

建築物震災復旧支援システムの開発

DEVELOPMENT OF A SUPPORTING SYSTEM FOR RESTORATION OF SEISMICALLY DAMAGED BUILDINGS

菅原裕太 —— * 1 三辻和弥 —— * 2
前田匡樹 —— * 3

Yuta SUGAWARA —— * 1 Kazuya MITSUJI — * 2
Masaki MAEDA —— * 3

キーワード：
即時被害推定, 応急危険度判定, 震災復旧, 支援システム

Keywords：
Immediate assessment of seismically damaged buildings, Quick inspection, Seismic damage restoration, Supporting system

Objective of this study is to develop a supporting system for Quick Inspection and restoration of seismically damaged buildings. This system consists of several functions such as gathering earthquake information, analyzing seismic response of buildings, predicting damaged area, and transmitting damage information through Web-GIS. Update technique based on Neural Network was proposed to modify the results from theoretical prediction of seismic response analysis. Simulations using damage data from recent great earthquakes were conducted. Results showed that this system is effective to the future practical use.

1. はじめに

応急危険度判定は 1995 年兵庫県南部地震を契機に全国的に判定士組織が整備され、余震などによる二次被害の防止を目的に近年の地震災害においても一定の成果が挙げられている。しかし、本来余震活動が活発な数日間のうちに判定を完了させることが望まれるのに対し、活動開始までの情報収集・伝達等に時間を要し地震発生後の 2、3 日後から本格化しているというのが現状¹⁾である。特に、被災者が収容される避難所や病院、その他防災拠点施設は早急に使用の可否を判断し、被災した施設は速やかに復旧を行う必要があるが、2003 年宮城県北部の地震などの近年の地震被害では、判定が行われないまま使用されている事例もあり問題が指摘されている。

2003 年の地震を契機に、宮城県では、産官学連携による宮城県地震対策推進協議会の応急危険度判定・復旧支援 WG において、応急危険度判定をはじめ震災復旧活動全体に関する制度構築および体制整備に関する検討を進めてきた。この WG では、公共施設及び木造住宅を対象に、地震発生後の速やかな応急危険度判定の実施、それに続く被災度区分判定・罹災証明の実施体制に関して検討を進めている（協議会の活動の詳細は <http://taishin-miyagi.net/>）。筆者らは、上記の一連の震災復旧活動の仕組みを効率的に機能させるような情報収集、分析、管理、伝達の機能を持つシステムを開発している。図 1 にシステムの位置付けと判定活動支援のフローを示す。

当システムでは、地震発生直後に得られる地震情報を予めデータベース化した各自治体の公共施設の建物情報に合わせることでその被害程度を即時に推定・発信し、応急危険度判定の実施やその範囲の決定を支援する。さらに、判定結果の集約機能により集計作業の効率化と進捗状況のリアルタイムな把握を実現させ、被災建物の復旧活動への速やかな移行を可能とすることを目指す。上記 WG では、

復旧のための判定制度に関する具体的な検討も行っているが、本稿では紙面の制約から、Web-GIS システムについて述べる。なお、本研究と類似の情報システムも、能島らの研究²⁾をはじめとして数件提案されているが、これらは fragility 曲線を用いて面的に建物群の被害推定をするものであり、当システムは特に公共建築物について、耐震診断による構造耐震指標 I_s 値を用いて個々の建物のより精密な耐震性能に基づいて個別に被災度の推定を行う点に特徴がある。

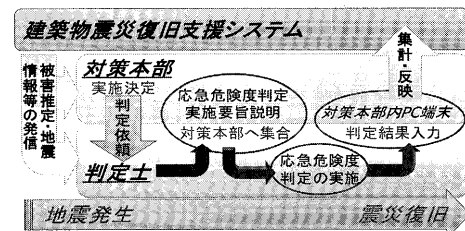


図 1 建築物震災復旧支援システムによる判定活動支援

2. 建築物震災復旧支援システムの構成

当システムの運用フローを図 2 に示す。各機能を以下に述べる。

1) データベースによる情報管理

建築物データベースとして、施設名、所在地(住所・緯度・経度)、構造種別、階数、建設年、耐震性能 (I_s 値、 $C_T S_D$ 値)³⁾、耐震補強実施の有無、発災時の用途(避難所、医療施設、災害対策本部等)、応急危険度判定・被災度区分判定の結果等を集約する。また、判定士データベースとして、判定士氏名、連絡先、勤務地、資格(応急危険度判定、被災度区分判定)を登録し、地域情報のデータベースには地区毎の地盤情報、建物の棟数や建設年代の構成割合などを登録する。

*1 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 修士課程
(現 東北電力株)
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11-1206)
*2 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 助教・博士(工学)
*3 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 准教授・博士(工学)

*1 Graduate School of Engineering, Tohoku University
(Tohoku-Electric Power Co., Inc.)

*2 Assistant Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.
*3 Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

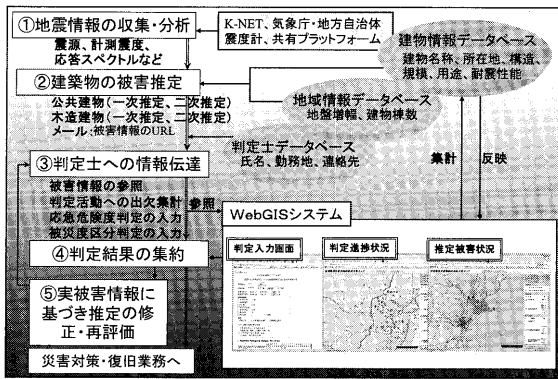


図2 建築物震災復旧支援システムの動作フロー

2) 地震情報の収集・分析

震源、マグニチュード、計測震度、観測波形 (K-NET、JMA、地方自治体震度計など) を収集し、観測点以外の地点の補間計算や応答スペクトル計算といった分析を行う。

3) 建築物の被害推定

被害率曲線による推定 (計測震度、建物の耐震指標 I_s 値を使用) と、限界耐力計算による詳細な被害推定 (応答スペクトル、 I_s 値、 $C_T S_D$ 値を使用) を行う。

4) 判定士への情報伝達

登録判定士に対し震災復旧支援システム Web ページの URL をメールで配信し、Web ページを通して被害推定状況や推定震度分布などの地震情報の発信を行う。

5) 判定結果の集計・発信

Web 上で応急危険度判定結果および被災度区分判定結果の入力を受け付け、判定結果の集計と GIS マップへの即時表示を行う。

6) 実被害情報に基づく被害推定の逐次更新

判定活動が進むにつれて入ってくる実際の被害情報に基づき、未判定建物の被害推定を逐次修正・再評価する。

以降では、特に研究的課題のある 3) 建築物の被害推定と 6) 実被害情報に基づく被害推定の逐次更新の手法について、その妥当性の検討を合わせて述べる。

3. 地震情報を用いた建築物の被害推定⁴⁾

建築物の被害推定は、以下の二段階に分けて行うものとする。

3.1 一次推定:被害率曲線による推定

一次推定は、地震発生直後に発表される計測震度を使った被害率曲線による推定で、可能な限り早く被害を推定することを目的とする。推定にあたり必要となる建物の地点における震度は、表層地盤の増幅率⁵⁾を考慮して観測点の震度から補間することにより推定する。続いて推定した震度を用い被害率曲線による被害推定を行う。以上を RC 造公共建築物と木造建築物群のそれぞれについて行う。

1) RC 造公共建築物の被害推定

RC 造の被害推定は図3に示す既往の研究⁶⁾で提案されている耐震指標 I_s 値毎の被害率曲線 (被災度別) を用い、被害確率を算定する。算定された各被災度の被害確率 (大破以上確率、中破確率、小破確率、軽微以下確率) を、被災度区分判定基準および復旧技術指針⁷⁾の耐震性能残存率 R を参考に加重平均することで被災度を推定する。

2) 木造建築物群の被害推定

木造建築物群については、500m メッシュ毎の推定震度から図4

に示す内閣府被害想定支援マニュアルの被害率曲線⁸⁾により建築年代 (1971 年以前、1972 年から 1981 年、1982 年以降) ごとに被害確率をもとめる。各年代の被害確率を 500m メッシュ毎の年代別棟数に掛け合わせることで被害棟数を推定する。

3.2 二次推定:限界耐力計算による被害推定

加速度記録や応答スペクトルが得られた時点で、二次推定として限界耐力計算法⁹⁾による詳細な被害推定を行う。これにより、一次推定では評価できない応答スペクトル性状や建物の復元力特性の考慮が可能となる。ここでは、RC 造建物の耐震診断データを用いた限界耐力計算による被害推定手法を行う。推定にあたり必要となる建物の応答スペクトルは、東北大学災害制御研究センターの地震動分布推定システム¹⁰⁾による 500m メッシュ毎の分布データを用いた。建物の復元力特性は、最小 I_s 値と $C_T S_D$ 値から靱性破壊型 ($I_s/C_T S_D > 1.27$) と脆性破壊型 ($I_s/C_T S_D \leq 1.27$) に分け図5のようにモデル化する。このとき、塑性率に対応する被災度は被災度区分判定基準⁹⁾などを参考に設定した。なお、強度指標 C は限界耐力計算における一次モードの等価質量と建物重量の比が概ね 0.8 であると仮定して $C_T S_D$ を 0.8 で除した値とし、変形は第一折点の変形角が $1/250$ となるように揃える。また終局点の変形角は、脆性破壊型では $1/150$ 、靱性破壊型では $1/150$ を下限値に $\mu/250$ とする。このとき μ は耐震診断基準³⁾の定める式(1)の変形によりもとめる。

$$F_u = \frac{\sqrt{2\mu - 1}}{0.75(1 + 0.05\mu)} \quad (1)$$

ここで F_u は $I_s/C_T S_D$ とする。また、一層あたりの高さは 360cm と仮定し、等価一質点系に集約したときの代表高さを「地上階数 \times 360 cm \times 0.8」としてもとめる。以下、 S_a - S_d スペクトルと復元力特性から現行の限界耐力計算法に従って応答推定を行い、応答変形に対応する被災度を図5により推定する。

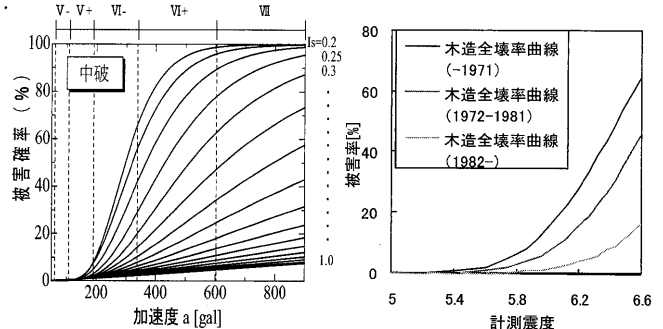


図3 RC造被害率曲線

図4 木造被害率曲線

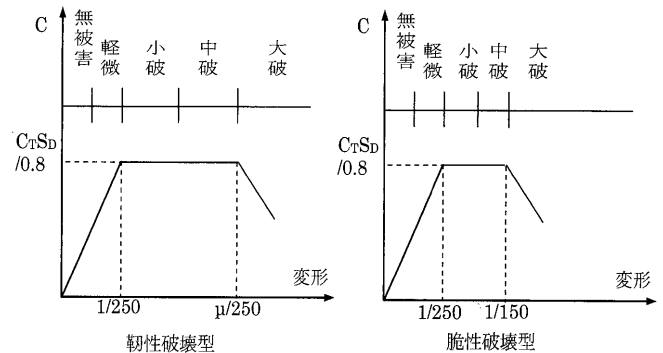


図5 耐力曲線モデル

3.3 過去の地震による検討

当システムの被害推定手法について、過去の地震を想定したシミュレーションにより妥当性および精度の検証を行った。

1) 一次推定の検証

2003年7月26日宮城県北部の地震、2007年3月25日能登半島地震、2007年7月16日新潟中越沖地震を想定し、被害推定のシミュレーションを行った。震度分布の推定結果を図6に示す。

震度の推定後、宮城県北部の地震については前述の方法によりRC造500棟および木造建築物群の被害推定を行い、能登半島地震と新潟中越沖地震については500mメッシュ毎の建物棟数データが無いため年代別棟数を各年代で同じと仮定して木造住宅の被害推定を行った。推定結果と実際の被害¹¹⁾¹²⁾¹³⁾を比較し表1および図7に示す。

震度分布の推定結果は、いずれも実際の被災地区と比較して概ね調和的である。宮城県北部の地震を想定したRC造の一次推定では、北村小学校のようなIs値が比較的高い建物が実際には大破しているなど必ずしも一致しない部分も見られたが、全体としては概ね良好に推定された。木造建築物群の一次推定について、図7の震度と被害率の関係を見ると、新潟中越沖では震度が大きい割に被害の無い地区もあり、震度のみによる一元的な推定には限界があることが分かる。ここで、三地震で精度を比較したものを図8に示す。これによると、宮城県北部の地震や能登半島地震では推定と実被害の対応は良好だが、新潟中越沖地震では推定がやや過大となる傾向が見られた。これについては、新潟中越沖では建物耐力の地域特性を考慮していない点やスペクトル性状の影響が考えられ、こうしたことから二次推定の手法が有効となると考えられる。ただ、図7に示した震度と被害率の関係では推定が実被害の上限を捉えており、地震直後の即時被害推定という観点では、判定活動を支援する情報として有効に機能していると考えられる。

2) 二次推定の検証

RC造公共建築物500棟について2003年7月26日宮城県北部の地震を想定し、二次推定手法による被害推定シミュレーションを行った。二次推定の結果を表1に合わせて示す。二次推定では一次推定に比べて鹿島台小学校や北村小学校については実際の被害に近くなったが、その他の建物については推定と実際の被害に乖離が広がる結果となった。ここで、一次推定と二次推定の実被害に対する精度を耐震性能残存率Rに換算して比較したものを図9に示す。図9から、二次推定では被害が過大に推定される傾向が見てとれる。また、推定と実被害の相関係数を計算してみると、一次推定では0.48、二次推定では0.41となった。この結果については、宮城県北部の地震は内陸型の地震であるため震源付近の激震域での地動の推定が困難で

あり、両手法とも精度が低くなるのはやむを得ないと考えられる。また、二次推定は手法としては精密であるが、加速度記録のある観測点が震度観測点よりも少ないことや、応答スペクトルが500mメッシュ単位の推定データであることによる影響などが考えられる。建物の復元力特性に関しても、Is値とC_TS_D値の二値によりモデル化している点や代表高さや強度の設定における精度の問題が考えられる他、基礎の損傷やすべりによる地震入力損失の可能性等が考えられる。これらについては、建物データに対応した地震被害データを収集し、精度向上のための更なる検討を行う必要がある。

表1 RC造の推定結果と実際の被害（宮城県北部の地震）

| 建物名 | 一次推定 | 二次推定 | 実際の被害 |
|-----------|------|------|--------|
| 矢本高等学校 | 中破 | 大破 | 中破 |
| 大曲小学校 | 小破 | 大破 | 軽微 |
| 小野小学校 | 小破 | 無被害 | 小破 |
| 矢本第一中学校 | 中破 | 中破 | 中破 |
| 鹿島台小学校 | 小破 | 小破 | 小破 |
| 浜市小学校 | 小破 | 無被害 | 軽微 |
| 宮戸小学校 | 小破 | 無被害 | 軽微 |
| 北村小学校 | 軽微 | 小破 | 大破 |
| 浜市小学校 | 軽微 | 無被害 | 軽微 |
| 大塩小学校 | 軽微 | 軽微 | 軽微 |
| 矢本東小学校 | 軽微 | 軽微 | 軽微 |
| 鹿島台小学校(西) | 軽微 | 小破 | 小破 |
| 赤井小学校 | 軽微 | 小破 | 軽微 |
| 赤井南小学校 | 軽微 | 小破 | 軽微 |
| 矢本第二中学校 | 軽微 | 無被害 | 軽微 |
| 鳴瀬第一中学校 | 軽微 | 小破 | 無被害 |
| 涌谷中学校 | 軽微 | 中破 | 被害報告なし |
| 南郷高等学校 | 軽微 | 小破 | 被害報告なし |
| 野蒜小学校 | 無被害 | 無被害 | 軽微 |
| ...その他の建物 | 無被害 | 一部軽微 | 無被害 |

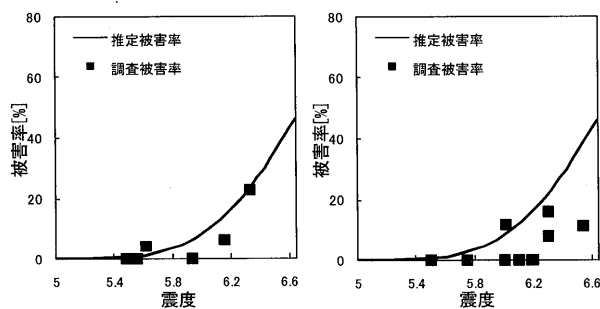


図7 震度と一次推定被害率および実被害率の関係(木造)

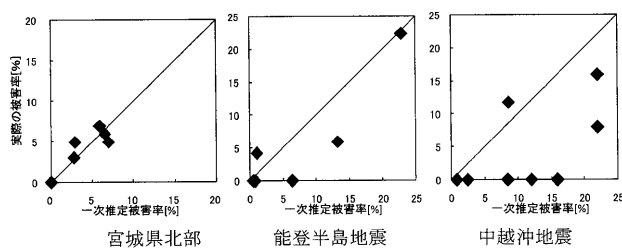


図8 木造の一次推定と実被害の比較

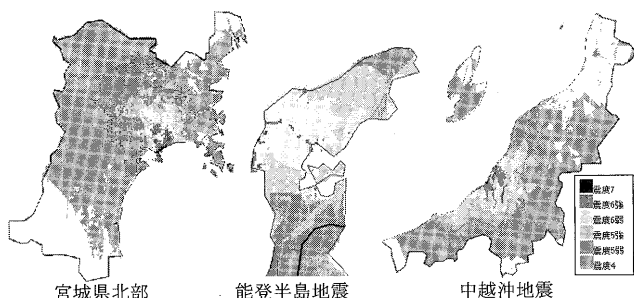


図6 推定震度分布

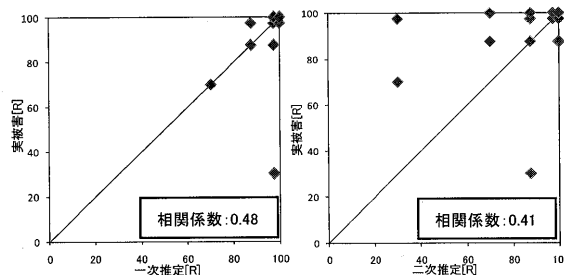


図9 RC造の一次推定と二次推定の精度比較

4. 実被害情報に基づく被害推定の逐次更新

ここでは、判定活動が進捗するにつれて入ってくる実被害データを用いて、一次推定および二次推定の結果を修正・更新する機能について述べる。

4.1 逐次更新の手法

被害推定の逐次更新を行う手法として、ニューラルネットワーク¹⁴⁾による手法を用いた。ニューラルネットワークは人間の神経細胞を模した数学モデルで、定式化が困難な問題への適用が容易であり、逐次更新の手法として有効と考えられる。ここでは入力層、中間層、出力層の3層構造をもつ階層型ネットワークを用いることとした。図10に、本手法における学習モデルを示す。

逐次更新の手順は、まず実際の被災度が分かった建物についてそのIs値や推定震度などを入力要素として実際の被害(教師値)を再現できる結合荷重を学習させる。学習の繰り返しにより学習値と教師値の誤差が収束し次第、まだ実被害が分からない建物のIs値や推定震度などを学習済みの結合荷重に入力する。このときの出力値が修正された推定被害となる。

4.2 逐次更新手法の検証

ここでは、2003年7月26日宮城県北部の地震を想定し検討を行った。教師値とする実被害データは、修正精度に偏りが出ないよう無被害、軽微、小破、中破、大破を全て含む5棟からスタートし、最大25棟まで増やした。なお、入力要素は表2に示す10項目を基準に、最大SAと最大SVを除く8項目、さらに階数・建築年・延べ床を除く5項目とした場合のそれぞれについて、更新を行わない場合(二次推定結果)との修正精度の比較を行った。このとき、精度の比較は教師値用の25棟以外の28棟について推定被害と実被害の κ 統計量を計算し比較した。 κ は二つの評定結果がどの程度一致しているかを表す指標で、値が1に近いほど一致していることを指し、0に近いほど一致度が低いことを指す。図11に結果を示す。

図11より、逐次更新による修正を行わない場合と比較して、教師値が少ない状態での更新はかえって一致度を下げるが、少なくとも10棟ないし15棟程度の教師値数が得られれば安定した逐次更新ができることが示された。ここで、入力項目数ごとに修正精度の安定する15棟以上の範囲における一致度 κ の平均と分散を計算し、表3に示す。これより、要素数が多いと精度は安定するが過学習となり易いため一致度は低く、入力要素を「二次推定結果」「推定震度」「Is値」「 C_tS_D 値」「速度増幅率」の比較的建築物被害と関わりが深いと思われる5項目に絞った場合の方がより高い精度での修正が可能であることが分かった。

表2 ネットワークの入力要素

| 番号 | 入力要素 | 建物被害との関係 | 要素数 |
|----|------------|-----------------|-----|
| ① | 二次推定結果 | スペクトル性状と耐力曲線が関係 | |
| ② | 推定震度 | 入力地震動に關係(一次推定) | |
| ③ | Is値 | 建物の耐震性に關連(一次推定) | |
| ④ | C_tS_D 値 | 建物の強度に關係 | |
| ⑤ | 速度増幅率 | 入力地震動の關連要素 | |
| ⑥ | 地上階 | 建物の高さ→固有周期に關係 | |
| ⑦ | 建築年 | 建物の経年劣化、設計強度に關係 | |
| ⑧ | 延床 | 建物重量に關係 | |
| ⑨ | 最大SA | 加速度応答スペクトルの最大値 | |
| ⑩ | 最大SV | 速度応答スペクトルの最大値 | |

表3 入力要素数毎の一致度 κ の平均と分散値

| | 10要素 | 8要素 | 5要素 |
|-------------|-------|-------|-------|
| κ 平均 | 0.153 | 0.367 | 0.437 |
| 分散 | 0.007 | 0.005 | 0.022 |

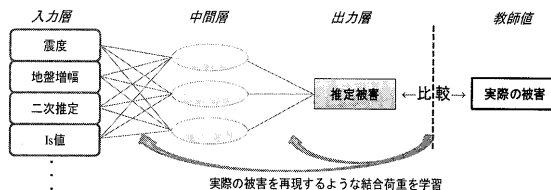


図10 ニューラルネットワークによる逐次更新

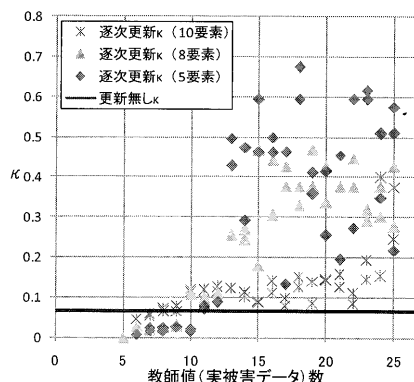


図11 実被害データ数による推定の一貫度 κ の変化

5. まとめ

建築物の迅速な判定活動および復旧活動の支援を目的とした情報収集・分析・管理・伝達の機能を持つシステムを構築した。

建築物の即時被害推定機能については、実際の地震時を想定した検討を通して建築物の被害程度を概ね良好に推定することが可能であることが示され、応急危険度判定の実施に係る情報支援という基本要件について満足される結果が得られた。また、実被害情報に基づく被害推定の逐次更新機能により、ある程度の実被害データ数が得られれば、最初の推定で合わない部分を効果的に修正できることが確認された。今後は、前述の協議会WGに参加する自治体による公共施設のデータベースの充実や、建築関係団体による判定士名簿の管理を進め、本システムの運用を開始する予定としている。

謝辞:当システムの開発にあたり、文科省防災研究成果普及事業から支援を頂きました。また本稿における検討にあたり、東北大学大野晋准教授より応答スペクトル分布のデータを提供して頂いた他、防災科学技術研究所のK-NETのデータを使用させて頂きました。関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会:建築防災 2004年2月号「特集 宮城県北部連続地震における応急危険度判定」
- 2) 能島暢呂ら:地震動情報と実被害情報の統合処理による緊急対応支援の数理モデル(土木学会論文集, No.724/I-62, pp.187-200, 2003.1)
- 3) (財)日本建築防災協会:「2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準解説」
- 4) 菅原裕太、前田匡樹、三辻和弥:耐震診断結果に基づく宮城県のRC造学校建築物の地震時被害推定(コンクリート工学年次論文集Vol.29, No.3, pp.1261~1266, 2007)
- 5) 翠川三郎、松岡昌志:国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価(物理探査, Vol.48, No.6, pp.519-529, 1995)
- 6) 四十万智博、前田匡樹:仙台市の公共施設における耐震改修と地震リスクの評価(コンクリート工学年次論文集 Vol.27, No.2, pp.1597~1602, 2005)
- 7) 日本建築防災協会:震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針(2001)
- 8) 内閣府:地震被害想定支援マニュアル(<http://www.bousai.go.jp/manual/index.htm>)
- 9) 日本建築センター:2001年版限界耐力計算法の計算例とその解説
- 10) 大野晋、遠藤卓、柴山明寛:宮城県における準即時地震動スペクトル分布推定(東北地域災害科学研究, Vol.43, pp.29-32, 2007)
- 11) 日本建築学会:2003年5月26日宮城県北部の地震災害報告 2003年7月26日宮城県北部の地震災害報告
- 12) 前田匡樹、三辻和弥、菅原裕太、中村匠、五十嵐さやか:2007年3月25日能登半島地震による建築物の被害調査報告(建築防災 2007年8月号)
- 13) 松川和人、三辻和弥、菅原裕太、前田匡樹:2007年新潟県中越沖地震における木造建築物の地震被害調査 その2調査概要と建物被害の特徴(日本地震工学会大会-2007梗概集 pp.476-477)
- 14) 熊沢逸夫:学習とニューラルネットワーク(森北出版, 1998)

[2008年2月20日原稿受理 2008年4月25日採用決定]