

想定地震選定システムの開発

石川 裕 奥村 俊彦 宮腰 淳一 斎藤 知生
(技術研究所) (技術戦略室) (技術研究所) (技術研究所)

Probabilistic Scenario Earthquake Evaluation System

by Yutaka Ishikawa, Toshihiko Okumura, Jun'ichi Miyakoshi and Tomoo Saito

Abstract

We developed a seismic hazard evaluation system to apply to seismic risk management and business continuity planning (BCP) of various enterprise facilities. This system evaluates the probabilistic seismic hazard curves as well as the contribution factors of probabilistic scenario earthquakes which have been proposed by the authors, so that we can easily identify the precaution scenario earthquakes anywhere in Japan. Analytical procedures and conditions of the seismic hazard are consistent with those used in the national seismic hazard mapping project. This paper describes the outline of the system followed by some case studies.

概 要

着目するピンポイントでの地震ハザード情報を迅速に提供するために「想定地震選定システム」を開発した。対象とする地点における地震動強さと発生確率の関係（ハザードカーブ）に加えて、強い揺れをもたらすとすればどの地震である可能性が高いかを指摘することができる。当該地点における地震リスクマネジメントや事業継続計画（BCP）の策定に活用できることはもとより、想定地震のイメージを明確にすることで、詳細な耐震検討や複数地点での同時リスク評価の検討などにも適用が期待される。

§ 1. はじめに

兵庫県南部地震を契機としてわが国は地震活動期に突入したという認識が生まれつつあり、現にこの数年全国各地で被害地震が頻発している。こうした趨勢の下、企業の地震防災力向上に対するニーズが高まりを見せているが、昨今の傾向として単なる被害軽減のみでなく、事業の早期復旧を意図した事前のプランニング（事業継続計画：BCP）に対する要望も顕在化している¹⁾。

事業継続計画の策定を含めて、耐震・防災投資の投資対効果の評価や多様な地震シナリオに対するリスクを検討するためには、地震リスクの計量化が必要である。とりわけ強調すべき点として、i) 地震動は場所ごとに異なる特徴を有するものであること、ii) 兵庫県南部地震や新潟県中越地震などの被害の多くは設計での想定を上回る地震動によって引き起こされた可能性が高いこと、が指摘できる。すなわち、地震リスクの計量化では、その第一歩として、着目する地点での地震環境を詳細に反映した確率論的地震ハザード評価が不可避である。

一方、平成17年3月、政府の地震調査委員会より「全国を概観した地震動予測地図」が公表された²⁾。また、その数値データは防災科学技術研究所のウェブサイト「地震ハザードステーションJ-SHIS」より公開されている³⁾。そこでは全国約1kmメッシュ単位での代表的な確率論的地震ハザード評価（確率論的地震動予測地図）の結果が格納されており、耐震設計や地震防災対策の基本的な入力情報として活用が期待されている。

本報告で新たに開発した「想定地震選定システム」は、この確率論的地震動予測地図のデータを活用し、よりピンポイントでの多様な確率レベルに対する地震ハザード情報を迅速に提供するためのシステムである。住所検索により対象とする地点を指定することで、その場所における地震動強さと超過確率の関係（ハザードカーブ）を表示することができる。加えて、著者らが提案した確率論的想定地震の概念⁴⁾⁵⁾を用いて、強い揺れをもたらすとすればどの地震である可能性が高いかを定量的に示す機能も有している。

以下、評価手法と評価条件の概要を説明するとともに、システムの適用例について紹介する。

§ 2. 確率論的地震ハザード評価と確率論的想定地震

2. 1 確率論的地震ハザード評価の概要

確率論的地震ハザード評価とは、対象地点における地震動の強さとそれを特定の期間内に超える確率の関係（ハザードカーブと呼ばれる）を算定するものである。ハザードカーブは、設計用地震動の設定や防災計画の立案などの基本情報として用いられるとともに、地震リスクの計量化においては不可欠な入力情報である。

ハザードカーブ算定の大略の手順は次のとおりである。

- 1) 対象地点周辺の地震活動をモデル化する。
- 2) モデル化したそれぞれの地震について、対象期間での発生確率、地震規模と距離の確率を評価する。
- 3) 地震の規模と距離が与えられた場合の地震動強さの確率モデルを設定する。通常は、距離減衰式とそのばらつきによってモデル化される。
- 4) モデル化された個々の地震について、着目する期間内にその地震によって地震動の強さがある値を超える確率を評価する。
- 5) 以上をモデル化した地震数繰り返し、それらの結果を統合することにより、全ての地震を考慮した場合に地震動の強さが着目期間内に少なくとも1度ある値を超える確率（超過確率）を算定する。

ハザードカーブ算定の定式化の概要を示す。着目する地点において、その周辺で発生する地震によって t 年間に少なくとも1回地震動の強さが y を超える確率を $P(Y > y; t)$ で表す。ハザードカーブは $P(Y > y; t)$ と y の関係を示したものである。 $P(Y > y; t)$ は個々の地震 k ごとの確率 $P_k(Y > y; t)$ に分解して次のようになる。

$$P(Y > y; t) = 1 - \prod_k \{1 - P_k(Y > y; t)\} \quad (1)$$

ここで、 $P_k(Y > y; t)$ は次式で表される。

$$P_k(Y > y; t) = 1 - \sum_{l=0}^{\infty} [P(E_k^{(l)}; t) \cdot \{1 - P(Y > y | E_k)\}^l] \quad (2)$$

ただし、 $P(E_k^{(l)}; t)$ は地震 k が期間 t の間に l 回発生する確率、 $P(Y > y | E_k)$ は地震 k が1度発生した条件下で地震動の強さが y を超える条件付確率である。

地震活動の時系列として周期性を有し、対象期間内に地震の発生がたかだか1回と仮定できる場合には、式(2)は次のようになる。

$$P_k(Y > y; t) = P(E_k; t) \cdot P(Y > y | E_k) \quad (3)$$

ただし、 $P(E_k; t)$ は地震 k が期間 t の間に発生する確率である。

また、地震活動が定常ポアソン過程でモデル化できる場合には、 $P(E_k^{(l)}; t)$ はポアソン分布となるため、式(2)は次のようになる。

$$P_k(Y > y; t) = 1 - \exp\{-\nu_k \cdot P(Y > y | E_k) \cdot t\} \quad (4)$$

ただし、 ν_k は地震 k の1年当たりの発生頻度である。

一方、地震 k に対して地震動の強さが y を超える条件付確率 $P(Y > y | E_k)$ は、マグニチュードの確率 $P_k(m_i)$ と当該マグニチュードに対する距離の確率 $P_k(r_j | m_i)$ 、 m_i, r_j に対する地震動強さの中央値 $\bar{Y}(m_i, r_j)$ とばらつき U の累積分布関数 F_U を用いて次のようになる。

$$P(Y > y | E_k) = \sum_i \sum_j \left[1 - F_U \left\{ \frac{y}{\bar{Y}(m_i, r_j)} \right\} \right] \cdot P(m_i) \cdot P(r_j | m_i) \quad (5)$$

これらの式に基づいてハザードカーブを算定することができる。ちなみに、確率論的地震動予測地図²⁾³⁾は、地点ごとに独立に算定された t 年間（30年または50年）のハザードカーブに基づいて、次の2種類が作成されている。

- a) 対象とする超過確率に対応する地震動強さを地点ごとに求め、その分布を地図上に表したもの
- b) 対象とする地震動強さの超過確率を地点ごとに求め、その分布を地図上に表したもの

2. 2 確率論的想定地震の概要

確率論的想定地震とは、対象とする超過確率のレベルに対応するような強さの地震動を起こし得る可能性が高い地震を想定地震として選定しようとするための概念である⁴⁾⁵⁾。その際、そのような地震動をもたらし得るような地震の相対的な出現可能性を表す指標として「貢献度」を定義している。ハザードカーブの算定と併せて、この貢献度が高い地震に着目することにより、対象地点で警戒すべき想定地震を明確化することができる。

想定地震の物理的なイメージを明確にすることで、動的解析に基づくより詳細な耐震検討が行えるとともに、複数地点での同時リスク評価の検討も可能となる。

t 年間の超過確率 p_y に対する地震 k の貢献度 $c_k(p_y; t)$ は、上記の式(2)～(4)で示した $P_k(Y > y; t)$ を用いて次式で表される。

$$c_k(p_y; t) = \frac{P_k(Y > y | t)}{\sum_k P_k(Y > y | t)} \quad (6)$$

式(6)より明らかなように、全地震に対する貢献度の総和は1（=100%）となる。また、貢献度は、着目する超過確率のレベル（=地震動強さのレベル）によって変化するとともに、同一地点で同じ超過確率であっても対象とする地震動指標が異なれば変化する。例えば長周期の地震動を対象とする場合には、一般的に遠方であっても規模が大きい地震の貢献度が相対的に高くなる。

§ 3. 評価モデル

確率論的地震ハザード評価に必要な地震活動モデルと地震動評価モデルは、地震調査委員会による「全国を概観した地震動予測地図」²⁾³⁾に準拠した。以下に、その概要を示す。

3. 1 地震活動モデル

日本全国で考慮する地震は、主要 98 断層帯に発生する固有地震、海溝型地震、およびその他の地震に大別して、それぞれについて地震の発生確率（または発生頻度）、発生場所、および地震規模の確率モデルを作成している。このうち、主要 98 断層帯に発生する固有地震と海溝型地震の想定震源域を図-1に示す。これらの地震の地震活動モデルは、地震調査委員会から公表されている長期評価に基づいており、また、モデル化が可能なものは更新過程を用いて地震発生確率を評価している。その他の地震については、主要 98 断層帯以外の活断層と震源断層を予め特定しにくい地震に分類し、いずれも地震の発生時系列はポアソン過程としている。後者の地震については、別途モデル化されている地震と重複しないように配慮し

た上で、規模に上限値を有する b 値モデル ($b=0.9$) を適用して、規模別の地震発生確率を求めている。この際、区分した領域内で地震発生頻度を一様とする方法と微小領域ごとに頻度を変化させる方法と併用し、両者の頻度を平均して用いている。

3. 2 地震動評価モデル

地震動強さの評価は、司・翠川による工学的基盤の最大速度の距離減衰式⁹⁾を用い、太平洋プレートの地震に対しては異常震域を表現するための補正項⁷⁾を加えている。ばらつきは、2003 年十勝沖地震の本震と余震記録を用いた分析結果⁹⁾を参照して、常用対数標準偏差で 0.2 を標準値として用いている。加えて、文献 2) に準拠した振幅依存性を考慮している。

地表の震度は、工学的基盤の最大速度に増幅率を乗じて地表の最大速度を求め、地表の最大速度と計測震度の経験的な変換式⁹⁾より算出している。最大速度の増幅率は、国土数値情報に基づく値（約 1km メッシュ単位）を初期値として用いるが、対象敷地での地盤調査資料がある場合には、それに基づいて設定することを基本としている。

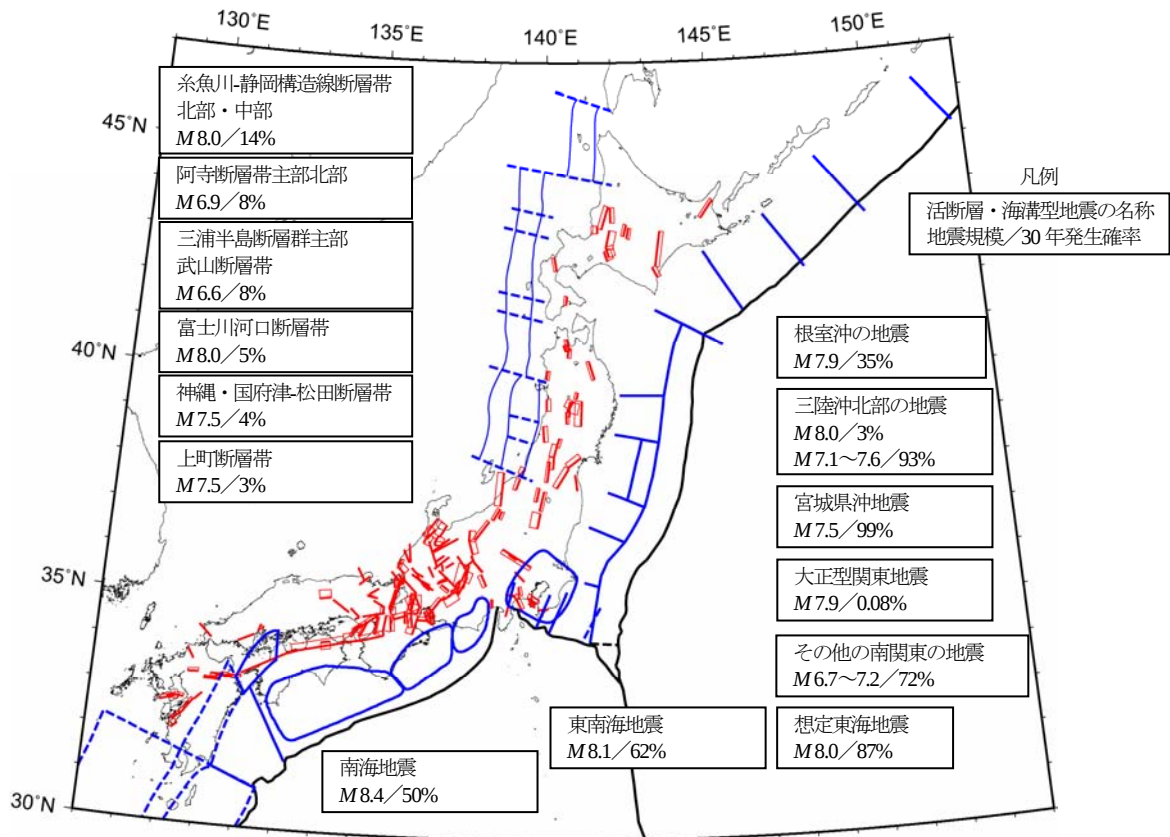


図-1 主要 98 断層帯と主な海溝型地震の想定震源域および
主な地震の規模と 2006 年より 30 年以内の発生確率

§ 4. システムの特徴と評価例

本システムはイントラネット上にあるウェブサーバに構築され、社内の関係する研究者・技術者が各自の PC からブラウザを通して自由に利用できるよう公開されている。

ここでは、東京都港区のある地点における地震ハザードを評価した例にそって、システムの特徴について説明する。

ユーザ情報を登録しシステムに入ると、まず評価するサイトの位置を入力する画面となる(図-2)。もしサイトの緯度・経度が予めわかっている場合にはそれらの値を直接入力することができる。それがわからない場合には住所を都道府県から市区町村、町丁目、番地、号の順番に選択していく。号まで選択すると建物形状まで描かれた地図が表示され、その地図上で対象位置をクリックすることにより、ピンポイントでの評価位置設定が可能となっている(図-3)。



図-2 サイト位置の入力画面（都道府県または緯度経度）



図-3 サイト位置の入力画面（地図上）

位置が特定されるとその場所の含まれる基準地域メッシュの国土数値情報を用いて設定された地盤増幅率の値が示される(図-4)。もし対象敷地の地盤情報が明らかな場合には、ここでより精度の高い地盤増幅率の値に変更することができる。

次に評価期間を何年にするかを設定する(図-5)。本システムでは西暦 2006 年 1 月時点から 10 年間、30 年間、50 年間での地震ハザードを評価することができる。

以上の諸条件を入力した後、実行ボタンを押すとサーバ上でハザード評価の計算が開始され、図-6 のような評価結果画面が表示される。

評価結果の画面は「対象地点・評価期間・地図選択」、「シナリオ型地震動評価結果」、「確率論的地震ハザード評価結果」の 3 つの部分から構成される。

「地図選択」のリンクをクリックすると、当該地点を中心とした範囲での、「ハザードマップ」、「地盤増幅率マップ」、「活断層マップ」、「震央マップ」がそれぞれ 2 つのスケールで表示される(図-7)。

「シナリオ型地震動評価結果」では当該地点に影響する代表的な地震の諸元およびそれらのマップが示される。この表では震源を予め特定できる地震を対象として、「その地震が発生した場合の平均的な地震動強さ」が大きい順 10 地震の情報が表示される。地震の発生確率とは無関係に想定地震あるいは備えるべき地震動強さのレベルを設定する場合に活用される。



図-4 地盤増幅率の入力画面



図-5 評価期間の入力画面

図-6の例では大正型関東地震(M7.9)が表の一番上に表示されており、この地震による当該敷地の地震動強さは計測震度で5.9と推定されている。

次に「確率論的地震ハザード評価結果」では、当該地点におけるハザードカーブが出力されるとともに、「50年超過確率10%相当の地震動強さ」が併せて表示される。図-6の例では「50年超過確率10%相当の地震動強さ」は計測震度で5.9と評価されている。ここで、「50年超過確率10%相当」とは、建物のPML(予想最大損失)評価において規範として用いられている確率レベルに対応し、期間が30年の場合には超過確率6%、期間が10年の場合には超過確率2.1%となる。

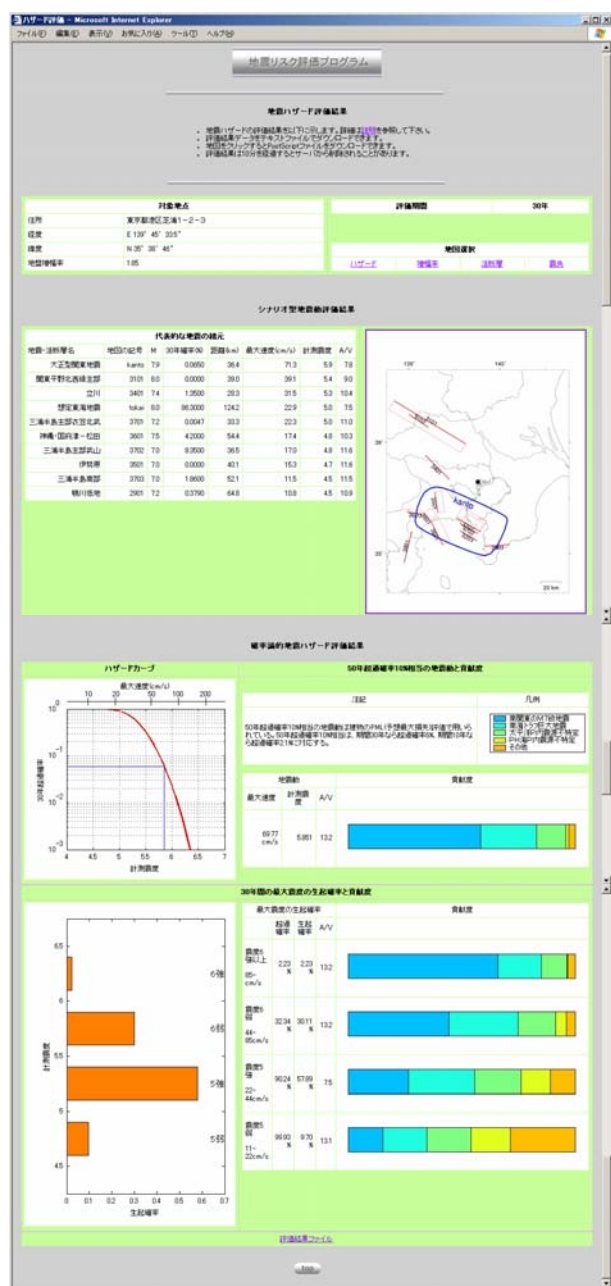
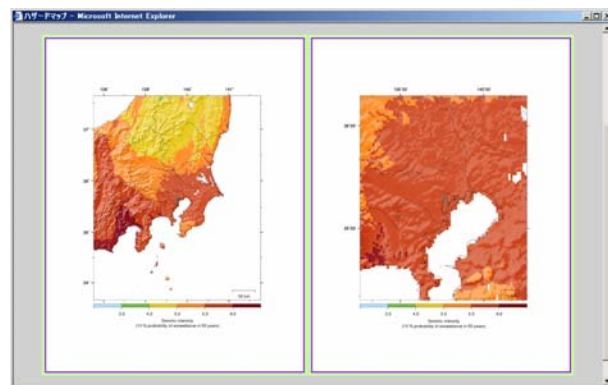
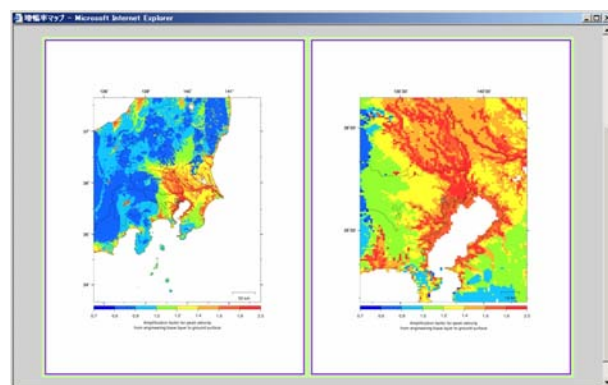


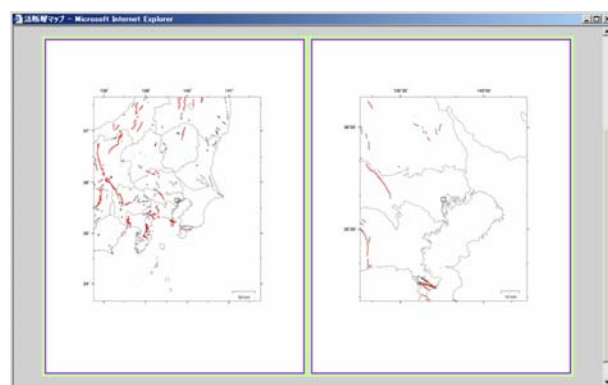
図-6 地震ハザード評価結果



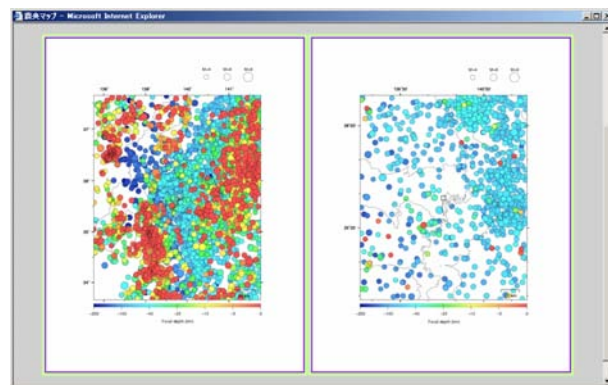
(A) ハザードマップ



(B) 地盤増幅率マップ



(C) 活断層マップ



(D) 震央マップ

図-7 各種関連マップ

本システムでは、2. 2で示した確率論的想定地震の貢献度を併せて表示できるのが大きな特徴である。図－6においてハザードカーブの右側の棒グラフが「50年超過確率10%相当の地震動強さ」の地震動に対する主な地震の貢献度を示したものである。ここでは「南関東のM7級の地震」の貢献度が最も大きく、次いで「南海トラフの地震」、「太平洋プレート内の震源を予め特定しにくい地震」の順となっている。

図－6の左下の棒グラフは対象期間における最大震度の生起確率を表している。この例では、震度5強が約59%、震度6弱が約30%となっている。また、その右には当該震度階に対応する主な地震の貢献度を示している。対象とする震度階（言い換えれば確率の

レベル）が異なると、各地震の貢献度が変化する様子がみてとれる。この例では特に震度6弱以下では多くの地震が影響していることがわかる。

図－8には中部地方のある地点における貢献度の例を示す。この例では震度階によらず「南海トラフの地震」の貢献度が支配的であることが理解できる。

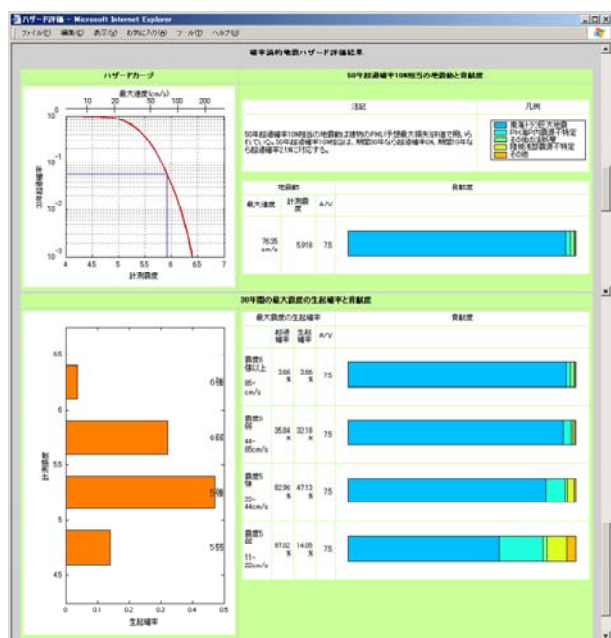
このように、例えば同じ震度6弱を対象とする場合でも、どのような地震によって震度6弱がもたらされるのかはその地域の地震環境に応じてさまざまである。簡易的にはハザードカーブの情報に基づいて、対象施設の確率論的地震リスクを評価することが可能であるが、動的解析を用いた詳細な検討を行う場合には、想定地震を明確にした方が理解しやすい。また、複数地点での地震リスクを検討する場合には、各地点での貢献度を比較することで、同時に影響する地震を容易に把握することも可能となる。本システムはこのように目的に資する多様な地震ハザード情報を出力できるのが特徴である。

§ 5. おわりに

本報告では、新たに開発した「想定地震選定システム」の概要について示した。今後、このシステムを活用して種々の建物や施設の地震リスクの定量評価を行うとともに、それを核としたリスクマネジメント技術の体系化を目指す必要がある。

謝辞

本報告で紹介したシステムでは（独）防災科学技術研究所の「地震ハザードステーション J-SHIS」による公開データを利用した。ここに記して謝意を表します。



図－8 特定の地震の影響が卓越する例

<参考文献>

- 1) 内閣府 防災担当，民間と市場の力を活かした防災力向上に関する専門調査会：“事業継続ガイドライン（第一版）”，2005.8.1.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：“「全国を概観した地震動予測地図」報告書”，<http://www.jishin.go.jp/main/>, 2005.3.23.
- 3) （独）防災科学技術研究所：“地震ハザードステーション J-SHIS”，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, 2005.5.
- 4) 亀田弘行，石川 裕，奥村俊彦，中島正人：“確率論的想定地震の概念と応用”，土木学会論文集，第577号/I-41, pp.75-87, 1997.10.
- 5) 石川 裕，奥村俊彦：“地域の集積リスクを考慮した想定地震の選定方法”，地域安全学会論文集，No.3, pp.199-206, 2001.11.
- 6) 司 宏俊，翠川三郎：“断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式”，日本建築学会構造系論文集，第523号, pp.63-70, 1999.9.
- 7) 森川信之，神野達夫，成田 章，藤原広行，福島美光：“東北日本の異常震域に対応するための距離減衰式の補正係数”，日本地震工学会論文集，第3巻，第4号, pp.13-26, 2003.11.
- 8) 奥村俊彦，渡辺基史，藤原広行：“2003年十勝沖地震の本震・余震記録に基づく最大速度のばらつきの検討”，日本地震学会講演梗概集，2004年度秋季大会，B26, 2004.10.
- 9) 翠川三郎，藤本一雄，松村郁栄：“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，Vol.1, pp.51-56, 1999.11.