

# 土木建築における腐食に関する研究 (その11)

——海水練り泥水を用いた OWS 壁の鉄筋腐食に関する実験検討——

喜田大三 守屋正裕

## Study on Corrosion in Civil Engineering and Building Construction (Part 11)

——Corrosive Effect of Seawater Mud on Reinforcing Bars  
in Concrete of Underground Diaphragm Walls——

Daizo Kita Masahiro Moriya

### Abstract

It is conceivable that seawater mud will be used in case of difficulty in obtaining fresh water for making mud in underground excavation. In such case there is fear of corrosion of reinforcing bars in the concrete contaminated by chlorides from the seawater mud. Accordingly, two test walls were made using seawater mud and normal mud, and investigations were carried out in connection with corrosion reinforcing bars. The results obtained were as follows: (1) A test method for the estimation of the electrical half-cell potentials of reinforcing bars in concrete was adopted for the purpose of determining the corrosion activity of the reinforcing bars. It was found that reinforcing bars are in a stable state of passivity and are not corroded even if seawater mud is used. (2) Analyses of chloride contents in concrete were performed by X-ray fluorescence analyzer. As a result, it was found that chloride contents are increased at layers within the depth of 2 cm from the concrete surface by influence of the seawater mud. However, there was no effect in regard to corrosion of reinforcing bars in concrete.

### 概 要

OWS・SOLETANCHE 工法による地中壁工事において、工事用の清水の確保が困難な条件下で、海水練り泥水を用いて地中壁を構築する場合が想定される。その際、泥水中の塩分がコンクリート中に混入し、鉄筋の腐食を誘発する懸念がある。そこで、海水練り泥水および通常の清水練り泥水とを用いて地中壁の試験体を製作し、鉄筋の腐食性ならびに塩分混入量について調査検討した。その結果次の知見を得た。(1) コンクリート中の鉄筋の腐食性判定法として、鉄筋の自然電位測定による方法を適用した。その結果、海水練り泥水を使用した場合でも鉄筋は十分防食状態にあると判定された。(2) コンクリート中への塩分混入は、試験体表面から深さ 2 cm の範囲内が顕著で、鉄筋周辺部もわずかに塩分の増加傾向が認められた。しかし、鉄筋への影響は無視しうる程度で、腐食を誘発する恐れはないと判定された。

### 1. はじめに

周知のように、コンクリート中の鋼材の腐食は、コンクリートの中性化や塩化物の介在によって誘発される。筆者らは、数年前から海砂を使用したコンクリート中での海砂付着塩分による鉄筋腐食の問題について、腐食機構の究明、防食法の検討など一連の実験研究を行ってきた<sup>1)~5)</sup>。それらの研究成果を基礎として、今回、次の課題について検討し、有用な知見を得たので報告する。

関西電力御坊火力発電所の建設計画に際し、その基礎には、OWS・SOLETANCHE 工法による WALL FOUNDATION が採用されることになった。ところが、同発電所の建設予定地は、埋立て造成間もない海上の人工島で、工事用の清水が十分確保できず、海水練り泥水の使用が検討された。海水練り泥水を用いるについては、安定液としての性能確保の問題と合わせて、地中壁の鉄筋に対する腐食影響の問題がクローズアップした。すなわち、コンクリート打設の際に、泥水中の塩分がコンク

リート中に混入する恐れがあり、鉄筋の腐食を誘発する懸念が生じた。

そこで、海水練り泥水を用いた場合に、塩分がどの程度コンクリート中に混入し、またその影響で鉄筋の腐食が誘発されるかどうかを明らかにする目的で実験検討した。

## 2. 実験概要

実験場所は、神戸第二地方合同庁舎の新築工事現場内で、まず、掘削壁面の崩壊防止、地下水の影響防止の目的で、自硬性安定液 (SG) による地盤改良を行なった。

次いで、海水練り泥水と清水練り泥水とを用いて、通常の OWS 工事手順に従い、ケリー掘削、鉄筋かご建込み、トレミー管を使用してコンクリート打設を行ない、それぞれ1体ずつ地中壁の試験体 (2.2×0.6×4.5 m) を製作した。

約1ヶ月後に、この試験体を地上に掘上げ、各種の調査試験を実施した。

なお、以下の文中で、海水練り泥水を用いた試験体を A、清水練り泥水のそれを B とした。

## 3. 試験体

### (1) 形状

図-1 に形状および配筋図を示す。

### (2) 泥水調合

海水練り泥水: ポリマー0.35%, ベントナイト1.25%

清水練り泥水: ポリマー0.35%, ベントナイト1.0%

### (3) コンクリート調合

設計強度: 270 kgf/cm<sup>2</sup> (4 週)

スランプ: 20 cm

セメント: 普通ポルトランド, 412 kg/m<sup>3</sup>

細骨材: 除塩海砂 (塩分0.04%以下), 750 kg/m<sup>3</sup>

粗骨材: 最大径 20 mm, 894 kg/m<sup>3</sup>

水: 206 l/m<sup>3</sup>

空気量: 4 %

混和剤: ポゾリス No. 70, 1.03 kg/m<sup>3</sup>

## 4. 調査試験内容与方法

### 4.1. 泥水の塩分濃度

掘削開始前の泥水および掘削完了時の孔内泥水を採取し、塩素イオン、ナトリウムイオンの濃度を化学分析し、塩分濃度を確認した。

### 4.2. コンクリート強度

荷卸時にシリンダーモールドに採取して現場水中養生したテストピースおよび A、B 両試験体からコアボーリングで抜取ったテストピースについて、常法により圧縮

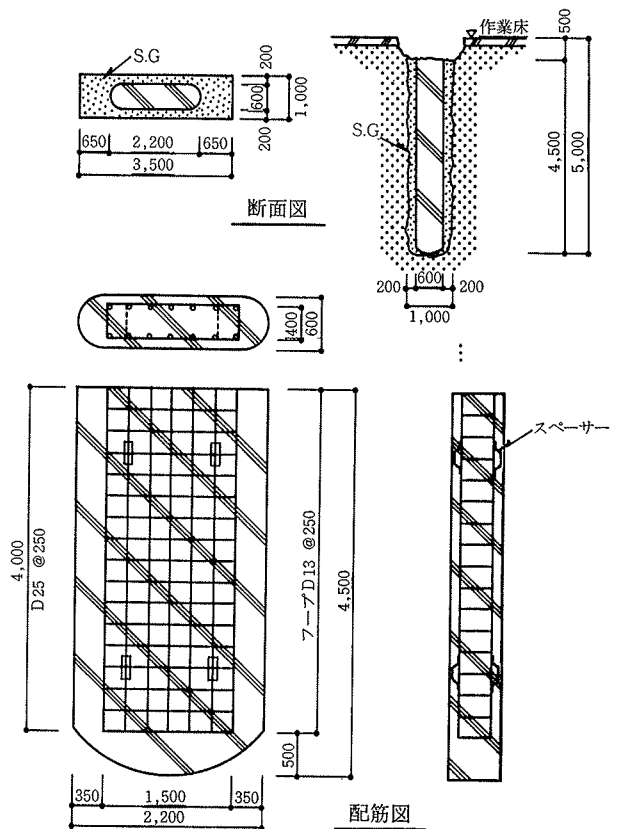


図-1 試験体の形状

強度を確認した。

### 4.3. 鉄筋の腐食性調査

既報<sup>1)~4)</sup>で述べているように、塩分の混入したコンクリート中において、鉄筋が腐食傾向にあったとしても、通常その速度は非常に遅く、数ヶ月あるいは数年のオーダーでは腐食有無の目視判定は困難である。そこで、今回の実験では、先に究明した腐食機構<sup>1)</sup>に基づく電気化学的手法を応用し、鉄筋の自然電位を測定して腐食の有無を判定した。この方法は、鉄筋がコンクリートのアルカリ雰囲気中で防食状態にある場合には不動態化状態の貴な電位を示し、逆に塩化物の作用によって腐食傾向にある場合には活性状態の卑な電位を示すという現象を利用したもので、短期間でしかも試験体を破壊せずに腐食の発生有無を判定できる。

なお、この自然電位測定による鉄筋の腐食調査法については、電位測定法、判定方法と判定基準などに関して、100体余りの試験体について別途に実験検討を重ねてきており、基礎実験を完了している。その詳細はいずれ報告する予定である。

さて、鉄筋の電位測定は、概略図-2 に示す方法で、図-3 の位置で行なった。測定頻度は、試験体を地上に掘上げた直後から約2ヶ月間にわたって、毎週1回とした。

#### 4.4. 塩分混入量の調査

A, B両試験体について、コアボーリングおよび表面を研ってコンクリート試料を採取した。図示しないが、試験体Aについては、24本のコアサンプルと14箇所の研り片を、試験体Bについては、3本のコアサンプルと3箇所の研り片を採取した。

コアサンプルは図-4のように、試験体表面からの深さごとに分割し、I~Vを分析用試料とした。

塩分の定量は、蛍光X線分析法により、塩素の特性X

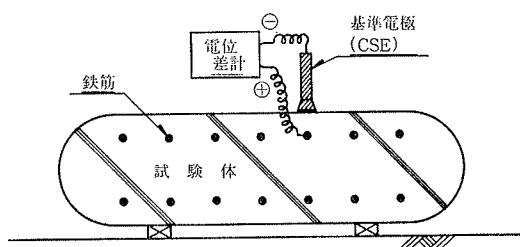


図-2 電位測定法

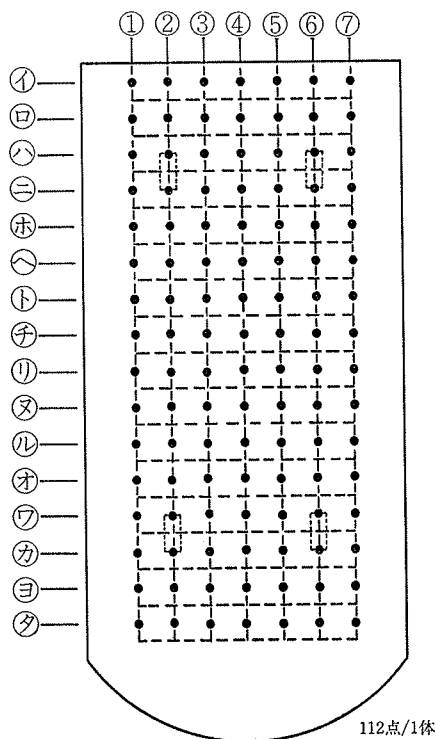


図-3 電位測定位置

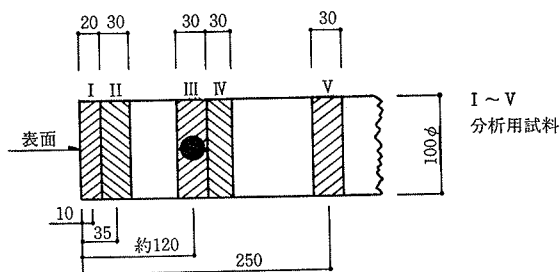


図-4 塩分分析用コアサンプルの分割

線 (ClK $\alpha$ ) ならびにカルシウムの特性X線 (CaK $\alpha$ ) の強度から、予め求めた検量線をもとに、セメント量に対する塩化ナトリウム量の割合として算出した。

#### 5. 実験結果と検討

写真-1 に試験体掘出し作業の様子を、写真-2 に試験体の外観を示す。

##### 5.1. 泥水の塩分濃度

分析結果を表-1 に示す。同表には、塩素イオン濃度をもとに換算した海水濃度を併記している。

掘削開始前と掘削完了時の塩分濃度を比較すると、海水練り泥水では掘削完了時に塩分濃度が若干低下し、清水練り泥水ではわずかに増加している。実験を行なった現場は海に面し、地下水が海水の影響を受けているので、地下水のわずかな混入によって塩分濃度が変化したものと考えられる。いずれにしてもその変化は実験目的に照らして許容しうる範囲内である。



写真-1 試験体の掘出し

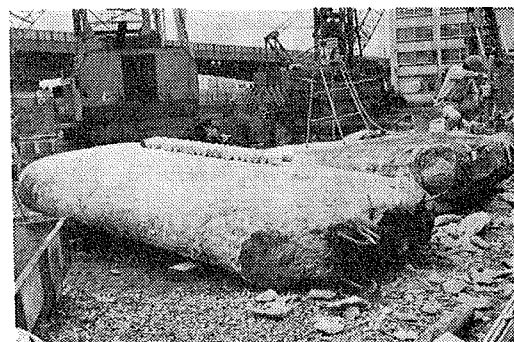


写真-2 試験体の外観

		Na <sup>+</sup> ppm	Cl <sup>-</sup> ppm	海水濃度% (Cl <sup>-</sup> 基準)
海水練り泥水	(1)	7780	13800	72.6
	(2)	6820	12000	63.2
清水練り泥水	(1)	500	284	1.5
	(2)	716	670	3.5

(1)掘削開始前、(2)掘削完了後

表-1 泥水の塩分濃度

## 5.2. コンクリート強度

現場荷卸時に生コン車から採取して4週間現場水中養生したテストピースの圧縮強度は、376~390 kgf/cm<sup>2</sup>、平均385 kgf/cm<sup>2</sup> (n=3)であった。また、試験体からコア抜きしたテストピースでは、8週強度で、試験体Aが354~379 kgf/cm<sup>2</sup>、平均369 kgf/cm<sup>2</sup> (n=4)、試験体Bが340~379 kgf/cm<sup>2</sup>、平均361 kgf/cm<sup>2</sup> (n=4)であった。

いずれも設計強度を十分クリアーしており、試験体Aと試験体Bとで有意差はない。すなわち、海水練り泥水を用いた場合にもコンクリート強度への悪影響は認められない。

## 5.3. 鉄筋の腐食性

A, B両試験体についてそれぞれ112箇所のポイントで、13回の電位測定を行なった。紙数の関係でデータのすべては提示できない。そこで、いくつかの代表的なデータを例示して以下に説明する。

まず、電位測定結果の評価判定法について概略説明する。数多くの供試体を用いて実験検討を重ねた結果、次の判定基準を得た。前記の方法(図-2)で測定した鉄筋の自然電位が-250 mV 以上の場合には、その周辺の鉄筋は十分不動態化し防食状態にある。-440 mV 以下の場合には、その周辺の鉄筋は明らかに腐食傾向にある。-250~-440 mV の範囲は、部分的に腐食傾向にあり、電位が低いほどその確率が高い。また、コンクリートが比較的若材令の場合は、電位の経時変化が見られ、電位が次第に高くなれば不動態化が進んでおり、逆に低くなれば腐食傾向にあると判定される。

さて、図-5は、試験体の主筋に沿った縦方向の電位分布を例示している。また、図-6は、各々の試験体について、112箇所の測定値をヒストグラムにし、測定日ごとに示している。これらの図から次の点が明らかである。

(1) 図-5において、部分的に電位の低い箇所がA, B両試験体ともに認められる。図上に記入しているように、この箇所は、鉄筋に溶接されている鋼板製スペーサーの一部がコンクリート表面に露出していた。すなわち、コンクリートのアルカリによる保護効果が十分に得られず、当然腐食傾向にあり、その結果低い電位を示しているのである。

(2) 上記のような明らかに例外的な箇所を除いては、A, B両試験体とも全般的に-250 mV 以上の電位を示している。この点は図-6からも明瞭である。したがって、両試験体ともに鉄筋は十分防食状態にあり、塩分による腐食誘発作用は認められない。

(3) 図-6で、電位の経時的な変化に注目すると、両

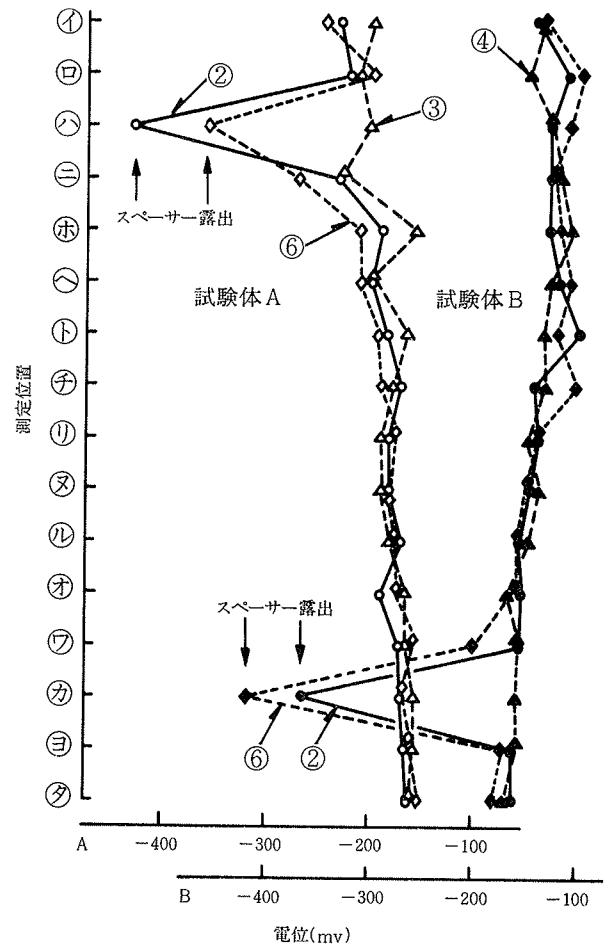


図-5 主筋に沿った電位分布

試験体とも次第に貴の方向に推移している。したがって、この傾向からも鉄筋は防食状態にあると判定される。

(4) 電位の経時変化の様子を試験体AとBとで比較すると、図-6から明らかなように、測定開始当初は、Aの方がBよりも全体的に数十ミリボルト電位が低く、その後次第にAの電位がBに近づき、最終的には両者間で有意な差はなくなっている。

(5) 上記のように、初期において、試験体Aの電位が十分安定化するのに若干の時間的遅れが見られる。このわずかな違いが海水練り泥水の影響を示唆しており、原因は次のように考えられる。

海水練り泥水を用いた場合、地盤の掘削が完了して泥水中に鉄筋かごを建込んでからコンクリートを打設するまでの数時間は、鉄筋が塩分濃度の高い条件下におかれる。この間、鉄筋は腐食するまでには至らないが、塩分の作用で活性化し易い状態にある。この条件が、コンクリート打設後に鉄筋が不動態化する過程で、不動態化の挙動に微妙な影響を及ぼしたのであろう。もちろん、泥水中の塩分がコンクリート中にある程度混入した場合に、同様の現象が現われる可能性も否定できない。塩分混入

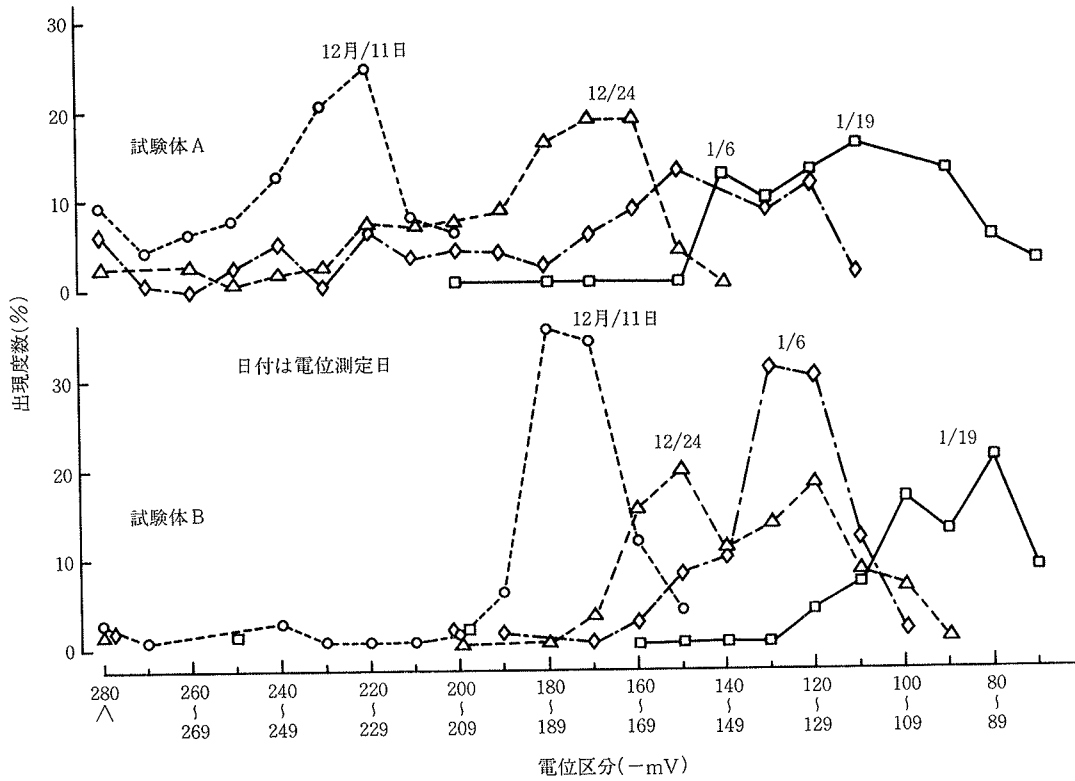


図-6 電位測定結果のヒストグラム

量については次項で説明する。

いずれにせよ、海水練り泥水を用いた場合でも鉄筋は十分防食状態にあり、問題ないという判定は変わらない。

(6) 今回は、自硬性安定液による地盤改良を行なった後に掘削しているため、その影響によって、掘削中の泥水の pH はアルカリ側に変化し、鉄筋かご建込み時には、pH 10以上であった。この点も鉄筋に対して有利に作用したものと考えられる。

#### 5.4. 塩分混入量

コアサンプルは図-4のように分割して微粉砕し、試験体 A については合計114個、Bについては合計 20 個のコンクリート試料を分析に供した。

分析結果を試験体表面からの壁厚方向の深さごとに集計し、図-7に示した。なお、試験体の表層部を研り取った試料は、分割したコアサンプルの I (表面部分) と合せて集計した。また、分析値は、セメント量に対する塩化ナトリウムの含有率に換算して表示している。この結果から次の知見が得られる。

(1) 試験体 A では、全般に、同じ深度の試料でも塩分含有率にバラツキが多いが、傾向としては、表面から 2 cm の範囲内で含有率が高く、2~5 cm の範囲で急減し、鉄筋周辺がわずかに高く、内部はほぼ一定である。傾向的には試験体 B も類似している。

鉄筋周辺 (III) の塩分含有率が、 その前後 (II, IV)

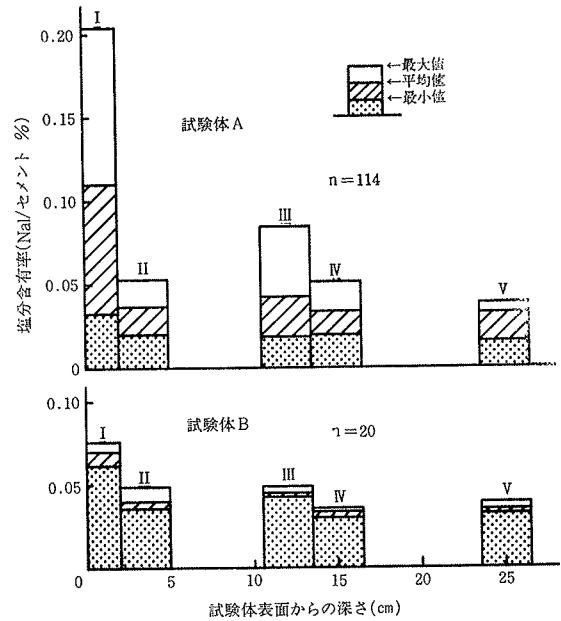


図-7 コンクリート中の塩分含有率

と比べて若干高くなっている現象は、おそらく、泥水をコンクリートで置換する際に、鉄筋周囲で多少泥水を巻込む傾向があるためと思われる。

(2) 試験体 A と B とを比較すると、表面部分 (I) の塩分含有率は明らかに大差があり、Aの方が最大値で約 2.7倍高い。したがって、この部分については海水練り

泥水を用いた影響が明瞭である。表面から2 cmより内部では、それぞれ平均値の比較ではAとBでほとんど差がなく、最大値では鉄筋周辺部（Ⅲ）でAの方が若干高くなっている。

(3) 前記のように、試験体に使用したコンクリートは現場の諸事情から止むをえず細骨材に除塩した海砂を用いている。生コン業者の分析データで、細骨材の塩分含有率は0.01～0.03%程度であった。したがって、もともとコンクリート中に含有していた塩分は、セメント量に対しておよそ0.02～0.06%となる。

そこで、この塩分量ならびに分析誤差を考慮すると、試験体Bについては、当然のことながら検出された塩分量のほとんどすべてがコンクリートにもともと含有していたものと判定される。また、試験体Aについては、影響の明らかな表面部を除いて、鉄筋周辺できわめてわずかに泥水の影響が見られる程度である。

(4) 試験体Aの表面部で、塩分含有率が高く、海水練り泥水の影響が大きい理由は、容易に想像されるように、泥水中でコンクリートが打上がる際、孔壁面とコンクリートの界面で、孔壁面の凹凸などに起因して、泥水が多少界面部に残留するためと考えられる。したがって試料採取場所によるバラツキも非常に大きく、規則性もない。

(5) 塩分による鉄筋の腐食を防止する観点から、現在、建築学会では細骨材に含有する塩分量を0.04%以下に規制し、土木学会では0.1%以下に規制している。この値をセメント量に対する割合に換算すると、概ね、前者は0.08%、後者は0.2%となる。これらの規制値と今回の分析結果を比較すると、鉄筋に影響のない表面部を除いては0.2%を十分クリアーし、0.08%もほぼクリアーしている。したがって、鉄筋への影響も特に心配ないものと判定される。

さて以上のように、塩分混入量の分析結果においても海水練り泥水を用いた場合の鉄筋への腐食影響はないと判断され、前記の電位測定による判定結果を裏づけている。

## 6. まとめ

OWS-SOLETANCHE 工法による地中壁工事で、海水練り泥水を用いた場合に、壁体の鉄筋に腐食作用を及ぼすかどうかについて実験検討した。海水練り泥水と通常の清水練り泥水とを用いてそれぞれ地中壁の試験体を製作し、鉄筋の腐食性、コンクリート中への塩分混入量を調査し、以下の結論を得た。

(1) コンクリート中の鉄筋の腐食性を判定するためにコンクリート表面から鉄筋の自然電位を測定する方法を

適用し、別途の基礎実験で裏づけられた判定基準によって検討した。その結果、海水練り泥水を用いた場合には、清水練り泥水の場合と比べて、鉄筋が不働態化する過程で若干の遅れが見られたものの、鉄筋は十分防食状態にあり、泥水の影響による腐食の恐れはないと判定された。

(2) コンクリート中の塩分混入量を分析した結果、明らかに海水練り泥水の影響が認められたのは、試験体表面から壁厚方向に深さ2 cm以内の範囲であった。また、鉄筋周辺部でもわずかに塩分の増加が見られたが、腐食を誘発する恐れはないと判断された。

(3) 自硬性安定液による地盤改良は、本掘削時の泥水のpHを上昇させ、鉄筋の防食上有利に作用する。

なお、今回の実験では、泥水の調合や諸性状、コンクリートの品質および地盤条件などに関しては、その影響有無を検討していない。その点で課題をすべて満足するものではない。しかし、今回得られた知見を参考に、従来から積重ねられている当工法に関する諸研究の成果ならびに実績に裏づけされた施工技術によって十分対応できるものとする。

## おわりに

前記した人工島における関西電力(株)御坊火力発電所の建設は、ここに報告した鉄筋の腐食問題も含めて海水練り泥水の使用に関する諸課題やその他の特殊条件を克服し、地中連続壁工事を成功裏に終了した。

今回の実験は、本店建築工務部 金田宏次長をチーフとする大規模基礎研究委員会からの依頼によって実施し、実験に際しては、同委員会の各位および実験場所とした神戸第二地方合同庁舎工事事務所の岩崎彦也所長、同福岡敏雄建築主任らの多大な御協力を得た。ここに深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 喜田, 守屋: 鉄筋の腐食メカニズムを解明, 金属, Vol. 49, No. 4, (1979), pp. 26～30
- 2) 喜田, 守屋: 土木建築における腐食に関する研究 (その3), 大林組技術研究所報, No. 15, (1977), pp. 108～111
- 3) 喜田, 守屋: 同題 (その4), No. 17, (1978), pp. 111～116
- 4) 喜田, 守屋: 同題 (その5), No. 19, (1979), pp. 74～78
- 5) 喜田, 守屋: 同題 (その6), No. 21, (1980), pp. 130～134