

【大変形解析 WG】

目 次

【大変形解析 WG】

1. はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
藤井 紀之 （応用地質）	
2. 要素試験・要素解析、はり要素に対する検討・・・・・・・・	3
2-1 要素試験・要素解析による基本挙動の確認（静的載荷検討）.....	5
植村 一瑛 （応用地質）	
林 健二 （フォレストエンジニアリング）	
三上 武子 （前田建設工業）	
2-2 要素試験・要素解析による基本挙動の確認（動的載荷検討）.....	7
林 健二 （フォレストエンジニアリング）	
植村 一瑛 （応用地質）	
三上 武子 （前田建設工業）	
2-3 非線形はり要素を対象とした検討・・・・・・・・	9
塩崎 禎郎 （JFE スチール）	
大矢 陽介 （港湾空港技術研究所）	
3. 遠心載荷実験を対象とした検討・・・・・・・・	11
3-1 傾斜地盤に対する遠心載荷実験結果を対象とした検討.....	13
藤井 紀之 （応用地質株式）	
植村 一瑛 （応用地質株式）	
三上 武子 （前田建設工業）	
3-2 矢板式構造に対する遠心載荷実験結果を対象とした検討.....	15
藤井 紀之 （応用地質株式）	
関野 真登 （地層科学研究所）	
仲摩 貴史 （地震工学研究所）	
4. 各種構造物を対象とした検討・・・・・・・・	25
4-1 盛土構造物を対象とした検討(1).....	27
兵頭 順一 （東電設計）	
佐藤 恭兵 （東電設計）	
渡部 龍正 （東電設計）	
牛島 崇 （ダイヤコンサルタント）	
村上 裕宣 （中央復建コンサルタンツ株式会社）	

4-2	盛土構造物を対象とした検討(2)・・・・・・・・・・・・・・・・	29
	牛島 崇 (ダイヤコンサルタント)	
	兵頭 順一 (東電設計)	
	佐藤 恭兵 (東電設計)	
	渡部 龍正 (東電設計)	
	村上 裕宣 (中央復建コンサルタンツ株式会社)	
4-3	盛土構造物を対象とした検討(3)・・・・・・・・・・・・・・・・	31
	村上 裕宣 (中央復建コンサルタンツ株式会社)	
	兵頭 順一 (東電設計)	
	佐藤 恭兵 (東電設計)	
	渡部 龍正 (東電設計)	
	牛島 崇 (ダイヤコンサルタント)	
4-4	河川堤防を対象とした検討・・・・・・・・・・・・・・・・	33
	湯浅 明 (日本解析センター)	
4-5	防波堤を対象とした検討(1)・・・・・・・・・・・・・・・・	37
	宇野 勝哉 (日本港湾コンサルタント)	
	柴田 大介 (日本港湾コンサルタント)	
	芋野 智成 (パシフィックコンサルタンツ)	
	大澤 史崇 (パシフィックコンサルタンツ)	
	平栗 昌明 (オリエンタルコンサルタンツ)	
	久木留貴裕 (オリエンタルコンサルタンツ)	
4-6	防波堤を対象とした検討(2)・・・・・・・・・・・・・・・・	39
	平栗 昌明 (オリエンタルコンサルタンツ)	
	久木留貴裕 (オリエンタルコンサルタンツ)	
	宇野 勝哉 (日本港湾コンサルタント)	
	柴田 大介 (日本港湾コンサルタント)	
	芋野 智成 (パシフィックコンサルタンツ)	
	大澤 史崇 (パシフィックコンサルタンツ)	
4-7	重力式岸壁を対象とした検討(1)・・・・・・・・・・・・・・・・	41
	戎 健次 (ニュージェック)	
	乗原 直範 (ニュージェック)	
	井瀬 肇 (五洋建設)	
	藤井 紀之 (応用地質)	
	住谷 圭一 (東亜建設工業)	
4-8	重力式岸壁を対象とした検討(2)・・・・・・・・・・・・・・・・	43
	井瀬 肇 (五洋建設)	
	戎 健次 (ニュージェック)	
	乗原 直範 (ニュージェック)	
	藤井 紀之 (応用地質)	

	住谷 圭一 (東亜建設工業)	
4-9	重力式岸壁を対象とした検討(3)・・・・・・・・・・・・・・・・	45
	藤井 紀之 (応用地質)	
	戎 健次 (ニュージェック)	
	栗原 直範 (ニュージェック)	
	井瀬 肇 (五洋建設)	
	住谷 圭一 (東亜建設工業)	
4-10	浮上を対象とした検討(1) 円形断面・・・・・・・・・・・・	47
	佐藤 成 (パシフィックコンサルタンツ)	
4-11	浮上を対象とした検討(2) マンホールの浮上を対象とした検討・・・・・・・・	49
	増田 幸一 (明窓社)	
4-12	浮上を対象とした検討(3) 矩形断面・・・・・・・・・・・・	52
	渡邊 香澄 (日水コン)	
	高橋 堅 (日水コン)	
	高橋 直樹 (日水コン)	
5.	平成26年度～28年度の成果まとめ・・・・・・・・・・・・	53
	FLIPコンソーシアム 大変形解析 WG	

1 はじめに

応用地質株式会社 ○藤井 紀之

1. 作業部会の目的

1995年に発生した兵庫県南部地震を契機に、我が国の土木構造物の性能設計体系化が本格的に進んでいる。このため、特に大規模地震動を考慮した設計では、液状化による変形量を精度よく予測する解析手法が求められている。一方、近い将来発生が懸念されている大規模地震を想定した場合、液状化による変形量は非常に大きくなることが予想され、これまで実務で適用されてきた微小変形理論に基づいた解析手法では工学上無視できない誤差が生じる可能性が示唆される。

このような背景を踏まえ、大変形解析WGでは、大変形理論に基づいた多重せん断機構モデル(以下、FLIP TULIP^{1),2)})の実問題への適用を目指す。具体的には、大変形理論を考慮したFLIP TULIPを実問題へ適用するため、被災事例解析等によって適用性を検証するとともに、大変形有効応力解析が効果を発揮する局面や適用限界を明らかにする。

2. 検討方針およびH28年度の検討内容

本WGの検討期間は平成26年度～平成28年度の3年間であり、今年度は最終年度の3年目に該当する。本WGの検討方針および検討内容を以下に示す。

(1)検討方針

- ・同じモデルに対して微小変形解析と大変形解析を行い、結果に対する比較・検討を行う。大変形解析には、Total Lagrangian法(以下、TL法)とUpdated Lagrangian法(以下、UL法)の両手法を用いることを基本とする。
- ・微小変形解析と大変形解析ともに解析プログラムはFLIP TULIPを用いることを基本とする。
- ・マルチスプリングモデルとカクテルグラスモデル(非排水条件、排水条件)の両者に対して検討を行う。
- ・今年度からFLIP TULIPで非線形はり要素が扱えるようになったため、非線形はり要素に対する検討を追加する。
- ・本報告書では、空間表示による「Cauchy応力」と「Euler-Almansiひずみ」を用いてデータ整理を行う。

(2)検討内容

- ・要素試験・要素解析、はり要素に対する検討によるFLIP TULIPの適用性の検証、適用限界の把握
- ・遠心模型実験結果のシミュレーションによるFLIP TULIPの適用性の検証、適用限界の把握
- ・被災事例解析等による各種構造物に対するFLIP TULIPの適用性の検証、適用限界の把握
- ・プログラム改良

3. 検討内容およびスケジュール

本WGの検討内容およびスケジュールを表-1に示す。

表-1 検討内容およびスケジュール

検討項目		1年目						2年目						3年目					
		H26		H27				H27		H28				H28		H29			
		10月	12月	2月	4月	6月	8月	10月	12月	2月	4月	6月	8月	10月	12月	2月	4月	6月	8月
各種構造物	事例選定、条件整理																		
	解析検討																		
	結果とりまとめ																		
要素試験 要素解析 はり要素	計画立案																		
	シミュレーション条件整理																		
	シミュレーションの実施																		
	結果とりまとめ																		
遠心実験	実験計画の立案、試解析																		
	実験の実施																		
	試験結果整理・分析																		
	試験結果シミュレーション																		
	結果とりまとめ																		
プログラム改良	構造部材等の幾何学的非線形性の適用																		
	プログラム改良のとりまとめ																		

4. 検討概要

本年度の各検討の担当一覧を表-2 に示す。

表-2 各検討の担当一覧(H28 年度)

所属	要素試験	はり要素	遠心載荷実験		各種構造物（事例解析）				
			傾斜地盤	矢板構造	盛土	河川堤防	ケーソン式防波堤	重力式岸壁	浮上り
応用地質株式会社	○		○	○					
有限会社 日本解析センター						○			
東電設計株式会社					○				
株式会社 ニュージェック								○	
株式会社 日本港湾コンサルタント							○		
JFEスチール株式会社		○							
株式会社 フォレストエンジニアリング	○								
東亜建設工業株式会社								○	
パシフィックコンサルタンツ株式会社							○		○
株式会社 地層科学研究所				○					
株式会社 明窓社									○
株式会社 地震工学研究所				○					
中央復建コンサルタンツ株式会社					○				
前田建設工業株式会社	○		○						
株式会社 日水コン									○
五洋建設株式会社								○	
株式会社 ダイヤコンサルタント					○				
株式会社 オリエンタルコンサルタンツ							○		

5. メンバー構成および主な検討内容

本年度のメンバー構成を表-3 に、本年度の WG における主な議題を表-4 に示す。

表-3 大変形解析 WG のメンバー構成(H28 年度)

No.	氏 名	所属	No.	氏 名	所属	No.	氏 名	所属
1 幹事	藤井紀之	応用地質株式会社	15	関野 真登	株式会社 地層科学研究所	29	渡部 龍正	東電設計株式会社
2 顧問	上田 恭平	京都大学防災研究所	16	小堤 治	株式会社 明窓社	30	高橋 直樹	株式会社 日水コン
3	湯浅 明	有限会社 日本解析センター	17	増田 幸一	株式会社 明窓社	31	渡邊 香澄	株式会社 日水コン
4	兵頭 順一	東電設計株式会社	18	中田 剛史	三井共同建設コンサルタント株式会社	32	栗津 進吾	JFEスチール株式会社
5	佐藤 恭兵	東電設計株式会社	19	大澤 史崇	パシフィックコンサルタンツ株式会社	33	平栗 昌明	株式会社 オリエンタルコンサルタンツ
6	栗原 直範	株式会社 ニュージェック	20	仲摩 貴史	株式会社 地震工学研究所	34	久木留 貴裕	株式会社 オリエンタルコンサルタンツ
7	山本 龍	株式会社 ニュージェック	21	ボムマチャン グィラダス	応用地質株式会社	35 特別顧問	井合 進	FLIPコンソーシアム
8	柴田 大介	株式会社 日本港湾コンサルタント	22	村上 裕宣	中央復建コンサルタンツ株式会社	36 特別顧問	一井 康二	関西大学
9	宇野 勝哉	株式会社 日本港湾コンサルタント	23	三上 武子	前田建設工業株式会社	37 顧問	飛田 哲男	関西大学
10	塩崎 禎郎	JFEスチール株式会社	24	戎 健次	株式会社 ニュージェック	38 特別会員	小濱 英司	国立研究開発法人港湾空港技術研究所
11	林 健二	株式会社 フォレストエンジニアリング	25	植村 一瑛	応用地質株式会社	39 特別会員	大矢 陽介	国立研究開発法人港湾空港技術研究所
12	住谷圭一	東亜建設工業株式会社	26	高橋 聖	株式会社 日水コン	40 事務局	溜 幸生	東電設計株式会社
13	芋野 智成	パシフィックコンサルタンツ株式会社	27	井瀬 肇	五洋建設株式会社	41 事務局	中原 知洋	五洋建設株式会社
14	佐藤 成	パシフィックコンサルタンツ株式会社	28	牛島 崇	株式会社 ダイヤコンサルタント			

表-4 大変形解析 WG の開催年月日および主な議題

No.	開催年月日		主な議題
1	2016年	10月28日	実施方針、事例解析結果報告
2		12月15日	遠心載荷実験結果速報、要素レベルの検討結果報告、事例解析検討結果報告
3	2017年	2月9日	JGS投稿論文確認、要素レベルの検討結果報告、事例解析検討結果報告
4		4月20日	要素レベルの検討結果報告、はり要素の検討結果報告、事例解析検討結果報告
5		5月30日	要素レベルの検討結果報告、事例解析検討結果報告
6		7月3日	成果報告書の内容確認
7		8月25日	成果報告、3年間の成果まとめ

参考文献：1) Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013. 2) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究,京都大学博士論文,2010.

2. 要素試験・要素解析、はり要素に 対する検討

2-1 要素試験・要素解析による基本挙動の確認（静的載荷に関する検討）

有効応力解析 大変形理論

応用地質(株) ○植村一瑛
(株)フォレストエンジニアリング 林 健二
前田建設工業(株) 三上武子

1. はじめに

近い将来、発生が懸念されている東南海・南海地震などの大規模地震を想定した場合、液状化による地盤の変形は非常に大きくなることが予想される。このような問題を取り扱う場合、微小変形解析では適用限界を超える可能性があるため、大変形理論に基づく解析が有用であると考えられる。本検討では、大変形理論に基づく多重せん断機構モデル（FLIP TULIP^{1),2)}）の基本挙動を確認することを目的として、平面ひずみ軸圧縮試験を対象とした解析を実施した。特に FEM メッシュの要素間の排水条件に着目して検討を行った。なお、検討に使用したプログラムは TULIP ver.643（64bit）である。

2. 解析条件

解析モデルは幅 10cm、高さ 30cm とし、カクテルグラスモデルでモデル化した。図-1 に解析モデルおよび解析手順の概要を示し、表-1 に解析定数を示す。なお、本検討では、解析手法として微小変形解析（以下 SD 法と示す）、Total Lagrangian 法（以下 TL 法と示す）、Updated Lagrangian 法（以下 UL 法と示す）の 3 手法で解析を実施した。以下に詳細の解析手順を示す。

2.1 要素間非排水（FEM の各要素間での水のやり取りなし、以下、非排水条件と示す）のケース

初期応力解析（圧密）段階においては、完全排水条件で、圧密応力 $p_0=98\text{kN/m}^2$ で等方圧密状態を再現し、その後、FEM の各要素間の水のやり取りがない条件（非排水条件）でひずみ制御での平面ひずみ軸圧縮を再現した。なお、平面ひずみ軸圧縮過程は静的な条件（stat 命令）で実施した。

2.2 要素間排水（FEM の各要素間での水のやり取りあり、以下、排水条件と示す）のケース

初期応力解析（圧密）段階においては、圧密応力 $p'_0=98\text{kN/m}^2$ となるように全応力 $=196\text{kN/m}^2$ 、間隙水圧 $=98\text{kN/m}^2$ を載荷した。その後、FEM の各要素間の水のやり取りがある条件（排水条件）でひずみ制御での平面ひずみ軸圧縮を再現した。なお、モデルの上下端および左右端は非排水境界とした。また、平面ひずみ軸圧縮過程は時間項を考慮するため、動的な条件（dyna 命令）で実施し、ひずみ速度は $1\%/min$ (3mm/min) とした。

3. 解析結果

非排水条件および排水条件の変形図および最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ のコンター図を図-2、図-3 に示す。なお、同図は解析終了時点の図である。

非排水条件の結果（図-2）を見ると、SD 法は最大せん断ひずみの大きい領域が供試体中央部に集中していることが分

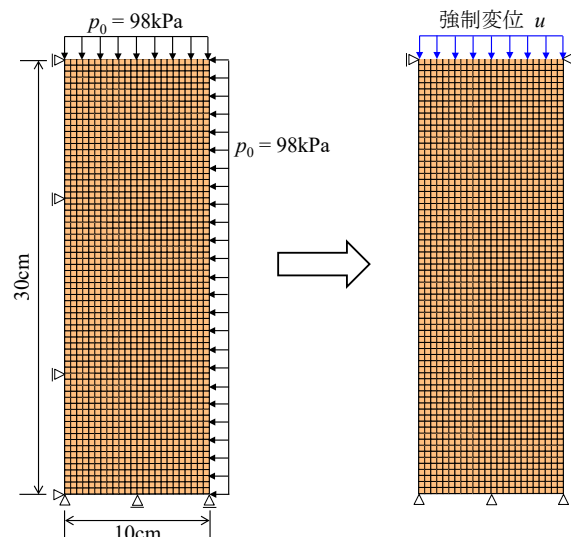


図-1 解析モデルと解析手順

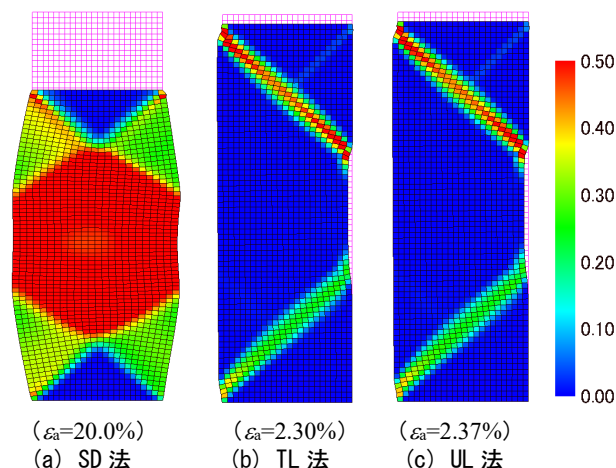


図-2 変形図と最大せん断ひずみのコンター図（非排水条件）

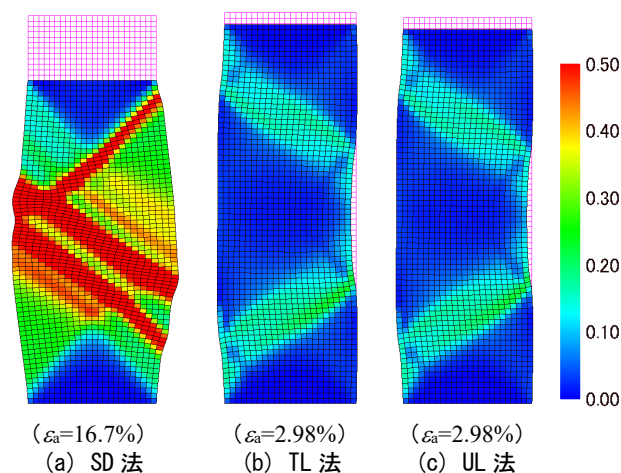
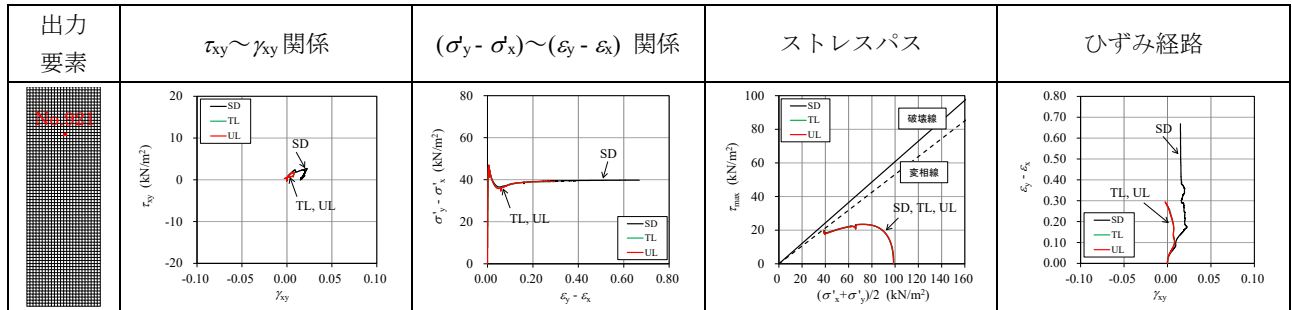


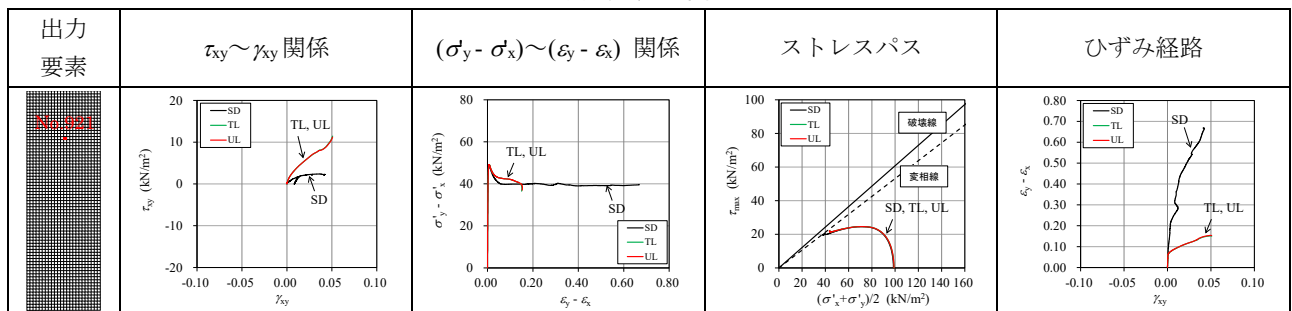
図-3 変形図と最大せん断ひずみのコンター図（排水条件）

表-1 解析定数

一般										液化パラメータ													
種密度	基準 拘束圧	初期 せん断 剛性	体積 弾性係数	拘束圧 依存係数	最大 減衰定数	内部 摩擦角	透水係数	変相角	ダイレイタンシーに関するパラメータ										液化強度曲 線の下限を規 定する パラメータ	体積圧縮特性 に関する パラメータ			
ρ_t (g/cm ³)	σ_{m1} (kN/m ²)	G_{m1} (kN/m ²)	K_{LAI1} (kN/m ²)	$m_{co} m_k$	h_{max}	ϕ_t (°)	k (m/s)	ϕ_p (°)	ε_{dkm}	$r\varepsilon_{dk}$	$r\varepsilon_d$	q_1	q_2	q_4	q_{10} (kN/m ²)	r_f	r_{mcomp}	$J865SW$	S_1	c_1	l_K	r_K	r_K''
2.07	112.5	17482	45590	0.5	0.24	31.3	1e10 ⁻⁴	28.0	0.200	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	20	0.2	1.0	0	0.005	1.00	2.000	0.500	0.100



(a) 非排水条件



(b) 排水条件

図-4 せん断帯付近の応力ひずみ関係とストレスパス、ひずみ経路

(応力は Cauchy 応力、ひずみは Euler-Almansi ひずみで定義)

かる。一方で、TL 法、UL 法は最大せん断ひずみが大きい領域が供試体に“逆くの字”状に発達しており、せん断帯を形成していることが分かる。また、これに伴い供試体の変形モードも SD 法は樽状、TL 法、UL 法は“くの字”状に折れ曲がるという違いが見られた。この傾向は、排水条件の結果（図-3）でも同様であった。

排水条件による違いに着目すると、非排水条件に比べて排水条件の方が最大せん断ひずみが集中する領域が大きくなる傾向を示した。これは、非排水条件では FEM 要素間の間隙水圧の再配分が考慮できないため、定常状態（Sus）に達する要素が少なく、せん断帯付近に集中するが、排水条件では、間隙水圧の再配分が考慮された結果、定常状態に達する要素が多くなったためであると考えられる。

図-4 に非排水条件および排水条件の応力ひずみ関係とストレスパス、ひずみ経路を示す。非排水条件の軸差応力～軸差ひずみ関係およびストレスパスは、SD 法、TL 法、UL 法でほぼ同様であるが、せん断応力～せん断ひずみ関係は $\gamma_{xy}=1\%$ 以上の範囲でやや違いが見られる。また、ひずみ経路に着目すると、概ね軸差ひずみ 10%以上となると SD 法と TL 法、UL 法の差が見られる。一方、排水条件の結果を見ると、軸差応力～軸差ひずみ関係はピークを超えた付近から SD 法、TL 法、UL 法の違いが現れ、せん断応力～せん断ひずみ関係は微小な γ_{xy} の段階から SD 法、TL 法、UL 法の違いが見られる。さらに、ひずみ経路は、非排水条件と同様に概ね軸差ひずみ 10%以上となると SD 法と TL 法、UL 法の差が見られる。

4. まとめ

本検討では、FLIP TULIP の基本挙動を確認することを目的として、平面ひずみ軸圧縮試験を対象とした解析を実施した。以下に得られた成果を示す。

- ・排水条件によらず大変形解析（TL 法、UL 法）では、明瞭なせん断面が形成される結果となった。
- ・生じるひずみに着目すると、排水条件によらず軸差ひずみが約 10%以上となると、微小変形解析（SD 法）と大変形解析（TL 法、UL 法）の差異が生じはじめる。
- ・排水条件を考慮することにより、供試体内の間隙水圧の再配分の効果を考慮することができる。

謝辞：本報告は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの研究活動の一環として実施したものである。ここに記し、関係者の方々に謝意を表します。

参考文献：1) Iai, S. Ueda, K., Tobita, T. and Ozutsumi, O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics, Vol.37(9), pp.1189-1212, 2013. 2) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究, 京都大学博士論文, 2010 年 3 月。

2-2 要素試験・要素解析による基本挙動の確認（動的載荷の検討）

有効応力解析 大変形解析

(株)フォレストエンジニアリング

○ 林 健二

応用地質(株)

植村 一瑛

前田建設工業(株)

三上 武子

1. はじめに

大規模地震では液状化による地盤の変形は非常に大きくなることが予想され、このような問題を取り扱う場合、微小変形理論ではなく大変形理論に基づく解析が有用であると考えられる。本検討では、大変形理論に基づく多重せん断機構モデル（FLIP TULIP¹⁾）の基本挙動の確認を目的として、非排水平面ひずみ圧縮試験（動的載荷）を対象とした解析を実施し、応力、ひずみや過剰間隙水圧比の発生状況について考察した。

2. 解析条件

解析モデル・解析手順と解析定数を図-1 および表-1 に示す。解析ではモデル（幅 10cm、高さ 30cm）に対して、最初に排水条件で等方圧密を行い、その後、非排水条件（FEM の各要素間の水のやり取りがない条件）で動的載荷による平面ひずみ圧縮を実施した。動的載荷は応力制御およびひずみ制御の 2 通りの方法により周期 1 秒で載荷した。また、載荷応力の影響を検討するため、応力制御では繰返しせん断応力比を変化させ、ひずみ制御では繰返し軸ひずみを変化させた。なお、本検討では、プログラム FLIP TULIP Ver6.4.3 を用いて微小変形理論（SD 法）、Total Lagrangian 法（TL 法）、Updated Lagrangian 法（UL 法）の 3 手法で解析した。また、大変形理論の応力・ひずみ系の表示は Cauchy 応力、Euler-Almansi ひずみとした。

3. 解析結果

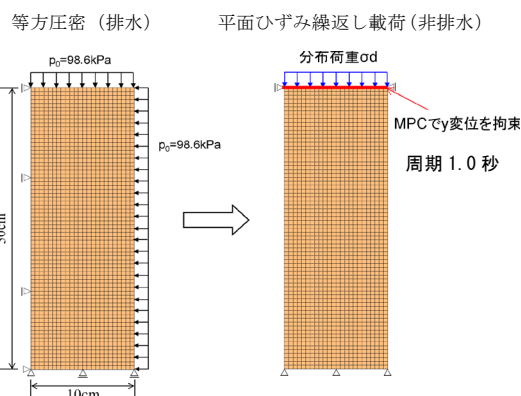
図-2 に着目要素（図-4(a)参照）における応力制御（応力比 $R=0.10, 0.15$ ）とひずみ制御（繰返し軸ひずみ 0.067%, 0.20%）の各ケースの応力経路図を示す。応力制御の解析結果では、SD 法は液状化する段階まで解析できたが、TL 法では液状化する直前の段階で計算が発散した。また、ひずみ制御の解析結果では、SD 法は計算が発散することはないが、繰返しせん断応力が徐々に減少し、液状化する段階には至らなかった。TL 法では少ない繰返し回数で計算が発散し、液状化する段階には至らなかった。なお、応力制御およびひずみ制御ともに、TL 法と UL 法はほぼ同じ結果となった。図-3 に着目要素における応力制御の各ケースの応力ひずみ関係を示す。SD 法に比べて TL 法では軸差ひずみ $\varepsilon_y - \varepsilon_x$ が小さい段階（8%程度）で計算が発散した。図-4 に応力制御のケース（応力比 $R=0.10$ ）における着目要素の最大せん断ひずみ分布図と過剰間隙水圧比分布図を示す。最大せん断ひずみ分布図では、すべての解析法でせん断帯の形成が確認できた。また、せん断帯は SD 法では左右対称の分布形状となったが、TL 法と UL 法では左右非対称の分布形状となった。過剰間隙水圧比分布図では、すべての解析法でせん断帯の形成される位置の過剰間隙水圧比が大きくなった。過剰間隙水圧比の最大値は 0.9 程度となった。

4. まとめ

本検討では、FLIP TULIP の基本挙動の確認を目的として、非排水平面ひずみ圧縮試験（動的載荷）を対象とした解析を実施した。解析より得られた結果をまとめると以下の通りである。

- ・ 応力制御による動的載荷では、SD 法では液状化する段階まで解析できたが、TL 法や UL 法では液状化する直前で計算が発散した。また、すべての解析法でせん断帯の形成が確認でき、その形成位置で過剰間隙水圧比が大きくなった
- ・ ひずみ制御による動的載荷では、すべての解析法でせん断応力が一定の繰返し載荷とならず、徐々にせん断応力の値が小さくなり、液状化する段階には至らなかった。

参考文献 1) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究，京都大学博士論文，2010 年 3 月。



<動的載荷（応力制御）の解析手順：上図>

- 1) 排水条件で等方圧密
- 2) 供試体上端に等分布荷重を繰返し作用

<動的載荷（ひずみ制御）の解析手順>

- 1) 排水条件で等方圧密
- 2) 供試体上端に強制変位（鉛直）を繰返し作用

図-1 解析モデルと解析手順

Numerical analysis on undrained plane-strain biaxial test by finite deformation theory using the program of FLIP TULIP

Kenji HAYASHI (Forest Engineering, Inc.)
Kazuaki UEMURA (OYO Corporation)
Takeko MIKAMI (MAEDA Corporation)

表-1 解析定数

一般							液状化パラメータ															
湿潤密度	基準拘束圧	初期せん断剛性	体積弾性係数	拘束圧依存係数	最大減衰定数	内部摩擦角	変相角	ダイレイタンシーに関するパラメータ										液状化強度曲線の下限を規定するパラメータ	体積圧縮特性に関するパラメータ			
ρ_t (g/cm^3)	σ_{ms}' (kN/m^2)	G_{ms} (kN/m^2)	$K_{L/U}$ (kN/m^2)	mG, mK	h_{max}	ϕ_r ($^\circ$)	ϕ_o ($^\circ$)	ε_{dom}	$\gamma \varepsilon_{do}$	$\gamma \varepsilon_d$	$q1$	$q2$	$q4$	q_{us} (kN/m^2)	γ_r	γ_{mtemp}	IB65SW	S_1	c_1	k_c	γ_K	$\gamma_{K''}$
2.07	112.5	17,482	45,590	0.5	0.24	31.3	28.0	0.20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	0.2	1.0	0	0.005	1.00	2.00	0.50	0.10

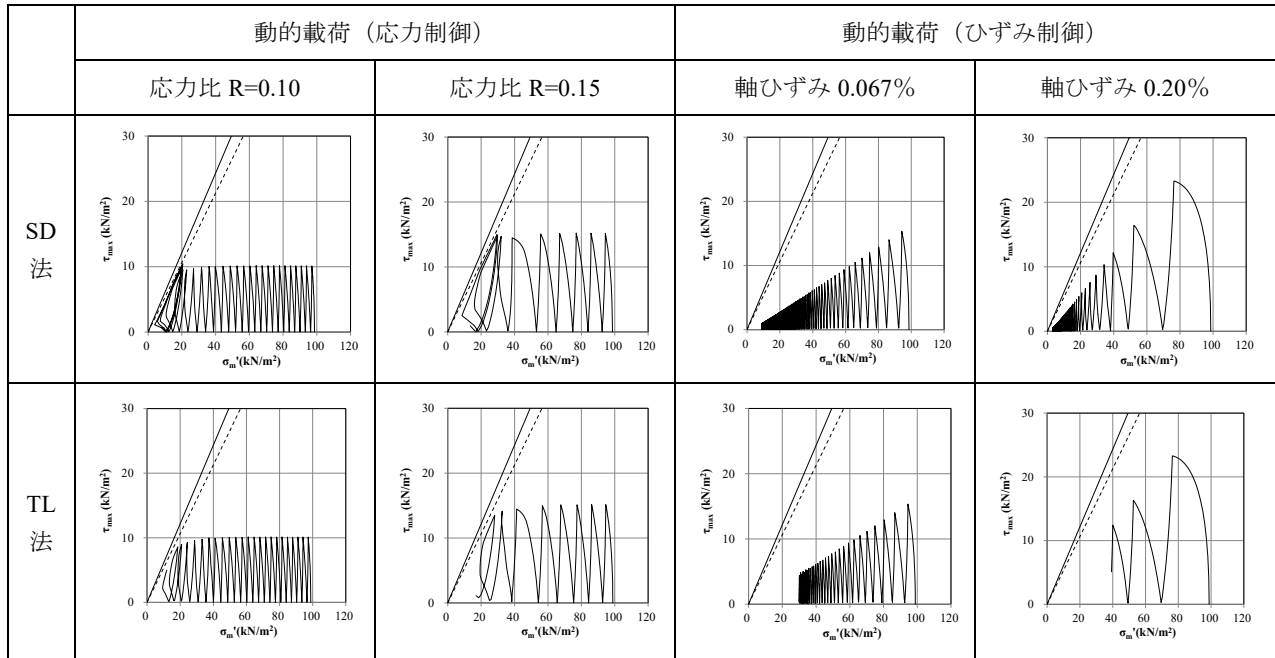


図-2 応力経路図（応力制御・ひずみ制御による動的載荷）

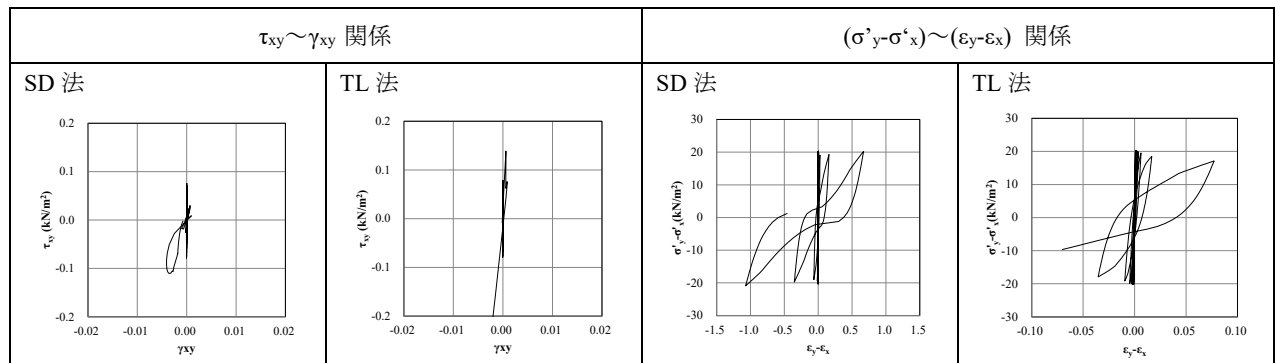
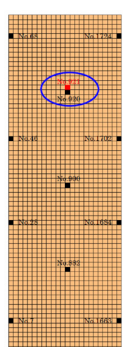
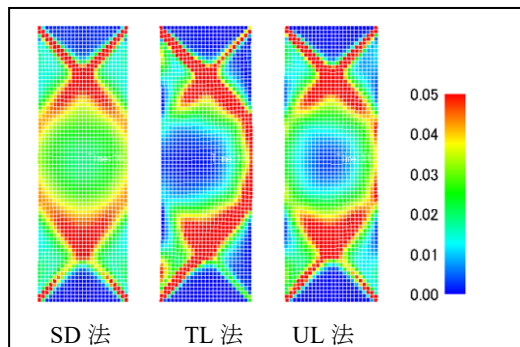


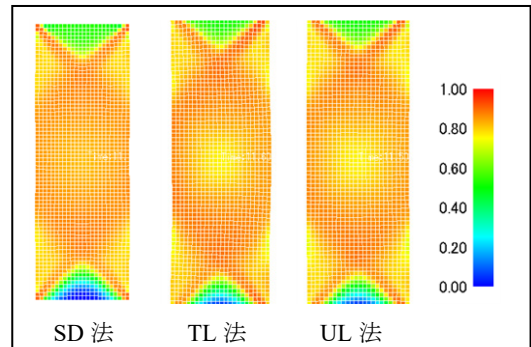
図-3 応力ひずみ関係（応力制御：応力比 R=0.10）



(a) 着目要素



(b) 最大せん断ひずみ



(c) 過剰間隙水圧比

図-4 最大せん断ひずみと過剰間隙水圧比のコンター図（応力制御：応力比 R=0.10）

2-3 非線形はり要素を対象とした検討

非線形はり要素 大変形

JFE スチール（株） 塩崎禎郎
港湾空港技術研究所 大矢陽介

1. はじめに

FLIP TULIP¹⁾を用いた大変形解析における「非線形はり要素」の挙動確認のため静的載荷解析を行った。

2. 検討モデル

本検討で用いたモデルを図-1 に示す。直杭式栈橋の上部工下端から海底面下の仮想固定点までの鋼管杭を想定している。FLIP の検討で用いるはり要素と、比較検討用として実施シェル要素を用いた 3 次元 FEM モデルを示す²⁾³⁾。検討対象とした鋼管杭は、長さ 20m、直径 1500mm、板厚 15mm の SKK400（降伏応力 235N/mm²）である。はり要素の解析では、第一段階で軸力比 0.15~0.75 相当の鉛直荷重を導入し、第二段階で杭頭部に回転を拘束した状態で強制水平変位を 0.2m まで与えた。水平載荷は 1000 ステップに分割して行った。解析ケースと解析条件を表-1 に示す。大変形に関するオプションスイッチは整備済みの ISWUT=3（大変形（大変位・大回転）解析 TL 法（Zienkiewicz 版））を用いた。

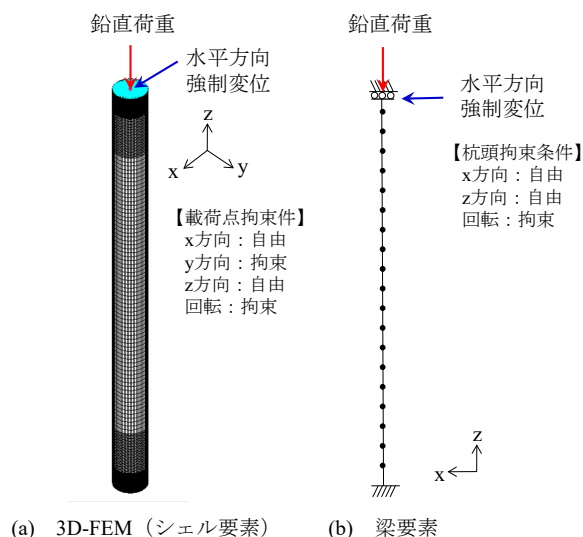


図-1 検討モデル

表-1 解析条件

	Case-1	Case-2	3次元FEM
プログラム	FLIP-TULIP Ver.641 ¹⁾⁴⁾	FLIP Ver.730 ⁵⁾	ADINA Ver.8.9 ⁶⁾
幾何学的非線形性	大変形	微小変形	大変形
鋼材の応力～ひずみ関係	降伏応力を折れ点とするバイリニア・二次勾配ゼロ。		

3. 解析結果

水平方向の強制変位を与えた際の杭頭部の水平方向反力（荷重）と杭頭水平変位の関係を図-2 に示す。いずれの軸力比でも Case-1 の初期勾配は 3 次元 FEM 解析と良好に一致している。すなわち、杭頭部の水平変位によって、鉛直荷重の作用する位置が変わることによる P-Δ 効果が、はり要素の計算で再現されていたことになる。一方、微小変形解析の Case-2 は、両者に比べ初期勾配が大きくなった。また、3 次元 FEM 解析の杭頭水平荷重の最

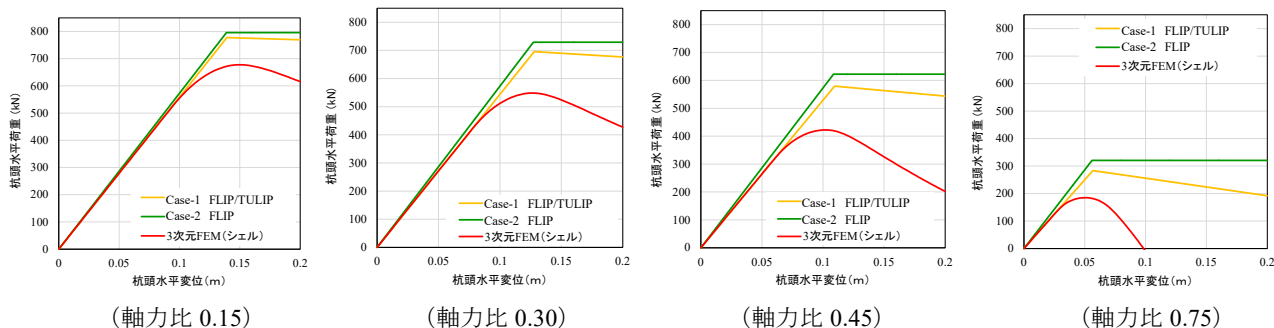


図-2 解析結果（荷重～変位関係）

大値は、はり要素の解析では再現できなかった。これは、3次元FEM解析では、固定端付近で局部座屈が発生し、耐力低下が生じたためである。

4. まとめ

FLIP TULIPの「非線形はり要素」は、幾何学的非線形性(大変形)を考慮した解析が行えることを確認した。ただし、鋼管杭の局部座屈による耐力低下に関しては、別途、非線形化する点の設定を見直す必要がある。

謝辞: 本検討はFLIP コンソーシアム WGの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献: 1)Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials International, Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013. 2)大矢陽介, 塩崎禎郎, 小濱英司, 川端雄一郎: 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, 第56巻第2号, 2017.6. 3)塩崎禎郎, 大矢陽介, 小濱英司, 川端雄一郎: 局部座屈を考慮した鋼管杭のM- ϕ 関係について, 第42回海洋開発シンポジウム講演集, 2017.6. 4)上田恭平: 砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究, 京都大学博士論文, 2010年3月. 5) Iai,S., Matsunaga.Y. and Kameoka,T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 6) ADINA R&D, Inc. : ADINA Theory and Modelling Guide, 2012.

【参考検討資料】

上記検討では、3次元FEM解析の最大荷重をあわせることができなかったため、微小変形解析ではあるが、文献2)3)で提案しているM-N曲面を用いた検討をCase-3として実施した。図-a1にM-N曲面を示す。(a)が従来法の設定(Case-2で利用)、(b)が文献2)3)の方法である。(b)は、鋼管杭の径厚比、細長比に応じてM-N曲面を原点側に移動させている。

図-a2に解析結果を示す。Case-3の線上に示す○印は、端部のはり要素が文献2)3)で設定した限界曲率に到達した時点を示している。微小変形解析であるため、3次元FEM解析と比べて、初期勾配は大きくなってしまいが、水平荷重の最大値を良くとらえている。

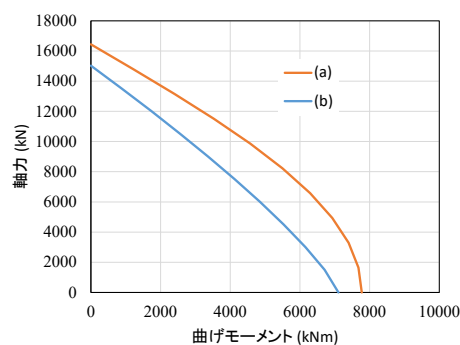


図-a1 M-N 曲面

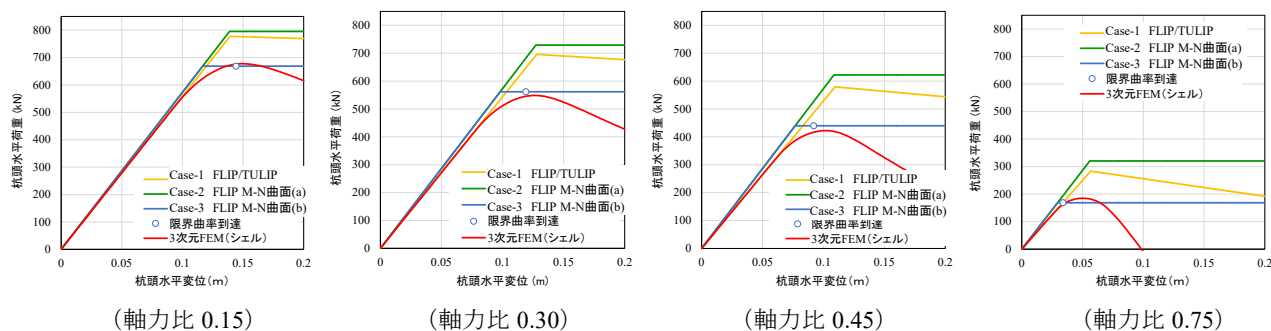


図-a2 解析結果 (荷重~変位関係)

3. 遠心載荷実験を対象とした検討

3-1 傾斜地盤に対する遠心载荷実験結果を対象とした検討

キーワード 遠心载荷実験 大変形理論 ひずみ空間多重せん断モデル

応用地質株式会社 ○藤井 紀之

植村 一瑛

前田建設工業株式会社 三上 武子

1. はじめに

本検討では、極限に近い状態まで地盤を液状化させた場合の挙動を遠心载荷実験で把握し、その結果と FLIP TULIP^{1),2)} による検討結果(微小変形解析, 大変形解析)を比較することで、大変形解析の適用性および適用限界について検討した。

2. 遠心载荷実験結果

(1)実験概要

以下に示す模型地盤および入力波形を用いて 50G 場での遠心载荷実験を行った。なお、詳細は文献³⁾のとおりである。

①地盤作成方法：空中落下法, ②砂材料：珪砂 7 号 ($\rho_s=2.641\text{t/m}^3, e_{\max}=1.219, e_{\min}=0.675$), ③模型地盤の相対密度： $Dr=50 \sim 56.4\%$, ④入力波形：正弦波(50Hz, 10 波)の 6 段階ステップ(図-4 参照)

(2)実験結果

高速度カメラで撮影した変形挙動を図-1 に示す。左図に昨年度実施した結果を、右図に今年度実施した結果を示す。実験で、両者で斜面部における流動の仕方が異なる傾向を示したが、液状化により流動現象が進み加振終了時には、目的のとおり液状化による流動現象の極限に近い状態を把握することができた。なお、法肩は約 2.1~2.2m, 法尻は約 4.0~4.2m 水平移動する結果となった。

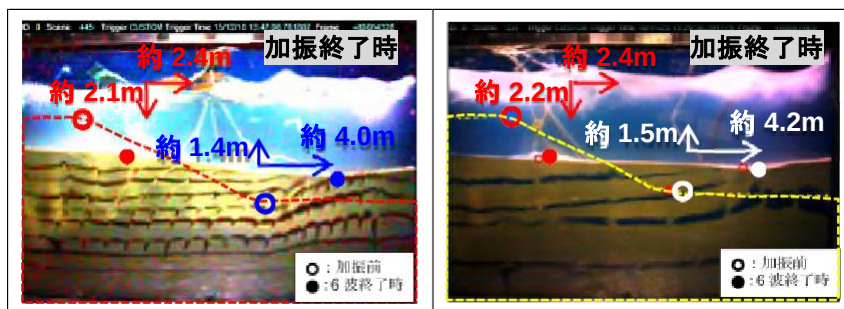


図-1 遠心载荷実験結果(左図：昨年度実施 右図：今年度実施)

3. FLIP TULIP を用いた再現解析の実施

(1)解析条件

FLIP TULIP を用いて再現解析を実施した。解析に用いた解析メッシュ図を図-2 に示す。解析条件を以下に示す。

- ①解析プログラム：TULIP643
- ②解析手法：微小変形解析, Total Lagrangian(TL) 法および Updated Lagrangian(UL)法の 3 手法
- ③解析モデル：マルチスプリングモデル
- ④解析パラメータ：7 号珪砂 $Dr=56.4\%$ 相当のパラメータを設定した(図-3,表-1 参照)。
- ⑤境界条件：底面は X,Y 固定, 側方は X 固定とした。
- ⑥入力波形：10Hz 以上をカットした波形を用いた(図-4 の調整波形)。なお、 $\Delta t=0.001\text{sec}$ とした。
- ⑦レーレー減衰： $\beta=0.001$ とした。

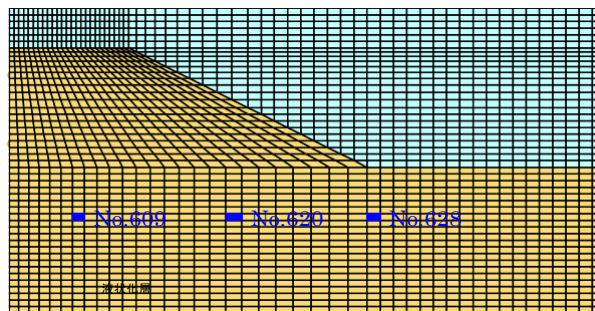


図-2 解析メッシュ図(スケールは 1G 場換算時)

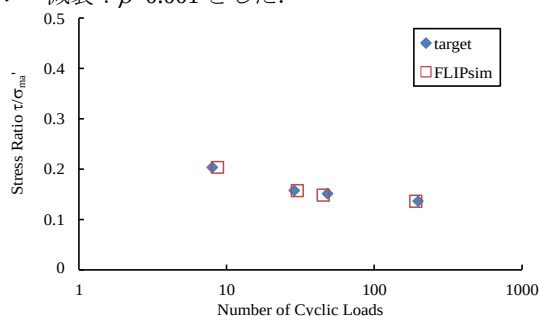


図-3 要素シミュレーション結果

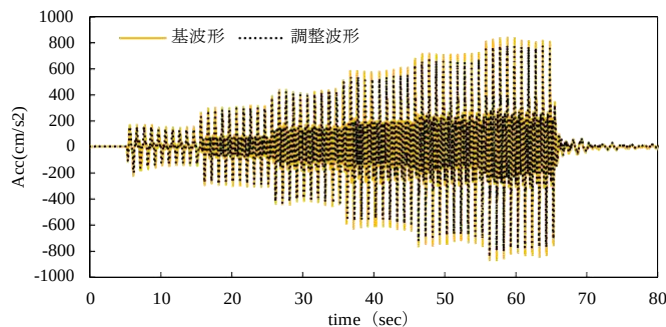


図-4 解析に用いた加速度時刻歴波形

表-1 解析に用いた解析パラメータ

relative density	soil particle density	standard initial mean effective stress	maximum void ratio	minimum void ratio	void ratio	porosity	saturated density	initial shear modulus ($\sigma'_{vm}=\sigma'_{vm}$)	initial bulk modulus of soil skeleton ($\sigma'_{vm}=\sigma'_{vm}$)	bulk modulus of pore water	shear resistance angle	phase transformation angle	Liquefaction parameter				
D_r (%)	s (g/cm^3)	σ'_{vm} (kN/m^2)	$e_{\max}$	$e_{\min}$	e	n	ρ_{sat} (g/cm^3)	G_{ms} (kN/m^2)	K_{ms} (kN/m^2)	K_t (kN/m^2)	σ'_t ($^\circ$)	σ'_p ($^\circ$)	s1	w1	p1	p2	c1
56.4	2.641	98	1.219	0.675	0.912	0.48	1.86	68110	177620	2200000	36.75	28.00	0.005	3.000	0.500	1.017	1.730

Study on applicability of the Strain Space Multiple Mechanism Model based on Large Deformation theory

N.Fujii, K.Uemura(OYO CORPORATIN), and T.Mikami(Maeda Corporation)

(2)解析結果

微小変形解析(以下, SD)による残留変形図(コンターは過剰間隙水圧比)を図-5 に, 大変形解析(UL)による残留変形図を図-6 に示す. なお, 大変形解析(TL)は, 21 秒付近で発散した. 解析結果より, 以下のことが分かった.

- ・ 残留変形図を比較すると, SD では天端から傾斜部にかけて大きく沈下し, 地盤にめり込むような非現実的な変形を呈した. 一方, UL では傾斜地盤部が地盤にめり込むような変形は見られず現実的な変形を示した.
- ・ ただし, 図-3 に示す遠心载荷実験結果の残留変形と図-6 に示す UL による残留変形図を比較すると, 実験結果と概ね整合する結果となった.
- ・ 以上より, 本検討のように初期状態から地盤の形状が大きく変化するモデルでは, 幾何学的非線形性を考慮した大変形解析を適用することは有効であることが分かった.

なお, 大変形解析の適用性および適用限界を定量的に把握すること目的として, 図-7 に示すとおり, 要素 620(図-2 参照)における「各種ひずみ経時変化図」および「ひずみ～変位関係」(要素 620 のひずみと法肩位置の変位)を整理した. 同図より, 以下の傾向が見て取れる.

- ・ 各種ひずみ経時変化図のとおり, 20 秒程度から SD と UL に差異が生じる結果となった. なお, UL では, せん断ひずみ(γ_{xy})および軸差ひずみ($\epsilon_y - \epsilon_x$)は 40%程度, 最大せん断ひずみ(γ_{max})は 60%程度に収束する傾向を示した.
- ・ 軸差ひずみと鉛直変位の関係に着目すると, 軸差ひずみが 10%程度を超えると, 同じ軸差ひずみでも SD の鉛直変位が 1m 程度大きくなる結果となった. 同様に, 最大せん断ひずみと合成変位(水平変位と鉛直変位の二乗和の平方根)の関係に着目した場合, 最大せん断ひずみが 20%程度を超えると SD の鉛直変位が 1m 程度大きくなる結果となった. 一方, せん断ひずみと水平変位の関係については, SD と UL で同様の傾向であった.

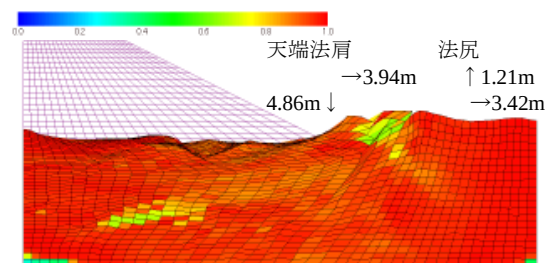


図-5 残留変形図(SD,コンターは過剰間隙水圧比)

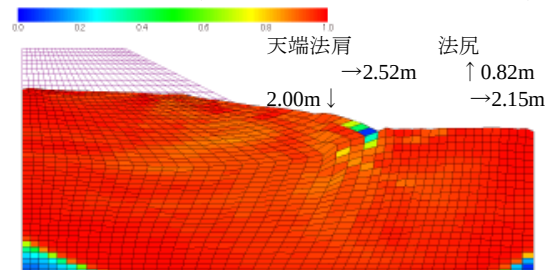


図-6 残留変形図(UL,コンターは過剰間隙水圧比)

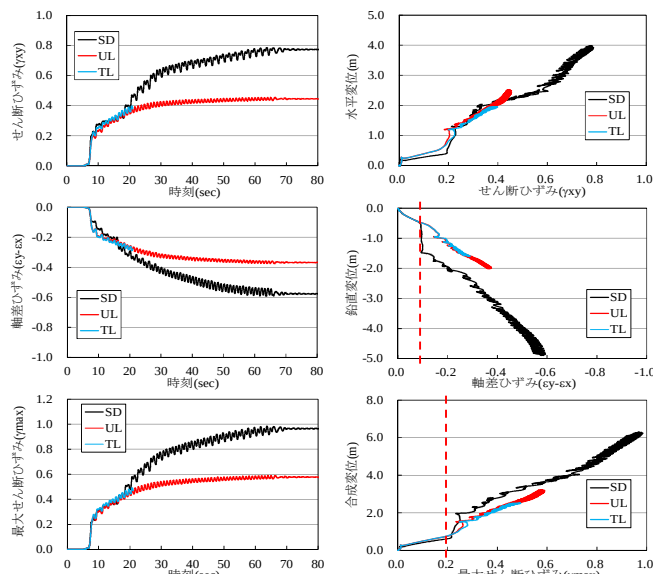


図-7 各種ひずみ経時変化図 要素 620 のひずみと法肩変位関係

4. 結論

FLIP TULIP(マルチスプリングモデル)の適用性および適用限界について, 本検討で得た結論を以下に示す.

- ・ 軸差ひずみが 10%程度もしくは最大せん断ひずみが 20%を超えるような場合は, 微小変形解析では誤った解まで表現する可能性があることから, 大変形解析の適用も視野に入れ, 解析手法の選定に留意する必要があると考える.
- ・ 地盤の軸差ひずみが 40%もしくは最大せん断ひずみが 60%程度までの挙動に対しては, 大変形解析の適用は高いと考える. ただし, それ以上のひずみレベルの挙動を対象とする場合には, FLIP TULIP(マルチスプリング)の適用について留意する必要があると考える.

5. 今後の課題

本検討では, マルチスプリングモデル(非排水条件)を用いて解析を実施し, 遠心载荷実験結果との比較検討を行った. その結果, 微小変形解析と大変形解析の変形モードを比較すると, 大変形解析は現実的な残留変形を示したものの, 適用限界がある可能性も示唆された. 今後は, カクテルグラスモデルを用いた透水を考慮した解析を行い, 引き続き FLIP TULIP の適用性および適用限界について検討したい.

謝辞: 本報告は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの研究活動の一環として実施したものである.

参考文献: 1) Iai, S., Ueda, K., Tobita, T. and Ozutsumi, O.: Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013. 2) 上田恭平: 砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究, 京都大学博士論文, 2010. 3) 藤井紀之ほか: 大変形理論に基づくひずみ空間多重せん断モデルの解析精度向上のための遠心载荷実験, 第 51 回地盤工学研究発表会, 1011-1012, 2016.

3-2 矢板式構造に対する遠心载荷実験結果を対象とした検討

キーワード 遠心载荷実験 大变形理論 矢板式構造

応用地質株式会社 ○藤井 紀之
株式会社地層科学研究所 関野 真登
株式会社地震工学研究所 仲摩 貴史

1. はじめに

微小変形理論に基づく解析プログラム FLIP ROSE では、矢板と背後地盤は X 方向自由度を MPC 拘束する設定が推奨されている¹⁾。ただし、矢板が大きく傾斜するような大変形挙動を対象とした場合、これまで誤差として扱っていた挙動が無視できなくなる可能性がある。また、大変形解析では矢板の傾斜に伴い Y 座標も変化することから、X 方向自由度を MPC 拘束するといった拘束条件が適切に実現象を表現しきれない可能性がある。このため、本検討では、矢板式構造を対象とした遠心载荷実験を実施し、その結果と FLIP TULIP^{2),3)}による検討結果(微小変形解析, 大変形解析)を比較することで、矢板式構造を対象とした FLIP TULIP の適用性、矢板と背後地盤の拘束条件のモデル化の検討を行った。

2. 遠心载荷実験結果

(1) 実験概要

図-1 に示す模型地盤及び図-2 に示すテーパー処理した正弦波(3 ステップ)を入力波形として 50G 場での遠心载荷実験を行った。なお、加速度センサー、間隙水圧センサー及びひずみゲージを図-1 のように配置した。実験概要は以下のとおりである。

- ①地盤作成方法：空中落下法，②砂材料：珪砂 7 号，③模型地盤の相対密度：Dr=50%，④矢板材質：アルミ板(肉厚 2mm)

(2) 実験結果

加振終了時の状態を図-3 に示す。同図に示すとおり、矢板頭部が 2.3m 程度前面へ傾斜する結果となった。

3. FLIP TULIP を用いた再現解析の実施

(1) 解析条件

FLIP TULIP を実施した際の解析条件を以下に示す。

- ①解析プログラム：TULIP643
- ②解析手法：微小変形解析, TL 法, UL 法の 3 手法
- ③解析モデル：マルチスプリングモデル
- ④解析パラメータ：Dr50.0%：3-1 の表-1 を用いた。Dr90%：簡易設定法(再訂版)より設定した(ただし非液化化層とした)。
- ⑤入力波形：土槽下端位置で計測された加速度波形の 10Hz 以上をカットした波形を用いた。なお、 $\Delta t=0.001\text{sec}$ とした。
- ⑥境界条件：底面は X,Y 固定，側方は X 固定とした。
- ⑦矢板と背後地盤の拘束条件：ジョイント要素($K_s=0$)，X 方向 MPC の 2 ケースとした。
- ⑧レーレー減衰： $\beta=0.0005$ とした。

4. 初期自重解析結果

初期自重解析結果の一例として、矢板と背後地盤をジョイント要素で拘束したケースの変形図と σ_x 、 σ_y のコンターを図-4 に示す。また、矢板発生曲げモーメントを図-5 に示す。

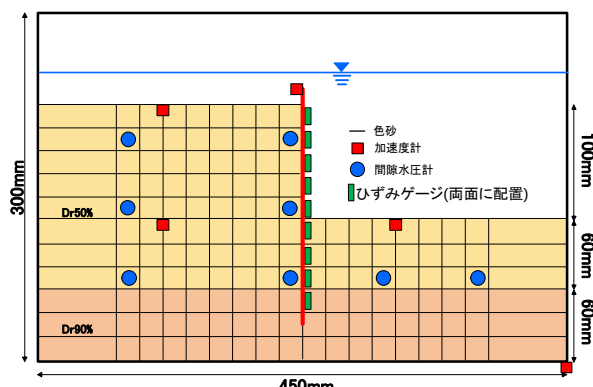


図-1 実験模型断面図

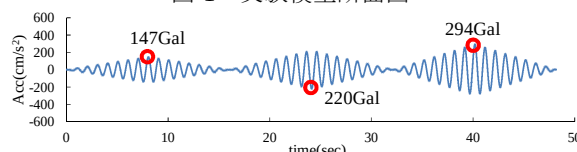


図-2 実験に用いた入力波形

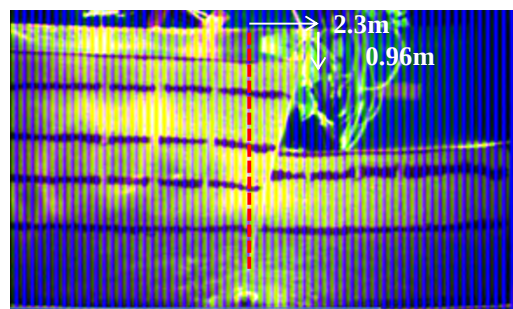


図-3 遠心载荷実験結果

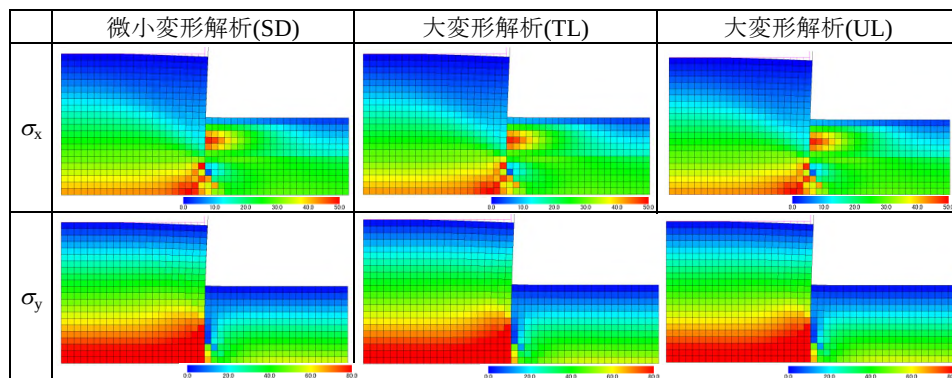


図-4 変形図と σ_x 、 σ_y 分布

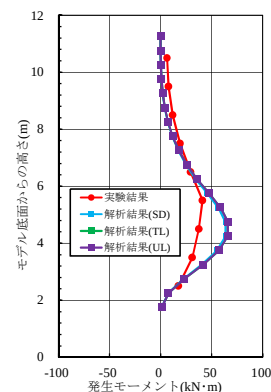


図-5 発生曲げモーメント図

Study on applicability of the Strain Space Multiple Mechanism Model based on Large Deformation theory(focusing on the sheet pile structure)
N.Fujii(OYO CORPORATIN), M.Sekino(GEOSCIENCE RESEARCH LABORATORY), and T.Nakama(Jishin Kogaku Kenkyusyo,Inc.)

初期自重解析の結果、微小変形解析と大変形解析の差異は確認できなかった。図-4の σ_x に着目すると、矢板が前面にはらみ出すことで、矢板前面の受働側および根入れ部の背後地盤側で局所的に応力が大きくなる結果となった。 σ_y については前面地盤側と背後地盤側の地盤高の差異に応じた応力状態となっていることを確認した。図-5の発生曲げモーメント図に着目すると、深度分布の傾向は実験結果と整合した解析結果となっているが、最大値でみると、実験結果と比較して解析結果のほうが4割程度過大となった。実験時の初期状態(50G場)では、矢板が傾斜するような変位は生じていなかったことを勘案すると、初期自重解析でこの現象が再現しきれていないことが要因と考える。

5. 動的解析結果

動的解析結果として、各ケースの変形図と過剰間隙水圧比のコンターを図-6に示す。また、加振終了時の矢板発生曲げモーメント図を図-7に示す。動的解析結果から得られた知見を以下に示す。

①矢板背面と地盤をX方向MPC拘束したケース

- ・微小変形解析、大変形解析(TL,UL)ともに背後地盤が矢板を乗り越えるような挙動となった。
- ・大変形解析では矢板が前面に傾斜することで矢板頭部のY座標が変化する現実的な挙動となり、幾何学的非線形性の効果が確認できた。
- ・TLとULでは同等の結果が得られた。
- ・微小変形解析結果では非現実的な挙動を示した。一方、大変形解析(TL,UL)では実験結果と同等の傾向を示したものの、解析途中で発散する結果となった。なお、大変形解析の発生曲げモーメントは、途中段階ではあるが実験結果とは概ね整合する値を示した。

②矢板背面と地盤をジョイント要素で拘束したケース

- ・微小変形解析、大変形解析(TL,UL)ともに背後地盤が矢板を乗り越えるような挙動は見られなかった。
- ・大変形解析では矢板が前面に傾斜することで矢板頭部のY座標が変化する現実的な挙動となり、幾何学的非線形性の効果が確認できた(微小変形解析は地震動入力後の早い段階で発散)。
- ・TLとULでは同等の結果が得られた。
- ・大変形解析(TL,UL)では実験結果と同等の結果が得られた。また、矢板発生曲げモーメントも実験結果と整合する結果となった。

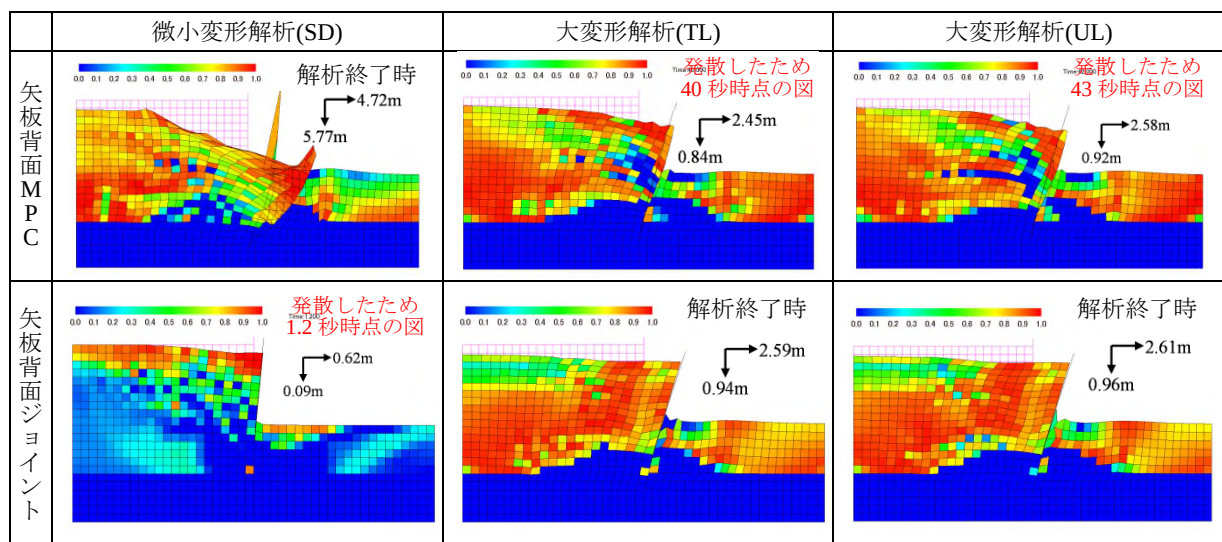


図-6 残留変形図(コンターは過剰間隙水圧比) ※矢板頭部の残留変位量を併記

6. 結論

矢板と背後地盤の拘束条件をジョイント要素($K_s=0$)とすることで、FLIP TULIPによって概ね妥当な結果を得た。本実験ケースがDr50%という厳しい条件下で行ったものの、大変形解析では安定した解を得ることができた。このため、矢板式構造に対する大変形解析の適用性は高いと考える。謝辞：本報告は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの研究活動の一環として実施したものである。

参考文献：1) Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013. 2) Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013. 3) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究, 京都大学博士論文, 2010.

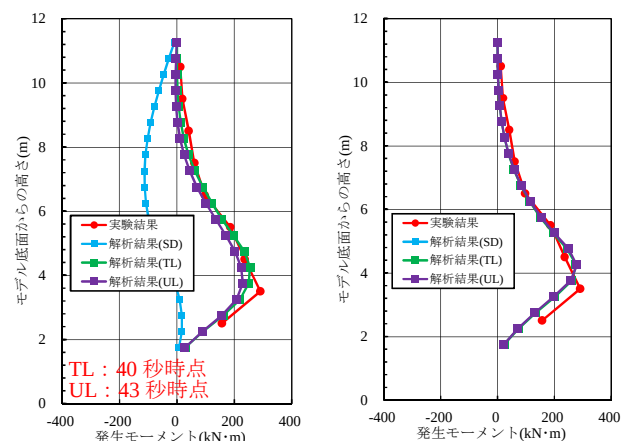
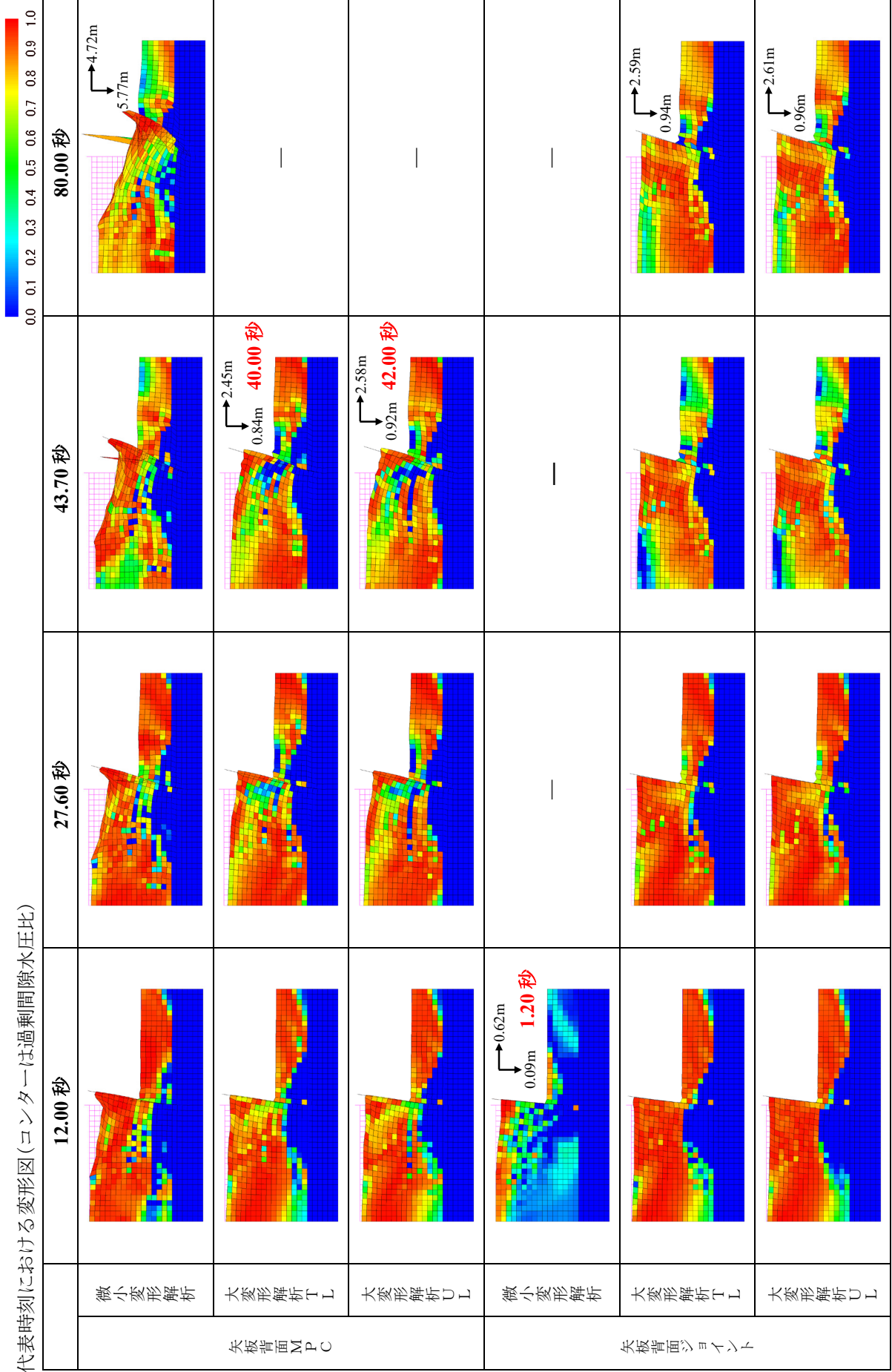
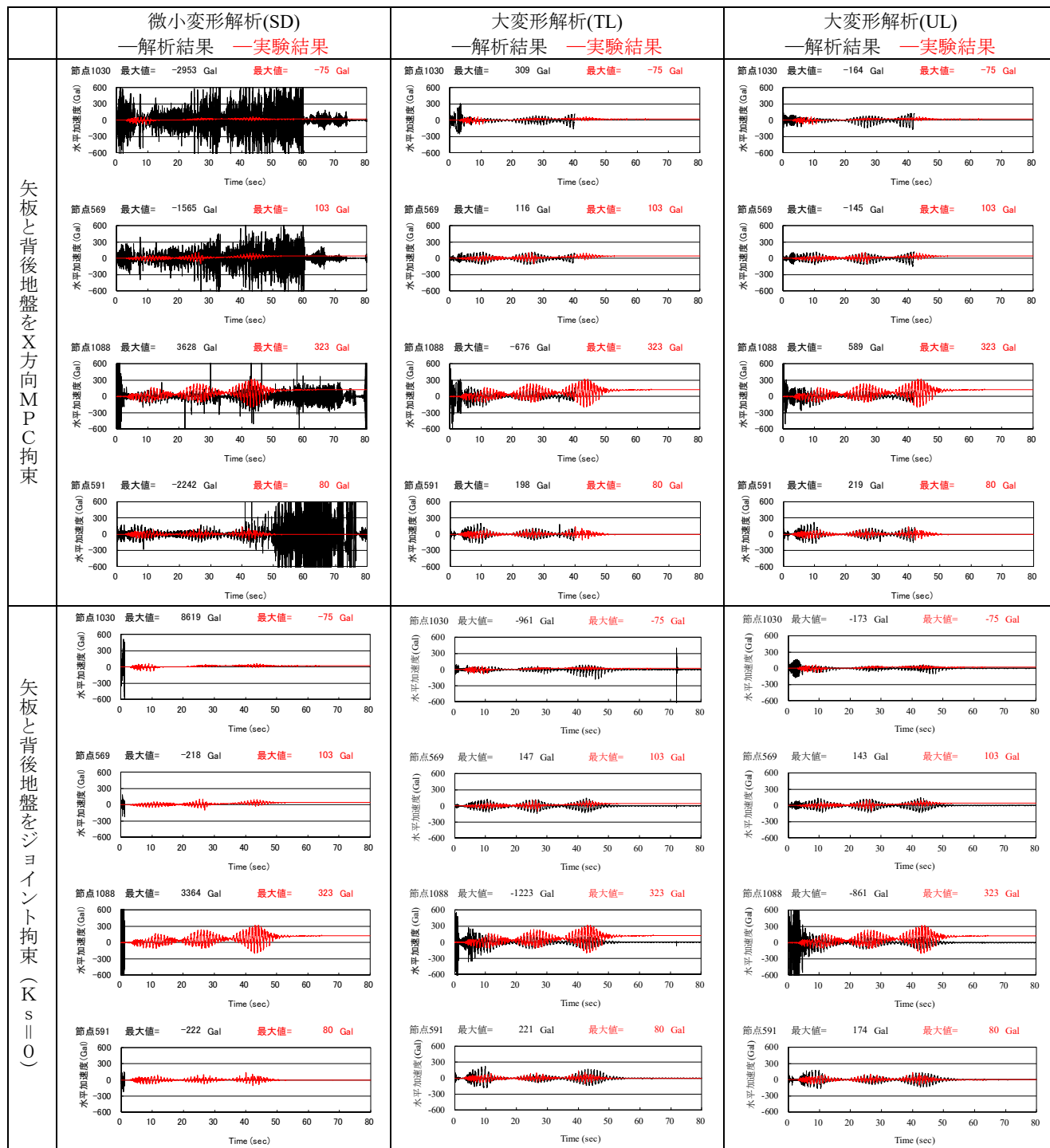
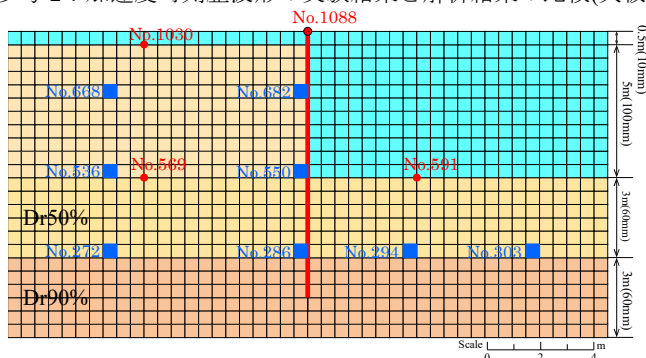


図-7 残留曲げモーメント図(左：MPC 右：ジョイント)

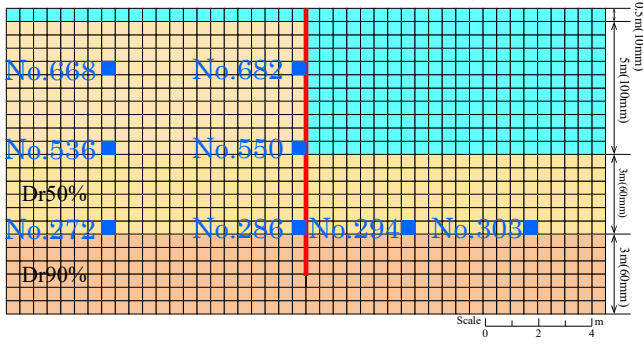
＜参考資料＞
参考-1：代表時刻における変形図(コンターは過剰間隙水圧比)



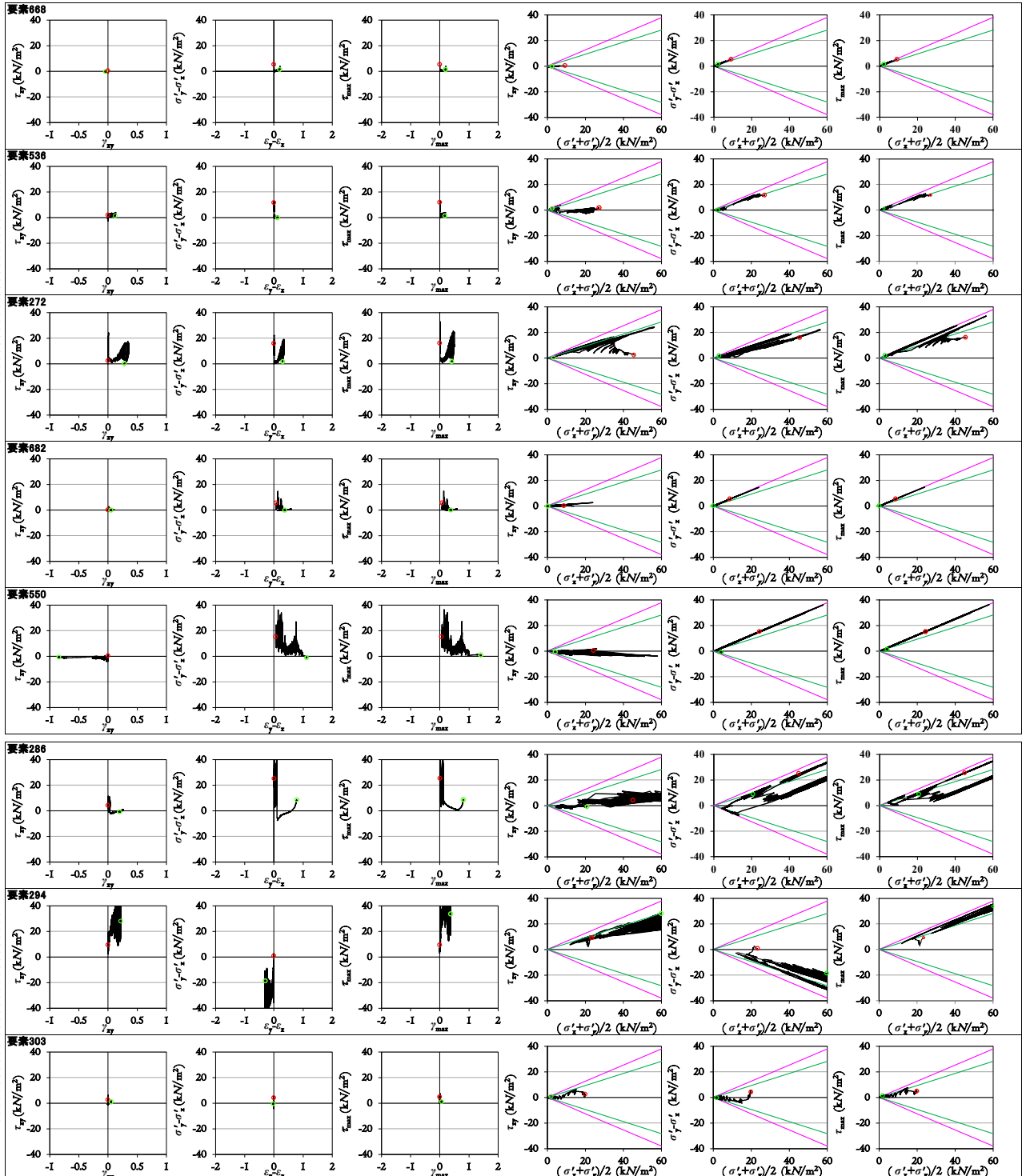
参考-2：加速度時刻歴波形の実験結果と解析結果の比較(矢板と背後地盤はジョイント拘束)



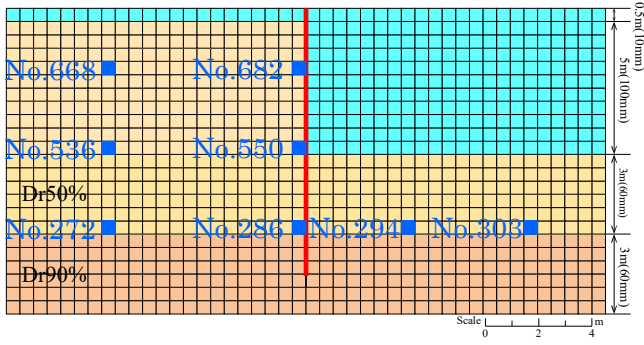
参考-3-1：応力ひずみ関係および応力パス(1)



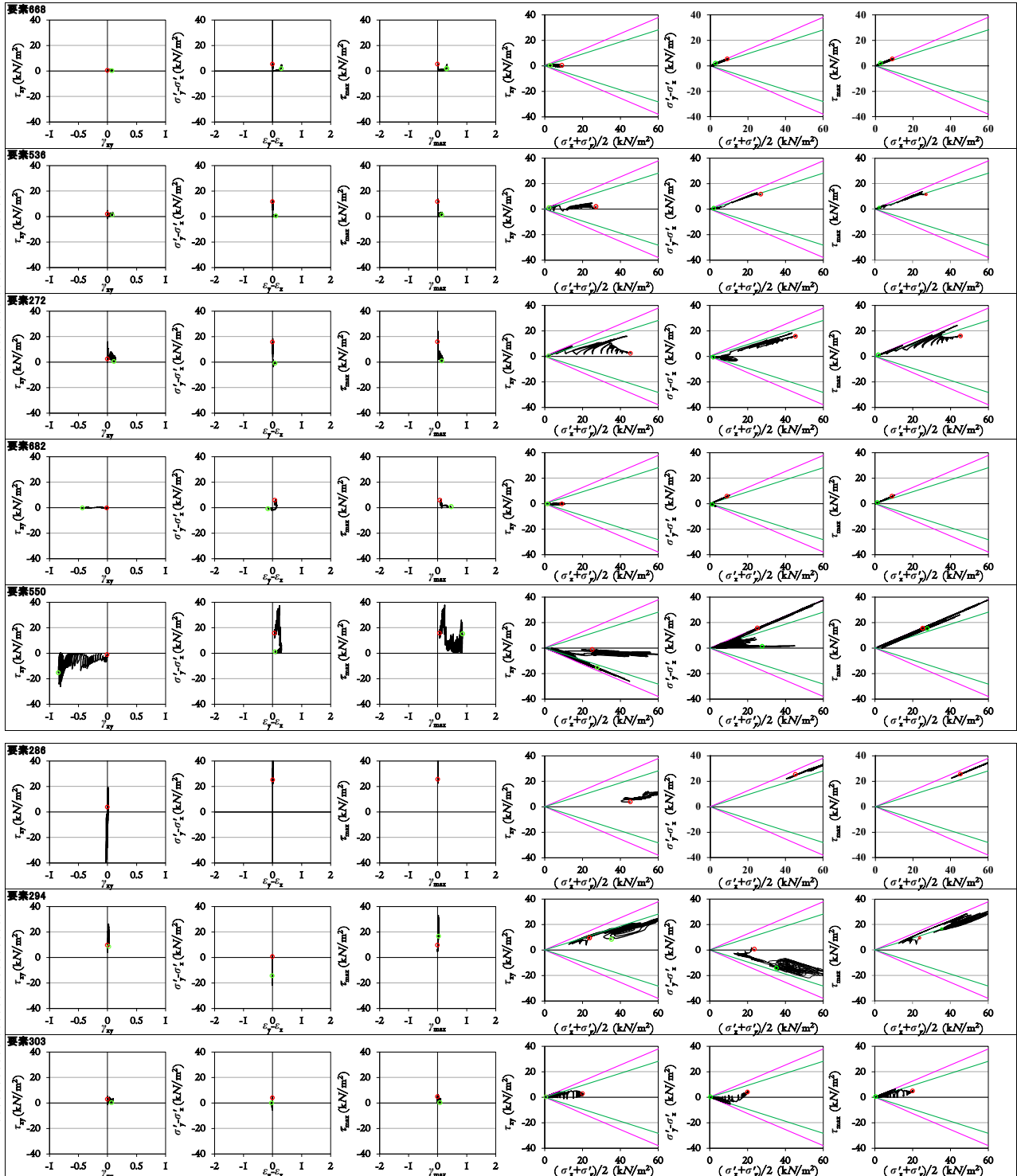
矢板と背後地盤を X 方向 MPC 拘束(微小変形解析結果)



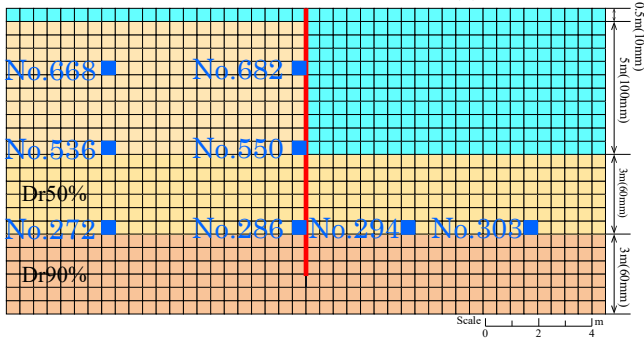
参考-3-2：応力ひずみ関係および応力パス(2)



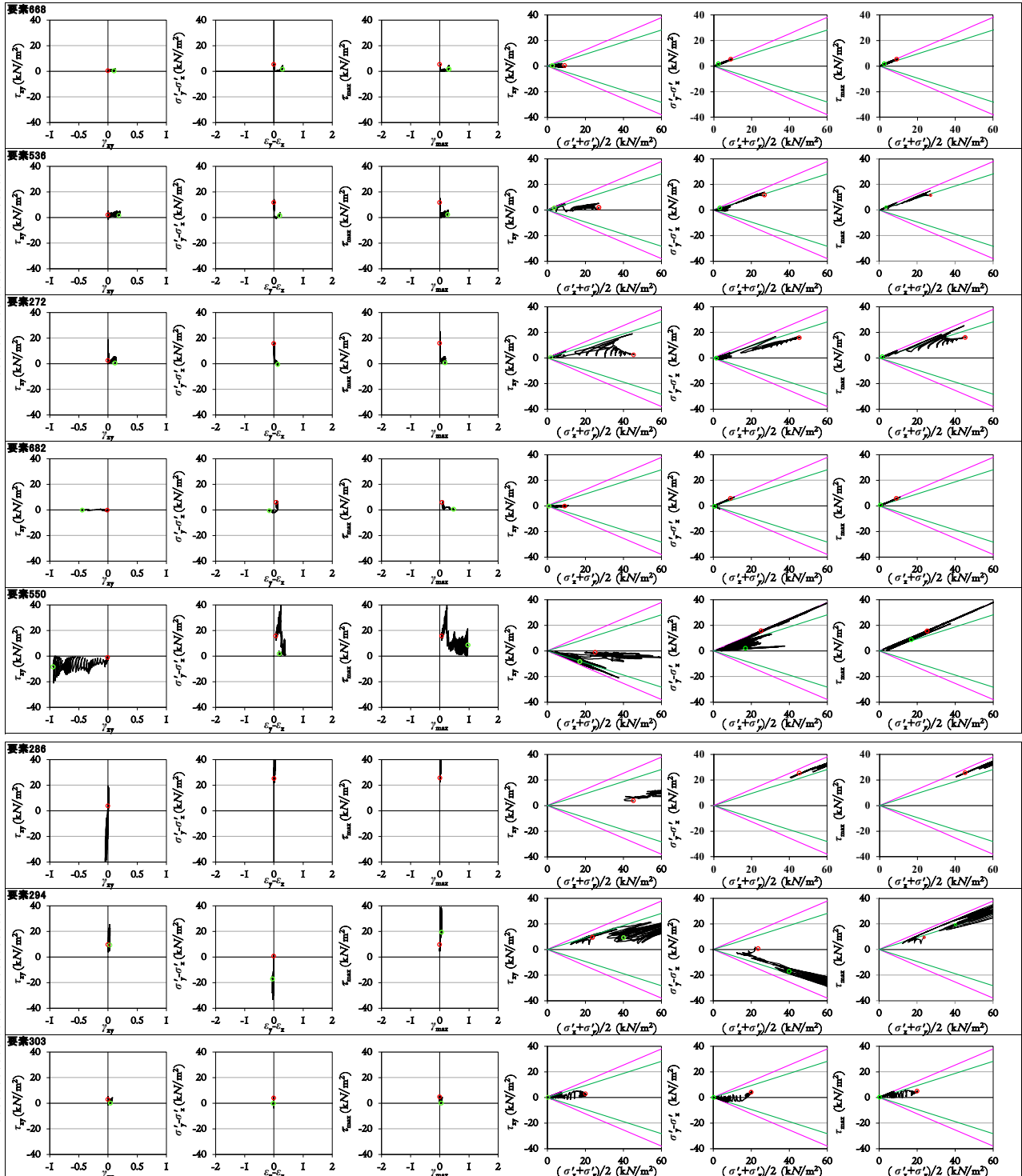
矢板と背後地盤を X 方向 MPC 拘束(大変形解析結果(TL))



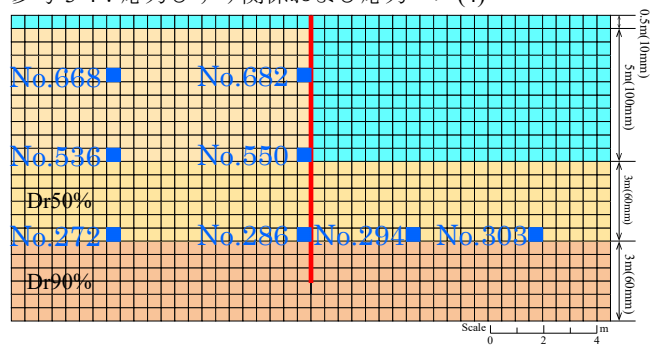
参考-3-3：応力ひずみ関係および応力パス(3)



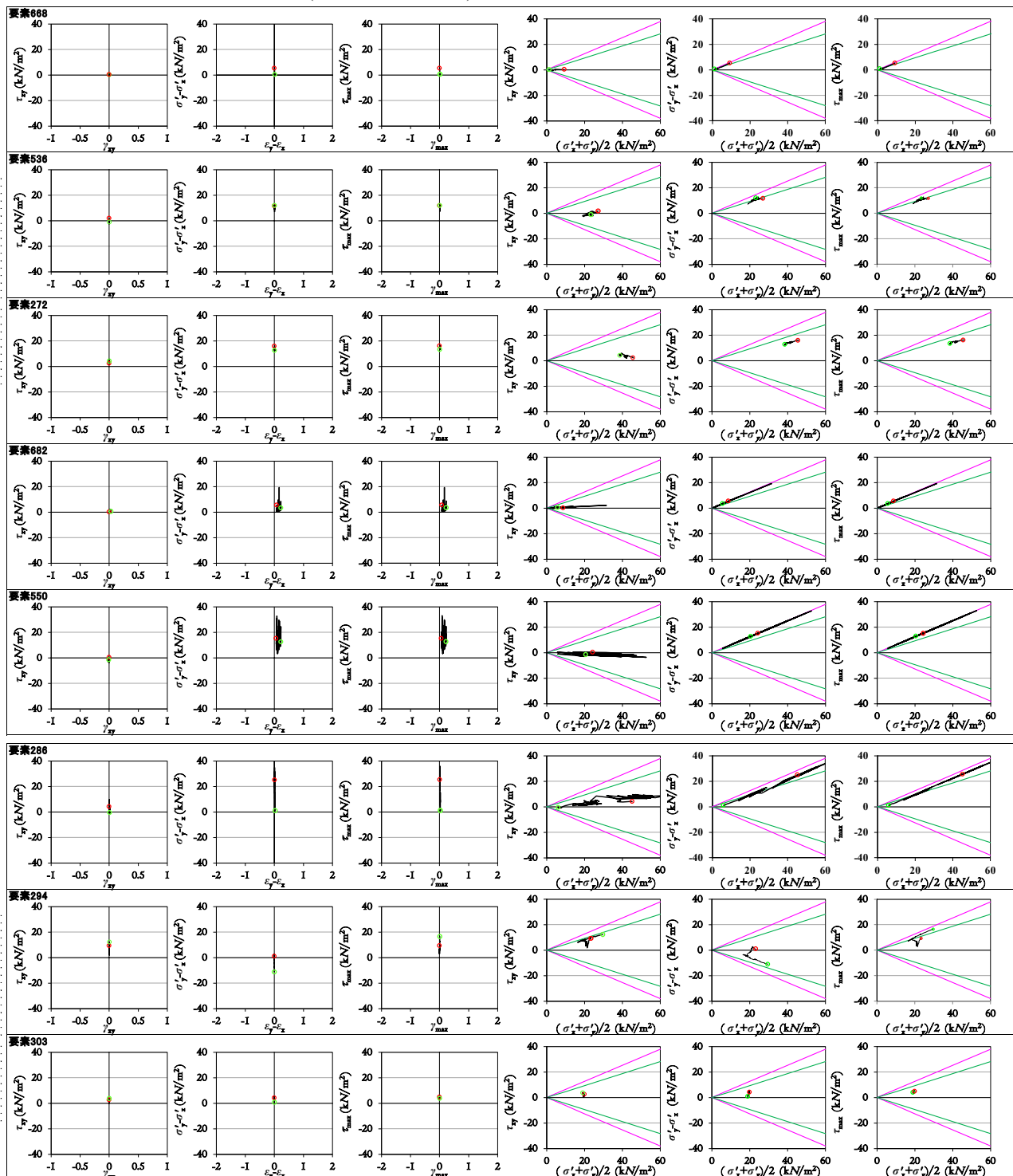
矢板と背後地盤を X 方向 MPC 拘束(大変形解析結果(UL))



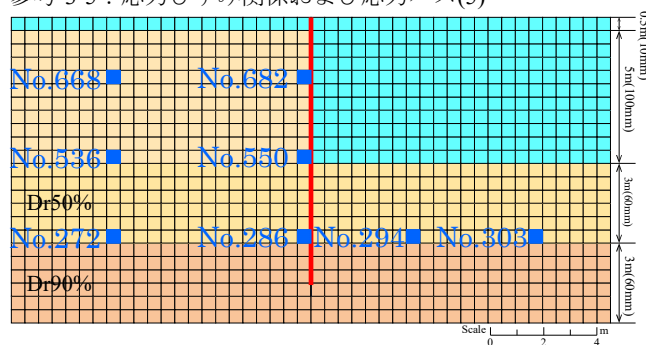
参考-3-4：応力ひずみ関係および応力パス(4)



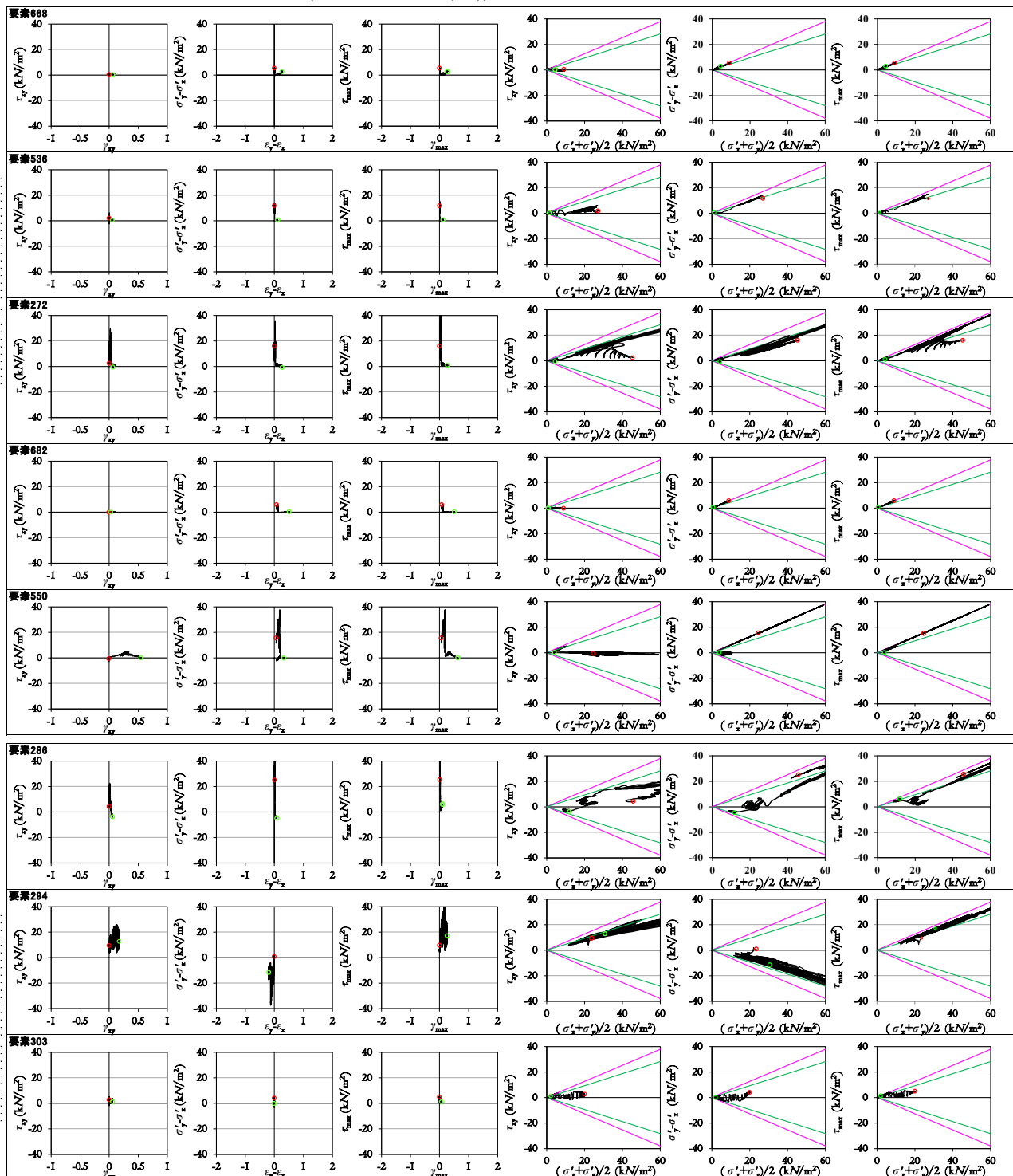
矢板と背後地盤をジョイントで拘束(微小変形解析結果)



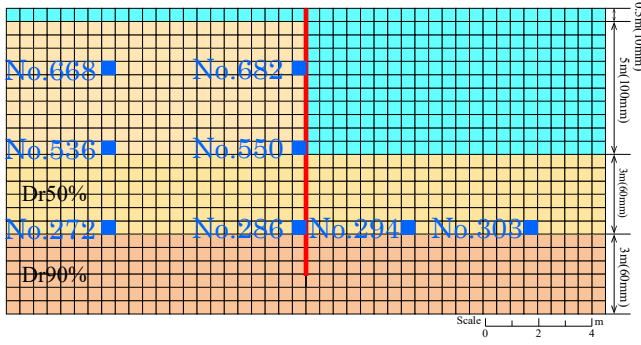
参考-3-5：応力ひずみ関係および応力パス(5)



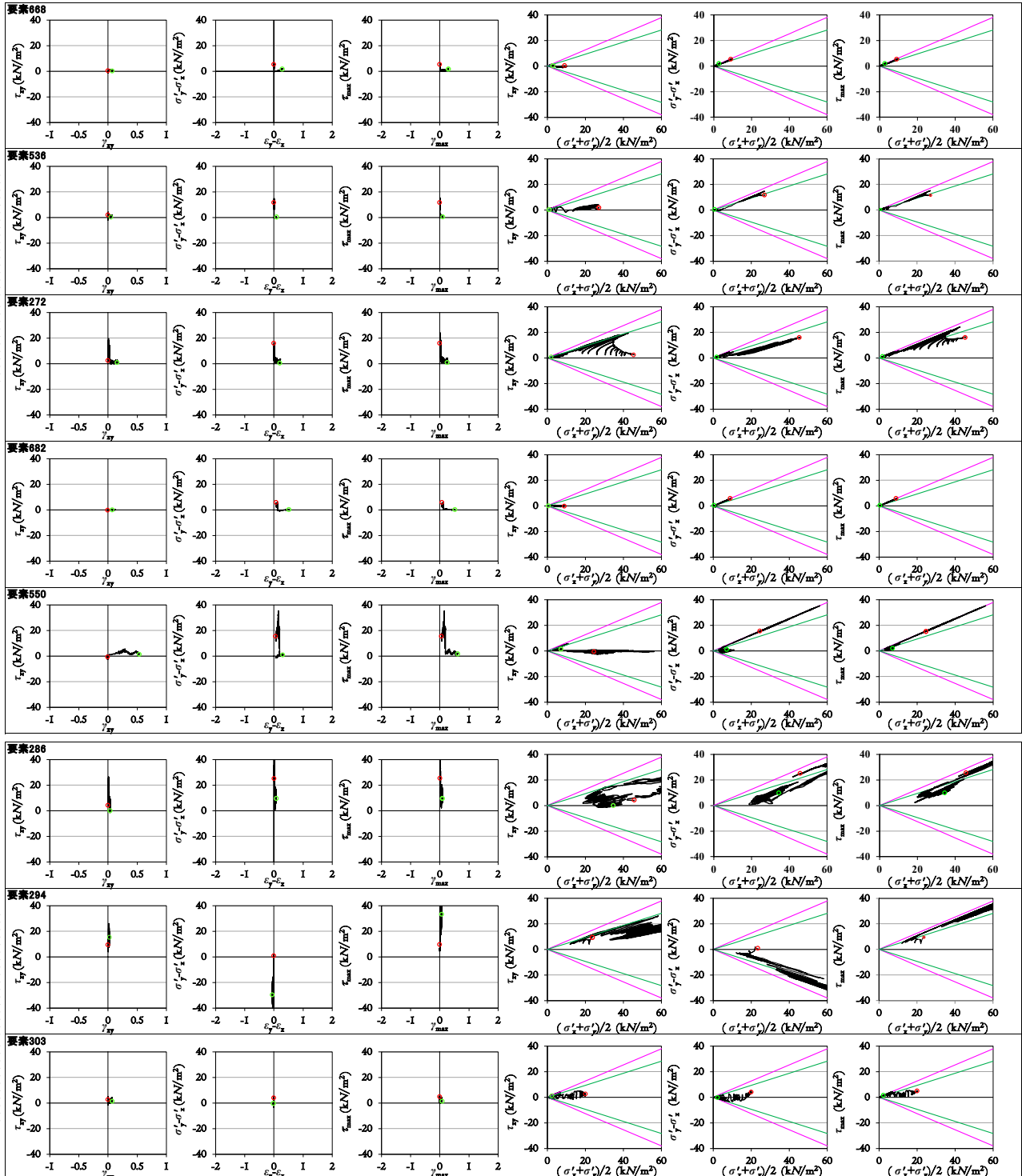
矢板と背後地盤をジョイントで拘束(大変形解析結果(TL))



参考-3-6：応力ひずみ関係および応力パス(6)



矢板と背後地盤をジョイントで拘束(大変形解析結果(UL))



4. 各種構造物を対象とした検討

4-1 盛土構造物を対象とした検討(1)

有効応力解析 大変形解析 盛土

東電設計株式会社

○兵頭順一

佐藤恭兵

渡部龍正

株式会社ダイヤコンサルタント

牛島 崇

中央復建コンサルタント株式会社

村上裕宣

1. はじめに

実務における土木構造物の耐震設計の多くは、微小変形理論に基づいた解析手法で評価している。今後、さらに大規模な地震が生じるとされており、微小変形理論に基づいた解析手法では、工学上無視できない誤差が生じる可能性が示唆される。そこで、本報告では、FLIP TULIP Ver6.4.3¹⁾²⁾を用いて、建設省土木研究所が実施した盛土の遠心力模型試験及び種々の条件の解析検討を実施し、大変形解析の適用性の検討を行った。

2. 盛土の遠心力模型実験の概要

本検討では、旧建設省土木研究所が実施した盛土の遠心力模型実験³⁾及び実験の盛土高さや液状化層厚をパラメータとしたパラメトリックスタディを実施した。実験は剛な土槽内に作成された盛土を 50G の遠心加速度場において加振することにより実施された。土槽の寸法は、幅 150cm、奥行き 30cm、深さ 50cm で側壁は剛である。地盤は図-1 に示すように盛土（江戸崎砂層）と基礎地盤（江戸崎砂層、7 号珪砂層）、排水層（碎石層）からなる地盤モデルであり、地下水位は 1G 場換算で GL-1.8m である。また、江戸崎砂の細粒分含有率 F_c は 0.8%、相対密度 D_r は 60.7% であり、珪砂の F_c は 0.7%、 D_r は 90.8% である。入力地震波形は図-2 に示すように最初に振幅 400Gal 程度の主要動があり、その後、余震が続く。実験結果は、主要動終了時の盛土天端の沈下量は 1G 場換算で 204cm、余震終了時 230cm であった。

3. 盛土の遠心力模型実験を対象とした有効応力解析

(1) 解析条件

各土層は FLIP TULIP のカクテルグラスモデル要素を用いてモデル化し、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。また、江戸崎砂層と 7 号珪砂層の液状化特性は、非排水繰返し三軸試験に基づく液状化抵抗曲線を参考に設定した。解析に用いる Rayleigh 減衰は、地震応答解析結果（非液状化状態）より水平応答変位量が収束するときの値とし、 $\beta=0.0002$ とした。FLIP TULIP の構成則は tmp7 法（ITMPM=1）、解析手法は微小変形理論と大変形理論に基づく解析を実施した。大変形解析は、Total Lagrangian 法（以下、「TL 法」という。）と Updated Lagrangian 法（以下、「UL 法」という。）の 2 種類の手法を用いた。入力地震動は、図-2 に示す入力地震波形の主要動部分である波形の最初の 11 秒間を用いた。検討ケースは、表-1 に示すケースを実施した。

(2) 解析結果

基本ケースの大変形解析（TL 法）の解析結果を図-3～図-4 に示す。盛土天端の沈下量は、微小変形解析 7.0m、大変形解析（TL 法）2.3m、大変形解析（UL 法）2.2m となった。大変形解析の沈下量は、TL 法と UL 法の両方で、実験値 2.0m を概ね再現する結果となった。TL 法と UL 法の結果は、最終沈下量だけでなく、沈下の時刻歴も概ね一致した。よって、FLIP TULIP では、盛土の遠心力模型実験結果に対して適用性を確認した。基本ケースの盛土天端の沈下量が 0.5m 付近（時刻 3 秒付近）までは、微小変形解析と大変形解析の沈下量は同程度であった。図-5 に江戸崎砂層（液状化層）の中央付近の要素の軸差応力と軸差ひずみ関係を示す。時間 3 秒付近では、軸差ひずみが 10～15% の範囲内にある。よって、軸差ひずみ 10% 程度までは微小変形解析と大変形解析はほぼ同じ挙動を示しているといえる。

基本ケースを元にして、盛土の高さ H と液状化層厚 T をパラメータとしてパラメトリックスタディを実施した。図-6 に盛土高さや盛土の沈下量の関係を、図-7 に液状化強度と盛土の沈下量の関係を示す。盛土高さを高くするほど、液状化強度を低くするほど、盛土天端の沈下量は大きくなった。図-8 に全ケースの盛土天端の沈下量の時刻歴を用いて、微小変形解析と大変形解析（TL 法）の盛土の高さで正規化した沈下量の比較を示す。正規化した沈下量 0.1 程度（沈下量 0.5～0.6m 程度）まで、微小変形解析と大変形解析（TL 法）の沈下量は 15% 程度の違いの範囲内であった。

4. まとめ

盛土の遠心力模型実験を対象として、FLIP TULIP による微小変形解析および大変形解析（TL 法、UL 法）を実施した。微小変形解析は、沈下量を過大評価する結果となった。FLIP TULIP による大変形解析は、実験結果の沈下量を概ね再現する結果となった。盛土高さ、液状化層厚、液状化強度をパラメータとして、パラメトリックスタディを行ったところ、盛土高さで正規化した沈下量は 0.1 程度（盛土天端の沈下量は 0.5～0.6m 程度）、軸差ひずみは 10% 程度まで、微小変形解析と大変形解析の差異は少ない結果となった。

謝辞

本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) Iai, S., Ueda, K., Tobita, T. and Ozutsumi, O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials
International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013.
- 2) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究，京都大学博士論文，2010年3月．
- 3) 建設省土木研究所耐震技術センター動土質研究室：法先固化改良による盛土の耐震対策効果に関する動的遠心模型実験報告書，土木研究所資料第3688号，平成12年．

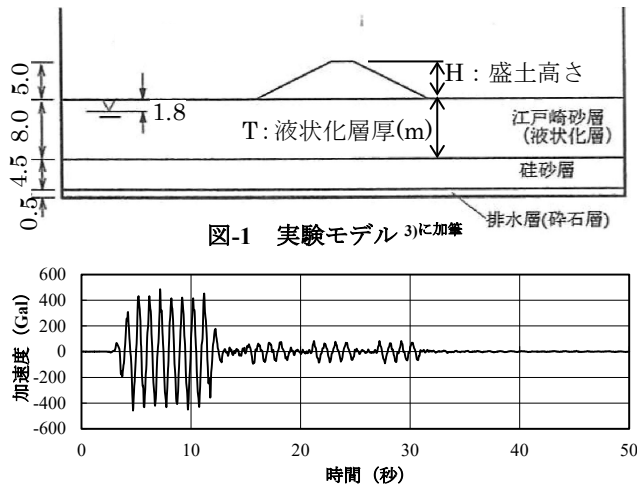


図-1 実験モデル 3)に加筆

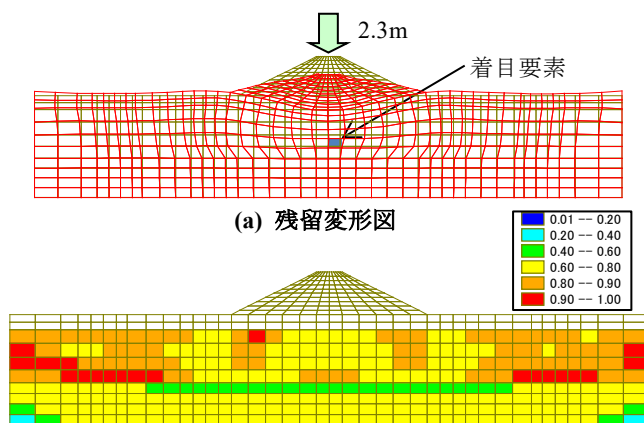


図-3 解析結果（基本，大変形理論（TL法））

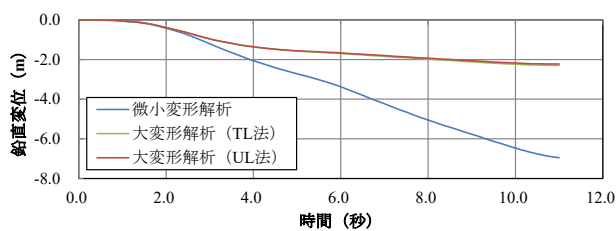


図-4 解析結果（基本，盛土天端の沈下量の時刻歴）

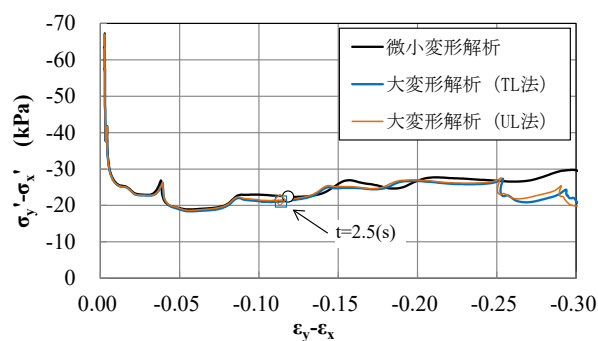


図-5 解析結果（基本，着目要素の軸差応力と軸差ひずみの関係）

表-1 検討ケース

基本とする対象構造物	ケース	盛土高さ H (m)	液状化層厚 T (m)	液状化強度 (R_{L20})	備考 N_{98} ($F_c=10\%$)
土研遠心実験	基本	5	6.2	0.08	—
盛土	1	5	6.2	0.12	1
	2	5	6.2	0.18	6
	3	5	6.2	0.24	12
	4	5	3.0	0.12	1
	5	5	9.0	0.12	1
	6	8	6.2	0.12	1
	7	8	6.2	0.18	6
	8	8	6.2	0.24	12

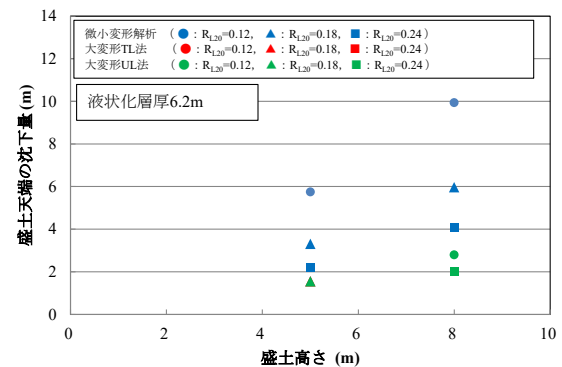


図-6 盛土高さと盛土の沈下量の関係

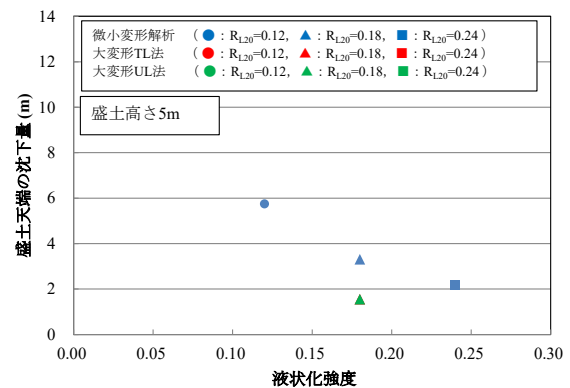


図-7 液状化強度と盛土の沈下量の関係

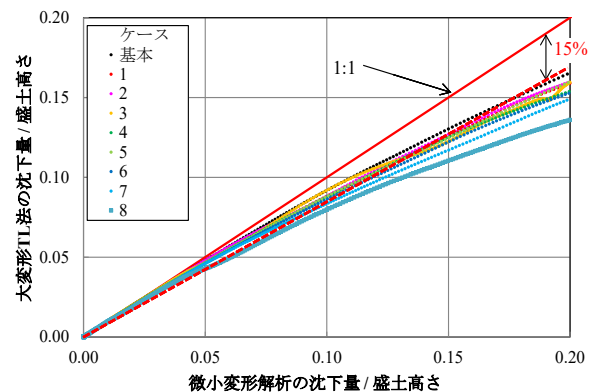


図-8 微小変形解析と大変形解析の比較（全時刻歴）

4-2 盛土構造物を対象とした検討(2)

有効応力解析 大変形解析 盛土

株式会社ダイヤコンサルタント ○牛島 崇
東電設計株式会社 兵頭 順一, 渡部 龍正, 佐藤 恭兵
中央復建コンサルタンツ株式会社 村上 裕宣

1. 検討概要

本検討は、盛土構造物に対する多重せん断機構モデルに基づいた大変形解析プログラムFLIP TULIP¹⁾²⁾の適用性の検討の一例として、液状化層厚を変化させたモデルに対し微小変形解析と大変形解析の結果比較を行うものである。

2. 解析モデル

解析モデルは、旧建設省土木研究所が実施した盛土の遠心力模型実験³⁾で使用されたモデルを基本とし、液状化層である江戸崎砂層の層厚を変化させた2モデルとした。モデル図と検討ケース名を合わせて図-1に示す。

3. 解析条件

各土層は全てFLIP TULIPのカクテルグラス要素とし、解析パラメータは既往検討⁴⁾の値を一部見直したもので表-1に示す。江戸崎砂層の液状化特性は、非排水繰返し三軸試験に基づく液状化抵抗曲線から設定したものであり、液状化強度は図-2中の $RL_{20}=0.12$ に対応する。モデルに入力する地震動は、図-3に示す加速度波形とし、このうち主要動部分である11秒間を用いた。FLIP TULIPの構成則、使用する解析手法、Rayleigh減衰定数は既往検討にない、それぞれtmp7法、微小変形解析と大変形：Total Lagrangian法(以下、TL法)およびUpdated Lagrangian法(以下、UL法)、 $\beta=0.0002$ とした。本検討におけるFLIP TULIPの適用バージョンは最新版のver 6.4.3とした。

4. 解析結果

(1) 地震動振幅 1.0 倍のケース

代表としてCASE4の応答分布図(残留変形図、最大過剰間隙水圧比分布図)を図-4に示す。また時刻歴結果として、微小変形解析と大変形解析(TL法)の盛土天端の沈下量比(以下、沈下量比)の時刻歴を図-5(a)に、盛土直下の液状化層の過剰間隙水圧比時刻歴を図-6(a)に、要素履歴として液状化層の軸差ひずみ-軸差応力関係を図-7(a)に示す。ここで、図-5(a)中の黒と赤の破線はそれぞれ沈下量比が1.10, 1.01となる時刻を示す鉛直の線である。図-5(a)より、波形の主要動の1波目が終わった2.3[s]以後から、微小変形解析と大変形解析の沈下量に徐々に差が開き始め沈下量比が単調増加することが確認された。また、当該時刻と図-6(a)、図-7(a)の対応から、液状化層の過剰間隙水圧比が0.5未満、軸差ひずみが10%未満の領域では微小変形と大変形の挙動にほとんど差が無いことが分かった。

(2) 地震動振幅 0.4 倍のケース

本検討では、大変形解析の適用性をさらに調べるため、沈下量比が全時刻で一定となるケースを想定し、追加することにした。図-5(a)に示したように時刻1.4[s]以前では沈下量比が1.01未満であり、1.4[s]以前における入力波の最大振幅が波形全体の最大振幅の0.4倍に相当することから、追加ケースは入力地震動の振幅を0.4倍に調整したCASE4'(モデルはCASE4と共通)とした。CASE4と同様に図-5(b)と図-6(b)に時刻歴結果、図-7(b)に要素履歴を示す。CASE4'では振幅調整の影響で、CASE4と比較し沈下量比の値そのものは小さくなるが、全時刻で1.01未満とはならなかった。また、軸差ひずみ10%付近において微小変形解析と大変形解析の挙動の差が明確に現れる様子も確認された。

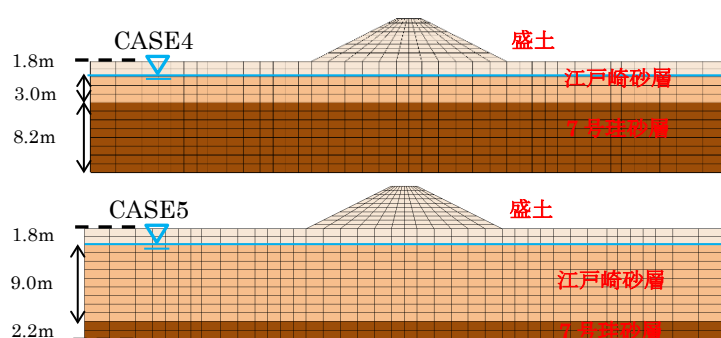


図-1 解析モデル

表-1 解析パラメーター一覧

	質量密度 ρ (t/m ³)	拘束圧 σ_{vm} (kPa)	拘束圧 依存定数 m_{vm}	初期せん断剛性 G_{00} (kPa)	体積弾性 係数 K_{vm} (kPa)	間隙率 n_1	最大減衰定数 η_{max}	内部 摩擦角 f (deg)	
盛土(江戸崎砂)	1.70	98	0.5	84000	218000	0.49	0.26	34	
江戸崎砂層 (地下水以下)	2.049	98	0.5	12630	32930	0.534	0.24	30.48	
江戸崎砂層 (地下水以上)	2.049	98	0.5	12630	32930	0.534	0.24	30.48	
7号粒砂層	1.98	98	0.5	86000	224300	0.40	0.24	48	

ダレンタン特性												
液状化 強度比	変相角 ϕ_r (deg)	E_r (GPa)	r_{vm}	r_{vm}	q_1	q_2	β	r_1	S_1	c_1	Stress値	
江戸崎砂層 (地下水以下)	0.12	28	0.10	2.90	0.20	1.00	2.50	2.00	0.50	0.005	1.00	15.82
7号粒砂層	—	33	0.10	6.00	0.08	1.00	3.50	2.00	0.50	0.005	1.00	—

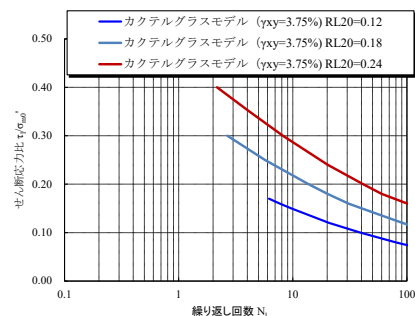


図-2 液状化抵抗曲線

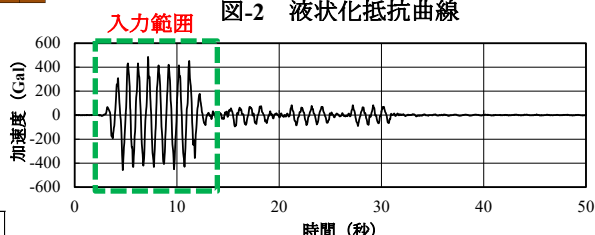


図-3 入力地震動の時刻歴

5. まとめ

表-2 と図-8 に検討ケースの残留沈下量の結果を一覧で示す。表-2 中には、参考として水谷⁵⁾による方法で算出した沈下量も合わせて記載している。盛土構造物の一例に対する FLIP TULIP の適用性を検討した結果、盛土天端の沈下量に対する大変形解析と微小変形解析の結果の差は、入力波形の振幅に影響されることが分かった。特に、入力波形をそのまま用いた CASE4 と CASE5 では、残留沈下量比が 2.5 以上となり、微小変形解析の沈下量が過大となった。また、沈下量比と液状化層の挙動に注目すると、軸差ひずみ 10%未満の領域では解析手法による結果の差はほとんど見られないことが確認された。

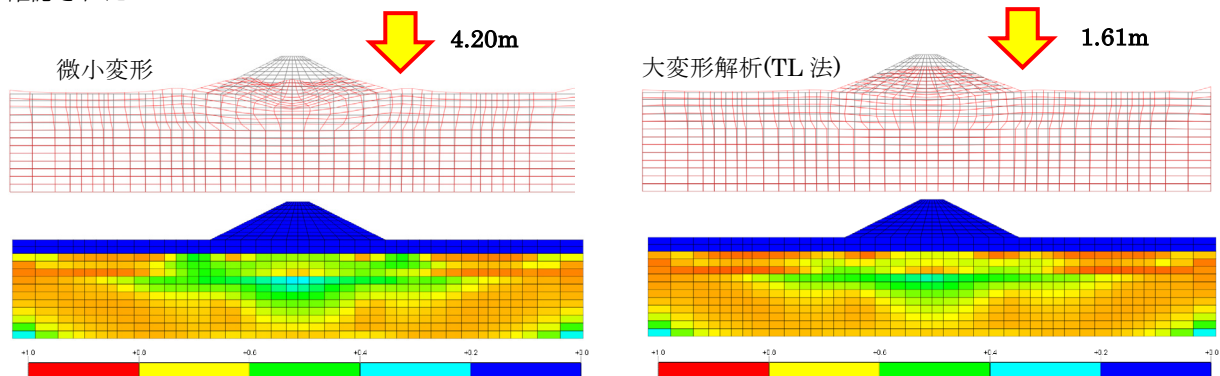


図-4 解析結果（残留変形図と最大過剰間隙水圧比：CASE4 モデル）

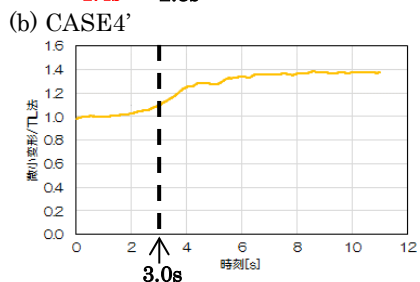
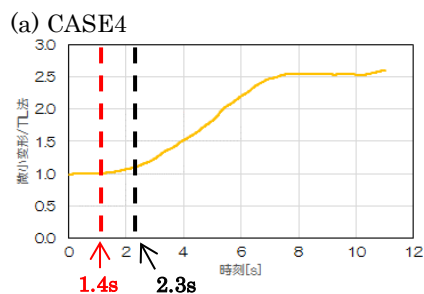


図-5 天端沈下量比の時刻歴

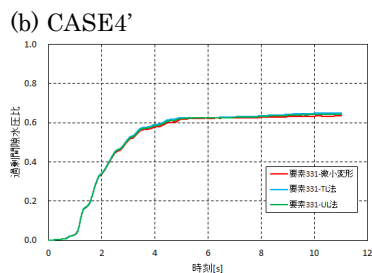
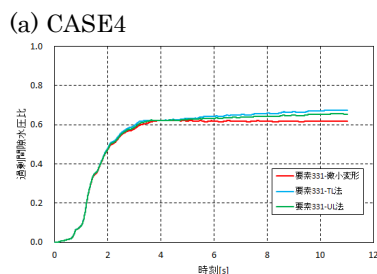


図-6 過剰間隙水圧比時刻歴

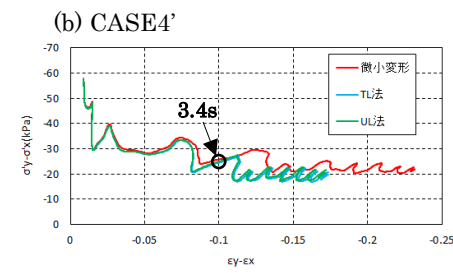
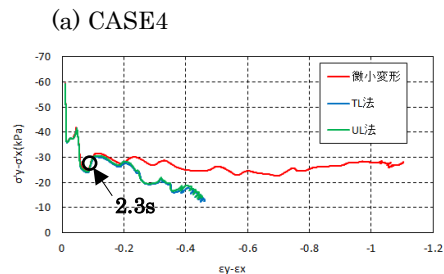


図-7 要素履歴(軸差ひずみー軸差応力)

表 2-解析結果一覧

検討ケース	計算手法	最終沈下量(m)
CASE4	微小変形	4.20
	TL	1.61
	UL	1.59
CASE4'	微小変形	0.98
	TL	0.71
	UL	0.71
CASE5	微小変形	4.58
	TL	1.71
	UL	1.69
水谷※	—	1.61

謝辞

本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) Iai, S., Ueda, K., Tobita, T. and Ozutsumi, O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013.
- 2) 上田 恭平: 砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究, 京都大学博士論文, 2010 年 3 月。
- 3) 建設省土木研究所耐震技術センター動土質研究室: 法先固化改良による盛土の耐震対策効果に関する動的遠心模型実験報告書, 土木研究所資料第 3688 号, 平成 12 年。
- 4) FLIP 研究会 大変形解析WG: 平成 27 年度 成果報告書, 平成 28 年 8 月。
- 5) 水谷 崇亮: 液状化に起因する盛土基礎の側方流動の矢板による低減, 東京大学博士論文, 2000 年。

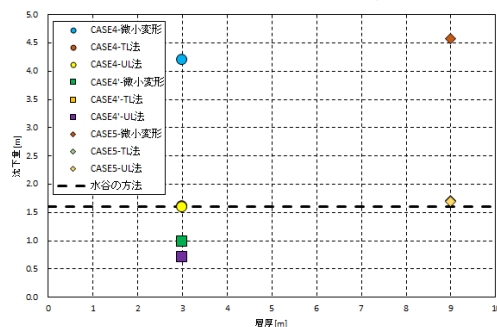


図-8 解析結果

4-3 盛土構造物を対象とした検討(3)

有効応力解析 大変形 盛土

中央復建コンサルタンツ株式会社 ○村上裕宣
東電設計株式会社 兵頭順一, 渡部龍正, 佐藤恭兵
株式会社ダイヤコンサルタンツ 牛島崇

1. 目的

大変形理論に基づいた多重せん断機構モデルFLIP TULIP¹⁾²⁾の実問題への適用に向けた一検討として、建設省土木研究所が実施した盛土の遠心力模型実験³⁾を対象としたFLIP TULIP Ver6.4.3を用いた解析検討を実施し、微小変形解析の適用範囲および大変形解析の有効性について検証を行うことを目的とする。

2. 解析条件

本検討では、模型実験モデルの液状化層厚、液状化強度、盛土高さ（上載荷重）を変えたケース（表-1 参照）を対象に微小変形解析および大変形解析を行い、各解析手法の適用性を確認した。このうち本稿では、盛土高さを変えたモデル（図-1 参照）に対して液状化強度を変化させた3ケース（表-1 のケース 6～8）を対象に行った解析結果を示す。

各土層はFLIP TULIPのカクテルグラスモデル要素を用いてモデル化し、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。各土層の材料物性を表-2 に示す。解析に用いるRayleigh減衰は、地震応答解析結果（非液状化状態）より水平応答変位量が収束するときの値とし、 $\beta=0.0002$ とした。FLIP/TULIPの構成則はtmp7 法（ITMPM=1）、解析手法は微小変形理論と大変形理論に基づく解析を実施した。大変形解析は、Total Lagrangian法（以下、「TL法」という。）とUpdated Lagrangian法（以下、「UL法」という。）の2種類の手法を用いた。入力地震動は、図-2 に示す入力地震波形の主要動部分である波形の最初の11秒間を用いた。また、軸差ひずみが小さい領域では微小変形解析と大変形解析との差異が小さいことが確認できたため、比較ケースとして波形の振幅を0.5倍したケースの解析も行った。

表-1 解析ケース

基本とする対象構造物	ケース	盛土高さ H (m)	液状化層厚 T (m)	液状化強度 (R_{L20})	備考 N ₉₈ (Fc=10%)
土研遠心実験	0	土研遠心	土研遠心	土研遠心	土研遠心
盛土 (土研遠心実験をベース)	1	5	6.2	0.12	1
	2			0.18	6
	3			0.24	12
	4		3	0.12	1
	5	8	6.2	0.12	1
	6			0.18	6
	7			0.18	6
	8			0.24	12

表-2 材料物性

	液状化 強度比	質量密度 ρ (t/m ³)	拘束圧 σ_{ms} (kPa)	拘束圧 依存係数 m_G, m_K	初期せん断 剛性 G_{ms} (kPa)	体積弾性 係数 K_{ms} (kPa)	間隙率 e	最大 減衰定数 h_{max}	内部 摩擦角 f (deg.)
盛土(江戸崎砂)	—	1.70	98	98	84000	218000	0.49	0.26	34
江戸崎砂層	0.12	2.049	98	98	12630	32930	0.534	0.24	30.48
	0.18	2.049	98	98	41690	108700	0.503	0.24	33.64
	0.24	2.049	98	98	66180	172600	0.479	0.24	36.22
7号珪砂層	—	1.98	98	98	86000	224300	0.40	0.24	48

	液状化 強度比	変相角 ϕ_p (deg.)	cd^{cm}	r_{dk}	r_{ed}	$q1$	$q2$	lk	r_k	S_l	c_l	S_u 値 (kPa)
江戸崎砂層 (地下水位以降)	0.12	28	0.10	2.90	0	1	2.50	2.00	0.50	0.005	1.00	15.82
	0.18	28	0.10	0.95	0	1	2.50	2.00	0.50	0.005	1.00	17.20
	0.24	28	0.10	0.38	0	1	2.50	2.00	0.50	0.005	1.00	18.35
7号珪砂層	—	33	0.10	6.00	0.06	1.00	3.50	2.00	0.50	0.005	1.00	—

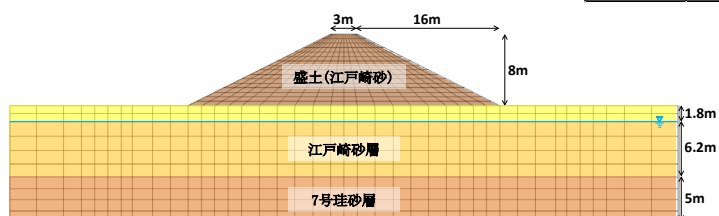


図-1 解析モデル

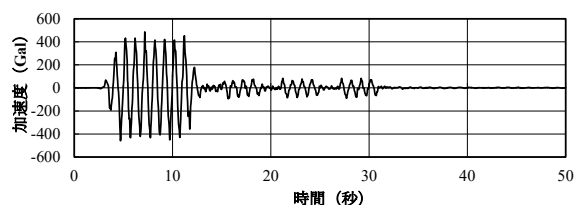


図-2 入力地震動の時刻歴

3. 解析結果

液状化強度比 R_{L20} を0.12としたケース6に対する各解析手法の解析結果（残留変形図、最大過剰間隙水圧比）を図-4、5に示す。なお、大変形解析結果として解析安定性が高かったUL法の結果のみを示すが、TL法とUL法との大きな差異がないことは確認している。盛土天端の沈下量は、微小変形解析9.94m、大変形解析（UL法）2.79mとなった。微小変形解析による沈下量は、盛土高さ8mを上回る過大な評価となった。一方で、大変形解析による結果は、遠心模型実験（ $R_{L20}=0.08$ ）とは液状化強度比が異なるため一概に比較はできないが、盛土高さ5mの遠心模型実験の沈下量2.0mに対して、盛土高さ8mのケース6の沈下量が2.79mとなっており、概ね同様の傾向を確認することができる。過剰間隙水圧比については、過剰間隙水圧の上昇する範囲は大変形解析の方が微小変形解析より広いことが確認できる。図-6に示す盛土天端沈下量の時刻歴については、TL法とUL法の結果は概ね一致した。

比較ケースとして行った、振幅を0.5倍したケースの結果を含む解析結果を表-3、図-6（いずれも盛土天端沈下量）、図-7（ケース8の軸差応力-軸差ひずみ関係）に示す。液状化強度比が小さいほど、沈下量が大きく、また振幅を小さくすることによる沈下量の低減率が大きいことが確認できる。また図-7より、軸差ひずみが10%（図中赤破線）より小さい領域では微小変形解析と大変形解析の結果の差異が小さいことが確認できる。

Case study on effective stress analysis of fill (3); Hironobu MURAKAMI (Chuo Fukken Consultants Co.,Ltd), Junichi HYODO, Tatsumasa WATANABE, Kyohei SATO (Tokyo Electric Power Services Co.,Ltd), Takashi USHIJIMA (Dia Consultants Co.,Ltd)

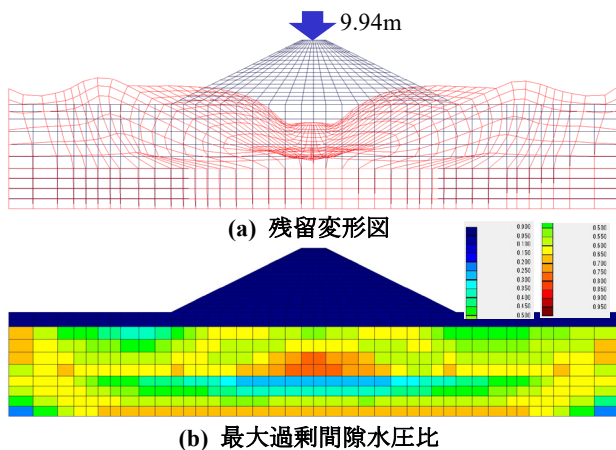


図-3 解析結果（ケース 6，微小変形理論）

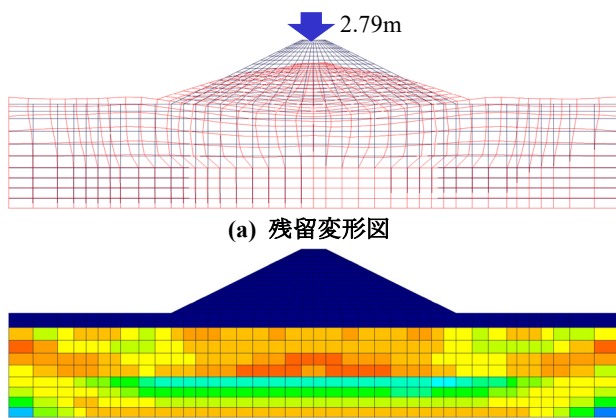
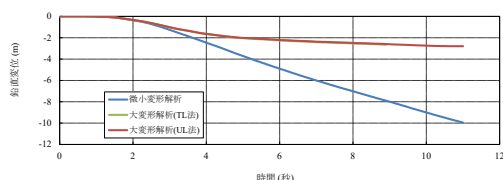


図-4 解析結果（ケース 6，大変形解析理論（UL 法））



(b) ケース 8

図-5 解析結果（ケース 6，盛土天端沈下量時刻歴）

※図-4～6 はすべて振幅 1.0 倍の結果

4. まとめ

模型実験モデルの諸パラメータを変えたモデルを対象として，FLIP TULIPによる微小変形解析および大変形解析（TL法，UL法）を実施した．微小変形解析は，沈下量を過大評価する結果となった．大変形解析は，TL法とUL法とで大きな差異は生じなかったが，UL法の解析安定性が高い結果となった．また，軸差ひずみが 10%までは微小変形解析と大変形解析との差異が小さいことが確認された．

謝辞 本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの研究活動の一環として実施されたものである．関係者の方々に謝意を表します．

参考文献 1) Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013.

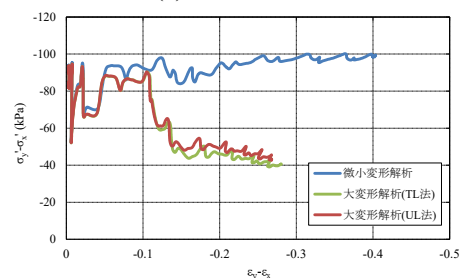
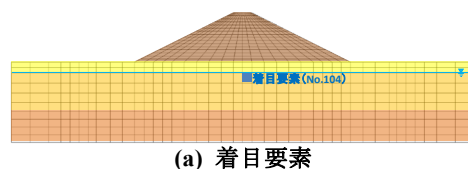
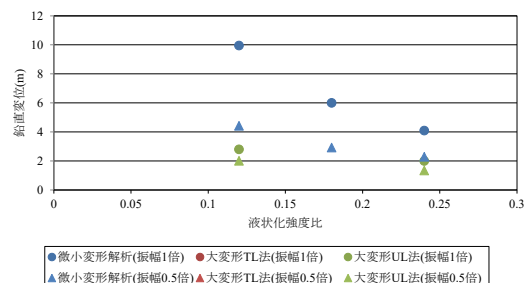
2)上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究，京都大学博士論文，2010 年 3 月．

3)建設省土木研究所耐震技術センター動土質研究室：法先固化改良による盛土の耐震対策効果に関する動的遠心模型実験報告書，土木研究所資料第 3688 号，平成 12 年．

表-3 解析結果（盛土天端沈下量）

振幅	ケース	液状化強度	微小変形解析	大変形TL法	大変形UL法
1.0倍	6	0.12	9.944	—	2.792
	7	0.18	5.996	—	—
	8	0.24	4.088	—	1.995
0.5倍	6	0.12	4.401	—	1.993
	7	0.18	2.901	—	—
	8	0.24	2.271	—	1.321

—：解析途中で発散



(c) 振幅 0.5 倍

図-7 解析結果（ケース 8，軸差応力ー軸差ひずみ関係）

4-4 河川堤防を対象とした検討

キーワード 盛土構造物 大変形解析、排水解析

有限会社日本解析センター ○湯浅 明

1. はじめに

FLIP TULIP^{1),2)}の基本的特性を把握することを目的として、被災事例のある堤防モデルを用いた非排水条件または排水条件による大変形と微小変形の手法の数値解析を行った結果の比較・検討を行った。今回、検討に用いたモデルは、阪神淡路大震災で被災した淀川堤防³⁾を選定した。使用したプログラムはFLIP TULIP621(64bit版)である。

2. 検討条件

解析条件を以下に示す。本検討では液状化層にカクテルグラスモデル（非排水または排水条件）を、非液状化層にはマルチスプリングモデルを用いた。大変形解析における応力・ひずみ系の表示は空間表示で Cauchy 応力, Euler-Almansi ひずみとした。

- 1)解析モデル：解析モデルその他は文献 3),4)を参考にした。土層区分と解析メッシュ図(幅 105m、底面境界から天端までの高さ 39.05m)を図-1 に示す。液状化層は As2-1,As2-2 層で地下水位は As2-1 上面に設定した。
- 2)パラメータ：表-1 に示す文献 3)の検討で用いられたパラメータを用いた。カクテルグラスモデルのパラメータは、異方圧密＋初期せん断が作用した状態からの繰り返しせん断による変形挙動を解析できるように設定したパラメータを元に決定された値で瞬時に液状化しやすい特性がある。透水係数は一律 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ とした。
- 3)入力地震動：図-2 に示す E+F 波形(時間刻み $\Delta t=0.02$ 秒)を用いた。解析の時間刻みは $\Delta t=0.01$ 秒とした。
- 4)その他条件：自重解析の境界条件は、底面固定境界、側方鉛直ローラーとした。動的解析の境界条件は、底面固定境界、側方粘性境界(V_p は 100 倍)とした。レーレー減衰は $\alpha=0.0$, $\beta=0.002$ とした。

3. 解析ケース

解析ケースは、微小変形解析(以下 SD 法), 大変形解析(Total Lagrangian 法: 以下 TL 法), 大変形解析(Updated Lagrangian 法: 以下 UL 法)の 3 手法を適用し非排水条件、排水条件とした計 6 ケースを実施した。次に、入力加速度のパラメトリック・スタディーを行い、天端の沈下量に着目して微小変形解析と大変形解析の相違について検討を行った。

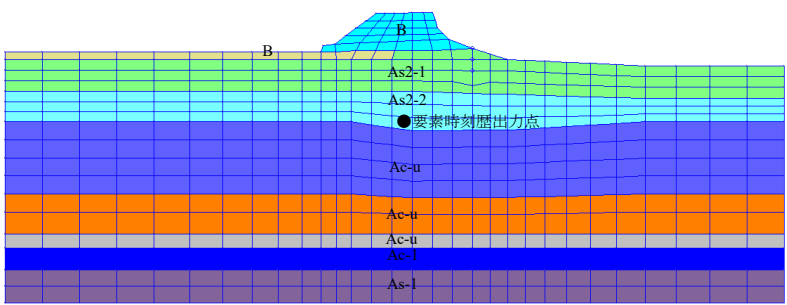


図-1 メッシュ図

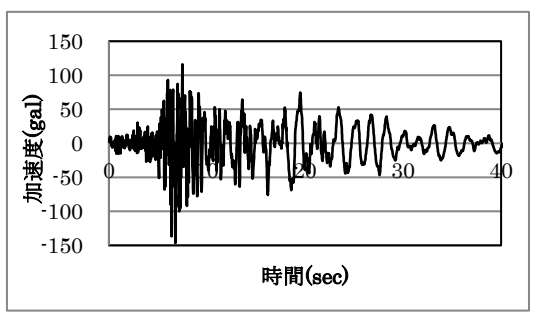


図-2 入力地震動

表-1 解析に用いた地盤物性値

区分	一般						液状化パラメータ															
	湿潤密度	基準拘束圧	初期せん断剛性	体積弾性係数	最大減衰定数	内部摩擦角	変相角	ダイレイタンスに関するパラメータ												液状化強度曲線の下限を規定する	体積圧縮特性に関するパラメータ	
								ρ_t (t/m^3)	σ'_m (kPa)	G _m (kN/m^2)	K _m (kN/m^2)	h _{max} (-)	Φ_f (度)	Φ_p (度)	ε_{dc}	$\gamma_{\varepsilon dc}$	$\gamma_{\varepsilon d}$	q1	q2			
B	1.85	57.8	5.99E+04	1.60E+05	0.24	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
As2-2	1.8	105	32810	87280	0.24	38	28	0.15	2	0.2	1	0.5	0.5	30	0.1	0.5	0.005	1.35	2	1.25		
As2-1	1.85	122	50370	134100	0.24	40	28	0.15	2	0.2	1	0.5	0.5	70	0.1	0.5	0.005	1.35	2	1.25		
Ac-u	1.65	156	3.47E+04	9.23E+04	0.21	34.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ac-1	1.75	191.3	5.67E+04	1.51E+05	0.21	39.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
As-1	1.75	209	6.32E+04	1.68E+05	0.24	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

4. 解析結果

図-3 に動的解析終了時の変形図と過剰間隙水圧比の分布図を、図-4 に動的解析終了時の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} (= \sqrt{((\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2)})$ の分布図を示す。変形モードはすべてのケースでほぼ同等の結果になった。天端の最大沈下量は、非排水条件の SD 法が 2.87m, TL 法が 1.95m, UL 法が 1.92m であった。排水条件の SD 法は 6.04m, TL 法が 2.15m, UL 法が 2.12m であった。SD 法は排水条件の違いによる天端の沈下量の差が大きく、排水条件の値は非排水条件の値の 2.1 倍であった。一方、大変形解析では排水条件による影響は小さく、非排水条件で TL 法 1.95m, UL 法 1.92m, 排水条件で TL 法 2.15m, UL 法 2.12m であった。過剰間隙水圧比の上昇度合いは、堤体直下で比較すると非排水条件、排水条件とも SD 法より両大変形解析の方がやや大きい。大変形解析 TL 法, UL 法の比較では、非排水条件、排水条件の差は SD 法の結果と比較すると小さい。最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ はすべてのケースで堤体直下での発生が大きく、SD 法より TL 法, UL 法の方が小さい。大変形解析 TL 法, UL 法の比較では、非排水条件、排水条件による差は小さいことが分かった。

次に、入力最大加速度を 50～2000 ガルまで変化させた時の天端の沈下量の比較を行った。結果を図-5 に示す。天端の沈下量は、入力最大加速度 50 ガルでも SD 法と比べると両大変形解析の方が 4 割程度小さい。SD 法、非排水条件の天端の沈下量は、入力最大加速度 2000 ガルに上げても増加の傾向にある。SD 法、非排水条件の天端の沈下量を基準に各ケースの比較を行うと、SD 法、排水条件の結果は他のケースよりかなり大きな値となった。大変形解析 TL 法, UL 法は、非排水条件、排水条件とも SD 法、非排水条件より小さく入力加速度の増加に対して 3m 程度に漸近する結果になった。全体において TL 法, UL 法の有意な差はない。大変形解析の非排水条件、排水条件の比較では、TL 法, UL 法とも排水条件の方が大きな値となった。

河川堤防の設計⁹⁾では、地震の液状化による盛土の天端の最大沈下量は、次式のように過去の地震被害より堤防高さの 75%が沈下しうる沈下量として計算される。

$$S_{d\max} = 0.75 \cdot H_d \quad \dots \dots (1)$$

ここに、 $S_{d\max}$ ：堤防の最大沈下量(m)， H_d ：堤防高さ(m)。本解析モデルの堤防高さは 6.3m なので(1)式による最大沈下量は 4.7m となる。図-5 において、入力最大加速度 2000 ガルを最大沈下量と見なせば SD 法の非排水条件、排水条件の両モデルは(1)式の最大沈下量 4.7m より大きくなる。一方、大変形解析法 TL 法, UL 法の非排水条件、排水条件の両モデルは(1)式以下となり実現現象を説明しうる値となった。

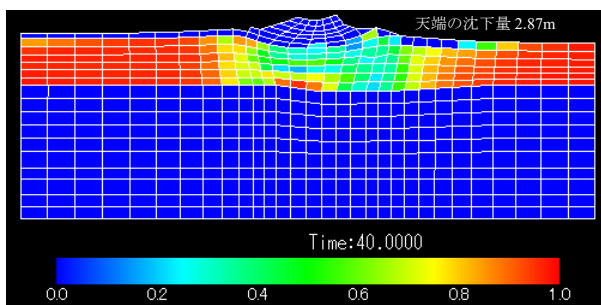
次に、水谷⁹⁾によるエネルギー原理に基づく手法により得られる盛土の沈下量との比較を行う。水谷の手法による本モデルにおける盛土の沈下量を表-2 に示す。図-5 において、SD 法の非排水条件、排水条件の両モデルは水谷の手法による沈下量 5.1m より大きくなる。一方、大変形解析法 TL 法, UL 法の非排水条件、排水条件の両モデルは水谷の手法以下となり実現現象を説明しうる値となった。

最後に、SD 法、大変形解析 TL 法, UL 法の 3 ケースについて排水条件で過剰間隙水圧比が消散するまでの解析を行った。消散過程の主な計算条件はレーレー減衰は $\alpha=0.0$, $\beta=0.2$ (動解の 100 倍)、 $\Delta t=0.1$ 秒である。天端の沈下量と図-1 中に示す液状化土層の過剰間隙水圧比の時刻歴を図-6 に示す。過剰間隙水圧比の消散過程の天端の沈下量は、若干隆起傾向にある。これはパラメータの見直しが必要と考えられる。過剰間隙水圧比が消散する過程で発生する天端の沈下量は 10cm 前後で動的解析時に生じる沈下量に比べてワンオーダー小さく微小変形で取り扱える範囲であることが分かった。SD 法と大変形解析 TL 法, UL 法の比較では、両大変形解析の方が消散速度が遅い傾向にあることが分かった。

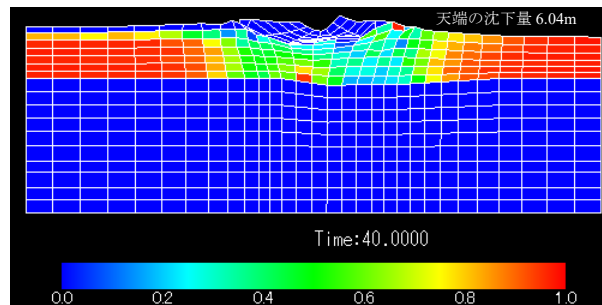
5. まとめ

本検討より、下記のことが分かった。

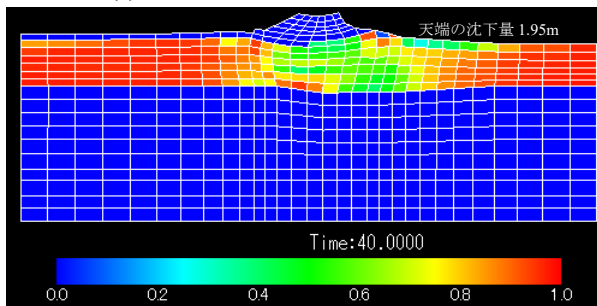
- ・入力加速度 50～2000 ガルの地震動の範囲において、天端の沈下量は微小変形解析より大変形解析の方が小さかった。
- ・大変形解析 TL 法, UL 法による天端の沈下量はほぼ同じであった。
- ・微小変形解析では、非排水条件、排水条件の違いによる天端の沈下量は後者の方が大きかった。
- ・大変形解析では非排水条件、排水条件の違いによる天端の沈下量は 1～2 割程度の差で排水条件の方が大きかった。
- ・河川堤防の設計による推定式、エネルギー原理に基づく手法による推定式より求めた天端の沈下量と本解析結果を比較した結果、SD 法の非排水条件、排水条件のモデルは両推定式による沈下量より大きくなる。一方、大変形解析法 TL 法, UL 法の非排水条件、排水条件の両モデルは両推定式による沈下量以下となり実現現象を説明しうる値となった。
- ・排水条件による間隙水圧の消散までを考慮した解析では、過剰間隙水圧比が消散する過程で発生する天端の沈下量は動的解析時に生じる沈下量に比べてワンオーダー小さく微小変形で取り扱える範囲であることが分かった。
- ・微小変形解析と大変形解析の比較では大変形解析 TL, UL の方が消散速度が遅い傾向があることが分かった。



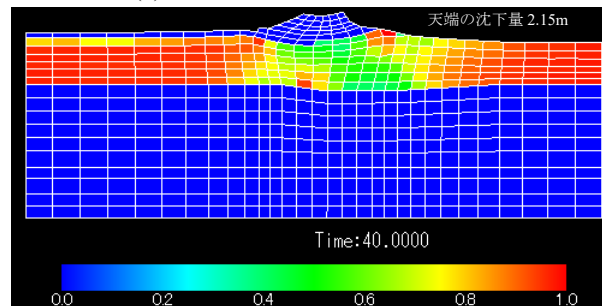
(a)微小変形解析 SD 法, 非排水条件



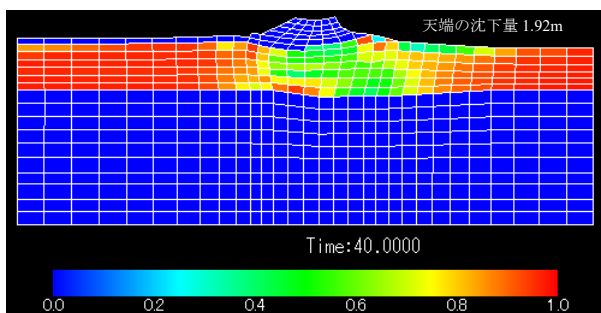
(b)微小変形解析 SD 法, 排水条件



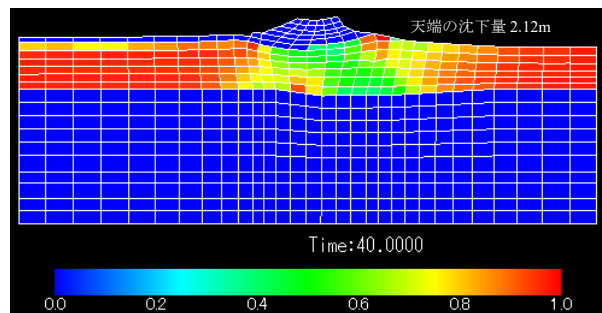
(c)大変形解析 TL 法, 非排水条件



(d)大変形解析 TL 法, 排水条件

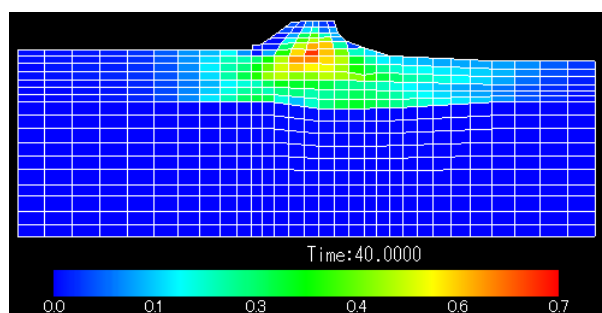


(e)大変形解析 UL 法, 非排水条件

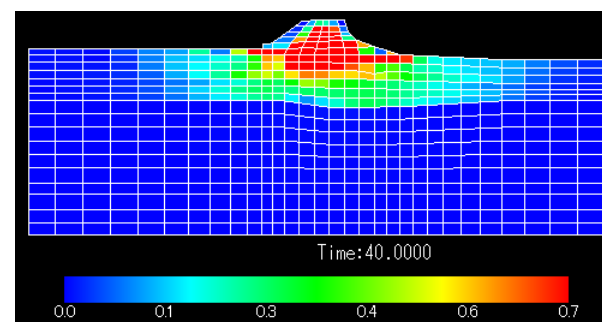


(f)大変形解析 UL 法, 排水条件

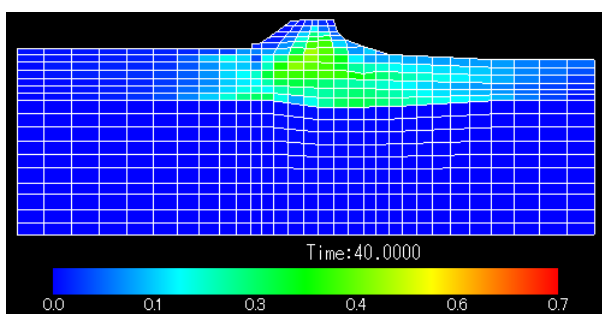
図-3 動的解析終了時の変形図と過剰間隙水圧比の分布図



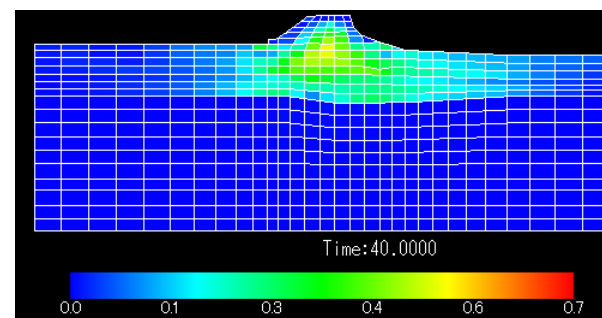
(a)微小変形解析 SD 法, 非排水条件



(b)微小変形解析 SD 法, 排水条件

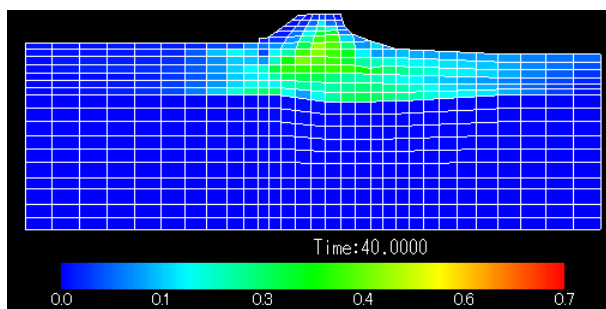


(c)大変形解析 TL 法, 非排水条件

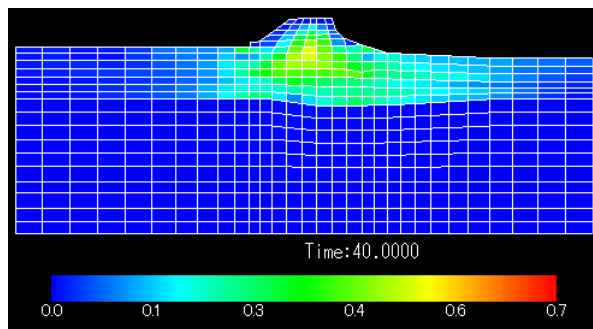


(d)大変形解析 TL 法, 排水条件

図-4 動的解析終了時の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ 分布図(その 1)



(e)大変形解析 UL 法, 非排水条件



(f)大変形解析 UL 法, 排水条件

図-4 動的解析終了時の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ 分布図 (その 2)

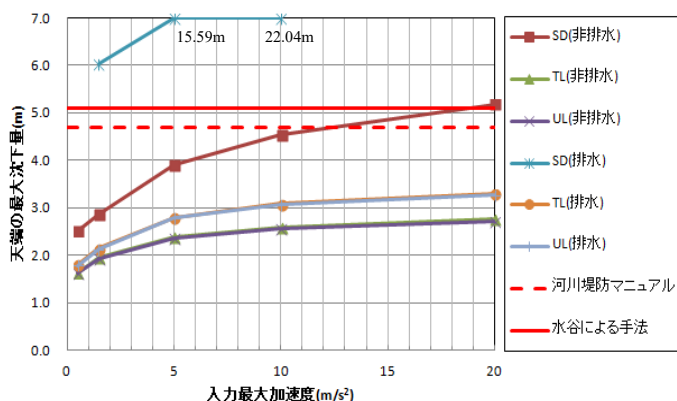
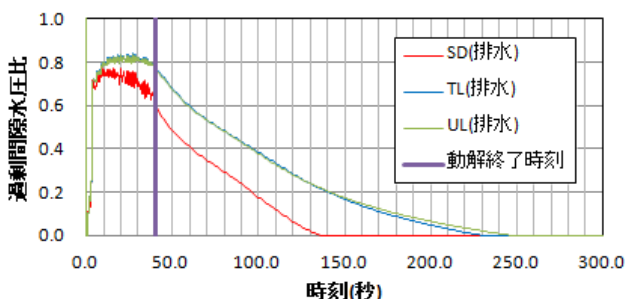


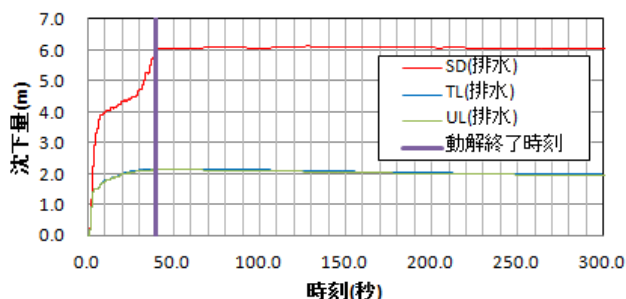
図-5 入力最大加速度を 50~2000 ガルまで変化させた時の天端の沈下量

表-2 水谷の手法による本モデルの盛土の沈下量

As2-1 層の層厚 H_1 (m)	5.5
As2-2 層の層厚 H_2 (m)	5.3
As2-1 層の飽和密度 ρ_1 (t/m ³)	1.85
As2-2 層の飽和密度 ρ_2 (t/m ³)	1.80
液状化層の層厚 H_0 (m)= H_1+H_2	10.8
液状化層の飽和密度 ρ (t/m ³)= $(\rho_1 \cdot H_1 + \rho_2 \cdot H_2) / (H_1 + H_2)$	1.83
盛土の層厚(m)	6.30
盛土中心の盛土荷重 P_0 (kPa)	114.2
盛土の天端幅 $2N_1$ (m)	7.6
盛土の底面幅 $2N_2$ (m)	25.1
土層幅 $2L$ (m)	79.9
盛土の沈下量 δH_1 (m)= $P_0 / (\rho \cdot g) \times (N_2 + N_1 - 2L) / (2L)$, $g=9.8$	5.1



(a)過剰間隙水圧比



(b)天端の沈下量

図-6 過剰間隙水圧比の消散と天端の沈下量

今後は、さらに多くの被災事例モデルを用いた解析を行い大変形解析の妥当性の検討を行っていく予定である。

謝辞：本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献：1) Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013. 2) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究, 京都大学博士論文,2010. 3) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会(地盤工学会、土木学会、日本機械学会、日本建築学会、日本地震学会)：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 港湾・海岸構造物 河川・砂防関係施設 1995 年兵庫県南部地震で被災した河川堤防の解析検証事例,第 26 回地震工学研究発表会講演論文集,2001 年 8 月 3) 芋野智成, 井合進,納見昭広,小堤治：砂質土の定常状態を考慮した河川堤防の被災事例解析(その 1),平成 20 年,第 43 回地盤工学研究発表会,平成 20 年. 4)第 2 期 FLIP 研究会高度利用技術の研究：FLIP の解析における解析精度向上に関する検討,成果報告,平成 16 年 6 月 7 日. 5) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川堤防の耐震点検マニュアル,平成 28 年 3 月,P7. 6)水谷崇亮：液状化に起因する盛土基礎の側方流動の矢板による低減,東京大学博士論文,2000 年 2 月

4-5 防波堤を対象とした検討(1)

有効応力解析, 大変形解析, 防波堤

(株)日本港湾コンサルタント ○宇野勝哉, 柴田大介
パシフィックコンサルタンツ(株) 芋野智成, 大澤史崇
(株)オリエンタルコンサルタンツ 平栗昌明, 久木留貴裕

1. はじめに

防波堤は, 水平変位が卓越する岸壁などに比べ, 加振による基礎地盤の変形に伴う鉛直変位が支配的となるため, ポテンシャルエネルギーの変化に伴う影響(例えば堤体の沈下に伴う基礎地盤の応力軽減など)が大きくなり, 対象断面(変形状態)によっては, 微小変形解析の適用が難しくなる(工学上無視できないような誤差が生じる)場合が考えられる。

そこで, 本検討では, 鉛直変位が卓越する防波堤を対象に, 微小変形解析の適用性を確認するとともに, 大変形解析 (FLIP TULIP)^{1),2)}の適用が望ましい局面(変形状態など)を模索することを目的としている。

2. 解析条件

神戸港第 7 防波堤を基本断面とし, 堤体形状(幅及び高さ), 地盤強度及び加速度レベルの 3 つをパラメータとし, 微小変形解析と大変形解析の両者を実施することで, 堤体沈下量などに着眼した変形状態の差異を確認した。なお, 大変形解析については, Total Lagrangian 法(以下, 「TL 法」)と Updated Lagrangian 法(以下, 「UL 法」)の 2 手法を用いた。

(1)解析モデル

図-1 に解析メッシュ図(基本断面)を示す。液状化層である置換砂の地盤パラメータは, 表-1 に示すように, 簡易設定法の再訂版を用いて 5 種類(液状化強度 $RL_{20}=0.10\sim0.30$)用意した。入力地震動は, 1995 年兵庫県南部地震の際の観測波形(G.L-32m, NS 成分及び UD 成分, E+F 波)をもとに, 最大加速度を 0.25~1.0 倍に補正した波形を使用した(図-2)。

(2)その他条件

構成則は tmp7 法, 数値積分法は改良型非線形反復法を用い, レーレー減衰は $\beta=0.002$ を適用した。また, 側方境界は粘性境界条件, 底面境界は固定境界条件とした。なお, 解析に使用した FLIP TULIP の Version は 6.4.3 である。

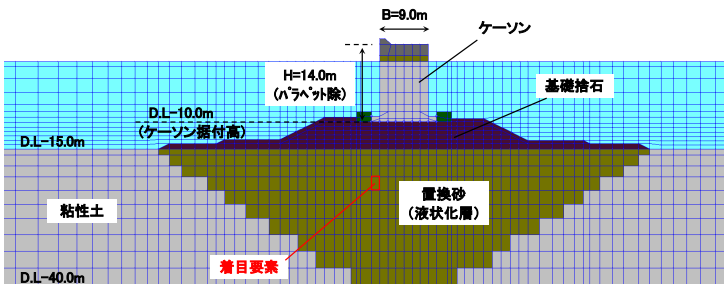


図-1 解析メッシュ図(基本断面)

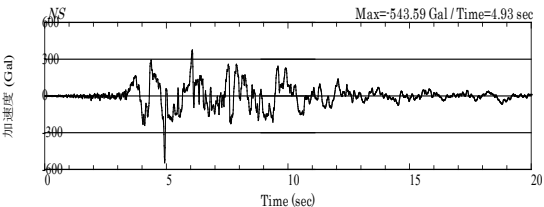


図-2 入力地震動(観測波形, NS 成分)

表-1 地盤の解析パラメータ(マルチスプリングモデル)

土層区分	湿潤・飽和密度 ρ_s (t/m^3)	基準有効拘束圧 σ_{m1} (kPa)	初期せん断剛性 G_{m1} (kPa)	体積弾性係数 K_{m1} (kPa)	ポアソン比 ν	間隙率 n	最大減衰 h_{max}	粘着力 C (kPa)	せん断抵抗角 ϕ_i (°)	変相角 ϕ_p (°)	液状化パラメータ						備考
											S1	w1	p1	p2	c1	Sus (kPa)	
粘性土	1.70	143.0	74970	195500	0.33	0.450	0.21	0.0	30.00	—	—	—	—	—	—	—	
置換砂	2.05	73.5	12626	32927	0.33	0.533	0.24	0.0	30.62	28	0.005	4.183	0.5	0.258	1.924	15.82	$RL_{20}=0.10$ 相当
	2.05	73.5	50505	131710	0.33	0.490	0.24	0.0	35.10	28	0.005	2.317	0.5	0.487	2.398	17.85	$RL_{20}=0.15$ 相当
	2.05	73.5	62451	162862	0.33	0.477	0.24	0.0	36.49	28	0.005	2.231	0.5	0.503	2.774	18.47	$RL_{20}=0.20$ 相当
	2.05	73.5	73344	191269	0.33	0.465	0.24	0.0	37.79	28	0.005	2.574	0.5	0.502	3.337	19.02	$RL_{20}=0.25$ 相当
	2.05	73.5	80172	209076	0.33	0.458	0.24	0.0	38.61	28	0.005	3.041	0.5	0.495	3.883	19.37	$RL_{20}=0.30$ 相当
基礎捨石	2.00	98.0	180000	469000	0.33	0.450	0.24	19.6	35.00	—	—	—	—	—	—	—	

3. 変形量(堤体沈下量)に着眼した検証

前述した各種条件(堤体形状, 地盤強度, 加速度レベル)をパラメータとし, 微小変形解析と大変形解析の両者を実施することで, 堤体沈下量に着眼した変形状態の差異を確認した。解析を実施したケースは表-2 の通りである。

まず, シリーズ 1 として, 堤体幅の相違(堤体高さは固定)による解析結果を図-3 に示す。両解析手法を比較したところ, 全てのケースにおいて, 微小変形解析に比べ, 大変形解析の方が得られる沈下量が小さくなることが確認される。また, 微小変形解析による沈下量が防波堤の壁高($H=14\text{m}$)の 1.5 割程度(約 2m)を超えて発生するケースから, 両者に 5 割程度の大きな差異が確認されるようになり, 微小変形解析の沈下量が大きくなる程, その差異は顕著に現れている。

次に、堤体形状として、堤体高さの相違(シリーズ 2)も含めた解析結果を図-4 に示す。なお、シリーズ 1 において得られた傾向(壁高に対する割合)を検証するため、各ケースにおいて得られた天端沈下量を壁高で除すことにより、壁高に着眼した整理を行った。その結果、シリーズ 1 と同様に、微小変形解析における沈下量が一定値(防波堤の壁高の 2 割程度)を超えて発生した場合、両者に 5 割以上の顕著な差が確認されるようになった。なお、解析を実施した全てのケースにおいて、大変形解析の TL 法と UL 法には有意な差は確認されなかった。

表-2 解析ケース一覧

ケース	堤体形状			地震動 (加速度 レベル)	液化化 強度 RL ₂₀
	堤体高 H (m)	堤体幅 W (m)	W/H		
1-1	14.0	3.0	0.2	>0.25, >0.5, >1.0	0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30
1-2	14.0	5.0	0.4		
1-3	14.0	9.0	0.6		
1-4	14.0	14.0	1.0		
1-5	14.0	20.0	1.4		
2-1	11.0	3.0	0.3	>0.25, >0.5, >1.0	0.25
2-2	17.0	3.0	0.2		
2-3	11.0	5.0	0.5		
2-4	17.0	5.0	0.3		
2-5	20.0	5.0	0.3		
2-6	11.0	9.0	0.8		
2-7	17.0	9.0	0.5		
2-8	20.0	9.0	0.5		
2-9	11.0	14.0	1.3		
2-10	17.0	14.0	0.8		
2-11	20.0	14.0	0.7		
2-12	11.0	20.0	1.8		
2-13	17.0	20.0	1.2		
2-14	20.0	20.0	1.0		

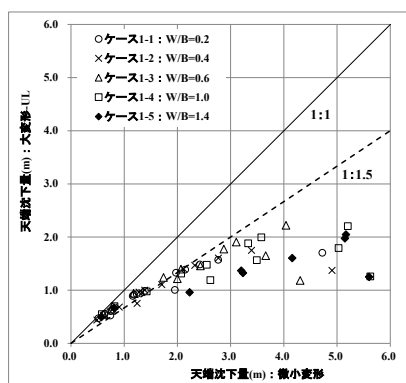


図-3 天端沈下量(シリーズ 1)

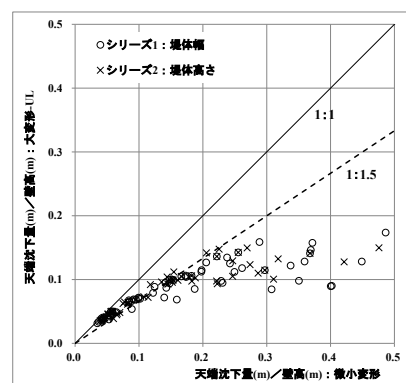


図-4 天端沈下量と壁高の関係

4. 要素レベルに着眼した検証

続いて、両解析手法において差異が生じる変形状態の確認として、要素レベルに着眼した検証を試みる。図-5 に、代表ケースにおける残留変形図及びせん断ひずみ分布図を示すとともに、置換砂の一要素(堤体直下；海側)における軸差ひずみと天端沈下量(鉛直変位)の関係(時刻歴図)を整理した。

両解析手法ともに、置換砂のせん断ひずみの進展状況に応じて、発生沈下量が大きくなることが確認される。なお、この傾向は、その他全てのケースにおいても同様に確認された。また、軸差せん断の影響が大きい置換砂の要素に着眼すると、軸差ひずみが 10%程度へ到達するまでは、両解析手法ともに同様の挙動(変形状態)を示しているが、10%程度を超えた以降、ひずみの進展状況に顕著な差が生じ、変形量へ与える影響も大きくなってくることが確認される。

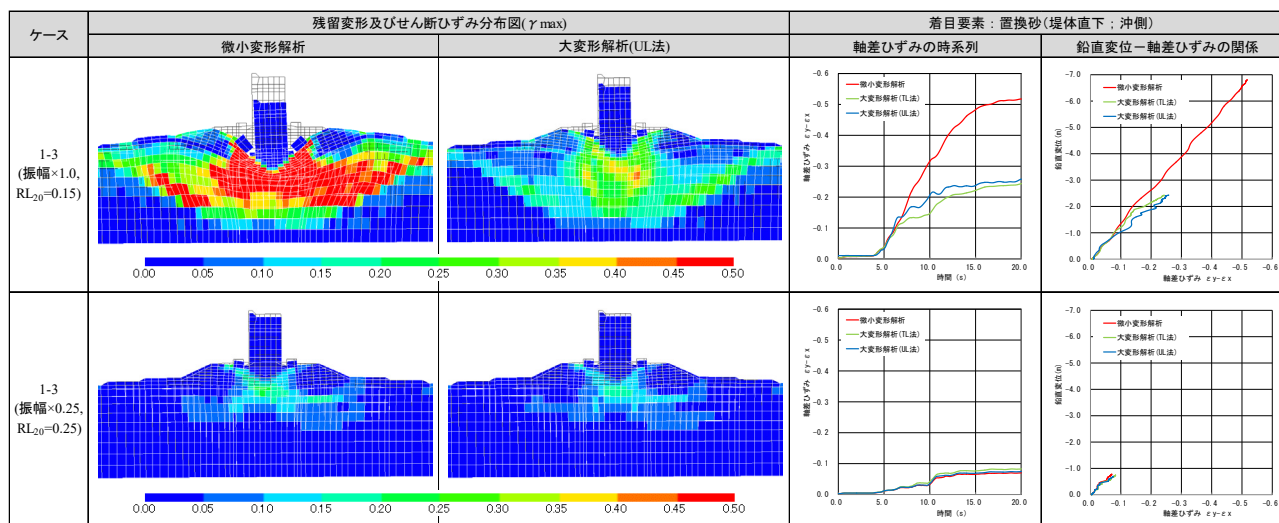


図-5 残留変形及びせん断ひずみ分布，発生沈下量と軸差ひずみ(置換砂)との関係

5. まとめ

防波堤を対象とした変形照査において、堤体形状によらず、微小変形解析にて壁高の 2 割を超える沈下量が発生した場合、また、変形に支配的となる直下地盤(置換砂)において、軸差ひずみが 10%程度の到達を境に、大変形解析による結果に対し顕著な差異が生じる可能性が高く、解析手法の選定には留意が必要となることが確認された。今後は、変形モードが異なる構造(例えば消波被覆堤)や、異なった液化化層の性状による影響なども考慮した検討が必要と考える。

謝辞：本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献：1) Iai, S., Ueda, K., Tobita, T. and Ozutsumi, O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013. 2) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究，京都大学博士論文，2010 年 3 月。

4-6 防波堤を対象とした検討(2)

有効応力解析, 大変形解析, 防波堤

(株)オリエンタルコンサルタンツ ○平栗昌明, 久木留貴裕
(株)日本港湾コンサルタント 宇野勝哉, 柴田大介
パシフィックコンサルタンツ(株) 芋野智成, 大澤史崇

1. はじめに

神戸港第7防波堤を対象とした変形照査において, 堤体形状によらず, 微小変形解析にて壁高の2割を超える沈下量が発生した場合, また, 変形に支配的となる直下地盤(置換砂)において, 軸差ひずみが10%程度の到達を境に, 大変形解析による結果に対し顕著な差異が生じる可能性が高く, 解析手法の選定には留意が必要となることを確認した。

本検討では, 変形モードが異なる構造として上部斜面堤¹⁾を対象構造物とし, 微小変形解析の適用性を確認するとともに, 大変形解析(FLIP TULIP^{2),3)}の適用が望ましい局面(変形状態など)を模索することを目的としている。

2. 解析条件

上部傾斜堤¹⁾を基本断面とし, 地盤強度, 加速度レベル, 液状化層厚の3つをパラメータとし, 微小変形解析と大変形解析の両者の結果を比較することで, 堤体沈下量などに着眼した変形状態の差異を確認した。なお, 大変形解析については, Total Lagrangian 法(以下, 「TL 法」)と Updated Lagrangian 法(以下, 「UL 法」)の2手法を用いた。

(1)解析モデル

図-1 に解析メッシュ(基本断面)を示す。表-1 に地盤の解析パラメータを示す。ここで, 液状化層である砂質土層の地盤パラメータは, 簡易設定法の再訂版を用いて5種類(液状化強度 $RL_{20}=0.10\sim0.30$)用意した。入力地震動は, 1995年兵庫県南部地震の際の観測波形(G.L-32m, NS成分及びUD成分, E+F波)と, 同波形を0.2倍に振幅調整した波形を使用した(図-2)。また, 液状化後の変形量による違いを把握するため, 液状化層の層厚を変化(1.4m, 3m, 7.5m, 16m)させた。

(2)その他条件

構成則は tmp7 法, 数値積分法は改良型非線形反復法を用い, レーレー減衰は $\beta=0.002$ を適用した。また, 側方境界は粘性境界条件, 底面境界は固定境界条件とした。なお, 解析に使用した FLIP TULIP の Version は 6.4.3 である。

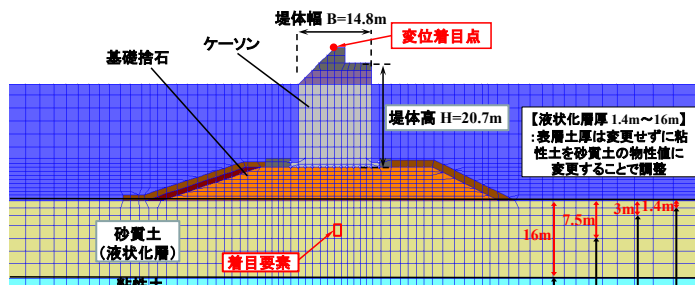


図-1 解析メッシュ(基本断面)

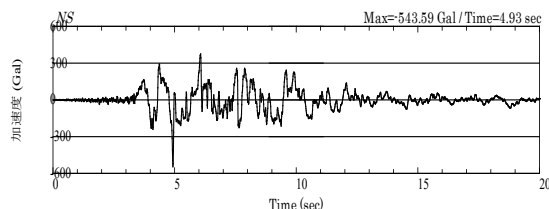


図-2 入力地震動(観測波形, NS 成分)

表-1 地盤の解析パラメータ(マルチスプリングモデル)

土層区分	湿潤・飽和密度	基準有効拘束圧	初期せん断剛性	体積弾性係数	ポアソン比	間隙率	最大減衰	粘着力	せん断抵抗角	変相角	液状化パラメータ						備考
	ρ_t (t/m^3)	σ_{vm}' (kPa)	G_{max} (kPa)	K_{ma}	ν	n	b_{max}	C (kPa)	ϕ' (°)	ϕp (°)	S1	w1	p1	p2	c1	Sus (kPa)	
粘性土	1.70	143.0	74,970	195,500	0.33	0.450	0.21	0	30.00	-	-	-	-	-	-	-	
	2.05	73.5	12,626	32,927	0.33	0.533	0.24	0	30.62	28	0.005	4.183	0.5	0.258	1.924	15.82	
砂質土 (液状化層)	2.05	73.5	50,505	131,710	0.33	0.490	0.24	0	35.10	28	0.005	2.317	0.5	0.487	2.398	17.85	
	2.05	73.5	62,451	162,862	0.33	0.477	0.24	0	36.49	28	0.005	2.231	0.5	0.503	2.774	18.47	
	2.05	73.5	73,344	191,269	0.33	0.465	0.24	0	37.79	28	0.005	2.574	0.5	0.502	3.337	19.02	
	2.05	73.5	80,172	209,076	0.33	0.458	0.24	0	38.61	28	0.005	3.041	0.5	0.495	3.883	19.37	
基礎礫石	2.00	98.0	180,000	469,000	0.33	0.450	0.24	19.6	35.00	-	-	-	-	-	-	-	

3. 変形量(堤体沈下量)に着眼した検証

前述した各種条件(地盤強度, 加速度レベル, 液状化層厚)をパラメータとし, 微小変形解析と大変形解析の両者の結果を比較することで, 堤体沈下量に着眼した変形状態の差異を確認した。表-2 に解析ケースを示す。

まず, シリーズ1として, 地盤強度の相違による解析結果を図-3に示す。両解析結果を比較したところ, 全てのケースにおいて, 微小変形解析に比べ, 大変形解析の方が得られる沈下量が小さくなることを確認した。また, 微小変形解析による沈下量が約1.5mを超えて発生するケースから, 両者に5割程度の大きな差異が確認されるようになり, 微小変形解析の沈下量が大きくなる程, その差異は顕著に現れている。

次に、液状化層の厚さの相違（シリーズ 2）による解析結果を図-4 に示す。シリーズ 2 においても、シリーズ 1 と同様に、微小変形解析における沈下量が 1.5m 程度を超えて発生した場合、両者に 5 割以上の顕著な差が確認されるようになることを確認した。ただし、神戸港第 7 防波堤を対象とした検討とは異なり、壁高の 2 割程度との整理はできなかった。これは、図-5 の残留変形図に示す通り、上部斜面堤では回転モードの変形も生じるためと考えられる。このため、回転モードの生じる断面では、壁高の 2 割以下となるため注意が必要である。なお、解析を実施した全てのケースにおいて、大変形解析の TL 法と UL 法には有意な差はなかった。

表-2 解析ケース一覧

ケース	解析条件		
	液状化強度 RL ₂₀	地震動 (加速度レベル)	液状化層厚 (m)
1-1,1'-1'	0.10	×1.0, ×0.2	16
2-1,2'-1'	0.15		
3-1,3'-1'	0.20		
4-1,4'-1'	0.25		
5-1,5'-1'	0.30		
5-2	0.30	×1.0	7.5
5-3			3
5-4			1.4

※ケース名'は地震動×0.2のケース

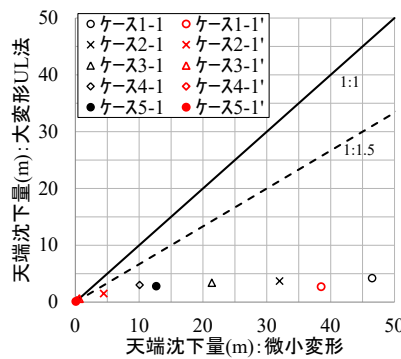


図-3 天端沈下量（シリーズ 1）

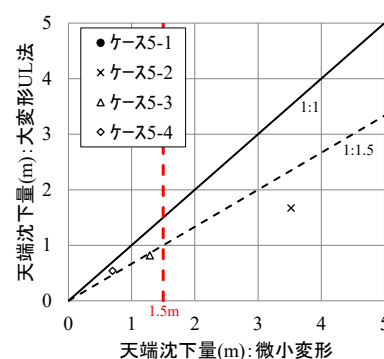


図-4 天端沈下量（シリーズ 2）

4. 要素レベルに着眼した検証

両解析手法において差異が生じる変形状態の確認として、要素レベルに着眼した検証を行った。図-5 に、代表ケースにおける残留変形図及びせん断ひずみ分布図を示すとともに、砂質土層の一要素（堤体直下；中央部）における軸差ひずみと天端沈下量（鉛直変位）の関係（時刻歴図）を整理した。

両解析手法ともに、砂質土層のせん断ひずみの進展状況に応じて、発生沈下量が大きくなることが確認された。なお、この傾向は、その他全てのケースにおいても同様に確認した。また、軸差せん断の影響が大きい砂質土層の要素に着眼すると、軸差ひずみが 10%程度へ到達するまでは、両解析手法ともに同様の挙動（変形状態）を示しているが、10%程度を超えた以降、ひずみの進展状況に顕著な差が生じ、変形量へ与える影響も大きくなることがわかった。

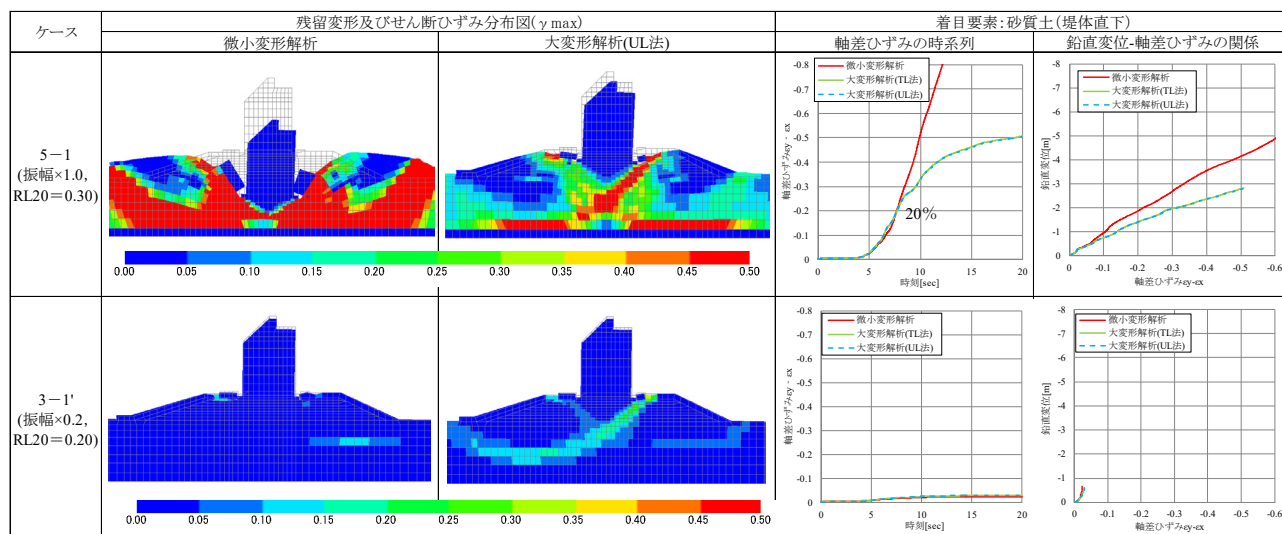


図-5 残留変形及びせん断ひずみ分布，発生沈下量と軸差ひずみ（砂質土）の関係

5. まとめ

- (1) 上部傾斜堤のような、回転モードによる変形が考えられる場合には、微小変形解析における沈下量が壁高の 2 割程度以下であっても、微小変形解析と大変形解析で沈下量に顕著な差が生じたため、注意が必要である。
- (2) 変形に支配的となる直下地盤(砂質土層)において、軸差ひずみが 5～10%程度の到達を境に、大変形解析による結果に対し顕著な差異が生じる可能性が高く、解析手法の選定には留意が必要となることを確認した。さらに、この傾向は神戸港第 7 防波堤の結果と同等であることを確認した。

謝辞：本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献：1) (財) 沿岸技術センター：港湾構造物設計事例集 pp5-1 - 5-3, 2007 年 3 月。 2) Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013. 3) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究，京都大学博士論文，2010 年 3 月。

4-7 重力式岸壁を対象とした検討(1)

有効応力解析, 大変形解析, 重力式岸壁

(株)ニュージェック ○戎 健次
栗原 直範
五洋建設(株) 井瀬 肇
応用地質(株) 藤井 紀之
東亜建設工業(株) 住谷 圭一

1. 目的

RF3 岸壁を基本断面として, 加速度レベルが異なる地震動に対して大変形解析と微小変形解析の比較検討を実施し, 微小変形解析の適用範囲, 及び大変形解析の有効性について検証を行うことを目的としている。

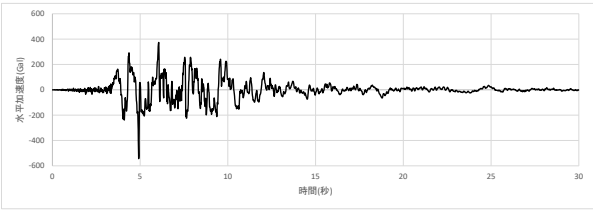
2. 解析モデル

まず, 平成 21 年度 FLIP 研究会 SteadyStateWG¹⁾において検証された各種解析パラメタを参考に, 置換砂の液状化強度 RL₂₀ を 3 つに設定した物性値(表-1)を用いて, 微小変形(以下 SD), 大変形(Total Lagrangian 法(以下 TL), Updated Lagrangian 法(以下 UL))の計 3 手法により変形量の比較を行った。入力動として用いた地震動は水平, 鉛直とも PI 波の観測波形(E+F 成分)(速度 PSI 値=83.89cm/s^{1/2})を 0.1~10.0 倍まで加速度補正したものを用いた(図-1)。

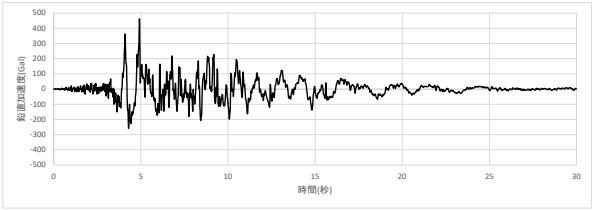
解析モデルは RF3 岸壁の断面(図-2)を基本として, 表-2 に示す計 15 ケースを対象とした。なお, 側方境界は粘性境界条件, 底面境界は固定境界条件としてモデル化を行った。また, 側方粘性境界の影響を考慮して陸側は岸壁法線から 100m の離隔距離を設定している。TULIP のバージョンは 6.4.3 を用いた。解析ケース数は SD, UL, TL とともに 18 波形×15 断面(270 ケース)である。

表-1 解析に用いた地盤パラメタ

土層名	湿潤・飽和密度 ρ _t (t/m ³)	間隙率 n	初期せん断剛性 G _{ma} (kPa)	体積弾性係数 K _{na} (kPa)	基準拘束圧 σ _{ma} ' (kPa)	ポアソン比 ν	拘束圧依存 mG _{mk}	内部摩擦角 φ _f (°)	粘着力 c (kPa)	履歴減衰 上限値 h _{max}	変相角 φ _p (°)	S1	w1	p1	c1	備考
埋立土(水位上)	1.8	0.45	79380	207000	63	0.33	0.5	36	0	0.3	—	—	—	—	—	
埋立土	2.0	0.45	79380	207000	63	0.33	0.5	36	0	0.3	28	6	0.5	0.8	2.43	
置換砂	2.0	0.512	26264	68492	48.75	0.33	0.5	32.74	0	0.3	28	3.192	0.5	0.406	2.051	RL ₂₀ =0.15相当
		0.482	50505	131710				35.96				2.214	0.5	0.499	2.61	RL ₂₀ =0.20相当
		0.454	73344	191269				39.09				3.408	0.5	0.488	4.307	RL ₂₀ =0.25相当
粘性土	1.7	0.45	74970	195500	143	0.33	0.5	30	0	0.3	—	—	—	—	—	
基礎捨石・裏込石・置土	2.0	0.45	180000	469000	98	0.33	0.5	40	0	0.3	—	—	—	—	—	



(1) 水平成分



(2) 鉛直成分

図-1 入力地震動時刻歴(PI 観測波形)

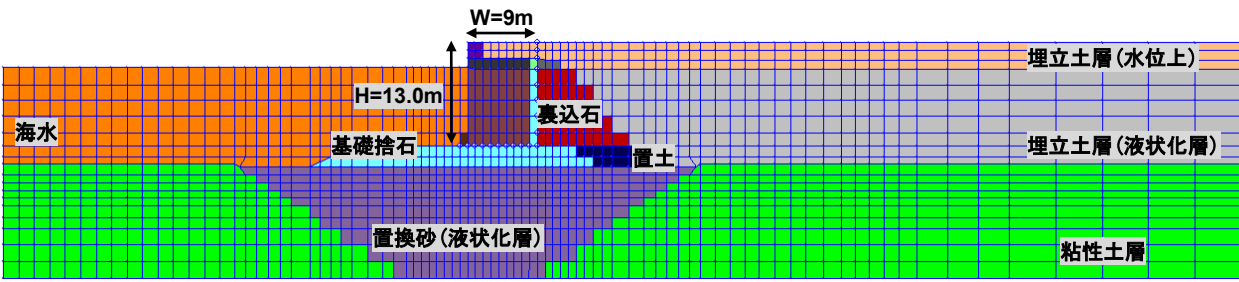


図-2 解析モデル(表-2 内のケース 1~3)

Case study on large deformation analysis Kenji Ebisu(NEWJEC Inc.) Naonori Kuwabara(NEWJEC Inc.)
of gravity-type quay (1) Hajime Ise(Penta-Ocean Construction Co.,Ltd) Noriyuki Fujii(OYO CORPORATION)
Keiichi Sumiya(TOA CORPORATION)

3. 解析結果

図-3 及び図-4 に岸壁天端水平変形量，及び岸壁傾斜角比較を示す。この結果，大変形解析である TL，UL は水平変形量，傾斜角とも概ね同等の値となることが確認できた。したがって，いずれの手法を用いても同じ結果を得ることができるものと考えられる。ただし，TL は UL に比べて解析の安定性が悪く，加速度が大きいケースでは発散する傾向にあることが確認されている。一方，SD と UL を比較した場合，水平変形量で概ね 6m 程度，傾斜角で 3° 程度以上となると，異なる結果となる傾向にあることが確認できた。図-5 にケース 15 の加速度倍率 5 倍の入力地震動による変形図を示す。これを確認すると，SD はケーソン前趾下端の置換砂でせん断ひずみの進展が小さく転倒モードが卓越する傾向にあるのに対して，UL はケーソン前趾下端の置換砂でせん断ひずみが進展し，SD に比べて滑りモードが卓越する傾向にあることが確認できた。この結果から，加速度レベルが大きいケースでは，SD と大変形(UL，TL)では変形モードに違いが現われることが分る。

水平変形量は，転倒モード，滑りモードの両者を含めた変形量であるため，変形モードを評価する指標としては適切でない。したがって，変形モードに着目することを目的として傾斜角を用いた評価を試みる。

図-6 に，水平変形量(SD)と傾斜角の差分(SD-UL)絶対値の関係を示す。この結果，水平変形量(SD)が 2m 程度までは差分絶対値の平均値が 0.11(°)であり，傾斜角に大きな違いは現れないが，水平変形量が 2m を超えるケースでは差分絶対値の平均値が 1.10(°)となり，SD と UL の傾斜角のばらつきが大きくなることが確認された。

4. まとめ

RF3 岸壁を基本ケースとして，液状化強度，ケーソン形状を変更した，解析ケース計 15 断面を対象に，加速度レベルが異なる地震動に対する微小変形解析，大変形解析(UL・TL)の比較検討を実施した。この結果，加速度レベルが大きいケースでは，SD と大変形(UL・TL)で変形モードが異なる結果となることが確認できた。特に SD の水平変形量が 2m を超えるようなケースでは，変形モードが大きく異なる可能性が有るため，解析実施時には SD と大変形(UL・TL)のいずれの手法を採用するかを慎重に検討する必要がある。謝辞：本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。参考文献：1)FLIP 研究会 Steady State WG：平成 21 年度 成果報告書，平成 22 年 7 月 28 日，第四期 FLIP 研究会 Steady State 作業部会

表-2 解析ケース

ケース	ケーソン高さ H (m)	ケーソン幅さ W (m)	W/H	液状化強度 (R_{L20})
1	13.0	9.0	0.7	0.15
2				0.20
3				0.25
4		13.0	1.0	0.15
5				0.20
6				0.25
7	10.6 (水深-7.5m)	5.5	0.4	0.15
8				0.20
9				0.25
10		9.0	0.8	0.15
11				0.20
12				0.25
13	18.1 (水深-15m)	11.0	0.6	0.15
14				0.20
15				0.25

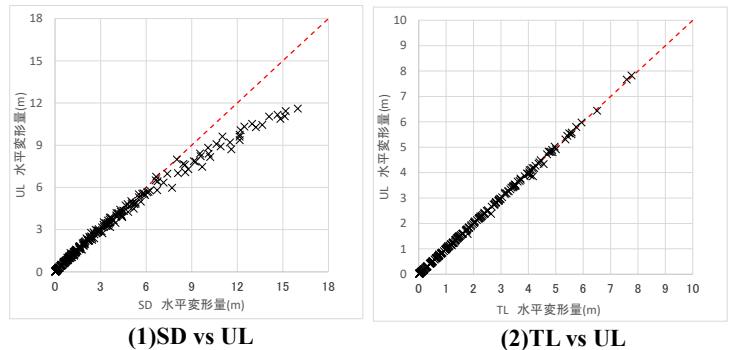


図-3 水平変形量比較

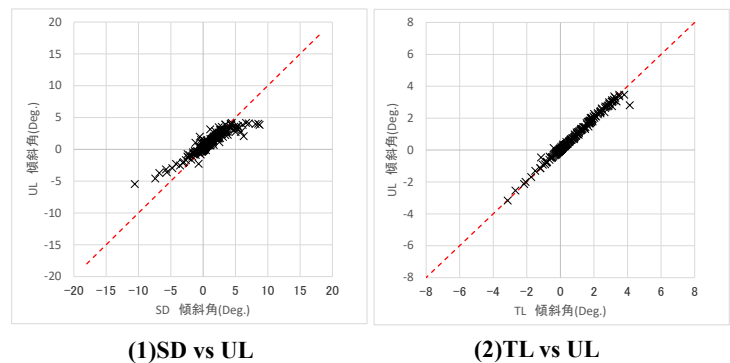


図-4 傾斜角比較

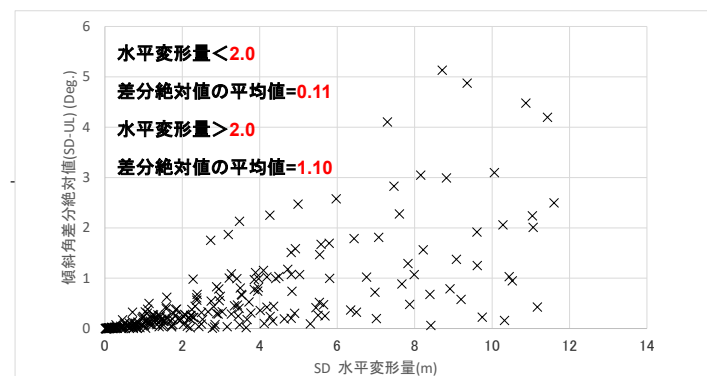


図-6 傾斜角差分絶対値

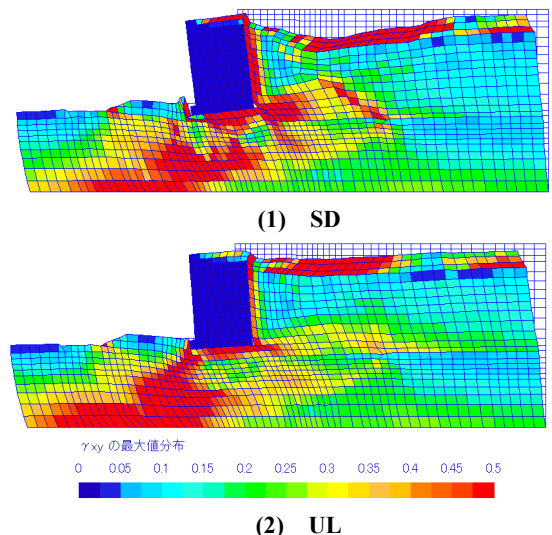


図-5 変形図(ケース 15)

4-8 重力式岸壁を対象とした検討(2)

有効応力解析, 大変形解析, 重力式岸壁

五洋建設(株) ○井瀬 肇
(株)ニュージェック 栗原 直範
戎 健次
応用地質(株) 藤井 紀之
東亜建設工業(株) 住谷 圭一

1. 目的

RF3 岸壁を基本断面として, 加速度レベルが異なる地震動に対して大変形解析と微小変形解析の比較検討を実施し, 微小変形解析の適用範囲, 及び大変形解析の有効性について検証を行うことを目的としている。

2. 解析モデル

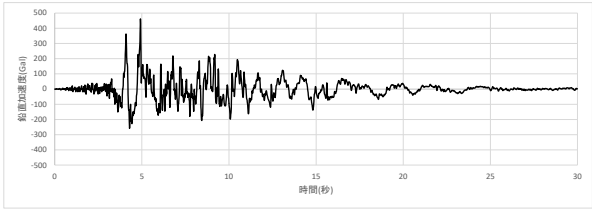
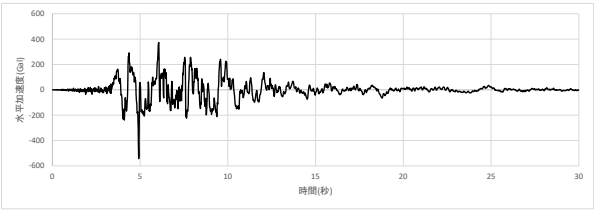
解析モデルは, 先に報告された **4-8 重力式岸壁を対象とした検討(1)**と同じである。以下に再掲する。

まず, 平成 21 年度 FLIP 研究会 SteadyStateWG¹⁾において検証された各種解析パラメタを参考に, 置換砂の液状化強度 RL_{20} を 3 つに設定した物性値(表-1)を用いて, 微小変形(以下 SD), 大変形(Total Lagrangian 法(以下 TL), Updated Lagrangian 法(以下 UL))の計 3 手法により変形量の比較を行った。入力動として用いた地震動は水平, 鉛直とも PI 波の観測波形(E+F 成分)(速度 PSI 値=83.89cm/s^{1/2}) (図-1)を 0.1~10.0 倍まで加速度補正したものを用い, 本報告では SD と TL,UL の差異が明確に現れる加速度補正 3 倍のケースを整理した。

解析モデルは神戸 RF3 岸壁の断面(図-2)を基本として, 表-2 に示す計 5 ケースを対象とした。なお, 側方境界は粘性境界条件, 底面境界は固定境界条件としてモデル化を行った。また, 側方粘性境界の影響を考慮して陸側は岸壁法線から 100m の離隔距離を設定している。TULIP のバージョンは 6.4.3 を用いた。

表-1 解析に用いた地盤パラメタ

土層名	湿潤・飽和密度 ρ_t (t/m ³)	間隙率 n	初期せん断剛性 G_{ma} (kPa)	体積弾性係数 K_{ma} (kPa)	基準拘束圧 σ'_{ma} (kPa)	ポアソン比 ν	拘束圧依存 mG_{mK}	内部摩擦角 ϕ^f (°)	粘着力 c (kPa)	履歴減衰 上限値 γ_{max}	変相角 ϕ_p (°)	S1	w1	p1	c1	備考
埋立土(水位上)	1.8	0.45	79380	207000	63	0.33	0.5	36	0	0.3	—	—	—	—	—	—
埋立土	2.0	0.45	79380	207000	63	0.33	0.5	36	0	0.3	28	6	0.5	0.8	2.43	—
置換砂	2.0	0.512	26264	68492	48.75	0.33	0.5	32.74	0	0.3	28	3.192	0.5	0.406	2.051	$RL_{20}=0.15$ 相当
		0.482	50505	131710				35.96				2.214	0.5	0.499	2.61	$RL_{20}=0.20$ 相当
		0.454	73344	191269				39.09				3.408	0.5	0.488	4.307	$RL_{20}=0.25$ 相当
粘性土	1.7	0.45	74970	195500	143	0.33	0.5	30	0	0.3	—	—	—	—	—	—
基礎捨石・裏込石・置土	2.0	0.45	180000	469000	98	0.33	0.5	40	0	0.3	—	—	—	—	—	—



(1) 水平成分

(2) 鉛直成分

図-1 入力地震動時刻歴(PI 観測波形)

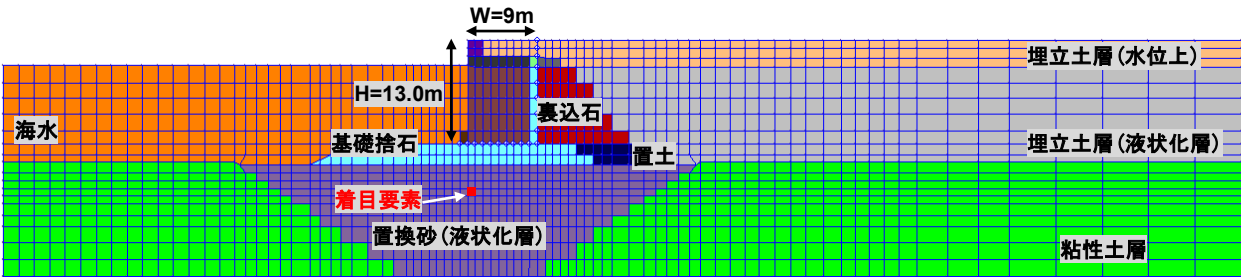


図-2 解析モデル(表-2 内のケース 1)

Case study on large deformation analysis
of gravity-type quay (2)

Hajime Ise(Penta-Ocean Construction Co., Ltd)
Naonori Kuwabara(NEWJEC Inc.) Kenji Ebisu(NEWJEC Inc.)
Noriyuki Fujii(OYO CORPORATION) Keiichi Sumiya(TOA CORPORATION)

3. 解析結果

図-3にケーソン下置換砂に注目した軸差ひずみ,せん断ひずみの残留値分布図を示す。この結果,ケーソン形状によらず UL に比べ SD の方がケーソン法線下端付近にて局所的なひずみが発生していることが確認できる。図-4に岸壁天端水平変形量,傾斜角,着目要素軸差ひずみ,及びせん断ひずみの時刻歴を示す。着目要素は,ケーソン法線下の深度 $W/2$ 程度の置換砂要素とした。この結果,SD と大変形 TL・UL では,水平変形量には大きな差がないにもかかわらず傾斜角に差が生じており,変形モードが異なることが確認できる。ここで,傾斜角に差異が発生するタイミングに注目すると,ケーソン形状によらず注目要素の軸差ひずみが 0.2,単純せん断ひずみが 0.3 に概ね達した時点であることが確認された。また,両手法ともに W/H が小さいケース 7, ケース 13 ではケーソンは前面側に傾斜し, W/H が大きいケース 4, ケース 10 では背面側に傾斜しているが,SD は UL に比べ背面側に傾斜する傾向があることがわかる。これは図-3 より,SD では UL に比べケーソン直下背面側のひずみが発生しやすいことがひとつの要因であると推察される。

表-2 解析ケース ($R_{L20}=0.15$)

ケース	ケーソン高さ H (m)	ケーソン幅 W (m)	W/H
1	13.3	9.0	0.68
4		13.3	1.00
7		5.5	0.41
10	10.6 (水深-7.5m)	9.0	0.85
13	18.1 (水深-15m)	11.0	0.61

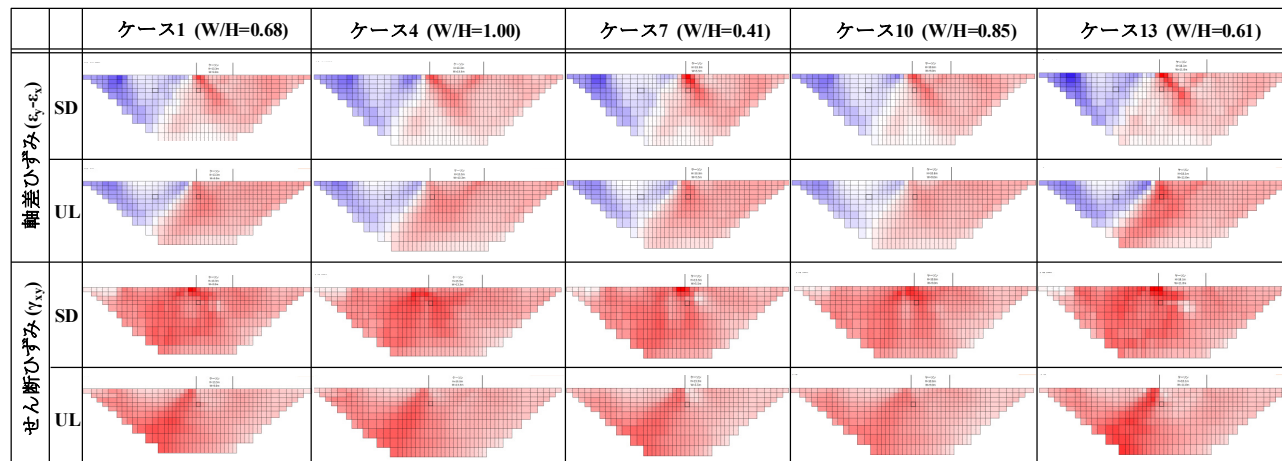


図-3 ケーソン下置換砂の軸差ひずみ ($\varepsilon_y - \varepsilon_x$), せん断ひずみ (γ_{xy}) 残留値分布

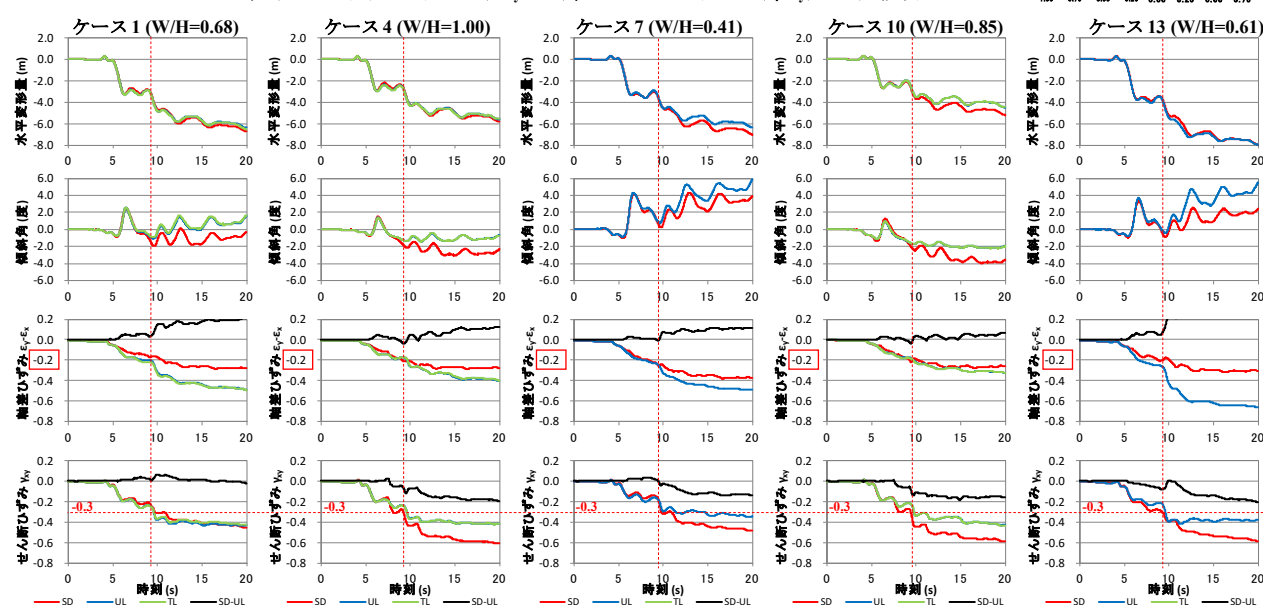


図-4 岸壁天端水平変形量,傾斜角,着目要素軸差ひずみ,せん断ひずみ 時刻歴比較 (傾斜角+:前面側)

4. まとめ

RF3 岸壁を基本ケースとして,ケーソン形状を変更した解析ケース計 5 断面を対象に,微小変形解析(SD),大変形解析(UL・TL)の比較検討を実施した。ケーソン下の置換砂に注目した結果,SD と大変形(UL・TL)でひずみ分布が異なり,変形モードが異なる結果となることが確認できた。特にケーソン法線直下地盤要素挙動に着目すると軸差ひずみが 0.2,単純せん断ひずみが 0.3 に概ね達した段階から SD と大変形(UL・TL)の要素挙動,全体挙動ともに差異が生じ始めることが確認できた。解析実施時には SD と大変形(UL・TL)のいずれの手法を採用するかを慎重に検討する必要がある。

謝辞: 本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献: 1)FLIP 研究会 Steady State WG:平成 21 年度 成果報告書,平成 22 年 7 月 28 日,第四期 FLIP 研究会 Steady State 作業部会

4-9 重力式岸壁を対象とした検討(3)

有効応力解析, 大変形解析, 重力式岸壁

応用地質(株) ○藤井 紀之
(株)ニュージェック 栗原 直範
戎 健次
五洋建設(株) 井瀬 肇
東亜建設工業(株) 住谷 圭一

1. はじめに

重力式岸壁に対する検討結果に対して, FLIP TULIP¹⁾²⁾の微小変形解析と大変形解析の相違が変形モードに及ぼす影響をケーソン形状に着目して考察を行った。

2. 検討ケース

本検討では, 4-8, 4-9 と同様に, 縦横比, 水深の相違によってケーソン形状を変化させた 5 モデルを対象とした(図-1 参照)。なお, 縦横比 W/H (W :幅, H :高さ)については, チャート式にて取り扱われている寸法を目安として, 0.4、0.6、0.7、0.8、1.0 の 5 パターン, 水深は実在する岸壁の水深を参考に, 7.5m, 10.0m(RF3 岸壁), 15.0m の 3 パターンである。

3. 解析結果

微小変形解析(以下 SD), 大変形解析(Total Lagrangian 法(以下 TL), Updated Lagrangian 法(以下 UL))の残留変形図(コンターは最大せん断ひずみ)を図-1 に示す。なお, 結果図は、置換砂の $R_L=0.15$, 入力地震動 PI 波 3.0 倍(速度 PSI 値 $=251.67\text{cm/s}^{1/2}$)に該当するケースを示した。

同図に示すとおり, いずれのケーソン形状に対しても, SD と TL, UL とで残留変形図に大きな差異は生じていない。ただし, ケース 1 に着目すると, SD ではケーソンが背後へ傾く傾向にあるのに対して, TL, UL では前面へ傾斜する傾向を示しており, 解析手法によって変形モードが異なることが考えられる。このため, 本検討では 4-8 で実施したケースのうち, ケーソン高さが同じであるケース 1~9 に対して, ケーソン形状に着目して解析結果の考察を行った。

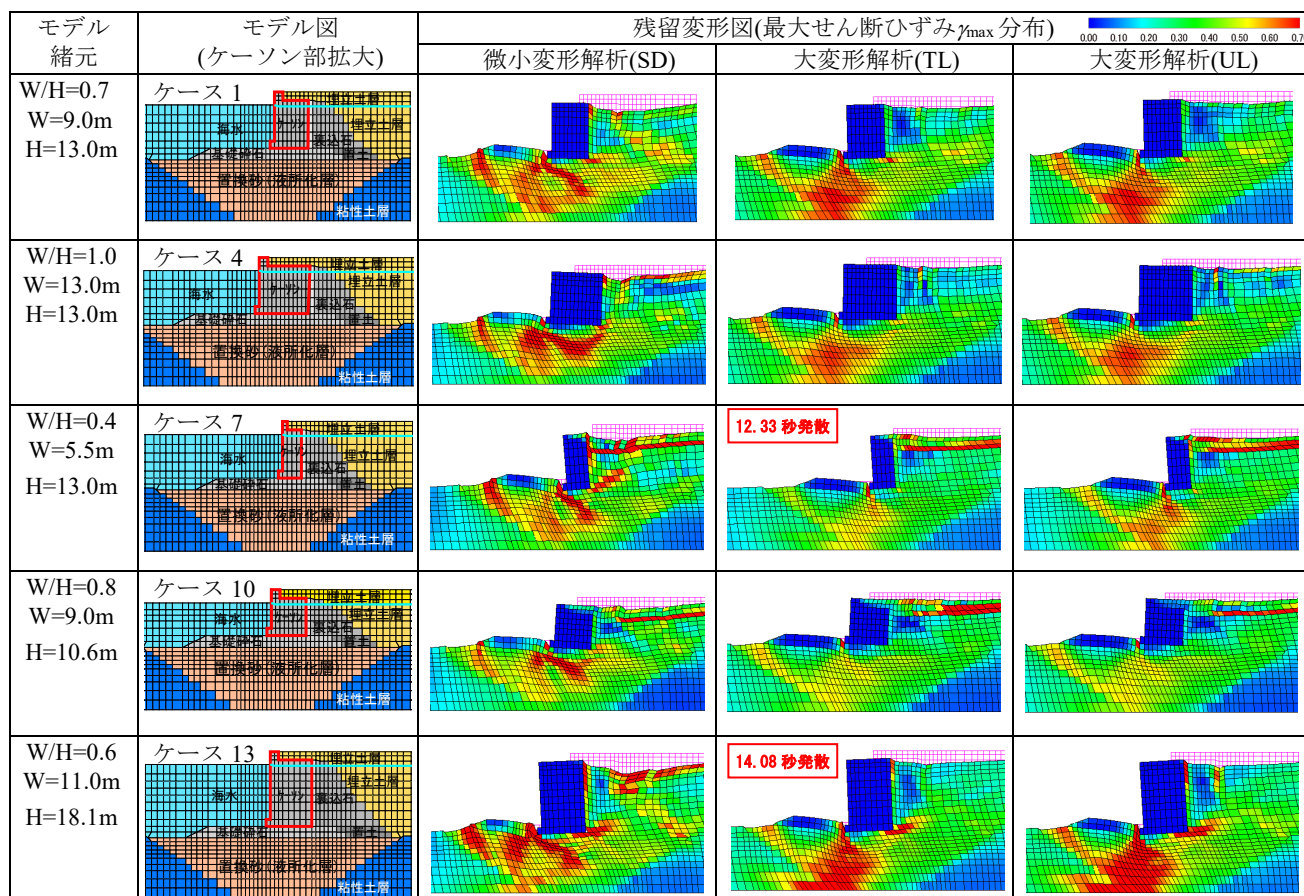


図-1 検討に用いたモデル図および解析結果(残留変形図 置換砂 $R_L=0.15$ 、加速度 3 倍)

Noriyuki Fujii(OYO CORPORATION)
Kenji Ebisu(NEWJEC Inc.) Naonori Kuwabara(NEWJEC Inc.)
Hajime Ise(Penta-Ocean Construction Co.,Ltd), Keiichi Sumiya(TOA CORPORATION)

4. 考察

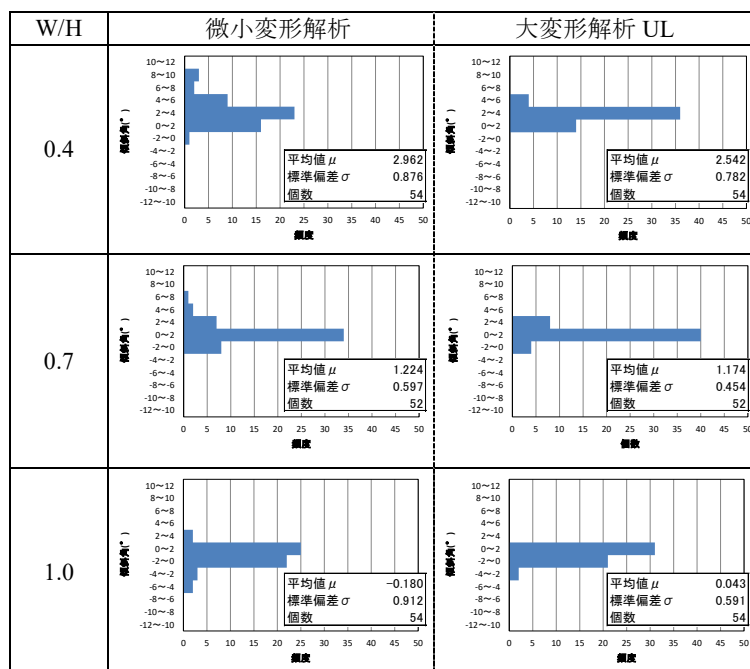
ケーソンの W/H ごとに、54 ケースの傾斜角の頻度分布図を整理して、図-2 に示す。同図には、ケーソン高さが同じモデルである W/H=0.4、W/H=0.7 および W/H=1.0 に対して、SD と UL の結果を示した。この結果より、W/H に関係なく SD と UL の傾斜角の平均値は大きくは変わらないものの、SD と比較して UL のほうが傾斜角のバラつきが少ないことが分かる。両手法による傾斜角のバラつき程度については、図-3 上段に示す W/H と傾斜角の関係からも確認できる。

ここで、図-3(下段)に示すとおり、入力地震動の PSI 値が大きくなるに従い、傾斜角差分(UL と SD の傾斜角の差分)の絶対値も大きくなる傾向を示し、PSI 値が $100\text{cm/s}^{1/2}$ を上回ると顕著となる。なお、図-4 に示すとおり、PSI 値= $100\text{cm/s}^{1/2}$ 程度は、W/H によらず水平変位が概ね 2m 発生する値であり、この結果は 4-7 の検討で示された結論と一致する。

以上より、ケーソン形状(W/H)にほとんど依存することなく、PSI 値= $100\text{cm/s}^{1/2}$ 程度(水平変位 2m 程度)を超えるケースについては、微小変形解析と大変形解析による傾斜角に有意な差異が生じる可能性があることから、解析手法の選定には留意する必要がある。

5. 今後の課題

本検討では、PSI 値を PI 波の 10 倍まで引き上げて液状化による極限の状態を想定した検討を行ったが、得られた結果の妥当性については検証できていない。一方で、ケーソン背後の地盤変位が微小変形解析と大変形解析とで大きく異なる傾向が見られた。このため、ケーソン式岸壁に対する FLIP TULIP の適用性や適用限界の更なる検討として、遠心载荷実験等によって液状化流動によるケーソン式岸壁の極限状態やケーソン背後地盤の挙動の把握と、その結果に対する検証等が考えられる。



※W/H=0.7 のケースは、2 ケースで発散

図-2 傾斜角の頻度分布図

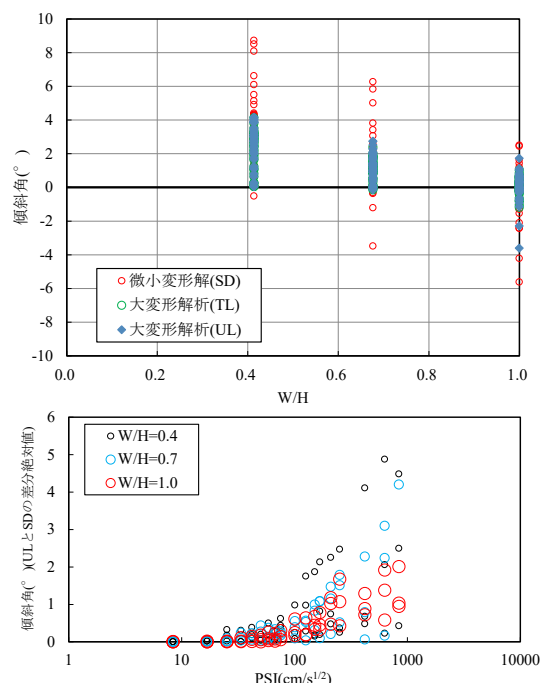


図-3 W/H と傾斜角(上段)、PSI 値と傾斜角差分絶対値(下段)の関係

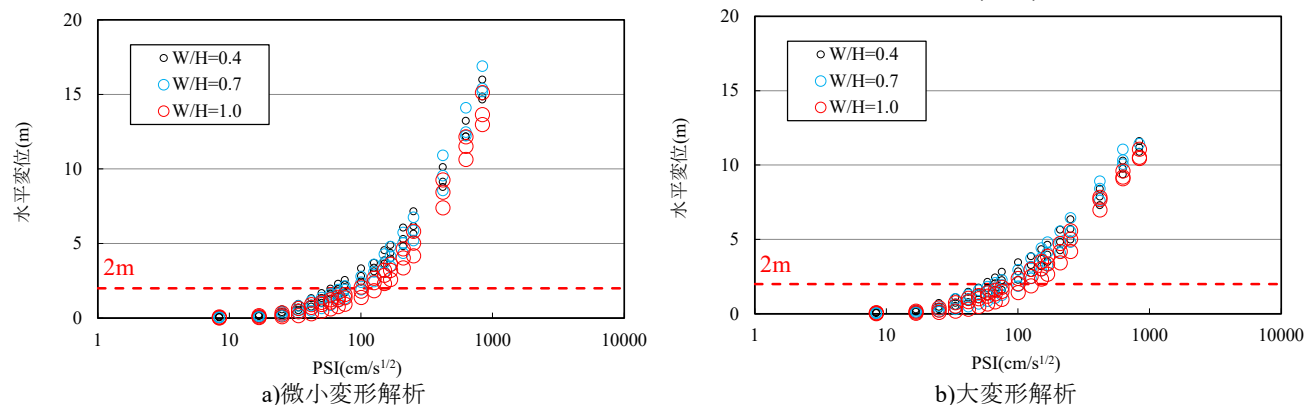


図-4 PSI 値と岸壁法線の水平変位の関係

参考文献：1) Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,Vol. 37(9),pp.1189-1212,2013. 2) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究,京都大学博士論文,2010.

4-10 浮上を対象とした検討(1) 円形断面

キーワード 埋設管, 浮上り, 液状化, 有効応力法, 大変形

パシフィックコンサルタンツ株式会社 ○佐藤 成

1. 検討目的

地中埋設管の浮上現象の事例として,平成15年に実施されたレベル2地震動を想定した大型振動台実験をとりあげる。FLIP 研究会では既に平成15年度¹⁾,平成17年度²⁾においてマルチスプリングモデルによる再現性の検討を行っている。本検討ではカクテルグラスモデルでの検討を含め,大変形理論を考慮した **FLIP TULIP^{3,4)} Ver6.4.3** の適用性について検証し,留意点の整理を行うものである。

2. 検討対象

大型振動台実験は,幅2.8m×高1.6m×奥行4mの剛土槽を6等分し,条件を変えたCASE1~CASE6の模型を作成して実施されており,当該検討はCASE1を対象とした(図-1)。地盤材料は十勝港の実物大浮上実験で用いた埋め戻し土(以下,浚渫砂)および実験フィールドの原地盤土を用いており,埋設物は,直径40cm,見かけ比重0.4程度の塩化ビニール管を使用している。模型地盤は,乾燥させた浚渫砂(原地盤土)を空中落下法により敷きならして締固め,その後,地表面まで浸潤して数日間放置した。なお,あらかじめ室内試験が実施されており,この結果を参照した。また,加振条件は5Hz,500galの正弦波で60波である¹⁾。

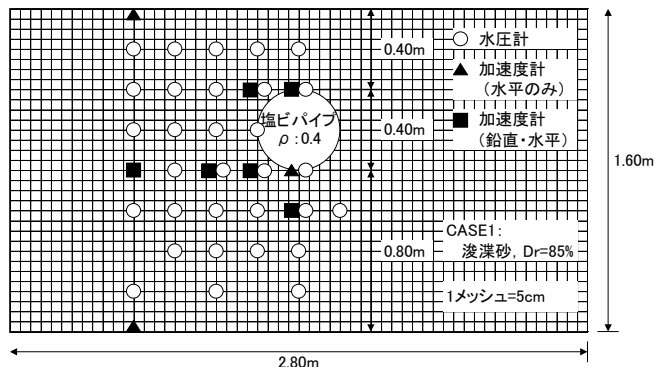


図-1 振動台実験 CASE-1 埋設管と計測機器設置状況

3. 検討方法

構成則,排水条件,幾何非線形条件に着目したケーススタディを行う(表-1)。CA_0とCA_1は模型実験CASE1の再現ケース,CA_2は大変形理論の適用性について検討するためのケースとした。模型実験では周辺地盤と埋設管の間に隙間が生じており,境界面にはジョイント要素(剛性 $K_n=K_s=1.0 \times 10^6$ kN/m²,摩擦角 $\phi_j=15^\circ$)を配置した。

表-1 解析ケース一覧

	構成則	パラメータ設定方針	排水条件	幾何学的非線形
CA_0	マルチスプリングモデル	Dr=85%の液状化強度に適合	排水(D) 非排水(U)	微小変形 大変形(TL, UL)
CA_1	カクテルグラスモデル	Dr=85%の液状化強度に適合		
CA_2	カクテルグラスモデル	Dr=70%の液状化強度に適合		

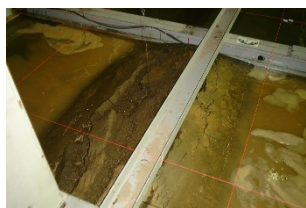


写真-1 加振終了時地表面状況

4. 検討結果

(1)解析パラメータ

表-2,表-3にマルチスプリングモデル(MSM),カクテルグラスモデルパラメータ(CGM)の一覧,図-2に液状化強度特性,図-3に応力比0.32の試験結果,CA_0とCA_1の要素シミュレーション結果(γ_{xy} 時刻歴, $\tau_{xy} \sim \gamma_{xy}$ 履歴)を示す。

(2)埋設管浮上りシミュレーション

図-4に埋設管の鉛直変位時刻歴,表-4に加振後の浮上量を一覧にして示す。CGMよりもMDMの方が大きい。これ

表-2 マルチスプリングパラメータ

		浚渫砂 Dr85%	浚渫砂 Dr70%
湿潤密度	ρ_t (t/m ³)	1.898	1.855
間隙率	n	0.461	0.487
S波速度	V_s (m/s)	111	86
初期せん断剛性	G_{ms} (kPa)	23400	13700
体積弾性係数	K_{ms} (kPa)	61000	35800
基準化拘束圧	σ'_{ms} (kPa)	3.63	3.46
ポアソン比	ν	0.33	0.33
拘束圧依存パラメータ	m	0.5	0.5
せん断抵抗角	ϕ_f (°)	43	41
粘着力	C (kPa)	0	0
最大減衰定数	h_{max}	0.25	0.25
液状化パラメータ	ϕ_p (°)	28	28
	S_1	0.0001	0.0001
	w_1	4.5	1.7
	p_1	0.45	0.5
	p_2	0.85	0.9
	c_1	2.7	2.25

表-3 カクテルグラスパラメータ

		浚渫砂 Dr85%	浚渫砂 Dr70%
カクテルグラス パラメータ	ϕ_p (°)	28	28
	ϵ_{dcm}	0.1	0.2
	ϵ_{dcg}	1.71	1
	ϵ_{dc}	0.16	0.5
	q_1	1	2.5
	q_2	0.88	0.1
	k_c	2	2
	h_{Lmax}	0.25	0.25
	$n_k=n'_k$	0.5	0.5
	S_1	0.005	0.005
	c_1	2.63	2
	q_4	1	1
	r_f	0.2	0.2
	r_{nmp}	0.5	0.5
	q_{us}	0	0

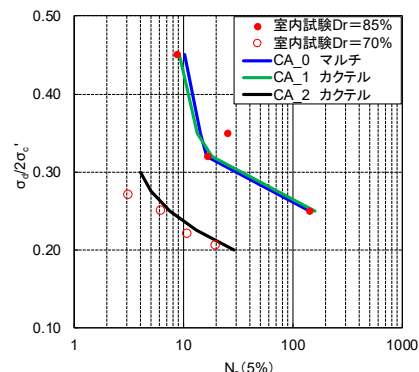


図-2 液状化強度特性

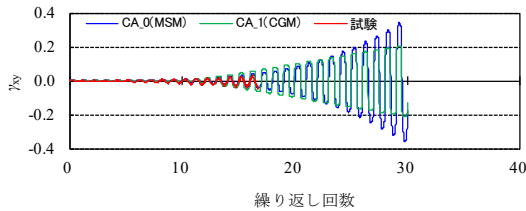


図-3(a)要素シミュレーション (γ_{xy} 時刻歴)

は液状化後のひずみの伸び特性の影響と考えられる。排水条件の影響で4cm程度浮上量が多い。図-5に加振終了時過剰間隙水圧分布図ならびに γ_{max} 分布図を示す。非排水では管の基礎地盤が負圧となるが排水では消散し、埋設管の基礎地盤および土被り地盤のひずみが顕著である。表-5に透水係数の違いによる影響を示す。透水係数が極端に大きいと過剰間隙水圧が抑制され、周辺地盤の剛性が大きくなり浮上量が小さくなる。実験では11.1cm浮上して地表面が盛りり（写真-1）、管側面から底面にかけて隙間が観察されている。

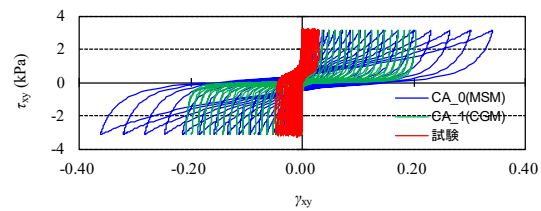


図-3(b) 要素シミュレーション ($\tau_{xy} \sim \gamma_{xy}$ 履歴)

表-4 埋設管浮上量構成則等比較 (単位: cm)

解析条件	排水条件	構成則	微小変形理論	大変形理論	
			SD	TL	UL
CA_0	非排水U	MSM	6.3	6.2	6.3
CA_1U	非排水U	CGM	1.7	1.7	1.7
CA_1D	排水D	CGM	5.9	5.9	5.8

表-5 埋設管浮上量透水係数比較 (単位: cm)

	10倍	1倍	1/10倍	1/100倍	※透水係数1倍 $k=2.4 \times 10^{-4} \text{m/sec}$
CA_1D	3.4	5.9	3.6	2.4	

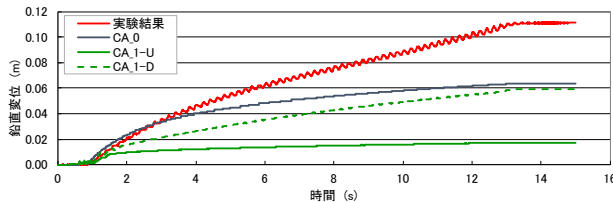


図-4(a) 埋設管鉛直変位時刻歴 (微小変形解析)

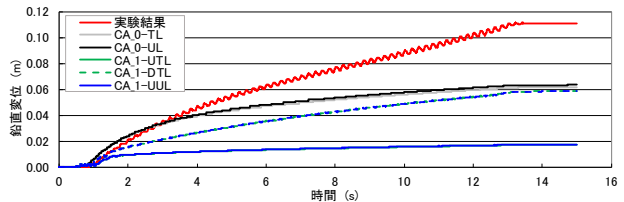
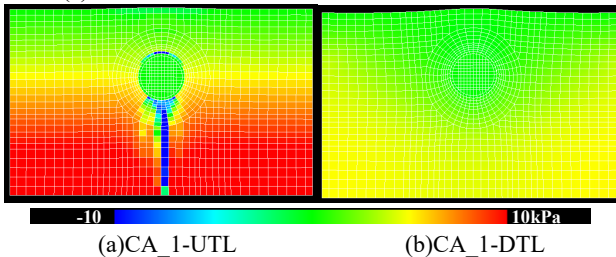


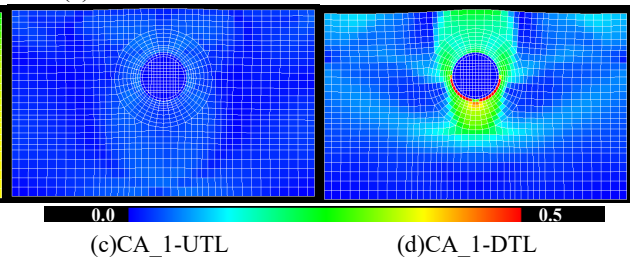
図-4(b) 埋設管鉛直変位時刻歴 (大変形解析 (TL の例))



(a)CA_1-UTL

(b)CA_1-DTL

図-5(a)残留時変形および過剰間隙水圧分布図



(c)CA_1-UTL

(d)CA_1-DTL

図-5(b)残留時変形および γ_{max} 分布図

(3)微小変形理論と大変形理論の比較

幾何非線形の影響を評価するため、表-2に示すCA_2のパラメータを用い、埋設管の見かけ比重を0.1、加速度振幅を4倍の2000Galまで上げて解析を行った。図-6に埋設管の鉛直変位時刻歴を示す。浮上量は2sec付近で違いが目立ち始めるが図-8に示す埋設管直上と直下の軸差せん断時刻歴では10%~20%付近で要素レベルの違いが認められる。図-7に微小変形と大変形理論での残留変形図および γ_{max} の分布図を示す。残留時の地表面形状は写真-1に示すように大変形理論の方が実験結果と整合的と考えられた。謝辞：本検討はFLIPコンソーシアムWGの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献：1) 第二期 FLIP 研究会浮き上がり作業部会：地中埋設構造物の浮き上がり問題への適用検討成果報告書、2003.7 2) 第三期 FLIP 研究会せん断ロック問題作業部会：せん断ロック問題に関する検討平成 17 年度成果報告書、2005.8 3) Iai, S., Ueda, K., Tobita, T. and Ozutsumi, O.: Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013. 4) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究、京都大学博士論文、2010年3月

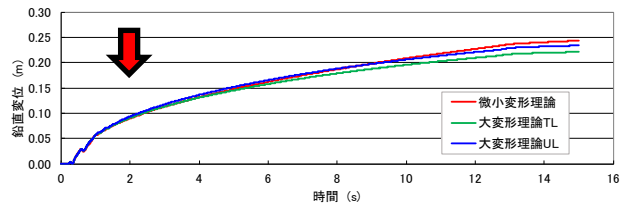


図-6 埋設管鉛直変位時刻歴(CA_2D)

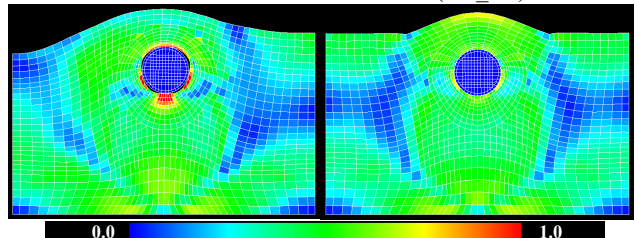


図-7 残留時変形および γ_{max} 分布図 (CA_2-D, DTL)

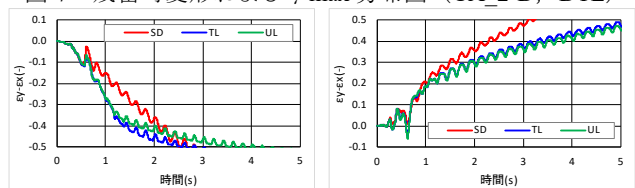


図-8(a) $\varepsilon_y - \varepsilon_x$ 時刻歴(管直上)

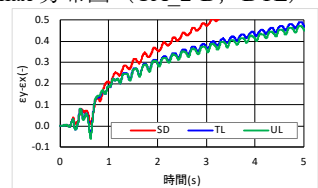


図-8(b) $\varepsilon_y - \varepsilon_x$ 時刻歴(管直下)

4-11 浮上を対象とした検討(2) マンホールの浮上を対象とした検討

大変形解析，地中埋設管，液状化，浮上り，有効応力法

明窓社 ○増田 幸一

1. 検討の目的

一般社団法人 FLIP コンソーシアムが設置した，大変形解析 WG で行っている各種検討の一環として，すでに，第二期 FLIP 研究会で実施した，農工研で行われたマンホールの浮上実験に対する実験解析を，最新の透水条件下のカクテルグラスモデルや大変形解析を用いてトレースする事により，これら最新の機能の特性，若しくは性能を明らかにすることを目的として，本検討を実施した．

2. 解析モデル

解析地盤定数(マルチスプリング要素)のパラメタは小堤等¹⁾に従った．また，カクテルグラスモデル要素のパラメタは，FLIPCSIM Ver.4.0.0 を使用して，試行錯誤により設定した．解析定数の一覧を表 1，2 に，また要素シミュレーション結果を図 2 に示す．本検討では，このうち，浚渫砂 Dr70%の物性値を解析に使用した．そのほか，図 1 に示す解析メッシュ，解析条件等は既往の解析に従った．なお，解析安定性のため，マンホール側面の拘束条件はジョイント要素ではなく MPC とした．

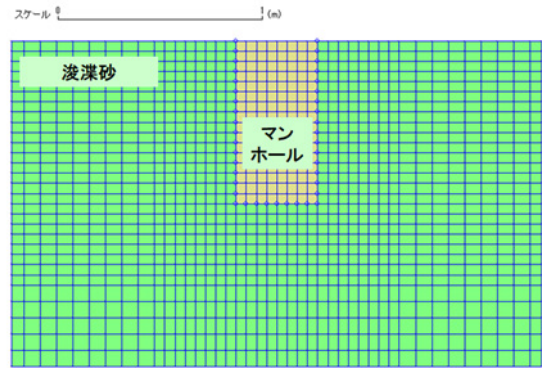


図 1 解析メッシュ図

3. 解析結果

土層をマルチスプリング要素(非排水条件)としたときと，カクテルグラスモデル要素(排水条件)とした場合について，FLIP ROSE(Ver.7.3.1)²⁾(以下，FLIP731)および FLIP TULIP(Ver.6.4.3)³⁾を用いて解析した．FLIP TULIP による解析は，微小変形解析(以下，SD 法)，および Total Lagrangian 法(以下，TL 法)と Updated Lagrangian 法(以下，UL 法)による大変形解析の 3 手法を用いている．入力地震動は，振動実験の観測値を基準とし，振幅を 0.5 倍，1.5 倍，2 倍及び 3 倍としたケースの解析も行った．また排水条件の解析では，解析時間を 600 秒とし，加震終了後の排水解析も実施した．

マンホール底面中央の鉛直変位(以下，浮上量)の最大値を表 3 に，また，図 3 にその時刻歴を示す．いずれの解析結果も実験に比べ浮上量が小さい．FLIP731 と FLIP TULIP の結果に大きな差異はない．

図 4，5 に土層をマルチスプリング要素(非排水条件)としたときと，カクテルグラスモデル要素(排水条件)としたときの加振終了時の $\gamma_{\max}$ 分布図と間隙水圧分布図を示す．

4. まとめ

FLIP731 および FLIP TULIP を用いてマンホールの浮上を対象とした解析を実施した．マンホールの場合，結果的に，浮上量は実験結果と比べてかなり小さく，浮上量は実験結果の 1/2 程度であった．このような条件下では，FLIP731 と FLIP TULIP の SD 法の解析結果に大きな違いがなかった．また，UL 法と TL 法による浮上量は，SD 法に比べ小さくなる傾向がみられた．SD 法と UL 法，TL 法の差は，入力地震波の振幅を大きくするに従い，大きくなる傾向がみられた．以上の結果から，FLIP TULIP のマルチスプリング要素(非排水条件)とカクテルグラスモデル要素(排水条件)への適用性は確認できたと思われる．

謝辞: 本検討は FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである．関係者の方々に謝意を表します．

表 1 地盤物性値

区分 パラメタ	物性			動的変形特性										液状化特性				
	湿潤 密度	間隙 比	間隙率	S波速度	初期せん断剛性	体積弾性係数	基準拘束圧	ポアソン比	拘束圧依存パラメタ	せん断抵抗角	粘着力	履歴減衰の上限値	変相角	液状化パラメタ				
記号	ρ_t	e	n	V_s	G_{ma}	K_{ma}	σ_{ma}	v	m	φ_r	C	h_{max}	φ_p	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
単位	t/m^3	-	-	m/s	kPa	kPa	kPa	-	-	度	kPa	-	度					
浚渫砂Dr85%	1.898	0.857	0.461	111	23400	61000	3.63	0.33	0.5	43.0	0.00	0.25	28.0	0.0001	6.5	0.45	0.85	2.5
浚渫砂Dr70%	1.855	0.951	0.487	86	13700	35800	3.46	0.33	0.5	41.0	0.00	0.25	28.0	0.0001	1.7	0.5	0.9	2.25

表 2 液状化パラメタ

名称	液状化パラメタ(カクテルグラスモデル)														
	ϕ'_p	ε_d^{cm}	$r_{\varepsilon dc}$	$r_{\varepsilon d}$	q_1	q_2	lk	H_{maxL}	$r_k=r'_k$	S_1	C_1	q_d	r_γ	r_{mtmp}	qus
浚渫砂(Dr=85%)	28.0	0.100	1.900	0.120	10.00	1.30	2.00	0.250	0.0300	0.0050	2.80	1.0	1.0	0.5	0.0
浚渫砂(Dr=70%)	28.0	0.200	1.000	0.500	2.50	0.10	2.00	0.250	0.5000	0.0050	2.00	1.0	0.2	0.5	0.0

Case study on effective stress analysis of uplift of a manhole

Koichi. Masuda (Meisosha)

参考文献: 1)小堤等: 地中埋設管浮上実験の有効応力法による実験解析に基づく浮上メカニズムの検討,第 48 回地盤工学会シンポジウム論文集,2003.11. 2) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K. Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 2011, 35(3): 360-392. 3) 上田恭平: 砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究, 京都大学博士論文, 2010 年 3 月

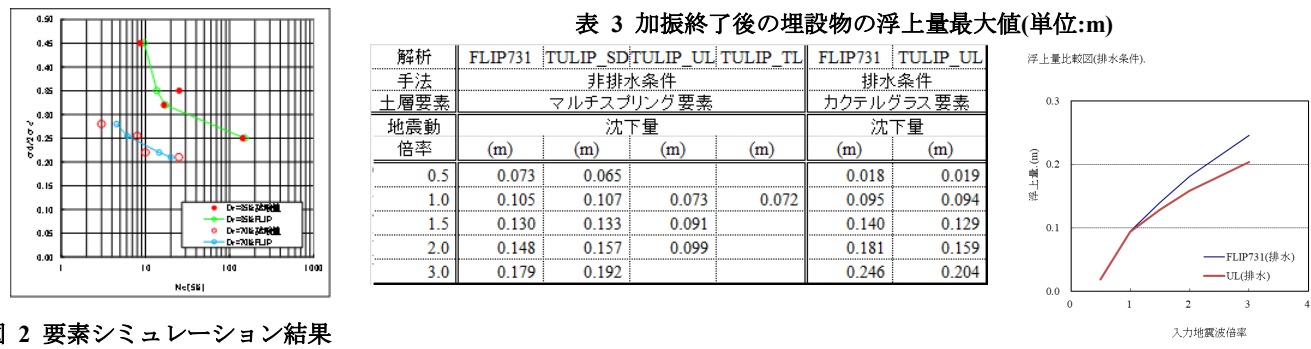


図 2 要素シミュレーション結果

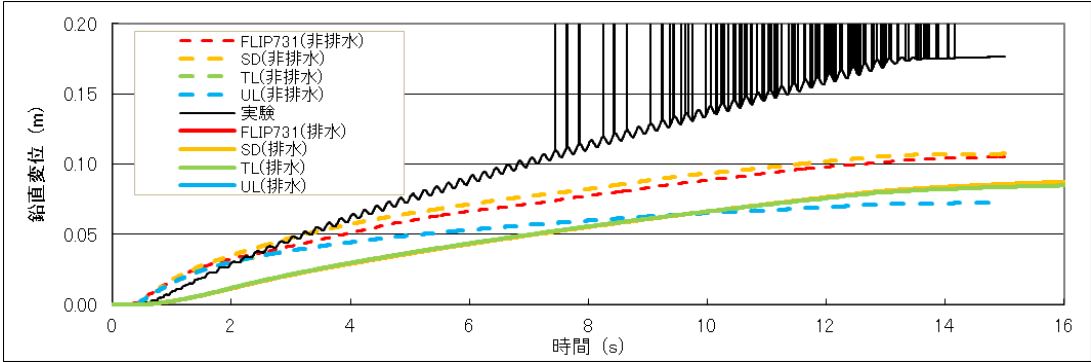


図 3 浮上量の時刻歴図

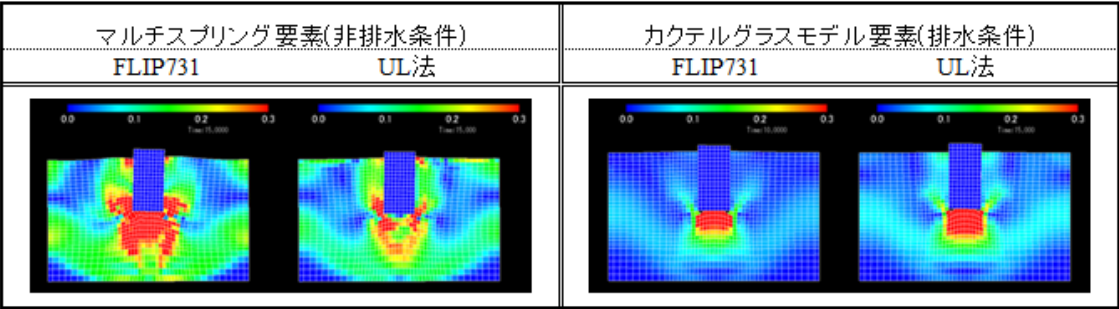


図 4 加振終了時の γ_{max} 分布図(変形は等倍)

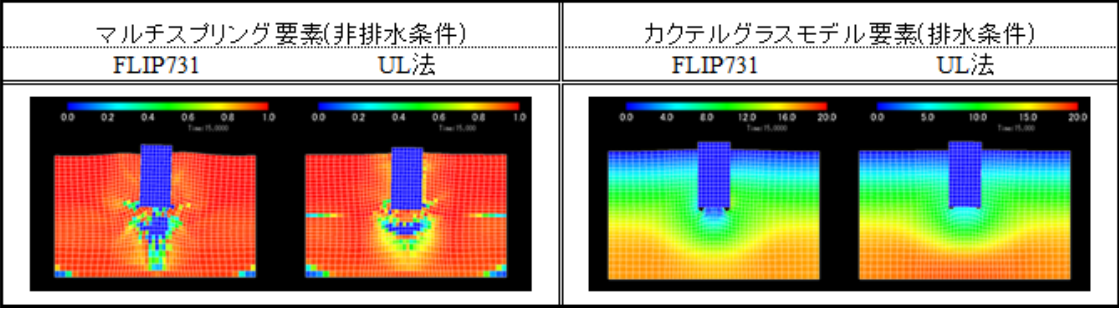


図 5 加振終了時の間隙水圧分布図 :非排水条件は過剰間隙水圧比、排水条件は過剰間隙水圧(kPa)

4-12 浮上を対象とした検討(3) 矩形断面

キーワード 埋設管、浮上り、液状化、有効応力法、大変形

株式会社日水コン ○渡邊 香澄, 高橋 堅, 高橋 直樹

1. 検討目的

浮上を対象とした検討(1) 円形断面の検討に対して、構造物形状を矩形とした場合の浮上り挙動の分析を行い、さらに FLIP TULIP の適用性の検討を行うことを目的とする。

2. 検討方法

地盤材料および埋設管（以下、躯体）の物性値は円形埋設管と同一とした。躯体の寸法は、円形埋設管と外接するよう一边を 0.4(m)とした。

境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。

入力波は、5Hz, 500gal, 60 波のテーパ波を用い、解析に用いた Rayleigh 減衰は、 $\beta = 0.0002$ とした。

FLIP TULIP のバージョンは Ver.6.4.3 を用い、微小変形解析（以下、SD 法）と Total Lagrangian 法（以下、TL 法）と Updated Lagrangian 法（以下、UL 法）による大変形解析を実施した。

3. 浮上り実験結果（円形断面）との比較

図-1 に解析メッシュ図を示す。

構成則はマルクスプリングモデル（非排水条件）を用い、地盤材料は浚渫砂 Dr 85%とした。図-2 に躯体の鉛直変位時刻歴を示す。

加振に伴い浮上量が増加する定性的な傾向は、実験・解析でほぼ同様であったが、加振終了時の浮上量は、実験で 11.4cm であるのに対し、解析では 5.0cm 程度であった。

なお、実験では振動しながら変位が増加していくのに対し、解析では振動が見られない。これは、実験時には振動台から鉛直振動も付随して入力されているためと考えられる。

また、SD 法と TL 法、UL 法の間で結果に有意な差は見られなかった。図-3 に加振終了時の残留変形および過剰間隙水圧分布図、軸差ひずみ分布図を示す。

地盤全体で見ると、過剰間隙水圧は地盤下方ほど大きい。躯体近傍に着目すると躯体直上地盤の過剰間隙水圧は躯体直下より同等もしくは大きくなっていることがわかる。また、円形埋設管と同様、躯体直下地盤の軸差ひずみは正符号で縦に引伸ばされており、直上地盤は負符号で横方向に引伸ばされていることがわかる。

4. 浮上り要因の分析

解析結果の妥当性を検証するため、浮上り開始以後の躯体に作用する各種鉛直方向外力を整理した（SD 法結果を整理）。図-4 に躯体の鉛直加速度時刻波形、図-5 に鉛直変位時刻歴を示す。躯体上面および躯体下面に作用する過剰間隙水圧合力の時刻歴波形を図-6 に示す。

加振開始時（ $t=0.0$ 秒）および躯体浮上り開始以後で躯体鉛直加速度が大きい時刻（ $t=1.76$ 秒）における、ジョイント要素の応力分布と合力を図-7 に、加振開始・終了時、時刻 0.90 秒および 1.76 秒での各種鉛直方向合力を表-1 に示す。

これら図表より、加振開始から浮上り開始までの約 1 秒間、過剰間隙水圧合力は地盤振動に伴って大きく変動するが、浮上り開始以降では安定収束化し、躯体浮上りに対する相互作用の結果、本解析ではむしろ浮上りを抑止する側に回っていることがわかる。

また、躯体に作用する外力は、鉛直加速度による躯体慣性力成分は小さく、定常的に作用する静水圧による浮力成分が大きいこともわかる。

最終時刻での最大せん断ひずみを図-8 に示す。せん断ひずみが大きくなる図中の着目点において、履歴ループの割線勾配から地盤のせん断剛性を算出した結果を図-9 に示す。浮上り開始と地盤剛性の低下はほぼ同時刻（1 秒付近）となっており、浮上りは地盤剛性の低下と大きな相関があることがわかる。

以上示した浮上り要因の分析は、従来の知見と整合しており、本解析結果が妥当であると判断された。

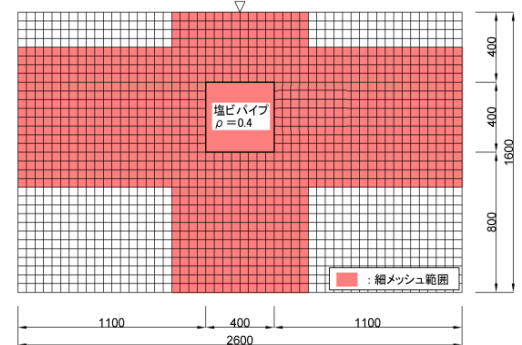


図-1 解析メッシュ図

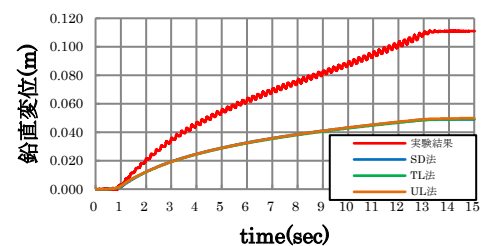
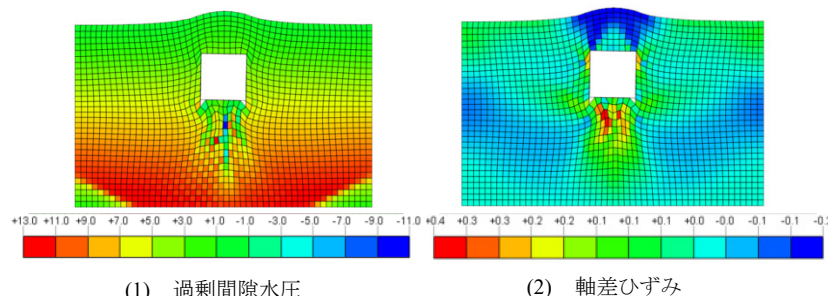


図-2 躯体鉛直変位時刻歴



(1) 過剰間隙水圧 (2) 軸差ひずみ
図-3 残留変形と過剰間隙水圧・軸差ひずみ分布図 (UL 法)

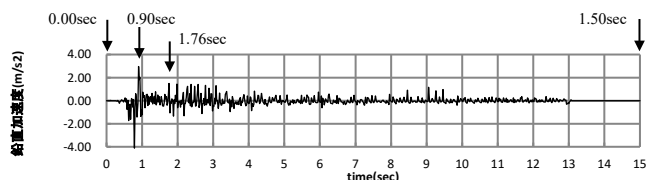


図-4 鉛直加速度時刻歴波形

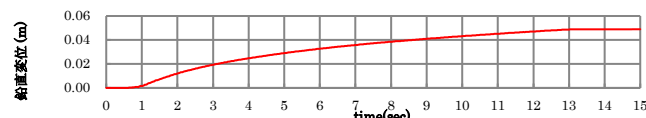


図-5 躯体鉛直変位時刻歴

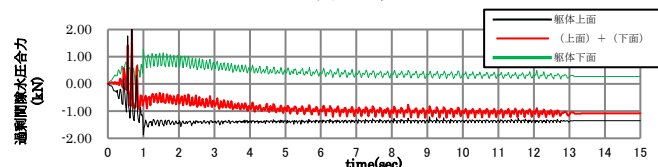


図-6 過剰間隙水圧の合力

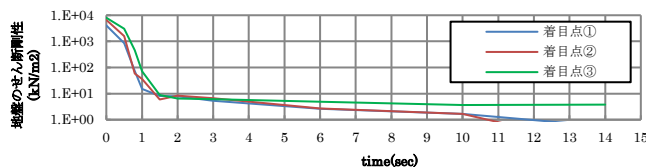


図-9 地盤のせん断剛性

5. TL 法, UL 法の適用性

ここでは、構成則をカクテルグラスモデル（排水条件）とし、地盤材料は浮上量が大きくなると予想される浚渫砂 Dr 70%を採用した。

入力加速度は 500gal のほか、1000gal と 2000gal に加速度レベルを上げて TL 法, UL 法の適用性を検討した。

本検討では躯体上部隅角部地盤で応力集中が生じ、解析が不安定となる傾向が見られた。そのため、図-1 に示した朱色の範囲でメッシュを細分割し、応力集中に追従できるような試みを行った。

図-10 に入力加速度 2000gal での SD 法および TL 法の残留変形、最終時刻での最大せん断ひずみ γ_{max} 分布図を示す。躯体近傍の平均的な最大せん断ひずみは SD 法, TL 法いずれも 20~80%程度となっている。なお、SD 法では回転変位を起こし、加振するにつれてこの回転量が増大した。ひずみレベルが大きい場合には TL 法, UL 法の導入を検討することが考えられた。

図-11 に入力加速度レベルごとの加振終了時鉛直浮上量を示す。

2000gal で鉛直浮上量に差異が認められるが、浮上量そのものが小さいため、SD 法と TL 法, UL 法で大きな違いは認められない。

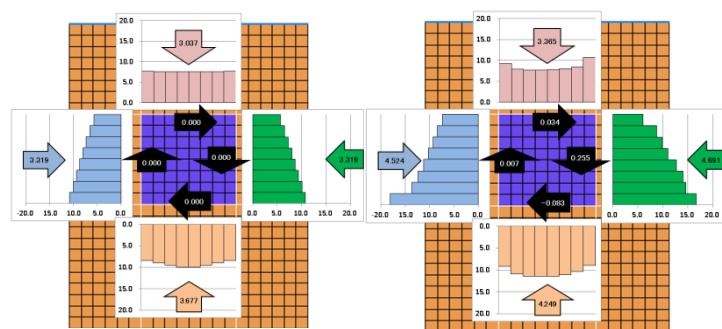
6. まとめ

浮上り時の躯体に作用する外力に関して若干の検討を加えた。

また、入力加速度レベルを大きくして、SD 法と TL 法, UL 法の適用性について検討したが、鉛直浮上り量に大きな違いは認められなかった。

矩形断面では、隅角部の応力集中に対して地盤の追従性が悪く、解析が不安定となりやすい。メッシュ分割をできるだけ細かくするなどの対応が望まれた。

謝辞：本検討は FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。



(1) 時刻 0.0 sec

(2) 時刻 1.76 sec

図-7 ジョイント要素応力と合力

表-1 躯体に作用する鉛直方向外力

時刻 (sec)	ジョイント要素応力				過剰間隙水圧		慣性力	静水圧	自重
	$\Sigma \sigma$		$\Sigma \tau$						
	躯体 上面	躯体 下面	躯体 左側面	躯体 右側面	躯体 上面	躯体 下面			
0.00	-3.04	3.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0	1.60	-0.64
0.90	-3.54	4.15	0.90	-0.39	-1.06	0.25	-0.19	1.60	-0.64
1.76	-3.37	4.25	0.01	-0.26	-1.50	1.07	-0.10	1.60	-0.64
15.00	-3.14	3.82	-0.01	-0.03	-1.36	0.27	0	1.60	-0.64

(単位 kN、上方向を正)

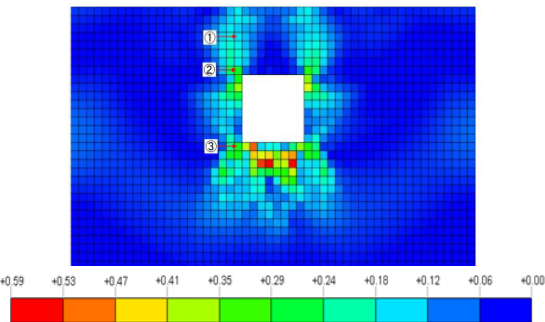
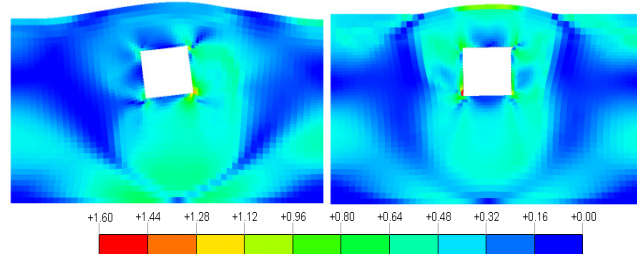


図-8 最大せん断ひずみ γ_{max} 分布図



(1) SD 法

(2) TL 法

図-10 残留時変形および γ_{max} 分布図

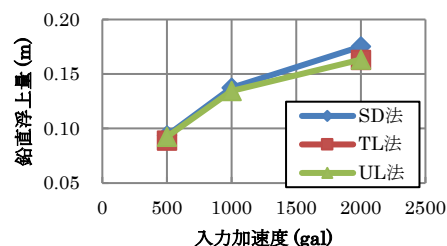


図-11 加振終了時鉛直浮上量

参考文献：1) 第二期 FLIP 研究会浮き上り作業部会：地中埋設構造物の浮き上がり問題への適用検討成果報告書，2003.7
2) 第三期 FLIP 研究会せん断ロック問題作業部会：せん断ロック問題に関する検討平成 17 年度成果報告書，2005.8

5 平成 26 年度～28 年度の成果まとめ

FLIP コンソーシアム 大変形解析 WG

大変形解析 WG では、FLIP TULIP^{1),2)}の実問題への適用を目指し、平成 26 年度～28 年度の 3 年間の活動を行った。主な成果概要は表-1 および表-2 に示すとおりである。

なお、表-1 および表-2 には主な検討結果、FLIP TULIP の適用性・適用限界を示した。また、本 WG にて検討できなかった課題についても併せて整理した。

表-1 大変形解析 WG における主な成果概要(その 1)

対象構造物	主な検討結果(適用性など)	今後の課題
要素試験 (平面ひずみ軸圧縮試験を対象)	<静的载荷> - 排水条件によらず大変形解析では、明瞭なせん断面が形成される。 - 排水条件によらず軸差ひずみが約 10%以上となると、微小変形解析と大変形解析の差異が生じはじめる。 - 排水条件を考慮することにより、供試体内の間隙水圧の再配分の効果を考慮することができる。 <動的载荷> - 応力制御の条件では、微小変形解析では液化化する段階まで解析できたが、大変形解析では液化化する直前で計算が発散。また、すべての解析法でせん断帯の形成が確認でき、その形成位置で過剰間隙水圧比が大きくなった。 - ひずみ制御の条件では、すべての解析法でせん断応力が一定の繰返し载荷とならず、徐々にせん断応力の値が小さくなり、液化化する段階には至らなかった。	- 室内試験結果の再現解析 - 中空ねじり試験結果等を対象とした追加検討。
鋼管杭	- FLIP TULIP の非線形はり要素は、幾何学的非線形性(大変形)を考慮した解析が行えることを確認。 - 鋼管杭の局部座屈による耐力低下に関しては、別途、非線形化する点の設定を見直す必要あり。	鋼管杭の局部座屈による耐力低下に対する検討。
傾斜地盤	- 液化化による極限状態を把握する目的で遠心载荷実験を実施。 - 大変形解析結果は実験結果と調和的な残留沈下量(法尻部は若干過小評価)、微小変形解析結果は非現実的な沈下量(過大評価)となった。 - 軸差ひずみが 10%程度もしくは最大せん断ひずみが 20%を超えるような場合、微小変形解析では誤った解まで表現する可能性があるため、大変形解析の適用も視野に入れ、解析手法の選定に留意する必要あり。 - 地盤の軸差ひずみが 40%もしくは最大せん断ひずみが 60%程度までの挙動に対しては、大変形解析の適用は高いと考える。それ以上のひずみレベルの挙動を対象とする場合には、FLIP TULIP(マルチスプリング)の適用について留意する必要あり。	カクテルグラスモデル(排水条件)を用いた検討。
矢板式構造	- 液化化による矢板式構造の極限状態を把握することを目的として遠心载荷実験を実施。 - 矢板と背後地盤の拘束条件をジョイント要素($K_s=0$)とすると、実験結果を概ね再現。矢板式構造に対する大変形解析の適用性は高いと考える。	- カクテルグラスモデル(排水条件)を用いた検討。 - 適用限界に対する検討。
盛土構造物 (土研遠心実験)	- 大変形解析結果は実験結果と調和的な残留沈下量、微小変形解析は過大評価(非現実的な挙動)。 - 大変形解析に対して液化化による極限の沈下量(水谷の式, $0.75H$)を概ね再現可能。 - 盛土直下の液化化層の軸差ひずみが 10%程度以上から、微小変形解析と大変形解析とで沈下量に差異が発生。	カクテルグラスモデル(排水条件)を用いた検討。

表-2 H28 年度大変形解析 WG における成果概要(その 2)

対象構造物	成果		今後の課題
盛土構造物 (淀川堤防)	・カクテルグラスモデルを用いた消散解析機能を確認. ・過剰間隙水圧比が消散する過程で発生する天端の沈下量は動的解析時に生じる沈下量に比べてワンオーダー小さく微小変形で取り扱える範囲であることを確認 ・微小変形解析と比較して大変形解析のほうが、消散速度が遅くなる傾向.		・適用限界に対する検討.
ケーソン式 防波堤	・堤体形状によらず、微小変形解析にて壁高の 2 割を超える沈下量が発生した場合、また、変形に支配的となる直下地盤(置換砂)において、軸差ひずみが 10%程度の到達を境に、大変形解析による結果に対し顕著な差異が生じる可能性が高く、解析手法の選定には留意が必要. ・ただし、上部傾斜堤のような、回転モードによる変形が考えられる場合には、微小変形解析における沈下量が壁高の 2 割程度以下であっても、微小変形解析と大変形解析で沈下量に顕著な差が生じたため、注意が必要.		・カクテルグラスモデル(排水条件)を用いた検討. ・適用限界に対する検討.
重力式岸壁	・ケーソン形状によらず、水平変位量が 2m を超えると、微小変形解析と大変形解析とで傾斜角のばらつきがおおきくなる. ・ケーソン法線直下地盤要素挙動に着目すると軸差ひずみが 20%, 単純せん断ひずみが 30%に概ね達した段階から微小変形解析と大変形解析の要素挙動、全体挙動ともに差異が生じ始める. ・ケーソン背後の地盤変状が微小変形解析と大変形解析とで異なる傾向.		・カクテルグラスモデルを用いた検討. ・背後地盤に着目した適用性の検討 ・適用限界に対する検討.
埋設構造物	円形	・微小変形解析、大変形解析とで浮上り量に有意な差異はなし. ・残留時の地表面形状は大変形理論の方が実験結果と整合 ・カクテルグラスモデル(排水条件)が適用できることを確認. 大変形解析の効果が発揮される局面は不明確.	・適用性に対する精査 ・適用限界に対する検討.
	マンホール	・マンホール側面をジョイント要素で拘束すると解析が不安定になるため MPC で拘束. ・微小変形解析、大変形解析とで浮上り量に有意な差異はなし. ・カクテルグラスモデル(排水条件)が適用できることを確認. 大変形解析の効果が発揮される局面は不明確.	・適用性に対する精査 ・適用限界に対する検討.
	矩形	・矩形断面では、隅角部の応力集中に対して地盤の追従性が悪く、解析が不安定となりやすいため、メッシュ分割をできるだけ細かくする対応が必要. ・微小変形解析、大変形解析とで浮上り量に有意な差異はなし. ・微小変形解析では回転変位を起こし、加振するに従い回転量が増大. ・カクテルグラスモデル(排水条件)が適用できることを確認. 大変形解析の効果が発揮される局面は不明確.	・適用性に対する精査 ・適用限界に対する検討.
ケーブル	・線形はり要素でケーブルをモデル化し、微小変形解析と大変形解析とで比較. ・微小変形解析では線材料に張力が発生しない不自然な結果であるが、大変形解析では線材料に自重による張力が発生し妥当な結果.		—

謝辞：本報告は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの研究活動の一環として実施したものである。

参考文献：1) Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O. : Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,Vol. 37(9),pp.1189-1212,2013.
2) 上田恭平：砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究,京都大学博士論文,2010.