

強震動予測のための地震観測の重要性と観測記録の利用例について

(独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 野津厚

1. 対象施設の敷地における地震観測の重要性について

一般に、地震による地盤の揺れ(地震動)は震源断層の破壊過程の影響(震源特性)と震源から地震基盤に至る伝播経路の影響(伝播経路特性)、それに地震基盤から地表に至る堆積層の影響(サイト特性)の三者によって決まると考えられている(図-1)。ここに地震基盤とは一般に花崗岩でS波速度が3km/s以上の地層を言う。

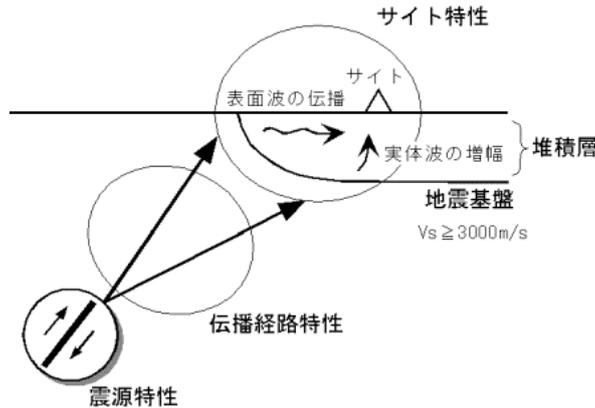


図-1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

堆積層が地震の揺れに大きな影響を与えた事例は数多く知られている。その一例として2000年鳥取県西部地震の例を図-2～図-4に示す。鳥取県境港市の気象庁観測点と港湾の観測点(境港-G)は弓ヶ浜半島の堆積層の上に位置しており、一方、防災科学技術研究所の観測点(SMN001とSMNH10)は島根半島の山麓に位置している(図-2, 図-3)。2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震の最大速度は前者が後者の4倍程度となっており(図-4)、堆積層の影響が大きいことを示している。被害も境港市内に集中している。

このように、堆積層の存在が地震動に及ぼす影響は非常に大きいため、将来の地震による揺れの推定を行う場合、対象地点周辺の堆積層が地震動に及ぼす影響、すなわちサイト特性を正確に把握することが重要である。このとき、サイト特性としては、工学的基盤面より上方の表層地盤の影響のみならず、工学的基盤面より下方の深層地盤の影響も重要であることが最近では認識されるようになってきている¹⁾。サイト特性の評価を見誤れば、地震動の推定結果にも数倍の誤差が生じ、その結果、補強の必要がない施設を補強してしまったり、あるいは、本来は補強すべき施設に関して補強の必要性を見逃してしまう恐れがある。従って、サイト特性の評価は重要である。



図-2 境港周辺の強震観測地点



図-3 境港周辺の地形（第八管区海上保安本部提供）

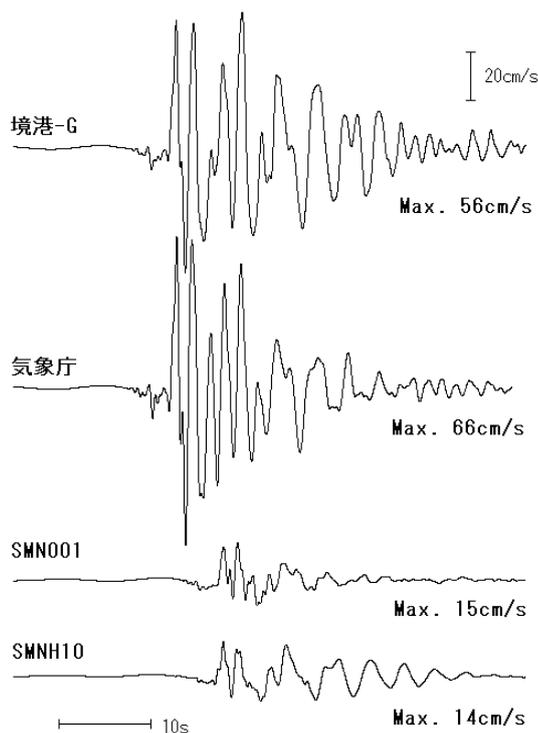


図-4 2000年鳥取県西部地震の際に境港周辺で観測された速度波形（断層直交成分）

新たに施設を整備しようとする地点、もしくは、既存施設の改良を実施しようとする地点が、揺れやすい場所にあっているか、そうでないかについては、現地地震観測を実施することにより、高精度で把握することができる。地震観測は、サイト特性を把握するためのもっとも確実かつ経済的な方法である。ここで強調したいのは、地震観測は決して高価なものではない、という点である。地震観測に係るコストの大半は地震計を購入するためのコストであるが、性能の良い地震計を購入するためのコストは、深さ20～30m程度のボーリング調査を行うためのコストと同程度(200～300万円程度)であるにすぎない。この程度の投資で、通常のボーリング調査ではなかなか把握できない地震基盤～地表までの地震波の増幅特性を把握することができるのであるから、たいへん経済的な調査である。もしもサイト特性を地震観測によらない方法で把握しようとするれば、例えば対象地点において地震基盤に達するボーリング調査を実施する必要があるが、その場合のコストは、地震基盤が深さ500mにあれば約5,000万円、地震基盤が深さ1000mにあれば約1億円にもなる。また、仮に地震基盤に達するボーリング調査を行ったとしても、その結果に基づいてサイト特性の評価を精度良く実施できるという保証はない。なぜなら、地震波に対しては、対象地点直下の堆積層のみならず、対象地点周辺の2次元的～3次元的な地下構造が影響を及ぼすので、サイト直下の土層を把握するだけでは不十分だからである。このように見えてくると、地震観測がいかに経済的な調査であるか、御理解いただけるのではないだろうか。さらに付け加えて言えば、サイト特性の評価のための地震観測は恒久的な観測である必要はない。例えば1つの空港で十分な記録が蓄積された場合には、地震計を次の空港に移して観測

を継続することができる。このようにすれば、1 空港あたりの観測コストは上記をさらに下回ることになる。

地震観測で重要なのは観測期間を十分に確保することである。十分な数のデータを得るためには、東日本の地震活動度の高い地域でも 1 年程度、地震活動度の低い地域では数年程度の観測期間が必要である。施設の新設や改良等のプロジェクトが予定されている場合には、時機を逸することなく観測を行うことが最も重要である。

2. サイト特性の把握のために実施された短期間の地震観測の例

ここでは、サイト特性の把握のために実施された短期間の地震観測の例として、広島港湾空港技術調査事務所により実施された岩国港での地震観測を紹介する。写真-1 および写真-2 は岩国港に設置された速度型強震計を示す。写真-1 でコンクリート製の基礎の上に設置されている円筒形のものが強震計のセンサーであり、左は記録器である。

短期間の地震観測では、積極的に多くの記録を取得するため、トリガーレベル（地震計が起動する揺れのレベル）を一般的な強震観測よりも小さなレベルに設定することが一般的である。しかし、港湾のように産業の集積している場所では、トラックや機械による雑振動のため、トリガーレベルをあまり低く設定できないことがある。一般にトラックや機械による雑振動は加速度は大きくても速度はあまり大きくない性質がある。それに対して、地震動は加速度は小さくても速度は比較的大きい。そこで、加速度でなく速度があるレベルを超えたときにトリガーがかかるような機構を採用しておけば、周辺の雑振動の影響を受けにくく、短期間に効率的に記録を取得することができる。写真-1 および写真-2 に示す速度型強震計はこのような利点を有している。なお、短期間に効率的に記録を取得する方法としては、上述の方法の他、トリガー起動方式によらず、長時間連続観測を行い、後から地震時の記録を取り出すという方法も考えられる。

岩国港では、2005 年 9 月下旬に観測を開始して以来、順調に記録が得られた。得られた記録の一部を以下に紹介する。図-5 は 2005 年 11 月 22 日に鹿児島県で発生した地震 (M6.0)、2006 年 2 月 1 日に愛媛県で発生した地震 (M4.5) および 2006 年 3 月 27 日に日向灘で発生した地震 (M5.5) に関して、岩国港と YMG016 (K-NET²⁾ 岩国) で取得された記録のフーリエスペクトルの比をとったものである。ここにフーリエスペクトルは水平 2 成分のベクトル和をとりバンド幅 0.05Hz の Parzen window を適用したものである。この図から、岩国港の強震計設置地点では YMG016 と比較して 1Hz 程度の成分が増幅されやすく、2Hz 程度の成分は増幅されにくいことがわかる。図-6 は図-5 に示したスペクトル比のうち、最初の 2 地震の対数平均と 3 地震の対数平均を示したものである。このように、記録の数が増すに従い、両地点のスペクトル比は安定してきており、信頼性の高いものとなっている。図-5 もしくは図-6 のスペクトル比を YMG016 のサイト増幅特性（例えば文献 3）に示されているもの）に乗じれば、岩国港の強震計設置地点におけるサイト増幅特性を評価することができる。



写真-1 岩国港に設置された速度型強震計とコンクリート製の基礎（広島港湾空港技術調査事務所提供）



写真-2 岩国港に設置された速度型強震計のセンサー（広島港湾空港技術調査事務所提供）

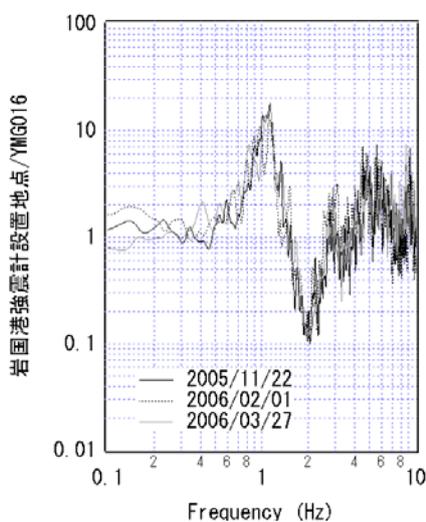


図-5 岩国港と YMG016 (K-NET 岩国) で同時に取得された記録のフーリエスペクトルの比

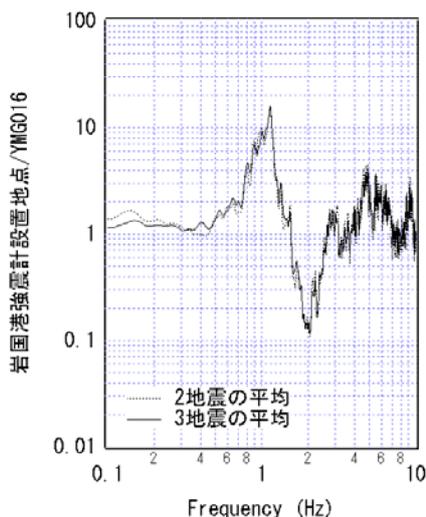


図-6 図-5 に示したスペクトル比のうち、最初の 2 地震の平均と 3 地震の平均

記録の個数としては、上の例のように、SN 比の確保されている記録を 3 個あるいはそれ以上取得することが望ましいが、記録の数がそれより少ない場合に全く解析ができないということではない。

観測は、上の例のように、通常の強震観測と同様、観測小屋の中でコンクリート製の基礎を用意して実施することが理想であるが、1~2 階建て程度の規模の小さい建物（事務所等）の 1 階床面で観測を行うことも

可能である。観測に用いる機器としては、通常の据え置き型の地震計の他、扱いやすい携帯用の地震計もある。観測に関連するその他の注意点として、得られた記録に基づいて地震動を評価する際、地表から工学的基盤に至る土質データ（可能な限り PS 検層結果）が必要となる。

3. 港湾における技術基準の改定

2007年4月に「港湾の施設の技術上の基準」（以下、技術基準という）が改定された。新しい技術基準⁴⁾では、レベル1とレベル2の2段階の設計地震動は、対象地点のサイト特性を考慮して設定されることになった。これにより、振幅・周期・継続時間などの点で対象地点に見合った設計地震動が設定されることとなるため、耐震設計の大幅な合理化が期待される。堆積層の影響により地震動の増幅されやすい港湾では強めの地震動が、そうでない港湾では弱めの地震動が設定されるようになるため、過不足のない耐震設計が可能となる。以下においては、新しい技術基準におけるレベル2地震動の位置づけと、レベル2地震動の標準的な設定方法を説明する。

(1) レベル2地震動の概要

新しい技術基準の省令において、レベル2地震動は「技術基準対象施設を設置する地点において発生するものと想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するもの」と定義されている。また、告示においてレベル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」とされている。省令・告示の解説では、レベル2地震動は、過去に大きな被害をもたらした地震の再来、活断層の活動による地震、M6.5の直下地震等の想定地震による地震動の中から最大規模のものを選定することが規定されている。従来の港湾の技術基準ではレベル2地震動の下限値は規定されていなかったが、新しい技術基準では土木学会第三次提言¹⁾に基づいてM6.5の直下地震による地震動が下限値として規定されていることも一つの特徴である。

(2) レベル2対象地震の選定

まず、(a) 過去に大きな被害をもたらした地震の再来、(b) 活断層の活動による地震、(c) 地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震、(d) 中央防災会議や地震調査研究推進本部など国の機関の想定地震、(e) 地域防災計画の想定地震、(f) M6.5の直下地震を考慮し((a) - (f)の中には重複するものもあり得る)、その中で、対象地点に最大規模の地震動をもたらす地震をレベル2対象地震として選定する。次に、レベル2対象地震の巨視的震源パラメータおよび微視的震源パラメータを設定した上で、対象地震が発生した場合の工学的基盤における地震動としてレベル2地震動を設定する。

(a) - (f)の想定地震のうち、いずれの地震が対象地点に最大規模の地震動をもたらすかについては、判断が難しい場合もある。例えば、近くで生じる比較的小さい地震と遠くで生じる比較的大きい地震とで、いずれが対象地点により強い地震動をもたらすか判断することは、必ずしも容易でない。また、地震動には振幅、周波数特性、継続時間など様々な側面があり、どの地震が施設に最も大きな影響を及ぼすかは、まず地震動を評価し、次に地震応答計算を行ってはじめてわかるという場合もある。このようなことから、この段階では無理にレベル2対象地震を一つに絞らず、候補となる地震を複数選定しておく。その場合、地震応答計算の結果を踏まえ、当該施設に最も大きな影響を与える地震動が最終的なレベル2地震動となる。

(3) 震源パラメータの設定

レベル2地震動の評価に必要な震源パラメータには巨視的震源パラメータ（基準点位置、走向、傾斜、長さ、幅、面積、地震モーメント）、微視的震源パラメータ（アスペリティの数、アスペリティの面積、アスペリティの地震モーメント、ライズタイムなど）およびその他のパラメータ（破壊開始点、破壊伝播速度、破壊伝播様式）がある。震源パラメータは、技術基準の附属書⁴⁾に記載されている標準的な設定方法（下記）に従って設定するか、もしくは別途詳細な調査を行って設定する。

標準的な設定方法は以下の通りである。先ず、東南海・南海地震のように、過去に大きな被害をもたらした地震の再来を想定する場合には、過去に実際に発生した地震（過去のイベントという）に関する震度データ（場合によっては波形データ）と整合するような震源パラメータを用いる。中央防災会議⁵⁾による想定東南海・南海地震の震源パラメータはよく用いられる（図-7）。活断層の活動による地震およびM6.5の直下地震を

想定する場合に対しては、活断層の長さもしくは地震の規模に基づいて巨視的・微視的震源パラメータを設定する手順が附属書に示されているほか、アスペリティ位置と破壊開始点の標準的な設定方法も附属書に示されている（図-8）。

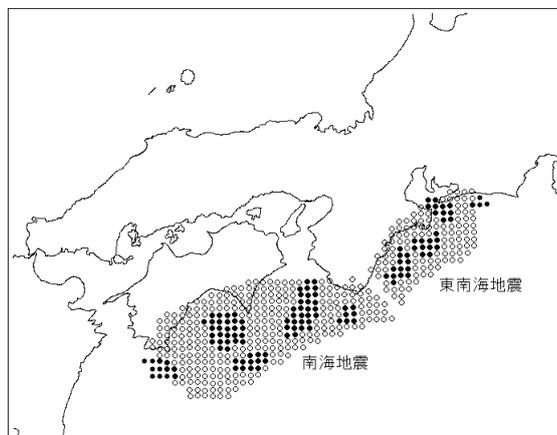


図-7 中央防災会議⁵⁾による想定東南海・南海地震の震源モデル

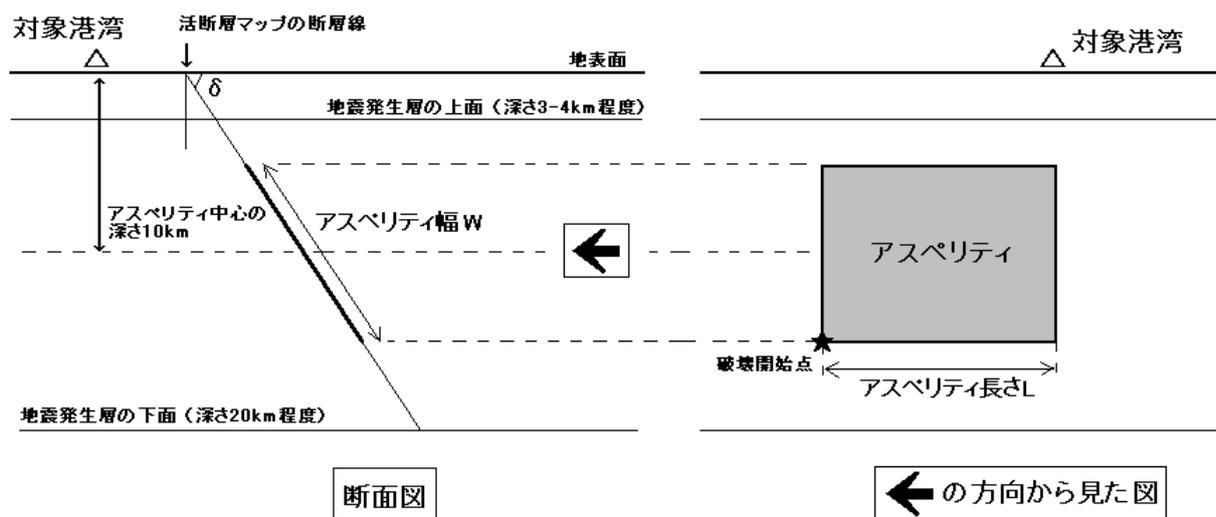


図-8 アスペリティ位置と破壊開始点の標準的な設定方法

(4) 強震波形計算手法—統計的グリーン関数法

いったん震源パラメータが設定されると、震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性を考慮した強震波形計算手法によりレベル2地震動を設定することができる。附属書⁴⁾では標準的な手法としてサイト増幅・位相特性を利用した強震動評価手法^{6)・7)}が紹介されている。これは統計的グリーン関数法⁸⁾のバリエーションの一つである。手法の詳細については附属書または文献^{7),9)}を参照していただくことにし、ここでは計算の流れだけを紹介する。

まず、想定地震のアスペリティ（図-9の large event）をいくつかの小断層に分割して、各々の小断層で生じる小地震による対象地点での揺れを先ず計算する（これをグリーン関数と称する）。次に、これをすべての小地震の分だけ足し合わせることにより、アスペリティの破壊による揺れを計算する。アスペリティが複数ある時には、すべてのアスペリティについて足し算を行う。最後に、表層地盤の地震応答計算（物性は線性を仮定する）により、工学的基盤におけるレベル2地震動（2E波）を計算する。グリーン関数を計算するときには震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮する。従って最終的に計算される地震波もサイト特性を考慮したものとなる。

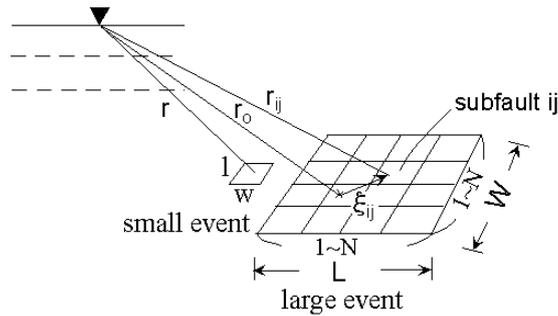


図-9 統計的グリーン関数法

4. レベル2地震動の計算例

ここでは港湾の技術基準に準拠した方法で空港でのレベル2地震動を計算した事例を紹介する。ここでは仙台空港を対象として、近くにある活断層である長町一利府線断層帯(図-10)が動いたという想定で地震動を計算する。なお、考慮すべき他の想定地震として1978年宮城県沖地震の再来やM6.5の直下地震などもあり、それらについても検討を行っているが、紙面の関係でここではスペクトルのみ掲載する。

(1) 計算条件

長町一利府線断層帯の地震の巨視的震源パラメタは次のように設定した。まず、地震調査研究推進本部¹⁰⁾によれば、長町一利府線断層帯の長さは21-40km、傾斜は35°~45°とされている。ここでは、長さは安全側をとり40km、傾斜は浅くするほど断層面が対象地点から離れるため45°とした。当該地域の地震発生層の厚さは13kmとされているので¹⁰⁾、幅は最大でも18kmである。そこで、全断層面積を $S=720\text{km}^2$ と設定した。地震モーメント M_0 は附属書の式より $1.83 \times 10^{26}\text{dyne-cm}$ と設定した。

長町一利府線断層帯の地震の微視的震源パラメタは次のように設定した。まず、アスペリティの面積 S_a を全断層面積 S の22%すなわち 158km^2 とした。対象地震はM7を越える比較的規模の大きい地震であるが、このような規模の大きい地震の場合、震源は複数のアスペリティによって構成されていることが普通である。そこで、アスペリティの個数は2個とし、 $S_{a1}=115\text{km}^2$ (長さ13.7km、幅8.4km)のアスペリティ1と $S_{a2}=43\text{km}^2$ (長さ6.6km、幅6.6km)のアスペリティ2を考えた。大きい方のアスペリティ1が対象サイトに近い場合を考え、図-8を参考に図-10のようにアスペリティを配置した(アスペリティの平均深さ10km)。アスペリティの地震モーメントはアスペリティ1が $M_{0a1}=6.59 \times 10^{25}\text{dyne-cm}$ 、アスペリティ2が $M_{0a2}=1.46 \times 10^{25}\text{dyne-cm}$ とした。アスペリティのライズタイムは附属書の式よりアスペリティ1が0.75s、アスペリティ2が0.59sとした。

強震動の評価に必要なその他のパラメタのうち地震基盤の密度 ρ は 2.7g/cm^3 、S波速度 V_s は 3.5km/s とした。破壊は図-10に示す破壊開始点から同心円状に拡大するものとし、破壊伝播速度 V_r はS波速度の80%とした。サイト増幅特性は、仙台空港での地震観測記録に基づいて算定されたサイト増幅特性³⁾を用いた。

(2) 計算結果

長町一利府線断層帯の地震に対する仙台空港の地表における試算結果は震度5.3(5強)となった(表層地盤の挙動は線形と仮定した場合の地表での震度)。図-11は長町一利府線断層帯の地震を想定した場合の仙台空港の工学的基盤における加速度と速度の波形を示したものである。図-12は種々の地震を想定した場合の工学的基盤における加速度のフーリエスペクトル(水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05Hzのパーセントウインドウを施したもの)を示したものである。M6.5の直下地震と長町一利府線断層帯の地震の寄与は拮抗している。

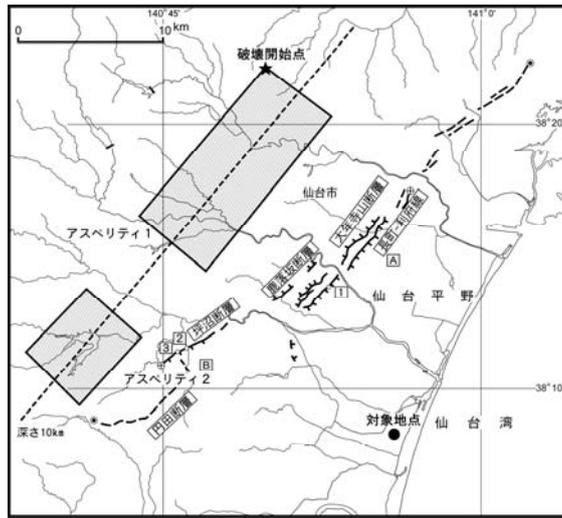


図-10 長町-利府線断層帯の位置と震源モデル（断層位置は地震調査研究推進本部¹⁰⁾を参考にした）

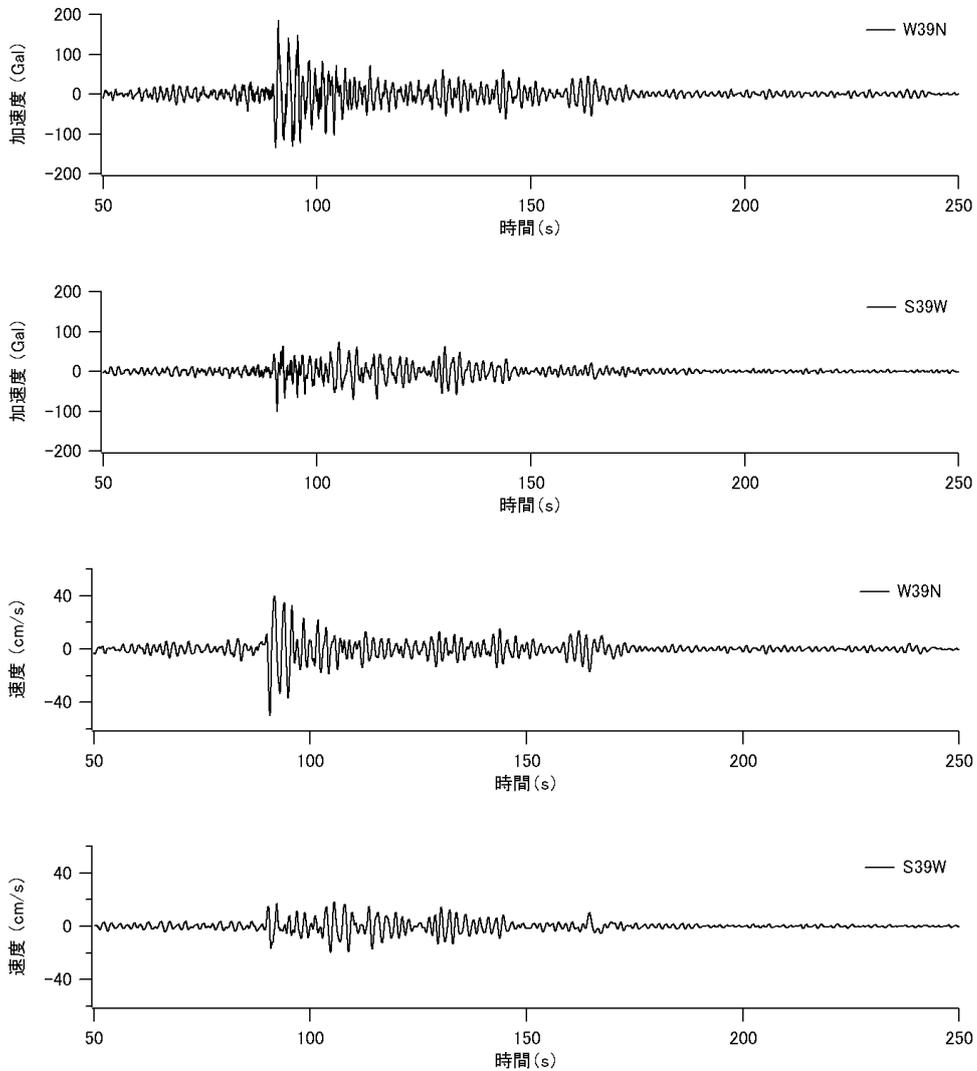


図-11 長町-利府線断層帯の地震を想定した場合の仙台空港の工学的基盤における加速度と速度の波形

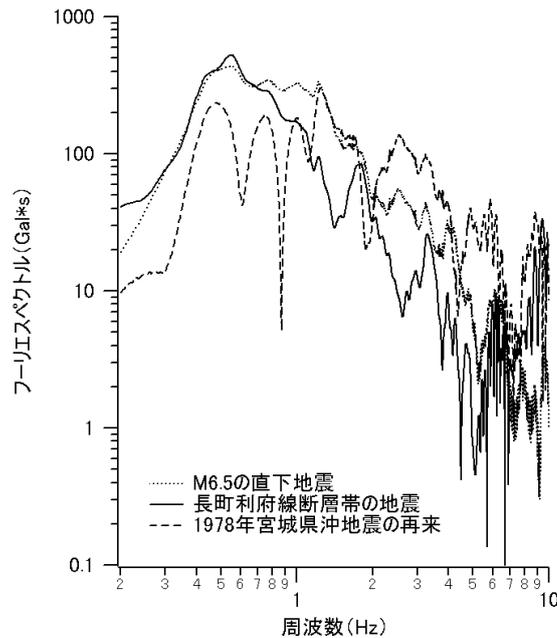


図-12 種々の地震を想定した場合の仙台空港の工学的基盤における加速度フーリエスペクトル

参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震設計法に関する第3次提言と解説，www.jsce.or.jp/committee/earth/index.html，2000.
- 2) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- 3) 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.1112，2005.
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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—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.
- 8) 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，日本建築学会構造系論文報告集，第430号，pp.1-9，1991.
- 9) 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.
- 10) 地震調査研究推進本部：長町—利府線断層帯の長期評価について，2002.