

# 2次元動的有効応力解析による河川堤防の地震時沈下量の再現性向上策に関する考察

梶尾 辰史<sup>1</sup>・谷本 俊輔<sup>2</sup>・片岡 正次郎<sup>3</sup>・佐々木 哲也<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室 研究官 (〒305-0804 つくば市旭1)

E-mail:kajio-t8910@nilim.go.jp

<sup>2</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 研究員

(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>3</sup>正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室長 (〒305-0804 つくば市旭1)

E-mail:kataoka-s92rc@nilim.go.jp

<sup>4</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 上席研究員

(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

河川堤防の耐震性能照査は地震後の天端高さの算定において一般的に静的照査法が用いられる。ただし、複雑な構造を有する堤防の動的挙動の評価が必要とされる場合等においては、地震時の堤防の変形メカニズムをより詳細に反映することのできる動的有効応力解析の活用も期待される。しかし、動的有効応力解析はパラメータ設定が複雑で解析技術者の熟練を要する等の技術的課題が多く、実務において安定的に適用可能な手法として確立されていない。そこで本研究では2011年東北地方太平洋沖地震で被災した鳴瀬川0.8km付近(右岸)の中下震動観測所及び吉田川16.1km付近(右岸)の山崎震動観測所の河川堤防を対象に綿密な地質調査を実施した上で、2つの解析コードを用いて再現解析を行い、動的有効応力解析の再現性向上策を検討した。

**Key Words** : River embankment, Liquefaction, Seismic measures, Dynamic effective stress analysis

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において被災した淀川堤防をはじめとし、これまで地震による多くの河川堤防の被害が報告されている。2011年東北地方太平洋沖地震では、北上川や鳴瀬川の堤防における地盤及び堤体の液状化による沈下や亀裂、噴砂等の変状被害<sup>1)</sup>が発生したことは記憶に新しい。また、今後も南海トラフ地震や首都直下地震等の大規模地震が発生することが予測されており、現在、各河川において堤防の耐震対策が進められている。

河川構造物の耐震性能照査指針・同解説(平成28年3月、国土交通省水管理・国土保全局治水課)<sup>2)</sup>では、地震の影響を静力学的に解析する静的照査法を用いて、堤防の耐震性能を照査することが示されている。一方で、地盤条件や対象施設の構造が複雑であること、あるいは土地利用の制約条件が厳しいこと等、堤防の詳細な地震時挙動の把握が必要な場合については、自重変形解析等(以下「静的解析」という。)での再現性には限界があるため、実務では動的有効応力解析(以下「動的解析」

という。)による検討が有効とされることがある。

動的解析は様々な土の繰返しせん断挙動を表現することができるため、多様な条件下に対して適用性の高い手法である。しかし、高い表現能力を有する反面、基本物性値や構成則特有のパラメータの設定数が多く、各指標の関連性が複雑であることから、解析手法を熟知する必要があり、解析結果が解析技術者の経験や知識に依存し、個人差が現れやすい。また、パラメータ設定に当たり詳細な地質調査と室内試験が必要であり、そのパラメータ設定が解析の精度に及ぼす影響も大きい<sup>3) 4)</sup>。実務において動的解析を安定的に適用するためには、解析精度を確保するための地質調査や解析条件設定の方向性を示すことが重要である。

以上のような背景から本研究では、一級河川鳴瀬川0.8km付近(右岸)の中下震動観測所(以下「中下地区」という。)、及び一級河川吉田川16.1km付近(右岸)の山崎震動観測所(以下「山崎地区」という。)を代表する各1断面において、有限要素法による静的解析及び動的解析を行い、各解析結果と実測沈下量を比較すること

で、各解析手法の地震時沈下量の再現性を評価する。その結果を用いて、動的有効応力解析を一般的な解析手法として実務に広く活用できるように、各解析結果を比較し、再現性の得られるパラメータ設定やそのための地質調査に着目して解析結果の再現性向上策について考察する。

## 2. 解析対象

### (1) 対象地点

今回対象とした2地点は、東北地方太平洋沖地震の際に地中及び地表の強震観測記録が得られた箇所である。鳴瀬川 0.8km 付近（右岸）の中下震動観測所では、堤防天端と堤防小段、基盤の強震記録と、砂質土層における過剰間隙水圧の記録も観測され、地震動に関する研究をする上で重要な記録が得られた観測所である。吉田川 16.1km 付近（右岸）の山崎震動観測所では、堤防法尻部の地表と基盤の強震観測記録が得られた観測所である。

これらの2地点における貴重な記録を用いて、観測所の代表断面で静的解析及び動的解析を実施することとした。

### (2) 対象地点の被災状況

中下地区の東北地方太平洋沖地震前後の横断測量による堤防天端中央の沈下量は約 47cm であった。横断測量から求められる沈下量は、堤防自体の沈下量に加えて、地殻変動量が含まれた値であるため地殻変動量を考慮する必要がある。鳴瀬川 0.8km（右岸）の地殻変動量は不明であったため、精度が確実な近傍の電子基準点「矢本」の地殻変動量を考慮し、地震時における堤防天端中央の沈下量の測量結果 47cm と地殻変動量 37.2cm の差分から 9.8cm とした。これより、中下地区はごく小規模な被災であったと考えられる。なお、電子基準点「矢本」は当該中下地区より 6km 程度離れている。

山崎地区は、吉田川16km（右岸）における東北地方太平洋沖地震後の調査で堤防天端中央の沈下量59cm、川表側法尻水平変位量212cm、川裏側法尻水平変位量68cmの変状が報告されている。今回の対象箇所は100m程度上流に位置しており、現地調査結果等を踏まえると沈下量は同程度であったと考えられる。本研究で実施した地質調査によれば、堤防盛土は細粒分含有率が20%程度の砂質土であり、12月～2月末の間の地下水位は定常的に堤体の50%程度の高さであったことから、堤防盛土自体の液状化の可能性のある閉封飽和領域が存在していることが分かった。したがって、山崎地区は堤体の液状化が被災原因の一つとして考えられる。また、2005年宮

城県沖地震での被災報告は無く、無被災であったと考えられる。

### (3) 対象地点の地質条件

今回対象とした2地点において、地層構成と地下水位が正確に把握できるようにボーリング調査とサウンディング、サンプリングを実施し、各地層について物理試験、三軸圧縮試験、動的変形試験及び液状化試験を実施した。これらの調査結果を基に、以降で示すパラメータ設定に反映させた。

中下地区の地質断面は図-1 に示す通りであり、既存調査結果と地震後に実施したボーリング調査結果からとりまとめた。堤防法尻部（川裏側）には、2011年東北地方太平洋沖地震以前に液状化対策としてのサンドコンパクションパイル（SCP）工法による地盤改良が施されている。ボーリング孔内水位より、地下水位は概ね水平でありBK層下端付近にあることが分かる。室内試験として基本物性値と液状化の評価に必要なパラメータを得るために、各層の物理試験、動的変形試験ならびに液状化強度試験を実施した。また、BK層、Acs層については現場透水試験を行った。

山崎地区の地質断面は図-2 に示す通りであり、既存ボーリング調査では堤防盛土の沈下形状や地下水位が不明であったため、堤防天端と川表側及び川裏側においてボーリング調査と地下水位観測を実施し、川表から川裏にかけて6本のピエゾドライブユーン（PDC）<sup>5)</sup>を実施することにより連続的な地層の断面形状を詳細に把握した。基礎地盤の表層部分は、薄い砂質土と粘性土の互層であり、地下水位は堤体内の高さ1/3の位置にある。室内試験として、物理試験、動的変形試験並びに液状化強度試験を実施し、動的解析FLIPのカクテルグラスモデルのパラメータを設定することを目的として三軸圧縮試験も実施した。

山崎地区は、今回実施した詳細な地質調査実施前の地質断面図<sup>6)</sup>が存在した。それは図-8 に示す通りであるが、単純な地層構成であり、堤防盛土の基礎地盤へのめり込み状況が反映されていなかった。そこで、地質調査内容の解析結果への影響を評価するために、今回の詳細な土質調査結果と調査前の地質断面図を基に、両ケースの解析を実施することとした。

なお、今回調査した中下地区と山崎地区の詳細な土質調査結果は、著者らにより国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室のウェブサイト<sup>7)</sup>にて公開している。

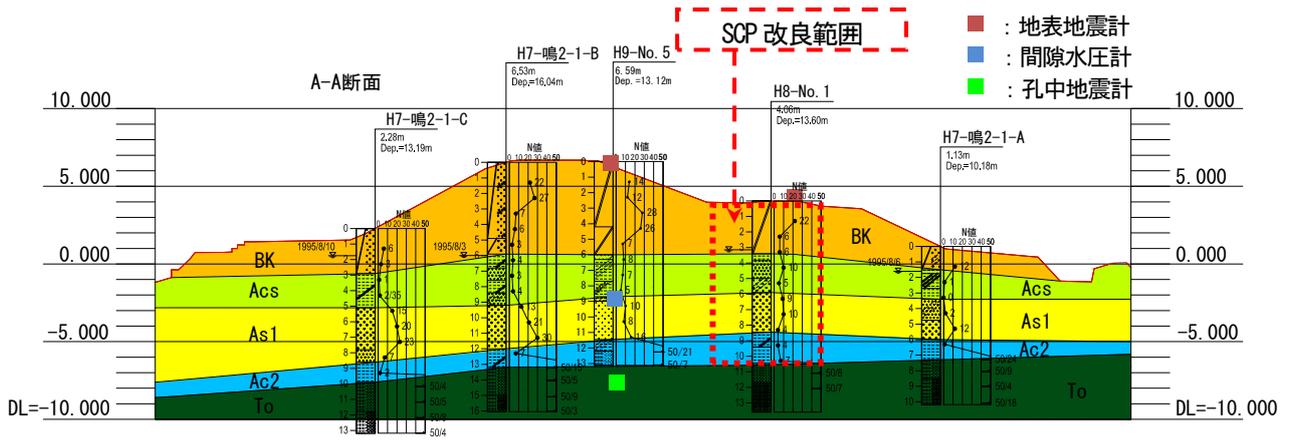


図-1 中下地区の地質断面図 (H:V=1:1)

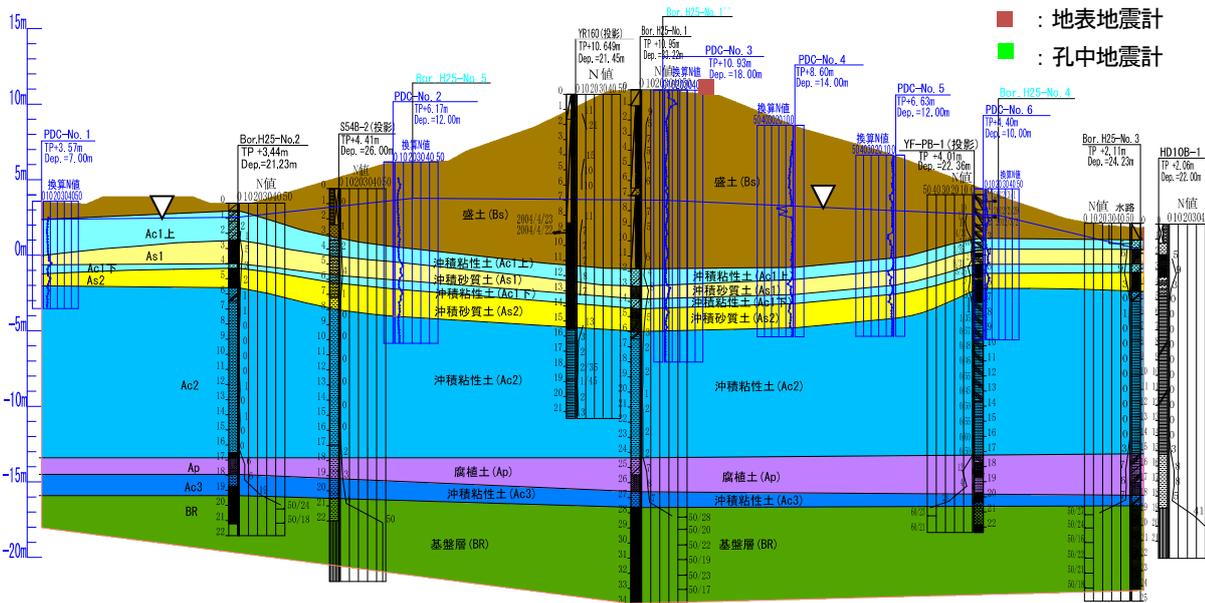


図-2 山崎地区の地質断面図 (H:V=1:1)

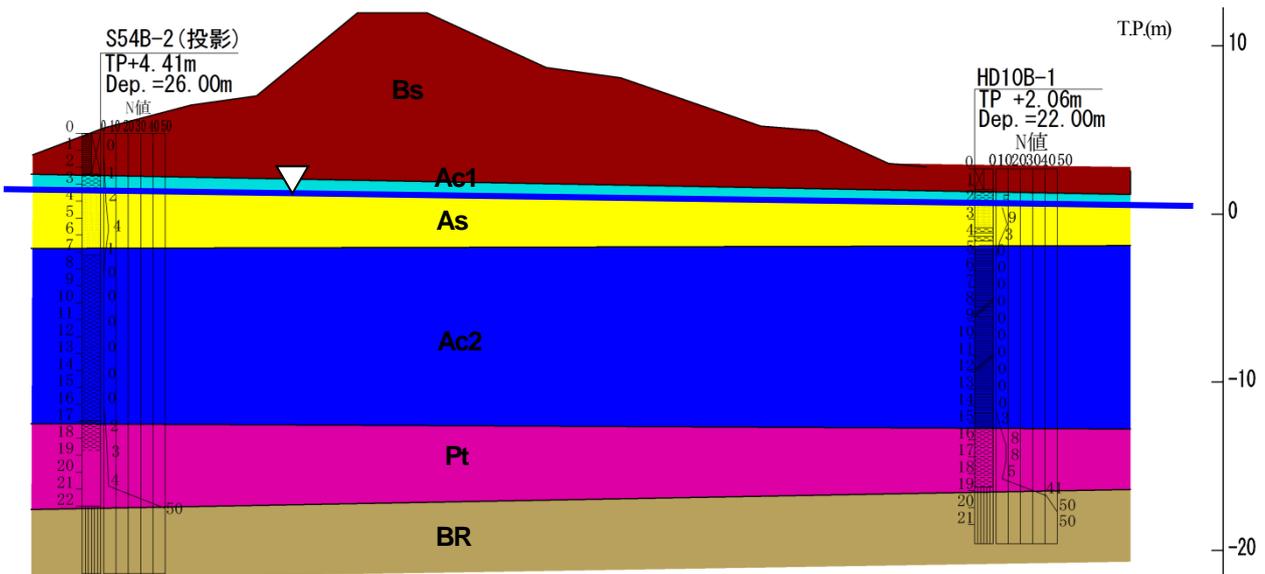


図-3 山崎地区の詳細な地質調査実施前の地質断面図 (H:V=1:1)

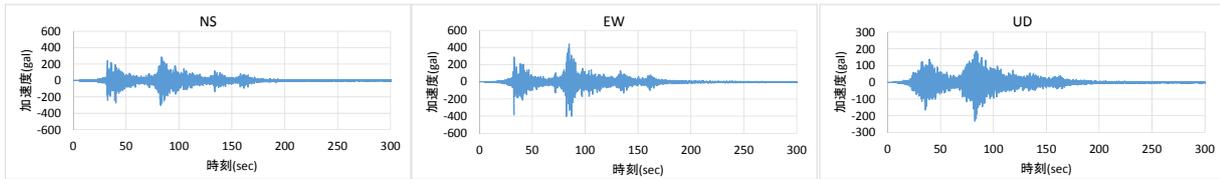


図-4 2011年東北地方太平洋沖地震における中下地区の孔中地震計（堤防天端-13m）の強震記録

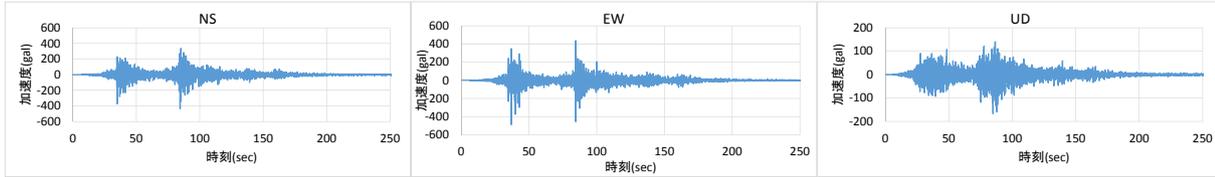


図-5 2011年東北地方太平洋沖地震における山崎地区の孔中地震計（堤防川裏側小段-22m）の強震記録

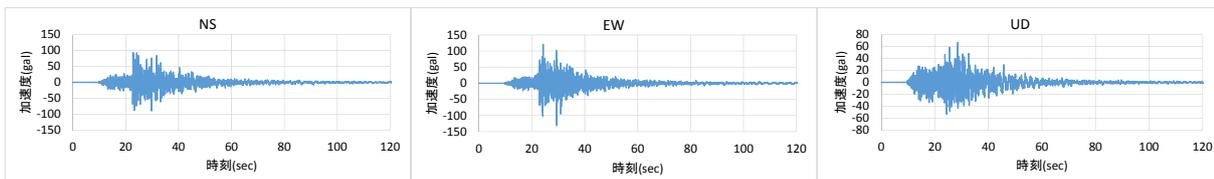


図-6 2005年宮城県沖地震における山崎地区の孔中地震計（堤防天端-22m）の強震記録

### 3. 対象地震動

強震記録が得られている地震動のうち、中下地区では2011年3月11日東北地方太平洋沖地震を対象とし、山崎地区では2011年3月11日東北地方太平洋沖地震と2005年8月16日宮城県沖地震を対象とする。その強震記録を図-4～図-6に示す。動的解析では孔中地震計の強震記録を工学的基盤波形として、水平方向2成分を堤防の横断面方向に方角補正した地震動を入力する。なお、静的解析では地表地震計の水平方向2成分合成の最大値を地盤の設計水平震度として用いた。

### 4. 解析手法と解析モデル

#### (1) 解析手法

本研究では、河川構造物の耐震性能照査指針・同解説（平成28年3月、国土交通省水管理・国土保全局治水課）<sup>2)</sup>で示されている静的解析手法のうち、広く一般に用いられている自重変形解析ALID<sup>9)</sup>と、動的解析手法については堤防への適用頻度の高い動的解析FLIP<sup>9)</sup>、動的解析LIQCA<sup>10)</sup>の2手法を用いることとした。なお、動的解析FLIPについては、マルチスプリングモデルとカクテルグラスモデルの両構成則を用いる。

#### (2) 解析モデル

解析モデルは地質構成及び地下水位を詳細に反映して作成し、地盤内を伝播する波の波長（5～15m程度）の1/5が最大サイズとなるようにメッシュ分割（1～3m）を行った。図-7、図-8に解析モデルを示す。解析領域は、側方は堤防法尻から堤敷幅の2倍まで、下方は孔中地震計設置深度までとした。

#### (3) 解析ケース

解析ケースは、パラメータ設定の影響を確認して各解析手法の適用性を検証するために、表-1に示す各ケースで解析を実施し、その結果を比較した。各解析ケースの考え方や各条件については以下に示す。また、要素試験シミュレーションにおいて、全ての着目点の試験結果と解析結果について、可能な範囲で整合性を図ったケースAのパラメータを表-2、表-3に示す。

山崎地区では地質調査項目が検計結果に及ぼす影響を把握するために、地質調査後（ケースA～D）と地質調査前（ケースE）の両断面について解析を実施し、比較した。その際の基本物性値は、地質調査及び室内試験の結果から設定した場合（ケースA～D）とN値から推定した場合（ケースE）の2パターンとした。

今回の解析ケースは、動的解析FLIPと動的解析LIQCAの両手法の液状化強度に関するパラメータを設定する際において、図-9（左図）のCASE0に示すように液状化強度曲線における非排水繰返し三軸試験の結果

(繰返し載荷回数 :  $N_c$ , 液状化強度比 (繰返しせん断強度比) :  $R_L$ ) と要素試験シミュレーション結果を整合させることに着目して設定した. 要素試験シミュレーションにおいて液状化特性に関する要素試験シミュレーション結果と液状化強度曲線が可能な限り重なり合うように整合させる方針とし, その整合 (フィッティング) の仕方を 4 ケース (ケース A (CASE0) ~ ケース E (CASE3)) とした. 具体的には, ①全ての  $N_c$  と整合させる (CASE0), ② $R_L20$  ( $N_c=20$ ) のみを整合させる (CASE1), ③ $N_c$  の小さい範囲を整合させる (CASE2), ④ $N_c$  の大きい範囲を整合させる (CASE3) の 4 ケースを設定した. この 4 ケースの具体例として動的解析 LIQCA の場合における Bs 層の液状化強度曲線を 図-9 (左図) に示す.

液状化強度曲線との整合性 (フィッティング) の着目点以外に, 動的解析 FLIP では応力履歴, 過剰間隙水圧の上昇過程, せん断変形及び体積収縮量といった着目点があり, 動的解析 LIQCA では応力履歴, 疑似過圧密比, 圧縮・膨張指数, 基準ひずみといった着目点がある. ケース A については, これらの着目点に関するパラメ

ータを調整して, 要素試験シミュレーション結果と液状化強度曲線が可能な限り整合するように計算したものである. ケース A の軸差応力~軸ひずみの関係と有効応力経路の履歴について, 要素試験シミュレーション結果と試験値を比較したものを 図-9 (右図) に示す.

動的解析 FLIP のケース B~ケース D については上述する CASE1~3 の設定方針と同時に, 体積収縮量の整合も図っているが, 応力履歴, 過剰間隙水圧の上昇過程, せん断変形の整合性の調整は対象外としている.

動的解析 LIQCA のケース B~ケース D については, 上述する CASE1~3 の設定方針のみとし, 応力履歴を整合させるための基準ひずみや圧縮指数  $\lambda$ , 膨潤指数  $\kappa$  については標準値を用いるものとして調整の対象外とした. ケース E については室内試験結果が得られておらず試験値と解析値の対比ができない状況を想定しているため, 標準的なパラメータの設定としている.

以上, これらのケースにおける解析過程を含めた解析結果を踏まえ, 動的解析の実務で利用する場合の再現性向上策について考察を行った.

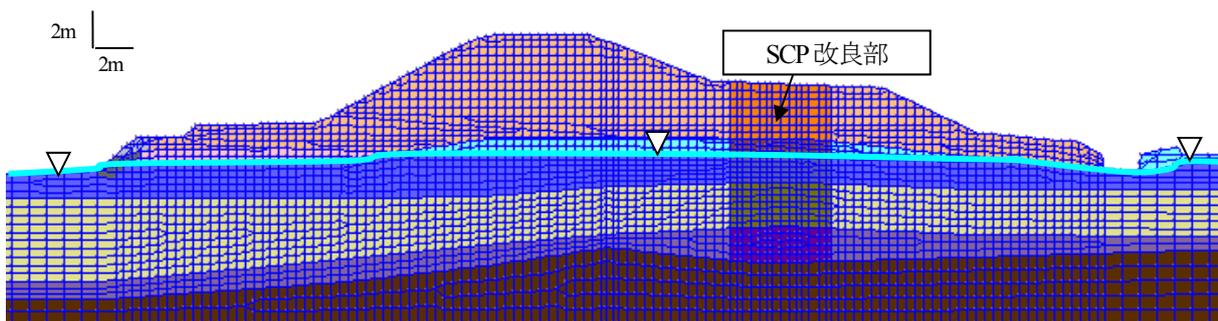


図-7 中下地区の静的・動的解析モデル (H:V=1:1)

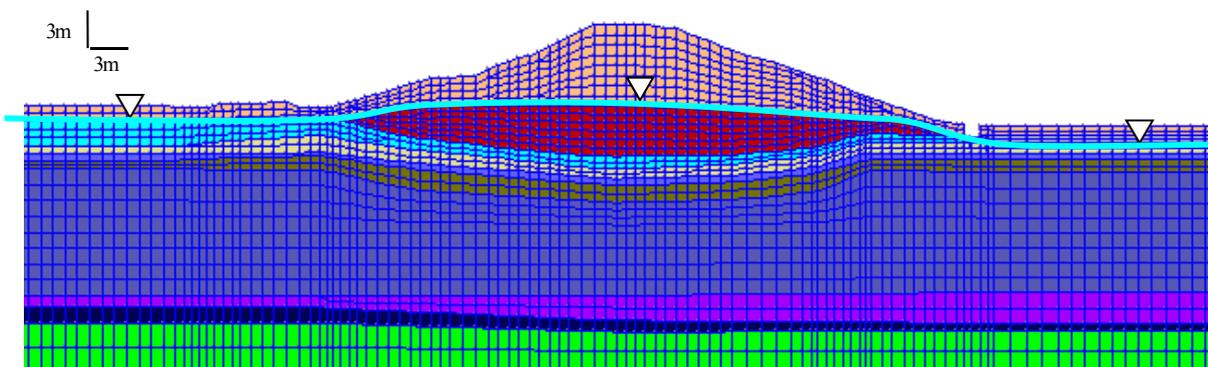


図-8 山崎地区の静的・動的解析モデル (H:V=1:1)

表1 動的解析のケース

FLIP (※ケースA~D:カクテルグラスモデル、ケースE:マルチスプリングモデル)																	
コード	解析断面		基本物性値		液状化強度曲線				応力履歴		水圧上昇		せん断変形		体積収縮特性		
	調査前	調査後	推定値	試験値	一般値	CASE0	CASE1	CASE2	CASE3	整合	未整合	整合	未整合	整合	未整合	整合	未整合
ケースA		○		○			○			○		○		○		○	
ケースB		○		○				○			○		○		○		○
ケースC		○		○				○			○		○		○		○
ケースD		○		○					○		○		○		○		○
ケースE	○		○		○						○		○		○		○

LIQCA																	
コード	解析断面		基本物性値		液状化強度曲線				応力履歴		擬似過圧密比		圧縮・膨潤指数		基準ひずみ		
	調査前	調査後	推定値	試験値	一般値	CASE0	CASE1	CASE2	CASE3	整合	未整合	調整	未調整	調整	未調整	調整	未調整
ケースA		○		○			○			○		○		○		○	
ケースB		○		○				○			○		○		○		○
ケースC		○		○				○			○		○		○		○
ケースD		○		○					○		○		○		○		○
ケースE	○		○		○						○		○		○		○

表-2(1) 動的解析 FLIP のパラメータ

中下地区																
No.	名称	液状化パラメータ(カクテルグラス)														
		$\phi_p'$	$\epsilon_{dcm}$	$r \epsilon_{dc}$	$r \epsilon_{d}$	$q1$	$q2$	$lk$	$H_{maxL}$	$rk=rk'$	$S1$	$c1$	$q4$	$r \gamma$	$rmtmp$	$qus$
1	BK	28.0	0.0245	7.05	0.60	1.70	1.08	2.00	0.182	0.167	0.005	2.300	1.0	0.2	1.0	0.0
2	Acs	28.0	0.0449	1.25	1.00	1.00	1.00	2.00	0.163	0.100	0.005	1.890	1.0	0.2	0.5	0.0
3	As1	28.0	0.0325	0.63	0.80	1.00	1.00	2.00	0.230	0.125	0.005	1.500	1.0	0.2	0.5	0.0
4	Acs(改良部)	28.0	0.0449	0.24	1.20	1.00	1.00	2.00	0.152	0.083	0.005	1.480	1.0	0.2	0.5	0.0
5	As1(改良部)	28.0	0.0325	0.63	0.80	1.00	1.00	2.00	0.190	0.125	0.005	1.500	1.0	0.2	0.5	0.0

山崎地区																
No.	名称	液状化パラメータ(カクテルグラス)														
		$\phi_p'$	$\epsilon_{dcm}$	$r \epsilon_{dc}$	$r \epsilon_{d}$	$q1$	$q2$	$lk$	$H_{maxL}$	$rk=rk'$	$S1$	$c1$	$q4$	$r \gamma$	$rmtmp$	$qus$
1	Bs(水位以深)	28.0	0.0449	32.25	0.28	1.00	1.00	2.00	0.24	0.025	0.005	2.40	1.0	1.0	0.5	200.0
2	As1	28.0	0.0449	1.20	0.80	1.00	1.00	2.00	0.24	0.050	0.005	1.12	1.0	0.2	0.5	100.0
3	As2	28.0	0.0449	2.00	0.40	1.00	1.00	2.00	0.24	0.075	0.005	1.80	1.0	0.2	0.5	120.0

表-2(2) 動的解析 FLIP のパラメータ

山崎地区							
No.	名称	液状化パラメータ(マルチスプリング): ケースE					
		PHIP	S1	W1	P1	P2	C1
2	As1	28.0	0.005	2.987	0.500	0.427	2.096

表-3 動的解析 LIQCA パラメータ

パラメータ名	記号	中下地区										山崎地区			
		BK-U未	BK-U改	BK未	BK改	Acs-U未	Acs-U改	Acs未	Acs改	As1未	As1改	Bs層(上)	Bs層(下)	As1	As2
圧縮指数	$\lambda$	0.0150	0.0150	0.0200	0.0200	0.0500	0.0500	0.0040	0.0040	0.0030	0.0030	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
膨潤指数	$\kappa$	0.0100	0.0100	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0030	0.0015	0.0015	0.0025	0.0025	0.0025	0.0026
無次元化初期せん断係数	$G_0/\sigma'_m$	2000	2000	1470	1470	1200	1200	770	770	800	800	1400.3	806	618.6	447.3
変相応力比	$M_m^*$	0.838	0.838	0.944	0.944	0.768		0.768	0.699	0.768	0.768	0.909	0.909	0.909	0.909
破壊応力比	$M_r^*$	1.336	1.336	1.147	1.147	1.336		1.115	1.115	1.272	1.272	1.325	1.172	1.219	1.194
硬化関数中のパラメータ	$B_0^*$	8000	8000	5500	5500	5000	5000	5000	5500	5000	5000	1500	1500	1800	2000
硬化関数中のパラメータ	$B_1^*$	80	80	55	55	50	50	50	55	50	50	10	10	50	50
硬化関数中のパラメータ	$C_f$	0	0	50	50	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
異方性消失パラメータ	$C_d$	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
擬似過圧密比	OCR	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.2	0.9	0.9	1.07	1.10	1.15	1.04
ダイレイタンス係数	$D_0$	0.0	0.0	5.0	5.0	0.0	0.0	1.5	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ダイレイタンス係数	$n$	0.0	0.0	21.0	21.0	0.0	0.0	20.0	4.0	17.0	17.0	6.0	6.0	6.0	6.0
基準ひずみ(塑性)	$\gamma_r^{*p}$	0.005	0.005	0.010	0.010	0.005	0.005	0.007	0.007	0.006	0.006	0.020	0.020	0.005	0.100
基準ひずみ(弾性)	$\gamma_r^{*e}$	0.010	0.010	0.004	0.004	0.007	0.007	0.010	0.050	0.010	0.010	0.100	0.100	0.005	0.100

※「未」は未改良範囲の地質を示し、「改」は SOP 改良範囲の地質を示す。

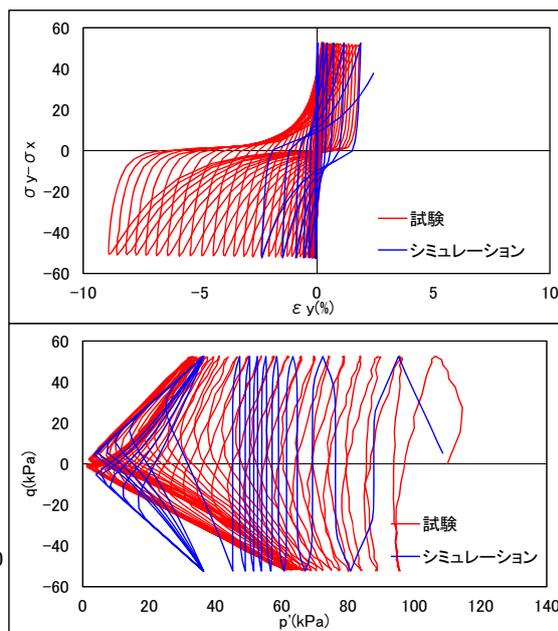
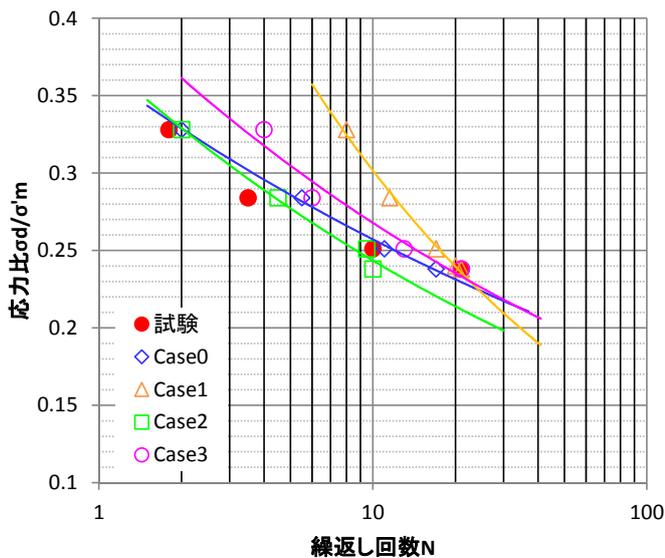


図-9 動的解析 LIQCA の場合における山崎地区 Bs 層の液状化曲線の感度分析ケース (左) と応力履歴 (右)

## 5. 解析結果及び再現性向上策

ここでは表-1 に示すケースのうち、各指標の試験値と解析値の整合性が最も高いケース A の結果について考察した。

### (1) 静的解析 ALID

中下地区における東北地方太平洋沖地震の静的解析 ALID の結果を図-10 に示す。堤防天端中央の沈下量は 207cm であり、実測 9.8cm の 21 倍である。液状化抵抗率  $F_L$  は堤体直下で 0.2 程度である。

山崎地区における東北地方太平洋沖地震の静的解析 ALID の結果を図-11 に示す。堤防天端中央の沈下量は 67cm であり、実測 59cm と概ね整合する。液状化抵抗率  $F_L$  は Bs 層、As1 層及び As2 層で 0.2~0.6 程度である。また、2005 年宮城県沖地震における山崎地区の堤防天端中央の沈下量は実測沈下量 0cm に対して 48cm であった。これより、静的解析 ALID において無被災の再現解析を行う場合は、過大評価となる可能性があることが分かった。

### (2) 動的解析 FLIP

中下地区の東北地方太平洋沖地震の解析結果 (カクテルグラスモデル) として、図-12 に圧密終了時の残留変形図 (コンタは最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$ ) と、地震動終了直後の過剰間隙水圧比 ( $\Delta u/\sigma'_{m0}$ ) の分布図を示す。カ

クテルグラスモデルでは堤防天端中央の沈下量は 58.8cm であり、実測 9.8cm の約 6 倍の沈下量となっている。また、堤体の表層付近におけるせん断ひずみが卓越していることが分かる。

次に、山崎地区の東北地方太平洋沖地震の解析結果 (カクテルグラスモデル) として、図-13 に圧密終了時の残留変形図 (コンタは最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$ ) と、地震動終了直後の過剰間隙水圧比 ( $\Delta u/\sigma'_{m0}$ ) の分布図をそれぞれ示す。これより、東北地方太平洋沖地震では堤体中央部及び法面直下の As1 層、As2 層のせん断ひずみが大いことが分かる。堤体天端直下では軸差せん断による変形、法面直下の As1 層、As2 層は単純せん断に近い変形の挙動を示して堤体全体が沈下し、法尻付近で側方に変位を生じていると考えることができる。

### (3) 動的解析 LIQCA

中下地区の東北地方太平洋沖地震の解析結果として、圧密終了時の残留変形と地震動終了直後の最大過剰間隙水圧比 ( $\Delta u/\sigma'_{m0}$ ) の分布図を図-14 に示す。堤防天端中央の沈下量は 300cm となり、実測 9.8cm の約 30 倍となっている。また、過剰間隙水圧比は、Acs 層で 1.0 まで上昇し、完全に液状化していることが分かる。残留変形図から堤体自体の変形が大いことが分かる。

山崎地区の東北地方太平洋沖地震の解析結果として、圧密終了時の残留変形図と地震動終了直後の過剰間隙水圧比 ( $\Delta u/\sigma'_{m0}$ ) の分布図を図-15 に示す。東北地方太平洋沖地震では、堤防天端中央の沈下量は 91cm であって

実測値 59cm と比較して大きいですが、変形モードとしては概ね整合していると言える。Bs 層（下）、As1 層ならびに As2 層が液状化により変形するが、中でも層厚の厚い Bs 層（下）における沈下量が卓越している。地震動終了直後には、Bs 層（下）から As2 層まで過剰間隙水圧が高くなっている。

#### (4) 再現沈下量の比較

表-1の各ケースについて、静的解析ALIDと動的解析FLIP、動的解析LIQCAの計算沈下量（堤防天端中央）を算出した結果を表-4、表-5に示す。

中下地区については、実測9.8cmに対し、全ての解析で過大な沈下量が計算され、特に静的解析ALIDと動的解析LIQCAでは実測値の約20～30倍の計算沈下量となった。これは堤体の規模が大きく、基礎地盤の液状化層厚が大きいことが影響していると考えられる。また、堤体の不飽和土の変形が解析上過大に算出されていることも影響していると考えられる。

山崎地区の静的解析ALIDと動的解析FLIP、動的解析LIQCAのケースAの結果は、概ね実測と整合している。山崎地区では堤体が圧密沈下によって基礎地盤にめり込んでおり、地下水位が高く、堤体内に閉封飽和領域が形成されている。堤体直下は粘性土と砂質土の互層となっており、その下は軟弱な粘性土が厚く堆積している。基礎地盤のAs1層とAs2層の過剰間隙水圧の上昇は顕著であるが、Bs層の閉封飽和領域のせん断変形及び水圧上昇・消散による沈下量が支配的であった。このように複雑な地層構成を有しているが、変形モードを適切に再現でき、その結果、沈下量の再現性も高かったと考えられる。

また、山崎地区では詳細な地質調査前の断面を用いて、N値よりパラメータを推定することを基本としたケースEを実施した。沈下量のみを見ると、動的解析LIQCAでは過大となっているものの、動的解析FLIPでは、ケースAより実測と整合する結果が得られた。しかし、堤体の閉封飽和領域が液状化したという実際の被災メカニズムを再現できていないため、今回の場合にはBs層とAs層の影響が相殺し偶然整合したに過ぎないものと考えられる。複雑な地層構成の堤体及び基礎地盤における耐震対策工の設計では、通常、動的解析が有効であると考えられる。

#### (5) 再現性向上策に関する考察

以上の結果から、動的解析を実施する上で再現性の向上策として重要な点が明らかとなった。具体は以下に示す。

まず、各種パラメータを設定するためには工学的基盤

までの地層構成と各地層の物性値を把握するための土質調査を行うことが重要である。この土質調査では特に解析結果に影響の大きい地下水位面や堤体形状の把握、各種パラメータ設定に必要な室内試験を実施すべきである。室内試験では細粒分含有率の深度方向の分布や、液状化強度曲線を求める非排水繰返し三軸試験が有益な資料となる。

また、動的解析の各種パラメータ設定は要素試験シミュレーション結果に基づき設定することが基本である。要素試験シミュレーションにおける液状化強度曲線へのフィッティング（整合性）の程度が解析結果に与える影響が大きい。ここでのフィッティングとは、各応力比における繰返し回数と曲線の傾きを整合させることである。

動的解析FLIPにおける要素試験シミュレーションでは液状化強度特性以外に単調載荷特性や体積収縮特性のフィッティング状況が解析結果に大きく影響する。この単調載荷特性は、等方圧密非排水条件でのCU試験により有効応力経路、応力ひずみ関係を描くことが可能であるため、これらの試験結果と要素試験シミュレーション結果が適合するように繰返し載荷特性と合わせて設定するものである。体積収縮特性についても試験結果と要素試験シミュレーション結果が適合することで、再現性の高い解析結果が得られるが、その際、石原らによるきれいな砂の最大せん断ひずみと体積ひずみの関係図<sup>11)</sup>のように頭打ちにする体積収縮特性と、直線的な体積収縮特性を選択する2つの方法が考えられる。現場条件で排水沈下の影響が大きいと考えられる場合は1次元地震応答解析により排水沈下の影響を確認した上で判断することが有効である。

動的解析LIQCAにおける要素試験シミュレーションでは、疑似過圧密比や膨張指数を調整して液状化強度曲線へのフィッティングを行うと安定した結果が得られやすかった。液状化強度曲線へのフィッティング以外には、圧縮指数及び膨張指数の影響が大きいことが確認できた。しかし、これらの物性値は本来圧密試験から求められるが、砂の圧密試験は一般的に実施しないため試験方法については今後の検討課題である。

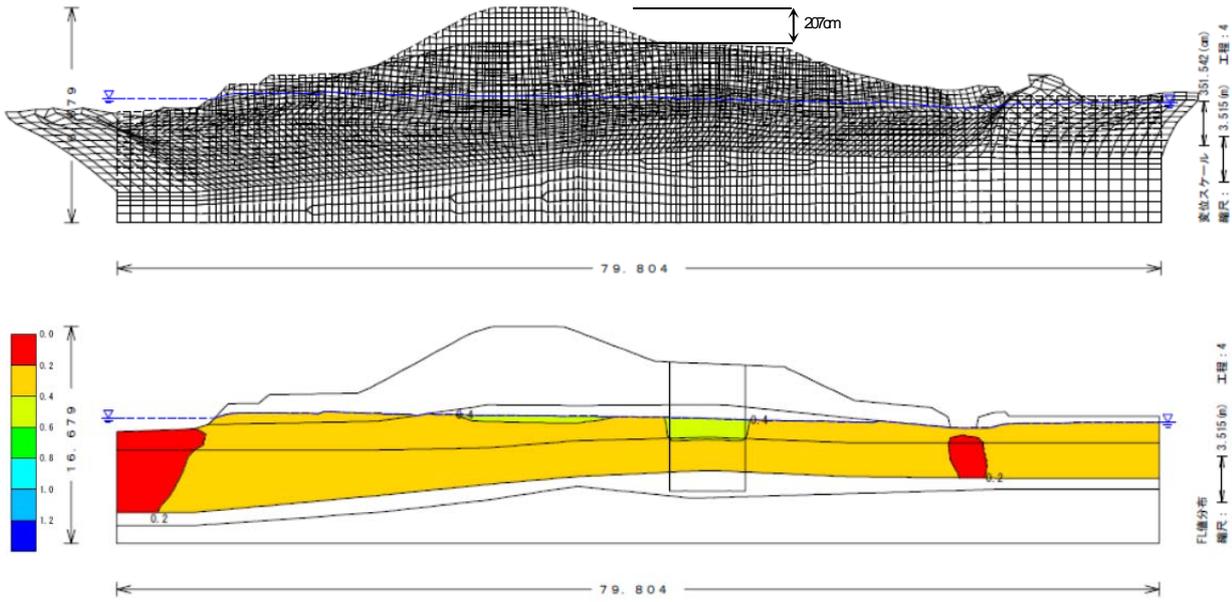


図-10 中下地区における東北地方太平洋沖地震の変形図（上）と  $F_L$  値分布（下）（ALID）（H:V=1:1）

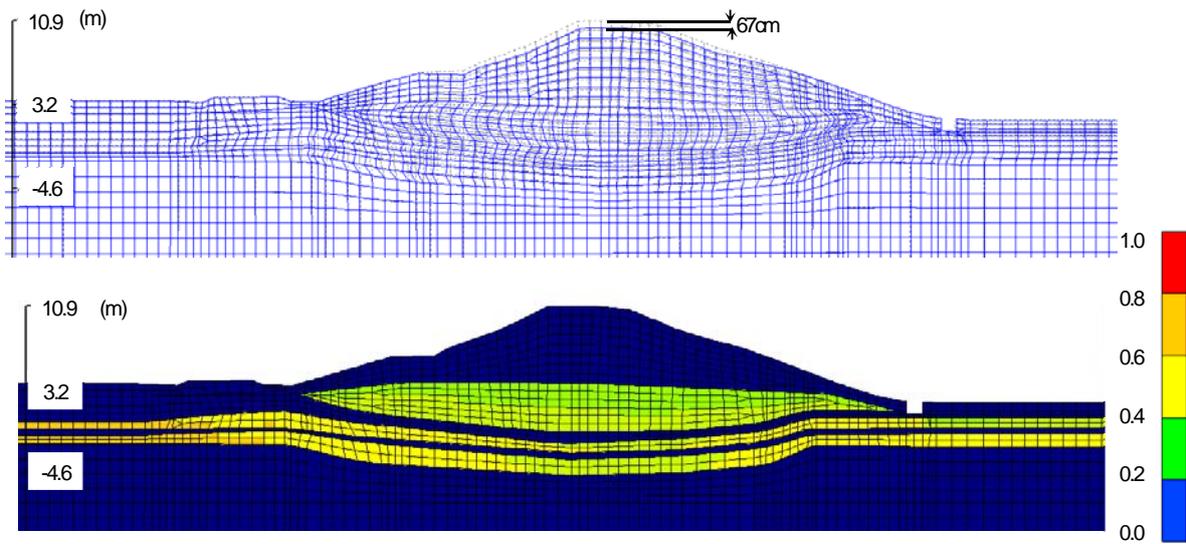


図-11 山崎地区における東北地方太平洋沖地震の変形図（上）と  $F_L$  値分布（下）（ALID）（H:V=1:1）

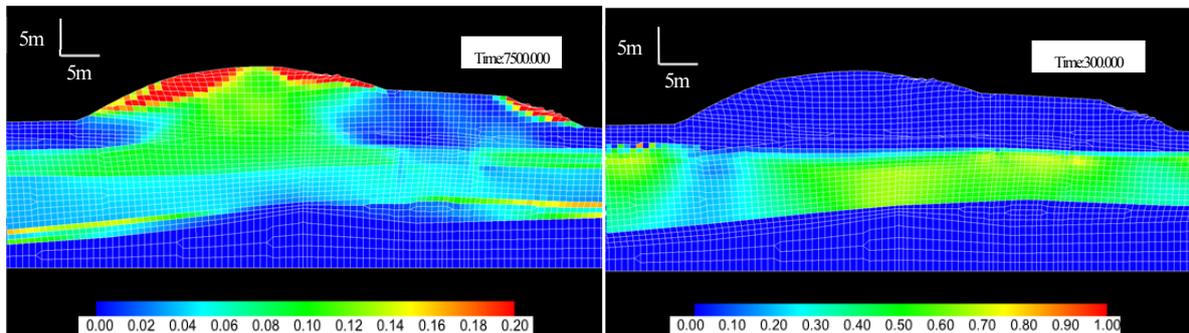


図-12 中下地区における東北地方太平洋沖地震の残留変形（左）と過剰間隙水圧比（右）（FLIP）（H:V=1:1）

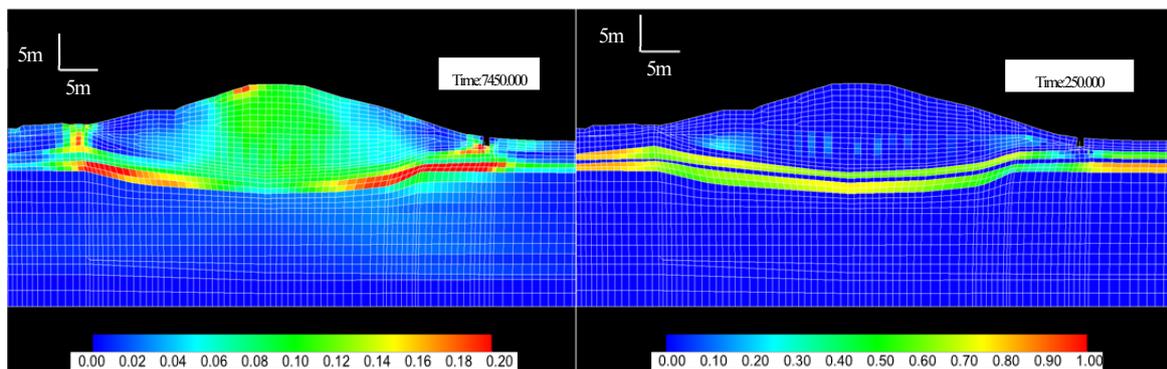


図-13 山崎地区における東北地方太平洋沖地震の残留変形（左）と過剰間隙水圧比（右）（FLIP）（H:V=1:1）

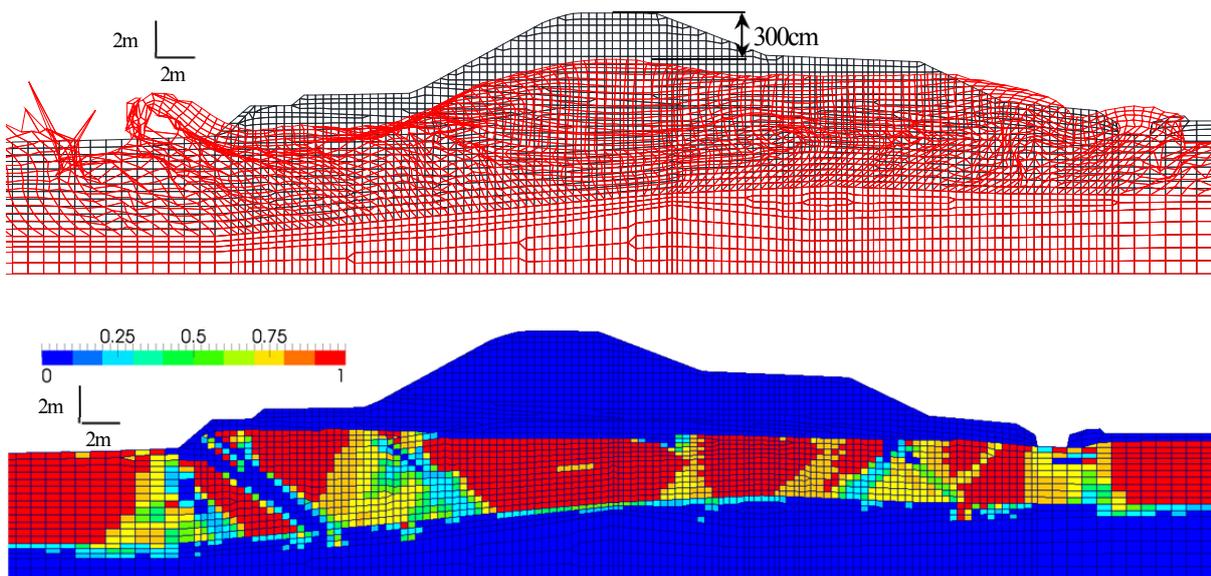


図-14 中下地区における東北地方太平洋沖地震の残留変形(上)と過剰間隙水圧比(下)(LIQCA)（H:V=1:1）

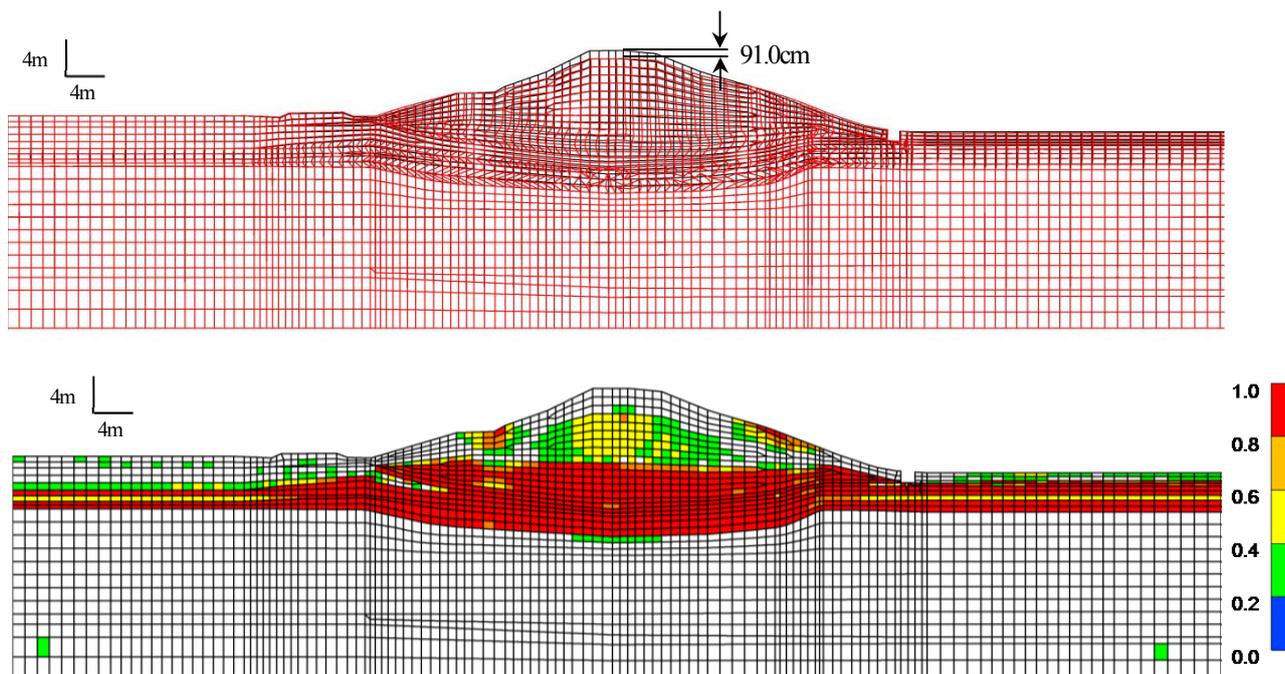


図-15 山崎地区における東北地方太平洋沖地震の残留変形過剰間隙水圧比（LIQCA）（H:V=1:1）

表-4 東北地方太平洋沖地震の各解析ケースの計算沈下量と実測沈下量の比較

検討断面	中下地区			山崎地区											
	9.8			59											
解析手法	ALID	FLIP	LIQCA	ALID			FLIP				LIQCA				
解析ケース	ケースA	ケースA	ケースA	ケースA	ケースE	ケースA	ケースB	ケースC	ケースD	ケースE	ケースA	ケースB	ケースC	ケースD	ケースE
地震動終了後(cm)	—	58.5	—	37.0	28.3	79.4	87.0	97.4	118.5	76.7	64.0	19.1	73.9	84.3	146.0
水圧消散後(cm)	207.0	58.8	300.0	67.0	55.4	83.8	89.1	99.0	120.1	—	91.0	52.7	140.9	163.7	146.8

表-5 2005年宮城県沖地震の各解析ケースの計算沈下量と実測沈下量の比較

検討断面	実測沈下量(cm)	解析手法	解析ケース	地震時終了後(cm)	水圧消散後(cm)
山崎地区	0	ALID	ケースA	15.0	48.0
		FLIP	ケースA	6.8	9.0
		LIQCA	ケースA	4.7	9.1

## 6. 結論

本研究では、河川堤防の2地点の強震観測所において、有限要素法による静的解析及び動的解析を行い、各解析結果と実測沈下量を比較することで、各解析手法の地震時沈下量の再現性を評価した。その各解析結果を比較し、再現性の得られるパラメータ設定やそのための地質調査に着目して解析結果の再現性向上策について考察した。その結果を以降に示す。

- ① 東北地方太平洋沖地震の中下地区と山崎地区における各種パラメータの感度分析の結果、液状化強度曲線、応力履歴、過剰間隙水圧の上昇等の要素試験シミュレーションでの全ての着目点について整合させたケースAは、概ね実測沈下量を再現することができた。ケースB～Dのように、パラメータ設定における着目点を変化させて感度分析を実施したところ、要素試験シミュレーションの精度が堤防沈下量の再現性に及ぼす影響が大きいことが分かった。特に、最も再現性の高いケースAと、液状化強度曲線の繰返し回数大きい箇所のみ整合させたケースDでは、沈下量に約1.5倍の差が生じており、パラメータの設定条件の違いが解析結果へ大きく影響することが明らかとなった。
- ② 山崎地区では詳細な地質調査前と調査後の両方の断面を用いて、動的解析を行った。沈下量のみを見ると、動的解析LIQCAでは過大となっているものの、動的解析FLIPではケースAより実測と整合する結果が得られた。しかし、堤体の閉封飽和領域が液状化したという実際の被災メカニズムを再現できていないため、今回の場合にはBs層とAs層の影響が相殺し偶然整合性が得られたに過ぎないものと考えら、複雑な地層構成の堤体及び基礎地盤における耐震対策工の設計では、動的解析が有効である。
- ③ 2005年宮城県沖地震の山崎地区の再現解析結果からは、実測沈下量0cmに対して堤防天端中央の沈下量は、静的解析ALIDが48cmであり再現性が悪く、動

的解析FLIPが9.0cm、動的解析LIQCAが9.1cmとなり、動的解析については概ね無被災を再現する結果となった。

- ④ 各種パラメータを設定するためには工学的基盤までの地層構成と各地層の物性値を把握するための土質調査を行うことが重要であり、解析結果に影響の大きい地下水位面や堤体形状の把握、各種パラメータ設定に必要な室内試験を実施すべきであることが今回の解析結果から再確認することができた。また、動的解析の各種パラメータ設定の基となる要素試験シミュレーションにおいて、液状化強度曲線へのフィッティング（整合性）の程度が解析結果に与える影響が大きいことが解析結果から明らかとなった。さらには、動的解析FLIPでは単調載荷特性及び体積収縮特性の整合性、動的解析LIQCAでは疑似過圧密比や膨張指数の物性値の設定が、解析結果の再現性向上に重要な指標であることが分かった。

これらの結果から、動的解析結果は地質調査内容やパラメータ設定方法によるところが大きいことが再認識できた。今後も、同解析を行う際の地質調査や解析条件設計の方向性、具体的な再現性向上策を示すために解析事例を増やし、知見を積み重ねていきたい。

**謝辞：**本研究の土質調査等では東北地方整備局北上川下流河川事務所の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：国総研資料No.646，土研資料No.4202，2011。
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針・同解説，2016。
- 3) 一般社団法人FLIPコンソーシアム：FLIP研究会14年間の検討成果「事例編」，2012。
- 4) 一般社団法人LIQCA液状化地盤研究所：NEWSLETTER NO.2，2015。
- 5) PDCコンソーシアムオフィシャルサイト：液状化ポテンシャルサウンディング試験PDC，<http://www.pdc-cons.jp/> (2016.9.2閲覧)
- 6) 北上川等堤防復旧技術検討会，国土交通省東北地方整備

- 局：北上川等堤防復旧技術検討会報告書資料編，7.国土交通省強震ネットワークにおける観測データ，2011.
- 7) 国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室：河川堤防の土質調査結果，<http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/index.htm> (2016.9.2閲覧) .
- 8) ALID 研究会：2次元液状化流動解析プログラム ALID/Win マニュアル，2007.
- 9) 一般社団法人 FLIP コンソーシアム：<http://www.flip.or.jp/>
- 10) 一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所：LIQCA2D13・LIQCA3D13 (2013年公開版) 資料，2013.
- 11) Ishihara, Yoshimine: Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquake, Soils and Foundations Vol.32, No.1, pp173-pp188, 1992.

## EXAMINATION OF THE EARTHQUAKE SETTLEMENT EVALUATION OF RIVER EMBANKMENT USING 2D DYNAMIC EFFECTIVE STRESS ANALYSIS

Tatsushi KAJIO, Shunsuke TANIMOTO, Shojiro KATAOKA and Tetsuya SASAKI

In the guideline for seismic design of river structures, static analysis is usually applied to calculate the deformation of a river embankment. Dynamic effective stress analysis is advisable in the cases that large measures are conducted or detailed examination is required due to land use status. However, dynamic effective stress analysis has not yet established as a stably applicable method because it needs special knowledge and has technical difficulty in setting parameters. In this paper, we studied points improve accuracy of dynamic effective stress analysis based on the detailed investigation of the ground at Naruse River R0.8km and Yoshida River R16km and the simulated behavior of the embankments during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.