

地盤内の遮水を目的とした岡山県産クレー を用いた注入工法の開発と改良効果に 対する検証



岡山大学学術研究院環境生命科学学域
小松 満

<共同研究者>

岡山大学大学院環境生命科学研究科
高橋 啓介

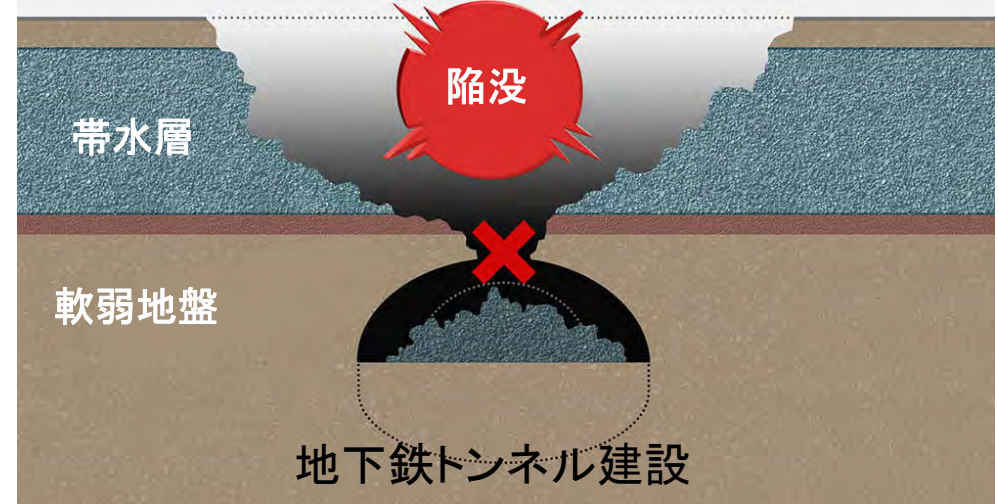
山陽クレー工業(株)
瀧本 弘治

博多駅前道路陥没事故(2016年11月8日)

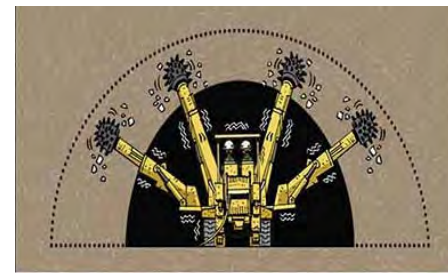


日経BP社: 日経コンストラクション, 第659号, pp.32-49, 2007.

原因



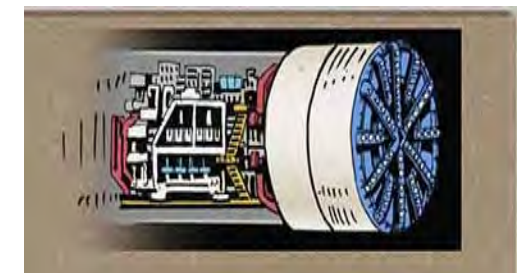
NATM工法
(New Austrian Tunneling Method)



- ・駅などの断面変化
- ・急な線形対応
- ・補助工法の新技術



シールド工法



- ・スピード
- ・軟弱層への適用
- ・費用対効果

都市部にNATM工法を採用(山岳トンネルでの主流工法)



地下水を多量に含む軟弱地盤(堆積層)の存在



切羽強度確保・湧水対策

軟弱地盤の掘削

補助工法の採用

経 済 性

工 期

安 全 性

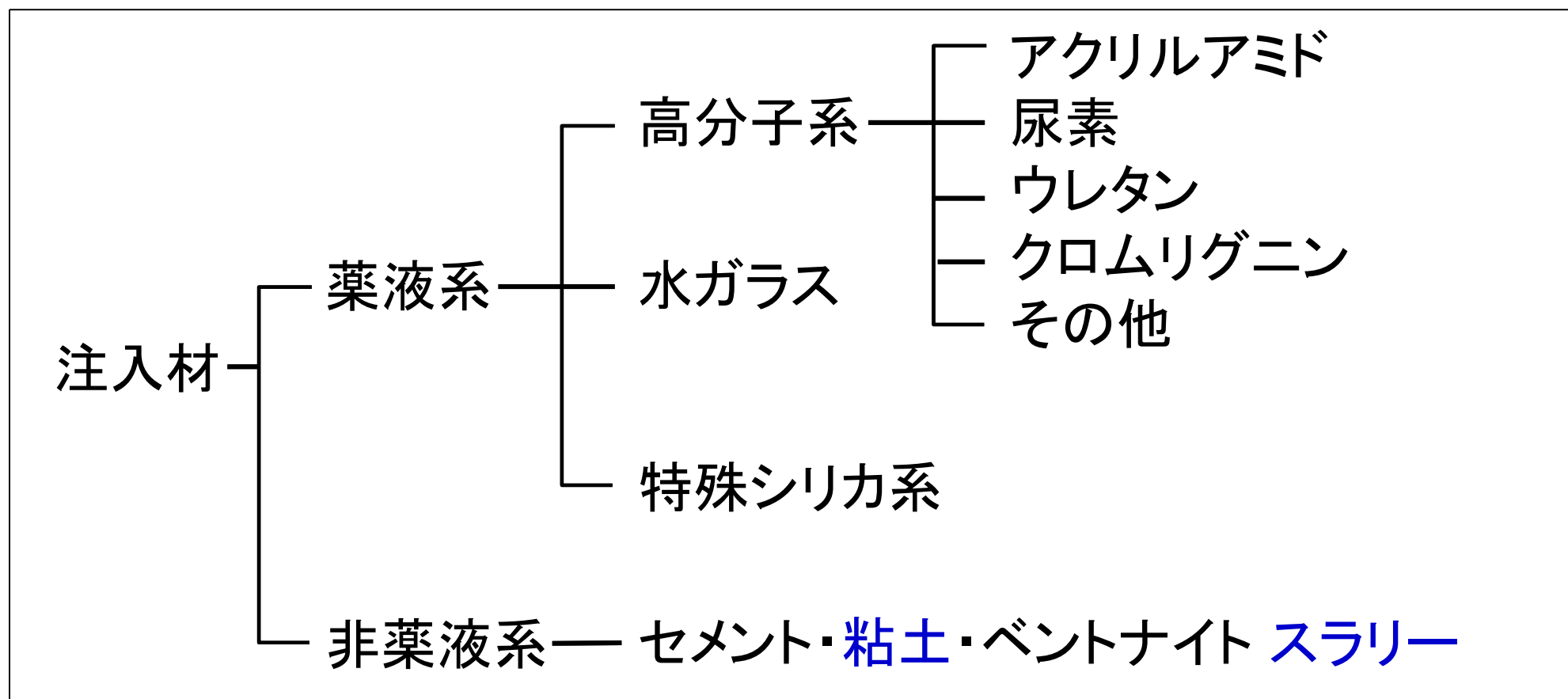
切羽状況に応じた効率的な補助工法システムの構築
(設計段階含む)



高透水性の砂層を対象にした低コストで環境に配慮した
注入工法の開発

【注入材の種類】

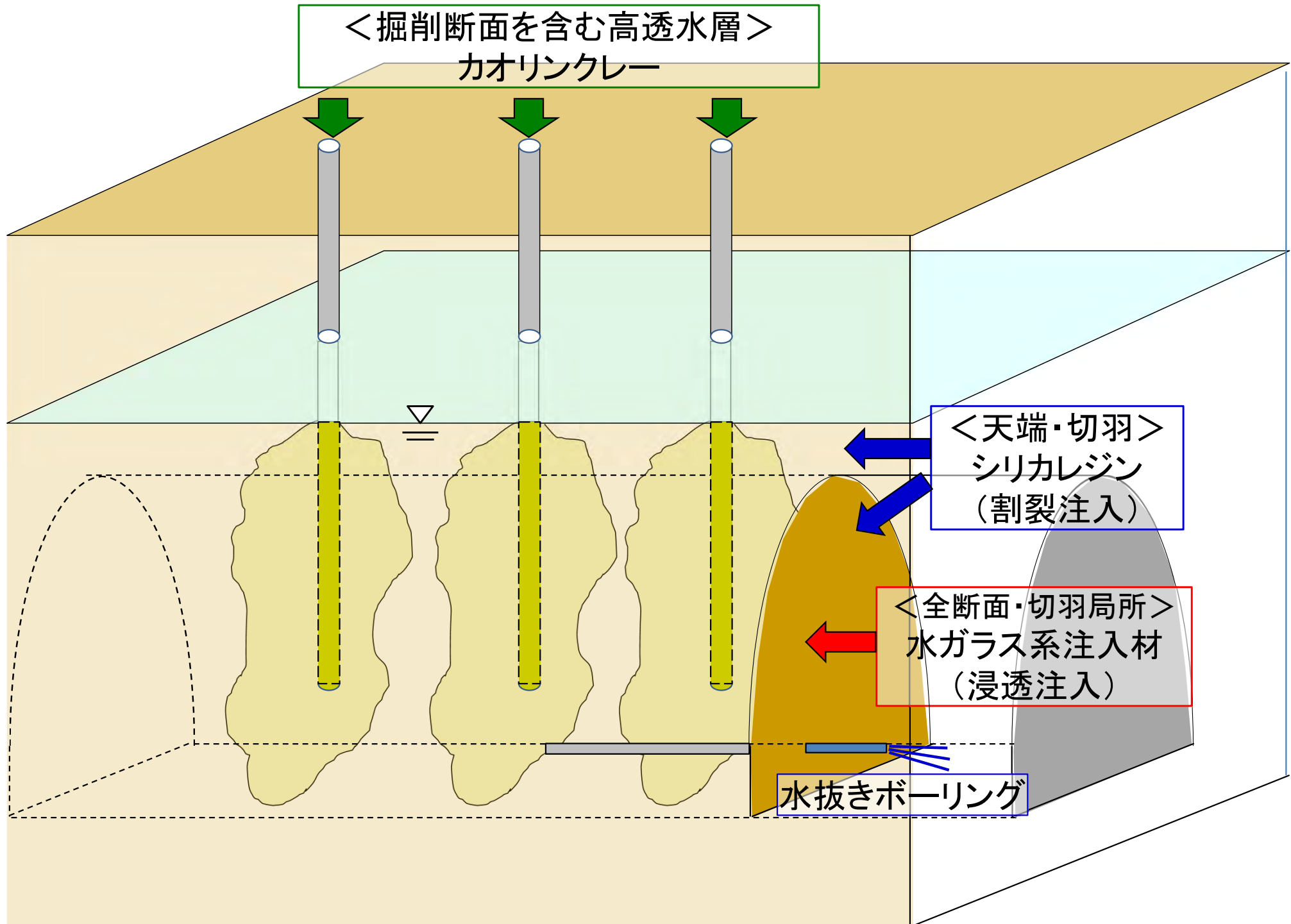
最新地盤注入工法技術総覧編集委員会編：最新地盤注入工法技術総覧，産業技術サービスセンター，pp. 79-85，1997.（一部改変）



高透水性の砂層を対象にした環境に配慮した注入工法の開発
【透水性低減効果を期待】



岡山県産カオリンクレーに着目



低コストで環境に配慮した注入工法の開発を目的に

岡山県産の粘土グラウトに着目

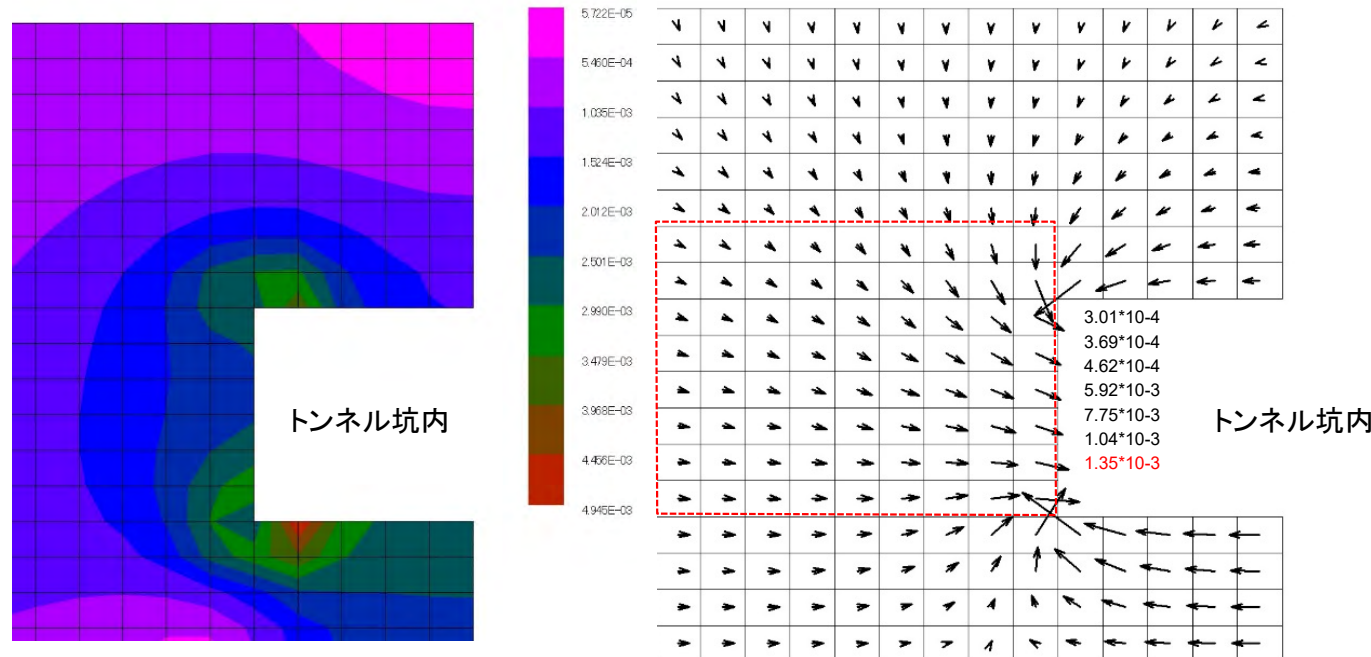
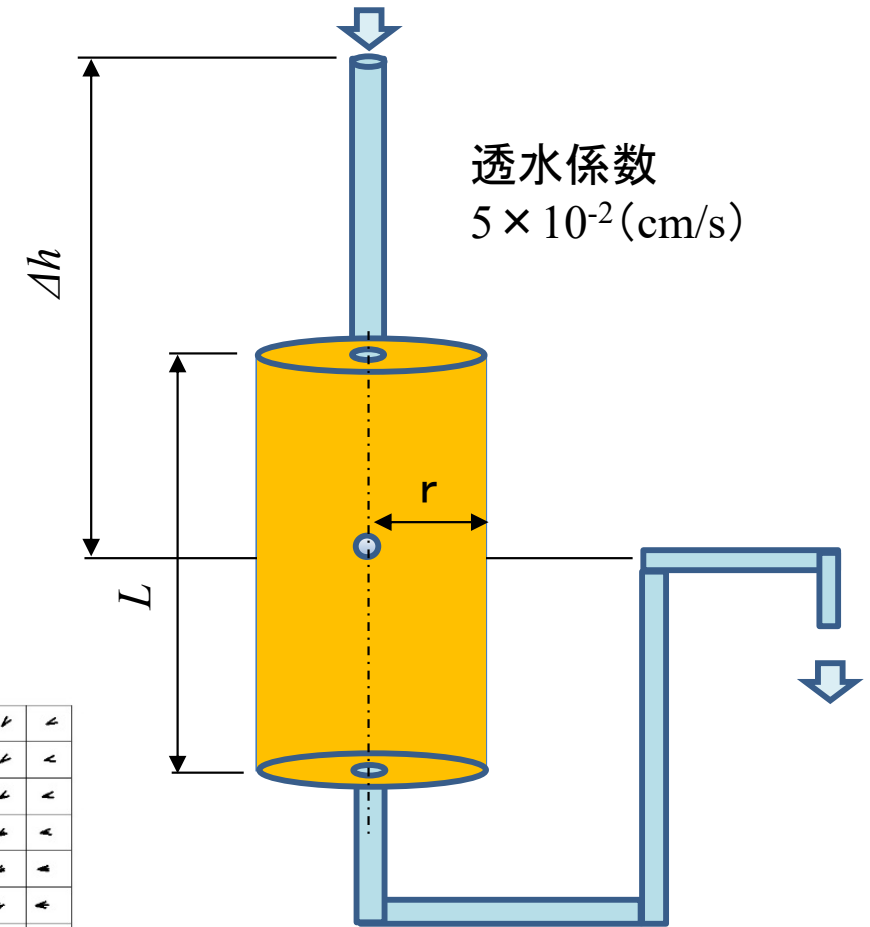
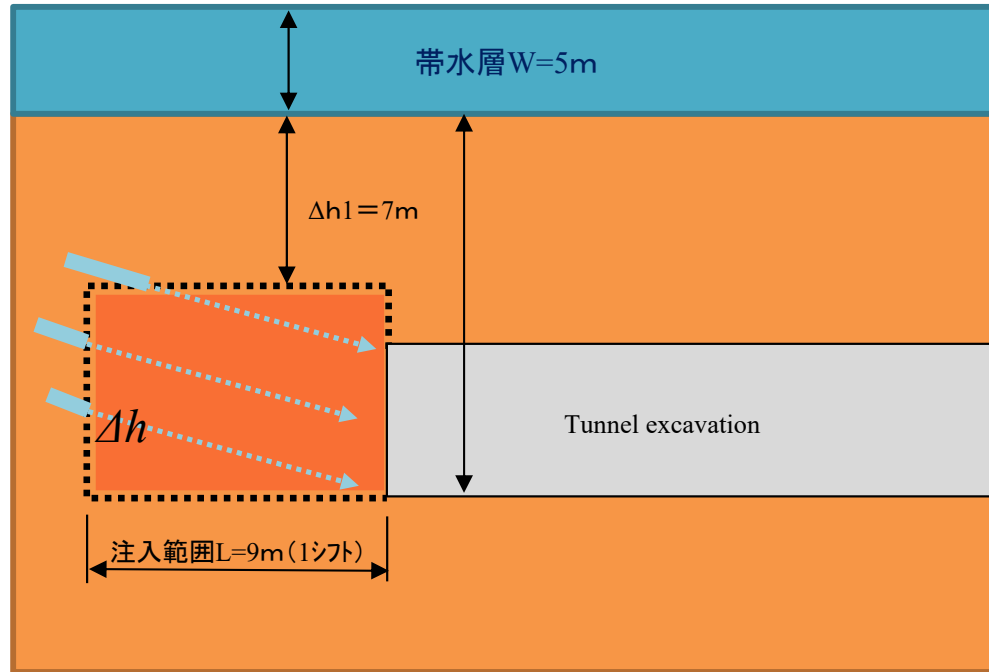
本研究の課題

- ① カオリンクレー及び懸濁液の特性調査
- ② 通水下での注入に最適なクレー懸濁液の検討
- ③ クレー懸濁液の間隙内移動挙動の評価
- ④ 注入範囲の検討

①～③：水平一次元注入・浸透実験（カラム）



④：断面二次元実験（土槽）



i	L (m)	Δh (m)
2.7	0.5	1.35
2.7	1	2.7

室内実験イメージ
(注入・透水性変化)

地下水浸透流解析結果

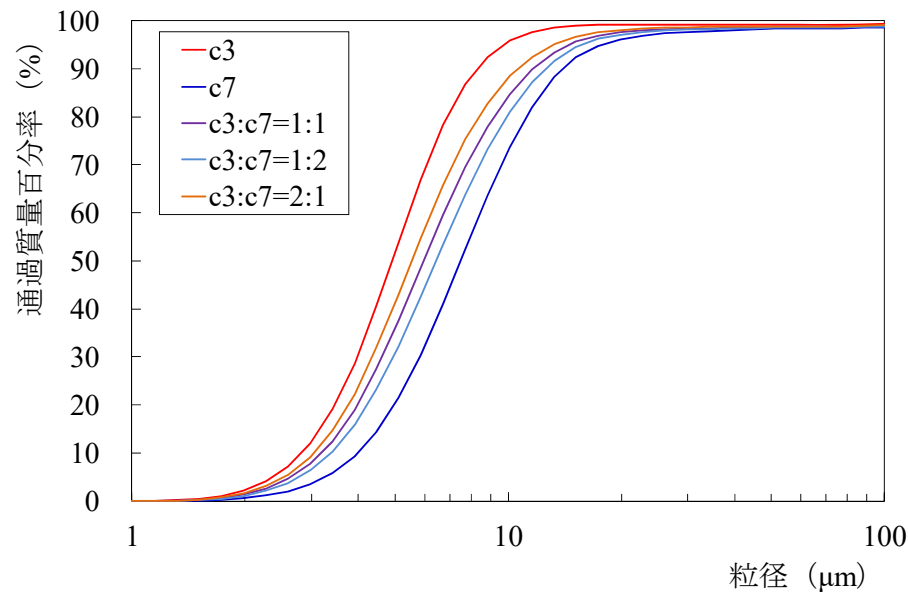
最大動水勾配 $i = 2.7$ に設定

MCクレー(c3), TPクレー(c7)【山陽クレー工業(株)製】 主成分 SiO_2 73~77%, Al_2O_3 18~23%

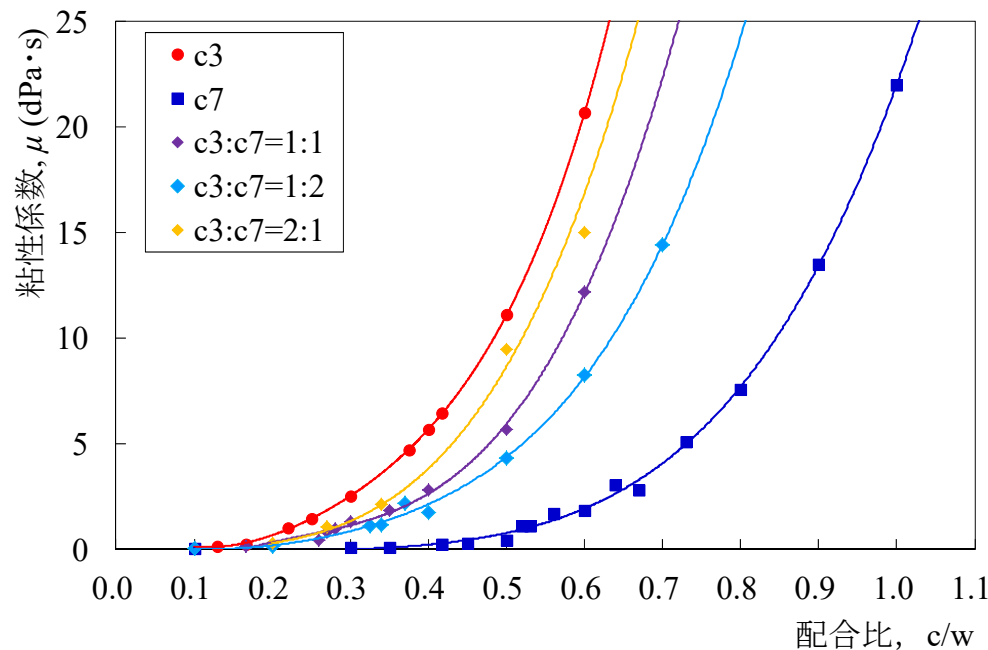
c3 : pH=4.9 (弱アルカリ性) c7 : pH= 7.5 (弱酸性)

密度及び粘度

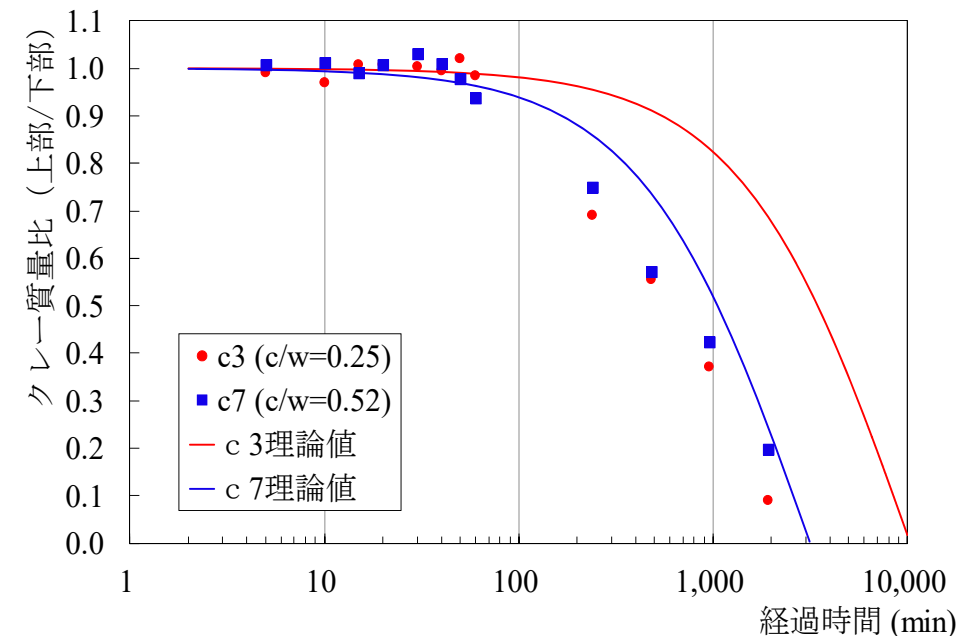
クレー種類	配合比 c/w	懸濁液密度 ρ_c (g/cm ³)	粘度 μ (dPa · s)
c3	0.25	1.148	1.46
c7	0.52	1.385	1.10
c3:c7=1:1	0.30	1.166	1.31
c3:c7=2:1	0.27	1.151	1.06
c3:c7=1:2	0.34	1.248	1.18



カオリンクレーの粒度分布

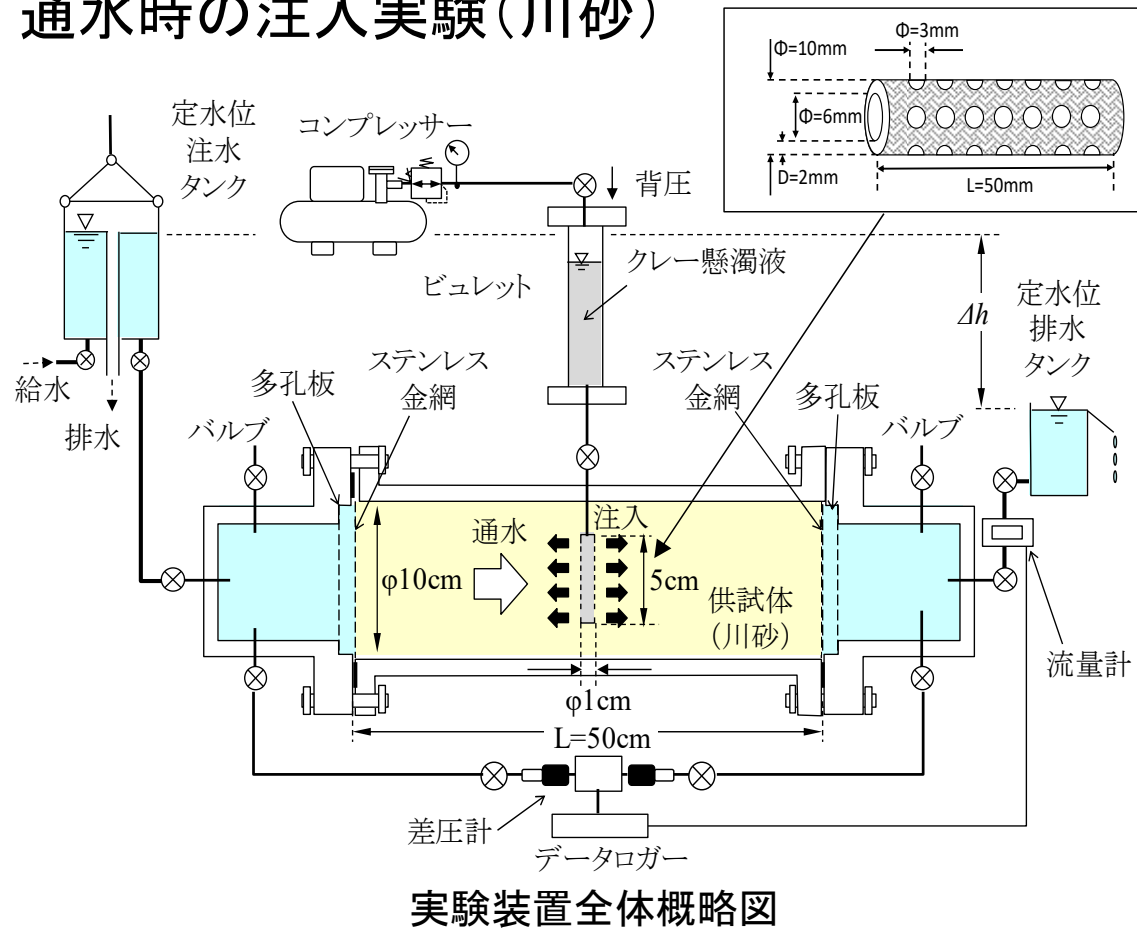


クレー懸濁液の配合比と粘度の関係



クレー懸濁液の沈降特性

通水時の注入実験(川砂)



実験状況



クレー注入状況



供試体解体状況

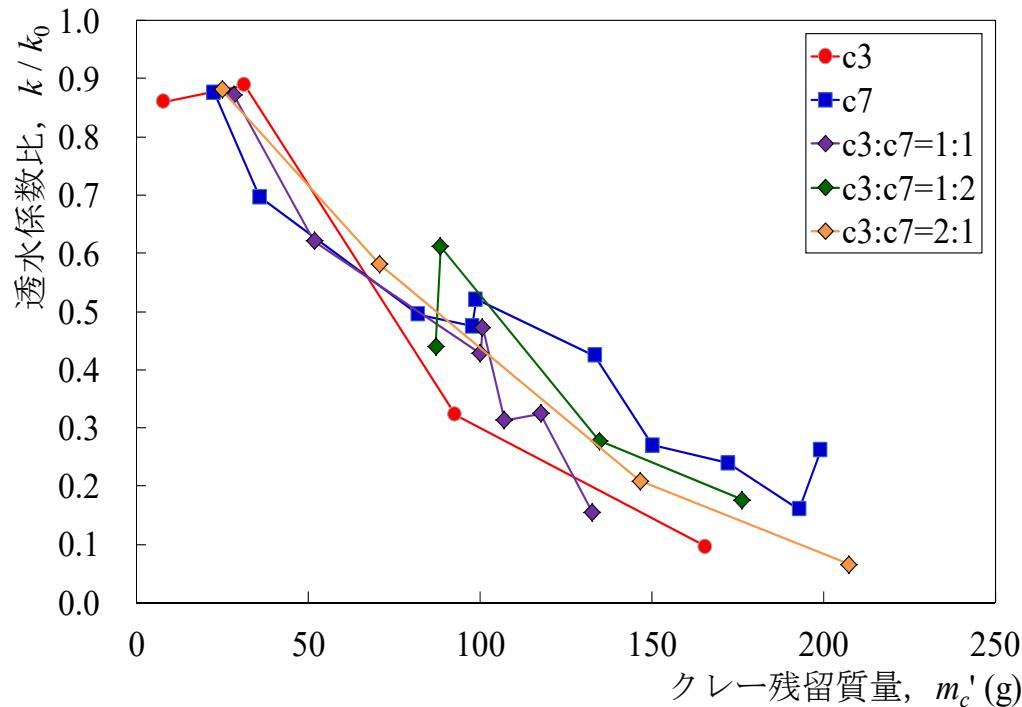
供試体作製・通水 ($i=2.7$)



クレー懸濁液注入 (50kPa)



注入量・流亡質量測定

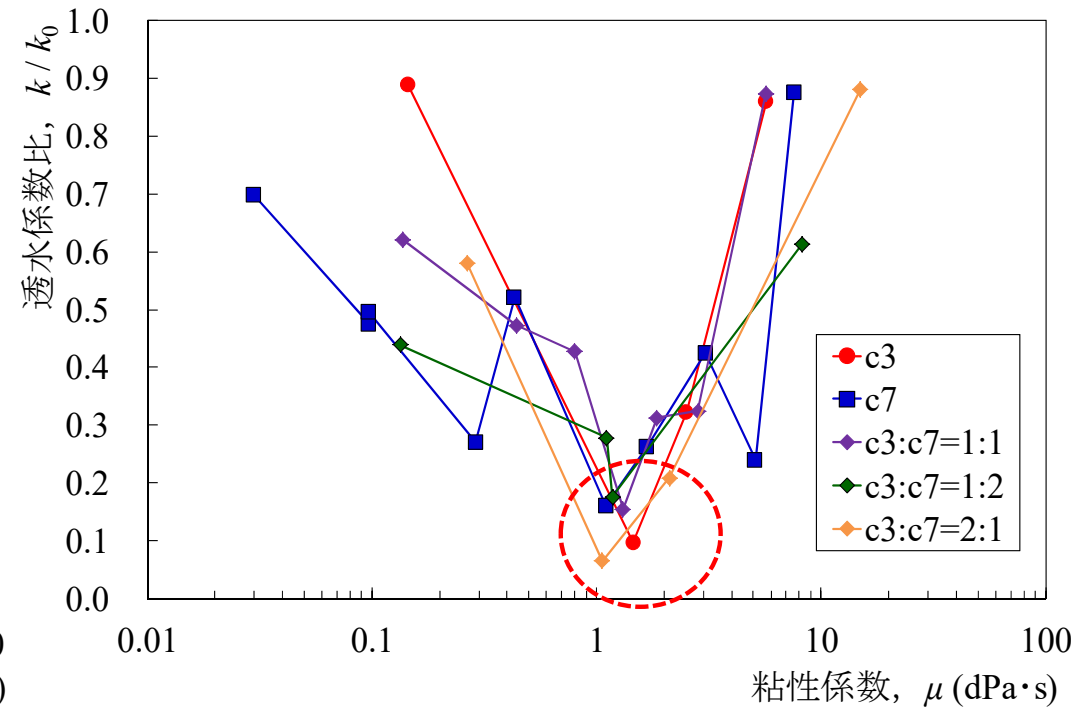


透水係数比と残留クレー質量比の関係

単体クレーのc3及び混合クレーのc3:c7=1:1及びc3:c7=2:1は同じクレー残留質量で低い透水係数比（透水係数低減効果）を示している。



粒径が小さいクレーの方が効率的な注入材料である



透水係数比と粘性係数の関係

透水性の低減効果の高い粘性係数の範囲が約1~2.5 dPa·sの範囲に集中している



粘性係数が重要なパラメータの一つである

定水位注水タンク

25cm / 10min

給水

排水

流量計

データロガー

間隙水圧計

マノメーター

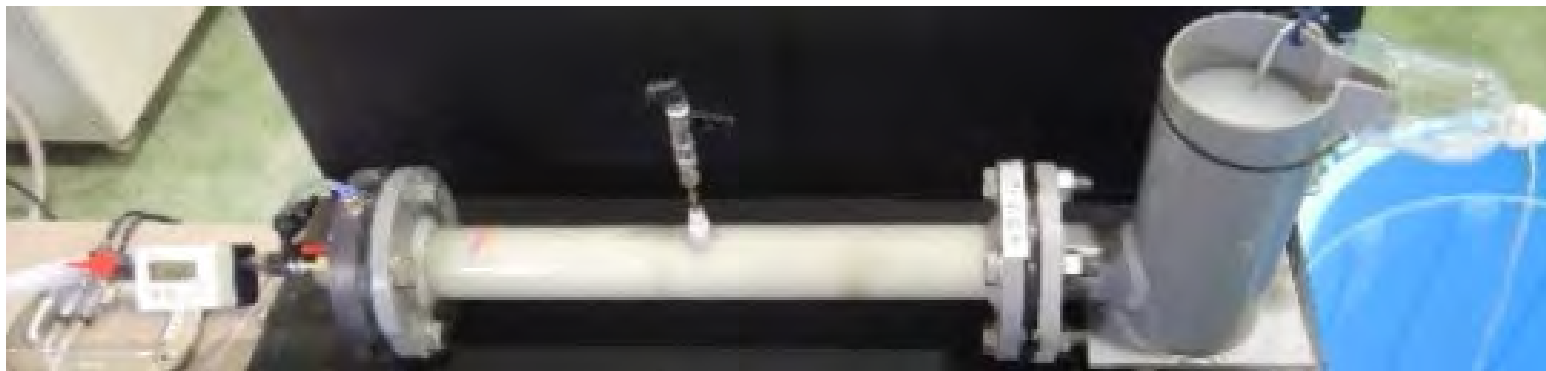
通水

供試体
(クレー懸濁液注入
ガラスビーズ)

定水位排水タンク

Δh

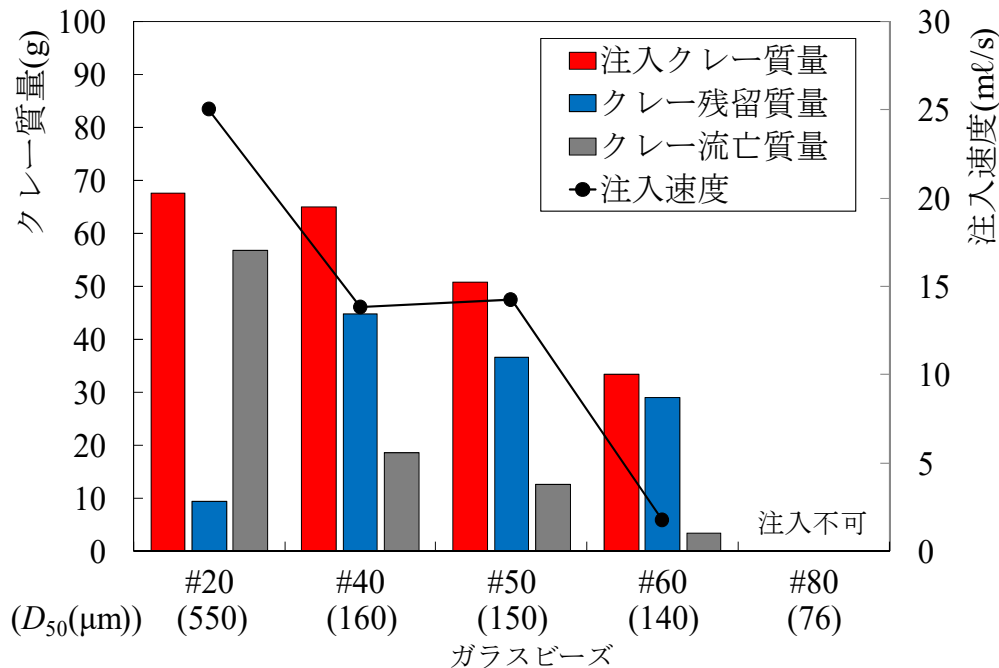
実験装置全体概略図



実験状況

クレー懸濁液の間隙内移動挙動の評価

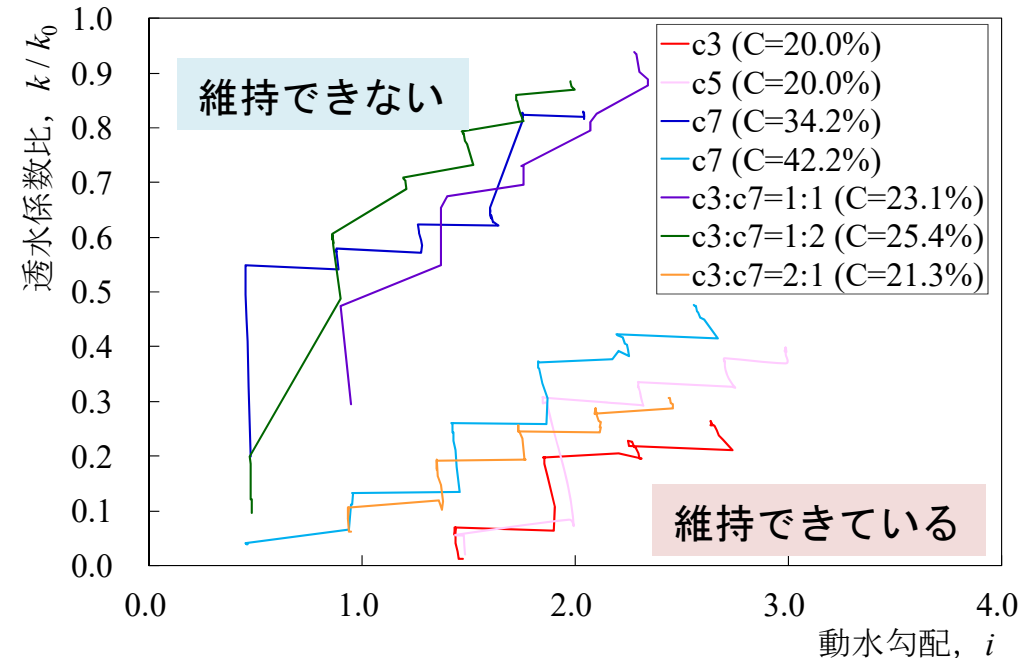
注入実験



c7(c/w=0.30)注入結果と注入後の通水実験結果

- ・ 間隙の大きさによって注入したクレーの流亡状況が異なることが分かる
- ・ 間隙の大きさにより注入速度も異なる

通水実験



透水係数比と動水勾配の関係

- ・ 動水勾配の上昇に対して透水性の低減効果を維持しているグループと維持できていないグループがある。
⇒ 粒径と粘性の違いが要因であることが判明
- ・ 透水係数の低減効果が発揮された濃度配合
⇒ 注入後の段階的な動水勾配の上昇による透水性の変化が、クレー懸濁液の特性により明確に分かれる結果

グラウタビリティー比による注入可否の検討

グラウタビリティー比 (GR)

$$GR = \frac{D_{15}}{G_{85}}$$



GR>24であれば注入可能

GR<11であれば注入不可

G_{85} = 注入材の85%粒径

D_{15} = 地盤土の15%粒径

土質工学会編：薬液注入工法の調査・設計から施工まで，pp. 2-4，1985.

注入可否検討結果 (○：可，×：不可)

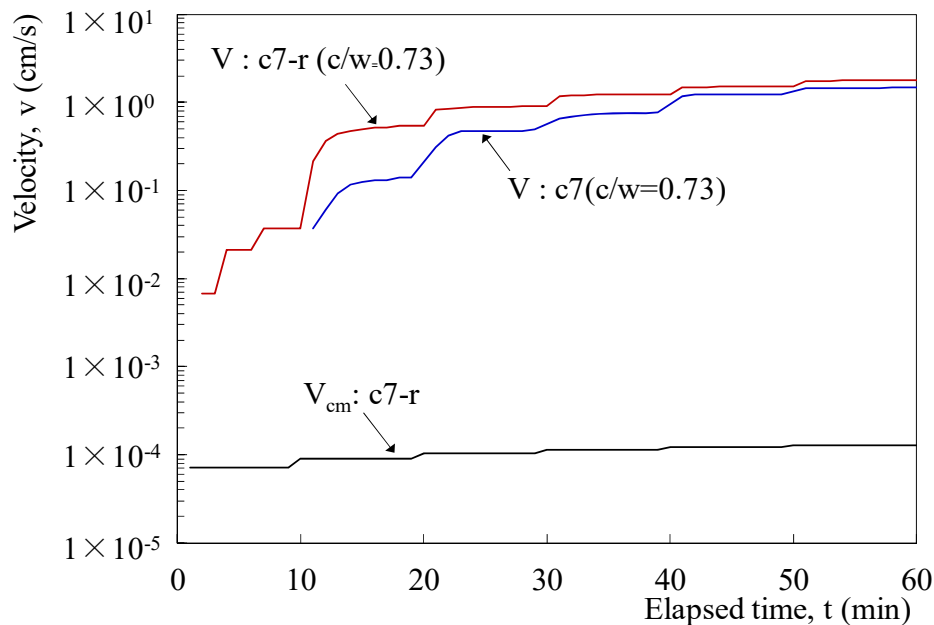
ガラスビーズ種類		#20	#40	#50	#60	#80
c3	計算	66.7	37.3	37.3	34.7	17.3
(C=20.0)	実験	○	—	—	—	○
c7	計算	38.5	21.5	21.5	20.0	10.0
(C=23.1%)	実験	○	○	○	○	×
(C=34.2%)	実験	○	—	—	—	×

式と実験結果は概ね整合する結果となり，クレ－懸濁液の注入の可否において，**グラウタビリティー比が適用**できる

水平浸透流に対する多粒子限界流速式

$$V_{cm} = n^{1/m} \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w(\rho_s - \rho_w) g d^3}{54\mu^2}} + 1 - 1 \right\}$$

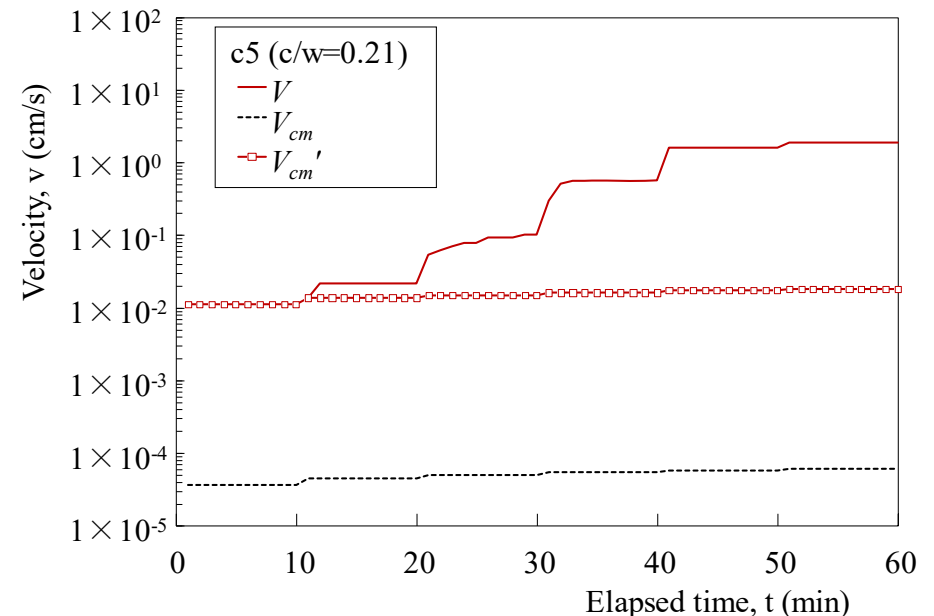
杉井俊夫, 梅基哲矢, 山田公夫, 名倉晋: 浸透破壊を対象とした進行性メカニズムの評価に関する研究, 地盤工学シンポジウム論文集, Vol.25, pp.61-67, 2013.



実流速と多粒子限界流速の関係

- 実流速 $c7-r \geq c7$: 粘度が低いと速い
- 実流速は多粒子限界流速 V_{cm} より2オーダー程度速い流速まで移動しない

原因として, 多粒子限界流速に粘性が考慮されていない事が考えられる

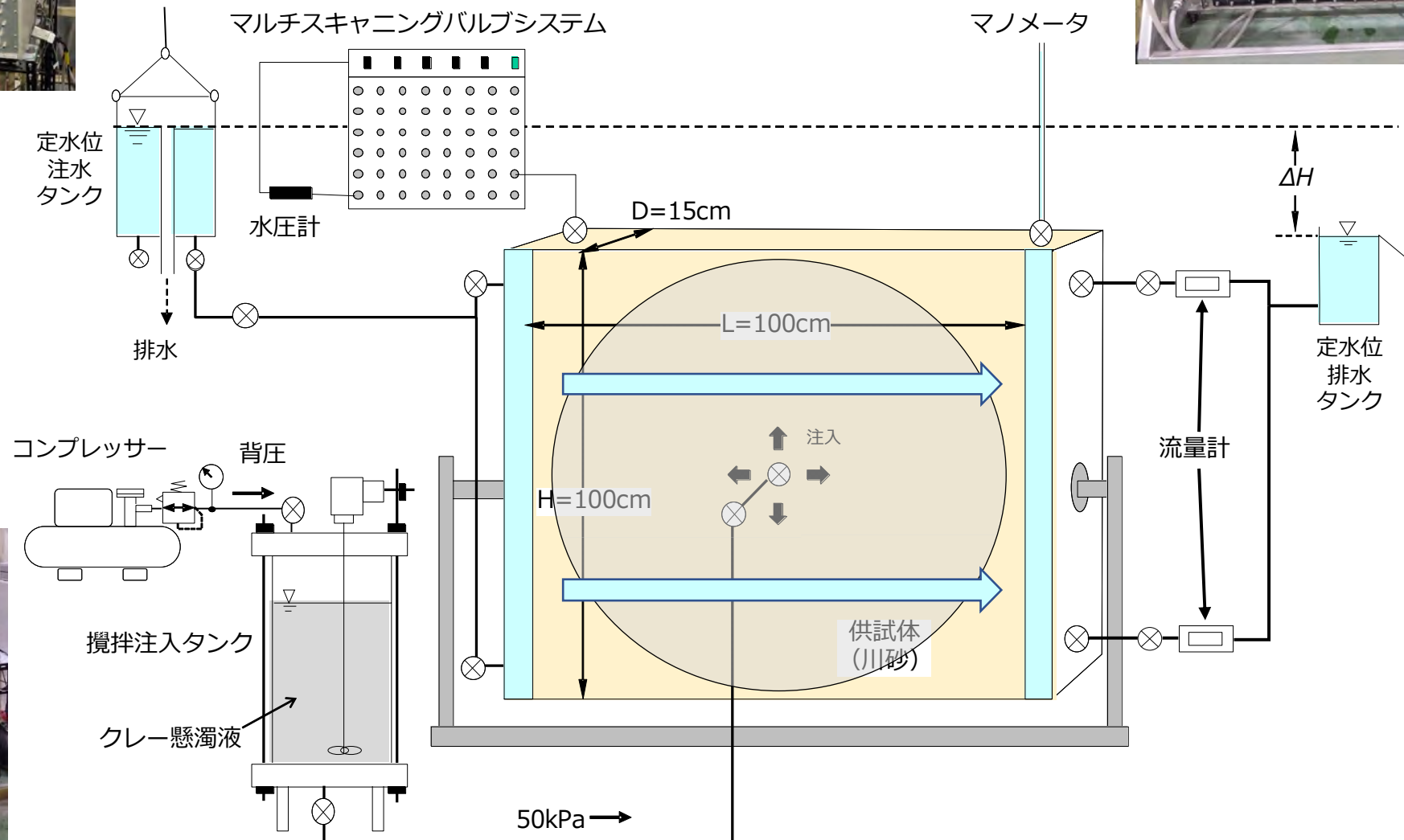
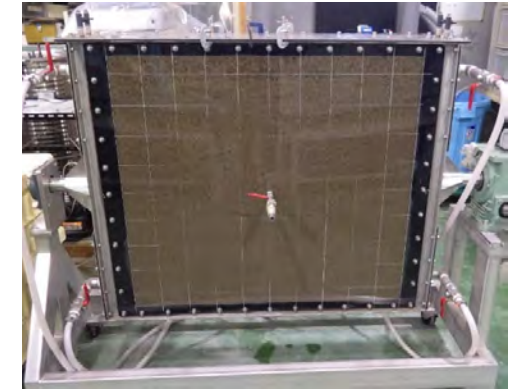


実流速と修正多粒子限界流速の関係

$$V_{cm}' = n^{1/m} \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w(\rho_s - \rho_w) g d^3}{54(\alpha\mu)^2}} + 1 - 1 \right\}$$

水の粘性係数と懸濁液の粘性係数の比
: 係数 $\alpha = \mu / \mu_c$ を導入した補正

実験の流れ: 通水実験 → クレー注入実験 → 通水実験

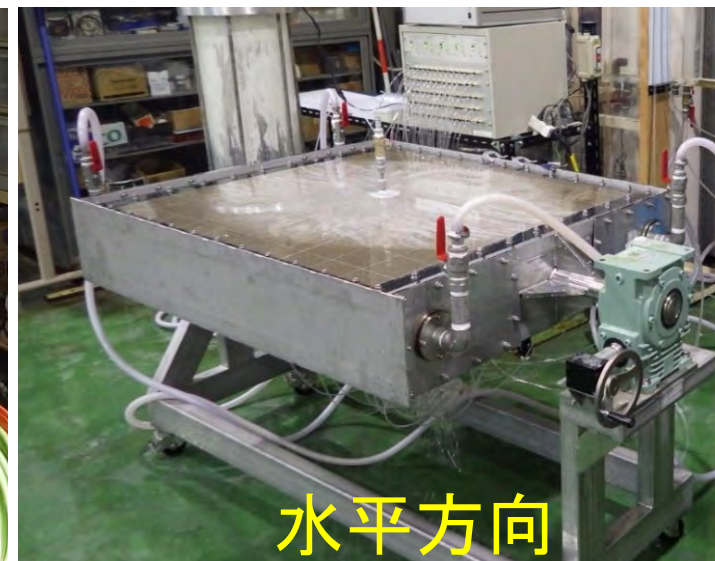
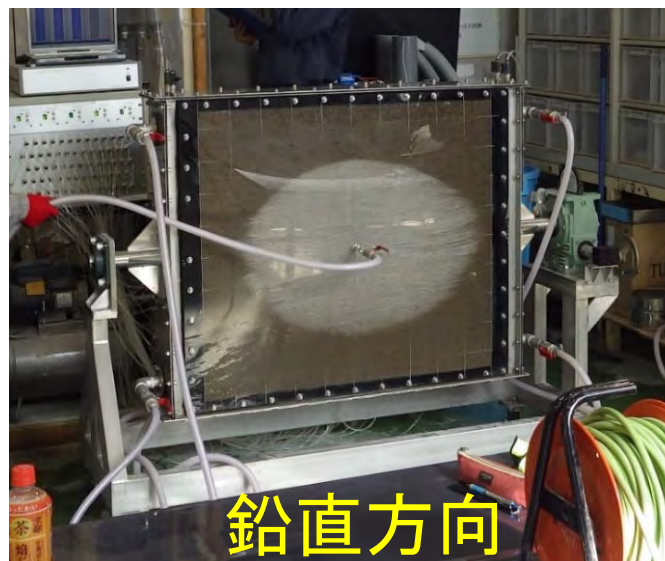


ケース	①	②	③	④	⑤
クレー	c3	c7	c3	c7	c3
向き	鉛直 		水平 		鉛直 
注入	流れなし				流れあり

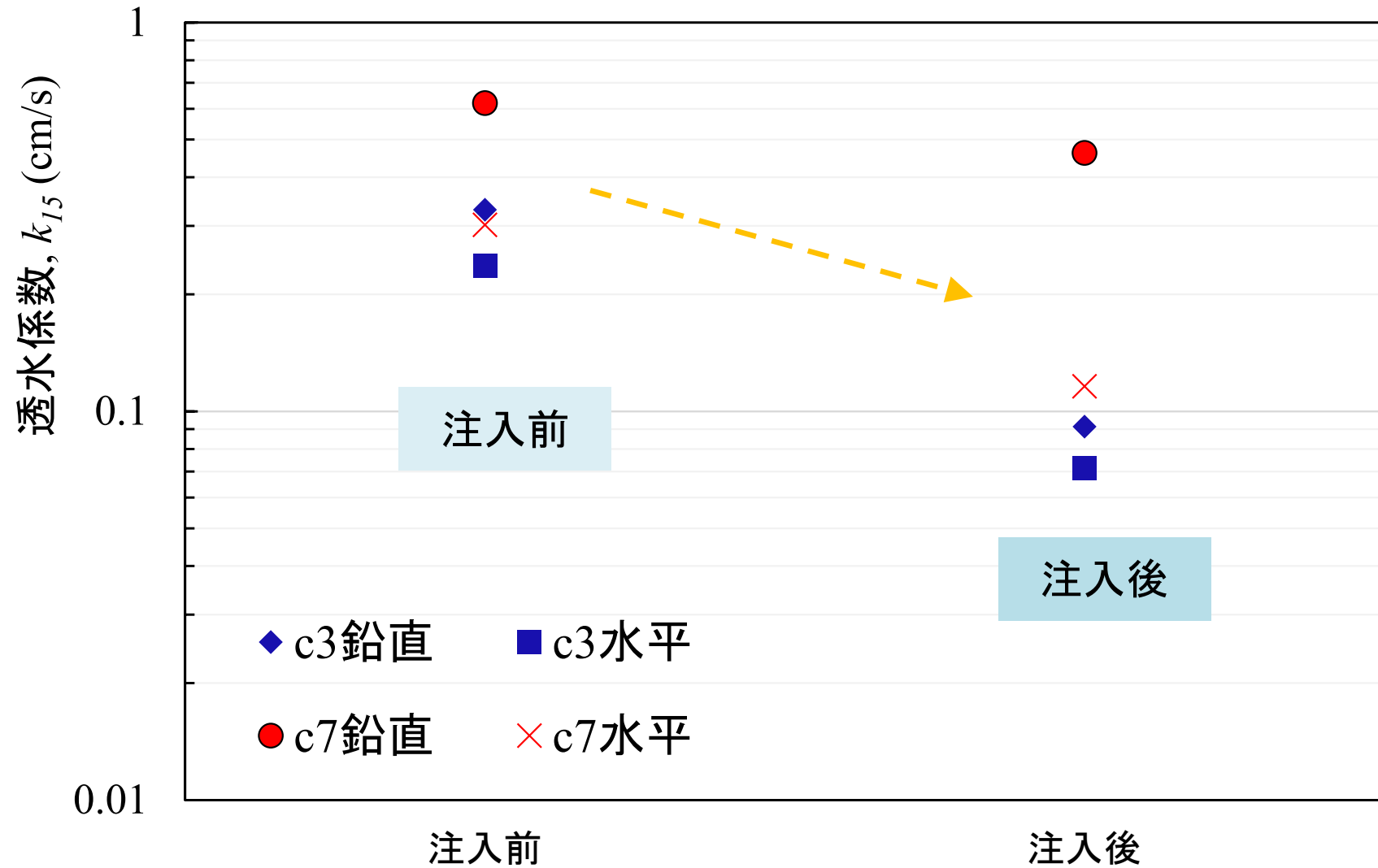
ΔH
=50cm

クレー種類	平均粒径 $D_{50}(\mu m)$	粒度 (μm)	土粒子密度 $\rho_s(cm^3)$	均等係数 U_c
c3	4.928	2.748	2.748	1.942
c7	7.482	2.713	2.713	2.117

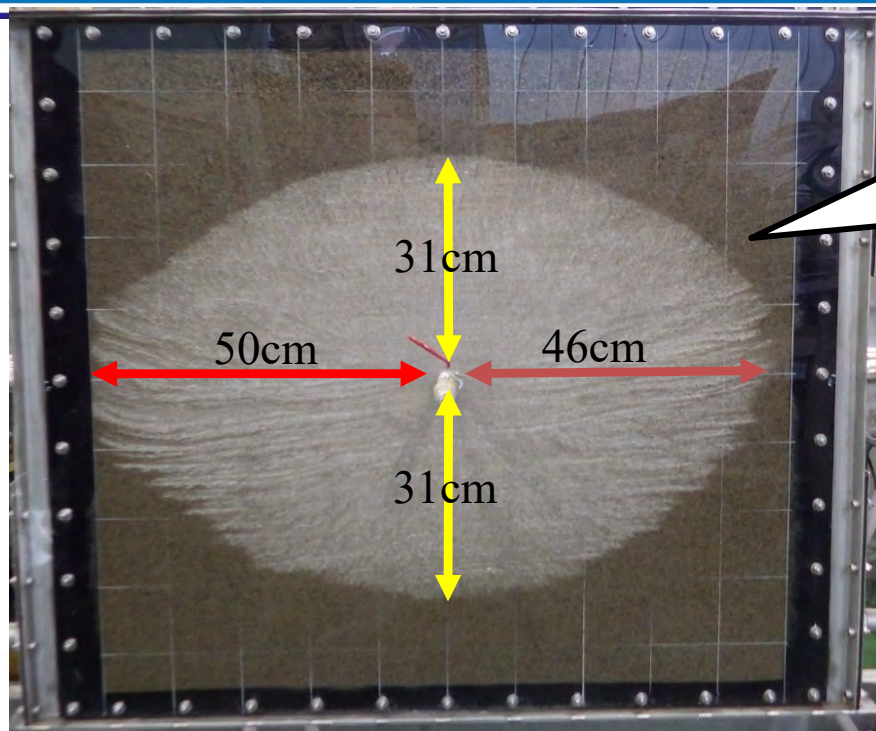
配合比 c3:c/w=0.25, c7:c/w=0.52



透水性低減効果の評価



注入による透水性低減効果を確認



c3 鉛直

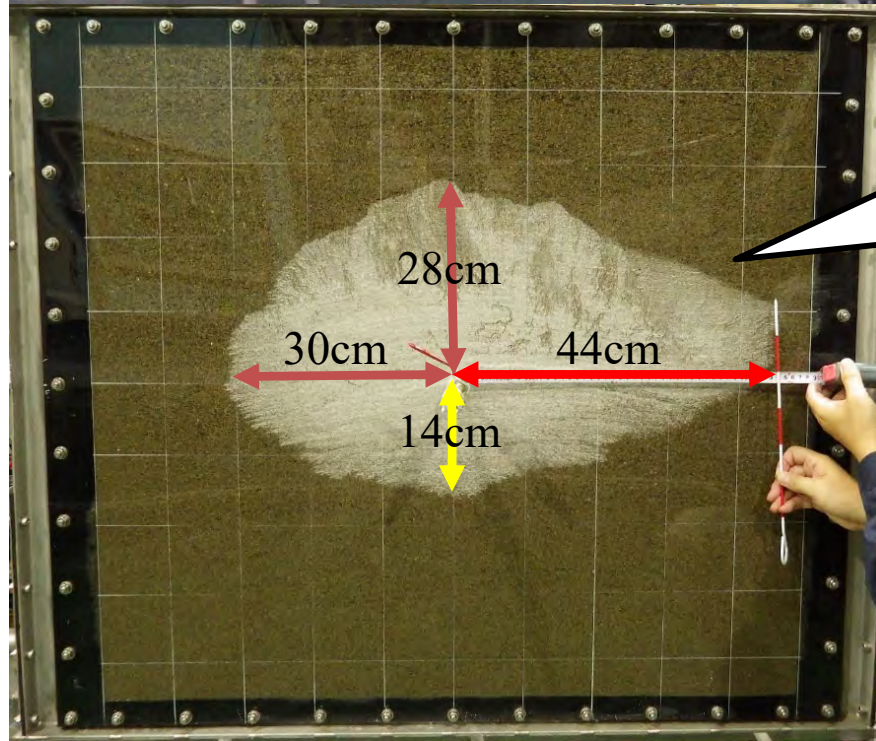
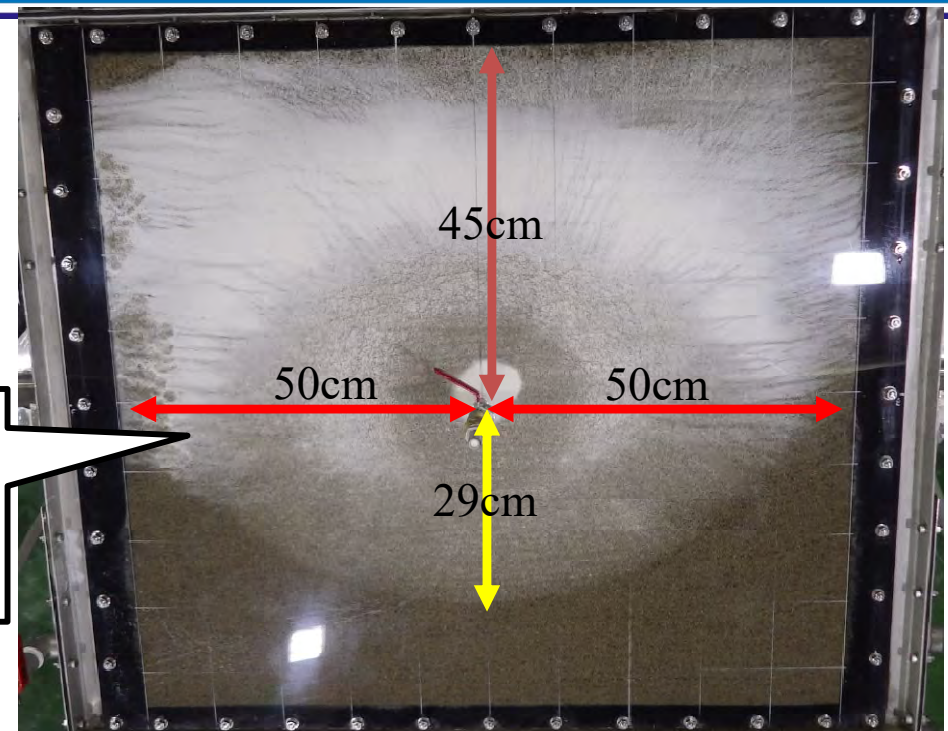
16min

37.73L

c3 水平

16min

35.52L



c7 鉛直

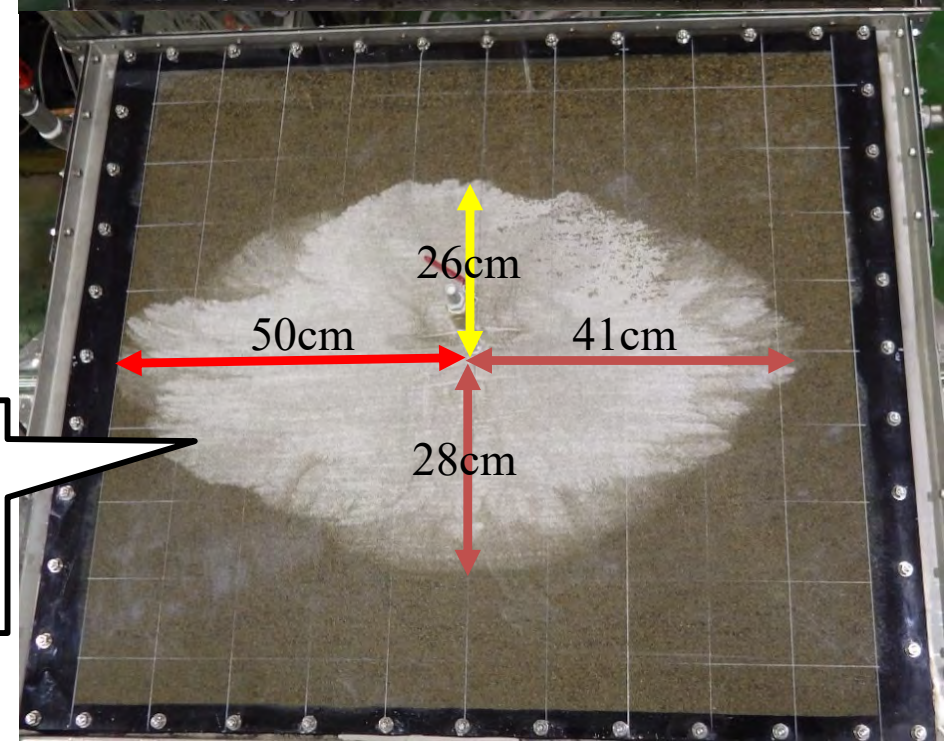
30min

22.59L

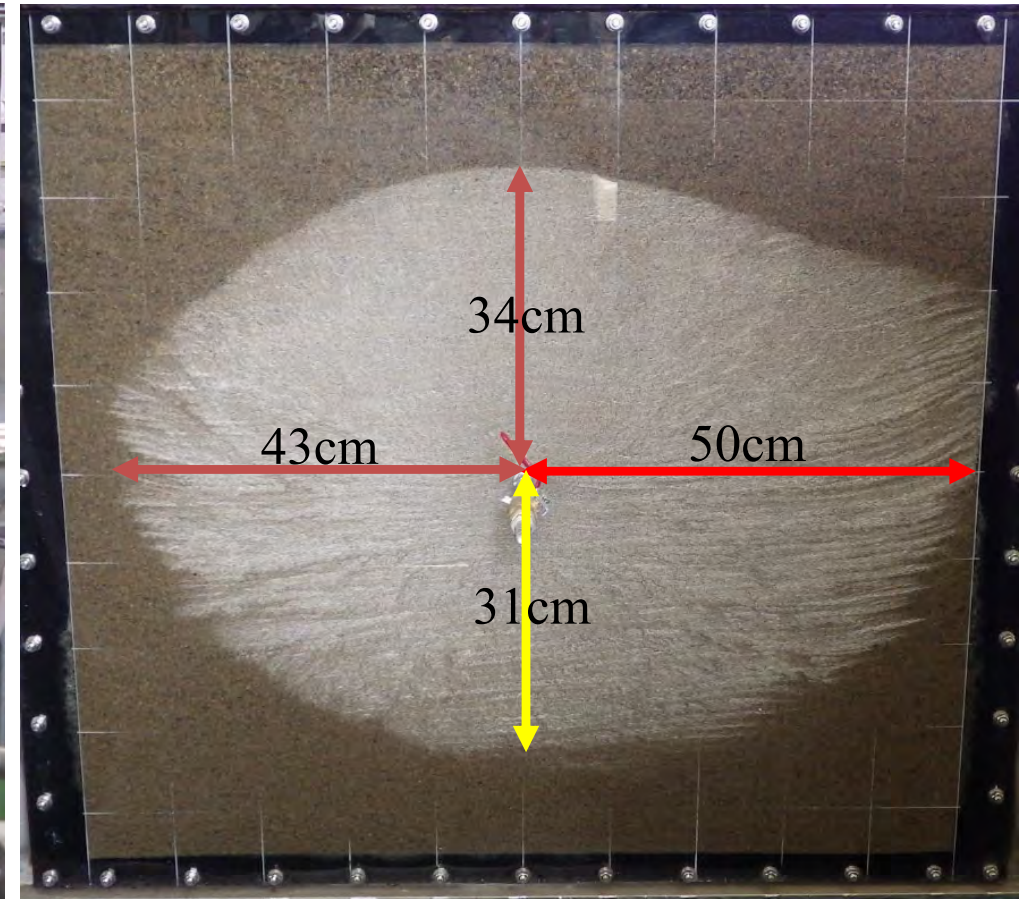
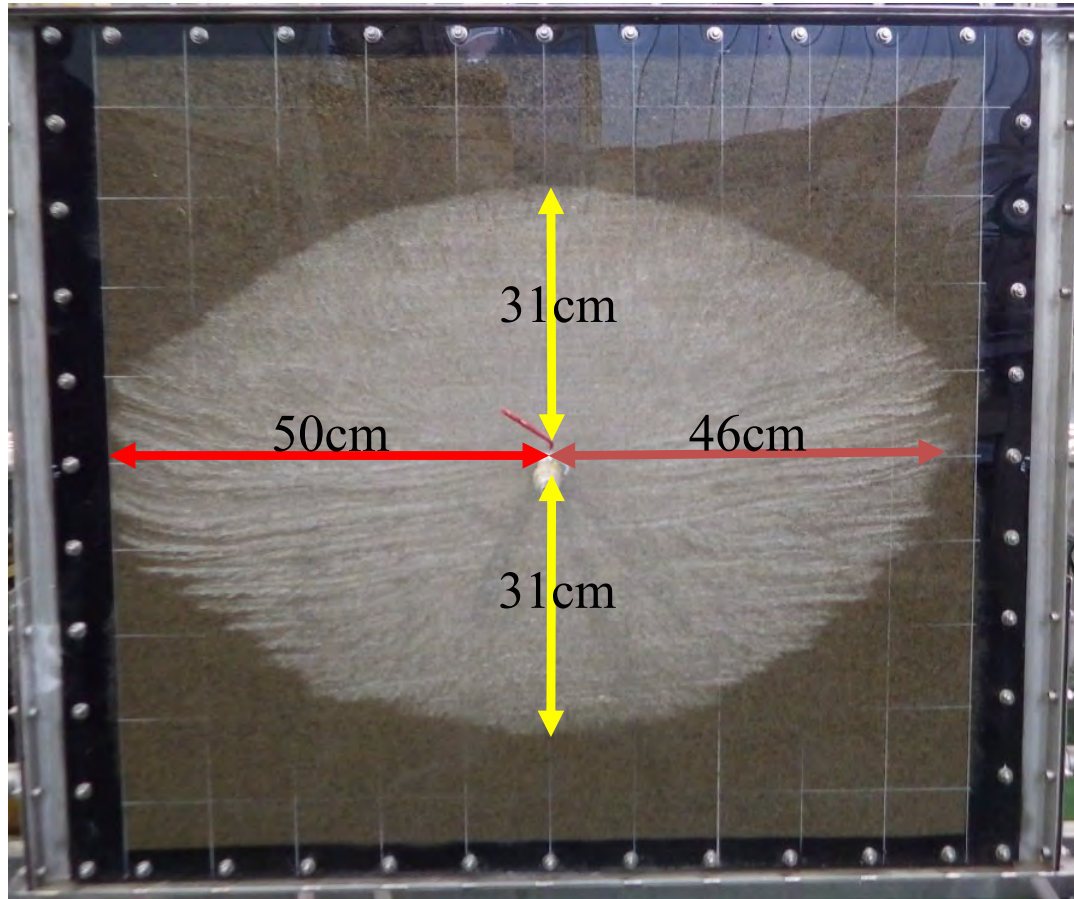
c7 水平

30min

32.33L



通水の有無による注入範囲の違い



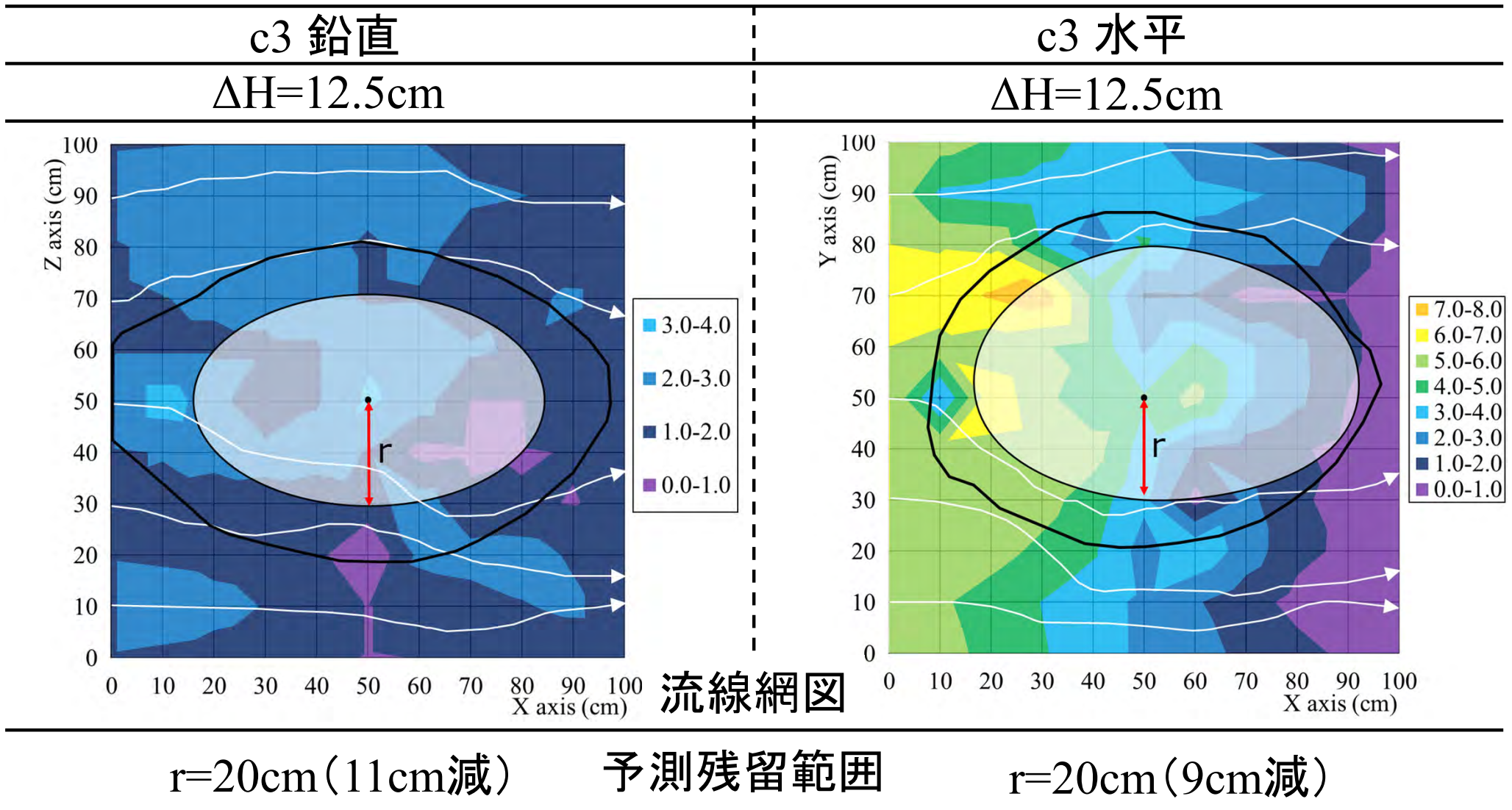
c3 鉛直(流れなし) 16min 37.73L c3 鉛直(流れあり) 16min 39.93L

水平方向には流下方向に流動する。鉛直方向は同等



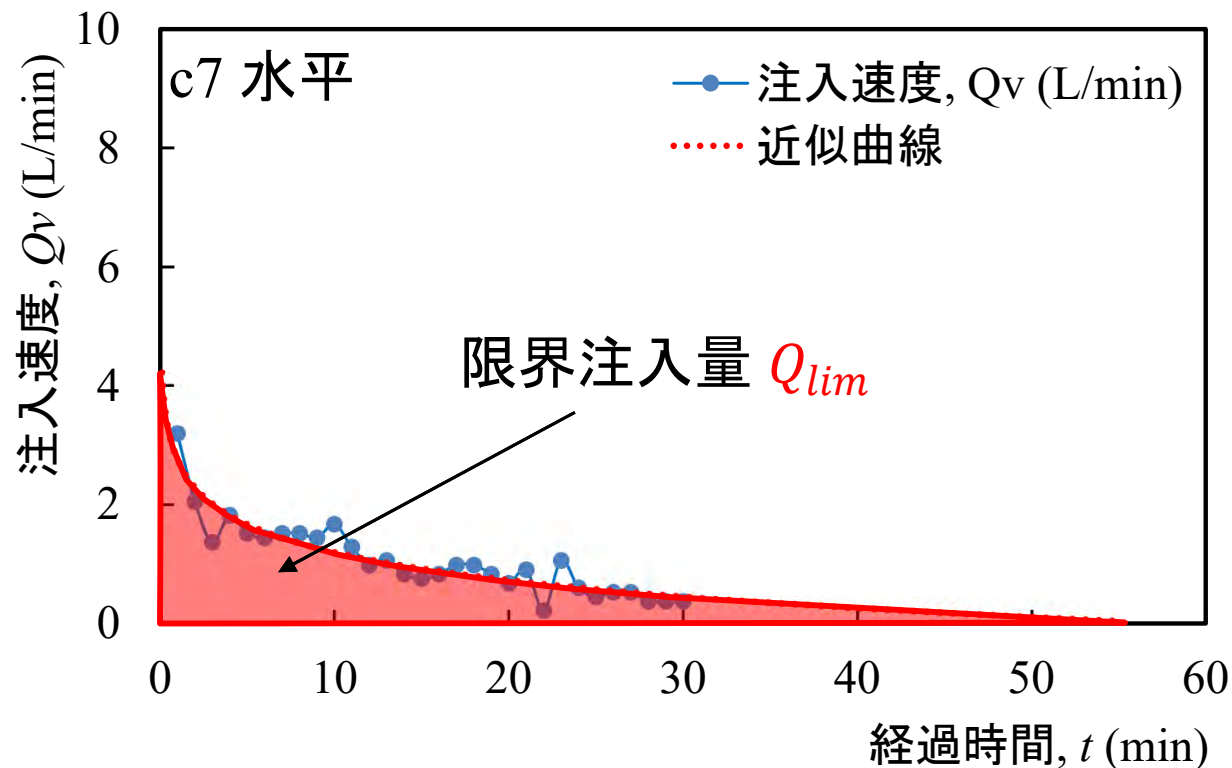
通水時注入においても注入量は同等である

注入有効範囲



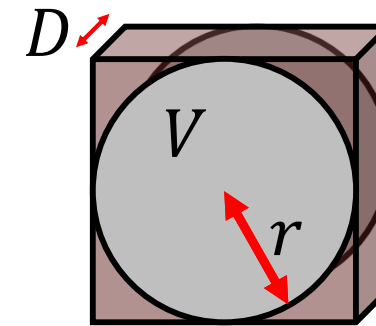
注入範囲は流れにより減少する

限界浸透距離



浸透範囲:円柱型

$$V = D\pi r^2$$



$$r_{lim} = \sqrt{\frac{Q_{lim}}{nD\pi}}$$

n : 間隙率

浸透距離推定式

$$R_e = \frac{\gamma_w \cdot g \cdot h \cdot r_e}{2S} + r$$

R_e : グラウトの浸透距離(cm) r : 注入孔半径(cm)

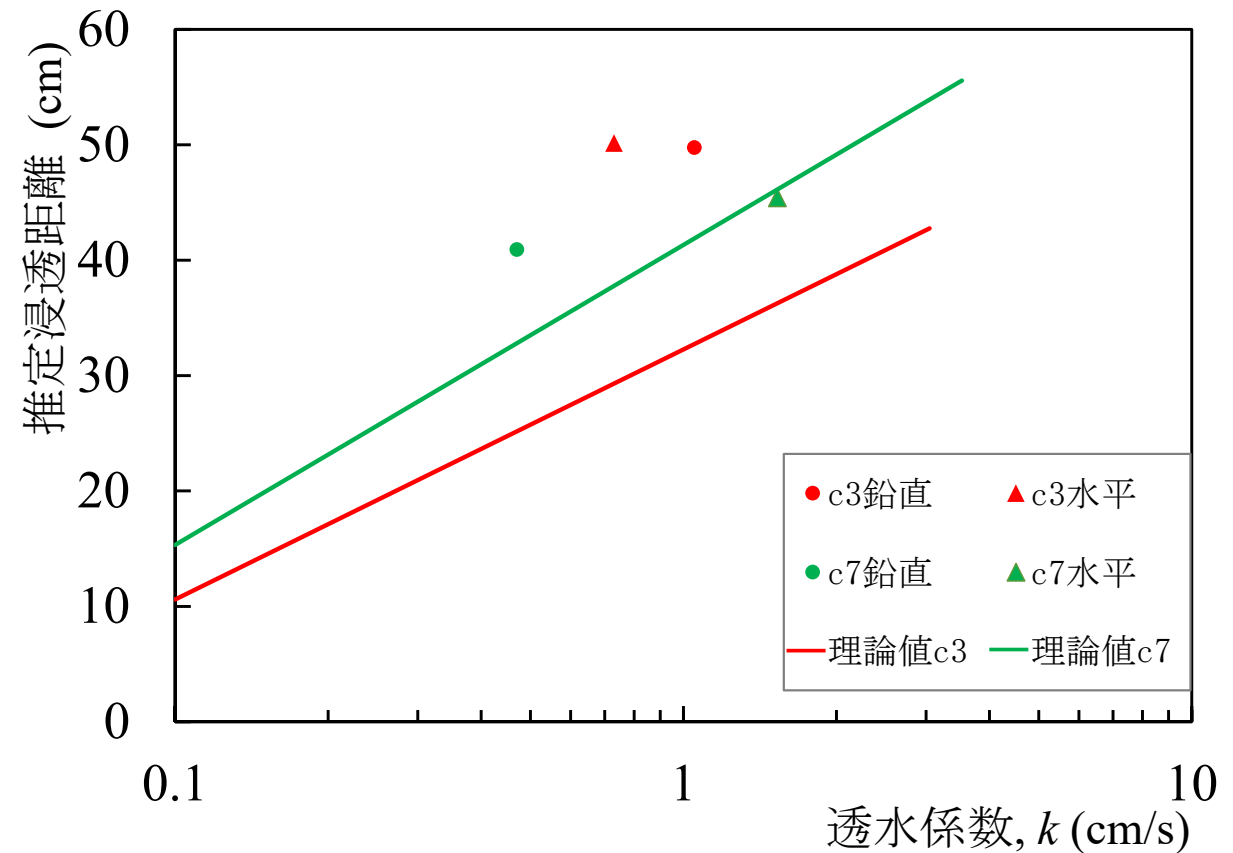
γ_w : 水の単位体積重量(g/cm³) g : 重力の加速度(cm/s²)

h : 水頭(注入圧)(cm) r_e : 間隙等値半径(cm)

S : グラウトのゲル強さ(dyne/cm²)

透水係数と浸透距離の検討

	推定浸透距離 $r_{lim}(\text{cm})$	理論浸透距離 $R_e(\text{cm})$
c3鉛直	49.8	33.1
c3水平	50.1	28.6
c7鉛直	40.9	36.4
c7水平	47.4	43.7



- c3とc7でほぼ同じ傾き
- c7は近似直線と近い値を示しているので近似式適用可能
- c3は近似直線とは離れているが安全側なので近似式適用可能

$$R_e = \frac{\gamma_w \cdot g \cdot h \cdot r_e}{2S} + r \quad \text{適用可能}$$

新たな粘土系注入材として岡山県産のカオリンクレー懸濁液に着目



- 一次元浸透条件下でクレー懸濁液を圧力注入した場合の挙動を調査し、注入に最適なクレー懸濁液を検討
- 断面二次元土槽を用いた透水性低減効果の確認と、浸透距離の推定式から注入範囲の検討

- (1) 残留クレー質量が多くなれば透水性の低減効果が高い。
- (2) 透水性の低減効果の高いクレー懸濁液の粘性係数の範囲は約 $1.0 \sim 1.5 \text{ dPa} \cdot \text{s}$ の範囲である。
- (3) クレー懸濁液の一定圧力注入により楕円形での広がりを示すとともに、注入状況の再現性を確認することができた。
- (4) クレー懸濁液の注入範囲において、理論式の浸透距離 Re の結果と実験結果を比較した結果、理論式が実験結果よりも小さな値を示したことから、安全側の指標として適用可能である。