

土木学会原子力土木委員会 津波評価小委員会（2019 年度第 2 回） 議事録（案）

1. 日 時 : 2019 年 9 月 27 日（金） 9:30~13:00
2. 場 所 : 電力中央研究所大手町地区 733 大会議室
3. 出席者 : 高橋委員長、有光委員、安中委員、大津委員、加藤委員、
齊藤氏(田村委員代理)、佐竹委員、嶋原委員、清水委員、菅原委員、谷委員、
富田委員、平田委員、八木委員、山中委員、米山委員、奥村常時参加者、
川真田常時参加者、野瀬常時参加者、森野常時参加者
松山幹事長、木場幹事、佐藤幹事、殿最幹事、藤井幹事、藤田幹事、森幹事、
山木幹事、横田幹事
加藤オブザーバー、木原オブザーバー、木村オブザーバー、栗田オブザーバー、
志方オブザーバー、土屋オブザーバー、中田オブザーバー、永松オブザーバー、
保坂オブザーバー、松田オブザーバー
4. 議 題 :
 - (1) 事務連絡
 - ・土木学会原子力土木委員会 津波評価小委員会(2019 年度第 1 回)議事録案 資料-1
 - (2) 水理模型実験
 - ・海底地すべり実験計画状況について 資料-2
 - (3) 津波解析手法の高度化に関する検討
 - ・分裂・砕波実験の再現計算（コメント回答） 資料-3-1
 - ・3次元モデルの検討（ハイブリッド手法） 資料-3-2
 - (4) 地震を要因とする津波に関する検討
 - ・3.11 インバージョン結果の精査 資料-4
 - (5) 地震を要因とする津波の確率論的評価に関する検討－ロジックツリーの検討－
 - ・分岐項目ごとの論点と関連知見の整理（南海トラフ） 資料-5
 - (6) 地震を要因とする津波の確率論的評価に関する検討－再現性指標に関する検討－
 - ・既往津波再現計算（日本海溝・千島海溝） 資料-6-1
 - ・既往津波再現計算（日本海東縁部） 資料-6-2
 - (7) 地震以外を要因とする津波の確率論的評価手法に関する検討
 - ・地すべり確率の算定方法のまとめ 資料-7
 - (8) その他

5. 議 事 :

(1) 事務連絡

・土木学会原子力土木委員会 津波評価小委員会(2019 年度第 1 回)議事録案 資料-1

○質問事項等あれば、松山幹事長まで。

(2) 水理模型実験

・海底地すべり実験計画状況について 資料-2

- Q : 前フェーズの反省点であった、どういう動きをしているかが不明であるという点を踏まえ、水路模型を工夫しているが、両サイドからの影響はどのように考えているのか。計算をする立場としては、断面 2 次元解析か 3 次元解析のどちらで計算を行えばいいのかが気になる。
- A : 極力摩擦などによる影響が生じないようにしたい。
- Q : 勾配は前フェーズの実験と同じか。
- A : 前回と同じ勾配である。
- Q : 円弧形状のすべりは再現計算が難しいのではないか。
- A : OpenFOAM で試計算を実施中であり、有意な水位が出ているため、計算は可能と考えている。
- C : なぜ円弧形状の地すべり体で実験したのか、位置づけを明確にしておいた方が良い。
- Q : 実験で計測する物理量は何か。
- A : 基本的には水位と流速である。また、地すべり体にマーカーを付けて横方向から撮影し、画像解析をして地すべり体の移動速度を計測する予定。
- Q : どのように計測するのか。
- A : PIV (粒子画像流速測定法) で計測しようと考えている。
- Q : 前フェーズの実験と同じ条件なのかもしれないが、最初のリリースするときの条件はどのするのか。粒状体はどのように落とすか。
- A : 前回と同様、エアシリンダーとワイヤー等によりゲートを下に引き下げる計画。ただし、前フェーズの実験の反省を踏まえ、引き下げることによって上から乗りあげるようなこともあったため、そういったことが無いようなるべく瞬時にゲートを下げることを考えている。
- Q : 4 枚の長さが異なる個体がすべる実験動画あったが、これは地すべりの模式図の初期の部分を実験しているものかと思う。その後さらにデブリ状になるまでの再現は、今回の実験では対象としていないのか。
- A : モルタルは固体であるため、再現が難しい。
- C : 動画を見ていると、モルタルが地すべりの模式図のように海側から徐々に下がっていったが、

最後に一番短い左側のモルタルが不自然な動きをしていたため気になった。

- C : 一番長い固体が先に床面に衝突しているため、不自然な挙動となっている。
- C : 今回実験で再現した現象は、自然には生じないような動きであると思う。この部分をうまく制御できるのかは分からないが、できないとしてもこういった挙動がどのような悪影響を及ぼすのか、実際シミュレートしたい現象と異なる動きについて注意深く考察しないと、せっかく実験をしても解釈が難しくなる可能性がある。
- A : ご指摘のとおりかと思う。実際はもっと深い水槽で実験を行うため、そういった影響が水位に対して優位に働くかはチェックする。基本的には地すべりの初動部分が津波水位に大きく影響すると考えている。実は、当初そのようなことも踏まえてサイコロ状で横方向にもスライスしてすべった後によりバラバラにさせることも考えていたが、シンプルな実験にした方が良くと考えこのようなスライス型とした。
- C : 今の実験装置の斜面はアクリルであるが、斜面の粗度を大きくすれば、不自然な挙動は若干弱まるかと思う。斜面の粗度を実際に近づければ、改善するのではないか。
- Q : 今回の実験は摩擦がポイントになる。摩擦係数を同定する実験は行うのか。
- A : モルタル同士の摩擦はある程度分かっているが、そのための実験は考えていなかったため検討する。
- C : 数値計算をするときには、摩擦係数を調整すれば再現できるような結果になるように思う。
- Q : 中間形状における地すべり体間のフィルムはザラザラするものなのか。
- A : 市販の塩ビ製の薄いものであり、ザラザラとしたものではない。
- C : どこの動きが水位に効いてくるかという話は検討するべき。そのためには、実験では難しいため、シミュレーションで検討してほしい。それにより、地すべり体の最後の挙動が問題になるのかならないのかを判断できるのではないか。実験を理想的な条件で行うのは無理であるため、シミュレーションをうまく活用してほしい。
- Q : 今回の実験は断面二次元の水路で行うということが特徴であると思うが、海岸工学委員会の中の津波小委員会のWGで似たような実験を行うのではないか。
- A : 海岸工学委員会の中の津波小委員会では、5mm程度のガラス玉や5mm程度の礫、砂を同じような条件で、陸上から落下させる実験を行う予定のため、海底地すべりとは異なる。断面二次元実験の予定。
- Q : 粒状体を気中から水中に落とすイメージか。
- A : そのとおり。

(3) 津波解析手法の高度化に関する検討

・分裂・砕波実験の再現計算 (コメント回答)

資料-3-1

- Q : 砕波モデルに関しては Kennedy et al. (2000) と松山モデルとが大差ないことを理解した。松山モデルを使えば、砕波モデルに関しては特に改良不要ということで良いか。

- A : 砕波後の減衰の部分に関しては問題ないと考えている。
- Q : 汀線付近の流速が Kennedy モデルでは大きいとのことだが、流速の実験値は確からしいか。特に汀線付近だから気になった。
- A : 確認しておく。
- Q : 再現計算において砕波モデルの違いが効いているかどうか、本日の話では微妙なところと言う印象。そもそも p.12 の砕波点の時系列と砕波後の時系列が、数値計算と実験で合っていないように見える。更にいうと再現計算では基本的に砕波せずに進んでいるように見える。Kennedy モデルと松山モデルが変わらないというよりは、単純に砕波モデルが効いていないのではないか。そう考えると、そもそも砕波する前のソリトン分裂の非線形分散は現象の再現自体が本当に出来ているのかも疑問。例えば、移流項を変えても砕波点前の部分が再現できていないのは、移流項の設定以前の話ではないか。基礎方程式を見直す必要があると感じる。
- A : ご指摘の通りだと思う。砕波点での波高の増幅はどのモデルでも表現できなかった。これについては計算格子間隔同様に検討中。
- Q : 基礎方程式は何を使用しているのか。
- A : Peregrine の方程式である。
- Q : Peregrine の式は静水圧近似の仮定を置いている。その他にもご提案式があるので、どれくらい違うかは確認した方が良さそう。また、断面 2 次元で良いので、CADMAS-SURFなどで真面目にナビエ-ストークス式を解いた場合に、実験が再現できるかというレベルの検討をした方が良さそう。
- A : CADMAS-SURF での検討はしており、砕波点での波高の増幅や砕波後の挙動は表現できていた。次回説明する。
- Q : 結論として実験の再現性を整理する際に、単純に波高だけを検討するのか、時系列まで検討するのかは考えた方が良さそう。単純に波高だけだと、見た目的には比を取って 1.1 とか 1.05 なら良いと思うが、細かく見ると時系列的には合っていない所もあるので、その辺りは工夫した方が良さそう。
- A : 承知した。
- C : 松山(2006)では、実験は 20~30 ケースやっていて、砕波波高を実験と計算で比較し、砕波波高で $\pm 10\text{cm}$ に入るのが全体の 80~90%程度という感じだった。今回の砕波波高がどのようなものかは検討いただければと思う。
- Q : 砕波点とはどういう定義か。
- A : 実験で砕波が確認できた点としている。崩れる直前。
- Q : となるとやはり再現が合わないのはおかしい。ここが合わないとなると、砕波後の減衰率もあっていないという事。最初の高さが合わないのに最後が同じという事は、減衰率が違う。砕波点での水位くらいは合っていないと次の話ができない。他の手法も含めて検討してほしい。

- A : 承知した。
- C : 分散波のコードにブシネスクモデルノートパリというコードがあり、これで分散波の再現計算を行い、非静圧モデルの STOC IC の計算と比較したことがある。ノートパリでも砕波点の計算をしていたが、非静圧モデルの STOC ICの方が成績は良かったと思う。

・3次元モデルの検討（ハイブリッド手法）

資料-3-2

- C : 2Dと3Dとの境界条件をフルード数に応じて切り替えていることについて、川のような流れのある場ではフルード数は指標になると思うが、海のような色々な方向へ流れる場合では3次元モデルの上から下まで同じ方向に流れるとは限らない。これらの条件を変えることも検討すること。2Dと3Dの境界条件は、まだ研究段階であり、どれが良いか誰にも分からない。OpenFOAMと同じ条件にしたという説明では受け入れられないため、再検討が必要。
- Q : 2Dと3Dの時間のカップリングについて、2Dと3Dでは必要な時間刻みが違うということ、また3Dでは流れが複雑になり、高流速が出た場合、計算中に時間刻みをさらに細かくする必要があることなどの課題があると思う。それらの課題にはどう対応するのか。
- A : 今の時点の手法では、流速が大きく3Dの時間刻みが細かくなった場合、すべてそれに統一した時間刻みとしている。
- C : 3Dにあわせたときに、2Dでは時間刻みが細かすぎる可能性もあるため、工夫の余地はあるのではないか。
- Q : 2D-3Dハイブリッドモデルの結果でマウンド部分の流速にノイズが出るのは非構造格子であるためとのことだが、3Dモデルでこうならないのはなぜか。
- A : 3Dの非構造格子の斜面に2Dの三角形の構造格子を無理やり接続していることから、3Dと2Dとがずれることからノイズが発生したと考えられる。フル3Dでは接続が無いためノイズは発生しない。
- Q : 3Dは非構造格子だが、接続がないからノイズが生じないということか。
- Q : 私もそこが分からなかった。3D非構造格子を2Dとマッピングするときはずれるのはなぜか。格子を三角形にしているだけではないのか。
- A : 自動的にOpenFOAMのメッシュャーが滑らかに非構造格子を設定してしまうため、こちらの思惑と違う形で接続がずれてしまった。調整の余地はあるかもしれない。
- C : 幾何学的にはマッピングできる気がする。Mintgen(2018)の手法にそういった部分を修正するアルゴリズムが入っていないためにおいた不具合かと思う。

(4) 地震を要因とする津波に関する検討

・3.11 インバージョン結果の精査

資料-4

- Q : こういった検討で最も重要なのは、津波インバージョン結果の差がどこで生まれたかという議

論をし、モデルの確からしさを確認することだと思う。この研究の目的を再度教えてほしい。

- A : 津波波形を取り入れた断層モデルを見比べて、津波の再現性の程度を確認している。最終的には、想定モデルを決定するためのパラメータとしてすべり速度を取り入れたいので、観測記録によって津波インバージョン結果にどのような違いが出るかを確認している。
- Q : 観測記録による違いを理解したいことはよく分かる。一方で、すべり速度やすべり量は基底関数に依存する。基底関数であるタイムウィンドウ幅を何秒にするかですべり速度は変わる。また、空間のパッチサイズの平均値としてのすべり量が出てくる。本来不安定なものを見ようとしているのだろうが、すべり速度に関しては津波に適用する近似値を求めようとしているという事で良いか。
- A : そのとおり。本検討では、元々はタイムウィンドウを 10s に設定していたのに対して、発表されている物の多くは 30s であったので、その違いを確かめたところ、平均像に大差はなかった。空間的な小断層サイズについては、佐竹(2013)年に出されたモデルと同じ設定としているが、例えば金戸ほか(2019)はもう少し細かい断層モデルで、根元ほか(2019)は更に細かいモデルで検討している。確かに細かく刻むと結果に違いは出てくるが、この検討では分布の中央がどの辺りに来るのかを確認したかった。空間的・時間的にサイズの違う基底関数を用いた複数の津波インバージョンを分析・整理した結果、平均的なすべり速度としては 0.2~0.3m/s 程度となることが確認できた。色々バリエーションを見るためにここまで検討し、これが結論だと考えている。
- Q : 津波を再現するすべり速度と実際の断層のすべり速度とは異なっているということを意識して分けて解釈すると良い。津波インバージョンにより求まるすべり速度は、津波と言うフィルターを介して求まるすべり速度である。実際のすべり速度はもっと早いものだが、津波やデータのフィルターを介したすべり速度はこれくらい遅いものになる。津波の計算で使用するのはこれくらい遅いもので十分だ、ということであれば納得できる。もう少し言うと、基底関数を設定する時にモデルのフィルターがかかるが、さらに津波観測データのフィルターもかかる。いくらインパルスを入れても、これが鈍って津波観測データになってくる。これは地震動でも同じで、地震波形を使っても実際のすべり速度は求まらない。モデルで規定する基底関数のスムージングの効果とデータ（レスポンス）が有するフィルターを通したものを観測している。津波と言うのは長周期のフィルターがかかっていると理解できる。そうするとそこから求めたすべり速度も長周期のフィルターがかかったものになる。説明する時には、津波を説明するためのすべり速度であり、実際のすべり速度と考えるのは違うと認識する必要がある。
- A : 承知した。あくまで津波を表現するためのすべり速度を求めるところを目標としている。
- C : データを集める時も、津波を説明するための様々な解釈が合って、その特徴を理解するというスタンスだと非常に良く分かりやすい。
- C : 同意見である。地震波には時間的な分解能はあるが空間的な分解能はない。逆に、津波には空間的分解能はあるが時間的なものはない。それをそのまま空間÷時間ですべり速度を考えて同じものだとみるとおかしくなってくるので、そこは気を付けた方が良い。

(5) 地震を要因とする津波の確率論的評価に関する検討 – ロジックツリーの検討 –

・分岐項目ごとの論点と関連知見の整理 (南海トラフ)

資料-5

- Q : 大すべり域、超大すべりのモデルに関して、配置によってローカルな津波高さは大きく異なる。今回杉野モデルを使っているが、津波レシピのモデルとの違いははっきりとさせて欲しい。
- A : 前のフェーズでは解析の労力を減らすために杉野モデルだけを使っていた。実際に確率論の検討をする際には、分岐を設けてモデルの違い含めて検討する必要があると考えている。
- Q : 了解した。
- Q : Murotani et al.(2013)では、破壊領域を津波インバージョン結果の小断層のうち 0m 以上のすべり量が推定された領域と定義されている。津波インバージョンに強い非負の条件を入れて誤差があると、余程のことがなければ 0m 以上のすべり量が求まってしまう。つまり、大すべり域等の面積の割合は設定した断層面積に依存する値だと考えられる。破壊領域をどの様に定義するかはセンシティブな問題。Murotani et al.(2013)の様な定義の仕方はあるのかもしれないが、Murotani et al.(2013)の定義したやり方だと、破壊領域は過大評価になることが想定されるため、ストレスドロップは小さく見積もられてしまう。そのため、引用文献に戻って検討すると良い。
- A : 破壊領域の面積が想定しているモデルに対して過大になっているかもしれないという事か。
- Q : Murotani et al.(2013)の式は、そもそも 0m 以上のすべりがあるところを全て破壊領域と定義している。だが、横軸にすべり量、縦軸に確率分布を考えてみると、非負の条件を考慮することは 0m すべりの小断層でも正の値が求まりやすい式になっている。例えば極端なことを言うと、地球全体で断層面を配置すると、理論上すべり量 0 ではない領域が非常に大きくなってしまった問題ははらんだ定義の仕方となっている。そういった定義の仕方ですべてのストレスドロップを信じていいのかわからない。過小評価となるような定義にしたがって議論して大丈夫だと言われると違和感がある。
- C : 津波想定では、津波インバージョンの結果から求めた面積から算出されるストレスドロップに対して、もっと広めに面積を設定する。想定する時はその領域がすべり量 0 になるかどうか分からなくて最大の範囲をとる。そういった想定モデルの面積と既往地震の面積とは違うので、それに対して同じストレスドロップの式を使う方が危険だと思う。
- A : 想定モデルの面積の方が広ければ、同じ応力降下量を想定しても大きなすべり量を考えることになるが、そういう趣旨のご指摘か。
- C : そういう意味で安全サイドであると、明確に説明する必要がある。

(6) 地震を要因とする津波の確率論的評価に関する検討 – 再現性指標に関する検討 –

・既往津波再現計算 (日本海溝・千島海溝)

資料-6-1

- Q : p.18、50m 遡上モデルについて、津波高が 50cm 以下の青のコンターとなっている地域は地盤高もそれくらい低いということか。
- A : そのとおり。沼になっている。

- Q : 本資料のタイトルは、「確率論的評価に関する検討」である。つまり、確率論的津波ハザード評価とセットで、既往津波の再現性から考えるとこの程度の $K \cdot \kappa$ であるということを示すのが目的と思う。また、先ほどの資料-5 のロジックツリーで、Mw9 クラスの地震に関しては一様すべりモデルは考えないという説明だった。津波ハザード解析では、一様すべりモデルではなく、大すべり域や超大すべり域を設定した不均一すべりモデルを検討しようとしている。そのため、再現性の検討を一様すべりモデルだけで検討するのでは不足しており、ハザード解析で用いる大すべり域等を設定した不均一すべりモデルでも追加して検討する必要があるのではないか。
- A : 一昨年までの検討で 3.11 津波に関して再現計算を行い K 、 κ を整理済であるが、その検討では不均一すべりモデルを考慮している。2003 年十勝沖地震についても不均一すべりモデルがいくつかあり検討はしたが、今回分析したモデルの成績が一番良かった。前回の報告では、2003 年十勝沖地震に関して不均一すべりモデルも含めた K 、 κ を報告している。
- Q : 前回議論したのかもしれないが、再現性というのは、どこを対象としているのか。海岸線近くのデータを再現したいのか、あるいは浸水域まで含めて再現したいのか。2003 年十勝沖地震津波では、低平地が極端に浸水していないため、浸水という話になると 2003 年十勝沖地震のモデルの評価では説明できないのではないか。
- A : 基本的には浸水まで含めた再現性を考えている。大きな浸水域を持つ津波については 3.11 で検討しており、そこで検討していない地震ということで今回 2003 年十勝沖地震を検討した。おっしゃるとおり、2003 年十勝沖地震では大きく浸水していない。
- Q : 2003 年十勝沖地震では漁港が被害を受けていたと思う。それらを再現しようと思うと 50m メッシュでは大きすぎるが、確率論の検討の際に計算時間を少なくするために 50m メッシュとしていると理解すればよいかう。
- A : 漁港などはもう少しメッシュを細かくした方がいいと思ったが、意外と 50m でも再現性が良かった。
- C : それは、事例として挙げている十勝や釧路の漁港は規模が大きいためである。100m 程度の規模の漁港はたくさんあるため、それらを再現できるのかということ。
- Q : 痕跡データの重複処理をしないと κ が小さくなるという結果だが、そもそも本当にこの検討で用いたモデルがベストなのかという問題がある。他のモデルでも重複処理をしない場合、ベストモデルが変わることがあり得るか。
- A : 他のモデルでは、特に κ が大きかったため、ベストモデルが変わることはないと考えている。
- C : $K \cdot \kappa$ の比較表を見ると、解像度の影響はあまり出ていないように思うが、50m 鉛直壁モ

デルと 150m 鉛直壁モデルでは重複処理した場合の痕跡数 n がそれぞれ 144 と 129 とそこまで大きく変わっていないことを考えると、痕跡データの地点をメッシュサイズ 50m では十分に再現できていないということである。より細かいメッシュで検討しないと、メッシュの解像度の影響が出ないとは言えないのではないか。一般防災では 50m メッシュは使われていない。今回の結果は確率論で対象としている計算条件という前提で確認した場合この程度というものであるため、この結果だけを見て解像度は関係ないという説明はできないと考える。

・既往津波再現計算（日本海東縁部）資料-6-2
(質疑なし)

(7) 地震以外を要因とする津波の確率論的評価手法に関する検討

・地すべり確率の算定方法のまとめ資料-7

- C : 地震時に間隙水圧が上昇して有効応力が下がるという話であったが、地震とセットにした場合には、地震動が大きい領域では間隙水圧が上がり、海の中でも液状化が生じることがかと思う。地震動の強さと合わせて、どの程度の領域が液状化するかを判定するという考え方か。
- A : そのとおり。

(8) その他

- 津波評価技術 2016 の英訳作業がほぼ終わったことを報告。今後、各委員にも確認いただき、コメントをいただきたい旨連絡した。土木学会のサイト等から委員メンバーが原稿をダウンロードできるようにし、1～2ヶ月程度の時間で確認を行う。今年度中の Web 公開が目標。
- 土木学会の海岸工学委員会の「津波作用に関する研究レビューおよび活用研究小委員会」から、実験データの公開・開示を依頼されているため、対応する旨周知した。
- 次回は 12/16PM、大手町ビル 7 階 733 会議室で開催予定。

以上