

자연계에 있어 부유사 발생원의 특성에 관한 연구

이 성 기

한국산림기술인협회

(2002년 5월 8일 접수; 2002년 6월 5일 채택)

A research on the features of suspended sediments origination in natural world

Sung-Gie Lee

Korea Forest Engineer Association, Seoul 140-013, Korea

(Manuscript received 8 May, 2002; accepted 5 June, 2002)

Suspended sediment outflows mainly by natural situation and artificial action and affects in down-stream. This research studied suspended sediments origination in forests size and mountain stream for natural situation, density for artificial action, and measured the size and possible quantity of suspended sediments origination and studied obstruction method of the generation by artificial action. As the result, I found that the size of generation is about 2~3% of forest size and the forest size which is affecting bare area of valley is about 1~2ha. In addition, possible outflow segments quantity by artificial facilities is assumed to be maximum 200ton/ha and abstract of mountain incline for mountain development needs minimize bare area valley by make right angle with minimum size.

Key Words : natural world, suspended sediment, water quality environment, bare area of valley, mountain development, forest road, formation or paleozoic strata.

1. 서 론

국토의 넓은 면적이 산림으로 구성되어 있는 산림국가에서는 산지를 효율적으로 이용할 필요가 있다. 하지만 산지의 이용은 개발을 동반하는 경우가 다수이며, 그곳에서는 다량의 토사가 계류에 유입되어 하류에의 수질환경 등의 자연현상에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

계류에 있어 탁수에 대한 연구는 O' Brieu (1933), Hayami(1938)등에 의하여 시작되어 임학, 사방공학, 하천공학, 토양학, 지질학 및 위생공학 등의 다방면에서 이루어지고 있으며^{3~8)}, 탁수의 유출에 대한 연구의 시점은 부유사 생산원에 기인하고 있다. 산림 유역 내에서 발생하는 계류의 탁수는 자연 또는 인위적 행위에 의하여 발생하는 것으로 지적되었고^{9,10)}, 이를 현지에서 직접 시료를 채취하여 확인이 되었다^{11,12)}.

한편, 산지 개발에 따른 탁수의 발생이 환경문제로서 제기된 것은 Packer등에 의한 1964년 이후로, 미국 북동부 Appalachians에 있어서 수원과 어류생식의 확보¹⁴⁾가 그 발단이라 볼 수 있으며, 일본에서도 산지 개발이 탁수의 발생원으로 지적되어 규제 방법을 제안하였다¹⁵⁾. 한편 산악산림의 소유역을 대상으로 한 나지부에서 자연적으로 발생하는 부유사 발생 구조에 대하여 수원의 최상류가 부유사농도원에 있다는 것이 연구되어 왔으며¹⁶⁾, 열대지대의 산지훼손에 의한 탁수발생의 연구도 시작되고 있다^{17,18)}.

이상의 연구는 주로 세립토의 유출형태와 과정 그리고 양에 대한 것으로 본 연구에서는 나지면적이 부유사유출량에 영향을 미치는 것으로 판단되어 산지지형에서 자연적으로 발생하는 계류의 나지면적을 추정하고, 임도(작업도 포함)등 인위적인 개발로 인하여 발생한 나지면적의 지형특성과 나지면적의 증가 경향을 검토하였으며, 나지에서 입경분포와 건조밀도를 측정하여 부유사 발생가능량을 추정하였다. 이는 산지에서 세비토의 발생원의 면적

Corresponding Author : Sung-Gie Lee, Korea Forest Engineer Association, Seoul 140-013, Korea
Phone : +82-02-702-5697
E-mail : sulee@kku.ac.kr

추정과 유출 가능량을 추정하여 산지지형적 변화에 따른 토사유출량의 예측에 기여하기 위함이다.

2. 조사 및 방법

자연적으로 발생하는 나지면적을 추정하기 위하여 동경 농공대학 부속 군마현 쿠사키(群馬縣草木 소재)연습림과 동경영림국 타카오산(東京都八王子市 소재) 유역을 대상으로 계류단면의 길이(윤변)와 계상의 폭을 가지는 산림면적과 중단기울기를 현지 계측 하였다. 대상지는 사암과 니암에서 생성되는 고생층지역이다.

임도개설에 의한 나지면적의 추정은 동경농공대학 쿠사키연습림과 타카오지역의 개설된 기존임도를 설계도와 현지계측에 통하여 조사하였으며 계측 내용은 산지사면의 경사각, 절취경사각에서 점토·자갈혼합토 지대와 연·경암지대로 구분하고 노면의 폭, 그리고 절성토면의 경사각과 길이를 측정하여 해석에 이용하였다(Fig 1). 또한, 도로개설로 인하여 노출된 나지에서 토사가 유출되는 것으로 사료되어 유출 가능한 입경의 분포를, 동경도 오쿠타마(동경도 奥多摩 소재) 수원림지역내 임도에서 범면토, 봉락토, 유출토(측구내)를 채취하였으며, 동경농공대학 쿠사키연습림에서는 3%의 중단기울기와 좌우측 범면으로부터 토사공급이 고려되지 않는 노선구간을 선택하였다. 채취 지점은 횡단 배수구를 기점으로 중단 5m간격으로 좌우 윤적이 형성된 노면의 12개 지점에서 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 일본토질공학회기준 「토사의 입도시험방법」(T131)의 JIS Z 8801에 규정된 표준망체¹⁹⁾를 사용하여 분류 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산림지역의 나지면적

산악지 부유사의 생산장소는 자연발생적인 계상과 계안의 나지이며, 그 나지면적에서 발생하는 부

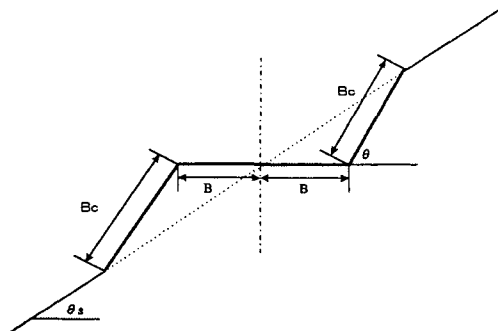


Fig. 1. A diagram of Intersect aspect of Bare area part.

유사는 계상과 계안에 모여져 유량에 영향을 받으며, 유량은 산림면적에 비례하여 증가되는 것으로 사료되며, 나지면적을 산림면적과의 관계표시는 간접적으로 Regime법칙²⁰⁾으로 표현한다. 즉, 흐름이 안정된 계상의 폭(B)과 유량(Q)과의 사이에는 일반적으로 Regime법칙($B = \beta Q^{0.5}$, $\beta = 3.5 \sim 7.0$)이 성립되는데, 산림 내에서 유출하는 계상의 나지면적 Ae를 산림면적 Af와의 관계는 Fig 2 (a, b)와 같다.

나지가 되는 계곡의 면적은 다음과 같이 일정한 관계가 성립된다.

쿠사키(군마현)의 경우

$$Ae = 3.07 \times 10^{-2} Af + 9.31 \times 10^{-2} \quad (1)$$

타카오(동경도)의 경우

$$Ae = 2.03 \times 10^{-2} Af - 1.15 \times 10^{-2} \quad (2)$$

평균적인 나지면적의 발생비율은 전자가 전체 산림면적 58ha중에 약 3.07%이며, 후자는 6.6ha에서 2.03%를 차지한 것으로 나타났다. 나지면적을 발생시키며 집수의 기본이 되는 산림면적(0차 계곡)이 차지하는 면적은 Fig 2의 파선으로 표시된 관계로부터 0.74~2.35ha정도가 된다.

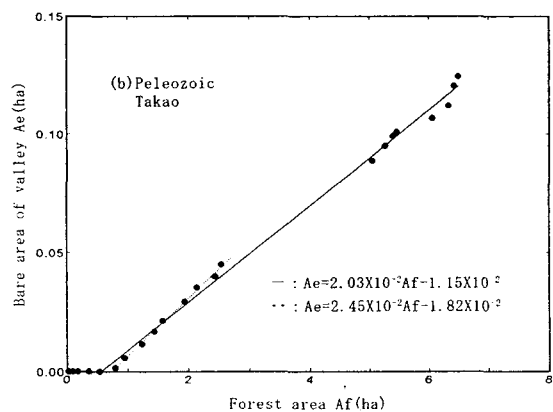
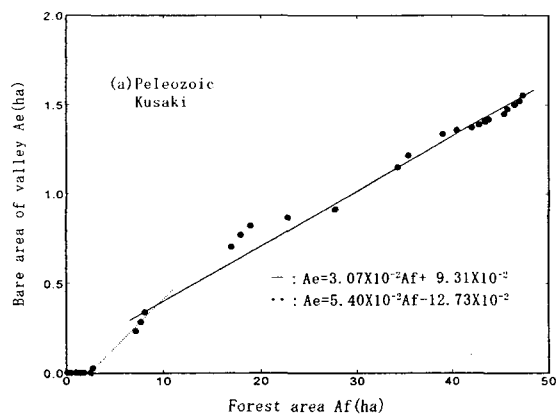


Fig. 2. Size of Mountain stream in Forest valley.

여기서, 나지면적의 증가형태는 대 면적을 대상으로 상세하게 관찰하면 단계적으로 변화하여 일괄적으로 나타나는데, 나지면적은 산림면적이 증가하면 계곡의 면적도 증가하고 그 후 완만하게 증가하는 경향을 지니고 있다. 변화 면적은 약 10ha 전후로 반복하여 발생한다. 여기서 집수의 기본형은 계상이 합류하는 지점에서 나지면적이 급격히 증가되는 것을 의미한다.

이와 같이 나지면적에서 발생하는 부유사는 나지면적에 비례하는 것으로 판단되며, 산림면적이 증가하여도 그 비율은 같은 현상으로 나타내는 것이 된다. 하지만, 10ha 전후의 산림증가에 대한 나지면적의 변화가 Regime법칙에 의하면, 계상폭 B의 변화와 유량의 증가 비율에 비교하여 감소하며 부유사 발생의 증가추세는 유량의 증가에 비하여 적어지고 산림면적이 증가되면 부유사의 농도는 감소되는 것으로 예상된다.

3.2. 임도개설에 의한 나지면적

부유사 발생을 임도개발에 원인을 두면 그곳에서 발생하는 노면과 절성토면의 나지면적을 산지경사로 나타낸 것이 Fig 3이다. 여기서 절취부 사면길이(Bc), 성토부사면길이(Bs), 노면(2B)로 구성되는 임도 내측에 해당되는 나지면적(Ars:m²)를 산지경사각(θ_s : °)과 절취경사각(θ : °)로 나타내면 다음의 식이 된다.

$$Ars=2B\{1+(1-G)\tan\theta_s/(\sin\theta-\cos\theta\cdot\tan\theta_s)\} \quad (3)$$

(3)식에서 G는 부유사의 유출제어 비율을 나타내는 계수이며, 절취와 성토에 있어서 점토, 자갈혼합토부의 식생피복율과 절취부의 연암과 경암이 점유하는 비율이다. 이 관계를 Fig 3으로 나타내면, 데

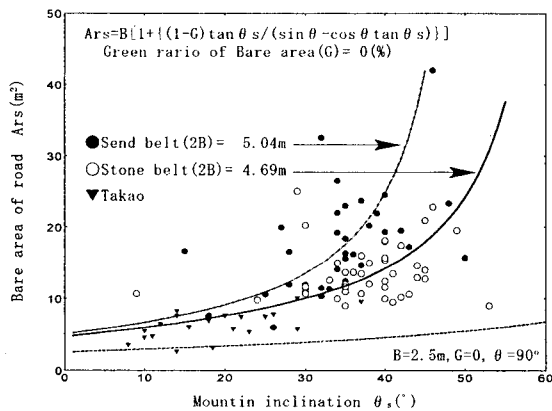


Fig. 3. Relation between Mountain inclination and Road size

이터의 분산이 크지만 나지면적은 산지경사각이 크면 클수록 증가하는 것을 나타내고 있다. 여기서 암석(○표)과 토사(●표)에 분포차가 있어 암질에 비교하면 토질이 큰 나지면적을 발생시키고 있다. Fig 중의 곡선은 (3)식에서 G=0으로 하고 노면폭 B를 절취토질별로 기울기 θ 로 구분하여 평균치 상태를 표시한 것이다. 노면폭 B와 절취토질별 기울기 θ 차의 평균치 분포도는 Fig 4의 a, b와 같이 나타낼 수 있다. 점토, 자갈혼합토사면의 평균 기울기는 52.03 °이며, 연경암 절취사면의 평균 기울기는 63.52 °으로, 이에 대응하는 B의 평균은 각각 5.04m와 4.69m으로 나타났다.

이상에서 기울기에 대한 나지면적의 증가 비율은 기울기 30 °를 경계로 급격히 증가하게 되는데, 실제의 분산은 차량대피소 및 국부적인 사면의 영향이 크게 작용하는 것으로 판단되어 진다.

여기서, 절취법면의 녹화를 실시함으로써 부유사 제어에 미치는 효과를 절취사면길이와 노면길이의 비로 검토하였다.

노면(B), 절취부(Bc)의 나지 비율을 나타낸 것이 Fig 5이다. 이에 대한 관계식은 다음의 (4)식에 의한다.

$$Bc/B=1/[2(1-G)\cos\theta\{(\tan\theta/\tan\theta_s)-1\}] \quad (4)$$

절취기울기 θ 는 점토질과 암질상태를 예상하여 평균치 52.03 °를 사용하였다. 여기서 Bc/B=1의 노면과 절취부의 비율(개설당시 G=0)이 같을 때에 $\theta=36$ °가 되어 기울기가 급하면 법면이 크게 된다.

일반적으로 산악지의 경사는 20%이상이 되기 때문에 어느 정도까지는 나지의 비율을 줄이기 위하여 70%의 녹화율을 달성하여야 하는 것을 의미하며, 이를 고려할 때 나지부의 감소에는 절토부의 녹화를 우선적으로 실시되어야 한다. 또한 G=0.3, 0.5, 0.8로 설정할 때에 녹지의 감소는 Fig 5에서 나타낸 것과 같다.

이상으로 산악지에 일정한 폭의 임도를 개설하기

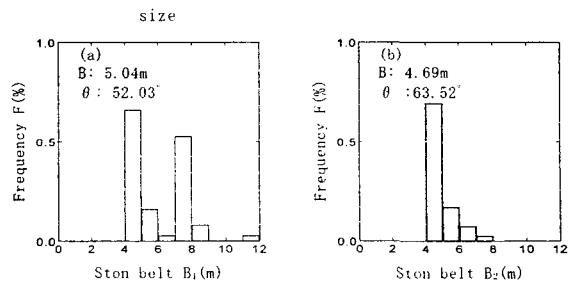


Fig. 4. Frequency of Road surface width in Send belt and Stone belt.

위해서는 사면기울기가 급할수록 나지면적이 크게 된다. 부유사 유출이 임도개설에 의한 나지면적에 비례하는 것을 고려한다면 급경사지(30° 이상)의 임도개설에서는 필요최소한의 개설규모로 하여야한다.

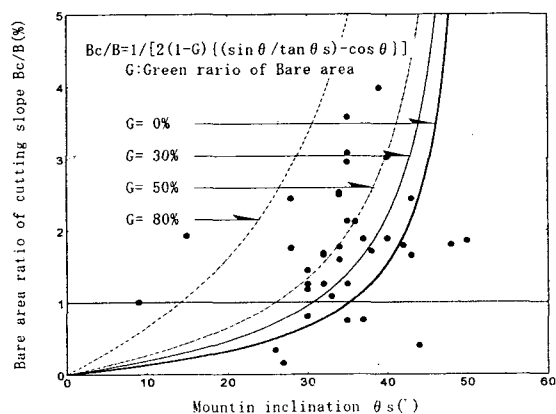


Fig. 5. Mountain inclination and Bare area ratio of Cutting slope.

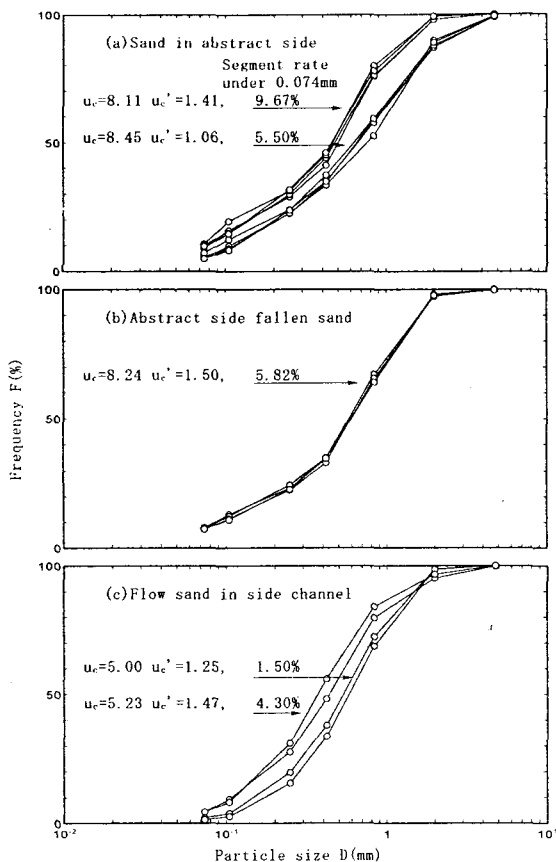


Fig. 6. Change of Particle, size distribution in Sand outflow trend.

예를 들면, 필요 최소한의 도로 폭을 2m, 절취부를 직각($\theta=90^\circ$)으로 절취하는 것으로 한정된 나지면의 증가는 기울기에 대하여 매우 적고 Fig 3에서 나타난 파선처럼 되어 나지의 제어에는 유효한 것으로 판단되어 진다. 하지만 절취부 법면의 녹화에 의한 세립토발생저지는 기대할 수가 없다.

3.3. 부유사 발생가능량

임도개설에 의한 노출나지는 노면과 절성토부가 부유사의 생산원이 되는데, 그에 대한 입경분포와 밀도가 점유하는 세립토의 비율을 기초로 부유사 유출 가능성을 검토하였다.

임내절취 사면내에서 낙하 및 유하상태의 입경가 적곡선에서 생산되는 부유사 발생의 상태를 추정하였을 때에 대략 세립토의 함유율을 입경가적곡선으로 나타내면 Fig 6(a, b, c)이 된다.

입경 0.074mm이하가 차지하는 세립토의 비율은 사면 내, 유하 및 유출의 순서로 작아지는데 이는 미세립자가 우선적으로 유출된 상태를 의미한다.

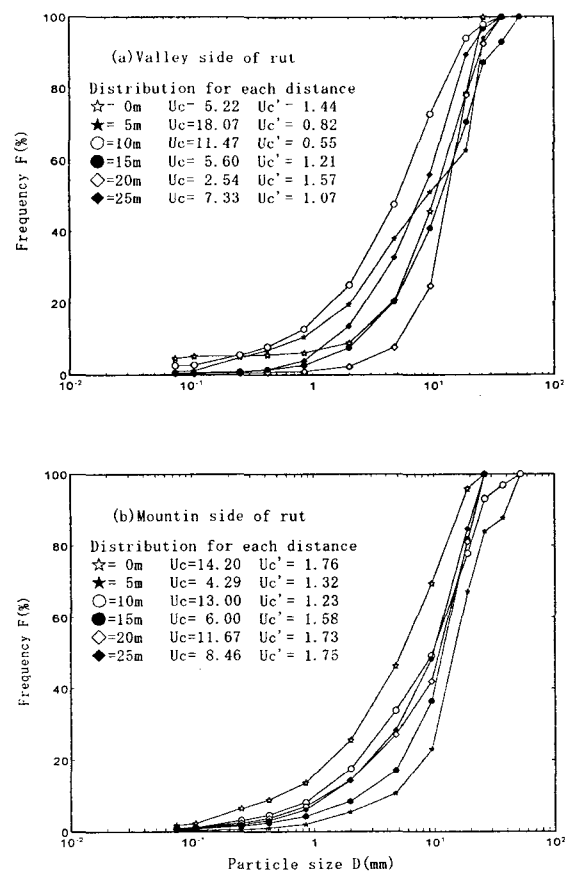


Fig. 7. Particle size for each distance in Gravel road-surface.

이때의 비율은 9.7%~5.8%~2.9%가 되었다. 노면 세립토가 유출되어 그 정도가 점유하는 비율을 나타낸 것이 Fig 7(a, b)이다.

그 결과, 잔존된 세립토는 평균적으로 1.5%(계곡측)와 0.81%(산측)를 차지하였다. 일반적으로 노면 내의 미세립자(0.074mm이하)가 차지하는 비율은 10%전후²¹⁾인데, 본 연구에서 나타난 노면에서의 부유사의 대부분은 유하하고 노면은 조립화되어 있는 것을 의미한다.

여기서, 노반의 건조다짐밀도 rd(g/cm³)와 산지밀도, 미세립자(0.074mm이하)가 전체에서 차지하는 비율을 나타낸 것이 Fig 8이다.

위의 Fig 8에서 산지(●표)와 노반(○표)별로 표시하고 있는데, 노반이 점유하는 미세립자의 비율은 높다하여도 20%이며, 평균으로는 약 10%가 된다.

노면에서 유출할 수 있는 세립토의 가능량을 추정하면 다음과 같다.

임도노반의 평균 다짐밀도는 2.3ton/m³으로 세립토가 차지하는 비율은 10%정도이다. 체적밀도를 표면적 밀도로 환산하면 2단위가 적게 되고, 평균 밀도는 rd=23kg/m³이며 ha로 환산하면 230ton/ha가 된다.

임도노반밀도의 최저한은 1.75ton/m³으로 미세립토의 비율을 20%라 할 때 350ton/ha가 되고, 산지를 최대로 하게 되면 rd=0.53ton/m³, 90%로 하게 되면 450ton/ha이 된다. 이를 비교하여 실제 계측에서 얻어진 선행연구의 예와 비교하면 임도 절취법면에서 발생하는 최대량은 약 0.6ton/ha²²⁾ 또는 작업도의 노면에서 일회 강우로 유출량은 23.1ton/ha²³⁾이 된다. 또한, 도시의 포장도로에서 유출하는 가능 최대량은 7~16kg/ha²⁴⁾으로 나타나 상호 단위가 다

르다.

이러한 결과는 임도 노면에서 유출할 수 있는 최대 가능량은 무진장한 양임을 의미하고 있다.

4. 결 론

산지에서 자연적으로 발생하는 토사의 유출은 하류의 하천과 해안형성에 영향을 주어 인간생활과 밀접한 관계로 유지되어 왔다. 하지만, 자연자체 또는 인위적 행위에 의한 단시간의 지형 변화는 토사 유출에 영향을 미치고, 그 변화에 의하여 하류에의 다양한 변화를 초래하게 된다. 따라서 본 연구에서는 상류지역의 지형적 변화에 따른 토사유출의 예측과 저지를 위하여 검토한 결과 다음과 같다.

- 1) 자연계에서 부유사가 되는 세립토의 발생장소는 지형학적으로는 계곡지형의 발달에 따르며 계류의 발생위치와 일치한다. 여기서, 자연발생적으로 유출하는 나지면적은 전 산림면적의 2~3%정도이며, 계류의 나지면적 형성에 미치는 산림면적은 약 1~2ha정도에 이른다.
- 2) 산악지에서 산림관리에 필요한 임도를 개설할 때에 발생하는 노면, 절취·성토법면의 나지면적은 산지사면이 급할수록 급격히 증가하며, 부유사량은 나지면적에 비례하여 증가하기 때문에 급 경사지에서의 도로폭등은 필요 최소한의 개설규모로 하여야 한다.
- 3) 산악지에서 인위적시설인 임도 또는 작업도의 노면에서 발생하는 유출 가능한 세립토의 양은 최대 200ton/ha으로 추정되지만 노면의 다짐(전압)정도와 강우상태를 고려하면 1회강우의 최대농도에서 최대 62.5kg/ha 정도인 것으로 추정되었다.

감사의 글

본 논문을 수행하는데 있어 자문과 도움을 주신 분께 진심으로 감사드리며, 심사를 맡아 주신 심사위원님들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) O'brien, M.P., 1933, Review of theory of turbulent flow and its relation to sediment transportation: Transactions American Geophysical Union 14, 487-491.
- 2) Hayami, S., 1938, Hydrological studies on the Yangtze river, China II: A theory of silt transportation by running water: Journal of Shanghai Science Institute Section. I, 1(9), 175-198.
- 3) 高山茂美, 1974, 河川地形, 共立出版, 東京, 75-

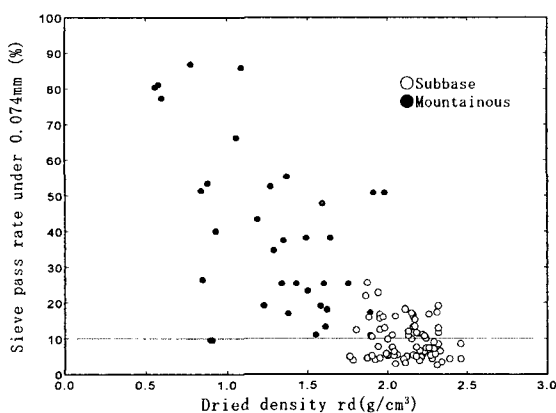


Fig. 8. Dried density and Fine grained soils pass rate under 0.074mm.

- 176pp.
- 4) 河村三郎, 1982, 土砂水理學(1). 森北出版, 東京, 242-311pp.
 - 5) Graf, W.H., 1984, Hydraulics of Sediment Transport. Water Resouces Publication, Michigan, 161-242pp.
 - 6) Eisma, D., 1993, Suspended Matter in the Aquatic Environment: Springer-Verlag, Berlin Heiderberg, 315pp.
 - 7) Foster, I., A. Gurnell, and B. Webb, 1995, Sediment and Water Quarity in River Catchement, John Wiley & Sons, 187-227pp.
 - 8) 倉茂好匡, 1996, 浮流土砂の測定および解析方法(恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村眞貴編; 水文地形學), 古今書院, 東京, 132-142pp.
 - 9) 江頭進治, 芦田和男, 1981, 山地地域における微細土砂の生産場と流出過程に関する研究, 京都大學防災研究所年報 24-B-2, 1-12.
 - 10) 松梨順三郎, 1993, 環境流體汚染, 森北出版, 東京, 5-72pp.
 - 11) 福島義宏, 1982, 林道建設による浮遊土砂濃度の上昇(佐々木功代表: 林道建設が自然植生, 景觀, 土砂生産量に及ぼす影響とその対策に関する研究), 文部省科研(総合研究A), 98-103.
 - 12) Kurashige, Y., 1993b, Mechanism of Suspended Sediment supply to Headwater River-sand its Seasonal Variation in West Central Hokkaido, Japan, The Japanese Journal of Limnology 54-5, 305-315.
 - 13) Packer, P. E., G. F. Christensen, 1964, Guides for controlling sediment from secondary logging roads, (Intermountain Forest and Range Expt. Sta. and Northern Region, U.S. Forest Service. 1964) 「堀高夫, 市原恒一譯, 1972, 林道より流出する土砂防止のためのガイド. 森林利用研究会資料. 82」.
 - 14) Kochenderfer, J. N., 1970, Erosion control on logging roads in the Appalachians(U.S. D.A.Frest Service Reserch Paper NE-158) 「南方康譯(1973)アパラチャ山系における林道の侵蝕防止法. 森林利用研究会資料No.83」.
 - 15) 市原恒一, 堀高夫, 1973, 林道へ流入する降雨水量に関する研究, 第21回 日林中部支論, 67-70.
 - 16) Terajima, T., T. N. Sakamoto, and K. Kitamura, 1996, Subsurface Discharge and Suspended Sediment Yield Interactions in a Valley Head of a Small Forested Watershed, Journal of Forest Research, 3(1), 131- 137.
 - 17) 淺利祐美子, 1997, 熱帯林における降雨時の浮遊砂の發生, 東京農工大學卒論, 1-86.
 - 18) A.Yasir, P., 1997, Impacts of selective logging on stream water of the tropical forest in Indonesia, 東京農工大學修士論文, 1-82.
 - 19) 土質試験法編輯委員會, 1990, 土質の試験方法と解説. 土質工學會, 東京, 54-67pp.
 - 20) 土木學會水理公式改訂委員會, 1985, 水理公式集. 土木學會, 東京, 220-246pp.
 - 21) 峰松浩彦, 1987, 林道の路盤形成に関する研究, 東京農工大學演習林報告, 23, 1-63.
 - 22) 福島義宏, 鈴木雅一, 1982, 田上山地土砂生産流出解析(V-B)報告書, 一若女谷試験地の水文觀測と裸地域における土砂生産移動觀測一, 65-105, 近畿地方建設局琵琶湖工事事務所.
 - 23) 市原恒一, 1987, 作業路の路面上を流れる雨水量の解析, 日林誌, 69(9), 329-342.
 - 24) 中村榮一, 1981, 都市流出水による汚濁流出シミュレーションー降雨時合流式下水道からのCO D流出ー, 土木技術資料, 23(5), 231-236.