

V—12 炭酸化および海水作用を受ける 鉄筋コンクリート部材の腐食

北海道大学工学部

宮崎 良弘

同 上

正員 佐伯 昇

同 上

正員 高田 宣之

1 序

鉄筋コンクリート部材において、現在、建設後数十年を超えるものが数多くなっている。それにつれて、構造物中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。腐食は長年月を経て徐々に進行するものであり、現在に至って現われ始めていると考えられるが、環境の厳しい条件下でもコンクリート構造物が使用されているためとも言える。つまり、コンクリート中の鉄筋は、従来、腐食しないものと考えられていたが、環境条件によっては腐食が問題となる。コンクリート中の鉄筋を腐食させる条件として、まず第一に考えられるものは、コンクリート中の PH の問題である。コンクリートの硬化反応過程で、水酸化カルシウムが生成されるが、これは強塩基性物質で、コンクリート中の間けき水を強アルカリ性に保っている。腐食は鉄の酸化反応で、強アルカリ性では進行しないことが確かめられている。つまり、コンクリート中の水酸化カルシウムの含有量によって腐食の進行が左右されると予測できる。水酸化カルシウムは、炭酸ガスによる炭酸化や、海水に洗い流されることにより失なわれる。近年の工場地帯の発展や車両の排気など、構造物周辺の炭酸ガス濃度は増加しており、コンクリートの中性化を促進している。第二に、海水作用に代表される塩素の影響がある。コンクリート中の PH が強アルカリ性であっても、多量の塩素イオンの存在は、鉄筋を腐食させる。なぜなら、塩素イオンがコンクリート中の電導率を増加させ、鉄の酸化反応の過程を促進するからである。水分もまた、この電導率に関係するものである。第三に、酸素の問題がある。腐食は鉄の酸化反応であるから、酸素が供給されなければ起こらない。このため、ひびわれ幅およびかぶり厚、さらにコンクリートの品質（気密性など）や劣化の程度が問題となる。すなわち、鉄筋表面部まで酸素が供給される状態にある箇所から腐食が始まると予想される。

本研究では、海水と炭酸化を受ける鉄筋コンクリート部材を対象に、鉄筋応力、ひびわれ幅、かぶりの違いによる腐食の度合を真空装置を用いた促進試験によって検討しようとするものである。

2 実験方法

(1) 実験供試体

供試体は、水セメント比 50%，および砂セメント比 $S/C=2$ の配合のモルタルとし、図-1 に示すように、両引き試験供試体を用いた。異形鉄筋 ($\phi 13$) を所要のかぶり厚 ($C=2\text{ cm}$ および 3 cm) に配置し鉄筋の前処理は、表面の条件をそろえるため 10% の塩酸で洗い、水酸化ナトリウム溶液で中和した後、さらに水洗いして、ワイヤーブラシにより表面を仕上げた。

(2) 腐食の促進試験法

促進試験は以下の手順で行なった。

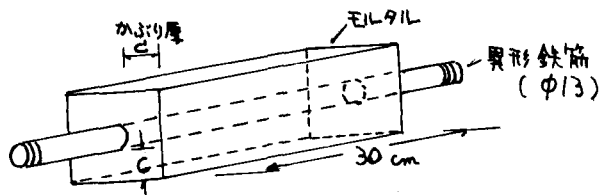


図-1 供試体

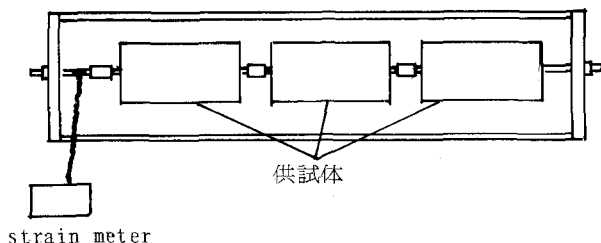


図-2 荷重状態

- a) 供試体は、28日間水中養生（20度C）を行なった。
 b) 養生終了後、乾燥器（50度C）で2日間乾燥した。
 c) 乾燥終了後、I ビームのフレームを用いて、供試体の鉄筋に応力をかけた（図-2を参照）。応力の種類は、 $f = 0, 250, 500, 1000, 1500, 2000$ ㎏とする。

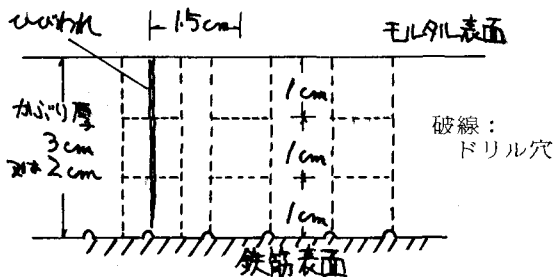


図-3 サンプル採取位置

- d) 供試体を、図-2 のような状態のまま、
 抜気タンクに入れ、真空にする（数torr × 24h）。
 e) 炭酸ガスを注入し、濃度100%の状態ですべての日数（1日～2日）をおく。
 f) 再び抜気し、真空状態にする（数torr × 24h）。
 g) 海水を注入し、所要の日数（1日～2日）をおく。
 h) 海水から取り出し、腐食促進のため、恒温恒湿室（約25 度C, R.H. 90%以上）に放置する。
 i) 一週間放置後、PH、塩素イオン濃度の測定を行ない、腐食の状態を調べる。

3 中性化、塩素イオン濃度の測定方法

(1) 中性化測定方法

供試体のひびわれを中心とした中性化の分布を知るため、図-3 のようにドリルで削り、サンプルを採取する。

各位置ごとに、サンプル2gを500mlの水に入れ、10分間攪はんし、可溶性水酸化カルシウムを溶かし出した後、上澄水のPHをPHメーターで測定した。また、その値からサンプル2g 中にある可溶性水酸化カルシウムの重量を算定し、重量パーセント（N）も求めた。計算は、次式による。

$$N (\%) = 9.25 \times 10^{(PH - 14)} \times 100$$

ここで PHは、PHメーターの読み。

このほか、1 %フェノールフタレイン溶液¹⁾（フェノールフタレイン1gを65mlのアルコールに溶かし、純水を加え100mlにしたもの）および、ナイルブルー・フェノールフタレイン混合溶液（ナイルブルー2 %およびフェノールフタレイン1 %アルコール溶液を2：1 で混合したもの）を割裂した供試体に噴霧して、中性化の程度を調べた。

(2) 塩素イオン濃度測定法^{2) 3)}

サンプル採取法は、中性化測定法と同じで図-3 のようにドリルで削り取り採取する。

各位置ごとのサンプルを110度C で絶乾状態にした後、5gをとる。それを 純水100mlに入れ15分間攪はんする。その水をろ過して50mlをとり、N/10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塩分量を求め、セメント量に対する重量パーセント（NC）を求める。計算は次式による。

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

滴定量 : A ml

4 実験結果 および 考察

炭酸ガスおよび海水による腐食の促進試験を行なった結果、コンクリート表面からの深さおよびひびわれの影響による中性化および塩素の浸透、応力による鉄筋付近の中性化および塩素の浸透の度合、そして、PH-塩素の複合作用による腐食面積、最大ひびわれ幅や鉄筋応力と腐食面積の関係についての資料がえられた。

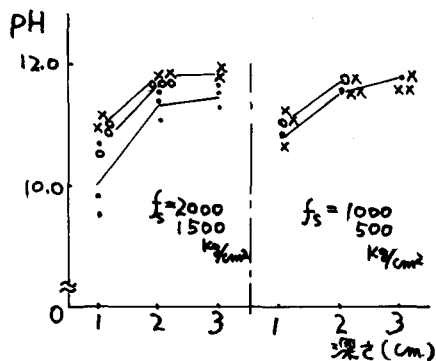


図-4 中性化 ($C = 3\text{cm}$)

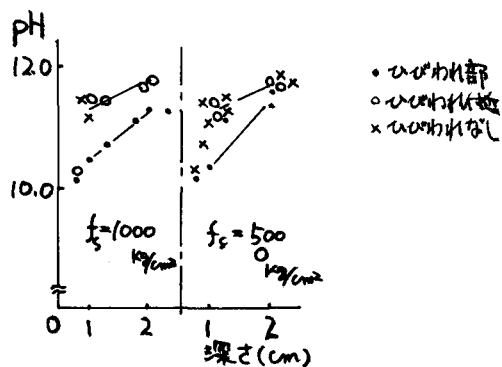


図-5 中性化 ($C = 2\text{cm}$)

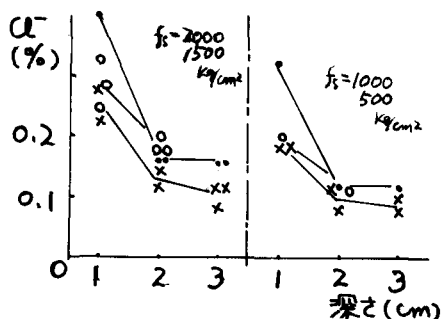


図-6 塩素イオン ($C = 3\text{cm}$)

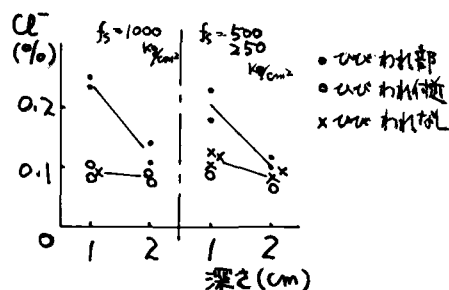


図-7 塩素イオン ($C = 2\text{cm}$)

(1) コンクリート表面からの深さ および ひびわれの影響によるPHの分布

図-3 に示すような、ひびわれ位置、ひびわれから1.5cm離れた位置、ひびわれと無関係な位置の3種類で、深さ1cmごとに測ったPHの値を、図-4 および図-5 に示す。

この図に示されたように、ひびわれ部のPHの低下が他より大きいことがわかる(応力の違いについては、(3)を参照)。しかし、ひびわれ部以外では、ひびわれから1.5cm離れた位置、ひびわれと無関係な位置、さらに応力が異なる場合も同じような傾向を示している。

深さ方向については、表面部の低下のみが大きく、炭酸化の進行が容易でないことを示している。

また、鉄筋応力などの条件が同じならば、かぶり2cmのほうが、3cmのものより中性化が進みやすい。

(2) コンクリート表面からの深さ および ひびわれの影響による塩素量の分布

塩素イオン濃度についても(1)と同様なグラフを図-6 および図-7 に示す。

ひびわれ部の浸透が大きいといえるが、その差は表面付近において顕著なだけで、かぶり深さに従って小さくなり鉄筋付近での差ははっきりしなくなる。かぶり2cmのほうが塩素浸透が小さいのは、ひびわれ性状の影響によるものと考えられる。かぶり2cmの供試体では、3cmのものに比べて、ひびわれの本数が増え、各ひびわれ幅は小さくなっている。

(3) 鉄筋応力と中性化の浸透

鉄筋応力と鉄筋付近のコンクリートのPH(または、水酸化カルシウム濃度)との関係を、図-8 および図-9 に示す。ひびわれの発生した供試体においては、ひびわれ部の鉄筋付近のPHの値だけをとっている。かぶり3cmでは、鉄筋応力が1000 $\%$ 、かぶり2cmでは500 $\%$ で、ひびわれの有無がわかれて

図のように、ひびわれの無い場合のPH（水酸化カルシウム濃度）は、鉄筋応力に無関係に高い値をとる。しかし、ひびわれ発生後のPHは応力が大きくなるに従って低下することがわかる。

かぶり3cmに比べて、かぶり2cmのほうがPHの値が低い。（中性化の状態を写真-1に示す。）

(4) 鉄筋応力と塩素イオンの浸透

鉄筋応力と塩素イオン濃度の関係を、上述の(3)と同様に図-10および図-11に示す。

ひびわれ発生後の鉄筋応力以上での塩素浸透量のばらつきが大きくなっている。しかし、応力の増加に従って浸透量は増えず、ほぼ一定の傾向を示している。

かぶり3cm（図-10）では、応力が1500kg/cm²以上になると、多少、塩素の浸透が大きくなる傾向があるようにみえる。

(5) 中性化と塩素の複合作用による腐食

図-12に、中性化、塩素濃度の各条件での腐食面積の関係を示した。

PH（または、水酸化カルシウム濃度）の低下による腐食の増大の傾向がはっきりしており、塩素イオンは、それを促進するという傾向を示している。塩素イオン濃度が0.2%程度では、腐食は、コンクリートの中性化に左右されている。

PHが11.94（または水酸化カルシウム濃度8%）以上で、塩素イオン濃度が0.2%程度に抑えられるのなら、腐食は起こらないと考えられる。

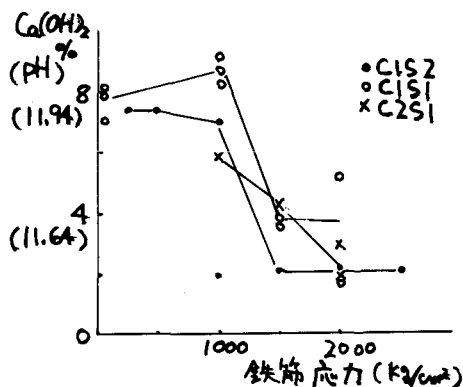


図-8 鉄筋応力と中性化 (C = 3cm)

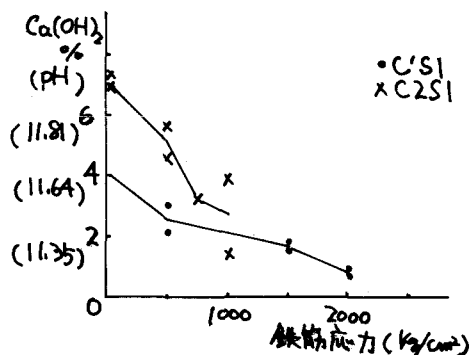


図-9 鉄筋応力と中性化 (C = 2cm)

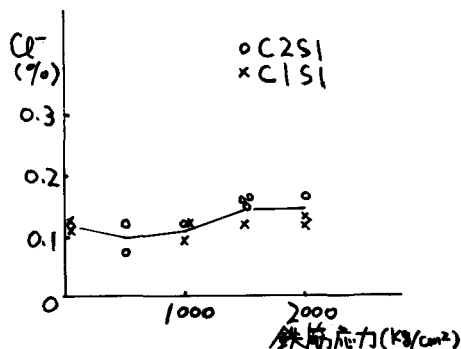


図-10 鉄筋応力と塩素イオン (C = 3cm)

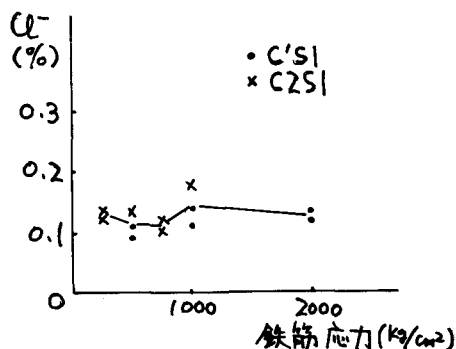


図-11 鉄筋応力と塩素イオン (C = 2cm)

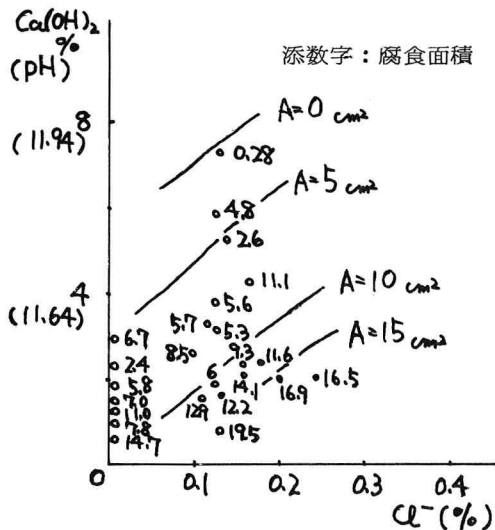
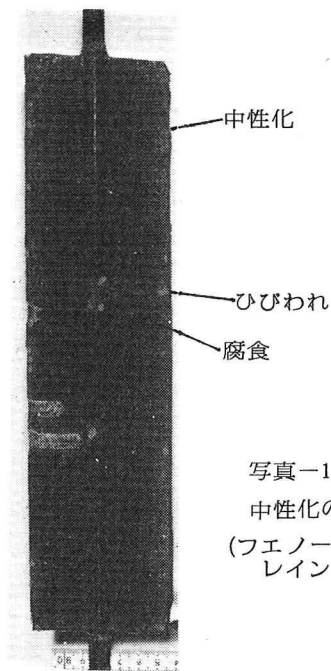


図-12 PH - 塩素イオンによる腐食面積



(6) 最大ひびわれ幅と腐食面積

図-13および図-14に最大ひびわれ幅と腐食面積の関係を示した。

これによれば、ひびわれ幅が大きくなれば腐食が大きくなるという傾向はわかるが、全体にばらつきが大きく、ひびわれ幅によって腐食の予測は難しい。これは、最大ひびわれ幅が、誤差の大きい性状であるためである。

(7) 鉄筋応力と腐食面積

図-15および図-16に、鉄筋応力と腐食面積の関係を示した。

ひびわれの発生により腐食が発生し、応力の増加によりその面積が大きくなるという関係がわかる。これは、上述の(6)の最大ひびわれ幅との関係より、よい相関があるといえる。

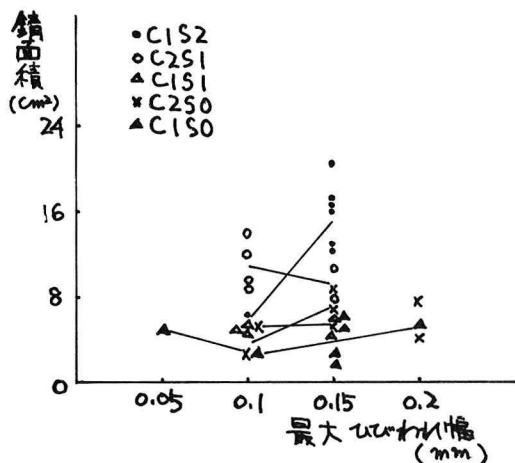


図-13 最大ひびわれ幅と腐食面積 (C = 3cm)

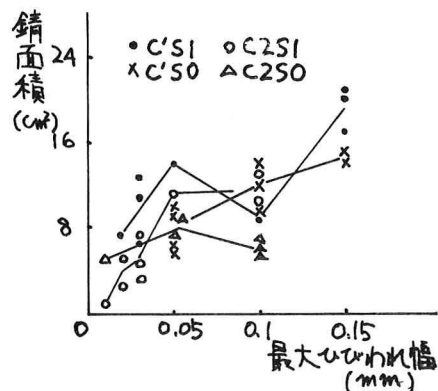


図-14 最大ひびわれ幅と腐食面積 (C = 2cm)

5 まとめ

中性化および海水による腐食の促進試験を行なった結果、次のようなことがわかった。

(1) ひびわれ部は、ひびわれが無い部分と比較して中性化および塩素イオン濃度が大きくなるが、コンクリート表面から離れるに従って、その差は小さくなる。

(2) 鉄筋応力の大きさによる鉄筋付近の中性化の浸透は、ひびわれの有無によって大きな差があり、また、鉄筋の応力が大きいほど中性化が進んでいる。かぶりの影響は、

2 cmと3 cmを比較すると、2 cmのほうがひびわれ部の中性化が進みやすい。

(3) 鉄筋付近における塩素の浸透の度合は、鉄筋応力にあまり影響を受けない。ただし、応力の増大により塩素の浸透の度合のばらつきが大きくなる傾向はある。これは塩素の浸透が、ひびわれ性状に影響されるためと考えられる。

(4) 中性化の進行、また塩素イオン濃度の増大に従って、等腐食面積を表わす線がほぼ直線的に大きくなっている。

また、PHが11.94(水酸化カルシウム濃度8%)以上で塩素イオン濃度が0.2%程度ならば、腐食は起こらない。

(5) 最大ひびわれ幅と腐食面積は、多少ひびわれ幅の増加に伴なって大きくなる傾向があるが、ばらつきが大きく、相関性は明瞭ではない。

(6) 鉄筋応力と腐食との関係は、比較的良好な相関を示し、かぶり3cmでは、ひびわれ発生後の1000μmから、応力が大きくなるに従って腐食が大きくなる傾向を示している。かぶり2cmのものについても同様なことが言える。

腐食を制御するためには、ひびわれ幅よりも鉄筋応力の方が有効である。

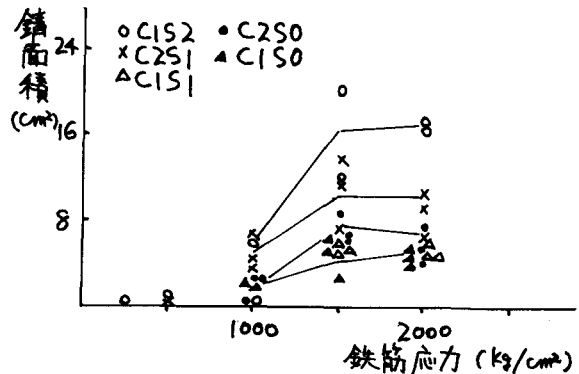


図-15 鉄筋応力と腐食面積 (C = 3cm)

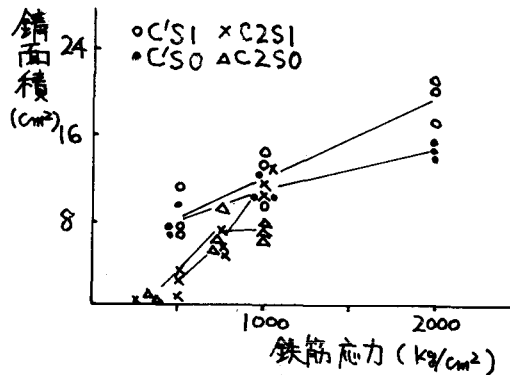


図-16 鉄筋応力と腐食面積 (C = 2cm)

参考文献

- 1) 依田 彰彦 「鋼材の腐食と対策—コンクリートの中性化」 コンクリート工学 Vol.15
- 2) 小林 豊治 「鋼材の腐食と対策—コンクリート中の塩分」 コンクリート工学 Vol.15
- 3) 片脇 清士 「コンクリート中に含まれる塩化物の定量方法に関する一試案」