

グラウト中の空げきが鋼材腐食性に与える影響に関する実験的研究 (供試体暴露3年半経過後)

(株)高速道路総合技術研究所 正会員 ○野島 昭二
 (株)富士ピー・エス 正会員 工博 徳光 卓
 太平洋セメント(株) 工博 山田 一夫
 京都大学 正会員 工博 宮川 豊章

1. はじめに

プレストレストコンクリートにおいて、PC 鋼材を健全に保ち、その緊張力を維持することは耐久性上極めて重要である。PC グラウト(以下、「グラウト」と略す)は、PC 鋼材と部材コンクリートとの一体化、および鋼材の腐食からの保護を目的に設置する。グラウトによる鋼材の保護性能はPC 鋼材表面に不動態皮膜を形成することにより保たれる。現在、グラウト材料および施工方法の改善により、グラウトの充填性は向上しているが、シースのリブの凹凸箇所などに小さな空げきが残されることは避けられない。

筆者らは、グラウトの空げきに着目し、空げき内部の環境条件と鋼材腐食との関係を明らかにすることにより、PC 鋼材の耐久性確保に関する指標を得ることを目的とした実験を行い、その中間報告を行った¹⁾。本稿は、その後に引続き実施した計測および観察結果をもとに考察を加えるものである。

2. 実験概要

2. 1 供試体

空げき部では空気が絶縁体となり、分極抵抗や自然電位などの一般的な電気化学的計測が行えない。そこで空げき部腐食の定性的傾向を把握するため、図-1に示すような分割鋼板の間に流れるマクロセル電流(腐食電流)を評価指標として用いるものとした²⁾。分割鋼板供試体はSS400の15×32×3mmの鋼板9枚で構成され、各鋼板には2本のリード線を接続した。分割鋼板供試体を密封可能なアクリル製の円筒内にセットして用いた。図-2に供試体の概要を示す。アクリル円筒はシースを模した

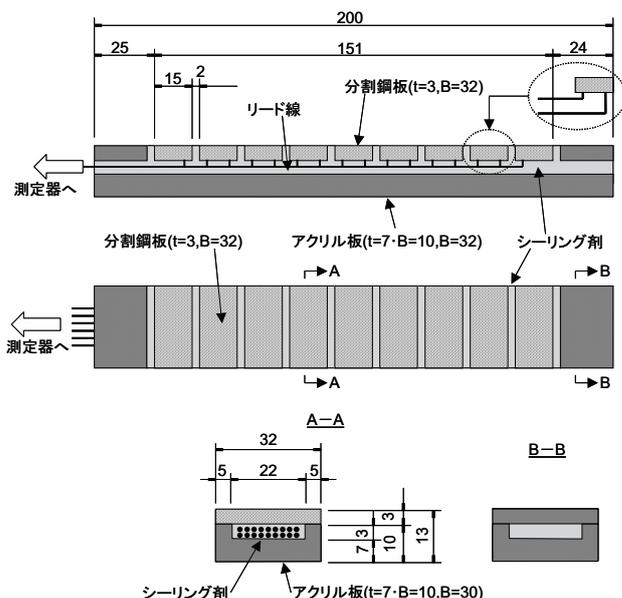


図-1 分割鋼板供試体の形状寸法

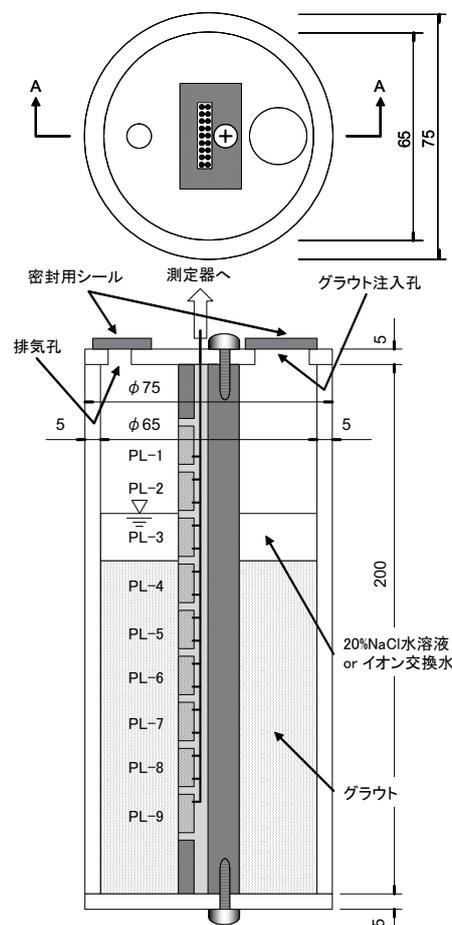


図-2 分割鋼板供試体のセット図

表-1 グラウトの配合とフレッシュ性状

W/C (%)	セメント (kg)	水 (kg)	混和剤 (kg)	JP 漏斗流下時間 3回平均 (秒)	密度 (g/cm ³)
43.0	30	17	0.3	14.5	1.912

表-2 供試体の種類

		供試体の名称 (各2体)						
		完全	閉塞	閉塞-水	閉塞-塩	開放	開放-水	開放-塩
空隙の有無		なし	あり	あり	あり	あり	あり	あり
腐食因子供給条件	酸素	×	閉塞	閉塞	閉塞	開放	開放	開放
	水	×	なし	あり	あり	なし	あり	あり
	塩化物	×	なし	なし	あり	なし	なし	あり

※供試体番号は実験水準を表す各供試体名称の後に-1, -2の枝番を付して表す。

ものであり、上部にグラウト注入孔と排気孔を設けた。

計測の要領を図-3に示す。鋼板に接続したリード線はリレースイッチとスイッチボックスを介して静ひずみ計に接続した。リレースイッチは常時短絡させ、測定時のみ 10Ωのシャント抵抗を介して電流が流れるものとし、抵抗に電流を流してから2秒後に測定するよう静ひずみ計を設定した。したがって、測定結果には電気抵抗による IR ドロップの影響が含まれている³⁾。

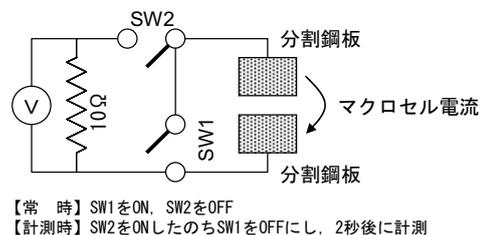


図-3 計測要領図

2. 2 長期暴露試験

グラウトは3社混合ポルトランドセメントを用いた高粘性グラウトとした。グラウトの配合とフレッシュ性状は表-1に示すとおりである。供試体の種類を表-2に示す。実験水準は空げきの有無、空げきの環境条件とした。完全供試体では、全ての鋼板が隠れるまでグラウトを充てんした。空げきを有する供試体は、PL-4が隠れるまでグラウトを充てんし、PL-3より上部は空げき部に露出させた。空げき部の腐食因子として、空気、水、塩化物を考慮した。空気の供給条件は供試体上部の注入孔と排気孔の閉塞、解放条件により変化させた。空げき部への水や塩水の供給はグラウト充てん14日後に行った。水はイオン交換水とし、塩水はシース中に浸透した凍結防止剤を考慮して20%NaCl水溶液とし、おのおのPL-3が隠れるまで注入した。供試体数は各条件2体×7水準の計14体とした。

供試体を20℃・90%R.H.の恒温室中に暴露し、マクロセル電流を1年間自動計測した。同時に鋼板腐食状況を目視観察した。現時点での暴露期間は約3年半であり、今後も継続暴露を予定している。なお、マクロセル電流密度は対象とする鋼板の両端から流入・流出する電流を合計し、鋼板の表面積で割ることによって算出した²⁾。数値はアノード電流(電子の流出)を正、カソード電流(電子の流入)を負で表した。

3. 実験結果

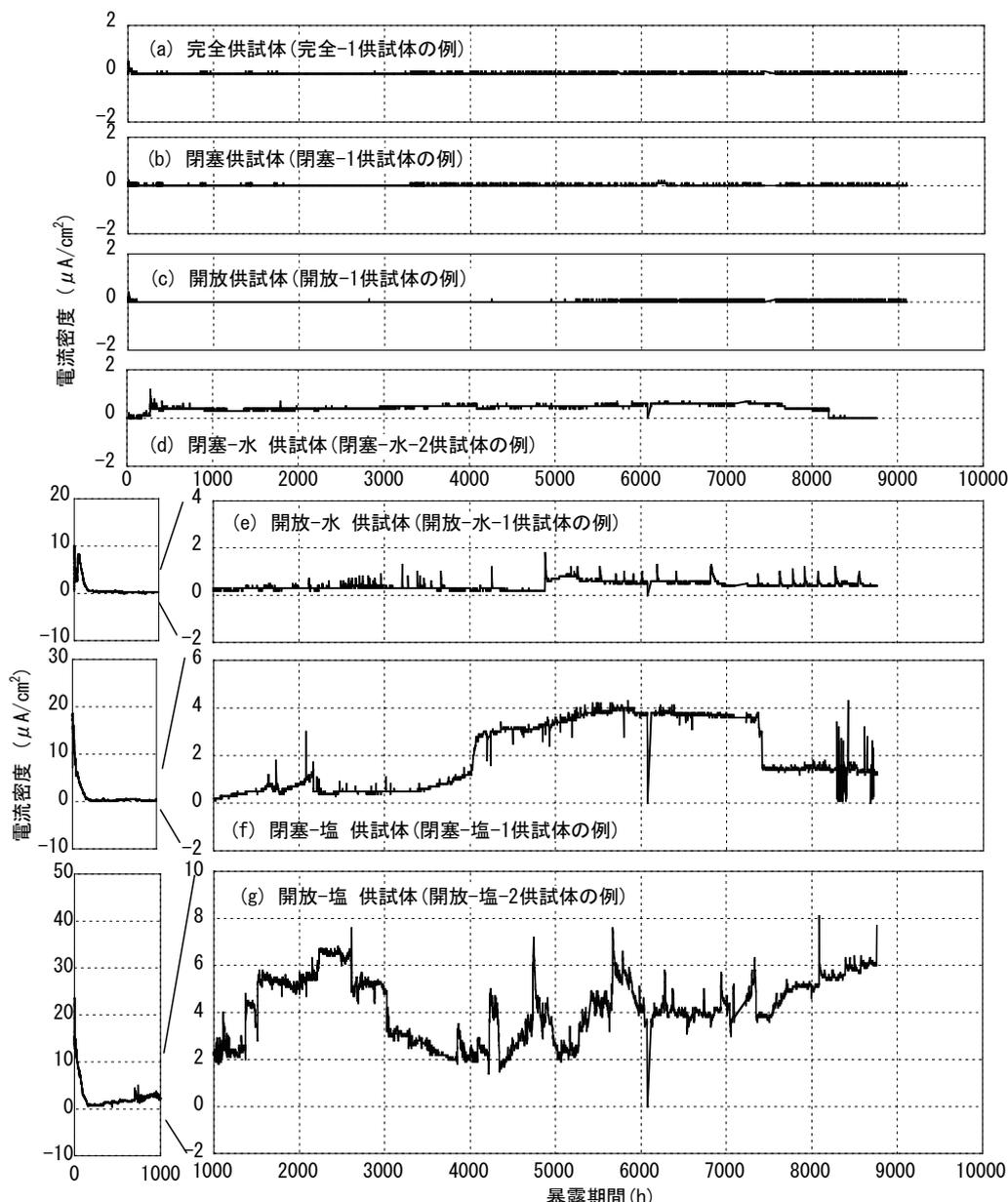
3. 1 暴露1年間のマクロセル電流挙動

(1) アノード電流密度の経時変化

分割鋼板供試体の鋼板間に流れるマクロセル電流は供試体内で完結しており、マクロセル電流の総和はゼロとなる。そこで各測定時におけるマクロセル電流密度のうち、アノード電流のみを合計してアノード電流密度とした。図-4にアノード電流密度と暴露期間の関係を示す。アノード電流密度の経時変化は供試体内におけるマクロセル腐食の巨視的な傾向を表している。完全供試体は鋼板すべてがグラウト中に埋設された状態にあり、図-4(a)に示すようにグラウト充てん直後を除いてアノード電流密度はほぼゼロとなる。

空げきを有する供試体のうち、図-4(b)・(c)に示す空げきに水を注入していない閉塞-1供試体と開放-1供試体は、完全供試体と同様にアノード電流密度が1年間ほぼゼロで推移した。

空げきに水を注入した供試体のうち、図-4(d)・(e)に示すイオン交換水を注入した供試体では、水の注



※暴露時間はそれぞれ、(a)~(c)が供試体作成後経過時間、(d)・(e)がイオン交換水注入後経過時間、(f)・(g)が塩水注入後経過時間を表す。図(e)~(g)は1000時間まで縦軸を大きくしている。

図-4 アノード電流密度と暴露期間の関係

入直後に開放-水-1 供試体で $10 \mu A/m^2$ 程度の電流密度を示した以降、時折、最大 $2 \mu A/m^2$ 程度の電流密度の発生と、電流密度が $0.2 \sim 0.5 \mu A/m^2$ に落ち着いた状態を繰り返した。これは腐食の進行によるものと考えられ、この環境条件での腐食は、速度が一定でなく、断続的に加減速を繰り返しながら進行することが伺える。電流密度の変動は気室を開放した開放-水-1 供試体より、気室を閉塞した閉塞-水-2 供試体が小さかった。理論的に閉塞-水-2 供試体では、容器内の酸素を消費したのちは腐食が進行しないと考えられるが、本試験の範囲内では収束しなかった。

図-4 (f)・(g)に示す開放-塩-2 供試体では、塩水の注入直後に $25 \mu A/m^2$ 程度の電流密度を示し、以降、最大 $8 \mu A/m^2$ 程度、常時 $2 \sim 6 \mu A/m^2$ の電流密度が観測された。塩水注入供試体においても、計測期間内では電流が収束しなかった。電流密度の変動は開放-塩-2 供試体より気室を閉塞した閉塞-塩-1 供試体が小さかった。

なお、暴露開始約2年後の500日後から1週間、再度、電流の計測を行ったが、マクロセル電流は図-4と同様に、空げきに水および塩水を注入した供試体で顕著であった。

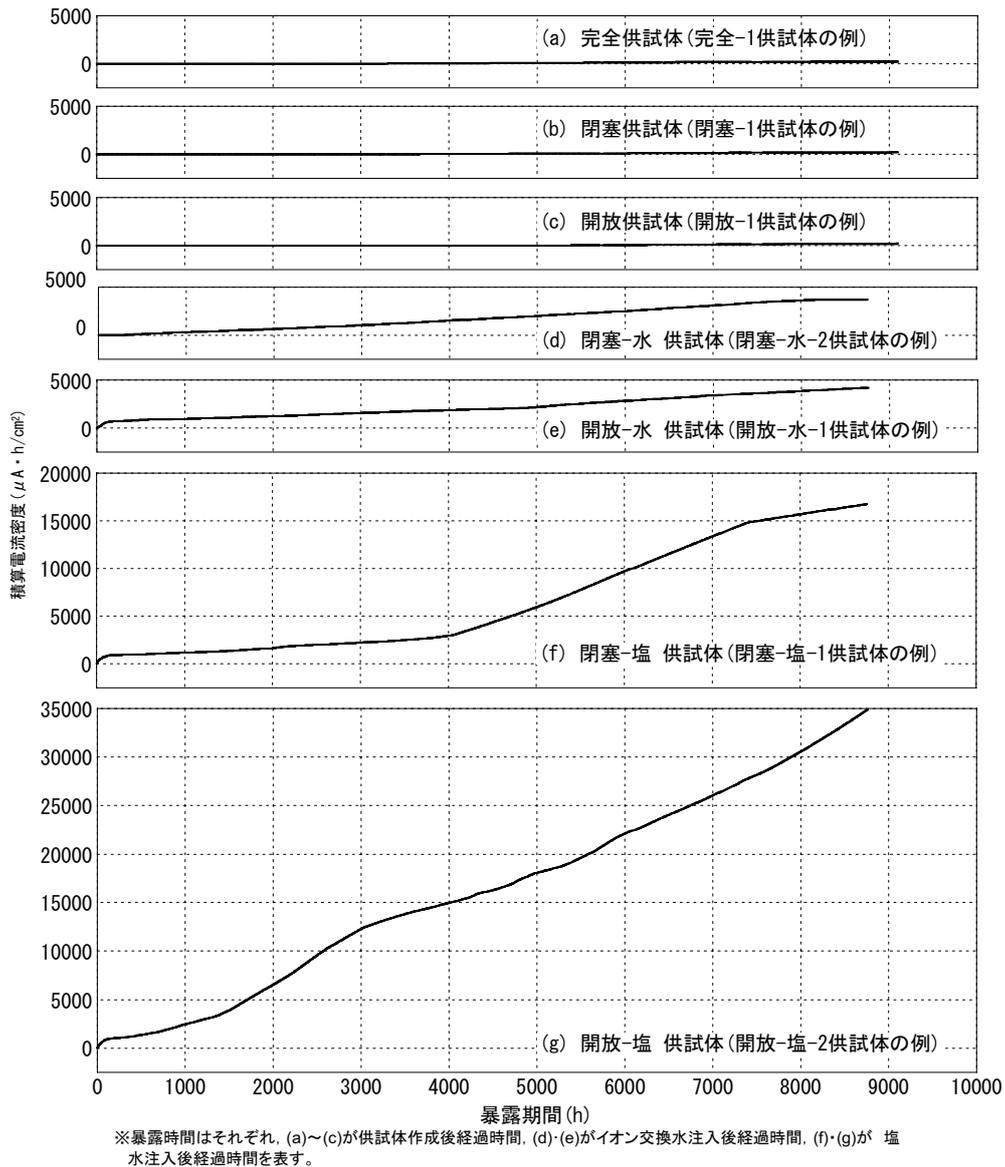


図-4 積算電流密度と暴露期間の関係

上記のように、マクロセル電流の計測結果から、空げき部の環境条件が湿潤状態に置かれた時にマクロセル腐食を生じることが確認された。特に、空げきに帯水した水が塩水の場合に著しい腐食を生じることが確認された。

(2) 積算電流密度の経時変化

積算電流密度と暴露期間の関係を図-5に示す。この図は図-4に示した電流密度の積分値であり、マクロセル腐食量と強い相関がある。図-5(d)・(e)に示したイオン交換水を注入した供試体では、閉塞供試体で初期からほぼ一定の積算電流密度の増分を示した。開放供試体では暴露初期に比較的大きな積算電流密度の増加を生じ、その後の積算電流の増分は閉塞供試体とほぼ同等であった。暴露一年後(約8,750時間)の積算電流密度は、閉塞-水-2供試体で約3,700 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ 、開放-水-1供試体で約4,500 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ に達した。

図-5(f)・(g)に示した塩水注入供試体では空げきの開放条件に関わらず、暴露初期に比較的大きな積算電流密度の増加が認められた。電流密度の増分は空げきを開放した場合の方が大きくなり、暴露一年後(約8,750時間)の積算電流密度は、閉塞-塩-1供試体で約16,800 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ 、開放-塩-2供試体で約34,900 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ に達した。なお、本実験で測定されたマクロセル電流は分割鋼板間を流れたもののみであり、一枚の鋼板内で



※1 水・塩水は供試体作成後 14 日で注入。閉塞-1・開放-1 供試体は水を注入していない
 ※2 供試体暴露開始 704 日後～767 日後の間に恒温室が故障し、空げきを開放した供試体の空げき部が散水により水没した。

写真-1 1298 日経過後の供試体空げき部の外観

完結するマクロセル電流やマイクロセル電流を測定していないため、この電流密度から空げき部全体の鋼材腐食量を算出することはできない。

3. 2 暴露期間中での腐食状態の変化

写真-1 に 1298 日経過後の供試体空げき部の外観を示す。なお、供試体暴露開始 704～767 日後の間に恒温室が故障し、空げきを開放した供試体(写真-1 (b)・(d)・(f))の空げき部が散水により水没したため、これらの腐食が進行した経緯がある。目視による鋼材の腐食程度と積算電流量は比較的よい相関を示したが、空げきを開放し水を注入しなかった開放供試体ではマクロセル電流がほとんど認められなかったにも関わらず、暴露 1 年目から 2 年目に軽微な錆が発生していた。しかし暴露 3 年半を経過した現在でも、空げき部に水を注入せず、空げきの閉塞のみを行った閉塞供試体では鋼板は光沢を有し、鋼板の錆は認められない。

4. シース内の有害となる残留空気に関する考察

「PC グラウト設計施工指針（PC 技術協会）」ではPC 鋼材を腐食から保護する性能を担保するために、「有害となる残留空気」を生じないようにグラウトを充てんすることを求めている。シース内に残された空げきが有害であるか否かは一体化性能とも関連するが、ここではPC 鋼材を腐食から保護する観点にのみ着目して考察する。

一般に、乾燥した雰囲気にある清浄な金属表面においても数 nm の酸化物皮膜が形成されるが、乾燥した状態ではほとんど錆は進行しないことが知られている⁴⁾。本研究では、暴露後 3 年半を経過した現在においても、「水を注入せず閉塞した空げき」ではマクロセル電流、目視ともに鋼材腐食の兆候が認められていない。本実験における閉塞供試体の空げきの環境が、供用期間全体にわたって鋼材表面に錆を生じさせないものであるか否かは明らかでないが、理論と実験結果の両面から考えて、「腐食に対して”有害でない残留空気とは、その大きさに関係なく空げきが乾燥状態に保たれることといえる。

空げきを乾燥状態に保つには、密封されたシース内を乾燥状態に保つことができるようなグラウト材料を使用することと、シースやキャップが空気・水分に対して十分な遮蔽性能を有し、かつ、この性能が設計耐用期間をとおして保たれることが必要である。欧米においては、現在、プラスチックなどの腐食しない材質のシースやキャップでPC 鋼材を密封するという考え方が提示され、その密封性をPC 鋼材と外部の鉄筋間の電気抵抗で評価する方法なども提示されている⁵⁾。ただし、現在のグラウト材料やシースなどが空げきを長期間乾燥状態に保つ性能を有するか否かは明らかでない。

一方、ノンブリーディングタイプのグラウトを用いるなど、シース内の残留空気を小さくする試みや、シース内の空げきの位置や大きさを非破壊検査により特定する方法が検討されている。残留空気が耐久性に及ぼす影響を明らかにするとともに、材料および施工面からの耐久性の向上に関するアプローチも鋭意進めていくことが重要である。

5. まとめ

本稿ではシース内の空げきに存在する PC 鋼材の腐食性に関する定性的傾向を確認するための 3 年半の暴露実験結果を示し、考察を加えた。本稿をまとめると以下のとおりである。

- 1) 20°C、90%R. H. の環境に 3 年半暴露したとき、空げきに水を注入せず空げきの密封のみを行った供試体では、空げき部の鋼材に腐食の兆候は見られなかった。
- 2) 理論と実験結果の両面から考えて、「腐食に対して”有害でない残留空気とは、その大きさに関係なく空げきが乾燥状態に保たれることであり、シース内の空げきを長期間乾燥状態に保つことができるようなグラウト材料・シースなどの材料と、その確実な施工方法の研究が重要である。

謝辞

本実験への協力と貴重なご意見を賜った PC グラウト規準作成委員会委員各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 徳光卓・野島昭二・山田一夫・宮川豊章：グラウト中の空げきが鋼材腐食性に与える影響に関する実験的研究，第 14 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 315-320，2005. 10
- 2) 長滝重義・大即信明・守分敦郎・鎌田敏郎・宮里心一：断面修復部における打継目の物質通過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響，土木学会論文集 No. 578/v-37，pp. 31-42，1997. 11
- 3) 山口光俊・徳光卓・藤田数正・鈴木丘：マクロセル電流計測の自動測定方法に関する実験的検討，土木学会第 60 回年次学術講演会，5-185，pp. 369-370，2005. 9
- 4) 腐食防食協会：腐食・防食ハンドブック，第 3 章大気，pp. 187-191，2000. 2
- 5) fib：Proceedings of the second workshop on “Durability of post-tensioning tendons”，2004. 10