

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

(株)富士ピー・エス 正会員 工博 ○徳光 卓
 日本道路公団試験研究所 正会員 野島 昭二
 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鋼材が健全に保たれ、その緊張力が維持されることは耐久性上極めて重要である。PCグラウト(以後、グラウトと略す)にはシーす内に配置されたPC鋼材表面に不動態皮膜を形成させ、耐食状態に保つ目的がある。グラウトの充てんが不十分な場合には、橋面から浸透した水や塩化物による鋼材腐食も懸念されることから、完全な充てんを目指したグラウト施工の改善に関する取り組みが行われている。現在、グラウトは材料の改良や施工方法の改善によって、ほぼ100%の充てんが可能となってきた。しかし、未だグラウトの充てん度を外部から非破壊で検査する方法は確立されておらず、また、現在でもシーす中に小さな空げきが残されることが避けられないこともまた事実である。

そこで、PC技術協会「PCグラウト規準委員会」の実験検討ワーキンググループでは、グラウトと鋼材腐食に関する耐久性を実験的に検討した。本実験の目的は、グラウト空げきに着目し、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である。

2. 実験概要

2.1 供試体

空げき部の鋼材腐食の測定では、空気が絶縁体であるため、自然電位測定や分極抵抗測定などの一般的な電気化学的手法が適用できない。そこで図-1に示す分割鋼板供試体を用い、分割鋼板間に流れるマクロセル電流を評価指標として用いるものとした¹⁾。分割鋼板供試体はSS400の15×32×13mmの鋼板9枚で構成し、各鋼板には2本のリード線を接続した。分割鋼板供試体は密封可能なアクリル製の円筒内にセットして用いた。図

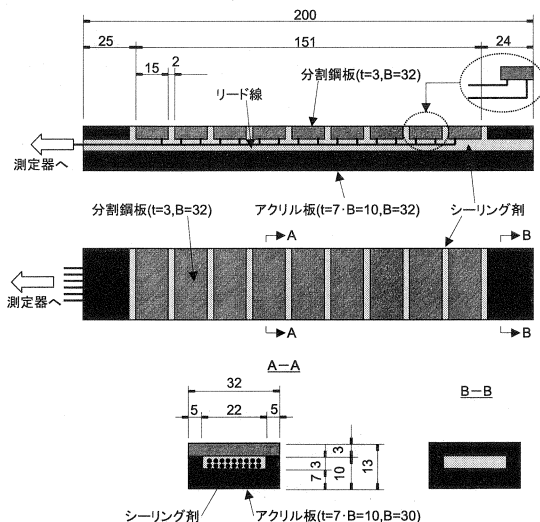


図-1 分割鋼板供試体の形状寸法

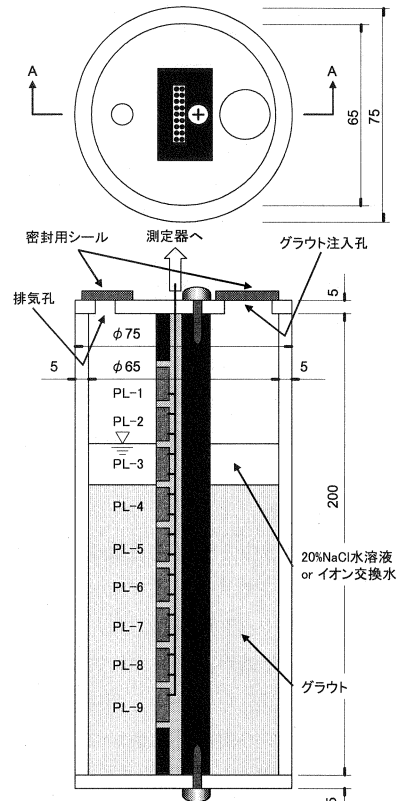


図-2 分割鋼板供試体のセット図

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のような枝番を付して表す。

— 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ものであり、上部にグラウト注入孔と排気孔を設けた。

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 の抵抗を介して電流が流れるものとし、静ひずみ計のプログラムは抵抗に電流を流してから 2 秒後に測定するよう設定した。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。

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融氷剤の濃縮を考慮して 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。

供試体は 20°C90%RH の恒温室中に暴露し、マクロセル電流を自動計測した。また、定期的に鋼板腐食状況を目視観察した。また、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¹⁾。なお、数値はアノード電流を正、カソード電流を負で表した。

3. 実験結果

3. 1 グラウト充てん直後の供試体

写真-1 にグラウト充てん 4 日後の閉塞-1 供試体の外観を示す。空げきを閉塞した供試体(以後、閉塞供試体と略す)の空げき部はブリージングを生じていないものの内壁には多量の結露が見られたが、1 体の供試体でわずかな錆が認められただけであった。また、空げきを開放した供試体(以後、開放供試体と略す)の内壁にも結露が見られたが、目視による錆は認められなかった。全供試体で結露は材令 28 日までに消失した。

また、全ての供試体において、グラウト充てん後 7~11 時間に微弱な電流の発生が認められた。図-3 に完全-1 供試体グラウト充てん 9.2 時間後のマクロセル電流密度を示す。各鋼板の電流は ±0.5 μA/cm² 以内と、後述する腐食に伴うマクロセル電流密度に比べて非常に小さく、その継続時間も 3 時間程度と一時的なもの

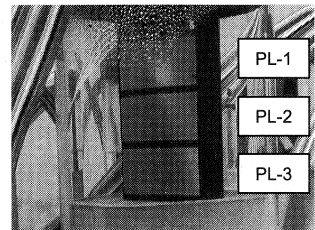


写真-1 グラウト充填4日後の閉塞-1 供試体

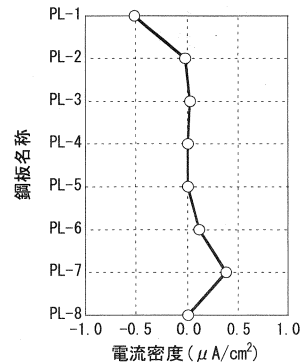


図-3 完全供試体グラウト充填9.2時間後のマクロセル電流密度

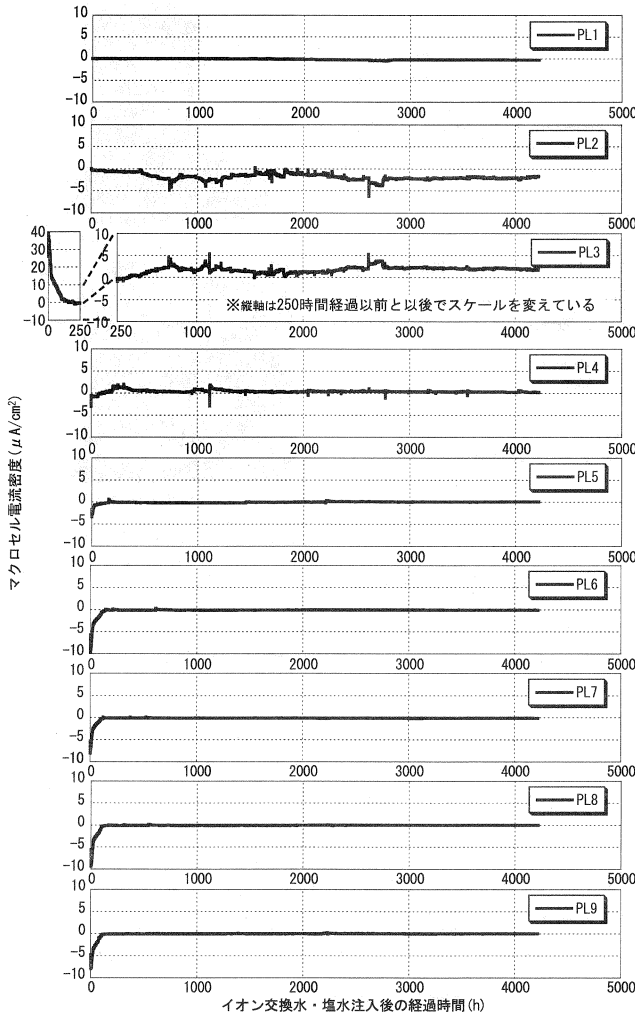


図-4 開放塩-1 供試体のマクロセル電流密度

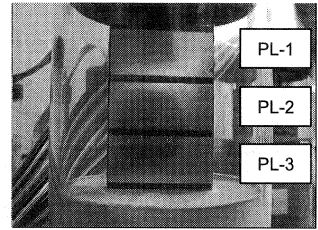
であった。電流の発生原因は不明であるが、全ての鋼板がグラウトに覆われていることから、腐食に伴うものではないと考えられる。他の空げきを有する供試体においてもグラウト中の鋼板に±0.5 μA/cm²以内の一時的な電流が認められたが、空げき部の鋼板には何らマクロセル電流は認められなかった。

3. 2 空げきに水・塩水を注入しなかった供試体

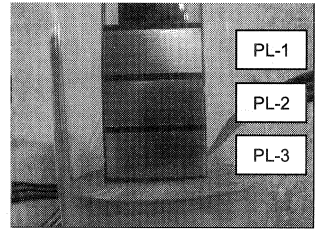
写真-2にグラウト充てん190日後の閉塞-1 供試体、開放-1 供試体の外観を示す。暴露後半年を経過した現在、いずれの供試体においても鋼板表面は金属光沢を有しており、また、充てん直後以降はマクロセル電流の発生も認められなかった。供試体の鋼板表面には目視による水膜の形成は認められなかったが、湿度90%の恒温室中に暴露していることから、開放供試体では鋼板表面に何らかの水膜が形成されているものと考えられる。既往の研究によれば、大気腐食速度は水膜が1 μmのとき最大となり、100Å以下では発錆に水が関与する腐食(湿食)を生じないとされていることから²⁾、本供試体の鋼板表面に生じている水膜は非常に薄いものと考えられる。

3. 3 空げきに塩水を注入した供試体

写真-3に塩水注入176日後(供試体製作190日後)の閉塞塩-1 供試体、開放塩-1 供試体の外観を示す。

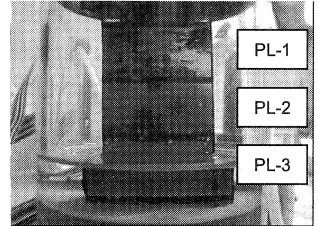


(1) 閉塞-1 供試体

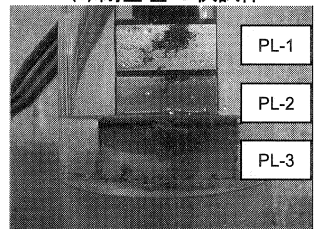


(2) 開放-1 供試体

写真-2 空げきに水・塩水を注入していない供試体



(1) 閉塞塩-1 供試体



(2) 開放塩-1 供試体

写真-3 空げきに塩水を注入した供試体

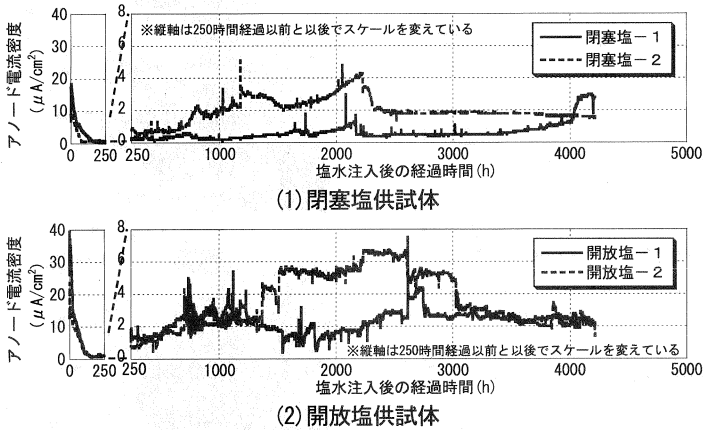
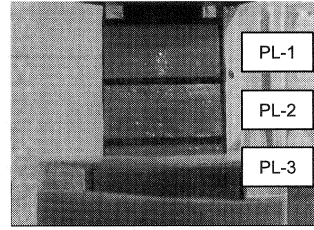
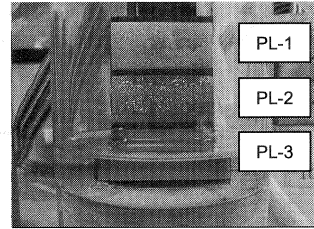


図-5 塩水充てん供試体のアノード電流密度



(1) 閉塞水-1 供試体



(2) 開放水-1 供試体

写真-4 空げきにイオン交換水を注入した供試体

両供試体とも水中および、空げき中の鋼板に腐食が認められたものの、開放塩-1 供試体では水中部の鋼板腐食が著しいのに対し、閉塞塩-1 供試体では水中部の鋼板腐食は顕著でなく、むしろ空げき中の鋼板腐食が著しかった。これは、開放供試体では空げき部への空気の供給により気中部の鋼板がカソードとなりやすいのに対し、閉塞供試体では空気供給の制限により、前者に比べて電氣的極性を持ちにくいと推察される。

図-4に開放塩-1 供試体における各鋼板のマクロセル電流密度を示す。塩水を注入した供試体では、塩水注入直後から PL-3 鋼板に $40 \mu A/cm^2$ の大きなアノード電流が、グラウト中の PL-4~9 鋼板にはカソード電流が認められ、塩水中の鋼板はマクロセル腐食を生じていることが確認された。これはグラウト中の鋼材近傍で酸素消費によるカソード反応が、PL-3 ではこれに対応するアノード反応が生じているものと考えられる。腐食電流は塩水注入後 100 時間で一旦落ち着いたが、500 時間を経過した付近から、PL-2~4 を中心として電流の発生と急激な増減が認められた。これはグラウト中の酸素が多量に消費された結果、空げき部の酸素消費に伴う PL-2 のカソード反応が生じ、これに対応する PL-3, PL-4 のアノード反応が生じた結果と考えられる。不動態化した鋼材表面が、塩化物などの作用により局所的な金属溶解(孔食)を生じる場合、電位の急激な増減(電気化学ノイズ)を生じることが知られている³⁾。本実験のマクロセル電流は鋼板間の相対的な電位差に伴うものであることから、本供試体の電位の急激な増減は孔食発生を示すものと推察される。

図-5に塩水充てん供試体のアノード電流密度を示す。アノード電流密度は巨視的なマクロセル電流の変化傾向を把握する目的で、図-4に示したような各鋼板の電流密度を基に、各測定時における全鋼板のアノード電流密度のみの和を求めたものである。アノード電流密度は、4 000 時間の段階において、全ての供試体でほぼ $2 \mu A/cm^2$ 程度となったが、途中の段階では閉塞供試体に比べて全般的に開放供試体の電流密度が大きくなった。このことから塩水を注入した供試体では、空げきの開放条件が腐食発生の有無に与える影響は小さく、主として腐食速度に影響を与えることが確認された。

3. 4 空げきにイオン交換水を注入した供試体

写真-4にイオン交換水注入 176 日後(供試体製作 190 日後)の閉塞水-1 供試体、開放水-1 供試体の外観を示す。イオン交換水注入後約半年を経過した現在でも閉塞水-1 供試体には腐食が認められず、開放水-1 供試体では水中部の鋼板に軽微な腐食が認められるだけであった。なお、開放供試体の水中部鋼板の腐食はイオン交換水注入後 10 日まで目視による進行が確認されたが、以降はほとんど変化が認められなかった。

図-6にイオン交換水注入後のアノード電流密度の経時変化を示す。開放供試体ではイオン交換水注入直後に $10 \mu A/cm^2$ 程度の電流が認められたが、閉塞供試体ではこの電流は認められなかった。また、イオン交

換水注入 100 時間以降は、いずれの供試体も時折電気化学ノイズと思われる電流の変動が認められるものの、全般的なアノード電流密度は $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度で安定していた。なお、図示していないが、各鋼板のマクロセル電流密度は PL-3 鋼板で微弱なアノード電流が観察されているものの 100 時間以降はほとんど変化していない。これらの結果を総合して考察すると、空げき部におけるイオン交換水の存在は鋼板の腐食を生じさせるが、塩水を注入した場合に比べて鋼材腐食に与える影響は小さいと判断される。

3. 5 空げきの環境条件と積算電流密度の関係

図-5、図-6 に示したアノード電流密度はマクロセル電流による鋼材の腐食減量と相関がある。ここで

アノード電流密度の時間積分値を積算電流密度と定義する。各空げき環境における積算電流密度が大きな供試体各 1 体を選び、積算電流密度と時間の関係を図-7 に示す。空げきに水・塩水を注入していない閉塞-1、開放-1 供試体の積算電流密度はグラウト充てん 4 550 時間後において、おのおの $74.2, 22.8 \mu\text{A} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ であった。図示していないが、同時間における完全供試体の積算電流密度は $90 \mu\text{A} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ であることから、空げきに水・塩水を注入していない供試体のマクロセル腐食量は、グラウトを完全に充てんした供試体と同等と考えられる。

また、イオン交換水を注入した供試体のうち、空げきを開放した開放水-1 供試体では、水を注入してから 150 時間後(グラウト充てん約 500 時間後)の積算電流密度は $700 \mu\text{A} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ 程度となったが、その後の積算電流密度の増加はわずかであった。空げきを閉塞した閉塞水-1 供試体では、イオン交換水注入直後の急激な電流増加はなく、時間と共に積算電流密度が増加した。グラウト充てん 4 550 時間後の積算電流密度は、閉塞水-1 供試体が $1 473 \mu\text{A} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ 、開放水-1 供試体が $1 935 \mu\text{A} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ であった。

塩水を注入した供試体では、塩水注入直後における電流密度の急増とともに、グラウト充てん 1 000~3 000 時間付近(塩水注入 600~1 600 時間)において積算電流密度の勾配増加が認められ、その勾配はイオン交換水を充てんしたものより急であった。グラウト充てん 4 550 時間後の積算電流密度は、閉塞塩-2 供試体が $8 501 \mu\text{A} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ 、開放塩-2 供試体が $15 434 \mu\text{A} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ であり、イオン交換水を注入した場合に比べて 6~8 倍程度となった。

4. グラウト空げきが鋼材腐食性に与える影響の考察

4. 1 乾燥した空げきの影響に関する考察

本実験における目視ならびに電気化学的測定に基づく腐食測定結果を表-3 に示す。閉塞-水供試体を除けば、目視の発錆状態とマクロセル電流の傾向は一致しており、空げき部の環境条件と鋼材腐食性の関係を定性的に評価することは可能と考えられる。ただし、本実験における電気化学的測定は鋼板間のマクロセル電流のみを評価し、鋼板内部で完結するマクロセル電流や、ミクロセル電流を評価していないため、本実験

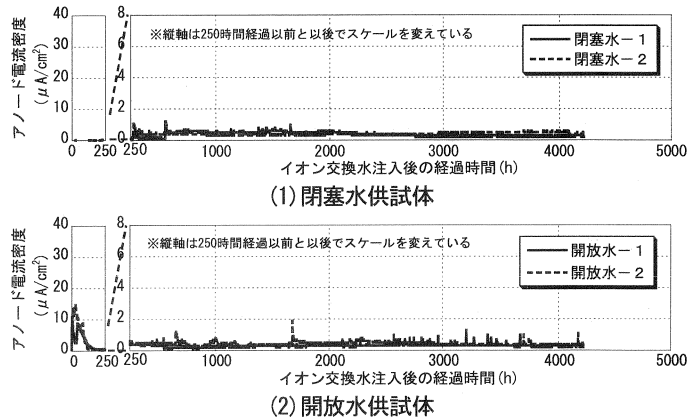


図-6 イオン交換水充てん供試体のアノード電流密度

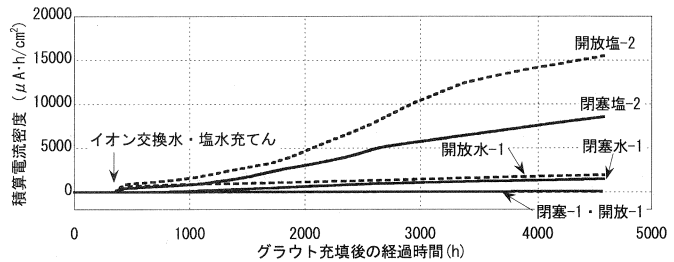


図-7 積算電流密度と時間の関係

での計測値は、そのまま鋼材の腐食全体を表すものではないことに注意が必要である。

本実験では空げき部の開放条件に関わらず、腐食に伴うと考えられるマクロセル電流の発生や目視による錆の発生は認められなかった。腐食防食分野において、問題となるのは湿食であり、水が関与しない腐食(乾食)は腐食速度が遅く事実上問題にならないとされている²⁾。本条件の供試体でグラウト充てん直後に生じた結露

は時間経過と共に消滅したことから、本実験と同様な乾いた条件の空げきの存在は鋼材の腐食にほとんど影響を与えないと判断される。

4. 2 帯水した空げきの影響に関する考察

本実験において空げき部に帯水した水の種類がその後の鋼材腐食の進行に与える影響は大きく、帯水中の塩化物の存在は空げき部の通気状態に関わらず鋼材を激しく腐食させることが確認できた。このことから、シースや定着具の密封条件に関わらず、グラウト材料には過大な塩化物が含まれてはならないと言える。

空げき中にイオン交換水を注入した条件では、密封した空げきに存在する鋼材は目視による腐食が認められず、気室を開放した空げきに存在する鋼材においてのみ目視による腐食が認められた。マクロセル電流の変化も、密封した空げき(閉塞-水)の条件では徐々に微弱な電流が流れるのに対し、開放した空げき(開放-水)の条件では水の注入直後に比較的大きな電流が流れたのち、微弱な電流に安定する傾向が見られた。このことから、密封したシース内に残留した水(ブリージング水や洗浄水がグラウト硬化後に残留した場合)の場合に比べて、シースの外部から侵入した水の方が鋼材腐食性に与える影響は大きいと判断される。

よって、PC鋼材の防食には、可能な限りグラウトを完全に充てんするよう努力することはもちろんであるが、止むを得ず空げきが生じた場合でもこれを局所的かつ乾燥状態にとどめるよう、水や酸素の侵入経路となるコンクリートを密実にし、あと埋め部(注入孔、定着部など)の施工を確実にすることが重要である。

5. まとめ

本論文は実験開始から約6ヶ月経過後までのデータに基づくものであり、現在も実験は継続中である。本実験結果から、実構造物におけるシース内の空げき残留に伴う鋼材腐食への影響に関し、暫定的な結論をまとめると以下のとおりになる。

- (1) シースや定着部、グラウトの注入・排出口などが十分な気密性と水密性を有しており、かつ、ノンブリージングタイプのグラウトを使用するならば、空げきの存在が鋼材腐食の進行に与える影響は小さい。
- (2) グラウト硬化後のシース内空げきに水が残留すると鋼材は腐食するが、腐食速度は比較的遅い。
- (3) グラウト硬化後のシース内空げきに残留した過大な塩化物を含む水の存在は鋼材を激しく腐食させる。前述のとおり、上記(1)の結論は空げきの存在を積極的に肯定するものではない。グラウトの施工においては、良質なグラウト材料を用いて可能な限り空げきを減らすよう努力するとともに、グラウト完了後は、酸素や水、塩化物がシース内に侵入する経路を確実に塞ぐことが重要である。

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

【参考文献】

- 1) 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, pp31-42, 1997. 11
- 2) 腐食防食協会：腐食防食ハンドブック、第3章大気、pp187, 2000. 2
- 3) 板垣昌幸、蝦名晋太郎、渡辺邦洋、額賀孝訓、梅村文夫：電気化学ノイズ法を用いた表面に黒皮が存在する炭素鋼の腐食挙動の検討、材料と環境、Vol. 53, No. 10, pp481-488, 2004

表-3 腐食測定結果のまとめ

	目視による発錆状況	計測による発錆状況
完全供試体	—	腐食なし
閉塞供試体	腐食なし	腐食なし
開放供試体	腐食なし	腐食なし
閉塞-水供試体	腐食なし	PL3 腐食(軽度)
開放-水供試体	PL3 腐食(軽度)	PL3 腐食(軽度)
閉塞-塩供試体	PL1-3 腐食	PL2-4 腐食
開放-塩供試体	PL1-3 腐食	PL2-4 腐食