

薬液の限界注入速度決定の問題点と その改善に関する研究

福井義弘¹・森 麟²・赤木寛一³

¹正会員 工修 西日本旅客鉄道(株) 福山施設管理センター (〒720-0066 広島県福山市三之丸町30-2)

²名誉会員 工博 早稲田大学名誉教授 理工学総合研究センター (〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1)

³正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1)

薬液注入において効果が十分に得られるようにするには、注入速度を限界注入速度 q_c 以下で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。 q_c は現場で定められた水注入試験を行い得られた注入圧 p と注入速度 q の関係(以下「 $p \sim q$ 曲線」という)から求められる。本論文は限界注入速度の決定に係わる問題点とそれに関する修正法を述べ、 $p \sim q$ 曲線の形状を支配する地盤の割裂特性について考察するとともに、注入速度が 10 l / 分 、 2 l / 分 のときの注入圧の比である p_{10} / p_2 値が限界注入速度に密接な関係にあり、妥当な限界注入速度の決定を容易にすることについて述べたものである。

Key Words : critical injection rate, chemical grouting, fracturing pressure, sandy ground, injection test

1. まえがき

薬液注入は止水や強度増加を主たる目的とした地盤改良工法の一つであり、開削工事やシールドトンネルなど地下水面下の地盤の掘削を実施する場合に広く用いられている。この工法は、簡便で迅速な処理が可能で、狭隘な空間においても施工できる特徴がある。これは他の工法では代替できない場合が多いので、今後ともその存在意義は大きい。しかし、重要な注入効果における確実性の面では、未だに十分な信頼性を確保できていない。このことが薬液注入工法の最大の問題点であり、これを解決するには薬液の浸透状態を支配する主要因とその対応手段を見出す基礎研究が必要不可欠である。

薬液注入は砂質系地盤を主対象とするので、この場合その効果を確実にするには、設計段階の想定のように、注入孔の各ステップにおける薬液の浸透固結体が球状または円筒状で良好なまとまった形状になり、隣接ステップの固結体と漏れなく連結一体化させることが必要である。これが薬液注入の基本思想と言える。著者らはこの基本思想の立場から、薬液の浸透固結形状に注目し、固結形態に最も影響を及ぼす因子は、注入の際に地盤中に伸展する割裂面の大きさであることを確認した。これに基づき良好にまとまった固結形状にす

るための薬液の浸透面となる割裂面積の許容限界を定量的に明らかにした¹⁾。ここで、対象とする薬液のゲル化時間は注入中にゲル化して浸透性の低下しないもの、すなわち緩結性薬液の使用を原則としている。発生する割裂面積の大きさは、注入地点の地盤状態と注入速度によって決まり、許容割裂面積に達する注入速度を限界注入速度とした。この限界注入速度の決定理論と実際地盤における試験方法については既に報告している^{2), 3)}。薬液注入においては注入地盤の限界注入速度以下の注入速度を用いることが必要条件であり、それによって良好にまとまった固結形状になり得る。これについては実地盤で薬液注入試験を実施し、検証も行っている⁴⁾。

その後、限界注入速度測定試験は、徐々に普及しつつあり、実施した多数の実地盤における試験結果から限界注入速度を求める段階で次のような問題が生じてきた。限界注入速度の決定には段階的に増加させていく注入速度 q とそれに応じた注入圧 p との関係にあたる $p \sim q$ 曲線が基本となるが、この $p \sim q$ 曲線は注入による地盤の割裂状況を示すので、正確なものでなければならぬ。しかし、 $p \sim q$ 曲線のプロットの値や曲線の形状を地盤の割裂圧やその他の条件からみて修正しなければならぬ場合のあることがわかり、その修正法を示した。それゆえ限界注入速度の正しい決定

には、 $p \sim q$ 曲線修正の有無を判別する必要もあり、実務上熟練を要する面が生じた。したがって現地試験で求めた限界注入速度の値は、その妥当性をチェックする必要が生じ、この方法として地盤の割裂特性を表している $p \sim q$ 曲線上の q が 2 l/分 と 10 l/分 の注入圧にあたる p_2 と p_{10} の比である p_{10}/p_2 値と限界注入速度の相関性がよいことを見出し、関係式を提示した。

このほかに注入工事の施工面積や延長が大きい場合は平面的な位置のずれにより地盤に変化が起こりうるので、限界注入試験箇所を増加させる必要がある。この場合、正式な試験のほかに実際の注入孔などを利用した p_{10}/p_2 値のみの測定による簡便な限界注入速度の測定法が開発されれば効果的であるので、その可能性について実際の注入現場で検証を試み、その問題点などを明らかにした。

本論文は、限界注入速度の決定に係わる問題点とそれに関する修正法を述べ、 $p \sim q$ 曲線の形状を支配する地盤の割裂特性について考察し、 p_{10}/p_2 値が限界注入速度に密接な関係にあることを示し、妥当な限界注入速度の決定法について述べたものである。なお、限界注入速度は以下、単に q_{cr} と記すことにする。

2. q_{cr} の決定を支配する $p \sim q$ 曲線の問題点

(1) 注入固結形状と q_{cr}

薬液注入ではほとんどの注入ステップにおいて、薬液を球形または円筒形に近い良好なまとまった形状に浸透固結させることが注入ゾーン全体を隙間なく固結一体化させるための必要条件である。各ステップの注入固結体の形状のうち、板状の扁平形やその他不規則な崩れた形状になるものが多いと注入ゾーンの固結部に隙間が生じ、注入効果は上がらず、トラブルにつながる原因となる。1つの注入ステップの周辺地盤がほぼ均一な場合で、注入固結体の形状が良好にまとまった形状にならずに崩れた固結形状になる原因は、用いた注入速度 q がその地盤に対して過大で地盤に発生する割裂面積が許容値を超過する場合である。割裂面が1枚で大きいときは扁平形になり、割裂面が複数枚で大きいと不規則に崩れた固結形状になる⁴⁾。また、ほぼ良好なまとまった形状になるものは割裂面積(割裂クラックの両面の合計面積)が 3000 cm^2 程度以下であることについては注入実験によ

り既に明らかにしている¹⁾。さらに、注入実験は注入全量 50 l であるが、実際の注入では1ステップ約 100 l で固結体積が大きくなるので、割裂面積も 5000 cm^2 程度まで許容される可能性もある¹⁾。

注入速度 q が過大な場合は発生する割裂面積が大きくなるので固結形状はまとまらず、崩れた形状になってしまう。したがって、薬液注入は必要な薬液量を q_{cr} 以下で実施し、良好な形状の固結体にすることで注入効果を確実に向上させることが可能となる。 q_{cr} は土層が変わると異なった値となるので土層別に q_{cr} を測定する必要がある。

実際の注入工事で使用する注入速度 q は特殊な注入工法を除き実用上 5 l/分 以上であることが必要なので²⁾、 q_{cr} が 5 l/分 以下、特に $1 \sim 2 \text{ l/分}$ 以下の場合には一般的な注入速度で薬液注入を行っても割裂が大きくなり、隙間の少ない一体化した注入ゾーンの形成はでき難い。したがって、薬液注入には適さない地盤であることが q_{cr} 値から事前に判定できる。粘性土などの透水性の極めて小さい地盤では q_{cr} はゼロに近いので薬液の浸透は僅かではほとんどは割裂の伸展に使われ脈状体を形成する。また、礫質地盤の q_{cr} は非常に大きいため、注入速度は最大限まで自由に選べるが、浸透薬液が地下水流で移動したり、液の比重の関係で沈降するので、瞬結性薬液やセメント・ベントナイトでの先行注入を行う必要がある。

(2) $p \sim q$ 曲線決定の際に考慮すべき問題点と修正法

a) $p \sim q$ 曲線と限界注入速度 q_{cr} 決定の手順

q_{cr} を求めるための試験方法である現場水注入試験については、既に報告されているので²⁾、ここではその要点について述べる。現場水注入試験は、図-1に示すように先端の直径 4.1 cm 、深さ 10 cm の素掘り孔部分から水を注入するものである。この方法は管内抵抗が正確に把握でき、注入する素掘り孔での有効注入圧が正しく測定できる。注入速度 q は表-1のように段階的に増加させ、それぞれの注入圧 P を測定し、管内抵抗と地下水位による補正を行った有効注入圧 p を算定して $p \sim q$ 曲線の作図を行う。

まず、図-2に $p \sim q$ 曲線の作図例を示す。一般に $p \sim q$ 曲線は注入速度の増加過程のものを指すが、減少過程のものは増加過程で地盤の割裂が生じ、浸透面積が増加しているもので、 p は小さくなり曲線は必ず増加過程の下側になる。この増加過程と減少過程の $p \sim q$ 曲線の差異は割裂状況を推定する判断材料の一つとなる。

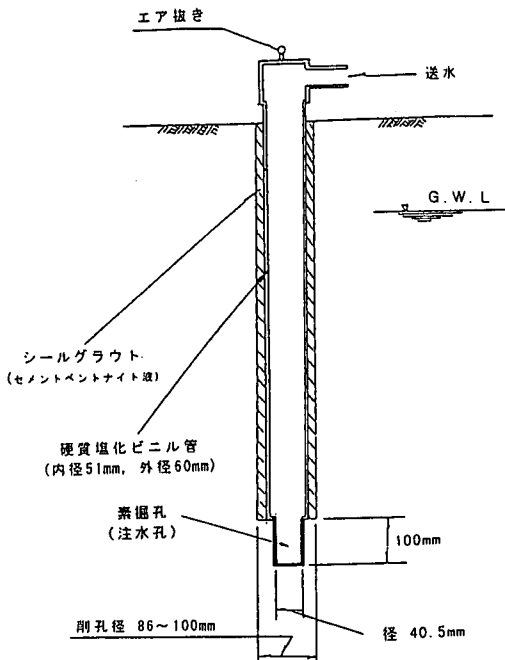


図-1 現場水注入試験孔形状

q の増加過程初期の割裂が発生するまでの範囲では、浸透面積は素掘り孔の表面積 142cm^2 と一定であるので、 $p \sim q$ 曲線は原点を通る直線となり、その後は q の増加とともに割裂面積が増加し割裂面からも浸透する。したがって浸透面積が初期の 142cm^2 より増加していくので注入圧 p は q に比例して上がらず、勾配が次第に減少する曲線となる。

q_{cr} は、2. (1) で述べたように割裂面積の許容値 $3000 \sim 5000\text{cm}^2$ に達する注入速度であるが、これを求める手順を図-3を用いて以下に示す。

手順1: $p \sim q$ 曲線の初期直線部を決め、その勾配 i_o の値を求める。初期直線部は割裂前の浸透面積 142cm^2 のままで水を注入したときの $p \sim q$ 関係に相当する。

手順2: 限界勾配 i_{cr} をもつ直線を原点から引く。この直線は割裂により生じた浸透面が許容割裂面積に維持された状態で、水ではなく粘性が水の2~3倍の薬液を注入したときの $p \sim q$ 関係の直線に相当する。

許容割裂面積は $3000 \sim 5000\text{cm}^2$ 、薬液の粘性が $0.002 \sim 0.003\text{Pa}$ 秒であるのでこれらの条件に合う i_{cr} は次のようになる¹⁾。

$$i_{cr} = \lambda \cdot i_o = (0.21 \sim 0.44) i_o \quad (1)$$

ここで、 λ は限界比である。

表-1 現場水注入試験における注入速度段階

過程	増加過程										減少過程						
注入速度 q [ℓ/分]	0.5	1	1.5	2	3	4	6	8	10	12	16	20	16	12	8	4	2
測定時間	各段階 5 分間																

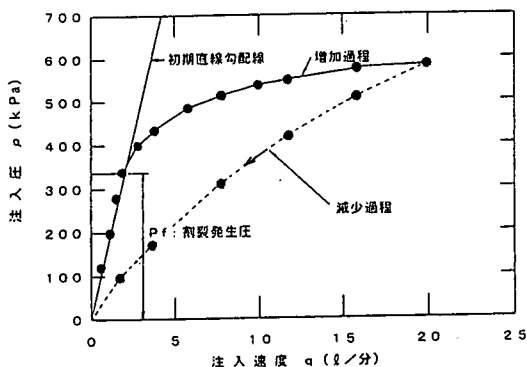


図-2 $p \sim q$ 曲線の作図例

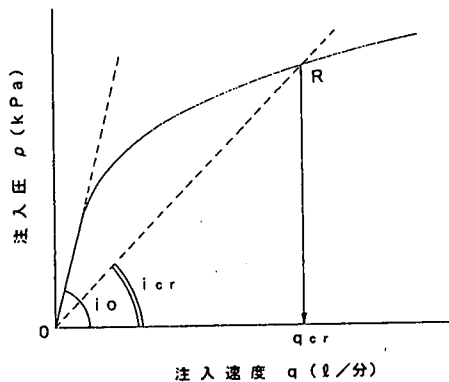


図-3 $p \sim q$ 曲線からの q_{cr} の決定方法

上式の λ の中央値を0.3として、 i_{cr} は次の値を用いている。

$$i_{cr} = 0.3 i_o \quad (2)$$

手順3: $p \sim q$ 曲線と限界勾配 i_{cr} の交点 R を求める。この交点 R はこの地盤が薬液注入の際に許容割裂面積に到達した点であり、この点における注入速度が q_{cr} となる。

以上のように現場水注入試験を行い、得られた $p \sim q$ 曲線を用いて q_{cr} を決定するものをここでは「 q_{cr} 試験」という。

b) $p \sim q$ 曲線決定の際の問題点と修正法

① 初期直線部の修正

一般に $p \sim q$ 曲線で割裂が発生するまでは浸透面積は 142cm^2 と一定であるので、Darcyの法則によ

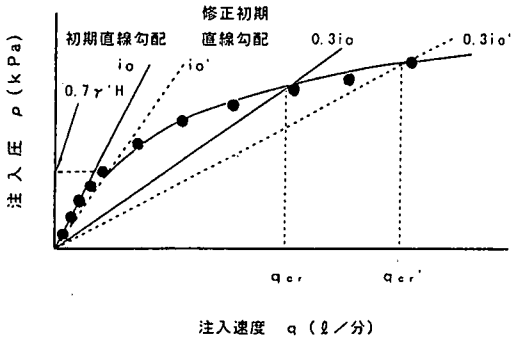


図-4 $p \sim q$ 曲線の初期直線部の修正

り直線になるはずであり、 $p \sim q$ 曲線よりその初期直線部を決めることになる。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意味するものである。 q を増加させていくと、 p も上がり地盤の割裂発生点に到達して、それ以後は割裂の伸展による浸透面積が増加するので、 $p \sim q$ 曲線の接線勾配は初期直線勾配 i_o よりも低下する。 q の増加とともに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するような曲線形状を描くことになる。前項に述べた q_{cr} を求めるにあたっては、 $p \sim q$ 曲線において原点を通る初期直線勾配 i_o が重要であり、この大きさが十分正確に求められることを前提にしている。したがって、増加過程初期の形状が重要となってくるため、現場水注入試験では増加過程の初期範囲(概ね 2 l/min まで)においては、注入速度を 0.5 l/min から開始し、 0.5 l/min ピッチで増加させるのを標準としている。これでも初期直線部に入る計測点数が少なく、かつばらつきにより初期直線の決定が困難な場合も少なくない。そのため透水性または割裂発生圧の小さい地盤の場合には、さらに注入速度のピッチを細かくし、例えば 0.2 l/min から開始し、 $0.2 \sim 0.3 \text{ l/min}$ ピッチ程度で増加させることも必要になる。

前項で述べたように割裂発生点に到達以後は $p \sim q$ 曲線の接線勾配が初期直線部の勾配よりも低下し始める。すなわち、初期直線部の最高圧は割裂発生圧となるはずである。したがって、直線部の最高圧が地盤の理論上の最小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実際の最小割裂発生圧を考慮して初期直線勾配 i_o を決定するのが合理的である。

砂質系地盤の場合の最小割裂発生圧の考え方は次章で述べるが注入地盤の最小有効主応力としてるので次のようになる⁵⁾。

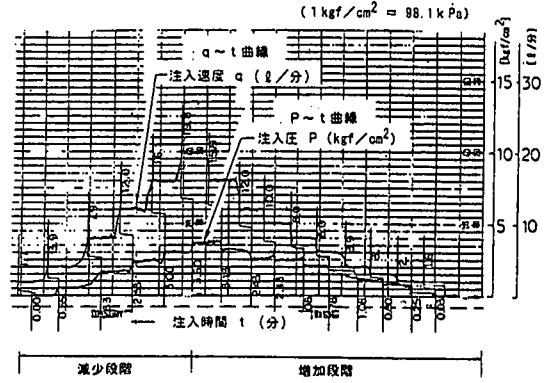


図-5 q_{cr} 試験中に得られる $P \sim t$ 、 $q \sim t$ 曲線の連続注入チャートの一例

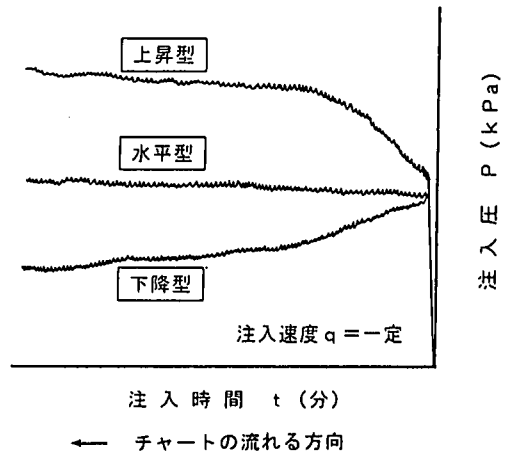


図-6 $P \sim t$ 曲線の分類

沖積層の場合

$$p_{cr} \approx 0.4 \gamma' h \quad (3)$$

洪積層の場合

$$p_{cr} \approx 0.7 \gamma' h \quad (4)$$

ここに、 $\gamma' h$: 有効土被り圧

そこで、初期直線部の最高圧は沖積砂質系地盤では $0.4 \gamma' h$ 以上、洪積砂質系地盤では $0.7 \gamma' h$ 以上になることを考慮し、初期直線部に属する計測値の選択を行い、初期直線勾配を決める必要がある。一例を示したものが図-4である。計測値の状況だけで初期直線勾配を引いた場合より最小割裂発生圧を考慮して引いた場合の方が勾配がやや緩やかになり、修正後の q_{cr}' は q_{cr} より少し大きくなっているが、この方が妥当な値と考えられる。

② q_{cr} 試験中に得られる注入チャートの $P \sim t$ 曲線が上昇型を含む場合の注入圧 P の修正
 q_{cr} 試験の水注入段階には各注入速度 q 毎に注

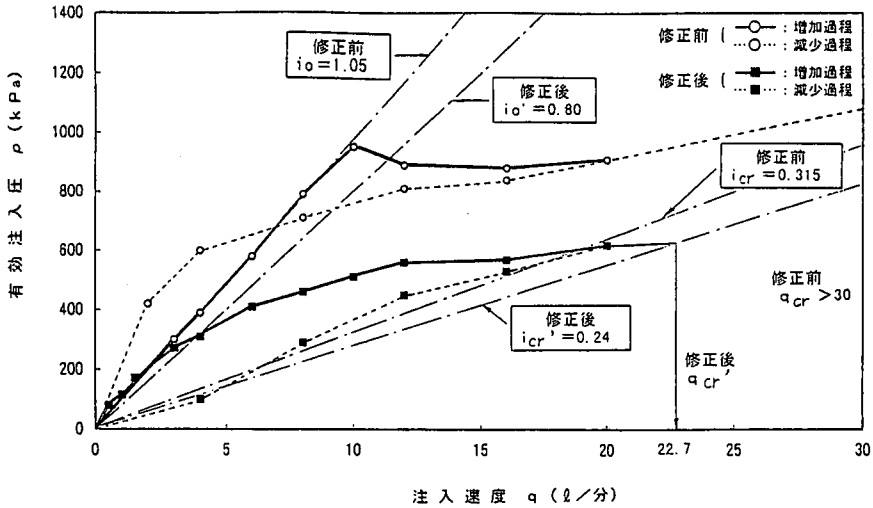


図-7 著しい上昇型の場合の修正前と修正後の $p \sim q$ 曲線の一例 (春日町)

入経過時間 t における圧力 P と q の状況が測定され、いわゆる $P \sim t$ 曲線、 $q \sim t$ 曲線が得られる。チャートの注入圧はポンプ圧 P で、補正した有効注入圧 p とは区別して大文字 P としている。一例として飯田橋東地点の場合を図-5に示す。本地点は深度21.0mの均一な洪積細砂層である江戸川層である。それぞれの段階における q は注入経過時間中一定値に保つが（実際上ポンプ性能により多少上下する）、 P はかなり変動する場合がある。この変動状況を大別すると図-6に示す水平型、下降型、上昇型の3種類になる。図-5のケースでは上昇型の上昇分が小さいのでわかりにくい、多数の $P \sim t$ 曲線を調査したところ注入圧 P の変化がほとんどない水平型と、 t とともに下降し安定する下降型の2つが多く、 t とともに P が上昇していく上昇型のもは一般に少ない。水平型の場合、注入している間の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経過時間とともに伸展していくため浸透面積が次第に増加して、 P が下がることを示すと考えられる。一方、上昇型の場合は土質および土層構成上の原因などで注入により周辺地盤に目詰まりなどが生じ、先端の素掘り孔付近の間隙水圧が徐々に上昇しているもので、割裂が生じてもごく僅かと考えられる。上昇型を多く含むケースでは通常的手法で $p \sim q$ 曲線を描くと、図-7の春日町地点のように $p \sim q$ 曲線の注入速度減少過程曲線 (20 l/分 \rightarrow 0 l/分) は増加過程曲線 (0 l/分 \rightarrow 20 l/分) の下側にならずに逆に上側になる場合がある。この地点は深度25.0mの細砂層で東京層に属する。このような $p \sim q$ 曲線は前項で述べた理由

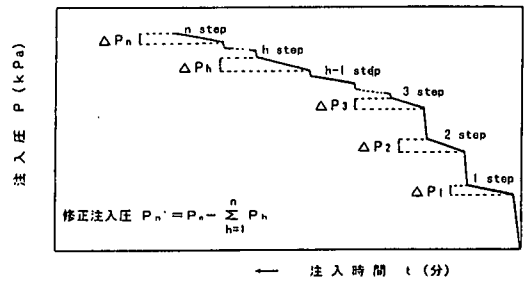


図-8 q_{cr} 試験の $P \sim t$ 曲線が複数段階で上昇型を示す場合の注入圧 P の修正

により不合理なものであり、上昇型の場合の有効注入圧 p は修正を要する。このためには間隙圧の上昇分を差し引いて注入に直接寄与する有効圧力を算定し、 $p \sim q$ 曲線を修正する必要がある。 q_{cr} 試験の $P \sim t$ 曲線で上昇型を示すものが n 段階ある場合には、図-8に示すように $P \sim t$ 曲線の h 番目段階の初期圧力と最終時の圧力 P_h との圧力差を ΔP_h とすると、 n 番目の修正注入圧力 P_n' は次式によって求められる。

$$P_n' = P_n - \sum_{h=1}^n \Delta P_h \quad (5)$$

この修正した P' から管内抵抗と地下水位による補正をして有効注入圧 p を求め $p \sim q$ 曲線を描けば、注入速度減少過程の曲線は増加過程の下側になり正常化する。したがって q_{cr} 値も大幅に修正されることになる。図-7はこの一例で、修正前と修正後の $p \sim q$ 曲線は大きく異なり、修正により減少過程の曲線の位置が正常化している。

3. $p \sim q$ 曲線の形状と地盤の割裂特性

(1) $p \sim q$ 曲線の形状と割裂発生圧

砂質系地盤でほぼ均一な場合は、 $p \sim q$ 曲線上における割裂発生までの初期直線部に続く割裂発生後の曲線部はほぼ滑らかな2次曲線の形状となる。青山一丁目地点の深度22.5mの細砂層である江戸川層で実測した $p \sim q$ 曲線での例を図-9に示す。

q_{cr} には図-2からもわかるように初期直線勾配 i_o の大きさが最も影響するが、 i_o がほぼ同じ場合には直線部の最上点の圧力に相当する割裂発生圧 P_f の大きさとそれに続く割裂発生後の曲線形状によっては q_{cr} は図-10のようにならざるを得ない。この図は図-9から推定されるモデルであるが、曲線②の方が割裂発生圧 P_f が高く、また、割裂発生後の割裂伸展量が少なく、各注入速度 q に対する注入圧 p も高い。このため q_{cr} が大きく、曲線①よりも注入には適する地盤ということになる。

この差異は割裂発生圧 P_f の大きさが割裂発生後の $p \sim q$ 曲線の高さ（必要注入圧）にも深く影響することを示唆している。こうしたことから q_{cr} には地盤の透水係数に関係する初期直線勾配 i_o の他に割裂発生圧 P_f の大きさにも相関が強いことが推定できる。

この P_f の値は、一般的な砂質系地盤の場合、既往の研究⁵⁾から以下ようになる。

$$P_f = m \sigma_s' + \sigma_t + R \quad (6)$$

ここに m : 1~2の範囲で急速加圧の場合または透水性のかなり小さい場合は2に近く、緩加圧の場合または透水性のやや大きい場合は1に近くなる。

σ_s' : 注入地点の最小有効主応力

σ_t : 地盤の引張強さ

R : 亀裂進展抵抗

この P_f を求める実験では大型3軸試験装置⁶⁾を用い、 $\phi 18\text{cm}$ の供試体の中心から亀裂が進行して外周面まで到達し浸透量が急増したときの注入圧を割裂圧とした。ここで R は亀裂進展抵抗を表し、割裂発生時点で生じている割裂面積が大きいほど大きくなる。このことは $p \sim q$ 曲線の初期直線部以降も p が上昇していることから明らかである。地盤中で行う q_{cr} 試験における割裂発生圧 P_f は、初めて小さな亀裂が生じた状態のものに相当すると考えられるので、亀裂発生時点では進展抵抗はなく、したがってこの場合の R は0に相当する。

このほか式(6)の地盤の引張強さ σ_t は一般の砂

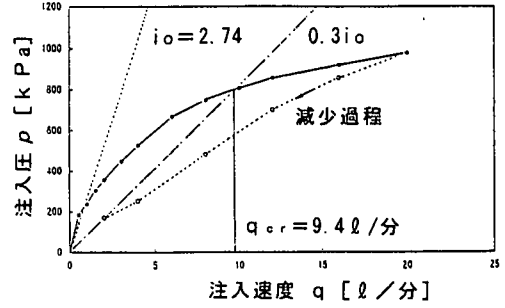


図-9 砂質系地盤で均一な場合の $p \sim q$ 曲線例（青山一丁目）

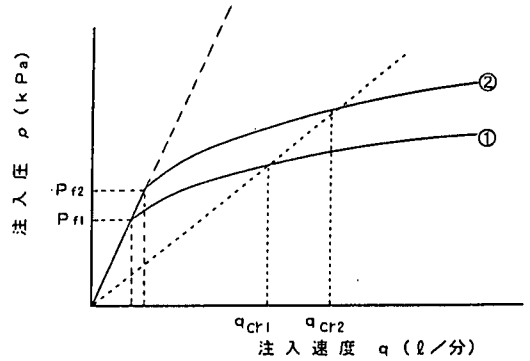


図-10 P_f の大きさによる q_{cr} の相違
(初期直線勾配が一定の場合)

質系地盤では0であるが、細粒分をある程度含有し、硬く締まった洪積層などでは粒子間のセメンテーションにより、やや固結したものがあリ、引張強さ σ_t を有するものもある。

また、 q_{cr} 試験では注入速度を段階的にゆっくり上げていくが、砂質系地盤の透水性の程度では式(6)の m の値は1~1.5程度であると考えられる⁵⁾。透水性が小さいほど1.5に近くなる。

以上のことから q_{cr} 試験における $p \sim q$ 曲線の直線部の最上点である割裂発生圧 P_f の最小圧は $m=1$ 、 $\sigma_t=0$ にあたるので次のように示すことができる。

$$P_f = \sigma_s' \quad (7)$$

注入地点の σ_s' は、その位置の有効土被り圧力 $\gamma' h$ 、静止土圧係数 K_o とすると

$$\sigma_s' = K_o \gamma' h \quad (8)$$

である。砂質土層の K_o は正規圧密のゆるい沖積層では小さく、硬く締まった過圧密の洪積層ではかなり大きな値になる場合もあり得る。 q_{cr} 試験結

果から得た P_r の値が有効土被り圧力 $\gamma' h$ に比べかなり大きいものは上述のような状態にあるものと考えられる。このような極端な場合を除き一般に実用的に用いられる K_o の範囲は、0.4~1.0であり⁷⁾、沖積層で0.4~0.5、洪積層で0.7~1.0程度と考えられる。最小圧としては、沖積層で0.4、洪積層で0.7であるとえられる。

砂質系地盤で細粒分をかなり含み、透水性が低く、硬くて固結度もあり、かつ深度の大きいほど式(6)の m , σ_s' が大きく、 σ_r も加わるので、割裂発生圧 P_r は大きくなる。したがって、 P_r 値は $p \sim q$ 曲線の初期部の高さに大きく影響する。

(2) $p \sim q$ 曲線の形状と割裂伸展抵抗

砂質系の地盤では注入時、ある圧力で割裂が発生して小さいクラックは生じるが、そのままの圧力では割裂は伸展せず、停止して安定する。この圧力がいわゆる割裂発生圧力に相当し、割裂をさらに大きく増加伸展させるには注入圧 p を上昇させる必要がある。注入圧 p を上昇させるということは、注入時の液体の注入速度 q を上げていくことに相当する。注入速度 q を上げると地盤に浸透する液量が増加せざるを得ないので、注入圧 p が上昇し割裂が増加伸展した後、停止し安定する。注入速度 q を段階的に上げていくと注入圧 P は増加し、割裂面積も同様に段階的に増加する。 q_{cr} 試験がこの状況に相当する。

いま注入速度 q にしたとき注入圧 p が安定すれば、割裂の増加は停止したことを示すが、これは割裂先端付近の液圧状態がその割裂の増加伸展に対する抵抗 R_r 。(以下、「割裂伸展抵抗」と称す)と釣り合った状態を意味する。この R_r は式(6)の R とは性質が異なる。 R_r は割裂先端地盤を押し広げる場合の抵抗に相当するので、地盤の変形係数 E と最小有効主応力 σ_s' (一般には静止土圧に相当する) にほとんど支配されると考えられる。 R_r の支配条件の詳細については別途基礎的な研究が必要であるが、ここではその概念だけにとどめる。ここで、注入速度 q を増加させると注入圧 p が増加するので、割裂が伸展しなければ割裂先端付近の液圧状態はほぼそれに比例して大きくなる。その結果、 R_r を超過するため割裂は直ちに増伸せざるを得ない。しかし、増加した割裂面からも注入液が浸透するので、割裂先端付近の液圧が低下し、 R_r と釣り合うと割裂の伸展は停止し安定する。

注入速度 q を一段上げた場合の p の上昇の時間的変化状況の一例は図-5に示してあるが、その他

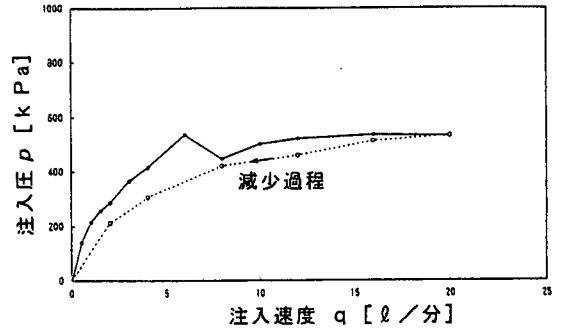


図-11 均一度の低い地盤の $p \sim q$ 曲線例(本郷三丁目)

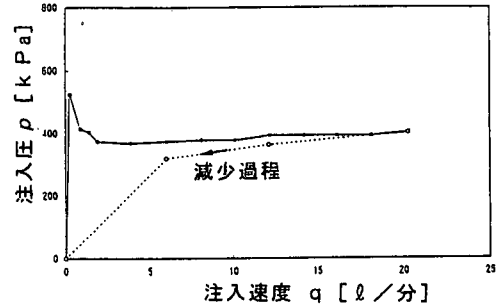


図-12 硬質粘性土地盤の $p \sim q$ 曲線例

の実測例も総合して分類すると、 q を増加した瞬間的な時間で割裂の伸展が完了するタイプと、割裂の増加が停止するまでに数分の時間を要するタイプがあることがわかる。前者は $P \sim t$ 曲線が水平になり、後者は下り勾配となつてから水平に移移する。この水平になった状態の安定した圧力がその注入速度に対する注入圧 p である。

地盤がほぼ均一で R_{r0} が変化しない場合は、図-9のような滑らかな $p \sim q$ 曲線となるが、均一度が低い地盤において行った q_{cr} 試験による $p \sim q$ 曲線の例を図-11に示す。この地盤は深度18.0mのシルト混じり細砂層の東京層であるが、割裂が伸展して地盤の硬さ、締まりの程度などが異なった位置に達すると R_r が変化する。 R_r がかなり低下する場合には注入速度 q が増加しても注入圧 p は減少する。一方、 R_r が増加する場合には p の上昇分がそれまでより大きくなる。したがって $p \sim q$ 曲線は図-11のように凸部及び凹部のある形状となる。

また、粘性土のように浸透しない地盤では、注入した液体はすべて割裂を伸展させて、その空隙に浸入することになる。注入中は割裂は常に伸展を続け、安定し停止することはない。そして割裂面より液体の浸透は極めて少ないので、注入圧 p は地盤の割裂伸展抵抗 R_r とほとんど同等であり、注入速度 q を大きくしても割裂がそれに応じて速

表-2 実際の施工における限界注入試験結果

試験場所	土質	有効注入圧 p [k Pa]		p_{10}/p_2	算定 q_{cr} [ℓ/分]	実測 q_{cr} [ℓ/分]	割裂発生時	
		$q=2$ [ℓ/分]	$q=10$ [ℓ/分]				q [ℓ/分]	P_f [k Pa]
西武44	シルト混じり細砂	860	1129	1.31	3.13	3.10	0.80	700
西武34	シルト混じり細砂	1004	1675	1.67	6.68	5.70	0.80	750
成田	細砂	80	228	2.85	18.50	16.50	-----	-----
船橋	細砂	194	330	1.70	7.01	9.00	-----	-----
下落合	細砂	277	563	2.03	10.32	14.00	-----	-----
麻布	硬質粘土層	650	630	0.97	-0.31	1.20	0.20	550
六本木	シルト混じり細砂	350	600	1.71	7.14	5.90	0.70	200
青山	細砂	360	800	2.22	12.22	9.40	0.70	190
国立競技場	細砂	220	510	2.32	13.18	12.70	1.50	160
柳町	細砂	80	215	2.69	16.88	19.80	3.00	110
新神楽坂	砂混じりシルト	600	750	1.25	2.50	2.85	0.50	400
本郷	シルト混じり細砂	280	500	1.79	7.86	7.10	1.00	200
元浅草	細砂	40	120	3.00	20.00	21.00	3.00	60
春日町	細砂	180	520	2.89	18.89	22.70	3.00	300
飯田橋東	細砂	170	480	2.82	18.24	16.50	2.00	150
仏向町	砂混じりシルト	1250	2300	1.84	8.40	4.80	-----	-----
山武町7m	細砂	80	230	2.88	18.75	14.00	1.50	60
山武町9m	シルト混じり細砂	420	550	1.31	3.10	8.00	1.80	410
若松町	中・細砂	120	430	3.58	25.83	19.50	3.00	220
飯田橋西	砂混じりシルト	510	600	1.18	1.76	4.40	1.00	350
森下34m	中・細砂	460	1170	2.54	15.43	17.80	1.20	380
森下41m	細砂	630	1200	1.90	9.05	9.20	1.00	410
代々木	砂混じりシルト	774	790	1.02	0.21	2.50	0.80	770
室内A	珪砂8号	90	250	2.78	17.78	18.00	-----	150
室内B	珪砂8号+特粉10%	170	310	1.82	8.24	8.10	-----	160
室内C	珪砂8号+特粉15%	200	300	1.50	5.00	5.90	-----	160
室内D	珪砂8号+特粉20%	220	340	1.55	5.45	5.00	-----	180

く進み、注入圧 p は R_{r0} 以上にはならない。したがって、 $p \sim q$ 曲線は割裂発生後はほぼ水平な線となり、浸透面である素掘り孔の割裂発生圧 P_r は σ_3 に一軸圧縮強さ q_u を加えた値 ($= \sigma_3 + q_u$) にほぼ等しくなるので⁹⁾、割裂発生圧のところを最も高くなる。麻布十番地区の深度22.0mの硬質粘土層(土丹)に属する上総層である図-12はこの状態を示している。

4. 地盤の割裂特性を表す p_{10}/p_2 値と限界注入速度との関連

(1) 注入速度 q の増加に伴う割裂特性を表す p_{10}/p_2 値

前章において述べたように $p \sim q$ 曲線は、初期直線勾配に関係する地盤の透水性と割裂発生圧 P_r およびその後の割裂の増加伸展状況を支配する地盤の割裂増伸抵抗 R_{r0} に大きく影響される。

q_{cr} 試験によって得られた $p \sim q$ 曲線の多数の事例を検討すると割裂発生時の注入速度 q は表-2 からみて2ℓ/分以下になっている。2ℓ/分を超えるのは割裂が発生しにくい透水性の相当に大きい地盤に限定されると思われる。 $q = 2$ ℓ/分 (q_2)

は q_{cr} 試験で測定する定点でもあり、その注入圧 p_2 は必ず測定されることになる。透水性がよく、 R_{r0} の大きい地盤ほど $p \sim q$ 曲線上の座標 (p_2, q_2) は割裂発生点に近くなるので、 p_2 は $p \sim q$ 曲線の割裂後の平均圧よりかなり小さくなる。一方、透水性が小さい上、 R_{r0} も小さい地盤になるほど割裂発生点の注入速度 q_r は2ℓ/分よりかなり小さくなるので、座標 (p_2, q_2) は $p \sim q$ 曲線の少し緩やかに勾配がなった付近にくる。したがって、 p_2 は $p \sim q$ 曲線の割裂後の平均圧に近づく。このことから p_2 は地盤の割裂発生圧との関連性を反映するものと考えられる。

また、 $q = 10$ ℓ/分の場合については、 p_{10} は割裂後の緩やかな勾配状態になった $p \sim q$ 曲線にあり、ほぼ割裂後の平均注入圧に近いことが表-2 からわかる。

以上のことから p_2 と p_{10} の比である p_{10}/p_2 値を考えると、透水性がよく、 R_{r0} も大きい地盤ほど p_{10}/p_2 値は大きくなり、透水性が小さい上に R_{r0} も小さい地盤ほど p_{10}/p_2 値は小さくなる。例えば透水係数が 10^{-2} cm/秒以上と大きいものは割裂しにくく、砂礫質地盤などでは $p \sim q$ 曲線が初期直線に近くなり、 p_{10}/p_2 値 $\approx 4 \sim 5$ となって、 q_{cr} は20ℓ/分よりはるかに大きく、 q_{cr} 試験の

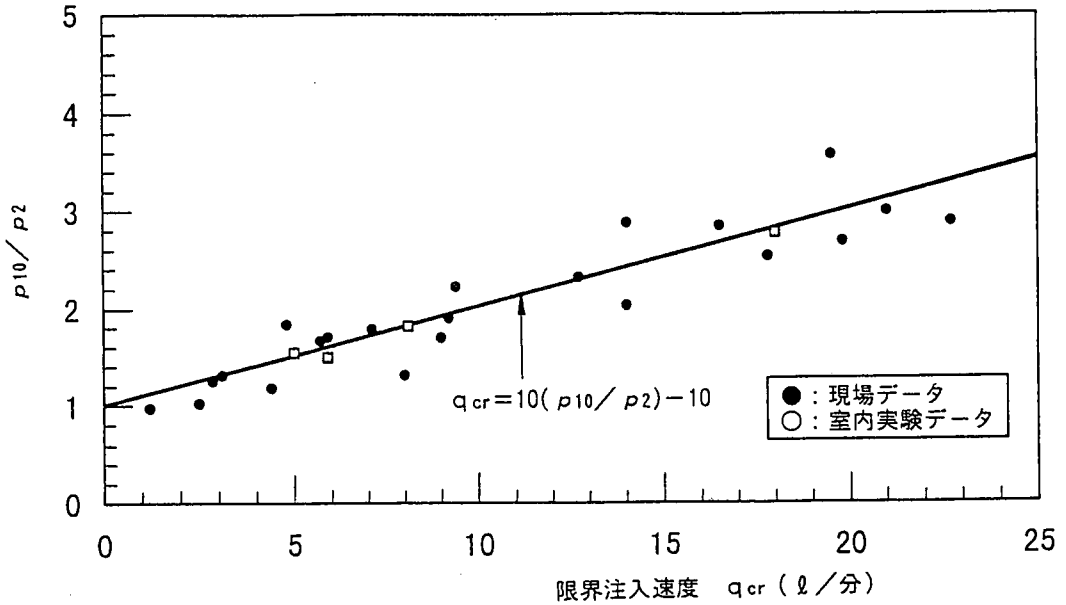


図-13 p_{10}/p_2 と限界注入速度 q_{cr} の関係

範囲では決定できない。また、透水性が非常に小さく、注入とほぼ同時に割裂せざるを得ない粘性土地盤では $p \sim q$ 曲線は、図-12のように P_2 に到達する q_2 は2 l /分よりはるかに小さく、それ以後はほぼ水平な線となり、 p_2 と p_{10} は同等で $p_{10}/p_2 \approx 1$ となる。このとき q_{cr} としては實際上ゼロに近い値である。その他多くの地盤の場合は、 p_{10}/p_2 値は1~4までの範囲に入り、 q_{cr} は1~30 l /分程度となる(q_{cr} が20~30 l /分のは推定値)。したがって、 p_{10}/p_2 値と q_{cr} には密接な関係があり、この p_{10}/p_2 値は注入速度 q の増加に伴う地盤の割裂特性を表す指標になりうると考えられる。

(2) p_{10}/p_2 値と q_{cr} の相関性およびその利用法
前節の表-2に示した q_{cr} は2章による修正を行った $p \sim q$ 曲線から求めたものである。なお、この表には室内実験土槽で行った q_{cr} 試験結果の4ケースを比較のため追加掲載した。この表の値を用いて、 q_{cr} に対する p_{10}/p_2 値をプロットしたのが図-13である。

ここで表-2のうち室内実験の4ケースを除いて、 q_{cr} と p_{10}/p_2 値についての回帰分析を行い、次式を得た。

$$q_{cr} [l/分] = 9.99(p_{10}/p_2) - 9.79 \quad (9)$$

相関係数 $r = 0.925$

これより両者の間には相関係数0.9以上の高い相

関があることがわかる。また、室内実験の4ケースもこの式(9)の関係を満足する。この式を実務面を考慮し単純化すると、次の式(10)で示すことができる。

$$q_{cr} [l/分] = 10(p_{10}/p_2) - 10 \quad (10)$$

式(10)は非常に簡便な式であり、 p_{10}/p_2 値がわかれば q_{cr} が容易に求められる。この p_{10}/p_2 値以外で、より相関性のよい p_n/p_m 値の有無を検討したが、特にこの相関性を超えるほどのものはなかった。ここで p_2 より小さい注入圧は通常の測定方法で正確な測定がしにくいという問題があるので除外した。

現場の注入工事で実用的な最小の注入速度 q は5 l /分程度とされているが、これが q_{cr} にあたる p_{10}/p_2 値では式(10)で1.5となる。また、実用上使用されている最大の q は、一般に20 l /分であるので、 $p_{10}/p_2 = 3$ となる。したがって、 q_{cr} が実用に供する注入速度に該当する地盤の p_{10}/p_2 は1.5~3.0の範囲となる。 p_{10}/p_2 値が1.5以下の地盤は、緩結性薬液で浸透固結を図るには不適当な地盤であり、 p_{10}/p_2 値が3~5程度と大きい地盤は q_{cr} が20 l /分以上であるが、ポンプの性能等から実際の設計・施工上は注入速度を20 l /分以下としている。 q_{cr} が非常に大きくなりうる透水性の大きい地盤では20 l /分以下で注入しても、薬液がゲル化するまでに注入位置からの移動が生じるなど不都合な問題があるので、ゲルタイムの短い

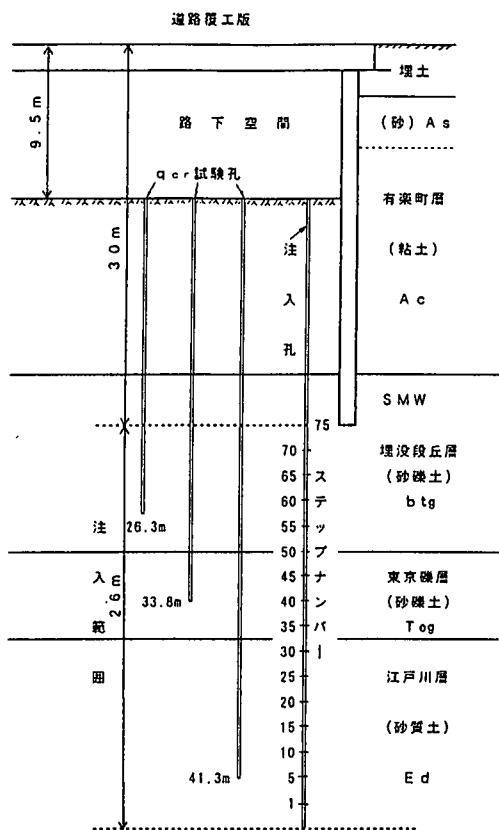


図-14 実際の注入孔を利用した測定断面
(東京都江東区森下地区)

もの使用やセメントベントナイト液などの事前注入を実施する必要がある。

先述したように q_{cr} 試験によりほぼ正確な q_{cr} を求めるには $p \sim q$ 曲線を描く際、2章で述べたような2種類のチェックが必要である。さらに、特に重要な初期直線勾配は直線部の範囲に測点が少ないと正しい傾きの直線を引くことは一般的に難しい。そこで q_{cr} 試験結果から正確な q_{cr} を求めるのは必ずしも容易ではないので、測定値のうち p_2 と p_{10} から p_{10}/p_2 値を求めて、式(10)に代入し q_{cr} を算定して比較してみる必要がある。試験での測定値を用いて $p \sim q$ 曲線を描き、正規の方法で求めた q_{cr} が式(10)から求めた値と大きく異なる場合には、 q_{cr} の求め方にミスがあると考えべきであり、このときはむしろ式(10)から求めた q_{cr} を採用する方が望ましい。

これらのことから式(10)は、注入地盤の q_{cr} 値のチェックと測定の簡便化に大きく寄与し、薬液注入の固結形状を支配する注入速度の適正值の選択に大幅に役立つものであると考えられる。

(3) 現場注入孔を利用した2段注入による 施工管理の可能性

前節で述べたように p_{10}/p_2 値は地盤の q_{cr} の特定を簡便にすることに寄与しているが、 p_{10}/p_2 値そのものは q_{cr} 試験で得た p_2 と p_{10} より求め、さらにこの試験を2章で述べたように注入範囲内の各構成土層について行う必要がある。注入工事が面的に広い場合は、 q_{cr} 測定位置とかなりずれた場所で注入を行うものもある。そのため同一土層でも q_{cr} 値が多少異なったり、土層境界深度が少しずれている場合がある。 q_{cr} 試験を多数行うことは必ずしも容易ではないので、現場において実際の注入孔を総数の数パーセント適切な位置に定めて、それら各注入孔の約半数にあたる奇数番の注入ステップについて、本注入の実施前にそれぞれ注入速度 $q = 2 \text{ l/分}$ と $q = 10 \text{ l/分}$ での2段注入を行い、 p_{10}/p_2 値が精度よく求められるとすれば、それらの q_{cr} 値を p_{10}/p_2 値と式(10)より直ちに求めることができる。このことから q_{cr} の面的および深度方向の変化状況がわかり、注入施工時にそれに応じて設計注入速度を修正する施工管理が可能となる。このことにより注入効果が向上され、薬液注入の信頼性を高めることができ得る。問題は現場の注入孔を用いた注入では浸透面積や管内抵抗などが正しく求められないので、精度のよい p_{10}/p_2 値が求まるかどうかという点である。

東京都江東区森下地区の大規模な注入現場で実際に設置された図-14に示すダブルパッカー式の注入孔3個を利用して、本注入に先立ちそれぞれ25ステップにつき $q = 2 \text{ l/分}$ と 10 l/分 で5分間ずつ2段注入し、現場で得られる $P \sim q$ チャートから p_2 と p_{10} を求めた。この場合、ここで実施した注入はそれぞれ該当するステップの注入工事を兼ねるものであるので、現場で使用される緩結性薬液を用いるが、水より粘性が少し大きいものの、 p_{10}/p_2 値を求めるときは粘性の影響が相殺されるので特に問題はないと考えられる¹⁾。また、この測定を行った各ステップでは、所定の2段注入完了に引き続いて設計注入速度に変えて注入を行い、設計注入量に過不足しないようにした。注入地盤は図-14に示す深度30~56mの範囲で土層としては、上から埋没段丘砂礫層 B_{tg} 、東京礫層 T_{og} 、江戸川層(砂質土)の3層から構成されている。これらの土層は予め q_{cr} 試験を実施し3土層の q_{cr} 値を求めた。また、 p_2 と p_{10} の測定値を地下水位及び管内抵抗で修正した有効注入圧 p_2 と p_{10} を用いて p_{10}/p_2 値を求め、式(10)で q_{cr} を計算した。

表-3 森下No. 123孔における2段注入試験結果

土質	Step No.	注入圧 [kPa]		算定 q_{cr} [ℓ/分]	算定 q_{cr} の平均値 [ℓ/分]	実測 q_{cr} [ℓ/分]
		p_2 [$q=2ℓ/分$]	p_{10} [$q=10ℓ/分$]			
砂質土 Ede	1	960	1090	1.4	6.9	9.2
	4	960	1580	6.5		
	7	1120	1280	1.4		
	10	1200	1760	4.7		
	13	810	1080	3.3		
	16	660	1860	18.2		
	19	1300	1360	0.5		
	22	580	950	6.4		
	25	1010	960	—		
	28	530	1160	11.9		
砂 Tog	31	530	1280	14.2	14.0	>20
	34	360	1280	25.6		
	37	620	1390	12.4		
	40	710	1270	7.9		
	43	660	1530	13.2		
	46	560	1200	11.4		
	49	450	1060	13.6		
	52	360	940	16.1		
	55	310	810	16.1		
	58	210	800	28.1		
砂 btg	61	310	770	14.8	18.2	>20
	64	210	620	19.5		
	67	310	760	14.5		
	70	210	680	22.4		
	73	250	610	14.4		

代表例としてNO. 123孔において実施した3層にわたる合計25ステップについての結果を表-3に示す。

各土層の算定した q_{cr} の平均値は実測した q_{cr} の大きさの順序に対応しているが、実測 q_{cr} 値よりかなり小さくなっている。各土層ともステップにより p_{10}/p_2 値にばらつきが大きく出ており、そのため算定した q_{cr} にかかなりの差異がみられる。特に最下層の江戸川層（砂質土）でこの傾向が最も顕著である。全般的に算定した q_{cr} が小さいのは、ポンプ等の注入設備が注入速度が大きいほど管内抵抗等の影響を受けやすく、そのため p_2 に対して p_{10} が小さめに出るからである。また、同一土層で p_{10}/p_2 値にばらつきが大きく出る主な理由は、薬液の初期浸透面積に相当するシールグラウト部のクラック面積が注入速度 $q=2ℓ/分$ の場合に比べ、 $q=10ℓ/分$ でかなり拡大することなどが考えられる。この初期浸透面積の増大が生じたとすると p_{10} の値は正常に上らず、 p_{10}/p_2 値は小さめになってくる。また、 $q=10ℓ/分$ に上げたときに生じるシールグラウトのクラック拡大量は各ステップで同一にはならないのでばらつきが出る。これは図-13は現場水注入試験用に通常の注入孔とは別の図-1に示す注入孔を用いて求めたものであり、実際に薬液注入工事で使用する注入孔とは形状等が異なるためである。管内抵抗が明確となる試験用の特殊な注入孔は実際の工事では実用的ではないので、ここでは工事で使用する一般の注入孔での検討を行った。このシールグラウトのクラックの拡大は地中で発生するので測定は困難であるが、このような現象に対する課題を解

消し、正規の q_{cr} 試験に近い p_{10}/p_2 値が求められるように改良できれば、注入の施工管理に大きな役割を果たすものと考えられる。

5. まとめ

徐々に普及している薬液注入における限界注入速度の測定試験 (q_{cr} 試験) は、種々の地盤で実施され、その過程でいくつかの問題点が明らかとなってきた。本研究はこれら q_{cr} 決定上の諸問題について研究したもので、得られた成果を要約し列挙すると以下のとおりとなる。

- ① q_{cr} は作図した $p \sim q$ 曲線に基づいて決定するが、 q_{cr} に最も影響する初期直線勾配 i_0 の決め方が必ずしも容易ではない。この勾配部の最高点は地盤の割裂発生圧 p_r であるが、これを $p \sim q$ 曲線上で明確に判定できない場合は i_0 の誤差が出やすい。このような場合に対して、その地盤に考えられる最小割裂発生圧 (式(3)および(4)) による修正法を提案した。
- ② q_{cr} 試験中の $P \sim t$ 曲線が上昇型になる場合がある。これは地盤の構造などから注入により地盤の間隙圧が上昇したことを意味するもので、その上昇分とそれ以前の段階で生じた上昇分の全合計量を差し引き、修正した p を用いたプロットによる $p \sim q$ 曲線にすれば、誤差の少ない q_{cr} を決定できる。
- ③ $p \sim q$ 曲線の $q=2ℓ/分$ と $q=10ℓ/分$ にあたる注入圧を p_2 、 p_{10} としたとき、 p_{10}/p_2 値は注入速度 q の増加に伴う地盤の割裂伸展特性をよく表している。
- ④ p_{10}/p_2 値は q_{cr} と強い相関があり、実測結果より次のような簡便な関係式が得られた。

$$q_{cr} [ℓ/分] = 10(p_{10}/p_2) - 10$$

q_{cr} は $p \sim q$ 曲線の作図の上で誤差が入りやすい場合があるので、実測した q_{cr} の妥当性を本式でチェックすることが可能であり、実測値と本式による値に大きな差のある場合には、むしろ本式による q_{cr} を参考とすべきである。

- ⑤ 現場注入孔を利用して $q=2ℓ/分$ と $q=10ℓ/分$ の2段注入を行い、 p_{10}/p_2 値を精度よく測定できれば q_{cr} の推定が可能になり、現場の注入管理上大きな利点がある。ダブルパッカー方式の注入現場についてこれを実施し、その p_{10}/p_2 値の妥当性を検証したが、平均的には低めの値になり、またばらつきも大きかった。この

原因はダブルパッカー方式における薬液の浸透面積にあたるシールグラウトの注入に伴うクラック面積の変化にあり，このような問題の解消が今後の課題として残った。

謝辞：薬液注入現場における q_{cr} 試験データの収集にあたっては，特に東京地下鉄道建設株式会社に多大なるご協力をいただいた。また，現場の注入孔を利用した2段注入による p_{10}/p_2 値と q_{cr} の相関性を検証した調査においてもその機会を与えていただいた。ここに深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 森 麟，田村昌仁，小峯秀雄，小川雄二：薬液注入において浸透固結形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) (社)土質工学会編：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研究委員会報告，pp. 2-20, 1993.
- 3) 森 麟，江本佑橘，小峯秀雄：p-q 曲線の形状の特徴と限界注入速度 q_{cr} ，土木学会第51回年次学術講演会，III-8280, 1996.
- 4) 森 麟，田村昌仁，森山健吉，上澤 充，小峯秀雄：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, pp. 131-139, 1994.
- 5) 森 麟，田村昌仁，千 柄植：ゲル化時間の長い薬液の砂質地盤における注入形態とその支配条件，土木学会論文集，No. 388/III-8, pp. 61-70, 1987.
- 6) 森 麟，田村昌仁，佐藤洋一：不均一地盤における薬液の注入形態とその支配条件，土木学会論文集，No. 418/III-13, pp. 239~247, 1990.
- 7) (社)土質工学会編：土質工学ハンドブック，pp. 228, 1982.
- 8) Mori, A. and Tamura, M. : Hydrofracturing pressure of cohesive soils, *Soils & Foundations*, Vol. 27, No. 1, pp. 14-22, 1987.

(1999. 4. 9 受付)

STUDY ON IMPROVEMENT OF THE DETERMINING METHOD FOR CRITICAL INJECTION RATE q_{cr} IN CHEMICAL GROUTING

Yoshihiro FUKUI, Akira MORI and Hirokazu AKAGI

It is important to control the injection rate less than the critical injection rate q_{cr} in order to obtain sufficient effects on chemical grouting. q_{cr} is the maximum permissible injection rate to make good solidified shapes. q_{cr} is determined with the relation between injection pressure p and injection rate q ($p\sim q$ curve) of the standard water injection test. But for several causes on measurement, q_{cr} based on $p\sim q$ curves of injection sites must be often modified. This paper investigates the improvement of method of determining correct q_{cr} . And the authors suggest that the ratio of p_{10} (at $q=10$ l/min) and p_2 (at $q=2$ l/min) calculated with $p\sim q$ curve is useful for determining correct q_{cr} easily. The relation between q_{cr} and p_{10}/p_2 value is follows: $q_{cr}=10(p_{10}/p_2)-10$