

1. はじめに

(1) 技術基準における地震動の定義

港湾の施設は、「技術基準対象施設に必要とされる性能に関して国土交通省令で定める技術上の基準（以下「技術基準」という。）に適合するように、建設し、改良し、又は維持しなければならない」旨、現行の港湾法に定められている。また、技術基準は、平成19年の港湾の施設の技術上の基準を定める省令（以下「基準省令」という。）に関する省令改正により、性能規定型に移行している。当該省令中においては、想定すべき作用等の諸条件に対して、各施設に対する要求性能が定められている。

上記の作用の一つである地震動に関しては、港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示（以下「基準告示」という。）において、設計で考慮すべき地震動として2種類の地震動が規定されており、各々の地震動に関する設定時の留意事項が示されている。この中で、レベル1地震動は、「地震動の実測値をもとに、震源特性、伝播経路特性、及びサイト特性を考慮して、確率論的時刻歴波形を適切に設定するものとする」とされている。また、レベル2地震動は、「地震動の実測値、想定される地震の震源パラメータ等をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、時刻歴波形を適切に設定するものとする」とされている。

(2) レベル1地震動の設定方法に関する既往文献等

レベル1地震動の作成手法については、平成19年に発刊された「港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾」（以下、「基準・同解説」という）において、参考手法として示されている。また、その設定の基本的な考え方およびその応用例についても、「基準・同解説」を含め、これまで様々な各種学術論文等で提示されているところである（例えば²⁾、³⁾）。

現行の基準・同解説においては、各港湾において施設を設置しようとする地点の工学的基盤において設定されたレベル1地震動の時刻歴波形を基に照査用震度を算定する方法が示されており、係留施設に代表される港湾の施設については、既にこの照査用震度をベースとした耐震設計が実施されている。具体的なレベル1地震動の各港における波形については、各港における確率論的地震危険度解析に基づき、年超過確率が1/75のフーリエ加速度振幅を有する地震動として国総研のホームページ上⁴⁾において公開している。

(3) 本研究の背景

港湾の各施設に対する耐震設計を行う上で、レベル1地震動は極めて基本的な前提条件であるにも関わらず、その設定手法の詳細に関して、設計者実務者が理解できる内容として、包括的かつ体系的に解説がなされた資料は存在していない。この主な理由は、レベル1地震動は非常に複雑なプロセスを経て設定されており、各設定プロセスは研究の進捗状況に応じて異なる学術文献等に記載されているためである。また、レベル1地震動の設定に際して必要となる入力情報は港湾ごとに内容が異なるとともに多岐にわたる項目が必要とされるが、これらの情報についても公表資料はない。

各港湾におけるレベル1地震動の確率論的時刻歴波形がホームページ上で公開され、設計実務上は特段の問題は発生していない。しかしながら、設計実務者が設計条件である地震動の設定根拠や各港湾における地震動特性を十分に理解せずに耐震設計を行うことは好ましくないことは言うまでもない。

(4) 本研究の目的

本研究では、上述したレベル1地震動の設定方法、すなわち地震危険度解析に基づく確率論的時刻歴波形の具体的な作成方法について、包括的かつ体系的に解説することを試みる。

具体的には、平成19年に設定した全国の重要港湾以上のレベル1地震動に関する設定過程を極力丁寧に、設定手法の概念とともに、具体的な設定事例も例示しつつ解説する（第2章）。さらに、本稿執筆時点で設定されている全国の港湾183地区における地震動の特徴を整理した結果を示すとともに（第3章）、各港湾の地震動設定の際に利用した入力情報をデーター一覧として整理した（付録資料）。

これらにより、設計実務者がレベル1地震動の作成方法についてより理解を深め、より良い耐震設計を行うことができるような環境整備を目指すものである。また、必要に応じて、設計者自らが各港湾におけるレベル1地震動を作成することができる環境整備を図るものである。

なお、本稿のとりまとめにあたっては、地震動の時刻歴波形はフーリエ変換によりフーリエ振幅とフーリエ位相に分離でき、それらは逆フーリエ変換により時刻歴に戻すことが可能であるといった、地震波形の基本的な解析手法については本稿の読者にとって既知であるものとして解説を行う。

2. 確率論的地震危険度解析に基づくレベル1地震動の設定手法

2.1 本章の構成と確率論的地震危険度解析の枠組み

(1) 本章の構成

第1章にて述べたように、現在重要港湾以上の各港で設定されているレベル1地震動は、確率論的地震危険度解析に基づいて設定されている。次ページ図-1左は現行の基準・同解説で採用されているレベル1地震動算定のための確率論的地震危険度解析の枠組みを示したものである。

ここでの確率論的地震危険度解析の一つの特徴は、地震動のフーリエ振幅とフーリエ位相に着目しているという点である。以下においては、まず、本節の(2)において、確率論的地震危険度解析の枠組みを説明する。次に、この枠組みの中で、より詳細な説明が必要な項目（図-1右に示す各項目）について、次節以降で説明する。図-1右の2.2、2.3等の番号は、当該事項が説明されている節の番号を示したものである。

(2) レベル1地震動算定のための確率論的地震危険度解析の枠組み

以下においては、図-1の左に示した確率論的地震危険度解析の枠組みとその手順を、順を追って解説する。本項での文章中に具体的な数値が出現する箇所があるが、これは設定手順を説明する際に用いた便宜的な数値であり、特段の物理的意味はないことを最初に断わっておく。

手順1)

レベル1地震動を設定する地点（以下、「対象地点」とする。）を決定し、決定した対象地点の周辺で過去に起こった地震や、想定される地震に対する情報を網羅的に収集する。

なお、以下では、対象地点の周辺に震源Xが1つだけある

ことが判明したと仮定して説明する。

手順2)

対象地震に関する震源モデルを作成する。作成方法の詳細については、後の節2.2で説明を行う。

手順3)

対象地震の年発生頻度を設定する。年発生頻度の設定方法については、2.2節で詳しく説明する。

ここでは、震源Xの平均活動間隔が500年であることが判明したと仮定する。すなわち、この例題における震源Xによる地震の年発生頻度は1回/500年=0.002回/年となる。なお、本稿における確率論的地震危険度解析では、手順7)で後述する通り、地震の発生は定常ポアソン過程に従うと仮定している。定常ポアソン過程とは、簡単に言えば、ある事象の発生確率が、時間の変化により変動しないとするものである。すなわち、震源Xによる地震の年発生頻度は時間的に変化しない(今年、来年、再来年、・・・、で同じ)と仮定している。従って、平均活動間隔の逆数が年発生頻度となる。

手順4)

設定した震源Xの震源モデルに基づき、対象地点で発生する地震動を計算する。この際、震源特性や伝播経路特性およびサイト増幅特性のばらつきを考慮して、同一の震源モデルに対して多数の計算を行う。

地震動の伝搬方法や地震波の伝播の仕方が“確実に”1つに決定
⇒ その地点の地震動の強さも1つに決定

1つの断層を考慮する場合でも、種々のばらつきを考慮
⇒ 対象地点で得られる地震動もばらつく

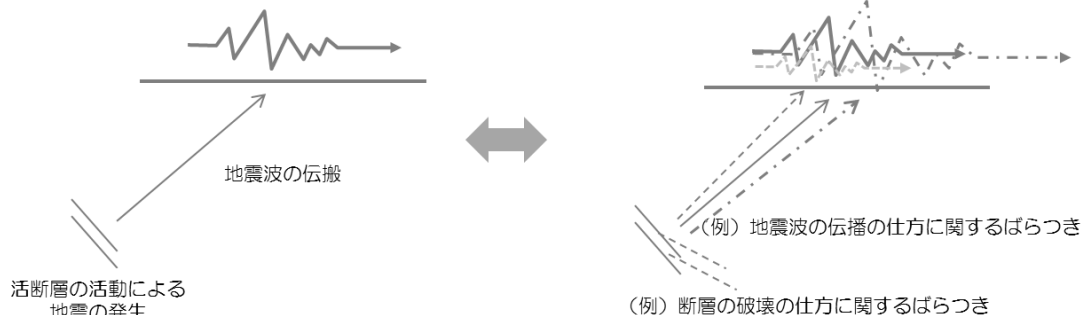


図-2 地震動のばらつきの考慮に関する概念図

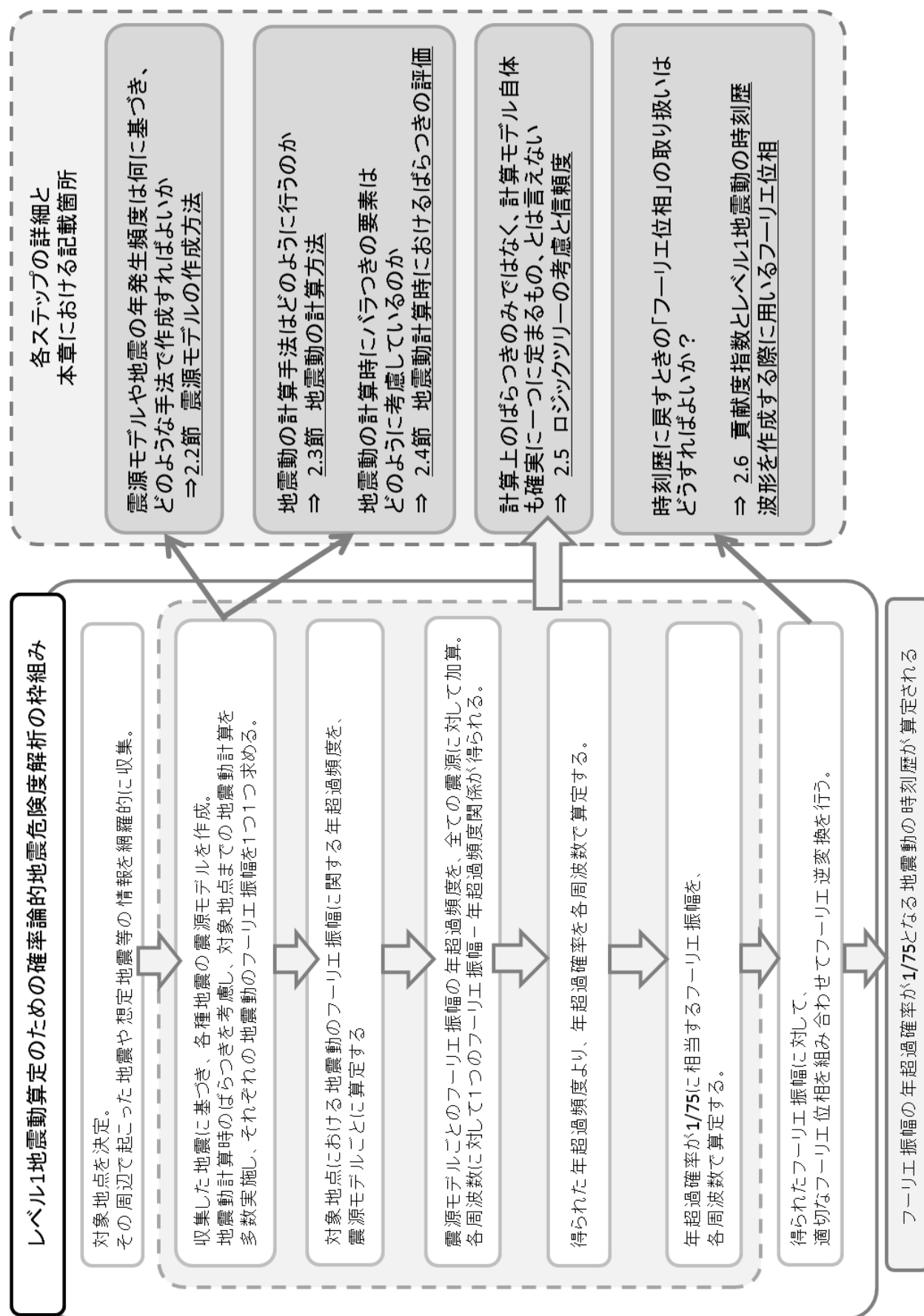


図-1 レベル1地震動算定のための確率論的地震危険度解析の枠組みと本章の構成

この点が確率論的地震危険度解析を実施する際の一つの大きなポイントであると言える。

仮に、震源断層の破壊過程や地震波の地殻内における伝播特性が確実に分かり、ばらつきも評価する必要がないほど確定的な言及が出来るのであれば、震源 X による地震が生じた際の対象地点における地震動は確実に1つに決定する(図-2左図参照)。

しかし、実際には、震源断層の破壊過程や地震波の伝播特性等、様々なばらつきや不確実性がある(図-2右図参照)。このため、震源 X による地震が生じた際の対象地点における地震動も、一定のばらつきを有するものとして評価することが合理的である。

ところで、地震動の強さを示す指標には、計測震度、最大加速度、最大速度など様々なものが存在する。ただし、冒頭述べたように、基準告示において、レベル1地震動は震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮した時刻歴波形として設定するものとされている。そこで、現行の基準・同解説では、地震動の強さを表す指標として、地震動をフーリエ変換した際に算定される各周波数における「フーリエ加速度振幅」を採用している。これは、上記の3特性を考慮してフーリエ加速度振幅を評価し、これに適切な「フーリエ位相」を与えれば、上記の3特性を考慮した時刻歴波形が得られるためである(フーリエ位相の与え方については2.6で後述する)。

実際の計算においては、震源断層の破壊過程や地震波の伝播特性等に種々のばらつきを与え、震源 X による地震が発生した際の、対象地点におけるフーリエ加速度振幅をそ

れぞれ計算している。

その詳細については2.3節および2.4節で詳述するが、ここでは説明を分かり易く行うため、各種のばらつきを50種類与えて震源 X による地震動を計算する場合を考える。なお、この50という数字は本節での説明上用いているものに過ぎないことに留意頂きたい。

図-3は、各種のばらつきを考慮しない場合と考慮する場合とで、対象地点における地震動計算結果のある周波数におけるフーリエ加速度振幅の頻度分布がどのように異なるかを示すイメージ図である。図のように、ばらつきを考慮すると、当然ではあるが、フーリエ加速度振幅の頻度分布もばらつきを有するものとなる。

手順5)

震源 X による地震の年発生頻度に関する情報と、対象地点における地震動計算結果に基づき、対象地点におけるフーリエ加速度振幅の年超過頻度、すなわちフーリエ加速度振幅が1年間にある値を超える平均的な頻度を計算する。

この際、手順としては、まず図-4に示すように、図-3の右図に示した頻度分布から、フーリエ加速度振幅の超過頻度分布を求め(図-4左図)、さらに相対超過頻度を求める(図-4右図)。

これによって、「震源 X が活動した際の、対象地点における地震動のフーリエ加速度振幅に関する超過確率」が求められる。ただし、これは「震源 X が活動した場合」という条件付き確率となっていることに留意が必要である。例えば、図-4の右図で示した例によれば、震源 X が活動し

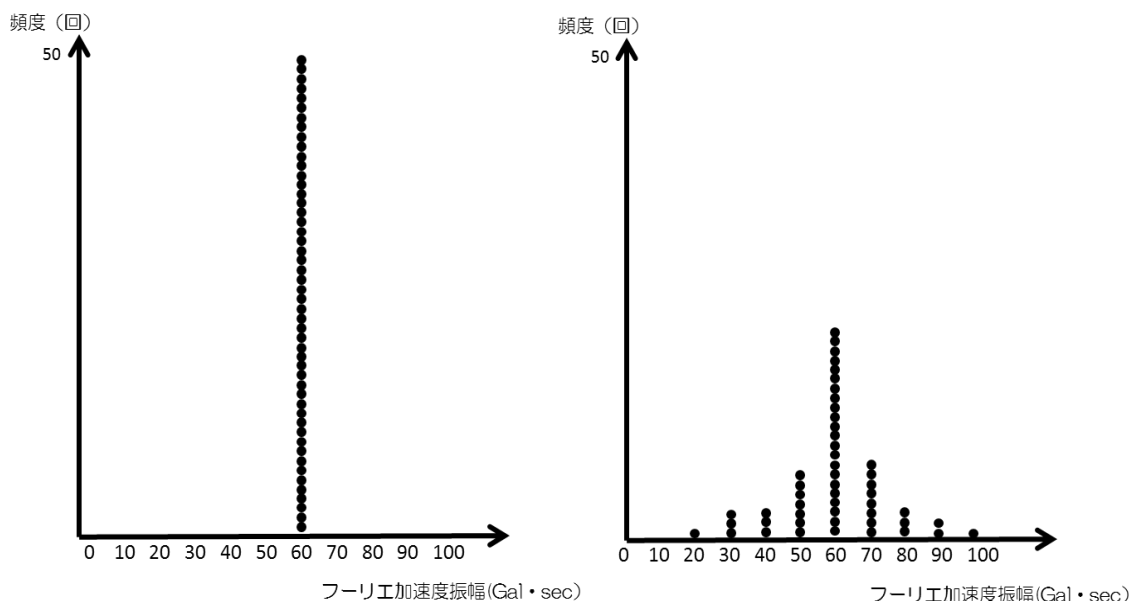


図-3 ある周波数におけるフーリエ加速度振幅の頻度分布のイメージ (左：ばらつき非考慮，右：ばらつき考慮)

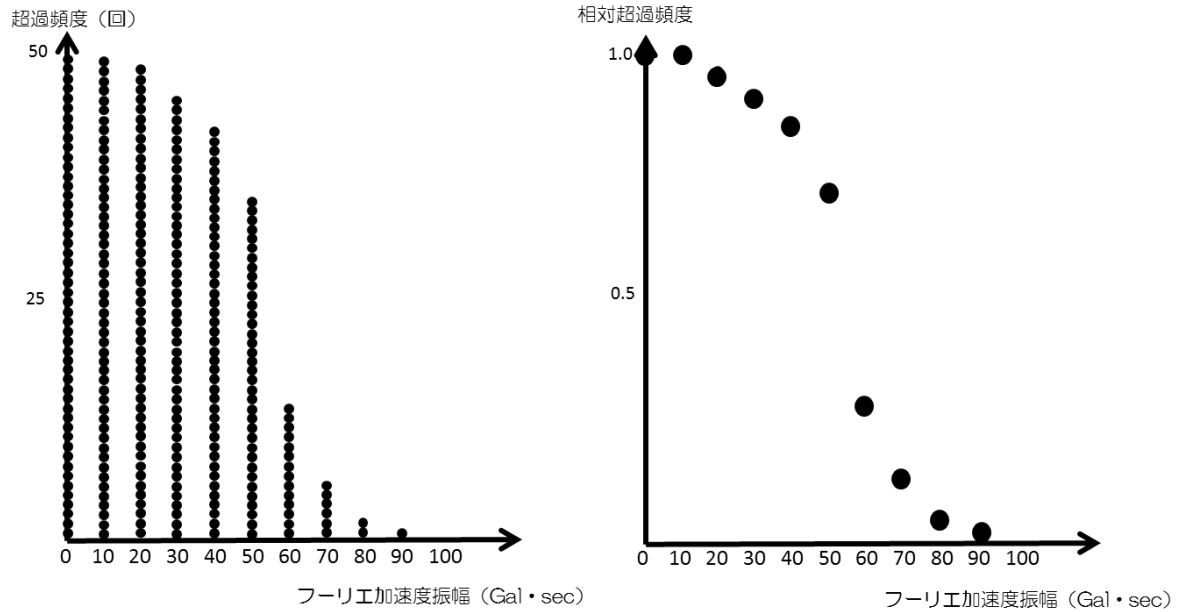


図-4 フーリエ加速度振幅の超過頻度のイメージ (左図) と相対超過頻度のイメージ (右図)

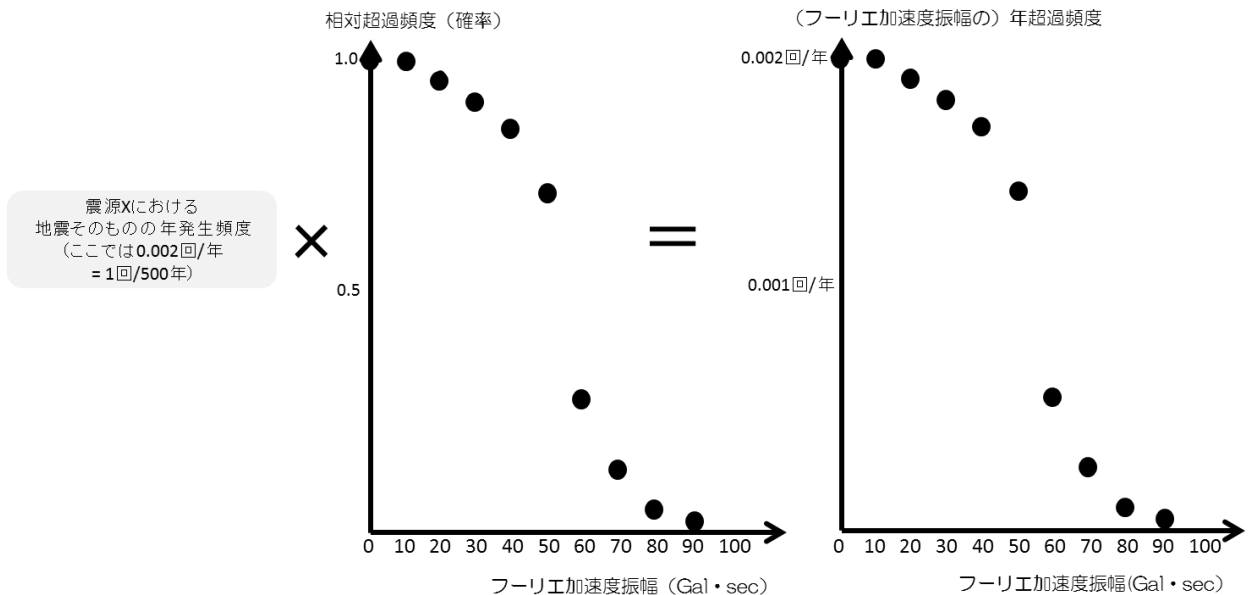


図-5 フーリエ加速度振幅の年超過頻度を算定する際の計算イメージ

た場合、今着目している周波数成分におけるフーリエ加速度振幅が 50(Gal・sec)を超える確率は約 75%であることがわかる。

今回の場合、対象地点においてレベル 1 地震動の設定時に考慮すべき地震が震源 X によるもののみであると仮定しているので、手順 3) で得られた地震そのものの年発生頻度と、上で述べた条件付き確率から、対象地点における地震動のフーリエ振幅に関する年超過頻度は下記のように計算することができる。

$$\text{対象地点におけるフーリエ加速度振幅の年超過頻度} \\ = (\text{震源 X による地震の年発生頻度}) \times (\text{震源 X によ}$$

る地震が発生した際の地震動のフーリエ加速度振幅の超過確率)

$$= (0.002 \text{ 回/年}) \times (\text{図-4 右図に例示した地震動のフーリエ加速度振幅の超過確率})$$

なお、この関係は図-5 のように示される。

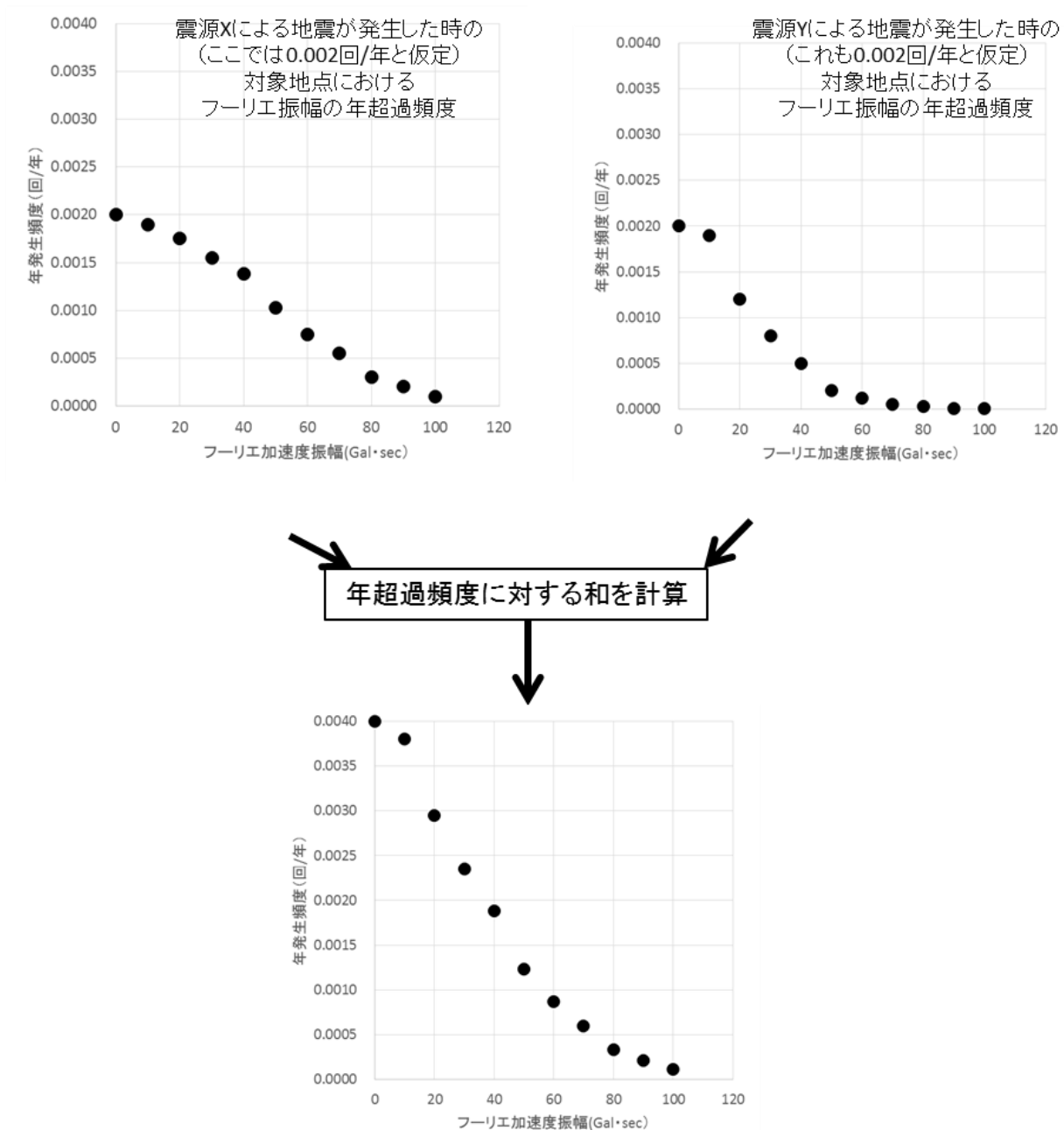


図-6 震源を複数考慮した場合の年超過頻度の算定イメージ

手順 6)

以上では、単純化のため一つの震源 X のみを対象として説明を行ったが、実際には、複数の震源を網羅的に考慮する必要がある。それぞれの震源について、手順 2)～5) を繰り返すことにより、それぞれの震源から発生する地震動に対して、対象地点におけるフーリエ加速度振幅と年超過頻度の関係が得られる。

対象地点において求めたいものは、全ての地震を考慮した場合のフーリエ加速度振幅とその振幅に対する年超過頻度の関係である。これについては図-6 のように、それぞ

れの地震に対するフーリエ加速度振幅と年超過頻度の関係を作成後、それぞれの地震の発生が他の地震の発生に影響されず、独立に発生するという仮定の下、グラフの縦軸（＝年超過頻度）に対する単純な算術和をとって評価することができる。

手順 7)

以上の手順により、すべての地震を対象とした場合のフーリエ加速度振幅と年超過頻度の関係を導いた上で、「フーリエ加速度振幅がある値を超える」という事象の発生が

定常ポアソン過程に従うと仮定し、フーリエ加速度振幅と年超過確率との関係を求める。

ここで、ある事象の発生が定常ポアソン過程に従うとは、具体的には次のようなことである。 λ は年超過頻度であるとする、

- 1) 微小時間 Δt の間に当該事象が発生する確率は $\lambda \Delta t$
- 2) 微小時間 Δt の間に当該事象が複数回発生する確率は無視できる
- 3) λ の値は時間的に変化しない (定常性)

このように仮定すると、 $t=1$ 年の間に当該事象が k 回発生する確率 P_k は次式で表される⁵⁾。

$$P_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (1)$$

また、回数を問わず、 $t=1$ 年の間に、ある事象が少なくとも 1 回発生する確率 P は、余事象、つまり 1 年間に 1 度も当該事象が発生しない確率を考慮して、

$$P = 1 - P_0 = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

として評価される。この式により、年超過頻度 λ を年超過確率 P に換算することができる。

この関係を利用すれば、フーリエ加速度振幅と年超過頻度の関係から、フーリエ加速度振幅と年超過確率の関係を求めることができる。また、このようにして得られる曲線は「ハザード曲線」と呼ばれる。

なお、 λ が十分小さいときには、 λ の値と P の値とは大きくは異ならず、実際、 $\lambda=0.1$ のとき $P=0.095$ 、 $\lambda=0.01$ のとき $P=0.00995$ である。従って、レベル 1 地震動の算定において着目する $P=1/75$ 付近では、年超過頻度と年超過確率はほぼ等しいと考えても差し支えない。

手順 8)

現行の港湾基準において定められているレベル 1 地震動として、年超過確率 $=1/75$ に相当するフーリエ加速度振幅を周波数ごとに算定する

フーリエ加速度振幅と年超過確率の関係 (ハザード曲線) は周波数毎に得られる関係であり、これを周波数毎に並べると、図-7 に示すように、3 次元的な曲面が得られる。これを「ハザード曲面」という。また、図-8 に示すように、ハザード曲面を年超過確率 = 一定 の面で切断するイメージで得られる、周波数とフーリエ加速度振幅の関係は「一様ハザードフーリエスペクトル」と称される。

レベル 1 地震動を算定する場合には、年超過確率 P を $1/75$ に設定することが一般的であるため、上で述べたハザード曲面を $P=1/75$ の面で切断する。その結果、年超過確率 $=1/75$ に相当する地震動のフーリエ加速度振幅が周波数ごとに得られることとなる。

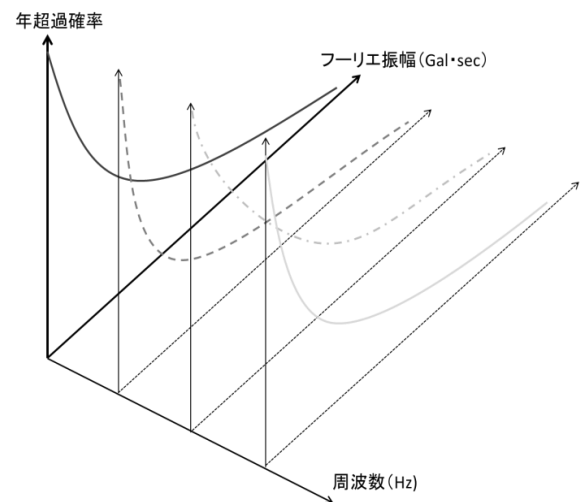


図-7 年超過確率を周波数とフーリエ振幅の関数としてプロットしたもの (ハザード曲面)

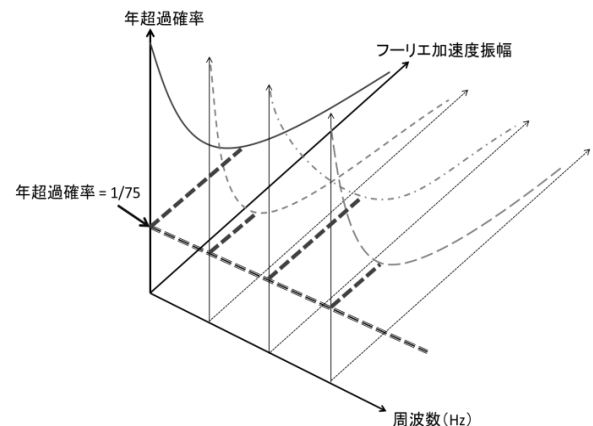


図-8 年超過確率 $= 1/75$ の面でのハザード曲面の切断

なお、参考までに、設計供用期間が 50 年であるような施設を考えた場合、当該施設が設計供用期間中に年超過確率 $1/75$ の地震動を越える地震動に遭遇する確率は次式に示すとおり約 0.5 である。

$$1 - \left(\frac{74}{75}\right)^{50} \approx 0.5 \quad (3)$$

実際には、レベル 1 地震動の算定においてさらにロジックツリーという概念をとりいれており、年超過確率 $=1/75$ に相当する地震動のフーリエ加速度振幅が複数のロジックに対して算定され、それを定められた方法で平均化することにより、レベル 1 地震動のフーリエ加速度振幅が得られる。この点については 2.5 で詳述する。さらに、レベル 1 地震動のフーリエ加速度振幅と適切なフーリエ位相を組み合わせるにより、レベル 1 地震動の時刻歴波形が得られる。フーリエ位相の与え方については 2.6 で詳述する。

以上が、現行の基準・同解説において採用しているレベル 1 地震動算定のための確率論的地震危険度解析の枠組み

である。次に、以上の枠組みの中で、より詳細な説明が必要な項目（すなわち図-1 右に示した各項目）について、次節以降で説明する。

2.2 震源モデルの設定方法

(1) 震源モデルの分類

本節では、レベル1地震動の対象地点を決定した後に、確率論的地震危険度解析を行う上で抽出すべき地震と、地震の種類に応じた震源のモデル化方法について解説する。

以下の内容は、文献¹⁾²⁾の記述に対してさらに補足的な説明を加えたものである。なお、ここで言う震源のモデル化とは、震源の位置と広がり、年発生頻度を設定することであり、震源パラメータの設定の詳細については2.3および2.4で述べる。

対象地点を決定後、その周辺で想定される地震や、過去にその周辺で発生した地震を網羅的に抽出する。

確率論的地震危険度解析を行う際に考慮する地震は、大きく分けて、①震源の位置、広がりなどをあらかじめ特定することが可能な地震（以下、震源位置等をあらかじめ特定することが可能な地震、とする）と、②震源の位置、広がりなどをあらかじめ特定することが困難な地震（以下、震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震、とする）の2つに大別することができる。

①の地震としては、活断層による地震や海溝型地震（その多くは中央防災会議や地域防災計画の想定地震）が挙げられる。一方、②の地震は、特定の震源断層に紐づけすることが困難な地震であり、 $M7.0$ 未満の比較的規模の小さい地震を考える。その発生位置はランダムであると考え、また、地震規模別の発生頻度は、対象地点周辺での過去の地震活動度を踏まえて、統計的手法により設定する。

以下、①の地震と②の地震のそれぞれに分類して解説する。

(2) 震源位置等をあらかじめ特定することが可能な地震に対する震源モデルの設定

ここで対象としている地震は、前述のとおり、震源の位置、広がりなどをあらかじめ特定することが可能な地震であり、活断層による地震や海溝型地震（その多くは中央防災会議や地域防災計画の想定地震）がこれに該当するが、活断層による地震と海溝型地震では、震源モデルの設定手法に違いがあるため、項を分けて記載する。

a) 活断層による地震を想定する場合

まず活断層による地震については、過去の調査によって得られている活断層データ⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾に基づき、対象地点周辺

の活断層を抽出し、それぞれの震源の位置と広がり、それに年発生頻度を設定する。

現行基準が施行された平成19年時点でレベル1地震動を設定した際の検討（以下、平成19年の検討）では、地震調査研究推進本部の検討¹⁰⁾¹¹⁾で「主要98断層帯」に分類されている活断層と、活断層詳細デジタルマップ⁷⁾に記載されている活断層のうち主要98断層帯に対応しないものを選択した。そして、それらのうち、対象地点から半径100km以内のものを抽出した。対象とした活断層の一覧を付録A-1に、その位置を付録A-2に示す。その各々について、震源の位置と広がり、年発生頻度を次のように設定した。

まず、断層長さ L については、文献⁷⁾⁸⁾に示されている地図から読み取った。断層が複数のセグメントからなる場合（付録A-1）はそれぞれの長さを読み取った。傾斜角については、主要98断層帯のうち文献⁸⁾に値が示されているものはその値を用いた。主要98断層帯のうち文献⁸⁾に値が示されていないもの、および活断層詳細デジタルマップから読みとった活断層は、横ずれ断層は 90° 、高角逆断層は 60° 、低角逆断層は 30° 、高角とも低角とも記載のない逆断層は 45° とした。

断層の上端については、微小地震の発生限界などを考慮して地表から2km~4km程度の値に設定されることが多い¹²⁾¹³⁾。文献¹⁰⁾¹¹⁾でも多くの場合3kmと設定されているため、ここではこれを参考に、すべての活断層に対して一律3kmとした。断層の下端については、主要98断層帯は文献¹⁰⁾¹¹⁾に示されている値を用いた。活断層詳細デジタルマップから読みとった活断層は、断層の下端は一律地表から20kmとした。これは、内陸地殻内地震は深くても20kmまでの範囲で生じるという知見¹⁴⁾も参考に設定したものである。

以上により、断層面積 $S(\text{km}^2)$ （またはセグメントの面積）が決定したことになる。発生する地震の規模の推定については2.3節および2.4節で述べる。

なお、活断層の地震による地震動を評価する場合においては、アスペリティ¹⁾は考慮しなかった。すなわち、断層面上でのすべりは一様と仮定している。これは、個々の活断層の影響を詳細に把握することが目的でないこと、年超過確率1/75のレベル1地震動の評価においては活断層が支配的要因とはならないことなどを考慮したものである。ただし、文献1)に示されているとおり、レベル2地震動の評価では、アスペリティを考慮することが必要である。

年発生頻度については、文献⁷⁾⁸⁾に平均活動間隔が示されているものについてはその逆数を年発生頻度とした（平均活動間隔が幅をもって示されている場合は、安全側の結果を得るために、最短の間隔を選択した）。また、文献⁷⁾⁸⁾

に平均活動間隔が示されていないものについては、年平均すべり量 $D(m)$ 、断層長 $L(km)$ と年発生頻度 ν (回/年) の間に次のような関係があることが知られている¹⁵⁾ ため、これを用いて年発生頻度を算定した。

$$\nu = 10^{1.1} \times D/L \quad (4)$$

このとき、年平均すべり量は、文献⁷⁾⁸⁾に値が示されている場合はそれを採用し、示されていない場合は活断層の活動度⁷⁾⁸⁾に基づいて設定した。活動度 A の場合 $5 \times 10^{-3}m/年$ 、活動度 A~B の場合 $1 \times 10^{-3}m/年$ 、活動度 B の場合 $5 \times 10^{-4}m/年$ 、活動度 B~C の場合 $1 \times 10^{-4}m/年$ 、活動度 C の場合 $5 \times 10^{-5}m/年$ とした。活動度が不明の場合はさらに活動度が低いと考えて $5 \times 10^{-5}m/年$ とした。

b) 海溝型地震を想定する場合

海溝型地震については、対象地点周辺で想定される海溝型地震を抽出し、それぞれの震源の位置と広がり、それに年発生頻度を設定する。

平成 19 年の検討では、文献¹⁰⁾¹¹⁾を参考に、対象地点から半径 150km 以内の海溝型地震を抽出し、震源の位置と広がり、それに年発生頻度を設定した。対象とした海溝型地震の一覧を付録 B-1 に、その位置を付録 B-2 に示す。

なお、活断層の場合に比べより遠方の地震までを対象としているのは、一般に海溝型地震は規模の大きいものが多く、より遠方まで影響する場合が多いと考えられるためである。

文献¹⁰⁾¹¹⁾に記載されている地震のうち、 $M7.0$ に満たない地震については、後述する「震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震」と重複すると考えられるため、ここでの検討対象から除外した。また、「三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート間大地震（津波地震）」は強い地震動をもたらさないと考えられるため、「択捉島沖の地震」「与那国島周辺の地震」は遠方の地震であるため、それぞれ検討対象から除外した。

対象とした海溝型地震の中には、発生しうる領域が示されているものの、「領域内でどこでも発生する可能性がある¹⁰⁾」とされている海溝型地震も存在する。これに該当するのは以下の地震である（付録 B-1）。

- ・十勝沖・根室沖・色丹島沖のひとまわり小さいプレート間地震
- ・十勝沖・根室沖・色丹島沖のやや浅いプレート内地震
- ・十勝沖・根室沖・色丹島沖のやや深いプレート内地震
- ・三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート内大地震（正断層型）
- ・三陸沖北部の固有地震以外のプレート間地震
- ・福島県沖のプレート間地震

- ・北海道北西沖の地震
- ・秋田県沖の地震
- ・佐渡島北方沖の地震
- ・南関東で発生する $M7$ 程度の地震
- ・安芸灘～伊予灘～豊後水道のプレート内地震
- ・日向灘のひとまわり小さいプレート間地震

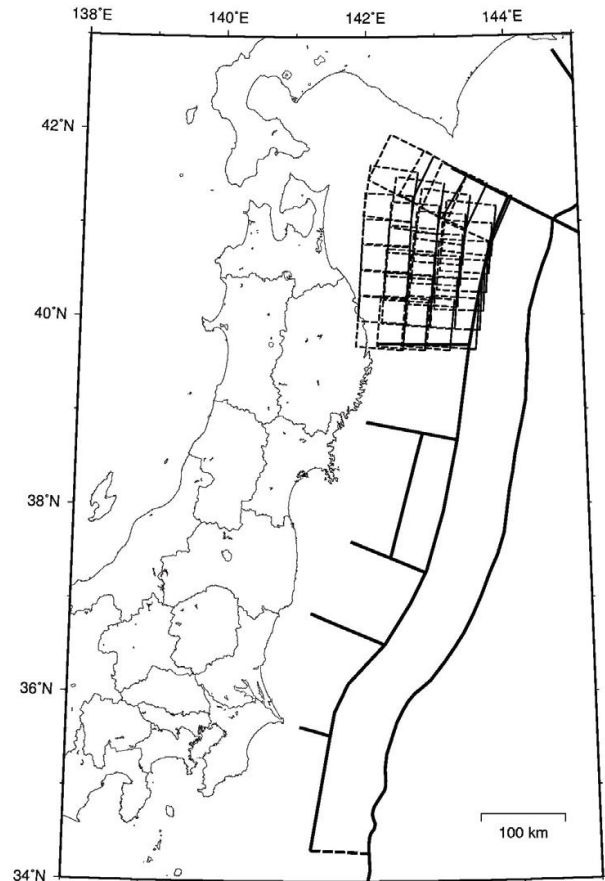


図-9 移動型震源の断層位置の確定方法
(図中点線部分の座標を読み取り)

これらの地震について、その詳細な断層位置は文献¹⁰⁾を参考に設定した。以下に、文献¹⁰⁾に記載されている「三陸沖北部の固有地震以外のプレート間地震」を例に具体的な断層位置の設定手法について示す。

文献¹⁰⁾によると、このエリアにおける想定地震は、「 M_w が 7.4~7.6 の地震に関しては長さ 60km、幅 60km の矩形の断層面を領域内にプレート境界に沿って南北 7×東西 4 列（断層数 28）並べて、そのいずれかで等確率で地震が発生すると仮定」という記載がみられる。この記載に基づいて断層面を決定することとした。すなわち、この例では、一つの想定地震に対して断層面を 28 ケース仮定することとした（これを移動型震源と呼ぶ）。

ただし、断層面の座標は明示されていないため、文献¹⁰⁾に記載されている図表から断層面の座標を読みとることとした。この際用いた図面の例を図-9に示す。断層の傾斜角および上端・下端深度はプレート境界の深度分布に基づいて設定した。また、2.3で後述するように、断層面積から経験式で地震モーメントを求めたとき、得られる地震モーメントが文献¹⁰⁾¹¹⁾の想定と大幅に異なる場合は、断層面積の調整を行い、地震モーメントが適切な値となるようにした。

海溝型地震の年発生頻度は、基本的に文献¹⁰⁾¹¹⁾に示されている平均発生間隔の逆数として設定しているが、関東地震に関しては、バックスリップ量が震源モデルで想定されたアスペリティ部の変位量に達するまでの時間を用いて算定している(2.5参照)。

なお、レベル1地震動算定のための確率論的地震危険度解析においては、2.1で述べたとおり、地震の発生は定常ポアソン過程に従うと仮定している。すなわち、年発生頻度は時間的に変化しない(今年、来年、再来年・・・で同じ)と仮定している。

しかし、実際には、これとは異なる確率モデルを想定する方がより厳密な場合もある。例えば、南海トラフの地震などのように、過去の発生履歴がわかっており、時間の経過とともに本来発生確率が上昇すると考えられる地震(近い将来発生が予想されるタイプの地震)がそれに該当する。

このようなタイプの地震が対象地点の近傍で想定される場合は、年発生頻度が時間的に変化するモデルを用いる方が、確率論的地震危険度解析としてはより厳密である。

しかし、この仮定を用いた場合、レベル1地震動も毎年のように変化することになり、設計上の取り扱いが困難となる。このため、南海トラフの地震等に対する検討についてはレベル2地震動で対応するという前提の下に、レベル1地震動算定のための確率論的地震危険度解析では、地震の発生は定常ポアソン過程に従うと仮定している。

(3)震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震に対する震源モデルの設定

ここでは、震源の位置、広がりなどをあらかじめ特定することが困難な地震に対する震源モデルの設定方法について述べる。ここで考える地震は、特定の震源断層に紐づけすることが困難な地震であり、M7.0未満の比較的規模の小さい地震である。

まず、対象地点周辺において過去に起こった地震のデータを整理し、地震規模と発生頻度の関係を求める。そして、その関係を用いて、規模が異なる震源を対象地点の周辺にランダムに配置する。

この際、地震の規模が比較的小さく、震源断層の空間的な広がりを考慮する必要性は小さいことから、ランダムに配置する震源は、マグニチュードの大小に依らず、ある一点にエネルギーが集中する点震源とする。

具体的な設定手順として、平成19年の検討では、まず、対象地点を中心とする半径100kmの範囲を考え、その中で、深さ3km～20kmの領域(浅部領域)と深さ20km～60kmの領域(深部領域)の2つの領域を考え、各々の領域において地震がランダムに発生するものと考えた。この深度の違いは、前者は地殻内で発生する地震を、後者はそれ以深のプレート境界やプレート内で発生する地震を想定したものである。

これらの領域における地震規模別の発生頻度を求めるため、過去の地震に関する情報を収集する必要があるが、その際、収集を行う範囲を半径100kmとすると、収集対象期間にたまたま地震活動度が低かった地域において、地震発生頻度が過小に評価される懸念がある。そこで、ここでは、情報収集を行う範囲を半径350kmとした。

収集を行ったのは、半径350kmの範囲において、浅部領域(0～20km)と深部領域(20～60km)で発生した地震の発生年月日、マグニチュード、震源の東経、北緯、深さの情報である。データ収集の際には、文献¹⁶⁾や気象庁ホームページ上¹⁷⁾で公開されている気象庁カタログを参照した。気象庁カタログのデータは、気象庁のホームページから、図-10に示されるような探索画面でサーチをかけることが可能である。

平成19年の検討においては、過去に生じた地震の情報を収集する際は、1926年から2002年までに発生したM5.0以上M7.0未満の地震のみを抽出した。M7.0以上の地震を考慮しないのは、特定の震源断層に紐づけすることが困難な比較的規模の小さい地震を考えているためである。また、M5.0未満の地震を考慮しないのは、M5.0未満の地震が年超過確率1/75の地震動に大きな影響を及ぼす可能性は小



図-10 気象庁カタログの検索サイト¹⁷⁾

さいと判断したためである。

ここで想定する地震はランダムに発生する地震であるため、過去のデータを収集する際、別な地震の余震であるものと判定された地震はデータから削除した。また、群発地震についても、最大のものだけを残してそれ以外を削除した。余震および群発地震の削除の判断基準としては、複数の地震が（震央間の距離にして）互いに 50km 以内、かつ 30 日以内に発生している場合に、最大のものを残してそれ以外を削除した。

次に、収集したデータに基づき、マグニチュードと地震の発生頻度を関連付ける。

一般的に、発生した地震の累積頻度の対数と地震のマグニチュードの関係は、直線で近似できることが知られている。マグニチュード M 以上の地震の累積発生回数を N (回) とすると、この関係は次式¹⁸⁾で表すことが出来る。ここで用いたマグニチュードは気象庁マグニチュードである。

$$\log N = A - bM \quad (5)$$

また、マグニチュード M の地震の発生回数を n (回) と置いた場合も、以下の式¹⁸⁾が成立する。

$$\log n = a - bM \quad (5')$$

式(5)および(5')は、いずれも一般に *Gutenberg-Richter* 式 (*G-R* 式) と呼ばれており、この傾きに相当する b の値は地域性や地下構造の特徴に大きく左右されることが知られている。なお本稿では $\log$ はすべて常用対数を表す。また、式(5)と(5')の b 値は同一の値となる¹⁸⁾。

b 値を求める際は、最尤法による手法¹⁸⁾を採っており、以下の式により算定している。

$$b = \frac{\log e}{(\sum_{i=1}^k \frac{M_i n_i}{m}) - M_{\min}} \quad (6)$$

ここに、

e : 自然対数の底

k : 離散化されたマグニチュードの個数

(例えばマグニチュード M を 5.0 から 0.1 刻みで $M=6.9$ まで考慮した場合、 k は 20)

M_i : i 番目のマグニチュード。

M_1 は 5.0, M_{20} は 6.9

$M_{\min}$: 取得したマグニチュードの最小値

(5.0 が最小であるが、4.95 とする)

n_i : M_i のデータ数

m : 取得した地震の数の合計 (= n_i の合計)

なお、最小二乗法ではなく、式(6)を用いる目的は、地震カタログにおいて収集されたデータ数の多い箇所（マグニチュードの小さいところ）での近似度を重視してグラフの傾きを求めることにある。

次ページの図-11 は、実際にある地点において地震カタログからデータを抽出し、余震データ等の削除を行うことにより得られた、深部領域におけるマグニチュードと累積地震発生数の関係である。

このデータに対して式(6)を適用し、例えば表-1 に示すような計算を行うと、 b の値および式(5)の A 値が定まる。なお、 A を求める際は、式(5)の N に $M=5.0$ に対応する N を代入すればよい。

この処理によって、点震源のマグニチュードと地震カタログから抽出した地震数の関係が得られたことになり、あ

表-1 b 値算定時における計算の具体例

M	累積回数N	回数 n_i	m	$\sum M_i n_i / m$	Mmin	b	A
5	179	34	179	5.36	4.95	1.06	7.54
5.1	145	35					
5.2	110	29					
5.3	81	11					
5.4	70	13					
5.5	57	12					
5.6	45	8					
5.7	37	8					
5.8	29	6					
5.9	23	3					
6	20	9					
6.1	11	6					
6.2	5	0					
6.3	5	3					
6.4	2	0					
6.5	2	0					
6.6	2	0					
6.7	2	2					
6.8	0	0					
6.9	0	0					

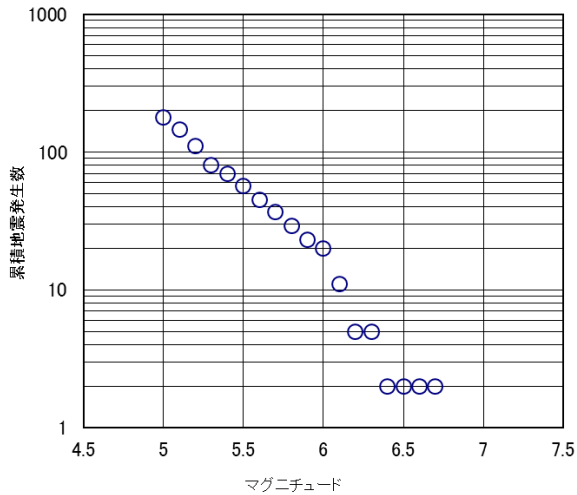


図-11 マグニチュードと累積地震発生数の関係の一例

るマグニチュードに対する $G-R$ 式で求められる地震数を、データを抽出した期間で除することによって、点地震のマグニチュードと年発生頻度の関係が得られることになる。

ただし、半径 350km の領域における地震発生頻度から半径 100km の領域における地震発生頻度への換算を行う場合、さらに $3.5 \times 3.5 (= (350\text{km}/100\text{km}) \times (350\text{km}/100\text{km}))$ で除する必要があるが、その場合、地震発生頻度の値が著しく小さく評価される場合が見受けられた、このため、レベル1地震動に関して安全側の評価を行うため、半径 350km の領域における地震発生頻度の値をそのまま半径 100km の領域における地震発生頻度の値として採用した。

しかし、上記の対応を採った場合においても、地震発生頻度の値が著しく小さく評価されるケースが発生した。

図-12 の左図は、ある対象地点の半径 350km の範囲にお

深部領域に関するマグニチュードと累積地震発生数の関係を描いたものである。なお、参考として、全く同様な方法により、同右図に累積地震発生数の全国平均値を示す。両者を比較すると分かるように、当該地点の累積地震発生数は極端に小さくなっている。

このように、地震発生頻度に関して、情報収集を行う範囲を拡大して評価しても、地震発生頻度の高い地点と低い地点において、設定するレベル1地震動の強さに著しく差が生じてしまう懸念があったため、以下のような対応を行った。

すなわち、対象地点の半径 350km の領域における地震発生状況から設定した地震規模別の地震発生数（「サイトの地震発生数」と呼ぶ）と、全国の対象地点における地震規模別の地震発生数の合計を対象地点数で除した地震規模別の地震発生数（「全国平均の地震発生数」と呼ぶ）を用いて、次の処理を行うことによって各対象地点の地震規模別の地震発生頻度を決定することとした。

- ① 対象地点の地震発生数 = サイトの地震発生数 + 全国平均の地震発生数とした。
- ② ①の地震発生数を元に、 $G-R$ 式によるモデリングを実施した。
- ③ 確率論的地震危険度解析に用いる地震発生頻度は、上述の処理で得られる地震発生頻度を2で除することにより求めた。

上記の地震発生頻度を用いることにより、サイトの地震発生頻度が極端に全国平均と異なる場合においても、全国平均に近づくような地震発生頻度が得られることになる。

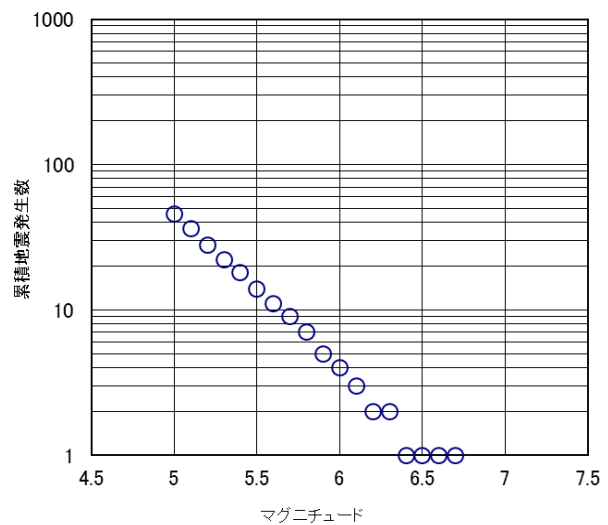
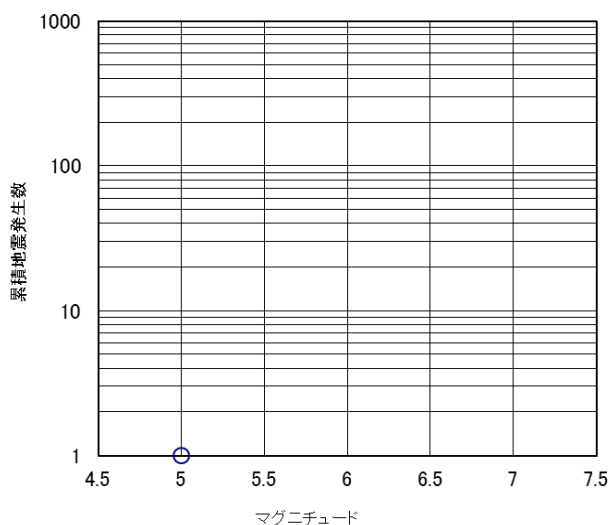


図-12 ある地点における地震カタログデータから抽出した累積地震発生数（左）と全国平均（右）の比較

いて、上述のとおり、気象庁カタログのデータを用いて、

上述の方法を採用したのは、港湾施設設計に用いるレベ

ル1地震動の強度が、全国の港湾で著しく変化することを防止するためである。また、全国平均の地震発生頻度については、浅部領域と深部領域それぞれについて算定を行った。全国の各港湾における地震発生頻度については、G-R式の直線とともに、付録Cに図化して整理した。

なお、図-11、表-1および下記の表-2に例示した累積地震発生数は上述の①の段階での地震発生数である。

次に、上記で得られた地震発生頻度とマグニチュードの関係を用いて、点震源を対象地点の周りにランダムに配置する。その際、過去の地震に関する情報を取得する際と同様に、深さ20km以浅の浅部領域と20km～60kmの深部領域のそれぞれの領域において点震源を配置する。ただし、活断層による地震を想定する場合と同様に、地震の震源は地表面から3km以浅には存在しないと仮定し、浅部領域では3km～20kmの範囲に点震源を配置した。

点震源は、対象地点を中心とする半径100kmの円筒内に一様かつランダムに配置した。対象地点から点震源までの距離はその結果に基づいて決まることになり、距離の比較的小さい地震よりも比較的大きい地震の方が、数が多いことになる。マグニチュード毎の点震源の数は式(5)に基づいて設定した。点震源の地震規模とその規模に対応する点震源の数は、図-11および表-1に対応する例では、表-2に示すとおりとなる。表-2に示すとおり、実際に点震源を対象地点の周辺に配置する際の点震源の個数は、浅部・深部の各領域でそれぞれ10,000個としている。この程度の数の点震源を配置すると、フーリエ加速度振幅の計算結果が点震源の配置数に左右されず、安定的な結果が得られるこ

とが過去の検討結果からわかっている¹⁹⁾。点震源を配置する際のマグニチュードの離散化は、M5.0～6.9まで0.1刻みとした。10,000個の点震源における地震発生頻度はすべて等しいとしており、かつ、それらの地震発生頻度の合計が上記の③で得られた地震発生頻度に一致するように個々の点震源の地震発生頻度を設定した。

以下に例として、横浜港山下地区(No.9209)を対象とし、気象庁カタログ(1926～2002)から抽出された震源位置を浅部、深部の各領域に対して図-13(a)および(b)に示す。また、点震源を浅部、深部の各領域に配置した状況を図-14(a)および(b)にそれぞれ示す。

なお、図-13において、震源の深度分布に10kmごとに集中が見られるのは、震源の深度を気象庁発表の情報に基づいて整理しており、この深度が10km単位で発表されることが多いためである。また、図-13(a)および(b)に示すように、深さがちょうど20kmの地震のデータは浅部領域、深部領域の双方の解析に使用している。

本節の内容に関する概要を図-15に整理した。

表-2 点震源を配置する際の地震規模別の点震源の数

M	累積回数N	G-R式による累積頻度	全体に対する割合	点震源の総配置個数	点震源の配置個数
5	179	179	21.77%	10000	2177
5.1	145	140	17.07%		1707
5.2	110	110	13.38%		1338
5.3	81	86	10.49%		1049
5.4	70	68	8.22%		822
5.5	57	53	6.45%		645
5.6	45	42	5.05%		505
5.7	37	33	3.96%		396
5.8	29	26	3.11%		311
5.9	23	20	2.44%		244
6	20	16	1.91%		191
6.1	11	12	1.50%		150
6.2	5	10	1.17%		117
6.3	5	8	0.92%		92
6.4	2	6	0.72%		72
6.5	2	5	0.57%		57
6.6	2	4	0.44%		44
6.7	2	3	0.35%		35
6.8	0	2	0.27%		27
6.9	0	2	0.21%		21

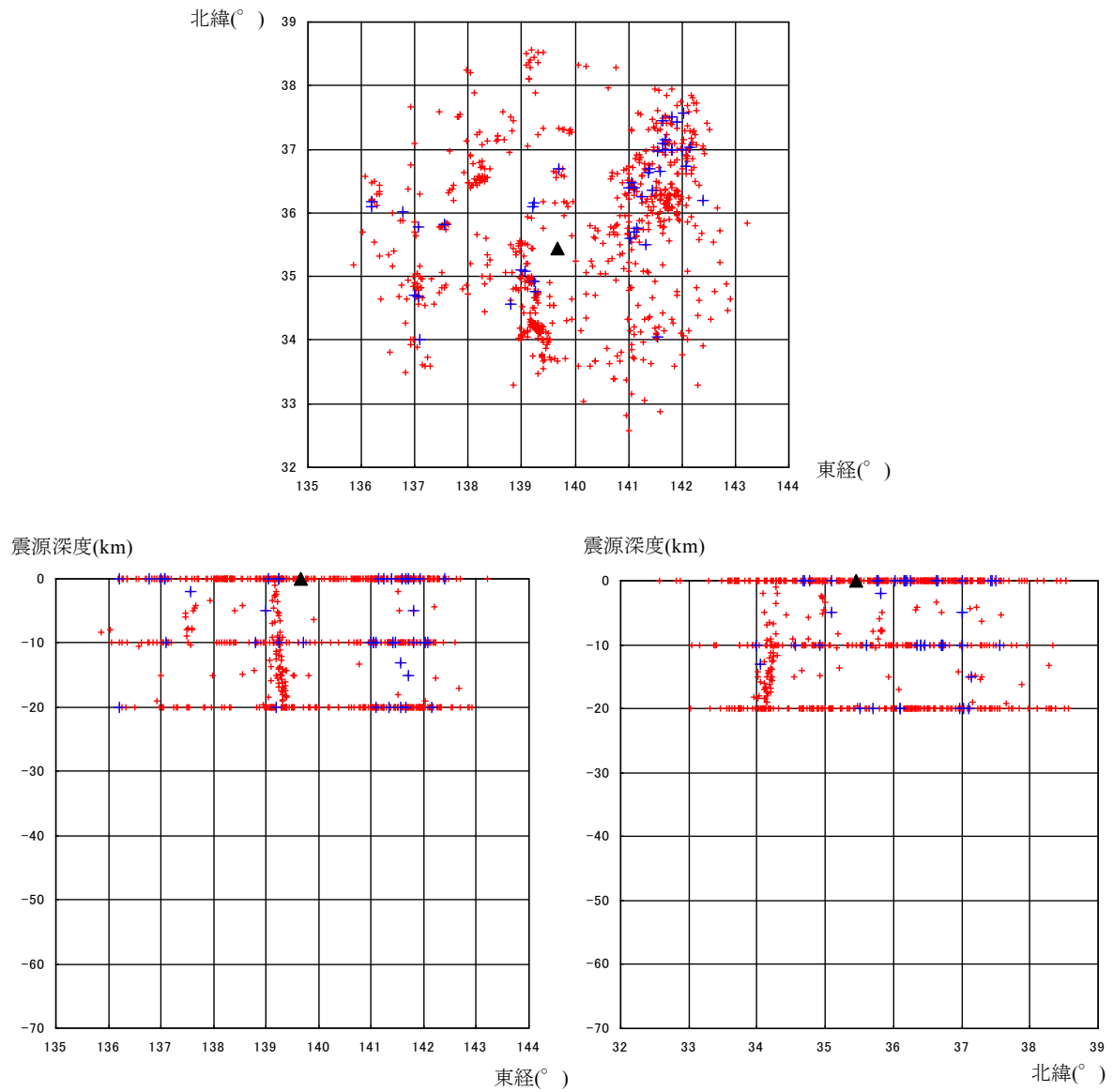


図-13 (a) 地震カタログデータから抽出した各震源の空間分布図（横浜港山下地区(No.9209)）

（地表から 20km 以浅の浅部領域）

上：平面図（横軸は経度，縦軸は緯度）

左下：深度分布図（横軸は経度，縦軸は深度） 右下：深度分布図（横軸は緯度，縦軸は深度）

図中”+”の凡例は M6.5 以上の震源を示す.

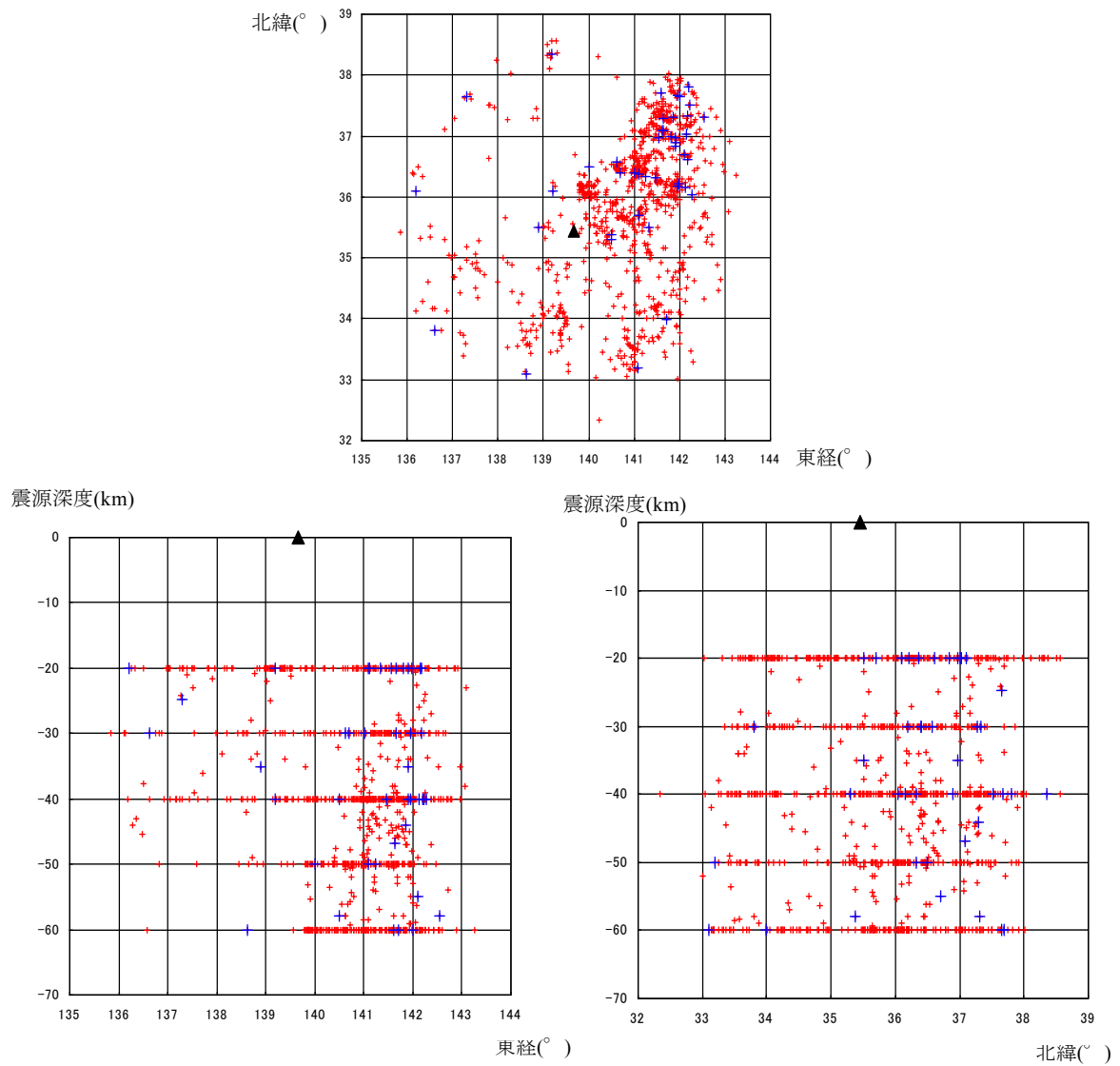


図-13(b) 地震カタログデータから抽出した各震源の空間分布図（横浜港山下地区(No.9209)）

（深度 20km-60km の深部領域）

上：平面図（横軸は経度，縦軸は緯度）

左下：深度分布図（横軸は経度，縦軸は深度） 右下：深度分布図（横軸は緯度，縦軸は深度）

図中”+”の凡例は M6.5 以上の震源を示す。

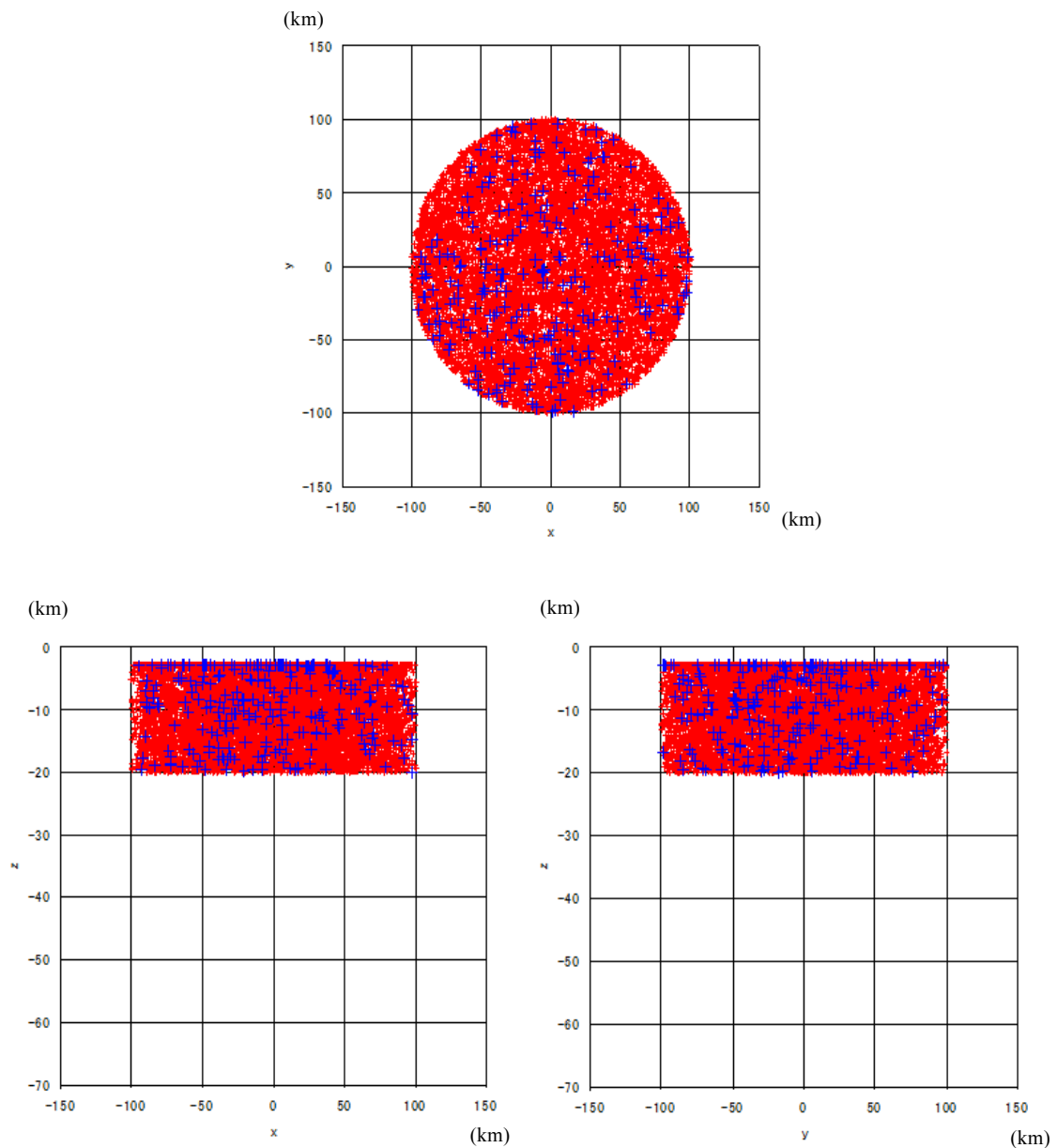


図-14(a) 点震源を配置した際の空間的配置状況（横浜港山下地区(No.9209)）

（地表から 20km 以浅の浅部領域）

上：平面図（横軸，縦軸ともに対象地点からの平面的な距離．横軸は経度方向の距離，縦軸は緯度方向の距離）

左下：深度分布図（横軸は経度方向の距離，縦軸は深度）

右下：深度分布図（横軸は緯度方向の距離，縦軸は深度）

図中”+”の凡例は M6.5 以上の震源を示す．

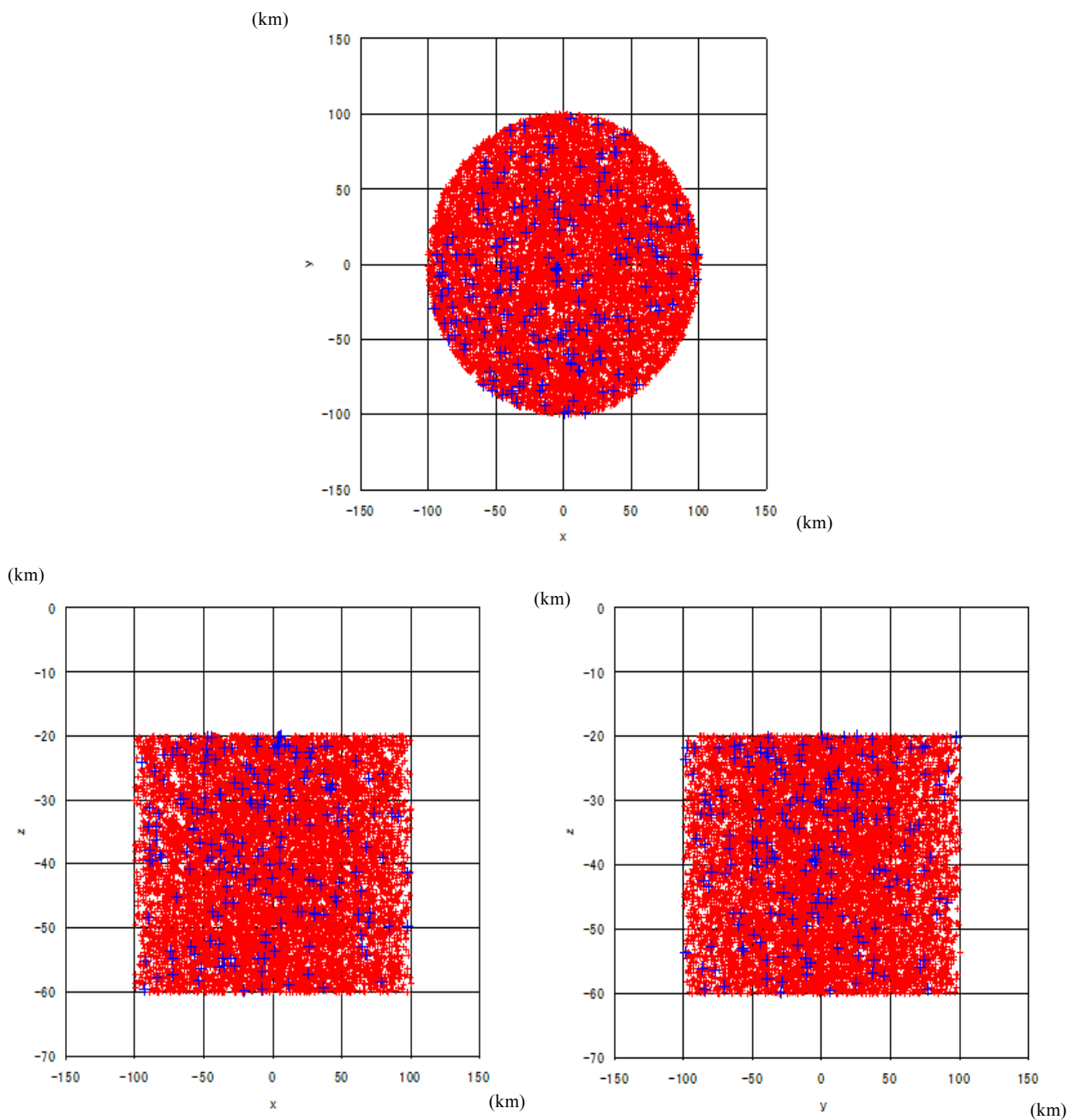


図-14(b) 点震源を配置した際の空間的配置状況（横浜港山下地区(No.9209)）

(地表から 20km-60km の深部領域)

上：平面図（横軸，縦軸ともに対象地点からの平面的な距離．横軸は経度方向の距離，縦軸は緯度方向の距離）

左下：深度分布図（横軸は経度方向の距離，縦軸は深度）

右下：深度分布図（横軸は緯度方向の距離，縦軸は深度）

図中”+”の凡例は M6.5 以上の震源を示す.

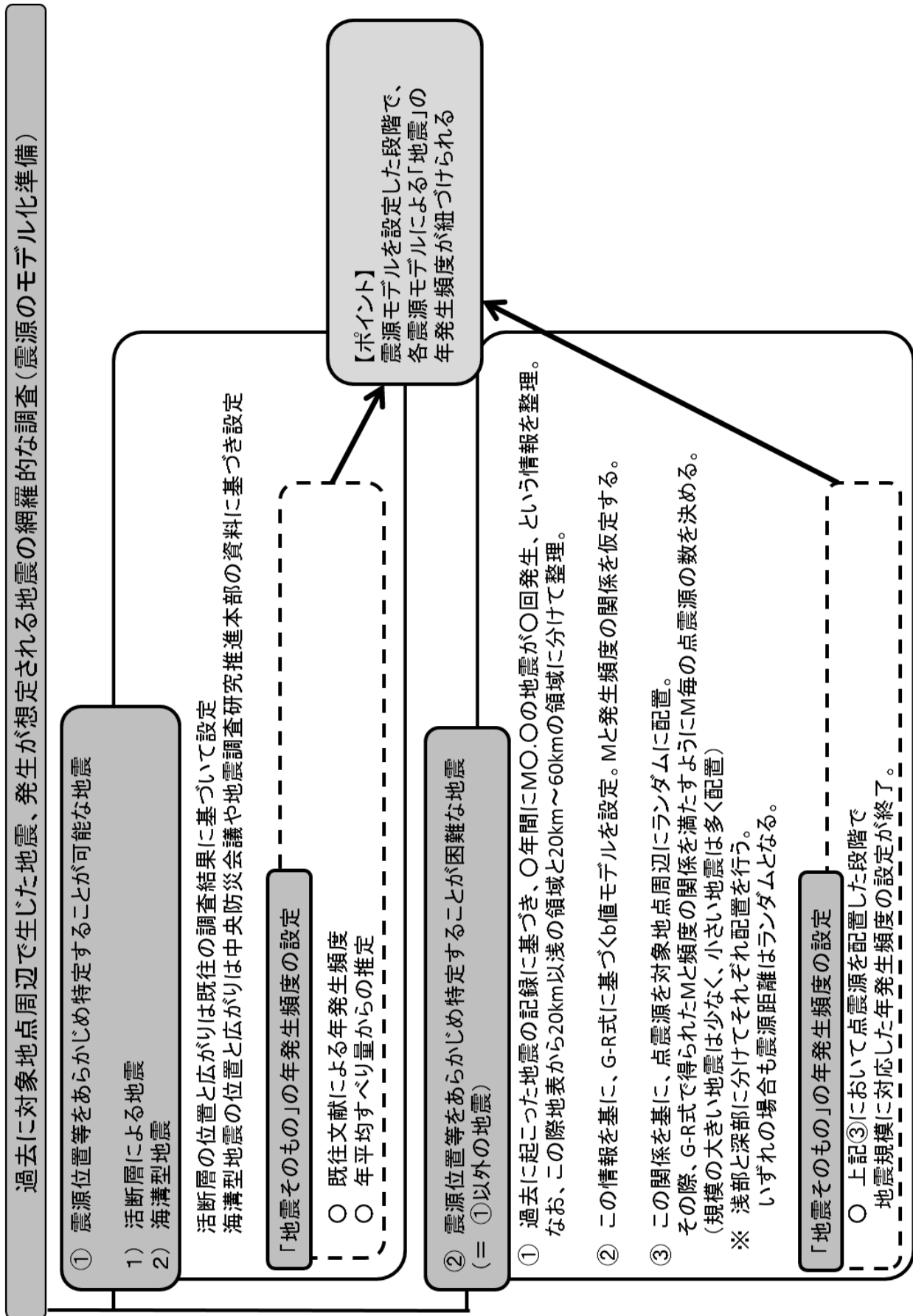


図-15 各種震源モデルの設定および配置方法

2.3 地震動の計算方法

(1) 地震動算定の基本となる考え方

前節で設定した震源モデルを用いて、対象地点における各震源からの地震動を計算する際の手法について述べる。ここで求めたいものは、各震源からの地震動のフーリエ加速度振幅を網羅的に計算した結果であり、図-1のフロー図のように、2.4節にて後述する各ばらつきを考慮した上で、対象地点でのフーリエ加速度振幅を評価することがここでの目標である。

さて、基準・同解説によれば、観測地震動のフーリエ加速度振幅スペクトル $O(f)$ は、それぞれ周波数の関数である震源特性 $S(f)$ 、伝播経路特性 $P(f)$ 、サイト特性 $G(f)$ の積で表される。

$$O(f) = S(f) \times P(f) \times G(f) \quad (7)$$

すなわち、観測地震動は、震源断層の破壊過程の影響を示した「震源特性」、震源から対象地点の地震基盤までの地震波の伝播特性を示した「伝播経路特性」、対象地点の地層構成等による地震波の増幅特性を示した「サイト特性」の3つの特性に分解でき、それぞれの積で表される（図-16参照）。

レベル1地震動の算定時における各震源からの地震動の計算においても、これらの震源特性、伝播経路特性、サイト特性をそれぞれ算定あるいは利用し、フーリエ加速度振幅を算定する。なお、サイト特性のうち、フーリエ振幅の周波数ごとの増幅率を示すサイト増幅特性については、既に対象地点において評価が完了していることを前提として以下の説明を行う。

なお、全国の各港におけるサイト増幅特性の詳細な算定方法については、文献²⁰⁾に掲載されており、また各港にお

けるサイト増幅特性のデータについては国総研 HP 上に掲載されている。

以下、震源位置等をあらかじめ特定することが可能な地震と、震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震とに分けて、平成19年に用いた計算方法について述べる。

(2) 震源位置等をあらかじめ特定することが可能な地震に関する地震動の計算

震源位置等をあらかじめ特定することが可能な地震については、2.2節にて触れたように、地震動を発生させる震源断層の位置、大きさ等がある程度明瞭になっている。このため、現行の基準・同解説¹⁾において提示されている統計的グリーン関数法を用いて、対象地点における地震動の時刻歴波形を直接的に算定した。

統計的グリーン関数法は、断層面を小断層に分割し、各小断層から生じる小規模の地震波形を、最終的に全て重ね合わせることで、その断層から発生する地震動の時刻歴を評価する方法である。この手法で、地震基盤～地表面のサイト増幅特性を用いて計算を行った場合、得られる地震波形は地表面の時刻歴波形である。一方、レベル1地震動は各港の工学的基盤において設定することになっているため¹⁾、ここで最終的に得られる時刻歴波形に対しては、工学的基盤から地表面までの地盤モデルを用いて、いわゆる“引き戻し”（＝工学的基盤から地表面までの増幅特性を差し引いて評価すること）作業を実施している。

なお、この引き戻しを行う際は線形の重複反射理論を用いている。プログラムとしてはSHAKEを用いているが、地盤の剛性や減衰定数は線形時のものを用いている。これは、先に述べた地震基盤～地表のサイト増幅特性は中小地

観測された地震動のスペクトル『O』

- ① 「震源断層の破壊過程の影響」（震源特性『S』）
- ② 地震波が地下の岩盤を伝わる際の「伝わり方」（伝播経路特性『P』）
- ③ 地震波が岩盤から堆積層に入射した後の「増幅特性」（サイト特性『G』）

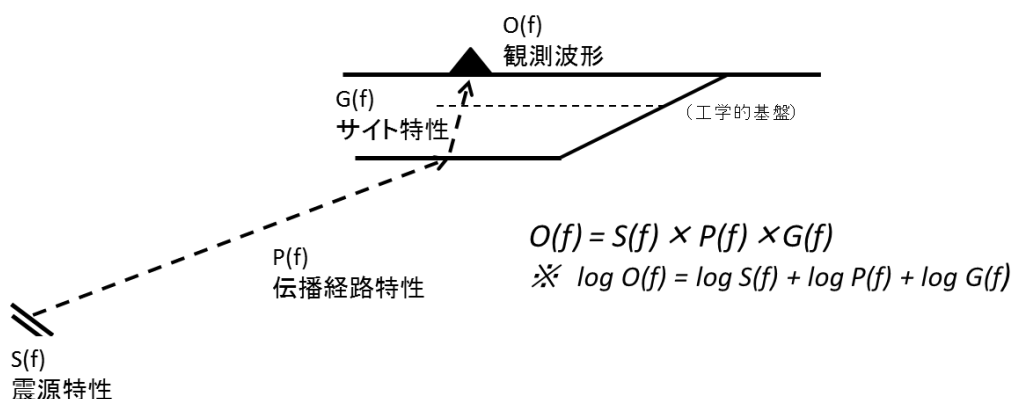


図-16 観測された地震動の3特性への分解

震記録に基づいて求められており、線形時に対応するためである。なお、各港における地盤モデルのデータについては国総研 HP 上に掲載されている。

以下、統計的グリーン関数法による地震動設定の詳細について述べる。

手順 1)

前項 2.2 の(2)で考慮した各地震の震源断層を $N \times N$ の小断層に分割する。後述のアスペリティを考慮する地震については、震源断層全体を小断層に分割する代わりに、アスペリティや背景領域を小断層に分割する。複数のセグメントからなる活断層についても、断層全体を小断層に分割する代わりにセグメントを小断層に分割する。平成 19 年の検討では、活断層については $N=10$ とした。海溝型地震に対して用いた N の値は付録 B-1 に示した。

手順 2)

分割後の小断層から発生する地震動の震源特性を、フリーエ加速度振幅として以下の式で評価する。

$S(f) =$

$$R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot PRTITN \cdot \frac{M_{0e}}{4\pi\rho Vs^3} \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_{max}}\right)} \quad (8)$$

ここに、

- $R_{\theta\phi}$: ラディエーション係数 (一般的には 0.63)
- FS : 自由表面による増幅の効果を示す数値 (=2)
- $PRTITN$: 地震動のエネルギーが水平方向の 2 成分に分散する効果を示す数値 (一般的には 0.71)
- M_{0e} : 小地震の地震モーメント
- ρ : 地震基盤における媒質の密度
- Vs : 地震基盤における媒質の S 波速度
- f : 周波数
- f_c : 小地震のコーナー周波数
- f_{max} : 高周波遮断周波数 (= 10.0Hz)

である。

上記の用語の解説については、文献 1), 2) に譲る。

式(8)に諸数値を代入することとなるが、以下、活断層の地震と海溝型地震で若干手順が異なる。

① 活断層の地震の場合

断層全体の地震モーメント M_0 を断層面積 S から次式¹⁾²¹⁾により算定した。 S は 2.2 節で得られる数値を用いた。

$$S = 2.23 \cdot 10^{-15} \cdot M_0^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

ここに S の単位は km^2 , M_0 の単位は dyne-cm である。な

お、式(9)から円形クラックモデル²²⁾を用いて応力降下量を求めると 2.3MPa となる。ここで得られた M_0 を N^3 で除したものを小地震の地震モーメント M_{0e} とする。更に、小地震のコーナー周波数 f_c を、次式¹⁾を用いて計算する。

$$fc = 0.66 \cdot Vs \cdot \left(\frac{1}{S_e}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

ここに S_e は分割後の小断層の面積 (S/N^2) である。

また、式(10)は応力降下量 $\Delta\sigma$ を用いて以下のようにも表すことができる。

$$fc = 0.49 \cdot Vs \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{M_{0e}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (10')$$

以上は標準的なパラメータであるが、後に 2.5 で述べるように、ロジックツリーにおいて上記と異なる地震モーメントと応力降下量を与える場合がある。その場合は式(10')でコーナー周波数を評価した。

地震基盤における媒質の密度は $2.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, S 波速度は 3.5km/s とした。

なお、複数のセグメントからなる活断層については、複数のセグメントを合計した断層全体の面積 S から式(9)により断層全体の地震モーメント M_0 を求め、これを、各セグメントの面積の 1.5 乗に比例するように各セグメントに配分した。そして、得られた各セグメントの地震モーメントを N^3 で除することにより小地震の地震モーメント M_{0e} を求めた。

② 断層位置が幅をもって示されている海溝型地震の場合

2.2 節で「移動型震源」と呼んだ地震である。断層位置の設定方法については 2.2 節で述べたとおりであるが、その他のパラメータについては確定することが困難であるため、地震動を計算する際は便宜的に活断層の方法に準じることとした。

地震モーメント M_0 を活断層を対象とした次式により断層面積 S から算定した。

$$S = 2.23 \cdot 10^{-15} \cdot M_0^{\frac{2}{3}} \quad (9: \text{再掲})$$

ただし、 $S > 291 \text{km}^2$ の場合

$$S = 4.24 \cdot 10^{-11} \cdot M_0^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

を用いた²³⁾。ここで得られた地震モーメントを N^3 で除することにより小地震の地震モーメントを求めた。コーナー周波数 f_c の値は式(10')で与えた。

$$fc = 0.49 \cdot Vs \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{M_{0e}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (10': \text{再掲})$$

なお、 $\Delta\sigma$ は 3.0MPa とした。

以上は標準的なパラメータであるが、後に 2.5 で述べるように、ロジックツリーにおいて上記と異なる地震モー

ントと応力降下量を与える場合がある。

地震基盤における媒質の密度は地域性を考慮して与えた（付録 B-1）。

③ 断層位置が確定しているがアスペリティは考慮しない海溝型地震の場合

これに該当するのは以下の地震である（付録 B-1）。

- ・北海道西方沖の地震
- ・北海道南西沖の地震
- ・青森県西方沖の地震
- ・山形県沖の地震
- ・新潟県北部沖の地震

これらの地震については、上記②の移動型震源と同様の方法で地震モーメントとコーナー周波数の設定を行った。後にロジックツリーにおいてこれと異なるパラメータを与える点も同様である。地震基盤における媒質の密度は地域性を考慮して与えた（付録 B-1）。

④ 断層位置が確定しておりアスペリティも考慮する海溝型地震の場合

これに該当するのは以下の地震である（付録 B-1）。

- ・色丹島沖の地震
- ・根室沖の地震
- ・十勝沖の地震²⁵⁾
- ・三陸沖北部のプレート間大地震²⁶⁾
- ・宮城県沖地震²⁷⁾²⁸⁾
- ・三陸沖南部海溝寄りの地震²⁷⁾
- ・関東地震²⁹⁾
- ・東海・東南海・南海地震³⁰⁾³¹⁾
- ・日向灘のプレート間地震³²⁾

これらの地震については比較的詳しい情報²⁵⁾⁻³²⁾が得られているため、これらに基づいてアスペリティおよび（地震により）背景領域を設定した（付録 B-1）。そして、アスペリティ（および背景領域）の地震モーメントを N^3 で除することにより小断層の地震モーメントを求めた。コーナー周波数 f_c の値は式(10')で与えた。地震基盤における媒質の密度は地域性を考慮して与えた（付録 B-1）。

なお、関東地震については 2.5 でより詳しい説明を行う。

手順 3)

小断層から発生する地震動の暫定的な時刻歴波形を与える作業を実施した。ここで作成する時刻歴波形は、データ長が 20.48 秒で、7 秒に重心のある波形とした。このような波形を作成するために、まず、(0, 1)の範囲で一様乱数 X を作成した。次にこれを

$$Y = (-\log_{10} X - \log_{10} e) \times 0.5 + 7.0 \quad (12)$$

で Y に変換すると、 Y は平均が 7.0 で分散の小さい変数となる。これを群遅延時間として用いた。そして、群遅延時間を数値的に積分することでフーリエ位相を求め、これより時刻歴波形を作成した。

群遅延時間については後に手順 7) で説明する。

手順 4)

震源から対象地点までの地震動の伝播経路特性 $P(f)$ を次式により評価した。

$$P(f) = \frac{1}{r} \exp\left(\frac{-\pi f r}{Q V_s}\right) \quad (13)$$

ここに、

r : 震源距離

Q : 伝播経路における媒質の Q 値

である。

なお、 Q 値が大きいほど地震波は減衰しにくい。その他の記号は式(8)と同様である。

式(13)において、震源距離 r は対象地点から震源までの直線距離を表しており、必ずしも対象地点直下の地震基盤から震源までの直線距離を用いてはいない。

これは、もともとのサイト増幅特性の定義あるいは導き方と関連している。サイト増幅特性を厳密に定義すると、堆積層上で観測される地震動のフーリエスペクトルを、同じ地点で仮に地震基盤が露頭している場合に観測される地震動のフーリエスペクトルで除したものであり、既往の研究でのサイト増幅特性の算出は実際にはこのような定義に基づいて行われている。

表-3 Q 値の地域別値

地域	地殻内地震	海溝型地震
九州	$Q=104 f^{0.63}$ 対数標準偏差：0.0498 加藤(2001)	$Q=152 f^{0.38}$ 対数標準偏差：0.256 佐藤・巽(2002)：西日本海溝型 (Wsub)
中国・四国	$Q=180 f^{0.7}$ 対数標準偏差：0.0550 Petukhin et al. (2003) : upper	
近畿		$Q=90 f^{0.8}$ 対数標準偏差：0.1130 Petukhin et al. (2003) : lower
東海以東	$Q=166 f^{0.76}$ 対数標準偏差：0.1650 佐藤・巽(2002)：東日本内陸型 (Ecru)	$Q=114 f^{0.92}$ 対数標準偏差：0.0580 佐藤・巽(2002)：東日本海溝型 (Esub)

従って、式(13)の震源距離 r は対象地点から震源までの直線距離とすることが適切である。

また、伝播経路における媒質の特性を示す Q 値は、以下の式で与えられる。

$$Q(f) = Q_0 \times f^a \quad (14)$$

上式中の Q_0 および a の値は地域ごとに異なる。用いたそれぞれの値については、表-3 に一覧として示した。表-3 に示す Q 値は各文献においてスペクトルインバージョン等により求められたものである。また、表中における標準偏差の使用法については、次節 2.4 節にて述べる。

手順 5)

手順 3) で得られた暫定的な地震波形をフーリエ変換し、その地震波形のフーリエスペクトルの振幅が、“震源特性 $S(f)$ × 伝播経路特性 $P(f)$ ” に合致するように調整 (入れ替え) を行った。この作業により、小断層から発生する地震波形の時刻歴 (ただし地震基盤に対応するもの) が得られることになる。そのフーリエ加速度振幅は $S(f) \times P(f)$ となっており、フーリエ位相はランダムとなっている。

手順 6)

更に、地震基盤から上の堆積層における地震動の増幅を考慮するため、サイト増幅特性を乗じた。この増幅率については、既に各港で与えられているサイト増幅特性を用い、手順 5) で与えられた “ $S(f) \times P(f)$ ” に各対象地点 (各港) において設定されているサイト増幅特性である $G(f)$ を乗じた。

手順 7)

対象地点における小断層の破壊に起因する時刻歴 (グリーン関数) を求めるためには、堆積層がフーリエ加速度振幅に与える影響のみでなく、堆積層がフーリエ位相におよぼす影響についても考慮する必要がある。この点については、別途、中小地震観測記録を用いて以下のように評価し

ている。

ある地震により得られた観測波形 (時刻歴波形) をフーリエ変換する。この操作により、フーリエ加速度振幅が複素数の絶対値として、フーリエ位相は複素数の位相角として得られることになるが、これを複素数の絶対値で除すれば、フーリエ加速度振幅は 1 に調整され、フーリエ位相成分のみが抽出されることになり、これを周波数領域で乗じることによりサイト位相特性の評価を行う。

ただし、この位相成分には、式(7)の考え方からすると、震源特性、伝播経路特性、サイト特性のそれぞれの影響が入っているように見える。

ここで、ある地震のフーリエ位相を角振動数で微分したものに着目する。これは一般に群遅延時間と呼ばれ、得られた値は微分した点の周辺における周波数成分の相対的な遅延時間であると言え、概ね、地震動の時刻歴において、当該周波数成分が対象地点に到達する時刻に対応する。

群遅延時間 t_{gr}^0 は、以下の式のように分解できる。式中の s, p, g のそれぞれの添え字は式(7)に対応する。

$$t_{gr}^0(f) = t_{gr}^s(f) + t_{gr}^p(f) + t_{gr}^g(f) \quad (15)$$

この際、 $t_{gr}^0(f)$ を求める際に用いた観測波形の元となる地震の規模が小さく、かつ震源距離が小さければ、上式の第 1 項はほぼ 0、第 2 項は一定数となるので、結局、第 3 項が群遅延時間を支配する要因となり、観測波形の群遅延時間そのものをサイト特性の反映とみなすことができる。

つまり、そのような観測記録のフーリエ位相はサイト特性だけで決まっており、観測記録のフーリエ位相を、そのままサイト位相特性として利用できるという考え方である。

ただし、この考え方を適用してサイト位相特性を評価するために用いる地震記録は、地震規模が小さく、かつ震源距離も小さい記録でなければならない。すなわち、式(15)の第 1 項と第 2 項の影響が、第 3 項に比べて十分小さいと

判断できる記録を用いなければならない。

そこで、実際には、マグニチュードは 5.0 以下、震央距離は 100km 未満、加速度振幅は 100Gal 以下の地震記録を用いてサイト位相特性を評価している。

手順 8)

上記までの手順で、小断層の破壊に起因する対象地点での時刻歴波形を求めるためのフーリエ加速度振幅とフーリエ位相は以下のように与えられたことになる。

フーリエ加速度振幅 : $S(f) \times P(f) \times G(f)$

フーリエ位相 : ランダム位相 + サイト位相特性

これを用いてフーリエ逆変換を行い、小断層に起因する地震動の対象地点における時刻歴波形を求めた。

手順 9)

上記までの手順で、小断層の破壊に起因する地震動波形（グリーン関数）が算定できたため、これを全ての小断層に対して重ね合わせることで、断層全体の破壊に起因する時刻歴波形を合成した。この合成の際には、次式¹⁾²⁴⁾を用いた。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(r/r_{ij} \right) f(t) * u(t-t_{ij})$$

$$f(t) = \delta(t) + \left\{ 1/n' / (1-e^{-1}) \right\} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[e^{-(k-1)/(N-1)/n'} \delta\{t - (k-1)\tau/(N-1)/n'\} \right]$$

$$t_{ij} = (r_{ij} - r_0)/V_S + \xi_{ij}/V_r \quad (16)$$

$U(t)$: 断層全体の破壊に起因する地表での地震動

$u(t)$: 地表における統計的グリーン関数

$f(t)$: 大地震と小地震の滑り速度時間関数の違いを補正するための関数

r : 小断層の震源距離

r_{ij} : ij 要素から対象地点までの距離(ij は小断層の番号)

N : 分割数 (手順 1) と同じ)

τ : ライズタイム

n' : 波形の重ね合わせの際に現れる見かけの周期性を除去するための整数

r_0 : 断層全体の破壊開始点から対象地点までの距離

ξ_{ij} : 破壊開始点から ij 要素までの距離

V_S : 地震基盤の S 波速度

V_r : 破壊伝播速度

なお、この式に示した処理に関するイメージ図を図-17 に示す。図-17 ではアスペリティを考慮しない場合を想定したが、アスペリティを考慮する場合には、アスペリティ

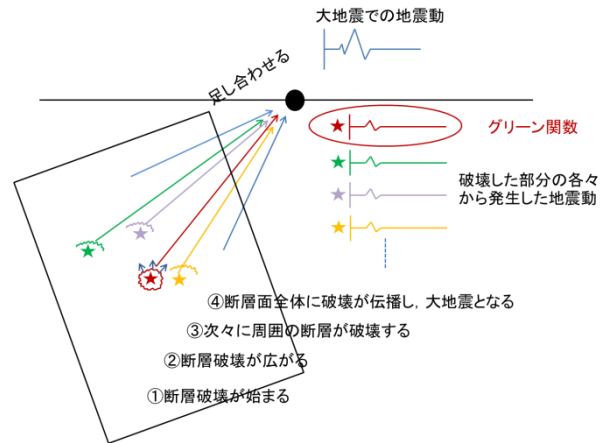


図-17 統計的グリーン関数法概念図

を小断層に分割し、式(16)を適用してアスペリティからの地震動を計算し、計算結果をすべてのアスペリティに対して加算すれば良い。同じように、複数のセグメントからなる活断層の場合は、セグメントを小断層に分割し、式(16)を適用してセグメントからの地震動を計算し、計算結果をすべてのセグメントに対して加算すれば良い。

式(16)を適用するにあたり、破壊開始点については、①活断層による地震の場合は断層下端に一樣かつランダムに配置した。②断層位置が幅をもって示されている海溝型地震、および③断層位置が確定しているがアスペリティは考慮しない海溝型地震の場合は断層面内に一樣かつランダムに配置した。④断層位置が確定しておりアスペリティも考慮する海溝型地震の場合は、原則として破壊開始点は一点に固定した（付録 B-1）。しかし、関東地震については破壊開始点をアスペリティの下端に一樣かつランダムに配置した。

いずれも破壊伝播様式は同心円状とした。破壊伝播速度は、内陸地殻内地震については 2.5km/s とした。海溝型地震については付録 B-1 に示す値を用いた。

断層面上の 1 点ですべりが継続する時間を示すライズタイム τ は基本的に以下の式²¹⁾で算定した。

$$\tau = 2.03 \cdot 10^{-9} \cdot M_0^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

ここに τ の単位は s, M_0 の単位は dyne-cm である。ただし、アスペリティを考慮する地震については、各々の震源モデルで設定されているライズタイム（付録 B-1）を用いた。

手順 10)

最終的に求めたいものは、対象地点における地震動のフーリエ加速度振幅である。ここでは既に手順 9) までの段階で対象地点における地震動の時刻歴波形が求められていることから、その波形に対してフーリエ変換を適用し、

フーリエ加速度振幅を算定した。

ただし、本節の冒頭で述べたとおり、レベル1地震動は各港の工学的基盤において設定することになっているため¹⁾、ここで得られた地表面でのフーリエ加速度振幅については、本節の冒頭で触れたように、工学的基盤までの引き戻し処理を実施する。

(3)震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震に関する地震動の計算

震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震に関しても、地震動の算定時に基本となる考え方は上記(1)で示した考え方と同一である。しかし、この場合は統計的グリーン関数法による処理は行っていない。すなわち時刻歴波形は算定していないことになる。

ここで算定したいものは、面的な広がりをもたない点震源の破壊に起因する対象地点におけるフーリエ加速度振幅の値であるため、上記で示した震源特性 $S(f)$ 、伝播経路特性 $P(f)$ 、サイト増幅特性 $G(f)$ がそれぞれ与えられるのであれば、それを単に掛け算したものが求めたいフーリエ加速度振幅そのものであり、時刻歴波形の計算は必ずしも必要でないことになる。

手順1)

震源特性 $S(f)$ を算定する。使用した式は式(8)と同様である。この時、点震源の規模はマグニチュード M (気象庁マグニチュード) で表現されているため、 M から地震モーメント M_0 を求めるために次式³³⁾を用いた。

$$M_0 = 10^{1.17M+17.72} \quad (18)$$

また、コーナー周波数は、式(10')において地震モーメントを小地震の地震モーメントから大地震の地震モーメントに変更した次式により求めた。

$$fc = 0.49 \cdot V_s \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10'')$$

ここで用いる応力降下量の値については、2.4節で後述する。地震基盤における媒質の密度は $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、S波速度は 3.5 km/s とした。

手順2)

伝播経路特性 $P(f)$ は式(13)によって算定した。この際、20km以浅における地震は表-3の地殻内地震による値を、20km-60kmの地震は表-3の海溝型地震による値を用いて Q 値を使い分けた。また、 r の値は2.2節において点震源を配置した際の対象地点から震源までの距離をそのまま用いた。

手順3)

既知である対象地点のサイト増幅特性 $G(f)$ を、手順1)、2)で得られた $S(f)$ 、 $P(f)$ とかけ合せたものを対象地点におけるフーリエ加速度振幅とした。

ただし、レベル1地震動は各港の工学的基盤において設定することになっているため¹⁾、サイト増幅特性 $G(f)$ をかける際には、地震基盤～地表面のものではなく、地震基盤～工学的基盤の $G(f)$ を用いている。

上記の整理からわかるように、震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震に対しては、この段階では位相情報は全く考慮されていない。この点については、後にレベル1地震動の時刻歴波形を計算する際に留意すべきポイントの1つとなるが、この処理については2.6節で解説する。

図-18に地震動の設定手法について整理したものを示す。

また、各港におけるレベル1地震動の設定に用いた断層パラメータ等の一覧は、付録AおよびBとして提示した。

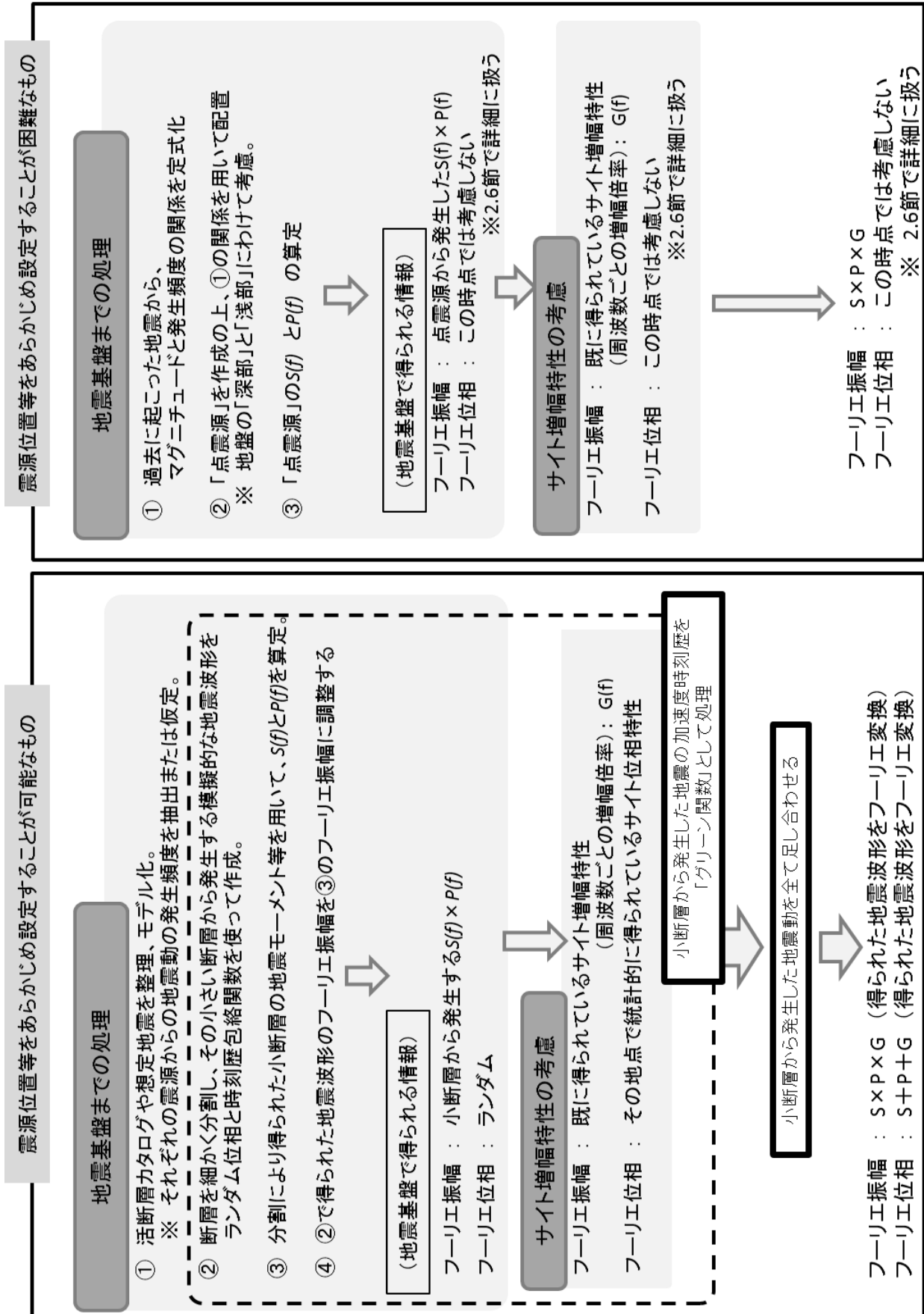


図-18 震源の種類による地震動の作成方法の違い (概念)

2.4 地震動計算時におけるばらつきの評価

(1) 本節の内容

確率論的地震危険度解析において重要な要素の一つは、地震動の計算をする際のばらつきの考慮である。以下においては、平成19年の地震動計算において考慮した各種のばらつきについて、想定地震の種類別に解説を行う。

なお、本節で述べる「ばらつきの評価」とは、後段の2.5節で示すロジックツリーによる評価とは本質的には異なるものであり、地震動という自然現象に不可避免的に含まれるばらつきを、何らかの確率モデルを前提に評価しようとするものである。

(2) 震源位置等をあらかじめ特定することが可能な地震の場合

a) 活断層による地震を想定する場合

活断層による地震を想定する場合は、以下のばらつきを考慮した。

① 断層の破壊開始点

； 断層面の下端に一様かつランダムに配置した。

② 小断層から発生する地震動の位相特性

； 統計的グリーン関数法を用いる際に、小断層から発生する地震動の位相特性を決めるための乱数の初期値はケース毎に変化させた。

③ ライズタイム τ

； ライズタイム τ を算定する式(17)に対して対数正規分布を仮定し標準偏差0.12（常用対数）を与えた。この標準偏差は、式(17)の元になったデータから得られたものである。

④ 伝播経路特性 $P(f)$ の算定に使用する $Q(f)$

； $Q(f)$ を与える式(14)に対して対数正規分布を仮定した。
なお、標準偏差については、2.3節の表-3に示した値を用いた。

⑤ サイト増幅特性 $G(f)$

； 対象地点で既知となっているサイト増幅特性に対して対数正規分布を仮定した。なお標準偏差は文献²⁰⁾の解析で得られた値を用いた。

地震動を計算する際は、①～⑤の組み合わせを考慮し、1つの断層に対して100通りの計算ケースを考慮した。

つまり、1つの活断層から発生する地震動を計算する際

は、100回の地震波形計算（2.3節で解説した統計的グリーン関数法を用いた100通りの地震波形の作成）を実施したことになる。

この“100”という数値については、例えば計算ケースの数を100以上とした場合、地震発生時のばらつきの程度をより精緻に評価できるが、前節に示した統計的グリーン関数法によって時刻歴波形を計算するという計算上の負荷と、ばらつきの精度に関するバランスを考慮して上記のケース数を採用した。

また、確率密度関数の与えられているパラメータ（③④⑤）について、地震動計算に用いる値を決める際は、確率密度関数に基づいてランダムに抽出するのではなく、LHS（Latin Hypercube Sampling）法³⁴⁾と呼ばれる手法を採った。

これは、与えられた確率密度関数の取り囲む部分を面積が等しくなるように区分し（例えば計算ケースの数が100ならば100等分する）、区分したエリアの中から1つずつサンプリングを行うという手法である。それぞれの区分されたエリアから1つずつ抽出するため、サンプル数が100程度とあまり多くないときでも、サンプリング時の偏りを避けることができるという利点がある。平成19年の検討では、活断層による地震だけでなく、以下に述べる他の地震に対してもLHS法を適用した。

なお、上記のサンプル数については、100程度であっても、計算結果の平均と標準偏差が概ね収束するという検討結果³⁵⁾が得られている。従って、活断層の地震に対してはサンプル数を100としたほか、以下に述べる他の地震に対しても、サンプル数は必ず100を越えるように設定した。

b) 断層位置が幅をもって示されている海溝型地震の場合
断層位置が幅をもって示されている海溝型地震を考慮する場合（移動型震源を考慮する場合）は、以下のばらつきを考慮した。

① 断層位置

； 移動型震源を考慮する場合は、2.2節にて述べたように、領域内に複数の断層位置を設定した。2.2節における図-9の例では、28ケースの断層位置が設定されている。

② 断層の破壊開始点

； ①で設定した断層面内に一様かつランダムに配置した（活断層の場合と異なり断層面内とした）。

③ 小断層から発生する地震動の位相特性

； 活断層の場合と同様、統計的グリーン関数法を用いる

際に、小断層から発生する地震動の位相特性を決めるための乱数の初期値はケース毎に変化させた。

④ ライズタイム τ

； 活断層の場合と同様に、ライズタイム τ を算定する式(17)に対して対数正規分布を仮定し標準偏差 0.12（常用対数）を与えた。

⑤ 伝播経路特性 $P(f)$ の算定に使用する $Q(f)$

； 活断層の場合と同様に、 $Q(f)$ を与える式(14)に対して対数正規分布を仮定した。

⑥ サイト増幅特性 $G(f)$

； 活断層の場合と同様に、対象地点で既知となっているサイト増幅特性に対して対数正規分布を仮定した。

断層位置の数を X としたとき、100 以上となる最小の X の倍数を求め、これを計算ケース数とした。確率密度関数の与えられているパラメータについては LHS 法を用いた。

c) 断層位置が確定しているがアスペリティは考慮しない海溝型地震の場合

この場合、考慮するばらつきの種類は b) と同様である。ただし計算ケースは 100 通りとした。確率密度関数の与えられているパラメータについては LHS 法を用いた。

d) 断層位置が確定しておりアスペリティも考慮する海溝型地震の場合

この場合、考慮するばらつきの種類は以下の通りとした。

① アスペリティの配置箇所

； アスペリティの断層面上での配置箇所は一様乱数で与えた。ただし、複数のアスペリティを配置する際は、それらが重ならないように配置した。

② 断層の破壊開始点

； 原則として破壊開始点は一点に固定した（付録 B-1）。ただし、関東地震については破壊開始点をアスペリティの下端に一様かつランダムに配置した。

③ 小断層から発生する地震動の位相特性

； 活断層の場合と同様、統計的グリーン関数法を用いる際に、小断層から発生する地震動の位相特性を決めるための乱数の初期値はケース毎に変化させた。

④ 伝播経路特性 $P(f)$ の算定に使用する $Q(f)$

； 活断層の場合と同様に、 $Q(f)$ を与える式(14)に対して対数正規分布を仮定した。

⑤ サイト増幅特性 $G(f)$

； 活断層の場合と同様に、対象地点で既知となっているサイト増幅特性に対して対数正規分布を仮定した。

アスペリティを考慮する海溝型地震の場合は、ライズタイムは各種文献等²⁵⁾⁻³²⁾に示されている値（付録 B-1）を用い、地震動計算時におけるばらつきは考慮していない。ただし、関東地震については、後述のロジックツリー（2.5 節）を検討する際に、別のライズタイムを仮定する場合がある。

アスペリティを考慮する海溝型地震の場合、計算ケースは 100 通りとし、確率密度関数の与えられているパラメータについては LHS 法を用いた。

(3) 震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震の場合

震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震、すなわち点震源で評価する地震に関しては、以下のばらつきを考慮した。

① 気象庁マグニチュード M からモーメントマグニチュード M_0 を評価する際のばらつき

； 点震源の配置は、2.2 節で説明した内容に従い、気象庁マグニチュード M を与え、2.3 節の式(18)により M_0 へ変換した。この際、式(18)に対して標準偏差 0.31（常用対数）を与えた。この標準偏差も、式(18)の元になったデータから得られたものである。

2.2 節に示した震源配置の段階で、気象庁マグニチュード M と地震の発生頻度は 1 対 1 に対応させているため、 M_0 の算定時にはその関係は固定されているものとして算定した。つまり、 M_0 にばらつきを与える際に地震発生頻度も変える、という操作は行っていない。

② 応力降下量 $\Delta\sigma$ に関するばらつき

； 式(10")に基づいてコーナー周波数 f_c を算定する際、以下のような値の範囲内で $\Delta\sigma$ を一様乱数として与えた。震源が 20km 以浅（浅部領域）の地震と 20km-60km（深部領域）の地震で異なる値を用いた。

20km 以浅（浅部領域）：2.3MPa – 10.0MPa

20km-60km（深部領域）：2.3MPa – 50.0MPa

なお、ばらつきの下限値である 2.3MPa は、円形クラッ

クの式²²⁾に式(9)を代入して得られる $\Delta\sigma$ の値であり、断層全体の平均的な応力降下量に相当する。一方、上限値の10.0MPa(浅部領域)は活断層の地震のアスペリティの値、50.0MPa(深部領域)はプレート内地震のアスペリティの値を想定して設定したものである。

③ 対象地点から震源までの距離

； 2.2節で示したように、浅部領域と深部領域のそれぞれに対して、半径100kmの円筒内に点震源を一様かつランダムに配置しており、その結果として震源距離が与えられている。なお、このとき震源距離は一様分布ではないという点に注意が必要である。

④ 伝播経路特性 $P(f)$ の算定に使用する $Q(f)$

； 活断層の場合と同様に、 $Q(f)$ を与える式(14)に対して対数正規分布を仮定した。

⑤ サイト増幅特性 $G(f)$

； 活断層の場合と同様に、対象地点で既知となっているサイト増幅特性に対して対数正規分布を仮定した。

点震源を考慮する場合は、浅部領域と深部領域にそれぞれ10,000個の震源を配置し、それぞれの震源から2.3節に示した方法により対象地点のフーリエ加速度振幅を計算した。

なお、点震源の場合は、活断層地震や海溝型地震の場合と比べて計算上の負荷は小さいため、サンプル数は10,000とした。これに伴い、サンプリング方法は、LHS法ではなく通常のランダムサンプリングを用いている。

地震動計算の際に考慮した各種のばらつきを表-4に整理して示す。

表-4 地震動等の計算に対して考慮したばらつき一覧

ばらつきの種類	震源位置等をあらかじめ特定することが可能な地震				震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震
	活断層による地震 を想定する場合	断層位置が幅をもって示されている 海溝型地震の場合（移動型震源）	断層位置が確定しているがアスペリティ は考慮しない海溝型地震の場合	断層位置が確定しておりアスペリティも考慮する 海溝型地震の場合 大正型関東地震 大正型関東地震以外の場合	
断層位置または 震源位置	固定	ばらつきを考慮 付録B-1参照	固定	固定	対象地点から半径100kmの範囲内に一様かつランダムに配置
アスペリティ	考慮しない	考慮しない	考慮しない	個数は各参考文献によって調査した数を配置。 ただし、断層面上での配置箇所は一様乱数で 与える。	（断層面等の広がり）は考慮しないタイプであるため、考慮しない
破壊開始点	断層の下端に一様かつランダムに配置	断層面内に一様かつランダムに配置	断層面内に一様かつランダムに配置	アスペリティの下端 （いずれか1つのアス ペリティ）に一様か つランダムに配置	（断層面等の広がり）は考慮しないタイプであるため、考慮しない
ライズタイム	ライズタイムを算定する式に対して、ある一定の標準偏差を与える。			ばらつきは考慮しない	（断層面等の広がり）は考慮しないタイプであるため、考慮しない
応力降下量	ばらつきは考慮しない				コーナー周波数を算定する際の応力降下量にばらつきを与える。 ただし、浅部領域と深部領域で異なるばらつきを与える。
気象庁マグニチュード から モーメントマグニチュー ドへの変換	ばらつきは考慮しない				震源特性S(f)を算定する際、気象庁マグニチュードMから モーメントマグニチュードM0に変換する際にばらつきを与える。
小断層からの位相特性	小断層から発生する波形の位相特性は乱数を用いて発生させる				（断層面等の広がり）は考慮しないタイプであるため、考慮しない
伝搬経路特性 P(f)	P(f)を算定する過程で用いる0(f)にばらつきを与える。ばらつき量は地域毎に異なる。				
サイト増幅特性 G(f)	対象地点でのサイト増幅特性に対して求められているばらつきを与える。ばらつき量は対象地点毎に異なる。				
サンプリング数	100通り。 分布関数が規定されているものは、LHS法 によるサンプリングを用いる。	断層位置がN通りであれば （100を超える最小のNの倍数）通り。 分布関数が規定されているものは、LHS法 によるサンプリングを用いる。	100通り。 分布関数が規定されているものは、LHS法 によるサンプリングを用いる。	100通り。 分布関数が規定されているものは、LHS法によるサ ンプリングを用いる。	浅部領域、深部領域ともに10,000通り。 LHS法によるサンプリングではなく、ランダムサンプリングを用いる。

2.5 ロジックツリーの考慮と信頼度

前節までに示した各種ばらつきを考慮した地震動計算の手法により、フーリエ加速度振幅と年超過頻度の関係を周波数ごとに示すことができる。しかし、平成19年に検討したレベル1地震動に関しては、これに更に“ロジックツリー”という概念を採り入れてハザード曲線の評価を行った。

前節で述べた「ばらつきの評価」は、地震動という自然現象に不可避免的に含まれるばらつきを、何らかの確率モデルを前提に評価しようとするものであった。しかしながら、実際には、何らかの確率モデルを前提に評価できる不確定性以外に、評価に用いる数理モデル（確率モデルもこの中に含めて考える）自体を一つには確定できないという意味での不確定性も存在する。確率論的地震危険度解析の分野では、前者は偶然的な不確定性（aleatory uncertainty）、後者は認識論的不確定性（epistemic uncertainty）と呼ばれる^{例え}ば³⁶⁾。このうちの認識論的不確定性の評価に用いられるのがロジックツリーである。この概念は、評価に用いる数理モデルの選択における不確かさを考慮し、一種の場合分けを施したものとと言える。図-19はこの概念を図化したものである。

ロジックとは、図-19に示すような場合分けにおける組み合わせの1つと考えることができ、また、ロジックツリーはこれを樹形図上に表したものである。ロジックツリーの場合分けを採り入れた場合、ロジック毎に、地震動の計算において異なるモデルが選択されるため、結果として算定されるハザード曲線も異なったものが得られる。すなわち、

フーリエ加速度振幅と年超過確率の関係がロジック毎に算定される。

平成19年のレベル1地震動作成時に用いたロジックの一覧を図-20に示す。この図に示すように、具体的なロジックは震源の種別毎に異なる。

この図の見方は以下の通りである。まず、地震のグループを、グループ1：内陸活断層とアスペリティを考慮しない海溝型地震、グループ2：アスペリティを考慮する海溝型地震、グループ3：点震源として考慮する地震（震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震）の3グループに分けた。図-20に示したとおり、各グループにおけるロジックツリーの形態は互いに類似している。なお、グループ1で、内陸活断層の地震とアスペリティを考慮しない海溝型地震を同一グループとしているのは、2.3節で説明したように、アスペリティを考慮しない海溝型地震は、内陸活断層の地震と同様な地震動の計算手法をとっているためである。

平成19年の検討においては、図-20に示すとおり、グループ1のうち内陸活断層については地震モーメント M_0 を、グループ1のその他の地震については地震モーメント M_0 と応力降下量 $\Delta\sigma$ を、グループ2のうち関東地震についてはライズタイムと地震モーメントを、グループ2のその他の地震については地震モーメント M_0 を、グループ3においては幾何減衰の関数形をそれぞれ変化させてロジックツリーを構成した。

それぞれのロジックの組み合わせは、図に示すようにグループ1は内陸活断層で3通り、それ以外で6通り、グル

地震動の計算において、物理的に発生する各種ばらつきを評価しているが、実際には、定式化やパラメータに不確実性があるため、この影響も考慮

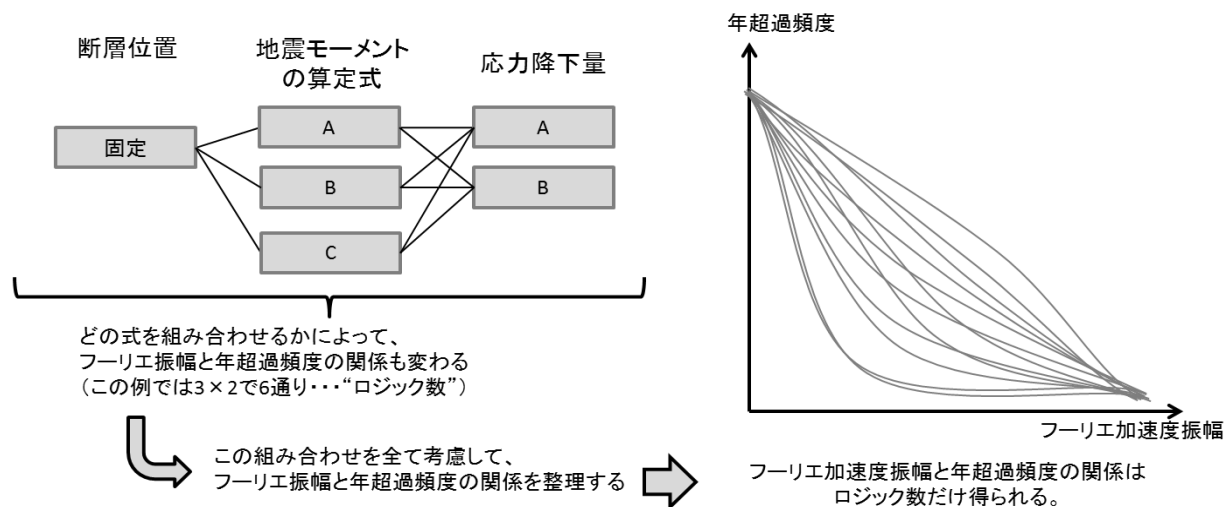
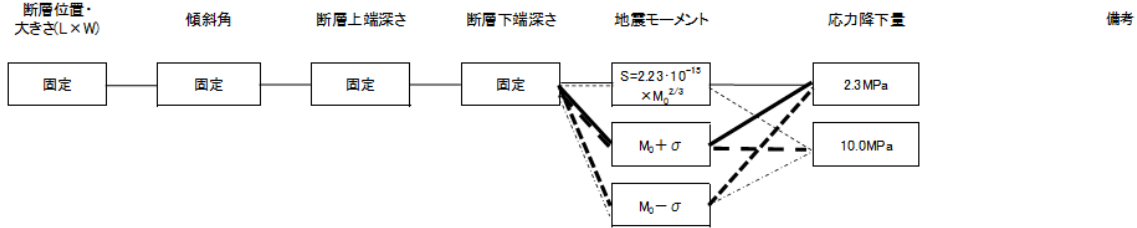


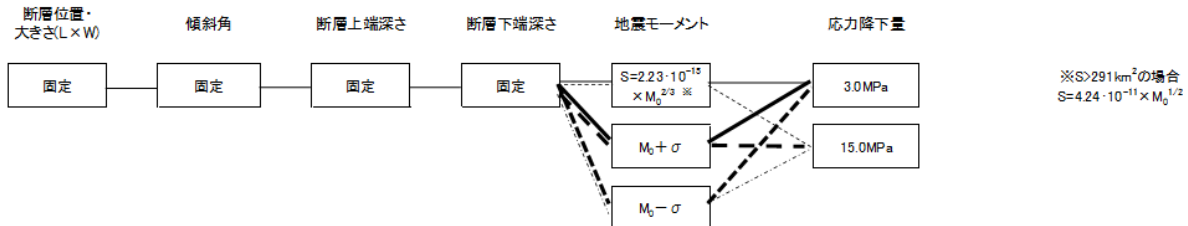
図-19 ロジックとロジックツリーの概念

グループ1:内陸活断層+アスペリティを考慮しない海溝型地震

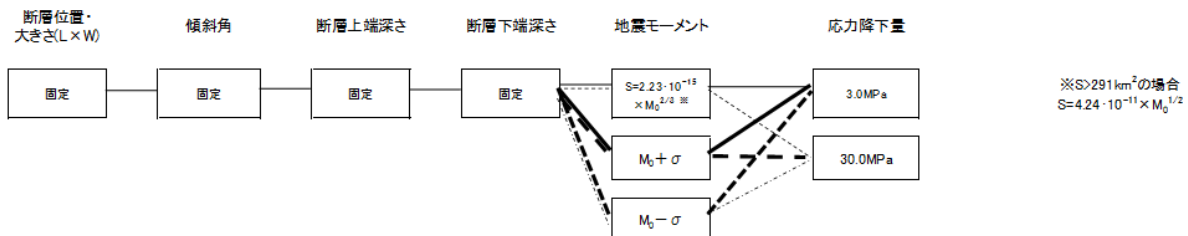
■内陸活断層:6通り



■海溝型プレート間地震(アスペリティを考慮しないもの):6通り

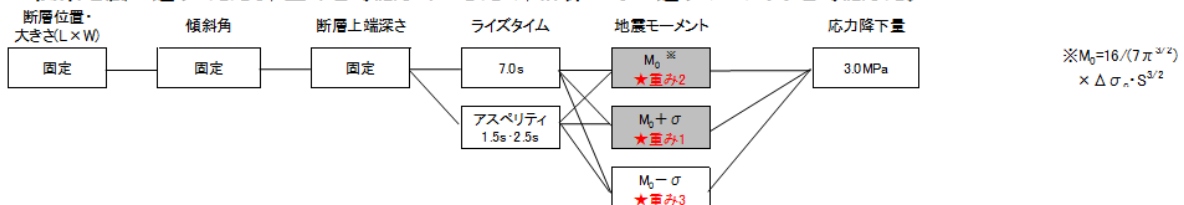


■海溝型プレート内地震(アスペリティを考慮しないもの):6通り

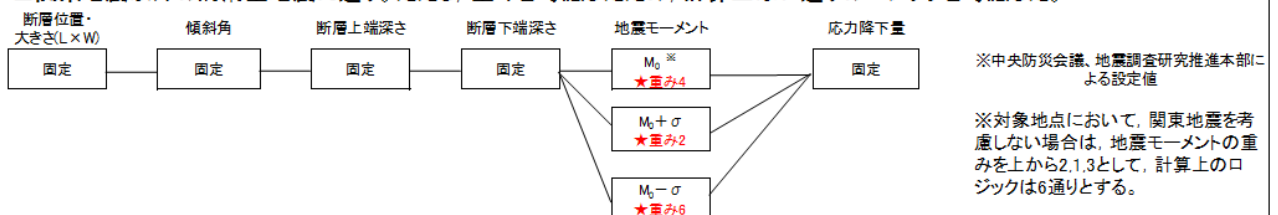


グループ2:アスペリティを考慮する海溝型地震

■関東地震:6通り ただし、重みを考慮しているため、計算上は12通りのロジックを考慮した。



■関東地震以外の海溝型地震:3通り。ただし、重みを考慮したため、計算上は12通りのロジックを考慮した。



グループ3:点震源として考慮する地震

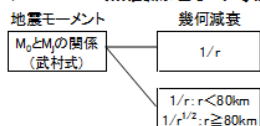


図-20 レベル1地震動を作成する際に用いたロジックツリー（全ての港湾に対して適用）

ープ2は関東地震で6通り、それ以外の海溝型地震で3通り、グループ3は2通りである。

同一グループのロジックは連動しており、例えば海溝型プレート間地震（アスペリティを考慮しないもの）の地震モーメントを $S = 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3}$ 、応力降下量を 15.0MPa として計算する場合は、海溝型プレート内地震（アスペリティを考慮しないもの）の地震モーメントを $S = 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3}$ 、応力降下量を 30.0MPa として計算する。

上述の内容については、図中の同一グループ内の線種を分類することにより表現した。なお、各ロジックツリーの一番上段のロジックに記載されているパラメータは、2.3節にて解説を行ったパラメータである。同一グループ内では、同一線同士の組み合わせで計算を行った。

図-20のグループ2のロジックツリーのうち、関東地震のロジックツリーについて少し詳しく説明する。関東地震

については、文献²⁹⁾の断層面積(130km×70km)を考慮し、これと応力降下量 $\Delta\sigma=3.0\text{MPa}$ から、円形クラックの式²²⁾で地震モーメントを求めたところ、 $M_0=1.07 \times 10^{28}\text{dyne-cm}$ となり、これを標準的なロジックとした。また、これに常用対数標準偏差 $\sigma=0.24$ ²³⁾を適用して（他の地震に対しても同様の σ を用いている）他のロジックを作成した。このようにして得られた地震モーメントから、せん断剛性 $\mu=3.31 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ を仮定してすべり量を求め、さらに2を乗じてアスペリティ部のすべり量を推定した。そして、これをバックスリップで除した値を平均発生間隔とした（このとき傾斜角の補正を行う）。このとき、バックスリップとしては 40mm/y と 24mm/y の2通りの値を考え、得られる平均発生間隔が 100～200 年の範囲に入る方のバックスリップの値を採用した。

その結果、 M_0 のケースでは 40mm/y、 $M_0-\sigma$ のケースで

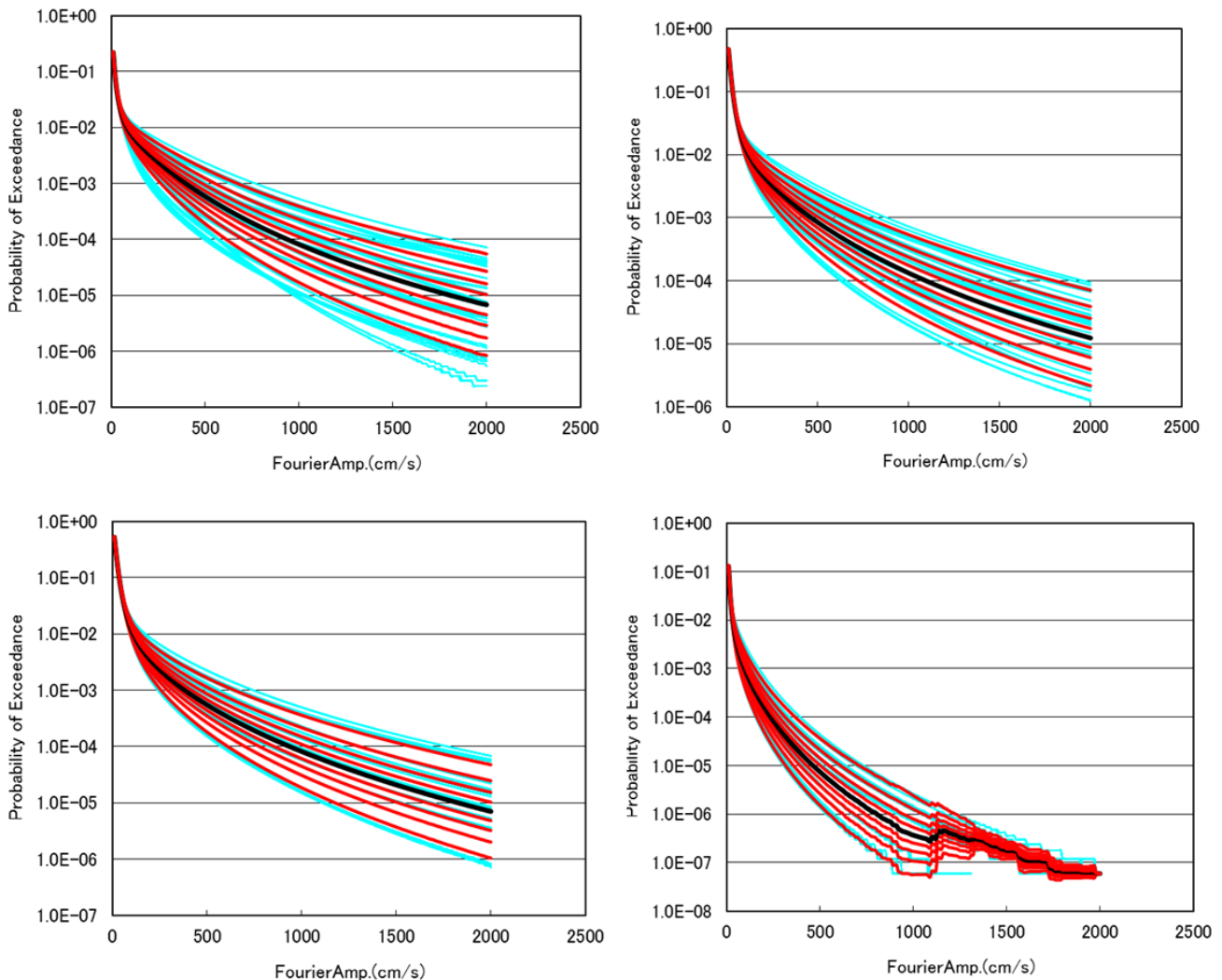


図-21 各ロジックに対応するフーリエ加速度振幅と年超過確率の関係（ハザード曲線）
（横浜港山下地区の場合）

左上：0.5Hz 右上：1.0Hz、左下：2.0Hz、右下：5.0Hz

は 24mm/y が採用されたが、 $M_0+\sigma$ のケースではいずれのバックスリップの値を採用しても平均発生間隔が 100～200 年の範囲に入らなかった。そこで、結果が近い方の 40mm/y を採用した。この結果、 M_0 、 $M_0+\sigma$ 、 $M_0-\sigma$ に対し、平均発生間隔は 162 年、282 年、155 年と算定された。これらの値を付録 B-1 に示している。

また、それぞれのロジックに対しては重みを与えている。平均的な地震モーメント M_0 を用いたロジックに対しては重み 2、標準偏差を加えて $M_0+\sigma$ とした地震モーメントについては重み 1、標準偏差を減じて $M_0-\sigma$ とした地震モーメントについては重み 3 を与えたため、計算上 12 通りのロジックに対して計算を行うことになった。

一方、グループ 2 において、関東地震以外の海溝型地震を考慮する場合は、ロジックは地震モーメントの変化のみの 3 通りとした。ただしこの際、関東地震とそれ以外の地震に対し、グループ内においてロジック数が異なるため、関東地震を考慮する場合に限り、図-20 に示したとおり、 M_0 、 $M_0+\sigma$ 、 $M_0-\sigma$ に対する重みをそれぞれ 4、2、6 とし、計算上のロジック数の調整を行い、グループ内での計算時におけるロジック数の統一を図った。この場合のグループ 2 に関する計算上のロジック数は 12 となる。

また、関東地震を考慮しない場合は、計算上のロジック数は地震モーメントの重みのみを考慮して 6 通りとした。

同様に、グループ 1 においても、グループ内での計算時におけるロジック数の統一を図るため、内陸活断層の応力降下量 2.3MPa に重み 2 を与え、グループ 1 に関する計算上のロジック数を 6 とした。

上記を踏まえると、最終的に用いた計算上のロジック数は、関東地震を考慮する場合は、グループ 1 で 6 通り、グループ 2 で 12 通り、グループ 3 で 2 通りであり、それらを掛け合わせると 144 通りとなる。また、関東地震を考慮しない場合はグループ 2 の組み合わせが 6 通りとなるため、72 通りとなる。

本節における上記の説明と、2.1 節～2.4 節で説明した内容に基づき、フーリエ加速度振幅と年超過確率の関係（ハザード曲線）が多数得られることになる。

横浜港山下地区を対象地点とした場合の、代表的な周波数に対する計算結果を図-21 に示す。図中には、各ロジックに対するフーリエ加速度振幅と年超過確率の関係（ハザード曲線）を示している。この事例では関東地震が考慮されているため、144 通りのロジックに対するハザード曲線が示されている。更にそれらの対数平均を太黒線で示した。

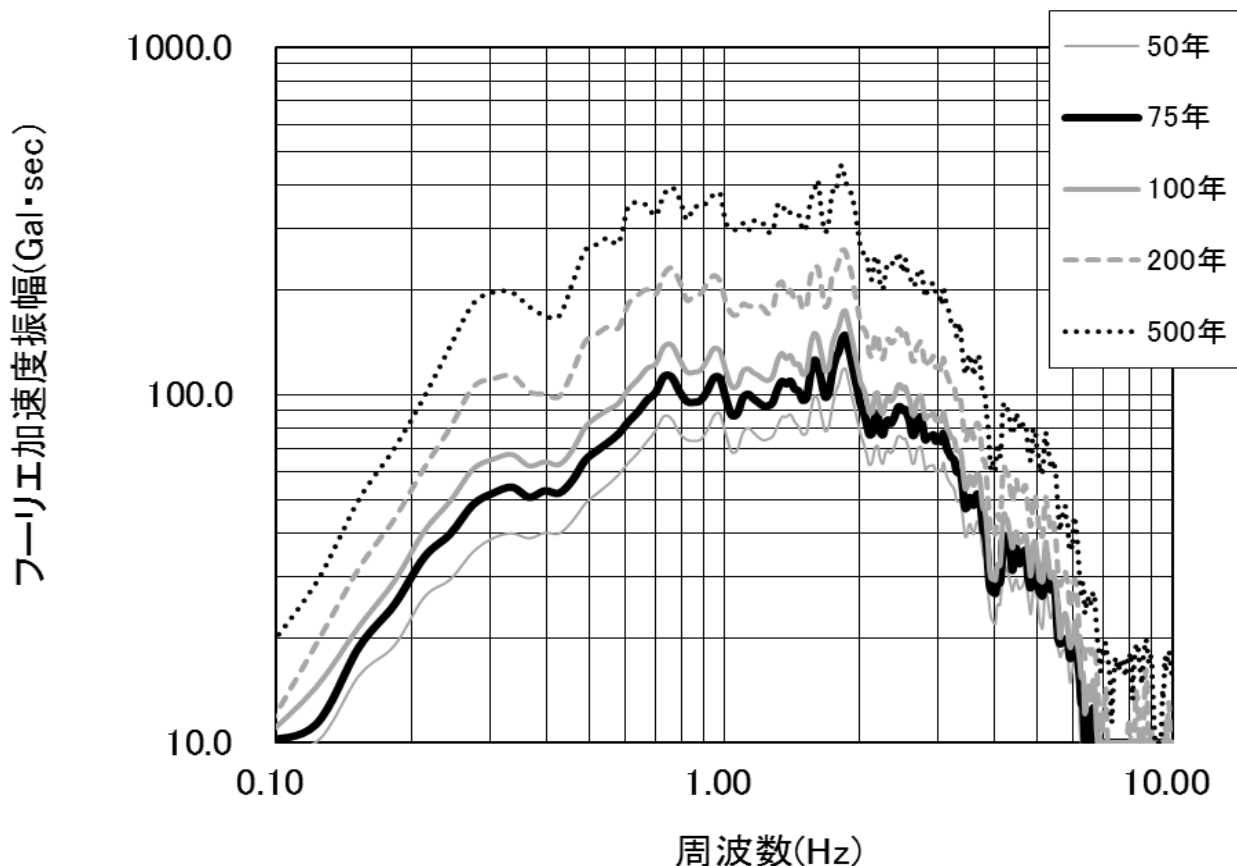


図-22 再現期間別の一様ハザードフーリエスペクトルの一例（横浜港山下地区の場合）

これを“信頼度 50%”のハザード曲線と定義する。ハザード曲線は、各周波数成分で得られることから、信頼度 50% のハザード曲線も周波数ごとに決定される。本稿執筆時点において国総研のホームページで公開しているレベル1地震動波形は、信頼度 50% のもののみである。ただし、この応用として、種々のロジックに対するハザード曲線の平均と分散を計算し、信頼度を 0~100% の間で任意に調整したハザード曲線を得ることも可能である。上記の処理で得られた周波数毎のハザード曲線を用いて、2.1 節の図-7 に相当する図を作成し、さらに図-8 の要領で、年超過確率が 1/75 の断面でスライスすることにより、年超過確率が 1/75 となるフーリエ加速度振幅を周波数毎に決定した。横浜港山下地区の場合を例に、図-21 のグラフから作成したフーリエ加速度振幅と周波数の関係（一様ハザードフーリエスペクトル）を、図-22 に示す。

現在国総研にて整備しているレベル1地震動波形は年超過確率が 1/75 である地震動であるが、図に示すとおり、種々の年超過確率に対し、同様にフーリエ加速度振幅と周波数の関係を得ることも可能である。

上記に示した内容について、図-23 にまとめて整理した。

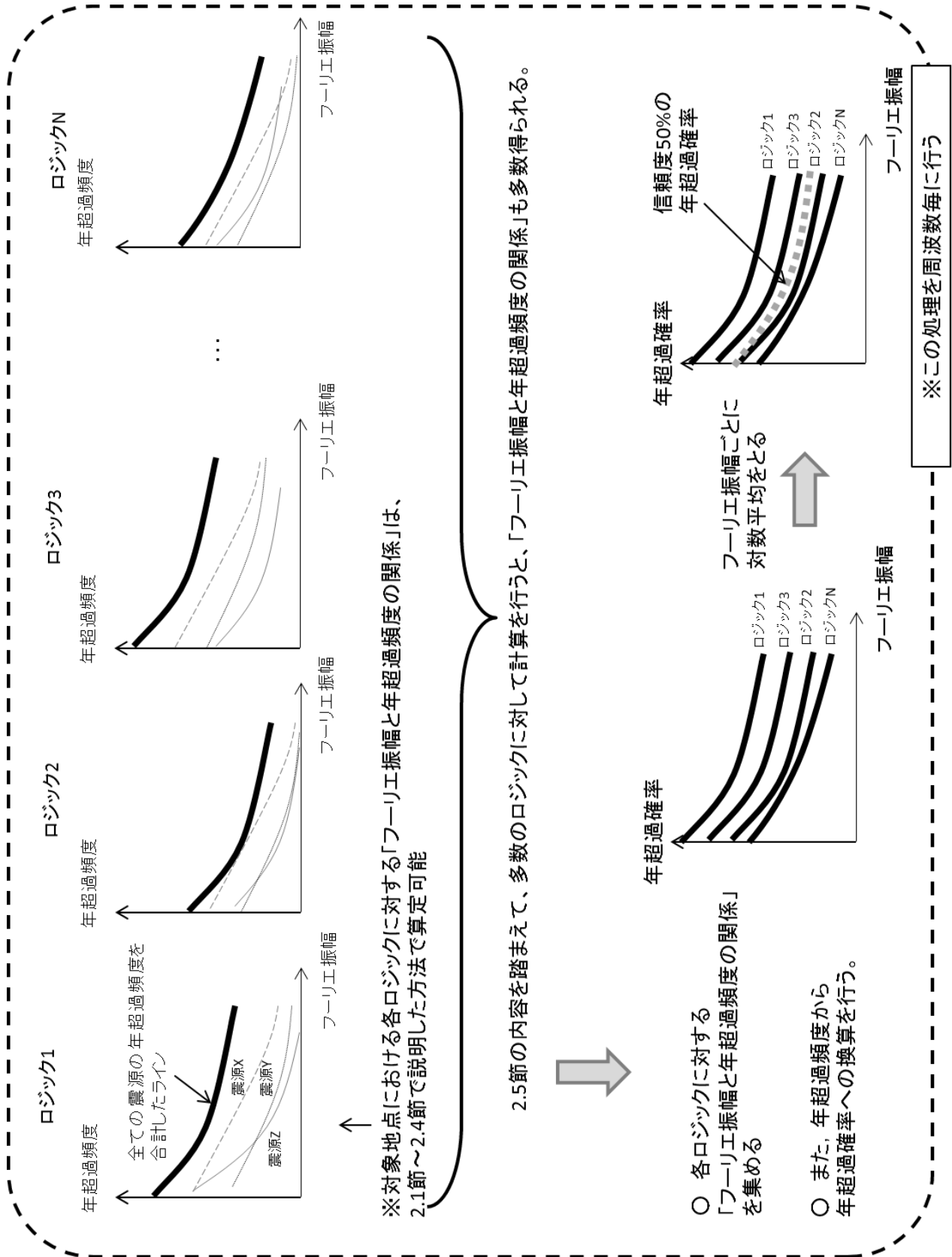


図-23 信頼度 50%のハザード曲線を得るための整理

2.6 貢献度指数とレベル1地震動の時刻歴波形を作成する際に用いるフーリエ位相

(1) 確率論的地震危険度解析により得られたハザード曲線に対する各震源の貢献度指数

上述の手順により、考慮すべき年超過頻度（およびそれに対応する年超過確率）に対するフーリエ加速度振幅を求めることができる。ただし、レベル1地震動は時刻歴波形で与えることとしており、そのためには、このフーリエ加速度振幅に対応するフーリエ位相を選定して与える必要がある。

フーリエ位相の選定について言及する前に、まず、これまで考慮してきた個々の想定地震が、地震危険度解析で得られたハザード曲線にどの程度影響を与えるかを示す指標である“貢献度指数”について説明する。

以下にその算定手順を示す。

手順1)

貢献度指数を求めたい年超過確率を決定し、2.5節で設定した信頼度50%のハザード曲線から、その年超過確率に対応するフーリエ加速度振幅 a_0 を読み取る。例えば、図-22に示した例を用いると、貢献度指数を求めたい年超過確率を1/75と設定した場合、1Hzにおけるフーリエ加速度振幅 a_0 は100(Gal・sec)と読み取ることができる。

次に、そのフーリエ加速度振幅 a_0 に対応する信頼度50%の年超過頻度を $w_{50}(a_0)$ と定義した。 $w_{50}(a_0)$ は信頼度50%のフーリエ振幅と年超過頻度の関係から求めることができる。

手順2)

信頼度50%のフーリエ加速度振幅 a_0 に対応する年超過頻度を震源毎に整理した。これは2.5節で設定したロジックごとに得られるものであることに留意する必要がある。 i 番目のロジックに関して、震源 X に関するフーリエ加速度振幅 a_0 の年超過頻度を $W_{i,X}(a_0)$ と定義した。

手順3)

各ロジックで $W_{i,X}(a_0)$ を求め、これを全て合計（ロジック数であれば、144通りの $W_{i,X}(a_0)$ を合計）したものを、 $w_{50}(a_0)$ で除した。この値が震源 X の貢献度指数となる。ただし、貢献度指数は周波数毎に得られることに注意が必要である。

手順4)

貢献度指数をすべての震源（震源 X , Y , Z ・・・）に対して計算した。その際、貢献度指数を各周波数に対して計

算し、0.5Hzから2.0Hzにおける貢献度指数の算術平均を当該震源に対する最終的な貢献度指数とした。

ここまでの手順を図-24に示す。また、各震源の貢献度指数の値は、算定したい年超過確率の値によって異なる。図-25は整理No.9213（横浜港山下地区）における代表的な周波数における年超過確率と貢献度指数の関係を示したものである。右下図は0.5Hzから2.0Hzまでの貢献度指数に関する平均処理を行ったものである。

図のように、考慮する年超過確率によって、震源ごとの貢献度指数も大きく異なることがわかる。例えば図-25の右下図のように、年超過確率が1/75の場合は「深部地震（＝点震源で評価する地震のうち深部領域で発生する地震）」の貢献度指数が高く、年超過確率が1/1000の場合は「関東地震」の貢献度指数が高くなることがわかる。

以上のように、貢献度指数が大きい震源とは、フーリエ加速度振幅と年超過確率の関係に与える影響が大きい震源、つまり、ハザード曲線に大きな影響を与える震源のことである。ただし、貢献度指数の絶対値に特段の意味はなく、他の震源との相対的な比較のための指標である。

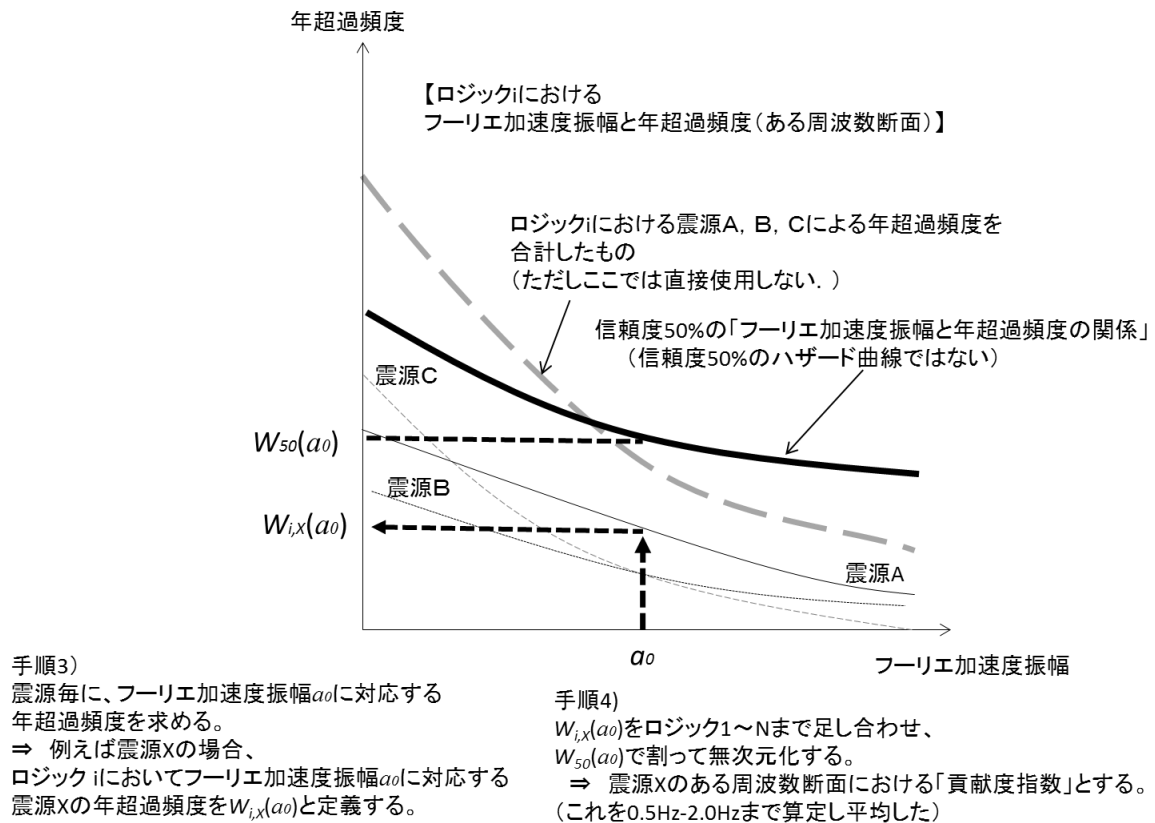
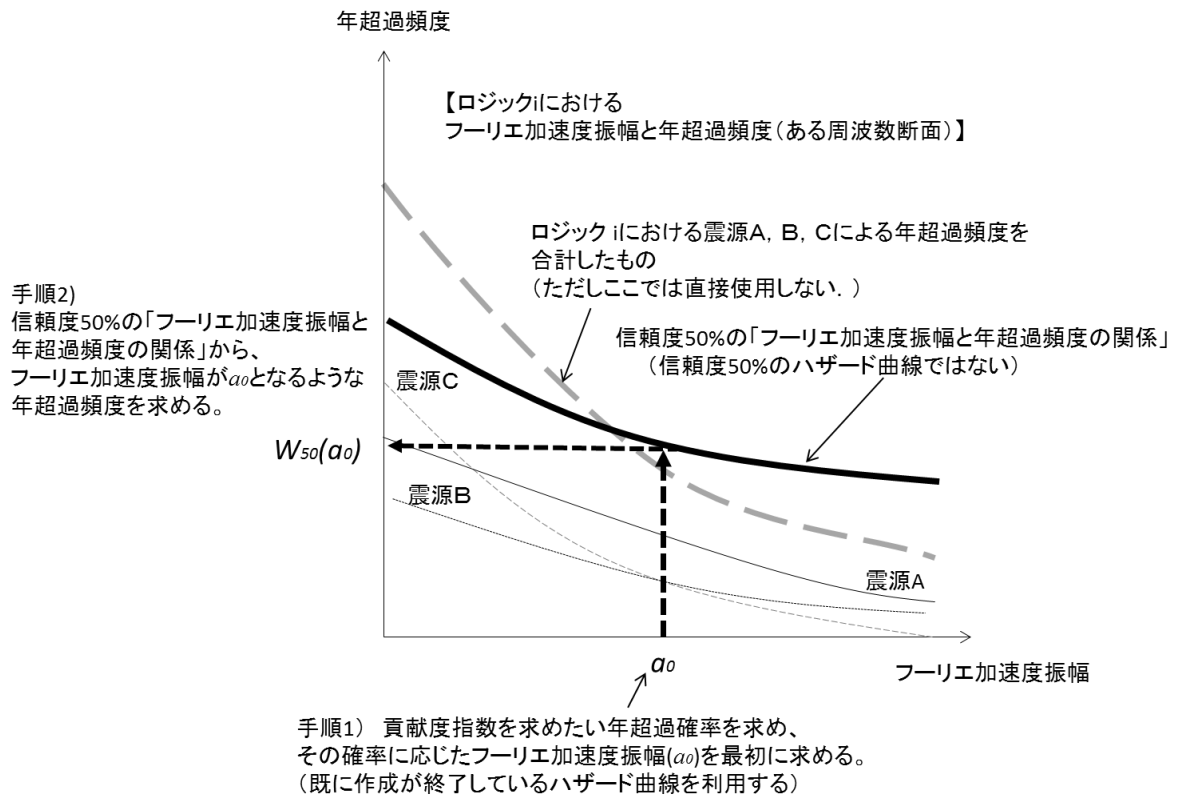


図-24 貢献度指数の算定方法

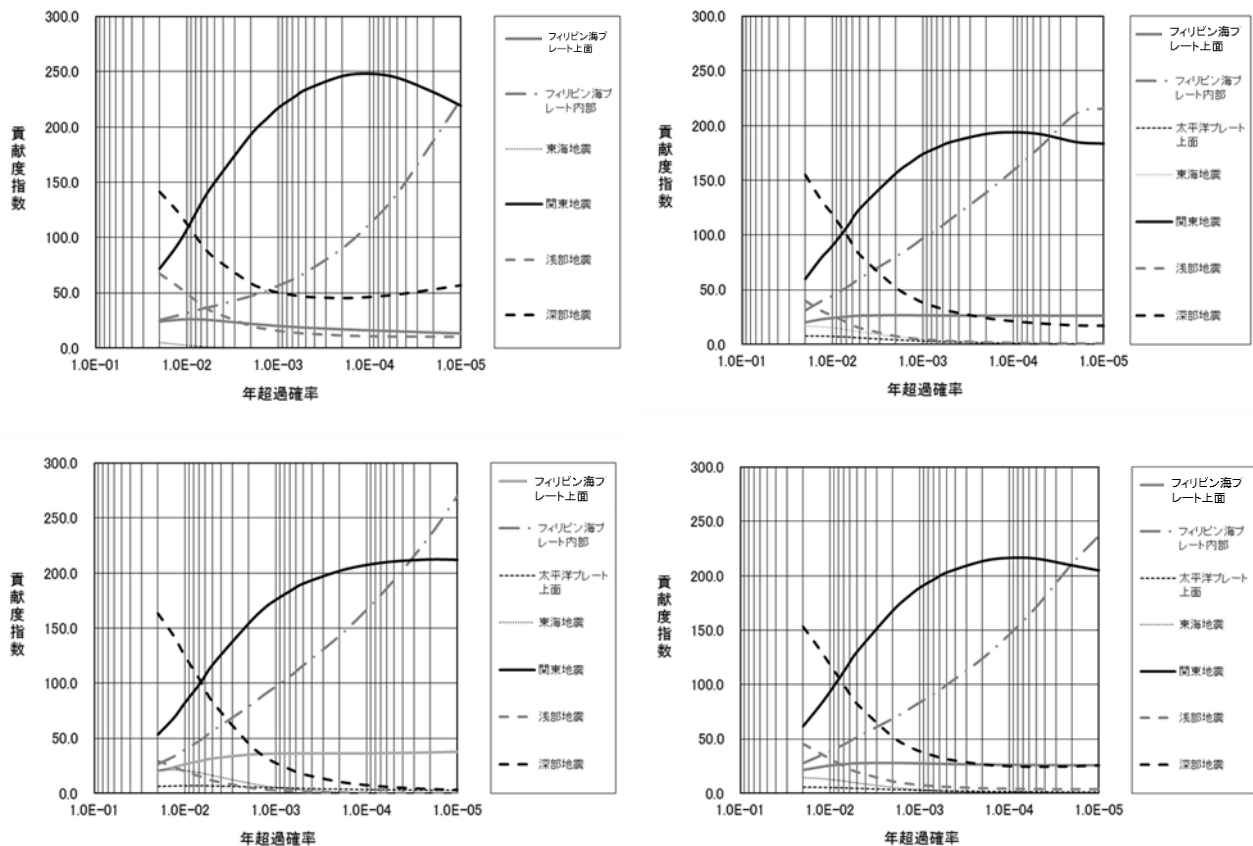


図-25 代表的な周波数における年超過確率と貢献度指数の関係（貢献度指数の大きい震源のみ掲載）

左上：0.5Hz 右上：1.0Hz，左下：2.0Hz，右下：0.5Hz-2.0Hz までの平均値

(2) フーリエ位相の選定

2.5 節で得られたフーリエ加速度振幅を地震動の時刻歴波形に変換するために必要となるフーリエ位相を選定する際は、上記で得られた貢献度指数の高い震源から発生する地震動のフーリエ位相を選択した。ただし、その際の貢献度指数は、0.5Hz から 2.0Hz までの貢献度指数に関する平均処理を行ったものを用いた。

これは、貢献度指数の高い震源を周波数毎に選んだ場合、例えば周波数 1.0Hz においては震源 X が、周波数 2.0Hz では震源 Y が貢献度指数の高い震源として別々に選択される可能性が高く、複数の異なる特性を持つフーリエ位相を混合することになり、因果律を乱すなどの不具合をきたす可能性があるためである。また、この際考慮する周波数は、構造物への影響が大きいと考えられる 0.5Hz から 2.0Hz までの範囲としている。

ここで貢献度指数の高い震源が選定された場合、その後の処理は以下の 2 つに大別される。

① 震源位置等をあらかじめ特定することが可能な地震（活断層，海溝型地震など）が選定された場合

活断層による地震や海溝型地震については、既に対象地点における統計的グリーン関数法を用いた地震波形の計算が終了しており、これらによる震源が貢献度指数の一番高い震源として選定された場合は、その震源から発生した地震動時刻歴をフーリエ変換することによって得られた位相特性を選定した。

しかし、これまでに述べたとおり、同一震源に対しても、各種ばらつきやロジックを考慮して複数の地震動を計算しているため、位相特性も複数の計算結果が得られていることになる。

このため、選定された地震によって得られた位相特性の群遅延時間を算定（位相を角周波数で微分）した上で、それら全ての平均をとり、その平均値に一番近い特性をもつ位相特性を利用する方法を採用した。一番近い特性を探す際には、最小二乗法によって誤差が一番小さくなる位相特性を有するものを選定した。

② 震源位置等をあらかじめ特定することが困難な地震が
選定された場合

このタイプの震源が選択された場合には、2.3 節の地震動の計算方法において述べたように、地震基盤における位相特性やサイト位相特性は、フーリエ加速度振幅を求める際に計算されていない。

このため、平成 19 年の検討では、地震基盤の位相特性は 2000 年鳥取県西部地震の際に取得された位相特性を、サイト位相特性は 2.3 節にて解説したものを便宜上用いた。実際に用いた記録は、KiK-net の強震観測地点である SMNH10 の地中の波形（NS 成分）であり、M7 クラスの地震の震源特性を反映していること、硬質地盤でサイト特性の影響はわずかであることから、この記録を選定した。この位相特性を図-26 に示す。

本稿執筆時点で国総研のホームページ上で公表しているレベル 1 地震動の時刻歴波形は、本章の記載事項に基づいて処理を行った結果である。

巻末付録として、以下の資料について整理を行った。

付録 A-1：レベル 1 地震動の設定地点において考慮した
活断層地震のパラメータリスト

付録 A-2：レベル 1 地震動の設定地点と考慮した活断層
の位置関係図

付録 B-1：レベル 1 地震動の設定地点において考慮した
海溝型地震のパラメータリスト

付録 B-2：レベル 1 地震動の設定地点と考慮した海溝型
地震の位置関係図

付録 C：レベル 1 地震動の各種特性に関するカタログ(B
値モデル，貢献度指数，年超過確率 1/75 のハザ
ード曲面，サイト増幅特性，サイト位相特性)

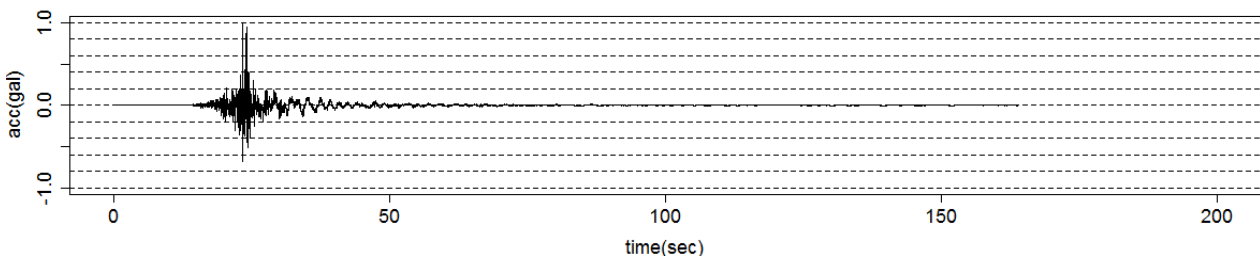


図-26 地震基盤におけるフーリエ位相（点震源の場合）
（位相を加速度振幅 1 の波形として示した）

3. 重要港湾以上の港湾を対象とした工学的基盤におけるレベル1地震動の波形特性と照査用震度

3.1 レベル1地震動に関する波形特性整理に際して用いた指標

本章では、本稿執筆時点で国総研のホームページ上に公開されている工学的基盤におけるレベル1地震動波形の特性について、全国的に整理した結果を示す。なお、対象港湾は、全国の重要港湾以上の港湾（183地区）である。

特性整理を行う際は、工学的基盤におけるレベル1地震動の最大加速度、速度 PSI 値を代表指標とした。以下、特に断りのない限り速度 PSI 値を単に PSI 値として示す。

ここで整理する各種指標は、地震危険度解析に基づいて設定した全国各港におけるレベル1地震動および照査用震度の全体的な傾向を把握することを目的とするものである。

上記の PSI 値は野津らによって定義された指標³⁷⁾である。従前地震動の指標として用いられてきた最大加速度と比べて、地震時における港湾構造物の被災程度との相関が比較的高い指標として用いられているものである。

PSI 値は、地震動の各時刻における速度を2乗した値に対して、時間方向に積分し、さらに平方根をとったものであり、地震波形のエネルギー値に相当するものとみなすことが出来る。 PSI 値($\text{cm/s}^{0.5}$)の定義を定式化すると以下のとおりである。

$$PSI = \sqrt{\int_0^{\infty} \{v(t)\}^2 dt} \quad (19)$$

$v(t)$ は地震動の速度波形の時刻 t における速度を示す。

なお、速度波形を算定する際は、加速度波形に対して強震観測年報^{例えば38)}にて公表されている処理と同様な処理を行った。

3.2 各地域におけるレベル1地震動の波形特性

式(19)を用いて算出した全国のレベル1地震動の工学的基盤面における最大加速度と PSI 値について、本稿執筆時点において国総研ホームページ上に掲載されている港湾毎に、各地方の平均値と共に、以下の表-5～表-12に地方毎に整理して示す。

なお、以下の表中のNo.と港湾（地区）名は現在国総研ホームページ上に掲載しているレベル1地震動のNo.および港湾または地区名にそれぞれ対応している。また、それぞれの表の下部に、参考として各地方の最大加速度と PSI 値の平均値を示した。

表-5 北海道地方における最大加速度と PSI 値

No.	港湾(または地区)名	最大加速度(Gal)	PSI 値($\text{cm/s}^{0.5}$)
9001	稚内港	49.4	26.9
9002	石狩湾新港	34.2	26.5
9003	根室港(根室)	98.1	16.6
9004	釧路港	137.0	47.8
9005	十勝港	331.3	35.9
9006	室蘭港	219.3	26.8
9007	函館港	79.0	41.2
9008	根室港(花咲)	107.7	20.7
9009	留萌港	135.8	9.3
9010	網走港	28.6	12.4
9011	紋別港	241.6	17.9
9013	苫小牧港	147.9	34.1
9014	小樽港	102.0	17.0
北海道地方平均		131.7	25.6

表-6 東北地方における最大加速度と PSI 値

No.	港湾(または地区)名	最大加速度(Gal)	PSI 値($\text{cm/s}^{0.5}$)
9101	むつ小川原港	133.0	29.9
9102	久慈港	210.7	41.8
9103	能代港	70.8	18.1
9104	船川港	222.7	20.2
9105	石巻港	247.6	22.6
9106	八戸港	214.2	40.9
9107	釜石港	86.4	11.8
9109	仙台塩釜港(仙台区)	155.0	23.6
9110	相馬港①(1号埠頭)	164.7	17.3
9111	小名浜港①	401.1	58.5
9112	青森港	88.1	54.0
9113	宮古港	102.6	8.7
9114	大船渡港	109.4	9.2
9115	秋田港	182.8	12.7
9116	酒田港	125.6	52.6
9117	仙台塩釜港(塩釜港区)	179.9	16.9
9118	小名浜港②	502.7	39.4
9119	小名浜港③	211.5	31.2
9120	相馬港②(2, 3号埠頭)	117.8	15.1
9121	宮古港(藤原埠頭)	176.9	30.4
東北地方平均		185.2	27.7

表-7 関東地方における最大加速度と PSI 値

No.	港湾(または地区)名	最大加速度(Gal)	PSI 値($\text{cm/s}^{0.5}$)
9201	日立港	180.5	17.0
9202	大洗港	144.6	23.8
9203	木更津港	149.3	36.7
9205	常陸那珂港	159.2	29.4
9206	鹿島港	246.0	28.5
9207	東京港①	145.8	22.7
9208	川崎港	139.7	31.4
9209	横浜港(山下地区)	175.4	33.5
9210	横須賀港	125.9	17.5
9211	千葉港	122.8	29.7
9212	東京港②	95.0	21.1
9213	東京港③	144.6	26.3
9214	千葉港(葛南港区)	182.2	42.1
9215	横須賀港(久里浜地区)	102.1	36.1
9216	横浜港(標準)	98.0	21.4
9217	横浜港(大黒地区)	158.9	47.3
関東地方平均		148.1	29.0

表-8 北陸・中部地方における最大加速度とPSI値

No.	港湾(または地区)名	最大加速度(Gal)	PSI値(cm/s ^{0.5})
9301	尾鷲港	124.0	10.2
9302	津松阪港	150.7	31.5
9303	直江津港	104.6	13.9
9304	両津港	214.5	32.2
9305	小木港	116.6	7.5
9306	七尾港	72.6	15.3
9307	三河港①	54.5	18.7
9308	名古屋港①	206.7	50.5
9309	清水港①	132.0	37.0
9310	清水港②	221.1	41.0
9311	敦賀港	108.1	17.1
9312	四日市港	108.1	31.3
9313	田子の浦港	192.0	40.8
9314	御前崎港	164.9	22.8
9315	衣浦港	109.4	39.2
9316	新潟港	228.0	26.8
9317	伏木富山港(伏木・新港港区)	117.4	20.8
9318	金沢港(金沢-G周辺)	69.7	13.5
9319	三河港②	95.9	14.8
9320	名古屋港②	151.5	27.2
9321	清水港③	122.7	29.5
9322	金沢港(金沢-G以外)	98.4	15.4
9323	伏木富山港(富山港区)	100.1	21.4
9324	四日市港(霞ヶ浦地区)	112.8	46.8
北陸・中部地方平均		132.3	26.1

表-9 近畿地方における最大加速度とPSI値

No.	港湾(または地区)名	最大加速度(Gal)	PSI値(cm/s ^{0.5})
9401	舞鶴港(前島地区)	380.5	17.0
9402	堺泉北港	98.1	37.5
9403	阪南港	173.0	43.3
9404	姫路港	224.3	30.3
9405	東播磨港	90.3	42.1
9406	日高港	178.7	10.8
9407	神戸港①	247.1	26.3
9408	大阪港①	107.8	32.1
9409	大阪港②	257.3	37.4
9411	和歌山下津港	165.1	38.0
9412	尼崎西宮芦屋港①	127.4	41.4
9413	尼崎西宮芦屋港②	100.6	25.1
9414	大阪港③	108.5	53.6
9415	神戸港②	178.5	33.8
9416	神戸港③	114.7	33.7
9418	神戸港④	100.4	53.9
9419	尼崎西宮芦屋港③	108.5	53.6
9420	和歌山下津港(本港地区)	103.8	29.5
近畿地方平均		149.2	35.5

表-10 中国地方における最大加速度とPSI値

No.	港湾(または地区)名	最大加速度(Gal)	PSI値(cm/s ^{0.5})
9501	岡山港	140.3	19.8
9502	宇野港	213.7	18.9
9503	水島港①	229.5	27.1
9504	福山港	103.6	19.6
9505	尾道糸崎港(K-NET三原)	127.5	9.0
9506	呉港(K-NET呉)	511.3	26.3
9507	鳥取港	107.4	16.8
9508	浜田港	77.6	13.6
9509	三隅港	163.4	14.8
9510	西郷港	118.1	15.7
9511	下関港	111.8	12.0
9512	小野田港	109.5	14.0
9513	宇部港	111.7	14.4
9514	三田尻中関港	113.0	17.4
9515	徳山下松港	188.9	17.8
9516	岩国港(No.1)	312.3	16.5
9517	広島港(五日市地区)	335.9	27.0
9518	境港	192.5	30.1
9519	岩国港(No.2)	712.2	26.0
9520	岩国港(No.3)	408.4	29.6
9521	岡山港(福島地区)	355.4	14.1
9522	呉港(阿賀地区)	416.9	14.0
9523	広島港(宇品地区)	71.5	27.2
9524	広島港(江波地区)	412.9	25.6
9525	水島港②	123.6	14.2
9526	広島港(吉島地区)	281.1	21.5
9527	広島港(船越・矢野地区(区域A))	440.5	30.7
9528	広島港(船越・矢野地区(区域B'))	374.4	21.0
9529	福山港(箕沖地区)	338.2	31.2
9530	広島港(江波北東部)	203.2	12.2
9532	浜田港熱田地区	142.6	7.5
中国地方平均		243.5	19.5

表-11 四国地方における最大加速度とPSI値

No.	港湾(または地区)名	最大加速度(Gal)	PSI値(cm/s ^{0.5})
9601	橘港	152.6	28.3
9602	坂出港①	173.4	33.3
9603	高松港①	125.4	22.5
9604	宇和島港	333.6	24.3
9605	今治港	163.0	27.9
9606	東予港	126.3	37.7
9607	新居浜港	97.6	25.7
9608	三島川之江港	117.9	29.0
9609	須崎港	192.2	17.5
9610	宿毛湾港(池島地区)	246.8	13.2
9611	高知港	192.1	32.9
9612	松山港(松山-G)	295.5	50.7
9613	徳島小松島港(小松島港地区)	566.7	32.8
9614	坂出港②	185.4	22.0
9615	高松港②	170.2	20.4
9617	徳島小松島港(津田地区)	238.2	37.7
9618	徳島小松島港(沖洲地区)	231.3	40.9
四国地方平均		212.2	29.2

表-12 九州・沖縄地方における最大加速度と PSI 値

No.	港湾(または地区)名	最大加速度(Gal)	PSI 値($\text{cm/s}^{0.5}$)
9701	博多港	166.1	14.8
9702	北九州港(響灘地区)(田浦地区)	59.9	10.2
9703	刈田港	73.6	15.2
9704	三池港	88.9	10.8
9705	長崎港	104.7	4.7
9706	佐世保港	69.2	10.5
9707	厳原港	94.4	5.7
9708	郷ノ浦港	122.6	6.0
9709	福江港	28.7	4.7
9710	中津港	85.6	17.8
9711	津久見港	143.1	11.2
9712	佐伯港	132.2	22.6
9713	唐津港	135.6	11.2
9714	伊万里港	41.0	7.3
9715	油津港	131.0	23.5
9716	熊本港	79.6	67.1
9717	八代港	99.3	25.0
9718	三角港	95.6	12.8
9719	川内港	64.0	13.9
9720	西之表港	71.6	8.5
9721	名瀬港	26.1	3.2
9722	運天港	66.5	9.0
9723	金武湾港	44.9	9.2
9725	細島港	366.0	36.9
9726	宮崎港	151.7	23.1
9727	大分港	197.6	25.8
9728	別府港	116.0	46.8
9729	鹿児島港	156.0	30.3
9730	志布志港	150.2	22.5
9731	那覇港	35.3	6.2
9732	中城湾港	44.2	5.5
9733	平良港	44.6	7.3
9734	石垣港(美咲町地区)	42.6	6.5
9735	北九州港(新門司地区)	146.9	6.5
9736	石垣港(新港地区)	47.8	6.0
9737	下関港(前田地区)	248.9	8.0
9738	下関港(長府地区)	248.5	10.7
9739	下関港(新港地区)	90.2	10.6
9740	博多港(アイランドシティ地区)	45.3	6.2
9741	北九州港(新門司沖地区)	104.8	5.1
9742	北九州港(新門司南地区)	139.5	6.1
9743	佐世保港(三浦地区)	135.0	8.0
9744	細島港(白浜地区)	242.1	15.4
9745	大分港(西大分地区)	171.2	32.4
9746	別府港(南部)	185.6	29.0
九州地方平均		114.1	15.1

上表に基づいて、全国の工学的基盤におけるレベル1時刻歴波形の最大加速度と PSI 値に関する頻度分布を算定した結果を図-27、図-28にそれぞれ示す。工学的基盤における最大加速度の全国的な平均値は約160Gal程度、 PSI 値については約 $25\text{cm/s}^{0.5}$ 程度の値となった。

最大加速度の大小自体は、港湾施設の地震時被害の大小とさほど相関関係がないことが知られているため、最大加速度については、あくまで参考程度の指標として解釈する必要がある。上記の183地点のデータを用いて最大加速度と速度 PSI 値の関係を示したものを図-29に示すが、両者の相関は大きくないことがわかる。

図-30は速度 PSI 値の全国的な分布を PSI 値の大小で色分けして示したものである。大局的に見れば、九州、沖縄な

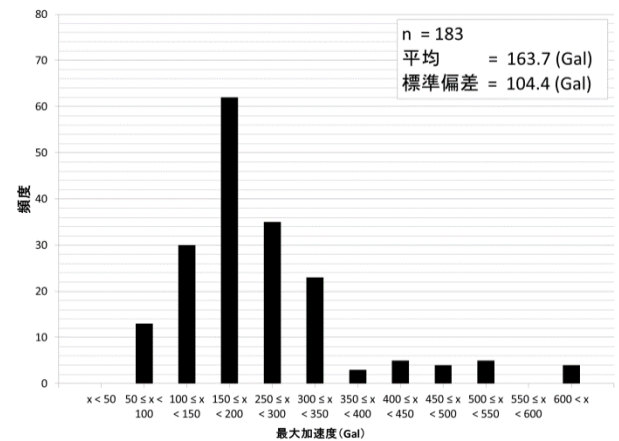


図-27 全国の工学的基盤における最大加速度の頻度分布

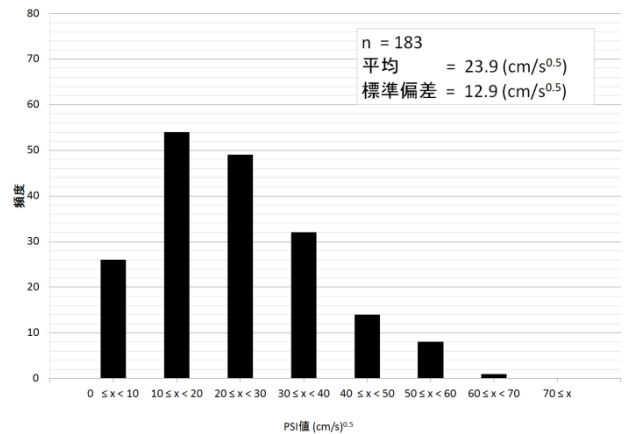


図-28 全国の工学的基盤における速度 PSI 値の頻度分布

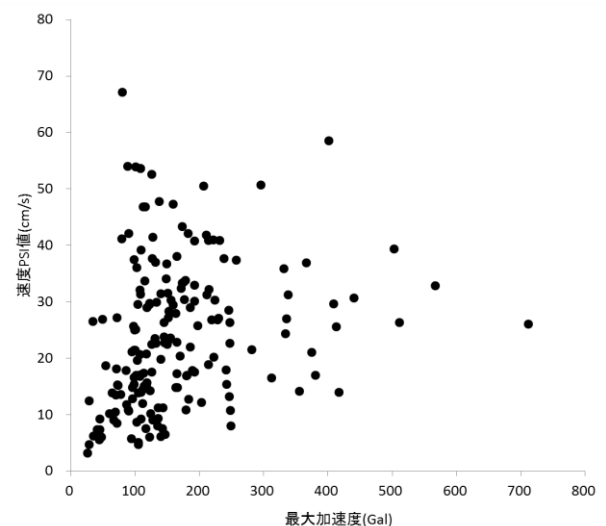


図-29 工学的基盤における最大加速度と速度 PSI 値の関係

どの地域で PSI 値が低めの値となる傾向にあるものの、その大小に地域的な偏りはほとんどないことがわかる。一方で、大阪平野や関東平野など、堆積層の厚さが大きいとさ

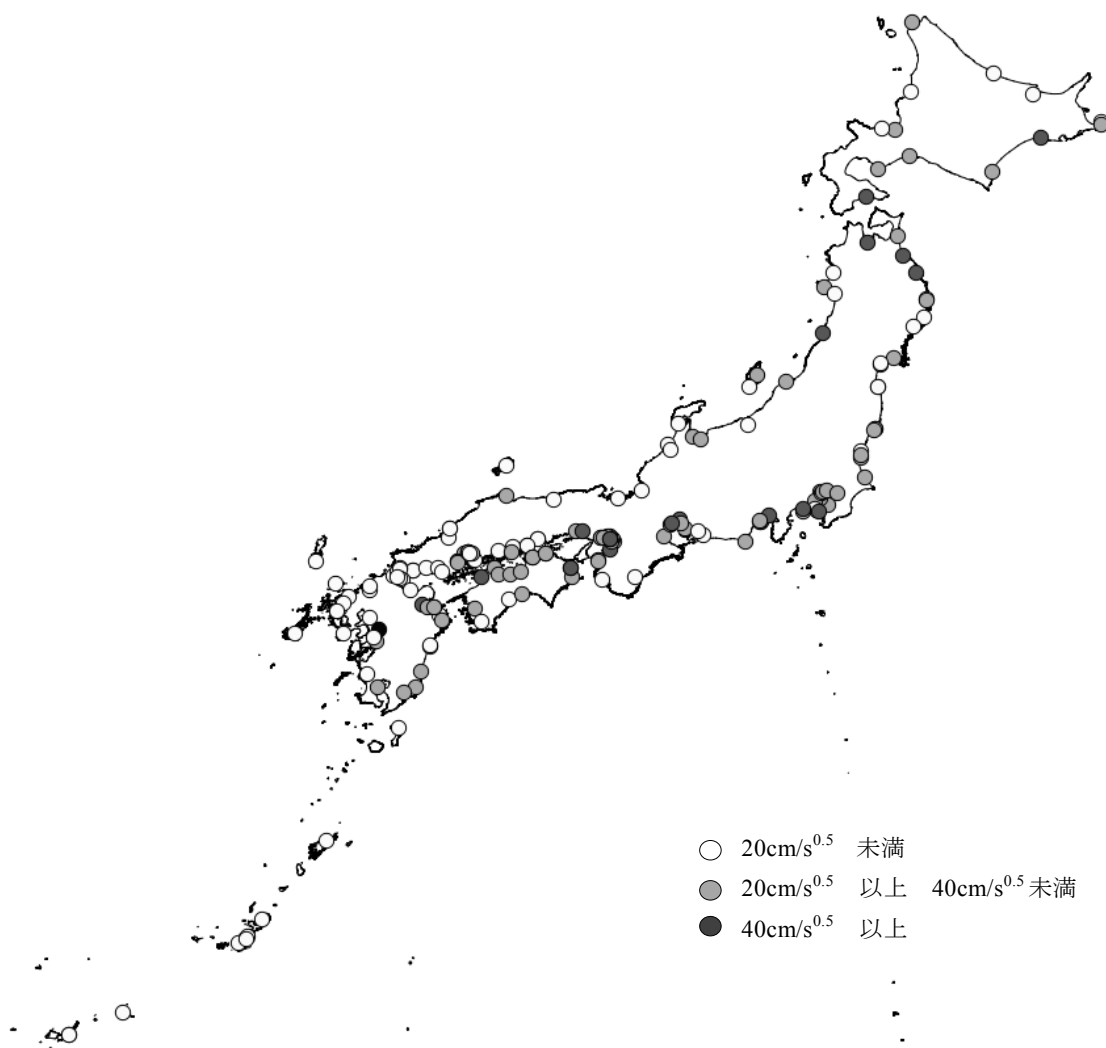


図-30 全国の重要港湾以上における工学的基盤の PSI 値の分布

れている地点に関しては工学的基盤におけるPSI値も大きく算出される傾向となっている。

上述の内容について確認するため、現在国総研HP上で公開されている各港のサイト増幅特性（地震基盤～サイト増幅特性）の0.5-2.0Hzの平均値と工学的基盤におけるPSI値の関係を示したものを以下の図-31に示す。0.5Hz～2.0Hzという周波数帯域は、2.6節の貢献度指数の算定において用いたものと一致させた。

図に示すように、岸壁の変形に大きく影響を与えるとされている周波数帯におけるサイト増幅特性が大きい箇所ほど、レベル1地震動のPSI値も大きく算定される傾向にある。

これについては、元々レベル1地震動を算定する際に、サイト増幅特性の影響を取り入れて算定していることから、上記の周波数帯でのサイト増幅特性が大きい箇所ではレベル1地震動そのものにそれらの周波数成分が多く含ま

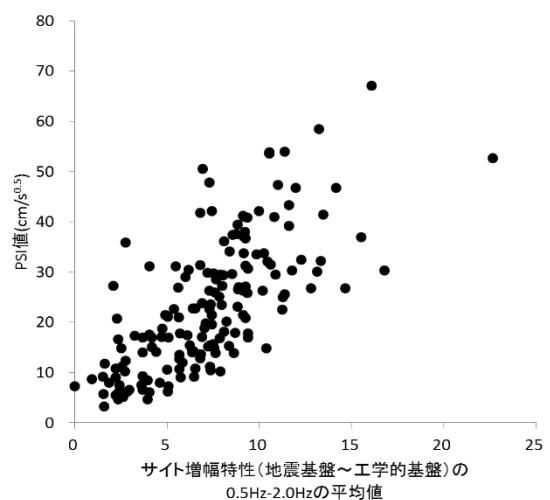


図-31 サイト増幅特性の 0.5Hz-2.0Hz の平均値と PSI 値の関係

れることによることに起因するものと想定される。一方で、比較的高い周波数帯でのサイト増幅特性の影響が大きい地点に関しては、高い周波数成分は速度波形への影響が相対的に小さくなるため、*PSI*値への算定結果には大きく影響しないと考えられる。

3.3 工学的基盤における*PSI*値と照査用震度の関係

最後に、上記で得られた*PSI*値と、現行基準の耐震設計で用いられている岸壁の照査用震度の関係について検討を行った。

現行基準における照査用震度に関する算定方法は、文献1)の通りであるが、重力式係船岸、控え直杭式の矢板式係船岸、控え組杭式の矢板式係船岸に関しては、それぞれ以下に示す照査用震度式として示されている。

重力式係船岸の場合においては、照査用震度式は下記のように表される。

$$k_{hk} = 1.78 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.55} \frac{\alpha_c}{g} + 0.04 \quad (20)$$

ここに、

k_{hk} : 照査用震度の特性値

α_c : 補正加速度最大値 (cm/s²)

g : 重力加速度 (=980cm/s²)

D_a : 許容される係船岸天端における変形量 (=10cm)

D_r : 基準変形量 (=10cm)

上記において、補正加速度最大値 α_c は、工学的基盤におけるレベル1地震動に対する1次元の地震応答計算によって得られる岸壁背後地盤の地表面加速度波形を、以下のフィルターによって波形処理を行い、さらにその波形の最大加速度を継続時間の影響を考慮した係数を乗じることによって得られる。

地表面加速度波形に適用する周波数フィルターは、

$$a(f) = \begin{cases} b & 0 < f \leq 1.0 \\ \frac{b}{1 - \left(\frac{f-1.0}{1/0.34} \right)^2 + 6.8 \left(\frac{f-1.0}{1/0.34} \right) i} & 1.0 < f \end{cases}$$

$$b = 1.05 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.23 \quad (21)$$

ここに、

a : 地震動の周波数特性を勘案したフィルター

f : 周波数 (Hz)

H : 壁高 (m)

H_R : 基準壁高 (=15.0m)

T_b : 背後地盤の初期固有周期 (s)

T_{bR} : 背後地盤の基準初期固有周期 (=0.8s)

T_u : 壁体下の地盤の初期固有周期 (s)

T_{uR} : 壁体下の地盤の基準初期固有周期 (=0.4s)

i : 虚数単位

である。

控え直杭式の矢板式係船岸、控え組杭式の矢板式係船岸に関しては、同様な形式で、以下の式(22)および式(23)のように表される

(控え直杭式における矢板式係船岸の照査用震度)

$$k_{hk} = 1.91 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.69} \frac{\alpha_c}{g} + 0.03 \quad (22)$$

(控え組杭式における矢板式係船岸の照査用震度)

$$k_{hk} = 1.32 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.74} \frac{\alpha_c}{g} + 0.05 \quad (23)$$

地表面加速度に適用する周波数フィルターは、

$$a(f) = \begin{cases} b & 0 < f \leq 1.0 \\ \frac{b}{1 - \left(\frac{f-1.0}{1/0.34} \right)^2 + 11.0 \left(\frac{f-1.0}{1/0.34} \right) i} & 1.0 < f \end{cases}$$

(控え直杭式の場合)

$$b = 2.25 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.96 \quad (24)$$

(控え組杭式の場合)

$$b = 2.25 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.76 \quad (25)$$

式中の係数については、重力式係船岸の場合と同様である。

上記の式の通り、平成19年の「基準・同解説」における係留施設の照査用震度は、岸壁の壁高 H 、背後地盤の固有周期 T_b 、海底面下の地盤の固有周期 T_u 、および許容変形量 D_a が支配的なパラメータとなっていることから、レベル1地震動の特性と照査用震度の関係を考慮する場合は、工学的基盤における時刻歴波形の他に、岸壁の壁高や地盤の固有周期等を考慮して検討を実施する必要がある。

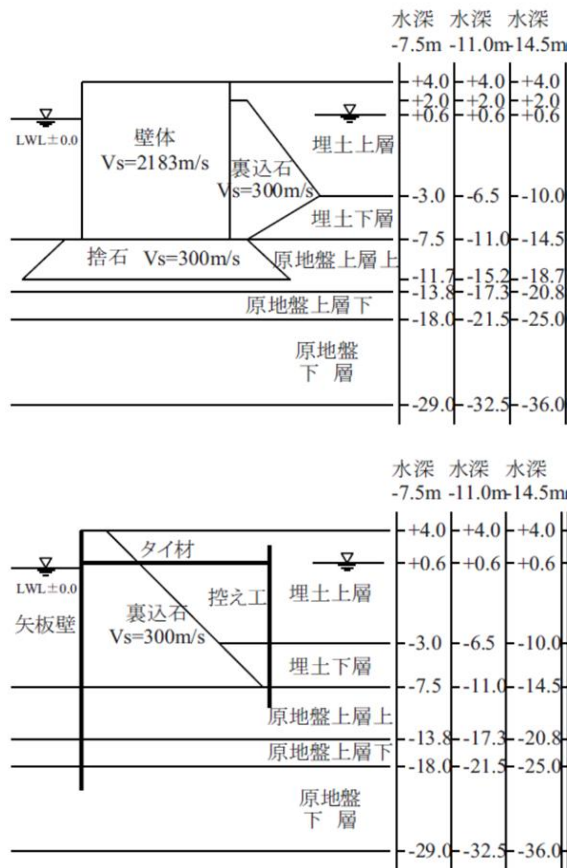


図-32 検討に用いた仮想断面
(文献³⁹⁾より抜粋)

上：重力式岸壁 下：矢板式岸壁

それらの組み合わせに関しては多数考えられるが、ここでは便宜的に安田ら³⁹⁾が行った検討を参考に、背後地盤 T_b の固有周期を0.8secと1.2secとした2パターン、岸壁の壁高を7.5m, 11.0m, 14.5mの3種類、岸壁の構造を重力式岸壁および矢板式岸壁（控え直杭式および控え組杭式）とした場合について検討を行った。検討に用いた仮想断面を図-32に示す。

なお、文献³⁹⁾によると、背後地盤の固有周期については、前者がやや締まった地盤を、後者が軟弱地盤として想定し、当該固有周期になるように地盤物性を調整している。また、地盤は全て砂地盤と仮定している。以下では、この仮想断面に対して、工学的基盤の波形を183ケース変化させた場合の重力式岸壁と矢板式岸壁の照査用震度について比較を行った。なお、上述の通り矢板式岸壁については、控え直杭式と控え組杭式の両方について算定を行った。

この際、地表面加速度波形を算定する際に工学的基盤波形に対して1次元の地震応答解析を実施する必要があるが、ここではFLIP⁴⁰⁾を用いた。用いたパラメータは全て文献³⁹⁾

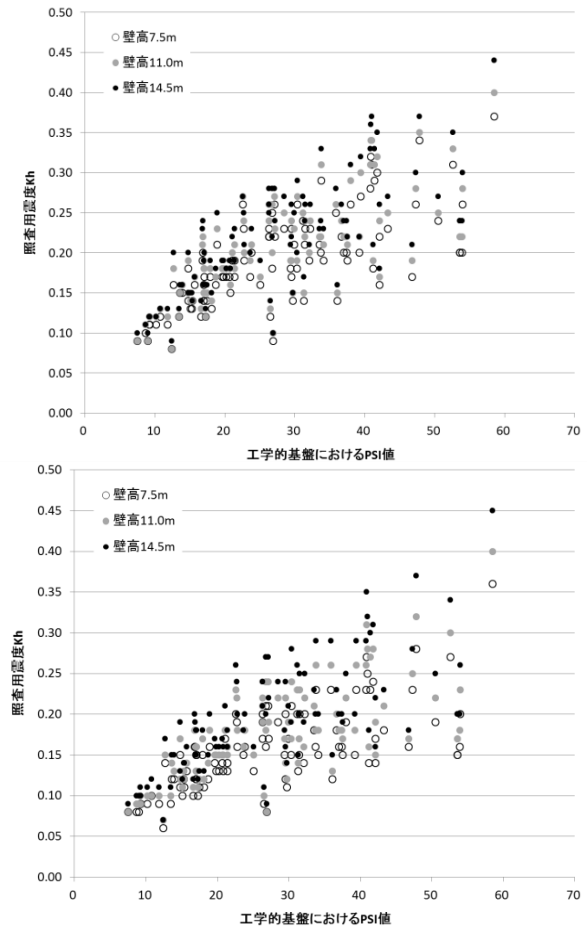


図-33 工学的基盤における PSI 値と
重力式岸壁における照査用震度

上：背後地盤の固有周期 0.8sec

下：背後地盤の固有周期 1.2sec

に示されているものを利用した。ただし、液状化は考慮していない。また、照査用震度算定にあたって、重力式岸壁の許容変形量 Da は10cm、矢板式岸壁については Da を15cmとして算定した。

図-33～図-35に、全国の港湾の工学的基盤のPSI値と上記の仮定を用いて算定した照査用震度の関係を示す。

図のように、各構造形式で照査用震度の算定式が異なるため、算出された照査用震度の値は当然異なるが、工学的基盤におけるPSI値と照査用震度の関係には一定の相関があることがわかる。

各図において、壁高が大きいものほど照査用震度が大きくなっているが、これは現行基準の照査用震度算定式が、壁高が高いものほど岸壁の変形が大きくなるということ踏まえて設定されているためである。また、背後地盤の固有周期の影響については、固有周期が大きくなる、つまり、軟弱な地盤ほど壁高の影響を受けやすくなっていることが図から読み取れる。

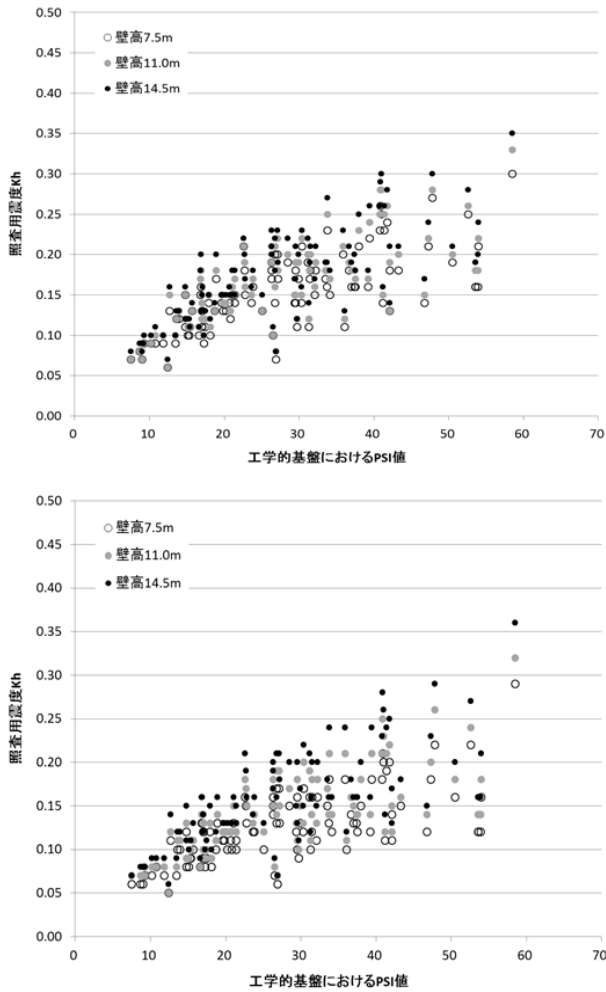


図-34 工学的基盤における PSI 値と矢板式岸壁
 (控え直杭式)における照査用震度
 上：背後地盤の固有周期0.8sec
 下：背後地盤の固有周期1.2sec

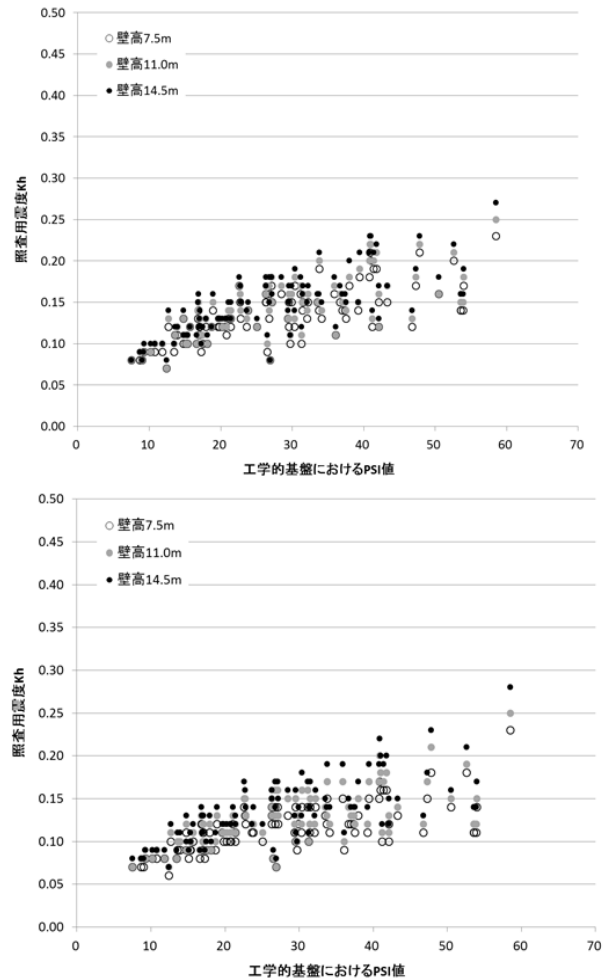


図-35 工学的基盤における PSI 値と矢板式岸壁
 (控え組杭式)における照査用震度
 上：背後地盤の固有周期0.8sec
 下：背後地盤の固有周期1.2sec

実際の設計においては、壁高や背後地盤の固有周期が種々に変動するため、この図のみで全てのパターンを網羅したことにはならないものの、上記の検討から、工学的基盤の PSI 値と岸壁の構造形式と壁高、および背後地盤の概ねの特徴を用いて、施設の設計対象地点において設定すべき照査用震度のレンジを把握するための判断材料となり得ると考えられる。

なお、上の図-33～図-35に関して、現行の基準・同解説においては照査用震度が0.25を超える場合はその値を0.25と、また、照査用深度が0.05を下回る場合はその値を0.05として設定することとして示しているが、図中においてはその操作は行っていない。

4. おわりに

本稿では、地震危険度解析に基づく確率論的時刻歴波形として設定されているレベル1地震動について、平成19年の検討時点における設定過程について、極力丁寧に、かつ体系的な解説を試みた。さらに、現在設定されている全国の183港湾または地区における地震動の特徴を整理した結果を示し、照査用震度と工学的基盤における PSI 値との関連性について基礎的な検討を行った。

また、付録資料として、各港湾の地震動設定の際に利用した入力情報および各種波形特性をデータ一覧として整理した。

本稿がレベル1地震動の作成方法に対して理解を深めていただくための、また、耐震設計手法のさらなる高度化に対する一助になれば幸いである。

謝辞

本資料をとりまとめるにあたり、(株)ニュージェックの山田雅行氏には、関連する既往文献等に関する詳細な解説や、図や文章等に関する表現について数多くのご指摘を頂く等、多大なるご貢献をいただいた。また、図面の作成については港湾施設研究室非常勤職員の海老沼京子氏に協力頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 2) 長尾毅・山田雅行・野津厚：フーリエ加速度振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析，土木学会論文集，No.801，I-73，pp.141-158，2005.
- 3) 長尾毅・山田雅行・野津厚：港湾構造物のレベル1地震動～関東地方～，海洋開発論文集，第20巻，pp.137-142，2004.
- 4) 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室HP，<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>.
- 5) ウィキペディア：ポアソン分布，<http://ja.wikipedia.org>.
- 6) 活断層研究会編：[新編]日本の活断層—分布図と資料，東京大学出版会，1991.
- 7) 中田高，今泉俊文編：活断層詳細デジタルマップ，東京大学出版会，2002.
- 8) 地震調査研究推進本部：主要活断層帯の長期評価，http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_danso.htm.
- 9) 産業技術総合研究所：活断層データベース，https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html.
- 10) 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，分冊1，確率論的地震動

予測地図の説明，2002，

http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar_yosokuchizu/.

- 11) 藤原広行，河合伸一，青井真，功刀卓，奥村俊彦，石井透，早川譲，森川信之，小林京子，大井昌弘，先名重樹，奥村直子：全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討，防災科学技術研究所資料，No.275，2005.
- 12) 地震調査研究推進本部：警固断層帯（南東部）の地震を想定した強震動評価について，
http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/index.htm.
- 13) 地震調査研究推進本部：中央構造線断層帯（金剛山地東縁—和泉山脈南縁）の地震を想定した強震動評価について，http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05jul_chuokozosen/index.htm.
- 14) 萩原尊禮編：日本列島の地震—地震工学と地震地体構造，鹿島出版会，1991.
- 15) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，地震2，Vol.28，pp.269-284，1975.
- 16) 宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震及び被害地震の表，1885-1980年，地震研究所彙報，Vol.57，1982.
- 17) 気象庁ホームページ.
- 18) 宇津徳治：地震学（第3版），共立出版，2001.
- 19) 山田雅行：地域地震環境に基づいた時刻歴波形を算定する確率論的地震ハザード解析手法に関する研究，鳥取大学学位論文，2011.
- 20) 野津厚，長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，2007.
- 21) Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, Vol.70, pp.59-80, 1999.
- 22) Esherbey, J.D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A241, pp.376-396, 1957.
- 23) 入倉孝次郎，三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測，地学雑誌，Vol.110，pp.849-875，2001.
- 24) 入倉孝次郎，香川敬生，関口春子：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良，日本地震学会講演予稿集，No.2，B25，1997.
- 25) 地震調査研究推進本部地震調査委員会強震動評価部会：2003年十勝沖地震の観測記録を利用した強震動予測手法の検証について，2004，<http://www.jishin.go.jp/main/>

- kyoshindo/04dec_tokachi/index.htm.
- 26) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：三陸沖北部の地震を想定した強震動評価について，2004，
http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/04may_sanrikuoki/index.htm.
- 27) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：宮城県沖地震を想定した強震動評価（一部修正版）について，2005，
http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05dec_miyagi/index.htm.
- 28) 野津厚，菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—内陸活断層地震および海溝型地震への適用性の検討—，港湾空港技術研究所資料，No.1120，2006.
- 29) Wald, D.J. and Somerville, P.G.: Variable-slip rupture model of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake: geodetic and body-waveform analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.85, pp.159-177, 1995.
- 30) 中央防災会議事務局：中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」（第7回）図表集，2001，
<http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/7/pdf/7-02.pdf>.
- 31) 中央防災会議事務局：中央防災会議「東南海，南海地震等に関する専門調査会」（第7回）図表集，2002，
http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/7/pdf/siryou2-1.pdf.
- 32) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：日向灘の地震を想定した強震動評価について，2005，
http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05sep_hyuganada/index.htm.
- 33) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係，地震2，Vol.43，pp.257-265，1990.
- 34) Mckay, R.L., Conover, W.J. and Beckman, R.J.: A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, Technometrics, Vol.21, pp.239-245, 1979.
- 35) 山田雅行，先名重樹，藤原広行：強震動予測レシピに基づく予測結果のバラツキ評価の検討～震源パラメータのバラツキについて～，日本地震工学会論文集，第7巻，第1号，pp.43-60，2007.
- 36) International Organization for Standardization: ISO23469, Basis for design of structures – Seismic actions for designing geotechnical works, 2005.
- 37) 野津厚，若井淳，長坂陽介：港湾地域強震観測年報（2012），港湾空港技術研究所資料 No.1283,2014
- 38) 野津厚，井合進：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察，第28回関東支部技術研究発表会講演概要集，土木学会関東支部，2001.
- 39) 安田将人，長尾毅：液状化を考慮した岸壁残留変形量の簡易評価法の提案，国土技術政策総合研究所資料 No.553，2009.
- 40) 井合進，松永康男，亀岡知弘：Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility，港湾技術研究所報告 第29巻 第4号，pp.27～56，1990.