

## 第27回 中部地盤工学シンポジウム論文集

平成27年8月7日（金）

主催：公益社団法人 地盤工学会 中部支部

後援：（一社）日本応用地質学会中部支部

中部地質調査業協会

（一社）建設コンサルタント協会中部支

（一社）日本建設業連合会中部支部



# 目 次

第1セッション（ 9 : 0 5 ~ 1 0 : 5 0 ）

司会 名古屋大学 野田 利弘

1-1 リン資材による締め固め条件下での鉛汚染土の不溶化効果と力学強度特性..... 1	
岐阜大学	小川 翔平, 佐藤 健
明治大学	加藤 雅彦
1-2 油汚染地盤の原位置非掘削浄化技術開発に関する室内土槽実験..... 7	
大同大学	棚橋 秀行
1-3 堆積軟岩を自然バリアとする高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する実験的 および解析的研究..... 15	
名古屋工業大学	山田 貴大, 木下 貴道, 栗本 悠平, 張 鋒
パシフィックコンサルタンツ(株)	蔭山 星
ジョイソンコントロールズ	神部 智也
1-4 三重県における災害廃棄物処理に対する取組 ..... 21	
応用地質(株)	伊藤 晃浩
三重県	藤田 修造, 春日井 忍
1-5 地震災害時の地下水利用を想定した濃尾平野における地下水管理..... 27	
大同大学	大東 憲二
1-6 開水路流れに起因する地盤内過剰間隙水圧の発生機構に関する一考察..... 31	
豊橋技術科学大学	松田 達也
名古屋工業大学	前田 健一, 山口 敦志, 三宅 達夫
北海道大学	泉 典洋
国土交通省中部地方整備局	伊藤 嘉
東洋建設(株)	宮本 順司, 角田 紘子, 鶴ヶ崎 和博
1-7 ジェット流によって発生する過剰間隙水圧に及ぼす地盤条件の影響..... 37	
名古屋工業大学	山口 敦志, 前田 健一, 李 兆卿
豊橋技術科学大学	松田 達也
日本工営(株)	齊藤 啓

特別講演その1 (11:00~12:00)

司会 名古屋大学 山田 正太郎

「南海トラフ巨大地震に備えて ～中部地震津波対策技術センターの取組～」

国土交通省 中部地方整備局 中部技術事務所 地震津波対策官 神野 祐一 氏

第2セッション (12:50~14:35)

司会 名古屋工業大学 檜尾 正也

2-1 スレキング特性の異なる3種類の泥岩砕石集合体の力学特性に及ぼす乾湿経験回数の影響 ..... 43

名古屋大学

酒井 崇之, 中野 正樹, 福田 雄斗, 工藤 佳祐

中日本高速道路(株)

倭 大史

2-2 高速載荷下における土を用いた緩衝材の載荷速度依存性に着目した耐衝撃挙動 ..... 51

名古屋工業大学

内藤 直人, 前田 健一, 奥村 勇太

(株)構研エンジニアリング

牛渡 裕二, 鈴木 健太郎, 川瀬 良司

2-3 火山砕屑物で覆われた斜面の崩壊予測 ..... 57

中部大学

余川 弘至, 浅野 憲雄, 武藤 大和

防衛大学校

野々山 栄人

名古屋大学

中野 正樹

2-4 三軸試験による河川堤防土の強度定数設定法 ..... 57

名城大学

小高 猛司, 崔 瑛, 武 楊, 田村 太郎

(株)建設技術研究所

李 圭太

2-5 プレート沈み込み運動と地震力の複合作用に起因するプレート境界断層の力学挙動 ..... 65

名古屋工業大学

栗本 悠平, 小枝 幸真, 王 乾, 張 鋒

2-6 人工埋立地盤に対する間隙水圧消散工法の液状化対策効果に関する数値解析的検討 ..... 76

名古屋大学

野中 俊宏, 山田 正太郎, 野田 利弘

2-7 空気～水～土骨格連成解析を用いた濃尾平野にある軟弱粘土地盤上の

河川堤防の耐震性照査 ..... 84

名古屋大学

吉川 高広, 野田 利弘, 中井 健太郎

東京ガス(株)

加藤 健太

特別講演その2 ( 14 : 45 ~ 15 : 45 )

司会 名古屋大学 山田 正太郎

「平成26年8月豪雨による広島土砂災害について」

広島大学 教授 土田 孝 先生

第3セッション ( 15 : 55 ~ 17 : 40 )

司会 豊田工業高等専門学校 伊東 孝

- 3-1 MRI による土の不飽和浸透特性把握の試み ..... 92  
山梨大学 荒木 功平, 藤森 弘晃, 舛谷 敬一, 熊谷 博司,  
坂本 肇, 大西 洋
- 3-2 粒度分布形状と内水圧変動に着目した管渠周辺の陥没挙動 ..... 96  
名古屋工業大学 新井 拓弥, 前田 健一, 佐藤 弘瑛, 田坂 晃一
- 3-3 基礎地盤の透水性に起因する堤体の進行性破壊 ..... 104  
名城大学 崔 瑛, 小高 猛司  
㈱建設技術研究所 李 圭太
- 3-4 既設群杭基礎の地盤部分改良工法の耐震補強効果に関する研究 ..... 108  
名古屋工業大学 西 遥輝, Kheradi Hamayoon, 張 鋒  
㈱大林組 岡 良亮
- 3-5 擁壁のための杭基礎の許容変位を考慮したたわみ挙動解析 ..... 114  
豊橋技術科学大学 岩越 恭平, 三浦 均也, 松田 達也  
㈱サインファースト 栗田 和博
- 3-6 砂質地盤中のサクシオンアンカーの把駐力特性に関する遠心模型実験 ..... 120  
東海大学 北 勝利



第1セッション  
(9 : 05 ~ 10 : 50)

司会 野田 利弘  
(名古屋大学)





## リン資材による締め固め条件下での鉛汚染土の不溶化効果と力学強度特性 Lead immobilization and mechanical strength in compacted soil with hydroxyapatite

小川翔平<sup>1</sup>, 加藤雅彦<sup>2,3</sup>, 佐藤健<sup>3</sup>

1 岐阜大学大学院・工学研究科生産開発システム工学専攻・kggxq712@yahoo.co.jp

2 明治大学・農学部農芸化学科

3 岐阜大学・工学部社会基盤工学科

### 概 要

不溶化処理では、重金属の溶出を防止するために汚染土壌へ不溶化資材が混和され、原位置埋め戻し、転圧、舗装後に土地の再利用が図られる。この場合、処理土壌に力学強度が要求され、必要に応じ安定処理材の追加が必要となる。しかし、不溶化資材単体による力学特性の変化に着目した研究は少ない。また、締め固められた土壌中での重金属不溶化効果を確認した研究も少ない。本研究は、リン資材を添加した鉛汚染土を最適含水比で締め固め、湿潤養生後の供試体の一軸圧縮強度と安定鉛物形成量および鉛溶出抑制効果を明らかにした。土壌への10%のリン資材添加は、土壌の物理性を変化させ、汚染の程度に関わらず一軸圧縮強度と靱性の増加をもたらすことが確認された。また、汚染土では、湿潤状態でのリン資材混和、締め固め状態での湿潤養生によって、緑鉛鉱が形成、成長することが確認され、同時に鉛の溶出量も抑制されることが確認された。

キーワード：鉛汚染、不溶化、リン資材、緑鉛鉱、一軸圧縮強度

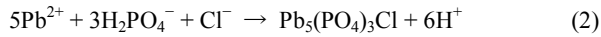
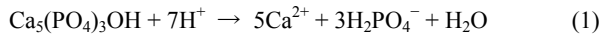
### 1. はじめに

重金属土壌汚染では、重金属の地下水溶出とそれによる健康被害を防ぐため、汚染土壌の掘削除去、遮水工による重金属移動の未然防止、矢板や地中壁による重金属移動の経路遮断などの対策がとられる。なかでも、重金属の溶解性を低減させることを目的とした不溶化処理は、施工手順が資材混合、転圧のみを要する簡便なものであるため、他の対策よりも安価であり、膨大な土量の汚染にも対応できる点に特徴がある。不溶化処理の資材は、土壌中のpHや酸化還元状態を変化させ重金属が溶解しにくい条件を作り出すものと、資材が重金属の吸着媒となり溶解した重金属を保持するものに分けられる<sup>1)</sup>。これら資材により不溶化された汚染土壌において、力学強度が要求される場合には、セメント系、石灰系の固化材が追加混合される。これらの固化材添加は、強度発現メカニズム上、土壌が高アルカリ条件となるため、一部重金属の可溶化、資材上の重金属の脱着が誘発され、不溶化した重金属の再溶出につながる可能性がある<sup>2)</sup>。

不溶化資材の中でも、鉛(以下、Pb)などの2価陽イオン重金属に対して高い吸着性を有するリン資材は、吸着したPbを式(1)、式(2)の反応により低溶解性の安定鉛物(緑鉛鉱)に変換し保持することができる<sup>3-5)</sup>。緑鉛鉱( $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ )の溶解度積( $\log K_{sp} = -25.05$ )は極めて低く<sup>5)</sup>、pHや酸化還元状態の変化に対して安定である<sup>4)</sup>。そ

のため、リン資材により緑鉛鉱に変換されたPbは、固化材の追加混合による再溶出の可能性が低く、長期的に安定した状態で維持されやすいと考えられる<sup>6)</sup>。これまでに、リン資材のPb汚染土壌への適用が国際的に検討されている<sup>7-10)</sup>。しかし、そのほとんどは、不溶化土壌の化学的性質にのみ焦点が当てられており、不溶化土壌の土壌構造と力学特性に着目した研究は少ない。

土壌中で緑鉛鉱が形成するためには、間隙水中へPbが一旦溶解し、資材粒子と接触、吸着されることが不可欠である<sup>11)</sup>。力学強度を確保するため締め固められた条件下では、土壌構造が密となっているため、Pbが資材と反応し緑鉛鉱を形成するか未知である。他方、締め固め条件下で緑鉛鉱が形成するのであれば、緑鉛鉱は細長い六角錐状の安定結晶であるため<sup>12,13)</sup>、結晶の形成、成長により土壌構造が緻密化し、固化材添加時と同様な力学強度増加があると考えられた。しかし、これらの現象は実証されておらず、緑鉛鉱の形成が土壌の力学強度にもたらす影響は評価されていない。緑鉛鉱の形成によって力学強度の増加が見込まれれば、リン資材の添加のみでPb不溶化と力学強度増加が達成できる可能性がある。本研究は、リン資材を添加したPb汚染土を最適含水比で締め固め、湿潤養生した後の一軸圧縮強度を明らかにした。加えて、一軸試験後の不溶化汚染土の緑鉛鉱態Pb量とPb溶出量を評価することで、締め固め条件におけるリン資材のPb不溶化効果と、それによる土壌の力学特性変化を明らかにした。



## 2. 実験方法

### 2.1 供試材料

本研究で使用するリン資材には、実土壌での Pb の不溶化実績が多い Hydroxapatite ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ) を使用した<sup>7-10)</sup>。Hydroxapatite は、窯業から排出される廃石膏と肥料のリン酸水素二アンモニウムから合成し<sup>14)</sup>、粒径 0.425 mm 以下の風乾状態で使用した。合成したリン資材は、重量当たり 30.3%のカルシウムと 14.4%のリンを含有し、粒子密度は 2.77 g/cm<sup>3</sup>、pH は 7.24 であった。

供試土壌には市販の粒径 2 mm 以下のまさ土 (SF) を使用した。まさ土の物理性を表 1 に示した。まさ土の含水比は 1.1%、粒子密度は 2.69 g/cm<sup>3</sup> であった。まさ土の化学性を表 2 に示した。まさ土の pH は中性で、Fe や Al などの酸化鉱物元素の合計は約 5% であった。また、まさ土原物の Pb 全量、Pb 溶出量いずれも環境基準値以下 (含有量基準: 150 mg-Pb/kg, 溶出量基準: 0.01 mg-Pb/L) であった。まさ土に添加量を変えて塩化鉛を混合し、Pb 全量が 25000 mg-Pb/kg, 50000 mg-Pb/kg の汚染土を作成した。両汚染土は、添加した Pb を平衡状態とするため、飽和度 60%、室温 25°C で 2 週間静置した後、風乾させ実験に供試した。まさ土原物は、Pb 全量が 0 mg-Pb/kg の未汚染土として使用した。

### 2.2 供試体作成と一軸圧縮試験

これらの未汚染土 (0 mg-Pb/kg) と汚染土 (25000 mg-Pb/kg, 50000 mg-Pb/kg) に対し、リン資材を添加しない未処理区と重量比で 10% 添加した処理区を設け、含水比をそれぞれ締め固め試験により得られた最適含水比 (未処理区: 12.8%, 処理区: 16.3%) に調整した。突き固め (締め固めエネルギー: A 法準拠) により供試体 (直径 5 cm, 高さ 10 cm) を作成した。供試体は一つの処理区ごとに 3 反復ずつ作製し、ポリエチレン製の袋で密閉し、恒温室内 (25°C) で 0 日, 30 日, 90 日間の養生を行った。養生後の供試体を脱型し、一軸圧縮試験に供試した。

### 2.3 X線回折法による試料中の緑鉛鉱態 Pb の定量

各一軸圧縮試験後の試料は、乾燥させ、X線回折分析に供試した。各試料は 0.425 mm 以下に粉碎した後、内標準物質として 20% のアルミナを加えて、再度粉碎した。調整した試料の結晶成分を X線回折装置 (リガク UltimaIV) にて同定し、緑鉛鉱のピーク範囲 (29.8° -29.9°) とアルミナのピーク範囲 (52.4° -52.6°) の最大ピーク強度の比を算出した。緑鉛鉱/アルミナピーク最大ピーク強度比と緑鉛鉱態 Pb 量の検量線の関係式を用いて、算出した最大ピーク強度比から試料中の緑鉛鉱態 Pb 量を定量した。

### 2.4 溶出量試験

各一軸圧縮試験後の試料は、乾燥させ、溶出量試験に供試した。ポリプロピレン製遠沈管内で試料と純水を固液比 1:10 で 24 時間振とうした。振とう後の懸濁液を 5000 rpm で 5 分間遠心分離し、上澄みを 0.45 μm フィルターでろ過した。ろ液中の Pb 濃度を ICP-AES (堀場製作所 ULTEMA2) にて定量し、Pb 溶出量とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 供試体の物理性

締め固め試験により得られた最適含水比における土壌の最大乾燥密度は未処理区で 1.94 g/cm<sup>3</sup>、処理区では 1.83 g/cm<sup>3</sup> であった。処理区における最大乾燥密度の減少は、リン資材を添加したことによる細粒分の増加によるものと考察される<sup>15)</sup>。供試体の乾燥密度は、未処理区では 1.81-1.88 g/cm<sup>3</sup>、処理区では 1.71-1.85 g/cm<sup>3</sup> で、締め固め度はいずれも 90% 以上となった。材齢 0 日と材齢 90 日の供試体間での含水比低下は、いずれも 2% 以下であった。未汚染土供試体の材齢 0 日における水分飽和度は、未処理区では 72.0%、処理区では 85.5% であり、比較的高い飽和度であったことが確認された。

### 3.2 リン資材を添加した Pb 汚染土の力学特性

図 1 に未汚染土 (0 mg-Pb/kg(a)) と汚染土 (25000 mg-Pb/kg(b), 50000 mg/kg(c)) の各供試体の一軸圧縮強度を示した。いずれの供試体でも、処理区の一軸圧縮強度は未処理区よりも高く、リン資材の混合による供試体の

表 1 供試土壌の物理性

含水比	粒子密度	最大粒径	礫分	砂分	細粒分	工学分類
(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(mm)	(%)	(%)	(%)	(-)
1.1	2.69	2	0	81.7	18.3	SF

表 2 供試土壌の化学性

pH	強熱減量	元素全量								溶出量
		P	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	Pb	Pb
(-)	(%)	(mg/kg)								(mg/L)
6.9	2.7	956	12700	35900	618	8220	6530	825	25	N.D.

強度増加が確認された。また、いずれの供試体の一軸圧縮強度も、材齢に伴って増加した。しかし、材齢 90 日の処理区供試体が到達した最大の一軸圧縮強度は、未汚染土では  $132 \pm 10 \text{ kN/m}^2$  であり、鉛全量が  $25000 \text{ mg-Pb/kg}$ ,  $50000 \text{ mg-Pb/kg}$  の汚染土でもそれぞれ  $139 \pm 9 \text{ kN/m}^2$ ,  $129 \pm 13 \text{ kN/m}^2$  で同程度であった。材齢 0 日の未処理区と材齢 90 日の処理区の一軸圧縮強度の差から算出される、未汚染土 ( $0 \text{ mg-Pb/kg}$ ) と汚染土 ( $25000 \text{ mg-Pb/kg}$ ,  $50000 \text{ mg/kg}$ ) の強度変化量は、それぞれ  $95 \text{ kN/m}^2$ ,  $85 \text{ kN/m}^2$ ,  $70 \text{ kN/m}^2$  であった。

図 2 には、未処理区(a), 処理区(b)の材齢 90 日供試体の応力-ひずみ関係 ( $n=3$  の代表データ) を表示した。未処理区供試体と処理区供試体の応力-ひずみ関係の比較から、応力-ひずみ曲線で描かれる部分の面積が、処理区供試体では総じて未処理区供試体よりも大きくなっていることが確認された。さらに、材齢 90 日の最大応力ひずみは、処理区供試体の方が未処理区供試体を  $0.2\text{--}0.4\%$  上回っていた。図 3 には、各供試体における一軸圧縮強度と変形係数の関係を示した。一軸圧縮強度と変形係数には比例関係が認められた。この関係式の傾きが大きいほど、材料は剛性が高く、脆性破壊を起こしやすい<sup>16)</sup>。処理区における一軸圧縮強度と変形係数の関係式の傾きは、未処理区よりも

小さい。以上より、土壌へのリン資材の混合は、供試体の一軸圧縮強度が増加することに加え、粘り強さ(靱性)の向上にも寄与することが確認された。

### 3.3 一軸圧縮試験後の緑鉛鉱態 Pb 量と Pb 溶出量

図 4 には、X 線回折分析により定量された、供試体作成前の処理区試料と一軸試験後の処理区試料中の緑鉛鉱態 Pb 量を示した。供試体作成前の処理区汚染土、すなわち乾燥状態でリン資材を混合した土壌からは緑鉛鉱態 Pb が検出されなかった。他方、一軸圧縮試験後の処理区汚染土、すなわち資材を添加し湿潤状態で一度攪拌が行われた土壌からはいずれも緑鉛鉱態 Pb が検出された。材齢 0 日の供試体では、 $25000 \text{ mg/kg}$  の汚染土で  $3300 \text{ mg-Pb/kg}$ ,  $50000 \text{ mg-Pb/kg}$  の汚染土で  $6800 \text{ mg-Pb/kg}$  の緑鉛鉱態 Pb が定量された。材齢 0 日の処理区汚染土における緑鉛鉱態 Pb 量の Pb 全量に対する割合は、 $13.2\text{--}13.6\%$  であった。この結果から、湿潤状態での土壌攪拌により、リン資材と土壌の Pb が反応し、緑鉛鉱が形成したことが確認された。また、材齢 30 日の供試体における緑鉛鉱態 Pb 量は材齢 0 日を上回り、材齢 90 日の供試体ではこれよりも多い、 $25000 \text{ mg/kg}$  の汚染土で  $5800 \text{ mg-Pb/kg}$ ,  $50000 \text{ mg-Pb/kg}$  の汚染土で  $10900 \text{ mg-Pb/kg}$  の緑鉛鉱態 Pb 量が定量された。材齢 90 日の処理区汚染土における緑鉛鉱態 Pb 量の Pb 全量に対

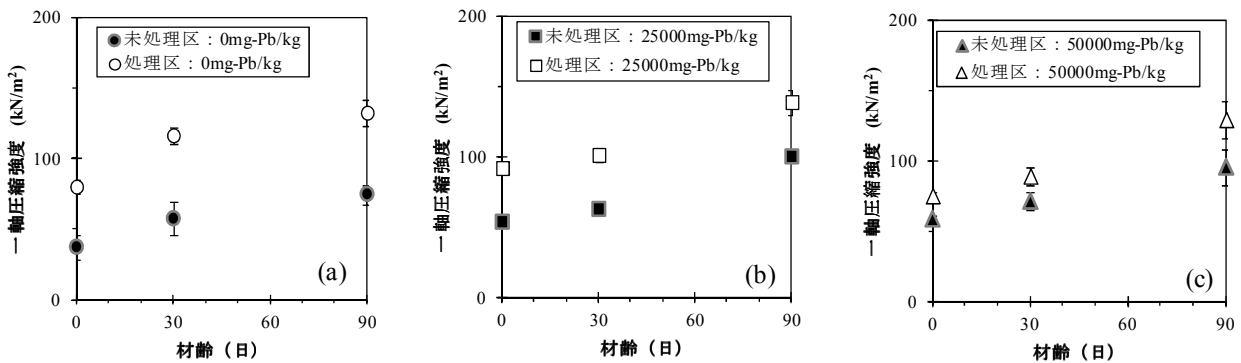


図 1 未汚染土 ( $0 \text{ mg-Pb/kg}$ (a)) と汚染土 ( $25000 \text{ mg-Pb/kg}$ (b),  $50000 \text{ mg-Pb/kg}$ (c)) の供試体の一軸圧縮強度

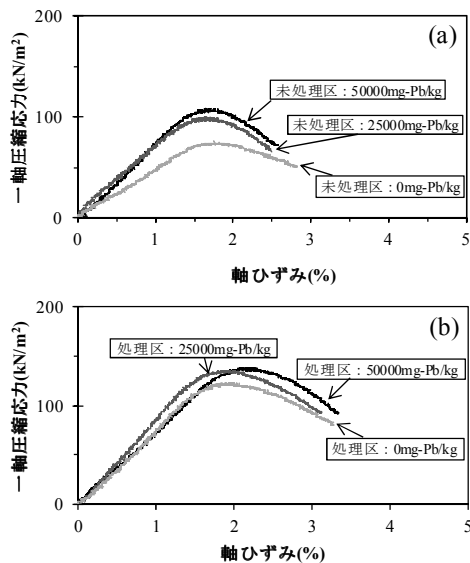


図 2 未処理区(a)と処理区(b)の材齢 90 日供試体の応力-ひずみ関係

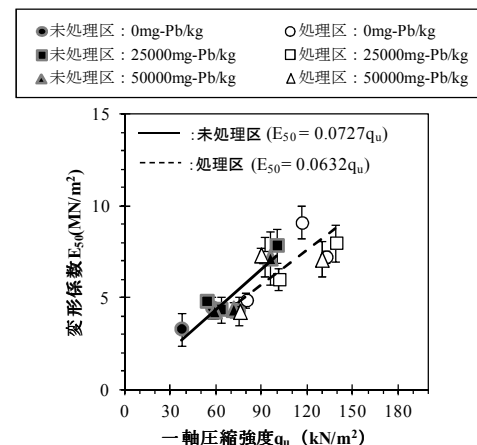


図 3 各供試体における一軸圧縮強度と変形係数の関係

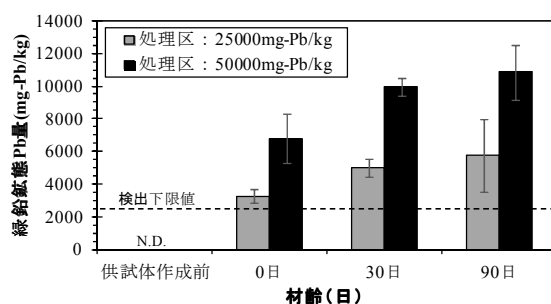


図4 処理区供試体中の緑鉛鉱態 Pb 量 (N.D.は検出限界値以下を示す.)

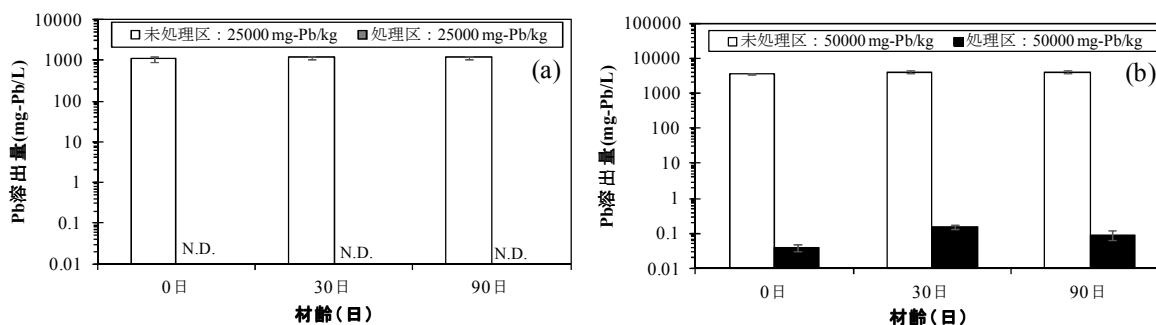


図5 一軸圧縮試験後の汚染土供試体 (25000 mg-Pb/kg(a), 50000 mg-Pb/kg(b)) の Pb 溶出量 (N.D.は検出限界値以下を示す.)

する割合は、21.8–23.2%であった。材齢30日、90日の汚染土処理区供試体の緑鉛鉱態 Pb 量が材齢0日よりも増加していることから、締め固められた土壤構造中（締め固め度90%以上、飽和度80%以上）でも緑鉛鉱が形成、成長することが確認された。

図5には、一軸圧縮試験後の汚染土 (25000 mg-Pb/kg(a), 50000 mg-Pb/kg(b)) の Pb 溶出量を示した。未処理区、処理区における Pb 溶出量は、いずれも材齢による違いはなく評価され、未処理区の 25000 mg-Pb/kg の汚染土では平均 1110–1170 mg-Pb/L、50000 mg-Pb/kg の汚染土では 3550–4110 mg-Pb/L の Pb 溶出が確認された。未処理区の汚染土の溶出時の pH は、4.0–4.5 の酸性域であった。これは、添加した塩化鉛に由来する。汚染土の Pb 溶出量はいずれも、溶出量基準値を大きく上回っていたが、25000 mg-Pb/kg の汚染土処理区では環境基準値以下の Pb 溶出量となり、50000 mg-Pb/kg の汚染土処理区土壤でも、環境基準値の10倍程度まで Pb 溶出量が抑制された。以上の結果から、リン資材が10%添加された Pb 汚染土では、極高濃度の Pb 汚染も、不溶化可能であることが確認された。処理区汚染土の溶出時 pH は、6.3–6.8 で中性域であった。リン資材そのものの pH は中性であり、リン資材の溶解と緑鉛鉱の形成反応には、間隙中の水素イオンが消費される (式(1), 式(2))。これにより、Pb 汚染土が中性化されたと考察される。

#### 4. 考察

##### 4.1 締め固め条件におけるリン資材の Pb 不溶化効果

本研究の結果より、リン資材が添加された鉛汚染土では、湿潤状態での土壤攪拌により土壤中 Pb の13%程度が緑鉛鉱に変換されることが確認された。この結果は、移動性の高い Pb は、不溶化処理を行う際の資材混合のみで不溶化

されることを示している。また、締め固められ供試体となったリン資材添加 Pb 汚染土でも、材齢が延びるほど緑鉛鉱態 Pb 量が増加することが確認された。したがって、力学強度が要求され、締め固められた不溶化土壤においても、リン資材と Pb は間隙中で反応し、緑鉛鉱を形成することが明らかとなった。締め固め条件では、土壤構造が密となるため、水分飽和度 (80%) は比較的高い値となった。飽和度が高いほど、土粒子と間隙水の接触面積は広く、また、間隙水同士の経路もつながりやすい。このため、締め固め条件下でも土壤表面の可溶性の Pb は溶解し、分散する中で資材と接触、反応したと考えられる。しかしながら、材齢90日の50000 mg-Pb/kg 汚染土では、供試体中の緑鉛鉱態 Pb 量が Pb 全量の20%程度であり、未反応の Pb が残存していることが確認された。この緑鉛鉱態 Pb の割合は、不飽和水分移動が再現されたリン資材不溶化 Pb 汚染土での既往研究の値よりも低かった<sup>11)</sup>。添加したリン資材のリン量と緑鉛鉱態 Pb 量から逆算される、リン資材の溶解量は7%未満であり、土壤中のリン資材もほとんどが未溶解であったことが推察される。本試験は密閉条件で養生が行われたことに加え、締め固め条件下では間隙の減少により透水性が低下する。そのため、供試体中では水分移動がほとんど生じず、間隙水中に溶解した Pb は移流されず、資材と接触、反応する機会が少なかったと考えられる。

汚染土処理区では、緑鉛鉱態 Pb に変換されていない Pb が存在するにもかかわらず、ほとんどの Pb 溶出が抑制された。また、材齢ごとに緑鉛鉱態 Pb 量は異なっていたが、抑制された Pb 溶出量はいずれの材齢においても同程度であった。これは、溶出試験の振とう操作により、間隙中で未溶解だった Pb が溶解し、未反応のリン資材と接触、反応したためと考察される。すなわち、締め固め条件下で土壤に未溶解で残存していた Pb が、水分移動により溶解し、

移流したとしても、未反応の資材と接触することでその都度、緑鉛鉱へと変換されることを意味する。

#### 4.2 リン資材による不溶化 Pb 汚染土壌の力学特性変化

一軸圧縮試験の結果から、土壌へのリン資材添加により、土壌の圧縮強度と靱性が向上することが確認された。また、リン資材を添加した供試体の一軸圧縮強度は、材齢を経るごとに増加することが明らかとなった。以上の結果は、Pb 汚染土へリン資材を混合することによって、土壌の力学強度増加と Pb の不溶化が両立できることを示している。リン資材添加による一軸圧縮強度の増加は、最大でも 70–95 kN/m<sup>2</sup>であった (図 1)。豊浦砂へのリン資材 (リン酸カルシウム) の 10% 混合では材齢 28 日において 40 kN/m<sup>2</sup> 程度の一軸圧縮強度増加が確認されている<sup>17)</sup>。リン資材の添加では土壌 pH が中性に保たれる。すなわち、セメント系や石灰系の固化材と異なり、強アルカリ条件に Pb 汚染土を曝されることなく、土壌力学強度の改良を図ることが可能である。まさ土への石灰+石膏固化材の 10% 混合では、材齢数日で 200 kN/m<sup>2</sup> 程度の一軸圧縮強度が確認されている<sup>16)</sup>。したがって、本リン資材による一軸圧縮試験の増加量は、他研究で報告されたリン資材と同程度で、石灰系固化材よりも少ないことが推察される。そのため、Pb 汚染土壌の力学強度を大きく改良する必要がある場合は、改良効果の高い石灰系やセメント系固化材の添加が不可欠となる。しかし、Pb 汚染土壌への固化材単用では、高アルカリ化により Pb の溶出リスクが高まるだけでなく<sup>2)</sup>、易溶性の Pb により固化材の水和反応が阻害され、力学強度の改良効果が低下することが明らかとなっている<sup>18)</sup>。本研究により、リン資材の湿潤混和だけでも易溶性 Pb が緑鉛鉱となることが確認されたため、Pb 汚染土に高い力学強度が要求される場合は、リン資材を混和し Pb と反応させた後、固化材を添加することで Pb 不溶化と力学強度の改善が両立できると考えられる。

リン資材の添加は、汚染の有無に関わらず、供試体の乾燥密度、飽和度などの物理特性を変化させ、未汚染土 (0 mg-Pb/kg) においても一軸圧縮強度と靱性を増加させた。また、土壌中でリン資材はほとんど未溶解だったことから、リン資材添加による力学強度の増加に寄与した要因には、リン資材粒子が加わったことによる粒径組成の変化が大きかったと考察される。本研究では、水分条件が一定で乾湿や水分移動の再現はなかったため、緑鉛鉱態 Pb 量は、最大でも 20% 程度であり、他研究と比べ低位であった。そのため、緑鉛鉱形成による土壌の力学強度の増加は確認されなかった。しかし、締め固め条件でも緑鉛鉱結晶が成長すること、力学強度への影響にはリン資材粒子の存在が大きいたことが明らかとなった。したがって、水分条件を変え緑鉛鉱の形成を促進することや、溶解性の高いリン資材を用いリン資材粒子の影響を最小限とすることにより、緑鉛鉱形成による力学強度の変化を明らかにすることができると考えられた。

## 5. まとめ

本研究は、リン資材を添加した Pb 汚染土供試体の、Pb 安定鉱物 (緑鉛鉱) の量と Pb 溶出量、一軸圧縮強度を明らかにした。土壌への 10% のリン資材添加により、汚染の程度に関わらず供試体の一軸圧縮強度と靱性が一定量増加することが確認された。土壌が汚染土である場合、湿潤状態での資材混合によって 13% の Pb が、緑鉛鉱に変化することが明らかとなった。加えて、締め固められ密な土壌構造下でも、30 日以上養生により Pb とリン資材が反応し、最大 23% の Pb が緑鉛鉱へと変換されることが示された。緑鉛鉱形成量にかかわらず溶出試験では、基準値レベルまで Pb 溶出量が抑制されることが確認された。

以上の結果は、Pb 汚染土へのリン資材添加によって、Pb の不溶化と力学強度増加が両立できることを示唆する。力学強度増加のメカニズムは、粒径組成の変化によるものが大きかったと考えられるが、今後さらに検討が必要である。

謝辞：研究を遂行するに当たり、ICP-AES、マイクロ波加熱分解システムを岐阜大学生命科学総合研究支援センター機器分析分野より、使用させて頂いた。また、X 線回折装置、一軸圧縮試験機を使用させて頂いた同大学工学部大矢豊教授、沢田和秀教授に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 乾徹, 大山将, 三浦俊彦: 地盤改良技術に関する最新動向 1. 掘削物の有効利用と自然由来の重金属, 材料, Vol. 62, pp. 224–230, 2013
- 2) 山田哲司, 大山将, 嘉門雅史: 重金属類汚染土壌のセメントによる固化・不溶化処理について, 土と基礎, Vol. 50, pp. 10–12, 2002
- 3) Mavropous, E., Rossi, A., M., Costa, A., M., Perez, C., A., C., Moreira, J., C. and Saldanha, M.: Studies on the mechanisms of lead immobilization by hydroxyapatite, Environmental Science and Technology, Vol. 36, pp. 1625–1629, 2002
- 4) Cao, X., Ma, L., Q., Rhue, D., R. and Appel, C., S.: Mechanisms of lead, copper, and zinc retention by phosphate rock, Environmental Pollution, Vol. 131, pp. 435–444, 2004
- 5) Scheckel, K., G. and Ryan, J., A.: Effects of aging and pH on dissolution kinetics and stability of chloropyromorphite, Environmental Science and Technology, Vol. 36, pp. 2198–2204, 2002
- 6) 趙宰佑, 井奥洪二, 後藤誠: Pb<sup>2+</sup> のポルトランドセメントによる固化, 鉛水酸アパタイトを用いた方法, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol. 105, pp. 650–654, 1997
- 7) Chen, M., Ma, L., Q., Singh, S., P., Cao R., X. and Melamed, R.: Field demonstration of in situ

- immobilization of soil Pb using P amendments, *Advances in Environmental Research*, Vol. 8, pp. 93–102, 2003
- 8) Scheckel, K., G., Ryan, J., A., Allen, D. and Lescano, N., V.: Determining speciation of Pb in phosphate-amended soils: Method limitations, *Science of The Total Environment*, Vol. 350, pp. 261–272, 2005
  - 9) Qian, G., Chen, W., Lim, T., T. and Chui, P.: In-situ stabilization of Pb, Zn, Cu, Cd and Ni in the multi-contaminated sediments with ferrihydrite and apatite composite additives, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 170, pp. 1093–1100, 2009
  - 10) He, M., Shi, H., Zhao, X., Yu, Y. and Qu, B.: Immobilization of Pb and Cd in Contaminated Soil Using Nano-Crystallite Hydroxyapatite, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 18, pp. 657–665, 2013
  - 11) 小川翔平, 加藤雅彦, 佐藤健: 非破壊分析の適用による土壌中の重金属移動と不溶化メカニズムの解明, 第26回中部地盤工学シンポジウム論文集, pp.103–108, 2014
  - 12) Masaoka, M., Kyono, A., Hatta, T. and Kimata, M.: Single crystal growth of  $Pb_5(P_xAs_{1-x}O_4)_3Cl$  solid solution with apatite type structure, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 292, pp. 129–135, 2006
  - 13) Manecki, M., Bogucka, A., Bajda, T. and Borkiewicz, O.: Decrease of Pb bioavailability in soils by addition of phosphate ions, *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 3, pp. 178–181, 2006
  - 14) Ogawa, S., Katoh, M. and Sato, T.: Contribution of Hydroxyapatite and Ferrihydrite in Combined Applications for the Removal of Lead and Antimony from Aqueous Solutions, *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 225, pp. 2023–2034, 2014
  - 15) 佐藤正行, 小田匡寛, 風間秀彦, 小瀬木克己: 細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, Vol. 1997 pp. 271-282, 1997
  - 16) 重松宏明, 西澤誠, 藪下諒二, 吉村康平, 田中均, 辻要: 廃石膏ボード由来の半水石膏を混合した石灰安定処理土の強度発現特性, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, Vol. 69, pp. 272–284, 2013
  - 17) 秋山克, 川崎了: リン酸カルシウム化合物によって固化した砂供試体の一軸圧縮強さに及ぼす各種粉末添加の影響, *地盤工学ジャーナル*, No.7, pp. 491-501, 2012
  - 18) Du, Y. J., Jiang, N. J., Liu, S.Y., Jin, F., Singh, D.N. and Pulppara, A. J.: Engineering properties and microstructural characteristics of cement solidified zinc-contaminated kaolin clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 51, pp. 289–302, 2014

# 油汚染地盤の原位置非掘削浄化技術開発に関する室内土槽実験 Laboratory soil tank experiments for the development of in-situ purification on oil polluted ground without excavation

棚橋秀行

大同大学・工学部・tanahasi@daido-it.ac.jp

## 概要

地盤環境修復のための研究が近年多く行われている。大同大学棚橋研究室では、特に油汚染地盤の非掘削浄化を目的に、界面活性剤を用いて機械油を乳化し回収する方法について継続的に研究を行っている。これまでに、間隙内二液反応発泡法を提案し、いくつかの実験ケースでそれまでの結果を大きく上回る浄化効率を確認している。本研究ではこれに加えて増粘剤 CMC を界面活性剤に添加することによる流れ場の制御も新たに着想した。これらの方法を下敷きに、模擬汚染地盤の均質・不均質、障害物の有無、界面活性剤の投与ポイントと汚染油の回収ポイントの間隔に影響する実験装置の大小（幅 60cm の土槽・幅 2m の土槽）などを比較する浄化実験を行った。これらの実験結果より、浄化の進行の違いに影響を与える要因について考察した。

キーワード：油汚染地盤，環境修復，非掘削浄化，室内実験

## 1. はじめに

近年、工場などからの油による地盤汚染が問題となっている。粘性が小さく揮発性に富む油に関する浄化の研究は進んでいるが、機械油などの高粘性で揮発しにくい油に対してはあまり進んでいない。大同大学棚橋研究室では、油汚染地盤の非掘削浄化を目的に、界面活性剤を用いて機械油を乳化し回収する技術 (SEAR: Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation) について継続的に研究を行っている。2014 年には酢酸と重曹を添加した界面活性剤の切り替え交互圧入による間隙内二液発泡法を用いた実験を行いその結果を報告<sup>1)</sup>した。これまでの研究の主なポイントは界面活性剤をどのように浸透させれば少しでも効率よくムラなく浄化ができるのかという「効率性」であった。しかしながら実際には汚染現場ごとに異なる条件が想定される。そこで本研究では、多くの条件下でも適応できる「汎用性」を持った技術の開発、という新たな視点から室内土槽を用いた模擬油汚染地盤の浄化実験を行った。

## 2. 小型 2 次元土槽を用いた実験

### 2.1 小型 2 次元土槽を用いた実験 2-1

(切り替え交互圧入による間隙内二液発泡法)

#### 2.1.1 実験の目的と方法

先述のように 2013 年度の研究において、重曹添加界面活性剤と酢酸添加界面活性剤を模擬油汚染盤に交互に圧

入して発泡させる実験で効率の良い浄化を行うことができた。本節の実験 2-1 は、昨年とほぼ同条件で行うことでその性能を確認するために実施した。浄化にはこれまで用いていた HLB10.5 の界面活性剤を用いた。HLB 値は 0 から 20 までの値を取り、0 に近いほど親油性が高く 20 に近いほど親水性が高くなる界面活性剤の物性指標である<sup>2)</sup>。実験の際、撮影画像から画像処理 (2 値化) を用いた方法で、土槽透明アクリル板観察面における油の残留領域の時間的変化を、初期汚染領域を 100% とした汚染領域比 (%) として定量化した。図-1 は実験装置の概略図である。小型 2 次元土槽 (内寸幅 62.0 cm × 高さ 72.0 cm × 奥行 5.0 cm) に下から豊浦砂を高さ 15 cm、質量比 10% の汚染油を混ぜた豊浦砂を高さ 15 cm、覆土として豊浦砂を高さ 20 cm の順で水締め充填した。充填密度は全層共通で、乾燥密度は  $\rho_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$  である。汚染油は灯油 1 : エンジンオイル 10 の比率で混合しスダン IV にて赤く着色したものである。

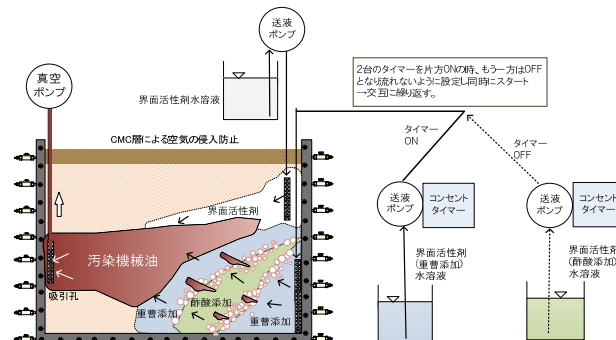


図-1 実験 2-1 の装置概略図

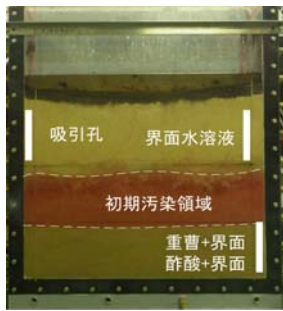


写真-1 実験 2-1  
初期状態

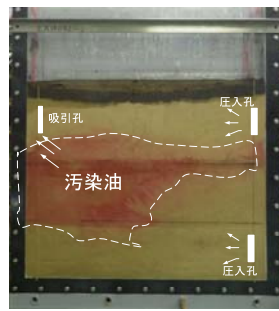


写真-2 4時間後  
(0.4PV)

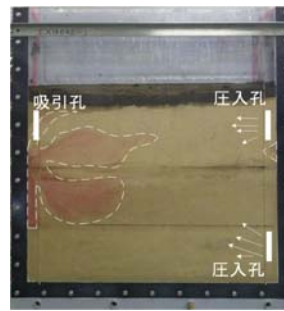


写真-3 8時間後  
(0.8PV)

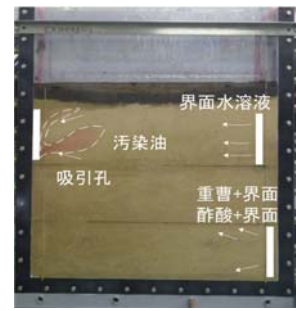


写真-4 12時間後  
(1.2PV)

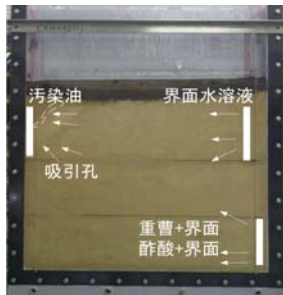


写真-5 18時間後  
(1.8PV)

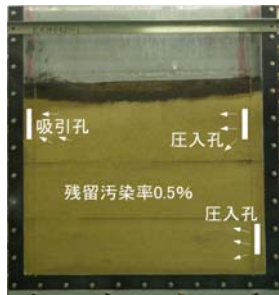


写真-6 21時間 10分後  
停止 (2.1PV)

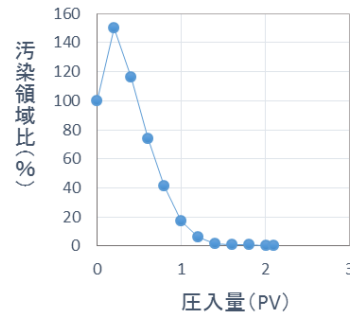


図-2 実験 2-1 の浄化の進行

地表面には、CMC（カルボキシメチルセルロース）の粉末を水で溶いたものにより被覆を施し吸引回収の際の空気の進入を防いだ。図-1の土槽内の右の圧入ノズルを用い、上からは HLB10.5 の界面活性剤 3% 水溶液 10 L、下からは同界面活性剤 3% に重曹を 8% 添加した水溶液 5 L と、同界面活性剤 3% に酢酸を 5% 添加した水溶液 5 L とともに 6 ml/min の速度でタイマーにより 30 分毎交互に圧入していく。この 3 つの水溶液の合計 20 L は 3 PV（Pore volume）に相当する。同時に図左側のように吸引孔を通じて真空ポンプで汚染油を吸い上げ真空サーバーの中へと回収する。

### 2.1.2 実験経過

写真-1 は実験開始時の初期状態である。写真-2～写真-4 のように発泡によって右下から順調に汚染油が押し上げられ乳化し、これが上方のノズルからの界面活性剤水溶液によってすすがれて左へ移動し、吸引孔から回収されていくことが分かる。写真-6 は 21 時間 10 分が経過した状態の写真である。この時点で視認できる汚染油が殆ど除去されたので実験を停止した。この実験の浄化の進行を図-2 に示す。写真-1 の初期汚染領域が汚染領域比 100% である。界面活性剤水溶液総計 3 PV を圧入する予定であったが、1.5 PV でほぼ浄化が完了した。

## 2.2 小型 2 次元土槽を用いた実験 2-2

### (下部より増粘剤添加液圧入)

#### 2.2.1 実験の目的と方法

これまでの小型 2 次元土槽を用いた実験では汚染機械油が土槽底面に残留し、吸引回収が難しくなる状況がよく見られた。そこで本節の実験 2-2 では図-3 のように先に上の洗浄液を流し汚染領域まで浸透させてある程度まで浄

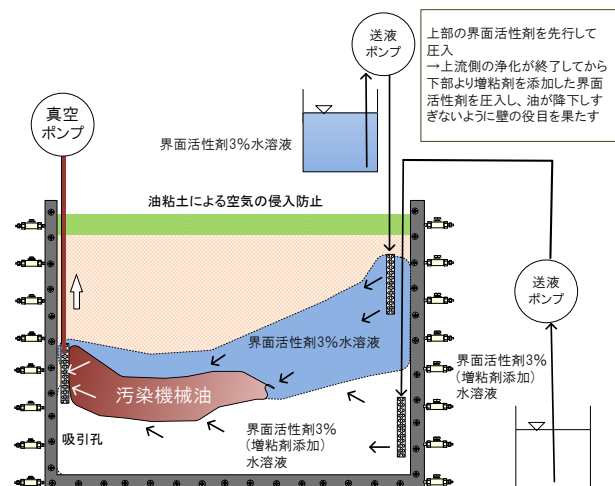


図-3 実験 2-2 の挙動予想図

化した後、増粘剤として以前被覆に用いた CMC を添加し粘性を高めた界面活性剤水溶液を下から圧入することで、汚染油が下方へ降下しなくなり残留なく浄化が進むのではないかと考えた。実験装置および汚染地盤の作成に関しては実験 2-1 と同じである。上からは界面活性剤 3% 水溶液を 13.3 L、下からはこれに、CMC 粉末を 0.5% (33.5 g) 添加したものを 6.7 L、計 20 L (=3 PV) 用意した。今回は地表面に油粘土を被覆し空気の進入を防いだ。圧入流速は上から 10.0 ml/min、下からは 5.0 ml/min とした。

#### 2.2.2 実験経過

写真-7 は初期状態であり、中層の色の濃い部分が初期汚染領域である。写真-8 は 5 時間後 (0.64 PV) の写真である。上からの洗浄液が汚染領域に浸透し、汚染油を乳化し左へ押し流している。この時点では下の洗浄液がまだ流れ始めた段階のため、汚染油が下方へ少し降下してしまっている。写真-9、10 は 10 時間後 (1.28 PV)、15 時間後 (1.91





写真-7 実験 2-2 初期状態

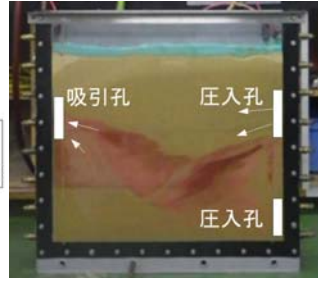


写真-8 5時間後 (0.64PV)

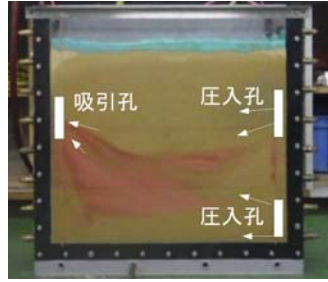


写真-9 10時間後 (1.28PV)

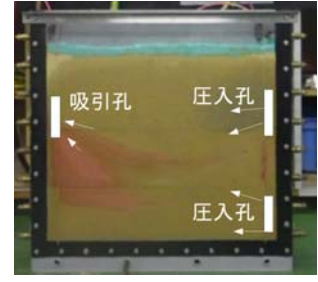


写真-10 15時間後 (1.91PV)

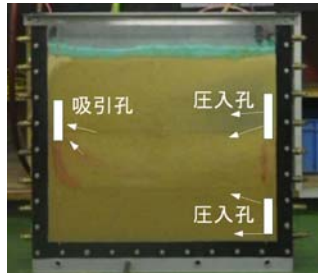


写真-11 20時間後 (2.55PV)

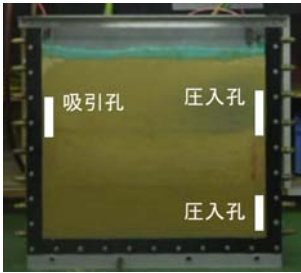


写真-12 終了時 (3.0PV)

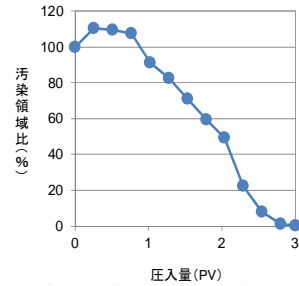


図-4 実験 2-2 の浄化の進行

PV) の写真である。下層に粘性の高い液体が流れているので、油が下方に残留することなく、ほぼ水平に押し流されていることが確認できる。写真-11 は 20 時間後 (2.55 PV) の写真である。若干細く線状に汚染油が残っているが、ほとんど浄化できている。写真-12 は実験終了時の写真である。この時点で洗浄液 (3.0 PV) を全て流し切ったので実験を終了した。図-4 に今回の実験の浄化の進行を示す。実験の序盤での汚染油の乳化により汚染領域比がいったん上昇したが、その後は順調に低下し、最終的には 3.0 PV 時に 0.2%まで下げることができた。

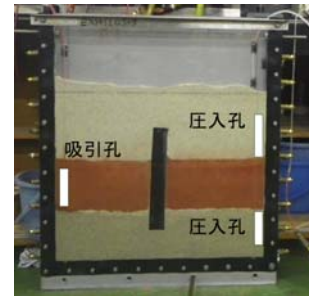


写真-13 実験 2-3 初期状態

## 2.3 小型 2 次元土槽を用いた実験 2-3 (複数地層・障害物実験)

### 2.3.1 実験の目的と方法

実際の地盤では複数の地層が存在し、特に工場の地下には各種埋設物が存在し浄化の障害となる。本節の実験 2-3 では、より実地盤での汎用性を高めるため、複数地層からなる模擬汚染地盤内に障害物を設置し、浄化実験を行うこととした。実験で用いた障害物の材質は弾力性に富んだゴムであり、土槽の奥行 5cm に対して 6cm の厚みを持つ角材状のものを土槽上部より鉛直になるように留意しながら挿入し設置した。写真-13 が今回の実験の初期状態である。実験装置にはこれまでと同じく小型 2 次元土槽を使用した。下層と上層には粒径約 1 mm の焼砂を使用し、中央の油汚染層は豊浦砂を使用した。充填密度・初期汚染濃度はこれまでと同様である。上部の圧入孔からは界面活性剤 3%水溶液を常に流し続け、下部の圧入孔からは界面活性剤 3%水溶液を 2 時間停止、1 時間圧入を交互に行なう。この間欠圧入は流れの固定化を避けることを狙うものである。流速は上下共に 10 ml/min とした。図-5 の挙動予想図のように、まず上流側の汚染油を障害物の下をくぐらせ、その後下流側で上下から挟み撃ちにすることで汚染油を

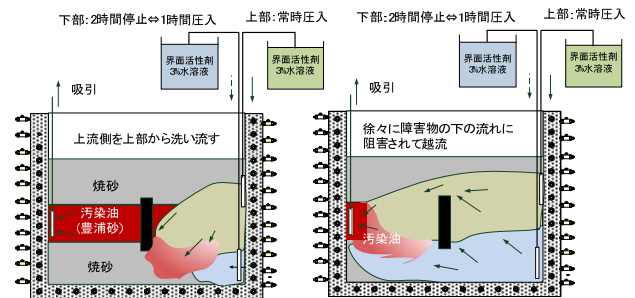


図-5 実験 2-3 挙動予想図

回収する、という浄化の進行に期待し実験を開始した。

### 2.3.2 実験経過

写真-14 は 12 時間後 (1.5 PV) の写真である。期待した通り下をくぐるように障害物の上流 (右) 側の汚染油が移動している。写真-15 は 24 時間後 (3.0 PV) の写真である。障害物の上流が完全に浄化され、洗浄液が障害物を超えて下流 (左) 側に達しているのが確認できる。これまでの実験ではこの 3.0 PV 圧入時で実験を終了していたが、今回の実験は設定条件が厳しいため、特に上限を設けずに浄化にめどが立つまで圧入～回収を継続することとした。写真-16 は 36 時間後 (4.5 PV) の写真である。障害物の下流側の浄化が徐々に進んでいる。写真-17 は 6.0 PV 圧入時の写

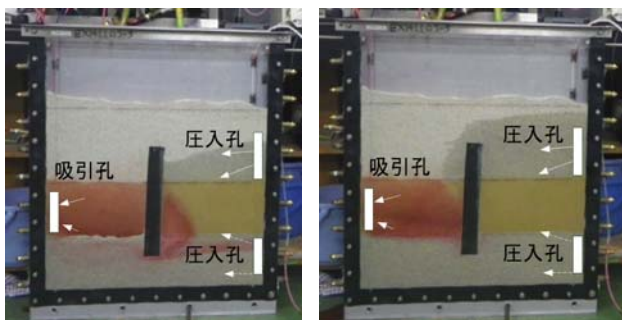


写真-14 12時間後 (1.5PV)

写真-15 24時間後 (3.0PV)

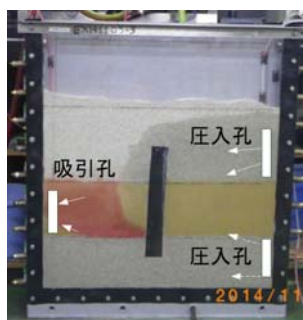


写真-16 36時間後 (4.5PV)

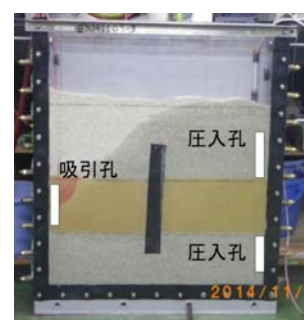


写真-17 圧入終了時 (6.0PV)

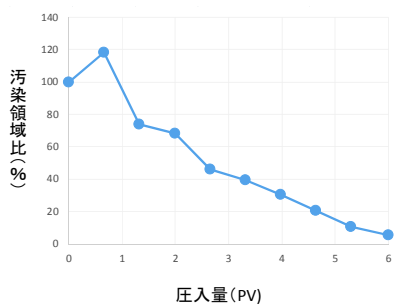


図-6 実験 2-3 の浄化の進行

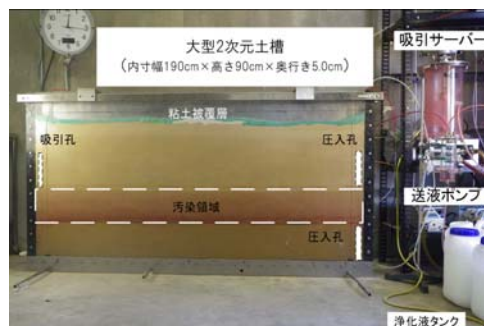


写真-18 大型 2 次元土槽と周辺装置 (実験 3-1 と 3-2 で共通)

真で、ここで実験終了とした。図-6に今回の実験の浄化の進行を示す。終了時までには6 PVを使用したが、最終汚染領域比 5.5%にいたるまで停滞なく順調に浄化が進行した。困難な条件であったが発泡反応も増粘剤も使用せず、洗浄液の送液・停止というシンプルな方法で浄化に成功したことは今後の汎用性に期待できる結果となった。

ここまでの小型 2 次元土槽を用いた実験で確認された浄化性能を、次章では大型 2 次元土槽を用いて確認する。

### 3. 大型 2 次元土槽を用いた実験

#### 3.1 大型 2 次元土槽を用いた実験 3-1

(切り替え交互圧入・間隙内二液発泡法)

##### 3.1.1 実験の目的と方法

実験 2-1 において交互圧入発泡による浄化性能が再確認された。今回は大型の土槽において実験を行いその浄化性能を確認する。写真-18 は実験装置の概略である。実験装置の構成は基本的に小型 2 次元土槽と同じである。大型 2 次元土槽(内寸幅 190 cm×高さ 90 cm×奥行き 5.0 cm)に下から豊浦砂を高さ 20cm、10%の汚染油を混ぜた豊浦砂を高さ 20 cm、覆土として豊浦砂を高さ 40 cm の順で水締め充填した。充填乾燥密度は  $\rho_d=1.55 \text{ g/cm}^3$  である。地表面は油粘土で被覆し空気の進入を防いだ。

右の上の圧入孔から界面活性剤 3%水溶液 50 L、下からは界面活性剤 3%+重曹 8%水溶液 25 L と界面活性剤 3%+酢酸 5%水溶液 25 L とをそれぞれ 30 分毎交互に圧入していく。この水溶液の合計 100 L が大型 2 次元土槽実験における 3 PV である。今回は上下共に流速を 5 ml/min の速度で圧入した。

#### 3.1.2 実験経過

写真-19は初期状態である。写真-20の24時間後(0.4 PV)には下から圧入している水溶液が作用し始め、汚染領域の右下部分が浄化されている。しかし、この時に上から圧入している水溶液が地表面付近にまで来てしまっていることもわかる。写真-21は48時間後の状態の写真である。地表面と被覆油粘土との隙間に、圧入している水溶液が溢れ出す現象が確認された。写真-23は72時間後の状態の写真である。被覆油粘土をすり抜けて水溶液が噴き出してしまった。このまま実験を続けると水溶液が溢れてしまう恐れがあるため写真-24の73時間後に実験を停止した。

前章の小型土槽では発泡により生じた二酸化炭素が溶液とともに右から左へと吸引されていた。しかし、大型土槽では吸引圧力が右のほうまで作用せず、気体が左へ移動せずこれにより上部からの水溶液が噴き出してしまったと考えられる。この間、浄化も進んでいない。理由は通底しており、発生した気泡が油汚染ゾーンの間隙に封入されてしまい、上部からの界面活性剤が浸透せず、期待したすすぎの働きをしなかった。発泡による浄化のコントロールには工夫が必要になることがわかった。

#### 3.2 大型 2 次元土槽を用いた実験 3-2

(下部より増粘剤添加液圧入)

##### 3.2.1 実験目的と方法

実験 2-2 と同様に、上の圧入孔からの界面活性剤の圧入に加えて、下の圧入孔から増粘剤として被覆と同じ CMC を添加し粘性を高めた界面活性剤水溶液を圧入することで、大型 2 次元土槽においても油汚染域を下から支えつつ挟み込むようにすることで汚染油が吸引孔へほぼ水平に



写真-19 実験 3-1 初期状態

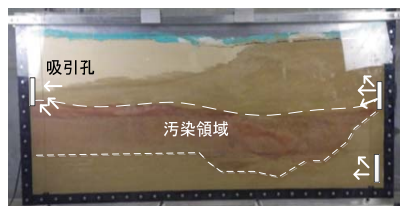


写真-20 24 時間後 (0.4PV)

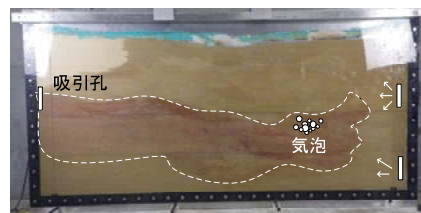


写真-21 48 時間後 (0.8PV)

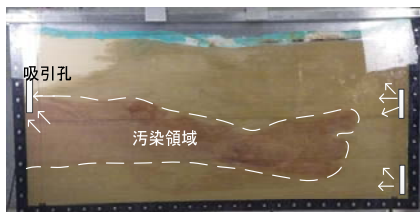


写真-22 60 時間後 (1.3PV)

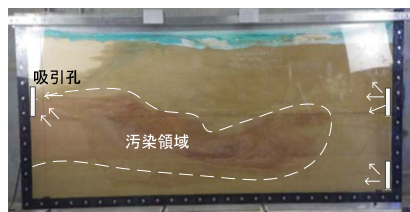


写真-23 72 時間後 (1.3PV)

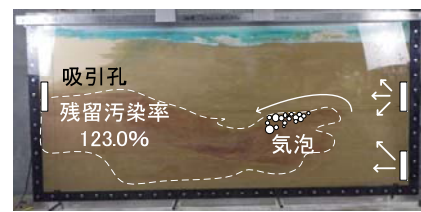


写真-24 73 時間後停止 (1.5PV)

移動するように浄化できるか実験を行う。汚染地盤の作成に関しては実験 3-1 (写真-18) と同じである。粘性を測定したところ、上から圧入する界面活性剤 3%水溶液は粘性  $3.8 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、下からの界面活性剤 3%+ CMC0.5%水溶液の粘性は  $50.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  であった。これらを上下とも流速  $5 \text{ ml/min}$  で圧入した。

### 3.2.2 実験経過

写真-25 は初期状態である。写真-26~27 は 30~45 時間後の状況である。下から圧入された粘性の高い界面活性剤の流れに支えられて、汚染油が降下することなく左に移動している。写真-28~30 は 75~105 時間後の写真である。上層部に広がった汚染域も徐々に小さくなっている。その後も浄化が順調に進行し、写真-32 の 135 時間後 (2.8 PV) には浄化がほぼ完了している。浄化液 3 PV を流し終えたので写真-33 の 143.5 時間後に実験を停止した。油汚染領域の下部に粘性の高い流れを作成することで、汚染油をほぼ水平に移動させて回収する良い結果を得られた。

## 3.3 大型 2 次元土槽を用いた実験 3-4

### (複数地層・障害物実験)

#### 3.3.1 実験目的

第 2 章の実験 2-3 では、2 つの圧入孔からの界面活性剤の時間差圧入や、圧入・停止を繰り返す投与パターンにより浄化に成功した。今回は、実験装置を小型 2 次元土槽から大型 2 次元土槽へと変更し、障害物の個数を 1 本から 4 本へと増やして実験を行う。

#### 3.3.2 実験方法

写真-34 に実験装置の概略を示す。下層と上層には粒径約  $1 \text{ mm}$  の焼砂を使用し、中央の汚染された層は豊浦砂を使用した。油の汚染濃度はこれまで同様 10% である。障害物に見立て角棒状のゴム素材を、4 本入れた。写真には実験経過の説明のために①~④の番号を振ってある。圧入流速は上下共に  $10 \text{ ml/min}$  とした。まず、上部に設置した圧入孔から先行して 3% 界面活性剤水溶液を圧入することから実験を開始する。実験開始から 2 時間後に下の圧入孔から同じく 3% 界面活性剤水溶液を圧入する。圧入を 1 時

間行った後は再び 2 時間停止、1 時間圧入の繰り返しで実験を行なっていく。上部孔に関してはこの間欠操作は行わず 3% 界面活性剤水溶液を継続して圧入する。

#### 3.3.3 実験経過

写真-35 は初期状態である。写真-36 は 100 時間後 (1.89 PV) である。②番と③番の障害物の間の汚染油が少し浄化されている。写真-37 は 140 時間後 (2.65 PV) である。全体的に汚染油の色が薄くなっており、乳化しているのがわかる。また、①番の障害物の右側がほとんど浄化されているのが確認できる。写真-38 は 160 時間後 (3.03 PV) である。写真-37 から 20 時間経過したがほとんど変化がない。写真-39 は 161.5 時間後 (3.05 PV) である。やはり、140 時間後 (2.65 PV) からほとんど変化がない。小型 2 次元土槽で成功した実験では障害物の下をくぐらせて汚染油を左に流していたのだが、写真をよく見ると油は上に行こうとしているが上の圧入孔からの界面活性剤に押さえつけられて停滞しているようである。そこで、次のように圧入パターンを変更した。

これまでの実験では上の圧入孔は常時洗浄液を流し、下の圧入孔は 2 時間停止、1 時間圧入の繰り返しで行ってきたが、下の圧入孔の役割を 2 時間圧入、1 時間停止に変更した。これにより上への流れの時間が増え、油が障害物の上側を通過するようにならないかと期待した。下からの圧入をあくまで間欠にしたのは、上下の圧入流速を固定してしまうと浸透領域が固定化し障害物の背面によどみ領域ができやすいと考えたことによるものである。写真-40 の 162.5 時間後 (3.07 PV) から下の圧入孔の圧入パターンを変更して洗浄液を圧入した。写真-41 は 182.5 時間後 (3.45 PV) である。下の圧入孔からの洗浄液の圧入時間が増えたことで、汚染油がこれまで以上に押し上げられ浄化が進んだと考えられる。写真-42 は 202.5 時間後 (3.83 PV) である。①番と②番の障害物の間の汚染油がほぼ浄化されているのが確認できる。②番と③番、③番と④番の障害物の間も同様にかなり浄化が進んでいる。写真-43 は 222.5 時間後 (4.21 PV) である。この時点で全体的に汚染油を浄化することに成功した。実験はその後もしばらく継続し

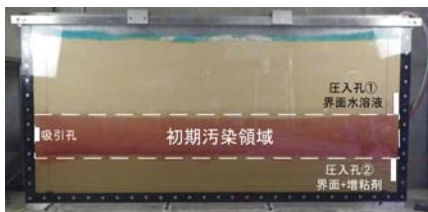


写真-25 実験 3-3 初期状態

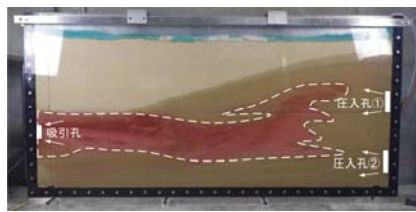


写真-26 30 時間後 (0.6PV)



写真-27 45 時間後 (0.9PV)



写真-28 75 時間後 (1.6PV)

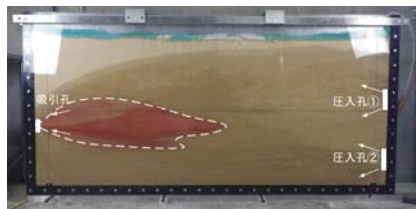


写真-29 90 時間後 (1.9PV)



写真-30 105 時間後 (2.2PV)



写真-31 120 時間後 (2.5PV)



写真-32 135 時間後(2.8PV)



写真-33 143.5 時間後停止 (3PV)

275 時間後で圧入を終了した。

使用した洗浄液の量は合計 185 L (5.2 PV) であった。今回の実験も小型 2 次元土槽実験 2-3 に引き続き困難な条件であったが、発泡反応も増粘剤も使用せず、洗浄液の送液・停止というシンプルな方法で浄化に成功した。均質で障害物の無い汚染地盤の浄化に要した 3 PV とさほどかわらない 4.21 PV で浄化を終了できており、今後の浄化対策における汎用的な方法として期待できる結果を得ることができた。

## 4. 考察

### 4.1 ここまでの実験結果について

大型 2 次元土槽実験の浄化の進行をまとめた図-7 にそって、ここまでの実験結果について考察する。

実験 3-1 (●) : 図-7 より、初期汚染領域よりも汚染領域を界面活性剤で拡散させただけで終わってしまった。この実験が途中で中断となったのは地表への界面活性剤水溶液の噴き出しによるものであったが、間隙内発泡法の浄化方法としての失敗は、発生した気泡が油汚染領域の間に入り込んだまま封入されてしまったため上部からの界面活性剤が汚染ゾーンに浸透できず、小型 2 次元土槽実験 2-1 のようなすすぎの働きをしなかったことにあった。発泡による浄化を広範囲で行うために、更なる工夫が必要であることがわかった。

実験 3-2 (■) : 3 PV の時点での汚染領域比をほぼゼロにすることができた。下から圧入する界面活性剤に CMC を添加し粘性を増したこの方法は、油汚染領域の下部に粘性の高い流れを作成することで、汚染油をほぼ水平に移動

させて回収する良い結果を得られた。この方法は効率のみならず、実地盤では地下水の 2 次汚染を防止することができる可能性の高い方法とも考えられる。

実験 3-3 (□) : 複数地層に障害物が埋設された難条件での実験であったが、4.2 PV でほぼ浄化され良い結果が得られた。2 PV から 3 PV のあたりに向け、浄化が若干停滞しているのが見受けられる。当初は上部圧入孔からの洗浄液で押し下げた油を下部圧入孔からの洗浄液で障害物の下をくぐらせる形で左へ流すことを考えていた。実際、圧入孔付近の障害物は我々の予想通りの結果となったが奥へ進むにつれ実際の挙動は我々の予想とは違い油が押し上げられ浮上する状況となった。

これまでの小型 2 次元土槽で今回の圧入方法を行った際には、土槽の横幅が小さいため、吸引が強くなり洗浄液を過剰に吸引して水位を下げてしまい、これに引きずられて汚染油下層に降下したのに対し、大型 2 次元土槽は横幅が大きいため、吸引が左端下流付近にしかかからず水位があまり下がらなかったため、汚染油がむしろ浮上した状態で障害物上部に引っかかっている様子になったことがわかった。これは土槽のサイズを変えたことによる挙動の大きな相違点であった。

その後、下部からの圧入パターンを 2 時間停止 / 1 時間圧入から、1 時間停止 / 2 時間圧入に変更した結果、3 PV を超えたあたりから浄化は飛躍的に進み、最終的には残留汚染油が 0.2% になるまで浄化することに成功した。

これは今後、継続的に研究してゆきたい方法であるが、特殊な条件下のみでの実験であったので、プレーンな条件、すなわち均質地盤で障害物のない状態で実施した場合にどの程度の浄化性能の上乗せとなるのを検討すべく、次

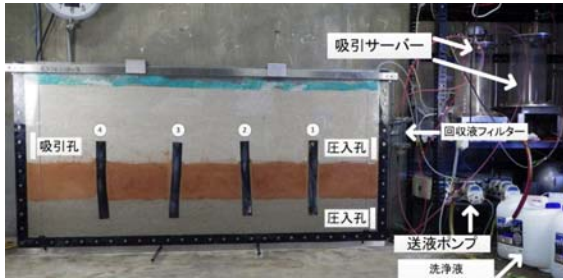


写真-34 大型 2 次元土槽と周辺装置 (実験 3-4)

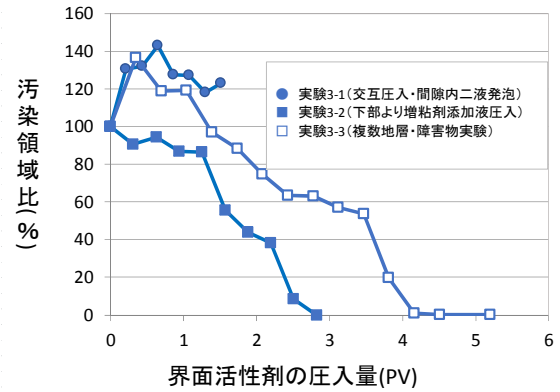


図-7 大型 2 次元土槽を用いた実験の浄化の進行の比較

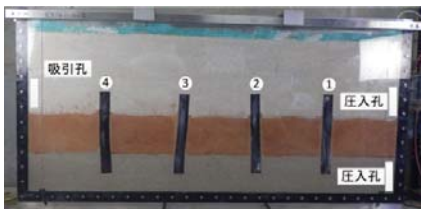


写真-35 実験 3-4 初期状態

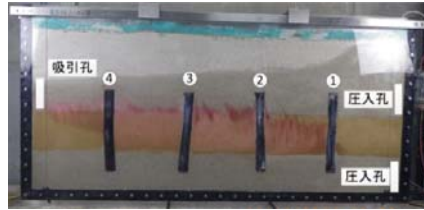


写真-36 100 時間後 (1.89PV)

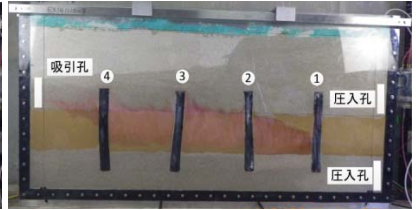


写真-37 140 時間後 (2.65PV)

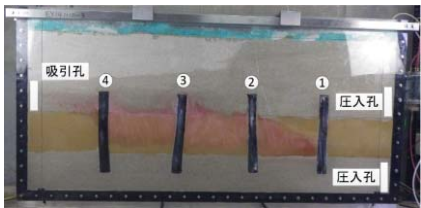


写真-38 160 時間後 (3.03PV)

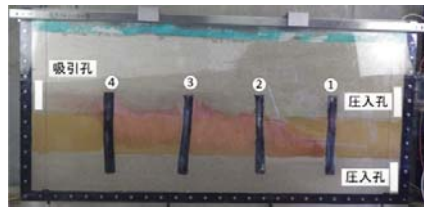


写真-39 161.5 時間後 (3.05PV)

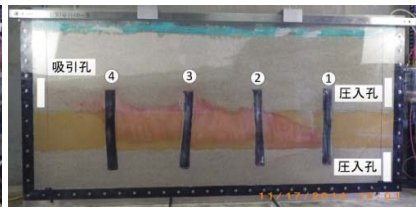


写真-40 162.5 時間後 (3.07PV)

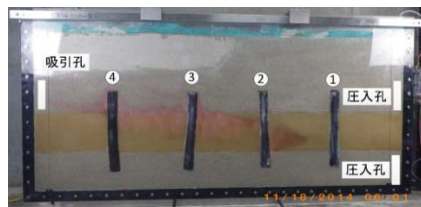


写真-41 182.5 時間後 (3.45PV)

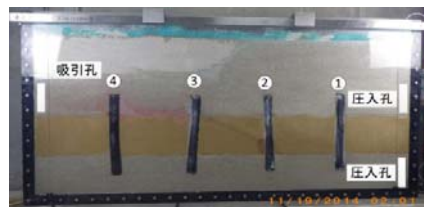


写真-42 202.5 時間後 (3.83PV)

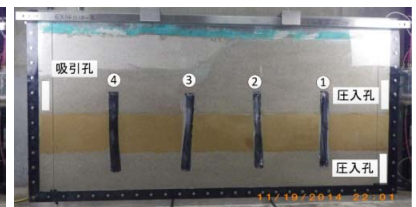


写真-43 222.5 時間後 (4.21PV)

節の追加実験 2 ケースを実施した。

## 4.2 小型 2 次元土槽を用いた追加実験-1 と 2

### 4.2.1 実験の目的と方法

追加実験-1 と 2 の 2 つの実験を行った。目的は先述の通りで、障害物のない均質地盤において、界面活性剤を連続投与するケース (追加実験-1) に対して間欠投与するケース (追加実験-2) がどの程度浄化性能が上乘せとなるのを比較することである。

前出の小型 2 次元土槽を 2 つ用意し、第 2 章の実験 2.1 と同様に汚染地盤を作成した。地表面には被覆を行わず、これまでの小型 2 次元土槽のように吸引圧がかかりすぎて地下水が過度に低下しないよう、変更した。コストのことも考え、今回の追加実験では 1、2 と下の圧入孔からは界面活性剤 (3%) を投与するが、上からは水のみを投与することにした。これにより使用する界面活

性剤の減量に期待する。

追加実験-1 では、上部圧入孔からは水を 5.0ml/min で、下部圧入孔からは界面活性剤を 5.0ml/min でともに連続投与した。

追加実験-2 では、30 分おきに、上部圧入孔からは水を 4.5ml/min で、下部圧入孔からは界面活性剤を 4.1ml/min で、間欠的に投与した。

### 4.2.2 実験経過と考察

追加実験-1 (連続投与) の実験経過が写真-44 の(a)~(e)、追加実験-2 (間欠投与) の実験経過が写真-45 の(a)~(c) である。写真の下の PV は水と界面活性剤の合計 PV で表記してある。追加実験-1 (連続投与) では 7.0PV 投与時でも汚染油がすじ状に残留しているが、追加実験-2 (間欠投与) では 4.0PV で浄化がすでに終了している、といった違いがみられた。

浄化の進行をグラフ化し、比較したものが図-8 である。

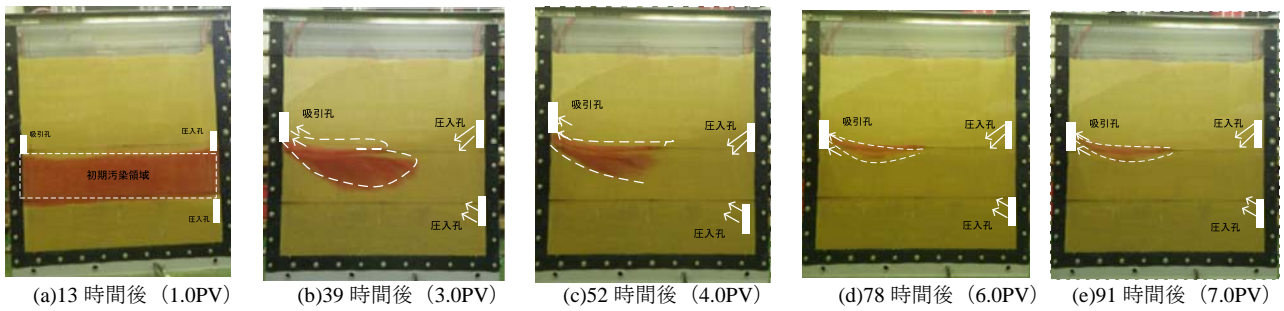


写真-44 追加実験-1 連続投与のケース（上部圧入孔：水のみ、下部圧入孔：界面活性剤を連続投与）

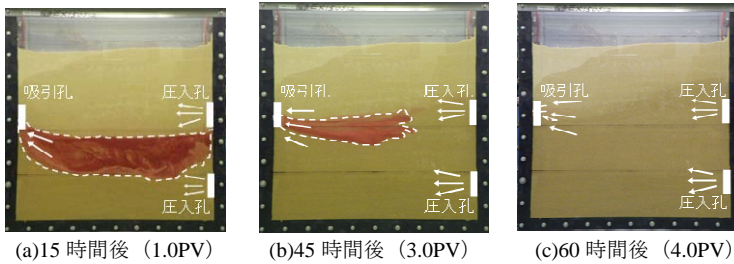


写真-45 追加実験-2 間欠投与のケース

（30分おきに上部圧入孔：水のみ、下部圧入孔：界面活性剤を交互に投与）

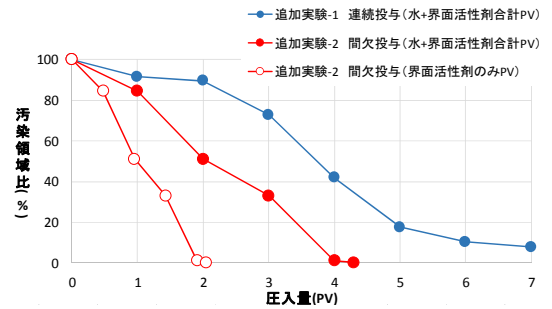


図-8 追加実験-1 と 2 の浄化の進行の比較

追加実験-1（連続投与）では5.0PVあたりから浄化効率が低下するのに対し、追加実験-2（間欠投与）ではほぼ一直線上に浄化完了（4.0PV）まで進行する様子が分かる。およそ半分のPVでほぼ同等の汚染油が回収できている。また、今回の実験では水も圧入しており、界面活性剤の実際の使用量はこれまでの実験よりさらに少ない。図-8の白丸（○）は、追加実験-2（間欠投与）における界面活性剤（3%）の圧入量である。2.0PVでほぼ浄化が完了している。小型2次元土槽を用いた実験で最も少ない圧入量で浄化できたのは実験2.1（切り替え交互圧入による間隙内二液発泡法）の1.5PVであった。圧入量だけみると追加実験-2（間欠投与）は確かに0.5PV多いが、実験2.1では発泡反応のために重曹を8%、酢酸を5%とかなりの高濃度で添加しており、コスト的には間欠投与のほうが安いと思われる。

また、追加実験-2（間欠投与）では地表面に被覆をしておらず、比較的低吸引圧の状態でも油分を移動・回収できたことは浄化作業工程の簡略化、ひいてはコストの削減にもつながるものと期待される。

## 5. まとめ

本研究では、多くの条件下でも適応できる「汎用性」を持った技術の開発という視点から室内土槽を用いた模擬油汚染地盤の浄化実験を行った。これらのことより、以下のような点が抽出された。

- 1) 間隙内反応発泡法を広範囲で行う際の気泡の封入によるその後の浄化液浸透阻害をいかにして解決するか。
- 2) 増粘剤を添加した界面活性剤により汚染油の下面を固定し浄化する方法の更なる高効率化とその応用。
- 3) 界面活性剤を間欠投与する方法の更なる高効率化。

このうち、3)については追加実験を行いその性能を確認したところ、間欠投与は従来の連続投与よりおよそ半分の圧入量で浄化が完了できることが確認できた。

この間欠投与による浄化方法は比較的汎用性が高いものと思われるため、今後の研究の中心としてとり組んでゆきたいと考えている。

謝辞：この研究には著者の所属する油汚染土壌の修復技術研究会（大同大学・株式会社エステム・応用地質株式会社・三信建設工業・財団法人東海技術センター・株式会社フジミックス・ミヨシ油脂株式会社）のご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 棚橋秀行：間隙内二液反応発泡を用いた切替交互圧入による油汚染地盤浄化ムラの低減、(社)地盤工学会ほか、第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会概要集、pp.301～306, 2014.
- 2) 例えば、中西茂子：洗剤と洗浄の科学、新コロナシリーズ33、コロナ社、p.43, 1995.

## 堆積軟岩を自然バリアとする高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する実験的および解析的研究

### Experimental and numerical research on geologic repository of high-level nuclear waste in soft sedimentary rock

山田貴大<sup>1</sup>, 蔭山星<sup>2</sup>, 神部智也<sup>3</sup>, 木下貴道<sup>1</sup>, 栗本悠平<sup>1</sup>, 張鋒<sup>4</sup>

<sup>1</sup>名古屋工業大学大学院・工学研究科・創成シミュレーション工学専攻

<sup>2</sup>パシフィックコンサルタンツ株式会社

<sup>3</sup>ジョンソンコントロールズ

<sup>4</sup>名古屋工業大学・大学院・工学研究科・E-mail: cho.ho@nitech.ac.jp

#### 概 要

高レベル放射性廃棄物の地層処分は各国で注目されているが、解決しなければならない問題はまた山積している。地層処分を実施する場合、高レベル放射性廃棄物をガラス固化した後、地表面より 300m 以深の岩盤中（天然バリア）に埋設するのが一般的な考え方である。しかし、天然バリアが堆積軟岩の場合、高レベル放射性廃棄物が放出する大量の熱エネルギーが岩盤の長期安定性を脅かす可能性がある。そこで、高温環境下における堆積軟岩の力学挙動を定量・定性的に評価できる熱弾粘塑性構成式の確立を目的に、異なる温度環境下における田下石を用いた三軸圧縮・クリープ試験を実施した。また、得られた試験結果を用いて、熱弾粘塑性構成式のパフォーマンスを検証し、パラメータを決定した。本稿では数値実験で不飽和状態のベントナイトを地層処分場に設置し、飽和・不飽和下負荷面軟岩熱弾粘塑性モデルを境界値問題へ適応させた結果についてまとめる。

キーワード：軟岩，温度依存性，熱

#### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分は各国で注目されているが、解決しなければならない問題はまた山積している。地層処分を実施する場合、高レベル放射性廃棄物をガラス固化した後、炭素鋼製のオーバーパックで覆い、さらにこれらを緩衝材（人工バリア）で覆ったものを埋め戻し材と共に地表面より 300m 以深の岩盤中（天然バリア）に埋設するのが一般的な考え方である<sup>1)</sup>。しかし、天然バリアが堆積軟岩の場合、高レベル放射性廃棄物が放出する大量の熱エネルギーが岩盤の長期安定性を脅かす可能性がある。そこで、本稿では高温環境下における堆積軟岩の力学挙動を定量・定性的に評価できる熱弾粘塑性構成式の確立を目的に、4種類の異なる温度環境下における田下石を用いた三軸圧縮・クリープ試験を実施し、得られた試験結果を用いて、提案する熱弾粘塑性構成式<sup>2)</sup>のパフォーマンスを検証した。また、地層処分の性能を評価するための数値実験では不飽和状態のベントナイトを地層処分の人工バリアとし、飽和軟岩と接した時の熱土水空気（THMA）の力学挙動を精査することで、飽和・不飽和下負荷面軟岩熱弾粘

塑性モデルに基づいて、THMA 有限要素解析の手法を提案し、その境界値問題へ適応性について報告する。

#### 2. 試験概要

本研究の試験試料には、実験を行う上で再現性が高いことで知られる田下石を用いる。田下石は、薄緑色で大谷石の一種に分類される多孔質凝灰岩の自然堆積軟岩である。試験では、田下石を直径 50mm×高さ 100mm の円柱形に成形し、完全に飽和させた状態（B 値=0.96 以上）で用いた。堆積軟岩の温度依存性を把握するために、温度制御が可能である高温高压三軸試験機を用いる。試験の流れとしては、始めに異なる温度環境下で排水三軸圧縮試験を実施し、ピーク強度（最大軸差応力）を求め、その結果をもとにクリープ応力を設定し、排水三軸クリープ試験を実施した。表 1 に三軸圧縮・クリープ試験の試験条件を示す。なお、クリープ応力は 80℃のピーク強度の 95%とした。

表 1 三軸圧縮・クリープ試験の試験条件

Temperature (°C)	20, 40, 60, 80
Effective confining pressure (MPa)	0.49, 0.98, 1.47
Strain rate (%/min)	0.002
Creep stress (MPa)	80°Cのピーク強度の95%
Rate of loading (kN/min)	0.05

### 3. 解析概要

温度変化が堆積軟岩の力学挙動に及ぼす影響が大きいという試験結果<sup>3)</sup>に基づいて、温度依存性を考慮した熱弾粘塑性構成式<sup>4)</sup>を提案する。堆積軟岩特有の力学挙動は、超過圧密材料として取り扱うことができるため、過圧密と中間主応力の影響を考慮できる下負荷面軟岩弾粘塑性モデル<sup>5)</sup>をベースに、温度変化と時間依存性を考慮した発展則を導入する。

$$f(t_{ij}, \varepsilon_v^p, \theta) = \ln\left(\frac{t_N}{t_{N0}}\right) + \xi(X) - \frac{1}{C_p} \left[ \varepsilon_v^p - \frac{\rho}{1+e_0} \right] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\dot{\rho}}{1+e_0} = -\Lambda \frac{G(\rho, t)}{t_N + 3K\alpha_T(\theta - \theta_0)} + h(t) \quad (2)$$

$$h(t) = \dot{\varepsilon}_v^0 [1 + t/t_1]^{-\alpha} \quad (3)$$

$$G(\rho, t) = a \cdot \rho \cdot \rho^{C_n \ln(1+t/t_1)} \quad (4)$$

ここで、式(1)は降伏関数であり、式(2)~(4)は、式(1)の適合条件に含まれる状態変数 $\rho$ の発展則 $\dot{\rho}$ を応力状態、時間、温度の関数として規定したものである。

### 4. 結果及び考察

前章で説明した試験試料を用いて行った室内試験の試験結果及び考察を示す。実施した室内試験は、三軸圧縮試験、三軸クリープ試験の三種類である。図1、図2に有効拘束圧 0.49MPa における三軸圧縮試験及び三軸クリープ試験の実験結果と解析結果を示す。又、図3に有効拘束圧毎の温度・ピーク強度関係の実験結果と解析結果を、図4に有効拘束圧毎の温度・クリープ破壊時間関係の実験結果と解析結果を示す。

#### 4.1 実験結果

図1(a)の三軸圧縮試験結果より、堆積軟岩特有のひずみ軟化挙動とダイレイタンス特性が確認された。図3(a)の温度・ピーク強度関係の拘束圧依存性について着目すると、各温度において、有効拘束圧が上昇すると、ピーク強度が上昇するという傾向が確認された。温度依存性について着目すると、各拘束圧で、20°Cのピーク強度と比較して、40°C、60°C、80°Cのピーク強度が低いという傾向は確認されたものの、温度が上昇するとピーク強度が低下するという一義的な傾向は確認されなかった。

図2(a)の三軸クリープ試験結果より、時間の経過と共に軸ひずみ速度が減少する遷移クリープ過程、減少が落ち着き、一定の速度を保つ定常クリープ過程、軸ひずみ速度が

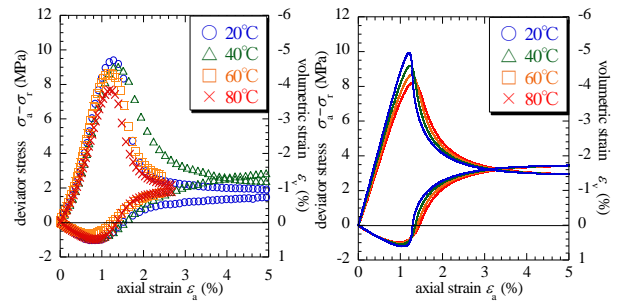


図1 三軸試験結果 ( $\sigma_r = 0.49\text{MPa}$ )

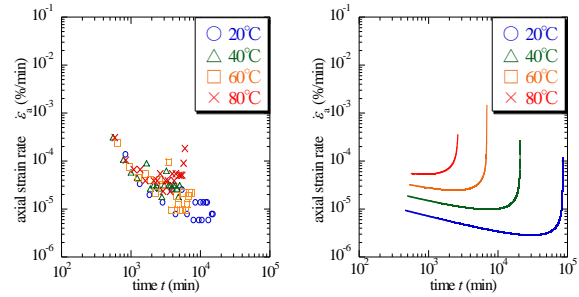


図2 時間軸ひずみ速度関係 ( $\sigma_r = 0.49\text{MPa}$ )

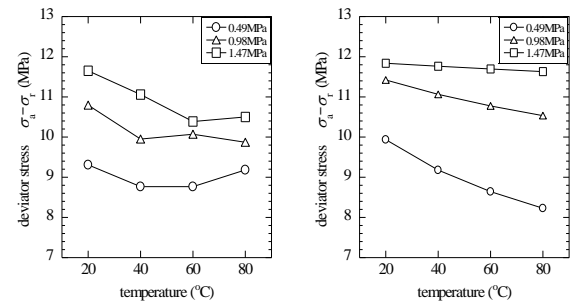


図3 ピーク強度の温度依存性

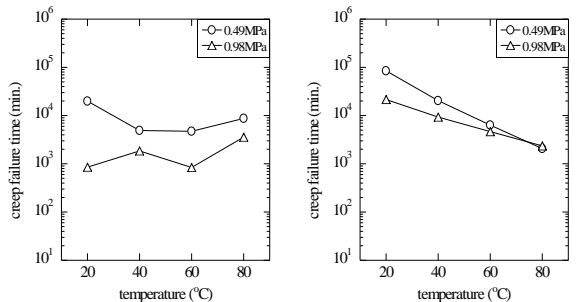


図4 クリープ破壊時間の温度依存性

再び増加する加速クリープ過程が確認された。図4(a)の温度・クリープ破壊時間関係の拘束圧依存性について着目すると、各温度において、有効拘束圧が上昇すると、クリープ破壊時間が短縮するという傾向が確認された。温度依存性について着目すると、各拘束圧で、温度が上昇するとクリープ破壊時間が一意的に短縮するという、既往の研究<sup>6)</sup>で報告された傾向は確認されなかった。

以上のように、三軸圧縮試験・三軸クリープ試験ともに、拘束圧依存性は確認されたものの、温度が上昇するとピーク強度が低下し、クリープ破壊時間が一意的に短縮すると



いう傾向は確認されなかった。

## 4.2 解析結果

表 2 に提案する熱弾粘塑性構成式に用いるパラメータを示す。提案する構成式は、異なる拘束圧ごとに過圧密比  $OCR$  と限界状態の応力比  $R_{CS}(=\sigma'_a/\sigma'_r)$  を与える必要がある。また、下線で示した値は先述した三軸圧縮・クリープ試験結果および物理試験より決定した。材料パラメータ以外の解析条件は、表 1 の試験条件と同様である。

実験結果からは、三軸圧縮・クリープ試験において、温度が上昇するとピーク強度が低下し、クリープ破壊時間が短縮するという傾向<sup>7)</sup>は確認されなかったものの、既往の研究ではこの傾向は確認されているため、解析ではこの傾向を表現しようと試みた。

図 1(b)の三軸圧縮試験の解析結果より、堆積軟岩特有のひずみ軟化挙動やダイレイタンシー特性を精度よく表現できることが確認された。さらに、図 3(b)の温度-ピーク強度関係の解析結果から、有効拘束圧が上昇するとピーク強度が上昇するという拘束圧依存性と、温度が上昇するとピーク強度が減少するという温度依存性を、定性的に表現できることが確認された。

図 2(b)の三軸クリープ試験の解析結果より、堆積軟岩特有のクリープ挙動を精度よく表現できることが確認された。さらに、図 4(b)の温度-クリープ破壊時間の解析結果から、有効拘束圧が上昇するとクリープ破壊時間が短縮するという拘束圧依存性と、温度が上昇するとクリープ破壊時間が短縮するという温度依存性を、定性的に表現できることが確認された。

以上のように、三軸圧縮・クリープ試験の解析結果ともに同一のパラメータを用いて、異なる温度・拘束圧の挙動を表現できることが確認された。

表 2 パラメーター一覧

Initial degree of overconsolidation $OCR$	40.0, 20.0, 13.6
Void ratio $e_N$	0.5
Young's modulus $E$ (MPa)	1000
Poisson's ratio $\nu$	0.12
Critical state stress ratio $R_{CS}$	6.9, 6.0, 5.3
Plastic stiffness $E_p(\lambda-\kappa)$	0.015
Time dependent parameter $\alpha$	0.5
Thermal expansion rock $\alpha_T$ (1/K)	$-2.5 \times 10^{-5}$
Potential shape parameter $\beta$	1.1
Overconsolidation parameter $\alpha$	3000
Time dependent parameter $C_n$	0.025

## 5. 熱と不飽和特性を考慮した構成式の提案

温度変化と飽和度の変化<sup>6)</sup>が堆積軟岩の力学挙動に及ぼす影響が大きいという試験結果に基づいて、飽和・不飽和と下負荷面軟岩熱弾粘塑性モデルを提案する。Original 下負荷面モデル<sup>7)</sup>と下負荷面軟岩弾粘塑性モデル<sup>5)</sup>をベースに、温度変化と飽和度の変化を考慮した発展則を導入する。

$$f = \ln \frac{p}{p_0} + \ln \frac{M^2 + \eta^2}{M^2} - \frac{\rho_s}{1 + e_0} \frac{1}{C_p} + \frac{\tilde{\rho}_e}{1 + e_0} \frac{1}{C_p} - \varepsilon_v^p \frac{1}{C_p} = 0 \quad (5)$$

$$d\left(\frac{\tilde{\rho}_e}{1 + e_0}\right) = -\Lambda \frac{\rho_s^\beta}{\tilde{p}}, \quad \rho = a\tilde{\rho}_e + b\rho_s \quad (6)$$

$$\tilde{\rho}_e = (\lambda - \kappa) \ln\left(\frac{\tilde{P}_{N1}}{P_{N1}} OCR\right) \quad (7)$$

$$\tilde{P}_N = P_N + 3K^s \alpha_T^s (T - T_0) \quad (8)$$

$$\rho_s = N(S_r) - N = Q(S_r^s - S_r); \quad Q = \frac{N_r - N}{S_r^s - S_r} \quad (9)$$

$$d\rho_s = -QdS_r \quad (10)$$

式(5)で表される降伏関数の中に、 $\tilde{\rho}_e$  と  $\rho_s$  はそれぞれ温度と飽和度の変化による正規圧密線との間隙比の差を表す。

## 6. 境界値問題 - 熱土水空気連成解析 -

提案する構成式のパフォーマンスを検証するために、実スケールにおける熱土水空気(THMA)有限要素連成解析を行った。表3に解析で用いたパラメータを示す。実スケールにおける高レベル放射性廃棄物処分施設の熱土水空気連成解析では、高レベル放射性廃棄物が放出する熱の影響を模擬するために、トンネル壁面の内側の全要素を内部熱源として設定する。ただし、実際に高レベル放射性廃棄物を地層処分する場合、廃棄物の体積が占める割合は、トンネルの体積に対して1.6%程度であると考えられているため、トンネル内側の内部熱源の熱量は、トンネルの体積に相当する廃棄物の放出する熱量の1.6%の値に設定する。高レベル放射性廃棄物が放出する熱量は、時間とともに減衰すると考えられており、地層処分を実施する前に地上である期間において自然放射する熱減衰を行わない場合(Case1)と、熱減衰を行う場合(Case2)の2 ケースを実施する。図5 に高レベル放射性廃棄物が放出する熱の影響を模擬した内部熱量の経年変化を示す。

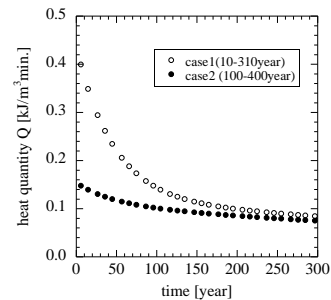


図5 内部熱量の経年変化

さらに、熱源の周りを不飽和状態のベントナイト(人工バリア)で囲い込むように設置した。ベントナイトの初期条件は、飽和度を86%、サクシオンを62MPa、全水頭を-6945mに設定した。また、Munozら<sup>8)</sup>(2006)によって得られた水分特性曲線と飽和度-透水係数関係をそれぞれ図6、図7に示す。この水分特性曲線と透水係数の関係に従って、有限要素解析を行った。

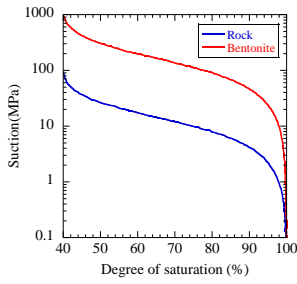


図6 水分特性曲線

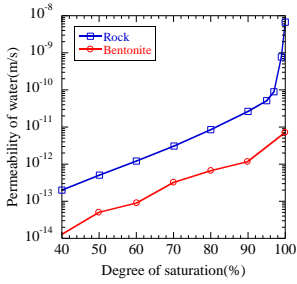


図7 飽和度-透水係数関係

### 6.1 2次元解析条件

図8に2次元解析メッシュを示す。解析メッシュは420要素，460節点で構成されており，トンネル半断面の下端面の節点を鉛直方向固定，トンネル半断面の左右側面の節点を水平方向固定に設定する。寸法は高さ520m，幅210m，地表面から熱源までの距離を300m，熱源を直径20mの半円形として設定した。初期応力は，自重解析によって与えた。水理境界は，トンネル半断面の上端面を排水条件，下端面，左右側面とトンネル壁面を非排水条件に設定し，軟岩の全水頭を520mに設定した。

### 6.2 3次元解析条件

図9に，3次元解析メッシュを示す。解析メッシュは8740節点，7560要素により構成されおり，トンネル半断面の下端面の節点を鉛直方向固定，トンネル半断面の左右側面の節点を水平方向固定に設定する。寸法は，高さ520m，幅210m，奥行き210mとし，上端面（地表面）より300mの地点に直径20mの半円孔を設けている。初期応力は，自重解析によって与えた。水理境界は，トンネル半断面の上端面のみを排水条件，残りの面とトンネル壁面（内部熱源との境界のみ）を非排水条件に設定し，軟岩の全水頭を520mに設定した。

表3 パラメーター一覧

	Bentonite	Rock
Compression index $\lambda$	0.050	0.010
Swelling index $\kappa$	0.010	0.001
Void ratio ( $p=98$ kPa on <i>N.C.L</i> ) $e_0$	1.040	0.450
Poisson's ratio $\nu$	0.300	0.120
Critical state stress ratio $R_{CS}$	9.15	4.50
Consolidation yield stress (MPa) $p_c$		20
Parameter of overconsolidation $a$	5.000	2.000
Parameter of suction $b$	0.5	0.5
Time dependent parameter $\alpha$		0.5
Parameter of overconsolidation $\beta$	1.00	1.10
Void ratio ( $p=98$ kPa on <i>N.C.L.S</i> ) $Nr$	1.060	0.500
Thermal expansion coefficient (1/K) $\alpha_T$	$-1.0 \times 10^{-6}$	$-2.5 \times 10^{-5}$
Thermal conductivity ( $\text{kJ m}^{-1} \text{K}^{-1} \text{Min}^{-1}$ ) $K_r^S$	0.060	0.200
Specific heat ( $\text{kJ Mg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) $C^S$	723	840
Heat transfer coefficient ( $\text{kJ/m}^2 \text{Kmin.}$ ) $\alpha_c$	236	236
Specific heat of water $C^W$		4184
Thermal expansion coefficient of water (1/K) $\alpha_r$		$2.1 \times 10^{-4}$
Saturated degrees of saturation $S_r^S$	1.00	1.00
Residual degrees of saturation $S_r^r$	0.40	0.40
Parameter corresponding to drying AEV (kPa) $S_d$	11000	21000
Parameter corresponding to wetting AEV (kPa) $S_w$	800	1000
Initial stiffness of scanning curve (kPa) $k_{sp}^e$	25000	90000
Parameter of shape function $c_1$	0.000001	0.00003
Parameter of shape function $c_2$	0.000005	0.00006
Parameter of shape function $c_3$	30.0	50.0

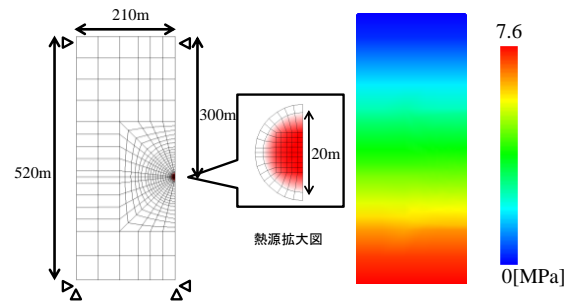


図8 2次元解析メッシュ

自重解析結果

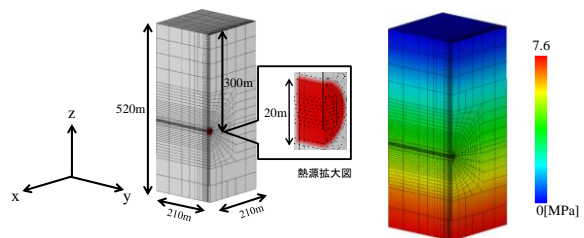


図9 3次元解析メッシュ

自重解析結果

### 6.3 2次元解析結果

図10～15に温度、飽和度、サクシオン、ベントナイトの全水頭、ベントナイトの体積ひずみ、軟岩の偏差ひずみの経年変化を示す。図10より、両ケースで時間が経過するにつれて、熱が放射状に伝播する様子が確認され、熱量を大きく設定したCase1はCase2よりも広範囲に熱が伝播している様子が確認された。また、Case1では、熱源からの水平距離が0m、2m、10mの節点において温度の経時変化に明確なピーク値が確認された。以上より、提案する解析手法は熱量の違いを表現できることが確認された。

図11より、Case1では、ベントナイトの飽和度は30年までは急激に上昇し、その後は緩やかな上昇に切りかわり、60年後に飽和に達したことが確認できる。一方、熱源からの距離が2mの軟岩の飽和度は不飽和のベントナイトとの水のやりとりで30年までは急激に減少し、その後は後背の飽和軟岩地盤の水供給で上昇に転じ、約70年後に再び飽和状態に戻る。図12より、Case1では、ベントナイトのサクシオンは30年までは急激に低下し、その後は緩やかな上昇に切りかわり、60年後に3MPa(地下300mの間隙水圧に相当)に収束していることが確認された。一方、熱源からの距離が2mの軟岩のサクシオンは30年程度までは増加し、その後は減少に切りかわり、ベントナイトと同様に-3MPaに収束している。つまり、サクシオンが減少する過程では飽和度が上昇し、サクシオンが増加する過程では飽和度が減少する傾向が明らかに確認された。また、ベントナイトが飽和に達するまでの時間を比較すると、Case1では70年後だったのに対して、Case2では80年後だった。Case1ではCase2よりも大きな熱量を与えたことで、図13よりCase1の方がベントナイトの全水頭が早く上昇していることが確認できる。その結果、サクシオンの減少が早まり、飽和に達するのも早くなったと考えられる。

図9より両ケースで、ベントナイト特有の吸水に伴う膨張挙動を表現できていることが確認された。膨張量を比較すると、熱量の小さいCase2の方が膨張量は大きかった。先述した通りCase1と比較してCase2の方が飽和度の発展が遅いため式(6)の $\rho_s$ の発展も遅くなり、Case2の体積膨張量の方が大きくなったと考えられる。図15より、Case1とCase2の軟岩の偏差ひずみを比較するとCase2の方がベントナイトの膨張量が大きかった分、偏差ひずみの値が大きい値を示している。

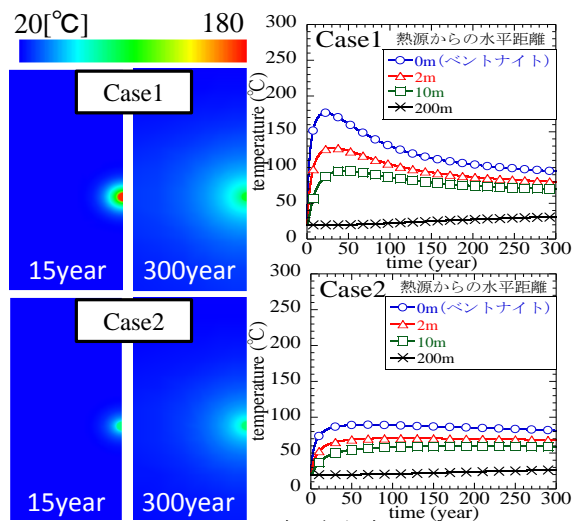


図10 温度の経年変化

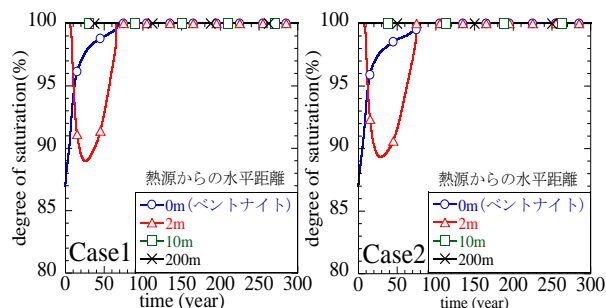


図11 飽和度の経年変化

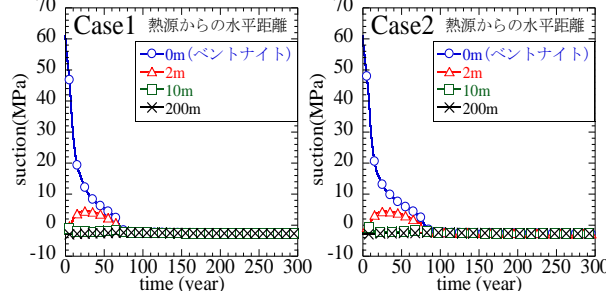


図12 サクシオンの経年変化

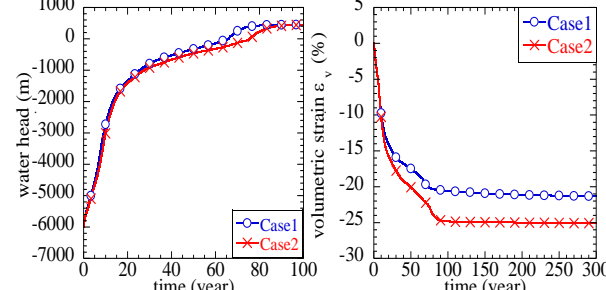


図13 ベントナイトの全水頭の経年変化

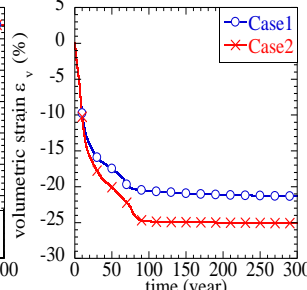


図14 ベントナイトの体積ひずみの経年変化

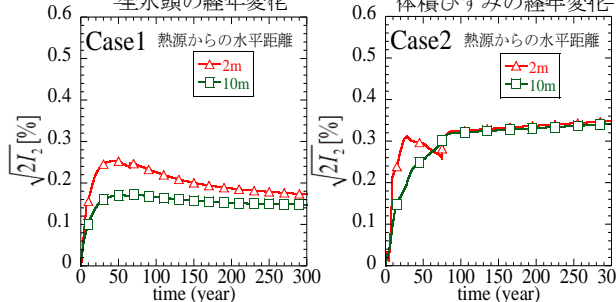


図15 軟岩の偏差ひずみの経年変化

## 6.1 3次元解析結果

図16~21に温度、飽和度、サクシオン、ベントナイトの全水頭、ベントナイトの体積ひずみ、軟岩の偏差ひずみの経年変化を示す。全体的に先述した2次元の解析結果と同様の傾向を示している。しかし、図11と図16を比較すると、3次元の解析結果ではベントナイトが飽和に達するのが早く、熱源からの水平距離が2mの軟岩が常に飽和状態になっていることが確認された(図18にも示しているように、サクシオンはまだマイナスの状態にある)。このような解析結果が得られたのは、ベントナイトに水を供給する軟岩が3次元の時の方が多いためだと考えられる。

## 7. まとめ

提案する解析手法を用いることで、内部熱源の初期熱量の違いや、発生する温度分布、サクシオン、飽和度、体積ひずみ、偏差ひずみの経年変化を定量的に評価することができた。但し、その精度は今後の現場試験や室内モデル実験で検証する必要がある。

- 1) 核燃料サイクル機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術の信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 1999.
- 2) Xiong, Y. L. et al.: Modification of thermo-elasto-viscoplastic model for soft rock and its application to THM analysis of heating tests, *Soils and Foundations*, Vol. 54, No.2, 176-196, 2014.
- 3) 蔭山星, 西村友宏, 栗本悠平, 熊勇林, 張鋒: 堆積軟岩の温度・クリープ特性のモデル化, 第48回地盤工学研究発表会, 富山国際会議場, 講演集(CD-ROM), 2013.
- 4) Zhang, S. and Zhang, F.: A thermo-elasto-viscoplastic model for soft sedimentary rock, *Soils and Foundations*, Vol.49, No.4, pp.583~596, 2009.
- 5) Zhang, F., Yashima, A., Nakai, T., Ye, G.L. and Aung, H., An elasto-viscoplastic model for soft sedimentary rock based on  $t_{ij}$  concept and subloading yield surface, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.1, pp.65-73, 2005.
- 6) Cui, Y. J. and Delage, P.: Yielding and plastic behavior of an unsaturated compacted slit, *Geotechnique*, 46(2), 291-311, 1996.
- 7) Hashiguchi, K. and Ueno, M.: Elastoplastic constitutive laws of granular material, *Constitutive Equations of Soils*, Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg., 1977.
- 8) Munoz J. Thermo-hydro-mechanical analysis of soft rock, application to a large scale heating test and large scale ventilation test, PhD thesis, Catalonia, Spain: Polytechnic University of Catalonia, 2006.

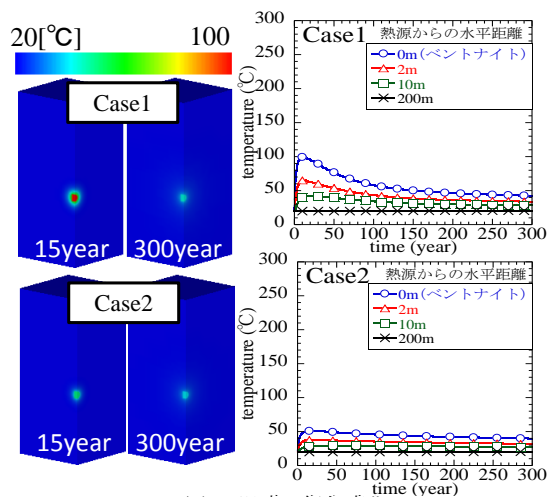


図16 温度の経年変化

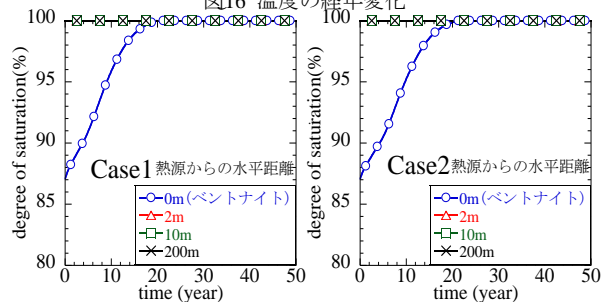


図17 飽和度の経年変化

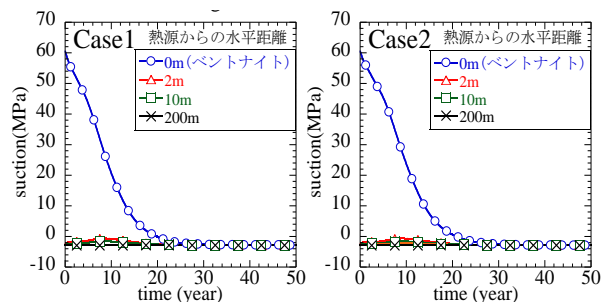


図18 サクシオンの経年変化

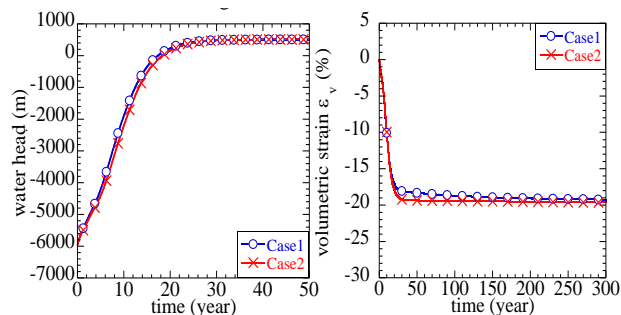


図19 ベントナイトの全水頭の経年変化

図20 ベントナイトの体積ひずみの経年変化

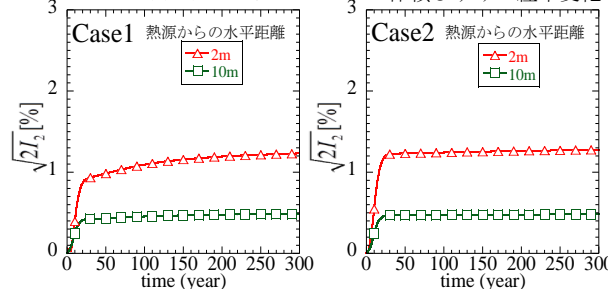


図21 軟岩の偏差ひずみの経年変化

## 三重県における災害廃棄物処理に対する取組 (Approach for the disaster waste disposal treatment in Mie)

伊藤晃浩<sup>1</sup>，藤田修造<sup>2</sup>，春日井忍<sup>2</sup>

- 1 応用地質・中部支社・ジオテクニカルセンター・ito-akihiro@oyonet.oyo.co.jp
- 2 三重県・環境生活部・廃棄物対策局・廃棄物・リサイクル課

### 概 要

三重県では、南海トラフ地震等による大規模災害により、甚大な被害が発生した市町に技術的助言や広域処理の調整など、県が行うべき役割等を定めた「三重県災害廃棄物処理計画」を東日本大震災や紀伊半島大水害から得られた知見をふまえて策定した。この計画では、市町が主体となって災害廃棄物を処理する場合に県が行う支援（基本対策）と市町自らが処理を行うことが困難になった場合に県が主体となつて行う廃棄物処理（特別対策）を処理の基本方針としている。この計画の最大の特徴は、PDCA サイクルに基づくマネジメントの仕組みを構築し、災害廃棄物処理計画の点検・評価を定期的に行い、必要に応じて計画の更新を行っていく点にある。また、この取組を通して、県内の災害廃棄物処理体制を構築し、訓練や研修等で計画の実効性を高めていく点が特徴として挙げられる。

キーワード：南海トラフ地震，災害廃棄物，処理計画，災害予防，教育訓練

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、大規模地震に加え津波の発生により、様々な災害廃棄物が混ざり合い、その量や処理の困難性もこれまでの災害を遙かに超えて広範囲に発生した。三重県においては、南海トラフ地震発生の緊迫性が高く、東日本大震災以上の被害が明日生じるかもしれないという状況に直面している。

災害廃棄物は、一過性とはいえ膨大な量が発生するため、可能な限り迅速かつ適切に処理する必要があること、また、平常時の廃棄物とは組成が大きく異なり、これまで培ってきた廃棄物の有効利用技術を、そのまま適用することが困難であることなど、その処理にあたっては、特有の課題、問題を解決しながら進めていく必要がある。

そのため、被害が発生してから措置を講じるのではなく、あらかじめ災害の規模、廃棄物の発生量、浸水区域、発生廃棄物の地域特性などを予測した上で、災害予防の観点もふまえ、可能な限り事前に対策を講じておくことが、迅速な復旧・復興のために求められる。

本稿では、このような災害廃棄物処理に対する三重県の取組事例について紹介する。

### 2. 災害廃棄物処理計画の概要

#### 2.1 計画の位置づけ

環境省では、東日本大震災の教訓、災害廃棄物処理の課

題を整理した上で、「災害廃棄物対策指針<sup>1)</sup>」を2014年3月に新たに策定し、地方公共団体におけるより実効ある「災害廃棄物処理計画」の策定を促進している。三重県が2015年3月に策定した「三重県災害廃棄物処理計画（以下、「県計画」という）<sup>2)</sup>」は、災害廃棄物対策指針や「巨大災害発生時における災害廃棄物対策のグランドデザインについて（中間とりまとめ）<sup>3)</sup>」をふまえ、「三重県地域防災計画<sup>4)</sup>」、「市町災害廃棄物処理計画」と整合を図り、災害により甚大な被害が発生した市町に代わって、県が主体となって災害廃棄物を処理するなど、県が行うべき役割等を定めている。

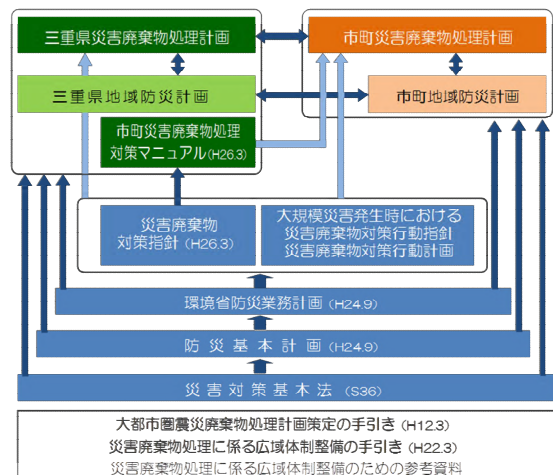


図1 県計画の位置づけ<sup>5)</sup>

## 2.2 対象とする災害と災害廃棄物

### (1)対象とする災害

県計画では、地震災害及び水害、その他自然災害を対象としている。地震災害については、南海トラフ地震及び県内主要活断層を震源とする内陸直下型地震を対象としている。一方、水害やその他自然災害については、洪水、浸水、土砂、竜巻、大雪等の災害を対象としている。このうち、地震災害の対象は、表1に示すとおりである。

表1 対象とする地震災害

南海トラフ地震	過去最大クラスの南海トラフ地震 (L1)
	理論上最大クラスの南海トラフ地震 (L2)
県内主要活断層を震源とする内陸直下型地震	養老-桑名-四日市断層帯
	布引山地東縁断層帯 (東部)
	頓宮断層 等

### (2)対象とする災害廃棄物

県計画において対象とする災害廃棄物は、発生源別に表2に示す種類に分類している。

表2 災害廃棄物の種類

発生源	種類
地震や津波等の災害によって発生するもの	木くず、コンクリートがら、金属くず、可燃物、不燃物、津波堆積物、廃家電、廃自動車等、処理困難廃棄物
被災者や避難者の生活に伴い発生するもの	生活ごみ、避難所ごみ、し尿

## 2.3 災害廃棄物処理の基本方針

### (1)対策方針

災害からのいち早い復旧・復興に向けて、災害廃棄物の処理を迅速かつ適正に実施するため、東日本大震災や紀伊半島大水害から得られた知見をふまえ、表3に示す対策区分に基づき災害廃棄物の処理を行う方針としている。

表3 対策区分

基本対策	市町が主体となって実施する災害廃棄物の処理について、県はその際生じる課題に対して、技術的助言や関係機関との広域調整等の支援を行う。
特別対策	県は、災害により行政機能低下や広域かつ甚大な被災状況において、市町自ら処理を行うことが困難であると判断 <sup>*</sup> した場合、県が主体となった災害廃棄物の処理を行う。

※判断基準

県が被災市町から地方自治法（昭和22年法律第67号）第252条の14の規定に基づく事務の委託を受けたとき

### (2)処理期間

災害発生から概ね3年以内の処理完了を目指すのが、地震の規模や災害廃棄物等の発生量に応じて、適切な処理期間を設定することとしている（図2参照）。

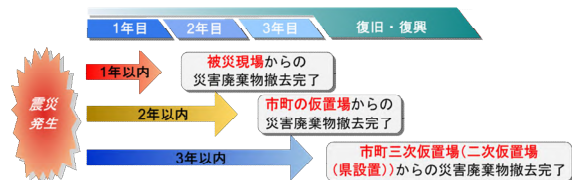


図2 災害廃棄物の目標撤去期限<sup>9)</sup>

### (3)処理方法

災害廃棄物の処理方法は、以下の5項目を基本とする。

#### ①処理範囲

- 最大限県内処理施設を利用して処理を行うことを優先する。
- 被災規模に応じて仮設処理施設や県外広域処理を活用する。

#### ②再資源化

- 東日本大震災でのリサイクル実績をふまえ、可能な限りリサイクルを行う。
- 国や関係自治体等と調整し、民間企業や公共の復興事業等における再生資材として利用先の確保を行う。

#### ③減量化

- 廃棄物の選別や焼却により、埋立する災害廃棄物量をできるだけ減量化する。

#### ④地元事業者の活用

- 被災後の重要な雇用の場と位置づけ、地域復興の観点で処理を行う。

#### ⑤合理性・透明性・経済性

- 合理性のある処理方策を選定し、透明性の高い契約手順に沿って、経済性を重視する。

## 2.4 災害廃棄物処理の全体像

### (1)概要

災害廃棄物処理の全体像を図3に示す。

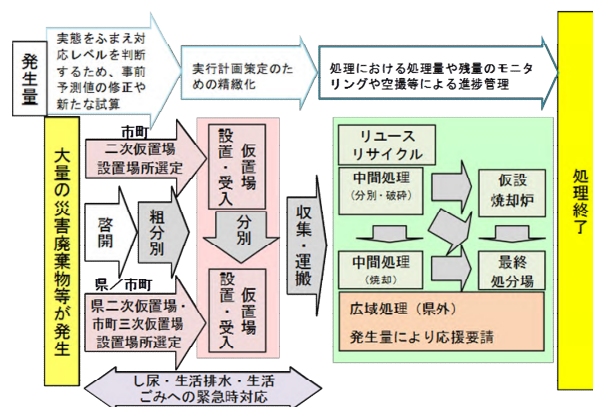


図3 災害廃棄物処理の全体像<sup>9)</sup>

発生した災害廃棄物は仮置場に搬入し、分別や破碎を行った後、できる限りリサイクルするよう努めるが、それが困難な場合には焼却処理や埋立処分を行う。県計画では、極力、市町と民間の既存施設を活用して、地域間連携による県内処理を目指す計画としている。

災害廃棄物発生量が膨大である場合は、計画期間内の処

理完了をめざし、県は焼却施設が不足する際には、仮設焼却炉等の設置を、また、混合廃棄物や津波堆積物については、仮設の破碎選別施設等の設置を検討することとしている。ただし、最大限の努力を行っても県内処理ができないものについては、県が国等との調整を図り、広域処理を実施することとしている。一方、日常生活から排出される生活ごみやし尿については、市町の既存施設での処理を前提とし、これらの処理施設が被災した場合には、近隣市町等での処理の受応援ができるよう県が調整することとしている。

### (2)地域区分

県計画では、災害廃棄物の処理にあたっては、三重県の29市町を表4及び図4に示す五つの地域に区分して、処理を進めていく方針としている。

表4 災害廃棄物処理における地域区分

地域区分	構成市町
北勢地域	桑名市、いなべ市、木曽岬町、東員町、四日市市、菟野町、朝日町、川越町、鈴鹿市、亀山市
中勢地域	津市、松阪市、多気町、明和町、大台町
伊賀地域	伊賀市、名張市
伊勢志摩地域	伊勢市、鳥羽市、志摩市、玉城町、南伊勢町、大紀町、度会町
東紀州地域	尾鷲市、紀北町、熊野市、御浜町、紀宝町

注) 一部事務組合等(伊勢広域環境組合及び香肌伊勢資源化広域連合)の構成市町が二つの地域区分となっている場合には、災害廃棄物処理体制は通常の一般廃棄物処理時を基本とする。

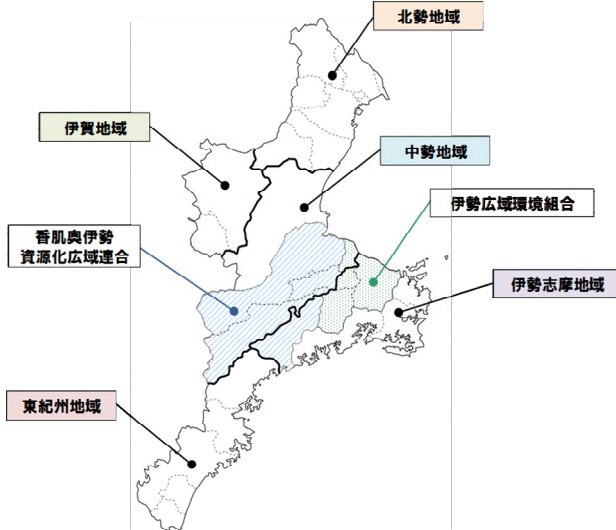


図4 災害廃棄物処理における地域区分<sup>8)</sup>

### (3)災害廃棄物発生量の推計

災害廃棄物の処理を行う場合は、廃棄物の種類によって処理の方法が異なることから、組成別の廃棄物量を把握する必要がある。三重県における主な地震による災害廃棄物の組成別及び津波堆積物の推計発生量は、表5及び図5に示すとおり見込まれている。

L1では、災害廃棄物が約4,600千トン、津波堆積物が約13,600千トン、計約18,200千トンとなっており、全体の

約75%は津波堆積物となっている。

L2では、L1の災害廃棄物量の概ね2倍の約33,900千トンが発生する見込みとなっている。また、内陸直下型では、養老-桑名-四日市断層帯による発生量が最も多く、約10,200千トンとなっている。三重県の一般廃棄物排出量が638千トン(平成24年度)であることから、L1では29年分に相当する大量の廃棄物が一度の災害で発生する推計結果となった。

表5 災害廃棄物の推計発生量及びその内訳<sup>9)</sup>

種類	L1	L2	直下型			
			養老-桑名-四日市断層帯	頓宮断層	布引山地東縁断層帯	
災害廃棄物	4,567	17,373	10,231	693	6,910	
	25.1%	51.2%	100.0%	100.0%	100.0%	
木くず	992千t	3,592千t	1,991千t	141千t	1,391千t	
	5.4%	10.6%	19.5%	20.3%	20.1%	
コンクリートがら	2,331千t	9,422千t	5,939千t	385千t	3,862千t	
	12.8%	27.8%	58.0%	55.6%	55.9%	
金属くず	137千t	552千t	339千t	22千t	217千t	
	0.8%	1.6%	3.3%	3.2%	3.1%	
その他(残材)	1,107千t	3,807千t	1,962千t	145千t	1,440千t	
	6.1%	11.2%	19.2%	20.9%	20.8%	
津波堆積物	13,640	16,570	0	0	0	
	74.9%	48.8%	0.0%	0.0%	0.0%	
県合計	18,207千t	33,943千t	10,231千t	693千t	6,910千t	
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	

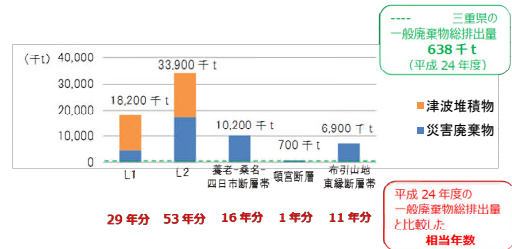


図5 三重県における災害廃棄物発生量<sup>10)</sup>

### (4)災害廃棄物処理フロー

三重県全体における災害廃棄物処理フローを、L1 発災時を例に図5に示す。

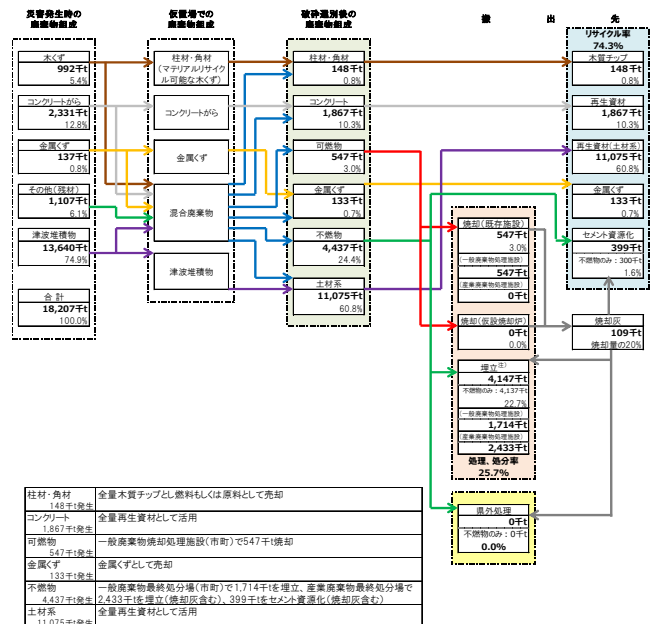


図6 南海トラフ地震(L1)の災害廃棄物処理フロー<sup>11)</sup>

災害時に発生した廃棄物は、破碎選別等により柱材・角材、コンクリート、可燃物、金属くず、不燃物、土材系に分別される。これらの量と割合は、災害廃棄物の選別率に基づき算出しており、東日本大震災から得られた割合を基に、表6のとおり設定している。

表6 災害廃棄物の選別率<sup>12)</sup>

	選別後							合計
	柱材・角材		コンクリート	可燃物	金属くず	不燃物	土材系	
	リサイクル	再生資材化	焼却処理	リサイクル	セメント資源化 又は埋立処分	再生資材化		
木くず	15	0	55	0	30	0	100	
コンクリートがら	0	80	0	0	20	0	100	
金属くず	0	0	0	95	5	0	100	
その他(残材)	0	0	0	0	85	15	100	
津波堆積物	0	0	0	0	20	80	100	

注)選別率は、東日本大震災の事例に基づくものである。

まず、木くずについては、選別後、柱材・角材としてリサイクル可能なものを15%、可燃物として焼却処理されるものを55%、不燃物として埋立処分されるものを30%の選別率に設定した。次に、コンクリートがら及び金属くずについては、東日本大震災においても、そのほとんどが再生資材化もしくはリサイクル(金属スクラップ)されており、コンクリートとして80%、金属くずとして95%の選別率に設定した。

また、その他(残材)については、不燃物としてセメント資源化又は埋立処分されるものを85%、土材系として再生資材化されるものを15%の選別率に設定した。

さらに、津波堆積物については、土材系として再生資材化されるものを80%、不燃物としてセメント資源化又は埋立処分されるものを20%の選別率に設定した。

以上により選別された災害廃棄物は、最終的にはリサイクルを行う木質チップ、再生資材、金属くず等と焼却灰の処理処分を行うものに分別される。

L1では、県内での連携(市町や地域ブロックを越えた協力を含む)による処理を行った場合、産業廃棄物処理施設も合わせると、3年間で全量を県内で処理することが可能となる。

## 2.5 災害廃棄物処理基本対策

### (1)し尿処理

避難所等に設置される仮設トイレは、被災者にとって生活の一部であり、公衆衛生上の観点から重要な施設となる。

県計画では、し尿の収集・運搬、処理は市町等が行い、県は市町と連携して情報収集、協力及び必要な支援に関する調整を行うこととしている。

現在の災害用トイレの備蓄数は、表7に示すとおりであり、必要基数に対し備蓄数が不足している状況にある。

県では、社団法人全国建設機械器具リース業協会中部支部と「災害時における仮設トイレ等のあっせん・供給に関する協定」を締結しているが、市町は、災害時のし尿収集・運搬車両の確保、処理に関する資機材の備蓄を促進するとともに、住民自らの簡易トイレの備蓄、仮設トイレの使用

方法等について、住民へ啓発を行うことが求められること等を県計画の基本対策として記載している。

表7 仮設トイレの必要基数と備蓄数

地震の種類	L1	
仮設トイレ必要基数(基)	13,971	
仮設トイレ備蓄数(基)	市町	7,531
	県	2,386
	合計	9,917

### (2)生活ごみ処理

県計画では、生活ごみの収集運搬及び処理は、通常時と同様に市町等が行い、県は、市町と連携して情報収集、協力、必要な支援に関する調整を行うこととしている。

そのため、市町は、想定する各避難所などから排出される廃棄物の排出方法や収集運搬及び処理の方法について、事前に検討しておく必要がある。

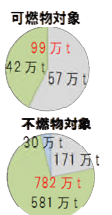
なお、生活ごみについては、焼却施設や資源化施設により処理を行うこととしている。

### (3)災害廃棄物処理支援

処理施設の稼働状況から算出した災害廃棄物の処理能力は、表8のとおりである。県計画では、市町及び民間業者における各処理施設(一般廃棄物焼却施設、産業廃棄物焼却施設、一般廃棄物最終処分場、産業廃棄物最終処分場、セメント工場)の処理余力を既存資料やヒアリング等から把握している。また、県は市町等における処理施設の被災状況を把握し、市町間の受入調整を行うこととしている。さらに、被災状況に応じて民間処理事業者への応援要請や地域間の受援・応援調整を行い、県内広域応援体制を構築することとしている。

表8 各処理施設における災害廃棄物の処理能力<sup>13)</sup>

施設	処理可能量(t)	備考
一般廃棄物焼却処理施設	570,600	処理期間3年
産業廃棄物焼却処理施設	421,000	処理期間3年(応援協定締結会員による)
一般廃棄物最終処分場	1,714,180	10年後残余容量
産業廃棄物最終処分場	5,807,630	10年後残余容量(応援協定締結会員による)
セメント工場	300,000	処理期間3年



## 2.6 災害廃棄物処理特別対策

### (1)事務委託または事務代替

災害廃棄物は一般廃棄物に該当するため、市町が処理責任を有し、その発生量に対する処理能力を確保して、処理を実施することとなる。しかし、壊滅的な被害により行政機能自体に影響があり、災害廃棄物の処理が困難な場合、市町は処理可能な範囲まで処理を行うこととし、それ以上については、県が地方自治法に基づき、市町に代わって処理を行うこととしている。県計画では、県が市町に代わって処理を行う場合、県は、事務の委託又は事務の代替執行に基づいて実施することとしている。



## (2) 県の仮置場

市町二次仮置場で粗分別された混合廃棄物は、二次仮置場（県設置）に運搬し、破碎選別処理を行う。そのため、県計画では、処理・処分先の受入条件に応じた破碎選別施設を設けることとしている。L1 の場合、二次仮置場（県設置）の必要面積は、表 9 に示す通り、合計で約 100ha と見込んでいる。

表 9 二次仮置場の必要面積 (L1) <sup>14)</sup>

地域区分	北勢	中勢	伊賀	伊勢志摩	東紀州	合計	
県二次仮置場 混合廃棄物処理量(t)	1,818,000	1,764,000	5,000	2,405,000	790,000	6,782,000	
破碎選別 ライン 占有面積	必要日処理量 <sup>※1</sup> (t/日)	2,346	2,276	6	3,103	1,019	8,751
	1ライン当たりの 最大処理量 (t/日)	600					
	必要ライン数	4	4	6	2		16
	1ライン当たりの 概略占有面積 (ha)	2.5					
仮置エリア 占有面積	必要面積(ha)	10.0	10.0	15.0	5.0	40.0	
	災害廃棄物 年間保管量 <sup>※2</sup> (t)	727,200	705,600	2,000	962,000	316,000	2,712,800
	災害廃棄物 仮置き占有 面積 <sup>※3</sup> (ha)	16.9	15.8	0.1	21.8	7.8	62.4
合計	26.9	26.0	36.8	12.8	102.4		

※1 年間稼働日数310日、2.5年間で処理することとした。  
 ※2 三年目には全量が二次仮置場（県設置）に搬入される前提として、1年分の保管量を計上した。  
 ※3 高さ5m、法面勾配1.2.0にて仮置き。

## (3) 仮設焼却炉

既存焼却施設のみでは処理能力が不足する場合には、県は仮設焼却炉を設置することとしている。仮設焼却炉が必要となるケースは、表 10・11 に示すとおり、L2 及び養老-桑名-四日市断層帯の地震災害ケースである。

表 10 災害廃棄物発生量（可燃物）と処理内訳

可燃物	発生量	直下型				
		L1	L2	養老-桑名-四日市断層帯	頓宮断層	布引山地東縁断層帯
処理先 (焼却)	市町	547	571	571	81	571
	民間	0	421	421	0	197
	仮設	0	987	106	0	0
	合計	547	1,979	1,098	81	768

表 11 仮設焼却炉の設置基数等<sup>15)</sup>

告知必要量(千トン)	L1	L2	養老-桑名-四日市断層帯			頓宮断層	布引山地東縁断層帯
			100t/日×2基	200t/日×2基	250t/日×6基		
北勢	—	211	—	—	—	—	
中勢	—	260	—	—	—	—	
伊賀	—	0	—	—	—	—	
伊勢志摩	—	433	—	—	—	—	
東紀州	—	83	—	—	—	—	
設置基数(基)	—	100t/日×2基 200t/日×2基 250t/日×6基	100t/日×2基	—	—	—	
必要面積(m <sup>2</sup> )	—	139,040	14,500	—	—	—	

注) 処理に要する期間を3年(年間210日、実稼働2年間)とした場合

## (4) 津波堆積物等の処理

津波堆積物は、処理ラインを設けて処理することにより、復旧・復興時に再生資材として利用する計画としている。

各地域における再生資材としての調整は、県が行うとともに、受入先の要求品質、使用量、使用時期等を的確に把握し、処理の方法を変更するなど柔軟に対応することとしている。

## (5) 処理困難廃棄物の処理

市町が通常において回収・処理を行わない廃棄物で、災

害時に発生する有害性・危険性がある処理困難廃棄物は、適切な回収及び処理が実施されない場合、環境や人の健康に長期的な影響を及ぼす可能性がある。

県計画では、有害物質等を取り扱う事業所やアスベストが吹付けされている建築物についての位置情報を震度・津波浸水域と合わせて地図上にプロットしている。また、発災時には適切な取扱いが行われるように、これらの情報を各市町に提供している。さらに、発災時の対応策を整理し、詳細については別途マニュアルを作成して対応していくこととしている。

## (6) 県外の広域処理調整

理論上最大クラスの南海トラフ地震 (L2) など、広域的な大規模災害が発生した場合、県内のみでは廃棄物の処理を行うことが難しくなる。県は国の動向を的確に把握し、図 7 に示す優先順位で調整を行い、災害廃棄物発生量に応じて国へ県外処理の調整を要請する。また、他都道府県から処理の応援を求められた場合には、必要な調整を行い、被災地の復興に協力することとしている。

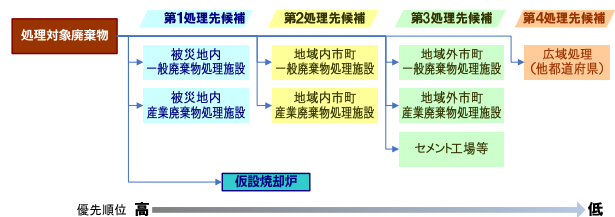


図 7 廃棄物の処理先と優先順位<sup>16)</sup>

## 3. 県計画の特徴

### 3.1 人材育成・教育訓練の推進

発災後速やかに災害廃棄物を処理するためには、災害廃棄物処理に精通し、かつ柔軟な発想と決断力を有する人材が求められる。そのため、平常時から災害マネジメント能力の維持・向上を図っていく必要がある。

県では、県、市町、民間事業者団体等の職員を対象とした研修を実施するなど、災害廃棄物処理に求められる人材育成を積極的に推進しているところである。

また、県と応援協定を締結している市町、民間事業者団体等と訓練を実施し、災害廃棄物処理に対する対応力の強化を継続的に図っていくことにも取り組んでいる。

### 3.2 災害廃棄物処理体制の構築

災害廃棄物処理計画の更新については、県地域防災計画の見直しや国指針の改定、市町一般廃棄物処理計画の見直しなどに基づき実施することになる。一方で、「災害廃棄物処理に関する連絡会」における検討内容や各種訓練の中で、処理を担う各主体の役割と機能を定期的に点検・評価を行い、必要に応じ計画を更新していくようなマネジメントシステムの構築も必要となっていく。このように、県計画では、図 8 に示す PDCA サイクルを今後も継続的に推進していくこととしている。

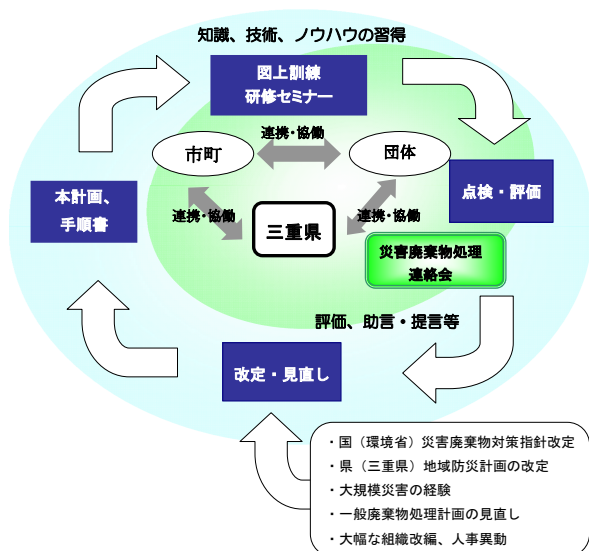


図 8 災害廃棄物処理計画に関するPDCAサイクルのイメージ<sup>17)</sup>

#### 4. 三重県における今後の取組

三重県では、2015年3月に策定した県計画の実効性を高めるために、今後、以下の取り組みを進めることとしている。

##### 4.1 各種マニュアル等の作成

県計画の実効性を高めるために、発生時に想定される多くの事象に適切に対応し、迅速に災害廃棄物処理を進めていく必要がある。そのため、以下に示すマニュアル等の作成を行う予定としている。

- ①処理困難廃棄物対応マニュアル
- ②業務手順書（改定版）
- ③BCP 指針

##### 4.2 連絡会の開催

膨大な災害廃棄物が発生した場合、県・市町・関係団体等が適正かつ円滑に災害廃棄物等の処理を進める必要がある。そのため、各関係機関が担う役割や情報共有を通して、連携を深めて処理体制の構築強化を図る。

##### 4.3 セミナーの開催

県及び市町の災害廃棄物処理計画の実効性のあるものとするために、処理を担う職員の災害時マネジメント能力の向上を図る。

##### 4.4 研修会の開催

災害廃棄物処理にあたっては、県計画と各市町が策定を進めている各市町災害廃棄物処理計画について、相互に整合と連携が図られている必要があることから、研修会を開催して情報共有を行うとともに、市町計画策定に係る技術

的助言等を行う。

#### 4.5 教育訓練の開催

県計画が適切に運用されるよう、発災後3日程度を経過したと想定した訓練を行うとともに、抽出された課題について改善を図り、発災時に備えた実行力の向上を図る。

#### 5. あとがき

今後、発生が予想される南海トラフ地震をはじめとする巨大地震などに備え、県計画を策定したところである。

県計画では、行政機能が低下するなど甚大な被害が発生した市町を県が支援するために必要な事項を取りまとめているが、この計画の実効性を高めるために、三重県では今後さまざまな取組を進めていく。

これらの災害廃棄物処理に対する取組が、今後、災害廃棄物処理計画の策定等に取り組む全国の自治体の参考になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 災害廃棄物対策指針，環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部，2014，86pp.
- 2) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，247pp.
- 3) 巨大災害発生時における災害廃棄物対策のランドデザインについて，環境省巨大地震発生時における災害廃棄物対策検討委員会，2014，74pp.
- 4) 三重県地域防災計画―地震・津波対策編一，三重県防災会議，2014，421pp.
- 5) 三重県災害廃棄物処理計画 概要版，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p3
- 6) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.33
- 7) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.31
- 8) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.32
- 9) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.40
- 10) 三重県災害廃棄物処理計画 概要版，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p3
- 11) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.47
- 12) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.42
- 13) 三重県災害廃棄物処理計画 概要版，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p8
- 14) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.92
- 15) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.103
- 16) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.128
- 17) 三重県災害廃棄物処理計画，三重県環境生活部廃棄物対策局廃棄物・リサイクル課，2015，p.30

# 地震災害時の地下水利用を想定した濃尾平野における地下水管理 Management of groundwater in the Nobi Plain that assumes groundwater use at earthquake

大東憲二<sup>1</sup>

1 大同大学・情報学部・総合情報学科・daito@daido-it.ac.jp

## 概 要

1960年代前半からの高度経済成長に伴い、鉄鋼産業等を中心に地下水の揚水量が急激に増加した。その結果、濃尾平野のほぼ全域に亘って地盤沈下が観測された。近年では、法律や条例での地下水採取規制等により、揚水量は徐々に削減され、低下していた地下水位は上昇してきており、それに伴い地盤沈下も沈静化している。しかし、地下水位が上昇することで、液状化の危険性など新たな問題の発生が懸念されている。本研究では、地下水位の過度の上昇を防ぐために、地下水の有効な利用方法を考え、三次元地下水流動解析と鉛直一次元圧密沈下解析を用いて将来の地下水利用シナリオに基づいた地下水状態変化及び地盤変動の予測を行った。その結果、濃尾平野に設けられている災害時の避難所に井戸を設置することで、著しい地盤沈下を生じさせないようにしながら、常時の環境用水や災害時の水源として地下水を活用する広域地下水管理の在り方を提言した。

キーワード：地盤沈下、地下水管理、環境用水、地震災害、地下水流動解析

## 1. はじめに

地下水は、日本では古くから貴重な水資源として様々な用途に利用されてきた。豊富な地下水に恵まれていた濃尾平野でも、昔から多くの人々によって地下水が利用されてきたが、1960年代前半からの高度経済成長に伴い、鉄鋼産業等を中心に地下水の揚水量が急激に増加した。その結果、平野のほぼ全域に亘って地盤沈下が観測された。近年では、法律や条例での地下水採取規制等により、揚水量は徐々に削減され、低下していた地下水位は上昇してきており、それに伴い地盤沈下も沈静化している。しかし、地下水位が上昇することで、液状化の危険性など新たな問題の発生が懸念されている。本研究では、地下水位の過度の上昇を防ぐために、地下水の有効な利用方法を考え、三次元地下水流動解析と鉛直一次元圧密沈下解析を用いて将来の地下水利用シナリオに基づいた地下水状態変化及び地盤変動の予測を行うことで、広域地下水管理の在り方を提言することを目的としている。

## 2. 地下水の有効利用

地下水は、水温の変化が少なく、井戸の掘削によって容易に利用できるなど様々な利点がある。また、近年では、

地下水揚水技術や膜ろ過技術の発達に伴い、安全でおいしい水が簡易に利用できるようになってきている。

地下水の有効利用としては、上水道としての利用の他、湧水公園など親水用水としての利用・ヒートアイランド対策・河川や池への放流による水質浄化などの環境用水としての利用等がある。また、災害時の給水水源としても利用価値が高い。阪神・淡路大震災の時には、断水した上下水道に代わって、地震被害の小さかった学校や公園の井戸が、避難所の飲料水や生活用水として利用され、井戸が地震に強いということが認識された。東海地方では、近い将来、大規模な地震が発生することが懸念されており、このような地震発生時には、上下水道の断水による生活用水の不足が予想される。そこで、本研究では、東海地震などの災害を考慮した上で、各自治体の避難所に井戸を設置し、汲み上げた地下水を通常時は上水道や環境用水として利用し、災害時には飲料水や生活用水として利用することを想定し解析を行った。

## 3. 地下水流動解析と圧密沈下解析

避難所に新たな井戸を設置する場合における地下水状態変化は、松田・大東ら<sup>1)</sup>の濃尾平野の三次元地下水流動解析を基にして予測した。解析範囲は、図1に示すよう

に、濃尾平野のほぼ全体を含んでいる 1164km<sup>2</sup> である。解析条件は、解析範囲内の避難所に新たな井戸を設置すると想定した。解析領域内の避難所の分布を図2に示す。設置する井戸は、通常は環境用水として利用し、災害時は生活用水として利用すると考え、常に稼動していると仮定する。この井戸を平成20年から稼動を開始すると仮定した。解析範囲内には、災害時の各自治体の避難所が合計1663箇所あり、各井戸での揚水量は、名古屋市での災害時の応急給水の目標水量（一人あたりの給水量 3L/日・20L/日・

100L/日・250L/日（Case1～Case4）を基準とした。各避難所に対する避難者数（各自治体の人口を避難所数で割った数）を表1に示す。また、各避難所の避難者数に、各Caseにおける揚水量を掛けかけた量を前年度の揚水量に加えた量として表2に示した。また、大東・天谷・向出ら<sup>2)</sup>の濃尾平野の鉛直一次元圧密沈下解析を基に、図1に示す過去に大きな地盤沈下が観測された十四山観測井付近での各Caseにおける将来の地盤変動の予測を行った。



図1 解析範囲

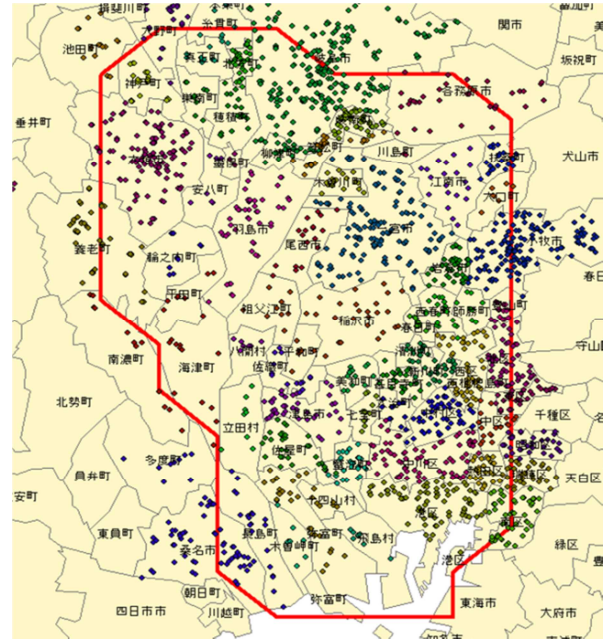


図2 解析範囲と避難所分布

表1 各自治体の避難所数と一箇所あたりの避難者

市町村名	避難所数	一箇所あたりの避難者数	市町村名	避難所数	一箇所あたりの避難者数
熱田区	27	2370	飛島村	8	559
北区	31	3324	豊山町	13	1002
昭和区	6	3285	春日町	10	776
中川区	71	3076	扶桑町	18	1446
中区	19	3804	美和町	14	1744
中村区	48	2812	弥富市	34	1339
西区	50	2872	安八町	7	2197
東区	8	2601	池田町	2	1643
瑞穂区	5	3642	大垣市	106	1357
港区	74	2026	大野町	4	940
南区	19	2854	海津市	19	1255
愛西市	65	1032	各務原市	23	4372
一宮市	173	2209	笠松町	28	841
稲沢市	41	3379	北方町	30	600
岩倉市	40	1188	岐南町	44	518
大口町	6	3097	岐阜市	175	1406
大治町	13	2270	神戸町	20	1019
蟹江町	28	1263	羽島市	50	1379
木曾岬町	7	848	瑞穂市	26	1859
北名古屋市	29	2872	本巣市	13	1218
清須市	37	1534	養老町	18	726
江南市	20	5081	輪之内町	9	1075
小牧市	55	1126	桑名市	46	1609
七宝町	12	1935	合計	1663	
甚目寺町	23	1744			
津島市	39	1711			

表2 各自治体における避難所一箇所あたりの地下水揚水量

名称	一箇所あたりの揚水量(m <sup>3</sup> /年)				名称	一箇所あたりの揚水量(m <sup>3</sup> /年)			
	Case1	Case2	Case3	Case4		Case1	Case2	Case3	Case4
西区	3145	20969	104846	262114	美和町	1909	12730	63648	159120
港区	2218	14788	73941	184853	甚目寺町	1910	12733	63666	159164
昭和区	3597	23978	119891	299728	豊山町	1098	7317	36584	91461
南区	3125	20836	104181	260453	稲沢市	3700	24669	123345	308363
北区	3640	24266	121330	303326	春日町	849	5663	28313	70783
中区	4166	27770	138852	347129	飛島村	612	4083	20413	51032
中川区	3369	22458	112289	280724	岐阜市	1539	10260	51302	128254
東区	2848	18984	94922	237304	大垣市	1486	9908	49542	123856
熱田区	2595	17299	86497	216242	各務原市	4788	31918	159589	398972
中村区	3079	20529	102646	256616	桑名市	1761	11742	58710	146776
瑞穂区	3988	26590	132949	332373	羽島市	1509	10063	50315	125788
小牧市	1233	8217	41085	102711	瑞穂市	2036	13572	67859	169648
一宮市	2419	16124	80622	201555	海津市	1375	9164	45818	114544
北名古屋市	3145	20965	104827	262067	本巣市	1334	8894	44470	111174
愛西市	1130	7533	37664	94159	養老町	795	5302	26509	66273
清須市	1679	11196	55980	139950	池田町	1799	11996	59982	149954
津島市	1873	12487	62435	156087	大野町	1030	6864	34320	85800
江南市	5563	37089	185444	463609	岐南町	567	3782	18912	47280
弥富市	1466	9772	48860	122151	笠松町	920	6136	30682	76704
扶桑町	1583	10553	52766	131916	神戸町	1116	7439	37194	92984
岩倉市	1301	8673	43366	108414	北方町	656	4377	21883	54707
大治町	2486	16573	82863	207159	木曾岬町	929	6193	30966	77414
大口町	3391	22606	113030	282575	輪之内町	1177	7844	39221	98053
七宝町	2119	14125	70624	176561	安八町	2406	16040	80201	200502
蟹江町	1383	9220	46101	115252					

#### 4. 解析結果と考察

井戸稼働有無での地下水位を比較すると、図3に示すようにG1層、G2層、G3層に共通して名古屋市付近を中心に放射状に地下水位の低下がみられる。

次に、十四山観測井付近における地下水位と累積沈下量

の経年変化を図4と図5に示す。Case1とCase2では、地下水位・累積沈下量ともに、井戸稼働後30年経過しても横這いの状態を保っており地盤沈下の可能性はないと考えられ、問題なく揚水することが可能である。Case3では、井戸稼働後、地下水位が愛知県で定められた管理目標安全地下水位を下回り、30年間で約6.8cmの沈下が見られた。

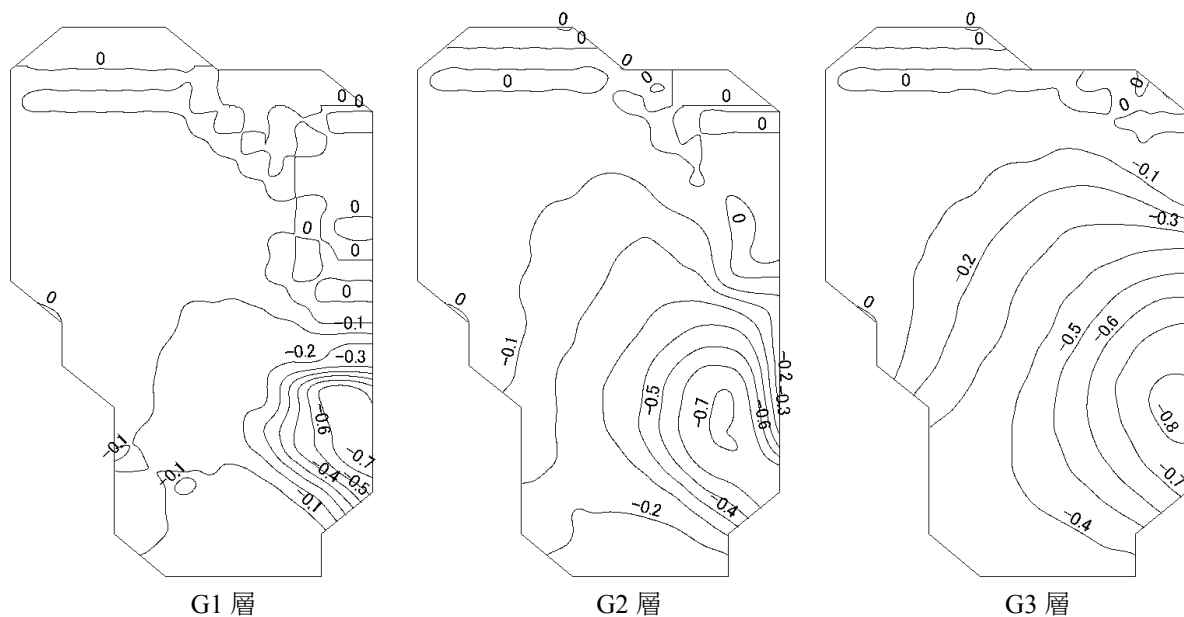


図3 井戸稼働有無における地下水位差 (Case2) (m)

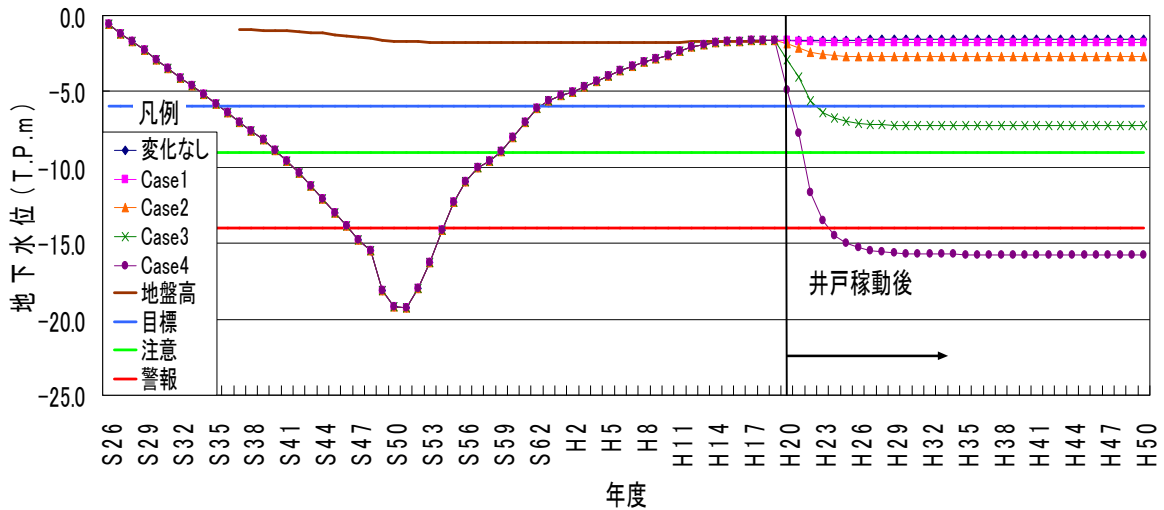


図4 十四山観測井における地下水位の経年変化 (G2層)

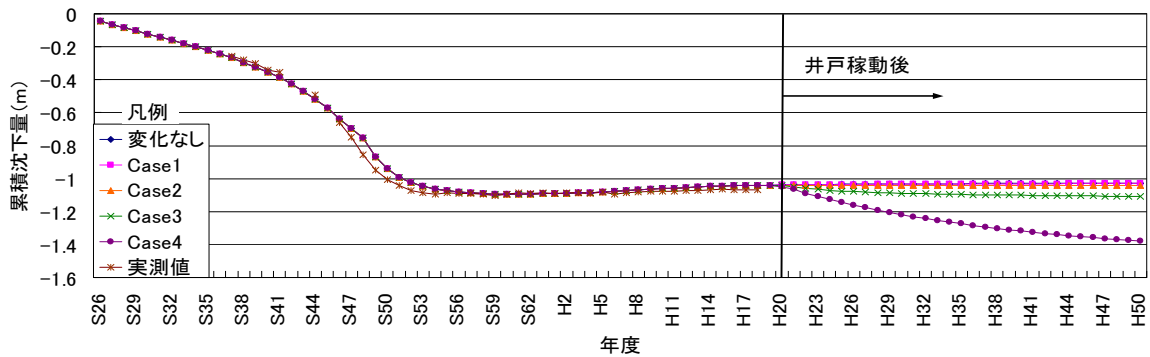


図5 十四山観測井付近における累積沈下量の経年変化

しかし、年間の沈下量は 1cm 未満であり、年月が経過するにつれて徐々に沈静化の傾向にあるため、地盤沈下に対する懸念は若干あるが揚水することは可能であると考ええる。Case4では、井戸稼動後の地下水位の低下が著しく、注意報地下水位及び警報地下水位下回り、30年間で約 33.8cm の大きな地盤沈下が発生してしまうため、このような揚水はできない。

## 5. まとめ

今回、三次元地下水流動解析と鉛直一次元圧密沈下解析を用いて将来の地下水状態及び地盤変動を予測し広域地下水管理の在り方について検討を行った。その結果、Case1 や Case2 程度の地下水であれば問題なく揚水できるが、Case3 を超える地下水を揚水し続けると地盤沈下の可能性が高いことがわかった。したがって、Case3 の一人あたり 100L/日を揚水できる限界の水量として、この揚水量以下の水量であれば揚水することが可能であると判断した。

また、濃尾平野では、過去に一度大きな地盤沈下が発生しているため、地盤が過圧密状態となっている。したがって、現在では、ある程度地下水を汲み上げたとしても、それほど大きな地盤沈下は発生しないと考えられる。また、

G2層の Case1 と Case2 では、管理目標安全地下水位までまだ余裕があるため、G1層・G3層の揚水量を減らし、G2層からの揚水量を増やすことで、より安定した揚水ができるのではないかと考えられる。

しかし、避難所数や人口に比例して揚水量が増加するため、避難所数や人口が多い名古屋市付近では、地下水位の低下が比較的大きい。この対策として、名古屋市付近での揚水量を減らし、地下水位の低下がほとんどない大垣市付近での揚水量を増やし、災害時には、不足分を名古屋市付近に運搬することで、地盤沈下の可能性はより低くなり、安定した広域地下水管理ができると考えられる。また、一人あたり 100L/日の地下水の揚水が可能であれば、環境用水や災害時の水源として十分に実用が可能であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 松田康弘・大東憲二・佐伯茂雄：地下水の適正利用を目指した総合的な地下水管理，土木学会，第12回地球環境シンポジウム講演論文集，pp.95-100，2005.
- 2) 大東憲二・天谷重治・向出剛一：臨界沖積平野の地盤環境保全のための地下水管理に関する考察，地下水学会誌，第34巻，第4号，pp.263-282，1992.

# 開水路流れに起因する地盤内過剰間隙水圧の発生機構に関する一考察

## A consideration on the developmental mechanism of excess pore water pressure in the seabed due to open channel flow

松田達也<sup>1</sup>, 前田健一<sup>2</sup>, 泉典洋<sup>3</sup>, 伊藤嘉<sup>4</sup>, 山口敦志<sup>5</sup>  
三宅達夫, 宮本順司<sup>6</sup>, 角田紘子<sup>6</sup>, 鶴ヶ崎和博<sup>6</sup>

1 豊橋技術科学大学・建築・都市システム学系・t.matsuda@ace.tut.ac.jp

2 名古屋工業大学・都市社会工学科

3 北海道大学・公共政策学連携研究部

4 国土交通省中部地方整備局・木曾川河川上流事務所

5 名古屋工業大学・大学院工学研究科博士前期課程

6 東洋建設株式会社・鳴尾研究所

### 概 要

開水路流れに伴う洗掘現象では、地盤表層に作用する掃流力に加えて地盤内に過剰間隙水圧が発生し、洗掘を助長する可能性が指摘されている。本研究では、開水路流れに起因する過剰間隙水圧の発生機構について、移動床水路実験により地盤内の間隙水圧変動を詳細に観測するとともに、移動床の透水性を考慮した流速分布から算出した理論解を求め、両者を比較することによりその要因を分析した。移動床水路実験において、地盤の相対密度を変化させた砂質土地盤を用いた場合、特に緩く堆積した地盤において、地盤内部に過剰間隙水圧  $u_e$  が発生し、地盤表層では液状化に似た応力状態となることがわかった。過剰間隙水圧の発生について開水路流れによって誘発される移動床内部の浸透流の鉛直流速分布を求め、流速分布から速度差に起因して発生する過剰間隙水圧を算出したところ、地盤表層では過剰間隙水圧が発生することを明らかとした。

キーワード：開水路流れ、洗掘、過剰間隙水圧

### 1. はじめに

津波や洪水などの水流により、海底床や河床が洗掘され、大規模な地形変化をもたらす。また、構造物周りにおいては非常に複雑な流れとなり、局所的に洗掘が発生することで支持力を失い、崩壊する事例が多々ある。このような自由表面流れによる地盤の洗掘現象は、これまでに精力的に研究され（例えば、芦田、道上<sup>1)</sup>）、水流により地盤表層を通過する流体力に伴い生じるせん断力、つまり掃流力による洗掘現象に焦点があてられてきた。一方で、近年の著者らの研究<sup>2)</sup>では、移動床上の水流による流体力は、移動床が多孔質材料であることから地盤表層にのみ影響を与えるだけでなく、地盤内部の応力も変化させ、洗掘を助長させる可能性を指摘した。

そこで、本研究では、開水路流れに起因する過剰間隙水圧の発生機構について、移動床水路実験によりさらに地盤洗掘・浸食速度および地盤内の間隙水圧変動の詳細な計測を踏まえ、洗掘現象について考察した。さらには、開水路流れに伴って誘発される移動床内の浸透流の流速分布を理論的に求め、その流速分布の勾配から土粒子に作用する

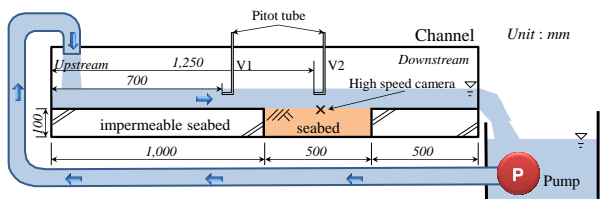
揚圧力となる過剰間隙水圧を算出し、実験結果との比較を行い、過剰間隙水圧の発生について検討した。

### 2. 移動床水路を用いた開水路流れによる洗掘実験

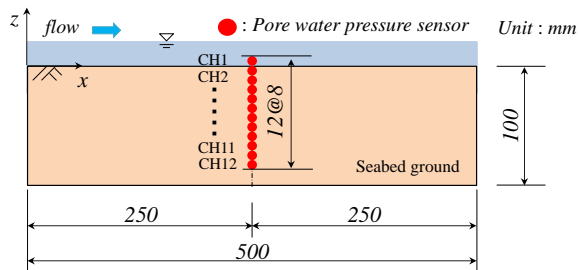
#### 2.1 実験概要

本研究で用いた実験装置は長さ 2.0m×幅 0.3m×高さ 0.3m のアクリル製移動床水路である（図 1(a)）。水路内には流入境界となる上流から 1.0m を起点とし、長さ 0.5m×幅 0.3m×高さ 0.1m の移動床区間を設置した。移動床区間においては、実験対象となる地盤材料を各種諸条件に合うように堆積させて地盤を作製した。移動床以外は不透水性の海底床としたが、海底床の表面は摩擦を考慮して、平均粒径  $D_{50}=0.17\text{mm}$  の豊浦砂を付着させている。

開水路流れは、装置下流側に設けた貯水タンクから水中ポンプを用いて水をくみ上げて装置上流に排出させることで循環流を発生させた。実験には、 $0.12\text{m}^3/\text{min}$  の規格を有する水中ポンプを使用した。水中ポンプの脈動による水面振動を取り除くため、上流側の排水付近に水面振動防止



(a)



(b)

図1 移動床実験装置の概略図：(a)，装置の概略；(b)，間隙水圧計の設置位置

表1 実験ケース

実験ケース	地盤材料	飽和度 $S_r$ (%)	相対密度 $D_r$ (%)
Case1-1	豊浦砂	100	40
Case1-2			40
Case2-1			70
Case2-2			70

装置を設置した。

実験時は、ピトー管計測および画像解析により開水路流れの断面流速分布を計測した。また、地盤内の間隙水圧を計測するため、小型間隙水圧計 (SSK 製) を用いた。現象を視覚的に考察するため、高速度カメラ (200~400fps) とビデオカメラ (29.97fps) を用いて現象の撮影を行った。

## 2.2 実験条件

実験ケースを表1に示す。本実験では、材料をいくつか用いて実験を実施したが、特に、本稿では豊浦砂を飽和状態に管理した移動床の実験ケースについて洗掘現象を詳細に分析したので、その結果について述べる。

図1(b)に移動床内の間隙水圧計の設置位置を示す。間隙水圧計は、境界の影響が少ないと考えられる断面中央に等間隔に設置した。

## 2.3 実験結果と考察

### (1) 開水路流れの流速分布と掃流力

開水路流れによって作用する移動床表面のせん断応力に関して、無次元掃流力  $\tau^*$  を求め、岩垣の式<sup>3)</sup>から算出される無次元限界掃流力  $\tau_c^*$  と比較し、本実験条件について確認した。

まず、ピトー管による計測結果および撮影画像を用いた PTV 解析結果を合わせた速度分布を図2に示す。ピトー管

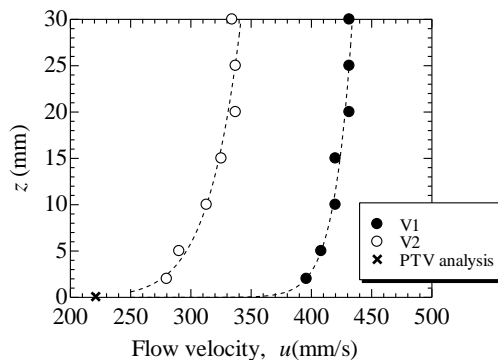


図2 図1(a)に示すV1 (不透水床) およびV2 (透水床) での流速分布およびPTV解析による流速

での計測は、模型水路の固定床上と移動床中央で行い、水路底面から 5mm 間隔で水面まで計測した。画像解析による結果は地盤表層近傍のトレーサに移動速度を計測した。また、測定された流速分布をもとに、Prandtl-Karman の対数分布則を用いて、摩擦速度  $u^*$  を求めた。

$$\frac{u}{u^*} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k} \quad (1)$$

ここで、 $\kappa$ : Karman 定数 ( $\kappa=0.4$ ),  $k$ : 相当粗度 ( $k=0.2$ ),  $A_r$ : 実験定数 ( $A_r=8.5$ ),  $z$ : 底面からの高さである。

画像解析による流速値が比較的正しい値と考えると、各計測により統合的に求めた流速分布は比較的正確に計測できているものとする。そこで、次に、摩擦速度  $u^*$  を用いて、次式により無次元掃流力  $\tau^*$  を算出した。

$$\tau^* = \frac{u^*{}^2}{sgd} \quad (2)$$

ここで、 $s$ : 砂の水中比重 ( $s=1.65$ ),  $g$ : 重力加速度,  $d$ : 砂の粒径であり、砂の平均粒径 ( $D_{50}=0.173$  mm) を用いることとした。

土粒子が移動し始める無次元限界掃流力を砂の粒径から算出し、本実験条件で得られる無次元掃流力と比較した。その結果、豊浦砂では  $\tau^*=0.129$ : 移動床上  $> \tau_c^*=0.075$  となり、無次元掃流力が無次元限界掃流力を上回ることから、洗掘が発生する条件であることを確認した。

### (2) 洗掘進行と表層に形成されるデューンの変化

実験時の洗掘の様子を図3に示す。地盤表層では、洗掘が発生し、土粒子が移動と堆積を繰り返すことで、デューンと呼ばれる河床波が形成された。この流下速度に着目し、地盤の相対密度の違いによるデューンの流下速度の比較を行ったところ (図4), 相対密度  $D_r=40$  %の方が早くデューンが形成され、さらに、移動速度も速いことがわかった。

### (3) 洗掘・浸食速度

次に洗掘・浸食速度について議論する。本研究で対象とする砂質土については、これまでに実験により洗掘・浸食速度が求められ、いくつかの算定式が提案されている。例えば、Wang and Bowles<sup>4)</sup>は堤体侵食について次の推定式を用いた検討を行っている。



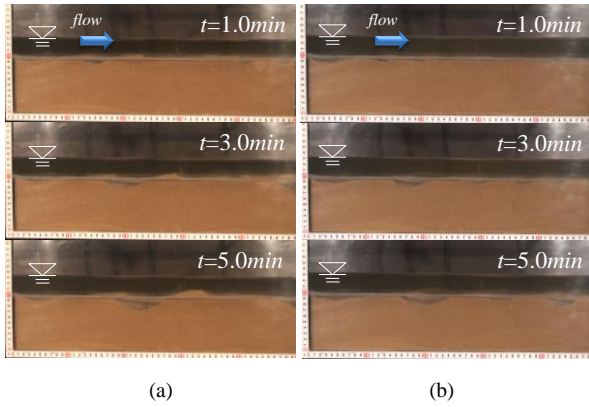


図 3 洗掘形状の変化 : (a), Case1-1( $D_r=40\%$ ) ; (b), Case2-1( $D_r=70\%$ )

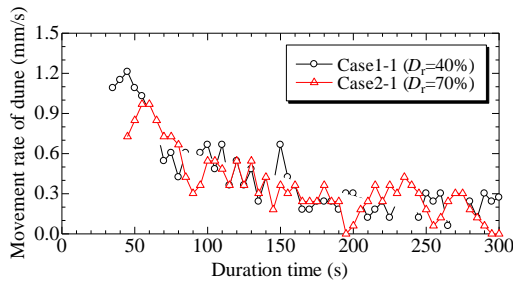


図 4 水流により生成されたデューンの流下速度の経時変化

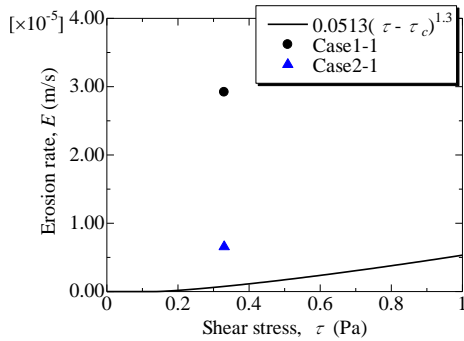


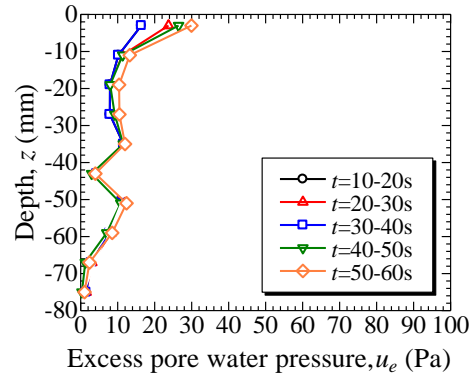
図 5 断面平均による洗掘・浸食速度

$$E = 0.0513(\tau - \tau_c)^{1.3} \quad (3)$$

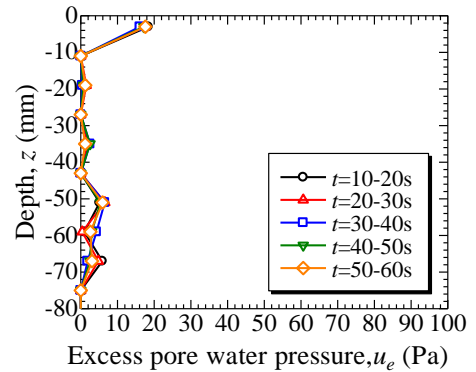
ここで、 $\tau$ 、 $\tau_c$ は掃流力および限界掃流力である。

上式を用いて洗掘・浸食速度を推定した。その結果と本実験において観察した洗掘速度を比較した(図 3)。実験値においては、実験開始 60 秒後の移動床において、 $x=0$  から  $\Delta x=5\text{ mm}$  間隔で初期地盤面  $z=0$  からの変動分  $\Delta z$  を計測して洗掘面積を求め、その値を移動床幅 500 mm に経過時間 60 秒を掛けた値で除して求めた。

相対密度  $D_r=70\%$  の洗掘・浸食速度が推定式と比較的近い値を示していることがわかる。一方で、相対密度  $D_r=40\%$  の地盤では、推定式に比べて洗掘・浸食速度が大きいことがわかった。前項で、デューンの流下速度にも相



(a)



(b)

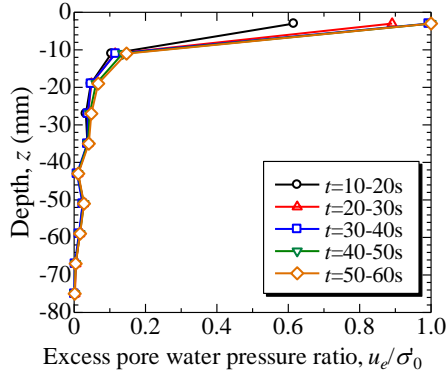
図 6 地盤内部の過剰間隙水圧分布 : (a), Case1-2 ( $D_r=40\%$ ) ; (b), Case2-2 ( $D_r=70\%$ )

対密度による違いが見られたが、洗掘・浸食速度においても、地盤の密度状態が起因してくることが明らかとなった。

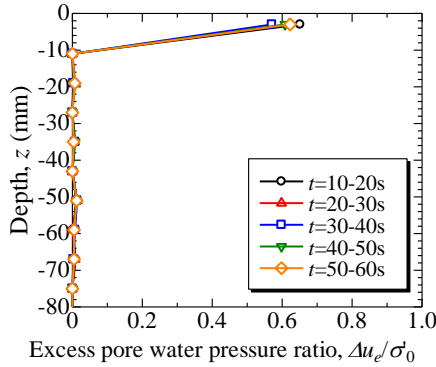
#### (4) 地盤内の間隙水圧変化

地盤の相対密度により、洗掘現象に違いが生じることが明らかとなったことから、その要因について分析するため、開水路流れが作用している際の地盤内部の間隙水圧の変化に焦点をあてて考察することにした。

図 6 に計測した間隙水圧から静水圧を差し引いた変動過剰間隙水圧  $u_e$  の深度方向分布を示す。地盤表層( $G.L.-3\text{ mm}$ )のみに過剰間隙水圧が発生する  $D_r=70\%$  に比べ、 $D_r=40\%$  では土槽中央付近( $G.L.-60\text{ mm}$ )まで変動過剰間隙水圧の発生が見られる。地盤内に変動過剰間隙水圧の発生することで、土粒子の有効重量が減少し、洗掘を助長すると考えられる。このことから、次に、変動過剰間隙水圧が地盤不安定化に与える影響を定量的に考察するため、過剰間隙水圧比を算出した(図 7)。過剰間隙水圧比は、各間隙水圧計から得られた変動過剰間隙水圧を、設置位置における土骨格の初期有効土被り圧( $\sigma_0'$ )で除して求めた( $=u_e/\sigma_0'$ )。  $D_r=40\%$  では、地盤表層( $G.L.-3\text{ mm}$ )において  $u_e/\sigma_0'=1.0$  に達しており、液状化に似た状態(流動化)となっていることがわかる。一方で、 $D_r=70\%$  においても地盤表層( $G.L.-3\text{ mm}$ )で  $u_e/\sigma_0'=0.6$  程度となっている。  $D_r=40\%$  では地盤表層が  $u_e/\sigma_0'=1.0$  となる液状化層厚が土粒子約 18 個分発生することがわかった。



(a)



(b)

図 7 計測された過剰間隙水圧により算出した過剰間隙水圧比の分布 : (a), Case1-2 ( $D_r=40\%$ ); (b), Case2-2 ( $D_r=70\%$ )

### 3. 移動床内の浸透流分布に基づく間隙水圧の上昇

本章では、地盤内に発生する過剰間隙水圧の発生要因を検討するため、移動床内に開水路流れに伴い浸透流が発生するものと考え（図 8）、その流速分布から速度勾配に起因して発生する過剰間隙水圧について考察する。

#### 3.1 開水路流れの流速分布

2次元の乱流場における開水路流れは、Reynolds 平均をとった 2次元 Navier-Stokes 方程式で表すことができる。座標軸は実験と同様に  $x$  座標および  $z$  座標をとり、 $z$  座標の原点を水路底面の透水層上としている。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

ここで、 $U_i$ は流速ベクトル、 $T_{ij}$ は応力テンソル、 $F_i$ は体積力、 $\rho$ は水の密度である。また、下付き  $i$  および  $j$  はそれぞれ  $x$  成分、 $z$  成分を示す。流れが乱流であり、レイノルズ応力が分子粘性応力に卓越している場合は、応力テンソルは次式で表すことができる。

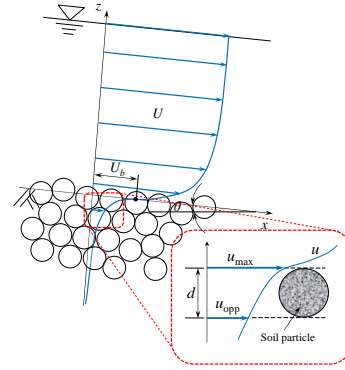


図 8 開水路流れによる透水性を有する移動床場の流速分布の模式図

$$T_{ij} = -P\delta_{ij} + \rho\nu_T \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

ここで、 $P$ は圧力、 $\nu_T$ は渦動粘性係数である。渦動粘性係数は混合距離モデルを用いて表されるが、開水路流れにおける自由表面の影響を考慮し、また、浸透層上の混合距離明確でない<sup>5), 6), 7)</sup>ことから、底面位置の補正量  $z_0$ を考慮した混合距離を用いて次式のように定義する。

$$\nu_T = l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| = \left[ \kappa(z+z_0) \left( 1 - \frac{z}{H} \right)^2 \right] \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \quad (7)$$

ここで、 $l$ は混合距離、 $H$ は水深を示す。

次に、開水路流れを流下方向に等流状態と仮定すると

$$\frac{U}{U_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z+z_0}{z_0} + \frac{U_b}{U_f} \quad (8)$$

を得ることができる。ここで、 $U_f$ および  $U_b$ はそれぞれ摩擦速度および  $z=0$ でのスリップ流速である。

#### 3.2 浸透流の流速分布

浸透流の2次元流れは、2次元 Navier-Stokes 方程式の体積平均および Reynolds 平均をとった次式で表される<sup>8), 9)</sup>。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) - \frac{nv}{K} u_i - \frac{nvF}{K} |u_i| u_i + F_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (10)$$

ここで、 $u_i$ は浸透層内において体積平均をとった実質流速ベクトル、 $p$ は間隙水圧、 $n$ は間隙率、 $\nu$ は水の動粘性係数、 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ は Reynolds 応力テンソルである。また、下付き  $i$  および  $j$  はそれぞれ  $x$  成分、 $z$  成分を示し、 $u_x=u$ 、 $u_z=w$ とする。

式(9)の第6項の流速に比例する項は Darcy の抗力を表し、第7項の流速の二乗に比例する項は Forchheimer の抗力項を示している。Reynolds 数が小さい浸透流では Darcy の抗力が支配的となり、Reynolds 数が大きくなるに従い Forchheimer の抗力が支配的となる。二つの抗力項に表れる  $K$  は長さの二乗の次元をもった透水性を表す係数であ

り、次式で表されることがわかっている<sup>10)</sup>。

$$K = \frac{d_s^2 n^3}{180(1-n)^2} \quad (11)$$

$$F = \frac{n}{100(1-n)} \frac{d_s}{\nu} \quad (12)$$

浸透流の特性を決める長さスケールは三つ存在するが、粒子径  $d_s$  および透水性を表す長さスケール  $\sqrt{K}$  と浸透層上面における摩擦速度を用いて、二つの Reynolds 数が定義できる<sup>6)</sup>。

$$\text{Re}_d = \frac{d_s U_f}{\nu} \quad (13)$$

$$\text{Re}_K = \frac{\sqrt{K} U_f}{\nu} \quad (14)$$

ここで、 $\text{Re}_d$  は粗度高さと粘性底層厚さの比を表す Reynolds 数であり、底面の粗滑を決定する無次元量である。一方で、 $\text{Re}_K$  は平均的な空隙の長さスケールと粘性底層厚さの比を表す Reynolds 数である。

浸透流も開水路流れと同様に等流状態を仮定する。

$\text{Re}_K$  が小さい場合、開水路流れと浸透流の間の交換が制御されるため、浸透流は開水路流れの乱流の影響をほとんど受けない。そのため、比較的粒径の小さい砂で構成された移動床が該当する。このとき、乱流に起因する項は無視でき、Brinkman 方程式<sup>11)</sup>が得られる。この微分方程式を解くと浸透流の流速が次式で求めることができる。

$$u = \left( \frac{U_b}{n} - \frac{Kg \sin \theta}{nv} \right) \exp \left[ z \sqrt{\frac{n}{K}} \right] + \frac{Kg \sin \theta}{nv} \quad (15)$$

ここで、 $\theta$  は移動床の傾きを表す。

$\text{Re}_K$  が大きい場合、境界面付近の浸透流も開水路流れの影響を大きく受け、乱流に起因するレイノルズ応力や Forchheimer の抗力項が支配的となる。たとえば、比較的透水性を有する砂礫で構成されており、土砂が流れにより輸送される場合はこれに該当する。この場合の浸透流の流速は、混合距離理論を用いて次式で表される。

$$u = \left[ \frac{U_b}{n} - \left( \frac{Kg \sin \theta}{nvF} \right)^{1/2} \right] \exp \left[ \left( \frac{nvF}{2l^2 K} \right)^{1/3} z \right] + \left( \frac{Kg \sin \theta}{nvF} \right)^{1/2} \quad (16)$$

ここで、 $l$  は混合距離であり、浸透流の現象について、混合距離  $l$  は浸透層内の空隙スケール  $B$  により規定されるといふ考えに則して決定した<sup>5), 12)</sup>。

### 3.3 開水路流れと浸透流の接続

境界面においては、せん断力が連続になることが推定される。ここでは、開水路流れと浸透流をその境界面において接続することを考える。

$\text{Re}_K$  が小さい場合、開水路流れが境界に及ぼすせん断力は開水路内の流れに働く重力成分であり、また、境界面浸透層のせん断応力は主に分子粘性によって担われ、 $z=0$  において次式が成立する。

$$n\rho\nu \frac{du}{dz} = \rho g H \sin \theta = \rho U_f^2 \quad (17)$$

上式の関係を用いると、式(15)より

$$U_b = \left( \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{K}{n}} + \frac{K}{\nu H} \right) U_f^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{n}} + \frac{\sqrt{K}}{H} \right) \text{Re}_K U_f \quad (18)$$

となり、式(18)において、 $\sqrt{K}/H$  は  $1/\sqrt{\varepsilon}$  と比較すると十分小さいことから、以下のように近似することができる。

$$\frac{U_b}{U_f} = \frac{1}{\sqrt{n}} \text{Re}_K \quad (19)$$

$\text{Re}_K$  が大きい場合、乱流による Reynolds 応力がせん断力を担うため、 $z=0$  において

$$n\rho l^2 \left( \frac{du}{dz} \right)^2 = \rho g H \sin \theta = \rho U_f^2 \quad (20)$$

また、式(16)を用いると

$$\frac{U_b}{U_f} = \left( \frac{2n^{1/2} K}{\nu Fl} \right)^{1/3} + \left( \frac{nK}{\nu FH} \right)^{1/2} \quad (21)$$

を得る。式(21)から  $U_b/U_f$  は  $\text{Re}_K$  に関係なく一定の値を取ることがわかる。右辺第2項は第1項と比較して非常に小さくなり無視できる。式(11)および(12)より式(21)は次式となる。

$$\frac{U_b}{U_f} = \left( \frac{1.1n^{5/2} d_s}{1-n l} \right)^{1/3} \quad (22)$$

式(19)および式(21)について、Suga et al.<sup>13)</sup>によって実験で得られた  $U_b/U_f$  と  $\text{Re}_K$  の関係と整合性を確認している。

### 3.4 理論的に得られた流速分布

図9に、式(16)を用いて得られた浸透流速の理論値を示す。また、計算に用いたパラメータは表2の通りである。 $G.L.$  ( $z=0\text{m}$ )での流速は、スリップ速度  $U_b=221.3 \text{ mm/s}$  となる。相対密度による違いがあまりなく、実験結果と比較すると極めて表層(土粒子約3個分)にのみ浸透流が生じる結果となった。

### 3.5 地盤内の浸透流速から得られた過剰間隙水圧

速度勾配によって表層近傍の土粒子に揚力力が作用すると考えられるため、Bernoulli のエネルギー保存則を用いて、土粒子に作用する過剰間隙水圧  $\Delta u_e$  を次式で求めた。

$$u_e = \rho c_L^* \frac{u_{\max}^2 - u_{\text{opp}}^2}{2} \quad (23)$$

ここで、 $u_{\max}$ : 土粒子上面の流速、 $u_{\text{opp}}$ : 土粒子下面の流速、 $c_L^*$ : 粒子レイノルズ数に基づく揚力係数である(図8)。

図10に過剰間隙水圧の分布の理論値を示す。速度勾配が急となる表層近傍においては過剰間隙水圧  $u_e$  が発生する。実験結果と比較すると、理論値が地盤際表面において最大で約 22 Pa であるのに対し、実験値は約 20~30 Pa となり、比較的よく再現できている。しかしながら、深度分布について着目すると、実験では見られた土槽内部に至る

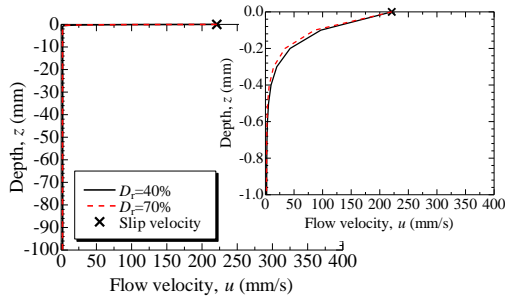


図 9 理論解による地盤内の浸透流速

表 2 理論解の計算に用いた主なパラメータ

$D_r$	40 %	70 %
$z_0$ (mm)	$4.85 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-2}$
$n$	0.451	0.418
$l$ (mm)	$6.35 \times 10^{-2}$	$5.55 \times 10^{-2}$
$K$	$2.27 \times 10^{-11}$	$1.61 \times 10^{-11}$
$F$	0.952	0.832

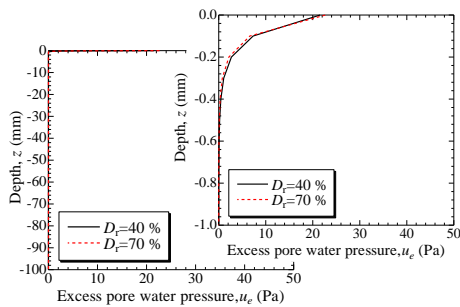


図 10 Bernoulliのエネルギー保存則を仮定した過剰間隙水圧の分布の理論値

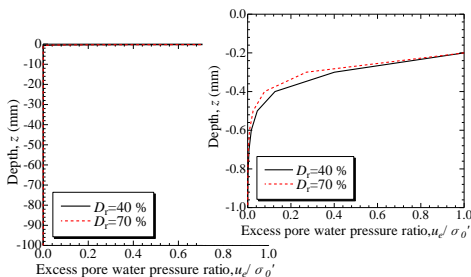


図 11 Bernoulliのエネルギー保存則を仮定した過剰間隙水圧の理論値を用いて算出した過剰間隙水圧比

過剰間隙水圧  $\Delta u_e$  の上昇は得られなかった。図 11 に過剰間隙水圧比の分布を示しているが、地盤表層の土粒子約 2

個分の層で地盤の強度低下が誘発されることがわかった。

#### 4. 結言

移動床実験により開水路流れに起因して地盤内部に過剰間隙水圧が発生することがわかった。特に緩く堆積した地盤では、地盤表層において液状化に似た応力状態となることがわかった。過剰間隙水圧の発生について理論値と実験値を比較したところ、開水路流れに起因して地盤内に浸透流が発生し、その浸透流の流速差に伴い地盤表層では過剰間隙水圧が発生することを明らかとし、理論値は実験値を定量的に評価できていることがわかった。

#### 謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基礎研究(B)23360203 および研究スタート支援 26889035、特別研究員奨励金(24・9200)の助成を受けており、ここに記して深謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第206号, pp. 59-69, 1972.
- 2) 今瀬達也, 前田健一, 伊藤嘉, 三宅達夫, 鶴ヶ崎和博, 澤田豊, 角田紘子: 間隙圧の変化に着目した開水路流れ及び越流による洗掘メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp.I-836-I-840, 2012.
- 3) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究(I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21, 1956.
- 4) Wang, Z. and Bowles, D. S.: Three-dimensional non-cohesive earthen dam breach model. Part 1: Theory and methodology, *Advances in Water Resources*, Vol.29, pp.1528-1545, 2006.
- 5) 山田正, 川端規之: 浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第325号, pp.69-80, 1982.
- 6) Nepf, H. and Ghisalverti, M.: Flow and transport in channels with submerged vegetation, *Acta Geophys*, Vol. 56, pp.753-777, 2008.
- 7) Nikora, V., Koll, K., Mclean, S., Dittrich, A. and Aberle, J.: Zero-plane displacement for rough-bed open-channel flows, In: International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow, 2002, September 4-6 2002, Louvain-la-Neuve, Belgium, pp.83-92, 20-2.
- 8) Whitaker, S.: The Forchheimer equation: a theoretical development, *Transport in Porous Media*, Vol.25, pp.27-61, 1996.
- 9) Breugem, W. P., Boersma, B. J., and Uittenbogaard, R. E., The influence of wall permeability on turbulent channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 562, 35-72, 2006.
- 10) MacDonald, I. F., El-Sayed, M. S., Mow, K. and Dullien, F. A. L., Flow through porous media: the Ergun equation revisited, *Industrial Eng. Chem. Fund.*, 18, 199-208, 1979.
- 11) Brinkman, H. C., A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles, *Appl Sci. Res.*, A1, 27-34, 1947.
- 12) Inoue, E.: On the turbulent structure of air flow within crop canopies, *Journal of Meteorological Society Japan*, Vol.41, No.6, 1963.
- 13) Suga, K., Matsumura, Y., Ashitaka, Y., Tominaga, S., and Kaneda, M.: Effects of wall permeability on turbulence, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.31, pp.947-984, 2010.

## ジェット流によって発生する過剰間隙水圧に及ぼす地盤条件の影響 Influence of soil properties on excess pore water pressure

山口 敦志<sup>1</sup>, 前田 健一<sup>2</sup>, 松田 達也<sup>3</sup>, 齊藤 啓<sup>4</sup>, 李 兆卿<sup>1</sup>

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・社会工学専攻・cko18563@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学・高度防災工学センター・都市社会工学科

3 豊橋技術科学大学・安全安心地域共創リサーチセンター・建築・都市システム学系

4 日本工営株式会社

### 概 要

本研究では津波等によって発生する構造物背後の越流に伴う落下水塊による地盤作用外力に焦点をあて、地盤の洗掘現象について考察した。考察にあたり、越流外力を単純化して模擬したジェット流を地盤に鉛直に作用させた実験を行い、地盤の有無や地盤種類および密度等の条件を変えた際の洗掘現象と間隙水圧の変化について検討した。まず、地盤を堆積させず貯水中にジェット流を作用させた場合、ジェット流直下において水圧の変動はあまり見られないことがわかった。次に、飽和状態で地盤堆積させた場合の間隙水圧挙動を調べたところ、地盤材料や相対密度によっては間隙水圧の変動に違いが生じることがわかった。特に、緩く堆積させた砂質地盤では、過剰間隙水圧の発生により液状化に近い現象が発生し、洗掘を助長していることが明らかとなり、過剰間隙水圧が発生する要因を分析した結果を本稿に示す。

キーワード：越流，洗掘，過剰間隙水圧

### 1. はじめに

津波による洗掘現象は、大規模な地形変化や海岸構造物の支持力低下をもたらす、甚大な被害を発生させることがある。例えば、2011年3月に発生した東日本大震災では、地震による被害に加え、同時に発生した津波による影響によって被害を拡大させた。この災害による各地での防波堤の被害報告から、その被災状況が岸壁等の係留施設や防潮堤の被害規模および背後地域への浸水に大いに影響していることがわかった。そのため、津波の作用による防波堤や防潮堤の破壊メカニズムの解明を早急に考えていく必要がある。

東日本大震災の津波による被害規模について、支持地盤の洗掘に伴う被害が大きく取り上げられている。その中でも、特に新たな課題である越流洗掘型に着目すると、八戸港八太郎防波堤では防波堤を越流した津波に伴い、防波堤背後地盤で洗掘が発生した(図-1)。これにより、被害規模が大きいところで深さ10m程度の洗掘した箇所もみられた<sup>1)</sup>。このような洗掘現象については、地盤表面を移動する流体速度と土粒子の重量、浮力等のつり合いから判定する掃流力による検討が一般的である<sup>2), 3)</sup>。しかし、近年の著者らの研究<sup>4)</sup>によると、地盤表面に流体力が载荷した際、地盤内部に過剰間隙水圧が発生し、地盤表層に液状化(流動化)に似た応力状態となる層が発生することがわかってきている。既往の研究では小型移動床水路に防波堤模

型を設置し、越流した水塊による洗掘現象について検討を行ったが、外力・現象が複雑で実現象に比べ応力レベルが著しく小さい等の問題があった。

そこで本研究では、津波等によって発生する構造物背後の越流に伴う落下水塊による地盤作用外力(以降、ジェット流と称す)に焦点をあて、越流による落下水塊を模擬した新たな実験装置を用いて実験を行った<sup>5)</sup>。この装置により、応力レベルを大きくするとともに、外力条件を単純化し、初期の衝撃的载荷と水塊の継続作用による洗掘現象について、地盤の有無や堆積地盤の種類および密度等の条件を変えた際の洗掘現象と地盤内部の間隙水圧挙動に与える影響に着目して実験を行った。

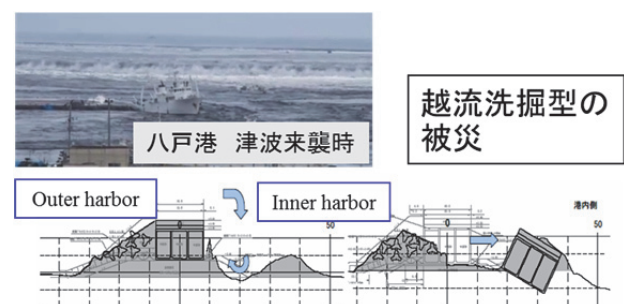


図-1 八戸港の防波堤被害<sup>6)</sup>

## 2. 実験概要

本研究では、図-2 (a)に示すような実験装置を用いた。本装置は、高さ  $H=1,000\text{mm}$ 、半径  $R=400\text{mm}$  の半円筒の実験土槽で、 $h_s=700\text{mm}$  の高さまで水中落下法で地盤を製作し、これを背後地盤として想定した。地盤面とノズル管間は水で満たした。土槽上面に設置した半円筒のノズル管： $\phi=50\text{mm}$ （地盤面とノズル管のクリアランス： $h_w=300\text{mm}$ ）より、津波による防波堤背後地盤の越流を模擬するために毎分  $0.12\text{m}^3$  の水中ポンプを用いて、流入速度  $v=2.06\text{m/s}$  で一定速度としたジェット流を発生させて地盤に約3分間载荷した。堆積地盤内の間隙水圧の変化を計測するために、実験土槽表面の亚克力壁面に小型間隙水圧計(SSK製)を図-2 (b) のように設置した。また、実験観察のためにビデオカメラと高速度カメラにより記録し、実験の様子を観察した。

本研究で行った実験ケースを表-1に示す。堆積地盤の有無による水の流れや水圧変化を調べるため、地盤堆積させた状態と水のみによる場合を行った。地盤堆積を有した全ケースにおいて地盤高  $h_s=700\text{mm}$  で、地盤材料を飽和状態で堆積させた。外力条件としてジェット流の流量も一定とした。同地盤材料でも相対密度を変化させて、洗掘の進行と地盤内の過剰間隙水圧の変化を調べ、洗掘メカニズムの解明を試みた。なお、本稿では相対密度  $D_r=40, 55, 70\%$  をそれぞれ緩・中密・密と称す。実験結果の再現性をとるために、豊浦砂・緩、中密、密では2ケース、水のみについては4ケース行った。

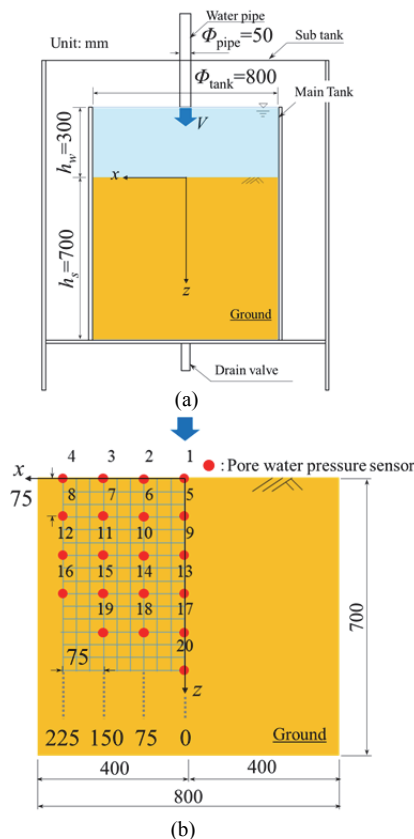


図-2 実験装置概略図：(a) 断面図，(b) 間隙水圧計の設置位置

表-1 実験ケース

地盤堆積	case	地盤材料	相対密度 $D_r$ (%)	
あり	case1	碎石	—	
	case2,3	豊浦砂	40	
	case4,5	豊浦砂	70	
	case6,7	豊浦砂	55	
	case8	まさ土	40	
	case9	まさ土	70	
	case10	珪砂2号	40	
	case11	珪砂2号	70	
	なし (水のみ)	case12-15	—	—

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 水のみ供試体におけるジェット流れの挙動

まず、地盤材料を用いず実験土槽内を水で満たした状態でジェット流を作用させた。水の場合、断面変化はないが、鉛直下方向へ進行したジェット流は底板によって跳ね返り、その流れが鉛直上方向へ進行している様子が確認できた (図-3)。断面から観察される水の流れからはジェット流直下以外に水の動きはほとんどみられなかった。

また、図-4に示す幅方向  $x=0\text{mm}$ 、 $150\text{mm}$  の列に設置した間隙水圧計 (CH1, 9, 17 と CH3, 11, 19) から過剰間隙水圧の挙動を調べたところ、ジェット流直下の  $x=0\text{mm}$  において、約  $500\text{Pa}$  以下の水圧変化がみられる一方、幅方向  $x=150\text{mm}$  ではほとんど変化がなかった。ジェット流直下でのみ水圧変動から、鉛直に作用する比較的高速の流れは土槽全体への拡散はほとんどなく、主に深さ方向に鉛直に作用することが考えられる。さらに、ジェット流の継続作用による過剰間隙水圧の経時変化から、水のみ

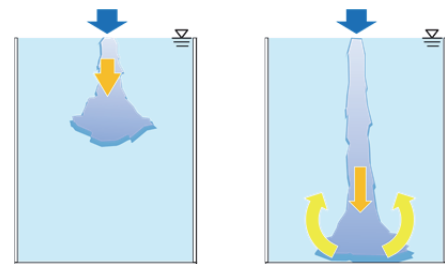


図-3 ジェット流の作用による落水塊の挙動をイメージ：ジェット流の底板での跳ね返りと鉛直上方向へ進行

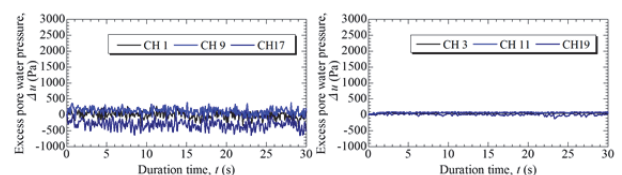


図-4 供試体が水の場合の水圧挙動：(a) 幅方向中央  $x=0\text{mm}$ ，(b)  $x=150\text{mm}$

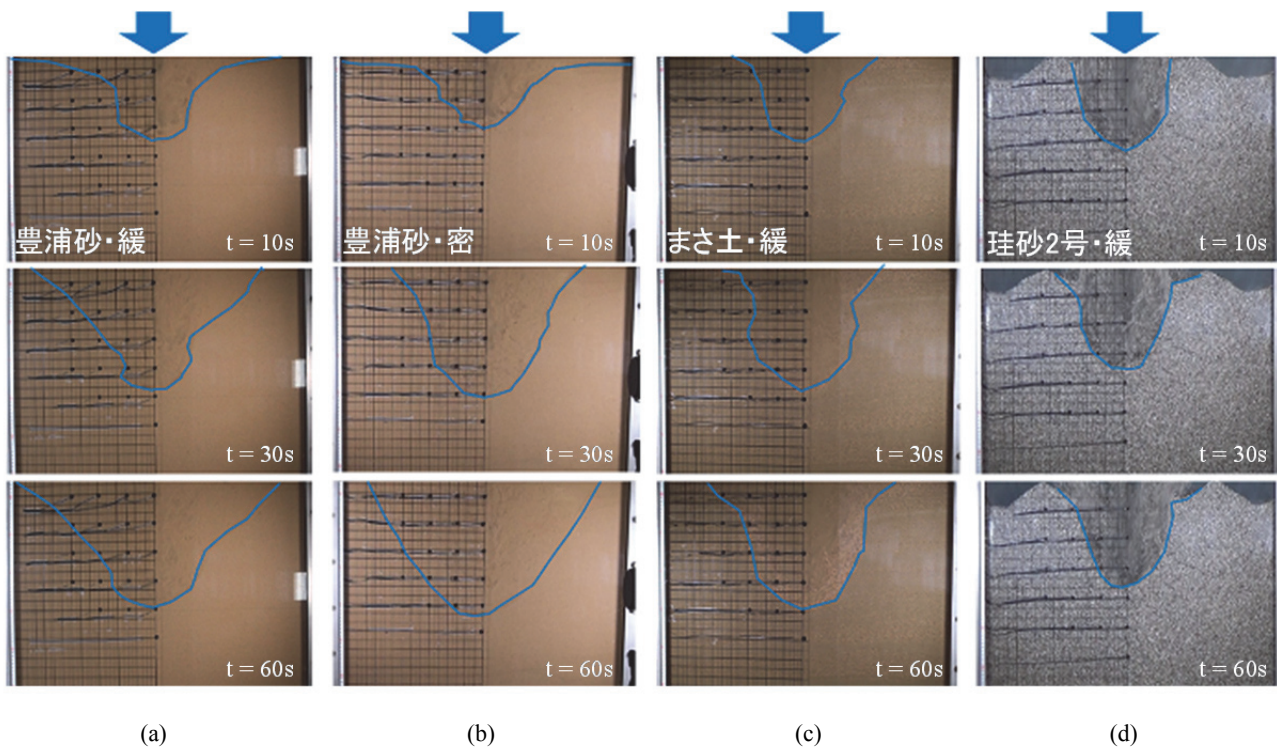


図-5 洗掘の進行の様子：(a) 豊浦砂・緩, (b) 豊浦砂・密, (c) まさ土・緩, (d) 珪砂2号・緩

の場合では落下水塊の衝撃に起因した著しい水圧変化は発生しないと考えられる。この結果を踏まえたうえで、次にジェット流が堆積地盤に作用する場合について考察していく。

### 3.2 地盤の進行的な洗掘挙動

各地盤材料にジェット流を作用させた時刻歴の洗掘の進行を図-5 に示す。すべての地盤材料で 60s 以降は洗掘が進行しない状態（限界状態）であったため、実験開始から 60s までにおける洗掘の進行について述べる。以下に相対密度や地盤材料の違いによる検討を行った。

#### (a) 豊浦砂における相対密度の違いによる洗掘挙動

豊浦砂・緩と密の結果について比較する。なお、豊浦砂においては各相対密度でそれぞれ2ケースずつ行い、実験データの再現性がとれていることを確認した。そこで、各1ケースずつの洗掘の進行の様子を比較する。

まず、豊浦砂・緩では、実験開始とともに鉛直方向へ洗掘が進行し、約 20s 後から水平方向の土を削る現象が見られた。ジェット流の衝撃に伴い、堆積地盤の表層が上下に移動するような様子も観察できた。また、露出した洗掘孔側面が崩れるようにして洗掘孔底に堆積する様子も確認できた。豊浦砂・密では緩に対して鉛直方向への進行は遅いが、水平方向の洗掘を伴いながら進行していることがわかった。緩な地盤では洗掘孔側面が不規則に崩れたが、洗掘の進行は幅方向中央  $x=0\text{mm}$  に左右対称な形状であった。

実験開始から 20s までは緩になるほど鉛直方向への洗掘が進行されているが、20s 以降は密になるほど洗掘の進

行が速くなっており、洗掘幅を見ても密の方が大きくなっている。緩の地盤では洗掘孔側面の土が崩れていき、洗掘孔底に堆積するため、洗掘の進行が遅くなったと考えられる。洗掘の進行は深度方向が約 300mm のところで収束し、洗掘幅は実験土槽の最大幅まで到達していた。この最終的な洗掘形状・最大洗掘深は両相対密度でほぼ同様であり、越流の洗掘の進行では地盤材料に起因している可能性がある。

#### (b) 地盤材料の違いによる洗掘挙動

次に、各地盤材料について相対密度が緩 ( $D_r=40\%$ ) の状態における洗掘の進行の様子を比較する。

まさ土の場合、洗掘の進行が収束していくにつれて土粒子が分粒し、細粒分は巻き上がったジェット流とともに流出し、粗粒分が洗掘孔底に堆積した。洗掘孔側面は崩れるよりもジェット流の流れで削られるようにして幅方向への進行がみられた。また、洗掘の進行では、側面の進行が左右非対称に洗掘されていった。地盤内で有効応力や粘着力が小さいところから洗掘されることが考えられ、土粒子内空隙や粒度・粒径で結果に影響を与えることが予想される。

珪砂2号では、洗掘の進行はジェット流が堆積地盤に当たった跳ね返りにより土粒子がほぼ垂直に上がり、洗掘孔周辺の表層に落掘の形成や直接洗掘孔底に堆積した。一方、鉛直方向に対して、水平方向への進行は見られなかった。実験開始約 10s から洗掘形状の変化はほとんど見られず、早期の段階で最大洗掘深まで到達した。表層に堆積された土粒子も時間の経過とともに洗掘孔側面へ滑るようにして孔底に堆積しており、最大洗掘深はほかの地盤材料より

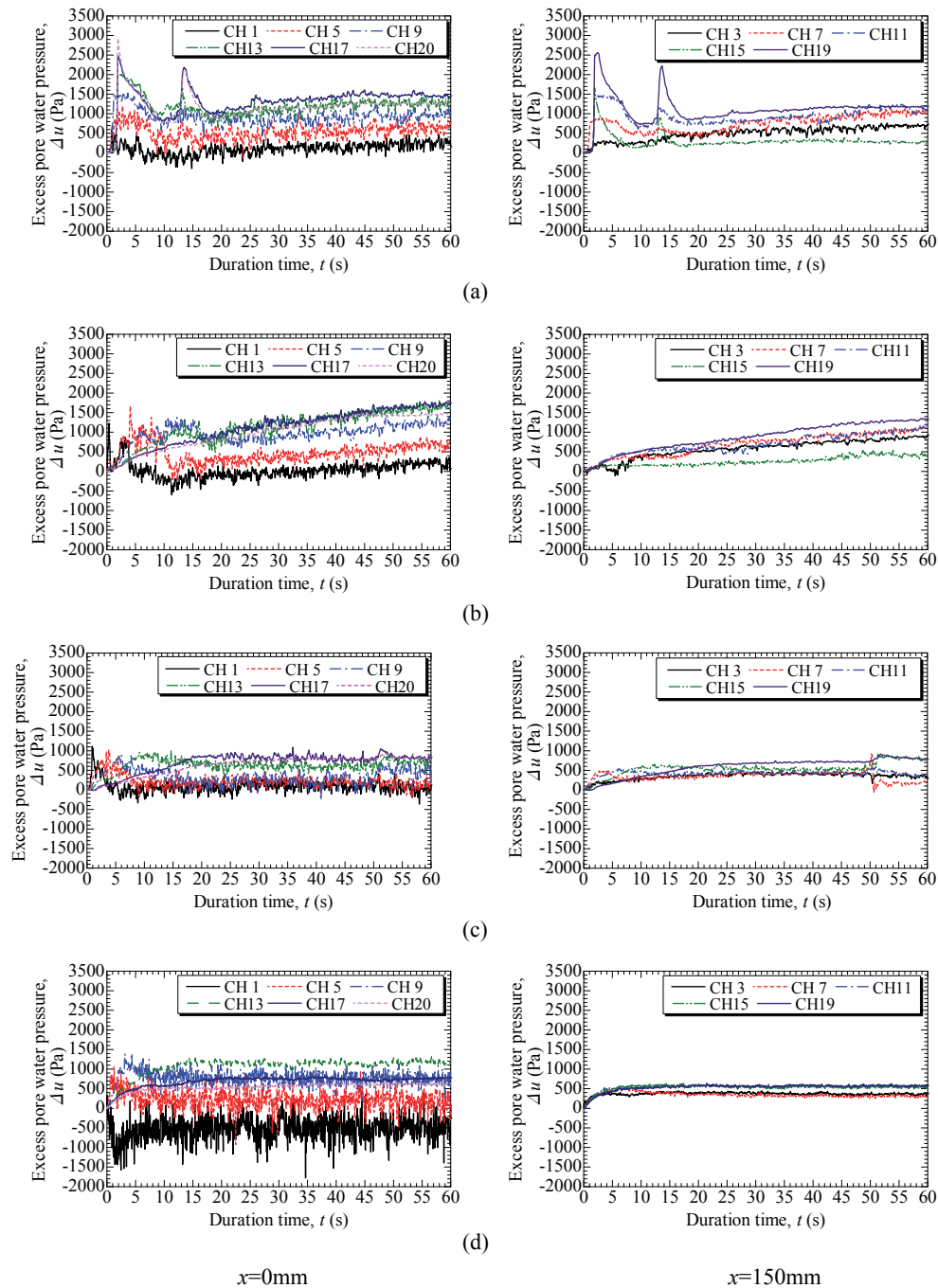


図-6 各地盤材料における過剰間隙水圧の経時変化：(a) 豊浦砂・緩, (b) 豊浦砂・密, (c) まさ土・緩, (d) 珪砂2号・緩, (左列) 幅方向  $x=0\text{mm}$ , (右列) 幅方向  $x=150\text{mm}$

も小さかった。

この結果から、地盤材料の違いにより洗掘進行の過程や洗掘形状が異なることがわかった。そこで、地盤内部の応力変化について検討を試みた。

### 3.3 洗掘の進行時における地盤内の水圧応答

各地盤条件の、0-60sにおける幅方向中央  $x=0\text{mm}$  と  $x=150\text{mm}$  の列に設置した間隙水圧計の計測値より算出した過剰間隙水圧の経時変化を図-6に示す。豊浦砂・緩の場合、約1.0-3.0sに尖った波形の応答が発生しており、深層部 (CH17, 20) ほど、過剰間隙水圧が著しく増大して

いることがわかった。緩では、幅方向  $x=150\text{mm}$  においても、深層部 (CH19) で同様の圧力上昇をしており、広範囲に影響を与えていることがわかる。ジェット流の作用により、深層部の体積圧縮およびせん断変形が最大となり、水圧増加したと考えられる。一方、密においては深層部の過剰間隙水圧に大きな挙動はみられず、時間経過とともに緩やかな上昇をしていることがわかった。落水水塊による洗掘は地盤条件により、表層部だけでなく深層部で過剰間隙水圧が増加することで土粒子骨格間の力が弱まり、支持力の低下を助長することが考えられる。この現象には落水水塊の衝撃に加え、地盤構成粒子の自重のほか、地盤の透



水性，土の等方圧縮やせん断変形の影響が考えられる。

まさ土では，過剰間隙水圧は深層部で 20s まで緩やかに上昇し，それ以降は約 800Pa で一定になっている。表層に対して深層部の水圧の変化は見られなかった。相対密度は緩の状態に設定したが，水圧の挙動は豊浦砂・密に酷似していると思われる。豊浦砂の緩の場合とは異なり，深層部で局所的な水圧計の応答は見られなかった。まさ土の方が粒度分布が広く，深層部での土粒子の移動が小さいことから，土のせん断作用の差異によるものと思われる。

珪砂 2 号では，地盤高から深さ  $z=300\text{mm}$  以降になると水圧の変化はなく，約 500Pa で一定であった。幅方向  $x=150\text{mm}$  ではほとんど水圧の変化が見られないことから，ジェット流による落下水塊が与える堆積地盤の影響範囲は豊浦砂のような砂質土地盤と比較すると小さいと思われる。珪砂 2 号のような砂質土と比較して透水性の高い地盤材料では，幅方向中央  $x=0\text{mm}$  のジェット流直下のみ水圧変化が生じ，それ以外の水圧の変化はほとんどない。ジェット流の落下水塊の作用による衝撃を砕石のような礫が抑制する役割を担い，高い透水性能により過剰間隙水圧の消散を促進させているものと思われる。

### 3.4 洗掘の限界状態における地盤内の水圧応答

地盤材料の中で，特に豊浦砂・緩では著しい水圧上昇がみられた。そこで，洗掘進行の限界状態以降地盤内の水圧応答を調べるため，実験開始から 90s までジェット流を継続作用させたときの水圧の挙動を図-7 に示す。実験開始直後の尖った波形では，どの水圧計も同等の応答を示していたが，洗掘形状が収束し始める 20s から最深部(CH20)よりも CH17, 18 の方が水圧が高い状態を保持していることがわかる。豊浦砂の最大洗掘深は，相対密度によらず約 300mm で，この深さは CH17 の位置に近く，水圧計は露出していることがわかった。CH20 はまだ地盤内であったことから，落下水塊により生じた洗掘孔の底部が反力板のような役割を担い，底部に水塊が当たった衝撃や跳ね返りにより，その付近に設置された CH17 や CH18 の水圧計がそれに応答して圧力上昇したと考えられる。

また，実験開始から 90s までの継続作用において，幅方向  $x=75\text{mm}$  に設置した CH18 が最も高い値を示している。ジェット流による落下水塊の衝撃により，堆積地盤では等方圧縮とせん断変形の作用が発生すると予想される。本実験で CH18 が最も高い水圧を応答したことから，深層部において等方圧縮よりもせん断変形の方が水圧上昇に大きく影響を与えることが考えられる(図-8)。一方，深層部に水圧計を設置した中で，CH19 が最も水圧が小さいことを鑑みると，せん断変形を与える影響範囲を調べるとともに地盤内の土粒子の移動を考慮する必要がある。

### 3.5 洗掘深と過剰間隙水圧分布

図-9 に幅方向中央  $x=0\text{mm}$  での 0-20s までの時間経過における深度方向と過剰間隙水圧の関係について各地盤材料・条件の結果を示す。なお，水圧分布の縦軸は深度

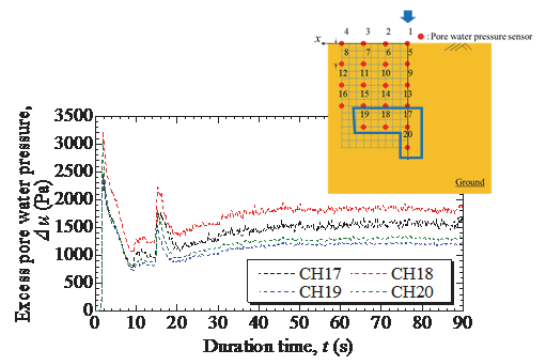


図-7 深層部 (CH17-20) における過剰間隙水圧の経時変化

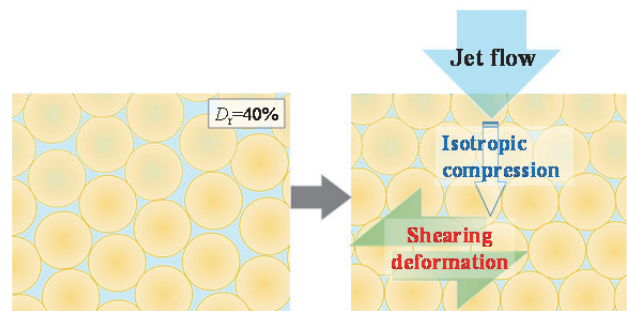


図-8 ジェット流作用時の地盤内における等方圧縮およびせん断変形の影響のイメージ図

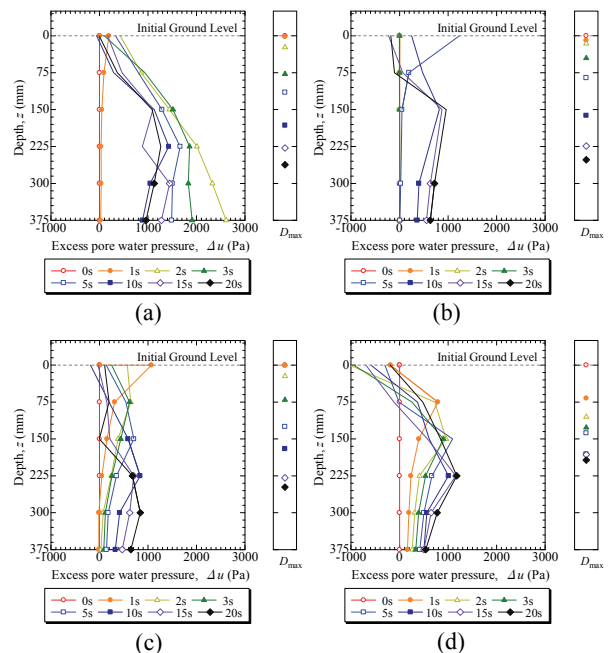


図-9 幅方向中央  $x=0\text{mm}$  の各地盤材料の水圧分布と時刻歴における最大洗掘深 ( $D_{\text{max}}$ ): (a) 豊浦砂・緩, (b) 豊浦砂・密, (c) まさ土・緩, (d) 珪砂2号・緩

方向で水圧計の設置位置の目盛で記し，洗掘の進行により時刻歴で各位置の水圧計が地盤から露出した場合はドットを非表示にしている。各水圧分布の右側に時刻歴における最大洗掘深  $D_{\text{max}}$  を示している。まず，豊浦砂・緩の場合，水圧分布で 1-2s の時に急激な水圧上昇がみられ，時刻歴の最大洗掘深からも 1-2s の洗掘の進行が加速的に上

がっていることから、洗掘の進行とともに地盤内の応力が上がることが考えられる。また、水圧は時間の経過で上昇と消散が繰り返されていることがわかり、この影響により、見かけの洗掘の進行よりも早い段階で深層地盤の支持力やせん断強度が低下する可能性がある。

密では緩のような著しい水圧の上昇はみられなかったが、時間経過に伴い、深さ  $z=150\text{mm}$  以降で徐々に水圧上昇していることが確認できた。これは洗掘の進行により地盤表層から計測器までの距離が短くなり、落下水塊の影響が出始めたことに起因していると考えられる。

水圧分布では勾配が大きくなるほど、深度方向の圧力上昇が大きいことがいえる。豊浦砂・緩、密の水圧分布より 2s の時の動水勾配を比較すると、緩の方が動水勾配が大きく、上向き浸透が発生していることが考えられる。洗掘の進行よりも先に地盤内部で液状化に似た状態を引き起こす可能性が考えられる。

まさ土では、水圧の深度分布では豊浦砂・密と同様、3s のとき表層で水圧が上昇した。また、深さ  $z=375\text{mm}$  (CH20) まで洗掘には至っていないが、地盤内部では時間の経過とともに水圧が上昇していることがわかった。時間経過に伴い、深度方向に水圧上昇が移動し、10-20s で深さ  $z=225\text{mm}$  で圧力が蓄積している。洗掘速度は 15s から減少しているが、20s における洗掘深よりも深いところで水圧の上昇がみられることから、洗掘の進行により圧力が伝播し、さらに見かけの洗掘到達よりも早く伝播している可能性がある。まさ土の水圧分布は豊浦砂・密に類似しているが、深度方向へいくほど時間経過に伴う水圧の挙動の変化は大きい。異なる粒径や透水の性質によって外力が与えられた時の堆積地盤の支持力やせん断強度の低下が懸念される。

珪砂 2 号・緩の場合、深さ  $z=225\text{mm}$  に設置した水圧計が最も高く応答している。また、洗掘の進行で 10s において CH1, 5, 9 の水圧計が露出していることから、洗掘の進行により落下水塊の到達距離が短くなり、水圧上昇の要因となったと考えられる。時刻歴の最大洗掘深より 10s から水圧の上昇はほぼ収束しており、時刻歴の最大洗掘深においても 10-20s の洗掘速度が急激に減少していることから、最大洗掘深の到達と水圧上昇の収束がほぼ同等であると思われる。

#### 4. 結言

本研究では、津波の作用による地盤の洗掘の進行と地盤内部の応力変化に着目した洗掘現象のメカニズムについて検討してきた。特に、地盤内部に発生する過剰間隙水圧の変動が洗掘現象に及ぼす影響を検討した。

津波が海岸構造物を越波する際の背後地盤の洗掘について着目した。越流水塊を模擬した実験装置を開発し、実験規模を大きく且つ外力の単純化をはかることで越流洗掘の現象解明を試みた。まず、地盤の有無で実験を行い水圧挙動を比較した結果、ジェット流直下において地盤が無い場合水圧の変動はあまり見られなかった。一方、地盤が

有る場合、見かけの洗掘の進行の違いに対して、異なる地盤材料や相対密度で地盤内の水圧の変動が大きく異なることがわかった。この結果から、間隙水圧により液状化に近い現象が発生し洗掘を助長していることが明らかとなった。本実験から、この過剰間隙水圧の発生は透水性や試料の等方圧縮、せん断による変形を及ぼす剛性に起因していると考えられる。また、地盤材料や条件の違いで異なる特徴的な波形の発生がみられ、これらはある基本波形に則していると考えられる。地盤条件を考慮した落下水塊による洗掘メカニズムを解明することで支持地盤の適切な材料選択や新たな対策工法を打ち出せると考えられ、今後の津波による洗掘現象のメカニズムを解明する手がかりになると思われる。

本実験の結果から、洗掘の進行や地盤内応力変動を踏まえると、越流洗掘においては粒径が大きく透水係数が高い珪砂 2 号が相対密度に起因することなく有効な地盤材料であると思われる。しかし、既往の研究<sup>7)</sup>では、ケーソンと支持地盤の間にある捨石マウンドより浸透破壊や支持力低下などの複合的な破壊が発生することも分かっており、津波作用を受ける防波堤の機能を確保するには複合的な視点からの機能評価と補強技術の選択が必要と考えられ、今後の課題とする。

#### 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基礎研究 (B)23360203 および研究スタート支援 26889035、特別研究員奨励金(24・9200) の助成を受けており、深謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 高橋重雄他：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報、港湾空港技術研究所資料、No.1231,pp.1-200, 2011.
- 2) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究(Ⅰ) 限界掃流力の流体力学的研究、土木学会論文集、第 41 号、pp. 1-21,1956.
- 3) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文集、第 206 号、pp. 59-69,1972.
- 4) 今瀬達也、前田健一、伊藤嘉、三宅達夫、鶴ヶ崎和博、澤田豊、角田紘子：間隙圧の変化に着目した開水路流れ及び越流による洗掘メカニズムの実験的考察、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol. 68, No. 2, pp. 1\_836-1\_840, 2012.
- 5) 松田達也、前田健一、三宅達夫、宮本順司、角田紘子、鶴ヶ崎和博：土粒子-土要素レベルに着目したジェット流に伴う地盤洗掘の実験的考察、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.70, No.2, 1\_1041-1045, 2014.
- 6) 国土交通省東北地方整備局港湾空港部 HP：第 3 回 東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会 資料 3, 2011.
- 7) 久泉友二、前田健一、今瀬達也、伊藤嘉：透水性が異なる二層地盤における洗掘メカニズムの外力要因分析、第 49 回地盤工学研究発表会、pp.909-910,2014.

特別講演 その1  
(11:00～12:00)

「南海トラフ巨大地震に備えて  
～中部地震津波対策技術センターの取組～」

神野 祐一 氏

(国土交通省 中部地方整備局  
中部技術事務所 地震津波対策官)

