

論文 厳しい環境下での実大 RC 建物の長期暴露試験について

大城 武*1・山田義智*2・谷川 伸*3

要旨：RC構造物の塩害の重要な要因である飛来塩分量と気象観測の関係を研究している。冬期に北西及び北東の季節風が卓越し、沖縄県本部町備瀬の暴露試験場において、16.7mg/dm²/dayと高い飛来塩分量を表す。次に、この要因に対応した実大RC暴露構造物のコンクリート中の塩分量分布を論述する。ここでは、建設から10年間にわたる塩分量の増加過程を解明している。また、対象のコンクリート面にアクリルゴム系塗膜を施した部位と無塗膜部位に分け、各々の含有塩分量を示し、塗膜による保護効果を論述する。さらに、塩分量分布に表れる塩分濃縮の現象に対して、その形成過程の定性的な考察を論述する。

キーワード：飛来塩分量、実大RC暴露実験、塩分量分布、塩分濃縮

1. はじめに

本研究は、亜熱帯海洋性気候下の沖縄県で、海岸に隣接して建設した実大RC暴露構造物を対象とし、塩害による劣化過程を解明する。本暴露構造物は、1984年9月に完成し、これを対象とした塩害劣化に関する研究成果は既発表である[1]～[4]。本論文は、暴露構造物屋根スラブ上で測定した飛来塩分量と風向・風速の気象データとの相関を示し、その要因に伴うコンクリート中の塩分量分布を論述する。ここでは、1994年10月の測定結果を図示し、10カ年の経年に伴う塩分量の増加過程を解明している。塩分量分布形状の特徴としては、表層に不規則的な分布が現れ、また、塩分濃縮のピークが内部に現れることである。この現象に対して定性的な論述を行い、ピークの形成について解明する。

2. 試験概要

沖縄県本部町備瀬崎に建設した実大RC暴露構造物を対象に実験を行っている(図-1)。本構造物の南面以外の三面は海に面し、海塩粒子を常時受け、強風時には下部で直接海水の飛沫を受ける。コンクリートの品質は、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比を63%、スランプを18cm、Feを210kgf/cm²、空気量を4%としている。東側部分のコンクリートには塩分量0.5% (NaCl/コンクリート重量)を調合時に初期混入し、この部分を有塩部と称している。また、西側部分には

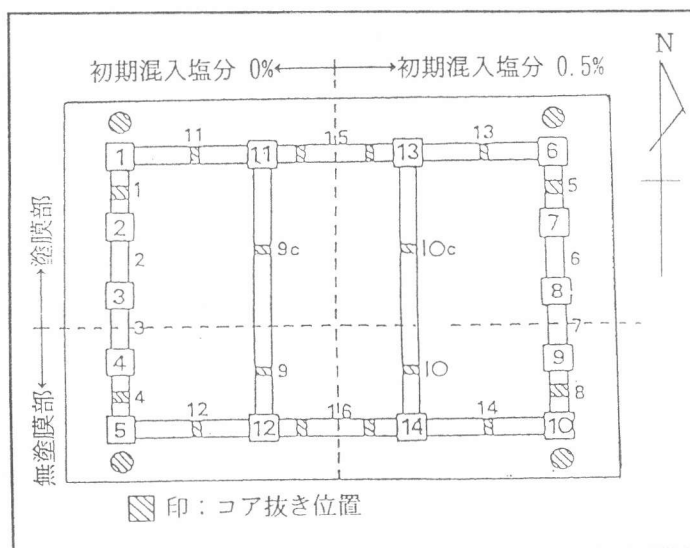


図-1 暴露構造物の平面図

- *1 琉球大学教授 工学部環境建設工学科、Ph. D. (正会員)
- *2 琉球大学助手 工学部環境建設工学科、工修 (正会員)
- *3 東亜合成(株)製品研究所 主任研究員 工修 (正会員)

塩分を初期混入してなく、無塩部と称し、2要因を区別する。また、北側の海岸側にはアクリルゴム系の塗膜防水を設し、この部分を塗膜部と称し、南側の無塗膜部と区別する。

本構造物の位置における飛来塩分特性を把握するため、スラブ上に土研式塩分捕集器を設置し、塩分量の測定を毎月行っている。この位置の気象データとしては、風の状況を考慮して対岸の伊是名島でのアメダス観測値を用いる。

コンクリート中の塩分量分析を行うため、図-1に図示した梁からコアを採取した。コアをスライスした後にクラッシュして試料を作り、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定で可溶性塩分量を分析している。ここでは、コンクリート重量に対する塩分量 (NaCl重量比, %) で示す。

3. 試験結果及び考察

3. 1 飛来塩分量

図-2に1994年1月から12月までの1年間にわたる日平均飛来塩分量を図示する。この地点は、南西から東まで広範囲に海に面し、海岸は岩礁で形成されて砕波の影響をうけている。飛来塩分量は12月から3月の期間が高く、この期間での北側の塩分量は16.73mg/dm²/dayであり、6月~7月の0.98mg/dm²/dayに比して高い。さらに、台風シーズンの9月~11月にはさらに高く、最高値45.35mg/dm²/dayが10月に記録されている。

飛来塩分量とそれに最も影響を与える風向・風速との関係を図-3に図示する。アメダスの観測値から計算した風速積算を対応する方位に図示し、また、同月の日平均飛来塩分量を方位別に記している。図中のあみかけ部分は海に開けている方向を示す。2月は冬期の北北西の風が卓越し、6月~7月は南南西の風が主である。それらの方向の風速積算に対応して飛来塩分量が表れている。2月の海側範囲(南西~東)の風速積算は2680m/秒で、また、西~東の3面での飛来塩分量は著しく大きな値、1078mg/月を示す。

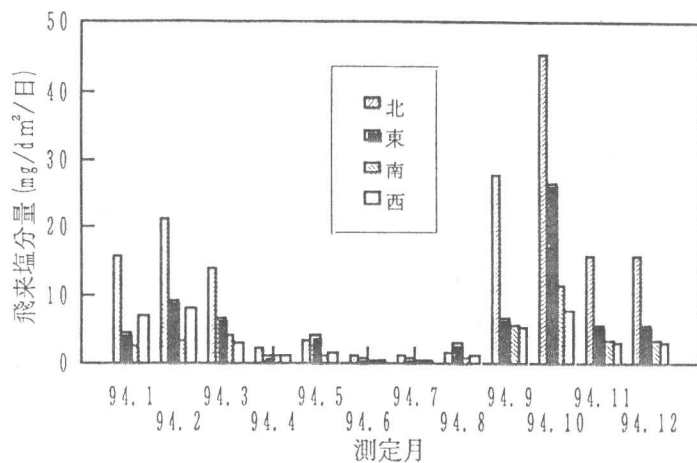


図-2 年間の日平均飛来塩分量

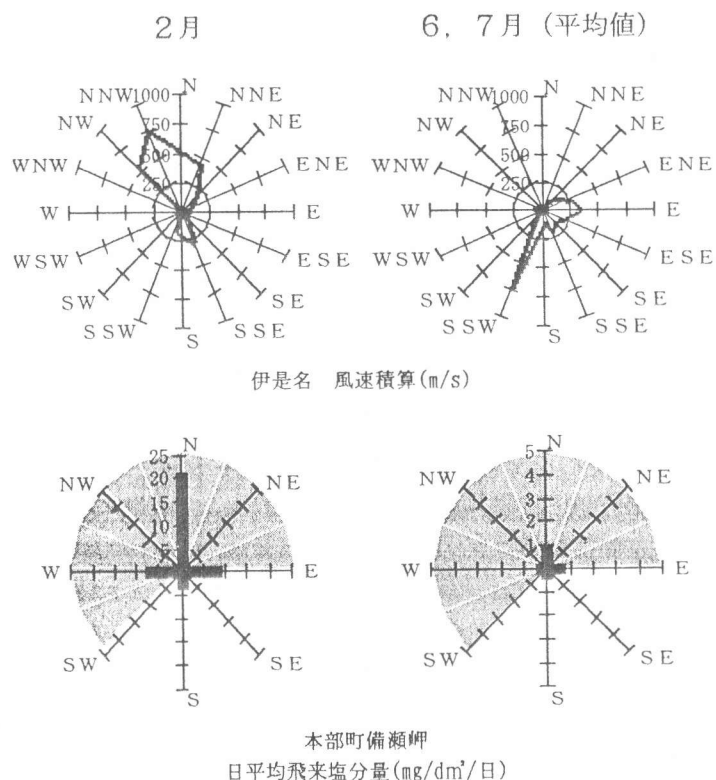


図-3 風速積算及び日平均飛来塩分量

3. 2 塩分量分布

無塩無塗膜部の梁の塩分量分布を図-4に図示する。経年変化を示すため、暴露期間2年、5年、7年、9年、10年の測定結果も図示する。南側に位置し、海に面し塩害環境の厳しい梁12、16の北側面では多量の飛来塩分が付着し、その結果、内部に多量の塩分量が浸透している。図中には、短期間で塩分浸透量を表すため、スラブ上においた同品質の供試体の分析結果（暴露期間1992年12月～1993年5月）も記入している。

北側面においては、暴露2年の梁16から暴露5年～10年の梁12の分布形状に経年変化し、内部の塩分量は増加している。鉄筋腐食ラインを0.06～0.12%と考えると、かぶり40mmの鉄筋位置では暴露2年でその値に達する。北側に比して、南側の塩分量の絶対値は大きくないが、これは環境条件の差異を表すもので、前述の飛来塩分量に対応する。

図示の様に、長期間の暴露試験の塩分量分布の特徴としては、表層付近にピークが生じ、表面での塩分量はむしろ減少することが明らかになった。この原因についての考察は次節に記述する。

図中に6カ月暴露の供試体の分布形状も示しているが、短期間に0.12%の塩分量が表層に浸透している。このことから、厳しい環境条件下においては、早期の塩害対策の必要性が示唆される。

無塩塗膜部の梁の塩分量分布を図-5に図示する。暴露2年の梁15及び暴露5～10年の梁11の分布形状は経年変化の無いことを示し、塗膜による遮塩効果を証明している。同図には6カ月間暴露の無塗膜供試体の分布形状も比較のため示しているが、塩分量及び形状ともに梁と類似している。建設時において塗膜部は、季節風の卓越する冬期の3カ月間、コンクリート養生のため無塗膜の状態にあった。その間に図中に示す塩分量が浸透したものと考えられる。鉄筋位置40～50mmにおける塩分量は0.02～0.06%で、鉄筋の腐食ラインに局部的に達している。鉄筋をはつり出して観察したところ、軽微な鉄筋腐食は認められるが、腐食進行速度は塗膜の遮水性により著しく低下していることがわかる。これらの梁は強風時に海水飛沫を直接受ける位置にあり、本構造物中で最も厳しい環境下にあることから、塗膜による遮塩及び遮水による保護効果を示している。

有塩無塗膜の塩分量分布を図-6に

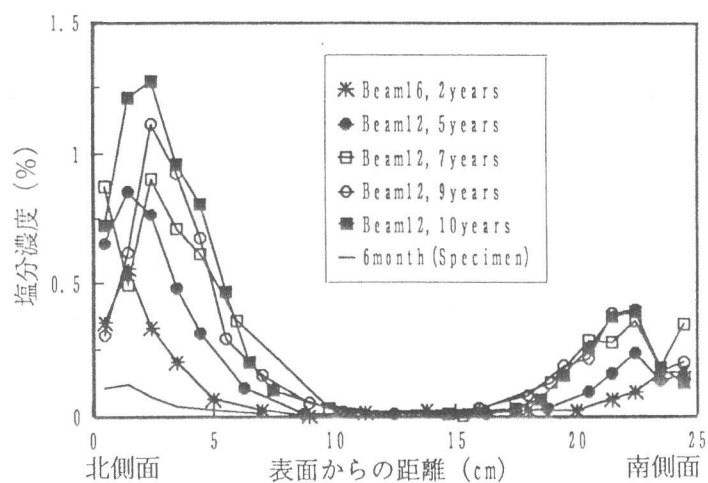


図-4 塩分量分布図（無塩無塗膜）

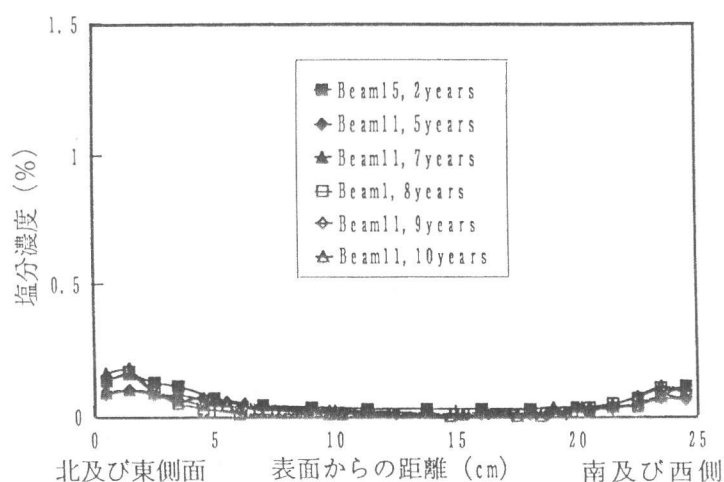


図-5 塩分量分布図（無塩塗膜）

図示する。梁中央部で初期混入の塩分量0.5%に近い0.46%が検出され、この量をベースに外部からの塩分浸透で増加している。図中の黒印の梁16及び14が北～南に、白印の梁8は東～西に位置し、これらの位置の環境に対応した分布を示している。

北側面においては、暴露2年の梁16、及び暴露5年、10年の梁14の分布形状の様に経年変化し、暴露10年において、塩分量のピークは1.77%に達し、表面から3.5cmに位置している。南側面からの浸透量は北側に比して少ないが、1.03%のピークに達し、絶対量としては大きい。

梁8の西側面は梁14の北側面と隣接した内部の位置であるが、それらの方向は異なる。この方向の差異が分布形状に表れ、北側面が西側面に比して大きな塩分量を示す。また、南側面と東側面は隣接した外部面として対応されるが、海に面した東側面が大きな値を示している。

有塩塗膜部の塩分量分布を図-7に

図示する。初期混入塩分量に対応して分析された0.35%をベースに、表層部において僅かに増加する分布を示す。この増加量は、図-5の無塩塗膜部の塩分量と対応し、塗膜施工前に浸透したものと考えられ、また、一部は内部における塩分量の移動とも考えられる。塗膜部においては塩分の濃度勾配が小さく、孔食の発生を阻止していることが鉄筋の腐食状況の観察で明らかになった。

3. 3 塩分濃縮現象

塩分量分布図で示した通り、表層部で塩分量の濃縮が生じる。この現象は、一般的に洗いながし、内部塩分の移動[5]、及び炭酸化に伴う塩分移動[6]等で説明されてきた。しかし、本実験の様に、外部からの塩分浸透過程における塩分濃度のピークの形成については十分に解明されていない。

ここでは、コンクリート中の細孔間を移動する水分の影響として考察する[7]。この現象をモデル化して図-8に図示する。横軸はコンクリート表面からの距離を示し、縦軸の上半分はコンクリートの相対含水率を表し、下半分は可溶性塩分量（コンクリート重量比）を表す。図中の高含水域の表面A点からC点までが主として液相の水分移動の影響を受けている。乾燥に伴って表面の相対含水率は低くなり、B点～C点の相対含水率に変化する。この様に乾湿に伴って相対含水率の変動する域を水分変動域(convection zone)と定義する。

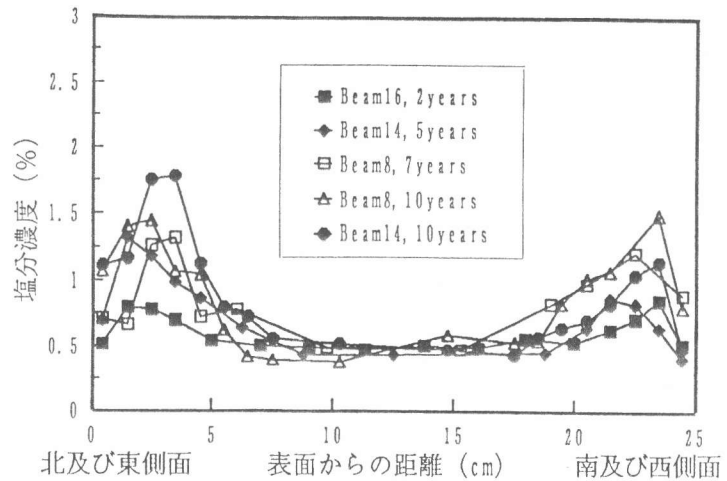


図-6 塩分量分布図 (有塩無塗膜)

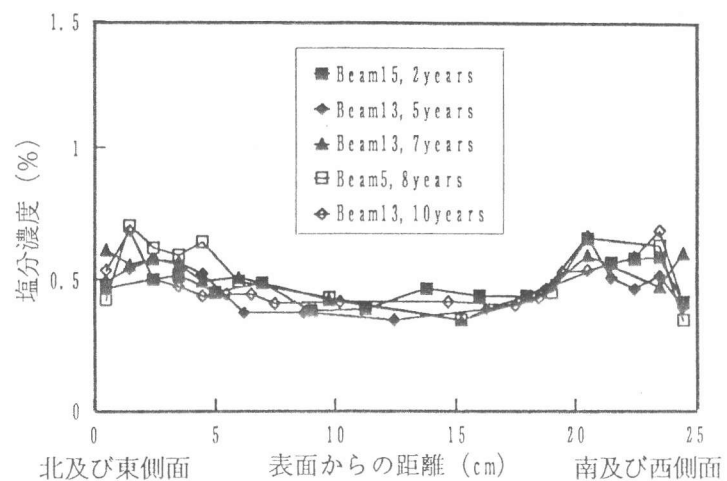


図-7 塩分量分布図 (有塩塗膜)

図-9に水分変動域での水分及び塩分の状況を説明するために細孔モデル図を示す。コンクリート中に浸透する塩分は、図-9(a)に示す湿潤時に液相水分に伴って表層部に移流してくる塩分と、表面から濃度勾配により拡散してくる塩分とがある。周りの環境が乾燥時(図-9(b))になると細孔径の太いところでは液相水分を保持する能力が小さく、液相の水分の蒸発に伴い、表層部に存在していた塩分が移動し、内部で濃縮する。その結果、図-8のC点付近に乾湿くり返しの環境下における塩分の濃縮が起こるものと考えられる。

経年に伴う炭酸化の影響でピークの位置が内部に移動する現象も本実験では現れている。この原因として、乾湿繰り返し環境下において、高い水セメント比のコンクリート組織中の炭酸化に伴う細孔の増加が考えられる[8]。その結果、水分変動域が内部に拡大されて、図-8の点Dに達し、それに伴い塩分濃縮のピークも内部に移動する。さらに、フリーデル氏塩として固定されていた塩分の遊離も考えられ[6]、塩分濃縮のピーク時の濃度が高くなる。

上記の様に、塩分の濃縮のメカニズムを非炭酸化及び炭酸化のコンクリート中の細孔中での水分の移動に伴うものとして記述した。また、表層部での塩分分布の不規則性は、洗い流し作用や、乾湿に伴う水分の変動過程のある時点の現象をとらえたものとして考えられる。

4. まとめ

飛来塩分量の測定及び暴露構造物のコンクリート中の塩分量分析の結果、次の知見が得られた。

- (1) 岩礁の海岸に面した地点での飛来塩分量は、冬期の季節風を受ける時期には $16.7\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ となり、また、台風時には $45.4\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ の値にも達する。この様に、高濃度の塩分がコンクリート面に付着し、塩害の主要因となる。

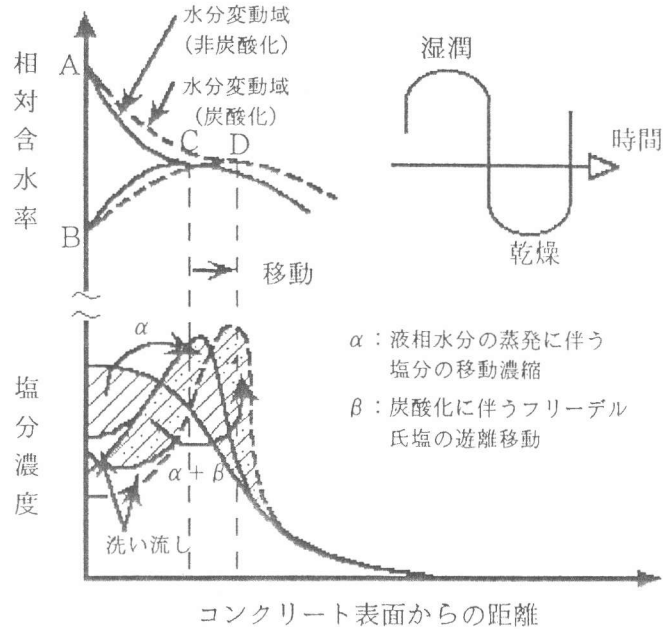


図-8 塩分濃度ピーク形成概念図

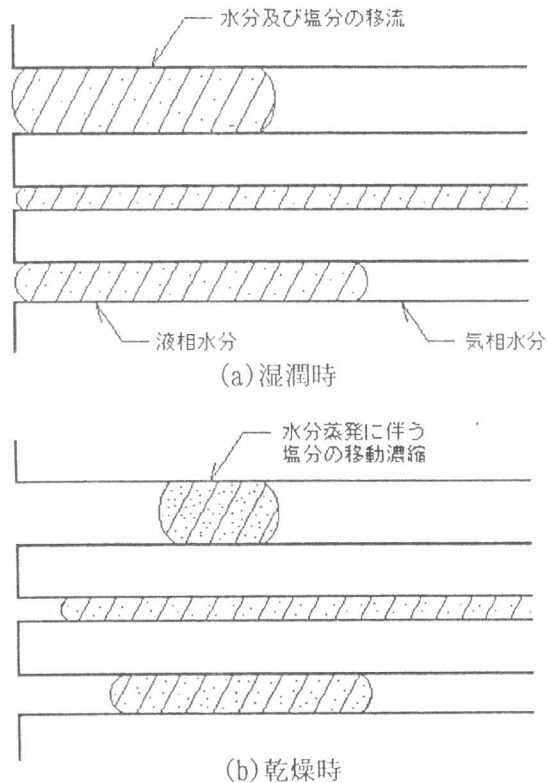


図-9 細孔モデル

- (2) 飛来塩分量に対応して、コンクリート中の塩分量は建設初期から経年的に増加し、早期に有害塩分量に達する。また、分布形状の特徴として、表面より内部の表層部に塩分濃縮のピークが形成され、さらに炭酸化に伴って経年的にその位置は内部に移動する。
- (3) アクリルゴム系塗膜は外部からの塩分浸透を阻止し、鉄筋の保護効果を表している。
- (4) 表層部での塩分濃縮の現象は、主として乾湿に伴う塩分を含んだ水の移動に伴って生じている。乾燥過程において、繰り返し生じる水の蒸発に伴って塩分は内部に移動し、濃度が濃縮するものと考えられ、さらに、コンクリートの炭酸化による細孔量の増加も影響している。

[謝辞]

本実験を行うに当たり、琉球大学大学院生佐藤旅人君及び研究室の学部学生に御協力頂きました、ここに記して感謝の意を表します。

[参考文献]

1. T. Oshiro, S. Tanikawa and N. Goto: Study on Durability of Structures Exposed to Marine Environment, Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovation in Design, ACI-SP128, pp. 433-447, 1991.
2. T. Oshiro, R. N. Swamy and S. Tanikawa: In-Situ Evaluation of a Flexible Surface Coating for Concrete to Prevent Chloride Penetration and Steel Corrosion, Durability of Concrete, ACI-SP145, pp. 851-870, 1994.
3. 谷川 伸, 大城 武, 後藤信弘: 塩害環境下におけるRC構造物の暴露実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp. 811-816, 1993.
4. 谷川 伸, 大城 武, 後藤信弘, 山田義智: 塩害を受けるRC暴露構造物の劣化評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 953-958, 1994.
5. 岸谷孝一, 櫻野紀元: 海砂を用いたコンクリート中の塩分の移動, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 1-4, 1980.
6. 小林一輔, 他: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, 第1巻 第2号, pp. 69-82, 1990.
7. K. Tuutti: Effect of Cement Type and Different Additions on Service Live, Concrete 2000 Edited by R. K. Dhir and M. R. Jones, pp. 1285-1295, 1993.
8. 佐伯竜彦, 他: 中性化によるコンクリートの微細組織の変化, 土木学会論文集, 第420号, V-13, pp. 33-42, 1990.