

円筒形タンクのスロッシング評価

Evaluation of Cylindrical Tank Sloshing

東京電力株式会社	西岡 邦泰	Kunihiro NISHIOKA
株式会社 東芝	服部 靖	Kiyoshi HATTORI
株式会社 東芝	藁科 正彦	Masahiko WARASHINA
株式会社 東芝	吉村 良治	Ryoji YOSHIMURA
日立G Eニュークリア・エナジー株式会社	福士 直己	Naoki FUKUSHI

For tank, the evaluation method for influence about top board by fluid sloshing is not defined well. We carried out shaking test about cylindrical tank to investigate behavior of inner fluid. And we conducted simulation analyses about the shaking test, too. In this paper, results of the shaking test and simulation analyses, and evaluation for comparison of those are described.

Keywords: Cylindrical tank, Sloshing, Earthquake, Shaking test, Simulation analyses, Nuclear power plant

1. 緒言

BWR 発電所に設置される平底円筒形タンクはその耐震重要度に応じて「原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC 4601」により耐震クラスが定められ、それぞれの耐震クラスにおいて想定される地震力に対する設備の健全性、内包流体の維持機能が求められている。しかし、スロッシングにより衝突する内部流体が天板へ与える影響を合理的に評価する手法は確立されておらず、多くのタンクは想定する地震力により発生する最大波高が天板に達しないように設計されている。

本研究では、平底円筒形タンクの振動試験を行い、非線形性の強い内部流体の波高、動圧などの時刻歴データを取得した。あわせて 3 次元シミュレーションによる流動解析を実施し、試験結果との比較によりその再現性を確認するとともに、スロッシングによるタンク天板への影響評価手法の検討を行った。

2. 発電所に設置されるタンクの設計

原子力発電所に設置されるタンクは、それぞれの耐震クラスに応じた地震に対して健全性、機能維持が求められる。例として原子炉補機冷却水サージタンクは、発電所において想定される最大の地震が発生した場合においても非常用機器に冷却水を供給できるように、内包流体を保持する耐震強度が求められる。また、耐震クラスが低いものでも、屋外設置で危険物を内包するタンクは、放爆構造となるように天板の溶接部位は比較的脆弱であることが求められることとなり、スロッシングによる波高が天板に達

連絡先：西岡邦泰，東京電力株式会社 原子力設備管理部 新潟県中越沖地震対策センター
〒110-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3
電話：03-6373-1111, E-mail:nishioka.k@tepcoco.jp

する場合、天板強度が流体の衝突に耐えられると評価するには困難を伴う。こういった状況を踏まえ、タンクではスロッシングによる最高液面高さが天板に届かないよう設計することが一般的である。

しかしながら、平成 18 年 9 月 19 日付で「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が改訂されたことにより、各発電所において想定される地震力が増大し、既設タンクにおいてスロッシングにより液面が天板に達する可能性が生じることとなったため、スロッシングによる内包流体の挙動解明、天板への影響評価手法が求められている。

3. 平底円筒形タンクのスロッシング評価

3.1 振動試験

本振動試験に使用したタンクの仕様および試験に用いた入力波を Table 1 に示す。

また、タンクの外観写真を Fig.1、振動試験で計測する項目のイメージ図を Fig.2、天板における波高計および圧力計の設置位置を Fig.3 にそれぞれ示す。

なお、本振動試験は独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）にて行った。

Table 1 Tank model and input wave for shaking test

タンク高さ	・ 3000mm
タンク直径	・ 3000mm
天板形状	・ 平板天板 ・ 円錐天板
試験水位	・ 高水位 (2700mm) ・ 標準水位 (2300mm) ・ 低水位 (1900mm)
加振波形	・ 共振正弦波 1 波 ・ 共振正弦波 3 波 ・ 新潟県中越沖地震 地表面観測波

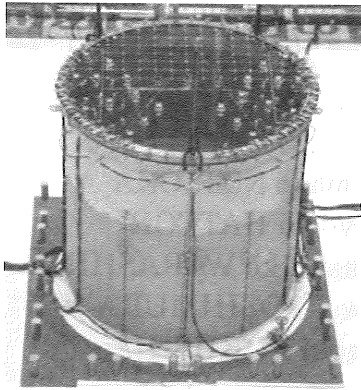


Fig.1 Figure of model tank for shaking test

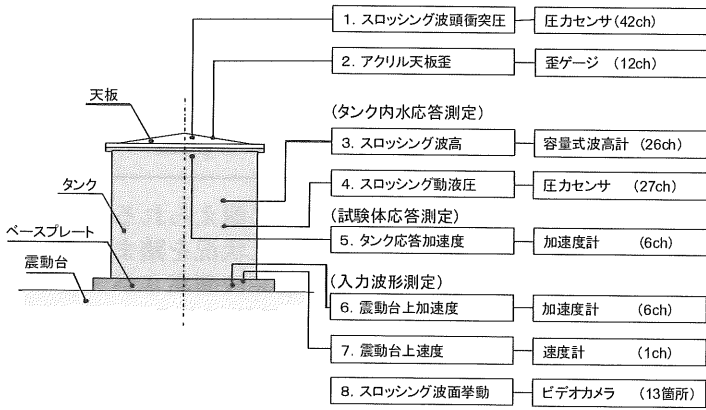


Fig.2 Measurement data

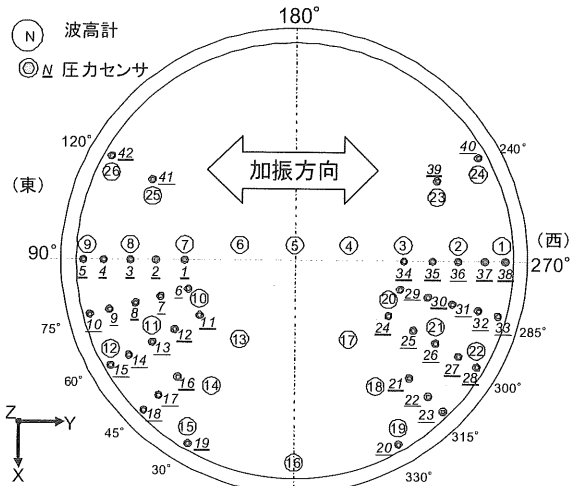


Fig.3 Location of sensors for wave height and pressure on top board

3.2 流動解析

3次元モデルによるスロッシング応答の流動解析を行い振動試験の結果と比較を行った。解析条件をTable2に示す。

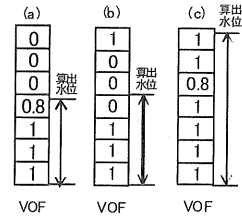
Table 2 Analysis condition

天板形状	・ 平板天板 ・ 円錐天板
試験水位	・ 標準水位 (2300mm)
加振波形	・ 共振正弦波 1 波 (変位 300mm)
解析コード	・ STAR-CD® v3.15

本流動解析において、圧力は高さ補正を行った全圧とし、波高は各メッシュにおける液体の体積割合であるVOFを用いて式-1により算出することとした。

$$h = \frac{\sum_{m=1}^n (VOF \times V)}{S} \dots (式-1)$$

ここで
VOF: 体積分率
V: 体積(m³)
S: 面積(m²)



算出水位のイメージ

流動解析により求めた平底円筒形タンクの中心断面における水面図を Fig.4 に示す。揺動した水は約 13.8 秒で波高計 1 番 (天板圧力計 38 番) の側で天板に衝突し、約 15 秒で反対側に振れる。そこで、最初に水面が天板に衝突する西側で解析結果と試験結果とを比較した。波高計 1,2,3 番および天板圧力計 34,36,38 番について比較した結果をそれぞれ Fig.5、Fig.6 に示す。

波高、天板圧力ともに、流動解析結果と試験結果とは全体によく一致した。衝突により水が砕けた以降に認められる波高の差については、衝突後の複雑な気液界面を再現するには、微細にメッシュ分割した解析モデルが必要であるのに対して、今回用いたモデルのメッシュが比較的粗いことが原因であると推定した。

同様に天板圧力に関しても、メッシュの粗さが原因で、試験結果に比べて流動解析で得られた最大圧力が低いと考え、メッシュの細分化を試みた。タンクの上半分について xyz 3 方向のメッシュサイズを 1/2 とした後、さらに衝突の影響が大きい最上層 2 層のメッシュを z 方向 (上下方向) に 1/5 とした結果が Fig.7 となり Fig.6 よりも試験結果の再現性が高まった。よって、天板衝突圧力のピークについても、3次元メッシュを細分化することにより再現できることが分かった。

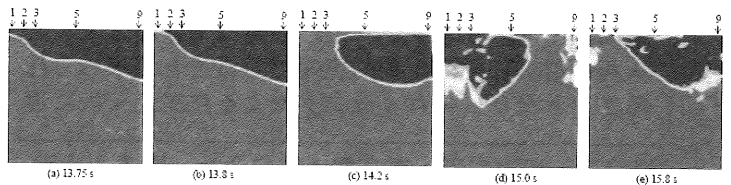


Fig.4 Fluid distribution through shaking time

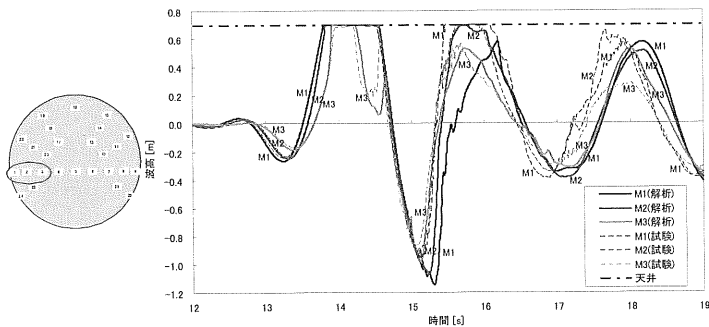


Fig.5 Comparison of wave height between shaking test and analysis

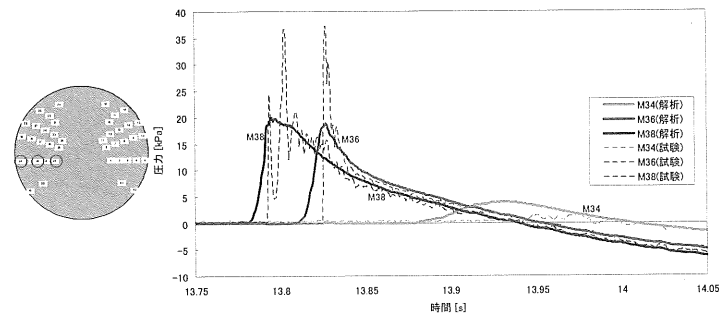


Fig.6 Comparison of pressure between shaking test and analysis

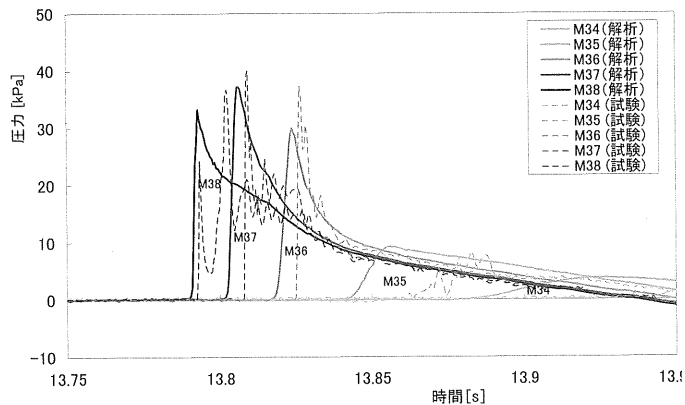
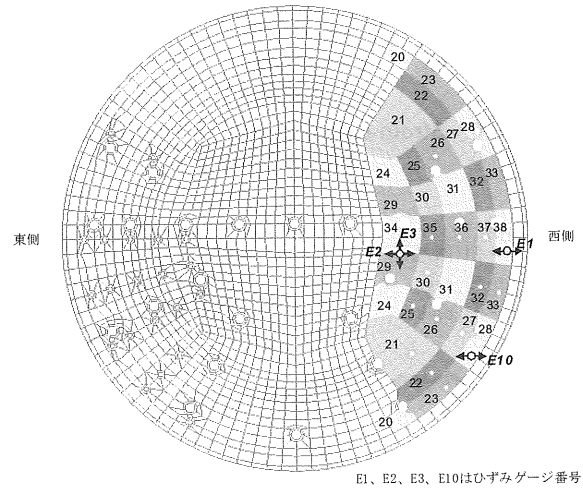


Fig.7 Analysis with segmentalized model

それぞれのひずみの時刻歴結果を Fig.9 に示す。応答解析結果は周期的な振動が発生しているが平均的には試験結果をほぼ再現している。また、20000Pa 以上をカットした応答解析結果においては、振動の各ピークで若干小さくなっているものの、衝撃圧を含む結果とほとんど変わらない。よって瞬間的な衝撃圧が変形に与える影響は限定的であり全体的なひずみはそれ以外の圧力の影響が支配的であると言える。



E1, E2, E3, E10はひずみゲージ番号

Fig.8 Analysis model to calculate strain on top board

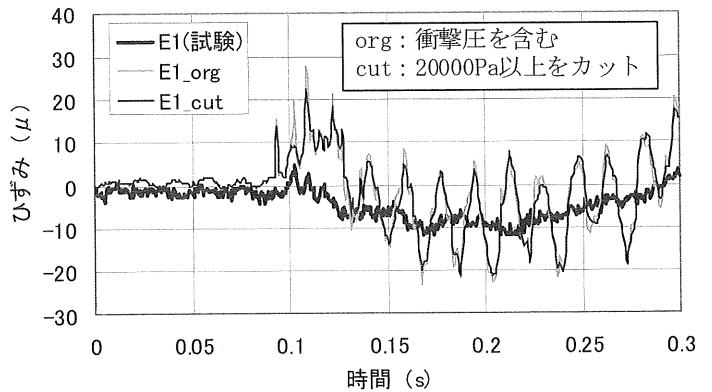


Fig.9 Measured strain and that calculated with measured pressure

3.3 天板の健全性評価

スロッシングによる波面衝突が天板強度へ与える影響を確認することにより、天板健全性の合理的な評価手法を検討した。

天板の健全性評価に必要な変形量は、振動試験においてひずみデータとして取得している。また先述のとおり天板の圧力データも得られているため、Fig.8 に示すように天板をモデル化し、各圧力計の周囲の領域に圧力時刻歴を与えて応答解析を実施し、発生するひずみを試験により計測されたひずみと比較した。さらに、瞬間的な圧力のピークが天板の変形に与える影響を評価するため、20000Pa 以上の衝撃圧をカットした圧力時刻歴による応答解析結果も合わせて確認した。

また、流動解析により得られた圧力時刻歴を用いたひずみを Fig.10 に示す。衝撃圧に相当する部分はないが、全体として試験圧力による応答解析およびひずみを模擬しており、流動解析で得られた圧力時刻歴を用いた天板の動的応答解析によっても、天板の変形挙動を模擬できることが分かった。

最後に、試験で計測された圧力時刻歴および、流動解析で得られた圧力時刻歴それぞれの最大値を静的に加えた結果を Fig.11 に示す。いずれの結果も試験で計測されたひずみに対し大きく、これらの評価が安全側の評価であることが分かった。

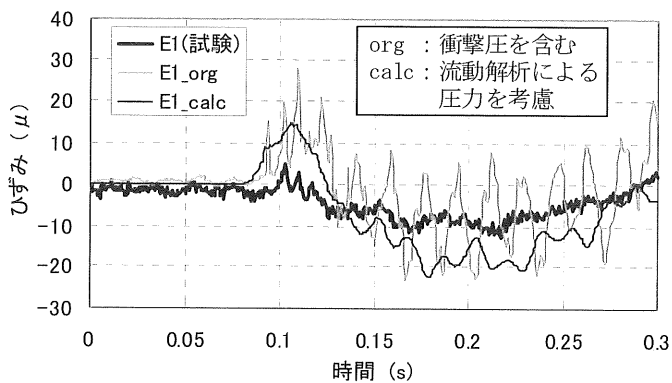


Fig.10 Strain calculated by pressure with simulation

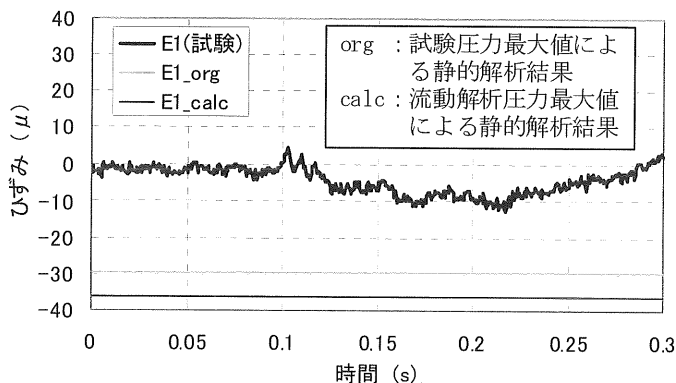


Fig.11 Strain calculated by maximum pressure with shaking test or analysis

日本原子力発電株式会社
 電源開発株式会社
 株式会社東芝
 日立GEニュークリア・エナジー株式会社

(平成 22 年 5 月 31 日)

4. 結言

- 1) 平板天板と円錐天板の各平底円筒形タンクの振動試験により天板衝突圧とスロッシング液面の分布データを取得できた。
- 2) 3次元シミュレーション解析により、液体が天板に衝突するまでの波高および天板圧力の試験結果を再現できた。
- 3) 3次元モデルのメッシュ細分化により天板への衝突圧力の試験結果を再現できることを確認した。
- 4) 瞬間的な圧力ピークが天板の変形に与える影響は限定的であることを確認した。
- 5) シミュレーション解析により得られた天板圧力の時刻歴データを用いて天板の変形挙動を模擬できることが分かった。

謝辞

本研究の成果はBWR 電力共通研究「タンクスロッシングに関する研究」によるものである。本研究に参加した会社を以下に記す。

東京電力株式会社
 東北電力株式会社
 中部電力株式会社
 北陸電力株式会社
 中国電力株式会社