第 III 部門　　薬液注入工法における地盤の不確実性が薬液浸透挙動に及ぼす影響

明石工業高等専門学校　学生会員　○角亮一郎
明石工業高等専門学校　正 会 員　石丸和宏
芝浦工業大学(前 明石高専)　正 会 員　稲積真哉

1. はじめに

薬液注入工法は軟弱な地盤を改良する工事であり、液状化の対策としても用いられており注目されている工法の一つである。しかしながら、2016 年 5 月に羽田空港 C 滑走路の地盤改良工事で十分に薬液が注入されていないことを隠蔽し、大きな話題になった。原因は、地盤内に薬液が浸透しにくい部分が多くあり、予定注入量の 5.4%しか注入できていなかったことである。薬液注入工法の工事数は年々増えているが、薬液注入工法に対する課題は多い。このような社会的背景を受けて、地盤内に浸透する薬液の挙動のメカニズムの解明が必要である。既存の研究では均質な地盤の条件での解析が行われてきたが、実際は不確定要素を含んだ不均質な地盤である。本研究では地盤改良が必要な土層に対して、不確実性地盤を再現した断面を薬液の浸透流解析を行い、その挙動を評価する。

2. 不確実性の再現方法

地盤の不確実性の再現方法として、本研究では地盤の性質で重要な透水係数に注目した。他のパラメータも検討はできたが、実際の現場調査でサンプリングする際に必ず透水係数を調べるため透水係数を対象にした。

$$K_h = \frac{1}{H}(k_1 H_1 + \cdots k_n H_n) \tag{1}$$

$$K_v = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \cdots + \frac{H_n}{k_n}} \tag{2}$$

ここで、K_h：水平方向の平均透水係数、K_v：鉛直方向の平均透水係数、H：全体の高さ、k_n：n 層の透水係数、H_n：n 層の高さである。

方法としては、式(1)、式(2)に示すように、平均透水係数を等しくし、全体では均質地盤として扱うが、対象の解析断面では値を分散させる方法を選択する。均質地盤との比較を行うため、平均透水係数、均質地盤の透水係数および不確実性を伴う範囲外の透水係数を等しくすることで不確実性を含んだ断面を疑似的に均質地盤として再現する。

3. 解析の基礎理論、解析断面

2 次元の飽和・不飽和の浸透流解析の支配方程式を式(3)に示す[1)]。

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k\frac{\partial H}{\partial x_i}\right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{3}$$

ここで、k：透水係数 [m/day]，H：全水頭 [m]，Q：境界流束 [m³]，θ：体積含水率である。

本研究で使用した解析断面を図 1 に示す。解析断面の境界条件を排水に設定し、解析メッシュの大きさを 0.25 [m]に設定した。

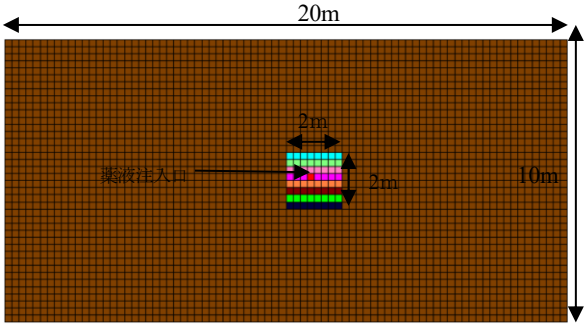

図 1　解析断面

不確実性を再現した部分は図 1 の 2 [m]×2 [m]の正方形断面で、0.25 [m]× 2[m]の層を 8 個設けた。8 層の上から場所番号 1 から 8 を設定した。

Ryoichiro Sumi, Kazuhiro Ishimaru and Shinya Inazumi
sumi_akashi@yahoo.co.jp

4. 解析条件

透水係数モデルを 4 つ作成し、乱数を与えて 8 つの領域に透水係数を与えていく。今回用意した透水係数モデルは表 1 に示す。

また、材料のパラメータおよび境界条件を表 2 に示した。各パラメータは砂質土の代表値を用いている [2)3)]。境界条件の注入圧を非定常条件にして、注入の減圧を再現した [4)]。乱数を振った後の 8 つの層に対する透水係数を表 3 に示す。与えられた透水係数を X 軸パラメータだけに適用させた断面、そして Y 軸パラメータだけに適用させた断面を作成し浸透流解析を行った。さらに、比較対象として均質地盤の断面も作成し、透水係数は平均透水係数を用いた。ただし、透水係数について、水ガラスの粘性を考慮した値に補正してある。

表 1　透水係数モデル

Kh, Kv (cm/sec)				平均透水係数
①	②	③	④	6.35E-04
3.10E-03	1.00E-03	8.80E-04	9.80E-05	

表 2　パラメータ、境界条件

パラメータ		
	有効間隙率 θ	比貯水係数 Ss
単位	%	1/m
砂質土	30	1.00E-04
境界条件		
	注入圧	全水頭
注入直後	0.1MP	10m（一定）
15分後	0.06MP	

表 3　乱数から決定した透水係数

場所	範囲	モデル番号	透水係数（cm/sec）
1	0-12.5	①	3.10E-03
2	12.5-25	③	8.50E-04
3	25-37.5	④	9.80E-05
4	37.5-50	③	8.80E-04
5	50-62.5	④	9.80E-05
6	62.5-75	②	1.00E-03
7	75-87.5	②	1.00E-03
8	87.5-100	④	3.10E-03

5. 解析結果

図 2、図 3 はどちらも注入後 15 分後の結果を示している。また、図 3 の流速ベクトル図に関しては、ベクトルの様子が判断しやすいように、6 [m]×10 [m]の結果を示している。現地調査で平均透水係数を得られた場合、図 2(c)のような断面になるが、注入口周辺の地盤の透水係数が今回のような場合、薬液の流れる圧力及び浸透範囲に大きく影響が出るという事が確認できる。特に水平方向に透水係数が低い地層が注入口周辺に存在する場合が最も薬液の浸透が困難である。流速ベクトル図において、透水係数がすべて一定の場合、全方向に均一にかつ均一な範囲に薬液の流れが存在していることが確認できる。一方で、不確実性を伴う断面では注入口周辺の透水係数が低いため、パラメータを変化させた部分を迂回するような現象も確認できる。

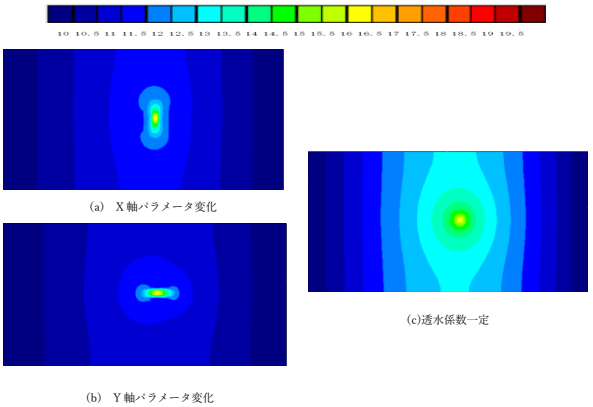

図 2　全水頭コンター図

6. 結論

本研究により、不確実性を伴う地盤を均質地盤として扱うことの危険性を確認できた。薬液の浸透が困難になる場所を減らすためには、現在使用されている水ガラスよりも低粘性の水ガラスを使用し、広範囲にかつ一定の強度を得られる薬液の開発が必要である。

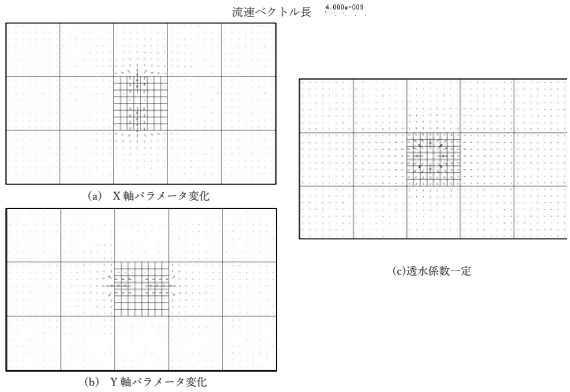

図 3　流速ベクトル図

【参考文献】

1) 西垣誠、菱谷智幸、橋本学、河野伊一郎：飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究、土木学会論文集No. 511/II-30、 pp.135-144、 1995年
2) 勝見武：Web Seminar 地盤環境汚染の基礎と解析の考え (http://www.engineeringeye.com/rpt/w010_katsumi/pdf/katsumi_all.pdf) 、pp9-29、取得年月日：2016年12月16日
3) 環境省：平成19年度広域最終処分場計画調査（海面最終処分場の閉鎖・廃止適用マニュアル策定に向けた調査）報告書、環境省、資料pp2-5、2007年
4) 公益社団法人地盤工学会：薬液注入工法の理論・設計・施工、公益社団法人地盤工学会、p18、2013年