

Ⅲ-722

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

早稲田大学 正会員 森 麟

大木建設(株) 正会員 ○江本祐橘

(財)電力中央研究所 正会員 小峯秀雄

早稲田大学 学生員 大屋 顕

1. まえがき

効果的な薬液注入を行うためには、注入時に大きな割裂を地盤中に発生させずに良好な形状の固結体が得られる注入速度を選定する必要がある。この注入速度は限界注入速度 q_{cr} 以下であり、この q_{cr} の値は、水注入試験により測定した注入速度 q とそれに対応する注入圧 P の関係、すなわちP-q曲線に基づいて決定される⁽¹⁾⁽²⁾。そのためには、正確にP-q曲線を求めることが重要であるが、注入圧等の決め方を無造作に行うと不合理な形状のP-q曲線が得られることがある。このようなP-q曲線に基づき求めた限界注入速度 q_{cr} もかなりの誤差を有することになる。本研究では、不合理な形状のP-q曲線を修正する方法を提案することを目的としている。

2. P-q曲線の修正の必要性とその方法

(1)初期直線部の修正について

一般にP-q曲線の初期直線部では、図-1に示すように P と q が原点を通る直線上にある。これは、ダルシーの法則に従い、かつ水が浸透する面積が一定であることを意味し、この直線部においては地盤中に割裂が生じていないことを示すものである。注入速度を増加させていくと、地盤中に割裂が発生することにより浸透面積が増加するので、P-q曲線の接線勾配は初期直線部の勾配よりも低下する。注入速度をさらに増加すると割裂がますます増えるので、曲線の接線勾配は次第に低下し図-1のような曲線形状を描く。限界注入速度 q_{cr} は、初期直線勾配 i_0 の0.3倍の勾配を有し原点を通る直線とP-q曲線の交点に相当する注入速度として求められる⁽¹⁾⁽²⁾。したがって、限界注入速度 q_{cr} を決定するためには初期直線勾配 i_0 を正確に求める必要がある。しかし、実際にP-q曲線の初期直線勾配を決定する場合、初期直線部における測定点が少ないことや測定値のバラツキなどにより正確に求めることが困難な場合が少なくない。先述したように、割裂が発生する時点でP-q曲線の接線勾配は初期直線部の勾配よりも低下し始めると考えられる。すなわち、初期直線部における注入圧の最大値 P_1 は割裂圧と考えられる。したがって、 P_1 が地盤の割裂圧以下である場合には、初期直線部のとり方に問題があり、このような場合には割裂圧を考慮して初期直線勾配を決定するべきと考えられる。

砂質地盤の場合、割裂圧 P_1 は第一著者の研究によると次のようになる⁽³⁾。

$$P_1 = m\sigma'_3 + \sigma'_t + R \quad (1)$$

ここに、 m は1~2の定数、 σ'_3 は有効水平土圧、 σ'_t は土の引張り強度、 R は割裂進展抵抗である。砂質地盤の場合、 m は1であり、 σ'_t はゼロと考えて良い。 R は定性的には地盤の透水性が高いほど大きくなる。したがって、

$$P_1 > \sigma'_3 \quad (2)$$

の関係が成り立つ。水注入試験で割裂の発生する箇所は試験孔先端部の素堀孔である。したがって、 σ'_3 は素堀孔の側面に割裂が発生するときの土圧に等しいと考えられる。割裂発生時は素堀孔が注水圧で押し上げられ、素堀孔周辺の地盤は受動状態になっていると思われる。このときの土圧係数 K は静止土圧係数 K_0 より大きくなる。砂質地盤に適用できるJakyの式で一般に測定される ϕ の値に対しては $K_0 \approx 0.5$ である⁽⁴⁾。したがって、 K の値は K_0 よりやや大きくなることを考慮して0.7程度と仮定すると、 σ'_3 は次式のようにになる。

$$\sigma'_3 = 0.7\gamma H \quad (3)$$

γH は素堀孔位置の有効土被り圧である。式(2)から、初期直線部における注入圧の最大値 P_1 は、式(3)の σ'_3 以上でなければならない。直線部の最上点の圧力について式(2)が成立しない場合には、注入圧が σ'_3 と等しい点と原点を結ぶ直線を修正初期直線部とした方が妥当であり、その勾配 i'_0 を用いて限界注入速度の修正値 q'_{cr} を求める方が良い。

(2) P-t曲線における注入圧 P の修正について

注入時には各注入速度毎に経過時間と注入圧 P との関係が記録される。これはP-tチャートと呼ばれる。一般にP-t

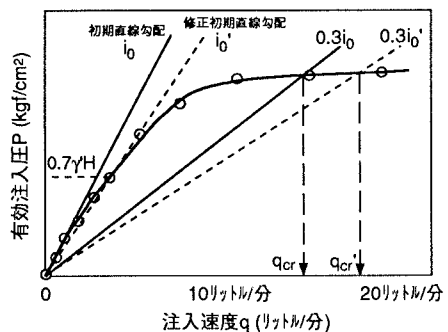


図-1 P-q曲線

チャートの形状は大別すると図-2に示す水平型、下降型、上昇型の3種類になる。一般に、注入圧の変化が小さい水平型が多いが、下降型、上昇型のような形状になることもある。水平型の場合、注入している間、浸透面積は一定に保たれていると考えられる。また、下降型は注入により地盤中に割裂が発生・進展しているため浸透面積が次第に増加していることを示すと推定される。一方、上昇型の場合は、土層の構成上の原因で注入により周辺地盤の間隙水圧が徐々に上昇しているものと考えられる。このため注水するほど周辺部の間隙水圧が上昇し、P-q曲線の注入速度減少過程（20リットル/分→0リットル/分）が増加過程（0リットル/分→20リットル/分）よりも上側になる場合がある（図-3参照）。このような場合、注入速度に直接寄与する圧力を求めP-q曲線を修正する必要がある。そこで、上昇型の場合には、注入圧として測定された値から注入中の圧力増加分を差し引いた値を有効注入圧としてP-q曲線を修正する方法を提案する（図-4参照）。

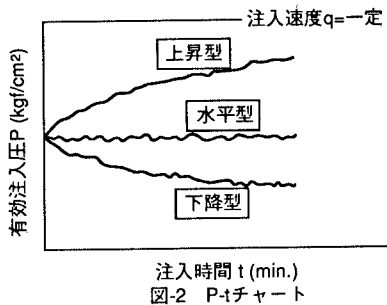


図-2 P-tチャート

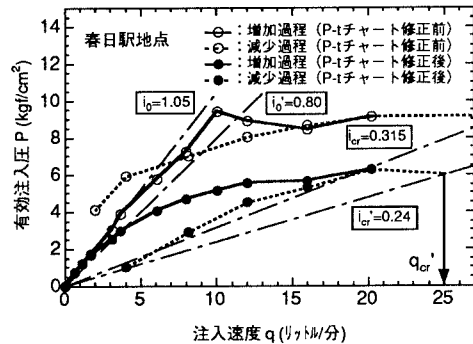


図-3 提案した方法による修正の試み（春日駅地点）

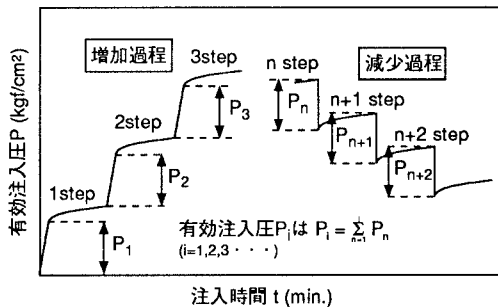


図-4 上昇型P-tチャートの修正方法

表-1 春日駅地点における P_1 と σ'_3 の比較

素掘孔位置 深度 (GL.-m)	地下水位 (GL.-m)	σ'_3 (kgf/cm²) (=0.7×有効土 被り圧)	P_1 (kgf/cm²)	P_1/σ'_3
25.0	21.2	2.97	1.6	0.5

・有効土被り圧は、地下水位以上の土の単位体積重量を1.8g/cm³、地下水位以下の土の水中単位体積重量を0.8g/cm³として算出した。

3. 修正の試み

提案した修正方法を、1例として文京区春日駅地点の水注入試験結果に適用した。この地点で実測したP-tチャートは上昇型であり、P-q曲線も減少過程の方が増加過程の上側にあったが、2(2)で述べた方法に適用したところ、図-3のように一般的な減少過程に修正された。また、初期直線部における注入圧の最大値と式(3)の σ'_3 の比、 P_1/σ'_3 は表-1に示すように0.5であり、2(1)で述べた方法により初期直線部の修正を行った。その結果、修正前のP-q曲線では限界注入速度を求めるのが困難であったが、修正後は $q_{cr}'=25$ リットル/分が求められた。今後は、提案した修正方法の妥当性をより詳細に検討していきたい。

参考文献

- (1)森崎, 田村昌仁, 小峯秀雄, 小川雄二(1993): 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, pp159-169
- (2)森崎, 田村昌仁, 森山健吉, 上澤充, 小峯秀雄(1994): 薬液注入による固結形状の予測に関する現場実験, 土質工学会論文報告集, Vol.34, No.2, pp131-139
- (3)森崎, 田村昌仁, 千柄植(1987): 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
- (4)最上武雄編著(1982): 土質力学, 技報堂出版