

3. 東南海・南海地震に対する現況堤防の安全性照査

3.1 安全性照査手法

変形解析手法の特徴

代表的な変形解析手法を以下に示す。

- LIQCA(Computer Program for Liquefaction Analysis) : F E M動的変形解析
- FLIP(Finite Element Analysis of Liquefaction Program) : F E M動的変形解析
- ALID(Analysis for Liquefaction-Induced Deformation) : F E M静的変形解析
- 東畑モデル : 流体力学に基づく解析
- 円弧すべり計算(U法) : 極限平衡法(従来の方法)

各種変形解析手法の特徴

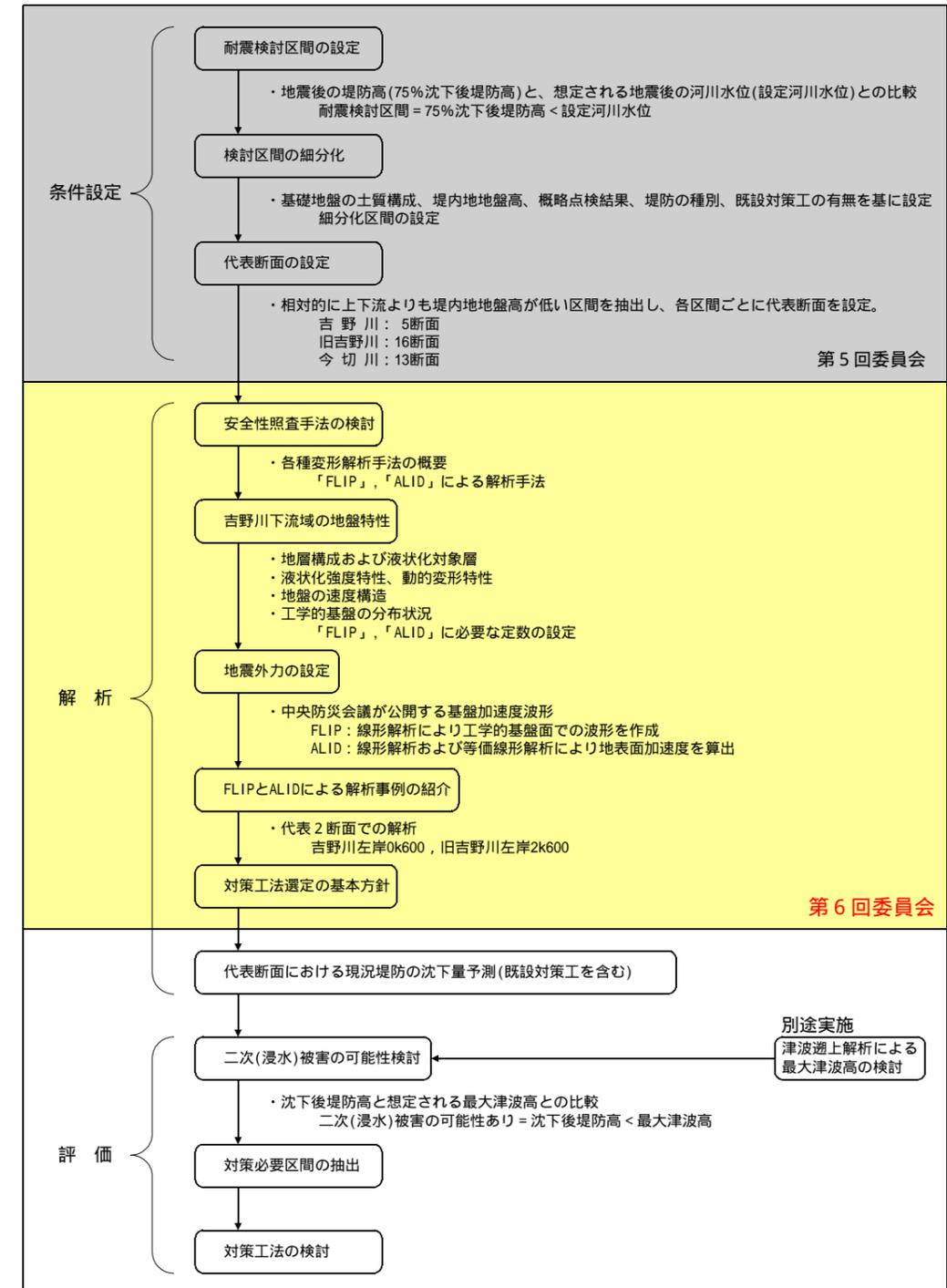
解析手法		特 徴	解析時間
有限要素法	動的	<ul style="list-style-type: none"> ・原理的に実際の現象を忠実に表現しうるモデル。 ・地震動の特性(振幅,周波数,継続時間など)が考慮される。 ・比較的多くの定数を設定する必要があり、そのために特殊な試験を必要とする。 ・試験だけで決まらない定数の設定があり、結果に影響を及ぼすため、解析者にはある程度の経験が必要。 	ある程度の時間を要する
	静的	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的簡便である。 ・F_Lに応じて土の剛性を徐々に低下させており、$F_L < 1.0$で強度を一律ゼロとする U法と比較して実際の土の特性を反映している。 	
流体力学に基づく解析(東畑モデル)		<ul style="list-style-type: none"> ・比較的簡便である。 ・地震動の継続時間は考慮される。 	やや時間を要する
円弧すべり法(U法)		<ul style="list-style-type: none"> ・極めて簡便である。 ・数多くの被害事例の上限をとるように沈下量と安全率の関係が設定されている。 	

出典：「河川堤防の地震時変形量の解析手法：財団法人 国土技術研究センター(平成14年2月)」の抜粋

本委員会においては、代表断面(吉野川, 旧吉野川, 各1断面)で実施した「FLIP」と「ALID」による解析事例を紹介する。

堤防の安全性照査の手順

東南海・南海地震に対する堤防の安全性照査は、以下に示すフロー図に従って実施する。

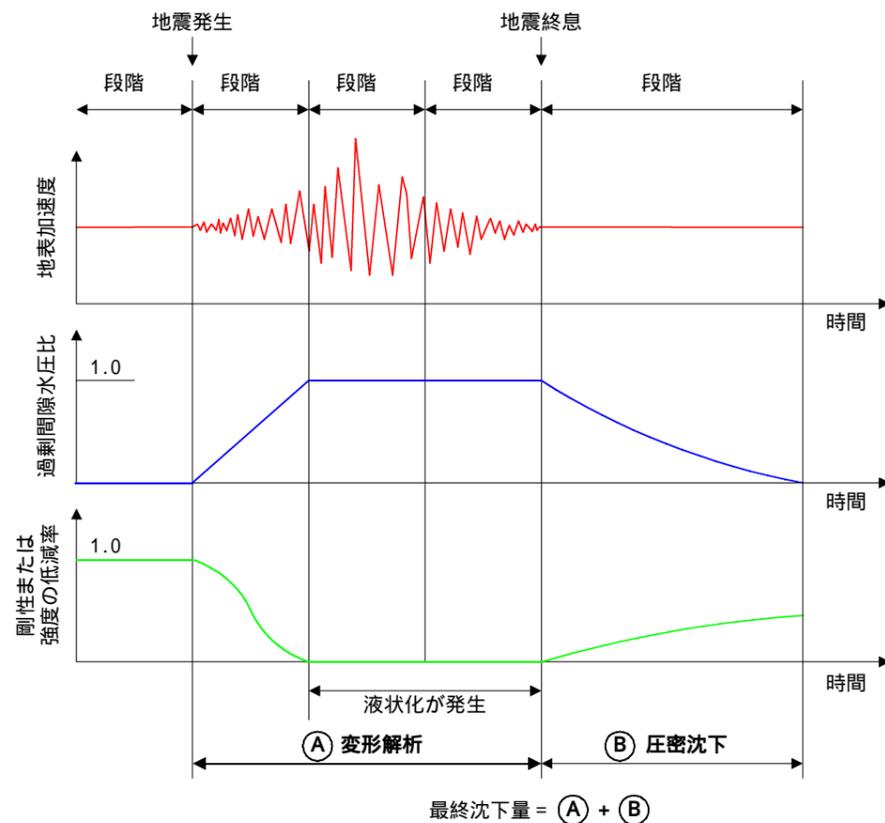


耐震対策検討フロー図

地震による地盤変形メカニズムと解析段階

地震時における地盤の挙動は、以下に示す5段階に区分できる(下図参照)。

- 段階 : 地震前の状態であり、盛土には自重のみが作用し、地震の慣性力は作用しておらず静止している。盛土底面と基礎地盤との境界面には初期せん断力が作用しているが、基礎地盤の砂層の剛性は低下しておらず、安定性を保っている。
- 段階 : 地震波の主要動の前半部における完全液化化に達するまでの段階である。地震時の慣性力による繰返し荷重が盛土および基礎地盤に作用することにより、砂層の過剰間隙水圧が上昇して完全液化化に至る。
- 段階 : 過剰間隙水圧の上昇により、初期に作用していたせん断力は失われ、盛土内において応力の再配分が行われ、塑性破壊が生じる。基礎地盤の砂層では過剰間隙水圧の上昇に伴い、土の強度および剛性が低下する。
- 段階 : 地震波の主要動の後半部における完全液化化後の段階である。液化化により先地盤の有効応力が失われ、盛土直下の基礎地盤が左右に絞り出されるように変形する。
- 段階 : 地震動が終息した後の段階である。この段階では地震の慣性力は作用していないが、発生した過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下が生じ、盛土は沈下する。



地震時における地盤の挙動の概念図

過剰間隙水圧：地下水で飽和した緩い砂の地盤が地震によって揺られると、砂の粒子が浮いて浮遊状態(液化化現象)になり、その深度より浅いところにある土の全ての重みが、圧力として水圧に加わる。この状態での水圧を過剰間隙水圧といい、液化化が起こる際には必ず発生する。

解析手法の特徴

地震時における地盤と盛土の挙動に対する動的変形解析(FLIP)および静的変形解析(ALID)の特徴を下表に示す。

項目	有限要素法に基づく動的解析法(FLIP)	有限要素法に基づく静的解析法(ALID)
地震動の入力 ~ 過剰間隙水圧の発生 ~ 土の強度・剛性の低下	<ul style="list-style-type: none"> ・解析底面において入力地震動を設定する。小さな時間ステップごとに変位や土の応力、過剰間隙水圧、ひずみ、強度、剛性などが地盤内の全ての地点において求まる。 ・地表面震度から求まる地盤内のせん断応力Lと土の液化化抵抗Rの比から簡便に液化化の程度を予測する液化化判定法(F_L法)とは異なり、地震動の特性(振幅、周波数、継続時間など)、土の力学特性や地層構成が地盤の状態(加速度分布、応力、ひずみなど)に及ぼす影響が考慮される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・液化化判定によって地盤内のF_Lの分布を求め、液化化すると判定された土についてはF_Lと繰返し三軸強度比R_Lから液化化後の低下した剛性を求める ・非液化化層の剛性も低下させる。 ・比較的簡便である。 ・F_Lに応じて土の剛性を徐々に低下させており、$F_L < 1.0$で強度を一律にゼロとする u法と比較して実際の土の特性を反映している。
盛土の沈下	<ul style="list-style-type: none"> ・地震中に生じる土の強度・剛性の低下、および地盤に作用する地震慣性力による地盤の変形が計算される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤の剛性が低下したことによって盛土が沈下するものと考え、地盤剛性が低下した状態での堤防沈下量を静的なFEMによって求め、これを地震による沈下量とする。 ・比較的簡便である。

F_L (液化化抵抗率 = R/L)：動的せん断強度比(R)と地震時せん断応力比(L)の比で表され、 F_L が1.0以下の土層については液化化すると判断。
 R (動的せん断強度比)：地震時における地盤の抵抗力
 L (地震時せん断応力比)：地震時に地盤に作用する力

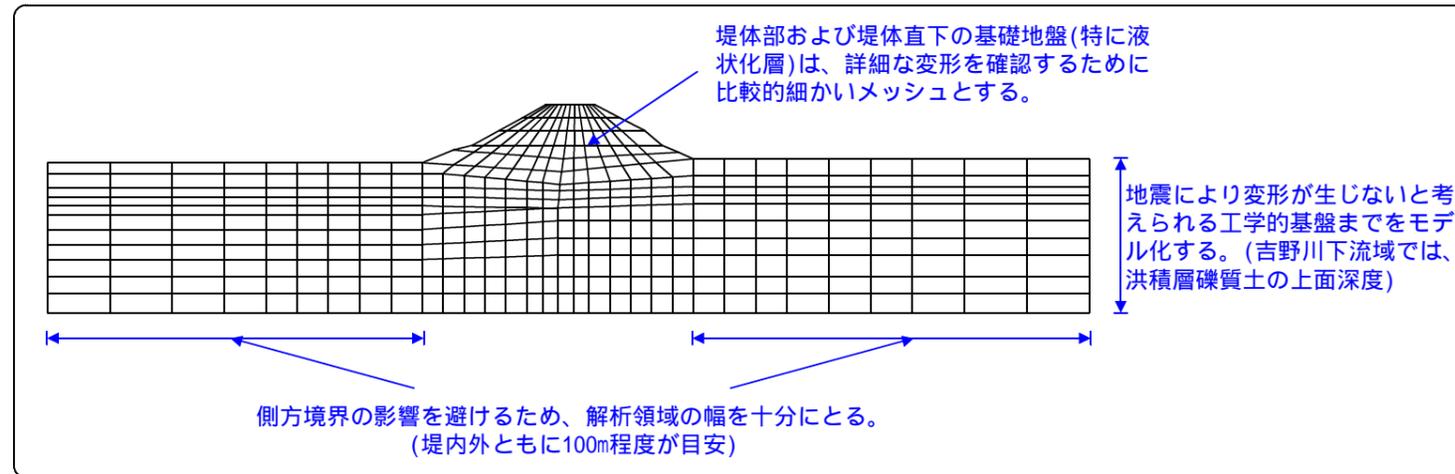
解析手法の概要

(1)地盤のモデル化

【動的変形解析(FLIP)】

【静的変形解析(ALID)】

(1.1) F E Mメッシュの作成



(1.2)変形解析に必要な定数

分類	項目	変形予測手法		変形解析への利用の考え方
		FLIP	ALID	
物理特性	湿潤密度	t (g/cm ³)		主に静的自重解析に用いる。 ALIDでは液状化抵抗率(FL)の算出およびせん断剛性低下率の算出に用いる。
	細粒分含有率	F_c (%)		
	10%粒径, 平均粒径	D_{10}, D_{50} (mm)		
	塑性指数	I_p (%)		
せん断特性	内部摩擦角	ϕ (°)		FLIPにおいて、地盤の応力, 変位, 強度の算出に用いる。
	変相角	ρ (°)		
変形特性	せん断弾性係数	G (kPa)		主にFLIPで、地盤の応力, 変位, 速度, 加速度, 強度, 剛性の算出に用いる。 ALIDでは、低下したせん断剛性(地震後の特性値)での静的自重解析に用いる。
	初期せん断弾性係数	G_{ma} (kPa)		
	体積弾性係数	K_{ma} (kPa)		
	ポアソン比			
	せん断波速度	V_s (m/s)		
	履歴減衰の上限値	h_{max}		
液状化特性	液状化特性の全体を規定する定数	W1		FLIPにおいて、地盤の応力, 水圧, 変位の算出に用いる。
	液状化特性の前半を規定する定数	P1		
	液状化特性の後半を規定する定数	P2		
	液状化特性の下限値を規定する定数	C1		
	液状化特性の最終状態を規定する定数	S1		

(F.1.3)境界条件の設定

静的自重解析

- ・側方：水平方向のみ固定
- ・底面：水平, 鉛直方向固定

動的解析

- ・側方, 底面：粘性境界(到達する波動が透過するような境界)

(A.1.3)境界条件の設定

静的自重解析

- ・側方：水平方向のみ固定
- ・底面：水平, 鉛直方向固定

粘性境界：動的解析においては、解析領域の境界面で反射波が発生する。この反射波による影響を避けるために、反射波を吸収するための境界を境界条件として与える。

ポアソン比：土に鉛直方向の圧縮力を加えたとき、「鉛直方向のひずみ ϵ_a 」に対する側方に膨れ出す「水平方向のひずみ ϵ_r 」の比。

$$\nu = \epsilon_r / \epsilon_a$$

(2)解析の実施

【動的変形解析(FLIP)】

【静的変形解析(ALID)】

(2.1)地震前の物性値を用いた静的自重解析

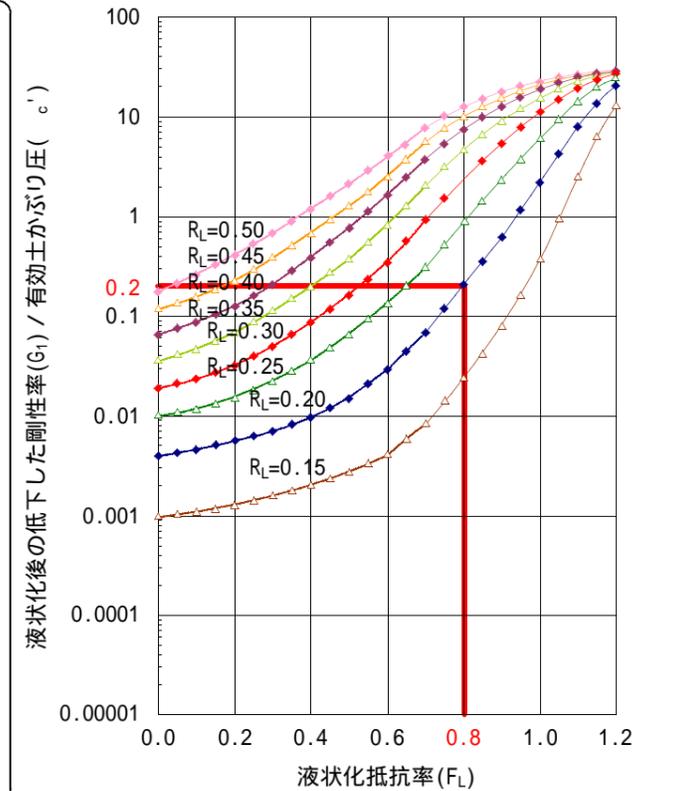
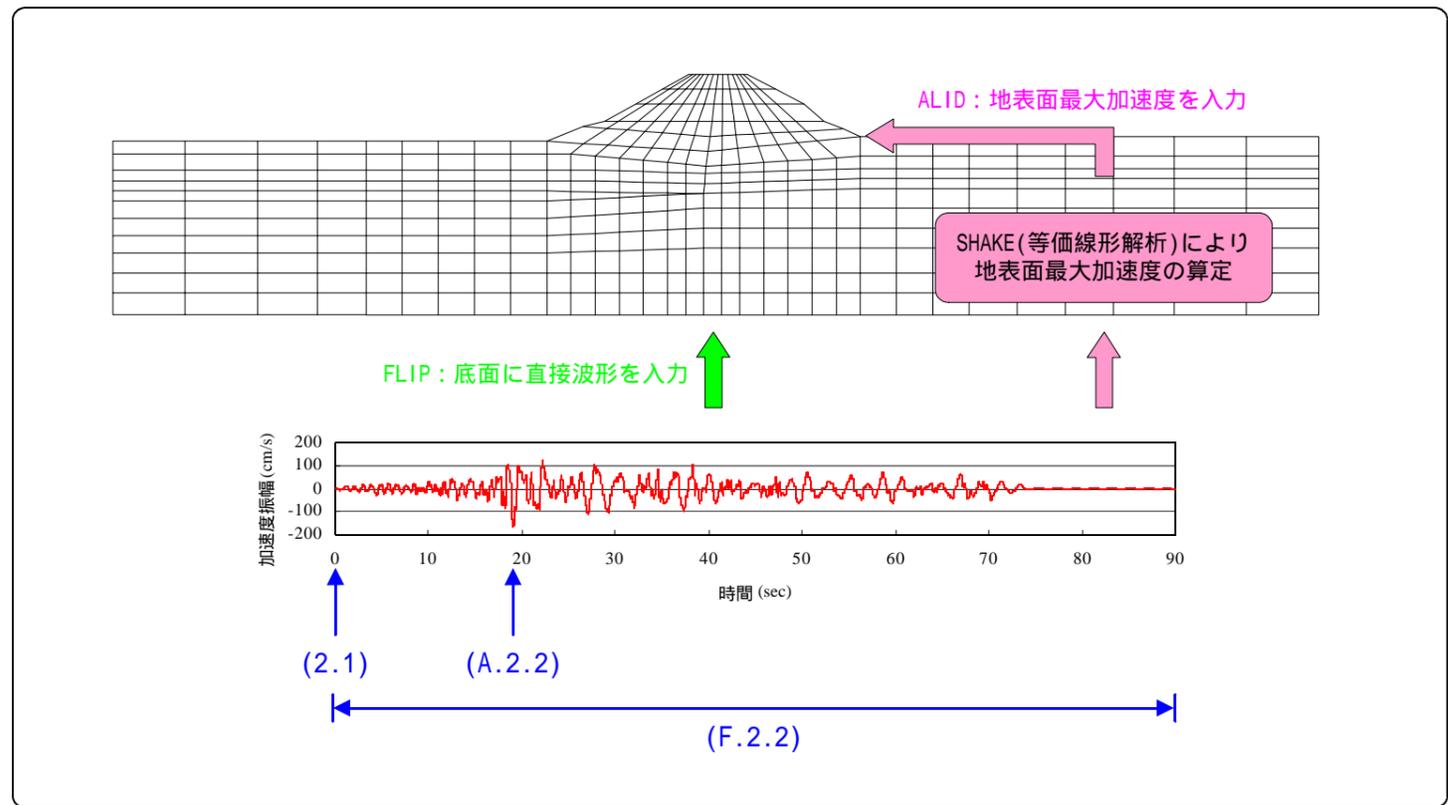
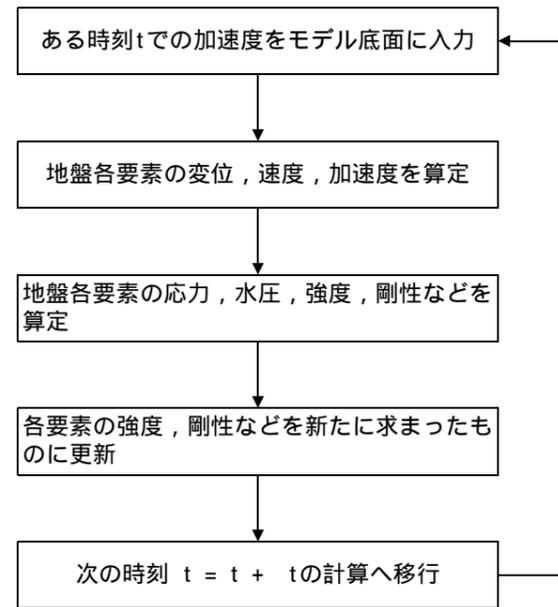
地震前の物性値を用いて、初期応力状態(現在の応力状態)を算定

(F.2.2)動的解析

静的自重解析で得られた初期応力を引き継ぎ、時刻歴波形を入力して解析を実施
時刻歴応答値を算出

(A.2.2)地震後の物性値を用いた静的自重解析

地表面最大加速度を用いた液状化判定により、地盤内の液状化抵抗率(F_L)の分布を求め、液状化すると判定された土層については、液状化抵抗率(F_L)と繰返し三軸強度比(R_L)の関係から、液状化後の低下した剛性(G_1)を求める。
液状化後の低下した剛性(G_1)を用いて、地盤剛性が低下した応力状態(地震後の応力状態)を算定



【液状化後の低下した剛性(G_1)の算出方法】

液状化抵抗率(F_L)を求める
繰返し三軸強度比(R_L)を求める (グラフより)
液状化後の低下した剛性率(G_1)と有効土かぶり圧(σ'_{v0})の比を求める
湿潤密度, 層厚, 地下水位より有効土かぶり圧(σ'_{v0})を求める
液状化後の低下した剛性(G_1)を求める

液状化抵抗率(F_L) = 0.8
繰返し三軸強度比(R_L) = 0.2 (グラフより)
液状化後の低下した剛性率(G_1) / 有効土かぶり圧(σ'_{v0}) = 0.2
有効土かぶり圧(σ'_{v0}) = 150kN/m²
液状化後の低下した剛性(G_1) = 30kN/m²

(F.2.3)最終変位量の算定

地震動終了後の変位量を最終変位量とする。

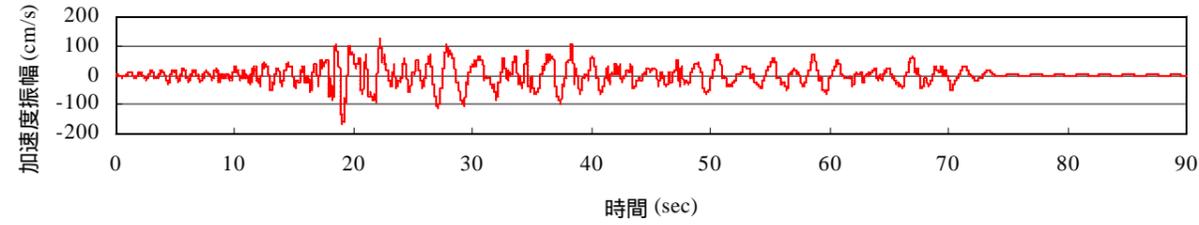
(A.2.3)最終変位量の算定

地震後の変位量から地震前の変位量の差をとり、最終変位量を算出する。

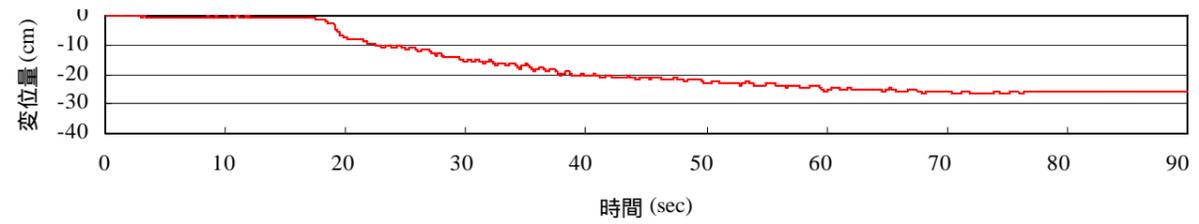
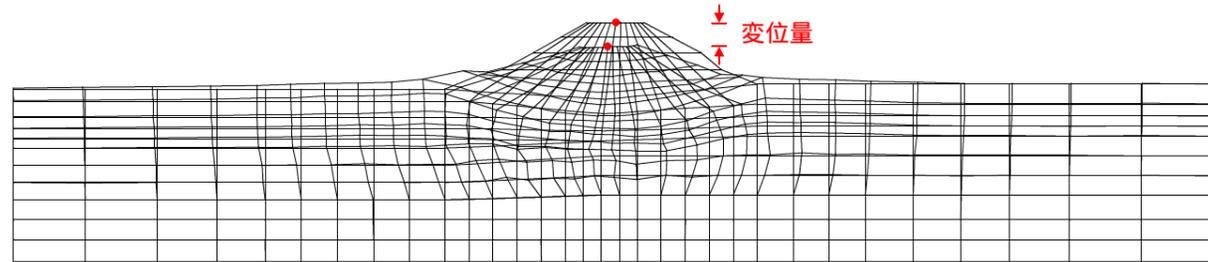
(3) 結果の整理

【動的変形解析(FLIP)】

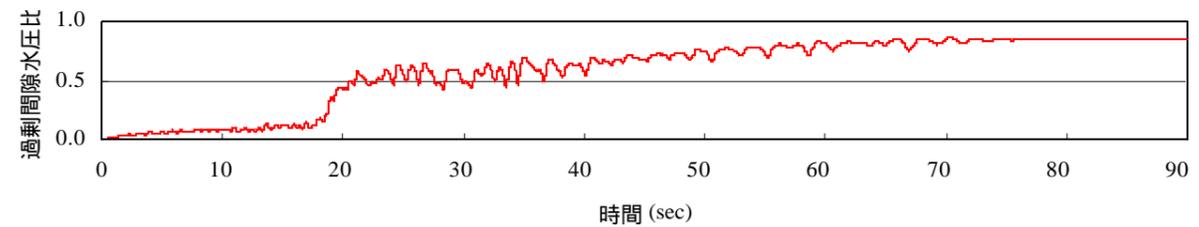
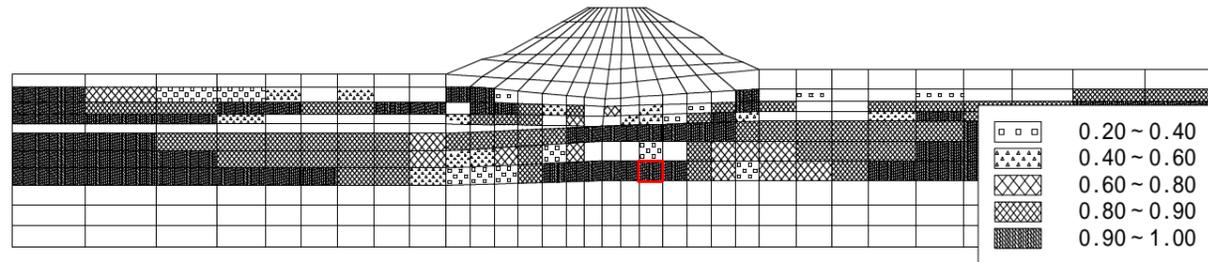
加速度振幅



残留変形図

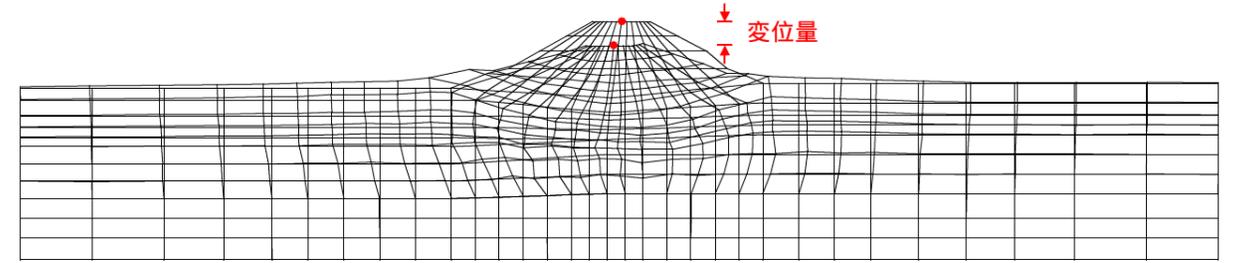


過剰間隙水圧比分布図

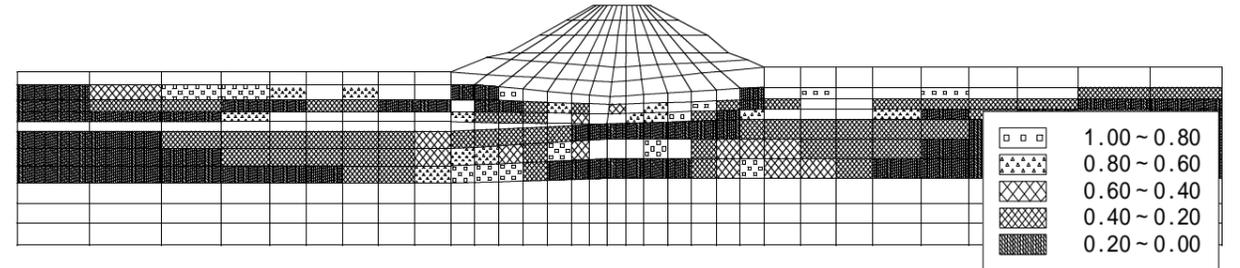


【静的変形解析(ALID)】

残留変形図



液状化抵抗率(F_L)分布図



3.2 吉野川下流域の地盤特性

吉野川下流域の地層構成

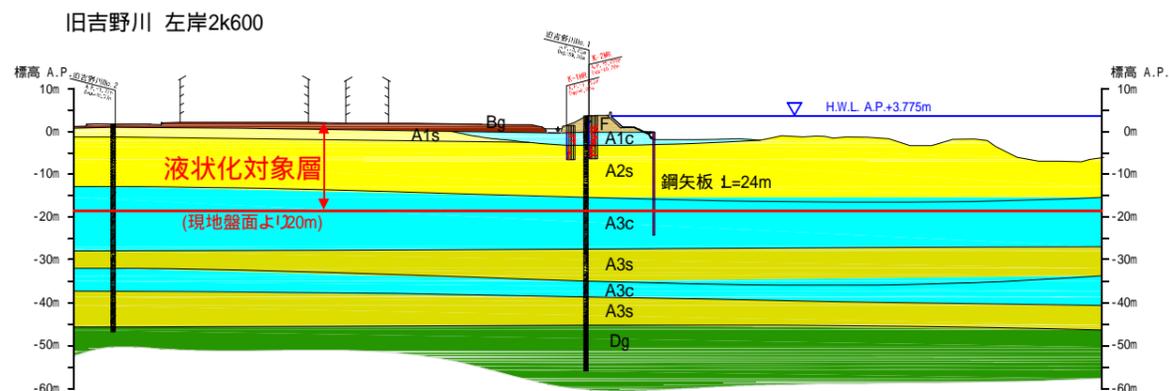
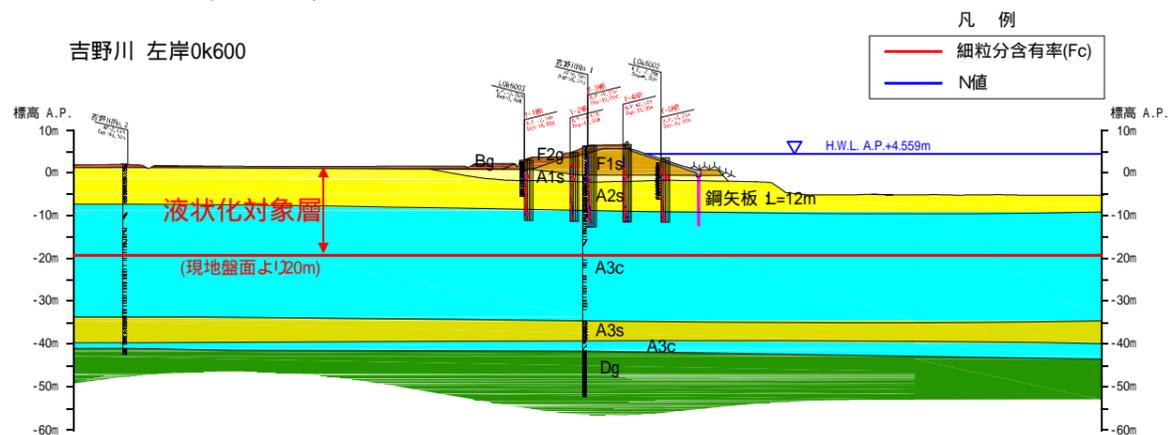
吉野川下流域の地層構成は下表に示すとおりであり、洪積層礫質土(Dg)を工学的な基盤とし、その上位には軟弱な沖積層粘性土(Ac)および砂質土(As)が互層状に厚く堆積する。

地質時代	地層名	地質記号	土質	
現世	堤内地盛土	Bg	礫質土	
	二期堤体盛土	吉野川：昭和2年以降	F _{2g}	礫質土
	一期堤体盛土	吉野川：昭和2年以前	F _{1s}	砂質土
	堤体盛土	旧吉野川	F	粘性土
新生代第四紀	沖積層第一砂質土	現河道の氾濫堆積物	A _{1s}	砂質土
	沖積層第一粘性土		A _{1c}	粘性土
	沖積層第二砂質土	縄文海退時の堆積物	A _{2s}	砂質土
	沖積層第三粘性土	縄文海進時の堆積物	A _{3c}	粘性土
	沖積層第三砂質土		A _{3s}	砂質土
	更新統	洪積層礫質土	Dg	礫質土

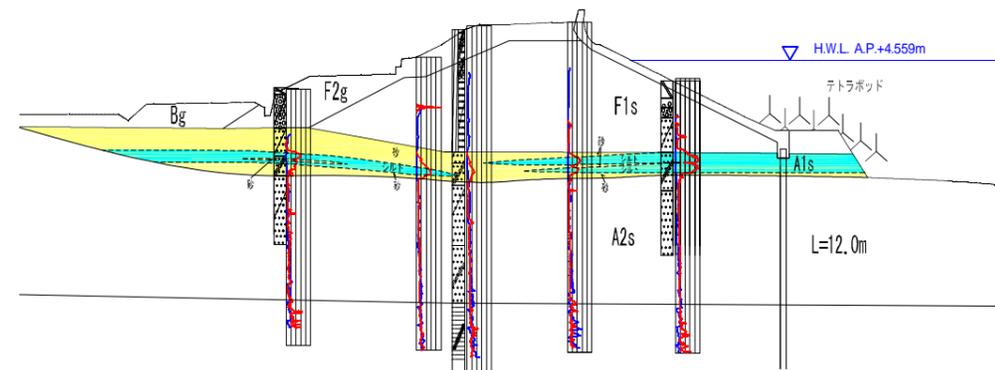
軟弱な沖積層の分布状況

かつての吉野川は、現在の旧吉野川(今切川)を本流としており、現在の第十堰の下流には吉野川の原型となる別宮川が流れていた。このため、吉野川は比較的静穏な堆積環境にあったと考えられ、縄文海進時に堆積した粘性土(A3c)が、層厚25m程度で厚く堆積する。

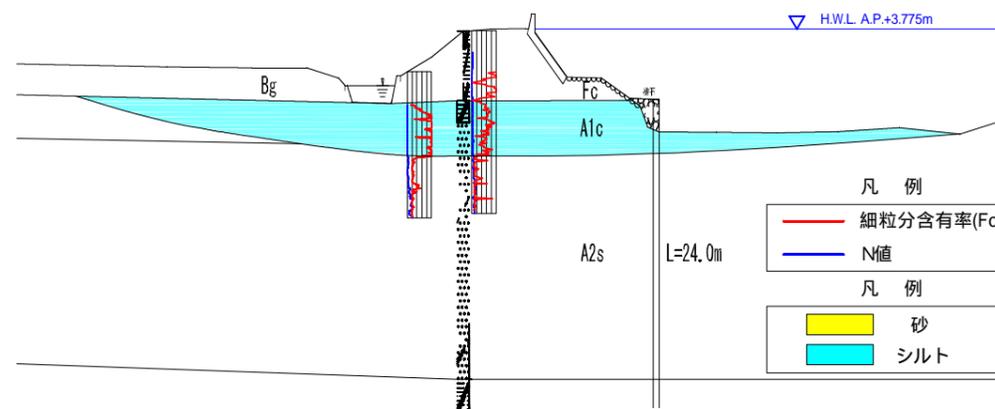
一方、旧吉野川は砂質土と粘性土が互層状に分布しており、洪水の度に一度堆積した粘性土(A3c)が洗掘され、そこに砂質土(A3s, A2s)が堆積したと考えられる。



堤防直下に分布する現河道の氾濫堆積物は、吉野川が本流となった現在の堆積環境が反映されており、吉野川では粘性土～砂質土が互層状を成す非常に不均質な地層となっている。一方、旧吉野川は比較的均質な粘性土が分布している。



堤体部分の拡大図(吉野川左岸0k600)



堤体部分の拡大図(旧吉野川左岸2k600)

液状化対象層の設定

一般に、液状化対象層とするのは緩い飽和砂質土層であり、「道路橋示方書・同解説(耐震設計編)：社団法人 日本道路協会(平成14年3月)」によれば、以下の条件全てに該当する場合を液状化の判定を行う必要がある砂質土層として定義している。

地下水位が現地盤面から10m以内にあり、かつ、現地盤面から20m以内の深さに存在する飽和土層
 細粒分含有率(Fc)が35%以下の土層、または、 E_v が35%を超えても塑性指数(I_p)が15以下の土層
 平均粒径(D_{50})が10mm以下で、かつ、10%粒径(D_{10})が1mm以下である土層

吉野川下流域に分布するA3cは粘性土であるものの、その上部はシルトを主体とする塑性指数(I_p)が15以下の地層である。したがって、現地盤面から20m以内の深さまでが液状化対象層となる。

塑性指数(I_p)：土を工学的に分類するための指標で、主に粘性土の塑性の大小を示すのに用いられる。粘土粒子が多いほど大きく、シルト粒子や砂粒子を多く含む土は小さい。

平均粒径(D_{50}), 10%粒径(D_{10})：粒度試験において、土の全重量に対する質量50%の土がふるいを通過したときの粒径を平均粒径という。10%粒径は質量10%の土がふるいを通過したときの粒径である。

液状化強度特性

地震に対する液状化対象層の動的せん断強度を得る目的で、液状化対象層から採取した試料について液状化試験を行い、繰返し三軸強度比(R_L)を求めた。結果を下表に示す。

試料採取位置			繰返し三軸強度比(R_L)
河川名	地層名	地質記号	
吉野川	堤体盛土	F1s	0.168
	沖積層第一砂質土	A1s	0.129
		A2s	0.220
旧吉野川	沖積層第二砂質土	A2s	0.180
			0.178
			0.185
旧吉野川	沖積層第二砂質土	A2s	0.167
			0.195

数値の色は下表の区分と対応

繰返し三軸強度比(R_L)は、土の種類や密度などによって異なってくる。また、液状化の発生は加わる地震力にも関係するため、繰返し三軸強度比(R_L)だけでは液状化するか否かの判断はできない。しかし、これまでの経験から、一般的な目安として「液状化のしやすさ」は下表のようにまとめられている。

吉野川下流域に分布する液状化対象層の繰返し三軸強度比(R_L)は概ね0.2以下を示し、下表に従えば、液状化しやすい土に区分されている。

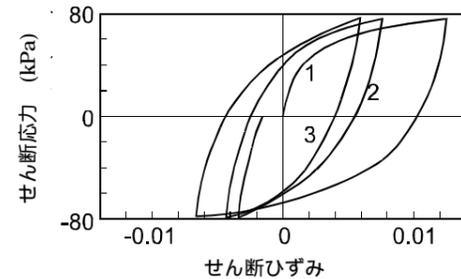
液状化の発生	繰返し三軸強度比(R_L)			
	0.2	0.3	0.4	0.5
しやすい	[Red bar from 0.2 to 0.3]			
中位	[Yellow bar from 0.3 to 0.4]			
しにくい	[Green bar from 0.4 to 0.5]			

参考資料：「液状化の調査から対策工まで(安田)：鹿島出版会」に修正加筆

動的変形特性

地震により土に繰返し荷重(地震による力)が作用すると、右図に示すような挙動(非線形性)を示す。

地盤材料の非線形性は動的変形特性とも呼ばれ、この変形特性は三軸試験機や中空ねじり試験機を用いた動的変形特性試験より求められる。



繰返しせん断を受ける土の挙動の例

地震時における地盤の液状化に対する抵抗力(強度)は、動的せん断強度比(R)で表される。この動的せん断強度比(R)は、液状化試験によって求められる繰返し三軸強度比(R_L)と以下の関係にある。

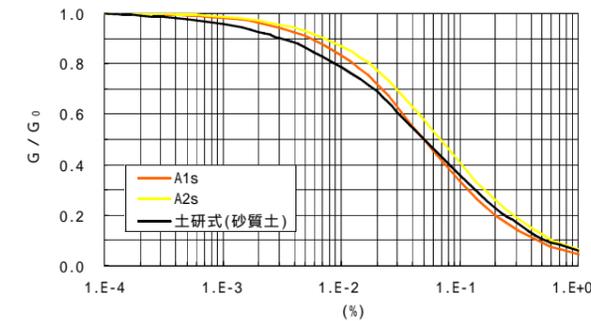
$$\text{動的せん断強度比}(R) = \text{地震動特性による補正係数}(C_w) \times \text{繰返し三軸強度比}(R_L)$$

ここで、地震動特性による補正係数(C_w)：タイプ (プレート境界での海洋型) = 1.0

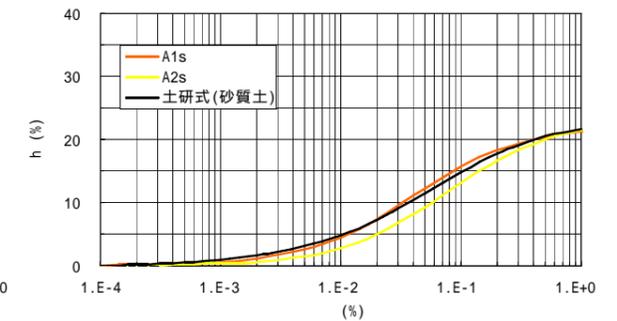
繰返し三軸強度比(R_L)：N値もしくは液状化試験(R_{L0})により設定

地震に対する液状化対象層(A1s, A2s, A3c)の動的変形特性を得る目的で、液状化対象層から採取した試料について動的変形特性試験を行い、応力-ひずみ関係の形状より、ひずみレベルに応じたせん断定数(G)と減衰定数(h)を求めた。

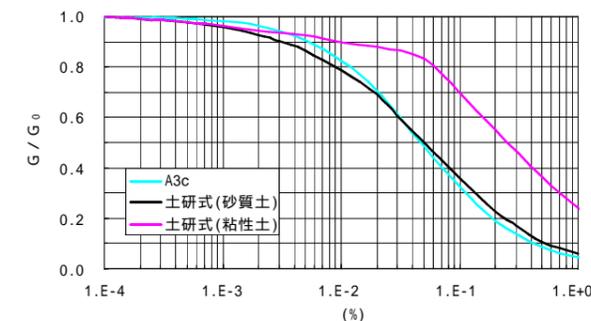
結果を下図に示す。なお、同図には「独立行政法人 土木研究所」が提案する一般的な砂質土および粘性土の動的変形特性を併記した。



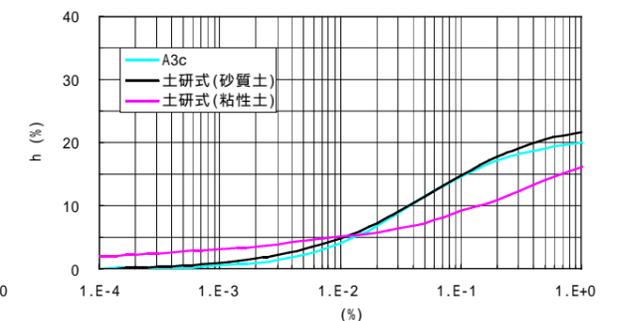
A1s, A2s層 G/G₀ ~ 関係



A1s, A2s層 h ~ 関係



A3c層 G/G₀ ~ 関係

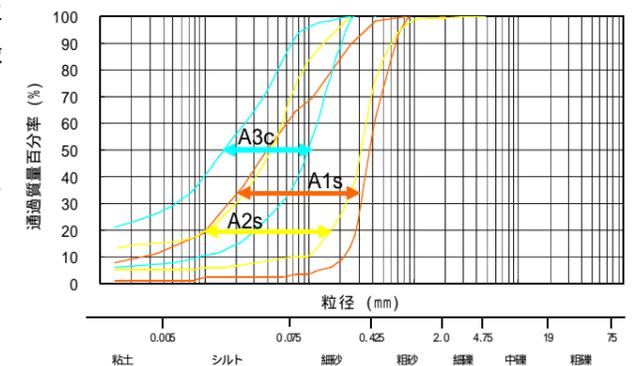


A3c層 h ~ 関係

A1sおよびA2sの動的変形特性は、「独立行政法人 土木研究所」が示す動的変形特性と近似しており、一般的な砂質土の変形特性といえる。

一方、A3cはシルトを主体とする粘性土であるものの、塑性指数(I_p)が15%未満と低塑性であるため、砂質土に近い物理特性を示す。

したがって、A3cの動的変形特性は、A1sおよびA2sと同様に砂質土に近似した変形特性を示す。



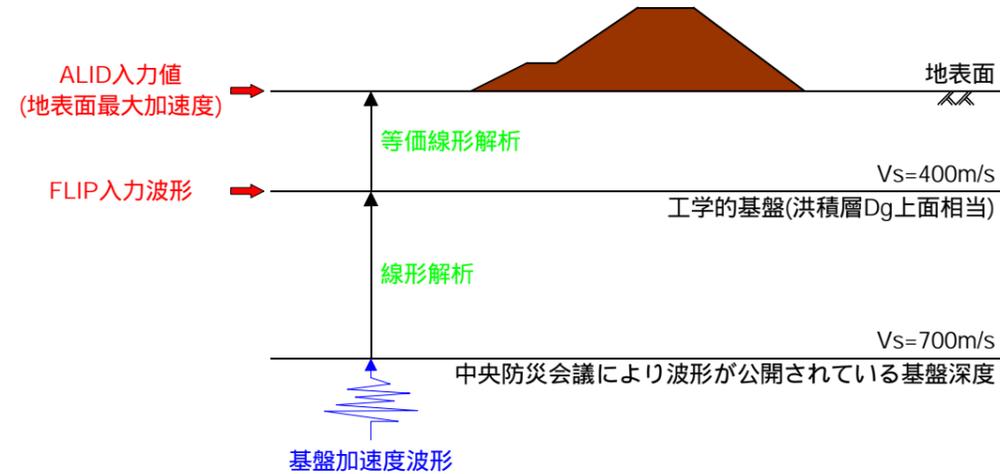
各地層の粒度分布

剛性率 G ：せん断弾性定数ともいい、力が加わった時のズレに対抗する度合いを示すもので、応力とひずみの比で求められる。剛性率は不変のものではなく、地盤内のひずみの大きさに依存して変化し、地震により地盤が揺らされた時には剛性は低下する。

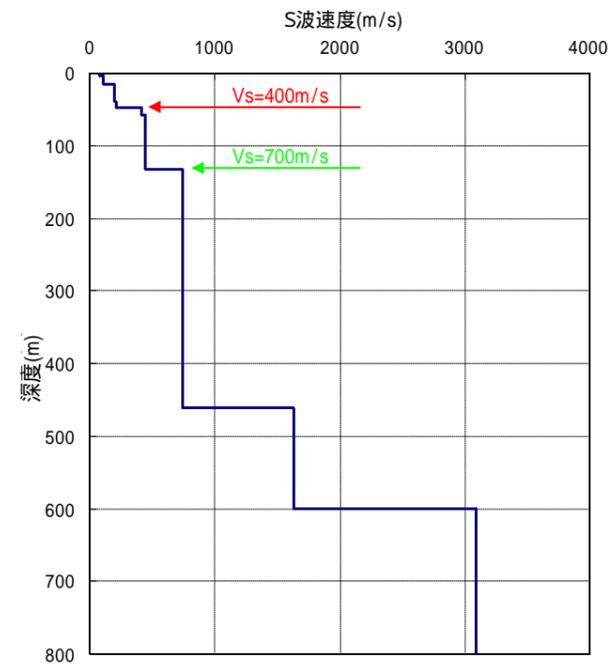
減衰定数 h ：地震を受けたことによって地盤内に発生し貯えられたエネルギーに対する、損失したエネルギーの割合を示す。減衰定数も剛性率と同じく、地盤内のひずみの大きさに依存して変化し、地震により地盤が揺らされた時には減衰定数は増大する。

地盤の速度構造

中央防災会議より公開されている東南海・南海地震連動モデルの地震波形は、せん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 相当層上面での基盤加速度波形である。変形解析(FLIP, ALID)に際しては、地表からこのせん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 相当層までの地盤のS波速度構造をモデル化する必要がある。



PS 検層および微動アレイ探査から得られた吉野川下流域のS波速度構造を下表に示す。基盤加速度波形の入射する $V_s=700\text{m/s}$ 相当層は深度133mに、工学的基盤($V_s=400\text{m/s}$ 以上)は深度47mに分布する。この工学的基盤($V_s=400\text{m/s}$ 以上)は、洪積層礫質土(Dg)上面深度に該当する。

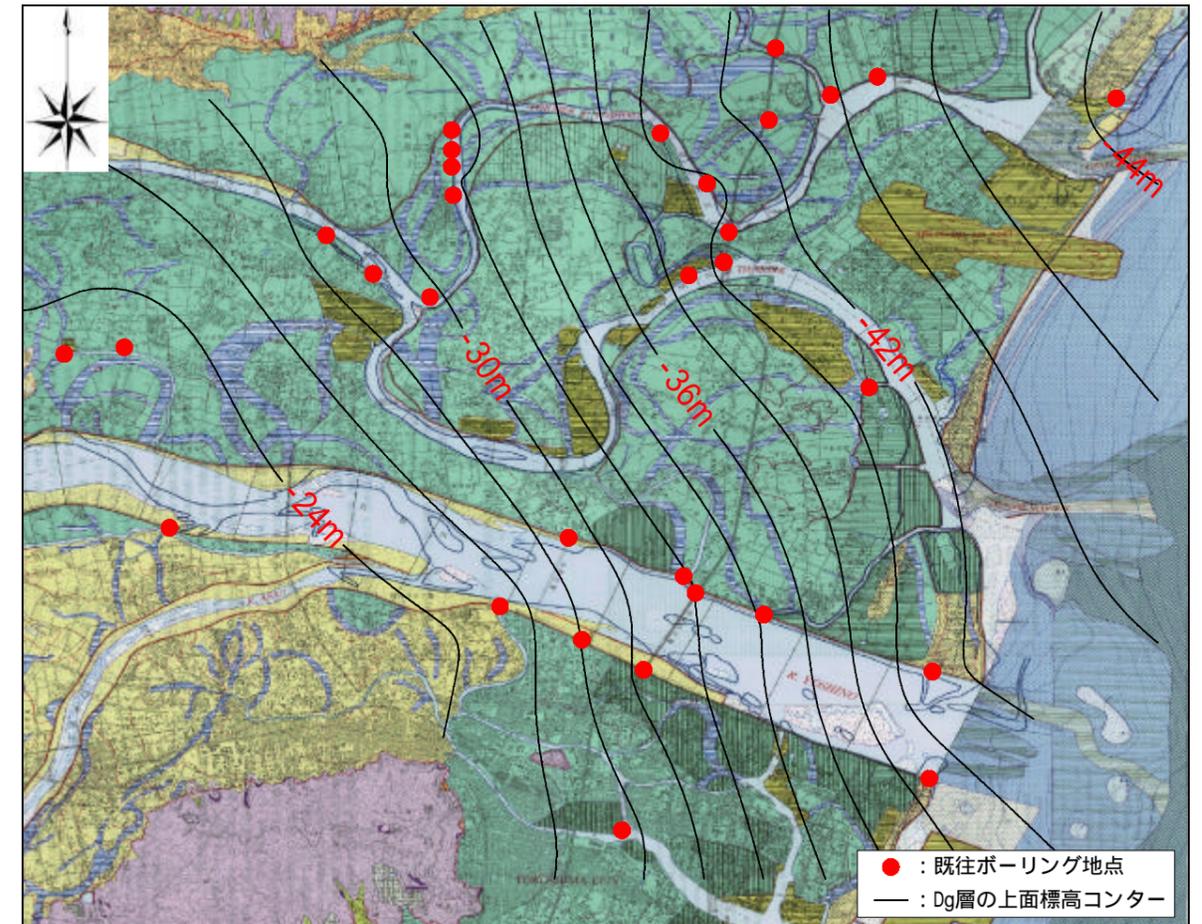


深度 (m)	S波速度 (m/s)
0.0 - 3.9	75
3.9 - 15.0	110
15.0 - 38.9	200
38.9 - 47.1	210
47.1 - 58.4	410
58.4 - 132.7	442
132.7 - 460.5	737
460.5 - 599.6	1630
599.6 -	3094

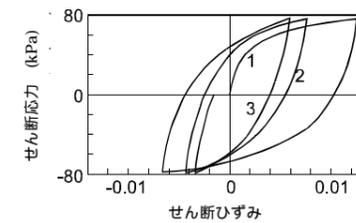
線形解析：地震により土に繰り返し荷重が作用した場合の「応力～ひずみの関係」を一定として解析する方法。
 等価線形解析：地震により土に繰り返し荷重が作用した場合、土の「応力～ひずみの関係」は非線形性を示す。しかし、線形解析ではこの非線形性を考慮できないため、地盤特性(非線形性)を取り入れる工夫として、非線形の応力～ひずみ関係を、発生するひずみレベルに応じた線形モデルに置き換える手法をとっている(右図参照)。「SHAKE」は等価線形解析手法の1つであり、従来、最も一般的に利用されてきた等価線形解析のプログラムであり、これまでに適用された事例も数多い。

工学的基盤(洪積層礫質土：Dg)の分布状況

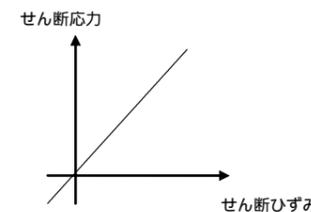
吉野川下流域における工学的基盤面($V_s > 400\text{m/sec}$ 以上)は、洪積層礫質土(Dg)の上面深度に該当する。このDg上面深度は、既往ボーリング結果によれば、南西から北東方向に向かって緩やかに傾斜している。



非線形(軟弱な土の挙動)

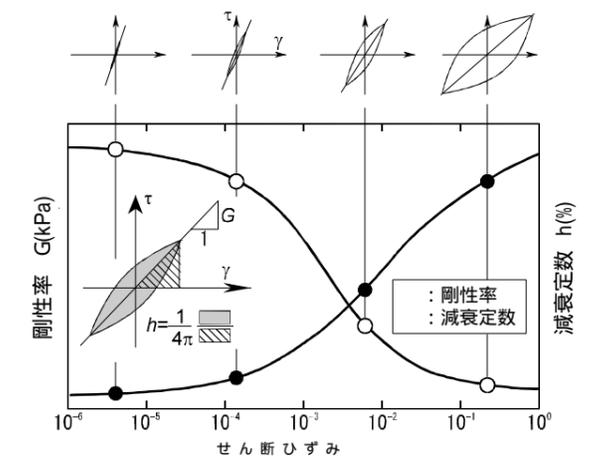


線形(岩盤など硬い土の挙動)



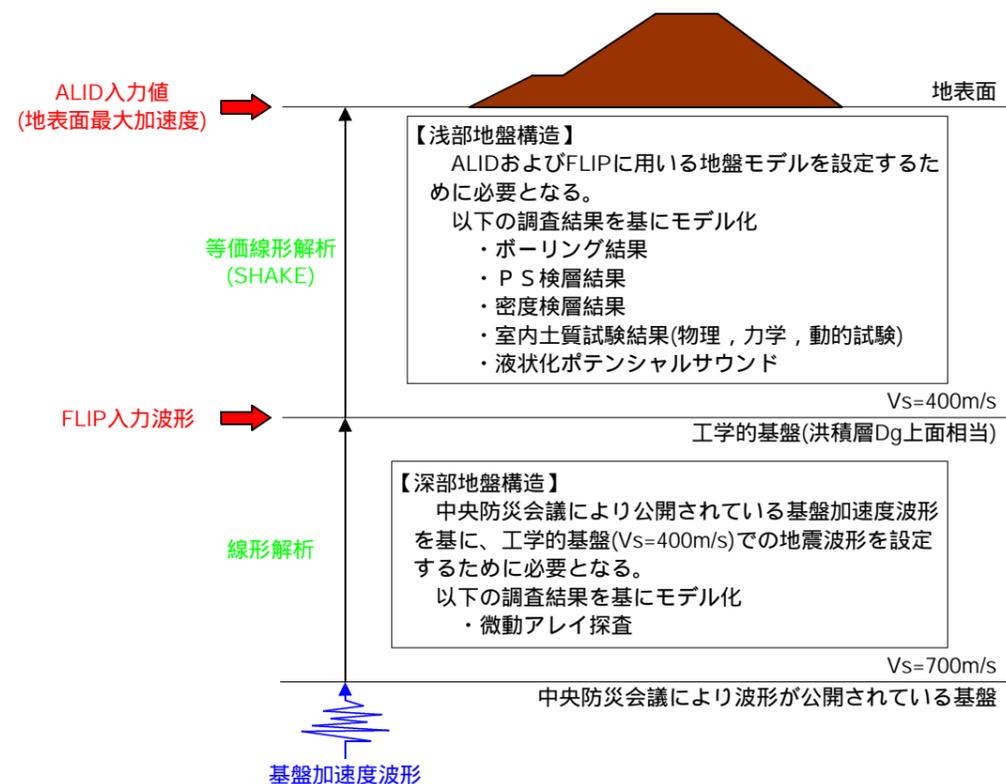
等価線形

土の非線形特性を線形解析に取り入れるため、非線形の応力～ひずみ関係をひずみレベルに応じて線形モデルに置き換える方法



3.3 地震外力の設定

FLIPおよびALIDに必要な地震外力の入力位置、および算定方法の概念図を下図に示す。



FLIPでは、工学的基盤(Vs=400m/s)における時刻歴波形が必要となる。ここで、中央防災会議「東南海・南海地震等に関する専門調査会」により公開された地震波形は、Vs=700m/s相当の基礎面における加速度波形である。このため、Vs=700m/sから400m/sまでの深部地盤を対象に線形解析を行い、工学的基盤における時刻歴波形を作成した。(右図参照)

一方、ALIDでは、地表面における最大加速度が必要となる。このことから、Vs=700m/sから400m/sまでの深部地盤は線形解析で、Vs=400m/sより上部の浅部地盤は、これまでに最も一般的に利用されてきた等価線形解析手法の1つである「SHAKE」により地表面最大加速度を算出した。

中央防災会議により公開されている地震波形の入射最大加速度、線形解析により算出した工学的基盤最大加速度、等価線形解析(SHAKE)により算出した地表面最大加速度(参考値)を下表に示す。

解析地点			入射最大加速度 ¹⁾ (Gal)	工学的基盤最大加速度 ²⁾ (Gal)	地表面最大加速度 ³⁾ (Gal)
河川名	左右岸	距離標			
吉野川	左岸	0k600	194	252	129
旧吉野川	左岸	2k600	134	141	144

1) 中央防災会議により波形が公開されている基礎深度(Vs=700m/s)

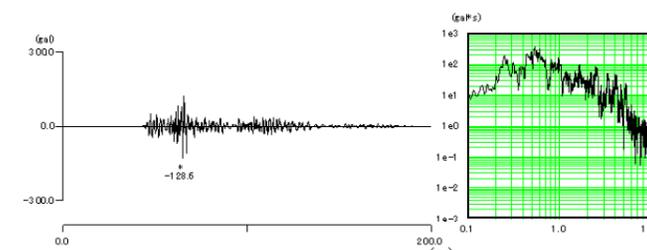
2) 工学的基盤(洪積層Dg上面相当: Vs=400m/s)

3) 等価線形解析(SHAKE)により算出した参考値

変形解析に用いた地震波形

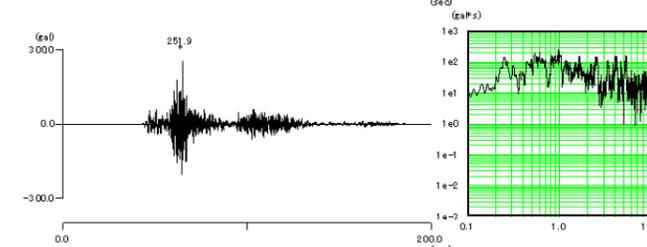
【吉野川左岸0k600】

地表面



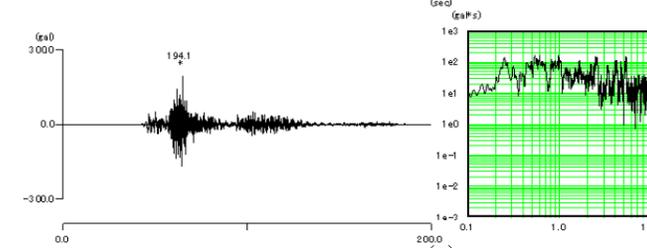
工学的基盤

(Vs=400m/s)



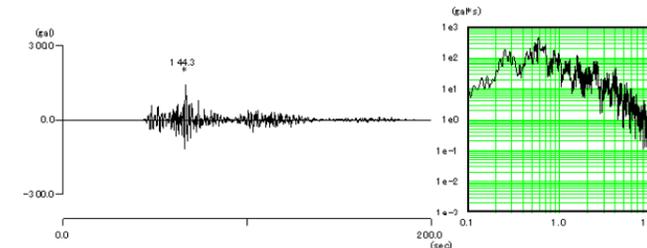
基盤

(Vs=700m/s)



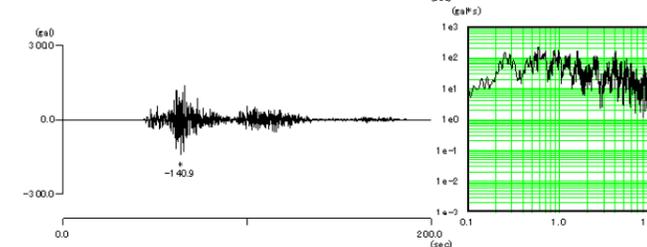
【旧吉野川左岸2k600】

地表面



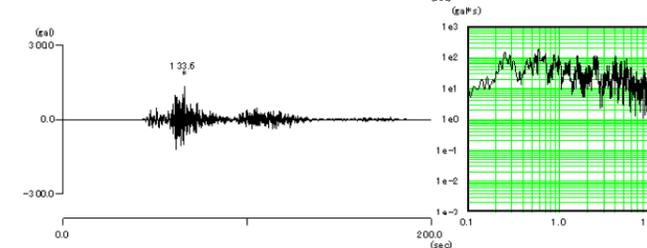
工学的基盤

(Vs=400m/s)



基盤

(Vs=700m/s)



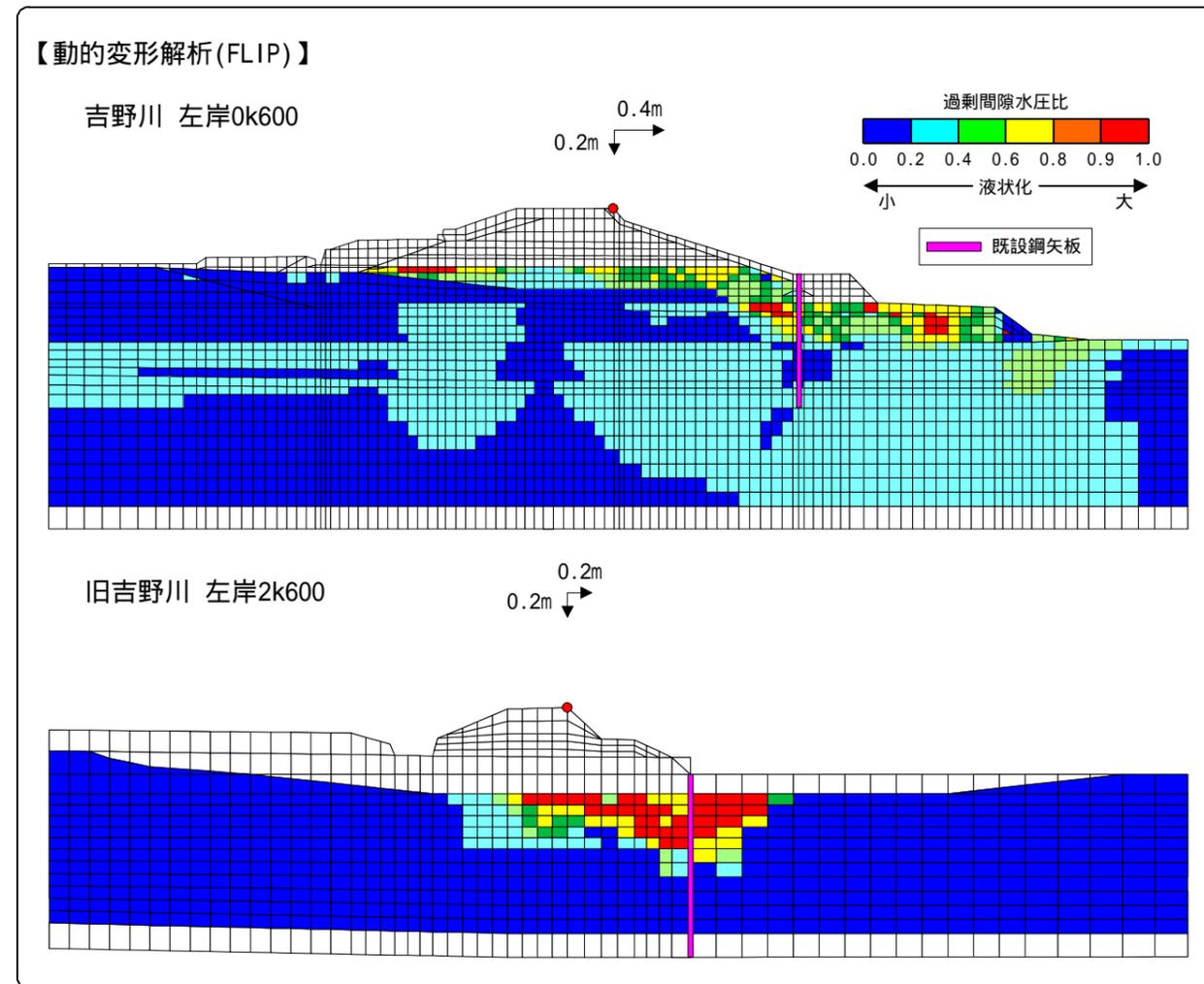
上図「gal * s ~ Hz」は、地震の周波数特性を示したものである。

詳細は巻末資料「地震に関する用語」pp4参照

3.4 FLIPとALIDによる解析事例の紹介

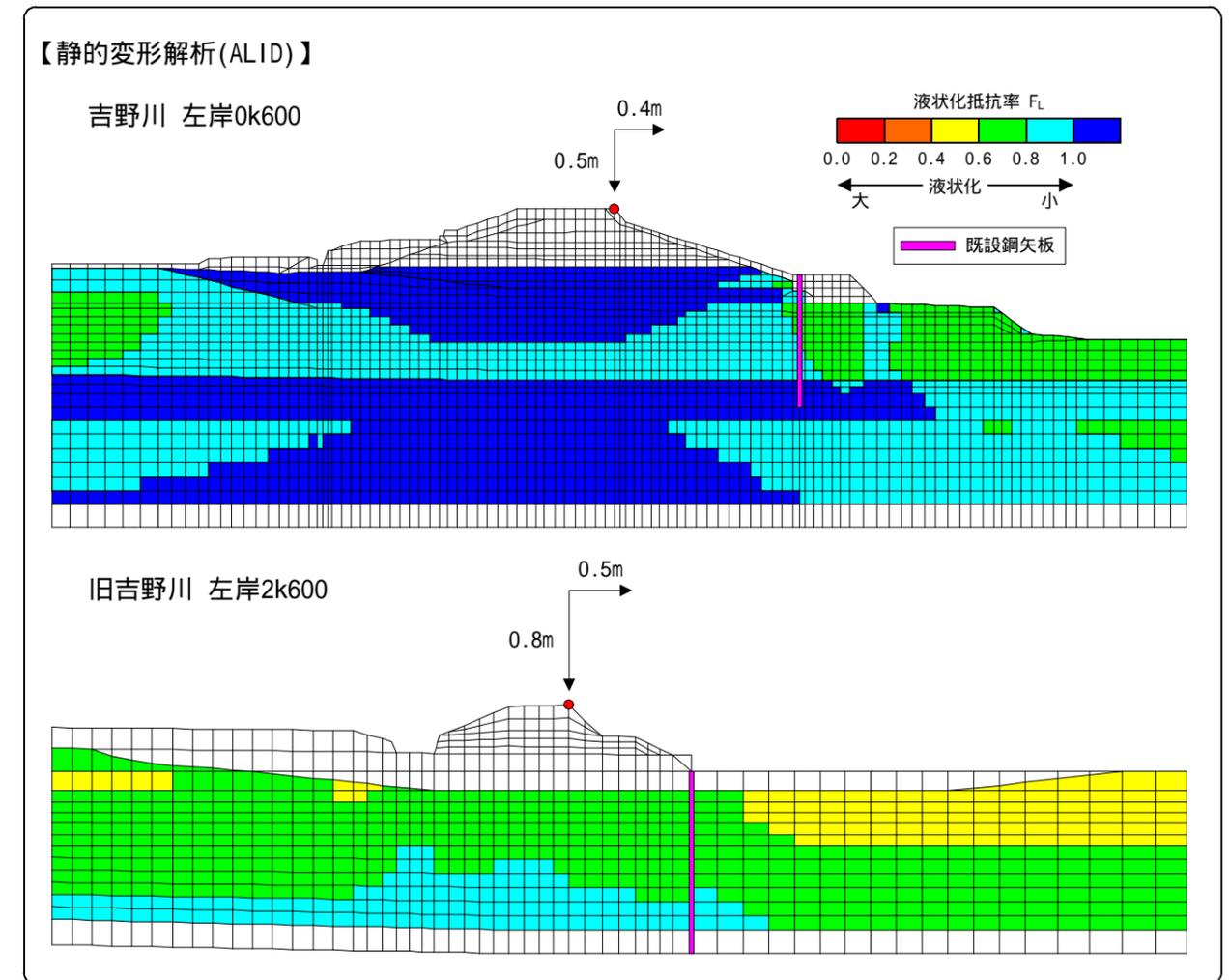
解析結果

吉野川左岸0k600および旧吉野川左岸2k600における、現況堤防(堤外側に鋼矢板施工済み：レベル1対策)の解析結果を下図に示す。



FLIPの結果

- ・盛土下部の基礎地盤において過剰間隙水圧比が上昇(液状化が発生)する結果となった。その主な要因は、地震時に堤体に作用する慣性力の増大によるものである。
- ・盛土下部のみ過剰間隙水圧比が上昇(液状化が発生)することにより、変形が生じた。



ALIDの結果

- ・液状化判定は、「道路橋示方書・同解説 耐震設計編：社団法人 日本道路協会(平成14年3月)」に準拠しており、計算では地表面最大加速度を地盤全体に一律に与えている。このため、基礎地盤全体で液状化抵抗率(F_L)が1未満を示す(液状化が発生する)結果となった。
- ・基礎地盤全体が液状化することにより、変形が生じた。