

近地項・中間項を考慮した修正経験的グリーン関数法に関する基礎的検討

長坂 陽介¹・野津 厚²

¹ 正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域地震動研究グループ（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1）

E-mail:nagasaka-y@pari.go.jp

² 正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域地震動研究グループ（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1）

E-mail:nozu@pari.go.jp

2016 年熊本地震本震では地表地震断層が表れ、周辺ではフリングステップを含む強震動が観測され、地表付近の浅部すべりが強震動に影響を与えた可能性がある。そこで本検討では、まず修正経験的グリーン関数法では従来考慮されていなかった近地項、中間項を導入するための野津(2006)の方法について解析解との比較による検証を行った。その結果点震源間の距離を適切に設定することで解析解と一致する結果が得られることが確認できた。さらに、変位に影響を与える断層の範囲と各項の寄与について検討を行い、ともに断層の大きさと対象地点までの距離によってその傾向が決まることが分かった。

Key Words: the 2016 Kumamoto earthquakes, corrected empirical Green's function method, near field term, intermediate field term, fling step

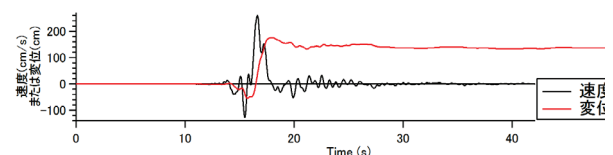
1. はじめに

2016 年 4 月 16 日 01:25(JST)に発生した熊本地震本震(M7.3)では、長大な地表地震断層が発生し、特に地表地震断層周辺の強震観測点で震度 7 を含む大振幅記録が観測された。地表地震断層のずれは最大約 2m であった。GNSS などの測地データによる地殻変動量の推定も行われており、断層周辺の広範囲にわたって断層運動による地殻変動が確認されている。これらの断層運動は強震動記録では変位波形のフリングステップとして現れる。地震における永久変位は近地項と中間項によるものであるが、近地項と中間項は遠地項と比べて距離による減衰が大きく、中小地震ではほとんど観測されない。一方で 2016 年熊本地震本震では地表付近が大きくすべったことにより断層極近傍地点では近地項・中間項の寄与が残り、益城町や西原村等では 1m を超える永久変位が観測された。

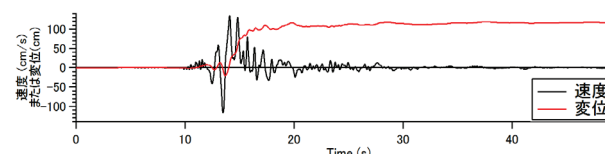
半経験的手法による強震動シミュレーションは中小地震記録を何らかの形で用いるため、近地項・中間項は考慮されないことがほとんどである。しかし、2016 年熊本地震本震の観測記録の変位・速度波形を見ると（図-1）、変位の立ち上がりとともに最大速度がそれに近い

大速度が発生しており、浅部すべりによる揺れが構造物被害に影響を与えた可能性がある。

そこで本研究では、遠地項だけでなく近地項・中間項を考慮した 2016 年熊本地震本震の強震動モデルを構築することを最終的な目的とし、本稿では野津(2006)¹⁾による近地項・中間項を簡便に評価する方法を用いた修正経験的グリーン関数法について、解析解との比較による検証とパラメタスタディーを行った結果について述べる。



(a) 西原村小森 EW 成分



(b) KiK-net 益城 地表 EW 成分

図-1 2016 年熊本地震本震の地表地震断層付近観測記録

2. 手法

本章ではまず修正経験的グリーン関数法²⁹⁾について簡潔に説明し、さらに近地・中間項を考慮する方法について述べる。

(1) 修正経験的グリーン関数法

修正経験的グリーン関数法では、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性、サイト位相特性をそれぞれ周波数領域で評価し、それらを掛け合わせることで対象地点での小地震波形（以下、グリーン関数）のフーリエ変換を求め、これをフーリエ逆変換することでグリーン関数を求める。断層面の時空間的な広がりを入倉(1997)⁹⁾の方法によりグリーン関数を重ね合わせることで表現する。各項目の具体的な評価法は以下の通りである。

震源特性はオメガスクエアモデル⁹⁾に従う震源スペクトル、伝播経路特性は Boore(1983)⁷⁾による幾何減衰と非弾性減衰を考慮したものとする。サイト増幅特性は野津・長尾(2005)⁸⁾などの経験的サイト増幅特性を用い、位相特性は中小地震記録による同サイトでの位相特性をそのまま用いる。中小地震の選択は、なるべく対象地震の近くで発生しメカニズムが近いものを用いることとする。このとき、因果性を満足するために中小地震記録のフーリエ変換をその絶対値にバンド幅 0.05Hz の Parzen Window を適用したもので割ったものを位相特性とする。

(2) 近地項・中間項の導入法

修正経験的グリーン関数法に近地項・中間項を導入するため、野津(2006)による方法を用いる。野津(2006)は $\theta\phi$ 成分についてのみ方法を示しているが、 r 成分については佐藤(2009)⁹⁾により同様の方法が適用できることが分かっている。

計算法は、まずグリーン関数の遠地項としてオメガスクエアモデルに従う震源スペクトルに幾何減衰、非弾性減衰を考慮したものを求める。次に均質全無限弾性体中のせん断くい違い点震源による理論地震動のフーリエ変換について、近地項・中間項・遠地項を含む全項の遠地項に対する比を求め、遠地項に乗じることで全項を含むグリーン関数を求める。グリーン関数は $\theta\phi$ 成分と r 成分についてそれぞれ求め、複数の点震源を用いる場合は入倉(1997)の方法に従って重ね合わせる。

3. 近地項・中間項の導入法の検証

前章の近地項・中間項を導入する手法は検証 (verification)が行われていなかった。特に、点震源からの寄与の和によりフリングステップを正しく計算できるか、

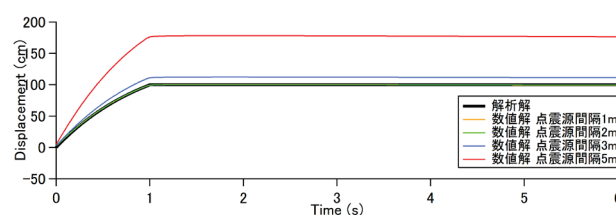
最終変位のすべり方向成分が断層極近傍ではすべり量の1/2に収束するという解析解¹⁰⁾にみられる性質が点震源からの寄与の和で表現できるかといった点については、専門家の間で様々な議論がある。そこで本稿では、解析解との比較により、近地項・中間項を考慮した修正経験的グリーン関数法の検証を行う。

(1) 検証条件

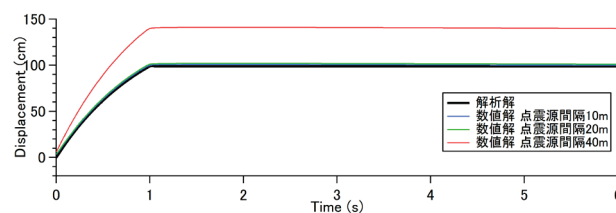
増田・引間(2002)¹⁰⁾は、均質全無限弾性体中の円形断層が同時に同量すべるときの、断層円の中心軸上における変位波形のすべり方向成分の解析解を示している。文献 11)には解析解の導出過程の詳しい説明がある。この解析解は面積積分を解析的に行っているため、先に述べた点震源に係る問題の検証に使える。そこで、解析解と同じ条件で 2.(2)に示した方法で数値解を求め、解析解と数値解を比較することで検証を行った。パラメータは表-1の通りとし、数値解における点震源間距離を変えた複数ケースで比較した。すべり速度時間関数は解析解、

表-1 媒質と断層面の設定

密度	2700 kg/m ³
S波速度	3000 m/s
P波速度	5196 m/s
Q値	∞
ライズタイム	1.0 s
すべり量	2.0 m
ラディエーション係数	理論値
コーナー周波数 ¹⁰⁾¹¹⁾	0.66Vs/S ^{0.5} Hz
走向、傾斜、すべり角	90°, 0°, 0°
点震源間距離	ケースごと
対象地点までの距離 (以下断層最短距離とする)	ケースごと
断層半径	ケースごと



(a) 断層最短距離 1m



(b) 断層最短距離 10m

図-2 解析解と数値解の比較：点震源間隔の検討

数値解ともに入倉(1997)に従うものとした

(2) 検証結果

図-2 に解析解と数値解の比較結果を示す。断層半径は 1000m で固定し、断層最短距離が 1m, 10m の 2 ケースで検討を行った。その結果、断層最短距離が 1m の場合は点震源間隔 2m 以下で解析解と一致し、それ以上の点震源間隔では解析解との乖離が広がった。断層最短距離を 10m にして同様の検討を行うと、点震源間隔が 20m 以下で解析解と数値解が一致した。この検討より、点震源間隔が断層最短距離の 2 倍以下であれば解析解と数値解が一致することが分かり、数値解の妥当性が確認できた。なお、対象地点の直下に点震源があるかどうかは結果に影響を与えなかった。

4. 近地項・中間項の性質に関する基礎的検討

(1) 近地項・中間項の影響範囲

近地項と中間項は遠地項に比べて距離とともに急速に減衰する。2016 年熊本地震本震でも地表地震断層の周辺で永久変位が観測されたが、それらが断層のどの範囲の影響を受けているかを知ることは断層浅部のモデル化に有用な情報となる。そこで本検討では断層最短距離を固定し、断層半径を変化させたケースを比較することで断層の影響範囲を調べた。

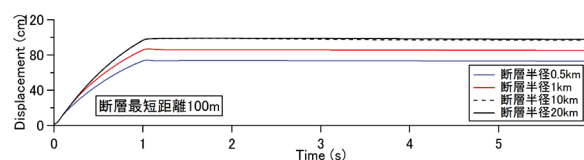
図-3 に断層の影響範囲の検討結果を示す。断層最短距離 100m のときは断層半径 10km 以上で最終変位が断層の片側すべり量とほぼ同じになる。断層半径 1km では最終変位が 85cm となり、断層半径が 0.5km では約 70cm となる。断層最短距離 1000m でも同様の傾向が見られた。

これより、断層半径と断層最短距離の関係で最終変位が決まると考え、断層半径と断層最短距離の比（対数）を横軸にとり、縦軸は対象地点での最終すべり量として図-4 に示した。図-4 よりすべての点が同一曲線上にあることが分かった。ただし、本検討は全無限弾性体内部の結果であるため、地表面や層構造を含む現実に近い条件での検討も必要である。

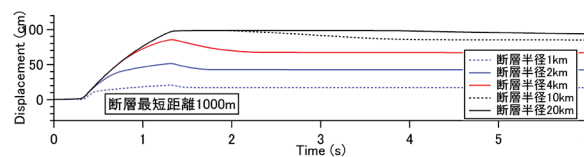
(2) 各項の寄与

最後に、近地項、中間項、遠地項の各項がどの程度変位に寄与しているかを数値解により調べた。計算条件は断層最短距離を 100m, 1000m の 2 通りとし、それぞれについて断層半径を変化させて各項の寄与がどのように変化するか調べた。結果を図-5、図-6 に示す。

図-5 より断層最短距離 100m では断層半径 1km でも 2km でも近地項、中間 P 項の順で変位に対して支配的と



(a) 断層最短距離 100m



(b) 断層最短距離 1000m

図-3 断層の影響範囲に関する検討

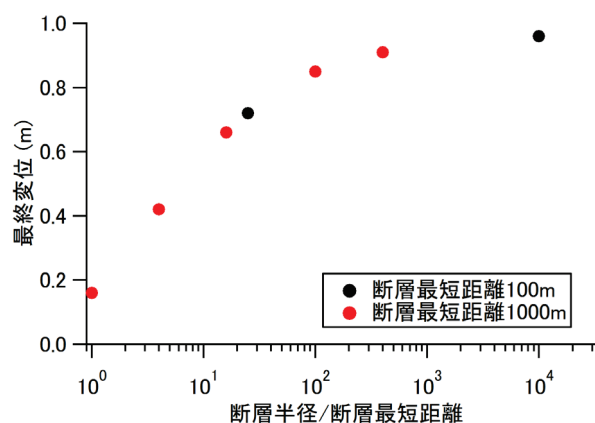


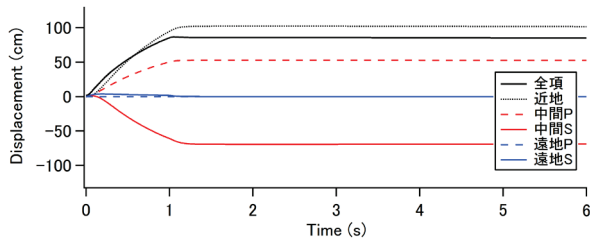
図-4 最終変位の断層半径と断層最短距離依存性

なり、中間 S 項がこれを打ち消すような向きに寄与している。これ以上断層半径を大きくしても傾向は変わらなかった。

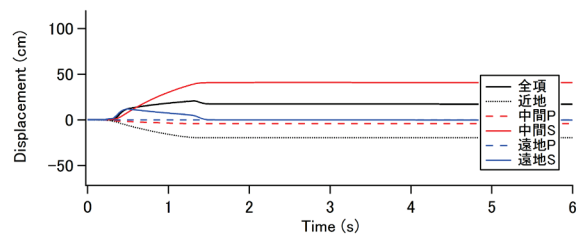
一方図-6 より、断層最短距離を 1000m にすると断層半径によって支配項が変化することが分かる。断層半径が 1km と小さいときは中間 S 項が支配的となり、断層半径 2km では近地、中間 S、中間 P の 3 項が同程度寄与しており、さらに大きくなると近地項が支配的となり断層最短距離 100m のときと同じとなる。最終変位に対する各項の寄与についても、断層半径と断層最短距離の比によりまとめることができ、図-7 のようになる。図-7 より、全項を足し合わせた変位は常に同じ向きであるが、支配項は断層半径と断層までの距離の関係により複雑に変化していることが分かる。

4. まとめ

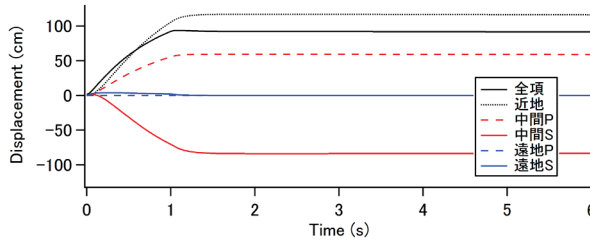
浅部すべりを修正経験的グリーン関数に組み込むため、本検討では野津(2006)による近地・中間項の導入方法について解析解との比較により検証した。その結果、近地項・中間項を考慮する場合は、点震源間距離を対象地点



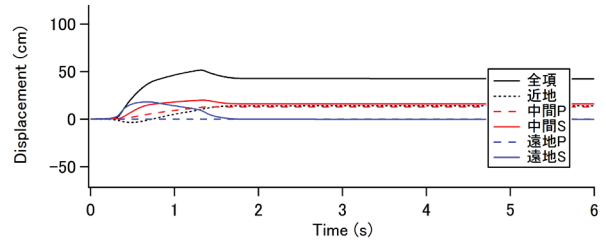
(a) 断層半径 1km



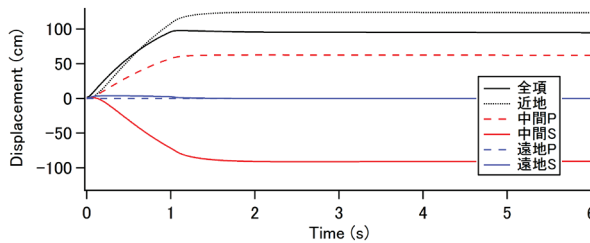
(a) 断層半径 1km



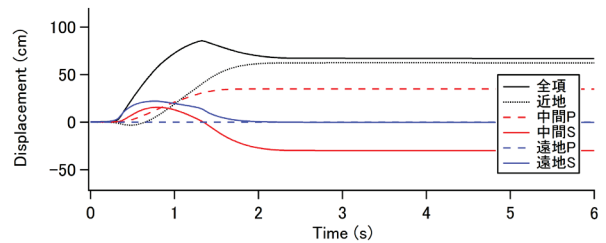
(b) 断層半径 2km



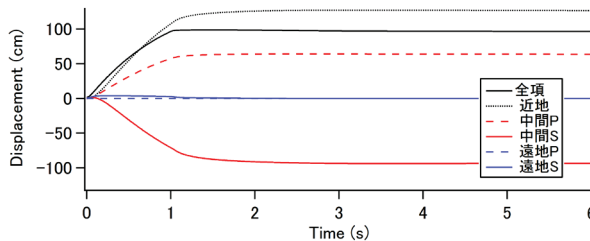
(b) 断層半径 2km



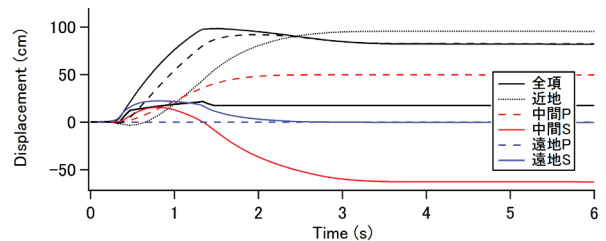
(c) 断層半径 4km



(c) 断層半径 4km



(d) 断層半径 8km



(d) 断層半径 8km

図-5 各項の寄与 (断層最短距離 100m)

図-6 各項の寄与 (断層最短距離 1000m)

までの距離の約 2 倍程度以下にすれば正しく計算できることが分かった。さらに断層半径と断層面から対象地点までの距離を変えた複数ケースの比較により、最終変位に影響を与える断層範囲を調べたところ、対象地点までの距離と断層半径の比と関係があることが分かった。最後に各項の寄与を調べると、最終変位は常に同じ向きであるが、各項の寄与は向きも含めて断層半径と対象地点までの距離によって変化することが分かった。

本手法のように点震源からの寄与の和によりフリングステップを正しく計算できるのか、最終変位のすべり方向成分が断層極近傍ではすべり量の 1/2 に収束するとう解析解 10)にみられる性質が表現できるかといった点について様々な議論があったが、点震源の間隔を十分小さくとればそれらが表現できることが本研究により示され

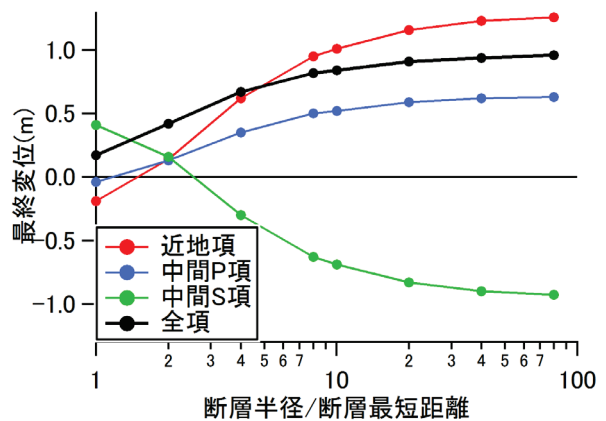


図-7 各項の最終変位への寄与

た意義は大きいと考えている。今後は熊本地震へ適用し、深部モデルと合わせたモデルを構築する予定である。

謝辞：本検討では熊本県および防災科学技術研究所の強震記録を使用しました。

参考文献

- 1) 野津厚：統計的グリーン関数法に近地項と中間項を導入するための簡便な方法，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.190-193，2006.
- 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) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良－因果性を満足する地震波の生成－，土木学会論文集 A，Vol.65，pp.808-813，2009.
- 5) 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.
- 6) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, Vol. 72, pp.1217-1231, 1967.
- 7) Boore, D.M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 8) 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.111，2005.
- 9) 佐藤智美：近地項と中間項を考慮した三成分統計的グリーン関数生成手法の高度化，日本建築学会構造系論文集，No.638，pp.629-638，2009.
- 10) 増田徹・引間和人：断層近傍における地震動，日本地震学会講演予稿集，A16，2002.
- 11) 野津厚：運動学的断層モデル（その1）（増田・引間，2002），http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/tutorial_jpn/tutorial_003.pdf.
- 12) Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, pp.4997-5009, 1970.
- 13) Brune, J.N.: Correction, *J. Geophys. Res.*, Vol.76, pp.5002, 1971.

INTRODUCING NEAR AND INTERMEDIATE FIELD TERMS INTO CORRECTED EMPIRICAL GREEN'S FUNCTION METHOD

Yosuke NAGASAKA and Atsushi NOZU

Surface ruptures were observed after the main shock of the 2016 Kumamoto earthquakes. Fling steps and associated large velocities were also observed at the strong motion stations near the surface ruptures. Shallow slips could cause these fling steps and large velocities. In this study, in order to consider the near and intermediate field terms in the strong motion simulation, we first verified Nozu (2006)'s method to consider these terms by comparing the result with an analytic solution. Good agreement was found between the analytic and numerical solutions when the interval of the point sources in Nozu (2006)'s method was appropriate. Then relationship of the size of the fault plane and the permanent displacement, and the contributions of each term were also examined.