

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360259

研究課題名（和文） 断層モデルを考慮した確率論的設計用地震動の提案

研究課題名（英文） Proposed procedure for probabilistic design earthquake ground Motions considering scenario earthquakes

研究代表者

神田 順（KANDA JUN）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：80134477

研究成果の概要：

断層モデルを用いた詳細法による強震動評価に基づいて、地震ハザード曲線を求め、そこから、確率的に設計用地震動を策定する手法について、過去の研究成果による手法の原型を元に提案を行った。本研究は、地震動の位相特性の違いによる応答の差異や、位相特性と断層パラメータの関係、および断層モデルの不確かさの考え方について、原型をさらに発展させることを試みた。また、設計用地震動を選定する際に行う、安全性のレベルを表す信頼性指標の値の設定についても考察を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2007 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2008 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・地震防災

キーワード：耐震設計、地震防災、地震ハザード、確率論、断層モデル、位相特性

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在の設計用地震動は、2000年の建築基

準法改正における国土交通省告示1461号による設計用応答スペクトルで規定されている。

一方、近年の地震学的・地震工学的な発展により特定の地震に対して断層モデルを設定して、震源特性、敷地の地域特性をより反映した地震動を詳細法による波形合成によって求めることが可能になった。

現在では、この手法を用いて計算される検討サイトで想定される複数の模擬地震動から、設計用応答スペクトルを求められるようになり、より地震動の地域特性が反映される設計用地震動が作成できるようになった。

(2)しかし、設計用応答スペクトルから設計用地震動を計算する際に与えられる位相特性は、従来よりランダム位相や歴史地震データの位相特性であり、詳細法による波形合成が確立した現在でも大きな変化はない。

断層モデルで詳細法による波形合成を行った時の位相特性は、地域に固有な地震動の位相特性を表すと考えられるので、そのような地震動の位相特性とランダム位相との差異を確認し、詳細法による波形合成で得られる地震動の位相特性の影響を検討する必要がある。

2. 研究の目的

(1)本研究では詳細法による波形合成で得られる複数の地震動から、設計用地震動を求めるに際して、波形合成による地震動の位相特性とランダム位相との差異について確認を行う。また、地震動の位相特性は、断層パラメータに大きく影響されると考えられるが、断層パラメータが地震動の位相特性に及ぼす影響を検討した上で、設計用地震動への位相特性の与え方を提案することを第1の目的とする。

(2)また、設計用地震動の元となる、断層モデルを用いて詳細法により波形合成して得られる地震動については、安全性・説明性の観点から確率論的に扱うのが適切である。これらの地震動は確定的な手法によって断層破壊のシナリオが設定されることが多いが、本研究では、断層モデルのパラメータのばらつきを考慮して、地震動のばらつきを評価すること、すなわち1つのシナリオ地震を確率論的に評価することで、設計用地震動を確率論的に扱うことを可能とする。本研究では、詳細法による波形合成に適用するための断層パラメータのばらつきの客観的な定量的評価を行い、その評価結果に基づいて、設計用地震動を決定することを第2の目的とする。

3. 研究の方法

(1)研究代表者らは、過去の成果である平成17年度原子力安全基盤調査研究「シナリオ地震の生起確率を考慮した基準地震動に関する研究」において、確率論的地震動評価手法の原型を開発しており、本研究では、その手

法を踏襲しつつ、より一般的なものとするために補強および拡張を行う。

(2)本研究による手法の検証として、関東地方の敷地において、本研究による設計用地震動の作成手法例を示す。

(3)本研究による研究手順を以下に示す。

予備的な確率論的地震ハザード解析
検討サイトに大きな影響を及ぼす地震動を選定して、断層破壊のシナリオを付与するために、距離減衰式を用いて、予備的な確率論的地震ハザード解析を行う。後に、断層破壊のシナリオを設定するため、地震発生モデルによって地震を6分類に分けて、予備的地震ハザード解析を行う。

ばらつきを有する断層モデルの設定
断層モデルを用いた詳細法によって得られた強震動評価結果を地震ハザードに反映させるために、ばらつきを有する断層モデルの検討を行う。

地震動の位相差分分布評価

主要動の継続時間の目安を与えられている位相差分の標準偏差を調べ、断層モデルや断層パラメータの違いで特徴が見いだせるかを調べる。

断層モデルによる強震動の計算

シナリオ地震の断層モデルを用い、詳細法によって敷地における強震動を計算する。
地震ハザード曲線の算定

で計算した詳細法の結果から、サイトにおける地震ハザード曲線を算定する。

確率論的設計用入力地震動の策定

算定した地震ハザード曲線に基づいて、設計用入力地震動の策定例を示す。設計用入力地震動として適切な信頼性指標を検討し、与える地震の位相特性による設計用地震動の差異についても検討を行う。

4. 研究成果

(1)予備的な確率論的地震ハザード解析

東京・大手町において行った予備的な確率論的ハザード解析の結果を図1に示す。図2には、全体の地震ハザードに対する、地震発生モデルの6分類ごとの寄与率を示す。

この結果より、東京・大手町では関東地震と震源が特定される活断層による地震の寄与率が大きいことがわかる。本研究では、震源が特定される活断層による地震ハザードに対する活断層ごとの寄与率も調べた。

その結果、シナリオを付与する地震として、1923年関東地震、関東平野北西縁断層帯、立川断層帯、および伊勢原断層で発生する地震を選定した。

図1と図2の結果において、直下地震の寄与率は、それほど大きくはならなかったが、直下地震が発生した場合、一般的に被害の程

度は非常に大きくなるため、ここでは、シナリオを付与する地震として、直下地震も検討を行うこととした。

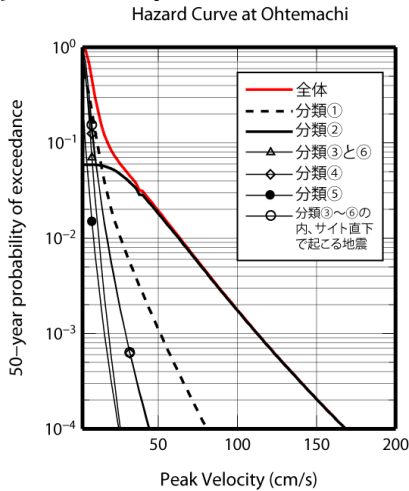


図 1 東京・大手町における地震ハザード曲線

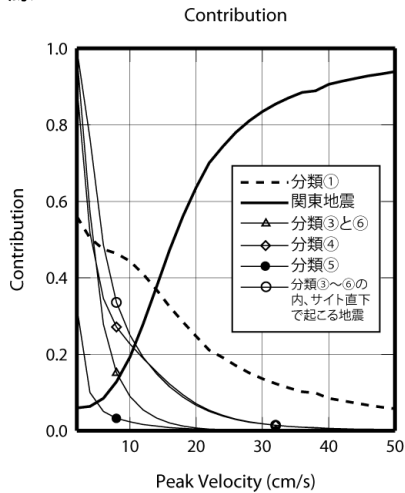


図 2 東京・大手町における各分類の全体の地震ハザードへの寄与率

(2) シナリオ地震のばらつきを有する断層モデルの設定

まず、特性化震源モデルで用いる断層パラメータを確認し、断層パラメータの不確かさの整理を行った。

続いて、(1)の結果により選定した地震に対して、基本的な断層モデルと断層パラメータの不確かさを考慮した断層モデルを、それぞれ設定した。1923 年関東地震について、断層モデルの設定例を図 3～図 5 に示す。図 3 は基本の断層モデルであり、図 4 と図 5 は、それぞれ地震動の短周期領域と長周期領域に影響を与える断層パラメータの不確かさを考慮した断層モデルの例である。

また、直下地震の断層モデル化手法については、平成 17 年度原子力安全基盤調査研究の成果を引用し、地盤増幅の補正を行うこととした。



図 3 1923 年関東地震の基本の断層モデル

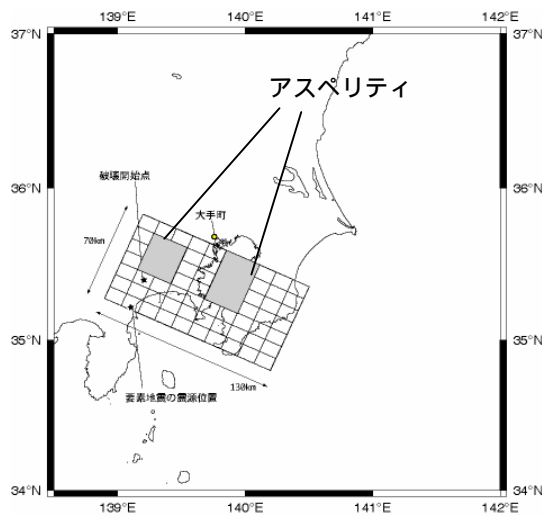


図 4 地震動の短周期領域に影響を与える断層パラメータの不確かさを考慮した、1923 年関東地震の断層モデルの例

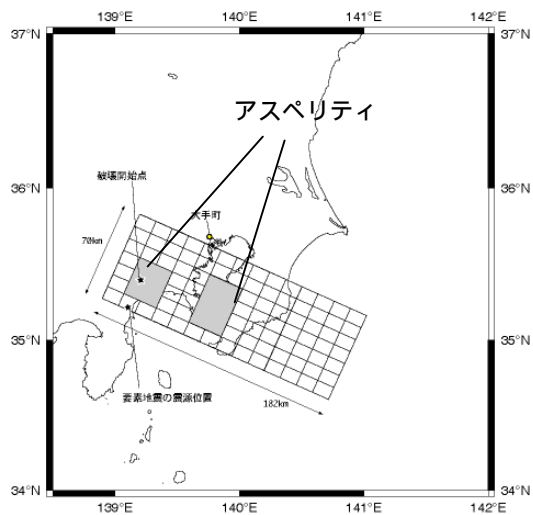


図 5 地震動の長周期領域に影響を与える断層パラメータの不確かさを考慮した、1923 年関東地震の断層モデルの例

(3) 地震動の位相差分分布評価

地震動の位相特性の検討するための指標として、本研究では、位相差分に着目した。

図6と図7に示すように、一般に地震動の加速度波形と位相差分分布の形状はよく似ており、それゆえ、位相差分の標準偏差は、主要動の継続時間の目安を与えられるとされている。ここでは、断層モデルや断層パラメータの違いで位相差分の標準偏差の値について、特徴が見いだせるかを調べた。解析の対象とした地震は、(2)で設定した断層パラメータの不確かさを含む関東地震(Mj 7.9~Mj 8.2)と、直下地震(Mj 5.5~Mj 6.5)である。

その結果、関東地震は東西、南北成分ともに0.85~0.92程度の値を取り、個々のケースの間で、大きな差はなかった。また直下地震における標準偏差の値は、0.3~0.42程度となっており、関東地震と比べるとかなり大きな値になっていることが分かった。

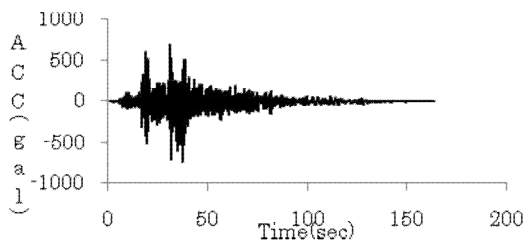


図6 関東地震の加速度波形の例

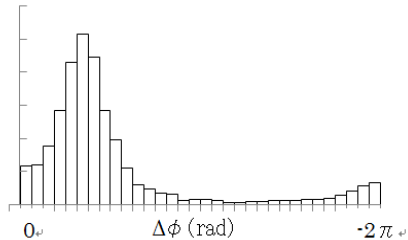


図7 図6の波形の位相差分分布

(4) 断層モデルに基づく強震動の計算結果

本研究では、詳細法のうち、経験的グリーン関数法を用いて、波形合成を行った。その結果の例として、図3~図5の断層モデルに対応する加速度波形と、活断層による地震および直下地震の波形合成結果の一例を、それぞれ、図8~図12に示す。

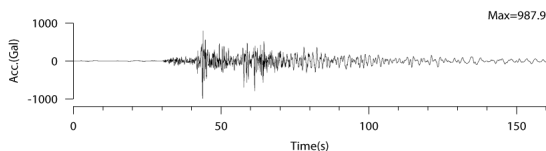


図8 図3の断層モデルによる加速度波形

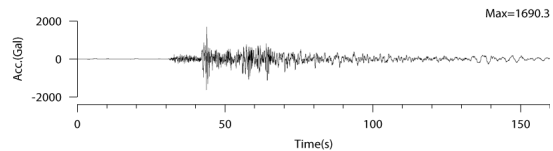


図9 図4の断層モデルによる加速度波形

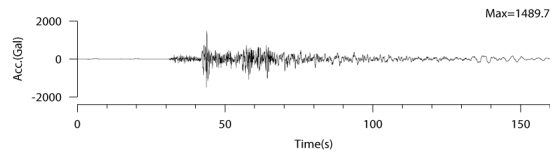


図10 図5の断層モデルによる加速度波形

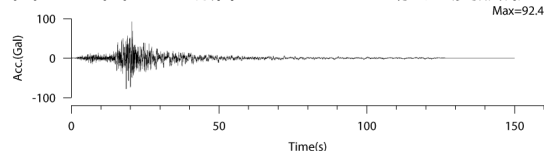


図11 活断層を震源とする地震の断層モデルによる加速度波形

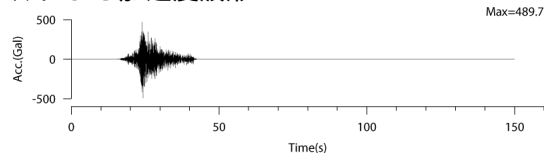


図12 直下地震の断層モデルによる加速度波形

(5) 断層モデルに基づく確率論的地震ハザード評価

(4)の強震動評価結果を用いて、地震ハザード曲線を計算した。各シナリオ地震の発生確率は、各地震の50年発生確率を、不確かさを考慮したことによって、重みづけした上で、配分した。東京・大手町での、断層モデルを用いた強震動評価結果による地震ハザード曲線を図13と図14に示す。図13は、横軸の地震動強さの指標を最大加速度にとったものであり、図14は、地震動強さの指標を最大速度にとったものである。両図ともに、縦軸は50年超過確率である。

ここでは、設計用地震動の作成例として、震度との対応が良いとされる最大加速度を指標とする地震ハザード曲線より、設計用地震動の対象とする地震動を選択する。

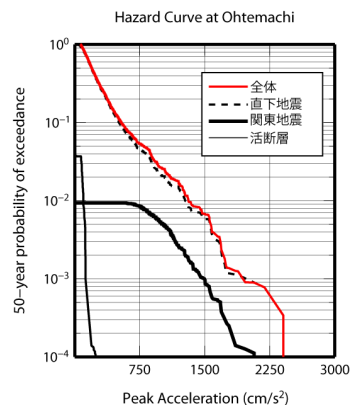


図 13 東京・大手町におけるシナリオ地震の強震動評価結果を用いた地震ハザード曲線（最大加速度）

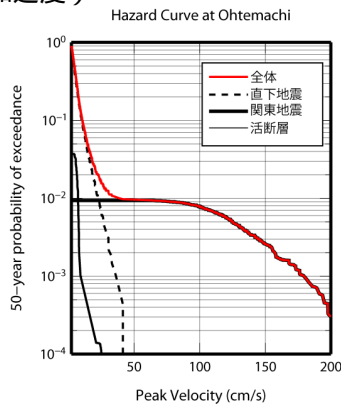


図 14 東京・大手町におけるシナリオ地震の強震動評価結果を用いた地震ハザード曲線（最大速度）

(6) 設計用入力地震動の信頼性指標の設定

設計用入力地震動の設定に関しては、地震動強さの年超過確率を目標性能に応じて定めることになる。首都圏においては、損傷限界に対して、20～30年の再現期間（年超過確率 0.03～0.05）程度、安全限界に対して、500年（年超過確率 0.002）程度と考えられている。経験を有する構造設計者のヒヤリングからも地震に対する不確実さへの対応に苦慮していることが伺われたが、最近はより高い耐震安全性を目標とする要求の存在も確認された。日本建築学会建築物荷重指針を参考に求められる、信頼性指標 $\beta=2, 3$ の荷重係数、2.75、5.17 に対応する再現期間は、それぞれ、930年（年超過確率 0.0011）、2900年（同 0.00034）となる。本報告においても、この程度の超過確率を例として取り上げることとした。

(7) 設計用入力地震動の策定

策定例として、 $\beta=3$ としたときの、設計用入力地震動を検討した結果を示す。

(6)より $\beta=3$ のときの 50 年超過確率は、 1.69×10^{-2} 程度となり、この 50 年超過確率をもつ地震動を、(5)の図 13 から選定することとした。地震ハザード曲線より、50 年超過確率 1.69×10^{-2} の近傍で得られた地震動は、関東地震と直下地震の 2 種類であった。

続いて、設計用入力地震動に与えるための位相について検討を行った。選定された関東地震の地震動を用いて、合成波形の位相特性とランダム位相との差異について確認を行った。ここで、(3)の不確かさを考慮した関東地震の位相差分分布の解析の結果、個々の断層モデル間において、位相差分分布に大きな差異は見られなかったことから、地震動の位相は、選定された関東地震のものをを用いることとした。具体的な検討ケースを以下に示す。

選定された関東地震のスペクトル + 選定

された関東地震の位相

選定された関東地震のスペクトル + ランダム位相 (Mj 8.0 の Jennings 型包絡関数)

選定された関東地震のスペクトル + ランダム位相 (Mj 6.0 の Jennings 型包絡関数)

告示スペクトル (レベル 2) + 選定された関東地震の位相

告示スペクトル (レベル 2) + ランダム位相 (Mj 8.0 の Jennings 型包絡関数)

告示スペクトル (レベル 2) + ランダム位相 (Mj 8.0 の Jennings 型包絡関数)

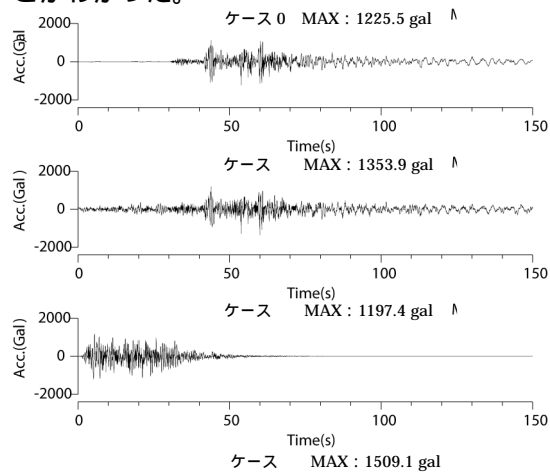
以上の 6 ケースについて、それぞれの加速度波形および、擬似速度応答スペクトル (5% 減衰、1% 減衰) を図 15～図 1 にそれぞれ示す。

図 15 では、選択された関東地震の加速度波形をケース 0 として、一番上に示した。ケース の波形は、ケース 0 とほぼ同じである。またケース は、告示スペクトルであるが、ケース 0 に比べて最大振幅は小さくなっているものの、継続時間の長い揺れを上手く再現している。両ケースともに、関東地震の位相を用いたことで、地震動の地域特性がよく反映されている。一方、ランダム位相を用いた場合 (ケース 、 、) 最大振幅レベルは再現できても、ケース 0 に見られるような、150 秒を超えても続く揺れは模擬することができなかった。

図 16 は、ケース 0 およびケース ～ の擬似速度応答スペクトルをトリパタイトで示している。実線が 5% 減衰の応答で、破線が 1% 減衰の応答である。

6 ケース全体を通して、5% 減衰の応答にはあまり差異は現れないが、1% 減衰の応答には多少の違いがみられる。特に、ケース とケース の違いは、関東地震の位相がランダム位相かであるが、長周期側において、ランダム位相のケース のスペクトルレベルが、小さくなってしまっていることがわかった。

以上の検討により、合成波形の位相を用いることで地震動の地域特性を反映できることがわかった。



ケース MAX : 1509.1 gal

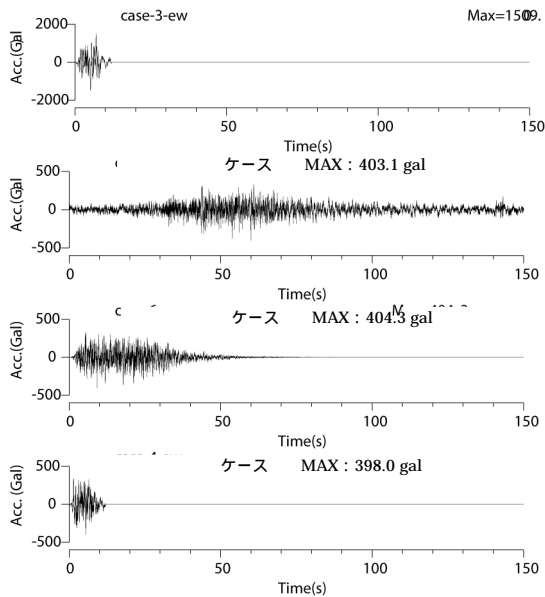


図15 選択された関東地震の加速度波形とケース ~ の加速度波形

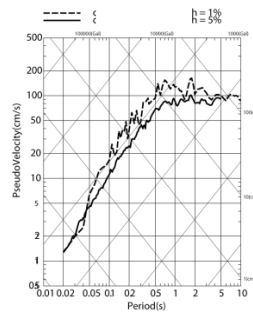
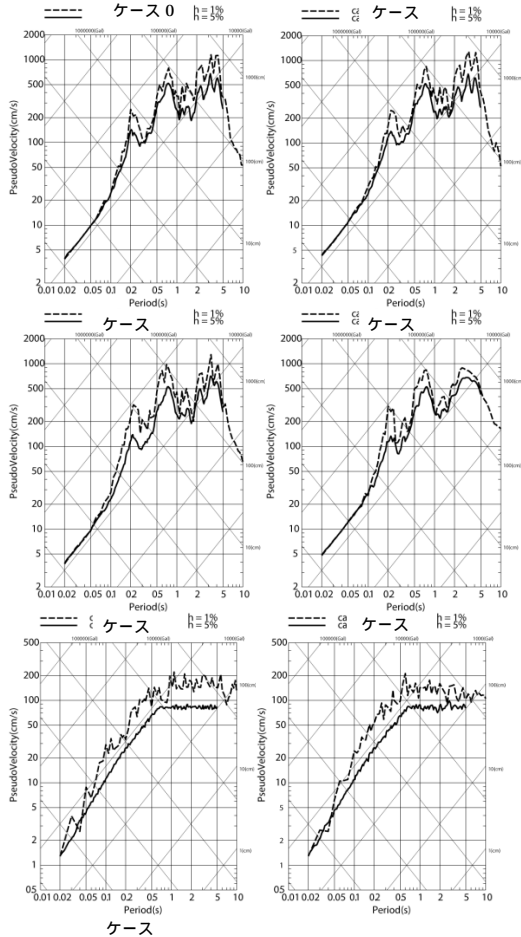


図16 選択された関東地震の擬似速度応答スペクトルとケース ~ の擬似速度応答スペクトル(共に、実線は5%減衰、破線は1%減衰)

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

畑奈緒末、1923 年関東地震における短周期レベルの推定幅の検討、日本建築学会大会 2007 (九州)、2007 年 8 月、福岡大学。

畑奈緒末、ばらつきを有する関東地震の断層モデルの作成、日本建築学会大会 2008 (中国)、2008 年 9 月、広島大学。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 順 (KANDA JUN)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：80134477

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

高田 毅士 (TAKADA TSUYOSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：10302762

岩崎 良二 (IWASAKI RYOJI)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：60011160

壇 一男 (DAN KAZUO)

清水建設株式会社技術研究所・地震動グループ・グループ長

研究者番号：90393561