塗膜防水層下のコンクリートひび割れ部分の炭酸化

CARBONATION OF CRACKED ZONE IN CONCRETE COATED BY WATERPROOFING MEMBRANE

塚越雅幸*¹, 宮内博之*², 田中享二*³

Masayuki TSUKAGOSHI, Hiroyuki MIYAUCHI and Kyoji TANAKA

The purpose of this elaboration is to investigate the carbonation resistance of waterproofing membranes applied to the concrete surface, particularly the cracked zone of the underlying concrete. The considered parameters were, the width of the crack in the concrete, the presence or absence of the waterproofing membrane, and the membrane thickness. Mortar prisms shaped specimens were coated by two types of the fluid waterproofing membrane. The prisms were cracked by bending and then exposed to an accelerated carbonation environment with an atmosphere of 10% carbon dioxide. After 1 year of exposure in this environment, the depth of carbonation was measured. Carbonation areas were observed along the cracks of the specimens with thin coatings along the wide cracks. Furthermore, a numerical simulation method was developed on the basis of diffusion theory and the carbonation at the cracked area of the concrete was simulated.

Keywords : *Waterproofing membrane, Concrete, Crack, Carbonation, Durability*

防水層、コンクリート、ひび割れ、炭酸化、耐久性

1. はじめに

コンクリートの炭酸化抑制には、仕上げ塗材や防水材料の塗布も有効であり、最近多く利用されるようになってきている。元来コンクリートは、それ自身である程度の耐久性をもつ材料ではあるが、近年、建築物への長寿命化が求められていることから、それに対する一つの手段としてこれら塗膜系材料の炭酸ガスの遮断性能が下地コンクリートの炭酸化防止に対し期待されている。そして、実際これらの材料の炭酸化抑止効果に関するデータも多く紹介されている。

しかし、鉄筋コンクリート建物では、ひび割れの発生を完全に抑制する事は難しいとされている。従ってひび割れ部分でも炭酸化抑制効果が保証されなければ、真の意味でこれら材料が有効であることにはならない。これら材料はコンクリートひび割れ直上で引っ張られると、局部的に皮膜が薄くなり、炭酸ガスの遮断性能の低下が懸念されるからである。現在はその点についての注意がほとんど払われていない。この材料の有効性を示すためには、ひび割れ部分での炭酸化抑制効果のデータの提示が不可欠である。

一般に塗膜系材料の、下地コンクリートのひび割れ抵抗性はその厚さにほぼ比例する。従って厚いものがより安全である。そのため本研究ではまず、塗膜系材料の中で比較的厚塗りの期待される塗膜

系防水層を対象として、ひび割れの発生したコンクリートに対し、どの程度の炭酸化抑止効果が期待されるのかを検討した。

2. 既往の研究

従来からコンクリートでは、ひび割れに沿って炭酸化が内部まで進行することは良く知られており、研究例¹⁻³⁾も多い。一方各種有機質系仕上げ材料のコンクリート炭酸化抑止効果についても研究がなされるようになっており、多種類の市販の材料について、その効果も報告されている⁴⁻⁶⁾。合わせて理論面での研究も進み、福島等⁷⁻⁸⁾は、数値計算により仕上げ材の効果を定量的に評価している。しかし、これらはすべてひび割れのないコンクリートの健全部分に対してのみの研究であり、実際の使用上で問題となるひび割れ部分での炭酸化抑止効果については、筆者等の知る範囲ではほとんど検討されていない。

3. 防水層の炭酸化抑制性能におよぼす塗膜厚さと下地ひび割れ幅の影響に関する実験

3.1 試験体

(1) 下地

試験体について、下地のひび割れ部を対象として観察を行うこと

*¹ 東京工業大学 大学院生・工修

*² 東京工業大学建築物理研究センター 助手・博士(工学)

*³ 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Res. Assoc., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

を目的としていること、また、ひび割れ部における炭酸化の観察のしやすさを考慮して、コンクリートの代用として、10cm×10cm×40cm のモルタル角柱を用いた。この調合表を表1に示す。これを曲げ試験により試験体にひび割れを生じさせなければならないが、ひび割れ幅の制御を確実にするために、その点に工夫を加えた試験体を作成した。すなわち図1に示すように、ひび割れを生じさせようとする試験体の上方に、ビニルチューブの中に入れた鉄筋とモルタルとの付着を防止した4mmφのねじ付き鉄筋を2本配した。この鉄筋の両端をナットの回転によりひび割れ幅を制御できるようにした。試験体下方は過度のひび割れ進展防止と試験体破損防止のために、6mmφの異型鉄筋を2本設置した。なお試験体は打ち込み後、3ヶ月間水中養生し、十分に水和反応させた後、さらに実験室内で2ヶ月間乾燥させた。

(2) 防水層部分

試料として用いた塗膜系防水層は、表2に示す通常の防水工事に用いられる市販のウレタンゴム系塗膜防水層とアクリルゴム系防水層を用いた。ひび割れ抵抗性は塗膜厚さとも密接に関係するため、0.3mm、0.5mm、1mm、3mm（但しアクリルゴム系塗膜防水層は標準仕様に合わせて、厚さ3mmを2mmとした）の4段階とした。なお、一般の防水工事においては表面保護層としてトップコートが施工される。そのため、表面にトップコートを約0.1mm(200g/m²)の厚さで施工した。

防水層の施工については、各仕様に基き室温環境下で塗布した。その後、防水層を十分硬化させるため、実験室内で1ヶ月間養生した。なお、次の作業におけるひび割れの作成過程で、ひび割れ幅の制御のために防水層施工面でのひび割れ幅を直接測定する必要がある。その際モルタル表面を一部露出させる必要があるため、防水層を両端部から幅10mm程度ビニルテープでマスキングをした。

(3) ひび割れの作成

油圧式圧縮試験機を利用して、3点曲げにより防水層裏面の下地モルタルにひび割れを生じさせた。加力直前に、ビニルテープで下地から絶縁していた防水層部分を除去し、モルタル面を露出させた。また、加力時にクラックスケールでひび割れ幅を測定しながら行った。所定のひび割れ幅になった時点で、各種厚さのステンレスのスペーサーをひび割れ内に挿入し、ねじの付いた鉄筋を固定用ナットで締めることで、ひび割れ幅を保持した。

ひび割れ幅は0.5mm、1mm、3mmの3段階とした。なお、ここで作製したひび割れ深さは、ひび割れ幅0.5mmの場合85mm、1mmの場合90mm、3mmの場合95mm程度となった。ひび割れ幅を固定した後、ひび割れ面を再度テープによりマスキングし、さらに防水層面以外の面をエポキシ樹脂でコーティングし、外気との接触を完全に遮断した。これら試験体作成の一連の過程を図2に示す。表3にこのような組み合わせで用意された全試験体の種類を示す。

3.2 促進中性化試験(促進炭酸化試験)と炭酸化領域の測定

エポキシ樹脂の硬化後、試験体を直ちに試験槽(CO₂濃度10±0.5%、温度20±2℃、湿度60±10%RH.)に暴露した。暴露期間は1年間とした。所定の時間経過後、後の作業における試験体破損防止のため、まずマスキング部分のエポキシコーティングを除去し、ひび割れ部分を露出させた。そこからエポキシ樹脂をひび割れ内部に注入し、ひび割れ部分を固定した。エポキシ樹脂硬化後、試験体を

表1 モルタル調合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)			空気量 (%)	フロー (cm)
	水*1	セメント*2	細骨材*3		
60	278	463	1389	1.0	17

*1:水道水、*2:普通ポルトランドセメント(3.16g/cm³)
*3:静岡県沢岡産砂(密度2.62g/cm³、吸水率1.27%)

図1 下地として用いたモルタル試験体

表2 試料として用いた塗膜防水層の種類

防水層の種類	100%モジュラス (N/mm ²)	破断時強度 (N/mm ²)	破断時伸び率 (%)
ウレタンゴム系塗膜防水層	1.5	2.6	650
アクリルゴム系塗膜防水層	2.0	2.5	300

図2 試験体の作成手順

表3 試験体の種類

試験体の種類		ひび割れ幅(mm)		
		0.5	1	3
塗膜なし		○	○	○
ウレタンゴムもしくは、アクリルゴムの塗膜厚さ(mm)	0.3	○	○	○
	0.5	○	○	○
	1	○	○	○
	3 or 2*	○	○	○

○:試験を実施、試験体数は各2体

*ウレタンゴムの塗膜厚さ:3mm、アクリルゴムの塗膜厚さ:2mm

長手方向にコンクリートカッターで途中まで切り込みを入れ、最後は割裂により内部断面を露出させた。その後、破断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、炭酸化の状況を調べた。

3.3 試験結果

ひび割れ部分の炭酸化状況の一例を写真1に示す。またこれをより明瞭にするために、2値化画像処理をして下側に示す。これは、ひび割れ幅3mmに対して、防水層が無い場合と、厚さ1mmのウレタンゴム系塗膜防水層を施工したものの例である。防水層が施工され

写真1 ひび割れ部の炭酸化進行状況例

ていない場合は、従来から指摘されているように、ひび割れに沿ってその先端近くまでV字形状で炭酸化が進行している。またひび割れ等のない表層部分も、表面から炭酸化が20mm程度進行している。

一方、防水層を塗布したものでは、ひび割れのない領域は全く炭酸化していない。しかし、ひび割れ部分においては、深さ15mm程度まで炭酸化の進行が確認された。すなわち塗膜防水層を施工したとしても、ひび割れ部分の炭酸化抑止効果は割り引いて評価しなければならないことを示唆するものである。

上記方法によりすべての試験体について、炭酸化進行状況を調べた結果を図3に示す。なお試験結果は2体の平均値で表している。

(1) ひび割れ幅の影響

防水層を施工していない試験体では、ひび割れ幅が小さい場合でも炭酸化がひび割れ先端まで到達している。しかし、防水層が施工されると炭酸化領域は急激に減少するが、ひび割れ幅が大きい場合はひび割れに沿ってわずかではあるが内部まで炭酸化が見られる。これは防水層がひび割れ直上で引っ張られ、厚さが薄くなるためCO₂の遮断性が低下するためと推定される。

(2) 塗膜厚さの影響

防水層の厚さの影響も顕著であり、膜厚さの薄い場合にはひび割れに沿って炭酸化が進行している。一方、ウレタンゴム系塗膜防水層の厚さ3.0mm、アクリル系防水層の厚さ2.0mmの場合においては、炭酸化は見られなかった。

(3) 防水材料による影響

今回用いた防水材料間には、大きな差は見られなかった。ただ、

図3 促進中性化試験(期間:1年間)による中性化深さ

防水層自身のひび割れ抵抗性には多少差があった。ウレタンゴム系防水層の方が破断しやすい材料であった。防水層が破断した場合は、炭酸化に対して全く無防備となり、CO₂がひび割れ内部にまで入り込み、炭酸化領域が急速に拡大する結果となった。

4. 下地ひび割れ直上部の防水層の炭酸ガス透過性

ひび割れ直上では防水層皮膜が引き伸ばされて薄くなるため、炭酸ガスが透過しやすくなり、炭酸化が加速されると推定される。そのため、防水層皮膜が伸長させられた場合に、どの程度炭酸ガス透過性が変化するかを調べた。

4.1 防水層の伸長方法

(1) 下地ひび割れによる防水層の伸長

防水層が下地ひび割れにより引き伸ばされる時、写真2のようにくびれながら変形する。そのためひび割れ直上の防水層内部の伸長状態は均一ではない。またその伸長率の直接測定も難しい。そして、その中央部分では、くびれのため厚さは最も薄くなり、その部分で炭酸ガス透過性が最も高くなると推定される。ここでは、この最も

薄くなる部分の透過性を測定する試験方法を工夫した。

まずひび割れ部分の幅と、防水層のくびれ中央部分の厚さとの関係を調べた。試験は先の項にて、炭酸化試験に用いた試験体にひび割れを生じさせた時、側面より防水層の厚さの変化を測定した。測定結果を図4に示す。当然のことながら、ひび割れ幅が拡大するに従ってその部分の厚さは減少する。

(2) 最も薄い部分と等価となる二軸伸長状態

実際のひび割れ直上の防水層は、ひび割れに直交する方向にのみに変形しており、ひび割れに平行な方向の変形が拘束されている。いわば、2軸引張状態にある。そこで、薄くなった厚さと等価となる伸びをシート状試験片に与える方法として、二軸伸長試験を採用した。そのため、写真3に示すような防水層試験片の両端をスライド可能なクリップで固定し、横方向の変形を拘束し、縦方向に伸長・固定させるような治具を製作した。なお実際の作業では、応力集中による破断防止のため、クリップで試験片を挟みこむ部分には補強が必要であり、端部が一般部分より厚いリブ付き断面のシート状試験片を作成した。なお試験片厚さは、前項までの試験と同様にウレタンゴム系塗膜防水層では0.3mm、0.5mm、1mm、3mm、アクリルゴム系塗膜防水層では0.3mm、0.5mm、1mm、2mmとした。

(3) 伸長率の決定

図4 ひび割れ拡大時のひび割れ中央部分の塗膜厚さ

図5 塗膜防水層の厚さと伸長率との関係

写真2 ひび割れ直上部の防水層の伸長状態

写真3 シート状試験体の2軸伸長治具

まず試験片の伸長率を決定するため、縦方向の伸長によるシート状試験片の厚さの変化を調べ、図5にその関係を示す。この図と図4を組み合わせて、ひび割れにより薄くなった防水層厚さと等価となるシート状試験片の伸長率を調べると、材質、厚さに関わらず下地ひび割れ幅0.5mmに相当する伸長率は約30%、1mmに対しては約60%、3mmに対しては約100%であった。

(4) 試験方法

まず各防水層試験片を、各々のひび割れ幅に対応する伸び率まで、すなわち30、60、100%伸長させた。次いで、内径70mmφ、内寸高さ70mmの金属製円筒容器を、伸長した防水層皮膜の片面に置き、接合部をエポキシ樹脂と、シーリング材でシールした。測定の概要を図6に示す。これ全体を、CO₂濃度10±0.5%、温度20±2℃、湿度60±10%のチャンバー内に設置した。CO₂ガスは下側から伸長状態にある試験片を介して容器内に流入する。その後定期的に、容器内のCO₂濃度を写真4に示すように、炭酸ガス検知管を、容器上面

図6 CO₂透過試験の概要

写真4 CO₂の測定

表4 透過試験を行った試験体の種類

防水層の種類	膜厚さ (mm)	伸長率(%)			
		0 (伸長なし)	30	60	100
ウレタンゴム系 塗膜防水層	0.5	○	○	○	○
	1	○	○	○	○
	3	○	○	○	○
アクリルゴム系 塗膜防水層	0.5	○	○	○	○
	1	○	○	○	○
	2	○	○	○	○

○: 試験を実施、試験体数: 各2体

図7 カップ内の防水層を透過した炭酸ガス量の測定結果

の測定孔から内部に差込み、50ml 程度を吸引採取し、測定した。

4.3 測定結果

炭酸ガス濃度の測定結果を図7に示す。時間の経過と共に容器内の炭酸ガス濃度は増加する。その増加の割合は初期に著しいが、次第に緩慢となる。この結果をもとに防水層の見かけの透過度を式(1)により計算した。なお、ここで見かけの透過度としたのは、防水層が伸長されており、無伸長状態で定義される透過度と区別するためである。また、この見かけの透過度は単位期間・単位面積あたりの各透過度を平均した値である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k \cdot C \cdot Ca \quad \dots (2)$$

ここで、

- C : CO_2 濃度
- Δt : 単位時間
- D_x, D_y : 下地モルタルの拡散係数
- $\partial x, \partial y$: 要素寸法
- k : 反応速度係数
- Ca : $Ca(OH)_2$ 濃度とする。

$$P = Q/C_{l,2} \quad \dots (1)$$

- ここで、 P : 見かけの透過度 (mm/day)
- Q : CO_2 の透過量 ($mm^3/day \cdot mm^2$)
- $C_{l,2}$: CO_2 の濃度差 (mm^3/mm^3)

この式により得られた見かけの透過度を図8に示す。伸長率の影響は顕著であり、伸長の程度が大きくなるに従って、見かけの透過度は大きくなる。これは防水層が引っ張られることにより、防水層内部の微小欠陥、気泡等が伸長され、ガス透過性が高まるためと思われる。

図8 防水層の見かけの透過度と伸長率

図9 防水層下のコンクリート下地ひび割れ部の炭酸化進行の概念図

5. 防水層下の下地ひび割れ部分の炭酸化シミュレーション

5.1 伸長状態にある防水層および下地ひび割れ部分のモデル化とシミュレーションの考え方

防水層が施工されても炭酸化がひび割れ内部まで進行するというここまでの実験の結果は、ひび割れ直上の防水層が大きく引っ張

図10 シミュレーションの流れ

られ、炭酸ガス透過量が増加するためと推定される。この状態を想定して、炭酸化シミュレーションを行った。

そのため実際のひび割れ部分の防水層を図9に示すようなモデルに簡略化した。そして、炭酸ガス侵入は次の3段階を経ると考えた。すなわち、①防水層皮膜を炭酸ガスが拡散し透過する過程、②ひび割れ空間内で炭酸ガスと空気とが相互拡散する過程、③それがコンクリート内部に拡散して行く過程である。この計算フローを図10に示す。

(1) 防水層の透過度

まず防水層皮膜を透過して炭酸ガスが下地部分および、ひびわれ部分へと透過する過程には前項の測定による見かけの透過度を使用した。

(2) ひび割れ空間内の拡散係数

ひび割れ空間内の拡散係数は、ある深さ方向の地点におけるひび割れ幅ごとに異なると予想される。このため、ひび割れ表面から先端までのひび割れ幅を一定とした時の試験体を作製して、その平行なひび割れ幅を変数とした透過試験を行なった。そして、その結果をシミュレーションモデルに適用することとした。

図11 ひび割れ部の炭酸ガスの移動速度測定

試験には直径 10cm×高さ 10cm のモルタル円柱試験体を1ヶ月間 封緘養生した後、割裂し、試験槽内で十分に炭酸化させたものを使用した。この割裂したモルタルが 0.5mm、1.0mm、3.0mm のひび割れ間隔になるよう平行に固定

図12 ひび割れ部の炭酸ガスの拡散係数

し、片面に容器を取り付け、ひび割れを通過して容器内部に侵入した炭酸ガスの量を定期的にガス検知管により測定した。図12に測定結果より求めたひび割れ部の炭酸ガスの拡散係数を示す。

(3) モルタル内部の拡散係数

下地モルタル部分の炭酸ガスの拡散係数は、既往の文献⁹⁾を参考にモルタルの促進中性化試験結果により求めた値である $3\text{mm}^2/\text{day}$ を使用した。なお、シミュレーションでは、ひび割れ深さ方向及びひび割れ幅の方向に炭酸ガスが拡散するモデルとした。

(4) 炭酸化反応速度係数について

炭酸化反応過程は、炭酸ガスと水酸化カルシウムの反応と仮定し、式(2)を用いて水酸化カルシウムの減少量を求めた。なお、炭酸ガスとモルタル中の水酸化カルシウムとの反応速度係数は既往の文献¹⁰⁾より $5 \times 10^6/\text{day}$ とした。

5.2 解析モデル

図13に下地ひび割れ部の解析モデルを示す。解析モデルは2次元の対称モデルとし、式(2)を用いて差分法により計算を行なった。境界条件に関して、防水層面については防水層の塗膜厚さを前述で測定した見かけの透過度に置き換え、ひび割れ幅については、5.1(2)のひび割れ空間内の拡散係数に置き換えることとした。モル

図13 下地ひび割れ部のモデル化 (要素寸法: 1mm×1mm)

図14 促進中性化試験結果とシミュレーション結果の比較例(ウレタンゴム系塗膜防水層の場合)

図15 促進中性化試験結果とシミュレーション結果の比較例
(アクリルゴム系塗膜防水層の場合)図16 促進中性化試験結果とシミュレーション結果の比較例
(塗膜防水層なしの場合)

タル部の要素の大きさは縦横 1.0mm とした。計算の条件は促進中性化試験と同じ炭酸ガス濃度 10% とし、暴露期間は 1 年間とした。なお、要素の大きさによる解の収束性は別途確認した。

5.3 シミュレーション結果

促進中性化試験で炭酸化が観察された試験体について、シミュレーション結果を、下地モルタル中の水酸化カルシウムが炭酸ガスと反応して減少した割合として表し、グレースケールで表示した。なお、実験結果は 2 値化して結果を示している。図 14 にウレタンゴム系塗膜防水層について、図 15 にアクリルゴム系塗膜防水層について比較をした結果を示す。いずれもひび割れ内部が炭酸化している状態が示されている。ただ解析モデルの分割要素の大きさは 1mm × 1mm であり、各々の要素内では実際には濃度勾配をもつものが平均化された値としてしか計算されていないため、相関性については大まかにしか議論できないが、概ね要素の平均炭酸化率 10~20% 程度を閾値とした場合と実験結果とは良く整合しているように思われる。

これを見ると防水層が施工されているとひび割れの無い部分は全く炭酸化が見られていない。しかしひび割れ部分では防水層があるにも係らず炭酸化が生じている。これはひび割れ部で皮膜が伸長させられ、ガス遮断性能が低下し、ひび割れ内部に炭酸ガスの侵入を許容し、モルタル内部の炭酸化が生じたとするここでの考え方の妥当性を示していると考えられる。

5.4 ひび割れ部分の防水層の炭酸化抑制に関する考察

防水層等のコンクリート表面保護皮膜の存在は重要である。そし

て下地がひび割れても、ひび割れ内部に面するモルタル部分の炭酸化はかなり抑制される。しかし、伸長状態にある皮膜の炭酸ガス遮断性能は低下するため、1mm 程度のひび割れを予想すると防水層の厚さは 1mm 以上は必要であることが、実験およびシミュレーション結果より考察される。

実際に防水層皮膜の破断があると、図 14 に示すように炭酸ガスの侵入が顕著になり、ひび割れの奥深くまで炭酸化領域は拡大する。もちろん防水層で全く保護されていない場合は、同じく図 16 に示すように、ひび割れ部分のみならず表面からも炭酸化が生じるが、皮膜破断の場合も、それに匹敵するくらいの領域の炭酸化が生じている。これら皮膜の下地ひび割れ抵抗性は皮膜厚さが直接関係しているため、この観点からも、十分な厚さの必要性が指摘される。

6. 結論

塗膜防水層下の下地モルタルひび割れ部分の炭酸化について検討した本研究の結論は、以下の通りである。

- (1) 下地にひび割れの無い部分については、防水層の存在が炭酸化を抑制するという従来の実験結果を確認した。
- (2) 防水層があっても下地の炭酸化を完全に抑止するものではなく、下地のひび割れ幅が大きい場合には、ひび割れに沿って炭酸化することを明らかにした。
- (3) 抑制効果低下の原因は、2 軸伸長による炭酸ガス透過試験により、防水層が伸長されると、炭酸ガス遮断効果が低下するためであることを実験的に示した。

- (4) 塗膜系材料で、コンクリートひび割れ部における炭酸化抑制効果を期待するには、十分な塗膜厚さが必要であることを示した。
- (5) ひび割れ直上部分の防水層の伸長を考慮した簡便なモデルを用いて炭酸化シミュレーションを行い、実験値と比較し、その有用性を示すと共に、ひび割れ部分の炭酸化現象の評価を可能とした。

参考文献

- 1) 阿部保彦：ひび割れ幅がコンクリートの中性化深さに及ぼす影響に関する文献調査報告 コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集 1998. 10
- 2) 魚本健人：コンクリート診断学入門 構造物の劣化対象 2004. 9. 30
- 3) 塚原絵万：ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食に関する基礎的研究 コンクリート工学論文集 2000. 1 pp75, 84
- 4) 長谷川拓哉：仕上材の鉄筋コンクリート躯体中性化抑制効果に関する研究 2003. 11
- 5) 本橋健司、榊田佳寛：コンクリート仕上げ材料の中性化抑制性能評価における熱重量分析の応用；日本建築学会構造系論文報告集、第 579 号、pp15. 21, 2004. 5
- 6) 長谷川拓哉：モデル建物の 11 年屋外暴露試験結果に基づく表面仕上げ材の中性化に対する保護効果；日本建築学会構造系論文報告集、第 555 号、pp37. 43, 2002. 5
- 7) 福島敏夫：表面仕上げ材のコンクリートの中性化抑制効果の定量的評価；セメント・コンクリート論文集、No. 44, pp. 448 - 453, 1990
- 8) 福島敏夫：コンクリートの中性化進行の理論的予測法と数値解析その 1 鉄筋コンクリート構造物外壁の耐久性予測法に関する研究；日本建築学会構造系論文報告集、第 428 号、pp1. 15, 1991. 8
- 9) 長井宏憲、兼松学、野口貴文、友澤史紀：遺伝的アルゴリズムによる RC 構造物の補修・改修最適化問題に関する研究 pp. 457-462, コンクリート工学年次論文集 Vol. 22. No. 1. 2000
- 10) 榊田佳寛、棚野博之：コンクリートの中性化進行予測モデル、コンクリート工学論文集、Vol. 2. No. 1. 1991, 1

(2006年2月10日原稿受理, 2006年5月2日採用決定)