

III-317

薬液注入における限界注入速度 q_{cr} の概略値推定法について

早稲田大学理工学部 正会員 森 麟
 学生員 ○入谷 剛
 学生員 林 忠

1. 研究の目的 砂質地盤において設計範囲全体の注入による固結効果が十分上がるようにするには各注入ステップにおける注入固結体がほぼ球状、または円筒状のまとまった形状となるようにすることが望ましい。このためには注入時の割裂面積が許容割裂面積 A_s ¹⁾ 以上にならないような注入速度で注入する必要がある。このためには割裂面積が A_s になる時の注入速度に当たる限界注入速度 q_{cr} ¹⁾ 以下で注入を行わねばならない。

q_{cr} の値は注入地盤で行う標準化した水注入試験により得られる $p-q$ 曲線から求められる¹⁾ ものであるが、水注入試験を行う前の薬液注入の設計段階で概略の q_{cr} が分かれば非常に好都合である。

本報告は概略の限界注入速度 q_{cr} を推定する方法を研究したものである。この q_{cr} 推定方法は、まず数ヶ所の現場における水注入試験の $p-q$ 曲線について検討し、その曲線形状と割裂面積の発生状況の關係に基づいたものである。各注入速度 q に対する割裂面積を $p-q$ 曲線の初期直線勾配から求めた透水係数 k を用いて算定した。割裂面積は q と k が同一であっても割裂発生後の $p-q$ 曲線の形状 (II) により大きく異なる。この曲線形状は地盤の割裂抵抗の大きさに關係するが、ここでは割裂抵抗の支配要因として地盤の N 値や土被り圧 γH を考慮した。

このようなことから、透水係数 k と注入速度 q の他に地盤の割裂抵抗を考慮して割裂面積の推定法を模索した結果、割裂面積 A が許容値 A_s になる注入速度を q_{cr} の概略値として求めた。

2. 現場の水注入試験による地盤の割裂進展状況

図1は一般的な水注入による $p-q$ 曲線である。この図で初期に現れる直線勾配部においては p と q は比例關係にあり、初期の浸透面積がそのまま保持されており、割裂はまだ発生していないことを意味している。注入速度 q が大きくなるに従い、注入圧力 p が直線勾配からずれて、圧力の増分が小さくなっていく。これは割裂が発生し、割裂面が浸透面積として増加したためである。割裂面積の大きさは、1つの球状浸透面から球状浸透するMaagの理論式を実験結果に合うように補正した修正Maag式¹⁾ (1) 式から求めることができる。この式も基本的には割裂面を含む全浸透面が同じ大きさの球状浸透面積と同等の浸透能力があるとしているので、実験結果にほぼ合うように薬液の粘性比の項で修正している。

修正Maag式

$$A = \frac{\mu^{4/3} q^2}{14400 \pi k^2 p^2} \quad (1)$$

μ : 薬液の水に対する粘性比 q : 注入速度 (l/min)

k : 透水係数 (cm/sec) p : 注入圧力 (kgf/cm²)

図2は5つの異なる現場の水注入による $p-q$ 曲線について、各注入速度 q に対応する割裂面積 A を修正Maag式から求めたものである。これより、いずれの場合においても注入速度 q が大きくなるに従い、割裂面積は増加する傾向にある。また割裂面積は式(1)からも分かるように透水係数 k の値に大きく影響され、 k が小さい地盤ほど単位面積当りの浸透量が少なくなることから、発生する割裂面積が多くなる。しかし、同図に示したように同一注入速度 q により発生する割裂面積の大きさは必ずしも透水係数 k が小さいものほど大きくはなっているわけではなく、発生割裂面積には透水係数 k 以外の要因すなわち圧力 p の大きさが影響していることが式(1)より分かる。

3. 地盤の N 値、 γH の発生割裂面積への影響 前章で発生する割裂面積の大きさは透水係数 k の大小だけでは決まらないことを示した。

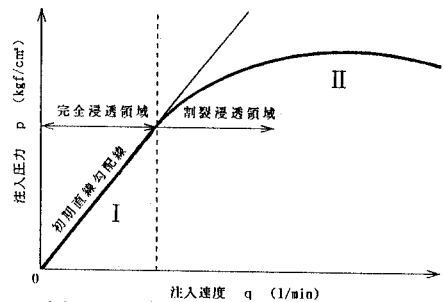


図1：水注入試験による $p-q$ 曲線

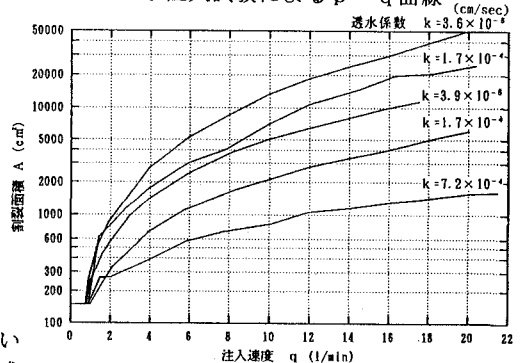


図2：現場注水試験による割裂進展状況

割裂の進展には割裂抵抗以上の注入圧力 p で割裂脈を押し広げ進展させねばならない。この割裂抵抗は地盤の N 値や地盤拘束圧 (γH にほぼ比例する) に関係し、これらが大きいほど大きくなるので、したがって注入圧力 p も大きくなり同一の透水係数 k 、注入速度 q であっても発生する割裂面積の大きさは小さく考えられる。

このことより、透水係数 k 、 N 値、 γH との積である $N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ を注入圧と透水係数に関する指標とし、図2の現場のデータを用い割裂面積 A と $N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ の関係を注入速度 q 別に図3にまとめた。

これより、 $N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ と割裂面積 A の関係は両対数座標ではほぼ直線となり、密な相関関係にあると思われる。したがって、 $N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ が分かれば大体の割裂面積の推定は可能である。

ただし、ここで用いた透水係数 k は水注入による $p-q$ 曲線の初期直線勾配線から Maag 式を使って求めたものである。このようにして求めた透水係数は現場透水試験や粒径より求めるクレーガーの透水係数値よりも1オーダー程度小さいことが多い。これは、 $p-q$ 曲線が揚水法でなく注水法により得られる圧力 p を用いている影響と考えられる。

ここで相関関係を求めるときに用いた透水係数は水注入試験によるものであるため、割裂面積の算定には注入法に相当する透水係数を用いることが望ましいことになる。

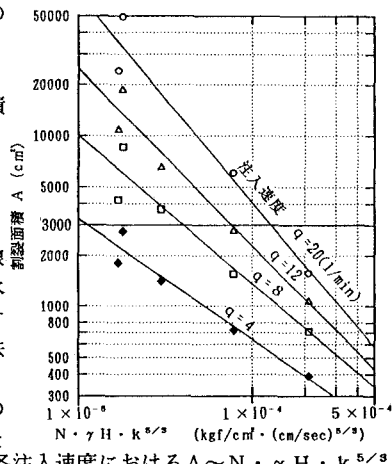


図3：各注入速度における $A \sim N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$

4. 透水係数 k 、 N 値、 γH による q_{cr} の推定法 有効なまとまった固結形状は発生する割裂面積の大きさが許容割裂面積 A_s 以下の場合に得られ、この時の注入速度が限界注入速度 q_{cr} である。このため $N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ が決まれば、図3で縦軸の A が A_s となるときの限界注入速度 q_{cr} が求められる。しかし、この図3は水注入の場合 ($\mu=1$) の $A \sim N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ の関係であるため、粘性比 μ の薬液を注入する場合にはこれを補正して用いなくてはならない。

前に行った我々の実験結果から薬液の粘性比を μ とした場合、割裂発生後の薬液の注入圧力 p_L は同一注入速度における水の注入圧力 p_w の $\mu^{1/3}$ 倍になることがわかった¹⁾。このことから式(1)の修正 Maag 式を用いると、同一注入速度であれば薬液注入により発生する割裂面積 A_L は水注入で発生する割裂面積 A_w の $\mu^{2/3}$ 倍となる。したがって、図3で許容割裂面積 A_s を 3000 (cm²) とした場合、粘性比 $\mu=2$ の薬液では $A=1890$ (cm²)、 $\mu=3$ では $A=1442$ (cm²) とし同図を用いればそれぞれ $A=3000$ (cm²) の割裂面積が生じる限界注入速度 q_{cr} が決まる。この場合の $N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ と q_{cr} の関係を図4に示す。

これより、 $N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ の値が $3.4 \sim 4.2 \times 10^{-5}$ (kgf/cm² · (cm/sec)^(5/3)) 以下の地盤では q_{cr} が 5 (l/min) 以下となるため一般的な実用注入速度の範囲では効果的な注入が期待できない。例えば、 N 値=20、 $\gamma H=1$ (kgf/cm²) のような比較的浅い位置の中位の締まりをもつ砂質土の注入では、透水係数 k が $3.5 \sim 3.9 \times 10^{-4}$ (cm/sec) 程度以下になると q_{cr} が 5 (l/min) 以下となり、薬液注入には適さない地盤と言える。

図3は5つの現場の $p-q$ 曲線のデータのみをもとにして模索したものであるので、他の地盤条件の場合に対する精度に疑問が残る。したがって、今後より多くのデータを収集、分析していくことが必要と考えている。

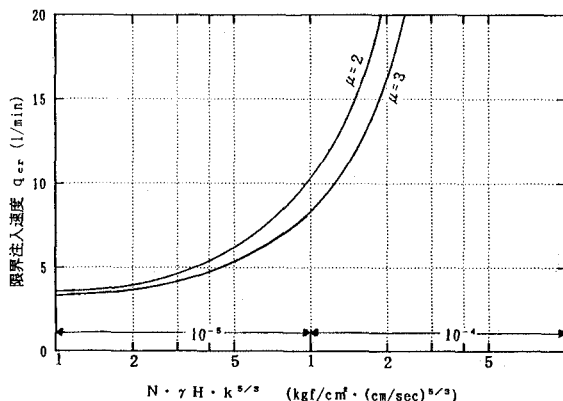


図4： $N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ と限界注入速度 q_{cr} の関係

5. まとめ

- (1) 割裂面積 A は透水係数 k 以外にも割裂抵抗を支配する N 値、 γH に影響を受け、 A と $N \cdot \gamma H \cdot k^{5/3}$ の間にはかなり密な相関関係があることが分かった。
- (2) 注入前にあらかじめ注入位置における地盤の透水係数 k (注入法に相当するもの)、 N 値、土被り圧 γH が分かれば、図4を用いて限界注入速度 q_{cr} の概略値を知ることが可能である。

〈参考文献〉

- 1) 森崎、小川雄二他：割裂浸透注入で有効な固結形状を得るための限界注入速度の予測方法について、第47回土木学会年次学術講演会概要集Ⅲ, pp. 1092~1093, 1992