

地震動の新しい考え方

野津 厚*

1. 性能設計の時代の照査用地震動

耐震設計をするとき、まずは、将来の地震による対象地点の揺れがどのようなものになるか、よく考えることからスタートしなければならない。このように書くとおやっと思われる方もいるかも知れない。確かに、現在、多くの示方書等では「設計標準スペクトル」が用意されているから、普通はそれを使って設計しておけば良く、構造物に将来どのような地震動が作用するか、技術者は考えなくても済むようになってきている。しかし、このことが、後に述べるように、より良い構造形式を選択する機会を技術者から奪っているという側面もある。ここでプロ野球の打者について考えていただきたい。打者は試合に臨む前に相手投手のビデオを見るなどして研究する。相手の持ち球に応じて対策を考える。投手の投げる球には個性があるからである。それと全く同じように、地震時の地盤の揺れ（地震動）にも対象地点に応じて明確な個性がある。プロ野球の打者が対戦相手の投手を調査するように、今後、耐震工学の技術者は、対象地点における地震動特性を調査し、対象地点に固有の性質を反映した照査用地震動を設定するようになると思われる。それにより、対象地点に適した構造形式を採用することも含め、より合理的な耐震設計が可能となるからである。

今回の港湾基準の改訂では、このような方向性が打ち出されている¹⁾。すなわち、サイト特性を考慮し、最新の強震動評価手法を活用して照査用地震動を設定することになっている。そもそもサイト特性とは何か、なぜそれを考慮する必要があるのか、**2.**で説明を試みる。また、サイト特性を考慮して地震動を計算する方法について**3.**で簡単に紹介する。さらに**4.**では、強震動評価の品質確保のため、重要構造物の建設予定地点における地震観測を進める必要があることについて述べる。

さて、想定地震に対する揺れの評価と性能設計との間にはどのような関わりがあるだろうか。この点について筆者は次のように考えている。性能設計の体系の下では、設計者は、当該施設が作用に対して発揮すると期待される性能を、市民や利用者に対して説明しようとするのであるが、その際、多くの市民や利用者は「東海地震」や

「活断層」は知っていても「設計標準スペクトル」は知らないという点に注意する必要がある。市民や利用者の立場からすれば、「設計標準スペクトル」に対する社会基盤施設のパフォーマンスを示されても、その情報はあまり使い勝手が良くない。一方、「東海地震」や「活断層地震」に対する社会基盤施設のパフォーマンスが専門家から示されれば、それに基づいて避難計画やBCPをたてることも可能となる。このような観点からも、想定される地震による地震動をできる限り正確に予測し、それに対して社会基盤施設が発揮する性能を明らかにしていくことが必要である。以上のことを踏まえると、本稿で説明するのは主に港湾の事情ではあるが、他の施設の整備に携わっておられる技術者の方にも参考にしていただければ面があるのではないかと考えている。

2. サイト特性の重要性について

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（図-1）。ここで地震基盤とはS波速度が3000m/sを越えるような非常に堅い岩盤のことである。なぜここでわざわざ地震基盤というあまり聞き慣れない用語を持ち出して説明しているのだろうか？それには次のような理由がある。まず、一般に地震はS波速度が3000m/sあるいはそれ以上あるような堅い岩盤内で発生する。また、地震波には、S波速度の大きい地層から小さい地層に入るときに増幅するという性質がある。地震基盤内ではS波速度コントラストが小さいので地震波は距離とともに減衰する一方であるが、地震基盤上面から地表にかけてはS波速度コントラストが時には20倍もあるので、そこで地震波は大きく増幅する。よって地震基盤上面は地震波が減衰から増幅に転じるターニングポイントとして重要である。図-1の堆積層とは地震基盤上面より上にあるすべての地層を意味しており、工学的基盤面より上の浅部地盤とそれより下の深部地盤の両方を含んでいる。通常のボーリング調査では把握しづらい深部地盤が地震動

*Atsushi Nozu 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 主任研究官 | 横須賀市長瀬 3-1-1

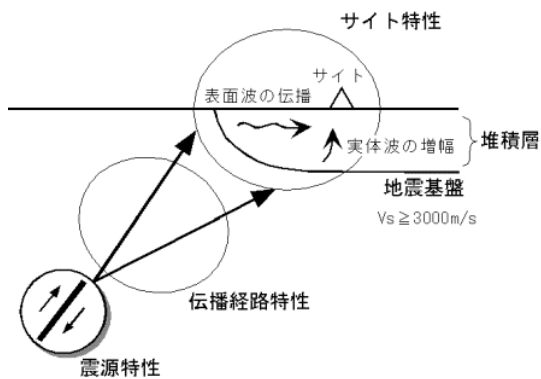


図-1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性



写真-1 境港周辺の地形 (第八管区海上保安本部提供)

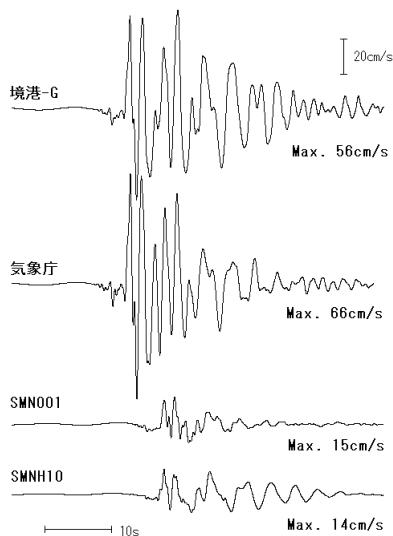


図-2 2000年鳥取県西部地震の際に境港周辺で観測された速度波形(断層直交成分)。

に与える影響も大きい。なぜなら、地震基盤と工学的基盤との間には10倍ものS波速度コントラストがあり、その分の増幅が見込まれるからである。一方、工学的基盤の直下に地震基盤に近い堅固な地層があるような場所では、その堅固な地層によって工学的基盤の揺れは拘束されるから、工学的基盤の揺れは小さい。このように、工学的基盤での揺れ自体が、それより深い地層の影響を受けて一様ではない。以下、サイト特性の重要性を示す例を2つ紹介する。

写真-1は鳥取県の境港市とその周辺を東側の上空から

撮影したものである(写真は第八管区海上保安本部提供)。この地域にはいくつかの強震観測地点が存在している。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。2000年鳥取県西部地震の際、これらの地点で得られた記録を見ると(図-2)、島根半島の山麓では最大速度が15cm/s程度であるのに対し、弓ヶ浜半島の堆積層上では60cm/s程度であり、実に4倍もの開きがある。このように、サイト特性の影響で、同じ地震に対しても揺れやすい場所と揺れにくい場所が存在し、かつ、その振幅の違いはかなり大きい。対象地点の揺れやすさをきちんと把握し、それを反映した照査用地震動を設定すれば、揺れにくい場所では無駄な投資を省くことができ、また、揺れやすい場所では強い揺れに備えて必要な耐震性を備えた施設を整備することができる。全体として、耐震強化のために使える限られた予算をより適切に配分することが可能となるはずである。

堆積層が地震動の周期特性に影響を与えることも良く知られている。図-3は八戸港と関西国際空港で得られた大地震の記録のフーリエスペクトルを比較したものである¹⁾。八戸港では1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の強震記録が得られており、26年の時を隔てて

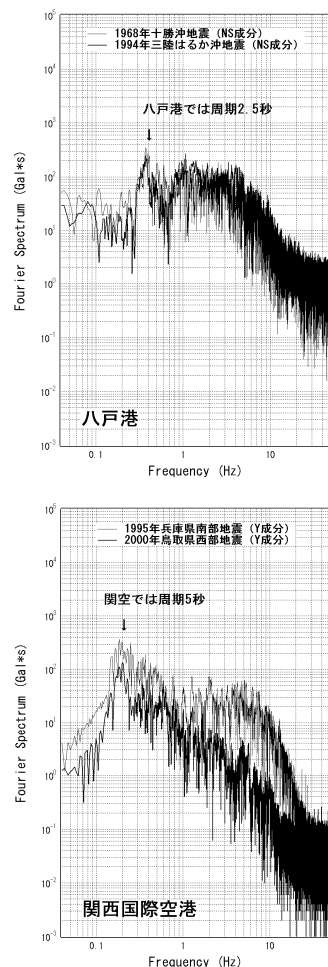


図-3 八戸港と関西国際空港で観測された強震記録のフーリエスペクトルの比較¹⁾

発生した2つの大地震で、いずれも周期2.5秒(周波数0.4Hz)の成分が卓越している。一方、関西国際空港では1995年兵庫県南部地震と2000年鳥取県西部地震の記録が得られており、いずれも周期5秒(周波数0.2Hz)の成分が卓越している。このように、特定の場所で特定の周期の地震波が卓越しやすいのはサイト特性によるものである。仮に固有周期5秒の構造物と固有周期2.5秒の構造物を考えた場合、八戸港では前者が有利、関空では後者が有利である。照査用地震動の周期特性が対象地点において実際に観測される地震動の周期特性と整合していれば、設計者は、対象地点により適した構造形式を選択することができるようになる。

3. 強震波形計算手法の簡単な紹介

震源特性、伝播経路特性およびサイト特性を考慮して対象地点での揺れを計算する方法にはいくつかのものがある。ここでは経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法²⁾を紹介する。この方法では、まず、小規模な地震による対象地点での地震動を評価し(これをグリーン関数という)、これを重ね合わせるにより、大地震による揺れを評価する(図-4)。図-4のlarge eventは想定地震のアスペリティ(の一つ)を示す。ここにアスペリティとは大地震の断層面上で特に強い地震波を出す領域のことである。これを $N \times M$ に分割し、分割後の各々の小断層と同じ面積の小地震(図-4のsmall event)を考える。小地震の震源スペクトルに伝播経路特性とサイト増幅特性を乗じることによりグリーン関数のフーリエ振幅を定める。ここに小地震の震源スペクトルは ω^2 モデル¹⁾に従うと考える(図-5)。伝播経路特性としては、震源から球面状に広がる実体波の幾何減衰と非弾性減衰の組み合わせを考慮する。サイト増幅特性としては、対象地点における地震観測記録から経験的に得られたものを用いる。我が国の主な既存の強震観測地点に対して経験的に評価されたサイト増幅特性の数値データが公開されている⁵⁾のでこれを利用するのが一つの方法である。また、新たに地震観測記録の得られた地点に対しても、既存観測地点とのスペクトル比をとることなどにより、経験的サイト増幅特性を比較的簡単に評価することができる¹⁾。グリーン関数のフーリエ位相としては、対象地点で得られている中小地震観測記録のフーリエ位相をそのまま用いる。対象地点において複数の中小地震観測記録が利用可能である場合には、対象地点への入射角ができるだけ想定地震と類似した中小地震のフーリエ位相を用いることが望ましい。それにより、堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に考慮できるためである。アスペリティからの地震動は、グリーン関数を重ね合わせる¹⁾ことで算定できる(図-4)。この重ね合わせを行うことにより、破壊伝播方向で揺れの強い指向性の効果が考慮される。アスペリティが複数あるときには、各アスペリティについて同様の作業を行い、各アスペリティからの寄与を加え合わせるにより、対象地点にお

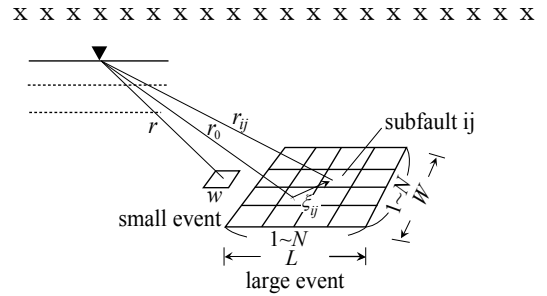


図-4 グリーン関数の重ね合わせ

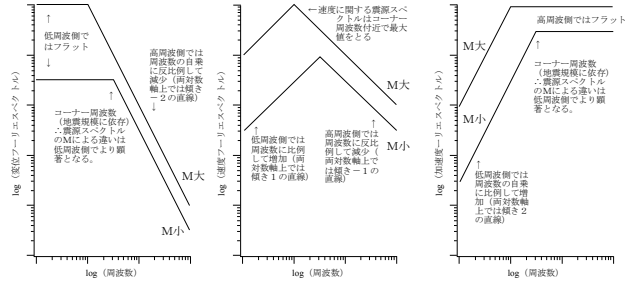


図-5 ω^2 モデルに従う変位、速度、加速度の震源スペクトル

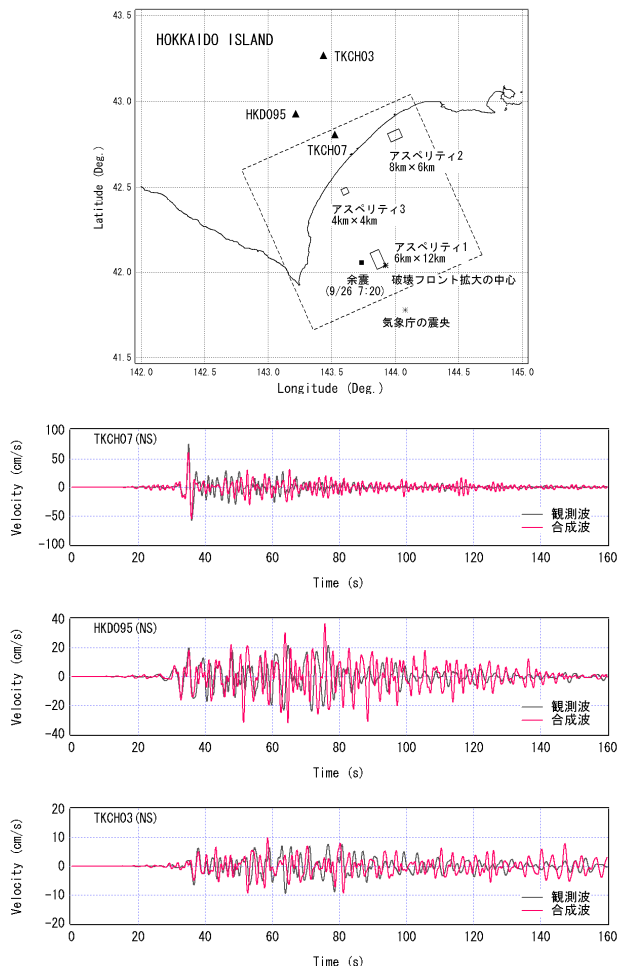


図-6 2003年十勝沖地震の震源モデル³⁾とそれによる速度波形の再現状況

る地震動を評価することができる。波形の計算において必要となる震源パラメータに関しては、技術基準の附属書に示された標準的な設定方法に基づいて設定する方法

と、個別の地震に関する詳細な調査に基づいて設定する方法がある¹⁾。

ここで紹介した強震波形計算手法を既往の大地震に対して適用しその適用性を検討した結果が文献 3)に示されている。文献 3)では計算プログラムも公開されている。図-6 には 2003 年十勝沖地震に対して TKCH07, HKD095, TKCH03 の 3 地点における速度波形を計算し観測波と比較した結果を示す。振幅や継続時間など地点毎の揺れの特徴が良く再現されている。

震源特性、伝播経路特性およびサイト特性を考慮して対象地点での揺れを計算する方法は、ここで紹介したものの以外にも存在する。重要なのは、既往の大地震への適用性が確認されている手法を用いることである。

4. 構造物の建設予定地点における地震観測

さて、上で紹介したような最新の強震動評価手法を活用したとしても、対象地点のサイト特性が把握できていなければ、信頼性のある強震動評価は不可能である。強震動評価の品質確保のために今後必要となるのは、重要構造物の建設予定地点における地震観測である。

重要な土木構造物の建設予定地点は、具体的な設計が始まるより何年も前から決まっていることが普通である。従って、適切に工程を管理すれば、具体的な設計を始める前に、建設予定地点において1~3年程度の地震観測を行うことは十分に可能である。よく受ける質問の一つに「対象地点から数kmの位置にK-NET等の既存の地震観測地点があり、そのデータに基づいてサイト特性を評価できないか」というものがある。こうした質問に対して、私の方からは「対象地点から数kmの位置にK-NET地点のM値があるときに、あなたは対象地点でボーリング調査をせずにK-NETのM値で代用しますか?」と答えることにしている。多くの技術者の方の答えはNoであろう。M値が場所毎に異なるように、サイト特性も場所毎に異なるので、原則としては現地での地震観測に基づいて把握を行う必要がある。地震観測というと高価な調査であるように感じられる方もおられるかもしれないが、必ずしもそうではない。地震観測のために地震計を1台購入したとしても、そのためのコストは20~30mのボーリング調査を1本行うためのコストと同程度であるにすぎない。また1台の地震計を複数の地点で順次使うようにすれば、1地点あたりのコストはさらに圧縮することも可能である。

ここでは、中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所が岩国港で実施したサイト特性評価のための地震観測を紹介する。岩国港では2005年9月下旬から半年ほど観測を行った。図-7はこの間に発生した3地震(震央は鹿児島、愛媛、日向灘)に関して、岩国港と、最寄りの既存観測点であるYMG016で取得された記録のフーリエスペクトル(水平2成分のベクトル和)の比をとったものである。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程度の成分は10倍程度であり、

逆に2Hz程度の成分は1/10程度であることがわかる。このような地震動特性の相違は工学的基盤面より上の地盤特性の違いとして説明できるものではない。通常のボーリング調査では把握しにくい深部地盤の影響も含むサイト特性を、短期間の地震観測により安価にかつ高い信頼性を持って把握できたことになる。

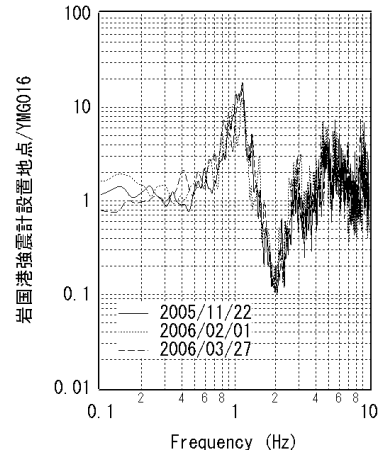


図-7 岩国港とYMG016 (K-NET岩国) で同時に取得された記録のフーリエスペクトルの比⁷⁾

5. まとめ

本稿で筆者が述べたかったのは以下の3点である。

- ①耐震設計では、まず、将来の地震による対象地点における地盤の揺れを評価することが必要である。
- ②地震時の地盤の揺れに対してはサイト特性が重要な影響を及ぼす。
- ③強震動評価の品質確保のため、重要構造物の建設予定地点における短期間の地震観測を推進する必要がある。

謝辞：本稿では防災科学技術研究所および気象庁の強震観測記録を利用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007。
- 2) 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，Vol.514，pp.97~104，1998。
- 3) 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—因果性および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。
- 4) Aki, K. : Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, Vol.72, pp.1217~1231, 1967。
- 5) 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。
- 6) 入倉孝次郎・香川敬生・関口春子：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良，日本地震学会講演予稿集，No.2，B25，1997。
- 7) 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集，2007。