

III-774

境界注入現象の発生条件とそのメカニズムについて

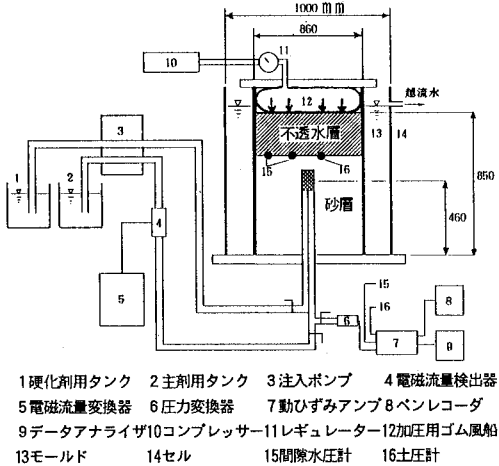
早稲田大学 正会員 森 麟
大木建設㈱ 正会員 江本 佑橘
早稲田大学 学生員 ○入谷 剛（現 東京電力）

1. 研究目的

薬液注入による地盤改良効果は、薬液が所定の範囲内に浸透し固結するときに最も期待できる。砂質地盤における薬液注入では、薬液が地盤の間隙中に浸透注入されることが前提となるが、注入の対象となる砂質地盤中に不透水性の粘性土層などが存在するような場合、薬液が層の境界部に集中的に注入されたり、粘性土層中を水平方向に割裂して薬液が逸走する境界注入現象が発生する可能性がある。この現象が発生すると薬液が砂層部分にあまり注入されず注入効果が著しく低減する。そこで本研究では、このような境界注入現象が発生するときの注入・地盤条件について調査し、その発生のメカニズムを明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

実験には図-1の大型の土槽を使用し、不透水層として粘性土を用いたが、図-2のケース1、2では不透水層の変形性の影響を調べるため、不透水層内に割裂が発生しないよう不透水層としてビニールシートを使用した。また不透水層の位置は吐出口位置より上4cm、下15cmの2通りとし、境界部には中心から10cmと30cmの位置に間隙水圧計、10cmの位置に土圧計を配置した。注入材には主に水及び水との粘性比 μ が2の溶液型緩結性薬液を使用した。ゲル化時間の境界注入に対する影響を調べるため瞬結性薬液も使用した。なお、境界面から流出が目視確認できるように注入材はローダミン溶液で着色した。また上載圧は土槽上面をゴム風船で加圧することで与えた。実験では砂層の透水性、不透水層の強度（一軸圧縮強度、変形係数）、上載圧等を変化させて注入を行い、注入速度 q 、注入圧力 p の他に、境界注入の発生に影響すると思われる注入時の境界面の過剰間隙水圧発生量 u 及び鉛直土圧 σ_1 を測定した。



1硬化利用タンク 2主剤用タンク 3注入ポンプ 4電磁流量検出器
5電磁流量変換器 6圧力変換器 7動ひずみアンプ 8ペンレコーダ
9データアナライザ10コンプレッサ11レギュレーター12加圧用ゴム風船
13モールド 14セル 15間隙水圧計 16土圧計

図-1: 実験装置概要

3. 境界注入の発生条件とそのメカニズム

3-1. 水及び緩結性薬液を注入した場合

実験結果を整理すると、砂層と不透水層の境界に水平の割裂面が発生し、この面から薬液が集中的に注入される①、②、③の場合と、軟弱な不透水層内を水平方向に割裂し、この中を薬液が割裂注入される④、⑤の場合の二つの異なる境界注入現象があり、その発生条件とメカニズムを①～⑤のそれぞれについて考察した。

① 透水性の小さい砂層で注入し、上側に割裂しにくい不透水層（ビニール層）がある場合（ケース1）

境界注入は層の境界部に水平割裂面が発生し、これを薬液が水平方向に拡大・進展させながら逸走する現象であるが、この水平割裂面の発生条件を考える上で境界部における鉛直土圧 σ_1 と注入で発生する過剰間隙水圧 u の大きさに着目した。

その結果、ケース1で砂層の透水性が小さい場合（ $k=2.1 \times 10^{-4}$ cm/sec）には、表-1に示すように不透水層の変形性に依らず、境界部における過剰間隙水圧 u （中心より30cm）が鉛直土圧 σ_1 にほぼ等しくなった時点で境界面から注入材の流出が認められた。このことから、境界割裂面は注入によって境界面の過剰間隙水圧 u が鉛直土圧 σ_1 よりやや大きくなったときその部分の不透水層が上方に変位して、不透水層と砂層が離れ境界

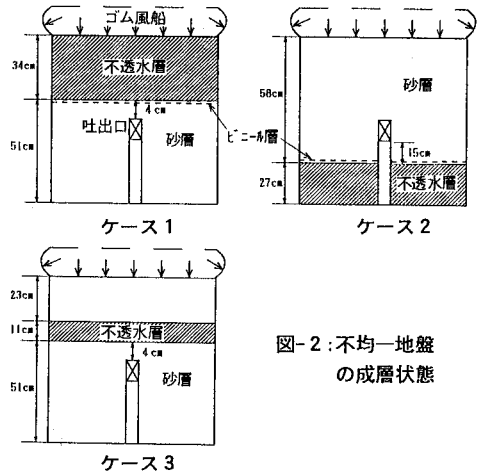


図-2: 不均一地盤の成層状態

実験番号	変形係数 E	鉛直土圧 σ_1	過剰間隙水圧 u
1	120	0.61	0.59
2	120	0.95	0.94
3	630	0.48	0.51

単位: (kgf/cm²)

部にくさび状に注入液が入り広がることで形成されと考えられる。しかし、表-1より不透水層の変形性が極端に小さい場合には、くさび作用に必要な局部的変形が生じにくいので、境界割裂面の発生には鉛直圧よりもかなり大きな過剰間隙水圧が境界部に発生する必要があるため、境界注入は発生しにくくなる。

② 透水性の大きい砂層で注入し、上側に割裂しにくい不透水層(ビニール層)がある場合(ケース1)

ケース1で砂層の透水性が大きい場合($k=1.5 \times 10^{-3}$ cm/sec)について $q=20$ (l/min)の大きい注入速度で緩結性薬液を注入したが、境界注入は発生せず薬液は砂層内を半球状に浸透した。また砂層内には割裂はほとんど発生しなかった。一方、先の境界注入が発生した①の場合には、砂層の透水性が小さいため砂層内で割裂が発生し、これが境界部まで到達しており、注入圧力 p が損失の少ない状態で境界部に作用していたと考えられる。このことから砂層の透水性が大きく注入材が割裂せずに浸透していく場合には、浸透による圧力損失が大きいため境界部の過剰間隙水圧 u が鉛直圧 σ_1 まで上昇せず、境界割裂面が形成されなかったと考えられる。しかしこの場合でも注入速度 q や薬液の粘性等を大きくすれば、境界部の過剰間隙水圧は上昇し、境界注入発生の可能性が生じ得る。

③ 砂層で注入し、下側に割裂しにくい不透水層(ビニール層)がある場合(ケース2)

不透水層が砂層の下側にある場合は、境界部に鉛直土圧 σ_1 より大きな過剰間隙水圧 u が発生した場合に不透水層が下方に変位するが、その上部の砂層は土被り圧で下方に追従変形し、境界部との間のくさび作用が生じにくい。くさび作用を生じさせるには大きな過剰間隙水圧の発生や下側不透水層の変形性が大きいことが必要と考えられる。

そこで砂層内で発生する割裂が不透水層まで容易に到達するようケース2で砂層の透水性を $k=2.1 \times 10^{-4}$ (cm/sec)と小さくし、さらに下側の不透水層の変形性をいくつか変化させて注入を行ったところ、砂層内で発生した割裂は境界部まで到達していたが、不透水層の変形性が極端に大きい場合($E=3$ kgf/cm²)以外は境界注入の発生はなかった。このことから、下側不透水層の変形性が特に大きい場合以外は、境界部にくさび作用が生ぜず境界注入しないことを示している。また、砂層の透水性が大きい場合は割裂の発生量が少なく浸透注入となるため、境界部までの注入圧力 p の損失が大きく過剰間隙水圧が小さいので境界注入発生の可能性はほとんどないと考えられる。

④ 透水性の小さい砂層で注入し、上側に強度が小さく薄い粘土層、その上に透水性の大きい砂層がある場合(ケース3)

①、②、③では割裂の生じないビニールの不透水境界面に沿う境界注入現象の発生メカニズムと条件を示したが、不透水層が軟弱粘土である場合、粘土層の中を水平方向に割裂して、薬液がこの中を逸走する境界注入現象が発生する場合があります。この条件について調査した。

この④では、下部砂層で発生した鉛直割裂面が粘土層を通して上面まで進展し、さらに粘土層内を水平方向に割裂し注入材がこの水平割裂面より逸走する境界注入が発生し、砂層内にはほとんど浸透しなかった。また、吐出口直上付近の境界部には一部境界割裂面が発生したが、水平方向にはあまり進展せず停止した。したがって、薬液の大部分は粘性土中の水平割裂による境界注入となった。これは、下部砂層中の割裂が粘土層下面に到達した時、粘土層の q_v が小さいため粘土層をそのまま鉛直方向に割裂して、上部砂層に達した時、砂層の透水性が大きいため割裂できず、粘土層上面の割裂脈幅も非常に小さいので上部砂層への浸透量は少ない。このため、それまで注入材が割裂の進展分その脈中に収容されていたが、割裂が停止したので注入圧が上がり、粘性土中に新たに水平な割裂脈が形成されたと考えられる。したがって既に述べたように、粘土層下面に生じていた境界割裂面が停止していたことからみて、粘性土中を水平割裂する方が圧力損失が少なく容易であることが分かる。

⑤ 透水性の小さい砂層で注入し、上側に強度が小さく厚い粘土層がある場合(ケース1)、及び粘土層の強度が小さく薄く、その上部に透水性の小さい砂層がある場合(ケース3)

この場合、下部砂層で発生した割裂がそのまま粘土層と透水性の小さい上部砂層を鉛直上方に進展し、加圧用ゴム風船に達して、砂層と風船との間で境界注入が生じ、粘土層境界部では発生しなかった。風船は非常に変形性が大きく容易にくさび作用が生じるため境界注入になり易い。また割裂が鉛直上方に風船まで進展したのは、粘土層または上部砂層の透水性が小さいため割裂脈内の圧力低下が小さかったため、風船がない場合には境界注入は生じないと考えられる。

以上①～⑤のケースを総括してみると、水及び緩結性薬液の場合の境界注入発生条件の一つに、注入砂層の透水性が小さく(透水係数 $k=10^{-4}$ (cm/sec)オーダー程度)、砂層の割裂が境界部まで到達する必要があるため、注入砂層の透水性が大きい場合には割裂が伸びないので、境界注入発生の可能性はほとんどないことが分かった。

3-2. 瞬結性薬液を注入した場合

上記の緩結性薬液による境界注入の発生必要条件からみて、ゲル化時間の短い瞬結性薬液を用いる場合には、砂層の透水性がやや大きい場合であっても注入中の薬液のゲル化により割裂が発生し、さらに注入圧力 p も緩結性薬液のものより大きいので、境界注入の可能性が高くなると考えられる。

ゲル化時間が5～10(sec)の瞬結性薬液を用いケース1の砂層透水係数がやや大きい場合($k=1.5 \times 10^{-3}$ cm/sec)について注入実験を行った。その結果、同じ供試体で緩結性薬液を注入した場合と異なり、砂層内で割裂が発生しこれが境界部まで進展して境界面を割裂し、薬液が逸走する境界注入が発生した。

緩結性薬液を用いた境界注入の場合には、薬液が吐出口から周辺の砂層に注入圧力 p 、浸透面積 A の大きさに見合う分だけ砂層へ浸透固結するが、瞬結性薬液の場合には、注入中の薬液のゲル化により吐出口付近の浸透領域が小さいまま固結するため砂層の浸透固結分が小さく、境界注入になる分量が多くなる。