

砂質土地盤における薬液注入効果に関する基礎的研究

著者	熊谷 浩二
号	1494
発行年	1993
URL	http://hdl.handle.net/10097/10301

氏 名	熊 谷 浩 二		
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学位授与年月日	平成 6 年 3 月 16 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項		
最 終 学 歴	昭 和 48 年 3 月 東北大学工学部土木工学科卒業		
学 位 論 文 題 目	砂質土地盤における薬液注入効果に関する基礎的研究		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 柳澤 栄司	東北大学教授 三浦 尚	
	東北大学教授 澤本 正樹	東北大学教授 新妻 弘明	

論 文 内 容 要 旨

本研究は、トンネル掘削や開削工事に止水・強度増加の目的で用いられている薬液注入工法について、注入効果の評価手法の確立を主目的として実施したもので、土質定数と注入効果の関係を考慮して効果を評価する方法についての基礎的な研究を行っている。

第 1 章は序論で、本研究の目的を述べ、関連する従来の研究を概観した。

第 2 章は、球形に浸透する場合の注入圧についての解析解を求めている。これは実際の注入状況にあわせて、注入速度一定で注入された薬液が注入中にゲル化現象によって注入圧がどのような挙動を示すかと解析したものである。図-1 の境界条件のもとで、多孔質材料中の注入圧変化は流れの連続の式から、最終的に Laplace の方程式で表される。この過程で用いた仮定は、次のようになる。

- (1) 固相が変形しない
- (2) Darcy 則が成立する
- (3) 透水係数が等方・均質である
- (4) 浸透液が非圧縮性である

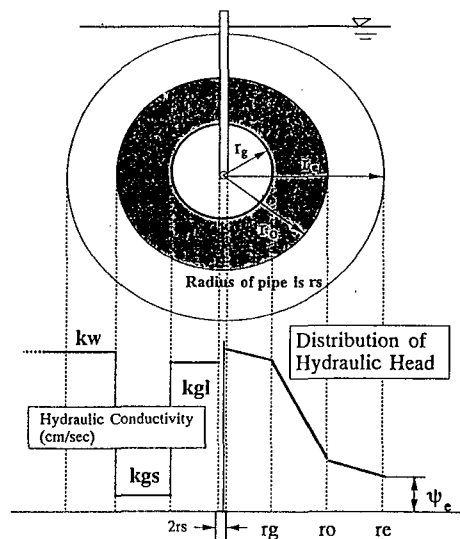


図-1 球状浸透注入の説明図

各相の未定数を決定し、球座標の解を求めると、次式のようになる。

$$\frac{d\Psi}{dr_0} = \frac{q}{4\pi r_0^2} \cdot \frac{1}{k_{gs} k_w} (k_w - k_{gs}) \quad (20)$$

(20)式より、ゲル化した薬液の透水係数 k_{gs} が水の透水係数よりも低ければ、あるいはゲル化が生じない緩結性薬液の場合薬液の透水係数 k_w が低ければ、注入水頭 Ψ は増加し続けることになる。また、(20)式より① r_0 が分母に r_0^2 の形で入っているの、注入圧の増加の割合は注入の進行とともに大きく減少し、一定値に近づくと、② k_{gs} が分母に入っていることにより k_{gs} (緩結性薬液の場合には k_w) の値が小さい程注入圧増加の程度が大きいことが分かる。

第3章は、浸透注入と割裂注入の違いによる注入圧傾向および注入効果の差をみるため、直径300mm×高さ300mmの円柱モールドを用いた実験の結果を示している。緩結めの供試体に緩結性薬液を注入速度1,000 cc/min および2,000 cc/min で注入した結果は、完全な球状になっており、理想的な浸透注入になっている。このことは、密詰め供試体でも同様であった。また、密詰め供試体に瞬結性薬液を注入した場合は、注入速度によって固結砂の形状が異なっている。これは割裂注入のためと思われるが、楕円球状になっているものから、著しく不規則な形状となるものまでがあり、割裂の程度および固結砂内部の填充率の分布や固結程度に差があると考えられる。

填充率 α (対象地盤の間隙に入った注入材の体積と元の間隙の体積との比率) の分布をみるために、化学分布用の試料(約15g)を図-2のように固結砂体の内部で6箇所、その外側の未固結部分で4箇所から採取した。填充率の分布は、浸透注入では80~120%とほぼ均質であるが、割裂注入では60~170%と大きくばらついている(図-3)。したがって、浸透注入による固結体は均質であり、割裂浸透注入では塊状に固結してはいるもののその均質さはやや劣るため、均質な固結体を期待する場合は、出来るだけ浸透注入が可能となるように注入条件を設定することが必要である

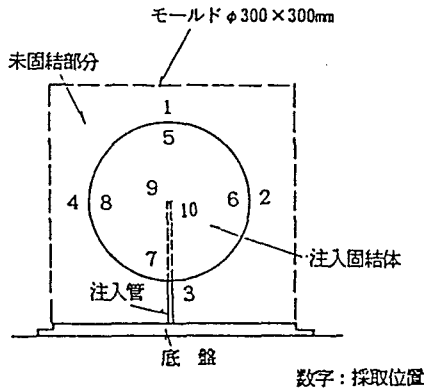


図-2 試料の採取位置

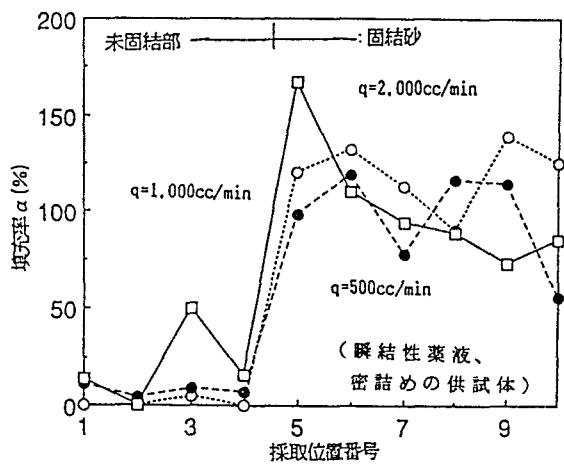


図-3 填充率の分布例(例)

ことを示している。また、割裂注入の場合には必ずしも良好な注入効果が期待できるものではなく、品質管理上問題になる可能性があることを示しているものと思われる。

第4章は、第2章で示した注入圧についての解釈を検証するため、前章の実験で得られた $P-q$ 関係、 $P-t$ チャートと注入効果としての固結形状との関係を求めている。また、割裂注入について、注入効果が発揮される局所的割裂と悪影響を及ぼす発展的割裂との2つの概念を提案し、これらが $P-t$ チャートから判断できることを示している。浸透注入の場合でも緩結・瞬結性薬液において、ゲル化現象を考慮するとそれぞれの $P-q$ 関係が線形関係にならないことを示し、割裂注入になるのは、 $P-q$ 関係が線形関係から著しくはずれ、 $P-t$ チャートが単調増加とならない場合であることを明確にした。このような性質は、 $P-t$ チャートを解釈する上で重要なものとなる。

第5章は、固結砂の強度と土質条件との基本的な関係を求めている。従来の供試体の締固め方法では、2 mm 程度の粒径の比較的大きな砂の間隙率を変えるのが困難なばかりでなく、密度分布が一樣な供試体を数多く作製することが困難であった。このため、本研究では、目標とする間隙率で再現性よく締固める方法を提案している。この方法は、図-4のようにバネ付きのロートに砂を入れ、一定高さより空中落下させて締固めるものである。この方法の特徴は、砂の排出につれバネに

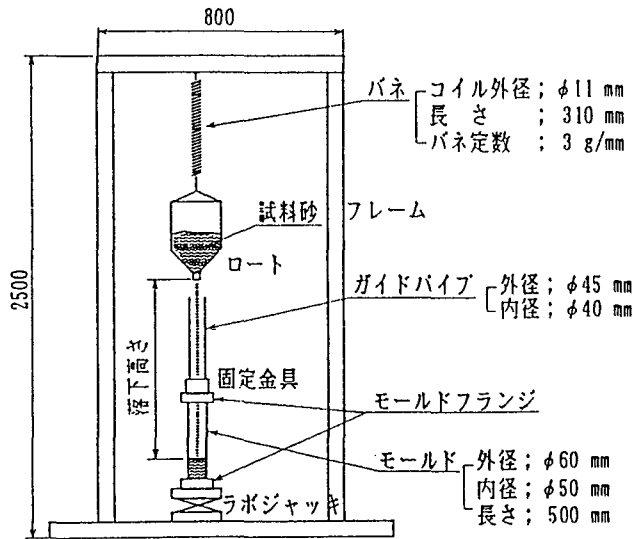


図-4 バネを用いた空中落下法の概要

加わる重量が減るに従い、バネの働きでロートが自動的に上昇することを利用することである。砂の表面との高さの差が常に一定に保たれるようにバネ定数を選定している。密度の調整は、ロート先端のノズル径および落下高さを変化させて行う。この方法によって作製した供試体に注入して得られた固結砂の相対密度と一軸圧縮強さとの関係を図-5に示す。砂の種類ごとにみると、それぞれ D_r に比例して一軸圧縮強さが大きくなる傾向が見られ、粒径の粗いものほどその勾配はなだらかになっている。また、図-6は填充率 α と一軸圧縮強さとの関係を示したものであるが、 α と q_u

の比例的な傾向は認められない。ここでの結果によれば、填充率がそれぞれある値以上であれば相対密度が一定のとき、砂の種類毎に一軸圧縮強さはほぼ一定値と考えて良さそうである。図-5の関係から見れば、注入後の一軸圧縮強さは填充率の影響より砂の相対密度により大きく関係していると考えられることができる。このように、この密度調整の方法によれば、浸透性や強度特性を知るための試験に必要な充分な精度をもつ供試体を作製することができ、固結砂の強度を知るための基本的な実験を行うことが可能となった。

第6章は、これまでの研究成果を不均質地盤である実現場に適用している。ひとつは、礫地盤における底盤止水工事での施工管理の事例である。注入圧変化（パターン）の「割合」に注目して注入効果との関係を検討している。一般に圧上昇が大きいほど注入効果は高くなると言われているが、未固結地盤における薬液注入では、岩盤注入と異なり注入孔1孔ごとの圧上昇の管理ではなく、『注入圧が上昇しないで終了した注入孔は、全注入孔の何%を占めるのか』を管理することが注入効果の予測に有効である。この場合、緩結性薬液の注入において注入圧の上昇しない注入孔は、浸透注入が図られ注入効果が発揮されていることを考慮する必要がある。この事例では、注入圧の分類方法や各種要因の設定など検討の余地が多く残されているが、注入工法の施工管理の一つの手法を得ることができた。

また、注入効果の評価事例の検討では、実現場において注入効果の評価手法として使われているいくつかの試験方法について、測定結果をもとに有効性と問題点を示している。この結果、電気検層とPS検層が最も有効な評価手法であることを示した。

注入効果は注入固結土自体の力学的性質と、注入範囲全体の均質性・連続性とのお互いに大きく関係している。したがって、注入効果の確認には、多方面の情報が必要であり、何種類かの測定結果を総合判断することが重要である。また、現状では、注入前後の測定値を比較して、単に差があれば効果があったと判断することが多い。注入効果の目標値あるいは期待値を注入前に設定して、注入後に得られた値との差をもとに、注入効果を判断するのが望ましい。

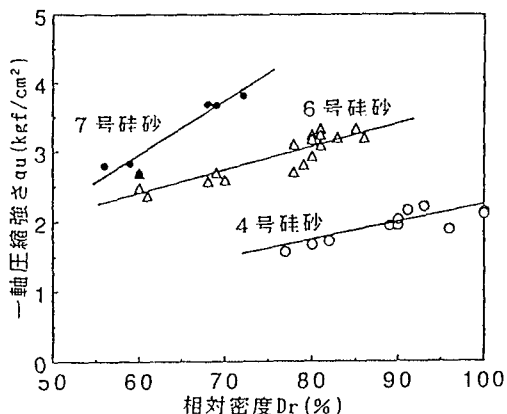


図-5 相対密度と一軸圧縮強さ

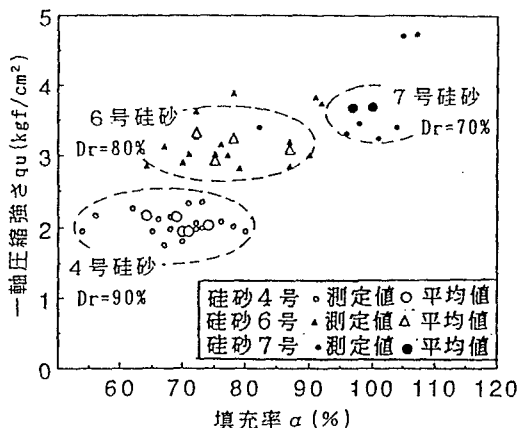


図-6 填充率と一軸圧縮強さ

審査結果の要旨

薬液注入工法は、軟弱地盤の強度や止水性を高めて掘削工事を容易にする補助工法であるが、地盤条件、薬液の性質、注入条件や注入方法などにより改良効果が異なり、適正な注入条件や注入方法あるいは注入効果の判定方法などについてはまだ定見が得られていない状況にある。本論文は、均質な砂地盤への薬液注入の現象を理論的に考察するとともに、砂供試体に対する室内注入実験によって得た注入固化体の特性を調べて、注入効果の検討を行なったものである。この結果、浸透注入形態がもっとも適正な注入条件となることを示し、現場における施工管理の方法として圧力管理が重要であることを述べたもので、全編7章よりなる。

第1章は、序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、薬液注入工法で通常用いられている注入速度一定の条件を用いて、ゲル化による透水係数の減少を考慮に入れた解析解を求め、注入量と注入圧の関係について考察を行なっている。その結果、透水性の大きな砂質地盤においても、薬液注入の進捗に伴い注入圧が高くなる傾向が見られ、浸透注入においても $P-q$ 関係は線形関係から外れることを示した。これは新たな知見である。

第3章では、ゲルタイム5秒の瞬結性薬液と5分の緩結性薬液を用いて、注入速度を変化させて、注入条件の違いによる注入効果の変化を室内試験により求めている。この結果、緩結性薬液では注入速度の如何にかかわらず浸透注入状態が保たれるが、瞬結性薬液では高拘束圧で注入速度が大きい場合のみ浸透注入状態になり、その他は割裂注入となり、固結砂の性状に著しい差異があることが知られた。これは重要な知見である。

第4章では、この注入実験における注入圧の変化と固結体の形状との関係を調べ、割裂注入の場合には $P-t$ チャートの形状から判別することが可能であることを示し、 $P-t$ チャートが施工管理に極めて有用であることを示した。

第5章では、試料土の密度を比較的容易に調整できる供試体作成方法を新たに開発し、この方法を用いて作成した固結砂供試体の強度と砂の状態との関係を明らかにしている。これは有用な知見である。

第6章では、現場における注入効果の確認の方法について述べたものである。施工管理に $P-t$ チャートを応用する方法を述べ、これにより浸透注入の判定が可能であることを示すと共に、弾性波探査や電気検層が現場での注入効果の判定に有効であることを示した。

第7章は、結論である。

以上要するに本論文は、砂質土地盤における薬液注入効果に関して基礎的な室内実験を行なうことにより、浸透注入状態が最良の改良効果を与えることを見いだすとともに、現場における注入効果の評価手法を提案したものであり、土木工学および土質工学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。