

[18] オートクレーブ方法による鉄筋の腐食量の推定

正会員 ○武 若 耕 司 (東京大学 大学院)
 正会員 小 林 一 輔 (東京大学 生産技術研究所)
 正会員 伊 藤 利 治 (東京大学 生産技術研究所)

1. まえがき

鉄筋の腐食によって鉄筋コンクリート構造物の耐久性が支配されると考えられる塩分環境の内でも、例えば海砂を使用した場合のように、練り混ぜ時にコンクリート中に塩分が導入される場合においては、コンクリート中に含まれる塩分量をある程度推定することが可能であるため、鉄筋の腐食問題に対する検討は比較的容易となるものと思われる。すなわちこのような場合には、鉄筋の塩分腐食あるいは防食についての有効な情報を得るために長期の試験期間が必要な暴露実験に代わって、腐食促進試験を用いて短期間に鉄筋の腐食状況を把握することができるものと考えられるためである。

そこで本研究では、この腐食促進試験方法として、腐食促進効果および試験結果の再現性等の点で非常にすぐれているオートクレーブ方法を用いて、海砂を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食性状に及ぼす各種要因の影響を詳細に検討するとともに、実際の自然環境下における暴露実験結果と比較することにより、この腐食促進試験結果の妥当性を確認し、海砂を使用した場合に生じる鉄筋の腐食量の推定を試みた。

2. オートクレーブ方法による腐食促進試験結果の検討

ここでは、海砂を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食性状に大きく影響を及ぼす要因として、海砂中の塩分量、かぶり厚、コンクリートの配合およびひびわれを取り上げ、検討を行なった。この結果は次のように要約される。

(1) 海砂中の塩分量と鉄筋の腐食量の関係

図-1は、オートクレーブ処理(180℃, 約9.8 atm.の条件下で8時間処理を行なうもの: 以下はすべて同一条件である)を1回行なった場合のコンクリート中の鉄筋の腐食量と海砂中の塩分量との関係を示したものである。この図より、海砂中の塩分量が0.02%以上となると鉄筋は腐食し、塩分量が増加するに従ってほぼ直線的に腐食量も増加する傾向にあることがわかる。

また、鉄筋の腐食量はオートクレーブ処理を繰返し行なうことによって急激に増加する傾向にあることも確かめられている。図-2は1回のオートクレーブ処理によって生じる鉄筋の腐食量に対する、2回および3回の処理の繰返しによって生じる腐食量の増加割合を示したものであるが、繰返し数が増加するに従って鉄筋の腐食量が指数関数的に増加することがわかる。なお、オートクレーブ処理を3回繰返して行なった場合には、塩分のまったく含まれていないコンクリート中においても鉄筋はわずかに腐食するが、これについては、コンクリート中のPHの低下を考慮する必要があるものと思われる。

以上の結果から、オートクレーブ方法によって得られた鉄筋の腐食量と海砂中の塩分量およびオートクレーブ処理回数との関係をでき

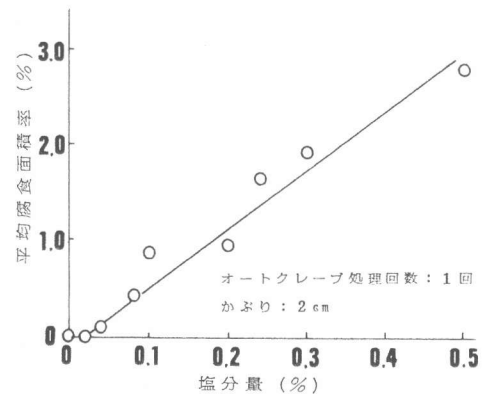


図-1. オートクレーブ方法によって得られた鉄筋の平均腐食面積率と塩分量の関係

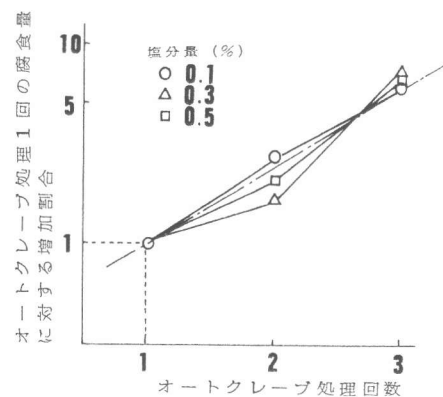


図-2. オートクレーブ処理の繰返しに伴う鉄筋の腐食面積率の増加割合

るだけ簡単に表わすと次のようになる。

$$C_A \propto 10^{0.4T \cdot (S - S_0)}$$

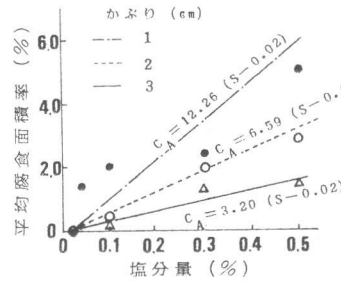
ここで、.....①

- C_A : 鉄筋の平均腐食面積率(%)
- T : オートクレーブ処理回数
- S : 海砂中の塩分量(%)
- S_0 : 腐食限界塩分量(%)

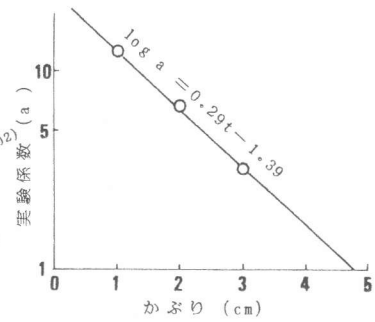
例えば $T=1$ の時: 0.02%

$T=2$ " : 0.01%

$T=3$ " : 0%



a) 鉄筋の腐食量と塩分量との関係におよぼすかぶり厚の影響



b) 直線近似によって得られた実験係数とかぶり厚の関係

図-3. オートクレーブ方法によって得られた鉄筋の平均腐食面積率とかぶり厚との関係式の推定

(2) かぶり厚と鉄筋の腐食量との関係

かぶり厚が増加するに従って鉄筋の腐食量は急激に減少する傾向にあることが確かめられた。図-3 (a)は、オートクレーブ処理1回の場合に得られた鉄筋の腐食量と塩分量の関係に及ぼすかぶり厚の影響について示したものである。この結果を①式に基づいて直線で近似し、この直線化によって得られた実験係数をかぶり厚との関係で示すと、両者の間には図-3 (b)に示す様な直線関係が得られた。この結果から、オートクレーブ方法によって得られた鉄筋の腐食量とかぶり厚との関係は、次のように推定される。

$$C_A \propto 10^{-0.29t} \dots \dots \dots \text{②} \quad (t: \text{コンクリートのかぶり厚 (cm)})$$

なお、図-3 (b)から、かぶり厚が4.8 cmを越えると鉄筋の腐食量は著しく小さくなると考えられ、この値が海砂を使用した鉄筋コンクリートのかぶり厚の設定にあたって一つの目安となるものと思われる。

(3) コンクリートの配合と鉄筋の腐食量との関係

鉄筋の腐食量は、コンクリートの水セメント比、セメント量あるいはワーカビリティによって影響を受けることが確かめられた。オートクレーブ方法によるこれらの影響についての検討結果では、次のことが明らかとなった。

i) 水セメント比が増加するに従ってほぼ直線的に腐食量も増加する傾向が認められた¹⁾。ただし、水セメント比が40%以下となると、かなり高い塩分量の場合でもある程度の腐食抑制効果を持つものと思われる。

ii) 図-4は、単位セメント量を変化させた場合の鉄筋の腐食量の変化について示したものであるが、この図より、同一の水セメント比であってもセメント量が増加するに従って鉄筋の腐食量は減少する傾向にあることがわかる。ただし、単位セメント量が350 Kg/m³程度以上となるとこのセメント量が鉄筋の腐食量に及ぼす影響は比較的小さくなる。

iii) ワーカビリティをスランブ値によって評価した場合、スランブ値が3~12 cm程度の範囲においては、腐食量に著しい差は認められなかったが、¹⁾ノースランブコンクリートあるいは極端にスランブ値の高いコンクリートでは、鉄筋の腐食量が増加する可能性は十分にあると思われる。

そこで、これらの影響をなるべく簡単な式によって表わすと、次の式が考えられる。

$$C_A \propto K \cdot 1/C \cdot (W/C - a) \dots \dots \dots \text{③}$$

ここで、 C : 単位セメント量 (Kg/m³)、 W/C : 水セメント比、 a : 定数、 K : ワーカビリティの影響を表わす数 (例えば、スランブ値3~12 cmの場合: 1)

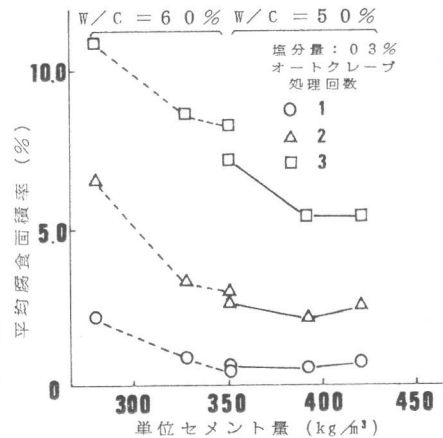


図-4. 鉄筋の平均腐食面積率に及ぼす単位セメント量の影響

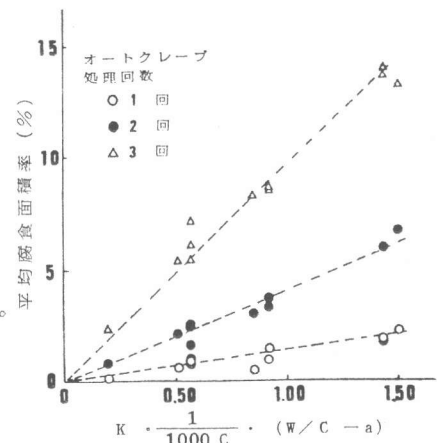


図-5. $K \cdot \frac{1}{C} \cdot (W/C - a)$ とオートクレーブ方法によって得られた鉄筋の平均腐食面積率との関係

なお、この式と腐食量の実測値との相関を調べるため、例えば $a=0.3$ として実験値と比較すると、図-5に示す様に、オートクレーブ処理の繰返し回数の如何にかかわらず良い相関関係が見られた。

(4) コンクリートのひびわれと鉄筋の腐食量の関係

かぶりコンクリートにスリットを設けモデルひびわれとし、オートクレーブ方法によってひびわれが鉄筋の腐食性状に及ぼす影響について検討を行なった。その結果、図-6に示すように、海砂中の塩分量が0.1%を越えると、コンクリートのひびわれがその近傍の鉄筋の局部腐食を増加させる大きな原因となることが明らかとなった。

また図-7は、海砂中の塩分量が0.3%の場合において、鉄筋の腐食量に及ぼすひびわれ幅の影響を示したものであるが、この図から、鉄筋の腐食量とひびわれ幅との間には次のような関係があることが明らかとなった。

- i) 一般に、鉄筋の腐食量が急激に増加する限界ひびわれ幅が存在する。
- ii) ただし、この限界ひびわれ幅はコンクリートの品質によって異なり特に水セメント比が増加するに従ってより小さな値となる。例えば水セメント比50%程度ではこの限界ひびわれ幅は0.1mm程度であるのに対して、水セメント比70%では0.04mm以下となる。

3. 屋外暴露実験結果

海砂を使用したコンクリート中の鉄筋の自然環境下における腐食性状を把握し、さらにはオートクレーブ方法によって得られた鉄筋の腐食性状の妥当性を確認するため、現在、屋外暴露実験を実施している。

暴露場所は千葉市郊外の住宅区域の一角の草地であり、この環境は海岸から離れており、外部環境からコンクリート中へ塩分が侵入することはほとんど考えられない。暴露供試体は、図-8に示すような梁供試体および円柱供試体で、梁供試体には最大ひびわれ幅が0.2mm程度となる様にひびわれを導入した。コンクリートの配合は、水セメント比を60%とし、砂重量に対してNaCl換算で0.3%の塩分を混入した。

以下に暴露期間1年半までの結果について示す。

- i) フェノールフタレイン溶液の噴霧によってコンクリートの中性を調べた結果によると、暴露期間1年半において平均中性化深さは2mm程度であった。このため、塩分を含まないコンクリート中の鉄筋には、いずれの場合にも全く腐食の発生は認められなかった。
- ii) これに対して、コンクリート中に塩分が含まれている場合には、鉄筋に明らかな腐食発生箇所が認められた。図-9は、円柱供試体における鉄筋の腐食量とかぶり厚の関係を示したものである。鉄筋の腐食は、特に鉄筋露出部の影響を受けないと考えられる部分(図中の10cm区間)においては、フツ部あるいはリブ部のつけ根付近に孔食状に点在しており、またこれまでのところ腐食量はあまり多くないものの、かぶり厚の増加にともなって明らかに鉄筋の腐食量は減少する傾向にあった。
- iii) 梁供試体においては、ひびわれの無い健全なコンクリート部に

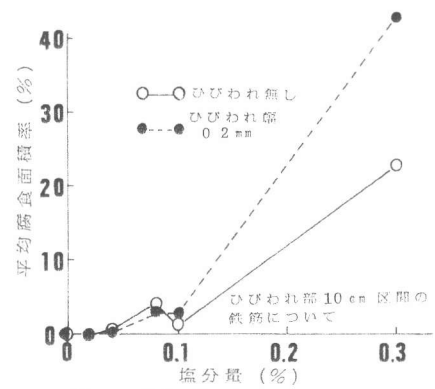


図-6. 鉄筋の平均腐食面積率と塩分量との関係に及ぼすひびわれの影響

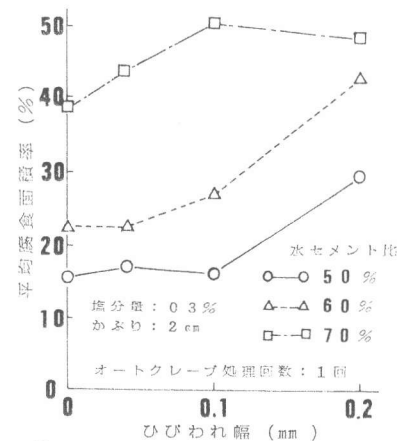


図-7. オートクレーブ方法によって得られたひびわれ部の鉄筋の腐食量とひびわれ幅の関係

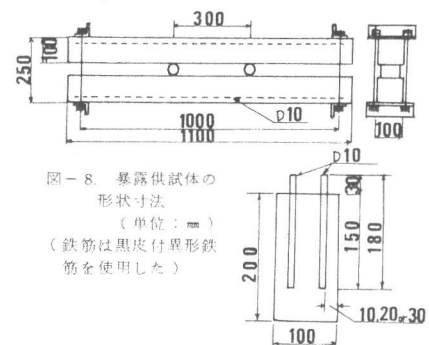


図-8. 暴露供試体の形状寸法 (単位: mm) (鉄筋は黒皮付異形鉄筋を使用した)

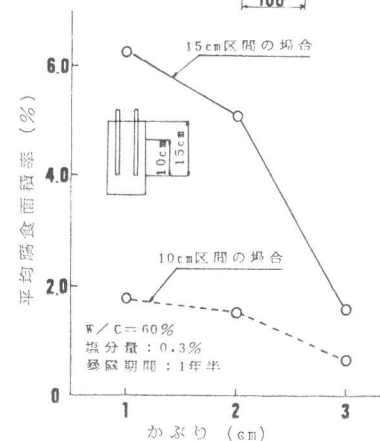


図-9. 暴露実験によって得られた鉄筋の腐食量とこれに及ぼすかぶり厚の影響

て孔食状の腐食が点在する一方、ひびわれ部においては腐食の集中する箇所が幾つか見うけられた。図-10は、この梁供試体のひびわれ部近傍の鉄筋の腐食量とひびわれ幅との関係を示したものである。末だ腐食箇所も少なく十分な傾向を得るまでには到らなかったが、この結果から、ひびわれ幅が0.05~0.1mm程度となる付近から鉄筋全体の腐食割合に比べてひびわれ部の腐食割合は増加する傾向にあり、このことは、オートクレーブ方法による試験結果とほぼ一致するようである。

4. オートクレーブ方法による鉄筋腐食量の推定および暴露実験結果との比較

オートクレーブ方法を用いた腐食促進試験結果から海砂を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食量を推定するため、①~③式を参考として次のような実験式を導いた。

$$C_A = K \cdot \frac{2000}{C} \cdot (W/C - 0.3) \cdot 10^{(0.4T - 0.3t)} \cdot (S - S_0) \quad \text{④}$$

なお、この式で得られた計算値をオートクレーブ方法によって得られた実験値と比較すると、図-11に示す様に両者は良く一致していることがわかる。

そこでこの実験式に暴露実験の実験条件をあてはめ、図-9で示した暴露実験結果あるいは大島らが行なった暴露実験結果^{2),3)}との実験式による計算値とを比較して、これを図-12に示した。この図から、オートクレーブ処理1回で得られる鉄筋の腐食量が、自然環境下における1年半から2年程度の鉄筋の腐食量とよい対応を示すことが明らかとなった。また、オートクレーブ処理を2回繰返した場合には、自然環境下に6年程度さらされた場合の鉄筋の腐食量を再現するようである。

すなわちこれらの結果は、オートクレーブ方法によって、自然環境下で生じるコンクリート中の鉄筋の塩分腐食を評価することが十分に可能であることを示すとともに、上述した様な、海砂を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食量の推定結果が十分に妥当性のあることを示すものである。

5. 結 論

本研究において、オートクレーブ方法によって得られた腐食促進試験結果と自然環境下における暴露実験結果との間にはすぐれた相関の存在することが確認され、この腐食促進試験結果に基づいて、例えば海砂を使用したような場合に生じるコンクリート中の鉄筋の腐食性状をある程度推定することが可能となった。

<参考文献>

- 1) 武若, 小林, 「オートクレーブによるコンクリート中の鋼材の腐食促進試験」, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1981.
- 2) 大島, 「海砂使用に関する最近の問題点」, セメント・コンクリート 372, 1978.
- 3) 大島, 池永, 「鉄筋コンクリートにおける海砂利用に関する研究」その1~その4, 日本建築学会大会学術講演叢書集, 1973, 1974, 1977, 1978.

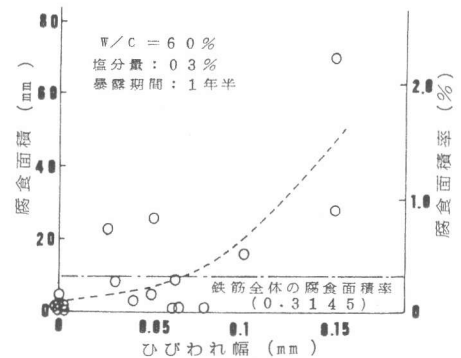


図-10. 暴露梁供試体中の鉄筋の腐食量とひびわれ幅の関係

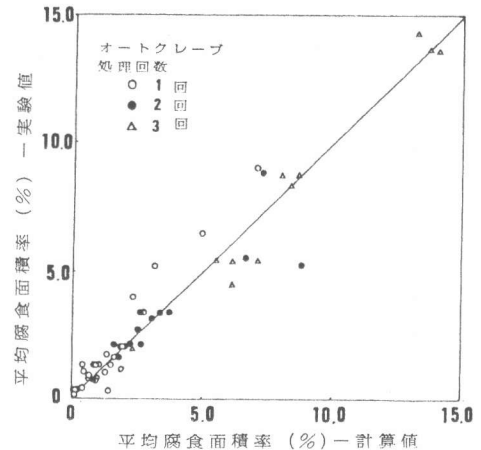


図-11. オートクレーブ方法によって得られる鉄筋の平均腐食面積率の推定値と実験値の比較

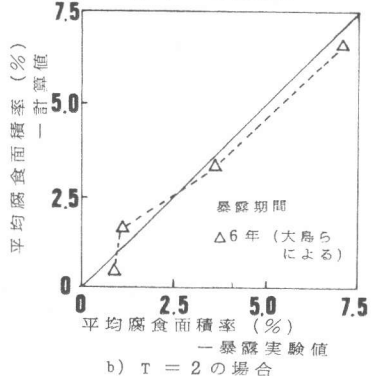
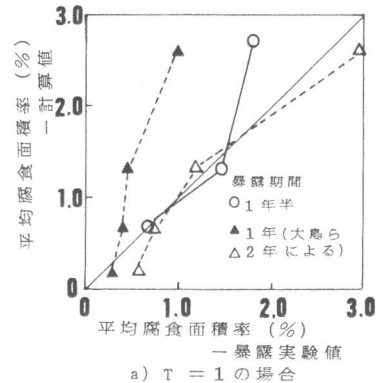


図-12. オートクレーブ方法によって得られる鉄筋の腐食量と暴露実験によって得られる値との比較