

III-B 280

p-q曲線の形状の特徴と限界注入速度 q_{cr}

早稲田大学 正会員 森 麟

大木建設（株） 正会員 ○江本佑橘

（財）電力中央研究所 正会員 小峯秀雄

1. まえがき

薬液注入において効果が十分得られるようにするには、注入速度 q を限界注入速度 q_{cr} 以下に選定・注入し割裂発生面を許容値以内におさめ良好な形状の固結体を得ることが重要である。限界注入速度 q_{cr} は注入に先立ち、現場で定められた水注入試験¹⁾を行い得られたp-q曲線から求める。しかし、地盤の不均一性や割裂状況に支配されるp-q曲線から規定の方法により求めた q_{cr} は、p-q曲線の形状の特徴も踏まえて妥当か否か判断する必要がある。求めた q_{cr} は誤差が生じやすい場合があるので、大きな誤りの無いようにしなければならない²⁾。本論文は、この問題について原位置で得られたデータに基づき考察したものである。

2. 割裂するまでの注入圧とp-q曲線

本章では、既往の研究成果³⁾⁴⁾から、地盤中に割裂が発生する前の注入圧とp-q曲線の形状について述べる。透水係数の大きい地盤では割裂が発生せず、注入速度が大きくなると注入孔周辺の浸透面地盤が押し上げられたり、管状のへこみや窄孔が生じる。この場合、注入圧 p は注入速度 q の増加に対し、緩い曲線を描いて増加していく。地盤の透水係数 k がある程度小さくなると、その地盤に応じた圧力値に注入圧が達すると地盤中に割裂が発生する。割裂発生圧 p_1 は、筆者らの研究によると、砂質地盤で徐々に q を増加させる場合は式(1)で表せる。

$$p_1 = \sigma'_3 + R \cdot \dots \cdot (1)$$

ここに、 σ'_3 ：注入地点の有効拘束圧、 R ：割裂状態になるまで亀裂が進展する抵抗
一方、粘性土地盤の p_1 は式(2)で表せる。

$$p_1 = \sigma_3 + \alpha q_{u1} \cdot \dots \cdot (2)$$

ここに、 σ_3 ：注入地点の拘束圧、 q_{u1} ：一軸圧縮強度、 α ：0.2～1.0の範囲の値

割裂発生や浸透面の変化が生じるまでは、いかなる地盤もp-q関係は直線となる。その勾配 i_0 は地盤の透水係数と注入孔の浸透面積で決定され、 q_{cr} を決める上で最も重要なパラメータである。

3. 割裂発生後の注入圧pとp-q曲線の形状

本章では、割裂発生後の注入圧とp-q曲線の形状について考察する。

1)砂質地盤の場合：地盤中に割裂が発生した後、その割裂をさらに進展させるには割裂先端の地盤を押し上げるための圧力が必要であり、その値は σ'_3 相当と考えられる。ところが、砂質地盤の場合は割裂面からの水の浸透に起因する圧力損失 R_g があるので、注入圧 p_{1a} は次式のようになる。

$$p_{1a} = \sigma'_3 + R_g \cdot \dots \cdot (3)$$

R_g は割裂長が長いほど、また割裂幅が狭いほど、また割裂中の流速が早いほど大きくなると思われる。注入速度 q を大きくすると、それに伴い注入圧は上昇するので、割裂先端の圧力が σ'_3 以上になり割裂はさらに進展する。したがって、割裂長、流速とも大きくなるため、 R_g は増加し先端圧力が σ'_3 まで低下した時点で割裂進展は止まる。割裂は一般に円板状に進展する傾向があるので、割裂面積は注入速度 q の2乗程度に比例して急激に大きくなる¹⁾。この場合、割裂面は浸透面になるので、 q の増分に対する注入圧 p の増加分は R_g の増加を加えても次第に小さくなる。したがって、p-q曲線は水平勾配に近づく（図1参照）。割裂後のp-q曲線の p の値は式(3)の p_{1a} に等しいことになるので、 q の増加により上昇した圧力分は R_g の増加分に相当する。すなわち、 q と割裂面積の増加が R_g を大きくしていることになる。割裂後のp-q曲線はなめらかな形状のものだけではなく、凹凸やピークの見られるものもある。これは、地盤の不均一性が原因していると考えられ、ピークが見られる場合は、割裂が硬い部分から軟らかい領域に延びたような状態であり σ'_3 が小さくなったことに原因しているものと思われる。

2)粘性土地盤（難透水性地盤）の場合：この場合、割裂面はほとんど不透水であるので、注入圧 p がそのまま割裂先端部に伝達される。先端部を押し上げて割裂を進展させるには地盤の拘束圧 σ_3 相当の水圧が先端部に作用すれば良い。割裂が進展すると割裂中に水が流れ込み圧力損失が生じるため、先端圧力が σ_3 以下に低下し割裂進展が止まる。その後、再び割裂先端圧力が上昇し σ_3 になると割裂が進行する。粘性土地盤の場合、注入圧 $p=\sigma_3$ の状態では割裂

は断続的に進展する。このため p_{1a} は次のようになる。

$$p_{1a} = \sigma_3 \cdot \dots \cdot (4)$$

したがって、割裂発生後は q を増加させても注入圧 p は σ_3 と等しく、 p - q 曲線は水平な直線状になる（図1参照）。 σ_3 の値は、軟弱粘土では土被り圧に近いが、過圧密粘土では土被り圧よりかなり大きい場合がある。また、上式の p_{1a} は式(2)の p_1 の値より小さいので、割裂後の注入圧は割裂時より αq_0 程度さがることになる。 q_0 が大きい場合には、この下がり分が目立つ p - q 曲線となる。

4. p - q 曲線形状の特徴としての p_{10}/p_2 と限界注入速度 q_{cr}

限界注入速度 q_{cr} を求めるのに重要な p - q 曲線の初期勾配 i_0 を正確に求めることが困難な場合は、適切な q_{cr} を選定できない。このような場合、 p - q 曲線の形状の特徴から q_{cr} が適切かどうかチェックする必要がある。そのためには、 p - q 曲線の形状を指標化する必要がある。本章では、2,3章で述べたような p - q 曲線の形状の指標化を試みる。

実測事例によると割裂が発生するときの q は3リットル/分以下が多い。また3章では、割裂後の p - q 曲線は次第に水平になる傾向があり、不透水性地盤では水平な直線となることを述べた。これらのことを考慮して、 $q=2$ リットル/分の注入圧 p_2 と $q=10$ リットル/分の注入圧 p_{10} の圧力比 p_{10}/p_2 を p - q 曲線の特徴を示す指標とした。透水性が良く割裂しにくい地盤の場合、 p - q 関係は初期直線部の関係とほぼ等しいので、 $p_{10}/p_2 \approx 4 \sim 5$ であり q_{cr} は極めて大きい。不透水性地盤の場合は極めて小さい注入速度で割裂が発生し、 p - q 曲線は水平状になるので $p_{10}/p_2 \approx 1$ となり q_{cr} はゼロに近い。このことから p_{10}/p_2 が大きいほど q_{cr} は大きくなると推察できる。なめらかな曲線形状を有し、測定値の信頼性が高い p - q 曲線10例について求めた q_{cr} の値と p_{10}/p_2 を図2に●印でプロットした。両者の間にはおおよそ式(5)の関係がある。

$$q_{cr} = 10 \left(\frac{p_{10}}{p_2} \right) - 10 \dots \dots (5)$$

その他の実測例を○印でプロットしてみたが、多少バラツキが大きくなる程度であった。このことから式(5)は求めた q_{cr} の妥当性をチェックするのに十分役立つと言える。この p_{10}/p_2 の他に、他の q に対応する p を用いた圧力比について q_{cr} との相関性を調べたが、 p_{10}/p_2 が最も高い相関性を示し、 p - q 曲線形状の特徴の指標として最も適していると思われる。

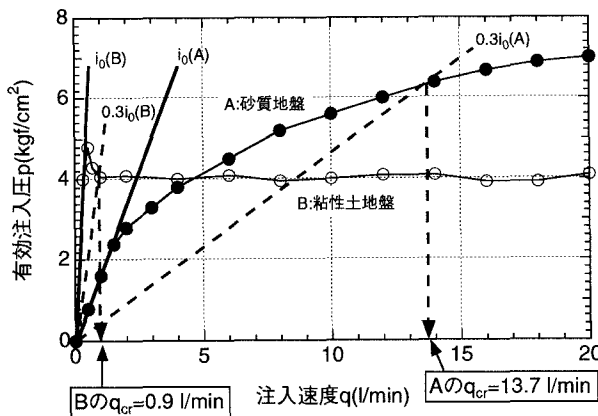


図1 砂質地盤と粘性土地盤の p - q 曲線の一例

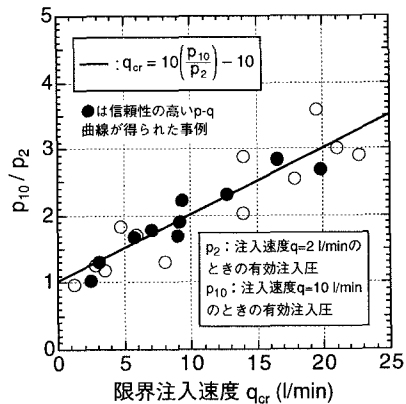


図2 p_{10}/p_2 と限界注入速度の関係

参考文献

- 1) 森崎他：薬液注入において浸透固結形状を考慮した限界注入速度の決定方法，土質工学会論文報告集，Vol. 33, No. 3, pp.159-169, 1993.
- 2) 森崎他：限界注入速度を決定する p - q 曲線の修正の必要とその方法，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第3部(B)，pp.1444-1445, 1995.
- 3) 森崎他：砂質地盤における割裂発生機構，土木学会論文集，第388号/III-8, pp.61-70, 1987.
- 4) 森崎他：泥水圧の上昇速度が粘性土切羽地盤の割裂圧に及ぼす影響について，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第3部，pp.106-107, 1993.