

論文 コンクリートのひび割れが中性化速度に及ぼす影響

伊代田岳史^{*1}・矢島哲司^{*2}・魚本健人^{*3}

要旨: コンクリート構造物の劣化原因の一つであるコンクリートの中性化において、実構造物で問題となるのはコンクリート表面にひび割れが存在する場合である。そこで本研究ではひび割れの存在するコンクリートの中性化についてひび割れの影響性を検討した。実験においては、曲げ用試験体にひび割れを生じさせて促進中性化試験を行い、材齢ごとに中性化深さを測定したところ、ひび割れが中性化速度に影響しないことが分かった。また、炭酸ガス拡散解析を行いひび割れが中性化にあまり影響しないことを解析的に証明した。

キーワード: 中性化, 中性化進行速度, ひび割れ, 炭酸ガス拡散解析

1. はじめに

コンクリート構造物の早期劣化の原因は数多く指摘されている。その中の一つにコンクリートの中性化が挙げられ、現在までに化学的な研究とコンクリートの技術的研究において数多くの研究結果が報告されている^{例えは¹⁾}。鉄筋コンクリート構造物において、コンクリートの内部がアルカリで満たされているときには鉄筋の周りに不動態皮膜が形成され、鉄筋が腐食することはないが、大気中の炭酸ガスがコンクリート中に拡散すると中性化されて鉄筋が腐食することが知られている²⁾。

これまで中性化速度に及ぼす材料および配合の要因である水セメント比, セメントや骨材の種類, 混和材(剤)の種類とその添加量, 養生条件および締め固めなどの影響等についてはかなり明らかにされてきた。これらの要因を含んだ中性化速度式は多くの人によって提案されているが、一般的には式(1)に示すように中性化深さ(X)は経過時間の平方根に比例するという式で表される。

$$X = A\sqrt{t} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 X は中性化深さ、 t は経過時間、 A は中性化速度係数を示す。

式(1)は通常、 \sqrt{t} 則と呼ばれており、式中の A の値は先で述べた中性化速度に及ぼす各種要因について実験的に求められた係数である。例えばここによく用いられている高田・魚本式を示す³⁾。

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) \times e^{(8.748 - 2563/T)} \times (2.94WC - 101.2) \times 10^{-2} \times \sqrt{Ct} \dots(2)$$

- ここに、 X : 中性化深さ (mm)
- C : 炭酸ガス濃度 (%)
- WC : 水セメント比 (%)
- T : 絶対温度 (T)
- t : 経過時間 (週)

この式においても A 値は各種要因を考慮していることが分かる。

実際の構造物を考えた場合、コンクリートの表面には乾燥収縮, 温度応力, アルカリ骨材反応などの様々な原因によってひび割れが発生する。ひび割れが存在するとそれだけ中性化は速く進行し、早い段階で鉄筋が腐食すると考えられる。このひび割れの影響による中性化の進行を知ることは、コンクリート構造物の耐久性を把握する上で極めて重要なことである。そこで本研究はひび割れの存在する場合の促進中性化試験を行い、ひび割れの中性化速度に及ぼす影響について検討した。

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
 *2 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)
 *3 東京大学生産技術研究所教授 工博(正会員)

2. 実験概要

水セメント比が 50%と 70%の二種類のコンクリートを用いて曲げ用試験体 (10×10×40cm) を作製し、コンクリートのひび割れを曲げ荷重により制御するためにコンクリート供試体の内部に D13 の鉄筋を埋め込んだ。埋め込んだ鉄筋はその位置を供試体の深さ方向に対して上・中・下の三カ所に配置し、曲げ荷重におけるひび割れの発生を制御した。材齢 5 日までは初期養生期間として水中養生し、供試体にひび割れを発生させるために曲げ荷重をかけた。発生した底面のひび割れを等間隔の 10 点で測定してその平均値をひび割れ幅とした。ひび割れ幅により水セメント比 50%の供試体は大, 中, 小, 無の 4 種類に, 70%の供試体は極大, 極小を合わせて 6 種類に分類した。ひび割れを発生させた後, ひび割れ部からの中性化の進行を見るためにひび割れ部を有する底面を除く 5 面をエポキシ系樹脂接着剤でシールし, 炭酸ガスが供給されない状態として促進中性化試験を行った。促進中性化試験は既往の研究³⁾により温度 40°C, 湿度 55%, 炭酸ガス濃度 10%の環境でそれぞれ促進養生期間 1 週, 2 週, 3 週, 4 週として行った。所定の材齢を経過した供試体を割裂し断面を露出させ, その断面にフェノールフタレイン 1%溶液を吹付け, 非発色面を中性化部として中性化深さをノギスで測定した。図-1 に測定の概要を示す。なお中性化深さの測定は, 健全部においては割裂面の一方方向に対して 20 点測定してその平均値を中性化深さ (X) とし, またひび割れ部の中性化深さ (X_c) も測定している。

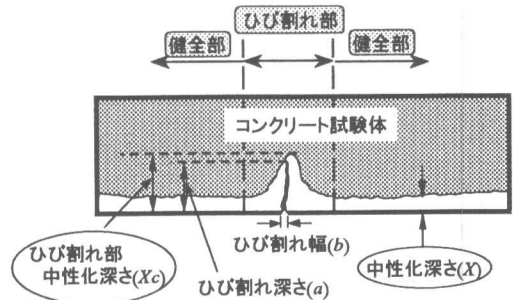


図-1 中性化深さとひび割れの定義

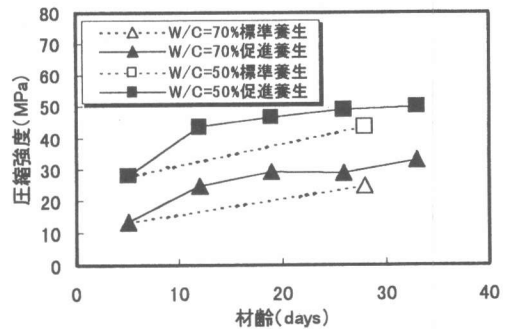


図-2 圧縮強度の経時変化

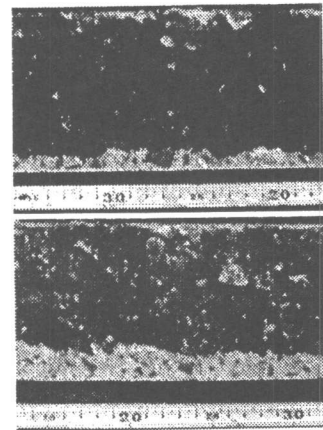


写真-1 中性化試験結果 W/C=70% (上: 促進養生期間1week, 下: 促進養生期間4weeks)

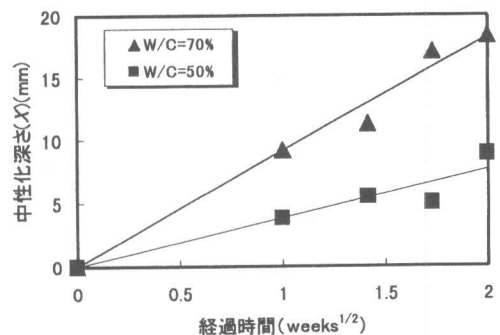


図-3 中性化深さの経時変化

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリートの圧縮強度

図-2 に水セメント比の違いによる圧縮強度の経時変化を示す。炭酸ガス濃度 10%で促進養生したコンクリートの強度は標準養生強度と比較して明らかに強度増加が認められた。これは中性化によってコンクリートの細孔構造が緻密になったためと考えられる。

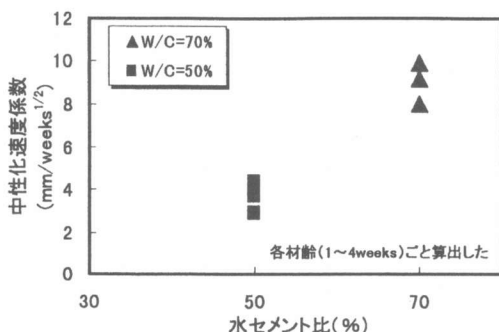


図-4 水セメント比と中性化速度係数

3.2 材齢と中性化深さの関係

写真-1 に W/C=70%の養生材齢 1 週と 4 週のひび割れの存在しないコンクリート供試体の中性化深さ(X)の状況を、図-3 に中性化深さ(X)の経時変化を示す。式(1)にも示した通り、一般に中性化深さ(X)は経過時間の平方根に比例するとされている。本実験で行った中性化試験も水セメント比によらずほぼ経過時間の平方根に比例していることが分かる。

また図-4 に水セメント比による中性化速度係数の関係を示す。W/C=50%に比較して 70%の方が中性化速度係数が大きいことは明らかであり、70%の方が中性化しやすいことが分かる。

3.3 ひび割れ部の中性化深さ

ひび割れの存在するコンクリートの中性化の様子を写真-2,3 に、健全部の中性化深さ(X)とひび割れの存在しないコンクリートの中性化深さ(X)との比較を図-5 に示す。W/C=50,70%ともに、ひび割れの存在している供試体の健全部における中性化深さは、ひび割れのない供試体の中性化深さとほぼ同じであり、健全部においてはひび割れの影響を受けないことが分かる。表面ひび割れ幅(b)に対する中性化深さ(X₀)の関係を図-6 に示す。表面のひび割れ幅(b)が増加するほど中性化深さ(X₀)は増加する傾向にあることが分かる。曲げ荷重によって発生させているひび割れは、同じものとならないためにひび割れ幅(b)に対する検討をしにくい。ため、実験値を近似することでひび割れ幅(b)に対する中性化深さ(X₀)の経時変化を算出した。近似は各週ごとにひび割れ幅(b)と中

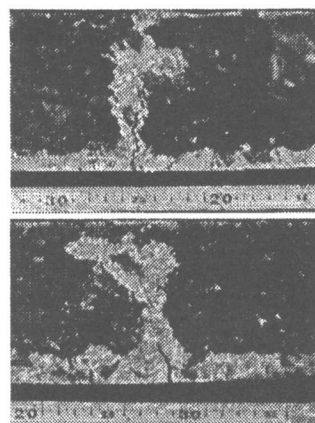


写真-2 ひび割れ部の中性化試験結果
W/C=70% ひび割れ幅極大
(上:促進養生期間1week, 下:促進養生期間4weeks)

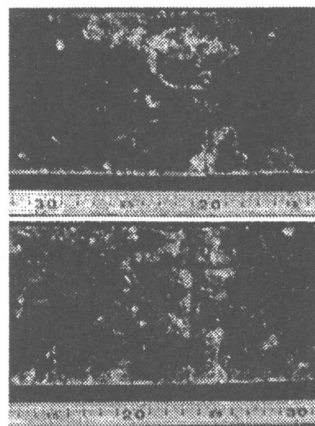


写真-3 ひび割れ部の中性化試験結果
W/C=50% ひび割れ幅大
(上:促進養生期間1week, 下:促進養生期間4weeks)

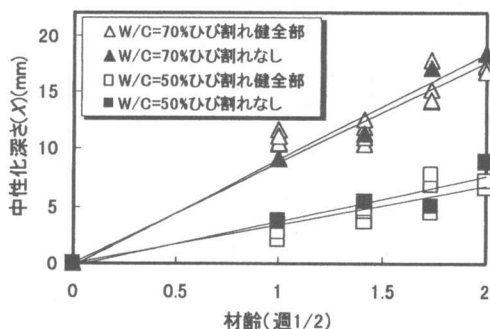


図-5 ひび割れ有無による中性化深さ

性化深さ(X₀)を log で近似し、あるひび割れ幅(b)に対する中性化深さ(X₀)を求めた。その例として W/C=70%の関係を図-7 に示す。表面ひび割れ幅(b)が大きいほど早い時期に中性化深さ(X₀)が大き

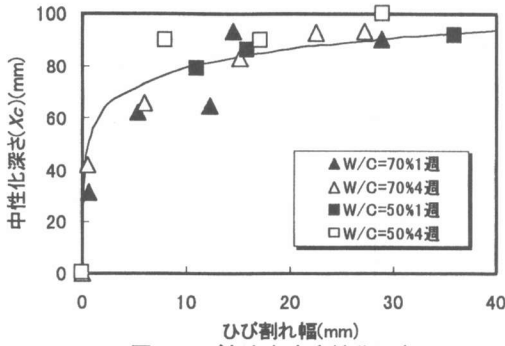


図-6 ひび割れ幅と中性化深さ

くなっており、その後は中性化の進行は落ち着く傾向にあるように見られる。しかしこの図では中性化深さの進行速度がわかりにくいので中性化進行速度を考えてみる。そこで、促進養生期間一週後の中性化深さ(X_c)に対するそれぞれの材齢における中性化の深さ割合を図-8に示す。ひび割れがない供試体においては、中性化深さ(X_c)の割合は材齢とともに増加しており中性化速度も速いことが見て取れる。一方、ひび割れがある供試体においては、中性化深さ割合が横這いとなっていることから、ひび割れ部の中性化の進行は健全部と比較すると遅いといえる。このことからひび割れがコンクリートに存在し、その大きさが大きいと初期材齢においては中性化深さ(X_c)が大きくなるが、健全部の方が中性化速度が速いために長期材齢においては中性化深さ(X_c)はほぼ一緒になってしまうと考えられる。つまりコンクリートにひび割れが存在していても長期的に考えると中性化にはあまり影響しないと考えられる。鉄筋コンクリートを考えた場合、ひび割れが鉄筋に到達していなければ鋼材の腐食に対するひび割れの影響は少ないと考えられる。

4. 二次元炭酸ガス拡散解析

4.1 解析手法とモデル

本解析においては、一般的に拡散で用いられるフィックの第二法則である次式の拡散方程式を用い、有限要素法により解析した。^{4), 5), 6)}

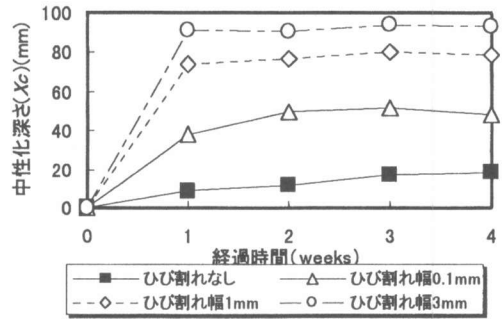


図-7 ひび割れ幅による中性化深さ経時変化 (W/C=70%)

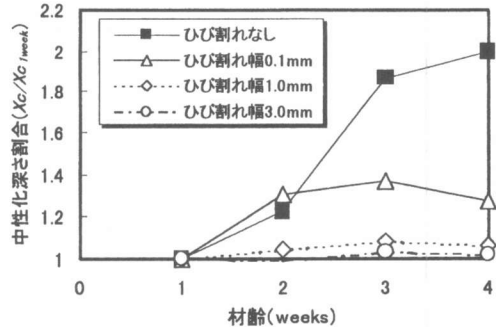


図-8 ひび割れ幅による中性化深さ割合

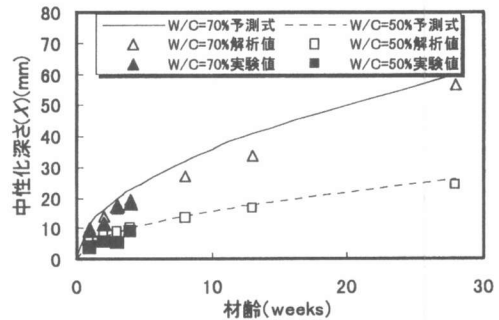


図-9 中性化深さ(予測値,解析値,実験値)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \kappa_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \kappa_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 u :濃度、 κ :拡散係数式

(3)の拡散方程式を差分法の一つであるクランク・ニコルソン法を用いて、格子の炭酸ガス濃度を解析により算出した。100mm×100mmのコンクリート供試体を想定し、それぞれを12分割して解析のモデルとした。ある一辺から炭酸ガスが浸透して拡散するとして、その部分の炭酸ガス濃度を10%とした。他の三辺においてはシー

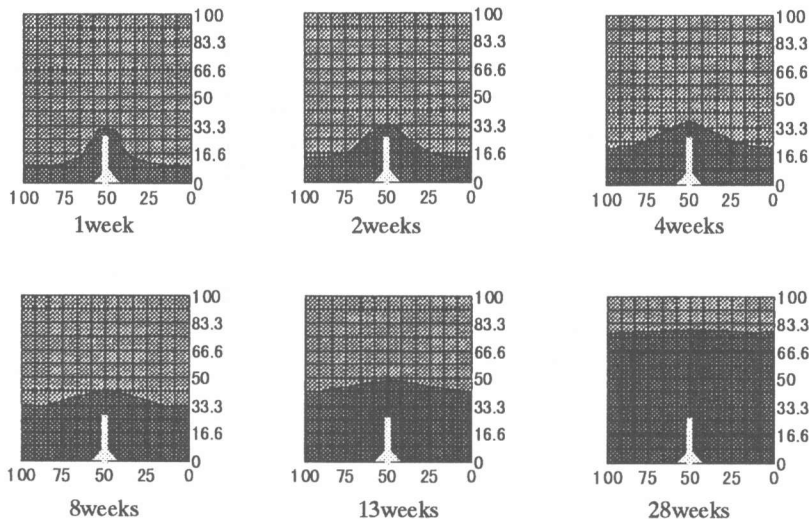


図-10 ひび割れ深さ3マスにおける解析結果

ルしてあるため炭酸ガス濃度は 0%とした。ひび割れ部分にも外気と同様の 10%濃度の炭酸ガスを想定した。また格子の炭酸ガス濃度に 5%になったときに中性化すると仮定した。実験におけるひび割れの存在しないコンクリート供試体の中性化深さ(X)と前述した高田・魚本式との比較を図-9に示す。予測式は実験値をよく近似していたことから高田・魚本式を基準に解析に用いる見かけの拡散係数を算出することとした。ここで長期材齢におけるひび割れの影響を解析的に把握するために、予測式から算出される中性化深さ(X)と解析から求まる中性化深さ(X)を一致させた結果、見かけの拡散係数は $W/C=70\%$ で $100\text{mm}^2/\text{sec}$, 50% で $25\text{mm}^2/\text{sec}$ となった。次節においてこの見かけの拡散係数を用いて長期材齢におけるひび割れの影響を解析的に検討する。

4.2 ひび割れを有するコンクリートの検討

同一環境下の促進試験器内において、ひび割れ部は外界と同じ濃度の炭酸ガスからのアタックを受けると考えられる。そこでひび割れの存在する部分での炭酸ガス濃度を外界と同じ 10%とし、深さ方向にある格子に初期条件として炭酸ガス濃度を 10%として解析を行った。これをひび割れ深さ(a)と考える。図-10 に $W/C=70\%$, ひび割れ

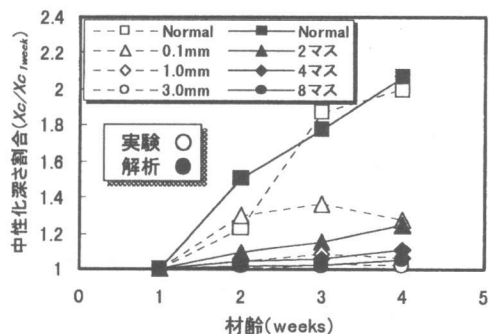


図-11 ひび割れ幅・深さ別の中性化深さ割合

深さ(a)が 3 マス (実際の試験体に換算すると 25mm) の解析結果を示す。この図から明らかに促進養生 1 週目にはひび割れの深さのところまでは中性化するが、その後 2 週, 4 週と経過すると、ひび割れ先端部からの中性化深さの進行は健全部と比較して少ないことが分かる。また、長期材齢の 13 週, 28 週を見ると健全部との差がほとんどなくなってくるが見取れる。このことからひび割れが中性化の進行に影響が少ないことが考えられる。このことを 3 章の実験結果で述べたのと同様に中性化深さ割合を使いひび割れ深さ(a)との関係を図-8 に示した実験値とともに図-11 に示す (実験: 白抜き, 解析: 黒)。解析においても実験と同様に、中性化深さの増加の割合はひび

割れの存在しない健全部の方がひび割れ部よりも大きいことが明らかである。

4.3 解析から見る中性化深さ

図-12 に本解析により算出した材齢 28 週のひび割れのないコンクリートと深さ約 25mm のひび割れを有するコンクリートの中性化深さを示す。ひび割れを有しているコンクリートと健全部の中性化深さ(X)にはほとんど差がないといえる。しかし全体的に中性化の領域はひび割れを有しているコンクリートの方が遙かに大きい。つまりひび割れが中性化に及ぼす影響が大きいことになる。しかし、実験では今回長期の材齢に関しては測定できなかったが、ひび割れの中性化深さ増加率に及ぼす影響が小さいことは 4 週までの実験で明らかとなった。本研究で用いた解析における問題として一定の見かけの拡散係数と初期条件としての炭酸ガス濃度を与えて計算していることが挙げられる。中性化には多くの要因が考えられ、その一つとしてコンクリート内部の拡散係数が時間と共に変動することが挙げられる。これはコンクリートの中性化がある程度進むと、細孔構造が緻密化し、物質の移動・拡散が起こりにくくなることがあるためである。このため見かけの拡散係数が時間と共に変動していく可能性があると考えられる。今後、この点を考慮して解析する必要がある。

5. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

(1)コンクリートにひび割れが存在している場合、ひび割れ部での初期段階の中性化深さは大きい但其後は中性化の進行が遅くなる傾向が見られる。

(2)ひび割れが存在しない健全なコンクリートにおいても中性化は進行し、ひび割れ部よりも速度としては早く進行する傾向にある。

(3)中性化の進行速度を考える場合にはひび割れの影響はほとんど見られない。

(4)二次元炭酸ガス拡散解析によるひび割れの影響を評価するためには、中性化によるコンクリ

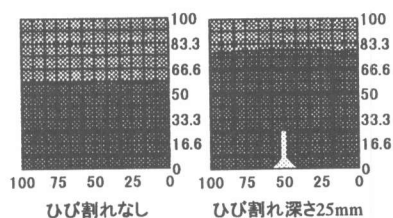


図-12 解析によるひび割れの影響

ートの緻密化を考慮する必要がある。

今後は、本解析によるひび割れの影響を明らかにするとともに長期材齢における実験的裏付けをし、ひび割れ幅(b)と中性化深さ(X_c)との関係を明らかにしていくことが必要である。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、元千葉工業大学卒論生西光政君に多大なご助力を頂きました。また東大生研の加藤佳孝助手、建設技術研究所木下勝也氏、元東大大学院山口明伸氏、出口知史氏には多大なご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)小林一輔：招待論文 コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集 No.433/V-15, pp.1-14, 1991.8
- 2)小林一輔著：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，森北出版
- 3)魚本健人，高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集 No.451/V-17, pp.119-128, 1992.8
- 4)戸川隼人著：有限要素法へのガイド，サイエンス社
- 5)矢川元基，宮崎則幸共著：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社
- 6)川原睦人著：有限要素法による流体解析，日化技連出版