

地震後の残留変形解析と地盤調査

地震後の残留変形解析は、有限要素法による解析が良く用いられており、解析には静的な方法と動的な方法があります。当社では、静的な方法を「ALID手法による堤防の解析と河川構造物の耐震設計支援システム：AFIMEX-RIVERUS（富士通FIP）」、動的な方法を「2次元非線形有効応力法地震応答解析：FLIP（FLIP コンソーシアム）」で実施致します。

ALID (Analysis for Liquefaction-induced Deformation) は、液状化に伴う残留変形解析で、液状化現象を生じる地盤上に、盛土体等の土構造物がある場合に適用できます。一方、FLIP (Finite element analysis program of Liquefaction Process) は、液状化地盤に限らず、不飽和地盤や平坦地盤の他に地盤形態が複雑な場合でも適用が可能です。

一般に、地盤調査によって得られる地盤条件と解析精度の組み合わせは、表-1.のように示されます。

表-1. 解析精度と地盤条件の組み合わせ

試験項目		試験から得られる情報	解析に用いる地盤条件の組合せ					
			結果の精度が高い (詳細検討レベル)		結果の精度にやや期待できる (概略検討レベル)		解析可能な条件 (基本検討レベル)	
			ALID	FLIP	ALID	FLIP	ALID	FLIP
原位置試験	標準貫入試験	N値、土質柱状図、地下水位	○	○	○	○	○	○
	PS検層	せん断波速度Vs	○	○	○	○	○	○
室内土質試験	密度試験	湿潤密度ρ、間隙比eo	○	○	○	○	○	○
	粒度試験	粒度特性、(粒度分布、FC、D50)	○	○	○	○	○	○
	三軸圧縮試験(CU-b)	内部摩擦角φf、変相角φp	○	○	○	○	○	○
	繰り返し三軸試験	液状化特性 液状化強度	○	○	○	○	○	○
	繰り返し三軸試験	変形特性 G/Go~γ、h~γ	○	○	○	○	○	○

当社では、解析に必要な上記の地盤条件を入手するための、下表に記載される地盤調査や室内土質試験に対応可能です。

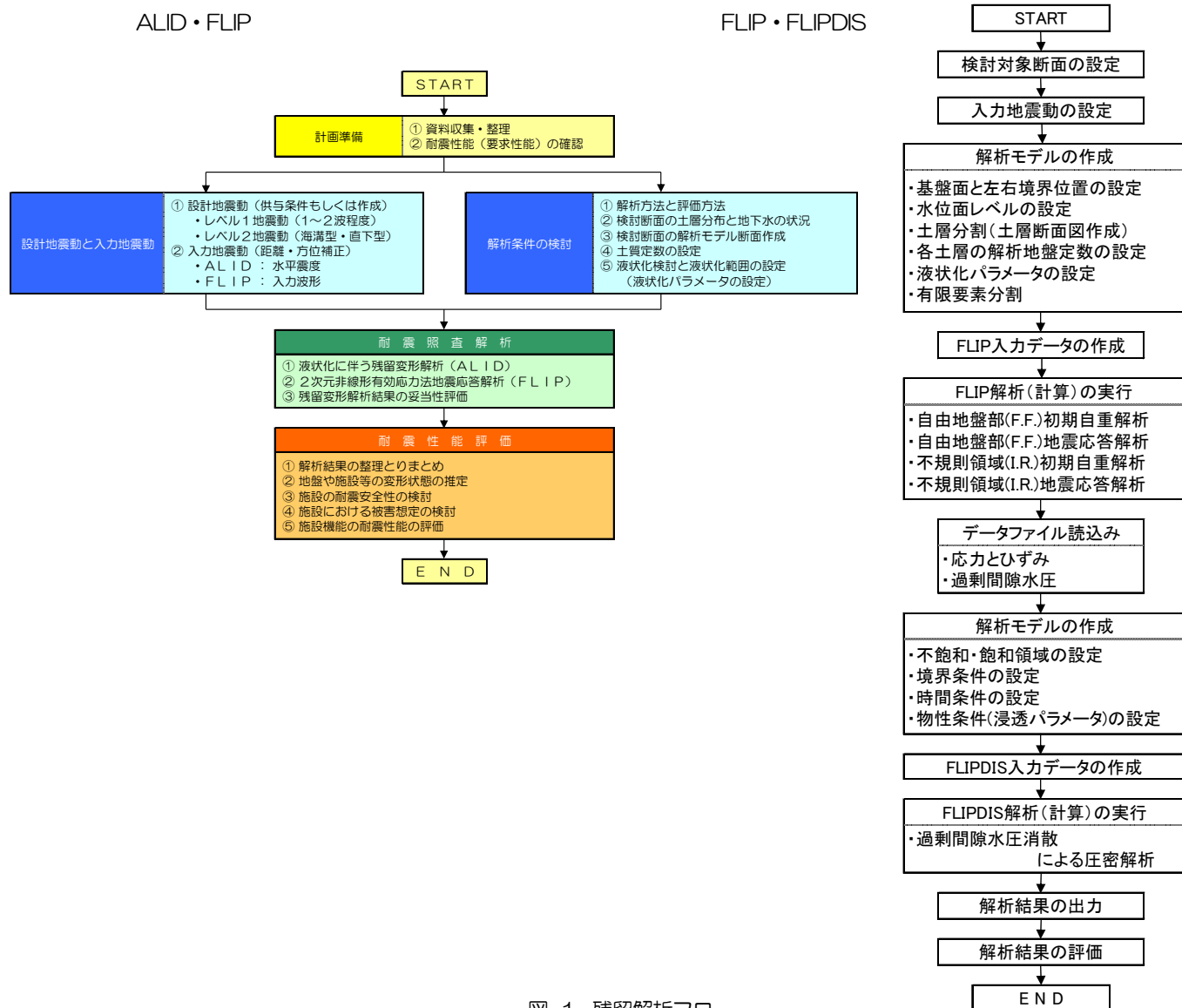


図-1. 残留解析フロー

表-2. 当社で実施できる残留変形解析に必要な主な地盤調査

調査の方法		得られる情報	調査結果の適用
資料調査・現地踏査		検討に必要な基礎的資料	現況実態の把握と検討条件の整理
物理探査	弾性波探査	常時微動測定	地盤の卓越周期
		表面波探査	伝播速度(Vr)
	電気探査	弾性波トモグラフィ	弾性波速度(Vp,Vs)
		比抵抗法	見掛け比抵抗値(ρ)
その他探査	比抵抗トモグラフィ	見掛け比抵抗値(ρ)	
	地震探査、電磁探査等	弾性波速度(Vp,Vs)、反射係数、電磁波速度・減衰	
物理検層	弾性波	速度検層(PS検層)	Vp、Vs、ポアソン比、せん断弾性係数、ヤング率等
	電気	電気検層	見掛け比抵抗(ρa)
ボーリング	機械ボーリング	柱状図(土層構成、地下水位)	詳細な地質構造の把握、原位置試験・サンプリングの実施
サウンディング	標準貫入試験	N値、試料観察記録	地盤の硬軟、土質定数の推定、支持力や液状化の判定など
	孔内水平載荷試験	変形係数(E,P0,Py,PI)	地盤反力係数算定と抗の水平抵抗の検討
	その他のサウンディング	土の硬軟、締め具合、土層構成、静的貫入抵抗等の土の工学的性質	地層構成と硬軟、N値の推定、小規模建築物の地耐力、基礎の支持力と沈下検討(砂地盤)等
サンプリング	シンウォールサンプリング	室内土質試験の試料	N値≤4の粘性土を対象、室内土質試験の実施
	デニソンサンプリング	室内土質試験の試料	N値≥4の粘性土を対象、室内土質試験の実施
	トリプルチューブサンプリング	室内土質試験の試料(砂質土)	室内土質試験の実施
	凍結サンプリング	室内土質試験の試料(砂・砂礫)	室内土質試験の実施
地下水調査	地下水水位・間隙水圧測定	地下水水位、間隙水圧(pw)	水位変動状況の把握、沈下検討、有効土被り圧の算定等
	現場透水試験	地下水水位、透水係数(k)	排水計画、浸透流解析等の地下水解析
	その他の地下水の測定	地下水の流れの向きや早さ等	広域あるいは局所的な地下水環境、水文特性

表-3. 当社で実施できる残留変形解析に必要な主な土質試験

試験方法	得られる情報	対象となる解析	
物理試験	土粒子の密度試験、含水比試験	地盤の基本的な物理定数	地盤解析全般
	粒度試験、液・塑性限界試験、	液状化判定の指標	
	粒度試験、液・塑性限界試験	液状化判定の指標	
	湿潤密度試験	地盤の単位体積重量	
三軸圧縮試験	圧密非排水(CU-b)条件	粘性土の非圧密・排水せん断強度	FLIP・ALIDによる残留変形解析
	圧密排水(CD)条件	地盤の圧密・排水せん断強度	
繰り返し非排水三軸試験	液状化特性	主に砂質土の動的せん断強度比	液状化解析 FLIP・ALIDによる残留変形解析
繰り返し三軸試験	動的変形特性(残留変形特性)	地盤を構成する各土層の繰り返し変形特性(G/Go~γ、h~γ) せん断応力比と残留ひずみの関係	FLIP・ALIDによる残留変形解析
繰り返し非排水中空ねじりせん断試験	液状化特性	主に砂質土の動的せん断強度比	液状化解析 FLIP・ALIDによる残留変形解析
繰り返し中空ねじりせん断試験	動的変形特性(残留変形特性)	地盤を構成する各土層の繰り返し変形特性(G/Go~γ、h~γ) せん断応力比と残留ひずみの関係	FLIP・ALIDによる残留変形解析
	繰り返し変形特性+単調載荷(せん断剛性特性)	液状化後の応力とひずみの関係、剛性低下率 剛性回復率、微小抵抗領域ひずみ等	ALIDによる残留変形解析

また、室内土質試験は、残留変形解析に入力する主要な地盤定数を確実に求めるために、下の写真に示すような優れた試験機類を整備しており、解析で要求される試験の実施ができます。



三軸圧縮試験装置 繰り返し三軸圧縮試験装置 中空ねじりせん断試験装置

なお、動的な土質試験では、振動をサイン波の他に、下図の様な実際の観測波やシナリオ波での実施も可能です。

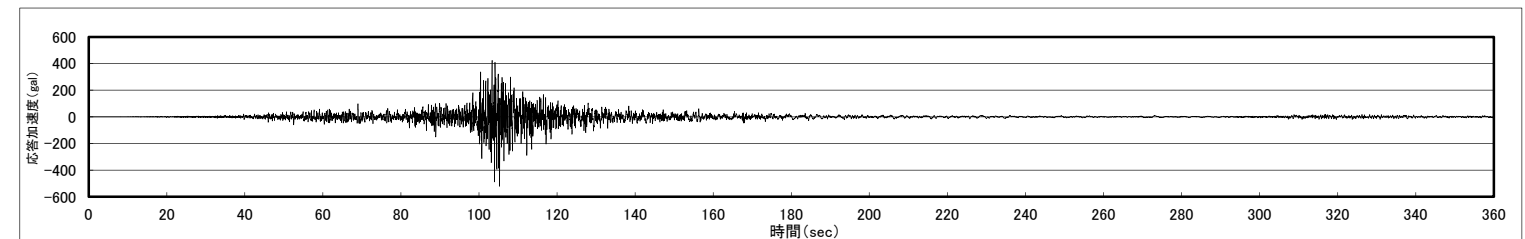


図-2. 入力地震波：ランダム波 (地表面波を基盤に引き戻した波)

詳細な検討における地盤定数は、表-4に示す ALID に比較して、表-5.に示す FLIP が容易に設定できます。また、土質試験の内容も同様です。

表-4. ALID で必要な地盤定数

1.初期応力解析方法の選択項目	入力項目	項目内容
① 弾性材料	①	せん断弾性係数 G, ボアソン比 ν , 湿潤重量 γ_t , 飽和重量 γ_{sat} , 初期土圧係数 K_i , 粘着力 C, 内部摩擦角 ϕ
② MC/DP弾塑性材料	②	該当項目①+ダイレイタンシー角 ϕ_d , 引張り強度 q_t , 剛性計算時平均主応力の選択, Janbu式 k, Janbu式 n, 平均主応力の最小値 σ_{m0}
③ e-logP弾性材料	③	せん断弾性係数 G, ボアソン比 ν , 湿潤重量 γ_t , 飽和重量 γ_{sat} , 初期土圧係数 K_i , 静止土圧係数 K_0 , 初期間隙比 e_0 , 破壊比 M, 引張り強度 q_t , 初期等価軸力差 q_0 , 標準圧密試験の圧縮指数 C_c , 標準圧密試験の膨潤指数 C_s , 平均主応力の最小値 σ_{m0} , 過圧密応力の増分と距離の傾き A, 過圧密応力の増分を0とするy座標位置 Y_0
2.液状化解析条件の選択項目		
① 全応力要素	①	該当項目①
② 液状化時剛性低下要素	① ④	該当項目①+剛性低下率 G3/G
③ 半有効応力要素	①	該当項目①
④ 液状化要素(安田・稲垣式)	① ⑤	該当項目①+相対密度 D_r , 剛性低下率 $G1/G$, 剛性回復率 $G2/G$, 微小抵抗領域ひずみ γ_L , 液状化後の体積ひずみの選択, 液状化安全率 FL , 液状化強度比 RL , 細粒含有率 F_c , 平均粒径 D_{50} , N 値, N値に対する σ'_v , 液状化時の剛性低下率の選択
⑤ 液状化要素(安田・吉田式)	① ⑤	該当項目①+相対密度 D_r , 剛性低下率 $G1/G$, 剛性回復率 $G2/G$, 微小抵抗領域ひずみ γ_L , 液状化後の体積ひずみの選択, 液状化安全率 FL , 液状化強度比 RL , 細粒含有率 F_c , 平均粒径 D_{50} , N 値, N値に対する σ'_v , 液状化時の剛性低下率の選択
⑥ 液状化時粘土弱要素	① ⑥	該当項目①+剛性低下率 $G1/G$, 液状化安全率 FL , 液状化強度比 RL
3.その他の項目		
① 梁要素	⑦	弾性係数 E, 断面積 A, 断面二次モーメント I (m**4), 単位重量 γ
② トラス要素	⑧	弾性係数 E, 断面積 A, 単位重量 γ
③ ジョイント要素	⑨	開閉剛性 $K_n(kN/m**3)$, せん断剛性 $K_s(kN/m**3)$, 粘着力 C, 内部摩擦角 ϕ , 引張り強度 q_t , 液状化剛性低下要素 $Ks1/Ks$, 過剰間隙水圧の選択

表-5. FLIP で必要な地盤定数

分類	力学特性	物理特性				動的変形特性							液状化特性					
記号	N	ρ	n	F_c	σ_{ma}	Gma	Kma	m_g	m_k	ϕ_f	C	hmax	ϕ_p	W1	p1	p2	c1	S1
パラメータ	N 値	単位重量	間隙率	細粒分率	σ_{ma} , Kma に対応する 基準拘束圧	せん断 弾性係数	体積 弾性係数	Gmの 有効拘束圧 依存性	Kmの 有効拘束圧 依存性	せん断 抵抗角	粘着力	履歴減衰 の上限値	変相角	液状化の挙動を規定するパラメータ				
必要な試験	標準貫入試験	密度試験	粒度試験	PS検層							三軸圧縮試験(CU-)	動的変形特性試験	三軸圧縮試験(CU-)	繰返し非排水三軸試験 繰返し非排水中空ねじりせん断試験				

土質試験の結果から、下図の様な動的特性が作成でき、これらの値をパラメータとして、解析に反映させます。
 なお、図-3~6の枠線色は、表-3~5の枠線色と対応しています。
 また、表-4内に示す剛性低下に関わるパラメータを設定する特殊な土質試験も、当社なら対応可能です。

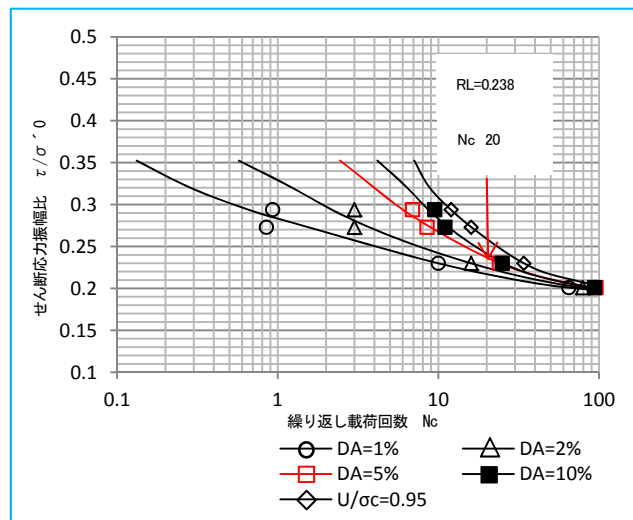


図-3.液状化強度曲線

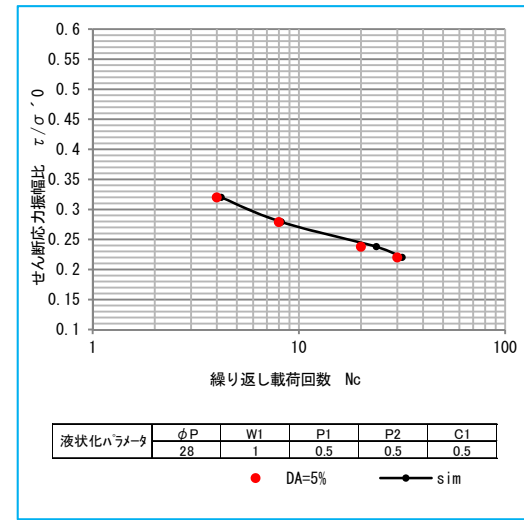


図-4.液状化パラメータシミュレーション

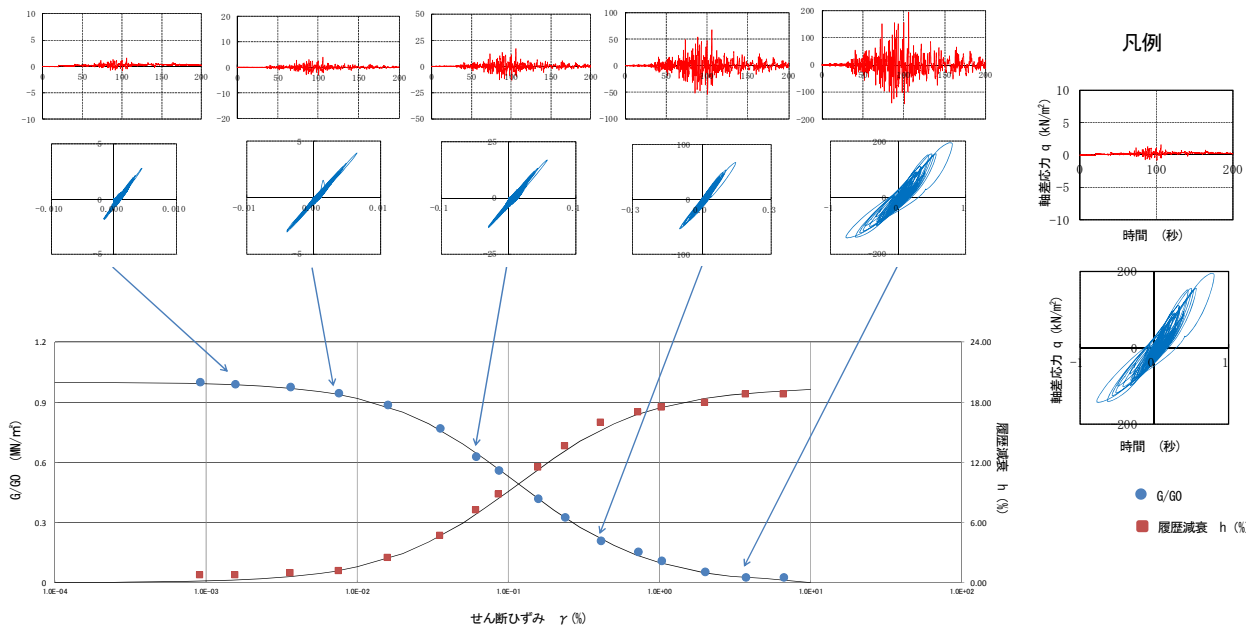


図-5. 繰返し試験時の応力ひずみ関係とひずみ依存性

図-6.の動的変形特性は、同じ条件で作成した供試体で正弦波とランダム波で試験を行った結果の例です。

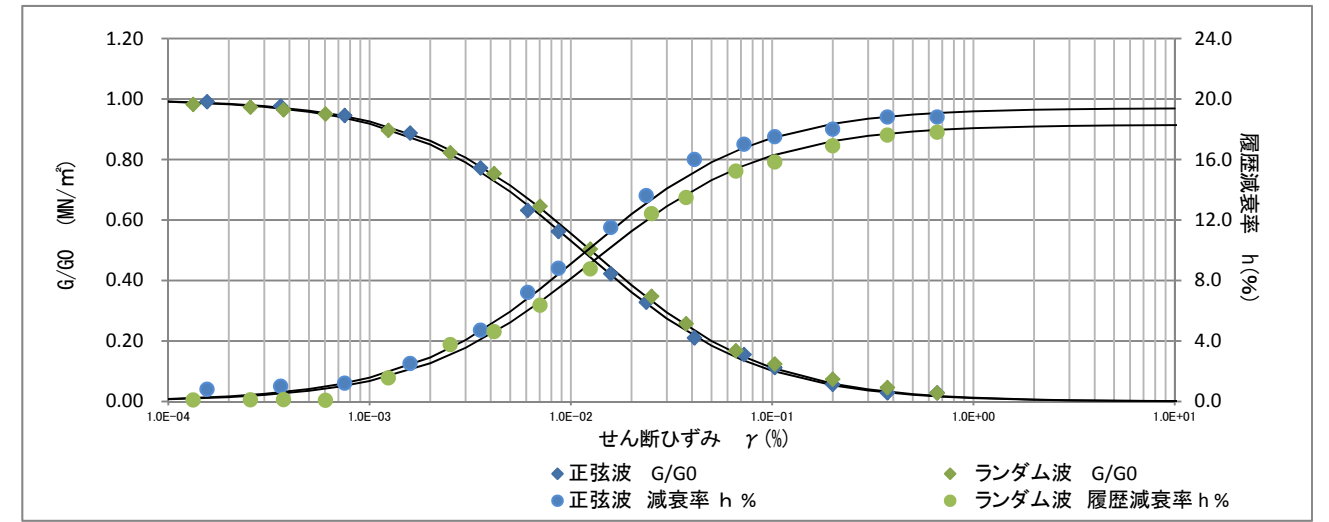
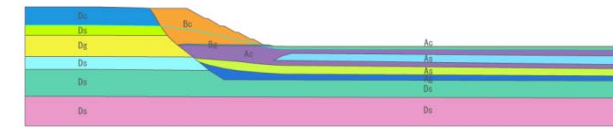


図-6.ひずみ依存性曲線の比較

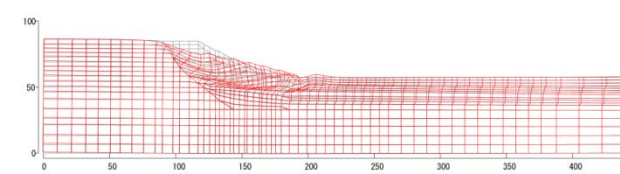
解析の事例を示します。

• FLIP

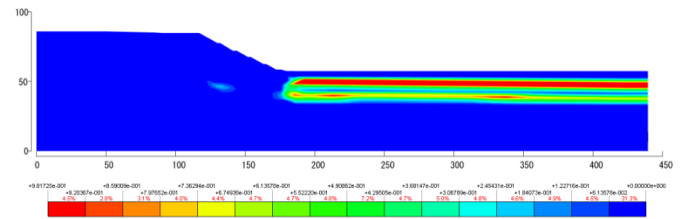
モデル断面図



変位図

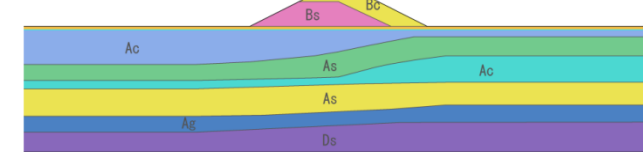


過剰間隙水圧比図

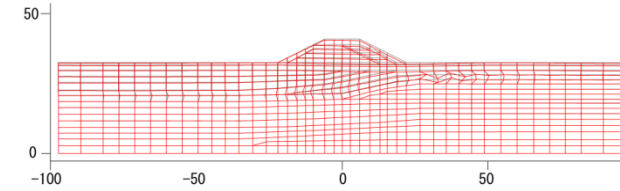


• ALID

モデル断面図



変位図



液状化抵抗率図

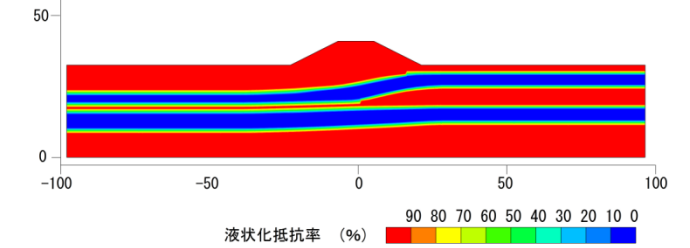


図-7.解析結果

株式会社ダイエーコンサルタンツ
 本社 〒105-0004 東京都港区新橋6丁目4番9号
 電話 03 (5776) 7700 FAX 03 (5776) 7770
 事業本部 〒193-0844 東京都八王子市高尾町1587番地
 電話 042 (665) 8370 FAX 042 (665) 8350
 担当 環境マネジメント事業部 染谷