

海岸堤防の地震時液状化による 自重変形解析例を紹介

GeoFEASによる自重変形解析を紹介

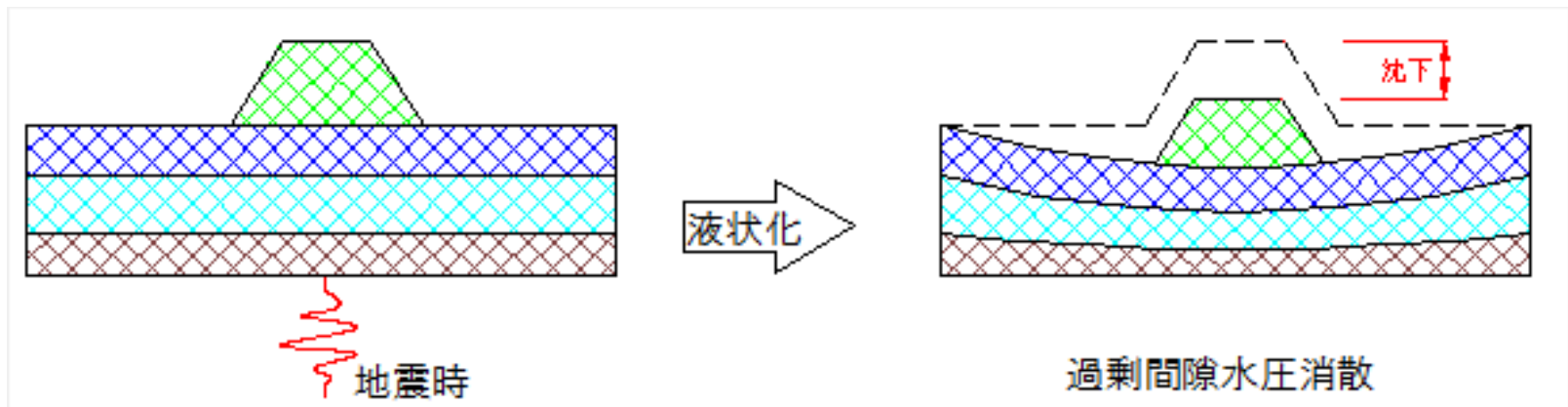
(株)ブルドジオテクノ

花田俊弘 技術士(建設／総技監)



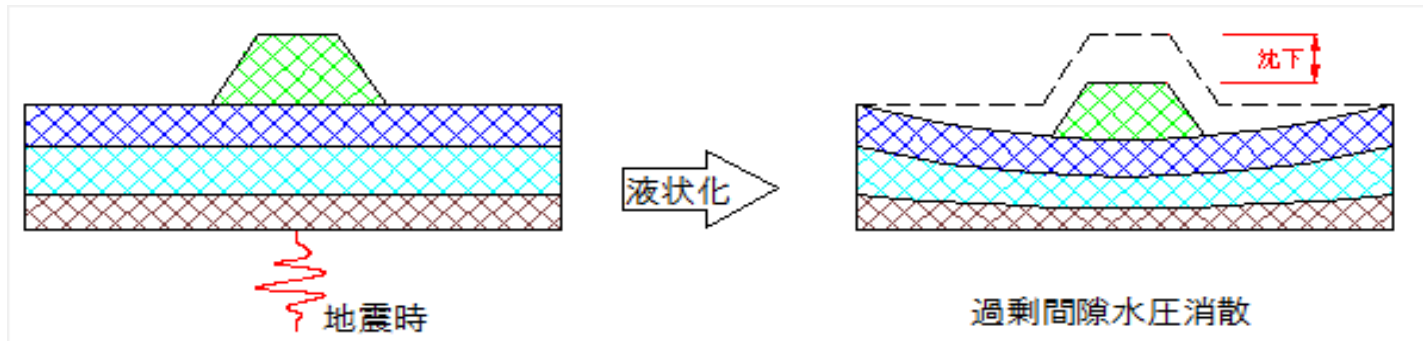
自重変形解析って何？

- 海岸堤防の耐震性能設計において
- 堤防の地震時変形量の解析
- 解析手法 (FEM解析、東畑モデル、円弧すべり Δu 法など)
- FEM解析 (動的FEM、静的FEMに大別)
- 動的FEM (LIQCA, FLIP), 静的FEM (ALID)
- ALID (平成19年河川構造物の耐震性能照査指針 (案) に掲載)
- **GeoFEAS** (平成19年河川構造物の耐震性能照査指針 (案) に対応)



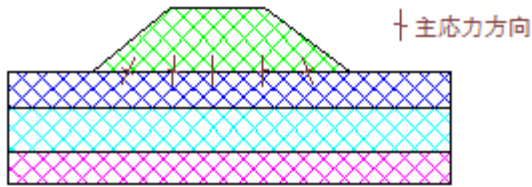
GeoFEASによる自重変形解析とは

- **GeoFEAS**「平成19年河川構造物の耐震性能照査指針(案)に対応」
- ALIDと同等な解析ができる(基本的な考え方、基本的な処理の流れは同じ)という意味で(平成19年河川構造物の耐震性能照査指針(案)の静的照査法)という扱い。
- **GeoFEAS**は、「平成19年河川構造物の耐震性能照査指針(案)の静的照査法」の記載に準じて、群馬大学地盤研究室にて新たに開発した解析部を用いており、ALIDの解析コードを使用しているということではないことに注意。
- (以上の説明は、フォーラムエイトQ&Aより)

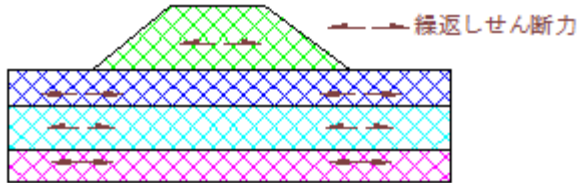


自重変形解析

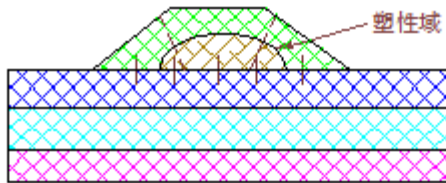
①地震前(堤防底面と地盤との境界面には初期せん断力作用)



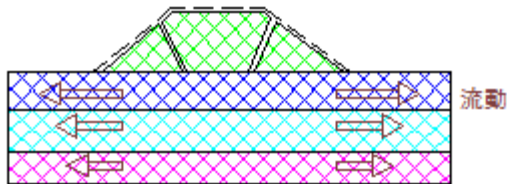
②地震発生(繰返しせん断力の作用)



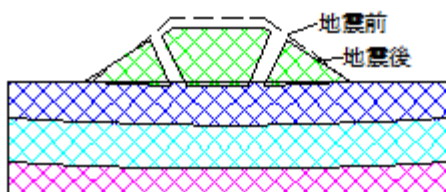
③完全液状化(過剰間隙水圧の上昇により堤防底部の変形が進行し、堤防内に破壊域発生)



④液状化継続中(塑性破壊域が発達し、堤防内に亀裂発生。液状化層の有効応力低下に伴う流動の発生)

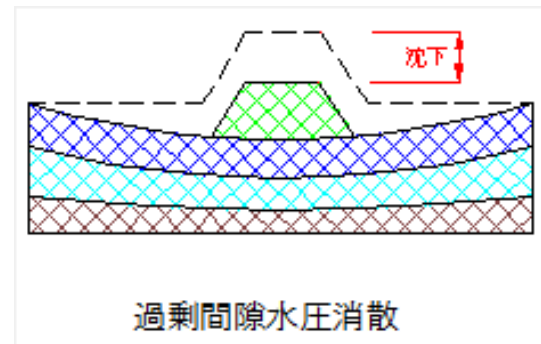


⑤過剰間隙水圧の消散(水圧消散に伴う沈下)

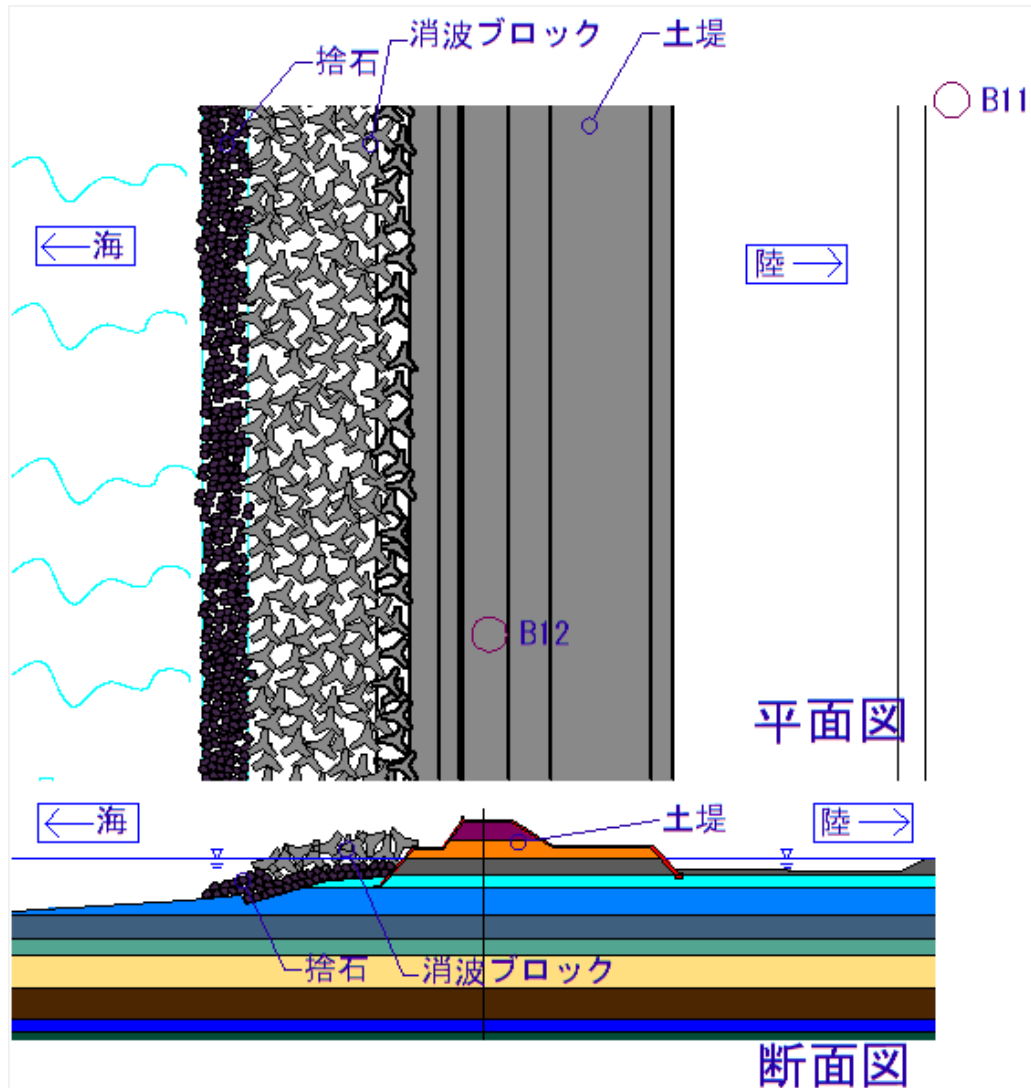


「液状化による地盤の地震時挙動の概念図」
(河川堤防の地震時変形量の解析手法参照)

- 地震時液状化による自重沈下
- ①地震前(堤防底面と地盤との境界面には初期せん断力作用)
- ②地震発生(繰返しせん断力作用)
- ③完全液状化(過剰間隙水圧の上昇により堤防底部の変形が進行し、堤防内に破壊域発生)
- ④液状化継続中(塑性破壊域が発達し、堤防内に亀裂発生、液状化層の有効応力低下に伴う流動の発生)
- ⑤過剰間隙水圧の消散(水圧消散に伴う沈下)
- 上記①～⑤解析により、堤防の沈下量を得る。



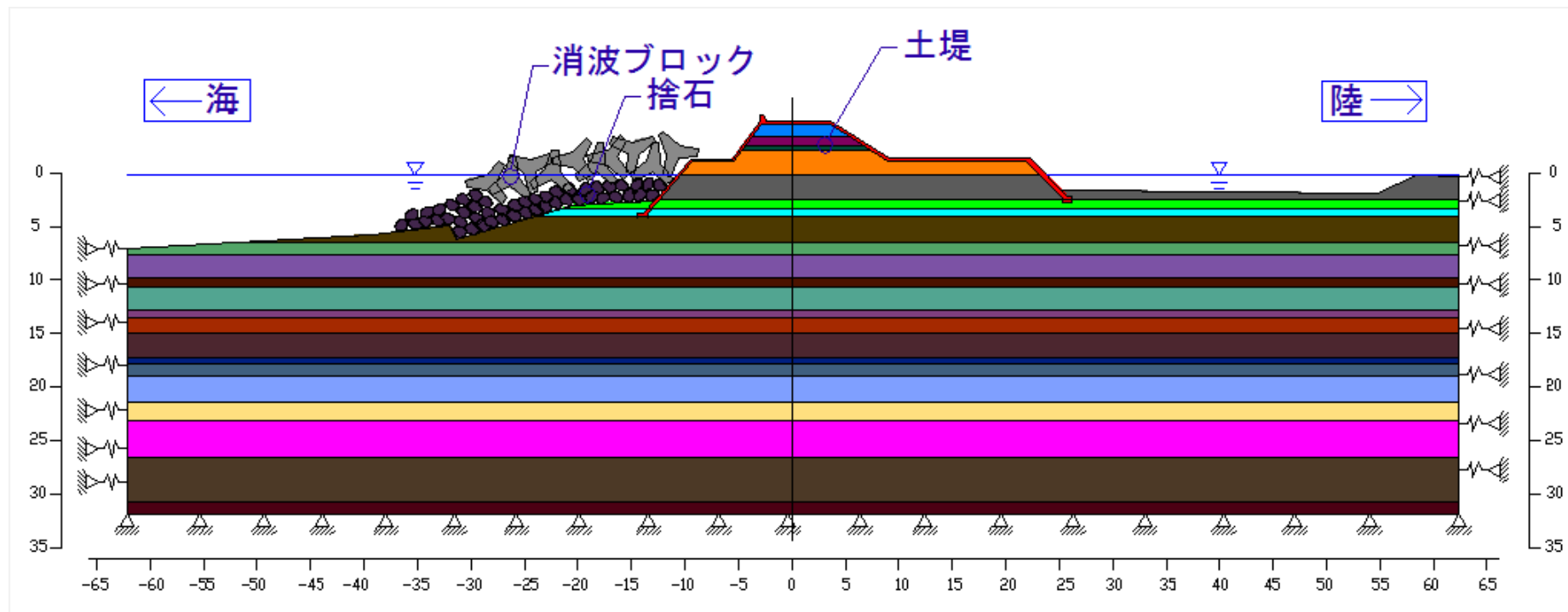
解析した堤防（北部九州の堤防）



- 傾斜型堤防
- （コンクリート張り）
- 昭和中期の大規模改修
- 18年前の小規模改修



解析した堤防（北部九州の堤防）



構造諸元

設置場所	九州管内 海岸堤防
堤防	傾斜型（コンクリート被覆式），盛土による土堤防 高さ： 7.4 m 天端幅： 6.6 m 敷幅： 38.2 m

海岸堤防の耐震性能設計

「漁港海岸保全施設の耐震性能設計のガイドライン(案)」(以下ガイドラインと略す)により、既設堤防の耐震性能を照査する。

- 耐震性能目標:耐震性能Ⅱ
- レベル1:無被害
- レベル2:構造物の一部が崩壊

本解析の目的

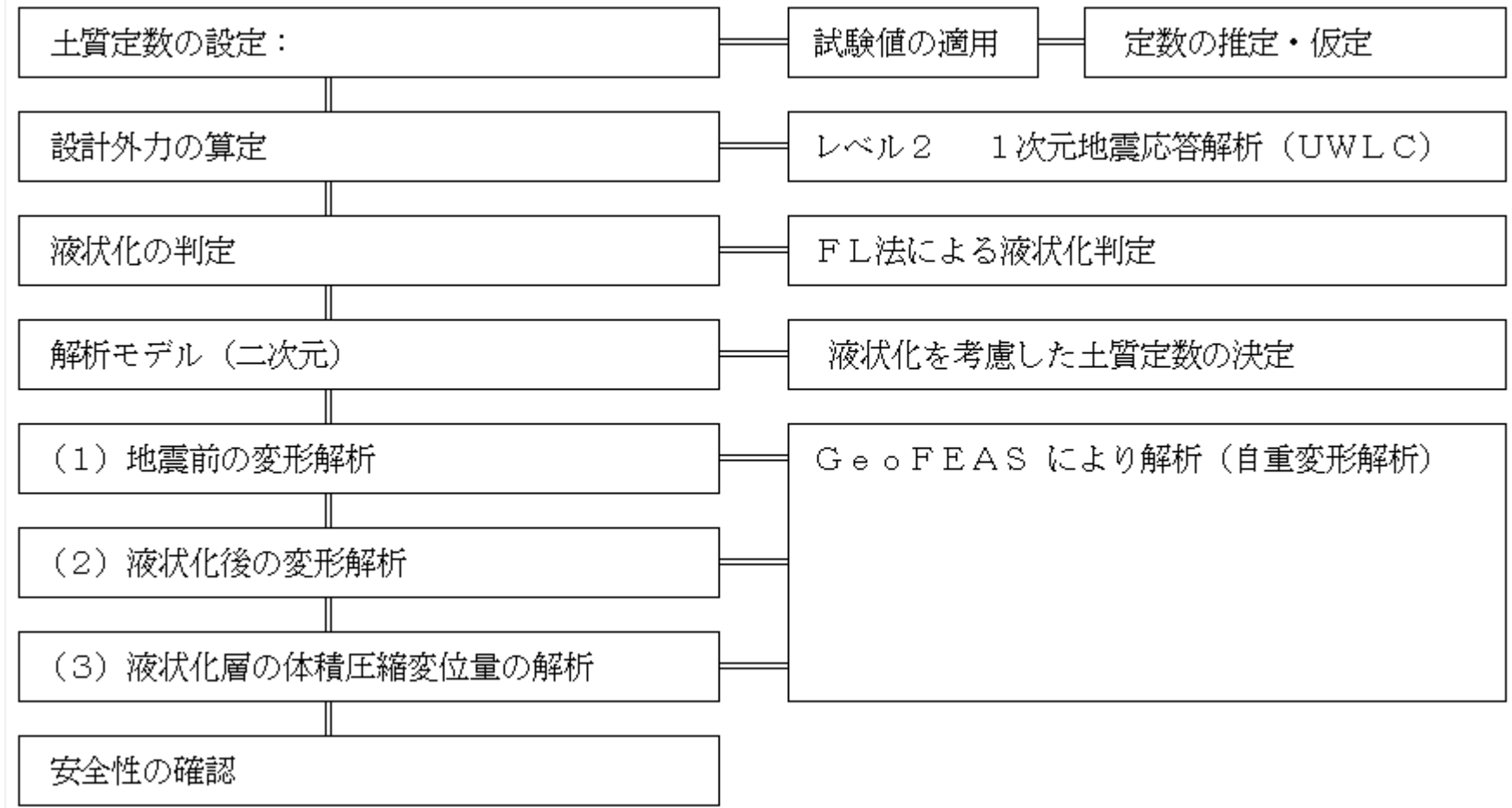
目的	設計状態	想定する荷重など	解析の目的
沈下量予測	地震時	レベル2	液状化を考慮した堤防の自重沈下量を推定する

②目標性能

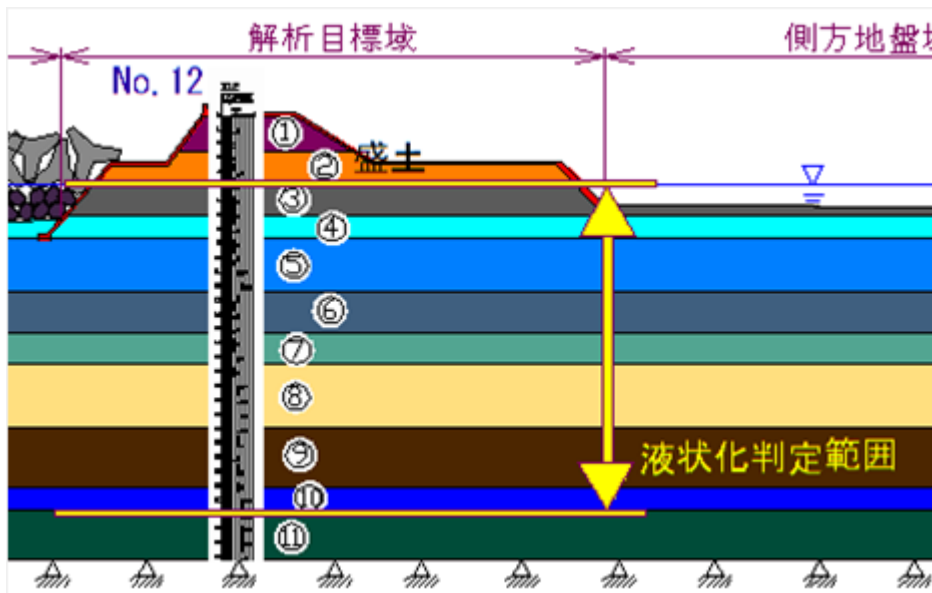
荷重状態	目標性能
レベル2 (タイプⅠ)	液状化による残留沈下量 < 越流しない高さ
レベル2 (タイプⅡ)	

レベル2地震時の耐震検討

①耐震検討チャート図



土質定数の設定



地層データ (B-12)

土層		平均N値	γ_t	F _c	D ₅₀	G ₀ **	ν^*
1. ML1 (堤防)	シルト	2	16.1			26078	0.45
2. S-C (堤防)	粘土混じり砂	5	18.3			34946	0.33
3. ML2 (堤防)	シルト	5	16*			47740	0.45
4. MH	粘土質シルト	7	16*			59742	0.45
5. S1	砂	12	17*	3.1		58188	0.33
6. S-M	シルト混じり砂	9	17*	18.4		48038	0.33
7. S2	中砂	8	17*	4.5		44408	0.33
8. G1	砂礫	16	18*		3.6	78789	0.33
9. S3	中砂	14	17*	5*		64488	0.33
10. S4	砂	21	17*	5*		84502	0.33
11. G2	砂礫	26	19*			108899	0.33

注：推定値は*、算定値**
 平均N値：測定したN値の各土層の平均値
 γ_t ：湿潤単位体積重量
 F_c：細粒土含有率(%)
 G₀：初期せん断剛性(=ρVs²)
 ν：ポアソン比

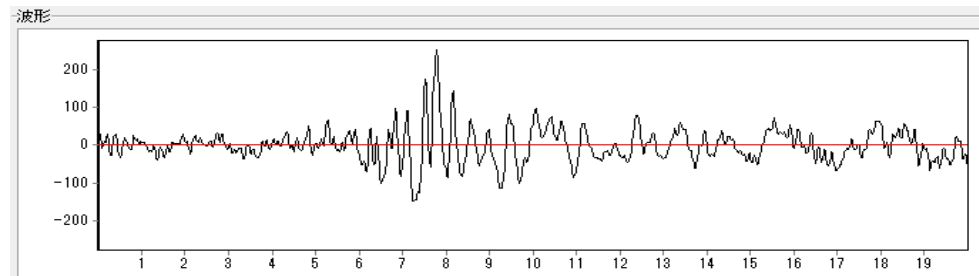
設計外力(レベル2地震動)

- * 地震レベル:レベル2(タイプⅠ、タイプⅡ)(ガイドライン記載の地震波形)
 - タイプ1=発生頻度が低いプレート境界に生じる海洋形の大規模な地震
 - タイプ2=発生頻度が極めて低いマグニチュード7級の内陸直下型地震

* レベル2タイプⅠ

八戸波 1968年N-S (出典:ビルディングレター)

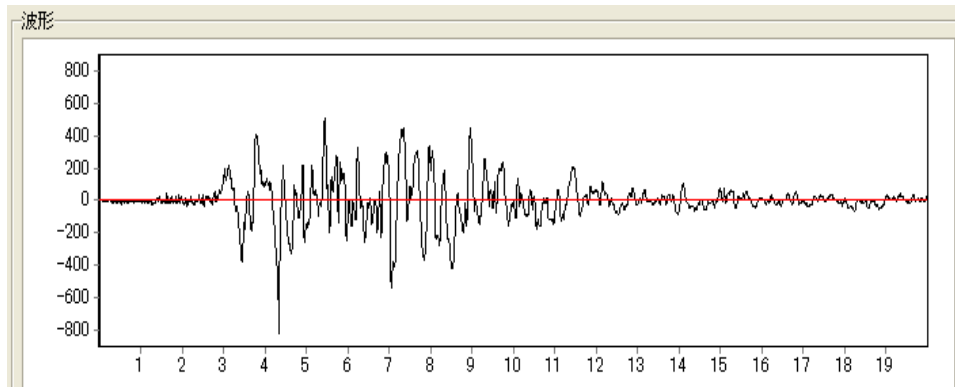
作用時間=20秒、最大加速度=229.7GAL



* レベル2タイプⅡ

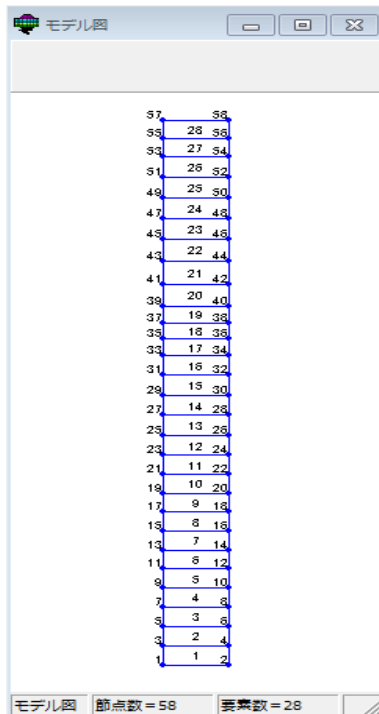
神戸ポートアイランド 1995年N-S (出典:日本道路協会)

作用時間=20秒、最大加速度=-706.6GAL



設計外力(UWLCによる一次元地震応答解析)

- * 一次元全応力モデル(HD要素)による地震応答解析(UWLCを使用)
- 各土層の最大せん断応力(地震時せん断応力比L算定に使用)
- 地表面最大加速度(設計水平震度算定に使用)



* 一次元全応力モデル(左図)

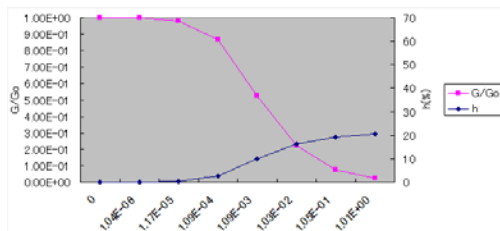
* UWLCは「群馬大学工学部・鵜飼研究室の地盤解析プログラム」
「プリポスト部はフォーラムエイトオリジナル」

* UWLCプログラムの紹介ですが、主に以下1~6の検討に適用できます。

- 1 全応力法を用いた地盤と構造物の動的相互作用の検討
- 2 土構造物(例えば河川堤防)の液状化時を含む地震時安定性の検討
- 3 液状化地盤内構造物の浮上がりの検討
- 4 液状化対策工の検討
- 5 遠心振動実験や大型振動台実験など実験のシミュレーション
- 6 1次元地震応答解析による詳細液状化判定
(上記は、フォーラムエイトHELPより)

* HD要素

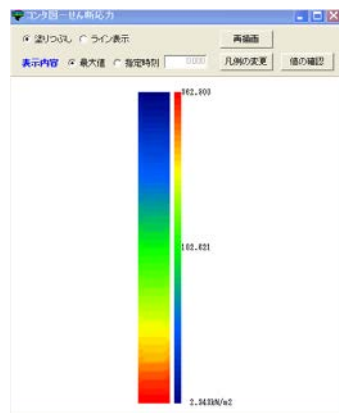
HDモデル(修正Hardin-Drnevichモデル)(双曲線モデル)



$$\tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \frac{G_o \gamma}{\tau_f / R_f}}$$

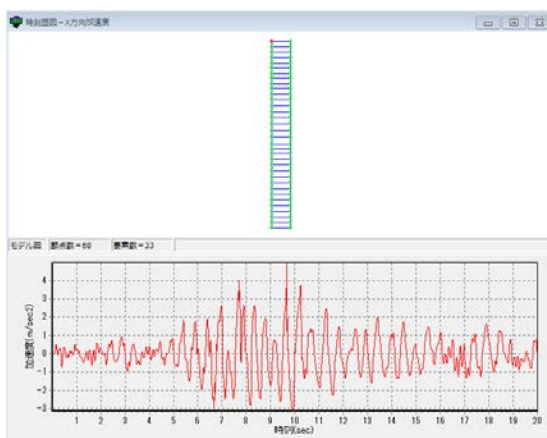
設計外力(一次元地震応答解析結果)

* 各土層の最大せん断応力(地震時せん断応力比L算定)



地震時せん断応力比Lの計算(八戸波)

Y座標(m)	応力 τ_{xy}	ΔH (m)	γt (kN/m ³)	w(kN/m ²)	σv (kN/m ²)	L
-2.41	8.16E+00	2.41	16.10	38.80	19.40	0.42
-4.78	2.17E+01	2.37	18.30	43.37	60.49	0.36
-6.99	2.96E+01	2.21	7.00	15.47	89.91	0.33
-8.61	3.31E+01	1.62	7.00	11.34	103.31	0.32
-12.23	4.10E+01	3.62	8.00	28.96	123.46	0.33
-15.23	4.65E+01	3.00	8.00	24.00	149.94	0.31
-17.39	4.91E+01	2.16	8.00	17.28	170.58	0.29
-21.81	5.30E+01	4.42	10.00	44.20	201.32	0.26
-26	5.73E+01	4.19	8.00	33.52	240.18	0.24
-27.67	5.95E+01	1.67	8.00	13.36	263.62	0.23



地震時せん断応力比Lの計算(神戸P波)

Y座標(m)	応力 τ_{xy}	ΔH (m)	γt (kN/m ³)	w(kN/m ²)	σv (kN/m ²)	L
-2.41	1.16E+01	2.41	16.10	38.80	19.40	0.60
-4.78	3.36E+01	2.37	18.30	43.37	60.49	0.56
-6.99	4.90E+01	2.21	7.00	15.47	89.91	0.55
-8.61	5.56E+01	1.62	7.00	11.34	103.31	0.54
-12.23	6.62E+01	3.62	8.00	28.96	123.46	0.54
-15.23	7.96E+01	3.00	8.00	24.00	149.94	0.53
-17.39	8.58E+01	2.16	8.00	17.28	170.58	0.50
-21.81	9.46E+01	4.42	10.00	44.20	201.32	0.47
-26	1.04E+02	4.19	8.00	33.52	240.18	0.43
-27.67	1.09E+02	1.67	8.00	13.36	263.62	0.41

液状化の判定 (FLを算定)

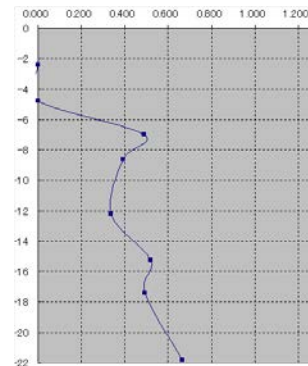
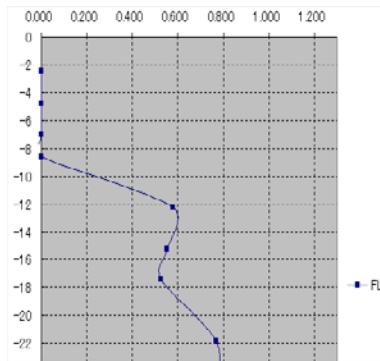
* 各土層の最大せん断応力 (液状化に対する抵抗率 $FL = R/L$)

液状化抵抗率FLの計算(八戸波)

Y座標(m)	L	R	FL	Lu
-2.41	0.42	0.000	0.000	1.00
-4.78	0.36	0.000	0.000	1.00
-6.99	0.33	0.000	0.000	1.00
-8.61	0.32	0.000	0.000	1.00
-12.23	0.33	0.192	0.578	1.00
-15.23	0.31	0.171	0.551	1.00
-17.39	0.29	0.151	0.524	1.00
-21.81	0.26	0.202	0.767	1.00

液状化抵抗率FLの計算(神戸P波)

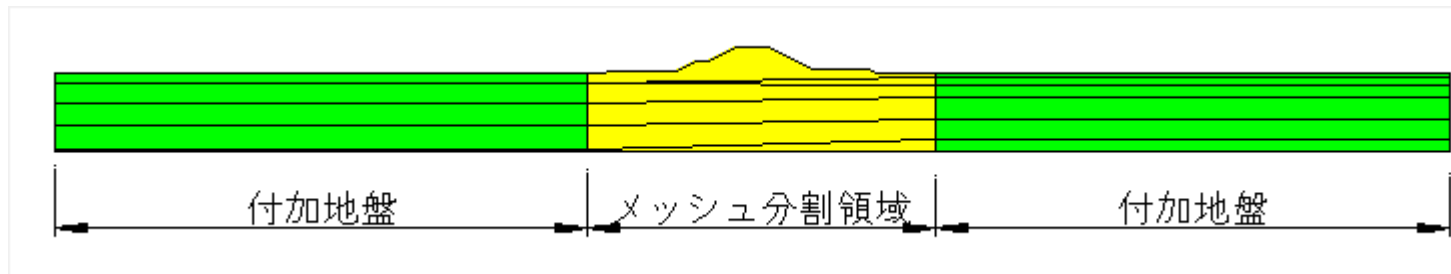
Y座標(m)	L	R	FL	Lu
-2.41	0.60	0.000	0.000	1.00
-4.78	0.56	0.000	0.000	1.00
-6.99	0.55	0.267	0.489	1.00
-8.61	0.54	0.212	0.394	1.00
-12.23	0.54	0.180	0.336	1.00
-15.23	0.53	0.275	0.518	1.00
-17.39	0.50	0.247	0.491	1.00
-21.81	0.47	0.312	0.664	1.00



* R(動的せん断強度比R): 道路橋示方書 V により計算する。
プログラム「杭基礎の設計(フォーラムエイト)」により算定した。

GeoFEASによる自重変形解析

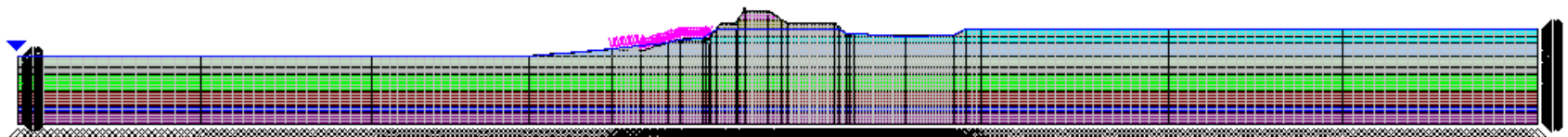
* 断面をモデル化



① FEM解析モデル

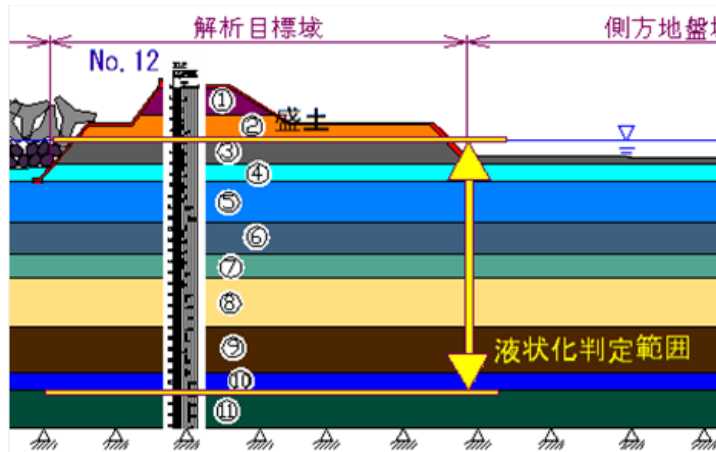
- ・側方の境界の影響を少なくするため、解析領域の幅は天端中心から両方向にそれぞれ堤幅の5倍を目安として設定する。
(堤防(土堤)の地震時変形解析計算例P9参照)
- ・モデルの境界条件は、モデルの両側面は水平変位を固定とし、モデル底面は水平変位と鉛直変位を固定とした。
- ・水平メッシュ分割は、平均N値より推定計算した V_s 値をもちいて波長(Lm)を算定し、 $L/5$ を分割する厚さの目安値としてメッシュ分割を行った。
- ・鉛直メッシュ分割は、堤防直下及び法尻かた堤高の2倍程度の範囲は0.5~1m程度で分割し、その外側は2~5m程度とした。

* GeoFEAS解析モデル



GeoFEASによる自重変形解析

* モデル要素(土質定数)

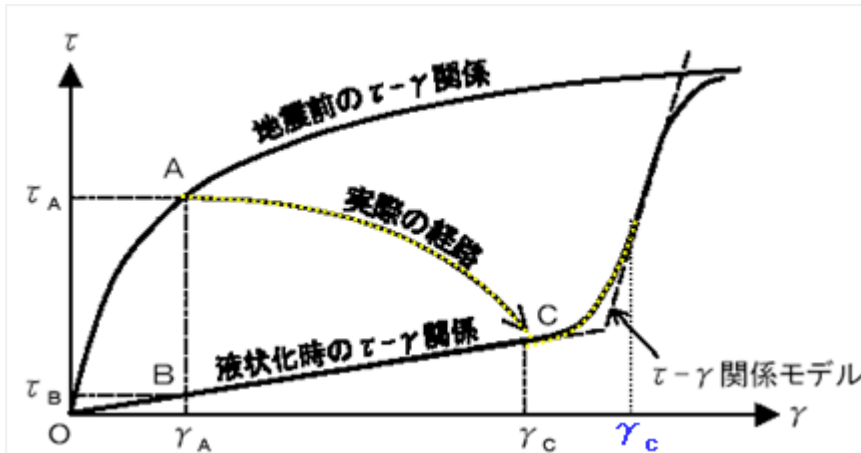


地層データ (B-12)

土層		平均N値	γ_t	Fc	D50	G _o **	ν^*	FL (L2)		液状化の有無	GeoFEAS解析要素モデル	
								タイプI	タイプII		構成則	モデル方式
1. ML1 (堤防)	シルト	2	16.1			26078	0.45				弾性	せん断剛性低減材料
2. S-C (堤防)	粘土混じり砂	5	18.3			34946	0.33				弾性	せん断剛性低減材料
3. ML2 (堤防)	シルト	5	16*			47740	0.45				弾性	せん断剛性低減材料
4. MH	粘土質シルト	7	16*			59742	0.45				弾性	せん断剛性低減材料
5. S1	砂	12	17*	3.1		58188	0.33	0.578	0.489	液状化する	バイリニア弾性	液状化材料
6. S-M	シルト混じり砂	9	17*	18.4		48038	0.33	0.551	0.394	液状化する	バイリニア弾性	液状化材料
7. S2	中砂	8	17*	4.5		44408	0.33	0.524	0.336	液状化する	バイリニア弾性	液状化材料
8. G1	砂礫	16	18*		3.6	78789	0.33	0.767	0.518	液状化する	バイリニア弾性	液状化材料
9. S3	中砂	14	17*	5*		64488	0.33	0.793	0.491	液状化する	バイリニア弾性	液状化材料
10. S4	砂	21	17*	5*		84502	0.33	0.980	0.664	液状化する	バイリニア弾性	液状化材料
11. G2	砂礫	26	19*			108899	0.33				弾塑性	MC(モールクーロン)

GeoFEASによる自重変形解析

* 地震前と液状化時のせん断応力～せん断ひずみ関係の模式図



$$\gamma_L = \left(\frac{1300}{G_1} \right)^{0.5587}$$

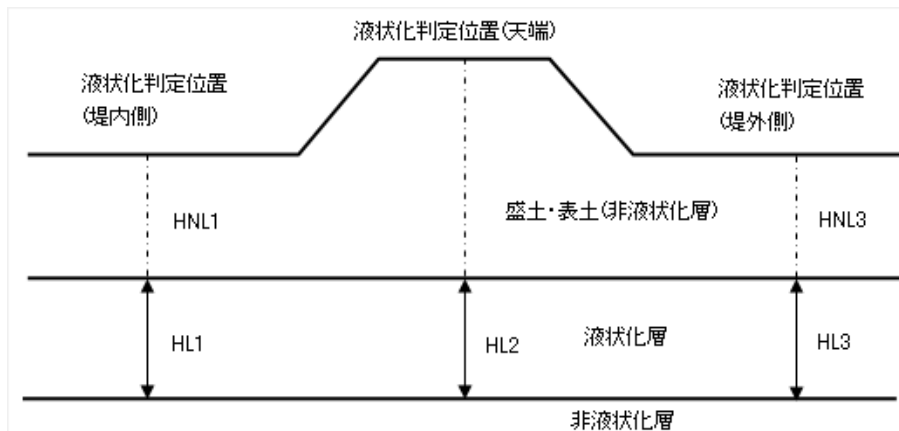
$$G_2 = \frac{2000}{\gamma_L}$$

G2: 液状化時の回復せん断剛性

γL: 微小抵抗領域ひずみ(%)

(フォーラムエイトセミナー資料より)

* せん断剛性低下材料



液状化材料に対して、FLをゼロで入力している場合は、内部計算になります。

$$\log G_1 = 2.8829 - 0.3032 \times D_L + 0.0803 \times H_{NL}$$

ここに、

DL: 液状化の程度を表すパラメータ

$$D_L = (1 - F_L) \times H_L$$

HL: (堤内地、天端直下、堤外地の)液状化層の平均厚 (m)

$$H_L = \frac{1}{3} (H_{L1} + H_{L2} + H_{L3})$$

HNL: (堤内地、堤外地の)非液状化層の平均厚 (m)

$$H_{NL} = \frac{1}{2} (H_{NL1} + H_{NL3})$$

FL: 天端直下の液状化層のFL値の平均値

(GeoFEASヘルプより)

GeoFEASによる自重変形解析

* 液状化材料

バイリニア弾性モデル

- 液状化材料

■ 液状化層のせん断弾性係数G1

液状化強度比RLが得られていて、FLの値に従って、河川耐震性能指針(案)図-解6.3.1液状化が生じる土層のせん断剛性の低減の例に従って、低下率 $G1/\sigma'c$ を推定する。

FL: 液状化安全率

RL: 液状化強度比

Dr: 相対密度(液状化後の沈下解析における体積弾性係数の推定に用いられる)単位:%

もしくは、N1(有効上載圧100kN/m²相当に換算したN値)

$\sigma'c$: 有効拘束圧

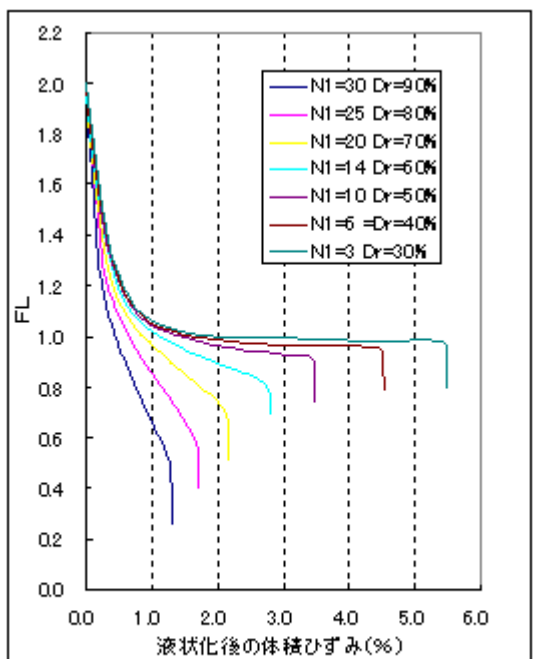


図 液状化層の体積ひずみとFL、換算N値N1の関係

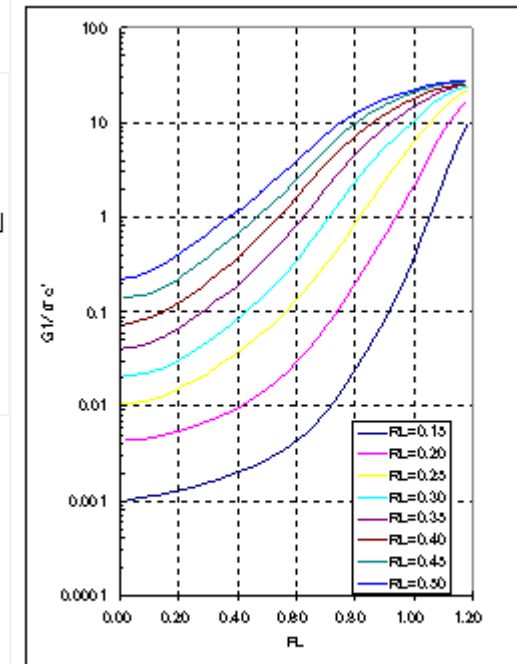


図 液状化が生じる土層のせん断剛性の低減(「河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説-I. 共通編」より)

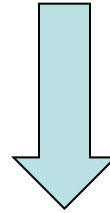
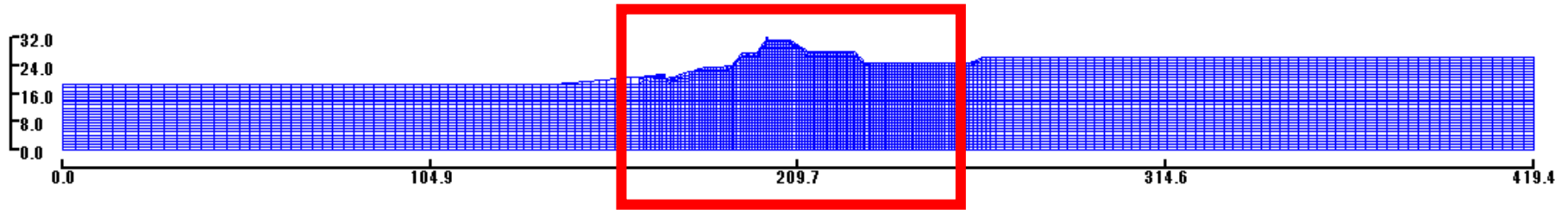
液状化後の体積圧縮による沈下量

下図より液状化層のN1の平均値と液状化の判定で得られる液状化に対する抵抗率FLを用いて、液状化層の体積ひずみを求め、液状化層の層厚を乗じて、液状化層の体積圧縮に伴う沈下量を求める。

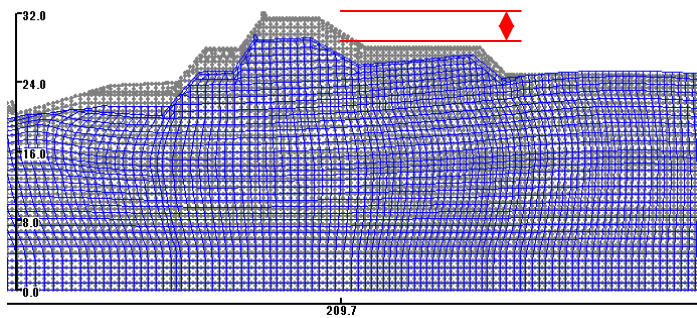
(GeoFEASヘルプより)

GeoFEASによる自重変形解析

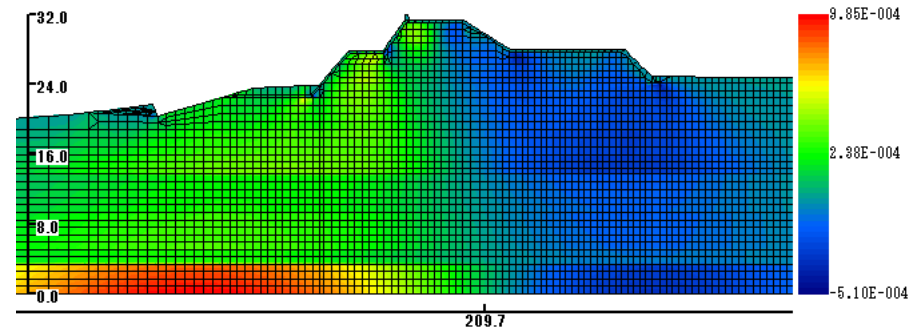
* GeoFEAS解析モデル



* GeoFEAS解析結果(変位図)



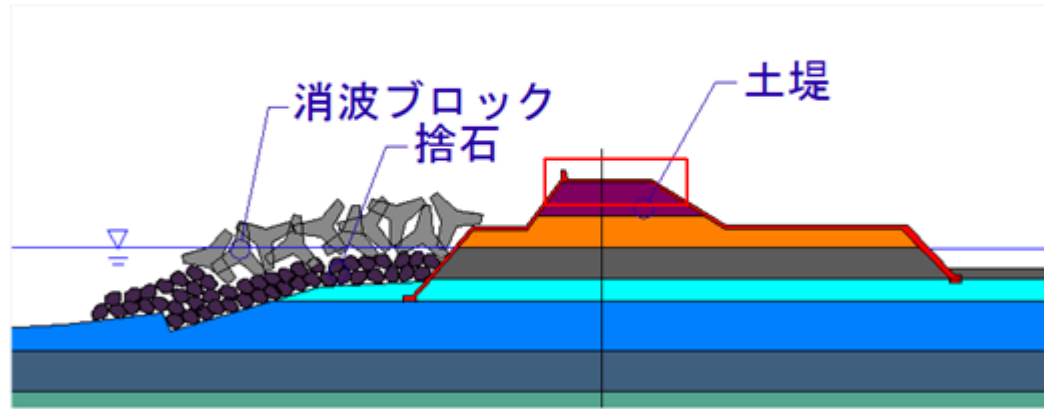
* GeoFEAS解析結果(せん断ひずみ図)



GeoFEASによる自重変形解析

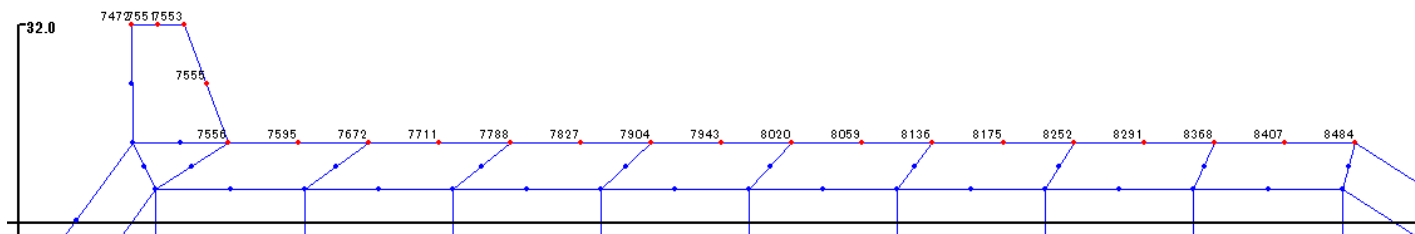
8. 安全性の確認

堤防の沈下高さが設定水位より上側である場合は、この堤防は危険ではないことになり、設定水位より下側である場合は、この堤防は危険であることになり何らかの対策を求められる。



土堤防の保護コンクリート天端に着目し、天端の沈下量を算出し検討する。

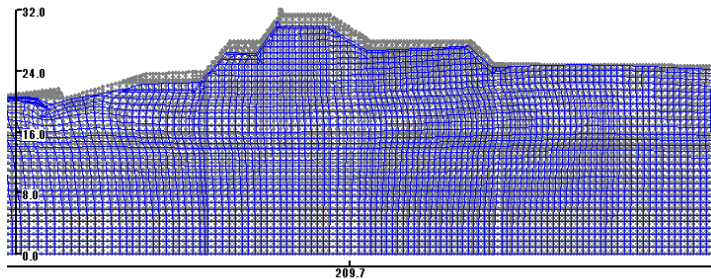
* GeoFEAS解析結果(堤防天端節点の鉛直変位の平均値)



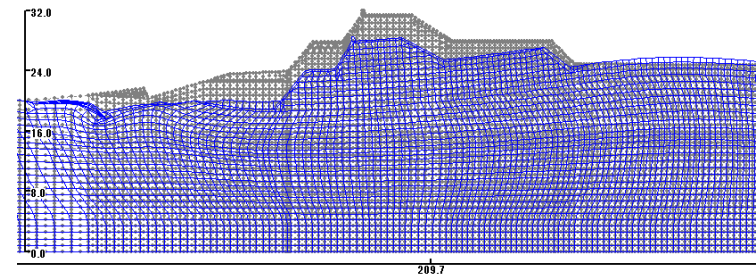
GeoFEASによる自重変形解析

* GeoFEAS解析結果(堤防天端節点の鉛直変位の平均値)

L2-1 (A) 2
FL (L2-I) 入力* (ガイドライン設定値)
鉛直沈下量 = 1.43 m



L2-2 (A) 2
FL (L2-II) 入力* (ガイドライン設定値)
= 3.20 m



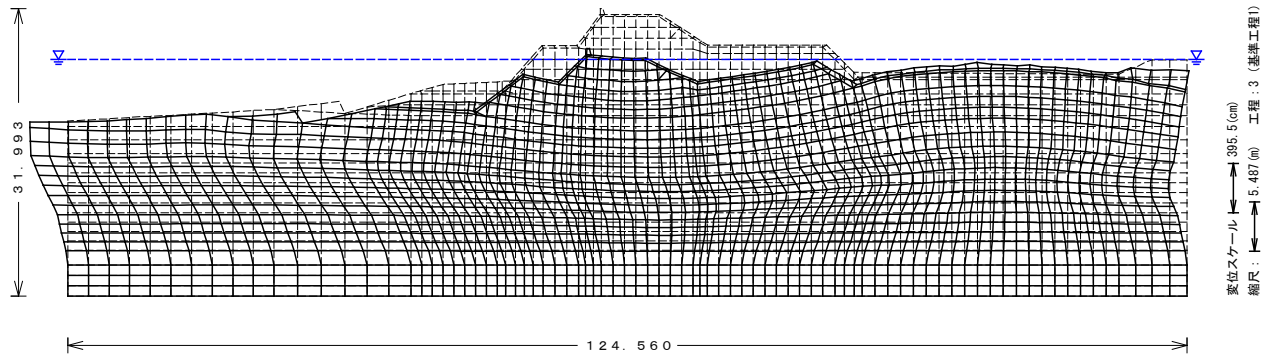
* 本堤防の耐震性能に関する評価

液状化による沈下量は、レベル2タイプ I = 1.43m、タイプ II = 3.20mとの結果を得た。
沈下時の高さでは、タイプ II 時 = 想定水位とほぼ同じと考えられる。

GeoFEASによる自重変形解析

* 参考としてALID解析結果(堤防天端節点の鉛直変位の平均値)

変形図



* 液状化による沈下量は、レベル2タイプⅡ = 3.36mとの結果を得た。

GeoFEASを用いた2次元FEM解析

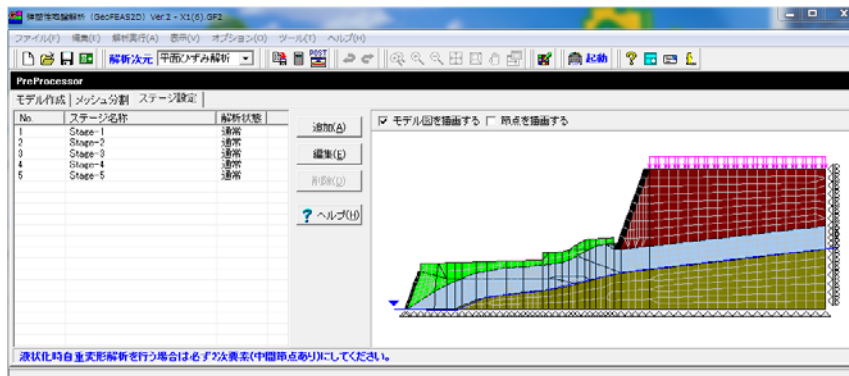
①GeoFEASによる自重変形解析

- 適用基準類: 河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説
平成19年3月 国土交通省河川局治水課

②GeoFEASは上記のほか、以下の検討に使用することができる。

- 地盤の応力・変形解析
- 斜面安定解析
- 土留め掘削解析
- シールドトンネル掘削時の周辺地盤影響解析
- NATM工法におけるトンネル施工検討解析
- 水圧の変動が地盤に及ぼす影響の検討
- 地盤と構造物の相互作用の検討
- 応答震度法

③フォーラムエイトのセミナーをぜひ活用して下さい。(CPD認定あり)



(GeoFEASヘルプより)

ご静聴ありがとうございました。

GeoFEASによる自重変形解析の紹介

(株)ブルドジオテクノ

花田俊弘 技術士(建設／総技監)

