

土木学会 エネルギー委員会主催
放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム
令和4年5月17日（於：土木学会講堂）

幌延地下研における立坑掘削時の水圧応答と 亀裂連結性の変化等に関する研究開発

Hydro-mechanical response during excavation
of shafts for the evaluation of fault hydraulic
connectivity

日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター 尾崎 裕介

Japan Atomic Energy Agency
Horonobe Underground Research Center
Yusuke Ozaki



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Geomechanics for Energy and the Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/gete



Variation in fault hydraulic connectivity with depth in mudstone: An analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL

Yusuke Ozaki^{a,*}, Eiichi Ishii^a, Kentaro Sugawara^b

^a Horonobe Underground Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Hokushin 432-2, Horonobe-cho, Hokkaido, 098-3224, Japan

^b Geoscience Research Laboratory, Yamato Higashi 3-1-6, Yamato, Kanagawa, 242-0017, Japan

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 May 2021

Received in revised form 9 December 2021

Accepted 4 January 2022

Available online xxx

Editors-in-Chief:

Professor Lyesse Laloui and Professor Tomasz Hueckel

Keywords:

Fault hydraulic connectivity
Effective hydraulic conductivity
Shaft excavation
Hydraulic pressure monitoring
Mandel-Cryer effect

ABSTRACT

Faulted mudstones have low effective hydraulic conductivity if the faults have limited hydraulic connectivity. Therefore, the hydraulic connectivity of faults is a crucial consideration in the geological disposal of high-level radioactive waste. There is a simple method based on single-borehole investigations to classify domains of faults in mudstone as having either high or low hydraulic connectivity. However, the nature of the hydraulic connectivity's transition with depth around the boundary between domains of faults with high and low hydraulic connectivity remains poorly understood. At the Horonobe Underground Research Laboratory (Japan), three shafts have been excavated in a Neogene siliceous mudstone, and hydraulic pressure has been monitored at boreholes during the laboratory's construction and operation. This study analyzed long-term hydraulic pressure data to estimate the variation of effective hydraulic conductivity and explore the nature of the variation of fault hydraulic connectivity with depth around the predicted boundary (at ~400 m depth) between domains of faults with high and low hydraulic connectivity (with less connectivity below the boundary). As the observed hydraulic pressure was greatly affected by the Mandel-Cryer effect, numerical simulations considered poroelastic effects. They showed that the effective hydraulic conductivity gradually decreased from ~400 to ~500 m depth, becoming comparable with that of intact rock below ~500 m. Theoretical analysis of the observed data also indicated the same variation with depth. These results suggest that the hydraulic connectivity of faults does not change abruptly, but instead varies gradually over several tens of meters around the domain boundary.

© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

内容 Contents

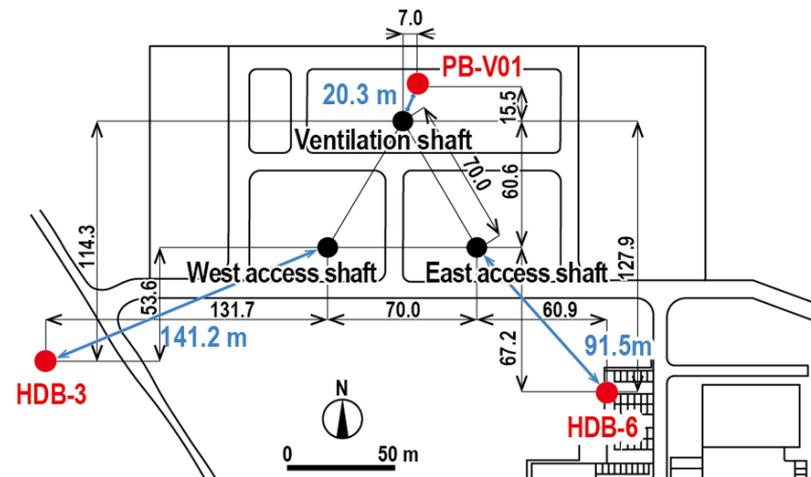
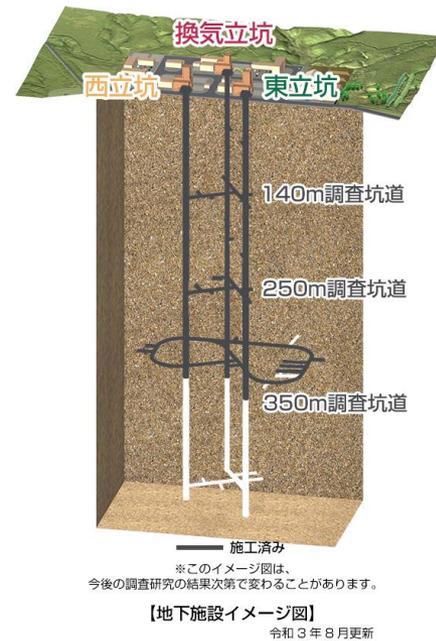
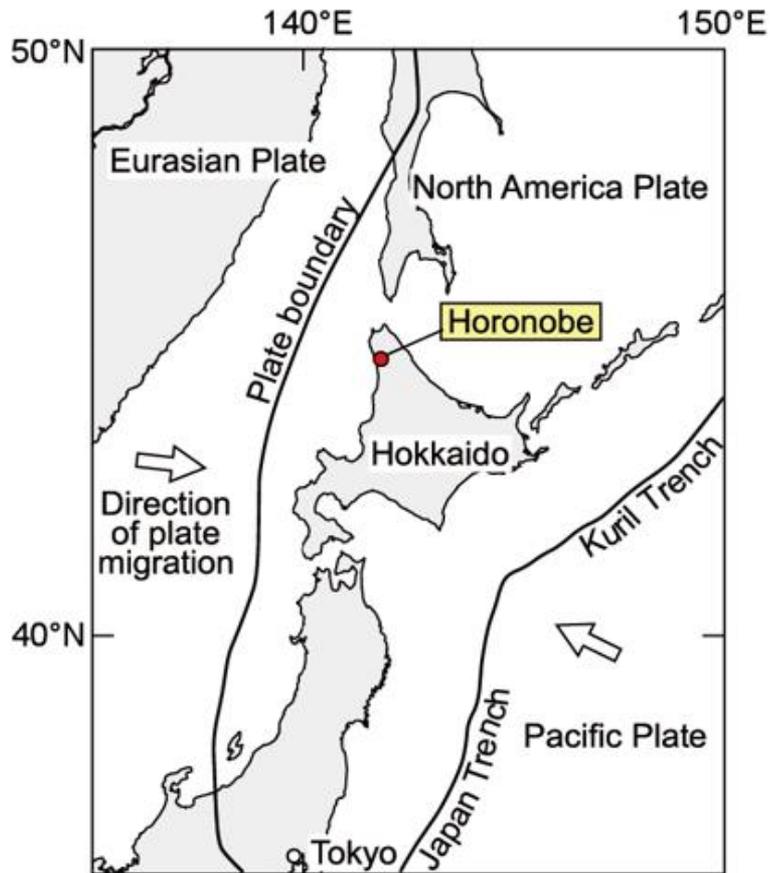
- 背景・目的
 - 研究対象と使用したデータ
 - 数値解析
 - 解析モデル
 - 感度解析（透水性）
 - 感度解析（力学特性）
 - 結論
- Objective of this study
 - Study site and data
 - Numerical simulation
 - Simulation model
 - Sensitivity analysis of effective hydraulic conductivity
 - Sensitivity analysis of mechanical properties
 - Conclusion and future study

背景・目的

Objective

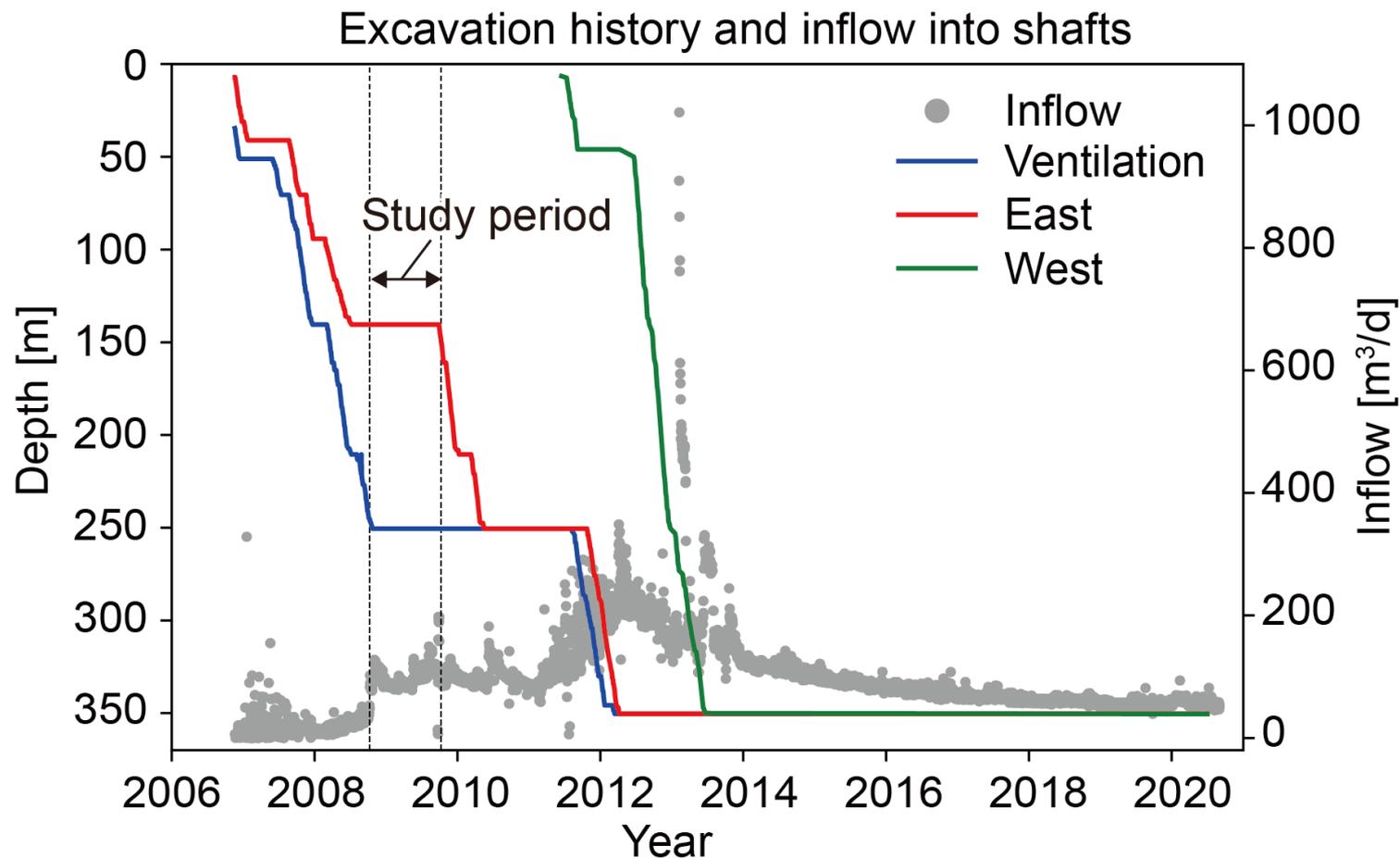
- 地層処分において低透水性の領域を検出する技術は重要である
- 先行研究では、断層の力学的な挙動に基づき、地下深部における堆積岩中の断層の連結性が乏しく透水性が低いことが予測されている
- 立坑掘削時の水圧応答の解析は、その応答の大きさから地下深部の低透水性領域の評価への利用が期待できることから、先行研究による低透水性の評価手法の実証に利用可能

調査場所 Study site



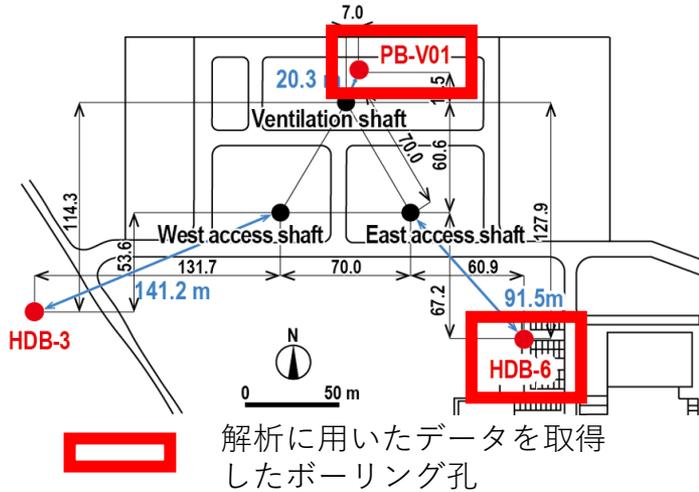
掘削と掘削時の湧水量

Excavation history and study period



掘削済みの深度および流量が概ね一定であり、モデル化が比較的容易なことからこれらのうち1年間(2008年10月 - 2009年10月)を解析の対象とする

立坑付近のボーリング孔 Studied data



解析対象：稚内層における水圧応答

PB-V01 未使用 使用

HDB-3

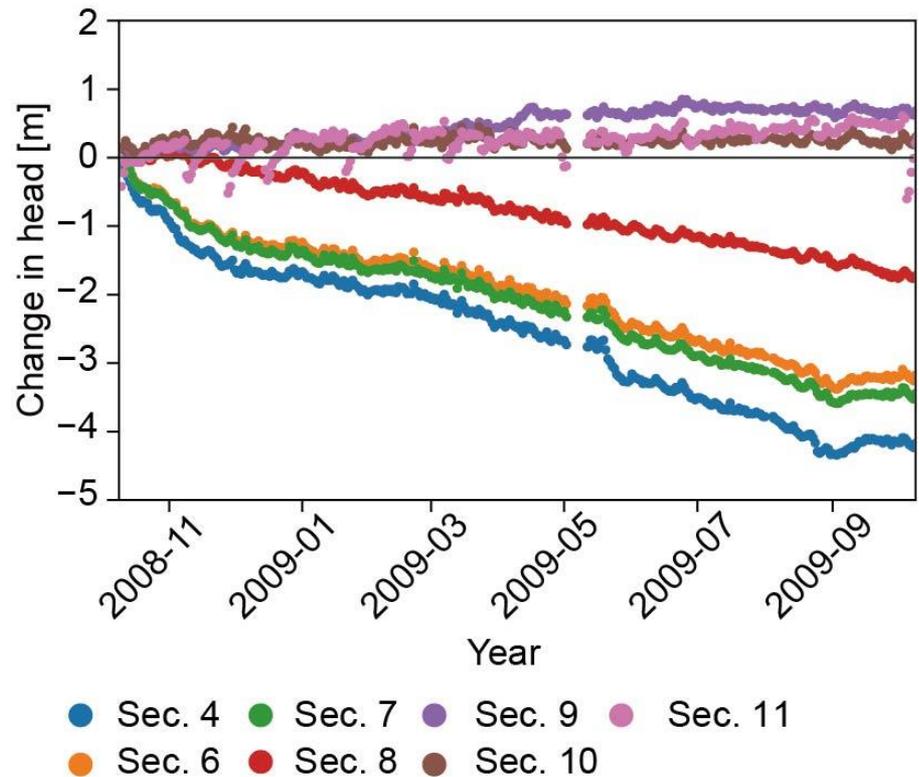
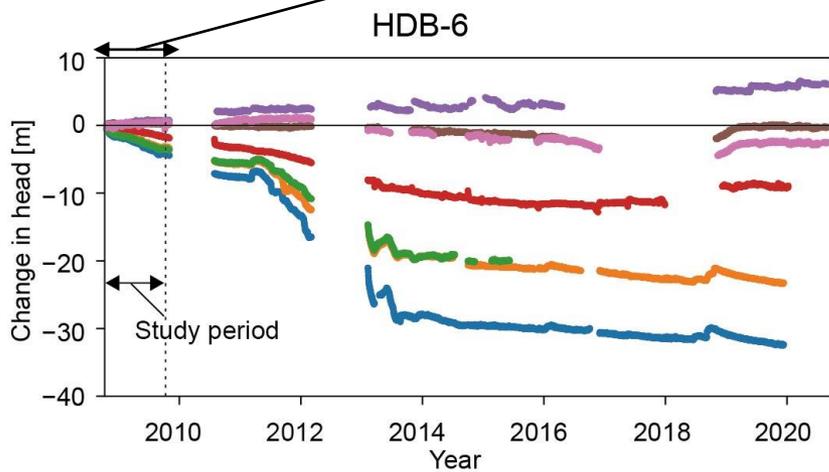
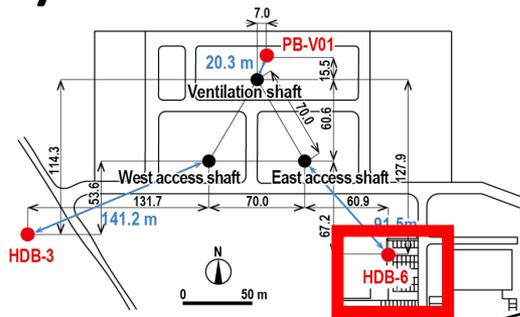
No.	Monitoring section (Below ground level, m)	Geology
1	90.19–100.04	Koetoi Fm.
2	185.36–195.21	Koetoi Fm.
3	196.11–258.53	Koetoi Fm.
4	326.39–336.21	Koetoi Fm.
5	397.54–426.84	Koetoi Fm.
6	435.23–487.28	Wkkanai Fm.
7	488.18–498.00	Wkkanai Fm.

HDB-6

No.	Monitoring section (Below ground level, m)	Geology	Geological feature
1	60.57–70.41	Koetoi Fm.	
2	71.31–24.74	Koetoi Fm.	
3	225.64–287.76	Koetoi Fm.	
4	291.00–301.00	Wkkanai Fm.	Fault
5	303.80–361.94	Wkkanai Fm.	
6	364.00–374.00	Wkkanai Fm.	Fault
7	389.00–394.00	Wkkanai Fm.	Fault
8	443.50–450.50	Wkkanai Fm.	Fault
9	509.00–514.00	Wkkanai Fm.	No Fault
10	562.50–567.50	Wkkanai Fm.	Fault
11	587.50–592.50	Wkkanai Fm.	No Fault

HDB-6における水圧応答

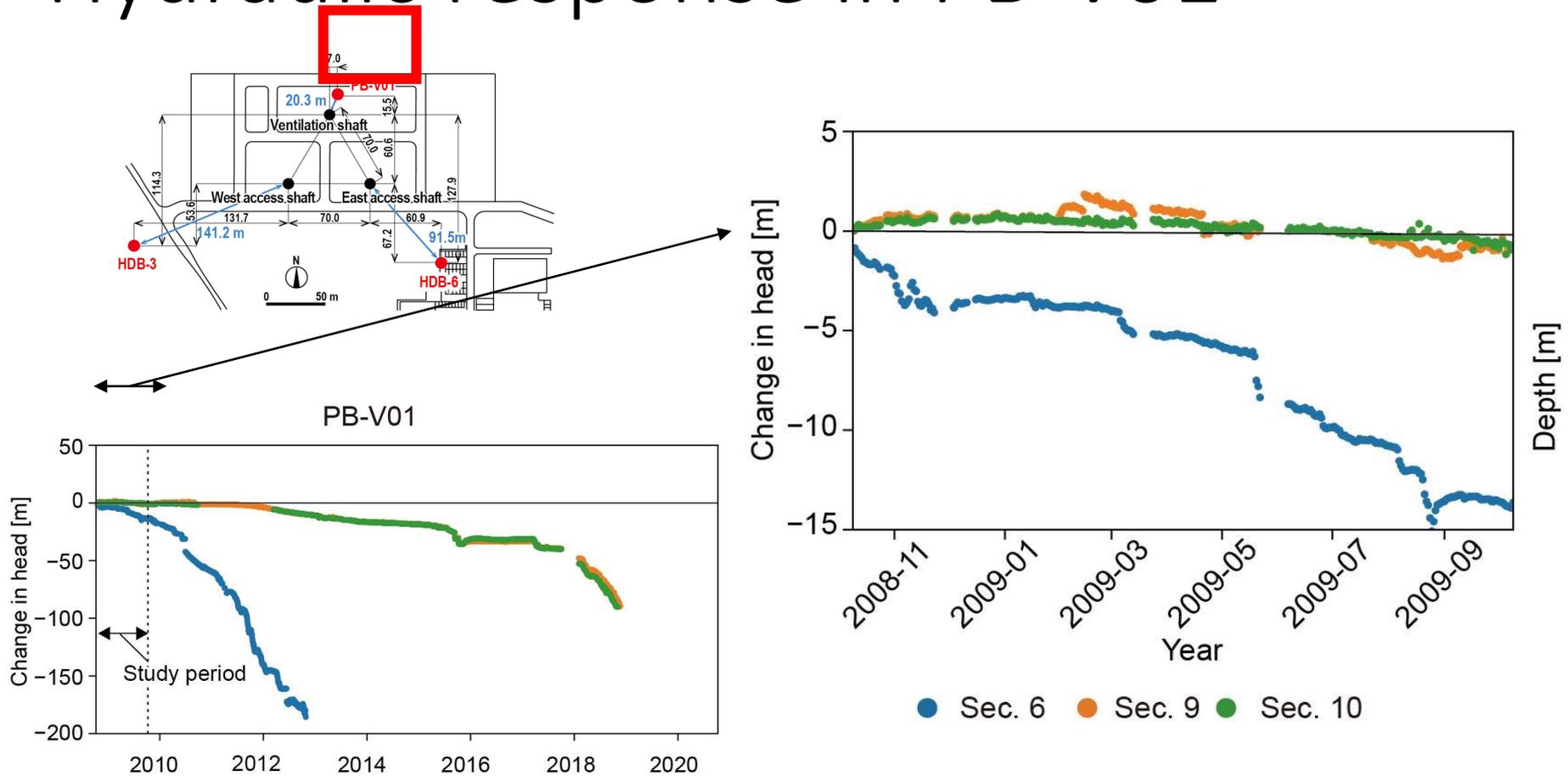
Hydraulic response in HDB-6



- 509mより浅い位置にあるボーリング孔では水圧が低下
- 509mより深い位置にあるボーリング孔では水圧が上昇

PB-V01における水圧応答

Hydraulic response in PB-V01



- 461.01mより浅い位置にあるボーリング孔では水圧が低下
- 461.01mより深い位置にあるボーリング孔では水圧が一時的に上昇

数値解析 Numerical simulation

- ビオ理論に基づく水理力学連成解析

幌延のような軟岩においては水理力学連成動が顕著な可能性

基礎方程式

$$-\nabla \cdot \sigma = f + \rho g$$

つり合い式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{k}{\rho g} \nabla^2 p = s$$

地下水の質量保存則

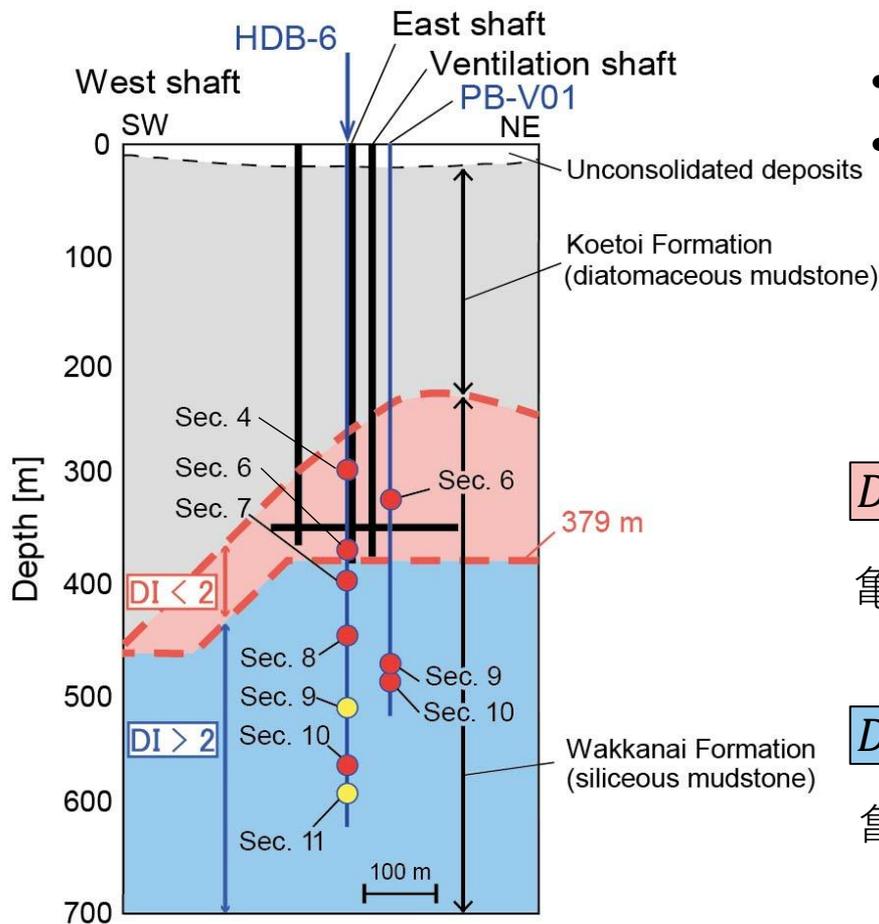
$$\begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_v \\ \Delta \zeta \end{pmatrix} = \frac{1}{K} \begin{pmatrix} 1 & -\alpha \\ -\alpha & \alpha/B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \sigma_m \\ \Delta p \end{pmatrix}$$

応力・水圧と体積ひずみおよび
間隙流体の体積の線形関係

FLAC3D 5.01を用いて解析を実施

概念モデル

Conceptual Model



- Fault intersection
- No fault intersection

- 稚内層の透水性に着目した解析
- 稚内層内の透水構造をダクタリティインデックス(DI)により分割

$$DI = \frac{\sigma'_m}{\sigma_t} \quad \sigma'_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \alpha p$$

DI < 2

亀裂や断層の連結性が高く、透水性が高い

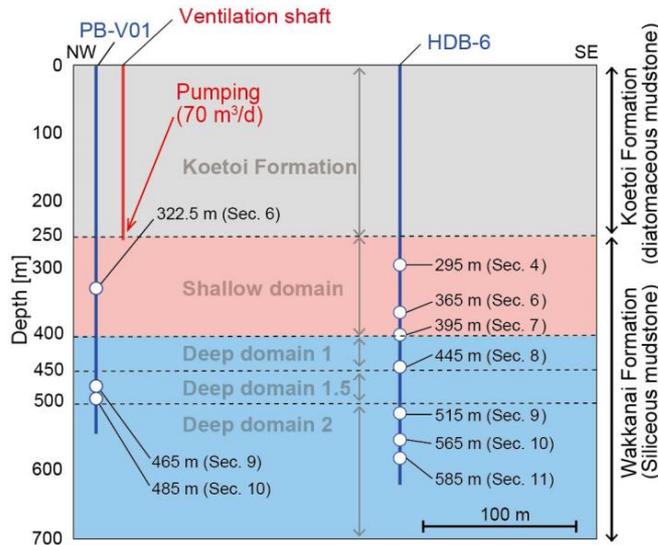
DI > 2

亀裂や断層の連結性が乏しく、透水性が低い

Ishii, 2015

解析モデル

Simulation results



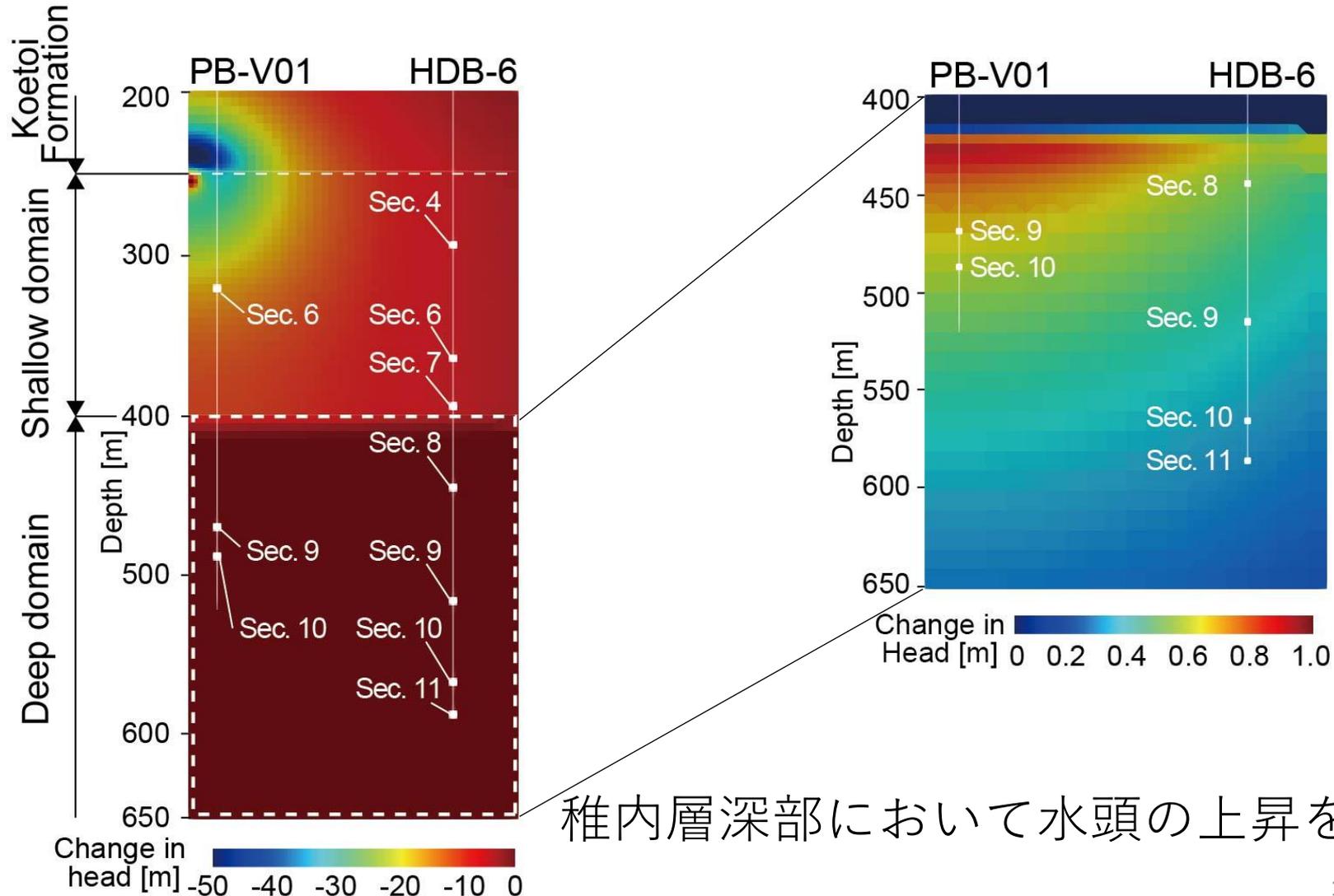
- 力学特性および水理力学連成挙動に関する物性値は、室内試験により取得された値を参考に設定
- 声問層および稚内層浅部の透水性は、パッカー試験により取得された値を参考に設定
- 稚内層深部の透水性は健岩部の値を参考に設定

基本モデルのパラメータ

	G [GPa]	K [GPa]	α	B	ϕ	k [m/s]	S_s [1/m]
Koetoi Formation	0.24	0.55	1.0	0.87	60	5.0×10^{-9}	1.4×10^{-5}
Shallow domain	1.95	1.62	0.93	0.79	40	2.0×10^{-8}	3.5×10^{-6}
Deep domain 1	1.95	1.62	0.93	0.79	40	1.0×10^{-11}	3.5×10^{-6}
Deep domain 1.5	1.95	1.62	0.93	0.79	40	1.0×10^{-11}	3.5×10^{-6}
Deep domain 2	1.95	1.62	0.93	0.79	40	1.0×10^{-11}	3.5×10^{-6}

解析結果 (水頭分布) Simulation results (hydraulic head)

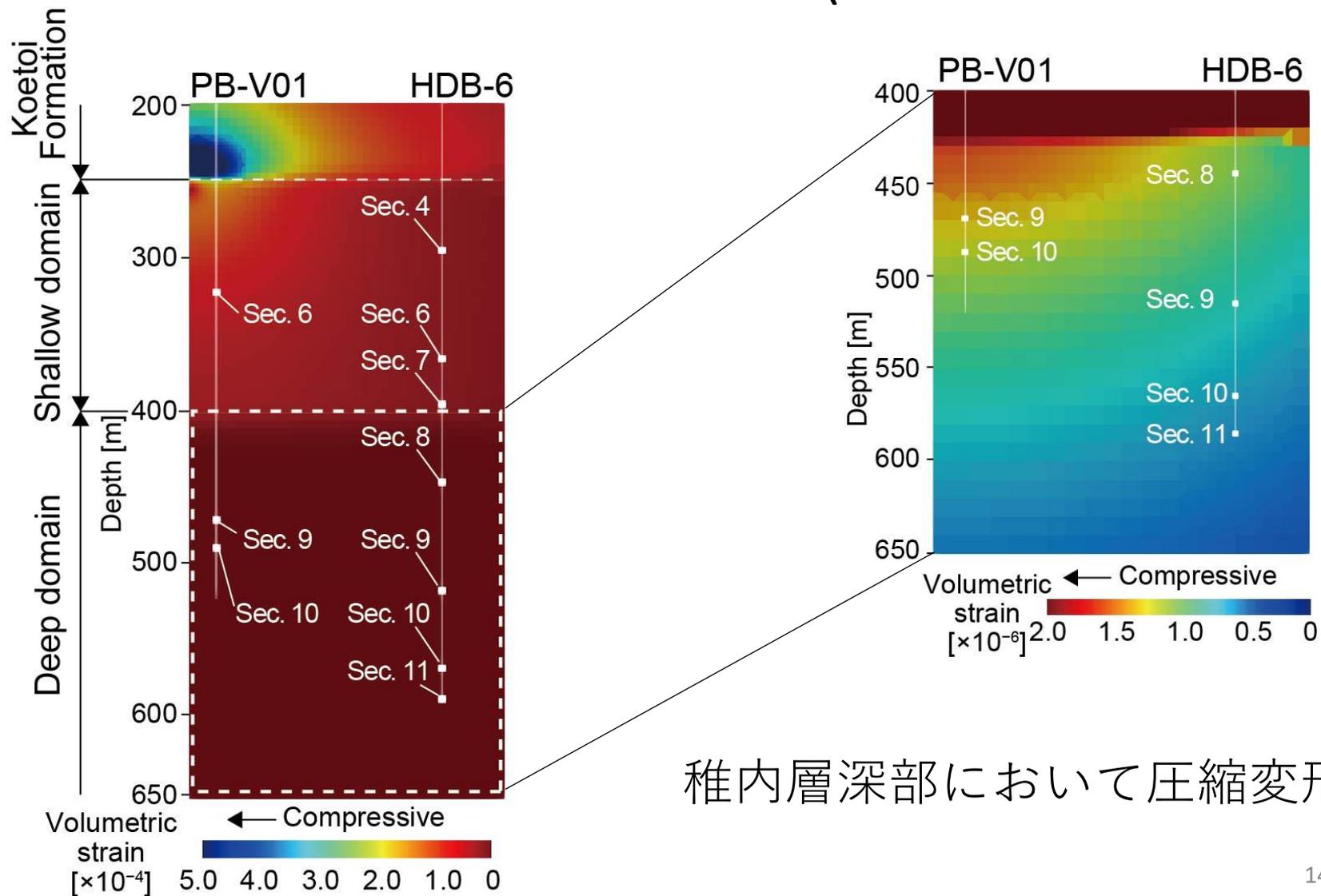
1年後の解析結果



稚内層深部において水頭の上昇を再現

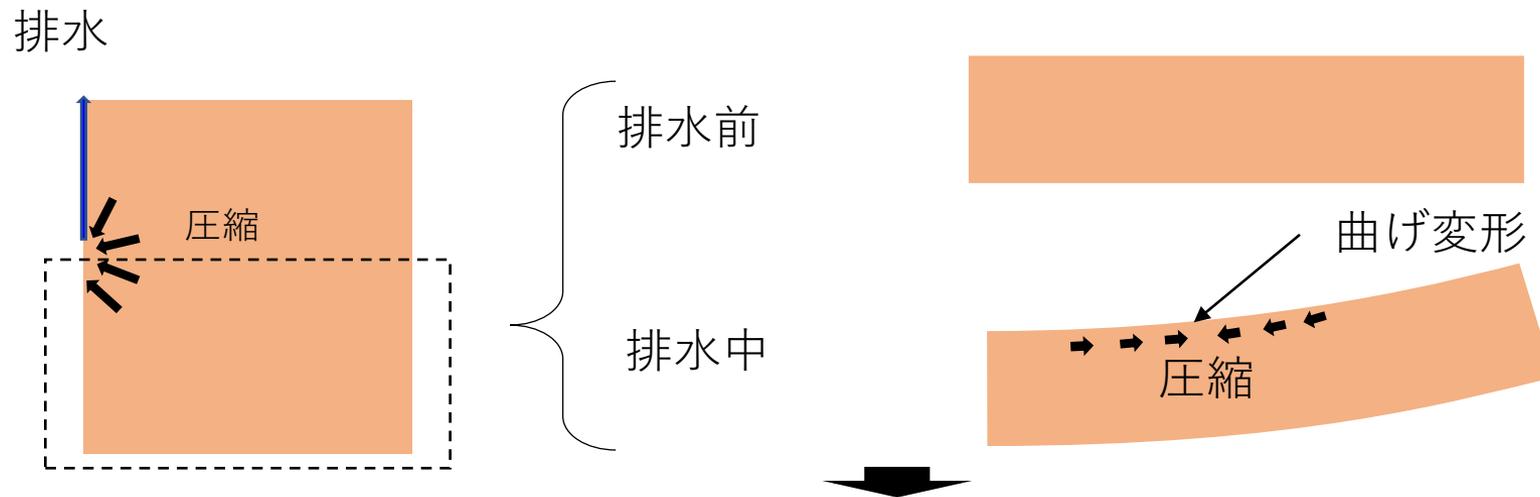
解析結果(体積ひずみ) Simulation results (Volumetric strain)

1年後の解析結果

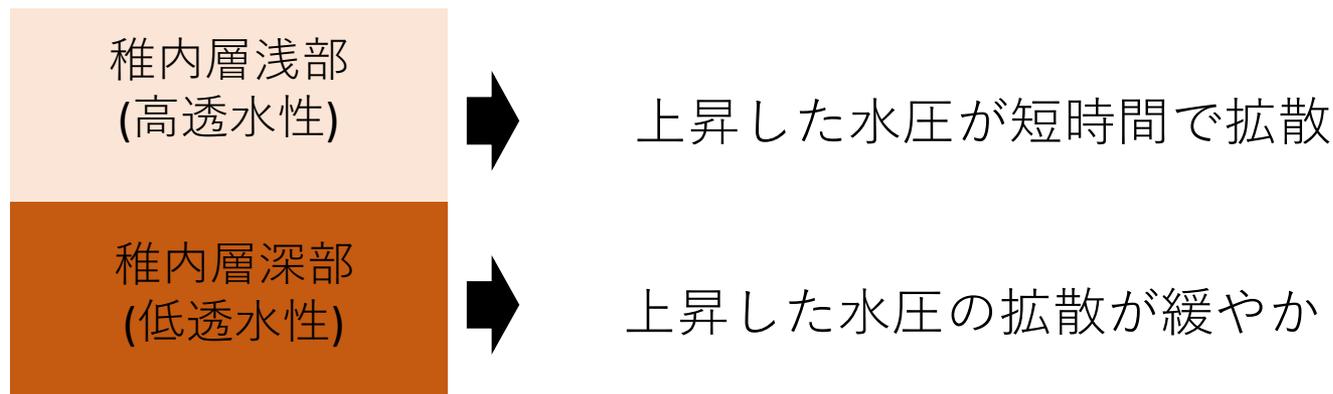


稚内層深部において圧縮変形

稚内深部における水頭上昇 Mechanism of pressure raise



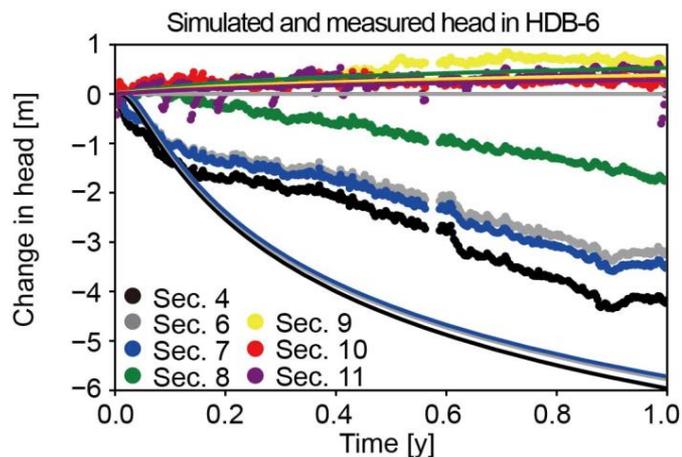
- 圧縮変形により間隙水圧が上昇



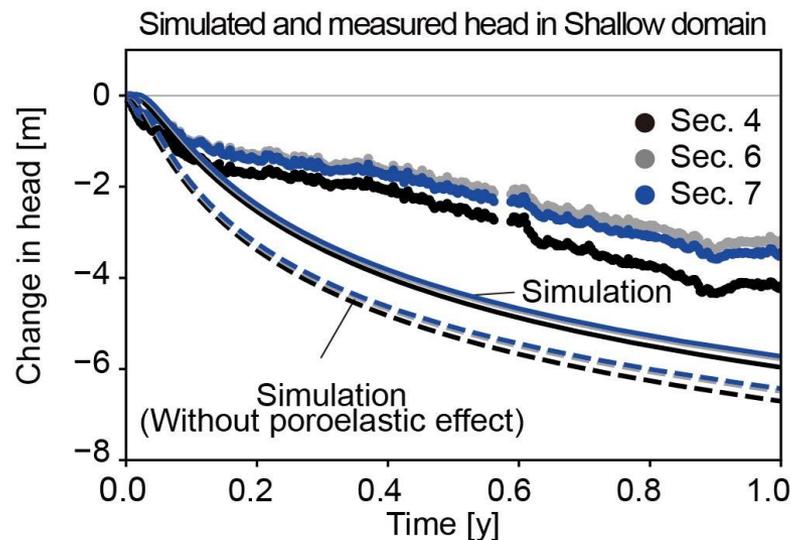
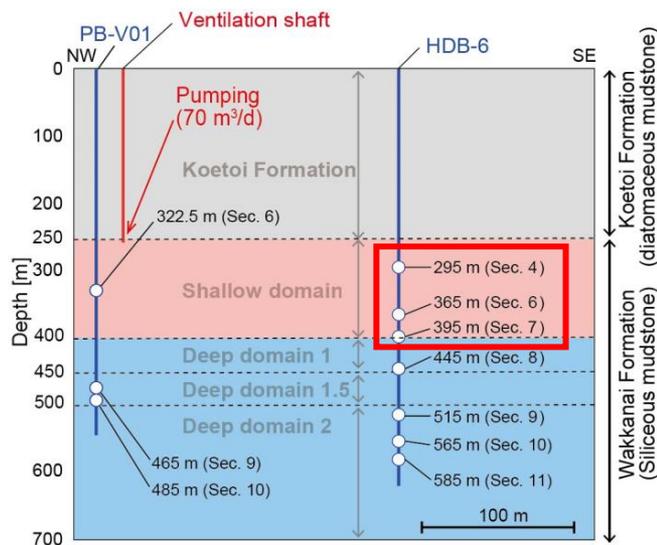
排水条件下における稚内層深部での水圧上昇はMandel Cryer効果で説明できる

解析結果と観測値の比較

Comparison of measured data and simulated results

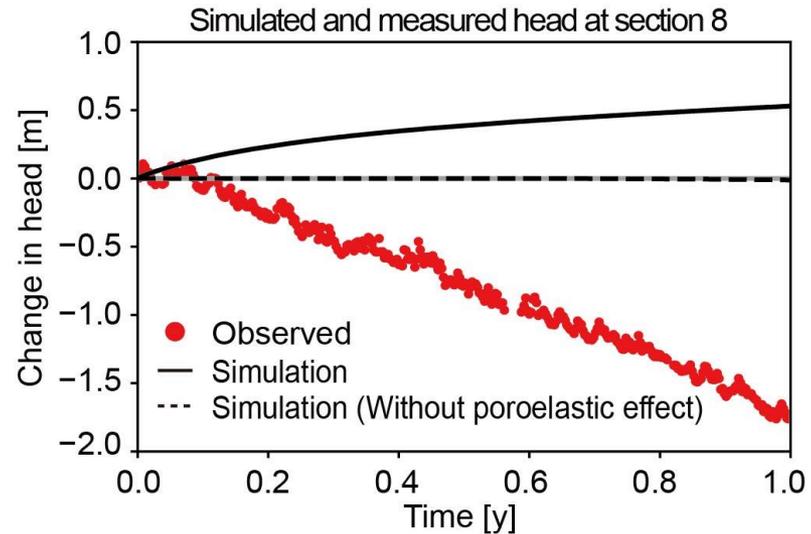
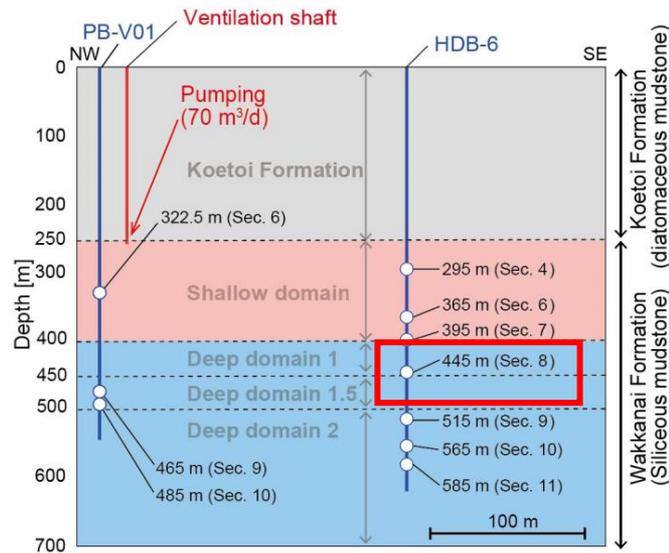


- 解析結果では稚内層浅部分では水頭が減少
- 稚内層深部で水頭の上昇を再現
- 稚内層浅部において、水理力学連成挙動は水頭の減少を抑制



解析結果と観測値の比較

Comparison of measured data and simulated results



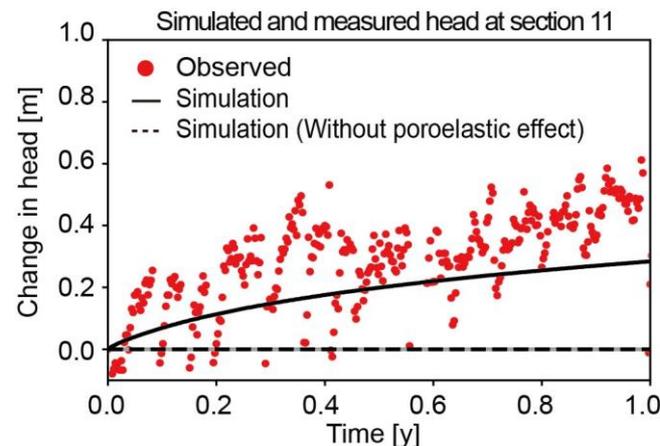
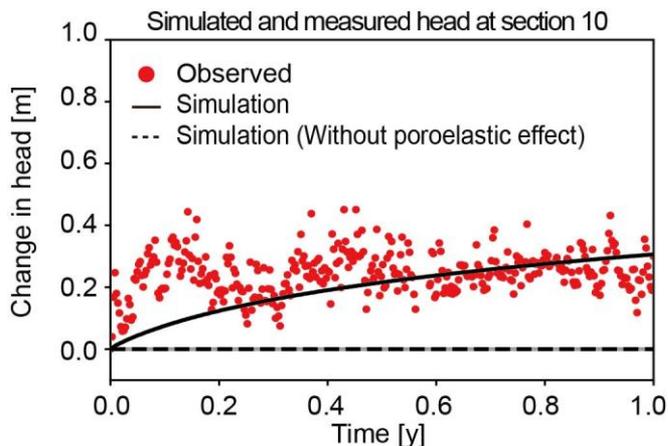
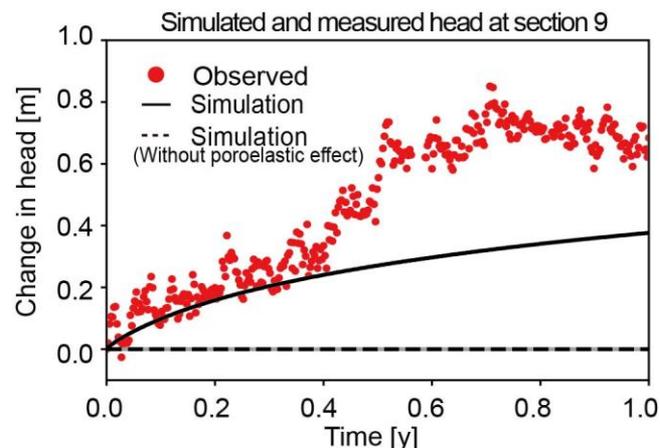
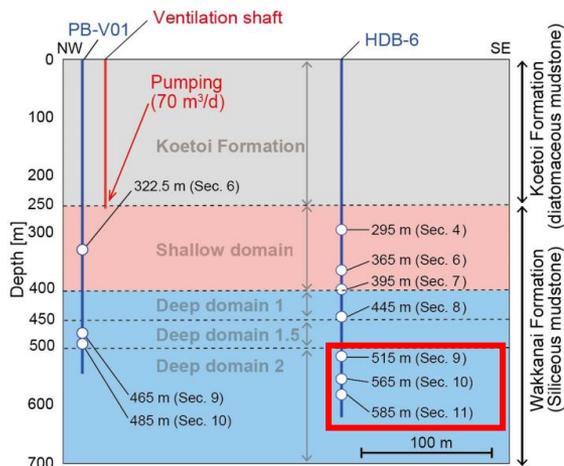
- 水理力学連成挙動を考慮しない場合、水頭に変化が見られない
- 水理力学連成挙動を考慮した場合、水頭が上昇



深度450m付近では基本モデルで設定した透水性よりも高い可能性

解析結果と観測値の比較

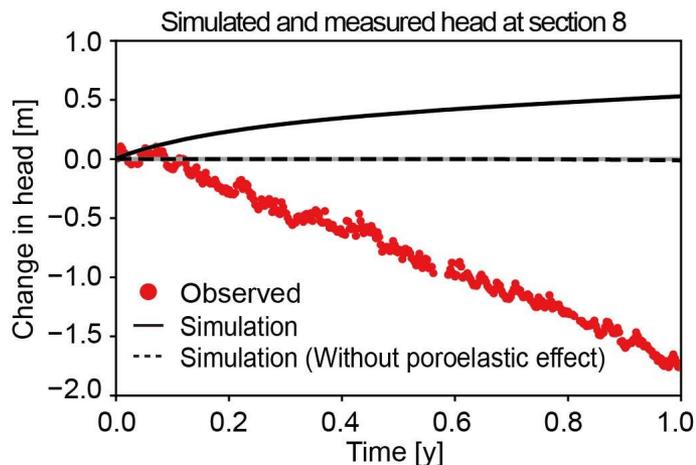
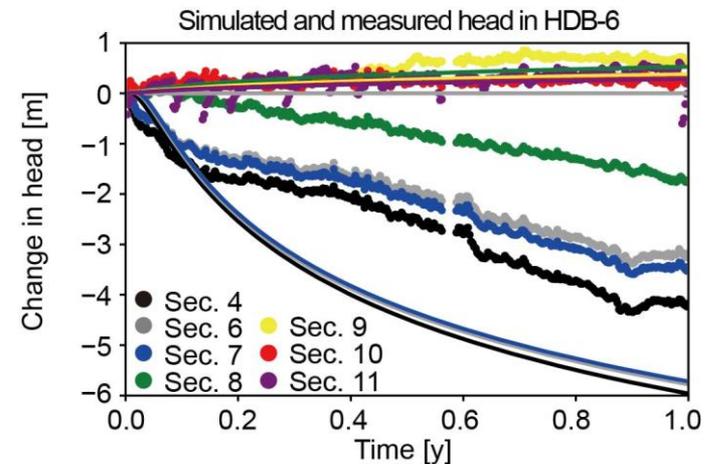
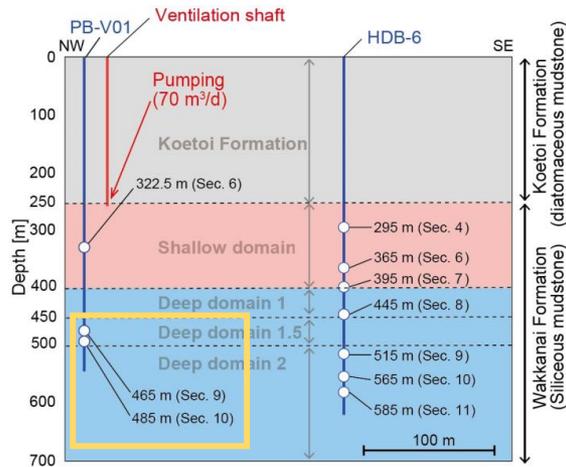
Comparison of measured data and simulated results



稚内層深部における水頭変化は再現

HDB-6における比較に関する考察

Question come from the comparisons



解析結果はDIの値が2付近である区間8を除いて概ね観測値を再現

- DIが2付近において透水性がどのように変化するのか評価

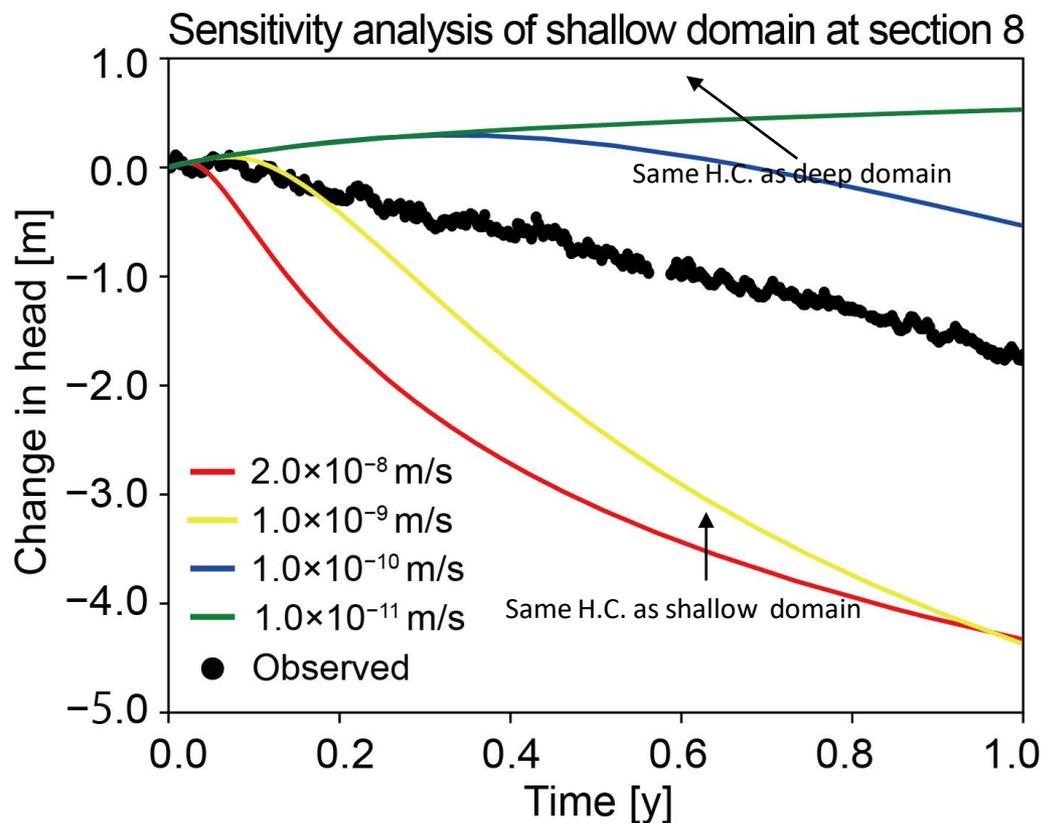
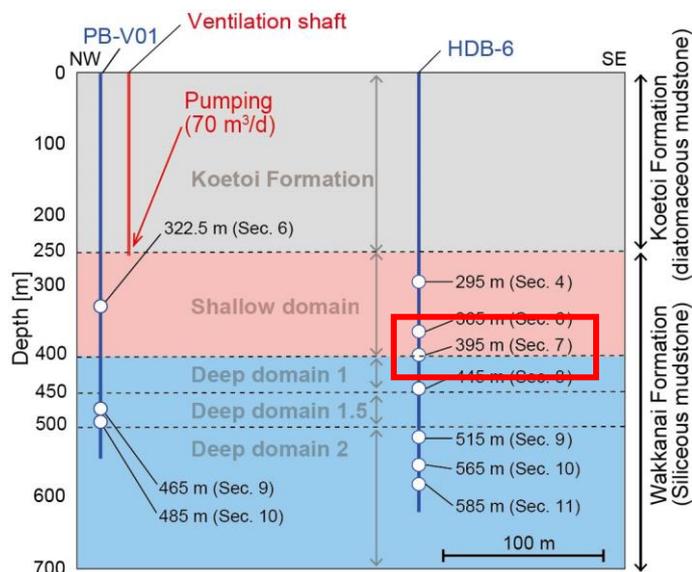


- PB-V01における比較による検討
- 感度解析による検討

HDB-6における水圧応答の感度解析

Parametric study around the boundary between shallow and deep domain

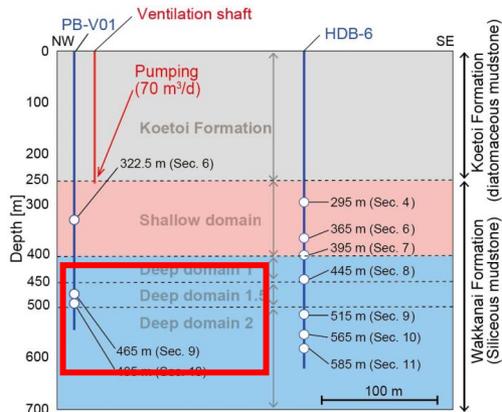
- 透水性（断層の連結性）が地下深くなるにつれて徐々に低下するという仮定の下、区間8が位置する深度の透水性を評価



- 区間8が位置する深度における透水性は、稚内層浅部と深部の間の値をとりうる

PV-B01における比較

Comparison of results in PV-B01



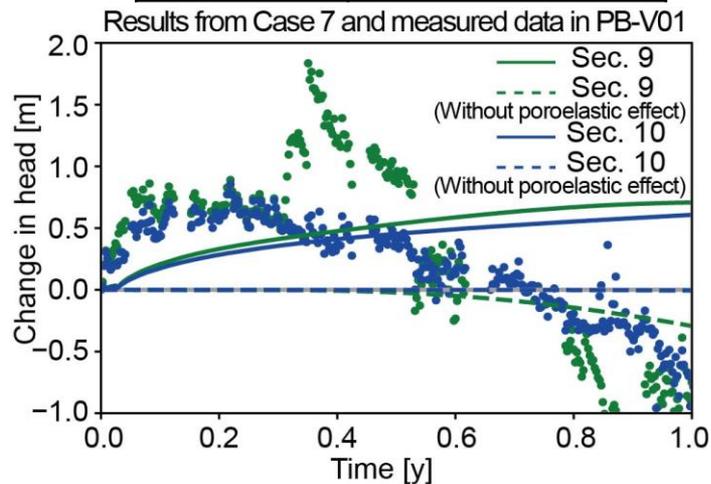
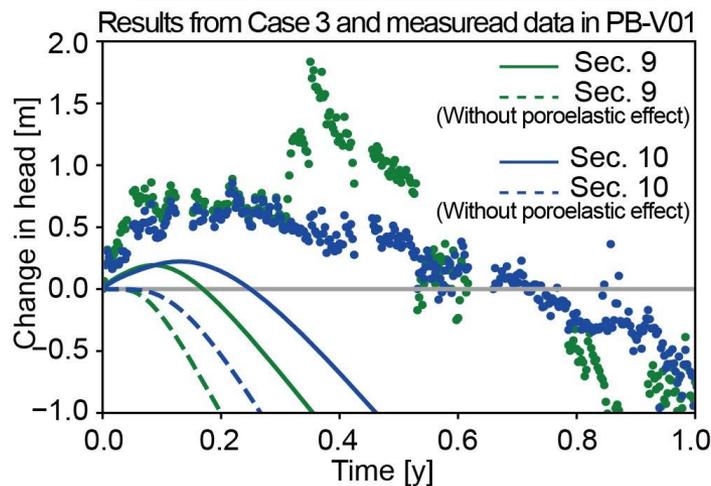
HDB-6における比較による推定

	Effective hydraulic conductivity [m/s]
Shallow domain	$\approx 2.0 \times 10^{-8}$
Deep domain 1	$1.0 \times 10^{-10} - 1.0 \times 10^{-9}$
Deep domain 2	1.0×10^{-11}

稚内層浅部と深部の間の領域をさらに分割

Deep domain 1	1.0×10^{-9}
Deep domain 1.5	1.0×10^{-9}
Deep domain 2	1.0×10^{-11}

Deep domain 1	1.0×10^{-9}
Deep domain 1.5	1.0×10^{-11}
Deep domain 2	1.0×10^{-11}



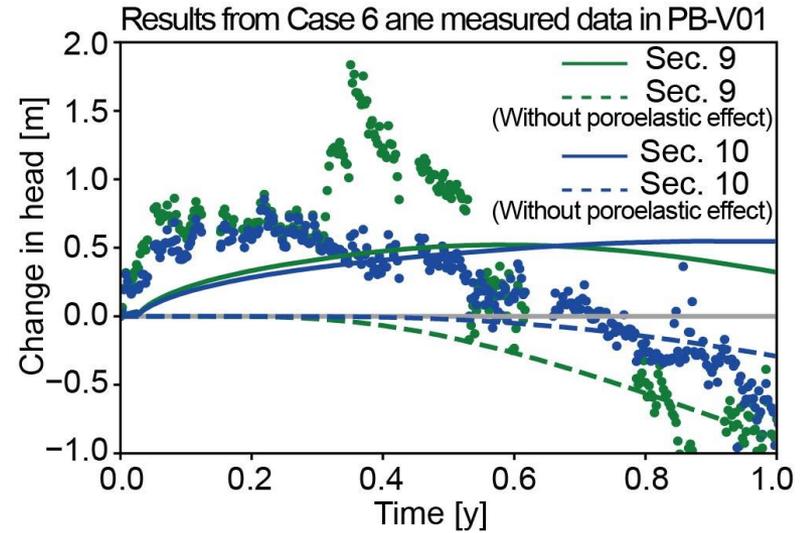
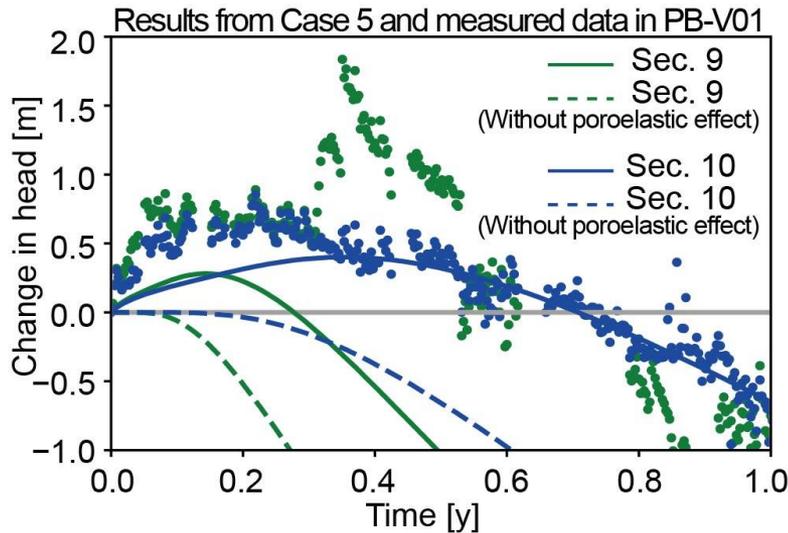
PV-B01による比較からも、稚内層深部において透水性（断層の連結性）が徐々に低下する様子が示唆される

PV-B01における比較

Comparison of results in PV-B01

Deep domain 1	1.0×10^{-9}
Deep domain 1.5	1.0×10^{-10}
Deep domain 2	1.0×10^{-11}

Deep domain 1	1.0×10^{-10}
Deep domain 1.5	1.0×10^{-10}
Deep domain 2	1.0×10^{-10}



PV-B01による比較からも、稚内層深部において透水性（断層の連結性）が徐々に低下する様子が示唆され、以下のように推定される

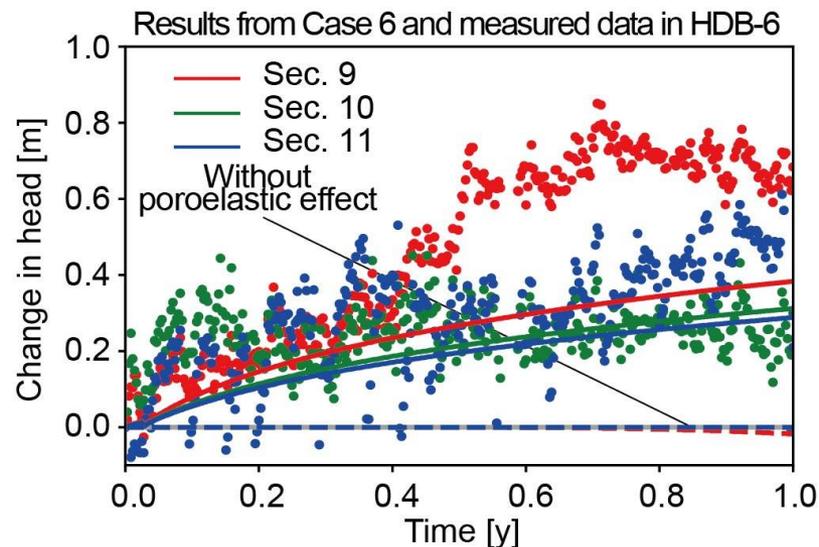
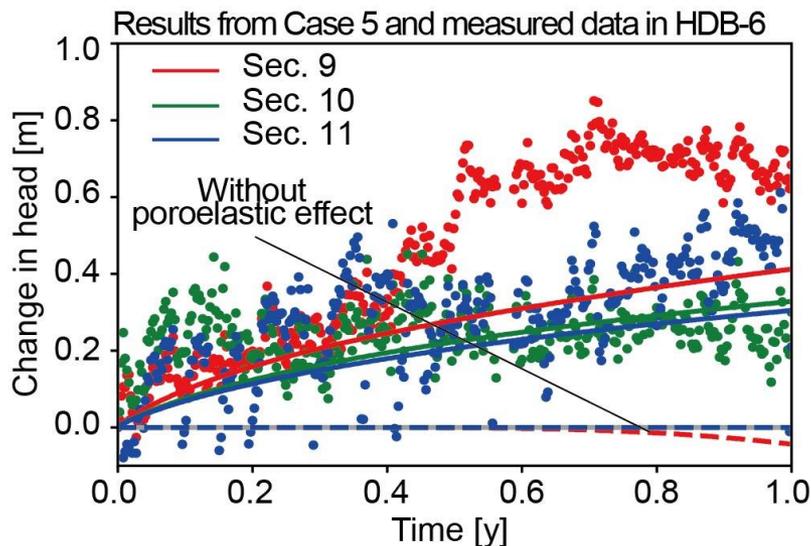
	Effective H.C.	Fault hydraulic connectivity
Shallow domain	$\approx 2.0 \times 10^{-8}$	High
Deep domain 1	$1.0 \times 10^{-10} - 1.0 \times 10^{-9}$	Intermediate
Deep domain 1.5	$\approx 1.0 \times 10^{-10}$	Intermediate
Deep domain 2	$1.0 \times 10^{-11} - 1.0 \times 10^{-10}$	Low

HDB-6における推定結果の検証

Confirmation of data in HDB-6

Deep domain 1	1.0×10^{-9}
Deep domain 1.5	1.0×10^{-10}
Deep domain 2	1.0×10^{-11}

Deep domain 1	1.0×10^{-10}
Deep domain 1.5	1.0×10^{-10}
Deep domain 2	1.0×10^{-10}



HDB-6およびPB-V01の水圧応答から、稚内層のDIの値が2付近の領域において、透水性（断層の亀裂の連結性）が徐々に低下する様子が示唆された

力学特性の設定および感度解析

Effect of mechanical properties on hydraulic response

- 水理力学連成挙動を考慮する場合、透水性に加えて力学的な物性値も設定する必要
- 健岩部相当の物性値を入力し立坑掘削時の水圧応答を再現
- 健岩部相当の物性値から計算される比貯留係数は、
原位置で観測された値と調和的



- 今回の再現解析を実施したような施設スケールの解析においては、
亀裂の連結性によらず健岩部相当の物性値を用いて解析できる可能性

力学特性が水圧応答に与える影響を検証

感度解析の条件

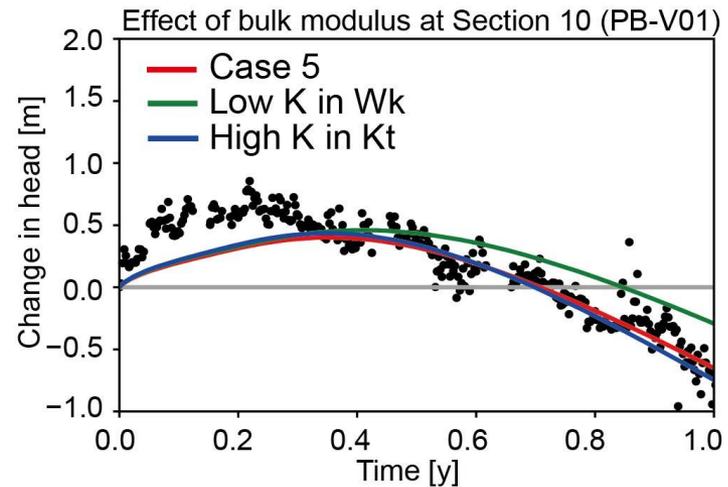
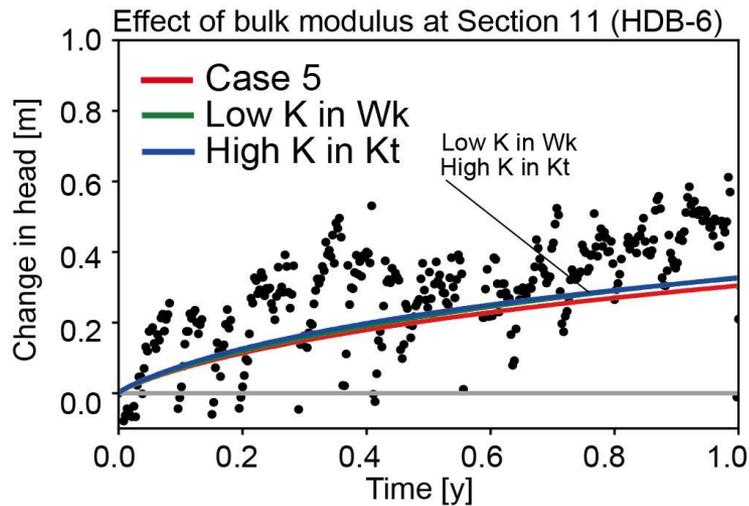
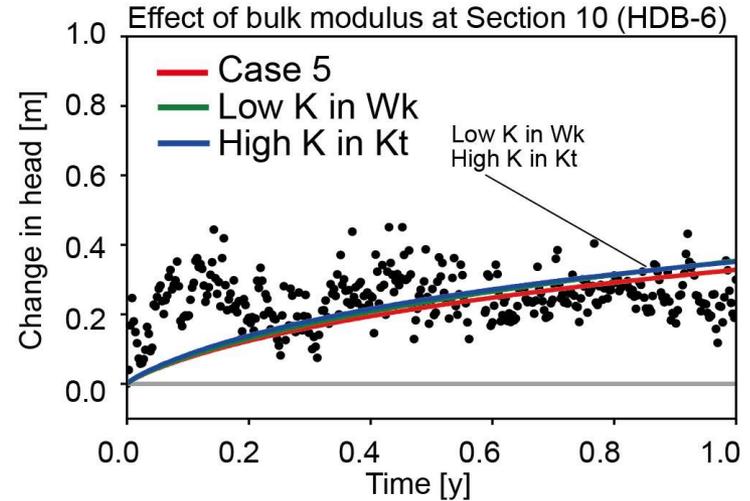
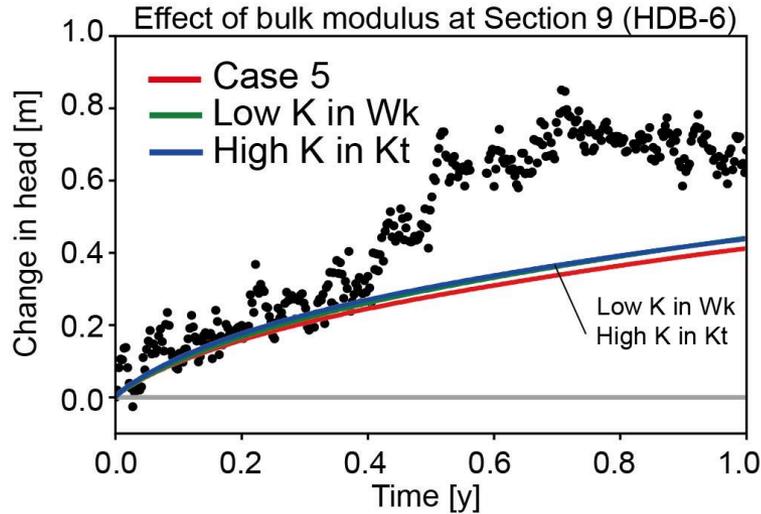
1. 稚内層は声問層よりも硬い（地下深部は地下浅部よりも硬い）
2. ポアソン比は正



体積弾性率および剛性率を制約

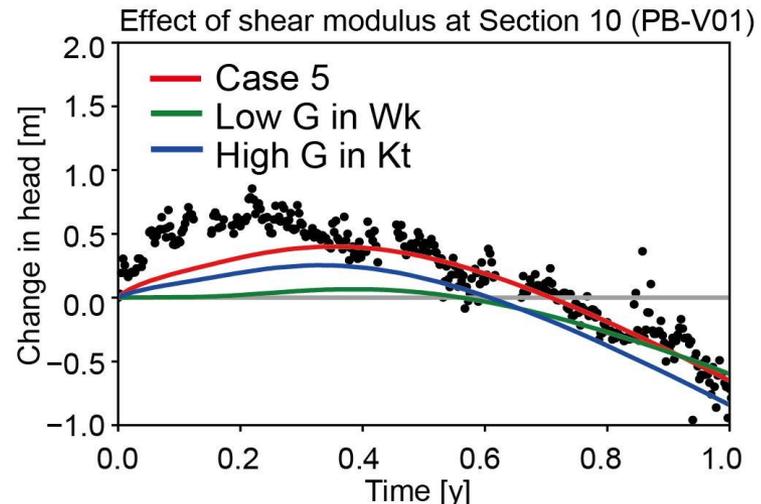
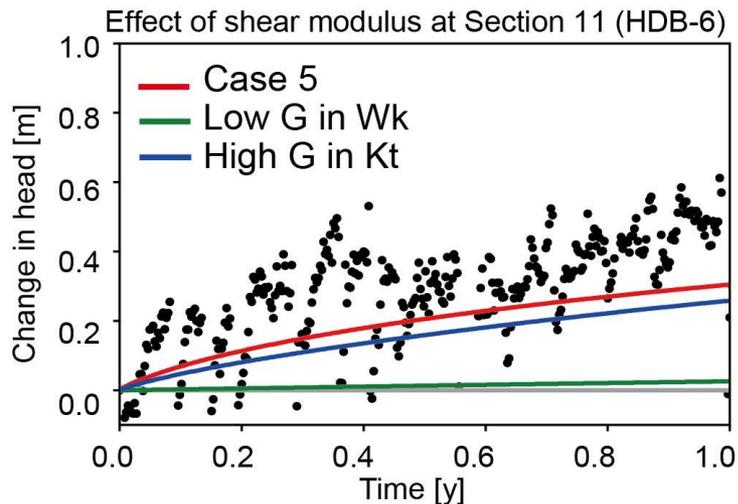
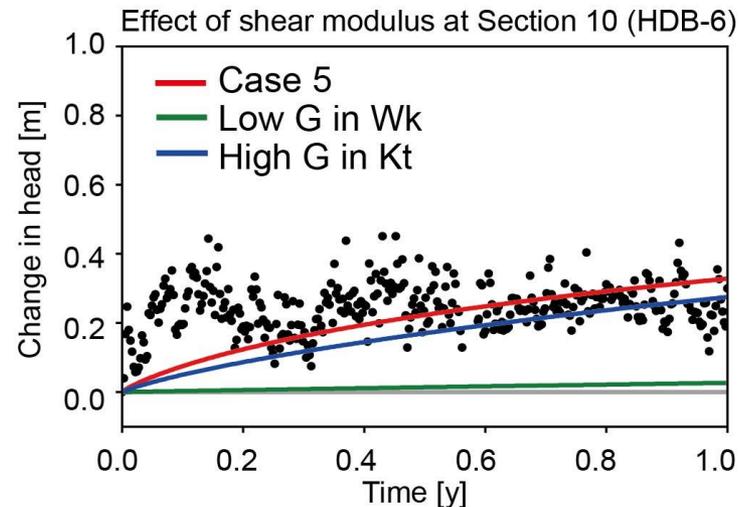
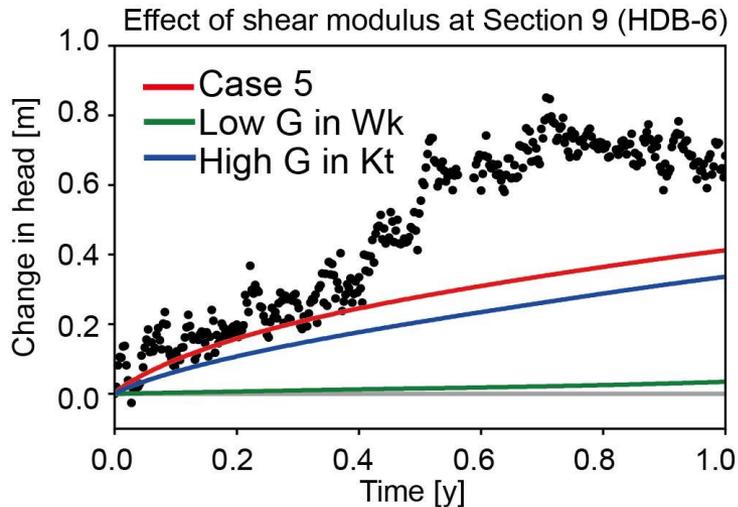
感度解析 (体積弾性率)

Sensitivity analysis of bulk modulus



感度解析（剛性率）

Sensitivity analysis of shear modulus



稚内層浅部と深部の剛性率の差が、稚内層深部における水圧上昇の程度に寄与

結論

Conclusion

- 水理力学連成解析により立坑掘削時の水圧応答の再現解析を実施
- 稚内層深部において排水条件下で観測された水圧上昇は水理力学連成挙動 (Mandel-Cryer effect) により再現
- 感度解析により、透水性（断層の連結性）は地下深部において徐々に低下する

パラメータ設定

Parameter Setting

体積弾性率の感度解析

	Koetoi Fm.			Wakkanai Fm.		
	G [GPa]	K [GPa]	γ	G [GPa]	K [GPa]	γ
Reference model	0.24	0.55	0.31	1.95	1.62	0.07
Low K in Wk	0.24	0.55	0.31	1.95	1.35	0.01
High K in Kt	0.24	1.62	0.07	1.95	1.62	0.01

剛性率の感度解析

	Koetoi Fm.			Wakkanai Fm.		
	G [GPa]	K [GPa]	γ	G [GPa]	K [GPa]	γ
Reference model	0.24	0.55	0.31	1.95	1.62	0.07
Low K in Wk	0.24	0.55	0.31	0.24	1.62	0.43
High K in Kt	0.80	0.55	0.01	1.95	1.62	0.07