

株式会社東京建設コンサルタント 中部支社 小川 友浩

河川堤防における静的FEM解析及び動的FEM解析の 解析手法の相違点や問題点抽出

本日の内容

- ①河川堤防における耐震性能照査の現状
- ②静的FEM解析手法について
- ③動的FEM解析手法について
- ④静的と動的の解析手法と解析結果の相違点
- ⑤作業上の注意点及び問題点
- ⑥解析事例の紹介

①河川堤防における耐震性能照査の現状

[河川堤防の耐震検討のこれまでの流れ]

平成 7年 1月 : 兵庫県南部地震発生

平成 7年 3月 : 河川堤防耐震点検マニュアル解説

照査の基準	沈下後の堤防高 < 照査外水位
地震外力	中規模地震動 (レベル1地震動)
照査方法	円弧すべり安全率 (kh法、 ΔU 法) \Rightarrow 沈下量を推定

平成 9年10月 : 河川堤防の液状化対策工設計施工マニュアル(案)

照査の基準	安全率 $F_s > 1.0$ (沈下なし)
地震外力	中規模地震動 (レベル1地震動)
照査方法	円弧すべり安全率 (kh法、 ΔU 法)

①河川堤防における耐震性能照査の現状

[河川堤防の耐震検討のこれまでの流れ]

平成19年 3月 : 河川構造物の耐震性能照査指針(案)同解説

照査の基準	沈下後の堤防高 < 照査外水位
地震外力	レベル2地震動
照査方法	地盤変形解析により沈下量を算定

平成23年 3月 : 東日本大震災発生

平成24年 2月 : 河川構造物の耐震性能照査指針・解説

レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル

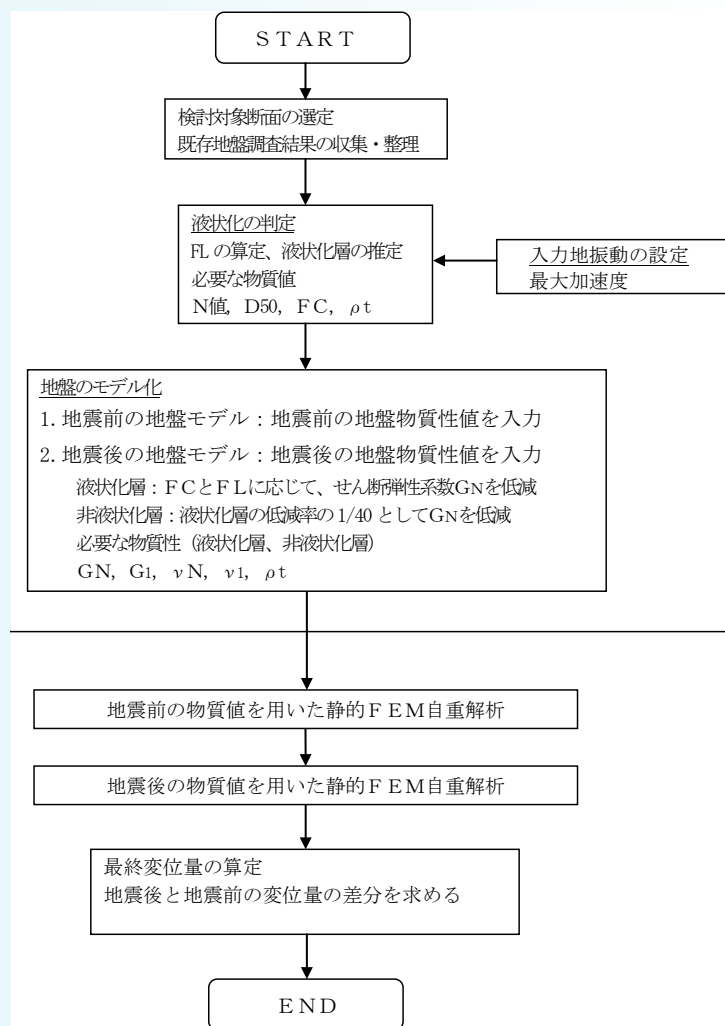
対策工検討時

照査の基準	安全率 $F_s > 1.0$ (沈下なし)
地震外力	中規模地震動 (レベル1地震動)
照査方法	円弧すべり安全率 (ΔU 法)

②静的FEM解析手法について

〔検討手順〕

- i) 検討断面に対して、**地表面加速度（静的）**を設定する。
- ii) 地表面加速度(静的)を基に『河川構造物の耐震性能照査指針』に示される液状化判定式を用いて**FL値を算定**する。
- iii) 地盤や構造物の物性値を設定する。
- iv) 堤防構造及び基礎地盤部の解析モデルを作成する。
- v) 地震前の**物性値によって自重解析**を行う。
- vi) 地震による**液状化の剛性低下を考慮**して自重解析を行う。
- vii) 自重解析による変形量の差から地震後の液状化による変形量を算定する。
- viii) 液状化によって発生した**過剰間隙水圧の消散に伴う沈下量**を算定しvii) で算定した沈下量に加算する。



②静的FEM解析手法について

【検討手順 i : 地表面加速度を設定する】

- 『河川構造物の耐震性能照査指針・解説 I 共通編』に準拠する。
- 地表面加速度(水平震度)は、地盤種別、地域補正係数により設定する。
- 地盤面における水平震度の標準値は、各地震タイプに応じて設定されている。

耐震性能照査上の地盤種別は、原則として、式(4.5.1)により算出する地盤の特性値 T_G をもとに、表-4.5.1により区分するものとする。ただし、地表面が耐震性能照査上の基盤面と一致する場合はI種地盤とするものとする。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \dots \dots \dots (4.5.1)$$

ここに、

- T_G : 地盤の特性値(s)
- H_i : i番目の土層の厚さ(m)
- V_{si} : i番目の土層の平均せん断弾性波速度(m/s)
- i: 当該地盤が地表面から耐震性能照査上の基盤面までn層に区分されるとき、地表面からi番目の土層の番号

表-4.5.1 耐震性能照査上の地盤種別

地盤種別	地盤の特性値 T_G (s)
I種	$T_G < 0.2$
II種	$0.2 \leq T_G < 0.6$
III種	$0.6 \leq T_G$



地盤種別	地震動のタイプ		
	レベル1	レベル2-1	レベル2-2
I種地盤	0.16	0.30	0.80
II種地盤	0.20	0.35	0.70
III種地盤	0.24	0.40	0.60

(出典:河川構造物の耐震性能照査指針・解説 I 共通編P12、13、19～22)

②静的FEM解析手法について

【検討手順 ii :FL値を算定する】

○『河川構造物の耐震性能照査指針・解説 I 共通編』に準拠する。

○液状化の判定を行う必要がある砂質土層の定義

沖積層の砂質土層で次の3条件すべてに該当する場合には、(2)によって液状化の判定を行わなければならない。

- 1) 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
- 2) 細粒分含有率 FC が35%以下の土層、又は、 FC が35%を超えても塑性指数 I_p が15以下の土層
- 3) 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

(出典:河川構造物の耐震性能照査指針・解説 I 共通編P25)

土層	標高(m)	深度(m)	N値	Fc (%)	Ip	D50 (mm)	土質条件	σ_v (kN/m ²)	σ_v' (kN/m ²)	砂質土の場合		N ₁	N _s	R _L	C _w	r _d	R	L	F _L	層厚	I-FL	PL
										C ₁	C ₂											
B	2.41	1.30	13	18.1		0.420	1	26.0	26.0	1.162	0.450	23.021	27.200	0.500	1.000	0.981	0.500	0.176	水位以浅	1.0	0.00	0.00
B	1.41	2.30	28	18.1		0.420	1	46.0	46.0	1.162	0.450	41.034	48.132	0.500	1.000	0.966	0.500	0.174	水位以浅	1.0	0.00	0.00
B	0.41	3.30	34	18.1		0.420	1	66.8	58.9	1.162	0.450	44.844	52.559	0.500	1.000	0.951	0.500	0.194	2.577	0.9	0.00	0.00
B	-0.47	4.18	300	18.1		0.420	1	85.2	68.5	1.162	0.450	368.191	428.288	0.500	1.000	0.937	0.500	0.210	2.384	1.0	0.00	0.00
As	-1.61	5.32	4	3.8		0.420	1	108.7	80.7	1.000	0.000	4.514	4.514	0.144	1.000	0.920	0.144	0.223	0.644	1.1	0.36	2.78
As	-2.59	6.30	8	3.8		0.420	1	128.3	90.4	1.000	0.000	8.479	8.479	0.197	1.000	0.906	0.197	0.231	0.852	1.0	0.15	1.01
As	-3.59	7.30	21	41.4		0.099	1	148.2	100.3	1.628	1.744	20.962	35.871	0.500	1.000	0.891	0.500	0.237	2.111	1.0	0.00	0.00
As	-4.59	8.30	6	41.4		0.099	1	168.1	110.2	1.628	1.744	5.660	10.959	0.224	1.000	0.876	0.224	0.240	0.932	1.0	0.07	0.40
As	-5.59	9.30	9	18.1		0.160	1	188.0	120.1	1.162	0.450	8.048	9.802	0.212	1.000	0.861	0.212	0.242	0.874	1.0	0.13	0.68
As	-6.59	10.30	12	18.1		0.160	1	207.9	130.0	1.162	0.450	10.200	12.302	0.237	1.000	0.846	0.237	0.243	0.975	1.0	0.03	0.12
As	-7.59	11.30	10	18.1		0.160	1	227.8	139.9	1.162	0.450	8.099	9.861	0.212	1.000	0.831	0.212	0.243	0.873	1.0	0.13	0.55
As	-8.59	12.30	14	18.1		0.160	1	247.7	149.8	1.162	0.450	10.828	13.032	0.244	1.000	0.816	0.244	0.243	1.006	1.0	0.00	0.00
As	-9.59	13.30	10	18.1		0.160	1	267.6	159.7	1.162	0.450	7.401	9.050	0.203	1.000	0.801	0.203	0.241	0.843	1.0	0.16	0.53
As	-10.59	14.30	9	18.1		0.160	1	287.5	169.6	1.162	0.450	6.386	7.870	0.190	1.000	0.786	0.190	0.240	0.792	1.0	0.21	0.59
As	-11.59	15.30	12	18.1		0.160	1	307.4	179.5	1.162	0.450	8.176	9.951	0.213	1.000	0.771	0.213	0.238	0.898	1.0	0.10	0.24
As	-12.59	16.30	9	18.1		0.160	1	327.3	189.4	1.162	0.450	5.898	7.304	0.183	1.000	0.756	0.183	0.235	0.778	1.0	0.22	0.41
Ac	-13.59	17.30	4	56.6		0.059	1	344.8	196.9	1.932	2.589	2.548	7.512	0.185	1.000	0.741	0.185	0.233	----	1.0	0.00	0.00
Ac	-14.68	18.39	1	56.6		0.059	1	361.0	202.3	1.932	2.589	0.624	3.795	0.132	1.000	0.724	0.132	0.233	----	1.0	0.00	0.00
Ac	-15.53	19.24	1	56.6		0.059	1	373.8	206.5	1.932	2.589	0.615	3.777	0.131	1.000	0.711	0.131	0.232	----	0.9	0.00	0.00
Ac	-16.52	20.23	1	56.6		0.059	1	388.7	211.5	1.932	2.589	0.604	3.756	0.131	1.000	0.697	0.131	0.230	----	1.0	0.00	0.00

1: 砂質土
2: 礫質土

※ $R_L > 0.5$ となる場合 $R_L = 0.5$ を上限に設定し
※粘性土は判定外とした。

平均FL	ΣPL
1.181	7.31

②静的FEM解析手法について

〔検討手順iii:地盤や構造物の物性値を設定する〕

要素	必要な地盤定数		設定方法
非液化化層	N:	N値	地質調査結果より
	qt:	湿潤密度	地質調査結果、各種基準等より
	G:	せん断弾性係数	N値から求める簡易式より推定 $G = E / 2 \cdot (1 + \nu)$ $E = 2800N$ E:弾性係数 ν :ポアソン比 N:N値
	ν :	ポアソン比	静止土圧係数より推定(0.33)
	G3/G:	剛性低下率	河川構造物の耐震性能照査指針(案)一問一答 河川局治水課 平成19年11月版より推定

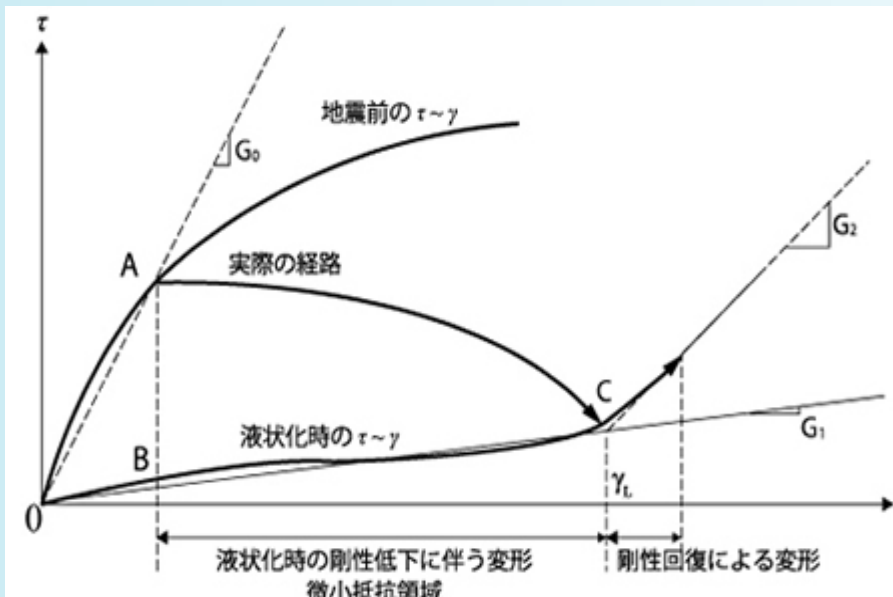
No	剛性低下の設定手法
1	非液化化層に引張り応力が生じないような剛性を繰り返し計算により求める方法
2	計算事例-01式(4-3)による方法 $\log G_1 = 2.8829 - 0.3032 \times D_L + 0.0803 \times H_{NL}$
3	安田ら*が提案する剛性低下率 $G_1 / G_n = 1/40$ *安田進、安達健司、吉田望、規矩大義、出野智之、櫻井裕一:液状化に伴う盛土および直接基礎の沈下に関するALIDの適用性、第46回地盤工学シンポジウム、pp.77-82。2001
4	液状化層の剛性低下率の10倍と設定する方法

②静的FEM解析手法について

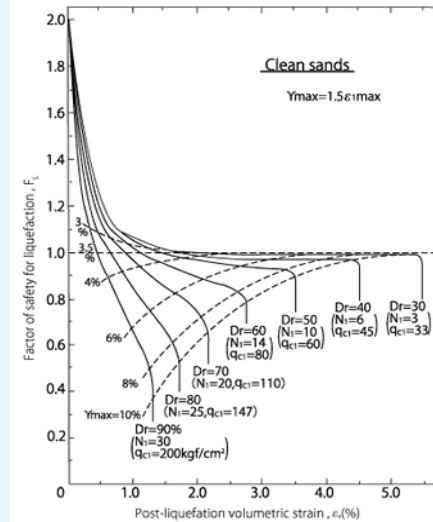
〔検討手順iii:地盤や構造物の物性値を設定する〕

要素	必要な地盤定数		設定方法
液状化層	N:	N値	地質調査結果より
	qt:	湿潤密度	地質調査結果、各種基準等より
	G:	せん断弾性係数	N値から求める簡易式より推定 $G = E / 2 \cdot (1 + \nu)$ $E = 2800N$ E:弾性係数 ν :ポアソン比 N:N値
	ν :	ポアソン比	静止土圧係数より推定(0.33)
	FL:	液状化安全率	河川構造物の耐震性能照査指針に準拠し算定
	Fc:	細粒分含有率	地質調査結果より
	G1/G:	せん断剛性低下率	次頁のグラフより内部設定
	G2/G:	回復せん断剛性比	次式より内部計算 $G_2 = \frac{2000}{\gamma_L} \cdot \gamma_L = \left(\frac{1300}{G_1} \right)^{0.5587}$
	Dr:	相対密度	道路橋示方書(平成2年2月)のN値からの推定式より $Dr = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma'v + 0.7}}$: $\sigma'v$ は有効上載圧
	D50:	平均粒径	地質調査結果より

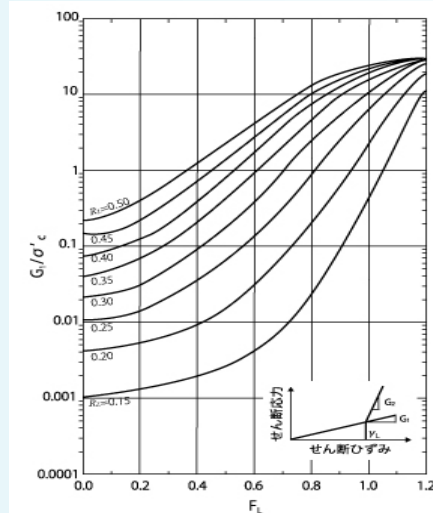
②静的FEM解析手法について [検討手順 iii : 地盤や構造物の物性値を設定する]



地震前及び液状化時におけるせん断応力
 ~せん断ひずみ関係の模式図



液状化による
 体積ひずみと
 液状化に対する
 抵抗率 F_L および
 N_1 の関係

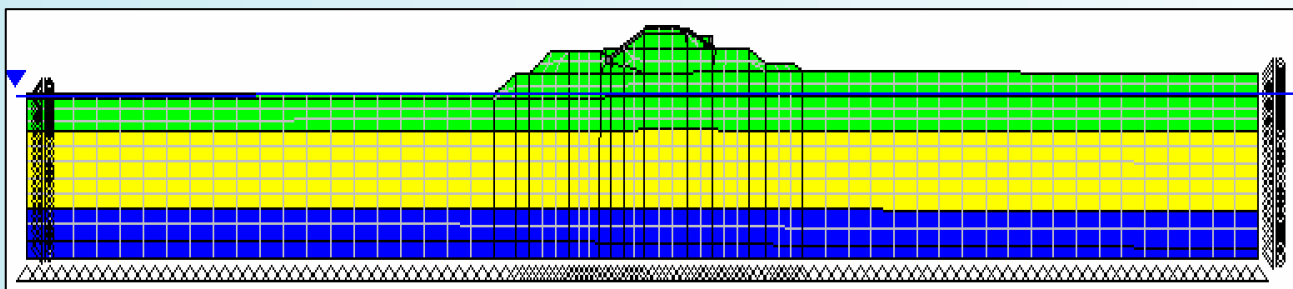


液状化が生じる
 地層のせん断
 剛性の低減の例

②静的FEM解析手法について

〔検討手順iv:解析モデルを作成する〕

- 解析領域幅 : 法尻から100m程度
- 領域深 : 20m程度
- メッシュ分割 : 大きな変形が想定される箇所 ⇒ 最大1m程度
それ以外 ⇒ 最大5m程度
- 境界条件 : 側面境界⇒鉛直ローラ境界(X方向固定)
底面境界⇒両方固定境界(X、Y方向固定)



中部地方の河川堤防(高潮堤防区間)

色および パターン	記号	土質区分	N値	湿潤単位体積重量 γ_t kN/m ³	飽和単位体積重量 γ_{sat} kN/m ³	弾性係数 E kN/m ²	ポアソン比	せん断弾性係数 Go kN/m ²	細粒分含有率 FC	50%粒径 D50	物性モデル
	護岸	RC		24.5		25,000,000	0.20	10,416,667	-	-	弾性モデル
	B	盛土	21.3	21.0	22.0	59,640	0.33	22,421	-	-	弾性モデル
	As	砂質土	10.7	18.4	19.4	29,960	0.33	11,263	26.5	0.282	パイリニア弾性
	Ac	粘性土	4.0	15.0	16.0	2,800	0.33	1,053	-	-	弾性モデル

②静的FEM解析手法について

【解析結果】

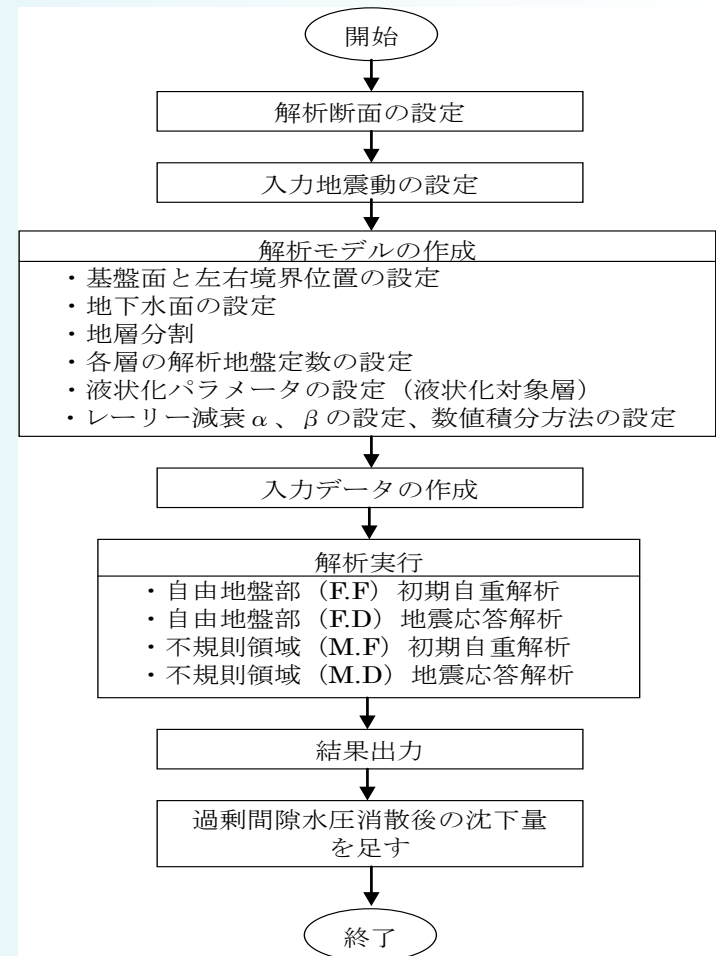
➤出力:モデル図、変形図、主応力図、主ひずみ図、FL分布図等

	レベル2-1 (水平震度:0.4)	レベル2-2 (水平震度:0.6)																																																																																												
FL分布図																																																																																														
変形図																																																																																														
変形量	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">鉛直変位(m)</th> <th rowspan="2">地震後一 照査外水位</th> <th rowspan="2">水平変位(m) 変位量</th> </tr> <tr> <th>計画高</th> <th>沈下量</th> <th>地震後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>6.200</td> <td>-3.058</td> <td>3.142</td> <td rowspan="3">-0.151</td> <td>-1.264</td> </tr> <tr> <td>②</td> <td>6.138</td> <td>-3.029</td> <td>3.109</td> <td>-1.377</td> </tr> <tr> <td>③</td> <td>6.072</td> <td>-2.809</td> <td>3.263</td> <td>-1.469</td> </tr> <tr> <td>④</td> <td>3.734</td> <td>-2.838</td> <td>0.897</td> <td rowspan="4">OUT</td> <td>-1.361</td> </tr> <tr> <td>⑤</td> <td>3.725</td> <td>-2.316</td> <td>1.409</td> <td>-1.458</td> </tr> <tr> <td>⑥</td> <td>3.763</td> <td>-1.285</td> <td>2.478</td> <td>-1.322</td> </tr> <tr> <td>⑦</td> <td>3.387</td> <td>-1.340</td> <td>2.047</td> <td>-1.175</td> </tr> </tbody> </table>		鉛直変位(m)			地震後一 照査外水位	水平変位(m) 変位量	計画高	沈下量	地震後	①	6.200	-3.058	3.142	-0.151	-1.264	②	6.138	-3.029	3.109	-1.377	③	6.072	-2.809	3.263	-1.469	④	3.734	-2.838	0.897	OUT	-1.361	⑤	3.725	-2.316	1.409	-1.458	⑥	3.763	-1.285	2.478	-1.322	⑦	3.387	-1.340	2.047	-1.175	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">鉛直変位(m)</th> <th rowspan="2">地震後一 照査外水位</th> <th rowspan="2">水平変位(m) 変位量</th> </tr> <tr> <th>計画高</th> <th>沈下量</th> <th>地震後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>6.200</td> <td>-3.199</td> <td>3.002</td> <td rowspan="3">-0.291</td> <td>-1.278</td> </tr> <tr> <td>②</td> <td>6.138</td> <td>-3.169</td> <td>2.969</td> <td>-1.401</td> </tr> <tr> <td>③</td> <td>6.072</td> <td>-2.943</td> <td>3.129</td> <td>-1.502</td> </tr> <tr> <td>④</td> <td>3.734</td> <td>-2.977</td> <td>0.757</td> <td rowspan="4">OUT</td> <td>-1.375</td> </tr> <tr> <td>⑤</td> <td>3.725</td> <td>-2.438</td> <td>1.287</td> <td>-1.498</td> </tr> <tr> <td>⑥</td> <td>3.763</td> <td>-1.357</td> <td>2.407</td> <td>-1.377</td> </tr> <tr> <td>⑦</td> <td>3.387</td> <td>-1.394</td> <td>1.993</td> <td>-1.161</td> </tr> </tbody> </table>		鉛直変位(m)			地震後一 照査外水位	水平変位(m) 変位量	計画高	沈下量	地震後	①	6.200	-3.199	3.002	-0.291	-1.278	②	6.138	-3.169	2.969	-1.401	③	6.072	-2.943	3.129	-1.502	④	3.734	-2.977	0.757	OUT	-1.375	⑤	3.725	-2.438	1.287	-1.498	⑥	3.763	-1.357	2.407	-1.377	⑦	3.387	-1.394	1.993	-1.161
	鉛直変位(m)			地震後一 照査外水位	水平変位(m) 変位量																																																																																									
	計画高	沈下量	地震後																																																																																											
①	6.200	-3.058	3.142	-0.151	-1.264																																																																																									
②	6.138	-3.029	3.109		-1.377																																																																																									
③	6.072	-2.809	3.263		-1.469																																																																																									
④	3.734	-2.838	0.897	OUT	-1.361																																																																																									
⑤	3.725	-2.316	1.409		-1.458																																																																																									
⑥	3.763	-1.285	2.478		-1.322																																																																																									
⑦	3.387	-1.340	2.047		-1.175																																																																																									
	鉛直変位(m)			地震後一 照査外水位	水平変位(m) 変位量																																																																																									
	計画高	沈下量	地震後																																																																																											
①	6.200	-3.199	3.002	-0.291	-1.278																																																																																									
②	6.138	-3.169	2.969		-1.401																																																																																									
③	6.072	-2.943	3.129		-1.502																																																																																									
④	3.734	-2.977	0.757	OUT	-1.375																																																																																									
⑤	3.725	-2.438	1.287		-1.498																																																																																									
⑥	3.763	-1.357	2.407		-1.377																																																																																									
⑦	3.387	-1.394	1.993		-1.161																																																																																									

③動的FEM解析手法について

検討手順

- i) 検討断面に対して、**地表面もしくは地盤面の加速度（動的）**を設定する。
- ii) **地表面加速度(動的)の最大値**を基に『河川構造物の耐震性能照査指針』に示される液状化判定式を用いて**FL値を算定**する。
- iii) 地盤や構造物の物性値を設定する。
- iv) 堤防構造及び基礎地盤部の解析モデルを作成する。地震波形を設定する。
- v) 地震前の物性値によって初期自重解析を行う。
- vi) 液状化の剛性低下を考慮して地震時応答解析を行う。
- VII) 液状化によって発生した過剰間隙水圧の消散に伴う沈下量を算定し vii) で算定した沈下量に加算する。



③動的FEM解析手法について

【検討手順 i : 地表面加速度を設定する】

○『道路橋示方書 V耐震設計編』に示される標準波を使用する。

- 地盤種別、タイプ別に応じて、3波ずつ標準波がある。
- 標準波は、地表面での加速度波であるため、基盤面に入力する場合は、一次元応答解析を行い、基盤面での波形に置き換える必要がある。

表-参 2.5 動的解析に用いる代表的な強震記録

(a) 標準加速度応答スペクトル S_0

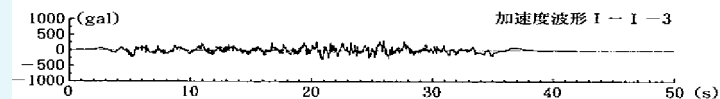
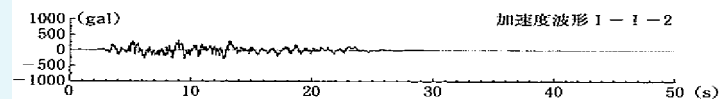
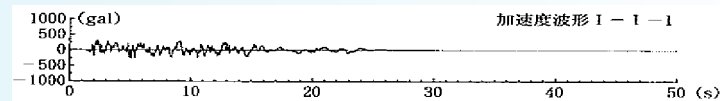
地盤種別	地震名	マグニチュード M	記録場所
I種地盤	1978年宮城県沖地震	7.4	開北橋周辺地盤上
II種地盤	1968年日向灘沖地震	7.5	板島橋周辺地盤上
III種地盤	1983年日本海中部地震	7.7	津軽大橋周辺地盤上

(b) 標準加速度応答スペクトル S_{10}

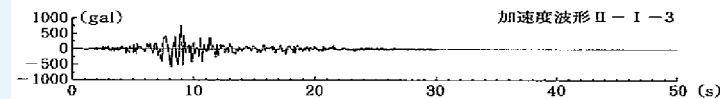
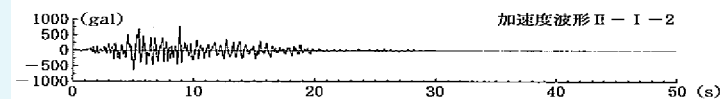
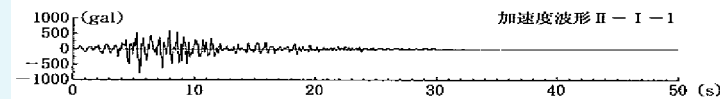
地盤種別	地震名	マグニチュード M	記録場所
I種地盤	1978年宮城県沖地震	7.4	開北橋周辺地盤上
	1993年北海道南西沖地震	7.8	七峰橋周辺地盤上
II種地盤	1968年日向灘沖地震	7.5	板島橋周辺地盤上
	1994年北海道東方沖地震	8.2	濫根沼大橋周辺地盤上
III種地盤	1983年日本海中部地震	7.7	津軽大橋周辺地盤上
	1994年北海道東方沖地震	8.2	釧路川堤防周辺地盤上

(c) 標準加速度応答スペクトル S_{30}

地盤種別	地震名	マグニチュード M	記録場所
I種地盤	1995年兵庫県南部地震	7.3	神戸海洋気象台地盤上
			猪名川架橋予定地点周辺地盤上
II種地盤	1995年兵庫県南部地震	7.3	JR西日本鷹取駅構内地盤上
			大阪ガス葺合供給所構内地盤上
III種地盤	1995年兵庫県南部地震	7.3	東神戸大橋周辺地盤上
			ポートアイランド内地盤上



(a) I種地盤



(a) II種地盤

(出典:道路橋示方書 V耐震設計編〔平成14年3月〕P304～310)

③動的FEM解析手法について

〔検討手順 i : 地表面加速度を設定する〕

○地域地震動を使用する。

- 中央防災会議や各自治体が所有する地震波を使用する。
- 地域地震動は基盤波形であることが多い。
- 地域地震動は、多くの波形を所有する自治体も多く、選定する必要がある。

出典	地震動タイプ	基盤面	地震波名	振動方向		備考	
				EW	NS		
H16 防災みえ	プレート境界型	工学的基盤	1 東海地震(工学的基盤)	○	○		
			2 東南海地震(工学的基盤)	○	○		
			3 東海・東南海・南海地震(工学的基盤)	○	○		
			4 南海地震(工学的基盤)	○	○		
	内陸直下型	地震基盤	5 伊勢湾断層帯(伊勢湾断層帯主部)(地震基盤)	○	○		
			6 伊勢湾断層帯(白子-野間断層)(地震基盤)	○	○		
			7 伊勢湾断層帯(鈴鹿冲断層)(地震基盤)	○	○		
			8 頓宮断層(地震基盤)	○	○		
			9 布引山地東縁断層帯西部(地震基盤)	○	○		
			10 布引山地東縁断層帯東部(地震基盤)	○	○		
			11 名張断層帯(地震基盤)	○	○		
			12 木津川断層帯(地震基盤)	○	○		
			13 養老-桑名-四日市断層帯(地震基盤)	○	○		
			14 養老-桑名断層帯(地震基盤)	○	○		
			15 鈴鹿東縁断層帯(地震基盤)	○	○		
中央 防災 会議	プレート境界型	工学的基盤	16 想定東海地震	1) 応力降下量一定とした震源モデルで、破壊開始点1のモデル(「東海S1モデル」)	○	○	
			17	2) 応力降下量一定とした震源モデルで、破壊開始点2のモデル(「東海S2モデル」)	○	○	
			18	3) 変位一定としたモデルで破壊開始点1のモデル(「東海D1モデル」)	○	○	
			19	4) 変位一定としたモデルで破壊開始点2のモデル(「東海D2モデル」)	○	○	
			20 東南海+南海地震	東南海地震と南海地震の震源域が同時に破壊される場合	○	○	
			21 東南海地震	東南海地震単独で発生する場合	○	○	
			22 南海地震	南海地震	○	○	
			23 東海+東南海+南海地震	想定東海地震、東南海地震、南海地震の震源域が同時に破壊される場合	○	○	
			24 東海+東南海地震	東海地震と東南海地震の震源域が同時に破壊される場合	○	○	

(事例: 三重県平成24年時点の地震波形一覧)

③動的FEM解析手法について

〔検討手順iii：地盤や構造物の物性値を設定する〕

地盤定数

必要な地盤定数		設定方法
N:	N値	地質調査結果より
qt:	土の湿潤密度	地質調査結果、各種基準等より
qw:	水の密度	各種基準等より
e0:	間隙比	地質調査結果より
v:	ポアソン比	静止土圧係数より推定
K:	透水係数	地質調査、粒度分布より推定
α 、 β :	レイリー減衰の係数	粘性減衰を3%に見込み、設定
α_p :	$\alpha_p = 1 - \frac{k_f}{k_s} \leq 1.0$	Kf: 水の体積弾性係数 Ks: 土の体積弾性係数 ※通常は、KfはKsより遙かに大きいので、1.0を使用

③動的FEM解析手法について

〔検討手順iii：地盤や構造物の物性値を設定する〕

ROモデルに関わる定数(非液状化層)

必要な地盤定数		設定方法
G0:	初期せん断剛性	N値から求める簡易式より推定 $G = E / 2 \cdot (1 + \nu)$ $E = 2800N$ E:弾性係数 ν :ポアソン比 N:N値
σ_m' :	初期平均有効拘束圧	深度に応じて算定
ν :	ポアソン比	静止土圧係数より推定(0.33)
C:	粘着力	地質調査結果、各種基準より
φ :	内部摩擦角	地質調査結果、各種基準より
Rf:	せん断強度を調整するパラメータ	$R_f = 1$ ※従来のROモデルと等しい。
RO α :	ROモデルのパラメータ	レイリー減衰の最大減衰定数より算定 $\alpha = 2^{\beta-1}$
RO β :	ROモデルのパラメータ	$\beta = \frac{2+\pi h}{2-\pi h}$ h:最大減衰定数 π :円周率

③動的FEM解析手法について

〔検討手順iii：地盤や構造物の物性値を設定する〕

PZ-sandモデルに関わる定数(液状化層)

必要な地盤定数		設定方法
Mf:	塑性ひずみベクトルに関するCSLの勾配	同定の手法は3つある。別に示す。
Mg:	直交ベクトルに関するCSLの勾配	同定の手法は2つある。別に示す。
C:	伸張側と圧縮側のCSLの比率	C=0.8を用いることが多い。
α_f :	応力比によりダイレイタンスーを決めるパラメータ	$\alpha_f=0.45$ とすることが多い。
α_g :	応力比により直交ベクトルを決めるパラメータ	α_g と同じとすることが多い。
Kevo:	体積弾性係数	算定式より推定。※別に示す。
Geso:	せん断弾性係数	算定式より推定。※別に示す。
mv:	体積弾性指数	0.4~0.8程度の値。0.5とすることが多い
ms:	体積弾性指数	mvと同程度の値とする。

③動的FEM解析手法について

〔検討手順iii：地盤や構造物の物性値を設定する〕

PZ-sandモデルに関わる定数(液状化層)

必要な地盤定数		設定方法
β_0 :	せん断硬化パラメータ	1～10の範囲。初期値として4.2
β_1 :	せん断硬化パラメータ	0.1～0.2の範囲。初期値として0.12
H_0 :	載荷時の塑性係数	砂の状態により、適宜決定。※別に示す。
H_{u0} :	除荷時の塑性係数	4000～10000kPa。初期値として6000
γ :	再載荷時の塑性変形に関するパラメータ	1.0～15.0の範囲。初期値として8.0
γ_u :	除荷時の塑性変形に関するパラメータ	0.0～10.0bの範囲。 $\gamma_u = \gamma - (\gamma - 2.0)$
P_0 :	初期平均有効応力	
OCR:	過圧密比	

※ モデルのパラメータの中で、 C 、 α_g 、 α_f 、 K 、 K は調整することはほとんどない。
 M_g 、 M_f 、 m_v 、 m_s 、 β_0 、 β_1 、 H_0 、 H_{u0} 、 γ 、 γ_u は、調整が必要。

③動的FEM解析手法について

〔検討手順iii:地盤や構造物の物性値を設定する〕

PZ-sandモデルに関わる定数(液状化層)

1. M_s

パラメータ M_s を同定する方法は3つあります。それらを①～③に示します。

- ① 圧密排水(CD)三軸圧縮試験もしくは圧密非排水(\overline{CU})三軸圧縮試験の応力比 $\eta (=q/p')$ ～軸ひずみ ε_s 曲線から読み取ります。 M_s はおおよそ最大応力比と等しくなります。
- ② 圧密非排水(\overline{CU})三軸圧縮試験の主応力差 q ～平均有効主応力 p' 曲線(有効応力経路)から読み取ります。 M_s はおおよそ原点から引いた $q \sim p'$ 曲線と接する直線の勾配と等しくなります。
- ③ 圧密排水(CD)三軸圧縮試験のダイレイタンスー($ds_s/d\varepsilon_s$)～応力比 η 曲線は一般に直線で近似することができます。 M_s はダイレイタンスーがゼロのときの応力比になります。

2. M_f

パラメータ M_f を同定する方法は2つあります。また、 $D_r \cdot M_f$ (D_r :相対密度)を M_f の初期値とすることも多いです。

- ① 圧密非排水(\overline{CU})三軸圧縮試験の $q \sim p'$ 曲線(有効応力経路)の形状と一致するように M_f を調整します。
- ② 密な砂においては、圧密排水(CD)三軸圧縮試験の体積ひずみ ε_v ～せん断ひずみ γ もしくは軸ひずみ ε_s 曲線から読み取ります。 M_f は体積収縮から膨張に変化する時の応力比になります。

③動的FEM解析手法について

〔検討手順iii:地盤や構造物の物性値を設定する〕

PZ-sandモデルに関わる定数(液状化層)

8. K_{s0}

K_{s0} は、要素試験シミュレーションプログラム中のパラメータ G_{s0} を指します。

主応力差 $q \sim$ 軸ひずみ ε_s 曲線の初期勾配を E_s とすると、 K_{s0} は式(2.2.2)より計算することができます。

$$K_{s0} = \frac{3E_s}{2(1+\nu)P_s(p'_0/P_s)^{\nu_s}} \quad (2.2.2)$$

ここに、 p'_0 は初期平均有効主応力、 P_s は大気圧であり、一般に $P_s = 100\text{kPa}$ です。 ν はポアソン比であり、圧密排水(CD)三軸圧縮試験の場合には0.2~0.3とし、圧密非排水($\overline{\text{CU}}$)三軸圧縮試験の場合には0.5とします。

式(2.2.2)より計算した K_{s0} を初期値とし、この値を必要に応じて調整することにより、主応力差 $q \sim$ 軸ひずみ ε_s 曲線を精度よく再現することができます。

9. K_{v0}

K_{v0} と K_{s0} の間には、式(2.2.3)で示す関係があります。

$$K_{v0} = \frac{2K_{s0}(1+\nu')}{9(1-2\nu')} \quad (2.2.3)$$

ここに、 ν' はポアソン比であり、圧密排水(CD)三軸圧縮試験、圧密非排水($\overline{\text{CU}}$)三軸圧縮試験に関わらず0.2~0.3とします。式(2.2.3)より計算した K_{v0} を初期値とし、この値を必要に応じて調整することにより、圧密非排水($\overline{\text{CU}}$)三軸圧縮試験の間隙水圧 $\Delta u \sim$ 軸ひずみ ε_s 曲線、もしくは圧密排水(CD)三軸圧縮試験の体積ひずみ $\varepsilon_v \sim$ 軸ひずみ ε_s 曲線を精度よく再現することができます。

③動的FEM解析手法について

〔検討手順iii：地盤や構造物の物性値を設定する〕

PZ-sandモデルに関わる定数(液状化層)

12. H_0

主応力差 $q \sim$ 軸ひずみ ε_s 曲線のフィッティングを行うことにより、 H_0 を決定することができます。また、圧密非排水(\overline{CU})三軸圧縮試験の $q \sim p'$ 曲線(応力経路)の形状をマッチングすることにより、 H_0 を同定することができます。 H_0 は砂の相対密度 D_r とある程度の相関があるため、 H_0 の初期値は表-2.2.1 に示す範囲内で選ぶことを推奨しています。

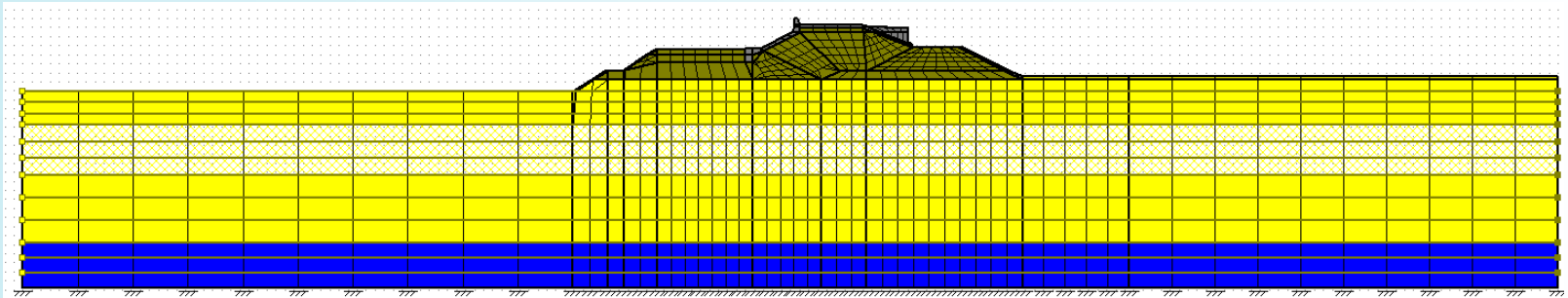
表-2.2.1 砂の状態と H_0 の関係

砂の状態	相対密度 D_r	H_0
非常に緩い (very loose)	<0.2	200~400
緩い (loose)	0.2~0.4	400~700
締まった (compact)	0.4~0.6	600~900
密な (dense)	0.6~0.8	800~1100
非常に密な (very dense)	>0.8	1000~1500

③動的FEM解析手法について

〔検討手順iv:解析モデルを作成する〕

- 解析領域幅 : 法尻から100m程度
- 領域深 : 基礎地盤まで
- メッシュ分割 : 大きな変形が想定される箇所 ⇒最大1m程度
それ以外 ⇒最大5m程度
- 境界条件 : 側面境界⇒等変位境界(X方向固定)
底面境界⇒両方固定境界(X、Y方向固定)
- 構成則 : 弾性モデル ⇒護岸、矢板等
ROモデル ⇒非液状化地盤
PZ-sandモデル ⇒液状化地盤



③動的FEM解析手法について

〔検討手順iv:解析モデルを作成する〕

(土質定数一覧)

色	記号	$\gamma t\text{-sta}$	$\gamma t\text{-liq}$	$\gamma \omega$	N値	有効拘束圧 σ_m	初期せん断 弾性係数 G_0	ポアソン比	弾性係数 E	レリー減衰係数		初期間隙比	α_p	水の体積 弾性係数Kf	透水係数 Kx	透水係数 Ky	異方性	構成則	間隙水圧モデル			
		$\gamma t(\text{kN/m}^3)$	$\gamma t(\text{kN/m}^3)$	$\gamma t(\text{kN/m}^3)$	回	kN/m ²	kN/m ²	ν	kN/m ²	α	β	e0	m/sec	m/sec	m/sec							
	RC	24.5	24.5	9.8			1.08E+07	0.16	2.50E+07	0.275	0.00275	0.000	1	2.2	6	1	-10	1	-10	無し	弾性モデル	全応力法を適用する材料
	B	19.0	19.0	9.8			5.90E+03	0.33	1.57E+04	0.275	0.00275	0.840	1	2.2	6	8	-5	8	-5	無し	ROモデル	全応力法を適用する材料
	As1	8.0	18.0	9.8	10.0	14.4	6.09E+03	0.33	1.62E+04	0.275	0.00275	0.880	1	2.2	6	1	-4	1	-4	無し	PZ-sand	有効応力法を適用する材料
	As2	8.5	18.5	9.8	14.5	46.2	1.22E+04	0.33	3.24E+04	0.275	0.00275	0.880	1	2.2	6	5	-5	5	-5	無し	PZ-sand	有効応力法を適用する材料
	As3	8.5	18.5	9.8	5.2	87.4	5.19E+03	0.33	1.38E+04	0.275	0.00275	0.990	1	2.2	6	7	-8	7	-8	無し	PZ-sand	有効応力法を適用する材料
	Ac	7.5	17.5	9.8	2.6	140.3	3.38E+03	0.33	9.00E+03	0.275	0.00275	1.450	1	2.2	6	1	-8	1	-8	無し	ROモデル	全応力法を適用する材料

(ROモデルに関わる定数)

色	記号	構成則	間隙水圧モデル	初期せん断剛性 G_0	初期平均 有効拘束圧 σ_m	粘着力C	内部摩擦角 Φ	Rf	Ro α	Ro β
				(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	度			
	B	ROモデル	全応力法を適用する材料	5902	50.0	10	30	1	3.44	2.782
	Ac	ROモデル	全応力法を適用する材料	3383	140.3	50	26	1	3.44	2.782

(PZ-sandモデルに関わる定数)

色	記号	構成則	間隙水圧モデル	Mf	Mg	C	α_f	α_g	Kevo	Geso	mv	ms	β_0	β_1	Ho	Huo	γ	γ_0	Po	OCR	
																	kN/m ²			kN/m ²	
	As1	PZ-sand	有効応力法を適用する材料	0.75	1.08	0.80	0.45	0.45	614.89	851.38	0.50	0.50	4.20	0.12	500.00	6000.00	7.50	5.50	14.40	1.0	
	As2	PZ-sand	有効応力法を適用する材料	0.78	1.18	0.80	0.45	0.45	480.50	665.30	0.50	0.50	4.20	0.12	600.00	9000.00	7.50	5.50	46.22	1.0	
	As3	PZ-sand	有効応力法を適用する材料	0.31	0.93	0.80	0.45	0.45	124.81	172.81	0.50	0.50	4.20	0.12	300.00	6000.00	8.00	0.75	87.38	1.0	

③動的FEM解析手法について

〔解析結果〕

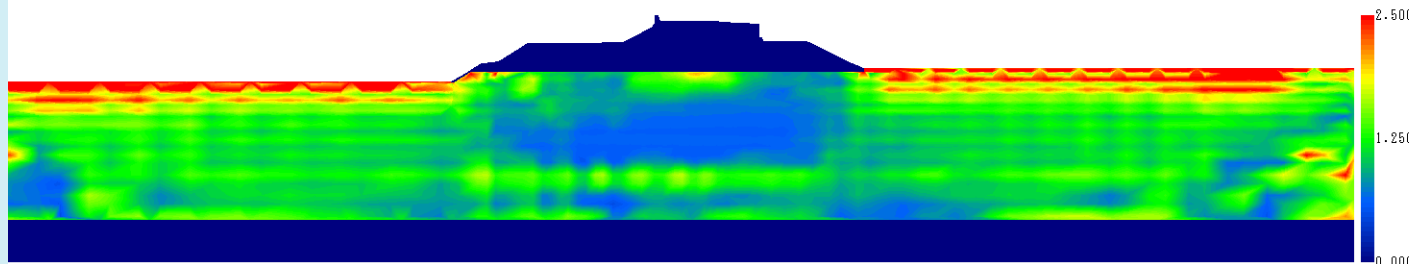
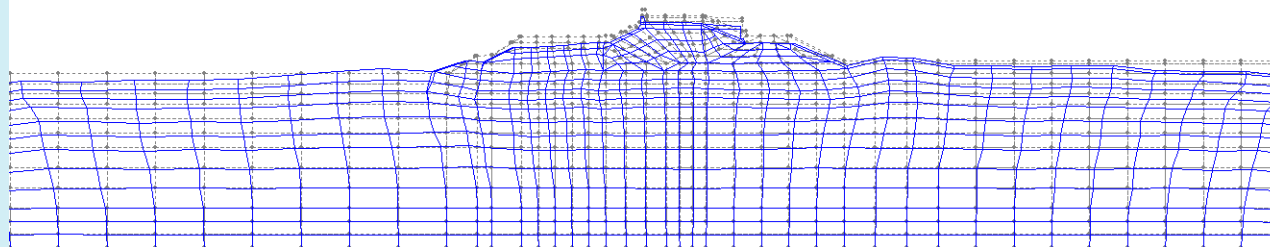
➤出力:モデル図、変形図、主応力図、主ひずみ図、
過剰間隙水圧分布図等

※動的解析であるため、時刻歴図として整理することができる。

(天 端)水平方向:**26cm**、鉛直方向**89cm**

(高 水 敷)水平方向:**71cm**、鉛直方向**120cm**

(川裏法尻)水平方向:**43cm**、鉛直方向**59cm**



④ 静的と動的の解析手法と解析結果の相違点

〔解析手法の相違点〕

i) 地震加速度(水平震度)の与え方

静的解析⇒一定値 動的解析⇒地震加速度波形

ii) 地盤及び構造物等の物性値の与え方

静的解析⇒非液化化層:5の定数、液化化層:10の定数

動的解析⇒非液化化層:7の定数、液化化層:17の定数

iii) モデルの違い

静的解析⇒液化化による剛性低下をバイリニアとして
モデル化

動的解析⇒液化化層はPZ-sandモデル、
非液化化層はROモデル

④ 静的と動的の解析手法と解析結果の相違点

〔解析結果の相違点〕

i) アウトプットの違い

静的解析⇒各ステップでのアウトプットのみ

動的解析⇒時刻歴のアウトプットが可能、

アニメーションも可能

ii) 結果の違い

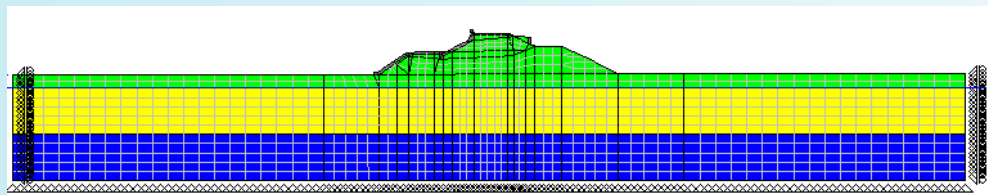
静的解析⇒比較的沈下量が大きめにしやすい。

動的解析⇒減衰しやすい地盤だと静的に比べ沈下量が小さくでる。

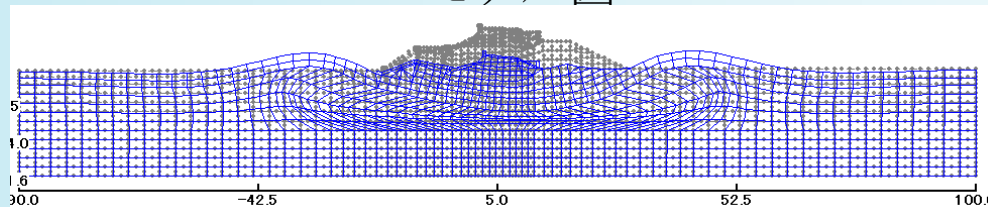
⑤作業上の注意点及び問題点 〔作業上の注意点（静的FEM解析）〕

沈下量の確認

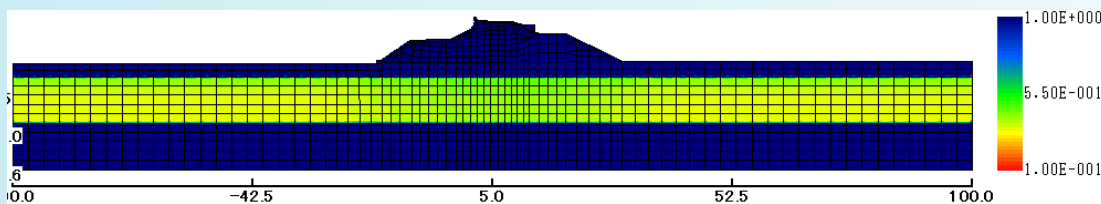
- 沈下が極端に生じることがあり、75%沈下量を大きく超えることがある。
- 今までの被災実績等から解析結果に信頼性を欠くことから、75%沈下量以上の場合には、75%沈下量を採用する。



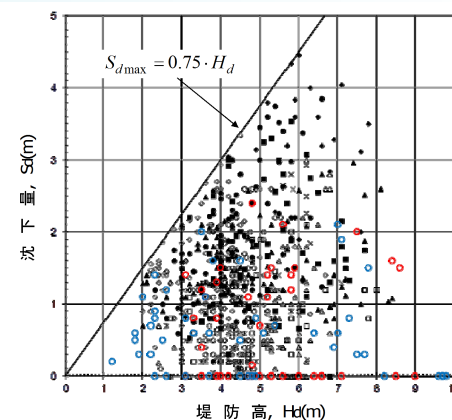
モデル図



変形図



FL分布図



- | | |
|-----------------------|----------------------|
| ◆ 濃尾地震(長良川、揖斐川等) | ■ 関東大地震(江戸川、富士川等) |
| ● 福井地震(九頭竜川、大型寺川等) | ▲ 十勝沖地震(新創路川、十勝川等) |
| ◇ 新潟地震(阿賀野川、信濃川等) | □ 宮城県沖地震(北上川、名取川等) |
| × 日本海中部地震(岩木川、米代川等) | △ 釧路沖地震(釧路川) |
| ○ 北海道南西沖地震(後志利別川) | × 兵庫県南部地震(淀川) |
| ○ 東北地方太平洋沖地震 | ○ 東北地方太平洋沖地震 |
| (阿武隈川、鴨瀬川、江合川等東北地整管内) | (利根川、霞ヶ浦、那珂川等関東地整管内) |

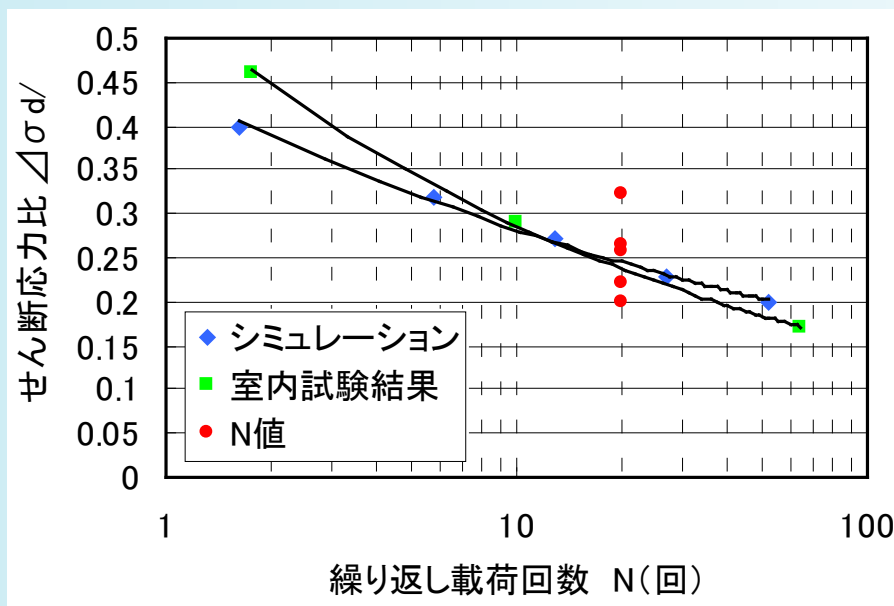
既往の地震における堤防高さ
と沈下量の関係
(出典:レベル2地震動に対する河川堤防
の耐震点検マニュアル平成24年2月)

⑤作業上の注意点及び問題点

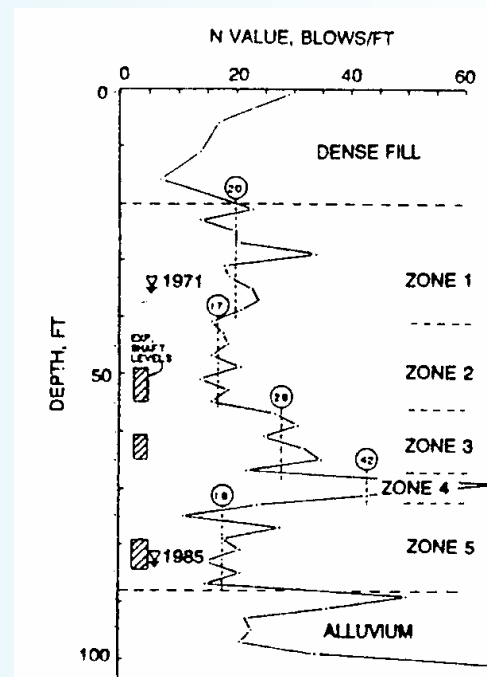
〔作業上の注意点（動的FEM解析）〕

液状化パラメータの同定例

- 液状化解析プログラムに付属されている要素試験シミュレーションプログラムを用いて、液状化強度曲線をマッチングすることによりパラメータを設定。
- 標準貫入試験結果も分かっているため、道路橋示方書に示されるN値より得られる液状化強度比を併せて図示。



液状化強度曲線



検討地点の標準貫入試験結果

⑤作業上の注意点及び問題点

〔作業上の問題点〕

i) 動的解析の場合、地震動の選択が必要。

➤ 地域地震動は、多くの波形を所有する自治体も多く、選定する必要がある。

⇒ 各地域地震動における震度等が発表されている場合があるので、震度が大きいものを採用するなどしてふるい分けする？

➤ 地域地震動を適切な地盤面に入力する必要がある。

⇒ 基盤波であれば、 $V_s = 300\text{m/s}$ 以上であり、N値50相当に入力

⑤作業上の注意点及び問題点

〔作業上の問題点〕

ii) 土質定数の設定に必要な地質調査がない。

静的解析⇒各種基準により、ある程度N値等から推定可能であるため、解析は可能である。

【精度良く解析するために必要な土質調査】

N値、粒度、土の密度、一軸圧縮(粘着力)、
三軸圧縮(内部摩擦角)

動的解析⇒液状化パラメータを設定するためには、繰り返し三軸試験が必要となる。一般値での解析は可能である。

【精度良く解析するために必要な土質調査】

N値、粒度、土の密度、一軸圧縮(粘着力)、
三軸圧縮(内部摩擦角)、繰り返し三軸試験
透水試験、Ps検層