

地震動のエネルギー指標の活用法に関する研究

平井 俊之

目 次

1. 序論	1 -
1.1. 概説	1 -
1.2. 本研究の背景	2 -
1.3. 本研究の目的と構成	4 -
1.4. 参考文献	6 -
2. 地震動の強さを表す指標としての地震動エネルギーの提案	7 -
2.1. 地震動のエネルギーに関する既往の研究	7 -
2.2. 本研究における地震動エネルギーの定義	10 -
2.3. 参考文献	13 -
3. 地震動エネルギーの距離減衰等の特性	14 -
3.1. はじめに	14 -
3.2. 距離減衰式に関する既往の研究	15 -
3.3. 地震動エネルギーの距離減衰式	16 -
3.3.1. 観測データ	16 -
3.3.2. 回帰分析	17 -
3.3.3. 地震動の継続時間	20 -
3.3.4. 他の指標の距離減衰特性との比較	21 -
3.4. 地震動エネルギーの周波数分布	28 -
3.4.1. ウェーブレット変換	28 -
3.4.2. 地震動エネルギーの周波数特性	31 -
3.5. 結論	37 -
3.6. 参考文献	38 -
4. 地震動エネルギーの保存則	40 -
4.1. はじめに	40 -
4.2. 地震動エネルギーに関する検討	41 -
4.2.1. 半無限水平2層地盤	42 -
4.2.2. 自由表面を有する水平2層地盤	43 -
4.3. 新たな保存量に関する検討	48 -
4.3.1. 自由表面を有する水平多層地盤	48 -
4.3.2. 数値解析による検討	51 -
4.4. 結論	56 -
4.5. 参考文献	57 -
5. 地震動エネルギーの地震工学における実務への活用	58 -
5.1. はじめに	58 -
5.2. 地震動予測結果の妥当性評価への活用	60 -
5.2.1. 既往の研究における地震動予測結果の妥当性評価	60 -

5.2.2. 想定断層モデルに対する地震動予測結果についての検討	- 61 -
5.2.3. 位相特性のばらつきの地震動予測結果への影響	- 67 -
5.2.4. 地震の規模の違いの地震動予測結果への影響	- 70 -
5.2.5. 地震動予測時の地盤の影響	- 75 -
5.3. 建造物の被害推定への活用	- 78 -
5.3.1.1 自由度系の応答解析	- 78 -
5.3.2. 地震動の強さを表す指標と塑性率や塑性エネルギーとの関係	- 81 -
5.4. 結論	- 87 -
5.5. 参考文献	- 89 -
6. 結論	- 91 -

1. 序論

1.1. 概説

土木構造物の設計が仕様設計から性能設計へと移りつつある中で、外力としての地震動についても、将来発生が予測される地震動を合理的に評価するための研究がなされている。耐震設計の実務においても、1995年兵庫県南部地震以降、設計対象地点における地震外力を、断層モデルを考慮し、経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法等の手法を用いて、地震波形として予測することが行われつつある。予測波形の妥当性を評価するために、最大加速度値や最大速度値等の指標が距離減衰式等と整合するかどうか調べられているが、想定する地震の断層位置や断層モデルに不確定要素があり、また地震動予測手法で用いるパラメータの設定にはいくつかの方法があるため、これらの指標の予測値には大きなばらつきが生じることが知られており、地震動予測結果の妥当性を評価することは容易ではない。

また、地方自治体等において地域防災計画を策定するために、地震被害想定が行われている。地震被害想定では、数多くの施設に対して地震時の被害を想定するため、地震動波形を用いて一つ一つの構造物の動的応答を求めるのではなく、地震動の強さを表す指標の大きさと構造物の被害との関係を過去の被災事例から求め、その指標によって構造物の被害を予測している。地震被害想定においてよく用いられる指標は、計測震度や最大加速度値、応答スペクトル等である。

これらの指標は確かに地震動の強さの一面を表しているが、時刻歴波形としての地震動の特徴を表すためには、地震動継続時間や位相特性等も考慮する必要がある。また、最大加速度値や最大速度値よりも、エネルギー的な指標の方がより実被害との整合性が高いとの指摘もある。そこで本研究では、地震動のエネルギー指標に着目し、地震工学における実務への活用について検討した。地震波の伝播に伴うエネルギーの流れの概念は古くからあり、いくつかの研究がなされているが、エネルギー量のばらつきに着目した研究はそれほど多くない。本研究では、まず既往の強震観測記録から地震動エネルギーの距離減衰特性を求めた。次に、地盤内を伝播する地震動のエネルギーの量が保存されるかどうかについて検討を行った。さらに、地震動エネルギー指標の、地震動予測結果の妥当性評価への活用や構造物の被害推定への活用について検討した。

1.2. 本研究の背景

日本のように大規模地震が頻発する国においては、構造物の設計断面が耐震設計によって決まるケースが多い。耐震設計による断面を決める大きな要因の一つは、外力である入力地震動である。よって、耐震設計に用いるための入力地震動を合理的に予測することは重要である。入力地震動を適切に設定できれば、構造物が目標とする耐震性能を確保するための設計の精度を向上させることができる。今後少子高齢化に伴い人口減少が予想され、社会資本整備等のための建設投資の減少が見込まれる中、過大設計を改善することにより、設計断面を縮小し、建設コストの低減に直結させることができる。また、過小設計を改善することで地震によって構造物が被災することを避けることができる。すなわち、過不足ない合理的な入力地震動の設定を行うことにより、建設コスト及び維持管理コストの縮減が可能であると考えられる。

構造物を設計する際に想定される地震動は、構造物の供用期間中におけるリスク評価を行って設定するのが理想的であるが、活断層の活動は数千年～数万年単位とされているのに対して、人類が地震の揺れの記録を始めてから百数十年しか経っていないため、大規模地震に関する情報はまだ十分に蓄積されていない。しかし、一般に構造物の供用期間として想定される数十年単位であれば地震危険度の評価が可能である。そこで現時点では、構造物の供用期間中に1回程度遭遇する再現期間をもつ地震動の強さを確率論的に評価すると共に、構造物の建設地点において将来起こるであろう最大規模の地震の強さを確定論的に評価して設計に用いられている。そして耐震設計では、地震動の強さに応じた性能(被災の程度の許容値)を確保することを目指して、構造物の部材断面や構造物基礎の必要強度等が決められる。

断層破壊の進展に関する研究¹⁾、震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性に関する研究^{2), 3)}やそれらの地震動予測への適用に関する研究⁴⁾等によって、地震動予測手法は大きく発展した。差分法⁵⁾等の理論的手法や経験的グリーン関数法⁶⁾、統計的グリーン関数法⁷⁾等の半経験的手法、あるいはこれらを組み合わせた手法⁸⁾等を用いることにより、過去に生じた大規模地震については、時刻歴の地震観測記録をほぼ再現することが可能となっている⁹⁾。1995年兵庫県南部地震以降、土木学会提言¹⁰⁾をきっかけに、レベル1地震動やレベル2地震動の考え方が明確になり、水道施設耐震工法指針・解説¹¹⁾(2009年)、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹²⁾(2007年)、大規模地震の対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説¹³⁾(2005年)等、近年改訂された各種構造物の技術基準類には、上記のような新しい地震工学的発展が反映されている。これらの基準類には、各地点ごとに、想定される地震動の特性を考慮した上で、入力地震動を時刻歴波形として予測する内容が記載されている。水道施設耐震工法指針・解説では、「レベル1地震動及びレベル2地震動は、原則として、建設地点周辺の地震活動度、震源特性、震源から建設地点までの伝播・増幅特性等を考慮し、適切に設定する」となっており、さらに、「レベル1地震動及びレベル2地震動は、時刻歴加速度波形又は応答スペクトルで表現する」と書かれている。港湾の施設の技術上の基準・同解説では、「レベル2地震動については、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」とある。大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説には、「ダムの耐震性能の照査には、想定地震によってダム地点において発生するものと推定される地震動の加速度時刻歴波形を用いることを基本とする」と記述されている。しかし、構造物の耐震設計に用いる入力地震動は、将来発生が予測される地震に対してのものであり、破壊開始点やアスペリティの分布等、震源断層における不確定性等があるため、予測結果にはばらつきが生じる。また、これらの地震動予測手法が多くのパラメータを必要とし、パラメータの設定にはいくつかの方法がある。そのため、予測された地震動がばらつきの範囲内で妥当かどうかを評価することが必要になる。

地震動の特徴を表す指標として一般的に考えられるのは、最大加速度値、最大速度値、計測震度、応答スペクトル、フーリエ振幅スペクトル、SI 値等の地震動の強さを表す量や継続時間、エンベロープ、群遅延時間等の地震動の位相を表す量である。予測された地震動が妥当かどうかを判断するためには、理論的な値と比較することと、これまでの観測記録と比較することが考えられる。理論的に導出可能となるのは、震源断層や地下構造が単純な場合に限定されており、現実的にはこれまでの観測記録と比較することが行われる。上記の指標のうち、よく用いられるのは、最大加速度値や最大速度値である。最大加速度値は設計震度との関連性から外力の強さの指標としてわかりやすい。また、最大加速度値や最大速度値については、数多くの距離減衰式に関する研究がある¹⁴⁾。したがって、これまでの多くの場合、予測波形について、最大加速度値や最大速度値を距離減衰式から得られた値と比較することにより妥当性の判断がされていると考えられる。

また、各地方自治体は、災害対策基本法に基づいて、大地震時における住民の避難や食料・生活必需品の備蓄等に関する地域防災計画を策定している。防災計画を策定するためには、まずその地域で発生が懸念される地震を想定し、対象とする地域における地震動の強さを面的に予測する必要がある。一般的には、断層を囲む数十 km 四方の範囲を対象として数百 m 四方単位のメッシュに細分し、そのメッシュ内では地震動の強さはほぼ等しいとしてメッシュごとに地震動の強さを予測する。つぎに、予測された地震動の強さから家屋やライフライン等の被害を予測する。さらに、予測される被害に対して耐震補強の実施等の予防対策、地震発生直後の応急対策や長期的な復旧・復興対策を策定する。この地域防災計画を策定するにあたっては、地震動の強さの見積は、その後の被害想定や被害を軽減する対策の規模等に大きな影響を与えるため、合理的に地震動の強さを評価する必要がある。地震被害想定においては、対象構造物の数は数万～数百万にのぼり、一つ一つの剛性や強度の情報は十分ではないので、過去の被害地震における構造物の被害の分析から求められた地震動の強さを表す指標と構造物の被害との関係式から、対象とする地震が発生した場合の被害を想定することが行われている。地震被害想定においてよく用いられる指標は、計測震度、最大加速度値、最大速度値、加速度応答スペクトル、SI 値等である。計測震度は、地震動の強さを表す指標として一般に最も知られており、地震被害想定が市民にとってわかりやすいという利点がある。

しかし、最大加速度値、最大速度値は瞬間的な地震動の強さを表す量であり、波形として予測した地震動の全体的な強さを反映した量でないことは明らかである。また、計測震度は物理量として明確ではないため、構造物の被害との対応は必ずしもよくない。

1.3. 本研究の目的と構成

本研究では、地震動強さの指標として地震動のエネルギーに着目し、その活用法について検討する。エネルギーは物理量として明確であり、また、エネルギー指標の算出に地震動の時刻歴波形全体を用いることで、経時特性についても反映することができる。地震動エネルギーの距離減衰特性について調べ、地震動エネルギーの地震工学における実務への適用として、地震動予測結果の妥当性評価への活用及び構造物の被害推定への活用を提案する。検討においては、ばらつきに着目し、既往の指標である最大加速度値や最大速度値との比較を通じて地震動エネルギーの特徴を明らかにする。

第2章では、地震動のエネルギーに関する既往の研究についてレビューを行うとともに、本研究で用いる地震動エネルギーの定義について述べる。また、1996年以降に発生した主な被害地震の地震観測記録を用いて、地震動エネルギーと最大加速度値や最大速度値等の指標との関係を示す。

第3章では、地震動エネルギーの距離減衰特性について述べる。

地震動の強さを表す指標として地震動エネルギーを用いるためには、観測記録を分析して地震動エネルギーの大きさを定量化し、「ものさし」を作る必要がある。地震動は、単位要素あたりで考えた場合には距離減衰が生じ、また粘性減衰等によって、地震動のエネルギーは他のエネルギーに転化され減少する。さらに地盤の不均質性によって観測点ごとにばらつきが生じる。これらの影響により生じる地震動エネルギーの距離減衰特性について論じる。既往の距離減衰式についてレビューを行った後、距離減衰特性のばらつきや本震と余震との値の違い等を、最大加速度値等の指標と比較することによって、地震動エネルギーの特徴を考察する。

第4章では、地震動エネルギーの保存について述べる。

地震動エネルギーを、地震動の強さの指標として用いるためには、エネルギー保存則について検討することが重要である。一般にエネルギーには保存則が成り立つことが知られており、震源を取り囲む任意の閉じた面における地震動のエネルギーの流れは保存されている。本研究で定義する地震動エネルギーにもエネルギー保存則が成立すれば、地盤内のどこで算出しても同じ値が得られ、指標として使いやすいくと考えられる。しかし、地震動エネルギーのように、時刻歴波形全体についての積分値が保存されているかどうかについての既往の研究事例は見当たらなかった。そこで、地盤内における地震動エネルギーの基本的な保存則について、減衰の無い水平成層モデルを用い、1次元のSH波の弾性伝播問題として検討する。

第5章では、地震動エネルギーの活用法の例として、地震動予測結果の評価への適用及び一自由度系の応答計算結果を用いた構造物の被害推定への適用について述べる。

地震動予測結果の評価への適用については、モデル断層を想定して地震動予測を行うことにより検討する。地震動の予測条件を変化させた場合に予測結果に必然の変化が生じるようなパラメータスタディを行い、その必然の結果が地震動エネルギーに反映されるかどうか検証する。また、最大加速度値や最大速度値等の既往の評価指標と比較することにより、地震動エネルギーの特徴や利点を明らかにする。

構造物の被害推定については、バイリニア型履歴特性を有する一自由度系の応答解析結果を通じて検討を行う。K-NET の地震観測記録を用いて、質量や減衰定数等を変えた数種類のモデルの応答解析を行い、構造物の被害を表す塑性率や塑性ひずみエネルギーと地震動の強さを表す各指標との関係を比較することにより、地震動エネルギーの構造被害推定への適用性について考察する。

第 6 章では、まとめと展望を述べる。

1. 4. 参考文献

- 1) Sekiguchi, H., Irikura, K., and T. Iwata. : Fault geometry at the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, No.90, pp.117-133, 2000.
- 2) 岩田友孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から震源特性, 伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震2, 第39巻, pp.579-593, 1986.
- 3) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第556号, pp.15-24, 2002.
- 4) 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-, 港湾技術研究所資料, No.1120, 2006.
- 5) 青井真, 早川俊彦, 藤原広行: 地震動シミュレータ: GMS, 物理探査, 第57巻, 第6号, pp.651-666, 2004.
- 6) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., pp.151-156, 1986.
- 7) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No.430, pp.1-10, 1991.
- 8) 入倉孝次郎, 釜江克宏: 1948年福井地震の強震動-ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現-, 地震2, 52, pp.129-150, 1999.
- 9) Kamae, K., and Irikura, K : Source model of the Hyogo-ken Nanbu Earthquake and simulation of near-source ground motion, Bull. Seism. Soc. Am. 88, 400-412, 1998.
- 10) (社) 土木学会: 土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説, 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会, 2000.
- 11) 水道施設耐震工法指針・解説, 2009.
- 12) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 13) 大規模地震の対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説, 2005
- 14) 井合進, 倉田栄一, 向井健: 地震最大加速度の距離減衰, 港湾技研資料, No.724, 1992.

2. 地震動の強さを表す指標としての地震動エネルギーの提案

2.1. 地震動のエネルギーに関する既往の研究

地震波の伝播に伴う地震のエネルギーの流れに関する研究はこれまでに数多くなされている。地震の規模に応じて震源から放射される地震のエネルギーは、震源を取り囲む任意の面におけるエネルギー密度の時間積分値に等しい。例えば、**図 2-1**に示す面 S_1 における以下の積分値は面 S_2 における積分値と等しい¹⁾。

$$-\int_0^{\infty} dt \int_{S_1} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0) \dot{u}_j n_j dS = -\int_0^{\infty} dt \int_{S_2} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0) \dot{u}_i n_j dS \quad (2-1)$$

ここに、 σ と σ^0 はそれぞれ時刻 t における応力及び初期応力である。 \dot{u} は粒子速度、 n はその面の法線方向である。**Richter**²⁾ は、ローカルマグニチュード (M_L) を用いて地震の規模を測定することを提案した。しかし、これはエネルギーの定義と正確に一致しているわけではなかった。その後、**金森**³⁾ は、地震の規模を表すのにモーメントマグニチュード (M_w) を用いることを提案した。 M_w は、震源のエネルギー解放量に関する地震モーメントから定義される。ただし、そのエネルギーは、式(2-1)で表される放射エネルギーとは異なっている。放射エネルギーに関する詳細な議論は、**Kostrov**⁴⁾、**Fukuyama**⁵⁾、**Abercrombie**⁶⁾ 等でなされている。

面 S を通過する地震波は、1 方向に伝播する P 波か S 波の単一の平面波として近似される。そのエネルギーは、P 波の場合は E_α 、S 波の場合は E_β として、それぞれ式(2-2)及び式(2-3)で表される。

$$E_\alpha = \int_0^{\infty} dt \int_S \rho V_p \dot{u}_\alpha^2 l_i n_i dS, \quad (2-2)$$

$$E_\beta = \int_0^{\infty} dt \int_S \rho V_s \dot{u}_\beta^2 l_i n_i dS \quad (2-3)$$

ここに、 ρ 、 V_p 及び V_s はそれぞれ密度、P 波速度、S 波速度である。 \dot{u}_α と \dot{u}_β はそれぞれ P 波と S 波の粒子速度振幅である。 l_i は波動の伝播方向を表すベクトルである。被積分関数で定義されるエネルギー密度は、粒子速度の 2 乗と波動インピーダンスとの積である。P 波と S 波の重ね合わせによって表される一般的な波動場における全エネルギーは、 $E_\alpha + E_\beta$ に等しくならないことに注意する必要がある。上式の保存則は、平面波に対して **ray tube**⁷⁾ を考えると、震源をとり囲む全表面を考えずに限られた面に対しても議論することができる。式(2-2)及び式(2-3)の被積分値を展開して得られるエネルギー密度は、 $\rho \dot{u}^2$ に波の伝播速度を掛けたものとなる。

安芸⁷⁾ は、一般的なエネルギーとして、運動エネルギー、ひずみエネルギー、熱エネルギー等について説明し、ひずみエネルギー密度と運動エネルギー密度が等しいことを示している。その上で、均質媒質中を伝わる平面波の伝播方向に垂直な単位面積を横切って伝達される単位時間あたりのエネルギー量(伝達エネルギー束)は、 $\rho V_s \dot{u}^2$ (ρ は密度、 V_s は地盤の S 波速度、 \dot{u} は粒子速度)であることを示し、伝播する地震エネルギーが波線チュー

ブ内に閉じこめられており、震源を取り囲む任意の面における伝達エネルギー束の面積分は保存されていることを示した。また、多治米⁸⁾も、任意の表面積をもつ領域内でエネルギー流量の面積分が保存されていることを示している。このように、震源から発生した地震のエネルギーは、弾性体内において全体として保存されていることが過去の研究によって示されている。

地震動のエネルギーと地震動強さとの関係に関して、高木⁹⁾は、気象庁の震度と地震動のエネルギーとの相関について論じている。地震動のエネルギーは、面積素片を通る地震波動のエネルギーの合計としている。そして、震度を規定しているのは、加速度や速度ではなく、エネルギーであるという結論を得ている。また、秋山ら^{10,11)}は、構造物へのエネルギー入力と構造物のエネルギー吸収という観点から研究し、一質点系における運動方程式から、弾性エネルギー、塑性ひずみエネルギー、減衰による吸収エネルギーの釣り合い方程式を導き、構造物の被害をエネルギーの観点から検討している。この中で、構造物への入力エネルギーを速度に換算したエネルギー換算速度応答スペクトル(V_E スペクトル)を、構造物へ入力される設計用の地震荷重として提案している。国生ら¹²⁾は、地盤中の微小要素の運動エネルギーとひずみエネルギーの和を時間軸上で積分した量を地震波のエネルギーと定義し、兵庫県南部地震時のポートアイランドにおける観測記録を用いて、そのエネルギー量の収支について分析を行っている。野津ら¹³⁾は、パワースペクトルの周波数による積分値を **PSI(Power Spectrum Intensity)** とよび、岸壁の被災の程度との関係を調べている。これによると、最大加速度値や最大速度値よりも **PSI** の方が、地震による岸壁の残留変形量との相関が高いという結果が得られている。また、井林ら¹⁴⁾は、地震動の継続時間全体にわたって構造物に入力される地震総入力エネルギーと、ある単位時間に相当するエネルギーとに着目し、弾性系の解析のみによって **RC** 単柱橋脚の地震時の応答塑性率や履歴エネルギーを推定する手法を提案している。さらに、地盤の液状化と地震動のエネルギーとの関係についても、片田ら¹⁵⁾や風間ら¹⁶⁾によって研究されている。片田らは、オンライン地震応答載荷実験によりエネルギーの釣合式からひずみエネルギーの算定に必要な応答値等を測定して求め、液状化の進行状況をひずみエネルギーの蓄積の面から考察している。風間らは、水平成層地盤の液状化を判定する手法として地震時に地盤中で費やされた累積損失エネルギーと地盤材料が液状化時に蓄えうる累積損失エネルギーを対比する方法を提案しており、等価線形解析から累積損失エネルギーを簡易に推定する方法について検討している。このように、構造物の被害と地震動のエネルギーとの関係について多くの研究がなされており、ほとんどが構造物の被害と地震動エネルギーとに密接な関係を見いだしている。

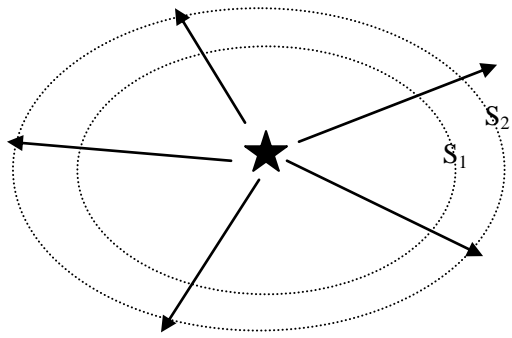


図 2-1 震源から放射された地震エネルギーと震源を取り囲む面 S_1 及び面 S_2

2.2. 本研究における地震動エネルギーの定義

震源から放射される全エネルギーは式(2-2)及び式(2-3)で表されるが、全エネルギーは運動エネルギーとひずみエネルギーとに分けることができ、平面波の伝播に関しては運動エネルギーとひずみエネルギーとは等しい^{17),18),19)}。本研究ではこのうちの S 波の運動エネルギーを対象とする。

運動エネルギー密度は以下で表される。 ρ は媒質の密度、 \dot{u} は粒子速度である。

$$\frac{1}{2}\rho\dot{u}^2 \quad (2-4)$$

ここで、S 波を対象とすると、エネルギーの伝播する速度は、せん断波速度 V_s に等しい。したがって単位体積を通過する単位時間あたりの運動エネルギーの量は以下で表される⁷⁾。

$$\frac{1}{2}\rho V_s \dot{u}^2 \quad (2-5)$$

地盤内のある位置において、式(2-5)で表される上昇波(SH 波)の伝播に伴う運動エネルギー密度の流れを地震動の全時刻歴にわたって積分した値を地震動エネルギーと定義し、次式で表す。

$$E = \frac{1}{2}\rho V_s \int_0^\infty \dot{u}^2(t) dt \quad (2-6)$$

$\dot{u}^2(t)$ は、水平方向 2 成分の $\dot{u}_x(t)$ 、 $\dot{u}_y(t)$ と鉛直方向成分 $\dot{u}_z(t)$ を用いて次式で表される。

$$\dot{u}^2(t) = \dot{u}_x^2(t) + \dot{u}_y^2(t) + \dot{u}_z^2(t) \quad (2-7)$$

式(2-6)は、式(2-2)の面積分の被積分項の 1/2 であり、本研究において定義する地震動エネルギーは、運動エネルギーとひずみエネルギーの和である全エネルギー量の 1/2 であることに留意する必要がある。なお、地震動エネルギーを式(2-3)で定義したとしても、以降の理論には何ら影響を与えず、値が 2 倍となるだけである。

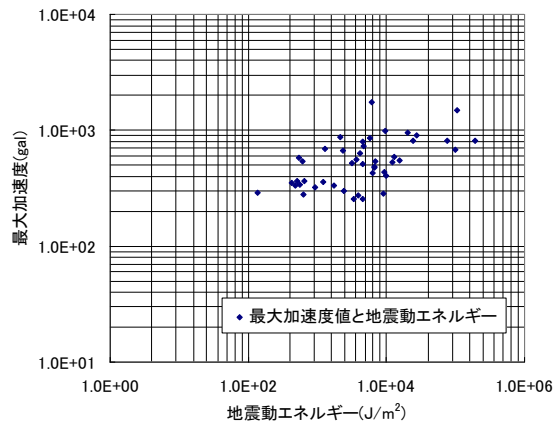
地震動エネルギーを算出するためには、地震動の時刻歴波形と算出位置における地盤の密度及び S 波速度の値が必要である。観測記録から算定する際には、地震計設置位置において地盤調査が行われている必要がある。また、耐震設計等に用いる地震動波形から算定する場合には、波形の入力位置における密度と S 波速度を決定する必要がある。

本研究において地震動の強さを表す指標として提案する地震動エネルギーと、他の地震動の強さを表す指標との関係について調べた。表 2-1 に 1996 年以降で大きな被害を与えた地震を示す²⁰⁾。これらの地震は K-NET の観測点において記録されている。表 2-1 の各地震の中から、最大加速度の上位 5 つの地震記録を取り出し、最大加速度、最大速度、計測震度、SI 値という地震動の強さを表す既往の主な指標と地震動エネルギーとの関係をプロットした結果を図 2-2 に示す。これらの指標のうち、地震動エネルギー、最大加速度値、最大速度値については、観測記録に対して 0.1Hz~10Hz のバンドパスフィルタ通過後の波形から算出した。最大加速度値と最大速度値は 3 成分から求めたベクトルの最大値とした。SI 値は、水平 2 成分それぞれの観測記録に対する一自由度系の速度応答波形(減衰定数

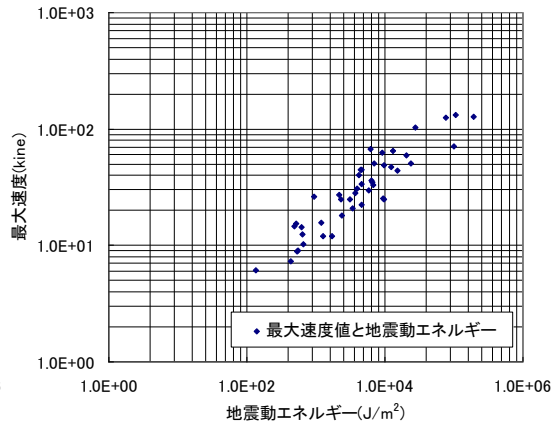
h=0.2)を計算し、この応答波形の水平 2 成分合成の最大値を取ったものを速度応答スペクトルの成分として、その速度応答スペクトルの 0.1 秒～2.5 秒の平均値として求めた。図 2-2より、地震動エネルギーと既往の各指標とは明確な相関があり、地震動エネルギーが地震動の強さを表す指標として有力であることを示している。また、地震動エネルギーは、最大速度値や SI 値との関係が良好であるが、これは地震動エネルギーの算定に速度値の時刻歴波形を用いているためであると考えられる。

表 2-1 近年の被害地震

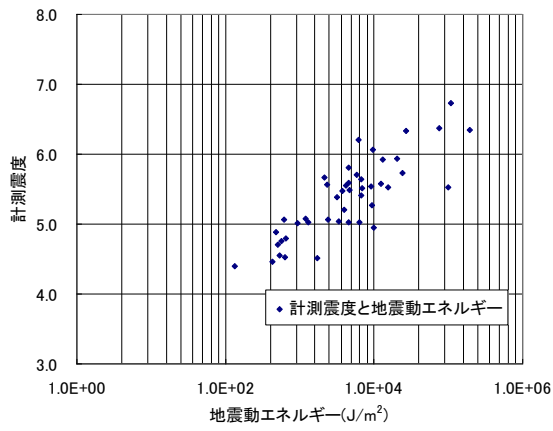
発生年月日	M	震央地名	人的被害	物的被害	最大震度
		地震名			
平成12年(2000年)10月6日	7.3	鳥取県西部	負 182	住家全壊 435 半壊 3,101など	6強
		平成12年(2000年)鳥取県西部地震			
平成13年(2001年)3月24日	6.7	安芸灘	死 2	住家全壊 70 半壊 774など	6弱
		平成13年(2001年)芸予地震	負 288		
平成15年(2003年)7月26日	6.4	宮城県北部[宮城県中部]	負 677	住宅全壊 1276棟 住宅半壊 3809棟など	6強
平成15年(2003年)9月26日	8	釧路沖[十勝沖] 平成15年(2003年)十勝沖地震	死 1 不明 1 負 849	住宅全壊 116棟 住宅半壊 368棟など	6弱
平成16年(2004年)10月23日	6.8	新潟県中越地方 平成16年(2004年)新潟県中越地震	死 68 負 4,805	住家全壊3,175棟 住家半壊13,810棟など	7
平成17年(2005年)3月20日	7	福岡県西方沖[福岡県北西沖]	死 1 負 1,204	住家全壊144棟 住家半壊353棟など	6弱
平成19年(2007年)3月25日	6.9	能登半島沖 平成19年(2007年)能登半島地震	死 1 負 356	住家全壊686棟 住家半壊1,740棟など	6強
平成19年(2007年)7月16日	6.8	新潟県上中越沖 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震	死 15 負 2,346	住家全壊1,331棟 住家半壊5,709棟など	6強
平成20年(2008年)6月14日	7.2	岩手県内陸南部 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震	死 17 不明 6 負 426	住家全壊30棟 住家半壊146棟など	6強



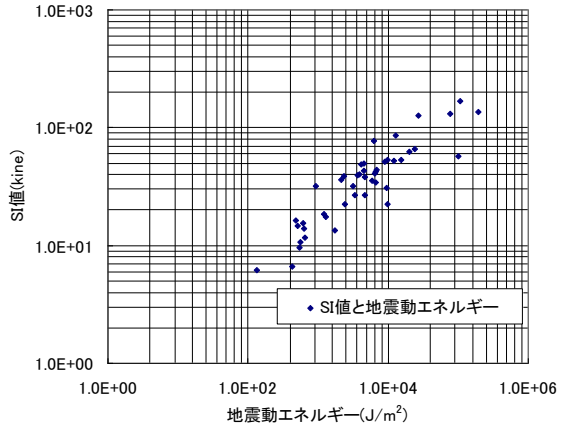
(a) 最大加速度値との関係



(b) 最大速度値との関係



(c) 計測震度との関係



(d) SI 値との関係

図 2-2 地震動エネルギーと他の指標との関係

2.3. 参考文献

- 1) A.E.H. Love : A treatise on the mathematical theory of elasticity, DoverPubns, New York, 1927.
- 2) C.F. Richter : An instrumental earthquake magnitude scale, Bull. Seism. Soc. Am., 25, pp.1-32, 1935.
- 3) H. Kanamori : The energy release in great earthquakes, J. Geophys. Res., 82, pp.2981-2987, 1977.
- 4) B.V. Kostrov, S. Das : Principles of earthquake source mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
- 5) E. Fukuyama : Radiation energy estimated at earthquake source, Geophys. Res. Let., 32, L13308, 2002.
- 6) R. Abercrombie, A. McGarr, G.D. Toro, H. Kanamori : Earthquakes: radiated energy and the physics of faulting, American Geophysical Union, Washington, DC, 2006.
- 7) 安芸敬一, P.G.リチャーズ : 地震学 定量的アプローチ, 上西幸司, 亀伸樹, 青地秀雄 共訳, 古今書院, 2004.
- 8) 多治米鏡二 : 弾性波動論の基本, 槇書店, 1994.
- 9) 高木聖 : 地震動の最大エネルギーと震度との関係, 気象研究所研究報告, 第20巻, 第1号, pp.79-89, 1969.
- 10) 加藤勉, 秋山宏 : 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号, pp.9-18, 1975.
- 11) 桑山仁, 秋山宏, 桐野康則 : フーリエ振幅スペクトルの平滑化による地震入力エネルギーの評価, 日本建築学会論文報告集, 第442号, pp.53-60, 1992.
- 12) 国生剛治, 本山隆一, 万谷昌吾, 本山寛 : 表層地盤における地震波のエネルギーフローと性能設計, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, pp.1-20, 2004.
- 13) 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, 平成12年度土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 2001.
- 14) 井林康, 中沢正利, 尾坂芳夫, 鈴木基行 : 地震入力エネルギーおよび地震入力単位エネルギーを考慮したRC橋脚の損傷度評価法の提案, 土木学会論文集, No.676/V-51, pp.1-11, 2001.
- 15) 片田敏行, 阿部幸樹, 東山晃 : ひずみエネルギー蓄積効果を用いた飽和地盤の液化化過程の考察, 土木学会論文集, 第388号/III-8, pp.43-50, 1987.
- 16) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司 : 地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液化化予測への適用 : 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.161-177, 1999.
- 17) 金森博雄(編) : 岩波講座 地球科学8 地震の物理, 岩波書店, pp.80, 1978.
- 18) Thorne Lay, 柳谷俊(訳) : 地震学 下巻 震源, 古今書院, pp.543, 2002.
- 19) 笠原慶一 : 地震の力学 近代地震学入門, 鹿島出版会, pp.15, 1983.
- 20) 気象庁 : <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/higai/higai1996-new.html>

3. 地震動エネルギーの距離減衰等の特性

3.1. はじめに

地震の規模に応じた強さで震源から放射された地震動は、震源から離れるにつれて、幾何減衰や粘性減衰等によってその強さが減少する。最大加速度値や最大速度値等の地震動の強さを表す指標に対して、このような距離減衰特性について多くの研究が行われている。距離減衰特性を求めることにより、地震の規模と震源からの距離の情報から、平均的にどの程度の強さの地震動になるかを推定することができ、建造物の耐震設計や被害推定に役立てることができる。ここでは、地震動エネルギーの距離減衰特性について検討した。地震動の強さはディレクティビティやサイト増幅特性等による影響を受けるため、同じ震源距離でも地点によってある程度のばらつきがあるが、ばらつきが小さいほど、地震動の強さの指標として妥当性が高いと言えるため、地震動エネルギーの距離減衰特性のばらつきの程度について検討する。また、地震の規模との関係についても検討した。さらに、ウェーブレット変換を用いて地震動エネルギーの周波数特性についても検討し、地震動エネルギーという量の合理的な説明を試みた。

3.2. 距離減衰式に関する既往の研究

これまでに各機関において多くの地震観測記録が蓄積されており、地震動の主要な指標について距離減衰特性が検討されている。古くは金井¹⁾による日立鉾山の岩盤での地震観測記録を用いた最大速度の距離減衰特性の研究がある。兵庫県南部地震での各地の最大加速度値をよく表現していた式として、福島・田中²⁾による距離減衰式が知られている。近年では、地震調査研究推進本部による強震動予測等多くの検討に採用されている式として、司・翠川³⁾の研究による最大加速度値や最大速度値の距離減衰式がある。計測震度についても松崎ら⁴⁾によって距離減衰特性が検討されているが、計測震度は、距離減衰式から推定した最大速度値から換算式によって推定することが多い。応答スペクトルに関しては、安中ら⁵⁾や内山ら⁶⁾等によって距離減衰式が提案されている。これらの距離減衰式は地震の規模を表す説明変数としてマグニチュードを用いているが、片岡ら⁷⁾は、加速度震源スペクトルの短周期レベルを説明変数として、最大加速度、最大速度、計測震度、SI 値、加速度応答スペクトルの距離減衰式を提案している。大淵ら⁸⁾は、国生らの提案したエネルギーを周波数領域に変換し、地震エネルギースペクトルとして振動数ごとの距離減衰特性について検討しているが、最大加速度値や最大速度値と比べてややばらつきが大きいと結論づけている。

3.3. 地震動エネルギーの距離減衰式

3.3.1. 観測データ

地震観測データは K-NET 及び KiK-net のデータを用いた⁹⁾。設計に用いる入力地震動は、工学的基盤面上の 2E 波として定義されることが多いことから、入力地震動の地震動エネルギーを、工学的基盤上の自由表面上のエネルギーとして評価する。工学的基盤上での地震動を評価する場合、地震計が工学的基盤上に設置されているか、工学的基盤までの詳細な地盤情報が明らかとなっている必要がある。解析に用いた地震を表 3-1 に示す。1997 年以降に観測された内陸活断層の地震で、 M_j が 5.5 以上で震源深さが 30km 以浅、観測点数 10 以上のものを選定した。2003 年十勝沖地震等のプレート境界地震を含めなかったのは、プレート内地震やプレート境界地震といった地震のタイプの違いによる距離減衰特性への影響を避けるためである。大規模な余震が複数あった場合には、本震と最大余震を選定した。K-NET の記録については、地表における地震動の最大加速度値が 10gal 以上のデータに対して、等価線形解析手法 (SHAKE) を用いて工学的基盤まで引き戻す計算をおこなった。工学的基盤の S 波速度は 300m/s 以上とし、調査ボーリングが工学的基盤まで達していない観測点のデータは除外した。せん断ひずみに関わる非線形特性は、砂と粘土でそれぞれの特性を設定し、砂の非線形特性は土被り圧依存性を考慮した¹⁰⁾。最大せん断ひずみが 0.3% を超え、等価線形解析の精度に問題が生じていると考えられるデータも除外した。KiK-net については、地表で S 波速度 300m/s 以上の地盤上に地震計が設置されている地点のデータを用いた。観測記録の低周波数側はノイズの影響が大きくなるため、引き戻し波に 0.1Hz のハイパスフィルタを施した。工学的基盤に引き戻した地震波形を用いて、地震動エネルギー、最大加速度値、最大速度値を算定した。最大加速度値及び最大速度値は、NS, EW, UD の各方向成分の 2 乗和の平方根の時刻歴の最大値として求めた。なお、最大加速度値や最大速度値については、地盤の S 波速度の違いによる影響の補正は行っていない。

表 3-1 強震観測記録のリスト

発震日時					M _w	記録数		地震名
						等価震源距離100km以下	すべて	
1997	3	26	17	31	6.1	39	59	鹿児島県北西部地震
1997	5	13	14	38	6.0	40	56	
1997	6	25	18	50	5.8	26	78	
1998	5	3	11	9	5.5	17	18	
1998	9	3	16	58	5.9	16	21	
2000	10	6	13	30	6.6	50	167	鳥取県西部地震
2003	7	26	0	13	5.5	29	52	
2003	7	26	7	13	6.1	29	88	宮城県北部地震
2004	10	23	17	56	6.6	38	147	新潟県中越地震
2004	10	23	18	34	6.3	35	132	
2004	12	14	14	56	5.7	17	22	
2005	3	20	10	53	6.6	35	114	福岡県西方沖地震
2006	4	21	2	50	5.6	27	30	
2007	3	25	9	42	6.7	18	91	能登半島地震
2007	7	16	10	13	6.6	33	142	新潟県中越沖地震
2007	7	16	15	37	5.6	32	61	
2008	6	14	8	43	6.9	41	127	岩手・宮城内陸地震

3.3.2. 回帰分析

本研究では、距離減衰式の基本形として次式を用いることとした。

$$\log_{10}(E) = aM_w + b\log_{10}(X_{eq}) + cX_{eq} + d \quad (3-1)$$

ここに、 E は、工学的基盤面上の地震動エネルギー、 M_w はモーメントマグニチュード、 a , b, c, d は係数である。 X_{eq} は等価震源距離¹¹⁾であり、次式で表される。

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{oi}^2 X_i^{-2}}{\sum_{i=1}^n M_{oi}^2} \quad (3-2)$$

ここで、震源断層を n 個の微小要素に分割するとして、 M_{oi} は断層内の微小要素 i の地震モーメント密度、 X_i は微小要素から観測点までの距離である。ここでは、既往の研究³⁾と同じく、断層面内での地震モーメント密度は一定と仮定した。等価震源距離は広がりをもつ断層をエネルギーからみて等価な点に置き換えたときの距離である。

既往の研究により、用いるデータのマグニチュードと距離に相関関係がある場合に一括で重回帰分析を行うと不都合が生じることが知られているため、距離に関わる回帰とマグニチュードに関わる回帰を分離する2段階回帰分析を行った¹²⁾。

具体的には、まず第1段階目の回帰式として、次式を用いた重回帰分析を行い、距離減衰に関する回帰係数 b と、各地震ごとに求まる回帰係数 α_i を求める。

$$\log_{10}(E) = \sum \delta_{ij} \alpha_i + b \log_{10}(X_{eq}) + c X_{eq} \quad (3-3)$$

添え字 i は地震の番号に対応しており、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。次に、各地震ごとに求めた α_i とモーメントマグニチュードを用いて、第2段階の回帰計算を行う。

$$\alpha = aM_w + d \quad (3-4)$$

表 3-1 に示す等価震源距離が100km以下の522個のデータを用いて回帰分析を行った結果、 $a=1.593$, $b=-1.856$, $c=-0.00274$, $d=-3.99$ が得られた。回帰式と観測値をプロットした結果を図 3-1 に示す。図 3-2 に岩手・宮城内陸地震及び鳥取県西部地震における観測値と回帰式を比較して示す。地震動エネルギーには、最大加速度値や最大速度値と同じように、明確な距離減衰特性があると言える。またモーメントマグニチュードが大きいほど大きな値をもつ傾向にあり、これも最大加速度値や最大速度値と同じ傾向である。

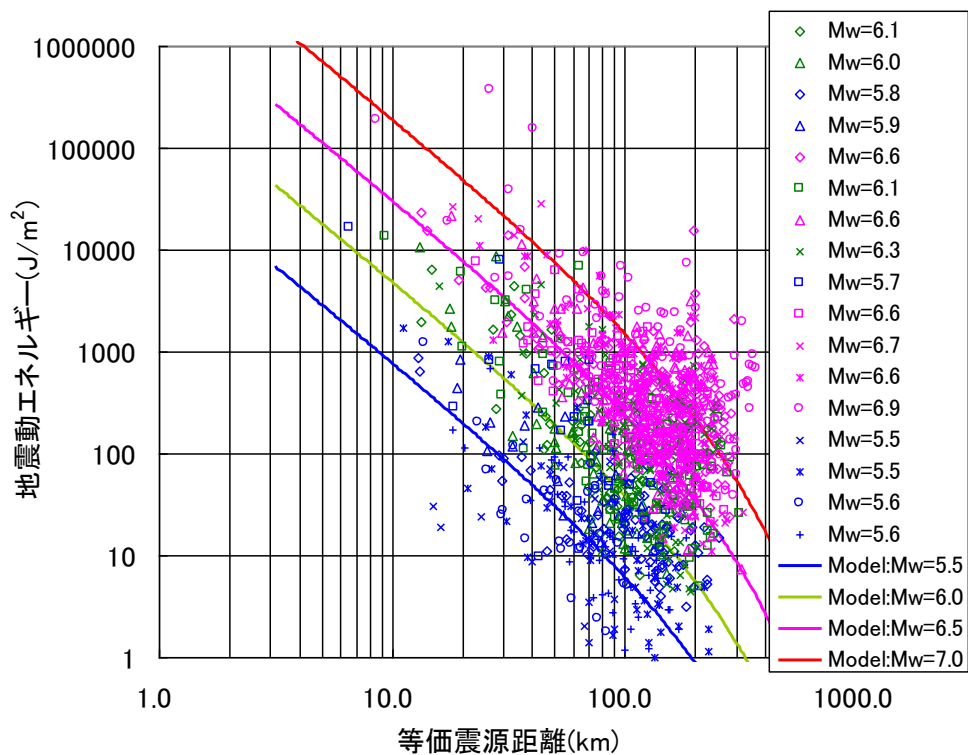
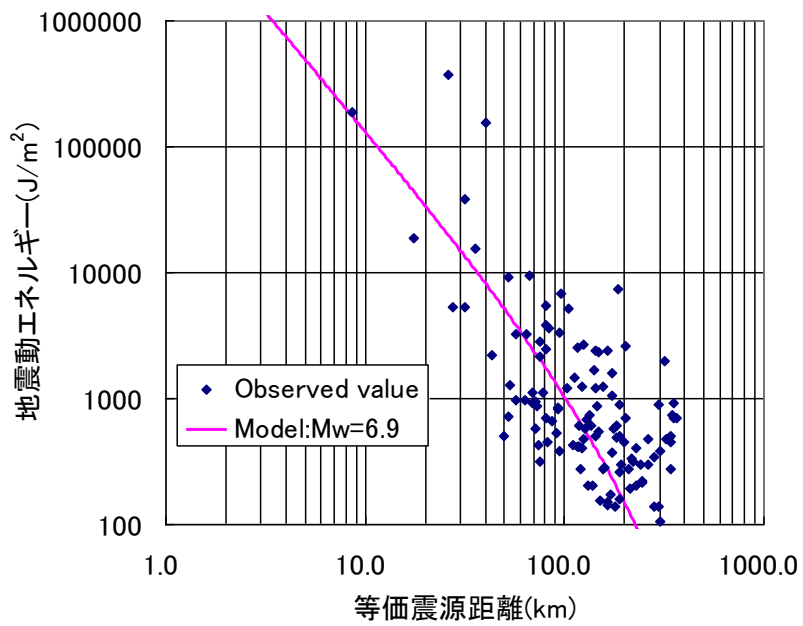
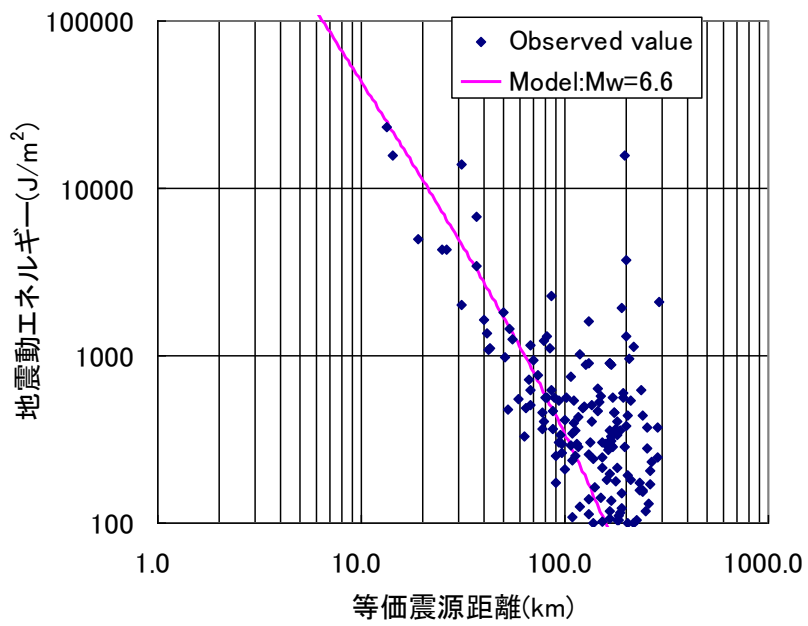


図 3-1 地震動エネルギーの距離減衰特性



(a) 岩手・宮城内陸地震



(b) 鳥取県西部地震

図 3-2 距離減衰式と観測記録の比較

3.3.3. 地震動の継続時間

地震動の継続時間の距離減衰特性について検討した。継続時間を記録全体とすると、地震計のプレトリガやポストトリガの設定に依存する。そこで、地震動が観測されてからある時間 t までの地震動エネルギー E_t を次式のように定義し、伊山ら¹³⁾が平均エネルギー入力率の算定に用いている時間幅を参考にして、 E_t が E の10%に達した時刻から E の90%に達した時刻までの間を地震動の継続時間 D と定義した。

$$E_t(t) = \frac{1}{2} \rho V_s \int_0^t \dot{u}^2(\tau) d\tau \quad (3-5)$$

図 3-3に地震動継続時間をプロットして示す。等価震源距離の対数と地震動継続時間の対数はほぼ線形の関係がみられる。これは、地震波が地盤内を伝播するにつれて、散乱や重複反射等の影響で継続時間が長くなる現象を表している。地震動継続時間について得られた回帰式を次式に示す。

$$\log_{10}(D) = -0.035M_w + 0.631 \log_{10}(X_{eq}) + 0.489 \quad (3-6)$$

地震動継続時間とマグニチュードの大きさとの明確な関係はみられない。これは、等価震源距離が短くて震源特性の影響が大きい記録が少なく、逆に等価震源距離が長く伝播経路特性の影響が大きい記録が多かったためと考えられる。

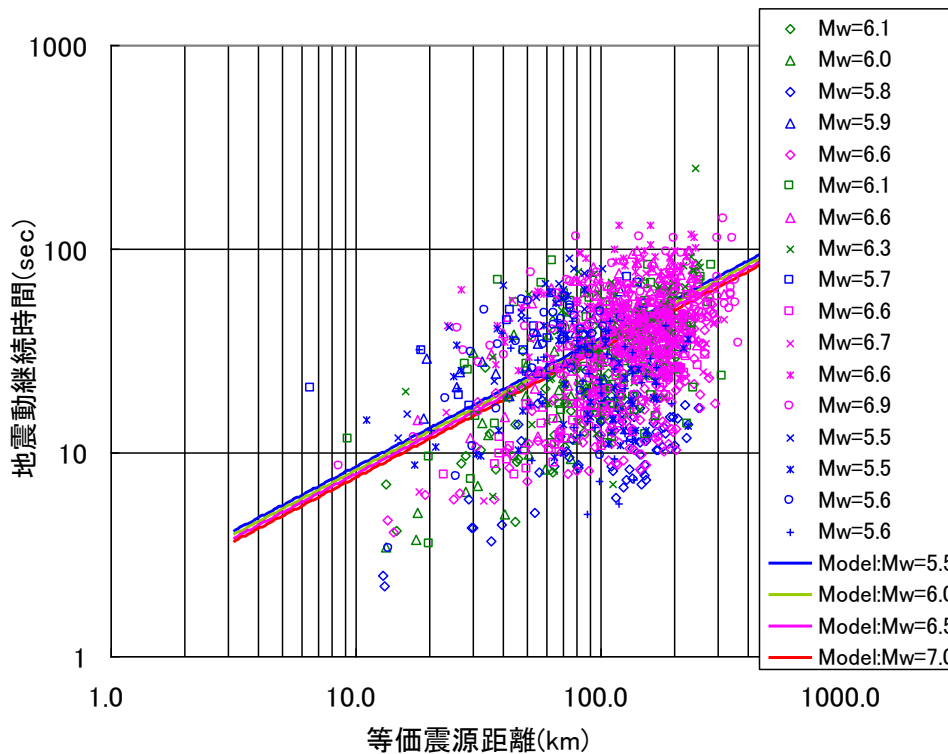
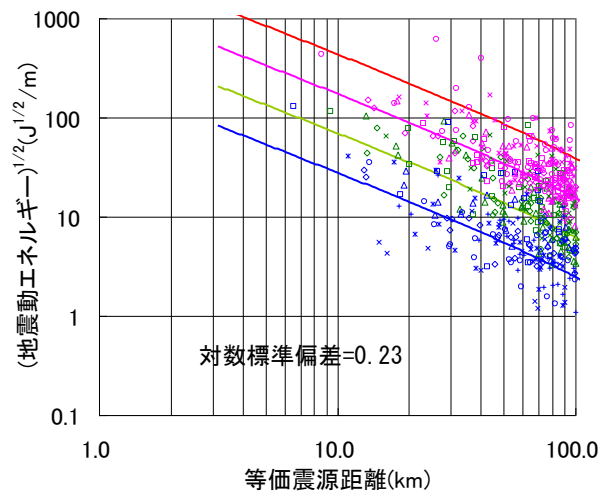


図 3-3 地震動継続時間

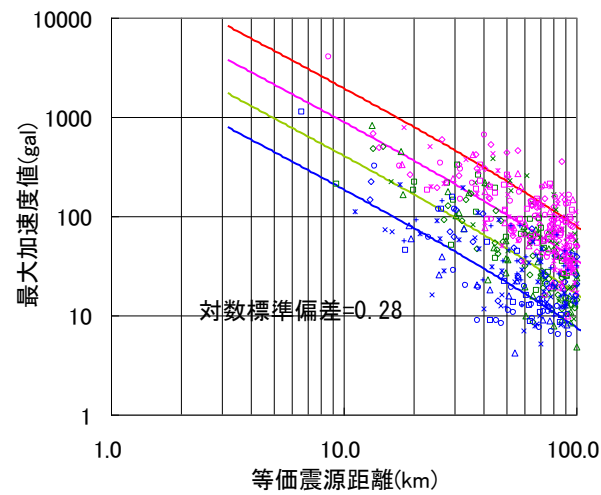
3.3.4. 他の指標の距離減衰特性との比較

(1) 距離減衰特性のばらつき

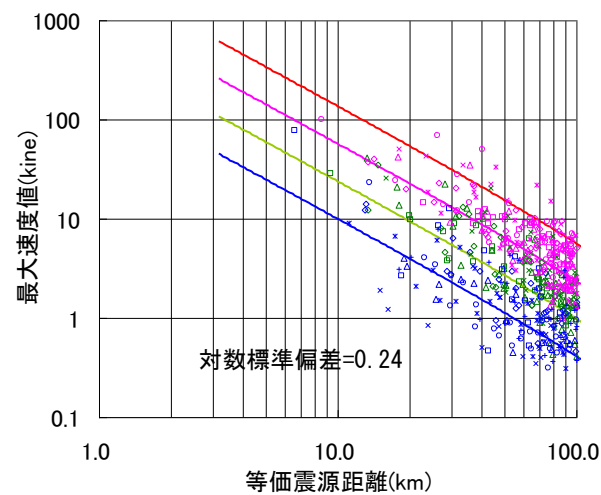
距離減衰特性のばらつきについては、翠川ら¹⁴⁾により、震源特性の影響、伝播特性の影響、地盤特性の影響等に分けて詳細な分析がなされている。それによると、既往の式の対数標準偏差は、常用対数で 0.2~0.3 程度である。最大加速度値と最大速度値について式(3-3)と同様の距離減衰特性を求め、等価震源距離が 100km 以下の観測記録に対して、対数標準偏差で地震動エネルギーとばらつきを比較した。地震動エネルギーは速度波形の 2 乗和に比例しているため、次元を合わせるために地震動エネルギーについては平方根のばらつきを算定した。図 3-4 に示すように、地震動エネルギーの平方根の対数標準偏差は 0.23 であり、最大加速度値の 0.28 より小さく、最大速度値の 0.24 とほぼ同等であった。



(a) 地震動エネルギー



(b) 最大加速度値



(c) 最大速度値

図 3-4 各指標のばらつきの比較

(2) 地震の規模の違いによる比較

地震動エネルギーと最大加速度値、最大速度値について、ほぼ同じ位置で起きた2つの地震を比較した例を2例示す。一つは、本震（新潟県中越地震17:56： $M_0=9 \times 10^{18}\text{Nm}$ ， $M_w=6.6$ ）と余震（18:34： $M_0=4 \times 10^{18}\text{Nm}$ ， $M_w=6.3$ ）とを比較した例（**図 3-5**）であり、もう一つは、同じ震源域（宮城県北部）で発生した2つの地震の規模の大きい方（2003 7/26 07:13， $M_0=2.3 \times 10^{18}\text{Nm}$ ， $M_w=6.1$ ）と小さい方（2003 7/26 00:13， $M_0=1.7 \times 10^{17}\text{Nm}$ ， $M_w=5.5$ ）について比較した例（**図 3-6**）である。各指標はすべて工学的基盤での値である。ほぼ同じ位置で発生し等価震源距離にほとんど差がない2つの地震に対しては、伝播経路特性とサイト増幅特性はほぼ同じと考えられるので、地震の規模の大きい方が地震動は大きくなる傾向にあると考えられる。図中の青線は1:1の線であり、緑線は観測記録の回帰式である。

まず、新潟県中越地震については、地震動エネルギーでは97%が本震の方が大きかったが、余震の方が大きいケースが最大加速度値では30%程度、最大速度値では20%程度ある。回帰式をみると、地震動エネルギーは1:1の線にほぼ平行である。ここで桃線として本震と余震との地震モーメントの比（ $4/9=0.444$ ）を引いてみると、回帰式とほぼ重なった。一方、最大加速度値の回帰式は1:1の線に近く、地震の規模の大きさの違いを反映しきれていない。また、最大速度値の回帰式は1:1の線と傾きが異なり、速度値の大きさによって本震と余震との比が変化するような特性を示しているため、やはり地震の規模の違いを反映しきれていないと考えられる。

次に、宮城県北部の地震についてみると、新潟中越地震の例に比べて規模の差が大きい。ため、地震動エネルギーだけでなく、最大加速度値や最大速度値も地震の規模の違いと整合し、規模の大きい方が小さい方よりも値が大きい。しかし、ばらつきはやはり地震動エネルギーよりも最大加速度値や最大速度値の方が大きい。また、桃線として地震モーメントの比（ $1.7/23=0.074$ ）を引いてみると、新潟中越地震の例と同じく、回帰式と重なることがわかる。

これより、地震動エネルギーの大きさは、地震モーメントの大きさと関係していることがわかる。

新潟県中越地震の本震と余震の最大加速度値の分布を**図 3-7**に示す。また、最大加速度値の本震と余震との大小関係を**図 3-8**に示す。北東方向は本震の方が余震よりも大きい、南西方向は余震の方が大きい傾向がはっきりしている。本震と余震とでディレクティビティの方向が異なるため、最大加速度値だけで評価すると余震の方が大きい結果になってしまう領域があると考えられる。

以上より、地震動エネルギーの方が最大加速度値や最大速度値よりも地震の規模との整合が高いと言える。

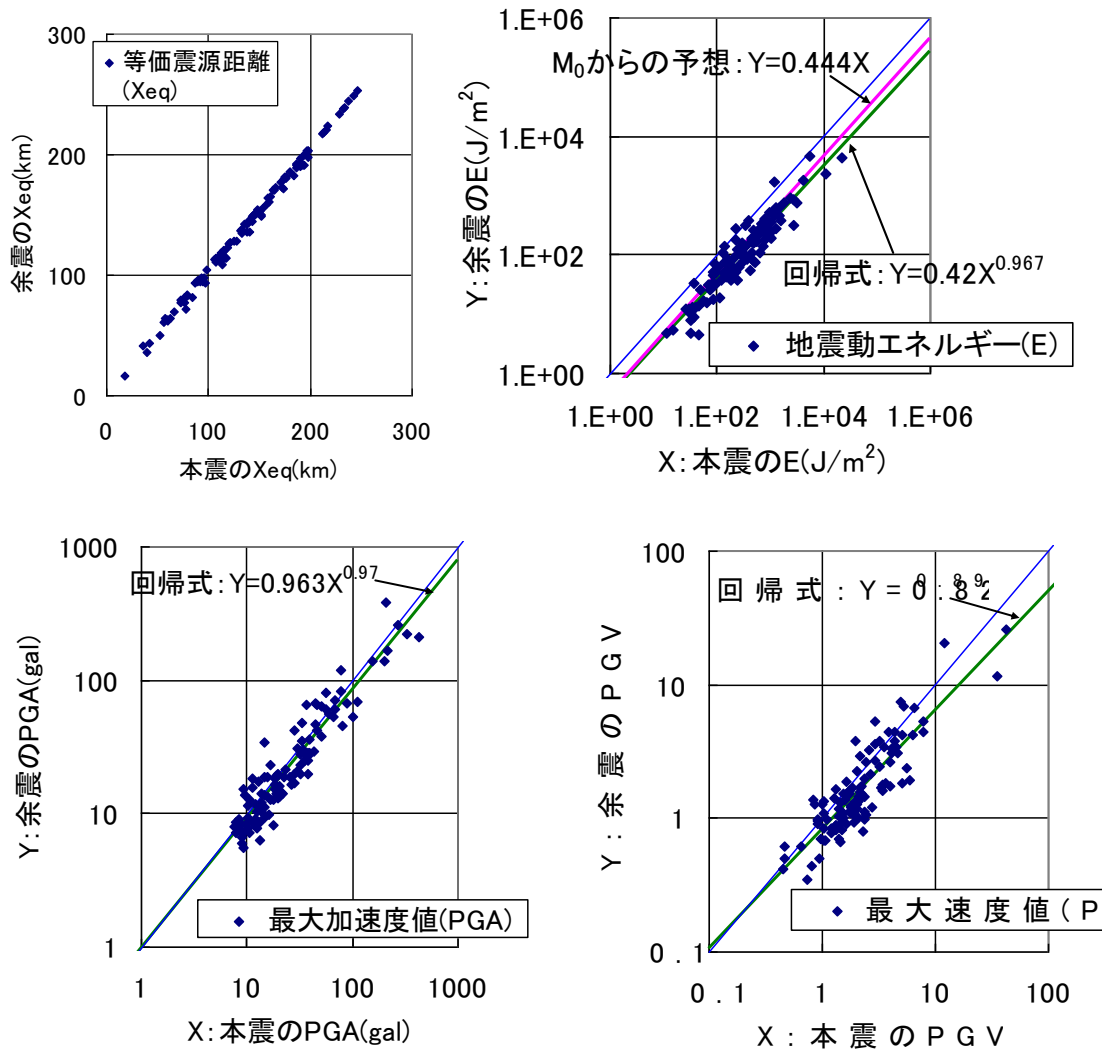


図 3-5 本震と余震の比較 (新潟県中越地震)

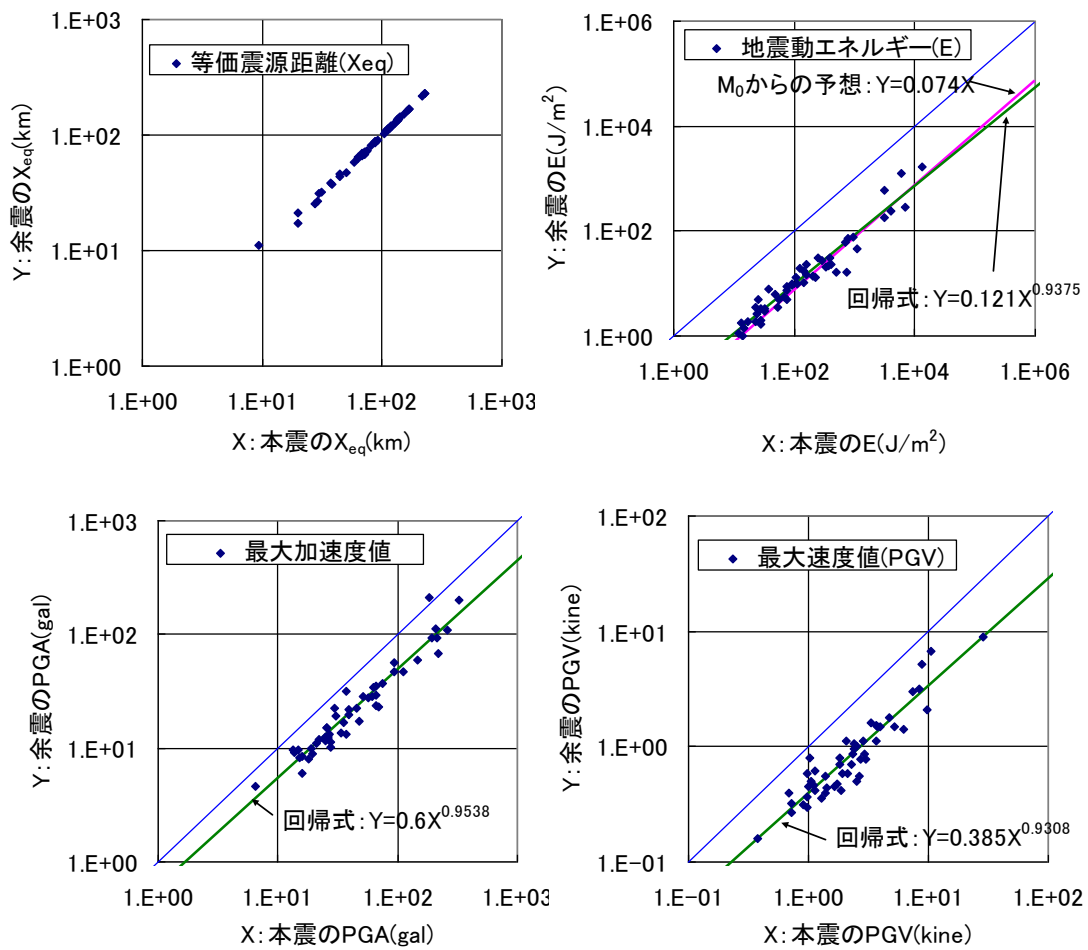


図 3-6 宮城県北部の地震の比較
(規模の大きい方 : 2003 7/26 07:13, 規模の小さい方 : 2003 7/26 00:13)

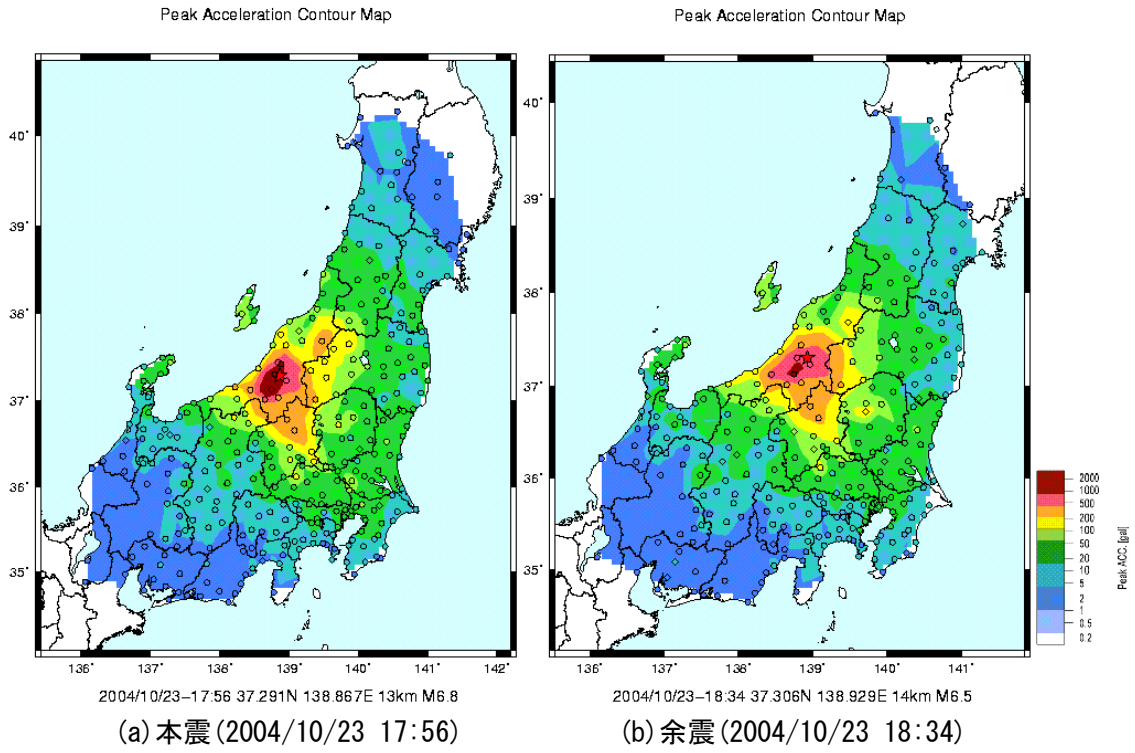


図 3-7 新潟中越地震の本震と余震の最大加速度値の比較

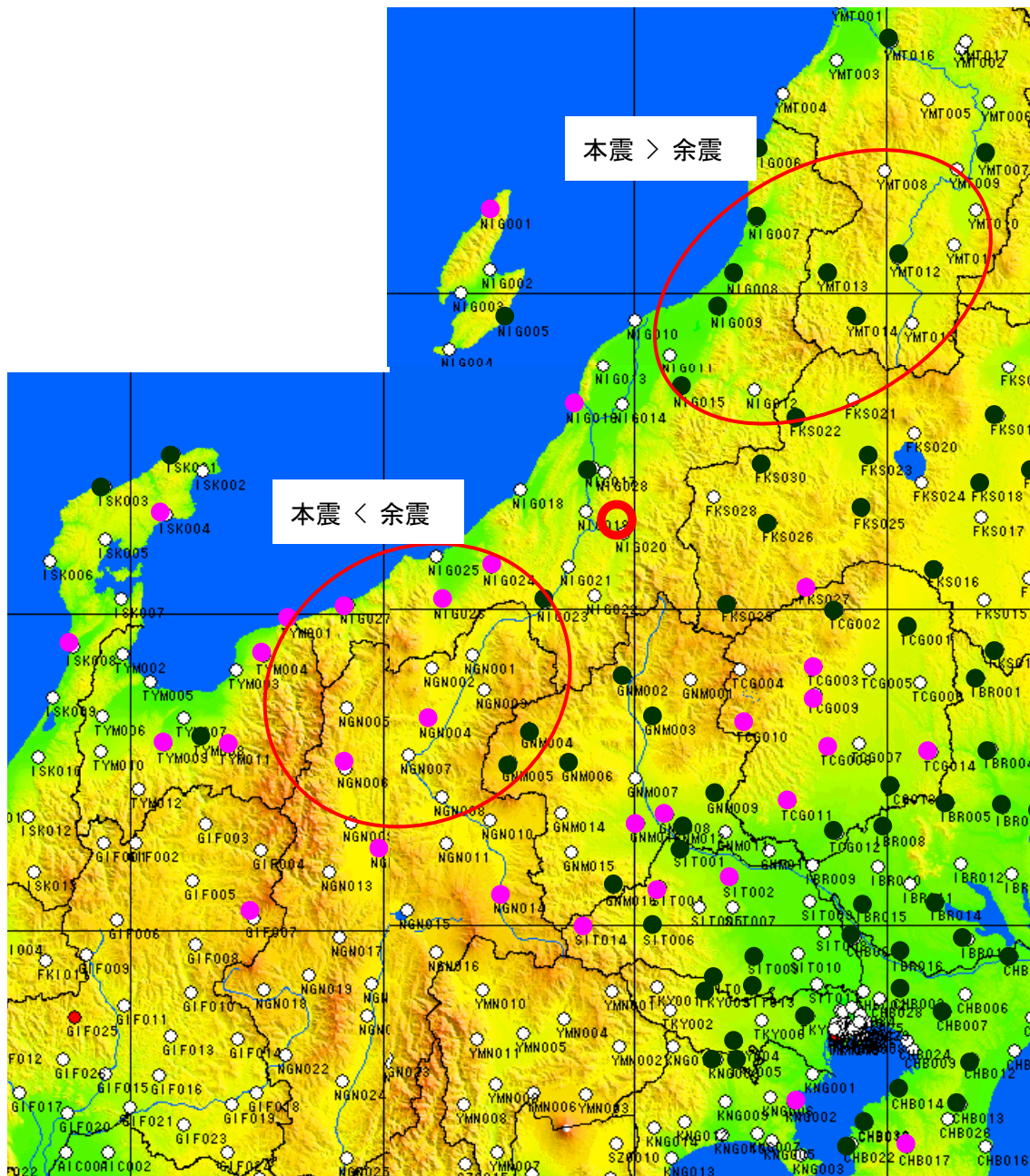


図 3-8 新潟中越地震の本震と余震との最大加速度値の大小関係の分布

3.4. 地震動エネルギーの周波数分布

3.4.1. ウェーブレット変換

地震動波形は非定常な時刻歴波形であるため、その特性を評価するためには、時間周波数特性の解析が可能なウェーブレット変換が適していると考えられる^{15),16)}。宮脇ら¹⁷⁾は、地震観測記録にウェーブレット変換を適用し、地震波のディレクティビティ効果を時間軸や振動数軸で調べている。また、一質点系の応答解析結果にウェーブレット変換を適用し、エネルギー入力や弾塑性系の塑性吸収エネルギー等について分析を行った研究^{18),19)}もみられる。

ウェーブレット変換は、以下の式により、変換と逆変換を行う。

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{u}(t) \psi_{m,n}(t) dt. \quad (3-7)$$

$$\dot{u}(t) = \sum_m \sum_n T_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (3-8)$$

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (3-9)$$

$\psi(t)$ は正規直交ウェーブレットである。 $\dot{u}(t)$ は入力 velocity 時刻歴波形、 $T_{m,n}$ はウェーブレット係数である。 m はウェーブレットのスケールを表す係数で、レベル m という呼び方をする。 n はウェーブレットの位置を表す係数である。逆変換は、多重解像度解析によって以下のように表される。

$$d_m(t) = \sum_n T_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (3-10)$$

$$\dot{u}(t) = \sum_m d_m(t) \quad (3-11)$$

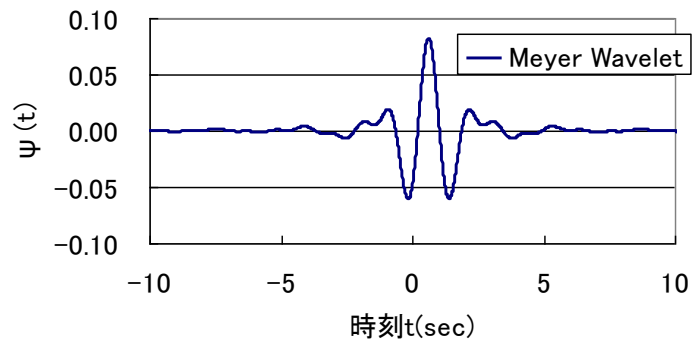
ここに、 $d_m(t)$ は $\dot{u}(t)$ のうちレベル m の成分である。各レベルの地震動エネルギーは、ウェーブレットの正規直交性に基づいて以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \rho V_s \int_0^t \dot{u}^2 dt = \frac{1}{2} \rho V_s \left(\int_0^t \sum_m d_m^2 dt + \int_0^t \sum_{m \neq n} d_m d_n dt \right) \\ &= \frac{1}{2} \rho V_s \sum_m \int_0^t d_m^2 dt = \sum_m E_m \end{aligned} \quad (3-12)$$

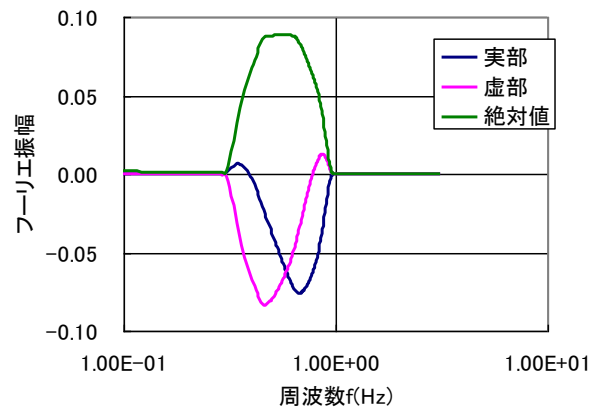
ここに、 E_m はレベル m の地震動エネルギーである。

本研究では、正規直交ウェーブレットとして **図 3-9** に示す Meyer のウェーブレットを用いた²⁰⁾。Meyer のウェーブレットは周波数領域で局在化しており、フーリエ変換と対応させた分析が可能であると考えられる¹⁶⁾。各レベルの周波数帯は **表 3-2** に示すとおりである。

図 3-10にウェーブレット変換の例を示す。波形データに0.1Hzのハイパスフィルタを適用しているため、中心周波数が0.1Hz以下であるレベル1からレベル4までのレベルは検討の対象範囲外とした。また、高周波数領域であるレベル11より高いレベルについては、地震動エネルギー全体に占める割合が低いため示していない。



(a) 波形

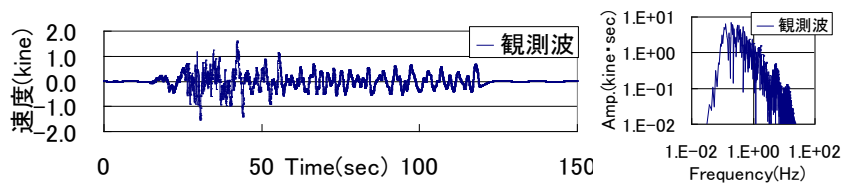


(b) フーリエ振幅

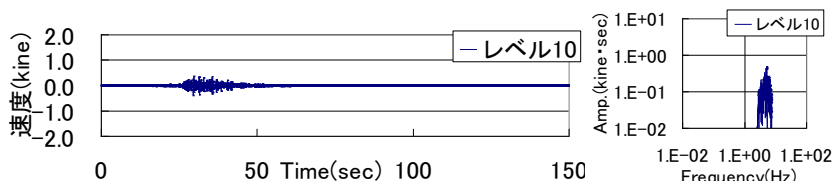
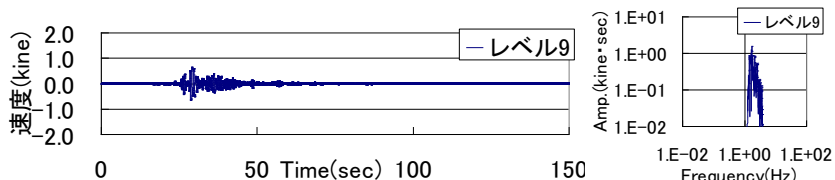
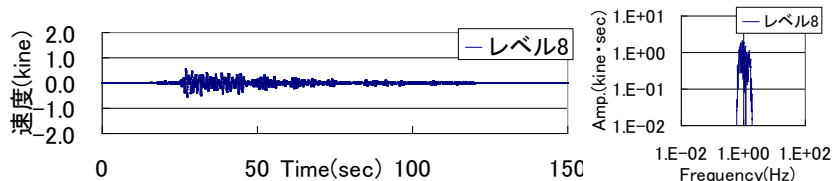
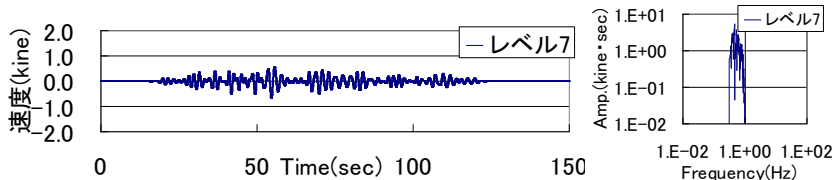
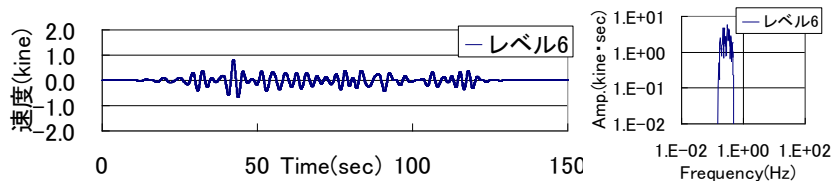
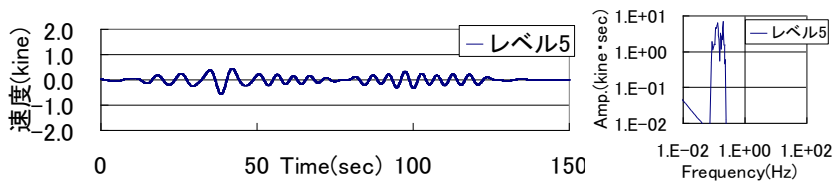
図 3-9 Meyer ウェーブレット

表 3-2 各レベルの周波数帯域

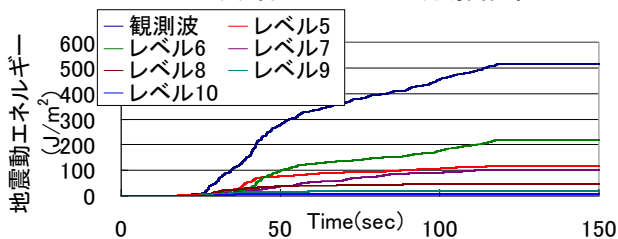
レベル	周波数帯(Hz)
0	- 0.008
1	0.004 - 0.016
2	0.008 - 0.033
3	0.016 - 0.065
4	0.033 - 0.130
5	0.065 - 0.260
6	0.130 - 0.521
7	0.260 - 1.042
8	0.521 - 2.083
9	1.042 - 4.167
10	2.083 - 8.333
11	4.167 - 16.667
12	8.333 - 33.333
13	16.667 -



(a) 観測波



(b) 各レベルへの分解結果



(c) 地震動エネルギーの時刻歴

図 3-10 ウェーブレット変換の例

3.4.2. 地震動エネルギーの周波数特性

地震動エネルギーの周波数特性を、以下の指標に着目して検討した。

- ・各レベルの地震動エネルギー (E_m) の距離減衰特性
- ・地震動エネルギーに対する各レベルの寄与率 (E_m/E)

寄与率は、各地震記録において、地震動エネルギー全体 (E) に対する各レベルの地震動エネルギー (E_m) の割合を表している。

図 3-11に、例として、観測記録のレベル5及びレベル10の成分の地震動エネルギーのプロットとその距離減衰特性を示す。距離減衰式は3.3.2と同じ手法を用いて決定した。また、図 3-12に各距離減衰式の係数を各レベルに対して求めた結果を示す。係数 c は100km以下の等価震源距離では係数 a , b に比べて影響が小さいため、係数 a , b に対して検討した。

図 3-13に、例として、観測記録のレベル5及びレベル10の成分の地震動エネルギーに対する寄与率とモーメントマグニチュード及び等価震源距離との関係を示す。表 3-1に示す全地震記録に対して各レベルごとに求めた寄与率を平均した結果を図 3-14に示す。

地震動エネルギーの特性を、オメガ・スクエア・モデルと比較して検討した。オメガ・スクエア・モデルは、震源における変位フーリエ振幅が低周波数側で一定値であり、コーナー周波数より高い周波数 f では f^{-2} に比例して減少する。また、規模の大きい地震と規模の小さい地震の変位フーリエ振幅の比は低い周波数で大きく、高い周波数では小さい。地震動エネルギーは速度波形のパワースペクトルに比例するため、図 3-15に示すように速度でみたモデルと比較する。

図 3-12における係数 a はモーメントマグニチュードに関する係数、係数 b は等価震源距離に関する係数である。

係数 a は、低いレベルで大きく、高いレベルで小さくなっている。これは、図 3-11で、レベル5においてはモーメントマグニチュードごとにプロットした各距離減衰式が離れているがレベル10では近いことに対応しており、オメガ・スクエア・モデルにおける大きい規模の地震と小さい規模の地震との違いに対応していると考えられる。 M_w の定義から、 M_w の差が2に対して地震モーメント M_0 の比は $10^3=1000$ 倍であり、オメガ・スクエア・モデルに従うと長周期側の振幅は1000倍、短周期側は10倍となる。パワーでみると、 M_w の差が1に対して長周期側は1000倍、短周期側は10倍である。したがって、理論的には、 a は低いレベルで3.0になり高いレベルで1.0になると考えられる。観測記録では、低周波数側のレベル5で2.0程度と理論値と比べてやや小さめである。これは、低周波数側は表面波の影響が含まれるためと考えられる。表面波マグニチュード M_s の定義式より、 M_s の差が1に対して表面波の振幅は10倍であり、エネルギーでは100倍である。新潟県中越沖地震や鳥取県西部地震において、周期数秒程度の卓越周期をもつレーリー波やラブ波等の表面波が励起され伝播する様子が、K-NETやKiK-netの地震観測網でとらえられている^{21), 22)}。高周波数側のレベル10で a は1.4程度であり理論値よりも若干大きい。これは、地震動の高周波数成分に関係する応力降下量の影響や、数Hz程度の周波数成分をもつLg波等の直達S波以外の地震波の影響等が考えられる。

係数 b はレベル5やレベル6の低いレベルでは-0.5~-1.0と絶対値が小さく、レベル8~レベル10では-2~-2.5と絶対値が大きい。これは、**図 3-11**で、レベル5では傾きが小さいが、レベル10では傾きが大きいことに対応している。この特性は、高周波数側では距離に対する内部減衰が大きく、低周波数側では小さいという地震波の伝播経路特性と対応していると考えられる。

図 3-13については、いずれも等価震源距離との明確な関係はみられないが、レベル5の方が寄与が大きいことがわかる。また、**図 3-14**からはレベル6 (0.13Hz~0.52Hz) やレベル7 (0.26Hz~1.04Hz) の寄与が大きいことがわかる。

オメガ・スクエア・モデルにしたがうと、エネルギーの周波数分布はコーナー周波数よりも低周波数側で周波数の2乗に比例して大きくなり、コーナー周波数でピークとなり、コーナー周波数よりも高周波数側では周波数の-2乗に比例して小さくなる。**図 3-14**に示す対数上の傾きは、各レベルの寄与率の比の対数をレベル間の中心周波数の比の対数で割った値である(例えば、L5の寄与率=0.179, L6の寄与率=0.216なので、対数上の傾き= $\log(0.216/0.179) / \log(2.0)=0.27$)。**図 3-14**から、レベル10より大きい高周波数側では、レベル10~レベル11が-1.65, レベル11~レベル12が-2.53と傾きがほぼ-2であり、**図 3-15**に示すオメガ・スクエア・モデルの高周波数側の傾きと整合している。低周波数側では傾きは小さく、ピークも滑らかであるが、これはさまざま規模の地震が含まれており、コーナー周波数が一定していないためと考えられる。

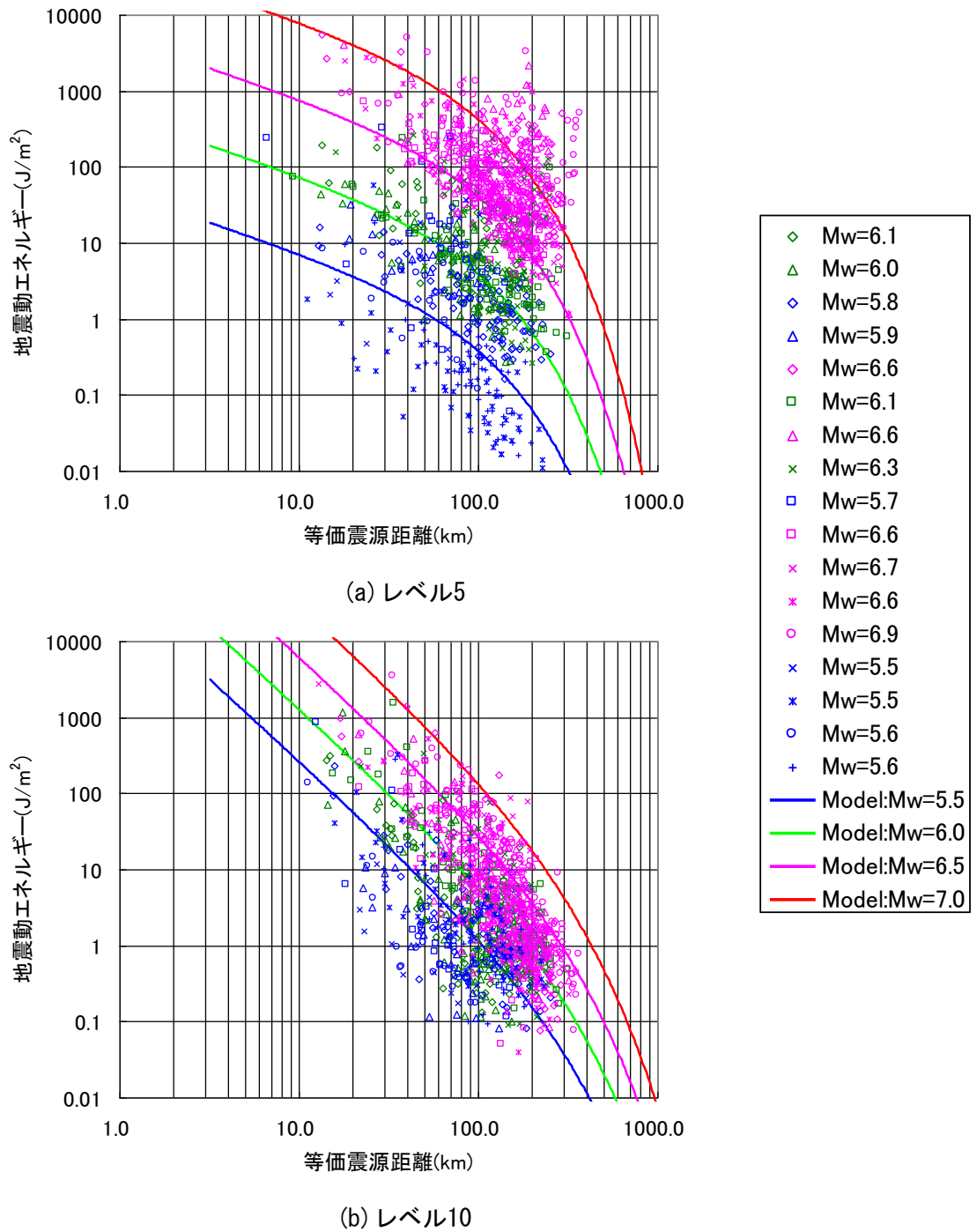
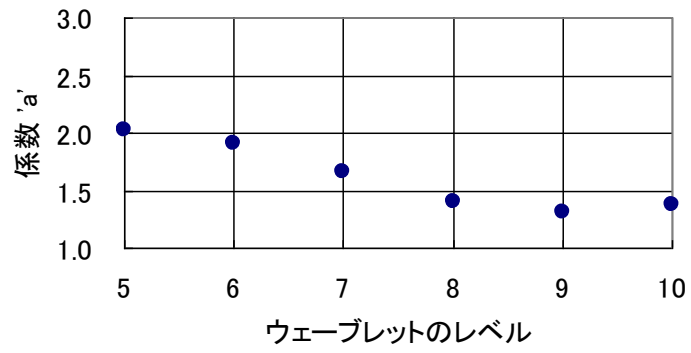
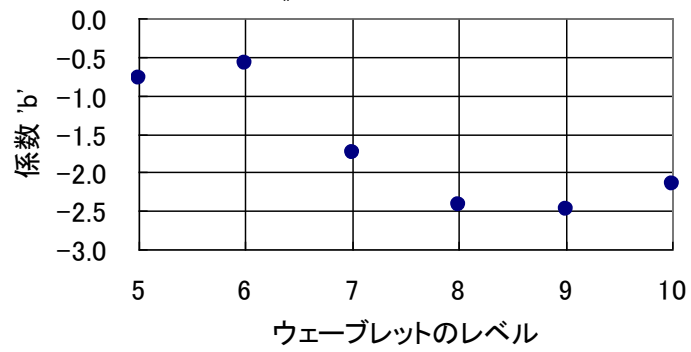


図 3-11 レベル5 とレベル10 の地震動エネルギーの距離減衰特性

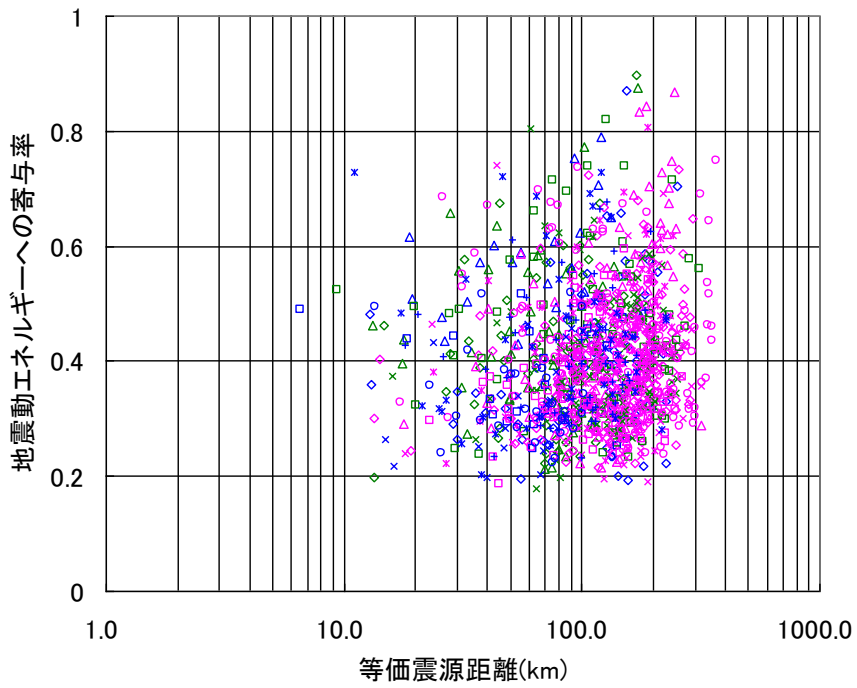


(a) M_w に関する係数a

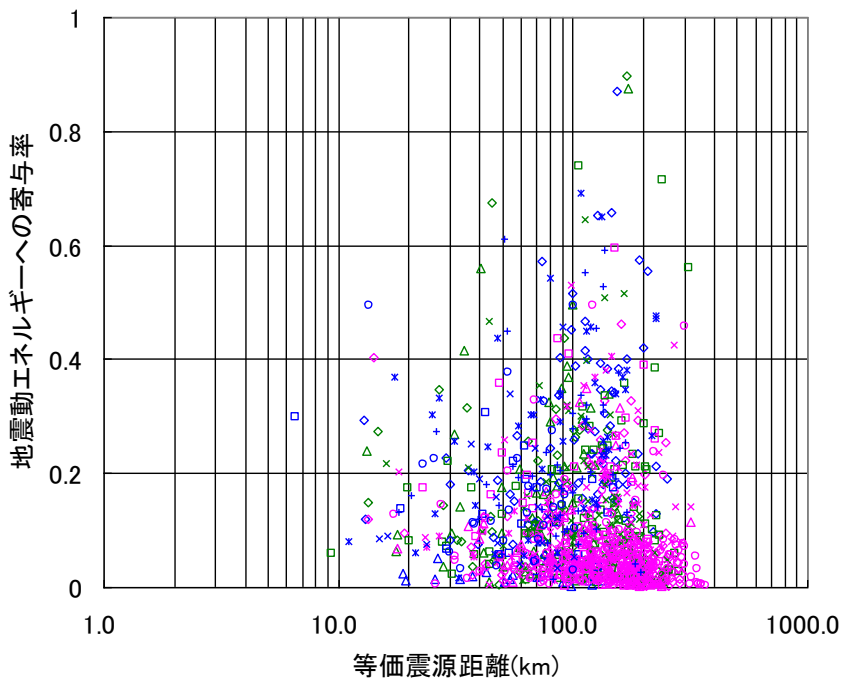


(b) 等価震源距離 λ_{eq} に関する係数b

図 3-12 距離減衰式の係数とウェーブレットレベルとの関係



(a) レベル5



(b) レベル10

- ◇ Mw=6.1
- △ Mw=6.0
- ◇ Mw=5.8
- △ Mw=5.9
- ◇ Mw=6.6
- Mw=6.1
- △ Mw=6.6
- × Mw=6.3
- Mw=5.7
- Mw=6.6
- × Mw=6.7
- × Mw=6.6
- Mw=6.9
- × Mw=5.5
- × Mw=5.5
- Mw=5.6
- + Mw=5.6

図 3-13 レベル5 とレベル10 の地震動エネルギー寄与率

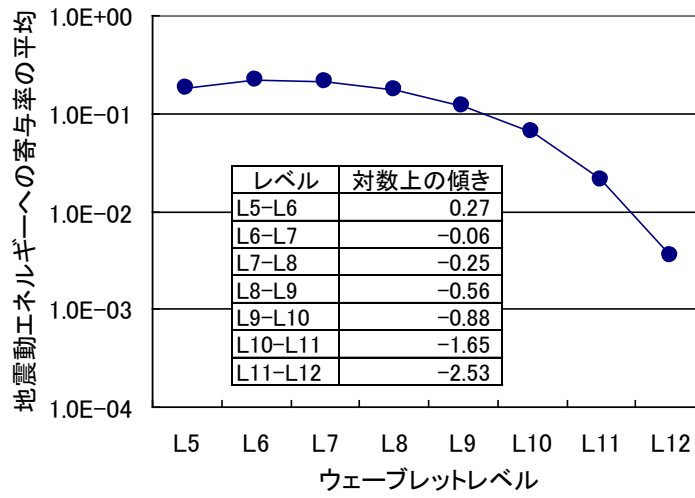


図 3-14 各レベルの地震動エネルギーへの寄与率

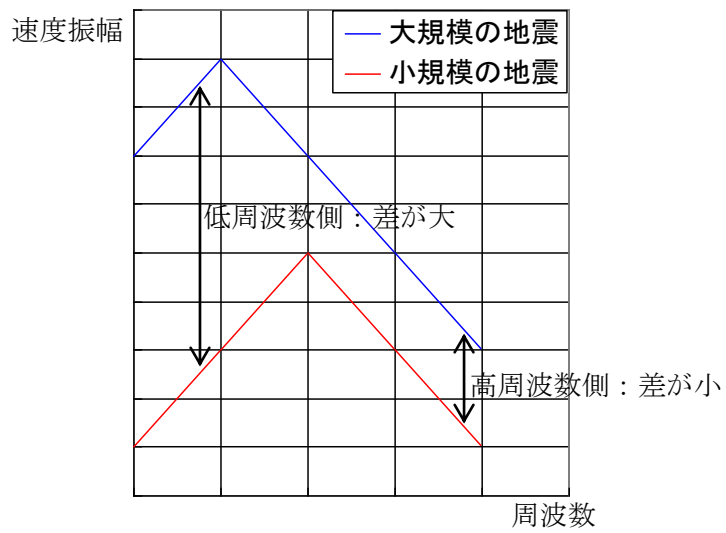


図 3-15 オメガ・スクエア・モデル

3.5. 結論

地震動は、地盤内の伝播に伴って減衰が生じる。幾何減衰によって波動場全体としてのエネルギーの変化は生じないが単位要素を通過する量として考えた場合には距離減衰が生じ、粘性減衰等によって地震動のエネルギーは他のエネルギーに転化され減少する。さらに地盤の不均質性によって観測点ごとにばらつきが生じることが考えられる。国内における17の地震について、K-NET及びKiK-netの522の観測記録を用いて地震動エネルギーの距離減衰特性を調べ、モーメントマグニチュードと等価震源距離を説明変数として距離減衰式を作成した結果、地震動エネルギーの距離減衰特性のばらつきは、最大加速度値よりも小さく、最大速度値とはほぼ同程度であるが、地震の規模に起因するばらつきは、最大加速度値や最大速度値よりも小さいことがわかった。さらに、地震動エネルギーの周波数特性をウェーブレット変換に基づいて調べたところ、地震動エネルギーはオメガ・スクエア・モデルと整合していることが示された。これらの結果から、地震動エネルギーは、最大加速度値等よりも地震の規模や距離に応じて安定的に地震動の強さを評価できる指標であると結論づけられた。

3.6. 参考文献

- 1) 金井清：地震動の振動特性に関する実験式，第2回日本地震工学シンポジウム講演集，pp1-4，1967.
- 2) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A new attenuation relationship for peak ground accelerations derived from strong-motion accelerograms, *Proceedings of Ninth Conference of Earthquake Engineering II*, 343-348, 1988.
- 3) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，pp.63-70，1999.
- 4) 松崎伸一，久田嘉章，福島美光：断層近傍まで適用可能な震度の距離減衰式の開発，日本建築学会構造系論文集，第604号，pp.201-208，2006.
- 5) 安中正，山崎文雄，片平冬樹：気象庁87型強震記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.161-164，1997.
- 6) 内山泰生，翠川三郎：震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第606号，pp.81-88，2006.
- 7) 片岡正次郎，佐藤智美，松本俊輔，日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式，土木学会論文集A，Vol.62 No.4，pp.740-757，2006.
- 8) 大淵正博，高田毅士：時刻歴波形構築のための地震動エネルギースペクトルに関する距離減衰式の提案，日本建築学会構造系論文集，第611号，pp.21-27，2007.
- 9) 木下繁夫，上原正義，斗沢敏雄，和田安司，小久江洋輔：K-NET95型地震計の記録特性，地震2，第49巻，pp.467-481，1997.
- 10) 善功企，山崎浩之，梅原靖文：地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，Vol.26，No.1，pp.41-113，1987.
- 11) Ohno,S., Ohta,S., Ikeura,T. and Takemura,M. : Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, *Tectonophysics*, 218, pp.69-81, 1993.
- 12) Joyner, W. B. and Boore, D. M. : Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from Imperial Valley, *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, pp. 2011-2038, 1981.
- 13) 伊山潤，桑村仁：ウェーブレット変換による地震動の時間一周波数解析，日本建築学会構造系論文集，第514号，pp.59-64，1998.
- 14) 翠川三郎，大竹雄：地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析，日本地震工学会論文集，第3巻，第1号，pp.59-70，2003.
- 15) 佐々木文夫，前田達哉：データ解析におけるウェーブレット変換の基本性状の検討，日本建築学会構造系論文集，第453号，pp.197-206，1993.
- 16) 佐々木文夫，前田達哉，山田道夫：ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析，構造工学論文集，Vol. 38B，pp. 9-20，1992.
- 17) 宮脇幸治郎，土岐憲三：ウェブレット解析による地震波特性に関する一考察，土木学会論文集，No.525/I -33，pp.261-274，1995.

- 18) 伊山潤：ウェーブレット変換による1質点弾性振動系の応答評価 地震動の離散ウェーブレット変換と入力エネルギーの関係に関する考察 その1, 日本建築学会構造系論文集, 第578号, pp.37-42, 2004.
- 19) 伊山潤：ウェーブレット変換による1質点弾塑性振動系の応答評価 地震動の離散ウェーブレット変換と入力エネルギーの関係に関する考察 その2, 日本建築学会構造系論文集, 第584号, pp.51-58, 2004.
- 20) Meyer Y. : Orthonormal Wavelets, in *Wavelets*, Springer, pp. 21-37, 1989.
- 21) 古村孝志, 武村俊介, 早川俊彦：2007年新潟県中越沖地震(M6.8)による首都圏の長周期地震動, 地学雑誌, 116, pp. 576-587, 2007.
- 22) Furumura,T., Kennett, B. L. N. and Koketsu, K., : Visualization of 3D Wave Propagation from the 2000 Tottori-ken Seibu, Japan, Earthquake: Observation and Numerical Simulation, *Bull. Seism. Soc. Am.* 93, pp. 870-881, 2003.

4. 地震動エネルギーの保存則

4.1. はじめに

地震動エネルギーを地震動の強さの指標として用いるためには、エネルギー保存則について検討することが重要である。一般にエネルギーには保存則が成り立つことが知られている。本研究で定義した地震動エネルギーにもエネルギー保存則が成立すれば、地震動の強さを合理的に評価することができると期待される。ここでは、地盤内における地震動エネルギーの基本的な保存則について、減衰の無い水平成層地盤を対象に、1次元のSH波の弾性伝播問題として検討した。

4.2. 地震動エネルギーに関する検討

式(2-3)に示したように、反射波を生じない場合に震源を取り囲む凸な面を通過する地震動のエネルギーは保存される。しかしながら、自由表面が存在する成層地盤を考えると、反射波や透過波が生じる。図 4-1に示すように、基盤から入射するエネルギーは、その全てが透過せずに、透過波のエネルギーと反射波のエネルギーとに分離される。基盤から最終的に放射されるエネルギーの総和は基盤から入射するエネルギーと等しいことが保証されるが、その層内の波や自由表面の波は、透過波と反射波の重ね合わせとなるため、層内で観測されるエネルギー密度が入射するエネルギーと等しいかは自明ではない。そのため、エネルギーの保存についての証明を避ける形で、工学的に実用化されてきた。例えば、国生・本山¹⁾は、エネルギーが次式で定義されるとき、層内の上昇波のエネルギーは下降波のエネルギーと極めて異なっていることを示している。

$$\int_0^{\infty} \rho V_s \dot{u}^2 dt \quad (4-1)$$

ここで、 V_s はせん断波速度である。彼らは上式で定義されるエネルギーの保存について検討せずに、その理由も地盤の非線形性に因るものとしている。

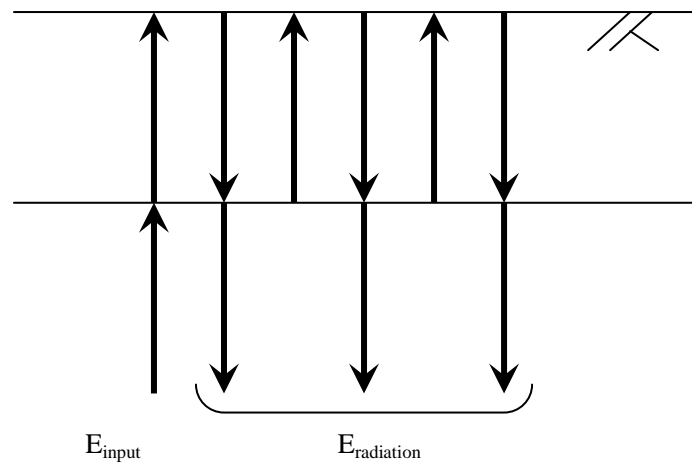


図 4-1 成層地盤へ入射した地震動(エネルギー : $E_{input}=E_{radiation}$)の重複反射

4.2.1. 半無限水平2層地盤

図4-2に示すように、半無限の媒質0と媒質1が面で接しており、媒質0からSH波が境界面に対して垂直に入射する場合、密度を ρ 、S波速度を V_s として、境界面における媒質0から媒質1への透過係数 T_{01} 及び媒質0から媒質0への反射係数 R_{00} は以下で表される。

$$T_{01} = \frac{2\rho_0 V_{s0}}{\rho_0 V_{s0} + \rho_1 V_{s1}} \quad (4-2)$$

$$R_{00} = \frac{\rho_0 V_{s0} - \rho_1 V_{s1}}{\rho_0 V_{s0} + \rho_1 V_{s1}} \quad (4-3)$$

ここに、 ρ 、 V_s の下添字は媒質を表す。入射波の速度振幅を \dot{u}_0 として、入射波の地震動エネルギー E_0 を、次式で定義する。

$$E_0 = \frac{1}{2} \rho_0 V_{s0} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{u}_0^2 dt \quad (4-4)$$

また、媒質0への反射波の地震動エネルギー E_R と媒質1への透過波の地震動エネルギー E_T は、それぞれ次式で表す。

$$E_R = \frac{1}{2} \rho_0 V_{s0} \int_{-\infty}^{\infty} (R_{00} \dot{u}_0)^2 dt \quad (4-5)$$

$$E_T = \frac{1}{2} \rho_1 V_{s1} \int_{-\infty}^{\infty} (T_{01} \dot{u}_0)^2 dt \quad (4-6)$$

式(4-4)、式(4-5)、式(4-6)より、 $E_0 = E_R + E_T$ を導くことができるため、地盤の境界面において地震動エネルギーは、透過するエネルギーと反射するエネルギーの和として保存されることがわかる。

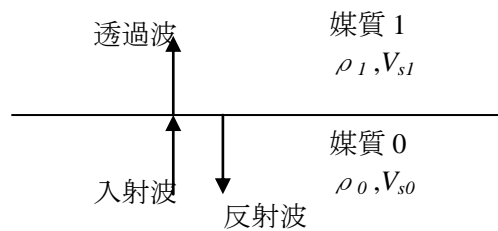


図 4-2 半無限水平2層地盤

4.2.2. 自由表面を有する水平2層地盤

(1) 時間領域での検討

図 4-3 に示すように、半無限媒質の基盤と表層からなる2層地盤が平面で接しており、基盤からSH波が境界面に対して垂直に入射することとする。入射波は次式で表される。

$$\dot{u}_0^U = A(t + z_0/V_{s0}) \quad (4-7)$$

ここに、 \dot{u}_0^U 、 t 、 Z_0 、 V_{s0} はそれぞれ、基盤内の上昇波の速度振幅、時間、基盤上端を原点とした場合の基盤内の深さ、基盤のS波速度であり、 A は \dot{u}_0^U が t と Z_0 の関数であることを表している。基盤から入力した波は表層内で重複反射を生じる。透過係数 T_{01} は式(4-2)で表され、反射係数 R_{11} は次式で表される。

$$R_{11} = \frac{-\rho_0 V_{s0} + \rho_1 V_{s1}}{\rho_0 V_{s0} + \rho_1 V_{s1}} \quad (4-8)$$

このとき表層内の上昇波 \dot{u}_1^U は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{u}_1^U &= T_{01}A(t - (H - z_1)/V_{s1}) + T_{01}R_{11}A(t - (3H - z_1)/V_{s1}) \\ &\quad + \cdots + T_{01}(R_{11})^{k-1}A(t - ((2k-1)H - z_1)/V_{s1}) \\ &= T_{01} \sum_{k=1}^{\infty} (R_{11})^{k-1} A(t - ((2k-1)H - z_1)/V_{s1}) \end{aligned} \quad (4-9)$$

ここに、 Z_1 、 H 、 V_{s1} はそれぞれ、表層上端を原点とした場合の表層内の深さ、表層の厚さ、表層のS波速度である。同様に下降波 \dot{u}_1^D は次式のように表すことができる。

$$\dot{u}_1^D = T_{01} \sum_{k=1}^{\infty} (R_{11})^{k-1} A(t - ((2k-1)H + z_1)/V_{s1}) \quad (4-10)$$

また、基盤内の下降波 \dot{u}_0^D は次式のように表すことができる。

$$\dot{u}_0^D = R_{00}A(t - z_0/V_{s0}) + T_{01}T_{10} \sum_{k=1}^{\infty} (R_{11})^{k-1} A(t - 2kH/V_{s1} - z_0/V_{s0}) \quad (4-11)$$

基盤の上昇波のエネルギーは、

$$E_0^U = \frac{1}{2} \rho_0 V_{s0} \int_{-\infty}^{\infty} A(t + z_0/V_{s0})^2 dt = \frac{1}{2} \rho_0 V_{s0} R(0) \quad (4-12)$$

ここに、 $R(t)$ は $A(t)$ の自己相関関数である。表層の上昇波のエネルギーは以下のようになる。

$$\begin{aligned} E_1^U &= \frac{1}{2} \rho_1 V_{s1} \int_{-\infty}^{\infty} \left(T_{01} \sum_{k=1}^{\infty} (R_{11})^{k-1} A(t - ((2k-1)H + z_1)/V_{s1}) \right)^2 dt \\ &= \frac{1}{2} \rho_1 V_{s1} (T_{01})^2 \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} (R_{11})^{k-1} (R_{11})^{l-1} R(2(l-k)H/V_{s1}) \end{aligned} \quad (4-13)$$

同様に，表層の下降波のエネルギーは，

$$E_1^D = \frac{1}{2} \rho_1 V_{s1} (T_{01})^2 \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} (R_{11})^{k-1} (R_{11})^{l-1} R(2(l-k)H/V_{s1}) \quad (4-14)$$

ここで，入射波がホワイトノイズの場合， $R(0)=1, R(t \neq 0)=0$ であるから，以下のように変形できる．

$$E_1^U = E_1^D = \frac{1}{2} \rho_1 V_{s1} (T_{01})^2 \sum_{k=1}^{\infty} (R_{11})^{2(k-1)} = \frac{1}{2} \rho_0 V_{s0} \quad (4-15)$$

途中，以下の無限級数解を用いた．

$$\sum_{k=1}^{\infty} ((R_{11})^2)^{k-1} = \frac{1}{1 - (R_{11})^2} \quad (4-16)$$

さらに，基盤内の下降波のエネルギーは，以下のようになる．

$$E_0^D = \frac{1}{2} \rho_0 V_{s0} \left\{ R_{00} R(0) + (T_{01})^2 (T_{10})^2 \sum_{k=1}^{\infty} (R_{11})^{2(k-1)} \right\} = \frac{1}{2} \rho_0 V_{s0} \quad (4-17)$$

以上より，入射波の自己相関関数が $t=0$ に局在する場合には，基盤内及び表層内の上昇波，下降波のエネルギーはすべて一致する．言い換えると，自己相関関数が $t=0$ に局在しない場合は，エネルギーが一致しない，すなわちエネルギー保存則が一般的には成り立たないことを示している．

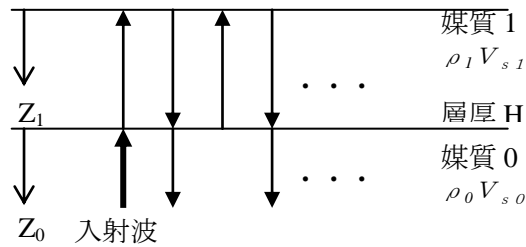


図 4-3 自由表面を有する水平 2 層地盤

(2) 周波数領域での検討

周波数領域で表現した各層内の変位は，以下の周波数領域の波動方程式を満足する．

$$-\frac{\omega^2}{V_{s1}^2}u_1(\omega, z_1) = \frac{\partial^2 u_1(\omega, z_1)}{\partial z_1^2} \quad (4-18)$$

$$-\frac{\omega^2}{V_{s0}^2}u_0(\omega, z_0) = \frac{\partial^2 u_0(\omega, z_0)}{\partial z_0^2}, \quad (4-19)$$

ここに， ω は角振動数， u_1 と u_0 はそれぞれ表層と基盤層の変位である．波動方程式の一般解は，次式のように上昇波と下降波の和で表される．

$$u_1(\omega, z_1) = A_1 e^{i\omega z_1/V_{s1}} + B_1 e^{-i\omega z_1/V_{s1}} \quad (4-20)$$

$$u_0(\omega, z_0) = A_0 e^{i\omega z_0/V_{s0}} + B_0 e^{-i\omega z_0/V_{s0}}, \quad (4-21)$$

ここに， i は虚数単位を表す． A_1 と A_0 は上昇波の振幅であり， B_1 と B_0 は下降波の振幅である．振幅を拘束するため，境界面において以下の境界条件が導入される．

$$u_1(\omega, h) = u_0(\omega, 0), \quad \rho_1 V_{s1}^2 \left. \frac{\partial u_1}{\partial z_1} \right|_{z_1=h} = \rho_0 V_{s0}^2 \left. \frac{\partial u_0}{\partial z_0} \right|_{z_0=0}. \quad (4-22)$$

その結果，基盤における振幅は表層の振幅と以下のマトリクスで関連づけられる．

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + R_{1,0})e^{i\omega h/V_{s1}}, & \frac{1}{2}(1 - R_{1,0})e^{-i\omega h/V_{s1}} \\ \frac{1}{2}(1 - R_{1,0})e^{i\omega h/V_{s1}}, & \frac{1}{2}(1 + R_{1,0})e^{-i\omega h/V_{s1}} \end{bmatrix}, \quad (4-23)$$

ここで， $R_{1,0} = \rho_1 V_{s1} / \rho_0 V_{s0}$ はインピーダンス比である．自由表面では表面力が0のため，変位の空間微分が0である．その結果，別の境界条件 $A_1 = B_1$ が導かれる．したがって，比 A_1/A_0 は次式で表される．

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{1}{\cos(\omega h/V_{s1}) + iR_{1,0} \sin(\omega h/V_{s1})}. \quad (4-24)$$

A_1/A_0 という量は，2層媒質の伝達関数 $H(\omega)$ の半分である．ここで， A_1/A_0 の絶対値の2乗として実数関数 P_1 を定義する．

$$P_1(\omega) = \left| \frac{A_1}{A_0} \right|^2 = \frac{1}{\cos^2(\omega h/V_{s1}) + iR_{1,0}^2 \sin^2(\omega h/V_{s1})}. \quad (4-25)$$

P_1 は $\cos(\omega h/V_{s1})$ の一価関数であり，**図 4-4**に示すように $\omega h/V_{s1} = n\pi$ の周期関数である．さらに， $\omega h/V_{s1} \in [0, \pi]$ で定義される P_1 は $\omega h/V_{s1} = \pi/2$ について対称である．したがって， $\langle P_1 \rangle$ で定義される $\omega \in [-\infty, \infty]$ における P_1 の平均は， $\omega h/V_{s1} \in [0, \pi/2]$ における P_1 の平均と等しい．

$$\begin{aligned}
\langle P_1 \rangle &= \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \frac{1}{\cos^2(\omega h/V_{s1}) + R_{1,0}^2 \sin^2(\omega h/V_{s1})} d\omega \\
&= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{d\tilde{\omega}}{\cos^2(\tilde{\omega}) + R_{1,0}^2 \sin^2(\tilde{\omega})},
\end{aligned} \tag{4-26}$$

ここで、 $\tilde{\omega} = \omega h / \beta_1$ と変数変換した。上式の積分は解析的に求めることができる。

$$\int_0^{\pi/2} \frac{d\tilde{\omega}}{\cos^2(\tilde{\omega}) + R_{1,0}^2 \sin^2(\tilde{\omega})} = \left[\frac{1}{R_{1,0}} \tan^{-1}(R_{1,0} \tan(\tilde{\omega})) \right]_0^{\pi/2} = \frac{\pi}{2R_{1,0}}, \tag{4-27}$$

したがって、周波数領域における P_1 の平均は、インピーダンス比 $R_{1,0}$ の逆数に等しい。

$$\langle P_1 \rangle = \frac{1}{R_{1,0}} = \frac{\rho_0 V_{s0}}{\rho_1 V_{s1}} \tag{4-28}$$

$\langle P_1 \rangle$ は、基盤への入力波が $|A_0| = 1$ を満たすとき、表層における上昇波の平均パワー、あるいは自由表面における観測波の振幅の半分の平均パワーを表している。同様に、 $|A_0| = 1$ のとき、 $\langle P_0 \rangle$ で定義される基盤における入力波の平均パワーは 1 に等しい。すなわち、以下の式が導かれる。

$$\rho_1 V_{s1} \langle P_1 \rangle = \rho_0 V_{s0} \langle P_0 \rangle. \tag{4-29}$$

式(4-29)は興味深い物理的特徴を示している。式(4-29)の左辺と右辺はともに上昇波の振幅の平均パワーに各層のインピーダンスを掛けたものである。これは、 $\rho V_s \langle P \rangle$ という量が各層で保存されることを示している。さらに、次式に示すように、その量は伝達関数 $H(\omega)$ から直接求めることができる。

$$\rho_1 V_{s1} \langle P_1 \rangle = \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \rho_1 V_{s1} \left| \frac{H(\omega)}{2} \right|^2 d\omega. \tag{4-30}$$

ところで、 $\langle P_1 \rangle$ がウィーナー・ヒンチンの関係を用いて

$$\langle P_1 \rangle = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_{-t/2}^{t/2} \left(\frac{1}{2} h(t) \right)^2 dt. \tag{4-31}$$

で表すことができるとする。ここに、 $h(t)$ は時間領域の伝達関数である。ただし、一般にデルタ関数の 2 乗に関する収束性の議論は容易でないため、ここでは形式的に表すものとする。このとき、 $\rho_1 V_{s1} \langle P_1 \rangle$ は

$$\rho_1 V_{s1} \langle P_1 \rangle = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_{-t/2}^{t/2} \rho_1 V_{s1} \left(\frac{1}{2} h(t) \right)^2 dt. \tag{4-32}$$

となり、前項のエネルギーの定義と類似する。

以上より、これまでの検討結果をまとめると、自由表面を有する水平 2 層地盤において、

$\rho V_s \langle P \rangle$ という物理量は保存されている。また、基盤入射波の周波数特性が単位振幅の一定値であホワイトノイズという条件においては、地震動エネルギーは保存されていることがわかった。

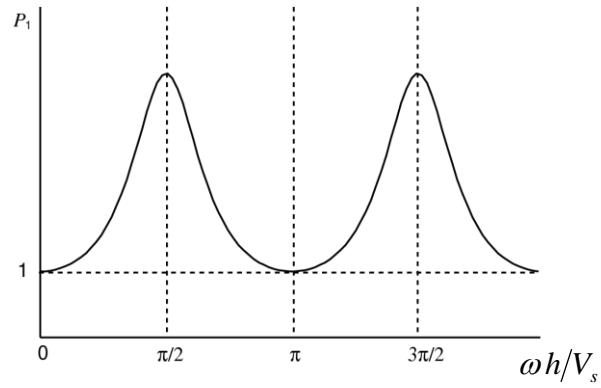


図 4-4 周期関数 P

4.3. 新たな保存量に関する検討

4.3.1. 自由表面を有する水平多層地盤

本節では、前節で導かれた物理量 $\rho V_s \langle P \rangle$ が、水平多層地盤において、各層で保存されるかどうかを調べる。図 4-5 に示すように、基盤の上に n 層 ($1-n$) からなる $n+1$ 層のモデルを考える。 k 層目のせん断波速度を V_{sk} 、密度を ρ_k 、層厚を h_k とする。2 層モデルと同様に、SH 波が鉛直に媒質中を伝播する場合を考える。

k 層における波動方程式の解は次式のように表すことができ、

$$u_k(\omega, z_k) = A_k e^{i\omega z_k / V_{sk}} + B_k e^{-i\omega z_k / V_{sk}}. \quad (4-33)$$

k 層目と $k+1$ 層目の間の境界面における境界条件は次式のように導かれる。

$$\begin{pmatrix} A_{k+1} \\ B_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1+R_{k,k+1})e^{i\omega h_k / V_{sk}}, & \frac{1}{2}(1-R_{k,k+1})e^{-i\omega h_k / V_{sk}} \\ \frac{1}{2}(1-R_{k,k+1})e^{i\omega h_k / V_{sk}}, & \frac{1}{2}(1+R_{k,k+1})e^{-i\omega h_k / V_{sk}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A_k \\ B_k \end{pmatrix}, \quad (4-34)$$

ここに、 $R_{k,k+1} = \rho_k V_{sk} / \rho_{k+1} V_{s,k+1}$ は k 層目と $k+1$ 層目の間のインピーダンス比である。以下、式(4-34)の行列式の成分を T_{ij}^k と表記する。1 層目と k 層目の間の振幅の関係は式(4-34)を再帰的に適用して、以下のように導き出される。

$$\begin{cases} A_k = T_{1i}^{k-1} \cdot T_{ij}^{k-2} \cdots T_{lm}^2 \cdot (T_{m1}^1 A_1 + T_{m2}^1 B_1) \\ B_k = T_{2i}^{k-1} \cdot T_{ij}^{k-2} \cdots T_{lm}^2 \cdot (T_{m1}^1 A_1 + T_{m2}^1 B_1) \end{cases} \quad (\text{for } k \geq 3) \quad (4-35)$$

自由表面における表面力 0 の条件から、 A_1 は B_1 と等しい。よって、

$$\begin{cases} A_k = C_{k-1} A_1 \\ B_k = D_{k-1} A_1 \end{cases} \quad (\text{for } 1 \leq k \leq n) \quad (4-36)$$

ここに、

$$\begin{cases} C_{k-1} = T_{1i}^{k-1} \cdot T_{ij}^{k-2} \cdots T_{lm}^2 \cdot (T_{m1}^1 + T_{m2}^1) \\ D_{k-1} = T_{2i}^{k-1} \cdot T_{ij}^{k-2} \cdots T_{lm}^2 \cdot (T_{m1}^1 + T_{m2}^1) \end{cases} \quad (\text{for } k \geq 2) \quad (4-37)$$

C_k と D_k は、以下のような再帰的な関係がある。

$$\begin{cases} C_k = T_{11}^k C_{k-1} + T_{12}^k D_{k-1} \\ D_k = T_{21}^k C_{k-1} + T_{22}^k D_{k-1} \end{cases} \quad (4-38)$$

C_0 と D_0 が $C_0 = D_0 = 1$ と仮定されるとき、上の再帰的な式は $k \geq 1$ において一般的に適用可能である。 $k=1$ においては、 C_1 と D_1 は明らかに次式のように書ける。

$$\begin{cases} C_1 = p_1 \alpha_1 + q_1 \alpha_1^* \\ D_1 = q_1 \alpha_1 + p_1 \alpha_1^* \end{cases} \quad (4-39)$$

ここに、 p_k と q_k は $p_k = \frac{1}{2}(1 + R_{k,k+1})$, $q_k = \frac{1}{2}(1 - R_{k,k+1})$ で定義される実数であり、 α_k は $\alpha_k = e^{i\omega_k/V_{sk}}$ で定義される複素数である。 α_k^* は α_k の複素共役である。よって、 D_1 は C_1 の複素共役である。

もし D_k が C_k と複素共役であるとする、 C_{k+1} と D_{k+1} は次式のように表される。

$$\begin{cases} C_{k+1} = p_{k+1}\alpha_{k+1}C_k + q_{k+1}\alpha_{k+1}^*D_k = p_{k+1}\alpha_{k+1}C_k + q_{k+1}(\alpha_{k+1}C_k)^* \\ D_{k+1} = q_{k+1}\alpha_{k+1}C_k + p_{k+1}\alpha_{k+1}^*D_k = q_{k+1}\alpha_{k+1}C_k + p_{k+1}(\alpha_{k+1}C_k)^* \end{cases} \quad (4-40)$$

よって、 D_{k+1} は C_{k+1} の複素共役となり、 C_n と D_n は以下の関係式を満たすことがわかる。

$$C_n^* = D_n \quad (4-41)$$

2 層地盤のときと同様に、パワー $P_1(\omega)$ を次式のように A_1/A_0 の絶対値の 2 乗として定義する。

$$P_1(\omega) = \left| \frac{A_1}{A_0} \right|^2 = \frac{1}{|C_n|^2} \quad (4-42)$$

式(4-42)の最後の部分の分母は以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} |C_n|^2 &= |T_{11}^n C_{n-1} + T_{12}^n D_{n-1}|^2 \\ &= \left| \frac{1}{2}(1 + R_{n,0})\alpha_n C_{n-1} + \frac{1}{2}(1 - R_{n,0})\alpha_n^* C_{n-1}^* \right|^2 \\ &= |\operatorname{Re}[\alpha_n C_{n-1}] + iR_{n,0} \operatorname{Im}[\alpha_n C_{n-1}]|^2 \\ &= (\operatorname{Re}[\alpha_n C_{n-1}])^2 + R_{n,0}^2 (\operatorname{Im}[\alpha_n C_{n-1}])^2 \end{aligned} \quad (4-43)$$

ここで、 α_n は $\alpha_n = e^{i\omega_n/V_{sn}}$ で定義される複素数である。 Re と Im はそれぞれ引数部の実数部と虚数部を表す。したがって、 P_1 の平均である $\langle P_1 \rangle$ は、次式のように書ける。

$$\langle P_1 \rangle = \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \frac{d\omega}{(\operatorname{Re}[\alpha_n C_{n-1}])^2 + R_{n,0}^2 (\operatorname{Im}[\alpha_n C_{n-1}])^2} \quad (4-44)$$

2 層モデル($n=1$)においては、 $C_0=1$ とみなすことができるため、 $\langle P_1 \rangle$ の表現は式(4-26)と等しい。式(4-44)は、3 層以上のケース($n \geq 2$)については解析的な積分を施すことができないため、別の方法で値を評価する必要がある。もし積分値が $1/R_{1,0}$ となれば、 $\rho_1 V_{s1} \langle P_1 \rangle$ と $\rho_0 V_{s0} \langle P_0 \rangle$ は等しくなる。同じようにして、 k 層目($k \geq 2$)における上昇波の平均パワーは次式のように表される。

$$\langle P_1 \rangle = \left\langle \left| \frac{A_k}{A_0} \right|^2 \right\rangle = \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \frac{(\operatorname{Re}[\alpha_{k-1} C_{k-2}])^2 + R_{k-1,k}^2 (\operatorname{Im}[\alpha_{k-1} C_{k-2}])^2}{(\operatorname{Re}[\alpha_n C_{n-1}])^2 + R_{n,0}^2 (\operatorname{Im}[\alpha_n C_{n-1}])^2} \quad (4-45)$$

もし積分値が $1/R_{k,k-1}$ であれば、 $\rho V_s \langle P \rangle$ は各層で保存されていることになる。したがって、モンテカルロシミュレーションを行ってその物理量の特徴を調べた。

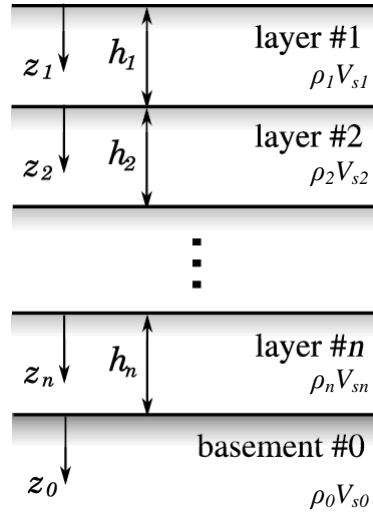


図 4-5 水平多層モデル

4.3.2. 数値解析による検討

まず、2層モデルに対してモンテカルロシミュレーションを実施することにより、 $\rho V_s \langle P \rangle$ が保存されているかを数値的に検証した。一様乱数によって、せん断波速度 10m/s ~ 700m/s、密度 $1000\text{kg/m}^3 \sim 2000\text{kg/m}^3$ の間でランダムに、表層と基盤に与え、地盤モデルを 500 セット作成した。表層のパラメータが基盤よりも小さくなるような拘束はしていない。また、表層の厚さについても 1m から 50m の間で一様乱数で生成した。図 4-6 にインピーダンス比 $R_{1,0}$ と層の厚さ h のパラメータ分布を示す。

各モデルにおいて、パワー $P_1(\omega)$ を式(4-26)によって算定した。図 4-7 に $1/R_{1,0}$ で正規化した P_1 の 3 つのサンプルを示す。前節で $P_1(\omega)$ の平均は $1/R_{1,0}$ になることが示されているので、 $R_{1,0}P_1(\omega)$ の平均は 1 になるはずである。振幅や周期性は 3 つのサンプルで異なるのに対して、 $R_{1,0}P_1(\omega)$ の計算値はどのサンプルも 1 の周辺に分布する。

$\rho V_s \langle P \rangle$ の保存について検証するため、 $\rho_1 V_{s1} \langle P_1 \rangle$ と $\rho_0 V_{s0} \langle P_0 \rangle$ と比較した。 $\langle P \rangle$ を求めるための積分は、 1.0s^{-1} から $2.5 \times 10^5\text{s}^{-1}$ の間で 1.0s^{-1} 間隔の数値積分で近似する。図 4-8 に $\rho V_s \langle P \rangle$ の比較を、 $\rho_1 V_{s1} \langle P_1 \rangle = \rho_0 V_{s0} \langle P_0 \rangle$ の直線と合わせてプロットする。黒点で示されているシミュレーション結果は、正確に線上にある。したがって、シミュレーション結果からも、2層モデルにおいて $\rho V_s \langle P \rangle$ が保存されることが確認された。

同様に、3層及び4層モデルに対してモンテカルロシミュレーションを行った。一様乱数によって、せん断波速度 10~700m/s、密度 $1000 \sim 2000\text{kg/m}^3$ の間でランダムに、基盤を含む各層に与え、地盤モデルを 500 セット作成した。全体の層の厚さについても 1 から 50m の間で一様乱数で生成し、所定の層数に分割した。図 4-9 及び図 4-12 に基盤と表層の間のインピーダンス比と全体の層厚のパラメータ分布を示す。

図 4-10 と図 4-13 に 3層モデル及び4層モデルにおいて算出され、 $1/R_{1,0}$ で正規化された $P_1(\omega)$ の 3 つのサンプルをそれぞれ示す。両モデルともいくつかの周期性が重なり合うため、 $P_1(\omega)$ の周期性を容易に見積もることができない。前節では P_1 の平均は解析的に求めることができないと述べたが、 $R_{1,0}P_1(\omega)$ は 1 の周りに分布している。そして、各層の間における $\rho V_s \langle P \rangle$ を図 4-11 及び図 4-14 に示す。 $\langle P \rangle$ を求めるための積分は 2層モデルと同様に、 1.0s^{-1} から $2.5 \times 10^5\text{s}^{-1}$ の間で 1.0s^{-1} 間隔の数値積分で近似した。3層モデルや4層モデルでも 2層モデルの場合と同様に、基盤を含む各層の $\rho V_s \langle P \rangle$ はほぼ等しいことがわかる。

さらに、10層モデルについてもシミュレーションを実施した。一様乱数によって、せん断波速度 10~700m/s、密度 $1000 \sim 2000\text{kg/m}^3$ の間でランダムに、基盤を含む各層に与え、地盤モデルを 500 セット作成した。全体の層の厚さについても 1 から 50m の間で一様乱数で生成し、所定の層数に分割した。図 4-15 に基盤と表層の間のインピーダンス比と全体の層厚のパラメータ分布を示す。

表層と基盤との $\rho V_s \langle P \rangle$ の比較を図 4-16 に示す。積分は 0.2s^{-1} から $1.0 \times 10^7\text{s}^{-1}$ の間で 0.2s^{-1} 間隔の数値積分で近似した。他のケースと同様に、表層と基盤の $\rho V_s \langle P \rangle$ はほぼ等しい。 $\rho V_s \langle P \rangle$ の深度分布(基盤における値で正規化されている)を図 4-17 に示す。 $\rho V_s \langle P \rangle$ は

各深度でほぼ一定であることがわかる。

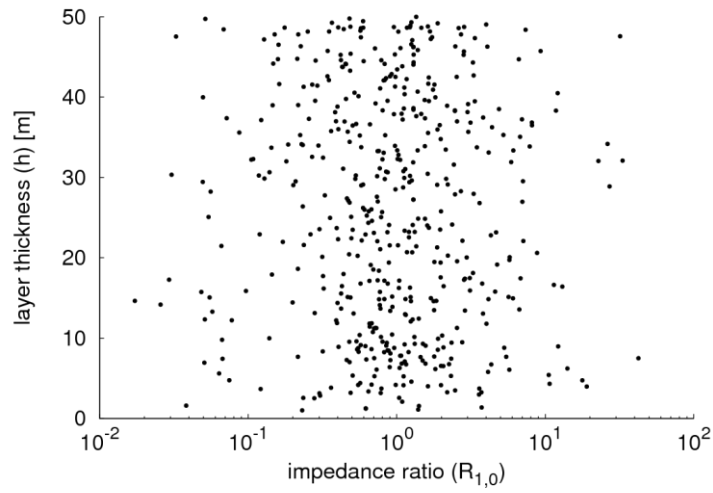


図 4-6 2層モデルのインピーダンス比と層厚の分布

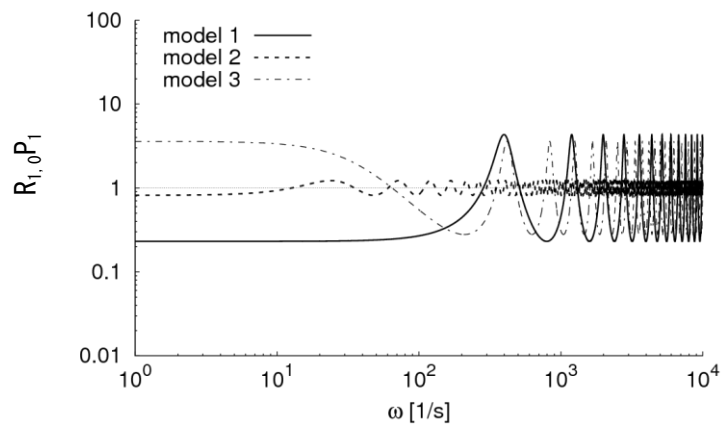


図 4-7 2層モデルにおいて $1/R_{1,0}$ で正規化した関数 P_1 の例

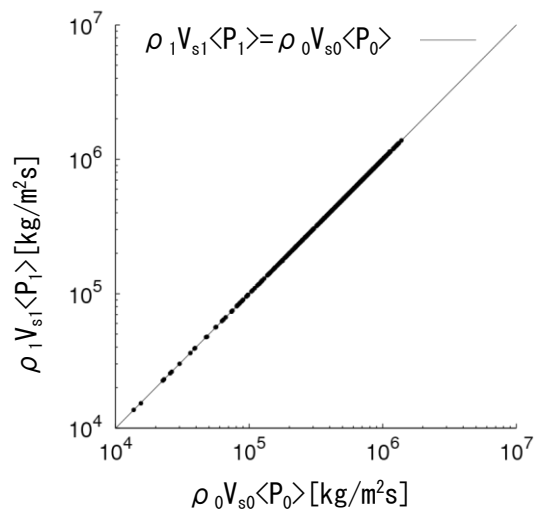


図 4-8 2層モデルにおける基盤と表層との $\rho V_s \langle P \rangle$ の比較結果

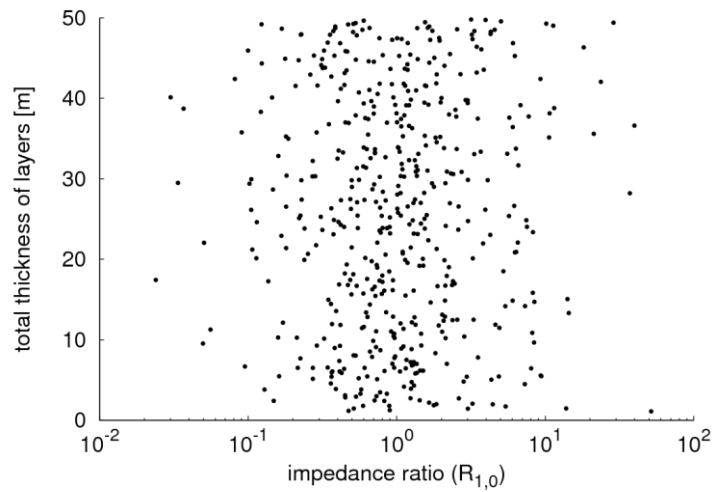


図 4-9 3層モデルのインピーダンス比と層厚の分布

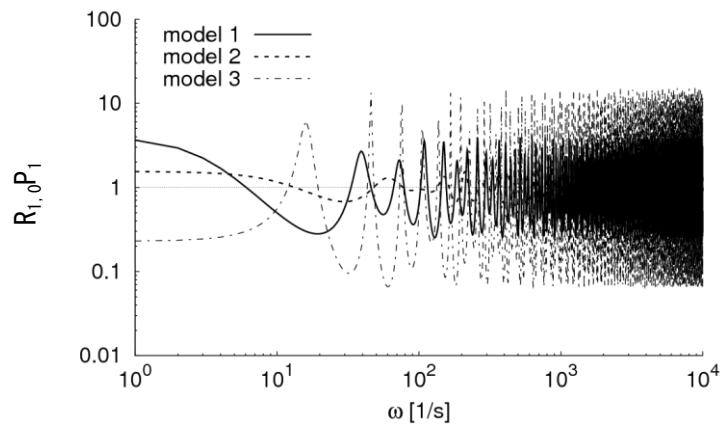


図 4-10 3層モデルにおいて $1/R_{1,0}$ で正規化した関数 P_1 の例

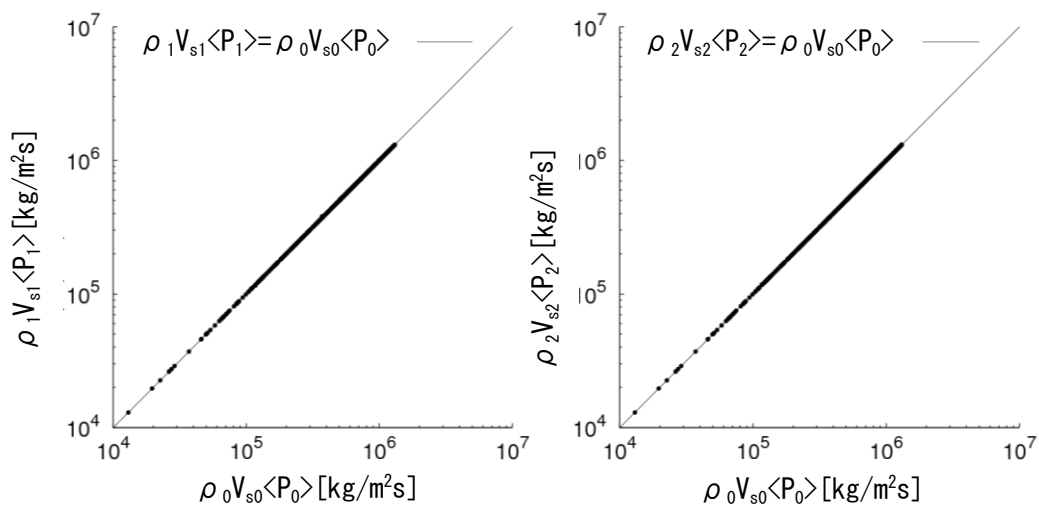


図 4-11 3層モデルにおける基盤と各層との $\rho V_s \langle P \rangle$ の比較結果

(左 : 1層目(表層)と基盤, 右 : 2層目と基盤)

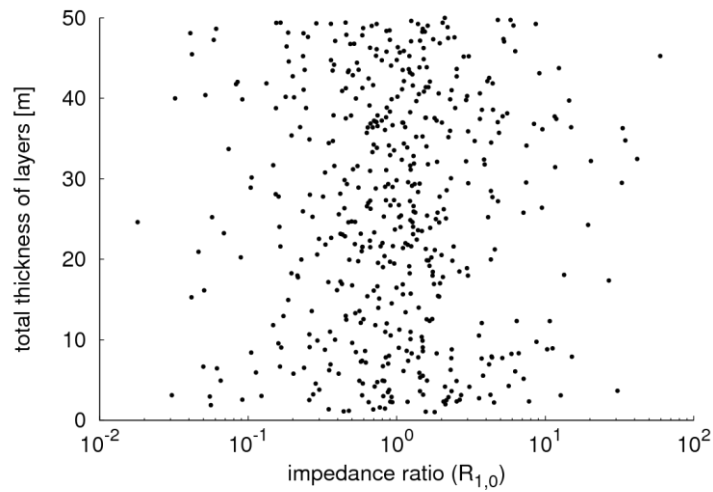


図 4-12 4層モデルのインピーダンス比と層厚の分布

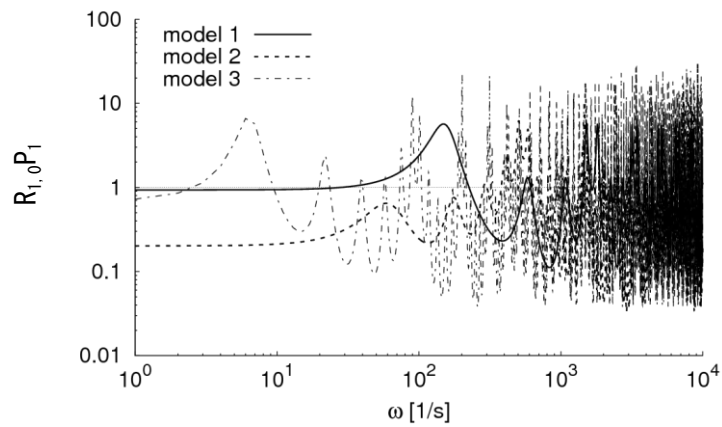


図 4-13 4層モデルにおいて $1/R_{1,0}$ で正規化した関数 P_1 の例

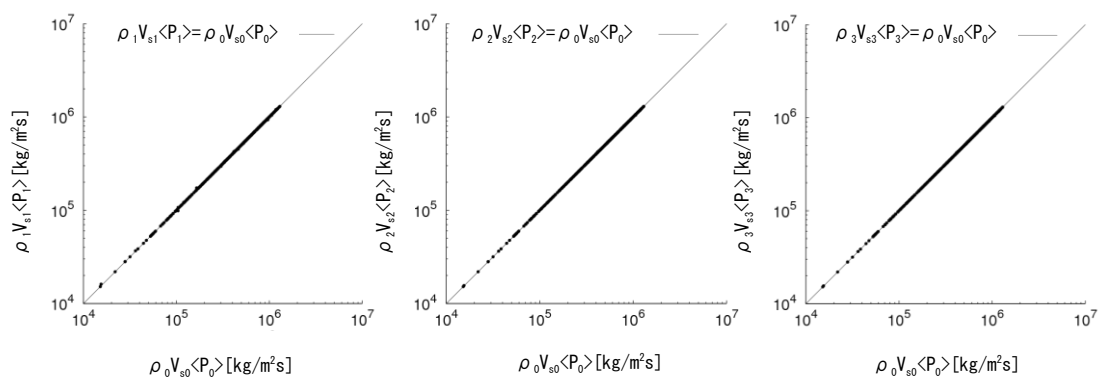


図 4-14 4層モデルにおける基盤と各層との $\rho V_s \langle P \rangle$ の比較結果
(左 : 1層目(表層)と基盤, 中央 : 2層目と基盤, 右 : 3層目と基盤)

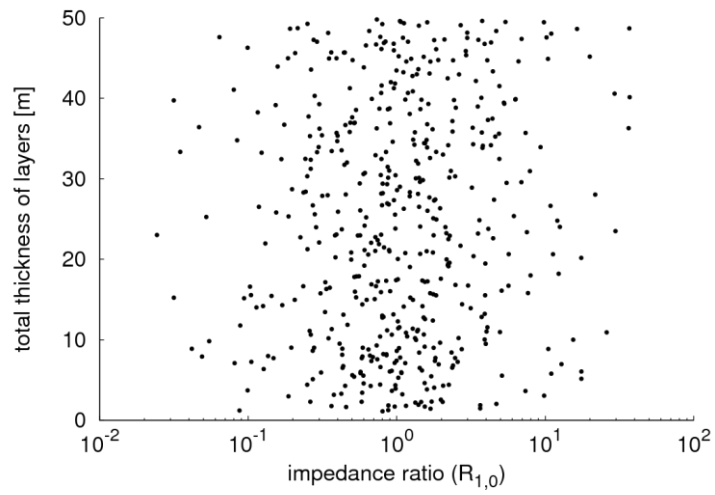


図 4-15 10層モデルのインピーダンス比と層厚の分布

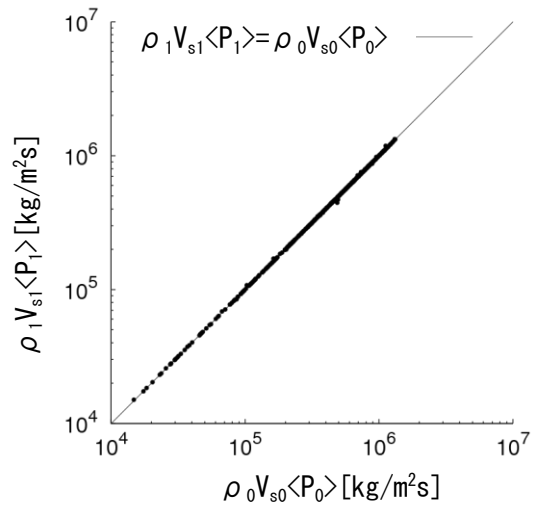


図 4-16 10層モデルにおける基盤と1層目(表層)との $\rho V_s \langle P \rangle$ の比較結果

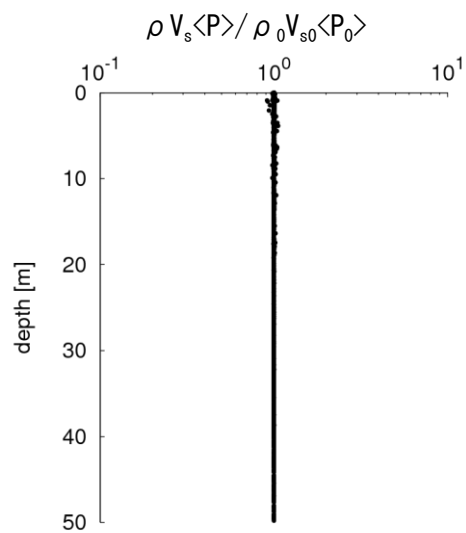


図 4-17 $\rho V_s \langle P \rangle$ の深さ分布(基盤の値で正規化)

4.4. 結論

水平成層地盤に対する地震動エネルギーの保存について検討した．水平 2 層地盤において SH 波が鉛直入射する条件では，入力がデルタ関数やホワイトノイズであれば，地震動エネルギーは保存されることが，理論的に証明された．このことは，各層の波動インピーダンスとインパルス入力に対する上昇波のパワーの周波数軸上の平均とを掛け合わせた量， $\rho V_s \langle P \rangle$ が保存されていることと同義である．

そこで，水平多層地盤内を鉛直に伝播する 2 次元 SH 波において，物理量 $\rho V_s \langle P \rangle$ の保存について議論した．一般的な水平多層地盤に対しては解析的に解を求めることができなかつたため，モンテカルロシミュレーションによって数値解析的に検討した．その結果， $\rho V_s \langle P \rangle$ の保存は，数学的には証明されていないものの，工学的な観点では十分成立していると考えてよいことがわかった．

水平多層地盤の各層において $\rho V_s \langle P \rangle$ が保存されているということは， $\rho V_s \langle P \rangle$ はデルタ関数やホワイトノイズが入射したときの上昇波の地震動エネルギーに相当することから，水平多層地盤の各層においてデルタ関数やホワイトノイズが入射した場合には上昇波の地震動エネルギーは保存されていることと同義である．

また，新たな物理量 $\rho V_s \langle P \rangle$ を算定するために詳細な地盤構造を必要としないのは特筆すべきである．着目する地盤深度の波動インピーダンスと，それらの間の伝達関数のみで十分である．今後，地震工学において適用性が広がっていくものと期待される．

4. 5. 参考文献

- 1) T. Kokusho, R. Motoyama : Energy dissipation in surface layer due to vertically propagating SH wave, J. Geotech. Geoenv. Eng., 128 , pp.309–381, 2002.

5. 地震動エネルギーの地震工学における実務への活用

5.1. はじめに

水道施設耐震工法指針・解説(2009年)、港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007年)、大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説(2005年)等、近年改訂された各種構造物の技術基準類では、現在の地震学の最新の知見を取り入れて耐震設計用のレベル2地震動を評価する内容となっている。地表付近で観測される地震動は、震源特性、伝播経路特性、サイト特性に分離できることが知られており、これら基準では、設計対象地点におけるレベル2地震動を設定するにあたって、レベル2地震動を起こしうる震源断層を特定し、その震源断層が活動した際に設計対象地点に生じる地震動を、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を合理的に評価し、それらを考慮できる算定手法を用いて予測することが求められている。これらの基準によってこれまでいくつかの設計用地震動が算定されてきた¹⁾²⁾。これらの算定手法は、過去に起きた大地震について観測波形を再現できることが示されているが、将来起こりうる地震動を予測する場合にはいくつかの問題点がある。

(1)破壊の大きいアスペリティ位置や破壊開始点等、地震動予測に大きな影響を与えるパラメータに関して、現在の地震学の知見をもってしても、将来起こりうる地震については予測することが困難なため、それらの不確定性を原因とするばらつきが生じる。

(2)地震動の算定手法の考え方は、差分法や統計的(経験的)グリーン関数法等、ある程度のグループに分けることができるが、パラメータの設定法や具体的な地震動の算定方法が多くあり、用いる手法によって算定結果は異なる。

これらの問題点に対しては、なんらかの指標によって、これまで蓄積されてきた強震観測記録を分析した値と、予測された地震動の値とを比較して判断することになる。指標として一般的に考えられるのは、地震動の最大加速度値、最大速度値、計測震度、応答スペクトル、フーリエ振幅スペクトル、SI値等の地震動の強さを表す量や、継続時間、エンベロープ、群遅延時間等の地震動の位相を表す量である。このうちで、過去の強震観測記録に対して最も多く分析・研究されているのが、最大加速度値や最大速度値である。しかし、これらの物理量はピーク値であって波形全体を評価しているとは言えないため、予測結果の妥当性評価は十分とは言えない。そのため、道路橋示方書等に記載のある設計用応答スペクトルと予測波形の応答スペクトルとを比較し、サイト増幅特性や震源特性等を考え合わせて予測結果の妥当性を評価することがある。

また、地域防災計画策定のための地震被害想定に用いる広域的な地震動予測においても、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を評価した手法が用いられている³⁾。被害推定においては、多数の構造物を取り扱うことになり、一つ一つの構造物について詳細な動的応答解析を行うことは現実的ではないため、被害推定には簡便な手法を用いられることが多い。例えば、住宅の被害については、被害率と計測震度との関係⁴⁾や被害率と最大地表速度との関係⁵⁾等について研究がなされており、地震動の強さを表す指標と被害の程度との関係式を用いた被害想定が行われている。簡便な手法を用いて被害推定を行うためには、構造物の被害と相関が高い地震動強さ指標を用いることが望ましい。

そこで本章では、地震動予測結果の妥当性評価と構造物の被害想定という2つの実務上

の問題に対して，地震動のエネルギー指標の適用性について検討した．

5.2. 地震動予測結果の妥当性評価への活用

5.2.1. 既往の研究における地震動予測結果の妥当性評価

過去の大地震を再現するシミュレーションでは、観測記録と比較することにより、予測地震動及び予測に用いた断層モデルや強震動予測手法の妥当性を評価することができる。釜江ら⁶⁾は、波形の形状、応答スペクトル、最大加速度値及び最大速度値を観測記録と比較し、地震動シミュレーション結果の妥当性を評価している。野津・菅野⁷⁾は、地震動予測波形と観測波形との重ね描き、フーリエ振幅スペクトルや応答スペクトルの比較を行っている。平井ら⁸⁾は、予測波形と観測波形の重ね描いた上で、相関係数を算出し、兵庫県南部地震の震源モデルの改良の検討を行っている。また、応答スペクトルの比較の他に、最大加速度値や最大速度値の距離減衰式との比較から妥当性を評価している。このように、過去の地震のシミュレーションであれば、観測波形をリファレンスとして予測結果の妥当性を評価することが可能である。

地震調査研究推進本部⁹⁾では、強震動予測結果の検証として、最大加速度値及び最大速度値を距離減衰式から求めた値と比較している。藤川ら¹⁰⁾は、名古屋市を対象に、東海地震を想定した地震動予測を行っているが、強震動予測結果の検証には最大加速度及び最大速度の距離減衰式との比較を行うとともに、過去の地震の推定震度分布や液状化履歴の記録等との整合性を確認している。このように、今後発生が予想される地震に対して地震動予測を行う場合には、主に距離減衰式を用いた妥当性の評価が行われている。

5.2.2. 想定断層モデルに対する地震動予測結果についての検討

地震動予測結果を評価する指標について検討するため、想定断層に対してその周辺の地点における地震動予測を行った。図 5-1 に断層モデルとその周辺の地震動予測地点を示す。また、表 5-1 に断層パラメータを示す。断層は長さ 20km、幅 18km で、松田式¹¹⁾によるとマグニチュードは 7.0 である。表中、地震モーメントと面積の関係、断層面積とアスペリティの面積の関係、地震モーメントとライズタイムの関係は、Somerville et. al¹²⁾により設定した。地震モーメントからモーメントマグニチュードは Hanks & Kanamori¹³⁾により求めた。アスペリティの応力降下量は、Boatwright¹⁴⁾により求めた。断層の平均すべり量とアスペリティの平均すべり量との関係は、石井他¹⁵⁾を用いた。平均破壊伝播速度は、Geller¹⁶⁾による地震発生層の S 波速度との経験式を用いた。図 5-2 に断層面におけるアスペリティと破壊開始点の位置を示す。波形予測手法は、統計的グリーン関数法とし、本節では地震基盤上($V_s=3400\text{m/s}$, $\rho=2700\text{kg/m}^3$)での予測波形について検討した。また、上下動については、古和田ら¹⁷⁾により上下動のための地震動予測法について研究されているが、本研究では水平動と同じように作成した。表 5-2 に要素地震の規模及び重ね合わせ数を算出した結果を示す。地震動予測地点は、想定断層を中心として、東西方向に 1° 、南北方向に 1.5° の領域とし、 0.05° ピッチごとに区切って東西方向に 21 分割、南北方向に 31 分割してグリッドを作成し、その格子点($21 \times 31=651$ 地点)で地震動予測を行った。

図 5-3 に代表地点の位置を示し、図 5-4 にその地点における予測波形を示す。北側はディレクティブティの影響で継続時間が短く最大加速度値も大きい。逆に南側は継続時間が長く最大加速度値は小さくなっている。中央部は震源断層に近いので、大きな地震動が予測されている。各地点における予測波形に対して、地震動エネルギー、最大加速度値、最大速度値を算定した。最大加速度値及び最大速度値は、NS, EW, UD の各方向成分の 2 乗和の平方根の時刻歴の最大値として求めた。図 5-5 に地震動予測結果の各指標の平面分布を示す。アスペリティと破壊開始点の位置との関係から、北側にディレクティブティが生じて大きな地震動になることが予想され、地震動エネルギーと最大速度値には、そのような傾向が見られる。しかし、最大加速度値は非常に出入りの多い分布形となっており、ディレクティブティの効果も明確ではない。これは、要素地震波形が、低周波数側はコヒーレントに足し合わさるのに対して、高周波数側はランダム性をもって足し合わされるために、高周波数側の振幅の影響を大きく受ける最大加速度値はランダム性によるばらつきの影響を受けてしまったものと考えられる。図 5-6 に距離減衰特性を示す。横軸は等価震源距離とした。地震動エネルギーについては、3 章で求めた距離減衰式と一緒にプロットしている。地震動エネルギーの距離減衰式は $V_s=300\text{m/s}$ 以上の工学的基盤において作成されているが、 $V_s>3000\text{m/s}$ の地震基盤における地震動エネルギーともよく一致していると言える。また各指標は距離減衰特性にある程度のばらつきを持っていることがわかるが、これは、ディレクティブティの効果が大きい場所は地震動が大きくなっているためである。

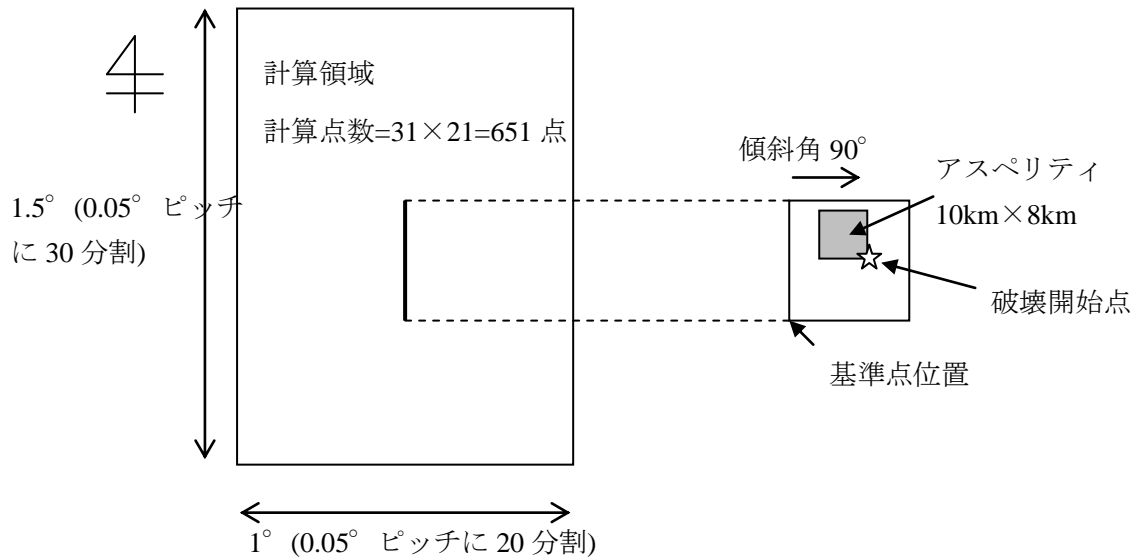


図 5-1 想定断層と地震動予測を行った地点

表 5-1 想定断層の断層パラメータ

項目	記号	単位	値	備考
基準点位置 北緯		°	35.1	想定
基準点位置 東経		°	136.510	想定
走向	θ	°	0	想定
傾斜	δ	°	90	想定
変位の方向	λ	°	90	想定
長さ	L	km	20	想定
上端深さ		km	2	想定
幅	W	km	18	下端深さ=20kmと傾斜から算定
面積	S	km ²	360	S=L×W
等価半径	R	km	10.7	
地震モーメント	M ₀	dyn・cm	6.49E+25	S=2.23×10 ⁻¹⁵ ×M ₀ ^(2/3)
マグニチュード	M		7.0	(log(L)+2.9)/0.6
モーメントマグニチュード	M _w		6.47	M _w =(logM ₀ -9.1)/1.5
S波速度	V _s	km/s	3.40	想定
密度	ρ	g/cm ³	2.70	想定
剛性率	μ	dyn/cm ²	3.12E+11	$\mu = \rho \times V_s^2$
平均滑り量	D	m	0.6	M ₀ = $\mu \times D \times S$
アスペリティの面積	S _a	km ²	79.20	S _a =0.22×S
アスペリティの幅	w _a	km	8.0	
アスペリティの長さ	l _a	km	10.0	
モデル上のアスペリティの面積	S _a	km ²	80.0	
等価半径	r	km	5.0	
アスペリティの応力降下量	$\Delta \sigma_a$	bar	104	$\Delta \sigma_a = (7/16) \times M_0 / (r^2 \times R)$
アスペリティの平均すべり量	D _a	m	1.2	D _a =2×D
アスペリティの地震モーメント	M _{0a}	dyn・cm	2.88E+25	M _{0a} = $\mu \times D_a \times S_a$
背景領域の地震モーメント	M _{0b}	dyn・cm	3.60E+25	M _{0b} =M ₀ -M _{0a}
背景領域の平均すべり量	D _b	m	0.41	D _b =M _{0b} /($\mu \times S_b$)
背景領域の応力降下量	$\Delta \sigma_b$	bar	17	$\Delta \sigma_b = (D_b/W) / (D_a/W_a) \times \Delta \sigma_a$
平均応力降下量	$\Delta \sigma$	bar	23	$\Delta \sigma = (7/16) \times M_0 / R^3$
ライズタイム	t _r	s	0.82	t _r =2.03×10 ⁻⁹ ×M ₀ ^(1/3)
破壊伝播速度	V _r	km/s	2.45	V _r =0.72×V _s
f _{max}		Hz	6.0	

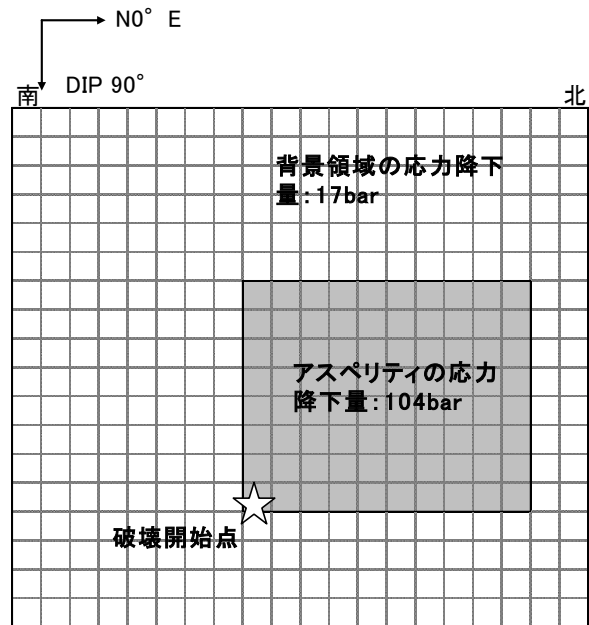


図 5-2 アスペリティの分布と破壊開始点の位置

表 5-2 要素地震の規模と重ね合わせ数

断層モデルの地震モーメント M_0	断層モデルのストレスドロップ $\Delta\sigma$	要素地震の地震モーメント M_{0e}	要素地震のストレスドロップ $\Delta\sigma_e$	重ね合わせ数 N^3	断層面上の重ね合わせ数	ライズタイムの重ね合わせ数
6.49E+25	23	8.01E+22	23	810	90	9

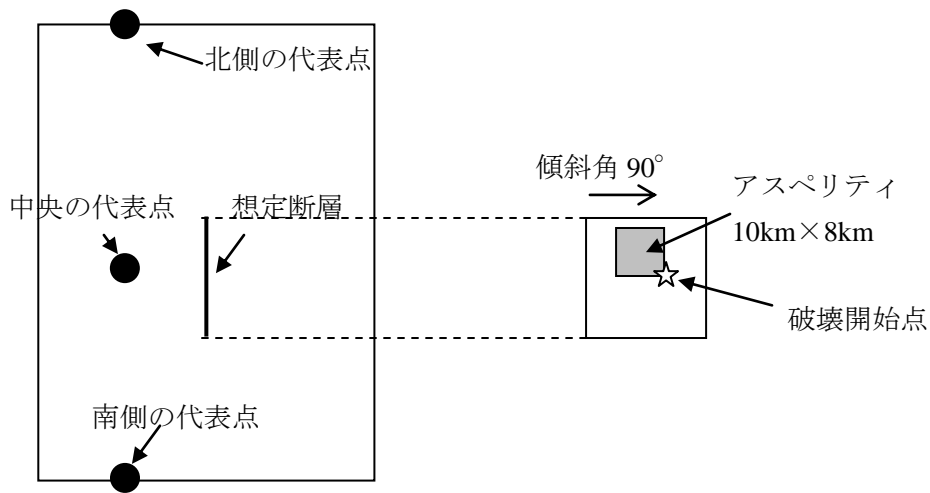


図 5-3 代表地点の位置

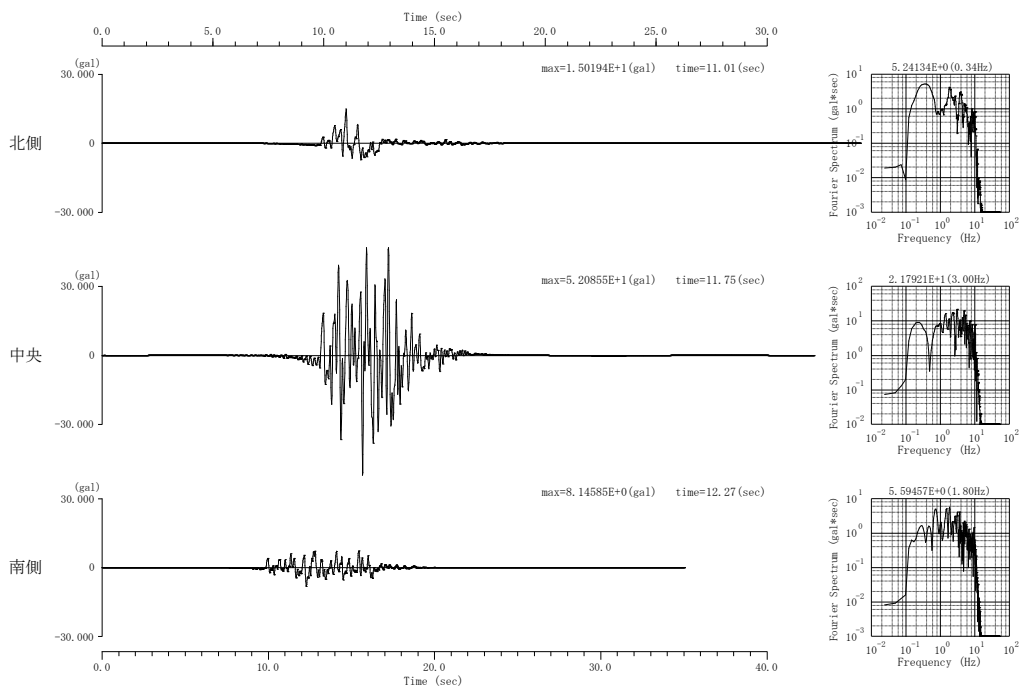
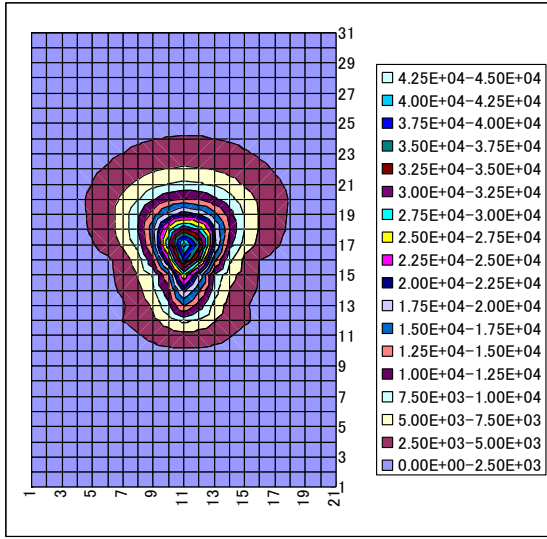
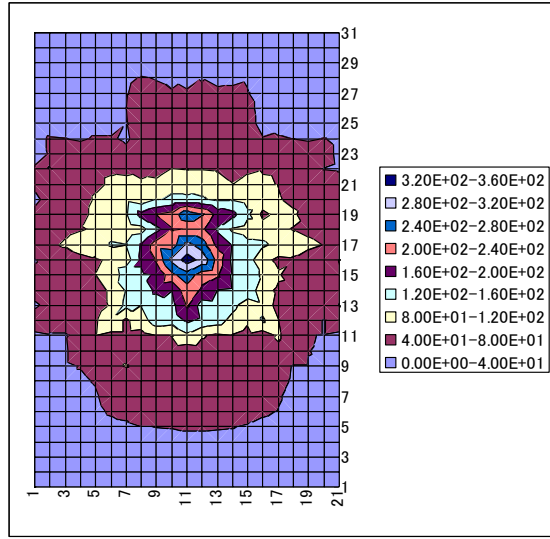


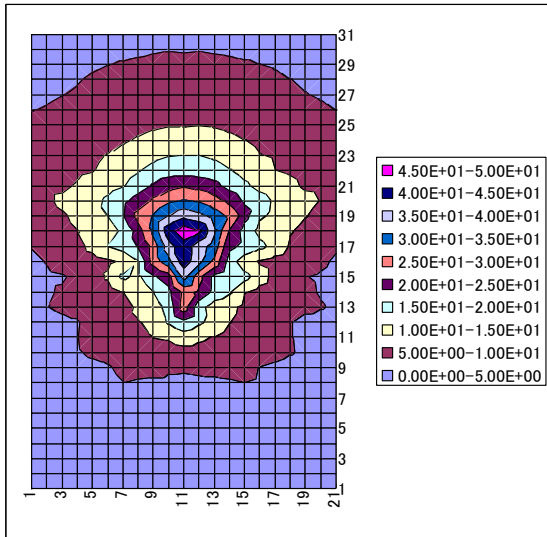
図 5-4 代表地点の予測波形



(a) 地震動エネルギー (J/m^2)

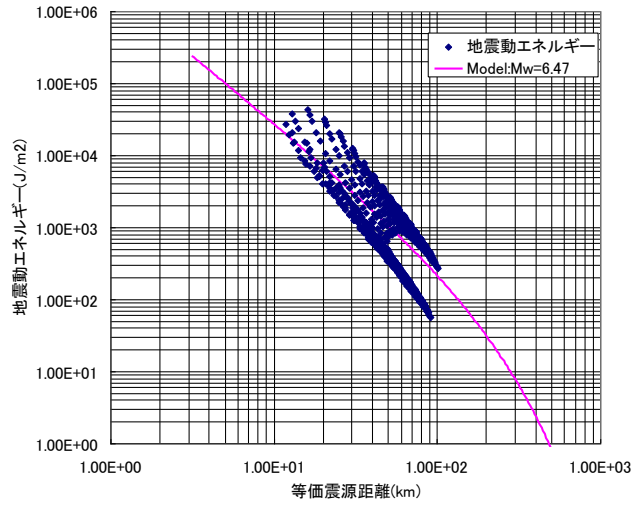


(b) 最大加速度値 (cm/s^2)

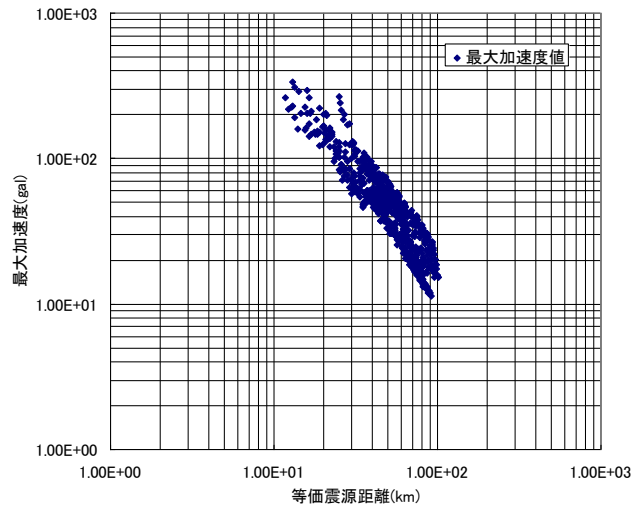


(c) 最大速度値 (cm/s)

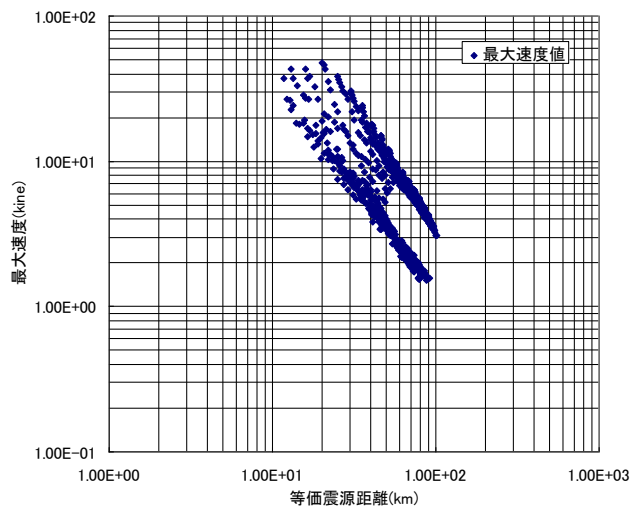
図 5-5 地震動予測結果の各指標の平面分布



(a) 地震動エネルギー



(b) 最大加速度値



(c) 最大速度値

図 5-6 地震動予測結果の距離減衰特性

5.2.3. 位相特性のばらつきの地震動予測結果への影響

統計的グリーン関数法を用いて地震動予測を行う場合、要素地震波形は統計的な手法¹⁸⁾で作成される。統計的というのは、振幅スペクトルはオメガ・スクエア・モデルから算定することができるが、位相特性はエンベロープ等を用いてモデル化するので、乱数によるランダム性が含まれることを示している。このランダム性は地震動予測結果の波形を微妙に変えることになるが、重ね合わせの過程においても振幅スペクトルはオメガ・スクエア・モデルを満足するように行われるため、予測された地震動のエネルギーは、本質的には位相特性のランダム性の影響をほとんど受けず、どの位相特性を用いてもほぼ同じになると考えられる。そこで、要素地震波形の位相を変えた 20 ケースのパラメータスタディを実施し、位相の特性が地震動の予測結果に与える影響を検討した。

図 5-7 にケース 1 とケース 2 の NS 方向、EW 方向、UD 方向の要素地震波形を例として示す。波形の右側に示す振幅特性はほぼ同じであるが、位相特性を変えることにより波形は異なっている。

図 5-8 に全 651 観測点において 20 ケースの算定結果のばらつきを求めた結果を示す。(a)、(b)ともに横軸は地震動エネルギーのばらつきとし、縦軸については、(a)は最大加速度値のばらつき、(b)は最大速度値のばらつきである。地震動エネルギーについては、3 章と同じく、速度値に次元を合わせるため平方根のばらつきでプロットしている。図中のピンクのラインは地震動エネルギーのばらつきと最大加速度あるいは最大速度のばらつきが同じになるラインである。図 5-8 から、地震動エネルギーのばらつきは、最大加速度値や最大速度値に比べて対数標準偏差で 1 桁から 2 桁小さいことがわかる。これらの地点の全部の平均値を算出すると、地震動エネルギーの 1/2 乗は 7.0×10^{-5} (0.9998 倍～1.0002 倍) に対して、最大加速度値は 0.023 (0.948 倍～1.055 倍)、最大速度値は 0.0048 (0.989 倍～1.011 倍) である。よって、地震動エネルギーは要素地震波形の位相特性のばらつきにほとんど影響を受けないが、最大加速度については、要素地震波形の位相特性のばらつきの要因だけで相当の(本検討では±5%程度)のばらつきが生じてしまうことがわかる。

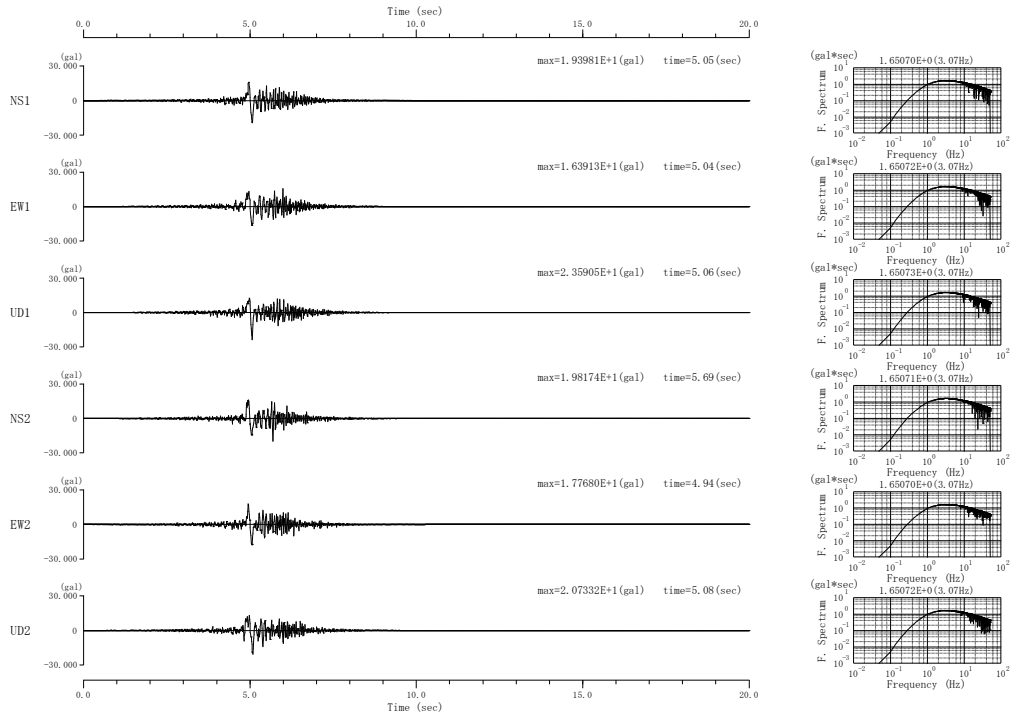
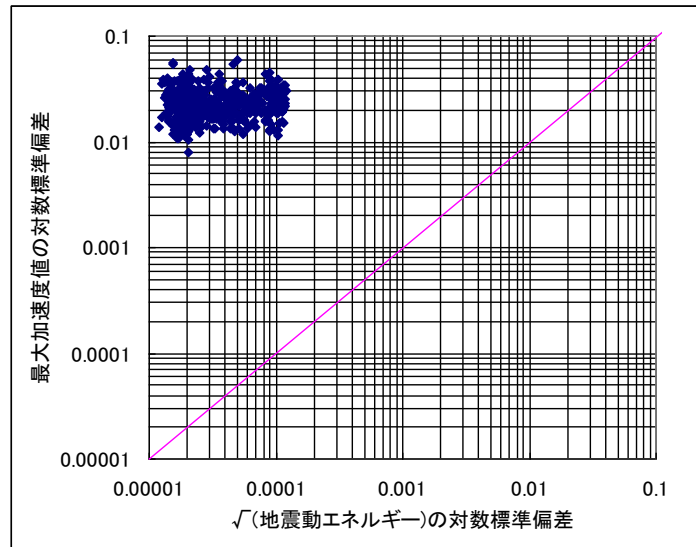
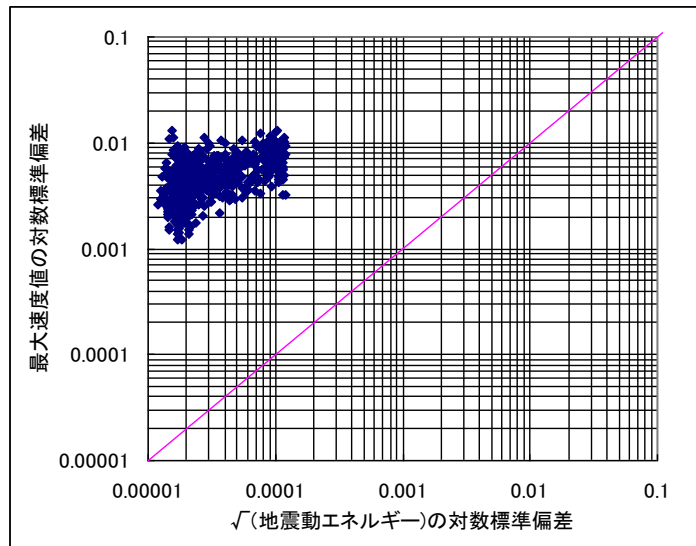


図 5-7 要素地震波形の例



(a) 地震動エネルギーの 1/2 乗と最大加速度値



(b) 地震動エネルギーの 1/2 乗と最大速度値

図 5-8 要素地震波形の位相特性の違いによる生じるばらつき比較

5.2.4. 地震の規模の違いの地震動予測結果への影響

(1) アスペリティの大きさ

図 5-9 に示すように、これまで検討してきた断層モデルにおけるアスペリティの大きさを小さくした場合と大きくした場合について、地震動予測を行い、その結果を比較した。

図 5-10 から図 5-12 に、アスペリティの大きさの違いによる地震動予測結果の違いを各指標ごとに示す。アスペリティの大きさの違いは断層から放射される地震動の強さの違いに直接結びつけることができると考えられる。地震動エネルギーについては、アスペリティの大きさが小さい場合と中間の場合、中間の場合と大きい場合とで比較すると、すべての地点でアスペリティの大きい方が大きな値となり、地震動の規模の大きさを適切に反映できていることを示している。しかし、最大加速度値や最大速度値については、地震の規模の違いを適切に反映していると考えられる地点は 6 割～7 割程度にとどまっている。また、地震の規模の違いによるばらつきをみても、地震動エネルギーは最大加速度値や最大速度値よりも小さいことがわかる。

以上より、波形の最大値だけでは、地震の規模を反映した評価を行うには限界があること、また、地震動エネルギーを指標とすることにより地震の規模を反映した評価を行える可能性があることが示された。

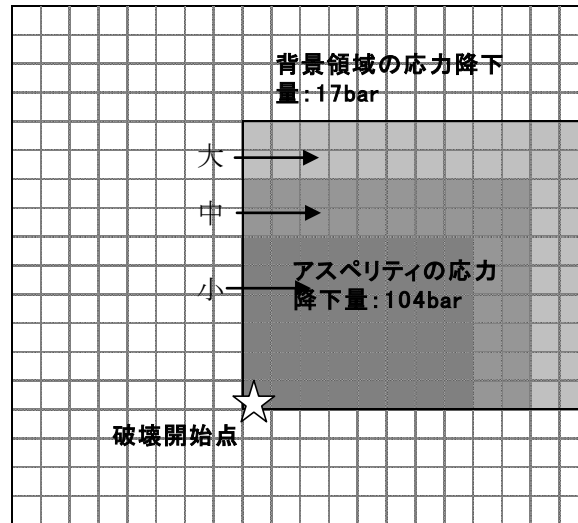
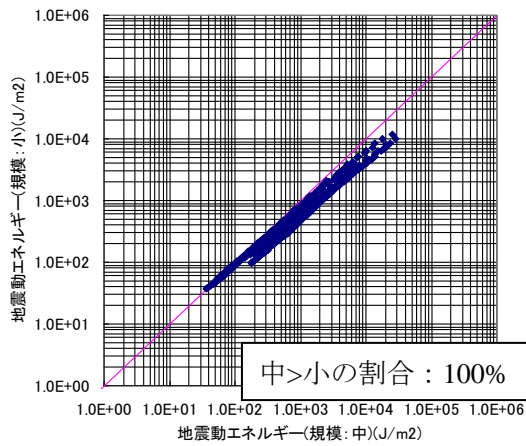
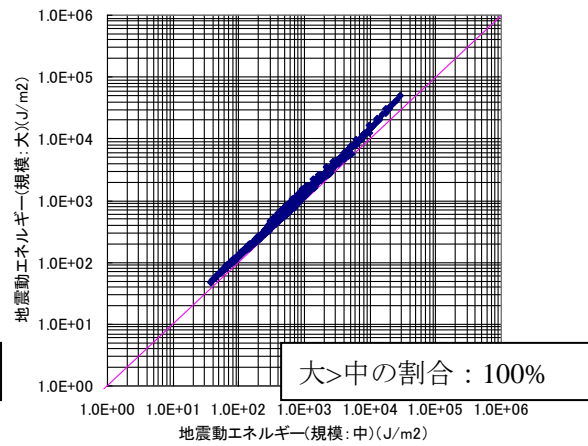


図 5-9 アスペリティの大きさの違い

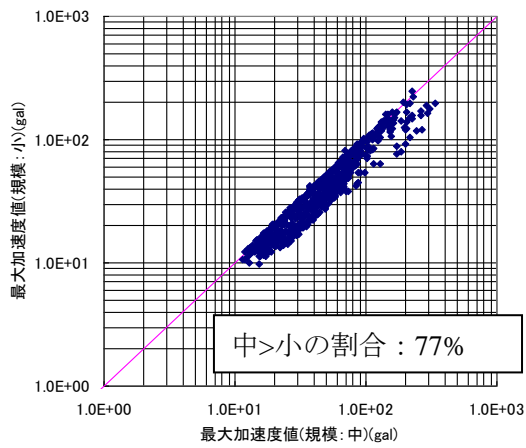


(a) アスペリティの大きさ中と小の比較

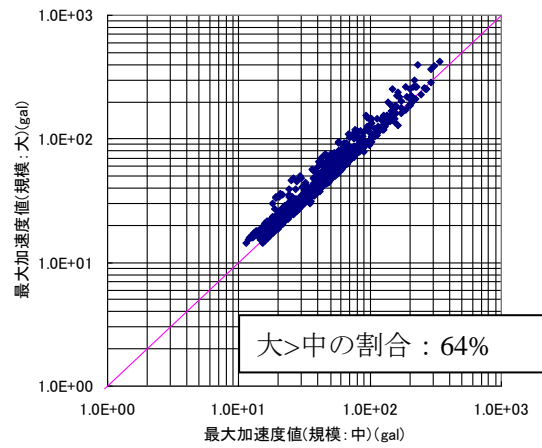


(b) アスペリティの大きさ中と大の比較

図 5-10 地震動エネルギーの比較

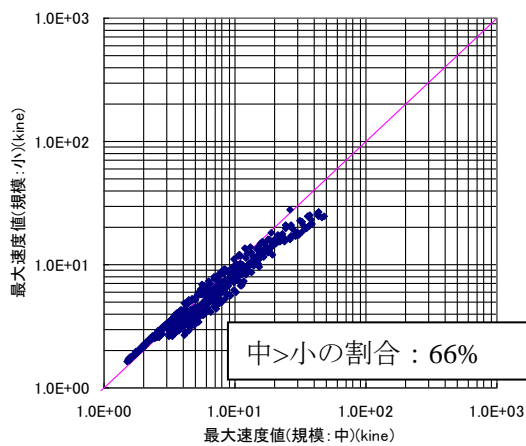


(a) アスペリティの大きさ中と小の比較

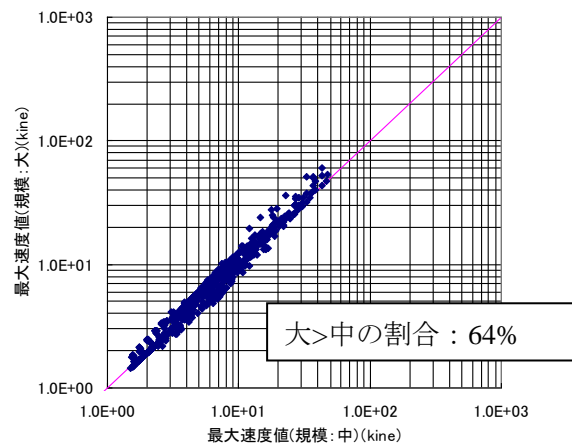


(b) アスペリティの大きさ中と大の比較

図 5-11 最大加速度値の比較



(a) アスペリティの大きさ中と小の比較



(b) アスペリティの大きさ中と大の比較

図 5-12 最大速度値の比較

(2) 想定断層の大きさ

表 5-3に示すように、これまで検討してきた想定断層より長さを短くした断層、長くした断層に対しても地震動予測を行い、予測結果を比較した。各断層のアスペリティの面積は(1)での各アスペリティの面積と同じであるが、背景領域の面積や要素地震の規模及び重ね合わせ条件については各想定断層ごとに設定し直しており、現実の地震動予測を意識したパラメータスタディである。**表 5-4**及び**表 5-5**に小さめの想定断層と大きめの想定断層についての重ね合わせ条件の算定結果を示す。アスペリティと破壊開始点の位置関係は(1)と同じとした。アスペリティの位置が地震動予測結果に及ぼす影響が大きいため、破壊開始点を3つの想定断層で一致させるように断層の位置を調整した。

図 5-13から**図 5-15**に想定断層の大きさに対する地震動予測結果の比較を示す。地震動エネルギーについては、ほぼすべての地点で断層の大きい方が大きな値となり、地震動の規模の大きさを適切に反映できていると考えられる。最大速度値については、8割～9割の地点で断層の大きさを反映した結果が得られている。しかし、最大加速度値については、2割～3割の地点で断層の大きさと地震動の大きさが逆であるという結果となっている。また、地震の規模の違いによるばらつきをみても、地震動エネルギーは、最大加速度値や最大速度値よりも小さいことがわかる。

以上より、地震動エネルギーを指標とすることにより地震の規模を適切に反映した評価を行える可能性があることが示されたと考えられる。

表 5-3 想定断層の大きさに関するパラメータスタディ

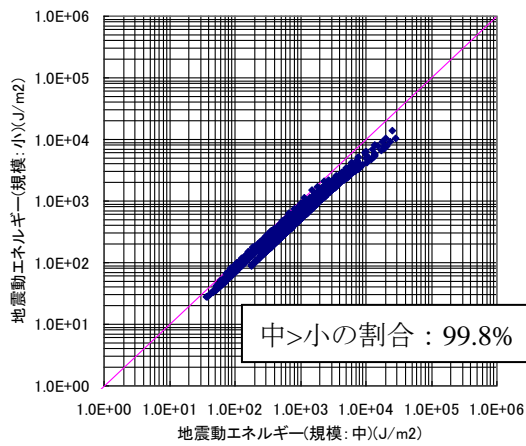
項目	記号	単位	中間	小さい	大きい	備考
走向	θ	°	0	0	0	想定
傾斜	δ	°	90	90	90	想定
変位の方向	λ	°	90	90	90	想定
長さ	L	km	20	16	28	想定
上端深さ		km	2	2	2	想定
幅	W	km	18	16	20	想定
面積	S	km ²	360	256	560	S=L×W
等価半径	R	km	10.7	9.0	13.4	
地震モーメント	Mo	dyn・cm	6.49E+25	3.89E+25	1.26E+26	$S=2.23 \times 10^{-15} \times Mo^{(2/3)}$
マグニチュード	M		7.0	6.8	7.2	$(\log(L)+2.9)/0.6$
モーメントマグニチュード	Mw		6.47	6.33	6.67	$Mw=(\log Mo-9.1)/1.5$
S波速度	Vs	km/s	3.40	3.40	3.40	想定
密度	ρ	g/cm ³	2.70	2.70	2.70	想定
剛性率	μ	dyn/cm ²	3.12E+11	3.1212E+11	3.121E+11	$\mu = \rho \times Vs^2$
平均滑り量	D	m	0.6	0.5	0.7	$Mo = \mu \times D \times S$
アスペリティの面積	Sa	km ²	79.20	56.3	123.20	$Sa = 0.22 \times S$
アスペリティの幅	wa	km	8.0	6.0	10.0	
アスペリティの長さ	la	km	10.0	8.0	12.0	
モデル上のアスペリティの面積	Sa	km ²	80.0	48.0	120.0	
等価半径	r	km	5.0	3.9	6.2	
アスペリティの応力降下量	$\Delta \sigma a$	bar	104	123	108	$\Delta \sigma a = (7/16) \times Mo / (r^2 \times R)$
アスペリティの平均すべり量	Da	m	1.2	1.0	1.4	$Da = 2 \times D$
アスペリティの地震モーメント	Mo _a	dyn・cm	2.88E+25	1.46E+25	5.39E+25	$Mo_a = \mu \times Da \times Sa$
背景領域の地震モーメント	Mo _b	dyn・cm	3.60E+25	2.43E+25	7.19E+25	$Mo_b = Mo - Mo_a$
背景領域の平均すべり量	Db	m	0.41	0.4	0.5	$Db = Mo_b / (\mu \times Sb)$
背景領域の応力降下量	$\Delta \sigma b$	bar	16.5	17.8	19.6	$\Delta \sigma b = (Db/W) / (Da/Wa) \times \Delta \sigma a$
平均応力降下量	$\Delta \sigma$	bar	23.1	23.1	23.1	$\Delta \sigma = (7/16) \times Mo / R^3$
ライズタイム	tr	s	0.82	0.69	1.02	$tr = 2.03 \times 10^{-9} \times Mo^{(1/3)}$
破壊伝播速度	Vr	km/s	2.45	2.45	2.45	$Vr = 0.72 \times Vs$
fmax		Hz	6.0	6.0	6.0	

表 5-4 小さな想定断層における要素地震の規模と重ね合わせ条件

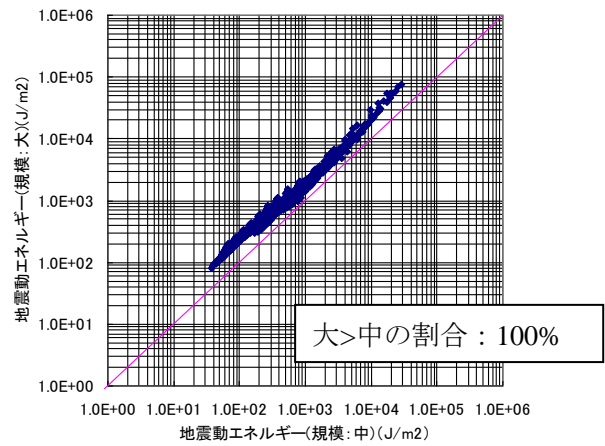
断層モデルの地震モーメントM ₀	断層モデルのストレスドロップ $\Delta \sigma$	要素地震の地震モーメントM _{0e}	要素地震のストレスドロップ $\Delta \sigma e$	重ね合わせ数N ³	断層面上の重ね合わせ数	ライズタイムの重ね合わせ数
3.89E+25	23	7.60E+22	23	512	64	8

表 5-5 大きな想定断層における要素地震の規模と重ね合わせ条件

断層モデルの地震モーメントM ₀	断層モデルのストレスドロップ $\Delta \sigma$	要素地震の地震モーメントM _{0e}	要素地震のストレスドロップ $\Delta \sigma e$	重ね合わせ数N ³	断層面上の重ね合わせ数	ライズタイムの重ね合わせ数
1.26E+26	23	8.17E+22	23	1540	140	11

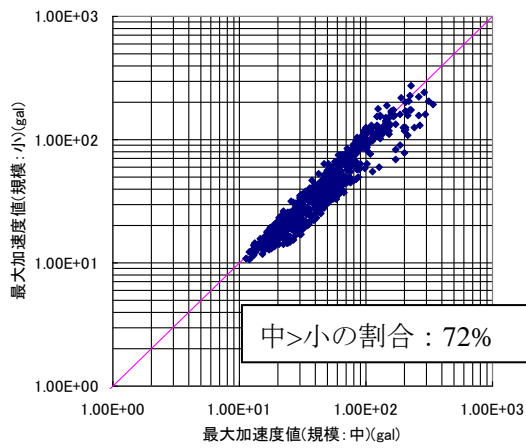


(a) 想定断層の大きさ中と小の比較

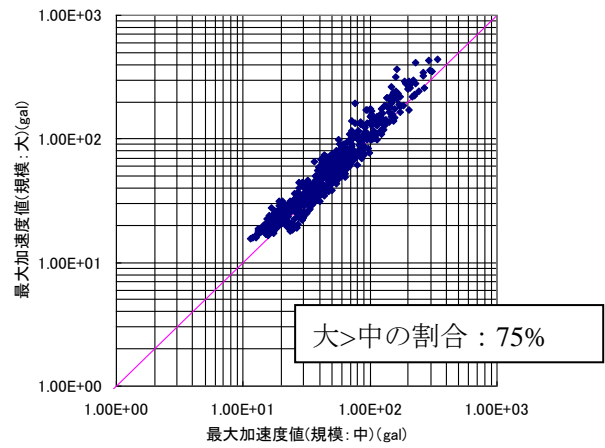


(b) 想定断層の大きさ中と大の比較

図 5-13 地震動エネルギーの比較

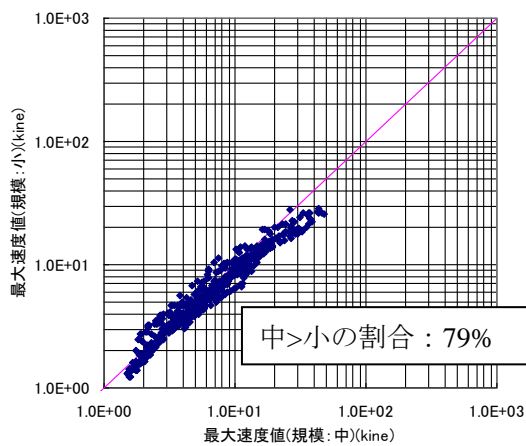


(a) 想定断層の大きさ中と小の比較

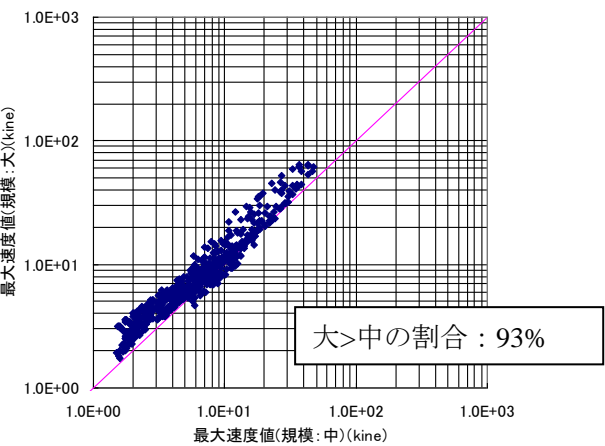


(b) 想定断層の大きさ中と大の比較

図 5-14 最大加速度値の比較



(a) 想定断層の大きさ中と小の比較



(b) 想定断層の大きさ中と大の比較

図 5-15 最大速度値の比較

5.2.5. 地震動予測時の地盤の影響

構造物の耐震設計に用いるための入力地震動は、工学的基盤上で設定されることが多い。ところが工学的基盤のスペックは各構造物の設計基準で違いがある。せん断波速度で見ると、港湾系の基準では 300m/s 以上という目安があり、建築系の基準では、500m/s 以上という目安がある。また、現実には、各地点によって工学的基盤の物性値は異なっており、洪積の砂礫層であったり第四紀の岩盤であったりする。もしも 2 地点で同じ地震動波形が得られたとして、地点 1 はせん断波速度 300m/s の砂礫層上であり、地点 2 はせん断波速度 700m/s の風化岩上であったとすると、2 つの地震動の大きさは明らかに同じではない。したがって、地震動予測結果を評価するとき、地震動予測位置の地盤の硬さについて留意する必要がある。最大加速度値や最大速度値は、地盤深部と地表付近とで値が大きく異なっていることが多くの観測記録から明らかとなっている。現状では最大加速度値や最大速度値の予測式(距離減衰式)は、地盤のせん断波速度がその式の適用範囲内あることを確認して用いる必要がある。

本節では、地震動エネルギーについて深部と地表付近とでどのような違いがあるかについて検討した。前章の検討により、伝達関数の 2 乗の平均値にインピーダンスを掛けた量は水平多層構造の各層内で保存され、基盤への入射地震動の周波数特性が一定のとき、各層内の地震動エネルギーは等しくなることがわかった。もし地震動エネルギーが一般的にその特性を有しているのであれば、地震動予測をどの硬さの地盤上で行おうと地震動の強さを合理的に評価でき、使いやすい指標であると言える。しかし、一般に地盤深部における地震動の周波数特性は一定ではないため、地震動エネルギーも地震動の卓越周波数と地盤の固有周波数の影響を受けて変化すると考えられる。ここでは、地震動エネルギー、最大加速度値、最大速度値について、地震基盤での値と工学的基盤における値との比較を行い、各指標における違いや特徴について検討した。

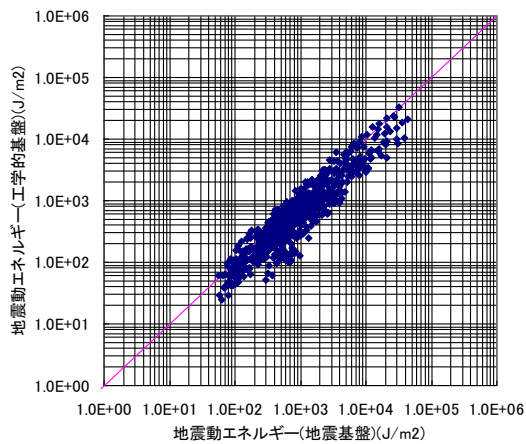
5.2.2 で地震基盤における地震動予測結果を示したが、各地点において、地震基盤から工学的基盤までの地盤構造を仮定して 1 次元の地震応答解析を行い、工学的基盤上の地震動を求めた。地盤モデルは、表 5-6 に示すように 4 層モデルとし、各層の層厚、密度、せん断波速度はある範囲で乱数を用いてランダムに決定した。さまざまな地盤条件における各指標の値の違いを検討することが目的であるため、近くの地点同士での層厚や物性値の相関性は与えていない。また、減衰 h は 0 として計算を行った。

図 5-16 に地震動エネルギー、最大加速度値、最大速度値の各指標について、地震基盤での値と工学的基盤での値とを比較した結果を示す。最大加速度値や最大速度値は工学的基盤の方が数倍大きく、地震動エネルギーは、地震基盤の方が若干大きめであるが、ほぼ地震基盤：工学的基盤=1:1 の線上に分布している。これは、最大加速度や最大速度は地盤の増幅の影響で浅いところが大きくなっているのに対し、前章で示したように、入力がデルタ関数やホワイトノイズであれば水平多層地盤内を伝播する地震動のエネルギーは各層で厳密に保存されるため、入力が地震動の場合であっても地震動エネルギーは地盤の増幅の影響が小さいためと考えられる。予測結果を等価震源距離との関係でプロットして図 5-17 に示す。地震動エネルギーは、地盤の S 波速度にかかわらず一つの距離減衰式で予測

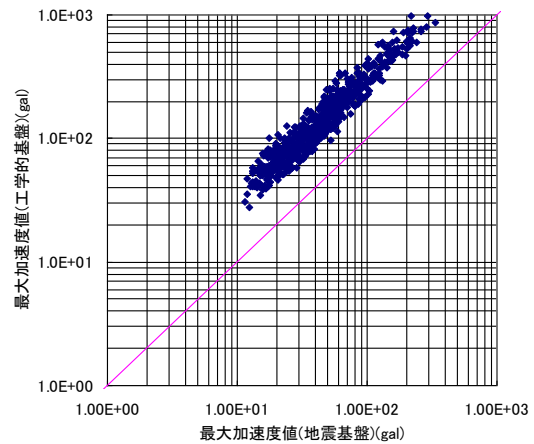
結果の評価が行えるのに対して、最大加速度値や最大速度値は地盤の S 波速度に応じて距離減衰式を補正する必要がある。

表 5-6 地震基盤から工学的基盤までの地盤モデル

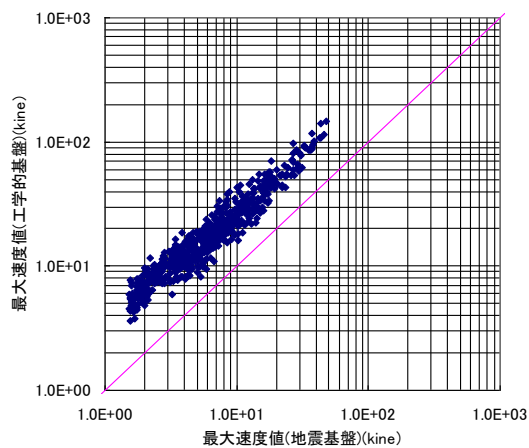
地層	せん断波速度(m/s)	密度(kg/m ³)	層厚(m)
工学的基盤	300	2000	25 ~ 75
中間層1	350 ~ 1050	1800 ~ 2200	150 ~ 450
中間層2	1100 ~ 3300	2250 ~ 2750	250 ~ 750
地震基盤	3400	2700	-



(a) 地震動エネルギー

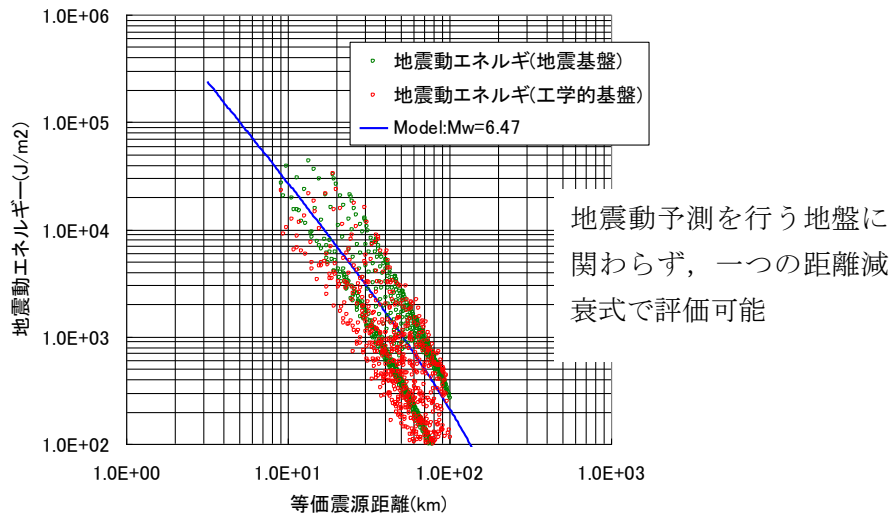


(b) 最大加速度値

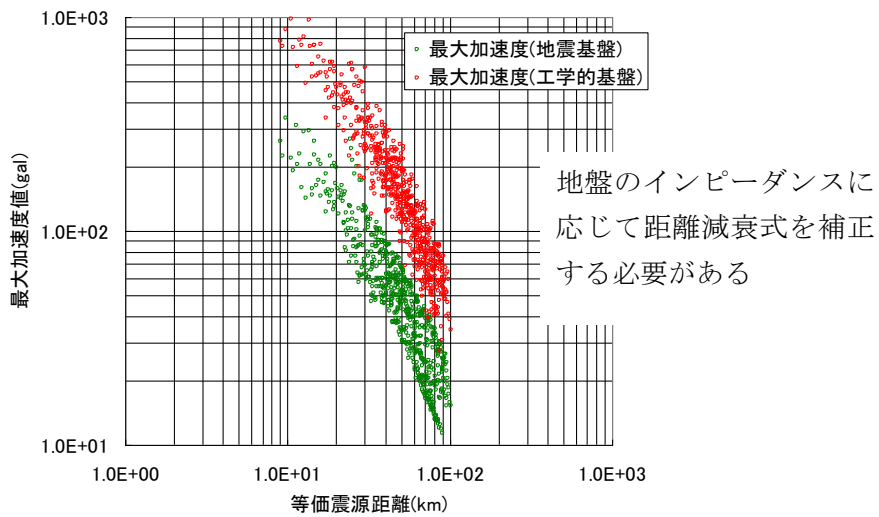


(c) 最大速度値

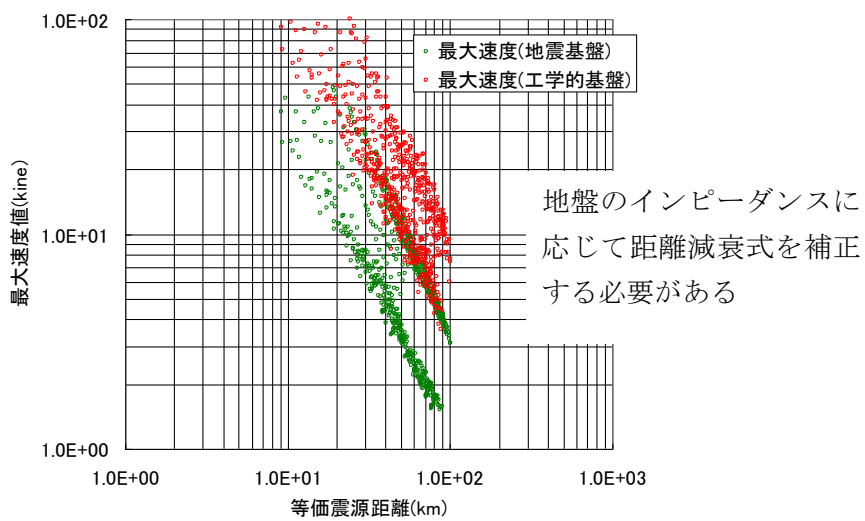
図 5-16 工学的基盤と地震基盤の比較



(a) 地震動エネルギー



(b) 最大加速度値



(c) 最大速度値

図 5-17 地震動予測結果の地震基盤と工学的基盤との違い

5.3. 構造物の被害推定への活用

5.3.1. 1 自由度系の応答解析

一自由度系に地動加速度 \ddot{u}_0 が作用した場合の運動方程式は次式で表される。

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_0) + c\dot{u} + ku = 0 \quad (5-1)$$

復元力特性は図 5-18 に示すように、バイリニアとした。非定常の地震動波形を入力する場合には、運動方程式を時間軸に対して離散化し、逐次計算を行って応答を求める。バイリニアの場合には弾性部分と塑性部分を分離して積分を行う **Operater Splitting 法(OS 法)**¹⁹⁾を用いて時間積分を行った。OS 法は、系の剛性を 2 つに分割し、一つの部分には陽的積分法を、もう一つの部分には陰的積分法を適用するという混合積分法であり、バイリニア型のように、剛性軟化型のシステムに関しては絶対安定性をもつ。n+1 ステップ目の応答において、OS 法ではまず予測変位 y を以下により算定する。

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t \dot{u}_n + \frac{\Delta t^2}{4} \ddot{u}_n \quad (5-2)$$

つぎに、復元力 p を算定する。バイリニアの計算には、前ステップからの初期剛性によって決まる点と、正の降伏域にある点、及び負の降伏域にある点の 3 点の復元力を比較し、中間にある点を採用する。

$$\begin{aligned} p_{n+1} &= p_n + K_1(y_{n+1} - y_n) \quad \text{or} \quad p_{n+1} = p_y + K_2(y_{n+1} - d_y) \quad \text{or} \\ p_{n+1} &= -p_y + K_2(y_{n+1} + d_y) \end{aligned} \quad (5-3)$$

K_1 は初期剛性、 K_2 は第 2 剛性である。加速度値を以下の式で求める。

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{-m\ddot{u}_{0n+1} - p_{n+1} - c(\dot{u}_n + \Delta t \ddot{u}_n/2)}{m + \frac{\Delta t c}{2} + \frac{\Delta t^2 K_1}{4}} \quad (5-4)$$

以下の式により速度と変位を求める。

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{\Delta t(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1})}{2} \quad (5-5)$$

$$u_{n+1} = y_n + \frac{\Delta t^2 \ddot{u}_{n+1}}{2} \quad (5-6)$$

そして、新たに求めた変位を用いて復元力を更新する。

$$\begin{aligned} p_{n+1} &= p_n + K_1(u_{n+1} - u_n) \quad \text{or} \quad p_{n+1} = p_y + K_2(u_{n+1} - d_y) \quad \text{or} \\ p_{n+1} &= -p_y + K_2(u_{n+1} + d_y) \end{aligned} \quad (5-7)$$

式(5-1)の両辺に $du = \dot{u}dt$ をかけ積分するとエネルギーのつりあい式が得られる。

$$\int_0^t m\ddot{u}dt + \int_0^t c\dot{u}dt + \int_0^t k u dt = -\int_0^t m\ddot{u}_0 dt \quad (5-8)$$

左辺第1項～第3項はそれぞれ時間 t における運動エネルギー W_k , 減衰により消費されたエネルギー W_h , 弾性ひずみエネルギーと塑性ひずみエネルギーの和 W_e である。右辺は地震による振動系への総入力エネルギー E_{in} である。地震終了時には, 弾性ひずみエネルギーは微小であり, W_e は主に塑性ひずみエネルギー W_p となる。

図 5-19 に入力地震動及びエネルギーの時刻歴波形の例を示す。各時刻において, $W_k + W_h + W_e = E_{in}$ が成立している。

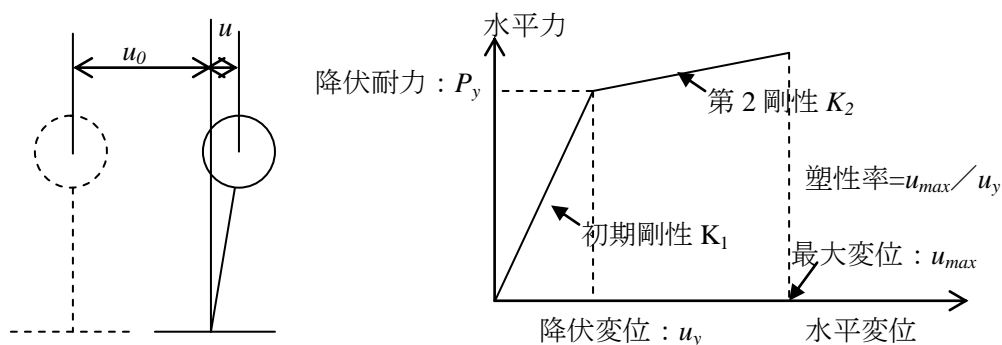
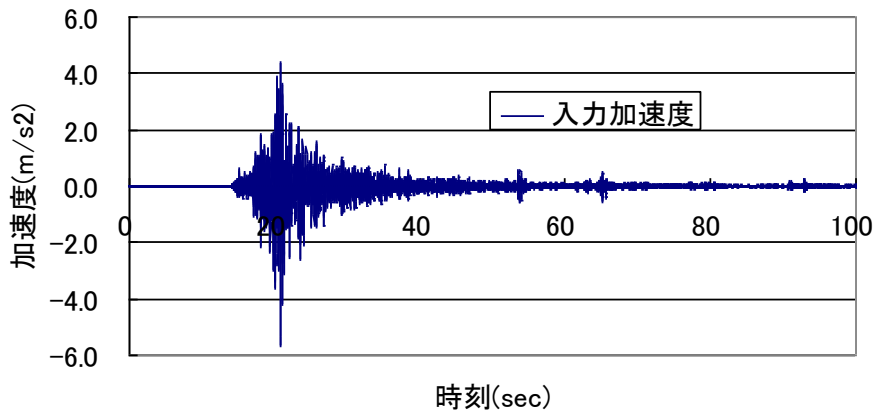
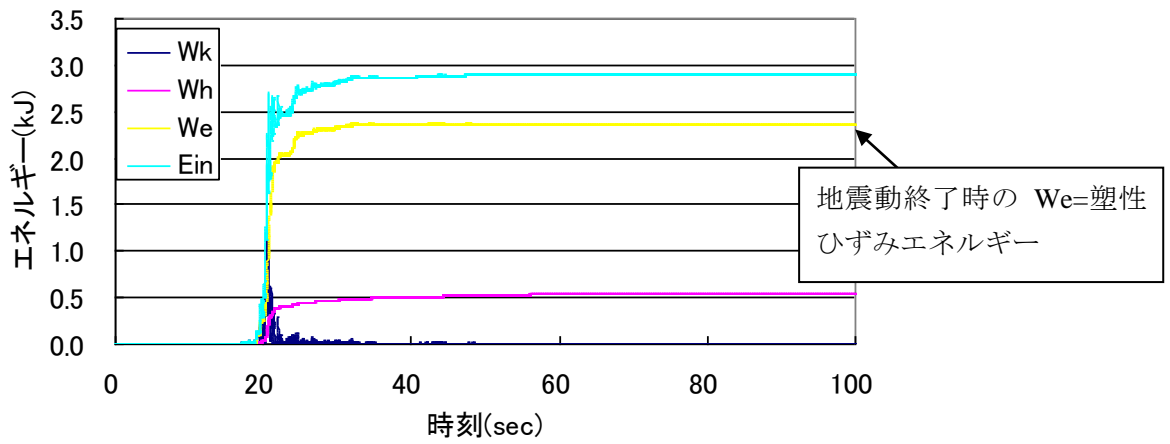


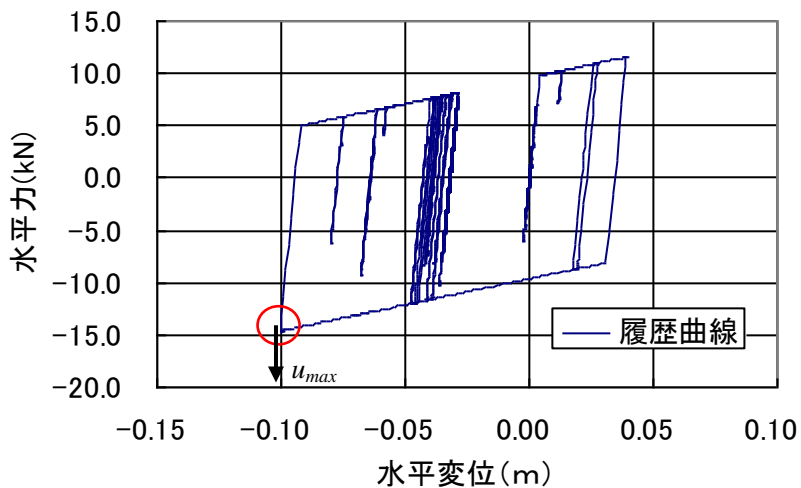
図 5-18 一自由度系のモデル



(a) 入力加速度波形(鳥取県西部地震の TTR009 における観測波形(工学的基盤上に変換))



(b) エネルギー収支の時刻歴波形



(c) 水平変位と復元力との関係

図 5-19 一自由度系の応答計算の例

(質量 $M=40t$, 減衰定数 $h=0.02$, $k_1=2450kN/m$, $k_2=50kN/m$, $u_y=0.004m$)

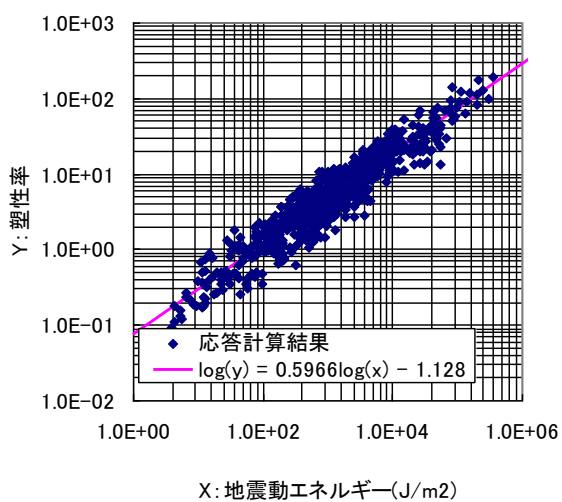
5.3.2. 地震動の強さを表す指標と塑性率や塑性エネルギーとの関係

K-NET 及び KiK-net における 1996 年以降の観測記録のうち、300gal 以上が記録された 377 個の地震記録(K-NET で 254 個, KiK-net で 123 個), 754 波形(NS と EW) を用いて, 一自由度系の応答計算を行った. 観測波形は, 0.1~10Hz のバンドパスフィルタを通過させた後で用いた. 構造物の損傷度合いを評価する指標として, 塑性率(最大変位 u_{max} /塑性変位 u_y)及び塑性ひずみエネルギー(W_e)を用いることとした.

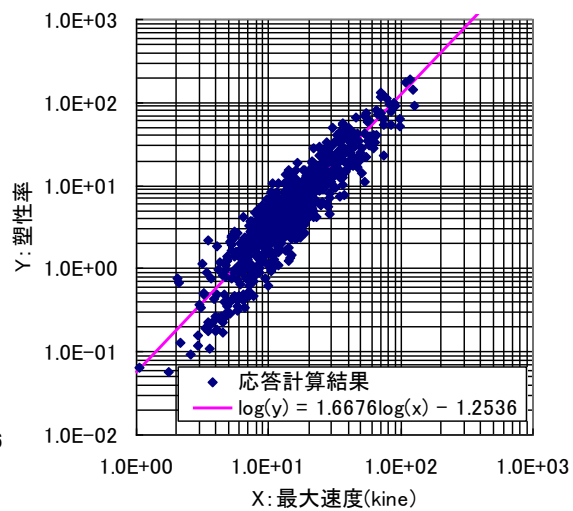
一自由度系の応答計算のモデルには, 地盤条件が考慮されないため, 地震動エネルギー算出にあたっては, 地盤の密度は 2000kg/m^3 , S 波速度は 300m/s と仮定した.

図 5-20 に塑性率と各指標との関係を示す. 地震動エネルギーと最大速度値は塑性率と相関が高い. 対数標準偏差は, 地震動エネルギーで 0.189(0.65 倍~1.55 倍), 最大速度値で 0.236(0.58 倍~1.72 倍)となり, 地震動エネルギーの方が若干小さい. 最大加速度値と塑性率との関係は, 対数標準偏差が 0.524(0.3 倍~3.33 倍)であり, 他の指標よりも大きなばらつきであった.

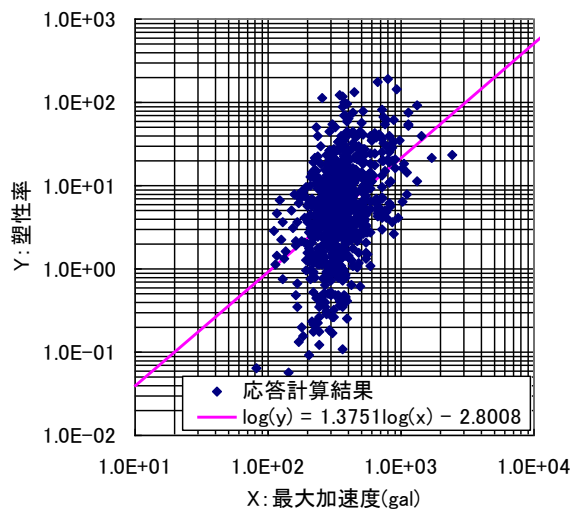
図 5-21 に塑性ひずみエネルギーと各指標との関係を示す. 塑性率が 1 以下のときは塑性ひずみエネルギーが非常に小さいため, 塑性率が 1 以上のデータについてプロットした. 地震動エネルギーと塑性ひずみエネルギーとの関係は他の指標との関係よりもばらつきが小さいことがわかる. 対数標準偏差は, 地震動エネルギーが 0.372(0.42 倍~2.35 倍), 最大速度値が 0.491(0.32 倍~3.09 倍), 最大加速度値が 0.828(0.15 倍~6.72 倍)であった. ただし, 塑性ひずみエネルギーが小さいデータは塑性率がほぼ 1 のデータであり, いずれの指標との関係においてもばらつきが大きく, 両対数軸図上での直線状にならないため, 塑性率が 4 以上のデータについて, 図 5-22 にプロットし直した. これによると, 地震動エネルギーと最大速度値については, 両対数軸図上で直線関係がみられるようになった. 地震動エネルギーと塑性ひずみエネルギーの関係は非常にばらつきが小さいことがわかる. 対数標準偏差は, 地震動エネルギーが 0.174(0.67 倍~1.49 倍), 最大速度値が 0.325(0.47 倍~2.11 倍), 最大加速度値が 0.524(0.3 倍~3.33 倍)であった. さらに, 地震動エネルギーと塑性エネルギーの関係は, 塑性エネルギーが大きくなるほどばらつきが小さくなっていることから, 大きな被害が想定されるほど地震動強さとの関係の信頼性が高くなると言える.



(a) 地震動エネルギー (対数標準偏差 0.189)

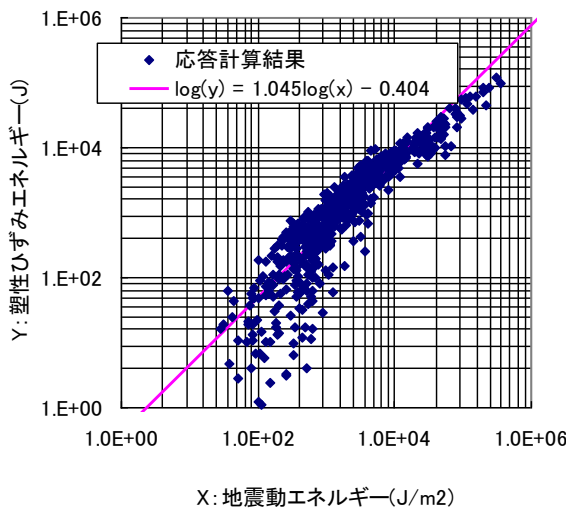


(b) 最大速度値 (対数標準偏差 0.236)

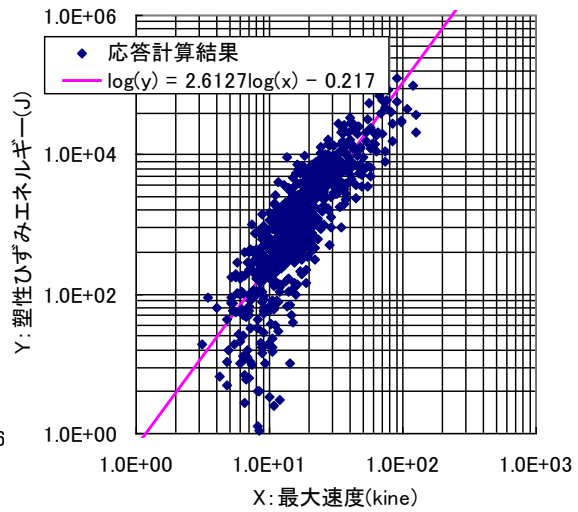


(c) 最大加速度値 (対数標準偏差 0.524)

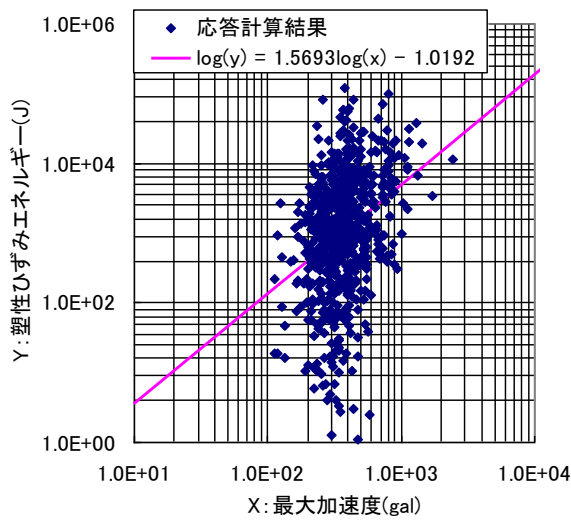
図 5-20 地震動の強さを表す指標と塑性率との関係
 (質量 M=40t, h=0.02, k₁=2450kN/m, k₂=50kN/m, u_y=0.004m)



(a) 地震動エネルギー (対数標準偏差 0.372)

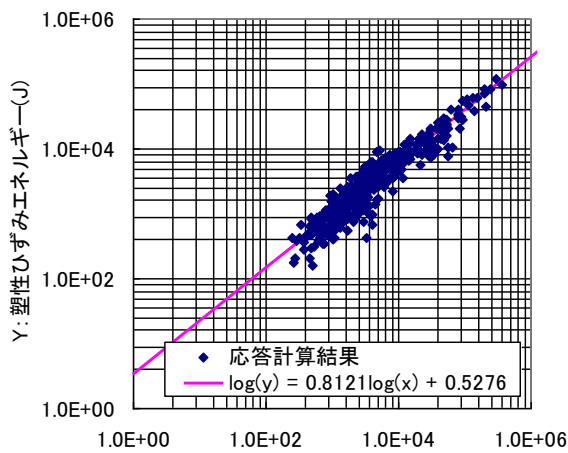


(b) 最大速度値 (対数標準偏差 0.491)



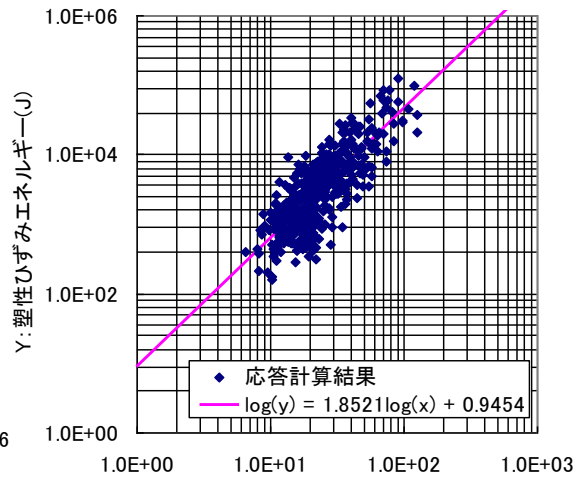
(c) 最大加速度値 (対数標準偏差 0.828)

図 5-21 地震動の強さを表す指標と塑性ひずみエネルギーとの関係 (塑性率 1 以上)
(質量 M=40t, h=0.02, k₁=2450kN/m, k₂=50kN/m, u_y=0.004m)



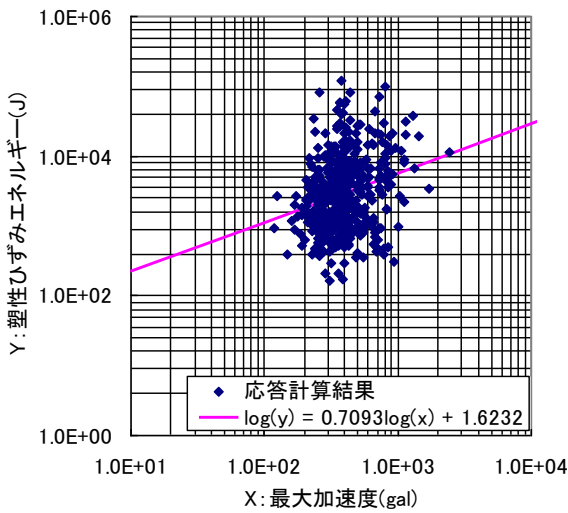
X: 地震動エネルギー(J/m²)

(a) 地震動エネルギー (対数標準偏差 0.174)



X: 最大速度(kine)

(b) 最大速度値 (対数標準偏差 0.325)



X: 最大加速度(gal)

(c) 最大加速度値 (対数標準偏差 0.524)

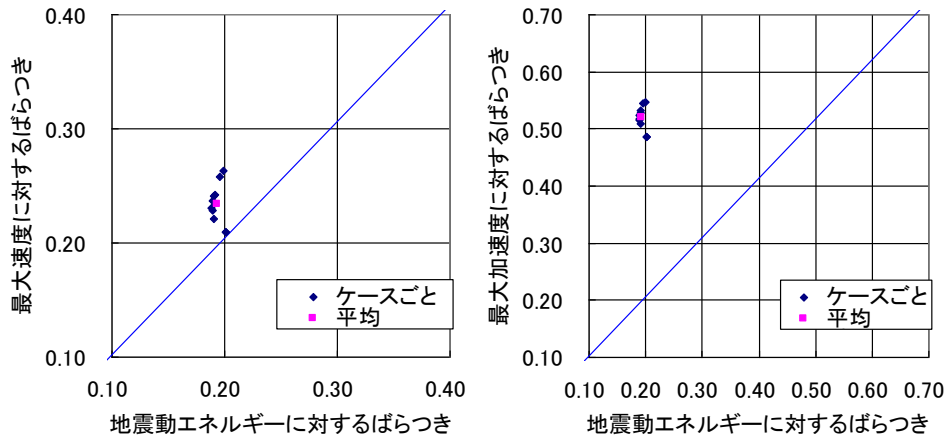
図 5-22 地震動の強さを表す指標と塑性ひずみエネルギーとの関係 (塑性率 4 以上)

(質量 M=40t, h=0.02, k₁=2450kN/m, k₂=50kN/m, u_y=0.004m)

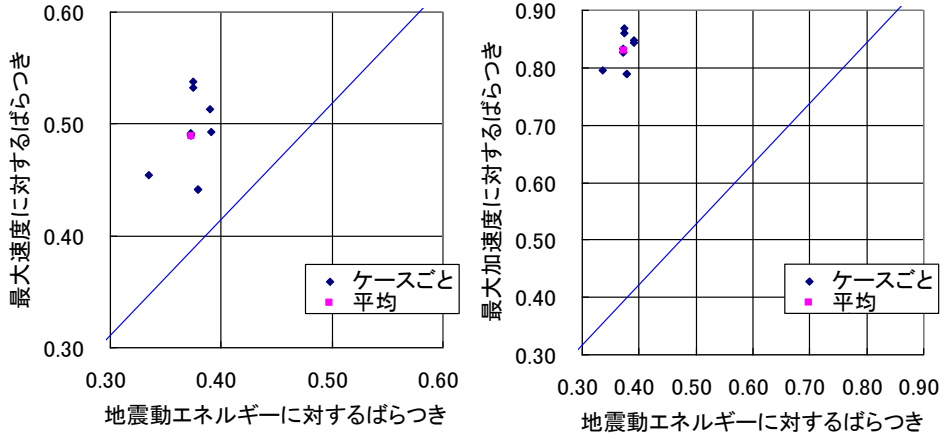
一自由度系の計算には、質量や減衰定数、初期剛性等、いくつかのパラメータが必要なため、1 ケースの計算だけでは一般的な傾向が示されているとは言えない。そこで、応答計算に必要なパラメータをいくつか変化させたパラメータスタディを行った。表 5-7 にパラメータスタディの結果を示す。また、地震動エネルギーに対するばらつきと最大速度値あるいは最大加速度値に対するばらつきをグラフ上にプロットして図 5-23 に示す。変化させたパラメータは、質量、減衰定数、降伏耐力、降伏変位、初期剛性、第 2 剛性であり、基本ケース(case1)から、あるパラメータだけ 2 倍あるいは 0.5 倍に変化させた。その結果、塑性率 4 以上のデータの塑性ひずみエネルギーについては、地震動エネルギーを説明変数とした回帰式から推定した値と実際の応答計算結果との相違は対数標準偏差で 0.179 となり、最大速度値の 0.324 や最大加速度値の 0.527 と比べて非常に小さいことがわかった。これは、地震動エネルギーも塑性ひずみエネルギーもともに、地震動の時刻歴波形全体を対象として算出する量であるためであると考えられる。さらに、塑性率についても、地震動エネルギーを説明変数とした回帰式から推定した値と実際の応答計算結果とが最も相関性が高いという結果が得られた。対数標準偏差の平均値で見ると、地震動エネルギーについては 0.194 であるのに対し、最大速度値は 0.234 であり、最大加速度値は、0.519 であった。塑性率は最大変位を降伏変位で割った値であるから、最大値の方が相関が高いと推測されるが、図 5-19 に示すように、繰り返しの荷重によって徐々に変形が進行するケースが多いために、継続時間を考慮した地震動エネルギーとの相関が高くなっていると考えられる。

表 5-7 応答計算のパラメータスタディ結果

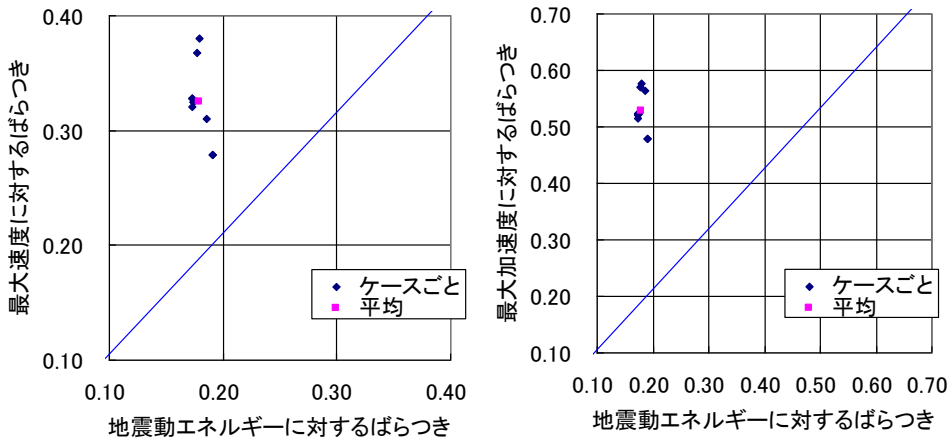
case	質量m (t)	減衰定数h	降伏耐力Py (kN)	降伏変位dy (m)	初期剛性k1 (kN/m)	第2剛性k2 (kN/m)	固有振動数f (Hz)	地震動の強さを表す指標と応答結果のばらつきの関係(対数標準偏差)								
								塑性率			塑性ひずみエネルギー(塑性率>1)			塑性ひずみエネルギー(塑性率>4)		
								地震動エネルギー	最大速度	最大加速度	地震動エネルギー	最大速度	最大加速度	地震動エネルギー	最大速度	最大加速度
1	40	0.02	9.8	0.004	2450.0	24.7	1.25	0.189	0.236	0.524	0.372	0.491	0.828	0.174	0.325	0.524
2	20	0.02	9.8	0.004	2450.0	24.7	1.76	0.201	0.209	0.487	0.379	0.442	0.790	0.191	0.279	0.478
3	80	0.02	9.8	0.004	2450.0	24.7	0.88	0.199	0.263	0.547	0.374	0.533	0.860	0.177	0.367	0.570
4	40	0.01	9.8	0.004	2450.0	24.7	1.25	0.191	0.241	0.528	0.390	0.513	0.844	0.173	0.328	0.522
5	40	0.04	9.8	0.004	2450.0	24.7	1.25	0.189	0.228	0.516	0.391	0.493	0.847	0.173	0.321	0.514
6	40	0.02	19.6	0.004	4900.0	49.5	1.76	0.201	0.209	0.487	0.379	0.442	0.790	0.191	0.279	0.478
7	40	0.02	4.9	0.004	1225.0	37.1	0.88	0.196	0.258	0.545	0.375	0.538	0.869	0.179	0.381	0.576
8	40	0.02	9.8	0.002	4900.0	24.6	1.76	0.190	0.221	0.509	0.335	0.454	0.794	0.186	0.310	0.563
9	40	0.02	9.8	0.004	2450.0	12.3	1.25	0.191	0.242	0.531	0.372	0.489	0.826	0.174	0.325	0.521
10	40	0.02	9.8	0.004	2450.0	50.0	1.25	0.188	0.230	0.518	0.373	0.492	0.833	0.173	0.328	0.523
平均								0.194	0.234	0.519	0.374	0.488	0.828	0.179	0.324	0.527



(a) 塑性率



(b) 塑性エネルギー (塑性率>1)



(c) 塑性エネルギー (塑性率>4)

図 5-23 ばらつきの比較

5.4. 結論

地震動エネルギーの地震工学の実務への活用例として、地震動予測結果の妥当性評価への適用性と構造物の被害推定への適用性について検討した。

地震動予測結果の妥当性評価については、モデル断層を想定し、統計的グリーン関数法を用いて周辺における地震動予測を行い、予測波形の強さを表す指標として地震動エネルギー、最大加速度値、最大速度値を算出し、比較した。

モデル断層のアスペリティの大きさのみを変えた場合、及びモデル断層の長さを変えて断層パラメータや重ね合わせ条件を新たに設定した場合のいずれにおいても、地震動エネルギーはアスペリティの大小や地震の規模の大小を反映した結果が得られたのに対して、最大加速度値や最大速度値は、小さいアスペリティや小さい規模の地震の方が大きな値となった地点が相当数存在した。

統計的グリーン関数法では、要素地震波形の位相特性にランダム性があるが、このランダム性は地震動予測結果に影響しないことが望ましい。要素地震波形の位相特性を20パターン変化させたパラメータスタディを実施したところ、地震動エネルギーのばらつきは対数標準偏差で最大加速度値や最大速度値よりも小さく、要素地震波形のランダム性の影響はほとんど受けないことが分かった。

また、入力がデルタ関数やホワイトノイズであれば水平多層地盤内を伝播する地震動のエネルギーは各層で厳密に保存されるため、入力が地震動の場合であっても、地盤の密度とS波速度が掛かっている地震動エネルギーは、最大加速度値や最大速度値ほど地盤の増幅の影響を受けないことがわかった。

地震動予測結果は、地震動エネルギーのみで評価するのではなく、多様な指標を用いて多面的に評価することが望ましいが、地震動エネルギーを地震動予測結果の評価指標に加えることによって、予測波形の妥当性を合理的に評価できる可能性がある。例えば、予測波形の最大加速度値が距離減衰式から算出した値よりもかなり大きかったとしても、地震動エネルギーが妥当な値であれば、偶然的なパルス状の波形が最大値として生じたに過ぎない、という工学的判断に合理性を与えることができる。

構造物の被害推定については、バイリニアの履歴特性をもつ一自由度系の応答解析を行い、構造物被害と地震動の強さを表す指標との関係を求めた。構造物被害は、塑性率と塑性ひずみエネルギーの大きさで表した。入力地震動は、K-NET 及び KiK-net の既往の観測記録とした。

地震動エネルギーの大きさと塑性率との関係は、ばらつきが最大加速度値や最大速度値と塑性率との関係よりも小さいことがわかった。また塑性率が高く被害が大きい構造物に対しては、地震動エネルギーと塑性ひずみエネルギーとの関係は、対数標準偏差で 0.179 と最大速度値と塑性ひずみエネルギーとの関係の 0.324 の約半分程度、最大加速度と塑性ひずみエネルギーの関係の 0.527 の約 1/3 程度と非常にばらつきが小さい。大きな被害が予測される場合には、被害程度の推定精度が向上することが期待できる。よって、地震動エネルギーは、構造物の被害推定にも高い適用性を有していることがわかった。

地震動エネルギーは、最大値はそれほど大きくないが継続時間が長く繰り返し荷重が多い

地震動に対する被害推定に適していると考えられる。構造物の特性にもよるが、例えば土は小さなひずみの段階から塑性化する材料であり、土構造物の被害は繰返し荷重の影響を大きく受ける。そのため、大阪近辺における東南海・南海地震の想定地震動のように、最大値が上町断層の想定地震動ほど小さくなくても継続時間が長い地震動に対しては、地震動エネルギーを用いることにより、合理的な被害推定を行うことができると考えられる。

5.5. 参考文献

- 1) 野津厚, 菅野高弘: 港湾におけるサイト増幅特性を考慮したレベル2地震動の算定事例, 港湾空港技術研究所資料, No.1146, 2006.
- 2) 安田成夫, 島本和仁, 大谷知樹: ダムの耐震検討用地震動設定への半経験的手法の適用, 国土技術政策総合研究所資料, 第458号, 2008.
- 3) 大西良広, 澤田純男: 上町断層について想定される地震動, 第36回地盤震動シンポジウム, pp.83-90, 2008.
- 4) 翠川三郎, 藤本一雄: 計測震度と住家被害率との関係 - 罹災調査結果を用いた検討 -, 日本地震工学論文集, 第2巻, 第2号, 2002.
- 5) 堀江啓, 林春男, 田中聡, 長谷川浩一, 牧紀男, 沖村孝: 地震による木造住宅の損傷度を反映する被害関数の構築, 地域安全学会論文集, No.5, pp.123-132, 2003.
- 6) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第500号, pp.29-36, 1997.
- 7) 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-因果性と多重非線形効果に着目した改良-, 港湾空港技術研究所資料, No.1173, 2008.
- 8) 平井俊之, 釜江克宏, 長沼敏彦, 伊藤進一郎, 西岡勉, 入倉孝次郎: 分岐断層の特性化震源モデルを用いた兵庫県南部地震の強震動シミュレーション, 日本地震工学学会論文集, 第6巻, 第3号, pp.1-11, 2006.
- 9) 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, 2002.
- 10) 藤川智, 佐藤俊明, 壇一男, 石井透, 佐藤智美, 早川崇, 松島信一, 渡邊基史, 福和伸夫, 久保哲夫: 名古屋市を対象とした想定新東海地震による強震動予測, 土木学会地震工学論文集, pp.1-4, 2003.
- 11) 松田時彦: 最大地震規模による日本列島の地震分帯図, 東京大学地震研究所彙報, 65, 1, 289-319, 1990.
- 12) Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T.Kagawa, N. Smith, and A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, 70, 59-80, 1999.
- 13) Hanks, T., and Kanamori, H.: A moment magnitude scale: J. Geophys. Res., v. 84, no. B5, p. 2348-2350, 1979.
- 14) Boatwright, J.: The seismic radiation from composite models of faulting, Bull. Seism. Soc. Am., 78, 489-508, 1988.
- 15) 石井透・佐藤俊明・Paul G. Somerville: 強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の抽出, 日本建築学会構造系論文集, 527, 61-70, 2000.
- 16) Geller, R.J.: Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am, 66, 1501-1523, 1976.
- 17) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.97-104,

1998.

- 18) Boore, D.M. : Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions based on Seismological Models of Radiated Spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, No.6, pp.1865-1894, 1983.
- 19) 康大彦, 田中康介, 前田匡樹, 井上範夫 : サブストラクチャー擬似動的実験による震災RC造建築物の残存耐震性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, 2002.

6. 結論

土木構造物の設計地震動評価や地震被害想定等で、従来よく用いられる指標は、計測震度や最大加速度値、応答スペクトル等である。これらの指標は確かに地震動の強さの一面を表しているが、時刻歴波形としての地震動の特徴を表すためには地震動継続時間や位相特性等も考慮する必要がある。また、最大加速度値や最大速度値よりもエネルギー的な指標の方がより実被害との整合性が高いとの指摘もある。そこで本研究では、地震動のエネルギー指標に着目し、地震工学における実務への活用法について検討した。

地震波の伝播に伴うエネルギーの流れの概念は古くからあり、いくつもの研究がなされているが、地震動エネルギーのばらつきについての研究はほとんど見あたらない。本研究では特に各指標のばらつきに注目し、地震動のエネルギー指標を地震動予測結果の妥当性評価や構造物の被害推定に適用した場合の利点について検討した。

第2章では、地震動のエネルギーに関する既往の研究について整理するとともに、本研究で用いる地震動エネルギーの定義について述べ、主な被害地震の観測記録を用いて地震動の強さを表す他の指標とともに地震動エネルギーの値を算定し比較した。その結果、地震動エネルギーと既往の各指標とは明確な相関があり、地震動エネルギーが地震動の強さを表す指標として有望であることがわかった。

第3章では、地震動エネルギーの距離減衰特性について調べた。

地震動は、地盤内の伝播に伴って減衰が生じる。幾何減衰によって波動場全体としてのエネルギーの変化は生じないが単位要素を通過する量として考えた場合には距離減衰が生じ、粘性減衰等によって地震動のエネルギーは他のエネルギーに転化され減少する。さらに地盤の不均質性によって観測点ごとにばらつきが生じることが考えられる。国内における17の地震について、K-NET及びKiK-netの522の観測記録を用いて地震動エネルギーの距離減衰特性を調べ、モーメントマグニチュードと等価震源距離を説明変数として距離減衰式を作成した結果、地震動エネルギーの距離減衰特性のばらつきは、最大加速度値よりも小さく、最大速度値とはほぼ同程度であるが、地震の規模に起因するばらつきは、最大加速度値や最大速度値よりも小さいことがわかった。さらに、地震動エネルギーの周波数特性をウェーブレット変換に基づいて調べたところ、地震動エネルギーはオメガ・スクエア・モデルと整合していることが示された。これらの結果から、地震動エネルギーは、最大加速度値等よりも地震の規模や距離に応じて安定的に地震動の強さを評価できる指標であると結論づけられた。

第4章では、地震動エネルギーの保存則について検討した。

地震動エネルギーを地震動の強さの指標として用いるためには、エネルギー保存則について検討することが重要である。一般にエネルギーには保存則が成り立つことが知られている。そこで、地盤内における地震動エネルギーの基本的な保存則について、減衰の無い水平成層地盤を対象に、1次元のSH波の弾性伝播問題として検討した。

その結果、水平2層地盤においては、入力がデルタ関数やホワイトノイズであれば、地震動エネルギーは保存されることが、理論的に証明された。このことは、各層の波動インピーダンスと

インパルス入力に対する上昇波のパワーの周波数軸上の平均とを掛け合わせた量 $\rho V_s \langle P \rangle$ が保存されていることと同義である。一般的な水平多層地盤に対しては解析的に解を求めることができなかったが、モンテカルロシミュレーションによって数値解析的に検討した結果、 $\rho V_s \langle P \rangle$ の保存は、数学的には証明されていないものの、工学的な観点では十分成立していると考えてよいことがわかった。よって、水平多層地盤の各層において、デルタ関数やホワイトノイズが入射した場合には、上昇波の地震動エネルギーは保存されていることが示された。

第5章では、地震動のエネルギー指標を地震工学の実務へ活用する方法として、地震動予測結果の妥当性評価と構造物の被害推定に適用した場合の利点について検討した。

地震動予測結果の妥当性評価においては、モデル断層を想定して統計的グリーン関数法を用いて周辺における地震動予測波形を作成し、地震動エネルギー、最大加速度値、最大速度値を算出して比較検討した。モデル断層のアスペリティの大きさのみを変えた場合、及びモデル断層の長さを変えて断層パラメータや重ね合わせ条件を新たに設定した場合のいずれにおいても、地震動エネルギーはアスペリティの大小や地震の規模の大小を反映した結果が得られたのに対して、最大加速度値や最大速度値は、小さいアスペリティや小さい規模の地震の方が大きな値となった地点が相当数存在した。統計的グリーン関数法では、要素地震波形の位相特性にランダム性があるが、このランダム性は地震動予測結果に影響しないことが望ましい。要素地震波形の位相特性を20パターン変化させたパラメータスタディを実施したところ、地震動エネルギーのばらつきは最大速度値や最大加速度値に比べて非常に小さく、要素地震波形のランダム性の影響はほとんど受けないことが分かった。また、地震動エネルギーを指標とした場合には、せん断波速度 $V_s=3400\text{m/s}$ の地震基盤上と $V_s=300\text{m/s}$ の工学的基盤上とで、最大加速度値や最大速度値ほど地盤による違いがないことがわかった。

構造物の被害推定においては、バイリニアの履歴特性をもつ一自由度系の応答解析を行い、塑性率や塑性ひずみエネルギーで表される構造物被害と地震動の強さを表す指標との関係を求めた。入力地震動はK-NETおよびKiK-netの既往の強震観測記録とした。地震動エネルギーと塑性率(最大変位/降伏変位)との関係のばらつきは、最大加速度値や最大速度値と塑性率との関係のばらつきよりも小さいことがわかった。また塑性率が高く被害が大きい構造物に対しては、地震動エネルギーと塑性ひずみエネルギーとの関係は、ばらつきが小さく、大きな被害が予測される場合には、被害程度の推定精度が向上することが期待できる。これらのことから、地震動エネルギーは、構造物の被害推定にも高い適用性を有していることがわかった。

以上の検討から、地震動エネルギーについて、主に以下の点が他の指標に対して優れていることがわかった。

- 1) 距離減衰特性において、地震モーメントとの関係が良く、地震の規模に起因するばらつきが他の指標よりも小さい。
- 2) 入力がデルタ関数やホワイトノイズであれば水平多層地盤内を伝播する地震動のエネルギーは各層で厳密に保存されるため、入力が地震動の場合であっても地震動エネルギーは地盤の増幅の影響が小さく、地盤の違いに起因するばらつきが小さい。
- 3) 地震動予測結果の妥当性評価や構造物の被害推定に活用した場合、最大加速度値や最大速度値よりもばらつきが小さく安定した結果が得られる。

地震動エネルギーの実務への活用の例を以下に示す。

- 1)地震動予測結果は、地震動エネルギーのみで評価するのではなく、多様な指標を用いて多面的に評価することが望ましいが、地震動エネルギーを地震動予測結果の評価指標に加えることによって、予測波形の妥当性を合理的に評価できる可能性がある。例えば、予測波形の最大加速度値が距離減衰式から算出した値よりもかなり大きかったとしても、地震動エネルギーが妥当な値であれば、偶然的なパルス状の波形が最大値として生じたに過ぎない、という工学的判断に合理性を与えることができる。
- 2)地震動エネルギーは、最大値はそれほど大きくないが継続時間が長く繰返し荷重が多い地震動に対する被害推定に適していると考えられる。構造物の特性にもよるが、例えば土は小さなひずみの段階から塑性化する材料であり、土構造物の被害は繰返し荷重の影響を大きく受ける。そのため、大阪近辺における東南海・南海地震の想定地震動のように、最大値が上町断層の想定地震動ほど小さくなくても継続時間が長い地震動に対しては、地震動エネルギーを用いることにより、合理的な被害推定を行うことができると考えられる。
- 3)水平成層地盤内の各層で保存される物理量 $\rho V_s \langle P \rangle$ は、着目する地盤深度の波動インピーダンスとそれらの間の伝達関数のみから算定でき、詳細な地盤構造を必要しないことから、今後、物理量 $\rho V_s \langle P \rangle$ は地震工学における諸問題において適用範囲が広がっていくものと期待される。

一方、地震動エネルギーについて、以下のような課題が残されている。

- 1)本研究で行った距離減衰特性の検討においては、十勝沖地震等の海溝型地震のデータが含まれていない。内陸活断層だけでなく、他の断層タイプにおける同様な検討が必要であると考えられる。
- 2)本研究で行った地震動エネルギーの保存に関する議論は、減衰の無い水平成層地盤を対象としており、3次元的な影響や減衰の影響について検討を行っていく必要がある。
- 3)地震動エネルギーの算出には、地震動の時刻歴波形の他に、地盤条件として、密度とS波速度の値が必要である。したがって、入力地震動の評価においては、入力位置における地盤条件を設定する必要がある。また、被害想定においても、一自由度系の応答計算には地盤条件は必要ないため、地震動エネルギーを算出するためには地盤条件を仮定する必要がある。構造物の被害推定に用いる場合には、構造物と地盤との連成系を考慮した解析手法を用いて地震動エネルギーと構造物被害との関係式を構築していく必要があると考えられる。その場合でも、実際の被害推定において現位置の地盤情報が必要となるため、地盤情報データベースの整備を期待しその活用を図るか、各構造物位置における地盤情報を何らかの形で推定する必要がある。

地震動エネルギーは地震動の大きさを表す指標として優れており、今後、構造物の設計に地震動エネルギーを活用していくことにより、さらに合理的な耐震設計が可能になるものと期待される。ただし、残された課題に対して、さらなる研究を行っていく必要がある。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々の御指導や御支援をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

澤田純男教授には、博士課程への編入学の機会を与えていただき、編入学から論文のとりまとめまで大変お世話になりました。視野が狭く怠け者の私は、途中何度も、つまずいた気になってなかなか研究が進みませんでした。その度に示唆や助言により導いていただきました。都度御指導を受けることにより、論理的な思考力や文章の構成力等、学位だけでなく多くのものを得ることができたと実感いたしております。ここに深甚なる感謝の意を表します。

林康裕教授には、論文の内容について大変有益な御指摘をいただき、内容を大幅に充実させることができました。深く感謝いたします。五十嵐晃准教授には、地震動エネルギーの導出に関して御指導いただきました。厚く御礼を申し上げます。

後藤浩之助教には地震動エネルギーの保存則について私が思い悩んでいるところを、親切に相談に応じていただきました。4章には後藤先生による成果が多く含まれています。心より感謝いたします。高橋良和准教授や研究室の学生の方々からもいろいろとアドバイスや励ましをいただきました。どうもありがとうございました。

博士課程への編入学の機会を得た発端は、株式会社ニュージェックの竹澤請一郎氏と共に実施していた業務で澤田教授に御指導を受けたことです。竹澤氏は私の入社以来数年間の所属長であり、技術者としてのあり方について教えていただきました。様々な思いを込めて心より感謝の意を表します。株式会社ニュージェックの松本敏克博士には、研究が思うように進まず悩むたびに相談に応じていただき、御自身の社会人の博士課程における経験から有益な助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

港湾空港技術研究所の野津厚博士からは、本論文におけるテーマについて、論文や業務での会話等を通じて有益なヒントをいただきました。深く感謝いたします。鳥取大学の香川敬生教授からも、学会発表での議論を通じて大変有益な助言をいただきました。ここに深謝の意を表します。

研究と業務を両立させることは困難であり、私の所属する株式会社ニュージェック港湾・海岸グループの方々にはたびたび負担をかけてしまい、申し訳ありませんでした。御理解と御協力に感謝いたします。

防災科学技術研究所により提供されている K-NET 及び KiK-net の強震観測データを使わせていただきました。ここに記して感謝いたします。

本論文をとりまとめるにあたりお世話になった多くの方々に、ここに重ねて心より感謝の意を表しまして、謝辞といたします。