

論文 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

菅原 裕太^{*1}・前田 匡樹^{*2}・三辻 和弥^{*3}

要旨：宮城県の RC 造学校建築物の耐震診断データを用いた地震発生直後における建築物の被害推定手法を提案する。本論では、計測震度分布を用いた既往の被害率曲線による被害推定と、応答スペクトルを用いた限界耐力計算による被害推定の二段階に分け、それぞれについて過去の地震を想定したシミュレーションを通してその妥当性の検討を行った。

キーワード：被害推定, 耐震診断

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、近年の地震災害（2003 年宮城県北部連続地震、2004 年新潟中越地震など）においても一定の成果が挙げられている。しかし、その目的が余震などによる二次被害を防止することにあるため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(図-1)というのが現状である^{1) 2)}。特に被災者が収容される避難所や病院、警察・消防などの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、これらの施設の中には判定

が行われないまま使用されている事例もあり問題となっている。

こうした現状から、迅速な震後対策の立ち上がりを実現されることがもめられ、そのためにも地震直後における被害状況の早期推定・把握が重要なものとなる。

現在宮城県では、宮城県沖地震の発生が危ぶまれる中で、産官学連携による宮城県地震対策推進協議会において、被災建築物の応急危険度判定および復旧支援に関する新しい制度の構築に向けた検討が行われている。そこでは、判定・支援活動の組織化の中心となる行政と判定士を派遣する民間組織（設計事務所協会、建築士会など）の間で、地震発生直後の情報伝達を効率化して速やかな判定士の召集や派遣を実現し、応急危険度判定を迅速化すること、その後の被災度区分判に基づく復旧支援制度の確立を目指している。こうした一連の活動の中で、筆者らは発災時の情報集約・発信の機能を果たすシステムの開発を行っている。

本論では、震後対策に有用な情報として建築物の被害推定結果を提供することを目的に、宮城県の RC 造学校建築物の耐震診断データを用いた地震発生直後における建築物の被害推定手法の提案を行う。

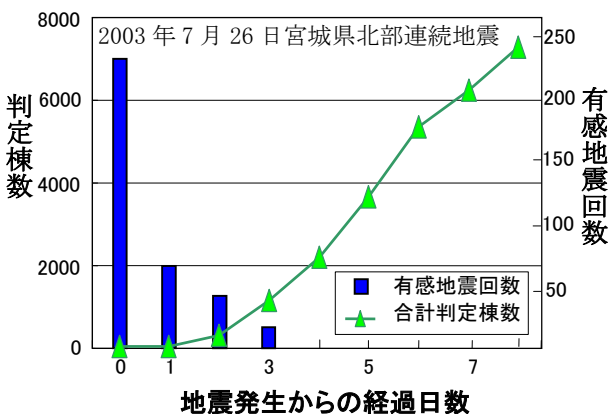


図-1 応急危険度判定の進捗

*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻修士課程 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻助教授 博士(工学) (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻助手 博士(工学) (会員外)

2. 建築物の被害推定

2.1 被害推定の概要

建築物の被害推定は、地震直後に得られる地震情報を建物の耐震性能と合わせることにより行う。推定にあたり必要となる建物の地点における地震動は、観測点における観測値を補間することによりもとめる。その概要を図-2に示す。補間の流れとしては、まず観測値を観測点ごとに表層地盤の増幅率で除すことで工学的基盤まで落とし、基盤上で線形補間する。その後再び地盤増幅率をかけ表層まで上げ、建物の地点における値を推定する。

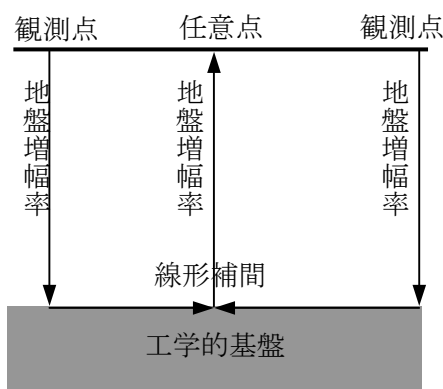


図-2 補間手法の概要

一方、建物の耐震性能は、宮城県が実施した県内の学校建築物の耐震診断結果から耐震指標 I_s 値および $C_T S_D$ 値から評価することとする。

なお、被害推定は得られる地震情報の違いに応じて、計測震度を用いた被害率曲線による被害推定、応答スペクトルを用いた限界耐力計算による被害推定の二段階に分けて行う。

2.2 計測震度による被害推定

地震の発生直後に得られる計測震度を用いた推定として、被害率曲線による被害推定を行う。被害率曲線は既往の研究⁴⁾で提案されている現行の震度階級に従った、 I_s 値別被害率曲線を用いる。まず、被害推定のための震度の補間にあたり、観測値を観測点ごとに表層地盤の増幅率で除し工学的基盤まで落とす。このとき、表層地盤の増幅率は防災技研が公開している500mメッシュの地形分類データ⁵⁾(最大速度増幅率)を

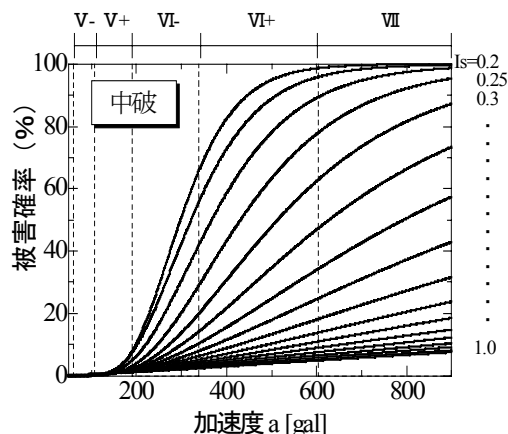


図-3 被害率曲線⁴⁾

用い、その使用にあたって式(1)に示す翠川他(1999)の式⁶⁾により計測震度 I を最大速度 V_{max} に変換する。

$$V_{max} = 0.02766 \times 10^{0.581 I} \text{ [Kine]} \quad (1)$$

次に、もとめた最大速度を表層地盤の最大速度増幅率で除し工学的基盤まで落とし、基盤上で線形補間⁷⁾する。補間後、その地点における最大速度増幅率を掛け合わせることで各地点の地表における最大速度をもとめ、式(1)により再び計測震度に変換する。以上の手順により震度を補間した後、図-3に示す被害率曲線⁴⁾を用いて加速度 a と構造耐震指標 I_s 値から被害確率(大破以上、中破以上、小破以上)をもとめる。このとき加速度 a は計測震度 I の定義式の変形である式(2)からもとめられる。

$$a = \sqrt{10^{(I-0.94)}} \text{ [gal]} \quad (2)$$

文献4)ではRC造建物について小破、中破、大破の各被災度の被害率曲線が提案されており、それらを用いて軽微以下、小破、中破、大破となる確率をもとめ、それぞれに1, 2, 3, 4のウェイトを付与し加重平均したものを被災度指数表-1のように定義し、その値によって被災度を推定する。

表-1 被災度指数

	軽微・無被害	小破	中破	大破・倒壊
被災度指数	~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~

2.3 応答スペクトルによる被害推定

続いて、応答スペクトルを用いた被害推定として、限界耐力計算による被害推定を行う。これは、現行の計測震度について実被害との非対応に関する指摘⁸⁾も多く、応答スペクトル性状の考慮することが必要との考えによるものである。推定にあたって必要となる各建物の地点における応答スペクトルは、一次元の地盤応答解析により表層地盤の剥ぎ取りを行い算定する。また、限界耐力計算にあたり、推定対象となる建物の復元力特性を最小 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-4**のようにモデル化する。

モデル化における塑性率に対応する被災度は

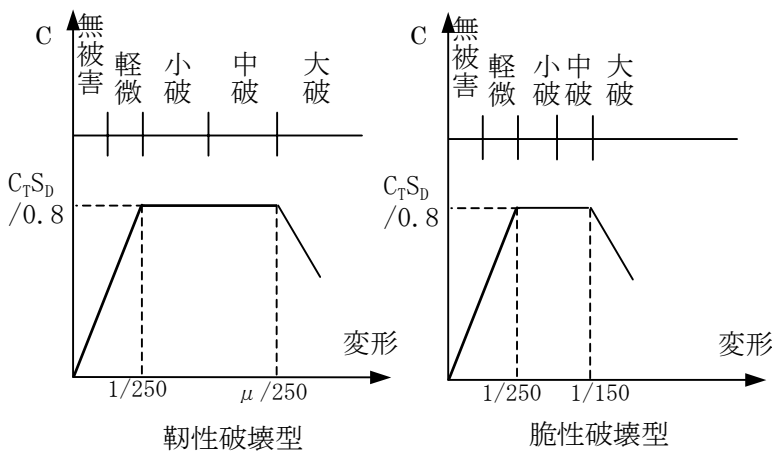


図-4 復元力特性のモデル化

京都市の地震被害想定⁹⁾や日本建築防災協会の被災度区分判定基準²⁾を参考にした。

なお、建物重量が一次モードの等価質量となることを考慮して、強度 C は $C_T S_D$ を0.8で除した値とし、変形は被災度区分判定基準²⁾などを参考に第一折点の変形角が $1/250$ となるように揃え、終局点の変形角は、脆性破壊型では $1/150$ 、靱性破壊型では $1/150$ を下限值に $\mu/250$ とする。このとき μ は耐震診断基準¹⁰⁾の定める式(3)¹⁰⁾によりもとめる。

$$F_u = \frac{\sqrt{2\mu - 1}}{0.75(1 + 0.05\mu)} \quad (3)$$

ここで F_u は $I_s/C_T S_D$ とする。また、一層あたりの高さを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 $\times 360 \times 0.8$ 」としてもとめ、以下現行の限界耐力計算法¹¹⁾に従い被害推定を行う。

被災度は、まず減衰定数 $h = 0.05$ で応答スペクトルを算定しもとめた S_a-S_d 曲線を、復元力特性に重ね合わせ推定する。このとき S_a-S_d 曲線が弾性範囲で交わる場合、その交点における変位から建物の推定被災度(無被害、または軽微)を判定する。

この時点で曲線が交わらない場合は式(4)¹¹⁾から塑性限界時の減衰 h' をもとめ、以下の計算を引き続き行う。

$$h' = 0.25 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{D_f}} \right) + 0.05 \quad (4)$$

ここで、 D_f は靱性破壊型・脆性破壊型ともに終局点の変形角を第一折点の変形角で除した値とする。式(4)により塑性限界時の減衰定数を算定後、**図-5**のように $h = 0.05$ および $h = h'$ で S_a-S_d 曲線を描き、各限界点と原点を結んだ線(等価剛性)の延長線との交点をもとめ、その2点を結び必要スペクトルを得る。ここで必要スペクトルと建物の復元力特性の交点を応答点とみなし、その点における変形から被災度(小破、中破、大破)を判定する。

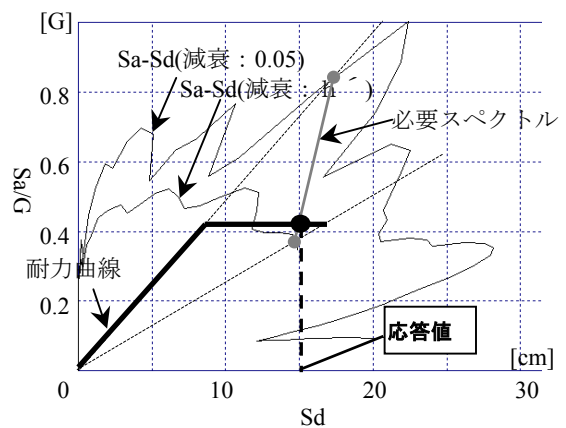


図-5 応答推定の例

3. 過去の地震を用いたシミュレーション

3.1 計測震度による被害推定

前節で提案した被害推定手法を用い、図-6に示す宮城県内のRC造公共建築物480施設を対象に、過去の地震災害(2003年5月26日宮城県沖の地震, 2003年7月26日宮城県北部連続地震, 2005年8月16日宮城県沖の地震)の本震を想定したシミュレーションを行った。

2003年5月および2005年8月の地震については、建物のデータの関係上、被害の無い建物みのシミュレーションとなったが、推計震度分布とも実状に沿う結果(図-7)が得られた。

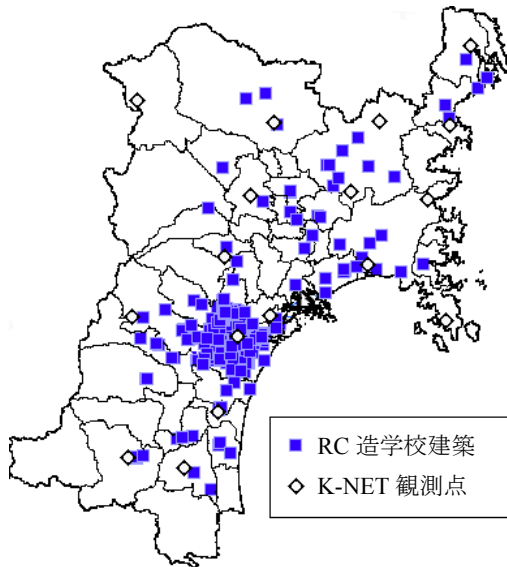


図-6 推定に用いる建物と観測点の分布

また、RC造の建築物にも被害が多く見られた2003年7月の地震を想定した場合については、矢本町や鳴瀬町に被害が推定され(図-7)これは実際の被災地域とも一致する。また被害のあった建物について、個々の推定結果と実被害状況¹²⁾を比較したものを表-2に示す。これによれば、Is値の比較的高かった北村小が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、その他の建物については概ね実被害に近い推定結果が得られている。この計測震度による推定手法においては、北村小のようなケースを考慮することは難しいが、ある程度広い範囲(町・地区レベル)でその分布を見るような使用法であれば一定の信頼度が得られるのではないかと考えられる。

表-2 推定結果と実被害の比較(2003/7/26)

建物	Is 値	推定震度	推定被災度	実際の被害
矢本高等学校	0.29	6.20	中破	中破
小野小学校	0.25	5.93	小破	小破
矢本第一中学校	0.38	6.22	小破	小破
矢本町民体育館	0.38	6.19	小破	RC壁の割裂
南郷高等学校	0.34	5.93	小破	被害報告なし
北村小学校	0.45	5.99	軽微以下	大破
鹿島台小1-2期	0.37	5.85	軽微以下	小破
矢本東小学校	0.64	6.20	軽微以下	軽微
鹿島台小3-4期	0.48	5.85	軽微以下	小破
...			(以下軽微以下で実被害と一致)	

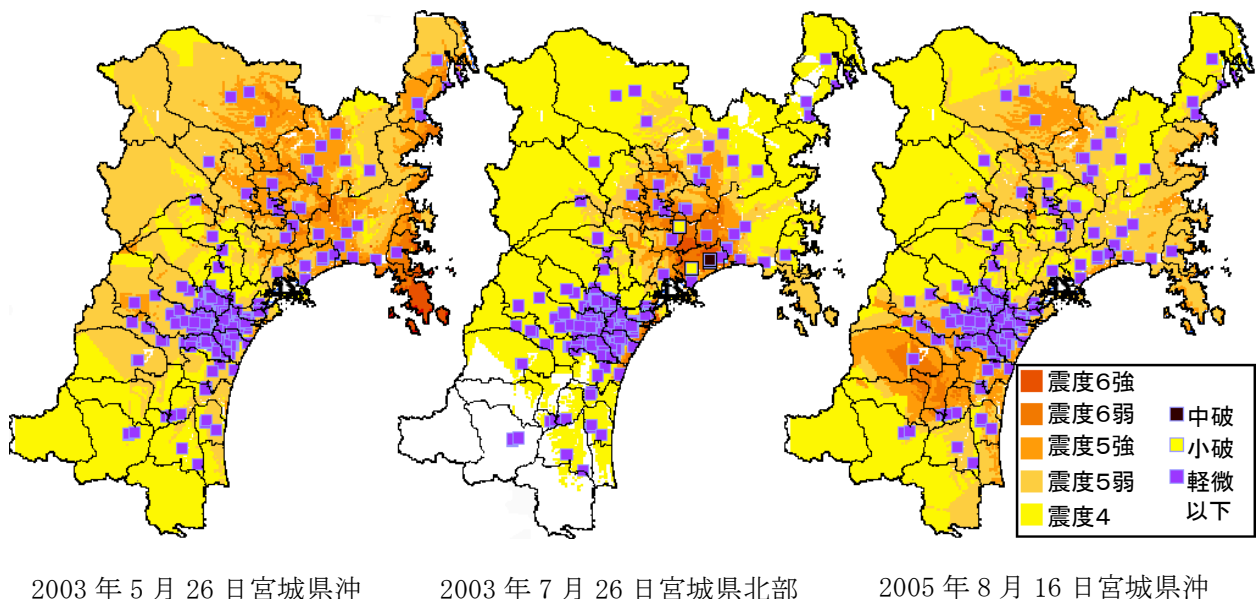


図-7 計測震度による被害推定結果

3.2 応答スペクトルによる被害推定

続いて、応答スペクトルを用いた限界耐力計算法による被害推定手法により、3.1 では考慮できなかったスペクトル性状や詳細な表層地盤の影響を検討する。シミュレーションは2003年7月26日の同地震を想定し、実際に被害を受けた建物6棟と無被害の建物17棟について行い、そのうち被害を受けた建物6棟の結果を表-3および図-8に示す。

実際に無被害の建物17棟については1棟が軽微と推定されたものの、残りの16棟は無被害と推定され実状に即した結果が得られた。また、前節では2棟とも軽微以下と推定された鹿島台小学校については、1-2期校舎、3-4期校舎とも小破と推定され実際の被害と一致するものとなった。しかし、矢本高等学校や矢本第一中学校の被害は実際よりも大きい被災度で推定されており、震度による推定に比べ全体的に被害が大きく評価される傾向も見られる。本手法は、被害推定の精度を高めうる可能性が認められる一方、何らかの補正を加える必要性も考えられ、そのためにもさらに多くのケースで検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

地震発生直後に得られる地震情報と耐震診断データを活用し、計測震度を用いた被害率曲線による被害推定および応答スペクトルを用いた限界耐力計算による被害推定の二段階の被害推定手法を提案した。さらに過去の地震を想定したシミュレーションを通して、提案した二手法とも推定結果が実際の被害と概ね一致し、二つの被害推定手法の特性を確認することができた。

局地的に大きな地震動が生じる可能性や前震・余震の影響などについては未検討であるが、今後、これらの推定を応急危険度判定活動の予備情報として有用なものとするため、より多くケーススタディを行うとともに、被害推定に直接影響する建物データベースの一層の充実化を進めていく予定である。

謝辞

本論では防災技術研究所のK-NETの地震波データを使用させていただきました。公開に対し感謝いたします。

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) 中埜良昭:「応急危険度判定」と「り災証明のための調査」はどう違うか(建築防災2005.9)
- 3) 日本建築防災協会:震災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針(2001)
- 4) 四十万智博:宮城県公共施設における耐震改修と地震リスクの評価(平成十六年度東北大学修士論文)
- 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) 翠川三郎, 藤本一雄, 村松郁栄:計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係(地域安全学会論文集, No.1, pp.51-56, 1999)
- 7) 川名清三, 柴山明寛:広域な面的震度情報を対象とした関東におけるリアルタイム地震情報システムに関する研究(日本建築学会大会学術講演梗概集2000)
- 8) 境有紀, 神野達夫, 瀬戸一樹:建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案(第11回日本地震工学シンポジウム論文集, 2002.11)
- 9) 京都市:京都市第3次被害想定
- 10) (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同解説」
- 11) 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
- 12) 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

表3 二次推定結果と一次推定及び実被害との比較 (2003/7/26) *はF=1の仮定による

建物	Is 値	CTSD 値	一次推定	二次推定	推定応答[cm]	実際の被害
矢本高等学校校舎	0.29	0.29*	中破	大破	6.45	中破
矢本第一中屋内運動場	0.96	0.45	小破	中破	6.43	小破
矢本町民体育館	0.38	0.23	小破	大破	9.59	RC壁の割裂
矢本東小学校西棟	0.64	0.64	軽微以下	軽微	2.58	軽微
鹿島台小1-2期校舎	0.37	0.47	軽微以下	小破	5.57	小破
鹿島台小3-4期校舎	0.48	0.49	軽微以下	小破	5.57	小破

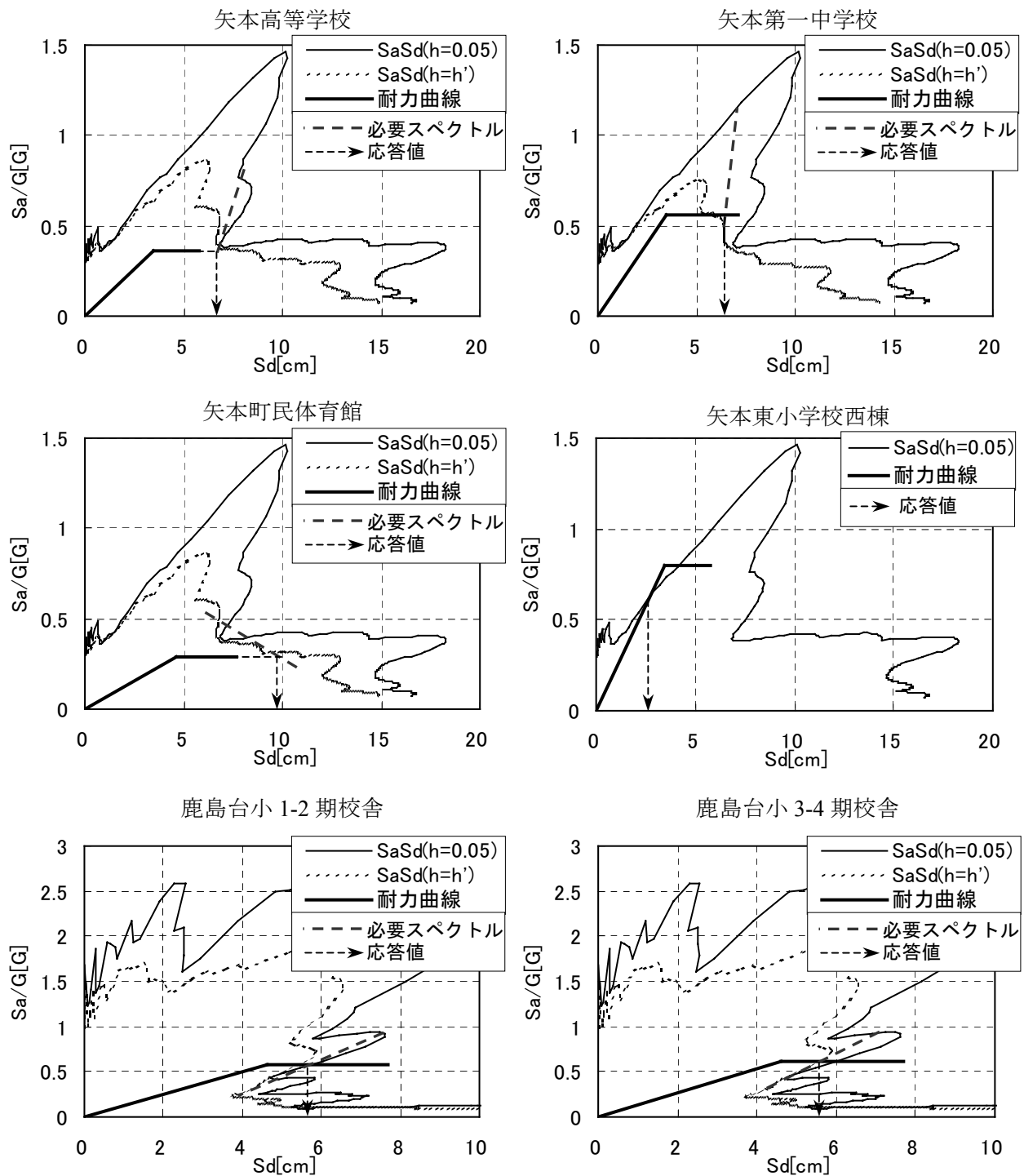


図-8 限界耐力計算法による被害推定