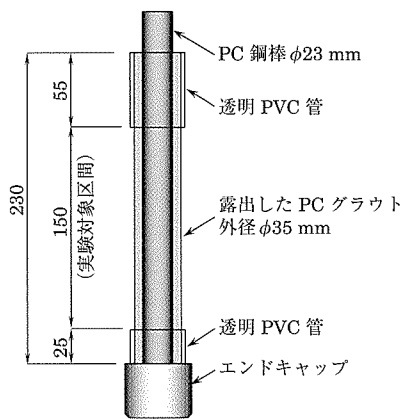


図 - 1 供試体形状寸法

表 - 3 PC グラウトの配合

| 水セメント比 | 水     | セメント   | 混和剤    |
|--------|-------|--------|--------|
| 45 %   | 45 kg | 100 kg | 1.0 kg |

表 - 4 実験に用いた塩化物イオン濃度の水準

| 表記方法                          | 塩化物イオン量 |       |      |     |     |      |      |      |
|-------------------------------|---------|-------|------|-----|-----|------|------|------|
|                               | 0.02    | 0.035 | 0.09 | 0.3 | 0.6 | 1.2  | 1.8  | 2.4  |
| セメント従量 (C × mass %)           | 0.02    | 0.035 | 0.09 | 0.3 | 0.6 | 1.2  | 1.8  | 2.4  |
| 塩化物イオン総量 (kg/m <sup>3</sup> ) | 0.3     | 0.5   | 1.2  | 3.9 | 7.8 | 15.6 | 23.4 | 31.2 |

混合したセメントに含まれる塩化物イオン量は、分析したところ 0.012 % であった。水は、水道水を使用した。

実験要因は、PC グラウトに含まれる塩化物イオン濃度のみとし、表 - 4 に示す 8 水準とした。すなわち、塩化物イオン濃度は、旧 JIS のポルトランドセメントの規格値である C × 0.02 mass %、現行の JIS 規格値である C × 0.035 mass %、欧米における PC グラウトに対する規制値と同程度である C × 0.09 mass %、さらに C × 0.3、C × 0.6、C × 1.2、C × 1.8 および C × 2.4 mass % の 8 水準とした。なお、グラウトに混入する塩化物イオン量は、セメント、水および混和剤に含まれる塩化物イオン量も考慮して添加量を調整した。なお、実験に用いた供試体は、各塩化物イオン濃度水準とも 3 体である。

(2) 電気化学的測定方法

PC 鋼材の腐食状況を判断する方法としては、所定の材齢における解体調査を基本とし、解体までの保存期間は、自然電位および分極抵抗の電気化学的測定によって非破壊で経時変化をモニタリングすることとした。

電気化学的測定は、所定の材齢において、湿気箱から供試体を取り出し、図 - 2 に示す電解槽に浸漬して行った。自然電位の測定は、供試体および参照電極（銀塩化銀 Ag / AgCl - 飽和塩化カリウム KCl、以下 Ag / AgCl 電極と称する）を飽和水酸化カルシウム Ca(OH)<sub>2</sub> 水溶液に浸漬し、測定器としてエレクトロメータ（入力抵抗 10<sup>8</sup> MΩ）を用いて行った。

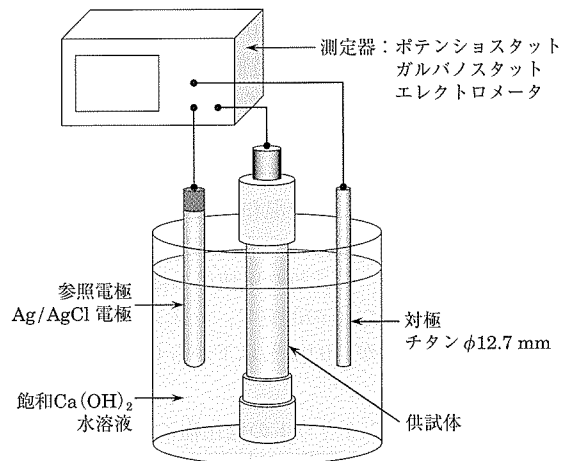


図 - 2 電気化学的測定用電解槽

分極抵抗は、ポテンシostat・ガルバノスタット（電位・電流制御装置）を測定器として用い、次に示す手順で直流法による測定を行った。まず、供試体、Ag / AgCl 電極および対極のチタン製丸棒 φ 12.7 mm を飽和 Ca(OH)<sub>2</sub> 水溶液に浸漬し、測定器に接続して自然電位を測定する。次に、その電位を起点とし、分極量が -5 mV、-10 mV および -15 mV となるように電流値を設定して、5 分間にわたって電流を印加する。5 分後の印加電流値を測定するとともに、電流遮断後 1 秒以内のインスタントオフ電位を測定する。その後、供試体の電位が初期電位に回復したのを

確認して、今度は分極量が+5 mV, +10 mV および+15 mV となるように電流値を設定して測定を行う。このようにして得られた印加電流密度とインスタントオフ電位との関係をグラフにプロットし、分極抵抗を求める。すなわち、原点を通る直線で補間したとき、その傾きが分極抵抗となる。なお、測定中は水溶液中にエアープンプによって空気泡を連行させ、つねに酸素を供給する状態とした。また、直流法による測定は、PC鋼材の電食による影響を最小限にするため、電流の印加を正負両側とし、かつ微小とした。

### (3) 解体調査およびその他の測定項目

供試体の解体によるPC鋼材の腐食状況の調査は、材齢230日(約0.7年)、1105日(約3年)および1860日(約5年)において、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準じて行った。解体を行った供試体は、一部の例外を除き基本的には各塩化物イオン濃度水準につき1体ずつとした。

解体調査では、まず、供試体のPVC管およびPCグラウトを取り除き、腐食の有無および状況を目視観察した。次に、透明なセロファンシートをPC鋼材に巻きつけ、腐食している部分を写し取って、その面積の合計を測定した。それにより、PC鋼材の腐食程度の判断指標のひとつとして、次式により腐食面積率を求めた。このとき、評価対象面積は、図-1に示す実験対象区間である150mmの範囲のPC鋼材表面積とした。

$$\text{腐食面積 (\%)} = \frac{\text{腐食面積 (mm}^2\text{)}}{\text{腐食評価対象面積 (mm}^2\text{)}} \times 100 \quad (1)$$

その他の測定項目としては、PCグラウトの圧縮強度、水素イオン濃度および塩化物イオン濃度とした。PCグラウトの圧縮強度試験は、JSCE-G 531「PCグラウトの圧縮強度試験方法(案)」に準じて行い、材齢14、28および91日に $\phi 50 \times 100$  mm 円柱供試体を用いて行った。

PCグラウトの水素イオン濃度は、材齢230および1105日に、ガラス電極式pH計を用いてJIS Z 8802を参考に測定を行った。

PCグラウト中の全塩分量および可溶性塩分量の測定は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」およびJIS A 1154 付属書2「硬化コンクリート中に含まれる温水抽出塩化物イオンの分析方法」に準じて行った。これは、供試体を製作したPCグラウトに、所定の塩化物イオンが含まれていることを確認するために行ったもので、測定は、材齢14、230および1105日に行った。材齢14日では、圧縮強度試験の終わった $\phi 50 \times 100$  mm 円柱供試体を用い、材齢230および1105日では、解体した供試体のPCグラウト片を用いた。

## 3.3 実験結果

### (1) PCグラウトの圧縮強度

材齢14、28および91日におけるPCグラウトの圧縮強度の試験結果を図-3に示す。各材齢とも、圧縮強度は $C \times 0.6$  mass %以下の水準では塩化物イオン濃度に関わらずほぼ等しく、 $C \times 1.2$  mass %以上では、塩化物イオン濃度の増加とともに減少する傾向が見られる。圧縮強度試験

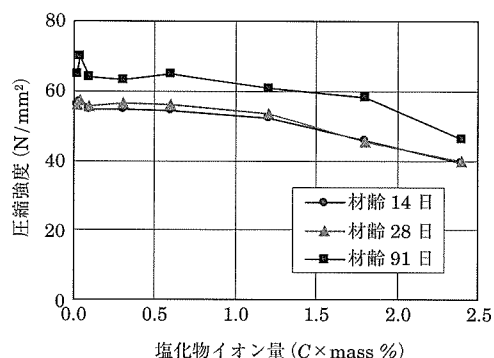


図-3 PCグラウトの圧縮強度

に用いる $\phi 50 \times 100$  mm 円柱供試体を用いてPCグラウトの密度を測定したところ、 $C \times 1.8$  および $2.4$  mass %の水準では2~4%程度値が小さくなることが確認された。密度の低下は、高濃度の塩化ナトリウムの混入により、有機混和剤の界面活性作用が変化し、消泡性/起泡性に何らかの影響を及ぼしたことによって空気量が増大したためであると考えられる。このことが、圧縮強度低下の一因であると考えられる。塩化物イオン濃度 $C \times 0.6$  mass %以下の圧縮強度は、材齢14日および28日で56 N/mm²程度、材齢91日で65 N/mm²程度であった。

### (2) 自然電位

自然電位の経時変化を図-4に示す。縦軸は、Ag / AgCl電極に対する値を飽和硫酸銅参照電極(以下CSE電極)に対する値に換算して表記した。なお、凡例の数字は塩化物イオン濃度( $C \times$  mass %)で、各塩化物イオン濃度水準の値は未解体供試体の平均値である。自然電位の測定値は実験開始から材齢300日程度までは、全体的に材齢の経過により貴な方向へ移動した。その後、実験終了まで自然電位は、卑または貴な方向へ移行しつつ、最終材齢である1810日には、材齢300日と同程度の値となった。これは、実験開始から材齢300日程度までは、PC鋼材はより腐食しにくい状態へ移行し、それ以降は、腐食環境に大きな変化がないことを表しているものと考えられる。また、初期材齢で、材齢の経過とともに電位が貴となる要因としては、セメン

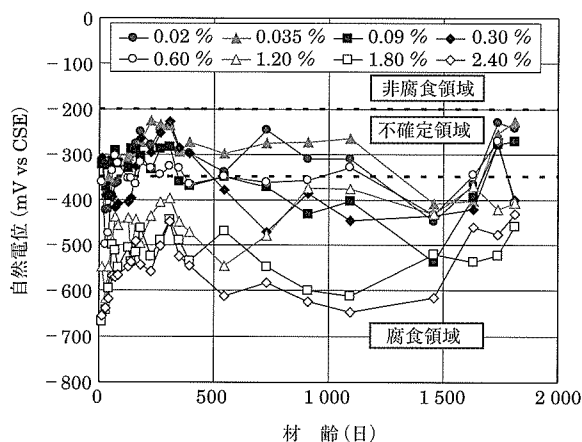


図-4 自然電位の経時変化

トの水和に伴い、塩化物イオンの固定化が進むとともに水酸化物イオン濃度は若材齢においてわずかに増加し鋼材発錆の指標である塩化物イオン濃度と水酸化物イオン濃度の比である  $[Cl^-] / [OH^-]$  が低下するためであると考えられる。

また、実験終了時では、自然電位の値から大別して2つのグループに分類できる。すなわち塩化物イオン濃度が  $C \times 0.02 \sim 0.09 \text{ mass \%}$  では、自然電位が  $-200 \sim -300 \text{ mV vs CSE}$  の範囲になり  $C \times 0.3 \sim 2.4 \text{ mass \%}$  では  $-400 \sim -500 \text{ mV vs CSE}$  の範囲となった。ASTM C876<sup>19)</sup> によれば塩化物イオン濃度水準  $C \times 0.02 \sim 0.09 \text{ mass \%}$  が不確定領域、 $C \times 0.3 \sim 2.4 \text{ mass \%}$  が腐食領域と判定される。ただし、この ASTM の判定基準は、道路橋床版の鉄筋腐食状況と自然電位との関係の実態調査に基づくものである。すなわち、鋼材腐食状態の絶対的な判断基準ではなく、あくまで腐食傾向の目安である。

(3) 分極抵抗

分極抵抗の測定結果を図 - 5 に示す。なお、凡例の数字は塩化物イオン濃度 ( $C \times \text{mass \%}$ ) で、各水準の値は未解体供試体の平均値である。自然電位の場合と同様に、実験開始から材齢 300 日程度までは、全体的には材齢の経過とともに分極抵抗は増加した。その後、実験終了まで、分極抵抗は増減が見られるものの、最終材齢である 1 810 日には材齢 300 日と大差のない値となった。すなわち、実験開始初期には、塩化物イオン濃度によっては、発錆の生じた供試体が存在する可能性があるが、その後長期的には、すべての水準において腐食がほとんど進行していないものと推測できる。

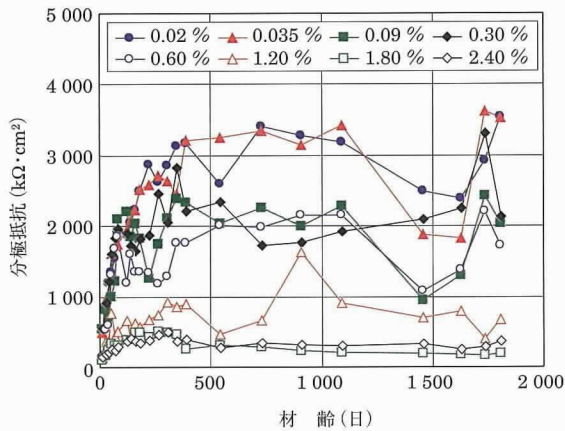


図 - 5 分極抵抗の経時変化

分極抵抗の経時変化の傾向および実験終了時の値から、3つのグループに分類できる。分極抵抗の最終値は、塩化物イオン濃度が  $C \times 0.02$  および  $0.035 \text{ mass \%}$  では  $3500 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$  程度、 $C \times 0.09 \sim 0.6 \text{ mass \%}$  では  $2000 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$  前後、 $C \times 1.2 \sim 2.4 \text{ mass \%}$  では  $500 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$  前後であった。自然電位の結果と比較し、グループ区分に差異はあるものの、電気化学的測定から読み取れる鋼材腐食に関する傾向は、ほぼ同様であった。

(4) 解体調査

材齢 230 日、1 105 日および 1 860 日における供試体解体直後の PC 鋼材の写真および発錆状況を表 - 5 に示す。材齢 230 日では、塩化物イオン濃度  $C \times 0.6 \text{ mass \%}$  を除く 7 水準の供試体を 1 体ずつ解体調査した。また、材齢 1 105 日および 1 860 日においては、すべての水準について、供試体を各 1 体ずつ解体調査した。

表 - 5 PC 鋼材腐食状況

| 材齢 (日) | 塩化物イオン濃度 ( $C \times \text{mass \%}$ ) | 0.02 | 0.035 | 0.09 | 0.3 | 0.6 | 1.2 | 1.8 | 2.4 |
|--------|--|------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 230    | 外観                                     |      |       |      |     | 未解体 |     |     |     |
|        | 発錆                                     | 無    | 無     | 無    | 無   | -   | 有   | 有   | 有   |
| 1 105  | 外観                                     |      |       |      |     |     |     |     |     |
|        | 発錆                                     | 無    | 無     | 無    | 微   | 有   | 有   | 有   | 有   |
| 1 860  | 外観                                     |      |       |      |     |     |     |     |     |
|        | 発錆                                     | 無    | 無     | 無    | 無   | 有   | 有   | 有   | 無   |

材齢 230 日では、 $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  以下の水準では発錆は認められず、 $C \times 1.2 \text{ mass \%}$  以上では局所的な発錆が確認された。材齢 1 105 日では、 $C \times 0.09 \text{ mass \%}$  以下の水準では発錆は認められず、 $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  以上では局所的な発錆が確認された。ただし、 $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  の腐食は、発生範囲および腐食程度もごくわずかであり、注視しなければ見逃す程度のものであった。最終材齢の 1 860 日では、 $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  以下の水準では発錆は認められず、 $C \times 0.6 \sim 1.8 \text{ mass \%}$  では局所的な発錆が確認された。なお、 $C \times 2.4 \text{ mass \%}$  では発錆が確認されず、塩化物イオン濃度がかかなり高い環境でも鋼材腐食が生じない可能性があるという結果が得られた。したがって、塩化物イオンによる鋼材の発錆は、確率的にかなりばらつきがあるといえる。すなわち、腐食発生限界濃度の見極めは、1つの供試体からではなく、総合的に判断する必要がある。

これら、3回の PC 鋼材の腐食状況の調査結果は、おおむね電気化学的な測定結果の傾向と一致するものであった。また、これらの結果から総合的に判断すると、PC グラウト中における PC 鋼材の腐食発錆限界塩化物イオン濃度は、 $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  程度であると考えられる。

図 - 6 は、解体調査時における PC 鋼材の腐食面積率の測定結果である。PC グラウトに含まれる塩化物イオン濃度が増加するほど PC 鋼材の腐食面積も増加する傾向となった。塩化物イオン濃度が  $C \times 0.6 \text{ mass \%}$  以上では、腐食面積率

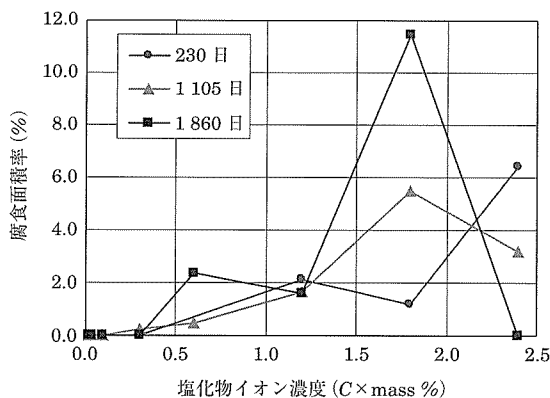


図 - 6 PC 鋼材の腐食面積率

は 2% 程度以上観測され、それに対して、 $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  以下の水準においては、ほとんど腐食が観測されなかった。1105 日で  $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  に軽微な腐食が観測されたが、その面積率はわずか 0.25% であった。塩化物イオン濃度が  $C \times 1.8 \text{ mass \%}$  以上では、腐食面積率の結果に大きなばらつきがあったが、これは、先に述べたように、塩化物イオンによる鋼材の発錆確率に、かなりばらつきがあるためだと考えられる。また、腐食は局所的に進行する場合もあり、腐食面積を指標にすると、本検討の目的である腐食の発生は捕らえやすいが腐食の進行の程度の評価には適さない可能性も考えることができる。なお、これらの結果は、おおむね電気化学的な測定結果および解体調査による腐食の観察結果と一致していた。

(5) PC グラウトの分析調査

圧縮強度試験あるいは解体調査が終了した PC グラウト片を試料として、含まれる塩分量の分析調査を行った。計画した塩化物イオン濃度と材齢 14、230 および 1105 日における分析結果の比較を図 - 7 に示す。全塩分量の分析結果から、ほぼ計画どおりの塩化物イオン量が PC グラウトに混入され、湿気箱での保存期間中や電解槽における電気化学的測定によっても、供試体の PC グラウトからの塩分の溶脱などは、ほとんど生じていないことが確認された。

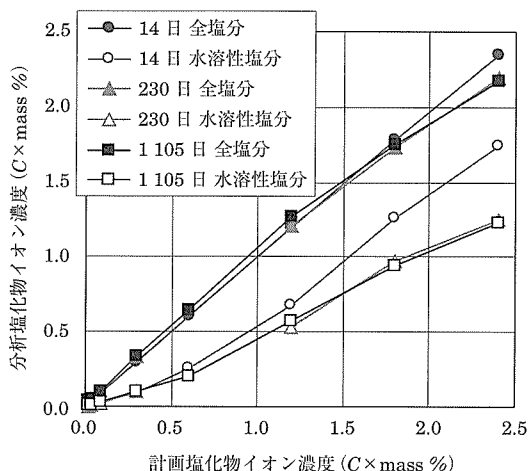


図 - 7 塩化物イオン濃度の比較

材齢 14 日に比べて材齢 230 日では、水溶性の塩分が減少し、材齢 230 日から 1105 日にかけては変化しなかった。このことから、材齢 14 日から 230 日にかけて塩化物イオンの固定化が進行したものと推察される。また、材齢 1105 日における水溶性塩分の全塩分に対する比は、たとえば塩化物イオン濃度が  $C \times 0.02 \text{ mass \%}$  で 16%、 $C \times 0.6 \text{ mass \%}$  で 32%、 $C \times 2.4 \text{ mass \%}$  で 57% と、全体的な傾向としては、塩化物イオン濃度の増加に伴い、水溶性塩分の比率は増加した。

PC グラウトの水素イオン濃度は、材齢 230 および 1105 日に、解体の終了した PC グラウト片を試料として測定した。材齢 230 日では、分析を行ったすべての水準で  $\text{pH} = 12.8$  であり、材齢 1105 日では、 $\text{pH} = 12.6 \sim 12.8$  の範囲であった。実験によるアルカリ分の溶脱はなく、すべての塩化物イオン濃度水準のグラウトで  $[\text{OH}^-]$  は同等であるといえる。したがって、全塩化物イオン濃度の増加に伴って水溶性塩化物イオン濃度の増加するものほど、鋼材の発錆のリスクは高まることになる。

3.4 実験のまとめ

PC グラウトに含まれる塩化物イオン濃度と鋼材腐食に関する実験を行ってきた。電気化学的な測定および供試体解体による PC 鋼材の腐食状況の調査結果から、PC グラウト中における鋼材腐食発錆限界塩化物イオン濃度は、 $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  程度であると考えられる。一方、コンクリートに対する鋼材腐食発錆限界塩化物イオン量は、従来より一般的に  $1.2 \text{ kg/m}^3$  とされている<sup>9)</sup>。両者を比較して示したのが表 - 6 である。たとえば、コンクリートの単位セメント量を  $400 \text{ kg/m}^3$  と仮定すると、PC グラウトの単位セメント量はコンクリートの 3.25 倍である。PC グラウトに対する鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を総量換算すると  $3.9 \text{ kg/m}^3$  であり、コンクリートの  $1.2 \text{ kg/m}^3$  に対して 3.25 倍となる。すなわち、単位セメント量の比と一致する。逆に、鋼材腐食発生限界塩化物イオン量をセメント従量と比較すると、コンクリートと PC グラウトの比は 1 : 1 となり、鋼材の発錆は、鋼材が接する空隙水中の自由塩化物イオン濃度  $[\text{Cl}^-]$  と自由水酸化イオン濃度  $[\text{OH}^-]$  の比  $[\text{Cl}^-] / [\text{OH}^-]$  に依存するとする過去の研究結果とも整合する。

表 - 6 鋼材腐食発生限界の比較

|        | 単位セメント量<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 鋼材腐食発生限界塩化物イオン量                  |   |
|--------|--------------------------------|----------------------------------|---|
|        |                                | 塩化物イオン<br>総量 ( $\text{kg/m}^3$ ) | セメント従量<br>( $C \times \text{mass \%}$ ) |
| コンクリート | 400 <sup>※1)</sup>             | 1.2 <sup>※2)</sup>               | 0.3                                     |
| グラウト   | 1300                           | 3.9                              | 0.3 <sup>※3)</sup>                      |
| 比      | 1 : 3.25                       | 1 : 3.25                         | 1 : 1                                   |

※1) コンクリートの単位セメント量の例

※2) 土木学会による一般的な値

※3) 本実験結果より

「PC グラウトの設計施工指針」<sup>3)</sup> では、材齢 230 日における解体調査までの実験結果に加え、表 - 1 に示した海外の規準類の規制値、既往の研究結果、および、わが国における塩害を受けた実橋の詳細な調査結果<sup>20)</sup>などを考慮し、

PC グラウトに内在する塩化物イオン濃度の制限値を  $C \times 0.08 \text{ mass \%}$  に規定した。ただし、この規制値は、初期塩分量の安易な増加を容認するものではなく、あくまで検討結果および実験結果に基づく合理化と捉える。また、外来塩化物イオンは、かぶりコンクリートなどによって適切に制御することを前提としており、さらにグラウト充てんに関する材料や施工方法などの技術的進歩が背景となっている。なお、かぶりによる対応だけでは不十分な場合には、完全には耐用年数が実証されていないものの、プラスチックシーすを用いることで外環境との物質の相互作用は大幅に削減可能と期待できる。この制限値は、PC グラウト中における鋼材腐食発錆限界塩化物イオン濃度  $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  に対して安全率が 4 程度である。コンクリートの場合にも、鋼材腐食発錆限界塩化物イオン量  $1.2 \text{ kg/m}^3$  に対して、練混ぜ時に含まれる塩化物イオン量の規制値は  $0.3 \text{ kg/m}^3$  であり、5 年間にわたる実験結果からも、その妥当性と安全性が検証された。

#### 4. PC 鋼材応力度の腐食への影響に関する実験

##### 4.1 実験の目的

前章の実験から、PC グラウト中における鋼材腐食発錆限界塩化物イオン濃度は、おおよそ  $C \times 0.3 \text{ mass \%}$  であることが明らかとなった。これは、応力の作用しない PC 鋼材に対する結果であるが、実構造物ではプレストレスを導入するため、応力負荷状態で用いられる。PC 鋼材においては、その応力度、腐食性物質の種類や量によっては、遅れ破壊を生じる可能性が指摘されており、チオシアン酸塩の影響に関する研究結果<sup>21)</sup>などが報告されている。

一方、塩化物イオンによる腐食環境下での PC 鋼材応力度の影響についても懸念されるところである。既往の研究では、塩水噴霧やコンクリート中での実験結果が報告されているものの<sup>22, 23)</sup>、PC グラウト中での研究は見当たらない。

そこで、前章で述べた PC 鋼材への応力無負荷状態での実験に引き続き、一連の実験として、応力が負荷された PC 鋼材に関する実験を行った。本実験では、PC グラウト中における応力が負荷された鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度および腐食性状への影響を検討し、塩化物イオン量の規制値の妥当性について検討することを目的とした。実験の詳細については文献<sup>24)</sup>に譲ることとし、ここではその概要を紹介する。

##### 4.2 実験概要

供試体の概要を図-8に示す。前章の応力無負荷の実験と同様、PC グラウトの中心に鋼材を配置した。実験に用いた鋼材は、PC 鋼棒  $\phi 11$  (SBPR 930 / 1080) で、かぶりは  $7.5 \text{ mm}$  とした。また、PC グラウトについても、材料および配合とも応力無付加の実験と同様とした。PC 鋼材の前処理後、図-8に示す荷重フレームに PC 鋼材をセットし、油圧ジャッキを用いて所定の緊張力を与えて定着した。次に、PVC 管を型枠として所定の塩分量を混入した PC グラウトを注入し、供試体を成型した。定着後の PC 鋼材の緊張力は、PC 鋼材に貼付けたひずみゲージによって、実験期間中

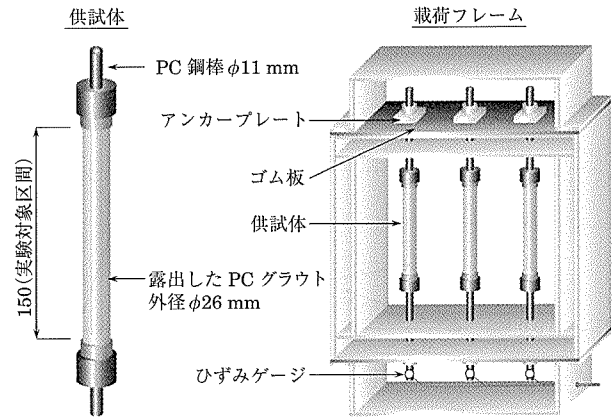


図-8 供試体概要

継続的にモニタリングした。供試体は約  $20^\circ\text{C}$  の室内に静置し、露出した PC グラウト部分は湿布で養生した。

実験要因としては、表-7に示すように PC グラウトに含まれる塩化物イオン濃度と PC 鋼材の負荷応力レベルとした。塩化物イオン濃度は、 $C \times 0.03 \sim 3.6 \text{ mass \%}$  の 5 水準とし、PC 鋼材に負荷する応力度は、無負荷、土木学会の使用時の制限値<sup>25)</sup>である  $0.7 f_{puk}$  (PC 鋼材の規格引張強度の 70%) および実験条件による限界値である  $0.8 f_{puk}$  の 3 水準とした。表中の○印が実験を行った要因で、上記の組合せにより全部で 13 水準とした。

PC 鋼材の腐食状況を判断する方法としては、所定の材齢における解体調査を基本とし、解体までの期間は、自然電位や分極曲線などの電気化学的測定によって非破壊的に経時変化を測定した。実験は最大で材齢 890 日まで継続した。

表-7 実験要因と水準

| セメント従量 ( $C \times \text{mass \%}$ ) →<br>塩化物イオン総量 ( $\text{kg/m}^3$ ) → | 塩化物イオン量 |      |     |      |      |
|--|---------|------|-----|------|------|
|  | 0.035   | 0.08 | 0.3 | 1.2  | 3.6  |
|  | 0.5     | 1.0  | 3.9 | 15.6 | 46.8 |
| 負荷応力度  | 0       | ○    | ○   | ○    | ○    |
| PC 鋼材の引張   | 0.7     | ○    | ○   | ○    | ○    |
| 強度 $f_{puk}$ に対する割合  | 0.8     | —    | ○   | ○    | ○    |

##### 4.3 実験結果

自然電位の経時変化を図-9に示す。凡例の左の数字は PC 鋼材の負荷応力度 (引張強度に対する比)、右の数字は PC グラウトの塩化物イオン濃度 ( $C \times \text{mass \%}$ ) を表す。まず、塩化物イオン濃度の影響について着目すると、材齢約 200 日まで特徴的な動きが見られる。初期材齢にはすべての水準で急速に貴の方向に推移し、その後  $C \times 3.6 \text{ mass \%}$  は大きく卑の方向に、 $C \times 1.2 \text{ mass \%}$  はわずかに卑の方向に、その他の水準は緩やかに貴の方向に推移した。最終材齢において ASTM C876 の腐食判定基準<sup>19)</sup>で照合すると、 $C \times 0.035 \sim 1.2 \text{ mass \%}$  が非腐食または不確定領域、 $C \times 3.6 \text{ mass \%}$  が腐食領域となる。次に、負荷応力度の影響に着目する。各塩化物イオン濃度について、 $0.8 f_{puk}$  までの応力度の範囲では、負荷応力度の顕著な影響は見られない。

供試体解体直後の PC 鋼材の写真および発錆状況を表-8

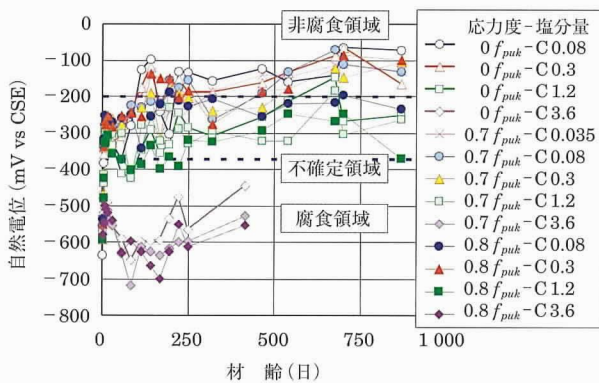


図 - 9 自然電位の経時変化

に示す。なお、塩化物イオン濃度が  $C \times 0.035 \sim 1.2$  mass % では材齢 597 および 890 日で、 $C \times 3.6$  mass % では材齢 182 および 480 日で解体調査を行った。また、すべての水準で、前期材齢で 1 体ずつ、後期材齢で 2 体ずつ解体調査した。後期で解体した供試体の腐食状況は、2 体とも同程度であったため、表には 1 体のみの写真を示す。 $C \times 3.6$  mass % の水準では、解体した全供試体に明らかな腐食が確認された。それに対して、 $C \times 1.2$  mass % 以下の水準では、ほぼ全数の供試体で PC 鋼材に発錆は認められず、健全な状態であった。ただし、 $C \times 0.3$  mass % で応力無負荷の水準の供試体で、解体した 3 体のうちの 1 体のみ、一部にかすかな変色程度の腐食が観察された。

このシリーズの実験から、次のことがいえる。すべての応力水準で  $C \times 3.6$  mass % のみ全供試体で明らかな発錆が確認された。さらに、 $C \times 1.2$  mass % 以下で唯一わずかな発錆の確認された  $C \times 0.3$  mass % の水準でも、応力を負荷していない供試体であったことから、 $0.8f_{puk}$  以下の応力範囲では腐食発生に対して PC 鋼材に負荷する応力の影響はないと判断できる。したがって、実構造物においては、適切な初期塩化物イオンの規制、外来塩化物イオンの制御および確実な PC グラウトの充填が、PC 鋼材を腐食から守るために重要であるといえる。

なお、残留ひずみが残るほどの応力履歴を有する鉄筋では、腐食の発錆に対して応力の影響があることが確認されている<sup>26)</sup>。

## 5. まとめ

5 年間にわたる応力無負荷の実験、および 2.5 年間にわたる応力負荷の実験から、次のような結論が得られた。

- (1) PC グラウト中における鋼材腐食発錆限界塩化物イオン濃度は、 $C \times 0.3$  mass % 程度である。
- (2) この値は、セメント従量と比較すると一般的なコンクリートと同等で、鋼材の発錆は、鋼材が接する空隙水中の自由塩化物イオン濃度と自由水酸化物イオン濃度の比に依存するという過去の研究結果とも整合する。
- (3) PC 鋼材に負荷される応力度は、規格引張強度の

表 - 8 実験要因と水準

| 材齢 (日)     | 塩化物イオン濃度 ( $C \times$ mass %) | 0.035   |   | 0.08 |     | 0.3 |     | 1.2 |   | 3.6 |     |   |   |
|------------|-------------------------------|---|---|------|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|---|---|
|            |                               | 0.7   | 0 | 0.7  | 0.8 | 0   | 0.7 | 0.8 | 0 | 0.7 | 0.8 |   |   |
| 597<br>182 | 外観                            | [Photographs of specimens showing appearance] |   |      |     |     |     |     |   |     |     |   |   |
|            | 発錆                            | 無   | 無 | 無    | 無   | 微   | 無   | 無   | 無 | 無   | 有   | 有 | 有 |
| 890<br>430 | 外観                            | [Photographs of specimens showing appearance] |   |      |     |     |     |     |   |     |     |   |   |
|            | 発錆                            | 無   | 無 | 無    | 無   | 無   | 無   | 無   | 無 | 無   | 有   | 有 | 有 |

80 % 以下の範囲であれば、腐食の発生に影響を及ぼさない。すなわち、実構造物での使用レベルでは、鋼材腐食に対して PC 鋼材の応力度の影響を考慮する必要はない。

- (4) 「PC グラウトの設計施工指針」で規定された PC グラウトに内在する塩化物イオン濃度の制限値  $C \times 0.08$  mass % は、PC 鋼材を腐食から保護するという要求性能に対して、十分な安全率をもった妥当な値であることが検証された。

なお、この PC グラウトに内在する塩化物イオン量の制限値  $C \times 0.08$  mass % は、現在では、土木学会のコンクリート標準示方書、NEXCO の構造物施工管理要領、国土交通省の土木共通仕様書にも取り入れられている。

ただし、これらの結果は普通ポルトランドセメントを用いた一般的な配合の PC グラウトによるものであり、特殊な配合や高炉セメントなどポルトランドセメント以外のセメントを用いる PC グラウトでは、内在する塩化物イオン濃度の制限値は、従来どおり総量で  $0.3 \text{ kg/m}^3$  以下とする、もしくは学術的に合理的な説明にもとづくなどの配慮が必要であると考えられる。

## 謝 辞

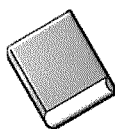
本実験の計画ならびに遂行にあたり、グラウト規準作成委員会ならびに実験検討委員会の委員諸氏に貴重なご助言ならびにご協力を賜りました。また、3 章の実験においては、田麦和也氏をはじめとする (株) 太平洋コンサルタントの諸氏ならびに太平洋セメント (株) の諸氏に、4 章の実験においては、金沢工業大学の宮里心一准教授ならびに東洋輔氏 (現オリエンタル白石 (株)) に多大なご協力をいただきました。記して、ここに深く謝意を表します。



## 参考文献

- 1) たとえば, 石橋忠良: PC 鉄道構造物の劣化事例と対策, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.1, pp.72 - 75, 2003
- 2) Woodward, R.J. & Williams, F.: Collapse of Ynys - y - Gwas bridge, Proc. of Instn Civ. Engrs, Part 1, 84, pp. 635 - 669, 1988
- 3) プレストレストコンクリート技術協会: PC グラウトの設計施工指針, 2005
- 4) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], pp.196 - 197, 2002
- 5) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.119 - 122, 2007
- 6) 建設省大臣官房技術審議官通達: コンクリート中の塩化物総量規制について, 1986
- 7) 土木研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクト, コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書第二編, pp.434 - 437, 1988
- 8) Bentur, A., Diamond, S. & Berke, N. S.: Steel Corrosion in Concrete, E & FN SPON, pp. 24 - 28, 1997
- 9) Hausmann, D. A.: Steel Corrosion in Concrete - How Does It Occur?, Materials Protection, Vol. 6, No. 11, pp. 19 - 23, 1967
- 10) Gouda, V. K.: Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel I - Immersed in Alkaline Solutions, British Corrosion Journal, Vol. 6, pp. 198 - 203, 1970
- 11) Page, C. L. and Havdahl, J.: Electrochemical Monitoring of Corrosion of Steel in Microsilica Cement Pastes, Matériaux et Constructions, Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions, Vol. 18, No. 103, pp. 41 - 47, 1985
- 12) Diamond, S.: Chloride Concentrations in Concrete Pore Solutions Resulting from Calcium and Sodium Chloride Admixtures, Cement Concrete and Aggregates, Vol. 6, No. 2, pp. 97 - 102, 1986
- 13) 米澤敏男, Ashworth, V. and Procter, R., P., M.: コンクリート中の鋼材腐食における塩素イオンの限界量について, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 141 - 144, 1986
- 14) Hussain, S., E., Al - Gahtani, A., S. and Rasheeduzzafar: Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete, ACI Material Journal, November - December, 1996
- 15) 北後征雄, 芦田公伸, 菊田憲弘, 宮川豊章: 電気化学的手法によるコンクリートの改質と補修硬化に関する実証的研究, 土木学会論文集, No. 641 / V - 46, pp. 101 - 115, 2000
- 16) 河野克哉, 山田一夫, 細川佳史, 梁承奎: 単位セメント量が異なるコンクリート中における塩化物イオンの鋼材発錆限界濃度, 土木学会第 61 回年次学術講演会論文集, V - 255, pp. 507 - 508, 2006
- 17) 細川佳史, 森大介, 山田一夫, 大竹淳一郎: コンクリート中における塩化物イオンの鋼材発錆限界濃度の表記に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 909 - 914, 2004
- 18) 芦田公伸: セメント硬化体やグラウトの塩分量と鋼材発錆, コンクリート工学, Vol. 43, No. 6, pp. 10 - 13, 2005
- 19) ASTM: Standard Test Method for Half - cell Potentials of Uncoated Reinforcing in Concrete, ASTM C876, 1987
- 20) 土木研究所: 塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究 (Ⅲ) - 塩害により損傷を受けた PC 鋼材の機械的性質 -, 土木研究所資料第 13810 号, 2001
- 21) 村山八洲雄, 今立文雄, 川上泰治, 西村良文, 山下健一: PC 鋼材の遅れ破壊に及ぼすコンクリート用混和剤の影響, プレストレストコンクリート, Vol. 37, No. 1, pp. 70 - 74, 1995
- 22) 上田隆雄, 溝口茂, 芦田公伸, 宮川豊章: 塩水を噴霧した PC 鋼材の応力腐食挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 109 - 114, 2000
- 23) 松塚忠政, 渡辺博志, 古賀裕久, 中村英佑: 塩分を含むコンクリート中の PC 鋼より線の腐食評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 919 - 924, 2005
- 24) 東洋輔, 宮里心一, 二井谷教治, 山田一夫, 宮川 豊章: グラウトの塩分濃度と PC 鋼材の緊張力が鋼材腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol. 65, No. 1, pp. 103 - 117, 2009
- 25) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.237 - 239, 2007
- 26) 東洋輔, 宮里心一: 応力負荷を受けた鉄筋のモルタル中における腐食特性の解明, 土木学会第 61 回年次学術講演会, No. 5, pp. 503 - 504, 2006

【2009 年 9 月 14 日受付】



刊行物案内

## 第37回 PC 技術講習会テキスト

### PC技術・最近の動向

#### 平成21年 2 月

定 価 6,000 円 / 送料 500 円

会員特価 5,000 円 / 送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会