

Title	グリーンベルト設定区域における土石流対応に関する研究
Author(s)	本田, 尚正
Editor(s)	
Citation	大阪府立工業高等専門学校研究紀要, 2000, 34, p.55-66
Issue Date	2000-06-30
URL	http://hdl.handle.net/10466/13530
Rights	

グリーンベルト設定区域における土石流対応に関する研究

本田 尚 正 *

Study on Debris Flow Control in the Greenbelt Region

Naomasa HONDA *

Abstract: It is expected that the greenbelts will play a role of a buffer zone against sediment disasters in pediments. This paper describes how the greenbelts should be appropriately used in terms of debris flow control. These conclusions are based upon the results of numerical analyses of sediment runoff process observed in actual basins. Chizuka and Nozakinakagawa Rivers, which drain from Ikoma mountain system, were chosen for discussions. The numerical analyses were conducted in order to investigate the changes in debris flow characteristics through the reaches of the rivers having check dams. The results of the numerical analyses indicate that the river-bed gradient tends to have a considerable effect on the debris flow behavior. The discharge rate of debris flow abruptly decreases as the sediment deposition increases due to decrease in the river-bed gradient. The sediment transport mode then changes from a debris flow into the hyperconcentrated flow or general contact loads. According to these results, the greenbelt needs to have a gentle and sufficiently wide slope in order to withstand debris flow. If it is actually not possible to have such a greenbelt, debris flow should be controlled by using structures such as check dams or embanked channels along with a certain amount of greenbelt.

Key Words: *sabo buffer greenbelt, gentle and sufficiently wide slope, debris flow control by using structures*

1. 緒 言

グリーンベルトは、市街地に隣接する山麓・山腹斜面において樹林を主とする緑地帯を整備し、土砂災害に対する安全性を高めるとともに、緑豊かな都市環境および自然環境・景観の保全・創出を図るものである¹⁾。近年、森林環境の保全、ひいては地球規模の環境保全に対する社会的関心の高まりの中で、森林が本来備えている自然災害に対する防御・軽減機能が注目され、見直されている。砂防事業においても、最近では、従来の砂防ダム等土木的施設の整備を主とした対策から、森林植生の土砂生産・土砂流出抑制機能を重視し、それらを緑のもつ多様性ととも積極的に砂防計画の中に取り込んでいく方策へと、質的転換が図られているところである。グリーンベルトは、そのような砂防における新たな動きの代表例の一つであるといえよう。

さて、グリーンベルトの第一義的な目的は、土砂災害の防止であるが、我が国における最近の土砂災害の

特徴として、土石流災害が顕著であることが挙げられる。土石流による被害は、家屋の破壊・流出等、壊滅的なものが多く、最悪の場合には人命の殺傷をまねくことから悲惨な結果となることが多い。そのため、全国各地の土石流危険渓流において、早急な対策の実施が望まれている。しかし、土石流は発生予測が非常に困難な上に、対象渓流は全国で8万箇所ともいわれており、それらに対して砂防施設を整備するのに要する費用と時間は、まさに天文学的な数字となる。したがって、これまでの土石流対策は、過去の災害や土砂流出の履歴をもとに、土石流危険渓流およびその周辺の山腹斜面を中心として、土石流発生域・流下域・堆積域ごとに、それぞれの特性に応じた対策工が行われてきた。

これに対して、グリーンベルトは、植生被覆による予防的な土砂生産源対策、あるいは、緩衝緑地帯を主体とした砂防施設の面的整備・面的管理、といった新しい性格をもっており、土石流対策としての期待は大きい。そのため、グリーンベルト整備構想の策定にあたっては、森林植生の土砂生産・土砂流出抑制機能とその限界を把握することが必要であり、とくに、緩衝緑地帯の必要範囲の設定には、土石流の流動・堆積特性を十分に考慮することが重要である。

2000年4月12日 受理

* 建設工学科 (Department of Civil Engineering)

注) 本稿は、参考文献 19), 20) を再編集し、まとめ直したものである。

本研究では、土石流対応という視点から、グリーンベルトに期待すべき土砂災害防止・軽減効果と、その適正な区域設定のあり方について議論する。以下では、まず、森林植生の土砂災害防止機能とその限界についてふれ、森林植生の砂防計画上の取扱いについて述べる。次に、生駒山系の西麓地域(大阪府域)を例として、グリーンベルト設定上の問題点について述べ、実流域を対象とした土石流の流動に関する数値シミュレーションの結果を示して、その検証を行う。

2. 森林植生の土砂災害防止機能とその限界

森林植生の土砂災害防止機能については、緑が存在する場の不統一性と、緑自身がつもつ不確かさゆえに、その定量的評価の手法は確立されておらず、砂防計画の策定にあたっては、植生の効果が十分に考慮されたものとなっていないのが現状と考えられるが、定性的には、概ね、図-1のように分類できる。

このうち、山腹植生の土砂侵食防止機能については、根系の土壌緊縛作用が有効に働く表層崩壊の範囲に限定され、根系の到達範囲外で発生する深層崩壊に対しては、侵食防止の顕著な効果は期待できないであろう。次に、溪畔植生は、元々、水流による脚部洗掘に対して抵抗力が弱いため、それ自身、溪岸侵食に耐えつつ、さらなる侵食防止機能を発現させるためには、河床変動が抑制されるか、護岸工や根固工と同様の脚部固定作用が必要であろう。また、緩衝樹林帯の待受的効果は、現地調査や水理模型実験等によって、ある程度確認されているものの、設計レベルでの定量的な評価手法は確立されていないのが現状である。さらに、土石流の規模(崩壊土砂量、流速、流量等)が大きい場合には、一瞬にして樹林帯が消滅した事例も数多く存在する^{2),3)}。

このように、森林植生の土砂災害防止に対する種々の効能について、もはや疑う余地はないが、それらはいくまでも限定的なものといえる。しかも、それらがある安定条件下で評価するには、守るべき人命・財産の尊さ・大きさに示されるように、ひとたび土砂災害が

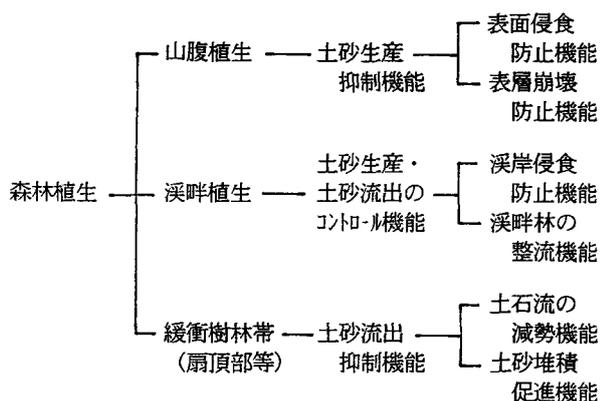


図-1 森林植生の土砂災害防止機能

発生した場合の社会的・経済的影響の大きさを考慮すれば、定性的な評価だけでは、一般社会に対して説得力に欠け、不十分であることが理解できよう。

しかし、植生効果の定量的評価にあたっては、土質力学・水文学等に立脚した検証がどうしても必要であるが、その実現は、冒頭でも述べたように、緑が存在する場の不統一性と、緑自身がつもつ不確かさゆえに困難をきわめている。砂防事業そのものがきわめて社会性が高く、高度の安全性が要求される事業である以上、未知の要素を包含する新しい技術に対しては、やはり慎重にならざるを得ないであろう。

以上より、著者は、砂防事業における森林植生の活用について、現段階では前提としてあくまでも植生の機能を十分に発揮し得る場の条件を整えることが必要であり、外力が大きすぎる場合や、保全対象区域に要求される安全度の程度によっては、人工構造物によるコントロールを行うべきであると考えている。とくに、溪流においては、土石流の流下区間では植生の機能を過度に期待すべきではない。総じて、今後の砂防事業においては、森林植生と土木的施設との効果的な組合せを検討するべきである。さらに特筆すべきことは、この両者の主従関係は一方的ではなく、保全対象区域も含めて、土砂移動を制御すべき場の条件に応じて決定されるということである。

3. グリーンベルト設定上の問題点

3.1 土砂移動に対する緩衝帯としての考え方

グリーンベルトの第一義的な目的は、土砂災害の防止にあり、その計画区域は、本来、砂防として必要な範囲(保全対象区域に要求される土砂災害に対する安全性を満たすために必要な範囲)を設定するべきである。著者は、このようなグリーンベルトの本質を、図-2(a)に示すように、土砂移動現象に対して十分安全な勾配と幅を有する緩衝帯の確保にあると考えている。

その一方、グリーンベルトは土地利用とその管理に関わるものであり、計画区域の策定にあたっては、現状の土地利用状況を勘案するほか、地域計画との整合や他事業との連携を図ることとされている¹⁾。そのため、現実的には、既成市街地との関係において、砂防上必要な範囲にありながら、すでに連たんしている居住域については、グリーンベルトの範囲から除外される傾向にある。そして、その場合には、図-2(b), (c)に示すように、地形勾配・幅が不十分な緩衝帯であるか、あるいは、緩衝帯がほとんどないグリーンベルトが設定されることとなる。

しかし、ここで、グリーンベルト整備構想の原点に立ち返ってみよう。都市周辺の山麓部は、元来、地形的にも地質的にも、自然災害に対して潜在的に危険性を帯びており、居住域とするには何らかの安全対策を必要とする場所であって、これまでそういった土地利用は

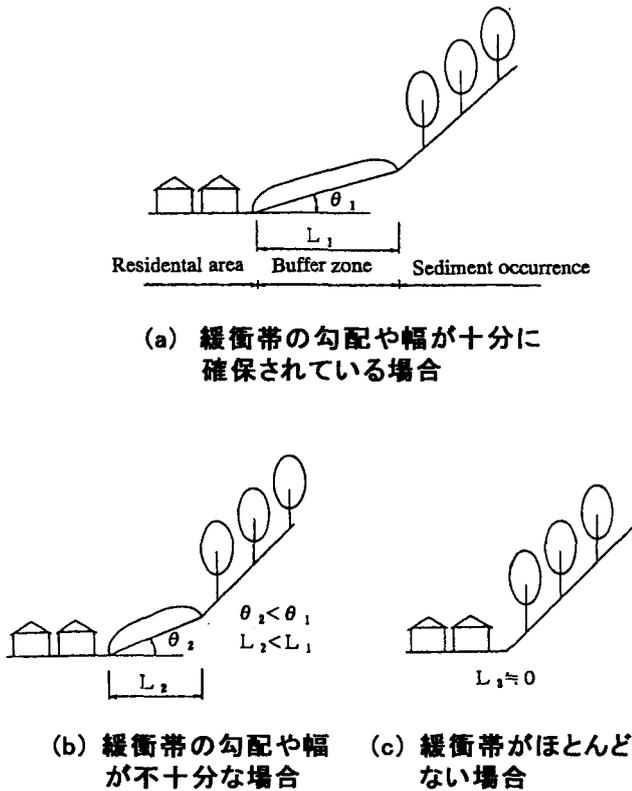


図-2 グリーンベルトの断面的形態

避けられてきた。にもかかわらず、都市域への人口・資産の集中化による都市の拡大現象に伴って、これらの地域は開発・宅地化され、市街化が進行していった。

このように、近年、都市部においては、短期的には居住域の確保という目的は達成されたが、それとひきかえに、長期的には、土砂災害の危険性をもつ区域は山麓部に拡大し、同時に、土砂災害の発生頻度も増大化していった。そして、それらの現実には、本来、グリーンベルトが位置するべき場所に、グリーンベルトによって保全が必要とされる対象が存在する、という皮肉な結果を生み出している

3.2 生駒西麓地域の場合

上述のような状況を生駒山系の西麓地域(大阪府域)を例にみてみよう。

生駒山系は、図-3 に示すように、近畿中央部に位置し、生駒山(標高 642m)を中心に約 25km にわたって南北に連なっている。そして、西は大阪平野、東は奈良盆地、北は淀川、南は大和川によって、それぞれ囲まれており、その稜線は、ほぼ大阪府と奈良県の府県境に相当する。生駒山系は褶曲による隆起によって生じたものであり、西側斜面(大阪府域)は急峻で多数の小溪流がある。それらは平均勾配 1/5 と急な谷あいを形成しており、流路は急勾配で短い。西側斜面は、それらの溪流によって活発に開削され、流送土砂となって堆積し、山麓部に生駒西麓堆積地と呼ばれる複合扇状地を形成している。

この生駒西麓地域を含む東部大阪地域は、寝屋川流域と呼ばれ、図-3 のとおり、生駒山系の稜線を東縁として、西を上町台地、南北をそれぞれ大和川と淀川に囲まれた東西約 14km、南北約 19km、流域面積約 270km² の都市河川流域である。

この流域は、図-3 のとおり、古来の入り海が上町台地北端(大阪城付近)の天満砂洲の発達による湾入口の閉塞(河内湾→河内潟→河内湖へと変化)と淀川・大和川の流送土砂の堆積によって陸地化したという大阪平野の生成過程⁵⁾から、流域域積の 3/4 が低湿な沖積平野である。流域を流れる寝屋川の河床勾配は、中流部の生駒西麓地域にせまる区間まで 1/12,500 と緩く、大阪湾の感潮河川となっている。さらに、沖積低地の河川はすべて天井川で、沖積低地は全域が内水区域である。

このように、寝屋川流域は治水きわめて厳しい自然環境にあり、流域の市街化は、昭和 20 年代までは、生駒西麓を除く低地部の段丘・扇状地および自然堤防等の土地条件の良好な微高地に限られ、低地にはすべて水田または畑地が展開されていた。

しかし、昭和 30 年代に入り、高度経済成長時代を背景として、大都市大阪市に隣接し、京都・奈良にも至近距離にあるという地理的好条件に加えて、鉄道・バス等の交通機関の発達や地価の低廉さといった諸条件が相互に関連し、急速に都市化が進行していった⁶⁾。そして、その市街化の波は今や生駒西麓地域にまで及んでいる。

さらに、北生駒地域においては、過去に土砂採取等の山地開発が激しく行われてきた⁷⁾。

以上述べてきたように、生駒西麓地域では、土砂生産が活発なことに加えて、近年では、隣接する寝屋川流域の急速な都市化の影響を受けて市街地が拡大しつつあり、土砂災害の危険性が高まっている。このような自然的・社会的条件を有する当地域において、グリーンベルトの区域設定を考えてみる。

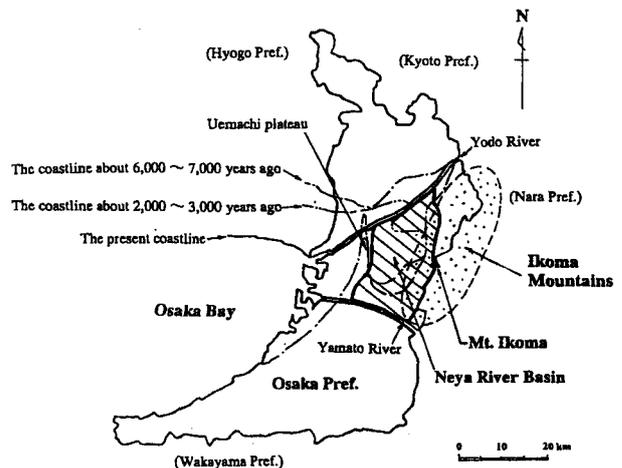


図-3 生駒山系および寝屋川流域の概要図⁴⁾

図-4は、生駒西麓地域における砂防指定地と都市計画区域との関係概略的に示したものである。なお、各区域の境界線は、実際には、かなり複雑に入り組んだものとなっている。

この図を単純化して見てみると、まず、砂防指定地内(概ね都市計画区域外)は、概ね生駒西麓斜面に相当し、植生被覆された区域と考えられる。次に、都市計画区域のうち、JR学研都市線または国道170号以西は、沖積平野東端部の低平地で、概ね高度に市街化された区域と考えられる。そして、この両区域にはさまれた山麓部では、すでに居住域が形成されている所もあり、今後も市街地の拡大が予想される区域と考えられる。

以上を念頭におき、かつ、前出の図-2(a)~(c)を参考にすれば、生駒西麓地域において、グリーンベルトの区域設定にあたっては、砂防指定地以西の山麓部の取扱いが重要であることがわかる。

図-5は、図-4に示された生駒山系の主要な5つの峰(北から順に、交野山、飯盛山、生駒山、高安山および高尾山)の頂上から沖積平野の東端部に至る区域の断面図の一例を示したものである。

この図をみてみると、まず、交野山山頂および高尾山山頂から描いた2つの断面図(図-5(a)、(e))では、いずれも、砂防指定地の境界線より東側に、 6.3° あるいは 9.5° といった緩やかな勾配をもつ山腹斜面が広がっている。これは、この2断面が、それぞれ、生駒山系の北端および南端近くに位置しており、淀川および大和川の流送土砂の堆積によって、沖積平野の中央部よりも地盤高がやや高く、南あるいは北に緩やかに傾斜しているためである。これらの緩傾斜面は、土砂移動に対する緩衝帯の役割を果たすものと考えられる。したがって、これらの区域については、砂防指定地内にグリーンベルトを位置付けることによって、図-2(a)の考え方が満足される。

次に、飯盛山山頂、生駒山山頂および高安山山頂から描いた3つの断面図(図-5(b)~(d))では、砂防指

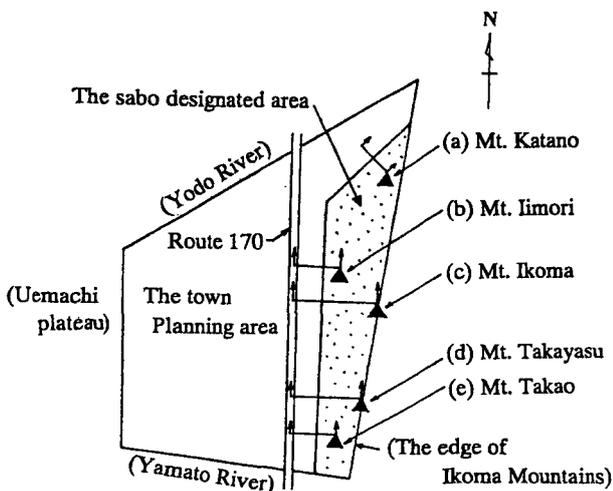
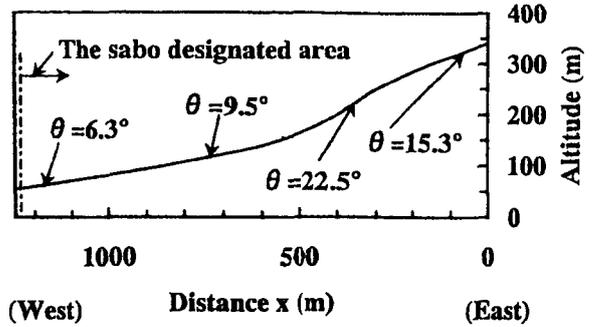
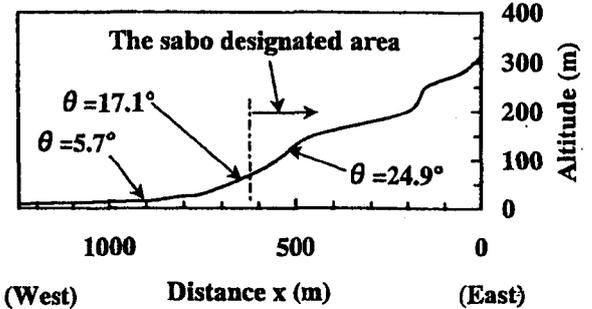


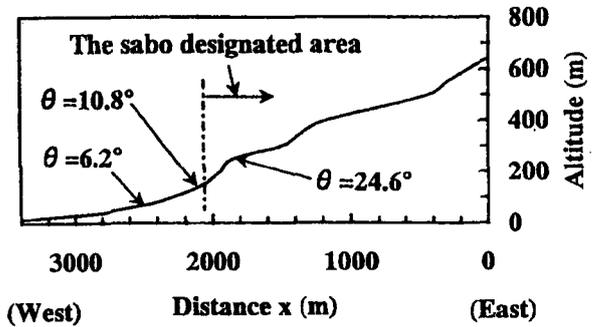
図-4 生駒西麓地域における砂防指定地と都市計画区域との関係(概略図)⁸⁾



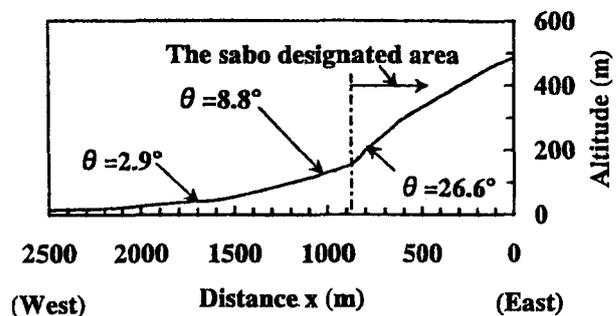
(a) 交野山山頂から描いた断面図



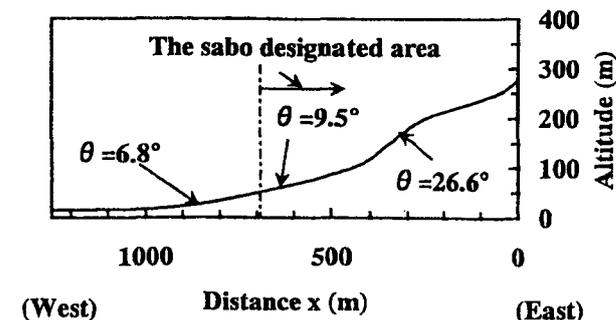
(b) 飯盛山山頂から描いた断面図



(c) 生駒山山頂から描いた断面図



(d) 高安山山頂から描いた断面図



(e) 高尾山山頂から描いた断面図

図-5 生駒西麓地域の断面図の一例⁹⁾

定地の境界線より東側の山腹斜面の勾配は、いずれも 20° を超えており、土砂移動が活発に行われる地形勾配となっている。一方、 10° 以下の緩やかな地形勾配をもつ区域は、いずれの断面図においても砂防指定地以西に位置している。したがって、これらの区域では、グリーンベルトは、**図-2(a)**の考え方から、砂防指定地以西において、砂防上必要な範囲を緩衝帯として取り込む形で区域設定することが望ましい。

しかし、その緩衝帯に位置付けるべき区域では、すでに一部に市街化が進行している。元来、砂防指定地は、土砂移動が激しい急斜面地が指定の対象であり、開発行為や土地利用形態は厳しく規制されてきた。その急斜面地に隣接する緩傾斜地上に人家が侵入し、市街地が徐々に拡大していったとみるべきであろう。その結果、グリーンベルトとそれによって保全されるべき区域が重複した形となっており、現実的には、当該区域のグリーンベルトとしての位置付けに困難をきたしている。

3.3 グリーンベルトの断面的検討の必要性

さて、ここで再び**図-2(a)~(c)**を眺めながら、グリーンベルトの区域設定のあり方について考えてみよう。

グリーンベルトとしては、あくまでも**図-2(a)**のような形態が理想であるが、現実的には、砂防上の必要性和土地利用の現状とのほごまで、**図-2(b)**あるいは**(c)**のような形態は、やむを得ず出現するだろう。それでも、市街地の後背斜面がグリーンベルトとして位置付けられ、森林植生が健全に育成・保全されることは、土砂災害防止の観点からは従前よりは良好な方向に向かっているものとして、一応評価できるかも知れない。

しかし、前章で述べたように、森林植生の土砂災害防止機能に対する評価は、現段階ではあくまでも定性的・限定的であり、緑のもつ砂防的効果に期待する方策のみでは、土砂災害防止に対して万全であるとはいえない。むしろ、市街地の後背斜面が**図-2(b)**あるいは**(c)**のような形態のままグリーンベルトとして位置付けられることによって、保全対象区域の住民が土砂災害に対して過度の安心感をもってしまおうとすれば、防災意識の面で重大な問題である。

土砂移動現象は、地形条件、とくに地形勾配と停止距離の影響を強く受ける。**図-2(a)~(c)**は、それを端的に示したものと見える。したがって、グリーンベルトの区域設定にあたっては、土砂移動現象の本質から、平面図的な線引きに終始するのではなく、むしろ、断面図的なチェックが重要である。

そして、その結果、現実的な対応として、土砂移動に対する緩衝帯としての場の条件(地形勾配および幅)を十分に満たしていない形態をグリーンベルトとして区域設定する場合には、前述の森林植生の場合と同様に、人工構造物によるコントロールを併せて計画するべきである。

4. グリーンベルト設定区域における土石流対応の例

ここでは、生駒山系の2溪流を対象に土石流の数値解析を行い、その結果をもとに、これまで述べてきたグリーンベルトの区域設定のあり方について検証する。

いま、山地河川において、渓床堆積物の条件、水の供給条件および溪流を含む流動・氾濫場の地形条件が与えられれば、土石流の支配方程式を数値的に解くことによって、土石流の発生過程から流動・氾濫を経て堆積が終了するに至るまでの過程をかなり精度よく追跡できる段階にある^{10),11)}。

このとき、実用的には、河道に沿った土石流の流動過程に対しては一次元支配方程式を適用し、土石流の面的な氾濫および堆積過程に対しては、氾濫域の地形データおよび一次元解析によって得られた谷出口の流出ハイドログラフを入力条件として、二次元支配方程式を適用する方法¹²⁾が合理的である。しかし、ここでは、主として、**図-2**に示したグリーンベルトの断面的形態について議論することから、土石流の挙動は河道に沿った議論で十分であると考え、一次元支配方程式による土石流の流動シミュレーションを行う。

4.1 土石流の一次元支配方程式

土石流の一次元支配方程式は、江頭・芦田ら¹³⁾によるものを用いる。すると、まず、土石流の質量保存則、運動保存則は、それぞれ次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Bv h}{\partial x} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial cBv h}{\partial x} = E \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \sin \theta_x - \frac{1}{\rho_m} \frac{1}{h} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{vE}{c_* h} - \frac{\tau_b}{\rho_m h} \quad (3)$$

$$\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho \quad (4)$$

ここに、 t は時間、 x は流れに沿った座標、 h は水深、 B は流動幅、 v は断面平均流速、 E は侵食($E < 0$ の場合には堆積)速度、 c は土石流の砂礫粒子体積濃度(断面平均濃度)、 c_* は砂礫の静止堆積濃度、 θ_x は河床勾配、 g は重力加速度、 ρ_m は泥水と砂礫の混合物の密度、 σ は砂礫の密度、 ρ は泥水の密度、 P は全圧力、 τ_b は河床せん断力である。

次に、河床位方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_*} \cos \theta_x \quad (5)$$

$$\theta_x = \sin^{-1} \left(-\frac{\partial Z_b}{\partial x} \right) \quad (6)$$

ここに、 Z_b は河床高である。

さて、上述の支配方程式によって土石流の流動過程を追跡するにあたり、未知量は h, c, v, Z_b, E および τ_b の 6 つである。それらに対して、これまでに用意された独立な式は、(1), (2), (3) および (5) の 4 つである。したがって、土石流の解析にあたっては、残りの 2 つの独立な式、すなわち、侵食速度 E と河床せん断力 τ_b の評価が必要である。そして、上述の支配方程式による土石流の追跡の精度は、それらをかかに与えるかに大きく依存することとなる。ここでは、次に示す江頭らの式^{14), 15)}を用いることとする。

$$\frac{E}{v} = c \cdot \tan(\theta_x - \theta_e) \tag{7}$$

$$\tau_b = \tau_s + \rho f v^2 \tag{8}$$

ここに、

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan \phi_s \tag{9}$$

$$\tau_s = \left(\frac{c}{c_s}\right)^{1/5} \rho(\sigma/\rho - 1) k_f g h \cos \theta_x \tan \phi_s \tag{10}$$

$$f = \frac{25}{4} \left\{ k_f \frac{(1-c)^{3/3}}{c^{2/3}} + k_g \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) c^{1/3} \right\} \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \tag{11}$$

ここに、 θ_e は土石流の濃度 c に対する平衡河床勾配、 ϕ_s は砂礫の内部摩擦角、 e は砂礫の反発係数、 d は砂礫の代表粒径、 k_f および k_g は係数で、それぞれ、 $k_f = 0.16, k_g = 0.0828$ である。

4.2 数値計算の方法および計算条件の設定方法

4.2.1 支配方程式の差分化

前節で示した土石流の支配方程式の差分化には、leap-frog 法を用いる。図-6 に、差分スキームの模式図を示す。なお、この図において、 n および i は、それぞれ、時間および距離差分格子を表している。

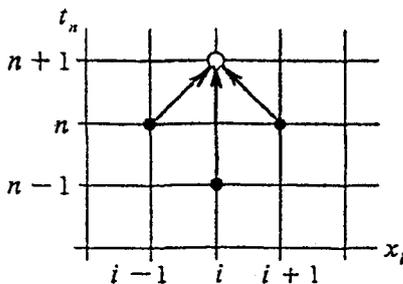


図-6 差分スキームの模式図

4.2.2 計算条件の設定

1) 初期河床縦断形状および流動幅

数値計算にあたっては、土石流流下域の地形条件として、初期河床縦断形状と流動幅に関するデータが必要である。まず、初期河床縦断形状については、

1/2,500 の地形図から谷筋の標高を読み取って求める。次に、流動幅については、1/2,500 の地形図から読み取った谷幅および谷の実測横断面¹⁶⁾をもとに推定する。

2) 元河床の侵食条件

土石流に取り込まれる材料が元河床にどのように分布しているかは、この種のシミュレーションにおいて極めて重要である。ここでは、非粘着性材料の安定限界勾配に着目し、前出の式(9)を参考にして、勾配が 22° を超える領域は岩盤になっているものとする。そして、これよりも緩い領域の河床には河床材料が分布していると仮定して、限界河床侵食深を設定する。

3) 水の供給条件

計算対象流域の 10 年確率・継続時間 10 分間降雨強度と土石流発生地点の集水面積から供給水量を見積もる。さらに、ここで、土石流による土砂流出が短時間のうちに終わることを念頭に置けば、水の供給は定常的であってもさしつかえないものと考えられる。そこで、計算では、この供給水量を定常的に与える。そして、そのときの土砂濃度は、前出の式(11)を流れの土砂濃度の薄い領域にまで適用することによって抵抗評価の煩雑さを避けるために、便宜上 5% とする。

4.3 千塚川の場合(土砂移動の緩衝帯としてのグリーンベルトの例)

4.3.1 流域の概要

千塚川は、大阪府八尾市大窪地区に位置し、生駒山系を源流として、恩智川(淀川水系)に流入している。図-7 のとおり、生駒山系の稜線(標高 450m 付近)から西側斜面に流域を形成し、流域面積は約 0.8km^2 、主流路延長は約 3.7km である。これらのうち、概ね標高約 130m 地点以東の山腹斜面および渓流区間(流域面積約 0.5km^2 、主流路延長約 $1,000\text{m}$)が、砂防指定地および土石流危険渓流に指定されている¹⁷⁾。

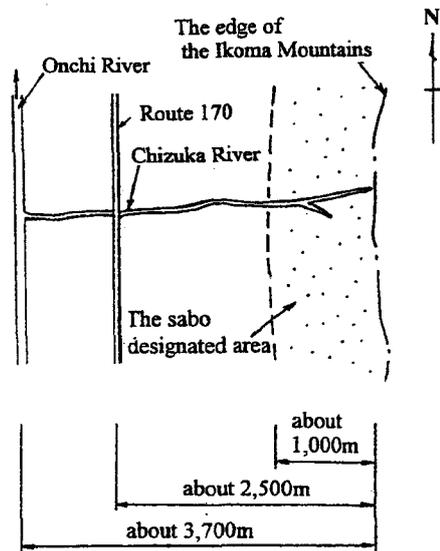


図-7 流域概要図(千塚川)

図-8に千塚川の河床縦断形状(標高380m~国道170号)を示す。この図からわかるように、千塚川の溪床勾配は上流域では20°を超えているところもあり、急峻である。しかし、標高約200m~約140m付近($x=500m \sim x=820m$ の谷止め工地点)では、平均で11°程度である。そして、谷止め工地点から下流の勾配は緩やかで、標高約80m以下の区間($x=1,300m$ よりも下流域)では溪床勾配は6°以下となっている。

この流域の地質は主として花崗岩で構成されており、山腹斜面においては表層の風化が激しく、土砂生産が活発に行われている。それらの生産土砂は、斜面下方や溪床上に厚く堆積しており、豪雨時には土石流発生の危険性が高い。しかし一方、土石流氾濫原にあたる砂防指定地以西の扇状地の土地利用状況は、主として田・畑地である。それらは農業振興地域の指定を受けており、市街地からは相当離れている。

千塚川では1999年8月に集中豪雨(最大46~72mm/hr)と小規模な斜面崩壊(崩壊土砂量100m³以下)に起因して土石流が発生した。その後の大阪府の調査結果によれば、流出土砂量は1,200m³程度と推定されている¹⁶⁾。これらの土砂は流木を伴って流下し、溪流沿いの小さなため池を次々と埋没させたものの、扇頂部付近で停止し、下流域までは到達しなかった。

4.3.2 計算条件

計算対象区間は、図-8のうち、1999年8月に斜面崩壊が発生した標高380m付近~標高50mまでの約1,500mとする。この区間には、中流部の $x=820m$ 地点に谷止め工(堰高3.0m,満砂状態)が設置されている。

計算に用いる流動幅 B は、最上流端から谷止め工までの区間では $B=6.0m \sim 10.0m$ 、谷止め工から扇頂部($x=900m$ 付近)までの区間では $B=6.0m \sim 12.5m$ とした。なお、扇頂部より下流域は土石流の氾濫・堆積域であるが、ここでは便宜上、流動幅として扇頂部の2倍の値($B=25.0m$)を与えて計算を行った。

ここでは、計算対象区間の最上流部で大規模な山腹崩壊が発生し、その崩壊土砂が河道内に堆積したものと、堆積土砂の条件を以下のとおり仮定する。

- ・崩壊による堆積土砂量 $V \approx 10,000m^3$
- ・堆積形状 谷の縦断形状に平行に堆積,
 $H=6.0m, B=6.0m, L=300.0m$

元河床の侵食条件であるが、千塚川において溪床堆積物に関する情報は得られていない。そこで、ここでは、最上流部の崩壊土砂堆積区間を除いて、勾配が22°を越える領域は岩盤になっているものとし、これよりも緩い領域の河床には厚さ2.0mの河床材料が分布していると仮定し、限界河床侵食深を2.0mとした。

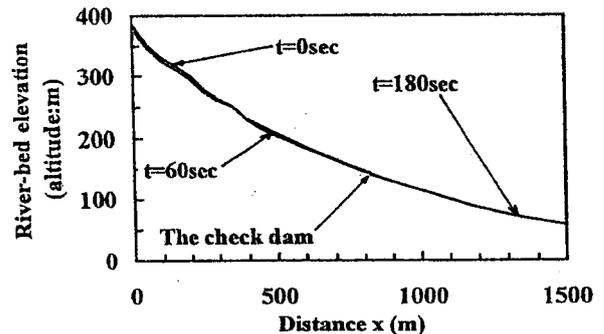
供給水量は、千塚川流域が位置する大阪府河内地区の10年確率降雨強度(短継続時間)として継続時間10分間降雨強度(91.2mm/hr)¹⁸⁾を考え、これと計算最上流端(崩壊土砂堆積地点)の集水面積(約0.02km²)から見積もると、0.3m³/sec程度(流出係数0.6の場合)となる。計算では、これを定常的に与えた。

谷止め工の堆砂域は、現状において満砂状態である。そこで計算では、谷止め工直下流地点において、谷止め工を通過した流量(水+土砂)に対応する等流水深を式(3)により与えた。

その他、数値計算に必要な物理定数は、それぞれ、 $\rho=1.20g/cm^3$ (微細砂濃度15%)、 $\sigma=2.65g/cm^3$ 、 $\phi_s=33.0^\circ$ 、 $c_s=0.50$ および $d=10.0cm$ である。また、差分条件は、 $\Delta x=1.0m$ および $\Delta t=0.02sec$ である。

4.3.3 計算結果および考察

図-9は、水の供給開始後、60秒および180秒経過後における河床高の時間変化を示している。



(a) 計算対象区間全体

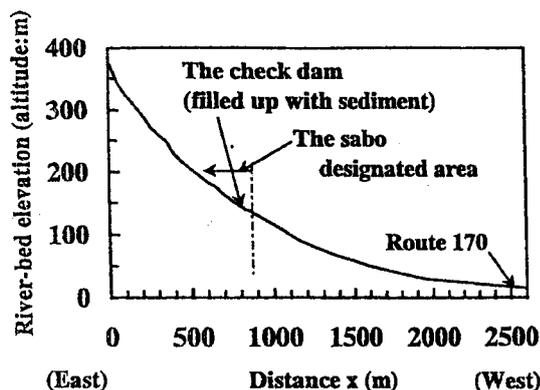
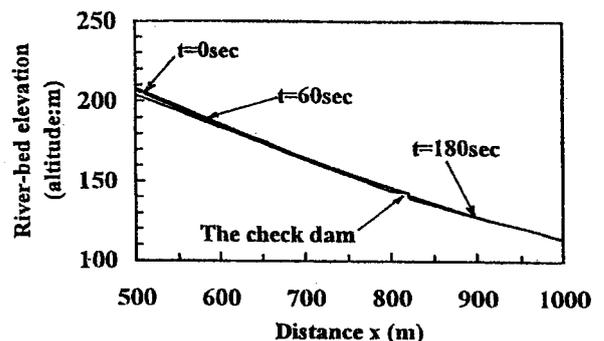


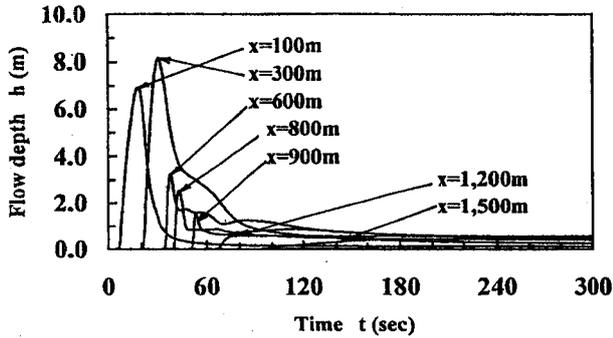
図-8 河床縦断形状(千塚川)



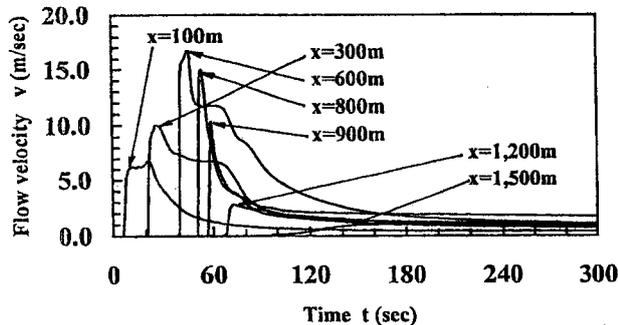
(b) 谷止め工付近(x=820m付近)

図-9 河床高の時間変化(千塚川)

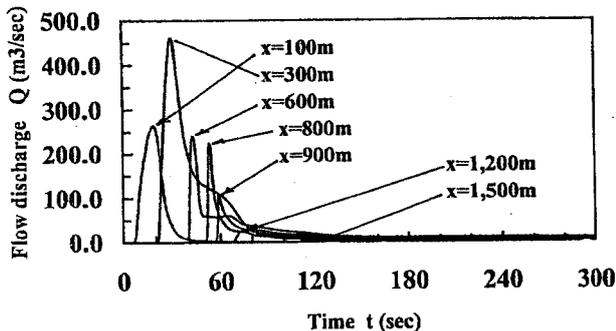
また、図-10は、上流端を0mとした距離 $x=100m$, $200m$, $300m$, $500m$, $600m$, $800m$, $900m$, $1,200m$ および $1,500m$ における水深、流速、流量(水+土砂)および土砂体積濃度の時間変化を示している。これらの図を参考にすれば、本計算条件下での千塚川における土石流の流動過程は、次のようである。



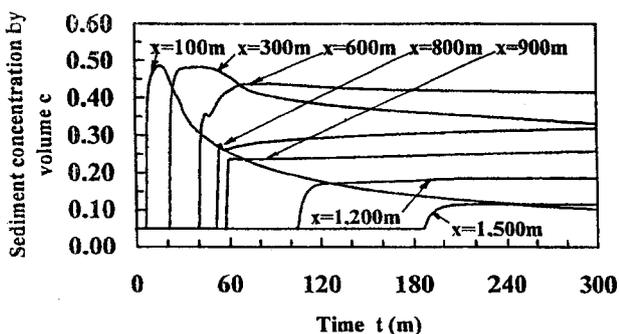
(a) 水深の時間変化



(b) 流速の時間変化



(c) 流量(水+土砂)の時間変化



(d) 土砂体積濃度の時間変化

図-10 土石流特性値の時間変化(千塚川)

標高 $380m$ 付近の堆積土砂は、通水開始後、ほどなく流動化し、通水開始後から 20 秒後には $x=300m$ 地点(河道堆積土砂の先端部分)に到達して、水深約 $8.0m$ 、流速約 $9.6m/sec$ 、ピーク流量約 $460m³/sec$ 、土砂濃度約 48% の土石流が形成されている(図-10)。

土石流はその後、 $x=400m$ 付近から $x=820m$ の谷止め工地点の区間にかけて堆積している(図-9(b))。これは、この区間の平均河床勾配が $\theta=11.3^\circ$ で、流下土石流の土砂濃度(図-10(d)、 $x=600m$ 地点で約 44%)に対する平衡河床勾配 $\theta_e=12.7^\circ$ (式(9)による)よりも緩やかであり、流動幅も $6.0m$ から $10.0m$ に広がっているためである。土石流の規模はこの区間を流下しながら徐々に減勢され、谷止め工上流の $x=800m$ 地点では水深約 $1.5m$ 、ピーク流量約 $220m³/sec$ 、土砂濃度約 30% にまで減少している(図-10)。谷止め工の直下流から扇頂部付近($x=900m$ 地点)においても若干の堆積がみられ(図-9(b))、 $x=900m$ 地点において、土石流の規模は水深約 $0.8m$ 、流量約 $100m³/sec$ 、土砂濃度約 25% にまで減勢している(図-10)。

そして、扇頂部よりも下流では、勾配はさらに緩やかになり、流動幅も拡大することから、土石流はさらに減勢され、流れの形態も土石流から土砂流へと変化している(図-10(d)、 $x=1,200$ 地点)。そして、計算区間最下流の $x=1,500$ 地点では、水深約 $0.1m$ 、流量約 $0.4m³/sec$ 、土砂濃度約 12% となっており、流量は供給水量 Q_{in} ($0.3m³/sec$)とほぼ等しくなっている(図-10)。

以上のとおり、本計算条件下において千塚川の上流域で発生した土石流は、中流域の緩勾配区間に順次堆積し、下流域の扇状地では氾濫していない。本計算例は、グリーンベルトが土石流のような激しい土砂移動現象に対して緩衝帯としての機能を発揮するためには、土砂移動特性に応じた適当な勾配と幅(停止距離)を有する必要があることを如実に示している。

4.4 野崎中川の場合(土木的施設との効果的な組合せを必要とするグリーンベルトの例)

4.4.1 流域の概要

野崎中川は、大阪府大東市野崎地区に位置し、生駒山系を源流として谷田川(淀川水系)に合流している。図-11に示すように、生駒山系の一峰(標高 $253m$)から西側斜面に流域を形成しており、流域面積約 $0.2km²$ (野崎新池地点)、主流路延長約 $800m$ (最上流地点~野崎新池地点)であり、下流の扇状地地形を呈しているところで右支川(流路延長約 $400m$)が合流している。そして、これらのほぼ全域が砂防指定地および土石流危険溪流に指定されている¹⁷⁾。

図-12に野崎中川(本川)の河床縦断形状を示す。この図からわかるように、野崎中川の渓床勾配は、上流域では 20° を超えているところもあり、急峻である。そして、扇頂部付近(図-12において $x=500m$ 付近)で $11\sim 14^\circ$ 程度、扇状地では $3\sim 6^\circ$ 程度である。

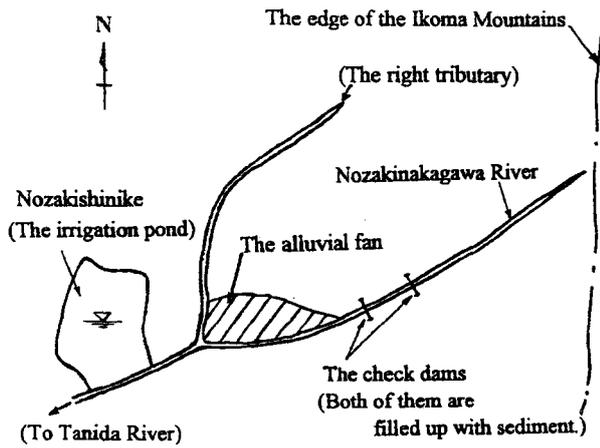


図-11 流域概要図(野崎中川)

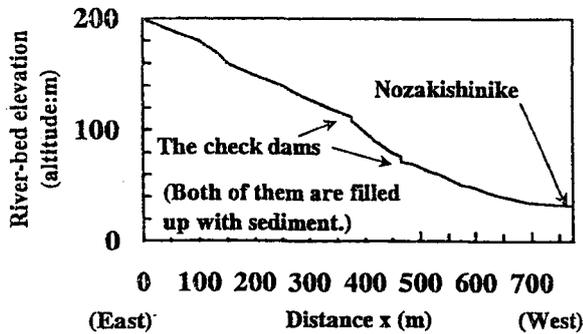


図-12 河床縦断形状(野崎中川:本川)

この流域においても、地質は主として花崗岩で構成され、山腹斜面における土砂生産は活発で、豪雨時には土石流発生危険性が高い。さらに、扇状地の直下流には野崎新池(農業用ため池)があり、それに近接して人家が密集している。そのため、土石流に起因してため池が氾濫することも予想され、それらによる人的および資産被害は計り知れない。このように、当該流域では、その自然的・社会的条件から、土石流による土砂災害ポテンシャルは非常に高いと考えられる。

4.4.2 計算条件

ここでは、野崎中川の本川を対象に数値計算を行う。計算対象区間は、図-12に示すように、標高200m付近～野崎新池までの約780mとする。この区間には、治山ダムが2基設置されている。それらの堰高は、1号治山ダム($x=380\text{m}$ 地点)が3.5m、2号治山ダム($x=470\text{m}$ 地点)が5.0mであり、ともに満砂状態である。

計算に用いる流動幅 B は、最上流端から1号治山ダムまでの区間では $B=4.0\text{m}\sim 5.0\text{m}$ 、1号治山ダムから扇状地付近($x=500\text{m}$ 付近)までの区間では $B=8.0\text{m}$ とした。なお、扇状地より下流域の流動幅は、千塚川の場合と同様とした。

場合と同様、扇頂部の2倍の値($B=16.0\text{m}$)とした。

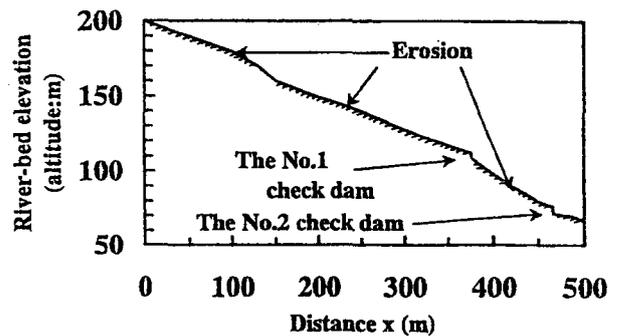
なお、ここでは、山腹斜面の植生は良好に保全されていると仮定し、崩壊等による生産土砂は考慮しない。

元河床の侵食条件は、勾配が 22° を越える領域は岩盤になっているものとし、これよりも緩い領域の河床では、簡易貫入試験の結果¹⁶⁾を参考にして、限界河床侵食深を1.0mとした。

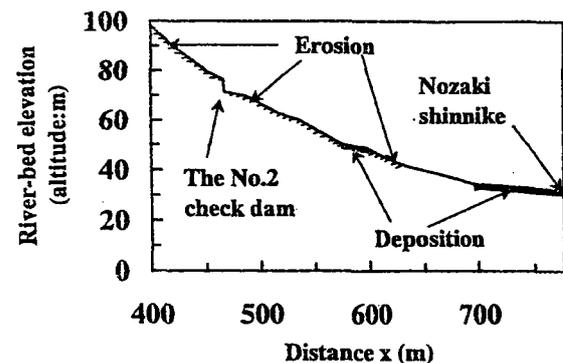
供給水量は、千塚川と同様に、野崎中川流域が位置する大阪府河内地区の10年確率降雨強度(短継続時間)として、継続時間10分間降雨強度(91.2mm/hr 、千塚川と同じ)を考え、これと計算最上流端の集水面積(約 0.01km^2)から供給水量を見積ると、 $0.15\text{m}^3/\text{sec}$ 程度(流出係数0.6の場合)となる。計算では、この供給水量を定常的に与えた。その他、治山ダムの取扱いや、計算に用いた物理定数および差分条件は、いずれも千塚川の場合と同様とした。

4.4.3 計算結果および考察

図-13は、水を供給し始めてから300秒経過後における河床侵食および堆積の状況を示している。また、図-14は、上流端を0mとした距離 $x=100\text{m}$ 、 200m 、 350m 、 450m 、 600m 、 700m および 750m における水深流速、流量(水+土砂)および土砂体積濃度の時間変化を示している。これらの図を参考にすれば、本計算条件下での野崎中川における土石流の流動過程は、次のようである。



(a) 最上流端～扇頂部 ($x=500\text{m}$ 付近)



(b) 扇状地付近 ($x=500\text{m}$ より下流域)

図-13 河床侵食および堆積の状況(通水開始300秒経過後、野崎中川:本川)

水の供給開始後、ほどなく河床堆積物は流動し、土石流化している。図-13(a)からわかるように、最上流端から扇頂部 ($x=500\text{m}$ 付近) までの区間は、初期河床勾配が 22° を超える一部の区間を除いて、ほぼ河床が侵食されており、総河床侵食量は、約 $1,500\text{m}^3$ である。

流下土石流は、これらの河床材料を取り込みながら規模を拡大し、通水開始後から 65 秒後には $x=450\text{m}$ 地点 (第 2 治山ダム直上流) に到達して、水深約 1.4m 、流速約 7.0m/sec 、ピーク流量約 $90\text{m}^3/\text{sec}$ 、土砂濃度約 40% の土石流が形成されている (図-14)。

土石流は、第 2 治山ダム通過後も、 $x=620\text{m}$ 付近まで河床を侵食している (図-13(b))。ちなみに、 $x=620\text{m}$ 地点における初期河床勾配は $\theta=11.3^\circ$ で、流下土石流の土砂濃度 (図-14(d)、 $x=600\text{m}$ 地点において約 36%) に対する平衡河床勾配 $\theta_e=11.1^\circ$ (式 (9) による) にほぼ等しい。なお、 $x=600\text{m}$ 地点においては、河床侵食によって土砂の取り込みがなされているにもかかわらず、 $x=450\text{m}$ 地点と比べて、土石流の規模 (水深、流量、土砂濃度) が減少している (図-14)。これは、扇頂部 ($x=500\text{m}$ 付近) より下流域では、流動幅が 8.0m から 16.0m に広がっているためである。

土石流は、その後、 $x=700\text{m}$ 付近より下流の勾配が緩い区間 (初期河床勾配 $\theta=3\sim 6^\circ$ 程度) で堆積し (図-13(b))、 $x=700\text{m}$ 地点において、土石流特性値は水深約 0.6m 、流量約 $30\text{m}^3/\text{sec}$ まで遞減している。

しかし、土砂濃度は約 25% であり、依然として高い値となっている。また、この地点から最下流端 (野崎新池) までの距離は約 80m と短く、 $x=750\text{m}$ 地点において、なおも水深約 0.5m 、流量約 $10\text{m}^3/\text{sec}$ 、土砂濃度約 19% の流れが保たれている (図-14)。

以上述べたような計算結果から、土石流は、その発生源において斜面崩壊等に起因する大規模な土砂生産がなくても、溪床堆積物の移動のみによって発生すること、河床侵食によって土砂を取り込みながら規模を拡大して流下すること、そして、勾配および停止距離といった地形条件によっては、下流にまで到達することがわかる。

したがって、野崎中川のような流域では、谷止め工や床固工等で溪床堆積物の侵食を防ぐ必要がある。さらに、下流域において災害安全度のさらなる向上を図る場合には、扇状地上において、砂防ダム等の土木的施設の設置が必要となる。

5. 結 語

本研究では、グリーンベルトの区域設定のあるべき姿について、土石流対応の視点から提言し、その妥当性について、実溪流を対象とした土石流の数値計算例を示すことにより検証を行った。それらの成果を要約すると、次のとおりである。

- 1) 森林植生は土砂災害防止機能を有するが、同時にその効果には限界がある。しかも、それらに対する定量的評価手法は確立されておらず、現時点では、あくまでも定性的評価の域を出ていない。したがって、そのような段階において、今後、植生効果を砂防計画に反映させていくためには、植生の機能を十分に発揮し得る場の条件整備が必要である

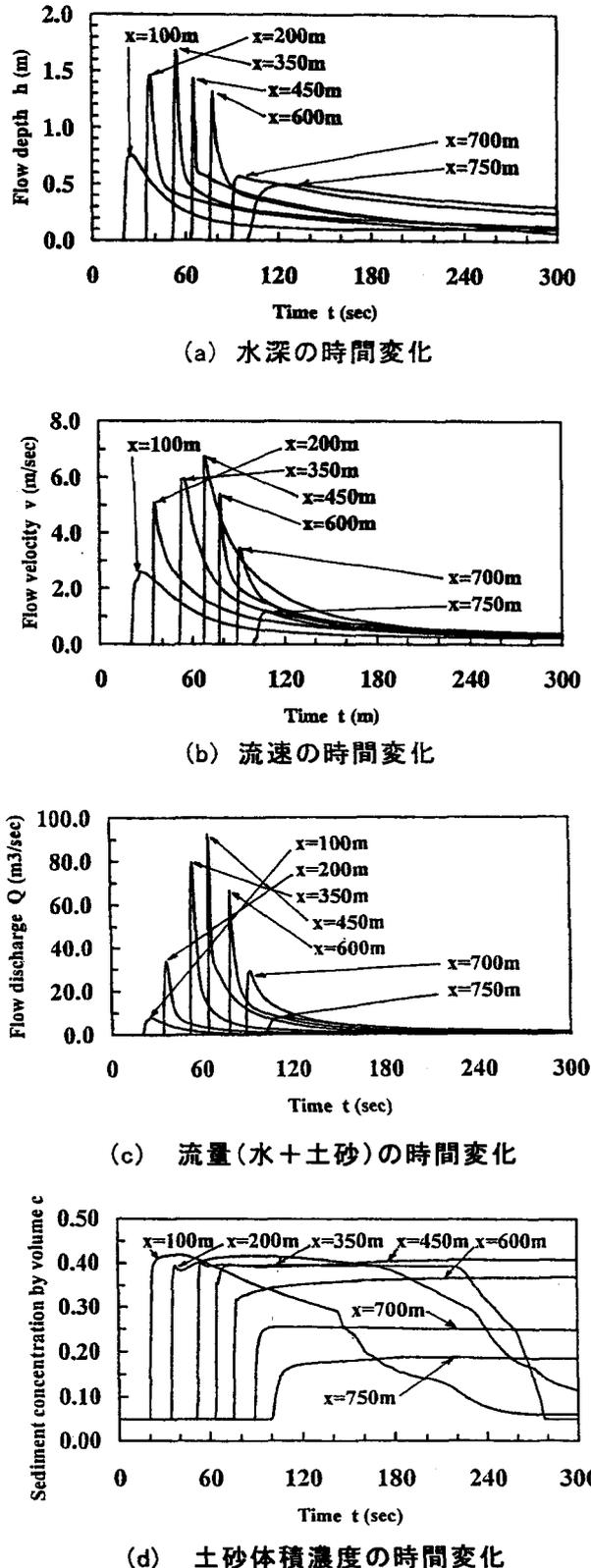


図-14 土石流特性値の時間変化(野崎中川:本川)

そして、土木的施設はその重要な手段の一つと位置付けられ、土砂災害防止の観点から、森林植生との効果的な組合せが要求される。

- 2) 土砂災害防止をその第一義的な目的としたグリーンベルトの本質は、土砂移動現象に対して十分な安全な勾配と幅を有する緩衝帯の確保にある。したがって、砂防上必要な区域の設定にあたっては、平面図上の線引きに終始するのではなく、むしろ、断面的形態の検討が重要である。そして、土砂移動に対する緩衝帯としての勾配や幅が不十分な場合には、上記 1) で述べた森林植生による土砂災害防止効果の限界という点から考えて、土木的施設との併用を計画すべきである。
- 3) 上記 2) の妥当性について検証するために、生駒西麓地域の 2 渓流を対象に土石流の流動シミュレーションを行った。まず、千塚川の場合には、最上流部において大規模な山腹崩壊による土砂生産および堆積を想定して計算を行った。その結果、堆積土砂は水の供給を受けて土石流化し、流動したが、溪床勾配の緩い区間で順次堆積し、最終的には扇頂部付近で停止・堆積して、下流域の扇状地区間まで到達しなかった。このように、土石流の停止・堆積は、地形勾配と停止距離に大きく依存するため、それらが十分に確保されている場合には、土砂移動に対する緩衝帯としてのグリーンベルトの機能が十分に発揮されることが示された。
- 4) 次に、野崎中川の場合には、山腹植生の良好な保全により土砂生産は行われぬものとして計算を行った。その結果、土石流は溪床堆積物の移動のみで発生し、流動過程において、さらなる溪床侵食によって大規模化した。そして、土石流は扇状地表面をも侵食して、下流の野崎新池および人家にまで到達した。この土石流による下流域への被害を防止するためには、扇頂部または扇状地上において、砂防ダム等による対策が必要である。このように、土石流の発達には、溪床侵食による土砂の取込みが大きく寄与しており、土石流災害の防止にあたっては、土石流発生源対策のみでは不十分であること、土石流氾濫域の地形勾配および停止距離によっては、土石流対策として土木的施設の設置が必要であること、などが示された。

最後に、今後解明すべき課題として、森林植生のもつ土砂災害防止効果を定量的に評価する手法が確立され、その効能が主観的ではなく、科学的・客観的に系統化された形で提示されることが望まれる。

また、本研究において、著者は再三にわたり、森林植生と土木的施設との効率的な組合せの必要性を主張しているが、それは単なる砂防上必要な機能の確保ではなく、それらが整備される場が保有・維持すべき自然環境および社会環境に配慮されたものであることはいうまでもない。

謝辞 本研究は、著者が平成 11 年度の 1 年間、専任研修員として京都大学大学院農学研究科に内地留学する機会を得て、実施されたものです。

同研究科森林科学専攻 水山 高久教授には、研究の進め方や課題設定等について、終始懇切なご指導を賜りました。ここに記して深甚の謝意を表します。

本研究を遂行するにあたり、大阪府土木部ダム砂防課からは、数多くの資料をご提供いただきました。また、立命館大学水工研究室(江頭 進治教授)には、土石流の数値計算にご協力をいただきました。ここに記して謝意いたします。

大阪府立工業高等専門学校建設工学科の教職員各位におかれましては、このたびの内地留学にあたり、激励下さいますとともに快く送り出してください、さらには、留学期間中の著者の教務および校務をご負担いただきました。ここに記して深謝いたします。

最後に、このような有意義な研修の機会を与えて下さった大阪府教育委員会ならびに大阪府立工業高等専門学校の関係各位に対し、心から感謝いたします。

参考文献

- 1) たとえば、(財)砂防フロンティア整備推進機構：都市山麓グリーンベルト整備計画，93pp.，1996。
- 2) たとえば、建設省土木研究所 砂防植生研究グループ：砂防と植生、「緑」のゼミナール(テキスト)，(社)全国治水砂防協会，pp.99-202，1998。
- 3) たとえば、水山高久・井良沢道也・福本晃久：樹林帯の土石流制御効果に関する水理模型実験報告書，建設省土木研究所資料第 2837 号，1990。
- 4) 宮本又次編：難波 大阪 歴史と文化，講談社，pp.73，1975，大阪府：大阪府史第 1 巻古代編 I，pp.219，1978，前田昇他監修：変貌する大阪—その歴史と風土—，東京法令出版，pp.1-12，1986，をもとに作成した。
- 5) 梶山彦太郎・市原 実：大阪平野の発達史，地質学論集第 7 号(海岸平野特集)，pp.101-112，1972。
- 6) 大阪府土木部：都市河川流域における水防災計画に関する基礎的研究，1987。
- 7) 大阪府土木部ダム砂防課：大阪府の砂防事業，1997。
- 8) 大阪府河川網図(中部)(大阪府土木部河川課，平成 10 年 3 月発行)をもとに作成した。
- 9) 1:25,000 地形図(建設省国土地理院，平成 10 年 11 月発行)をもとに作成した。
- 10) たとえば、中川 一・高橋 保・澤田豊明・里深好文：計画土石流の設定と避難計画，京都大学防災研究所年報，第 39 号，B-2，pp.497-502，1996。
- 11) たとえば、江頭進治・本田尚正・宮本邦明：姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション，水工学論文集，第 42 巻，pp.919-924，1998。
- 12) 江頭進治：土石流の流動機構と氾濫・堆積域の解析—基礎理論からハザードマップまで—，1999 年度(第 35 回)水工学に関する夏季研修会講義集 A コース，(社)土木学会水理委員会・海岸工学委員会，pp.A-6-1-18，1999。

- 13) 江頭進治:土石流の停止・堆積のメカニズム(2), 新砂防, 第 46 卷, 第 2 号, pp.51-56, 1993.
- 14) 江頭進治:土石流の停止・堆積のメカニズム(1), 新砂防, 第 46 卷, 第 1 号, pp.45-49, 1993.
- 15) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭:掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集, 第 41 卷, pp.789-794, 1997.
- 16) 大阪府から資料をご提供いただいた.
- 17) これらの数値は大阪府土砂災害危険箇所図(大阪府土木部ダム砂防課,平成 10 年 3 月印刷)より読み取った.
- 18) 大阪府土木部河川課:大阪府の計画雨量, pp.144, 1978.
- 19) 本田尚正・水山高久:・グリーンベルト設定区域における土石流への対応, 砂防学会誌, 投稿中.
- 20) 水山高久・本田尚正:・グリーンベルト設定区域における土石流対応, 平成 12 年度(社)砂防学会研究発表会印刷中.