

2013年度河川技術に関するシンポジウム OPS1堤防の浸透破壊

～目に見えない堤体・基盤内からの破壊～
より深い現象の理解と堤防管理の高度化を目指して
(2013.06.06)

地盤工学での浸透破壊の研究動向

名古屋工業大学 前田健一

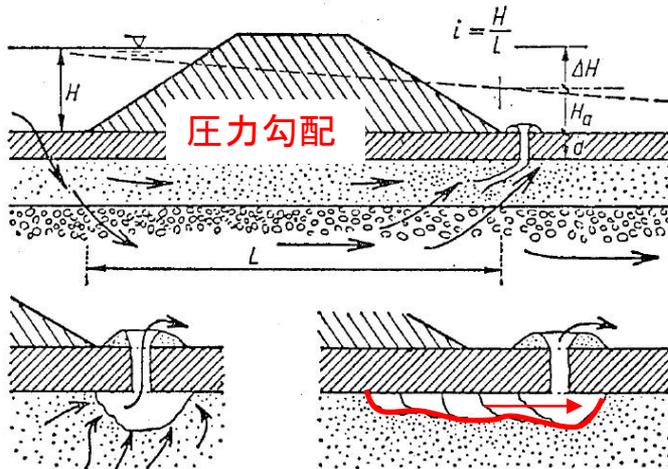
構造体(堤体)レベル

構造体要素(部分)レベル

土の要素(土塊)レベル

土粒子レベル

浸透破壊を様々なスケールの視点で 考察してみる

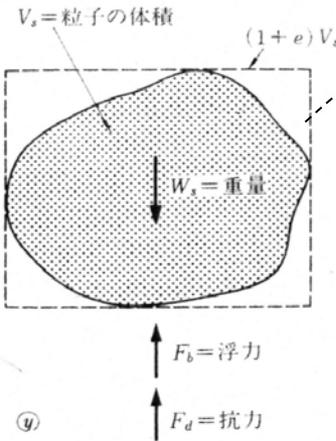


長瀬, 応用地質技術年報, 1978

図・1 浸食性の噴出水の発達の定説
Fig.1 Generalized hypothesis of erosive spouting.

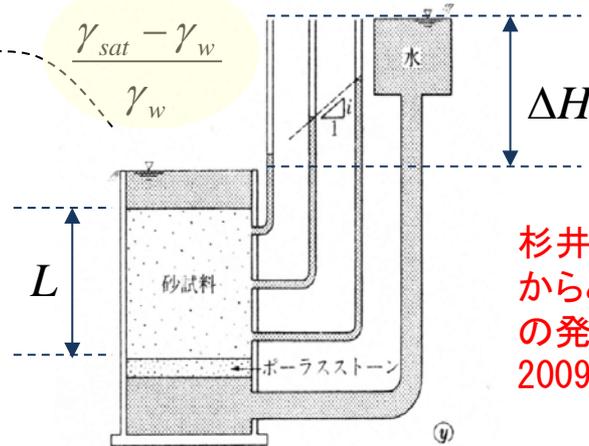
！変形すると、どうなるのか？

吉見吉昭, 砂地盤の液状化 (土質基礎シリーズ), 1991



$$F_s = \frac{i_{cr}}{i} = \frac{\frac{G_s - 1}{1 + e}}{\frac{\Delta H}{L}}$$

つり合い問題であれば、結びつく



粒子が動くのは、 $i < i_{cr}$

杉井ら, 限界流速からみた浸透破壊の発生と進行, 2009

土粒子レベルの視点

土要素としての視点

土粒子～構造体としての視点



Surface flow -> seepage into slope , small piping

heavy rain 130-150 mm/h

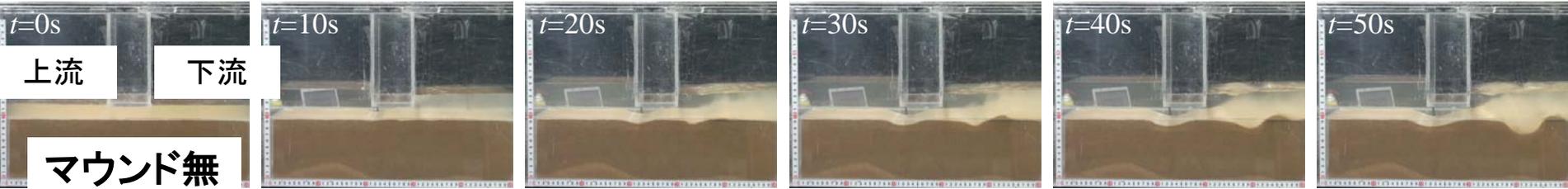
Piping: 最初はきれいな水の漏水 ⇒
濁り ⇒ 堤内から「ゴロゴロ」という音 ⇒
大きな粒子が流失 ⇒ 詰まり ⇒
滑り土塊の変位 ⇒ 濁った漏水の再開



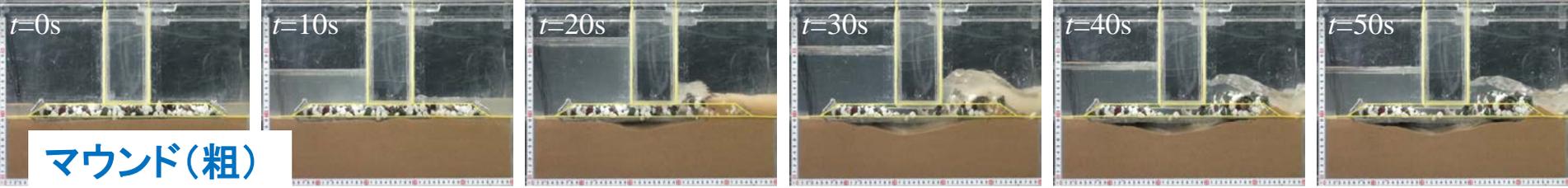
亀裂とすべり (ただし破壊しない)



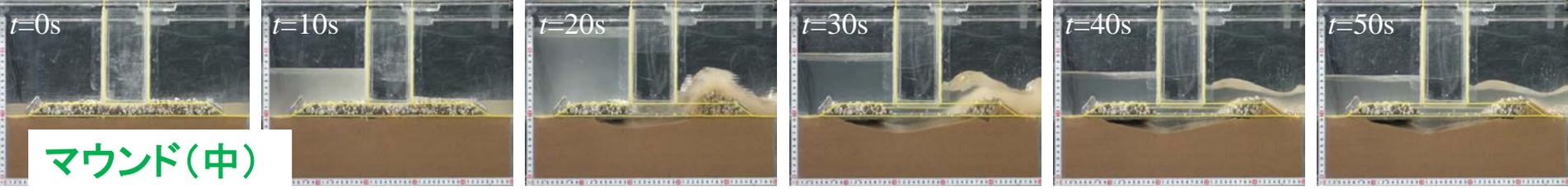
洗掘の進行



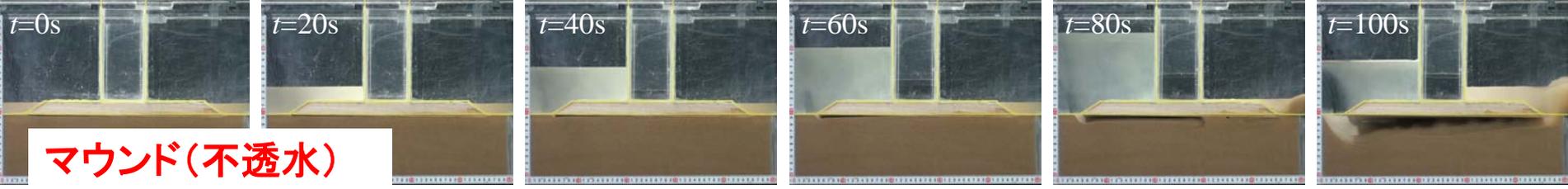
(a) Case1 : マウンドなし条件の洗掘進展



(b) Case2 : Gravel-A条件の洗掘進展

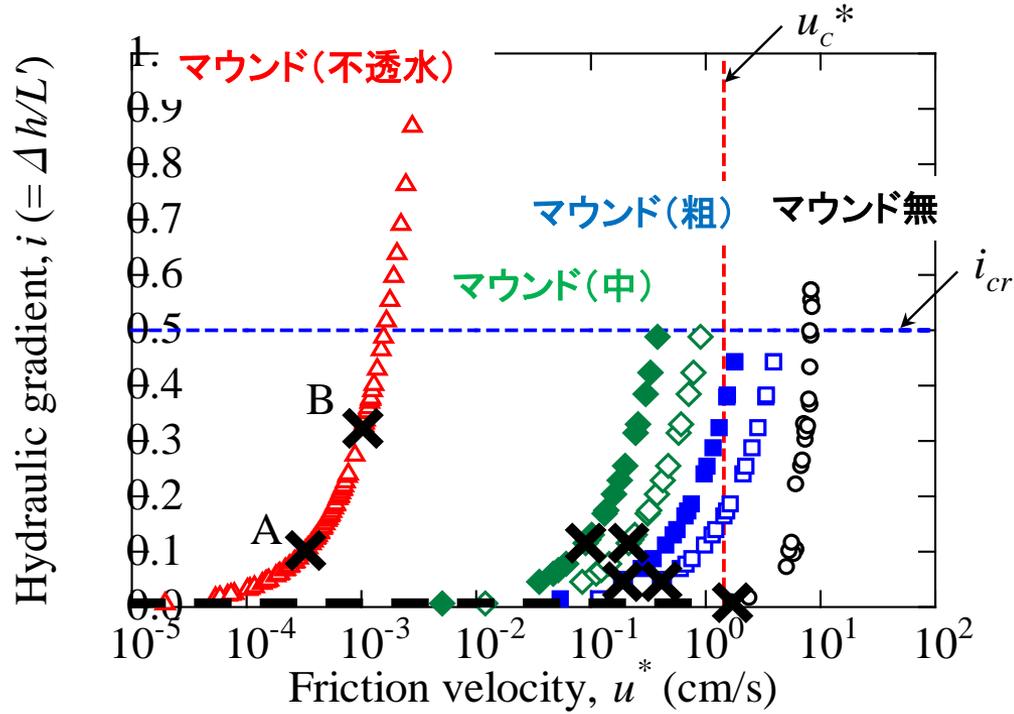


(c) Case3 : Gravel-B条件の洗掘進展

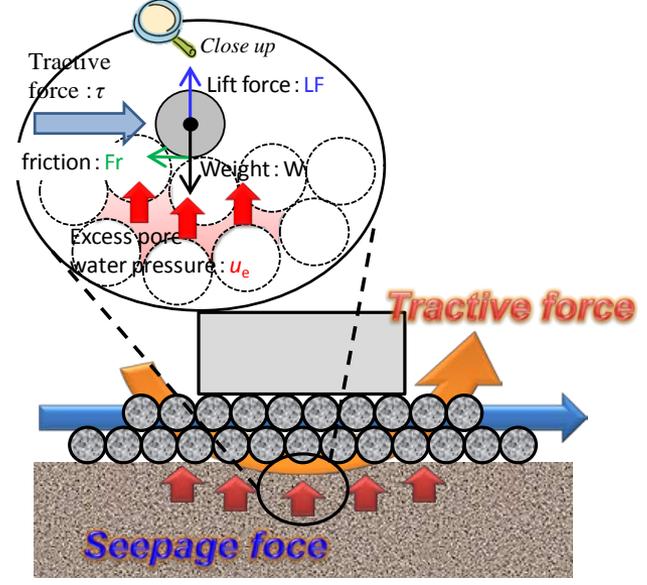
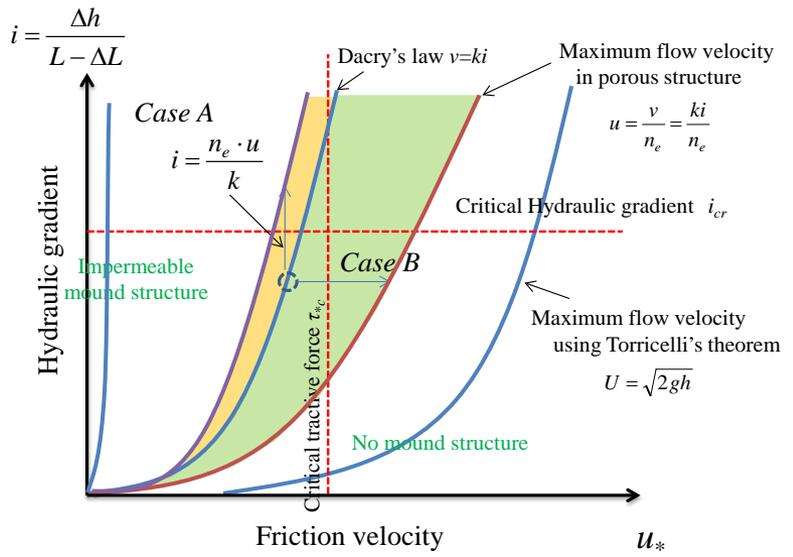


(d) Case4 : 不透水条件の洗掘進展

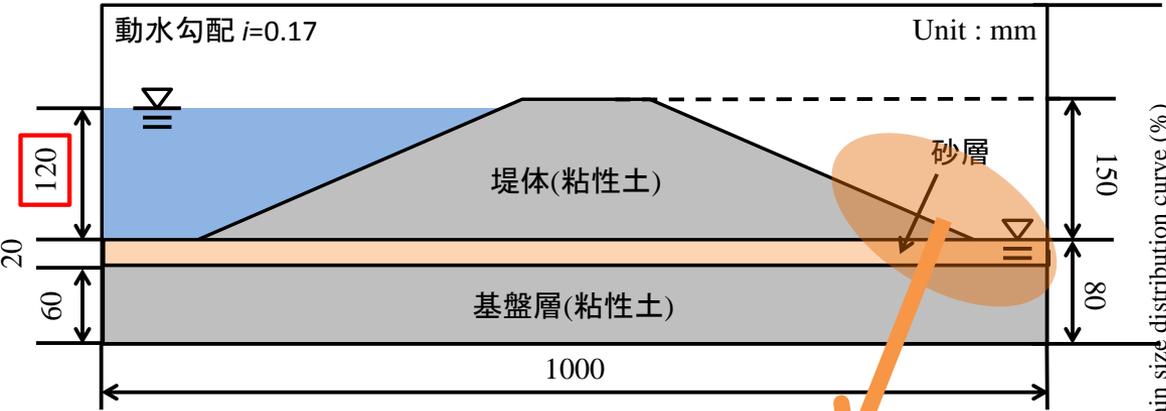
下の砂地盤に作用する掃流力：摩擦速度と（巨視的）動水勾配



- Case1 : No mound structure
- Case2 : Gravel-A mound structure ($u=ki$)
- Case2 : Gravel-A mound structure ($u=ki/n_e$)
- ◆ Case3 : Gravel-B mound structure ($u=ki$)
- ◇ Case3 : Gravel-B mound structure ($u=ki/n_e$)
- △ Case4 : Impermeable mound structure
- ✕ Start point of scouring soil



堤体模型実験の結果

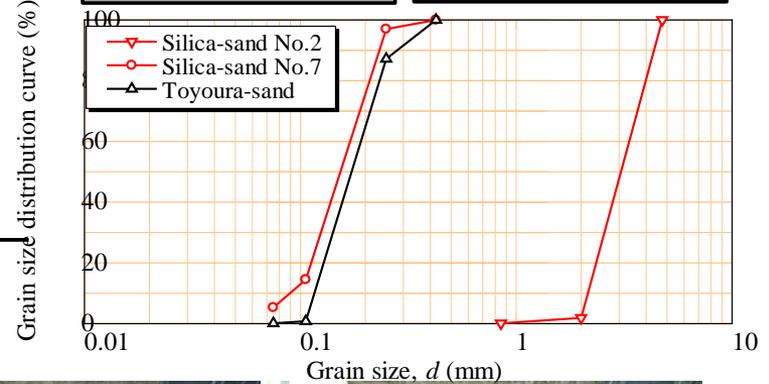


① 二層砂層

粘土
珪砂7号(小)
珪砂2号(大)
粘土

② 豊浦砂

粘土
豊浦砂
粘土



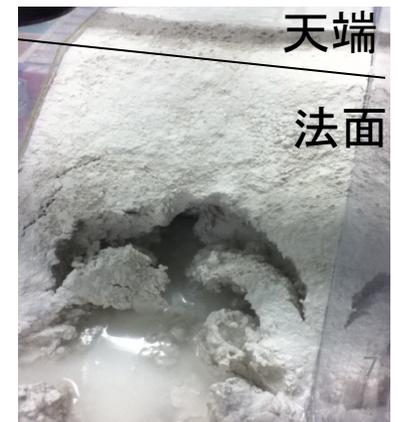
① 二層砂層 珪砂2号 珪砂7号



局所的な濁った漏水が切欠で、法先からの砂層・堤体を浸食。その後パイピングにより破堤。

② 豊浦砂

内部侵食しない豊浦砂では、漏水しても、堤体の法先に掘削しても破壊しない



微小な変形は見られるが、破堤には至らない。

粒径Dと限界実流速Vの関係(堤体模型実験)

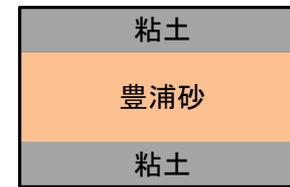
壊れた砂層

硅砂2号と7号の二層砂層



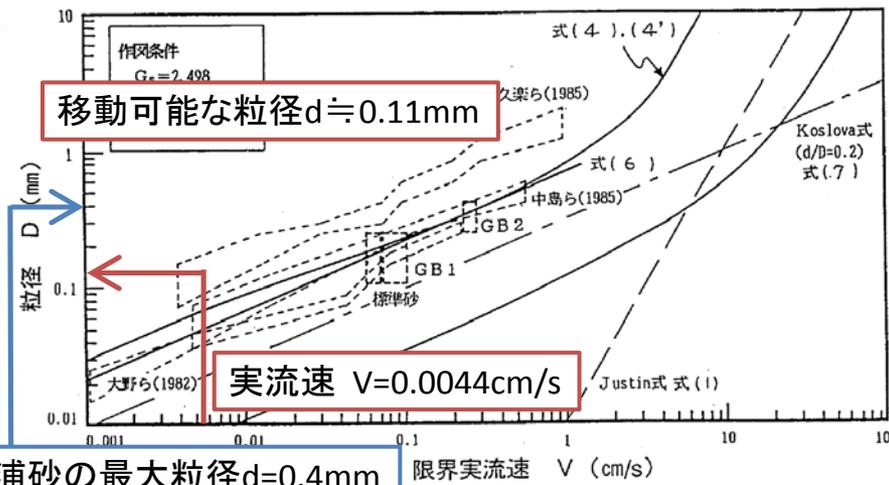
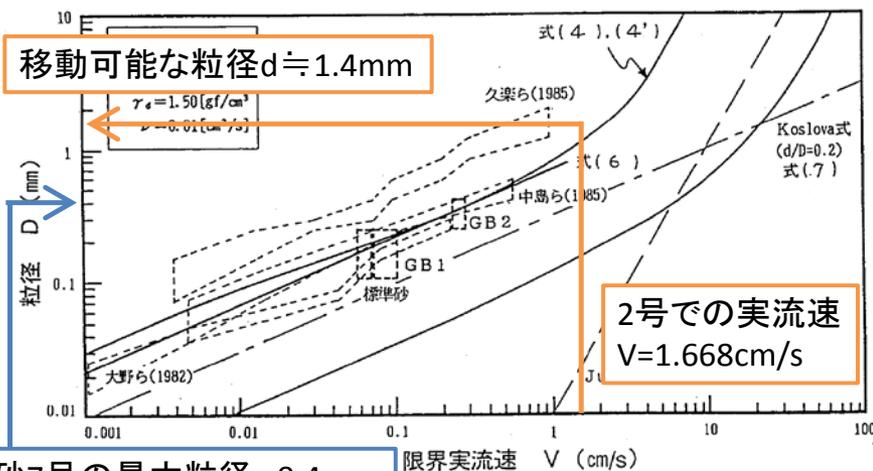
壊れない砂層

豊浦砂



試料名	透水係数 (cm/s)	i=0.2における実流速(cm/s)	最大粒径 (mm)
硅砂2号	8.34	1.668	4.0
硅砂7号	4.38×10^{-3}		0.4

試料名	透水係数 (cm/s)	i=0.2における実流速(cm/s)	最大粒径 (mm)
豊浦砂	2.2×10^{-2}	4.4×10^{-3}	0.4



浸透流速 > 最大粒径の限界流速

浸透流速 < 最大粒径の限界流速

→ 粒径の揃った砂層は破壊しにくい。
 粒径差が大きく、細かい砂の限界流速より速い浸透流速が破壊に至る必要条件。

15min

20min

30min

35min

40min

45min



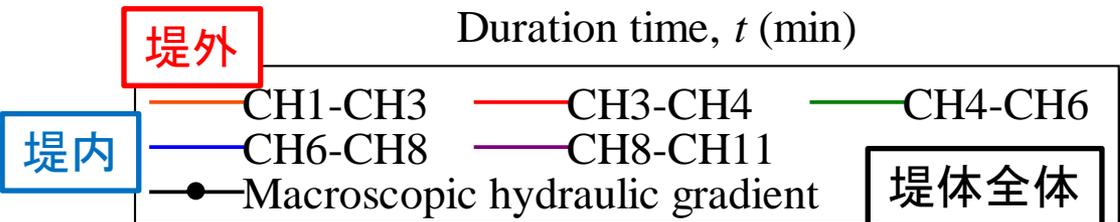
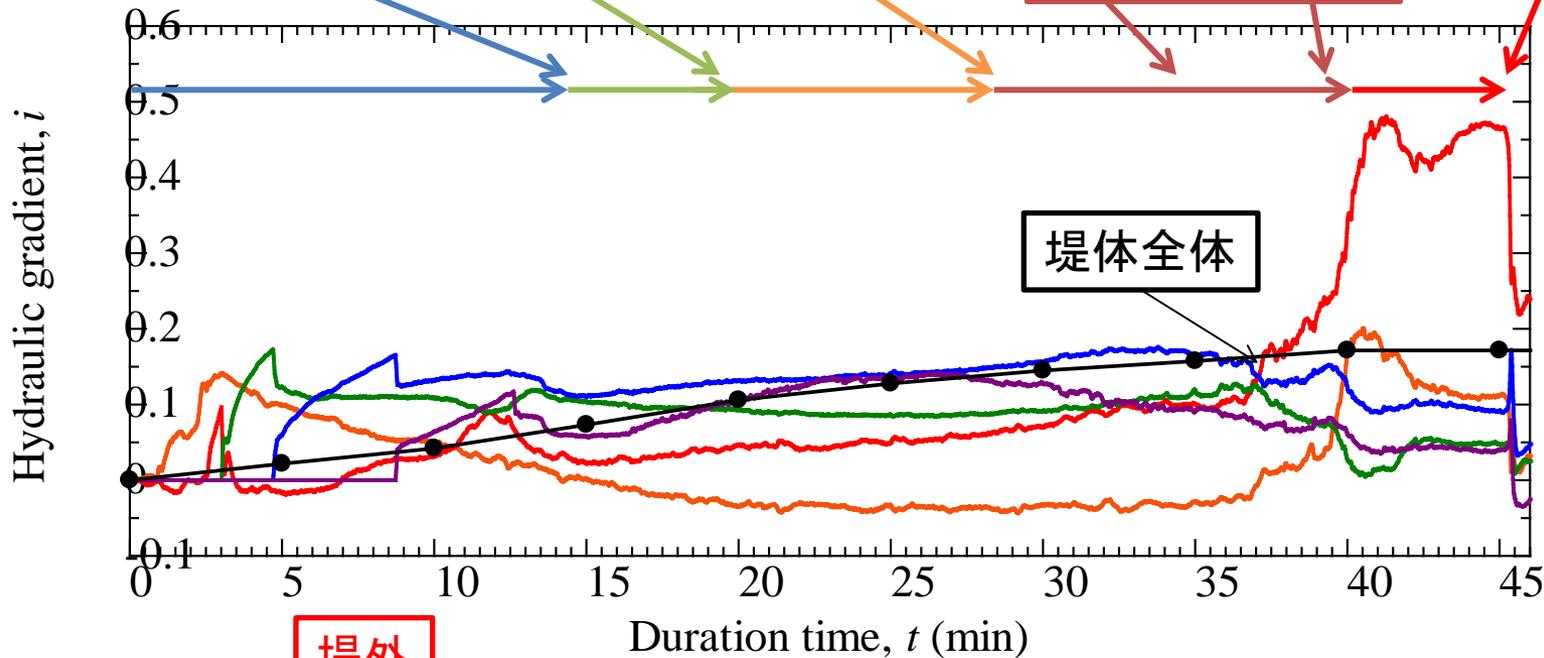
砂層の飽和

小規模な噴砂

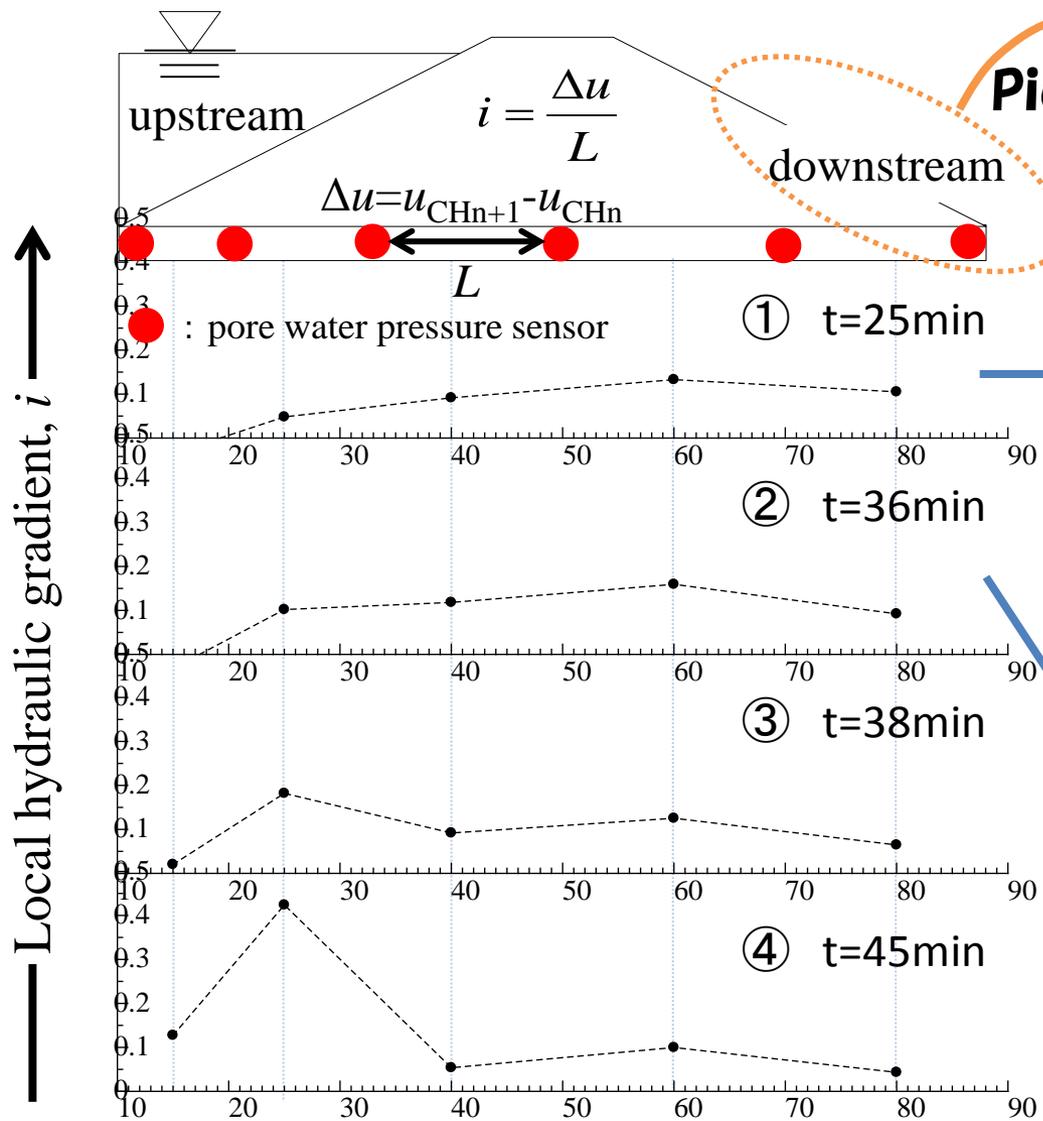
法尻からゆっくり浸食

法面のすべり
著しい局所的漏水

破壊



局所的(計測器間)動水勾配の変動



Pick up!

実験時の堤内側の様子(2倍速)



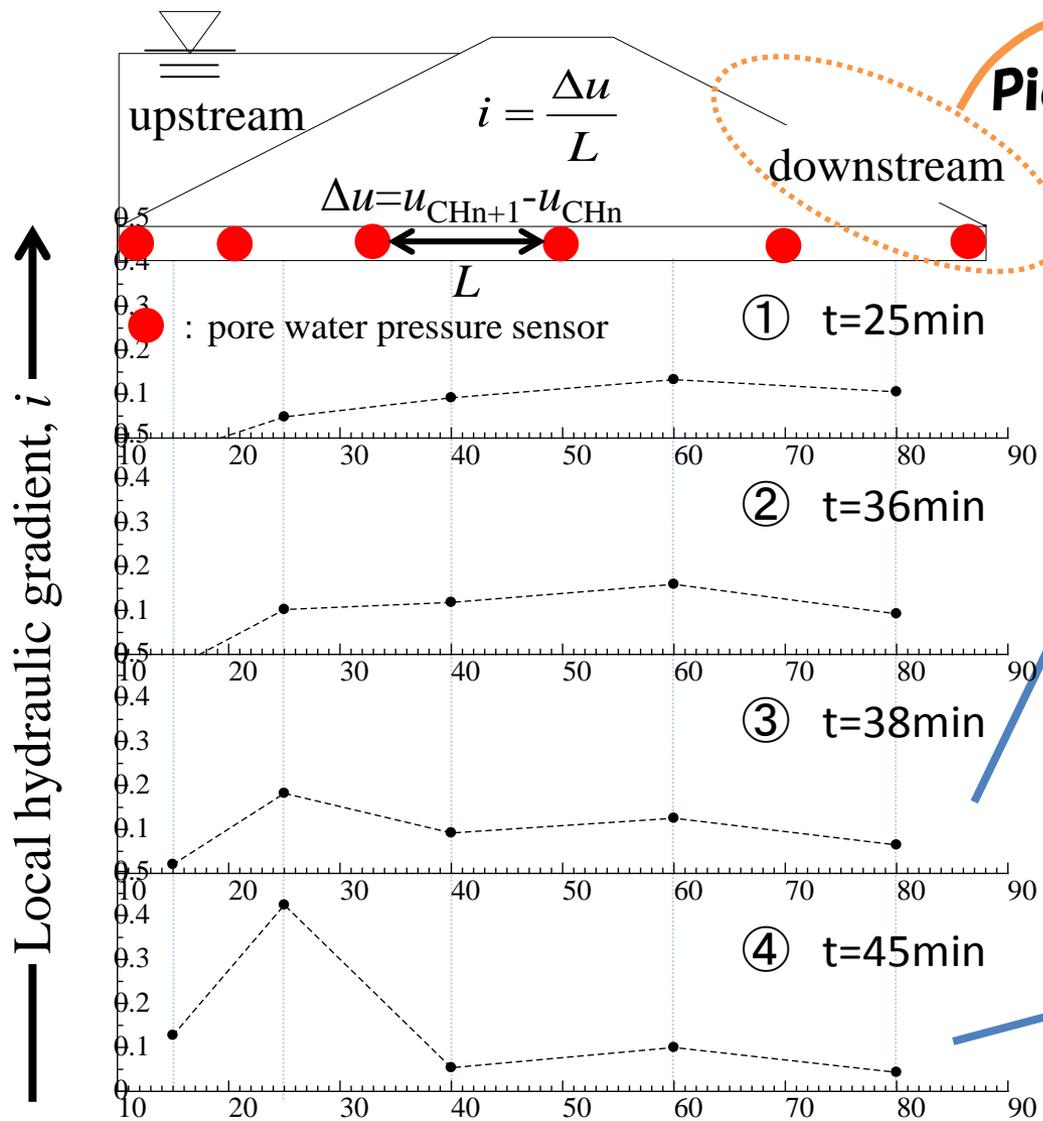
砂層からの浸透により徐々に浸食



局所的な漏水の様子 (画像左側)

①, ②: 全体的に動水勾配が上昇。砂層・堤体が徐々に浸食。 → 漏水が局所化。

局所的(計測器間)動水勾配の変動



Pick up!

実験時の堤内側の様子(2倍速)



漏水箇所の流量増加 法面の滑り



さらに流量増加 → 破堤に至る

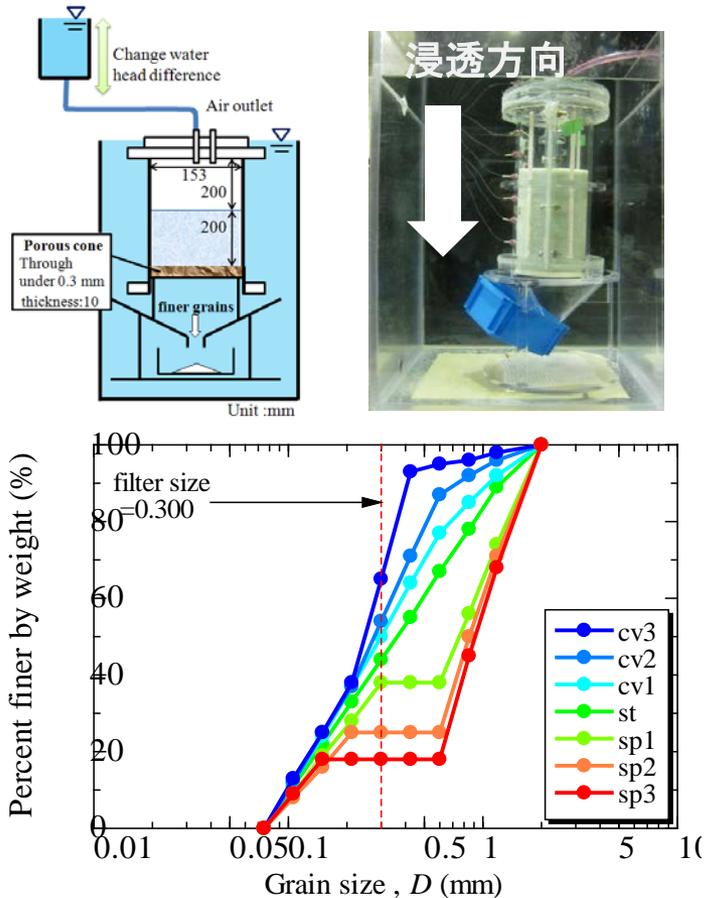
③, ④: 堤外側の動水勾配が著しく上昇。
→ 漏水箇所の流量が増加 → 破堤

粒子レベル ～ 土要素レベル

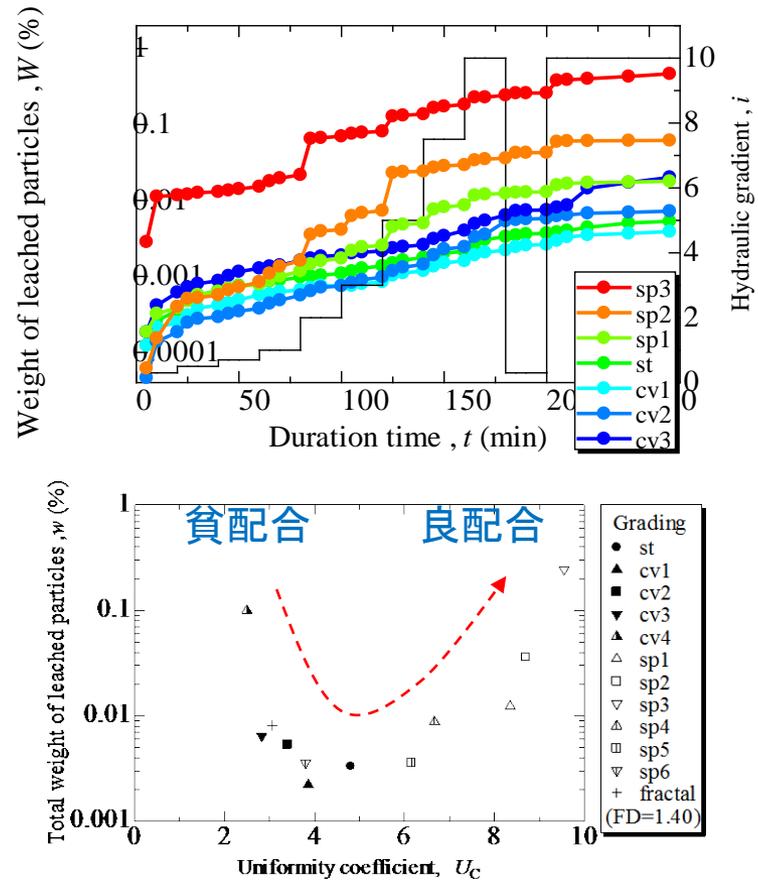
(粒度の大きさ, 広さだけでなく, 形状が重要)

粒径混合分布の流出過程

粒度分布



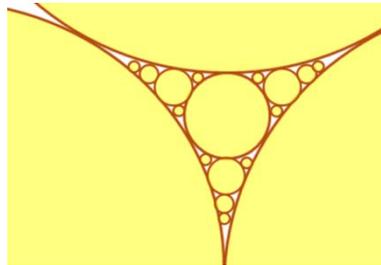
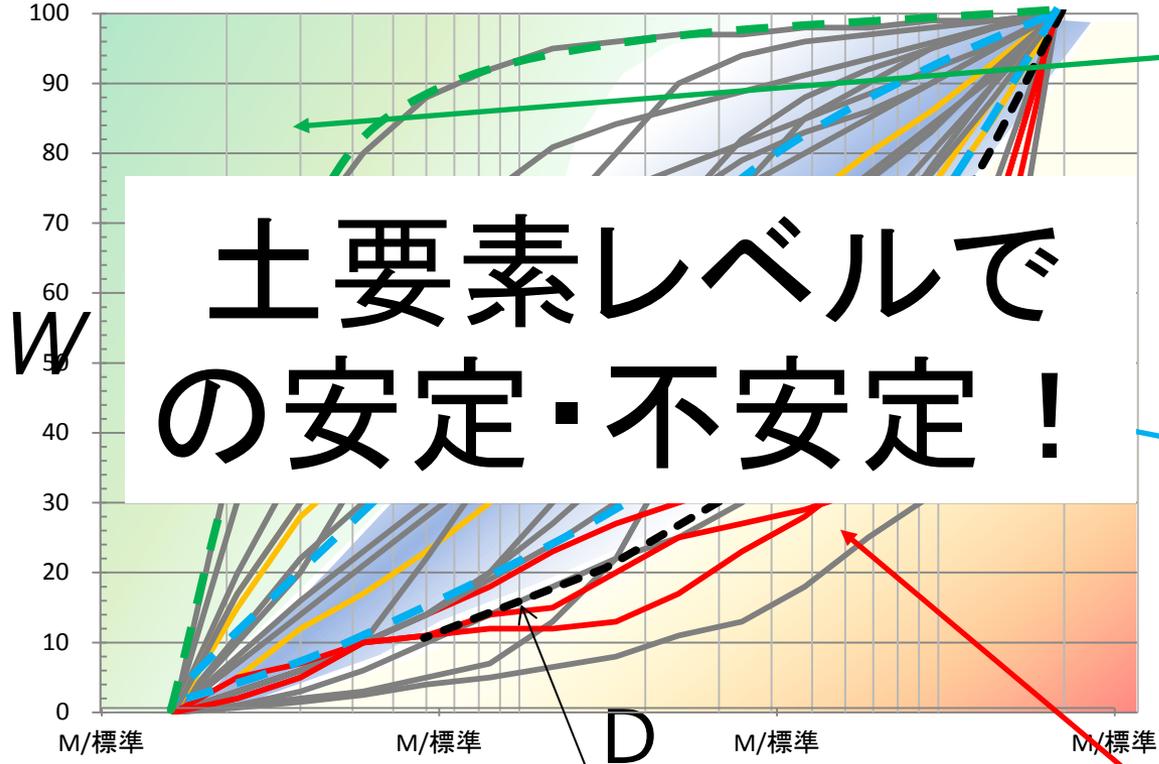
流出量の経時変化



流出量: 階段分布 > 中間粒径過多 \geq 直線分布

直線分布から離れるほど流出量増加, **流出のスパイラル**

内部浸食の判定境界



フラクタル粒度の例
(フラクタル次元 = 1)

(a) 内部浸食なし

粒度がそろっているので内部浸食しない（細粒分が土内部で移動できない）→境界からの流出は注意

(b) 内部浸食に安定な粒度

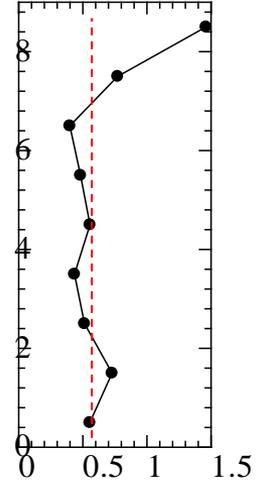
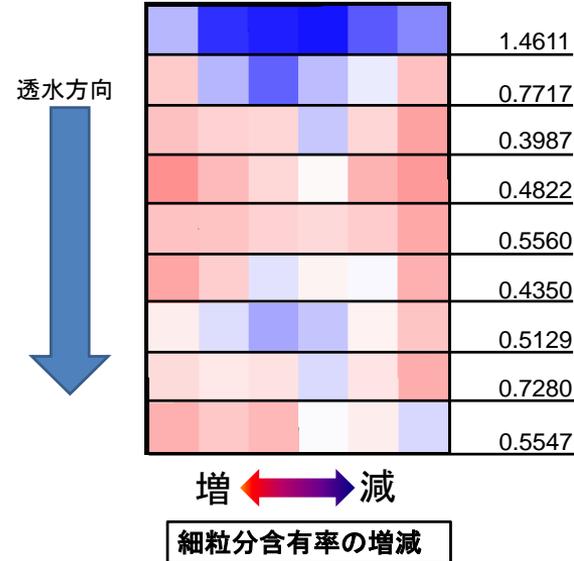
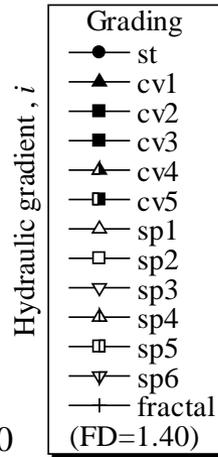
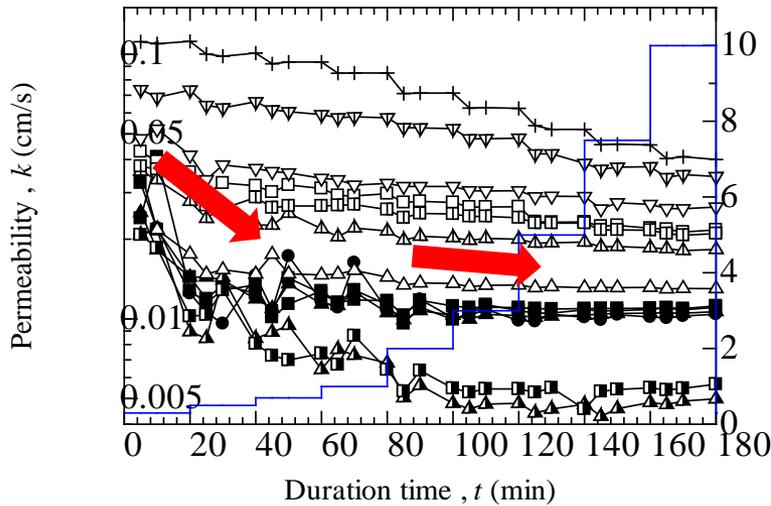
内部浸食量は少なく、連鎖的流出は発生しない

(c) 内部浸食に不安定な粒度

内部浸食量は多く、流出後の粒度形状もより浸食を受けやすい粒度形状⇒浸食の連鎖

流出だけでなく，目詰りも大事？

透水係数



間隙比 e

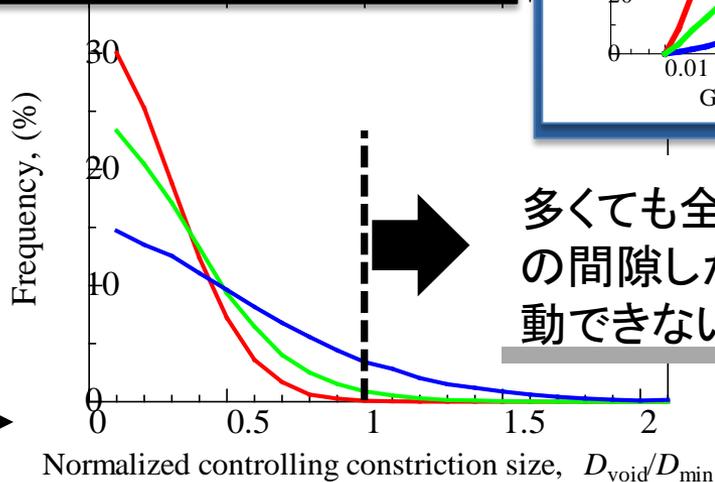
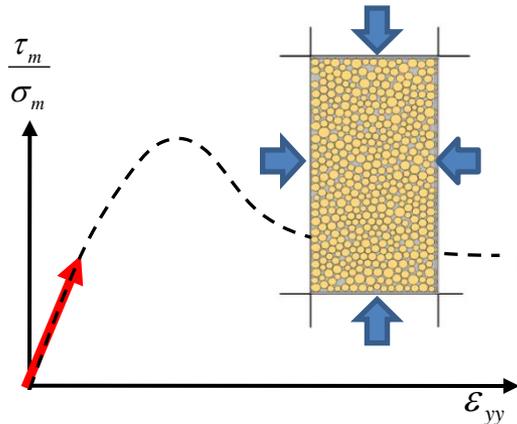
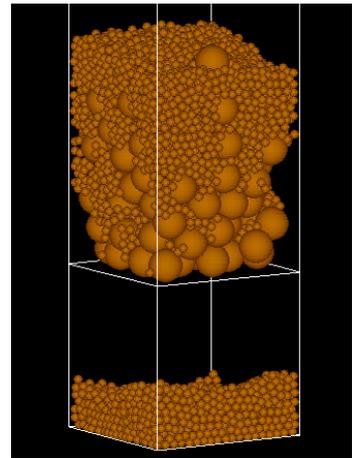
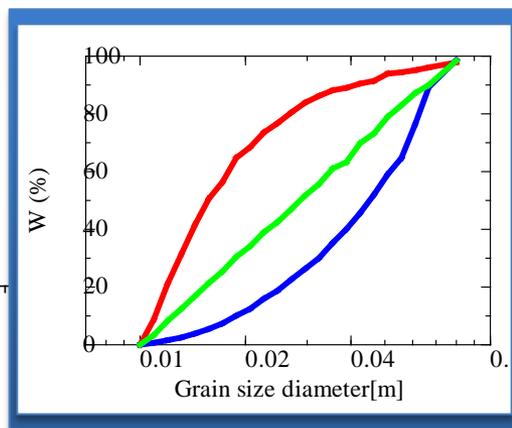
➡ 局所的な目詰りの発生

内部浸食 -土粒子流出による塑性変形を考慮した解析-

数値解析

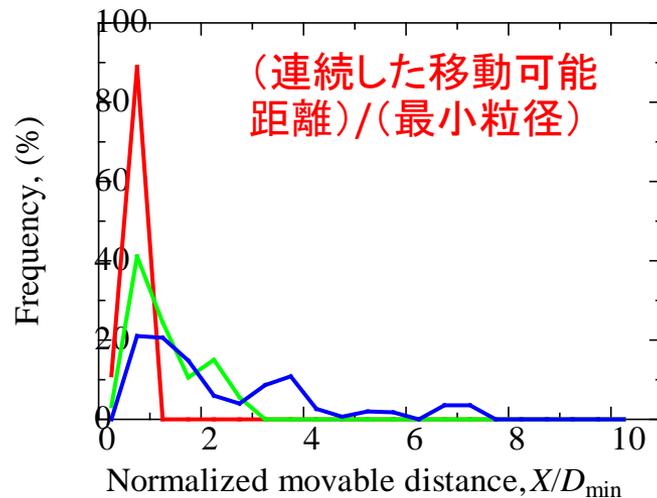
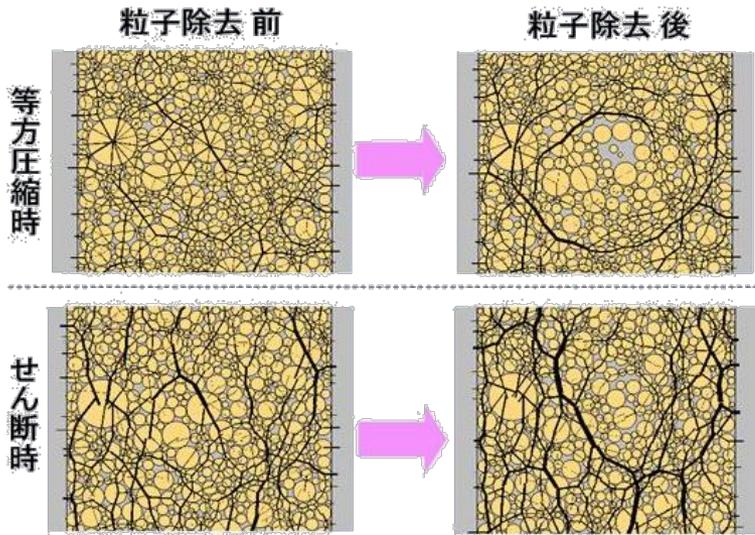
個別要素法によるアプローチ

細粒分が粒状体内を移動可能な間隙径の頻度分布



多くても全体の5%程度の間隙しか細粒分は移動できない。

(間隙径) / (最小粒径)



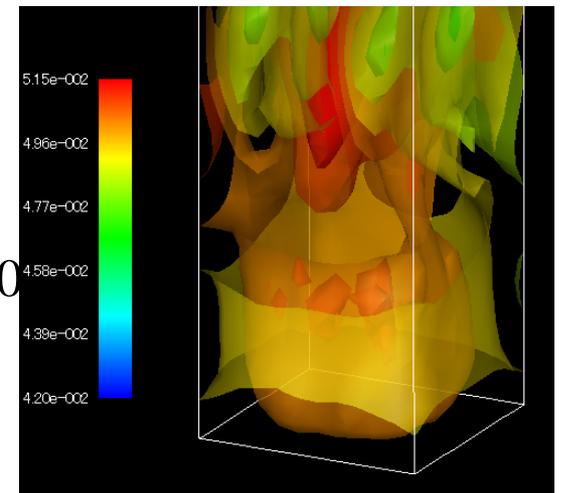
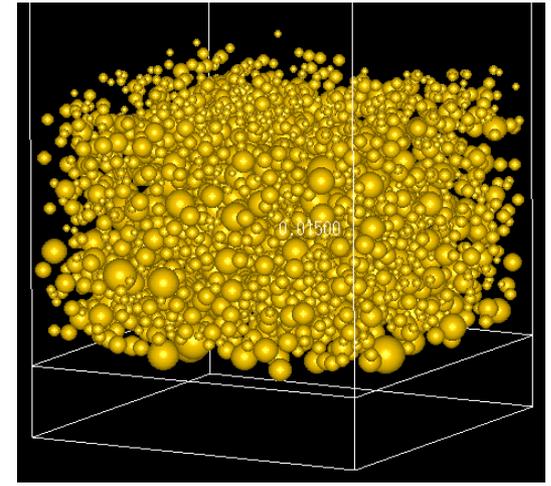
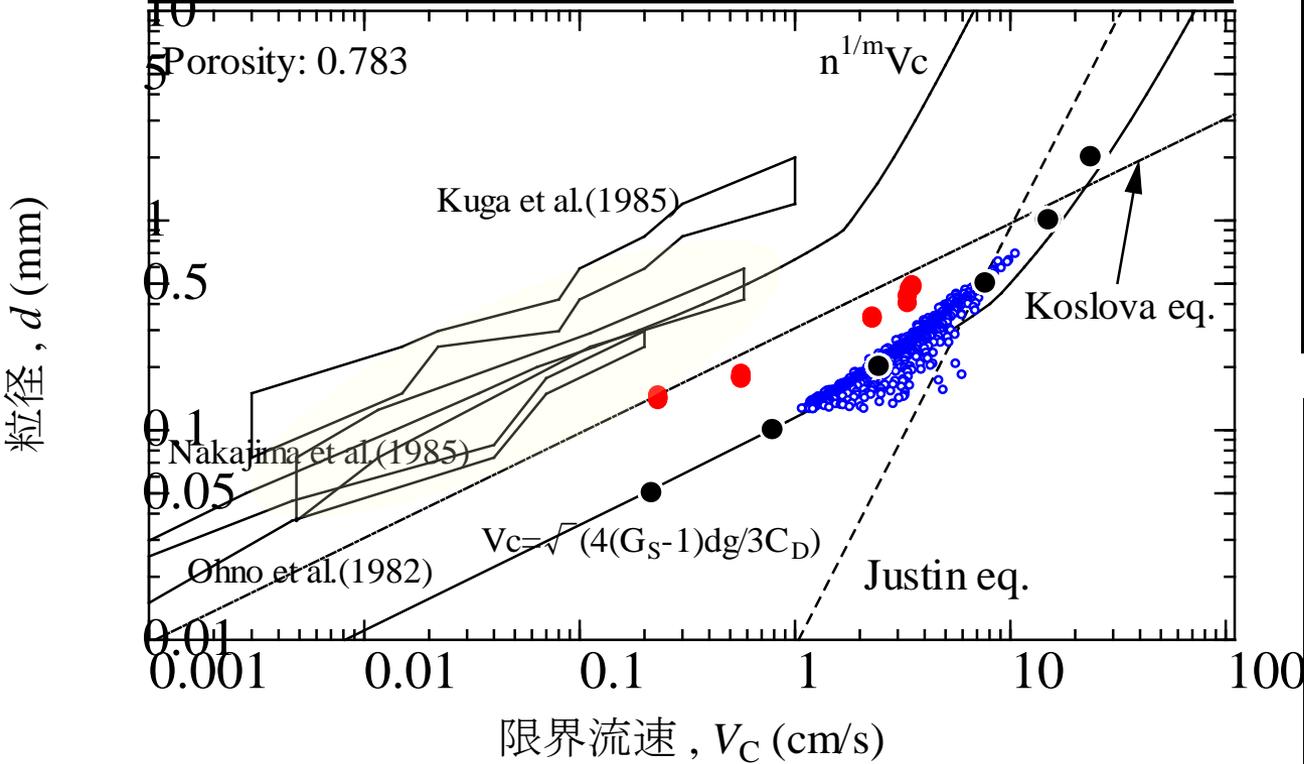
(連続した移動可能距離) / (最小粒径)

間隙比だけでなく、「繋がり」の拘束条件が重要！

粒子の限界流速

DEM + CFD

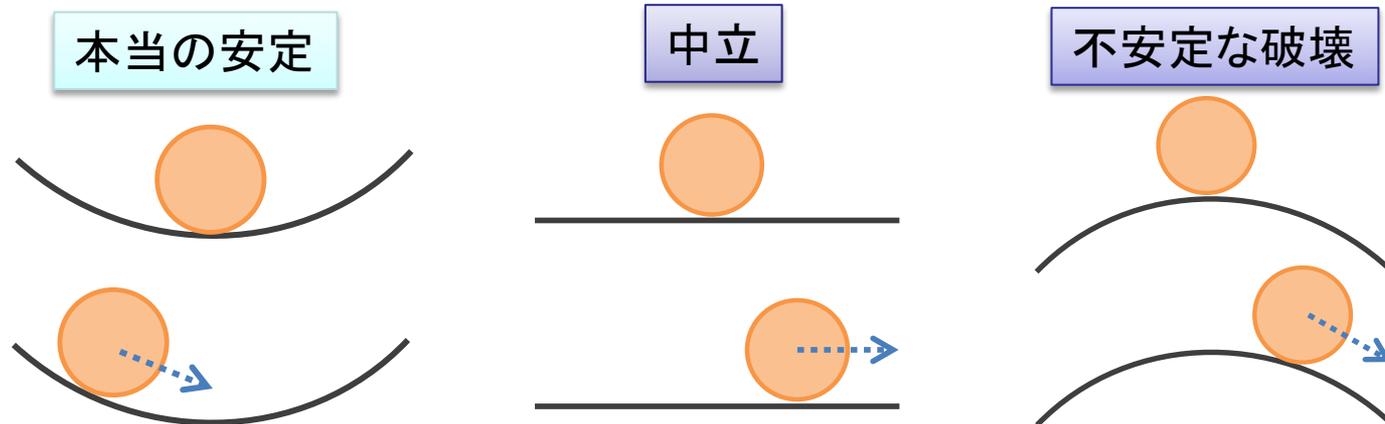
- Numerical solution and its grading shape
- Lognormal distribution ($R_D=8.0$, 3083 particles, boiling)
 - Lognormal distribution ($R_D=8.0$, 3083 particles, settling)
 - Unitary distribution (200 particles, Settling)



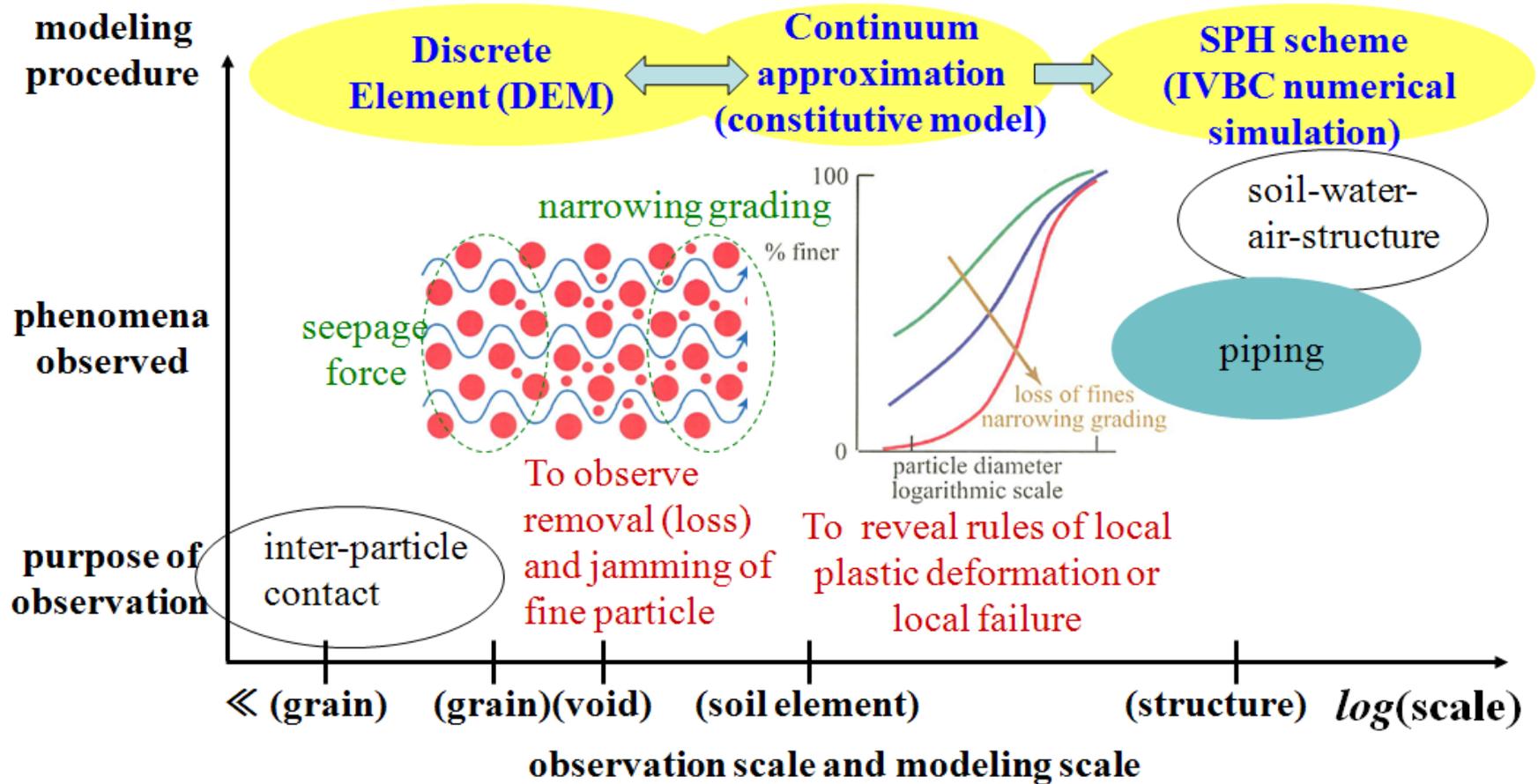
引用: 山田謹吾, 杉井俊夫, 宇野尚雄; 粒子群の干渉効果を考慮した限界流速式の提案, 土木学会第44回年次学術講演会, pp.1050-1051, 1989

土要素レベル ～ 構造体要素

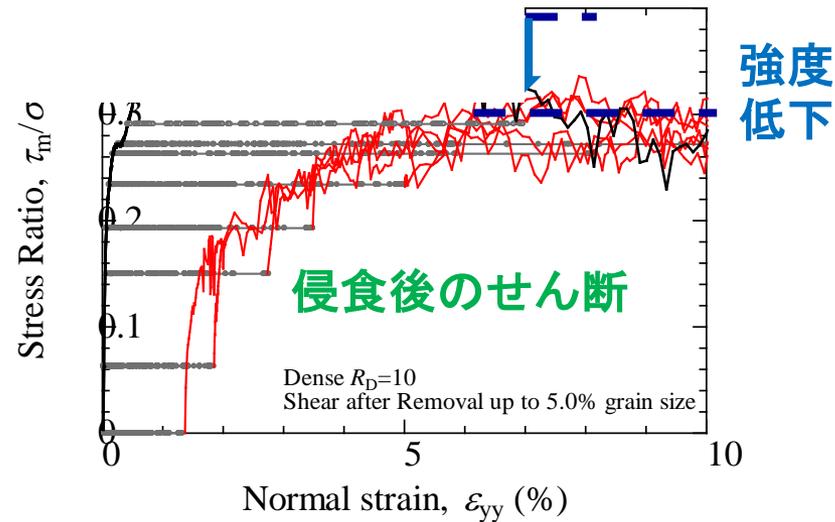
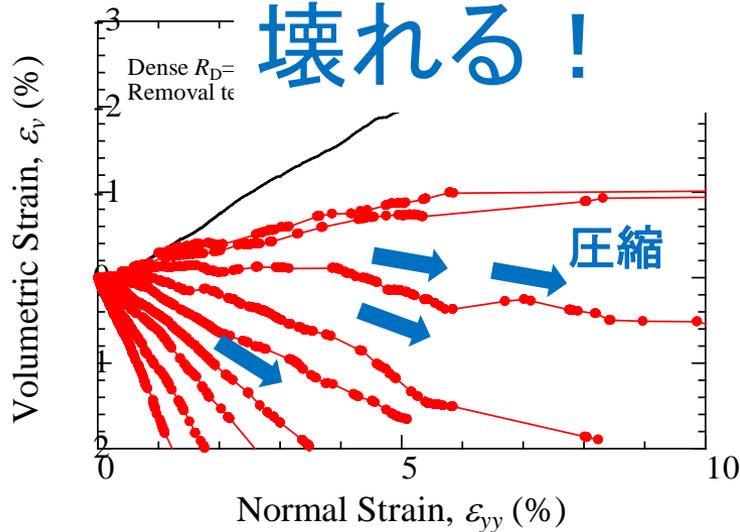
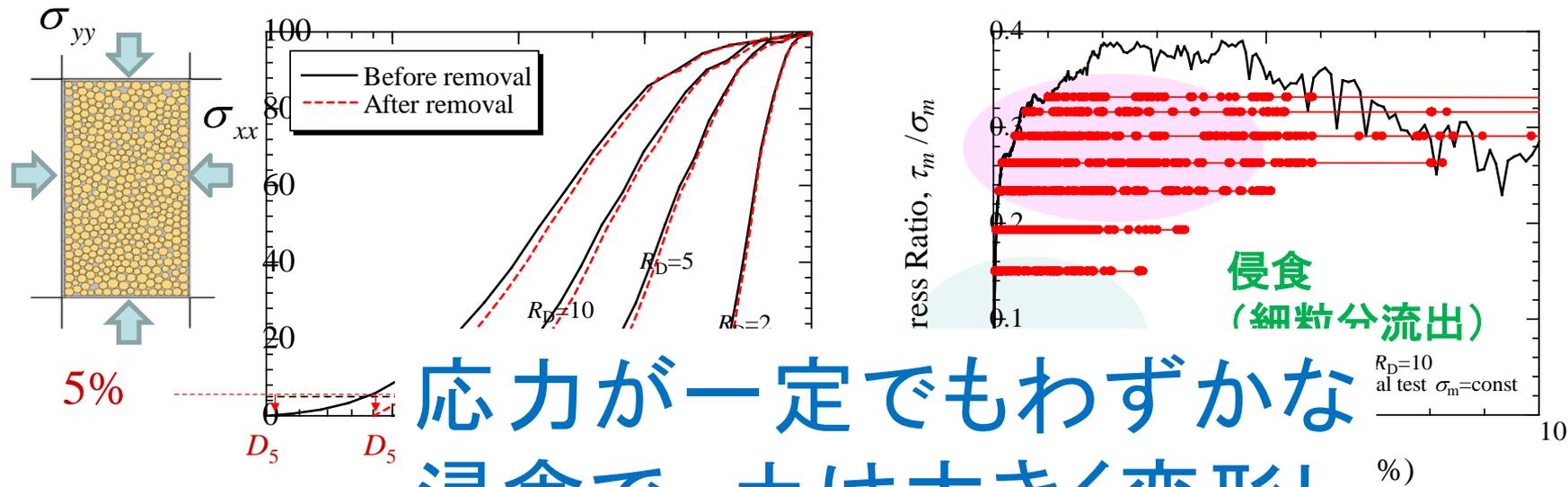
(安定, 不安定)



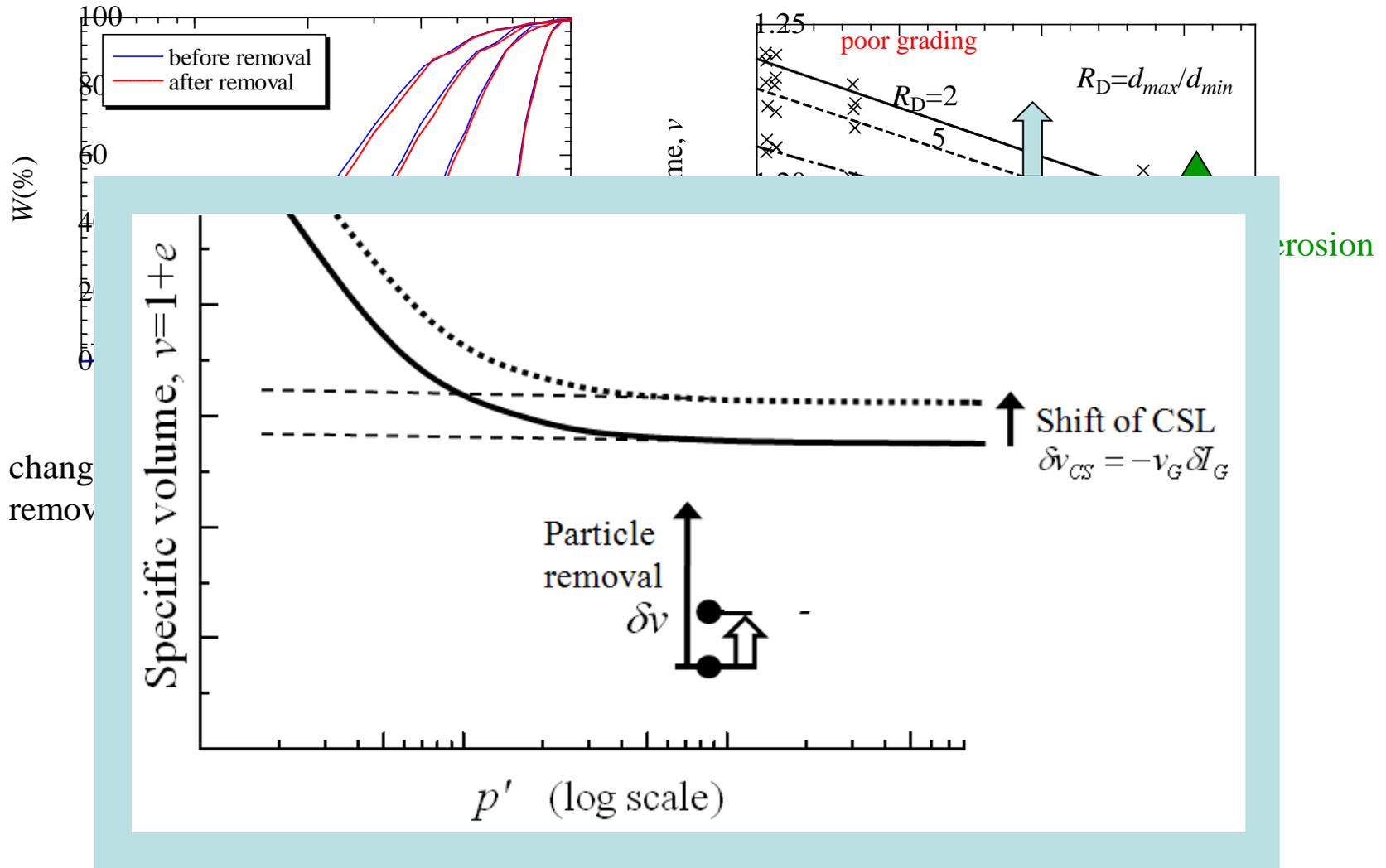
A trial study to solve internal erosion in multi-scale and multi-phase



内部侵食に伴う変形・破壊挙動



Modelling mechanical erosion soil mechanics with changing grading



D. M. Wood & K. Maeda: *Acta Geotechnica* (2007);

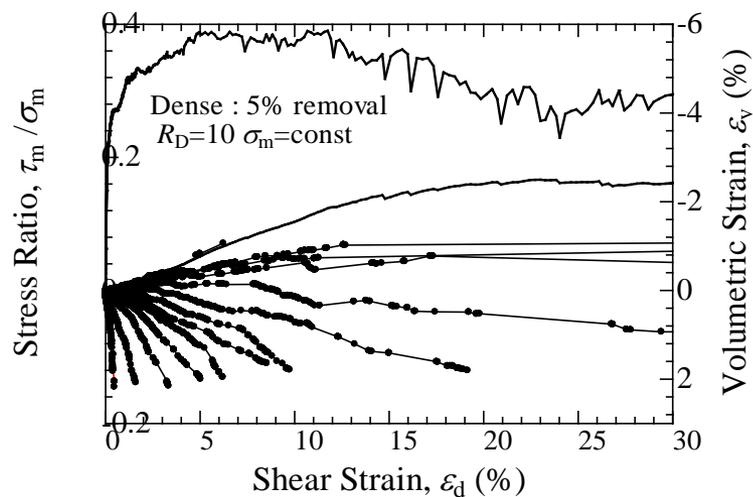
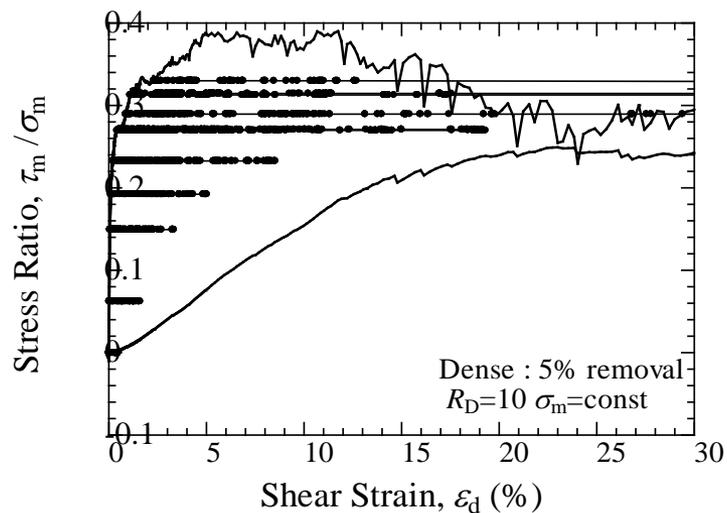
D. M. Wood, K. Maeda & E. Nukudani : *Geotechnique*, 60 (6) (2010)

From previous 3 results, we made the continuum model.

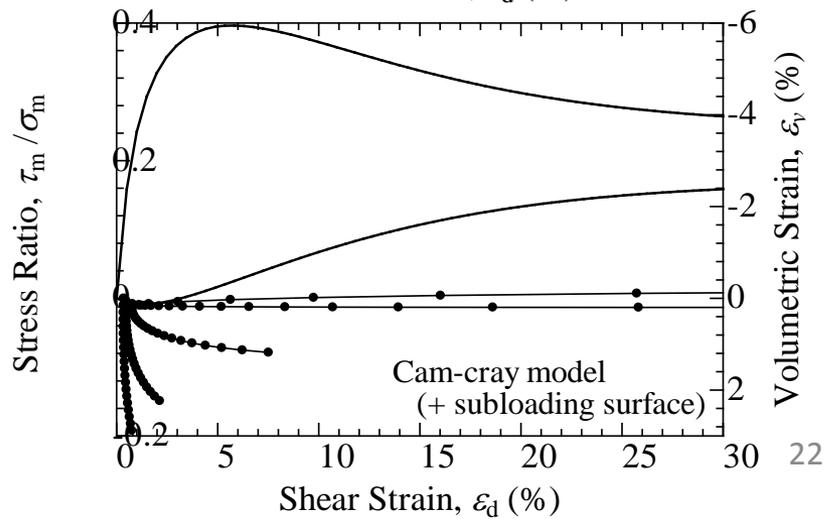
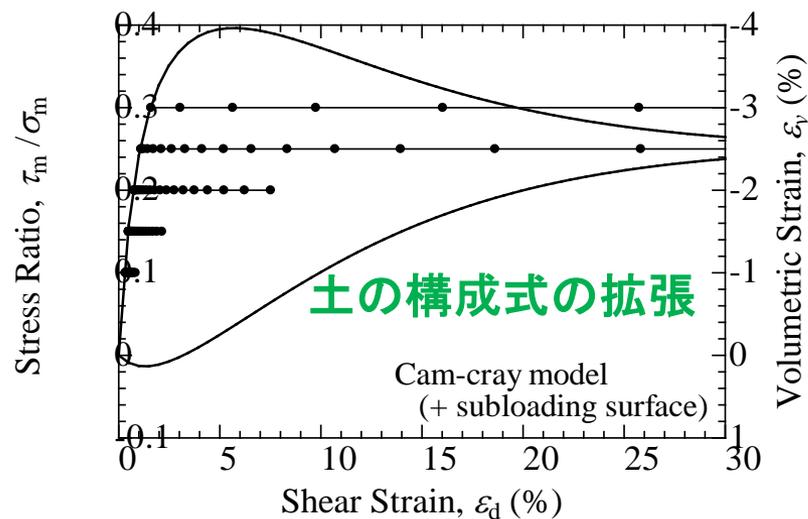
Performance of proposed model

DEM simulation results

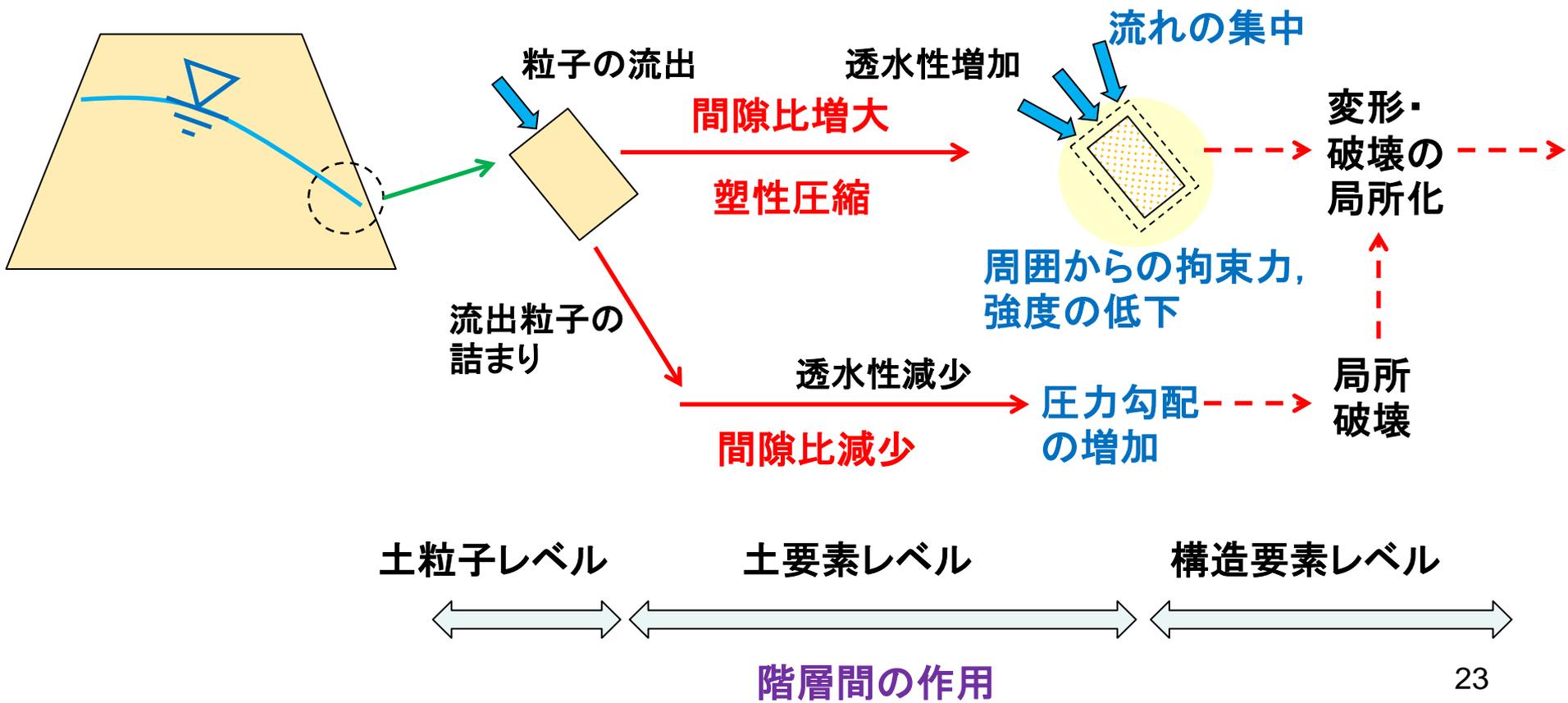
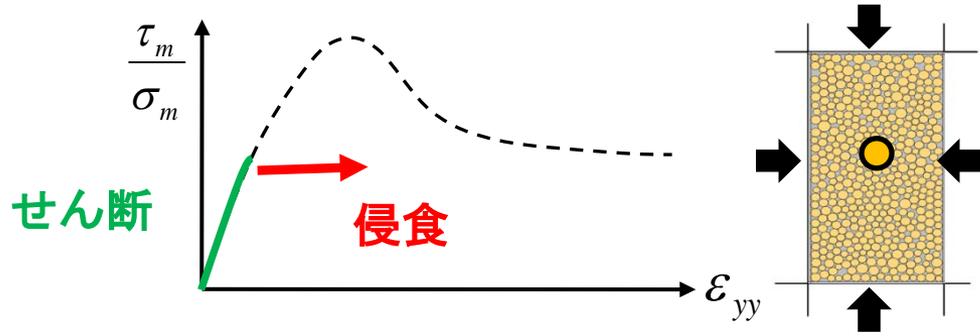
DEMによる数値実験



Proposed continuum model Including erosion effect



侵食による構造要素の局所変形の伝播



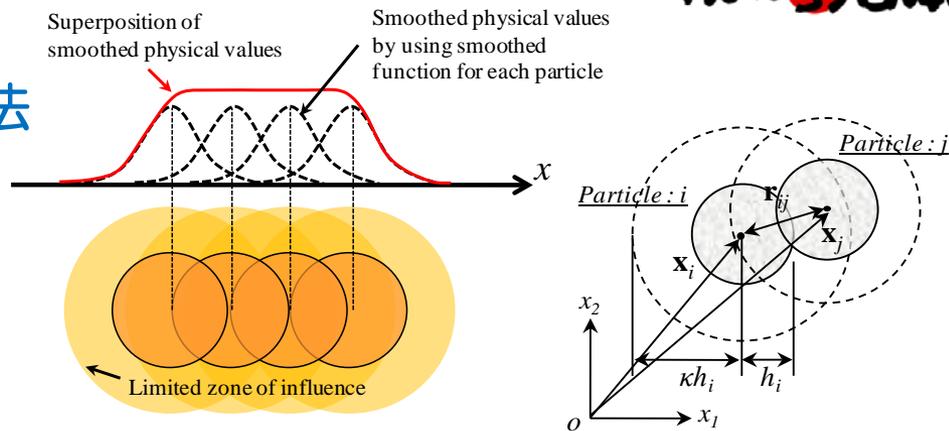
土粒子レベル～
構造体要素 ～ 構造体レベル

数値解析手法の概要

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法

物理量を有した質点において(物理的), 補間点(数学的)を持ち, 場の連続性を表現している.

メッシュレスの性質があり, 流動・崩壊等の第変形問題や相変化問題への適応が可能である.

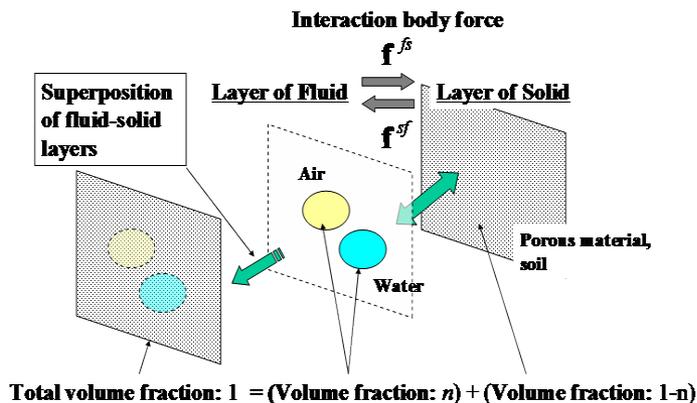


$$\langle f(\mathbf{x}) \rangle = \int W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) f(\mathbf{x}') d\mathbf{x}'$$

土水連成解析：相の重ね合わせ

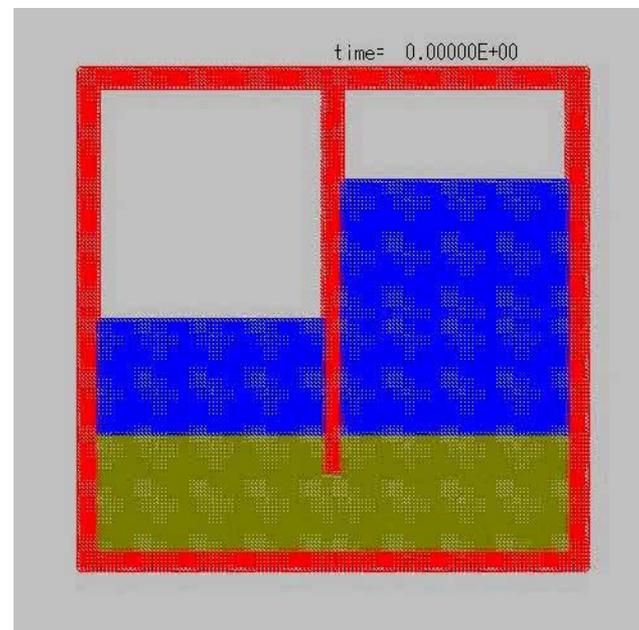
混合体理論

地盤を土粒子骨格と間隙流体からなる混合体と考え, Darcy則を適用したBiotの混合体理論を適用し, 土水連成解析を行っている.



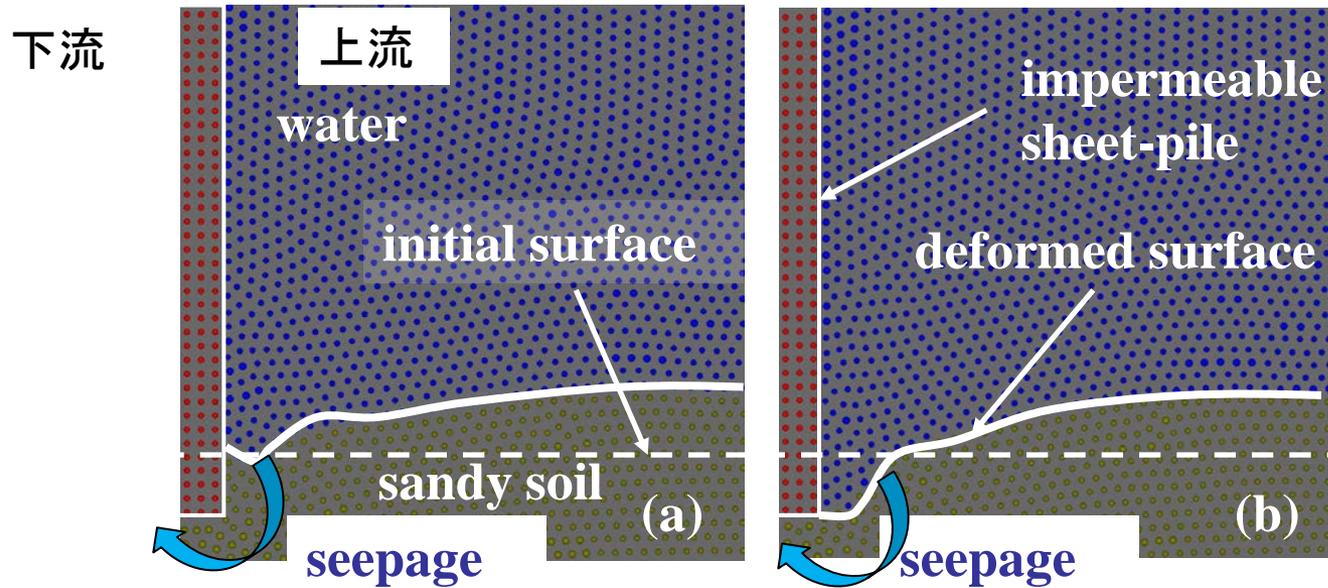
- n : 間隙率
- k : 多孔質体の透水係数
- g : 重力加速度
- v^s : 固体の速度
- ρ_f : 流体密度
- v^f : 流体の速度

$$\mathbf{f}^{sf} = n^2 \frac{\rho_f g}{k} (\mathbf{v}^s - \mathbf{v}^f)$$

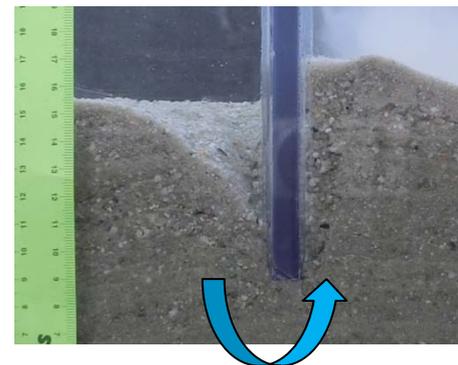
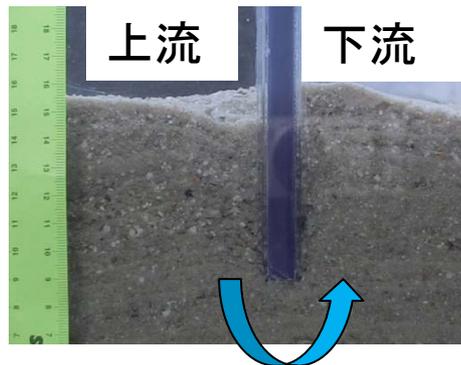


矢板周りの浸透解析

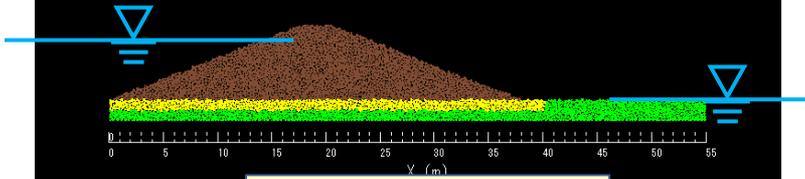
内部浸食の影響を入れると、局所的な変形に



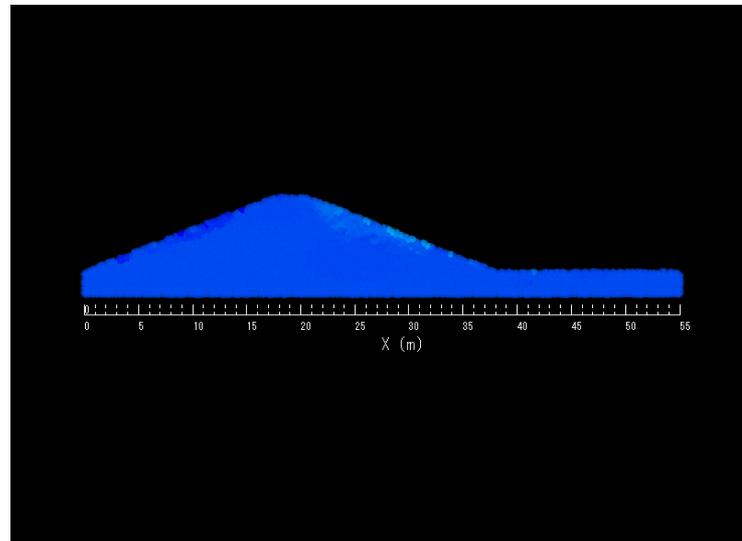
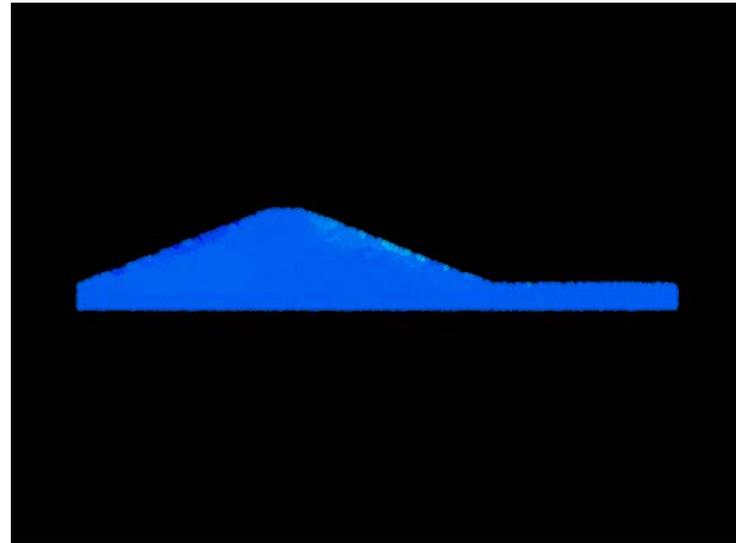
(a) 内部浸食なし; (b) 内部浸食あり



constant water level

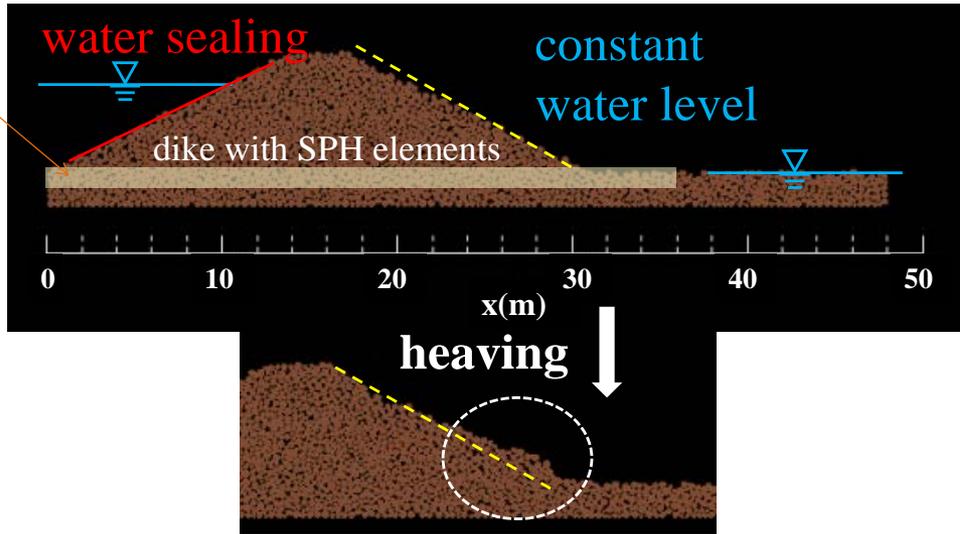


砂礫の透水層



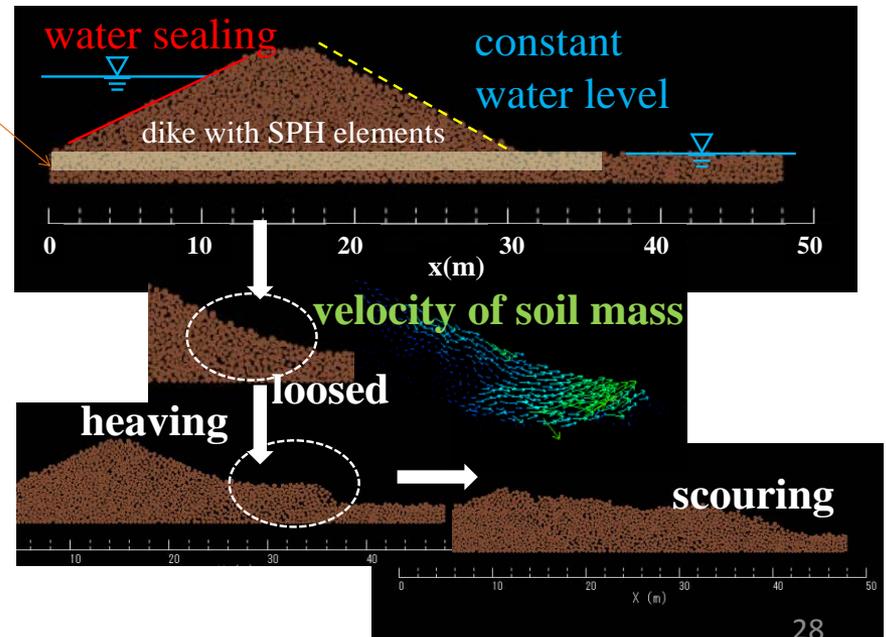
内部侵食の効果なし

砂礫の透
水層



内部侵食の効果あり

砂礫の透
水層



進行性破壊の理解に向けて

- パイピングの進行には, 掃流(表面洗掘)・表面洗掘と内部侵食と目詰まり(圧力勾配の変動)が必要?
- 破壊の進行には, 土粒子～土要素～構造要素～構造体(堤防)のループ作用が必要?
- 階層間を結ぶ力学モデル, 数学モデルの必要性
土粒子～土要素～構造要素～構造体(堤防)～?
- (地)粒度分布の形状を軽視していた? 乱流は?
- (地)ゆるみと波長・波形を工夫した探査
- (水)土粒子レベル(極表面)－水の相互作用式
OK! ? 式は多いが, 意外と多い実験パラメータ!!
- 破壊制御
航空機の世界には想定外がない(壊れ方を決めている)
破壊力学では, 脆性破壊, 延性破壊, 強度の速度依存が明瞭

