

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(A Method of Determine the Critical Injection Rate
Considering Permeated Shapes in Chemical Grouting)

森	麟 ⁱ⁾	(Akira Mori)・
田 村 昌	仁 ⁱⁱ⁾	(Masahito Tamura)
小 峯 秀	雄 ⁱⁱⁱ⁾	(Hideo Komine)
小 川 雄	二 ^{iv)}	(Yuji Ogawa)

キーワード：割裂浸透／固結形状／砂質土／室内実験／注入速度／透水係数／薬液注入 (IGC : K6)

1. は じ め に

薬液注入は止水・強度増加を目的とした地盤改良工夫であり、開削工事やシールドトンネル工事などの掘削工事、特に地下水面下を対象とする場合に広く用いられている。この工夫は、簡便迅速で応急対策としても優れる反面、確実性・信頼性に乏しいという問題点を抱えている。この主な原因としては、土中における注入薬液の挙動が明らかでないため、設計した注入方法が対象地盤に対して適切かどうかを判断する明確な基準がなく、また改良効果を予測・確認する方法が十分に確立していないことが挙げられる。合理的な注入を行うためには、まず注入方法が地盤条件に対して適切かどうかを判断し、改良効果が期待できる注入方法で行うことが必要であり、このような条件が満足された場合において、初めて効果確認の信頼性も高くなり得る。

砂質地盤を対象とした注入では、地盤に薬液を浸透注入させることが基本であり、これが可能な場合のみ、吐出孔から球状ないし円筒状、もしくはそれに近い良好な固結形状を得ることができる。通常の注入設計では浸透

注入により、薬液が良好な形状に固結することを前提にしている。しかし、注入条件によっては、浸透注入が困難で地盤に割裂が生じて、注入薬液の多くが割裂した部分に集中して注入されることがある。

割裂が生じた場合の固結形状は、必ずしも不良というわけではない。砂質地盤の場合は、割裂した部分から薬液が浸透することができるので、割裂の発生は浸透面積の拡大とみなすことが可能である。このため、割裂後の固結形状は割裂面の進展形状に左右されと考えられる。なお、このような割裂した部分から浸透する状態は、割裂浸透と呼ばれている。割裂が吐出孔近傍に留まる場合には比較的良好な固結形状が期待できるが、一方、割裂が大きく遠方まで進展する場合には、固結形状がいびつになったり、薬液が注入範囲外に流出して未固結部分が残る、十分な注入効果をあげ難い。

割裂の進展する程度は、注入速度、地盤条件（透水性、拘束圧、強度）、注入圧などに左右されるが、特に注入速度と地盤の透水係数の影響が大きく、筆者らのこれまでの研究によれば、注入速度がその地盤に対する許容値を超えると割裂状注入が支配的になることがわかっている¹⁾。しかし、この許容値に関しては、定量的に不明な部分が多く、実際の地盤での決定方法に関しても明らかでない。

本研究は、割裂浸透によってほぼ良好な固結形状が得られる許容注入速度（以下、限界注入速度という）に関するものであり、大型土槽による注入実験により固結形状に及ぼす注入速度などの影響を調べて限界注入速度の決定方法を提案している。なお、本研究では薬液の浸透を図るうえで最も有利であるゲル化時間の長い緩結性薬液を対象としている。

i) 早稲田大学理工学部土木工学科 教授（東京都新宿区大久保3-4-1）

ii) 建設省建築研究所第3研究部

iii) 財電力中央研究所立地部

iv) 早稲田大学大学院 修士課程学生（現・鹿島建設（株））
（1992. 7. 14 原稿受付・討議期間 1994. 4. 1, 要請があれば1か月の期限延長可能）

2. 固結形状の支配条件

2.1 注入圧力と注入速度

固結形状は、注入条件（注入速度、注入圧など）と地盤条件（透水性、深度など）の関係に依存しているので、それらの関係について考えることにする。

土中のある一地点（半径 r_1 (cm) の球空洞、すなわち吐出孔周辺の空洞の表面）から注入する場合、割裂が生じないとすると、放射状に浸透して球状注入形となり、式(1)が成立する。これは Maag の式として知られる一地点からの三次元注入理論式²⁾である。

$$q = \frac{4 \cdot \pi \cdot k \cdot r_1 \cdot p}{\mu \cdot \gamma_w} \quad (1)$$

ここに、 q = 注入速度 (cm³/sec), k = 透水係数 (cm/sec), r_1 = 吐出部である球空洞の半径 (cm), p = 注入圧 (kgf/cm²), μ = 水に対する注入液の粘性係数の比である。また、 p の単位を (kgf/cm²) で表現したので、水の単位体積重量 γ_w は (kgf/cm³) で表示する。さらに注入速度 q の単位は、本論文は計算式では (cm³/sec) で表示するが、その他では (l/min) に換算して記述する。なお、1 cm³/sec = 0.06 l/min である。

注入速度が地盤の透水性に対して十分小さく、吐出孔周辺空洞の表面に当たる浸透面だけで浸透注入が得られている段階では、割裂が生じないので浸透面積はそのまま変化しない。このため、有効注入圧（実測する注入圧から管内抵抗や注入位置との差を考慮して補正したもので、本文ではこの有効注入圧のことを単に注入圧としている）は注入速度にほぼ比例する。その後、注入速度が増加するにつれて、吐出周辺空洞の表面から割裂脈が発生・進展し、割裂によって生じた浸透面積（以下、割裂面積という）が次第に増加する。注入後は、発生した割裂脈から地盤に浸透することができる。このような割裂脈からの浸透が割裂浸透である。注入速度の増加により割裂面積が拡大するので、注入圧の増分は次第に小さくなる。注入速度がさらに増加して、地盤中に大きな割裂脈が発生すると、割裂面積が急激に増加するので、この段階の注入圧は注入速度を上げてそれ以前の注入圧より小さくなり得る。

図-1 には、砂質地盤においてゲル化時間の長い緩結性薬液を注入した場合の一般的な注入圧 p と注入速度 q の関係（以下、 $p \sim q$ 曲線という）を示す。なお、図中の注入圧は、注入速度を段階的に増加しながら注入した際、各段階での圧力の変動がほとんどなくなった状態の値である。この $p \sim q$ 曲線の原点 O から a 点までの直線区間では割裂は発生せず、浸透面積が増加しない完全な浸透注入となる。この直線区間を初期直線勾配と定義

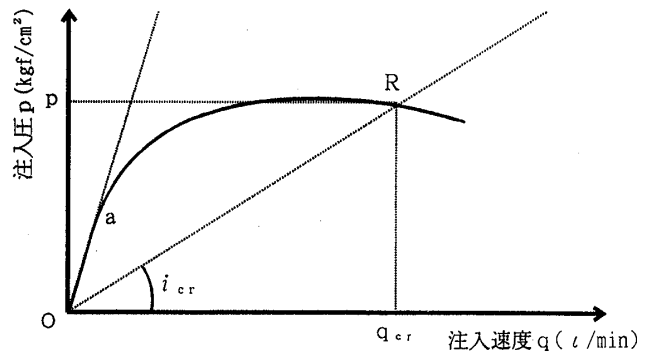


図-1 $p \sim q$ 曲線

する。 a 点からは曲線形となり、その曲線勾配 ($\Delta p / \Delta q$) が次第に減少して、一定値またはマイナス勾配になる。これは a 点において吐出孔周辺地盤から割裂が発生して、浸透面が増加していることを意味している。

また、 $p \sim q$ 曲線に及ぼす地盤条件の影響としては次のように考えられる。 $p \sim q$ 曲線の初期直線勾配は透水係数、直線部から曲線部への変化点と曲線部の勾配状況は深度（拘束圧）に密接に係わっている。透水性が小さいほど、初期勾配が大きくなり、拘束圧が小さいほど曲線勾配が小さくなりやすく、またマイナスに転ずる注入速度も小さくなっている。

2.2 固結形状と限界注入速度

一定の地盤条件のもとで注入する場合、固結形状に影響を及ぼす注入条件としては注入速度と注入圧であるが、この両者をそれぞれ任意に設定することはできない。注入圧は、注入速度に応じて定まるので、良好な固結形状を得るためには、このどちらかの適正な範囲を知ればよいことになる。許容注入圧を定めて注入状況を把握しようとする試み³⁾もあるが、現場で実測される注入圧は管内抵抗など大きさの不明なものを含んでいるため、注入圧の絶対値の持つ意味は複雑で評価しにくい。また、実際の注入工事においては、一定の注入速度のもとで注入が行われており、施工管理や積算などを行ううえでも注入速度で管理の方が合理的である。そこで、ここでは固結形状と注入速度の関係に注目し、良好な固結形状を得ることのできる注入速度の上限値、すなわち限界注入速度の持つ意味について考えることにする。

前節で述べたように、割裂が進展する度合いは、 $p \sim q$ 曲線に反映されると考えられる。したがって、適正な注入速度の範囲を $p \sim q$ 曲線から読みとるためには、良好な固結形状を得るために許容できる割裂の進展度合いを何らかの形で評価し、その結果を $p \sim q$ 曲線上で決めることが必要となる。

割裂の進展度合いは、割裂面積で表すことができる。

まず、ここで浸透面を球状とした Maag の式を用いて、割裂面積 A （初期吐出孔面積と増加した浸透面積）を式(1)を変形して式(2)より求めることにした。実際の割裂面の形状は平面的なものであり、球の周面からの浸透を仮定している Maag 式と異なるので、実際の浸透状況に対して適用できるわけではない。ここでは、割裂面積の進展の度合いを、浸透面積を指標として定式化するために採用することにした。実験においては、実際の割裂面積を測定して注入圧、注入速度の関係を求め、Maag 式を採用するに際して係数の補正等を行っている。なお、割裂面が球の周面の場合と平面(円盤の両面)の場合の違いについては、6章で後述しているが、その違いはあまり大きくはない。

$$A = \frac{\mu^2 \cdot \gamma_w^2 \cdot q^2}{4 \cdot \pi \cdot k^2 \cdot p^2} = \frac{\mu^2 \cdot \gamma_w^2}{4 \cdot \pi \cdot k^2 \cdot i^2} \quad (2)$$

ここで、 A = 割裂面積 (cm^2)、 $i = p \sim q$ 曲線において原点を通る任意の直線勾配 ($= p/q$) である。この勾配 i は割裂面積 A が一定の状態であり、その割裂面積の大きさは式(2)より勾配 i の2乗に反比例することがわかる。したがって、注入速度が a 点を超えると勾配 i が小さくなり、必要割裂面積が拡大することになる。

固結形状は割裂面積が拡大するにつれて、浸透面積が板状的になって行くので、球形状から次第にいびつな形に変化する。このため、割裂浸透によってほぼ球形状の固結形状が得られる許容割裂面積 A_{cr} と地盤の透水係数 k がわかれば、その状態での p/q に当たる限界勾配 i_{cr} は式(3)より求めることができる。

$$i_{cr} = \frac{\mu \cdot \gamma_w}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A_{cr} \cdot k}} \quad (3)$$

したがって、図-1に示した $p \sim q$ 曲線と限界勾配の交点 R における注入速度は、割裂面積が許容割裂面積となる状態の注入速度であり、この大きさが限界注入速度 q_{cr} に相当する。

しかしながら、上記の考え方は、注入条件によらず式(1)が成立すると仮定した場合であり、発生する割裂面の大きさが式(2)と一致するかどうか不明である。このため、 $p \sim q$ 曲線から限界注入速度を推定する手法を確立するためには、固結形状と許容割裂面積の大きさとの関係の他に、発生割裂面積の実測値と計算値の相違を調査することが必要である。

また、上述した方法で薬液による限界注入速度を求めるためには、薬液による $p \sim q$ 曲線を求めておくことが必要である。しかし、実用の薬液を用いて $p \sim q$ 曲線を求めると、大量の薬液が必要となるばかりでなく、地盤中でゲル化して本工事に影響を及ぼすことも考えられる。このため、薬液のかわりに水を用いて $p \sim q$ 曲線を

利用する数段簡便な方法をとることにする。薬液と水とは粘性が異なり、 $p \sim q$ 曲線の形も粘性に左右されるが、この影響については別途考慮している。

3. 現場における水注入による $p \sim q$ 曲線

前章で述べたように、ここでは薬液による $p \sim q$ 曲線のかわりに、水注入試験による $p \sim q$ 曲線を利用する方法をとるので、実際注入工事では注入計画段階で現場水注入実験を行い、現場地盤の $p \sim q$ 曲線を求めることにした。

一般の注入管を用いて現場注水実験を行うと、地表で実測した注入圧は管内抵抗を含んだものとなる。管内抵抗はパッカー用の瞬結ゲルの付着状況などにより異なり、浸透に有効な注入圧 (= 実測した注入圧 - 管内抵抗 + ヘッド差) を正確に知ることができない。また、吐出孔付近の正確な初期浸透面積も不明である。正しい $p \sim q$ 曲線を描くためには、正確な有効注入圧と初期浸透面積を知ることが重要である。

図-2に示す提案した水注入試験方法は、ボーリング孔(直径10 cm)を一旦グラウトで満たして、5 cmの底付き塩ビパイプを挿入固定し、グラウトが固結した後、パイプ先端を直径4.1 cm、深さ10 cm ボーリングして、この素堀孔部分から注入するものである。この方法では、管内抵抗は小さく、地上部で正確に測定できる。さらに初期浸透面積(素堀孔表面積)は142 cm^2 となる。

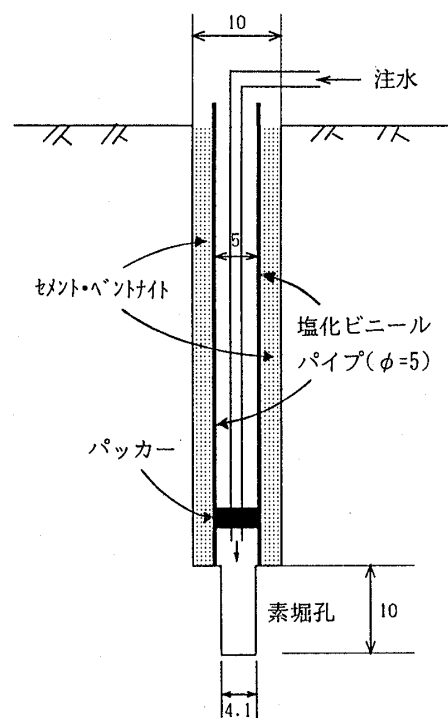
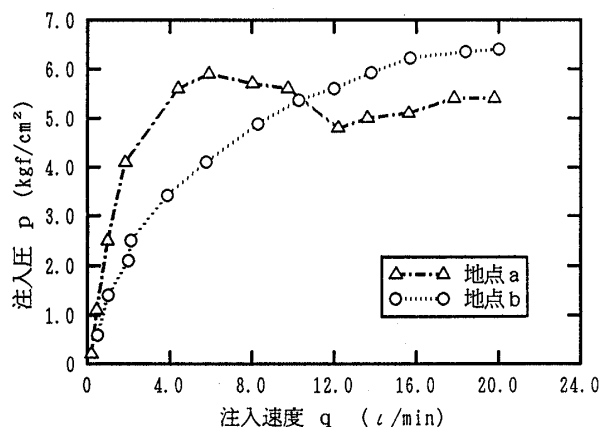


図-2 提案した水注入試験孔 (単位: cm)

表-1 現場水注入実験における土質概要

地点	深度 (m)	土質	N 値
a	8	細砂	50
b	21	細砂	31

図-3 $p \sim q$ 曲線 (現場水注入)

この面積は実際の注入孔周りの浸透面積に近いと考えて決めたものである。また、この注入試験は注入液を水として実施するものである。表-1には、注入現場の土質性状を示す。

図-3には、現場水注入実験における注入圧～注入速度の関係を示しているが、この $p \sim q$ 曲線は、図-1で示したものと類似の形となった。 $p \sim q$ 曲線の形としては、透水性のかなり小さい地点aの細砂層では、注入圧が6 l/min程度の小さい注入速度から一定あるいは減少に転じている。一方、透水性がやや大きい地点bの細砂層では、 $p \sim q$ 曲線の曲線勾配は、注入速度が増加するにつれてやや低下するものの、マイナス勾配には至っていないことがわかる。したがって、地点aでは小さい注入速度で大きな割裂脈が発生するが、地点bでは大きな割裂が発生せず、ほとんど浸透注入状態になることが予想できる。

なお、実際の注入工事では地下水等の水質の監視が必要となっているが、現場水注入試験に用いるこの素掘孔は、地下水調査用のボーリング孔として利用することが可能である。

4. 室内大型土槽による注入実験の方法及び試料

限界注入速度の研究に用いた大型土槽による注入実験装置の概要を図-4に示す。土槽の底板に直径80 cmの

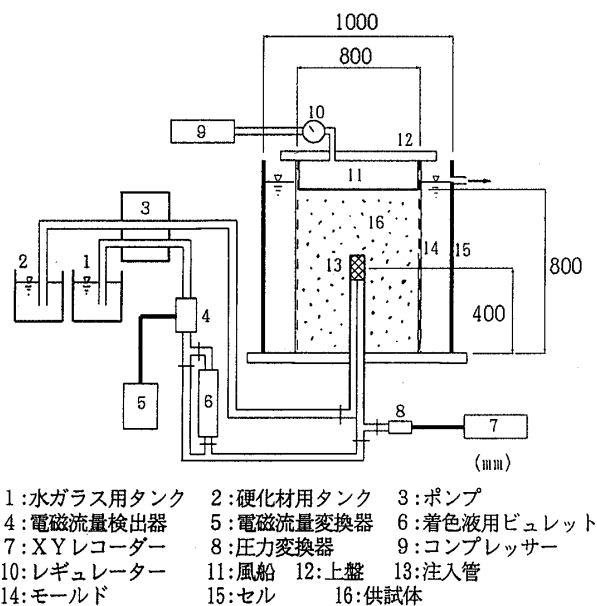


図-4 注入実験土槽

モールドを設置し、この中に試料砂を詰め、その中心から注入する仕組みになっている。モールドは直径80 cm、高さ100 cmの鋼製円筒で、側面には注入により押し出された間隙水の排水が可能のように、約2 mmの孔が多数開いている。その内壁には砂の流出を防止するために、63 μ mの金属メッシュを張り付けている。モールド内に水を入れ、試料砂を投入し、突き棒で固めて一定の状態に土槽を作製する。モールドの外周にはアクリル製のセルを設け、セルとモールドの間は水が満たされた状態にしておく。注入に伴う土槽中からの排水は、モールド上部から外部にオーバーフローできる。また、モールド内に詰めた試料砂の上表面にはゴム風船を取り付け、風船を加圧する。今回の実験では、上載圧はすべて1.0 kgf/cm²に設定している。これは、土被り深さにすると地下水位によって異なるが、薬液注入で一般的な7~15 mに相当する。モールドの中央には、直径4 cmの注入管を底面から40 cmの位置に立ち上げた。また、注入圧は注入管の下端の実測圧力から管内抵抗を減じたものとした。注入管と砂とは密着した状態に締固めるので特別のパッカーは不要で、管内抵抗は事前に正確に測定できる。このようにすれば水注入試験及び薬液の一点注入も可能である。

表-2、図-5には、試料砂の種類及び粒度分布曲線を示す。試料砂は、市販の8号ケイ砂を主体とし、それと粒度の細かい特粉ケイ砂を混合したものを用いた。なお、混合においては、ミキサーを用いて表-2のような混合率で、5~6バッチに分けて6分間混合した。この

表-2 試料砂の種類

試料	摘 要	透水係数 $k(\text{cm/sec})$	間隙比 e	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$
A	ケイ砂 8 号	1.5×10^{-3}	0.774	1.494
B	A : 特粉ケイ砂 = 9:1	7.5×10^{-4}	0.659	1.597
C	A : 特粉ケイ砂 = 8.5:1.5	5.2×10^{-4}	0.636	1.620
D	A : 特粉ケイ砂 = 8:2	3.0×10^{-4}	0.621	1.634

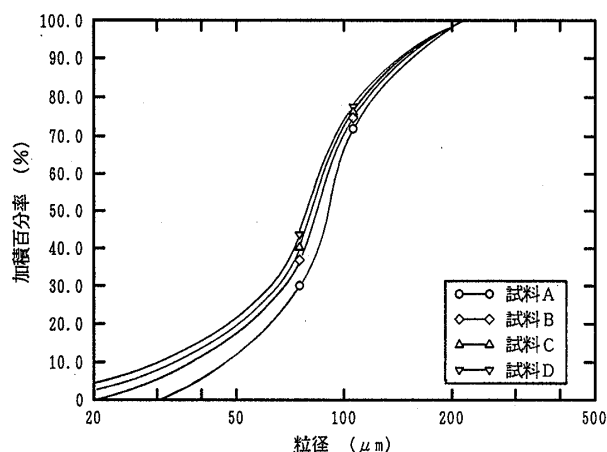


図-5 粒度分布曲線

試料砂を上記の方法で土槽に入れ、水注入試験による $p \sim q$ 曲線を求めておく。つぎに同様に作った土槽において、緩結性の溶液型水ガラス系薬液を使用して一点注入を行う。表-3 には、2 種類の薬液の配合及び水との粘性比を示す。

薬液を用いた一点注入実験は、注入速度や試料の種類を変化させ、合計13ケース実施した。表-4 には、各ケースの注入条件を示している。表中の注入圧は、実験終了直前の圧力から、その実験の注入速度における薬液の管内抵抗を差し引いた値を用いた。なお、薬液の総注入量は、土槽の大きさの制約上いずれも50 lとした。また、割裂面の判定を容易にするため、総注入量50 lのう

表-3 薬液の配合

種類	配 合 (cc)		ゲル化時間 (分)	水に対する 薬液の 粘性比 μ
	A 液500	B 液500		
I	3号水ガラス 250	グリオキザール リン酸 水 436	20~30	2
	水 250			
II	3号水ガラス 300	水 436	15~20	3
	水 200			

表-4 各ケースにおける注入条件と割裂面積

CASE	試料	注入速度 (l/min)	注入圧 (kgf/cm ²)	薬液	実測した 割裂面積 (cm ²)
1	A	15.0	3.1	I	620
2	A	23.0	3.8	I	720
3	A	24.0	3.5	I	1230
4	B	10.0	3.6	I	570
5	B	20.0	3.8	I	2310
6	C	10.0	3.62	I	1820
7	C	16.0	4.15	I	2730
8	D	6.0	3.69	I	1410
9	D	10.0	4.19	I	3240
10	D	12.0	4.3	I	4580
11	D	20.0	4.05	I	9000
12	B	8.0	3.5	II	580
13	B	14.0	4.26	II	1240

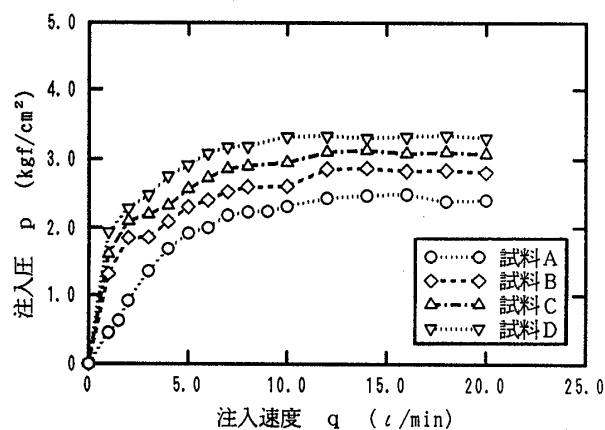
ちの最後の5 lは、注入パイプ途中のビュレットに切り替えて、着色した薬液を注入した。

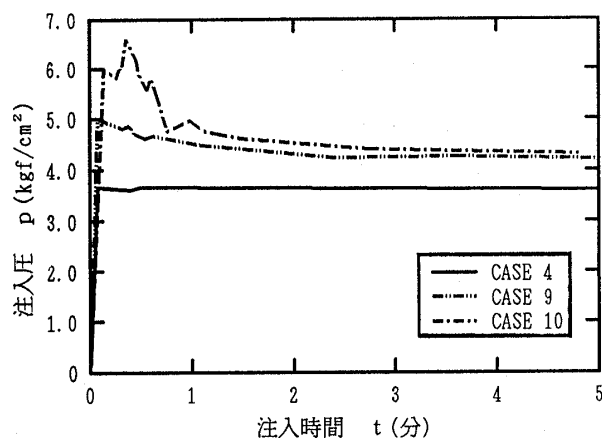
5. 注入実験結果

5.1 水注入試験の $p \sim q$ 曲線と薬液注入時の $p \sim t$ 図

水注入試験における各試料の $p \sim q$ 曲線を図-6 に示す。この図より、透水性の小さい試料ほど、 $p \sim q$ 曲線の初期の立ち上がり勾配が大きくなっている。

図-7 には、薬液を一定の注入速度で総量50 l注入した場合の注入圧と注入時間の関係 ($p \sim t$ 図) のいくつかの例を示す。注入圧の大きさは、注入直後に最大値を示し、その後徐々に低下して一定値となる場合が多い。

図-6 $p \sim q$ 曲線 (室内水注入)

図-7 $p-t$ 図

5.2 薬液の注入速度による固結形状と発生割裂面積

薬液を数種の注入速度でそれぞれ50 l注入終了後、薬液の固結を確認してから土槽中の未固結部分の砂を掘削あるいは水洗いにより除去して、固結体全体の形状を観察し、ほぼ球状かいびつ形かを判定した。つぎに、固結体を上から5~10 cmごとに水平方向に切り取って水平断面を観察し、断面ごとに着色された割裂面の寸法を測定した。割裂面は必ずしも直線的に放射状に伸びているわけではないので、メジャーを用いて細かく測定し、各断面の割裂状況から割裂面の全体図をスケッチした。さらに、割裂面を円や長方形などの組み合わせに近似して割裂面の大きさを計算した。その両面から薬液が浸透すると考え、得られた割裂面の大きさを2倍して固結体内に発生した割裂面全体の表面積を求めた。

図-8は、上記の一点注入による各ケースの割裂面積（初期吐出孔表面積50 cm²を含む）と固結形状（球状またはほぼ球状、ややいびつ形、いびつ形）の関係を示す。写真-1, 2には球状またはほぼ球状の固結形状、写

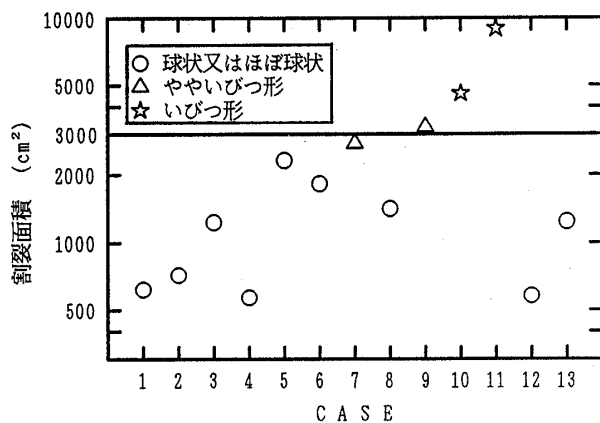


図-8 供試体の割裂面積と固結形状の関係

真-3, 4には、ややいびつ形の固結形状を示している。この一点注入で、これらの写真-1~4程度の固結形状が期待できる場合には、実際上の大きい固結範囲を得るために行う群注入を行ったとすると、連続した固結範囲が

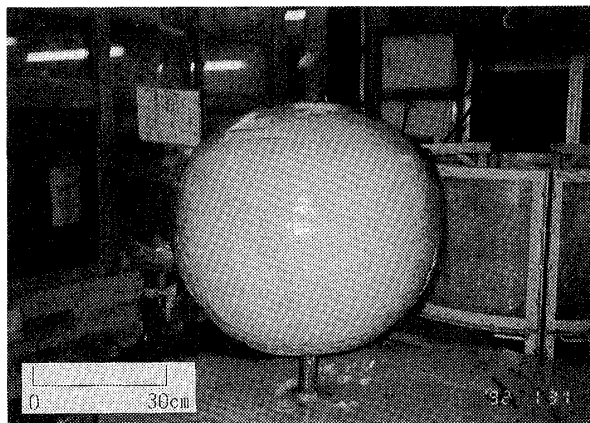


写真-1 試料 A の固結形状（全体図, CASE.2）

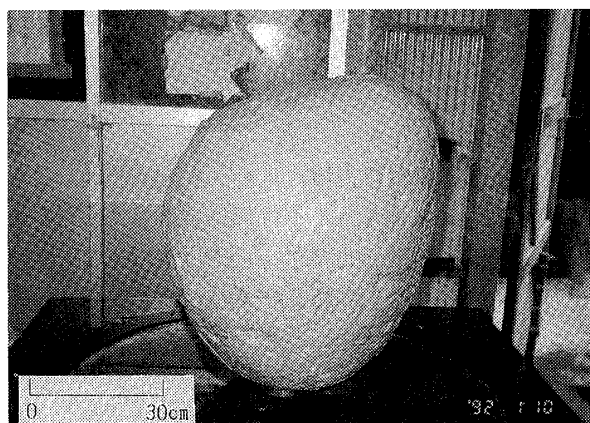


写真-2 試料 B の固結形状（全体図, CASE.5）

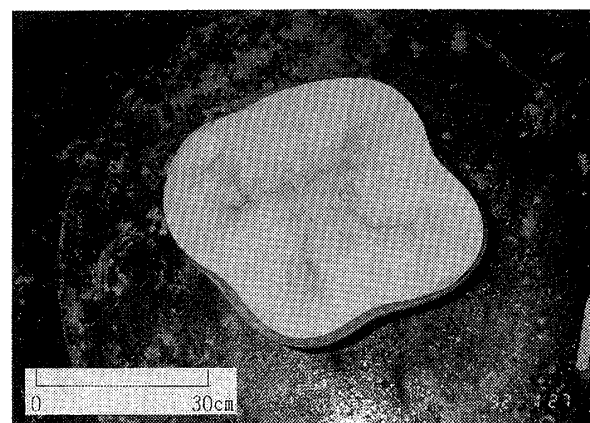


写真-3 試料 C の固結形状（真上からの断面, CASE.7）

得られるものと考えられ、固結形状としては適切な範囲と判断される。写真-5、写真-6には、固結形状がいびつ形となったCASE. 10とCASE. 11の固結体の断面図を示しており、2～4本の割裂脈が鉛直かつ半径方向に

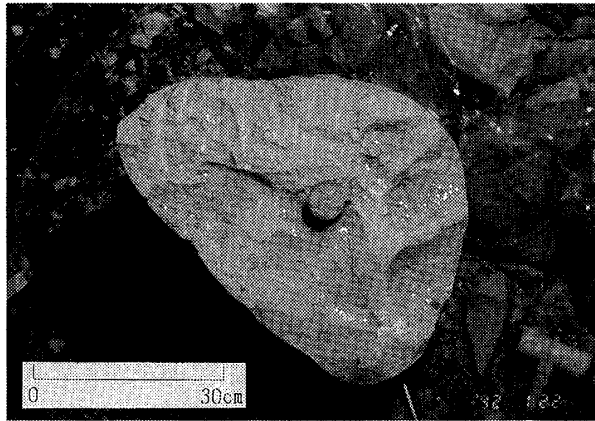


写真-4 試料Dの固結形状（真上からの断面, CASE.9）

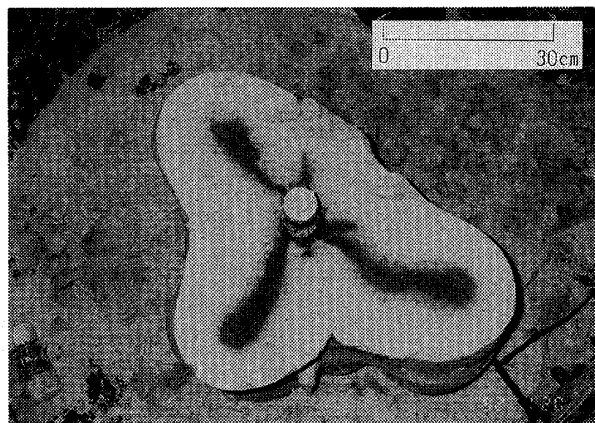


写真-5 試料Dの固結形状（真上からの断面, CASE.10）

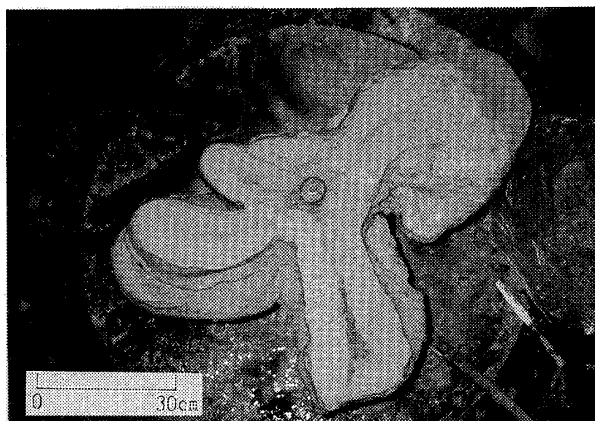


写真-6 試料Dの固結形状（真上からの断面, CASE.11）

発生していることがわかる。これらの場合は群注入を行っても注入範囲内において未固結部分が残しやすいと考えられる。

図-8から判断すると、薬液による割裂面積の許容値は 3000 cm^2 程度と判断される。すなわちこの面積は、直径44 cm程度の一つの円盤状に割裂が発生したとき、円盤両面の合計面積である。割裂面積の許容値としては、割裂面からの浸透形状に影響する割裂面の発生本数や割裂面の発生形状も関係がある。発生本数が多く、対称的に分布するほど固結形はよくなるはずである。そこで、今回の実験や今までの現場実験の結果をみると、ほぼ均一な地盤では発生する割裂本数は2～4本がほとんどで、ほぼ対称的に発生し、割裂面は大体鉛直で平面または湾曲したものとなるので、図-8による割裂面積の許容値でよいものと考えられる。

6. 割裂面を有する場合にMaag式を援用するための補正

5.2において、薬液注入で割裂浸透注入になる場合、ほぼ球状に近いややいびつ形状を固結体で得られる割裂面積の許容値は 3000 cm^2 であることを示した。2章で述べた方法から限界注入速度を決定するために、Maagの式がそのまま適用できれば好都合であるが、Maag式(式(1), 式(2))による必要浸透面積と実測割裂面積が異なる場合は、球状浸透面に基づくMaag式に、割裂面を有する場合に援用するに当たっての補正などを行わなければならない。そこで薬液注入時の注入圧 p_L 、注入速度 q 、薬液の粘性係数および試料の透水係数を用いて、Maag式から求められる必要浸透面積と実測割裂面積を比較してみることにした。

図-9には、その比較した結果を示す。この図よりMaag式による割裂面積は、実測の割裂面積よりかなり

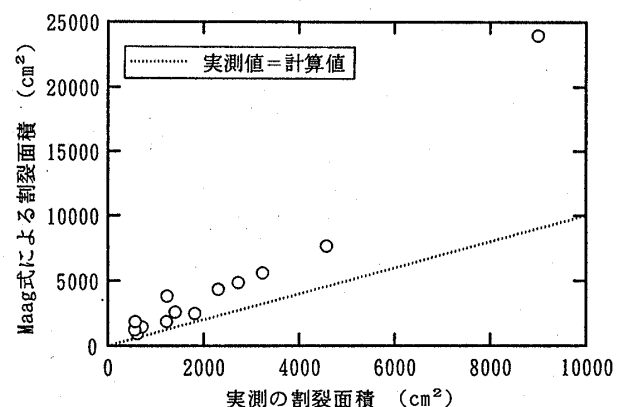


図-9 割裂面積の実測値とMaag式による計算値

大きくなっていることがわかる。このため、Maag 式を補正して実測値にほぼ一致するように改めることが必要である。

発生する割裂面積の値が実測値と合致しない理由としては、注入圧に対する薬液の粘性の影響度のずれや、割裂面の形状が式(1)で仮定した球の周面形状とは異なることによる影響などが考えられる。

このうち割裂面の形状の影響については、次のように考えることができる。Maag 式では、球空洞の表面から注入されることを前提にしたものであり、割裂面は球の表面である。実際に生じる割裂によって形成される割裂面は、写真-5で示されるように平面的なものであり、この影響を考慮することが必要である。いま、半径 r_2 の円盤の両面から浸透する場合の注入圧と注入速度の関係は、片面からの浸透に相当する井戸底流れの式⁴⁾ ($Q=4kr_2H$, Q : 注入速度 (cm³/sec), H : ヘッド (cm)) を2倍した式(4)に相当すると考えられる。

$$q = \frac{8 \cdot k \cdot r_2 \cdot p}{\gamma_w} \quad (4)$$

割裂面積の大きさは式(1)と式(4)でそれぞれ $4\pi r_1^2$ (半径 r_1 の球の表面積), $2\pi r_2^2$ (半径 r_2 の円盤の両面積) となる。このため、同一の注入圧と注入速度では、式(4)の割裂面積が式(1)より2割大きくなる程度である。したがって、割裂面がその他の形状になったとしても、Maag の(1)式によるものとあまり大きな差はないものと思われる。

そこで、粘性の影響度に注目して Maag 式の補正を行うことにした。吐出孔部分の浸透面積が不変である $p \sim q$ 曲線の初期直線部の勾配 i_0 では、水注入による場合の初期直線勾配 i_{ow} に対する薬液による初期直線勾配 i_{ol} の比 α は、粘性比 μ (水を1.0とする) に一致するはずである。しかし、今回の α を調査した注入実験では、図-10に示すように i_{ol} は粘性比 μ に比例せず、 i_{ol} と i_{ow} の比 α は、式(5)に示すように μ のほぼ $2/3$ 乗に等しくなった。

$$i_{ol} = \alpha \cdot i_{ow} = \mu^{2/3} \cdot i_{ow} \quad (5)$$

また、割裂が発生した後の曲線部分においては、水の注入圧 p_w に対する薬液の注入圧 p_L の比 β は、薬液と水との粘性比よりかなり小さいものとなった。図-11には、同一の注入速度における水の注入圧 p_w と薬液の注入圧 p_L の関係を示しているが、両者の比 β は、式(6)に示すように μ の $1/3$ 乗程度倍となった。なお、 β の値は必ずしも一定でなく、注入速度の大きさによってやや変化するが、割裂面積が数千 cm² 前後における値として $\mu^{1/3}$ をとった。

$$p_L = \beta \cdot p_w = \mu^{1/3} \cdot p_w \quad (6)$$

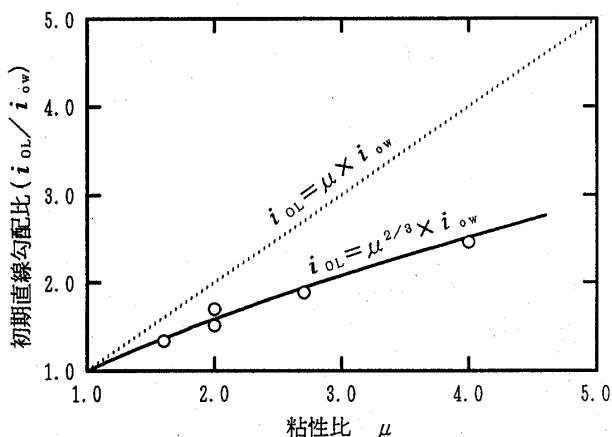


図-10 粘性比と初期直線勾配比の関係

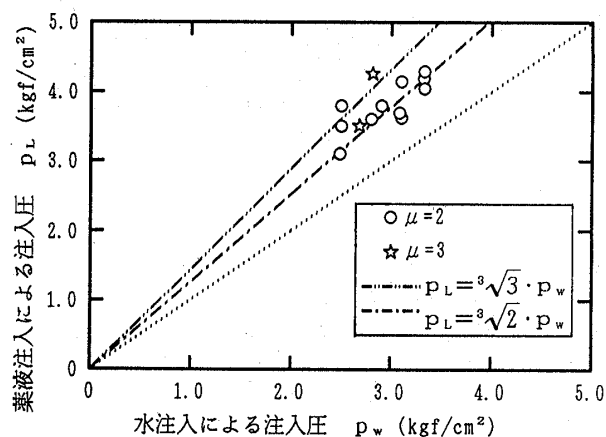


図-11 p_w と p_L の関係

そこで、式(5)、式(6)を用いて、Maag 式による割裂面積 A を与える式(2)を補正すると、式(7)が得られる。この式は、水注入における注入圧 p_w から薬液による割裂面積 A_L を求める式を意味する。

$$A_L = \frac{(\alpha/\beta)^2 \cdot q^2 \cdot \gamma_w^2}{4 \cdot \pi \cdot k^2 \cdot p_w^2} = \frac{\mu^{2/3} \cdot q^2 \cdot \gamma_w^2}{4 \cdot \pi \cdot k^2 \cdot p_w^2} \quad (7)$$

図-12には、式(7)を用いて補正した割裂面積と実測した割裂面積の関係を示しており、両者はほぼ一致していることがわかる。ここでは、あらかじめ同一地盤における水注入の $p \sim q$ 曲線が描かれており、その曲線で実際に注入した注入速度における p_w を用いて計算している。したがって、事前に図-6のような水注入の $p \sim q$ 曲線を作成することが前提となる。

一方、水注入の場合の割裂面積は粘性比 μ が1.0であるので、式(7)から式(8)のようになる。

$$A_w = \frac{q^2 \cdot \gamma_w^2}{4 \cdot \pi \cdot k^2 \cdot p_w^2} = \frac{A_L}{\mu^{2/3}} \quad (8)$$

式(8)の左辺 A_w は、粘性比 μ の薬液による割裂面積

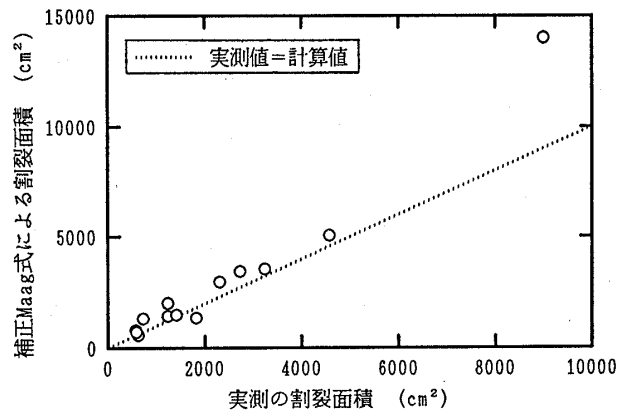


図-12 割裂面積の実測値と補正 Maag 式による計算値

が A_L となった注入速度で、水を注入した場合の割裂面積に相当する。式(1)の Maag 式が注入速度や粘性によらず成立するとすると、 α, β はともに μ で、 A_w は A_L に当然一致する。

7. 限界注入速度 q_{cr} の決定方法

これまでの結果により、①良好な固結形状が得られる許容割裂面積は、薬液の場合 3000 cm^2 であること。②実測した割裂面積から Maag 式を補正すると式(7)となることがわかった。したがって、限界注入速度は2章に述べたように割裂面積が許容値となる限界勾配 i_{crL} (p_w/q_{cr}) と $p \sim q$ 曲線の交点の注入速度として与えられることになる。

式(7)より限界勾配を求めると、式(9)となる。薬液による許容割裂面積 A_{crL} と粘性比 μ および透水係数 k がわかれば限界勾配が定まる。

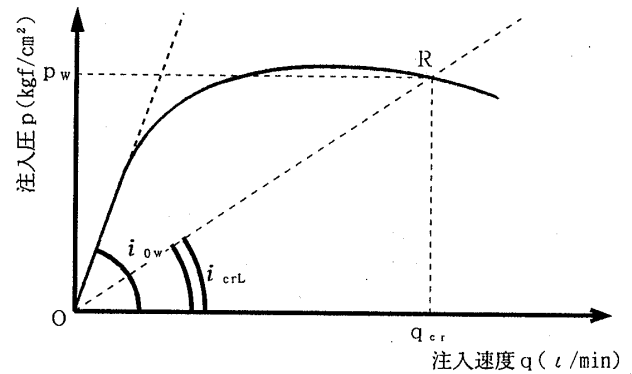
$$i_{crL} = \frac{\mu^{1/3} \cdot \gamma_w}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{A_{crL}} \cdot k} = \frac{\mu^{1/3} \cdot \gamma_w}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{3000} \cdot k} \quad (9)$$

地盤の透水係数 k の大きさは、土質試験などにより別途求めることができるが、 $p \sim q$ 曲線の初期直線勾配からも求めることができる。

図-2 に示した標準化した水注入試験では、素堀孔壁の形状は一定であり、浸透面積は 142 cm^2 である。 $p \sim q$ 曲線の初期直線勾配部分では割裂が発生せず、浸透面積は素堀孔の周面積の 142 cm^2 であると考えられるので、初期直線勾配 i_{ow} は、式(3)より、式(10)で与えられる。

$$i_{ow} = \frac{\gamma_w}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{142} \cdot k} \quad (10)$$

式(10)から得られる透水係数の値そのものは、通常の透水試験に比較して注入圧や注入速度が大きいため必ずしも一致するわけではないが、ここでは割裂の進展の度

図-13 水注入 $p \sim q$ 曲線からの q_{cr} の決定法

合いを勾配の変化を指標として評価しようとするものであり、この限りにおいては問題はないと思われる。

初期勾配と限界勾配との比(限界比 λ) は、式(9)、式(10)より透水係数 k を消去すると、式(11)で与えられる。

$$\lambda = \frac{i_{crL}}{i_{ow}} = \sqrt{\frac{142}{A_{crL}}} \times \mu^{1/3} = \sqrt{\frac{142}{3000}} \cdot \mu^{1/3} = 0.22 \cdot \mu^{1/3} \quad (11)$$

したがって、薬液による割裂面積の許容値を 3000 cm^2 とするときの限界注入速度 q_{cr} は、図-13に示すように $p \sim q$ 曲線と限界勾配 i_{crL} ($= \lambda \cdot$ 初期勾配 i_{ow}) の交点における注入速度として与えられる。なお、 λ の値は、薬液の注入量が 50 l とした本実験においては $\mu = 2 \sim 3$ の範囲では、 λ は $0.27 \sim 0.31$ で約 0.3 となる。

8. 限界注入速度と設計注入速度

限界注入速度の大きさは、前章で述べた方法によって求めることができるが、ここで重要になるのは薬液による許容割裂面積 A_{crL} や Maag の式の補正式である。 A_{crL} の値は一点からの注入量の大きさによっても異なることが考えられる。本実験は室内実験のため、薬液の注入量が 50 l で現場より少ないが、実際の地盤では 100 l 程度注入する。どちらも割裂面積が同一であると考えると、注入量すなわち注入時間が長くなるほど固結形状としては良好になる。このため、 3000 cm^2 の割裂面積の許容値は安全側の値になりうる。また、許容割裂面積の値は、注入間隔によっても左右され、注入間隔を密にするほど許容割裂面積は大きく設定することも可能である。割裂面積の許容値を 5000 cm^2 としても、その大きさは、割裂面を円板とすると直径 56 cm の円盤の両面積にすぎず、割裂面積を 3000 cm^2 とした場合の直径 44 cm と比較して著しく大きなものではない。

また、Maag の式の補正式も総注入量の影響を受ける

可能性がある。本試験では、注入総量が小さいので、注入圧を計測する時間が短い。計測時間が長いと、水注入に対する薬液注入の初期直線勾配の割合 α は、注入液の粘性比に比例してくることが考えられる。時間が短い場合は薬液の浸透半径が小さく、薬液が浸透して押し出される間隙中の液体が薬液より粘性の小さい水であるため、粘性に比例しない段階で注入が終了してしまい、注入圧が小さくなる傾向がある。このため、式(5)の α の値が $\mu^{2/3}$ となって μ より小さくなったように思われる。また今回、式(6)の割裂発生後の同一注入速度 q に対する薬液の注入圧 p_L と水と注入圧 p_W の比 β を粘性のみの関数 ($p_L = \mu^{1/3} \cdot p_W$) として定めたが、 β は注入速度の大きさ、すなわち割裂の進展の度合いによって異なる。割裂進展の初期段階では β は α に近くなり、割裂が進展して停止した状態では β は 1 に近くなる。したがって、式(7)の α/β の値は、注入条件によって変化する可能性が考えられる。ただし本試験で必要としている α/β は、割裂面積が数千 cm^2 となる範囲に限定されるので、 $\alpha = \mu \sim \mu^{2/3}$ 、 $\beta = \mu^{1/3}$ の範囲にあるものと考えられる。したがってこのような場合、図-13における限界比 λ (i_{cL}/i_{OW}) は、粘性比 μ を 2~3、また許容割裂面積を 3000~5000 cm^2 とすると、0.21~0.44 の範囲となり、 λ の標準値としては 0.3 がほぼ中央値である。

このようにして求めた限界注入速度は、良好な固結形状が得られる注入速度の上限値であり、実際の注入工事における設計注入速度は、限界注入速度以下とすることが必要である。設計に用いる λ 値は、水注入試験の精度や工事の規模・重要性などを考慮して決定すべきである。極めて良好な固結形状を期待する場合には、設計 λ 値を 0.4 以上とすることが望ましい。しかし、固結形状は、設計 λ 値を大きくしてもそれほど良好になるわけではない。設計上の注入範囲は一点注入した場合の固結領域として考えると直径 1 m 前後の球程度となるので、発生した割裂面積が小さければ、割裂が全く発生しない場合と同程度の固結形状が得られると考えられる。限界勾配が初期直線勾配の半分程度、すなわち λ 値が 0.5 程度の場合は、割裂面積は式(11)において $\lambda = 0.5$ 、 $\mu = 2 \sim 3$ とすると、902~1181 cm^2 で約 1000 cm^2 となる。この大きさは直径約 25 cm の円盤の両面積程度にすぎず、実測の割裂面積が 720 cm^2 であった CASE. 2 では、球状の固結形状が認められた(写真-1)。したがって、この程度の割裂面積であれば、割裂面がいびつな場合でも注入範囲から考えて固結形状に及ぼす割裂の影響はなく、割裂が発生していない場合とほぼ同等の固結形状が得られると考えられる。このため、実用上の設計 λ 値の上限値は 0.5 程度であると考えられる。本方法で

は、 $p \sim q$ 曲線の初期直線勾配が十分明確に求められていることを前提にしているので、この勾配部の範囲では、所定の素堀孔周面積が確保されていることが必要である。しかし、地盤が特にゆるい場合には、素堀孔の崩壊などにより所定の周面積が得られないこともあり得る。素堀孔の周面積が小さくなっている場合には、安全側の限界注入速度が得られるので問題は少ないが、周面積が大きくなる場合には大きめの危険側の限界注入速度が得られることに留意すべきである。設計 λ 値が 0.4 程度の場合には、素堀孔周面積が所定の値の 2 倍程度大きくなっても、 $\lambda = 0.3$ の場合と同程度の良好な固結形状が期待できる信頼性を有している。

なお、 $p \sim q$ 曲線の初期直線勾配は、式(10)に示したように地盤の透水係数に逆比例しているので、正しい透水係数が分かっているならば、この直線勾配から求められる透水係数と比較し、初期直線勾配の大きさの妥当性を判断することができる。

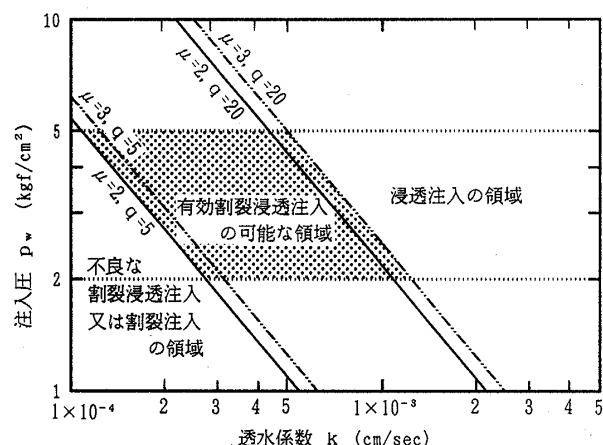
9. 限界注入速度の決定が必要な地盤

どのような地盤においても、水注入による $p \sim q$ 曲線を正確に求めることができれば、限界注入速度を知ることができる。しかし、実際問題としては注入の対象となるすべての地盤において限界注入速度が必要になるわけではない。実用の注入速度は 5~20 l/min であるため、限界注入速度が明らかにこの範囲外にあると判断される場合は、限界注入速度を求める必要はない。

通常の注入速度の範囲では、透水性のかなり大きい砂・礫では完全な浸透注入、透水性の小さいシルトなどでは割裂注入にしかなり得ないので、固結形状が注入速度によって大きく変化することはない。透水性が比較的小さい砂質地盤のように注入速度が大きくなると割裂が発生しやすい地盤、すなわち割裂浸透になりやすい地盤の場合にこそ、限界注入速度を把握することが重要となる。

図-14に注入速度を 5 l/min から 20 l/min とし、また割裂面積の許容値を 3000 cm^2 とした場合の、透水係数と注入圧の関係を両対数グラフで示す。なお、この図は式(7)を用いて計算を行ったものである。

計算において注入圧の範囲は、本実験や現場水注入実験のデータにおけるその多くが 2.0~5.0 kgf/cm^2 (注入圧から管内抵抗を引いたもの) にあるため、2.0~5.0 kgf/cm^2 とした。また、粘性比は 2.0~3.0 とした。図-14に示した結果より、割裂浸透となって注入が有効な限界注入速度を正しく知る必要のある地盤は、透水係数がほぼ $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ の範囲であることがわかる。またこの結果は、透水係数 k が $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$

図-14 q_{cr} の決定に必要な透水係数の k の範囲

以上の地盤では、実用注入速度 5~20 l/min のどれを用いても効果的な浸透注入が期待でき、一方 $k=1 \times 10^{-4}$ cm/sec 以下の地盤では、注入速度を最も小さい 5 l/min にしてもいびつな固結体が割裂注入となり、全体的に良好な固結体が形成される効果的な注入ができないことを意味している。したがって、この限界注入速度は透水係数 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec オーダーの砂質土層と判別された場合に考慮すべきものである。なお、地盤の透水係数の判定には、十分な注意を払うべきである。

10. ま と め

本研究は、薬液が割裂浸透注入になっても良好な固結形状が得られる注入速度の上限値である限界注入速度を、現場水注入試験によって得られる $p \sim q$ 曲線から求める考え方に関するものであり、土槽実験により固結形状と割裂面積の関係を調べて、限界注入速度の決定方法を提案している。主な結果は、以下のとおりである。

① 固結形状と割裂によって生じる割裂面積の関係を実験的に調べた結果、一点からの総注入量 50 l の場合に良好な固結形状が得られる割裂面積の許容値は 3000 cm^2 程度である。

② 限界注入速度は、現場水注入試験における $p \sim q$ 曲線と許容割裂面積の大きさを用いて求めた限界勾配 i_{crL} によって求めることができる。

③ 限界勾配 i_{crL} は水注入試験による $p \sim q$ 曲線の初期直線部勾配 i_{OW} の 0.21~0.44 の範囲で、0.3 がほぼ中央値である。

④ 5~20 l/min の実用上の注入速度のもとでは、現場水注入試験により限界注入速度を求める必要がある地盤は、透水係数で $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec オーダーの砂層であり、透水係数がこの範囲外の場合には、固結形状が実用の注入速度の範囲内で変化する可能性は少ない。

今後は提案した方法により実際地盤の限界注入速度を求めて、この注入速度前後で薬液注入し、その固結形状の掘り出し調査を行い、使用した注入速度から予想される固結形状と比較検討を行う計画を考えている。

最後に本研究を進めるに当たり、林 忠氏、入谷 剛氏、室田篤司氏、高橋隆一郎氏には多大なご助力を賜ったことを心から感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 森 麟・田村昌仁・平野 学 (1987): 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, pp. 131~140.
- 2) 土質工学会編 (1985): 「薬液注入工法の調査・設計から施工まで」, pp. 66~71.
- 3) Morgenstern, N. R. and Vaughan, P. R. (1963): "Some observations on allowable grouting pressure," Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice, London, Butterworths, pp. 36~42.
- 4) 土木学会編 (1971): 「水理公式集」, pp. 369.