

論文 透水性を有する注入材料の開発

外館良之^{*1}・丸山久一^{*2}・下村匠^{*3}

要旨：地盤および周辺構造物の安定性に悪影響を及ぼす地盤中の空隙・空洞を充填し、かつ地下水の保全、間隙水圧の上昇の防止を目的として透水性を有する注入材料の開発の可能性について検討を行った。その結果、起泡剤・増粘剤・発泡剤等の既存の混和剤を適切に組み合わせることにより、ある程度の流動性と、透水性を兼ね備えた注入材の開発の可能性が確認できた。また、空隙形成には細骨材粒径、気温が大きく影響していることが分かった。

キーワード：注入材料、流動性、透水性、起泡剤、発泡剤

1. はじめに

薬液注入工法とは、止水、地盤の強化、構造物およびその周辺地盤の安定性に悪影響を及ぼす土中の空隙・空洞充填を目的として、薬液を細い管を通して地盤中の所定の箇所に圧入する工法であり、その施工の簡便さから多くの建設工事において補助工法あるいは半永久的な工法として広く用いられている。薬液注入の目的が止水である場合は、その注入範囲は明確である。しかし、地盤強化や空洞充填が目的である場合はその注入範囲の設計は難しい。なぜなら対象土を砂とした場合、せん断を受けた場合には通常では排水状態で変形していくのに対し、薬液注入を行った場合には砂は非排水状態でせん断を受けるという大きな変化が生じ、このことが強度や変形特性に不利になることがあり得るからである [1]。また、空洞充填を目的とした場合、空洞を完全に充填することが大切で、強度はそれ程必要ないことが多く、地下水の保全といった観点からは止水性もそれ程重要でないといえる。しかし従来の注入材では、その効果は止水性と強度向上との複合の形で現れることが多い。その結果地下水の枯渇、それに伴う地盤沈下、間隙水圧の上昇等の問題が生じる。そこで、空隙・空洞を充填できる流動性と透水性を有する注入材料の開発がこれらの諸問題の対策として有効であると考えられる。本研究では、その一段階として、注入材料として必要な流動性と、透水性能とを兼ね備えた注入材料の開発を目的とした。

2. 実験概要

2.1 透水性注入材の製造方法の概要

本研究では、当初はペーストに発泡剤を添加することにより注入材の多孔化を目指したが、空隙の均一性や連続空隙の形成に難があり、膨張率も大きくなることからこの方法を断念した。そこで、起泡剤によって流動性を損なわない範囲内で気泡を混入し、細骨材を混入することにより気泡を均一に分布させ、時間の経過による気泡膜の不安定化および気泡の拡大化と、発泡剤の反応とを利用することにより連続空隙を形成させた。

*1 西松建設（株）工修（正会員）

*2 長岡技術科学大学教授 工学部建設系、Ph.D（正会員）

*3 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系、工博（正会員）

2.2 目標値

本研究の注入材料は比較的大きな空隙、空洞充填を目的としており、水ガラス等のような浸透性は必要ないものとした。流動性の目標値として、プレパックドコンクリート用注入モルタルの基準であるPロート流下時間16～20secを目標とした[2]。また、透水性能については、本研究の地下水流の保全、間隙水圧上昇の防止といった目的からは、周辺地盤と同程度あるいはそれ以上の透水性を有していることが望ましい。本研究では透水係数 10^{-2} cm/sec以上を目標とした。

表－1使用材料

種類	記号	名称、主成分、比重など
セメント	C	早強ポルトランドセメント (3.13)
水	W	水道水
細骨材	S	信濃川産川砂
起泡剤	Fa	アミン系界面活性剤 (1.052)
発泡剤	Al	特殊表面処理アルミニウム粉末
増粘剤	Ad	アクリル系高分子化合物
高性能減水剤	Sp	ナフタンスルホン酸系 (1.2)

表－2細骨材の物理的性質

	粒径 (mm)	比重	粗粒率	吸水率 (%)	実積率 (%)
S1	0-1.2	2.58	1.95	2.31	61.2
S2	0.6-1.2		3		60.1
S3	0.3-0.6		2		60.4

表－3基本配合

細骨材	W/C (%)	S/C (wt.)	Fa/C (wt.%)	Sp/C (wt.%)	Ad/W (wt.%)	Al/C (wt.%)
S1	100	4	3	0.5	0.005	0.6
S2	80	4	3	0.5	0.005	0.6
S3	120	4	3	0.5	0.005	0.6

2.3 使用材料及び配合
本透水性注入材に使用した材料を表－1に示す。発泡剤には特殊な表面処理を施し、反応開始を1～2時間程度遅延させたものを使用した。また細骨材の粒度は、プレパックドコンクリート用注入モルタルの規格に準ずるものを標準として使用し[2]、さらに1.2～0.6mm、0.6～0.3mmにふるい分けしたものを使用して、粒径の違いによる影響を検討した。使用した細骨材の物理的性質を表－2に示す。配合を表－3に示す。なお、基本とした配合は細骨材S1のものである。

2.4 供試体作製方法

注入モルタルの練り混ぜには容量11.4ℓのホバート型ミキサを使用した。細骨材、セメント、発泡剤を低速(106rpm)で60秒間かくはんし、その後、水、起泡剤、減水剤、増粘剤を投入し、低速で30秒かくはん後にかき落としを行い、さらに中速(196rpm)で120秒間練り混ぜた。練り上がったモルタルをモールドに流し込み、24時間後に脱枠し、試験日まで水中養生を行った。

2.5 試験項目および方法

本試験で指標として用いた透水性注入材の物性値は、流動性、透水係数、膨張率そして空隙率である。

1) 流動性試験

流動性試験は、JSCE-1986「プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法(Pロートによる方法)」に準じて行った。

2) 透水性試験

透水性試験は、JIS A 1218「土の定水位透水試験」に準じて行い、水頭差は15cmとした。供試体寸法はΦ10×h10cmの円柱体とし、水中養生7日で測定を行った。

3) 膨張率試験

膨張率の測定は、メスシリンダーにモルタルを入れ原容積に対する膨張量の百分率で表した。

4) 空隙率（初期空隙率、硬化後全空隙率および連続空隙率）試験 [3]

初期空隙率は、練り上がり直後のフレッシュモルタルの重量を測定し、配合より算出した。連続空隙率は、アルキメデスの原理による静水中に置かれた物体に働く浮力の関係を応用して測定した。十分に飽和させた供試体の水中重量 W_1 を測定し、その後、表乾重量 W_2 を測定した。供試体の透水性能により表乾状態になるまでの時間が異なるが、本研究においては $20 \pm 2^\circ\text{C}$ で24時間気中養生後の重量を表乾重量と定義した。さらに24時間の炉乾燥を行った後の絶乾重量 W_3 および供試体体積 V を測定し、以下の式より算出した。

$$\text{全空隙率(\%)} = (1 - (W_3 - W_1) / V) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{連続空隙率(\%)} = (1 - (W_2 - W_1) / V) \times 100 \quad (2)$$

3. 実験結果及び考察

3.1 初期空隙率と流動性、空隙率の関係

表-3の配合において、起泡剤添加率およびかくはん時間を変化させることにより初期空隙率を変化させた。初期空隙率と流下時間の関係を図-1に示す。初期空隙率が増加すると気泡のボールベアリング効果により流動性は向上し、空隙率45%では流下時間は約24秒である。しかし、空隙率をそれ以上大きくしても、材料分離を生じロートの流下終了が明確でなくなるため流下時間は短くはならず、逆に長くなる場合もあった。図-2に初期空隙率と全空隙率の関係を示す。初期空隙率45%くらいまでは、全空隙率は初期空隙率と同程度か、発泡剤による膨張のために初期空隙率より大きな値となる。しかし、初期空隙率を45%以上とすると材料分離を生じ、気泡の脱泡等による体積収縮を起こし、全空隙率は大きく低下する。以上の結果より、初期空隙率を40~45%の範囲内に制御することにより流動性は向上し、多くの空隙を供試体内に残存させることができることから連続空隙の形成にも有利となる。しかし流下時間は23秒程度であり、流動性のさらなる改善が必要である。

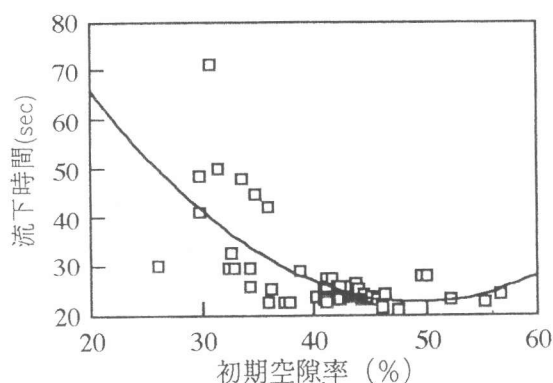


図-1 初期空隙率と流下時間

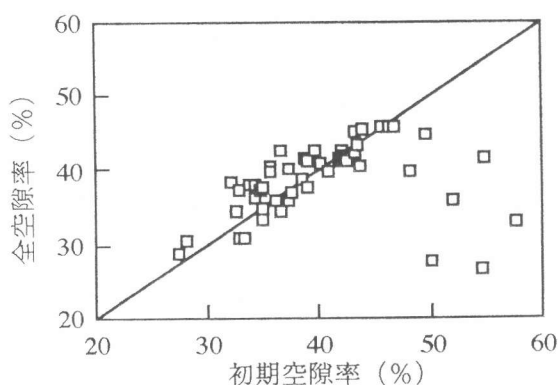


図-2 初期空隙率と全空隙率

3.2 混和剤添加率と流動性、透水性の関係

1) 発泡剤添加率

表-3の配合において、発泡剤添加率 $A1/C$ を0~0.6%の間で変化させた供試体を作製し、発

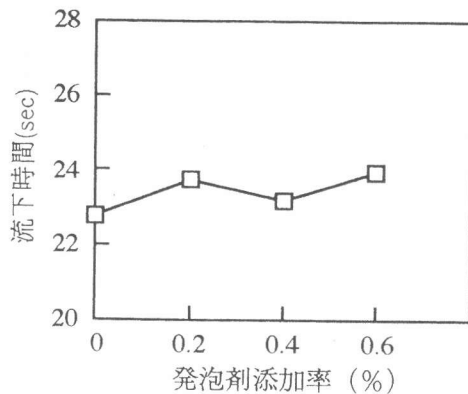


図-3発泡剤添加率と流下時間

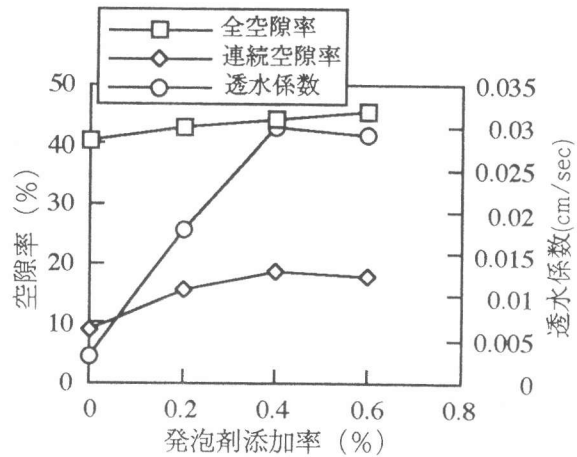


図-4発泡剤添加率と空隙率、透水係数

泡剤の効果について検討した。図-3に発泡剤添加率と流下時間の関係を示す。発泡剤の添加量は絶対量としてはごく僅かであり、発泡剤添加による流下時間への影響は見られない。図-4に発泡剤添加率と空隙率、透水係数の関係を示す。発泡剤を添加しない場合においても透水性はあるが、その透水係数は0.003cm/sec程度と小さい。しかし発泡剤添加率の増加に伴い連続空隙率が大きくなり、透水係数も大きくなる。流動性にも影響はなく、発泡剤の添加が連続空隙の形成に有効であるといえる。

2) 増粘剤添加率

気泡モルタルの製造においては、比重差により気泡の分布が不均質になるので、増粘剤等を気泡安定剤として用いる必要がある。しかし、増粘剤の過剰添加はモルタルの粘性の増加による流動性の低下、連続空隙の形成を阻害する可能性があるため、適切な添加率を検討する必要がある。図-5に増粘剤添加率と初期空隙率、流下時間の関係、図-6に添加率と空隙率、透水係数の関係を示す。増粘剤を添加しない場合は材料分離を生じたため流下時間は遅く、脱泡による体積収縮を生じた。過剰に添加するとモルタルの粘性が増加し、また初期空隙率が低下するため流動性は低下し、気泡膜の安定性が増すため連続空隙が形成されにくくなり、透水係数は低下する。

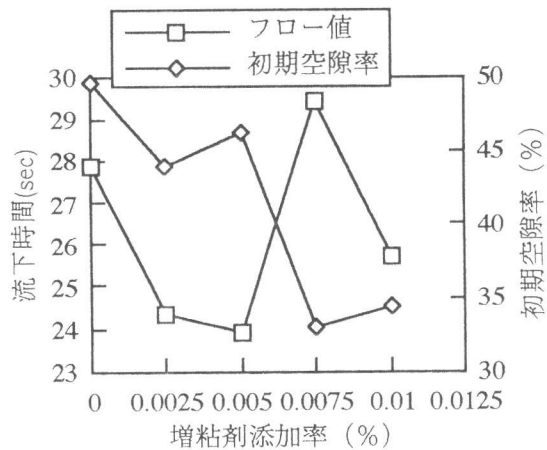


図-5増粘剤添加率と流下時間、初期空隙率

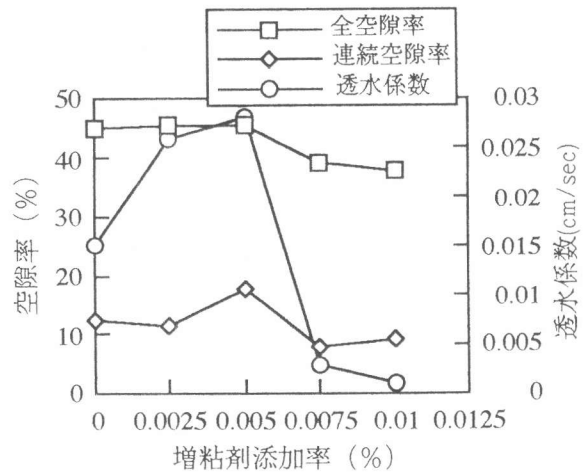


図-6増粘剤添加率と空隙率、透水係数

本研究の範囲では、添加率を0.0025～0.005 %とすることにより流動性・透水性は良好なものとなる。

3.3 細骨材粒径の影響

細骨材の粒径が流動性、透水性能に及ぼす影響を検討するために、細骨材粒径を3種類に変えて検討した。図-7に初期空隙率と流下時間の関係を示す。細骨材 S2 を用いたものは、他の粒径を用いた場合より流下時間が若干遅くなる。図-8に連続空隙率と透水係数の関係を示す。細骨材 S2 を使用した場合、連続空隙率との相関係数が高く、同一連続空隙率において高い透水係数を示している。他の粒径の細骨材を使用した場合は連続空隙率との相関は低い。透水係数は単に連続空隙率だけではなく、空隙径やその経路にも影響されていると考えられる。既往の研究 [4] より骨材粒径による気泡径の違いが特に認められなかったことから、連続空隙の経路の影響が大きいと考えられる。細骨材 S3 を使用した場合、特に透水係数が小さく、連続空隙率との相関も低いことから、0.6mm以下の細骨材が連続空隙の経路を複雑化していると考えられる。

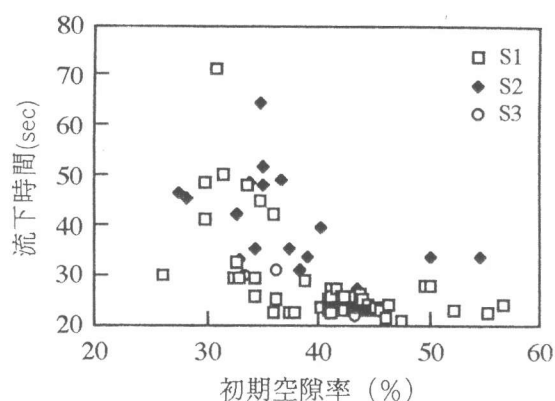


図-7 初期空隙率と流下時間

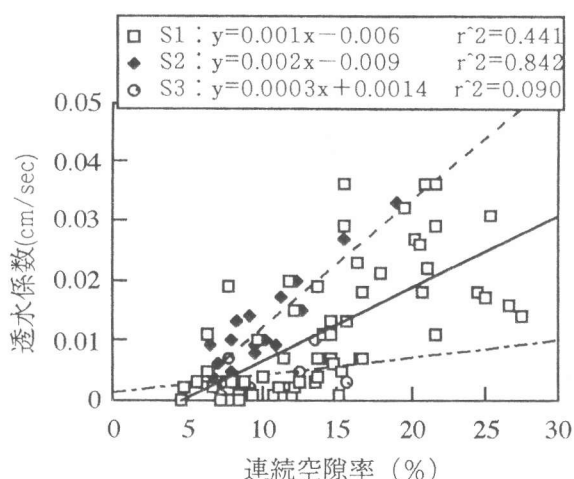


図-8 連続空隙率と透水係数の関係

3.4 温度の影響

発泡剤の発泡性状は気温の影響が大きいことが知られている。気温による発泡性状の違いが本注入材の連続空隙の形成に及ぼす影響を検討した。なお、初期空隙率は42%前後になるように調整した。図-9に膨張率の経時変化を示す。膨張性状は気温により異なるが、20℃においては練り上がり後2時間程度経過してからであり、注入性への影響はないといえる。また、適度な膨張により注入部の側壁との付着性も良好なものとなる。図-10に気温と空隙率、透水係数の関係を示す。気温が低いものほど連続空隙率、透水係数は小さくなる。膨張開始が遅くなると、セメントの凝結によりモルタルの粘性が高められ、連続空

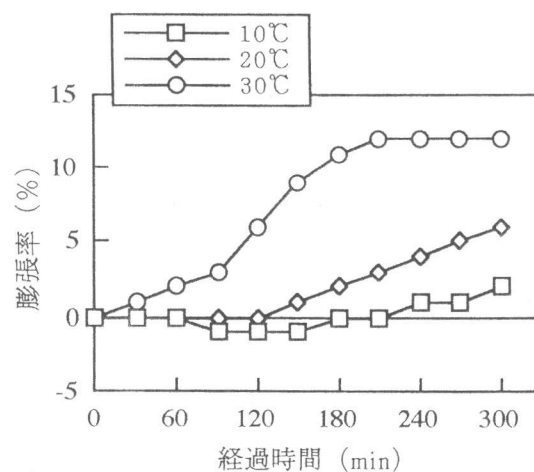


図-9 膨張率の経時変化

隙へと発達しにくくなる。また膨張開始が遅くなるほど径が小さい気泡が多くなると言われており [5]、連続空隙の径が小さくなったものと考えられる。本研究の範囲内では気温が高い程連続空隙率、透水係数とも大きくなった。しかし、発泡開始が早くなりすぎると所定の箇所に注入される前に発泡するため注入性に影響を及ぼし、モルタルの粘性が低いために形成された連続空隙が閉塞する可能性もある。連続空隙の形成は膨張量だけではなく、発泡剤の反応速度、セメントの凝結とも関係があるものと考えられる。

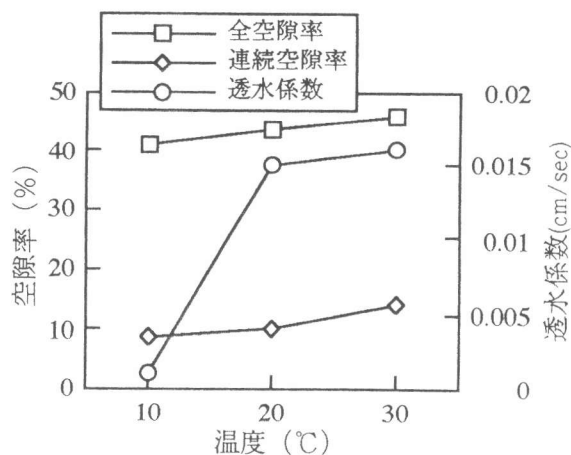


図-10 温度と空隙率、透水係数

4. まとめ

- 1) 起泡剤により、注入材練り混ぜ時に40～45%の気泡を混入し、発泡剤を添加することによりある程度の流動性と、透水性を付与することが可能である。
- 2) 本研究により得られた透水性注入材の物性は、Pロート流下時間は23秒程度、透水係数は0.01～0.03cm/sec程度である。
- 3) 1.2～0.6mmの細骨材を使用することにより、透水性には有利な構造となる。
- 4) 連続空隙の形成には気温の影響が大きく、気温が低いと連続空隙率は小さくなり、その径も小さくなるため透水性は低下する。

[謝辞]

本研究の実施にあたり、大木建設(株)の江本祐橘氏より多大なる御援助を頂いた。また、発泡剤は藤沢エフ・ピー・ケー(株)より提供して頂いた。ここに謝意を表します。

[参考文献]

- [1] 森麟：薬液注入工法の現状と将来への展望、土と基礎、26-8、pp.1-2、1978.8
- [2] コンクリート標準示方書(施工編)：pp.209-210、1991.9
- [3] 日本コンクリート工学協会エココンクリート研究委員会第3WG：第3回研究会資料、No.WG 3.4.4
- [4] 松尾伸二・丸山久一・清水敬二・江本祐橘：透水コンクリートの透水・透湿・吸音特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、pp.525-530、1992
- [5] 児玉和己ほか：アルミニウム粉末の発泡を制御したブレバッドコンクリートに関する基礎的研究(その1)、日曹マスタービルダーズ研究所報No.5、pp.40-47、1982