

杭基礎で支持された高圧ガス設備の耐震性評価における静的梁ばねモデルの適用性検討

高圧ガス保安協会 フェロー会員 ○木全 宏之 小山田 賢治 名倉 和広 高橋 茂 大野 卓志
清水建設（株） 正会員 藤田 豊 福武 毅芳

1. はじめに

杭基礎で支持された高圧ガス設備を対象に地震時の杭応力を評価する場合、精緻な方法として3次元FEM地震応答解析（地盤が液状化を生じる場合には3次元FEM有効応力解析）による手法、簡易な方法として設計基準類で扱われている梁ばねモデルを用いた静的非線形解析による手法等が考えられる。本報では、杭支持の横置円筒形貯槽を対象に、両者の解析手法で地震時の杭応力を算定し、得られた杭応力を比較することで簡易な梁ばねモデルの適用性について検討した。なお、本検討は「経済産業省委託 令和4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さらなる高度化に向けた調査研究）」として実施されたものである。

2. 解析モデルと解析ケース

3次元FEM地震応答解析に用いた横置円筒形貯槽－杭基礎－地盤連成系モデルを図-1に示す。貯槽は質点系モデル、地盤はソリッド要素、基礎版はシェル要素、鋼管杭は梁要素でモデル化し、地盤モデル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た。ここで、地盤概要と解析定数を表-1に示す。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モデルを採用した。砂に液状化を考慮する場合にはダイレイタンスーモデルとしておわんモデルを採用し、液状化強度比－繰返し回数の関係を道路橋示方書（H29）によるR20と竜岡らの方法に基づき図-2のように設定した。一方、2次元梁ばねモデルを図-3に示す。同モデルは、建築基礎構造設計指針（2019）と道路橋示方書（H29）に基づき作成しており、地盤ばねはN値に従う地盤定数と非線形性を与えた。ここで、両モデルとも杭材の曲げモーメント－曲率関係には軸力依存を考慮したバイリニアの非線形特性を与えた。また、3次元FEM地震応答解析の解析ケースを表-2に示す。杭の線形・非線形や地盤の液状化の有無を考慮し、これと同様の解析ケースを梁ばねモデルによる静的非線形解析でも実施した。

3. 入力地震動

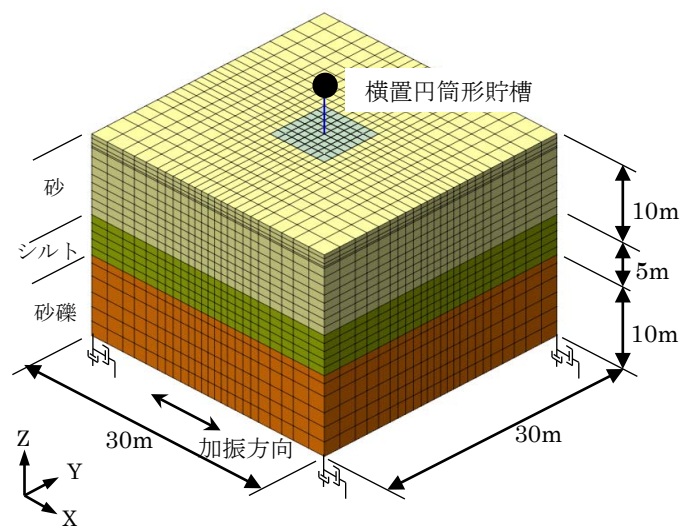
3次元FEM地震応答解析に用いる入力地震動は上町断層帯地震波とし、堺・高石コンビナート地区近傍のK-NET堺で得られた地震観測記録を用いて、経験的グリーン関数法により作成した地震波である。作成した工学的基盤におけるNS(X)方向の入力地震動の加速度波形を図-5に示す。一方、梁ばねモデルに用いる地盤変位分布は、土柱モデルの地震応答解析で得られた地表面最大変位時における水平地盤変位分布（図-4参照）を与え、貯槽の慣性力は3次元FEM地震応答解析で得られた最大慣性力を静的外力として与えた。

4. 3次元FEM地震応答解析と梁ばねモデル解析による杭断面力の比較

3次元FEM地震応答解析結果と2種類の梁ばねモデル解析から得られた鋼管杭の曲げモーメント－曲率関係を図-6に示す。同図には、表-2に示す解析ケースに従い、両解析手法の結果を重ね書きしている。ケース1及びケース2は非液状化地盤を対象にしており、解析手法にかかわらずケース1は杭が概ね弾性範囲に収まり、ケース2はケース1に比べて杭の肉厚が薄いことから杭頭で塑性率が2程度になっている。これより、非液状化地盤で、梁ばねモデル解析結果が杭頭で塑性率が2程度以下であれば、杭応力評価において梁ばねモデル解析手法が適用可能と考えられる。一方、ケース3は液状化地盤を対象にしており、3次元FEM地震応答解析結果では杭の塑性率が2～4程度と梁ばねモデル解析に比べてかなり大きくなっている。この原因は、3次元FEM地震応答解析結果では砂層の液状化で地盤剛性が極端に低下し、杭頭近傍と杭の支持層境界でインピーダンス比が急激に変化したことで、杭の曲率がこれらの位置に集中した可能性がある。液状化地盤において、梁ばねモデル解析結果は3次元FEM地震応答解析結果に比べて杭の曲率を過小評価しており、梁ばねモデル解析を設計に用いる場合には留意が必要である。

キーワード 高圧ガス設備、3次元FEM地震応答解析、梁ばねモデル解析、杭基礎

連絡先 〒105-8447 東京都港区虎ノ門 4-3-13 TEL 03-3436-6103



(鋼管杭 φ 600mm, L=15.9m, 杭本数 4 本)

図-1 横置円筒形貯槽—杭基礎—地盤連成系モデル

表-1 地盤概要と解析定数

GL(m)	地層名	緩い地盤		
0.0		N 値	Vs(m/s)	ν
-10.0	砂	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 V_s は道路橋示方書の式による。
地下水位は GL±0.0m とする。

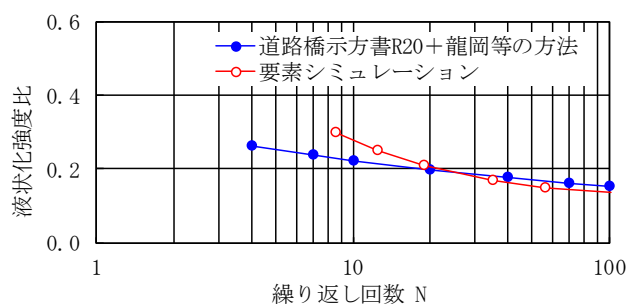
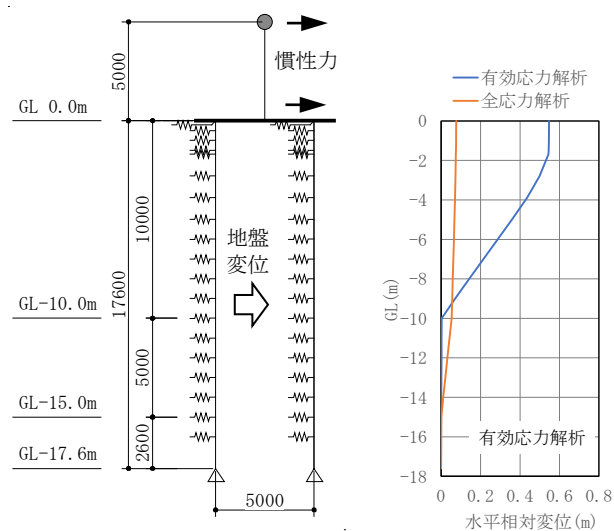


図-2 液状化強度比—繰返し回数の関係



(1/2モデルのため杭は2本)

図-3 2次元梁ばねモデル

図-4 土柱モデルによる
水平地盤変位分布

表-2 解析ケース (3次元 FEM 地震応答解析)

No.	解析法	材種	杭径 (肉厚)	予想される 非線形性
1	全応力解析	SKK400	φ 600mm (t=16mm)	杭 : 概ね線形 地盤 : 非線形
2	全応力解析	SKK400	φ 600mm (t=12mm)	杭 : 非線形 地盤 : 非線形
3	有効応力解析	SKK490	φ 600mm (t=16mm)	杭 : 非線形 地盤 : 液状化

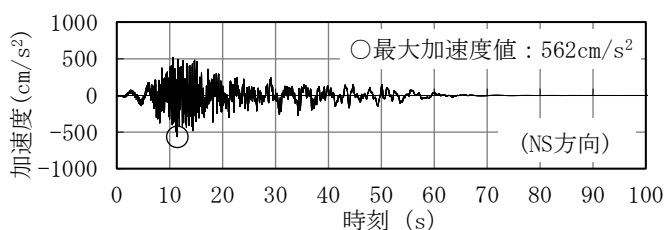
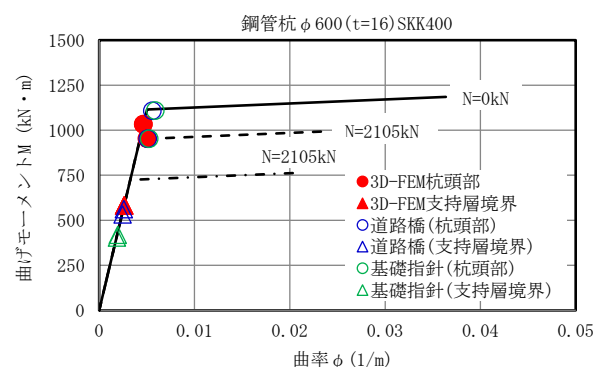
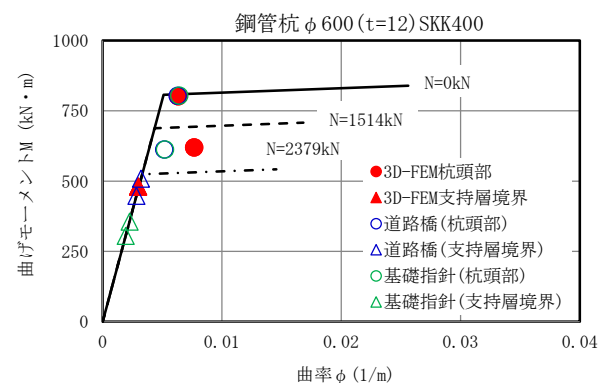


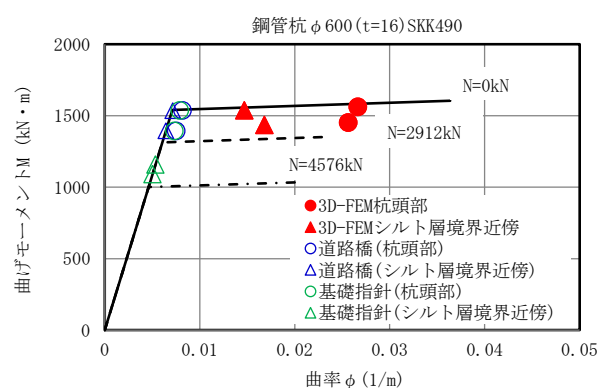
図-5 入力地震動(上町断層帯地震波, 工学的基盤)



(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3

図-6 鋼管杭の曲げモーメント-曲率関係