

## [43] 中性化および海水作用によるコンクリート中の鉄筋の腐食について

正会員 ○佐 伯 昇 (北海道大学工学部)

高 田 寛 之 (北海道大学工学部)

正会員 藤 田 嘉 夫 (北海道大学工学部)

### 1. まえがき

コンクリート構造物において、数十年を越えるものが数多くなり、それにつれてコンクリート構造物の鉄筋の腐食に関する報告が多数みられるようになった。これはコンクリートの耐久性にすべて問題があるというよりは、むしろこれまで見過ごされてきたものが、ここ数年の点検によって集中的に出て来たもので、構造物の供用期間中の維持管理の必要性を忘れていたためでもある。すなわちコンクリート構造物は良い環境条件であれば腐食は問題ではないが、厳しい環境条件では腐食が起る可能性があるということで、古い調査結果からも言われていたことである。コンクリート中の鉄筋の腐食は中性化や塩素イオンなどの作用によって長年月を経て徐々に進行し、特に、ひびわれなどによって鉄筋表面部が露出すると、これらの影響は大きくなる。本研究は中性化と海水作用を受ける鉄筋コンクリート部材を対象として、両引き試験用の供試体を用いて、鉄筋に応力を載荷した状態で、炭酸化および海水浸透の促進を行い、恒温恒湿室に放置して腐食を観察し、鉄筋応力、ひびわれ、かぶりによる腐食の影響について検討したものである。

### 2. 実験方法

写真-1に示すような抜気タンクを用い、応力載荷のまま供試体の中性化と海水浸透の促進を行い、腐食の観察を行った。以下その内容を述べる。

#### (1) 実験供試体

供試体は図-1に示すように、両引き試験用供試体を用い、長さ30cmは一定として、かぶり厚さ(C)を2.3.5cmに変化させた。使用した鉄筋は異形鉄筋SD35のD13mmである。供試体の材料はセメントに普通ポルトランドセメントを用い、砂は錦岡海岸砂(比重2.75, 吸水率1.12%塩分量は砂の絶乾重量に対して、NaClに換算して0.016%)を用いた。配合は水セメント比50%, 砂セメント比2のモルタルを用いた。海水のみの促進の場合、腐食が起らなかったため一部、あらかじめNaClを混入した(セメント重量に対して0.4%)。使用する鉄筋の表面を一定にするため次のような前処理を行った。

① 10% HClに10分間つける。② 水洗い後、毛ブラシで磨き錆を落す。③ 10% NaOHにつけて中和した後、水洗し、ワイヤブラシで黒皮を落とし表面を一定にした。打設は鉄筋を型枠にセットした後、モルタルを打込み、突き棒と木ツチを用いて十分に締固めを行った。打設後1日は湿潤養生を行い、その後28日間水中(20℃)で養生を行った。コンクリートから露出する鉄筋部はあらかじめコーティングした。

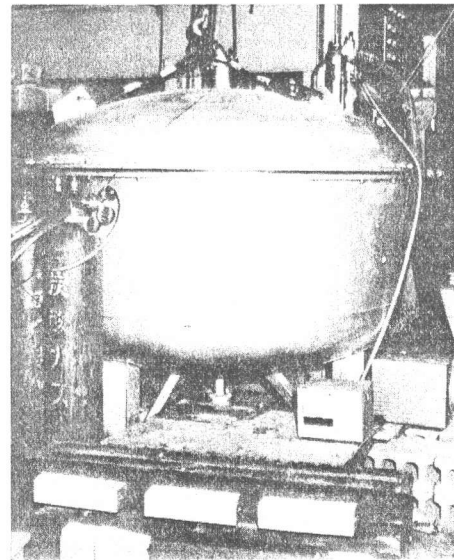


写真1 換気装置

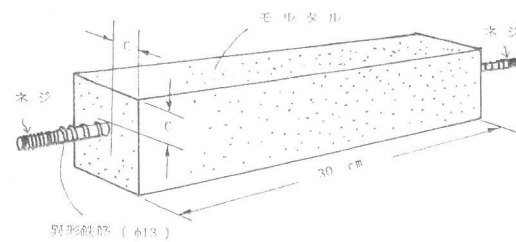


図-1 供試体

② 腐食の促進試験

腐食の促進試験を行うため、図-2に示すように供試体をカプラーで3連につなぎ、所定の応力に加工した後、フレームに固定し、この状態のまま写真-1に示す抜気タンクに入れ、炭酸ガスおよび海水の注入を行った。その後恒温湿室に移し、一週間放置した後炭酸化、塩分濃度の状態、腐食面積などの測定を行った。以下その手順を述べる。

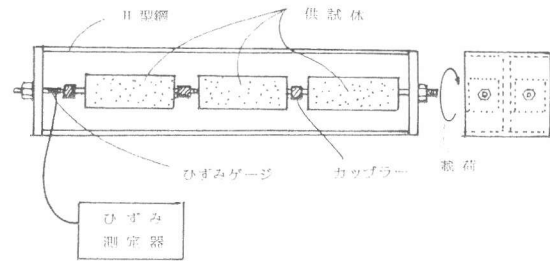


図-2 載荷フレーム

i) 供試体は28日間水中養生後、コンクリートから露出している鉄筋部を断熱材で保護して、乾燥器(50℃)に入れて、2日間定重量になるまで乾燥する。

ii) 乾燥終了後、図-2に示すHビームのフレームに3本供試体をセットし、その端部に試作のロードセルを付けて、所定の応力になるまでナットにより加力した。応力の種類は0, 500, 1000, 1500, 2000Kg/cm<sup>2</sup>を標準とした。加力後、表面のひびわれ幅を測微鏡(20倍)で測定した。供試体の端面からの炭酸ガスあるいは海水の注入を防ぐため、コーキング材を2~3mm塗り、端部からの腐食を避けた。又カプラーなどの露出部にも同じ処理を行った。

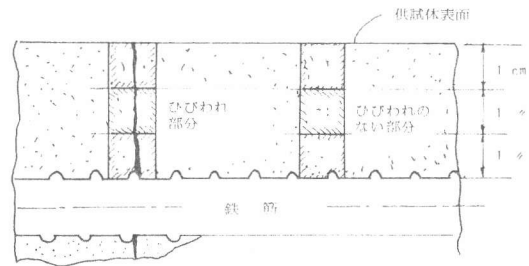


図-3 資料採取位置

iii) フレーム内に固定された供試体を吊り上げ、抜気タンクの中にセットし、2~3 Torrまで抜気して、24時間運転状態のままとした。

iv) 濃度100%の炭酸ガスをポンプからタンク内に注入し、1気圧にした後、所定の日数(1日, 2日)まで密閉したまま放置した。炭酸化の促進だけのものは、その後取り出し、24時間水中に漬した後、恒温湿室(25℃, RH80~90%)に放置した。

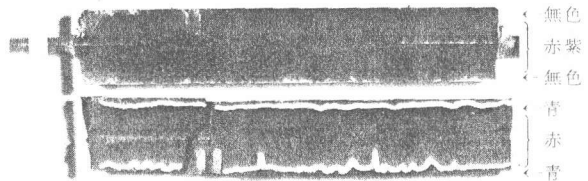


写真-2 中性化状況

v) 海水作用の促進をするものは、さらにもう一度抜気(2~3 Torr)し、24時間後真空ポンプを作動のまま、海水を注入し、供試体を海水で漬した後、タンクの蓋を開け、所定の日数(1日~5日間)放置した。

vi) 海水から取り出し、恒温湿室に移し、一週間後 pH, 塩分濃度および腐食状態を測定した。

3. 炭酸化および塩分濃度の測定方法

炭酸化および塩分濃度を測定するために資料は図-3に示すように、モルタル表面から1cm深さごとに採取した。その位置はひびわれ発生の部分およびひびわれに無関係な部分の2箇所とした。採取法は供試体をボール盤に固定し、径8.5mmのコンクリート用ドリルで孔をあけて、モルタルの粉末を採取した。

(1) 炭酸化測定方法

所定の位置ごとの資料を2g計量し、500mlの水(25℃水道水, pHは補正)に入れ、10分間スターで攪拌し、可溶性Ca(OH)<sub>2</sub>を溶かし出した後、上澄水のペーパーをpHメーターで測定した。それ故pH値はこの試験法による値である。又このpH値から可溶性水酸化カルシウムの重量を、資料に対する重量%(N)で表わした。

$$N(\%) = 9.25 \times 10^{\text{pH}-14} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

ここでpHはpHメーターからの読みである。その他、1%フェノールフタレン溶液およびメチルブルー・フェノールフタレン混合液(メチルブルー2%およびフェノールフタレン1%アルコール溶液を2:1で混合したもの, pH=10で赤→青

に変色)を供試体の中央で割裂させた面に噴霧して、中性化の程度を調べた。その結果の一例を写真-2に示す。フェノールフタレン溶液の場合赤紫色から無色に変色するため、無色の部分に噴霧されていないと見間違える場合があり、多量に噴霧して滲んで判別つかない場合、あるいは変色域がpH8.2~10と広い欠点もある。一方ナイルブルー・フェノールフタレン溶液の場合、赤色と青色の2色が出るため境界がわかりやすい。後者の方が変色ゾーンが大きい。

(2) 塩分濃度測定法

(1)と同様に各位置から採取した資料を110℃で1日乾燥し、絶乾状態にした後、5gの資料を計量し、純水1000mlに入れ、スターラーで15分間攪拌する。その溶液を濾過して50mlを計量し、0.1N硝酸銀溶液で滴定する。滴定量から、その塩素イオン量に相当するNaCl量を求め、セメント重量に対する重量パーセント(NC)を次式から求めた。

$$NC(\%) = 0.00812 \times A \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

ここでAは滴定量でmlである。

4. 実験結果および考察

(1) ひびわれの中性化に及ぼす影響

図-4はひびわれがない部分のモルタル表面から深さ方向のCa(OH)<sub>2</sub>の濃度を表わしている。pH12で9.25%となり、ほぼこの程度の状態でCa(OH)<sub>2</sub>で飽和されているとみなされる。1日および2日間炭酸化を促進した場合および1日、2日間炭酸化を促進した後さらに海水浸透の促進を行った場合の結果を示している。かぶり3cm程度までは海水の影響を受けた方が中性化が進まない傾向を示し、かぶり深さが4~5cm程度になると中性化はあまり進んではいない。図-5はひびわれ部分より採取した資料によるかぶり深さ方向の中性化の状況を示したものの(かぶり3cmの場合)で鉄筋応力は750~2800kg/cm<sup>2</sup>の範囲のものである。応力によって中性化の差異はあまりなく、図-4のひびわれなしの部分のCa(OH)<sub>2</sub>の%とひびわれ部分のCa(OH)<sub>2</sub>の%の比を求めると図-6のようになる。かぶり2~3cmの場合、鉄筋表面近傍はひびわれがない場合に比して2倍程度の中性化が進んでいること、またかぶり5cmになると、鉄筋近傍はひびわれによる中性化の進行はほとんど見られない。すなわちかぶり大きいと隅りからCa(OH)<sub>2</sub>の供給する能力が大きいため、中性化が進みにくいと考えられる。

(2) ひびわれの塩分浸透に及ぼす影響

図-7はひびわれのない部分の塩分浸透について、コンクリート表面からの深さ方向による塩分濃度(3.12による)を示したもので、セメント重量に対するNaClの重量パーセントで示している。1日および2日間の海水浸漬による差は表面から深さ2cmまで認められるが、それ以上の深さでは差はない。また深さ4.5cmでも塩分の浸透が見られる。海水の浸漬を行わないモルタル中の塩分濃度は0%であった。ひびわれ部分における塩分濃度の

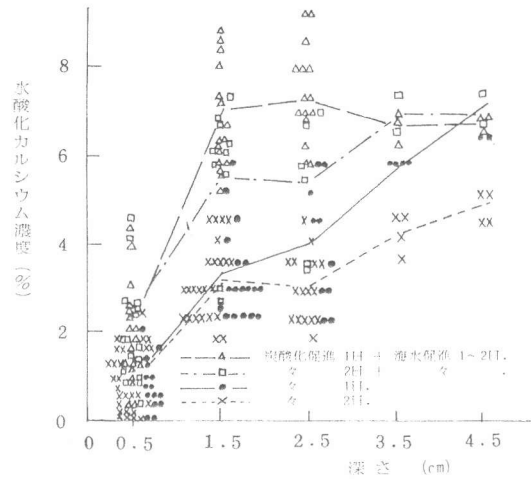


図-4 中性化(ひびわれなしの部分)

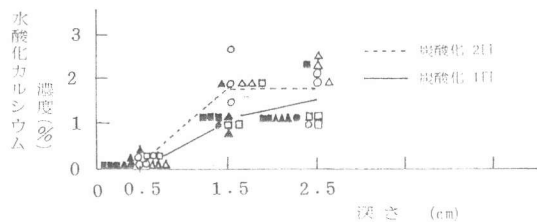


図-5 中性化(ひびわれ部分)

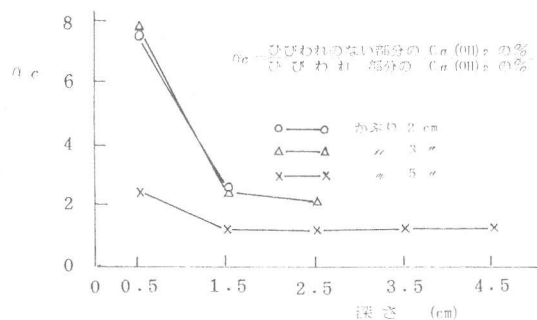


図-6 ひびわれ部の中性化の割合

一例 ( $C=3\text{ cm}$ ) を示すと図-8 のようになる。1000~2000  $\text{Kg/cm}^2$  の範囲の鉄筋応力によって多少、塩分浸透に差異があるが、区別する程差はない。またかぶり  $2\text{ cm}$  においても同じような傾向を示していた。図-7 のひびわれのない部分の塩分濃度に対するひびわれ部分濃度の倍率 ( $\alpha_N$ ) を示すと図-9 のようになる。かぶり  $2\text{ cm}$  および  $3\text{ cm}$  においてそれぞれ 1.2 倍、1.5 倍となっている。

図-10 はかぶり  $2$  および  $3\text{ cm}$  の供試体における鉄筋の腐食面積 (炭酸化、海水の促進および恒温湿室に一週間放置後、断面中央で割製し、鉄筋を取出した後、接着テープを鉄筋に貼り、錆の部分を書した後、剥し、方眼紙に貼って錆面積を近似的に測定する) と鉄筋近傍の pH 値との相関性を塩分濃度  $0\%$ 、 $0.10\sim 0.14\%$  (平均値  $0.12\%$ ) および  $0.15\sim 0.20\%$  ( $\sim 0.4\%$ ) (平均値  $0.18\%$ ) をパラメタとして求めたものである。ただしカッコの  $0.4\%$  は炭酸化の促進を行わないで海水の浸透の促進のみによって腐食させた場合、腐食が起らなかったため、強制的に練混ぜ時に  $\text{NaCl}$  (セメント重量の  $0.4\%$ ) を入れ、海水浸透の促進を行った結果、モルタル中に入った濃度である。これによって初めて腐食が生じた。鉄筋近傍の  $\text{NaCl}$  濃度が  $0\%$  の場合、 $\text{pH} 11.4$  ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  濃度で  $2.3\%$ )、同様に  $\text{NaCl}$  濃度が  $0.12\%$  の場合、 $\text{pH} 11.8$  ( $5.8\%$ )、 $\text{NaCl}$  濃度  $0.18\%$  の場合、 $\text{pH} 12.0$  ( $9.3\%$ ) で腐食が生じない限界点となる。各塩分濃度でこれ以上 pH が低下すると腐食が発生することになる。この限界線を示すと図-11 のようになり、 $\text{NaCl}$  濃度 - pH 値の関係はほぼ直線となり、鉄筋近傍の塩分濃度が大きくなるに従って、中性化が進まなくとも腐食が起る事になる。

### 5. 結 論

- (1) かぶりコンクリートのひびわれによって、鉄筋近傍の炭酸化はひびわれが無い部分に比してかぶり  $2\sim 3\text{ cm}$  で約 2 倍、かぶり  $5\text{ cm}$  ではひびわれの有無による差はほとんどない。
- (2) 同様に塩分の浸透はひびわれによって、かぶり  $2\sim 3\text{ cm}$  の場合  $1.2\sim 1.5$  倍程度である。
- (3) コンクリート中の鉄筋近傍の炭酸化と塩分 ( $\text{cm}^2$ ) 濃度の底合によって腐食が発生し、その発生する限界線は塩分濃度の増加によって、ほぼ直線的に pH 値が増加する直線となる。

### 参 考 文 献

- 1) 浜田 稔, セメントコンクリート, 46272, pp.2~17
- 2) G.J.Verbeck ACI, SP49-3, pp.21~38

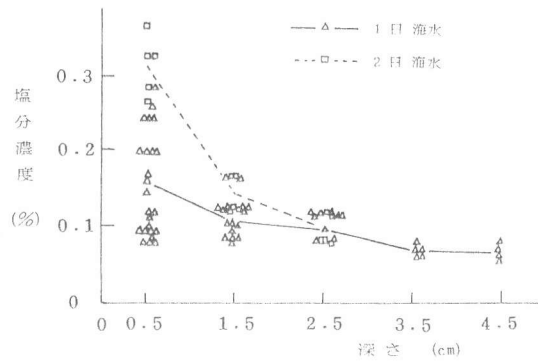


図-7 塩分濃度 (ひびわれなしの部分)

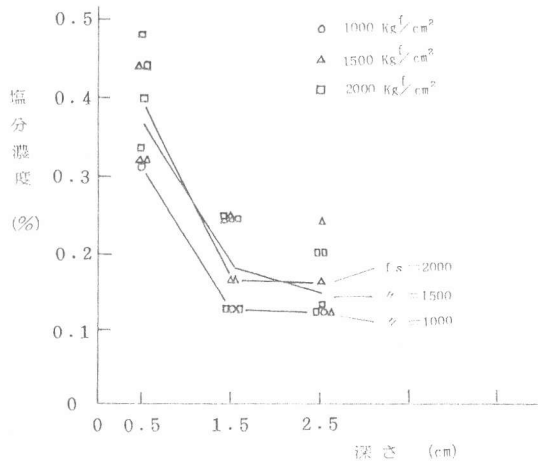


図-8 塩分濃度 (ひびわれ部分)

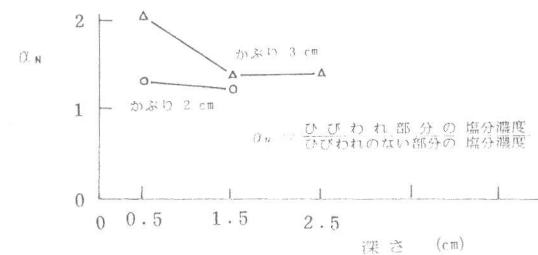


図-9 ひびわれによる塩分濃度の影響

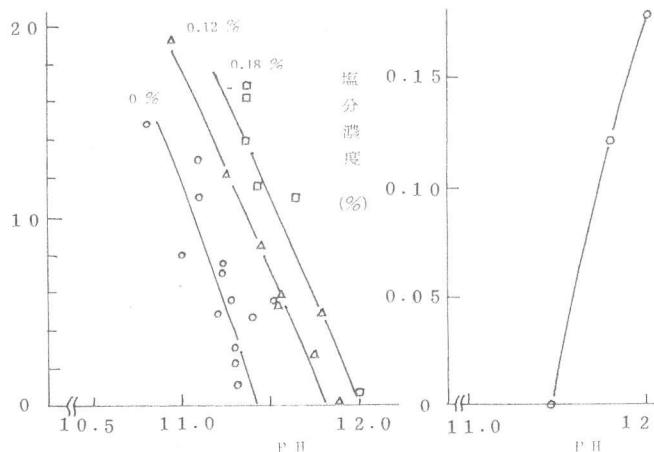


図-10 中性化-塩分濃度による腐食面積

図-11 中性化-塩分による腐食限界