X線 CTを用いた地下水上昇による LNAPL 挙動の可視化実験

熊本大学 工学部社会環境工学科 学生会員 塚本直己 熊本大学院 正会員 椋木俊文 熊本大学院 学生会員 小丸泰平

1. はじめに

ガソリン等の石油・石炭系の化合物は水に溶けにくく、水よりも密度が低いことから難水溶性液体 LNAPL(Light Non Aqueous Phase Liquid)と呼ばれている。LNAPLは土壌に漏出すると、重力により不飽和帯を鉛直方向に浸透していく。それと同時に地盤の非均質性や毛管力により水平方向へも拡がる。LNAPLは水よりも密度が小さいため地下水面上では鉛直方向への浸透を阻害され、主に水平方向へと拡がっていくり。このLNAPLが高濃度で地盤内に存在した場合、地下水に徐々に溶け出していき、長期の土壌汚染を引き起こす可能性があり、適切にLNAPLの挙動を把握し浄化対策を行わなければならない。今回の実験では地下水位の上昇がLNAPLの挙動にどのような影響を与えるのかX線CT²⁾を用いて三次元での模型実験を行った。

2. 実験概要

図-1 は実験に使用した実験装置の概要図である。実験に用いた土槽は高さ30cm, 直径20cmの円筒型の透明アクリル製である。土槽の底部にはバルブが取り付けられており、ここから水の供給を行うことができる。模型地盤作製の際、土槽底部から高さ1.5cmの範囲で帯水槽として硅砂3号の層を作製し、硅砂3号の層の上部の高さ28.5cmの範囲に実験で用いた豊浦砂の層を作製した。

今回の実験では地下水上昇による影響を評価するため表-1に示すとおり2つの実験条件を設定した。Case1では乾燥状態の地盤に対してLNAPLの注入を行う。Case2では、初期条件で不飽和帯を形成している地盤に対してLNAPLの注入を行った。Case2ではLNAPL注入後さらに地盤底部から水の供給を行い地盤上部から5cmの深さまで不飽和帯を上昇させた。Case2において、初期地盤の不飽和帯を作製する際とLNAPL注入後に地下水上昇を想定した給水を行う際には、給水方法として土槽の底部から15cmの高さに水頭を与え豊浦砂の毛管力によって給水を行う方法を用いた。表-2は今回の実験に用いた液体の物性を示している。X線CT撮影によって得られるCT値は物質の密度と比例するため、CT値と湿潤密度

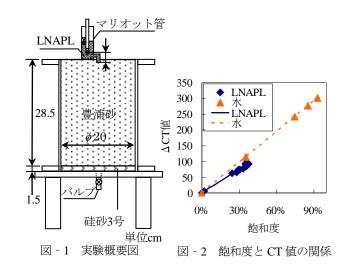


表 - 1 実験 Case

	地盤材料	乾燥密度 ρ _d (mg/m³)	初期地盤の 含水状態	水位上昇
Case1	# >+>	1.62	乾燥	なし
Case2	豊浦砂	1.63	湿潤	あり

表 - 2 実験に用いた液体の物性(15℃)

	水	LNAPL
密度ρ (t/m³)	0.999	0.750
粘性係数 μ(mPa·s)	1.138	1.40
表面張力σ(mN/m)	73.48	22.17
界面張力 σ(mN/m)		36.76

の相関を取ることで地盤内の飽和度分布を求めることが 可能である。図 - 2はCT値と飽和度の相関を示している。

3. 結果および考察

図 - 3 は土槽の中心から半径 3cm 部分における深さごとの飽和度分布である。図 - 3(a)は Case2 における初期地盤と水位上昇実験終了後の CT 値から求めた飽和度分布と実測により求めた飽和度分布を示している。これを見ると、誤差はあるが実測値から求めた飽和度分布と CT値から求めた飽和度分布はほぼ同じ傾向を持っている。また初期地盤は深さ 9cm から不飽和帯を形成している事が確認できる。図 - 3(b)は LNAPL を注入してから 3 時間後の Case1、Case2 それぞれの LNAPL の飽和度分布である。Case1 では 11cm の深さまで LNAPL 飽和度が 20%以

上あるのに対して、Case2 では 10cm の深さにおいて LNAPL 飽和度は 11%となっている。また、深さ 6cm から 9cm において Case2 のほうがわずかだが高い飽和度で LNAPL が存在している。これは不飽和帯によって鉛直方向への浸透が妨げられ、不飽和帯の上部に LNAPL が滞留したためと考えられる。図ー3(c)は Case2 における水位上昇後の飽和度分布を水と LNAPL で分けたものである。本来なら水は土槽上部から 5cm の深さには存在しないはずだが、これを見ると 4cm の高さまで水が上昇していることが確認できる。これは LNAPL の存在によって間隙が小さくなり、LNAPL 浸透領域の毛管力が上昇したことが考えられる。

図 - 4(a)、(b)は Case1、2 における LNAPL 注入 3 時間 後の LNAPL の飽和度分布を示しており、これを見ると Case1 ではLNAPL は深さ 11cm まで浸透が確認できるが、 Case2 では 11cm の深さにおいて LNAPL の領域は確認で きない。Case2の深さ11cmにおいて初期地盤は水飽和度 が 70% 近くあり、毛管力の低下や水により LNAPL の浸 透が妨げられたと考えられる。図 - 4(c)は Case2 における LNAPL 注入後に土槽底部から水を供給した後の水の飽 和度分布を示している。これをみると、深さ 11cm では、 ほぼ一定の飽和度で水が分布しているが、深さ 8cm にお いて LNAPL が浸透している中心の領域と周りの乾燥し ていた領域とでは水の飽和度に差が生じている。これは、 間隙中に LNAPL が存在しているため水が浸入できる間 隙が少なくなり水の飽和度が低くなったと考えられる。 4cm において乾燥している領域よりも LNAPL が浸透し た領域に水が浸入してきている。また深さ 2cm、4cm で は LNAPL の浸透領域と乾燥している領域の境界付近に 高い飽和度で水が分布している。LNAPL の残留により LNAPL 浸透領域における空気間隙が小さくなり、よって その領域の毛管圧力が上昇したことが考えられる。

4. まとめ

今回の実験では LNAPL が浸透することでその浸透領域の毛管力が上昇したことが考えられる。特に LNAPL 浸透領域と乾燥領域の境界付近の毛管力が高い傾向にある。今後は、LNAPL の存在と毛管力の関係性について検討していく必要がある。

参考文献

- 1) R・ヘルミック: 地下環境での多相流と輸送現象 pp.5 270, 2004
- 2) 大谷順: X線 CT 法、土と基礎、vol.54, No.4, pp32 33, 2006

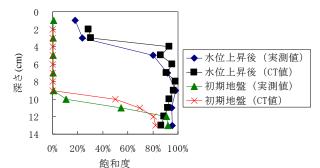


図 - 3(a) Case2 の実測と CT 値から求めた飽和度

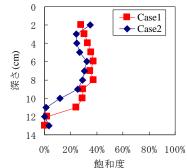
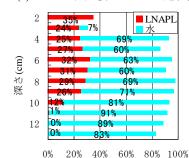


図 - 3(b) LNAPL 注入後の LNAPL 飽和度分布



0/0 20/0 40/0 00/0 00/0 100/0

飽和度 図 - 3(c)Case2 における水位上昇後の飽和度分布

図-3 深さごとの飽和度分布

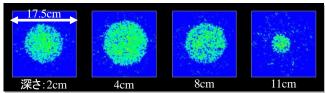


図 - 4(a): Case1-LNAPL 注入後の LNAPL の飽和度分布

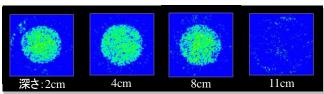


図 - 4(b): Case2-LNAPL 注入後の LNAPL の飽和度分布

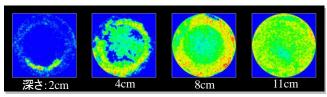


図 - 4(c): Case2-水位上昇後の水の飽和度分布 0% 100%

図 - 4 CT 画像