#### 2020/10/23

断層変位を受ける地中管路の 設計手法に関する研究小委員会 最終報告会

# 成果報告WG1 (永久変位成分を含む地震動の計算手法)

# 国立研究開発法人海上·港湾·航空技術研究所 港湾空港技術研究所 野津厚

謝辞:防災科学技術研究所,気象庁,熊本県,関西地震観測研究協議会 による強震波形データを使用しました.記して謝意を表します.

1

- 1. はじめに
- 2. 離散化波数法の概要と検証(verification)事例
- 3. 複合型震源モデルの熊本地震への適用例
- 4. 複合型震源モデルの大阪湾断層帯への適用例

# 目次

# 1. はじめに

- 2. 離散化波数法の概要と検証(verification)事例
- 3. 複合型震源モデルの熊本地震への適用例
- 4. 複合型震源モデルの大阪湾断層帯への適用例

◎大地震の際,震源付近では断層運動に伴う永久変位を含む地震動が生じる 1999年台湾集集地震や2016年熊本地震本震のように地表地震断層を伴う大地 震では特にそれが著しい

◎こうした場合に観測されるステップ状の変位波形はフリングステップと呼ばれる ことが多い(Hisada and Bielak, 2003).

◎フリングステップは、その立ち上がり時間が十分に大きければ、断層近傍に立地する構造物への影響は(断層をまたぐ構造物を除けば)小さいと考えられる.しかしながら、熊本地震本震の際に観測されたフリングステップは立ち上がり時間が2s程度と短く、構造物に対して顕著な応答をもたらしうるものであった.





◎熊本地震の際に西原村で観測された波形は最大速度が200cm/sを超えている(左下) 応答スペクトルで見ても道路橋示方書の設計スペクトルを上回っている(右下) このような大振幅の波形は,免震構造物等に多大な影響を及ぼす恐れがあり,種々の検討がなされている(例えば林・杉野,2018)

◎一方,地中構造物に対しては、断層変位の影響が大きいのは当然としても、 フリングステップによる動的な効果がどの程度影響するかは不明な点が多い.しかしながら、近年では地中構造物を対象として動的解析を行う事例も増えてきており、断層付近の地中構造物の耐震設計においても、動的な効果を見込んだ解析を適用する機会が今後は増えるのではないか.>>入力地震動の必要性



◎現時点で一般に用いられている強震動シミュレーション手法は、フリングス テップを考慮できないものが多い。例えば、港湾の分野で広く照査用地震動 の評価に用いられている修正経験的グリーン関数法(古和田他、1998;野津 他、2009)は、兵庫県南部地震の神戸市内の地震動など、永久変位成分が 支配的でない場合の震源近傍地震動の計算には有効であるが(下図)、そ のままではフリングステップを含む地震動を計算することができない。





6

◎断層深部に位置するアスペリティの破壊による影響を考慮した従来の手法 は熊本地震の際の西原村のような地震動を再現できない.しかしながら一方で, 益城町のように深部のアスペリティの影響が支配的な地震動に対しては従来 の手法が有効である.

◎そこでWGでは,従来から設計において考慮されている断層深部のアスペリ ティの破壊に伴う強震動に加え,フリングステップも考慮できる包括的な強震 動予測手法の開発を行った.その際,工学的な活用を念頭に,できるだけ簡便 な震源モデルを用いることとした.

	モデル化の方法	主な計算対象	計算手法
領域B	ー様な断層モデルに 動的な情報を追加	(主に浅部のすべ りに起因する)フリ ングステップ	離散化波数法
領域A	深部にアスペリティを 配置	深部のアスペリ ティに起因する強 震動	修正経験的グリーン 関数法(従来手法)

# 目次

- 1. はじめに
- 2. 離散化波数法の概要と検証(verification)事例
- 3. 複合型震源モデルの熊本地震への適用例
- 4. 複合型震源モデルの大阪湾断層帯への適用例

#### 離散化波数法

※離散化波数法は,種々の震源の条件に対し,半無限地盤または水平成 層地盤の応答を計算できる手法である(Bouchon, 1981; Bouchon, 2003).

※点震源に対する応答は無限級数の形で与えられており、面震源に対する応答は、通常は点震源に対する応答の重ね合わせで計算する.

※離散化波数法では、震源から放射される地震波を様々な周波数と様々な波数を有する地震波の重ね合わせで表現する.



#### 離散化波数法

※離散化波数法では、点震源から放射される地震波を様々な周波数と様々なティクオフ・アングルを有する波に分けて考える

※水平な地層境界に入射した地震波の透過と反射を,周波数と波数に対して独立に,弾性定数に基づいて厳密に計算する.

※その結果をすべての周波数と波数について重ね合わせることで, 点震 源に対する応答が求まる.



# 離散化波数法

フリングステップの計算に離散化波数法を用いる理由:

フリングステップを含む地震動を計算する際,上盤側と下盤側での永久変 位の違いを正確に考慮するためには,自由表面における境界条件を厳密 に扱うことのできる手法を用いる必要がある.

# 離散化波数法の誤差要因

1. 実際の計算では無限級数をどこかで打ち切らなければならない. そのときの打ち切り波数kmax

$$\hat{\phi} = -\frac{i\pi}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \frac{k_n}{\nu_n} J_0(k_n r) e^{-i\nu_n |z|}$$
$$\nu_n = \sqrt{(\omega/\alpha)^2 - k_n^2}, \qquad \operatorname{Im}(\nu_n) < 0$$

- 2. 面的な広がりをもつ断層は小断層の集合で表現される. そのときの 小断層のサイズ
- 3. .....

離散化波数法の検証(Verification)

※フリングステップを含む断層近傍地震動への離散化波数法の適用性 に関する検証の事例として、永久変位に関する(静的な)解析解(Okada, 1985)との比較を行った事例(Wu et al., 2019)と、永久変位に至る過程 を含む変位波形に関する解析解(増田・引間, 2002)との比較による検 証を行った事例(野津, 2002)を紹介する. 永久変位に関する(静的な)解析解との比較を行った事例(Wu et al., 2019)



検討対象とした点震源

永久変位に関する(静的な)解析解との比較を行った事例(Wu et al., 2019)



増田・引間(2002)による解析解との比較を行った事例(野津,2020)



増田・引間(2002)による解析解は、<u>円形断層で同時に</u>すべりが生じたと きの<u>全無限弾性体</u>における地震動に関する解析解であり、<u>円の中心軸</u> <u>に沿った観測点</u>での地震動の<u>すべり方向成分</u>を与えるものである.

## 増田・引間(2002)による解析解



17

## 増田・引間(2002)による解析解





限界として

(1)円形断層が同時にすべった場合に対応し破壊伝播の効果は入っていないこと,

(2)すべり方向成分に関する解析 解であり断層直交成分は対象外 であること、

などはあるものの,永久変位成分 まで含んだ地震動の解析解として 貴重な存在である.

$$\overline{u(r_0, t)} = \beta^2 \begin{bmatrix} -\frac{3}{2} \frac{a^2 r_0}{R^5} \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau D(t - \tau) d\tau \\ -\frac{1}{2} \frac{a^2 r_0}{R^3} \frac{1}{\alpha^2} D(t - R/\alpha) \\ +\frac{1}{2} \frac{a^2 r_0}{R^3} \frac{1}{\beta^2} D(t - R/\beta) \\ +\frac{1}{2} \frac{1}{\beta^2} D(t - r_0/\beta) \\ -\frac{1}{2} \frac{r_0}{R} \frac{1}{\beta^2} D(t - R/\beta) \end{bmatrix}$$

Verificationのための計算条件 –

Verificationのための計算条件

 $\rho$ =2700kg/m<sup>3</sup>,  $\alpha$ =5196m/s,  $\beta$ =3000m/s

円形断層の半径:1000m

すべり速度時間関数

$$\dot{D}(t) \propto e^{-t/t_r} \cdots 0 < t < t_r$$

最終すべり量は2m, ライズタイムは1sとした.

※解析解は全無限弾性体に対するものであるため、離散化波数法では震源からの入射場のみを考慮する.

# ☆面積分を数値的に実行するための点震源の集合 (点震源の間隔が50mである場合の図)



その他の計算条件

- $\bigstar k_{max} = 5\pi/z_s$
- ☆周波数の虚部 $\lambda$ の大きさ  $\lambda = 2\pi/T$

☆離散フーリエ変換に用いるタ イムウインドウは,必要なタイム ウインドウの2倍の長さ(16s)を 用意し,後半を棄却

☆ナイキスト周波数は8Hz

22

# - 結果 -



点震源の間隔50mの場合

 $% k_{max}$ の値は $z_s$ に応じて十分に大きくとる.

 $k_{max} \ge 5\pi/z_s$ 

※小断層サイズは十分に小さく設定する.

小断層サイズ ≤ 断層面最短距離×0.5

1. はじめに

- 2. 離散化波数法の概要と検証(verification)事例
- 3. 複合型震源モデルの熊本地震への適用例
- 4. 複合型震源モデルの大阪湾断層帯への適用例

従来から設計において考慮されている断層深 部のアスペリティの破壊に伴う強震動に加え, フリングステップも考慮できる包括的な強震動 予測手法の開発と, 熊本地震本震への適用を 通じた検証を行った.

	モデル化の方法	主な計算対象	計算手法
領域B	国土地理院によるシ ンプルな断層モデル に動的な情報を追加	(主に浅部のすべ りに起因する)フリ ングステップ	離散化波数法
領域A	上記の面上にフォ ワードモデリングによ りアスペリティを配置	深部のアスペリ ティに起因する強 震動	修正経験的グリーン 関数法

- 出発点として用いた国土地理院の測地学的断層モデル -

出発点として用いた国土地理院の測地学的断層モデル(黒の長方形)



断層A1, A2: 布田川断層

断層B+断層A1+断層A2=領域B

出発点として用いた国土地理院の測地学的断層モデル(黒の長方形)



	経度	緯度	上端 深さ	長さ	幅	走向	傾斜	滑り角	滑り量	M <sub>w</sub>
	(°)	(°)	(km)	(km)	(km )	(°)	(°)	(°)	(m)	
断層B	130.807	32.770	0.8	10.2	13.0	205	72	176	2.7	6.65
断層A1	130.996	32.878	0.6	20.0	12.5	235	60	209	4.1	6.96
断層A2	130.975	32.883	0.2	5.1	6.6	56	62	178	3.8	6.36

国土地理院による震源断層モデルを出発点とすることの利点

〇国土地理院のモデルは、3枚の断層面からなるとは言え、各断層面におけるす べり量を一様とした比較的シンプルなモデル

→比較的シンプルなモデルで各地の永久変位とフリングステップを一定の精度で 再現できるならば、予測問題への適用を考えたとき意義は大きい

〇断層運動による永久変位は、西原村小森のように断層面距離のごく小さい地点では断層面全体のすべりではなく観測点直近でのすべりによって決まるが、大津 (KMM005)のように若干離れた場所では断層面全体の影響を受ける.



国土地理院による震源断層モデルを出発点とすることの利点

〇国土地理院のモデルは、3枚の断層面からなるとは言え、各断層面におけるす べり量を一様とした比較的シンプルなモデル

→比較的シンプルなモデルで各地の永久変位とフリングステップを一定の精度で 再現できるならば、予測問題への適用を考えたとき意義は大きい

○断層運動による永久変位は、西原村小森のように断層面距離のごく小さい地点では断層面全体のすべりではなく観測点直近でのすべりによって決まるが、大津(KMM005)のように若干離れた場所では断層面全体の影響を受ける. →震源周辺の各地でのフリングステップを適切に再現できるためには、断層面の浅部のみならず深部を含めたモデル化が必要である.

〇国土地理院のモデルは、震源周辺の各地において、少なくとも永久変位をある 程度適切に計算できる

→これにすべりの時間的な発展に関する情報を付与することで,各地のフリングス テップを適切に計算できる可能性がある - すべりの時間的発展に関する情報の付与 -

# すべりの時間的発展に関する情報の付与





すべりの時間的発展に関する情報の付与

★断層A1とA2の破壊開始時刻 →各々の破壊開始点と断層Bの破壊開始点を結 ぶ最短距離を破壊伝播速度で除した値

★破壊伝播速度

 $\rightarrow$ 2.4km/s

(西原村小森および南阿蘇村河陽におけるフリングステップの到来時刻が観測と整合するように設定)

★断層Bの破壊開始時刻

→当初は0.0sとしていたが、この条件ではK-NET 熊本(KMM006)のNS成分のフリングステップの 到来が早すぎる結果となったので2.5sとした.

★すべり速度時間関数

 $V(t) = \propto e^{-t/t_r}$ 

★ライズタイム:2.0s



領域Bのみの計算結果(変位波形)



フリングステップの到来時刻は適切→破壊伝播速度は概ね妥当 フリングステップの立ち上がりに要する時間は適切→ライズタイムは概ね妥当

領域Bのみの計算結果(変位波形)



フリングステップの到来時刻は適切→破壊伝播速度は概ね妥当 フリングステップの立ち上がりに要する時間は適切→ライズタイムは概ね妥当

領域Bのみの計算結果(変位波形)



領域Bのみの計算結果(変位波形)



領域Bのみの計算結果(速度波形)



変位波形は概ね適切に 再現できているにも関わ らず,速度波形は大幅な 過小評価となっている.

# これはアスペリティの寄与を考慮していないため

黒	;	観測
赤	:	計算

# - アスペリティの設定 -

## 領域A(アスペリティ)の設定

過去に作成した熊本地震本震のアスペリティモデル(野津, 2017)ではアスペリティは布田川断層沿いの傾斜角84°の断層面上に配置していた. ここで領域Bとして設定している布田川断層沿いの断層A1の傾斜角は60°であるので, ここでは傾斜角60°の断層A1上にアスペリティを置きなおした.



赤の箇所が領域A(アスペリティ)

領域B+領域Aの計算結果(変位波形)



変位波形の計算結果は 背景領域のみを考慮し た場合に比べ永久変位 の値に変化はないが少 し短周期成分が乗ってお り観測波形の特徴に近 づいている.

黒:観測 緑:計算

領域B+領域Aの計算結果(速度波形)



速度波形の計算結果は 背景領域のみを考慮し た場合に比べ観測結果 に大きく近づいている.



— 議論 —

#### 議論

- ★詳しく見れば、断層面上でのすべりの不均質な分布(益城町付近よりも西原村付近ですべりが大きい)を考慮することにより結果が改善の方向に向かうことはある 程度明らかである。
- ★しかし,破壊伝播速度,ライズタイム,すべり量などを断層面上で一様とした簡便な震源モデルでフリングステップをある程度再現できることは,予測問題への応用を念頭におけば有用な情報である。
- ★フリングステップの再現ということに関する限り、断層モデルを複雑化する必要はなく、過小評価が心配であれば計算結果に安全率をかけておけば良い.

対象とする地震動	事例	不均質震源モデルの必要性
深部のアスペリティに起 因する強震動	兵庫県南部地震の際 の神戸市内の地震動	すべりの一様な断層モデルで 計算できないことは明らか
フリングステップ	熊本地震本震の際の 震源近傍地震動(のー 部)	すべりの一様な断層モデルで 十分

	モデル化の方法	主な計算対象	計算手法
領域B	国土地理院によるシ ンプルな断層モデル に動的な情報を追加	(主に浅部のすべ りに起因する)フリ ングステップ	離散化波数法
領域A	上記の面上にフォ ワードモデリングによ りアスペリティを配置	深部のアスペリ ティに起因する強 震動	修正経験的グリーン 関数法

★構築した震源モデルは、比較的シンプルなものであるにも関わらず、フリングステップを含む変位波形と速度波形を精度良く再現できることが確認された。

★破壊伝播速度, ライズタイム, すべり量などを断層面上で一様とした簡便な震源 モデルでフリングステップをある程度再現できることは, 予測問題への応用を念頭 におけば有用な情報である.

- 1. はじめに
- 2. 離散化波数法の概要と検証(verification)事例
- 3. 複合型震源モデルの熊本地震への適用例
- 4. 複合型震源モデルの大阪湾断層帯への適用例

〇同様の複合型震源モデルを大阪 湾断層帯に適用した事例(岡田他, 2019,沿岸技術研究センター論文 集)を紹介する.

〇断層帯は「大阪湾断層1」,「大阪 湾断層2」,「大阪湾断層3」,「和田 岬断層」,「摩耶断層」の5つのセグ メントからなる.和田岬断層と摩耶断 層はそれぞれポートアイランドの西 側と東側を通っている.

○地震調査研究推進本部により「大阪湾断層帯の長期評価」がなされており、地震規模はM7.5、傾斜は西傾斜60~80°、1回のずれ量は約2~3.5m(上下成分)とされている.



	モデル化の方法	主な計算対象	計算手法
領域B	ー様な断層モデルに 動的な情報を追加	(主に浅部のすべ りに起因する)フリ ングステップ	離散化波数法
領域A	深部にアスペリティを 配置	深部のアスペリ ティに起因する強 震動	修正経験的グリーン 関数法(従来手法)

〇領域Bは, 地震調査研究推進本部の長期評価を基に, 断層の上端深さを0kmとし, 断層幅は地震発生層の下限深さを15kmと仮定し, 各セグメントの傾斜角を考慮して設定している.

<u>Case-1</u> すべり角90°, すべり量3.5m <u>Case-2</u> すべり角135°, すべり量4.9m

O<u>ライズタイムは、熊本地震の評価で実績のある2.0sとしている</u>.

	モデル化の方法	主な計算対象	計算手法
領域B	ー様な断層モデルに 動的な情報を追加	(主に浅部のすべ りに起因する)フリ ングステップ	離散化波数法
領域A	深部にアスペリティを 配置	深部のアスペリ ティに起因する強 震動	修正経験的グリーン 関数法(従来手法)

〇領域A(アスペリティ)の断層パラメータは港湾基準に従って設定している.

〇水平成分のサイト増幅特性は国土技術政策総合研究所港湾施設研究室のホームページで公開されている神戸港の各ゾーンのサイト増幅特性を用いている.

〇鉛直成分のサイト増幅特性は観測記録の上下水平スペクトル比に基づいて設定している.

Case1走向直交成分

Case1鉛直成分



〇従来の深部のアスペリティ(領域A)のみを考慮した地震動は水平成分130kine程度, 鉛直成分30kine程度. これにフリングステップが加わることで,水平成分は 150kine程度, 鉛直成分は90kine程度となっている.

〇この例では5つのセグメントのすべり量を同じとしているが,各セグメント毎のデー タがあればそれに従って設定することも可能.

#### まとめ

※WG1では,従来から設計において考慮されている断層深部のアスペリティの破壊に伴う強震動に加え,フリングステップも考慮できる包括的な強震動予測手法の開発を行った.

※提案手法は、フリングステップを主な計算対象とする領域Bと、深部のアスペリティに起因する強震動を主な計算対象とする領域Aを合わせた複合型の震源モデルを用いるものである。この手法について熊本地震本震のデータを用いた検証(validation)を行った。

	モデル化の方法	主な計算対象	計算手法
領域B	ー様な断層モデルに 動的な情報を追加	(主に浅部のすべ りに起因する)フリ ングステップ	離散化波数法
領域A	深部にアスペリティを 配置	深部のアスペリ ティに起因する強 震動	修正経験的グリーン 関数法(従来手法)