

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15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) 住宅耐震性能の定量的評価手法の調査
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 平成16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 | 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15年度業務目的

振動計測データを用いて、損傷の有無についてSVMによる構造性能評価手法を実用的なものとするために、新たな指標を採用して定量評価の精度を高めた手法を提案すると共に、実験を実施して検証する。

またSVMによる耐震診断システムに活用するため、住宅の耐震性能を市民が理解しやすい簡便な形で定量評価する手法に求められる基本構成要素を洗い出し、現実的な評価手法候補を模索する。今年度は住宅の耐震安全性レベルに対する目標値を社会的要望から評価する手法の開発を行う。

(2) 平成15年度の成果

(a) 業務の要約

平成15年度は、次の研究を実施した。

1) 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)

昨年度は、損傷箇所によって共振周波数の変化率パターンが異なることを利用して、SVMによる自動損傷層検知が可能であることを示した。本年度は、さらに進展させて、損傷層の定性的(損傷層検知)かつ定量的(損傷程度)な自動健全性診断を提案した。新たな入力として反共振周波数の変化量についても検討した。反共振周波数は共振周波数と同様にモード解析で簡単に特定できる。加振位置や応答測定位置に依存して変化する局所項であるため、センサ設置数や位置は従来のシステムとは異なってくるが、診断の信頼性は高まると推測される。反共振にはおいては、純せん断以外のモデルにおいても検討し、その特性を調べた。

その結果、共振周波数と反共振周波数がともに損傷と相関が高く、パターン認識の入力に適したパラメータであることを示した。さらに、SVMに工夫を加えることで精度向上の可能性を示すとともに、反共振の導入により純せん断以外の構造物への適用も可能になることを示した。

2) 住宅耐震性能の定量的評価手法の調査(日本女子大学 平田京子)

耐震改修を促進し、耐震性能を定量的に評価する手法を普及させるためには、市民が理解しやすい評価手法にする必要がある。特に性能設計・表示に対応するため目標性能を明示することが求められる。しかし住宅にどのくらいの目標性能を付与すればよいのかという点を解明した研究はほとんどない。そこで今年度は耐震安全性レベルの目標値を明確にするため、設計に使える精度で市民の要望から把握することを目的とする。

すでに市民が自分の住宅にどのくらいの耐震安全性レベルを要望しているのか、定量評価する手法を提案し、全国のユーザーに調査した研究実績がある¹⁾。これを基に市民が自分の住宅に望む安全性レベルを個々に算出するプログラムを開発してきた。今年度はこれらのツールを用いて、市民の望む個々の目標安全性レベルを算出し、評価手法を模索する。

(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

対象となる低層構造物は主にせん断構造とみなすことができるため、提案する健全性診断手法の理論的検証をシミュレーションデータや、小型模型の実験データから行った。これらの検証により、共振周波数を入力とするSVMのシステムの有効性と限界を確認し、具体的な改善策を検討した。まずは学習データの基準化を行い、次に分類クラスの異なるSVMを構築し、損傷パターンに応じて組み合わせることで多様なデータに対応できるようにした。さらに、新たな入力として反共振周波数の変化量を検討した。反共振周波数は共振周波数と同様にモード解析で簡単に特定できる。加振位置や応答測定位置に依存して変化する局所項であるため、センサ設置数や位置は従来のシステムとは異なってくるが、診断の信頼性は高まると推測される。反共振においては、純せん断以外のモデルにおいても検討し、その特性を調べた。

2) 住宅耐震性能の定量的評価手法の調査

簡便な住宅性能評価手法を構築するには、市民の分かりやすい指標で評価することが重要である。その指標を用いて市民の要望する目標耐震安全性レベルを把握する。市民がどのくらいの耐震安全性レベルを要望しているのか、市民が自分で望む安全性レベルを分かりやすく算出できるWEBプログラムを制作し、保有している。今年度はこれらのツールを用いて市民の望むレベルを算出する。市民が自分で望む安全性レベルを算出できるWEBプログラムを用いて、目標レベルに対する各自の要望を調査した。また算出プロセスとわかりやすい指標を解析・考察し、値の妥当性などを検討した。

(c) 業務の成果

1) SVMによる簡易耐震診断システムの開発

提案手法の流れ

昨年までの研究において、単層損傷時の共振周波数変化率で学習したSVMを用いて損傷層の検知が可能なことを示し、さらにSVMの出力と剛性値が線形関係になることを利用して、近似式から剛性低下率を算出することを提案した¹⁾。本研究では、その手法で識別の難しいデータが確認されたことを改善するために、新たに反共振周波数の変化を入力に採用する。以下に提案するシステムのフローを示す。

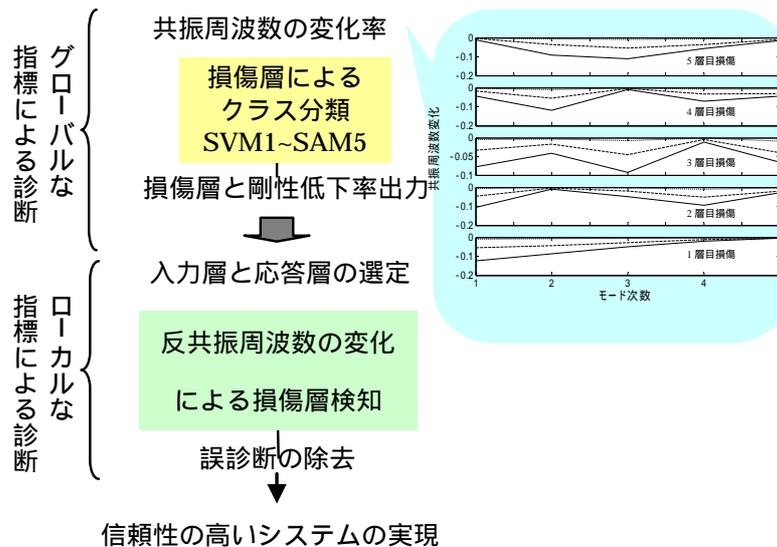


図1 提案システムのフロー

共振周波数および反共振周波数変化の利用

共振周波数は比較的算出が容易であり、複数用いることができる場合、モード形と同様に損傷の空間情報等を得ることもできる²⁾。対象をせん断構造とみなし、損傷が質量変化をひきおこさないとするれば、損傷は剛性の低減で評価できる。

反共振周波数は加振・応答位置に依存して変化する局所項であり、共振周波数と同様にモード解析で求めた周波数応答関数から簡単に特定できる。加振点が*i*点で応答点が*j*点の周波数応答関数の反共振周波数は、特性行列*G*の*j*行目と*i*列目を除いた余因子行列の行列式を0とする周波数として求めることができる。

$$G = \begin{bmatrix} -m_1\omega^2 + k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & -m_2\omega^2 + k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & -m_3\omega^2 + k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & -m_4\omega^2 + k_4 + k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & -m_5\omega^2 + k_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

例として、加振点*i*=3、応答点*j*=4のときを考えると、式(2)の枠内の行列式より反共振周波数は*k*₅と*m*₅で表される。すなわち、純せん断の場合、任意の加振点 - 応答点間に損傷が存在しても、反共振周波数は健全状態に比べて変化しないが、加振点 - 応答点の外に損傷がある場合にのみ反共振周波数は低下する³⁾。

共振周波数変化による SVM の構築と検証

本研究では損傷の位置同定だけではなく、SVMの出力と剛性低下の線形近似式から、損傷程度を算出する。以下では、この提案を軸に複数のSVMを構築し、組み合わせることにより、精度の向上を図るとともに診断の難しいデータについて考察を行う。

*i*層目損傷データとその他の損傷データを分類するSVMをSVM_{*i*}として、5層分の計5種類のSVMを作成した。さらに、剛性と共振周波数の感度に有効範囲があることから、従来の健全状態の共振周波数による基準化をタイプAとし、全層の剛性50%低下時の

共振周波数で基準化したタイプBを新しく導入した。

上記で導入したタイプAとタイプBのどちらの出力を重視するかの指標として、建物全体の剛性低下の度合いを判定する。剛性低下の刻みは10%ずつとし、元の90%の剛性のデータを分類するSVMをSVM09とし、SVM09～SVM01の9種類作成した。

2層分損傷時(1層あたりの剛性低下率40%)の実験データを入力したときの各SVMの出力を図2に示した。SVM09～01の出力に関しては、白と出力されているところにデータが属しているとみなす。この分類結果により、剛性は元の50～60%と推測されるので、基準化タイプBによる出力結果が有効と推測される。右のSVM1～5の出力に関しては、剛性低下率が出力されており、黒い棒が真値、白い棒が同定値を示す。

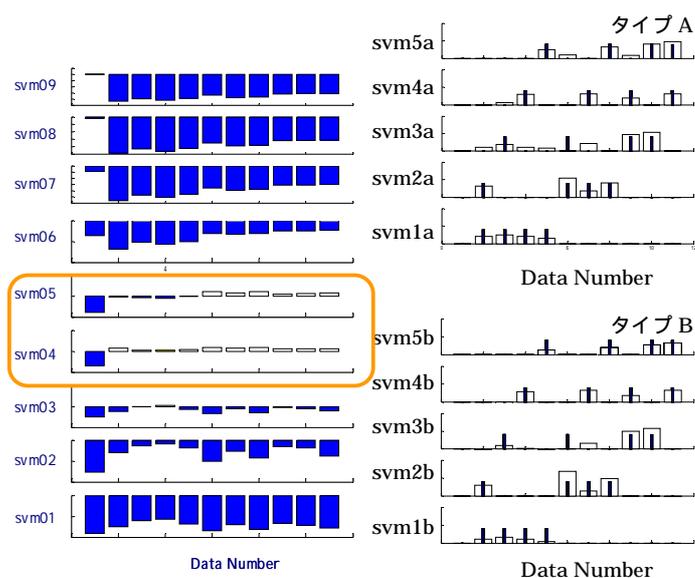


図2 実験データの検証結果一覧

タイプBでは剛性値にばらつきはあるが、誤診断は減少し、精度の向上が図れた。しかし、2,3層目損傷データにおいては両タイプで3層目の損傷が検知されず、誤診断が発生してしまった。これは、2,3層目損傷データと2,5層目損傷データの形が非常に似たものになるためと考えられる。パターン認識では、精度が上がることで、識別率もよくなる一方、データが酷似していることで誤った診断をしてしまう恐れがあることが判明した。

反共振周波数を用いた損傷層の検知

構造物に複数の損傷が存在する場合、組合せによっては形が似通ってしまうことがある。これは全次数の共振周波数変化率が構造物のグローバルな特性を示すためである。そこで、このような誤差をなくし、システムの信頼性を高めるため、新たな入力として反共振周波数変化の活用を検討する。

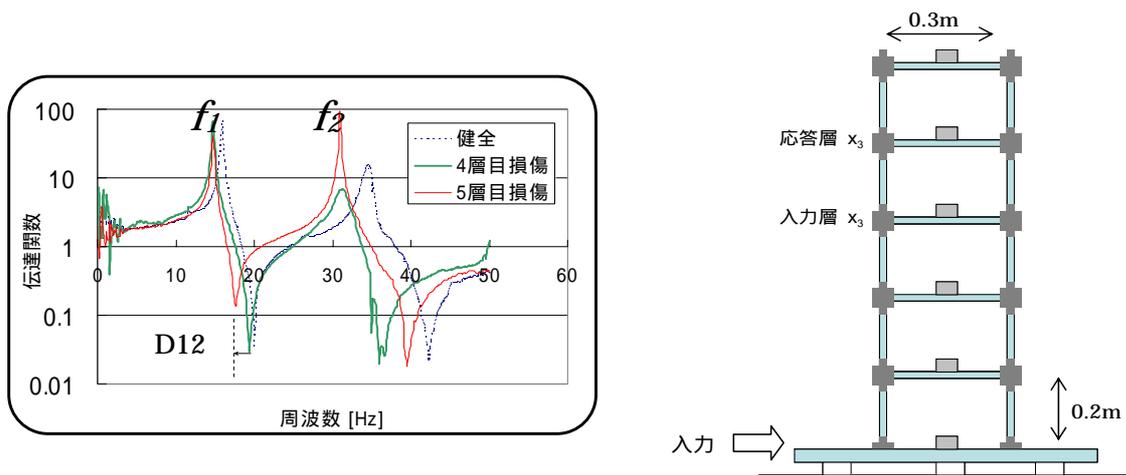


図3 反共振周波数の導出方法

先述したとおり、せん断構造においては入力 - 応答点間の損傷に対して反共振周波数は変化しないことが知られている。したがって、純せん断ではない小型模型の実験を行い、実験装置とSAP構築モデルの2つを比較することで、損傷に対する反共振周波数の挙動を調べる。検証においては共振周波数変化が負のとき、入力点と応答点間に損傷が存在すると判断する。i次とj次の共振周波数の間に存在する反共振周波数を fa_{ij} とすると、変化量は式(2)で表される。

$$\Delta fa_{ij} = fa_{ij} - fa'_{ij} \quad (2)$$

バネを柱に見立てた5層の小型模型において、ゴムで支えたプレートに衝撃を与えることで入力とし、各層の加速度を計測、時刻暦の積分により伝達関数上での入力i層と応答j層の変位 x_i と x_j を算出し、相対変位のスペクトル解析から反共振周波数を確認した。図3は入力3層目、応答4層目のときの伝達関数である。反共振点は一点のみであり、 fa_{34} を見るにより5層目の損傷有無のみが確認できる。実験と有限要素モデルの反共振周波数変化を図に示した。計測誤差、同定誤差を0.3~0.2Hzと考えれば、シミュレーションと実験の傾向は一致する。

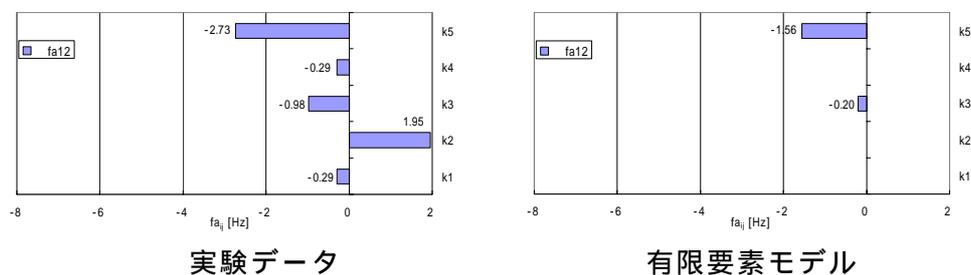


図4 反共振周波数の変化量の比較

このことから、詳細なモデルが構築できれば、その反共振周波数変化をパターン認識の入力として学習することで、実用的な損傷同定が可能となる。反共振周波数は損傷有無を考慮する範囲が限定的である。すなわち、共振周波数による診断により入力・応答層を選定することで、信頼性の高いシステムの構築が期待される。

2) 住宅耐震性能の定量的評価手法の調査

目標耐震安全性レベルの簡易評価プログラムの検討

建築基準法レベルで設計された既存住宅の標準的な耐震安全性レベルを定量的に把握するため、先行研究の算出結果と本プログラムの算出値を比較し、本研究の算出プログラムが妥当であるかどうかを検討した。算出プロセスは、前年度の報告書に記載した通りである。先行研究の結果一覧と本プログラムによる目標信頼性指標 γ_r の算出値(集合住宅の場合)を表1に示す。

表1 先行研究の結果と本プログラムによる算出値の比較

| 地域 | 本研究の解析 RC4~9階集合住宅 | 松村論文 RC複数 | 建研総プロ RC8階オフィス | 建研総プロ S8階オフィス | 荷重指針 基準法2次 設計レベル の試算結果 |
|----|----------------------|--------------|-------------------|------------------|---------------------------------|
| | 終局限界 1/50 | 終局限界 - | 終局限界 1/50 | 終局限界 1/50 | |
| 東京 | 1.4 | 0.5~1.0 | 2.0 | 2.2 | 平均 1.3 |
| 大阪 | 1.7 | 1.2~1.8 | 2.2 | 2.5 | - |

注: 基準期間を50年とする。解析結果は標準的な支出金額の場合。後述の引用文献より作成

目標耐震安全性レベルに関する調査

日本女子大学生涯学習総合センターで開発されたVOD(ビデオオンデマンド)形式のWEBプログラムを現在公開している。これを用いて、市民の要望する目標レベルを調査した。

調査期間 2003年5月 試験段階調査
2004年2月より 一般公開調査
調査方法 WEBによるVOD形式のアンケート
調査対象 全国の市民

調査結果から、現時点で355人の結果が得られ、図5のような集計結果が得られている。この場合の耐震安全性指標は、供用期間における信頼性指標で評価を行った。結果からは、標準的な住宅が震度6弱に耐える程度と認識されることが多く、目標としては現在の基準法レベルよりも上のレベルを希望している回答が多いことが特徴であった。また支出金額に傾向が読み取れ、多くの市民はたとえ新築する場合でも、支出金額は1割程度の割り増しまでと考えている。供用期間については50年を希望していることが多く、実際に住宅の建て壊しが30年程度で行われている現状よりも、長い期間が希望されていることになる。



図5 調査中の耐震安全性レベルの集計（回答者数 310人時点）

また既存木造の耐震補強をする場合には、ユーザーによっては100年などの長い供用期間を希望する場合や補強後の性能に対する大きな期待があることが予測され、どの程度の供用期間・性能をめざした補強計画であるのかについて性能として情報開示することが重要であり、ユーザーに対しても説明すべき項目になることが分かった。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) SVMによる簡易耐震診断システムの開発

SVMの出力と剛性低下率から線形近似式を求め、層剛性の簡易同定を行った。学習データの基準化を健全時ではなく、剛性が50%低下した場合の共振周波数で行うことにより、各層の損傷データの相関がない範囲を移動させた。これにより学習データの異なるSVMを2種類作成し、検知できる損傷データの範囲が広がった。さらに、分類クラスの異なるSVM（損傷層による分類、構造物全体の剛性低下率による分類、3次までの共振周波数を用いて損傷層を上層・中層・下層とした分類）を作成して組合せることにより診断の信頼性が高まることを示した。複数層損傷データも用いて学習したSVMの検証を行うことにより、単層損傷データで学習することの有効性を示した。小型模型の実験を行い、誤診断されたデータの損傷ケースから、損傷層の組合せが異なっても共振周波数の変化率が酷似するデータが存在することを確認した。

以上を踏まえ、損傷層による反共振周波数変化を調べ、自動健全性診断手法への適用を検討した。本手法の特徴は、反共振周波数は共振周波数と同様に、モード解析で求めた周波数応答関数から簡単に特定できる。共振周波数が加振位置や応答測定位置に依存しない全体項であるのに対して、反共振周波数はこれらの位置に依存して変化する局所項であるため、単層損傷の学習により、複数層損傷にも適用可能である。

共振周波数の変化および反共振周波数の変化の2つの指標を利用してSVMを活用することによって、損傷検知の位置精度、損傷レベル精度が向上し、実用性の高い手法である。将来的には、大量のセンサが常設されている大規模構造物の自動診断への適用も視野に入れたい。

2) 耐震性能の目標値を市民の要望から評価する簡便な手法確立のための調査

住宅の耐震性能を表示する際、市民に分かりやすく表現するには、どのくらいの地震に耐え

るか、その時どのような被害・状態になるか、補修する必要があるかという3点がポイントになる。まず地震の大きさについて、震度階で表現するのが市民にとって分かりやすいことが分かっている¹⁾。他のポイントである被害状態や補修については、適切な指標が確定されていない。

今回の調査結果からは、市民は自分の支払う金額を意識した上で、目標レベルとして多少金額を支払ってでも現在の法令レベルより高めたい、50年程度の供用期間を希望したいと考えていることが読み取れる。したがって耐震補強の目標値をどこに定めるのか、現行法レベルでよいのか、それよりも上げておくべきなのかについては慎重な対応が必要であり、できるだけ設計時に表示し、説明する必要がある。

耐震補強ではユーザーがコストをかけることになる。したがって、補強後の目標レベルについてユーザーと設計者との意識のずれが生じることを避ける必要があり、性能の向上と工事単価の関わりに相関性が認められなければ、ユーザーからの不信感が予想される。簡易的な評価手法を構築する際に、「どのレベルまで補強するか」、「どのくらいの供用期間を想定するか」という目標値を明確にして、その条件をユーザーに伝達することが重要である。

(e) 引用文献

【(c)1引用文献】

- 1) Mita, A. and H. Hagiwara, "Quantitative Damage Diagnosis of Shear Structures Using Support Vector Machine", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.7, No.6, 683-689, 2003
- 2) 薛松涛, 李銀生, 謝強, 周波数分析に基づいたフレーム構造損傷同定の実験的研究, 第44回自動制御連合講演会前刷, 208-211, 2001
- 3) 稲田貴臣, 島村佳伸, 轟章, 小林英男: 反共振周波数変化に基づくCFRP積層梁のはく離領域の判定, 日本機械学会論文集A編, 67巻664号, 1929-1935, 2001

【(c)2引用文献】

- 1) 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 - ユーザー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.
- 2) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 第3版, 1993年6月.
- 3) 松村和雄, 牧野稔: 地震動の再現期間値と鉄筋コンクリート造建物の破壊確率の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)(構造), pp.171~172, 1990年10月.
- 4) 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」平成7年度・8年度報告書, 建設省建築研究所・日本建築センター・国土開発技術研究センター, 平成8年3月・平成9年3月.
- 5) 坂本順, 森保宏: 現行設計法により設計される建築物の信頼性レベルについての試算的考察 終局限界および使用性限界状態設計に用いる荷重モデル[], 日本建築学会構造系論文集, 第501号, pp.41~48, 1997年11月.

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願
なし
- 2) ソフトウェア開発
なし
- 3) 仕様・標準等策定
なし
- 4) 成果の発表

| 著者 | 題名 | 発表先 | 発表年月日 |
|----------------------------------|---|---|-------------------|
| Mita, A. and H. Hagiwara | Quantitative Damage Diagnosis of Shear Structures Using Support Vector Machine | KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 7, No. 6, 683-689, (2003) | 2003年11月 |
| Hagiwara, H. and A. Mita | Local Damage Assessment of a Building Using Support Vector Machine | Earthquake Resistant Engineering Structures IV | 2003年9月 |
| 萩原宏美, 三田彰 | サポートベクトルマシンを用いた建築構造物の定量的損傷評価 | 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) | 2003年9月 |
| 三田彰, 萩原宏美 | パターン認識を活用した建築構造物の損傷診断 | 日本地震工学会大会2003 梗概集 | 2003年11月 |
| 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 - 安全性レベルの決定と情報公開の関係に注目して - | 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)(構造) | 2003年9月 |
| Kyoko Hirata, Takashige Ishikawa | PROBABILISTIC EVALUATION OF DESIRABLE TARGET SEISMIC LEVEL DERIVED FROM REQUIREMENTS OF USERS | 13th World Conference on Earthquake Engineering | 2004年 (in press). |

(3) 平成16年度業務計画案

ワイヤレスで振動データを取得可能な携帯型センサシステムとして、2つの振動センサからのデータを取得可能なワイヤレスセンサシステムを試作する。また、SVMなどのパターン認識手法を用いた診断プログラムの構成について検討する。