

III-36

ゲル化時間の短い薬液による砂地盤の割裂現象と浸透メカニズム

早稲田大学 正会員 森 麟, 田村昌仁
早稲田大学 学生員 ○福井義弘

1. まえがき ゲル化時間が注入時間より短い薬液では、後続薬液は先行薬液のゲル化した部分を最終的には割裂しない限り注入できない。従って、固結形態はこの割裂の現象に大きく左右されるが、ゲル化時間の短い薬液の場合の砂質地盤の割裂現象や固結形態を支配する条件については十分明らかではない。本報告は、まず砂質地盤の割裂現象とゲル化時間の短い薬液の注入圧の意味について考察し、薬液の浸透メカニズムを明らかにしたものである。

2. 砂質地盤の割裂圧 液体による砂質土の割裂現象は文献1)で明らかにしたが、割裂圧の大きさは注入加压速度にも依存している。ゲル化時間が特に短い薬液では、すぐゲル化するのでその割裂現象は注入薬液により周りの地盤の間隙水圧があまり増加しない“急加压条件”と同じ状況下で生じうる。従って、まず急加压条件での割裂圧について調べることにした。実験は薬液のかわりに泥水を用いて行ったが、泥水では注入管周りに泥膜が形成されるので透水性が十分大きい砂でも間隙圧が殆ど増加せず、加压速度に無関係に急加压条件が得られる。割裂実験装置の概要及び実験方法は、文献1)に示す。試料は、未固結砂のほか薬液による固結砂も使い、表1、2に示す。図1、図2には未固結砂及び固結砂の割裂圧と拘束圧の関係を示す。図1より、割裂圧は透水性が大きいほど大きく、試料F, G, H, Iの場合、割裂圧 P_{rl} は拘束圧 σ'_s の2倍に比例している。透水係数 k が 10^{-3} (cm/s)よりかなり大きい試料C, Dでは、割裂圧が拘束圧の8~10倍とかなり大きい。図1には、孔壁周りの全般せん断破壊を引き起こすのに必要な極限空洞内圧³⁾も示すが、試料C, Dの割裂圧は P_u' と同程度になっている。これは透水性が大きくなると割裂のメカニズムが異なることを示している。

一方、試料C, Dを25%水ガラス薬液で固めた透水性の特に小さい固結砂J, Kでは、引張強度があるにも拘わらず割裂圧が未固結砂より小さい。そして、割裂圧は拘束圧 σ'_s の2倍に比例し、図2の縦軸の切片値は固結砂自身の引張強度 σ_t よりやや小さい。 $(2\sigma'_s + \sigma_t)$ の大きさは、孔壁の引張破壊を引き起こすのに必要な内圧なので、固結砂の場合、孔壁の引張破壊が割裂を発生させたと考えてよい。

割裂の状況は泥水を着色して求めた。透水性が特に小さい固結砂では明瞭な垂直割裂が認められる。しかし、割裂圧が P_u' と同程度となった透水性が大きい試料C, Dでは注入管周りに球形状の泥水の浸透域がみられ、割裂が発生しても特定の方向に割裂が進展できないと思われる。

3. ゲル化時間の短い薬液の注入圧と薬液の浸透メカニズム 薬液注入実験については、文献2)の三軸装置²⁾を用いて行った。実験方法等も文献2)を参照されたい。砂試料は表1に示している。薬液は25%水ガラス(硬化材:グリオキザール, リン酸)でゲル化時間 G_t は20~30秒, 注入速度 $q=2$ (L/min)である。図3には、試料C, Gの有効注入圧 P'_{rl} ²⁾と経過時間 T の関係を示す。透水性の大きい試料Cでは、注入時間がゲル化時間を超える頃より増加し始めているので、この変化は薬液のゲル化に関係している。注入圧は図1で示した割裂圧 P_{rl} ($\sigma'_s=0.5$ kgf/cm²)よりやや小さい程度となった。一方、透水性が小さい試料Gでは、注入の初期から注入圧はピーク値を示し、その後次第に減少している。これは、薬液がゲル化する以前に注入孔周りで割裂が生じたためと考えられる。そしてこのピーク値は図1に示した試料Gの割裂圧 P_{rl} ($\sigma'_s=0.5$ kgf/cm²)程度である。

固結体積は、試料C, Gでそれぞれ24, 18(L)である。全注入薬液が砂粒子間隙を100%でん充するとした場合の理論固結体積はどの砂も約28(L)となる。固結形態は、試料Cではほぼ球形状、試料Gでは鉛直板状となる。薬液の浸透状況は、注入の最終段階で着色薬液を注入して調べたが、試料Cでは着色液の浸透域がほぼ同心円状に見られ割裂が事実上発生しなかったと思われる。これは注入過程の試料全体の体積増加がほとんど生じなかった結果とも一致する。試料Gでは着色液の浸透域が割裂脈の部分に限られ、しかも注入過程の体積増加が大きいので、割裂注入が主体になっていることは明らかである。この実験は注入時間がゲル化時間よりかなり上回るが、試料Cでは、着色液が球形状に浸透しており、これは後続薬液が間隙中でゲル化した先行薬液を

穿孔しているためであろう。この穿孔的な浸透注入は、砂の透水性が大きいものほど長期間にわたって生じる。これは割裂圧が大きいため注入圧が大きくなっても割裂しにくいことが原因であろう。穿孔的注入の初期では、浸透部分の全間隙が穿孔の対象となるので後続薬液は球形状に浸透するが、経過時間とともに穿孔可能な間隙部分が限られ次第にコブ状の固結部が外周に形成される。その後、透水性が低下した薬液の固結部を鉛直二分割するように割裂が発生すると考えられる。図4には、注入圧と砂の透水性の関係を示すが、透水性が大きいほど注入圧が大きくなっている。固結体積は透水係数 k が大きいものほど大きく、固結形態もより球形状になる。

図5には、試料D、Gの注入圧 P' と注入速度 q の関係を示す。試料Dの場合、水の注入圧 P_w は、注入速度が増すにつれて大きくなっており、これは水では浸透注入が可能であることを示している⁴⁾。そして、注入圧 P' は、 P_w よりかなり大きくなっている。一方、試料Dより透水性が小さい試料Gでは、 P_w は注入速度が増すにつれて減少しているの、割裂注入が主体になっていると考えられる。この場合 P' と P_w の差がほとんどない。 P' と P_w の差の大部分は、穿孔的に浸透する際の抵抗に起因すると考えられるのでこの差が大きいほど固結形態はより大きい球形状になっていることを示すものと思われる。また、図5には、注入圧に及ぼす拘束圧の関係も示すが、拘束圧が大きいほど固結体が増加して形態はより球形状になっている。これは拘束圧が大きいほど割裂圧が大きく、注入圧は高くなりうるので穿孔的浸透が生じやすくなるためであろう。

4. まとめ ゲル化時間の短い薬液による固結形態は、先行薬液のゲル化部分を後続薬液が穿孔する浸透段階に強く依存している。砂の透水性や拘束圧が大きいと割裂圧が大きいので、注入圧が大きくなっても割裂しにくい。従って、この場合には、穿孔的な浸透注入段階が長期間継続して球形状の固結形態が得られやすい。

参考文献

- 1) 森, 田村, 栗原: 土木学会年次講演会, 1988
- 2) 森, 田村, 平野: 22回土質工学研究発表会, 1987
- 3) 森, 田村, 原口: 23回土質工学研究発表会, 1988
- 4) 森, 田村, 平野: 土木学会論文集, No. 388, 1987

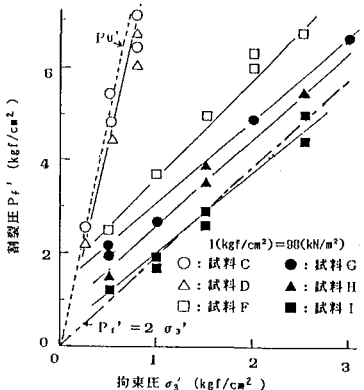


図1 未固結砂の割裂圧 P_f' と拘束圧 σ_3' の関係

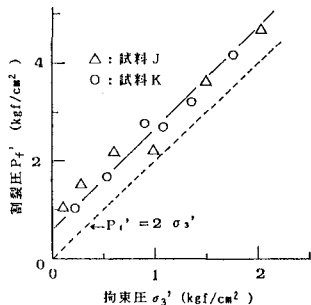


図2 固結砂の割裂圧 P_f' と拘束圧 σ_3' の関係

表1 砂の種類

試料	γ_s (gf/cm³)	ϕ (°)	k (cm/sec)
A	1.51	35	2.7×10^{-1}
B	1.52	34	1.0×10^{-1}
C	1.53	38	1.0×10^{-2}
D	1.45	37	5.0×10^{-3}
E	1.51	40	3.0×10^{-3}
F	1.43	40	1.5×10^{-3}
G	1.51	43	5.8×10^{-4}
H	1.51	38	3.2×10^{-4}
I	1.45	39	2.1×10^{-4}

γ_s : 乾燥密度, ϕ : 摩擦角 k : 透水係数

表2 固結砂の種類

試料	γ_s (gf/cm³)	σ_c (kgf/cm²)	qu (kgf/cm²)	ϕ (°)	k (cm/s)
J	1.55	0.55	2.56	35	$< 10^{-5}$
K	1.48	0.52	2.75	36	$< 10^{-5}$

σ_c : 引張り強度, qu : 一軸圧縮強度

試料 J, K は、試料 C, D をそれぞれ薬液で固結させたもの

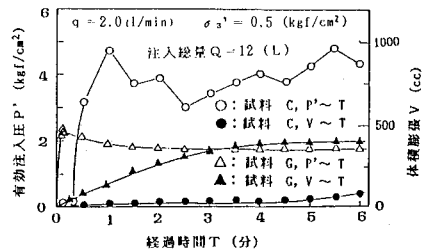


図3 試料 C, G の有効注入圧 P' 体積膨張 V と経過時間 T の関係

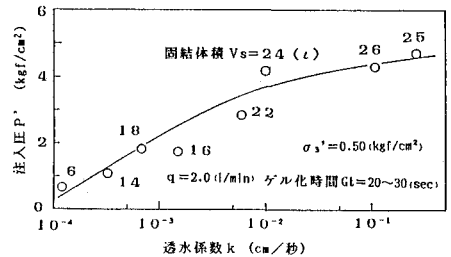


図4 注入圧 P' と砂の透水性の関係

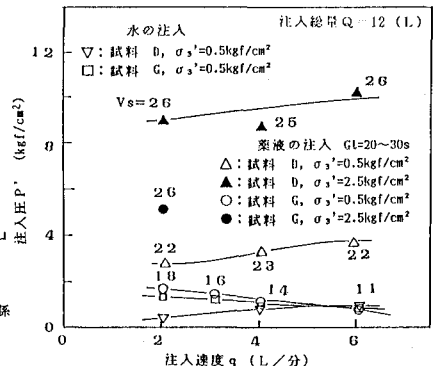


図5 試料 D, G の注入圧 P' と注入速度 q の関係