

湧水域に存在するパイプの斜面安定
および地形発達に及ぼす影響

恩田裕一*

The Effect of Soil Piping at Seepage Face on Slope Stability
and Landform Development

Yuichi ONDA*

Abstract

The effects of pipes on the hillslope stability were examined at an amphitheater valley head in Obrara village, central Japan. Plaster casts of pipes shows that the burrows were 6.6-100 cm in length and 20-45 degrees downward. In 1999, due to the heavy rainfall a small landslides occurred where plaster cast analysis was performed. The slope stability analysis and subsurface water observation of the lower slope suggest that the small landslides are due the formation of the pipes and upward hydraulic conductivity, which is much lower angle occurring landslides in "walls" of the amphitheatres. Therefore, piping by groundwater upwelling zone facilitate much of the landslidig and landform development.

Key words: *piping erosion, preferential flow, landslides, slope stability analysis, amphitheater valley head*

1. は じ め に

従来、パイピングやパイプフローが斜面崩壊に及ぼす影響については、古くから指摘されており、現在も多くの研究が精力的に行われている (Pierson, 1983; McDonnell, 1990; Uchida et al., 1999). これらの研究において、パイプは、斜面地中水を集中させ、崩壊の発生を引き起こしていることが議論されている。また、近年においても、災害事例からパイピングによる水の吹き出しにより、通常の安定解析では安全とされていたところが崩壊することが報告されてきており (川谷・沖村, 1978; 伊勢田ほか, 1985; 榎ほか, 2000), パイプと崩壊のより詳しい実態の解明が必要とされている。

Tsukamoto et al. (1983) は、西三河 (藤岡町・小原村) の崩壊地を調査したところ、64箇所の崩壊地のうち、60箇所の崩壊地にパイプが存在しており、一つの崩壊地に平均 3.6

2001年6月4日受付, 2002年4月1日再投稿, 2002年6月10日受理

* 筑波大学地球科学系

* Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8571, Japan

個存在していることを示している。また、湧水域に存在するパイプでは（寺嶋・佐倉，1993）非常に大きな動水勾配をもったパイピングにより一種の崩壊が発生することが知られている。現地調査によれば（植下ほか，1973），このようなパイピングによる崩壊は，豪雨時の崩壊のかなりの部分を占めるとともに有効応力・せん断強度の低下によって起こる崩壊と漸移するものであるという。このように，パイピングと崩壊とは多くの関連があるものの，実際に崩壊が発生した斜面において，パイプの分布特性やその水文環境を測定してある例はほとんどない。

本研究の調査地では，1986 年以来，水文観測がおこなわれており，その後，パイプの形状・土砂生産量について調査が行われている。その斜面において，1999 年に豪雨において，崩壊が発生した。そこで，本研究では湧水場におけるパイプの実態，形成要因，またその土砂流出状況を整理したのち，1999 年に崩壊した斜面を例にとりて，湧水域に発生するパイプの斜面安定に及ぼす影響，さらには地形形成に与える影響について議論したい。

2. 調査流域および方法

2.1. 調査地域

調査地域は，名古屋東方にある小原村の 1 小流域である（Fig. 1）。この付近は，標高 300-500 m の丘陵地となっており，地質は花崗閃緑岩である（仲井，1970）。この流域は，恩田（1989）において，F-2 流域と呼ばれ，水文地形調査が行われてきており，隣接する花崗岩地域に比較すると，豪雨時における表層崩壊は著しく少ないことが知られている（Onda, 1992）。この付近の谷地形は，Amphitheater もしくは，船底型の谷といわれており，convex な斜面形と幅の広い谷底面からなっている（Kochel and Piper, 1986; Onda, 1994）。

この流域の谷頭部付近に調査地点を設けた（Fig. 1 の H 地点）。谷頭部も，側壁斜面と同様に convex な斜面縦断形をしており，斜面と谷底部の境界付近にパイプが多数存在し，水が湧出している。調査地点付近は，斜面からの崩積土が斜面下方にローブ状に堆積している。パイプはローブ状の崩積土と谷底部との境界に多数存在している。

2.2. パイプ調査方法

パイプからの土砂の生産量の測定は，以下のように行った。まず，湧水が生じているパイプの流出口にブリキで作った樋を差し込む。そしてその上に，台所用品の三角コーナーのゴミ袋を全体をカバーするように取り付ける。今回使ったフィルターペーパーは，和紙製で孔隙の平均の大きさは $200\ \mu\text{m}$ であった。パイプの流出口に取り付けた袋からは，水が徐々に滲み出すものの，土砂は内部にトラップされる。この袋を 1 日から 3 日おきに交換する。集められた土砂は 24 時間炉乾燥し，袋ごと秤量した。土砂量は，g/day の単位に換算した。調査は，1987 年 7 月に行った。H 地点においては，このような調査を 7 カ所（H1-H7）で行った。

次に，この地点のパイプの状態を知るために，パイプの石膏型による調査を行った。調

査は、石膏を水に溶かし、直径 20 cm、高さ 30 cm の容器に入れる。容器には、ビニールチューブ（径 20 mm）が取り付けられており、その片側をパイプにセットする。その後、ホースを一気に引き上げることによって、石膏を流し込んだ。調査は、1993 年 7 月に行った。

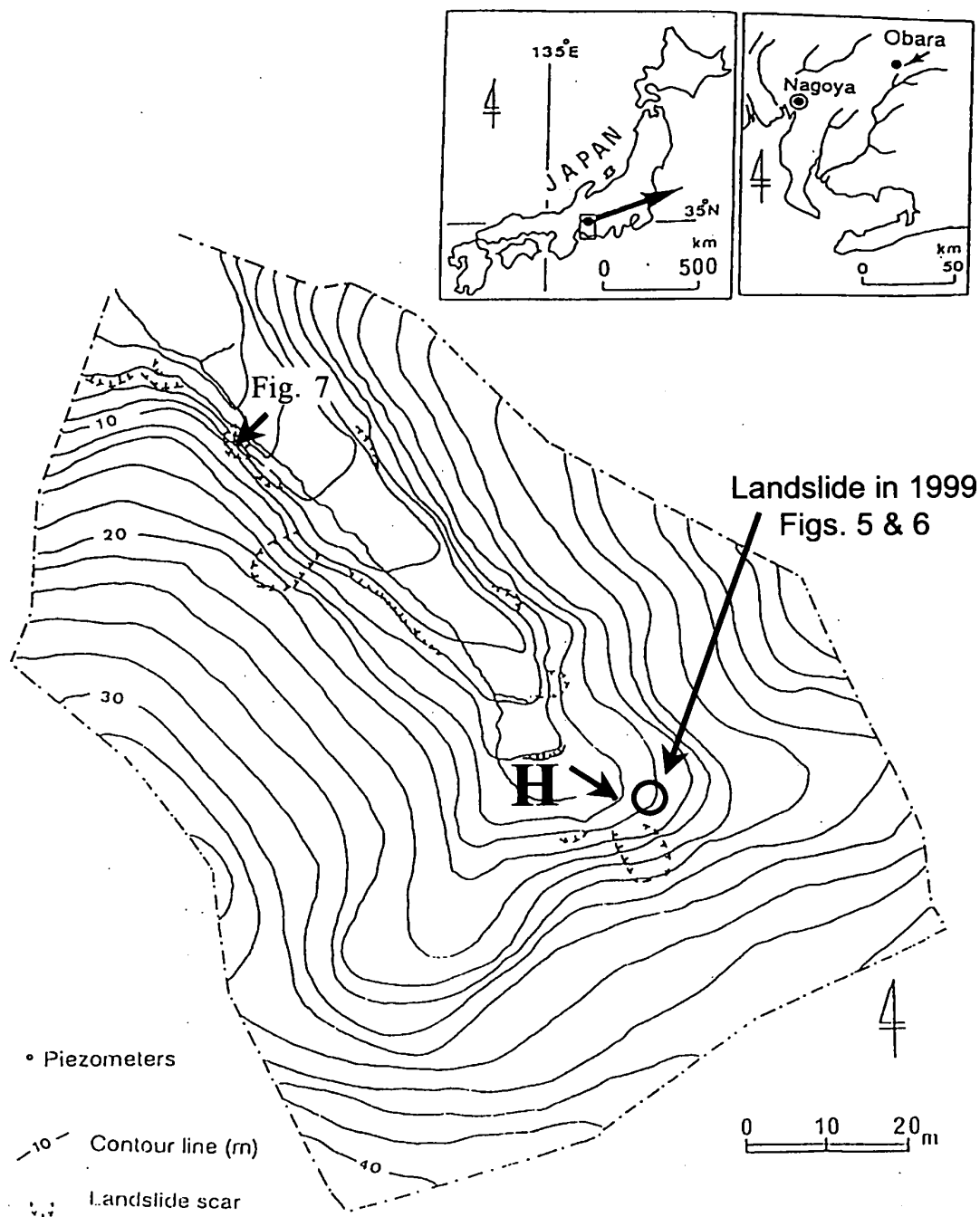


Fig. 1. Study site (H: valley head)

3. 結果および考察

3.1. パイプからの土砂流出量

Figure 2は1987年の6月7日から21日における生産土砂量の典型的なタイプを示したものである。谷底部に存在するH6パイプは7月7日から16日の間の、降雨の少ない時期に土砂生産量が非常に少ない（1 g/day ～ 4 g/day 程度）。しかしながら、H5のパイプは、6月12日以降の降雨に伴い土砂生産量が100 g/day 以上と急激に上昇し、土砂生産量は降雨と対応しているように見える。7月18日に、日雨量63 mm、最大時間雨量6 mmの降雨があった。この降雨によって、H5パイプは最初土砂を生産していたものの、その後パイプ穴が閉塞したことが観察された。

これに対し、隣接しているH6パイプは、降雨時にも1.6 g/day程度と、土砂生産が少なかったが、H5パイプの閉塞によって、水および土砂が流出を始めたことが目視された。実際に、降雨時の土砂生産量は、H6パイプは4.1 g/dayであったのに対し、隣接するH5パイプは1.5 g/dayにすぎなかった。その後内部の水みちが変わったためか、H5パイプの土砂生産量は、109 g/dayと回復し、実際にも多くの水が流れるようになったことが観察された。

上記のような降雨に伴うパイプからの土砂生産量は、流出量の増加によって、増加すると考えられる。また、谷底面は常時地下水位が高く、また最大で0.35という上向きの動水勾配が確認されている（Onda, 1994）。このような通常時からの地下侵食は、地下の空洞

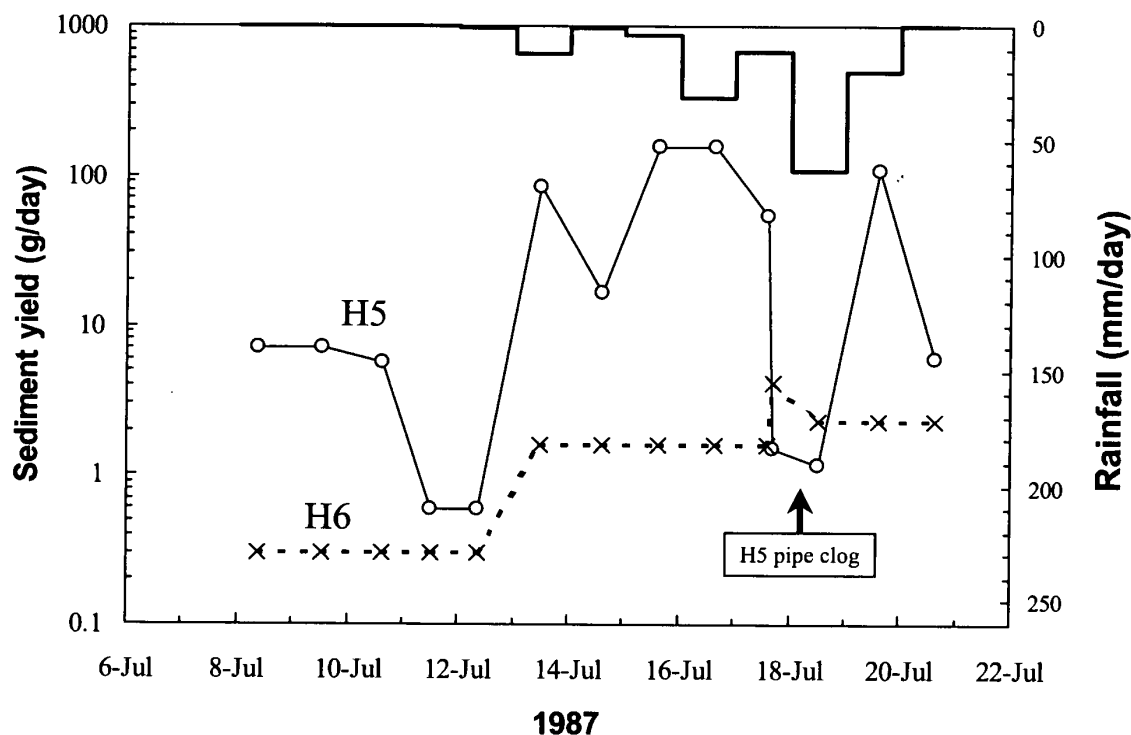


Fig. 2. Sediment yield from the H5 and H6 pipes

化, ひいては地盤強度の低下をもたらす可能性が高い。

3.2. パイプの形状

1993 年に, 土砂生産量を測定した H4 パイプ付近において, パイプの形状を測定した。ただし, 上記の土砂生産量調査と時期が離れていたために, 土砂生産量を測定したパイプと, 形状を測定したパイプは異なるものであると思われる (Fig. 3a)。調査地点の斜面幅は, 1.02 m である。

石膏によって型どりされたパイプの形状を, Table 1に示す。外見からでは調査範囲に 9 個のパイプが存在するようには見えなかったが, No. 3 が 5 cm 以下と, 極めて短かったため調査から除外した。パイプの長さは, パイプごとに異なり, 6.6 cm から長いものでは 99.7 cm に及ぶ。また, パイプの容積は, 合計で 2,000 cm³にもなる。これを斜面幅 1 m あたりに直すと, 1,960 cm³/m となる。また, Fig. 3b および Fig. 3c に示した範囲内 (50 cm 角の立方体) の部分においては, 平均空隙が 0.92 % 増加したことに相当する。

これらの型どりされたパイプを, 現地測量の結果と併せて, 3次元モデルを作成した

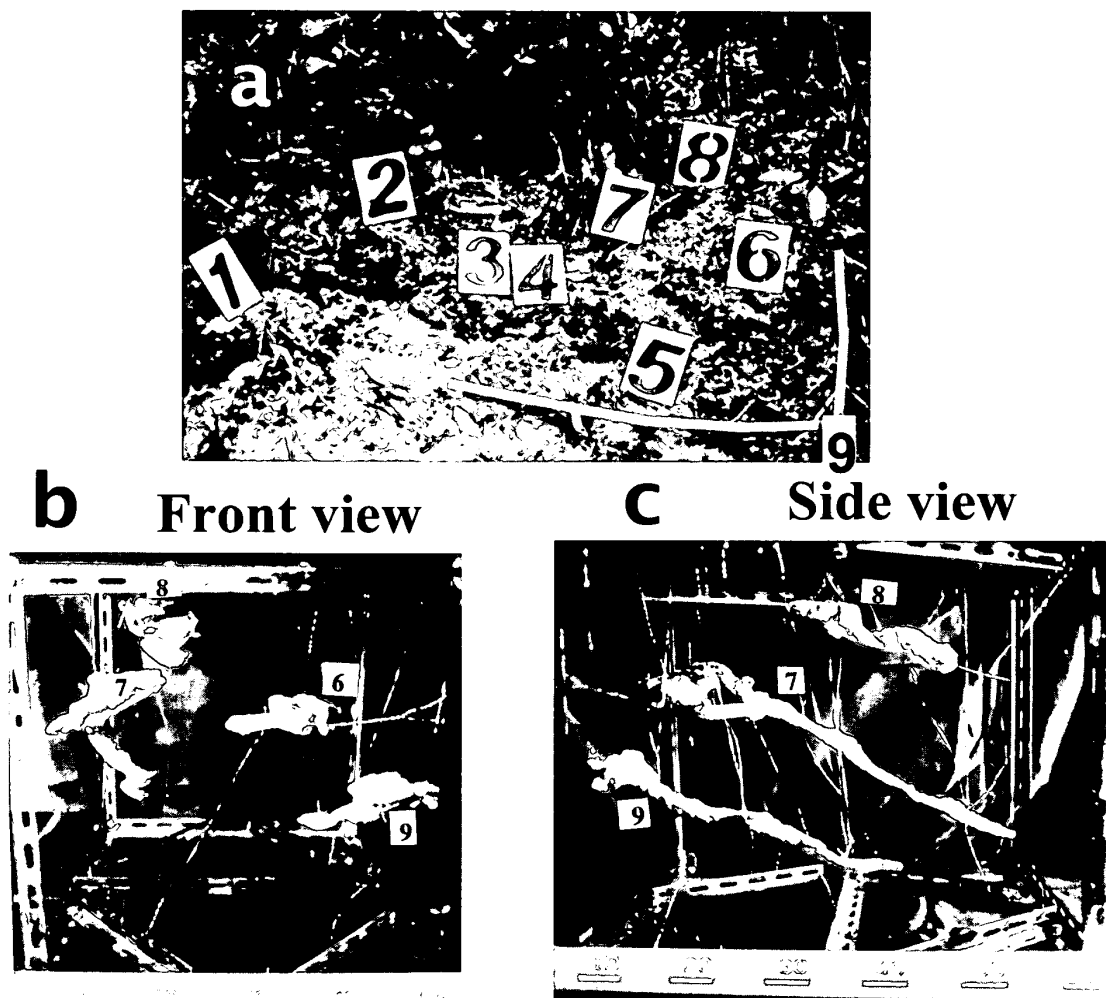


Fig. 3. Three dimensional structure of the burrows (H site Nos. 6-9)

Table 1. The dimension of the burrows at H site

No.	Horizontal Angle (degrees downwards)	Volume (cm ³)	Length (cm)	Average width (cm)	Sinuosity
1	30	200	44.4	3.6	1.6
2	20	550	99.7	3.8	1.2
4	30	50	12.8	2.5	1.2
5	30	50	6.6	3.3	1.0
6	35	100	19.0	3.2	1.5
7	45	400	58.6	4.7	1.1
8	20	350	24.4	6.4	1.1
9	25	300	36.5	4.4	1.0

(Fig. 3b, 3c). 例として, Nos. 7, 8, 9のパイプを示すと, それぞれほぼ平行であり, 45° , 20° , 25° の角度で下方にのびていることがわかる. すべてパイプ穴は, 斜め下方に伸長しており, その平均は 29° となった (Table 1). また, 調査中に計 12 匹多くのカニが発見された. パイプは地下水面下にのびているが, サワガニはエラ呼吸であるため (武田, 1983), 通常は水がある場所に住むと考えられる. Onda and Itakura (1997) による定水頭土槽実験によると, サワガニを土槽内に飼った場合, 今回観察されたと同様な巣穴が形成された (Fig. 4). また, その方向は下方 20° へ伸びており, 地下水面下に存在していた. これらのことから, このパイプはサワガニの巣穴である可能性が高い.

塚本ほか (1988) は, パイプ形成に対する小動物の影響について考察している. これによると, 土壌の層位別により, 動物の影響が異なり, また小動物の通過がパイプ形成に重要な役割を果たすことを示唆している. 本研究の調査結果および Onda and Itakura (1997) の実験結果から考えると, サワガニは, むしろ巣穴を掘るという行為を通じてパイプそのものを形成している可能性が高い. そして, サワガニの巣穴掘削に伴うパイプは, 地下水面下へ伸びるという特性を持つため, 湧水点付近における土砂流出, 水流出にも重要な影響を持つことが明らかになった.

3.3. 1999 年に発生した小崩壊

1999 年 9 月 14 日～15 日にかけて, 2 日間雨量 97 mm, 最大時間雨量 28 mm/h (アメダス小原観測所) の降雨があった. この降雨によって, パイプの観測を行った土層が小崩壊を起こした (Fig. 5: 位置は, Fig. 1に示す). 崩壊は, 浅層崩壊で深さおよそ 80 cm 程度, 幅 5.25 m であった. 崩土は流動化しており, 崩壊面全面に薄く堆積しているのが見られた. 崩壊の断面図を Fig. 6に示す. 崩壊の平均角度は 28° であり, 流域内の convex な縦断型を持つ斜面の下方に分布している. この流域内で典型的に見られる, 勾配 50° 程度斜面のの小崩壊とはかなり異なった様相を示していた.

この崩壊は, すべり面がほぼ直線的であること, また斜面下方が解放されているために, 無限長斜面安定解析を適用することは妥当であると考えられる. 安定解析は, Selby

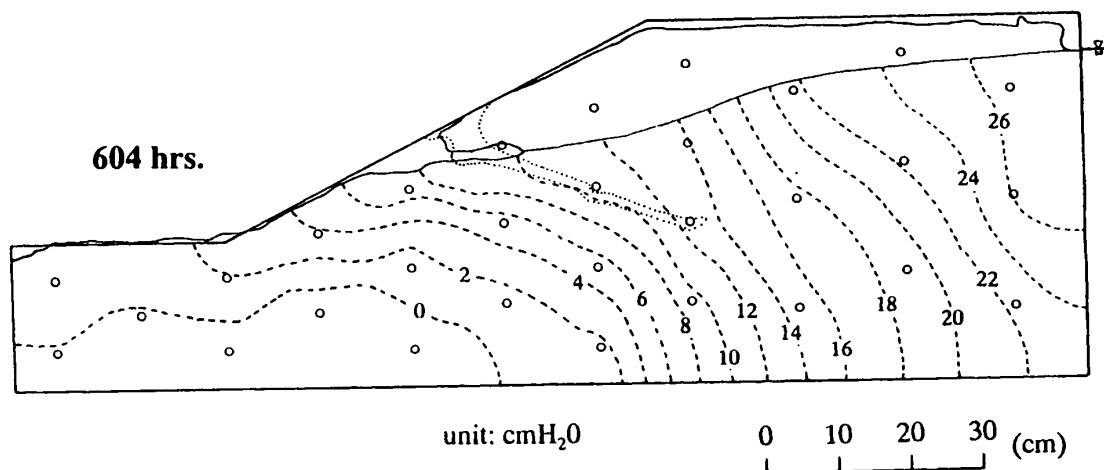


Fig. 4. Potential distribution of the flume experiment with 5 crabs at 604 hours (dotted line: crab burrow) after Onda and Itakura (1997)

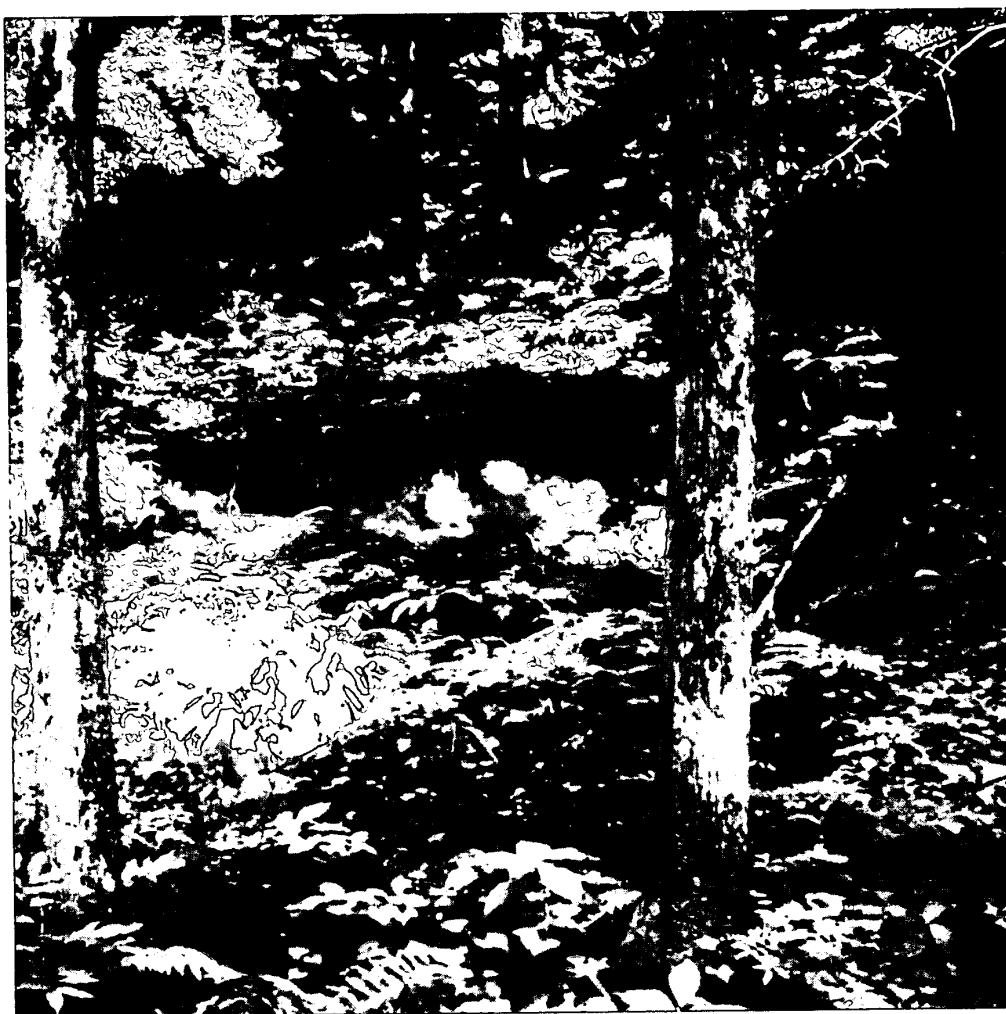


Fig. 5. Photograph for landslide occurring in Sep. 14, 1999

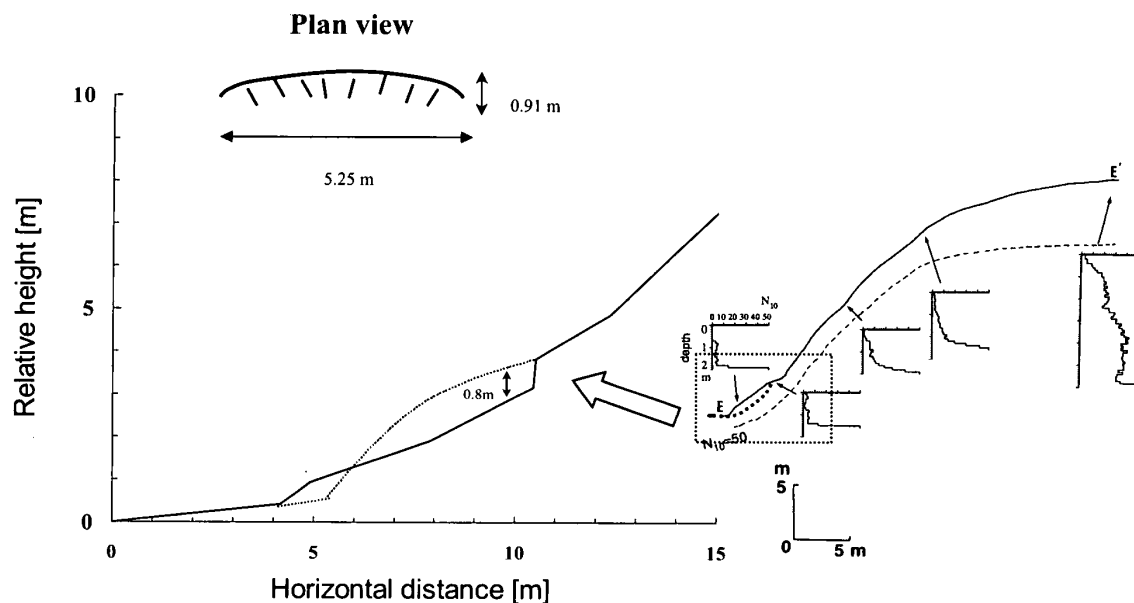


Fig. 6. Location and shape of the landslide occurring in Sep. 14, 1999

(1993) にしたがひ、下記の式を用いた。

$$F = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)z \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

ここで、 F は土塊の安全率、 γ は自然含水比における単位体積重量、 γ_w は水の単位体積重量、 m は相対水深 (0-1の間を取る)、 z は崩壊深である。ここで、直径 12 cm の、自然含水比状態における排水ひずみ制御型一面せん断試験器で求めた土質定数 (Onda, 1994; $c' = 4.2 \text{ kN/m}^2$, $\gamma = 1.4$, $\gamma_w = 1$, $\phi' = 32.1^\circ$) を用いて、土層完全飽和状態 ($m = 1$) 計算すると、安全率、 F は 1.26 となる。これは、かなり安全側と判定される。

前節で述べたパイプの型どりの際に、土層はやや攪乱される結果となっていたが、本崩壊は、調査後 6 年経過したときに発生したことから、新たに土層内部にパイプが形成されていた可能性が高い。実際、1993 年から 1999 年の間に何回か現地を訪れた際には、パイプが形成されていたことが確認されている。したがって、土塊内では、サワガニによる巣穴形成、パイプ流出による土砂流出によって、内部に Table 1 に示したものと同様な空洞が生じていた可能性が高い。さらには、また、この試験流域においても、1987 年の観測期間において、上向きの 0.35 という動水勾配が観測されている。このような、上向きの動水勾配が、内部の間隙水圧を高め、崩壊発生をもたらすことになるのであろう。このような、斜面脚部における崩壊は、新藤・高見 (1982) によって、実験的にパイピングの発生と上向きの動水勾配との関係で論じられている。

一般には、パイプは地下水の有効な排出経路とされ、むしろ地下水の有効な排出システムとして認識されている。しかしながら、豪雨時には、実際観測されているように

(Fig. 2), パイプの閉塞が起こることがある. 調査流域は, 風化花崗岩よりなっており, 粘着力はあまり大きくない. パイプの維持には, 粘着力が強く関係することが知られている (塚本ほか, 1988). したがって, 花崗岩山地においては, パイプ閉塞が, 粘着性の高い他の地質の山地よりも起こりやすい可能性がある. このように, 花崗岩湧水域に存在するパイプは, 内部の空洞化 (パイプ石膏型どりによる測定によれば, 0.92 %の空隙の増加が見られた) による土塊全体のせん断抵抗力の低下をもたらすとともに, 豪雨時に閉塞した場合は, 浸透水圧を上昇させ, 崩壊の発生を助長するものと考えられる.

従来より, 地中水の浸透水圧による崩壊は, 数多く報告されている. 長崎災害や広島災害においても, 地中水の浸透水圧が原因とされている崩壊が存在する (伊勢田ほか, 1985, 榎ほか, 2000). 今後, 浸透水圧によるパイピング崩壊の発生 (寺嶋・佐倉, 1993) と, これらの崩壊の特徴についても議論することによって, 崩壊発生に及ぼすパイプの役割についてより一般化できるであろう.



Fig. 7. Landslide occurring at the lower part of the convex slopes (Location is shown in Fig. 1)

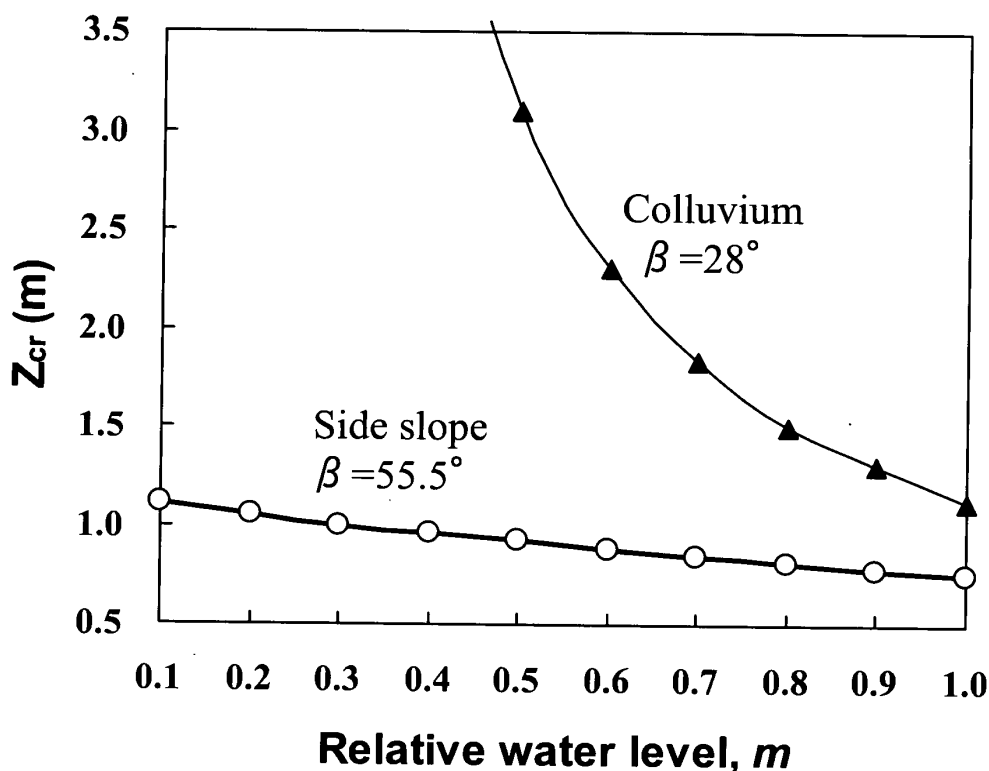


Fig. 8. The relationship between relative water level, m , and critical soil thickness under the infinite slope stability analysis

3.4. 地形変化に及ぼす影響

Onda (1994) は、船底型の谷地形に関して、斜面下方の急斜面の安定について議論した。このような、船底型の斜面縦断形は convex であるため、斜面下方は 50° 以上と極めて急傾斜である。このような斜面下方で、Fig. 7 に示すような小規模な崩壊が分布していることが知られている。ここで、斜面の臨界条件を考え、(1) 式で $F = 1$ とし、Onda (1994) で示された、斜面下方の 15 箇所の崩壊 (Fig. 7 のような) の平均勾配 55.5° 、および今回の崩壊の勾配 28° について、臨界土層深 Z_{cr} と相対水深 m との間の関係をグラフで示すと Fig. 8 のようになる。

Fig. 8 より、谷頭部斜面で発生した崩壊 (勾配 28°) の場合臨界土層深が、相対水深の影響を強く受けるのに対し、谷壁斜面 (勾配 55.5°) の場合は、相対水深が臨界土層深にあまり影響を与えないことが示される。このことは、緩傾斜では、崩壊するためには高い地下水位が必要であり、集水性の高い凹部のみ崩壊が可能である。これに対し、側壁斜面では、崩壊するにはわずかの水位上昇で充分であり、凹部も凸部も比較的崩壊しやすい。このことが、水の湧出と船底型地形の関係の議論に加え (白井, 1978; Kochel and Piper, 1986; Laity and Malin, 1985), 船底型の谷の側壁斜面が一様な斜面の平行後退を起こしている理由説明に重要であると考えられる。

実際 1999 年の崩壊では、斜面下方の土層が、安定解析において安全側であるにもかかわらず

らず、崩壊が発生した。この崩壊は、湧水による上向きの動水勾配によって浸透水圧が高まり、間隙水圧が極めて大きくなったため発生したものと考えられる。このようなタイプの崩壊は、斜面下方の土砂を除去し、船底型の谷地形の形成に寄与することが示唆される。

4. お わ り に

パイプの斜面安定に及ぼす影響を明らかにするために、小原村においてパイプの形状を測定し、また、パイプからの土砂流出を測定した。パイプは、斜面下方 20-45° の方向に長いものでは 100 cm 程度にわたってのびていた。また、パイプには、サワガニが多く見受けられたため、パイプの形成はサワガニの巣穴と大きな関係があり、これに加え、湧水点付近における土砂流出、水流出にも重要な影響を持つことが明らかになった。1999 年に最大日雨量 48 mm の降雨によって、調査地点が斜面下部が崩壊した。安定解析によれば、この斜面は安定側と判定されたため、斜面下方からの浸透水圧によって崩壊した可能性がある。今回生起した崩壊は、この流域内の斜面下方で発生する崩壊と勾配が大きく異なり、また地形発達上、斜面下方の土砂を除去することで船底型の谷地形の形成に寄与することが示唆された。

引 用 文 献

- 榎 明潔・池田勇司・Kokubu, A. A.・吉川大洋 (2000) 崩壊メカニズムの推定, (社) 地盤工学会 (編) 『平成11年の広島県豪雨災害調査報告書』, 167-171.
- 伊勢田哲也・棚橋由彦・山本芳裕 (1985) 長崎豪雨による緩斜面の崩壊機構. 土質工学会論文報告集, 25(2), 173-184.
- 川谷 健・沖村 孝 (1978) 基岩から地下水の湧出する斜面の表土層の安定について. 建設工学研究所報告, 20, 205-222.
- Kochel, R. C. and Piper, J. F. (1986) Morphology of large valley on Hawaii: Evidence for Groundwater Sapping and Comparisons with Martian Valleys: *Journal of Geophysical Research*, 91, 175-192.
- Laity, J. E. and Malin, M. C. (1985) Sapping processes and the development of theatre-headed valley networks on the Colorado Plateau: *Geological Society of America Bulletin*, 96, 203-217.
- McDonnell, J. J. (1990) The influence of macropores on debris flow initiation. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 23, 325-331.
- 村田重之・樗木 武・平田登喜男・渋谷秀昭 (1988) 降雨時斜面崩壊に及ぼす浸透地下水の影響: 土と基礎, 36(4), 45-50.
- 仲井 豊 (1970) 愛知県三河地方の花崗岩類: 地球科学, 24, 139-145.
- 恩田裕一 (1989) 土層の水貯留機能の水文特性および崩壊発生に及ぼす影響: 地形, 10, 13-26.
- Onda, Y. (1992) Influence of water storage capacity in the regolith zone on hydrological characteristics, slope processes and slope form: *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 36, 165-178.
- Onda, Y. (1994) Seepage erosion and its implication to the formation of amphitheater valley heads: a case study at Obara, Japan: *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 627-640.
- Onda, Y. and Itakura, N. (1997) An experimental study on the burrowing activity of river crabs on subsurface water movement and piping erosion. *Geomorphology*, 20, 279-288.
- Pierson, T. C. (1983) Soil pipes and slope stability: *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 16, 1-11.

- Selby, M.J. (1993) *Hillslope materials and processes 2nd edition*, Oxford University Press, Oxford, 451pp.
- 新藤静夫・高見元久 (1982) 模型斜面を用いた流出実験. ハイドロロジー, **12**, 19-24.
- 白井哲之 (1978) 下総台地東部の侵食谷の形態に関する若干の考察 - 未固結砂層地域の谷地形 - : 千葉大学教育学部研究紀要, **27**, 153-174.
- 武田正倫 (1983) 「カニの生態と観察」. グリーンプックス41, ニューサイエンス社, 94pp.
- 寺嶋智巳・佐倉保夫 (1993) 花崗岩山地谷頭部の地形変化に及ぼす斜面浸透水流の影響. 地形, **14**, 365-384.
- 塚本良則・峰松浩彦・丹下 勲 (1988) 斜面の表層に発達する地中パイプ. 波丘地研究, **6**, 268-280.
- Tsukamoto, Y., Ohta, T., and Noguchi, H. (1983) Hydrological and geomorphological studies of debris slides on forested hillslopes in Japan. IAHS Publ., **137**, 89-98.
- Uchida, T., Kosugi, K. and Mizuyama, T. (1999) Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed. Journal of Hydrology, **222**, 18-36.
- 植下 協・桑山 忠 (1973) :47.7豪雨による西三河地方の山地崩壊の実態調査. 矢入勝正編「昭和47年豪雨災害の調査と防災研究」, 文部省科学研究費報告書, 104-107.