

第4章 長周期地震動とその被害の予測手法に関する文献・資料調査

4.1 長周期地震動の予測手法に関する既往研究

4.1.1 はじめに

地震本部では、「長周期地震動予測地図」2009年試作版⁴⁵⁾、2012年試作版、2016年試作版⁴⁶⁾を公開している。内閣府では、南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告を公開している(内閣府(2015)⁴⁷⁾)。国土交通省では、観測データに基づく設計用長周期地震動の作成手法を開発している(国交省(2010)⁴⁸⁾)。また、気象庁では、長周期地震動の距離減衰式による長周期地震動階級の予測精度について検討を行っている(気象庁(2014a)⁴⁹⁾)。以下では、主としてこれらの公的機関で採用されている長周期地震動の予測手法について紹介する。

4.1.2 長周期地震動予測地図（地震本部）

地震本部では、一般的な地震動の予測手法として「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」を示している。レシピでは、震源モデルと地下構造モデルを作成し、統計的グリーン関数法と呼ばれる半経験的手法で計算した短周期成分と、差分法により理論的手法で計算した長周期成分を合成して地震動の予測とするハイブリッド合成法（入倉・釜江(1999)⁵⁰⁾）が採用されている。

「2009年試作版」、「2012年試作版」、「2016年試作版」について、対象地震などを比較したものを表4.1-1に示す。

表 4.1-1 長周期地震動予測地図の比較

項目	2009年試作版	2012年試作版	2016年試作版
対象地震	<ul style="list-style-type: none"> ・想定東海地震 ・東南海地震 ・宮城県沖地震 	<ul style="list-style-type: none"> ・南海地震(昭和型) 	<ul style="list-style-type: none"> ・相模トラフ沿いのM8クラスの地震
震源モデル	<ul style="list-style-type: none"> 前イベント震源モデル ・東南海地震 ・宮城県沖地震 特性化震源モデル ・想定東海地震 	<ul style="list-style-type: none"> 前イベント震源モデル ・南海地震(昭和型) 	<ul style="list-style-type: none"> ・1923年大正関東地震 ・1703年元禄関東地震 を念頭に置いた特性化震源モデルで、アスペリティ配置や面積等の多様性を考慮
地下構造モデル	地下構造モデル(1次)	地下構造モデル(1次)の作成手法を改良して作成した地下構造モデル	地層の連続性を考慮して作成した浅部地盤構造モデルを地下構造モデル(1次)と接続した浅部・深部統合地盤構造モデル
対象周期帯域	周期 3.5 秒以上	周期 2 秒以上	周期 1.2 秒以上
速度応答スペクトルの分布図の周期	周期 5 秒、7 秒、10 秒	周期 3 秒、5 秒、7 秒、10 秒	周期 2 秒、3 秒、5 秒、7 秒、10 秒

長周期地震動予測地図について、速度波形、速度応答スペクトル、地下構造モデル、および速度応答スペクトルの分布図、長周期地震動における最大速度の分布図、長周期地震動の継続時間の分布図の高解像度版のデータが公開されている。

2009年試作版：

http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/09_choshuki/

2012年試作版：

http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/12_choshuki/

2016年試作版：

http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/16_choshuki/

長周期地震動予測地図の各報告書で挙げられている主な課題を表 4.1-2 にまとめた。

表 4.1-2 長周期地震動予測地図の各報告書で挙げられた今後の課題

項目	2009 年試作版	2012 年試作版	2016 年試作版
震源モデルに関する課題	<ul style="list-style-type: none"> 海溝型地震の特性化震源モデルは、内陸地殻内地震に比べてさらなる研究が必要 そのため、想定東海地震の周期 5 秒未満の計算結果は本来より小さい可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 震源モデルの短周期側への拡張や大きな地震のモデル化に関しては、南海トラフで発生が懸念される巨大地震に向けてさらなる研究が必要 	<ul style="list-style-type: none"> アスペリティ配置等の多様性を考慮したが、その他の個々の断層パラメータではばらつきを考慮する手法を確立することが必要 多様性を考慮した個々のシナリオの重みはすべて 1 としており、計算結果が本来より小さい可能性がある。
地下構造モデルに関する課題	<ul style="list-style-type: none"> 全国の 1 次地下構造モデルの構築に向けて検討を進める予定 	<ul style="list-style-type: none"> さらなる精度向上に加え作成領域の拡張が必要 長周期帯の再現性等を重視したため、地質学等の既往知見と十分に整合しない懸念がある。 地下構造調査結果が少ない堆積平野や、地震記録が少ない海域等では検証が十分と言えない。 	<ul style="list-style-type: none"> 周期 1 秒以上の計算には、地下構造モデルの精度向上、観測記録の蓄積が必要 相模トラフ地震のような震源断層から近い場合の検証が十分とは言えない。 現在の計算資源では表層地盤を含む広域の解析が困難 陸域の観測記録を再現するモデルを構築したが、海域の観測記録も再現するようなモデル更新が望まれる。
対象周期帯域に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> 計算上の問題等で周期 3.5 秒以上の計算としたため、周期帯の拡張を目指す。 	<ul style="list-style-type: none"> 2009 年試作版の地震も周期 2~3 秒で計算するなど、工学的活用に向け継続的な取り組みが必要 	<ul style="list-style-type: none"> 周期 1.2 秒以上の計算としたが、2 秒未満の精度検証が不十分 周期 2 秒の応答値の精度向上については今後の課題

4.1.3 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告（内閣府）

内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」から、南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告が2015年12月17日に公開された。概要を以下に示す。

(1) 検討条件

内閣府の検討では、以下の条件で三次元差分法により長周期地震動を予測している。

1) 検討対象とする地震と長周期地震断層モデル

過去地震については、1707年宝永地震(M 8.6)、1854年安政東海地震(M 8.4)、1854年安政南海地震(M 8.4)、1944年昭和東南海地震(M 7.9)、1946年昭和南海地震(M 8.0)の5地震を検討対象としている。

長周期地震断層モデルの検討にあたっては、最大クラスの地震に相当する2011年東北地方太平洋沖地震など、過去地震における断層の破壊過程に関する解析結果を収集し、その特徴等を整理して、2011年東北地方太平洋沖地震等から得られた知見を反映させている。

2) 対象とする地震動の周期

長周期地震動による被害が懸念される超高層建築物の固有周期や、貯蔵されている石油を含む石油タンクのスロッシング固有周期をふまえて、周期2～10秒程度の地震動を検討対象としている。

3) 地盤構造モデル

浅い地盤構造モデルについては、深さ30mまでのS波平均速度(AVS30)から表層地盤による震度の増幅分を求め、これを工学的基盤における震度の予測結果に加えることで、地表での震度を予測している。

深い地盤構造モデルについては、地震本部から公開されている「全国一次地下構造モデル(暫定版)」(2012)を基にして、四国および東海地域等で観測した水平動と上下動の振幅比に合致するよう地盤構造モデルを修正している。

(2) 今後の課題

長周期地震動の予測手法の高度化、地盤構造モデルの高度化、建築物の挙動・影響の評価機能の充実を挙げている。また、長周期地震動の予測は、発展途上の技術であり、震源や強震動生成域の場所、地盤構造モデル等の計算条件により、予測結果は大きく変わる場合があり、今回の想定とは異なる事象が発生する可能性があることにも留意する必要があると指摘している。さらに、今回の検討は、あくまでも現時点の科学的知見に基づいたものであり、今後の科学的知見の蓄積を踏まえ検証し、必要に応じて修正していくべきものであると述べられている。

4.1.4 長周期地震動作成手法の試案（国土交通省）

国土交通省は、地震動の観測データに基づいて設計用長周期地震動（ただし水平動のみ）を作成する手法の試案を提示し、意見募集を行った（国交省（2010））。ここで提案された手法は、各観測地点の解放工学的基盤における加速度応答スペクトルと、群遅延時間の平均値および分散を回帰式から算出し、フーリエ（逆）変換を用いて時刻歴波形を作成するものである。

なお、本手法では、周期 0.1 秒から 10 秒の周期成分を適用範囲とし、沖縄県および想定東海地震、東南海地震、宮城県沖地震の断層直上およびその近傍地域は対象外としている（国交省（2010））。

国交省（2010）による提案手法に対する意見募集が終了した翌月の 3 月 11 日に 2011 年東北地方太平洋沖地震が発生した。2011 年度建築基準整備促進事業では、事業主体（（株）大崎総合研究所）と建築研究所との共同研究として、上記意見募集で出された意見への対応や提案手法の検証なども含めて、2011 年東北地方太平洋沖地震における長周期地震動特性について検討し、提案手法の改良などを行っている。この検証内容や作成手法の改良については、大川ほか（2013）⁵¹⁾にまとめられており、この改良案に対する意見募集が国交省により行われている（国交省（2015）⁵²⁾）。

作成手法の改良点は、以下の 2 点である。

- i) 提案式を $M_w 9$ のマグニチュードまで適用可能としたこと
- ii) 震源域による増幅率とサイト係数の違いの考慮

これらの改良を加えた予測式による値と 2011 年東北地方太平洋沖地震の各地での観測記録とを比較し、改良を加えた予測式がより良く観測値を再現していることが確認されている。さらに、地震本部の昭和南海地震を対象とした 2012 年版長周期地震動予測地図との比較も試みた結果、両者に大きな相違がないことも確認されている（大川ほか（2013））。

4.1.5 距離減衰式の比較（気象庁）

気象庁の長周期地震動予測技術検討ワーキンググループでは、長周期地震動に関する4つの距離減衰式を取り上げて、長周期地震動階級の予測精度に関する検討を行っている（気象庁(2014a)）。検討に用いられた距離減衰式は、表4.1-2のとおりである。

この検討では、緊急地震速報（警報）を発表したMj5.5以上の地震について、警報が発表された報、M最大となった報、最終報のそれぞれの震源を利用して、予測と観測の適合度を調べている。その結果、4式とも実用に耐えるレベルの予測適合度が得られており、長周期地震動階級を予測するために提案された防災科研式(b)の予測精度が最も高いという結果が得られている。

ただし、巨大地震に対する長周期地震動の予測技術については、今後も検討を進める必要があると述べられている。

表 4.1-2 長周期地震動に関する距離減衰式の特徴の比較

	距離減衰式の評価手法			
	建築研式 佐藤ほか (2010 ⁵³⁾ , 2012 ⁵⁴⁾	防災科研式(a) Morikawa and Fujiwara(2013) ⁵⁵⁾	内閣府式 横田ほか (2011) ⁵⁶⁾	防災科研式(b) 気象庁(2014b) ⁵⁷⁾
評価対象	絶対加速度応答 スペクトル	絶対加速度応答 スペクトル	相対速度応答 スペクトル	絶対速度応答 スペクトル
応答スペクトル の減衰定数	海溝型(5%) 内陸型(1%と5%)	5%	5%	5%
マグニチュード の種類	モーメント マグニチュード	モーメント マグニチュード	モーメント マグニチュード	気象庁 マグニチュード
震源からの距離 の取り方	断層最短距離	断層最短距離	震源距離	震源距離
地震タイプの 考慮の有無	内陸型と海溝型を考慮	考慮していない	内陸型と海溝型 を考慮	考慮していない
深部地盤の影響 の考慮の有無	海溝型については、地震 基盤から工学的基盤ま でのS波の鉛直伝播時間 を考慮	深い堆積層による 振幅の増幅効果を 考慮	深部地盤の一次 固有周期により 考慮	観測記録、深部地盤 による補正係数を 考慮
その他の特徴	海溝型については、震源 域(太平洋プレートの地 震とフィリピン海プレ ートの地震)による伝播 特性の違いを考慮	Mw 9 まで適用可能	—	長周期地震動階級 を予測するために 提案されている

4.2 長周期地震動による被害の予測手法に関する既往研究

4.2.1 はじめに

長周期地震動による被害の予測手法に関しては、以下のような研究が行われている。

- i) 建物をモデル化して、時刻歴応答解析を行う手法
- ii) 距離減衰式や応答スペクトルなどを用いる手法
- iii) 簡易応答評価式を用いる手法

以下では、上記の手法の概要と既往研究について述べる。

4.2.2 建物をモデル化して、時刻歴応答解析を行う手法

建物を 3 次元モデルや等価な曲げせん断棒にモデル化して、時刻歴応答解析により各階の最大床応答加速度と最大応答層間変形角などを求めて、内外装、躯体、設備、天井などの被害を評価する手法である(たとえば、恒川ほか(2013)⁵⁸⁾)。恒川ほか(2013)では、S 造 14 階建建物を対象に地震予想最大損失率(PML: Probable Maximum Loss)の評価を行っている。予測対象は建物(構造部材と非構造部材)であり、家財は予測対象とはなっていない。

各部位に対する最大床応答加速度、あるいは最大応答層間変形角と被害割合の関係は被害関数として設定されている。間仕切壁と天井(システム天井)、外装と床仕上、および設備のクライテリアと被害関数との関係を表 4.2-1~3 に示す。間仕切壁のクライテリアは加登ほか(2007)⁵⁹⁾の実験を参考に、天井のクライテリアは田村ほか(2005)⁶⁰⁾の研究を参照して表 4.2-1 のように設定し、童ほか(1996)⁶¹⁾の変換式により加速度に変換している。外装のクライテリアは PC カーテンウォールを、床仕上のクライテリアは標準的なフリーアクセスフロアを想定し、表 4.2-2 に示すように設定されている。大破の被害関数は、解体およびガラ搬出費用を考慮し 150%としている。堅配管については、S 造では層間変形角 1/100 を考慮することとされていることから、表 4.2-3 のように設定されている。一般的に、外装、内装、および設備の堅配管などの被害は最大応答層間変形角に依存し、天井、および床置型や吊下げ型の設備機器は最大床応答加速度に依存するように設定される場合が多い。

また、設備機器および配管の最上階、中間階、および最下階における配置割合を表 4.2-4 に示す。復旧費用の評価は、各階の部位ごとの復旧費用を求め、これを足し合わせて建物全体の復旧費用を算定している。

表 4. 2-1 間仕切壁と天井のクライテリアと被害関数(恒川ほか(2013) 表 7 より)

	間仕切壁		天井 (システム天井)	
	層間変形角	被害関数	床応答震度	被害関数
小破	1/200	10%	5	10%
中破	1/100	50%	6	30%
大破	1/50	150%	7	150%

表 4. 2-2 外装と床のクライテリアと被害関数(恒川ほか(2013) 表 8 より)

	PC 版	床仕上	被害関数
	変形角	応答加速度	
小破	1/150	400gal	10%
中破	1/100	800gal	30%
大破	1/50	1,000gal	150%

表 4. 2-3 設備のクライテリアと被害関数(恒川ほか(2013) 表 9 より)

	機器, 横配管	縦配管	被害関数
	応答加速度	変形角	
小破	660gal	1/100	10%
中破	1,000gal	1/75	20%
大破	1,500gal	1/50	40%
崩壊	2,000gal	1/30	150%

表 4. 2-4 設備機器および配管の建物内配置 (恒川ほか(2013) 表 10 より)

	機器, 横配管	縦配管
最上階	5.0%	1.33%
中間階	65.0%	17.33%
最下階	10.0%	1.34%
計	80.0%	20.0%

この手法は、個々の建物に対して被害の予測を詳細に行う場合に用いられる手法である。多くの建物を対象として被害の予測を行う場合には、個々の建物の振動モデルと入力地震動の作成、および時刻歴応答解析に多くの労力を要するため、より簡易的な手法を用いる必要がある。

4.2.3 距離減衰式や応答スペクトルなどを用いる手法

建物を 1 自由度系でモデル化して、応答スペクトルから最大応答変位を求め、またエネルギースペクトルから長時間の揺れによる繰返し回数を評価して被害を簡易的に予測する手法である。また、距離減衰式により建物被害と相関が高い周期帯域の平均速度応答を求めて、この平均速度応答を用いて構造種別と建物の層数に応じた被害関数を設定する手法も提案されている。以下では、これらの予測手法の概要について述べる。

(1) 阿部ほか(2013)⁶²⁾による被害の予測手法

地震動や建物特性が持つバラツキを考慮した上で、地域全体の面的な被害予測を行うために、時刻歴応答解析を行うことなく簡易に超高層建物の応答や被害を予測できる手法を提案している。この手法の予測対象は建物(構造部材)であり、建物(非構造部材)と家財は予測対象とはなっていない。

手法の概要は以下のように述べられている。

- 「①地震動特性はスペクトルで表現する。
- ②想定する建物は、等価 1 自由度系に置換し、建物全体を Bi-Linear 型にモデル化する。
- ③評価指標を最大値に関わる評価指標(最大変位、最大層間変形角)と繰返しに関わる評価指標(部材累積塑性変形)とに分類し、最大値に関わる評価指標は応答スペクトルにより、繰返しに関わる評価指標はそれに加えてエネルギースペクトルにより推定する。」(阿部ほか(2013))

a) 最大値に関わる評価指標の算出

等価線形化手法により建物の縮約 1 自由度系モデルを作成し、減衰を考慮した応答スペクトル(Sa-Sd 曲線)から代表点の層間変形角を求め、これに係数を乗じて最大層間変形角を算出している。この係数は、3 種類の S 造純ラーメン架構の骨組モデルの時刻歴応答解析結果による代表点変形角と最大層間変形角の関係から図 4.2-1 に示すような近似折線で設定されている。

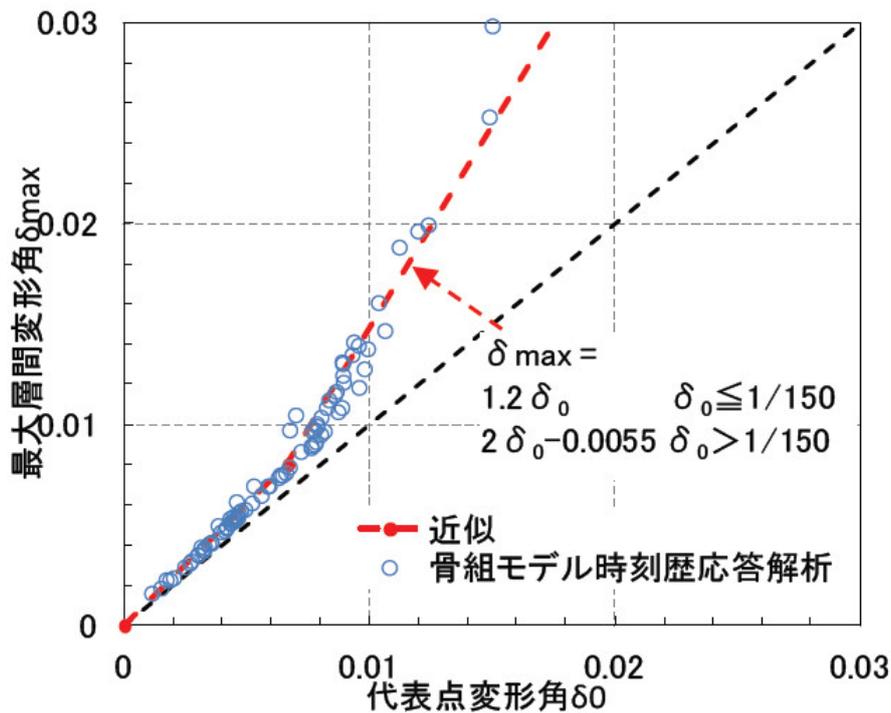


図 4.2-1 代表点変形角と最大層間変形角の関係(阿部ほか(2013)図3より)

b) 繰返しに関わる評価指標の算出

部材累積塑性変形倍率の算出フローを図 4.2-2 に示す。ここに、部材累積塑性変形倍率は、部材の塑性変形を累積したものを部材の弾性範囲の限界を表す降伏変位で除したものである。

まず、弾性時から最大応答時までの周期帯域におけるエネルギースペクトルの平均値から総入力エネルギーを評価する。総入力エネルギーのうち損傷寄与分のエネルギーを、最大応答時の 1 サイクル消費エネルギーで除して、繰返し回数を求める。部材累積塑性変形倍率の安全側の評価として、最大部材塑性率が前述の回数分繰返すとして、部材累積塑性変形倍率を評価する。最大部材塑性率は図 4.2-3 に示すように代表的な骨組モデルの解析結果をもとにした代表点応答変形角との関係から求めている。

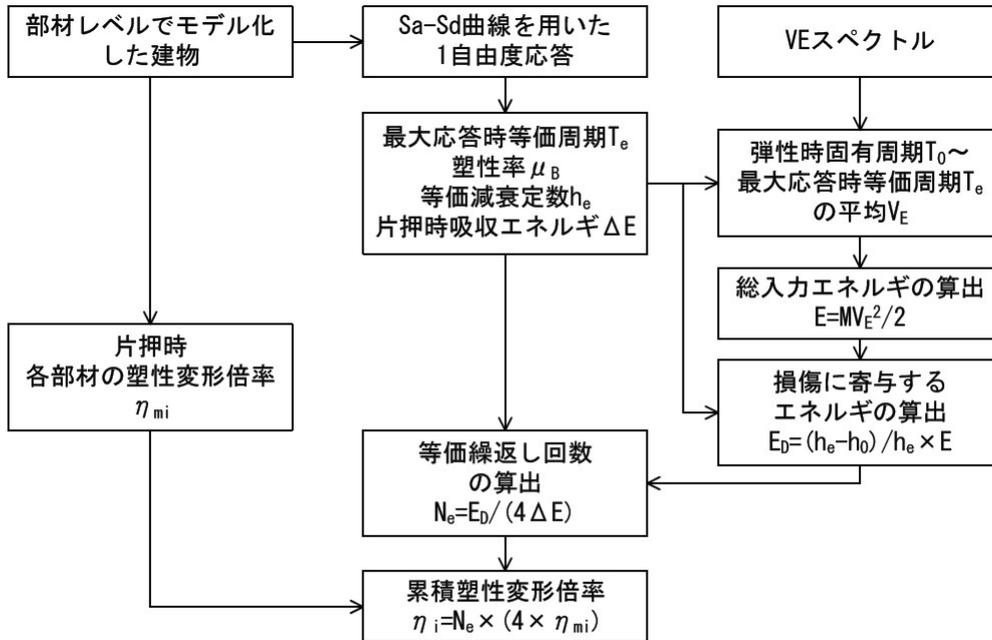


図 4. 2-2 エネルギースペクトルを用いた累積応答の算出(阿部ほか(2013) 図 4 より)

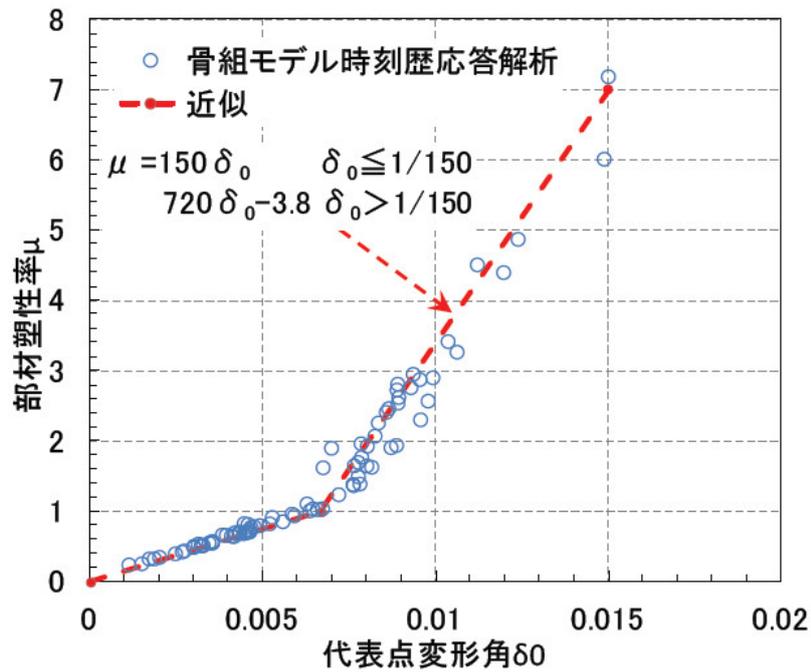


図 4. 2-3 代表点変形角と最大部材塑性率の関係(阿部ほか(2013) 図 5 より)

c) 超高層建物のモデル設定

簡易な超高層建物モデルは、既往の超高層建物データをもとに、以下のように剛性と耐力を設定することにより、Bi-Linear型でモデル化している。

- i) 剛性は、建物の弾性 1 次周期に基づいて設定している。既往の研究(勝俣ほか(2011)⁶³⁾)による高さ H (m) と周期 T_1 (秒) の関係から $T_1 = 0.0256H$ としている。なお、Bi-Linear 型モデルの第 2 勾配の第 1 勾配に対する比については、論文に記載されていない。
- ii) 耐力は、設計せん断力の 1.5 倍程度の耐力を有すると仮定している。設計せん断力係数は、既往の研究(日本建築学会(2007)⁶⁴⁾)にある設計せん断力係数 C_B と周期 T_1 の関係から $C_B = 0.3/T_1$ としている。すなわち、平均的な耐力 Q は $Q = 0.45/T_1$ と設定している。

d) 検討に用いている長周期地震動

東海-東南海-南海の 3 連動地震(紀伊半島沖から破壊開始、陸地寄りアスペリティ)モデルでシミュレーションした東京付近の 2km メッシュごとの地震動を設定している。検討に用いている長周期地震動のある周期での擬似速度応答スペクトル値の分布を図 4.2-4 に示す。3 秒~5 秒では中央本線の南側や所沢周辺など局所的に応答が大きくなる場所がある。東京都心部に比べて横浜や東京都西部ではあまり大きくない(阿部ほか(2013))。上記のシミュレーション波形に関する出典の記載はないが、阿部ほか(2013)の「まとめ」には「南海トラフ地震に対する長周期地震動予測地図検討のため、東京近傍での長周期地震動の面的な被害評価を試行した。」と記載されている。

e) 被害の予測結果

検討用長周期地震動に対して求めた超高層建物の最大層間変形角の面的分布を図 4.2-5 に示す。想定する超高層建物は 30 階~60 階までの 4 種としている。埼玉県南部や東京都内中央本線の南側の地域では 30 階建と 40 階建で層間変形角が $1/100$ (0.01) rad を超えるが、それ以外は概ね $1/100$ rad 以下となっている。 $1/100$ rad は通常の設計クライテリアであり、それ以上は設計クライテリアを超えた大きな応答となり大きな被害が発生する可能性がある」と述べられている(阿部ほか(2013))。

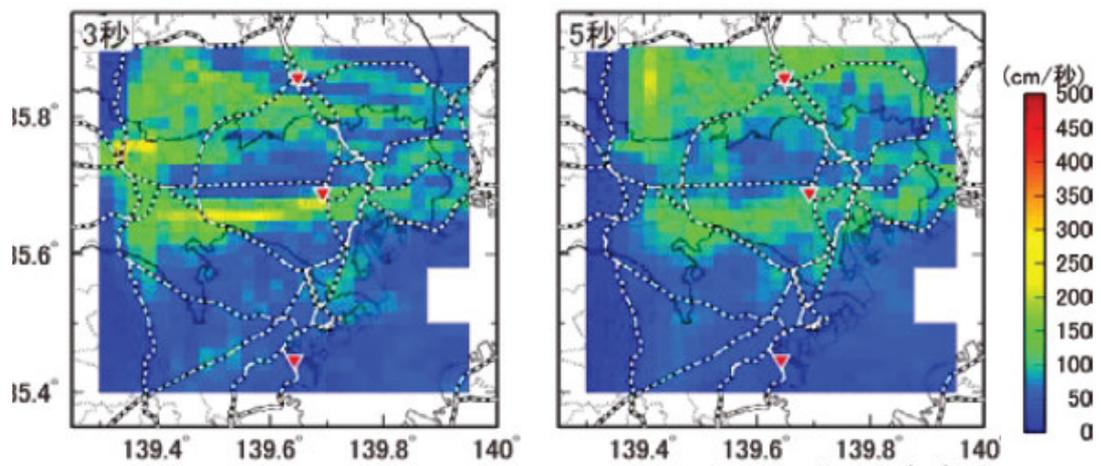


図 4.2-4 擬似速度応答スペクトル値の分布
(阿部ほか(2013)図6より)

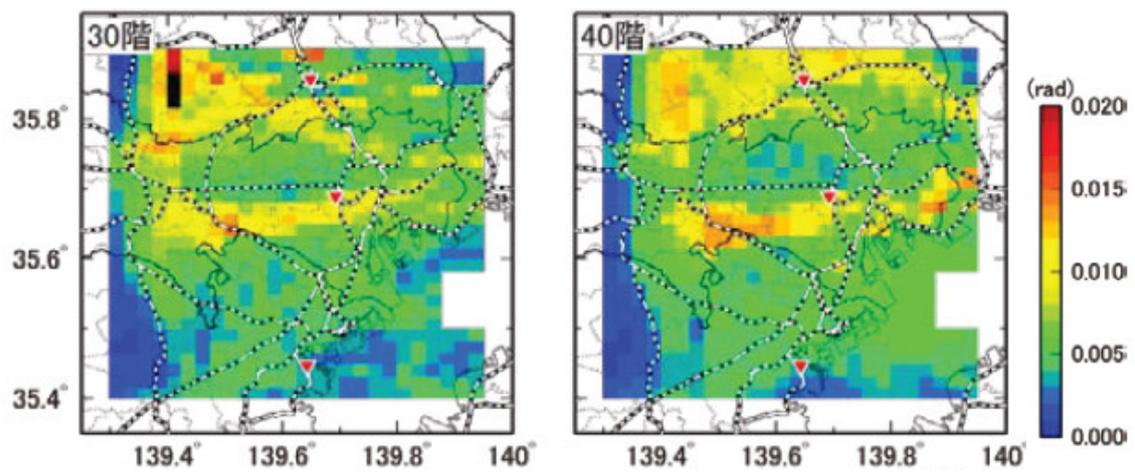


図 4.2-5 応答最大層間変形角の分布
(阿部ほか(2013)図7より)

(2) 新井ほか(2011)⁶⁵⁾による被害の予測手法

建物の構造種別や層数を考慮した被害の予測手法を提案している。この手法では、それぞれの建物被害と対応した地震動強さ指標が用いられている。この手法の予測対象は建物(構造部材)であり、建物(非構造部材)と家財は予測対象とはなっていない。

1) 建物種別の分類

建物層数の違いによって被害が対応する地震動の周期帯(地震動強さ指標)が異なり、また、木造建物と非木造建物の耐震性能(被害関数)が異なることから、建物群を木造、中低層(10階以下)非木造、高層(11階以上)非木造の3つの建物種別に分類している。

非木造建物の中低層と高層を10階で分けた理由については、以下のように記述されている。

- i) 非木造建物の大部分を占める鉄筋コンクリート造建物の1~10階の弾性周期が木造建物の弾性周期とほぼ同じ0.2~0.5秒となる。
- ii) 建物の被害を評価する際の地震動指標についても、既往研究(境(2009)⁶⁶⁾、熊本ほか(2008)⁶⁷⁾において同じ指標(1-1.5秒平均速度応答)が提案されている。
- iii) 上記の2点から、木造と中低層(10階以下)非木造については、被害関数における地震動強さ指標として同じものを用いることができると考えられる。

なお、周期 T_1 秒から T_2 秒までの平均速度応答 $V_{T_1-T_2}$ は、次式のように定義されている。

$$V_{T_1-T_2} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} V(T) dT \quad (4.2-1)$$

T_1, T_2 : 下限周期、上限周期

$V(T)$: 周期 T の弾性速度応答(減衰定数5%、水平2方向ベクトル和)

2) 被害関数

被害率として、木造建物に対しては全壊率、中低層非木造建物と高層非木造建物に対しては大破率が用いられている。これらの建物に対する被害関数は、以下のように設定されている。被害関数における地震動強さ指標としては、木造建物と中低層非木造建物に対しては 1-1.5 秒平均速度応答、高層非木造建物に対しては 2-4 秒平均速度応答が用いられている。1-1.5 秒平均速度応答を用いている理由は、1)に示したように既往研究(境(2009)、熊本ほか(2008))において、木造建物と中低層非木造建物に対しては同じ地震動指標が提案されているためである。なお、高層非木造建物に対して 2-4 秒平均速度応答が用いられている理由については、論文に記載されていない。

(4.2-2)式と(4.2-3)式は 1993 年釧路沖地震から 2008 年岩手沿岸北部地震までの 17 地震 61 記録とその周辺の実被害データを基に導かれたものであるが、(4.2-4)式については、高層非木造建物の実被害データがほとんど存在しないため、これらの強震記録を用いて、様々な高層建物を対象とした地震応答解析結果に基づいて設定したと述べられている(新井ほか(2011))。

$$D_w = \Phi(2.90 \log V_{1-1.5} - 8.15) \quad (4.2-2)$$

$$D_l = \Phi(2.26 \log V_{1-1.5} - 7.07) \quad (4.2-3)$$

$$D_h = \Phi(5.78 \log V_{2-4} - 13.94) \quad (4.2-4)$$

D_w, D_l, D_h : 木造建物, 中低層非木造建物, 高層非木造建物の被害率

$V_{1-1.5}, V_{2-4}$: 1-1.5 秒平均速度応答, 2-4 秒平均速度応答

Φ : 標準正規分布の累積確率

3) 平均速度応答の予測式

1-1.5 秒平均速度応答と 2-4 秒平均速度応答の予測式として、下記の式を提案している。

$$V_{1-1.5} = \frac{1}{0.5} (1.5 \cdot 10^{aI_{JMA}+b} - 1.0 \cdot 10^{c \log PGA+d}) = 3 \cdot 10^{aI_{JMA}+b} - 2 \cdot 10^{c \log PGA+d} \quad (4.2-5)$$

$$V_{2-4} = \frac{1}{2.0} (4.0 \cdot 10^{eI_{JMA}+f} - 2.0 \cdot 10^{g \log PGV+h}) = 2 \cdot 10^{eI_{JMA}+f} - 2 \cdot 10^{g \log PGV+h} \quad (4.2-6)$$

$V_{1-1.5}, V_{2-4}$: 1-1.5 秒平均速度応答, 2-4 秒平均速度応答

I_{JMA} : 計測震度

PGA : 最大地動加速度 (cm/s^2)

PGV : 距離減衰式による最大地動速度 (cm/s)

$a \sim h$: 回帰係数

回帰係数 $a \sim h$ は、1993 年釧路沖地震から 2008 年岩手沿岸北部地震までの 17 地震 61 記録を用いて最小二乗法により決定している。

予測式より求めた平均速度応答と観測記録より算出した平均速度応答との対応関係を図 4.2-6 に示す。1-1.5 秒平均速度応答と 2-4 秒平均速度応答がそれぞれ精度よく予測できていると述べられている(新井ほか(2011))。

波形データが得られない震度観測点においては、計測震度と最大地動加速度が得られるが、最大地動速度は得られない。このため、安中ほか(1997)⁶⁸⁾による最大地動速度 PGV の距離減衰式が用いられている。

$$\log PGV = 0.697M_j + 0.00293H - \log X - 0.00163X - 2.116 \quad (4.2-7)$$

M_j : 気象庁マグニチュード

H : 震源深さ (km) ($H > 100\text{km}$ のときは $H = 100\text{km}$ とする)

X : 震源距離 (km)

(安中ほか(1997)では等価震源距離を、新井ほか(2011)では震源距離を用いている。)

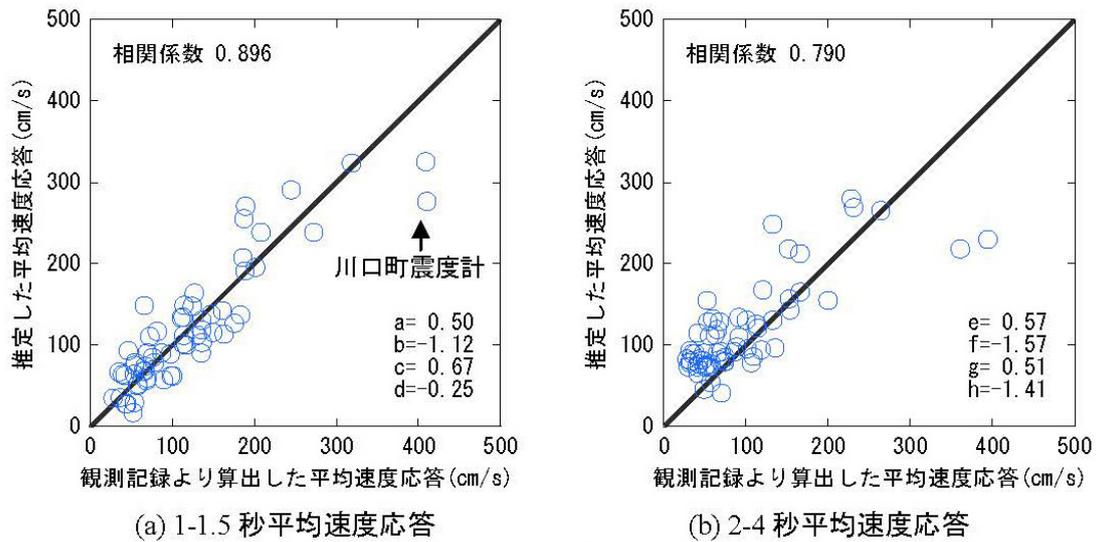


図 4.2-6 予測した平均速度応答と観測記録より算出した平均速度応答の対応
(新井ほか(2011) 図 3 より)

4) 過去の地震における被害の予測

1995 年兵庫県南部地震から 2009 年駿河湾の 14 地震に対して、提案した被害の予測手法を適用し、実被害との対応関係について検討している。なお、検証に用いる実被害データについては、木造、非木造、中低層、高層ごとのものは、現状ではほとんど存在しないため、建物全体としての実被害データにおける全壊棟数と、被害の予測結果における全壊・大破棟数の比較に留まっている。

過去の地震における被害の予測は、以下のような手順で行っている。

① 観測点における地震動強さ指標の算定

強震観測点における地震動強さ指標として、平均速度応答 $V_{1-1.5}$ と V_{2-4} を (4.2-5) 式と (4.2-6) 式により評価する。

② 地震動強さ指標の面的補間

被害の予測を面的に行うために、地震動強さ指標(平均速度応答 $V_{1-1.5}$ と V_{2-4})を面的に補間している。この面的補間のために、K-NET と KiK-net の強震記録のみを使った場合とこれらの記録に加えて、震度計情報を加えた場合についても検討を行っている。追加する震度計は、気象庁や地方自治体が設置したものの中で、震度 5 弱以上を記録したものとしている。なお、1995 年兵庫県南部地震においては、K-NET と KiK-net の設置以前であるため、震度計情報の追加の有無に関する場合分けは行っていない。

面的補間方法として、以下の3つを用いている。

- ・ 重み付け平均

距離による重み付け平均を行う方法であり、求めたい任意点から最大50km以内かつ最大5点の観測点における地震動強さ指標を用いて、次式による距離の重み付けを行い、任意点における地震動強さ指標 V を算出する。

$$V = \frac{\sum_{i=1}^5 \frac{V_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{d_i}} \quad (4.2-8)$$

V_i : i 観測点における地震動強さ指標

d_i : 任意点と i 観測点の距離

- ・ 三角形線形補間

三角形線形補間法は、三角形で囲まれた任意点を近似するものであり、連立方程式を使用して解く方法である。三角形の内部での地震動強さ指標を一次式で近似できるとすれば、地震動強さ指標を変数が3つの連立方程式で表すことができ、連立方程式を解くことにより、任意点の地震動強さ指標を求めることができる。

- ・ Simple Kriging

Simple Kriging 法は、平均値(トレンド成分)と共分散を既知として補間する方法である。基盤面における(4.2-9)式に示す安中ほか(1997)の加速度応答スペクトルの値を擬似速度応答スペクトルにし、それをもとに算出した基盤相当の値の残差をランダム成分として空間補間を行っている。共分散関数は距離に比例する指数関数型とし、相関距離は既往の研究より20kmに設定されている。

$$\log SH = c_m M_j + c_h H - \log X - bX + c_0 \quad (4.2-9)$$

SH : 水平加速度応答スペクトル (cm/s^2)

M_j : 気象庁マグニチュード

H : 震源深さ (km)

X : 震源距離 (km)

c_m, c_h, b, c_0 : 係数

補間位置は、重み付け平均と三角形線形補間については地表と基盤、Simple Kriging については基盤としている。また、1995 年兵庫県南部地震においては、気象庁や関西地震観測研究協議会など様々な機関から公開されている強震波形データを用いて、面的補間方法と補間位置だけを変化させている。

面的補間を工学的基盤上で行う場合は、対象とする地震動指標(平均速度応答 $V_{1-1.5}$ と V_{2-4})の表層地盤の増幅率が必要となる。この手法では、 $V_{1-1.5}$ の増幅率として先名ほか(2009)⁶⁹⁾による微地形区分ごとのスペクトル増幅率、 V_{2-4} の増幅率として J-SHIS で公開されている微地形区分ごとの最大速度の増幅率を用いている。

3つの面的補間方法を適用する際の場合分けを表 4.2-5 に示す。

表 4.2-5 適用の際の場合分け(新井ほか(2011)表 3 より)

補間方法	補間位置	K-NET・KiK-net の強震記録のみ	震度計情報 を加える
重み付け平均	地表	KKiK (重み付け地表)	KKiK+震度計 (重み付け地表)
	基盤	KKiK (重み付け基盤)	KKiK+震度計 (重み付け基盤)
三角形線形補間	地表	KKiK (三角形地表)	KKiK+震度計 (三角形地表)
	基盤	KKiK (三角形基盤)	KKiK+震度計 (三角形基盤)
Simple Kriging	基盤	KKiK (Kriging基盤)	KKiK+震度計 (Kriging基盤)

実被害(全壊数)と被害の予測結果(全壊・大破建物数)を比較した結果を図 4.2-7 に示す。実被害は消防庁のホームページで公開されている災害情報を用いているが、消防庁の全壊数は、(4.2-2)式～(4.2-4)式の基となった研究者による判定のほぼ2倍となるため(山口ほか(1999)⁷⁰⁾、1/2の値を実際のデータとして用いている。

高層非木造建物の被害の予測結果(全壊・大破建物数)については、1995年兵庫県南部地震では約110棟～140棟、2007年新潟県中越沖地震では数棟の被害となっており、その他の地震では0となっている。このため、新井ほか(2011)による検証は、主に木造建物と中低層非木造建物を対象とした検証となっている。

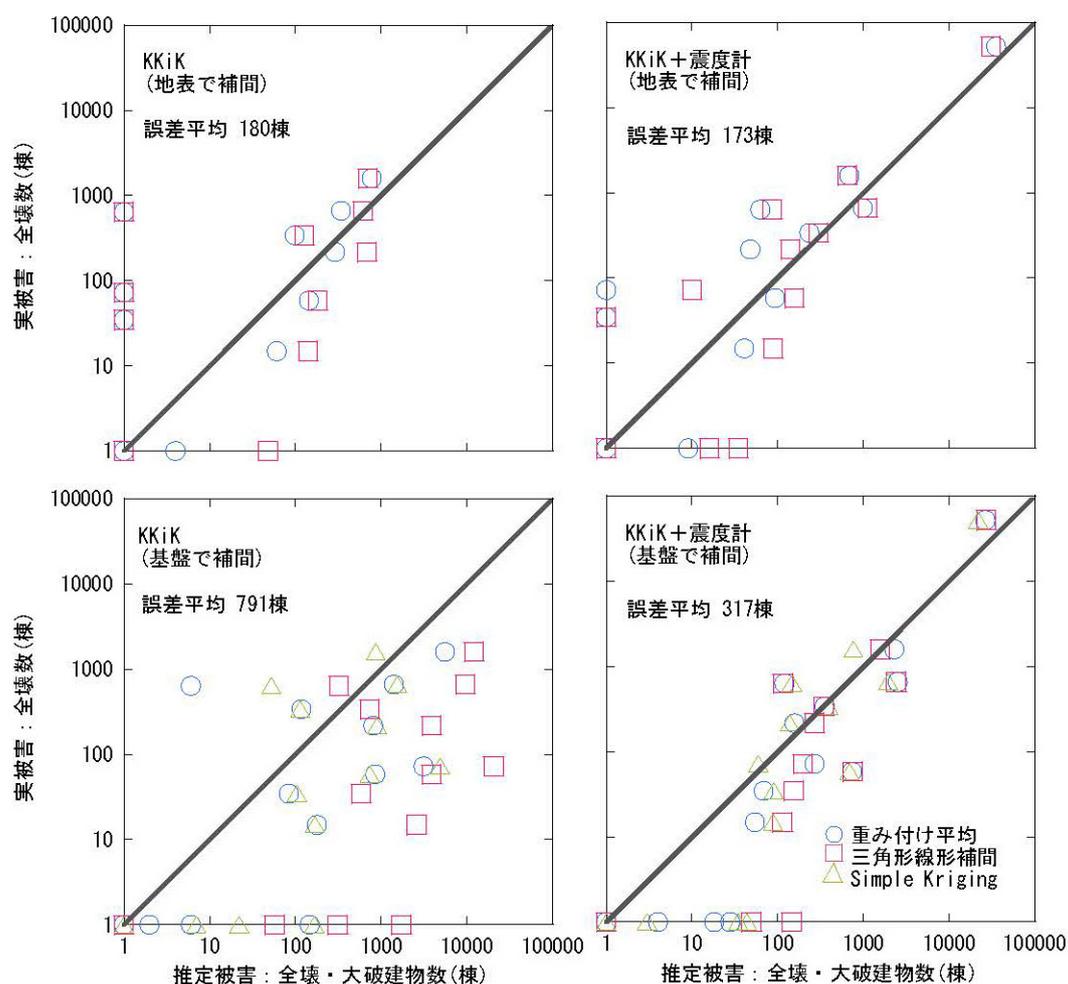


図 4.2-7 全壊・大破建物数と全壊数の対応(新井ほか(2011)図 6 より)

4.2.4 簡易応答評価式を用いる手法

高層建物の各階の応答加速度と層間変形角を簡易応答評価式により算定し、これらの応答量から家具・機器類の転倒・移動危険性と非構造部材の損傷可能性を評価する手法である。この手法の予測対象は建物(非構造部材)と家財である。

(1) 中村ほか(2005)⁷¹⁾による被害の予測手法

中村ほか(2005)は、田村ほか(2005)による高層建物の簡易応答評価式を用いて、高層建物における家具・機器類の転倒・移動危険性と非構造部材の損傷可能性を評価する手法を提案している。また、提案手法の適用性検証のため、2004年新潟県中越地震における非構造部材の被害状況と提案手法による評価結果との対応関係を調べている。

1) 家具・機器類の転倒危険性評価

家具・機器類の転倒危険性については、金子(2003)⁷²⁾により提案されている家具分類ごとの転倒率 R で判定している。

$$R = \begin{cases} \alpha \cdot \Phi((\ln A_f - \lambda)/\zeta) & F_f \leq F_b \\ \alpha \cdot \Phi((\ln V_f - \lambda)/\zeta) & F_f > F_b \end{cases} \quad (4.2-10)$$

A_f (cm/s²), V_f (cm/s) : 床の最大応答加速度と最大応答速度

Φ : 平均値 λ , 標準偏差 ξ (対象とする家具分類の寸法の分布等から算定)の正規分布関数

F_f (Hz) : 床応答の等価振動数 [= $A_f/(2\pi V_f)$]

F_b (Hz) : 家具の形状(奥行き B (cm), 高さ H (cm))から算定される境界振動数
[= $15.6/\{H^{0.5}(1+B/H)^{1.5}\}$]

α : 床の滑りにくさを表す指標で、家具分類と床分類ごとに設定

家具分類は以下の4種類としており、家具の配置条件も考慮している。

- H1 : 高さ $H \geq 150\text{cm}$ で、「壁際」以外に配置
- H2 : $H \geq 150\text{cm}$ で、「壁際」に配置
- L1 : $90\text{cm} \leq H < 150\text{cm}$ で、「壁際」以外に配置
- L2 : $90\text{cm} \leq H < 150\text{cm}$ で、「壁際」に配置

床は滑りにくさにより3分類(床A, B, C)としている。床Bの場合の4分類の家具の転倒率と床応答との関係を図4.2-8に示す。転倒危険性は転倒率の大きさにより4段階に分類されている。

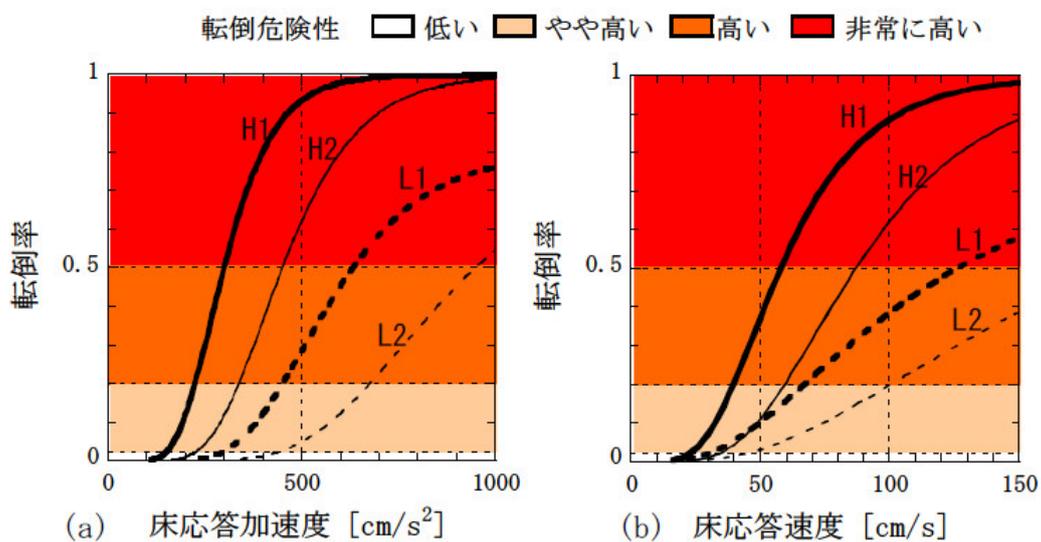


図4.2-8 家具の転倒率と転倒危険性評価(中村ほか(2005)図1より)

2) 家具・機器類の移動危険性評価

家具・機器類の移動危険性については、移動確率と移動量の2つの指標で判定している。移動確率は $1-\alpha$ とし、移動量 d は、摩擦係数 μ 、床応答の等価振動数 F_f 、床の最大応答速度 V_f を用いて金子ほか(1999)⁷³⁾の提案式で評価している。 V_f と d との関係を図4.2-9に示す。移動確率と移動量による移動危険性の評価法を図4.2-10に示す。移動確率が高く移動量が大きいものほど危険性が高いと評価している。

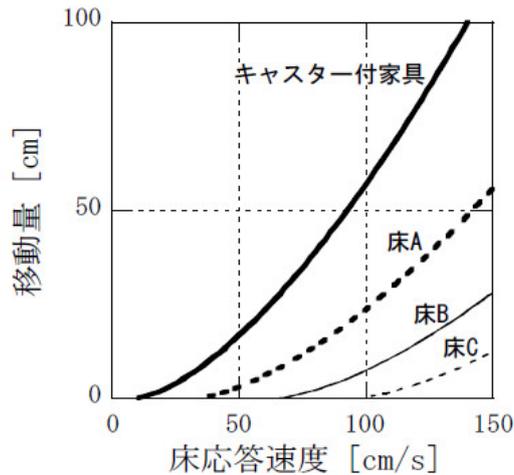


図 4.2-9 家具の移動量評価(中村ほか(2005)図2より)

移動危険性 □ 低い □ やや高い □ 高い □ 非常に高い

		移動確率 $1-\alpha$			
		$1-\alpha=0$	$0<1-\alpha<0.5$	$0.5\leq 1-\alpha<1$	$1-\alpha=1$
移動量 δ [cm]	$\delta=0$				
	$0<\delta<2$				
	$2\leq\delta<20$				
	$20\leq\delta$				

図 4.2-10 家具の移動危険性評価(中村ほか(2005)図3より)

3) 非構造部材の耐震性分類と損傷レベルの設定

非構造部材については、耐震実験等の文献を基に層間変形角(あるいは加速度)に対する損傷レベルを整理し、多様な非構造部材の耐震性をある程度統一的に扱えるように、耐震性を表 4.2-6 に示す4つに分類している。

表 4.2-6 非構造部材の耐震性分類(中村ほか(2005)表 1 より)

耐震性分類	被害と関連の高い指標	耐震性	部材例
A	層間変形角	高	・ALC (挿入筋構法以外) ・カーテンウォール ・乾式間仕切壁 (軸組下地ボード)
B	層間変形角	中	・ALC (挿入筋構法) ・乾式間仕切壁 (直張りボード)
C	層間変形角	低	・タイル (RC下地 湿式仕上げ)
D	層間変形角と加速度	—	・天井

損傷が層間変形角による外壁・間仕切壁は、耐震性の高さで3つに分け(分類 A, B, C)、損傷が層間変形角と応答加速度の両方による天井を分類 D としている。

耐震性分類 A, B, C の非構造部材について、層間変形角と損傷レベルの関係を図 4.2-11 のように設定している。損傷レベルは被災度 0(被害なし)、被災度 1(軽微な被害・小規模補修必要)、被災度 2(中規模な補修必要)、被災度 3(大規模な補修・取替えが必要)の4段階に区分している。

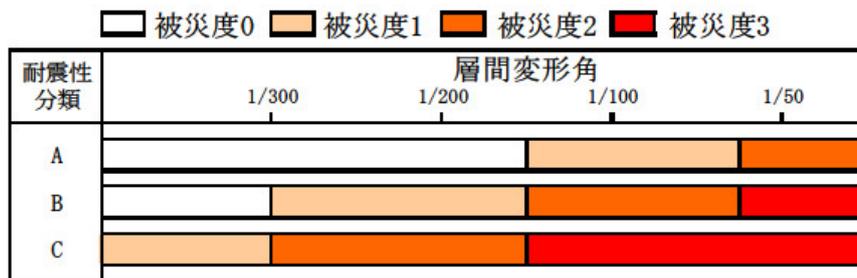


図 4.2-11 耐震性分類(A, B, C)の層間変形角と損傷レベルの関係
(中村ほか(2005)図 4 より)

4) 2004年新潟県中越地震の非構造部材の被害との対応

中村ほか(2005)は、2004年新潟県中越地震で被災した長岡市、十日町市、小千谷市の非木造建物の外観調査による非構造部材の被害状況と上記の手法による評価結果との比較を行っている。

3市における地震観測記録の最大加速度と最大速度から田村ほか(2005)の簡易応答評価式を用いて3階建S造建物の最大層間変形を計算し、階高を350cmと仮定して、最大層間変形角の平均値を算出している。可動窓ガラス(耐震分類A)、ALC[挿入筋構法](B)、現場張りタイル(C)、ラスモルタル(C)についての損傷評価結果と3市の被害状況との比較結果を図4.2-12に示す。評価結果は概ね被害状況と対応していると述べられている。

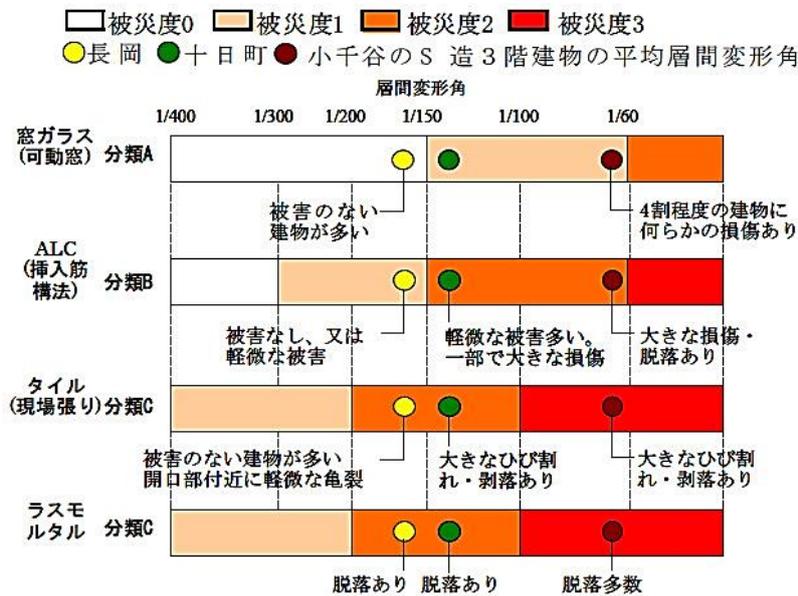


図 4.2-12 2004年新潟県中越地震の非構造部材の損傷評価結果と被害状況
(中村ほか(2005) 図5より)

4.2.5 長周期地震動による被害の予測手法の比較

4.2.2 から 4.2.4 で示した被害の予測手法について、評価対象、予測内容、手法の検証状況、メリットおよびデメリットをまとめたものを表 4.2-7 に示す。

なお、これらは 2011 年東北地方太平洋沖地震より前の手法であり、2011 年東北地方太平洋沖地震の被害を説明する検討は行われていない。

表 4.2-7 長周期地震動による被害の予測手法の比較

	時刻歴応答解析を行う手法 (恒川ほか(2013))	応答スペクトルと入力エネルギースペクトルを用いる手法 (阿部ほか(2003))	簡易応答評価式を用いる手法 (中村ほか(2005))	応答スペクトルを用いる手法 (新井ほか(2011))
評価対象	建物(構造部材) 建物(非構造部材)	建物(構造部材)	建物(非構造部材) 家財	建物(構造部材)
用いる地震動情報	入力地震動の加速度時刻歴	Sa-Sd 曲線および入力エネルギースペクトル	最大加速度 最大加速度と最大速度の比(A/V)	速度応答スペクトル
建物のモデル化	3次元モデルや曲げせん断棒モデル	等価1自由度系モデル(復元力特性はBi-Linear型)	多質点のせん断棒モデル	—
被害の予測に用いる指標	最大層間変形角 最大床応答加速度	代表点変形角	最大層間変形角 最大床応答加速度	2~4秒の平均速度応答
上記指標の評価手法	時刻歴応答解析	Sa-Sd 曲線および入力エネルギースペクトル	簡易応答評価式	回帰式
用いる被害関数	小破、中破、大破などに対する層間変形角や応答加速度を設定	被害関数は設定されていない	損傷度に対応する層間変形角と応答加速度の閾値を設定	正規分布の累積関数
予測内容	各階の部位別被害率	最大層間変形角 部材累積塑性変形倍率	各階の部位別損傷度(0, 1, 2, 3)	高層非木造の建物被害率
被害関数の設定根拠	設計クライテリアや既往の実験結果	—	既往の耐震実験等	強震記録による様々な高層建物を対象とした応答解析結果
予測手法の検証状況	行われていない	東海-東南海-南海地震に対する被害の予測を行っているが、過去の地震に対する検証は行われていない	2004年新潟県中越地震における長岡市、十日町、小千谷市の非木造建物に対して検証を実施	1995年兵庫県南部地震までの14地震に対して主に木造、中低層建物に対する検証を実施
その他の特徴	PML(Probable Maximum Loss)の評価手法	長周期地震動の影響を考慮	非構造部材を耐震性に基づいて4種類に分類	地震動強さ指標の面的補間
メリット	高精度である	多くの建物に適用可能	多くの建物に適用可能	多くの建物に適用可能
デメリット	振動解析モデルの設定と入力地震動の評価が必要であり、多くの建物には適用困難	簡易予測のため高さ方向の被害が適切に予測できない場合があり、応答スペクトルと入力エネルギースペクトルの設定が必要	建物の非線形性が考慮されていない	過去の地震に対する十分な検証が行われていない

