

液状化地盤の側方流動メカニズム

— 水膜現象を考慮した評価法 —

中央大学
國生 剛治

謝辞:

過去10年間にわたる中央大学での研究を支えてくれた多くの
大学院生と卒業研究生諸君に深く謝意を表します。



1

関係論文リスト

Kokusho, T. Current state of research on flow failure considering void redistribution in liquefied deposits, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, Vol.23 , 585-603, 2003.

Kokusho, T., Yoshikawa, T., Suzuki, K. and Kishimoto, T., Post-liquefaction shear mechanism in layered sand by torsional shear tests, 12th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.1, 1045-1050, Boston, 2003.

Kokusho, T. and Fujita, K.: Site investigation for involvement of water films in lateral flow in liquefied ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society for Civil Engineers, Vol. 128, No. 11, 917-925, Nov. 2002.

Kokusho, T. and Kojima, T.: Mechanism for postliquefaction water film generation in layered sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society for Civil Engineers, Vol.128, No.2, 129-137, Feb. 2002.

Kokusho, T.: Mechanism for water film generation and lateral flow in liquefied sand layer, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.99-111, 2000.

國生剛治: 砂層の成層構造による液状化時の水膜生成と地盤安定性への影響、*応用地質*、第41巻、第2号、77-86、2000.

國生剛治: 水膜現象が液状化砂層の側方流動へ与える影響、*土と基礎*、Vol.47、No.4、pp.103-106、1999.

Kokusho, T.: Effect of nonlinear soil properties on seismic amplification in surface layers, 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (Lisbon), pp. 913-918, 1999.

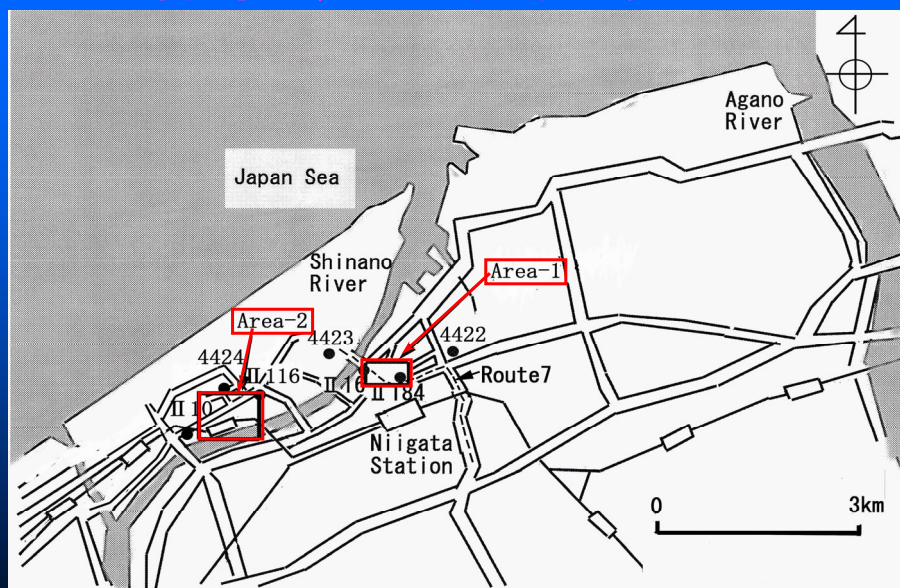
2

地震時液状化にともなう側方流動の特徴

- ・沈下量に比べて非常に大きい。
- ・水平に近い緩やかな傾斜でも起きる(海底地盤を含め)。
- ・しばしば地震終了後にも起きる。
- ・そのメカニズムについてはまだ見解が分かっている。
- ・流動にともなう残留変位、残留強度、残留剛性の評価は性能設計に不可欠である。

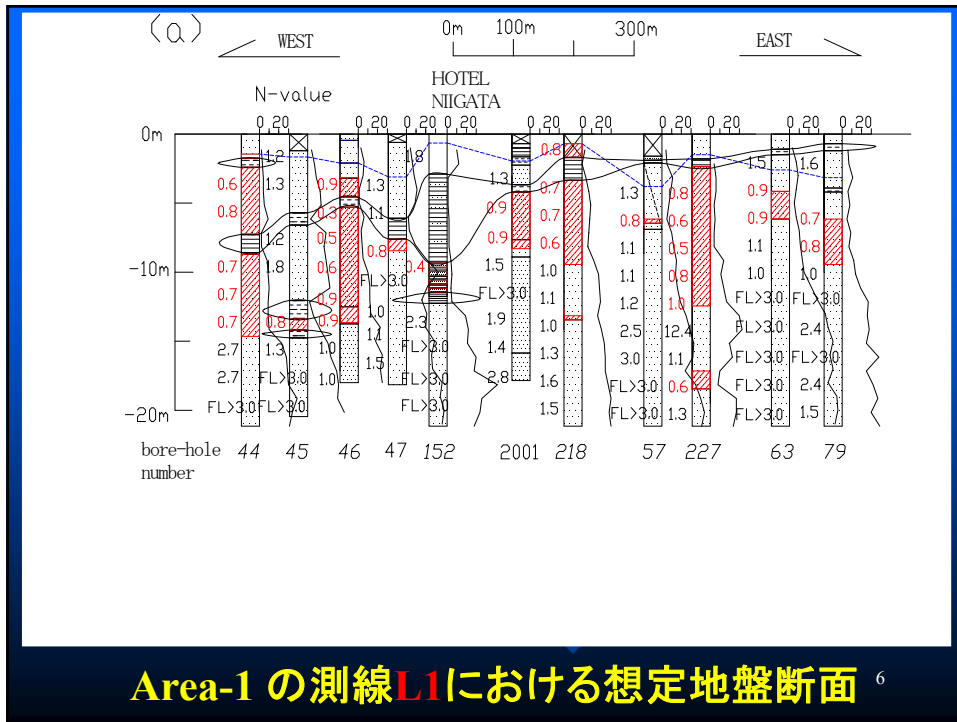
3

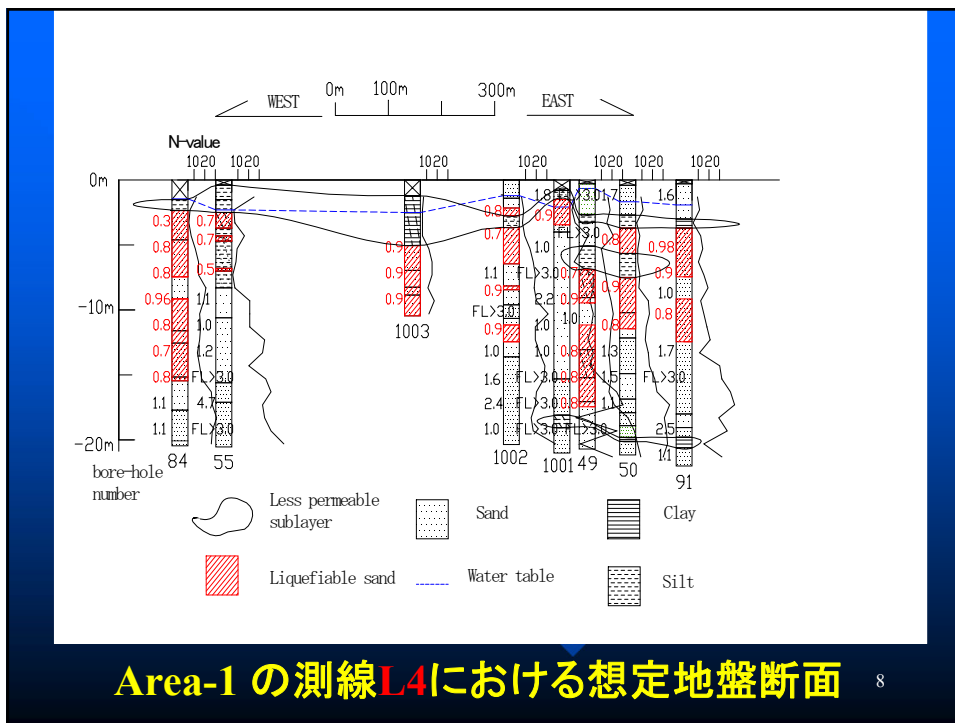
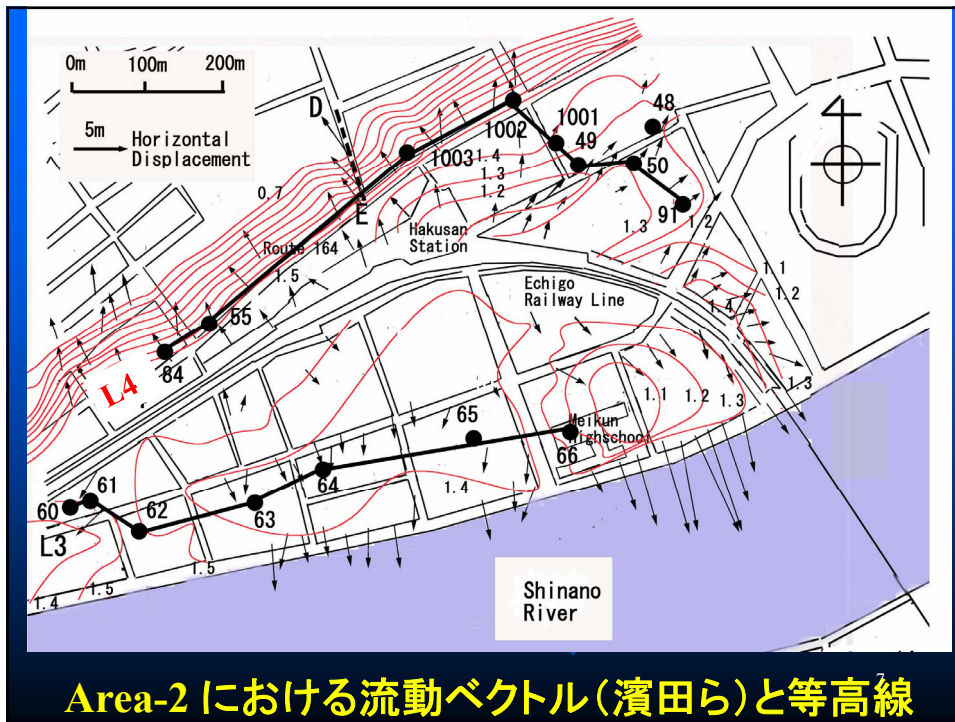
新潟地震での流動の典型例

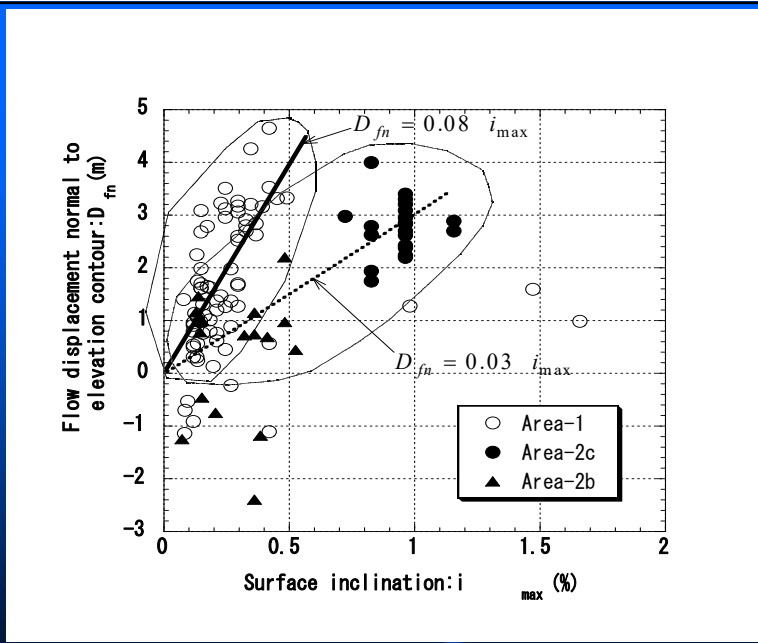


新潟市内2箇所の調査対象地域

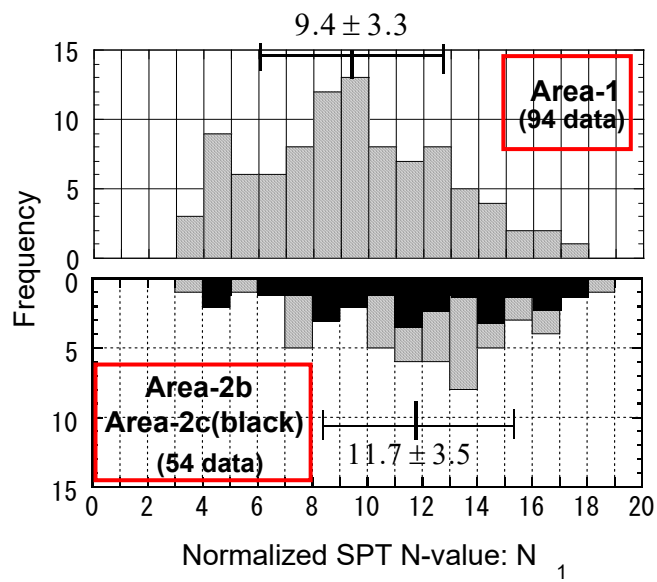
4



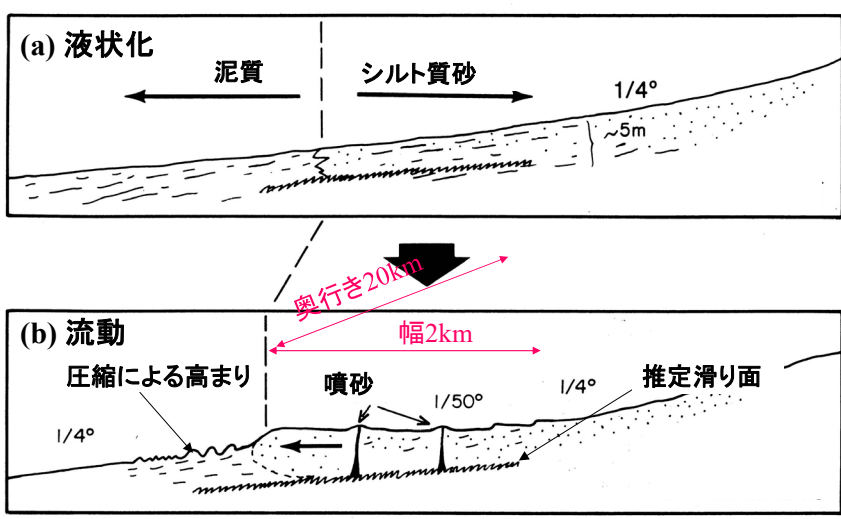




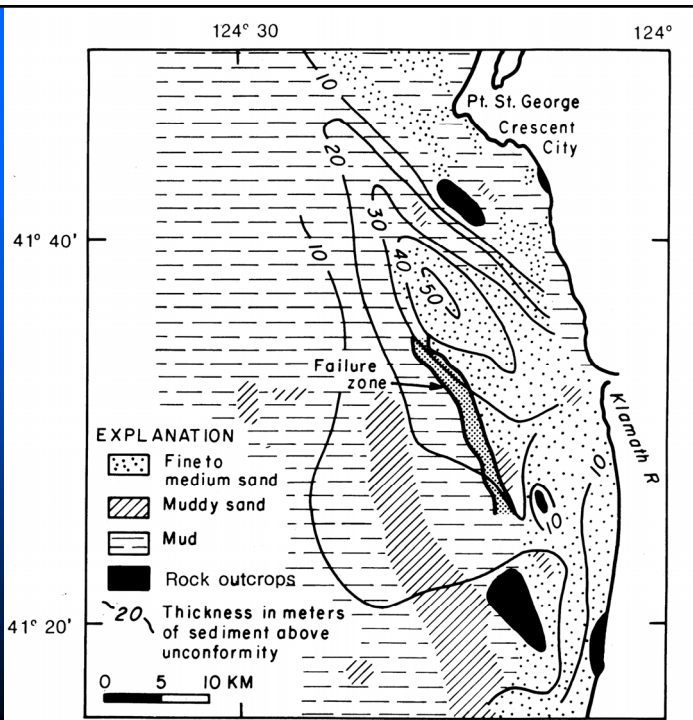
Area-1,2での流動変位と地表面勾配の関係

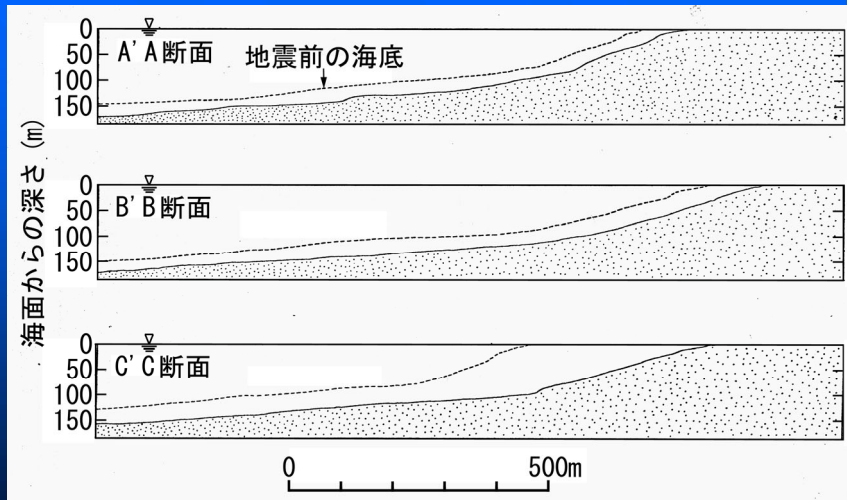


Area-1,2での基準化N値 N_1 の頻度分布



1980年の地震によるカリフォルニア沖の海底地すべり





13

側方流動メカニズムについての異なる見解

非排水せん断メカニズム

- (a) 初期せん断応力の下での地震慣性力による繰返しせん断
- (b) 非排水残留強度 < 静的せん断応力
- (c) (b)+ 余震の微小振動効果

部分排水せん断メカニズム

- (d) 成層不均質砂層での 間隙再配分による水膜現象

14

非排水せん断メカニズム (b)

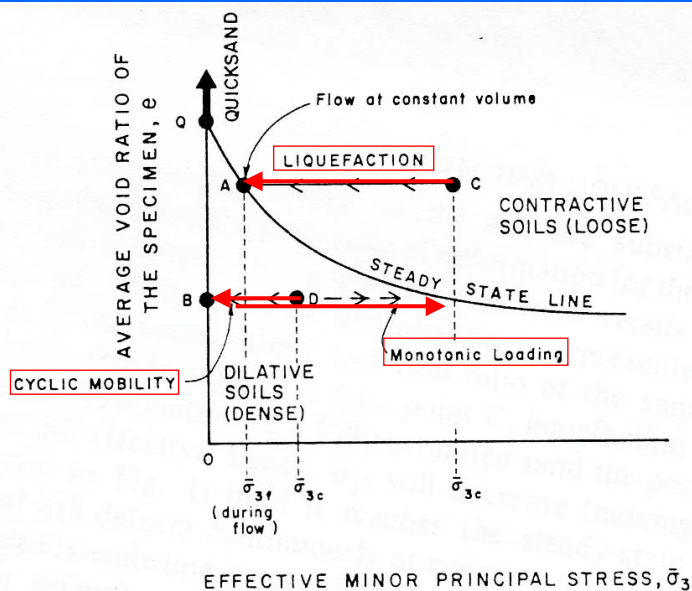
Casagrande (1971) による“liquefaction”の定義：
Sand developing substantial loss of its shear strength
leading flow of soil mass.

Castroら(1977)のSSLによる“liquefaction”の説明：
Liquefaction is a result of undrained failure of a contractive sand looser than critical void ratio.

Dilative sand, monotonically loaded, does not liquefy (does not flow).

Dilative sand cyclically loaded reaches zero-effective stress, but does not flow, increasing resistance in subsequent monotonic loading. (e.g. shake table test by Dobry et al. (1995):メカニズム(a)).

15



有効側圧と間隙比のグラフ上でのSteady state line (SSL) より上の contractive soil の liquefaction とSSLより下の dilative soil の cyclic mobility (Castro and Poulos 1977)

非排水せん断メカニズム (b)

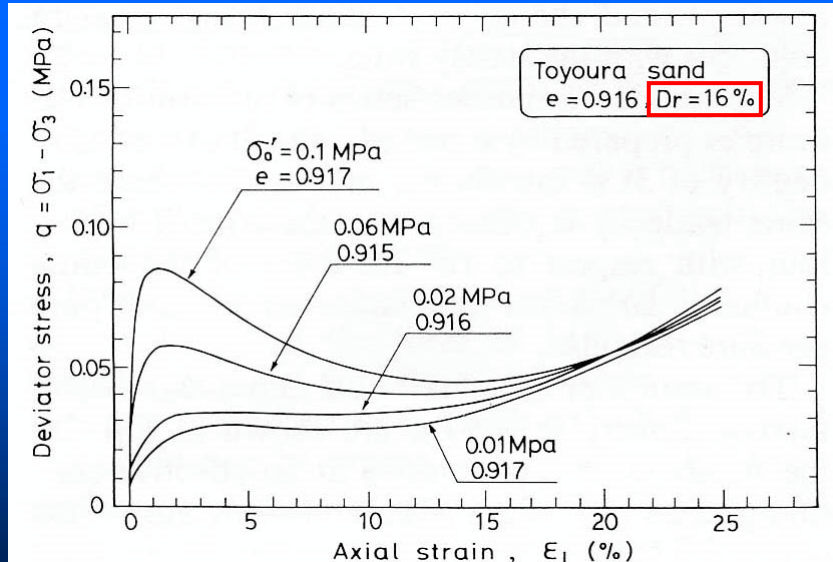
Castro and Poulos (1977)によれば:

Contractive sands looser than critical e exhibits flow-type failure without dilative response.

Undrained steady-state strength is defined as a function of e alone.

しかし彼らのデータは 396 kPaの高拘束圧のものであり、液状化で通常問題となる98kPa前後の拘束圧では、 D_r の小さな砂でもせん断強度は一旦低下した後 (Quasi steady state strength: Ishihara 1993)、ひずみと共に再び増加する。

17



豊浦砂の三軸非排水試験による0.1-0.01 Mpaの拘束圧でのせん断強度の変化 (Ishihara 1993).

18

非排水せん断メカニズム

Meneses et al. (1998):

Small aftershock tremors lubricates particle contacts, reducing the residual strength to some extent.
この現象(メカニズム(c))それ自身は否定できないが、側方流動メカニズムとして一般化できるか？

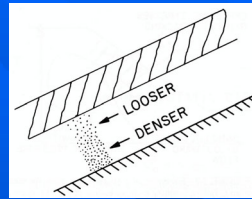
以上より、通常の拘束圧の下では密度の緩い砂でもDilativeであり、非排水せん断メカニズムでは、大きな流動変形は説明できない。

19

間隙の再配分による部分排水せん断 (d)

以前より多くの研究者の直感的指摘

側方流動メカニズムの可能性の一つ：NRC Report (1985)



模型地盤での低透水性シーム直下の水膜の生成：Liu & Qiao 1984, Fiegel, & Kutter (1994), Kokusho et al. (1998, 1999, 2000) and others.

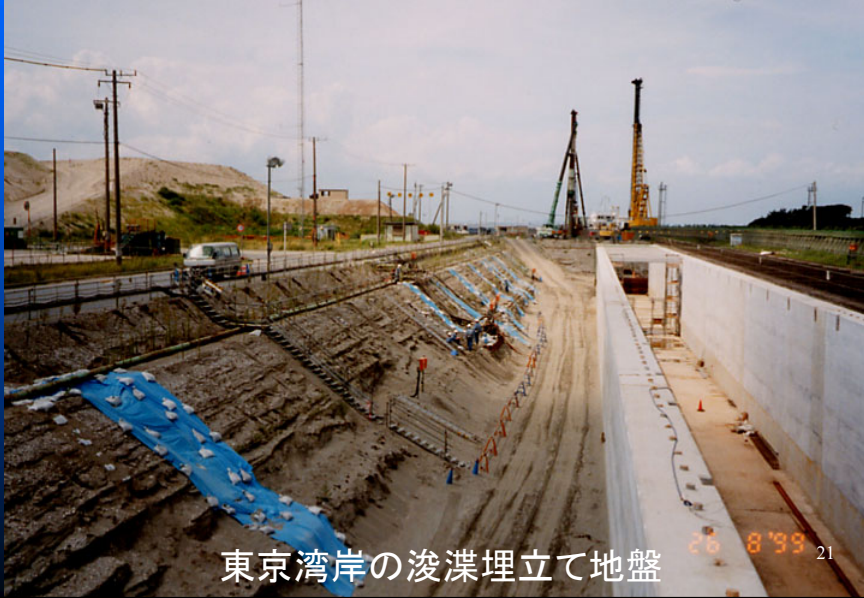
模型地盤での水膜に沿った時間遅れの流動：Kokusho et al. (1998, 1999, 2000).

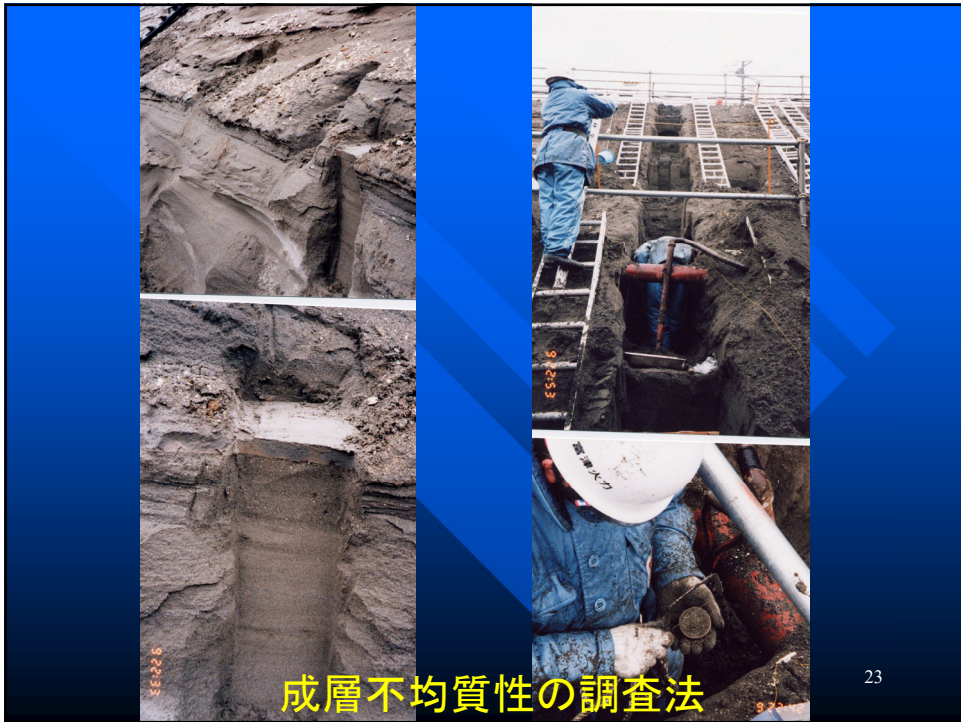
砂層の成層不均質性が重要 !!!

20

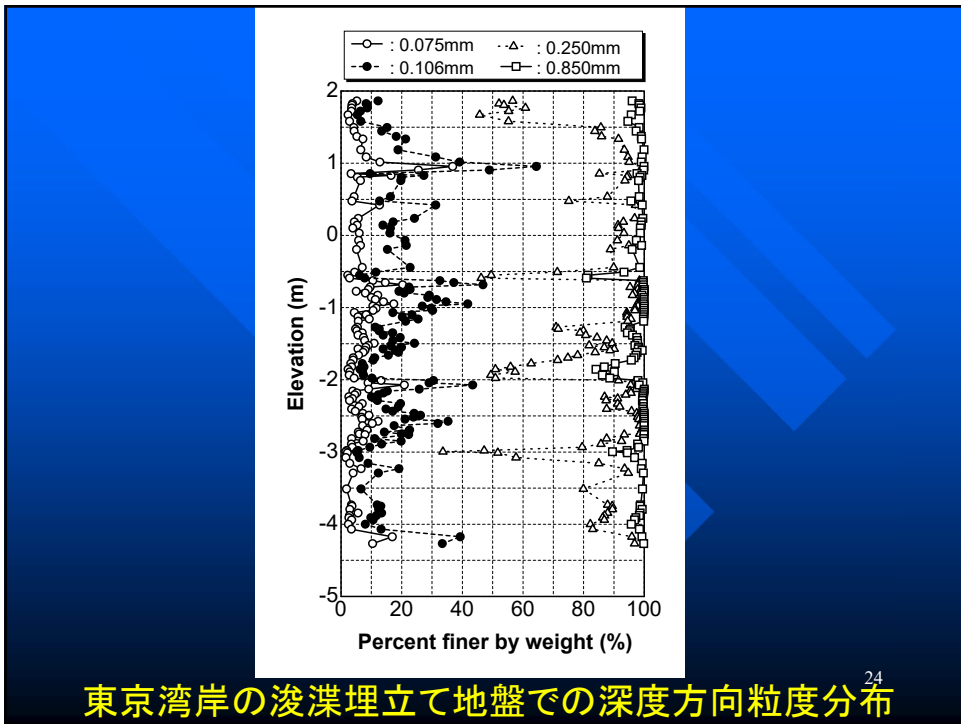
地盤調査

砂地盤はどのくらい不均質か？

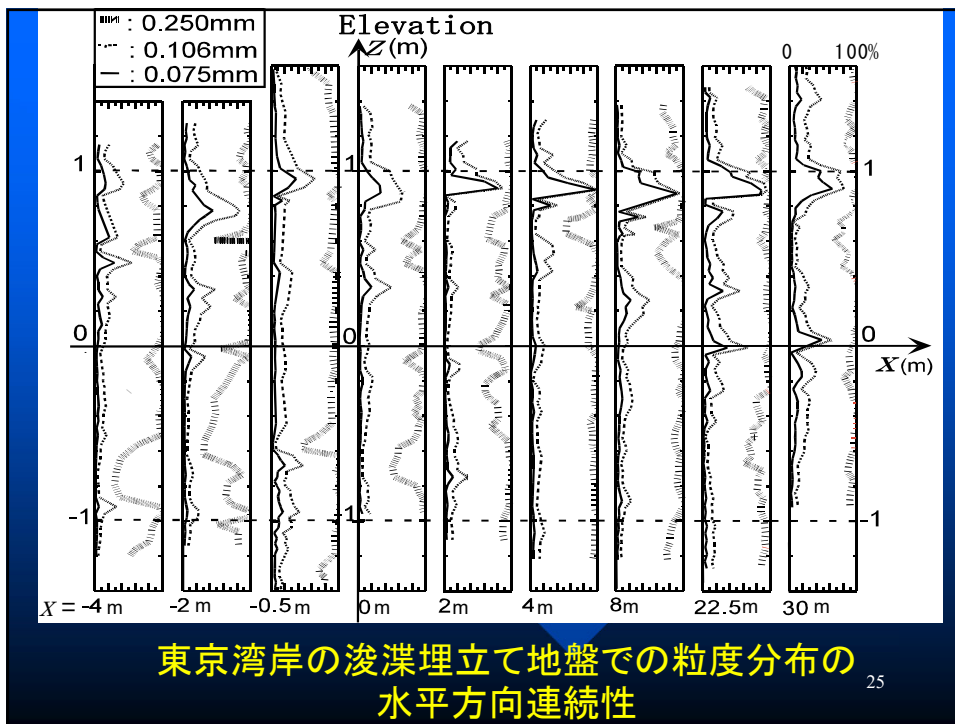


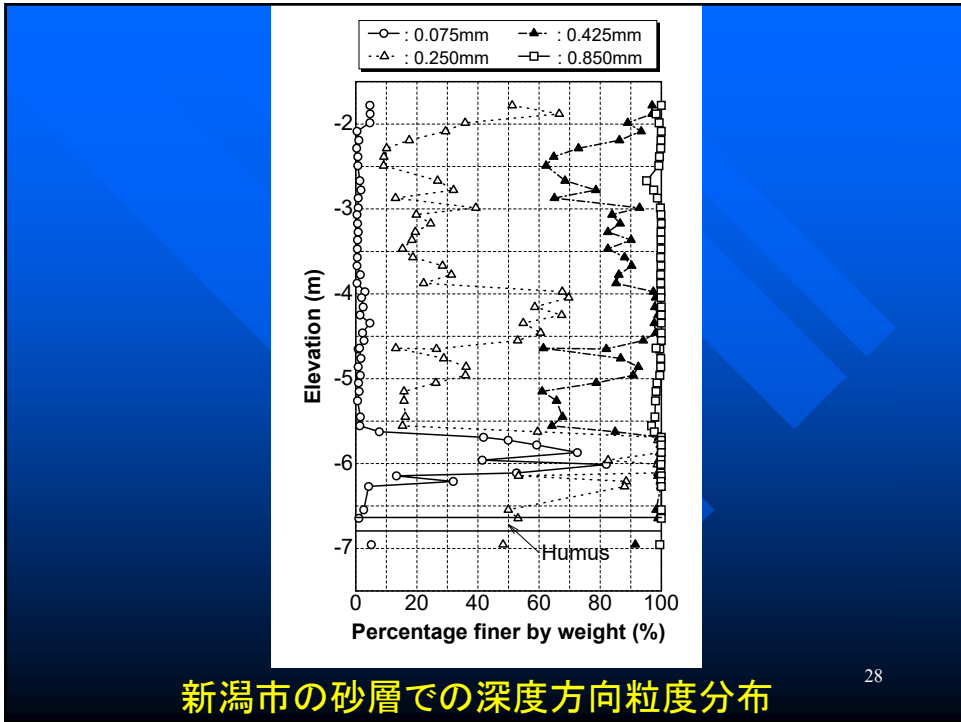
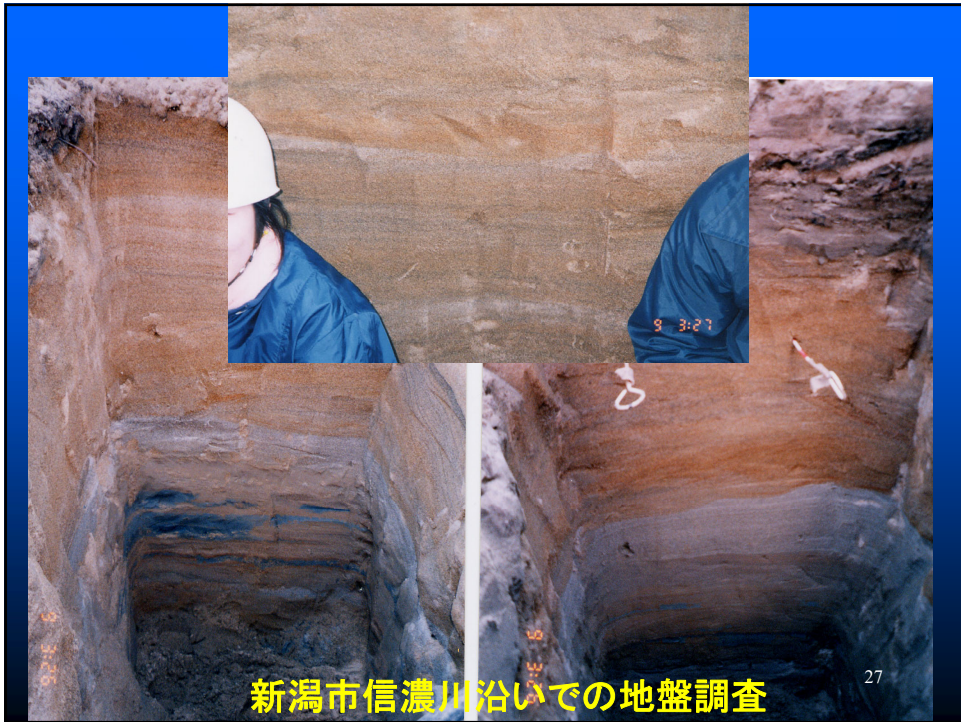


23



24

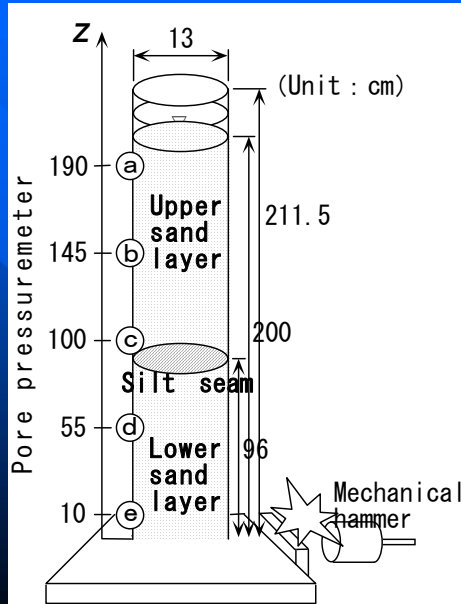




新潟市の砂層での深度方向粒度分布

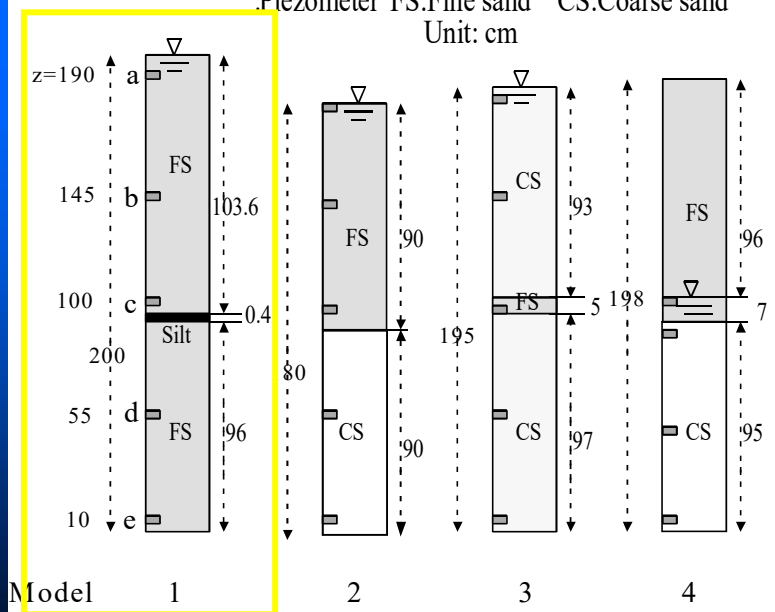
28

1次元円筒土槽での液状化試験



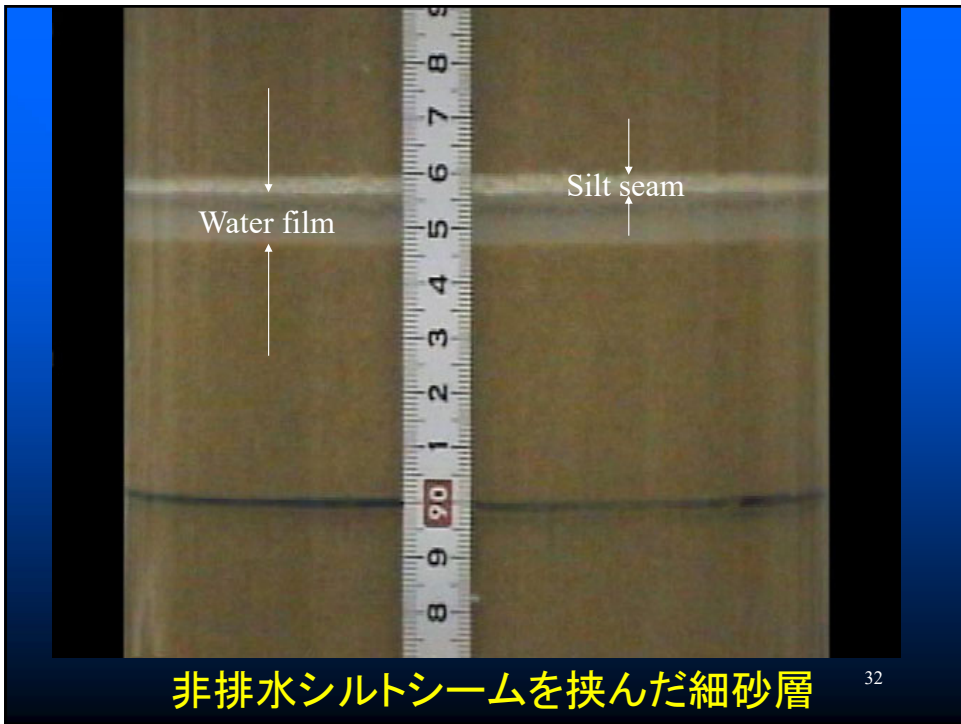
29

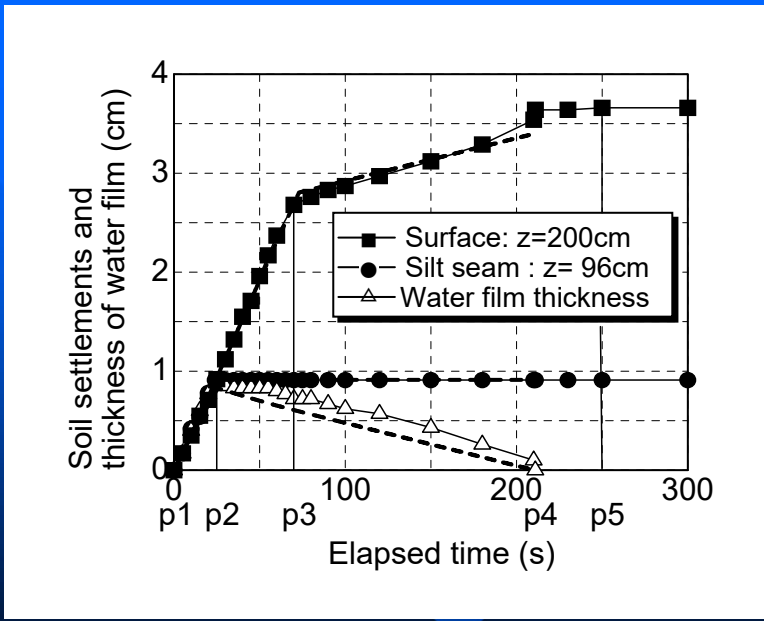
□ : Piezometer FS: Fine sand CS: Coarse sand
Unit: cm



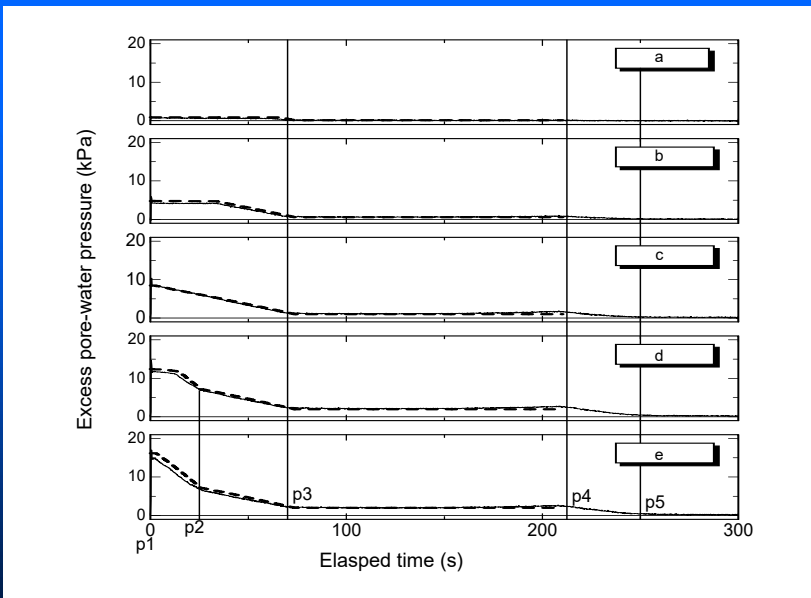
4種類の1次元地盤モデル

30

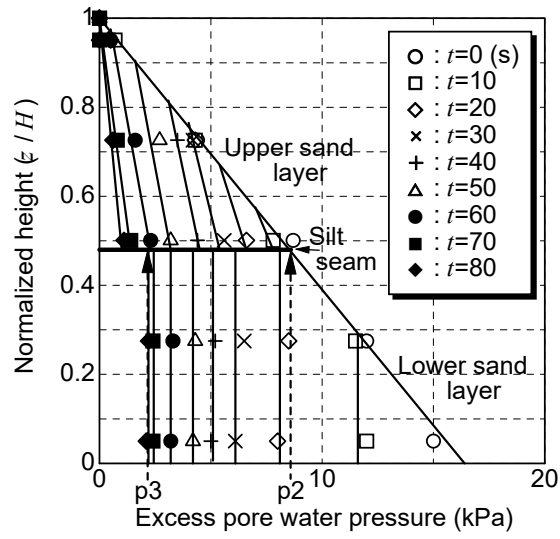




砂層の沈下と水膜厚さの時間変化

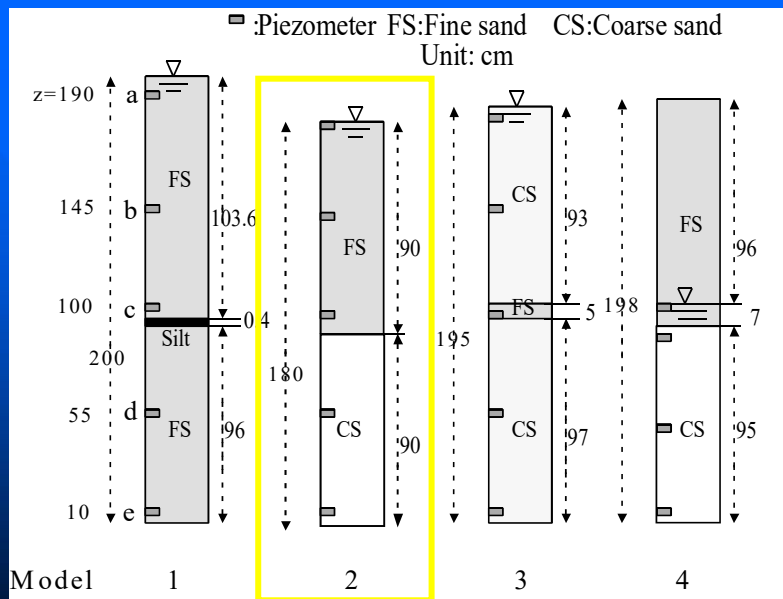


深度ごとの過剰間隙水圧の時間変化



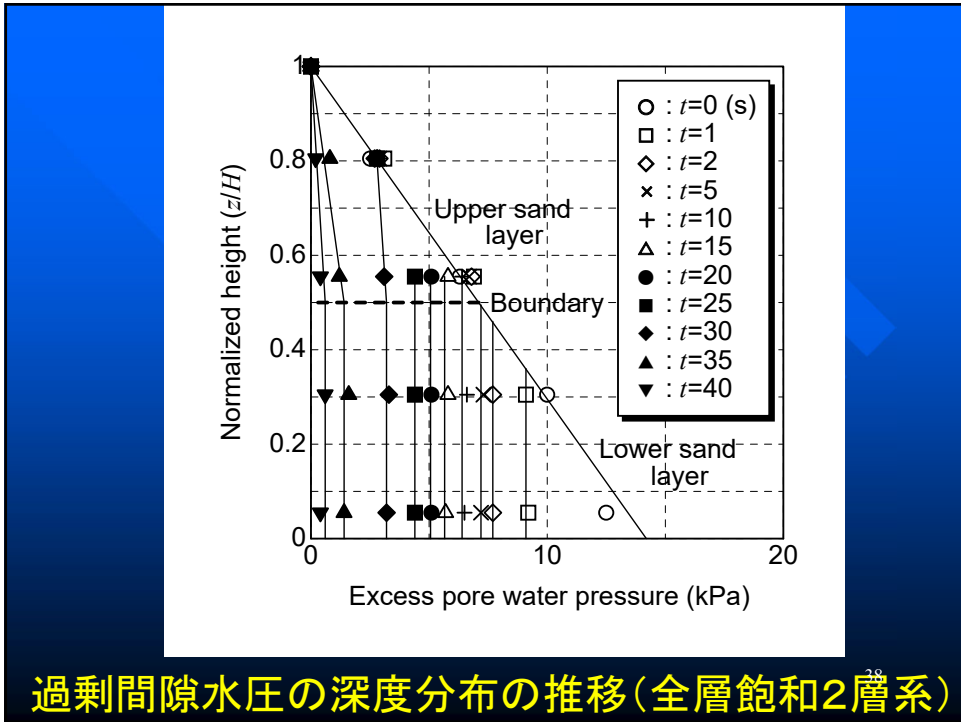
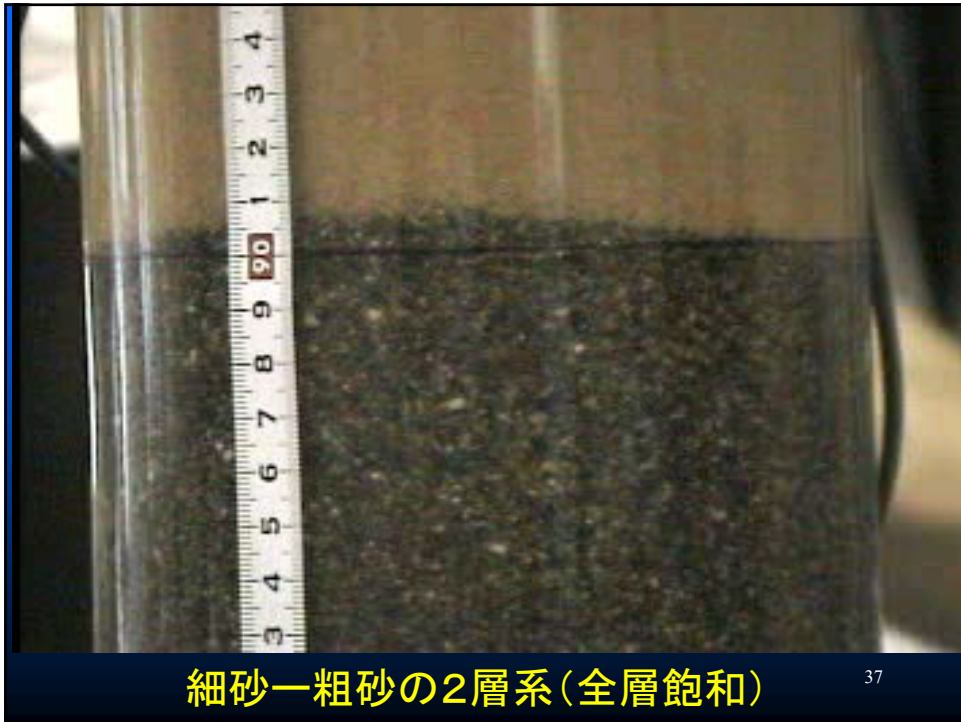
過剰間隙水圧の深度分布の推移

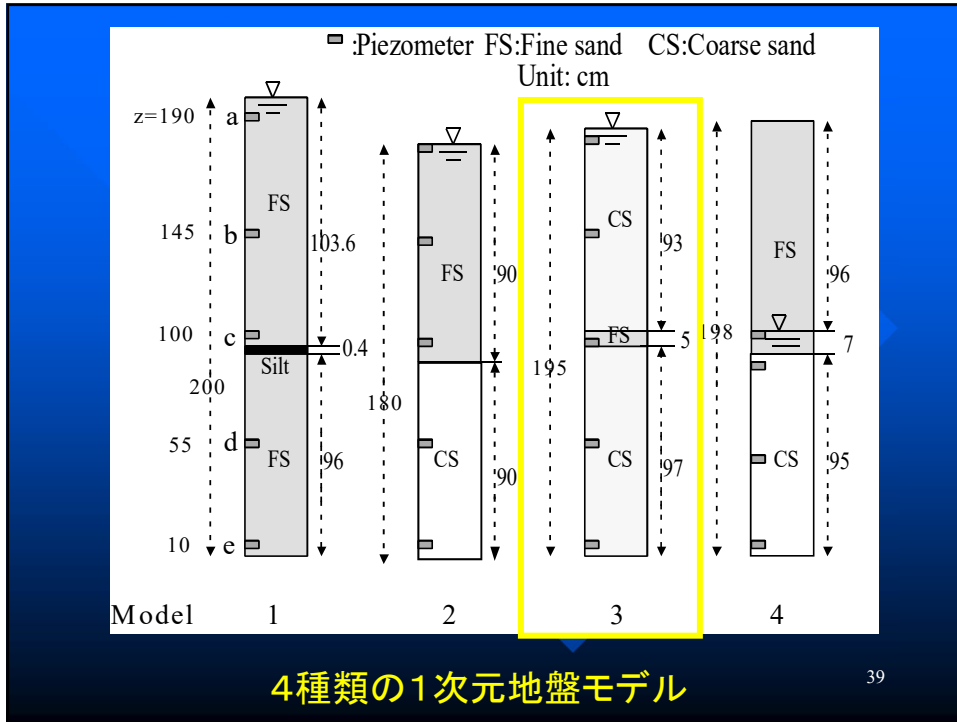
35



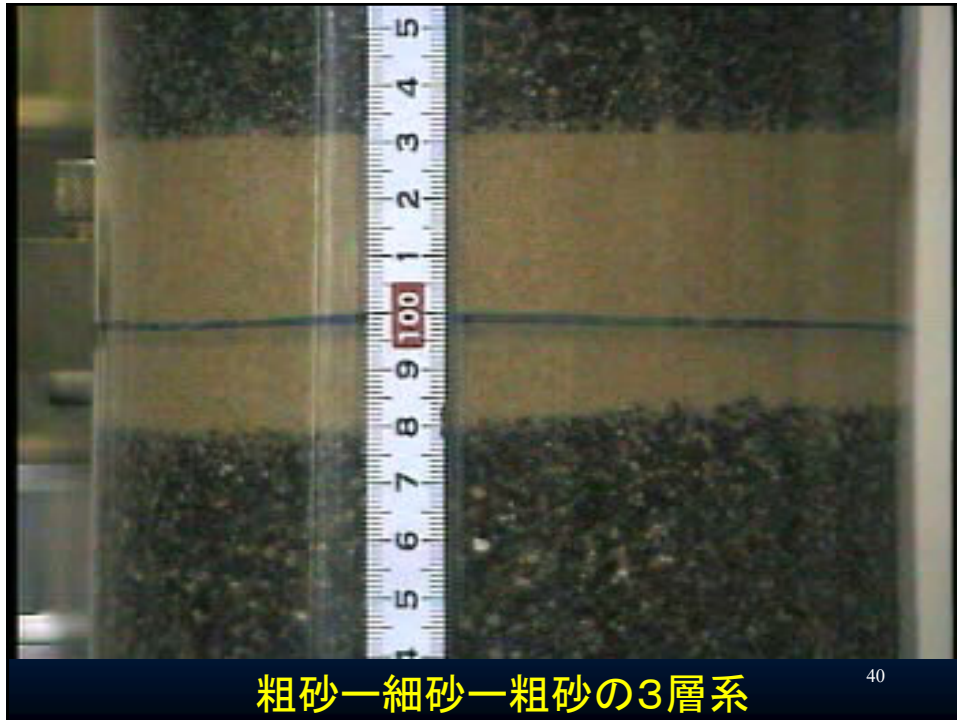
4種類の1次元地盤モデル

36

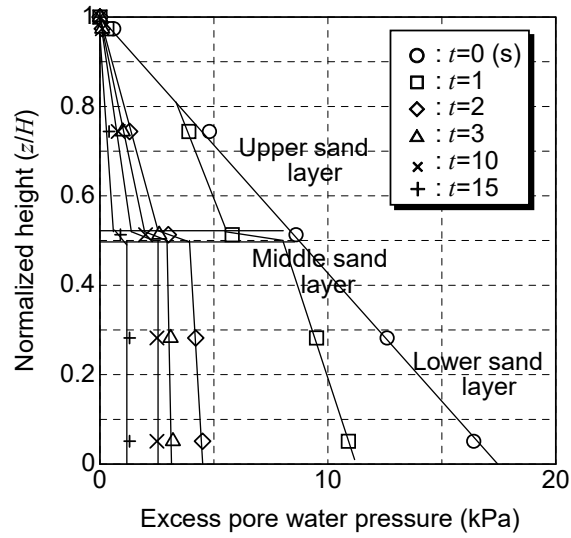




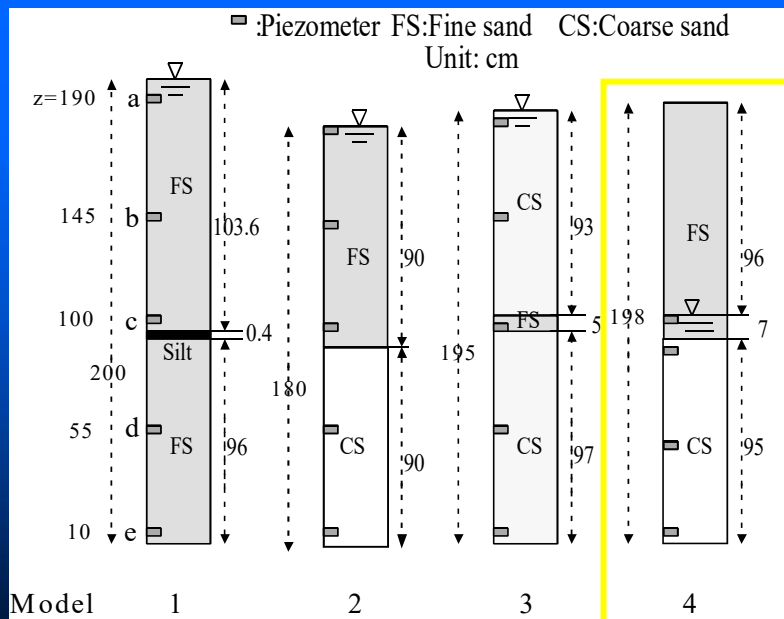
39



40

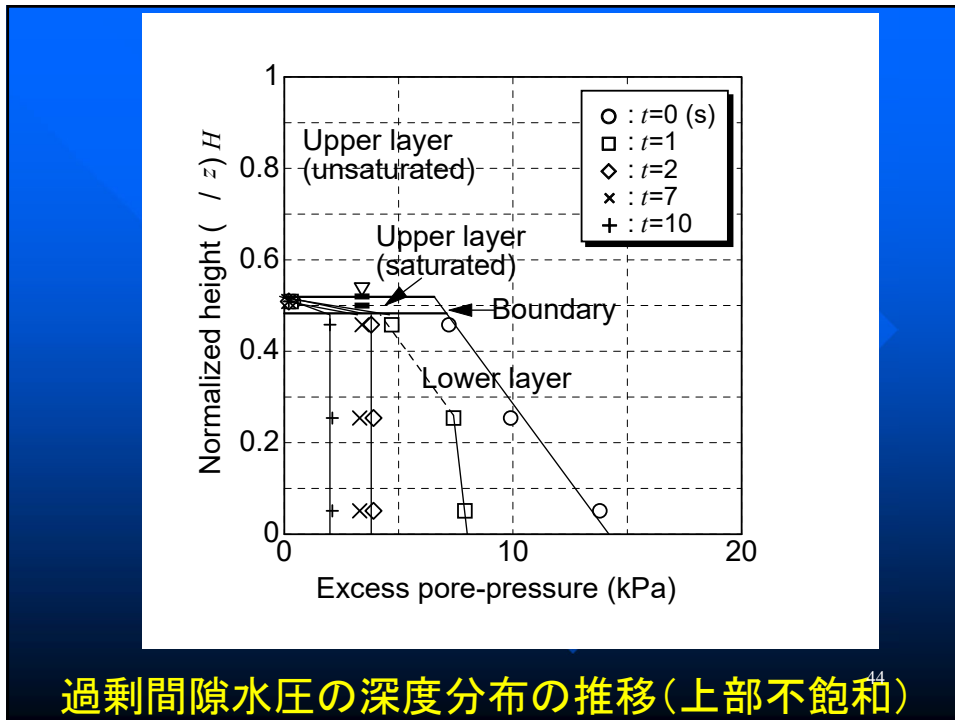


過剰間隙水圧の深度分布の推移(3層系)⁴¹

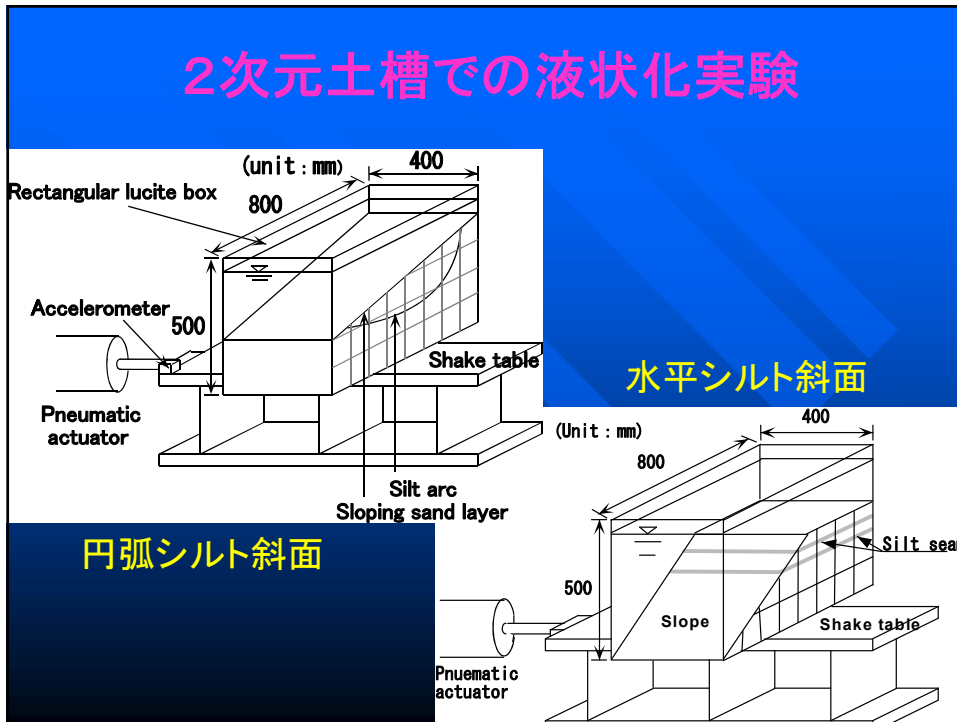
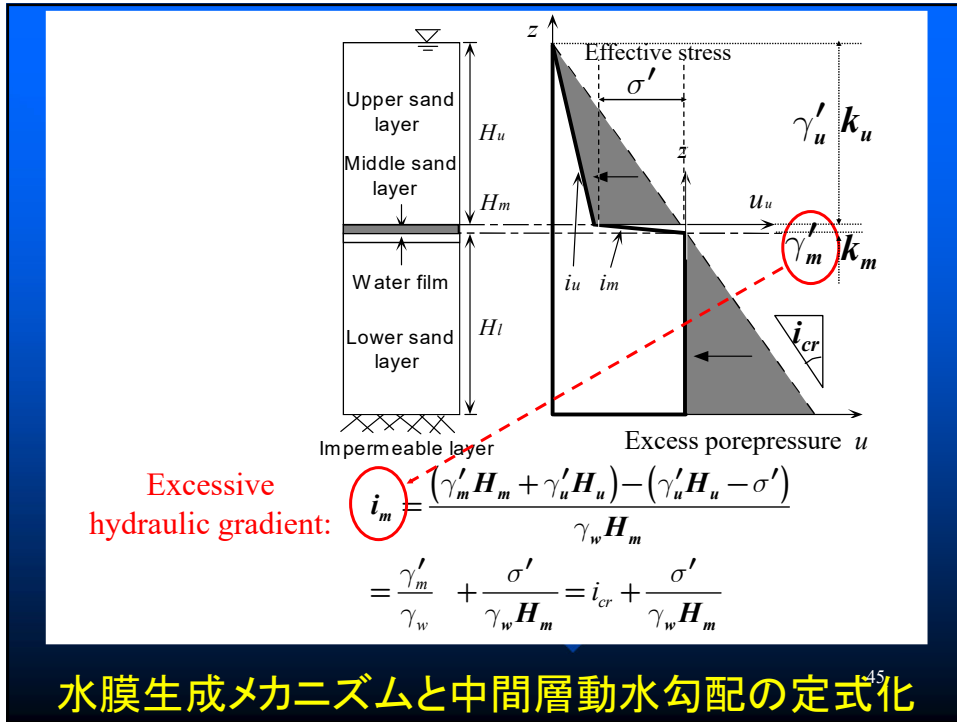


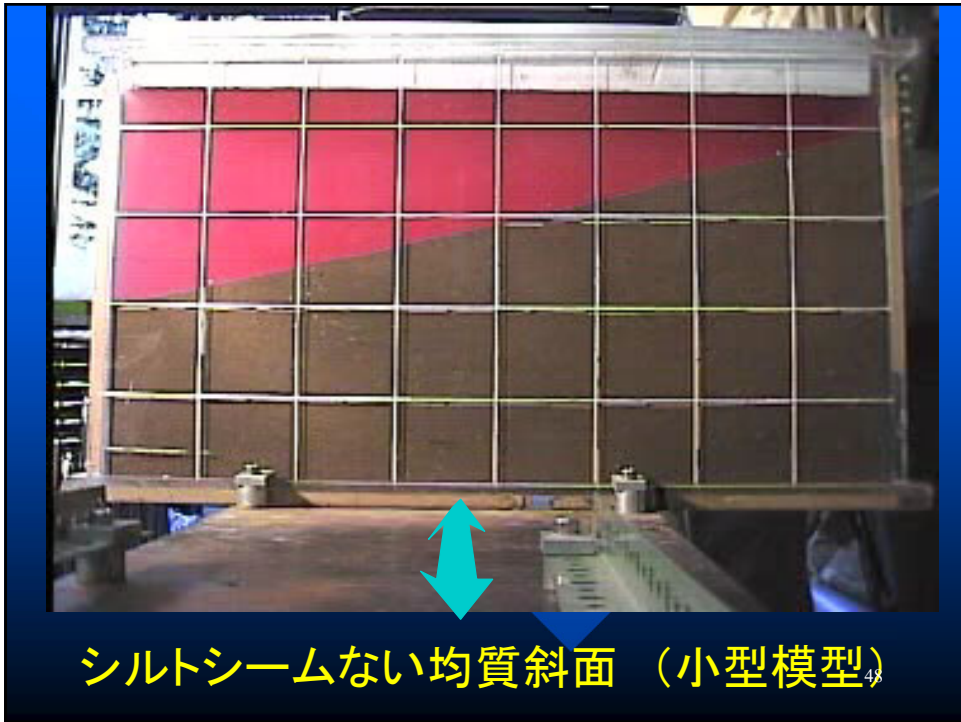
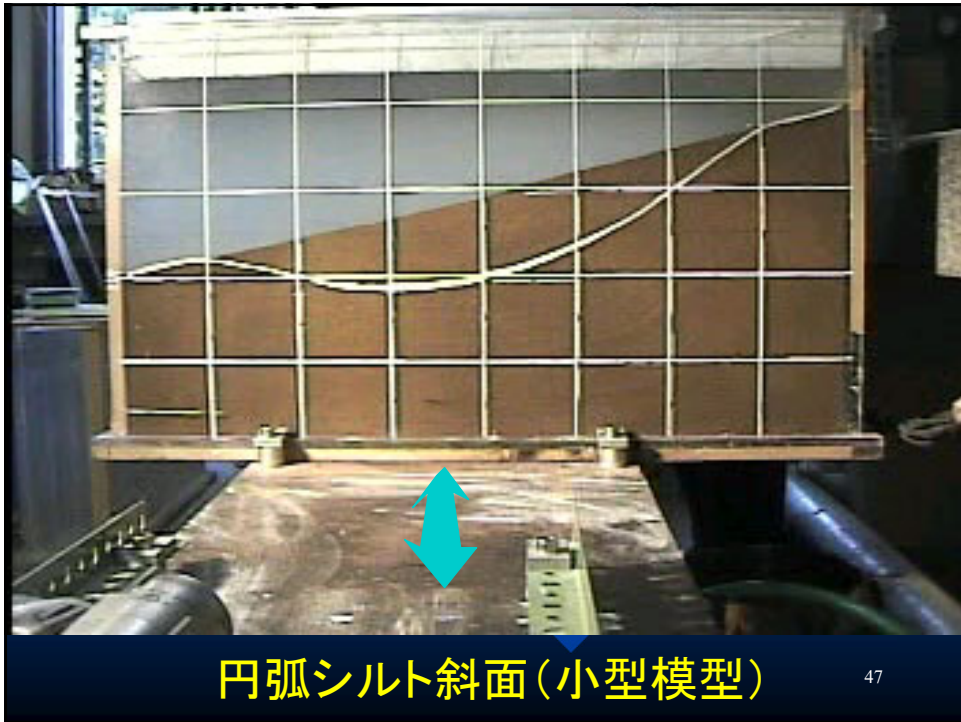
4種類の1次元地盤モデル

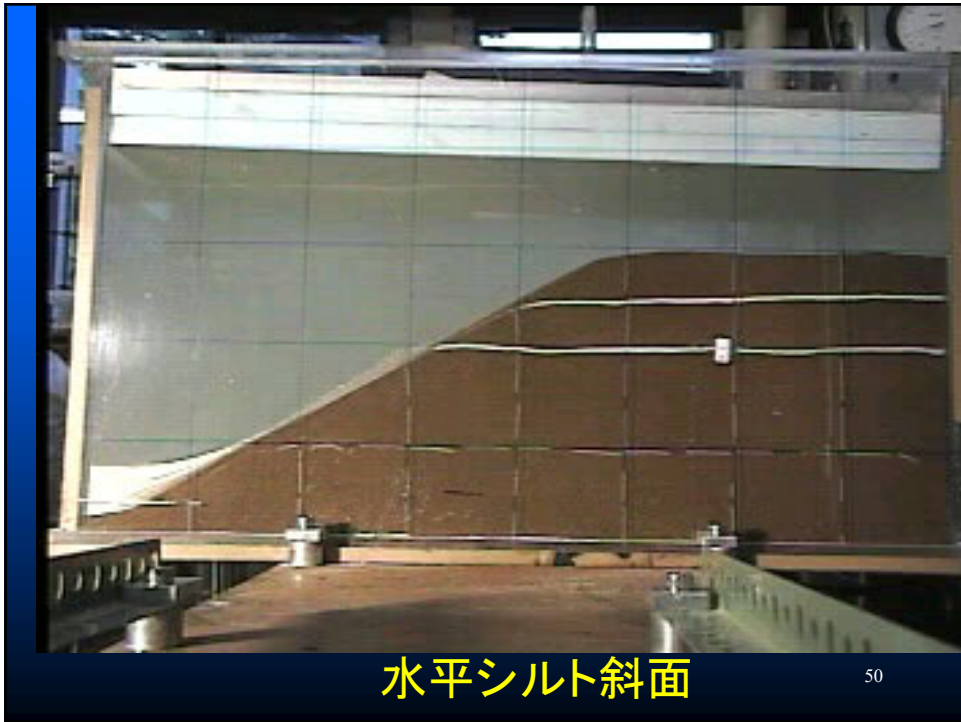
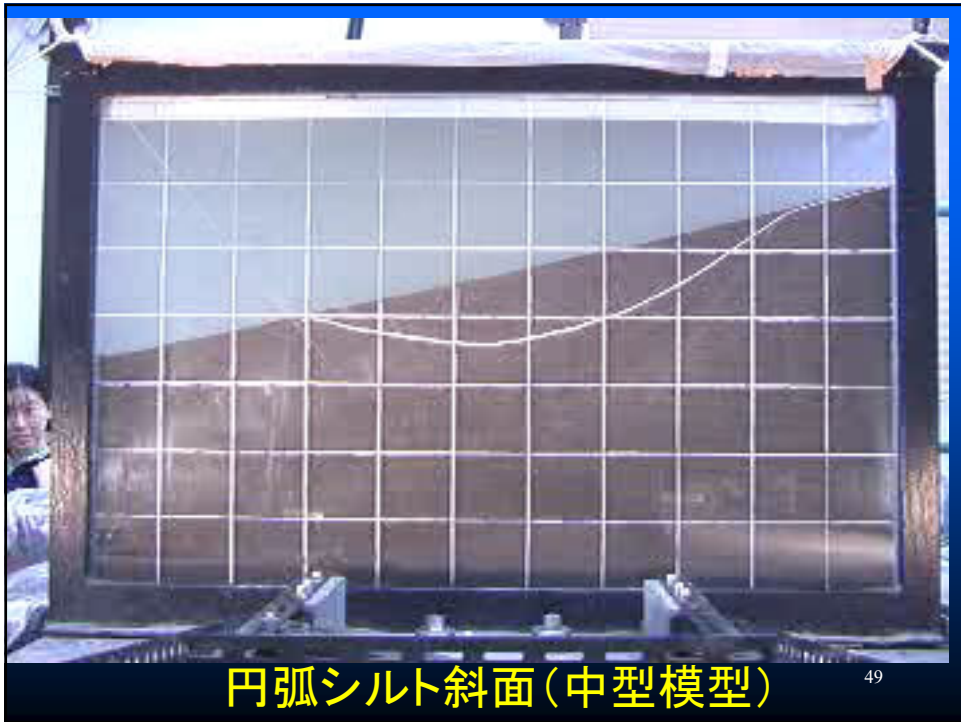
42

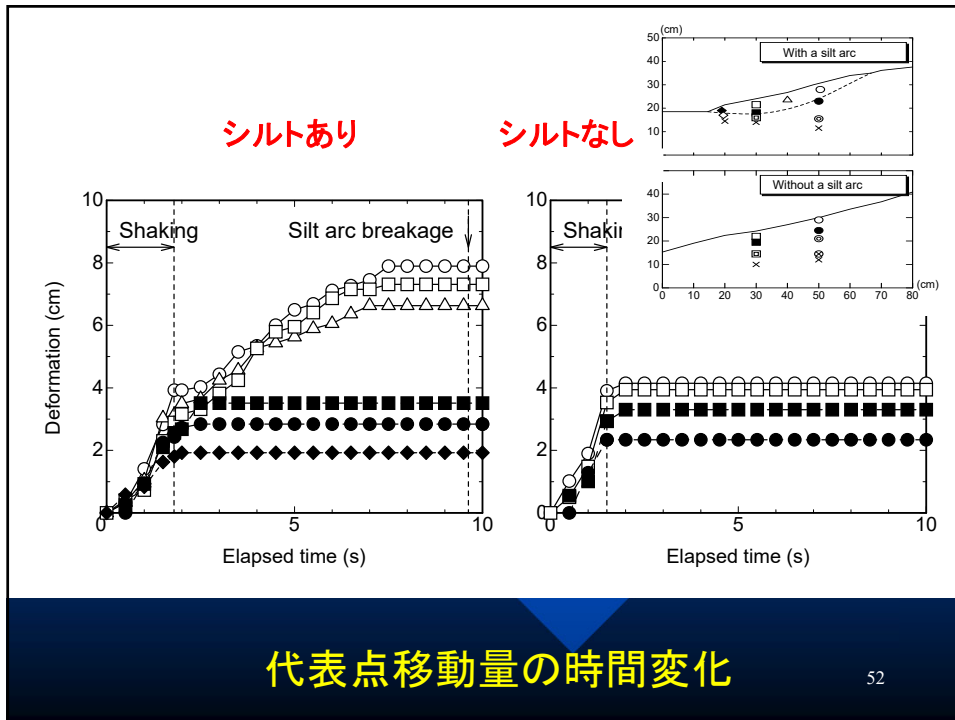
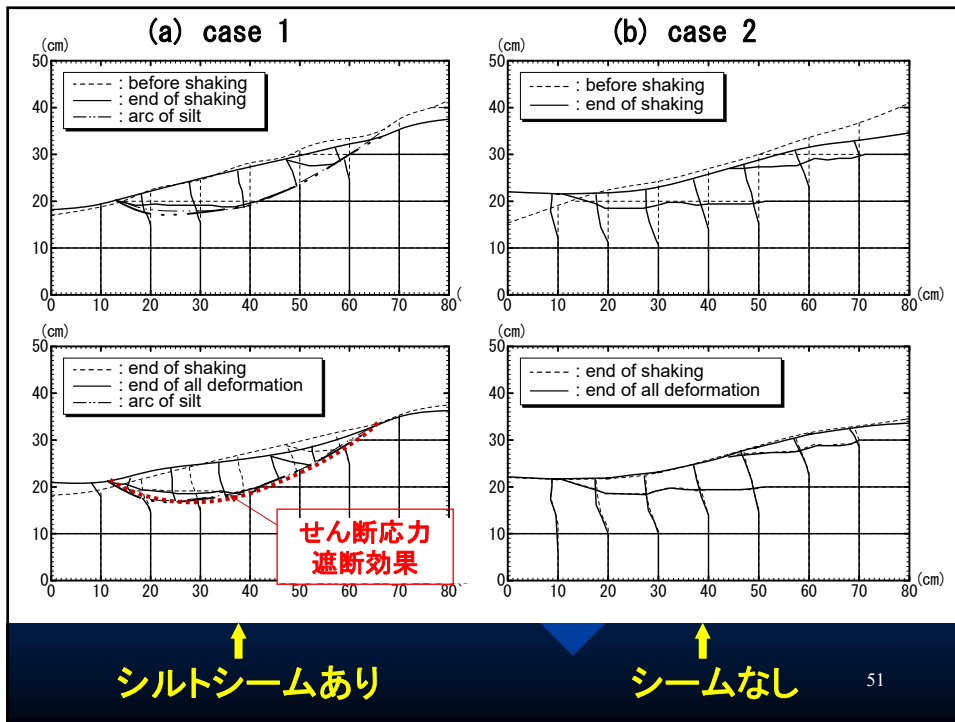


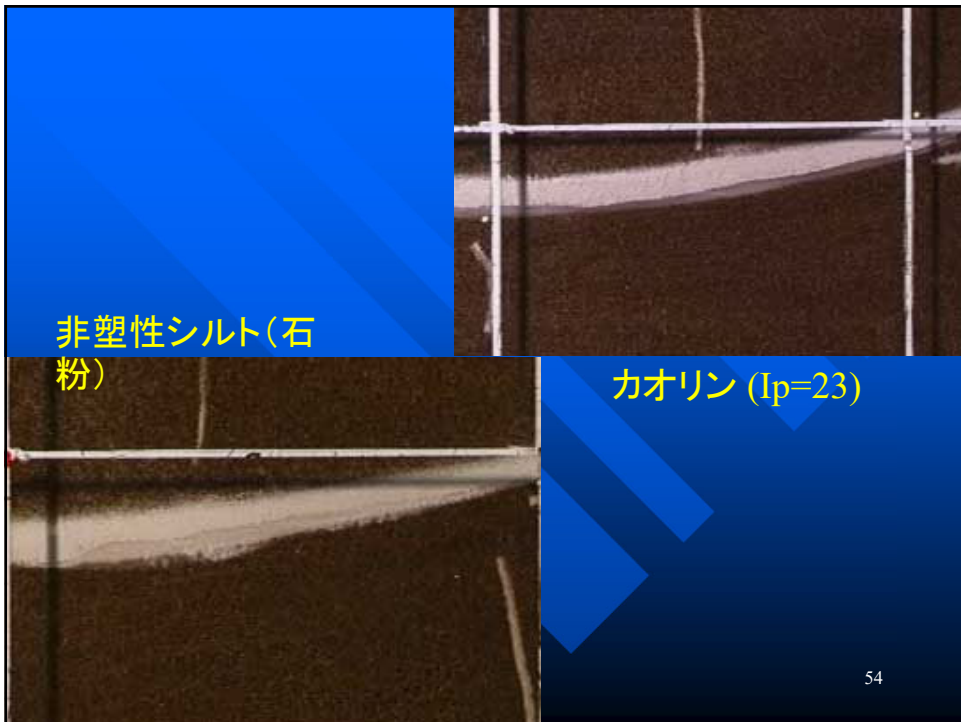
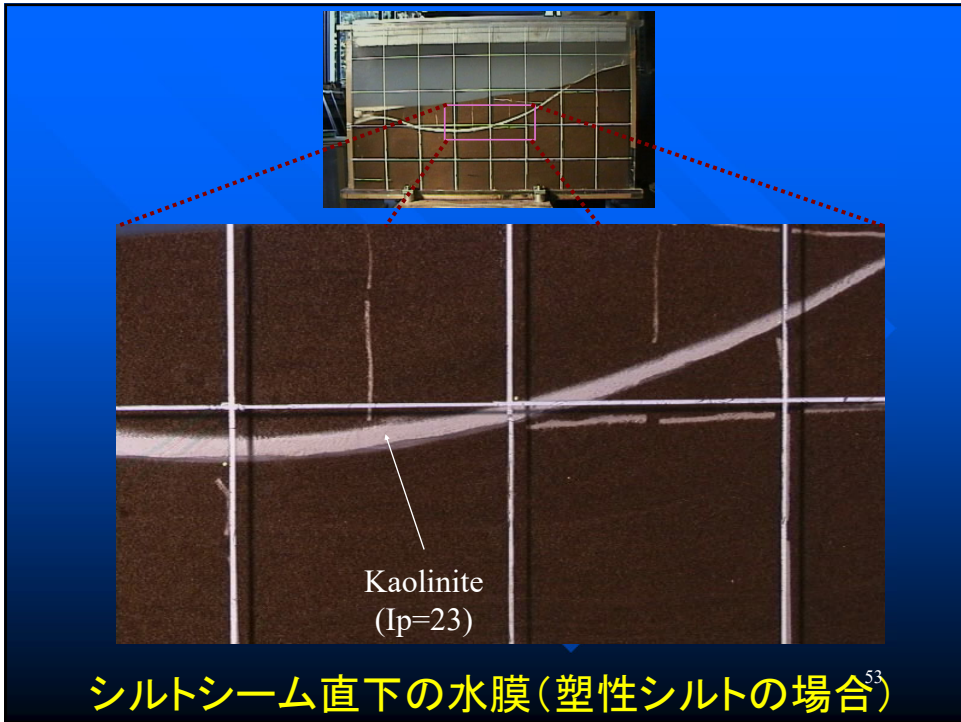
過剰間隙水圧の深度分布の推移(上部不飽和)⁴⁴

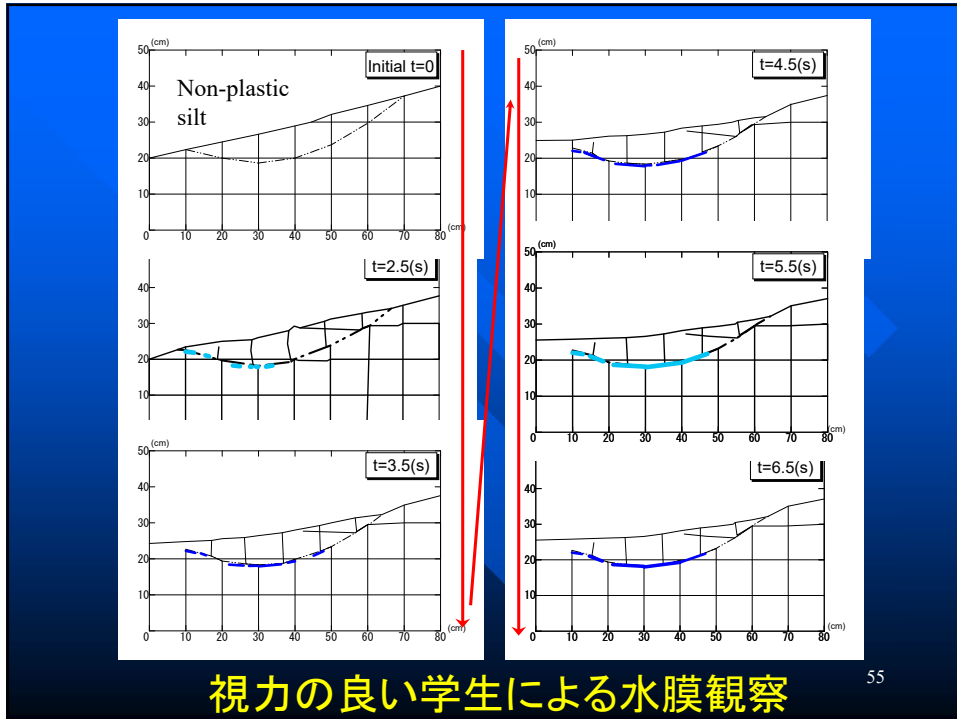




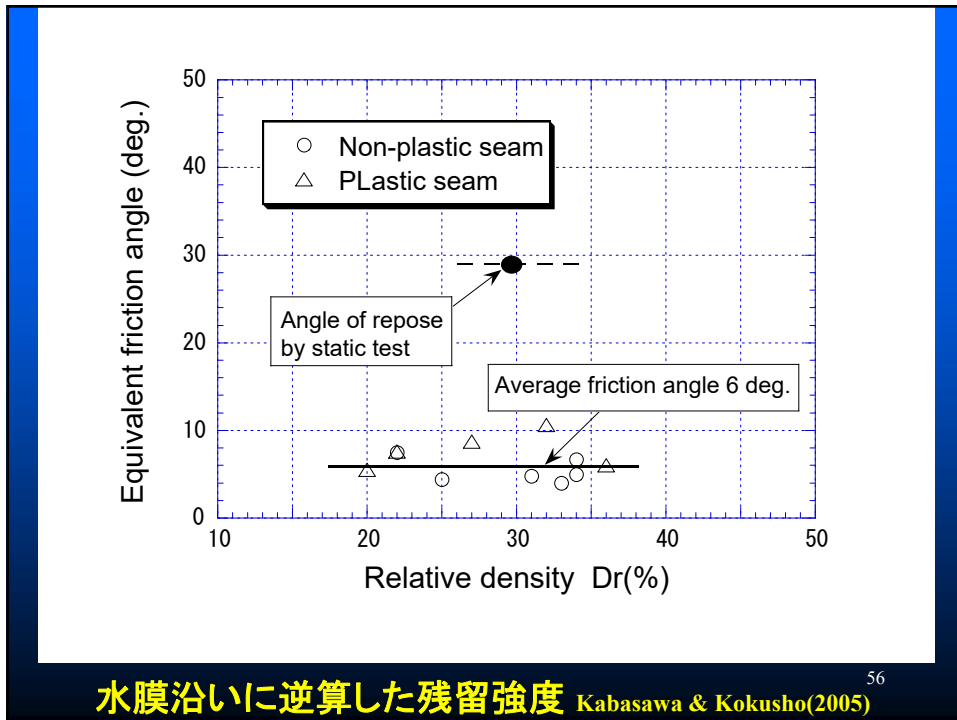




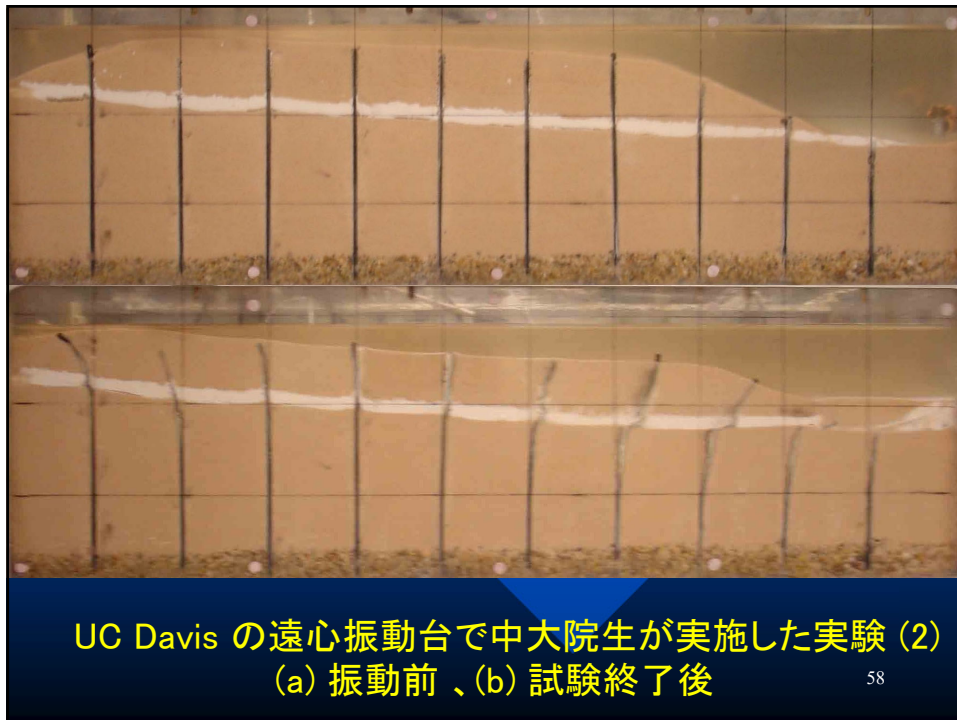




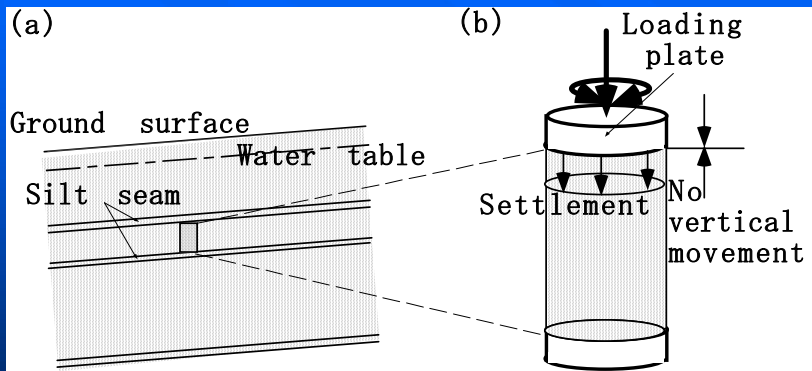
視力の良い学生による水膜観察



水膜沿いに逆算した残留強度 Kabasawa & Kokusho(2005)



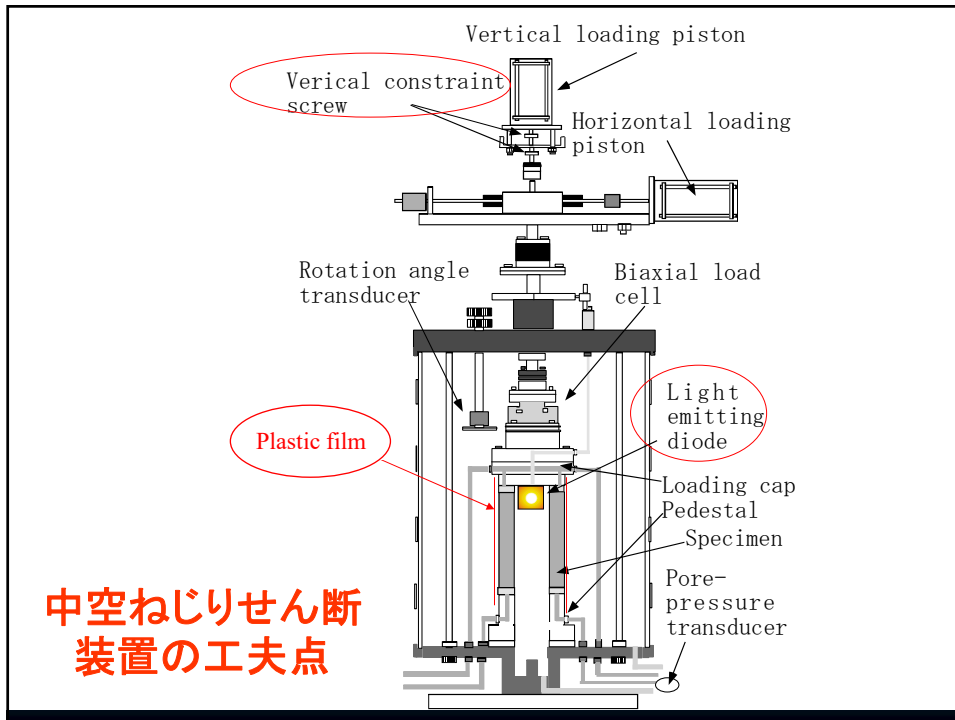
非排水繰り返しせん断による 水膜生成試験



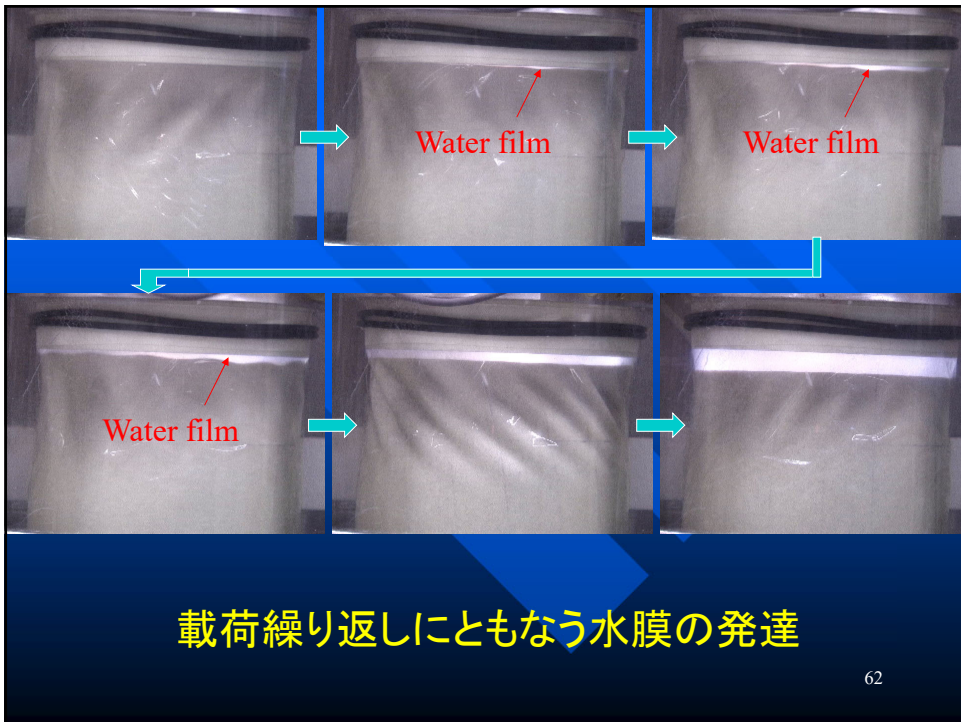
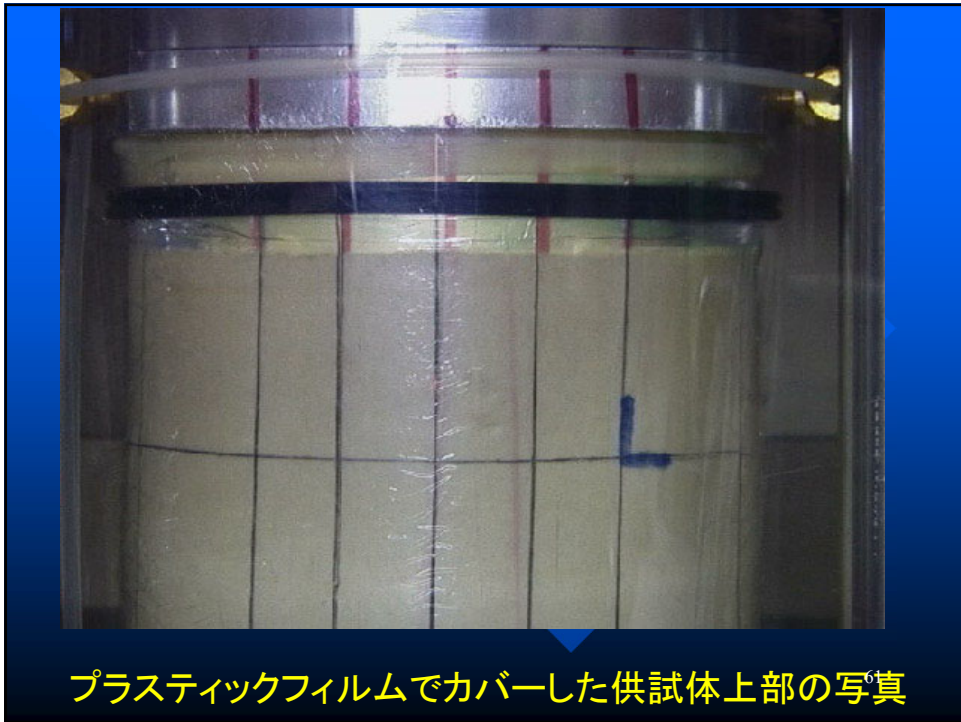
緩い斜面で低透水シームに挟まれた砂層がSH波を受けることを想定。

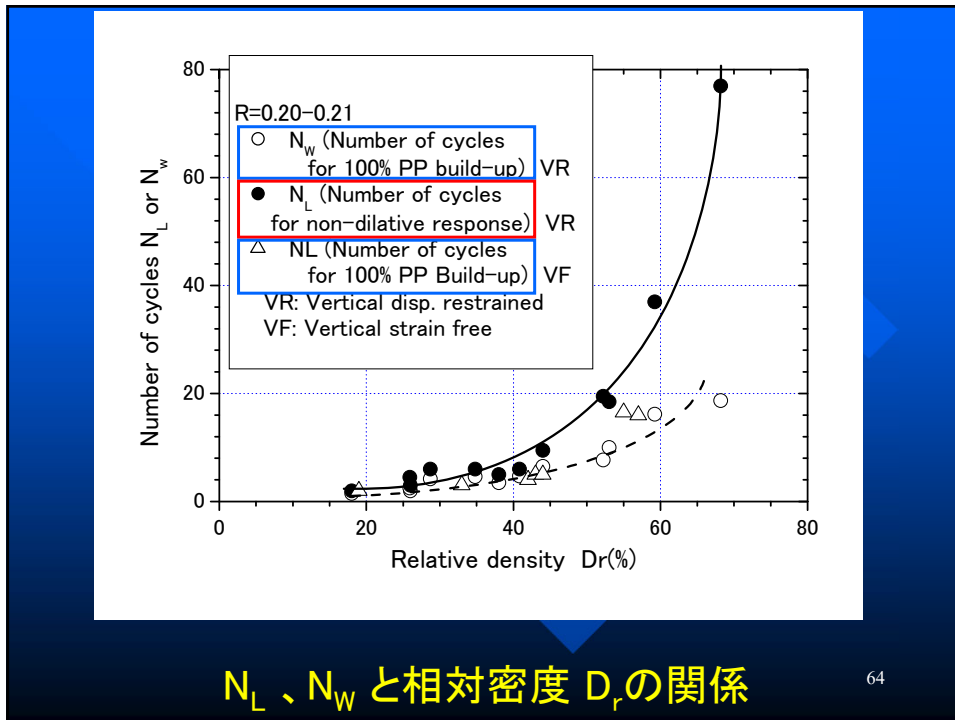
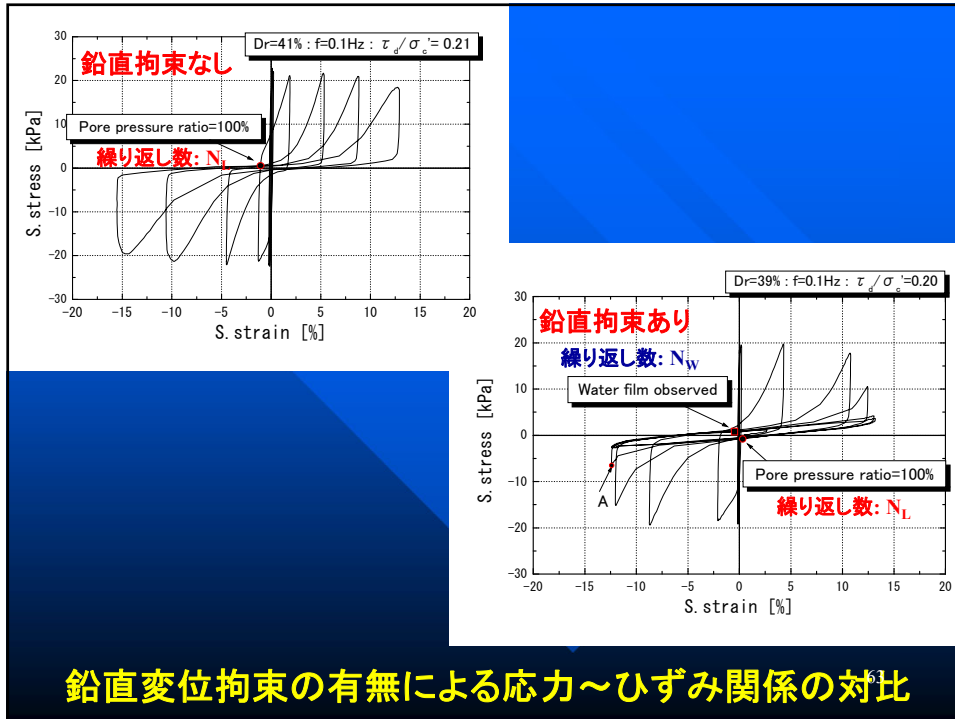
中空ねじりせん断装置による原地盤砂層が受ける応力の再現。

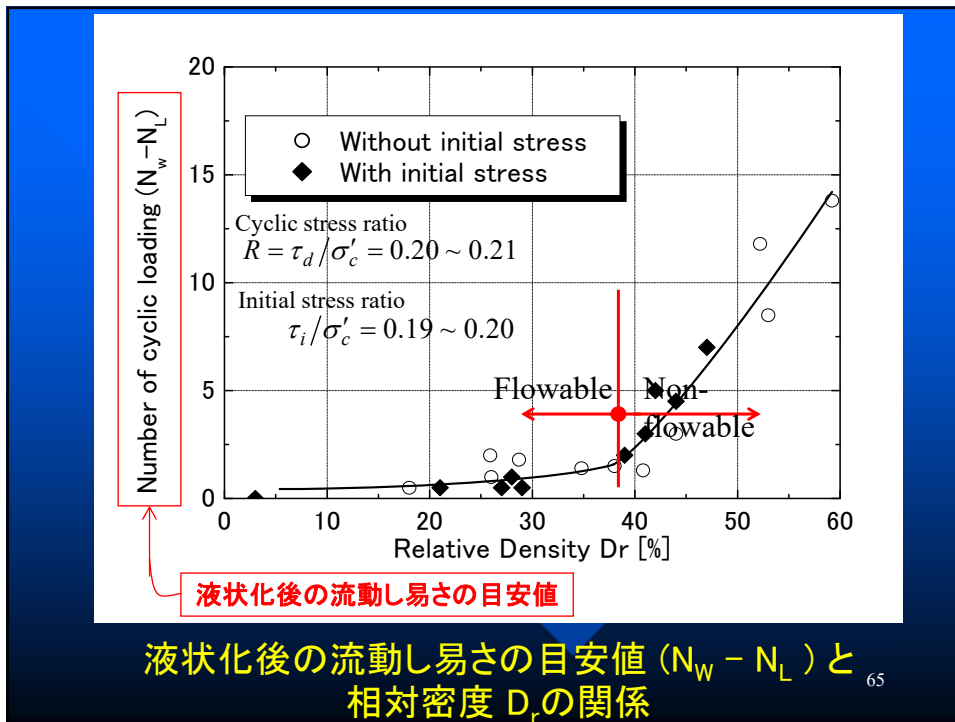
59



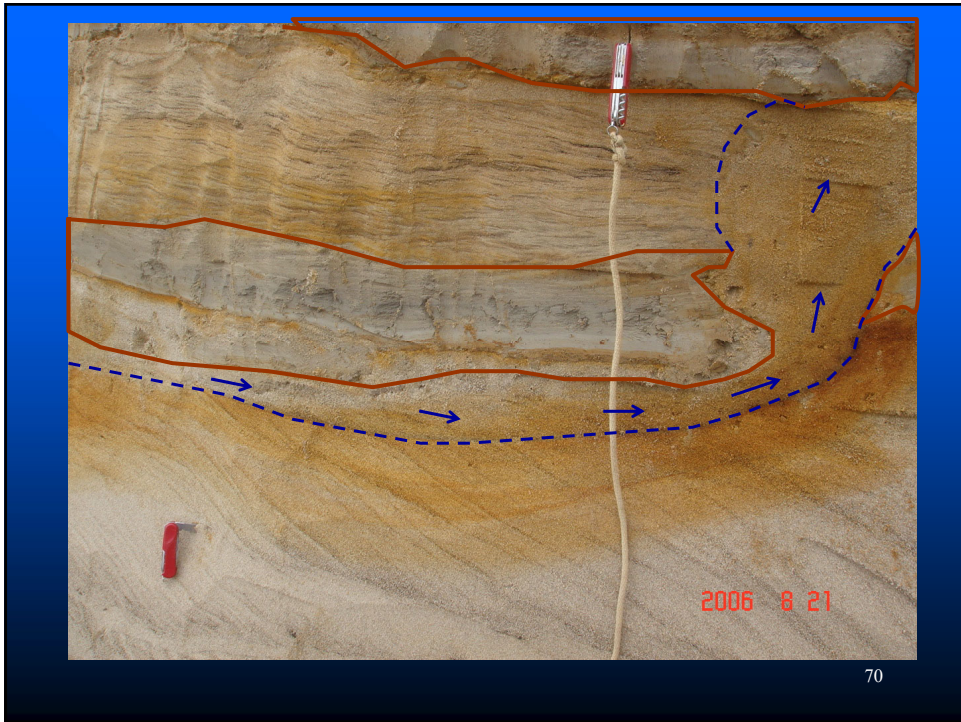
中空ねじりせん断装置の工夫点

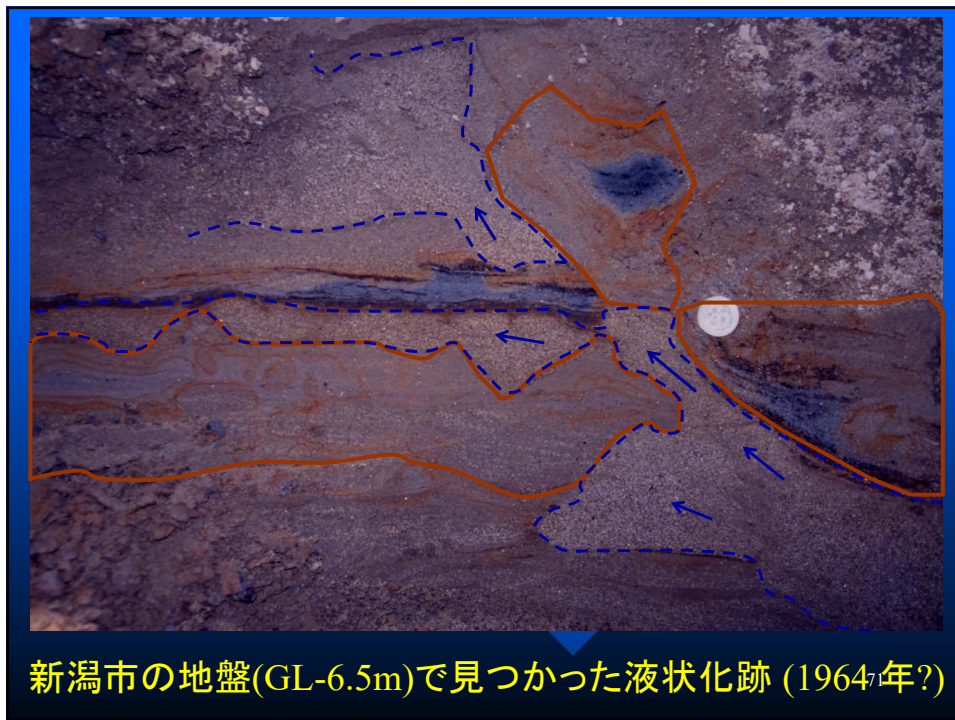












水膜現象を考慮した流動評価法

実設計に適用できる具体的な評価法はまだ存在しない。

多様な地盤条件に対応するためには詳細なケーススタディーや模型実験による研究がさらに必要。

しかし、水膜現象を考慮した流動について、実設計にあたっての幾つかの重要事項は指摘できる。

シルト層/シームの重要性を意識した設計 での3項目の考慮事項

地盤調査:

地質調査、 SPT→CPT

流動変位量評価:

水膜生成可能性評価

不安定化層の特定

最大水膜厚さ=最大沈下量の評価

残留強度評価

流動変位量評価

対策法:

地盤改良 締め固め/ドレーン/ 固化

構造物側の対策

73

地盤調査;

地形・地質調査 による砂層・砂層内シームの
深度方向分布状況と水平連続性の程度の推定。

CPTなど連続貫入試験による砂層・シルト層と
シームの分布状況の把握

上記2項目の組み合わせによる、砂層・シルト
層、シームの2次元・3次元分布の把握

74

流動評価法

緩い砂層では従来の液状化・流動検討に加えて、特に水膜流動の検討が必要。

主要なシルト層・シームの影響を考慮する必要あり。

液状化の程度、体積ひずみ量の評価

最大水膜厚さ～地盤沈下量

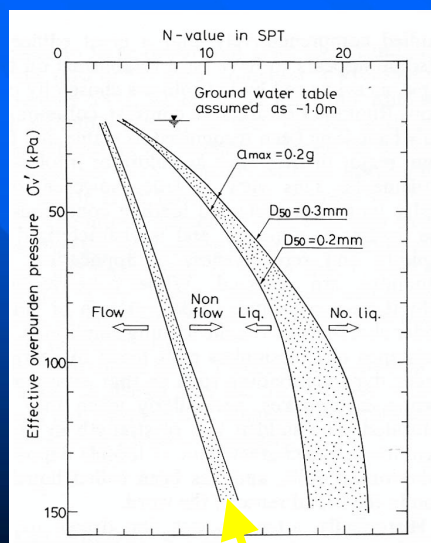
不安定可能性土塊の判定

残留強度

滑り面の凹凸の影響を考慮した流動量の評価⁵

N値による流動不安定性の判定

(Ishihara 1993).

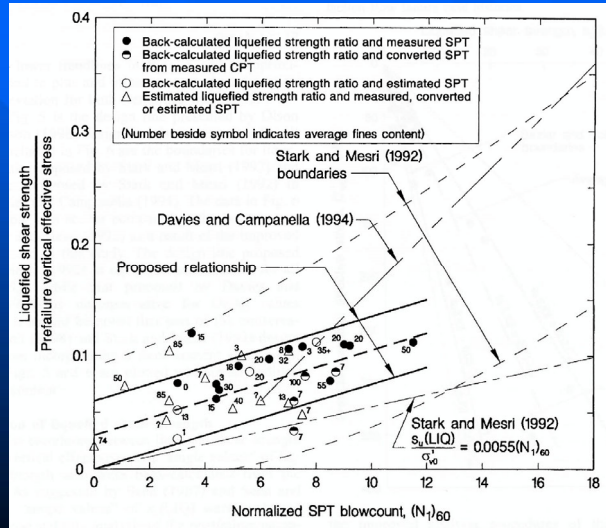


FlowとNon-flow の境界

76

残留強度をどう決めるか？

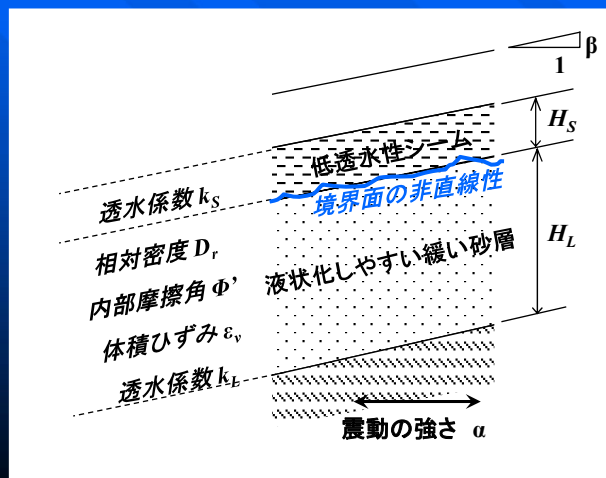
ケースヒストリーの逆解析の例 (Olson, and Stark,2002) .



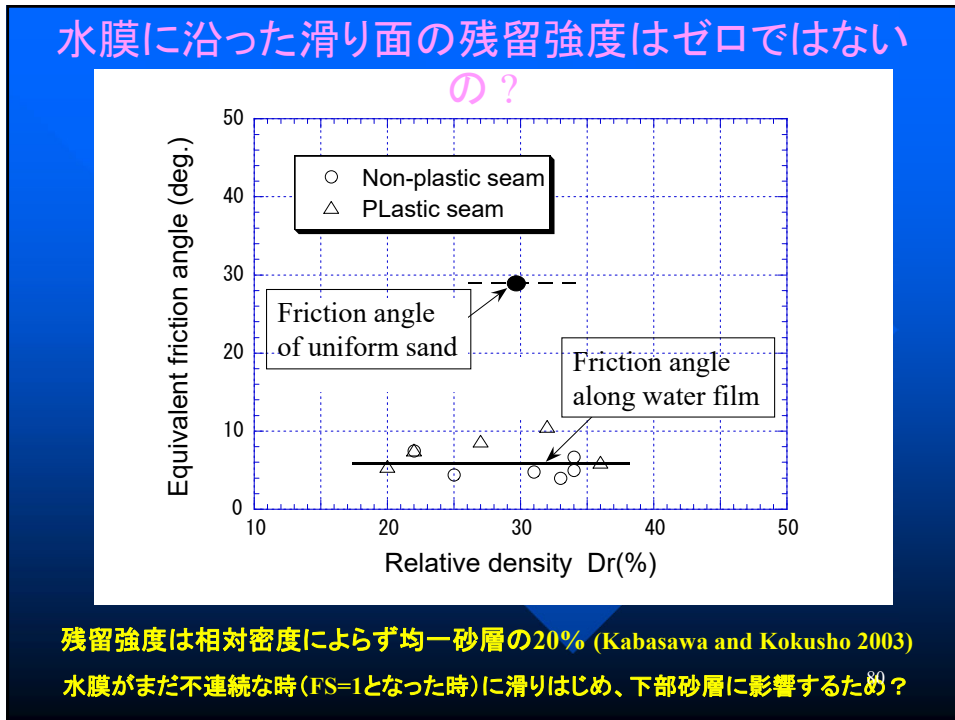
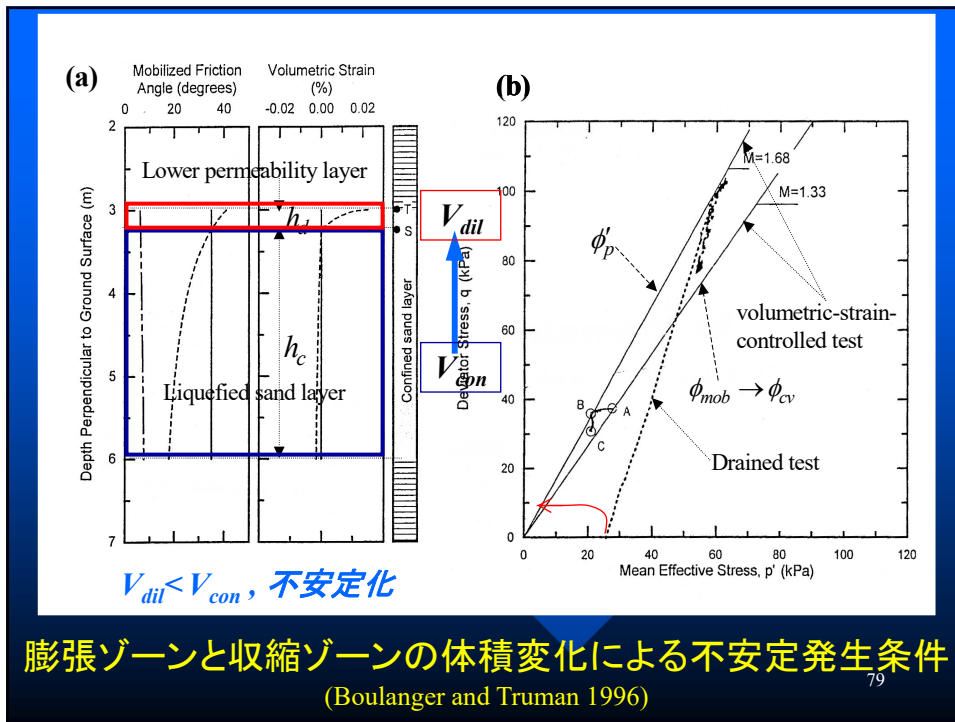
77

水膜現象による流動の可能性をどう判断するか？

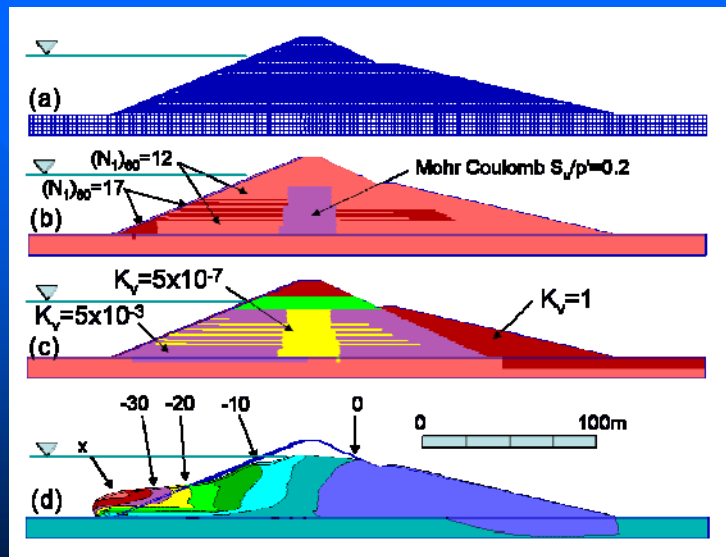
数々の影響因子; $\beta, H_S, k_S, H_L, D_r, \phi', \epsilon_v, k_L, \alpha,$
 水膜の非直線性, など



78



実構造物設計に向けての試み



FLAC コードによる Lower San Fernando Dam の解析例 (a) 要素分割 (b) $(N1)_{60}$ 分布 (c) 低透水部分 (d) 水平変位 (Naesgaard et al. 2006)

地盤改良法;

地盤締め固めは液状化後の体積ひずみを減少させ、水膜厚さとその継続時間を減少させる。

鉛直ドレーンは早期の排水を可能とし、水膜の存在により特に排水が効率的になる。

地盤固化によって固化部分が周辺地盤の流動圧に抵抗する。

これらの地盤改良は既に液状化対策に使われているが、水膜流動の観点から設計法を見直す必要がある。

まとめー1

原地盤の砂層は異なる粒度の成層構造からなっており、決して均質ではなく、水平方向にある程度連続性を有するシルトシームを含むことが多い。

異なる粒度の成層構造からなる緩い砂層では液状化時に層境界に水膜もしくは1時的な不安定現象が現れる。

通常の砂はSSLより密な側(dilative)であり、液状化後に大きな流動を起こさない。それに対し、水膜が形成されると、それに沿ってnon-dilativeなせん断変形が可能となり、時間遅れの大きな流動変形の原因となる。

83

まとめー2

シルトシーム直下の砂を模擬したせん断試験により、 $D_r < 40\%$ の緩い砂では初期液状化(間隙水圧100%)のあとほどなく、水膜によるnon-dilativeな応答が現れ、緩い砂が水膜流動を起こしやすいことを明示。

新潟市地盤やカリフォルニア沖海底地盤でのごく緩い砂地盤の大流動は水膜現象が関与していたことを示唆している。

液状化跡の露頭に見られるSillは、水膜形成のなごりと考えられる。

水膜を考慮した設計法にはまだ課題多いが、幾つかの指摘は可能。また既に一部で試みが始まっている。地盤改良のうち特に鉛直ドレーンは有効性が増す。

84