「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤 工学的新技術開発と人材育成プログラム」

廃炉のための地盤環境学

地下水環境予測と数値解析

鈴木 誠(千葉工業大学)

地盤環境学の位置づけ

- 汚染水•地下水環境
 - 放射性物質が周辺に飛散
 - 格納容器から漏れ出した放射性物質が施設内に滞留
 - 降雨や地下水流動に伴って,放射性物質が移動
 - 作業環境の暴露リスク

 $\overline{}$

- 域外への拡散リスク
- ・ デコミッショニング
 - 放射性廃棄物処分における放射性物質が移動

- 域外への拡散リスク

土壌地下水中の物質の動態

土壌・地下水中の物質は種々の形態で移動する



内容

- 地下水環境の現況調査と将来予測
 - 室内試験
 - ⇒ トレーサー試験方法の検証
 - 現場試験
 - ⇒ トレーサー試験による実流速の測定(透水係数,有効間隙率)
 - ⇒ 水理モデルの構築
 - (透水係数,分散係数,流速,境界条件などの設定方法)
- 地下水環境の数値解析による将来予測
 - ⇒ 広域からサイト周辺モデルの解析の紹介

サイト周辺の地下水状況



概略断面図



①室内土層実験による測定精度の検証

- ・
 か射性汚染物質は地下水流により移動・
 拡散する?
- 地下水流速とは何か?
- 核種汚染濃度と経過時間の関係は?

放射性汚染物質の移流分散を精度よく予測する。









<動水勾配の与え方>

- ・土層水槽の動水勾配は、両側貯水槽の水面高さの差と100cmで固定されている土層水槽の横幅 より求めることができる。
- ・土層水槽の両側の貯水部の水位は、貯水部と連結した水位調整用タンク中央に配置した排水管 の高さと同じであり、上流側のタンクの水位(上流側貯水槽)は水槽高さ50cmで固定されているた め、下流側のタンク下の高さ調整台のダイアルを回転することで水位差を作ることができる。
- ・水位差は、両貯水槽の水面をスケールで計測することで求める。

~地下水流速とは?~



n_e:有効間隙率

~間隙率nと有効間隙率n。~

間隙率n: 土の全体積に対する間隙体積の比 有効間隙率n_e: 間隙のうち水が動ける部分のみを有効とした間隙率

~トレーサー試験の評価方法~



~ 移流分散の概念~



~トレーサー試験の試験結果~

$$v_1 / v_2 = n_e$$

珪砂5号(間隙率:40%)

v₁: ダルシー流速 v₂: 実流速 n_e: 有効間隙率

水位差(cm)	ダルシー流速(m/s)	実流速(m/s)		有効間隙率(%)	
		ピーク	立ち上がり	ピーク	立ち上がり
4.81	4.59×10 ⁻⁵	1.31×10 ⁻⁴	1.37×10 ⁻⁴	35.04	33.41
3.68	3.12×10 ⁻⁵	9.19×10 ⁻⁵	3.12×10 ⁻⁴	33.95	30.72
3.66	3.17×10 ⁻⁵	9.16×10 ⁻⁵	1.20×10 ⁻⁴	34.61	26.48



砂層の有効間隙率

30% 土木学会編(1974): 水理公式集

水位差(cm)	観測孔1	観測孔2	観測孔3
4.81	0.874	0.00	0.502
3.68	0.560	0.00	0.517
3.66	0.951	0.00	0.628

塩分濃度比









~室内試験のまとめ~

- 珪砂5号を用いた室内試験では妥当な移流を測定可能
- 電気伝導率計の設置方法を工夫するするとより高い精度の 測定が可能
- ●物質移行には移流に加え分散・拡散も大きく影響

②実験井戸による現場試験



~現場試験の課題~

- 地盤調査技術の確からしさを室内と現場の環境を用いて吟味できるデータ品質を確保
- ② 単一孔試験から複数孔試験と段階的なアプローチにより,地 下水場を定量的に把握
- ③トレーサー試験による物質の移流分散現象を定量的に把握
- ④ 長期モニタリングに備えた基本的原理や将来的な課題を検討できる環境



~揚水試験による透水係数の算定方法~



6. 628 m $k = \frac{Q}{2\pi D \Delta h} \ln(\frac{r_2}{r_1})$ (1) $k = \frac{Q}{2\pi D(h_1 - h_2)} \ln(\frac{r_1}{r_2})$ (2) k:透水係数 *Q*:揚水量 D:帯水層厚(1m) Δh :全水頭差 r1,r2: 揚水井から観測井までの距離 *h_i-h_w*:揚水井と観測井の全水頭差 r_i: 揚水井から観測井までの距離 r_w: 揚水井戸の半径 D: 帯水層厚(1m)

(1)式の場合

No.1-No.3孔間: *k*=5.08×10⁻³ (m/s) No.3-No.4孔間: *k*=5.81×10⁻³ (m/s) No.1-No.4孔間: *k*=3.67×10⁻² (m/s)

(2)式の場合

No.1-No.5孔間: k=3.75×10⁻⁴ (m/s) No.3-No.5孔間: k=3.52×10⁻⁴ (m/s) No.4-No.5孔間: k=3.20×10⁻⁴ (m/s)

(2)式の場合では同程度の値となるが、(1)式の場合は値にばらつきが生じる。 この要因には、水位の観測誤差が考えられる。

~揚水試験による透水係数の算定方法~

各孔の水位の観測誤差ɛ;を考慮し,透水係数kを最小二乗法から算定

観測誤差 ε_i を (2)式に加え, 透水係数kを次式で表す。

$$k = \frac{Q}{2\pi D(h_i + \varepsilon_i - h_w)} \ln(\frac{r_i}{r_w})$$

観測誤差ε;は次式で表現され,右式を最小化することで算定される。

 $\varepsilon_{i} = \frac{Q}{2\pi D} \ln(\frac{r_{i}}{r}) \frac{1}{k} - (h_{i} - h_{w}) \qquad \implies \qquad f(\varepsilon) = \Sigma(\varepsilon_{i})^{2} \qquad \implies \qquad \frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial k} = 0$

取小一米広の快討り一へ						
	未知データ	既知データ	最小二乗解			
1	k , h ₅	_	h_1, h_3, h_4			
2	k	h ₅	h_1, h_3, h_4			
3	k, h ₁	—	h_3, h_4, h_5			
4	k	\mathbf{h}_1	h_3, h_4, h_5			
(5)	k	h ₀	h_1, h_3, h_4, h_5			

~各ケースの透水係数と観測誤差~

	1		1 Г		2		
<i>h</i> ₅ (m)		6.237		<i>h</i> 5 (m)		5.628	
透水係数 (m/s)		3.63×10 ⁻³		透水係数 (m/s)		3.51×10 ⁻⁴	
観測誤差 (m)	ε1	5.88×10 ⁻²		観測誤差 (m)	\mathcal{E}_1	4.23×10 ⁻²	
	£ 3	5.76×10 ⁻²			ε3	1.85×10 ⁻³	
	£ 4	5.86×10 ⁻²			ε4	-5.24×10 ⁻²	
3		I L		(4)			
$h_1(\mathbf{m})$		6.311		h1(m) 透水係数 (m/s)		6.242	
透水係数 (m/s)		3.39×10 ⁻⁴				3.85×10 ⁻⁴	
観測誤差 (m)	ε3	2.68×10 ⁻²		観測誤差 (m)	ε3	-3.66×10 ⁻²	
	ε4	-2.97×10 ⁻²			ε4	-8.54×10 ⁻²	
	ε5	2.97×10 ⁻³			ε5	1.61×10 ⁻²	
	5						
$h_0(m)$ 6.1		6.151		• 観測誤	差はci	mのオーダ-	
透水係数 (m/s)		2.02×10 ⁻³	、・ 透水係数の変動係数				
	ε1	-1.94×10 ⁻¹					
観測誤差 (m)	ε3	-1.99×10 ⁻¹	V	③を選択			
	ε4	-2.02×10 ⁻¹					
	ε5	3.06×10 ⁻¹					

~孔間の透水係数の再評価~

観測誤差を考慮した場合

(1)式の場合

- No.1-No.3孔間: *k*=3.39×10⁻⁴ (m/s) No.3-No.4孔間: *k*=3.39×10⁻⁴ (m/s)
- No.1-No.4孔間: *k*=3.39×10⁻⁴ (m/s)

(2)式の場合

No.1-No.5孔間: k=3.39×10⁻⁴ (m/s)

- No.3-No.5孔間: *k*=3.39×10⁻⁴ (m/s)
- No.4-No.5孔間: *k*=3.39×10⁻⁴ (m/s)



観測誤差を考慮した場合、(1)式、(2)式のどちらを用いた場合でも同様の 値を確認することができた。

したがって、観測誤差を考慮することでより整合性のある透水係数の値を 得ることが可能であると考えられる。

~トレーサー試験の概要~



- ・ 5本の試験井戸を用いて水理試験を実施
 ⇒ GL-11~12m付近の砂礫層に決定
- ・ 4本の試験井戸を用いて塩水トレーサー試験を実施
- ・ 試験方法は放射状収束試験を採用

~トレーサー試験の方法~

 トレーサー剤:塩水+エタノールの混合液
 混合液:原位置地下水+Nacl+エタノール ⇒ 濃度:約3.5% 比重:1.0
 投入方法:ストレーナーに混合液入りの風船を投入孔に設置し 試験区間で破裂させ投入



~平均(ダルシー)流速の算定~

- 揚水孔から各孔までの距離rを半径として算出した 側面積と揚水量から**各孔における流速**を求める
- 各孔における流速と距離から成り立つ関数を距離rで積分し 各孔間の距離で割ることで各孔間での平均的な流速を求める



~トレーサー試験の改良~

孔内の上下流の影響 ⇒ 測定区間を限定させることで確認

- ・測定区間をパッカーで区切らない状態
- ・測定区間をパッカーで区切る状態



~パッカーの効果~

観測孔1



~試験結果の一例~



実流速 (m/sec)	立ち」	Ŀがり	ピーク		
設置位置	37	cm	37 cm		
投入孔~観測孔1	1.54>	×10 ⁻⁴	7.06×10 ⁻⁵		
設置位置	26 cm 46 cm		26 cm	46 cm	
投入孔~観測孔2	1.21×10 ⁻⁴ 2.35×10 ⁻⁴		5.55×10 ⁻⁵	9.80×10 ⁻⁵	

~数値解析モデル~

 $H_{\rm t} = 6.344 \, {\rm m}$







観測孔1の37cm 観測孔2の26cmと46cm を対象に解析を実施



観測孔が同じでも深さにより有効間隙 率nが異なった。

地下水流が砂礫層の中で直線的では ないため, 迂回した経路が考えられる。

観測孔が同じであると分散長が等しくなった。

地下水流の経路が長くなっても、分散には比較的影響が小さいと考えられる。

~現場試験のまとめ~

段階的な調査の有効性

⇒ 水理試験の結果から対象層の決定 水みちを把握するための水理試験(温度検層試験)後に トレーサー試験を実施

パッカーの有効性

⇒ 孔内での上下流の影響が確認されたため測定区間を パッカーで遮蔽させることが必要

妥当な実流速を評価するためには

- 水みちを詳細に把握することが重要である
- 平均的な数値解析では、実流速の経路は有効間隙率に現れる



③ 浸透流•物質移行解析

広域地下水流動のネスティング解析

⇒ 最終的にはサイト周辺の地下水流動予測(データ同化)



広域モデルの非定常解析からネスティング機能を用いて狭域モデルへの境界条件を 受け渡し、広域モデルと同様の解析結果を出力させる。



狭域モデルの詳細解析が効率よく行える。

~ 狭域モデルによる時系列解析~

狭域モデルは広域モデルから切り出し







広域モデル地下水位コンター図(30日目)

経過時間(日) 地下水位変動

設定水理定数

	1.1E-08	1.1E-08	0.54	1F解析設定値
	1.0E-05	1.1E-08	0.41	1F解析設定値
年寺層風化部)	1.0E-05	1.0E-05	0.41	沖積層相当として設定
	1.1E-06	1.1E-08	0.54	泥岩と互層から推定
	1.0E-08	1.0E-08	0.30	1F解析設定値

福島県浪江(アメダス)の2011年4月の日降水量 解析時間間隔は12時間ピッチで30日間(60ステップ)

40.0

30.0 g

25.0 15.0

10.0

5.0



15. 15.7

15.6 15.6

현 关 15.5

15.4

15.4

- ~ 数値解析のまとめ~
- 解析効果化
 - > ネスティングは精度を上げ,計算時間の短縮が可能
 - ▶領域分割法は計算時間の短縮にはなるが、事後処理があり、 解析時間は効果小
- 解析モデルの作成

▶ 降雨の地表面流出を考慮した浸透量の算定が必要

まとめと今後の予定

- ① 室内土層実験による実流速の測定精度の検証
- ② 実験井戸を5孔設置し,現場試験を実施



<u>今後の予定</u>

①室内試験に多点電気伝導率計で、分散パラメータの評価

②現場試験のまとめと数値シミュレーション

③観測データとシミュレーションを組合せたデータ同化の検討

FIN