

港湾技研資料

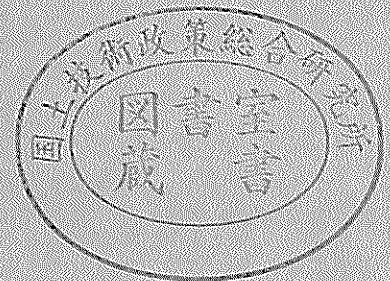
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 534 Sept. 1985

砕石ドレーン材の目詰まり評価法に関する室内実験

| | | |
|---|---|---|
| 善 | 功 | 企 |
| 大 | 根 | 田 |
| 入 | 澤 | 一 |
| | | 明 |

運輸省港湾技術研究所



目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 要 旨 | 5 |
| 1. まえがき | 5 |
| 2. 実験概要 | 6 |
| 2.1 実験の基本的考え方 | 6 |
| 2.2 実験装置 | 7 |
| 2.3 試 料 | 7 |
| 2.4 実験方法 | 8 |
| 2.5 目詰まり評価法 | 9 |
| 2.6 実験方法に関する2～3の検討 | 10 |
| 3. 短期目詰まり実験結果および考察 | 12 |
| 3.1 上載圧の影響 | 12 |
| 3.2 相対密度の影響 | 12 |
| 3.3 動水勾配の影響 | 14 |
| 3.4 透水流速の影響 | 14 |
| 4. 繰り返し目詰まり実験結果および考察 | 16 |
| 5. 目詰まり試料の透水試験結果および考察 | 16 |
| 5.1 実験結果 | 16 |
| 5.2 透水係数低下に関する考察 | 17 |
| 6. 目詰まりの評価と実際への適用に対する問題点 | 19 |
| 7. まとめ | 19 |
| 8. おわりに | 20 |
| 参考文献 | 20 |

Experimental Study on the Evaluation of the Clogging Limit in Gravel Drain

Kouki ZEN*
Hideaki OHNEDA**
Kazuaki IRISAWA***

Synopsis

The purposes of this study are (1) to develop the testing method evaluating the clogging limit of the gravel drain, (2) to investigate the influence factors affecting the clogging limit with the developed testing technique, and (3) to estimate the change of the coefficient of permeability of the clogged gravel drain.

In the experiments, the weight of the sand caught in the gravel is measured, by cutting the gravel into several thin layers, so that the factors such as the overburden, the relative density of sand, the hydraulic gradient and the flow velocity are evaluated quantitatively.

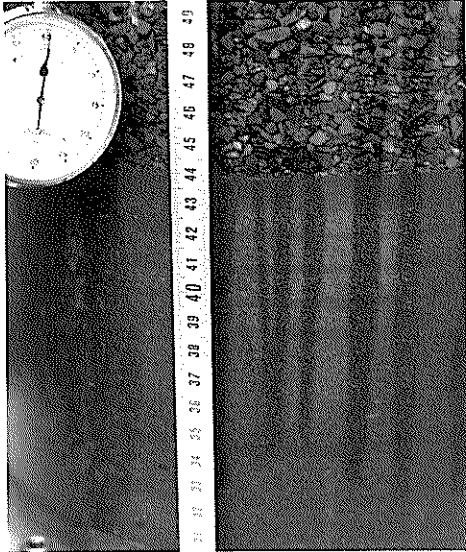
The measured coefficients of permeability of the clogged gravels are compared with the theoretical ones which are derived from both the Zunker type and the Kozeny type equations.

The main findings of the study are as follows;

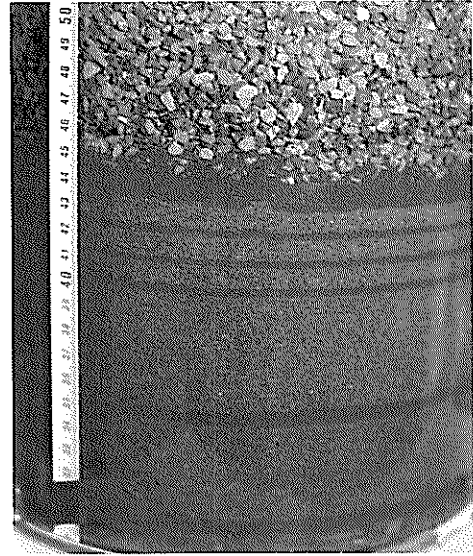
- (1) No effect of the overburden on the clogged gravel length and weight is observed.
- (2) The clogged gravel length and weight increase as the hydraulic gradient increases, the relative density decreases and the flow velocity increases.
- (3) It is found that the clogged gravel length and weight tend to increase as the flow time increases, becoming the constant values within about one hour.
- (4) The coefficient of permeability of the clogged gravel showed $1/2.5$ of that of the gravel for the 15% of the weight ratio of the sand caught in gravel (W_r), $1/5$ for the 30% of W_r and almost the same value as that of the sand for the 50% of W_r .
- (5) The decrease of the coefficient of permeability is well represented by the Kozeny type equation within 15% of the volume ratio of the sand caught in gravel.
- (6) The test results show that the proposed testing technique is useful to evaluate quantitatively the clogging limit of the gravel drain.

* Chief of Soil Dynamics Laboratory, Soils Division
** Former Senior Research Engineer, Soils Division
*** Member of Soil Dynamics Laboratory, Soils Division

砂・碎石の実験前・中・後の状況



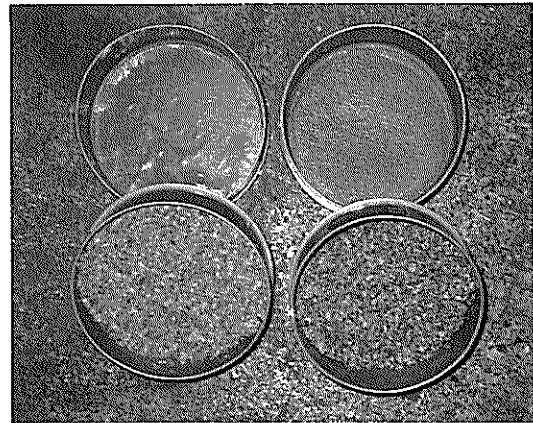
口絵写真-2 透水前の供試体の状況



口絵写真-3 目詰まり状況

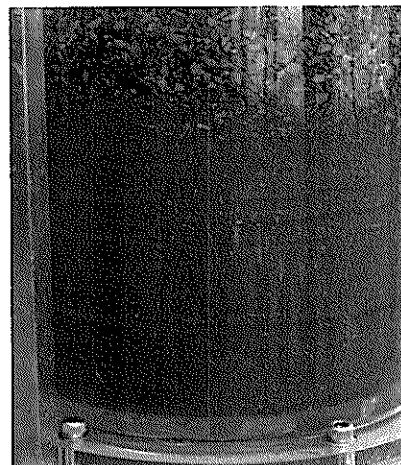


口絵写真-4 目詰まり上端部の状況



口絵写真-5 水洗後の碎石、砂の状況

各口絵写真-2～6は本文中の写真-2～6に対応している。



口絵写真-6 砂の移動状況の一例



砕石ドレーン材の目詰まり評価法に関する室内実験

善 功企 *
大根田 秀明 **
入澤 一明 ***

要 旨

液状化防止対策工法の一つである砕石ドレーン工法に用いられるドレーン材の目詰まりを調べるための実験手法を開発し、その手法を用いてドレーン材の目詰まりに及ぼす影響要因を解明するとともに、目詰まりによるドレーン材の透水係数の低下量を測定する目的で実験を実施した。本研究の特徴は、着色した砂を用いてドレーン材である砕石と砂の境界周辺における目詰まり量をモデル実験により定量的に評価した点にある。実験では、1回の地震動を受けた場合のドレーン材の目詰まりに対応する短期目詰まり、および何回かの地震動に対するドレーン材の目詰まりに対応する繰り返し目詰まりを対象とし、ドレーン材に流入する砂の範囲（目詰まり長）、砂の重量（目詰まり量）に及ぼす上載圧、砂の相対密度、動水勾配、流速などの影響について調べている。さらに、目詰まり量とドレーン材の透水係数の低下量を測定し、Zunker型およびKozeny型の理論式を用いて、砂の混入率と透水係数の関係について比較検討を行っている。本研究により得られた主要な結論は次のとおりである。

- (1) ドレーン材の目詰まり長、目詰まり量に上載圧は影響しない。
- (2) 目詰まり長、目詰まり量は、動水勾配が増加すると大きくなる。
- (3) 目詰まり長、目詰まり量は、砂の相対密度が小さくなると増大する。
- (4) 透水流速に比例して目詰まり長、目詰まり量は増加する。
- (5) 目詰まり長、目詰まり量は、透水時間によって増加する傾向にあるが、1時間程度の時間が経過すると一定の値となる。
- (6) 目詰まり後のドレーン材の透水係数は、今回用いたドレーン材と秋田外港砂では、目詰まり重量比で15%の場合 $1/2.5$ 、30%の場合 $1/5$ に低下し、50%の場合には、砂の透水係数にはほぼ等しくなる。
- (7) 混入した砂によるドレーン材の透水係数の低下は、混入率が15%以下ではKozeny型の式により表される。
- (8) 着色した砂を用いる本実験手法により、ドレーン材の目詰まりを定量的に評価できることが明らかとなった。

1. まえがき

液状化防止対策工法の一つとして砕石ドレーン工法の開発は比較的新しく、したがって、現状では現場におけ

る実績もそれほど多くはないが、港湾の分野においても港湾施設の耐震性の見直しにともなう液状化対策工法の一つとして検討が行われている現状である。砕石ドレーン工法では、用いられるドレーン材の透水係数が原地盤

* 土質部 動土質研究室長

** 前土質部 主任研究官（現関西国際空港株式会社）

*** 土質部 動土質研究室

の透水係数に比較して十分大きくなければならず、この工法の効果を期待するためには、ドレーン材の透水係数が原地盤の透水係数の200倍必要とも¹⁾、1000倍必要ともいわれている²⁾。このようなドレーン材を確保することはそれほど困難ではないと思われるが、ドレーン材と原地盤砂の粒径が著しく異なるため、碎石ドレーン打設後のドレーン中への原地盤砂の流入によるドレーン材の透水係数の低下の有無や、低下の程度を定量的に把握しておく必要があるものと考えられる。碎石ドレーン工法を対象としたドレーン材の目詰まりについては、既にいくつかの研究があるが^{3)~5)}、これらは、ドレーン材の選定に重点が置かれ、必ずしも目詰まりを定量的に評価したものではないようである。したがって、本研究の目的は、ドレーン材の目詰まりを調べるための実験手法を開発し、その手法によりドレーン材の目詰まりに及ぼす影響要因を解明するとともに、目詰まりによるドレーン材の透水係数の低下量の評価法を確立しようとするものである。

本研究の特徴は、着色した砂を用いてドレーン材である碎石と砂の境界周辺における目詰まり長、目詰まり量および透水係数の低下を室内実験により評価しようとし

た点にある。実験では、ある大きさの地震動が1回発生した場合と、ある期間内に複数回発生した場合を想定し、このときのドレーン材の目詰まり長および目詰まり量に及ぼす上載圧、砂の相対密度、動水勾配、流速などの影響について調べている。これらの要因の影響を調べた後、碎石中に目詰まりした砂と同じ重量の砂を再度碎石に混入し、定水位法による透水試験を行い透水係数の変化を測定している。さらに、砂の混入率によるドレーン材の透水係数の低下を、実測値とZunker型の式およびKozeny型の式から求まる理論値と比較し検討を行っている。

2. 実験概要

2.1 実験の基本的考え方

ドレーン材の目詰まりを調べる本実験では、ドレーン材と砂地盤の境界周辺部における砂の移動を中心に測定を行った。これは、ドレーン材の目詰まりが、ドレーン材と原地盤の境界から進行するという考えに基づくものである。実際の改良地盤では、地震時における砂地盤中の間隙水圧は図-1に示すように、ドレーン部で最小、ドレーンの影響範囲の最遠点で最大となることが現場実験により明らかにされている⁶⁾。間隙水圧の分布は、ドレーン材、原地盤、地震動などの特性により異なるものと思われるが、上述のように境界周辺部における砂の移動を考えるとすると、この近傍における間隙水の水平方向の流れによる砂の移動をいくつかの影響要因を考慮してモデル化した室内実験により調べることができると考えられる。図-2は、このような考えに基づきドレーンと原地盤の境界部をモデル化したものである。図-1からも明らかなように、実際のドレーンの周辺部における間隙水圧は原地盤中の値に比較して著しく小さく、また、その分布形状は、図-1上で上に凸の形状をなしている。図-2では、このような間隙水圧の分布を直線で近似しているが、実際のドレーンの周辺部を考えるとこの仮定はほぼ妥当なものと思われる。地震動による間隙水圧は、必ずしも図-2に示されるように一定ではないが、ピーク時を考えると、実際の地盤中の間隙水圧は徐々に増加することが予想されることから目詰まりに対しては安全側の仮定である。

原地盤中の水の流れは、層流状態でDarcy側に従うものと仮定したうえで、室内実験においてもこの条件が満足されるようにして試験を行っている。

実際に打設されたドレーンの目詰まりについては、1回の地震によるものと繰り返し何回も地震を受けた場合の目詰まりが考えられる。ここでは、前者を短期目詰まり、後者を繰り返し目詰まりとよぶことにし、短期と繰

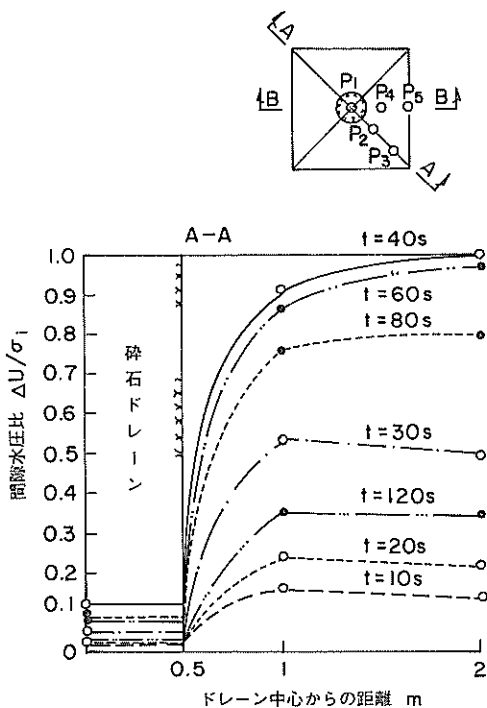


図-1 間隙水圧分布の時間的推移 (斎藤ら⁶⁾)

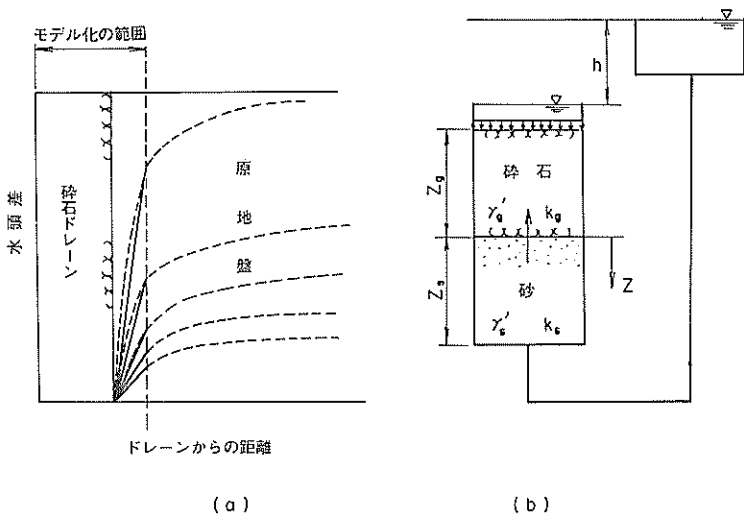


図-2 改良地盤のモデル化

り返しの相違についても調べている。

2.2 実験装置

図-3 に使用した実験装置の概要を示している。本装置は、直径 23 cm、高さ 60.5 cm の透明の亚克力円筒

(試料を詰めやすくするために中央部で 30.0 cm と 30.5 cm の円筒を接続)、底部から一定の水頭差で水を透水させるための水タンク、および供試体上載圧を載荷するためのエアーシリンダーとピストンロッド、載荷板から構成されている。写真-1 に実験装置全景を示す。

2.3 試料

実験に使用した砂は、秋田港外港地区において採取されたもの (以後、秋田外港砂とよぶ) で、比重が 2.682、

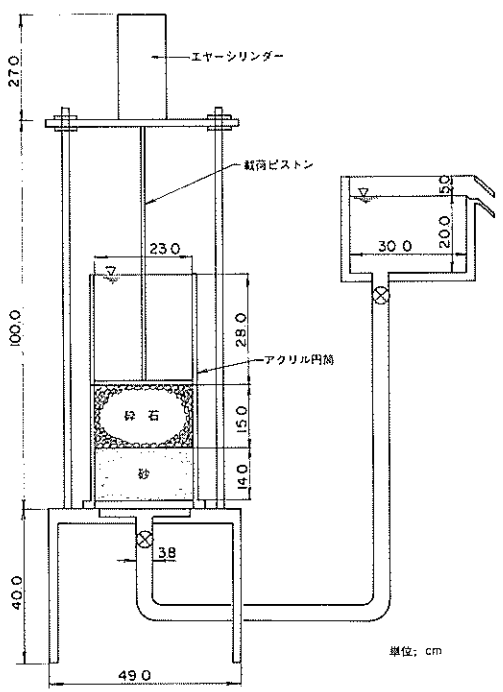


図-3 実験装置模式図

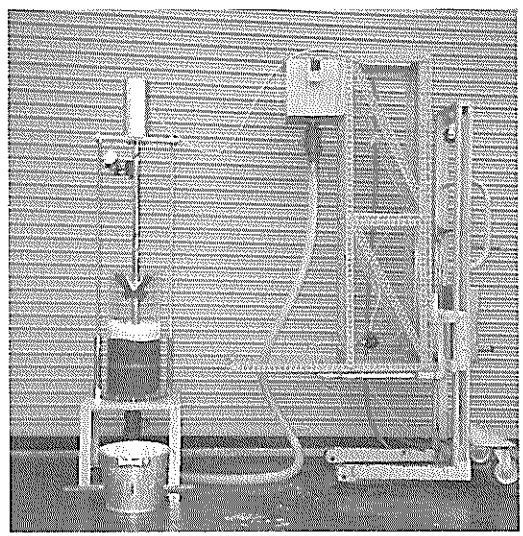
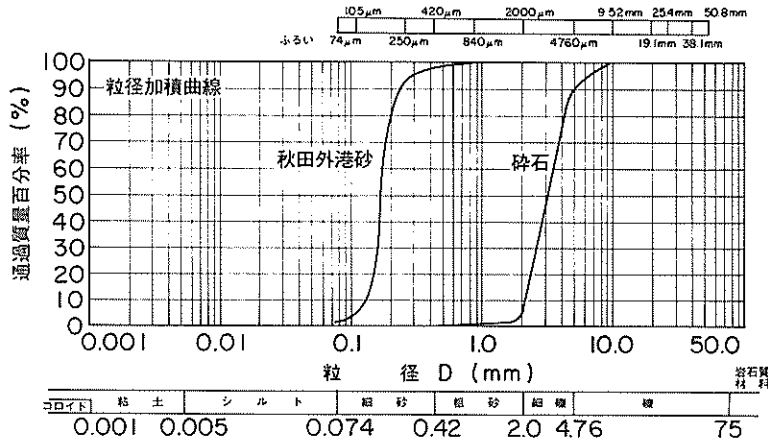


写真-1 実験装置全景



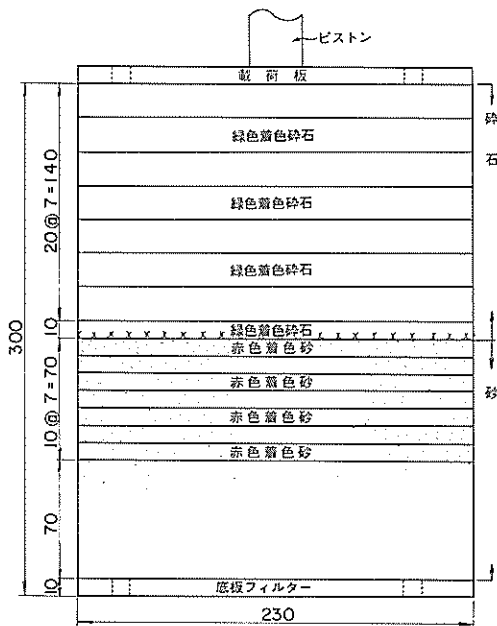
図一四 試料の粒度分布

透水係数が 1.5×10^{-2} cm/s である。また、最大間隙比、最小間隙比は、それぞれ 1.300、0.793 であった。ドレーン材として用いた碎石は、7号碎石で、表面乾燥状態での比重が 2.52、透水係数が 2.9 cm/s である。両試料の粒度試験結果を図一四に示す。

2.4 実験方法

アクリル円筒内の試料は、砂の間隙比が 1.00 となるように水中落下法により詰めた。このときの砂の層厚は 14

cm で、乾燥単位体積重量は 1.31 gf/cm^3 である。また、間隙比を数種類にかえた実験も行った。碎石の層厚は 15 cm で、表面乾燥状態の単位体積重量は 1.35 gf/cm^3 である。試料は着色試料と無着色試料を互層につめているが、その一例を図一五に示している。試料を詰めた後、上載圧を加え供試体の沈下量を読みとり、沈下が落ち着いてから透水を開始した。実験に用いた上載圧は、0.1、0.25 および 0.5 kgf/cm^2 である。透水中は、沈下量、



図一五 供試体作成の一例

表一 実験シリーズ

| |
|---|
| <p>a) 短期目詰り実験 ドレーン打設後、最初の地震に対する目詰まりを対象として鉛直圧力、動水勾配、間げき比の目詰まりに対する影響を調べることを目的とした。 短期の目詰まりであるので、透水時間は 5 分間とした。 実験は、 鉛直圧力：0.1 ~ 0.5 kgf/cm² 動水勾配：1.5 ~ 12 間げき比：1.0 ~ 1.23 の範囲で行った。</p> |
| <p>b) 繰り返し目詰まり実験 間げき比：$e = 1.00$ 動水勾配：$i = 8$ 鉛直圧力：$p'_v = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ の条件で、短期目詰まり実験を繰り返す方法で最大 60 分（12 回）まで行った。</p> |
| <p>c) 目詰まり試料透水試験 a), b), の結果、想定される目詰まりに対しての碎石部分の透水係数の低下を調べる目的で行った。</p> |

流量を測定し、透明アクリル円筒の外側から目詰まり長を観測した。目詰まり長については、試験後、砕石層を1 cm ごとに分割してその中に存在する着色砂の有無により判断している。透水時間は、短期目詰まり実験では5分間、繰り返し目詰まり実験では5分間の透水を最大12回、合計1時間の透水を行っている。透水時間を5分間とした明確な根拠はないが、砕石ドレーンの現場実験の結果を参考にすると、間隙水圧の消散は2～3分、多くとも5分以内に終了していることによる。実験シリーズについては、表-1に取りまとめている。

2.5 目詰まり評価法

砕石中に流入する砂による目詰まりを定量的に評価するためには、砕石中の砂の量を何らかの方法により測定する必要がある。本研究で用いた方法は、着色した砂もしくは砕石を透明アクリル円筒中に互層につめ、透水により砕石中に移動した砂の範囲（目詰まり長）を円筒の外側から観測し、透水停止後、砕石中心部における目詰まり長および砕石各層中の砂の重量（目詰まり量）を測定するものである。目詰まり長については砂と砕石の境界から砕石部に流入した砂の上端部までの長さで表している。写真-2～4は、それぞれ透水前の供試体の状況、目詰まり状況、目詰まり上端部の状況を示したものである。写真-2～4より明らかなように、着色砂を用いているため、砂の流入状況をより明確に把握することが

できる。目詰まり量は境界から各層ごとに砕石を取り出して、目詰まりした砂を水洗いにより分離させ、炉乾燥後重量を測定している。4 cm 以上の砕石部分について

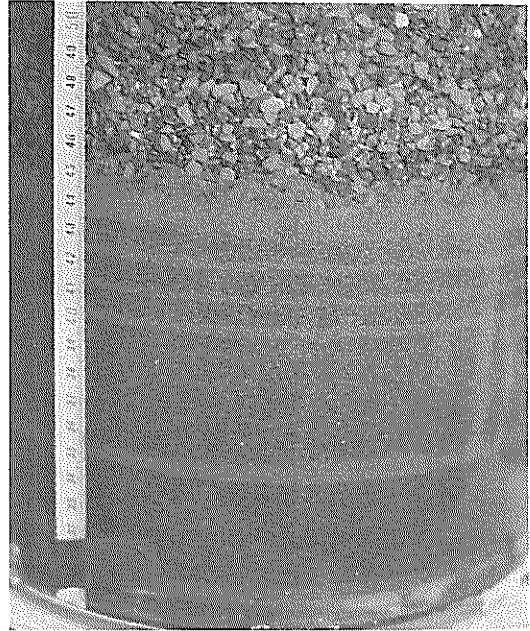


写真-3 目詰まり状況

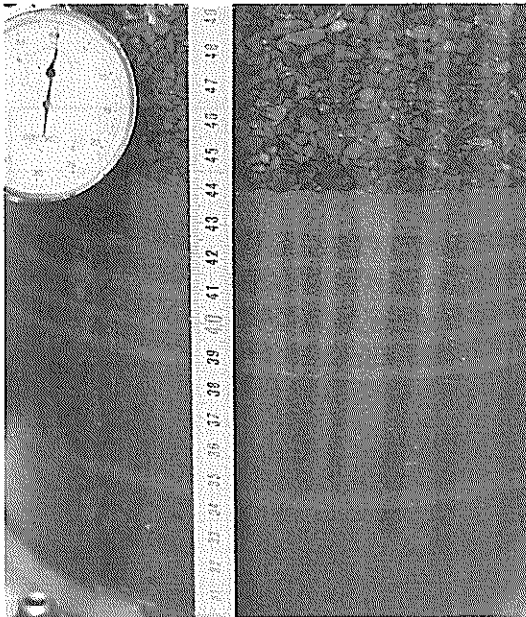


写真-2 透水前の供試体の状況

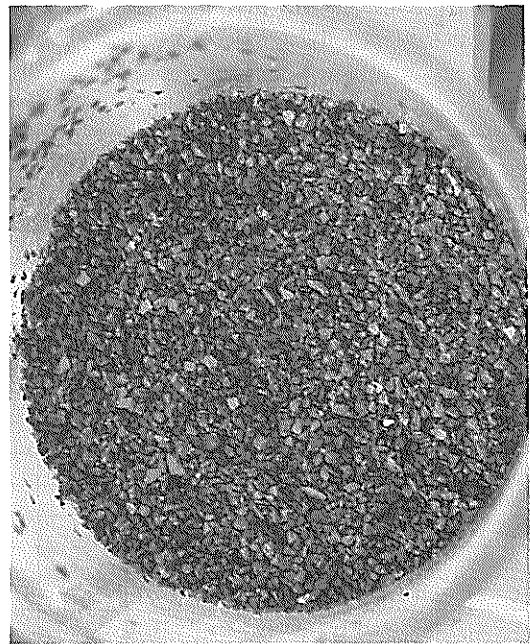
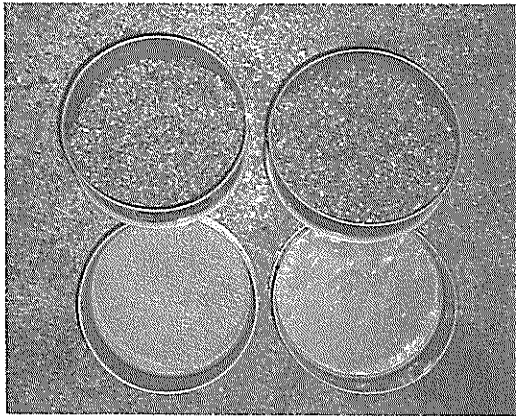


写真-4 目詰まり上端部の状況



写真—5 水洗後の碎石，砂の状況

は目詰まり量の測定は実施しなかったが、この理由は、今回の実験では目詰まり長がすべて4 cm以下であったことによる。目詰まり重量比は、取り出した碎石の重量で砂の目詰まり量を除して求めている。以上のようにして求められた目詰まり長は、原地盤の砂がドレーン材にどの程度流入するかの判断に、目詰まり重量比は、目詰まりした後のドレーン材の透水係数の低下量を測定するために用いられる。写真—5には目詰まり重量比を求めするために水洗した碎石，砂の状態を示している。なお、試料の着色に用いたペイントは、漂砂の観測などで用いられている流砂調査用蛍光塗料（化成オプトニクス㈱製）

である。

2.6 実験方法に関する2～3の検討

これまで述べた実験では、モデル地盤が碎石と砂の2層地盤となっている。このような状態における水の流れが、Darcy則に従っているかを検討する。Darcy則が成り立つ場合には、流速 v は次式（1）で与えられ、

$$v = ki = k_g i_g = k_s i_s \quad (1)$$

また、層全体の透水係数 k および動水勾配 i は、次式（2）、（3）となる。

$$k = \frac{z_g + z_s}{\left(\frac{z_g}{k_g}\right) + \left(\frac{z_s}{k_s}\right)} \quad (2)$$

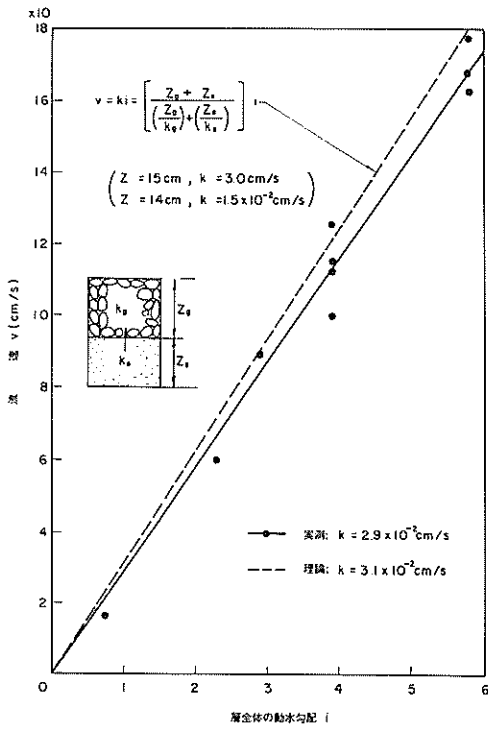
$$i = h / (z_g + z_s) \quad (3)$$

ここに、 z_g 、 z_s は、それぞれ碎石層、砂層の厚さ、 k_g 、 k_s は、透水係数、 i_g 、 i_s は、動水勾配、 h は、水頭差である（図—2（b））。

式（1）、式（3）の v 、 i は実験により求められ、また、式（2）の k は、碎石、砂の個別の透水係数から計算される。表—2は、15の実験ケースについてとりまとめたもので、これらのうち間隙比が1.00の場合の理論値と実測値を比較すると図—6のようになる。実測値にはばらつきがみられるが、平均値で見ると $k = 2.9 \times 10^{-2}$ cm/sとなり、理論値の $k = 3.1 \times 10^{-2}$ cm/sとほぼ一致しており、実験に用いた水頭差では、Darcy則が満足

表—2 短期目詰まり実験ケースと結果

| ケース | 鉛直圧力 P_v (kgf/cm ²) | 動水勾配 i_s | 間げき比 e | 相対密度 D_r (%) | 目詰まり長 L (cm) | 目詰まり重量 W (g) | 目詰まり重量比 W_r (%) | 透水前変位 (mm) | 透水後変位 (mm) | 透水量 cc/分 | 水温 (°C) | 備 考 |
|-----|--------------------------------------|---------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------|---------------|-------------|------------|-------|
| A-1 | 0.10 | 8.0 | 1.00 | 59 | 1.5 | 98.0 | 4.4 | 0.89 | 0.09 | 3129 | 16.0 | |
| A-2 | 0.10 | 8.0 | 1.00 | 59 | 1.5 | 132.5 | 5.9 | 1.30 | 0.08 | 2874 | 14.0 | |
| A-3 | 0.10 | 12.0 | 1.00 | 59 | 2.5 | 231.9 | 10.4 | 0.70 | 0.01 | 4194 | 14.0 | ボイリング |
| A-4 | 0.25 | 8.0 | 1.00 | 59 | 1.0 | 131.3 | 5.9 | 2.68 | 0.65 | 2794 | 12.0 | |
| A-5 | 0.25 | 12.0 | 1.00 | 59 | 1.8 | 109.7 | 4.9 | 2.20 | 0.46 | 4058 | 14.0 | |
| A-6 | 0.50 | 8.0 | 1.00 | 59 | 1.0 | 112.4 | 5.0 | 5.47 | 0.59 | 2500 | 12.0 | |
| A-7 | 0.50 | 12.0 | 1.00 | 59 | 1.6 | 119.9 | 5.4 | 4.88 | 1.30 | 4404 | 14.0 | |
| B-1 | 0.10 | 4.8 | 1.00 | 59 | 1.0 | 28.6 | 1.3 | 1.30 | 0.03 | 1489 | 15.0 | |
| B-2 | 0.10 | 6.0 | 1.00 | 59 | 1.5 | 96.0 | 4.4 | 0.70 | 0.20 | 2219 | 14.5 | ボイリング |
| B-3 | 0.25 | 1.5 | 1.00 | 59 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.44 | 0.20 | 422 | 17.0 | |
| C-1 | 0.10 | 12.0 | — | — | 4.0 | 288.0 | 13.1 | 0.74 | 0.42 | 5992 | 14.5 | |
| C-2 | 0.25 | 8.0 | — | — | 1.0 | 194.4 | 8.7 | 2.50 | 0.13 | 4134 | 12.0 | |
| C-3 | 0.25 | 12.0 | 1.11 | 37 | 3.5 | 293.8 | 13.4 | 3.17 | 1.12 | 4392 | 18.0 | |
| C-4 | 0.50 | 8.0 | 1.23 | 14 | 1.5 | 208.5 | 9.3 | 3.90 | 3.30 | 4288 | 12.0 | |
| C-5 | 0.50 | 12.0 | 1.03 | 53 | 2.5 | 57.7 | 2.6 | 2.64 | 0.06 | 4524 | 15.0 | |



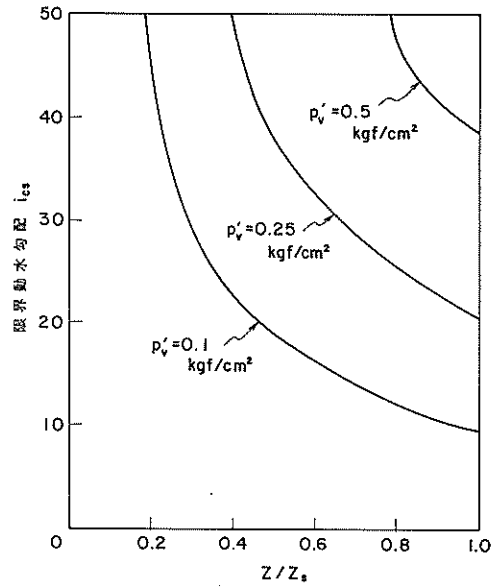
図一六 層全体の動水勾配と流速

されているとみなされる。

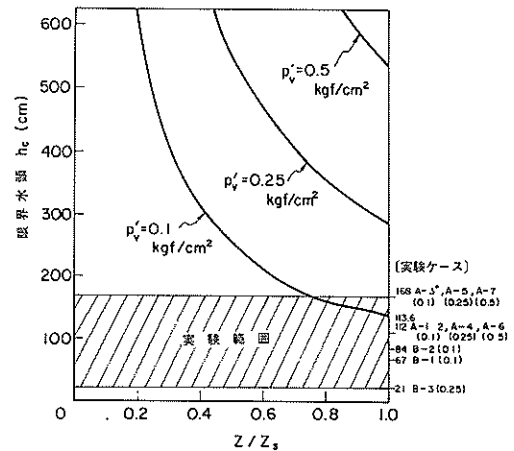
実験に用いる水頭差については、砂層のボーリングが発生しない状態 — 液状化前の状態 — となるように設定する必要がある。この理由は、砕石ドレーン工法が液状化を防止する目的で施工されることから、液状化した後のドレーンの目詰まりを調べても無意味なことによる。砂層のボーリングが発生しない条件は、砂層中の有効鉛直応力が負の値とならないことが必要で、そのときの砂層の動水勾配は次式で表される。

$$i_{cz} = \frac{\gamma'_g z_g + \gamma'_s z + I_o p'_v}{\gamma_w \left\{ \left(\frac{k_s}{k_g} \right) z_g + z \right\}} \quad (4)$$

ここに、 γ'_g 、 γ'_s は、砕石、砂の水中単位体積重量で、 z は、砕石層との境界から砂層の対象断面までの深さである。 p'_v は、上載圧、 I_o は、上載圧の伝ばんを表す影響値で、 $I_o = 1.0$ と仮定する。式(4)の関係を示すと、図一七のようになる。これは、砂層内の最下端においてボーリングが発生しやすいことを示すものである。図一八は、限界水頭と実験に用いた水頭差を表したもので、ケースA-1の場合、実際にボーリングが発



図一七 砂層内の限界動水勾配



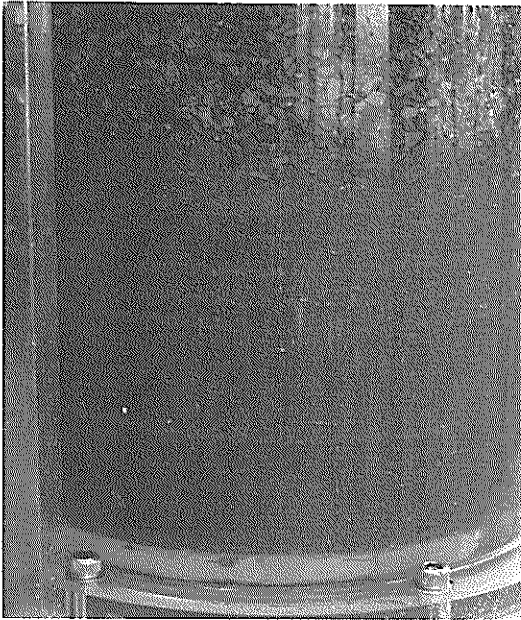
*ボーリング発生
() 上載圧 p'_v (kgf/cm²)

図一八 実験に用いた水頭

生じたが、その他の場合についてはすべてボーリングの生じる以前のの水頭差である。

次に、式(1)から砕石、砂層の動水勾配 i_g 、 i_s を求めてみると、本実験では i_g は 0.06 以下、 i_s は 12 以下となっており、砕石層の動水勾配は無視される程度である。

写真一六は、砂の移動状況の一例を示したもので、2.1



写真一六 砂の移動状況の一例

で述べたように砂の移動が砕石層と砂層の境界から進行していることがわかる。

次に、本研究では、試験法や装置が簡単なことから図一三に示したような鉛直方向に透水を行う装置を用いているが、この場合、浸透力と重力(砂の自重)の作用方向が逆方向になっており、水平方向への透水実験の場合とは条件が異なっている。ちなみに、本実験で使用した砂の粒径はだいたい0.1~1.0 mmであるから、粒子を球形として水中重量を求めてみると $0.88 \times (10^{-6} \sim 10^{-3})$ gfと非常に小さい。この自重の影響に関しては次のように考えることができるものと思われる。すなわち、砂が安定状態から移動し始めるためには、自重よりも大きな浸透力が必要であるが、いったん動き出すと、その移動状況は、作用する力のみについて考えてみると浸透力から自重を引いた力により支配される。これは、層内の平均流速がDarcy則にしたがって一定であるとの前提による。したがって、土粒子個々ではなくマクロ的にみた場合、境界の砂の単位体積当りの浸透圧 j は、 $j = r_w i_s$ 、水中単位体積重量 $r' = (G_s - 1) r_w / (1 + e)$ で与えられるから、境界における砂の単位体積に作用する力 s_v は、 $s_v = j - r' = r_w i_s - (G_s - 1) r_w / (1 + e)$ で求められる。水平方向の透水を行う場合には、砂の単位体積に作用する力 s_h は、動水勾配を $i_{s,h}$ とすると、 $s_h = r_w i_{s,h}$ であるから、両者の場合にそれぞれ作用する力 s_v と s_h

を等しく置くと、 $i_{s,h} = i_s - (G_s - 1) / (1 + e)$ となり、鉛直方向の透水実験から求まる動水勾配 i_s を水平方向の透水実験における動水勾配 $i_{s,h}$ に換算することができる。いま、 $G_s = 2.682$ 、 $e = 1.00$ とすると、 $i_{s,h} = i_s - 0.8$ が得られることになる。なお、鉛直方向の透水と水平方向の透水の違いによる影響については3.3で述べることにする。

3. 短期目詰まり実験結果および考察

実験は、目詰まりと上載圧、間隙比、動水勾配、透水速度の相関性を見いだすことを目的として15ケースの実験条件を設定して行った。表一2は、これらの実験条件と結果を取りまとめたものである。表一2においてケースAおよびBは上載圧と動水勾配の影響を調べるために相対密度が59%における結果であり、ケースCは相対密度を変えて行った実験結果である。これらの結果をもとに、上述の目詰まりに関する影響要因について個別に検討を行うことにするが、以下で検討する目詰まり量については、砂粒子の観測された砕石層における全重量を採用し、目詰まり重量比 W_f (%) = (砂の目詰まり重量 / 砕石の重量) × 100で整理を行った。

3.1 上載圧の影響

図一9は、上載圧の影響を調べるために表一2のケースAをプロットしたものである。これらのデータは、相対密度($D_r = 59\%$)、動水勾配($i_s = 8, 12$)を一定として上載圧のみ変化させたものであるが、ボイリングが発生した1ケースを除けば、目詰まり長、目詰まり量の両者とも同一動水勾配のもとでの目詰まりは一定となっており上載圧の影響は無いものとみなされる。したがって、砂層内の鉛直圧力は本実験では明らかではないが、砂層に伝達される応力の影響係数が同じだとすると、目詰まりに対する鉛直圧力の影響も無いものと考えられる。なお、ボイリングの発生した1つのケースについては、鉛直圧力が0の状態になった影響が大きいものと思われ、別途検討の必要があるものと考えられるが、実際の砕石ドレーン工法の設計にあたってはこのような状態(すなわち液状化の状態)が生じないように考慮されていることから、今回の考察の対象から除外した。

3.2 相対密度の影響

表一2のケースAおよびCのデータを相対密度で整理したものが図一10である。図一10では、示されているデータ数が少なくばらつきもあるが、目詰まり長、目詰まり量ともに相対密度が減少すると増加する傾向にある。なお、図一10における相対密度は、砂を詰めた初期の相対密度を用いている。図一11は、透水前後の供試体

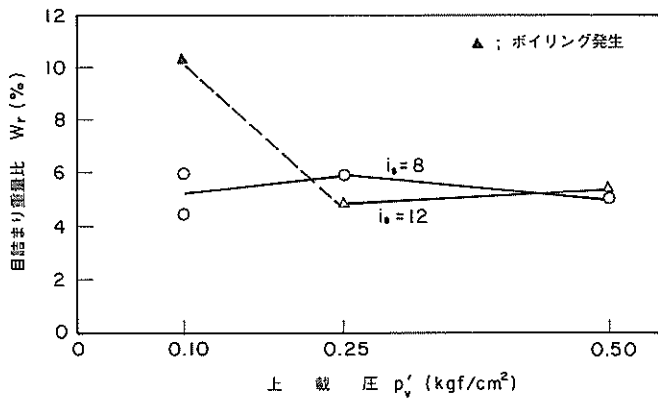
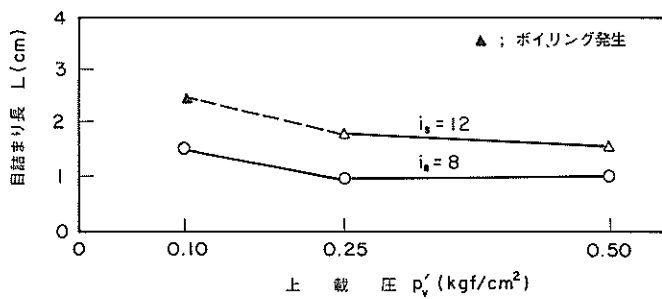


図-9 目詰まりと上載圧の関係

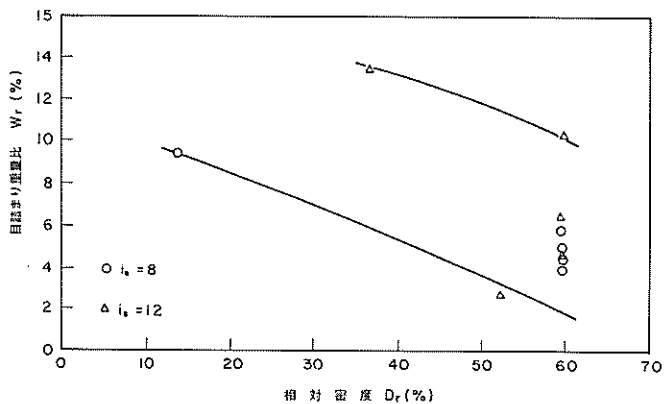
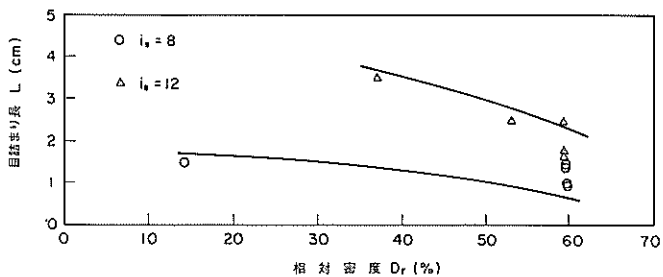
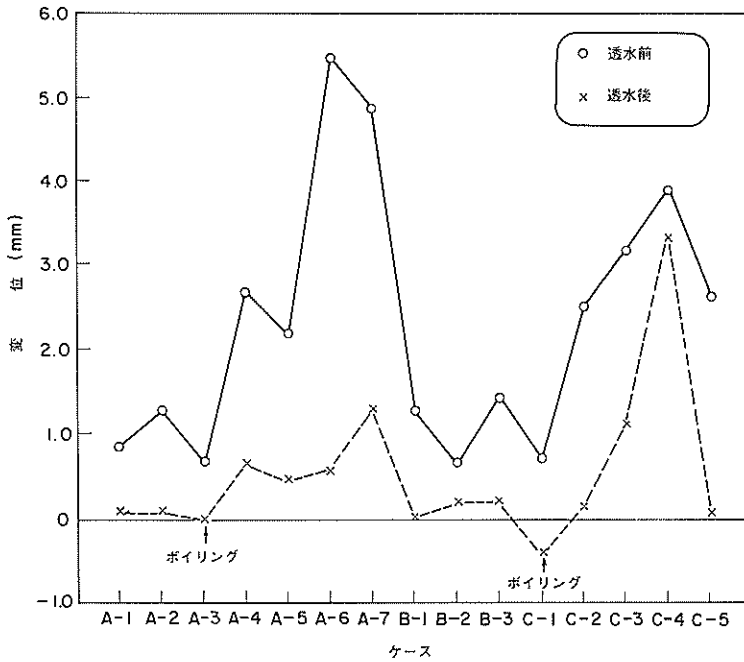


図-10 目詰まりと相対密度の関係



図一 11 透水前後の供試体の変位

の変位量を示したものであるが、上載圧荷おおよび透水による供試体の変位は最大で5.47 mmであり全層圧の2%以下であることから、初期の相対密度の変化は考えないで整理を行っている。

3.3 動水勾配の影響

図一 12 は、動水勾配の影響を調べるために表一 2 のケース A, B をプロットしたものである。これらのデータは、間隙比を一定として上載圧、動水勾配を変化させたものである。前述のように、上載圧の目詰まりに及ぼす影響は無視されるので、図一 12 は動水勾配と目詰まりの関係を示していることになる。図一 12 から明らかなように、目詰まり長、目詰まり量とも動水勾配が小さい場合にはほんのわずかであるが、動水勾配が4程度以上になると目詰まりが大きくなっている。

次に、2.6 で述べた考えにもとづき、鉛直方向の透水を水平方向の透水の場合に換算した結果について調べてみる。図一 12 の i_s を $i_{s,h}$ に換算すると図一 12 の中の△印となるが、砂の自重による影響はそれほど小さくなく、全体の傾向としては、 i_s で整理した場合とほとんど変わらないとみなしてよいものと思われる。

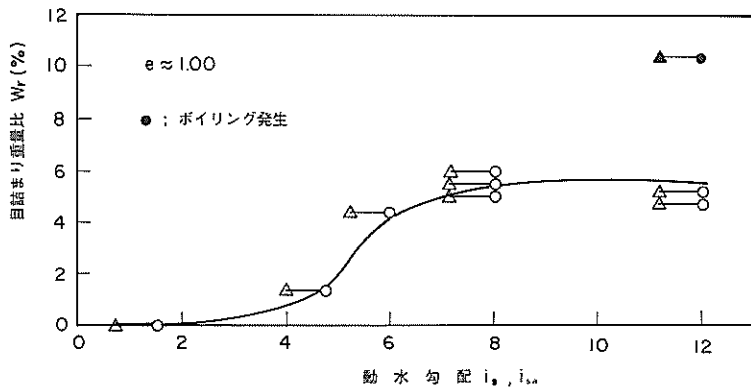
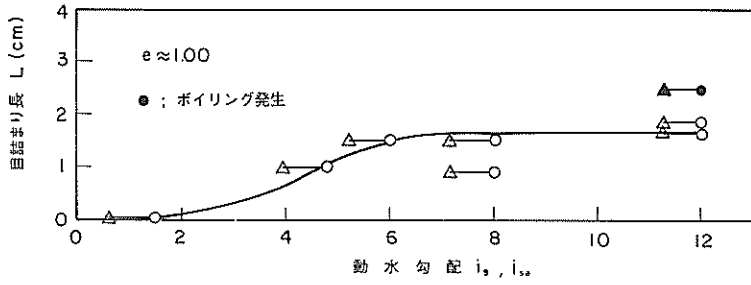
3.4 透水流速の影響

これまでの結果より、碎石の目詰まりには動水勾配と相対密度（間隙比 e ）が関与していることが明らかとなった。水の流れが Darcy 則に従うとすると、流速 v は透水係数 k と動水勾配 i の積で表され、また、 k は間隙比の関数 $f(e)$ であるから、これらの2つの影響要因を含む流速を用いて整理を行ったものが図一 13 である。図一 13 では、 $v = 0.16 \text{ cm/s}$ 以上におけるデータのばらつきはあるが、目詰まりは流速の増加とともに増加している傾向にある。これらのデータの抱絡線を求めてみると、

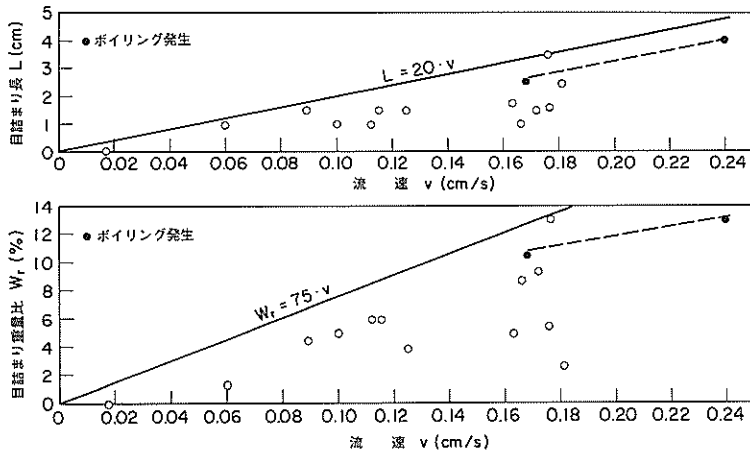
$$\text{目詰まり長 } L (\text{cm}) = 20 v, (v : \text{cm/s})$$

$$\text{目詰まり重量比 } W_r (\%) = 75 v, (v : \text{cm/s})$$

となっている。ここに、目詰まり重量比 $W_r = (\text{目詰まり砂の重量} / \text{碎石の重量}) \times 100$ である。なお、図一 13 中の黒丸はボイリングの発生したデータを表しており、流速が $0.17 \sim 0.24 \text{ cm/s}$ 以上については別途検討の必要があるものと思われるが、ボイリングが発生しない範囲のみを考えると、本実験では最大目詰まり長は約 4 cm、最大目詰まり量は 15%程度と考えられる。



図一 12 目詰まりと動水勾配の関係



図一 13 目詰まりと流速の関係

4. 繰り返し目詰まり実験結果および考察

ドレーン材の長期的な目詰まりを検討するために、長期間に何回か発生すると思われる地震動に対する目詰まり、すなわち2回目以降の地震に対する目詰まり状況を測定した。試験の方法は、5分間の透水をそれぞれ1, 3, 6, 12回繰り返し、各回数終了後に試料を取り出し目詰まりを測定した。実験条件は、短期目詰まり実験結果から目詰まりを生じやすいケースを選択し、上載圧 0.1 kgf/cm^2 、動水勾配8とした。実験結果を表一3と図一14に示している。なお、データの整理は、各繰り返し回数に対応する透水時間の合計で行っている。図一14より明らかなように、目詰まり長、目詰まり量ともに繰り返し透

水回数が増えると目詰まりも増加する傾向が見られ、1回目（透水時間5分）に比較して12回の繰り返しの（透水時間60分）の目詰まり長は1.33倍、目詰まり量は1.14～1.52倍となっている。また、図一14では、目詰まり状況が、透水回数の増加により一定値に近づいていく傾向がみられ、この時間は30分～1時間程度である。このことは、今回のような条件のもとでは、砕石中の目詰まりにある限界の存在することを示唆するもので、砕石中にある程度の砂が流入すると、その状態で境界における砂が安定し、それ以上目詰まりが進行しなくなるものと考えられる。なお、一般的には、上記現象は、ドレーン材と原地盤砂の粒径にも依存することが予想される。

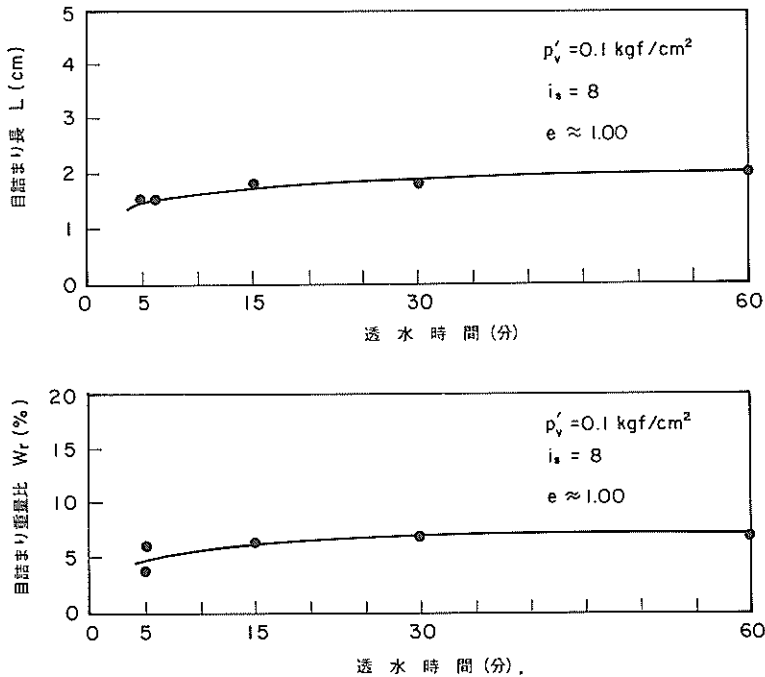
表一3 繰り返し目詰まり実験結果

| 透水時間 (分) | 透水回数 (回) | 目詰まり長 (cm) | 目詰まり重量比 (%) |
|----------|----------|------------|-------------|
| 5 (短期) | 1 | 1.5 | 4.4 |
| 5 (短期) | 1 | 1.5 | 5.9 |
| 15 | 3 | 1.8 | 6.2 |
| 30 | 6 | 1.8 | 6.7 |
| 60 | 12 | 2.0 | 6.7 |

5. 目詰まり試料の透水試験結果および考察

5.1 実験結果

これまで述べてきた目詰まり実験結果では、目詰まり長の最大が約4cm、目詰まり量の重量比が約15%以下であった。これらの結果を参考に、砕石に砂を混合した試料を作成し、2.2で述べた装置を用いて定水位法による透水試験を実施している。この場合浸透流の状態が層



図一14 目詰まりと透水時間の関係

流状態になるように小さな動水勾配を用いている。実験条件と結果を表一4に示す。図一15は、目詰まりによる碎石の透水係数の低下を示したもので、目詰まりの重量比が50%になるとドレーンの排水効果がほとんど見られなくなるのがわかる。また、目詰まり重量比が30%の場合には、透水係数は約1/5まで低下するが、本実験で得られた最大目詰まり重量比15%では、透水係数の低下率は1/2.5程度である。

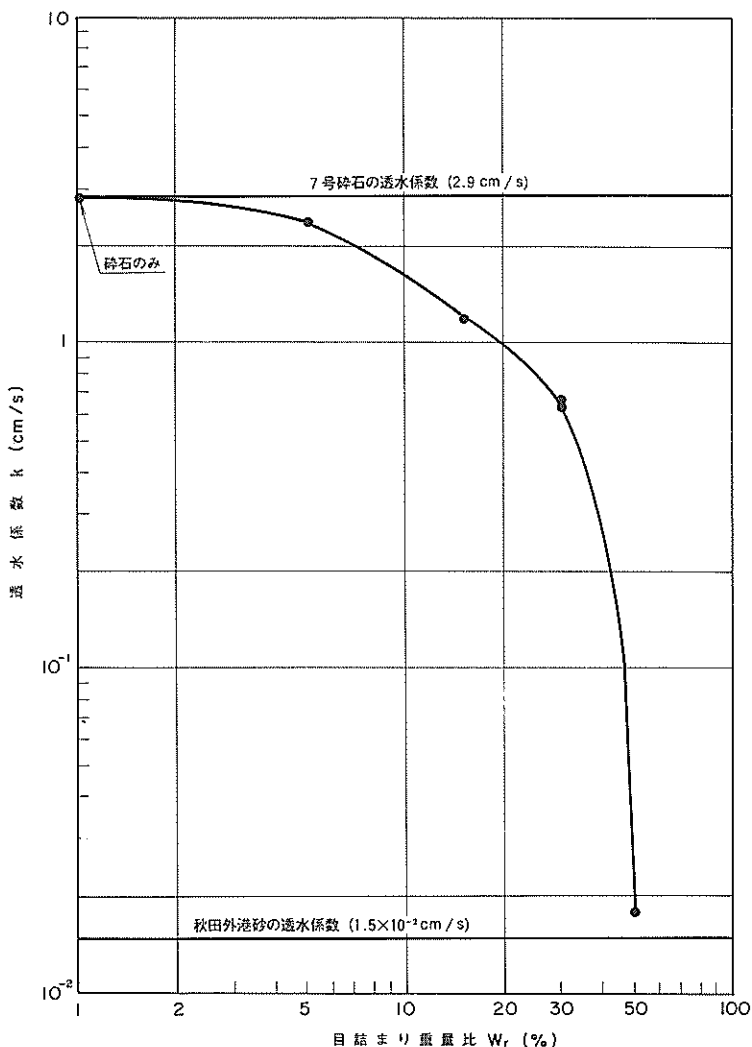
5.2 透水係数低下に関する考察

碎石中に目詰まりした砂によりドレーンの初期の透水係数が低下することが明らかにされたが、目詰まり量と透水係数低下の関係について、理論的解析結果と実測値

との比較を行ってみる。理論的解析としては、佐藤⁷⁾により定式化された岩盤中に充填されたグラウト材による

表一4 目詰まり試料透水実験結果

| 目詰まり重量比(%) | 目詰まり試料透水係数(cm/sec) |
|------------|----------------------|
| 0 | 2.9 |
| 5 | 2.4 |
| 15 | 1.2 |
| 30 | 0.64, 0.67 |
| 50 | 1.8×10^{-2} |



図一15 目詰まりによる透水係数の低下

透水係数の低下と充填率の関係を用いることにする。一般に、流れが層流である場合、透水係数 k は、

$$k = \frac{C}{\mu} \rho g f(\lambda) d^2 \quad (5)$$

の形式となる。ここに、 μ ：水の粘性係数、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 d ：代表寸法、 C ：定数、 $f(\lambda)$ ：多孔媒体の空隙状態を表す空隙関数とよばれるものである。したがって、式(5)において、空隙関数として Kozeny ($f(\lambda) = C_k \lambda^3 / (1 - \lambda)^2$, $C_k = 0.2773$) および Zunker ら ($f(\lambda) = C_z (\lambda / (1 - \lambda))^2$, $C_z = 0.1108$) のものを用いて定式化を行うと、

$$\frac{k'}{k} = \left\{ \frac{(\lambda_i - \alpha)}{\lambda_i} \right\}^3 \left\{ \frac{(1 - \lambda_i)}{1 - (\lambda_i - \alpha)} \right\}^2 \quad (\text{Kozeny 型}) \quad (6)$$

$$\frac{k'}{k} = \left\{ \frac{(1 - \lambda_i)(\lambda_i - \alpha)}{\lambda_i \{1 - (\lambda_i - \alpha)\}} \right\}^2 \quad (\text{Zunker 型}) \quad (7)$$

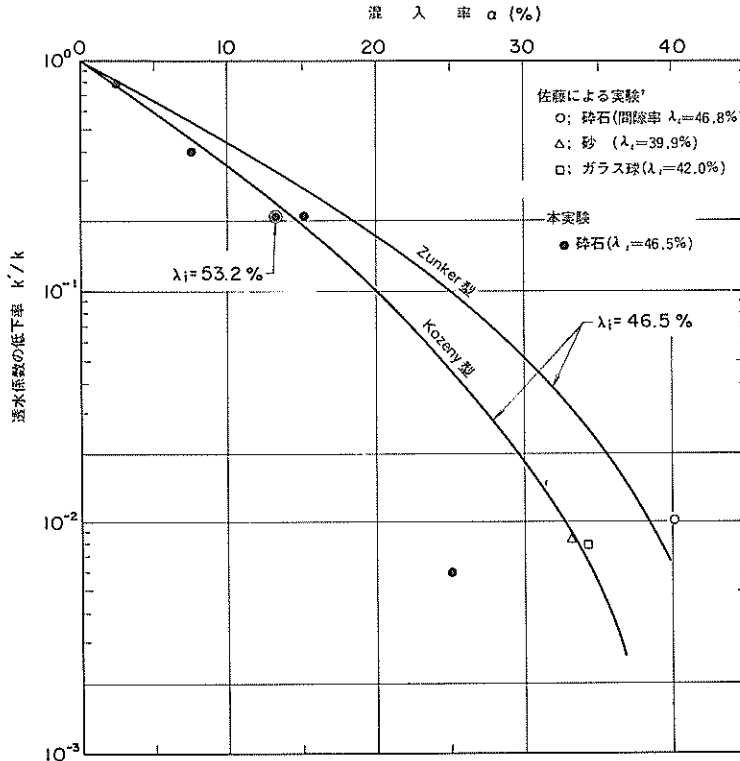
表一五 砂の混入率

| 砕石の 初期間隙率 | 目詰まり 重量比 | 砂の重量 | 砂の体積 | 砂の混入率 |
|--------------|-------------|-------|-------|----------|
| λ_i | W_r | W_s | V_g | α |
| 0.465 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.465 | 5 | 112 | 42 | 0.025 |
| 0.465 | 15 | 336 | 125 | 0.075 |
| 0.465 | 30 | 672 | 251 | 0.151 |
| 0.465 | 50 | 1120 | 418 | 0.251 |
| 0.532 | 30 | 2352 | 877 | 0.131 |

となる。ここに、 k' ：目詰まり後の透水係数、 λ_i ：砕石の初期間隙率、 α ：砂の目詰まり率（混入率）で、 V を砕石の体積、 V_g を目詰まり砂の体積とすると、

$$\alpha = (V_g / V) \quad (8)$$

で定義される。なお、 V_g は目詰まり砂の重量 W_s と比重 G_s 、水の単位体積重量 γ_w から、 $V_g = W_s / G_s \cdot \gamma_w$ により求めている。表一五に今回の実験から得られた結果を



図一六 透水係数低下に関する実測値と理論値の比較

示す。なお、式(6)、(7)の α 、 λ_1 は百分率ではない。これらをプロットし、佐藤の実験結果とともに表したものが図-16である。図-16より明らかなように、砕石ドレーン材への砂の目詰まりによる透水係数の低下についても、グラウト注入地盤の透水係数の低下同様、これらの式(6)、(7)により推定できるものと考えられる。なお、今回の実験結果では、混入率が15%以下においてZunker型の式(7)よりも、Kozeny型の式(6)の方がより適合性が良いように思われる。

6. 目詰まりの評価と実際への適用に対する問題点

液状化対策としてのドレーンの設計にあたっては、ドレーンの目詰まりを考慮しなければならない。実際のドレーン材の選定にあたっては、極力目詰まりのない材料が選ばれるものと思われるが、ドレーンの目詰まりは原地盤の砂の状態や種類などにより異なることが予想される。実際にドレーン材の目詰まりを定量的に把握するためには、これまで述べてきた実験手法が適用可能なものと考えられるが、室内実験により得られた試験結果を実際の設計や施工に適用する場合に2つの方法が考えられる。第1に、設計段階において、ドレーン材の目詰まりによる透水係数の低下をあらかじめ考慮しておき、目詰まりを見込んだやや小さめの透水係数を採用する方法である。第2に、ドレーン打設時にドレーン径にいくぶんかの余裕を見込み、余裕部分については原地盤の砂と同じ透水係数とみなす方法である。前者の場合には、これまで述べてきた試験方法により目詰まり長、目詰まり量や透水係数の低下を定量的に把握できるが、ドレーン全体の透水係数をどのように評価するか検討の必要があろう。また、後者の場合には、実際のドレーンの施工においてドレーン径は設計値よりも大きくなる場合が普通であり、この分をどの程度見込むかについて検討の必要が

表-6 砕石杭出来形

| | 削孔延長(m) | | 砕石使用量(m ³) | | 仕上がり径(mm) | |
|---|---------|--------|------------------------|-------|-----------|-----|
| | 設計 | 実施 | 設計 | 実施 | 設計 | 実施 |
| 1 | 1110.2 | 1124.2 | 217.6 | 287.4 | 500 | 571 |
| 2 | 1061.0 | 1092.5 | 208.0 | 274.2 | 500 | 565 |
| 計 | 2171.2 | 2216.7 | 425.6 | 561.6 | 500 | 568 |

あるものと考えられる。表-6は、第1港湾建設局秋田港において実施された試験工事の結果であるが、実際のドレーン径は、設計値500mmに対して、仕上がり径565~571mmと約15~14%大きくなっている。また、砕石の使用量は、設計に対し約32%のくいとみとなっている。これは、目詰まりに対して安全側の結果を与えていることになる。設計時に余裕長を考慮する場合に、この分をどのように取り扱うかについては今後のドレーン打設実績など、より多くのデータの収集が必要であらう。

7. まとめ

室内実験により、砕石ドレーン工法に用いられるドレーン材の目詰まりと透水係数の低下を定量的に把握するための実験手法の開発を行い、この手法を用いてドレーン材の目詰まりに関する基本的な問題について調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ドレーン材の目詰まりを評価するパラメータとして、目詰まり長と目詰まり重量比を用いることができる。
- (2) 目詰まり長、目詰まり重量比は、相対密度、砂層の動水勾配、透水流速、透水時間などの影響を受けるが、上載圧の影響は受けない。
- (3) 目詰まり長、目詰まり重量比は、これらの要因のうち相対密度が大きくなると減少し、砂層の動水勾配が大きくなると増大する。また、今回用いた試料では、ある透水流速に対して、目詰まり長、目詰まり重量比には限界があり、これらの限界は透水流速に比例している。さらに、目詰まり長、目詰まり重量比は、透水時間によって増加する傾向にあるが、ある程度の時間が経過すると一定の値となる。この時間は30分~1時間程度であった。
- (4) 目詰まり後のドレーン材の透水係数は、今回用いたドレーン材と秋田外港砂では、目詰まり重量比で15%の場合1/2.5、30%の場合1/5に低下し、50%の場合には、砂の透水係数にほぼ等しくなる。
- (5) 混入した砂によるドレーン材の透水係数の実測低下率を、砂の混入率を用いてZunker型およびKozeny型の空隙関数を用いた理論式と比較したところ混入率が15%以下では、透水係数の低下率はKozeny型の式により表されることが明らかとなった。
- (6) 着色した砂を用いて実際にドレーン材内に流入する砂の量を測定する本実験手法により、ドレーン材の目詰まりを定量的に評価できることが明らかとなった。

8. おわりに

今回実施した実験では、ドレーン材の目詰まりを定量的に把握する実験手法の開発に主眼を置いている。したがって、ある原地盤砂に対して、どのようなドレーン材が最適かという問題についてはふれられていない。最適なドレーン材の選定にあたっては、必ずしも、目詰まり現象のみが支配的要因ではなく、砕石ドレーン工法の設計手法や施工条件、材料コスト等の種々の要因が総合的に判断されるべきであると思われるが、現状においては、完全な設計法が確立されているわけではなく、また、施工実績もそれほど多くはないことから、本研究では、最適なドレーン材を一般的に規定しようとするものではなく、原地盤の砂の特性に応じて、ドレーン材の目詰まりを確認するという基本的立場をとっている。今回の実験は、試料の種類も少なく、実験ケースも不十分であるが、実験から得られた知見を提供することによって、類似の研究に取り組まれている各方面の参考となればと思い、あえてとりまとめた次第である。各位の御批判を抑ぐところである。

おわりに、本実験の遂行にあたっては、元土質部動土質研究室研修生（現日本国土開発㈱）玉井友章氏および

同研究室加藤丈晴氏に負うところが大きい。記して深甚の謝意を表したい。（1985年6月29日受付）

参考文献

- 1) Seed, H.B. and J.R. Booker: Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drain, *Jour. of Geotechnical Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT 7, 1977, pp. 757 ~ 768.
- 2) 吉見吉昭：砂地盤の液状化，技報堂，1980，pp.97.
- 3) 大野義郎，伊藤克彦，南川洋士雄，大北康治：砕石ドレーンの短期目詰まり限界について，第19回土質工学研究発表会，昭和59年6月，pp.191 ~ 192.
- 4) Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Tarbot, J.R. : Basic Properties of Sand and Gravel Filters, *Jour. of Geotechnical Division*, ASCE, Vol.110, No. 6, 1984, pp. 684 ~ 700.
- 5) 中島 豊，伊藤克彦，大北康治，島岡久寿：砕石ドレーンに用いる砕石の粒度分布について，第20回土質工学研究発表会，昭和60年6月，pp. 749 ~ 750.
- 6) 斎藤 彰，大野義郎，持丸知也，吉田 映，長山秀昭，横山幸満：砕石ドレーン工法の液状化対策効果に関する実験的研究，日本鋼管技報，No.92，1982，pp. 66 ~ 78.
- 7) 佐藤邦明：グラウト注入における水理効果の算定，土と基礎，Vol. 32，No. 12，pp. 47 ~ 52.

港 湾 技 研 資 料 No.534

1 9 8 5 . 9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
 横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.