

水および緩結性薬液を浸透注入した時の $p \sim t$ 曲線

清水建設(株)技術研究所 正會員 宮本武司

1. はじめに 注入圧力は注入工事の重要な管理項目とされ、施工中には注入圧力 p と注入時間 t の関係（いわゆる $p \sim t$ 曲線）が必ず測定されている。しかし、この $p \sim t$ 曲線が注入状態や注入効果の推定に利用される例はほとんどない。その主な理由の一つに、砂質土で理想的な注入状態とされる浸透注入についてさえ、その $p \sim t$ 曲線の形状がどのようなものか、未だよく知られていないことがあげられる。

今回、直径1.5m、高さ1mの大型土槽に二重管ダブルパッカー方式の注入管を埋設し、水や緩結性薬液を浸透注入した時の $p \sim t$ 曲線を、注入管口元や注入管近傍の砂中で測定した。本文では、これらの測定結果から、測定位置による $p \sim t$ 曲線の相違や、測定値と浸透理論による計算値との対応性等について報告する。

2. 試験装置と試験方法 試験装置の概要を図-1に示す。試験土槽の寸法は直径150cm、高さ100cmで、その内部には直径135cm、高さ102cmの金網が設けてある。供試体は、空中落下法により8号珪砂を一定高さから撒き出す方法により、間隙比が0.8、透水係数が 5×10^{-3} cm/sのものを作成した。

薬液注入に先立ち、水の注入速度を段階的に増加・減少させて $p \sim q$ 関係を測定し¹⁾、適正な浸透注入速度決定の参考にした。また、注入管と注入ポンプの間（以下、注入管口元と呼ぶ）では正確な注入圧力は測定し難いので、注入バルブすぐ外側の砂中にも圧力計を埋設した（図-1 参照）。
注入した薬液のゲルタイムは約1時間である。



3. p ~ q 曲線に基づく注入速度の設定 図 - 2 に、水の注入試験から求めた p ~ q 曲線¹⁾を示す。この図のように注入速度 q の増加過程では、注入管口元と砂中のいずれも、q の増加過程初期と q が毎分 14 ℓ を越える付近で、p ~ q 曲線の勾配に変化が生じている。増加過程初期の p ~ q 曲線の勾配変化は、注入バルブごく近傍の状態変化を反映したもので、あまり重要な意味はないと考えられる。しかし、毎分 14 ℓ を越える付近の勾配低下は、割裂注入発生を示す可能性もあり、今回の試験では、薬液を浸透注入させるための注入速度として、毎分 12 ℓ を採用した。

4. 水注入時の $p \sim t$ 曲線 図-3に、葉液の送液開始後注入バルブに葉液が到達するまでの水注入期間中の $p \sim t$ 、 $q \sim t$ 曲線を示す。ここでは、注入管口元の測定値に含まれる損失圧力¹⁾(図-4参照)の値は補正していない。この図によれば、 q の増加に伴い p が増加するが、約0.6分後に q が毎分12ℓに達すると p はほぼ一定になる。

この時の注入管口元と砂中の p は、それぞれ 130kPa 、 220kPa であるが、注入管埋設前に測定した $q=12\text{ l/min}$ の損失圧力値 (92kPa 、図-4 参照) を補正すれば、両者の p は一致する。

図-5に、 p と q の比(p/q)を縦軸にとって描いた図を示す。この図によれば、砂中では注入開始0.05分後(q が3ℓ/min)以降は p/q が一定値を示している。一方、注入管口元では p/q が一定になるのは0.15分後以降(q が毎分7.5ℓ以上)で、砂中と注入管口元の $p \sim t$ 曲線には違いがあるといえる。

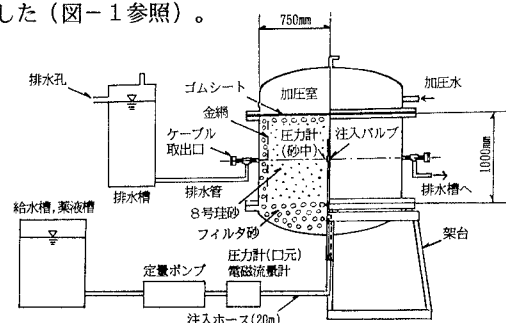


図-1 試験装置の概要

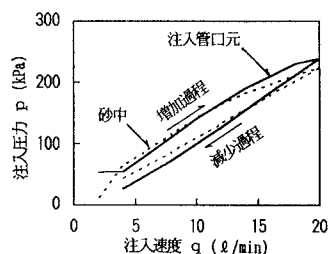


図-2 水注入試験による $p \sim q$ 曲線

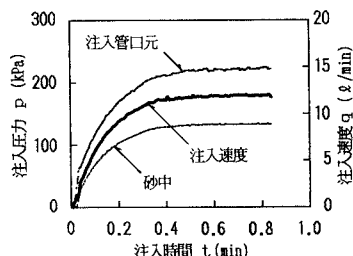


図-3 注水時の $p \sim t, q \sim t$ 曲線

5. 薬液注入時の $p \sim t$ 曲線 図-6に、毎分12ℓの速度で薬液を注入した時の $p \sim t$ 、 $q \sim t$ 曲線を示す。なお、注入管口元の値としては、前述の損失圧力値を補正した値を示す。

この図のように、薬液注入時には水注入時と異なり、 q が毎分12ℓと一定であるにも関わらず、 p は時間の経過に伴い上昇傾向にある。この薬液浸透注入時の $p \sim t$ 曲線には、以下のような特徴が認められる。

- ①薬液注入開始直後に p は急激に上昇するが、その上昇量は、注入管口元と砂中のどちらもほぼ等しく、50kPa程度である。
- ②砂中では、急激な圧力上昇後、約5分後まで緩やかに p が上昇してピークに達し、以後、逆にやや p が低下する。
- ③注入管口元では、注入終了まで一貫して砂中より早い速度で p が上昇するため、時間の経過に伴い砂中の測定値との差は拡大する。

このように、注入開始直後を除き、注入管口元と砂中の測定値は顕著な相違を生じている。以下、測定値と浸透理論による計算値を比較する。

6. $p \sim t$ 曲線の測定値と計算値の比較 図-7中の□印は、今回の供試体に対して、薬液が球状に浸透する時の p と薬液浸透距離の関係を、Maagの式に基づく方法²⁾により算定し、 $p \sim t$ 曲線を求めたものである。この図から計算値の特徴や測定値との関係につき、以下のことがいえる。

- ① p の計算値は注入開始後約1分間で上昇し、以後ほとんど上昇しない。
- ②注入開始1～4分後頃までは、 p の計算値の方が測定値より高い。
- ③注入開始4分以降は、 p の計算値と砂中の測定値とはよく一致する。
- ④注入管口元の測定値は、注入開始1分以降は計算値を超え過大となる。

以上のように、 $p \sim t$ 曲線の計算値と砂中の測定値とは、 $p \sim t$ 曲線後半部分では対応するものの、前半部分では対応するとはいえない。一方、注入管口元の測定値と計算値の間には、対応性は全くみられない。

注入固体体の観察結果では、固化形状はほぼ球形で割裂脈も観察できず、今回、浸透注入時の $p \sim t$ 曲線が得られたと判断される。上記のような計算値と測定値間の相違の原因は、現時点ではまだ不明であるが、供試体の異方性や、注入中の薬液の拡散・希釈、注入管や注入バルブの閉塞、等に起因するものと想定される。

7. おわりに 水や薬液を浸透注入させた時の $p \sim t$ 曲線を、注入管口元と注入管近傍の砂中で測定し、浸透理論による計算結果とも比較検討した結果、以下の知見を得た。

- ①薬液注入時には、注入管口元と砂中で測定した $p \sim t$ 曲線に、顕著な差異を生じる。
- ②計算値は、砂中の測定値とはある程度対応するが、注入管口元の測定値とは全く対応しない。

今回得られた知見は、 $p \sim t$ 曲線から薬液が浸透注入状態にあることを判定するためには、従来のような注入管口元の圧力ではなく、砂中の注入圧力を正確に測定する必要があることを示している。また、単に $p \sim t$ 曲線の形状を検討するだけでなく、 p の値にも注目することが必要で、そのためには、薬液注入前に水の注入試験を行って、 $p \sim q$ 曲線を正確に測定することなども不可欠であることを示している。

参考文献

- 1) 宮本武司：水注入試験における $p \sim q$ 曲線と測定位置によるその相違、第29回土質工学研究発表会（投稿中）
- 2) 宮本武司：薬液の浸透に伴う注入圧力変化と注入圧力～注入時間関係について、薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム発表論文集、pp.161-168、1993

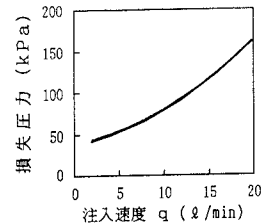


図-4 注入装置の損失圧力

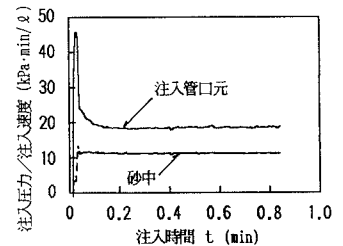


図-5 注水時の p/q の経時変化

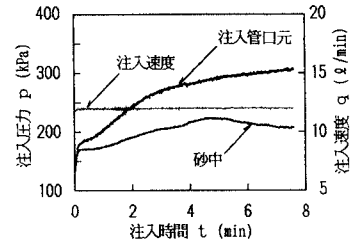


図-6 薬液注入時の $p \sim t$ 、 $q \sim t$ 曲線

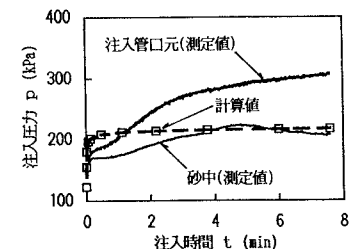


図-7 $p \sim t$ 曲線の測定値と計算値の比較