FLIP による液状化解析について

室井謙吾[i]，眞鍋尚[ii]

Liquefaction Analysis using FLIP

Kengo MUROI, Takashi MANABE

1995 年に起きた兵庫県南部地震では，ポートアイランドをはじめ，神戸市や芦屋市，西宮市などの多数の埋立地で液状化の被害が発生した．液状化解析技術の習得には難解な計算手法の理解や適切な液状化パラメータの設定など高度な専門性が求められる．本論では液状化解析として広く用いられる港湾空港技術研究所が開発した液状化解析ソフト FLIP について解析手法を紹介し，解析事例として港湾構造物の耐震解析の事例を紹介する．

(**キーワード**): 液状化，FLIP，港湾構造物，耐震性能照査

1 はじめに

1995 年に起きた兵庫県南部地震では，ポートアイランドをはじめ，神戸市や芦屋市，西宮市などの多数の埋立地で液状化の被害が発生した．また，埋立地の護岸に近い地区では液状化により側方流動が発生し，護岸が海側に数メートル移動するなど，神戸港に壊滅的な被害をもたらした．兵庫県南部地震以後，レベル 2 地震動に対する耐震性能の照査方法が規定され，液状化が事前に想定される場合には動的解析法により液状化の影響を考慮した検討をする必要がある．一方で，液状化解析技術の習得には難解な計算手法の理解や適切な液状化パラメータの設定など高度な専門性が求められる．

液状化現象は一種の地盤破壊現象であり，地盤の地震応答解析の一分野として発展してきた．地震応答解析手法の開発は 1970 年代になって本格化し，まず，全応力解析で土の非線形性を近似的に表現した SHAKE に代表されるような等価線形解析が登場した．SHAKE は一次元であるため簡易的であること，またフリーソフトであることも相まって，急速に広がり，現在でも広く使用されている．しかし，全応力解析法のため液状化解析には現在のところ，適用不可である．1970 年代後半から北米や日本などで有効応力解析法が開発され，液状化を考慮した解析が可能になった．

液状化解析で実務においてよく使用される解析ソフトには LIQCA や FLIP などが挙げられる．いずれも有効応力解析法であり，Biot の二相混合体理論に基づき u-p 定式化に基づく．有効応力解析法は，土に応力が作用するとき，土骨格が受け持つ応力と間隙水が負担する応力に分けて表現し，間隙水圧の発生を考慮する解析手法であり，間隙水の挙動を表現することで液状化現象を評価する．LIQCA では土の構成則として弾塑性モデル[1)]を用いており，一方で FLIP では任意方向の単純せん断を仮想したせん断応力とせん断ひずみ関係のモデル（多重せん断ばねモデル）に過剰間隙水圧の発生量と塑性仕事の関係を表現した応力経路モデルを組み合わせた方法[2,3)]を用いており，解析の理論は両者で大きく異なっている．従来 FLIP では応力経路モデルを用いて解析していたため，非排水条件でしか解析できなかったが，排水状態の体積ひずみを定式化したカクテルグラスモデル[4)]を用いることで要素外への間隙水の移動も考慮した排水条件での解析も可能となっている．また，設計の実務における解析では，地盤のほかにも杭などの構造物を同時にモデル化し，地盤と構造物の相互作用を検討する必要があり，LIQCA，FLIP ともにこれらを考慮可能な解析ソフトとなっている．

FLIP は港湾基準に記載されており，解析実績が豊富である．また，解析上の課題解決や適用範囲拡大へ

[i] サイエンスソリューション部　先進技術システムチーム　コンサルタント
[ii] サイエンスソリューション部　先進技術システムチーム　次長　博士（工学）

向けて FLIP コンソーシアムが改良・機能拡張を頻繁に行っており，様々な解析事例を取り扱うことができるようになっている．本論では，FLIP の解析手法について取り上げ，その解析事例として港湾構造物の耐震解析の事例について紹介する．

2 FLIP について

FLIPは旧運輸省港湾技術研究所において，開発され，その後もFLIP研究会やFLIPコンソーシアムにおいて改良・機能拡張とともに，高度利用促進が進められている．FLIPコンソーシアムへ入会すると，ユーザー会員として解析プログラムの利用が可能となる．以下では，FLIPの基礎方程式および構成則について示す.

2.1 基礎方程式

Zienkiewicz ほか[5]に従い，u-p 定式化に基づく間隙水で満たされた多孔質体の運動方程式および水流の収支バランスを表す式は式(1), 式(2)のように表される．

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \ddot{u}_i \tag{1}$$

$$\left(k_{ij} p_{,j}\right)_{,i} - \dot{\varepsilon}_{ii} - \left(k_{ij}\rho_f g_j\right)_{,i} = -\left(k_{ij}\rho_f \ddot{u}_j\right)_{,i} + n\dot{p}/K_f \tag{2}$$

ここで,

σ_{ij}：全応力，ρ：土と水の混合物としての密度，g_i：重力加速度ベクトル，$\ddot{u}_i$：土骨格の加速度ベクトル，k_{ij}：透水係数，p ：間隙水圧，ε_{ii}：土骨格のひずみ，ρ_f：間隙水の密度，n：間隙率，K_f：間隙水の体積弾性係数である．

2.2 多重せん断ばねモデル

実際の構造物周辺の地盤では，初期の応力状態が場所ごとに異なり，地震時の影響も異なる．FLIP では，この初期の応力状態の違いを適切に評価するべく，せん断面の方向ごとのばねを考えた多重せん断ばねモデル[2]を用いている. 多重せん断ばねモデルでは数多くのばねを考え，それぞれのばねが単純せん断や軸差せん断に寄与する割合を考慮して地盤の挙動を表現する．各ばねは双曲線型の骨格曲線でモデル化され，実際の減衰定数に対応できるように拡張されたメイシング則により，各ばねの履歴が表現される. 定式化を数式で表すと, 式(3)のように表現できる．

$$\sigma' = -p\mathbf{n}^{(0)} + \sum_{i=1}^{I} q^{(1)}\,\mathbf{n}^{(i)}\Delta\omega \tag{3}$$

ここで,

$\mathbf{n}^{(0)T} = \{1\ \ 1\ \ 0\}$

$\mathbf{n}^{(i)T} = \{\cos\omega_i\ \ -\cos\omega_i\ \ \sin\omega_i\}$

であり，ω_iは各せん断面（$i = 1$～I）の方向，$\Delta\omega$はモデル化したせん断面の間隔，p, qはそれぞれ応力の平均成分と偏差成分である．

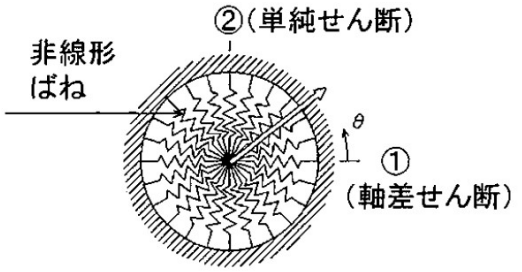

図 1 多重せん断ばねモデル[2]

2.3 過剰間隙水圧モデル

Towhata ほか[2]は，土に作用しているせん断応力の状態に応じて，その時の過剰間隙水圧は単位体積の土になされたせん断仕事の累積値と密接な関係にあり，この関係は載荷経路に依存しないことを明らかにした．Iai ほか[3]は，上記の結果に基づき，累積塑性せん断仕事に基づいて応力経路を与えるモデルを提案し，土のダイレイタンシーの効果を表現した．

過剰間隙水圧モデルでは，累積塑性せん断仕事に基づいて，液状化の進展に伴う過剰間隙水圧の上昇，有効応力の減少およびせん断剛性の低下を評価する．このモデルでは，式(4)のように状態変数 S を定義する．

$$S = \begin{cases} S_0 & (r < r_3) \\ S_2 + \sqrt{(S_0 - s_2)^2 + \{(r - r_3)/m_1\}^2} & (r > r_3) \end{cases} \tag{4}$$

ここで,

$S_2 = S_0 - (r_2 - r_3)/m_1$，$r_3 = m_3 S_0$，$r_2 = m_2 S_0$，$r_2 = m_2 S_0$，$m_1 = \sin\varphi_f$，$m_2 = \sin\varphi_p$，$m_3 = 0.67 m_2$，r = τ/σ_mはせん断応力比，σ_mは有効拘束圧，φ_fは内部摩擦角，φ_pは変相角である．

また，S_0は液状化フロントとよばれ，最大過剰間隙水圧に相当する量で，正規化塑性せん断仕事wの関数として式(5)のように表される．

$$S_0 = \begin{cases} 1 - 0.6\left(\dfrac{w}{w_1}\right)^{P1} & (w < w_1) \\ (0.4 - S_1)\left(\dfrac{w_1}{w}\right)^{P2} + S_1 & (w > w_1) \end{cases} \quad (5)$$

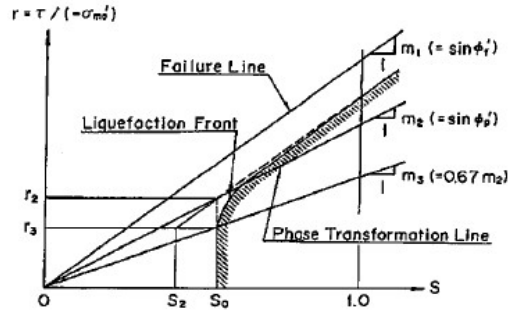

図 2　過剰間隙水圧モデル [3)]

S_1はS_0の最小値であり，S_0はwとともに，$S_0 = S_1$の線に漸近するように減少していく．液状化フロントの位置が決まれば，せん断応力比rに応じて状態変数 S が定まり，この S に応じて，砂のせん断剛性とせん断強度を調節する．調節された砂のせん断剛性とせん断強度は，多重せん断ばねモデルに反映されて，非排水条件下で繰り返しせん断される砂の挙動を表現する．

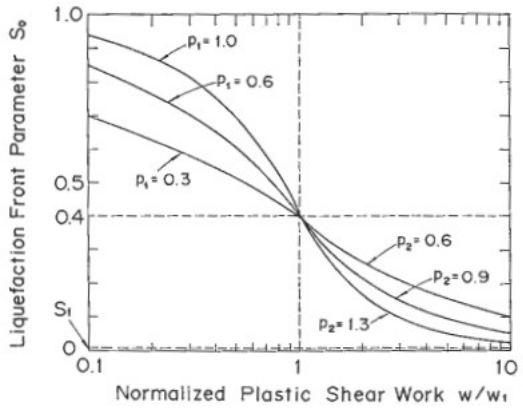

図 3　液状化フロントパラメタ S_0 と正規せん断仕事の関係 [3)]

2.4　カクテルグラスモデル

過剰間隙水圧モデルでは，液状化後の排水沈下などを考慮することができなかった．そこで FLIP では，多重せん断ばねモデルに，排水状態の体積ひずみを定式化し組み合わせたカクテルグラスモデル [4)]が新たに導入された．カクテルグラスモデルでは，排水状態の体積ひずみを定式化し，非排水状態では，過剰間隙水圧は体積ひずみモデルから求められる体積ひずみに体積弾性係数を乗じることで求めることができる．ダイレイタンシーによる体積ひずみε_dを蓄積成分と振動成分に分けて式(6)のように表現する．これは，せん断による仕事をしない成分と累積塑性せん断ひずみに比例する成分の重ね合わせとして表現できることを意味している．

$$\varepsilon_{\mathrm{d}} = \varepsilon_d^c + \varepsilon_d^d \quad (6)$$

ここで，
ε_d^c，ε_d^dはそれぞれ収縮的成分（振動成分），膨張的成分（蓄積成分）である．

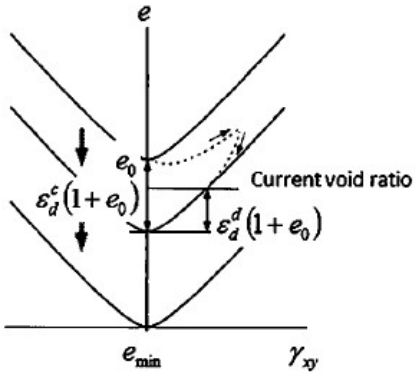

図 4　カクテルグラスモデル [4)]

このモデルは，振動成分は上に凸な曲線でカクテルグラスをひっくり返した形状と見立て，カクテルグラスモデルと名付けられた．

3　液状化を考慮した港湾構造物の解析事例

3.1　計算条件の設定方法

3.1.1　解析対象範囲

解析対象範囲は，解析検討対象を中心に深度方向は工学的基盤までとし，水平方向は側方粘性境界での変形の影響が解析検討対象に及ぼす影響を考慮して，設定する．

3.1.2　工学的基盤

港湾基準[6)]では，以下の3条件を満足する土層を基盤層としている．

・せん断波速度が300m/s以上
・それ以深に柔らかな層がない
・平面的にも十分広く分布する

せん断波速度が得られていない場合は，岩盤またはN値50以上の砂質土層や一軸圧縮強度が65tf/m²以上の粘性土層を基盤層とみなしてもよい．

3.1.3 地盤の解析定数の設定

FLIPで設定する地盤パラメータは動的変形特性として双曲線型ばねの性質を決めるパラメータと，液状化特性としてダイレイタンシーモデルの性質を決めるパラメータに分類できる．

液状化特性のパラメータは，液状化強度試験を再現できるように要素シミュレーションを行い，パラメータを試行錯誤し変化させ設定するが，液状化強度試験が得られていない場合には，N値と細粒分含有率から簡易的にパラメータを設定する方法[7]も提案されている．

3.1.4 レイリー減衰の設定

レイリー減衰C_{ij}は数値計算の安定化を目的として，式(7)で与える．

$$C_{ij} = \alpha M_{ij} + \beta K_{ij} \qquad (7)$$

ここで，M_{ij}：質量行列，K_{ij}：剛性行列とする．

通常，α=0，β>0（剛性比例係数）のように剛性比例型のレイリー減衰行列を設定する場合が多いが，剛性比例係数βの決定にあたっては，自由地盤部の1次元解析モデルを使用して，非液状化非線形解析を行い，βをそれ以上減じても，最大応答変位の地中分布が変化しなくなるようなβの臨界点を採用する．

3.1.5 構造部材のモデル化

構造物の部材非線形性は非線形はり要素により，軸力変動を考慮したM-φ関係（M：曲げモーメント，φ：曲率）による非線形を定義できる．

近年，杭式構造物では経済設計の観点から，大径厚比（直径D/板厚t=100程度）の鋼管杭が採用されることが多い．径厚比が小さな鋼管杭は局部座屈による耐力低下が起こりにくく，変形が進んでも耐力を保ち続けることができる一方，径厚比が大きな鋼管杭は，全塑性モーメントに到達する前に，局部座屈が生じて耐力低下が生じる危険性が高い[6]．そのため，杭の径厚比を考慮して非線形性を定義するモデル化[8,9]が提案されている．

3.1.6 地盤と構造物の相互作用のモデル化

設計の実務における解析では，杭など構造物を同時にモデル化し，地盤と構造物の相互作用を検討する必要がある．地盤と構造物の相互作用として，杭をはり要素でモデル化し，地盤要素との間を「杭―地盤相互作用ばね」[10]で結合することで杭間の地盤のすり抜けを考慮した相互作用のモデル化が可能となる．

周囲の地盤の応力状態に依存して，ばねの物性値が決まるため，地盤液状化時のばね剛性の低下が自然に表現できる[10]．

また，杭軸方向の挙動については，先端支持力を考慮するばね要素と周面摩擦を考慮した杭―地盤相互作用ばねあるいはジョイント要素でモデル化できる．

3.1.7 初期応力状態の評価

井合ほか[11]は背面を埋め立てて築造する矢板式岸壁を対象に，その築造過程を模擬するような手順により多段階の自重解析を行い，その初期応力状態に基づいて地震応答解析を行うと，施工過程を無視して解析モデル全体に一度に重力を作用させて，大まかに評価した初期応力状態に基づく地震応答解析と比べて，矢板式岸壁の地震残留変位，発生応力とも著しく小さい結果が得られたとしている．よって，構造物や地盤の初期応力状態は，地震時挙動に影響を与えるため，施工過程を考慮した多段階の自重解析を行うことが望ましい．

3.2 計算条件

3.2.1 解析対象

解析対象は，矢板式係船岸（秋田港大浜2号岸壁）[12,13]とした．FLIPにおける解析モデルを**図 5**，地盤の物性値を**表 1** に示す．解析に用いた入力地震動を**図 5** に示す．入力地震動は秋田港大浜2号岸壁の近傍岩盤上で観測された波形を基盤面上の2E波として設定する．0秒から80秒までの80秒間を解析対象時間として解析を行った．

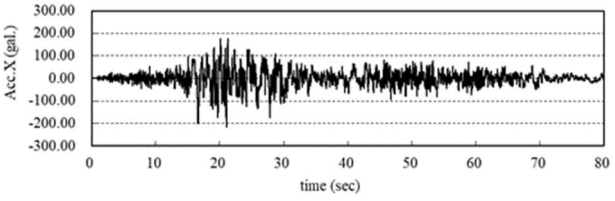

図 5　入力地震動

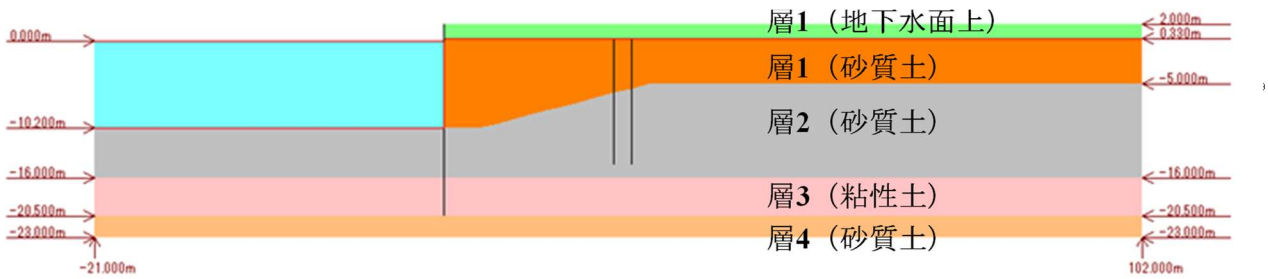

図 6　矢板式係船岸（秋田港大浜 2 号岸壁）の解析モデル [12),13)]

表 1　地盤の物性値

			動的変形特性										液状化特性					
層名	土質	質量重量（湿潤）	有効上載圧	基準有効拘束圧	基準初期せん断剛性	基準初期体積剛性	拘束圧依存係数	ポアソン比	間隙率	最大減衰	粘着力	内部摩擦角						
		γ_t [t/m^3]	σ_v' [kN/m^2]	σ_{ma}' [kN/m^2]	G_{ma} [kN/m^2]	K_{ma} [kN/m^2]	m	v[-]	n[-]	h_{max} [-]	c [kN/m^2]	φ_f [°]	φp	S1	w1	p1	p2	c1
層1	砂質土	2.00	38.0	98.00	33800	88150	0.5	0.33	0.45	0.24	0.0	37.00	28	0.005	0.8	0.5	0.8	1.485
層2	砂質土	2.00	104.0	98.00	72200	188300	0.5	0.33	0.45	0.24	0.0	41.00	31.5	0.005	6.7	0.5	0.8	3.05
層3	粘性土	1.50	153.0	98.00	72600	189300	0.5	0.33	0.55	0.20	0.0	30.00	0	0	0	0	0	0
層4	砂質土	2.00	170.0	127.50	168200	438600	0.5	0.33	0.45	0.24	0.0	44.00	31	0.005	3.4	0.5	0.84	2.25
層1(地下水面上)	砂質土	2.00	38.0	98.00	33800	88150	0.5	0.33	0.45	0.24	0.0	37.00	0	0	0	0	0	0

3.2.2　数値解析条件

数値解析条件の一覧を**表 2** に示す.

表 2　数値解析条件

項目	検討手法および条件
土のダイレイタンシーモデル	マルチスプリングモデル
地盤の初期応力評価方法	多段階解析
応力-ひずみ関係の非線形反復計算法	改良型非線形反復法
時間積分手法	Wilson の θ 法(θ=1.4)
時間積分間隔	0.01 秒
計算時間	80 秒間
要素積分手法	選択的次数低減積分法（SRI 法） 偏差成分 2 次, 平均成分 1 次
レイリー減衰行列	質量剛性行列 α=0 剛性比例行列 β=0.001
底面境界	粘性境界 Vp=1500m/s，Vs=286m/s
側方境界	粘性境界 Vp は値を 1000 倍
ジョイント要素のレイリー減衰	動的解析時にジョイント要素に減衰を与えない(β=0)

3.3　解析結果

砂質土の液状化考慮有無による解析結果の比較を示す. 液状化を考慮する場合には層 1 の地下水面下, 層 2 および層 4 に**表 1** の通り, 液状化特性を設定し, マルチスプリングモデル（多重せん断ばねモデル＋過剰間隙水圧モデル）として取り扱う. 液状化を考慮しない場合には, 液状化特性は設定せず, 動的変形特性のみ設定し，多重せん断ばねモデルとして取り扱う. 地盤変形図を**図 7～図 10** に, 過剰間隙水圧比分布図を**図 10** に, 矢板の曲げモーメント図を**図 11** に示す. 液状化層設定により, 砂質土の液状化の進展に伴う過剰間隙水圧の上昇，有効応力の減少およびせん断剛性の低下を評価する. **図 10** の過剰間隙水圧比分布図では，層 1 および矢板前面の層 2 の地盤の過剰間隙水圧比が 1.0 に近い値を示しており, 液状化の進展が表現される. 液状化の進展により過剰間隙水圧が上昇することで矢板にかかる水圧が大幅に増大し，また矢板前面地盤のせん断剛性が低下することで受働土圧が減少し, **図 11** の比較のように矢板の曲げモーメントが大きくなることが確認できる. 液状化を適切に考慮した解析を行わないと矢板等の構造物に発生する曲げモーメントを過小評価するため, 構造物の性能照査の観点からも液状化の進展を考慮した解析が重要である.

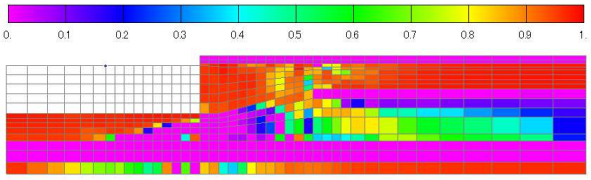

図 10　過剰間隙水圧比分布図

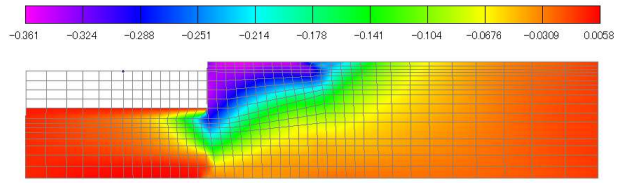

図 12　地盤変形図（残留変形）液状化層設定なし

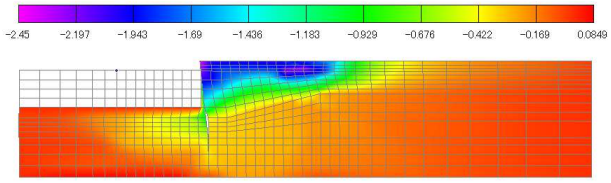

図 13　地盤変形図（残留変形）液状化層設定あり

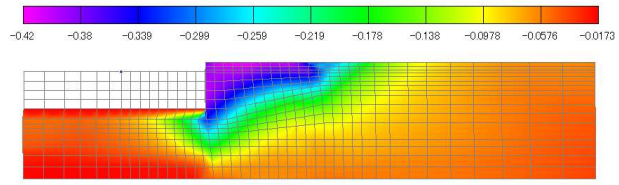

図 14　地盤変形図（最大変形）液状化層設定なし

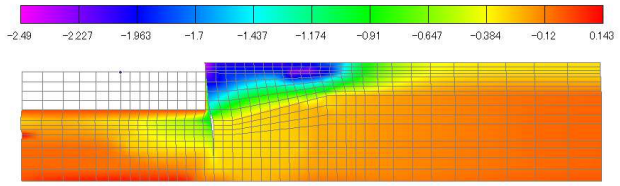

図 15　地盤変形図（最大変形）液状化層設定あり

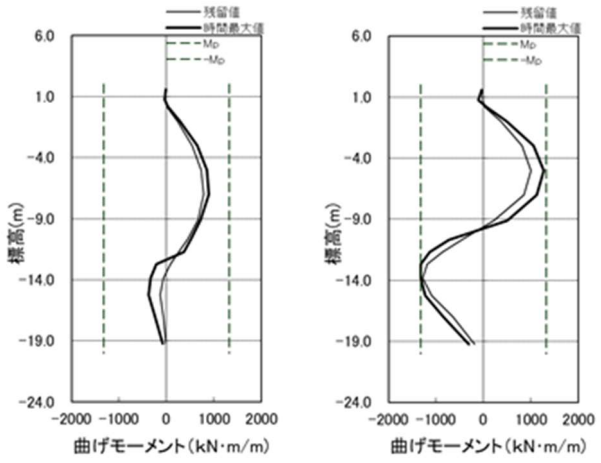

図 11　矢板の曲げモーメント分布図（左図：液状化層設定なし，右図：液状化層設定あり）

4　おわりに

液状化解析として FLIP の計算手法を取り上げ，港湾構造物として矢板式係船岸の液状化考慮有無による計算事例について紹介した．

当社では，当該分野において矢板式係船岸の改良設計に伴う耐震解析や，それ以外にも地中構造物の耐震解析なども業務実績が豊富であり，今後も耐震・液状化解析の技術開発に寄与していきたいと考えている．

引 用 文 献

1) Oka,F., Yashima,A., Tateishi,A., Taguchi,Y. and Yamashita,S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus ,*Geotechnique*, Vol.49, No. 5, pp.661-680, 1999

2) Towhata,I. and Ishihara,K.: Modelling Soil Behavior under Principal Stress Axes Rotation, *Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics*, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985

3) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka,T.: Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model, *Rep. of the Port and Harbour Res. Inst.* Vol.29, No.4, pp.57-83, 1990

4) Iai,S., Tobita,T., Ozutsumi O., Ueda,K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,* Vol.35 No.3 pp.360-392, 2011

5) Zienkiewicz, O.C. and Bettss, P: Soil and Other Saturated Media under Transient,Dynamic Conditions, General Formulation and the Validity Various Simplifying Assumptions, *Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads*, Jhon Wiley & Sons, 1982.

6) 公益社団法人日本港湾協会：「港湾の施設の技術上の基準・同解説（上・中・下巻）平成 30 年 5 月」

7) 森田年一ほか：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタ簡易設定法，港湾技研資料 No.869，1997

8) 大矢陽介ほか：耐震性能照査における鋼管部材のモデル化法の提案，港湾空港技術研究所報告 Vol.56 No.2，2017

9) 大矢陽介ほか：径厚比を考慮した鋼管部材のモデル化法の各種港湾施設への適用，港湾空港技術研究所報告 No.1338，2017

10)小堤治ほか：2 次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化，第 38 回地盤工学研究発表会，pp. 1899～1900, 2003
11)井合進ほか：地盤の初期応力条件が矢板式岸壁の地震時挙動に与える影響の解析的検討，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集 pp.809-812，2001
12)一般社団法人 FLIP コンソーシアム：FLIP 研究会 14 年まとめ（事例編） 3-3-1 矢板式岸壁，3-3-1～3-3-25，https://www.flip.or.jp/ja/flip_download.html
13)Iai,S. and Kameoka,T.: Finite element analysis of earthquake induced damage to anchored sheet pile quay walls, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.1, pp.71-91, 1993