



建設ICTマスター養成講座
基礎養成編 選択分野別ソフトウェア実習

液状化による 自重変形解析

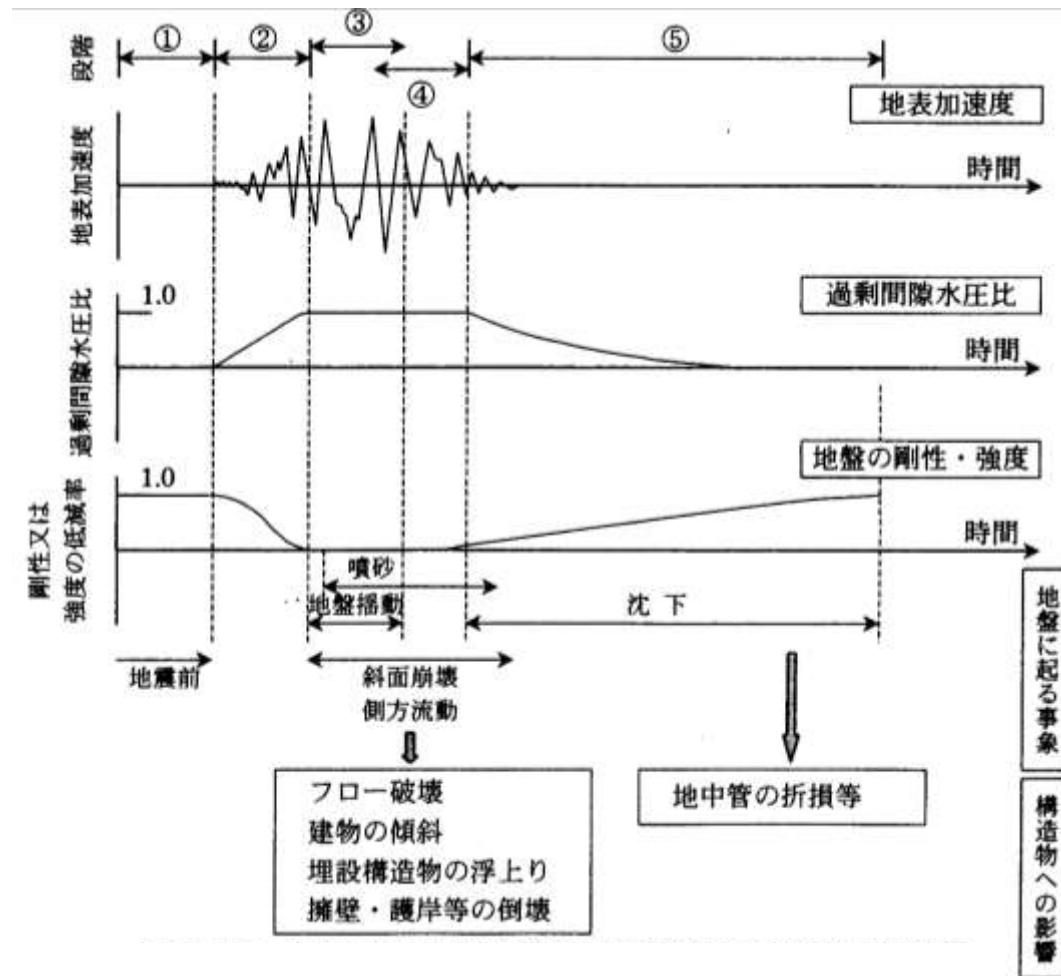
内容:

- 液状化が堤防挙動に及ぼす地震時の影響
- 数値解析手法
- 静的解析手法
- 問題点

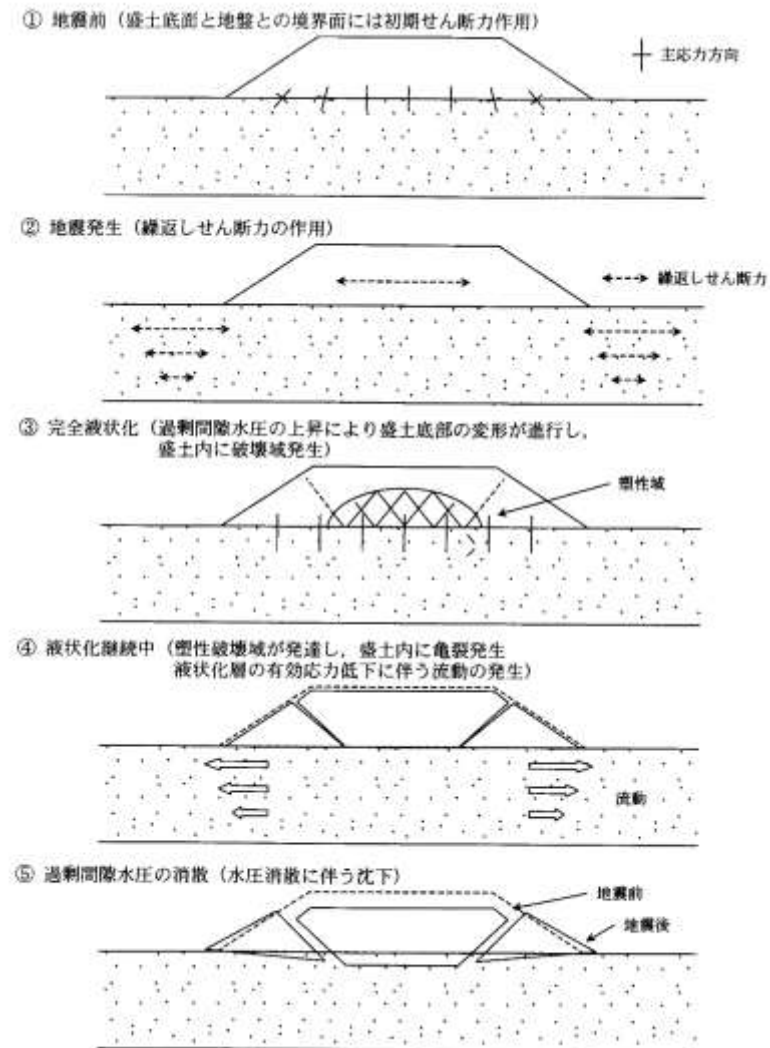
書籍: 主に第9章をご参照

液状化する砂の地震時挙動：概念図

(河川堤防の地震時変形量の解析手法より)



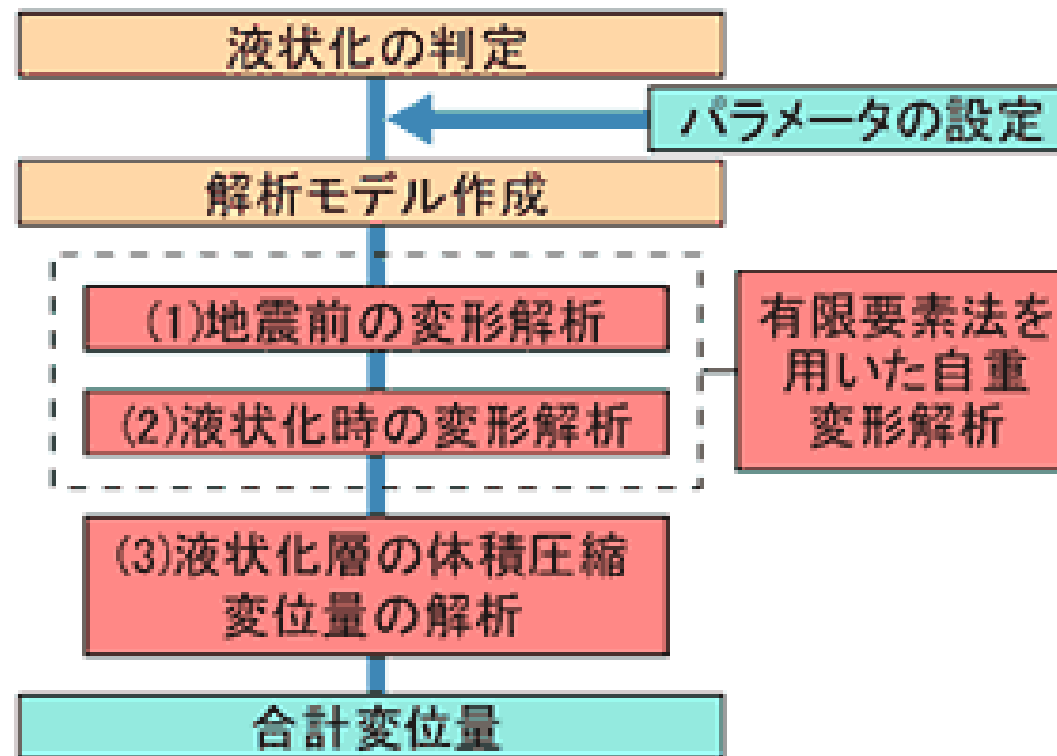
液状化地盤と盛土の地震時挙動: 概念図



液状化による自重変形解析

- 静的解析(液状化による自重変形解析)
- 動的有効応力解析
 - ・有効応力法にもとづき非連成解析(地震時の間隙水圧は別途計算する)、あるいは連成解析(土と水の二相問題として間隙水圧も変数として解く。例:UWLC)がある。

液状化による自重変形解析



液状化による自重変形解析フロー

液状化の判定

液状化に対する抵抗率 : $F_L = R/L$

動的せん断強度比 : $R = c_w R_L$

c_w : 地震動特性による補正係数

(タイプⅠの地震動の場合)

$$c_w = 1.0$$

(タイプⅡの地震動の場合)

$$c_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$

R_L : 繰返し三軸強度比

地震時せん断応力比 :

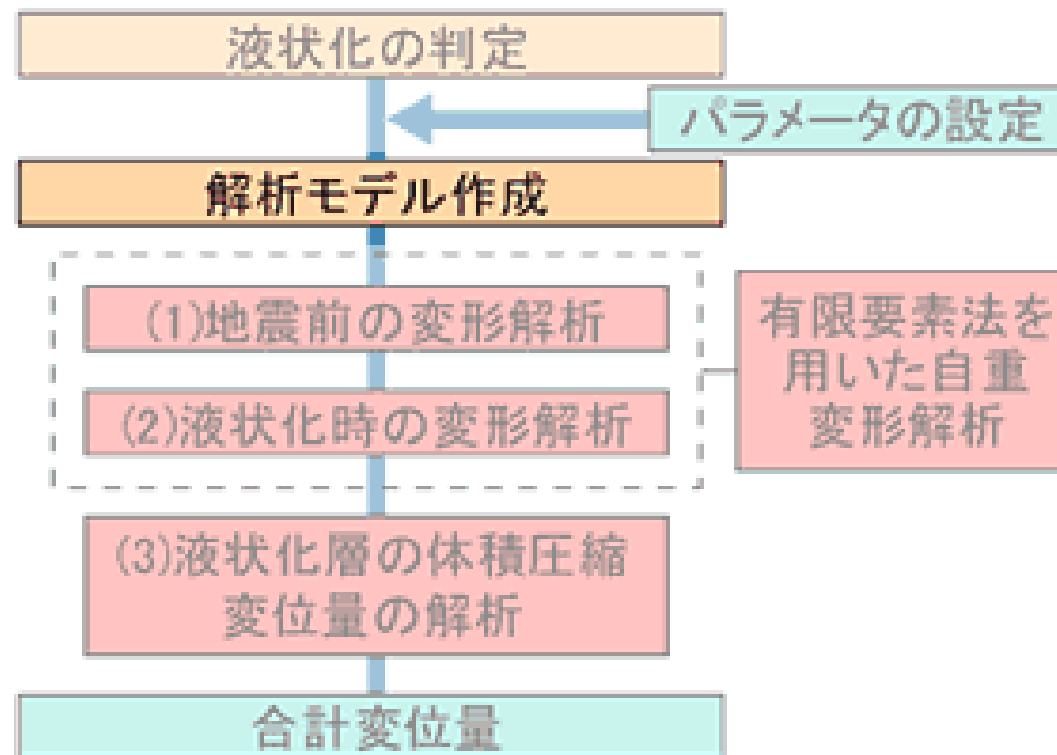
$$L = r_d k_{hg} \sigma_v / \sigma'_v$$

r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

$$r_d = 1.0 - 0.015x$$

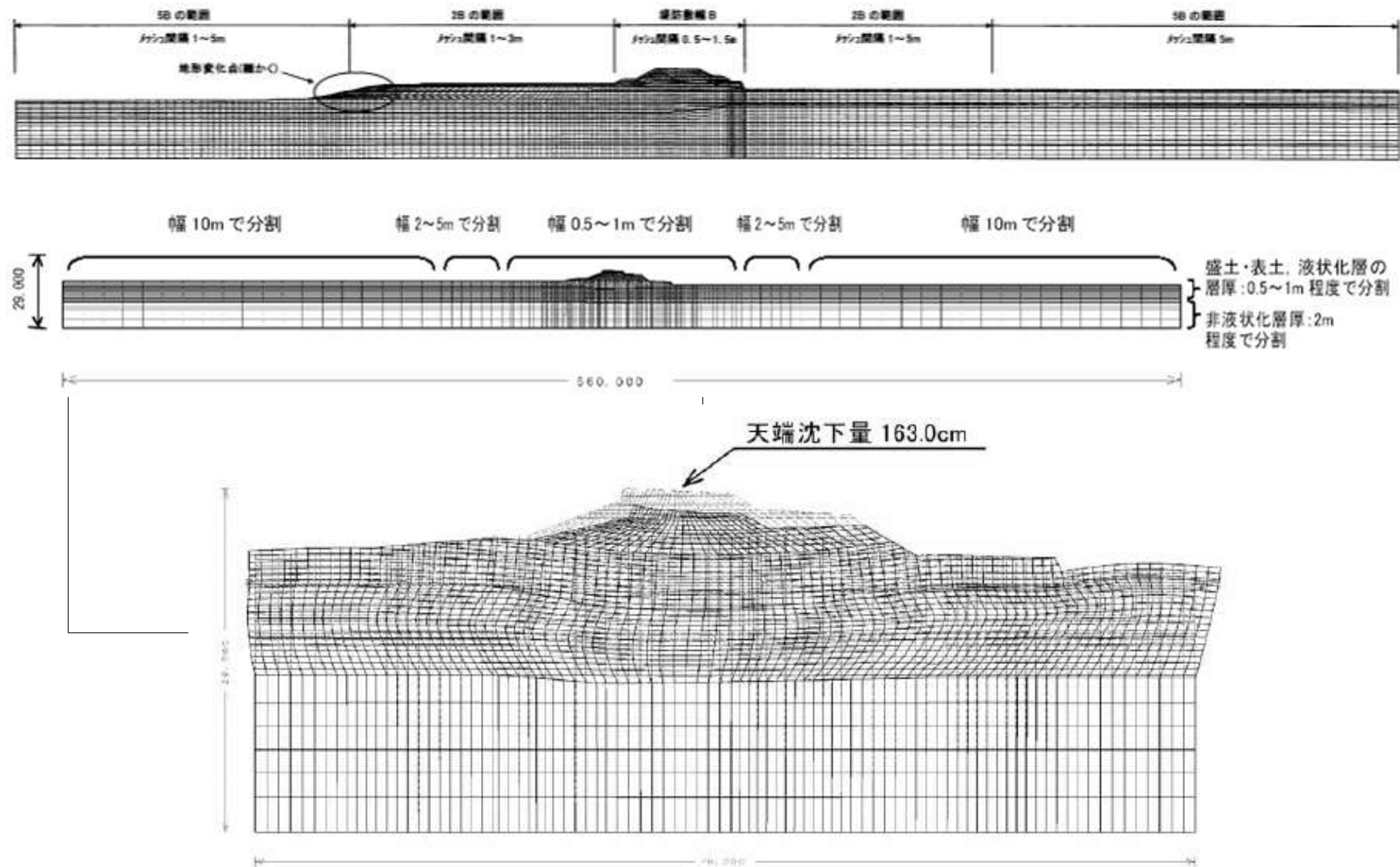
日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編

液状化による自重変形解析

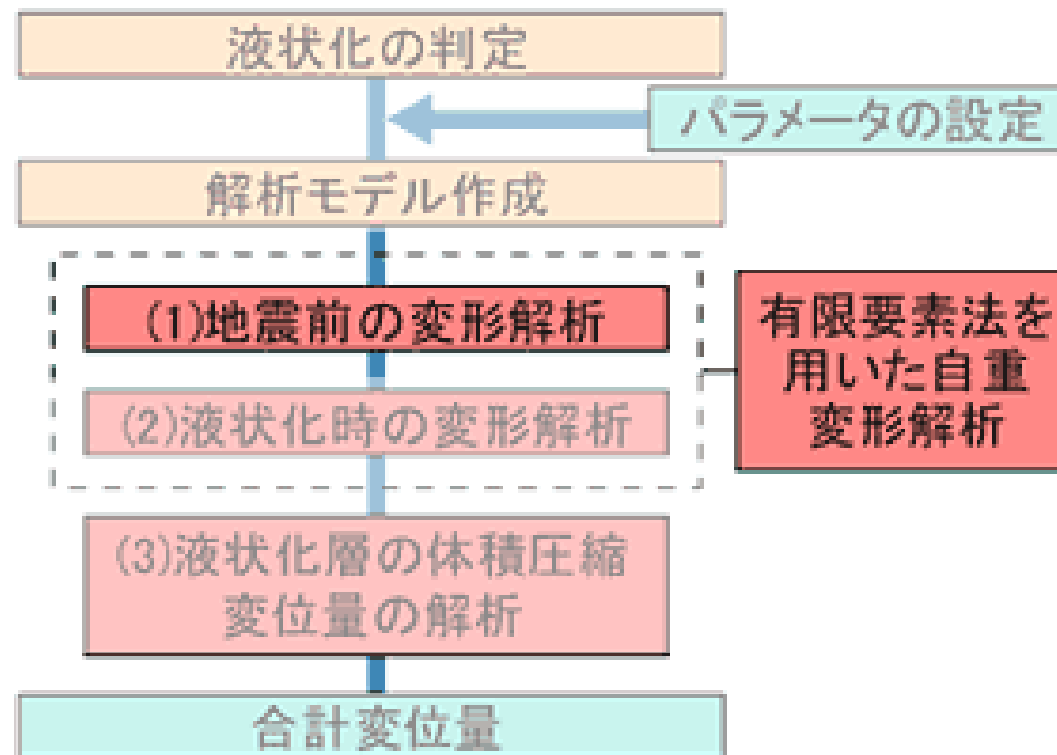


液状化による自重変形解析フロー

解析モデルとメッシュ分割



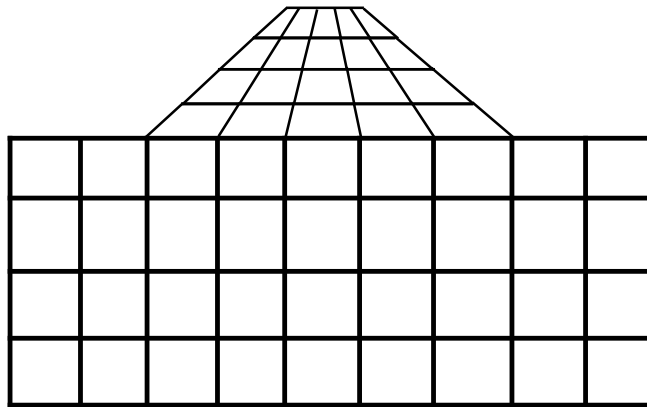
液状化による自重変形解析



液状化による自重変形解析フロー

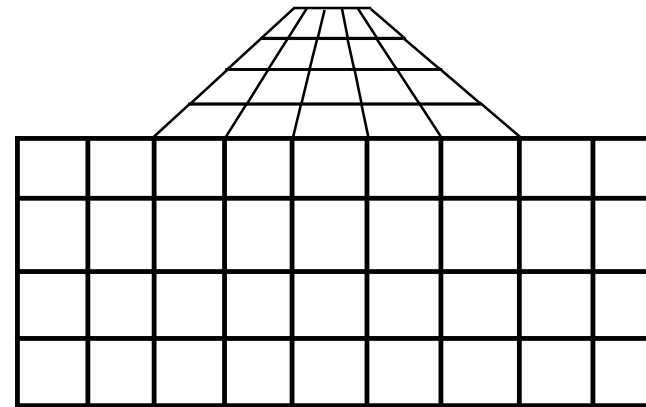
地震前の変形解析

自重を一括に作用し、
変形を求める。(○)



そのわけは、液状化後も一括して解析するので、Gの変化だけを考慮するため。

施工ステップを考慮し、
マルチステージ解析を
行い、変形を求める。
(×)



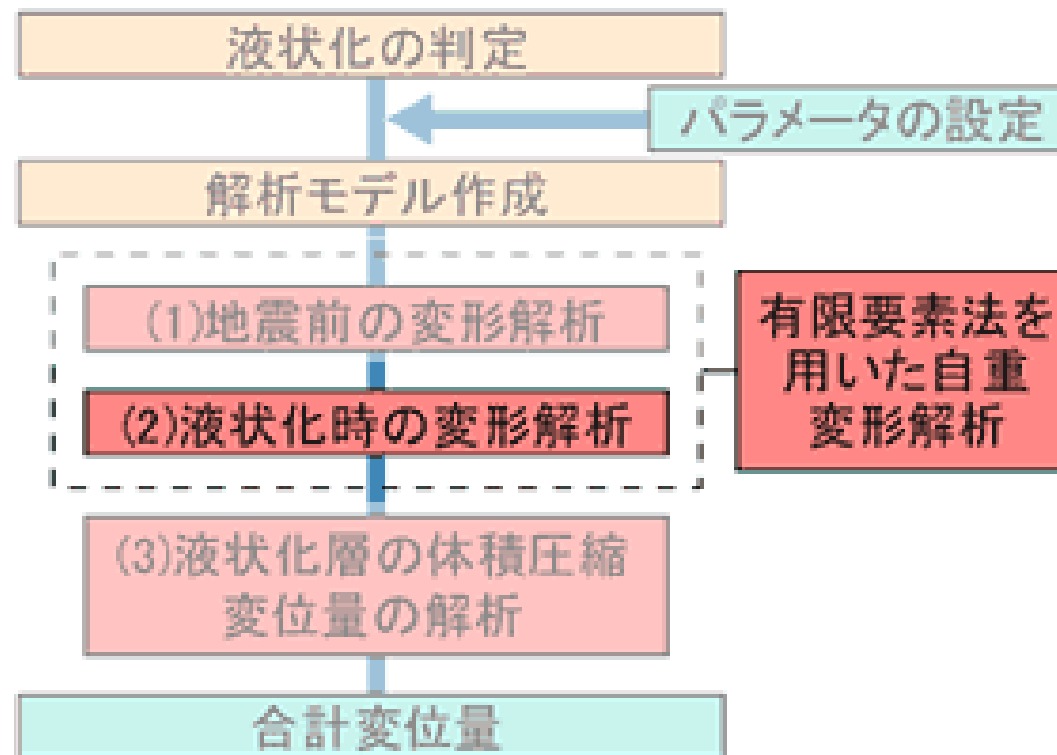
等方線形弾性構成則

ヤング率もしくは変形係数

変形係数 E_0 と補正係数 α

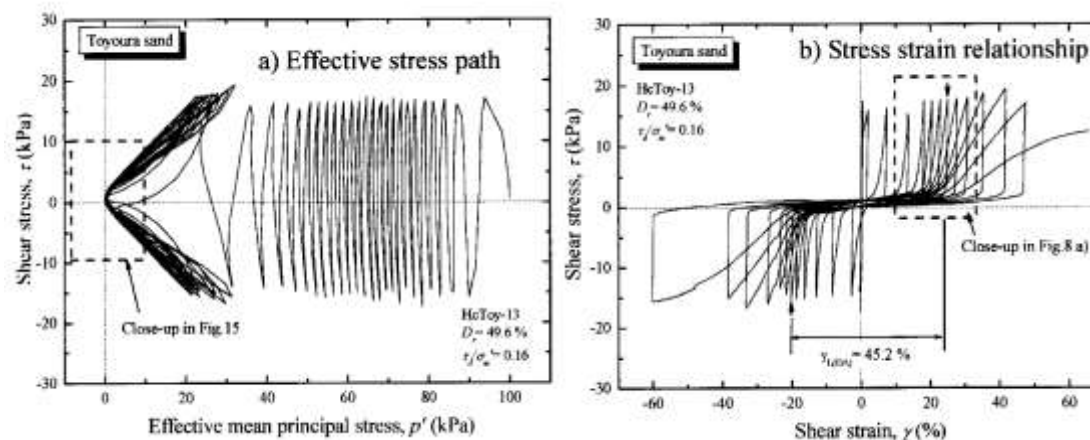
変形係数 E_0 の推定方法	補正係数 α
直径0.3mの剛性円板による平板載荷試験の繰返し曲線から求めた変形係数の1/2	1
孔内水平載荷試験で測定した変形係数	4
供試体の一軸圧縮試験又は三軸試験から求めた変形係数	4
標準貫入試験の N 値より $E_0=2800N$ で推定した変形係数	1

液状化による自重変形解析

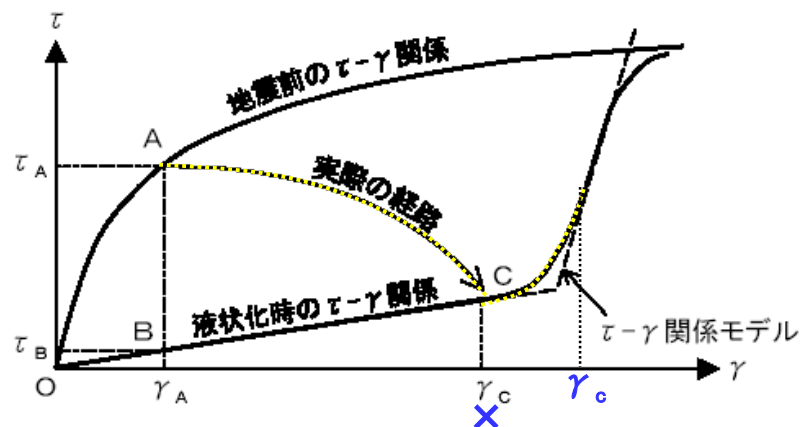
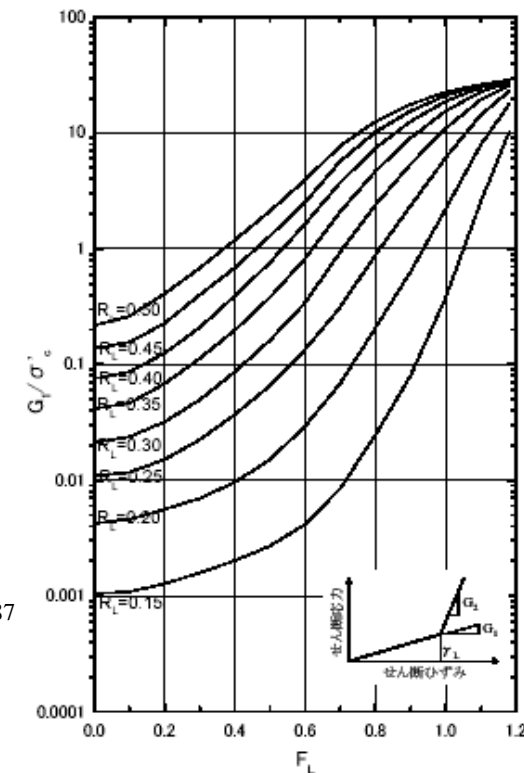


液状化による自重変形解析フロー

液状化層のせん断剛性



Dr=49.6%の豊浦砂の繰返し中空ねじりせん断試験



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

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

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

非液状化層のせん断剛性

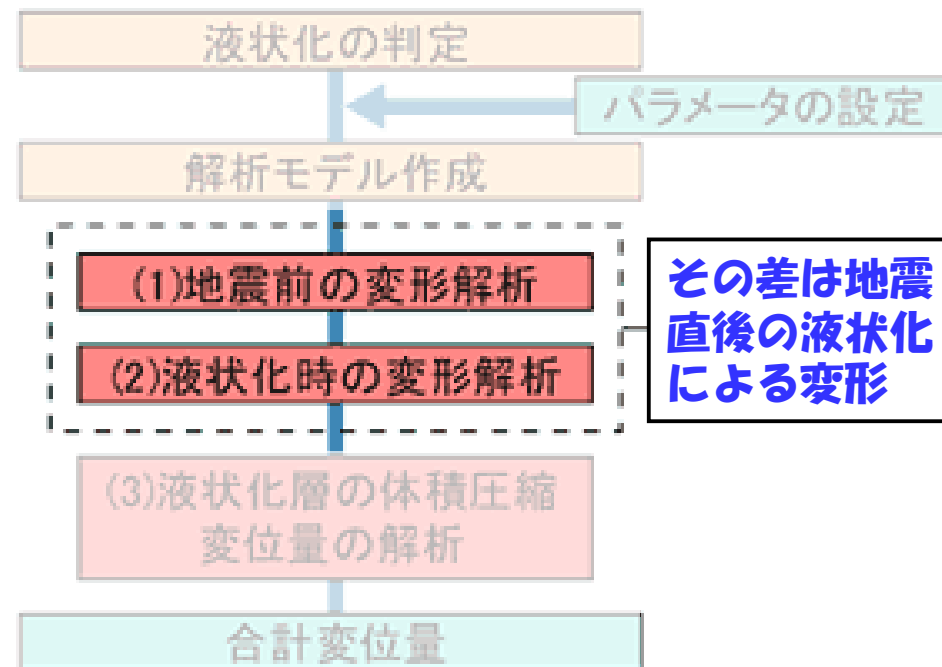
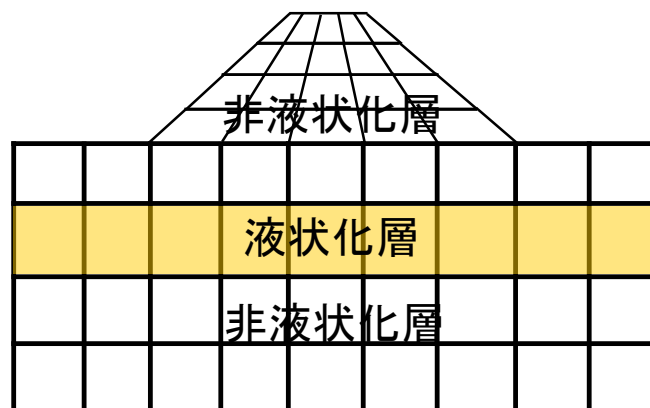
- 液状化層より下は、液状化の影響を受けない。
- 液状化層より上の非液状化層は、液状化の影響を受け、せん断剛性を低減する。

低減方法(H19):

1. 非液状化層に引張応力が生じないように剛性を繰返し計算により求める方法。
2. $\log G1 = 2.8829 - 0.3032 \cdot DL + 0.0803 \cdot HNL$
3. 液状化層の剛性低下率の10倍と設定する方法
4. 地震前の初期剛性の1/10程度、もしくは1/40とする方法

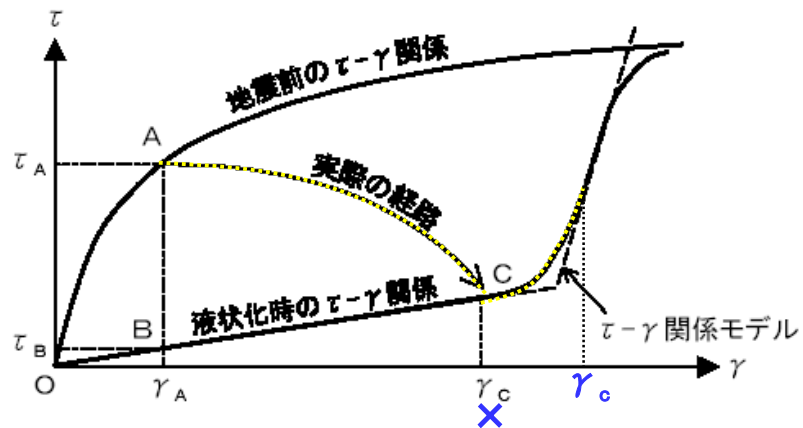
液状化時の変形解析

自重を一括に作用し、
変形を求める。



変形パターンを考えると、地震前の変形解析
においても、自重を一括に作用し変形を求め
る必要がある。

液状化時の変形解析



これまでの液状による自重変形:

地震直後の液状化による変形: $\gamma_C - \gamma_A$

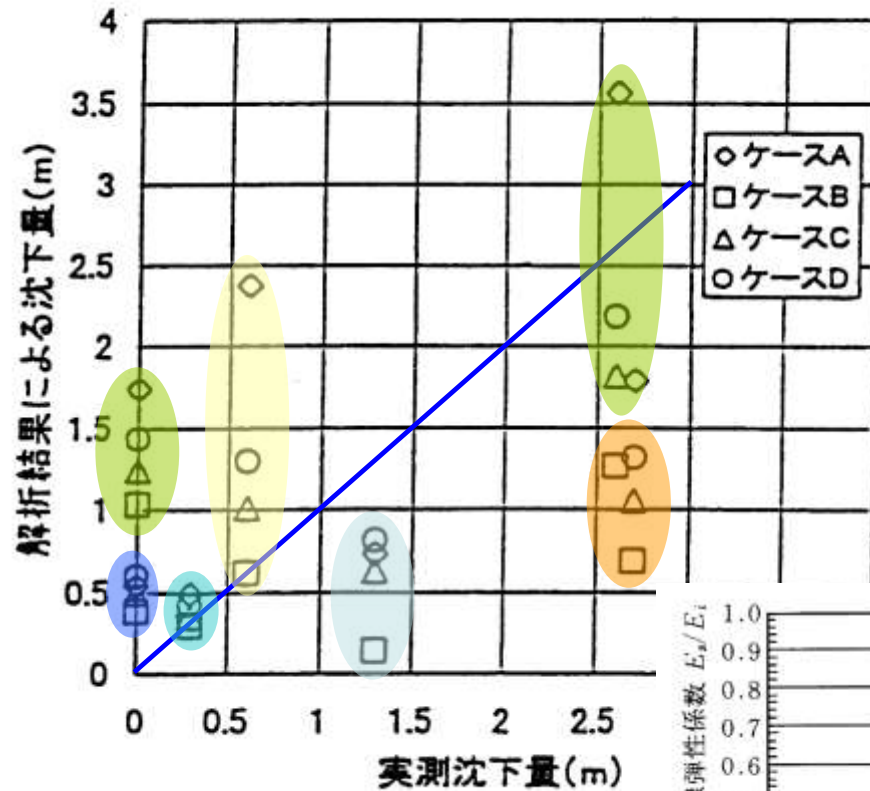
(参考)もう一つの求め方: ... 本対象製品では採用していない

地震直前のすべての荷重: F_A

点Bに等価な荷重: $F_B = \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{D}^e (G_1, \nu_1) \boldsymbol{\epsilon}_B dA$

液状化による変形は荷重 $(F_A - F_B)$ による変形だと考える。

非液化化層のせん断剛性低減の影響



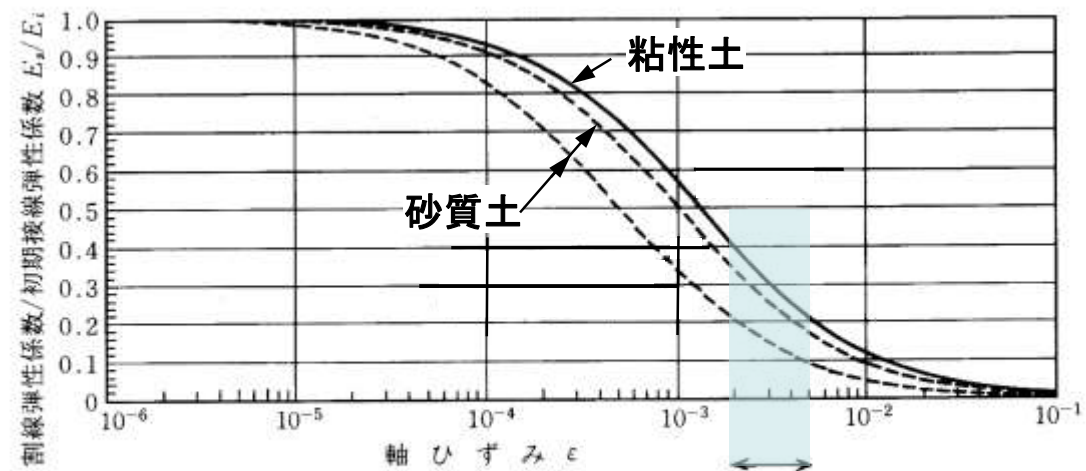
A: 液化化層の剛性低下率の10倍

B: 剛性低下しない

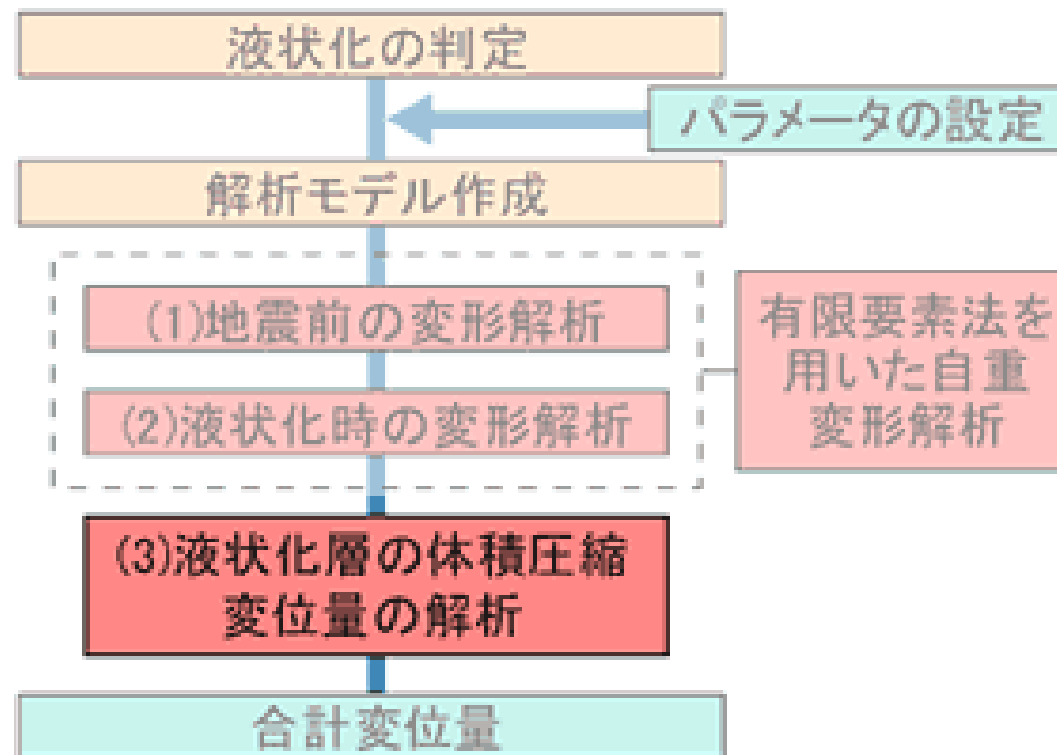
C: 地震前のせん断剛性の1/5

D: 地震前のせん断剛性の1/10

せん断剛性の低減は、変形が小さい場合に大き過ぎ、変形が大きい場合に小さすぎる。

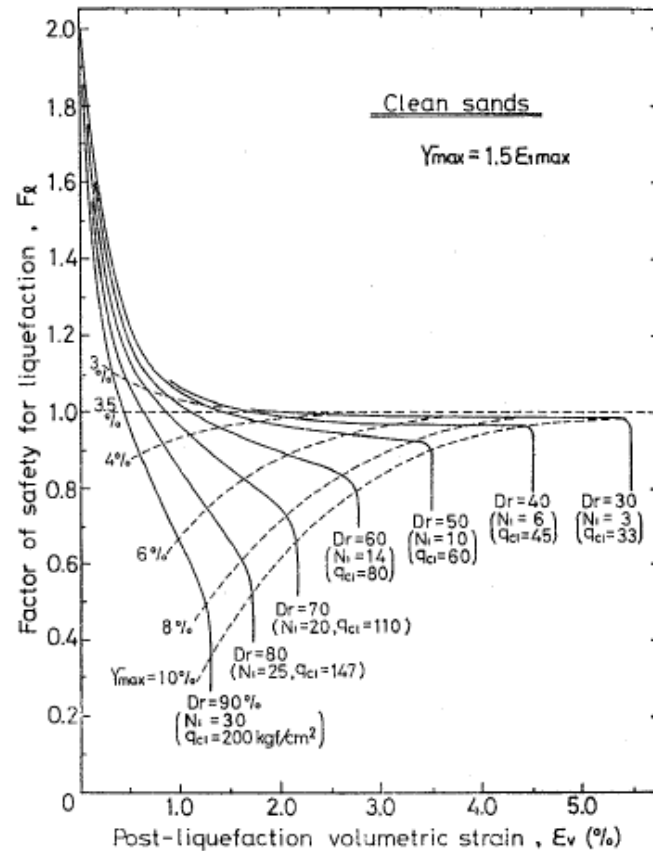


液状化による自重変形解析



液状化による自重変形解析フロー

間隙水圧の消散による体積圧縮



キレイな砂の実験結果

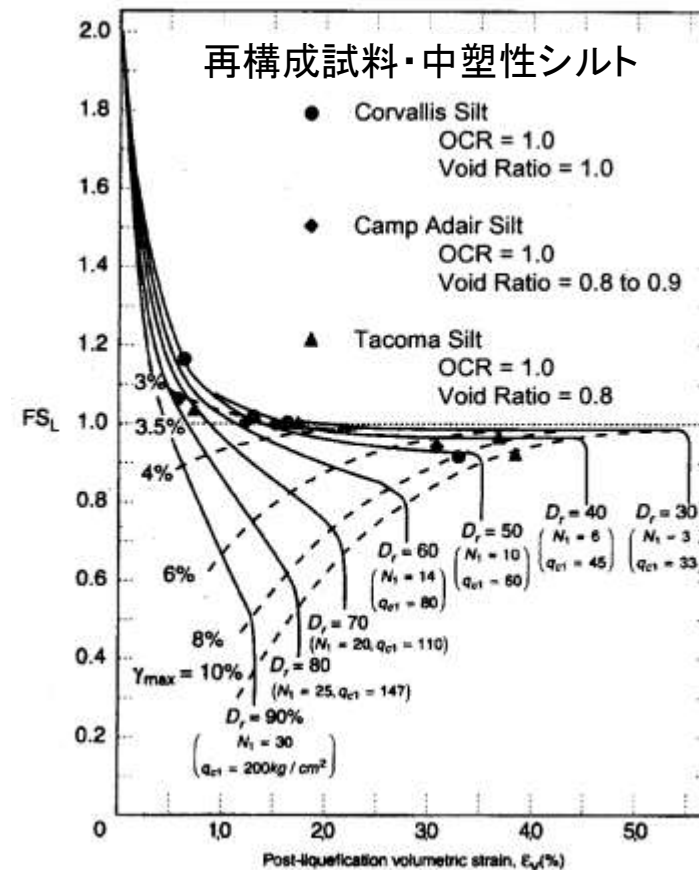
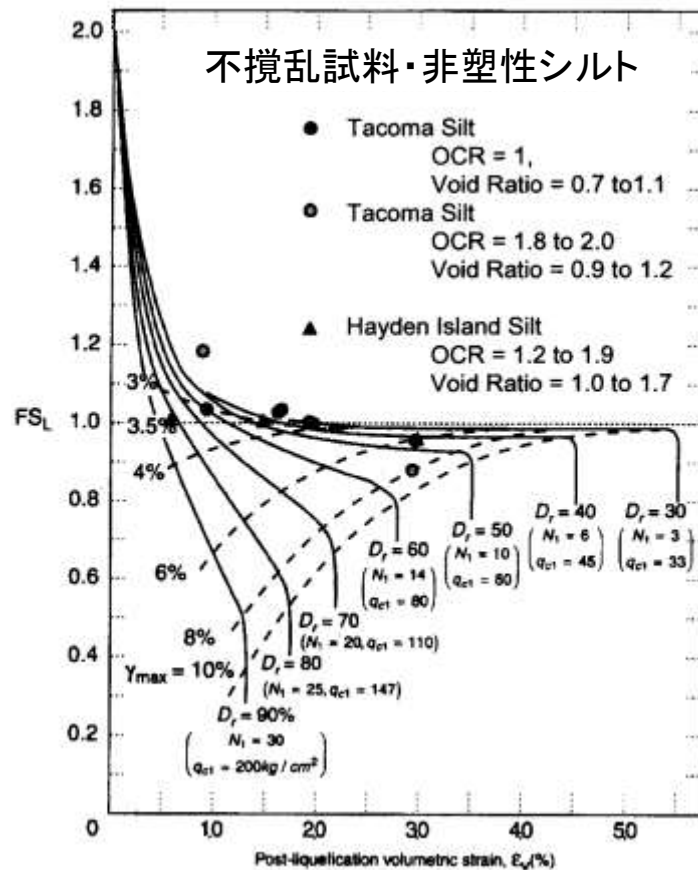
細粒分がある砂はどうなるか？

今は、その影響を考慮していない。

出典: "EVALUATION OF SETTLEMENTS IN SAND DEPOSITS FOLLOWING LIQUEFACTION DURING EARTHQUAK", ISHIHARA et al., SOILS AND FOUNDAS, Vol.32, No. 173-188, Mar. 1992

液状化による体積ひずみとFLと換算N1との関係

間隙水圧の消散による体積圧縮



細粒分の影響を考慮した補正N値を用いるべき。

れき質土は？

間隙水圧の消散による体積圧縮

ALID(第三版)資料、pp.21-22

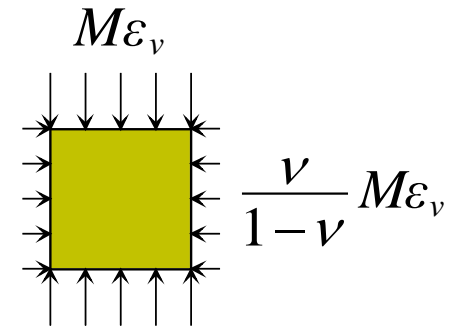
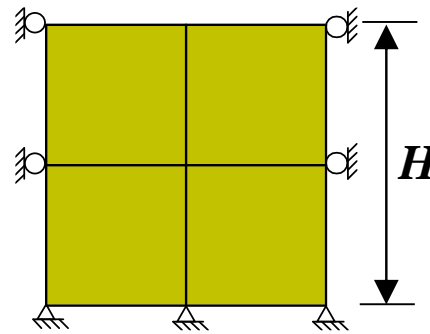
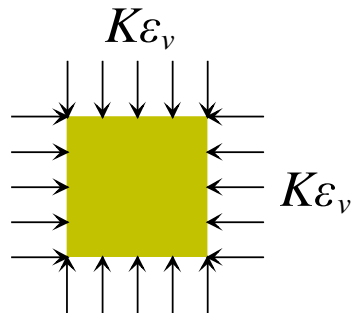
本対象製品では

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{m} K \varepsilon_v dV$$

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV$$

$$\mathbf{m} = (1 \quad 1 \quad 0)^T$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_0 = (0 \quad \varepsilon_v \quad 0)^T$$



$$S = \frac{K}{M} \varepsilon_v H$$

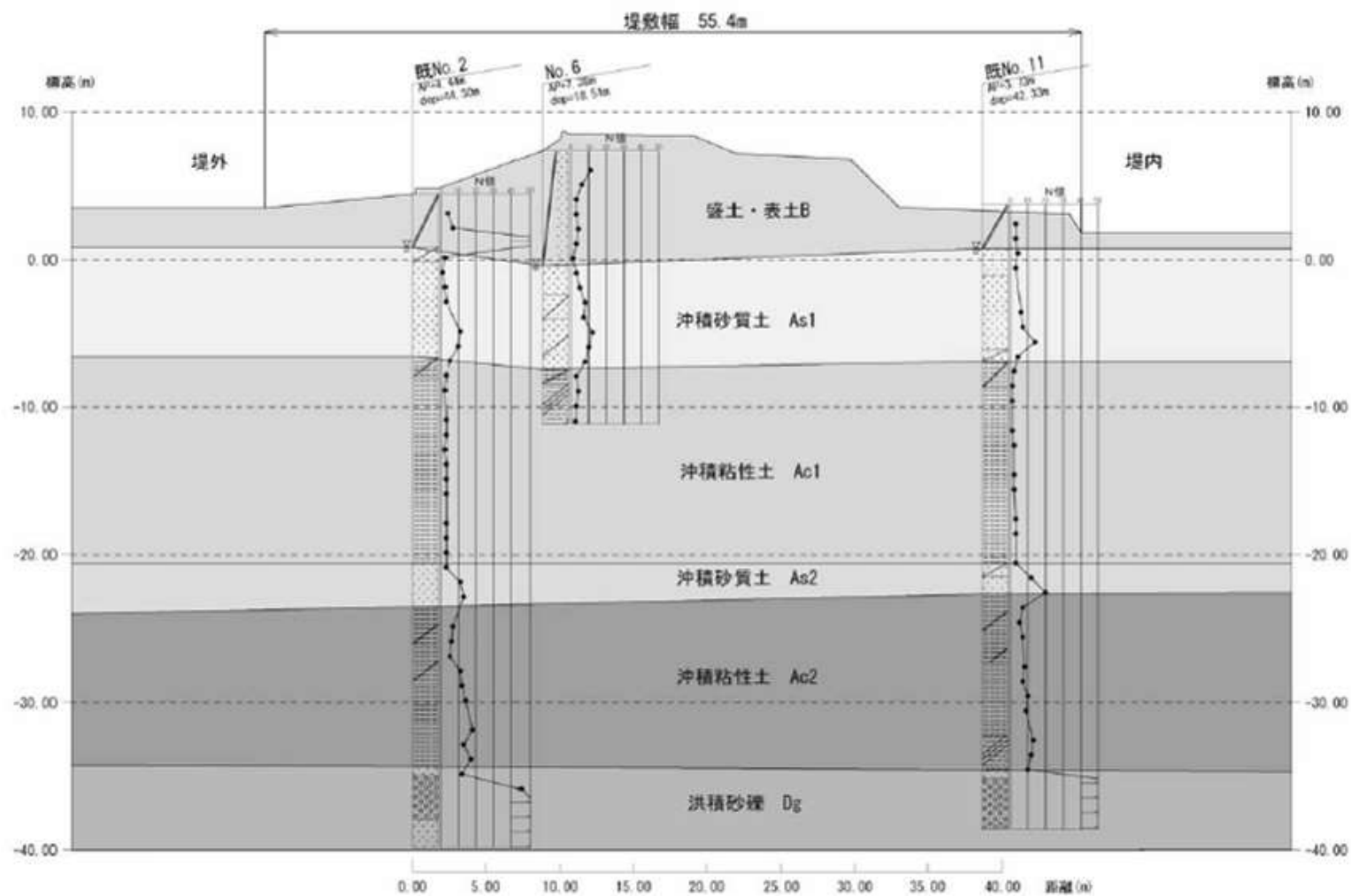
$$(S = \frac{2}{3} \varepsilon_v H, \nu = \frac{1}{3})$$

$$S = \varepsilon_v H$$

体積変形係数 : $K = \frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$

拘束変形係数 : $M = \frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}$

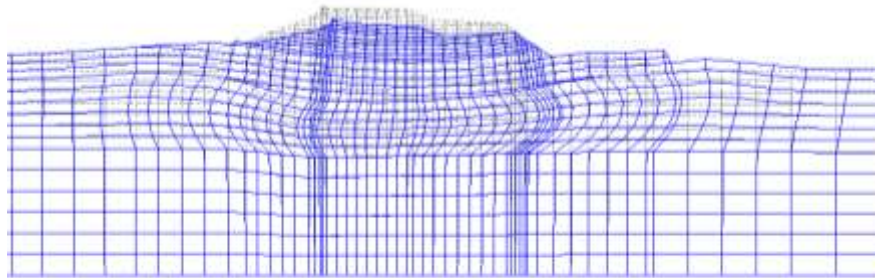
解析事例1



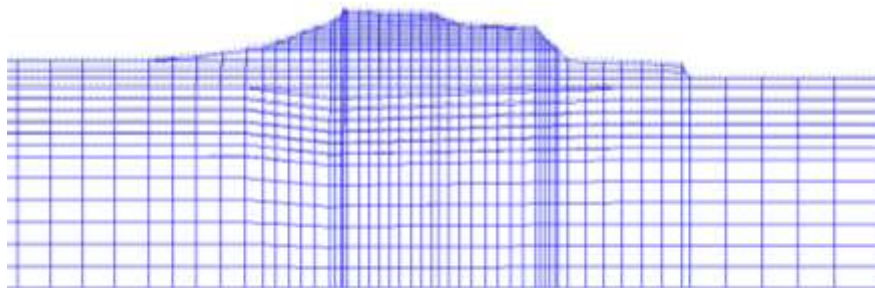
解析事例1

本対象製品による解析結果

天端沈下量171.9cm

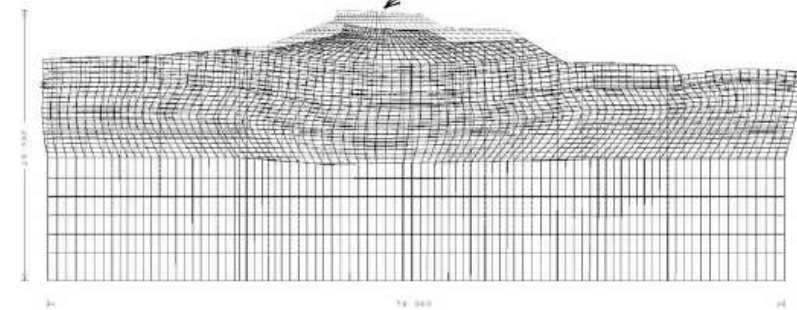


天端沈下量31.0cm



計算事例-01

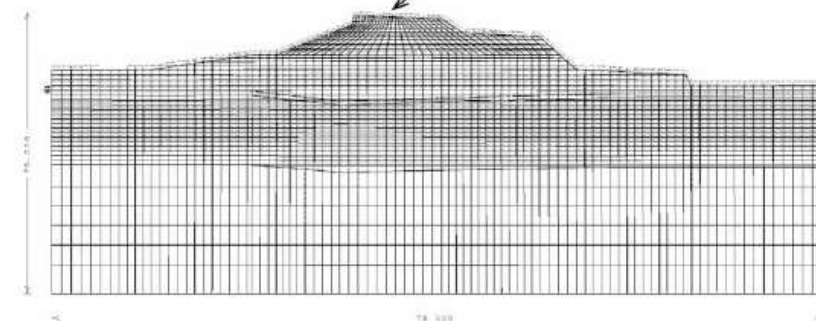
天端沈下量 171.4cm



a) 液状化時の変形

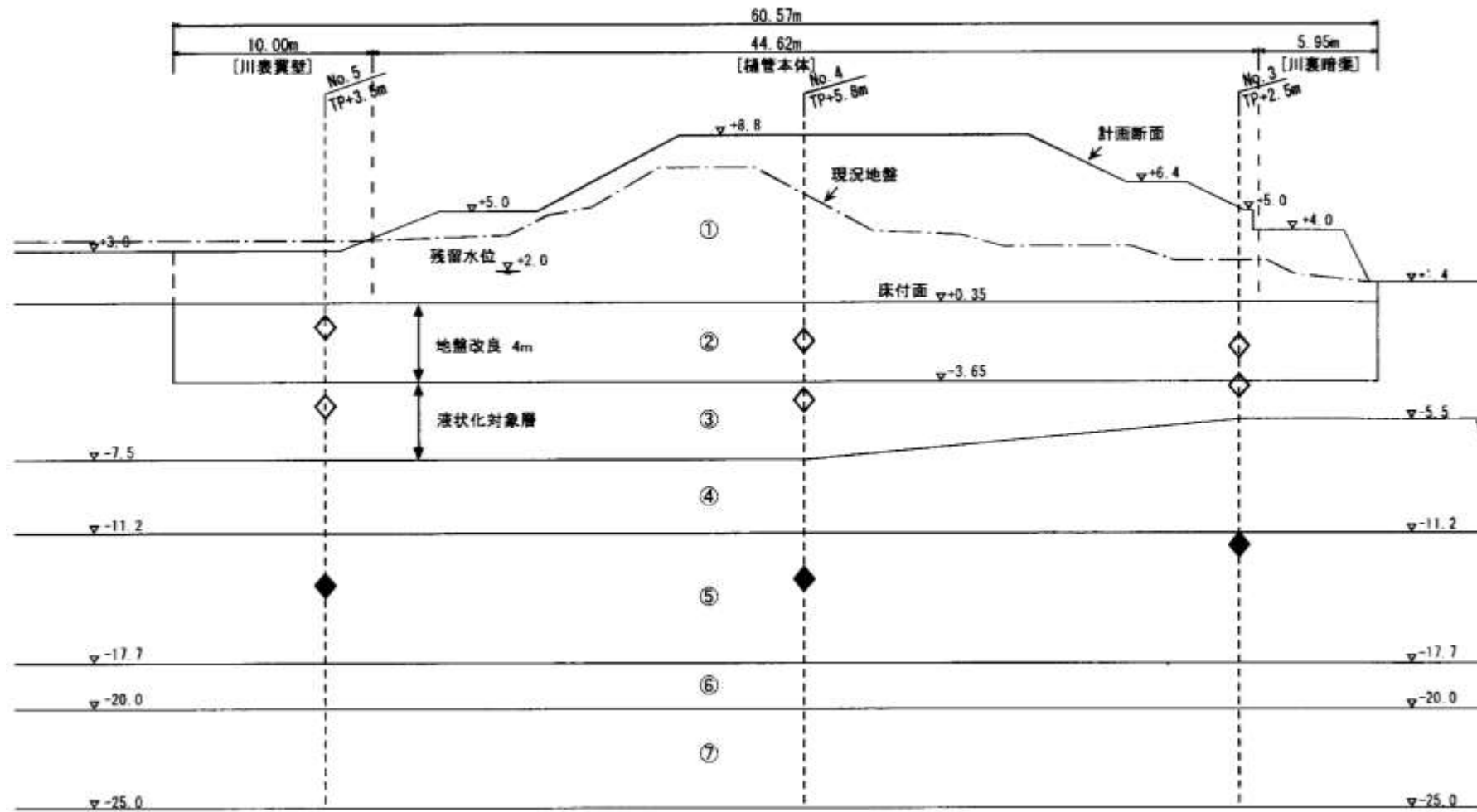
(a) 非排水条件における変形図

天端沈下量 38.3cm

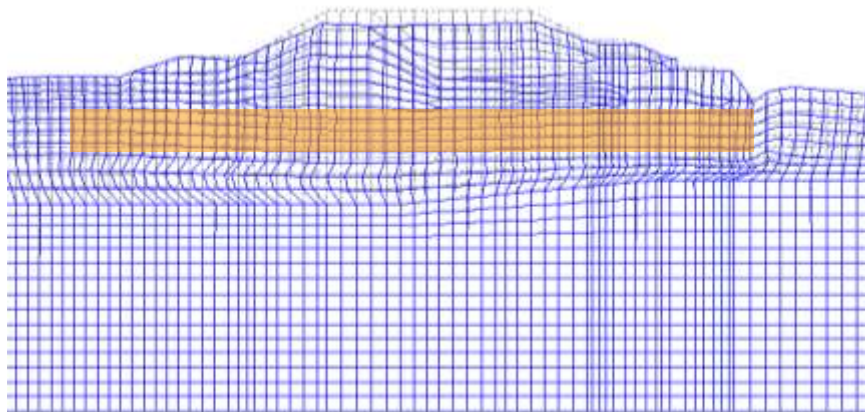


b) 液状化後の体積圧縮

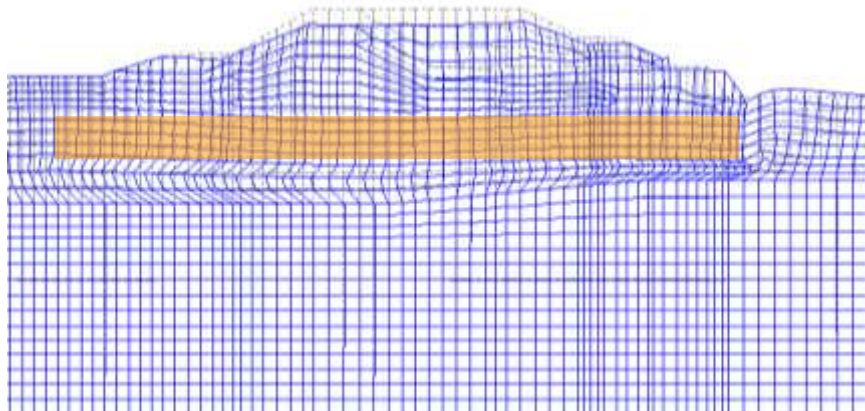
解析事例2



解析事例2



せん断剛性低減率が $1/10$ →天端沈下95cm
せん断剛性低減率が $1/40$ →天端沈下120cm



せん断剛性低減率が $1/10$ →天端沈下104cm
せん断剛性低減率が $1/40$ →天端沈下141cm

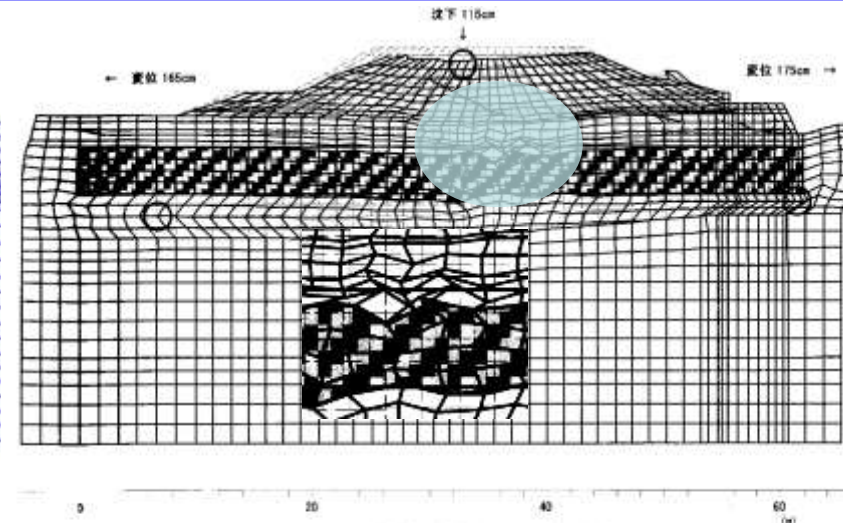


図 4-23 レベル 2-1 地盤変形図(メッシュ変形図)

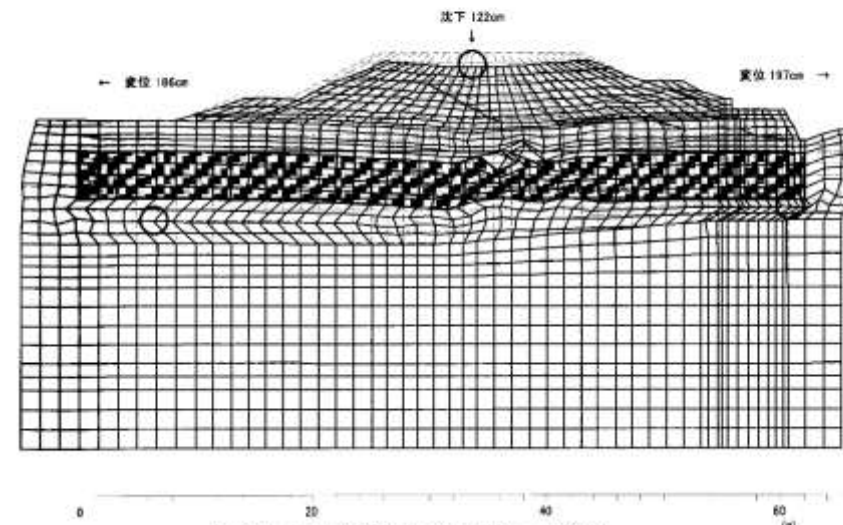


図 4-24 レベル 2-2 地盤変形図(メッシュ変形図)

河川構造物の耐震性能照査指針・解説

—Ⅱ．堤防編—、平成28年

主な変更：

- 細粒分を含む砂の液状化強度の評価法
- ボーリングで確認された地下水位より上の飽和度の高い一定の範囲を液状化層として扱うことにより、堤体の液状化による沈下量を適切に評価
- 拘束圧に応じた液状化層のせん断剛性の補正を導入することにより、基礎地盤の液状化層による変形を適切に評価

NOTE：

基礎地盤が軟弱粘性土の場合、地震前より、圧密沈下によって堤体が基礎地盤にめり込むように沈下する。沈下した部分は、築堤後の圧密沈下の過程で、堤体の側方伸張変形により、堤対の密度の低下や拘束力の低下(ゆるみ)が生じていると考えられる。

非液状化層のせん断剛性

- 液状化層より下は、液状化の影響を受けない。
- 液状化層より上の非液状化層は、液状化の影響を受け、せん断剛性を低減する。

低減方法(H28):

1. 非液状化層に引張応力が生じないように剛性を繰返し計算により求める方法。
2. $\log G1 = 2.8829 - 0.3032 \cdot DL + 0.0803 \cdot HNL$ (新しい指針にはない。)
3. 液状化層の剛性低下率の10倍と設定する方法
4. 地震前の初期剛性の1/10程度、もしくは1/40とする方法
5. 引張降伏を考慮した弾完全塑性モデル(新しく加わった)

・・・本対象製品にはないので弾完全塑性で代用

液状化の判定

液状化に対する抵抗率 : $F_L = R/L$

動的せん断強度比 : $R = c_w R_L$

c_w : 地震動特性による補正係数

(タイプ I の地震動の場合)

$$c_w = 1.0$$

(タイプ II の地震動の場合)

$$c_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$

R_L : 繰返し三軸強度比

地震時せん断応力比:

$$L = r_d k_{hgL} \sigma_v / \sigma'_v$$

r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

$$r_d = 1.0 - 0.015x$$

k_{hgL} : 液状化の判定に用いる地盤面の設計水平震度

$$k_{hgL} = c_z k_{hgL0}$$

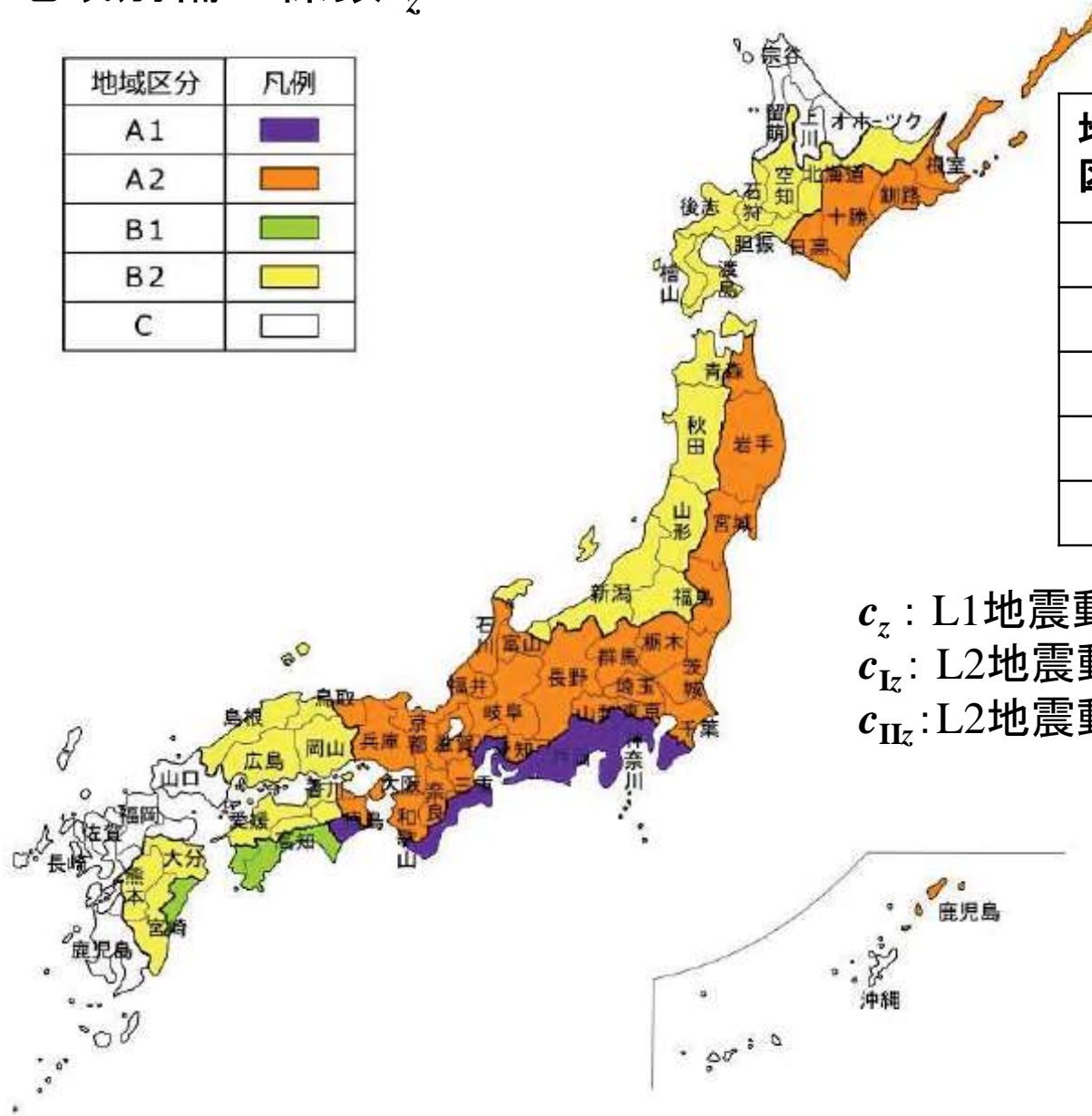
k_{hgL0} : 液状化の判定に用いる地盤面の設計水平震度の標準値

日本道路協会: 道路橋示方書・同解説
V耐震設計編、平成24年。
河川構造物の耐震性能照査指針・解説
— II. 堤防編 —、平成28年

地域別補正係数 c_z

地域区分	凡例
A1	
A2	
B1	
B2	
C	

地域区分	地域別補正係数		
	c_z	c_{Iz}	c_{IIz}
A1	1.0	1.2	1.0
A2	1.0	1.0	1.0
B1	0.85	1.2	0.85
B2	0.85	1.0	0.85
C	0.7	0.8	0.7



c_z : L1地震動

c_{Iz} : L2地震動(タイプI、海溝型)

c_{IIz} : L2地震動(タイプII、内陸直下型)

液状化判定に用いる地表面の設計水平震度の標準値 k_{hgL0}

新

	L1地震動	L2地震動 (タイプⅠ)	L2地震動 (タイプⅡ)
I 種地盤	0.12	0.50	0.80
Ⅱ 種地盤	0.15	0.45	0.70
Ⅲ 種地盤	0.18	0.40	0.60

旧

	L1地震動	L2地震動 (タイプⅠ)	L2地震動 (タイプⅡ)
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

道路橋示方書では土の重量に起因する慣性力もしくは地震時の土圧の算出

繰返し三軸強度比 R_L ：

$$R_L = \begin{cases} 0.0882 \sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882 \sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases}$$

の部分は $\sqrt{N_a/1.7}$

＜礫質土以外の場合＞

$$N_a = c_{FC} (N_1 + 2.47) - 2.47$$

$$c_{FC} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{cases}$$

＜礫質土の場合＞

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\} N_1$$

$$N_1 = 170N/(\sigma'_v + 70)$$

(N_1 :有効上載圧100kN/m²相当に換算したN値)

＜砂質土＞

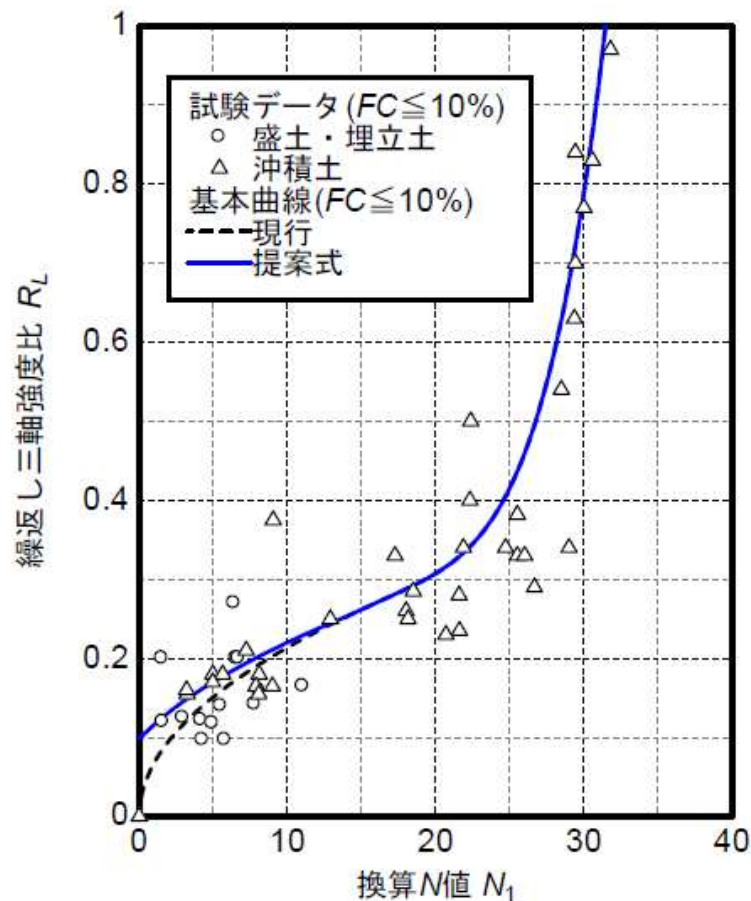
$$N_a = c_1 N_1 + c_2$$

$$c_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 40)/50 & (10\% \leq FC < 60\%) \\ FC/20 - 1 & (60\% \leq FC) \end{cases}$$

$$c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC - 10)/18 & (10\% \leq FC) \end{cases}$$

＜礫質土の場合＞

同左



・盛土・埋立土に関する $FC < 10\%$ の緩い砂であっても, R_L は最小で 0.1 程度.

→ N_1 が小さい領域において, $R_L = 0.10$ 程度が下限となるように式を修正.

基本曲線(現行):

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_1/1.7} & (N_1 < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_1/1.7} + 1.6 \times 10^{-6}(N_1 - 14)^{4.5} & (14 \leq N_1) \end{cases}$$

基本曲線(提案):

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_1 + 2.1)/1.7} & (N_1 < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_1/1.7} + 1.6 \times 10^{-6}(N_1 - 14)^{4.5} & (14 \leq N_1) \end{cases}$$

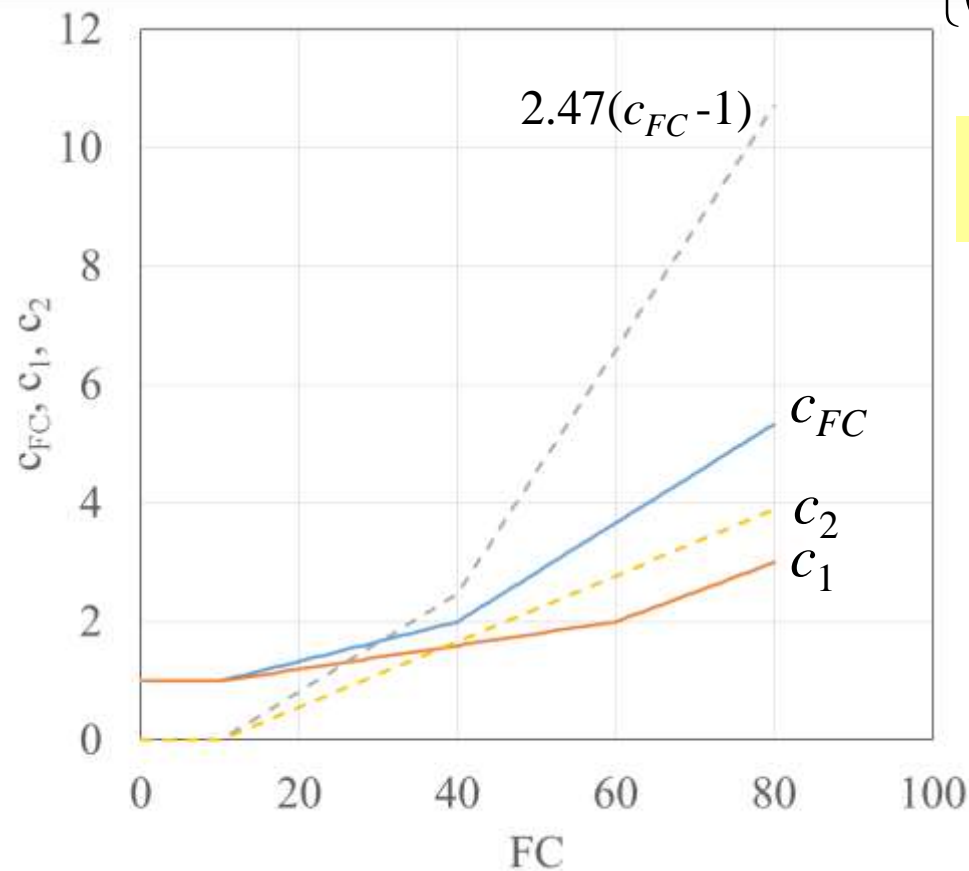
(防災・減災に向けた研究成果報告会資料より引用)

粒度の影響を考慮した補正N値

河川構造物の耐震性能照査指針・解説
—Ⅱ. 堤防編—、平成28年

$$N_a = c_{FC} N_1 + 2.47(c_{FC} - 1)$$

$$c_{FC} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{cases}$$



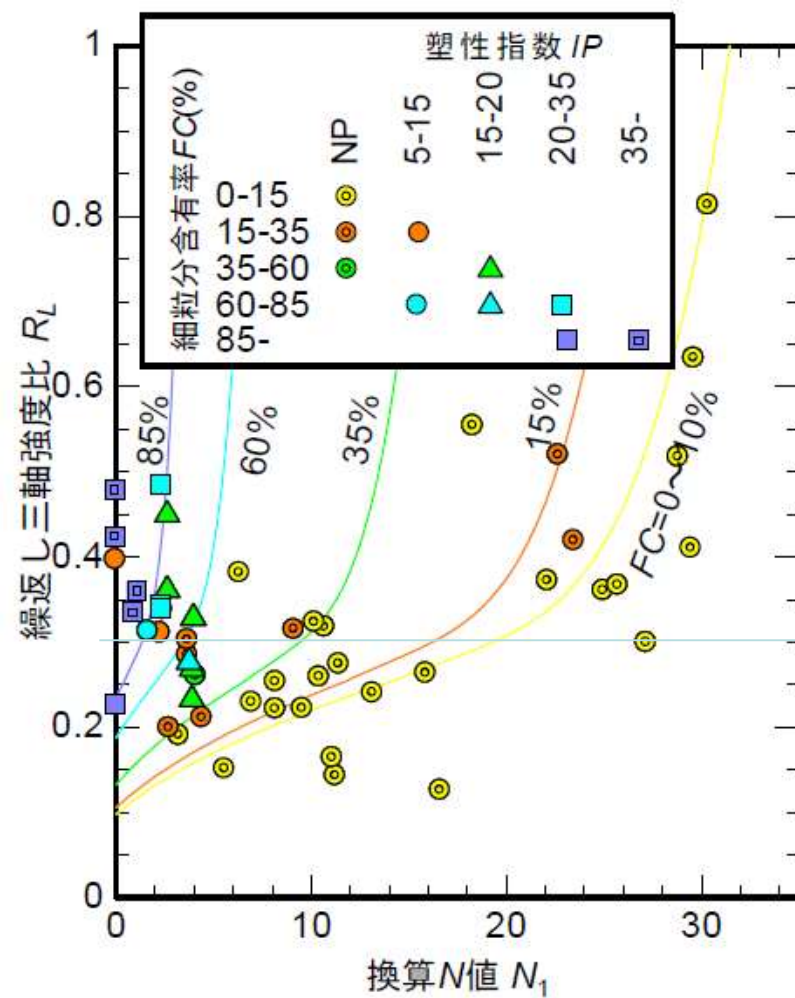
日本道路協会：道路橋示方書・同解説
Ⅴ耐震設計編、平成24年。

$$N_a = c_1 N_1 + c_2$$

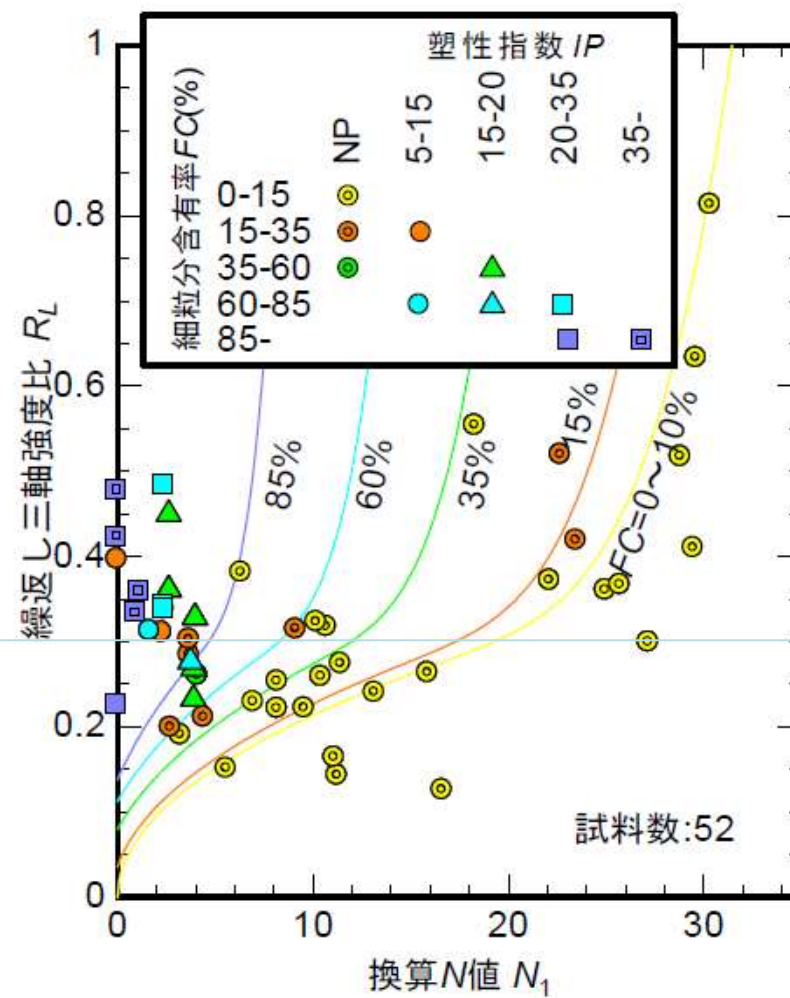
$$c_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 40)/50 & (10\% \leq FC < 60\%) \\ FC/20 - 1 & (60\% \leq FC) \end{cases}$$

$$c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC - 10)/18 & (10\% \leq FC) \end{cases}$$

新



旧



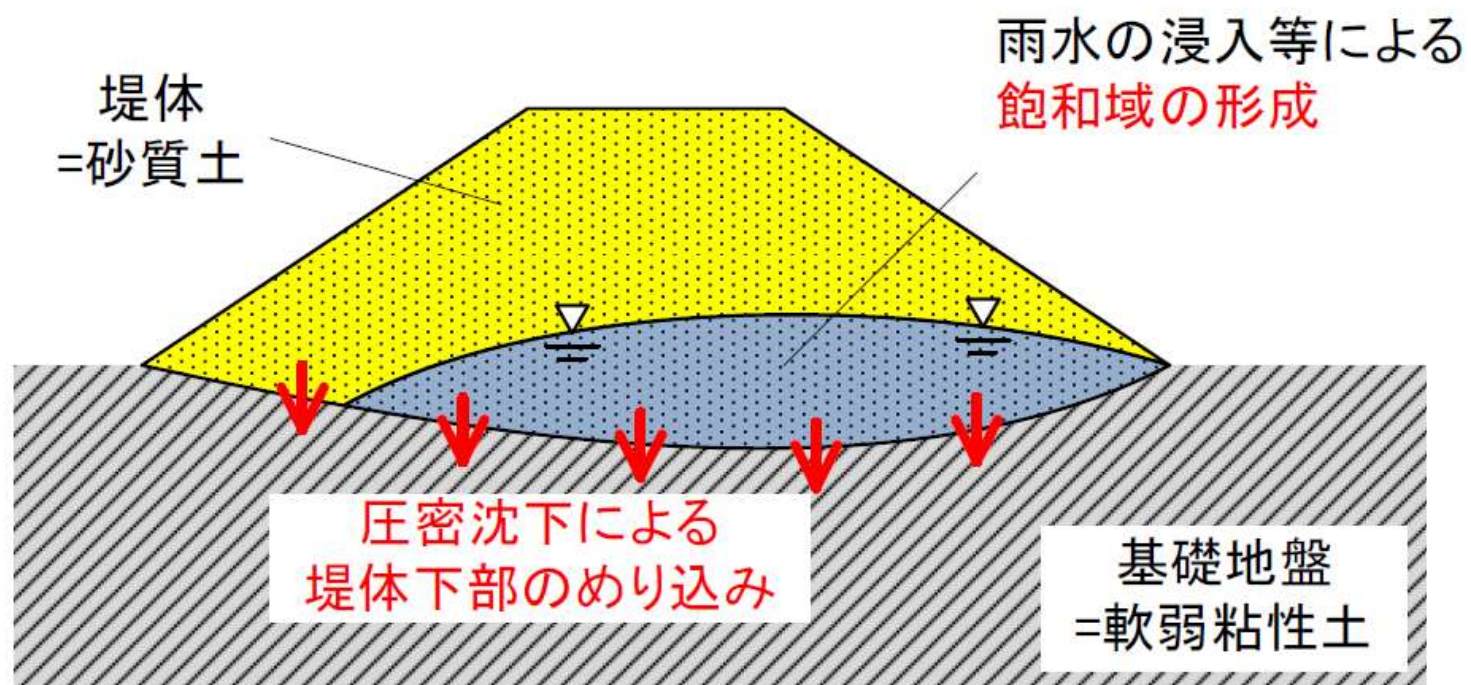
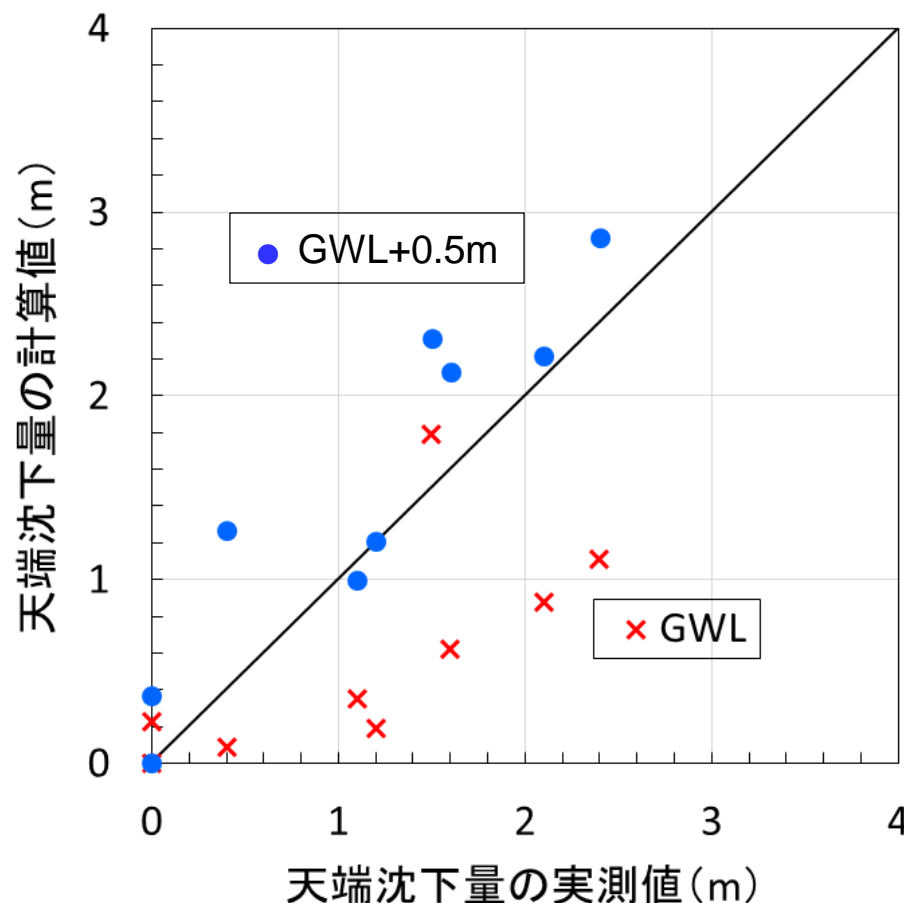


図-解3.1.1 堤体の液状化による被災の典型的な状況



GWL:ボーリングで確認された地下水位

(脇中ら(2013)のデータで作成)

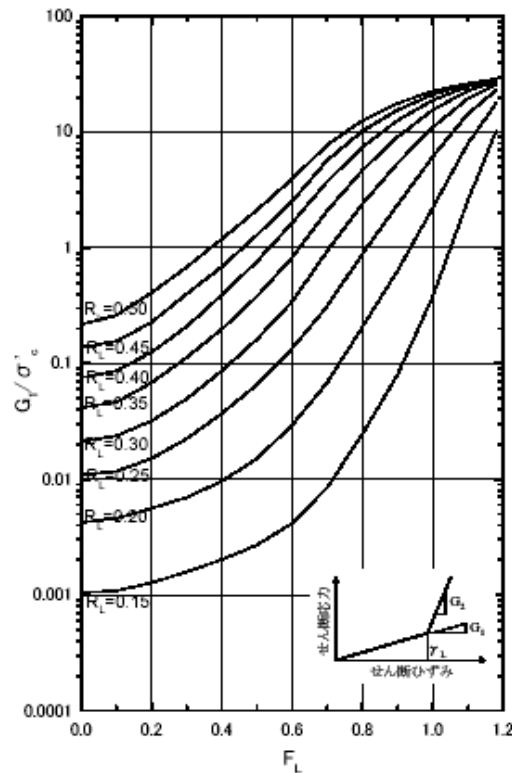
ボーリングで確認された地下水位より上の飽和度の高い一定の範囲を液状化層として扱うことにより、堤体の液状化による沈下量を適切に評価

のり尻部の地表に液状化層が出ているか非液状化層が表面を覆っているかで変形に大きな差が生じる。

地下水位より上部の非液状化層でも地下水位に近い部分は元々飽和度も高く、下の液状化層からの排水も考慮すれば、液状化層とほぼ同じ挙動をとると考えられる。

通常想定される水位を用いればよい。出水期(多雨期)の平均地下水位程度[照査指針Q&A(国交省HP)]。

液状化層の中でも深さの影響を低減するために、
液状化時のせん断剛性を以下のように補正



液状化が生じる地層の
せん断剛性の低減の例

左図に示すせん断剛性に、
補正係数 c_{cp} を乗じる。

$$c_{cp} = \begin{cases} 1 & (\sigma'_v < \sigma'_{v0}) \\ (\sigma'_v / \sigma'_{v0})^n & (\sigma'_v \geq \sigma'_{v0}) \end{cases}$$

ここに、

σ'_v : 鉛直有効応力

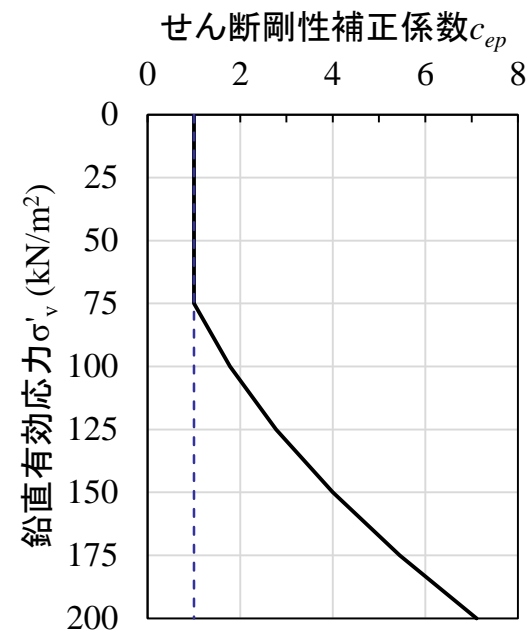
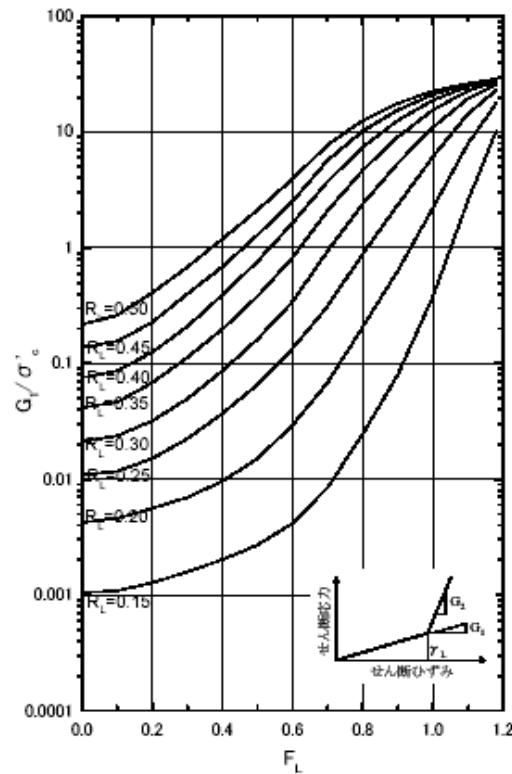
σ'_{v0} : パラメータ(基準鉛直有効応力)

n : パラメータ

(一例として、 $\sigma'_{v0} = 75 \text{ kN/m}^2$, $n=2$)

(出典: 河川堤防の液状化対策の手引き)

液状化層の中でも深さの影響を低減するために、
液状化時のせん断剛性を以下のように補正

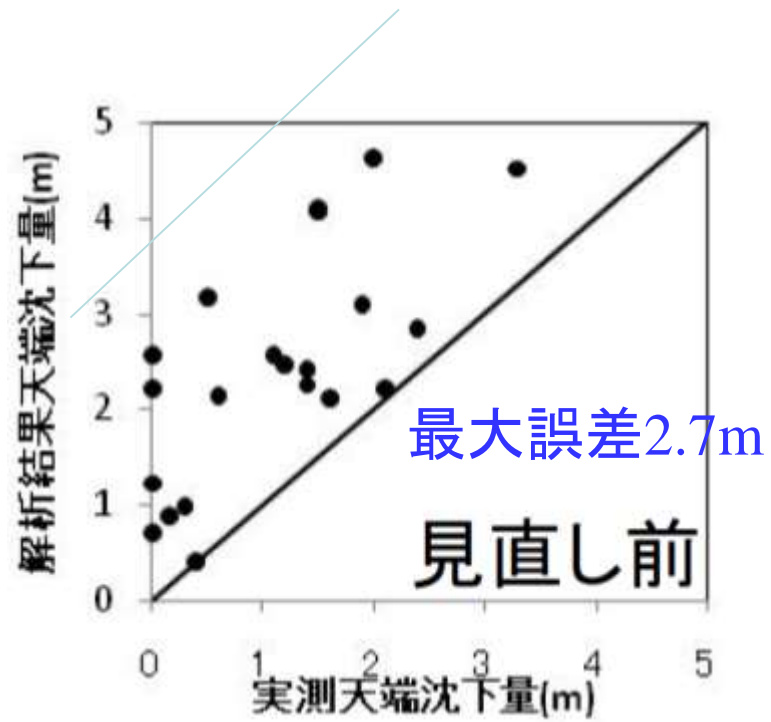


液状化が生じる地層の
せん断剛性の低減の例

時間の経過とともに液状化強度が増加する

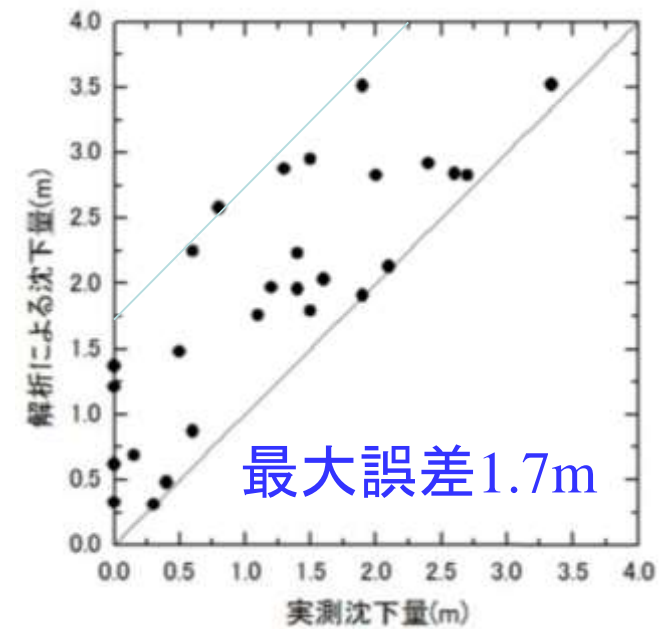
液化強度





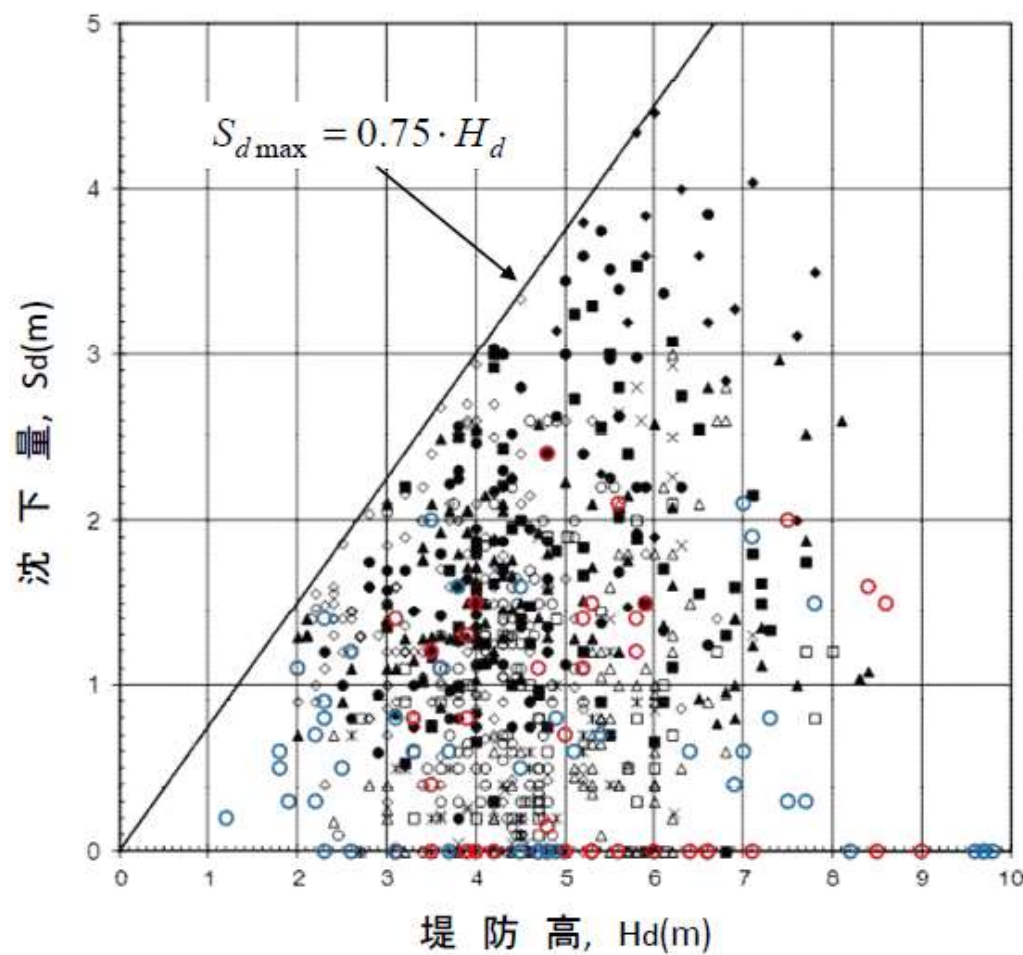
せん断剛性補正なし

沈下量の計算値が
約1m改善



せん断剛性補正あり

(出典:河川堤防の液状化対策の手引き)



堤防天端に堤防高さの75%以上の沈下が生じた事例はなく、地震前の堤防高さの25%は最低でも残存

堤防高さと沈下量の関係 (河川堤防の耐震点検マニュアル)

- | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| ◆ 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、大聖寺川等) | ▲ 十勝沖地震(新釧路川、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
(阿武隈川、鳴瀬川、江合川等東北地整管内) | ○ 東北地方太平洋沖地震
(利根川、霞ヶ浦、那珂川等関東地整管内) |

まとめ：

- 液状化の発生と変形量の予測
- 道路橋示方書耐震編に準拠したFL値
- FEM数値解析手法(静的解析)にもとづく液状化自重変形解析
- 河川構造物の耐震性能照査指針への適用
- 液状化解析手法には課題が多く、継続的な研究が望まれ、今後さらなるに指針の改訂もあるだろう。

『Ⅴ．斜面の安定解析・河川構造物の耐震性能照査』編の説明は以上となります。