

自己評価報告書

平成 23 年 4 月 28 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20360256

研究課題名 (和文) 浮屋根と液体の非線形性を考慮した大型液体貯槽の地震時スロッシング理論の体系化

研究課題名 (英文) Systematized Theory for Sloshing in a Large Liquid Storage Tank Considering Nonlinearities of Floating Roof and Liquid

研究代表者

松井 徹哉 (MATSUI TETSUYA)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：70023083

研究分野：構造設計工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：液体貯槽，浮屋根，スロッシング，長周期地震動，流体-構造連成作用，ポテンシャル理論，流体非線形，構造非線形

1. 研究計画の概要

過去の大地震でスロッシング被害が特に集中したシングルデッキ型浮屋根式液体貯槽を対象に，長周期地震動がスロッシング応答に及ぼす影響を検討する。浮屋根と液体の非線形性を考慮した構造・流体連成スロッシング解析プログラムを開発し，その妥当性を円筒貯槽模型の振動実験によって検証しつつ，実現象を再現できる解析理論として完成させる。さらにその成果に基づいて，シングルデッキ型浮屋根の損傷・沈没のメカニズムを解明するとともに，それらに及ぼす各非線形要因の影響を分析し，合理的な浮屋根の耐震強度評価法と耐震補強法の提案に結びつける。

2. 研究の進捗状況

(1) 浮屋根と液体の非線形性を考慮した大型液体貯槽のスロッシング解析法として，液体に対しては液面条件（運動学的条件，動力学条件）を除く全境界条件を満たすポテンシャル理論の解析解を，浮屋根に対しては有限要素法を適用する結合解法を開発した。本解法によれば，液体領域や貯槽本体の要素分割を必要とせず，入力データ作成の労力から開放される上に，離散化に伴う誤差を最小化することができ，浮屋根や液体の非線形性を考慮することが可能となる。

(2) 本解法を 2003 年十勝沖地震で沈没・火災の被害を受けたシングルデッキ型浮屋根式円筒貯槽に適用し，被害原因の究明を試みた。

(3) 解析法の妥当性を検証するために，縮小模型による振動台実験を行った。実験に用いた模型は半径 800mm のステンレス鋼製円筒貯

槽内部に塩化ビニル膜製のデッキ部とアクリル製の外周ボンツーンから成るシングルデッキ型浮屋根を浮かべたものであり，実機貯槽として想定した容量 3 万キロリットルおよび 10 万キロリットル貯槽との相似則を考慮して，断面寸法の異なる 2 体の浮屋根模型を用意した。浮屋根変位の計測には 8 台の CCD（固体撮像素子）カメラを用い，撮影した各計測点の映像をモーションキャプチャー処理によりデジタル波形に変換する方法を採用した。

(4) 解析および実験の結果得られた知見は以下のように纏められる。

- ① 浮屋根の応答には，周方向 1 次の線形モードのほか，液面や浮屋根の非線形性に起因する周方向 0 次，2 次，さらに 10 万キロリットル貯槽の場合には 3 次の非線形モードが存在する。
- ② 非線形モードの存在により，ボンツーンには鋼材の座屈限界を超える高応力が発生し，ボンツーンの損傷・沈没に結びついた可能性がある。
- ③ ボンツーン応力には液面の非線形性よりも浮屋根の非線形性，特にデッキ部の幾何学的非線形性（膜応力効果）の影響が大きい。

3. 現在までの達成度

② おおむね順調に進展している。

(理由)

本研究の当面の目標であった浮屋根と液体の非線形性を考慮したスロッシング解析法の開発とその模型振動実験による検証が当初の予定通り完了した。

4. 今後の研究の推進方策

(1) 前年度までに完成させた浮屋根と液体の非線形性を考慮した構造・流体連成スロッシング解析プログラムを、ポンツーンの座屈崩壊に至る過程を追跡できる解析プログラムへと発展させる。液体に対しては液面条件を除く全境界条件を満たすポテンシャル理論の解析解を適用し、浮屋根デッキ部およびポンツーン部を大たわみおよび塑性化が考慮できる有限要素薄板要素によってモデル化する。

(2) 前項で開発したポンツーンの弾塑性座屈を考慮した非線形スロッシング解析プログラムに基づき、ポンツーン部の座屈崩壊に至る過程を追跡し、沈没につながる座屈破壊の発生の可能性を検討する。

(3) 上記の研究成果に基づき、現行の消防庁告示に代わる大型液体貯槽浮屋根の耐震強度評価法と補強法を提案し、その妥当性と補強の効果を、三次元地震波震動台を用いた模型実験によって検証する。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① 永谷隆志, 松井徹哉: 浮屋根式円筒液体貯槽模型の地震時スロッシング実験—線形ポテンシャル理論解の実験による検証—, 日本建築学会構造系論文集, 第 659 号, pp. 235-242, 2010, 査読あり
- ② 永谷隆志, 松井徹哉: 解析解と有限要素法の結合解法による浮屋根を有する 2 次元矩形貯槽の非線形スロッシング解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 644 号, pp. 1723-1730, 2009, 査読あり
- ③ T. Matsui, Y. Uematsu, K. Kondo, T. Wakasa and T. Nagaya: Wind Effects on Dynamic Response of a Floating Roof in a Cylindrical Liquid Storage Tank, Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Vol. 131, Issue 3, pp. 031307/1-10, 2009, 査読あり
- ④ T. Matsui: Sloshing in a Cylindrical Liquid Storage Tank with a Single-deck Type Floating Roof under Seismic Excitation, Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Vol. 131, Issue 2, pp. 021303/1-10, 2009, 査読あり
- ⑤ 松井徹哉, 植松康, 近藤宏二, 若狭拓夫, 永谷隆志: 頂部開口型円筒液体貯槽にお

ける浮屋根の強風時スロッシング応答, 日本建築学会構造系論文集, 第 636 号, pp. 235-242, 2009, 査読あり

- ⑥ 松井徹哉: 応答スペクトル法による円筒液体貯槽浮屋根の地震時スロッシング応答の予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 627 号, pp. 741-748, 2008, 査読あり

[学会発表] (計 15 件)

- ① 永谷隆志, 松井徹哉: シングルデッキ型浮屋根を有する円筒液体貯槽模型の地震時スロッシング実験, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, 2010 年 11 月 20 日, つくば
- ② 永谷隆志, 松井徹哉: 解析解と有限要素法の結合解法による浮屋根式円筒液体貯槽の非線形スロッシング解析, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, 2010 年 11 月 20 日, つくば
- ③ 松井徹哉: 連成解析手法の現状—解析的アプローチ, 第 8 回新シェル・空間構造セミナー「流体と構造物の連成解析手法の現状と展望」, 2009 年 7 月 8 日, 日本建築学会
- ④ T. Nagaya, T. Matsui, T. Wakasa: Model Tests on Sloshing of a Floating Roof in a Cylindrical Liquid Storage Tank under Seismic Excitation, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, 2008/7/31, Chicago, Illinois, U.S.A
- ⑤ T. Matsui, Y. Uematsu, K. Kondo, T. Wakasa, T. Nagaya: Wind Effects on Sloshing of a Floating Roof in a Cylindrical Liquid Storage Tank, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, 2008/7/31, Chicago, Illinois, U.S.A

[図書] (計 1 件)

- ① 松井徹哉ほか: 容器構造設計指針・同解説, 日本建築学会, 2010, 全 355 ページ, 共著 (pp. 320-330 を分担)