

ピナツボ火山東部河川流域における 大規模土砂移動現象と対策

Sedimentation Responses to Large Volumes of Volcanic Deposits
in the Eastern River Basin of Mt. Pinatubo, Philippines

井上美公¹ ・ 広瀬典昭²
Yoshikimi INOUE and Noriaki HIROSE

¹ 正会員 日本工営(株) 国際事業部 ピナツボ開発事務所長 (〒102-0083 東京都千代田区麹町 2-5)

² フェロー会員 日本工営(株) 事業開発本部長 (〒102-8539 東京都千代田区麹町 5-4)

On 15 June 1991, Mt. Pinatubo awoke with a climactic eruption after 500 years of dormancy. The eruption produced remarkable volume of ashfall deposits and pyroclastic flow deposits over the surrounding areas. The volume of pyroclastic flow deposits in the slope of Mt. Pinatubo was estimated at 6.7 billion cubic meters with deposits as much as 200 meters in thickness. Lahar generated by heavy rain falling on pyroclastic flow deposits poses grave danger in the low-lying areas. This paper describes the process of large-scale sediment transport in alluvial fan located in the eastern river basin of Mt. Pinatubo, which have been observed during eight years after the eruption.

Keywords : Mt. Pinatubo, Pyroclastic Flow, Lahar, Sediment Control Structure

1 はじめに

フィリピン国ルソン島中部のピナツボ火山は、1991年6月に今世紀世界最大規模の噴火を起こし、近隣諸国にまで大量の火山灰を降下させた。1991年6月15日の最大噴火時には、ピナツボ火山の山体は山頂部400mほどが崩壊し、高温の火砕流がピナツボ山周囲の山麓部に厚く堆積するとともに、大量の火山灰が火山周辺に降下堆積した。

火砕流堆積物の総量は67億 m^3 と推定され、山頂付近にて火砕流堆積物堆積深は200m以上にも達し、ピナツボ東部河川上流域では流域界が頻繁に変化したことが判明している¹⁾。火砕流堆積物の温度は噴火後数年を経ても摂氏300度程度と推定され、降雨時には高温の泥流(ラハール)となって下流域に流下・堆積した(図1)。また、1993年10月に火砕流堆積域で起こった大規模二次爆発(地下水あるいは伏流水が高温の火砕流堆積物と接触しておこる水蒸気爆発)による河川争奪のため、東部河川流域の一つであるパング・ボトレロ川の流域面積は増加し、それ以降、パング・ボトレロ川で甚大な泥流災害が発生してきた²⁾。

このピナツボ火山噴火規模は火砕流堆積物の比較から、雲仙普賢岳の約50倍と推定されている。

ここでは、ピナツボ火山噴火災害の発生プロセスを報告するとともに、ピナツボ火山東部に位置するパング・ボトレロ川流域における大規模土砂移動現象、泥流制御施設の現状と今後の土砂堆積を推定した。

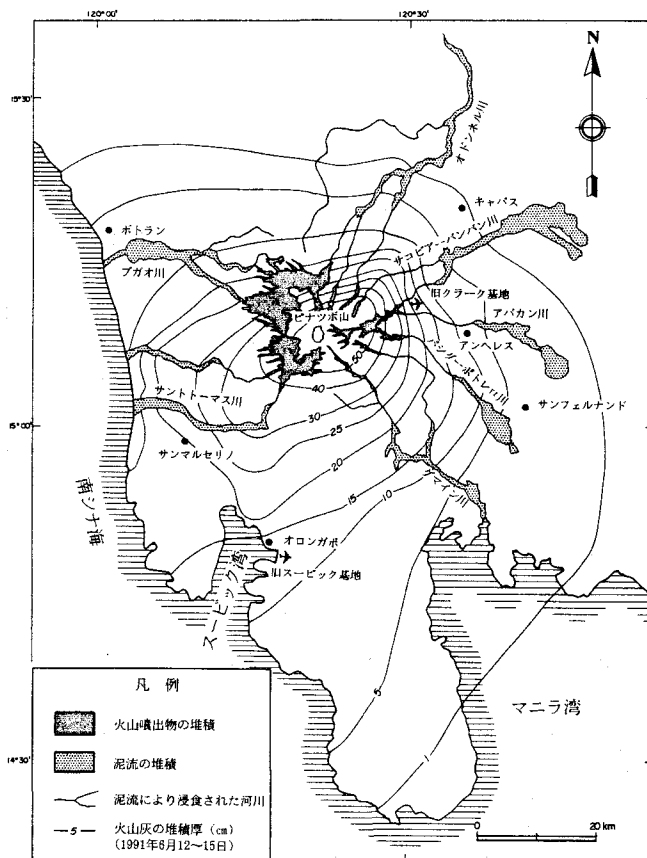


図1 ピナツボ火山における噴火災害図(PHIVOLCS)

2 ピナツボ火山噴火災害の発生プロセス

ピナツボ火山噴火災害の発生プロセスを、東部斜面のバシグ・ポトレロ川流域を例として以下にまとめた。

(1) 一次災害(1991)

ピナツボ火山噴火により、半径50kmの範囲には大量の火山灰が降下した。一方、総量67億m³におよぶ火砕流堆積物は、噴火直後には摂氏700度で堆積深も200mであったため、山腹の樹木や生物を壊滅させた。

(2) 初期の二次災害(1991～1994)

火砕流堆積物の内部は、噴火後数年を経ても摂氏300度程度と高温のままであり、330回(1992～1994)に及ぶ2次爆発を起こすことにより、固結しはじめた火砕流堆積物を粉砕した。この火砕流堆積物が泥流の生産源となり、1991年から1993年にかけて、降雨のたびに扇頂部の急傾斜扇状地から扇中央部の緩傾斜扇状地にかけて堆積した。堆積深は最大15m以上にも及んだ。

特に、1993年10月の河川争奪以降、バシグ・ポトレロ川上流域の火砕流堆積物(泥流生産源)はおよそ80%増加し、それまでの3.4億m³(1993)から6.1億m³(1994)となり³⁾、さらなる泥流氾濫をもたらした(図2)。

この一連の泥流氾濫による避難世帯数はバシグ・ポトレロ川の位置するパンパンガ州で37千世帯に及ぶ。

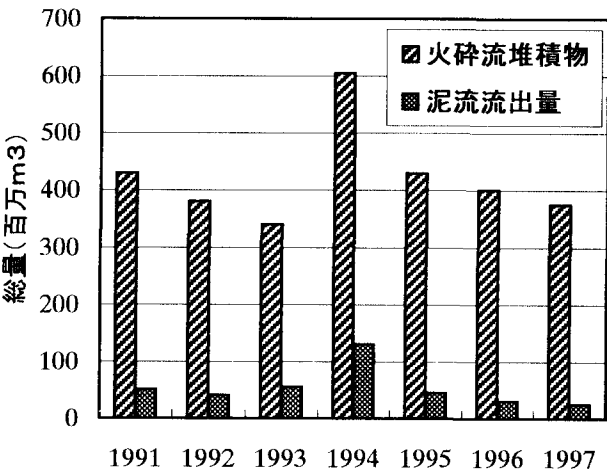


図2 火砕流堆積物量と泥流流出量の経年変化

(3) 中期の二次災害(1995以降)

1995年以降、二次爆発の規模・頻度が減少し、火砕流堆積物の固結が促進された。同時に、最上流からの泥流流出の規模・頻度ともに減少し、扇頂部から扇中央部にかけての泥流堆積物の二次侵食が顕著となった。泥流堆積物は、泥流あるいは高濃度の浮遊砂流となって扇端部へ二次移動した。

その後、微少な土砂粒子はさらに下流へ流下し、河口部デルタ地帯へ流出している。この結果、河床上昇・河道閉塞により河道通水能力は減少し、下流域へ洪水被害をもたらしている。現在、この現象による長期に亘る浸水被害が社会問題化している。

3 泥流(ラハール)の堆積過程と河道形成

ピナツボ火山周辺の泥流は非常に粘性の高い固・液混相流であり、固体成分と液体成分とが、あたかも一種の連続体であるような運動をしている⁴⁾。容積土砂濃度60～70%、土粒子の平均粒径0.5mm、単位堆積重量2.1ton/m³である。現地観測によれば、バシグ・ポトレロ川流域における扇状地内の土砂移動現象には次のような特徴をあげることができる。

(1) ロープとその中心線を流れる凹形水路の形成

泥流先端部の堆積形態は平面的には舌状で、立体的には低い鼻型である。極めて特徴的なのは、中央の最頂部に顕著な凹形水路を形成し、鼻型先端部で左右いずれかに振れて泥流は消失する。

(2) 流れの遡上と流れの分派

ロープが扇面上を直進し、その先端が停止すると凹形水路を流下してきた河床砂は停止し、この現象が上流に遡上する。ロープ中心線を土砂が遡上した際に、扇面と比高の小さくなった地点で流れが側方に溢れ、新たな河道が形成される。

(3) 泥流堆積域での河道蛇行現象

扇状地の蛇行現象については種々報告があるが⁵⁾、ここでは1997年3月の河道状況に基づいて視覚的に包絡線を描くことにより、今後の河道計画のマクロ的な目安とした(図3)。扇中央部(平均河床勾配1/170)において、河道変遷の収束はこの包絡線がつくる蛇行河道と仮定すれば、将来の蛇行幅は現況の川幅の3倍程度となり、包絡線間の距離を蛇行幅(W)とすると蛇行波長(L)はL=15・W程度となる。

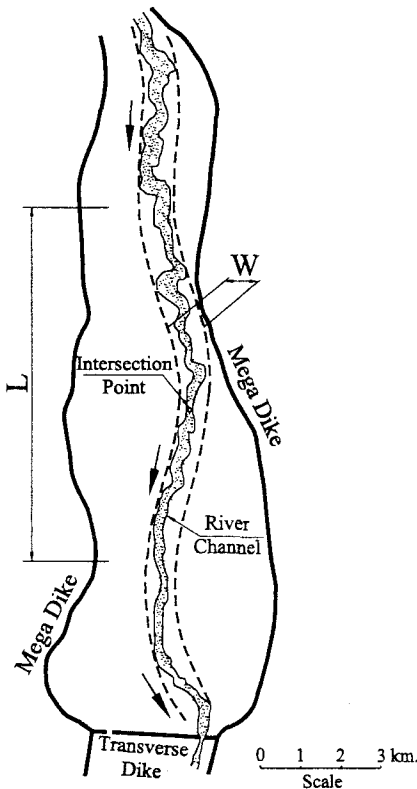


図3 泥流堆積域での河道蛇行状況(1997年3月)

4 パシグ・ポトレロ川流域における施設配置

1993年10月の河川争奪以来、フィリピン政府公共事業道路省(DPWH)はパシグ・ポトレロ川流域において一線堤(Primary Dike)の延長(1991)、二線堤(Secondary Dike :1993~1994)を建設したが、泥流堆積により満砂状態となり、三線堤(Tertiary Dike :1994~1995)、また1996年にはサンドポケット総面積45km²、高さ約12mのメガダイク(Mega Dike)を建設した⁶⁾(図4)。いずれも自国資金にて建設されたものである。

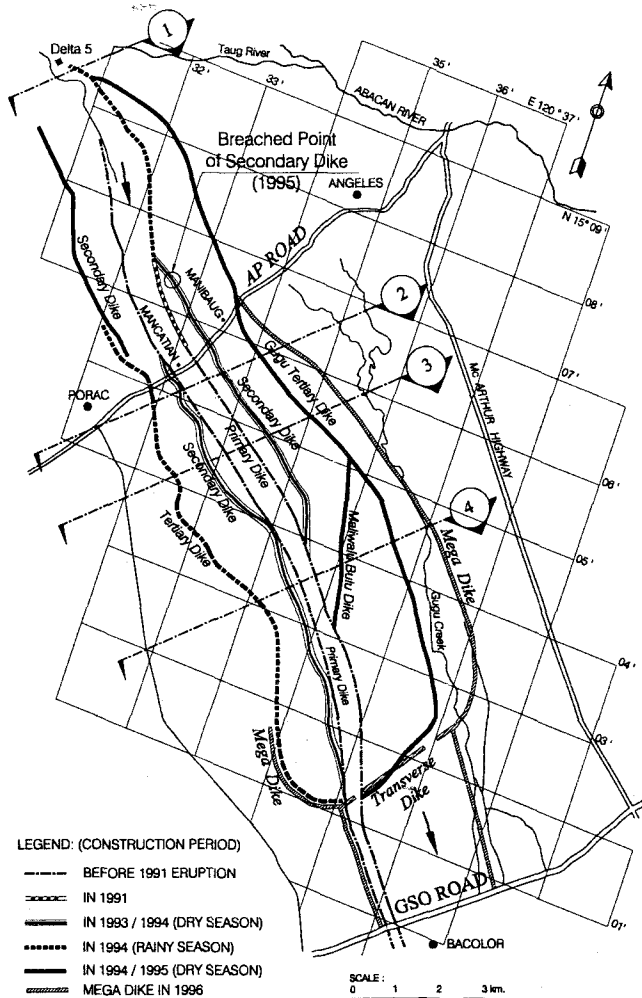


図4 泥流・洪水制御施設配置図

5 土砂移動現象と堤防建設の推移

扇状地の土砂移動現象を理解する上での微地形要素に Intersection Point (河床勾配と扇状地表面勾配の交差点: 以下、IPと称す)がある^{7) 8)}。扇状地の土砂氾濫現象のステージはIPの移動に着目し3タイプに分類されている。

- Type① : 上流からの土砂供給が活発であり、扇頂部から扇端部まで河床が扇面より高い。
- Type② : 流出土砂量が減少し、扇頂部では河道の下刻が進み、河床が扇中部で扇面と交わる。
- Type③ : 扇面と河床の比高は大きくなり、IPは扇端部へ移動し、ついに両者は交わらない。

パシグ・ポトレロ川流域での土砂氾濫現象においても、IPの移動(図5)に着目し、堤防建設の推移と照合した。

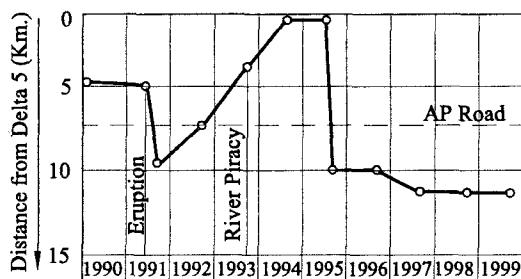


図5 インターセクションポイントの経年変化図

(1) 噴火前(1991年以前):Type②

噴火前には、IPは Angeles-Porac 道路(以下、AP道路と称す)より約2km上流にあり、右岸側への土砂氾濫を懸念して、右岸側はIP上流から最下流まで、左岸側ではAP道路から最下流まで一線堤が建設されていた。

(2) 噴火直後:Type②

噴火直後は、上流の一線堤で20mおよびAP道路付近で15mの河床低下、また扇端部の国道7号線(西部方面への主要国道:以下、GSO道路と称す)付近で1~3mの堆積をみている。噴火直後にこのような侵食が進行したのは、上流山地部を覆った火山灰の固結により一時的に洪水流出率が增大するとともに、不安定な火山灰は泥流となって流下、扇中部の河道を侵食しながら、50km 下流まで氾濫、堆積したためと考えられる。IPに着目すると、噴火前より河床低下が発生したため、IPはAP道路より下流2.5km地点まで前進した。

(3) 1992年~1993年(河川争奪前):Type②

火砕流堆積域から降雨のたびに泥流が氾濫した。IPは徐々に上流へ推移し、1993年11月にはAP道路より3km上流地点まで後退した。AP道路付近では5m程度の泥流堆積が発生し、1993から1994年にかけて高さ6mの二線堤が建設された。

(4) 1994年(河川争奪以降):Type②からType①へ

河川争奪以後、大量の泥流流出により山地狭窄部で40m、扇頂部で20mの河床上昇が発生し、扇状地はType②からType①へ逆行した。泥流堆積の横断形状はAP道路付近で二線堤に囲まれた蒲鉾状となり、扇状地両岸にて高さ7mの三線堤の建設が開始された。

(5) 1995年:Type①からType②へ

扇頂部では8月初旬より河床低下傾向となり、8月中旬には左岸部二線堤の越流破堤により、河床低下はAP道路下流3kmまで進んだ。この一ヶ月間に、IPが一気に扇頂部から扇中部まで前進した。

(6) 1996年以降:Type②

IPは1995年と同様にAP道路下流3kmにあり、下流での土砂氾濫が懸念されたため、横堤(Transverse Dike)3kmを含む、高さ12m、総延長29kmのメガダイクが1996年に建設された。横堤により上流での土砂捕捉が促進されたため、1996年以降、下流部での大規模土砂・洪水氾濫は起こっていない。しかしながら、横堤より上流での土砂捕捉により、IPは1995年時とほぼ同地点に位置している。扇状地の土砂移動現象という点からは、Type③への移行を阻害する要因となっている。

6 扇頂部(Delta 5 地点)における河道断面変化

扇頂部(Delta 5 地点)における一連の土砂移動現象の中で、1995年雨期には河床上昇から河床低下へ遷移し、河道断面が急激に変化した(図6)。各測定日における河道断面を実線で、前回測定日の河道断面を点線で示す。また、各河道断面の測定実施間に発生した総降雨量および最大日降雨量を各断面間に示している。

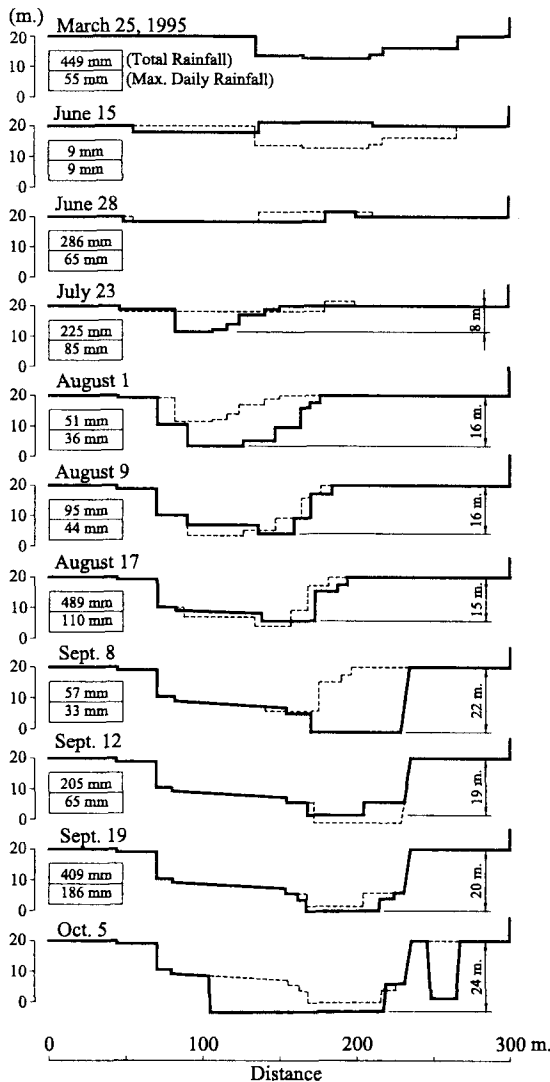


図6 扇頂部における河道断面変化図 (Section 1)

1995年7月以降で特に河床低下と流路幅の拡大が顕著であるのは、台風通過直後の、8月1日、9月8日、10月5日である。一方、台風が発生しない場合には、河床高はあまり変化がないか若干上昇傾向にあるとともに、河道はある程度安定しており小段丘が形成される傾向がみられた。

1995年に急速に河床低下傾向になった理由として考えられるのは、火砕流堆積域での二次爆発の規模と頻度である。1994年の77回(うち大規模二次爆発8回)から1995年の18回(大規模二次爆発なし)と極端に減少し、これが火砕流堆積物の固結を促し流出土砂の減少を招いたと考えられる。

7 扇中部での土砂堆積状況

3時期の航測図化(1991、1994、1996)に基づけば、扇状地における土砂堆積量は330百万 m^3 と推定される。このうち、290百万 m^3 (約85%)が火砕流堆積原からの流出(生産土砂)、残りは扇頂部から扇中部にかけての河道侵食によるものである。

扇中部の土砂堆積状況を見ると、各断面において1996年2月時は中央部が盛り上がった形状となっていることがわかる。これは、二線堤の破堤前には堤外地内部に泥流が蒲鉾状に堆積したからである。Section2(扇頂部より7.8km地点)における最大堆積厚は噴火前の地表面と比べると16mにも及んでいる。

また、1995年10月の洪水時には、扇頂部より5km地点における二線堤の越流破堤により、二線堤と三線堤間に河道が形成され、泥流は二線堤を越流し三線堤との間を流下した。Section2(扇頂部より7.8km地点)では、噴火前地盤(500年前噴火時の泥流堆積物)をさらに深さ7m、幅200m程度侵食して河床低下が進行したことを示している。

扇中部での大規模土砂移動は1995年10月の洪水を最後に収束し、以後は河岸侵食による河道拡幅が顕著となっている。

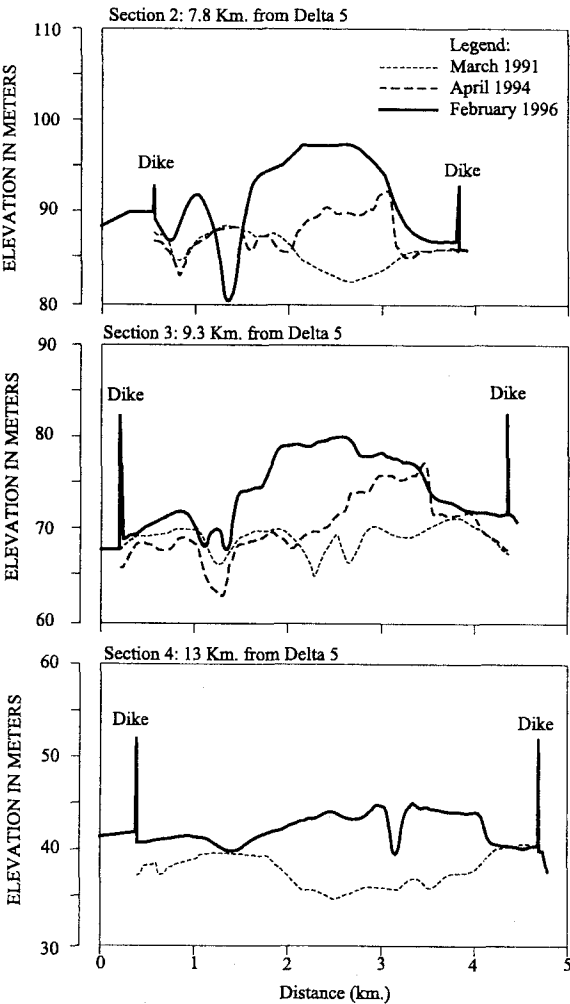


図7 扇中部における河道断面変化図

8 扇端部での洪水時土砂移動

フィリピン政府が泥流氾濫の拡大防止を目的として、1996年2月～6月に建設したメガダイクは、扇端部の両岸に高さ12m、総延長29kmの堤防と、扇端部での泥流堆積を促進するための高さ12m、総延長3kmの横堤 (Transverse Dike) から成っている。なお、横堤には、洪水越流部として開口部 (幅100m) が2箇所設置された。横堤での流域面積は144km²である。

1997年8月の台風時に、約20年確率規模の豪雨による大規模泥流が発生し、扇頂部から扇中央部にかけての泥流堆積物が二次移動し、扇端部の横堤付近に大量の土砂が堆積した⁹⁾。

横堤近傍の平面図 (図8)、縦断変化図 (図9) および横断変化図 (図10) を示す。この結果、横堤の効果を判定することが可能となった。

- a) 横堤より上流 4.5km 区間での堆積量 15.6 百万 m³
- b) 横堤より下流 3.5km 区間での堆積量 3.6 百万 m³
- c) 横堤による初期土砂捕捉率 81 % (= 15.6 / 19.2)

上述のように、横堤による土砂捕捉率は 81%と高率を示しており、メガダイク建設の主目的である、土砂氾濫地域の拡大防止および土砂堆積の促進という初期の目的から判断すれば非常に効果的であったことを示している。

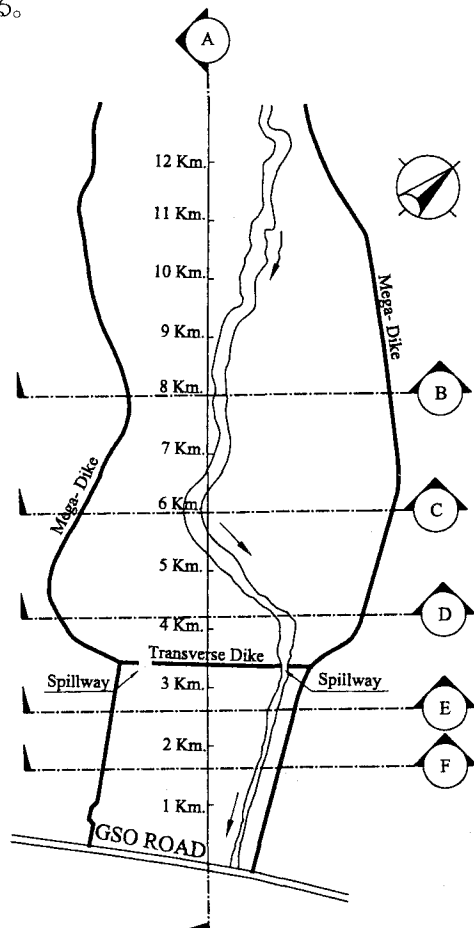


図8 横堤付近の平面図 (1997年)

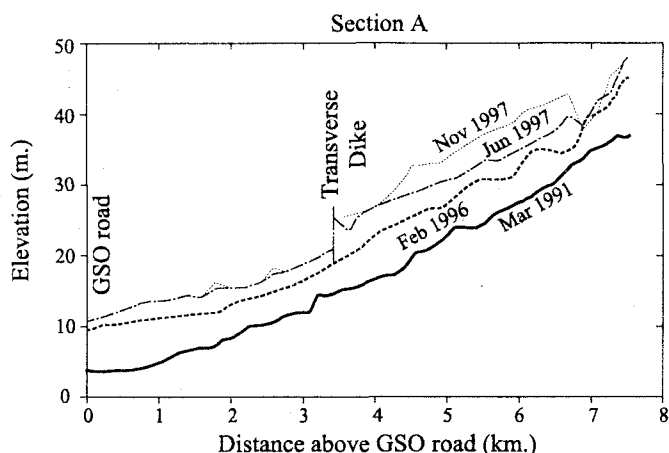


図9 横堤付近の土砂堆積縦断変化図

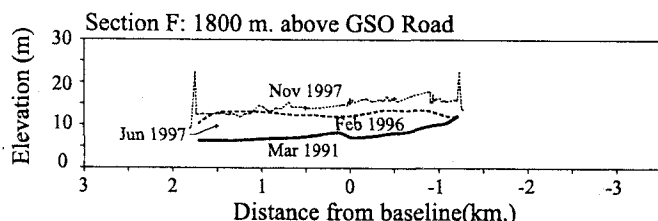
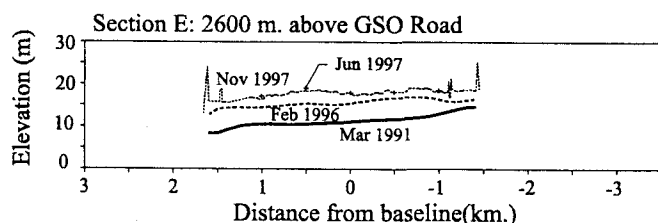
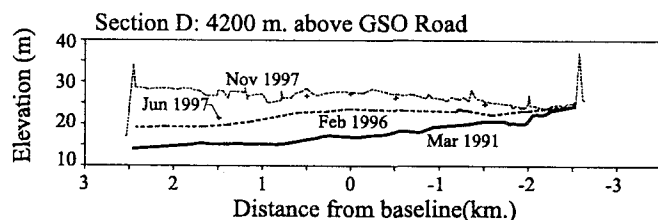
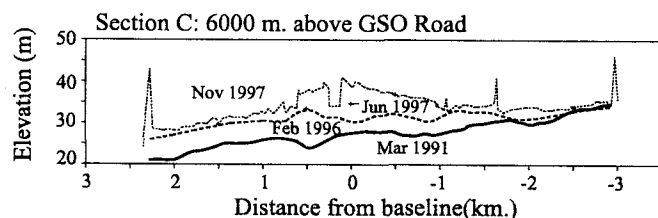
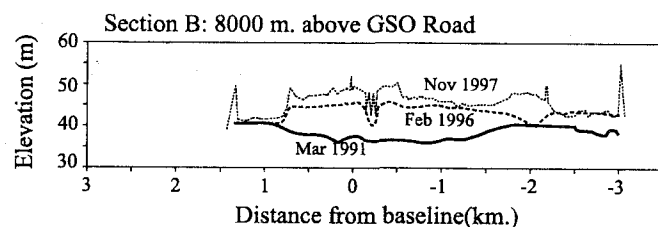


図10 横堤上下流における土砂堆積横断変化図

9 将来の土砂堆積予測

これまでのバシグ・ポトレロ川流域における堤防建設によりサンドポケットにおける総貯砂容量は、既に河床低下が発生している扇頂部約5km区間を除いて、646百万 m^3 となる。しかしながら、1997年8月に起こった20年確率規模の洪水・土砂移動の際には、土砂堆積の横断面の不均一性や、堤防沿いに局所的な土砂堆積が確認されている。このため、メガダイクには土砂堆積面と堤防天端間に少なくとも余裕高4mを維持しておくことが必要である。この余裕高を考慮すると有効貯砂容量は457百万 m^3 となる

また、扇頂部から扇端部までの各河川区間での1997年11月における土砂総堆積量は287百万 m^3 であり、既に有効貯砂容量の63%が堆積したことになる。

ここで、マクロ的な推定ではあるが、1997年11月における各河川区間の土砂堆積・侵食量の合計を河川全体での土砂堆積総量で除すことにより土砂堆積・侵食傾向をパターン化した。今後は、この堆積・侵食傾向を継続しながら今後20年間に予想される生産土砂量 90 百万 m^3 (1998～2017)が流入すると仮定し、サンドポケット内の土砂堆積状況を推定した(図11)。

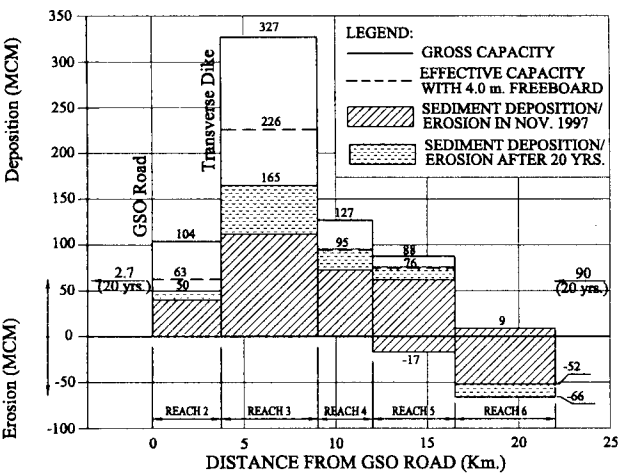


図11 土砂収支の将来予測

余裕高4mを維持する場合には、横堤より上流において20年後の空き容量は横堤より上流 5km区間における61百万 m^3 (GSO 道路と横堤防区間を加えた場合には74百万 m^3)のみとなり、約20年後にほぼ満砂状態になることが予想される。

一方、今後20年間に少なくとも2.7百万 m^3 の堆積物がGSO道路下流へ流出すると算定され、最下流のデルタ地帯にて河床上昇や河道・河口閉塞を引き起こし、二次災害である洪水被害の原因となる。横堤とGSO道路間に新たなサンドポケットを建設し下流水路への土砂流出を制御するとともに、下流域の河道改修が緊急の課題である。

10 おわりに

本報告では、ピナツボ火山噴火後9年間における災害発生のプロセスをまとめるとともに、東部河川流域のバシグ・ポトレロ川流域における地形変化および土砂移動の現象を考察した。

開発途上国における防災プロジェクトは、自国資金不足から災害に対する施設安全度は限られており、また建設後の維持管理に予算措置が講じられないのが実情である。また、本報告に述べたように、災害が上流から下流へ遷移していくケースでは、防災基本計画の見直しを適宜おこない、限られた予算の中で施設規模の決定、建設実施の優先度を策定することが必要であることを認識した。

本報告で記述したバシグ・ポトレロ川流域では、日本のODA融資にて、下流域の施設建設が開始されている。今後、観測を継続していくことにより、火山噴火による土砂移動とその対策工について検討を進めていきたい。

謝辞： 本報告をまとめるに当たり、多くの参考文献と助言を頂いたフィリピン地震火山研究所(PHIVOLCS)や米国地質調査所(USGS)の調査担当者に謝意を申しあげます。また、貴重な調査機会を与えて頂いたフィリピン政府や建設省、国際協力事業団(JICA)、国際協力銀行(JBIC)の関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本工営(株)・(株)建設技術研究所、フィリピン共和国ピナツボ東部河川流域洪水および泥流制御計画調査報告書、国際協力事業団、1996
- 2) 広瀬典昭、井上公夫、ピナツボ火山噴火後の地形変化と土砂災害、地形 第20巻第4号、pp431-448、1999
- 3) Newhall,C.G. and Punongbayan,R.S., FIRE and MUD (Eruptions and Lahars of Mt.Pinatubo, Philippines), pp.1023-1032, University of Washington Press, 1996
- 4) 原義文、ピナツボ噴火後の土砂流出、新砂防 44(6)、pp.29-34、1992
- 5) 山本晃一、沖積河川学(堆積環境の視点から)、pp129-190、山海堂、1994
- 6) Mount Pinatubo Commission, Integrated Plan for the Mount Pinatubo Affected Areas, pp7-7, 1994
- 7) 大石道夫、空中写真判読シリーズ、新砂防、pp92-119、1974-1981
- 8) 芦田和男編、扇状地の土砂災害(発生機構と防止軽減)、pp9-44、古今書院、1985
- 9) Nippon Koei Co., Ltd., Pinatubo Hazard Urgent Mitigation Project (Part III : Monitoring and Planning on Lahar/ Mudflow Control Works in Pasig-Potrero River Basin), Department of Public Works and Highways (DPWH), 1998

(2000.10.2 受付)