

論文 RC部材の繰り返し履歴を考慮した有限要素解析

野崎 幸男*¹、槇田 敦*²、橋本 洋一*³、野口 博*⁴

要旨：本研究では、RC部材を対象とした動的有限要素解析（FEM）プログラムの開発の一環として、動的FEMプログラムで使用可能な繰り返し履歴を考慮した、RCを表現する要素を開発することを目的としている。そのため静的解析下での繰り返し荷重を受けるコンクリートモデルの開発を行った。開発プログラムの検証にはRC平板実験[1]を解析対象とし、解析モデルの検証を行った。

キーワード：FEM解析、繰り返し履歴モデル、RC平板実験

1. はじめに

従来、構造解析には取り扱いの比較的簡便な静的解析が主に行われてきた。しかし、構造物の構造性能に大きな影響を与える外力は、一般には自重などの静的な外力よりも地震に代表されるような動的な外力である。また、静的解析と動的解析とを比較したときに、静的解析では、構造物の慣性力を無視するだけではなく、減衰その他の構造物の動的特性（ひずみ速度の物性への影響など）や構造物と外力との相対作用が考慮されておらず、実際の現象を静的な観点から説明することが困難な場合が多い。

そこで、本研究ではRC構造物の挙動をFEM解析を利用して追跡するにあたり、動的FEM解析プログラムを開発する一環として、RCを表現する要素の構成則に繰り返し履歴を考慮したものを導入し、静的解析下での繰り返し荷重を受けるコンクリートモデルの開発を行うことを目的とした。

2. コンクリートの履歴特性のモデル化

2.1 圧縮応力下の履歴特性モデル

図-1に本解析モデルの圧縮応力下の履歴特性を示す。

ここで、

M点：最大応力点 (ϵ_{cu} , σ_{cu})

E点：除荷開始点 (ϵ_{en} , σ_{en})

C点：除荷曲線と再載荷曲線との交点 (ϵ_{cp} , σ_{cp})

T点：折れ曲がり点 (ϵ_{tp} , σ_{tp})

P点：除荷後に応力が零になる点 (ϵ_{pc} , 0.0)

X点：再載荷曲線と包絡線との交点 (ϵ_{xc} , σ_{xc})

R点：再載荷開始点 (ϵ_{rc} , σ_{rc})

B点：再除荷開始点 (ϵ_{bc} , σ_{bc})

E→T間：直線（剛性は初期剛性）

T→P間：二次曲線（T点で剛性連続）

P→X間：直線

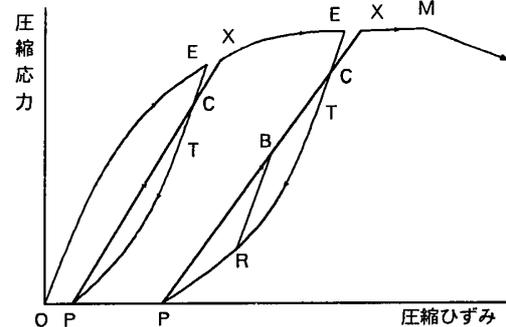


図-1 圧縮側の履歴曲線のモデル化

* 1 千葉大学大学院 自然科学研究科、工修（正会員）（西松建設（株））

* 2 前田建設工業（株）（前、千葉大学大学院 工学研究科）、工修

* 3 東京電力（株）（前、千葉大学大学院 工学研究科）、工修

* 4 千葉大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

C点の応力 σ_{cp} は次式に示す Darwin[2]らの提案式に従う。符号は圧縮を負とする。

$$\sigma_{cp} = 5/6 \sigma_{en} \quad (\epsilon_{en} \geq \epsilon_{cu})$$

P点のひずみ ϵ_{pc} (除荷後の残留ひずみ) は次式に示す Karsan[3]らの提案式に従う。

$$\epsilon_{pc} = [0.145(\epsilon_{en}/\epsilon_{cu})^2 + 0.127(\epsilon_{en}/\epsilon_{cu})] \cdot \epsilon_{cu}$$

P点での剛性 (EPPC) が初期剛性より大きくなった場合は、P点から剛性が初期剛性である直線と包絡線との交点をX点と再定義する。圧縮側に初めて移行した場合で最大圧縮応力の 1/3 以下で除荷した場合は、P点に向かう除荷曲線ではなく、O-T間の包絡線上を戻ることとした。

なお、図-2(a)に示すように、R点からX点に向かう途中でC点を超えない点で除荷となる場合は、E点、C点、T点、P点を固定して、再び除荷する点 (B'点) から傾き初期剛性の直線で包絡線からの除荷曲線に動く (B'→R')。ただし、C点とX点との間で除荷となる場合は、図-2(b)に示すように、包絡線からの除荷曲線がその点を通るようにE点、C点、T点、P点を再定義する。この方法によって、実験で観察されるように、ある程度の応力振幅で除荷・再載荷を繰り返すと、ひずみが漸増する現象が再現できる。

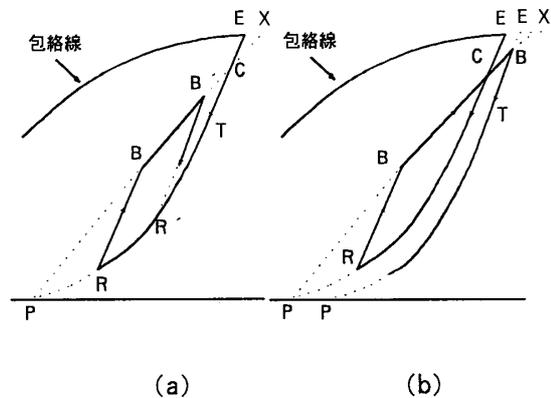


図-2 除荷・再載荷・再除荷時のルール

2.2 引張応力下の履歴特性モデル

図-3 に本解析モデルの引張応力下の履歴特性を示す。

ここで、

- T点：ひび割れ発生点 (ϵ_{cr} , σ_{cr})
- T'点：圧縮の影響を考慮したひび割れ発生点 (ϵ_{ccr} , σ_{ccr})
- E'点：除荷開始点 (ϵ_{tmax} , σ_{tmax})
- P'点：除荷後の応力が零になる点 (ϵ_{pt} , 0.0)
- R'点：再載荷開始点 (ϵ_{rt} , σ_{rt})
- O→T間、P→T'間：直線 (剛性は初期剛性)
- T→E'間、T'→E'間：三次曲線
- E'→P'間、E'→R'間：二次曲線
- P'→E'間、R'→E'間：直線

鉄筋とコンクリートとの付着によるテンションスティフニング効果の表現は、白井ら[4]の提案式に従う。

除荷履歴 (E'~P'間) は、既往の実験[5][6]を参考にし、塑性ひずみを求め、二次曲線で定義した。

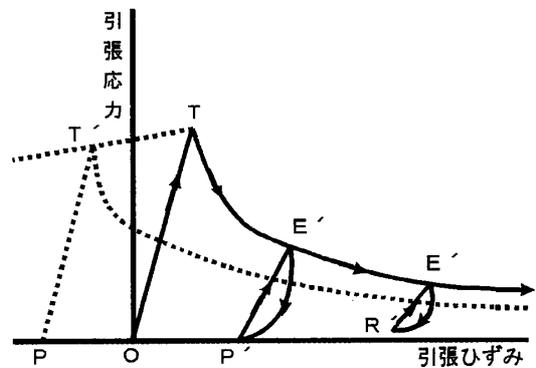


図-3 引張側の履歴曲線のモデル化

2.3 圧縮剛性－引張剛性モデル間の相互作用

繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリートには、一般に2方向のひび割れが発生し、引張剛性モデルと圧縮剛性モデルとは密接な関係を持ち、載荷・除荷・再載荷の載荷履歴においても連続的につなぎ合わされたループを描けるモデルである必要がある。

図-4に引張－圧縮間の履歴曲線のモデル化を示す。ここで、

J点：除荷曲線から圧縮直線への移行点(ϵ_j , σ_j)

この履歴モデルでは、圧縮・引張のいずれも除荷時に塑性ひずみが発生し、履歴面積の表現が可能である。

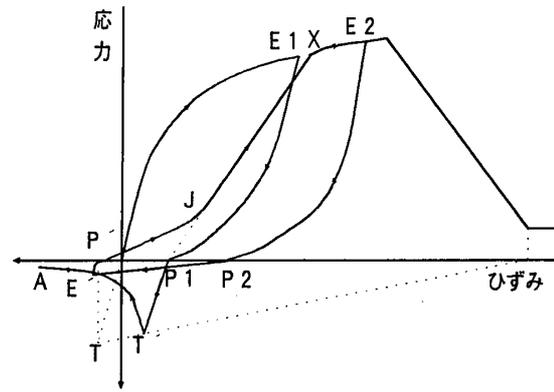


図-4 引張－圧縮間の履歴曲線のモデル化

2.4 載荷・除荷・再載荷の判定基準

既往の研究[7][8]では解析中の除荷・再載荷の判定は、部材に与える強制荷重の除荷・載荷に従っているものがある。しかしこの方法を採用した場合、部分除荷（部材レベルと積分点レベルでの等価1軸ひずみの増分量の符号が異なる状態）が生じる場合に、その履歴が無視されてしまう。本解析では部分除荷が生じた場合にも対応するため、要素の積分点レベルでのひずみの値およびその増分量を除荷・再載荷の判定基準にすることとした。表-1に除荷・再載荷の判定基準を示す。

表-1 除荷・再載荷の判定基準

$\epsilon \leq 0$		$0 < \epsilon$	
$\Delta\epsilon \leq 0$	$0 < \Delta\epsilon$	$\Delta\epsilon \leq 0$	$0 < \Delta\epsilon$
再載荷	除荷	除荷	再載荷

ϵ : 等価1軸ひずみ、 $\Delta\epsilon$: ϵ の増分量

2.5 ひび割れのモデル化

繰り返し荷重を受けるRC平板の解析では、除荷による低応力状態下での主応力方向が、収斂計算などで不安定となることがある。そこで、第一のひび割れ発生後、ひび割れ方向と最大主応力の直交方向とを一致させることが困難なため、本解析では固定ひび割れモデルを使用した。このモデルはコンクリート積分点において引張強度を超えた時点で、その最大主応力に直交する方向、即ちひび割れ方向を記憶する。このひび割れ方向は後の最大主応力方向には影響されず固定される。その後の応力は応力座標変換マトリックスによりひび割れ方向での応力として求める。

また、ひび割れを含むRC要素の非線形性能の特徴である、付着によるひび割れ直交方向の引張剛性（テンションスティフニング効果）は白井式を、ひび割れ面に沿ったせん断伝達（せん断剛性）は Al-Mahaidi モデル[9]を、ひび割れ平行方向の圧縮剛性（圧縮低減）は榎本・野口式[10]を用いて表現した。

3. 平板試験体の解析

ひび割れ発生後の引張－圧縮間の履歴特性が得られている実験結果は、現時点では限られている。本研究ではそれらの1つである1985年にトロント大学において、Collinsらによってせん断実験[1]が行われたRC平板を解析対象試験体とし、解析モデルの検討を行った。

3.1 Collinsらによる平板基礎実験の概要

Collinsらの行った平板実験での試験体は補強筋比と載荷方法（応力比）をパラメータとした3体（SE8, SE9, SE10）である。表-2に試験体の諸元を、図-5に試験体形状を示す。本研究では、この3体のうちSE8とSE9を検証のための解析対象試験体とした。

3.2 試験体のモデル化

要素分割に関しては、平板試験体の特徴である一様応力場となることを利用して、一要素の4節点シェル要素で表現した。補強筋は積層面材にして、シェル要素の一層としてシェル要素と同一挙動を示すようにした。実際の試験体の周辺部における加力治具との接続部分は、厳密には応力分布が乱れていることが予想されるが、周辺部の破壊が先行していないものに関しては、一要素によるモデル化が可能であると考えられる。

図-6に境界条件を示す。加力方法はローラー支持をしている2カ所の節点に変位を与え、純せん断変形をさせた。

コンクリートは2軸応力の構成則には Darwin 等の等価1軸ひずみに基づく直交異方性モデルを、破壊条件には Kupfer らの研究に基づくモデルをそれぞれ用いた。圧縮応力-ひずみ関係は、応力上昇域には Saenz 式、下降域には修正 Kent-Park 式を用い、2.1で述べた繰り返し履歴を考慮している。

3.3 解析方法

前述の鉄筋コンクリートの履歴特性のモデル化を、材料挙動を定義するユーザーサブルーチンとして解析の前処理・後処理に優れている汎用 FEM 解析プログラム ABAQUS に組み込んだものを解析プログラムとして使用した。解析は接線剛性法により、また収束計算は Newton 法により、変位制御で行った。

3.4 解析結果の検討

1) コンクリートの応力-ひずみ履歴関係

図-7、8に Collins らの実験及び解析から得られたコンクリートの応力-ひずみ履歴の比較を示す。ひび割れ発生後の引張-圧縮間の履歴性状は実験結果と比較的良く対応している。大ひずみレベルに至るまで、履歴ループは連続性を保ちながら、滑らかな形状を示している。しかし、履歴面積が実験に比べて解析では小さい点など、履歴曲線の形状に関して、今後対応性の検討を行っていく必要がある。

表-2 試験体諸元

試験体名	コンクリート強度 kgf/cm ²	鉄筋比 %	降伏点 kgf/cm ²	応力比 V:fx:fy
SE8	377.4	不等量 X:2.94 Y:0.98	5017 4884	-
SE9	450.8	等量 2.94	4303	-
SE10	346.8	不等量 X:2.94 Y:0.98	5017 4884	1:-1/3:-1/3

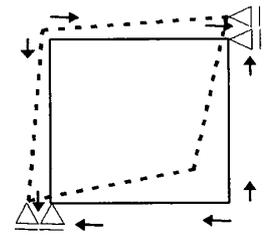
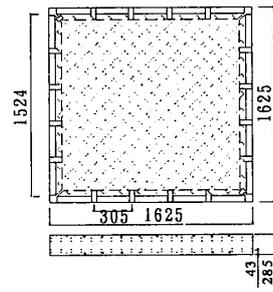
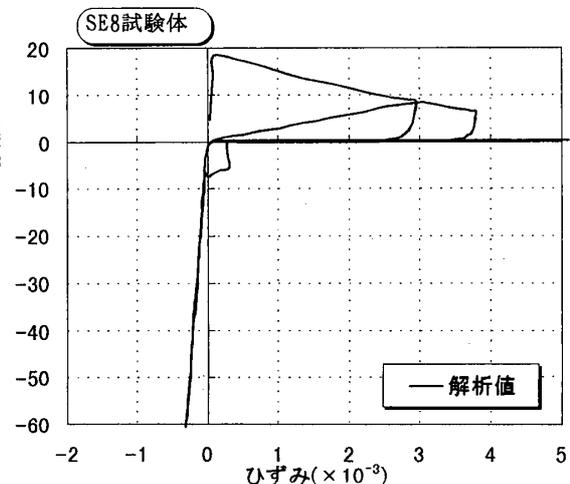
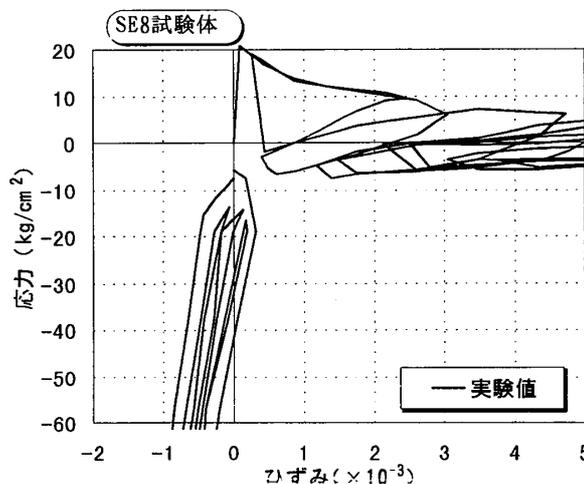


図-5 試験体形状

図-6 境界条件



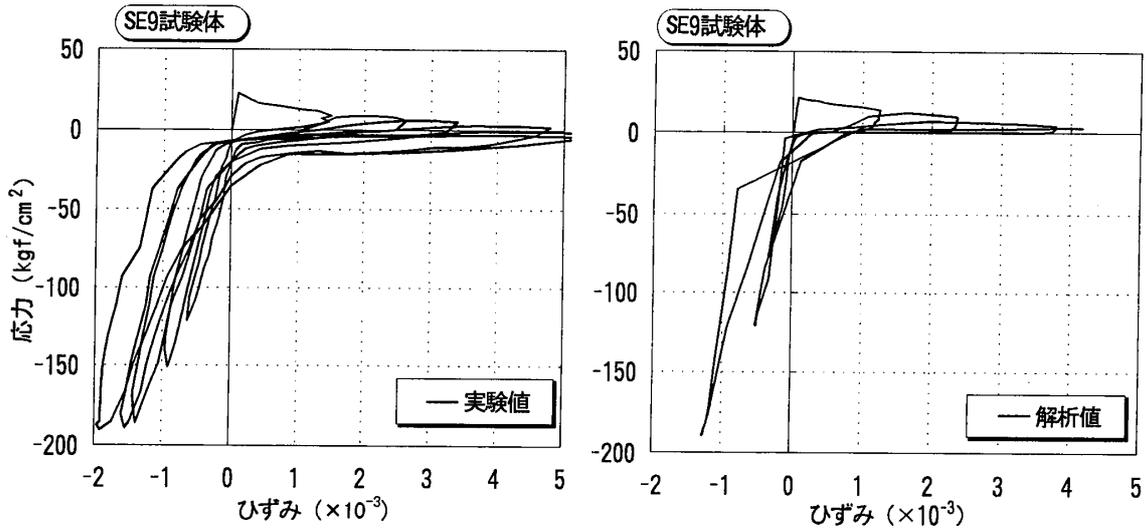


図-8 コンクリートの応力-ひずみ履歴 (SE9 試験体)

2) せん断応力-せん断ひずみ関係

図-9に Collins らの実験及び解析から得られたせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。初期剛性からせん断ひび割れ発生後の二次勾配への移行や、せん断ひずみの大きなレベルでの、除荷から再載荷に切り替わるあたりの形状は、比較的良く対応している。しかし、図-10に示すように、せん断ひずみの小さなレベルでの除荷から再載荷に切り替わる辺りの勾配に差が見られる。また、全般的に、実験に比べ解析の方が履歴面積が小さめとなる傾向が見られる。

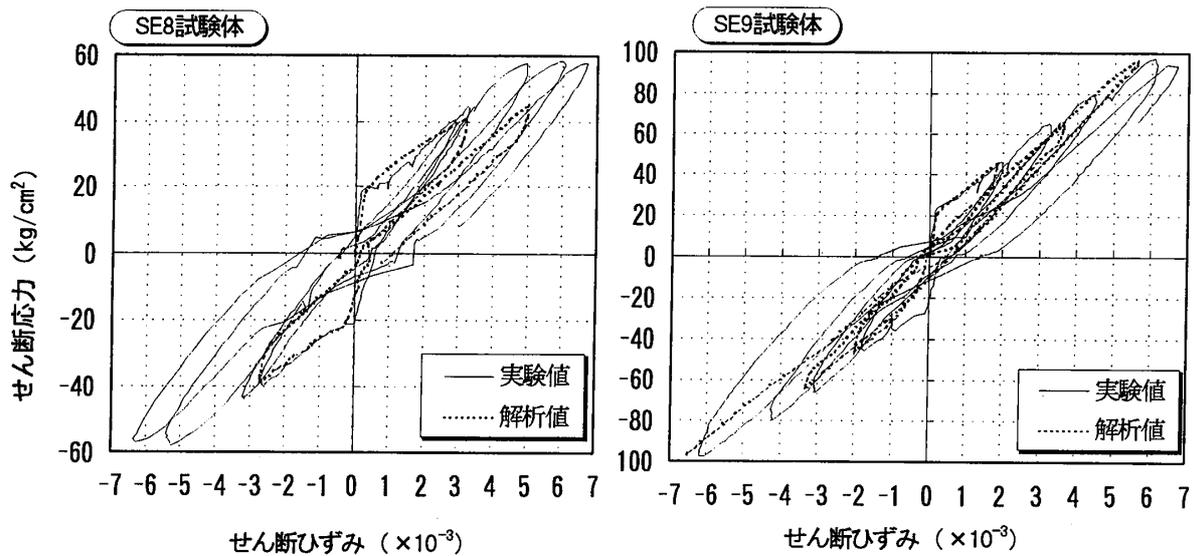


図-9 せん断応力-せん断ひずみ関係

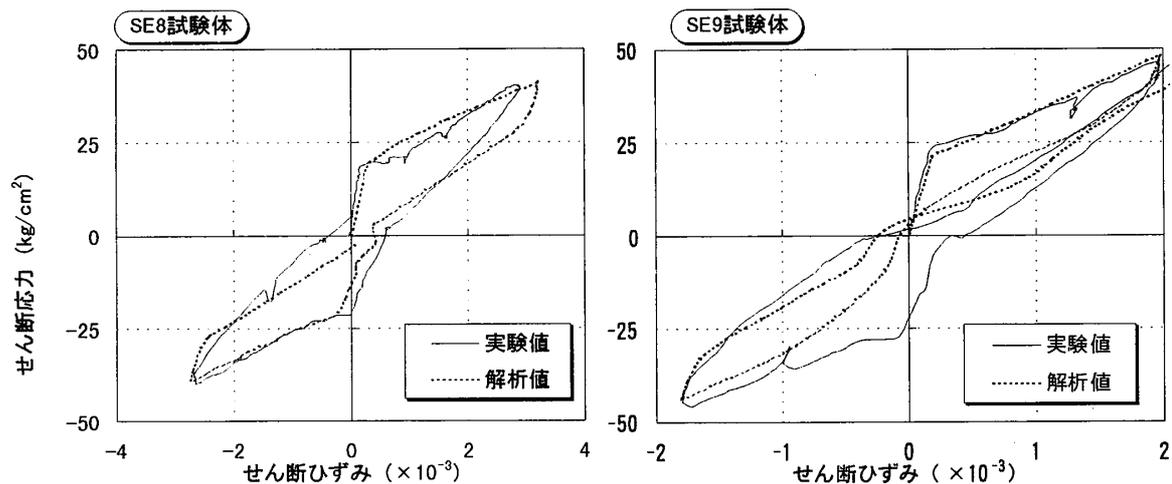


図-10 せん断ひずみの小さい範囲での履歴曲線

4. まとめ

本研究を以下のようにまとめる。

・繰り返し履歴を考慮したモデルを用いて FEM 解析を行った結果、ひび割れ発生後の引張-圧縮間の履歴性状、及び初期剛性からせん断ひび割れ発生後の二次勾配への移行に関しては、比較的よく対応している。

・解析で繰り返しを重ねる回数が増えると実験と比べ、解析では履歴面積を小さく評価する傾向にある。しかし実験結果の包絡線と解析結果は良く対応していると言える。本研究では、RCを表現する要素の履歴における繰り返し効果を考慮しているが、他の影響因子についても今後考慮しなければならないと考えられる。

【参考文献】

- [1]N. J. Stevens, M. P. Collins, "Analytical Modeling of Reinforced Concrete Subjected to Monotonic and Reversed Loading", Univ. of Toronto Publication No.87-1 Department of Civil Engineering, Dec., 1986
- [2]Darwin,D. and Pecknold,D.A.: Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete, Civil Engineering Studies, SRS No.409, Univ. of Illinois, July, 1974.
- [3]Karsan,I.D. and Jirsa,J.O.: Behavior of Concrete Under Compressive Loadings, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.95, No.ST12, pp.2543-2563, Dec.,1969.
- [4]佐藤稔雄、白井伸明他：鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究（その6）（その7）、建築学会大会、1978.9、pp1615-1618
- [5]佐藤稔雄、白井伸明他：RC耐震壁の履歴特性と非弾性解析、建築学会大会、1980.9、pp1803-1804
- [6]岡村 甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技法堂出版、1991.5
- [7]申 鉉穆：繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の有限要素解析、東京大学学位論文、1988.6
- [8]鳥山壮一：RC部材の耐震性能に関する FEM 解析、千葉大学修士論文、1996.2
- [9]Al-Mahaidi, R. S. h., "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members", Report No.79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Jan., 1979
- [10]榎本勝則、野口 博他：ひび割れた超高強度コンクリートの圧縮特性の劣化に関する解析的研究、建築学会大会、平成6年9月、pp737-738