３次元液状化解析による鋼矢板を用いた堤防補強工法の評価

3-D FEM study on reinforcement effect of sheet-pile wall installed in coastal dyke as countermeasure against liquefaction

高浜宏輔[1]，八嶋厚[2]，沢田和秀[3]，小川達也[4]，藤原覚太[5]

1 岐阜大学大学院・工学研究科社会基盤工学専攻 v3121021@edu.gifu-u.ac.jp
2 岐阜大学・工学部社会基盤工学科
3 岐阜大学・工学部附属インフラマネジメント技術研究センター
4 八千代エンジニアリング株式会社
5 新日鐵住金株式会社・鋼構造研究部

概　　要

地震や津波に対する減災措置として，地盤が液状化しても堤防高さを保ち津波が到来しても全壊に至らない「粘り強い堤防」が必要とされている。著者らは，海岸堤防の補強工法として，既設堤防の両法肩から鋼矢板（以下、矢板）を鉛直に挿入しさらに矢板と直角方向に矢板（以下、隔壁）を等間隔で設置する工法を提案しており，地震時における堤防の変形や損傷が大きく抑制されることを 2 次元液状化解析により確認した。しかしながら既往の研究では，堤防延長方向の変形状態は同一であると仮定した 2 次元平面ひずみ解析により検証しており，矢板と隔壁による立体的（３次元的な）な補強構造の挙動が液状化時の堤防におよぼす影響について評価していない。そこで本研究では，堤防延長方向の挙動を考慮するため，隔壁間の間隔に着目した 3 次元液状化解析を実施した。その結果，隔壁間の間隔の違いによって堤防延長方向の挙動が大きく異なり，従来の 2 次元液状化解析結果との差異が生じることがわかった。

キーワード：海岸堤防，3 次元液状化解析，鋼矢板，隔壁

1. 背景と目的

2011 年の東日本大震災では，東北・関東地方を主に多数の海岸・河川堤防が被害を受けた。今後発生が予測される南海トラフ地震など巨大地震への備えとして，海岸堤防および河口近くの河川堤防には地震による被害を軽微に留め，その後到来する津波に対して倒壊しない「ねばり強い」機能が求められている。

著者らは，図 1 に示すような「隔壁を併用した２重矢板構造」（以下、隔壁併用構造）により堤防を補強する工法を提案した[1),2)]。ここで隔壁とは堤防延長方向と直角方向に設ける鋼矢板壁を示す。重力場における振動台模型実験により，本構造は東日本大震災クラスの巨大地震に対しても堤防の沈下を大幅に抑制することを確認した[2)]。そこで得られた結論をまとめると以下の通りである。

・地盤内の過剰間隙水圧が高まった状態で継続して加振を受けることで，堤体が大きく沈下するなど甚大な損傷が見られた。

・堤体内に矢板を配置する補強策を講じることで，締切り内地盤の沈下が抑制されるとともに矢板自体の沈下はほとんど見られず，矢板が初期の堤体高さを維持する結果であった。

・地盤内の過剰間隙水圧が高まった状態で再度加振を受けても，矢板で補強された堤体は矢板自体が締切り内地盤の水平方向への流動に対して抵抗力を発揮することで，堤体の沈下が抑制されるなど被災程度が低減される結果であった。

・2 重鋼矢板壁に対して隔壁を設置することで，矢板の曲げ変形が抑制され，堤体の沈下抑制効果がさらに向上されることが確認された。

・隔壁長さを堤体天端から堤体下端まで設置した場合についても，隔壁を矢板全長に渡り配置した場合と同等程度の堤体沈下を抑制する効果が確認された。

・ 隔壁を配置することで矢板に生じる変形が低減されることから，適用する矢板断面を小さくできれば建設コスト縮減に繋がる可能性が考えられる。

以上の結論より、今後発生が予測されるレベル 2 クラスの巨大地震への備えとして，堤体の変状を精度よく予測できる手法を準備し，対策工の健全性照査に取り組むことが求められる。これを受け著者らは，巨大地震にも対応可能な変形予測手法の提案を目的に，振動台模型実験の計測データを基に模型実験の再現解析[3),4)] (LIQCA2D12[5)]を利用)を行った。これにより，隔壁併用構造の有する高い変形抑制効果を数値解析上でも一定の精度で評価できることを確認した。

しかしながら，再現解析[3),4)]に用いた 2 次元平面ひずみ

解析による検討では，隔壁を堤防延長方向で平均化した平面モデルとして仮定しており，3 次元的（立体的）な挙動までは追跡できていない。そこで，本研究では隔壁併用構造の 3 次元的（立体的）な挙動特性を把握すべく，3 次元液状化解析ツール(LIQCA3D15[6])を用いて，3 次元解析メッシュモデルを作成し，液状化解析を実施した。本論文では，特に 2 次元平面ひずみ解析との違いに留意しながら考察していく。

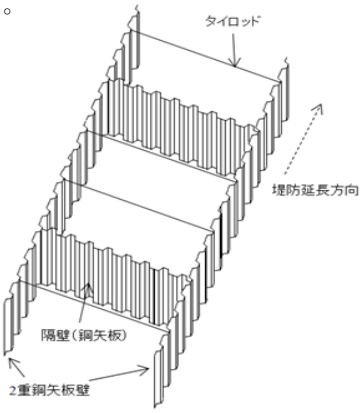


図 1　隔壁併用構造

2.　3 次元液状化解析の概要

2.1　解析条件

本解析では模型実験[1), 2)]にならって実構造物の 1/25 スケールを想定し，図 2 に示す外形を有した 3 次元解析モデルを作成し，図のように XYZ 軸を設定した。このモデルは節点数 7,290，要素数 5,730 であり，寸法は横幅 2,800mm，盛土高さ 300mm，液状化層厚 320mm，非液状化層厚 200mm の計 820mm の縦方向深さ，奥行方向に 340mm である。図 2 には，解析出力で対象とする点および断面を併記した。

境界条件は水平方向の側面を x 方向固定(y,z 方向は自由)とし，底面を全方向固定，また対称性を考慮し奥行方向の側面を y 方向固定(x,z 方向自由)とした。

解析は初期応力解析，動的解析の順に実施する。初期応力解析では，堤防盛土および液状化層，非液状化層に弾完全塑性モデルを用いた。動的解析では，堤防盛土，液状化層および非液状化層に砂の繰返し弾塑性モデルを用いた。動的解析に用いた地盤物性パラメータを表 1 に，鋼矢板の物性パラメータを表 2 に示す。変形挙動を明確にするため，矢板の剛性を小さな値に設定した。

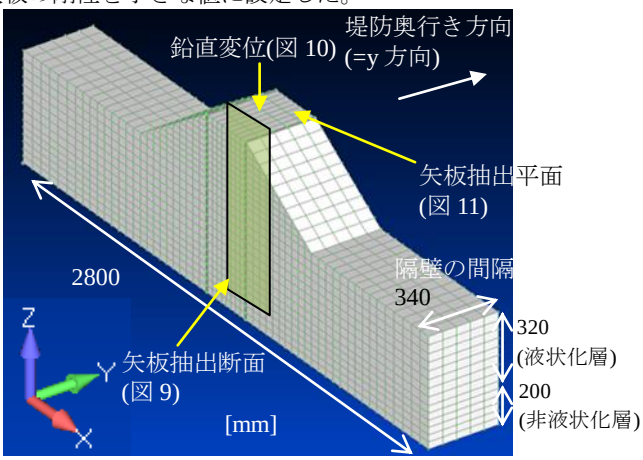


図 2　解析モデル外形

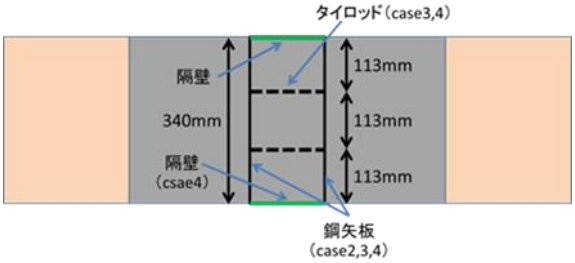


図 3　解析モデル平面図(case1~4)

表 1　液状化層の物性パラメータ

諸元		液状化層	盛土層	締固め層
間隙比	e_0	0.821	0.878	0.682
圧縮係数	λ	0.018	0.02	0.025
膨張係数	κ	0.0055	0.0055	0.0025
無次元化初期せん断係数	―	1000	900	9008.52
透水係数/水の体積弾性係数 (m/kN・s)	k/γ_w	2.17E-6	0	6.73E-7
変相応力比	M_m	0.909	0.909	0.910
破壊応力比	M_f	1.122	1.15	1.221
硬化関数中のパラメータ	B_0	7000	5000	2000
硬化関数中のパラメータ	B_1	50	50	20
硬化関数中のパラメータ	C_f	0	0	0
異方性消失のパラメータ	C_d	2000	2000	2000
ダイレイタンシー係数	D_0	5.0	0.5	1.8
ダイレイタンシー係数	n	3.0	4.0	9.0
塑性規準ひずみ	γ_P	0.01	0.01	0.015
弾性規準ひずみ	γ_E	0.02	0.05	0.10

表 2　鋼矢板の物性パラメータ

諸元		鋼矢板
ヤング係数	E（kN/m^2）	3.0E+7
ポアソン比	ν	0.3
厚さ	T（m）	0.003
単位体積重量	γ'(kN/m^3)	60.76

2.2　解析ケース

解析対象ケースは以下の 4 ケースとする。対応する平面および断面図をそれぞれ図 3 および図 4 に示す。

Case1: 無対策構造

Case2: 2 重矢板構造(タイロッドなし)

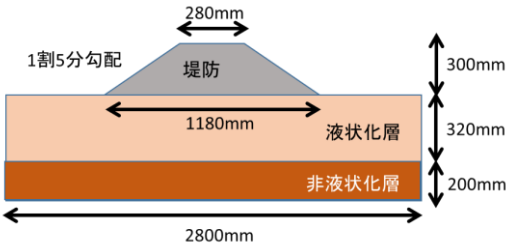
Case3: 2 重矢板構造(タイロッドあり)

Case4: 隔壁併用構造

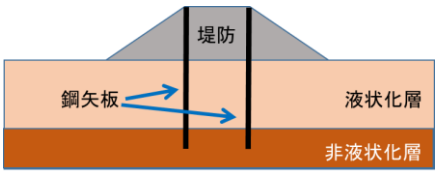
Case2 は Case1 のモデルに矢板要素を両法肩部から鉛直方向に配置したモデルである。鋼矢板は曲げ部材であることから，本来シェル要素等でモデル化すべきである。本研究においては，2 次元平面ひずみ解析と 3 次元解析の違いにのみ注目していることから，鋼矢板についても薄い弾性ソリッド要素としてモデル化している。矢板と地盤の境界面には，厚さの極薄いソリッド要素を設け，矢板と地盤の間のすべりを考慮できるようにした。極薄いソリッド要素の地盤物性は，周囲の地盤と同じものを用いた。モデル化の模式図を図 5 に示す。

Case3 は Case2 のモデルに堤体天端から 1 ソリッド要素分下(30mm)の位置でタイロッドにより両鋼矢板を結合した構造を想定し，当該位置の両矢板との節点に x 方向の等変位境界を設けた。

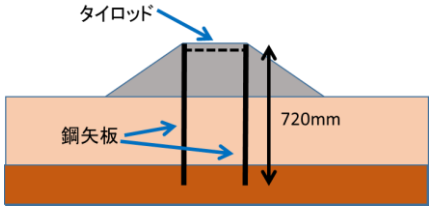
Case4 は Case2 のモデルを基に作成した。ここでは鋼矢板が外側にはらむ挙動を抑止するという隔壁の機能のみに着目し，奥行き方向 0mm および 340mm の位置の、矢板間の隔壁位置に相当する各節点に x 方向の等変位境界を設定した。



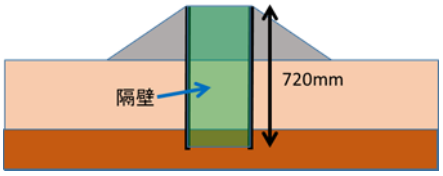
Case1:無対策構造



Case2: 2重矢板構造(タイロッドなし)



Cace3:2 重矢板構造(タイロッドあり)



Case4:隔壁併用構造

図 4　解析モデル断面図

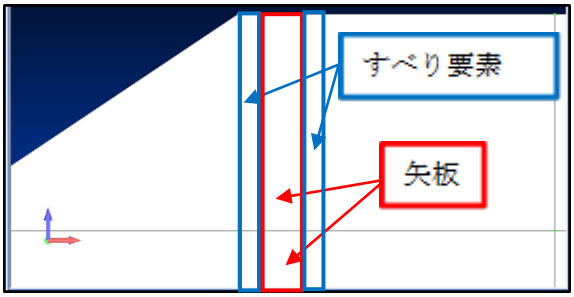


図 5　矢板付近の模式図

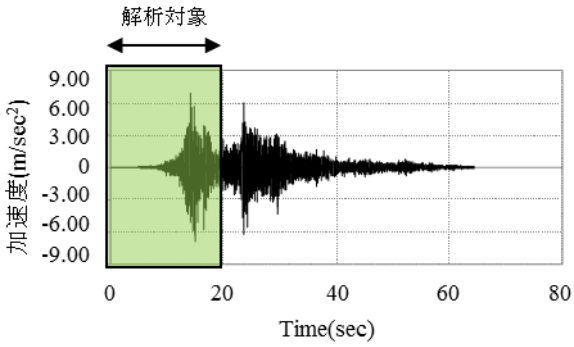


図 6　入力波形

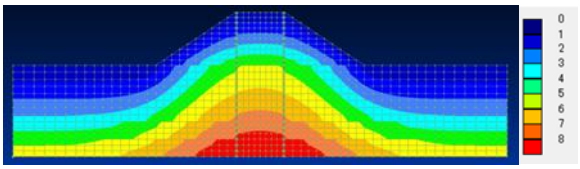


図 7　初期応力解析による鉛直応力コンター

2.3　加振波形

対象とする地震動には，図 6 に示す東北地方太平洋沖地震における K-NET 釜石で観測された，地表面の加速度記録の EW 成分を選定した。解析では，本波形を相似則に基づき時間スケールを調節したものを用いた。本研究では 3 次元的な挙動を検証することが目的であるため実地震動の継続時間は無視し，0 秒から 20 秒までの地震動を解析対象とした。

3.　初期応力解析

解析の手順として，まず初期応力解析を実施したのち，動的解析をした。図 7 は 3 次元解析の初期応力解析により得られた鉛直応力のコンター図を示す。全ケースについて，同じ初期応力状態の値を初期状態としてインプットし，動的解析を実施した。

4.　動的解析

図 8 は Case1 から Case4 における加振後(t=20sec.)の堤防の変形図を示す。すべてのケースで堤防法尻から外側の地盤では波打った変形が見受けられる。3 次元解析の性格上，本研究においてはメッシュ数をあまり多く設定していないため，堤防盛土から離れた位置では解析精度が低下している。本研究では堤防盛土および鋼矢板周辺の 3 次元効果のみを検討しており，そこから離れた周辺地盤の変形モードについては留意していない。

Case1 では堤体の側方への流動に伴って，堤体が沈下していく様子が確認できる。Case2 では矢板自体は高さを維持していることが確認できる。ただし，鋼矢板上部にタイロッドが敷設されていないため，矢板上部が開き，堤体が沈下していく様子がわかる。一方，Case3 ではタイロッド接続部に想定する位置の x 方向の等変位境界を設けたため、Case2 に比べて矢板上部の水平変位を抑制されており，その拘束効果により，矢板の深度方向において，たわむような変形が確認できる。Case4 では矢板間の地盤の沈下が大きく抑えられており，沈下抑制効果が発揮されていることがわかる。

鋼矢板の挙動についてより詳細に検討するため，図 9 に前面から奥行方向に 136mm 離れた鉛直断面における矢板の水平変位をプロットした。Case2 ではタイロッドが敷設されていないため，矢板上部に大きな開きが見られる。一方，case3 では，矢板の上部にタイロッドが敷設されており，その深度において矢板の相対変位がゼロとなっている。Case3 では，上部が連結されていることと下部が支持層に届いていることにより，堤防外側に向けたわむように変形していることがわかる。case4 は，前面と最後面に隔壁を有している。しかしながら，その中間的位置における矢板は，隔壁からの拘束効果が薄まり，図に見られるように若干の外側に向かうたわみが観察される。

図 10 は加振時の時刻歴で表された奥行方向 136mm の位置における堤体天端中心(図 2 の鉛直変位参照)の沈下量を示す。Case1 から Case4 の順で沈下量が小さくなっていることがわかる。先の鋼矢板に関する検討で Case2 から Case4 の順で鋼矢板の変形は小さくなっており，沈下量と鋼矢板の変形量の傾向が一致する。以上のことから，鋼矢板の変形を抑制することが堤防の沈下抑制に大きく影響すると考えられる。

図 11 に加振後(t=20sec.)における，矢板最上部の水平変位(図 2 の矢板抽出平面参照)の堤防延長方向にみた分布を示す。Case2, 3 は，堤防延長方向に隔壁などの異物が混在していないため，堤防延長方向に均一な水平変位分布を示している。また，タイロッドが敷設されていない case2 では，矢板の開きが大きくなっていることがわかる。一方，Case 4 は隔壁間の中間位置に向かって天端が徐々に開いていく変形をしていることがわかる。隔壁が結合されている箇所を支点とし，堤防奥行き方向に向かって曲げ変形する挙動が確認できる。

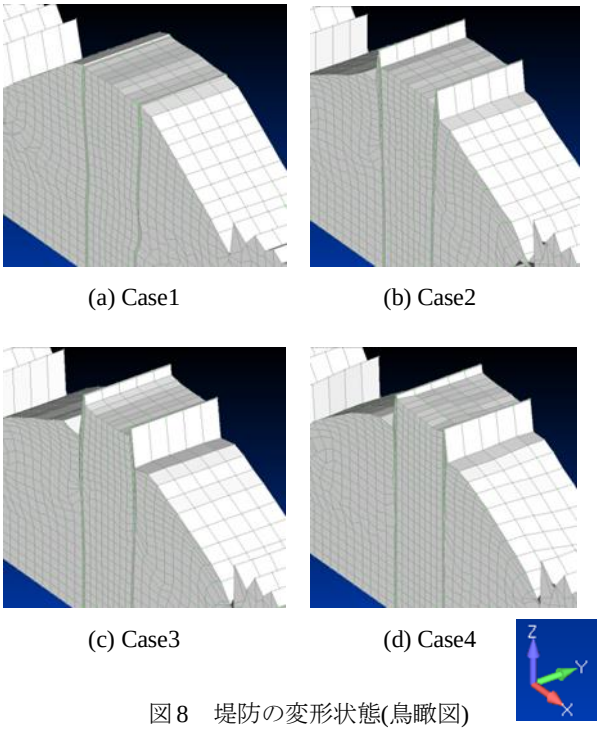


図 8　堤防の変形状態(鳥瞰図)

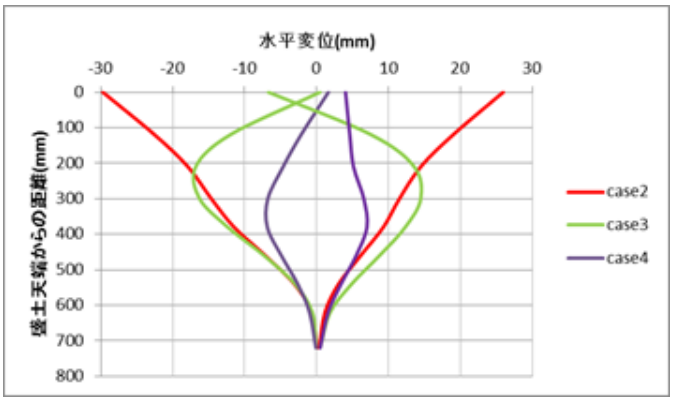


図 9　矢板水平変位（断面視）

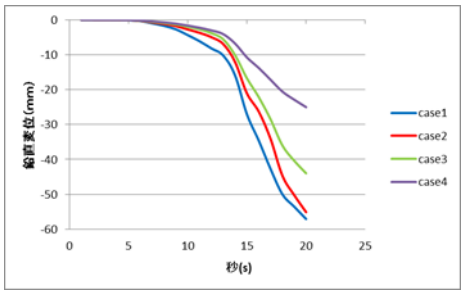


図 10　堤体の鉛直変位時刻歴

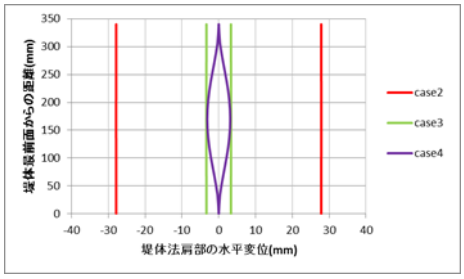
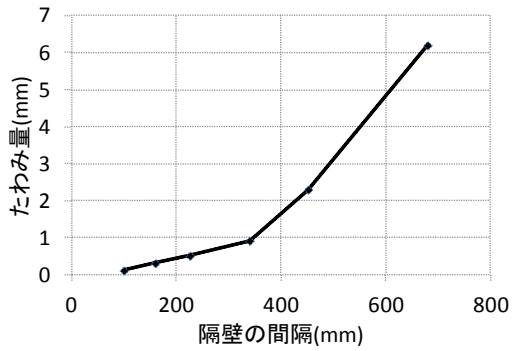


図 11　矢板水平変位（平面図）

表3　隔壁の間隔(mm)

case	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6
間隔	100	160	226	340	452	680



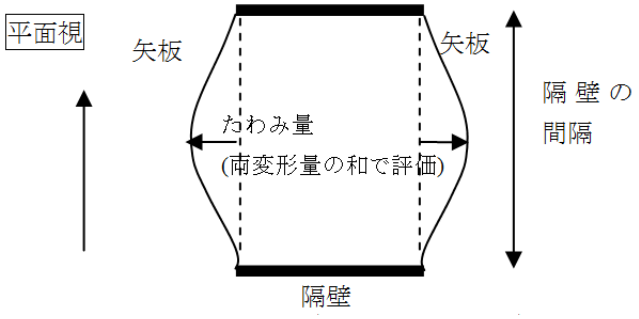


図 12　隔壁の間隔と矢板の水平方向の変形量

5. 隔壁の間隔に関するパラメトリックスタディ

前章の結果から，隔壁間において 3 次元的な変形が認められた。そこで Case4 のモデルの奥行き方向距離を変化させ，隔壁の間隔を変更した解析モデルを構築した。検討対象とした隔壁の間隔を表 3 に示す Case4-1 から Case4-6 の 6 パターンにおいて検討した。

図 12 に加振後(t=20sec.)における，隔壁の間隔および矢板の最大水平変位量(図 2 矢板抽出平面および図 12 の概念図を参照)との関係を示す。隔壁の間隔が小さい場合は，2 重鋼矢板に生じる水平方向の変形は小さいが，間隔が大きくなるにつれ水平方向の変形量が増加する結果となった。

6. まとめ

本研究の 3 次元解析によって，立体的補強された堤体の挙動について検証することが可能となった。隔壁の間隔が 170mm 程度(実構造 8.5m)であれば，堤防の変形・沈下が効果的に抑制されることを確認した。

さらに隔壁の間隔に着目しパラメトリックスタディを実施したことで，隔壁の間隔が大きくなると，堤防奥行き方向にみた鋼矢板の曲げ変形が発生することを確認した。このことが堤防の沈下抑制効果に与える影響については今後の課題としたい。また，今回の 3 次元解析により得られた結果と 2 次元の解析結果との比較し，2 次元解析で評価可能な隔壁間隔の範囲について検討を進める。

なお，実際の構造では，隔壁間隔が広くなる場合においても，一定間隔でタイロッドが敷設される。本研究では，隔壁とタイロッドの個別効果に注目して検討したため，隔壁およびタイロッドを併用した沈下抑制効果については検討していない，別途，併用効果については解析を実施しているので，別の機会に発表したいと考えている。

3 次元解析においては解析時間短縮のために，矢板をモデル化したソリッド要素を大きめに設定している。今後は，曲げ部材特有の構造効果をより詳細に検討するために，シェル要素および 3 次元ジョイント要素を用いた解析を実施する予定である。

参　考　文　献

1) 乙志和孝ほか：鋼矢板を用いた盛土構造物の減災技術に関する実験的研究，土木学会四国支部，21世紀の南海地震と防災，第7巻，2013
2) 藤原覚太ほか：巨大地震下における海岸堤防の鋼矢板補強策に関する実験的研究，地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-，2014
3) K. Fujiwara et.al.：Study on levee reinforcement using double sheet-piles with partition walls，Mini-Symposium-Chubu，2016 (Submitted)
4) K. Fujiwara et.al.：Study on coastal levee reinforcement using double sheet-piles with partition walls，ISOPE2016, 2016 (Submitted)
5) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ：LIQCA2D12・LIQCA3D11（2012年 追加資料），2012.
6) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ：LIQCA2D15・LIQCA3D15（2015年公開版）資料，2015.