

コンクリート表面保護工法の性能評価に関する研究

コンクリート研究室 小倉 孝道
指導教員 下村 匠

要旨：表面被覆材のピンホールや浮き、剥がれ等の欠陥が物質遮蔽性能へ与える影響について実験的に検討するために、模擬欠陥を設けた供試体に電位差を与えてイオンを透過させる通電試験を行った。試験結果より、欠陥を含む被覆材の平均塩化物イオン拡散係数を導出し、比較、考察を行った。また、表面改質材のひとつである浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートについて、飽水状態における物質遮蔽性能と、細孔構造の緻密化の観点から物質遮蔽メカニズムを再検討した。

キーワード：表面被覆材、表面改質材、欠陥、塩化物イオン拡散係数、物質遮蔽性能、細孔構造

1. はじめに

コンクリート表面保護工法は、コンクリート表面を保護することによって塩化物イオンや水分、酸素等の劣化因子の侵入を抑制する工法である。表面被覆材は、コンクリート構造物表面に皮膜を形成し、それ自体に膜厚を有するものである。表面改質材はコンクリート内部に浸透し、表層近傍のコンクリートの性質を改善する効果があり、それ自体には膜厚をもたないものである。

表面被覆材について、本研究室の既往の研究では、各種表面被覆材の塩化物イオン拡散係数を評価し、いずれの表面被覆材も物質遮蔽効果はコンクリートに比べてはるかに大きいことが明らかとなった。しかし、実構造物においては、施工時の被覆材の初期欠陥や供用中の経年劣化が懸念され、これらが実質的に被覆材の効果を支配する可能性がある。現状では、これらの欠陥が表面保護工法の性能低下に与える影響について定量評価できるモデルがない。そこで本研究では、被覆材を適用したコンクリート供試体に模擬欠陥を導入し、欠陥が物質遮蔽性に及ぼす影響を通電試験により実験的に評価する。

本検討の他にも、被覆材の細孔構造と物質遮蔽性能の関係、および被覆材の物質透過性試験

法についても検討を行ったが、ここでは被覆材の欠陥が物質遮蔽性能に及ぼす影響に関する検討について述べる。

表面改質材については、既往の研究により細孔構造を緻密化させる材料であることが確認された。そこで本研究では、表面改質材の一つである浸透性吸水防止材（撥水材）を塗布したコンクリートについて、飽水状態における物質遮蔽性能と、撥水層における細孔構造の緻密化の観点から物質遮蔽メカニズムを再検討する。

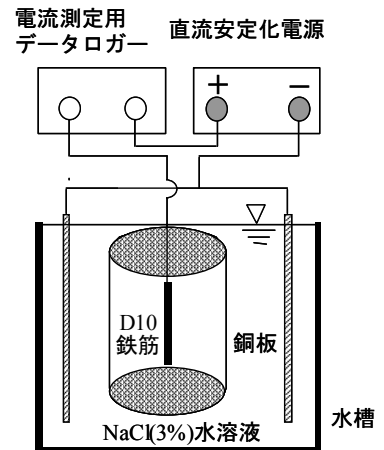
2. 表面被覆材の欠陥が物質遮蔽性能に及ぼす影響

2.1 供試体

コンクリート供試体の種類を表-1に示す。供試体は、中心にD10鉄筋を1本埋め込んだコンクリート円柱供試体とし、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ と $\phi 15 \times 20\text{cm}$ を用いる。表面被覆材はエポキシ樹脂（比重 1.15、引張強度 $49[\text{N}/\text{mm}^2]$ 、弾性係数 $3.5[\text{kN}/\text{mm}^2]$ ）とし、円柱の側面に塗布した。実験シリーズは、母材コンクリートの配合、供試体寸法（かぶり厚さ）、欠陥の種類を実験パラメータとして、全部で16種類とした。供試体数は各種類1体とした。

表－1 供試体の種類

供試体 No.	W/C (%)	かぶり (mm)	被覆材	欠陥	欠陥面積率 (%)	
1	45	45	なし	-	-	
2		70				
3	55	45				
4		70				
5	65	45				
6		70				
7	55	45	あり	なし	0	
8				ピンホール	10 個	0.03
9					20 個	0.06
10					30 個	0.09
11				浮き	5 個	3
12					10 個	6
13					15 個	9
14				剥がれ	2cm×1 本	10
15					1cm×2 本	
16					0.5cm×4 本	

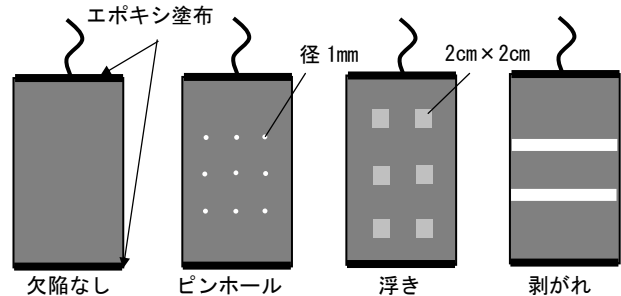


図－2 通電試験装置の概略

供試体はコンクリート打設後 28 日間水中養生し、通電時に円柱の半径方向の電流が卓越するように、上下面に側面より厚くエポキシ樹脂を塗布した。

2.2 模擬欠陥の導入

欠陥は、ピンホール、浮き、剥がれ（隙間）を模した 3 種類とした。各種類に対して欠陥量や欠陥の大きさを 3 パターン変化させた。図－1 に模擬欠陥を導入した供試体を示す。



図－1 模擬欠陥を導入した供試体

2.3 通電方法

通電試験装置を図－2 に示す。供試体を 3%NaCl 溶液に入れ、鉄筋を陽極、供試体外部の銅板を陰極として、直流電源装置を接続し、30V の定電圧を加えた。試験中は、供試体を流れる電流の経時変化を測定した。

まず、コンクリート表面における塩化物イオンの移動に関する境界条件は、熱伝導問題における熱伝達境界と類似の考え方を適用し、表面より出入りする塩化物イオンの流束を次式で表すこととする。

$$J_{cl dif} = -D_{Cl} \frac{C_{cl}^s - V_o \cdot C_{ext}}{h_{Cl}} \quad (1)$$

3. 被覆材の塩化物イオン拡散係数の導出方法²⁾

3.1 概要

本法は、通電試験により得られた物質透過性に関する供試体レベルの実験結果と、濃度拡散メカニズムを仮定した塩化物イオンの移動解析結果が、経験上一定の相関関係を満足することを利用し、表面被覆材の塩化物イオン拡散係数を同定するものである。既報²⁾において、方法を詳述したので、ここでは概略のみ述べる。

3.2 被覆材中における塩化物イオンの拡散移動モデル

ここに、 $J_{cl dif}$: 境界における塩化物イオンの拡散流束[kg/m²/s], D_{Cl} : 水中における塩化物イオンの拡散係数(=1.35×10⁻⁹[m²/s]), C_{cl}^s : コンクリート表面における単位体積中の自由塩化物イオン濃度[kg/m³], V_o : コンクリート単位体積中の総細孔量[m³/m³], C_{ext} : 外部の液状水中の自由塩化物イオン濃度[kg/m³], h_{Cl} : コンクリート表面近傍に形成される塩化物イオン濃度勾配の層(境界層)の厚さ[m]である。 $h_{Cl}=0.00075m$ とする。式中の D_{cl}/h_{cl} は、数式表現の上では熱伝導解析における熱伝達率に相当し、境界の物質透過

性状を表現する。

一方、被覆材を施工した場合、表面における流束は、同様の考え方にに基づき以下の式により表現する。

$$J_{clif} = -D_s \frac{C_{clf}^s - V_o \cdot C_{ext}}{t_s} \quad (2)$$

ここに、 D_s ：被覆材の塩化物イオン拡散係数 [m^2/s]、 t_s ：被覆材の厚さ[m]である。このような定式化を行った場合、計算上、被覆材の物質遮蔽性能は t_s と D_s の比によって決まることとなる。そこで、本研究では、被覆材に対して、厚さを 1.0mm と仮定して、塩化物イオン拡散係数を同定することとした。

4. 実験結果と解析結果

4.1 通電試験結果

図-3に、かぶり 45mm、W/C55%のコンクリートを用いた供試体のシリーズの電流の経時変化を示す。No.3 以外の供試体は電流が概ね一定となる定常状態が現れている。この電流値はかぶりコンクリートと表面被覆材のトータルの物質透過抵抗性の指標と考えることができる。そこで、試験終了時までの積算電流量をそれまでの時間で除した平均電流 I を試験結果の代表値として抽出する。平均電流が小さいほど、物質遮蔽性が大きいことになる。

図-4は、かぶり 45mm、W/C55%のコンクリートを用いた供試体のシリーズの平均電流を示している。被覆材に欠陥を導入した供試体はいずれも被覆材なしの供試体と健全な被覆材に覆われた供試体の中間の結果となった。

4.2 実験結果と解析結果の相関性の検討

平均電流は、そのままでは知見を他の問題に適用できないため、通電試験結果と拡散移動解析結果を比較することにより、被覆材の拡散係数を導き出す。各供試体中の塩化物イオンの拡散移動解析値の代表値として、定常状態における塩化物イオン流束 J を抽出する。

図-5に、被覆材を施工していない供試体に

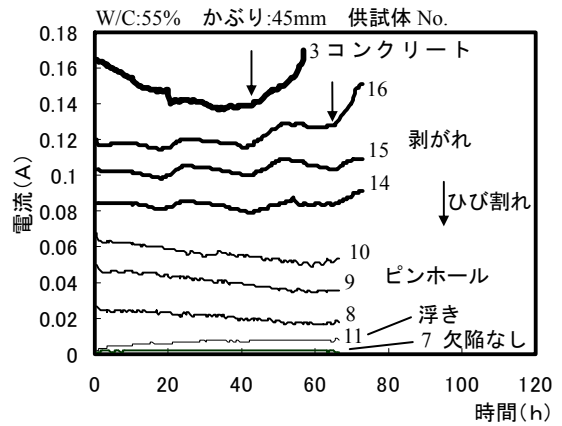


図-3 電流経時変化 (W/C55%)

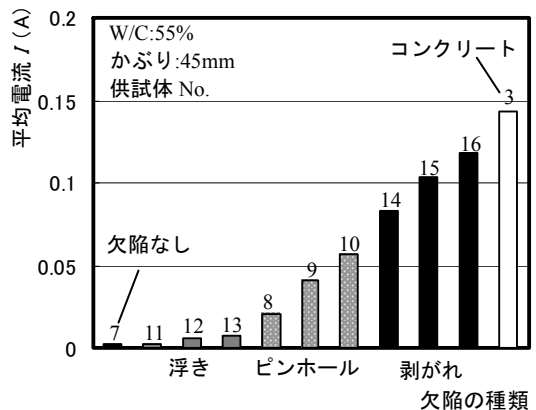


図-4 表面被覆材の欠陥を模擬した供試体の平均電流 I (供試体 No. 7~16)

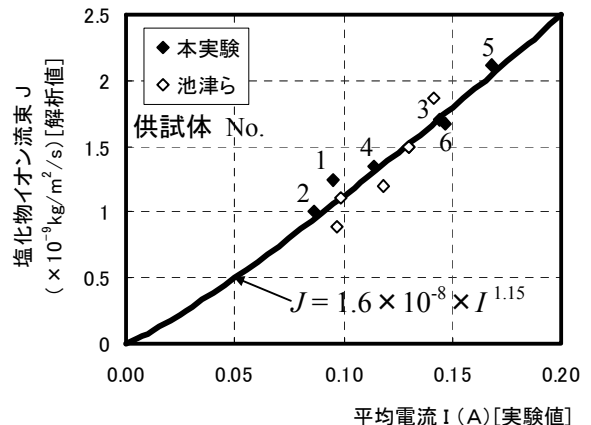


図-5 通電試験結果と拡散移動解析結果の相関

における通電試験結果と拡散移動解析結果の相関を示す。解析に必要なコンクリートの物質移動特性に関する材料パラメータは、著者らの既往の研究²⁾³⁾に基づきコンクリート配合より決定した。図-5には本研究の実験結果の他に、池津らの実験結果²⁾もプロットしている。

水セメント比、かぶり厚さによらず、実験結果と解析結果との間には一定の関係が認められる。この相関関係を以下の近似曲線で表した。

$$J = 1.6 \times 10^{-8} \times I^{1.15} \quad (3)$$

4.3 欠陥を有する被覆材の平均塩化物イオン拡散係数の同定

4.2 で得られた相関関係が被覆材を有する供試体にも成立すると仮定し、解析結果と実験結果が近似曲線上に位置するように被覆材の拡散係数 D_s の値を決定する。このようにして求めた欠陥を有する被覆材の平均塩化物イオン拡散係数を図-6 に示す。

浮きを模擬した欠陥を導入した被覆材は、健全な被覆材と大差ない拡散係数となった。ピンホールの場合約 1~1.5 オーダー、剥がれの場合約 2~2.5 オーダー、健全な被覆材に比べて平均拡散係数が大きくなるという結果となった。ピンホールや剥がれはコンクリートが外部と直接接触してしまうため、そこが優先的な侵入経路となり、平均的な物質遮蔽性能が大きく低下したと考えられる。

5. 被覆材の欠陥が物質遮蔽性能に与える影響に関する検討

5.1 欠陥面積率を用いた平均拡散係数

欠陥を有しない表面被覆材は、コンクリート中への腐食因子の侵入を実用上許さないと考えてよいほど高い物質遮蔽性能を有するが、欠陥を有する場合無視できないほど物質遮蔽性能が損なわれることが実験結果より明らかとなった。したがって、既知情報をもとに欠陥の影響を考慮した表面被覆材の物質遮蔽効果を予測できることが工学的に重要といえる。ここではまず、単純なモデルにより欠陥の影響を表すことができるか検討することにする。

欠陥の状態を一元化した簡単な指標により定量化する場合、まず面積率で表すことが考えられる。欠陥面積率とは表面被覆材の単位面積当たり存在する欠陥の面積の割合であり、欠陥の形状、大きさ、個数によらない。

次に、欠陥を有する表面被覆材の平均拡散係数を簡単に表すことを考える。この場合、面積率を考慮して線形に平均化するモデルが考えら

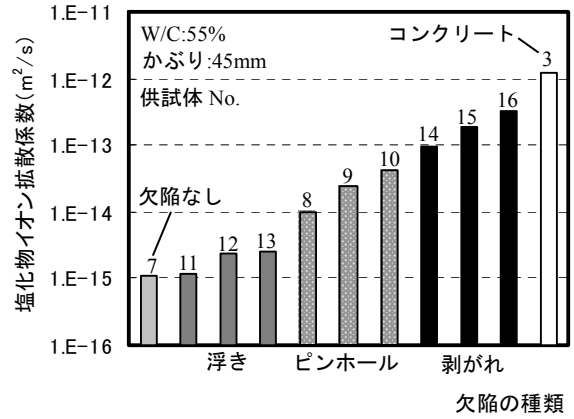


図-6 欠陥を有する被覆材の塩化物イオン拡散係数

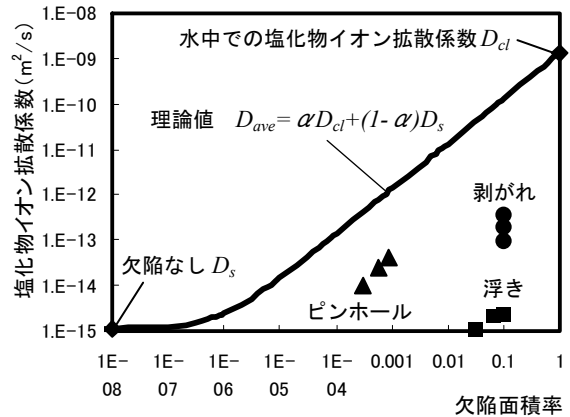


図-7 実験値と理論値の比較

れる。欠陥部分の境界条件が式(1)、健全な被覆材部分の境界条件が式(2)で表されることに整合させると、欠陥を含む被覆材の塩化物イオン平均拡散係数 D_{ave} は、以下の式で表される。

$$\frac{D_{ave}}{t_s} = \alpha \frac{D_{cl}}{h_{cl}} + (1-\alpha) \frac{D_s}{t_s} \quad (4)$$

近似的に以下で表す。

$$D_{ave} = \alpha D_{cl} + (1-\alpha) D_s \quad (5)$$

ここに、 D_{ave} : 欠陥を含む被覆材の塩化物イオン平均拡散係数[m²/s], α : 欠陥面積率, D_{cl} : 水中における塩化物イオン拡散係数[m²/s], D_s : 被覆材の塩化物イオン拡散係数である。

図-7 に欠陥面積率と塩化物イオン拡散係数の関係の実験値を式(5)のモデルとともに示す。浮きを導入した供試体も浮きの面積を欠陥の面積としてプロットした。ピンホールの面積率は浮きや剥がれに比べてオーダーが小さいので、同一グラフ上で比較するために欠陥面積率は対

数で表した。

ピンホールと剥がれを導入した全供試体の結果を見ると、欠陥面積率に応じて平均拡散係数が増加する傾向が確認できる。浮きを導入した供試体の結果はそれらの傾向からやや外れている。すなわち、欠陥により物質遮蔽性能は損なわれることは認められるものの、欠陥面積率と平均拡散係数の間には明確な相関関係は認められない。当然ながら、欠陥のうちでも被覆材に物理的に穴があく欠陥は物質遮蔽性に対して影響が大きい。

欠陥を導入したいずれの供試体の結果も、式(5)で表される曲線よりも拡散係数が小さい側に位置している。つまり、欠陥量を面積率で表して線形平均化モデルを用いて予測した場合よりも、実際には物質遮蔽性は損なわれまいといえる。このような結果が得られた理由は明らかではないが、平均化モデルにより予測することで、安全側の結果を与えることが明らかとなったことはひとつの知見として意義がある。

剥がれを導入した供試体3体は、欠陥の大きさと数は異なるが欠陥面積率は同一である。これら3体は、拡散係数に若干の相違がみられ、0.5cm×4本(供試体 No.16)のように、面積の小さい剥がれが多数あるものは、大きい剥がれが少数あるものよりも物質遮蔽性能が低下した結果となっている。同一欠陥面積率の場合個々の欠陥寸法が小さいほうが物質遮蔽性を損なう傾向が一般的なものであるのかどうかは、今回のデータだけでは確言し難い。この範囲の近傍で欠陥の大きさと面積率をパラメータとした実験を行うことにより明らかにしたいと考えている。

6. 表面改質材によるコンクリートの物質遮蔽性能向上メカニズムの再検討

6.1 研究背景

表面改質材の問題点として、物質遮蔽メカニズムが解明されていないことがあげられる。これは、材料の発展に伴い種類が多種多様となっていることや、内部に含浸する材料であるため

に現象が把握しづらいことなどが理由にある。

池津²⁾は、コンクリート表面を改質する浸透性改質材と、表面に撥水層を形成する浸透性吸水防止材の2種類の改質材について、細孔径分布を測定し、細孔構造変化の観点から物質遮蔽メカニズムの検討を行っている。図-8に表面改質材による細孔構造の変化を示す²⁾。図より、浸透性改質材および浸透性吸水防止材ともに、コンクリートに比べて細孔構造が緻密化しているという結果が得られた。

しかし、浸透性吸水防止材については、コンクリート表面に撥水層を形成する材料であるため、本来細孔構造を緻密化する材料ではないと考えられる。コンクリートの細孔構造が緻密化した理由について物性の観点から明らかにし、吸水防止材によるコンクリートの物質遮蔽性能向上メカニズムを再検討していく必要がある。

そこで本研究では、浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートについて、飽水状態における物質遮蔽性能と、撥水層における細孔構造の緻密化の観点から物質遮蔽メカニズムを再検討した。

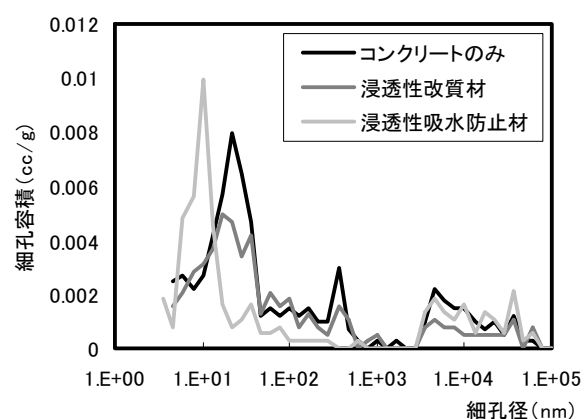


図-8 表面改質材による細孔構造の変化

6.2 実験概要

浸透性吸水防止材の飽水状態における物質遮蔽性能の検討は、塩化物イオン拡散係数を指標値とした電気泳動法(JSCE-G571-2003)により行った。撥水層における細孔構造の緻密化の検討については、窒素ガス吸着法により、細孔径分布を測定した。実験シリーズは、水セメント

比 55%のコンクリートと、浸透性吸水防止材、浸透性改質材とし、これらを比較、考察した。

6.3 実験結果

図-9に塩化物イオン拡散係数（実効拡散係数）の比較を示す。浸透性吸水防止材を施工したコンクリートは、コンクリートのみおよび浸透性改質材を施工した場合に比べ、塩化物イオン拡散係数が小さくなる結果となった。コンクリートのみに対しては約1オーダー、浸透性改質材に対しては約0.5オーダー拡散係数が小さい。よって、浸透性吸水防止材は、飽水状態においても高い物質遮蔽性能を有することが明らかとなった。

図-10に細孔径分布の測定結果を示す。撥水層（吸水防止材）は、コンクリートのみおよび浸透性改質材を施工したコンクリートに比べ、ピーク位置が微小側にシフトし、1~100nm全域において細孔容積が小さい結果となった。吸水防止材によってコンクリート中の細孔構造が緻密化していることを示している。これは、細孔に撥水材粒子が充填することによるものであると考えられる。

以上の結果より、浸透性吸水防止材によるコンクリートの物質遮蔽性能向上メカニズムは、撥水材粒子が空隙に充填し、コンクリートの細孔構造を緻密化させることによる可能性が高いと考えられる。

7. まとめ

本研究において、以下の知見が得られた。

- (1) コンクリート用表面被覆材に発生すると考えられる欠陥のうち、ピンホール、剥がれなど物理的な穴状の欠陥が物質遮蔽性に及ぼす影響が大きい。一方、コンクリートと表面被覆材との間に浮きが生じて、穴があいていなければ物質遮蔽性が大きく損なわれることはない。
- (2) 欠陥を有する表面被覆材の平均的な物質遮蔽性能は単位面積当たりの欠陥面積率と相

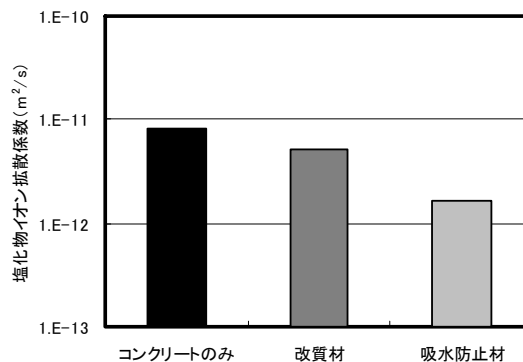


図-9 塩化物イオン拡散係数の比較

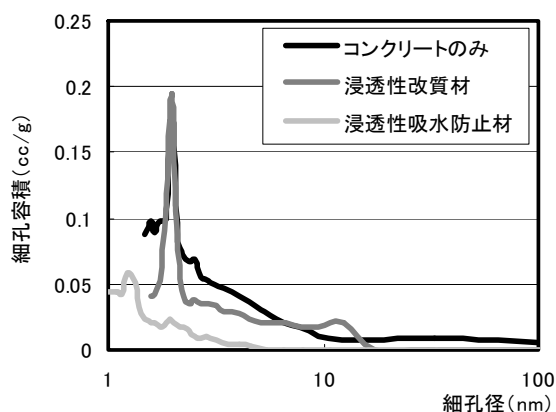


図-10 細孔径分布の測定結果

関がある。

- (3) 実験で得られた欠陥を有する表面被覆材の平均拡散係数は、欠陥量を面積率で表して線形平均化モデルを用いて予測される拡散係数よりも小さい。
- (4) 浸透性吸水防止材によるコンクリートの物質遮蔽性能向上メカニズムは、撥水材粒子が空隙に充填し、コンクリートの細孔構造を緻密化させることによる可能性が高い。

参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法設計施工指針，コンクリートライブラリー119,2005
- 2) 池津和弘：コンクリート用表面被覆材および表面改質材による塩分遮蔽メカニズムの解明，長岡技術科学大学修士論文，2005.2
- 3) 下村 匠，福留和人，前川宏一：微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析，土木学会論文集，No.514/V-27，pp.41-53,1995.5.