

球形貯槽の3次元FEM有効応力解析による耐震性検討

(株)大崎総合研究所 正会員 ○藤田 豊

高圧ガス保安協会 フェロー会員 木全 宏之 小山田 賢治 大野 卓志

1. はじめに

高圧ガス設備等耐震設計基準(旧耐震告示)に準拠して設計された杭基礎を有する球形貯槽は、杭基礎-地盤系との動的相互作用や地盤変位による構造物への影響を考慮していないことから、球形貯槽を軟弱地盤に設置した場合、地震時に杭基礎が損傷する可能性がある。本報では、杭基礎の耐震性向上を図る対策として増し杭に着目し、球形貯槽-杭基礎-地盤連成系の3次元FEM有効応力解析結果から杭本数と杭の損傷低減効果について検討する。なお、本検討は「経済産業省委託 令和元年度石油・ガス供給等に係る保安対策調査等事業(高圧ガス設備等耐震設計手法の標準化・高度化及び防災・減災対策)」として実施されたものである。

2. 解析モデルの概要

球形貯槽-杭基礎-地盤連成系モデルを図-1に示す。地盤はソリッド要素、球形貯槽及び基礎版はシェル要素、タイロッドブレースはロッド要素、支柱及び鋼管杭($\phi 600\text{mm}$, $t=16\text{mm}$)は梁要素でモデル化している。ここで用いる地盤の概要と解析定数を表-1に示す。地盤は緩い地盤とし、地表から砂、シルト、杭の支持層となる砂礫で構成されている。砂及びシルトの動的変形特性には、安田・山口の提案式をベースに設定した修正R-0モデルを採用する。ここで、地下水位GL-1.5m以深の砂は液状化を考慮できる有効応力モデルとし、道路橋示方書によるR20と竜岡らの方法に基づき、砂の液状化強度比-繰返し回数の関係を図-2に示すように設定している。また、球形貯槽は直径12.41mの鋼製貯槽(貯槽容量1000 m^3)で球殻を線形弾性として取り扱うが、タイロッドブレースは軸力-軸変位関係にバイリニアの非線形特性を、支柱及び杭には曲げモーメント-曲率関係に軸力依存を考慮したバイリニアの非線形特性を付与している。杭本数は、17本(旧耐震告示で設計)、29本及び49本の3種類としている。なお、3次元FEMモデルの側面には繰返し境界を、底面には半無限境界を模擬したダッシュポットを設けている。

3. 入力地震動

入力地震動は上町断層波とし、半経験的手法のうち経験的グリーン関数法により作成している。地震波作成のための中小地震は2013年12月15日の地震(Mj3.8)とし、防災科学研究所の地震観測点(K-NET 堺)で得られた観測記録を採用する。この観測記録は地表の記録のために、地盤モデルを用いて工学的基盤まで引き戻している。作成された工学的基盤におけるNS(X)方向、EW(Y)方向及びUD(Z)方向の入力地震動の加速度波形を図-3に示す。

4. 3次元FEM非線形モデルによる有効応力解析

有効応力解析結果のうち、最大応答相対変位を図-4に示す。同図によれば、砂が液状化を生じて地表面の水平変位は約90cmと大きくなっており、地表面の水平加速度は液状化に伴い 300cm/s^2 以下になっている。また、タイロッドブレースの軸力-軸変位関係を図-5に示す。同図から、杭の本数が増加すると相対的に杭基礎-地盤系の剛性が増加するために、タイロッドブレースに生じる軸力が増加しているが、十分弾性範囲内に収まっている。一方、鋼管杭の杭頭部の曲げモーメント-曲率関係を図-6に示す。ここで、梁要素を用いた場合の杭の最大曲率 ϕ_{max} を推定する方法は、時刻歴の曲率 ϕ_z 及び ϕ_y を用いて時刻歴の二乗和平方根を作成し、その最大値を ϕ_{max} とした上で、その時刻における杭軸力からM- ϕ 関係上のプロット点を評価している。同図より、杭本数が17本の場合は、すべての杭の曲率が終局曲率 ϕ_u (鋼管杭の杭頭座屈)を大きく上回り、杭本数が29本の場合は、杭の曲率が ϕ_u 辺りになっていることから、杭は破壊する可能性が高い。一方、杭本数が49本まで増加すると、すべての杭は ϕ_u 以下に十分納まっており、杭の耐震性を確保できている。また、球殻重心位置の応答加速度を図-7に示す。同図によれば、杭本数の増加に伴い、杭基礎-地盤系の剛性が増加して球殻重心の応答加速度が増加している。

キーワード 3次元FEM非線形モデル, 有効応力解析, 球形貯槽, 増し杭, 杭の最大曲率

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1 TEL 03-3561-4398

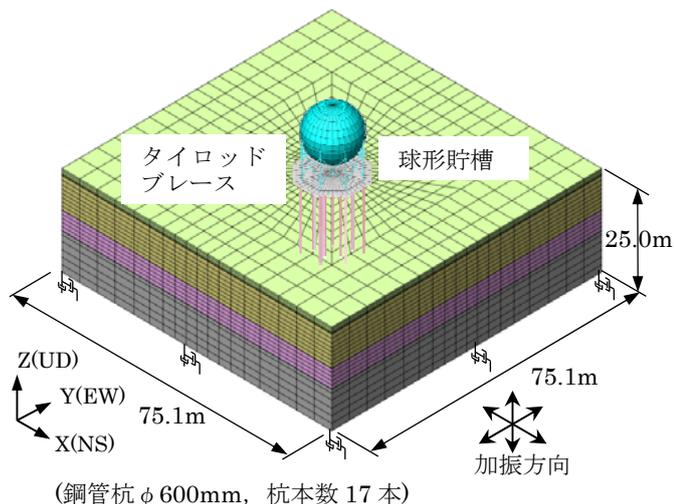


図-1 球形貯槽—杭基礎—地盤連成系モデル
(鋼管杭 φ600mm, 杭本数 17 本)

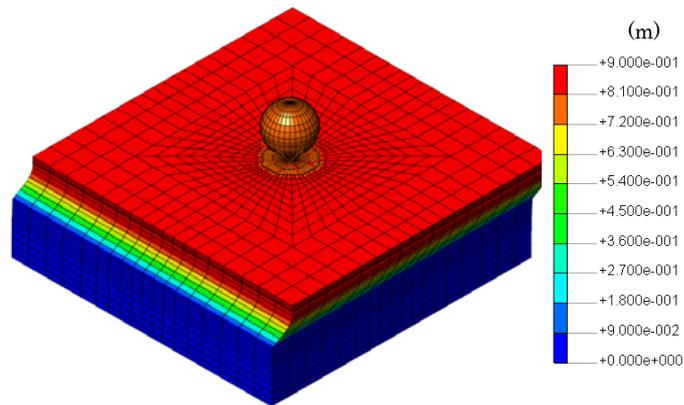


図-4 球形貯槽の最大応答相対変位 (杭本数 17 本)

表-1 地盤概要と解析定数

GL(m)	地層名	緩い地盤		
		N 値	Vs(m/s)	ν
0.0				
-1.5	砂(1)	7	153	0.40
-10.0	砂(2)	7	153	0.48
-15.0	シルト	2	126	0.49
-25.0	砂礫	45	285	0.45
	工学的基盤	50	300	0.45

注:せん断波速度 Vs は道路橋示方書の式による.
地下水位は GL-1.5m とする.

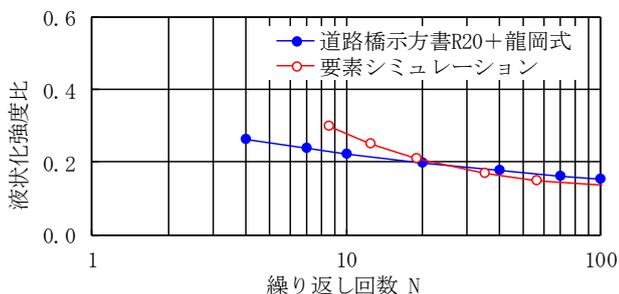


図-2 液状化強度比—繰り返し回数の関係

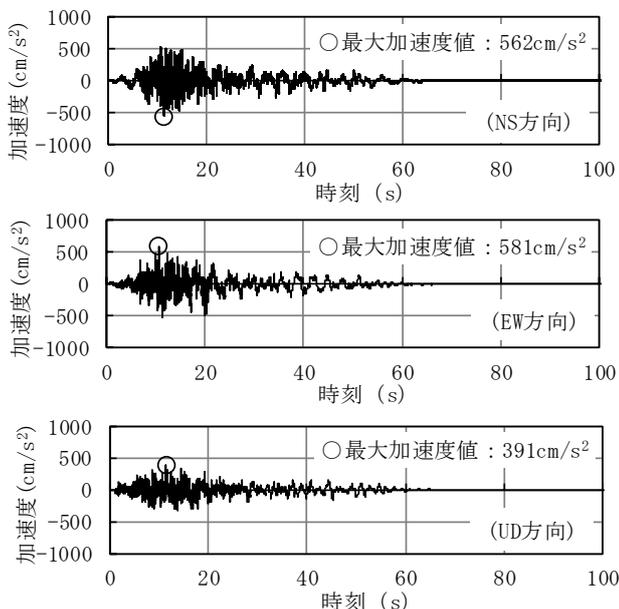


図-3 入力地震動 (上町断層波, 工学的基盤)

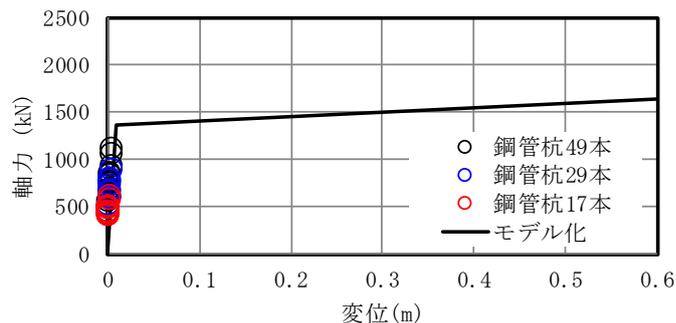


図-5 タイロッドブレースの軸力-軸変位関係

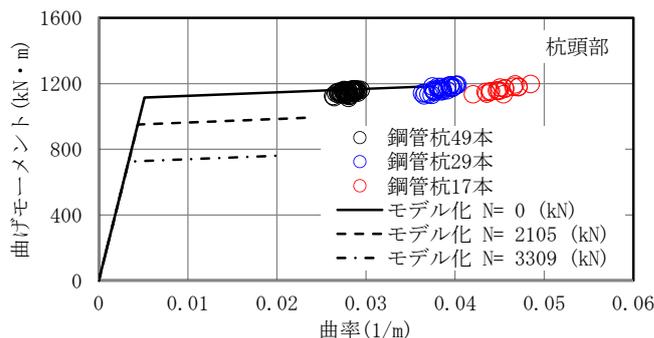


図-6 鋼管杭の曲げモーメント-曲率関係

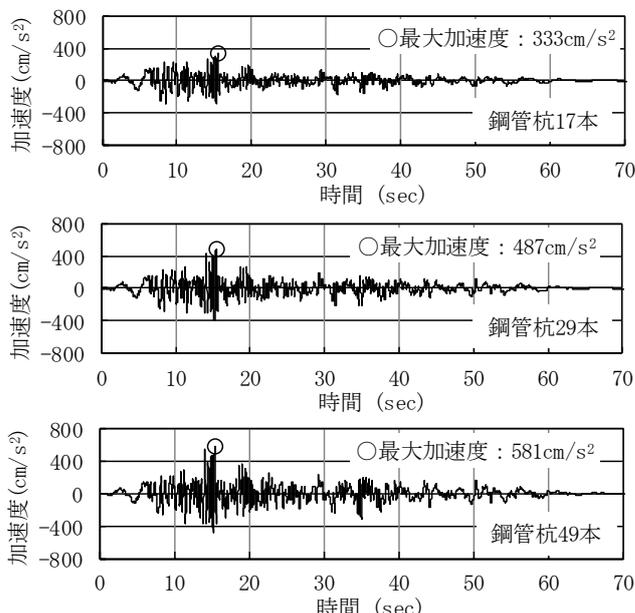


図-7 球殻重心位置の応答加速度 (X 方向)