

広島大学大学院工学研究科	学生会員	○川端 昇一
広島大学大学院工学研究科	正会員	土田 孝
広島大学大学院工学研究科	正会員	加納 誠二
広島大学大学院工学研究科	学生会員	川口 将季
広島大学大学院工学研究科	学生会員	中川 翔太
広島大学大学院工学研究科	学生会員	花岡 尚

## 1.背景・目的

広島県内には全国最多の 31,987 箇所<sup>1)</sup>の土砂災害危険箇所があり、東広島市では 2,782 箇所にも及ぶ土砂災害危険箇所が存在している<sup>1)</sup>。危険箇所すべてに物理的な防災対策を行い、災害危険度を軽減するには、多大な時間と費用を要するため、ソフト面での対策が重要視されている。現在のソフト対策はハザードマップの作成や降雨データを基に土砂災害警戒情報の公開、避難勧告等の発令などが行われているが、これらの危険度評価には地盤情報が考慮されていない。そのため、危険度評価の精度を向上させるには、個別溪流ごとの地盤情報を考慮することが必要不可欠である。

本研究では、安全かつ効率よく調査できる現場調査方法を用いて、地盤情報の収集を行い、それらのデータを基に、所定の降雨を与えた時の土石流危険溪流の危険度評価を溪流ごとに個別に実施することにより、土砂災害危険度評価の精度向上を目的としている。

## 2.調査箇所の選定

試験場所の選定にあたって、数多くの土石流危険溪流が存在している東広島市に着目した<sup>1)</sup>。図 1 は、広島県東広島市西条町において土石流危険溪流に指定されている溪流である。土石流危険溪流に指定されていること、また、現在の雨量指標による危険度評価の単位である同一メッシュ内 (5km×5km) に位置することから、図 1 の赤い丸で囲んだ 4 溪流を選定した。

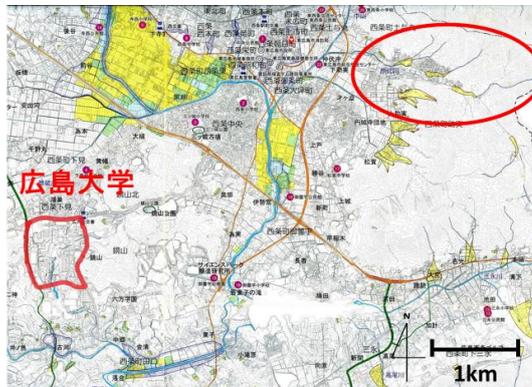


図 1 西条町の土石流危険溪流

## 3.原位置調査の選定

各溪流の地盤調査は以下の方針で行った。

- 1) 源頭部を決定し、20m 間隔で調査地点を選定する。
- 2) 降谷側面は源頭部から下り、斜面勾配 12.5°以下となるまで約 20m 間隔で選定する。
- 3) 谷側面は溪流中心部から 5m 離れた両岸で選定する。

以上のことは地形図と現地踏査を基に行った。図 2 に図 1 の赤い丸で囲んだ 4 溪流を拡大したものを示す。

なお、軽量動的コーン貫入試験は各地点の左岸、右岸で実施し、サンプリングは各地点の左岸、右岸のう

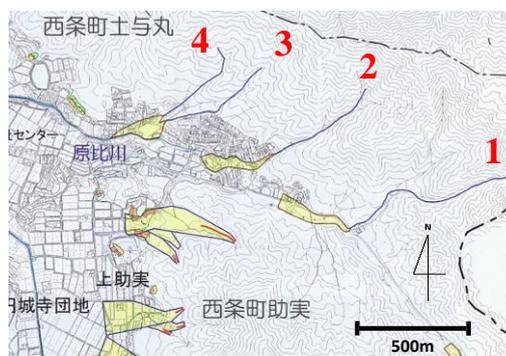


図 2 調査を実施した溪流

ちの4地点で実施している。また試料採取は2~3地点で行った。表1に各溪流の試験地点数を示す。

表1 試験地点数

	溪流1	溪流2	溪流3	溪流4
軽量動的コーン貫入試験	9	4	7	7
サンプリング	4	4	4	4
試料採取	3	2	3	3

#### 4. 試験結果

軽量動的コーン貫入試験により各溪流の各地点で得られた貫入抵抗値(図3)から表層土の厚さを推定した。推定した表層土の厚さおよび勾配により斜面のモデル化を行った。これらの結果より図4のように各溪流での断面図を作成した。各試験地点での貫入抵抗値が10MPaをこえた所を基盤層とし、基盤層上層部分を表層土と推定した。なお、断面図の水平距離は最も下流の試験地点を基準とし、表層厚は各試験地点での溪流横断方向(左岸, 右岸)での推定値の平均により求めた。表層厚の平均は溪流1で0.8m, 溪流2で0.7m, 溪流3で0.6m, 溪流4で1.3mであり、溪流4の表層厚は他の溪流に比べて厚いことが分かる。勾配の平均が溪流1は14.4°, 溪流2は16.3°, 溪流3は16.1°, 溪流4は18.1°であり、溪流3は他の溪流に比べて急勾配であることが分かる。また、試料採取により各地点の間隙比, 土粒子密度, 飽和度, 単位体積重量を得た。

これらの物性値を用いて土田らが提案した推定式<sup>2)</sup>により表層地盤の粘着力および内部摩擦角の推定を行った。この推定法には原位置での所定の深度の飽和度, 貫入抵抗値を必要とする。まず, 土被り圧5kPaにおける貫入抵抗値 $q_{d5}$ を求める。5kPaにおける貫入抵抗値 $q_{d5}$ を式(1)のように示される<sup>2)</sup>。

$$q_{d5} = q_d - 0.01 \times (\gamma_t \cdot z - 5) \quad (1)$$

ここで,  $q_{d5}$ :は土被り圧5kPaにおける貫入抵抗値(MPa),  $q_d$ は貫入抵抗値(MPa),  $\gamma_t$ は土の単位体積重量( $kN/m^3$ ),  $z$ は深さ(m)である。そして粘着力 $C_d$ および内部摩擦角 $\phi_d$ を式(2), 式(3)から推定する<sup>2)</sup>。

$$\phi_d = 29.9 + 1.61 \ln(q_{d5}) + 0.142 S_r \quad (2)$$

$$c_d = 10.6 + 1.19 \ln(q_{d5}) - 0.041 S_r \quad (3)$$

ここで,  $\phi_d$ は内部摩擦角(°),  $c_d$ は粘着力( $kN/m^2$ ),  $S_r$ は飽和度(%)である。推定した結果, 粘着力 $C_d$ は $8.2kN/m^2 \sim 11.2kN/m^2$ , 内部摩擦角 $\phi_d$ は $29.6^\circ \sim 36.4^\circ$ であった。

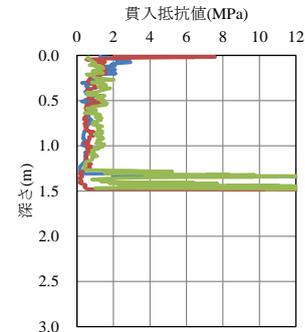
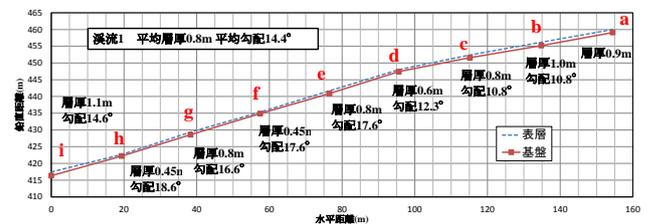
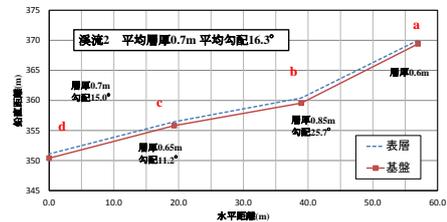


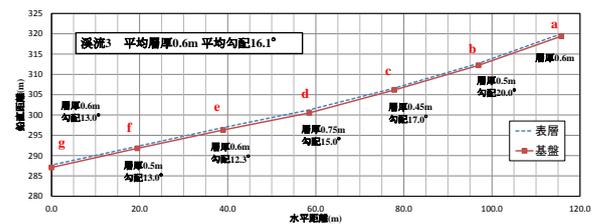
図3 貫入試験結果(溪流1地点b左岸)



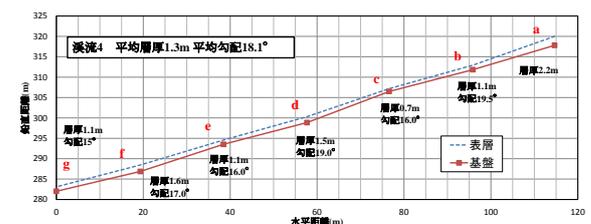
溪流1



溪流2



溪流3



溪流4

図4 断面図

## 5. 浸透解析と地下水位

本研究での降雨浸透の考え方を図5に示す。雨が降り続く時、降雨が地盤内に浸透し始めると、上層から順にある値  $\theta_h$  まで体積含水率が上昇していく。その後は、水分量は上昇せずに、 $\theta_h$  を保った不飽和帯が下層に向かって下降していく。この不飽和帯を高含水比帯と呼んでおり、高含水比帯が不透水層に到達すると地下水が形成され、図5のように下層から上層に向かって地下水位は徐々に上昇する。この過程を解明するため1次元不飽和浸透解析を溪流の各点で行った(図6)。不飽和浸透流解析に用いる基礎方程式はRichardsの式<sup>3)</sup>を用いた。Richardsの式を式(4)に示す。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( -k_{wu}(\psi) \frac{\partial(\psi + z)}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

また、地表面の降雨浸透境界条件を式(5)に示す。

$$R = q = K(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (5)$$

なお、横方向の流出は考えず、基盤層を不透水層とした。Richardsの差分近似式によってサクションを計算し、得られたサクション値を水分特性曲線に当てはめることによって体積含水率を求めた。なお、解析に用いた水分特性曲線および初期の圧力水頭と全水頭は実験値(飽和体積含水率0.433, 残留体積含水率0.158, 飽和透水係数0.006cm/s, 初期体積含水率0.300)とした<sup>4)</sup>。用いた水分特性曲線を図7に示す。解析の結果は以下の通りである。

- 1) 高含水比帯の体積含水率(図8)および高含水比帯の降下速度は表層の厚さに関係なく降雨強度によって決まることが分かった。
- 2) 各層厚における降雨強度と地下水位形成開始時間の関係が分かった(図9)。

## 6. 安定解析と危険度評価

1次元不飽和浸透流解析の結果、原位置地盤調査で得た物性値、推定した強度定数を基に、高含水比帯下降過程および地下水位上昇過程における斜面安定解析を行った。高含水比帯下降過程および地下水位上昇過程を図10に示す。高含水比帯下降過程では高含水比帯の最下面および基盤面をそれぞれすべり面とし

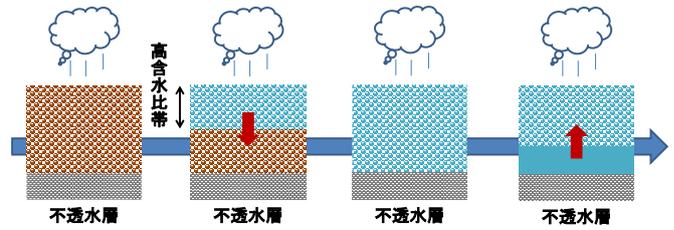


図5 体積含水率の経時変化

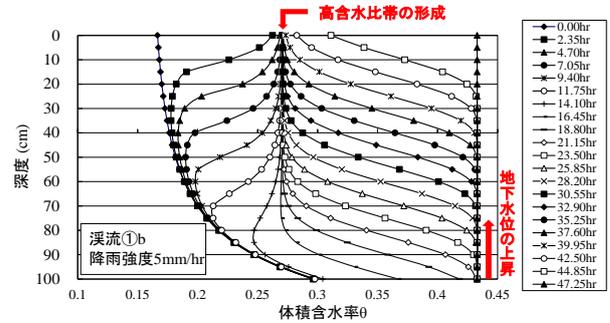


図6 安全率の経時変化

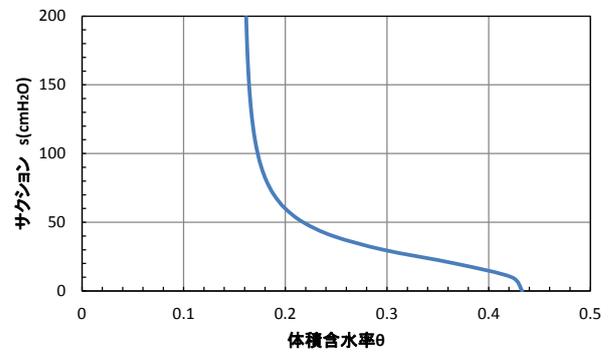


図7 水分特性曲線

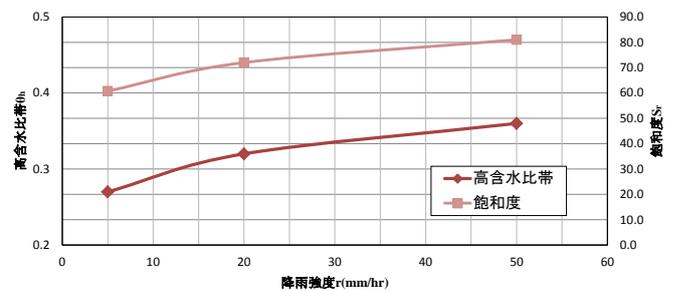


図8 降雨強度－体積含水率, 降雨強度－飽和度

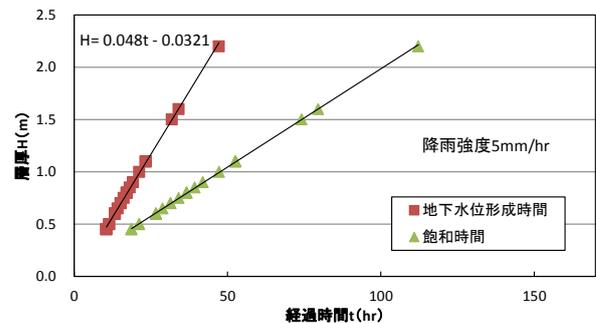


図9 時間－層厚 (降雨強度 5mm/hr)

て安定解析を行い、地下水水位上昇過程は基盤面をすべり面として安定解析を行った。また、安定解析は溪流の各地点(たとえば図2のb~i点)で降雨強度5mm/hr, 20mm/hr, 50mm/hrの降雨を継続的に降らせた条件でそれぞれ安定解析を行った(図11)。なお、図12において安全率が1未満となる時間を示している。

表2は、各溪流の各降雨強度における安全率1未満の地点ができる最短時間および危険度評価の結果である。安全率による危険度評価では溪流3が安全率1未満となる時間が最も短いため、一番危険であるといえる。安全率1を切る時間、1以下となる範囲、溪流の下流にある住宅数など社会的な重要度を考慮した総合的な危険度評価を行った場合も溪流3が一番危険であることが分かった。

### 7. 結論

対象とする4つの溪流において原位置地盤調査および浸透流解析を行った。これらから得られた地盤情報を基に作成した斜面モデルに対し、降雨強度5, 20, 50mm/hrの降雨を継続的に降らせた際の安定解析を行い、斜面の安全率の経時変化を示した。現在の危険度評価では同じ評価となっていた4つの溪流において一連の調査、浸透流解析、斜面安定解析により4つの溪流の危険度を定量的に示すことができた。

参考文献：

- 1) 広島県ホームページ：土石流危険溪流・急傾斜地崩壊危険箇所・地すべり危険箇所一覧表
- 2) Takashi Tsuchida, Athapaththu A.M.R.G, Seiji Kano, Kazuki Suga : Estimation of In-situ Shear Strength Parameters of Natural Masado Slopes by Using Lightweight Dynamic Cone Penetrometer, ISOPE 2007, Vol.2, Lisbon, Portugal, pp.1205-1212, 2007.
- 3) Richards, L.A. : Capillary Conduction of Liquids in Porous Mediums, Physics 1, pp318~333, 1931.
- 4) 由利厚樹：まさ土の土中水分変動に及ぼす降雨特性と地盤条件の影響, 広島大学大学院修士論文, pp.91-113, 2010.

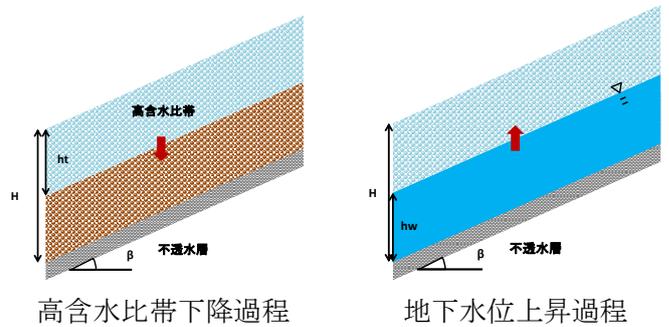
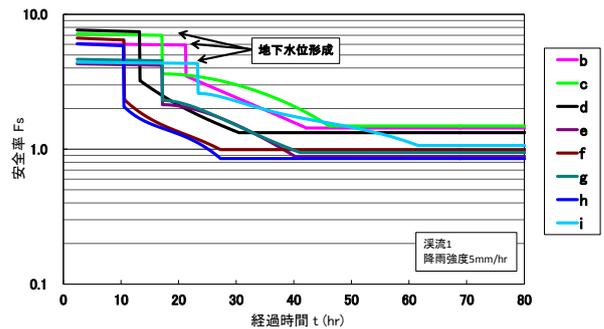


図10 高含水比帯下降過程および地下水水位上昇過程



基盤面をすべり面とした時

図11 安全率の経時変化

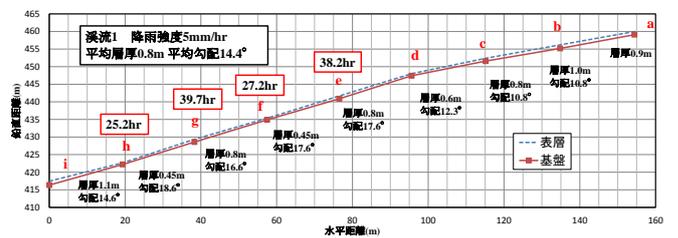


図12 安全率1未満となる時間

表2 4つの溪流の相対的な危険度評価

	溪流1	溪流2	溪流3	溪流4
勾配(°)	18.6	25.7	20.0	19.5
層厚(m)	0.5	0.9	0.5	1.1
降雨強度5mm/hrにおける安全率1未満となる時間(hr)	25.2	25.1	19.0	47.2
降雨強度20mm/hrにおける安全率1未満となる時間(hr)	5.2	7.7	5.2	12.2
降雨強度50mm/hrにおける安全率1未満となる時間(hr)	2.3	3.7	2.4	5.7
安全率1を切る時間からみた危険度(4点満点)	3	2	4	1
安全率1未満となる範囲(4点満点)	4	1	3	2
社会的な重要度(4点満点)	1	4	3	3
総合的にみた危険度(12点満点)	8	7	10	6