

港湾基準のレベル2地震動作成方法における問題点について

(株)アライズソリューション 正会員 吉田 隆千代

1. はじめに

本稿は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)」(以下、港湾基準とよぶ)のレベル2地震動作成方法における問題点について考察を行ったものである。

2. 港湾基準のレベル2地震動作成方法

一般に、地表の地震動のフーリエ振幅は、震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積で与えられ、フーリエ位相はそれぞれの群遅延時間の和で評価される。

港湾基準では、規模と震源距離の十分小さな地震が対象サイトで観測されている場合、その記録の群遅延時間は、時間軸上の平行移動分を除けばサイト位相特性を表しているとし、このことを利用した地震動評価手法が示されている。すなわち、統計的グリーン関数法により算出した地震基盤での地震動をいったんフーリエ変換する。つぎに、スペクトルインバージョンにより求められたサイト増幅特性をかけ、さらに、サイトで得られた中小地震の地震動(以下、中小地震動とよぶ)をフーリエ変換し振幅1に調整して乗じてフーリエ逆変換する。これらのことを式で表すとつぎのようになる。

$$A(f) = A_b(f)G(f)\frac{O(f)}{|O(f)|} \quad (1)$$

ここに、 $A(f)$ は地表における地震動のフーリエ変換、 $A_b(f)$ は地震基盤における地震動のフーリエ変換、 $G(f)$ はサイト増幅特性、 $O(f)$ はサイトで観測された中小地震動のフーリエ変換である。(1)を逆変換すればサイトにおけるレベル2地震動が与えられる。

3. 港湾基準の方法の問題点

地震動のような因果性をもつ時系列をフーリエ変換する場合、得られる複素数の実部と虚部は Hilbert 変換の関係で結ばれ、互いに独立に存在し得ない。また、フーリエ振幅とフーリエ位相は、実部と虚部から算定される絶対値と偏角であるため、それらの間にも拘束条件が生じる。(1)式右辺2項3項はスペクトルインバージョンで求められたサイト増幅特性に中小地震動の位相をくっつけて合体させたもので、たとえば「木に竹を接いだ」ようであり、数理的に意味をなさない。

以下に、(1)式右辺3項が何を表しているかを考える。サイトの波動伝播機構が線形時不変システムであるとすると、地震基盤での入射地震動に対する地表面の応答はつぎのように表される。

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (2)$$

ここに、 $x(t)$ は地震基盤における入射地震動、 $h(t)$ はインパルス応答関数、 $y(t)$ は地表面の応答、 $*$ は合積を表す。ここで、地震基盤における入射地震動 $x(t)$ をつぎのように表す。

$$x(t) = \sum_{k=1}^N a_k \delta(t - t_k) \quad (3)$$

(3)を(2)に代入してフーリエ変換すると次式になる。

$$Y(\omega) = H(\omega) \sum_{k=1}^N a_k e^{-i\omega t_k} \quad (4)$$

ここに、 $Y(\omega)$ は $y(t)$ のフーリエ変換、 $H(\omega)$ は $h(t)$ のフーリエ変換、 ω は角周波数である。(4)式で、 $H(\omega)$ を振幅と位相に分けて表す。

$$Y(\omega) = |H(\omega)| \sum_{k=1}^N a_k e^{-i(\omega t_k - \phi_0(\omega))} \quad (5)$$

$|H(\omega)|$ はサイト増幅特性であり、 $\phi_0(\omega)$ はサイト位相特性である。(5)の振幅と位相はつぎのようになる。

$$|Y(\omega)| = |H(\omega)| \sqrt{\left(\sum_{k=1}^N a_k \cos(\omega t_k - \phi_0(\omega)) \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^N a_k \sin(\omega t_k - \phi_0(\omega)) \right)^2} \quad (6)$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{-\sum_{k=1}^N a_k \sin(\omega t_k - \phi_0(\omega))}{\sum_{k=1}^N a_k \cos(\omega t_k - \phi_0(\omega))} \right) \quad (7)$$

サイト位相特性は、システムに単位インパルスを与えれば求められる。一方、(7)は、地震基盤における入射地震動の中に含まれる震源特性とサイト位相特性が混在したものになっており、サイト位相特性だけを表していない。したがって、サイト位相特性の算出に中小地震動の位相を用いるのは誤りであるといえる。

4. 模擬波の作成と比較

サイト特性を重複反射理論によって求め、それを用いて作成した模擬波（方法1）と、サイト特性のうちサイト増幅特性のみを重複反射理論から求め、サイト位相特性には中小地震動の位相を与えて作成した模擬波（方法2）を比較し検討を行った。

模擬波を作成するサイトは K-NET 広島（HRS013）とした。広島平野は岩盤上に干拓・埋立を計画的に行って造られた人工地盤であり、理想的な水平成層地盤を形成していると推察されることから、重複反射理論の適用が可能と考えられる。基盤と表層からなる水平2層地盤を仮定すれば、サイト特性は、つぎのように与えられる。

$$H(\omega) = \frac{1}{\cos(k_1 H_1) + i\alpha \sin(k_1 H_1)} \quad (8)$$

$$k_1 = \frac{\omega \sqrt{1-2ih}}{V_1} \quad (9)$$

ここに、 h は減衰定数、 k_1 は表層地盤内の波動の波数、 H_1 は表層地盤の厚さ、 α はインピーダンス比、 V_1 は表層地盤のせん断波速度である。ここでは、K-NET 広島の土質データをもとに、諸元をつぎのように設定した。 $h=0.001$, $H_1=30\text{m}$, $\alpha=0.03$, $V_1=130\text{m/s}$ 。

これらの諸元を(8)(9)に代入して作成したサイト特性を示す（図1）。図中、上側がサイト位相特性であり、下側がサイト増幅特性である。なお、参考のためにスペクトルインバージョンにより算出されたサイト増幅特性を破線で示している。両者の卓越振動数は1次と2次についてはよく一致している。

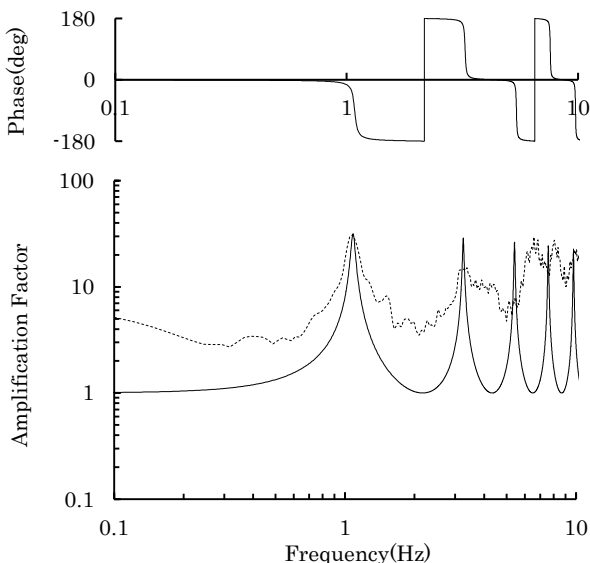


図1 サイト特性

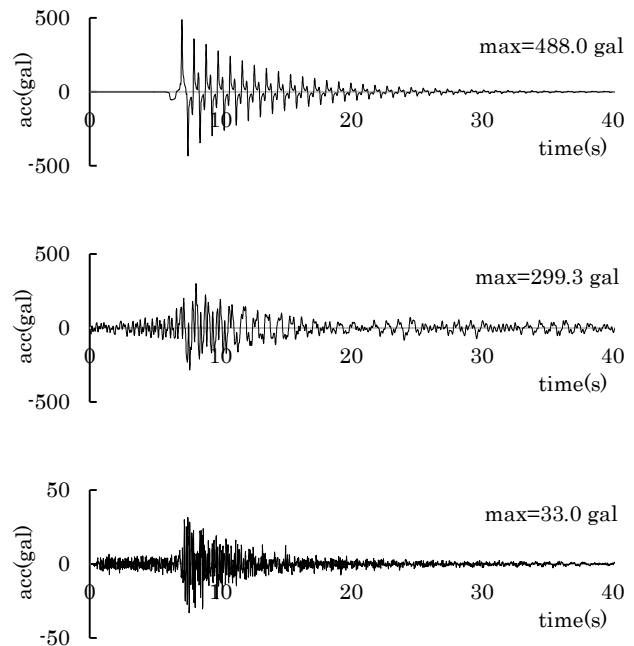


図2 模擬波および中小地震の地震波

つぎに、M6.9 直下地震に相当する断層パラメータを設定し、サイトにおける模擬波を作成した（図2）。図中、最上段は方法1による模擬波、中段は方法2による模擬波、最下段はサイトで観測された中小地震（M5.0）の地震波である。方法1で作成した波形は、断層破壊の衝撃により波が立ち、時間とともに自由減衰している。規則的なパターンを繰返しているが、これは震源特性に断層破壊過程の非定常性が考慮されていないためである。方法2で作成した波形は継続時間が長く、波形の包絡形状が中小地震動のそれによく似ており、中小地震動の位相特性の特徴が色濃く表れている（APPENDIXにて補足説明を行う）。地震動特有の非定常性が見られるのは中小地震動に含まれる震源特性や伝播経路特性の表れである。最大加速度は方法1のその6割程度であるが、サイト増幅特性とサイト位相特性の間に関連がないため小さめに算定されたと考えられる。

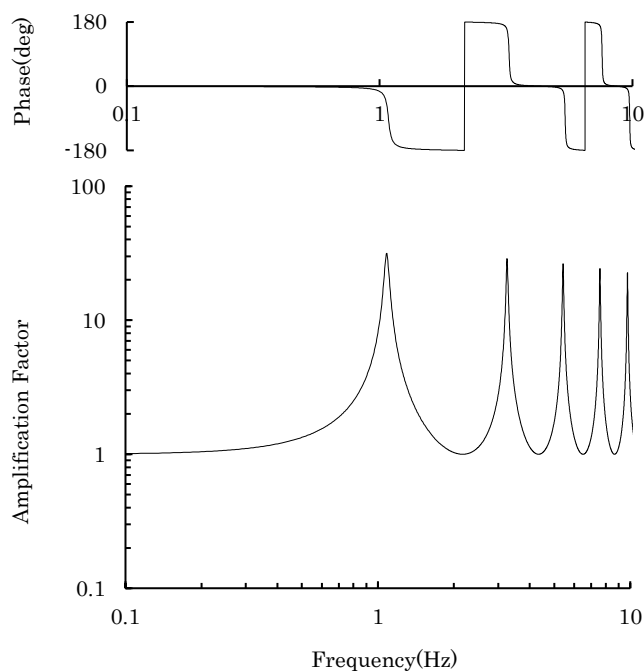
5. まとめ

港湾基準のレベル2地震動の作成方法における問題点を指摘した。サイト特性の与え方は「木に竹を接いだ」ようであり、サイト増幅特性とサイト位相特性の間に関連がないため、この方法を用いると精度の劣る地震波ができる可能性がある。

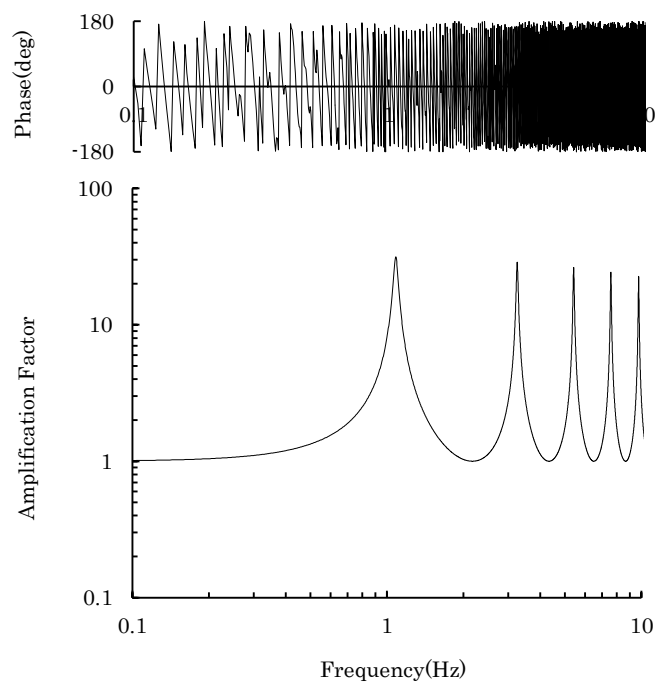
謝辞 国立研究開発法人防災科学技術研究所のデータを使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献 （社）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），pp. 351-360，平成19年7月

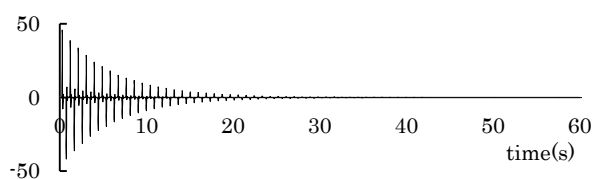
APPENDIX [サイト特性とフーリエ逆変換]



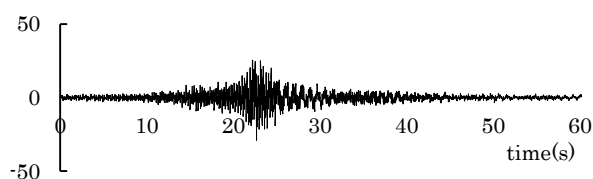
付図 1 方法 1 で用いたサイト特性



付図 2 方法 2 で用いたサイト特性



付図 3 方法 1 で用いたサイト特性のフーリエ逆変換



付図 4 方法 2 で用いたサイト特性のフーリエ逆変換

図 2 の計算に用いたサイト特性とそのフーリエ逆変換を、付図 1, 2, 3, 4 に示す。

サイト特性が線形時不変システムであれば、その逆変換はインパルス応答関数になるはずである。

方法 1 で用いたサイト特性をフーリエ逆変換して得られた時系列はインパルス応答関数になっている。一方、方法 2 で用いたサイト特性をフーリエ逆変換して得られた時系列はインパルス応答関数にならず、位相特性に含まれる中小地震の震源特性や伝播経路特性の特徴が振幅特性に応じて選択的に現れたような波形になっている。

なお、図 2 において、三つの波形のピーク発生時刻がそろっているように見えるが、これは、比較を容易にする目的で、方法 1 の波形のピーク発生時刻に概ね一致するように方法 2 の波形と中小地震動の波形を時間軸上で平行移動させたためである。