[13] ひびわれによる高強度コンクリート中鋼材の腐食

正会員 関 博 (早稲田大学理工学部)
正会員 ○河原 忠弘 (早稲田大学大学院)
山本 英夫 (鴻池組土木工務部)
川俣 雅彦 (東京都建設局)

1. まえがき

近年、海岸に面したあるいは海洋中にあるコンクリート構造物の劣化の問題がとりあげられるようになり、とりわけ補強材としての鉄筋やPC鋼材の腐食による劣化が検討されるようになってきた。激しい腐食環境である海岸や海洋において十分な耐久性を保持することは重要なことであるが、腐食の機構や材料・設計・施工の要因と腐食の関係などについて多くの課題が残されていると思われる。

本研究では高強度コンクリートを中心として促進養生により鋼材に腐食を発生させ、ひびわれ幅と腐食量の関係を検討することを主な目的とした。

2. 実験方法

(1) 供試体の製作

実験に用いた供試体の種類及び材料は表1，2の通りであり、表3ではコンクリートの示方配合を示している。供試体は高強度コンクリートの場合、加圧工法〔打設→加圧(10 kg/cm²，5分間)→蒸気養生(100℃，3時間)〕によるものと真空工法〔打設→吸引(350 mHg，15～20分程度)→蒸気養生(100℃，3時間)〕によるものの2通りを用いた。実験の一部として、骨材にスラグ砕石および砕砂を用いたコンクリートについても検討を行った。供試体は図1に示す形状を有し、主筋の腐食だけを対象とすることとして、溶接部，プラスチックスペーサー，横筋などの影響を極力受けないよう配筋を定めた。主筋は、降伏点128 kg/mm²，引張強さ157 kg/mm²，伸び9%である。また、管理供試体は圧縮(φ10×20 cm)と曲げ(10×10×40 cm)の供試体を用いた。表4は強度試験結果をまとめたものである。

表1 供試体の種類及び本数

コンクリートの種類	骨材の種類 細骨材	骨材の種類 粗骨材	供試体数
高強度(加圧式)	川砂	玉砕石	12本
高強度(真空式)	川砂	玉砕石	8本
普通	川砂	玉砕石	10本
スラグ砕石(1)	風砕砂	高炉スラグ砕石	2本
スラグ砕石(2)	川砂	グ砕石	2本

注：普通ポルトランドセメント使用

表2 骨材の試験結果

	骨材の種類	表乾比重	吸水率(%)	粗粒率	実積率(%)
細骨材	大井川産川砂	2.63	1.21	2.80	64.0
	*完全破砕風砕砂	2.90	1.08	2.62	65.7
	**3mm以下粒調整風砕砂	2.89	0.31	4.03	64.5
粗骨材	大井川産玉砕石	2.64	0.56	6.74	60.6
	高炉スラグ砕石2005B	2.64	2.72	6.69	58.7

注：使用した風砕砂は、＊と＊＊を1：1の割合で混ぜたものである

表3 コンクリートの示方配合

コンクリートの種類	スランプ(cm)	空気量(%)	W/C(%)	S/a(%)	単位量(kg/m³) W	C	S	G
高強度	2 (10)	1.5	36	40	151	420	735	1110
普通	8	1.5	55	43	173	314	808	1073
スラグ砕石	2 (10)	3.0	41	44	156	380	904	1049

注：( )内の数字は、目標VB値(秒)を表す。
粗骨材最大寸法は20 mm

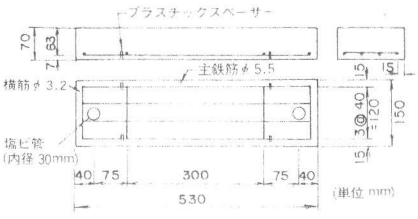

図1 供試体諸元

(2) 荷重の載荷および載荷方法

試験方法は、図2のように2本1組の供試体の圧縮縁を向い合わせにし、純曲げスパンを6 cmとして、センターホールジャッキで荷重を加え、その後ナットで介し荷重を保持した。促進試験前に鉄筋直上のひびわれ幅を測微計(最小目盛 1/100 mm)を用いて測定し、促進試験後に再び測定し、その後荷重を除荷した。

表4 コンクリートの強度特性の試験結果

種類	圧縮強度(kg/cm²) 標準養生 28日	気中養生 3時間	14日	28日	気中→促進 (90→126) 28日	曲げ強度(kg/cm²) 気中 (83→122) 28日
高強度(加圧)	590	500	743	786	784**	73.3
高強度(真空)	593	378	635*	625	606**	64.4
普通	389	115*	268	291	362**	37.7

注：スラグ砕石(1)、(2)の圧縮強度はそれぞれ585、628(kg/cm²)。※～気中養生24時間
無印＝供試体6本の平均値 ＊＝供試体5本の平均値 ＊＊＝供試体4本の平均値

促進試験はコンクリート劣化試験装置(自動プログラム制御方式，温度－20℃～＋70℃，湿度30%～95%(at 40℃))を使用し、促進期間を1ケ月とした。1サイクルは12時間とし、温湿度は60℃，40%

R.H.の恒温恒湿に調整した。しかしながら、1サイクルにつき1回の割合で3時間の塩水（Nacl 3％溶液）噴霧を行うので、噴霧後湿度が40％の元の状態に戻るまで約7時間半を要した。

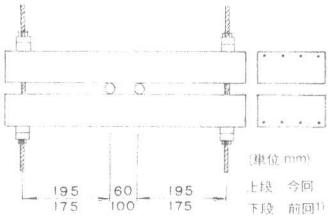

図2 載荷方法

(3) 腐食量の測定

促進試験完了後、供試体を解体して鉄筋を取り出し、腐食量（腐食面積，腐食長さ，最大腐食深さ，腐食重量減）を測定した。腐食面積は、取り出した鉄筋に透明なセロハン紙を巻き腐食部を写しとり、それをポスターカラーで塗りつぶした後光電管式プラニメーターで測定してmm単位まで求めた。それと同時に、腐食長さをトレースからmm単位まで定規によって測定した。最大腐食深さは、小さな孔食も測定できるようにするため先端に針を付けたダイヤルゲージを作り、腐食部と平坦部との差を測定して求めた。また、腐食部付近の左右両側を切断し、その試料片を10％クエン酸二アンモニウム溶液に16時間浸漬後、腐食した鉄筋と腐食していない鉄筋（補正用）との重量減の差を求め腐食重量減とした。なお、対象とした腐食は横筋間に発生したもののみとした。

(4) 中性化および塩分量試験

中性化試験は、普通コンクリートのみについて実施した。解体直後の供試体のいくつかのコンクリート片にフェノールフタレイン1％アルコール溶液を噴霧し、着色の状態により判定した。

塩水を噴霧させたコンクリート中での塩分量の蓄積を調べるため、可溶性塩素量を以下の方法[2]で求めた。すなわち、鉄筋のかぶり部分のコンクリートを対象として、鉄乳バチで105μ全通程度に粉砕し、試料を90℃の温浴に3時間浸漬しCl^-を抽出させた後、$\frac{1}{10}$N硝酸銀溶液で滴定し（モール法），NaCl 量を算出した。

3. 腐食の状況および中性化

取り出した鉄筋の腐食は、発生箇所（ひびわれ部およびそうでない所），断面減少の程度，形や色，などを種多様のものがあり、腐食の複雑性を示すものだと考えられる。ひびわれに対応している腐食と対応していない腐食を比較すると、色においてはあまり差が認められず、ほとんどのものが赤サビに近い黄土色であった。腐食の形は、ひびわれ部の腐食の方が鉄筋軸方向に伸びたものが目立った。また、普通コンクリートの純曲げ区間の腐食は多くが点錆に近い錆であった。コンクリート表面に赤錆が溶出したひびわれの全てについて、促進試験後の観察によるとそこから鉄筋軸方向に新しいひびわれが生じているのが認められた。このひびわれは、鉄筋の腐食による膨張圧が原因で生じたものであると考えられる。

普通コンクリートの中性化試験を行った結果、最大で深さ1mm程度であり、中性化による腐食はひびわれ部以外では起こっていないと考えられる。

4. ひびわれと腐食の発生

(1) 腐食発生率とコンクリートの品質

図3はひびわれ幅0mmを越えて0.35mmまでの、ひびわれ幅0.05mm毎における腐食の発生した割合（腐食発生率と呼ぶ）を示したものである。本図によると、ひびわれ幅が増加するに従って腐食発生率も増加する傾向を示しており、全供試体の平均値で考えるとひびわれ幅が0.2mmを越えるとひびわれ部分のほぼ80％で腐食が生ずることになっているのがわかる。また、高強度（加圧式），高強度（真空式），普通の順に腐食発生率は低下しており、高強度のコンクリートほどひびわれ部分での腐食発生の可能性は高いようであった。上記はひびわれ部分のみを考慮した場合であるが、腐食の発生がひびわれ部分と対応する率（腐食対応率と呼ぶ）を考えてみる。すなわち、ひびわれ幅0のデータを含めるが腐食0のひびわれ幅のデータを削除すると、腐食対応率は、高強度（加圧式）で85.3％、高強度（真空式）で84.1％、普通で78.2％となり、普通コンクリートは高強度コンクリートに比べてひびわれ部以外で腐食する可能性が高いということが言えそうである。また、図4はひびわれと腐食の状況を表したものであるが、この例からも

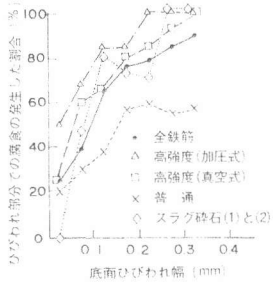

図3 ひびわれ幅と腐食の発生した割合

同様の傾向がうかがえる。表５は Cl^- 含有量の測定結果を示したものである。本表によると、強度が低いほどコンクリート中の塩分量は増加する傾向を示しており、腐食対応率における結果をある程度説明するものと思われる。すなわち、高強度コンクリートの方が普通コンクリートに比べ緻密であるため Cl が浸透しにくく、ひびわれのない所では耐食性に富んでいると考えられる。

表５　モルタル中の NaCℓ 含有量

供試体の種類	試料数	変動係数 (%)	NaCℓ 含有率 (%)
高強度(加圧式)	6	12	1.11
高強度(真空式)	6	11	1.79
普　通	6	19	2.56

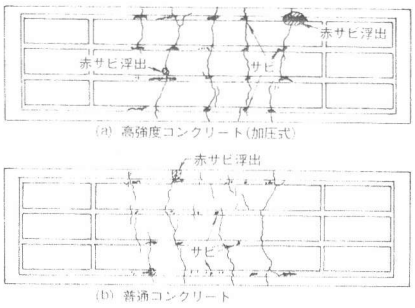

図４　ひびわれと腐食の状況

(2)　腐食測定値相互の関係

腐食測定値（腐食面積，腐食長さ，最大腐食深さ，腐食重量減）および２次的に求めた腐食面積率（＝腐食面積／（腐食長さ×円周））の相互の関連性を調べるために、一次回帰分析および相関分析を行った[3]。その結果、腐食面積と腐食長さに非常に良い相関性（線形）があることが認められた（図５）。また、図において面積率１００％の場合を示してあるが、このように面積率１００％に近いものはほとんど存在しないし、鉄筋軸方向または円周方向に極端に進行が偏った腐食がないこともわかる。このことは、鉄筋軸方向を長径とする楕円形の錆が多く見られたことの裏付けにもなると考えられ、錆の鉄筋軸方向への進み方と鉄筋円周方向への進み方には相関性があるといえる。

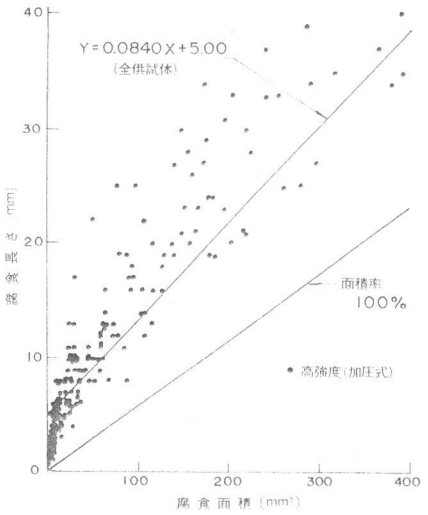

図５　腐食面積と腐食長さの関係

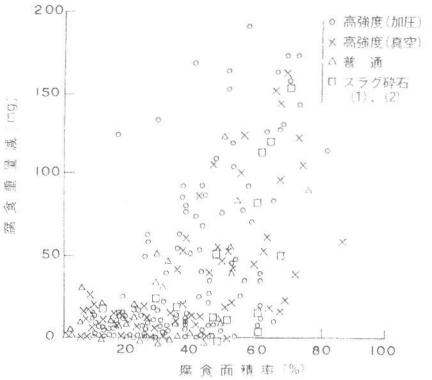

図６　腐食面積率と重量減の関係

図６は腐食面積率と腐食重量減の関係を示しており、面積率が３０％前後を越えると腐食重量減が増加する傾向を呈している。すなわち、腐食はある程度鉄筋表面に広がった後、深さ方向への進み方が活発になるのではないかと推測される。

その他の相関係数を見ると 0.5 ～ 0.8 の範囲にあり、特に腐食面積と腐食重量減が 0.81（データ数４０９），腐食面積と最大腐食深さが 0.73（データ数４１３）であり、腐食面積は他の腐食測定値と何らかの関連性があると考えられる。

(3)　ひびわれ幅と腐食面積

図７は、ひびわれ幅毎における腐食面積の度数および度数分布を示している。本図は全供試体を対象としたものであるが、傾向はコンクリート種類毎のものとさほど異らず、供試体の種類は分布形状にはほとんど

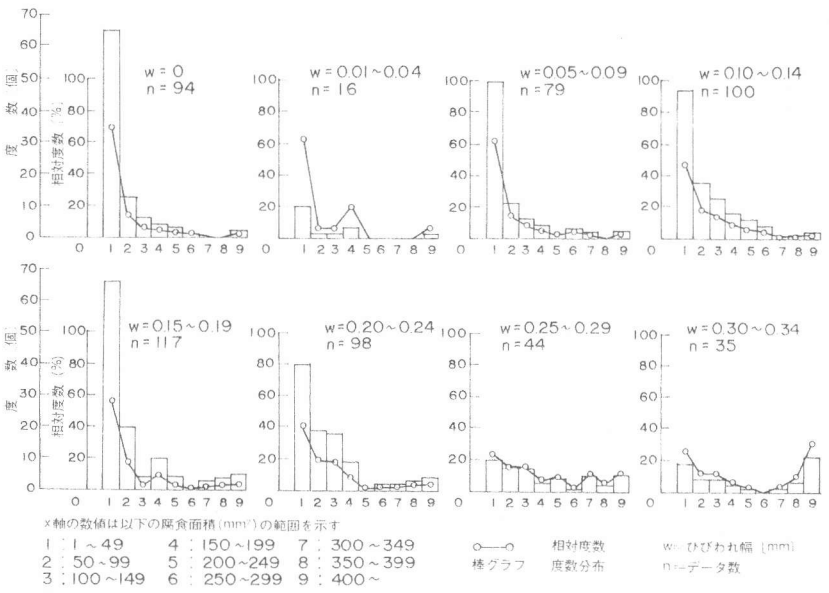

図７　腐食面積のひびわれ幅ごとの変化

影響を及ぼさないといえそうである。ひびわれ幅が0.25㎜程度を越えると急に分布形状が異る傾向が認められるが、これは高強度および普通コンクリートの双方に共通しており、注目すべき点だと思われる。ひびわれの発生していない時の分布形状は、ひびわれ幅の小さい場合におけるものとそれほど相違せず、ひびわれ幅の小さい範囲内では腐食面積の分布は、ひびわれの有無には大きな影響を受けないと考えられる。また本図と図3から、ひびわれ幅が小さい時には腐食発生の可能性は低く、発生する腐食もその面積は小さいが、ひびわれ幅が大きくなるにつれ、特に0.25㎜前後からは腐食発生の可能性が高まるとともに腐食面積の大きいものの占める割合が多くなるようである。

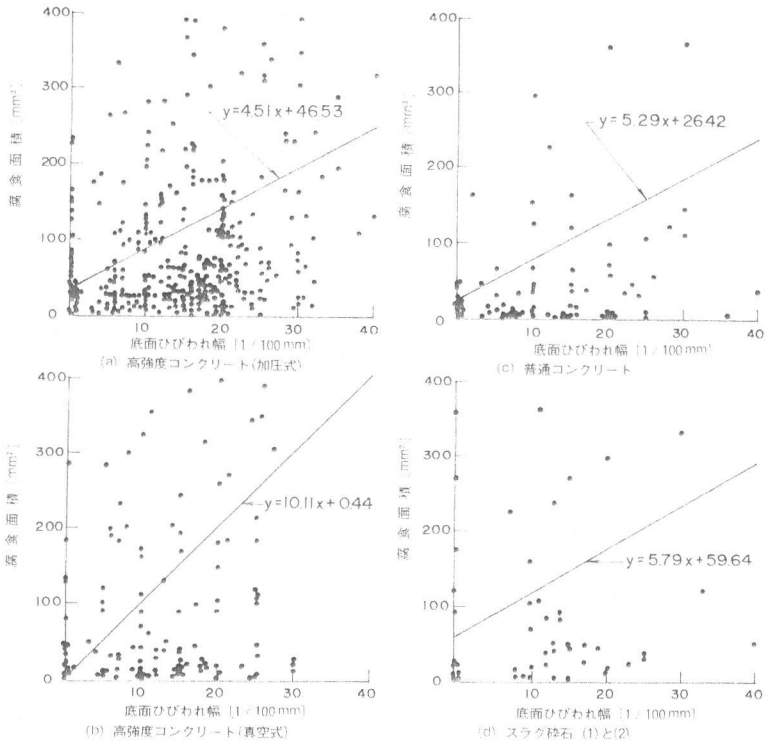

図8　ひびわれ幅と腐食面積の関係

全供試体について、ひびわれ幅0の腐食測定値を含み、腐食面積0のひびわれ幅を除いた場合におけるひびわれ幅と腐食面積の関係を図8に示す。両者の相関係数は0.33程度（データ数669）と低い値であった。

コンクリートの種類間に相関性の差異があるかを調べるために、相関係数の差の検討（有意水準5％）を行った。その結果、ひびわれ幅と腐食面積の関係においては明瞭な差がないと思われた。また、一次回帰直線を見ると高強度（真空式）の勾配が多少大きいが、ばらつきが大きく高強度コンクリートと普通コンクリートの間には顕著な差があるとは思われない。

5. まとめ

コンクリート中鋼材の腐食傾向を調べるために高強度コンクリート，普通コンクリートなどを用いて1ケ月間の塩水噴霧による促進試験を実施した。本試験の範囲内では次のような事項が明らかになったと思われる。

1）ひびわれ幅が大きくなると、その部分で鉄筋は腐食しやすくなる。

2）高強度コンクリートに比べ、普通コンクリートではひびわれ以外の箇所でも腐食の発生する可能性が高い。

3）鋳の鉄筋軸方向への進み方と円周方向への進み方には何らかの相関関係が存在する。

4）0.25㎜程度を越えたひびわれ幅では、大きな腐食面積の発生する割合が高くなるようである。

5）高強度コンクリートと普通コンクリートを比較すると、ひびわれ幅と腐食面積の関係について、明瞭な差が認められなかった。

なお、本実験は日本加圧コンクリート矢板工業会からの委託として実施したものである。実験計画，供試体の製作などについて、藤井健太郎氏をはじめ日本プレスコンクリートK.K.の方々、竹永義氏をはじめバキュームコンクリートK.K.の方々に御助力頂いた。謹んで感謝の意を表する次第である。

参考文献：1）関・藤橋・森田：ひびわれによる鋼材の腐食とその評価に関する二，三の考察，セ技年報35，1981，p114～117

2）近藤・森永：硬化コンクリート中の遊離塩分量の抽出条件による差，日本コンクリート会議 鉄筋コンクリートにおける塩化物の影響に関するシンポジウム発表報文集，1975，p29～32

3）松本：土木解析法（I），技報堂