

# 礫混じりの土砂堆積地盤における透水性の原位置測定と評価

森井俊広・森 敬幸\*・松本 智\*\*

(平成13年 5月30日受付)

**要約** 山間部峡谷に堆積した土砂地盤の流出特性を知るため、原位置浸潤試験により地盤の透水性を調べた。調査サイトは、斜面崩壊土が流下し、峡谷の河川敷に堆積した地盤で、大きな礫の間に小礫まじりの砂が分布する。試験にはゲルフ式プレッシャーインフィルトメータ(GPI)法を用いた。簡便で迅速な原位置試験法であることから、比較的多くの測定データが得られ、調査地盤の透水性を適切に評価することができた。礫を含む地盤の透水係数の評価法を提示し、堆積地盤からの流出特性に及ぼす礫の影響を検討した。

**キーワード**：原位置浸潤試験、土砂堆積地盤、透水係数、プレッシャーインフィルトメータ法、飽和不飽和浸透流解析

## はじめに

山間部峡谷に堆積した土砂地盤の流出特性を知るため、原位置浸潤試験により地盤の透水性を調べた。調査サイトは、大規模な斜面崩壊土が流下し、峡谷の河川敷に堆積した地盤である。地盤には直径30から70cm程度の大きな礫が散在し、その間にマトリックス部として小礫まじりの砂が分布する。調査にはゲルフ式プレッシャーインフィルトメータ(Guelph pressure infiltrometer : GPI)法<sup>1,2)</sup>を用いた。GPI法は、地表面に挿入した単一リングから定水頭状態で浸潤させ、定常に達したときの浸潤量から現場飽和透水係数(Field-saturated hydraulic conductivity of soil)  $K_{fs}$ を測定する。 $K_{fs}$ は、空気泡を含んだ状態での現地地盤の透水性を表すもので、実際の地盤の透水や降雨浸透挙動などを予測する上で現実に即した情報となる。また、GPI法は、試験装置がシンプルで測定も簡単という、原位置試験法としてのすぐれた特徴をもつ<sup>3)</sup>。

本報告では、土砂堆積地盤で実施した原位置浸潤試験の結果をまとめ、GPI法の適用性を紹介する。特に、短時間で比較的多くのデータが取れることから、地盤の透水性を統計的な観点から分析できる利点を示す。次いで、礫を含む地盤での透水係数の評価法を提示し、有限要素法(FEM)による飽和不飽和浸透流解析を通して礫混じり地盤の流出特性を調べる。

## GPI法の概要

GPI法の試験装置は非常にシンプルで、図1に示すように、鋼製の単一リングにマリOTT式の給水タンクを連結した構造となっている。半径  $a$  のリングを地盤表面から深さ  $d$  に挿入したのち、一定の圧力水頭  $H$  のもとでリング内から地盤へ浸潤させ、時間が経過して定常状態に達したときの浸潤量  $Q_s$  を測定する。このとき、 $K_{fs}$  は、次式により算出できる。

$$K_{fs} = \frac{\alpha^* G Q_s}{a \alpha^* H + a + G \alpha^* \pi a^2} \quad (1)$$

$$G = 0.316 \frac{d}{a} + 0.184 \quad (2)$$

ここで  $G$  は形状係数で、地表面の点湧源からの定常浸潤に対する厳密な理論解を、リング内からの面状の浸潤挙動へ拡張するため、数値実験<sup>1)</sup>により求められた。 $\alpha^*$  は、土の不飽和透水係数とサクションの関係を指数関数で表したときのべき乗指数である。これにより、浸潤流れにしめる毛管力の影響をシンプルな形で表現するこ

\*新潟大学大学院自然科学研究科

\*\*新潟県土木部

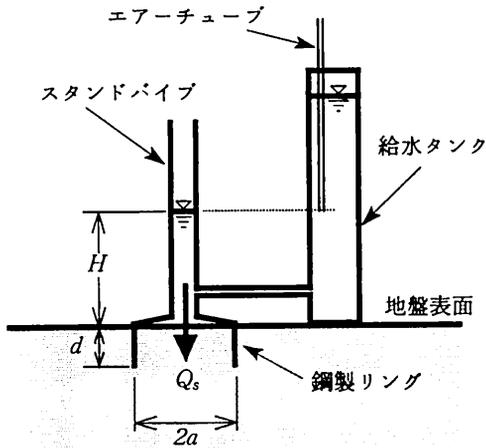


図1 ゲルフ式プレッシャーインフィルトローメータ (GPI) 試験装置の構造概要

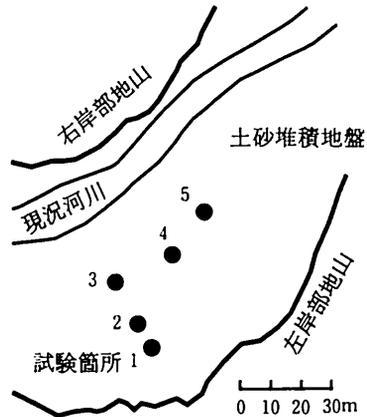


図2 土砂堆積地盤における原位置浸潤試験の実施箇所

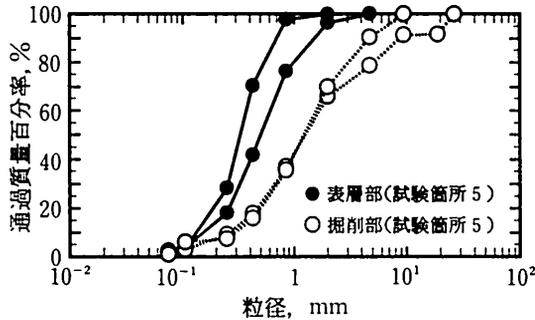


図3 代表的な試験箇所から採取した土砂の粒度特性

とができ、 $K_{fs}$ の算出式が簡略化されている。ただし、 $\alpha^*$ は、土質観察などにより試験に先立ってあらかじめ定めておく必要がある<sup>4)</sup>。

### 礫混じり地盤の透水性の原位置測定

#### 1. 現地試験の概要

現地では、図2に示すように、互いに10mから20m離れた地盤表層部の5箇所、大礫の間のマトリックス部を対象にGPI法による原位置浸潤試験を実施した。次いで、各試験箇所をバックホウで1m程度掘り、それからさらに10cmから30cmほど地盤を乱さないようにしてスコップで掘り下げた掘削部で、再度、GPI法による試験を行った。試験には、市販の鋼管を利用した $a=5.5\text{cm}$ のリングを用い、 $d=3.0\text{cm}$ とした。 $H$ は15-17cm程度を最も多く設定した。GPI法の試験後に、リング挿入部近傍の地盤から、100cc容積のサンプラーを用いてコア土を採取し、室内定水位透水試験により透水係数 $K_{core}$ を測定した。採取したコア土は、原位置浸潤試験での空気封入状態に対応させるため、アルミバット内でコアの高さの半分程度まで浸漬し、1日間放置した。図3は、代表的な試験箇所の地盤表層部と掘削部から採取したコア土の粒度試験結果をまとめたものである。地盤材料の工学的分類方法によれば、それぞれのマトリックス部の材料は、砂と礫質砂に分類される。このため、これまでに推奨されている値<sup>4)</sup>にしたがって、式(1)の $\alpha^*$ として $0.12\text{cm}^{-1}$ を仮定した。

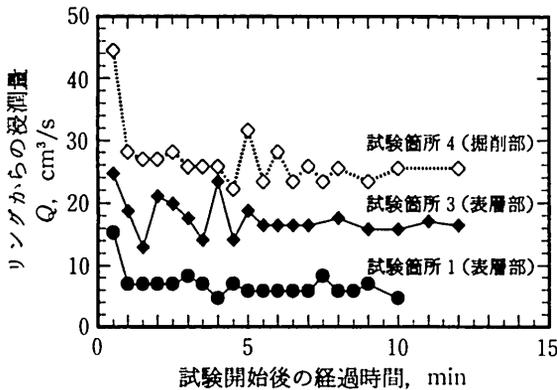


図4 GPI法を用いた原位置試験における浸潤量の測定例

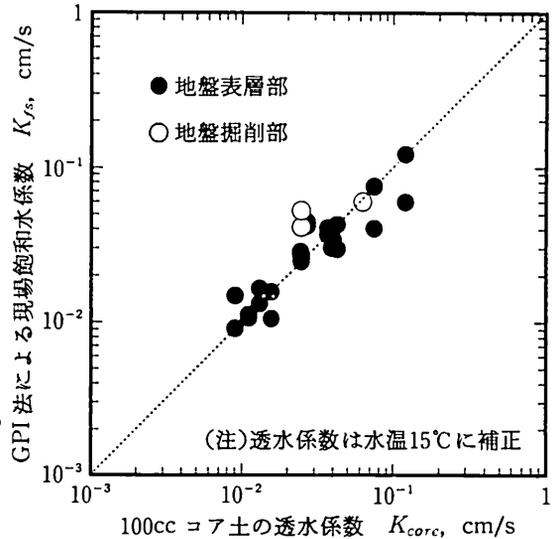


図5 GPI法で測定した現場飽和透水係数  $K_{fs}$  と採取コア土の透水係数  $K_{core}$  との比較

## 2. GPI法の試験特性

図4は、GPI法による原位置試験で測定した浸潤量の時間変化の一例である。地盤のマトリックス部が砂ないし礫質砂材料であることから、すべての試験ケースで、初期の水分状態に関係なく、試験開始後3分から7、8分といった早い段階で、浸潤量が一定に落ち着くのを確認できた。一連の試験では、この一定に落ち着いた浸潤量を  $Q_s$  として式(1)から  $K_{fs}$  を算定した。GPI法から得られた  $K_{fs}$  と100cc コア土の  $K_{core}$  を、図5に比較する。いずれの透水係数も、水温15°Cの値に補正している。GPI法は、測定領域をできるだけ大きくして、地盤中の亀裂や小穴などの影響を包括した形で透水性を評価しようとするものである。図5では、このGPI法から得られた  $K_{fs}$  が、100cc といった小さな容積で測定された  $K_{core}$  とおおむね同程度の値を出している。このことから、今回対象とした地盤では、大きな礫の間に堆積した土砂は、亀裂や小穴などの水みちが少ない比較的均質な状態で分布していると推察できる。

## 3. 地盤の透水性の統計的評価

試験によって得られる地盤の特性値にはばらつきがともなる。このばらつきの中で、対象とした地盤が、試験箇所ごとに平面的に異なった  $K_{fs}$  の分布特性を持つのか、また表層部と掘削部で  $K_{fs}$  に有意な違いがあるのかを調べた。分析には、試験箇所および地盤深さ(つまり表層部と掘削部)の2つの因子が  $K_{fs}$  の分布に影響するとして、二元配置の分散分析法を用いた。分析データは表1に示すとおりである。試験箇所のうち、1箇所の掘削部では、小礫が集中していたため試験が実施できなかった。表2に、この試験箇所を除く4箇所の試験データに対する分散分析の結果をまとめる。同表の有意確率に着目して、 $K_{fs}$  の分布特性をみると、次のことがいえる。まず、 $K_{fs}$  は試験箇所ごとに統計的に有意な違いはもっておらず、地盤マトリックス部の透水性は、平面的にみればおおむね均一であることが分かる。一方、地盤表層部と掘削部の  $K_{fs}$  には統計的に高度に有意な差があり、土砂堆積地盤のマトリックス部は、深さ方向に非均質な透水性構造をもつと推察される。表1から分かるように、 $K_{fs}$  は、地盤表層部に比べ掘削部の方で大きくなっている。この透水性構造は、図3の粒度組成の対比とも符合しており、斜面崩壊土が河床部に堆積する過程で、質量のより大きな礫や粗砂が深部に分布し、表層部には相対的に細かな砂が被覆することによって生じたと推察される。

表1 GPI法による原位置浸潤試験から得られた現場飽和透水係数  $K_{fs}^{a)}$

| 試験位置<br>繰返し <sup>b)</sup> | 表層部                   |                       | 掘削部 <sup>c)</sup>     |                       |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                           | #1                    | #2                    | #1                    | #2                    |
| 試験箇所1                     | $1.06 \times 10^{-2}$ | $1.48 \times 10^{-2}$ | $8.16 \times 10^{-2}$ | $8.32 \times 10^{-2}$ |
| 試験箇所2                     | $4.01 \times 10^{-2}$ | $5.96 \times 10^{-2}$ | -                     | -                     |
| 試験箇所3                     | $4.05 \times 10^{-2}$ | $2.96 \times 10^{-2}$ | $1.86 \times 10^{-1}$ | $5.58 \times 10^{-2}$ |
| 試験箇所4                     | $1.65 \times 10^{-2}$ | $3.04 \times 10^{-2}$ | $4.85 \times 10^{-2}$ | $4.15 \times 10^{-2}$ |
| 試験箇所5                     | $2.66 \times 10^{-2}$ | $3.40 \times 10^{-2}$ | $4.13 \times 10^{-2}$ | $5.99 \times 10^{-2}$ |

a)  $K_{fs}$  (cm/s) は、水温15℃に補正した値である。

b) 試験は、リング挿入箇所を変えて2回ずつ行った。

c) 試験箇所2の掘削部では、試験を実施していない。

表2 原位置浸潤試験結果の分散分析

| 因子    | 自由度 | 分散比 $F_0$ | 有意確立 $p$ | 寄与率、% |
|-------|-----|-----------|----------|-------|
| 試験箇所  | 3   | 1.36      | 0.323    | 4.5   |
| 地盤深さ  | 1   | 8.76      | 0.018**  | 32.5  |
| 交互作用  | 3   | 1.01      | 0.437    | 0.1   |
| 繰返し誤差 | 8   | -         | -        | 62.9  |
| 合計    | 15  | -         | -        | 100.0 |

\*\*因子の影響が統計的に高度に有意であることを意味する。

### 礫混じり地盤の透水性の評価

#### 1. 礫率を考慮した透水係数

礫混じりの地盤の透水性を、ダルシーの式で定義される透水係数を通して評価しようとする場合、透水にまったく寄与しない礫部分と、これ以外の礫間に分布する土砂部分(マトリックス部)の面積比率を考慮する必要がある。礫部分の面積がごく小さければ、原位置試験で求めたマトリックス部の透水係数をそのまま地盤の透水性とみなしても差しつかえない。しかし、この礫部分の面積の比率が大きくなると、原位置試験で求めたマトリックス部の透水係数を、そのまま、地盤全体の透水係数とみなせなくなってくる。これを、以下で、簡単な管モデルを用いて考察する。

地盤内での土中水の流路を、図6のような、断面積  $A$ 、長さ  $L$  の円筒状の管と考える。 $A$  は、透水を受け持つ土砂部分の断面積  $A_s$  と間隙断面  $A_v$ 、そして透水に寄与しない礫部の断面積  $A_g$  からなる。また  $A_s$  と  $A_v$  をあわせたマトリックス部の断面積を  $A_m$  とする。原位置透水試験でえられる透水係数は、このマトリックス部  $A_m$  に対して求められたもので、これを  $K_m$  とする。流路の  $a$  端と  $b$  端の間に作用する動水こう配を  $i$  とする。このように単純化した管モデルで、地盤全体の断面  $A$  に対する透水係数  $K$  が、 $K_m$  とどのような関係をもつのかを調べる。

マトリックス部を通過する流量は、 $q_m = (K_m \cdot i) \cdot A_m$  と表されるから、断面  $A$  に対する全体の透水係数  $K$  は、

$$K = \frac{q_m}{A \cdot i} = K_m \left(1 - \frac{A_g}{A}\right) \quad (3)$$

で与えられる。礫部分の断面積の影響をパラメータとして取り込むため、礫材料の締固め試験で用いられる礫

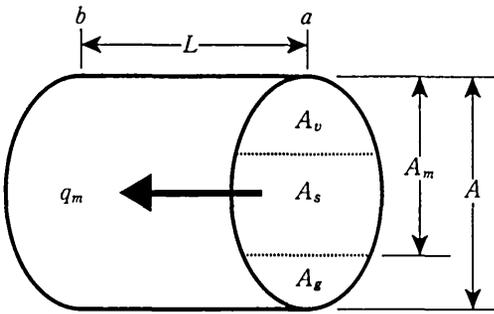


図6 礫率を考慮した透水係数を求めるための地盤内の概念的な円筒状流路モデル

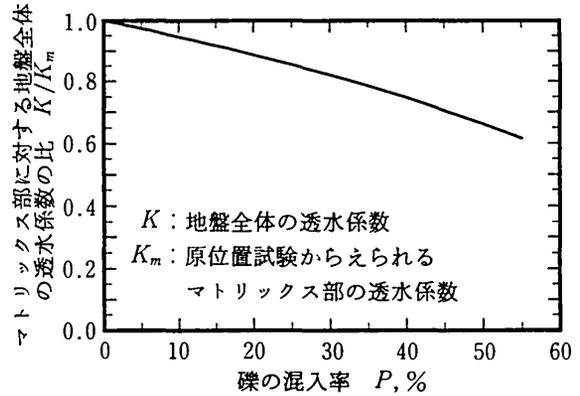


図7 礫の混入率にともなう地盤全体の透水係数の変化

の混合率(礫率) $P$ を導入する<sup>5)</sup>。礫とマトリックス部の土砂は、いずれも、母岩は同じであることから、粒子比重をともに $G_{sg}$ とする。 $P$ は、礫とマトリックス部の土砂の合計質量に対する礫の質量の比で定義されるから、図6のような長さ $L$ の円筒を考えると、

$$P = \frac{A_g}{A_s + A_g} \quad (4)$$

で与えられることになる。一方、コアサンプリングやラジオアイソトープ法などで測定されるマトリックス部の乾燥密度を $\rho_d$ とすると、これは、マトリックス部の体積 $L \cdot A_m$ に対する土砂の質量 $G_{sg} \cdot \rho_w \times L \cdot A_s$ の比で定義されるから、

$$\rho_d = G_{sg} \cdot \rho_w \cdot \frac{A_s}{A_m} \quad (5)$$

と表される。ただし、 $\rho_w$ は水の密度である。上記の式(3)-(5)から、 $A = A_g + A_m$ を考慮して、 $A_s$ 、 $A_g$ 、 $A_m$ 、 $A$ を消去すると、原位置試験で測定されるマトリックス部の透水係数 $K_m$ と礫を含む断面全体の透水係数 $K$ との関係が、次式のように表される。

$$\frac{K}{K_m} = 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{1-P}{P} \right) \left( \frac{G \cdot \rho_w}{\rho_d} \right)} \quad (6)$$

ここで、 $K_m$ がGPI法でえられる $K_{js}$ に相当することは前に述べたとおりである。

地盤のマトリックス部の乾燥密度を100cc コア土で測定した密度で代表させることにすれば、今回の現地調査結果では、おおむね $\rho_d = 1.35\text{g/cm}^3$ 程度であった。礫および土砂の比重を $G_{sg} = 2.65$ 、水の密度を $\rho_w = 1.0\text{g/cm}^3$ とすると、式(6)より、 $K/K_m$ と $P$ の関係は図7のようになる。地盤全体の透水係数 $K$ は礫の混合率が大きくなると、原位置試験で測定されるマトリックス部の $K_m$ より次第に小さくなるのがわかる。本調査地点では、 $P$ がたとえば20%から40%程度であれば、地盤全体の透水性は、GPI法を用いた原位置試験でえられる透水係数より12%から25%程度低めに見積もっておく必要があることになる。

## 2. 礫率を考慮した流出特性

地盤からの流出特性の予測値に及ぼす礫の影響を、仮想地盤を対象としたFEM 飽和不飽和浸透解析<sup>6)</sup>を通して調べる。図8に示すように、在来の地山地盤上に堆積した高さ20m、延長100mの土砂堆積地盤を想定する。堆積地盤はそれぞれ厚さ10mの2層構造とし、表1の試験結果を参考にして、上層部の透水係数 $K_m = K_{js}$ を $3.0 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ 、下層部のそれを $7.5 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ とする。上下層とも、現地試験より $G = 2.65$ 、 $\rho_d = 1.35\text{g/cm}^3$ であると、解析では間隙率0.49として、公表されている砂材料の不飽和水分特性<sup>7)</sup>を用いた。

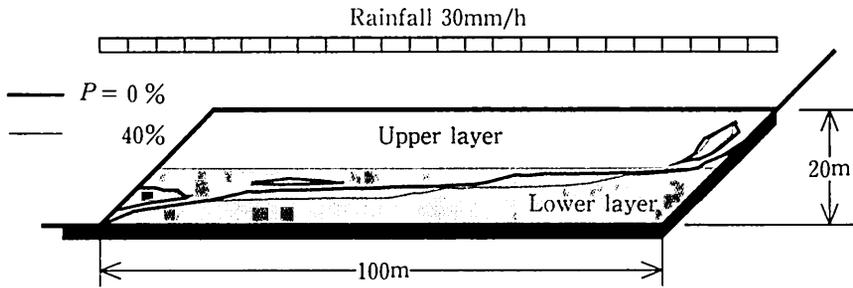


図8 流出特性を調べるために想定した不透水性地山地盤上の2層系土砂堆積地盤およびFEM解析によって推定された豪雨時における地盤内の水圧分布

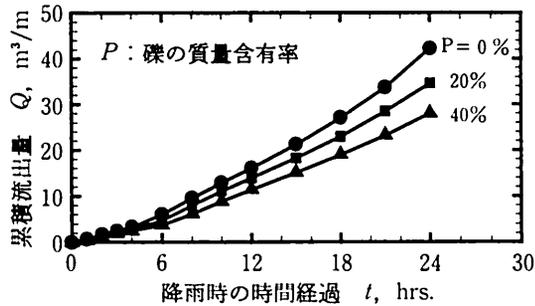


図9 FEM解析によって予測した仮想土砂堆積地盤からの流出量と礫率による違い

図9に、豪雨時における堆積地盤からの累積流出量を、 $P=0\%$ 、 $20\%$ および $40\%$ のケースについて比較する。堆積地盤は初期に飽和度 $60\%$ の状態にあり、これに強度 $30\text{mm/h}$ の豪雨が地表面および下流斜面に流入するとした。在来の地山地盤は不透水性の境界面、下流斜面の下層部分は浸出面になりうる境界面として扱った。図9の $P=0\%$ は、たとえばGPI法などによってえられたマトリックス部の透水係数をそのまま流出予測計算に用いたケースに相当する。したがって、図9から、現地試験でえられるマトリックス部の透水係数を、前節のような礫率にもとづく補正を加えずにそのまま用いると、流出量を多めに見積もってしまうことがわかる。先の図8には、参考に、 $P=0\%$ と $40\%$ について、降雨経過後12時間での地盤内の地下水位を比較している。流出量に比べ、地盤内の水頭分布に及ぼす礫の影響は相対的に小さいことがわかる。

### おわりに

これまで主としてソイルサイエンス分野で用いられてきたGPI法を、土砂堆積地盤の透水性の評価に適用した。試験装置は非常にシンプルで可搬性があり、測定も簡便で迅速に行えるといった原位置試験法としてのすぐれた特徴を確認できた。特に、比較的多くの試験データを短時間に得ることができ、これにより、地盤の透水性構造を統計的な観点から評価できたことは、従来の原位置試験法に比べた場合の重要な特長であると考えられる。また、現地試験の結果を参考に、礫を多く含む地盤の透水係数の評価法を提示した。仮想地盤を対象としたFEM解析を通して、GPI法などによって測定されるマトリックス部の透水係数を、礫率にもとづく補正を加えずにそのまま用いると、流出量を多めに見積もってしまうことを示した。

本研究は、文部省科学研究費補助金による補助を受けた(基盤研究(B)、課題番号12556036)。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

1. REYNOLDS, W. D. and D. E. ELRICK. 1990. Pondered infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow, *Soil Science Society of America Journal*, 54 : 1233-1241.
2. 森井俊広・秋田由紀・佐藤みわ. 2000. 土の飽和透水係数の原位置測定. 新潟大学農学部研究報告, 53(1) : 47-54.
3. 森井俊広・井上光弘・竹下祐二. 2000. プレッシャーインフィルトローメータ法を用いた原位置透水試験の測定精度. 農業土木学会誌, 207 : 29-37.
4. ELRICK, D. E. and W. D. REYNOLDS. 1992. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. Pp. 1-24 in TOPP, G. C., W. D. REYNOLDS and R. E. GREEN (eds.) *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*, SSSA Special Publication, 30, Soil Science Society of America, Madison, WI.
5. 土質工学会編. 1988. フィルダムの調査・設計から施工まで, 土質工学会, pp. 90-93.
6. MORII, T. 1999. Prediction of water movement in soil by finite element method. *Bulletin of the Faculty of Agriculture, Niigata University*, 52(1) : 41-54.
7. NEUMAN, S. P. 1973. Saturated-unsaturated seepage by finite elements. *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 99 : 2233-2250.

# In-situ Measurement and Evaluation of Hydraulic Conductivity of Sand Sediment Soil Mixed with Gravel.

Toshihiro MORII, Takayuki MORI\* and Satoshi MATSUMOTO\*\*

(Received May 30, 2001)

## Summary

Permeability of sand sediment soil was measured by using in-situ infiltration test to predict amount of runoff from the soil subject to heavy rainfall. The debris flow had sedimented onto river bed to form the soil between narrow valley. The soil was sand mixed with small to large gravel. A Guelph pressure infiltrometer (GPI) was employed to measure field-saturated hydraulic conductivity of the soil. The GPI method was effectively applied to measure the hydraulic conductivity of the soil quickly and easily. A physical model to determine of hydraulic conductivity of soil taken account of gravel content was proposed. Effect of gravel content on the runoff amount from the soil was examined by using saturated-unsaturated seepage analysis. **Key words:** In-situ infiltration test, Sand sediment soil, Hydraulic conductivity of soil, Pressure infiltrometer method, Saturated-unsaturated seepage analysis.

---

\*Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Japan.

\*\*Department of Civil Engineering, Niigata Prefecture, Japan