

I - 36

北海道の3大地震を用いた橋梁の動的解析に用いる確率加速度と擬似地震波

北海道開発コンサルタント(株)	正員	畑	一洋
北海道開発局開発土木研究所	正員	島田	武
北海道開発局開発土木研究所	正員	小林	将
専修大学北海道短期大学	正員	金子	孝吉

1. はじめに

橋梁などの公共土木施設を設計するうえで合理的な耐震設計の検証法は、擬似地震波を用いた動的解析による照査方法である。弾性域における地震時の挙動が複雑な橋梁は、動的解析により安全性を照査することが望ましく、これに用いる擬似地震波は、建設地点の地震動特性を十分配慮し解析に活用することが要求される。もし、橋梁などのある特定の地点に限って設計が行われるとき、建設地点の地域性が生かされた擬似地震波を作成することができれば、地震動の増幅特性、地域による地盤特性、地表面の振動による伝達特性が加味されていることから、より高度な動的解析の照査が行えるようになる。

本論文では、有史以来、北海道の有感地震が最も多い釧路・根室地方において、確率的な要素を加味した北海道3大地震による擬似地震波を作成する方法について報告するものである。

2. 解析概要

本解析は、北海道の3大地震における釧路・根室地方の加速度地震波記録を用いて、高速フーリエ（逆）変換と応答スペクトル解析の手法より、この地方の地盤特性を考慮した擬似地震波を作成する。

1) 補正地震波形の作成

本解析に用いた地震波記録は、釧路・根室地方の大楽毛橋、別海橋、釧路跨線橋、および温根沼大橋に設置されている記録装置より収集された情報である。（図-1～4）

地震動の最大水平加速度は、同一地震であっても記録する地盤特性や距離などによって異なる。一方、推定最大加速度は、釧路・根室地方において確率加速度推定システム¹⁾を用いて推定した結果、90年確率の推定最大加速度が2.09g_{a1}を得ている。

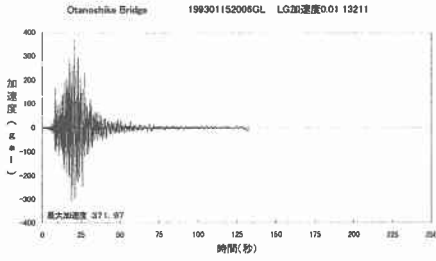
本解析では、最大加速度に着目せず地震波の振動特性に注目するため、地震波の最大加速度が推定最大加速度となるように地震波記録を均等補正し、これを補正地震波形とする。ただし、補正地震波の総点数(N)は、各地震波の中で最も多い点数を2の累乗とし波形の後続をゼロとする。

2) 振幅と位相角

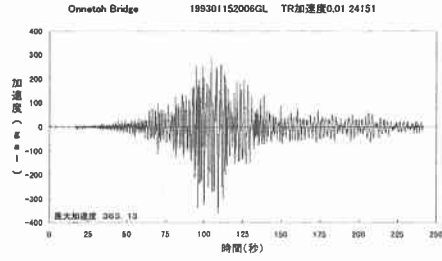
釧路・根室地方において最大加速度が統一された補正地震波を用いて、地震波毎の振幅と位相角を算出する。振幅と位相角は、加速度波形を時間領域から周波数領域へ変換し、高速フーリエ変換を解析手法を用いて行う。補正加速度地震波 $a(t)$ を等間隔の複素数型データ a_j ($j = 0, 1, 2, \dots, N-1$) と表すと、この高速フーリエ変換 b_n ²⁾ は、

$$b_n = \sum_{j=0}^{n-1} a_j \cdot W^{jn} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

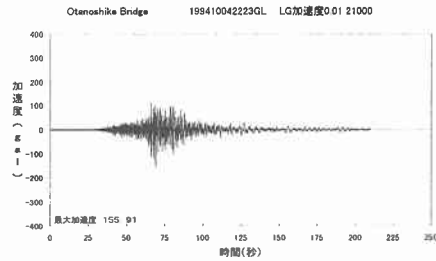
$$W = e^{i(2\pi/N)}$$



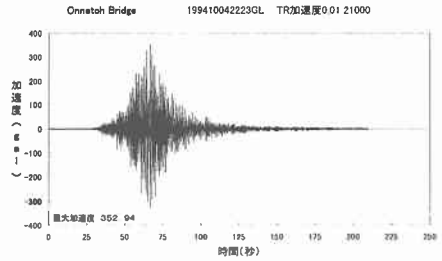
図－１ 大楽毛橋（釧路沖地震）



図－２ 温根沼大橋（釧路沖地震）



図－３ 大楽毛橋（北海道東方沖地震）



図－４ 温根沼大橋（北海道東方沖地震）

で与えられる。 b_n は、ダニエルソン－ランチョスの補助定理を用いて長さ $N/2$ のフーリエ変換の偶数番数列 b_n 、奇数番数列 b_n から与えられる。

$$b_n = b_n^{(e)} + W^n b_n^{(o)} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

式（２）による合成を $\log_2 N$ 回繰り返すことで式（１）の高速フーリエ変換 b_n に到達し、最終的な合成値を N で除算して複素フーリエ係数 C_k が求まる。この C_k を実数部と虚数部に分解すると、

$$C_k = \frac{A_k - iB_k}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

となる。 A_k は有限フーリエ $\cos$ 係数、 B_k は有限フーリエ $\sin$ 係数である。 A_k と B_k の k 次成分より振幅 X_k と位相角 ϕ_k が次式で与えられる。

$$X_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (4)$$

$$\phi_k = \arctan\left(-\frac{B_k}{A_k}\right) \quad -\pi < \phi_k < \pi$$

3) 合成地震波の作成

作成方法は、釧路・根室地方における補正地震波の振幅と位相角から、それぞれを同一周波数において調整する。この値を高速フーリエ逆変換の入力値とすることで合成地震波の加速度が与えられる。

① 振幅と位相角の調整法

振幅と位相角の調整は同一周波数領域にて行う。振幅の調整法は、各記録波の同一周波数において最大値を選定する。位相角の調整は値と符号を分けて行う。位相角の値は、同一周波数において絶対値の位相角を合計し記録波形数で除算した値とする。ただし、位相角の符号は、各記録波の同一周波数において、手法1) 正・負号毎の位相角の記録件数が多い方を採用する提案(図-5・6)、手法2) 正・負号毎の絶対値による位相角の合計値の大きい方を採用する提案(図-7・8)、の二種類について解析を行う。

これらの方法から振幅特性と位相角特性を調整することで調整振幅 X_k' と調整位相角 ϕ_k' が算出される。

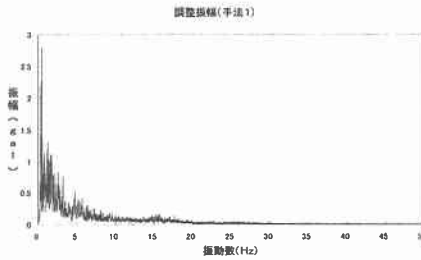


図-5 調整振幅(手法1)

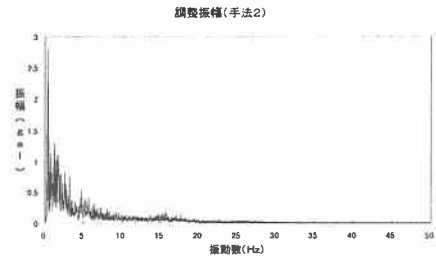


図-7 調整振幅(手法2)

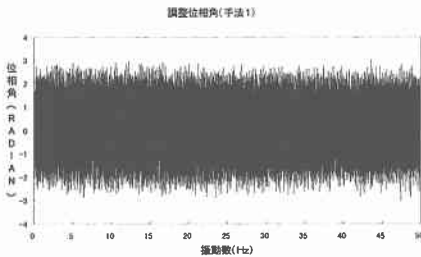


図-6 調整位相角(手法1)

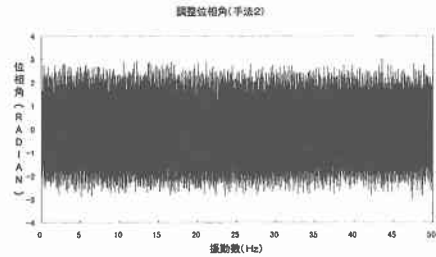


図-8 調整位相角(手法2)

② 高速フーリエ逆変換

調整振幅 X_k' と調整位相角 ϕ_k' は、 k 次成分の有限フーリエ係数 A_k と B_k より次式から与えられる。

$$A_k = X_k' \cos \phi_k' \quad (5)$$

$$B_k = -X_k' \sin \phi_k'$$

有限フーリエ係数 A_k と B_k を k 次成分の等間隔による複素型データとすることで高速フーリエ逆変換の入力値となる。逆変換式は、式（１）の e 指数をプラスとすることで求まる。算出後のフーリエ変換値から実数部を取り出し、これを合成地震波の加速度値 $y_a(t)$ とする。

４）フィルターの作成

補正地震波における加速度応答スペクトル S_a は、系の固有円振動数 ω_d と減衰定数 h との関係から次式より与えられる。

$$S_a = \omega_d \left| \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-h\omega_d(t-\tau)} \left[\left(1 - \frac{h^2}{1-h^2} \right) \sin \omega_d(t-\tau) + \frac{2h}{\sqrt{1-h^2}} \cos \omega_d(t-\tau) \right] d\tau \right| \quad (6)$$

ここに、時間 t 、地動加速度の時刻歴 $\ddot{y}(\tau)$ 、減衰固有円振動数 ω_d 、微小な時間幅 $d\tau$ とする。この加速度応答スペクトル S_a から地動加速度の最大値 $\ddot{y}_{\max}$ の比より、規準化加速度応答スペクトル $\bar{q}_a$ は次式から与えられる。

$$\bar{q}_a = \frac{S_a}{\ddot{y}_{\max}} \quad (7)$$

釧路・根室地方の補正加速度から算出された規準化加速度応答スペクトル $\bar{q}_a$ を時刻歴毎に合計し、記録波数にて除算することで地盤特性を加味したフィルター F_a （平均規準化加速度応答スペクトル）が与えられる。ただし、このフィルターの最低値を1.0とする。（図－9）

$$F_a = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{q}_a}{N} \quad (8)$$

５）擬似地震波の作成

釧路・根室地方の擬似地震波の加速度 $Y(t)$ は、同一周波数領域にて「３）合成地震波の作成」より求められた加速度の合成地震波 $y_a(t)$ と、「４）フィルターの作成」より算出されたフィルター F_a を用いて、次式より与えられる。

$$Y(t) = y_a(t) \times F_a \quad (9)$$

３．解析結果

本解析は、前章「①振幅と位相角の調整法」で記述した手法１と２の解析手法を用いて、釧路・根室地方の擬似地震波を作成する。

擬似地震波の全体形状は、立ち上がり部分、主要動部分、および減衰部分に分けられる。特に主要動部分の波動は、地盤特性や地形などの影響を複雑に受けて特性を変化させていると考えられる。

この波形を考察すると両手法とも主要動部分が二箇所あるような形状をしている。これは、北海道の３大地震による釧路・根室地方の地盤特性を加味した地震波特性が重なり合い、さらには表層地盤の振動波が構造物へ伝播した際の振動変化によるものと考えられる。また、主要動のずれによる重なり合いは、汎用性があるとも考えらる。

手法1における位相角の正負件数による判定法の結果は、立ち上がり部分が約16秒、主動部分がやや見極めずらいがおよそ51秒、そして最大加速度およそ486galは約16秒の結果を持つ擬似地震波が求められた(図-10・11)。手法2における位相角の正負件数による判定法の結果は、前者と同じく立ち上がり部分がおよそ16秒、主動部分が約51秒であり、約22秒には最大加速度およそ419galとなる擬似地震波である。(図-12・13)

擬似地震波はあくまでも原波形として採用し、最大加速度などの波形サイズは、使用時に適正に補正する。

最大加速度は、両手法を比較すると手法1の方が数値的に大きく算出されているが、振幅は手法2の方が大きいことがわかる。また、位相角の符号における手法1は同一件数のときに正を選定していることもあり正側が、手法2は位相角の数値的な結果から負側が、それぞれ多く算出された結果である。ただし、位相角の符号の調整法は両方で異なるが、どちらも擬似地震波の形状に大きな差異は見受けられないこともわかる。

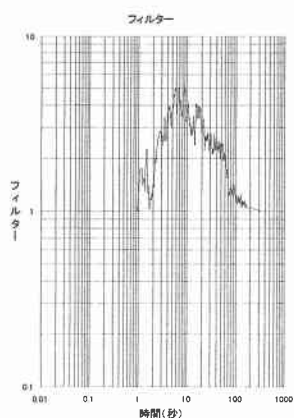


図-9 フィルター

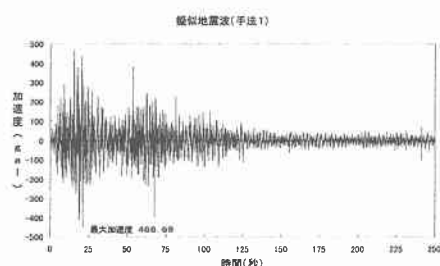


図-10 擬似地震波(手法1)

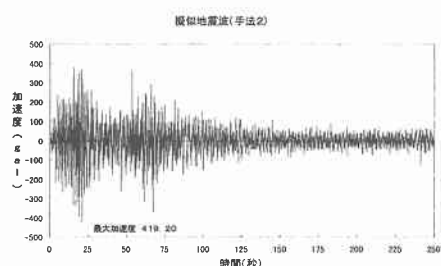


図-12 擬似地震波(手法2)

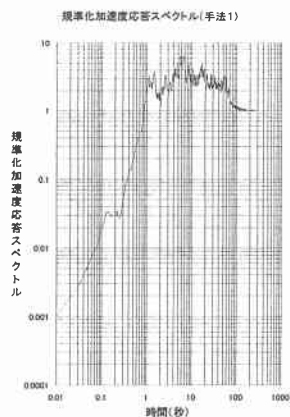


図-11 規格化加速度応答スペクトル(手法1)

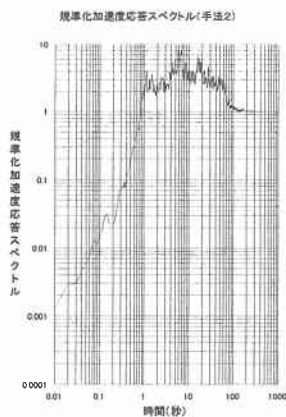


図-13 規格化加速度応答スペクトル(手法2)

4. まとめ

北海道の3大地震において記録された釧路・根室地方の地域特性や地盤特性を含んだ加速度地震波を用いて、擬似地震波を作成する手法1・2を提案した。

この作成手法は、振幅と位相角の調整法や構造物への伝播特性の調整法に大きく左右されることがわかった。両手法は、地震動特性、表層面への伝達特性、および応答特性を含んだ解析手法であることから、地域特性を考慮した擬似地震波の作成において有効であることがわかった。特に、周波数領域において振幅、位相角、および応答スペクトルを調整することで地震動特性に大きく左右されるが、地震波形においては有効であると考えられる。

今後は、さらに検討を加え擬似地震波の解析手法について分析を進めていきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 畑一洋、佐藤昌志、岩淵武、吉田紘一：地震地域を想定した任意地点の確率加速度推定システムについて、土木学会北海道支部論文報告集、第52号(A)、1996年2月
- 2) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会