

強震動シミュレーションとヒルベルト変換を併用した新しい設計入力地震動作成法の提案

正会員 ○野津 厚*

強震動	シミュレーション	ヒルベルト変換
設計入力地震動	フーリエ振幅	群遅延時間

はじめに

港湾の分野では設計入力地震動の作成に強震動シミュレーションが多用されている¹⁾。強震動シミュレーションの利点とは、言うまでもなく、震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮して、対象施設の敷地で実際に生じうる realistic な地震動を生成できることである。特に、サイト特性は対象施設の敷地に生じる地震動の周波数特性や経時特性の決定要因として重要であり、既存の強震動シミュレーション手法は、サイト特性を考慮することにより、適切な周波数特性と経時特性を有する設計入力地震動を生成することに成功してきている。

しかしながら、地震動にはこれら以外にも様々な特性があり、中でも方向性(=方向別の振幅特性)を適切に与えるという点において、既存の強震動シミュレーション手法は必ずしも成功しているとは言えない。

岸壁や護岸のように特定の方向の地震動の影響を受けやすい構造物の場合、設計入力地震動の作成において方向別の振幅を適切に与えることは特に重要である(同じことは建築構造物についても言えるだろう)。

そこで本研究では、スペクトル適合波を対象とした五十嵐他²⁾の研究を参考に、強震動シミュレーションとヒルベルト変換を組み合わせることで、方向性の観点から妥当な設計入力地震動を与える新しい方法を提案する。

強震動シミュレーション結果の適用における課題

ここでは2005年7月23日千葉県中部の地震を例に検討を行う。図1は同地震を対象に疑似点震源モデル³⁾を用いてK-NET千葉とK-NET新宿における地震動のフーリエスペクトルを計算した結果である。なお、文献3)では理論的なラディエーション係数と平均的なラディエーション係数を重み付け平均した係数が用いられているが、結果的にこのケースでは理論的なラディエーション係数の影響は大きくないことが示されているため、ここでは平均的なラディエーション係数を用いて計算を行った。また、地震動の計算には経験的なサイト増幅特性⁴⁾を用いた。図1では、K-NET新宿では見られない1-2Hzの卓越がK-NET千葉では見られることなど、地震動の周波数特性は適切に再現できていると考えられる。図2は同じく速度波形の計算を行った結果であるが、経時特性の観点からも計算結果は妥当であると考えられる。一方、図3は水平面上に速度の軌跡をプロットしたものである。

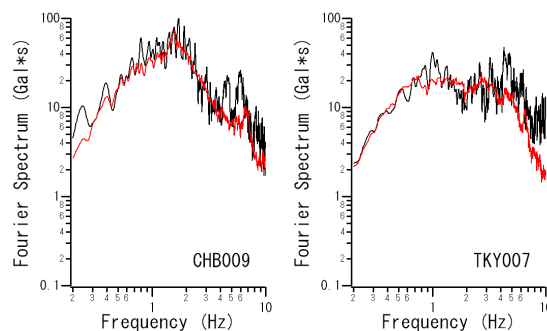


図1 K-NET千葉とK-NET新宿におけるフーリエスペクトル(水平2成分の自乗和平方根)の観測結果(黒)と計算結果(赤)

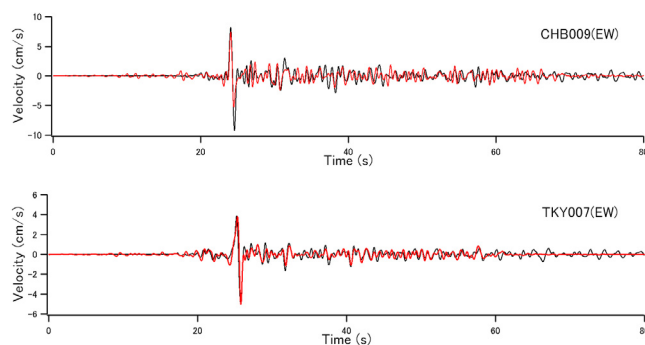


図2 K-NET千葉とK-NET新宿における速度波形(0.2-2Hz)の観測結果(黒)と計算結果(赤)

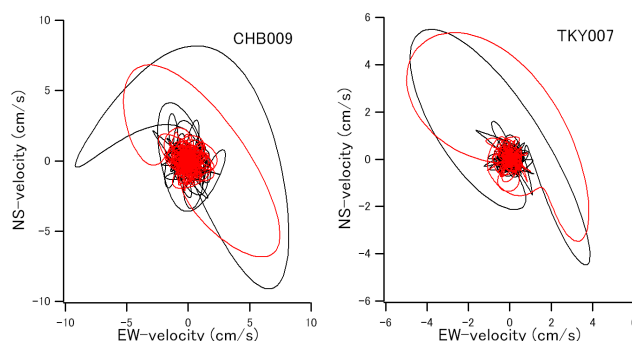


図3 K-NET千葉とK-NET新宿における速度(0.2-2Hz)の軌跡の観測結果(黒)と計算結果(赤)

K-NET新宿では観測結果の卓越方向が適切に再現されているが、K-NET千葉では必ずしもそうではない。このように、現状の強震動シミュレーション結果は、周波数特

性や経時特性の点で妥当な場合であっても、方向別の振幅特性という点で妥当でない場合があり得る。これが、課題の1点目である。

また、地震動の卓越方向は震源のメカニズムに依存する。従って、仮に与えられたメカニズムの下での強震動シミュレーション結果が(卓越方向も含め)極めて正確であったとしても、例えば首都直下のスラブ内地震のように震源のメカニズムが不明確な場合においては、強震動シミュレーション結果を(方向別の振幅の大小を含め)そのまま設計入力地震動として採用することは、ためられる。特定の方向に強い設計入力地震動を採用することが妥当なのは、活断層の近傍など特殊な条件の場合(例えば5)に限られるであろう。これが課題の2点目である。

提案法

図3の赤線のように一つの方向に強い揺れとなるのは、水平2成分の地震波の到来時刻に原因があり、EW成分のピークとNS成分のピークが揃って到来するために、一方向に強い揺れとなっている。これを解決するにはヒルベルト変換を用いることができる²⁾。

ある時間の関数をフーリエ変換し、 $\omega > 0$ の範囲では $+i$ 、 $\omega < 0$ の範囲では $-i$ を乗じ、フーリエ逆変換したものが元の関数のヒルベルト変換である。この操作は元の関数の位相を 90° だけシフトさせることに相当する。

提案法では、①水平2成分のうちの1成分を通常の高震動シミュレーションで作成し、②そのヒルベルト変換を元の成分に直交する水平成分として採用する。この方法では、水平2成分の位相が 90° ずれるため、一方向だけに強く揺れる結果とはならない。

なお、この方法で水平2成分の地震動を生成した場合、フーリエ振幅スペクトルと群遅延時間は全ての方向に対して同一となる。これは次のように示すことができる。いま、強震動シミュレーションで作成したEW成分のフーリエ変換を $F(\omega)$ とし、EW成分のヒルベルト変換をNS成分として採用することになると、NS成分のフーリエ変換は $iF(\omega)$ 、東から北に角度 ϕ だけ回転した方向の地震動のフーリエ変換は $F(\omega) \cos \phi + iF(\omega) \sin \phi$ である。これは $F(\omega) (\cos \phi + i \sin \phi) = F(\omega) \exp(i\phi)$ のように変形できるので、両辺の絶対値をとれば、 ϕ 方向の地震動のフーリエ振幅は ϕ によらず $|F(\omega)|$ となることがわかる。また、 ϕ 方向の地震動のフーリエ位相を $\theta'(\omega)$ 、元の地震動のフーリエ位相を $\theta(\omega)$ とすると $\theta'(\omega) = \theta(\omega) - \phi$ であり、両辺を ω で微分すれば、地震動の群遅延時間が ϕ に依存しないことがわかる。

提案法による地震動の作成結果

提案法を実際に適用して水平2成分の地震動の作成を行った。対象は2005年7月23日千葉県中部の地震によるK-NET千葉での地震動である。図4はヒルベルト変換

で求めた速度波形と原波形(強震動シミュレーション結果)の比較である。上段はEW成分からヒルベルト変換で求めたNS成分と元のNS成分との比較、下段はNS成分からヒルベルト変換で求めたEW成分と元のEW成分との比較である。なお上段についてはヒルベルト変換後の波形の正負を反転させて示している。ヒルベルト変換による波形は、経時特性等の観点からも十分にrealisticな波形となっており、この点では強震動シミュレーション結果に対して特に遜色はないものと考えられる。図5は提案法による速度軌跡と強震動シミュレーション結果の軌跡の比較である。当初意図した通り、方向別の振幅の変動が小さい地震動が得られている。このように提案法によればrealisticな経時特性等を保ったまま方向別の振幅の変動が小さい地震動を得ることができる。

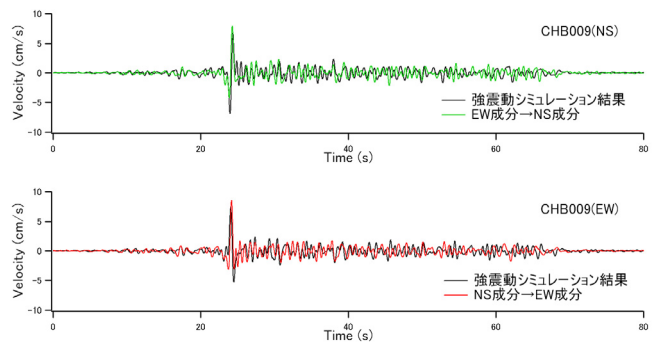


図4 ヒルベルト変換で求めた速度波形(0.2-2Hz)と原波形(強震動シミュレーション結果)の比較。

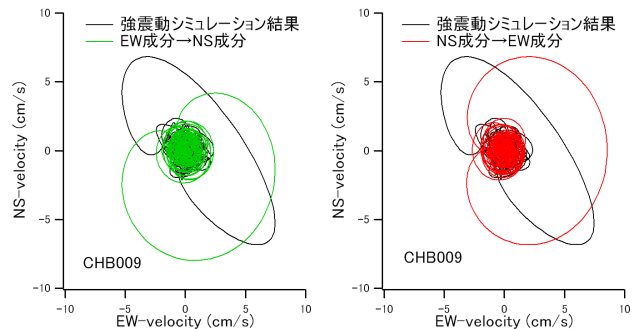


図5 提案法による速度軌跡(0.2-2Hz)と強震動シミュレーション結果の軌跡の比較。

謝辞 防災科学技術研究所のK-NETの強震記録を利用しました。心より御礼申し上げます。

参考文献 1)日本港湾協会(2007). 2)五十嵐他(2012), 土木学会論文集A1, Vol.68, pp.1_458-1_469. 3)長坂他(2014), 第14回日本地震工学シンポジウム. 4)野津・長尾(2005), 港空研資料No.1112. 5) Nozu and Iwan (2003), Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.20, pp.49-54.