

高圧下での介在砂層への板状止水注入模型実験

MODEL TESTS OF GROUTING FOR DEWATERING FOR THIN SAND LAYER UNDER HIGH PRESSURE

蔵本 哲夫¹・平岡 博明¹・宮崎 啓一¹・萩原 敏行²

Tetsuo KURAMOTO・Hiroaki HIRAOKA・Keiichi MIYAZAKI・Toshiyuki HAGIWARA

It is expected that the large scale construction works in large depths are more and more increasing from now on. In such case, certain grouting for dewatering toward thin permeable sand layers is quite essential. A series of model tests on the grouting for dewatering for thin sand layers under high pressure was carried out. In these experiments, a pressurizing cylindrical steel container with 1.8m in diameter and 0.35m in height was used. The drain layer was installed in surroundings of model sand layer, and the experimental system that the pore water pressure of sand layer is able to be kept constant was made. Moreover, it was put the steel plate on the sand layer and the overburden pressure corresponding to depth of 50m by rubber backing was loaded on it.

This paper describes the experiment method and the experiment results about the effects of injection speed on quality of improved sand and its cut-off performance, depending on the difference of the sand thickness under the high pressure.

Key Words : *grouting for dewatering, thin sand layer, model tests*

1. はじめに

今後、深さ 40m～50mの大深度での都市 NATM 工事が増加すると考えられる。このような工事においては、周辺地盤の確実な止水が必要となる。特に対象地盤が土丹層、すなわち固結シルトと介在砂層の互層地盤では、介在砂層への止水注入が重要である。そこで、高圧下での介在砂層への合理的な止水薬液注入を行うことを目的として、室内模型実験を実施した。

本報文では、介在砂層への薬液注入実験の概要、高圧下での層厚の違いによる限界注入速度、改良体の出来型形状、および注入速度が改良体の止水性に及ぼす影響について述べる。

2. 介在砂層への注入

均一な比較的厚い層の砂地盤に対する薬液注入に関しては、既に多くの研究がなされている¹⁾²⁾。この場合、注入圧力算定には、図-1(a)のような球状浸透のメカニズムを仮定したMaggの式が用いられる¹⁾²⁾。これに対して、土丹層すなわち固結シルトと砂の互層地盤の介在砂層へ注入を行う場合には、砂層水平方向に図-1(b)のように板状に浸透するメカニズムが想定される。

薬液注入，止水，砂地盤，模型実験

¹ 正会員 西松建設 技術研究所

² 非会員 西松建設 技術研究所

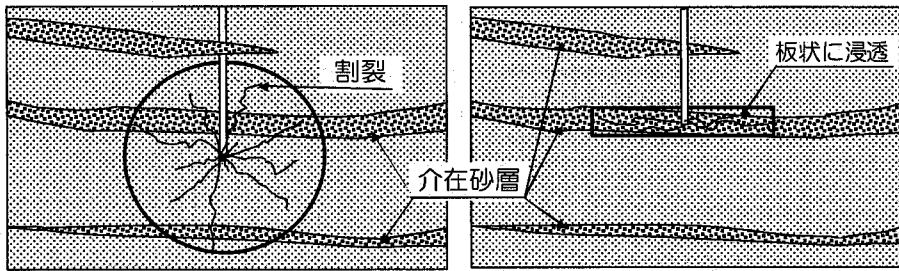


図-1(a) 均一砂層の球状浸透メカニズム

(b) 介在砂層の板状浸透メカニズム

3. 実験概要

(1) 実験試料

表-1 に実験に使用した試料の物性値と実験条件、図-2 に試料の粒度分布を示す。本実験では、土丹層の介在砂層への薬液注入を想定した。実験試料は、介在砂層と透水係数 ($1.0 \times 10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$)、粒度分布（細粒分含有率 16.0%）がほぼ等しくなるように珪砂 6 号 A と珪石粉を質量比 8:2 の割合で混合して作成した。

(2) 注入材

実験に用いた注入材は、水ガラス系の溶液タイプで、ゲル化時間が長く、浸透性の高い非アルカリ性であることから、地下水の汚染もなく、環境に優れた特性を有するシリカゾルを用いた。

表-1 試料の物性値と実験条件

砂層厚	50mm	
	200mm	
透水係数	$1.0 \times 10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$	
密度	1.6 g/cm^3	
上載圧	932kPa	深度50m、地下水位GL-1mを想定
間隙水圧	481kPa	
注入材	シリカゾル	水ガラス系溶液型

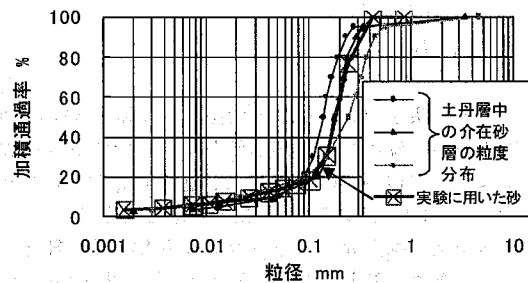


図-2 試料の粒度分布

(3) 実験システム

実験に用いた実験システムを図-3 に示す。実験には、介在砂層をモデル化するために、直径 1,800mm、高さ 350mm の円筒型剛土槽を使用した。砂層の周囲に排水層を設け、砂層の間隙水圧を一定に保てる構造とした。また、砂層の上面には載荷板を設置し、その上からエアバックにより上載圧を載荷できる構造とした。

模型地盤は砂層厚を 50mm、200mm とし、乾燥状態で所定の密度に締め固めて作成した。その後、約 15 時間脱気水を通水して飽和させた。砂層の下面および上面には、砂層境界面に沿って薬液が浸透しないように厚さ 10mm の石膏層を挟んだサンドイッチ構造とした。

模型地盤作成後、載荷板、エアバック付きの上蓋を取り付け、50m 深さの圧力レベルをモデル化するために、砂層内の間隙水圧 (481kPa) および上載圧 (932kPa) を徐々に加えた。

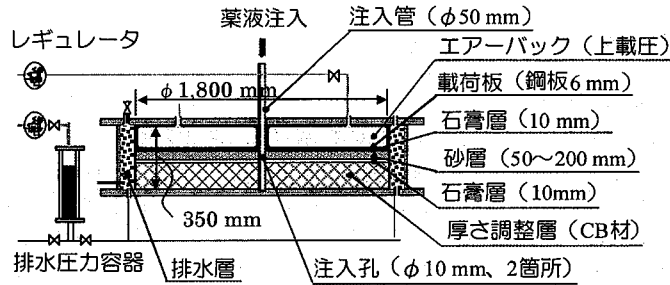


図-3 実験システム

(4) 実験方法

a) 事前水注入試験

事前水注入試験を行い、図-4に示す注入速度と注入圧力の関係(p-q曲線)から限界注入速度(qcr)を求めた。qcrは、p-q曲線における初期直線勾配に、係数 $m=0.3$ をかけて求めた限界勾配とp-q曲線との交点として求まるものである³⁾。qcrの注入速度以下であれば、浸透割裂注入である適切な改良体が形成されていると判断されるものである。一般のダブルパッカーによる注入施工では、qcrは10 l/minとされている。

b) 薬液注入試験

薬液注入試験は、図-5に示すように容器の中央部の注入管(φ=50mm)から、砂層内にφ=10mmの2つの注入孔より行った。qcrを含む注入速度を変えて、表-2に示す実験ケースについて試験を行った。計画注入径は、ケース4の1,800mm以外は1,500mmとして実施した。

c) 改良体での出来形観察

注入実験後、改良体の出来形形状の観察を行った。

d) 改良体の止水性の確認

改良体の半径方向の異なる位置から採取した試験体を用いて透水試験を実施し、目標透水係数と比較した。

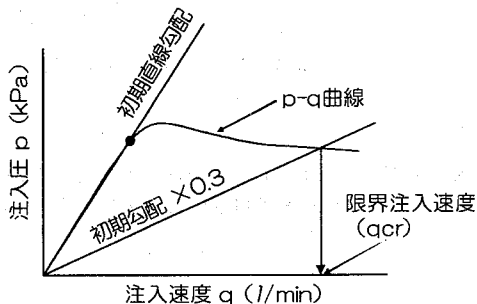


図-4 注入速度と注入圧の関係

表-2 薬液注入条件と砂層の初期状態

実験 ケース	砂層厚 mm	注入条件		砂層の初期状態	
		注入速度 l/min	計画注入径 mm	間隙率 %	透水係数※ cm/s
1	50	10	1,500	37.4	6.7×10^{-4}
2		5(qcr)	1,500	39.0	7.2×10^{-4}
3		2	1,500	37.6	5.3×10^{-4}
4		2	1,800	37.4	-
5	200	10	1,500	38.0	1.3×10^{-4}
6		7(qcr)	1,500	38.4	1.3×10^{-4}
7		2	1,500	38.1	2.8×10^{-4}

※ 透水係数は事前水注入試験(p-q曲線)の初期勾配より算出

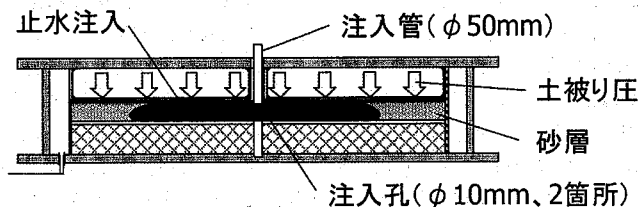


図-5 薬液注入イメージ

4. 実験結果および考察

(1) 事前水注入試験 (qcr試験)

写真-1 に事前水注入試験 (qcr 試験) 状況, 図-6 に事前水注入試験より得られた p - q 曲線をそれぞれ示す. qcr 試験の結果より, 砂層厚 50mm, 200mm の各々で qcr は 5 l/min, 7 l/min と砂層厚の違いにより異なることがわかった. すなわち, 層厚が厚くなると qcr は大きくなる傾向が認められる. p - q 曲線の初期勾配より, 表-2 に示す砂層の初期状態の透水係数が得られた. また, 砂層厚により初期勾配で得られる浸透注入区間 (グラフ上の初期直線部) から割裂浸透注入区間へ変化していく注入圧力が異なる. これは, 砂層厚が 50mm に比べ 200mm では層厚が厚いため, より大きな圧力を必要とするためであると考えられる. その結果, 砂層厚 200mm では 50mm で到達する最大注入圧をはるかに越えた点で最大値に達している.

従来の球状注入では 10 l/min 程度で注入されることが多く, 土丹層中の介在砂層のような薄い砂層への注入では, 層厚が厚くなるほど qcr が大きくなることから, 層厚が厚くなると球状注入のメカニズムに近づくと考えられる.

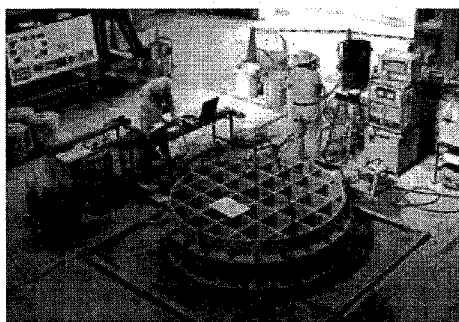


写真-1 事前水注入試験 (qcr 試験) 状況

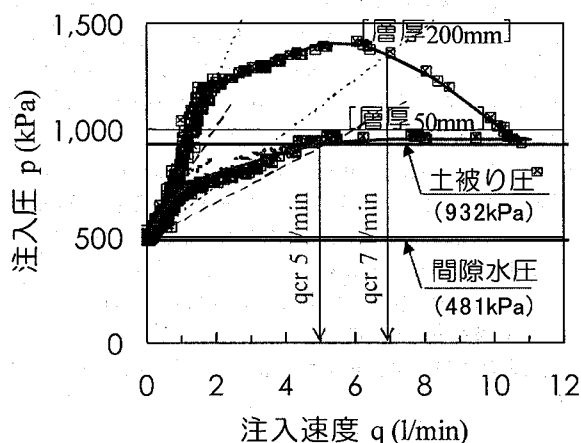


図-6 注入速度と注入圧の関係

(2) 薬液注入試験

qcr 試験の結果から, 表-2 に示す条件で薬液注入試験を実施した. すなわち, 各砂層厚の qcr と割裂注入の影響が大きいと予想される注入速度 (10 l/min), 浸透注入になると予想される注入速度 (2 l/min) で薬液注入試験を実施した.

(3) 改良体形状

改良体の出来形を図-7 に示す. 図のように改良体形状は, 砂層厚の違いならびに注入速度によって異なる形状となった.

砂層厚 50mm において qcr で注入した結果 (ケース 2) では, 計画径に近い円形の良好な改良体が形成された. 一方, qcr 値よりも大きい速度 (10 l/min) で注入した結果 (ケース 1) は扁平した形状となった. これは割裂注入が卓越したためと推定される. また, qcr よりも小さい速度 (2 l/min) で注入した結果 (ケース 3) では, qcr での注入と同様な円形に近い良好な改良体が形成された. ただし, 改良体の周縁部近くではやや固結度が低く, 改良体の大きさは計画注入径よりやや小さくなった.

砂層厚 200mm において qcr で注入した結果 (ケース 6) では, 改良体周縁部付近に一部未改良範囲ができたが, 他の範囲については概ね計画半径に改良された. qcr よりも大きい速度 (10 l/min) で注入した結果 (ケース 5) では, 表面の改良域は計画半径以上の範囲まで改良されているが, 砂層鉛直断面底面部に向か

うにつれて改良域が狭くなる傾向となった。これは、図-8 に示すように砂層上面部を割裂浸透しながら、底面方向へ浸透していったものと考えられる。また、 q_{cr} よりも小さい速度 (2 l/min) で注入した結果 (ケース 7) ではほぼ円形の改良体が形成された。

砂層厚 50mm, 200mmとも q_{cr} 以下で注入した場合、円形に近い良好な改良体が形成されたが、 q_{cr} よりも大きい速度で注入した場合は扁平した形状となった。

以上より、各砂層厚に対して q_{cr} を求めて、 q_{cr} 以下で注入試験を行うことにより、計画径に近い良好な改良体が形成できるものと推察される。作業効率を考慮すると、 q_{cr} での注入が合理的な注入速度であると考えられる。

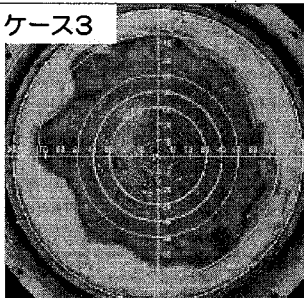
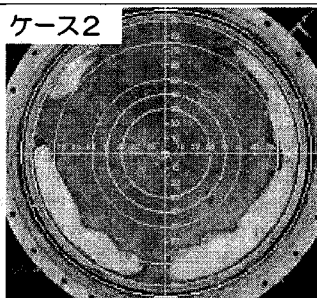
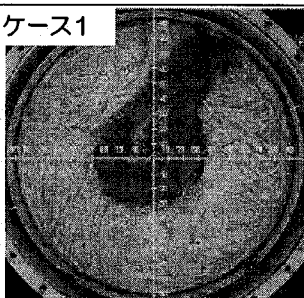
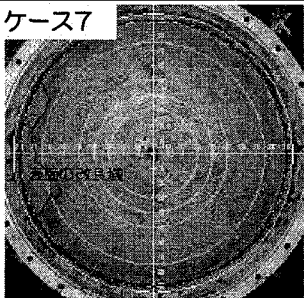
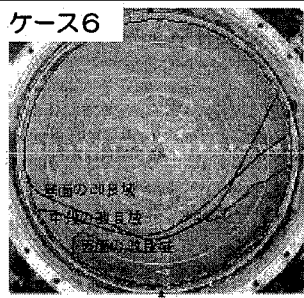
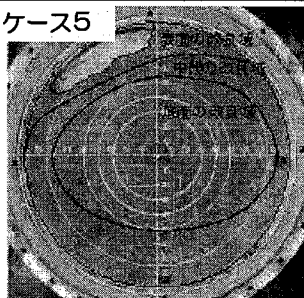
層厚	注入速度2 l/min	注入速度5,7 l/min	注入速度10 l/min
50 mm	ケース3  ほぼ円形 評価○	ケース2  ほぼ円形 評価○	ケース1  扁平 評価×
200 mm	ケース7  ほぼ円形 評価○	ケース6  ほぼ円形 評価○	ケース5  底面やや小 評価△

図-7 改良体の出来形

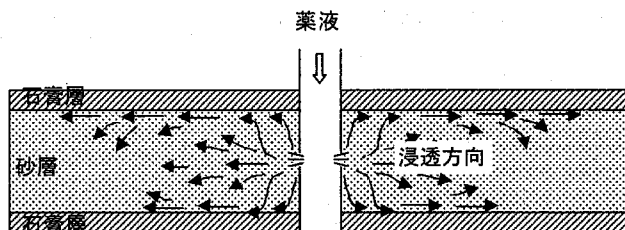


図-8 介在砂層への注入材の浸透イメージ

(4) 改良体の止水性

試験後、改良体の各位置から供試体を切り出し、改良体の円周方向の透水係数を調べるために室内変水位透水試験を行った。なお、透水試験では 50m 深度での透水性を評価するために、それに相当する 451kPa の有効拘束圧を加えて行った。

図-9 は、注入試験から得られた改良体の注入位置からの正規化した距離 (a/r) での透水係数の結果を示している。砂層厚 50mm の改良体はケース 1 の割裂注入を除き、注入孔からの計画注入径に対して 85% 以内の位置で、止水注入として十分な効果が期待できる目標透水係数 ($5.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$) 以下の値が得られた。ただし、改良体の周縁部近くについてはやや固結度が低く、改良体から試験体採取して透水試験を実施することができなかった。以上より、砂層厚 50mm の改良体の止水性について、注入計画の 85% では十分な止水性が確保できていると考えられる。

砂層厚 200mm の改良体は全ての供試体において、目標透水係数より大きく下がった結果が得られた。

以上より、改良体の止水性について、注入計画径の 85% 以内では、十分な止水性が確保できていると考えられる。

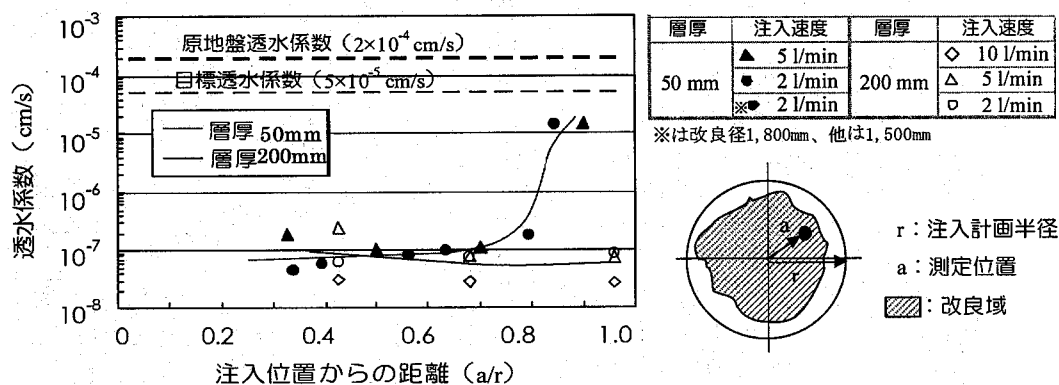


図-9 改良体の透水係数

5. まとめ

高圧下での介在砂層への薬液注入実験から、 q_{cr} は従来の球状浸透より低く、砂層厚50mm、200mmの各々で5 l/min、7 l/minと砂層厚の違いにより異なった。改良体については、形状は砂層厚50mm、200mmともに q_{cr} 以下で注入した改良体は円形に近い形状となったが、 q_{cr} より大きい速度で注入した改良体は扁平した出来形形状を示した。改良体の止水性については、 q_{cr} 以下の速度で注入すると、砂層厚50mmでは計画注入径の85%、砂層厚200mmでは計画注入径の100%で十分な止水性が確保できることが確認できた。

参考文献

- 森麟, 田村昌仁, 小峰秀雄, 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, Vol.33, No.3, pp. 159-169, 土質工学会, 1993.
- 森麟, 田村昌仁, 平野学: 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, No.388, pp. 131-140, 土木学会論文集, 1987.
- 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 (委員会報告), 土質工学会発表論文集, 1993.