

パイピングの発生条件 (堤体－基礎地盤－水位波形)

研究メンバー

前田健一

名古屋工業大学・教授

岡村未対

愛媛大学・教授

泉典洋

北海道大学・教授

渦岡良介

徳島大学・教授

高橋章浩

東京工業大学・教授

新清晃


応用地質株式会社・東京支社技術部・部長代理

小型模型実験：砂質土堤体、透水性基盤層；単一層

基盤層：豊浦砂(飽和)

堤体：豊浦砂（含水比13%）

8倍速

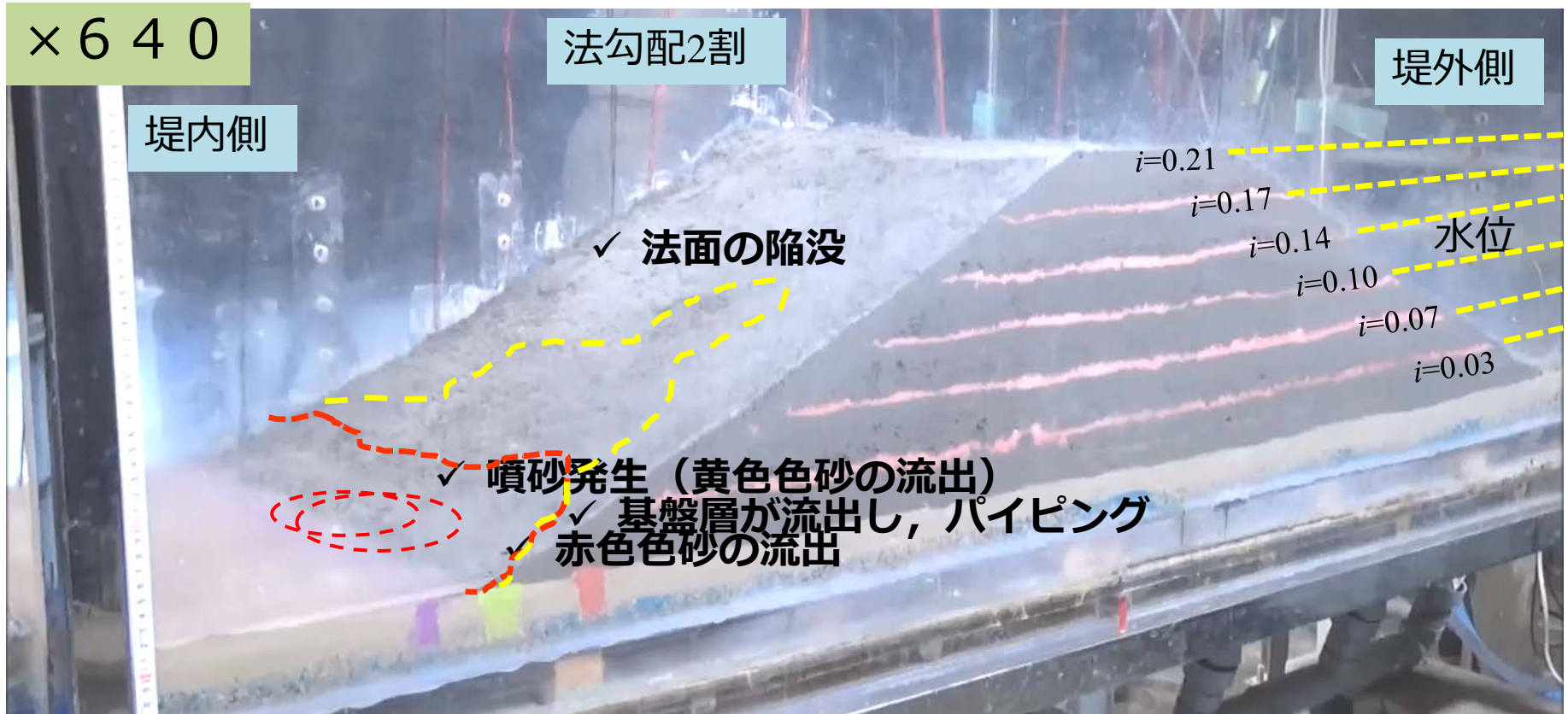


法尻が広範囲で
泥濁化
すべり

越流30秒前（76分46秒）から

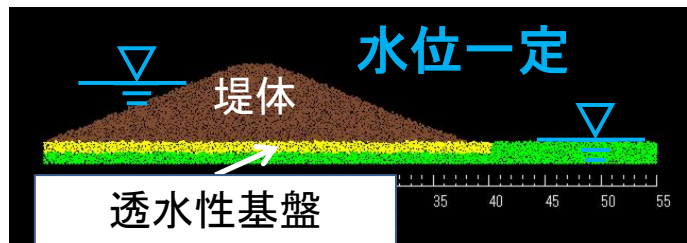
- 砂質土堤体が、基盤層の空洞を塞ぎ空洞の進行が起きにくい

小型模型実験：粘性土堤体；2割勾配、透水性基礎地盤；複層



- ① $i=0.06$ (噴砂発生) 基礎層上層が噴出
- ② 堤内側に向けボイリングが継続的に発生
- ③ 堤内側の局所的な流動変形
- ④ 粘性土の堤体下部に一定水位下でもルーフィングによる空洞が進展
- ⑤ 堤外側での変状、亀裂、河川水の進入
- ⑥ $i=0.20$ 法面の陥没

粒子法による堤防の変状・破壊解析：浸透破壊モードとその発現条件の整理



解析条件

透水性基盤～堤体～外力を一体で整理

⇒ 破壊モードが変化

⇒ 単なる破壊パターン分けでなく、点検・対策選定に効果的な発現条件の整理

今後は、三次元化と破壊確率算定へ、変状開始箇所と弱点の関係など

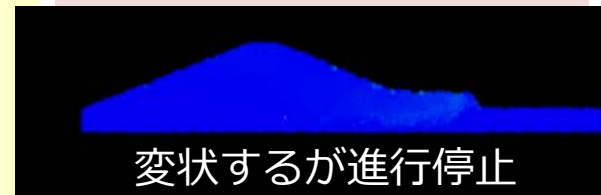
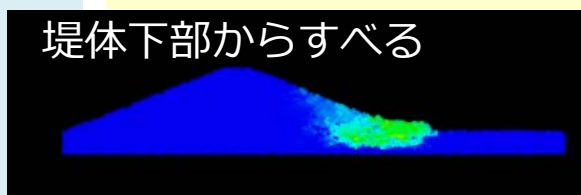
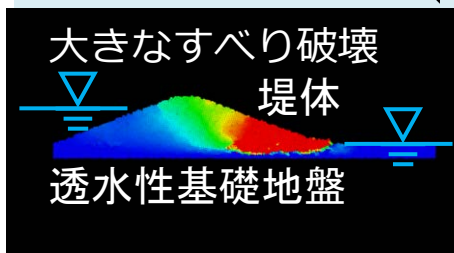
堤体強度

低

中

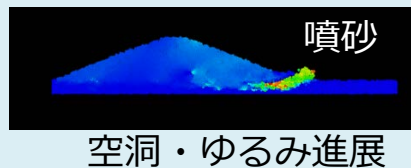
高

単一透水性基盤

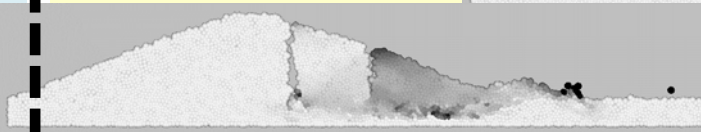


堤体下の水圧上昇・液状化
(せん断強さ、支持力の低下)

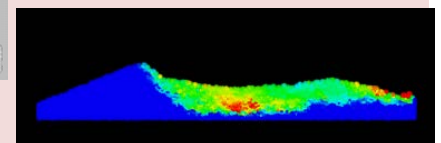
複層透水性基盤



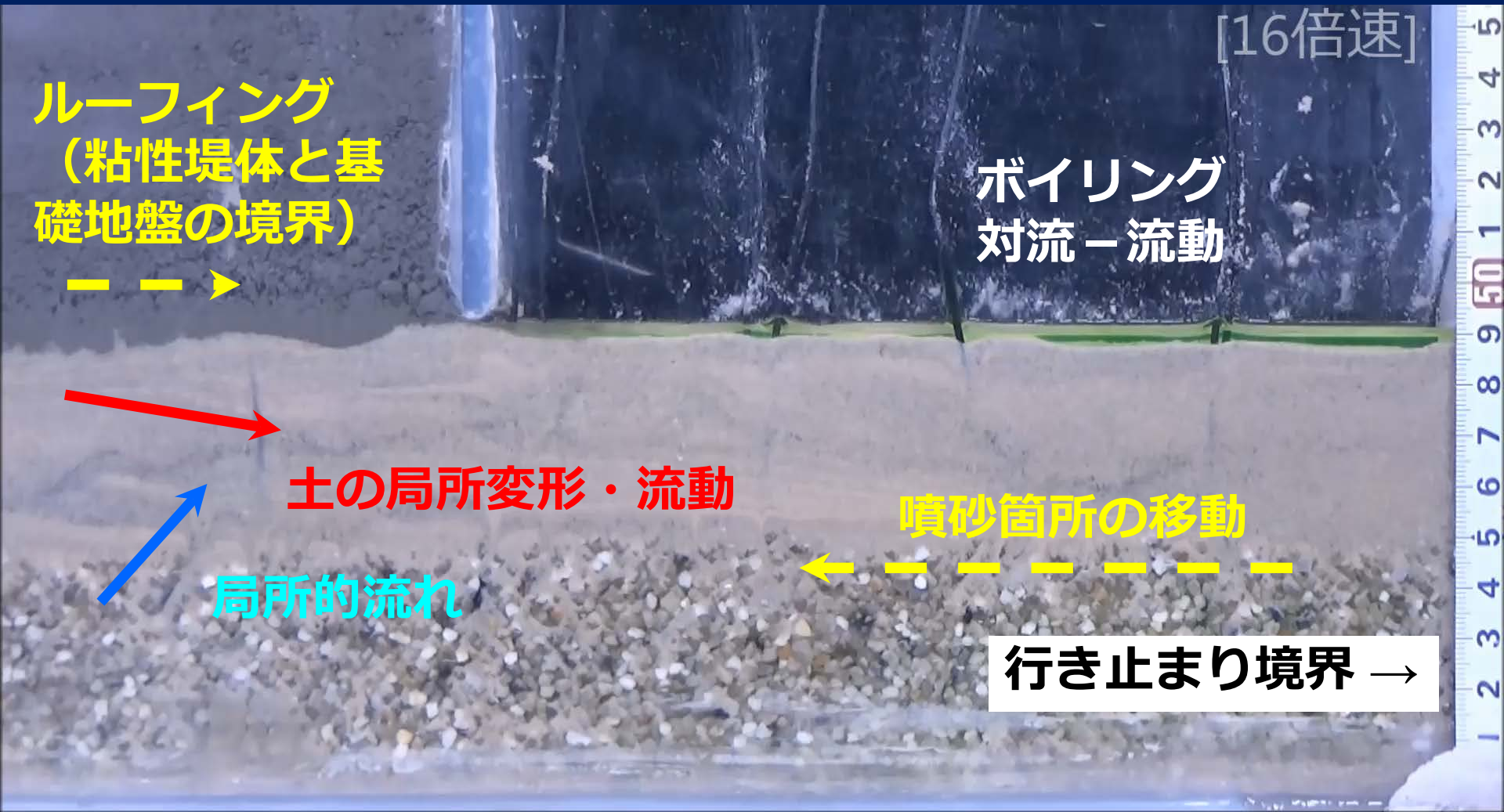
堤体下の局所的液状化
(支持力低下、流動)



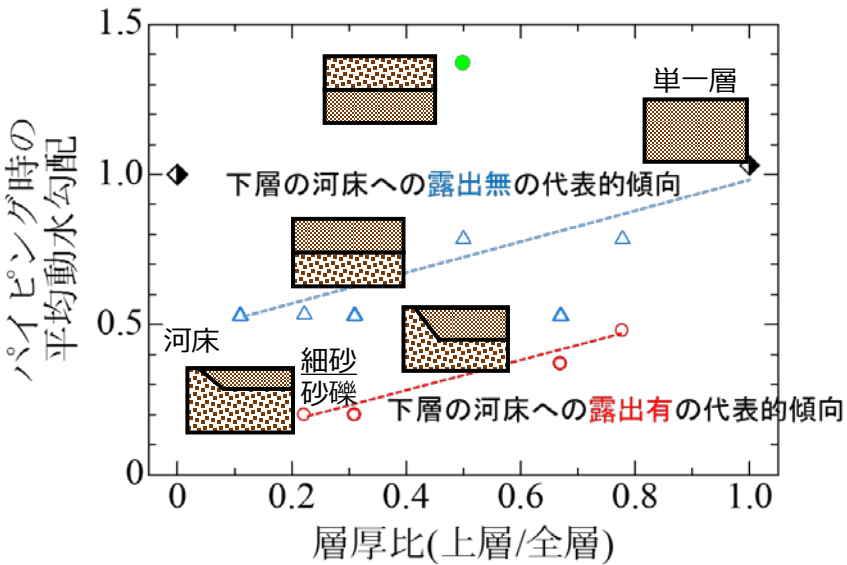
すべりがパイピングを誘導



簡易パイピング実験（堤体の変形をある程度拘束） 噴砂動態（1）：流れと変形の局所化



基礎地盤の土層分布によるパイピングの危険度分類



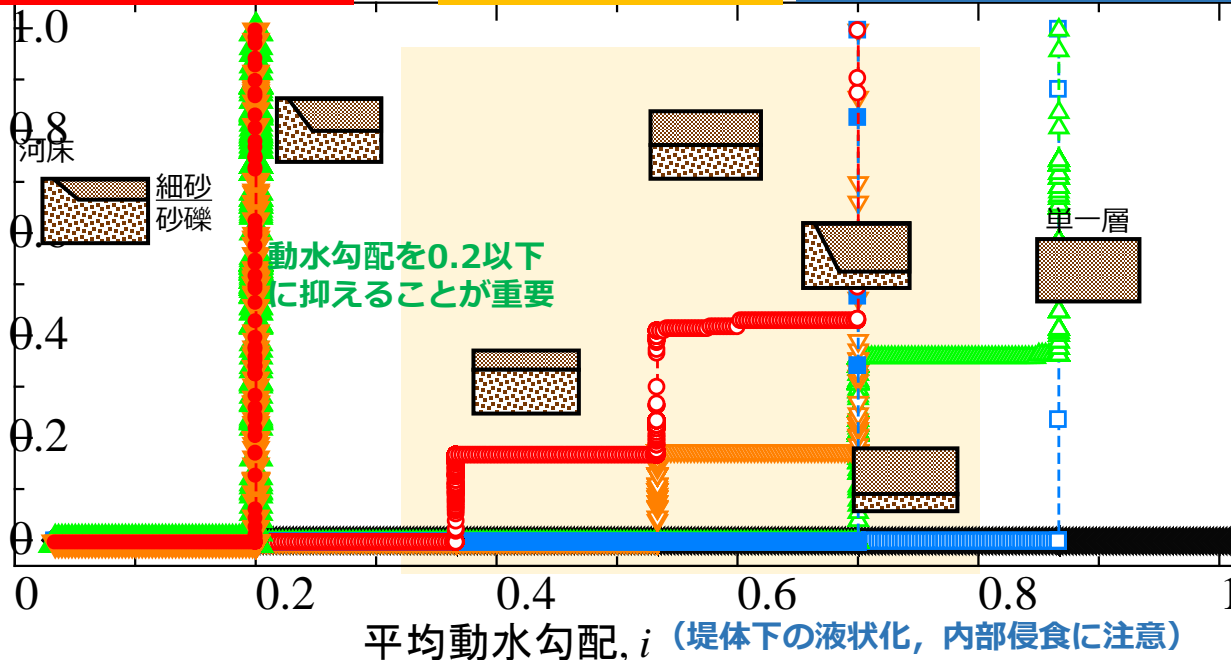
- 透水性基盤内の複層性（流速比），細砂上層厚が半分以下，行き止まり地盤，下層砂礫層への流入境界⇒パイピングリスクが高い（パイピング条件は限定的）。
- 上層細砂が厚い場合もしくは単一層の場合には，脆弱ではなくなる
- 土層分布+水防：余裕高を使える条件

最も危険⇒要対策

水防活動で対応

パイピングに至り難い

パイピング進行度

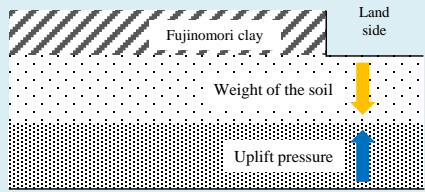


- 砂礫層が河床に繋がっておらず，層厚比が0.5程度あれば，初期変状があり破壊までに時間を要する⇒水位低下もしくは，水防活動で決壊を抑制

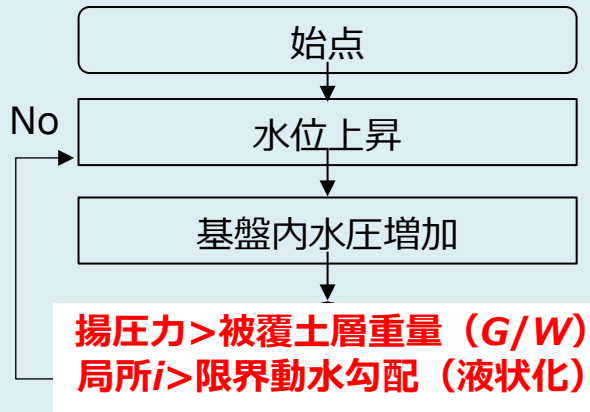
- 現行のパイピング照査でアウトでも，外力と土層構造を一体に考えれば破壊しない場合がある

被覆土有りの場合のパイピングフローチャート：3段階 発端～進展～破壊

第一段階 漏水・噴砂の発生



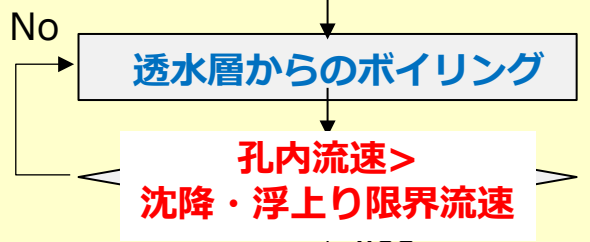
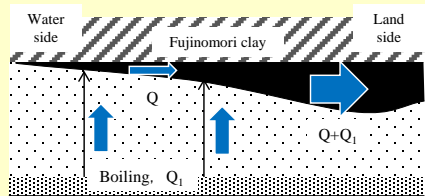
- ✓ 従来通り、 G/W
- ✓ 堤内不陸・高低、堤外地層
- ✓ 層構成を大まかに掴む



揚圧力 > 被覆土層重量 (G/W)
局所 $i >$ 限界動水勾配 (液状化)

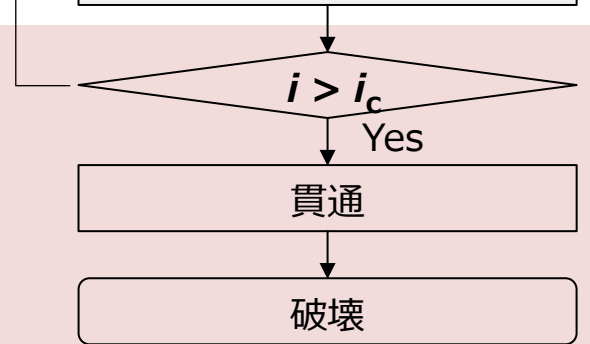
Yes
三次元集水流れ・噴砂の発生

第二段階 空洞の進展



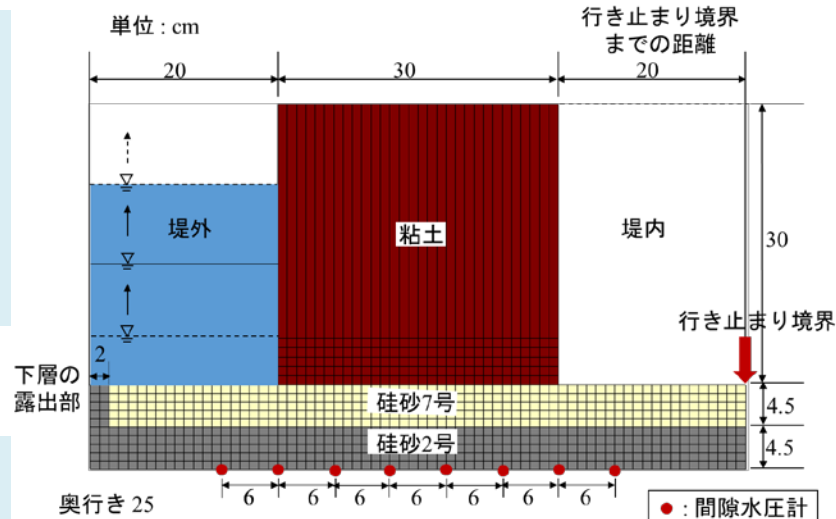
孔内流速 >
沈降・浮上り限界流速

Yes
空洞の進行



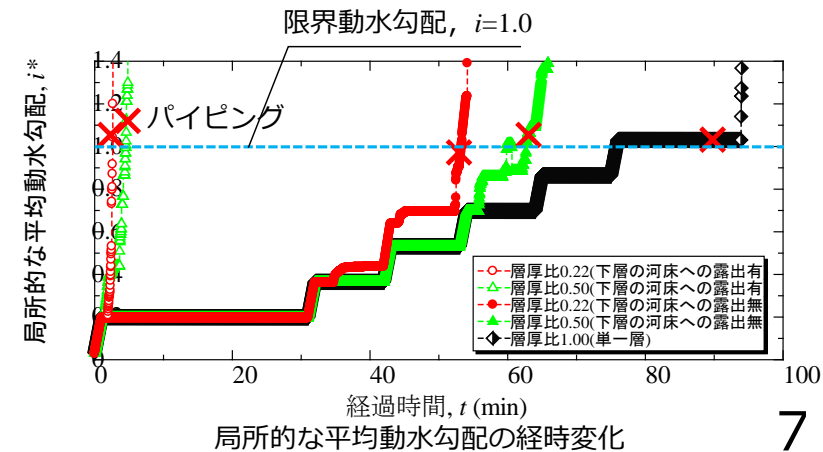
$i > i_c$
Yes

貫通
破壊



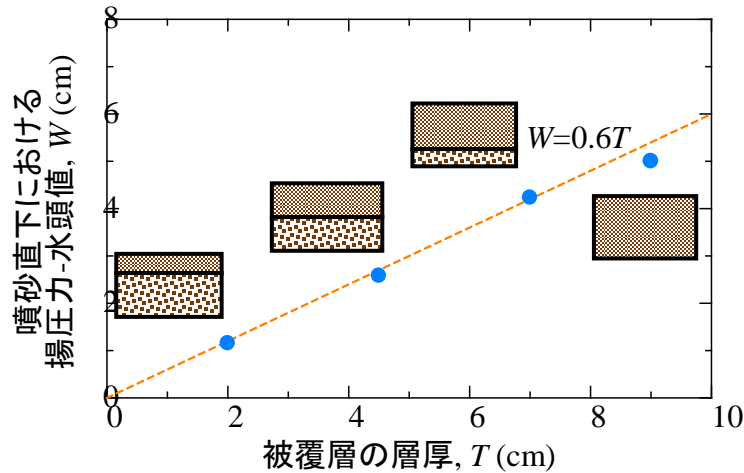
“流入境界（下層の露出）”

“行き止まり境界”

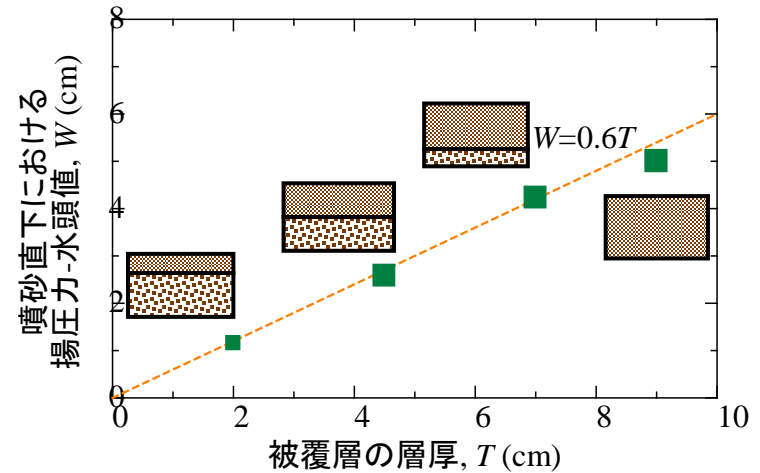


噴砂発生 (G/W, 局所動水勾配で予測可能) 模型実験結果と飽和浸透解析結果の比較

模型実験結果：噴砂発生時の局所動水勾配

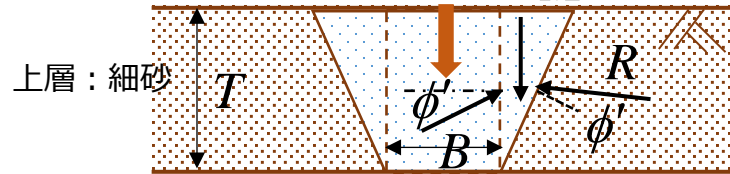


3次元飽和浸透流解析結果 (実験と同時刻)



- 複数個の噴砂発生までは模型実験と浸透流解析が一致
- 噴砂発生の予測は通常の飽和浸透解析を用いることで十分に予測
- (被覆土層厚) ÷ (揚圧力) = 1.7 (=1/0.6)

盤膨れの極限解析 $G = \gamma B T M$



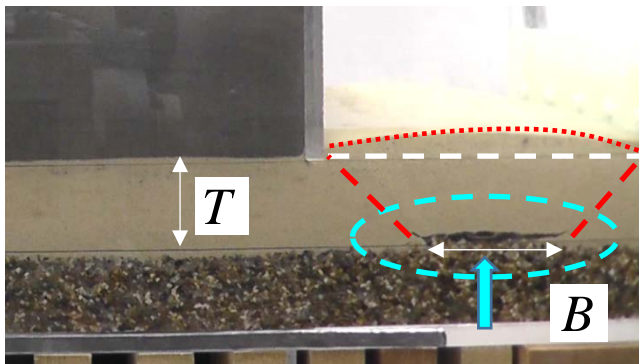
内部摩擦角のみ考慮すると ($c=0$)

噴砂発生条件に地盤のせん断強度 (締め固めの効果) が考慮される

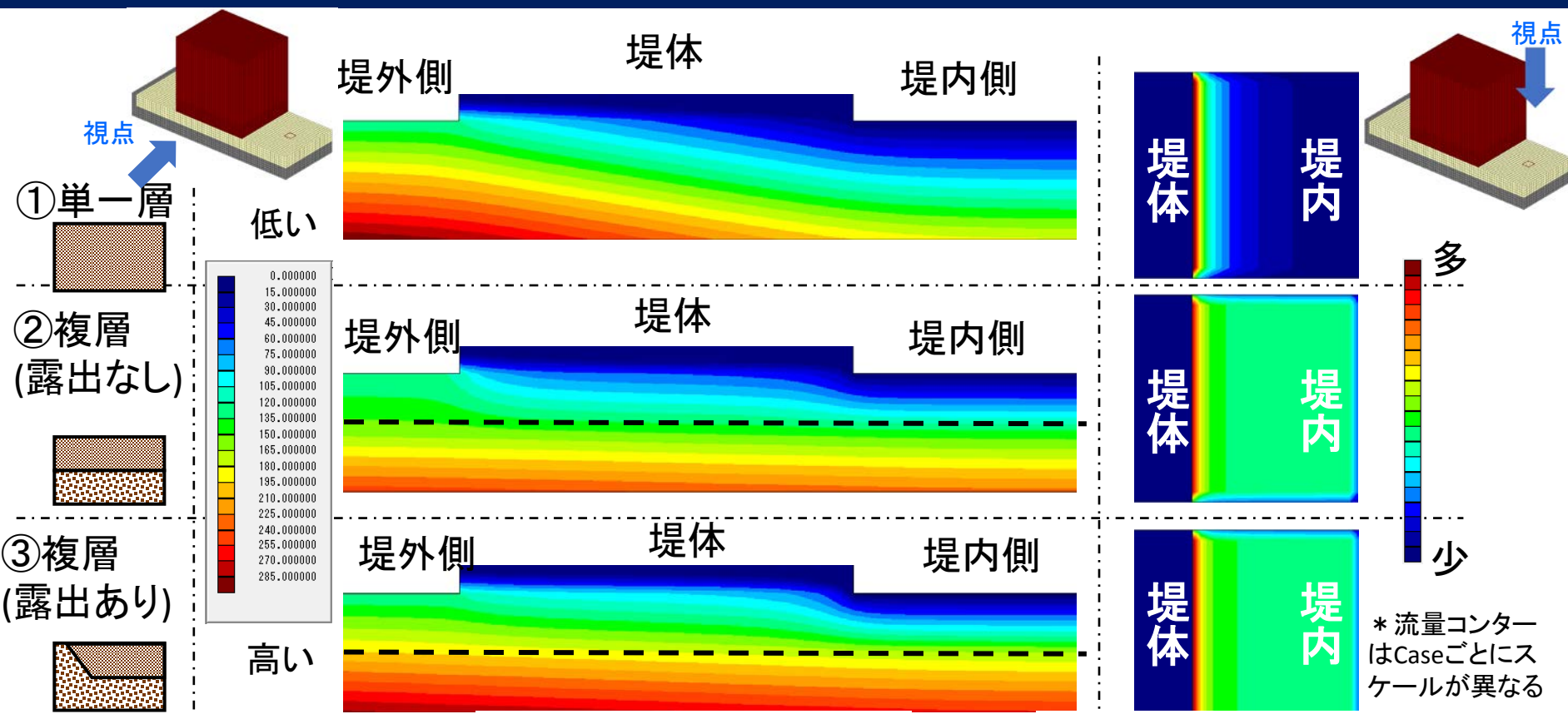
水圧 $W = uB$

$$\frac{G_p}{W} = \frac{G}{W} + \frac{\gamma' \cdot T^2 \cdot \sin 2\phi'}{W}$$

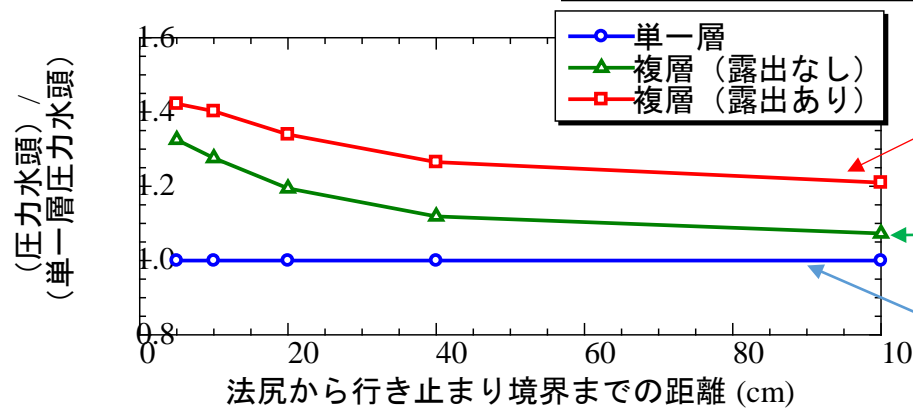
Bは何で決まる?



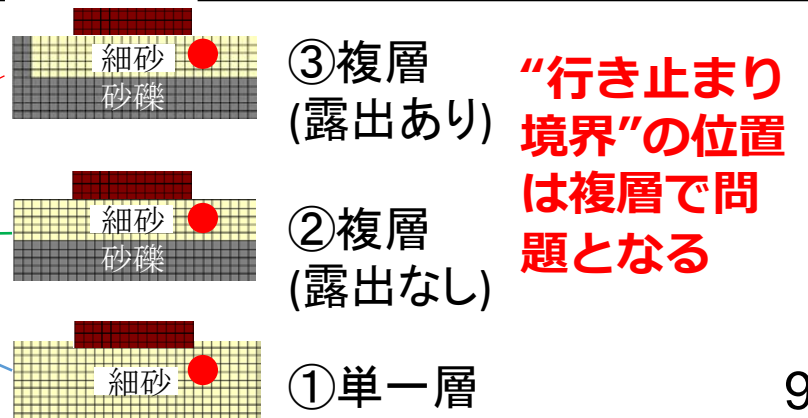
圧力水頭・漏水量分布(透水基礎地盤構成の違い)



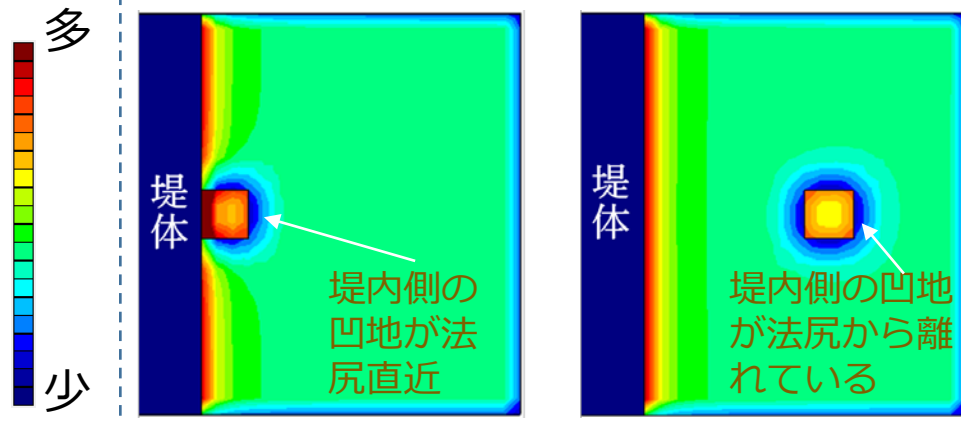
圧力分布(鉛直断面)



漏水量分布(平面:堤内側)



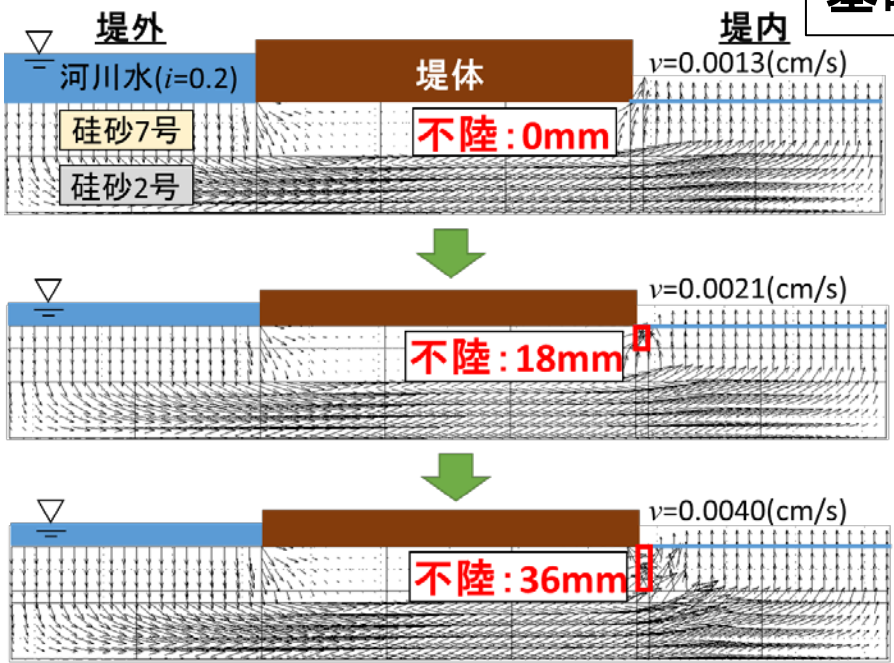
3次元集水・局所化：堤内地の高低差から鉛直噴砂孔へ



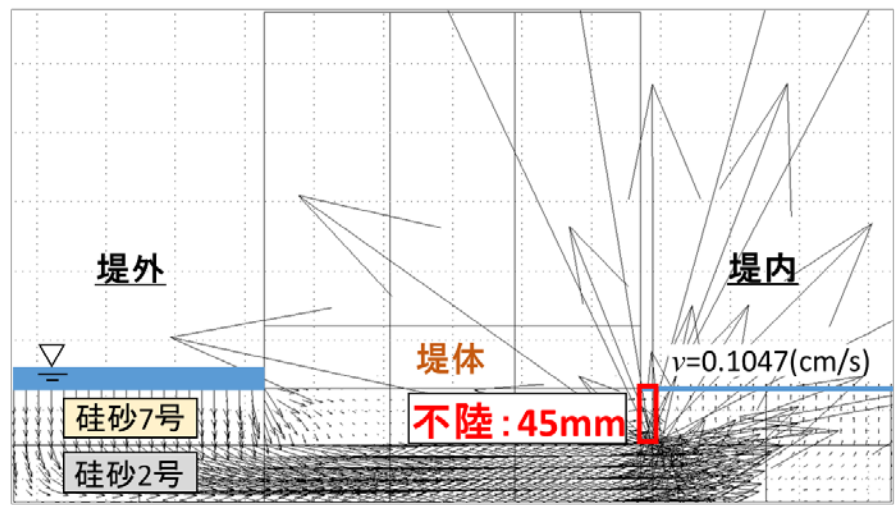
→複層は法尻から離れた地点で噴砂が発生する可能性が高い
→実スケールで30cmの低い箇所があると、ダルシー浸透の約**5倍**程度の流速発生

複層基礎地盤：漏水量（平面図）

基礎地盤の流速ベクトル ($i=0.2$; 断面図)

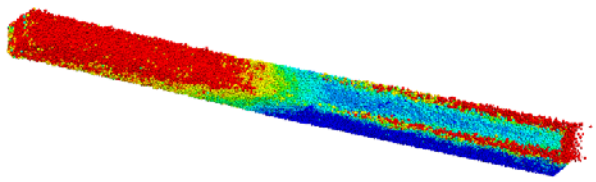
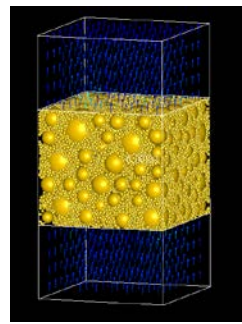
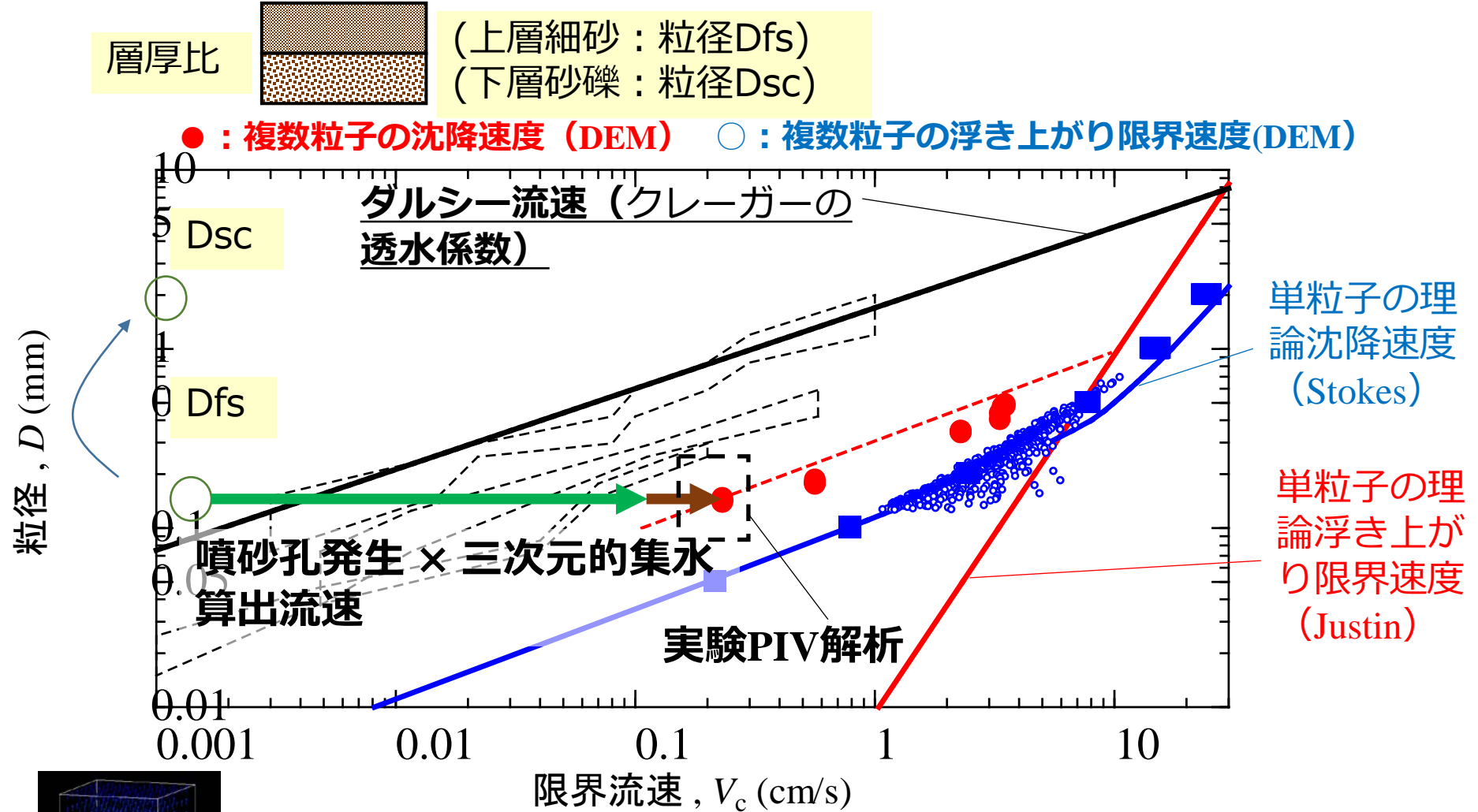


不陸が地表面から下層に到達
流速が**80倍**に！



三次元的流れの局所化、粒子の噴出⇒ダルシー則の100倍近い流速の発生；破壊が加速

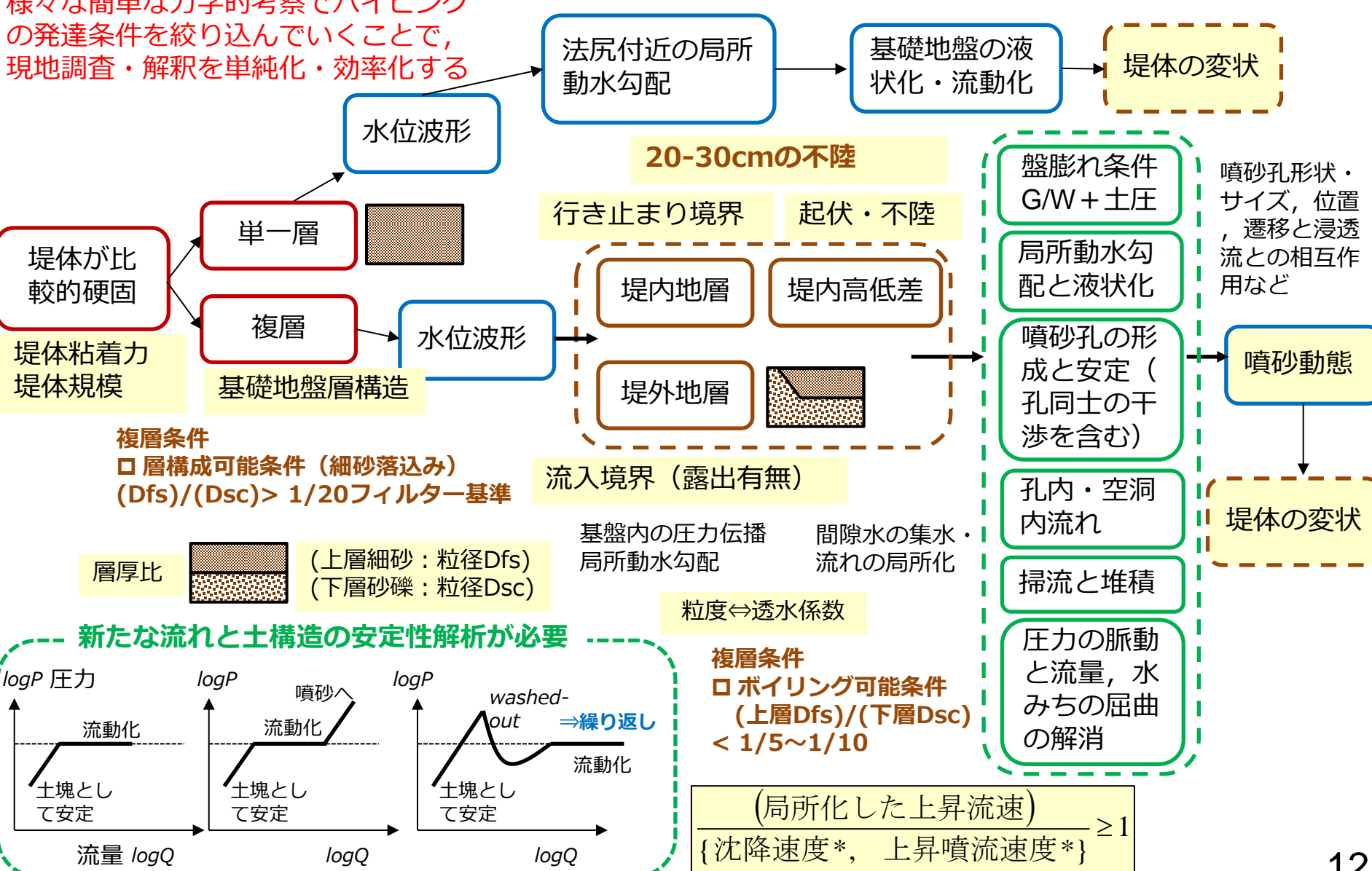
噴砂継続条件と限界流速：（複層の意味）



個別要素法DEM + 流体解析CFD

パイピングの発生・発達・破壊の条件の整理と調査項目 (粒度、基礎地盤土層構造、堤内外地形・不陸)

様々な簡単な力学的考察でパイピングの発達条件を絞り込んでいくことで、
現地調査・解釈を単純化・効率化する

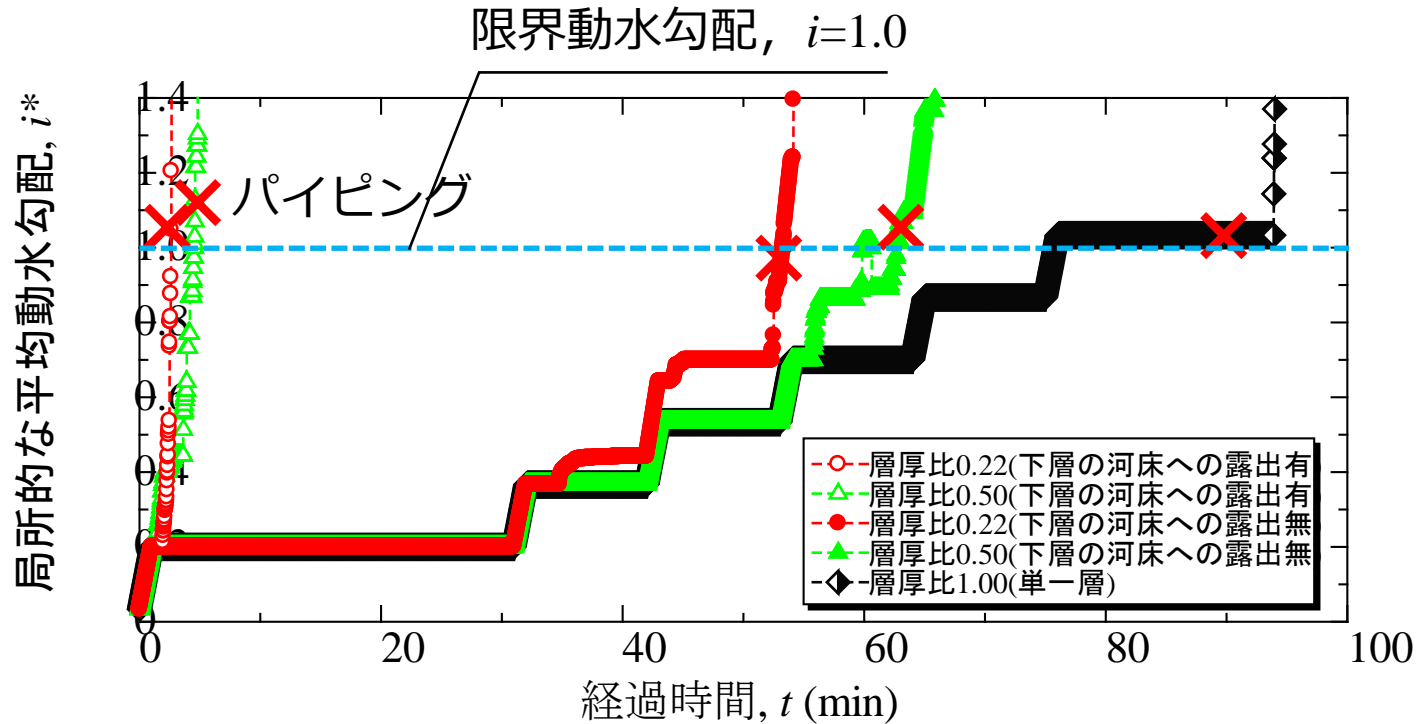


小型模型実験：粘性土堤体；1.5割勾配、透水性基礎地盤；複層

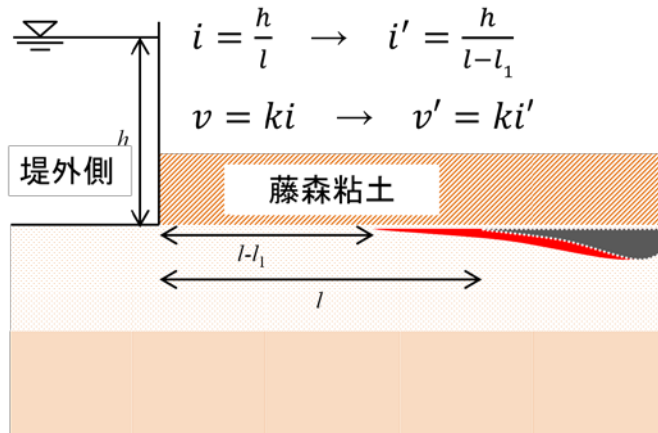


- ① $i=0.06$ (噴砂発生) 基盤層上層が噴出
- ② 堤内側に向けボイリングが継続的に発生
- ③ 堤内側の局所的な流動変形
- ④ 粘性土の堤体下部に一定水位下でもルーフィングによる空洞が進展
- ⑤ 堤外側での変状、亀裂、河川水の進入
- ⑥ $i=0.20$ (パイピングにより破堤)

空洞の貫通：一気に破壊する条件



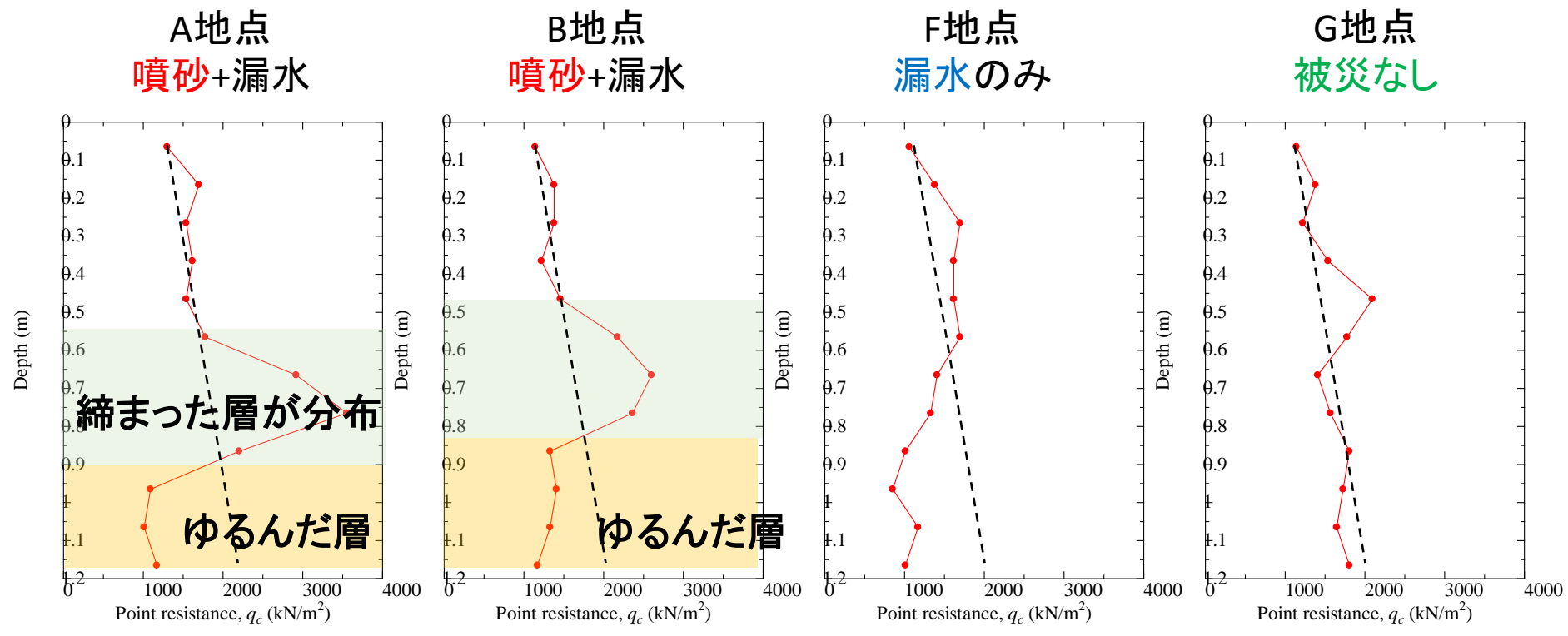
局所的な平均動水勾配の経時変化



- ✓ 空洞の進行により基盤砂層が流出し、浸透路長が短くなることで局所的な動水勾配が急激に増加する
- ✓ 空洞化が進行し、局所動水勾配が1.0付近で一気にパイプが貫通、破壊する

局所的な平均動水勾配の経時変化の概略図

鬼怒川:漏水・噴砂地点 左岸 L13.2: リバーテクノコーン



- (黒破線は被災無しのG地点の貫入抵抗のトレンド)
- 被災無しの箇所(G地点)では, 深くなるほど徐々に地盤が締まっている
- 漏水箇所(F地点)には, 締まっている層はなく, 深さ方向に一定か, 徐々に緩くなっている
- 噴砂箇所(A, B地点)には, 法尻地表面から深さ約0.5mに締まった層があり, 締まった層の下に急激に緩い層が分布している⇒ゆるむためには上部にしまった層が必要か