プラント基礎の耐震補強について

木全　宏之[1]・藤田　豊[2]・小林　望[3]

[1]フェロー会員　工博　清水建設株式会社　土木技術本部設計第二部（〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館）
[2]工博　清水建設株式会社　原子力・火力本部設計部(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館)
[3]正会員　工修　清水建設株式会社　土木技術本部設計第二部(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館)

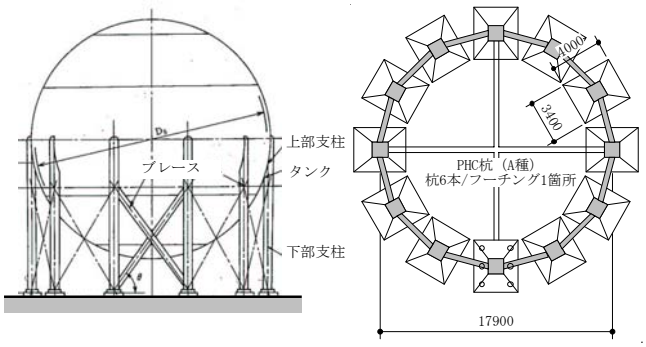
BCPの観点から東京湾沿岸に立地する杭基礎で支持された球形タンクの耐震補強を実施するにあたり，事前に球形タンクー杭基礎ー地盤連成系の三次元有効応力解析を実施し，球形タンクの損傷について把握した．その結果，球形タンクを支持するPHC杭の塑性率が4を越え，杭の損傷が認められたため，表層5mを高圧噴射攪拌工法により地盤改良することでPHC杭の耐震安全性が確保された．

キーワード：球形タンク，三次元有効応力解析，液状化，地盤改良

１．はじめに

東京湾沿岸には，産業上重要な基幹プラントが集中している．一方，それらのプラントも建設されて30年以上経過しているものが比較的多く，近い将来に起こりうる地震に対してBCPの観点から耐震補強を検討または既に実施している企業もある．東京湾沿岸では支持層が30m以深にあることが多いことから，プラント基礎はPHC杭等の既製杭で支持されていることが多い．そのため，耐震補強にはプラント本体の補強のみならず，臨海部特有の地盤の液状化に伴う杭の損傷を低減するために，杭の増し打ちや地盤を補強（地盤改良）する例も見受けられる．

本報では，東京湾で比較的多く見受けられる杭支持された球形タンクを対象に，内閣府が提示している東京湾北部地震動を用いて，球形タンクと支持地盤を含めた三次元有効応力解析を実施し，地盤の液状化に伴う杭基礎の損傷について検討する．また，杭の損傷が予想される場合には，杭基礎の耐震補強として地盤改良に着目し，地盤改良よる杭の損傷低減効果について把握を試みる．



(a) 立面図　　(b) 基礎平面図

図-1　球形タンクの形状・寸法

２．対象構造物と対象地盤

(1) 対象構造物

対象構造物は**図-1**に示す球殻の直径が17.9mの球形タンクである．球形タンクの内容物の比重は概ね10kN/m^{3}である．この球形タンクは12本の支柱と支柱間をつなぐブレースで構成されており，球形タンクに生じる地震力に対してブレース付き架構で抵抗する構造になっている．上部荷重を地盤に伝達させる基礎は72本のPHC杭（φ400）で支持されており，支持層はGL-28.65m～GL-36.0mの細砂Ds1となっている．

表-1　地層の層序と物性値

深さ (m)	地層名	γ (t/m³)	N 値	Vs (m/s)
-2.00	埋土 Fc	1.70	3	140
-3.10	埋土 Fc	1.70	3	140
-10.55	細砂 As1-1	1.80	15	200
-13.35	細砂 As1-2	1.80	25	230
-17.90	細砂 As1-3	1.80	15	200
-22.65	粘土質シルト Ac1	1.65	4	160
-25.85	細砂 As2	1.80	20	220
-28.65	粘土質シルト Ac2	1.65	6	180
-36.00	細砂 Ds1	2.00	45	280
-45.60	腐植土・シルト Dc2	1.70	15	250
-54.95	細砂 Ds2	2.00	>50	400
-66.90	シルト質粘土 Dc3	1.70	25	290
	工学的基盤	2.00	>50	450

注記：地下水位はGL-2.0m

(2) 対象地盤

対象地盤の地層の層序と物性値を**表-1** に示す．地層は概ね平行成層で，砂質土と粘性土が交互に堆積した構造になっている．地表から埋土，細砂，粘土質シルト，細砂，粘土質シルト，細砂の層序で，GL-28.65m から洪積層が現れるとともに，工学的基盤は GL-66.9m の細砂（せん断波速度 Vs=450m/s）となっている．地表から 3.10m～17.90m の細砂は N 値が 15～25 程度となっており，地震動の大きさによっては液状化の可能性を有する地盤と考えられる．また，杭の支持層は GL-28.65m で現れる細砂 Ds1 で，その N 値は 45 となっている．なお，この球形タンクは，護岸からの最短距離で 100m 以上離れており，本地盤が液状化を生じたとしても，それによる側方流動の可能性は低いと考えられる．

３．入力地震動

内閣府中央防災会議から提出された「首都直下地震専門調査会報告」（平成 17 年 7 月）によれば，フィリピン海プレートと北米プレートの境界で発生する首都圏直下地震として東京湾北部地震，茨城南部地震，多摩地域地震の 3 地震(マグニチュード 7.3)が提示されている．ここでは，対象プラントが東京湾沿岸に立地することから，入力地震動は東京湾北部地震とする．その時刻歴加速度波形と応答スペクトルを**図-2** に示す．時刻歴加速度波形によれば，直下型地震のために継続時間は 30 秒と短く，応答スペクトルから，周期が 0.7 秒付近と 2～3 秒付近で比較的大きな応答を生じる．このため，東京湾沿岸に立地するプラントでは，構造物-地盤系の

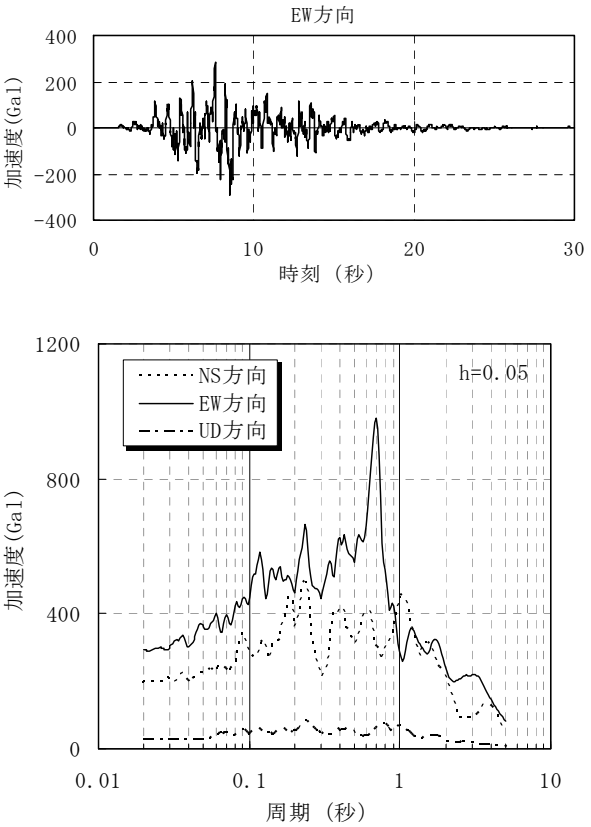


図-2　入力地震動（東京湾北部地震）

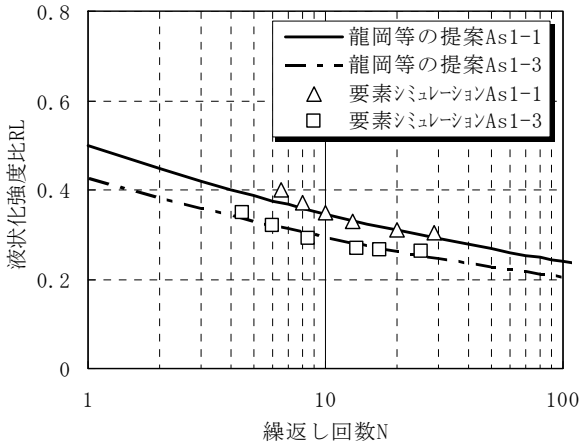


図-3　液状化強度曲線（細砂 As1-1，As1-3）

固有周期が比較的長く，プラントとして大きな応答を生じる可能性がある．

４．三次元有効応力解析による検討

(1) 液状化地盤のモデル化

有効応力解析では，地盤のせん断応力-せん断ひずみ関係を修正 R-O モデルで，間隙水圧の上昇を松岡・福武の過剰間隙水圧モデル（Bowl モデル[1]）で

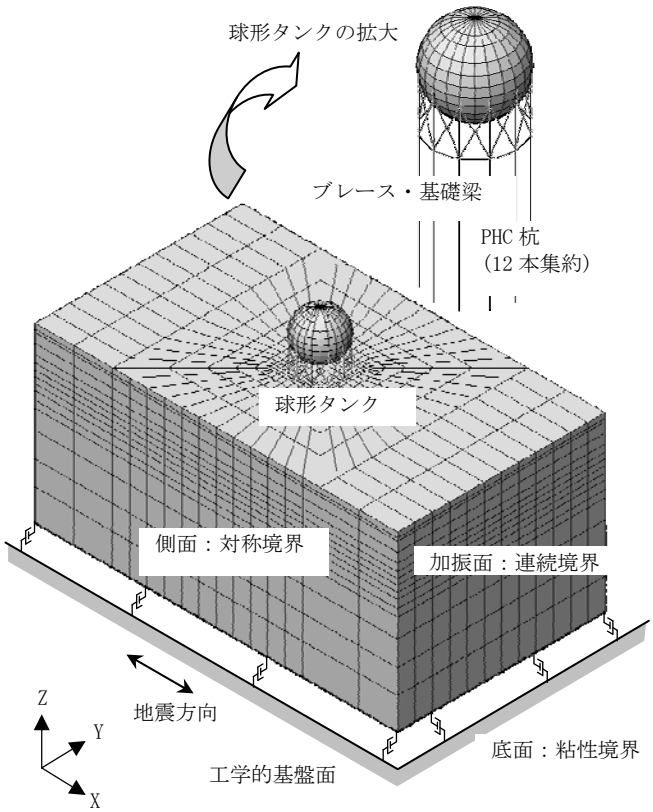


図-4　三次元解析モデル

表現しており，非排水条件を課すことで過剰間隙水圧の上昇を考慮している．Bowl モデルのパラメータは，道路橋示方書[2]に記載する液状化強度比と龍岡等の提案式[3]を組合せて作成した液状化強度曲線（液状化強度比 Rl～繰返し回数 N）を，要素シミュレーションによりフィッティングさせることで評価する．本地盤のうち，細砂 As1-1 及び As1-3 の N 値が 15 のために液状化を生じる可能性があるが，細砂 As1-2 は N 値が 25 と高いことから，液状化を生じる可能性が低い．このため，細砂 As1-1 及び As1-3 について要素シミュレーション解析を実施し，その解析結果と龍岡等の提案式による液状化強度曲線と比較したものを**図-3** に示す．両者は概ね類似の液状化強度曲線を描いており，Bowl モデルのパラメータが妥当であることがわかる．

(2) 三次元解析モデル

球形タンク－杭基礎－地盤連成系の三次元解析モデルを**図-4** に示す．地盤を非線形ソリッド要素でモデル化し，その範囲は，加振方向（護岸法線直交方向）に 110.3m，加振直交方向（護岸法線方向）に 80.3m，深さ方向に GL-66.9m（地表から工学的基盤上面）とする．解析モデルの底面には波動の逸散を考慮できる粘性境界を設ける．側面には X 方向ローラを設けて対称境界として取り扱い，加振面には連続境界を付与する．地震応答解析では，すべての地盤要素のせん断応力－せん断ひずみ関係について修正 R-O モデルを付与する．特に GL-3.1m～GL-17.9m の細砂 As1-1 と As1-3 は，修正 R-O モデルの他に Bowl モデルを併用して有効応力要素として取り扱っている．また，ここで用いる液状化強度曲線（液状化強度比 Rl～繰返し回数 N）は，(1)の要素シミュレーションで決定した液状化パラメータを用いるものとする．

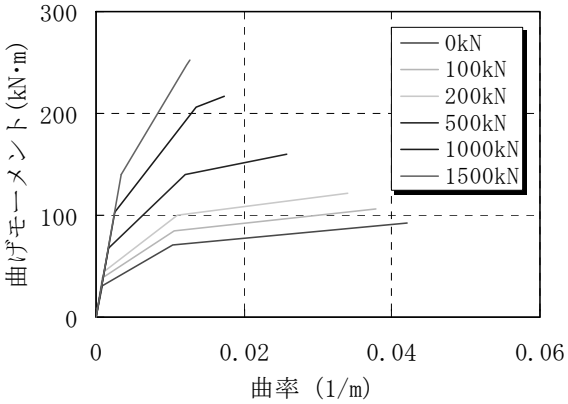


図-5　杭の曲げモーメントと曲率の関係

球殻は高圧ガス設備耐震設計指針[4]に基づきモデル化する．ここで対象とする球形タンクは，設計圧力が 0.6MPa 未満で貯蔵容量が 3000m^3 以下のため，剛体のシェル要素でモデル化し，支柱間に張られたブレースはロッド要素でモデル化している．球形タンクを支持する 12 箇所の基礎はそれぞれ集中質点で表現し，1 箇所のフーチングを支持する 6 本の PHC 杭（φ400，A 種）は集約して 1 本の非線形はり要素でモデル化する．PHC 杭は軸力により非線形特性が変動することから，ファイバーモデルにより軸力変動を考慮した曲げモーメント－曲率関係を求めた後，**図-5** で示す降伏，ひび割れ，終局のトリリニアで表現する[5]．なお，ペデスタルおよび基礎梁については線形弾性としてモデル化している．

(3) 解析結果

球形タンクの最大加速度分布，地盤の最大せん断ひずみ分布および過剰間隙水圧比分布を**図-6**～**図-8** に示す．

地表面加速度は 2.5m/s^2 程度であるが，トップヘビーの球形タンクの加速度は増幅されて 5.0m/s^2 程度となっている．せん断ひずみ分布によれば，

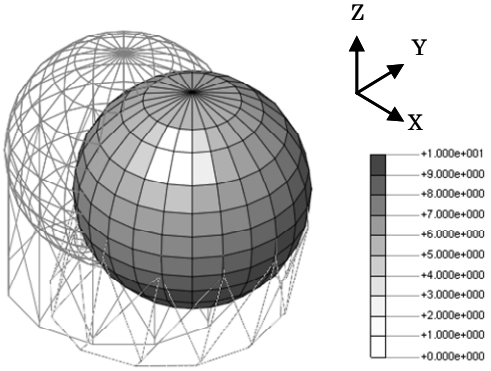


図-6　球形タンクの加速度分布

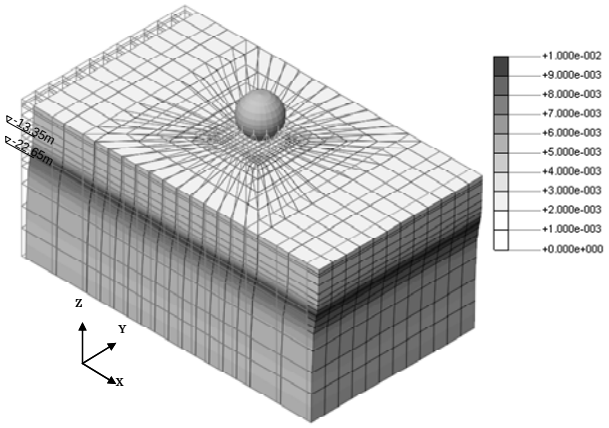


図-7　地盤のせん断ひずみ分布

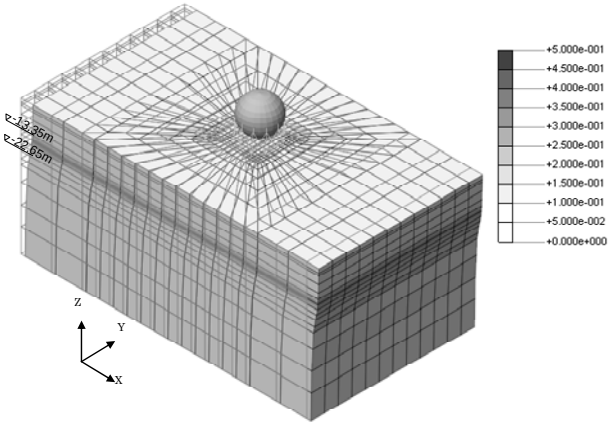


図-8　過剰間隙水圧比分布

GL-13.35m～GL-22.65m にある細砂と粘土質シルトは他の地層に比べて非線形性が大きく進行しており，最大せん断ひずみは概ね 1.0%に達している．このため，地表面変位は細砂と粘土質シルトのせん断ひずみが支配的である．地盤の過剰間隙水圧によれば，GL-13.35m～GL-17.9m の細砂で 0.5 近傍となっていることから，ある程度過剰間隙水圧の上昇が認められるが，完全な液状化まで至っていない．

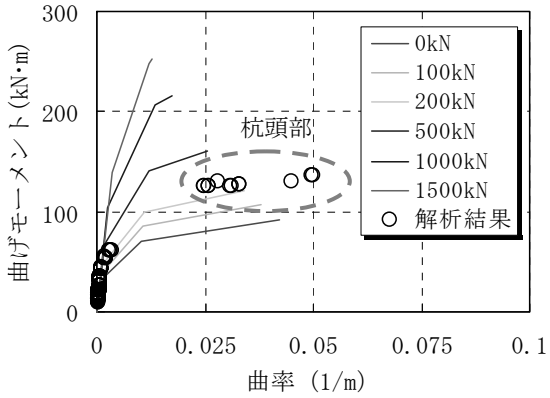


図-9　解析による杭の曲げモーメントと曲率の関係

解析から得られた杭の曲げモーメントと曲率の関係を**図-9** に示す．杭頭部分と細砂 As1-3 と粘土質シルト Ac1 の層境界で杭応力が大きくなる傾向がある．杭頭部は球形タンクの慣性力による影響と考えられ，杭中間部については地盤震動の影響と考えられる．特に，杭頭部分では，大きな曲げモーメントを生じて杭の塑性率が 4 を越えていることから破壊に近い損傷を生じてしているものと想定される．この原因は，杭頭付近での地盤と杭の非線形性の進行により，球形タンクー地盤連成系の振動モードが励起されたものと考えられる．そのため，地盤と杭の非線形性の進行を低下させる耐震補強対策が必要と考えられる．

５．耐震補強検討

(1)補強部位と補強方法

杭基礎の補強方法は，大別して次の 2 種類が考えられる．

①補強杭を増し打ちし，地震の抵抗を高める．

②杭周辺の地盤の強度を上昇させることで杭に生じる応力を低減させる．

一般的に，プラントでは杭基礎周辺に多くの配管が敷設されていることから，杭基礎の補強においては①の方法に比べて②の補強を選択することが多い．本地盤でも，表層から約5mの地層を対象に，**写真-1** に示す高圧噴射攪拌工法による地盤改良を実施している(設計一軸圧縮強さ1MPa)．また，フーチングに取り合う基礎梁に大きな応力が生じることから，現状の基礎梁断面の拡大を図っている．地震応答解析による耐震補強検討結果を以下に示す．

写真-1　地盤改良(高圧噴射攪拌工法)

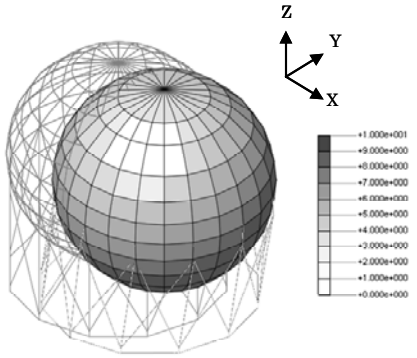


図-10　地盤改良後の球形タンクの加速度

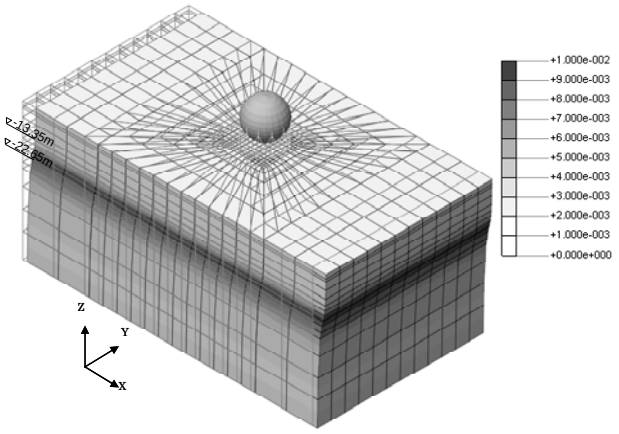


図-11　地盤改良後の地盤のせん断ひずみ分布

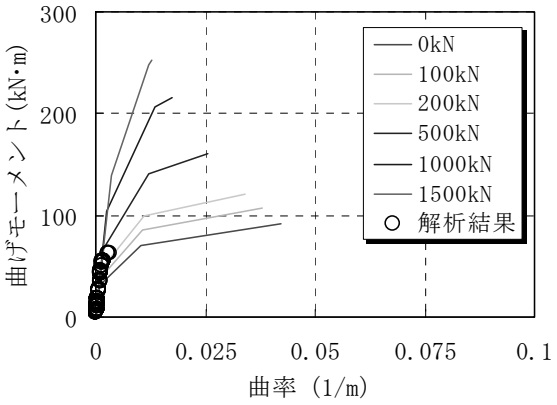


図-12　地盤改良後の杭の曲げモーメントと曲率の関係

(2)地震応答解析

球形タンクの最大加速度分布，地盤の最大せん断ひずみ分布を**図-10** および**図-11** に示す.

球形タンクの加速度は 3.5m/s^2 程度となっており，地盤改良前の 5.0m/s^2 に比べて加速度が低減している．一方，地盤のせん断ひずみ分布は，表層地盤のせん断ひずみが若干小さくなっているが，GL-13.35m～GL-22.65m にある細砂と粘土質シルトは地盤改良前とほとんど差異がない．このことから，表層を地盤改良したとしても地盤全体の変形を低減させる効果は全くないことがわかる.

解析から得られた杭の曲げモーメントと曲率の関係を**図-12** に示す．地盤改良により表層の地盤剛性が高くなることから，杭頭近傍の曲げモーメントが現状に比べ低減されている．全ての杭は，第二折れ点（降伏点）以下の応答となっていることから，杭は地盤改良を施すことで十分安全であることが確認された．ただし，入力地震動がより大きくなり，細砂が完全に液状化するような地盤の場合には，地中部における地盤変形が増大し，地中部の杭が損傷する可能性もある．このため，地震動と構造物－地盤連成系の応答に応じて適切な補強対策を選定することが重要である.

６．まとめ

東京湾で比較的多く見受けられる杭支持された球形タンクを対象に，内閣府が提示している東京湾北部地震動を用いて，三次元有効応力解析を実施し杭基礎の損傷について検討した．また，地盤改良による耐震補強検討を行った．その結果を以下にまとめて示す.

①球形タンクはトップヘビー構造であり，地盤と杭の非線形性にともない球形タンク－地盤連成系の振動モードが励起されていた．その結果，地表面加速度に対して，現状の球形タンクの増幅率は 2 倍程度となっていた.

②地盤のせん断ひずみ分布によれば，GL-13.35m～GL-22.65m にある細砂と粘土質シルトの非線形性

が大きく進行しており，そのひずみは概ね 1.0%に達していた．このため，地表面変位は細砂と粘土質シルトのせん断ひずみが支配的であった．

③杭の曲げモーメント分布によれば，杭頭部分と杭中間部で杭応力が大きくなる傾向がある．特に，球形タンクに大きな加速度が生じていることから，杭頭部分では大きな曲げモーメントを生じ，杭が破壊に近い損傷を生じていることがわかった．

④杭の損傷を低減するために，表層から約 5m の地層に対して高圧噴射攪拌工法による地盤改良を実施し，地盤強度を高めた結果，杭頭近傍の曲げモーメントが低減され，全ての杭の耐震安全性を確保することができた．

⑤表層の地盤強度を上げることで杭頭を健全な状態に補強することができたが，さらに地震動が大きくなった場合には，GL-3.10m～GL-17.90m にある細砂が液状化となる可能性が高いために，表層の地盤強度を上げる補強対策のみでは適切とは言えないことから，別途耐震補強方法を追加することが必要と考えられる．

参考文献

1) 福武毅芳，松岡　元：任意方向単純せん断におけるダイレイタンシーの統一的解釈，土木学会論文集，No.412/Ⅲ-12，1989.

2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ　耐震設計編，2002.

3) 足立紀尚，龍岡文夫：土木学会編 新体系土木工学 18 土の力学，1981.

4) 高圧ガス保安協会：高圧ガス設備耐震設計指針レベル 1（耐震設計設備・基礎編），2006.

5) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能，第 2 版，1990.

6) 吉見吉昭，福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術，技報堂出版，2005.

7) 地盤工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで，第 5 版，1997.