

論文 鉄筋コンクリート構造物の塩害評価に関するコンピュータシミュレーション

松武進太郎*1・武若耕司*2

要旨: 鉄筋コンクリートの塩害について、コンピュータ解析用に作成したコンクリートモデルを用いてシミュレーションを行った。このコンクリートモデルの環境設定にあたっては、実コンクリートの細孔容積分布を考慮し、腐食因子である水分の存在、塩分や酸素の拡散性を解析した。また、鉄筋のマクロセル腐食をモデル化し、鉄筋腐食量算定も試みた。このプログラムを用い、塩分拡散係数に及ぼすコンクリートの品質や含水状態の影響あるいは、鉄筋腐食に伴うひび割れ発生までの年数の検討を行った。

キーワード: 塩害、コンピュータシミュレーション、塩分拡散、細孔分布、マクロセル腐食

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化が大きな社会問題となっている。その原因の一つとして、いわゆる塩害が考えられる。この塩害については、これまでもさまざまな研究がなされてきたが、実態の解明は未だ十分ではない。その理由として、多孔質材料であるコンクリートの品質のばらつきを十分に把握できないこと、また、実験が長期にわたるために限られたデータしか取得できていないことなどが挙げられる。そこで本研究では、コンピュータ解析用にモデル化されたコンクリート（以下、解析用コンクリートモデルと称す）を用い、鉄筋腐食に関する様々な要因を取り入れて、塩害によるコンクリート構造物の耐久性をシミュレーションすることを試みた。

2. 解析用コンクリートモデルの概要

今回の解析モデルとしては、図-1に示すような二次元RCモデルを考えた。また、コンクリートの品質は、内部に存在する細孔球で決まるものとした。これは、コンクリート中に存在する様々な空隙を、全て球として考えるようモデル化したもので、その球径や個数でコンクリートの品質を表すことができる。さらに、品質のばらつきを考

慮して、細孔球の配置や径は、ランダム性を持たせて設定できるようにした。細孔球同士は重なって設定される場合があるが、その際は細孔容積の調整を行い塩分・酸素拡散係数の算定における球の重なりの影響を除去した。

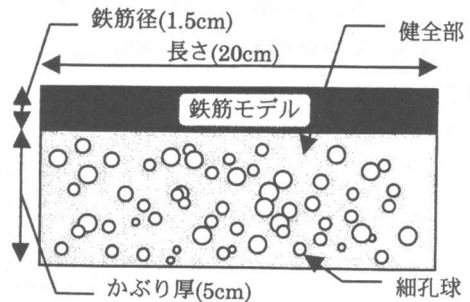


図-1 解析用コンクリートモデル

3. 解析用コンクリートモデルによる塩害評価の手法の概要

3. 1 解析用コンクリートモデルの環境設定

3. 1. 1 細孔分布

(1) 細孔容積分布関数

コンクリート中に存在する細孔空隙は、分子レベルから可視レベルに近いものまで、大きさが連続的に分布しているものと考えられる。そこで下村らは、コンクリート単位体積中の細孔分布を、細孔容積分布密度関数 ($V(r)$) として、式(1)

*1 鹿児島大学大学院 工学研究科海洋土木工学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)

のような連続関数で示されるものとした¹⁾。

$$V(r) = V(\infty)BCr^{C-1}\exp(-Br^C) \quad (1)$$

ここで、 r ：細孔半径(m)、 $V(\infty)$ ：単位体積あたりにおける総細孔容積(m^3/m^3)、 B, C ：関数の形状を決定するパラメータである。

本解析では、式(1)を使用してコンクリートモデルにおける細孔容積分布の設定を行った。

(2) 細孔分布モデル

コンクリートの空隙は、Å のオーダーからmm のオーダーまで幅広く分布しており、これを大別すると、ゲル空隙、毛細管空隙および欠陥空隙に別けられる。この内、ゲル空隙は一般にコンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼさないと考えられていることから、ここでは、毛細管空隙が主となる空隙と、欠陥空隙を考慮の対象とした。図-2は、これら二種類の空隙の分布モデルの概念図である。なおここでは、便宜上、主に毛細管空隙によって構成される空隙分布を細孔分布と称し、また、欠陥や気泡等で構成される空隙分布を欠陥分布と称することにした。

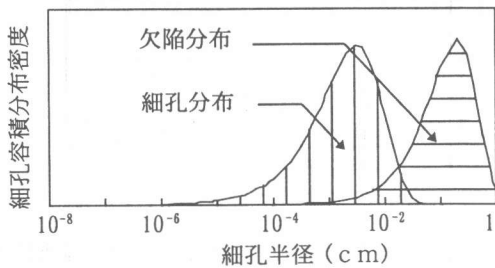


図-2 細孔分布、欠陥分布の概要

3. 1. 2 水セメント比の設定

コンクリートモデルの基本品質を表すパラメータとして、水セメント比を考えた。水セメント比の増加に伴う品質低下については、セメントと反応しない余剰水の増加に伴う毛細管空隙の増加によると考えた。一般に、毛細管空隙は30 μm以下であると考えられていることから²⁾、細孔分布の直径30 μm以下の部分は、元々は水である(余剰水部)とみなした。細孔分布の30 μm以上のものは、例えばブリージング等で生じるものとみなした。なお、図-1において細孔球以外の部分は

健全部(完全水和部)であり、ゲル空隙はここに取り込まれているものと考え、この部分の水セメント比を30%とし、これに余剰水量を加味して各コンクリートモデルの水セメント比を決定した。

また、欠陥分布については、後述する塩分拡散係数の実測値との整合性を調整するためには、水セメント比ごとに適宜、分布形状を決定した。図-3には各水セメント比ごとに実際に用いた細孔径分布の例を示す。

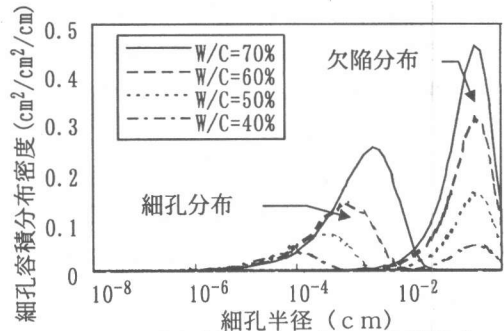


図-3 本解析で用いる細孔、欠陥分布

3. 1. 3 相対含水率の設定

相対含水率とは、コンクリートの全細孔中に含まれる水分の割合を表していると考え、今回の解析では、図-4に示すように細孔分布及び欠陥分布で設定された細孔球をともに水球と空隙球に分け、全細孔球容積に対する水球容積の比によって相対含水率を表すことにした。

通常、コンクリートは表面から内部に向かうにつれ、相対含水率が徐々に増加する傾向にある。そこで、かぶりコンクリートを幾つかのブロックに分割し、それぞれ含水率を変えることによって、コンクリートの含水状況を再現した。本解析では、最大細孔球半径を1 cmとしていることから、か

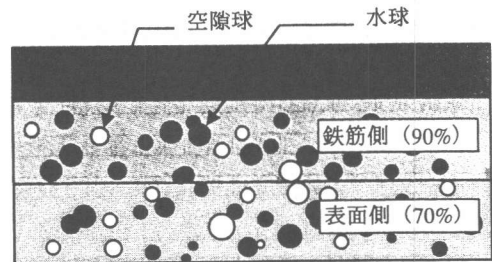


図-4 相対含水率の一例 (相対含水率が80%の場合)

ぶりコンクリートを2ブロックに分け、鉄筋側のブロックを全体の相対含水率より10%高く、表面側を10%低くなるように設定した。

3. 1. 4 拡散係数の算定方法

(1) 塩分拡散係数

塩分は、コンクリート表面から、それ自身の濃度差によって拡散しながら鉄筋に向かって浸入していく。鉄筋に到達した塩分は、鉄筋を覆っている不動態被膜を破壊し鉄筋腐食を開始させる。このことから、塩分の拡散速度を算定することは、腐食開始年数や腐食量算定の際にあたっての腐食領域を推定する上で重要であると考えられる。

本解析では、塩分の浸入速度を拡散係数で表し、また、塩分が鉄筋に到達するまでの到達経路は、簡便のため直線であると仮定した。その拡散状況については、細孔球内と健全部、あるいは水球内と空隙内で異なると考えた。すなわち、健全部では常時一定の拡散速度を持つと仮定し、水で満たされた細孔球中では塩分は一瞬で拡散し、一方、空隙となっている細孔球では、塩分はその球の中を拡散できず、その球の外側を歩いていくと仮定した。この状況を図-5に示す。これによって、コンクリート内の塩分拡散が、コンクリート断面全体に均一には生じない状態を再現した。以上をふまえ、鉄筋が腐食するのに必要な量の塩分が鉄筋に到達する時間（以下塩分到達時間） T は式(2)を用いて算定することにした³⁾。

$$T = \frac{L^2}{12 \cdot D \cdot \left(1 - \sqrt{C_L/C_0}\right)^2} \quad (2)$$

ここで L ：経路の全長、 D ：健全部の塩分拡散係数($10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$)、 C_L ：不動態被膜を破壊する鉄筋表面の塩分量(0.04%コンクリート質量とした)、 C_0 ：コンクリート表面の塩分量(0.9%コンクリート質量とした)である。なお、ここでいう経路の全長とは、図-5において塩分が実際に通る経路である。一方、式(2)を D を求める式に変形し、これに上記で求めた塩分到達時間と最小かぶり厚を代入すると、通常、実験や調査等で求められる見かけの塩分拡散係数(D_X)を算定することができる⁴⁾。

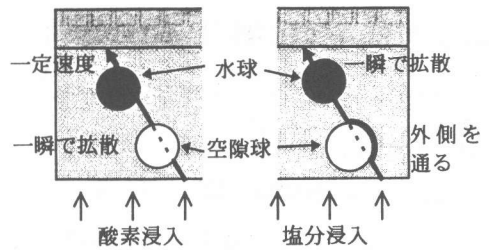


図-5 塩分・酸素拡散経路の考え方

(2) 酸素拡散係数

酸素は、水分とともに、腐食反応を促す要因である。酸素の拡散速度を算定することは、腐食速度、腐食量を把握する上で重要である。

酸素も塩分と同様、その到達経路は直線であると仮定した。酸素は水中に溶ける量は限られており、一方、気体中では急速に拡散する。そこで酸素については、健全部、水球中はそれぞれある一定の速度で、また、空隙中では一瞬で拡散すると仮定した(図-5)。以上のことを考慮し、まず酸素到達時間を求めた後、塩分の場合と同様に最小かぶり厚を用いて逆算すると、解析用コンクリートモデルの見かけの酸素拡散係数(D_{Oa})を導くことができる。

3. 2 腐食条件の設定

3. 2. 1 アノード、カソード面積の設定⁴⁾

通常、コンクリート内の鉄筋腐食はマクロセル腐食が支配的であることは良く知られている。そこで本解析についても、その考えに基づいて鉄筋腐食量の算定を行った。まず、鉄筋を1cmごとのセクションに分割する。塩分が到達し、ある許容値以上になったセクションから腐食が開始するが、その時の到達経路は、図-6のように端から順に到達時間を計算し、最短の到達経路を見つけ、

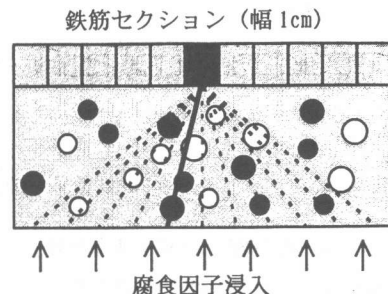
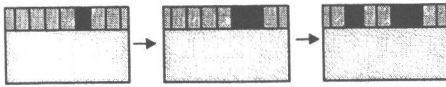


図-6 到達経路算定の概要



- : アノード部 (腐食部)
- : カソード部 (非腐食部)

図-7 腐食部の拡大状況の概念図

その経路を採用する。鉄筋腐食は、図-7に示すように、塩分が早く到着した順番に腐食が起こるものと考え、その時々々の全腐食部をアノード部、非腐食部をカソード部とし、アノード/カソード面積比は時間とともに変化するものとした。

3. 2. 2 鉄筋腐食量の算定方法

鉄筋腐食量の算定にあたっては、各セクションの腐食反応がカソード支配またはアノード支配のいずれかの支配形態をとると仮定した。カソード支配では、カソード表面で生じる反応 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ において、アノード支配では、アノード部の近傍で生じる反応 $4Fe^{2+} + 8OH^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$ においてそれぞれ、酸素の供給速度が反応を律速させると考えた。それぞれの支配形態における腐食反応速度は式(3)、(4)のように求められる⁵⁾。

カソード支配

$$V_{Fe^{2+}} = C_{OO} \frac{A_C \cdot D_{OA}}{A_A \cdot L_{XXC}} \quad (3)$$

アノード支配

$$V'_{Fe^{2+}} = C_{OO} \frac{D_{OA}}{L_{XXA}} \quad (4)$$

ここで C_{OO} : 大気中の酸素濃度, A_C : カソード面積, A_A : アノード面積, $L_{XXC(A)}$: カソード(アノード)部の最短酸素拡散距離である。腐食反応支配形態の判定は、 $V_{Fe^{2+}}$ と $V'_{Fe^{2+}}$ のバランスから式(5)で決まる。

$$\begin{matrix} < & \text{カソード支配} \\ V_{Fe^{2+}} & \\ \geq & \text{アノード支配} \end{matrix} \quad (5)$$

最終的な腐食量 (V_T) は式(6)で求めた。

$$V_T = V_{Fe^{2+}} \left(\text{or } V'_{Fe^{2+}} \right) \cdot [Fe] \text{分子量} \quad (6)$$

3. 2. 3 ひび割れが発生する条件

鉄筋が腐食すると錆を生じ、鉄の約 2.5 倍もの体積を占め、その膨張圧がかぶりコンクリートに

ひび割れが発生する。コンクリートにひび割れが発生する限界腐食量 (W_{Cr}) としては式(7)を用いることにした⁶⁾。

$$\begin{aligned} W_{Cr} = & -0.4325\Phi(\Phi - 19.1) \\ & + 65.01\alpha^{-1.217} + 5.349X \quad (7) \\ & + 420.5A^{-0.5702} - 33.57 \end{aligned}$$

ここで Φ : クリープ係数, α : 体積膨張率 (通常は 3.2), X : 形状関数, A : 腐食角度 (通常は 360°) である。

4. コンクリート中の塩分拡散性の検討結果

以上のように設定した解析用コンクリートモデルと実際のコンクリートの整合性については、それぞれの塩分拡散状況を比較することで検討した。本解析では、3. 1. 4に示した逆算手法により、まず、細孔分布のみを考慮して解析用コンクリートモデルの塩分拡散係数 (これを基本塩分拡散係数と称す) を求め、その後、欠陥分布も加えたかたちで、コンクリートのばらつきを考慮した塩分拡散係数を算定した。

基本塩分拡散係数については、健全部の塩分拡散係数を $10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ とし、また、算定に用いた細孔分布は前述の図-3に示すものである。図-8は、細孔分布のみを考慮した場合に、解析用コンクリートモデルにおいて求められた基本塩分拡散係数と水セメント比の関係を示す。また、この基本塩分拡散係数をベースとして、さらに欠陥分布モデル (図-3参照) を用いて塩分拡散係数を求めた例を図-9に示す。なお、図-8, 9中には、既往の実験により得られた塩分拡散係数の実測値の一例も併せて示してある⁷⁾。

これらの結果から、まず基本塩分拡散係数については、水セメント比の増加とともにその値も増加する傾向にはあるが、その増加割合は実測結果に比べると極めて小さいものであった。また、細孔球の設定にあたってランダム係数を変化させてコンクリート中での細孔の分布状況を変えても、データのばらつきはほとんど見られなかった。この事は、水セメント比が大きくても、もし、材料

分離等による欠陥が全く生じないようなコンクリートであるならば、塩分拡散性はそれほど大きくならないことを示している。しかし実際には、水セメント比が増すに従ってコンクリート中の種々の欠陥の量は急激に増えてくる。そこで、その欠陥の量を考慮して、図-9に示すように解析用コンクリートモデルの塩分拡散係数を事例に近づけようとする、図-3に示したように水セメント比の増加とともに欠陥容積を大幅に増加させる必要が生じた。そして、このこととは逆に、実施コンクリートの塩分拡散性が実はかなり大きな欠陥の存在に支配されている可能性が高いことを示していると考えられた。

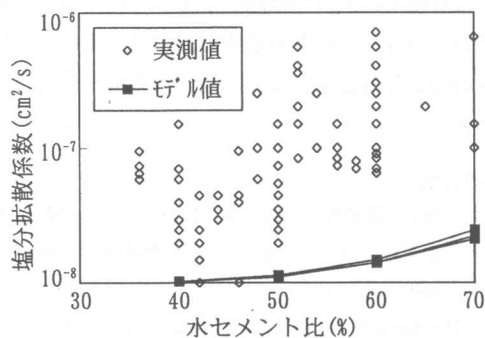


図-8 細孔分布のみを考慮して求めた塩分拡散係数
(同一水セメント比におけるデータは、細孔設置時のランダム係数が異なるもので、細孔分布および容積量は同じ)

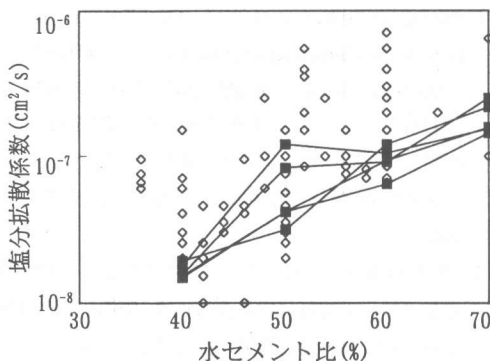


図-9 欠陥分布を考慮して求めた塩分拡散係数の解析結果の例
(同一水セメント比におけるデータは、欠陥設置時のランダム係数が異なるもので、欠陥分布および容積量は同じ)

図-10は、含水率を変化させた場合の塩分拡散係数の変化の状態をシミュレーションした一例である。この結果は、相対含水率が高いほど塩分拡散性が大きくなる状況をコンクリートモデルに

おいて的確に表すことができることを示している。

図-11は、細孔径が塩分拡散係数に及ぼす影響について若干の検討を試みた結果である。この場合、同一水セメント比の条件において、総細孔容積を一定としているにもかかわらず、細孔径の大きさによって塩分拡散係数は大幅に異なっており、径が大きくなるほど塩分拡散係数に大きな影響を与えることが明確に分かる。

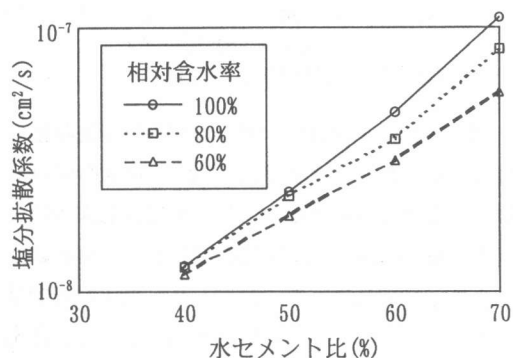


図-10 相対含水率と基本塩分拡散数の関係

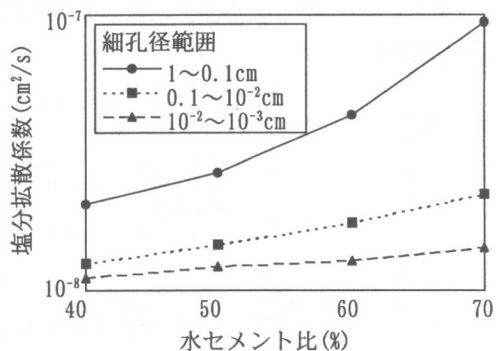


図-11 細孔径別の塩分拡散係数

5. 塩害を受ける鉄筋の腐食性の検討結果

鉄筋腐食性は、腐食生成物による膨張圧で、かぶりコンクリートにひび割れが発生するまでの年数により評価した。図-12は、コンクリートの相対含水率 80 および 60%それぞれにおけるひび割れ発生年数と水セメント比の関係を細孔球設定のランダム係数が異なる幾つかのケースについて示したものである。この図によると、一般にいわれているように、水セメント比に反比例して、コンクリートの塩害に対する耐久性が失われる状況が確認できると共に、水セメント比が大きくなるに従ってひび割れ発生年数のばらつきも非常に大

きくなるようであった。

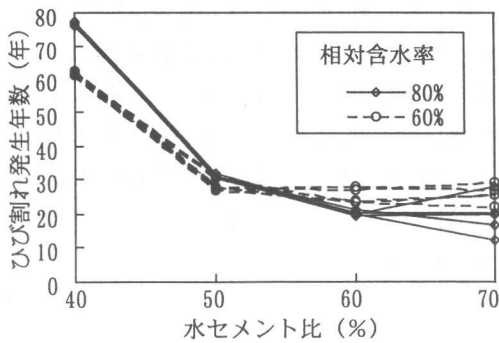


図-1 2 ひび割れ発生年数

図-1 3は、相対含水率とひび割れ発生年数の関係を示したものである。これより、含水率が60%以下の場合には含水率の低下と共に鉄筋腐食性も低下するが、60%以上では必ずしも含水率と鉄筋腐食性との間には一定の傾向が見られるわけではなく、コンクリートの品質の違いによって、含水率と塩分拡散性あるいは含水率と酸素拡散性の関係が微妙に異なるため、含水率が鉄筋腐食性に及ぼす影響も異なってくるようであった。

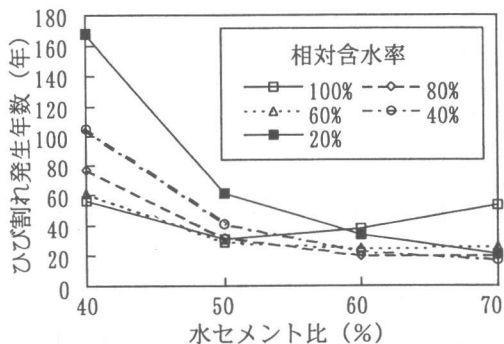


図-1 3 相対含水率とひび割れ発生年数

6. まとめ

本論文では、塩害によるコンクリート構造物の劣化について考察する一つの試みとして、実構造物におけるコンクリート品質のばらつきを考慮して、腐食因子の浸透や鉄筋腐食のメカニズムなどを把握できるコンピュータシミュレーション用のコンクリートモデルを構築した。

すなわち、コンクリート中の細孔や欠陥をその径の分布を考慮した細孔球としてコンクリートモデル内に設定し、細孔や欠陥の影響を考慮した腐

食因子の浸入のシミュレーションを行った。その結果、コンクリート品質のばらつきについてある程度実状に即して表現することができ、塩分の拡散状況についても実施コンクリートに近づけることができた。また、鉄筋腐食については、これまで解析することが困難であったマクロセル腐食の進展状況を考慮してかぶりコンクリートにひび割れが発生するまでの腐食状況を解析することができ、その結果、コンクリートの種々の条件におけるひび割れ発生年数について、その状況を把握することができた。

本論で具体的に述べていない酸素の拡散状況、空隙内の水分移動、また細孔分布の形状等については今後まだ改善の余地が残されているが、本解析は、コンクリート構造物の耐久性評価のために有効なシミュレーション手法に成り得ると考えている。

参考文献

- 1) 下村匠・陳丙学・小沢一雅：コンクリートの細孔構造と収縮特性，土木学会第46回年次学術講演会，pp.478-479，1991
- 2) Uchikawa,H, Uchida,S and Hanehara,S, : Measuring Method of Pore Structure in Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete, il cemento, Vol.88, No.2, pp.67-90, 1991
- 3) Bazant,Z.P. : Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures -Application-, Journal of the Structural Division, Vol.105, pp1137-1166, 1979
- 4) 武若耕司：コンクリート中の種々の欠陥を考慮した塩害シミュレーションに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.1, pp789-794, 1993
- 5) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書，鉄筋腐食と補修工法に関する解析的研究，pp93-113, 1992
- 6) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(Ⅲ)，補修工法の性能評価のための解析的手法，pp236, 1996
- 7) 武若耕司：海洋環境化のコンクリートの含有塩分量に関する既往調査結果の整理と分析，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集，第V部，pp36-37, 1988