

第 12 回地震・津波技術評価検討会における外部専門家及び専門技術者の評価意見及びその回答

No.	安全研究プロジェクト	外部専門家・専門技術者	評価項目	評価意見	回答
1	津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究	糸井 達哉 氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。②解析実施手法、実験方法が適切か。③解析結果	報告書の P5 について、S の標準偏差と書かれているが、S の標準偏差は M0 に依存し、logS の標準偏差は M0 に依存しないと仮定することが一般的ではないでしょうか。そのあたりが不明瞭な記載になっていますので、誤解のない記載に報告書を修正することが必要かと思います。	拝承いたします。ご指摘を踏まえ、報告書の該当箇所の記載を以下のように修正します。 「原論文中では、log(S)の標準偏差 $\sigma_{\log(S)}$ が M0 に依存しないと仮定して $\sigma_{\log(S)}$ は 1.54 と示されている。ここでは S の関数とし、log(M0)の標準偏差 $\sigma_{\log(M0)}$ が S に依存しないと仮定することで $\sigma_{\log(M0)}$ は 1.94 となる。」
2			の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	報告書の P18 について、ロジックツリー(図 2.1.7a,b)で、対数正規分布とロジックツリーとして書かれていますが、対数標準偏差の値をロジックツリーの分岐として記載するのが適切なロジックツリーの書き方ではないでしょうか。	ご指摘のように、対数標準偏差の値をロジックツリーの分岐とすることも考えられますが、本研究では、各スケール則が固有の値を持つと考え、それぞれ 1 つ設定することとしました。そのため、分岐のないロジックツリーとして表現することにしました。
3				報告書の P60 について、技術的にそれほど難しくなく最大加速度に対する確率論的地震ハザード評価をなぜ実施せず、式 2.4.10 の式変換を用いた評価としているかが理解できません。研究計画として委託先等の能力	ご指摘ありがとうございます。本研究では、海底地すべり起因の確率論的津波ハザード評価手法の整備を目的としています。その中で、同手法の可用性を確認するためにモデル海域として駿河湾を対

に起因する手法の選択でしょうか。具体的には、海底の堆積物による地盤の増幅を考えた後に、その波が正弦波に近似できるとして、式 2.4.10 を適用することは、近似的には成り立つかもしれませんが、工学的基盤の最大速度に式 2.4.10 を適用することは適切ではないと思われます。また、加えて、海底の堆積物による地盤増幅率が考えられていないことの妥当性についても懸念があります。

津波ハザード評価として、不確かさの幅を適切に把握しようという方向性は適切と考えます。一方、確率論的地震動ハザード評価では、諸外国では専門家意見をはじめとした SSHAC 手法により、技術的な妥当な範囲の中心や分布、範囲を評価することが標準的になっています。これは、評価者によって不確かさの評価幅を異なることを避けるためです。確率論的津波ハザード評価も不確かさの特徴は、地震動ハザードと同じであることから、同様な枠組みを志向することが、国際的な整合性等

象としましたが、実際の地盤物性値の情報を入手することが困難な状況であることを踏まえ、地震加速度も含めて、評価に必要なデータを仮定することでモデル海域での試解析としました。ご指摘のように最大加速度を指標とした確率論的地震ハザード解析を実施することは、技術的に困難ではありませんが、モデル海域での試解析のための仮定のデータを得るために人的・費用的リソースを投入することの効果は小さいと判断しました。その代わりに、公的機関の公表データ（最大速度のハザード曲線）の利用を考えました。

しかし、ご指摘を踏まえまして、手法の精緻化のためには海底の堆積物を含めた地盤増幅率を考慮する必要があると考え、地盤物性値の取得や地盤モデルの設定と合わせて、今後の課題とさせていただきます。報告書には、その旨を記載いたします。

確率論的地震ハザード評価における SSHAC 手法の複数専門家意見を取り入れる枠組みを確率論的津波ハザード評価にも志向することが適切であるとのことご意見、拝承いたします。

しかしながら、本研究のスコープは、従来（土木学会の津波評価技術など）の確率論的津波ハザード評価では取り扱っていなかった不確かさの項目を示し、その反映方法を提案するとともに、それらの項目がハザード解析結果に及ぼす影響の程度を感

の観点から適切ではないかと考えられます。一方、本プロジェクトでは、不確かさを適切にとらえようという試みも含まれていますが、従前の **best estimate** のハザード評価を行う枠組みを暗黙の前提としているように感じます。実際、求められた平均ハザード曲線が、適切であることを示すことができていません。以上より、「不確かさ」の取り扱いの改善という研究背景を踏まえると、必ずしも十分ではない部分もあり、今後の改善が必要であると考えられます。

委託研究を規制庁の研究の成果とすることについて、規制庁側がそれを受けてどのような技術的解釈を加えてまとめたのかについて、明確化が必要かと考えられます。

度解析的に把握しようとするものです。ご指摘のありました **best estimate** を志向したというよりも、一専門家としての意見を具体化したものになります。

まずは、本研究の知見を論文等により公表し、これらの不確かさの項目が広く認知され、そして将来的には SSHAC 手法による確率論的津波ハザード評価において、一専門家の意見として本研究で取り上げた不確かさ項目が認識論的あるいは偶然的な不確かさの項目として組み込まれることを期待します。

本研究プロジェクトのうち、「2.4 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備」の一部 (2.4.2 項) を委託研究による実施体制で進めてきました。

規制庁の委託研究では、規制庁が研究課題、目的、大まかな仕様を提示して、委託先を公募によって決定し、研究を進めてきました。その際、規制庁職員も目的を共有し、定期的な打合せを行い、研究に関わることで、成果を共有しています。

ただし、本報告書の中では、委託先が実施主体であることに配慮して、研究結果を記載しましたが、ご指摘を踏まえて、2.4.2 項のまとめとして、新たに「(3)海底斜面の地震時安定性評価における修正フェレニウス法の適用性について」を立て、委託先による実験及び解析結果を踏まえた規制庁の考えを

				記載するよう修正いたします。
6	岩田 知孝 氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。	報告書からは本内容に関して読み取ることが困難であるが、そうされているのであろう。	<p>評価項目の①「国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。」について、読み取り難いとのこと、大変失礼いたしました。各研究課題の実施にあたって踏まえた既往研究を以下のとおり整理いたします。</p> <p>「2.1 津波発生・伝播モデルの不確かさ評価手法の整備」では、確率論的津波ハザード評価手法に関する既往研究の主なものとして、杉野ら(2015)^{2.1.2}、土木学会(2016)^{2.1.1}、地震本部(2020)^{2.1.3}を取り上げました。これらの既往研究では考慮されていなかった不確かさ項目を指摘し、さらに、これらの不確かさ項目に関わる既往研究 (Murotani et al.2013^{2.1.5}, 田島ら 2013^{2.1.6}, 藤原ら 2015^{2.1.7}, Gutenberg and Richter1944^{2.1.10}, Kagan2002^{2.1.11} など) について調査・分析し、確率論的津波ハザード評価手法への導入方法を提案しました。</p> <p>「2.2 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築」では、津波評価に関する最近の動向として地震本部の津波レシピ(2017)^{2.2.1} とその中で導入された Tanioka and Satake(1996)^{2.2.2} の方法 (地殻の水平変位の寄与分を考慮した津波初期水位の設定方法) に着目し、この方法を採用したときの特性化波源モ</p>

7			<p>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p>	<p>適切性についての自己評価がないため正確にはわからないが、そうであろう。</p>	<p>デルの設定方法はどうか、という点に研究課題を見出して研究に取り組みました。</p> <p>「2.3 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証」では、既往研究として著者らの論文(杉野ら 2014^{2.3.1})を取り上げて、この論文中で提案したプレート間地震津波の特性化波源モデルのうち、Mw8.8以下の特性化波源モデルを対象に実津波の痕跡高の再現性を定量的に評価しました。</p> <p>「2.4 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備」では、既往研究として、Grilliら(2009)^{2.4.3}や鳴原・Horrillo(2014)^{2.4.4}を踏まえ、既往研究では考慮されていなかった不確かさ項目の導入及び、陸域斜面で実績のある斜面安定性評価手法の海底環境下での適用性把握を研究課題として設定し、研究に取り組みました。</p> <p>上述のとおり、各研究課題に関連する既往研究を踏まえて研究を遂行するとともに、報告書の各節において、その旨を記載しております。</p> <p>評価項目の②「解析実施手法、実験方法が適切か。」について、適切性に関する自己評価がないため正確には分からないとのこと、大変失礼いたしました。各研究課題について、当該評価項目に関する自</p>
---	--	--	--------------------------	--	---

己評価を以下のとおり整理いたします。

「2.1 津波発生・伝播モデルの不確かさ評価手法の整備」では、一例ですが、地震規模と断層面積に関するスケーリング則の確率モデルを設定し確率論的津波ハザード評価手法に導入しました。上記の確率モデルの設定においては、原論文の結果をトレースした上で、元の地震データを精査し、必要に応じて一部訂正した。確率論的津波ハザード解析コードでは、上記の確率モデルの導入に必要な乱数生成には、科学技術分野で実績のある MATLAB のライブラリーを使用し、適切な確率分布が生成されていることを確認すること、サンプリング数の多寡や乱数の種の影響を考慮してサンプリング数を決定したことから、解析方法は適切であると考えます。

「2.2 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築」では、プレート間地震による地殻変動の水平変位による津波初期水位の生成を模擬した水理模型実験を実施し、初期水位に関するデータを取得しました。模型作成に際し、水槽と可動式斜面模型の間には低摩擦シート、模型の動作には PC 制御による電動アクチュエーターを採用し、極めて再現性の高い実験装置であることを確認しています。また、実験方法及び結果については、土木学会論文集 B2 (道

口ら 2019^{2.2.4}) に掲載されており、技術的査読を経たものであることから、実験方法は適切であると考えます。また、東北地方太平洋沖地震津波の波源推定に用いたインバージョン解析手法及び津波伝播解析についても既発表論文(杉野ら 2013^{2.2.10}) で用いた手法と同様であることから、適切であると考えます。

「2.3 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証」では、既往津波の再現のための津波伝播解析を実施しており、前述の 2.2 節と同様であり、適切であると考えます。

「2.4 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備」では、海底斜面を模擬した遠心模型実験を実施しました。この実験は、類似の実験を行った経験のある日本大学への委託で実施し、実験結果及び解析結果は、委託先から日本地震工学会論文集に発表し、技術的査読を経たものであることから、実験方法及び解析方法は適切であると考えます。また、本研究で使用した確率論的津波ハザード解析手法の基本モジュールは、既発表論文(杉野ら 2015^{2.1.2}) のものを使用していることから、同解析手法についても適切であると考えます。

8		②解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>ご質問させていただいたように、これまでと異なる津波評価手法での震源モデリングでは、幾何平均、幾何標準偏差が向上したというご説明をうけたが、波形や観測量に戻って何がよくなったかということを示していただかないと、こういった高度なモデルの優越性や結果に意味があるかどうかはわからないと考えるが如何か。もちろんそれらも見ておられての結果の導出とは考えるが、</p>	<p>拝承いたします。本研究で推定した2つの津波波源モデル(TS法モデルと従来法モデル)による解析値と観測値の比較図を追記させていただきます。比較図は、遡上高や浸水高などの津波高さと沖合の津波水位波形といたします。</p> <p>なお、誤解されている可能性があるので、念のため、本研究の目的を補足説明いたします。本研究では、上記2つのモデルの再現性について、優劣を判定することが目的ではありません。むしろ、どちらも同程度の再現性であることを確認した上で、TS法を導入したことにより推定される津波波源モデルのすべり分布がどのように変化するかを確認することが目的です。</p>
9		④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	<p>東北地方太平洋沖地震の津波に関しては海底じすべりの可能性は完全に否定されたのか？</p>	<p>小平ほか(2012)の論文によれば、東北地方太平洋沖地震の後の海底地形の調査により、海溝軸沿いの一部で海底地すべり跡が発見されており、海底地すべりが発生していた可能性は高いと考えます。</p> <p>本研究(項目2.2)では、海底地すべりが発生していた可能性を指摘する報告があるものの海溝軸沿いの全容が判明していないことから、津波初期水位の生成が全てプレート間地震による海底の地形変化によると仮定して検討を進めました。本報告書では、その旨を記載していなかったため、誤解を招くことになりました。上記の内容を報告書に記載させていただきます。</p>

					<p>【参考文献として追加】</p> <p>・小平ほか、2011年東北地方太平洋沖地震：海底地形データから明らかにされた海底変動、地質学雑誌、110、9、530-534、2012.</p>
10	津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究	梅木 芳人氏	<p>①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。②解析実施手法、実験方法が適切か。③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。</p>	<p>2.3 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証</p> <p>今回検討された既往地震再現モデルの(K, κ)を、東北地震津波の(K, κ)と比較するためには、痕跡データの精度等による影響の程度を考察することに加えて、最適な既往地震再現モデルを追求することが重要と考える。そのことなしに、「PTHAの計算津波高の不確かさを地震規模に応じて変化させることの必要性が示唆された。」(p.74)との結論には、少し飛躍があるように思う。</p>	<p>本研究(2.3節)の目的は、著者らの既発表論文(杉野ら2014^{2.3.1})で提案したプレート間地震津波の特性化波源モデルのうち、$M_w 8.8$以下の特性化波源モデルの設定方法について実津波の痕跡高の再現性を定量的に評価することです。そのため、設定方法を固定した上で、許容される範囲で、波源の位置や不均一すべりの配置を変化させて、複数の特性化波源モデルを設定し、できるだけ最適な再現モデルを探求する、という方法を取りました。</p> <p>ご指摘の主旨は、杉野ら(2014)^{2.3.1}の方法に固執するのではなく、新たな設定方法を追求する必要がある、と解釈いたしますが、これは上述した本研究の目的を超えていると考えます。ただし、結論には飛躍があるとのことご指摘を踏まえ、以下のように修正いたします。</p> <p>「今回得られた(K, κ)は、確率論的津波ハザード評価(PTHA)の不確かさの設定パラメータ$\beta = \ln(\kappa)$として利用できるものの、杉野ら(2014)^{2.3.1}</p>

11				<p>海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備において、「海底地すべり起因津波の確率論的ハザード手法が提案できた」という結論になっているが、提案というには、本当にその方法が最適なのかという検証が不十分と考えられるため、実用化のための精度向上だけではなく、手法そのものの再検討も課題として挙げられた方が良いと思う。</p> <p>今後に向けての課題抽出はされているが、「津波ハザードの信頼性向上」の（現時点での）最終目標を想定したうえで、そのための課題、検討の優先順位、というような、理想像でも良いので今後の研究計画も含めた全体像を示していただけるとよいと思う。</p>	<p>の特性化波源モデルを採用する場合には、計算津波高の不確かさを地震規模に応じて変化させることの必要性が示唆された。」（下線付きが追記した箇所です。）</p> <p>拝承いたします。本プロジェクト期間内での検討では、ご指摘のとおり、提案した手法では不十分な点がありますので、確率論的津波ハザード解析手法を構成する各種要素の手法についてさらなる検討が必要であることを追記いたします。</p> <p>プロジェクト期間を終えた現時点において、開始時点の目標は達成したと考えている。ただし、研究を遂行したとこと各研究課題において新たな課題が見つかったので、これらの解決が最終目標と考えます。ただし、費用対効果や人的リソースを考慮して、次期プロジェクトで優先的に解決すべき課題として 2.2 節の課題 (p.76) を選定しました。今後 4 年間での解決を目指します。</p>
12					
13	津波ハザード評価の信頼性向上に	土志田 潔 氏	②解析実施手法、実験方法が適切か。③解析結果の評価手法、実験結果の	7.今後の展開について、②・③の観点からコメントする。2020年10月に開催された前回の検討会にて、松山専門技術者からコメントがあったとおり、波の伝播速度と、試験設備で模擬されている海底地形の変形速度との関係に依存して、波高は大幅に変化し得ると考えられ	ご指摘いただいたように、本研究（項目 2.2）の物理実験によって生じる水位は、波の伝播速度（波速）と斜面模型の移動速度との関係に依存すると考えます。そのため、表 2.2.1 に示した実験条件のとおり、波速を変えるため 2 種の水深を設定し、また、

	<p>関する研究</p>		<p>評価手法が適切か。</p>	<p>る。この点を考慮した試験条件の設定と、解析結果の評価を行う必要があると考えられる。</p> <p>また、図面の説明資料では、Tanioka and Satake 論文の著者名について、誤記(Sateke)が混在している。</p> <p>以上</p>	<p>斜面模型の移動速度も数ケース設定して、実験データを取得しました。</p> <p>図 2.2.12 の縦軸の数値が 1.0 を超えた Case6 の例では、斜面模型の中央位置での水深 15.5cm から波速は 123cm/s、斜面模型の移動平均速度は約 11.1cm/s であり、その比 0.09 となる。このように移動速度が波速に比べて遅いケースでも縦軸の数値が 1.0 を超えるため、やはり波速と移動速度との関係だけでは実験の現象を説明することができません。</p> <p>そこで、地殻（実験では斜面模型）の移動速度に係る運動エネルギーが関係しているのではと考えており、R3 年度から開始する研究 PJ の中でその効果を解明していく予定です。その際、ご指摘を踏まえて、幅広く実験条件を設定し、現象を解明して、津波初期水位の設定方法の改良につなげていきたいと考えております。</p> <p>説明資料中で誤記がありましたこと、失礼いたしました。訂正させていただきます。</p>
14	<p>津波ハザード評価の信頼性向上に関する</p>	<p>松山 昌史 氏</p>	<p>①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。②解析実施手法、実験方法が適切</p>	<p>2.1.1(3)砕波指標に基づく限界波高モデル</p> <p>沿岸の津波高に一定の限界的なものがあるのではないという観点の研究は津波リスクを評価する上で重要であり、この観点の必要性は十分にあると考えられます。しかし、研究の内容には書きに示すように複数の疑問があります。</p>	

研究	か。	<p>【観点①②】</p> <p>ここで引用している合田の限界波高モデルは、通常の波浪や台風時の高波浪を対象としたものである。実験や観測で対象とした波動の周期は、現地換算(実規模)で10秒から20秒である。よって、津波の主たる周期と考えられる周期数分から60分といった長い周期の水面波動を対象としていない。この点にきちんと言及した上で、津波のような長周期波に適用する上で、考え方や課題を記載した上で研究をすすめるべきであるが、そのような記載が本報告書では見られない。是非に追記していただきたい。</p> <p>【観点①】</p> <p>また、津波のような長周期波が沿岸の到達した場合には、遠浅海岸では砕波現象が発生するが、例えば三陸沿岸などの遠浅ではない沿岸では水面の盛り上がり時間が数分かかるため砕波現象は発生しないことがある。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震による津波について、女川原子力発電所の港湾で得られた水位記録によると水位上昇開始から最大水位上昇(約13.8mの津波高)まで数分かかっており、このような長時間では砕波現象は発生しない。このような沿岸地形の特徴と砕波についても触れるである。</p> <p>【観点②】</p> <p>さらに、遠浅海岸では津波の前面波形が発達して、水の壁のような状況で押し寄せている状態では、その水面</p>	<p>拝承いたします。</p> <p>本研究(2.1節)では、地震規模と断層面積のスケーリング則のモデル化上の不確かさを考慮したとき、現実的ではないと考えられる極めて高い津波高を推定することが予想されたので、なんらかの限界値を設定することができないか検討しました。そこで、合田の限界波高モデルの採用を試みました。ご指摘のとおり、このモデルは津波を対象としたものではなく、波浪等を対象とした実験式です。それでも、このモデルが水深波長比をパラメータとしていることから、本研究では試行的に適用範囲を超えて外挿した形での導入となりました。ご指摘を踏まえ、津波の限界波高と砕波を関連づけることに無理があり、さらなる検討が必要であるとの認識に至り、2.1.1(3)に係る検討項目を報告書から削除いたします。</p>
----	----	---	---

15			<p>波形の連続性が失われており、砕波現象が起きていると考えられる。しかし、前面波形の背後には数 km に及ぶ水塊も押し寄せているので、砕波による波高の減衰は期待できないのではないのでしょうか。そのような観点で限界波高という考え方は沿岸の津波高には適用は難しいと考えております。</p> <p>それから、報告書の 17 ページの下から 2 行目で、「砕波現象を適切に取り入れた研究」が「極めて高い津波高を推定する結果」に対して必要と書かれていますが、上記の 3 点の課題などもあるので、「砕波現象を適切に取り入れた研究」がこの観点で必要という記載は不適當ではないのでしょうか。</p>	<p>拝承いたします。</p> <p>津波高の限界と砕波現象を関連付けた表現を修正いたします。</p>
16		<p>①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。</p>	<p>2.2 津波地震による津波の特性化モデルの構築</p> <p>【観点①】</p> <p>本研究では「プレート間地震の津波の特性化モデルの構築」のタイトルが適切と考えます。タイトルにあります「津波地震」の用語は誤解を生む可能性があるため不適當です。「津波地震」は金森先生の論文などにあるよう、「地震のマグニチュードに対して津波のマグニチュードが大きい地震」や 1894 年明治三陸地震津波のように“地震による震度が 2、3 程度と小さいが沿岸で数 m 以上の津波高となる大きな津波となる地震”のことを指します。渡辺偉夫著の日本被害津波総覧第 2 版などを参照してください。津波地震は「海溝軸付近で発生するプレート間地震の一つ」ではありますが、定義とはかけ離</p>	<p>ご指摘いただきありがとうございます。研究開始時点では水平変位の寄与分の効果が出るのは海溝軸沿いのプレート間地震と想定しており、地震本部等でも「海溝寄りのプレート間地震（津波地震等）」との記載があることから対象を分かりやすくするために「津波地震」をタイトルに使用しました。しかし、ご指摘いただいたように、「津波地震」とは“地震のマグニチュードから期待される津波発生地震と異なり、異常に大きな津波を発生させる地震”であり、また、発生メカニズムも地震だけではありません。ご指摘を踏まえ、「プレート間地震津波の特性</p>

17

れた表現です。

2.2.3 津波地震による津波の特性化モデルの構築

同じインバージョン解析手法で、津波の入力条件となる海底地殻変動について、水平変位の効果の考慮の有無の違いによるすべり量分布の違いを比較された内容は、津波波源の評価における研究として非常に興味深く、良い成果を得られたものと考えます。報告書でも言及されていますが、海底勾配と水平効果の大きさの関係が整理されると今後の津波波源設定に有用な知見を与えるものと期待されます。

18

2.3.2 内陸地殻内地震による津波の特性化波源モデルの再現性

53 ページに以下の文書があります。「今回得られた (K, κ) は、PTHA の不確かさの設定パラメータ $\beta = \ln(\kappa)$ として利用できる。」は、この特性化モデルの特徴を踏まえて記載すべきです。この β は既往津波記録について最適と考えられる波源モデルによる津波高における不確かさで、波源モデルは最適であるが数値計算や使用する地形データ、実測データ等に関する不確かさを反映したものです。よって、特性化モデルを複数試した中で最も実測津波記録と調和的な特性化モデルは、最適モデルとはまだ言えないのではないのでしょうか。よって、特性化モデルに関する β を β_t とすれば、最適モデルにおける不確かさ β_s より β_t は少なくとも大きい。

化波源モデルの改良」に修正いたします。

コメントいただき、ありがとうございます。今後、海底勾配と水平変位の寄与分の効果の大きさの関係も整理していきたいと思えます。

本研究 (2.3 節) の目的は、著者らの既発表論文 (杉野ら 2014^{2.3.1}) で提案したプレート間地震津波の特性化波源モデルのうち、 $M_w 8.8$ 以下の特性化波源モデルの設定方法について実津波の痕跡高の再現性を定量的に評価することです。そのため、設定方法を固定した上で、許容される範囲で、波源の位置や不均一すべりの配置を変化させて、複数の特性化波源モデルを設定し、できるだけ最適な再現モデルを探求する、という方法を取りました。

ご指摘にあるように、本報告書の β は、波源モデルや地形モデル、数値計算モデル、実測データなど数多くの不確かさに依存しており、いずれも最適な、あるいは精緻なモデルやデータを用いることに

19		<p>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p>	<p>2.4.1 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の提案とモデル解析での試解析</p> <p>[観点②]</p> <p>「②津波初期水位の算定」において、Watts, et. al.の手法を用いています。この方法で断面2次元的な設定は可能ですが、幅方向の設定はどのようにされているのか記載が必要と考えます。東北地方太平洋沖地震の津波に関しては海底じすべりの可能性は完全に否定されたのか？</p>	<p>言い換えれば βt は、βs の上限値として使えるということではないでしょうか。「利用できる」という点は同意しますが、最適モデルにおける β と同等に扱うことはできないと考えます。</p> <p>なお、βs を探索する試みとすれば、対応する既往津波についてインバージョン解析による波源モデル(断層モデル)を構築して、その最適と考えられる断層モデルを分析するアプローチも有力ではないでしょうか。</p> <p>よって小さくなるものであると考えます。もちろん、地形モデルを津波発生時のものに精緻化する方法や、インバージョン解析を用いてより最適な波源モデルを探索する方法も考えられますが、前述のとおり、本研究の目的に沿って、特性化波源モデルの設定方法を固定し、プロジェクト期間内で実施可能な範囲の検討結果であると考えます。</p> <p>従いまして、ご指摘も踏まえ、当該文章については、以下のように修正いたします。</p> <p>「今回得られた (K, κ) は、確率論的津波ハザード評価 (PTHA) の不確かさの設定パラメータ $\beta = \ln(\kappa)$ として利用できるものの、<u>杉野ら(2014) 2.3.1 の特性化波源モデルを採用する場合には、計算津波高の不確かさを地震規模に応じて変化させることの必要性が示唆された。</u>」(下線付きが追記した箇所です。)</p> <p>Watts, et. al.の手法には、断面2次元の設定を3次元の設定に拡張する手法も示されています。本研究ではその手法を採用しました。具体的には、地すべり幅 w は、Slide型では $w=0.25 \times$ 斜面長、Slump型では $w=1.0 \times$ 斜面長としました。ご指摘を踏まえ、上記の内容を報告書に追記いたします。</p>
----	--	--------------------------	--	---

20	地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフレンジイ評価に関する研究	糸井 達哉 氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。②解析実施手法、実験方法が適切か。③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	<p>誤記や不明瞭な記載が多く報告書として体裁が整っていない部分が見られます。以下に適切でない例を示します。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・報告書に誤記(鹿島建設の略称の誤記、「確率論的リスク評」など)があります。 ・2.1.2のz、d、ξ、hなどの文字が定義されていません。 ・文章中で変数がイタリックになっていたり、全角と半角が混在しているものが多くみられます。 ・表2.14など表の字がつぶれていて読めません表が多くみられます。 ・2.1.2 エネルギーEと漂流物E、ヤング率Eが同じ文字が使われており、報告書の理解の妨げになります。 ・式2.1.2 およびその周辺：$E\xi$のξは下付き文字でしょうか。ξをかけているのでしょうか。前者かと思いますが、その場合、このような記載は適切ではありません。 ・報告書P20「$\Delta t=1$」、「$1/\sqrt{80}$」など単位がありません。 ・表2.1.9などの防潮堤位置ですが、原点、座標軸の記載がなく、数字から位置が特定できないのではと思います。 ・報告書P35、ρに単位がありません。 ・報告書P35で、「今回の試験結果では、ばらつきの定量評価まではできなかったものの、最大持続波荷重の比 	<p>コメントありがとうございます。</p> <p>誤記や脱字は、改めて全章について確認をいたします。</p> <p>御指摘の箇所については、分かりやすい表記となるように見直します。特に、津波波力(水の密度)の評価については、実験で得られた事実を述べる様に記載を見直します。また、委託事業の液化化実験について規制庁が考察した部分を明確にし、設備耐震の評価についてはJEAG4601の位置付けを記載いたします</p>
----	--	---------	--	---	---

			<p>率は最大でも 1.11 であり、1.15 倍程度の余裕を見込めば保守的に評価できると考えられる。」と記したうえで、「1.2 倍程度 ($\rho=1.2$) の余裕を含めることで、保守的に評価可能であることが分かった。」と記載がありますが、ばらつきの定量評価できないのに、1.2 倍で保守的であると結論づけるのはやや乱暴な論理に感じます。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・報告書 P44 「上式は、フルード数 (FrE) 及び最大比エネルギー (Emax) の 2 つの変数を有する式となっている。」とありますが、上式がどの式を指すのかわかりません。 ・報告書 P71 結果示す→結果を示す ・報告書 2.3.2 の冒頭に「本節では、委託事業において実施した実験概要について示すとともに、実験結果に対する規制庁の考察を示す。」と記載されていますが、本節内は実験に関する客観的な事実の記載にとどまっております。規制庁の考察に相当するものがどの部分に相当するのか、明確にさせていただくことが必要かと思われま す。 ・報告書中に JEAG4601 と記載する場合には、発行年を常に併記することが必要かと思えます。基準地震動が S2 と記載されている箇所もありますが、古い JEAG をしているためと思われま す。なぜ、古い JEAG を参照するのか理由を記載する必要があるように思えます。 	
21	岩田 知孝 氏	①国内外の過去の研究、最新	報告書からは本内容に関して読み取ることが困難であるが、そうされているのであろう。	【①～④共通回答】 コメントありがとうございます。わかり難い資料

22		知見を踏まえているか。 ②解析実施手法、実験方法が適切か。	適切性についての自己評価がないため正確にはわからないが、そうであろう。	で申し訳ありませんでした。①～④については別紙で説明させていただきます。 同上。
23		③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	適切なのであろう。	同上
24		④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	わからない。	同上
25	梅木 芳 人 氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。②解析実施手法、実験方法が適切か。③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	2.1 津波に対する防潮堤の脆弱性評価 2.1.2 漂流物衝突荷重影響 漂流物衝突荷重に対して、今回のレポートでは衝突荷重に対する評価が中心となっているが、実際の施設に対する荷重評価では衝突位置との関係が重要になるため、衝突位置について何らかの言及(今後の検討課題等)したほうが良い。	コメントありがとうございます。 ・漂流物の衝突位置については、各サイト固有の海岸地形や防潮堤形状等の条件に左右されるため、事業者が検討するのが妥当と思われるので、本研究では研究の対象外とさせていただきました。
26		④重大な見落とし(観点の欠)	2.1.2 砂移動荷重影響 P25: 試験装置について、移動床と固定床の幅が異なっているが、中央で仕切らなかった理由、およびそれが試験結果に与える影響の有無について考察を加えたほうが良い。	・砂移動の試験装置の仕切りの位置を、左右非対称とした理由を報告書に記載いたします。 ・固定床と移動床の代表時間の差異や密度の寄与率の考察等については、今後の論文化を進める中で検討したいと考えております。

27	落)がないか。	<p>その他</p> <p>P32,34,35：荷重比（移動床/固定床）を算出しているが、代表で時刻歴を示しているケース（図 2.1.15 および図 2.1.16）を見ると堤体前面浸水深の大きさが固定床と移動床では異なっている。また、表 2.1.14 にて最大密度と荷重比の整理をしているが、図 2.1.16 と図 2.1.17 との比較において波力最大と密度最大の時刻が一致しておらず、両者の関係について丁寧な考察を加えたほうが良い。例えば、最大堤体前面浸水深で無次元化するなどして、波力を比較すれば、浮遊砂による密度増分の影響がより明確になると考えられる。</p> <p>事前説明時に、設計と PRA 等の設計超過の両方を考慮したフラジリティ評価を検討したとのご説明がありました。設計に用いる場合と PRA 評価に用いる場合とでは、用いる評価手法の観点が異なると考えられるため、その点を意識した報告書のまとめ方をされると良いと思う。</p> <p>今後に向けての課題抽出はされているが、各研究項目の（現時点での）最終目標を想定したうえで、そのための課題、検討の優先順位、というような、理想像でも良いので今後の研究計画も含めた全体像を示していただけるとよいと思う。</p> <p>「2.1.2 砂移動荷重影響」の試験に関して、実スケールで 16mm の粒径となるとの記載があるが、砂の粒径に対する実験スケールの設定の考え方や設計に落とし込むときの留意点があるとよいと思う。</p>	<p>・感想をいただきありがとうございます。今後研究を進める上で参考にさせていただきます。</p>
----	---------	---	---

28		土志田 潔 氏	②解析実施手法、実験方法が適切か。	7.今後の展開について、②の観点からコメントする。 (1)津波に対するフラジリティ評価手法の検討では、「黒津波」を対象とした検討が計画されており、数値解析の実施が挙げられている。多量の堆積物を巻き込んだ津波を対象に解析を計画されている場合には、今回終了するフェーズで防潮堤前面に砂丘がある条件での数値解析を実施されており、その知見を活用することが可能と考えられる。	コメントありがとうございます。今回得られた知見は、今後の研究の参考にしたいと考えております。
29		松山 昌史 氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。	津波漂流物の研究成果については、電中研で大型実験などに取り組んでおります。その成果も踏まえていただくことが必要と考えます。 大規模水理実験による津波フラジリティ評価手法の高度化(その2)ー津波漂流物の衝突力評価手法の適用性検証ー、高島ほか、O15003、2015。 原子力発電所における津波漂流物の影響評価技術-現状調査とその適用に関する考察-、甲斐田他、O16010、2017。 津波波力と漂流物衝突力を受けるコンクリート壁の応答評価法の提案、柴山ほか、O17002、2018。	コメントありがとうございます。御提示いただいた文献は、本研究に係る既往の知見として参考としておりますので、参考文献一覧に加えさせていただきます。
30	大規模噴火プロセス等の知	糸井 達哉 氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。②解	報告書の1.1背景の記載が理解できません。特に、原子力安全規制に関する研究という意味での位置づけを明確にする必要があるように考えます。例えば、審査ガイドにおける課題認識、長期的な規制の改善への貢献、	背景の記載を以下のように修正します。 火山影響評価ガイドでは、「巨大噴火が差し迫っていない」と評価できることを求めており、過去に巨大噴火を起こした火山の地下において大規模な

見の蓄積に係る研究

析実施手法、実験方法が適切か。③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。
④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。

及び、安全研究として実施されている「規制へのPRAの活用のための手法開発及び適用に関する研究」へどのような情報が提供されるのかなどを明確にすることが必要と考えます。

マグマ溜まりを示唆する領域の有無が一つの評価指標となる。これまでに、過去に長期の休止期間があり大規模噴火を起こした火山の活動評価手法を整備するための知見や国内外の巨大噴火を起こした火山の噴火直前のマグマ溜まりの深度、当該深度領域の地下構造を探查する手法について知見が蓄積されつつある。

一方、巨大噴火を起こすソースとなる巨大なマグマ溜まり生成のプロセスやマグマが蓄積する時間的なスケールについての知見は海外の研究事例が基本となっている。例えば、Costa(1)は、鉱物生成年代を推定し、噴火年代と対比することによりマグマ滞留時間を推定する手法を解説し、Allan(2)ら、Druitt(3)ら、Gualda(4)らは斑晶中元素の固体内拡散速度から斑晶が高温のマグマに曝されていた時間を推定している。

過去に巨大噴火を起こした火山の地下構造の探查については、主に自然地震観測に基づく地震波速度構造やMT法による低比抵抗構造の探查領域の空間的な広がり把握しうる解像度で探查した海外での報告例(5),(6)ある。解像度の高い構造を探查するためには、広域で周密な観測点を配置する必要があるが、巨大噴火を起こした火山の多くはカルデラ地形大半が水没している等、探查を行う際の障害となることから事例は少ない(本当は無いと書きた

31			<p>報告書の 1.1 の背景において、巨大マグマだまりの生成プロセスなどについて、海外の研究事例に基づく点が問題という指摘に対して、個別事例の調査をしたという報告のみで、得られた成果が海外の研究事例と比較してどうだったかという点に関する記載がありません。</p>	<p>い)。 No.30 と同様</p>
32			<p>報告書 2.1.2 ①「今回提案する手法は、偏りがあるようなケースにおいての活用が期待される」とありますが、規制庁としては、「今後の検討で用いるべきである」とするか、「手法としてさらなる改良が必要である」等の結論を定量的に示すか等の記述にすべきで、一般的な記述を結論とするのは適切ではないのではないのでしょうか。</p>	<p>いわゆる天然のものを用いて検討する場合、多かれ少なかれ不確実性を持ってしまいます。本検討対象の場合、火山灰が落下した数百km×数十km以上の領域からサンプリングできる試料数は、地理的要因や人為的要因等により大きく左右されます。その上で、今回、試料側にバラつきがあっても、既往の手法と比べバラつきの少ない計算結果が得られる手法を考案したということになります。従いまして、試料採取側での課題を包含できたという書きぶりとしております。</p>
33			<p>報告書 2.1.2 ②で「5cm 程度以下では、・・・コンタミネーションが多くなる傾向にあった。ゆえに、これらの点を留意し、調査を実施する必要がある」と記載がありますが、ここでいう「調査」とは何を指すのでしょうか。「次年度以降の調査」でしょうか？</p>	<p>ここでの「調査」は、事業者が実施する「降下火砕物に関する火山影響評価に資する調査」を指します。</p>
34			<p>報告書 2.1.3 について、文献調査が網羅的であることが理解できるような報告書の記載とすることが望ましいと考えられます。</p>	<p>拝承いたします。なお、本文献調査では東伊豆単成火山群や阿武単成火山群など、日本国内の単成火山群に関する文献を網羅的に調査したほか、海外で</p>

35

報告書 2.4.1 の準備過程に関する結論（巨大噴火を起こす火山では、・・・、巨大噴火に至ると考えられる）については、自然現象の記述としてはいささか単純化されすぎている印象を覚えます。特に、発電所の安全性を検討する上では、より多様なシナリオを提示することが求められるのではないかと思います。

36

報告書 2.4.2 で「・・・考えられている。」「していることにある。」等の記述が散見されますが、それぞれ根拠となる参考文献の記載がなく散文的ですので、もう少し客観的な記載にすることが望ましいと考えられます。

37

報告書 2.4.3 の結論（最終的には地下のマグマの状態

研究が進んでいる Southwest Nevada volcanic field や Eifel volcanic field などの代表的な単成火山群に関する文献を調査しています。

これまでの巨大噴火に関する審査では火山ごとに個別評価が行われています。本研究でも、活動履歴についてはいくつかのパターンを示すことができたと考えています。一方で、巨大噴火を起こす火山には特徴があることを示唆する知見が得られつつあることも事実です。本研究では巨大噴火に至る共通の事象を見出し、評価のための基準とすることを目指しています。

表現を修正するとともに、参考文献を引用し以下のように修正しました。

始良カルデラでは、地下 11~15 km 付近に推定体積 100 km³ 程度のマグマ溜まりが定置していると推定される。始良カルデラで観測されている広域な地殻変動データを基に、変動力源の解析が行われ、カルデラの中心エリア内の地下 11~14km の深さに変動力源の存在が示されている。これまでは、始良カルデラの広域地殻変動は、1914 年の大正噴火や 1946 年の昭和溶岩の噴火等桜島火山で起こったイベントと地殻変動が関連付けられ解釈 71,74,75 されているが、推定体積 100 km³ 程度マグマ溜まりの体積変化と解釈することもできる。

ご指摘のとおりであるのですが、「単成火山」とい

を把握し評価することが重要である)は、研究をする以前からわかっていることではないかと推察されます。

38

報告書 3.1(1)の「検討したことで認識できた」という主観的な記載は、研究のまとめとしては適切ではないように感じます。

39

報告書 3.1(4)の結論が、規制研究としては重要と思いますが、具体的な成果が記載されていません。明確な記載が必要かと思えます。

40

報告書 3.2については、当初目標と対比した記載が望ましいと考えられます。

う専門用語は、「1回の噴火輪廻で形成された火山」という意味です。つまり、富士山のような何度も噴火を繰り返して成長する「複成火山」とは異なります。他方、火山影響評価ガイドでは、完新世に活動のない第四紀火山に対して、過去の噴火履歴から活動評価を行う方法を記載しています。このような背景から、本節は、一回の噴火輪廻しかない単成火山に対して、過去の噴火履歴からどのように活動評価できるのかという観点で取りまとめております。

「認識できた。」を「整理することができた。」と修正しました。

以下のように修正しました。

令和2年度までに得られた上記の(1)～(3)の知見に基づいて、過去に巨大噴火を起こした火山の噴火に至る準備過程の検討、過去に巨大噴火を起こした火山の現状評価の検討及び単成火山群の活動評価に関する考え方の検討を行い、現時点での巨大噴火の準備過程シナリオ、始良カルデラを事例とした現状評価及び単成火山群の活動評価の考え方を示した。

本研究は5カ年計画の内2カ年分の成果をとりまとめています。令和3年度に一部計画を見直すことを想定しており、現時点ではこの見直しに向けて得られた知見を整理した状況です。

その他、報告書に誤記等不適切な記載が散見されます。

- ・ P8 Uint → Unit
- ・ 図 2.1.6 図の字が見えません。
- ・ 図 2.1.7 字が見えません。
- ・ 図 2.1.10 縦軸に単位がありません

・ P8 「地質学的にも古地磁気学的検討においても短時間に形成された可能性がある」は、「地質学的検討、および、古地磁気学的検討のいずれからも短時間に形成された可能性があることが示唆された」という意味でしょうか？

・ P21 で「粒度分布の結果を図 2.1.10 に示す」と書かれているが、図 2.1.10 は平均値（中央粒径）の距離依存性であり、粒度分布ではありません。

・ 2.1.2 の可用性という言葉ですが、「availability（システムが継続して稼働できる度合いや能力）」という工学会用語かと理解していましたが、本報告書に用いる用語として適切でしょうか。

・ P61 密度を 2500kg/m^3 とした場合とありますが、マグマの密度であれば、そのように明記が必要かと思えます。また、マグマの供給量と密度の関係についても、教科書的な内容なので、記載をしていないのかもしれませんが、記載が必要かと思えます。

ご指摘ありがとうございます。誤字および文字サイズにつきましては修正いたします。

図 2.1.10 につきましては、軸タイトルの最後に付してございます[φ]が単位でございます。

そのような意味で記載しております。

ご指摘ありがとうございます。修正いたします。

地球科学分野では「availability」について特定の意味を持つことはなく、ここでは一般的辞書にある「有用性」の意で使用しています。

一般的に用いる岩片の密度です。報告書には 2500kg/m^3 （岩片密度）と記載します。

42	岩田 知孝氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。	報告書からは本内容に関して読み取ることが困難であるが、そうされていると考える。	ご確認いただきありがとうございます。より理解し易い表現を目指して善処して参ります。
43		②解析実施手法、実験方法が適切か。	観測においては、社会的条件下において、最大限の努力をされているのだと想像するが、地震波トモグラフィやネットワークMTによる調査は、達成目標としている分解能を十分に達成することができるのであろうか？チャレンジングな課題であるので、結論を急ぐのではなく、本当にわかったことを丁寧に報告としてまとめるとともに、将来的にそれを解決するような方策を提示することが肝要と考える	ご確認いただきありがとうございます。今後の報告方法、調査方法等について検討して参ります。
44		③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	②にも書いたが、社会的条件で限られた観測しかできないといったことも含め、このフェーズでできる(できた)ことと次のフェーズがあるとした場合に、それを解決するにはどういった方策があるのか、ということ調査項目も含め十分に検討して欲しい。	ご確認いただきありがとうございます。今後の調査方法等について検討して参ります。
45		④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	現時点では特に気づかない。	ご確認いただきありがとうございます。
46		土志田 潔氏	②解析実施手法、実験方法が適切か。	(3)b.地化学的手法について、②の観点からコメントする。マグマの供給状況を検討する観点では、対象をカルデラ火山に限定せず、噴火間隔が長い火山や最新活動時期が古い火山、若い花崗岩体等を対象に、C/Cl 比を測

47		<p>①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。</p>	<p>定し、最新噴火からの経過時間との関係を調べる、といった検討を行うことが考えられる。</p> <p>(4)「考え方の検討」について、①・③・④の観点からコメントする。</p> <p>マグマ溜まりの位置や深度の推定においては、観測・推定手法に応じ、異なる結果が得られることから、慎重に議論を進める事が望ましい。これに対し、スライド資料の後半<過去に大噴火を起こした火山の現状評価の検討>では、論理の飛躍が複数の箇所に認められる。</p> <p>まず、「地下11~15km付近のマグマ溜まり」として、S波の低速度域(深度15km)と変動力源(深度11km)を同じ物として扱っている。変動力源の位置に近い深度10km付近には低速度領域が認められていない事を考慮すると、両者を同一と解釈するためには、詳細な議論が必要と思われる。</p> <p>次に、従来の研究では、鹿児島地域の広域的な地殻変動は桜島火山のマグマ供給系に起因すると解釈されてきた。地殻変動量と桜島火山の噴出量が等しいためであり、今回の報告でも項目(3)c.では同様の解析結果が得られている。これに対し、項目(4)では、見出されているマ</p>	<p>ご指摘の通り、現時点では新たな解釈として位置づけ、以下のように修正します。</p> <p>始良カルデラでは、地下11~15km付近に推定体積100 km³程度のマグマ溜まりが定置していると推定される。始良カルデラで観測されている広域な地殻変動データを基に、変動力源の解析が行われ、カルデラの中心エリア内の地下11~14kmの深さに変動力源の存在が示されている。これまでは、始良カルデラの広域地殻変動は、1914年の大正噴火や1946年の昭和溶岩の噴火等桜島火山で起こったイベントと地殻変動が関連付けられ解釈^{71,74,75}されているが、推定体積100 km³程度マグマ溜まりの体積変化と解釈することもできる。</p> <p>従来の解釈では、大正噴火の噴出量(約1.5km³)と地殻変動量(噴火前の水準値はない)から推定した供給量がおおよそ等しいとの理解です。また、変動力源の位置とマグマ溜まりの位置が異なることはあり得ると考えています。始良カルデラ下の地下構造が明らかになりつつあり、このことを踏まえた解釈を今後検討していく予定です。</p> <p>深度推定については、メルト包有物の含水量だけでなく、熱力学的な検討も合わせて推定しています。</p>
----	--	--	--	--

グマ溜まりについて、桜島との関連を論じることなく、始良カルデラの活動と結びつけているように読める。従来の解釈を変更するには、多角的な議論が必要と思われる。

更に、(2)の岩石学的手法で行われた、入戸噴火直前のマグマ溜まり深度推定では、マグマが水に飽和していることを仮定した手法も用いられている。同手法では、水に不飽和な場合には推定深度が異なる可能性もある。

別紙 評価の観点①～④に係る自己評価結果

- ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。
- ② 解析実施手法、実施方法が適切か。
- ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。
- ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。

1. 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価

①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか（添字は、報告書本文で参照としている文献番号（なお xxx, yyy, zzz は、今後本文に追記する文献））

防潮堤は、津波防護施設の一つであり、原子力発電所敷地内への津波の浸水を抑制する重要な構造物である。そのため、津波の波圧特性等を適切に把握し、防潮堤の津波に対する構造健全性を評価する必要があることから、防潮堤に作用する(1)漂流物衝突荷重影響、(2)砂移動荷重影響、(3)最大持続波力評価の体系化に係る水理試験を基に検討を実施した。

(1) 漂流物の衝突により生じる荷重評価については、これまで複数の評価式が提案されており、運動方程式に基づく FEMA (2012) ^{2.1.3} の式や、河川の橋脚を被衝突物とする道路橋示方書 (2002) ^{2.1.4} の式等が、比較的良好に知られている。また、漂流物の剛性 ^{x.x.x} や、既往の評価式の適用性 ^{y.y.y}、津波波力と衝突力の重畳 ^{z.z.z} に着目した既往研究も行われている。

一方、特に被衝突物近傍海域における津波の特性を踏まえた、各評価式の適用条件や適用範囲についての知見は十分には得られていない。

これより本研究では、原子力発電所の防潮堤に作用する漂流物衝突荷重について、近傍海域における津波の特性も考慮した既往評価式の適用条件や適用範囲に係る、体系的な漂流物衝突荷重評価の考え方を整理した。

(2) 砂を含む津波が防潮堤に作用した際の作用波圧は、真水の場合の算出値に流体密度を乗じて評価するのが一般的である。流体密度としては複数の値が提示されており、例えば、FEMA (2008) ^{2.1.5} 及び FEMA (2019) ^{2.1.6} では、設定した浮遊砂濃度を踏まえ、それぞれ真水密度の 1.2 倍及び 1.128 倍を使うこととされている。

一方、防潮堤前面の砂丘等の砂が、津波によって移動した際の防潮堤に対する作用荷重の評価に係る知見は十分には得られていない。

これより本研究では、前面に砂丘等を有する原子力発電所の防潮堤に作用する砂移動荷重について、一般的な流体密度を用いた評価の適用性をはじめとした考え方を整理した。

(3) 防潮堤に作用する津波波圧には段波波圧と持続波圧があり、設計条件範囲内（防潮堤を津波は越流しない）における両者の防潮堤の構造健全性に

与える影響については、概して持続波圧による影響の方が大きいことを、NRA技術報告（2015）^{2.1.7}にて報告している。

一方、設計条件から設計条件を超え防潮堤を越流する津波までを対象とした場合の、防潮堤の構造健全性に与える影響についての知見は十分には得られていない。

これより本研究では、防潮堤のフラジリティ評価に必要となる設計条件から設計条件を超え防潮堤を越流する津波までを対象に、防潮堤に生じる現実的な最大波力/波圧を評価する手法についての体系的な考え方を整理した。

②解析実施手法、実施方法が適切か

(1) 漂流物の衝突荷重に係る水理試験では、測定結果に津波による荷重と漂流物衝突による荷重の両者が含まれることから、防潮堤を試験水路の横断方向に短冊状の部位に分割し、衝突が生じた部位の荷重と衝突が生じなかった部位の荷重を比較し、衝突荷重成分を特定した。

(2) 砂移動荷重影響に係る水理試験では、防潮堤の前面に砂を用いた砂丘形状の移動床と、木製の砂丘形状の固定床を同一水路内に並べて設け、両者の防潮堤へ作用する荷重を比較することで、移動床における砂移動に伴う津波波力荷重の増分を求めた。

(3) 最大持続波力評価の体系化に係る水理試験では、設計条件を超える津波として、入力津波高さを大幅に超える津波までを模擬し、入力津波高さを超えると越流が生じる防潮堤及び越流が生じない防潮堤を用いて両者に作用する最大波力/波圧を比較し、越流に係る試験結果の整理を行った。

③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か

本研究で得られた成果は、外部専門家や課内におけるレビュー及び規制部説明会等から意見をいただく等の確認を行った上で、査読論文等として公開し、妥当性の評価がされている。

④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。

①～③を実施したことで研究を確実に進めており、重大な見落としは無いものとする。今後の課題として、東北地方太平洋沖地震で発生が報告されたヘドロ状の堆積物が混入した津波（「黒津波」という）の発生条件等について検討する必要があると考えられる。

2. 地震に対する建屋のフラジリティ評価

①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか（添字は、報告書本文で参照としている文献番号）。

規制部門から要望があった研究課題、現在実施されている新規制基準適合性に係る審査状況等から、建屋の三次元挙動に係る評価手法に関する技術的知見の更なる蓄積が必要という課題を抽出した。その課題に対して、三次元 FEM 解析による原子炉施設の地震応答解析に関する最新の国内外の文献を調査・分析し、地震時の建屋の三次元挙動に係る評価において留意すべきモデル化因子の候補を選定し^{2.2.4 JAEA 委託報告書、2.2.5 NRA 技報}、それら因子に対し

て、原子炉建屋の三次元 FEM モデルを用いた感度解析を実施し、各因子が地震時の建屋応答に与える影響を整理した。

②解析実施手法、実施方法が適切か

研究及び実務で実績のある複数の解析コードを用いて解析的検討を実施した。また、採用した解析手法は、原子炉建屋で計測された地震観測記録のシミュレーション解析等を行うことで妥当性を検証した。

③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か

解析的検討は複数の解析コードを用いて実施しており、互いの結果を比較することで妥当性を検証した。また、それらの評価手法は外部専門家会合や課内レビュー、規制部説明会等から意見をいただく等の確認を行った。

④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。

①～③を実施したことで研究を確実に進めており、重大な見落としは無いと考えている。今後の課題として、建屋の三次元 FEM モデルを用いた地震応答解析では、建屋－地盤間の接触・剥離現象に係るモデル化手法、原子炉建屋の RC 造耐震壁の非線形特性に関するモデル化手法について、より多くの観測記録を分析する等、技術的知見を更に蓄積する必要があると考えられる。

3. 地震に対する地盤の液状化に係る fragility 評価

①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか（添字は、報告書本文で参照としている文献番号）。

液状化に関する既往の研究では、主に飽和した砂質土を対象に、学協会を中心に多くの研究、開発が進められている。また、1995 年兵庫県南部地震では、人工埋立地における大粒径の礫を含む地盤の液状化や液状化に伴う沿岸地盤の流動現象等が発生し、これらを踏まえ関係する指針類において、礫分に対する考え方を踏まえた見直しも行われている^{2.3.1 松尾、2.3.2 土木研究所}。

これら既往の研究においては、材料挙動に関する検討例はあるものの、原子力発電所敷地沿岸部の様な複雑な地盤条件における礫質土地盤の詳細挙動を対象とした検討例は少なく、特に、発電所の地盤のような密に締め固められた礫質土地盤の液状化に伴う変形挙動等に関する知見は十分に得られていない。

そこで、既往の研究状況を踏まえ、発電所敷地沿岸部を想定し密な礫質土地盤を対象とした研究を計画し、遠心模型実験及びその結果を対象とした数値シミュレーション解析による礫質土地盤の過剰間隙水圧の蓄積や変形挙動等を確認した。

②解析実施手法、実施方法が適切か

本研究では、地形条件や地盤条件等に対する模型寸法の影響を極力抑えるために、国内で最大規模の遠心載荷試験装置を用いて遠心模型実験を実施

した。また、遠心模型実験では計測が難しい地盤内のひずみ性状について、遠心模型実験による応力状態を模擬した中空ねじり試験の結果により確認した。実験結果に対する再現解析においては、複数の解析コードを用いて解析を実施することで、解析結果の信頼性を高めた。

③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か

毎年度の研究成果については、委託先において専門家会合を実施し、実験・解析に係る方針および整理についてコメントを受け、そのコメントを踏まえた成果の取りまとめ、次年度以降の研究計画へフィードバック等を行ってきた。また、成果が纏まった段階で学会発表等を行い、広く専門家からの意見をいただいた。さらに、課内レビューや規制部への説明会を実施して、意見をいただいた。

④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。

①～③を踏まえた研究を遂行し、密な礫質土地盤の液状化時の変形挙動等に関する技術的知見が得られたことから、重大な見落としは無いものと考ええる。ただし、礫質土地盤の解析結果においては、特に、水平変位や過剰間隙水圧で実験結果と差異がみられたことから、有効応力解析の礫質土への適用にあたっては、更なる検討が必要と考えられる。

4. 地震に対する設備の耐力評価に係るフラジリティ評価

①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか（添字は、報告書本文で参照としている文献番号）。

放射性物質の拡散を防護する観点より選定した設備の現実的耐力値については、外部の有識者で構成された委員会で検討して原子力工学試験センター及び原子力安全基盤機構が実施した耐震試験に基づいた。さらに、耐力の余裕が最も小さい設備について、既往の知見^{2.4.1~2.4.7}高速増殖炉の座屈設計に係る研究を踏まえて詳細評価を実施した。

②解析実施手法、実施方法が適切か

FEMを用いた容器の詳細座屈評価手法の適用性については、国より委託された高速増殖炉の座屈設計に基づく既往研究で確認されている。また研究に用いた FEM モデルは、座屈変形を適切に表現するために、既往研究に基づき座屈モードの波長に対して十分に小さいメッシュサイズとなるように設定した。

③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か

研究の実施過程において、外部専門家会合や課内レビュー及び規制部への説明会を行って意見をいただくことで、研究成果の信頼性向上を図った。

④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。

①～③を踏まえて研究を実施しており、重大な見落としは無いものとする。今後は、新規制基準への対応より新たに導入された設備に対する耐力を

整理することが必要となる。

5. 地震に対する設備の亀裂進展に係るフラジリティ評価

①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか（添字は、報告書本文で参照としている文献番号）。

米国機械学会規格委員会において、地震等の交番荷重下におけるフェライト鋼の疲労亀裂進展則の妥当性が議論されていることを踏まえ^{2.5.2ASME}、国内の鋼材を用いた試験計画を立案した。試験条件の設定の際には、米国機械学会が疲労亀裂進展則を策定した当時の試験条件を確認し、本研究の試験結果と比較が出来るように設定した。また、フラジリティ評価においては、国内の規制基準で規定される維持管理及び亀裂評価の手法に準じて、解析条件を設定した。

②解析実施手法、実施方法が適切か

既往研究により、交番荷重下の疲労亀裂進展速度には亀裂の開閉口挙動が大きく影響することが知られている^{2.5.5 J.M.Bloom}。そのため、本研究では試験片として、亀裂の開閉口挙動を精度良く観測することが出来る中央切り欠き平板試験片を採用した。また、比較のため、試験片に載荷する交番荷重は、既往研究で用いられている負荷レベルと同程度となるように設定した。

③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か

研究の実施過程において、外部専門家を招聘した検討会や課内レビュー及び規制部への説明会を行って意見をいただくことで、研究成果の信頼性向上を図った。また、研究成果を学術論文やプロシーディングス等として投稿し、外部査読を受けることで、結果の妥当性を担保するよう努めた。

④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。

①～③を踏まえて研究を実施しており、重大な見落としは無いものとする。今後の研究では、上記のような試験片で観測される疲労亀裂進展挙動と、実機を想定した設備の耐震裕度との関係を整理することが必要となる。

6. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する建屋のフラジリティ評価

①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか（添字は、報告書本文で参照としている文献番号）。

新規制基準では、原子力施設に対して竜巻飛来物や火山噴石等の衝突に係る評価が追加され、衝突に伴う構築物の構造評価および衝撃評価が必要となった。原子力分野においては、古くからトルネードミサイルやタービンミサイル等の衝突に係る研究が行われ、構築物の局部損傷（貫入・貫通・裏面剥離）に係る知見は多数報告されており、様々な局部損傷評価式が既往研究で整理されている^{2.6.5 Q.M.Li}

一方、衝撃評価に必要となる衝撃荷重の作用により構造物内を伝播する応力波に関する研究はあまり無いが、規制庁が参加している国際ベンチマークプロジェクトでは、再現解析における境界条件や減衰等が課題となっている^{2.6.8 OECD/NEA}。

本研究では当該プロジェクトで得られた知見を反映しつつ、様々な床を有する構造物が衝撃作用を受けた際の挙動を明確にするための大型衝突実験を実施するとともに、その実験結果の再現解析から解析手法を確認した。さらに、衝撃挙動に対する構造物の周辺地盤の影響についても検討を行うものとした。

②解析実施手法、実施方法が適切か

本研究では、衝撃挙動の伝播特性をとらえるため、試験体は可能な限り大きなものとし、構造部材は様々な固有周期を有する床となるように設計した。衝突物である飛翔体は、剛飛翔体と柔飛翔体（ステンレス製・樹脂製）を製作し、衝突物の剛性の差異による影響を検討した。

実験の実施場所については、国内外の様々な実験場について調査し、実験目的に応じて試験場を選定した。計測機器については、衝撃挙動が一般の計測機器では対象としない高周波成分の振動であるため、複数社の機器を用いた予備実験を実施し、実験に最適な機器選定を行った。

解析手法の確認における再現解析には、衝撃解析で一般的に用いられる LS-DYNA と Abaqus の二つのコードを用いて様々な検討を実施した。主な検討項目としては、構造物の境界条件、地盤剛性、摩擦係数、減衰モデル、衝撃荷重曲線等とした。

③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か

研究の実施に際しては、委託先において専門家会合（土木分野1名、建築分野1名、機械分野2名）を年2回実施し、実験・解析に係る方針および整理についてレビューを受けた。さらに、課内レビューや規制部への説明会を開催して意見をいただいた。また、研究成果は学会発表等に諮り、専門家の意見を受けた。

④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。

①～③を踏まえた研究を遂行し、衝撃作用を受ける構造物の挙動を確認した。本研究の成果は、論文等で公表済みであり、本研究に対して重大な見落としは無いものとする。

今後の課題として、原子力施設には、様々な設置状況の構造物が存在する。また、構造物は複雑な形状を有している。その様な原子力施設の状況を踏まえ、設置状況や形状特性を考慮したより現実的な耐衝撃評価に係る技術的知見を蓄積していく必要があると考えられる。

7. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する設備のフラジリティ評価

①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか（添字は、報告書本文で参照としている文献番号）。

原子力施設で使用されている設備について、建屋への航空機衝突による衝撃振動に対する耐力評価の先行研究としては、米国原子力エネルギー協会（NEI）によるものが、ほぼ唯一の事例である^{2.7.2 NEI}。上記に加えて、米国電力研究所（EPRI）による高周波地震動に対する設備の耐力評価の研究を、衝撃振動に対する評価対象設備の選定や、設備の弱部を検討する上で参考とした^{2.7.4 EPRI}。以上の先行研究を踏まえて研究計画を立案した。

②解析実施手法、実施方法が適切か

NEI の事例では、衝撃振動として考慮すべき卓越周期帯、設備耐力に関する記述はあるものの、具体的な耐力の評価方法は明らかにされていない。そこで、設備の衝撃振動に対する耐力評価の方法としては、EPRI の事例と同様に、既往の耐震試験に倣った設備の振動試験を実施することで、対象設備の機能維持・機能損傷する加速度レベルを確認することとした。

設備の加振条件としては、入力波の加速度レベル、卓越周波数、加速度時刻歴波形を考慮して、設備の状態、動作を確認した。振動試験における振動台上の入力波の加速度レベル、卓越周波数の設定に関しては、NEI の知見を参照した。加速度時刻歴波形については、衝撃振動の伝播における極初期の振動を想定した作用時間の極めて短いショック波、それ以降の建屋の自由振動を想定した作用時間の長いランダム波を使用した。

③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か

研究の実施にあたり、試験計画の立案から試験の実施、結果の確認に至る研究の各ステップで、地震・津波研究部門内の設備の耐震設計、耐震試験の経験者を中心としたレビューを実施することで、一連の実施内容を確認した。また、外部有識者を複数名招聘して、試験計画、詳細手順、試験実施時のデータ計測の観点及び試験結果等に関して意見をいただき、試験の実施、試験結果のまとめに反映した。さらに、課内レビューを行うと共に、設備の衝撃評価等に関係している原子力規制庁内の関係者に試験の実施内容やその結果について適宜説明して意見をいただいた。

④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。

①～③を実施したことで研究を確実に進めており、重大な見落としは無いものとする。

今後の課題としては、(a)設備の設置状況を踏まえた、設備への入力と設備の応答の関係に着目した各々の評価方法について既往評価手法の適用性を検討、(b)衝撃振動と部材の材質の関係に着目した検討、がある。

8. 落下による衝撃に対する核燃料輸送容器のフラジリティ評価

①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか（添字は、報告書本文で参照としている文献番号）。

過去 20 年間に実施された核燃料輸送容器の落下試験及び解析に係る文献調査を行い、ドイツ連邦材料研究所（BAM）のスラップダウン落下試験に係る文献^{2.8.4 B. Droste}に着目し、試験・解析の実施状況を整理した。

②解析実施手法、実施方法が適切か

落下試験は、IAEAの技術助言文書^{2.8.5 IAEA}が定める落下高さや落下地盤の剛性等に係る要件を満足する条件を用いた。また、落下姿勢についても事前解析によって保守的となる落下角度を求めて試験を実施した。なお、事前解析では、過去の類似事例において用いられている動的解析コードLS-DYNAによる有限要素解析を用いた。

③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か

事前解析や試験計画の立案時、供試体の設計時、落下試験実施時及び事後解析実施時等の各過程において外部専門家会合を実施し、コメント等をいただき研究を実施した。最終成果に対しても同様に外部専門家会合において評価を受けた。また、ドイツ連邦材料研究所（BAM）の専門家とも研究成果の妥当性について、議論を行った。

さらに、課内レビュー及び規制部への説明会を行い、意見をいただいた。

④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。

①～③を実施したことで研究を確実に進めており、重大な見落としは無いものとする。