

論文 海洋環境下における再生コンクリートの耐久性に関する検討

早川 健司^{*1}・山路 徹^{*2}・濱田 秀則^{*3}・伊藤 正憲^{*4}

要旨: 再生コンクリートを海洋環境下のコンクリート構造物へ適用することを目的とし、耐海水性に優れる高炉セメントを用いた再生コンクリートの耐海水性の評価、また再生骨材の品質との関係について検討した。特に、海水の作用を受ける再生コンクリートの強度変化、およびコンクリート中の鉄筋腐食に大きく影響する塩化物イオン透過性などの耐久性に関する試験を実施した。その結果、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して、高炉セメントを用いた再生コンクリートの塩化物イオン透過性は大きく改善され、骨材品質によっては海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物へ適用できる可能性が示された。

キーワード: 再生コンクリート、海洋環境、高炉セメント、塩化物イオン透過性、鉄筋腐食

1.はじめに

再生骨材を使用したコンクリートを港湾構造物へ適用するためには、海水の作用による強度性状の変化、また、より付加価値の高い鉄筋コンクリートへの適用においては、コンクリート中の鉄筋腐食性状に関する適切な評価が重要である。

これまでの研究^①により、普通ポルトランドセメントを用いた再生コンクリートは、海水の作用を受ける環境下においても必要強度を確保することができ、無筋コンクリート構造物への適用は十分可能であることが示されている。しかし、塩化物イオン透過性は水セメント比を小さくしてセメント硬化体の組織を緻密としても大きく改善されず、鉄筋コンクリート構造物への適用は困難なのが現状である。

一般に、高炉セメントもしくは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは海水の作用に対する抵抗性が高く、また塩化物イオンの透過に対して高い抵抗性を有しており、塩害に対する鉄筋腐食抑制に優れていることが報告されている^②。

そこで本研究では、高炉セメントB種を用いた再生コンクリートを港湾構造物へ適用することの有効性を検討するために、強度、塩化物イオン透過性、コンクリート中の鉄筋腐食性状に関する試験を実施した。また、吸水率の異なる再生細・粗骨材を使用し、骨材品質との関係について検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

セメントは密度 3.15g/cm³の普通ポルトランドセメント、および密度 3.04g/cm³の高炉セメントB種の2種類を使用した。

表-1に、使用した骨材の物理的性質を示す。再生細・粗骨材には、吸水率の異なるそれぞれ

表-1 骨材の物理的性質

	記号	粗粒率	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	品質 [*]
普通細骨材	NS	2.50	2.59	1.9	—	—
再生細骨材	RS1	2.94	2.45	4.9	64.2	1種
	RS2	3.27	2.25	13.1	73.2	規格外
普通粗骨材	NG	6.68	2.70	0.2	62.0	—
再生粗骨材	RG1	6.73	2.51	3.3	60.5	2種
	RG2	6.54	2.38	6.8	64.7	3種

*)建設省の用途別暫定基準(案)

* 1 : 運輸省 港湾技術研究所 構造部 材料研究室派遣研究員 工修(東急建設、正会員)

* 2 : 運輸省 港湾技術研究所 構造部 材料研究室研究官 工修(正会員)

* 3 : 運輸省 港湾技術研究所 構造部 材料研究室 室長 工博(正会員)

* 4 : 東急建設㈱ 技術研究所 土木研究室 工修(正会員)

2種類を使用した。比較用の普通細骨材には千葉県君津産の陸砂、普通粗骨材には青森県八戸産の碎石を用いた。再生骨材は使用前に24時間以上のプレウエッティングを行い、表乾状態で使用した。

2.2 コンクリートの配合

表-2に、実験で使用したコンクリートの配合を示す。セメント種類の影響に関する検討は、普通コンクリート(OPC-N, BB-N)および低品質再生細・粗骨材(RS2, RG2)を使用した再生コンクリート(OPC-R4, BB-R4)で行った。また、骨材品質による耐海水性の違いを検討するため、粗骨材に再生粗骨材(RG1)、細骨材に普通細骨材(NS)、再生細骨材(RS1)、およびこれらを等量混合した細骨材を使用した配合を用い、使用骨材の品質を5段階(N, R1~R4)に変化させた。

一般に、同一水セメント比の再生コンクリートの性能は普通コンクリートより低下するため、再生コンクリートを適用するためには、強度、耐久性の両面から水セメント比を小さく設定する必要があると考えられる。そこで本研究では、水セメント比の設定を普通コンクリートで55%，再生コンクリートで50%とした。

配合は、目標スランプ $8\pm2.5\text{cm}$ 、空気量4.5±1.5%となるように、単位水量、細骨材率、A-E減水剤の使用量を調整して決定した。

2.3 練混ぜ方法および養生条件

コンクリートの練混ぜには、100リットルの強制練りパン型ミキサを用いた。練混ぜ方法は、セメントと細骨材を空練りした後注水して30秒練り混ぜ、さらに粗骨材を投入して60秒間練り混ぜる方法とした。

供試体は材齢28日まで20°C標準水中養生を行った。耐海水性の検討を行うために、材齢28日以降は、20°C海水、劣化促進を目的とした60°C海水、飛沫帶を模し1日2回約3時間の海

表-2 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	骨材の種類		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Ad.
		細骨材	粗骨材			W	C	S	G	
OPC-N	普通ポルトランド	NS	NG	55	43	154	280	793	1096	0.70
BB-N				55	43	148	269	800	1106	0.67
BB-R1	高炉セメントB種	NS	RG1	50	43	148	296	790	1015	0.74
BB-R2		NS+RS1		50	43	150	300	765	1011	1.50
BB-R3		RS1	50	46	154	308	789	948	1.54	
OPC-R4	普通ポルトランド	RS2	RG2	50	48	162	324	745	854	1.62
BB-R4				50	48	159	318	747	856	1.59

注) 記号R1~R4は再生骨材品質の高低に対応

水噴霧を行い乾湿繰り返しを受ける屋外施設(以下、飛沫帶)に暴露した。なお、使用した海水は、すべて神奈川県横須賀市の久里浜湾より採取したものである。

2.4 試験方法

(1) 試験項目

表-3に、実施した試験項目を示す。

表-3 試験項目

圧縮強度試験	JIS A 1108
	標準水中養生
	材齢7, 28, 56, 91, 182日
	20°C海水、60°C海水、飛沫帶 材齢182日
急速塩化物イオン透過性試験	標準水中養生：試験材齢182日
	AASHTO T-277
電気泳動による拡散係数の評価試験 ³⁾	標準水中養生：試験材齢182日
	15V定電圧
	アノード側： $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 飽和水溶液 カソード側： NaCl -5%水溶液
鉄筋腐食評価に関する試験	飛沫帶暴露：試験材齢182日
	表面観察
	交流インピーダンス法 ⁴⁾ 定電位ステップ法 ^{5) 6)}

(2) 塩化物イオン透過性の評価方法

塩化物イオン透過性の評価は、標準水中養生した材齢182日の供試体に対して、急速塩化物イオン透過性試験、およびこれと同様の装置を用いた電気泳動による拡散係数の評価試験³⁾を実施した。前者はAASHTO T 277に準拠して行った。図-1に電気泳動による拡散係数の評価試験の概要図を示す。本実験においては、アノード側に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 飽和水溶液、カソード側に NaCl -5%水溶液を満たし、両セル間に15Vの電位差を与え、アノード側水溶液の Cl^- の濃度変化を経時に測定した。塩化物イオン Cl^- の濃度変化は図-2に示すようになる。拡散係数 D_{Cl} は、式(1)~(3)より求めた。すなわち、濃度変化が

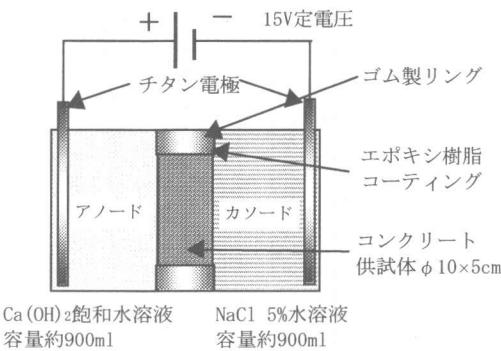


図-1 電気泳動試験概要図

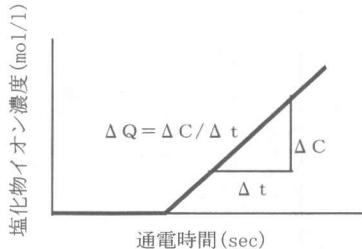


図-2 塩化物イオンの濃度変化

定常になったときの傾きである透過速度 ΔQ ($\text{mol}/\text{l} \cdot \text{sec}$) から単位時間・単位面積あたりの物質移動量であるフラックス J_{Cl} ($\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) を求め、溶液の濃度勾配 C_{Cl} および電位勾配 $d\phi/dx$ から電気的移動度 u_{Cl} を算出し、拡散係数 D_{Cl} (cm^2/sec) に変換した。

$$J_{Cl} = \Delta Q_{Cl} \cdot V/A \quad (1)$$

$$u_{Cl} = \frac{J_{Cl}}{C_{Cl} \cdot d\phi/dx} \quad (2)$$

$$D_{Cl} = \frac{k \cdot T}{e \cdot Z_{Cl}} u_{Cl} \quad (3)$$

V : 被検出セル中の溶液体量、 A : コンクリートの断面積、 k : ボルツマン定数、 T : 絶対温度、 e : 電気素量、 Z : 塩化物イオンの価数

20°C海水および飛沫帶に暴露した供試体は、暴露開始5ヶ月において供試体表面から内部方向に5点の全塩分量をJCI規準(案)SC-4に準拠して測定した。

(3) コンクリート中の鉄筋腐食状況の予測方法

コンクリート中の鉄筋の腐食性状は、図-3に示す $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体を飛沫帶に暴露し、

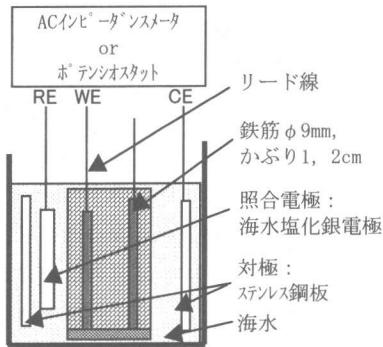


図-3 電気化学的試験の概要図

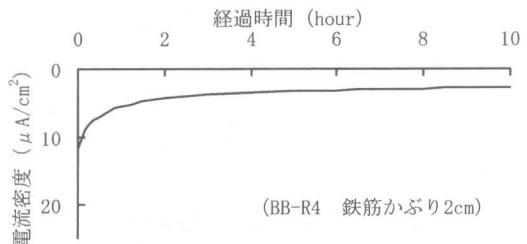


図-4 定電位ステップ法の測定例

暴露開始後5ヶ月において電気化学的手法により鉄筋の腐食性状に関する検討を行った。その後、割裂して鉄筋を取り出し表面観察を行った。今回行った電気化学的測定は交流インピーダンス法⁴⁾および定電位ステップ法^{5), 6)}である。両測定とも、照合電極に海水塩化銀電極、対極にステンレス鋼板を用い、図-3に示す試験装置によって行った。

交流インピーダンス法は、自然電位を基準に代表的な高・低周波(10Hz・10MHz)の交流電圧(10mV程度)を付加したときの応答電流を測定し、鉄筋の腐食速度の指標となる見かけの分極抵抗およびコンクリート抵抗を求める方法を用いた。

定電位ステップ法は、鉄筋の電位を照合電極に対して-1000mVに保持し、そのときの鉄筋と対極間を流れる電流を経時に測定するものである。測定される電流の大きさは、鉄筋への酸素供給量に支配され、鉄筋への酸素供給量が大きいほど流れる電流は大きくなる。図-4に定電位ステップ法の測定結果の一例を示す。試験の評価は、1, 5, 10時間後の電流密度の平均値で行った。

3. 結果および考察

3. 1 圧縮強度

図-5に材齢28日における圧縮強度を示す。高炉セメントを使用した普通・再生コンクリートの強度は、普通ポルトランドセメントを使用した場合より、若干小さくなつた。骨材品質による影響は、使用骨材の品質の低下に伴つて概ね減少する傾向にあり、W/Cが5%大きい普通コンクリートと比較して、90～100%程度であった。

図-6に材齢182日まで標準水中養生した場合の材齢と圧縮強度の関係を示す。高炉セメントを用いた材齢28日の再生コンクリートの圧縮強度は、普通ポルトランドセメントを用いた場合より若干小さかつたが、材齢91日以降ではほぼ同等となつた。

3. 2 海水の作用が強度に及ぼす影響

図-7は、20℃海水、飛沫帶、および劣化促進を目的とした60℃海水にそれぞれ暴露した場合の圧縮強度を標準水中養生した場合の圧縮強度に対する比率で示したものである。20℃海水、および飛沫帶に暴露した場合の圧縮強度比は、20℃海水暴露した場合に若干低下する傾向であったが、普通・再生コンクリートで顕著な差異は認められなかつた。暴露日数が5ヶ月と短期間であることから、今後も引き続き暴露試験を実施していく必要があると考えられる。

60℃海水に暴露した場合、普通ポルトランドセメントを用いた普通・再生コンクリートの圧縮強度比は0.7前後であった。これに対して高炉セメントを用いた普通・再生コンクリートの圧縮強度比は0.73～0.92であり、いずれも普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより大きくなつた。再生コンクリートの中では、吸水率の大きい再生細・粗骨材を用いたBB-R4の低下率が最も大きかつた。この結果、海水の作用を受ける環境下において、高炉セメントを用いたコンクリートを適用することは、再生コンクリートにおいても十分効果的であることが示された。

3. 3 塩化物イオン透過性

図-8に急速塩化物イオン透過性試験結果を

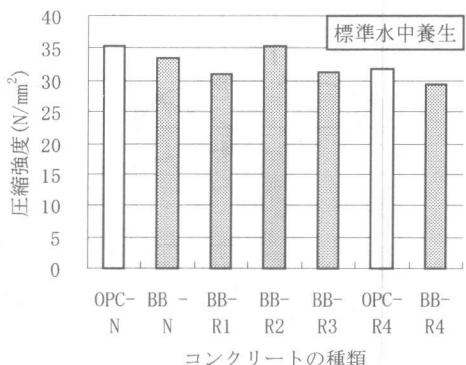


図-5 材齢28日における圧縮強度

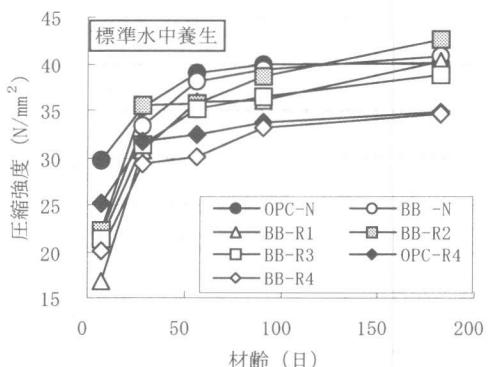


図-6 材齢と圧縮強度の関係

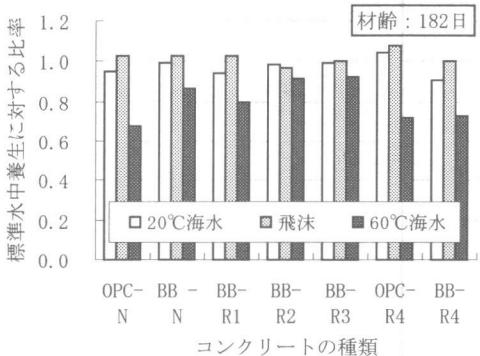


図-7 海水の作用が圧縮強度に及ぼす影響

示す。OPC-R4は、通過電流量が大きくジュール熱の発生によって溶液の温度が上昇し、試験開始後約3時間で溶液温度が80℃を超えたため、この時点での試験を終了した。高炉セメントの使用によって、普通・再生コンクリートとも6時間通過電流量は大きく減少した。吸水率の大きい再生細・粗骨材を用いたOPC-R4、BB-R4を除いては、1500～2000 クーロン程度であり、

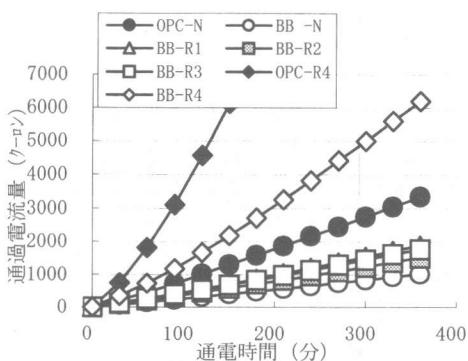


図-8 急速塩化物イオン透過性試験結果

OPC-N より小さくなつた。

急速塩化物イオン透過性試験は、コンクリート中への塩化物イオンの拡散係数を直接評価する試験でないため、電気泳動による拡散係数の評価試験も実施した。この試験により得られたコンクリートの見かけの拡散係数を図-9に示す。また、一部の供試体については、20°C海水中に5ヶ月間暴露した後、供試体の表面から深さ方向に5点の塩分濃度分析を行い、Fick の第2法則より逆算して求めた見かけの拡散係数も示す。BB-R4 の見かけの拡散係数は、BB-N よりは大きな値を示したもの、OPC-N より小さくなつた。また、使用骨材の品質の低下に伴い見かけの拡散係数は大きくなつた。これらの試験から、高炉セメントの使用によって塩化物イオンの拡散性状を大幅に改善できることが示された。

電気泳動による試験結果と急速塩化物イオン透過性試験結果との関係は概ね良好であった。しかし、普通コンクリート (OPC-N, BB-N) と再生コンクリート (OPC-R4, BB-R4) の6時間通過電流量の関係は、電気泳動によって求めた見かけの拡散係数の大小関係と異なる結果になった。急速塩化物イオン透過性試験はコンクリートの電気的抵抗に支配される通過電流量によって評価する試験であることから、吸水率の大きい再生細・粗骨材を使用したような電気的抵抗の小さい再生コンクリートの塩化物イオン透過性を評価する際は、十分注意する必要があるものと考えられる。

また、高炉セメントを用いることによりコンク

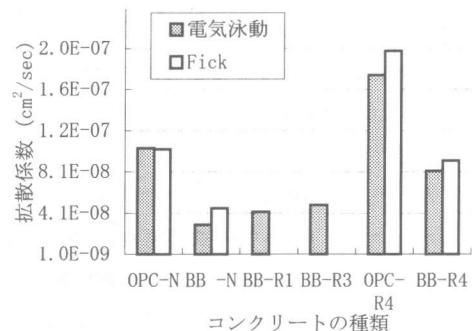


図-9 拡散係数の試験結果

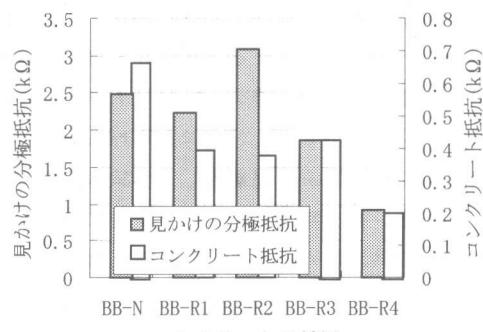


図-10 交流インピーダンス法の測定結果

リートの塩化物イオンの透過に対する抵抗性が向上するのは、水和物組織が緻密となるためと考え、OPC-R4 および BB-R4 に対して、水銀圧入法による細孔径分布の測定を行った。しかし、細孔径分布および全細孔容積 (OPC-R4: 0.128, BB-R4: 0.147 ml/g) はほぼ同等であり、この試験で得られた細孔構造に顕著な差は認められなかった。

3.4 鉄筋の腐食

(1) 電気化学的手法による検討

図-10 に交流インピーダンス法によって測定した見かけの分極抵抗、およびコンクリート抵抗を示す。ここで試験値は、かぶりが 1.2 cm のそれぞれの鉄筋で測定した値の平均で示している。鉄筋の腐食速度と密接な関係を示す見かけの分極抵抗は、BB-R4 で若干小さくなつた。しかし、見かけの分極抵抗から算出⁷⁾した鉄筋の腐食速度は $2.0 \sim 6.6 \times 10^{-3} \text{ mm/year}$ と非常に小さい範囲にあり、鉄筋の表面状態は概ね同等であったと考えられる。また、コンクリート抵抗の大小関係は、急速塩化物イオン透過性試験

の6時間通過電流量の関係と一致していた。

図-11に定電位ステップ法の測定結果を示す。BB-Nの電流密度は $0.09 \mu A/cm^2$ であったのに対し、再生コンクリートは $0.18\sim0.25 \mu A/cm^2$ と大きくなつた。この結果、電気化学的手法からではあるが、コンクリート中の鉄筋腐食に大きな影響を及ぼす再生コンクリートの酸素拡散係数は、普通コンクリートより大きくなる可能性がある。

(2) 塩分浸透量および鉄筋の腐食状況

乾湿の繰り返しを受ける環境下では、塩化物イオンの濃度勾配による拡散だけではなく、乾湿の作用によって直接コンクリート内部へ塩化物イオンが浸透することが考えられる。このため、飛沫帯に5ヶ月間暴露した供試体内部の塩化物イオン量を測定した。図-12に飛沫帯に暴露した供試体の表面からの距離と塩化物イオン量の関係を示す。塩化物イオンは供試体表面から2cmまで浸透しており、その浸透量は使用骨材の品質の低下に伴い、大きくなっていることが示されている。このように塩化物イオンはかぶりが1,2cmである鉄筋表面まで達していたが、割裂して鉄筋表面を観察したところ、すべての供試体で腐食は認められなかった。本実験の暴露期間が5ヶ月間と短いことから、使用する骨材品質と鉄筋腐食性状の関係については、長期の暴露試験により検討する必要がある。

4. 結論

港湾構造物への再生コンクリートの適用性評価を目的として行った本研究により、以下のことが明らかとなった。

- (1) 高炉セメントB種を用いた再生コンクリートの圧縮強度は、材齢28日では普通ポルトランドセメントを用いた場合より若干小さいものの、材齢91日以降では同等であった。
- (2) 60°C海水による促進劣化試験の結果、高炉セメントを用いた再生コンクリートの圧縮強度の低下率は、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートより小さかった。
- (3) 再生コンクリートの塩化物イオン透過性は、

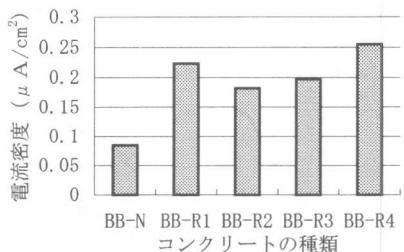


図-11 定電位ステップ法の測定結果

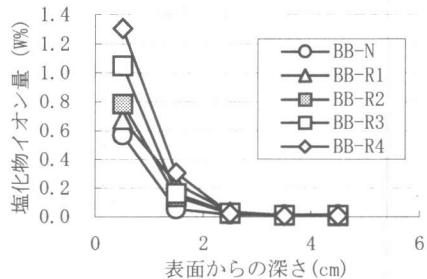


図-12 コンクリート内部の塩化物イオン量

高炉セメントの使用により大幅に改善され、普通ポルトランドセメントを使用した普通コンクリートと同程度にまで改善された。また、使用骨材の品質低下に伴って塩化物イオンの拡散係数は大きくなつた。

(4) 再生コンクリートの酸素拡散係数は、普通コンクリートより大きくなる可能性がある。

以上のように、港湾構造物へ再生コンクリートを適用する場合、高炉セメントの使用は極めて有効であることが示された。

参考文献

- 1)伊藤正憲、福手勤ほか：海洋環境下における再生コンクリートの適用性評価に関する研究、港湾技術研究所報告、第37巻、第4号、1998.12
- 2)例えば、笹谷輝彦、鳥居和之ほか：自然環境下に暴露したコンクリート中の鉄筋の腐食性状、16-1, 787, 1994
- 3)大即信明、久田真ほか：電気泳動法によるモルタル中の塩化物イオン拡散係数の推計、土木学会論文集、No.592/V-39, 1998.5
- 4)横田優：鉄筋腐食診断器の開発、電力土木 No. 257, 1995.5
- 5)濱田秀則、福手勤ほか：コンクリート表面被覆の塩害防止効果ならびにその評価法について、港湾技術研究所資料、No. 706, 1991, 6
- 6)例えば、藤嶋ほか：電気化学的測定法、技報堂出版
- 7)横田優：鉄筋腐食モニタリングによるコンクリート構造物の寿命予測について、第41回日本学術会議材料研究連合講演会、1997.9