

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）

日 時：2019 年 6 月 28 日（金）13：30～17：30

場 所：弘済会館 4 階「蘭」

出席者：高橋委員長、後藤委員、有光委員、安中委員、斉藤委員、富田委員、山中委員、佐竹委員、室田氏（奥寺常時参加者代理）、谷委員、米山委員、天野委員、平田委員、蛭沢委員、嶋原委員、八木委員、菅原委員、高橋常時参加者、川真田常時参加者、森野常時参加者、奥村常時参加者

松山幹事長、森幹事、木場幹事、佐藤幹事、藤井幹事、藤田幹事、山木幹事、芝幹事

加藤オブザーバー、木村オブザーバー、中田オブザーバー、土屋オブザーバー、保坂オブザーバー、

松田オブザーバー、甲斐田オブザーバー、志方オブザーバー、大津オブザーバー、田中オブザーバー

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(2018 年度第 3 回)議事録案 資料-1

(2) 水理模型実験

- ・砂移動実験 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 資料-3

(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（コメント対応） 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（伊豆・小笠原海溝） 資料-5

(6) 地震以外を要因とする津波に関する検討－地すべり実験の再現性向上の検討－

- ・海底地すべり（運動学的手法[PKLS モデル]） 資料-6-1

- ・陸上地すべり（二層流分散波モデル） 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

- ・津波漂流物の衝突に関する施設評価 WG の設置について 資料-8-1

- ・津波評価技術(2016)の英訳の状況について 資料-8-2

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(2018 度第 3 回)議事録案 資料-1

○修正等あれば、電中研松山まで要連絡。

(2) 水理模型実験

・砂移動実験 資料-2

Q : 地形の侵食深は、上流側では大きいですが、下流側で平衡濃度に達しているとなると地形勾配は平坦になってくるはず。地形が平坦になっている部分はあるか。

A : 平坦という感じではないが、下流側はかなりゆるやかな勾配となっている。

C : 今回の実験では平衡濃度を計測するのが目的。砂の巻上げと沈降が釣り合うと侵食深は一定となる。できるだけそのような場所で計測してほしい。

(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 資料-3

Q : 砕波する前までの分裂現象について、実験回ごとの再現性はどうか。

A : 実験は 2 回ずつ行っており、それらはほぼ重なっていて、砕波の再現性は高い。

Q : 砕波モデルがいろいろある中で今回は松山モデルを用いている。他のモデルについても、将来的には検討するのか。

A : 今のところは考えていないが、前回ご提案頂いたモデル (Kennedy et al.(2000)) については検討することを考えている。

C : 提案したモデルにこだわっている訳ではない。色々なモデルで検討した中で、これがベストであるということとを説明した方がよいと思う。

A : 承知した。他のモデルでも検討する。

Q : 松山モデルは崩れ波の砕波に適用できるものだと思うが、今回の実験ではプランジング (巻波) などの現象は起こらなかったか。

A : 実験で得られた波形は比較的短周期のものであった。

Q : 松山モデルで、巻波を考慮できるのか。

A : 砕波するまでは再現可能と考える。

C : 再現解析においては、分散項だけでなく、移流項の計算をどのように行うかについても整理する必要がある。今回は慣性項ハイブリッド差分法で解いているが、一次風上差分法で解いた場合との結果の比較もした方がよい。実験では分裂しても、計算では数値粘性が入って分裂しない場合もある。ケースバイケースであるため、移流項についても検討してほしい。

- A : 承知した。
- C : 過去の検討では、移流項を一次風上差分で解くとは上手くいかなかったという経験がある。二次の風上差分にしないと波が尖らないと思う。そういう意味で、先ほどの嶋原先生のコメントは重要である。
- A : 承知した。
- Q : 計算格子間隔が 2.5cm で十分であるかといった検討は、今後行うのか。
- A : 細かくしたメッシュでの検討は実施したが、細かい分裂波の周期がもっと短くなり、再現性が低下した。
- C : 分散誤差が入っている可能性がある。また、空間格子間隔を細かくした場合時間間隔も細かくしないと CFL 条件を満たさないということかもしれない。いずれにしても、空間格子間隔を細かくした結果再現性が悪くなるというのには、何らかの要因があるではないか。
- A : 承知した。要因を分析する。

(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（コメント対応）

資料-4

- Q : AIC を使うときは共分散行列を考慮しないと正しく最適モデルを求められない。検討しているか。
- A : 今後検討する。
- C : 情報量の問題を扱うときは検討した方がよい。また、共分散をしっかり考慮するのは難しい問題であり、AIC により求めたモデルを最適モデルと思わないのが正しいと考えている。
- C : 震源時間関数について、海溝側と深い側とでは剛性率が違う。つまり、地震動と津波とでは震源時間関数で見えるものが違ってくるはずである。一般に震源時間関数は μ を一律にして検討されるが、実際には、 μ の小さい海溝付近の震源時間関数は小さく、 μ の大きい深い側の震源時間関数は大きいはず。それを考慮すると、地震動と津波の震源時間関数はあまり変わらないかもしれない。ポテンシールレート（震源時間関数を剛性率で割ったもの）で地震動と津波とを比較してはどうか。地震動と津波の震源時間関数は矛盾していると言われるが、そのように分析すると矛盾していないかもしれない。
- A : 整理方法を検討する。
- Q : 強震動と津波のモデル上の違いは $3 \cdot 10^1$ 以前より言われていたが、現象は同じであるので、強震動、津波の両方を説明できるモデルを作ろうというアプローチもある。この研究は、そのようなアプローチをとるのか。また、今後はどうか。アプローチの仕方をどう考えているか確認したい。
- A : 最終的には津波のモデルのライズタイムをどう設定するかが課題であるため、津波を再現するモデルを中心として検討している。金戸ほか(2019)や根本ほか(2019)のモデルは、津波観測データと地震動のデータ（陸域 GPS 1 秒間隔の地殻変動データ）を用いたモデルであり、今回金戸ほか(2019)と津波のモデルとの違いを分析したその結果、海溝軸付近の断層挙動についての違いは小さく、津波の再現モデルのライズタイムを使うことに問題はないと考えている。地震動のデータを使うと求まるモデルが変わってくるが、それが津波に影響しないということが分かれば、特段問題はないと考えている。そのため、津波のモデルの検討において地震動のデータを含める必要性は現状ないと考えている。

- C : 承知した。原子力の分野としては、強震動と津波の両方を説明できるモデルを作り説明性を高めることが重要と感じているので質問した。
- C : 陸域の GPS の 1 秒間隔の地殻変動波形は強震動波形ではないので誤解のないようにしてほしい。陸域の GPS 波形を用いた再現モデルは地震発生後 80 秒からすべりが大きくなるが、これは津波波形のみを用いた再現モデルでは出てこない。津波のモデルはもう少しゆっくりすべりつづける。しかしながら、津波に影響の大きい海溝軸付近の大きなすべりはどのモデルでも共通であり、陸域の GPS 波形の感度がないという分析結果については、そのとおりだと考えている。
- Q : 津波インバージョンに用いている沖合 GPS の津波波形について、津波到達から何分間の記録を使っているか。それは岸からの反射波の影響のない時間か。
- A : 地震発生から 50 分間の波形を使用している。そのため、反射波の影響も入っているが、沖合であり影響は大きくないと考えている。
- Q : 3. 1 1 で陸域に大きく遡上している。グリーン関数を海岸線で全反射する条件で作成しているが、津波インバージョン結果への影響はないのか。
- A : 前回小委の際、線形インバージョン結果の再現モデルを用いて、遡上モデルでの非線形の前ワード解析を実施した結果を示している。GPS 地点の津波波形の比較から、非線形の前ワード解析結果は、観測波形のピークを再現できていることを確認している。後続波も、よく見れば変わる程度であった。沿岸近くでは全反射の影響があるかもしれないが、沖合の GPS 地点ではほとんど影響がないことを確認している。
- A : 私が行う津波インバージョンでも同じ検討をしている。津波インバージョンから求まる再現モデルの非線形計算結果と観測波形とが、使用した時間の範囲で一致することを確認している。
- Q : 陸域の GPS 地殻変動波形について、津波影響の大きい鉛直変位で比較しているとの説明であったが、陸域では鉛直変位は小さくなっているため、水平変位を比較する方が良いのではないか。また、陸域の GPS 地点の鉛直変位の観測値と計算値の比較の図は、再現できているという根拠として示しているのか。
- A : そうではない。海溝軸付近で 60~70m のすべりがあっても、陸域 GPS 地点の鉛直地殻変動への寄与は 8~9cm であり、鉛直地殻変動 60~70cm に対して感度はないと考えている。また、陸域の GPS 地点の水平地殻変動についても同じように分析はしており、同様の傾向であることを確認している。海溝軸付近のすべりによる陸域 GPS 地点の水平地殻変動への寄与は 50cm 程度であり、全水平地殻変動約 3m に対して感度はないと考えている。

(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（伊豆・小笠原海溝）

資料-5

- C : 領域区分として沈み込むプレートの構造は重要であり、南海トラフでも同様の整理がなされている。その考え方において青ヶ島構造線等による区分は妥当と考える。
- Q : ロジックツリーのうち p28 の「海溝軸付近までの連動頻度」の項目は、津波地震との連動を想定して

いると思うが、P29 では海溝軸から深さ 60km までの面積を算出している。両頁の関係は。

A : p29 は、海溝軸付近まで目一杯含まれた場合この程度の Mw や平均すべり量になるということを目安として示している。海溝軸付近を含まない場合は、その分を差し引くことになる。

Q : 海溝軸まで連動しない場合の上端深さや面積はどう考えるのか。

A : 津波地震が発生していない所であるため、三陸沖や房総沖のデータから類推せざるを得ない。

C : 南海トラフなどと違って、伊豆小笠原海溝は海溝軸付近の傾斜角が急なので、津波地震の領域の面積は大きくないとすれば、簡略的に上端深さ 0 km として検討することも可能かもしれない。

A : 上端深さを 15km や 20km などとした場合に、面積等の数値がどうなるか検討し、報告する。

Q : 認識論的不確実さを扱う場合は、SSHAC など何らかの作法に従うべきと思う。原子力学会の津波 PRA の基準ではレベル 1 ~ 3 に分けられている。1605 年慶長地震を対象にしないとしていることについて、今回レベル 1 の作法の中でロジックツリーを作り専門家から意見を聞いたうえでこういった整理をするという前提であれば理解できるが、レベル 3 の作法に照らすと、不確実さの分布を作るという思考が欠けている。今回の目標は、原子力土木委員会が 2009 年に作成したロジックツリーをアップデートすることなのか、それとも SSHAC の作法に基づいて整理するという前提なのか。

A : 最終的な落としどころについては議論が必要である。今フェーズでは、SSHAC レベルのことはするのは非現実的であると思う。研究の中で意思決定方法をレビューした上で、今の作業を進めている。今の作業は前回のアンケートが念頭にあり、アンケートを再度やる場合、設問としてこういうものが必要、あるいは不要といったことを仕分けしロジックツリーをアップデートするというのが当面の課題である。

C : 2009 年のアンケートであれば、津波 SSHAC でいうと、レベル 1 か 2 に相当する。ロジックツリーの作り方としてそれに則った形をとるのであれば、リーダーが専門家から意見を聞くという前提があり、発生可能性が低いものでも棄却せず、情報として載せておくというのが重要になる。

A : 承知した。1605 年慶長地震について、起こりうるという人がいるという事実を、どのように扱うのかということも今後の検討課題である。色々な意見がある中で、現実的にどこかに境界が引かれているということも確かであるため、ご指摘の点が疎かにならないよう十分配慮する。

C : 2009 年のアンケートでは、既往最大は Mw8.5 程度であり Mw9 というのは論理上出てこなかったというのが、認識論的不確実さのアプローチの大きな教訓である。3.11 の重要な教訓を反映するためにも、このような背景を踏まえたうえで、不確実さをどう扱うか、専門家から意見を聞いてどう分布をとるかという議論をする必要がある。

A : 承知した。

Q : 海溝付近まで断層がすべったときは、固定端が無くなる。表面がずれて自由表面となった瞬間に、固定端は仮想的に 2 倍上となり、すべり量も 2 倍近くになるというのが一般的な話である。その話と想定しているすべり量との関係を教えてほしい。

A : P6 に断層パラメータを示しているが、平均応力降下量を最大 3 MPa と考え、それと断層面積を用いて Eshelby(1957)の方法で地震モーメントを求めている。伊豆小笠原南部では平均すべり量は 7.33m となり、津波地震領域を含む場合は、海溝軸付近で大きくすべる領域が出てきて、大きくすべる領域は平均すべり量の 2 倍、更に中心部では平均すべり量の 4 倍という設定としている。

Q : 単純な横ずれ断層を考えた場合、自由表面が破壊された瞬間に固定端は自由端となるため、

Eshelby(1957)の式が成立しなくなるのではないか。

A : 平均応力降下量の 3MPa は、津波インバージョンでできたモデルに対して Eshelby(1957)が成り立つと仮定して、平均 1.57MPa と求めたものである。従って平均応力降下量を 3MPa とすると、海溝軸付近で大きくすべるモデルと辻褃が合うようにはなっている。

Q : 3MPa という数値は、プレート境界で発生する地震の平均応力降下量として Kanamori and Anderson(1975)等の論文で言われているものではないのか。

A : そうではない。津波の地殻変動から求めた Mw9 クラスを含む地震の断層モデルの統計は、Murotani et al.(2013)でまとめている。その関係を用いると、平均で 1.57MPa、1 σ のばらつきを見ると 3MPa 程度となる。Murotani et al.(2013)とは別に、海溝軸付近を含まない地震も集めると、剛性率の兼ね合いもあり 3MPa 程度になるという別の統計もあると思う。

Q : プレート内で発生する地震やアウトラーズ地震では、10MPa というのがスタンダードでは。

A : 海溝軸付近を含まない地震というのは、プレート間巨大地震という意味で述べた。

C : Murotani et al.(2013)には、平均応力降下量は記載されていない。Murotani et al.(2013)の地震モーメントと断層の面積に基づき、Eshelby(1957)の式を使って計算すると、平均応力降下量が 1.57MPa になるということ。

Q : ロジックツリーの中に G-R モデルと固有地震モデルとの分岐があるが、これは再来期間の分岐のパラメータを変えるということか。

A : 固有地震のモデルをどこまで限定するかについて、この資料では明確にしていなため分りにくいですが、固有地震のモデルではそれぞれの領域面積から算出される Mw を中心として、Mw を ± 0.2 まで考慮するというのを基本としている。G-R モデルの場合は、さらに大きいものから小さいものまで考慮できる。

Q : STL の北側では島弧地殻の厚さが深く、南では浅いという話があったが、そうすると、プレート間地震が起きるカップリング領域の深さも違ってくるのではないかと思う。ロジックツリーの発生位置に関する分岐において南北のカップリング領域の深さ方向の幅についても反映させる必要があるのではないか。

A : 南北のカップリング領域の違いを示す証拠はあまりないが、追加で検討する。

C : STL の南北でカップリング領域の幅を変える必要は必ずしもないかもしれないが、少なくともそれを疑わせるようなエビデンスが一つあるため、採用しない場合にはその考察が必要と考える。

A : 承知した。ちなみに、以前試作したときは一律で深さ 60km でモデル化していたが、特に 60km に意味はなく、他海域からの類推となっている。

C : 深さ 60km をそのまま使う場合は、そのロジックをセットで考えた方が良い。

Q : ロジックツリーの静的応力降下量のブロックについて、0.82~3Mpa の一様分布とあるが、これはどういう意味か。

A : 静的応力降下量の出現頻度を一様分布と仮定しているということ。実際には一様分布でなく正規分布かもしれないが、既往検討では固有地震の Mw 分布について基準となる既往最大を中心として、 ± 0.1 、 ± 0.2 の 5 つの Mw を決めて一様分布と仮定していたため、それに倣っている。

Q : 静的応力降下量の一つのブロックの中で静的応力降下量のばらつきを偶然的不確実さとして扱うということか。

- A : そのとおり。自然のゆらぎを意図している。
- C : 参考情報であるが、地震本部の検討では大すべり域の面積を全体面積の 30%としている。地震本部では、大すべり域の面積が 20%では過小評価気味であり、背景領域に大きなモーメントが分配される傾向となると整理されている。
- Q : ロジックツリーのうち、Mw8 以上の地震発生の可能性有り/無しに分岐は、どう分岐か。固有地震モデルから出るものが「有り」で、特定できない震源の地震が「無し」というイメージか。
- A : 伊豆小笠原海溝の既往最大は Mw7.4 程度であるため、Mw8 クラスの地震が将来起きるか起きないかの分岐を設定している。
- Q : それが認識論的不確実さということか。例えば地震動では、特定できないとしたものに対して、規模、発生位置、頻度が不明であるため G-R モデルで表現するなどしているが、今回の場合「有り」「無し」の不確実さ要因が不明確である。
- A : この分岐は便宜的に決めているところもある。Mw8 以下のプレート間地震しか発生しないのであれば、確率論の評価結果に影響しないと考えている。
- C : 確率論的に影響しないというのが思い込みの可能性もある。手戻りとなる可能性もあるため、認識論的不確実さの取り扱い方の基本を明確にすべきである。
- A : 承知した。

(6) 地震以外を要因とする津波に関する検討 – 地すべり実験の再現性向上の検討 –

・海底地すべり（運動学的手法[PKLS モデル]） 資料-6-1

・陸上地すべり（二層流分散波モデル） 資料-6-2

- Q : 海底地すべりの再現計算について、地すべり体の移動の仮定②の速度は、等加速度運動の速度の分布を途中で切ったということか。
- A : 仮定②は地すべり体の平均速度と移動距離を拘束条件として終端速度の式を使って作っている。ただほとんど等価速度運動と変わらないようになっている。
- Q : 陸上地すべりの再現計算について、時間を 0.数秒ずらして観測波形と比較している理由は。
- A : 実験ではゲートを引き下げて地すべりを発生させているが、それにかかる時間が 0.2s 程度。一方、二層流の解析では瞬時に現象が始まるため、その差が出ていると考えて時間をずらしている。
- Q : 三次元解析はどうか。
- A : 三次元解析では、ゲートの引き下げ自体を再現していることから、比較の際に時間をずらしていない。

(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

- Q : 限界安全率を 1 としない例の根拠について、Hynes-Griffin and Franklin(1984)の図を示しているが、その見方がよくわからない。どう理解すればよいか。

- A : 図中には地すべり体の速度が示されており、直線の傾き Ng がすべりの始まる臨界加速度である。この線上では、加速度が重力加速度 g の N 倍であることを意味している。加速度が Ng をこえると地すべり体が動き出し、徐々に遅くなっても移動が止まらず、最終的に速度波形と直線が重なったところで止まる。
- C : 安全率 1.0 を下回ったら必ず地すべりが発生するとは思わないが、限界安全率の幅を 0.15 まで広げるかどうかについてはもう少し検討する必要がある。

(8) その他

・津波漂流物の衝突に関する施設評価 WG の設置について 資料-8-1

- 津波漂流物の衝突に関する施設評価について、津波評価小委員会の下部に WG を設置し検討する計画を説明し、承認された。

・津波評価技術(2016)の英訳の状況について 資料-8-2

- 資料について、紹介を行った。
- 今後、委員、関係者に校正原稿を電子配布し、確認を依頼することとなった。

以上