

3.1.2.3 SVMによる簡易耐震診断システムの開発

目次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5ヵ年の年次実施計画
- (e) 平成14年度業務目的

(2) 平成14年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
 - 1) SVMによる簡易耐震診断システムの開発
 - 2) 既存建物の耐震安全性評価事例の分析と社会的反応に関する調査
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 平成15年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 SVMによる簡易耐震診断システムの開発

(b) 担当者

所属	役職	氏名
慶應義塾大学理工学部	助教授	三田 彰
日本女子大学住居学科	助教授	平田京子
慶應義塾大学大学院理工学研究科	大学院生	萩原宏美

(c) 業務の目的

地震被災度の高い既存木造建物に対して、耐震安全性を高めるため、耐震診断技術の開発、耐震補強指針の開発、行政ならびに市民が容易に理解でき普及可能性の高い耐震補強技術の開発、耐震補強後の建物についての耐震補強診断技術の開発をおこなう。

(d) 5カ年の年次実施計画

1)平成14年度：

サポートベクトルマシン (SVM) を用いた、耐震診断手法の理論的な構築を開始する。また、現状の住宅の耐震安全性能についての定量的な評価を行い、開発する耐震診断手法の診断結果の妥当性について検討する。

2)平成15年度：

前年度に得られた理論的な成果を基に、SVM を用いた耐震診断システムの開発を開始する。また、耐震安全性レベルに対するユーザーの要求を定量的に把握するための簡便な手法について研究する。

3)平成16年度：

前年同様の検討を継続するとともに、ワイヤレスで振動データを取得可能な形態センサシステムの使用について検討し、2つの振動センサからデータ取得可能なワイヤレスセンサシステムを試作する。また、前年度の研究成果に基づいて、携帯端末に搭載可能な診断プログラムを作成する。

4)平成17年度：

開発したワイヤレスセンサの妥当性を検証する。また、高密度センサネットワークの設置された建物に適用して、その精度と適用可能性について確認する。

5)平成18年度

ワイヤレスセンサを用いて取得される診断データおよび診断結果を蓄積する仕組みについて検討すると共に、結果的に蓄積されたデータベースから、保険や保険デリバティブの設計に活用可能な有用な情報を抽出するデータマイニングの仕組みについて検討する。

(e) 平成14年度業務目的

本研究では、損傷の有無とその位置の検知を目的としてサポートベクトルマシン (SVM) を用いた、耐震診断手法の理論的な構築を開始する。固有振動数の剛性変化に対する感度パターンをサポートベクトルマシン (SVM) によって識別することにより、せん断型建造物の損傷層の特定が可能であることを示す。損傷検知に必要な固有振動数は、せん断型建築建造物の場合、基礎と最頂部に1つずつセンサがあれば精度良く算出可能で、各層すべてにセンサを設置することなしに、簡便に損傷を検知できるシステム構築が可能となる。単層損傷に対する学習によって構築した SVM は、複数層の損傷検知にも適用可能なことが示唆される。また、現状の住宅の耐震安全性能の評価手法についての事例調査を行い、社会的反応の側面についての検討も行う。

(2) 平成 14 年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は、次の研究を実施した。

SVMによる簡易耐震診断システムの開発(慶應義塾大学 三田彰、萩原宏美)

既存建物の耐震安全性評価事例の分析と社会的反応に関する調査(日本女子大学住居学科 平田京子)

(b) 業務の実施方法

1) SVMによる簡易耐震診断システムの開発

せん断建造物を対象として、数少ないセンサから比較的容易に求めることが可能である固有振動数の変化率を特徴ベクトルとして、サポートベクトルマシン (SVM) を構築し、解析的にその損傷識別能力を検討した。また、小型の模型を製作し、実験的に提案手法が有効であることを確認した。

2) 既存建物の耐震安全性評価事例の分析と社会的反応に関する調査

住宅耐震性能の適切な定量的評価手法を模索し、簡便な評価手法の提案に寄与するため、本研究では既存建物の評価手法の事例を収集し、分析を行った。

①ユーザーにとって分かりやすいレベルの評価方法をさぐるための手がかりにする

ため、これまでの耐震設計レベルに対する社会的反応を文献調査した。特に建物1棟全体としての評価手法にどのようなものがあるか、その解析手法の特徴は何かなどについて広範な文献調査を行い、まとめを行った。

②大地震を教訓として変化してきたその当時の耐震設計の状況とそれに対する社会的な反応を世論からさぐった。これには世論を表す新聞記事と雑誌・書籍や研究論文を調査対象にして文献調査を実施した。

(c) 業務の成果

1) SVMによる簡易耐震診断システムの開発

a) 業務の要約

固有振動数の剛性変化に対する感度パターンをサポートベクトルマシン (SVM) によって識別することにより、せん断型構造物の損傷層の特定が可能であることを示す。損傷検知に必要な固有振動数は、せん断型建築構造物の場合、基礎と最頂部に1つずつセンサがあれば精度良く算出可能で、各層すべてにセンサを設置することなしに、簡便に損傷を検知できるシステム構築が可能となる。また、単層損傷に対する学習によって構築した SVM は、複数層の損傷検知にも適用可能なことが示唆される。本研究では、損傷の有無とその位置の検知を目的として SVM を構築するが、たとえば、特徴ベクトルのノルムは損傷の程度に感度を持つ量であり、位置の特定だけでなく、定量評価への拡張も期待できる。

航空機やインフラの急速な老朽化が契機となり、構造物の健全性をタイムリーにかつ正確に把握する構造ヘルスマニタリングシステムに関する研究が盛んに行われている。こうしたシステムの導入は、メンテナンスコストの低減に直接貢献するだけでなく、劣化や損傷による事故や災害の可能性を事前に予測することにより、個別の構造物だけでなく、社会全体にとってのリスク要因を減らすことにもつながる。保険制度と結びつけることで、さらに効果的な仕組みとできる可能性もある¹⁾。

健全性を把握するためには、振動や歪み、温度などの物理量を計測し、その値から構造物の健全性や損傷の指標を推定することが必要となる。代表的な方法としては、構造物の振動をセンサでとらえ、剛性や減衰を損傷指標として求める方法がある。こうした推定に用いられる手法は、システム同定手法と呼ばれて、高度な手法も含めて、多くの研究がある。たとえば、海上油田プラットフォームは、その支持架構が海中深くにあり、目視等によって確認することが困難なため、固有振動数の変化などによって、損傷を評価しようとする研究が過去に盛んに行われてきた。また、航空機や自動車の分野で急速な発展を遂げたモード解析²⁾に基づく健全性診断手法にも様々なものが提案されている。文献³⁾に振動現象に基づく手法の主なものについて詳しくまとめられている。

いくつかの手法のうち、固有振動数の変化による手法⁴⁾は、損傷に対する感度が低く、ローカルな損傷検知には向かないとされ、また、MAC・COMAC 解析を踏まえたモード

形状比較⁵⁾、⁶⁾や柔性を用いて損傷位置を特定する研究⁷⁾も、得られた結果から、損傷の度合いを定量的に評価するには至っていない。

建築構造物の場合、せん断型の構造システムとしてモデル化することが多く、その場合、層レベルの損傷をその剛性の低下や減衰の増加によって評価することは合理的である。時間領域での状態方程式表現に基づき、層の剛性と減衰を並列処理によって逐次求める手法⁸⁾、⁹⁾や、各層の振動応答データのフーリエ変換を用いて、周波数領域で静的な極限を取ることで層剛性および層減衰の評価式を導出する方法¹⁰⁾などが提案されているが、いずれも多く階で加速度などの振動データが取得できることが前提となっている。しかしながら、層レベルの損傷を求めるために、全層に加速度計を設置するのは、現時点ではコスト面で引き合わないことが多い。そこで、本研究では、極力少ないセンサの情報を最大限に利用して、簡便に層レベルの情報を検出する方法について提案する。必要なデータは、たとえば、構造物の基礎と最頂部の加速度のみである。このデータから固有振動数を求め、健全時の固有振動数と比較して作成される固有振動数変化率ベクトルを特徴ベクトルとして、健全性を診断する。特徴ベクトルの識別には、パターン認識手法の一種であるサポートベクトルマシン¹¹⁾を活用した。その手法の概要と適用可能性について以下に示す。

b) 業務の実施方法

高い識別能力を持つサポートベクトルマシンと損傷検知との関係についてまず検討した。そのために、せん断型構造物の損傷と固有振動数の感度関係を解析的に導き、固有振動数の変化率を特徴ベクトルとするパターン認識手法を構築した。構築したシステムの性能の評価のために、数値モデルによるシミュレーションおよび小型模型実験による定量的評価を行った。以下に、サポートベクトルマシンについて概説する。

サポートベクトルマシン(Support Vector Machine、以下 SVM)は、1960年代に Vapnik らによって提案された超平面による特徴空間の線形分割法に端を発するパターン認識手法である。線形空間に限定した SVM は特に線形 SVM と呼ばれる。しかし、一般の問題に対して適用する場合には、線形分離の可能なケースは極めてまれである。その場合、非線形空間を線形識別可能な高次元空間に写像してから線形 SVM を適用することが数学的には可能であるが、写像した上で、分割超平面を求める計算量は莫大で、現実的ではない。1990年代に入り、この問題を解決するカーネル関数と呼ばれる関数が提案¹¹⁾された。この関数によって、実際の写像空間を意識することなく、線形 SVM とほぼ同等な手順で SVM 構築が可能となり、適用範囲が大きく広がった。このカーネル関数を用いて拡張された SVM を非線形 SVM と呼ぶ。その構築手順の概略以下のとおりである。

(i) 線形 SVM

図1に示すように特徴ベクトル \mathbf{x}_i が重み \mathbf{w} を用いて、2クラスに分割することが可能

であるとする。その分割平面となる超平面は次式で定義される。

$$(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i) + b = 0 \quad (1)$$

超平面で分割される領域のどちらにあるかは、

$$f(\mathbf{x}_i) = \text{sgn}((\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i) + b) \quad (2)$$

で定義される識別関数の出力の正負で判別される。ただし、分割超平面は、図1中の実線や破線のように無数に存在し、一意に定まらない。そこで(1)式の値が境界上で1となるような制約条件を設ける。

$$\min_{i=1, \dots, n} |(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i) + b| = 1 \quad (3)$$

あるいは等価な条件として

$$f(\mathbf{x}_i) \cdot ((\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i) + b) \geq 1 \quad (4)$$

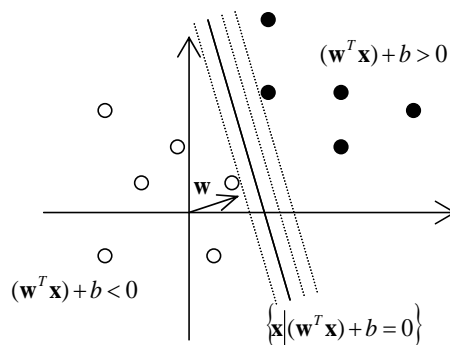


図1 超平面による線形識別

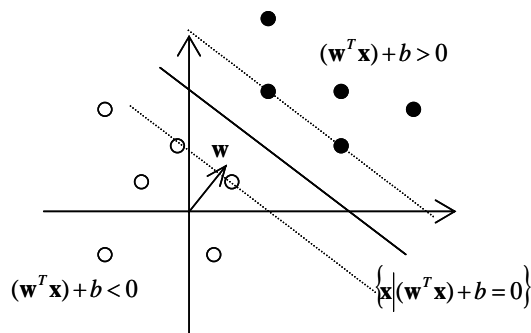


図2 制約条件を課した線形識別

とする。その概念を図2に示す。この時、超平面に最も接近する特徴ベクトルつまり、境界上に存在する特徴ベクトルを、特にサポートベクトルと呼ぶ。超平面から、両側のサポートベクトルまでの距離（マージン）は、定義から常に $1/\|\mathbf{w}\|$ なので、識別能力を高めるには、このマージンを最大にする \mathbf{w} を選ばばよい。線形 SVM の問題は(4)式の制約条件下、次式を最小化することに帰着する。

$$d(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \quad (5)$$

このようなプロセスで分割超平面が決定され、汎用性の高いパターン認識が可能となる。ここで定義される SVM は例外なしに特徴ベクトルを分割し、識別誤差がないので **Hard Margin SVM** と呼ばれる。

一方、若干の例外を許容して緩和したものを **Soft Margin SVM** と呼ぶ。例外を許容するために(6)式で定義されるスラック変数(**Slack Variable**)と呼ばれる緩和係数を導入する。

$$\xi_i \geq 0, i = 1, \dots, n \quad (6)$$

制約条件式(4)は次式のように緩和される。

$$f(\mathbf{x}_i) \cdot (\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b) \geq 1 - \xi_i, i = 1, \dots, n \quad (7)$$

この場合の最小化問題は(7)式の条件の下で、下式を最小にする \mathbf{w} を求めることに変更される。

$$d(\mathbf{w}, \xi) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (8)$$

この条件は、なるべく例外データを少なくするために、緩和係数の和を小さく、かつ識別能力を高める \mathbf{w} を定めることになる。係数 C は緩和の程度と識別精度とのトレードオフを定めるものである。

(ii) 非線形 SVM

一般的には、線形識別が適用できるケースは少ない。その場合は、図3のように元の空間（入力空間）を線形 SVM が適用できる高次元空間（特徴空間）へ写像（ $\mathbf{F}: \mathbf{x}_i \mapsto \mathbf{z}_i$ ）することによって、上記の線形 SVM を適用できる。ただし、そのまま適用すると、途中で必要となる $(\mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{x}_i))$ を求める計算量が莫大となるため、現実的ではない。ところが、**Mercer** の条件

$$(\mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{x}_i)) = K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) \quad (9)$$

を満たすカーネル関数を用いると、直接入力空間で算出が可能となり、非線形 SVM が現実的なものとなる。代表的なカーネル関数には次式に示すようなものがある。

Polynomial 関数 $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = (\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)^d \quad (10)$

Radial Basis 関数 $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \frac{\exp(-\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2)}{\sigma} \quad (11)$

ここにあげた以外にも数多くのものが存在する。最小化問題は写像された特徴空間で解くのではなく、これらのカーネル関数を用いて、入力空間で直接解くことが可能となる。

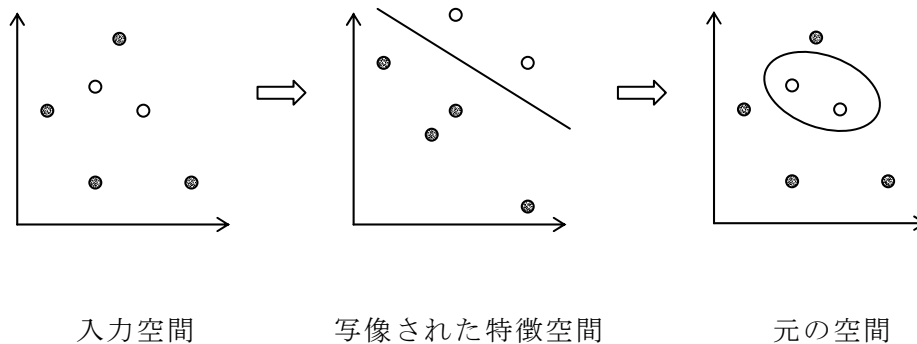


図3 写像を用いた非線形 SVM

c) 業務の成果

(i) 剛性変化と固有振動数の関係に基づく特徴ベクトルの構築

減衰のない構造物の運動方程式をモード空間で表現すれば、 r 次のモードについて次式で表現できる。

$$(-\omega_r^2[M] + [K])\{\phi\}_r = \{0\} \quad (12)$$

$[M]$, $[K]$ はそれぞれ質量マトリクスおよび剛性マトリクスである。 ω_r , ϕ_r は r 次の固有振動数および固有モードである。上式を剛性要素 k_{ij} で偏微分し、転置した r 次固有モードベクトルを左から乗ずれば、固有振動数 ω_r の剛性要素 k_{ij} に対する感度は次式となる。

$$\frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}} = \frac{1}{2\omega_r} \{\phi\}_r^T \frac{\partial [K]}{\partial k_{ij}} \{\phi\}_r, (r, i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

剛性マトリクスの対称性を考慮すれば、結果的に

$$\frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}} = \begin{cases} \frac{1}{\omega_r} \phi_{ir} \phi_{jr}, & i \neq j \\ \frac{1}{2\omega_r} \phi_{ir}^2, & i = j \end{cases} \quad (14)$$

と関係づけられる。ここで ϕ_{ir} は r 次モードの i 成分を意味する。高次の項を無視すれば、固有振動数の変化分 $\Delta\omega_r$ と剛性要素変化分 Δk_{ij} との関係は下式となる¹³⁾。

$$\Delta\omega_r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}} \Delta k_{ij} \quad (15)$$

単純化した建築構造物のモデルとして、図4のような n 個の質量 m_1, m_2, \dots, m_n と n 個のばね k_1, k_2, \dots, k_n からなるせん断構造物を想定すると、 i 層のばね k_i の変化によって、剛性要素で変化があるのは $k_{ii}, k_{(i-1)(i-1)}, k_{i(i-1)}, k_{(i-1)i}$ のみとなって、下式のように単純化される。

$$\Delta\omega_r = \frac{\Delta k_i}{2\omega_r} (\phi_{ir}^2 + \phi_{(i-1)r}^2 - 2\phi_{ir}\phi_{(i-1)r}) \quad (16)$$

これを ω_r で除すことにより、振動数の変化率とし、

$$\frac{\Delta\omega_r}{\omega_r} = \frac{\Delta k_i}{2\omega_r^2} (\phi_{ir} - \phi_{(i-1)r})^2 \quad (17)$$

i 層にかかわる固有振動数の変化率ベクトルを下式で定義する。

$$\{\gamma_i\} = \left[\frac{\Delta\omega_{1i}}{\omega_1}, \frac{\Delta\omega_{2i}}{\omega_1}, \dots, \frac{\Delta\omega_{ni}}{\omega_n} \right] \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (18)$$

ここで、 $\Delta\omega_{ri}$ は i 層の剛性変化による r 次固有振動数の変化率である。この固有振動数の変化率ベクトルとばねの変化には直接相関があるので、この変化率ベクトルを特徴ベクトルとしたときに、損傷層を特定可能な固有のパターンを持つことが十分に期待される。本論文では、この固有振動数の変化率ベクトルを特徴ベクトルとして、損傷層特定に用いることが可能かどうかについて検討する。

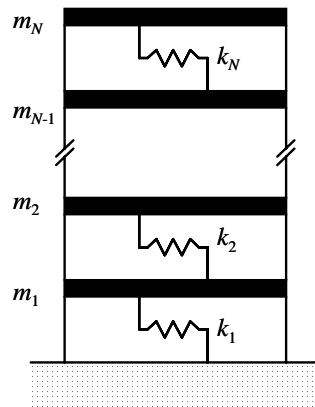


図4 N層せん断構造物

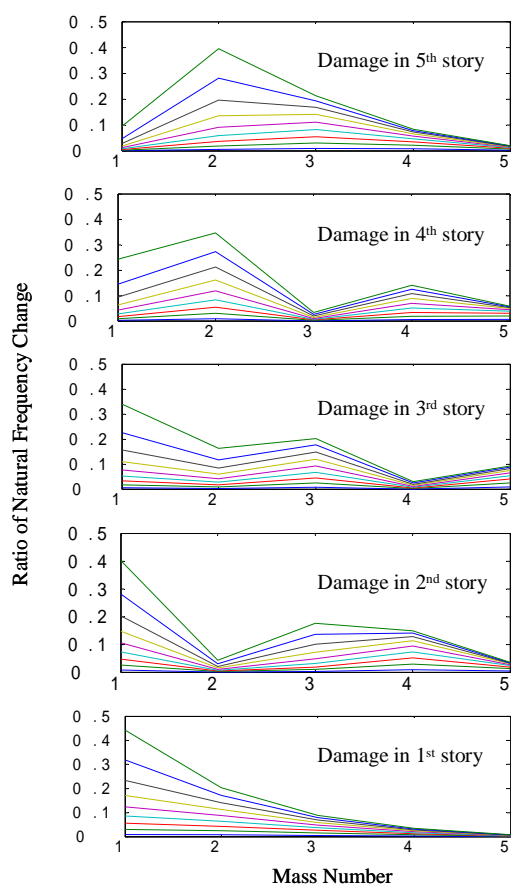


図5 各損傷パターンにおける特徴ベクトルの形

図5に5層のせん断構造物を想定し、それぞれの層が損傷によって、元の剛性の95%, 85%, ..., 25%, 15%とした場合の固有振動数変化率ベクトルを算出して示す。固有振動数変化率ベクトルは、損傷@パターンごとに特徴的な形状をしており、このベクトルを特徴ベクトルとすることによって、損傷位置の検出の可能性が十分あることが示唆される。なお、剛性との感度式において、固有振動数の変化率の2乗とする考え方¹⁴⁾もある。

(ii) サポートベクトルマシンによる損傷同定

特徴ベクトルの各要素は一般的には同じ次元であるとは限らず、またその確率的な変動特性も異なっている。したがって、なんらかの指標に沿って特徴ベクトルの要素を基準化することが必要となる。実際、サポートベクトルマシン自身のチューニングよりも特徴ベクトルの基準化の巧拙によって、その認識精度が大きく左右されることも珍しくない。

もっとも簡単なモデルとして、2層のせん断構造物を想定する。各層の質量および剛性は同一であるとする。第1層の剛性が元の剛性の90%, 85%, 80%, 75%, ..., 20%, 15%の場合について(18)式で定義される固有振動数の変化率ベクトルを算出した。第2層についても同様の低減率の場合について算出した。このケースでは特徴ベクトルの要素が2

次元であるので、グラフ表示が可能である。図6に基準化をしていない特徴ベクトルを示す。また、損傷のない場合は固有振動数の変化がないとした。

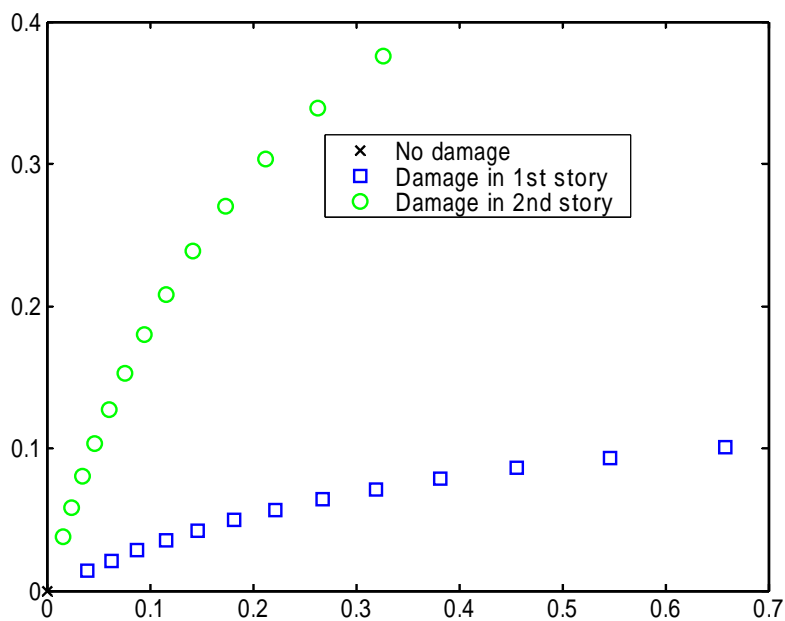


図6 2層構造物の固有振動数変化率ベクトル

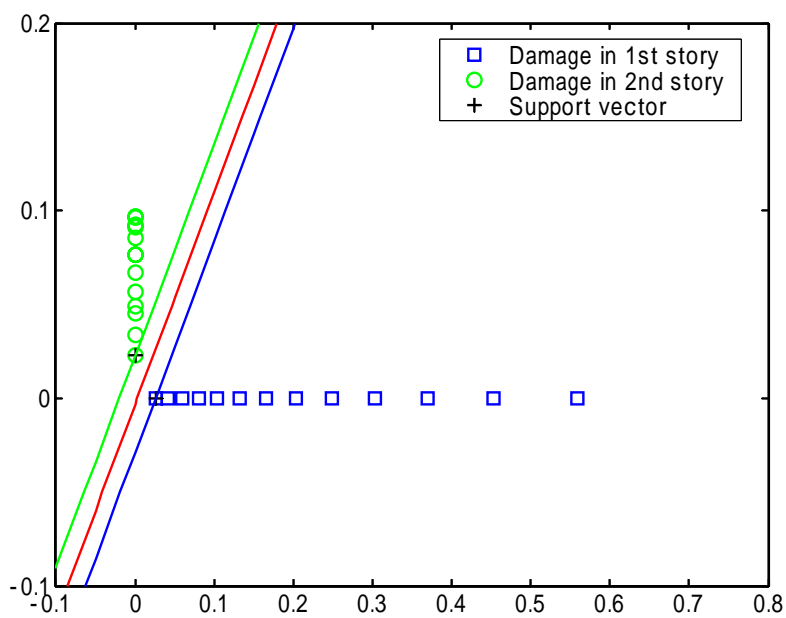


図7 バイアスで基準化した特徴ベクトルとサポートベクトル

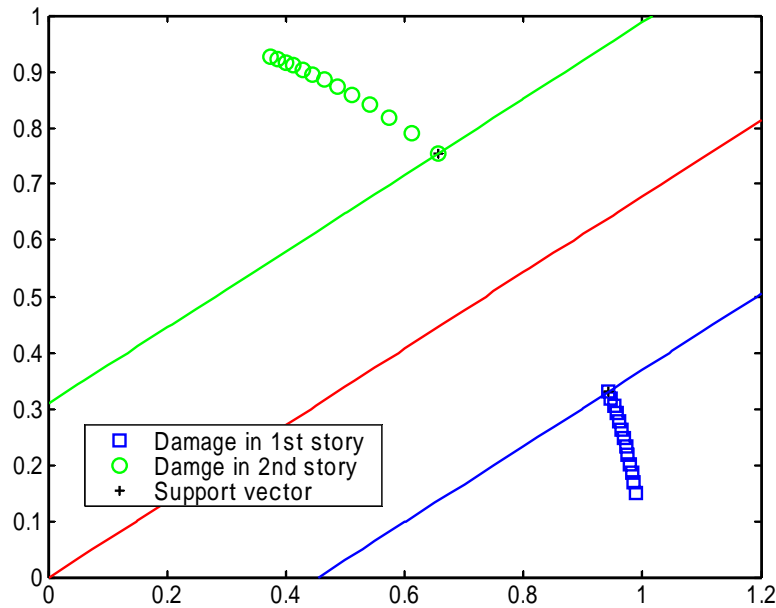


図 8 ノルムで基準化した特徴ベクトルとサポートベクトル

この図から、それぞれの領域が重なっておらず、このまま超平面（この場合は直線）で領域分割が可能であることが一目で判断される。少なくとも 2 層モデルの場合、サポートベクトルマシンによる識別は基準化を施していない特徴ベクトルを用いても容易に可能であるといえる。固有振動数の変化率から層損傷を求めようとする本手法の可能性が示唆される。固有振動数の変化率ベクトルは無次元量であり、その変動の程度も図 5 あるいは図 6 からわかるように同程度のオーダーである。ここでは、基準化として 2 種類について検討した。ひとつはベクトルのバイアス成分を除去するもので、全層の剛性を一律に低下あるいは増加させることを意味する。一律の増減は、実際には荷重の増減や温度変化によるものが主と考えられるので、物理的にも合理的な基準化である。バイアス成分は、固有振動数変化率ベクトルの最小要素がゼロになるように調整した。その結果を図 7 に示す。また、その時の線形 SVM による分割平面とそのマージンも示した。+印はマージン上にある特徴ベクトルであるので、この場合のサポートベクトルである。それぞれの特徴ベクトルが直線状に分布しており、結果的に次元が低減されていることがわかる。

一方、特徴ベクトルを単位のノルム（絶対値）となるように基準化した場合を図 8 に示す。この場合はすべての特徴ベクトルが単位半径の円周上に分布することになる。多次元の場合には、超球表面上となり、この場合も次元が 2 次元から 1 次元に低減される。図 8 に示すようにこの場合のマージンは図 7 に比べて大きいことがわかる。ただし、これは図 6 に示されるようにノルムの本来小さな特徴ベクトルを円周上に移動したことによって生ずるものであるため、こうした変動の小さな領域のデータの誤差を増幅させるおそれもあることに留意が必要である。

2層の場合には、線形SVMの適用が可能であり、バイアスによる基準化、ノルムによる基準化の双方とも良いパターン認識が可能であることが示された。しかし、層数が増えると、特徴ベクトルの次元が上がり、もはや線形SVMによって精度の高い識別は不可能となる。ここでは、5層のせん断構造物を例に取り、SVMの構築手順とその検証について述べる。

対象とする5層せん断構造物は各層の質量および剛性がすべて同一のものとする。この場合、固有振動数は5次まで存在するので、特徴ベクトルの次元は5次元となる。損傷の検知は2クラス分類によるものとし、 i 層に損傷のある特徴ベクトルとそうでないものとの認識するSVMをSVM i と呼ぶこととする。損傷の無い特徴ベクトルを識別するSVMはSVM0とした。したがって、総数6のSVMを構築することになる。最適な非線形SVM構築のため、下記の前提の下に最適化操作を行った。

- ・ 特徴ベクトルはバイアスで基準化する。
- ・ カーネル関数は(11)式で定義される Radial Basis 関数とする。
- ・ 緩和係数を導入する。

したがって、構築されるSVMは非線形 Soft Margin SVMとなる。決定すべきパラメータは重みを表すパラメータである(8)式の C および(11)式のカーネル関数内の σ である。両者はそれぞれ独立ではなく、誤識別の許容の程度を表すパラメータとなっている。これらのパラメータは、超平面による識別に対して、誤識別が最も少なくなるように設定した。識別関数によって学習データが誤識別なく分類でき、かつそれらのデータがマージンの内部に存在しない確率が高いものを識別精度が良いとした。学習には各層について元の剛性を95%から10%まで5%ずつ低下させて、各層ごとに18のモデルを作成した。また、無損傷のケースとして全層とも剛性低下のないケースを付け加えた。つまり、学習に用いたモデルの数は91である。

表1に、各SVMのパラメータ一覧と交差確認法の一つである l-o-o 法 (leave-one-out 交差確認法、データを一つずつ抜き出して最適化を行い、抜き出したデータが正しく識別される確率を算出する) に基づく精度を ξ α 推定法¹⁵⁾で算出して示した。

表 1 5層せん断構造物用 SVM のパラメタと識別精度

SVM	σ	c	l-o-o[%]
SVM0	60	20	88.5
SVM5	90	90	81.3
SVM4	90	80	83.3
SVM3	90	80	82.3
SVM2	90	80	86.5
SVM1	90	80	78.1

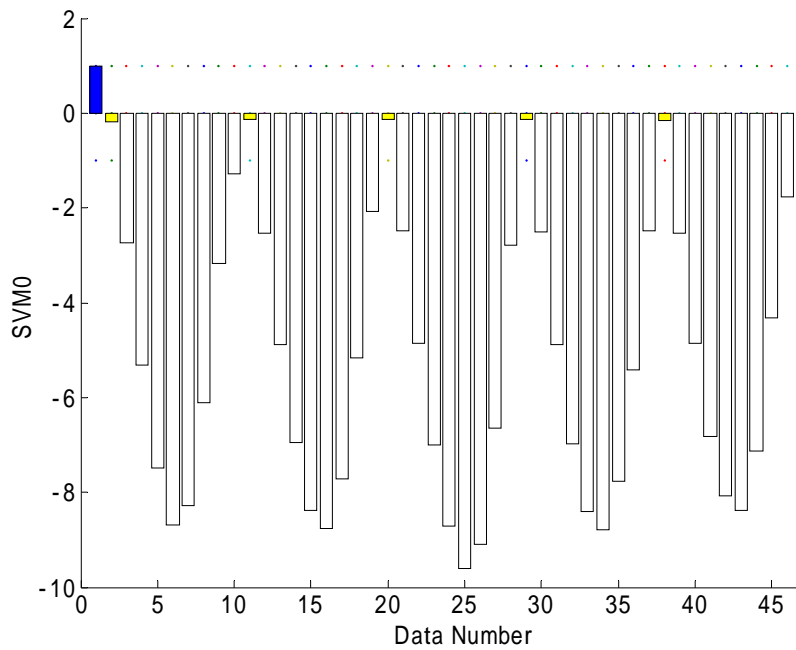


図 9 5層用 SVM0 からの出力結果

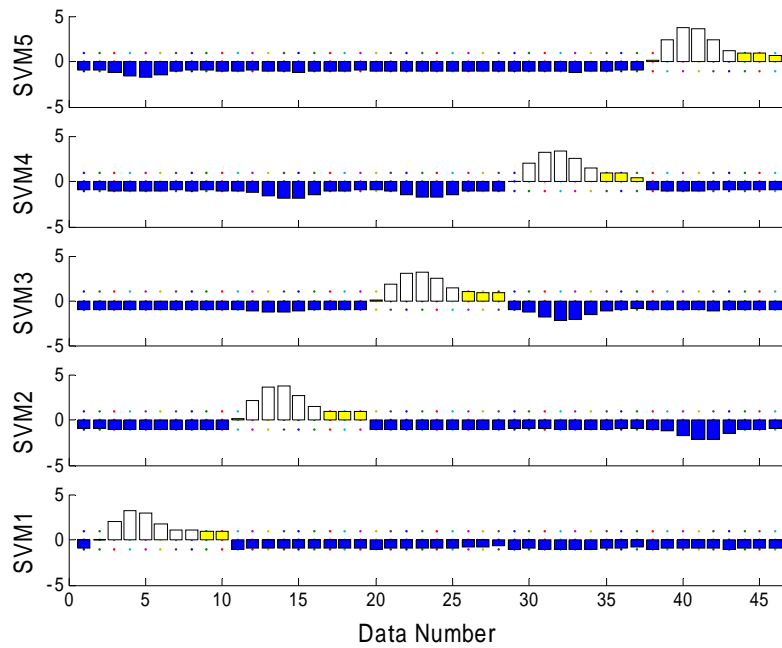


図 10 5層用 SVM1~5 からの出力結果

学習の確認のために用いたシミュレーションデータは 46 個である。データ No. 1 は無損傷を示すゼロベクトル、次の 9 個は 1 層目のみ損傷したとするデータで、剛性を 95%, 85%, ..., 15%へと 10%ずつ低下させたものである。以下、5 層まで同様なデータを作成した。対象とする層に損傷がある、つまり剛性が低下していると識別されたもののうち、マージンの外側のものを白、マージンの内側にあるものを灰色とした。損傷がないか、あるいは対象層以外に損傷があると識別されたものをマージンの内外の区別なく黒で示すこととした。図 9 には SVM0 の出力が示されているが、無損傷の最初のデータのみ黒の出力となり、その他のデータについてはすべて損傷がどこかにあることを示唆する出力となっている。出力の大きさは分割超平面からの距離を表していて、1 となるとき、その特徴ベクトルはマージン上にあることを示す。図 10 には、その他の SVM からの出力を示す。すべてのケースについて、当該層に損傷があることを正確に識別しており、かつ当該層以外に損傷がある場合に誤識別はされていない。損傷のごく小さな領域および損傷が大きな領域について SVM の出力はマージンの内側に入るものの、識別自体は正確で、固有振動数の変化という比較的算出しやすい指標から損傷位置の特定が十分可能であることが示された。

これまでの検討から、損傷が特定の層にのみ発生しているときには、提案された手法によってその損傷を検知することが十分な精度で可能なことが示された。しかし、実際の損傷は特定の層にのみ発生することはまれであり、複数の層が同時に損傷し、しかもその程度に違いがあることが普通である。この場合、すべての損傷の組み合わせについて学習用の特徴ベクトルを生成して、複数層の検知に用いるのがもっとも精度が高いと思われるが、損傷の程度があまり大きくない範囲においては、近似的に各層の損傷程度の特徴ベクトルに及ぼす影響は加法的であると考えられるので、単層損傷検知のための SVM によって、複数層の損傷検知に適用できる可能性がある。そこで、複数層損傷の例として、表 2 に示すような 3 層目と 5 層目においてそれぞれ損傷程度を変えて組み合わせたデータを生成し、単層用の SVM1~5 に入力した。出力結果を図 11 に示す。片方の剛性低下が小さく、他方の剛性低下が大きいときに、誤識別が生じているが、その他の場合には 2 つの層の損傷を識別することが可能であることがわかる。

表 2 3 層、5 層同時損傷のデータ番号一覧

5th story 3rd story	0.9k ₀	0.8k ₀	0.7k ₀	0.6k ₀	0.5k ₀
0.9k ₀	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
0.8 k ₀	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
0.7k ₀	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15
0.6k ₀	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20
0.5k ₀	No.21	No.22	No.23	No.24	No.25

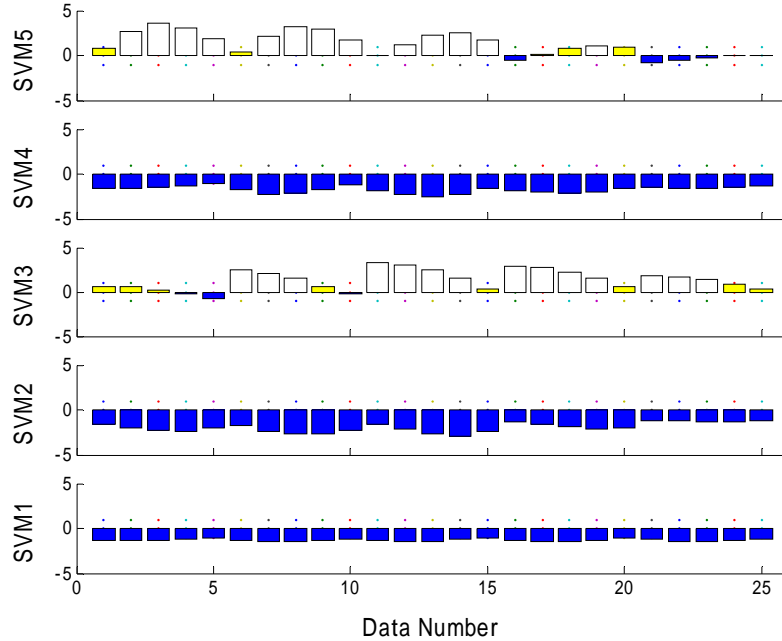


図 11 3層、5層同時損傷モデルに対する出力結果

図 1 2 に示すような、各層高さ 30cm の 5 層せん断構造試験体を使った実験を行った。各層は、4 本のリン青銅の板ばねで支持された 30×30×1cm のアルミ平板から成り立っている。試験体は、4 本とも厚さ 2.5mm の板ばねを使用した層を健全層、4 本のうち、2 本を厚さ 1.5mm の板ばねに置き換えたものを損傷層とした。損傷層の剛性は健全層の剛性の約 60% である。損傷層を 1 層から 5 層まで順番に変更して、SVM からの出力を調べた。用いた SVM はあらたに学習させたものではなく、4.2 で構築したものである。

図 1 2 に示すように、実験模型基部をパルス加振して、各層に設置したサーボ型加速度計により、サンプリング振動数 1kHz で 10 秒間計測した。デシメーションによって 50Hz にリサンプリングした後、1 層から 5 層まで、計測したすべての自由振動波形を用いて、ERA(Eigensystem Realization Algorithm)法¹⁶⁾を適用した。この方法により、1 次から 5 次まで精度よく固有振動数を同定することができた。健全なモデルを No.1、1 層損傷モデルを No.2、以下 5 層損傷モデルの No.6 まで 6 つのケースについて(18)式で定義される固有振動数変化率ベクトルを算出した。これまでの検討と同じく、このベクトルからバイアス成分を除去した上で、特徴ベクトルとして各 SVM に入力した。図 1 3 からわかるように、すべてのケースについて誤診断なく、出力されることが確認された。

以上より、固有振動数の剛性変化に対する感度パターンを SVM によって識別することにより、せん断型構造物の損傷層の特定が可能であることが示された。損傷検知に必要な固有振動数は、せん断型建築構造物の場合、基礎上と最頂部に 1 つずつセンサがあれば精度良く算出可能で、各層すべてにセンサを設置することなしに、簡便に損傷を検

知できるシステム構築が可能となる。また、単層損傷に対する学習によって構築した SVM は、複数層の損傷検知にも適用可能なことが示唆された。本研究では、損傷の有無とその位置の検知を目的として SVM を構築したが、たとえば、特徴ベクトルのノルムは損傷の程度に感度を持つ量であり、位置の特定だけでなく、定量評価への拡張も期待できる。

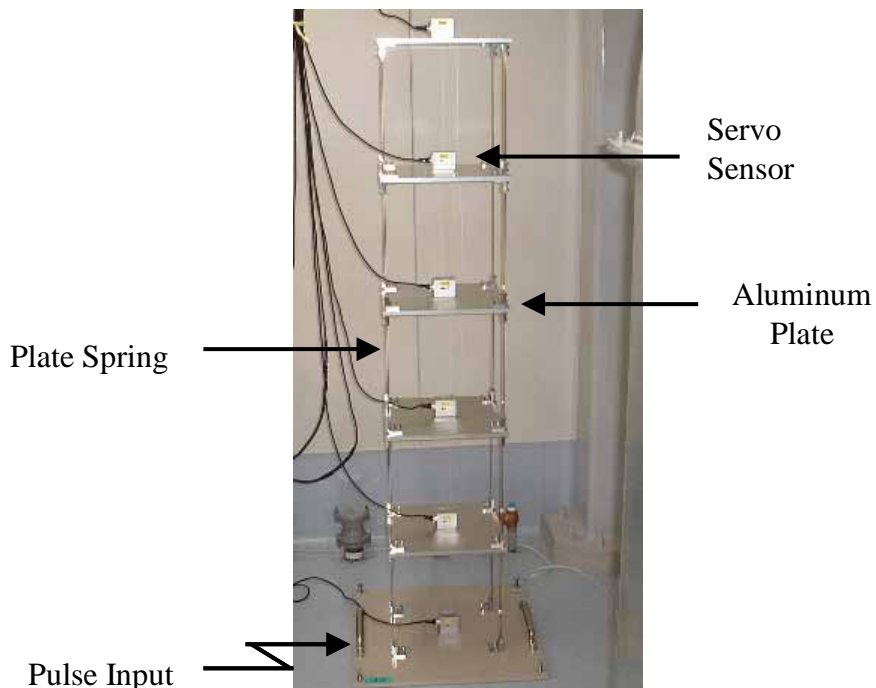


図 12 損傷検知模型実験の概要

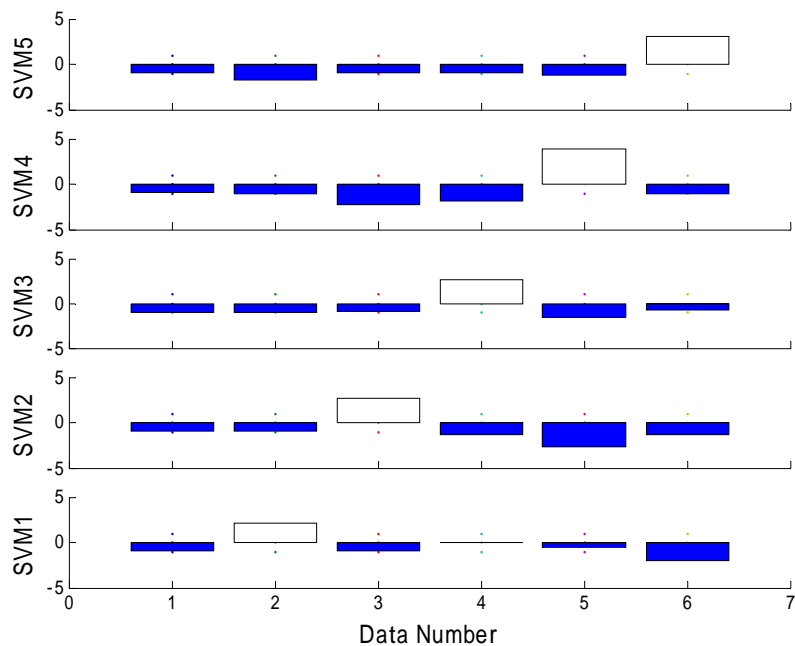


図 13 実験結果に対する 5 層用 SVM1~5 からの出力結果

2) 既存建物の耐震安全性評価事例の分析と社会的反応に関する調査

a) 業務の要約

住宅耐震性能の適切な定量的評価手法を模索し、簡便な評価手法の提案に寄与するため、本研究では既存建物の評価手法の事例を収集し、これからの評価手法の手がかりとする。また今後は住宅ユーザー・オーナーに直接安全性レベルを理解してもらうよう、設計者が説明責任を果たす必要がある。このことからユーザーにとって分かりやすいレベルの評価方法をさぐるための手がかりにするため、これまでの耐震設計レベルに対する社会的反応を調査する。

まず、建物の定量的な耐震安全性評価手法のうち既存手法にどのようなものがあるか、また現在建っている建物の安全性評価手法についての全体像を横断的に把握する。特に建物1棟全体としての評価手法にどのようなものがあるか、その解析手法の特徴は何かなどについて調査を行い、そのまとめを行った。

次に大地震を教訓として変化してきたその当時の耐震設計の状況とそれに対する社会的な反応を世論からさぐった。これには世論を表す新聞記事と雑誌・書籍や研究論文を調査対象にして文献調査を実施した。

建物1棟全体の耐震性能評価はそれほど簡単ではない。現在のところ、こうした建物全体を評価する耐震安全性能評価手法には、既存建物の耐震診断基準における I_s 値が用いられる。これは耐震安全性能を数値的に把握できるという点で性能グレードの把握に役立つものである。ただし事務所や商業建築などのいわゆるビルディングなどには適用しているが、たとえば住宅のように壁量計算だけの構造設計が行われる建物には適用しにくい。しかし日本の建築物の中で最も多いのは住宅であり、経年劣化などにより地震被害を受けるリスクが大きい住宅の耐震安全性能を強化しておくことが必要である。また少なくとも住宅のもつ危険性についてユーザー・オーナーが正確に把握しておくことが望まれる。そこで、木造や住宅などの小規模な建築物における耐震安全性を簡便に評価する手法を考察し、なおかつユーザーの理解しやすい指標でユーザーに直接理解してもらうことをめざして研究することを目的とする。

まず既存の評価手法の提案を文献から調査し、どのようなものがあるかについて全体像を把握する。特に建物1棟全体としての評価手法にどのようなものがあるか、その解析手法の特徴は何かなどについて調査を行い、そのまとめを行った。

また2つめの目的として、既往の大地震において当時の設計水準とその問題点はどのように情報としてユーザーに伝わり、社会にどう評価されたのかという社会的反応を調査した。安全性能の評価手法には、これに限るという絶対的な評価手法が存在しているわけではない。そのため大地震の際に建物倒壊や損壊が生じた際の社会的反応から、ユーザーに分かりやすい、安心できる手法を考究する。

b) 業務の実施方法

(i) 耐震安全性能評価手法

文献調査を実施し、1996 年度より 5 年間程度を対象として以下の文献を中心に解析例・分析事例を調査した。

- ・ 日本建築学会大会学術講演梗概集
- ・ 日本建築学会構造系論文集
- ・ 日本建築学会各支部研究報告集
- ・ 各種国際会議、国内シンポジウムや研究発表会の要旨集

(ii) 耐震安全性に関わる設計レベルや当時の設計手法に対する社会の反応

大正時代から 1995 年の兵庫県南部地震までを対象として、次の資料を調査した。

- ・ 全国規模の新聞紙の地震関連記事全般
(朝日新聞、読売新聞、毎日新聞、日経新聞)
- ・ 震災時の専門家の意見を見るために当時発行された雑誌類
- ・ 書籍、震災誌など

c) 業務の成果

(i) 耐震安全性能評価手法

建物耐力の定量的評価事例では、建物耐力の平均値および変動係数など、基礎データになりうるような応用性のある事例について収集することを意図した。上記文献に掲載されている全論文の中から、既存建物の耐力および変動係数の調査結果データに関わるものを、構造種別ごとに表 3 にまとめた。

木造建物では 1 層せん断力係数の評価が多く、No.4 データが兵庫県南部地震の被害率に見合う耐力パラメータとして算出されたものである以外は、実在の既存建物の評価といえる。一方 RC 造でも降伏ベースシア係数で表現されたものが増えている。これらの結果からみると、耐震安全性能の評価にはベースシア係数が分かりやすく、構造種別を問わず比較できる指標になることが分かる。その他に、 I_s 値は研究データの蓄積が多く、木造を除いては実際の建物のデータが多数集まっている。

これらの耐震性能指標を用いて、たとえば本研究ではユーザーの要望から目標となる住宅の耐震安全性レベルについて構造種別を問わず算出するために、図 14 のような手法を使って、ベースシア係数で耐力と建設地の地震危険度を算出し、ユーザーの要望する目標耐震安全性レベルの評価を行うことなどを計画している。この方法では建物 1 棟全体を 1 つの安全性指標で算出でき、設計者には設計指標にそのまま応用でき、ユーザーには分かりやすい形に置き換えて説明することができる。本図のフローの詳細な説明は、文献 8) を参照されたい。

今年度の研究においては、2 つのヒントが得られた。1 つは簡便な設計者用性能指標としてベースシア係数や I_s 値が考えられ、これを木造などに応用する手法を試みること

である。もう1つはこれをユーザーに分かりやすい指標に置き換え、性能指標を説明できるようにすることである。このような2点について、来年度はさらに研究を進める予定である。

表3 実在建築物の耐力に関する統計調査・分析結果

a) 木造軸組工法住宅の耐力に関する調査・分析

NO.	建物建築年 調査地	データ数	調査・分析の条件	平均値	変動 係数	文献
1	昭和初め～ 平成7 西宮・京都市	5 (震災後の 住宅)	在来構法木造住宅の静的水平加力実験。最大耐力時の1層せん断力係数の評価(余力あり)	0.43～0.54 平均0.48		3
2	昭和47 石川県 金沢市	2	在来構法木造2階建住宅の静的水平加力実験。Co=0.2に対応する1階層せん断力係数	0.41～0.69		4
3	昭和36～59	関東X市の 2階建専用 住宅約120 ～130	住宅の水平耐力が設計層せん断力係数Co=0.2に等しい時1となるよう評点を定めた時の評点分布	1.42	0.16	1
4	地震被害データに基づく被害関数の算出	-	兵庫県南部地震の被害率に見合う耐力パラメータとして算出された値(降伏ベースシア係数)	0.6～0.8	0.6	5

b) RC実在建築物の耐力に関する調査・分析

NO.	建物建築年 調査地	データ数	調査・分析の条件	平均値	変動 係数	文献
1	昭和46以前 東北地方	242 全用途	中低層RC建物の終局強度を降伏ベースシア係数で表現	1.195	0.43	2
2	- 阪神の震度VII 地域	234 多くは共同 住宅	7階建以下の建物で1階の弱軸方向の壁終局ベースシア係数の全年代平均値	1.2		6
3	新耐震設計法 以後 宮城県中心	11 集合住宅	実在建築物の階数別の降伏ベースシア係数のうち梁間・桁行方向の小さい方の値	2階建2.29 3階建1.52 4階建1.54 5階建1.58	0.34 0.48 0.31 0.25	7
4	地震被害データに基づく被害関数の算出	-	兵庫県南部地震の被害率に見合う耐力パラメータとして算出された値(降伏ベースシア係数)	1.6～1.8	0.6	5

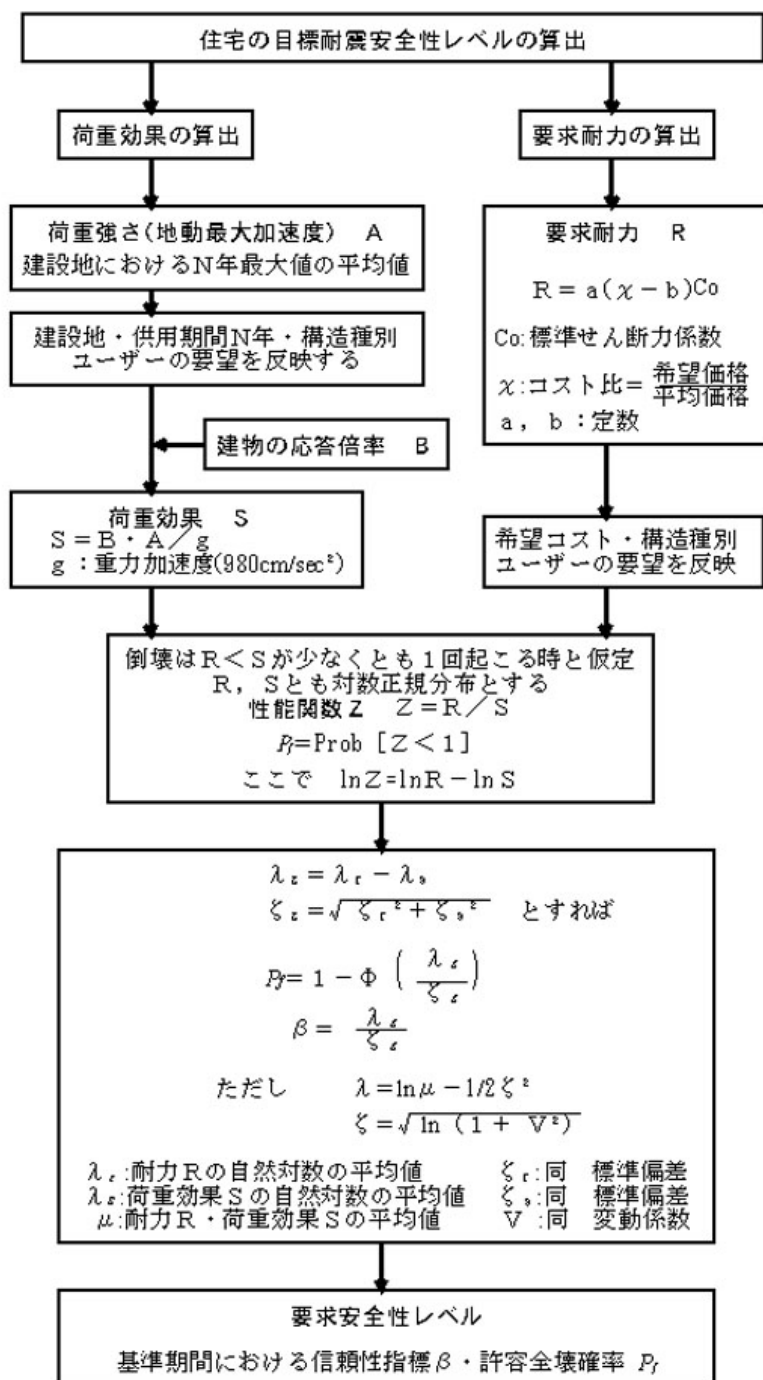


図 1 4 目標耐震安全性レベルの算出フロー

(ii) 耐震安全性に関わる設計レベルや当時の設計手法に対する社会の反応

大地震後における社会の反応、すなわち世論を伝える情報メディアとしては、昭和までは新聞・ラジオ・雑誌、それ以後は新聞とテレビが中心であった。そこで新聞をとりあげ、全国紙4紙（朝日・読売・毎日・日経）において各地震の発生後約2ヶ月間、地震関連記事が収束するまでを対象に文献調査を行った。

① 関東大地震から戦前まで

大正時代には関東大地震が発生したが、当時建物の安全性向上の視点での記事はほとんどなく、耐震安全性に関する世論は高まらなかった。特に火災による被害が著しかったため、火災と地震に対して有効なRC造の導入に期待が寄せられた。一方、大きな転機である震度規定の導入や耐震設計が開始されたことは社会からはほとんど関心を向けられなかった。

② 戦時中の大地震

続いて東南海地震から南海地震までは、軍事目的で意図的に情報操作が行われた。救援よりも国民監視に重点が置かれ、地震について語ることを許されず、新聞記事の検閲は厳重に行われた。被害記事は被害実態がまったく伝わらないきわめて少ない記事量であったため、地震に対する社会の関心は低く、情報伝達は途絶したままであった。

③ 戦後の大地震

戦後の大地震では、情報が次第に正確に伝わるようになってきた。社会的反応は地震や耐震に関する正確な知識の伝達に関心が高まってくるが、その頃には関東大地震や福井地震、兵庫県南部地震ほどの建物被害が生じないものが多く、ユーザーの関心はあまり高まらなかったと言える。

社会的な反応の存在が明確に示されたのは、1981年の新耐震設計法への改正時である。これ以上世論を無視できないという改正動機が記事中に見られる。この時期に防災意識の高まりがあったが、その背景の1つとして大地震の周期説、余震情報をめぐる住民のパニック事例数例などがあった。しかしこの時には専門家は安全性が十分であると述べており、社会はこれに対する疑問ももたなかった。そのため兵庫県南部地震において安全神話の崩壊という象徴的な言葉がメディアを通して生まれた。耐震安全性の議論は社会を通さず、専門家の中でだけ議論されてきたため、社会と専門家との間の距離が遠くなっていた。

人命保全に着目した場合、関東大地震から宮城県沖地震までは、悲惨な被害状況に対する感想的な記事はあっても、生命の確保が重要であることが新聞や雑誌にほとんど取り上げられていない。あきらめの感情が支配的であると推測され、日本人の昔から培ってきた自然に従順な価値観が根底にあったものと推察される。

戦後になって初めて復旧や被災者の視点での情報が伝わるようになった。情報は正確に伝わり始めたが、専門家が安全性に問題なしと判断、それ以上の議論がなかった。兵庫県南部地震では市民の安全性に対する信頼が崩壊したことが明確に示された。現在で

は、耐震改修事例の増加や、性能表示で構造安全性の性能表示を強く求めるなど、特に住宅ユーザーの関心は比較的高い状況にある。

したがって、こうしたユーザーの関心に合わせて、ユーザーにも分かりやすい耐震安全性能の評価手法を構築することが不可欠である。

(d) 結論ならびに今後の課題

固有振動数の剛性変化に対する感度パターンを **SVM** によって識別することにより、せん断型構造物の損傷層の特定が可能であることが示された。損傷検知に必要な固有振動数は、せん断型建築構造物の場合、基礎と最頂部に 1 つずつセンサがあれば精度良く算出可能で、各層すべてにセンサを設置することなしに、簡便に損傷を検知できるシステム構築が可能となる。また、単層損傷に対する学習によって構築した **SVM** は、複数層の損傷検知にも適用可能なことが示唆された。今後、せん断構造物という単純な構造に対して有効であった本手法を、より現実に近い構造物について検討を進める必要がある。

設計指標として使われる耐震安全性指標と、社会的反応からみる安全への関心についての調査結果から、ユーザーの関心を高め、耐震安全性能を向上させるために、ユーザーにとって直接理解できるような耐震安全性能の評価手法を構築することが不可欠であることを明らかにした。この点から、今後の課題としてユーザーが考えるわかりやすい安全性指標とはどのようなものか、設計指標とのすりあわせを今後考察する。また合わせてユーザーの意思決定プロセスの解明、どのような耐震性能ならば満足するのかについて、シミュレーションや調査などを行う必要があることがわかった。

(e) 引用文献

【(c) 2) 引用文献】

- 1) シンポジウム「設計荷重の考え方」資料，日本建築学会設計荷重理論小委員会，pp. 44～48，1989年4月．
- 2) 小野瀬順一：鉄筋コンクリート造建物の耐力分布と被害分布，第6回日本地震工学シンポジウム(1982)講演集，pp. 2081～2088，1982年12月．
- 3) 鈴木祥之，中治弘行，岩井哲，北原昭男：在来構法木造住宅の実大水平力載荷実験，日本建築学会構造系論文集，第499号，pp. 69～76，1997年9月．
- 4) 後藤正美，鈴木有，浦憲親：一方向水平加力実験による実在木造建物の耐震性能の検討，日本建築学会構造系論文集，第506号，pp. 147～154，1998年4月．
- 5) 宮腰淳一，林康裕，田村和夫：被害データと地震応答解析に基づく建物群の耐震性能に関する考察，第10回日本地震工学シンポジウム(1998)，pp. 327～332，1998
- 6) 藤原悌三，鈴木祥之，林康裕：1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物の被害と最大地動速度の樹形モデルによる相関評価，日本建築学会構造系論文集，第510号，pp. 153～159，1998年8月．

- 7) 志賀敏男, 山影修司: 施行令耐震規定改訂後のRC造建物群の柱率・壁率, 日本建築学会東北支部研究発表会, pp.313~316, 1994年6月.
- 8) 平田京子, 石川孝重: 社会的に要求される耐震安全性レベルの確率論的評価—ユーザの要望をふまえた性能設計の構築に向けて, 日本建築学会構造系論文集, 第543号, pp.23~29, 2001年5月.

【(c) 1) 参考文献】

- 9) Mita, A.: Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technologies in Civil and Building Structures, Proc. Second International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Sept. 56-67 1999.
- 10) モード解析ハンドブック編集委員会編: モード解析ハンドブック, コロナ社, 1999
- 11) Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., and Shevitz, D. W.: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems From Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS 1996.
- 12) たとえば, Hearn, G. and R.B. Testa, Modal Analysis for Damage Detection in Structures, *Journal of Structural Engineering*, **117**(10), 3042-3063, 1991.
- 13) Ko, J.M. and C.W. Wong, et al: Damage Detection in Steel Framed Structures by Vibration Measurement Approach, *Proc. of 12th International Modal Analysis Conference*, 280-286, 1994.
- 14) Salawu, O.S., and C. Williams: Damage Location using Vibration Mode Shapes, *Proc. of 12th International Modal Analysis Conference*, 933-939, 1994.
- 15) Pandey, A.K., M. Biswas, et al.: Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility, *Journal of Sound and Vibration*, **169**(1), 3-17, 1994.
- 16) 三田彰: 並列処理に向くヘルスマニタリングシステム, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 799-800, 1997
- 17) 吉元怜毅, 三田彰, 森田高市: 振動モードとセンサ特性を考慮した構造物の並列処理型損傷同定, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.48B, pp.487-492, 2002
- 18) 中村充, 竹脇出, 安井譲, 上谷宏二: 限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定, 日本建築学会構造系論文集, 第528号, 75-82, 2000
- 19) Vapnik, V.N.: *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer, 1995.
- 20) 三田彰, 萩原宏美: サポートベクトルマシン (SVM)による構造物の健全性診断 (その1, 2) 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) B-2, 953-956, 2002.
- 21) Zhao, J. and T. DeWolf: Sensitivity Study for Vibrational Parameters Used in Damage Detection, *J. of Structural Engineering*, ASCE, vol.125, NO.4, 410-416, 1999.

- 22) Morita, K., M. Teshigawara, H. Isoda, T. Hamamoto and A. Mita: Damage Detection Tests of Five-Story Frame with Simulated Damages, Proc. of the SPIE vol. 4335, Advanced NDE Methods and Applications, 106-114, 2001.
- 23) Joachims, T.: Learning to Classify Text Using Support Vector Machines, Methods, Theory and Algorithms, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 24) Juang, J. N., Pappa, R. S.: An Eigensystem Realization Algorithm (ERA) for Modal Parameter Identification and Model Reduction, NASA/JPL Workshop on Identification and Control of Flexible Space Structures, 1984.

【(c) 2) 参考文献】

- 1) 日本建築学会編：木造住宅の耐震性－地震被害と実大実験からわかったこと－，日本建築学会，1996年9月．
- 2) 檜橋秀衛，牧野稔，表俊一郎：古い木造家屋の降伏耐力の分布に関する調査および分析，日本建築学会構造系論文報告集，第419号，pp. 67～76，1991年1月．

(g) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Mita, A. and H. Hagiwara	Damage Diagnosis of a Building Structure Using Support Vector Machine and Modal Frequency Patterns	Smart Structures and Materials 2003: Smart Systems and NDE for Civil Infrastructures	2003 (in press).
Hagiwara, H. and A. Mita	Structural Health Monitoring System Using Support Vector Machine	Proc. of the International Conference on Advances in Building Technology	2002.12
Mita, A. and H. Hagiwara	Local Damage Assessment of Structures by Support Vector Machine	Proc. The Second International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Busan, Korea, T6E,	2002

平田京子, 石川孝重	ユーザーに分かりやすい性能表示のあり方ー構造安全性能に対するユーザーの意識変化と合意形成ー	日本建築学会関東支部研究報告集（構造）， pp.311～314	2002 年度
平田京子, 石川孝重	耐震安全性レベルに対する社会的合意形成に関する調査	日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）（構造 I）	2003 年 9 月 （投稿中）

(3) 平成 15 年度業務計画案

- (a) サポートベクトルマシン（SVM）を用いた耐震診断手法の理論的な成果を基に、SVMを用いた耐震診断システムの開発を開始する。
- (b) 耐震安全性レベルに対するユーザーの要求を定量的に把握するための簡便な手法の開発を行う。