

近地項および中間項を考慮した統計的グリーン関数の作成方法

正会員 野津 厚*

統計的グリーン関数法	近地項	遠地項
理論地震動	震源	強震動評価

1. はじめに

統計的グリーン関数法¹⁾は実用的な強震動評価手法として利用されることの多い手法であるが、従来、少なくとも次の2つの欠点を有すると見られてきた^{2),3),4)}。小断層からの地震動の位相に任意性があり、そのため、地震波のコヒーレントな重なり合いが保証されず、velocity pulse を適切に評価できない恐れがある。統計的グリーン関数法で一般的に仮定される震源スペクトルは遠地項(のうちS波)をモデル化したものであるため、近地項および中間項の寄与を考慮できない。これらの点に関しては、統計的グリーン関数法よりも差分法等の理論的な強震動評価手法の方が優れていると一般には考えられている。一方、上述のような統計的グリーン関数法の短所を克服し、統計的グリーン関数法の適用範囲を低周波側に拡張しようとする試みもなされている。については、久田²⁾は要素波の位相を低周波側で0とする方法を、香川⁴⁾は上に凸の要素波のみを選択する方法を提案している。さらに野津・菅野⁵⁾および野津他⁶⁾は、震源に関しては久田²⁾の方法を適用し、サイト特性の評価は古和田他⁷⁾の方法を適用することにより、統計的グリーン関数法を用いた場合でも1995年兵庫県南部地震の際に震源近傍で観測されたvelocity pulseを良好に再現できることを示している。こうしたことから、統計的グリーン関数法の欠点のうちについては克服される見通しがたつたと見える。そこで、本稿では、すなわち、統計的グリーン関数法に近地項および中間項の影響をどのように取り込むかという問題について考えてみる。

2. 定式化

統計的グリーン関数法に近地項および中間項の影響を取り入れるための定式化を以下に示す。

まず、等質等方な全無限弾性体内部のせん断食い違いによって生じる変位場 $u(x,t)$ は次式で与えられる(文献8)の式(2.97))。

$$u(x,t) = \frac{M_0}{4\pi\rho} \left[R_{0\phi}^N \frac{1}{r^4} \int_{r/\alpha}^{r/\beta} \tau f(t-\tau) d\tau + \frac{1}{\alpha^2} R_{0\phi}^{IP} \frac{1}{r^2} f\left(t - \frac{r}{\alpha}\right) + \frac{1}{\beta^2} R_{0\phi}^{IS} \frac{1}{r^2} f\left(t - \frac{r}{\beta}\right) + \frac{1}{\alpha^3} R_{0\phi}^{FP} \frac{1}{r} \dot{f}'\left(t - \frac{r}{\alpha}\right) + \frac{1}{\beta^3} R_{0\phi}^{FS} \frac{1}{r} \dot{f}'\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \right] \quad (1)$$

ここに M_0 は地震モーメント、 ρ は密度、 α はP波速度、 β はS波速度、 r は震源距離、 $f(t)$ は正規化されたすべり時間関数(最終すべり量を1としている)、 $\dot{f}'(t)$ はその時間微分である。

また、

$$\begin{aligned} R_{0\phi}^N &= 9 \sin 2\theta \cos \phi r - 6 \left(\cos 2\theta \cos \phi \theta - \cos \theta \sin \phi \phi \right) \\ R_{0\phi}^{IP} &= 4 \sin 2\theta \cos \phi r - 2 \left(\cos 2\theta \cos \phi \theta - \cos \theta \sin \phi \phi \right) \\ R_{0\phi}^{IS} &= -3 \sin 2\theta \cos \phi r + 3 \left(\cos 2\theta \cos \phi \theta - \cos \theta \sin \phi \phi \right) \\ R_{0\phi}^{FP} &= \sin 2\theta \cos \phi r \\ R_{0\phi}^{FS} &= \cos 2\theta \cos \phi \theta - \cos \theta \sin \phi \phi \end{aligned} \quad (2)$$

は球座標系 (r, θ, ϕ) で表されたラディエーション係数である。式(1)の右辺[]内の第一項は近地項、第二項は中間項(P波)、第三項は中間項(S波)、第四項は遠地項(P波)、第五項は遠地項(S波)を表す。いま、式(1)の変位場において、全項を考慮した場合と、遠地項(S波)のみを考慮した場合のフーリエ変換の比を求めることを考える。この比は、式(2)のラディエーション係数の形から、成分と成分に対して共通であることがわかる。そこで、スカラー関数

$$\begin{aligned} u(t) &= -6 \frac{1}{r^4} \int_{r/\alpha}^{r/\beta} \tau f(t-\tau) d\tau \\ &\quad - 2 \frac{1}{\alpha^2} \frac{1}{r^2} f\left(t - \frac{r}{\alpha}\right) \\ &\quad + 3 \frac{1}{\beta^2} \frac{1}{r^2} f\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \\ &\quad + \frac{1}{\beta^3} \frac{1}{r} \dot{f}'\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

を考え、右辺の第一項から第四項までのフーリエ変換をそれぞれ N, IP, IS, FS とすると $(N+IP+IS+FS)/FS$ が求めるものである。いま $f(t)$ のフーリエ変換を $F(\omega)$ とし、実際に式(3)の右辺各項のフーリエ変換を実行すると、求める比は

$$\begin{aligned} \frac{(N + IP + IS + FS)}{FS} &= \\ &= 6i \left(\frac{\beta}{r\omega} \right)^3 \left[1 - e^{-i\omega r(1/\alpha - 1/\beta)} \right] \\ &\quad - 6 \left(\frac{\beta}{r\omega} \right)^2 \left[1 - \frac{\beta}{\alpha} e^{-i\omega r(1/\alpha - 1/\beta)} \right] \\ &\quad + 2i \left(\frac{\beta}{r\omega} \right) \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2 e^{-i\omega r(1/\alpha - 1/\beta)} \\ &\quad - 3i \left(\frac{\beta}{r\omega} \right) + 1 \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

さて、統計的グリーン関数法では、計算の過程で、地震基盤における統計的グリーン関数のフーリエ変換が表れる。これは、通常、遠地項（S波）のみを考慮したものであるから、これに式(4)の比を乗じることにより、近地項および中間項の影響を考慮した統計的グリーン関数を得ることができる。

なお、式(4)は、媒質のパラメタである α と β を別とすれば r のみの関数である。いま仮に $\alpha/\beta = 1.732$ (ポアソン固体) とし、式(4)の絶対値を r/β の関数として示すと図1のようになる。式(4)の絶対値は r/β が小さいとき1より大きく、 r/β が中間的な値のときいったん1より小さくなり、 r/β が大きいときには1に漸近する。すなわち、 r/β が小さいときには近地項と中間項を無視することにより地震動を過小評価する可能性があり、 r/β が中間的な値のときは近地項と中間項を無視することにより地震動を過大評価する可能性がある。

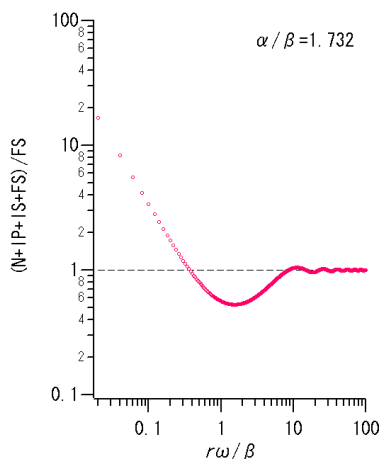


図1 近地項等を含む波の遠地項に対するスペクトル比

3. 数値計算例

上記の定式化を用いた数値計算例を示す。ここでは、久田²⁾の方法で遠地項（S波）を考慮した統計的グリーン関数を生成し、上記の方法で近地項と中間項の寄与を加え、これを等質等方な全無限弾性体における理論的グリーン関数³⁾と比較した。サイト直下2kmの位置に $M_0=9.24E+22$ dyne-cm の点震源 (strike=0,dip=90,rake=90) をおき、地表（地震基盤）での東西成分を計算した。媒質のパラメタは $\rho=2.7$ g/cm³, $v_p=6.1$ km/s, $v_s=3.5$ km/s, $Q=$ とした。統計的グリーン関数の計算を行う際、理論的グリーン関数との比較を行うため、 $RAD=1.0$, $PRTITN=1.0$ とした。また、全無限弾性体の理論的グリーン関数はそのままでは自由表面の効果を含まないため振幅を2倍にして比較した。生成された統計的グリーン関数は高周波側で²⁾モデルに従うが²⁾、高周波成分を理論的グリーン関数と比較することには意味がないので、比較の対象は1Hz以下の速度波形とした。統計的グリーン関数を生成する際のコーナー周波数は2.0Hzとした。理論的グリーン関数のコーナー周波数はこの場合ライズタイムによって決まる。コーナー周波数が2.0Hzとなるようにライズタイムを0.16sとし、すべり速度時間関数は二等辺三角形とした。もっとも、理論的

グリーン関数を計算する際のライズタイムやすべり速度時間関数の詳細は、ライズタイムさえ十分短く設定されていれば、1Hz以下の波形に対して大きな影響を及ぼすものではない。結果を図2に示す。遠地項（S波）だけの場合と近地項等を含む場合について比較しているが、いずれの場合も生成された統計的グリーン関数は理論的グリーン関数とよく一致している。なお、この場合は近地項等を含む方が全体に振幅が小さい。4. おわりに

本研究では、従来は遠地項（S波）の寄与のみを考慮していた統計的グリーン関数法に対し、近地項および中間項の影響を取り込むための方法を検討した。その結果、近地項および中間項の影響は、周波数領域での簡単な演算により導入できることがわかった。最初に述べたように、従来より統計的グリーン関数法に関して二つの問題点が指摘されていたが、本研究ではこのうち後者に関する解決策を示した。前者についてはすでに解決策が示されており^{2),4)}、従来の問題点はほぼ解消されたと考えている。実際、数値計算例のところで示したように、統計的グリーン関数法を用いても、理論的手法を用いても、少なくとも地震基盤のレベルではほぼ等価な地震動を生成できるようになっている（ただし理論的手法と比較する意味のある低周波側において）。従って、今後、統計的グリーン関数法と理論的手法を比較する場合には、サイト特性評価の正確さという点に議論のポイントが移っていくものと考えられる。

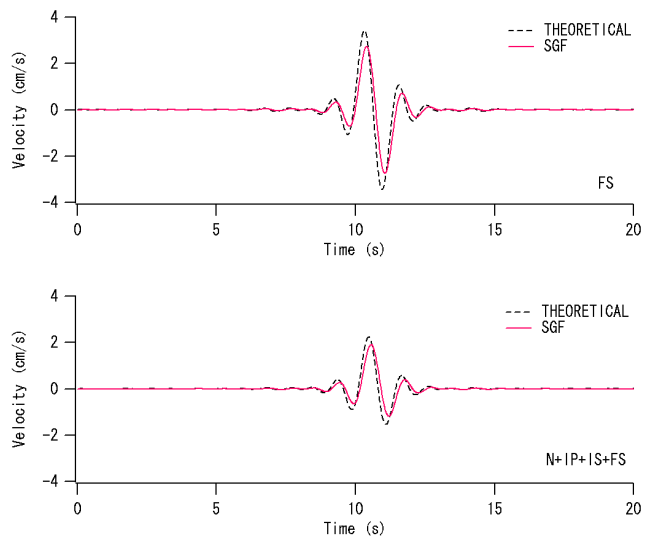


図2 理論的グリーン関数と統計的グリーン関数の比較。上段は遠地項（S波）のみの場合、下段は近地項等を含む場合。

謝辞：本研究の実施にあたり（株）ニュージェックの山田雅行さんとの議論は参考になりました。記して謝意を表します。

【参考文献】1)釜江他：日本建築学会構造系論文報告集，430，1-9，1991。2)久田：日本地震工学会大会 - 2004 梗概集，368-369，2004。3)堀家・大西：日本地震工学会大会 - 2004 梗概集，364-365，2004。4)香川：日本地震工学論文集，4，21-32，2004。5)野津・菅野：港湾空港技術研究所資料 No.1120，2006。6)野津他：日本地震工学論文集（投稿中）。7)古和田他：日本建築学会構造系論文集，514，97-104，1998。8)佐藤：地震動 - その合成と波形処理，第2章，鹿島出版会，21-88，1994。