

平成 22 年 5 月 14 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560492

研究課題名 (和文) スロッシングと液状化を考慮したタンク基礎の安定性評価手法の開発

研究課題名 (英文) Development of estimation method for tank foundation stability due to soil liquefaction and sloshing of tank content.

研究代表者

仙頭 紀明 (SENTO NORIAKI)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：40333835

研究成果の概要 (和文)：飽和砂地盤上のタンク基礎の地震時の沈下量を室内要素実験，遠心模型実験および有効応力解析をもとに評価した。その結果，タンクの沈下は地盤の液状化層厚，入力地震動の最大加速度および継続時間の影響を強く受けることがわかった。また，タンク直下地盤の土の応力状態，特に側圧係数の増加が沈下に影響していることがわかった。タンクの沈下に及ぼすスロッシングの影響は地震動主要動のそれとくらべると限定的であることがわかった。

研究成果の概要 (英文)：Settlement of tank foundation due to liquefaction is estimated by laboratory element test, centrifuge experiment and effective stress analysis. Settlement of the tank foundation is related with thickness of liquefied layer, maximum acceleration and duration of the earthquake motion. The magnitude of tank foundation settlement is also related with stress condition of soil below the foundation, especially increase of the coefficient of lateral pressure (K). Settlement is caused to some extent by sloshing compared with main earthquake motion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：動土質，液状化，タンク，基礎，沈下，有効応力解析，遠心载荷試験

1. 研究開始当初の背景

(1) 長周期地震動は都市臨海部に建設されたタンクのスロッシング現象を誘発し，タンクの損傷や火災による環境汚染が懸念されている。スロッシング波高が高くなり，長時間

揺れが継続することでタンク基礎地盤には内容物の水頭変化による鉛直交番荷重が長時間繰返し作用することになる。

(2) また既設の石油タンクには液状化の可能性が高い地盤に建設されたものも多く，一

部は液状化対策がなされていない。これらのタンクは基礎地盤の液状化により不同沈下による被害が発生しうる。

(3) 液状化地盤上のタンクの沈下量に関する解析が多く実施されている。近年の研究成果の蓄積により、数 10cm~数 m という大きな沈下量が表現できるようになったものの、解析手法や解析パラメータの決め方によって、予測結果に相当のばらつきがあることが指摘されている。

(4) 大地震の際には上記 (1) 及び (2) が連成した現象が起こりうる。すなわち主要動で基礎地盤に液状化が発生した場合、後続のスロッシング荷重変動によりタンクの不同沈下量が増加する可能性がある。しかし実験データや現場調査結果が存在しないため、定性的および定量的な議論がなされていないのが現状である。

2. 研究の目的

(1) 液状化地盤上のタンク基礎沈下予測解析の精度を向上させる。

(2) 液状化とスロッシングが同時に発生した場合の沈下量に関する室内要素実験、および遠心荷重実験結果を得る。

(3) 実タンクモデルの地震応答解析によりタンク基礎の沈下に及ぼす様々な要因をパラメータスタディーにより検討し、沈下量の定量評価を試みる。要因としては以下のことがあげられる。

- ① 入力地震動の最大加速度
- ② 入力地震動の継続時間
- ③ タンク基礎の規模
- ④ 液状化層厚
- ⑤ スロッシングの有無

3. 研究の方法

(1) 既存の有効応力解析コード (EFFECT) を改良し、液状化後の沈下予測の精度を向上させる。具体的には液状化後の沈下挙動が表現できる構成モデルを組み込みそのパフォーマンスを検証する。

(2) タンク直下地盤の地震時の応力状態を模擬した室内要素実験を中空ねじりせん断試験を用いて実施する。この実験結果は改良した解析コードの性能を評価するためのベンチマークとして用いる。同時に以降で行うシミュレーションのための適切なパラメータセットを決定する。

(3) 飽和砂地盤上のタンク構造物をモデル化した遠心模型震動実験を実施する。実験は、入力地震動の違い、タンクの接地圧、スロッシングの有無に着目して実施する。

(4) 遠心模型実験のタンク-地盤モデルを有効応力解析により解析し、改良した解析モデルが境界値問題の挙動を表現できるか検証する。あわせて、パラメータセットの見直

しを実施する。

(5) 飽和砂地盤上のタンク構造物の地震時の沈下について有効応力解析を用いて実タンクモデルについてケーススタディーを実施し、沈下量に及ぼす様々な要因を定量的に分析する。

4. 研究成果

(1) 液状化後の沈下予測向上のためのモデル

(仙頭モデル) を組み込みこんだ有効応力解析コード (EFFECT) により、遠心模型実験をシミュレーションターゲットとした液状化-圧密沈下解析を実施した。解析結果より、従来モデルと比較して仙頭モデルでは再圧密沈下量が大きくなり、最大入力加速度 200Gal 程度のケースでは図 1 に示すように実験値に近い最終沈下量が得られた。また入力地震動の特性に対しては、継続時間の長い海溝型地震動での地表面沈下量が、継続時間の短い直下型地震動での沈下量よりも大きくなるという特長を再現することができた。

(2) タンク直下地盤の応力状態を模擬した中空ねじり試験とそのシミュレーションを実施した。その結果、以下が明らかとなった。

① 繰返しせん断応力の荷重により、土要素の鉛直軸ひずみが増加していく現象を再現できた。また、繰返しせん断試験での有効応力経路の特徴を再現できた。

② 側圧係数 $K=0.4$ の場合、繰返し回数に対し軸ひずみやせん断ひずみが徐々に出にくくなるという (硬化する) 実験結果の詳細な特徴までは再現できなかった。 $K=0.8$ のケースでは、ある繰返し回数に達すると図 2 にあるように軸ひずみやせん断ひずみの増分量が急激に増加する (軟化する) 実験結果の特徴が再現できた。

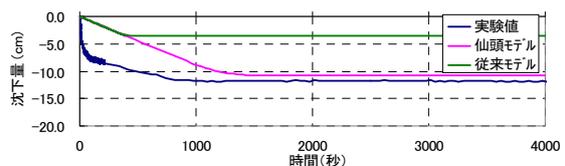


図 1 タンク沈下量の実験値と解析値の比較

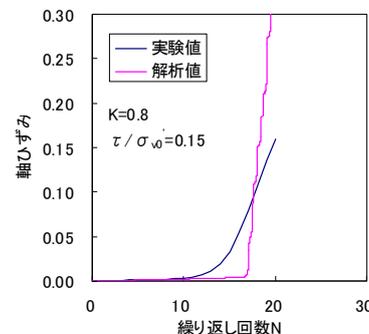


図 2 タンク直下地盤の軸ひずみ

(3) 遠心模型振動実験により、地震動の継続

時間の違いがタンクの沈下量，沈下性状および地盤内の応答特性などに与える影響を定量的に検討した。

その結果，以下のことがわかった。

①入力地震動の継続時間が長いほうが，タンクの沈下量が大きくなることがわかった。また，タンクの沈下量は接地圧が大きいほうが絶対沈下量，不同沈下量ともに大きくなることがわかった。そのときのタンクの沈下モードとして，加振中に発生するシェイクダウンモードと，過剰間隙水圧の消散に伴う再圧密沈下モードを確認した。両者の影響度を実験結果から分析したところ，シェイクダウンモードでの沈下量が60%~70%程度，再圧密沈下モードでの沈下量が30%~40%であることがわかった。また，その割合は地震動の継続時間により変わることがわかった。

②実験結果より地中せん断ひずみ時刻歴を分析したところ，地震動の継続時間の長いケースでは，継続時間が短いケースに比べて最大せん断ひずみの大きさは小さいものの，繰返し回数が多いことがわかった。これによりタンク直下地盤の軸ひずみが蓄積し，タンクの沈下量が大きくなったものと推定される。

(4)遠心模型振動実験をシミュレーションの対象としたEFFECTによる二次元有効応力解析を実施した。シミュレーション結果の一例を図2に示す。解析では液状化地盤上のタンク沈下量の定量評価に対する適用性を検討し，その結果，以下のことがわかった。

①タンクの沈下量に影響を及ぼす土質パラメータを検討し，再圧密特性を規定するパラメータ C_c の影響が大きいことを明らかにした。このとき， C_c を土質試験結果の1/2に設定すると，継続時間が短い地震動を入力した遠心模型振動実験によるタンクの沈下量とおおむね整合した。この要因のひとつは C_c の拘束圧依存性と考えられるが，実務を前提とする場合には，パラメータ設定のための要素試験条件が検討課題であり，液状化地盤の再圧密体積ひずみの発達特性の拘束圧依存性について更なる研究が必要である。

②上記で設定したパラメータにより，継続時間の長い地震動での遠心模型振動実験をシミュレーションした。その結果，タンク沈下量は遠心模型実験結果と同様に入力地震動の継続時間の影響を受け，継続時間の短い地震動と比較して増大したが，解析値は実験値よりも20%~60%程度大きくなった。

③シミュレーション結果より抽出したタンク直下地盤における地震時の側方土圧係数 K 値の変化を分析し，その鉛直ひずみの発達メカニズムを考察した。その結果，地震時のタンク直下地盤では K 値が変動し，地盤要素がより変形しやすくなる状態 (K 値が大きくなる) になることがわかった。これによりタンク直下地盤の土要素には地震動による繰

返しせん断応力の作用による大きな軸ひずみが発生し，タンクの沈下量が増大するものと考えられる。

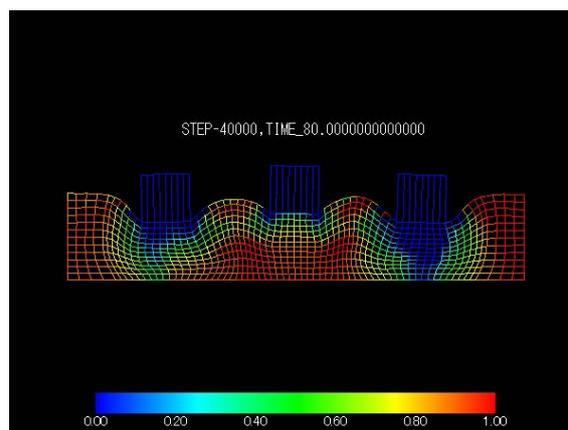


図3 シミュレーション結果の例(過剰間隙水圧比分布)

(5)遠心模型実験を実施し，スロッシング荷重がタンクの沈下量，沈下性状および地盤内の応答特性などに与える影響を定量的に検討した。その結果，以下のことがわかった。

①今回の実験ではタンク内容液に大きなスロッシング波高を与えることができなかった。水面振動は一次モード(3Hz)から二次モード(6Hz)に変化し，加振方向前後(NおよびS側)において動水圧のピークが同時刻に観察された。このモード変化により，タンクのロッキング振動が低減したものと考えられる。

②密な地盤ではタンクの沈下量は大きく低減することがわかった。

③地震波で液状化した地盤に加速度振幅の小さい長周期の正弦波で加振したところ，タンクの沈下は促進された。これに対して地震により発生する地中せん断ひずみの分析をしたところ，液状化地盤中では大きなせん断ひずみが発生していることがわかった。このことから，前述したタンク沈下量の増大に対し，繰返し作用する地中せん断ひずみの発生が大きく影響するものと考えられる。

(6)タンク直下地盤の応力状態を模擬した繰返しせん断試験に対し，地中せん断応力の時刻歴を与える実験を実施した。さらに，その試験体にスロッシングによる鉛直応力変動(軸差せん断)を与え，鉛直ひずみの発達を分析した。スロッシング荷重を模擬した繰返し軸差応力履歴で蓄積した土要素の鉛直ひずみの大きさは，せん断応力履歴での蓄積量と比較して5%~20%程度であり，タンクの総沈下量に占めるスロッシングの影響は限定的であった。しかしながら，これについてはスロッシングの繰返し回数に依存することから，スロッシング荷重の設定方法について

は更なる検討が必要である。

(5) 有効応力解析コード EFACT を用いて液状化地盤における実タンク沈下量の予測解析を実施し、タンク基礎の沈下に対する地震動の継続時間、スロッシング荷重、タンクの規模および液状化地盤の層厚の影響について検討した。

①解析結果の分析より、図 4 に示すように液状化層厚が大きいほどタンクの沈下量は増加すること、群設タンクでは単設タンクに比べて沈下量が小さくなることがわかったが、タンク径や液深（鉛直応力）と沈下量には明確な相関が見られなかった。また、タンクの沈下量は単に最大加速度値にのみ支配されているわけではなく、地震動の継続時間に影響を受けていることがわかった。

②一方、タンクの沈下量に対するスロッシング荷重の影響は比較的限定され、地震動（地盤の振動）の影響による沈下量に対して 10%～20%程度の増加となることがわかった。（図 5）

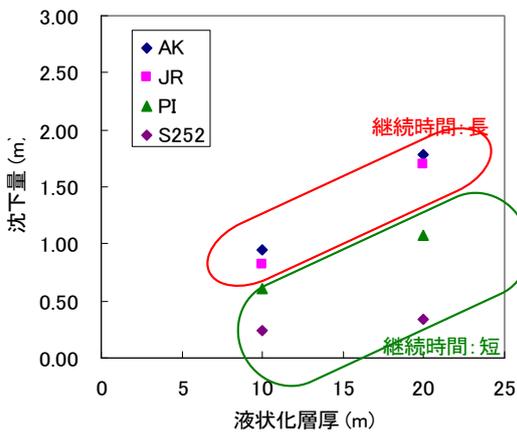


図 4 液状化層厚とタンク沈下量の関係

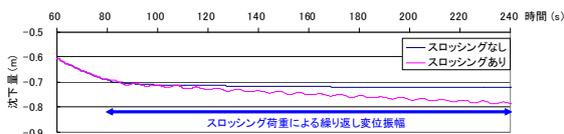


図 5 スロッシングの有無に着目したタンク沈下量の時刻歴の解析結果

5. 主な発表論文等

（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 1 件）

① Shunichi Higuchi, Noriaki Sento, Motoki Kazama, Ryosuke Uzuoka, Hirohisa Takahashi, Influence of earthquake motion characteristics on settlement behavior of tank foundation due to liquefaction, Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - Kokusho, Tsukamoto & Yoshimine (eds), 査読有り, pp. 595-601, 2009.

〔学会発表〕（計 4 件）

① 樋口俊一, 伊藤浩二, 仙頭紀明, 繰返しせん断履歴を考慮した砂の再圧密モデルを用いた液状化地盤の有効応力解析, 第 42 回地盤工学研究発表会, pp. 1641-1642, 2007.

② 樋口俊一, 樺沢祐樹, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹, 液状化によるタンク基礎の沈下に及ぼす地震動継続時間の影響, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp. 1601-1602, 2008.

③ 仙頭紀明, 樋口俊一, 高橋啓久, 風間基樹, 渦岡良介, 液状化に伴うタンク基礎の沈下に関する室内要素実験, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp. 1603-1604, 2008.

④ 樋口俊一, 渦岡良介, 仙頭紀明, 風間基樹, 有効応力解析による液状化地盤のタンク基礎の沈下挙動の検討, 第 44 回地盤工学研究発表会, pp. 1260-1261, 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仙頭 紀明 (SENTO NORIAKI)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：40333835

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

樋口俊一 (HIGUCHI SHUNICHI)

大林組・技術研究所・主査

研究者番号：40450994