

◆ 土砂災害特集 ◆

土石流による鉄骨造、コンクリートブロック造の家屋破壊

山田 孝* 南 哲行**

1. はじめに

平成 11 年 6 月に広島市近郊の住宅開発区域で発生した土砂災害を契機に、土砂災害危険区域での土地利用規制が災害防止を徹底するために重要なとの認識が高まっている。建設省ではそれを受け平成 13 年度の法施行に向け準備を進めている。土地利用を効果的に規制するためには土砂災害危険区域内で想定される被害の程度をあらかじめ定量的に評価する必要がある。これまでの土石流災害の実態によると、家屋の構造(木造、鉄筋コンクリート、ブロック等)によって被害の程度は大きく異なる。例えば、長崎災害ではブロック造の家屋の全壊率が約 60%と高く、鉄筋コンクリート造のそれが低いことが報告されている¹⁾。

水山らは、既往文献によって様々な家屋構造の被災例と強度の整理、鉄筋コンクリート造の家屋の土石流に対する耐力の計算を行った¹⁾。また、水山らは土砂堆積厚、地盤勾配、氾濫開始点からの距離と主に木造家屋の被災程度との関係を調べ、土石流のエネルギーを表す指標と家屋の被災度に良い相関があることを明らかにした²⁾。石川は、昭和 63 年広島県加計町での土石流災害での木造家屋の被災調査と二次元の浅水流モデルに基づく土石流氾濫数値シミュレーションによって流体力を計算し、流体力が 9.8~98kN/mにおいて家屋全壊が発生している、98kN/m以上になると全壊の比率が著しく高くなる、という知見を得た³⁾。また、土石流を対象としたものではないが、Perla は雪崩の流体力が 29.4kN/m 以上であるときに木造家屋が全壊されることを報告している⁴⁾。

以上のように木造家屋については破壊強度の情報がある程度得られているが、鉄骨造、コンクリートブロック造の家屋のそれについては情報が少ない。特に被災地の鉄骨造、コンクリートブロック造の家屋の変形及び破壊状況から土石流の

エネルギーを推定し、それらの破壊に要する土石流の力を求めた事例はない。都市近郊の土石流危険渓流の下流域には、木造家屋のみならず鉄骨造、コンクリートブロック造の家屋も多く見られるため、早急にそれらの土石流に対する強度を評価し、補強や場合によっては移転等の措置を施す必要があると考えられる。

本研究は、平成 9 年 7 月 10 日に鹿児島県出水市境町針原川で発生した土石流により被災した鉄骨造、コンクリートブロック造の家屋の破壊実態を調べ、それらの破壊に要する土石流の力を推定したものである。

2. 土石流の氾濫・堆積状況⁵⁾

平成 9 年 7 月 10 日に鹿児島県出水市境町針原川の中流域の深層崩壊(土砂量: 約 16 万 m³)により発生した土石流は完成間際の針原川砂防ダムの右岸袖部等を破壊するとともに、その下流域で氾濫して(堆積土砂量: 約 8 万 m³)、死者 21 名、重傷者 13 名、に及ぶ壊滅的な土砂災害をもたらした(写真-1)。

砂防ダム下流域における土石流の堆積区域(図-1)には土石流本体の堆積物を示す舌状の平面形態を呈する 4 つの土石流ロープ(A~D)が認められる。それらの堆積厚は約 2~3m 程度であり、



写真-1 平成 9 年 7 月 11 日に鹿児島県出水市境町針原川で発生した土石流災害(中日本航空株式会社撮影: 平成 9 年 7 月 11 日)(写真中の家屋①、家屋②は本論で調査の対象とした被害家屋)

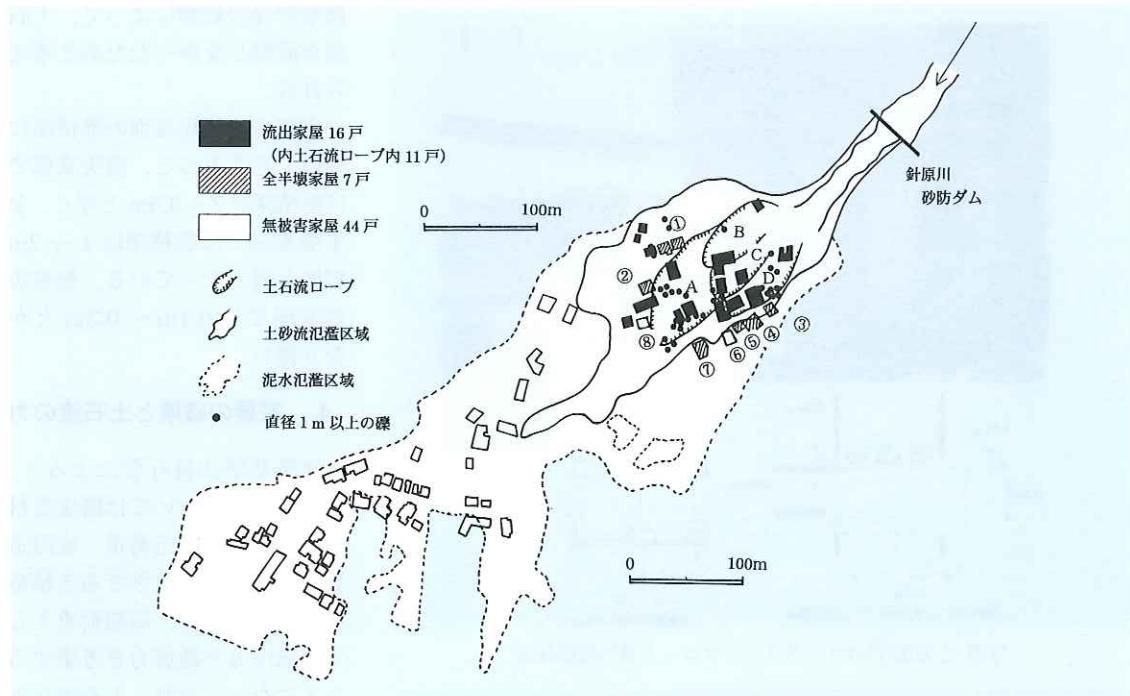


図-1 土石流の堆積地域と家屋の被害状況

直径1~3m程度の礫がロープの先端や縁辺部に堆積している。土石流ロープ下流の土砂流堆積区域には数10cm大の礫や砂が1m内の厚さで堆積しており、土石流の後続流が土石流ロープの一部を侵食しながら流下・堆積したと考えられる。土砂流堆積区域下流の泥水氾濫区域には、砂や粘土・シルトが数mm~数cm程度と薄く堆積している。

3. 土石流による被災家屋の分布

土石流による流失家屋、全・半壊家屋、氾濫区域内での被害を受けていない家屋の分布を、地形図(スケール1:2,500)、被災前後の空中写真および現地調査によって調べた。さらに、現地調査より被災を受けて残っている家屋についてその構造を調べるとともに、壁や梁等の損傷に關係したと思われる礫径、土砂の堆積深を計測した。図-1に被災家屋の分布状況を示す。家屋の被災程度は「流失」(家屋が基礎からなくなっているもの)、「全半壊」(倒壊したため修復が不可能なもの及び損傷が大きく修復が非常に困難なもの)、「無被害」(泥水の浸入はあるものの建物の構造に損傷のないもの)の3段階に便宜的に分類した(表-1)。流失家屋は16戸、全半壊は7戸、無被害は44戸である。土

表-1 被害家屋の分類(数字は家屋の件数)

微地形区分	流失	全半壊	無被害
ロープA	3	0	0
ロープB	2	0	0
ロープC	2	0	0
ロープD	4	0	0
土石流区域	5	6	1
泥水氾濫区域	0	1	43
合計	16	7	44

石流本体の堆積区域であるロープでは11戸の家屋が流出し、土砂流氾濫区域では流出家屋と全半壊数はほぼ半数となっている。

全半壊家屋として残っている家屋のうち、土石流ロープAの右岸側に位置する家屋①は、針原川砂防ダムから約210m下流(勾配:約4度)に建てられた2階建てのコンクリートブロック造であり、1階部を土石流が流下し、土砂が堆積した(写真-2)。また、土石流ロープAの先端付近に位置する家屋②は針原川砂防ダムから約250m下流(勾配:約4度)に建てられた鉄骨造であり、1階部を土石流が流下し、2階にも一部土砂が流入した(写真-3)。壁面などの損傷は見られるが、原形はとどめている。家屋⑧は家屋②と同様の鉄骨造であるがほとんど損傷はなかった。家屋前方の

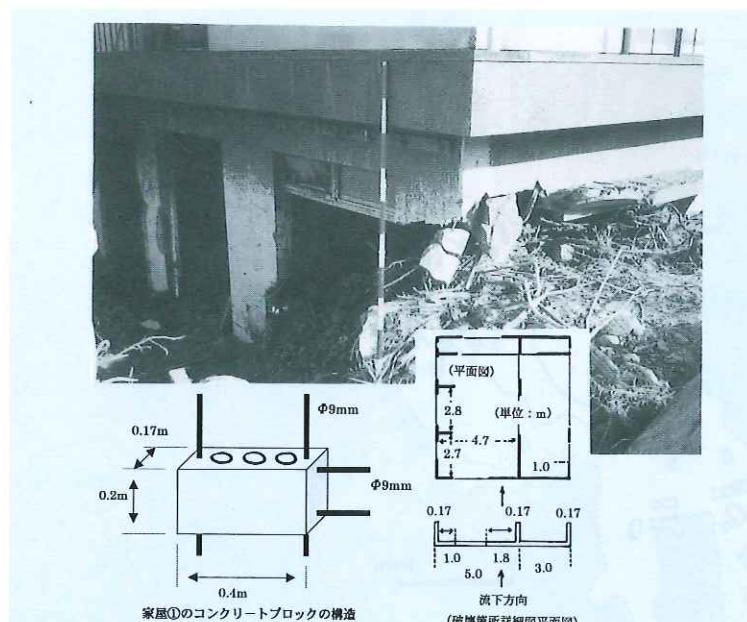


写真-2 家屋①のコンクリートブロック壁の破壊状況

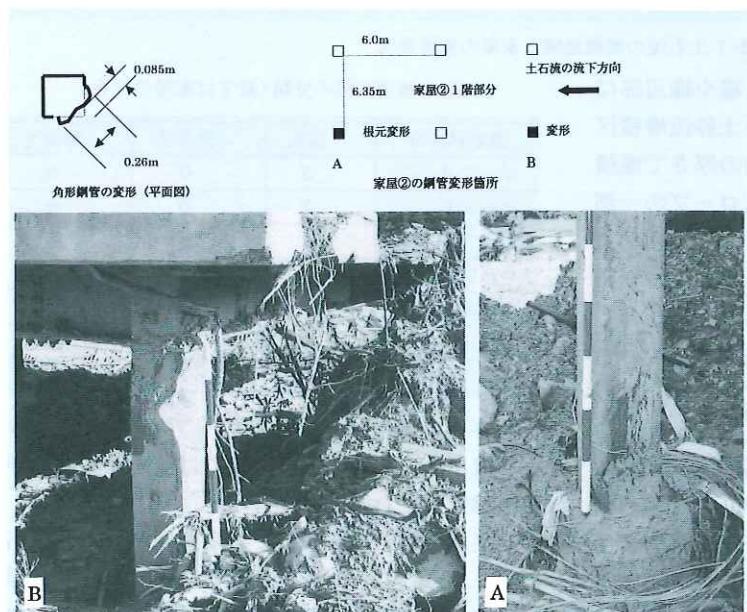


写真-3 家屋②の角形鋼管の変形状況

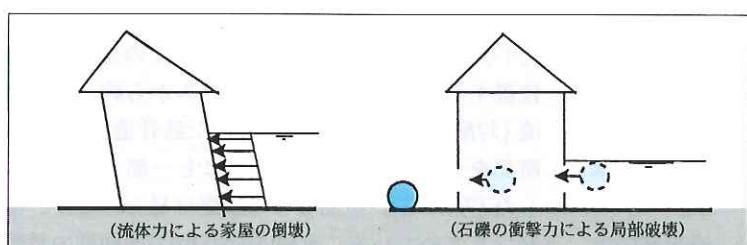


図-2 土石流の流体力と衝撃力の概念

微地形等の影響によって、土石流が直撃しなかったためと考えられる。

家屋の被災程度別の堆積深について見てみると、流失家屋では堆積深が2~3.5mと厚く、全半壊家屋では堆積深は1~2m程度と薄くなっている。無被害の家屋では0.1m~0.3mとかなり薄い。

4. 家屋の破壊と土石流の力

建築基準法施行令によると、家屋の設計においては構成部材の重さである固定荷重、家財道具・居住者等の重さである積載荷重、積雪荷重、短期荷重としての風圧力と地震力を考慮することになっており、土石流は外力として対象としていない。

土石流による力はこれまでの研究成果によると流体力と衝撃力とに区分される⁶⁾(図-2)。流体力は土石流が家屋の壁面に面的にかつ連続的に作用し、家屋をなぎ倒そうとする力である。これに対して衝撃力は土石流中の礫が家屋の壁面などに局所的に衝突する場合に発生する力であり、家屋と礫の動的相互作用により瞬間的に発生する集中荷重として求められる。この集中荷重は礫の運動エネルギーと家屋の破壊変形までに受ける仕事量が等値であるとして求められる。

以下に、土石流による破壊痕跡が残存し、土石流ロープと土砂流堆積区域との境界付近に位置する家屋①、②を対象として、鉄骨造及びコンクリートブロック造りの家屋の破壊をもたらした土石流の力を算定する。今回、算出される土石流の力は

d' : 壁厚 (17cm) σs : 鉄筋の破壊強度 ($2,400 \text{kg/cm}^2$)

上記の式 (6), (7) から破壊時の応力と流体力の関係式を求める下記の式 (8) が得られる。

$$F = \frac{7As \cdot d' \cdot \sigma s}{\ell^2} \quad (8)$$

式 (5), (8) から土石流の流速を求める式 (9) が得られる。

$$V = \sqrt{\frac{7g \cdot As \cdot d' \cdot \sigma s}{\rho \cdot h \cdot \ell^2}} \quad (9)$$

土石流の流動深を堆積深とみなして $h=1.5 \text{m}$ とすると、土石流の流速は 2.1m/s (ちなみに土石流先端部の粗度係数を 0.1 として Manning 式により土石流の流速を求める約 2.7m/s となり、上記の方法で求めた値と近似する)、流体力は 58.8kN/m と計算される。

一方、2階建て鉄筋コンクリート造りの家屋 (大きさ: $6 \text{m} \times 6 \text{m}$ 、重量: 846.7kN 、ベースシャ係数 $C_0: 1.0$ 、構造特性係数 $D_s: 0.55$) の1階部分全体に土石流が作用した場合、直接基礎を仮定し底面での土との摩擦 (摩擦係数: 0.6 程度) で家屋全体が破壊される圧力は、 47kN/m^2 と計算された (建設省建築研究所試算)。土石流の流動深を 1.5m とすると、この家屋全体が破壊される限界水平力は約 68.6kN/m となり、実際の家屋の破壊状況から求めた上記の値 (58.8kN/m) に近い。

次に、礫が先に求めた土石流の流速と同じ流速 (2.1m/s) でこのコンクリートブロック壁に衝突した場合を想定する。礫の運動エネルギーはコンクリートブロック壁の変形による弾性エネルギーとして蓄えられると考える。コンクリートブロック壁は、その両端が柱にヒンジで固定され、壁の中央部に礫の衝突による集中荷重が作用すると仮定した。礫の衝突時の運動エネルギー (E_e) は、前述の式 (3) で求めることができる。壁に蓄えられる弾性エネルギー (E_i) (変形による仕事量) は式 (10) で表される。

$$E_i = \frac{1}{2} P \delta = \frac{P^2 \ell^3}{96EI} \quad (10)$$

ここに、

 ℓ : 壁の幅 (3.085m) I : 壁の断面二次モーメント (4.09E-04) m^4) E : 壁の弾性係数 ($140,000 \text{kg/cm}^2$)

$E_e = Ei$ とすると、礫が壁に及ぼす衝撃力 (P) は式 (11) のようになる。

$$P = 4V \sqrt{\frac{3WEI}{g\ell^3}} \quad (11)$$

ここに、

 W : 矽の重量 (t)

壁に生ずる最大曲げモーメント (M_{\max})、最大曲げ応力 (σ_{\max}) は各々式 (12), (13) で求められる。

$$M_{\max} = \frac{P\ell}{4} \quad (12)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{S} \quad (13)$$

ここに、

 S : 壁の断面係数 (4.82E-03 m^3)

鉄筋にかかる最大引張応力 (σs) は式 (14) で求まる。

$$\sigma s = \frac{8M}{7As \cdot d'} \quad (14)$$

ここに、

 As : 鉄筋量 (3.33E-04) d' : 壁厚

表-2 に計算結果を示す。コンクリートの破壊曲げ応力度は 21.4N/cm^2 、鉄筋の引張破壊応力度を 244.9N/cm^2 とすると、直径 20cm 以上の礫が衝突した場合は、礫の衝撃力は壁の破壊応力度を超過しこのコンクリートブロック壁は破壊されると考えられる。ただし、実際にはコンクリートブロック造りの家屋は不静定構造であるので礫の衝突箇所付近は局所的な破壊に留まり、家屋全体の倒壊は生じないものと考えられる。

以上から、流体力が 58.8kN/m 未満となる区域では鉄筋コンクリートブロック造りの家屋 (ただし、今回の被災家屋と同じ構造のもの) の壁は全面的には破壊されないと考えられる。ただし、礫の衝撃力により壁が局所的に破壊され、そこから土砂が 1 階に流入する危険はある。

5. おわりに

鹿児島県出水市針原川で発生した土石流による家屋の被災実態を調べ、鉄骨造りの家屋ならびに鉄筋コンクリート造りの家屋の破壊をもたらす

土石流本体部がかなりの速度で流下している場合のものではなく、土石流本体部がまさに堆積しロープを形成する直前の場合のものである。

4.1 鉄骨造の家屋の破壊をもたらした土石流衝撃力

鉄骨造の家屋②の1階部分が破壊され、その柱の鉄骨に大きな変形が発生している(写真-3)。柱は角形鋼管柱による構造(写真-3)であり、上流側鋼管柱と下流側鋼管柱の2本が大きく変形している。鋼管の厚さは9mm、形状は25cm×25cmであり、最大変形量は上流側鋼管で8.5cm、下流側鋼管で6cmであった。家屋②の鋼管を変形させた礫については、現地では鋼管と接している礫が存在せず特定できなかったため、鋼管から1m周辺内に堆積している最大径の礫の衝突により鋼管が変形したとみなした。上流側鋼管ならびに下流側鋼管に衝突したと考えられる礫の平均径は、各々、0.9m、1.2mである。これらの礫が土石流と同じ速度で鋼管に衝突してそれを変形させたと仮定した。さらに、鋼管柱は根本、上端の端部において変形し、部材全体の曲げ変形は生じていないため、局部変形のみが生じたとして土石流衝撃力を算出した。

角形鋼管の集中荷重による変形式は現時点では得られていないので、角形鋼管を内接する半径を持つ円形鋼管として、式(1)から変形と力の関係を求めた。さらに、この変形するまでの仕事量と礫の運動エネルギーが等しいとして式(4)を誘導し、土石流の流速を逆算した。

$$F = 1/4 \cdot K \cdot \sigma_y \cdot d^2 \cdot (\delta/D)^{0.5} \quad (1)$$

$$Ed = 1/6 \cdot K \cdot \sigma_y \cdot d^2 \cdot (\delta^3/D)^{0.5} \quad (2)$$

$$Ee = 1/2 \cdot m \cdot V^2 \quad (3)$$

ここに、

F ：作用荷重

Ed ：鋼管が変形する際の吸収エネルギー

K ：定数(150)

σ_y ：鋼管の降伏応力(23,536N/cm²)

d ：鋼管厚(0.009m)

δ ：鋼管の変形量

D ：鋼管直径(0.25m)

m ：礫の質量($4/3 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \gamma/g$)

Ee ：礫の運動エネルギー

V ：礫の速度

r ：礫の半径

γ ：礫の単位体積重量(2.6t/m³)

$$V = \{1/3m \cdot K \cdot \sigma_y \cdot d^2 \cdot (\delta^2/D)^{0.5}\}^{0.5} \quad (4)$$

式(1)、(2)、(3)に家屋②における鋼管の変形量($\delta=0.085\text{m}$ (上流側鋼管)、 0.06m (下流側鋼管))、衝突したと思われる礫の平均径(0.9m(上流側)、1.2m(下流側))を代入すると、上流側鋼管への礫の衝突速度 $V=6.9\text{m/s}$ 、衝撃力 $F=42.5\text{t}$ 、下流側鋼管への礫の衝突速度 $V=3.5\text{m/s}$ 、衝撃力 $F=35.7\text{t}$ 、が得られる。

4.2 コンクリートブロック造の家屋の破壊をもたらした土石流の流体力ならびに衝撃力

家屋①の上流側のブロック壁(壁厚 $d'=17\text{cm}$ 、 $\phi=9\text{mm}$ の鉄筋が20cm間隔に挿入されていた)は全面に渡って破壊された(写真-2)。下流側のブロック壁は破壊されずに残存している。上流側のブロック壁の破壊形態から、主に土石流の流体力によって破壊されたものと考えることができる。土石流の流体力は下記の式(5)で求められる。

$$F = \frac{\rho}{g} h V^2 \quad (5)$$

ここに、

ρ ：土石流の密度

h ：土石流の流動深

V ：流速

F ：単位幅あたりの流体力

コンクリートブロック壁は曲げによって破壊されたと仮定し、一方向鉄筋コンクリート板からなる単純梁とみなすと、流体力によるコンクリート板の曲げモーメント(M)は、以下の式(6)で求められる。

$$M = \frac{1}{8} F \ell^2 \quad (6)$$

ここに、

ℓ ：支間長(308.5cm)

F ：流体力

とする。

これに対し、一方向鉄筋コンクリート板の抵抗モーメント(Mr)は、以下の式(7)で求められる。

$$Mr = \frac{7}{8} As \cdot d' \cdot \sigma s \quad (7)$$

ここに、

As ：鉄筋量(3.325cm²)

表-2 磯の衝撃力とコンクリートブロック壁の破壊応力度

磯の直径 ϕ m	磯の重量 W t	衝撃力 P t	最大曲げモーメント M_{\max} t·m	最大曲げ応力 σ_{\max} N/cm ²	鉄筋の引張応力度 σ_s N/cm ²
0.1	0.001	0.76	0.58	1.2	121
0.2	0.011	2.14	1.65	3.5	341
0.3	0.037	3.94	3.04	6.4	626
0.4	0.087	6.06	4.67	9.8	965
0.5	0.170	8.47	6.53	13.9	1,348
0.6	0.294	11.14	8.59	18.2	1,772
0.7	0.467	14.03	10.82	22.9	1,233
0.8	0.697	17.14	13.22	28.1	2,728
0.9	0.992	20.46	15.78	33.5	3,255
1.0	1.361	23.96	18.48	39.2	3,812

土石流の力についての知見を得た。

土石流氾濫区域での流体力の分布は、二次元氾濫シミュレーションによって各メッシュごとに計算できるので、今回得た知見を用いれば家屋の破壊が生じる区域をある程度の精度で予測することが可能となる。

今後とも家屋の被災実態を詳細に調べ、家屋の破壊強度を踏まえた高精度の土石流危険区域設定手法の開発に結びつけていきたい。

最後に針原川での現地調査を行うにあたり様々な便宜を図って頂いた鹿児島県土木部砂防課、出水土木事務所の関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水山高久、下東久巳：土石流の堆積と家屋の破壊、土木技術資料、Vol.26, No.7, pp.22-27, 1984.
- 2) 水山高久、石川芳治：土石流による家屋の被災度、砂防学会誌、Vol.42, No.1, pp.22-25, 1989.
- 3) 石川芳治：山地小渓流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究、京都大学学位論文、1989
- 4) Perla, R. and Mrtinelli, Jr., M.: Avalanche Handbook. Agriculture Handbook 489. U. S. Dept. of Agriculture, Forest Service, pp.238, 1976.
- 5) 山田孝、南哲行、小山内信智、水野秀明：1997年7月10日に鹿児島県針原川で深層崩壊に起因して発生した土石流の流下・堆積実態、砂防学会誌、Vol.51, No.1, pp.46-54, 1998.
- 6) 建設省河川局砂防部砂防課：土石流対策技術指針(案), 1998.

山田 孝*



建設省土木研究所砂防部
砂防研究室主任研究員、
農博
Dr.Takashi YAMADA

南 哲行**



建設省河川局砂防部
砂防課砂防事業調整官
(前 建設省土木研究所
砂防部砂防研究室長)
Noriyuki MINAMI