

第5章 水文及び気象

第 5 章 水文及び気象

| | 頁 |
|--------------------------------|------|
| 5.1 一般 | 5-1 |
| 5.2 計画流域の気象概要 | 5-1 |
| 5.2.1 地形 | 5-1 |
| 5.2.2 気象 | 5-2 |
| 5.3 気象及び流量観測所 | 5-3 |
| 5.4 観測データの解析 | 5-7 |
| 5.4.1 降雨資料の均質性 | 5-7 |
| 5.4.2 水文周期 | 5-7 |
| 5.5 ダム地点流量 | 5-11 |
| 5.5.1 手法 | 5-11 |
| 5.5.2 測水所地点流量 | 5-11 |
| 5.5.3 計画ダム地点流量 | 5-13 |
| 5.6 設計洪水量 | 5-17 |
| 5.6.1 概要 | 5-17 |
| 5.6.2 可能最大降水量 (PMP) | 5-17 |
| 5.6.3 単位図の作成 | 5-21 |
| 5.6.4 PMP の時間分布および有効降雨 | 5-21 |
| 5.6.5 PMP による Flood Hydrograph | 5-21 |
| 5.6.6 チベット流域の流出成分 | 5-30 |
| 5.6.7 可能最大洪水量 (PMF) | 5-30 |
| 5.6.8 確率洪水量 | 5-30 |
| 5.6.9 採用値 | 5-37 |

| | 頁 |
|--------------------------------|------|
| 5.7 氷河湖決壊による洪水 | 5-42 |
| 5.7.1 概 要 | 5-42 |
| 5.7.2 過去の事例 | 5-42 |
| 5.7.3 GLOF発生のメカニズム | 5-48 |
| 5.7.4 アルン川流域内の氷河湖の分布 | 5-52 |
| 5.7.5 GLOF解析 | 5-55 |
| 5.7.6 GLOFの警戒システム | 5-77 |
| 5.7.7 まとめ | 5-78 |
| | |
| 5.8 堆 砂 | 5-80 |
| 5.8.1 一 般 | 5-80 |
| 5.8.2 採水資料による堆砂量の推定 | 5-81 |
| 5.8.3 アルン川近傍地点における浮遊砂の実績 | 5-82 |
| 5.8.4 堆砂形状の予測 | 5-84 |

LIST OF TABLES

| | |
|----------------|---|
| Table 5-1 | Basin Area |
| Table 5-2 | Rain Fall Data |
| Table 5-3 | Hydrological and Meteorological Data List |
| Table 5-4 | Monthly Discharge Data at Dam Site |
| Table 5-5 (1) | Computation of PMP between 20 km and 30 km |
| Table 5-5 (2) | Computation of PMP between 30 km and 40 km |
| Table 5-5 (3) | Computation of PMP between 40 km and 50 km |
| Table 5-5 (4) | Computation of PMP between 50 km and 60 km |
| Table 5-5 (5) | Computation of PMP between 60 km and 70 km |
| Table 5-5 (6) | Computation of PMP between 70 km and 80 km |
| Table 5-6 (1) | Synthetic Unit Hydrograph of PMP (at the Dam Site) |
| Table 5-6 (2) | Synthetic Unit Hydrograph of PMP (at the Powerhouse) |
| Table 5-7 | Probable Flood Discharge at Tumlingtar by Log Pearson III Method (Daily) |
| Table 5-8 | Probable Flood Discharge at Tumlingtar by Gumbel Method (Daily) |
| Table 5-9 | Probable Flood Discharge at Arun Dam Site by Log Pearson III Method (Instantaneous Peak) |
| Table 5-10 | Probable Flood Discharge at Arun Dam Site by Gumbel Method (Instantaneous Peak) |
| Table 5-11 | List of GLOFs in Nepal |
| Table 5-12 | Discharge Capacity at Various Gate Openings and Water Levels |
| Table 5-13 | Input Conditions and Simulation Results for Prescribed GLOF |
| Table 5-14 | Annual Suspended Load Concentration |
| Table 5-15 (1) | Sedimentation Load of Sapt Kosi River |
| Table 5-15 (2) | Sedimentation Load of Rivers in Tibet |

LIST OF FIGURES

- Fig. 5-1 Typical Isohyetal Map of Arun Basin
- Fig. 5-2 Double Mass Curve Method
- Fig. 5-3 Moving Average Analysis
- Fig. 5-4 Spectral Analysis
- Fig. 5-5 Duration Curve of Monthly and Annual Discharge
- Fig. 5-6 Analyzed Area in Arun River Basin
- Fig. 5-7 Ground Profile, Air Streamlines and Precipitation Trajectories for PMP Estimation
- Fig. 5-8 (1) Unit Hydrograph at Arun Damsite
- Fig. 5-8 (2) Unit Hydrograph at Powerhouse
- Fig. 5-9 Time Distribution of Rainfall Increment Six-Hour Period
- Fig. 5-10 (1) Enveloping of Estimated Base Flow (Contains the Flow from Tibet Basin) by Areal Conversion Method
- Fig. 5-10 (2) Enveloping of Estimated Base Flow (Contains the Flow from Tibet Basin) by Tank Model Method
- Fig. 5-11 (1) Probable Maximum Flood at Arun Damsite
- Fig. 5-11 (2) Probable Maximum Flood at Powerhouse
- Fig. 5-12 (1) Probable Flood Discharge (Log Pearson III)
- Fig. 5-12 (2) Probable Flood Discharge (Gumbel Method)
- Fig. 5-13 Location Map of GLOF in Nepal
- Fig. 5-14 Reference Map of GLOF around Nepal
- Fig. 5-15 Glacier Lake Classification
- Fig. 5-16 Location Map of Glacier Lakes in Arun River Basin
- Fig. 5-17 Peak Discharge and Water Level at Junction of Arun River and Barun Khola during GLOF
- Fig. 5-18 Profile of Arun River for GLOF Analysis
- Fig. 5-19 (1) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola Case-010
- Fig. 5-19 (2) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola Case-021
- Fig. 5-19 (3) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola Case-022
- Fig. 5-19 (4) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola Case-031

- Fig. 5-19 (5) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
Case-032
- Fig. 5-19 (6) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
Case-041
- Fig. 5-19 (7) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
Case-042
- Fig. 5-20 (1) Change of Water Level in Arun Reservoir Case-010
- Fig. 5-20 (2) Change of Water Level in Arun Reservoir Case-021
- Fig. 5-20 (3) Change of Water Level in Arun Reservoir Case-022
- Fig. 5-20 (4) Change of Water Level in Arun Reservoir Case-031
- Fig. 5-20 (5) Change of Water Level in Arun Reservoir Case-032
- Fig. 5-20 (6) Change of Water Level in Arun Reservoir Case-041
- Fig. 5-20 (7) Change of Water Level in Arun Reservoir Case-042
- Fig. 5-21 Warning System against GLOF
- Fig. 5-22 Reservoir Sedimentation Profile

第5章 水文及び気象

5.1 一般

本章においては、発生電力量算定に必要なダム地点の流量資料と、ダム設計上不可欠な設計洪水量、氷河湖決壊による洪水 (Glacier Lake Outburst Flood ; GLOF) 及び堆砂解析について記述する。本計画流域はその大部分がチベット側に属しており、しかもチベット側についてはほとんど情報が得られなかったが、ネパール側で入手した資料が整備されており、この資料だけでも十分満足できる結果が得られた。

設計洪水量に関しては、本計画の重要性を考慮してPMF手法を採用したが、アルン流域が典型的な地形性降雨の条件を備えているため、PMF手法による洪水量想定は有効と思われる。GLOFに関しては、文献調査により、過去の既往例及びメカニズムに関する説明をし、さらにアルン流域に存在する氷河湖の位置と概略規模を示した後に、GLOFの仮想計算を試みる。堆砂については、探水試料及び、実績値から堆砂量を推定すると共に、堆砂形状のシミュレーション計算を行うこととする。

5.2 計画流域の気象概要

5.2.1 地形

(1) 一般

アルン川はネパール東部の一大河川であるSapt Kosi河の支流であり、ヒマラヤ山脈北部のチベット高地の氷河にその源を発する。アルン川は初めヒマラヤ山脈と平行して東進するが、この間は平均傾斜も約1/600~1/100と比較的緩く、谷幅も広い。その後、急激に南に向きを変えると、今までの様相を一変して平均傾斜は1/50位になり、谷も険しいV字状を成したまま、ヒマラヤ山脈を横切ってネパール側へと抜け出た後、いくつかの支流を合わせながらTribeniでSapt Kosi河に合流する。

このようにアルン川はヒマラヤ山脈を境にチベット流域とネパール側流域という地形的にも気象的にも全く性格の異なる地域を流下するわけだが、ダムサイトを基点にすると、その90%以上がチベット流域に属することになる。地形的に見た場合、チベット流域は比較的なだらかな高原を成しているが、ネパール側は標高差のはげしい山岳地形を呈しており、また気象的に見た場合、チベット流域はヒマラヤ山脈に遮蔽された少雨寒冷帯に属するのに対し、ネパール側はヒマラヤ高地を除きモン

スーンに支配された多雨温暖地帯に属する。一方水文気象観測資料はチベット流域に関しては、現在までに入手した資料はわずかTingri地点（アルン川上流部）の月別集計値のみであるのに対し、ネパール流域では5.3節で述べるように、かなりまとまった資料が揃った。このようにアルン3計画の水文解析に利用できるチベット流域の情報は限られているが、洪水解析に関しては、その大部分がヒマラヤ南斜面で生じる流出成分に依存していることから、ネパール側のデータだけでもかなりの精度で算定できると思われる。

(2) 流域面積

(i) ダム地点

現在迄の報告書に用いられた流域面積の値はMaster Plan とPre-F/S とが異なっているため、再度、検証を行った。但し、チベット領域については縮尺の小さい地図資料の入手が困難なため、検証から除外した。

Table 5-1 Basin Area

| Item | Case | (1) M/P | (2) Pre-F/S | (3) F/S |
|------------------------|------|---------------|-------------|----------|
| Tumulingtar G.S | | - | 30,762 | - |
| Tumling.G.S - Dam Site | | Not Indicated | | 1,452 |
| Dam Site | | 32,332 | 30,031 | 29,310 |
| Dam Site - Boundary | | Not Ind. | 1,381 | Not Ava. |

(ii) 測水所地点

支流の測水所の値は、NEAによって提供されたものを採用する。

Tumlingtar (No. 604.5) C. A = 30,762km²

Sabhaya G. S (No. 602) C. A = 375km²

Hinwa G. S (No. 602.5) C. A = 110.44km²

5.2.2 気象

(1) チベット流域

全チベット地域の降水量はおおむね東の方が多く、西に行くに従って減少していき、中には年平均降水量が100mmを下回る地域もある。アルン川のチベット流域は、ヒマラヤに遮蔽されているため、チベット全地域の中でも少雨帯に属し、アルン川のチベット流域のほぼ中央に位置するTingriでは1971~1975の5年間の年平均降水量は322mmとなっている。なお年間の降雨分布はヒマラヤ南部と同様、夏期（6月

～9月)に90%以上の降雨が集中している。一方、蒸発量は極めて多く、先のTingriでは1971～75年の5年間の年平均蒸発量は2569mmにも達している。これは、チベット流域が比較的低温であるにもかかわらず、晴天日数が多く、湿度が低いこと、標高が高いために日射量が強いことなどが蒸発を促進する要因と考えられる。

なお、年平均気温はTingriで0.7℃。月平均値は-11.3℃～10.9℃となっており、11月から3月までは月平均気温は零下を示している。

(2) ネパール側流域

アルン川のネパール側流域は気候区分で見ると亜熱帯から高山帯までほとんどあらゆる要素を含んでおり、地形、とくに標高によって気象現象が大きく支配されており、年平均降水量ではその幅は、1200mmから3500mmもの開きとなって表れている。ネパール東部の降雨分布の特徴は、降水量の極大域がMahabharat山脈の南斜面とヒマラヤ山脈の南斜面に東西に帯状に分布していることであり、その間の低地帯では、少雨域を形成していることである。これは、モンスーン期に南東から吹き込んでくる湿潤な気流が、まず標高2000m前後のMahabharat山脈の南斜面で雨を降らせた後、さらにヒマラヤ山脈の南斜面で急激な上昇気流となって、降水を生じさせるからである。アルンダムサイト付近のNumはこの地域でも最も降水量の多い地点であり、年降水量は多い年で、5000mmにも達することがある。ダム流域の内ネパール側の流域年平均降水量は、等雨量線法によると、2650mmとなる。Fig. 5-1にはアルン全流域の典型的な雨量分布を示し、Table 5-2には代表的な気象観測所における降雨データを記載した。

5.3 気象及び流量観測所

本計画地点の近傍に位置する気象および流量観測所をDWG. 1に示す。この中でダム流域内に位置するのは、NumとChepuwa観測所のみであるが、他の観測所も、ダム地点流量を算出する際には、有力な情報源となった。

流量観測に関しては、現在アルン本流に設置されているのは、ダムサイトの下流約50km地点のTumlingtar測水所のみであるが、観測期間が1975年より今日に至るまでの11年間で、多少期間が短いものの、電力量計算には十分使用できる期間と精度を有している。なお、Table 5-3には各観測所の観測期間を示した。

Table 5-2 Rain Fall Data

| Station Number | Station Name | Altitude (EL. m) | Periods of Observation | Years | Jan. | Feb. | Mar. | Apr. | May | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Oct. | Nov. | Dec. | Annual Data | Note |
|----------------|--------------|------------------|------------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------------|--------------------|
| | Tingri | 4300 | 1970-1975 | 5 | 0.0 | 0.1 | 0.4 | 0.8 | 1.9 | 14.7 | 28.9 | 37.6 | 12.9 | 2.4 | 0.3 | 0.0 | 322.2 | Tibet area |
| 1201 | Namche Bazar | 3450 | 1949-1980 | 32 | 31.5 | 17.2 | 29.8 | 24.9 | 41.9 | 136.3 | 227.8 | 221.3 | 146.3 | 65.3 | 9.7 | 16.2 | 968.2 | Outside Arun Basin |
| 1202 | Chaurikhark | 2619 | 1949-1980 | 32 | 14.7 | 17.9 | 44.8 | 48.2 | 103.2 | 322.3 | 592.6 | 574.1 | 329.5 | 84.3 | 15.0 | 9.1 | 2154.7 | Outside Arun Basin |
| 1301 | Num | 1497 | 1960-1983 | 24 | 32.3 | 43.5 | 83.3 | 233.1 | 474.2 | 741.7 | 672.1 | 593.8 | 518.8 | 279.2 | 64.8 | 22.0 | 3758.8 | |
| 1303 | Chainpur | 1329 | 1948-1983 | 36 | 14.5 | 12.2 | 23.9 | 79.0 | 167.9 | 215.0 | 315.3 | 279.4 | 181.0 | 63.0 | 15.5 | 4.2 | 1370.9 | |
| 1317 | Chepuwa | 2591 | 1960-1983 | 21 | 43.4 | 68.9 | 130.4 | 140.6 | 235.6 | 414.0 | 510.6 | 442.8 | 347.2 | 144.0 | 48.6 | 15.4 | 2541.5 | |
| 1325 | Dingla | 1190 | 1957-1983 | 27 | 14.2 | 12.0 | 28.9 | 74.1 | 168.5 | 297.4 | 394.4 | 396.1 | 338.0 | 106.9 | 10.7 | 6.5 | 1847.7 | |

Fig. 5-1 Typical Isohyetal Map of Arun Basin

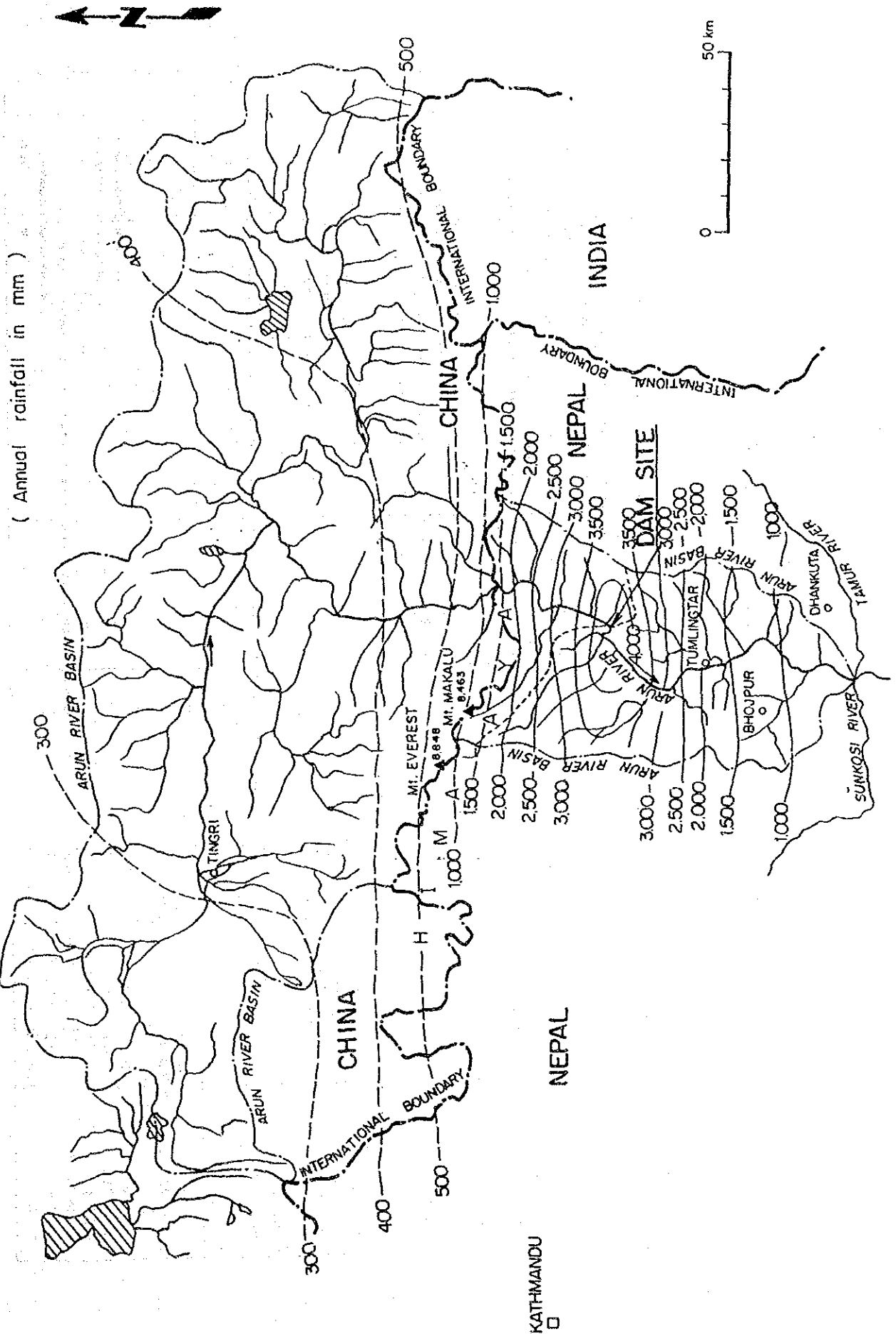


Table 5-3 Hydrological and Meteorological Data List

| Meteorologic Station | Station Number | Location | | Elevation (m) | Year | | | | | | | |
|---|----------------|--------------------------|---------|---------------|------|------|------|------|------|--|--|--|
| | | Lat. N | Long. E | | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | | | |
| Arun River Basin Chapcha Mhu Tualingtar Bingla Chaitapur Lessa Ghat | 1317 | 27° 46' | 87° 25' | 2,591 | | | | | | | | |
| | 1301 | 27° 33' | 87° 17' | 1,407 | | | | | | | | |
| | 1321 | 27° 17' | 87° 13' | 303 | | | | | | | | |
| | 1325 | 27° 22' | 87° 01' | 1,676 | | | | | | | | |
| | 1303 | 27° 17' | 87° 20' | 1,329 | | | | | | | | |
| 1305 | 27° 08' | 87° 17' | 305 | | | | | | | | | |
| Bhedi Kosi River Basin Syangboche Khunjung Nuwabe Bazar Chaurikhark | 1225 | 27° 49' | 86° 43' | 3,700 | | | | | | | | |
| | 1217 | 27° 49' | 86° 43' | 4,340 | | | | | | | | |
| | 1201 | 27° 50' | 86° 43' | 3,450 | | | | | | | | |
| | 1202 | 27° 42' | 86° 44' | 2,438 | | | | | | | | |
| Tawar River Basin Ulungchung Gola Lang Thang Taplethock | 1401 | 27° 41' | 87° 47' | 1,720 | | | | | | | | |
| | 1403 | 27° 33' | 87° 47' | 1,780 | | | | | | | | |
| | 1404 | 27° 29' | 87° 47' | 1,372 | | | | | | | | |
| Kalimandu Kallimandu I.E. | 1030 | 27° 42' | 85° 20' | 1,324 | | | | | | | | |
| Runoff Gauging Station Tualingtar Lengachal Mudjal Barak Shetra Sabhaye Bhima | 604.5 | Arun | | 30,762 | | | | | | | | |
| | 604 | Arun | | 34,304 | | | | | | | | |
| | 600 | Tawar | | 5,640 | | | | | | | | |
| | 605 | Supra Kosi | | 59,550 | | | | | | | | |
| | 602.5 | Sabha Kula Bhima Kula | | 375 110.4 | | | | | | | | |

5.4 観測データの解析

5.4.1 降雨資料の均質性

上述した資料の内、アルン流域に存在し、しかも比較的観測期間の長いNum、Chepuwa、Chainpur、Dinglaの4気象観測所の降雨データについてダブルマスカーブ法により、資料の均質性を検証した。結果をFig. 5-2に示すが、いずれもほぼ直線状をなしており、精度上問題がないと考えられる。

5.4.2 水文周期

水文資料は、長期的に見た場合、ある周期性を持つと考えられる。この周期を把握することにより、貯水池運用及び発生電力量の策定にある程度参考となるため、ここでは移動平均法及びスペクトル解析により周期性の解析を試みた。ただし、流量資料は11年しか存在しないため、今回は降雨データによって代用させることとした。使用したデータはカトマンズ(62年間)、Num(23年間)、Chainpur(37年間)の3ヶ地点である。

(1) 移動平均法 (5年単位)

Fig. 5-3に移動平均法による結果を示す。Numでは周期性が見出せないが、カトマンズとChainpurでは20~26年程度の周期が存在することがわかる。両者の曲線の傾向は比較的似ているため、カトマンズとアルン流域との水文周期はほぼ同じと考えられる。

(2) スペクトル解析

ここではカトマンズのデータを取り上げてスペクトル解析を行った。手順としては、降雨の時系列データ(年単位)を $x(t)$ とし、この年次データの変化をフーリエ変換により各種周波数 f に分解する。〔式(i)〕。次に式(ii)により周波数 f の成分がもつ単位時間内の平均エネルギー(パワースペクトル) $S_x(f)$ の大小により卓越成分を選別しようというものである。

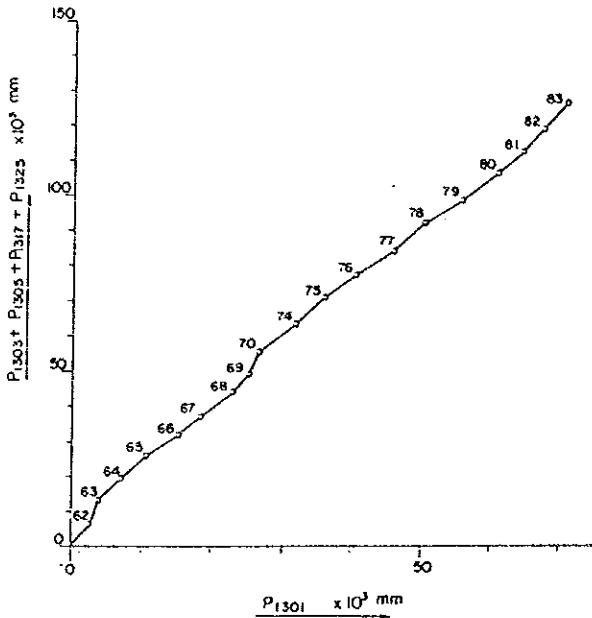
$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (i)$$

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} |X(f)|^2 \right] \quad (ii)$$

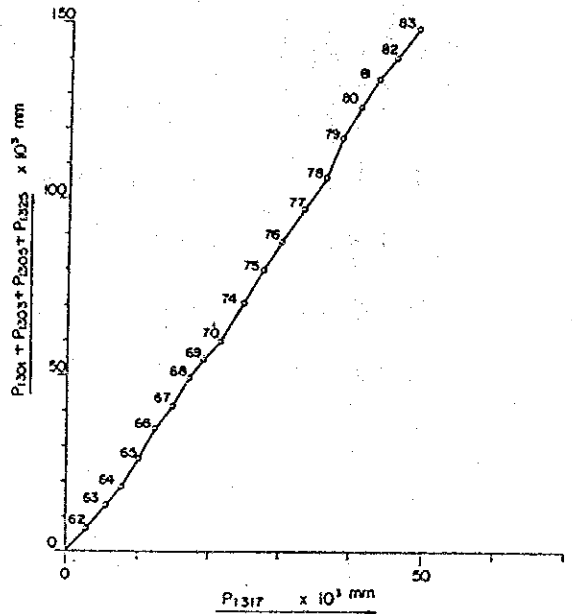
以上の結果をFig. 5-4に示すが、smoothed lineより20~30年の周期性がうかが

Fig. 5-2 Double Mass Curve Method

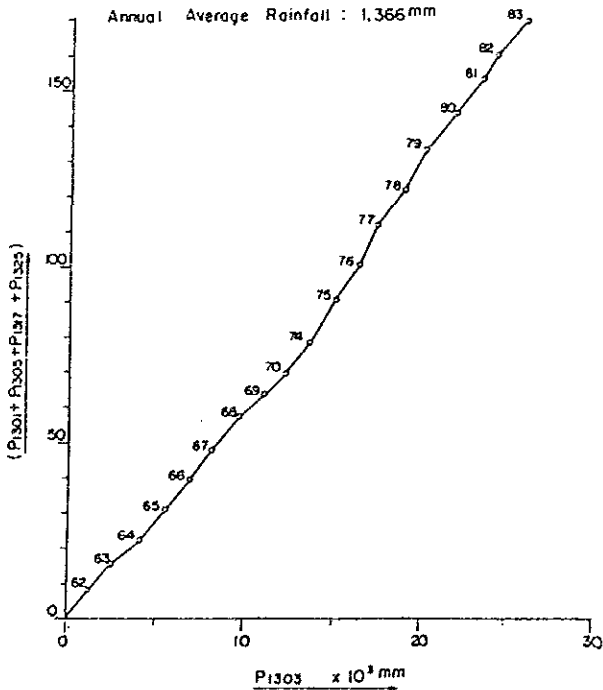
Num P1301
 (1962 ~ 1970 & 1974 ~ 1983)
 T = 19 years
 Annual Average Rainfall : 3,727 mm



Chepuwa P1317
 (1962 ~ '70 & 1974 ~ '83)
 T = 19 years
 Annual Average Rainfall : 2,566 mm



Chainpur P1303
 (1962 ~ '70 & 1974 ~ '83)
 T = 19 years
 Annual Average Rainfall : 1,366 mm



Dingla P1325
 (1962 ~ '70 & 1974 ~ '83)
 T = 19 years
 Annual Average Rainfall : 1,813 mm

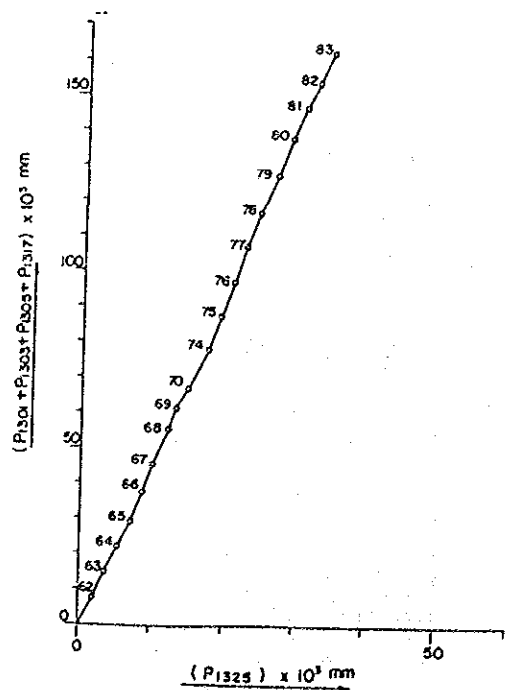
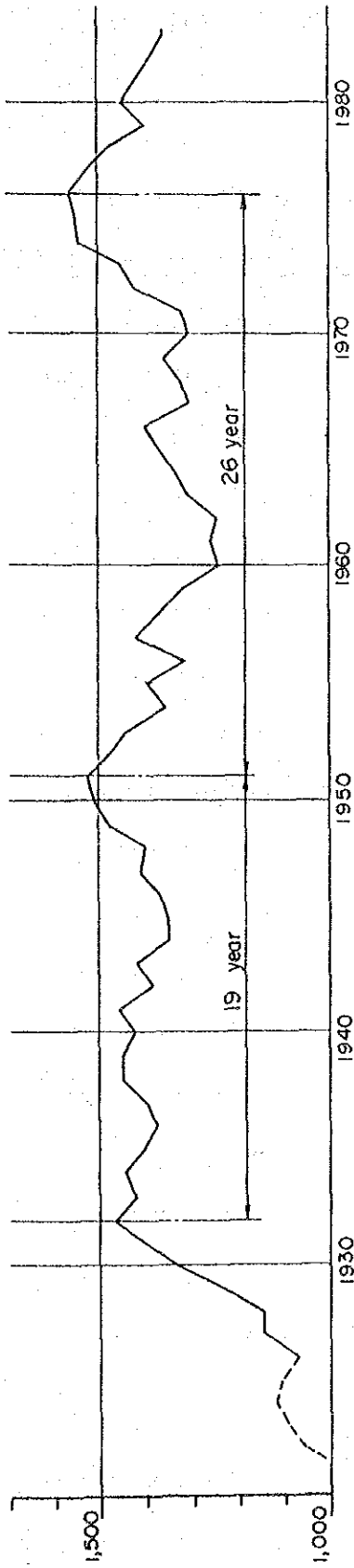
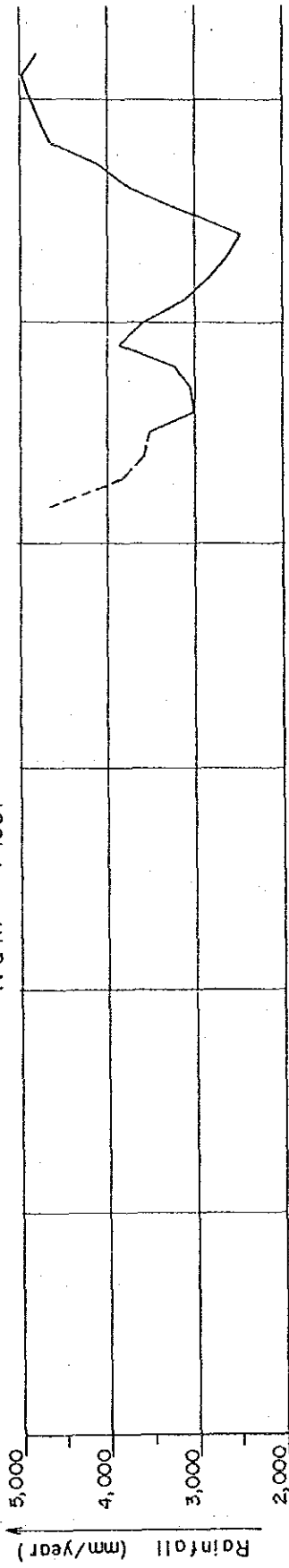


Fig. 5-3 Moving Average Analysis (T = 5 year)

Kathmandu I.E P1030



Num P1301



Chainpur P1303

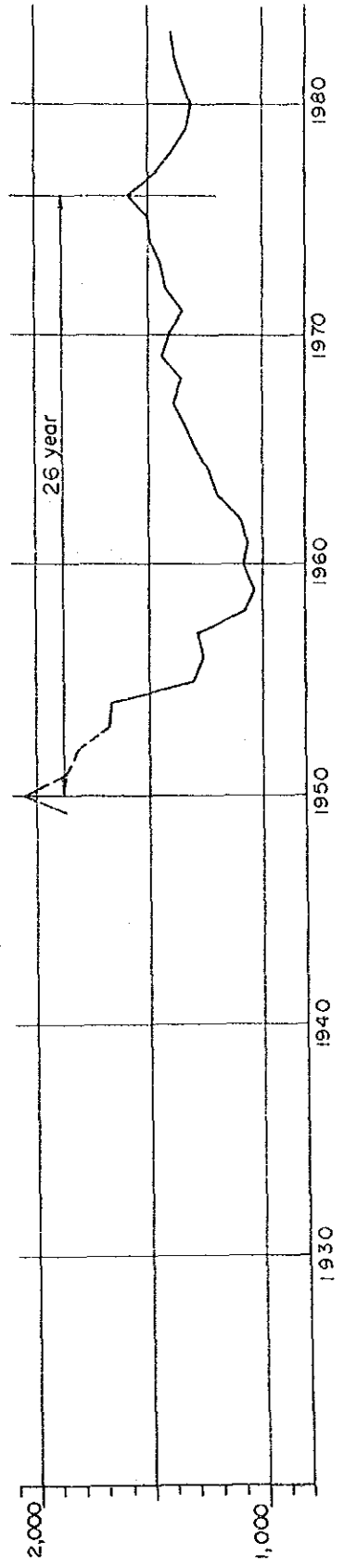
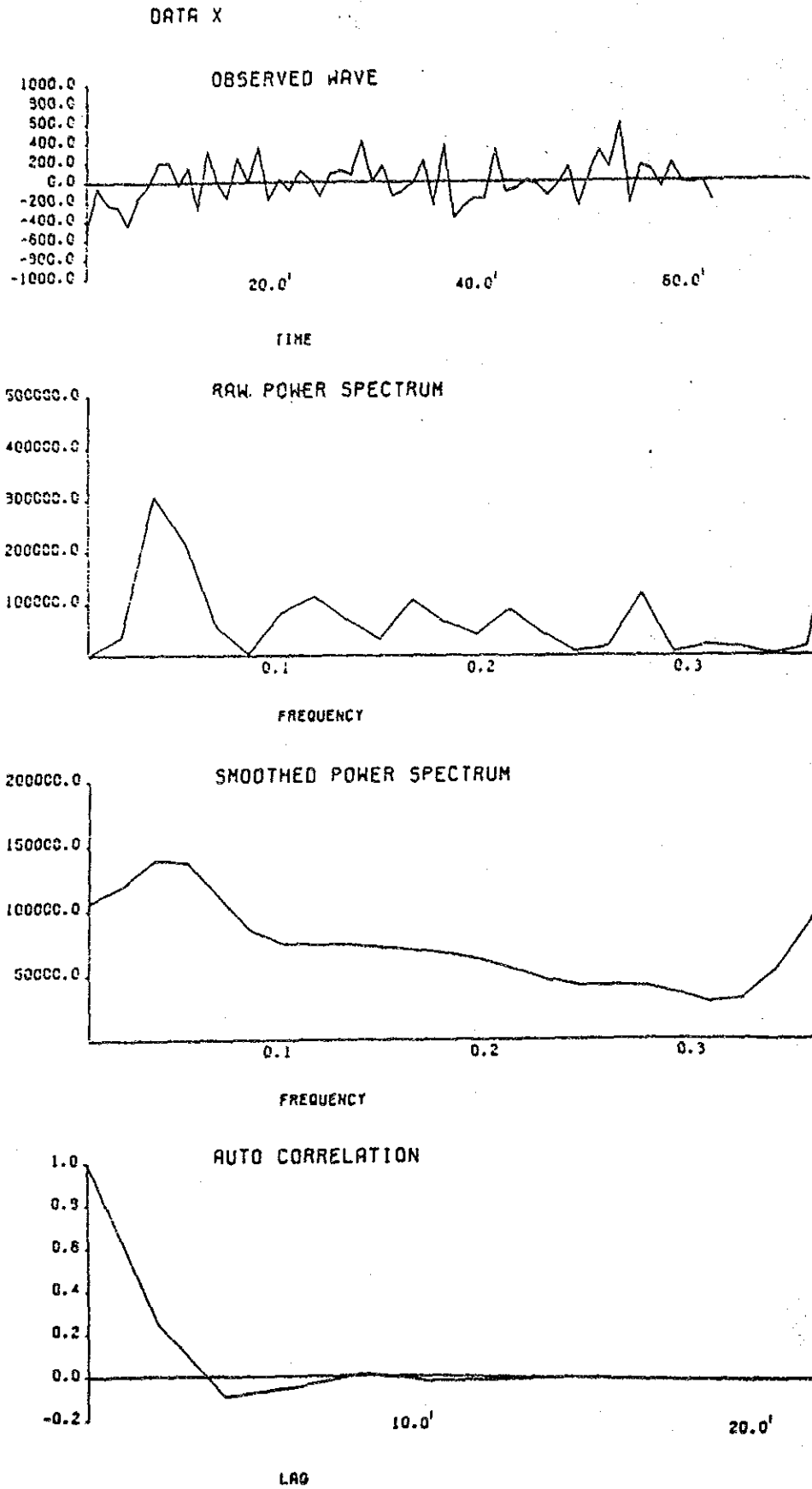


Fig. 5-4 Spectral Analysis



える。

(1)、(2)の結果より、電力量計算に必要なデータは20年以上存在することが望ましいことがわかった。

5.5 ダム地点流量

5.5.1 手法

ダム地点流量はTumlingtar測水所の実測値よりTumlingtar測水所とダム地点間の残流量をさし引くことによって得られた。

アルン川はチベット流域とネパール側流域という気象状況が全く異なる2地域を有しているため、単純な流域換算ではTumlingtar測水所からダム地点流量を算出できないからである。プレフィージビリティスタディではTumlingtar測水所とMulghat測水所の流量資料を用いたが、今回はSabhaya測水所とHinwa測水所をMulghat測水所の代わりに用いることとした。その理由は以下の通りである。

- (1) Sabhaya測水所とHinwa測水所は共にTumlingtar測水所に近接して位置しているため、これらの流域の有する気象および地形状況は、Mulghat測水所の流域よりもはるかに似通っていると考えられる。
- (2) Sabhaya、Hinwa両測水所で実測値に基づいて得られたレーティングカーブはTumlingtar測水所のレーティングカーブに匹敵するだけの精度を有している。

5.5.2 測水所地点流量

各測水所地点流量は、現地において収集された水位及び流量実測記録をもとに算定された。

(1) 水位流量曲線

(i) Tumlingtar Gauging Station (No. 604.5)

| Item | Gauging Hight $H < 4.0$ m | Gauging Hight $H \geq 4.0$ m |
|---------------------------|--|--|
| Before 14 Aug. '80 | $Q = 40 \cdot H^2 + 150 \cdot H + 50$ | |
| 15 Aug. '80 ~ 11 Aug. '81 | $Q = 85 \cdot H^2 - 45 \cdot H - 160$ | $Q = 85 \cdot H^2 - 115 \cdot H + 120$ |
| After 12 Aug. '81 | $Q = 85 \cdot H^2 - 115 \cdot H + 120$ | |

式はHMGによって作成された。

(ii) Sabhaya Gauging Station (No. 602)

| | | |
|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Item | Gauging Hight $H < 1.65$ m | Gauging Hight $H \geq 1.65$ m |
| Before 1 Jun '76 | $Q = 16.24H^2 - 4.84 \cdot H + 0.36$ | $Q = 34.6H^2 - 42.9 \cdot H + 13.3$ |
| | Gauging Hight $H < 1.40$ m | Gauging Hight $H \geq 1.40$ m |
| 1 Jul. '76 ~ 1 Jun. '82 | $Q = 14.8H^2 - 6.15 \cdot H + 0.64$ | $Q = 34.6H^2 - 42.9 \cdot H + 13.3$ |
| | Gauging Hight $H > 0$ | |
| After 1 Jun. '82 | $Q = 34.6H^2 - 42.9 \cdot H + 13.32$ | |

(iii) Hinwa Gauging Station (No. 602.5)

$$Q = 21.53 \cdot H^2 - 13.92 \cdot H + 2.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

(2) 測水所間の相関性

Tumlingtar Gauging Station, Sabhaya Gauging Station 及び Hinwa Gauging Station の相関性を分析した。

| Item | Sample | Equation of Correlation | Coeff. r |
|--|--------|---|------------|
| ① Tumlingtar and Sabhaya Monthly Average Data Daily Average Data | 114 | $Q_{602} = 0.05 \cdot Q_{604.5} + 1.14$ | 0.915 |
| | 3,523 | $Q_{602} = 0.05 \cdot Q_{604.5} + 1.20$ | 0.781 |
| ② Tumlingtar and Hinwa Monthly Average Data Daily Average Data | 39 | $Q_{602.5} = 0.02 \cdot Q_{604.5} - 0.81$ | 0.900 |
| | 1,257 | $Q_{602.5} = 0.01 \cdot Q_{604.5} - 0.32$ | 0.808 |
| ③ Sabhaya and Hinwa Monthly Average Data Daily Average Data | 25 | $Q_{602} = 3.55 \cdot Q_{602.5} + 2.88$ | 0.936 |
| | 862 | $Q_{602} = 3.34 \cdot Q_{602.5} + 3.42$ | 0.816 |

Ref. $Q_{604.5}$: Tumlingtar Gauging Station

Q_{602} : Sabhaya Gauging Station

$Q_{602.5}$: Hinwa Gauging Station

計算結果から次の点が指摘される。

(i) Tumlingtar Gauging Station と他の 2 Gauging Stations の相関関係を見ると、

① Tumlingtar and Sabhaya および ② Hinwa の相関係数 r の値は、支流の ③ Sabhaya and Hinwa の値に比べて低い。

(ii) Monthly の相関係数は①が②よりも高いが、Daily においては反対に②が①よりも高い。

5.5.3 計画ダム地点流量

(1) Tumlingtar Gauging Stationと計画ダム地点間の残流量

Tumlingtar Gauging Station と計画ダム地点間の残流量は Sabhaya及びHinwa Gauging Stations の 流量資料と降雨量分布から算定した。

$$Q_t = (Q_{602} + Q_{602.5}) * C.A_t / (C.A_{602} + C.A_{602.5}) * P_t / P_{av}$$

Q_t : Runoff between Tumlingtar and Project dam site

Q_{602} : Runoff at Sabhaya Gauging Station

$Q_{602.5}$: Runoff at Hinwa Gauging Station

$C.A_t$: Drainage area between Tumlingtar and Project Site
(1,452 km²)

$C.A_{602}$: Drainage area of Sabhaya Gauging Station (375km²)

$C.A_{602.5}$: Drainage area of Hinwa Gauging Station (110.4km²)

P_t : Average rainfall of the Drainage area between Tumlingtar and Project Site (1975~'81)

Dry season from Oct. to Apr. (721mm)

Monsoon season from May to Sep. (2,652mm)

P_{av} : Average Rainfall of the Drainage areas Sabhaya and Hinwa gauging stations (1975~'81)

Dry season from Oct. to Apr. (535mm)

Monsoon season from May to Sep. (2,142mm)

$$Q_t = 4.03 * (Q_{602} + Q_{602.5}) \text{ ----- Dry season}$$

$$Q_t = 3.70 * (Q_{602} + Q_{602.5}) \text{ ----- Monsoon season}$$

上記の式によって、算定された残流域流量は計算上、日別であるが日付に対応し得る精度は有していない。その理由は以下の通りである。

- Sabhaya 及び Hinwa流域はTumlingtar測水所流域に隣接しているものの、流域外であり、Tumlingtar測水所地点流量には含まれない。
- 計画区域の降雨帯の移動により、流出時間のずれが生じる。

上記の理由から、日付け表示をしない事とした。

(2) 計画ダム地点流量

計画ダム地点流量は当地点とTumlingtarGauging Station 間の残流量をTumlingtar Gauging Station 流量より差し引いた値とした。

但し、残流量の値は日付けに対応しない為、各年各月の月別流況の値を使用し、日別で計算した。

$$QDnth. = Q604.5nth. - QTnth.$$

$QDnth.$: 歴年月における月別流況の n 番目の計画ダム地点流量

$Q604.5nth.$: 歴年月における月別流況の n 番目のTumlingtar測水所地点流量

$QTnth.$: 歴年月における月別流況の n 番目の残流域流量

以上により算出したダム地点の月別平均流量をTable 5-4 に、月別平均流況図をFig. 5-5 に示す。また日流量はAppendix-Bに掲載した。

また、Tumlingtarのデータとここで算出したダム地点流量を一次回帰式で表現すると次の式となる。

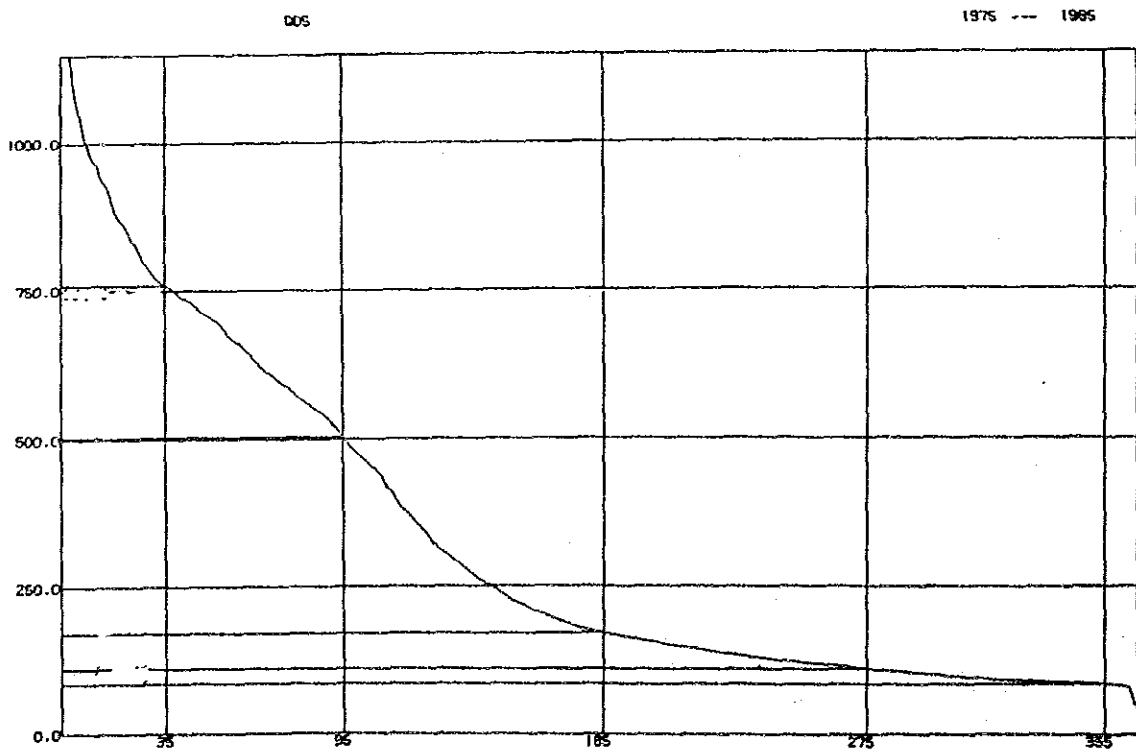
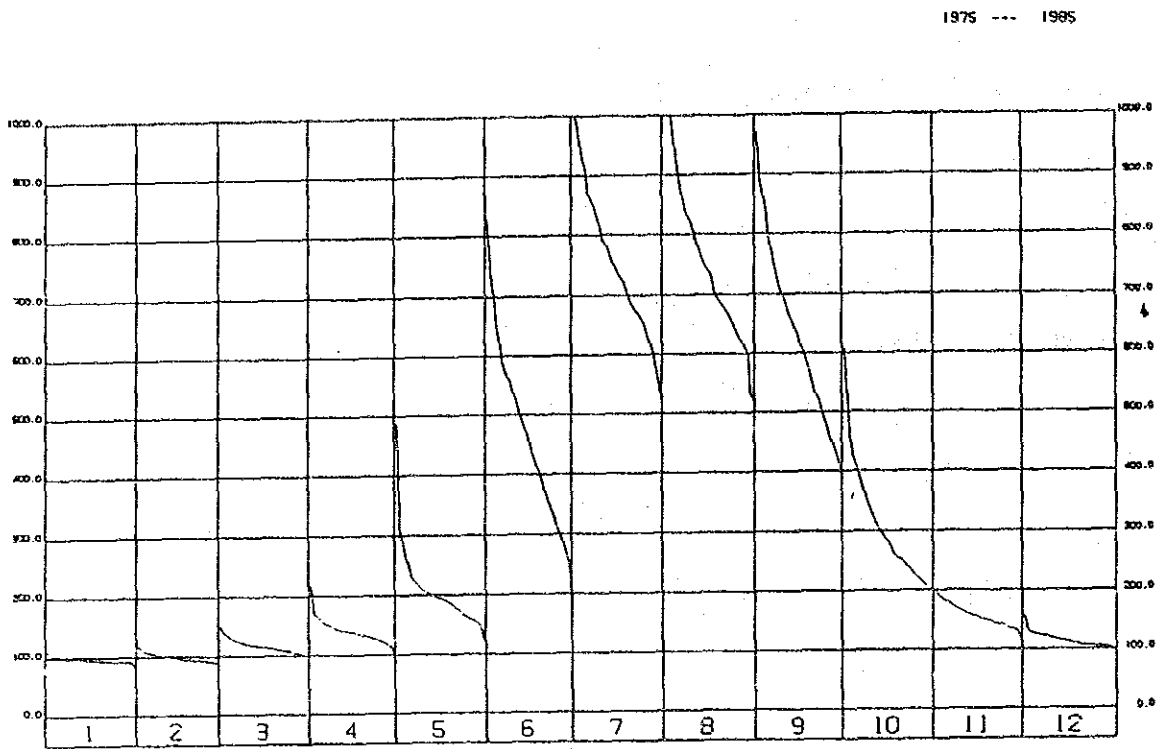
$$\text{月別} : Q(\text{Dam}) = 0.77 \times Q604.5 - 4.07 \quad (r = 0.99)$$

$$\text{日対応} : Q(\text{Dam}) = 0.76 \times Q604.5 + 0.25 \quad (r = 0.99)$$

Table 5-4 Monthly Discharge Data at Dam Site

| Year | Jan. | Feb. | Mar. | Apr. | May | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Oct. | Nov. | Dec. | Average |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|
| 1975 | 94.03 | 72.82 | 58.91 | 60.68 | 221.49 | 452.25 | 727.42 | 671.39 | 760.09 | 365.03 | 167.45 | 105.72 | 314.57 |
| 1976 | 78.88 | 78.54 | 91.03 | 108.89 | 167.50 | 588.20 | 680.54 | 728.80 | 517.27 | 275.74 | 178.75 | 125.88 | 302.38 |
| 1977 | 100.87 | 106.21 | 129.64 | 144.06 | 170.78 | 439.45 | 792.85 | 872.37 | 563.40 | 384.64 | 213.20 | 147.57 | 340.65 |
| 1978 | 120.92 | 123.24 | 143.84 | 184.31 | 297.06 | 580.97 | 654.12 | 795.39 | 571.54 | 334.56 | 186.36 | 128.73 | 344.82 |
| 1979 | 93.90 | 93.95 | 110.20 | 153.50 | 219.02 | 323.54 | 876.65 | 787.40 | 493.68 | 403.65 | 191.69 | 155.58 | 327.51 |
| 1980 | 120.53 | 127.66 | 155.59 | 198.32 | 216.81 | 469.43 | 798.15 | 1270.62 | 1032.87 | 443.08 | 204.59 | 130.53 | 431.84 |
| 1981 | 100.98 | 119.26 | 137.24 | 188.22 | 277.09 | 603.38 | 975.98 | 991.12 | 649.92 | 238.78 | 138.62 | 104.59 | 379.02 |
| 1982 | 95.61 | 99.48 | 130.34 | 160.97 | 181.40 | 487.61 | 679.70 | 556.37 | 373.95 | 135.88 | 83.67 | 65.48 | 255.23 |
| 1983 | 59.68 | 62.85 | 84.84 | 93.84 | 163.84 | 300.86 | 666.13 | 555.01 | 765.25 | 320.46 | 130.02 | 104.84 | 276.87 |
| 1984 | 91.54 | 93.09 | 116.40 | 96.93 | 139.92 | 427.89 | 740.56 | 616.57 | 602.98 | 233.10 | 109.17 | 94.57 | 280.93 |
| 1985 | 89.32 | 95.33 | 109.37 | 115.59 | 142.93 | 479.00 | 712.98 | 553.74 | 590.58 | 254.86 | 107.85 | 84.18 | 278.98 |
| Ave. | 95.11 | 97.49 | 115.22 | 136.85 | 199.80 | 468.42 | 755.01 | 763.53 | 629.23 | 308.16 | 155.58 | 113.42 | 321.16 |

Fig. 5-5 Duration Curve of Monthly and Annual Discharge



5.6 設計洪水量

5.6.1 概要

アルンダムの設計洪水量については、本計画のネパール国における経済的および社会的重要性を考慮すると、可能最大洪水量の手法を採用することが妥当であると考えられる。

可能最大洪水量（以下PMF）とは、ある地域で理論的に起こりうる気象及び水文現象が最も厳しい条件で組み合わさった時に予想される洪水量と定義される。ただし、本手法をアルン流域に適用するに当たっては、次の条件を前提とした。

- (i) アルン流域をヒマラヤ山脈を境に北側のチベット流域と南側のネパール流域に分離した。
- (ii) チベット流域については、利用できるデータがほとんどないが、年平均降水量が約 300mm程度と非常に少雨地域であり、洪水を引き起こすような規模の豪雨の発生はまず考えられないため、今回は基底流出成分として扱うこととした。
- (iii) ヒマラヤの南側流域に関しては、可能最大降水量に起因する流出量を直接流出成分とし(ii)の基底流出成分に足し合わせることによってPMFを算出した。
- (iv) PMFを誘起する要因の一つとして融雪も重要な役割を果たすことがあるが、アルン流域の洪水ピーク期は7月～9月で融雪期からはずれていること、冬期の降雪量が夏期の降雨量に比較し格段に少ないことから、本流域では融雪がPMFに占める割合が比較的少ないと考えられるため、今回は(ii)のチベット流域成分に融雪分も含まれると仮定した。

以上の手法とは別に確率統計解析も合わせて行ったが、流量データの期間が11ヶ年と短く、この解析結果のみでは信頼性に欠けるため、ここでは参考値程度にとどめておきたい。ただし、工事中的出水予測については確率値を採用した。

5.6.2 可能最大降水量（PMP）

PMPは非地形性降雨と、地形性降雨に大別されるが、アルン流域の降雨形態を見ると、その降水原因が南のベンガル湾側から吹き込む季節風に起因し、しかも降雨域がヒマラヤ山脈の南側斜面に限られ、平地およびヒマラヤ北部では降雨量が極端に少ないことから、地形性降雨の典型的な性質を備えていると考えられる。以下にPMP算出の手順を示す。

(i) 地形縦断図の作成。(Fig. 5-6、5-7)

1/500,000 地形図よりアルン流域のヒマラヤ山脈南側斜面の代表縦断形状をメッシュ法にて算定した。なお、標高は計算の都合上、大気圧(mb)に換算してある。

(ii) 大気の流線の設定

大気の流線は50mb毎に与えることとし、地表の影響を受けない面(Nodal surface)を300mbと仮定した。なお、流線間の降水量は次式で与えられる。

$$R = \frac{V_1 \cdot \Delta p_1 (\bar{q}_1 - \bar{q}_2)}{Y} \cdot \frac{1}{g \rho}$$

ここにRは降水量(cm/sec)、 V_1 は平均流入風速(cm/sec)、 Δp_1 は流入個所の気圧差(mb)、 \bar{q}_1 、 \bar{q}_2 はそれぞれ流入個所および、流出個所での平均比湿(g/kg)、Yは水平距離(cm)、gおよび ρ はそれぞれ重力加速度(cm/sec²)および水の密度(g/cm³)を示している。なおここでは比湿の代わりに混合比wを用いることとし、またディメンジョンを使用データにそろえると次式になる。

$$R = \frac{0.8813 \times V_1 \cdot \Delta p_1 (\bar{w}_1 - \bar{w}_2)}{Y}$$

ここに、Rは24時間雨量(mm/day)、 V_1 は平均流入風速(m/sec)、 Δp_1 は流入個所の気圧差(mb)、 \bar{w}_1 、 \bar{w}_2 はそれぞれ流入個所および流出個所における平均混合比(g/kg)、Yは水平距離(km)を示している。

(iii) 気象データ(0 km地点における)の設定

気象データとしては、気温および相対湿度は、Bhojpur (BL. 1595m、1971年～82年、12ヶ年)。風速についてはカトマンズのを代用することにした。なお、今回は入手したデータが日単位のため、PMPも日単位で算出することとし、各データの代表値は次のようにして決めた。

気温(T)：最高気温の月平均値を包絡線で結び、その最高値25℃を採用した。なお標高による気温の低減率は-0.6℃/100mとした。

相対湿度(R·H)：2回/日の観測値の内、小さい方を当日の代表湿度とし、

Fig. 5-6 Analyzed Area in Arun River Basin

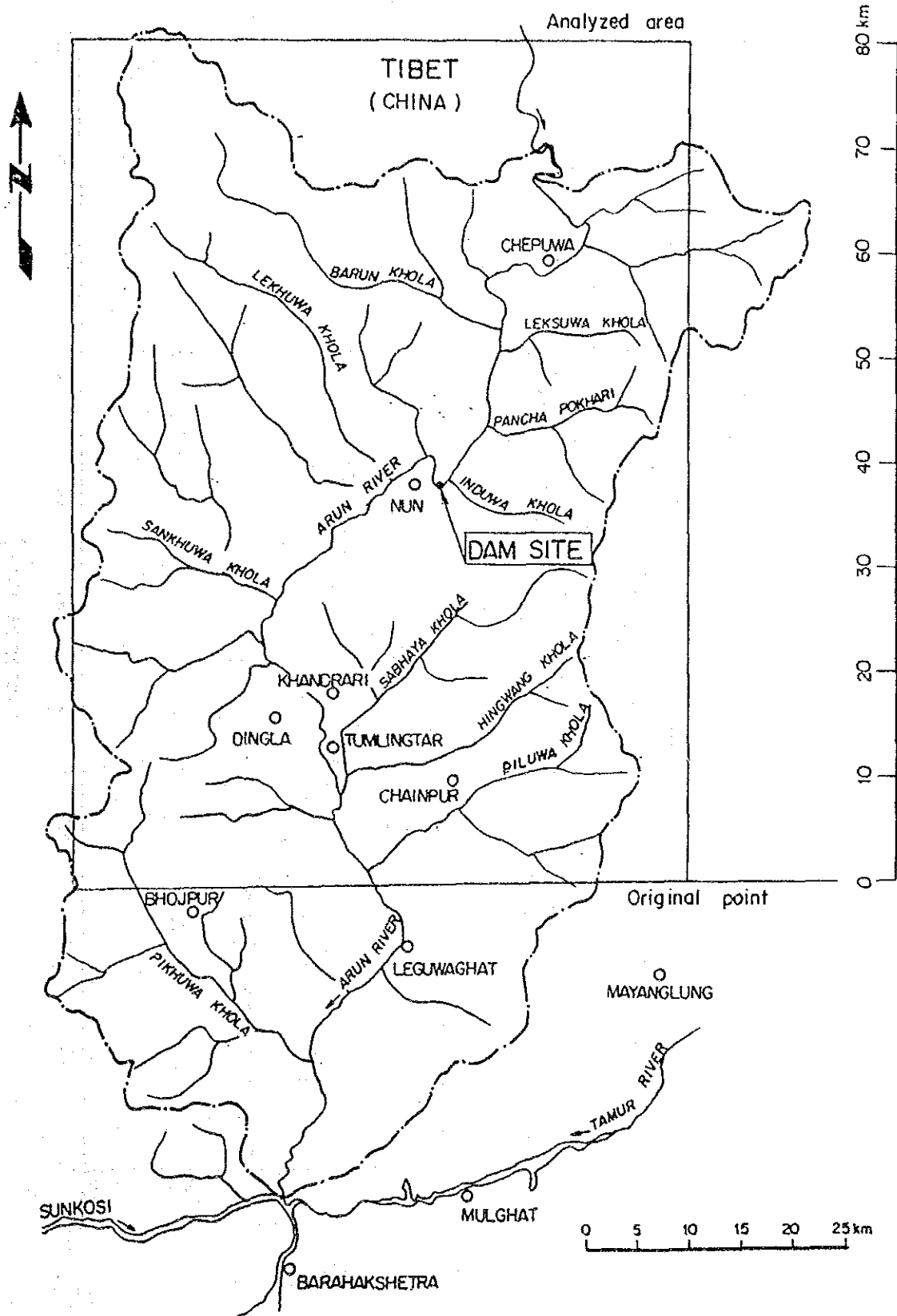
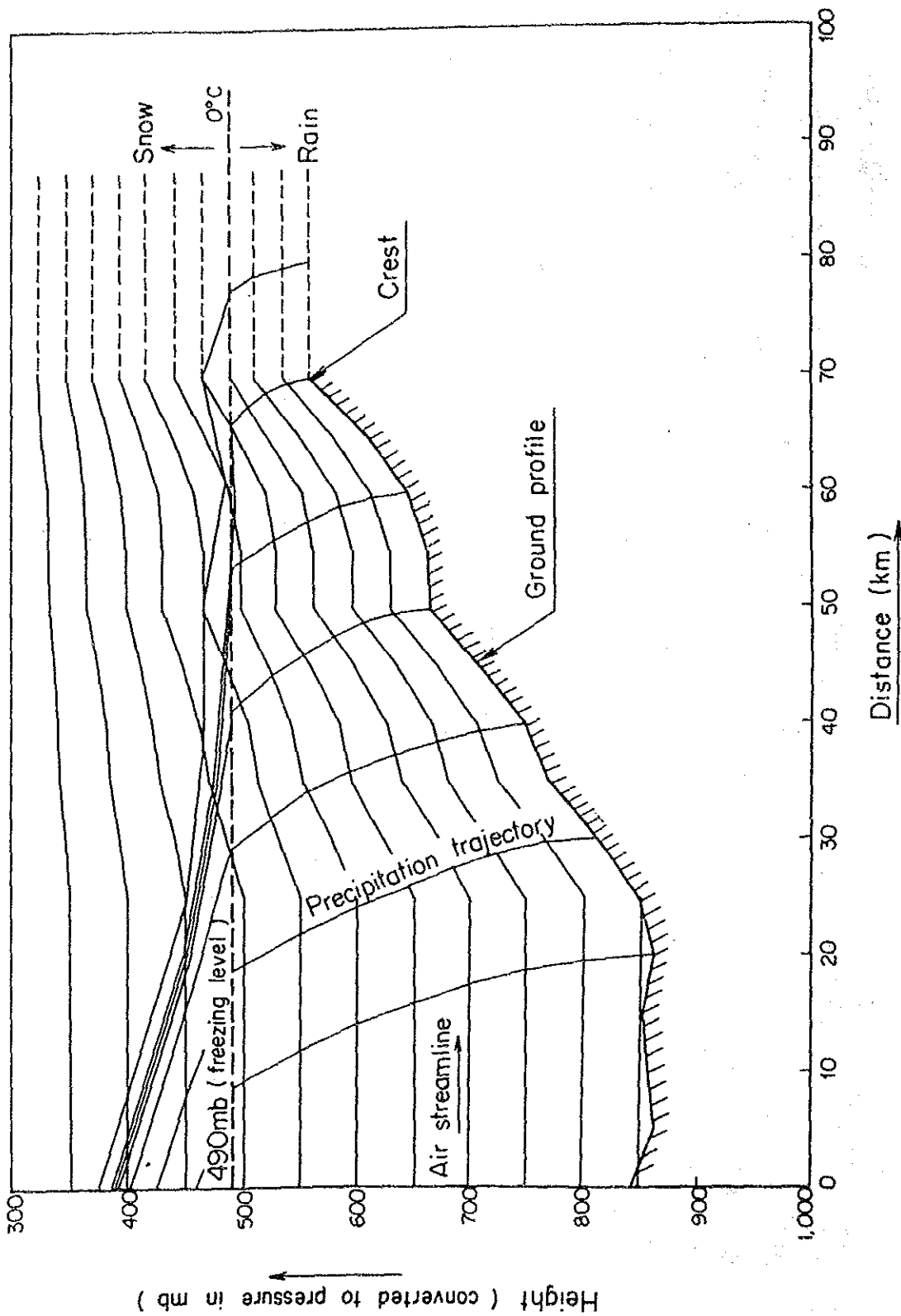


Fig. 5-7 Ground Profile, Air Streamlines and Precipitation Trajectories for PMP Estimation



その中での最高値93%を採用した。標高と相対湿度の関係は日本での観測結果を元に 300mbで50%となるように直線変化させた。

風速 (V) : Bhojpurの風速データを入手していないため、カトマンズの1971~75、5ケ年の日平均風速の内、雨期に記録された最高値 6.7ノット (3.4m/s)を代用した。なお標高による風速の増加率は、これも日本での観測結果を元に 300mbで50m/sとなるように直線変化させた。

(iv) 氷線の設定

先の気温の降下率より、氷線を 490mbに設定した。この線を境に上では雪、下では雨となる。

(v) Fig. 5-7 に示すように10km毎に降雨軌跡を作成する。

(vi) Table 5-5 (I)~(G)に示すように各降雨軌跡間毎に先に示した降雨算定式により降雨量を計算する。

以上の結果から、ダムの流域の内ヒマラヤ山脈南側斜面におけるPMPの日流域平均を求めると、434mm/dayとなる。

5.6.3 単位図の作成

今回の解析では洪水時のハイドログラフが入手できなかったため、Snyderの方法を用いて単位図の遅れ時間、ピーク流量等を推定することとした。また単位図の形状は、上昇部分については $t^{2.4}$ 、下降部分については指数関数として表現することとして、6時間単位、降雨強度1cmに対応する単位図を作成した。(Fig. 5-8 (I))

5.6.4 PMPの時間分布および有効降雨

単位図が6時間単位のため、先に求めたPMP値も6時間雨量毎に配分し直す必要がある。配分率は既往世界最大地点雨量の降雨時間と降雨量関係を示す次式 $R = 16.6 \cdot H^{0.475}$ を使用した。この結果をFig. 5-9に示すが図中arrangeとは流出量をもっとも厳しくなるように並びかえたものであり、また有効降雨とは、アレンジした値からさらに時間損失量 2 mm/hrを差し引いたものである。

5.6.5 PMPによるFlood Hydrograph

以上より、有効降雨を単位図により合成するとFlood Hydrographが得られる。(Table 5-6 (I))

Table 5-5 (1) Computation of PMP between 20 km and 30 km

| P (mb) | T (°C) | R.H (%) | V (m/s) | Vav (m/s) | VavΔP (m/s) | Ws (g/kg) | WI | Pc (mb) | Tc (°C) | PLT | WLT | PUT | WUT | Wlav | WLTav | WUTav | $\frac{\Delta WLTav}{WLTav} = \frac{Wlav - WLTav}{WLTav}$ | $\frac{\Delta WUTav}{WUTav} = \frac{WUTav - Wlav}{WUTav}$ |
|--------|--------|---------|---------|-----------|-------------|-----------|-------|---------|---------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|---|---|
| 350 | -15.8 | 54 | 46.0 | | | 3.2 | 1.72 | 310 | -25.0 | 350 | 1.72 | 350 | 1.72 | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 0.00 | 0 |
| 400 | -9.6 | 58 | 41.9 | 43.95 | 2197 | 4.8 | 2.78 | 360 | -17.5 | 400 | 2.78 | 400 | 2.78 | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 0.00 | 0 |
| 450 | -4.2 | 62 | 37.0 | 39.45 | 1972 | 6.5 | 4.03 | 415 | -11.0 | 450 | 4.03 | 450 | 4.03 | 3.40 | 3.40 | 3.40 | 0.00 | 0 |
| 500 | 0.6 | 66 | 33.2 | 35.10 | 1755 | 8.0 | 5.28 | 460 | -6.0 | 500 | 5.28 | 500 | 5.28 | 4.65 | 4.65 | 4.65 | 0.00 | 0 |
| 550 | 5.0 | 70 | 28.9 | 31.05 | 1552 | 10.0 | 7.00 | 515 | -2.0 | 550 | 7.00 | 550 | 7.00 | 6.14 | 6.14 | 6.14 | 0.00 | 0 |
| 600 | 9.0 | 74 | 24.5 | 26.70 | 1335 | 12.5 | 9.25 | 555 | 3.5 | 600 | 9.25 | 600 | 9.25 | 8.12 | 8.12 | 8.12 | 0.00 | 0 |
| 650 | 12.7 | 78 | 20.6 | 22.55 | 1127 | 14.5 | 11.31 | 610 | 8.0 | 650 | 11.31 | 645 | 11.31 | 10.28 | 10.28 | 10.28 | 0.00 | 0 |
| 700 | 16.1 | 82 | 16.4 | 18.50 | 925 | 15.5 | 12.71 | 650 | 11.0 | 700 | 12.71 | 685 | 12.71 | 12.01 | 12.01 | 12.01 | 0.00 | 0 |
| 750 | 19.3 | 85 | 11.9 | 14.15 | 707 | 18.5 | 15.72 | 720 | 15.0 | 750 | 15.72 | 725 | 15.72 | 14.21 | 14.21 | 14.21 | 0.00 | 0 |
| 800 | 22.2 | 89 | 8.3 | 10.10 | 505 | 22.0 | 19.58 | 775 | 20.0 | 800 | 19.58 | 770 | 19.5 | 17.65 | 17.65 | 17.65 | 0.00 | 0 |
| 850 | 25.0 | 93 | 3.4 | 5.85 | 292 | 24.0 | 22.32 | 830 | 23.0 | 850 | 22.32 | 815 | 22.0 | 20.95 | 20.95 | 20.95 | 0.00 | 0 |

24hr volume (mm(km)) = 0.8813 × TOTAL = 0
 Unit horizontal area (km) = 20
 24hr average rainfall (mm) = 0.0
 (41 - 0) / (30.0 - 20.0) = 4mm

Table 5-5 (2) Computation of PMP between 30 km and 40 km

| P (mb) | T (°C) | R.H (%) | V (m/s) | Vav (m/s) | VavΔP (m/s) | Ws (g/kg) | WI | Pc (mb) | Tc (°C) | PLT | WLT | PUT | WUT | Wlav | WLTav | WUTav | $\frac{\Delta WLTav}{WLTav} = \frac{Wlav - WLTav}{WLTav}$ | $\frac{\Delta WUTav}{WUTav} = \frac{WUTav - Wlav}{WUTav}$ |
|--------|--------|---------|---------|-----------|-------------|-----------|-------|---------|---------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|---|---|
| 350 | -15.8 | 54 | 46.0 | | | 3.2 | 1.72 | 310 | -25.0 | 350 | 1.72 | 350 | 1.72 | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 0.00 | 0 |
| 400 | -9.6 | 58 | 41.9 | 43.95 | 2197 | 4.8 | 2.78 | 360 | -17.5 | 400 | 2.78 | 400 | 2.78 | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 0.00 | 0 |
| 450 | -4.2 | 62 | 37.0 | 39.45 | 1972 | 6.5 | 4.03 | 415 | -11.0 | 450 | 4.03 | 450 | 4.03 | 3.40 | 3.40 | 3.40 | 0.00 | 0 |
| 500 | 0.6 | 66 | 33.2 | 35.10 | 1755 | 8.0 | 5.28 | 460 | -6.0 | 500 | 5.28 | 490 | 5.28 | 4.65 | 4.65 | 4.65 | 0.00 | 0 |
| 550 | 5.0 | 70 | 28.9 | 31.05 | 1552 | 10.0 | 7.00 | 515 | -2.0 | 550 | 7.00 | 525 | 7.00 | 6.14 | 6.14 | 6.14 | 0.00 | 0 |
| 600 | 9.0 | 74 | 24.5 | 26.70 | 1335 | 12.5 | 9.25 | 555 | 3.5 | 600 | 9.25 | 555 | 9.25 | 8.12 | 8.12 | 8.12 | 0.00 | 0 |
| 650 | 12.7 | 78 | 20.6 | 22.55 | 1127 | 14.5 | 11.31 | 610 | 8.0 | 645 | 11.31 | 595 | 11.00 | 10.28 | 10.28 | 10.12 | 0.00 | 0 |
| 700 | 16.1 | 82 | 16.4 | 18.50 | 925 | 15.5 | 12.71 | 650 | 11.0 | 685 | 12.71 | 635 | 12.50 | 12.01 | 12.01 | 11.75 | 0.00 | 0 |
| 750 | 19.3 | 85 | 11.9 | 14.15 | 707 | 18.5 | 15.72 | 720 | 15.0 | 725 | 15.72 | 670 | 14.00 | 14.21 | 14.21 | 13.25 | 0.00 | 0 |
| 800 | 22.2 | 89 | 8.3 | 10.10 | 505 | 22.0 | 19.58 | 775 | 20.0 | 770 | 19.5 | 710 | 17.5 | 17.65 | 17.65 | 15.75 | 0.00 | 0 |
| 850 | 25.0 | 93 | 3.4 | 5.85 | 292 | 24.0 | 22.32 | 830 | 23.0 | 815 | 22.0 | 750 | 20.0 | 20.95 | 20.79 | 18.75 | 0.16 | 0 |

24hr volume (mm(km)) = 0.8813 × TOTAL = 46
 Unit horizontal area (km) = 41
 24hr average rainfall (mm) = 1.3
 (2383 - 41) / (40.0 - 30.0) = 234mm

Table 5-5 (3) Computation of PMP between 40 km and 50 km

| P (mb) | T (°C) | R.H. (%) | V (m/s) | Vav (m/s) | VavΔP (m/s) | Ws (g/kg) | WI | Pc (mb) | Tc (°C) | PLT | WLT | PWT | WUT | Wlav | WLTav | WUTav | $\frac{\Delta WLTav}{WLTav} = \frac{Wlav - Vav\Delta P}{WLTav}$ | $\frac{\Delta WUTav}{WUTav} = \frac{Wlav - Vav\Delta P}{WUTav}$ |
|--------|--------|----------|---------|-----------|-------------|-----------|-------|---------|---------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|---|---|
| 350 | -15.8 | 54 | 46.0 | | | 3.2 | 1.72 | 310 | -25.0 | 350 | 1.72 | 350 | 1.72 | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 0.00 | 0 |
| 400 | -9.6 | 58 | 41.9 | 43.95 | 2197 | 4.8 | 2.78 | 360 | -17.5 | 400 | 2.78 | 400 | 2.78 | 3.40 | 3.40 | 3.40 | 0.00 | 0 |
| 450 | -4.2 | 62 | 37.0 | 39.45 | 1972 | 6.5 | 4.03 | 415 | -11.0 | 450 | 4.03 | 450 | 4.03 | 4.65 | 4.65 | 4.65 | 0.00 | 0 |
| 500 | 0.6 | 66 | 33.2 | 35.10 | 1755 | 8.0 | 5.28 | 460 | -6.0 | 490 | 5.28 | 480 | 5.28 | 6.14 | 6.14 | 6.14 | 0.00 | 0 |
| 550 | 5.0 | 70 | 28.9 | 31.05 | 1552 | 10.0 | 7.00 | 515 | -2.0 | 525 | 7.00 | 500 | 6.50 | 8.12 | 8.12 | 8.12 | 0.00 | 388 |
| 600 | 9.0 | 74 | 24.5 | 26.70 | 1335 | 12.5 | 9.25 | 555 | 3.5 | 530 | 9.25 | 530 | 8.50 | 10.28 | 10.28 | 10.28 | 0.00 | 834 |
| 650 | 12.7 | 78 | 20.6 | 22.55 | 1127 | 14.5 | 11.31 | 610 | 8.0 | 595 | 11.00 | 560 | 10.00 | 12.01 | 12.01 | 12.01 | 0.15 | 1161 |
| 700 | 16.1 | 82 | 16.4 | 18.50 | 925 | 15.5 | 12.71 | 650 | 11.0 | 635 | 12.50 | 585 | 11.00 | 14.21 | 14.21 | 14.21 | 0.26 | 1396 |
| 750 | 19.3 | 85 | 11.9 | 14.15 | 707 | 18.5 | 15.72 | 720 | 15.0 | 670 | 14.00 | 610 | 12.50 | 17.65 | 17.65 | 17.65 | 0.96 | 1745 |
| 800 | 22.2 | 89 | 8.3 | 10.10 | 505 | 22.0 | 19.58 | 775 | 20.0 | 710 | 17.5 | 635 | 15.0 | 20.95 | 20.95 | 20.95 | 1.90 | 1970 |
| 850 | 25.0 | 93 | 3.4 | 5.85 | 292 | 24.0 | 22.32 | 830 | 23.0 | 750 | 20.0 | 665 | 18.0 | 27.00 | 27.00 | 27.00 | 2.20 | 1301 |

24hr volume (mm(km)) = 0.8813 x TOTAL = 2704
 Unit horizontal area (km) = 40
 24hr average rainfall (mm) = 59.5
 24hr average rainfall over last leg = (7754 - 2383) / (50.0 - 40.0) = 527mm

Table 5-5 (4) Computation of PMP between 50 km and 60 km

| P (mb) | T (°C) | R.H. (%) | V (m/s) | Vav (m/s) | VavΔP (m/s) | Ws (g/kg) | WI | Pc (mb) | Tc (°C) | PLT | WLT | PWT | WUT | Wlav | WLTav | WUTav | $\frac{\Delta WLTav}{WLTav} = \frac{Wlav - Vav\Delta P}{WLTav}$ | $\frac{\Delta WUTav}{WUTav} = \frac{Wlav - Vav\Delta P}{WUTav}$ |
|--------|--------|----------|---------|-----------|-------------|-----------|-------|---------|---------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|---|---|
| 350 | -15.8 | 54 | 46.0 | | | 3.2 | 1.72 | 310 | -25.0 | 350 | 1.72 | 350 | 1.72 | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 0.00 | 0 |
| 400 | -9.6 | 58 | 41.9 | 43.95 | 2197 | 4.8 | 2.78 | 360 | -17.5 | 400 | 2.78 | 400 | 2.78 | 3.40 | 3.40 | 3.40 | 0.00 | 0 |
| 450 | -4.2 | 62 | 37.0 | 39.45 | 1972 | 6.5 | 4.03 | 415 | -11.0 | 450 | 4.03 | 450 | 4.03 | 4.65 | 4.65 | 4.65 | 0.00 | 0 |
| 500 | 0.6 | 66 | 33.2 | 35.10 | 1755 | 8.0 | 5.28 | 460 | -6.0 | 480 | 5.28 | 475 | 5.28 | 6.14 | 6.14 | 6.14 | 0.00 | 0 |
| 550 | 5.0 | 70 | 28.9 | 31.05 | 1552 | 10.0 | 7.00 | 515 | -2.0 | 500 | 6.50 | 485 | 6.00 | 8.12 | 8.12 | 8.12 | 0.25 | 776 |
| 600 | 9.0 | 74 | 24.5 | 26.70 | 1335 | 12.5 | 9.25 | 555 | 3.5 | 530 | 8.50 | 500 | 7.50 | 10.28 | 10.28 | 10.28 | 0.62 | 834 |
| 650 | 12.7 | 78 | 20.6 | 22.55 | 1127 | 14.5 | 11.31 | 610 | 8.0 | 560 | 10.00 | 530 | 8.50 | 12.01 | 12.01 | 12.01 | 1.03 | 1161 |
| 700 | 16.1 | 82 | 16.4 | 18.50 | 925 | 15.5 | 12.71 | 650 | 11.0 | 585 | 11.00 | 560 | 10.00 | 14.21 | 14.21 | 14.21 | 1.51 | 1396 |
| 750 | 19.3 | 85 | 11.9 | 14.15 | 707 | 18.5 | 15.72 | 720 | 15.0 | 610 | 12.50 | 590 | 12.00 | 17.65 | 17.65 | 17.65 | 2.46 | 1745 |
| 800 | 22.2 | 89 | 8.3 | 10.10 | 505 | 22.0 | 19.58 | 775 | 20.0 | 635 | 15.0 | 620 | 14.5 | 20.95 | 20.95 | 20.95 | 3.90 | 2223 |
| 850 | 25.0 | 93 | 3.4 | 5.85 | 292 | 24.0 | 22.32 | 830 | 23.0 | 665 | 18.0 | 650 | 17.5 | 27.00 | 27.00 | 27.00 | 4.45 | 1447 |

24hr volume (mm(km)) = 0.8813 x TOTAL = 8798
 Unit horizontal area (km) = 50
 24hr average rainfall (mm) = 155.0
 24hr average rainfall over last leg = (12058 - 7754) / (60.0 - 50.0) = 430mm

Table 5-5 (5) Computation of PMP between 60 km and 70 km

| P (mb) | T (°C) | R.H (%) | V (m/s) | Vav (m/s) | VavΔP (m/s) | Ws (g/kg) | WI | Pc (mb) | Tc (°C) | PLT | WLT | PUT | WUT | Wlav | WLTav | WUTav | $\frac{\Delta WLTav}{WLTav} = \frac{Wlav - Wav\Delta P}{WLTav}$ | $\frac{\Delta WUTav}{WUTav} = \frac{Wlav - Vav\Delta P}{WUTav}$ |
|---|--------|---------|---------|-----------|-------------|-----------|-------|---------|---------|-----|-------|-----|------|-------|-------|-------|---|---|
| 350 | -15.8 | 54 | 46.0 | | | 3.2 | 1.72 | 310 | -25.0 | 350 | 1.72 | 350 | 1.72 | | | | | |
| 400 | -9.6 | 58 | 41.9 | 43.95 | 2197 | 4.8 | 2.78 | 360 | -17.5 | 400 | 2.78 | 400 | 2.78 | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 0.00 | 0 |
| 450 | -4.2 | 62 | 37.0 | 39.45 | 1972 | 6.5 | 4.03 | 415 | -11.0 | 450 | 4.03 | 450 | 4.03 | 3.40 | 3.40 | 3.40 | 0.00 | 0 |
| 500 | 0.6 | 66 | 33.2 | 35.10 | 1755 | 8.0 | 5.28 | 460 | -6.0 | 475 | 5.28 | 475 | 5.28 | 4.65 | 4.65 | 4.65 | 0.00 | 0 |
| 550 | 5.0 | 70 | 28.9 | 31.05 | 1552 | 10.0 | 7.00 | 515 | -2.0 | 485 | 6.00 | 485 | 6.00 | 6.14 | 5.64 | 5.64 | 0.50 | 776 |
| 600 | 9.0 | 74 | 24.5 | 26.70 | 1335 | 12.5 | 9.25 | 555 | 3.5 | 500 | 7.50 | 490 | 7.50 | 8.12 | 6.75 | 6.75 | 1.37 | 1835 |
| 650 | 12.7 | 78 | 20.6 | 22.55 | 1127 | 14.5 | 11.31 | 610 | 8.0 | 530 | 8.50 | 490 | 7.00 | 10.28 | 8.00 | 7.25 | 2.28 | 2570 |
| 700 | 16.1 | 82 | 16.4 | 18.50 | 925 | 15.5 | 12.71 | 650 | 11.0 | 560 | 10.00 | 505 | 8.00 | 12.01 | 9.25 | 7.50 | 2.76 | 2553 |
| 750 | 19.3 | 85 | 11.9 | 14.15 | 707 | 18.5 | 15.72 | 720 | 15.0 | 590 | 12.00 | 520 | 9.50 | 14.21 | 11.00 | 8.75 | 3.21 | 2276 |
| 800 | 22.2 | 89 | 8.3 | 10.10 | 505 | 22.0 | 19.58 | 775 | 20.0 | 620 | 14.5 | 540 | 12.5 | 17.65 | 13.25 | 11.00 | 4.40 | 2223 |
| 850 | 25.0 | 93 | 3.4 | 5.85 | 292 | 24.0 | 22.32 | 830 | 23.0 | 650 | 17.5 | 560 | 15.0 | 20.95 | 16.00 | 13.75 | 4.95 | 1447 |
| 24hr average rainfall over last leg = (17215 - 12058) / (70.0 - 60.0) = 515mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24hr. volume (mm(km))=0.8813×TOTAL= 13683 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Unit horizontal area (km)= 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24hr average rainfall(mm)= 200.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTAL= 19533 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17215 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 245.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 515mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Table 5-5 (6) Computation of PMP between 70 km and 80 km

| P (mb) | T (°C) | R.H (%) | V (m/s) | Vav (m/s) | VavΔP (m/s) | Ws (g/kg) | WI | Pc (mb) | Tc (°C) | PLT | WLT | PUT | WUT | Wlav | WLTav | WUTav | $\frac{\Delta WLTav}{WLTav} = \frac{Wlav - Vav\Delta P}{WLTav}$ | $\frac{\Delta WUTav}{WUTav} = \frac{Wlav - Vav\Delta P}{WUTav}$ |
|--|--------|---------|---------|-----------|-------------|-----------|-------|---------|---------|-----|------|-----|------|-------|-------|-------|---|---|
| 350 | -15.8 | 54 | 46.0 | | | 3.2 | 1.72 | 310 | -25.0 | 350 | 1.72 | 350 | 1.72 | | | | | |
| 400 | -9.6 | 58 | 41.9 | 43.95 | 2197 | 4.8 | 2.78 | 360 | -17.5 | 400 | 2.78 | 400 | 2.78 | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 0.00 | 0 |
| 450 | -4.2 | 62 | 37.0 | 39.45 | 1972 | 6.5 | 4.03 | 415 | -11.0 | 450 | 4.03 | 450 | 4.03 | 3.40 | 3.40 | 3.40 | 0.00 | 0 |
| 500 | 0.6 | 66 | 33.2 | 35.10 | 1755 | 8.0 | 5.28 | 460 | -6.0 | 475 | 5.28 | 470 | 5.28 | 4.65 | 4.65 | 4.65 | 0.00 | 0 |
| 550 | 5.0 | 70 | 28.9 | 31.05 | 1552 | 10.0 | 7.00 | 515 | -2.0 | 485 | 6.00 | 470 | 5.80 | 6.14 | 5.64 | 5.54 | 0.50 | 931 |
| 600 | 9.0 | 74 | 24.5 | 26.70 | 1335 | 12.5 | 9.25 | 555 | 3.5 | 490 | 7.50 | 485 | 7.40 | 8.12 | 6.75 | 6.60 | 1.37 | 1835 |
| 650 | 12.7 | 78 | 20.6 | 22.55 | 1127 | 14.5 | 11.31 | 610 | 8.0 | 490 | 7.00 | 470 | 6.70 | 10.28 | 7.25 | 7.05 | 3.03 | 3641 |
| 700 | 16.1 | 82 | 16.4 | 18.50 | 925 | 15.5 | 12.71 | 650 | 11.0 | 505 | 8.00 | 490 | 8.00 | 12.01 | 7.50 | 7.35 | 4.51 | 4310 |
| 750 | 19.3 | 85 | 11.9 | 14.15 | 707 | 18.5 | 15.72 | 720 | 15.0 | 520 | 9.50 | 510 | 9.50 | 14.21 | 8.75 | 8.75 | 5.46 | 3868 |
| 800 | 22.2 | 89 | 8.3 | 10.10 | 505 | 22.0 | 19.58 | 775 | 20.0 | 540 | 12.5 | 540 | 12.5 | 17.65 | 11.00 | 11.00 | 6.65 | 3359 |
| 850 | 25.0 | 93 | 3.4 | 5.85 | 292 | 24.0 | 22.32 | 830 | 23.0 | 560 | 15.0 | 560 | 15.0 | 20.95 | 13.75 | 13.75 | 7.20 | 2106 |
| 24hr average rainfall over last leg = (17849 - 17215) / (80.0 - 70.0) = 63mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24hr volume (mm(km))=0.8813×TOTAL= 19533 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Unit horizontal area (km)= 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24hr average rainfall(mm)= 245.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTAL= 20253 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17215 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 245.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 63mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Table 5-6 (1) Synthetic Unit Hydrograph of PMP
(at the Dam Site)

| Time (hr) | Rainfall (cm) | Time | | | | | | | | | | | | | | | | Discharge (m ³ /s) | |
|-----------|---------------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|-------------------------------|----|
| | | 0 | 6 | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 54 | 60 | 66 | 72 | 78 | 84 | 90 | | 96 |
| 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 1.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 2.1 | 0 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 2.5 | 0 | 29 | 121 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 3.1 | 0 | 34 | 153 | 320 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 4.3 | 0 | 42 | 177 | 404 | 213 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 7.5 | 0 | 59 | 220 | 468 | 269 | 141 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 42 | 21.3 | 0 | 101 | 311 | 580 | 311 | 179 | 94 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | 5.5 | 0 | 286 | 533 | 821 | 385 | 207 | 119 | 63 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 54 | 3.7 | 0 | 74 | 1508 | 1406 | 546 | 256 | 137 | 79 | 42 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | 2.8 | 0 | 50 | 390 | 3983 | 935 | 363 | 170 | 91 | 53 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 66 | 2.3 | 0 | 38 | 263 | 1030 | 2649 | 622 | 241 | 113 | 61 | 35 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 72 | 1.9 | 0 | 31 | 200 | 696 | 685 | 1761 | 414 | 161 | 75 | 40 | 23 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 78 | | 26 | 163 | 529 | 463 | 456 | 1171 | 275 | 107 | 107 | 50 | 27 | 15 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 84 | | 137 | 430 | 352 | 308 | 303 | 779 | 183 | 71 | 33 | 18 | 10 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 90 | | | 361 | 286 | 234 | 205 | 201 | 518 | 122 | 47 | 22 | 12 | 7 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 96 | | | | 240 | 190 | 156 | 136 | 134 | 344 | 81 | 31 | 15 | 8 | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| 102 | | | | 160 | 126 | 103 | 90 | 89 | 229 | 54 | 21 | 10 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| 108 | | | | | 106 | 84 | 69 | 60 | 59 | 152 | 36 | 14 | 7 | 7 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |
| 114 | | | | | | 71 | 56 | 45 | 40 | 39 | 101 | 24 | 24 | 14 | 9 | 6 | 6 | 6 | 1 |
| 120 | | | | | | | 47 | 37 | 30 | 27 | 26 | 67 | 67 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 2 |
| 126 | | | | | | | | 31 | 25 | 20 | 18 | 17 | 17 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 2 |
| 132 | | | | | | | | | 21 | 16 | 13 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 3 |
| 138 | | | | | | | | | | 14 | 11 | 11 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 5 |
| 144 | | | | | | | | | | | 9 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 13 |
| 150 | | | | | | | | | | | | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| 156 | | | | | | | | | | | | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| 162 | | | | | | | | | | | | | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 168 | | | | | | | | | | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 174 | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 180 | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | 2 | 1 |
| 186 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 |
| 192 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 198 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 204 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 210 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 216 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 222 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Table 5-6 (2) Synthetic Unit Hydrograph of PMP
(at the Powerhouse)

| Time (hr) | Rainfall (cm) | Time | | | | | | | | | | | | Discharge (m ³ /s) | | | | | | | | | | | |
|--------------|------------------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|----|----|----------------------------------|----|----|----|----|----|-----|---|---|---|---|------|
| | | 0 | 6 | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 54 | 60 | 66 | | 72 | 78 | 84 | 90 | 96 | 102 | | | | | |
| 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 6 | 1.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 |
| 12 | 2.1 | 0 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 181 |
| 18 | 2.5 | 0 | 35 | 146 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 614 |
| 24 | 3.1 | 0 | 41 | 185 | 388 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1035 |
| 30 | 4.3 | 0 | 50 | 214 | 490 | 281 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1462 |
| 36 | 7.5 | 0 | 71 | 265 | 568 | 355 | 203 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2015 |
| 42 | 21.3 | 0 | 122 | 376 | 704 | 410 | 256 | 147 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3084 |
| 48 | 5.5 | 0 | 345 | 644 | 997 | 509 | 297 | 186 | 106 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5134 |
| 54 | 3.7 | 0 | 89 | 1823 | 1707 | 721 | 368 | 215 | 134 | 77 | 56 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7697 |
| 60 | 2.8 | 0 | 60 | 472 | 4835 | 1235 | 521 | 266 | 155 | 97 | 70 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6797 |
| 66 | 2.3 | 0 | 46 | 318 | 1251 | 3497 | 893 | 377 | 193 | 112 | 70 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5776 |
| 72 | 1.9 | 0 | 37 | 242 | 844 | 905 | 2529 | 646 | 273 | 139 | 81 | 51 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4846 |
| 78 | | 0 | 31 | 197 | 642 | 611 | 654 | 1829 | 467 | 197 | 101 | 59 | 37 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4028 |
| 84 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3231 |
| 90 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2338 |
| 96 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1692 |
| 102 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1222 |
| 108 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 880 |
| 114 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 633 |
| 120 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 455 |
| 126 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 322 |
| 132 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 226 |
| 138 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 150 |
| 144 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 70 |
| 150 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42 |
| 156 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 |
| 162 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| 168 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 174 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 180 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 186 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 192 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 198 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 204 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 210 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 216 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 222 | | 0 | 31 | 165 | 522 | 465 | 442 | 473 | 323 | 338 | 143 | 73 | 42 | 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |

Fig. 5-8 (1) Unit Hydrograph at Arun Damsite

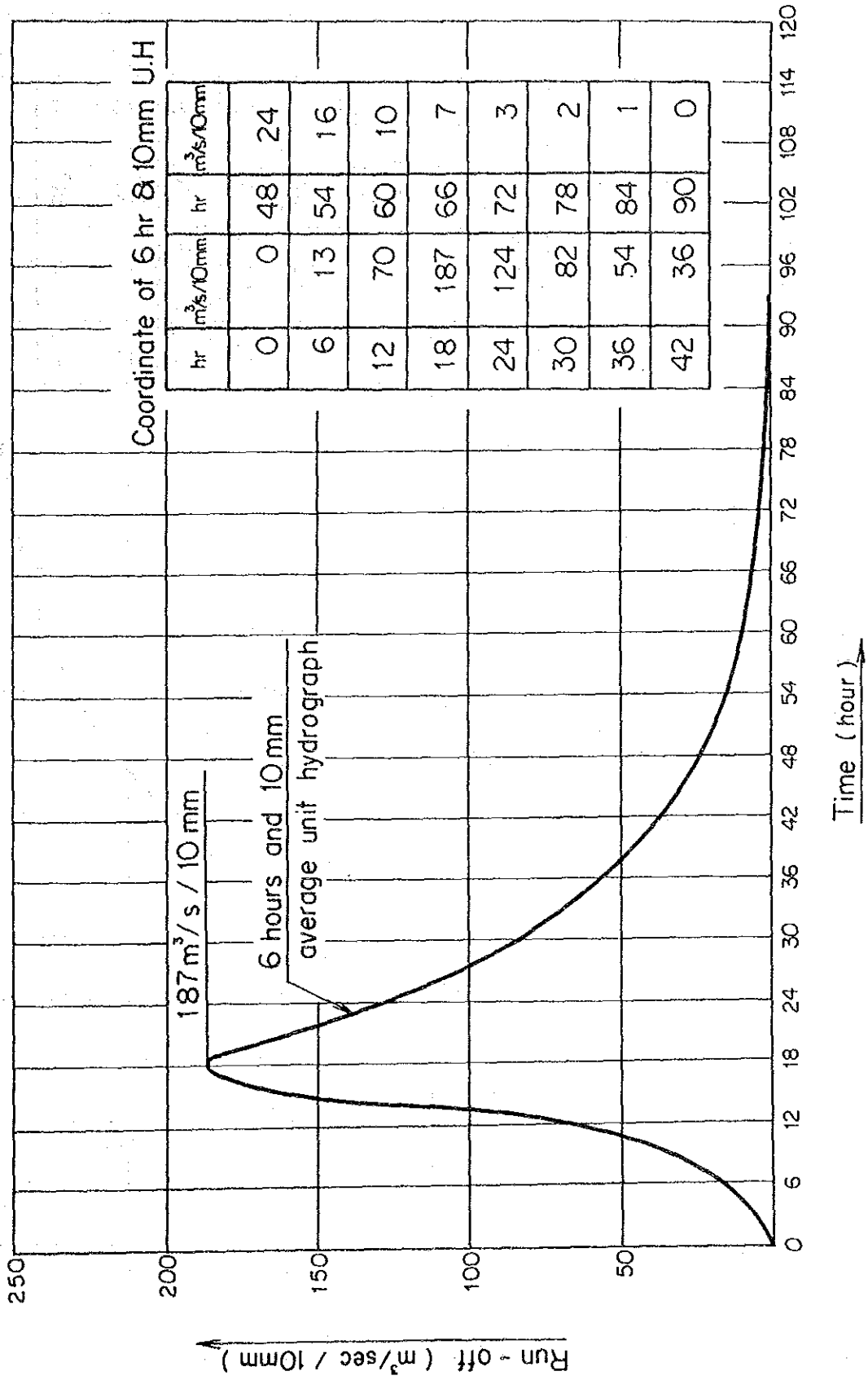


Fig. 5-8 (2) Unit Hydrograph at Powerhouse

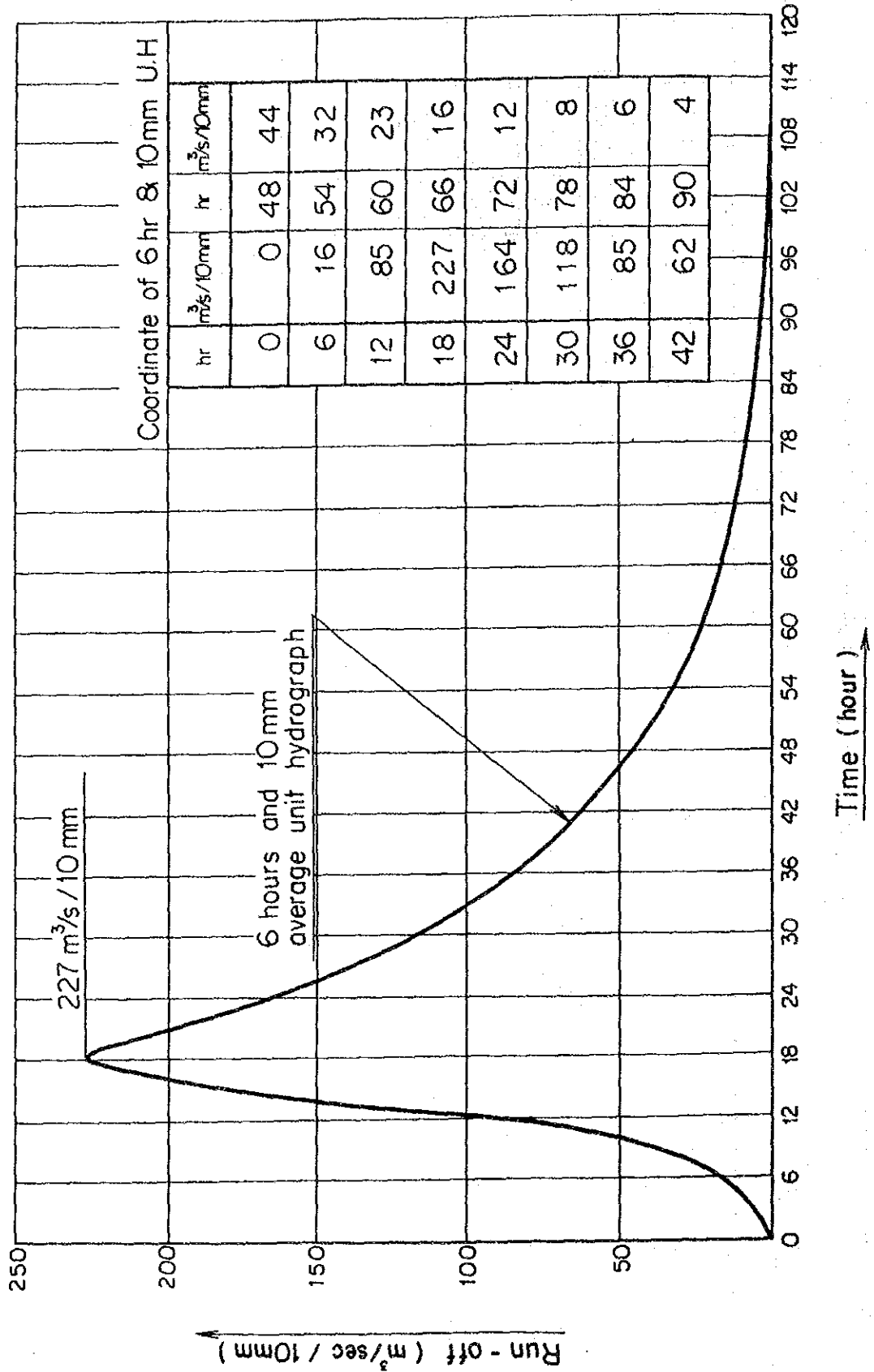
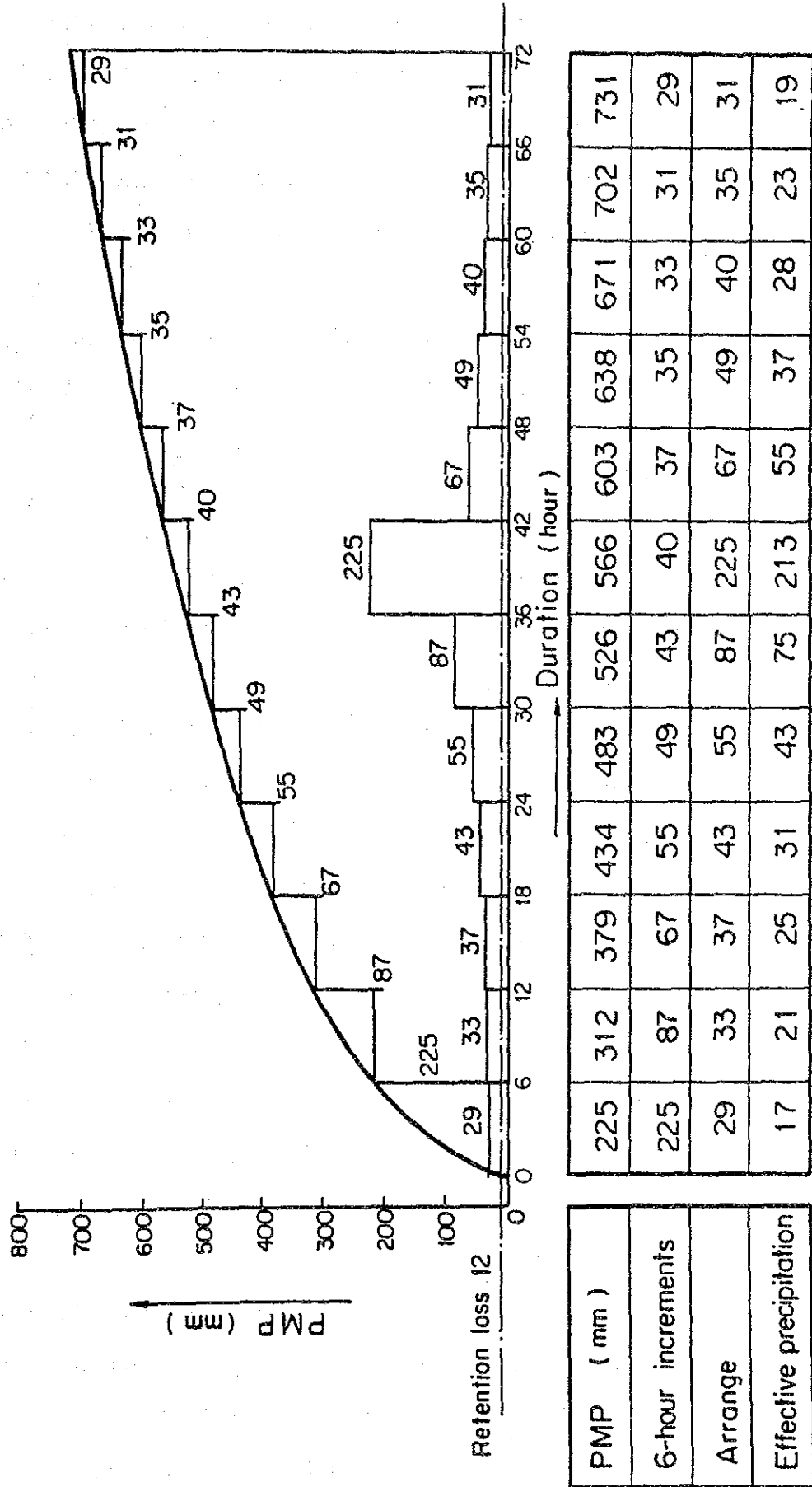


Fig. 5-9 Time Distribution of Rainfall Increment Six-Hour Period



5.6.6 チベット流域の流出成分

アルン流域の大部分を占めるチベット流域に関しては、ほとんどデータがないためチベット流域の水文解析はほとんど不可能に等しいが、幸いなことにチベット流域の年平均降水量が300mm程度しかなく、洪水を引き起こすような豪雨の発生はまず考えられないため、チベット流域の流出成分が基底流出成分の主体をなすものと考えことにする。基底流出成分の分離方法としては、次の2方法を試みた。(計算期間は1976~83、8ケ年)

- (i) Sabhaya 測水所のデータを面積換算して、ヒマラヤ南側の流出成分とし、Tumlingtar 測水所のデータから差し引いたものをチベット流域の流出成分とする。

$$Q(\text{Tibet}) = Q(\text{Tumlingtar}) - \frac{2833}{375} \times Q(\text{Sabhaya})$$

- (ii) ヒマラヤ南側流域に存在する次の4ヶ所の降雨データを用い、タンクモデル法により流出解析を行い、その結果をTumlingtar 測水所のデータから差し引くことによりチベット流域の流出成分を得た。

$$Q(\text{Tibet}) = Q(\text{Tumlingtar}) - Q(R(\text{Dingla, Num, Chainpur, Chepuwa}))$$

流出形態の異なるものを差し引くために、得られた結果はかなりノイズを含んでいるため、5日移動平均法により、平滑化した後、1枚の用紙に8ケ年分のhydrographを重ね合わせて包絡線で結んだのが、Fig. 5-10 (1)、(2)である。

どちらも同じ傾向を示しているが、(i)の方がやや大き目の値を示しているため、(i)の中の最大値1,600m³/sをチベット流域からの最大流出成分とする。

5.6.7 可能最大洪水量(PMF)

以上よりPMPによる流出成分とチベット側流出成分を足し合わせることで、ダムサイトにおけるPMFが得られる。その結果をFig. 5-11(1)に示す。図よりピーク流量は7,700m³/sとなる。

5.6.8 確率洪水量

Tumlingtarの1975~1985、11ケ年のデータに基づきLog Pearson III、およびGumbelにより算出した結果をTable 5-7、5-8に示す。Tableには年最大値に基づくものと、月別最大値に基づく解析結果とを併記してある。

なお、本計算はTumlingtar地点の日洪水量に基づいているので、ダム地点のピーク流量を算出するには、流域換算と共にある割増し率を乗じなければならない。

Table 5-7 Probable Flood Discharge at Tumlingtar by Log Pearson III Method (Daily)

| Return Period | Annual Flood | Monthly Probable Flood Discharge | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|----------------------------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| | | Jan. | Feb. | Mar. | Apr. | May | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Oct. | Nov. | Dec. |
| 2 | 1768 | 134 | 143 | 177 | 233 | 492 | 1116 | 1593 | 1528 | 1326 | 805 | 279 | 172 |
| 5 | 1990 | 152 | 169 | 218 | 287 | 606 | 1328 | 1856 | 1837 | 1701 | 1088 | 336 | 239 |
| 10 | 2123 | 164 | 183 | 243 | 319 | 676 | 1454 | 2039 | 2025 | 1915 | 1231 | 366 | 304 |
| 20 | 2245 | 174 | 197 | 266 | 348 | 740 | 1566 | 2220 | 2195 | 2099 | 1342 | 391 | 387 |
| 50 | 2394 | 186 | 213 | 295 | 384 | 820 | 1702 | 2463 | 2406 | 2312 | 1455 | 418 | 531 |
| 100 | 2502 | 196 | 225 | 316 | 409 | 877 | 1798 | 2653 | 2558 | 2458 | 1523 | 437 | 673 |
| 200 | 2607 | | | | | | | | | | | | |
| 500 | 2743 | | | | | | | | | | | | |
| 1000 | 2845 | | | | | | | | | | | | |
| 10000 | 3179 | | | | | | | | | | | | |

Table 5-8 Probable Flood Discharge at Tumlingtar by Gumbel Method (Daily)

| Return Period | Annual Flood | Monthly Probable Flood Discharge | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|----------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | | Jan. | Feb. | Mar. | Apr. | May | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Oct. | Nov. | Dec. |
| 2 | 1,774 | 134 | 142 | 177 | 232 | 490 | 1,106 | 1,613 | 1,520 | 1,302 | 774 | 273 | 193 |
| 5 | 2,048 | 157 | 174 | 227 | 298 | 632 | 1,370 | 1,941 | 1,904 | 1,763 | 1,106 | 345 | 301 |
| 10 | 2,229 | 172 | 195 | 260 | 343 | 726 | 1,544 | 2,157 | 2,158 | 2,069 | 1,326 | 393 | 373 |
| 20 | 2,402 | 187 | 215 | 292 | 385 | 816 | 1,712 | 2,365 | 2,402 | 2,362 | 1,537 | 439 | 442 |
| 50 | 2,627 | 206 | 240 | 332 | 440 | 933 | 1,929 | 2,634 | 2,717 | 2,741 | 1,810 | 498 | 531 |
| 100 | 2,796 | 220 | 260 | 363 | 481 | 1,020 | 2,092 | 2,835 | 2,954 | 3,025 | 2,015 | 543 | 597 |
| 200 | 2,963 | | | | | | | | | | | | |
| 500 | 3,185 | | | | | | | | | | | | |
| 1,000 | 3,352 | | | | | | | | | | | | |
| 10,000 | 3,908 | | | | | | | | | | | | |

Fig. 5-10 (1) Enveloping of Estimated Base Flow (Contains the Flow from Tibet Basin) by Areal Conversion Method

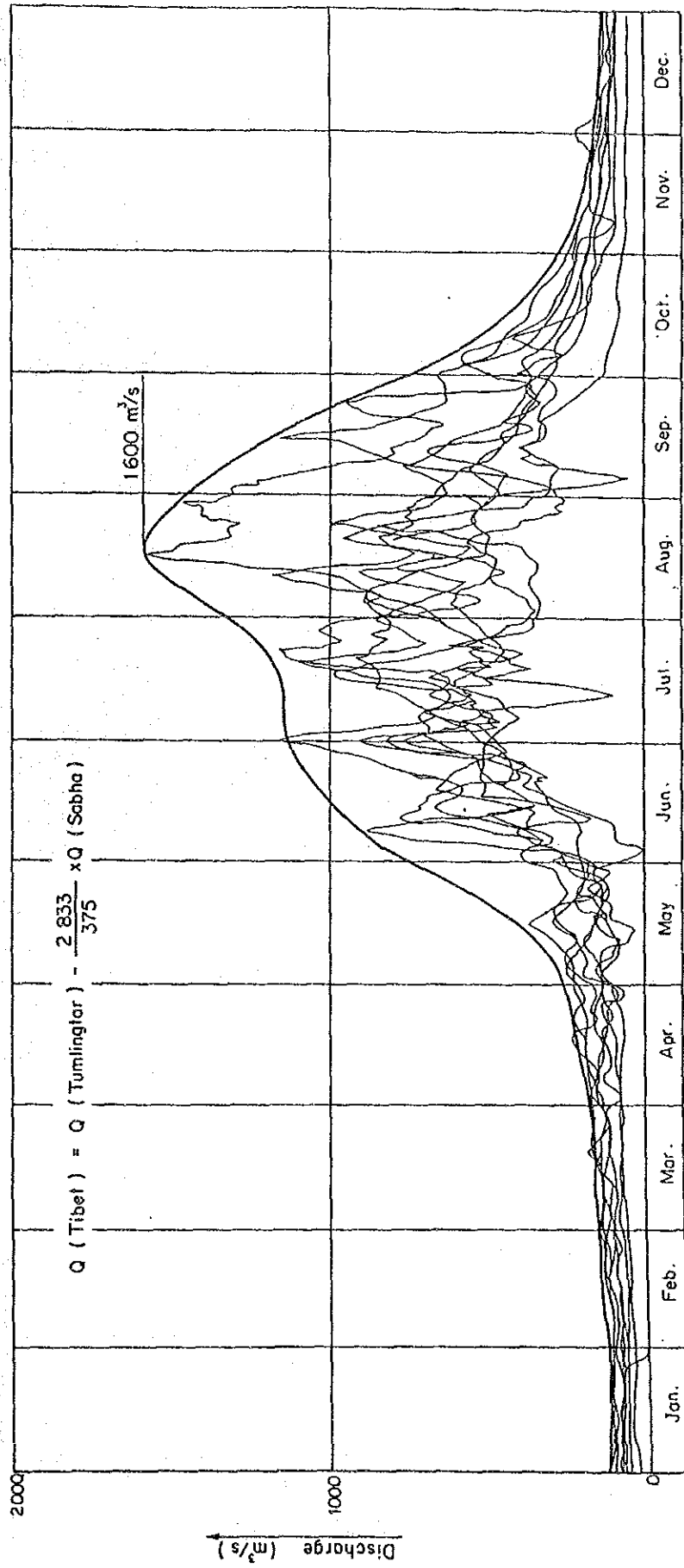


Fig. 5-10 (2) Enveloping of Estimated Base Flow (Contains the Flow from Tibet Basin) by Tank Model Method

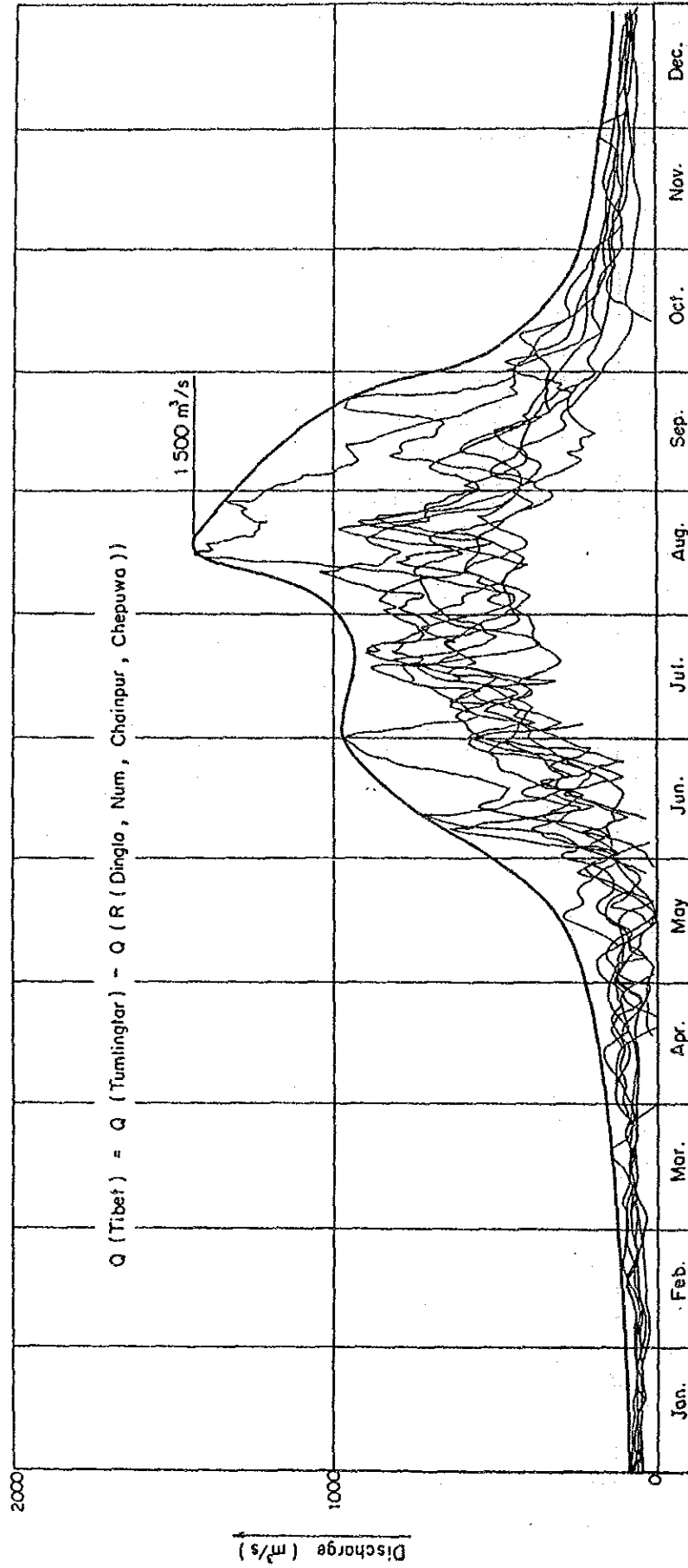


Fig. 5-11 (1) Probable Maximum Flood at Arun Damsite

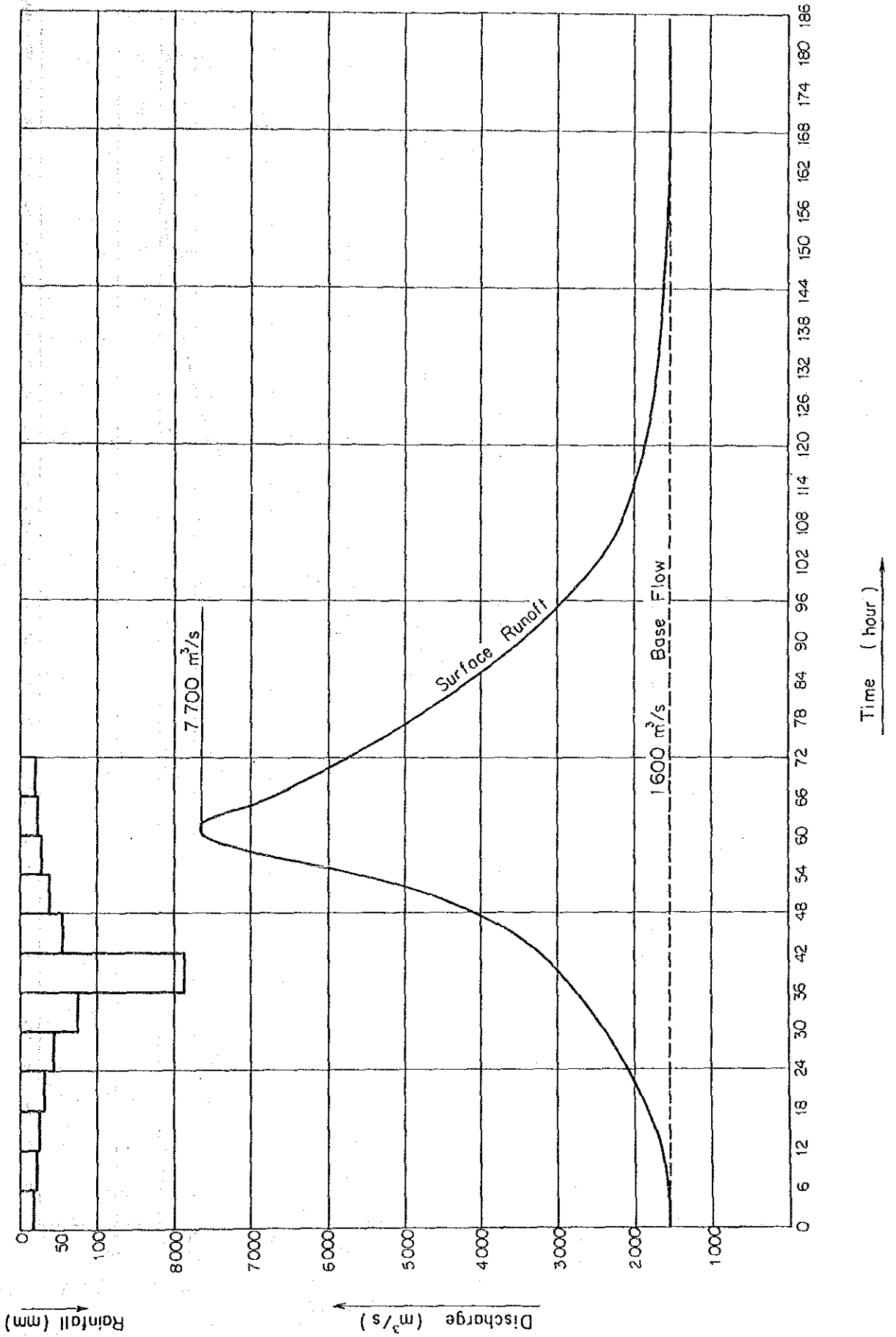
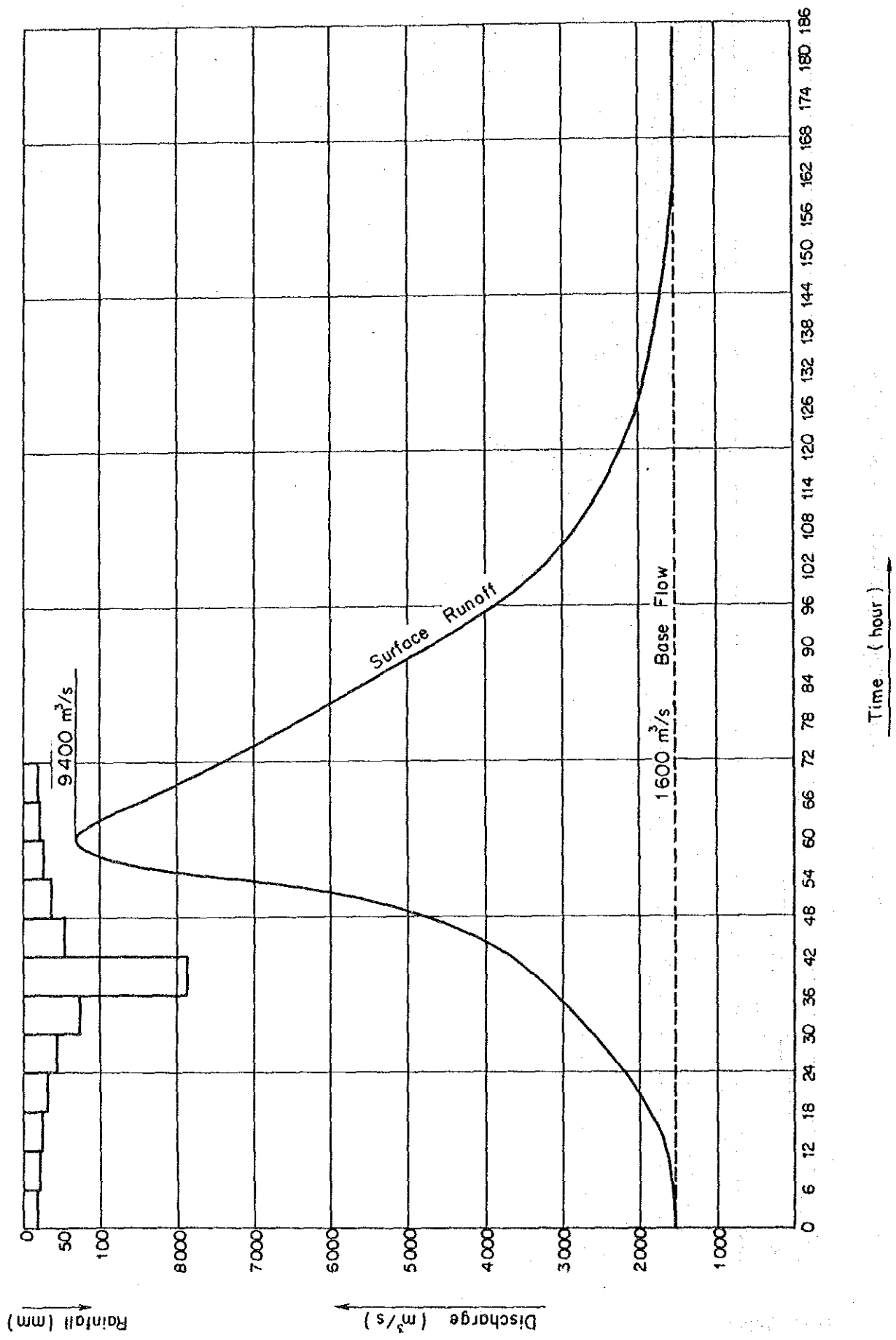


Fig. 5-11 (2) Probable Maximum Flood at Powerhouse



流域換算としては5.5.3で算定したダム地点流量とTumlingtar流量との一次回帰式を用いることとし、ピーク化率は5.6.3で求めた単位図より算定することとした。換算係数はそれぞれ0.76および1.64であり、これを用いて算出したダム地点ピーク流量をTable 5-9、5-10に示す。

なおFig. 5-12(1)、(2)に、両手法による年最大値についての解析結果を図示する。

5.6.9 採用値

(1) ダムサイト設計洪水量：7,700 m³/s

アルンダムのようなコンクリートダムの場合は、通常設計洪水量として確率計算値を採用する。しかし、本スタディにおいては、以下に示す不確定要素を網羅する値として、理論的に最大値であるPMFを採用した。

- (i) Tumlingtar測水所の観測期間が11年しかないため、確率計算の結果の精度は特に1000年以上のリターンピリオッドにおいて疑わしい。
- (ii) チベット地域がダムサイト流域の大部分を占めるにもかかわらず、気象情報がきわめて少ないため、チベット流域の洪水解析はむずかしい。
- (iii) 洪水の1要因であるGLOFについては、現在のところ量、原因、頻度等の詳細について不明な点が多い。

(2) 発電所における設計洪水量：9,400 m³/s

(1)と同様の理由により発電所における設計洪水量は、PMFを用いて計算した。

(Table 5-6 (2)、Fig. 5-8 (2)、Fig. 5-11 (2))

計算手法は、ダムサイトの場合と全く同じだが、流域面積の差が593km²あるため、単位図による合成値ではダムサイトに比べ約1.3倍大きくなった。以上より、基底流量1600m³/sは一定とすると、発電所地点でのピーク流量(PMF)は9,400m³/sとなった。

(3) 河流処理に必要な設計流量：490m³/s

本プロジェクトのクリティカルパスはダムではないので、ダムの建設期間を乾期(11月から4月まで)に限ることにより、仮排水路のトンネル径および仮締切ダムの高さを小さくでき、より経済的にできる。Table 5-9、5-10に確率解析の結果を示すが、490m³/sという値は、Table 5-10の11月、リターンピリオッド10年のものを採用している。

Table 5-9 Probable Flood Discharge at Arun Dam Site by Log Pearson III Method (Instantaneous Peak)

| Return Period | Annual Flood | Monthly Probable Flood Discharge | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|----------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | | Jan. | Feb. | Mar. | Apr. | May | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Oct. | Nov. | Dec. |
| 2 | 2,204 | 167 | 178 | 221 | 290 | 613 | 1,391 | 1,986 | 1,904 | 1,653 | 1,003 | 348 | 214 |
| 5 | 2,480 | 189 | 211 | 272 | 358 | 755 | 1,655 | 2,313 | 2,290 | 2,120 | 1,356 | 419 | 298 |
| 10 | 2,646 | 204 | 228 | 303 | 398 | 843 | 1,812 | 2,541 | 2,524 | 2,387 | 1,534 | 456 | 379 |
| 20 | 2,798 | 217 | 246 | 332 | 434 | 922 | 1,952 | 2,767 | 2,736 | 2,616 | 1,673 | 487 | 482 |
| 50 | 2,984 | 232 | 265 | 368 | 479 | 1,022 | 2,121 | 3,070 | 2,999 | 2,882 | 1,814 | 521 | 662 |
| 100 | 3,118 | 244 | 280 | 394 | 510 | 1,093 | 2,241 | 3,307 | 3,188 | 3,064 | 1,898 | 545 | 839 |
| 200 | 3,249 | | | | | | | | | | | | |
| 500 | 3,419 | | | | | | | | | | | | |
| 1,000 | 3,546 | | | | | | | | | | | | |
| 10,000 | 3,962 | | | | | | | | | | | | |

Table 5--10 Probable Flood Discharge at Arun Dam Site by Gumbel Method (Instantaneous Peak)

| Return Period | Annual Flood | Monthly Probable Flood Discharge | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|----------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | | Jan. | Feb. | Mar. | Apr. | May | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Oct. | Nov. | Dec. |
| 2 | 2,211 | 167 | 177 | 221 | 289 | 611 | 1,379 | 2,010 | 1,895 | 1,623 | 965 | 340 | 241 |
| 5 | 2,553 | 196 | 217 | 283 | 371 | 788 | 1,708 | 2,419 | 2,373 | 2,197 | 1,379 | 430 | 375 |
| 10 | 2,778 | 214 | 243 | 324 | 428 | 905 | 1,924 | 2,688 | 2,690 | 2,579 | 1,653 | 490 | 465 |
| 20 | 2,994 | 233 | 268 | 364 | 480 | 1,017 | 2,134 | 2,948 | 2,994 | 2,944 | 1,916 | 547 | 551 |
| 50 | 3,274 | 257 | 299 | 414 | 548 | 1,163 | 2,404 | 3,283 | 3,386 | 3,416 | 2,256 | 621 | 662 |
| 100 | 3,485 | 274 | 324 | 452 | 600 | 1,271 | 2,607 | 3,534 | 3,682 | 3,770 | 2,511 | 677 | 744 |
| 200 | 3,693 | | | | | | | | | | | | |
| 500 | 3,970 | | | | | | | | | | | | |
| 1,000 | 4,178 | | | | | | | | | | | | |
| 10,000 | 4,871 | | | | | | | | | | | | |

Fig. 5-12 (1) Probable Flood Discharge (Log Pearson III)

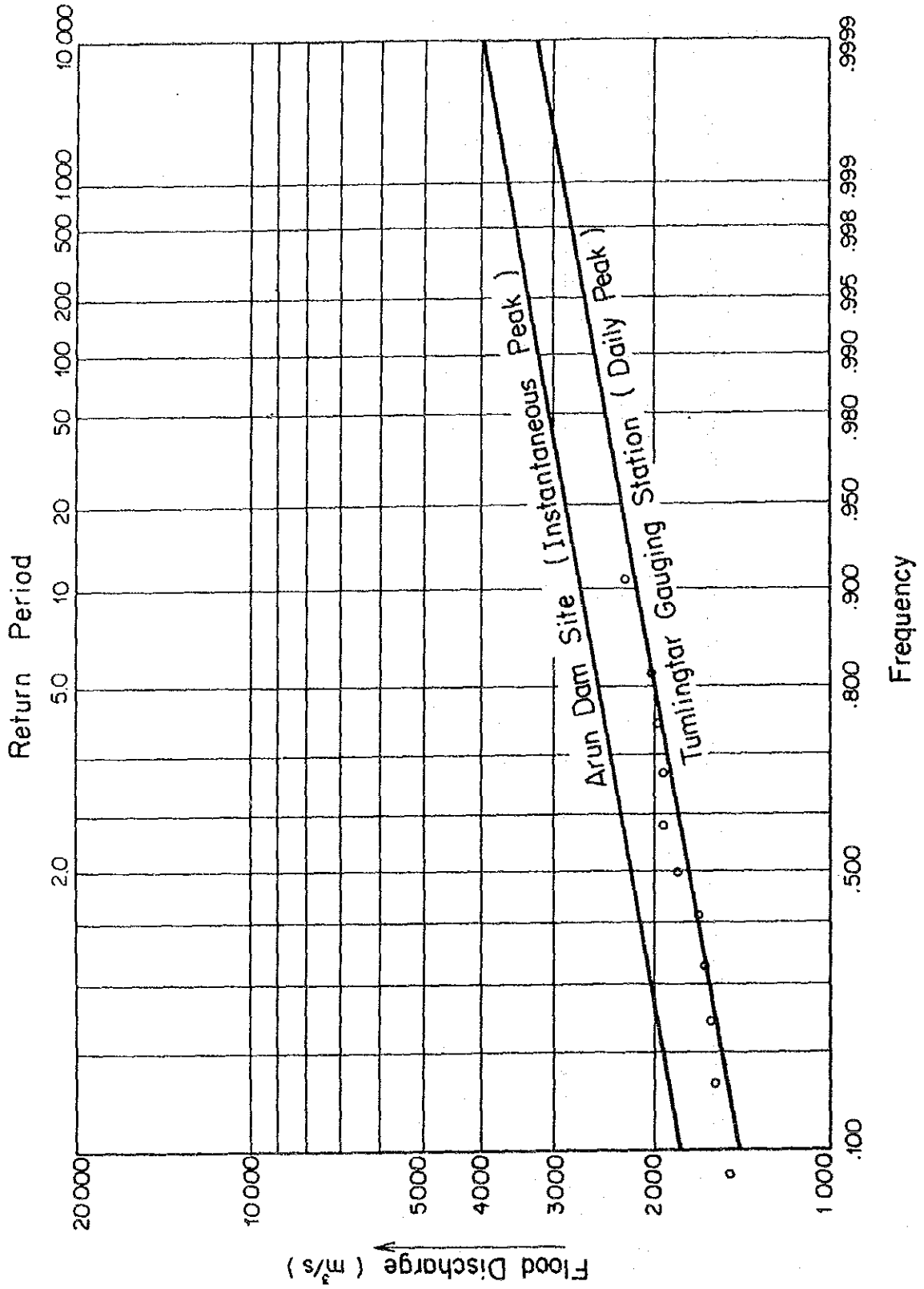
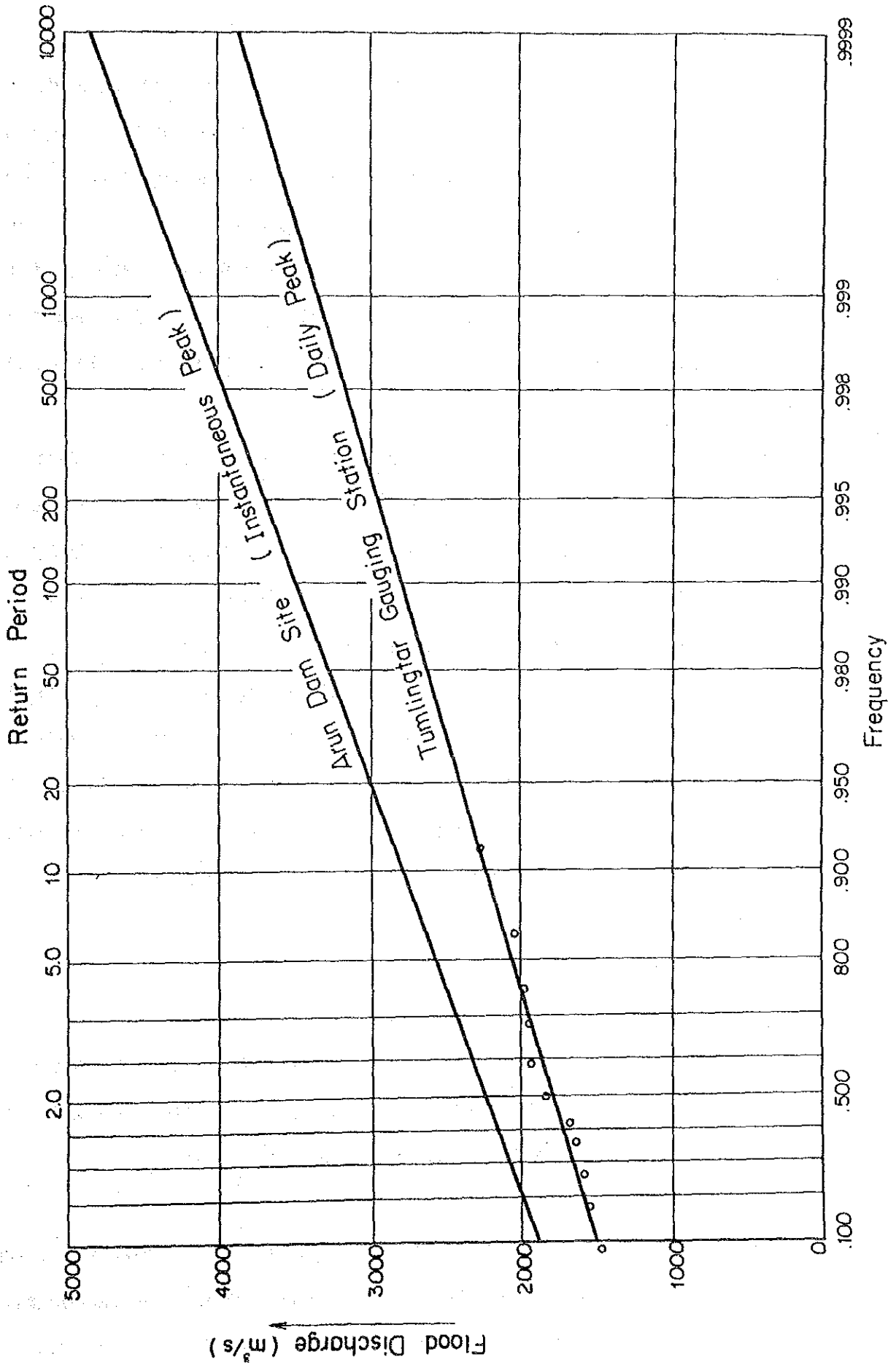


Fig. 5-12 (2) Probable Flood Discharge (Gumbel Method)



5.7 氷河湖決壊による洪水

5.7.1 概要

氷河湖の決壊に起因する洪水 (Glacier Lake Outburst Flood: GLOF) は、氷河山脈を源流域に持つ地域 (ヒマラヤ、アラスカ、ヨーロッパアルプス、北欧、アンデス山脈) でたびたび発生していることが報告されている。さらに最近の研究では、この現象が上記地域では、決して稀な現象ではないことも明らかになっている。ネパール国内においても最近では、1981年、1985年に河川構造物に被害を与える規模の大洪水が発生している。従って本プロジェクトのように上流域に氷河を有する地点に建設を計画する河川構造物に対しては、通常の降雨による洪水以外にGLOFによる影響も十分考慮されなければならない。

本節では、まず過去のGLOFの事例を紹介すると共に、その発生メカニズムについて言及する。また文献およびランドサット画像より、アルン流域の氷河湖の分布を調査し、その中から1つの氷河湖を選んで仮想洪水を発生させ、ダム地点までの伝播状況を大型計算機 (FACOM 380S) によってシミュレーション計算を行った。さらに参考として、GLOFを未然に防ぐ方法および発生時の警戒体制についても言及する。

本節を記述するにあたっては、ネパール政府水資源省が現在すすめているGLOF研究の中間レポート (Preliminary Study of the Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) Phenomenon in the Nepal Himalaya (Phase I-Interim Report by WBCS, 1986)) から引用するところが大きい。また氷河に関する記載に当たっては名古屋大学水圏科学研究所樋口敬二教授、上田豊助教授及び滋賀県琵琶湖研究所伏見碩二専門研究員よりヒマラヤ氷河研究の点から助言を受けた。

5.7.2 過去の事例

(1) ネパール国内の事例

Table 5-11、Fig. 5-13に、ネパール国内でのGLOFの事例の一覧を示す。なお表中には発生源がチベット側に属するものも含んでいる。以下年代順に追って説明を加えることにする。なお文頭の番号は図・表のものに対応している。

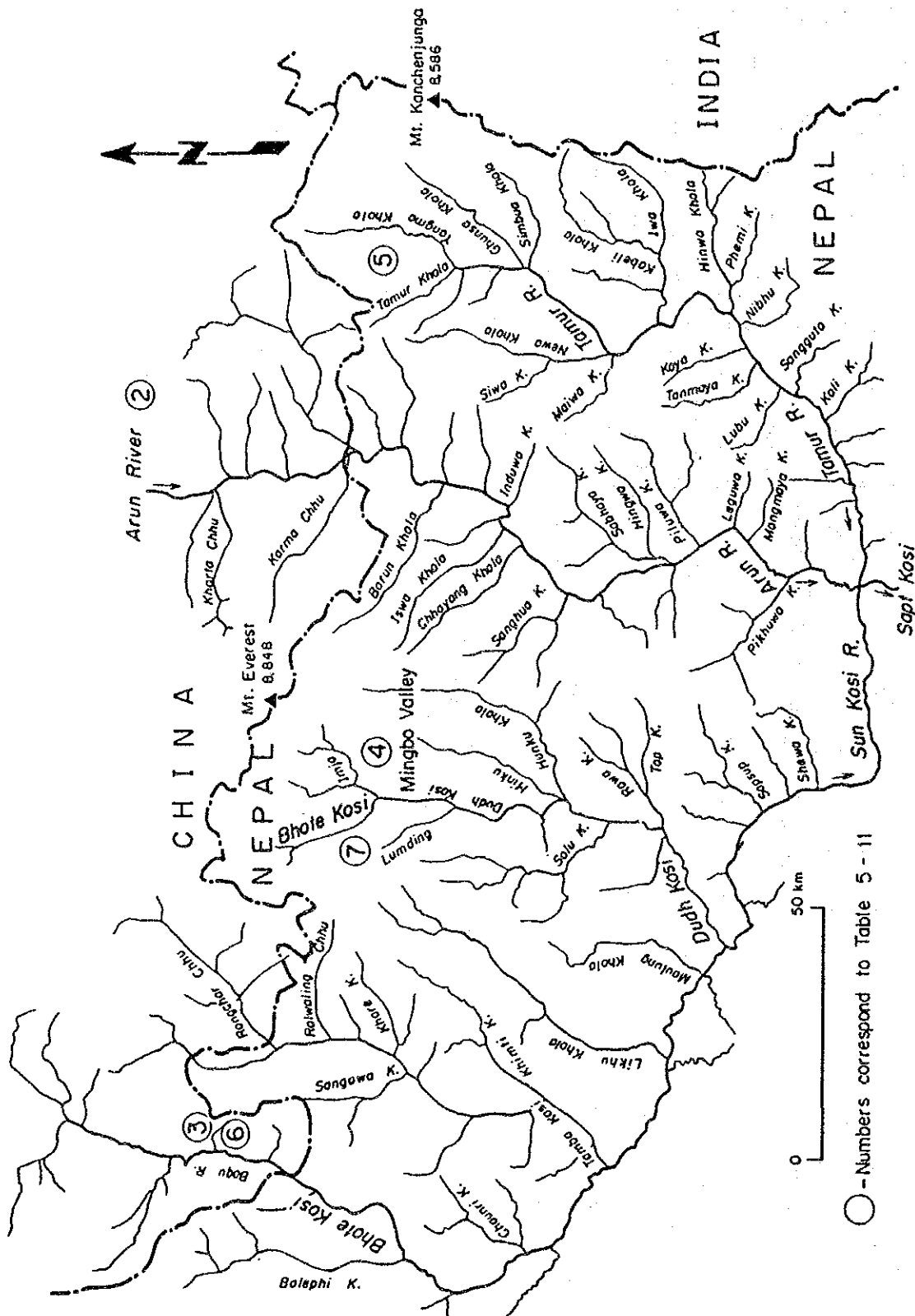
① Pokhara (約 600年前)

Carson (Erosion and Sedimentation Processes in Nepalese Himalaya, ICIMOD, 1985) によると、約 600年前、Machhapuchare 背後の10km程度の氷河湖が決壊し、Pokhara谷一帯を多量の土砂 (平均厚さ50~60m) で埋めたと報告している。

Table 5-11 List of GLOFs in Nepal

| No. | Date | Location | Available Information of Data |
|-----|-----------------------------|---------------------------------|--|
| ① | Approximately 600 years ago | Pokhara Valley | Not Available |
| ② | 1964? | Arun River | Not Available |
| ③ | 1964 | Bhote Kosi | Glacier Lake : Zhangzangbo Glacier Scale is relatively small. |
| ④ | Sep. 3, 1977 | Dudh Kosi, Mingbo Valley | Glacier Lake : Nare Glacier, 4,000,000m ² Peak Discharge : 1,300m ³ /s (at Rabuwa Bazar) |
| ⑤ | Jul. 24-25, 1980 | Tamur River | Not Available |
| ⑥ | Jul. 11, 1981 | Bhote Kosi (Boqu River) | Glacier Lake : Zhangzangbo Glacier. 19,000,000m ² Peak Discharge : 15,920m ³ /s |
| ⑦ | Aug. 4, 1985 | Bhote Kosi, Langmoche Valley | Glacier Lake : Langmoche (Dig Cho) Glacier, 6,000,000m ² ~ Peak Discharge : 2,000m ³ /s at least 10,000,000m ² |

Fig. 5-13 Location Map of GLOF in Nepal



② アルン川 (1964年頃)

現地の住民によると、1964年頃(一説には、もう少し以前)にチベット側のも
のと思われる木材やコンクリート、トラックの車体などが、大量の土砂と共に流
下してきたという。

③, ⑥ Bhote Kosi (1964, 1981)

Bhote KosiはSun Kosiの上流に当たり、チベット側ではBogu Riverと呼ばれて
いるが、この流域では1964年と1981年の2回GLOFの発生が確認されている。発生
源はどちらもチベットの Zhangzangbo氷河の末端と考えられる。1964年のGLOFは
比較的小規模であったのに対し、1981年のものはピーク流量が15,920m³/sと見積
もられ、ネパールとチベットを結ぶ China-Nepal Highwayを至る所で寸断させて
しまった他、Sun Kosi発電所の放流ゲートも一部被害を受けた。

(Ref. Characteristics of Debris Flow Caused by Outburst of Glacial Lake
in Bogu River in Xizang, China, 1981, by Xu Daoming, 1985)

④ Dudh Kosi, Mingbo Valley (1977.9.3)

Dudh Kosi はSun Kosiの支流に当たり、エベレスト周辺のKhumbu地域を源にし
ている。この時の氷河湖(Nare 氷河末端)の規模は、4,000,000 ~ 5,000,000m³
と推定され、このGLOFの実測ハイドログラフは下流のRabuwā Bazarで観測されて
いる。(Ref. 1) IAHS Publ. No. 149, Nepal Case Study: Catastrophic Floods,
H. Fushimi et al, 1985; 2) Mountain Research and Development, vol. 6, No. 1,
1986, Mountain Hazards Mapping in the Khumbu Himal, Nepal, with Prototype
Map, Scale 1:50,000, M. Zimmermann et al)

⑤ Tamur River (1980.7.24 ~ 25)

Tamur 川で発生したGLOFの発生源、規模等の詳細は不明だが、30kmにわたって
河床より20mの高さまですべての木がはぎとられたと報告されている。

⑦ Bhote Kosi, Langmoche Valley (1985.8.4) (名前は同じだが③、⑥とは場所
が異なる。)

④と同様Khumbu地域の Langmoche氷河でGLOFが発生し、規模は総量6,000,000
~ 10,000,000m³程度、ピーク流量約 2,000m³/sと推定される。この時のGLOFでは
完成間近のNamche Small Hydel Projectの施設がことごとく破壊されてしまった。

(Ref. Glacier Lake Outburst Flood(Jokulhlaup) on the Bhote/Dudh Kosi-

August 4, 1985. by V. J. Galay, 1985)

(2) 他国の事例

既に述べた通りGLOFの現象は世界各地で報告されているが、ネパールと離れている国々ではその気象条件、GLOFの発生形態等が異なるため、ここでは、ネパール周辺の国に限って既往例を紹介することとする。(Fig. 5-14参照)

(i) パキスタン (Hewitt, 1985 IAHS No149)

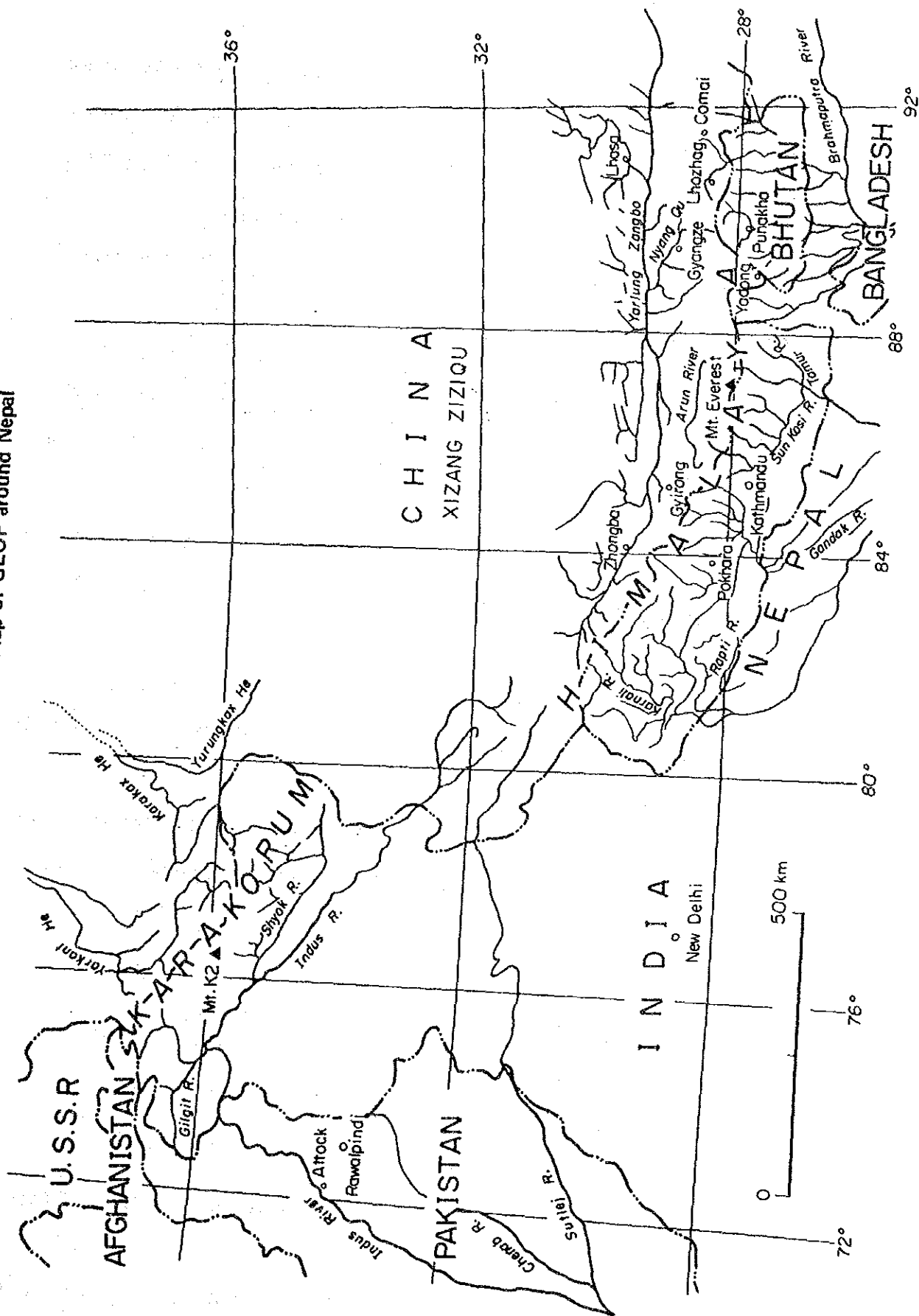
パキスタンでは、最近 200年間に35のGLOFの事例が報告されており、現在でもなお危険箇所が各地に存在している。パキスタンの氷河は山脈でいうとKarakorumとHindu Kushに大別でき、また水系では山脈南側の Indus川と北側の Yarkant川とに分類できる。この地域の氷河は、ネパールヒマラヤに比べ、長さの点でかなり長大なスケールを有しており、そのために氷河湖の形態もかなり異なったものになっている。すなわちネパール地方の氷河湖がモレーンダム(氷河末端に形成される堆積物)ならびにアイスコアを含むモレーンダムによって堰き止められたものが一般的であるのに対し、パキスタン地方では氷河が他の谷を堰き止めるいわゆるアイスダムの形式が非常に多く見られる。アイスダムによる氷河湖は、ダムの決壊と氷河による谷の閉塞という現象が繰返し行われるためGLOFの頻度は非常に高いものとなる。

Indus川上流の Shyok川では過去幾度となく大洪水に見舞われているが、これは Shyok川支流の Chong Khumdan氷河およびKichik Khumdan氷河が Shyok川を堰き止めることによって形成された氷河湖の決壊に起因している。中でも1929年8月15日に発生したGLOFの規模は非常に大きいため以下にその概要を紹介する。

| | | | |
|--------------------|--------------------------------|----------------------|--------|
| Glacier Dam (1929) | Observation at Attock, 1194 km | | |
| | below the Glacier Dam | | |
| Length of Lake | 16km | Max. Flood Rise | 8.1m |
| Average Width | 1.6km | Rise to Peak | 17.0hr |
| Depth at Dam | 120m | Duration of Wave | 70hr |
| Volume | $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ | Travel Time from Dam | 81hr |

また Karakorum北側を源流とする Yarkant川 (チベット)でもGLOFの発生が報告されており、1959年から1984年までに9回、1978年以降に限ってみると1981年を除いて毎年GLOFが発生している。規模は、ピーク流量にして $800 \text{ m}^3/\text{s} \sim 6,270$

Fig. 5-14 Reference Map of GLOF around Nepal



m³/s程度となっており、この量から推定して氷河湖の容量は10⁶ ~ 10⁷ m³のオーダーと考えられる。

(ii) ブータン (Gansser, 1970, The Mountain World)

ブータン北部のヒマラヤには、氷河湖及び以前氷河湖を形成したと思われる痕跡が数多く存在する。かつて Punakhaを襲った洪水も Sankosh川上流 Lunana 地域の一氷河湖が決壊したものと想像される。氷河湖の規模はその痕跡も含め、10⁷ m³オーダーのものが確認されており、今後、GLOFの危険が予想される。

この地域の氷河湖の特徴はネパール地域で見られるものと同様、モレーンによる堰き止め湖が主体となっている。

(iii) チベット (Rivers and Lakes of Xizang, 1984)

チベット地方にも多くの氷河湖が存在し、湖水面積は1 km²程度のものから数10 km²に及ぶものまで多岐にわたっている。上記の文献によると次の2つのGLOFの事例が紹介されている。

(a) 1954年7月16日、雅魯藏布江 (Yarlung Zangbo) 支流、楚河上流 (Nyang Qu)

氷河湖の規模は約 250,000,000m³で、下流の江孜 (Gyangze)ではピーク流量が 7,000m³/s~10,000m³/s程度を記録した。

(b) 1940年7月10日、ブータン国境近くの亜東 (Yadong)

氷河湖の規模は約 5,000,000m³で4~5 mの水位上昇が生じた。ピーク流量は約 3,700m³/sと推定される。

以上の他にもヒマラヤ北部に位置する措美 (Comai)、洛札 (Lhozha)、吉隆 (Gyirong)、仲巴 (Zongba) 付近で1940年以降9回のGLOFが確認されている。

5.7.3 GLOF発生のメカニズム

(1) 氷河湖の形成過程

氷河湖はダムを形成する材質によって次の3つに大別できる。

(i) モレーンダムによる湖

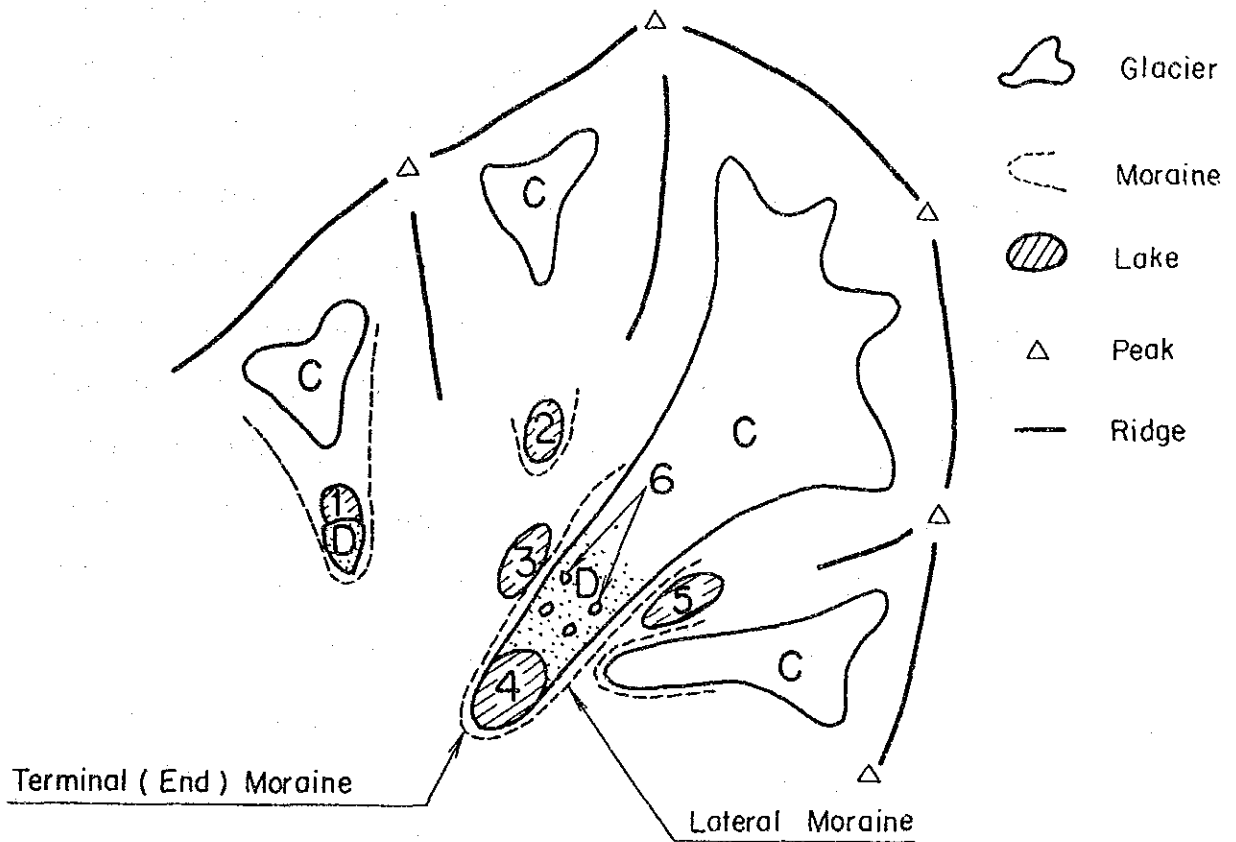
(ii) 氷河による堰き止め湖

(iii) モレーン中にアイスコアを含む湖

この分類以外にも湖の発生位置や規模等からさらに細分類できるが、その1例を Fig. 5-15に示す。

ネパールヒマラヤ地域では、モレーンおよびアイスコアを含むモレーンダムによ

Fig. 5-15 Glacier Lake Classification (by H. Fushimi)



Definition of Glacier (by S. Moribayashi)

C Type : Clean type is not almost covered with debris

D Type : Dirty type is covered with debris

① Glacier Lake between C and D

② Moraine Dammed Lake

③ Lake Dammed in Tributary

④ Proglacial Moraine Dammed Lake

⑤ Interglacial Lake

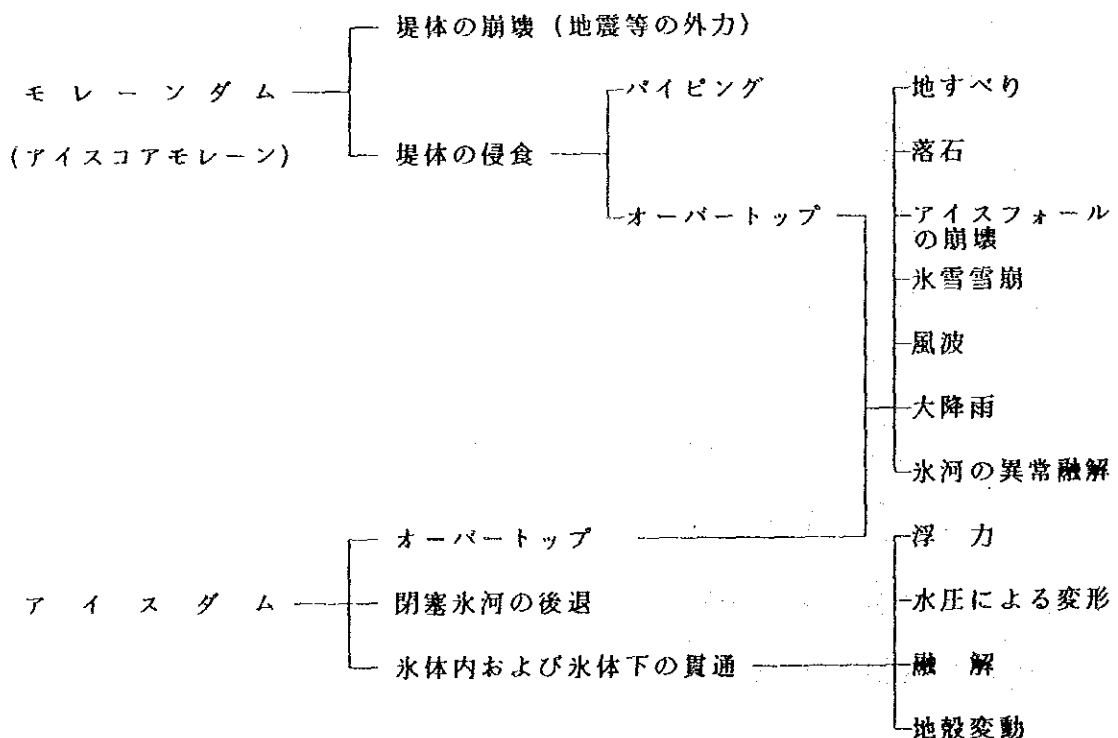
⑥ Ablation Lake

る氷河湖が非常に多く分布しており、GLOFの主要因となっている。この種の氷河湖が形成される過程は次のように考えられる。(The Mountain World, Gansser, 1970)

まずかつて大規模な氷河が前進し(最近では18、19世紀頃)その末端に巨大なモレーンを形成した後、何らかの要因(主に気候)で後退し、そのモレーンの上流に水がたまって氷河湖を形成するというものである。モレーンは大きなものになると高さが100mを超えるものもあり、このクラスの氷河湖は容量が 10^6m^3 オーダー中には 10^7m^3 に達するものも存在する。なお、モレーン内にかつての水体を残すか否かでアイスコアモレーンと単なるモレーンに区別される。特にヒマラヤ地域では岩屑で覆われた氷河が多数存在するため、直接日射をさえぎることより、氷河が後退した後もいわゆるdead iceとなって長年モレーン内に存在する例が数多く見られる。一方、氷河による堰き止め湖はアラスカやヨーロッパアルプスを始め世界各地で頻繁に見られる現象だが、特に氷河がサージ(氷河の急激な流下現象のこと。原因としては地震、短期間の大降雪、雪崩、アイスフォールの崩壊、気温の急激な変化等が考えられる。)を起こした時に大災害を引き起こす可能性が大きくなる。

(2) 氷河湖決壊の要因

氷河湖決壊の要因は次のように分類できる。



この中で、ヒマラヤ地域でよく見られる現象はモレーンダム（アイスコアモレーンダム）がパイピングを起こすか、あるいは氷河末端のアイスフォール崩壊によるダム越流が支配要因と考えられる。パイピングは、主としてそのモレーンの材質、モレーンの厚み、さらにアイスコアモレーンの場合は、気温にも大きく左右される。ただし、この種の氷河湖の決壊が7月～9月のモンスーン期に集中していることから次のような一連の仮定が成り立つ。

降雨および高温による氷河の融解により氷河から氷河湖への流入が増加するに伴い、氷河湖の水位が上昇しついに越流ないしモレーン内の浸透流の増加を引き起こすことになる。さらにアイスコアを含む場合にはやはり高温によりアイスコアおよび周辺凍土が緩み、一層浸透水の増加を助長させることになる。

このように氷河湖が上流からの多量の水の補給により高水位に保たれ、さらにモレーン堤体自身のゆるみが進んでいる時に大豪雨やアイスフォールの崩壊等により一時に多量の水が越流するとモレーンダムが急激に侵食破壊へとすすむことは容易に想像される。

一方アイスダムの崩壊は原理的にはモレーンダムの場合とほとんど変わらないが、大きく異なるところは、崩壊過程がモレーンダムに比べ比較的緩やかなことと、新たな氷河の押し出しにより同一地点で何度でも繰り返し発生することである。

(3) 洪水の伝播

GLDFのハイドログラフは降雨の場合と異なり、ピークが急激に立ち上がった後、急速に減水するのが特徴である。ただし、これもモレーンダムとアイスダムの場合とでは多少形状が異なっており、モレーンダムが決壊した時の方がアイスダムの時に比べピークが尖鋭化している。この理由は決壊に要する時間の違いに主に起因しており、モレーンダムの時は数10分から数時間というオーダーで崩壊が進行するのに対し、アイスダムの時は徐々に水量が増加し、数日というオーダーでピークを迎えるのが一般的な現象である。このことは仮に同じ容量を有する2種の氷河湖が決壊すると、モレーンダムの方がアイスダムに比べはるかに大量のピーク流量を記録することになる。

洪水の下流への伝播状況は、河道の形状に大きく左右され、しかも兩岸の侵食、土砂の堆積、それに伴う流れの滞留を繰り返しながら流下していくため一概には言えないが、過去の記録から見て、一般に下流に向かうに従ってピーク流量が減衰し

ていくのが確認されている。たとえば1981年にBhote Kosiで発生したGLOFの記録では50kmの間にピーク流量が15,000m³/sから2,000m³/s程度にまで減衰している。ただしGLOFの洪水流は多量の土砂を含んでいるため、川の合流点でもう一方の川を土砂で堰き止めることも十分予想され、このような堰き止め湖が再度決壊すると、上述したような単純な伝播現象とは異なった様相を呈することになる。いずれにしてもGLOFの影響はかなり下流にまで及び、5.7.2のパキスタンの事例で述べたように発生源から1,200km下流の地点で8.1mの水位上昇を記録した例もあるほどである。

(4) 流送土砂

GLOFの時にどの位の量の土砂が流下するかは、ダムやそれに付随する取水設備の設計にとって非常に重大な問題である。土砂の生産源はまず決壊したモレーンそのものが考えられるが、その他にGLOFにより侵食を受ける河床及び河岸からの土砂も莫大な量となる。しかしGLOF時の浮遊砂量の測定は非常に困難であるばかりでなく、測定施設そのものが未だ整備されていない現状では実測値を決定することはできない。ただし、一つの試算として(Blown and Church, 1986)カナダのNostetuko RiverでのGLOFの実測値より、氷河湖直下で平均50,000mg/lの濃度が推定された。実際にはこの数倍の値が最大濃度になると考えられ、この試算でいくと20万~30万mg/lに達することになる。また流送土砂量と同時に流下土砂の最大径もゲートやスクリーンの設計にとって不可欠な問題であるが、実測になると家屋程度の巨石が流下したことも確認されている。

またGLOFの発生前後でその川の流送土砂量が大きく変化することは容易に想像される。事実Tamur川のMulghatでは1978年6月より1981年1月まで定期的に土砂量を測定していたが、GLOFの発生した1980年7月を境にそれ以後の土砂量は以前に比べ4倍程度増加しているのが確認された。なおこの時のGLOFで流下した土砂量は洪水時には50,000mg/lから200,000mg/l程度を記録しただろうと想像される。

(Electrowatt, 1982)

5.7.4 アルン川流域内の氷河湖の分布

アルンダムに今後予想されるGLOFの被害を、未然に防ぐための予備調査的な意味として、チベットを含むアルン川流域に分布する氷河湖の位置および概略規模の調査を行った。今回使用した資料を下記に示す。

| | | |
|-----|-------------|--|
| 地 図 | 1/1,000,000 | OPERATIONAL NAVIGATION CHART ONC H-9 by DMAAC (Defense Mapping Agency Aerospace Center), 1978 |
| | 1/500,000 | Nepal by Apa Productions |
| | 1/250,000 | ATLAS OF THE WORLD by The Times |
| | 1/192,500 | LATEST TREKKING MAP DHANKUTA TO KANCHENJUNGA, MT. EVEREST, MAKALU & ARUN RIVER, 1985/86 |
| | 1/50,000 | MT. MAKALU, APSUWA KHOLA, KIMASANGKA and TIPTALA BHANJYANG by Topographical Survey Branch, Department of Surveys, H. M. G. Nepal, 1982 |

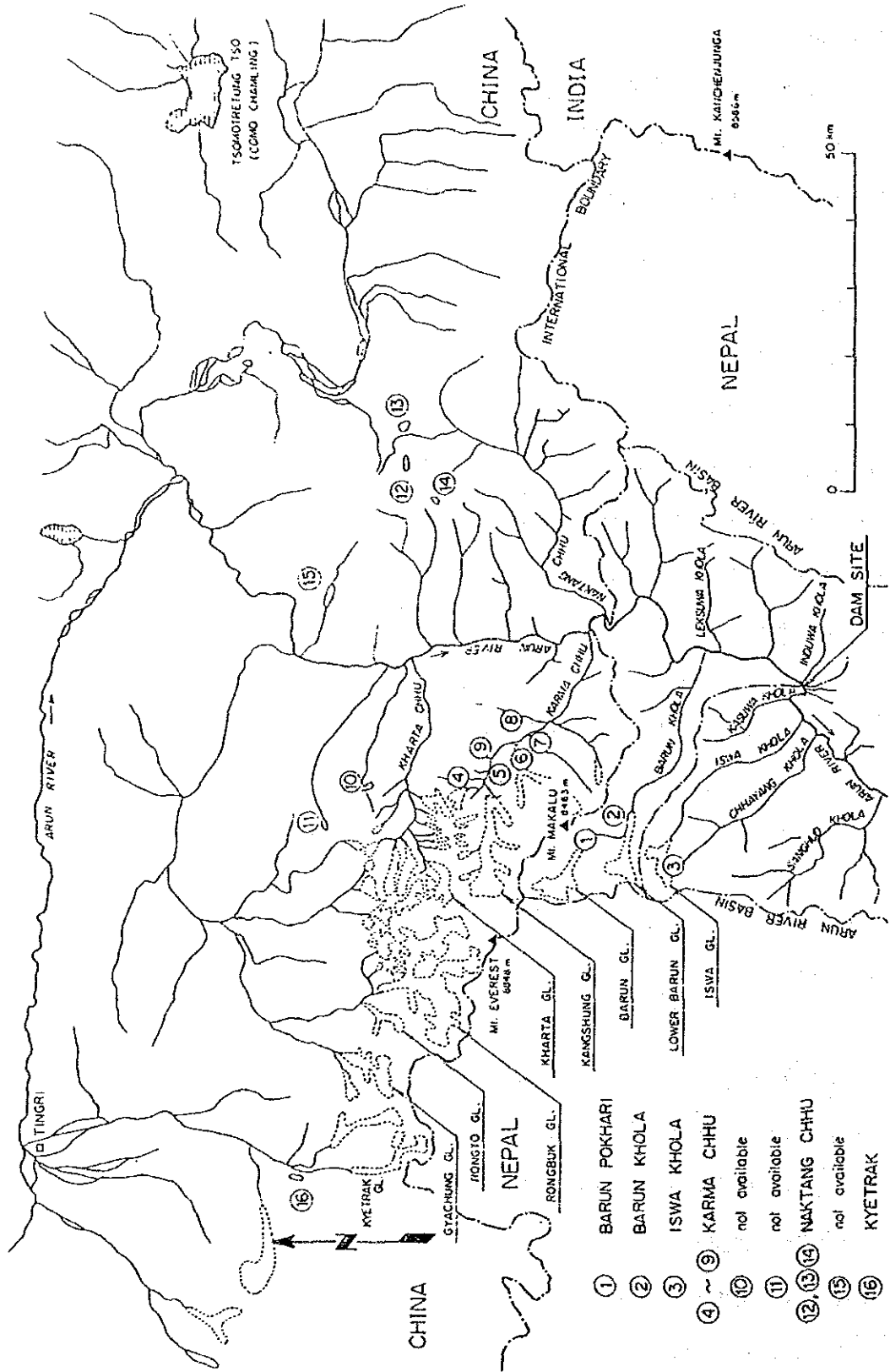
ランドサット画像

| ランドサットNo. | 撮 影 日 | 使用バンド | 縮尺 |
|-----------|------------|-------|-------------------------------|
| 139-40 | 1984年5月20日 | 7 | 1/1,000,000 |
| 139-41 | 1984年3月17日 | 7 | 1/1,000,000 |
| 140-40 | 1984年5月19日 | 7 | 1/1,000,000、1/200,000 (拡大) |
| 140-41 | 1984年4月9日 | 7 | 1/1,000,000、1/200,000 (拡大) |

以上の資料の内 1/1,000,000図と 1/500,000図は主にチベット地域での支流の形状を把握するために使用した。1/192,500、1/50,000図はネパール領域内しか図化されていないため、この地図からは Mt. Makalu 付近を水源とする Barun Kholaの詳細を把握するにとどまった。同図には Barun氷河末端に顕著な氷河湖が1つ (Barun Pokhari)確認されており、次項の仮想計算においてもこの氷河湖の決壊を想定している。なお同図よりネパール領域内には Barun Khola以外に、氷河湖を有するような巨大な氷河は確認されなかった。以上地図による予備調査を行った後、ランドサットの画像より氷河湖が存在すると思われる氷河を丹念に検証した結果 Fig. 5-16 及び下記に示す個所に氷河湖が存在する可能性が認められた。

今回のスタディでは、現地調査及び空中写真撮影を行っていないため、現地での同定ができず、あくまで氷河湖の存在の可能性を示すにとどまったが、今後チベット側については中国の協力を得て、現地調査を実施し、より具体的な資料に基づいてGLOBF

Fig. 5-16 Location Map of Glacier Lakes in Arun River Basin



の解析を行うことが望まれる。

① Barun Pokhari : 湖水面積 約 0.3km²

② Barun Khola 左岸 : 湖水面積 約 0.3km²

③ Iswa Khola 上流 : 湖水面積 約 0.1km²

④～⑨ Karma Chhu 流域 :

湖水面積 0.1km²～ 0.3km²程度の湖が兩岸及び支川に10数個確認できた。これがすべて氷河湖かどうかは LANDSATデータでは断定できない。

⑩、⑪ Kharta Chhu に隣接するアルン川右岸支流 :

それぞれ湖水面積は 0.7km²程度とかなり規模が大きいが、位置的には氷河湖ではなく、自然湖の可能性もある。

⑫、⑬、⑭ Naktang Chhu上流 :

湖水面積は⑫、⑬が約 1 km²、⑭が約 0.5km²とかなり規模が大きいがこれも氷河湖かどうかは判断できない。

⑮ Kharta Chhu 近くのアムン川左岸支流 : 湖水面積 約 1.0km²

⑯ Kyetrak 付近の氷河湖 : 湖水面積約 1.0km²

5.7.5 GLOF解析

(1) 採用モデル

GLOFの現象は、それを解明するのに足るだけの事例が報告されていないため、今後発生する頻度や規模を経験則から予測するのは非常に困難である。そこで、今回は限られた情報からシミュレーション計算を行うことにより、仮想のGLOFの伝播状況及びダムサイトを含む各流下地点での規模を推定することにより、GLOFの対処方法に関する手掛かりをつかむことにした。採用したモデルは開水路の非定常流を差分スキームにより解析を行うものであり (EPDC UNSTEADY FLOW ANALYSIS MODEL)、次のような特徴を有している。

- ・途中の横流入（支流）を考慮できる。
- ・上流端、下流端及び横流入の条件は任意の時間毎に自由に指定できる。
- ・河川横断は任意断面に適用が可。
- ・各種の損失（断面変化、曲り、粗度の変化）を入力できる。

また一方で次のような制約もある。

- ・射流状態では適用性に問題がある。

・土砂の影響は考慮されない。

このようなモデル計算を行うに当たっては実測値との検証が不可欠だが、アルン川流域に限っては、比較できるGLOFが過去に実測されていないため、各種入力条件についてはWECSのGLOFレポートで採用した値を参考にした。

(2) 入力条件

(i) 発生位置

発生箇所は、5.7.4で述べたように、Barun Khola上流の氷河末端に存在する氷河湖が、ダムより最短距離にあるため、この位置を発生源とする。ただし、上述したように本プログラムでは射流の条件下では、計算精度に問題があるため、平均勾配が1/11と限界勾配を超えた河床勾配を有するBarun Kholaでは計算が困難なため、実際に流量を入力したのはBarun Kholaとアルン川本流の合流点とした。

(ii) 氷河湖の規模

Barun 氷河の氷河湖の規模は地図 (1/50,000) 及びLANDSAT 画像 (1/200,000 に拡大) より判読すると概略 0.3km²の面積を有している。水深が数10mに及ぶとすると $1 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$ m³程度の規模となる。

今回は 1×10^6 m³、 3×10^6 m³、 5×10^6 m³、 1×10^7 m³の4ケースを計算対象とし、いずれのケースも30分で破壊が進行すると仮定した。(Fig. 5-17 参照)

(iii) 河川縦断

Fig. 5-18に1/50,000地形図より判読したダム上流の河川縦断形状を示す。

入力を簡略化するためアルン川本流については次の区間に区切って河川勾配を入力した。

| | | | | |
|-------|---|------|--------|------|
| ダムサイト | ～ | 4 km | 1/80 | |
| | | 4 km | ～ 11km | 1/70 |
| | | 11km | ～ 22km | 1/40 |
| | | 22km | ～ 38km | 1/30 |
| | | 38km | ～ | 1/27 |

なお、本流における限界勾配は、流量 $1,000$ m³/sで約1/16、流量 $10,000$ m³/sで約1/20となり、本流では射流は生じない。

Fig. 5-17 Peak Discharge and Water Level at Junction of Arun River and Barun Khoia during GLOF

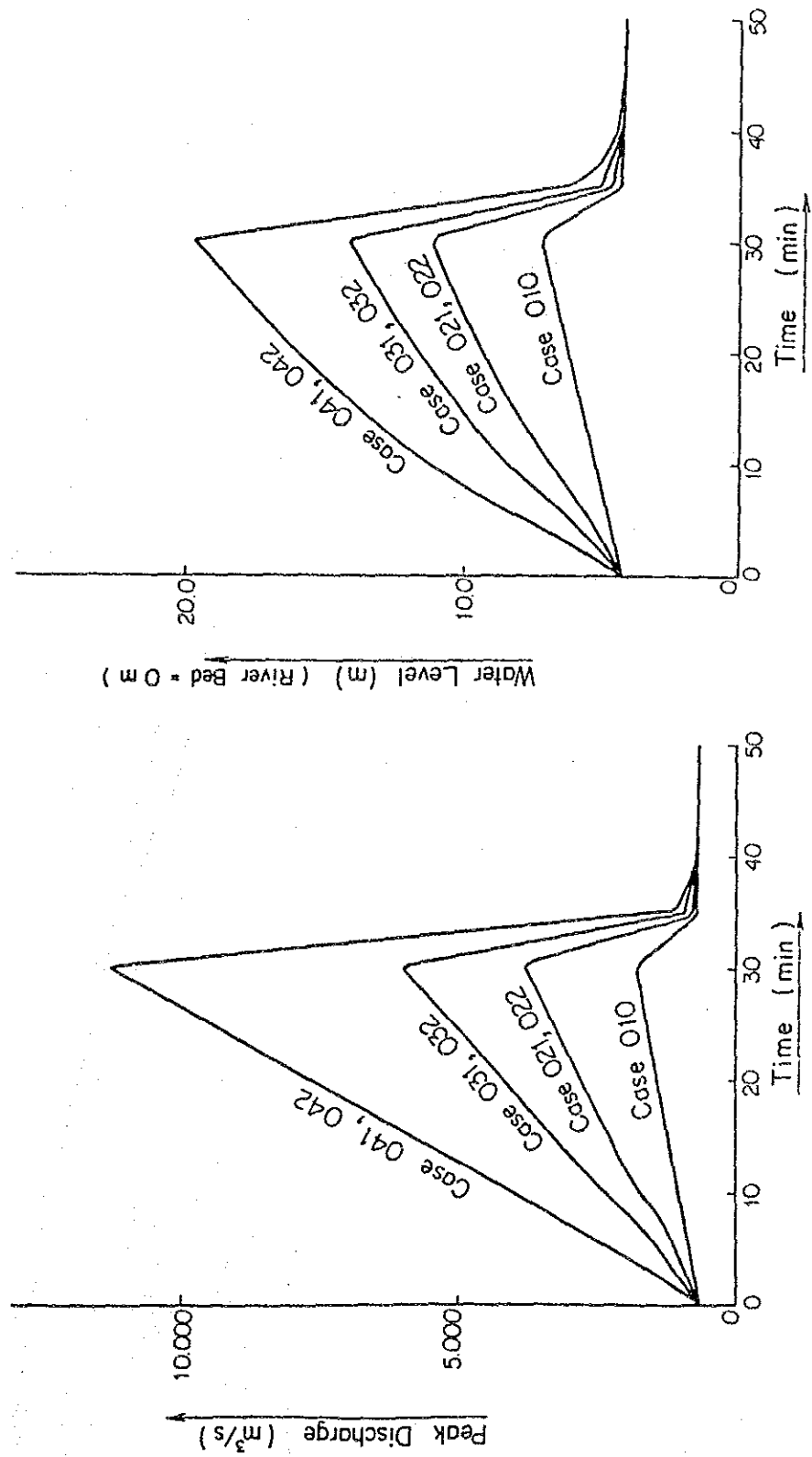
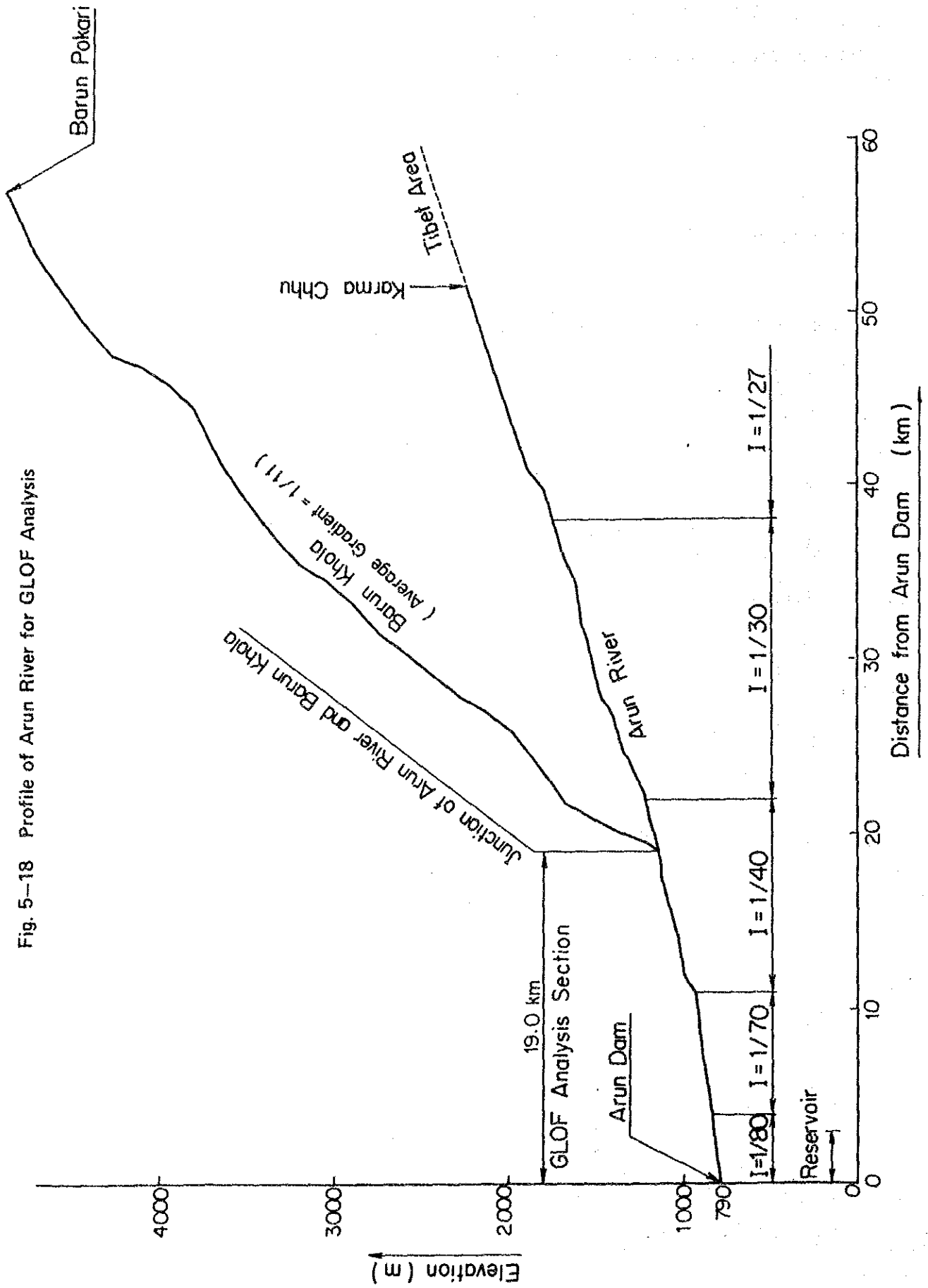


Fig. 5-18 Profile of Arun River for GLOF Analysis



(iv) 計算初期値

ダム水位 : 満水位 842.0m

初期流量 : 700m³/s (7、8、9月の平均値)

粗度係数 : 0.1 (WECS GLOF レポートより)

(v) ゲート放流条件

満水位 842.0mから設計洪水水位 844.0mの間の貯水容量(サーチャージ容量)

が約 1,000,000m³しかないため、ゲート操作を行わないとこの量以上の流入量

があった場合には越流の恐れが生じる。そこでGLOFのピーク流量に対処するには、

あらかじめゲート放流により貯水池水位を下げることが必要不可欠の

条件となる。そこで今回は、GLOFが発生した直後及びその30分後にゲート操作

を開始するという2ケースについて検討した。なお、Table 5-12 に水位とゲ

ート開度を変数とした放流量の計算値を示す。

(3) 解析結果

Table 5-13に示す7ケースについて解析を行い、その結果をFigs. 5-19(1)~(7)、Figs. 5-20(1)~(7)に示す。

Figs. 5-19(1)~(7)はBarun Khola とアルン川の合流点からダムサイトまでの洪水の伝播状況(水深とピーク流量)を示している。

ピーク流量を見ると各ケースとも下流に流下するに従い、ピーク値が減衰していく様子が確認された(図中 Attenuation Line で示す)。Case010 を除き他のケースは、洪水が到達する前に予備放流を行っているため、ダム近辺ではほぼ初期水位より低い位置で水位変動している。

この様子をさらに拡大して図示したのが、Figs. 5-20 (1)~(7)の図であり、同図より全ケースとも、ゲート操作を適切に行いGLOFに備えて貯水位を低下させておけば、ダムに被害を及ぼすことなく下流に放流できることを示唆している。

今回の検討で最も条件が厳しいのが、Case-042であるが、この条件通りにGLOFが発生することは次の理由によりないと考えられる。

(i) Barun Khola で現在までに確認されている氷河湖はせいぜい 5×10^6 m³程度の容量しかなく、 10×10^6 級の規模になることはまず考えられない。ただし、アルン川上流には 10^7 m³級の氷河湖が存在する可能性は十分にある。

(ii) モレーンの崩壊時間をWECSのレポートを参考にして30分としているが、モ

レーンの規模が大きくなる程、崩壊に時間を要することは容易に想像される。

この結果、現在見積もっている初期ピーク流量はかなり軽減される。

(iii) 氷河湖の全量が崩壊時に流出すると仮定しているが、現実的には一部は流下せずに残るものと思われる。

(iv) GLOFの発生源からアルン川の合流点までの射流区間は、洪水波形が減衰せずそのままの形で伝播すると仮定したが、実際には各所で曲がりや摩擦によりピーク部分が減衰するはずである。

(v) ゲートの開閉速度を50cm/min. と仮定したが、GLOFのような非常時には、もっと速く設定するのが一般的だろう。この処置により、GLOF到達時には貯水位をもっと低く抑えることが可能となる。

(i) の氷河湖の規模については、今後調査区域を広げ、また現地調査を行うことにより、位置と容量を明確にする必要があるが、今回扱った 10^7m^3 はモレーンダムで想定される一応の上限値と考えられるため、Barun Khola 以外の個所でGLOFが発生してもダム地点に到達する時は、Case-042以下となることが予想される。

以上より、アルン川上流域のGLOFについても適切なゲート操作により、十分対処できると考えられる。

Table 5-12 Discharge Capacity at Various Gate Openings and Water Levels

| Opening of Gate (m) | Discharge Capacity (m ³ /sec) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| | Water Level of Reservoir (EL.m) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 829 | 830 | 831 | 832 | 833 | 834 | 835 | 836 | 837 | 838 | 839 | 840 | 841 | 842 | | |
| 1 | 98 | 215 | 287 | 345 | 394 | 438 | 478 | 515 | 550 | 582 | 613 | 642 | 670 | 697 | | |
| 2 | 98 | 283 | 481 | 610 | 718 | 813 | 898 | 976 | 1,048 | 1,116 | 1,179 | 1,240 | 1,298 | 1,353 | | |
| 3 | 98 | 283 | 529 | 792 | 969 | 1,122 | 1,257 | 1,380 | 1,493 | 1,599 | 1,699 | 1,793 | 1,882 | 1,968 | | |
| 4 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,141 | 1,362 | 1,554 | 1,727 | 1,886 | 2,032 | 2,170 | 2,300 | 2,423 | 2,540 | | |
| 5 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,527 | 1,786 | 2,015 | 2,223 | 2,414 | 2,592 | 2,760 | 2,919 | 3,070 | | |
| 6 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 1,945 | 2,240 | 2,503 | 2,743 | 2,965 | 3,174 | 3,370 | 3,556 | | |
| 7 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,393 | 2,721 | 3,016 | 3,287 | 3,539 | 3,775 | 3,999 | | |
| 8 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,487 | 2,870 | 3,229 | 3,554 | 3,854 | 4,134 | 4,398 | | |
| 9 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,487 | 3,007 | 3,374 | 3,762 | 4,115 | 4,443 | 4,750 | | |
| 10 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,487 | 3,007 | 3,567 | 3,903 | 4,319 | 4,700 | 5,053 | | |
| 11 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,487 | 3,007 | 3,567 | 4,164 | 4,456 | 4,900 | 5,306 | | |
| 12 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,487 | 3,007 | 3,567 | 4,164 | 4,800 | 5,033 | 5,502 | | |
| 13 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,487 | 3,007 | 3,567 | 4,164 | 4,800 | 5,471 | 5,632 | | |
| 14 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,487 | 3,007 | 3,567 | 4,164 | 4,800 | 5,471 | 6,179 | | |
| 15 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,487 | 3,007 | 3,567 | 4,164 | 4,800 | 5,471 | 6,179 | | |
| 16 | 98 | 283 | 529 | 828 | 1,176 | 1,570 | 2,008 | 2,487 | 3,007 | 3,567 | 4,164 | 4,800 | 5,471 | 6,179 | | |

Table 5-13 Input Conditions and Simulation Results for Prescribed GLOF

| Case | Location of G.L. | Volume of G.L. (m ³) | Duration of Failure (min) | Start Time of Gate Operation | Initial Peak Discharge (m ³ /s) | Max. Discharge from Dam (m ³ /s) |
|------|------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|--|---|
| 010 | Barun Khola | 1 × 10 ⁶ | 30 | — | 1,775 | — |
| 021 | " | 3 × 10 ⁶ | " | Just after outburst of G.L. | 3,904 | 2,000 |
| 022 | " | " | " | 30min. after outburst of G.L. | 3,904 | 2,500 |
| 031 | " | 5 × 10 ⁶ | " | Just after outburst of G.L. | 6,015 | 3,500 |
| 032 | " | " | " | 30min. after outburst of G.L. | 6,015 | 4,000 |
| 041 | " | 10 × 10 ⁶ | " | Just after outburst of G.L. | 11,273 | 6,000 |
| 042 | " | " | " | 30min. after outburst of G.L. | 11,273 | 7,000 |

Fig. 5-19 (1) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
Case--010

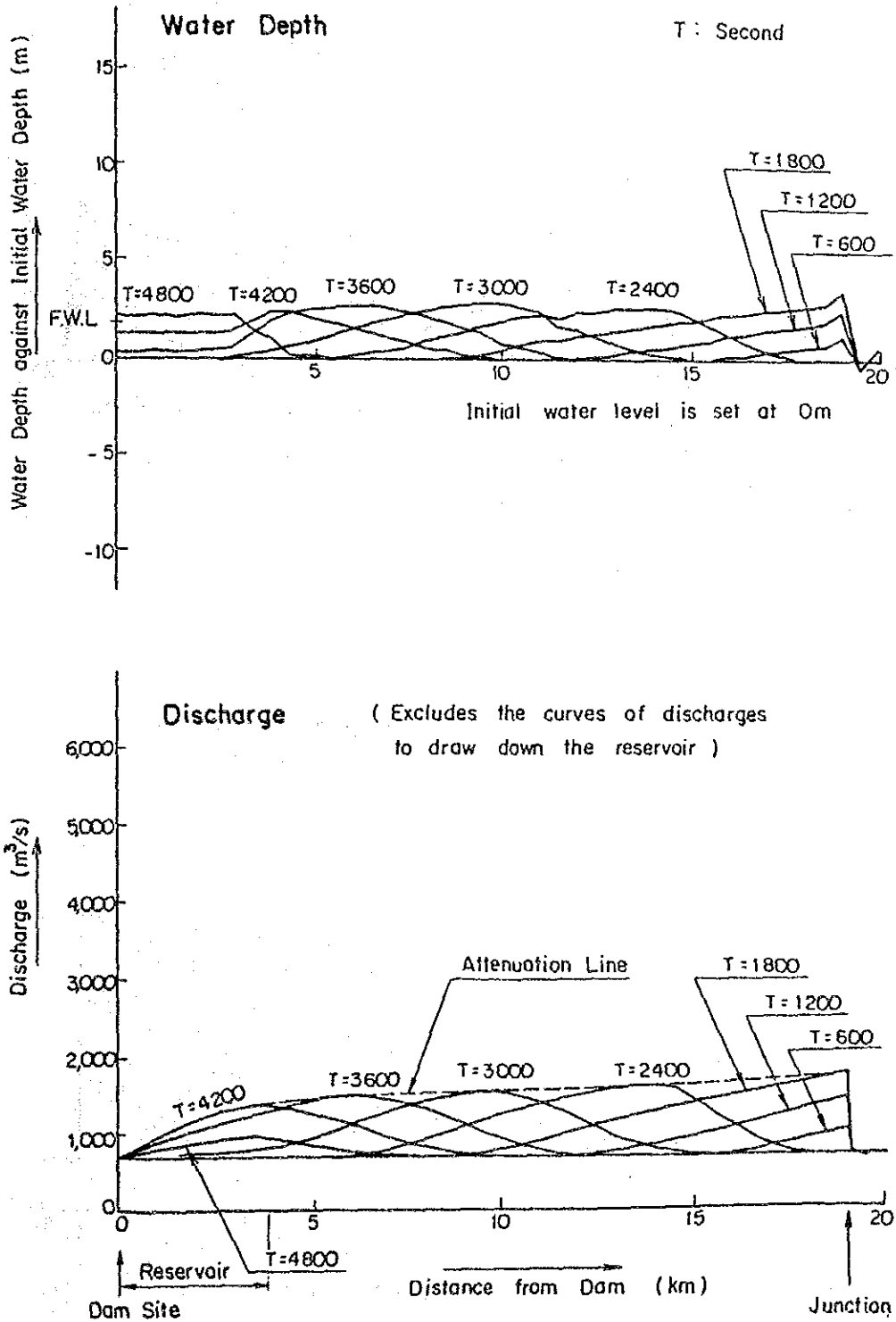


Fig. 5-19 (2) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
 and Junction of Barun Khola
 Case-021

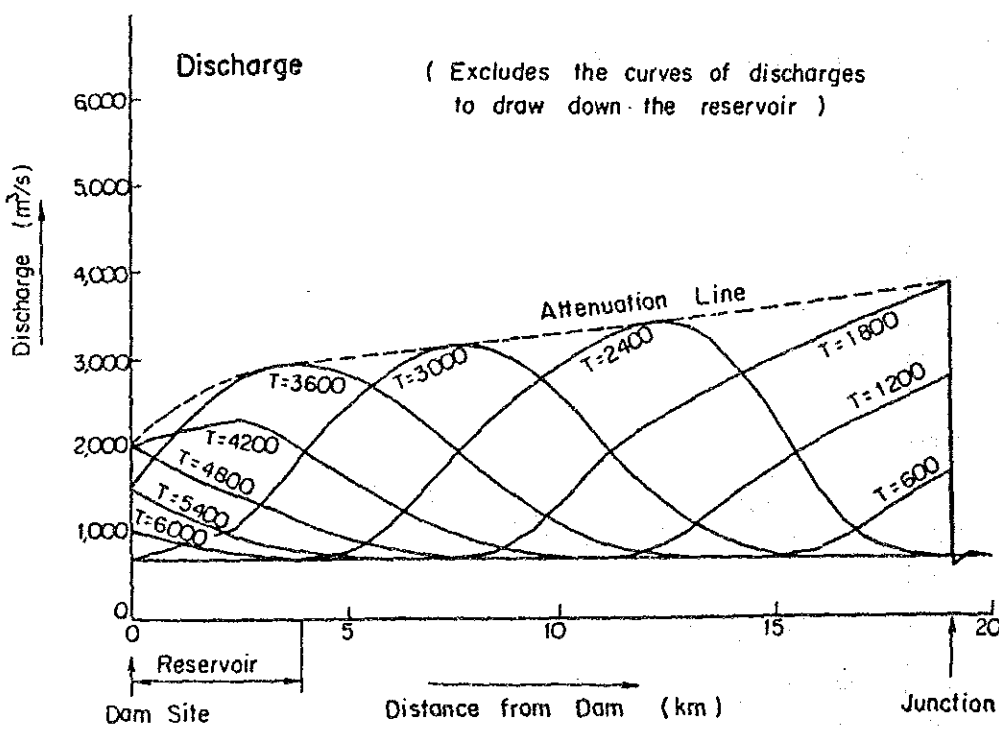
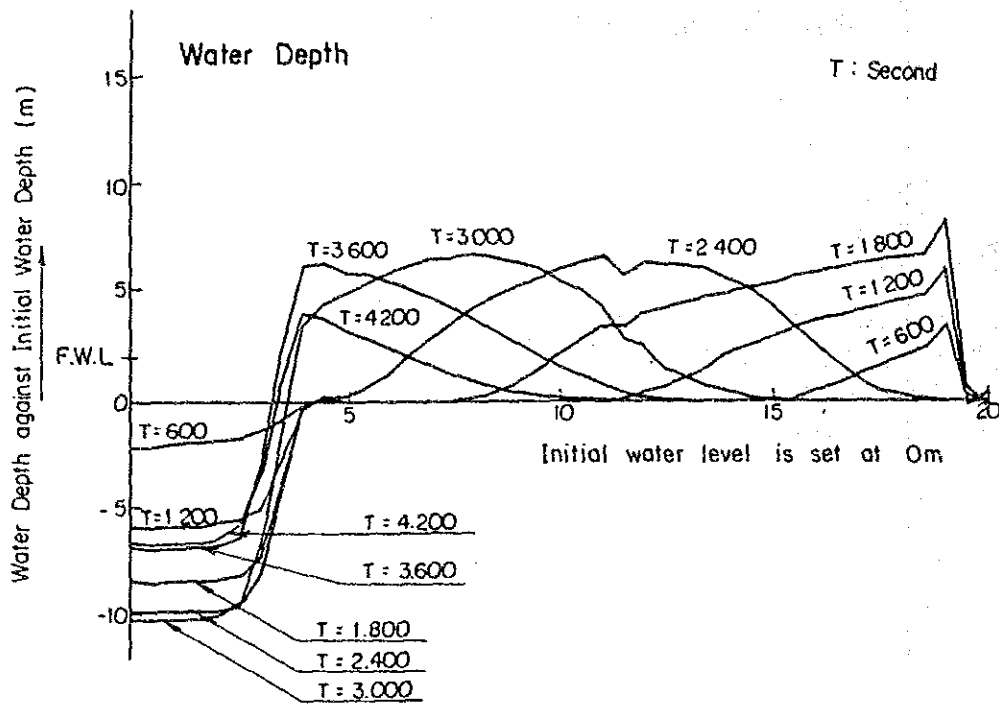


Fig. 5-19 (3) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
 and Junction of Barun Khola
 Case-022

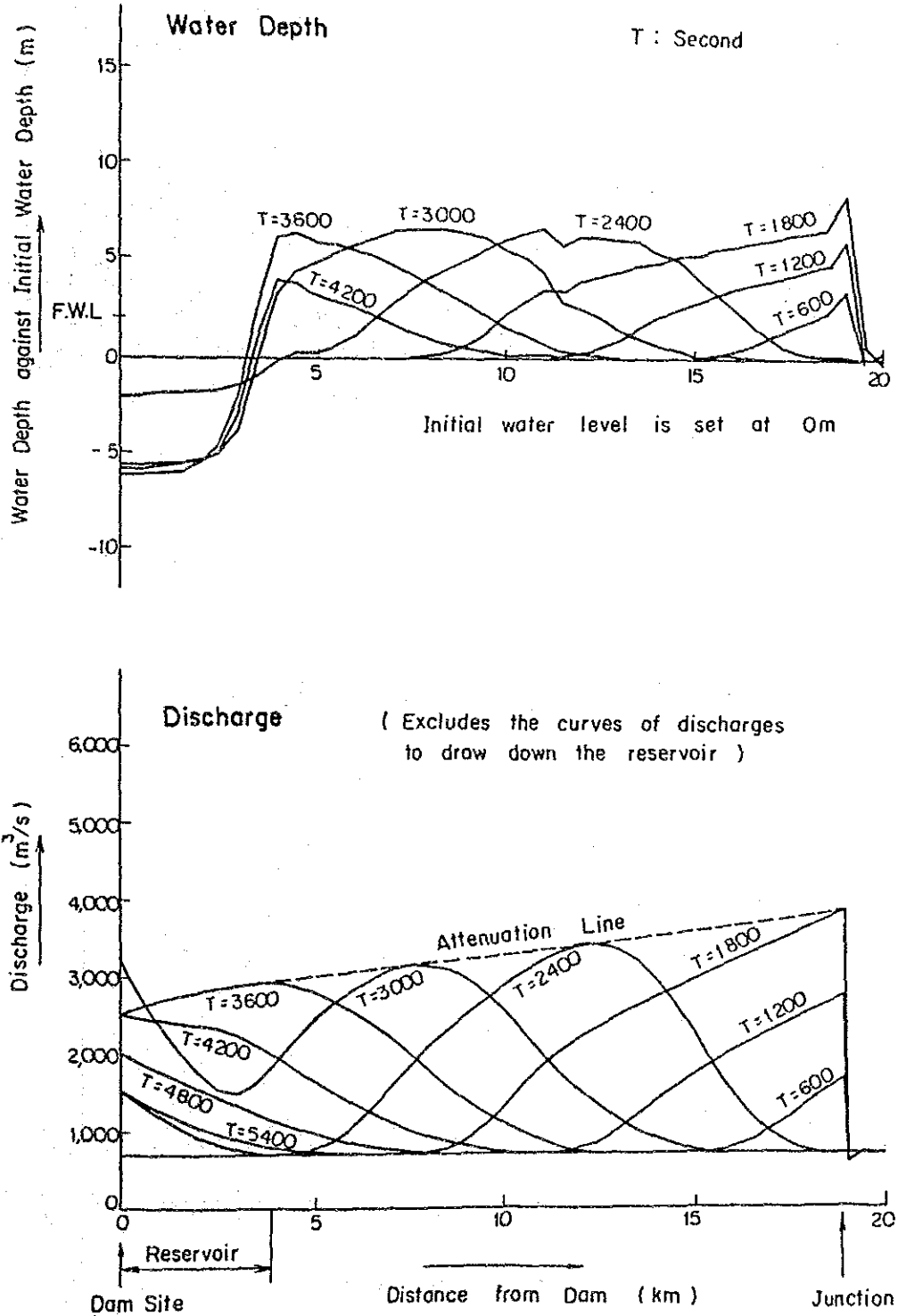


Fig. 5-19 (4) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
 and Junction of Barun Khola
 Case-031

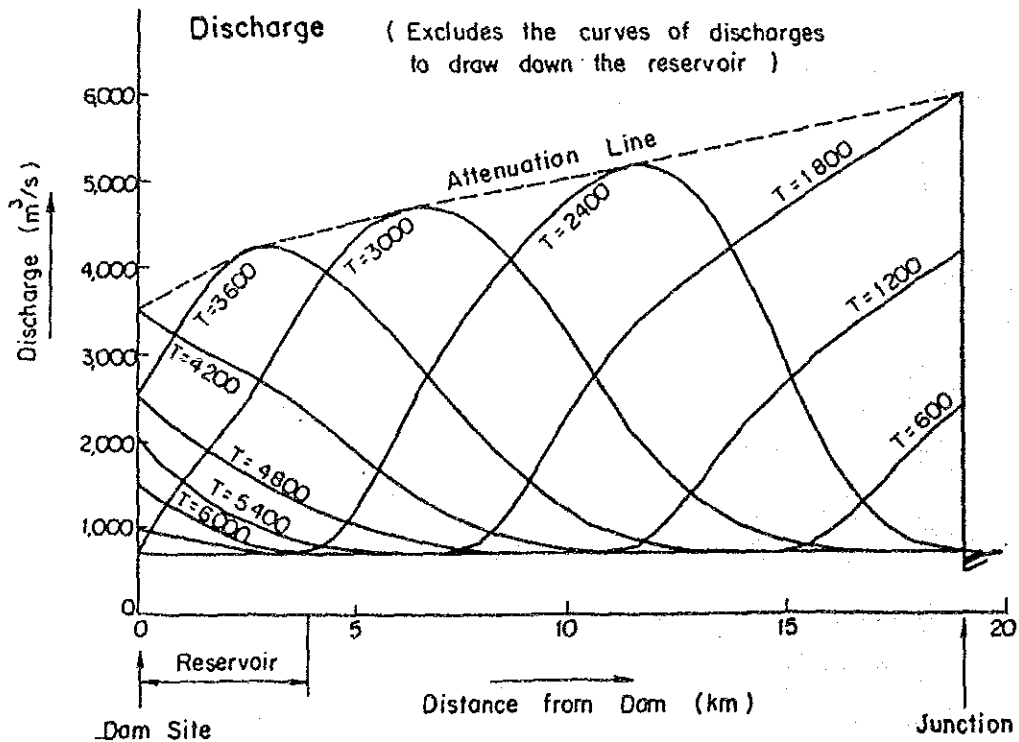
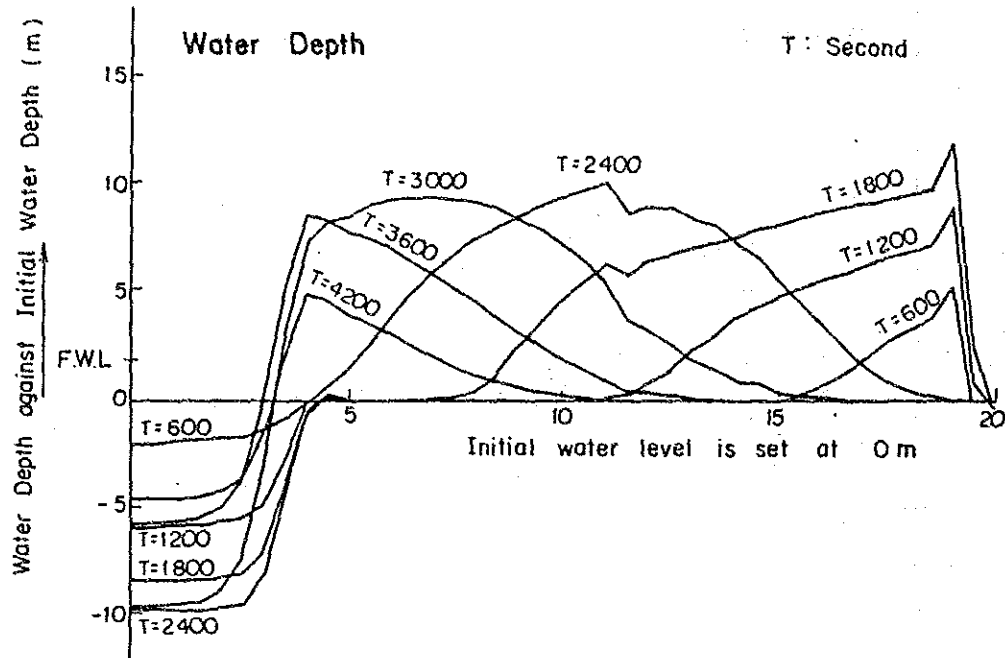


Fig. 5-19 (5) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
Case-032

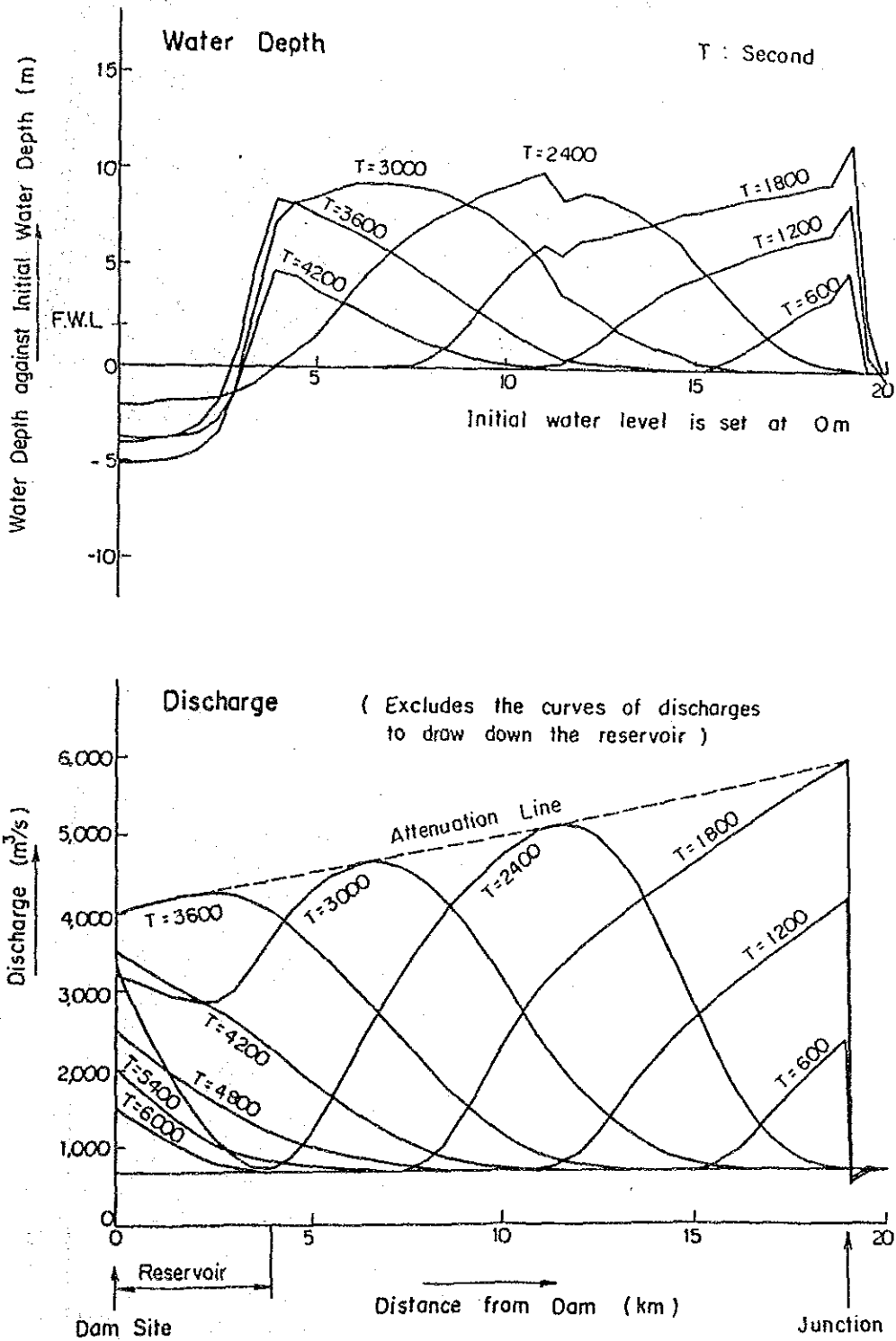


Fig. 5-19 (6) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
 and Junction of Barun Khola
 Case-041

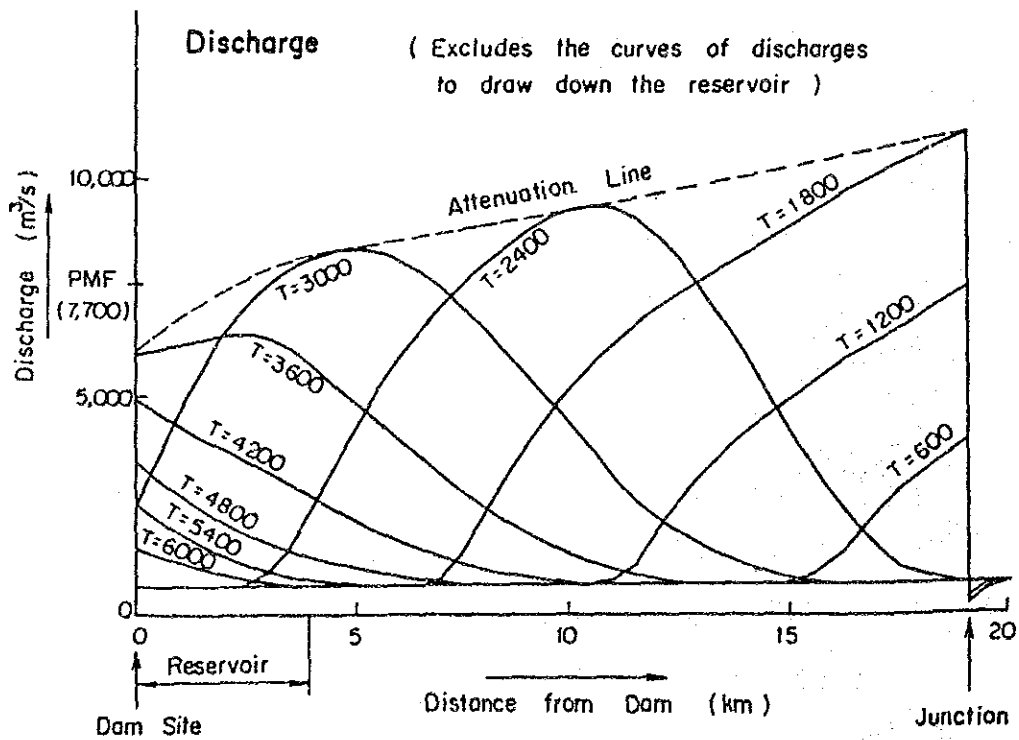
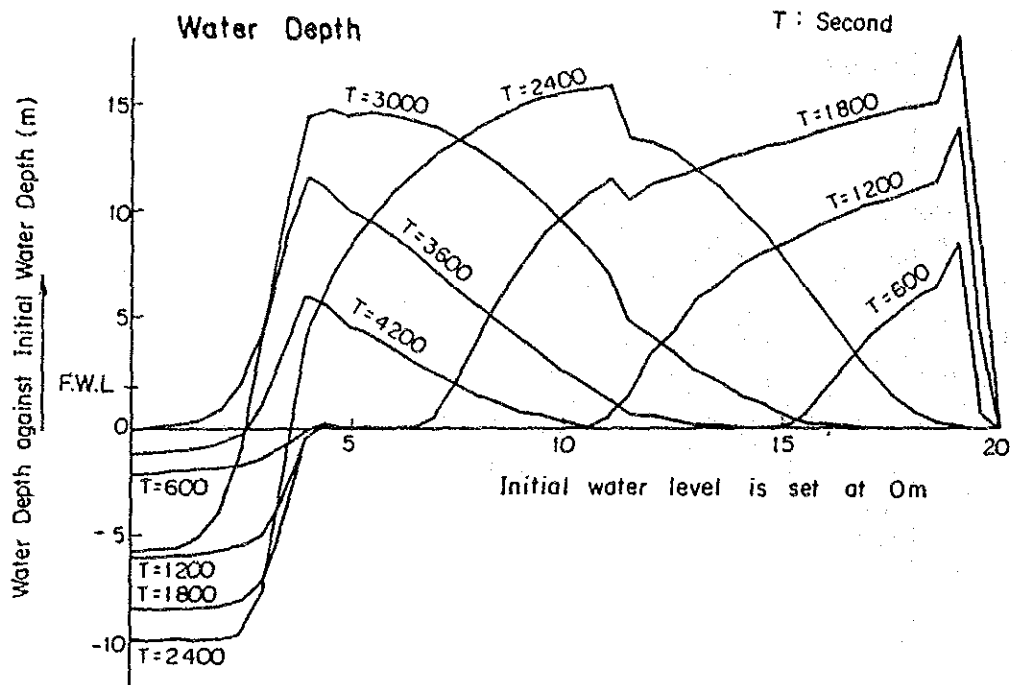


Fig. 5-19 (7) GLOF Propagation between Arun Dam and Junction of Barun Khola
Case-042

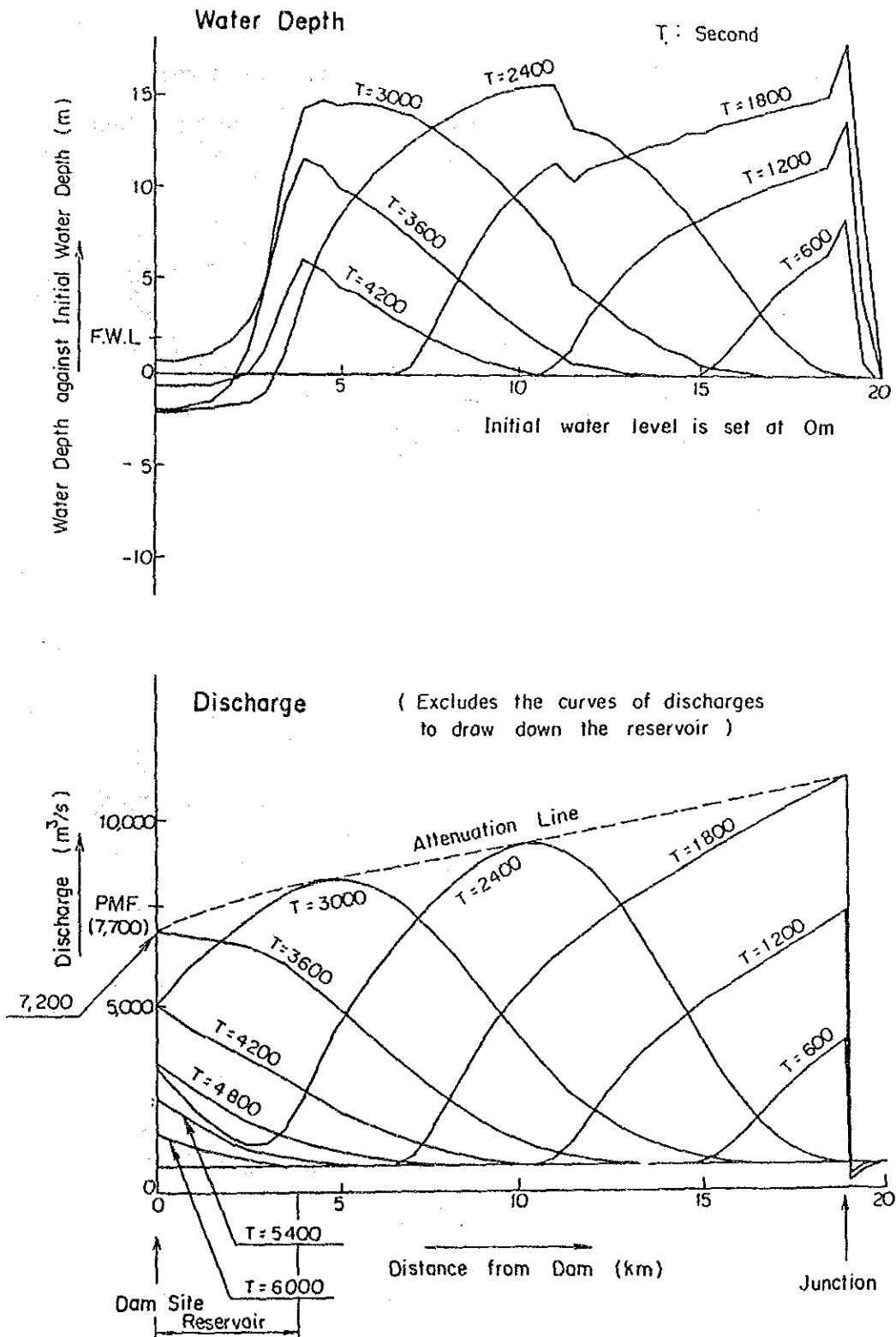


Fig. 5-20 (1) Change of Water Level in Arun Reservoir
 Case--010 (No Gate Operation)

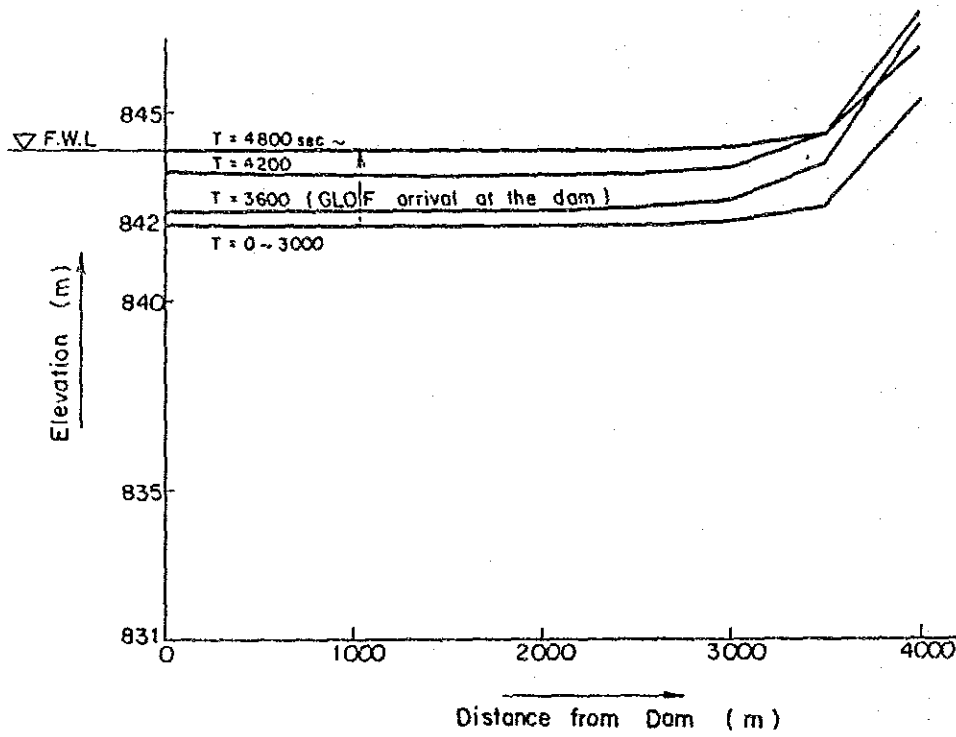


Fig. 5-20 (2) Change of Water Level in Arun Reservoir

Case-021

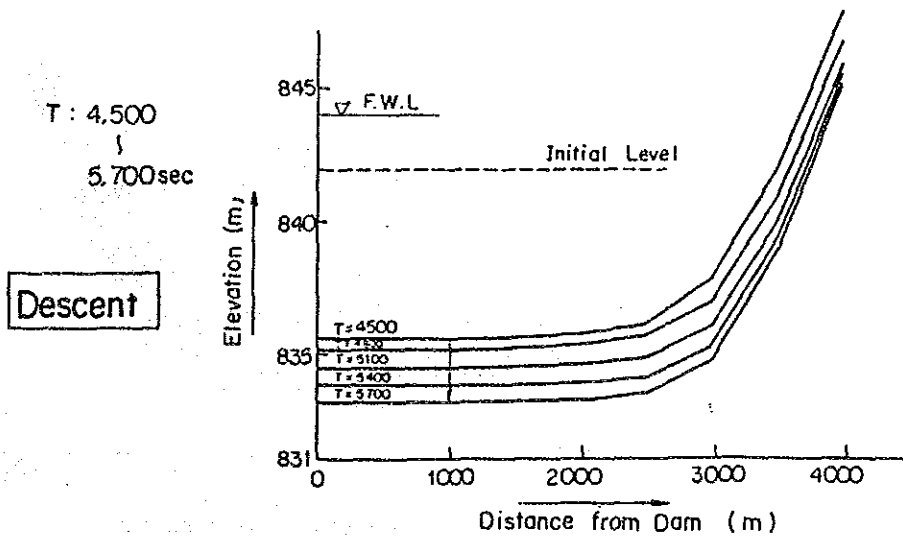
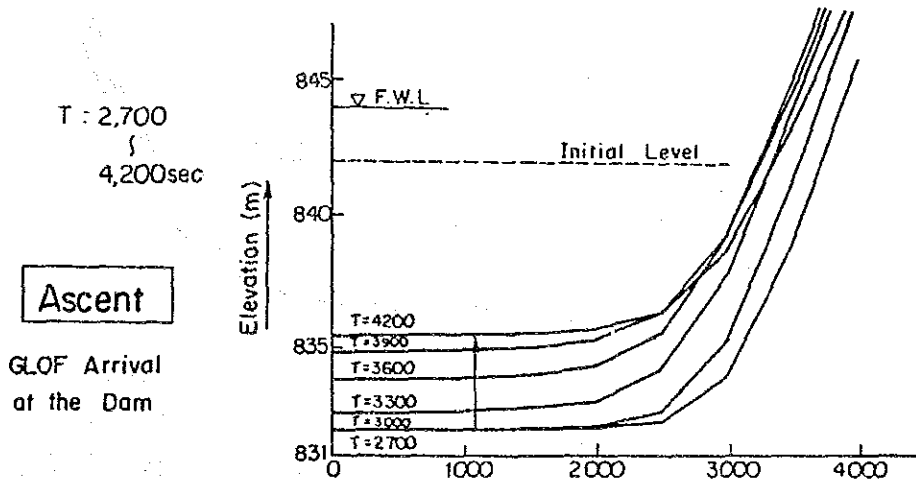
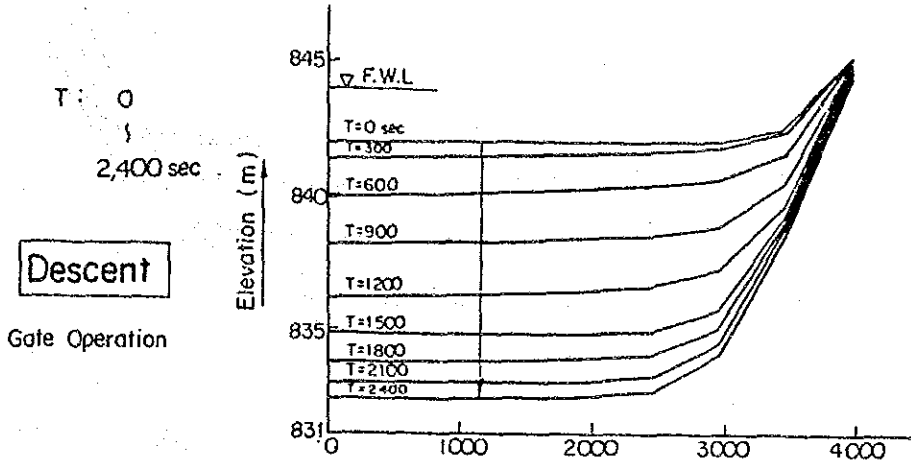


Fig. 5-20 (3) Change of Water Level in Arun Reservoir

Case-022

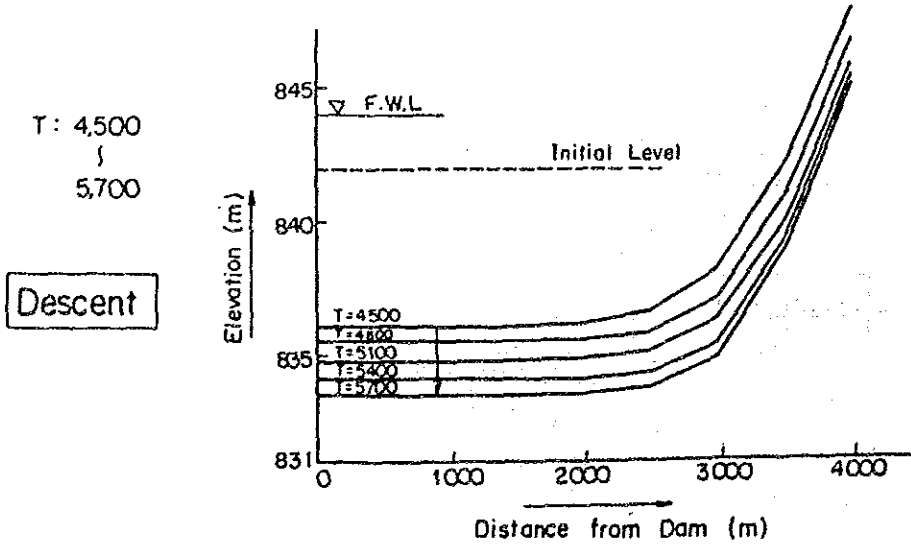
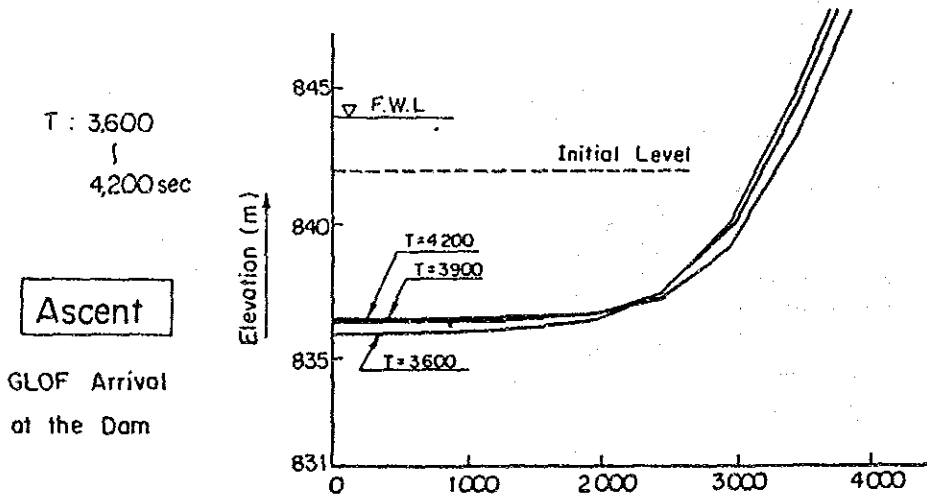
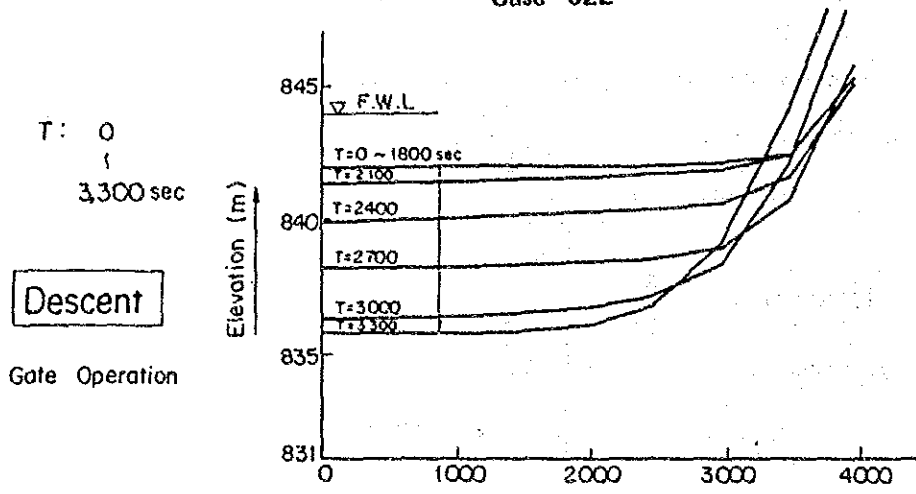


Fig. 5-20 (4) Change of Water Level in Arun Reservoir

Case-031

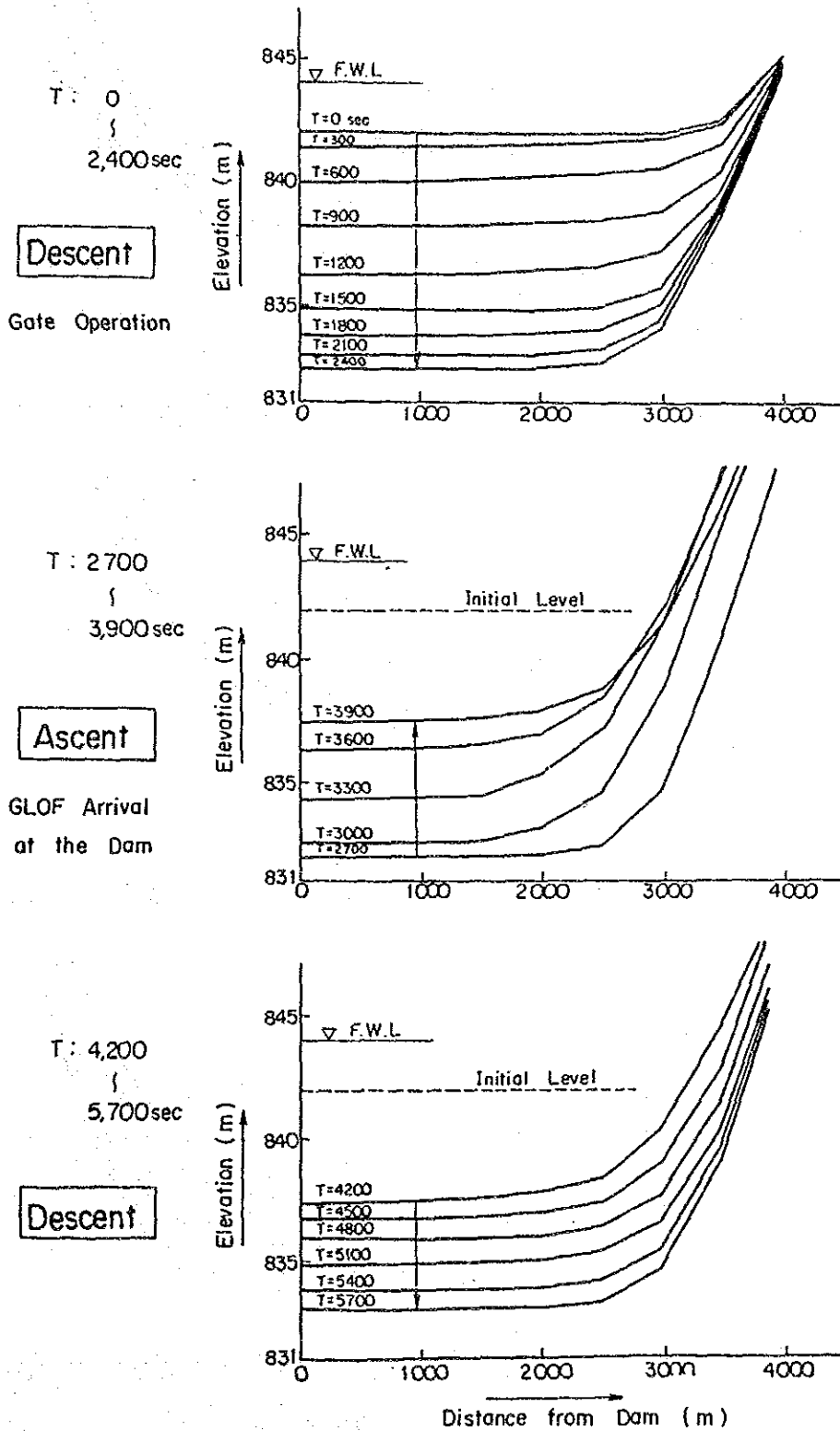


Fig. 5-20 (5) Change of Water Level in Arun Reservoir

Case-032

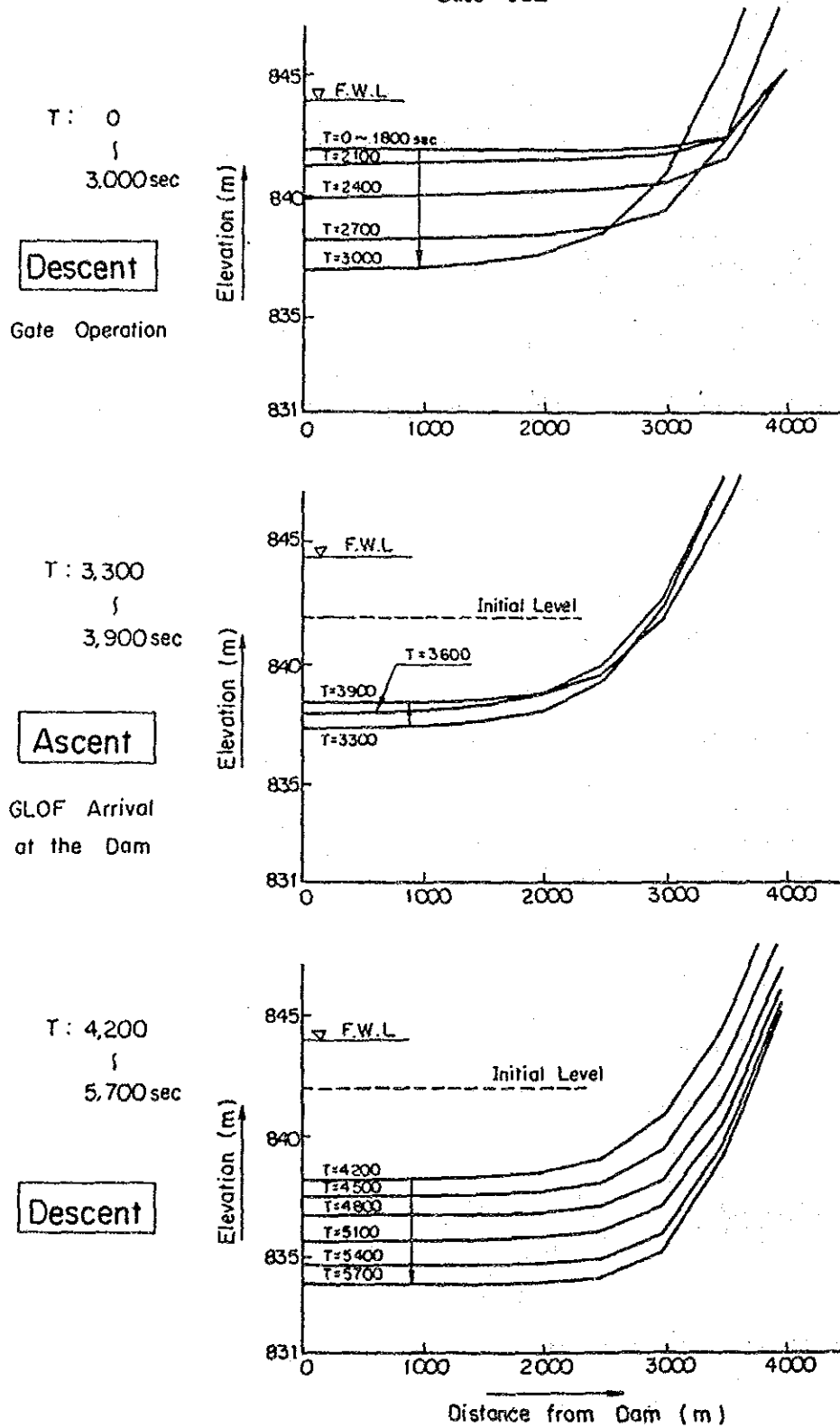


Fig. 5-20 (6) Change of Water Level in Arun Reservoir

Case-041

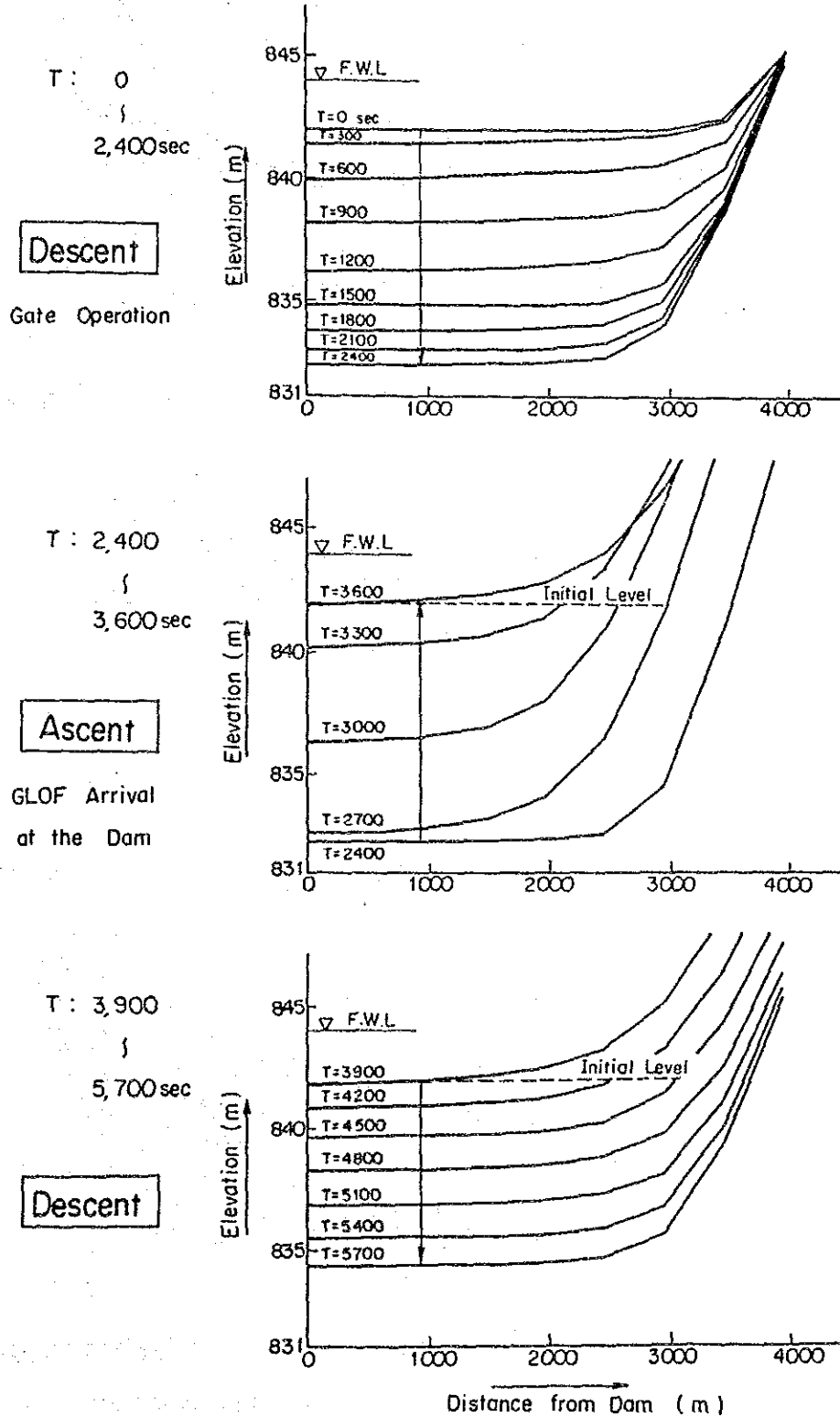
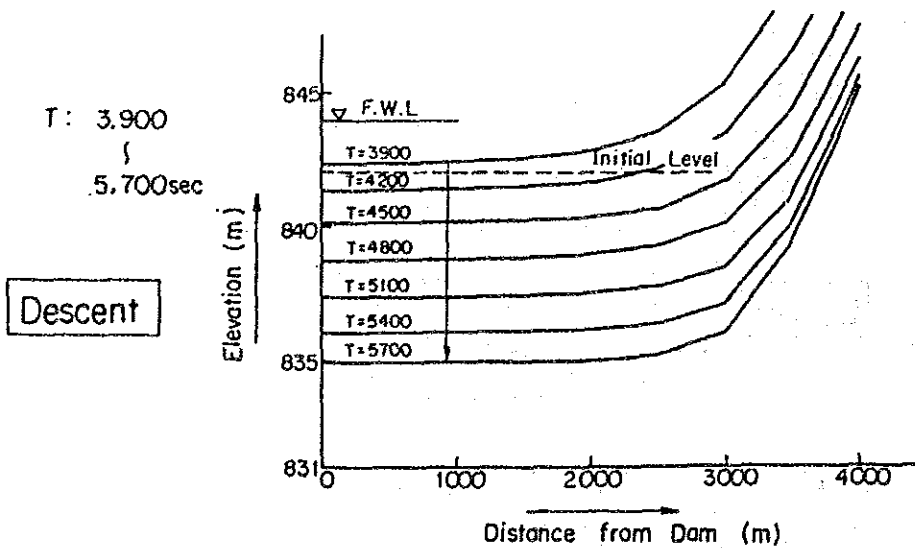
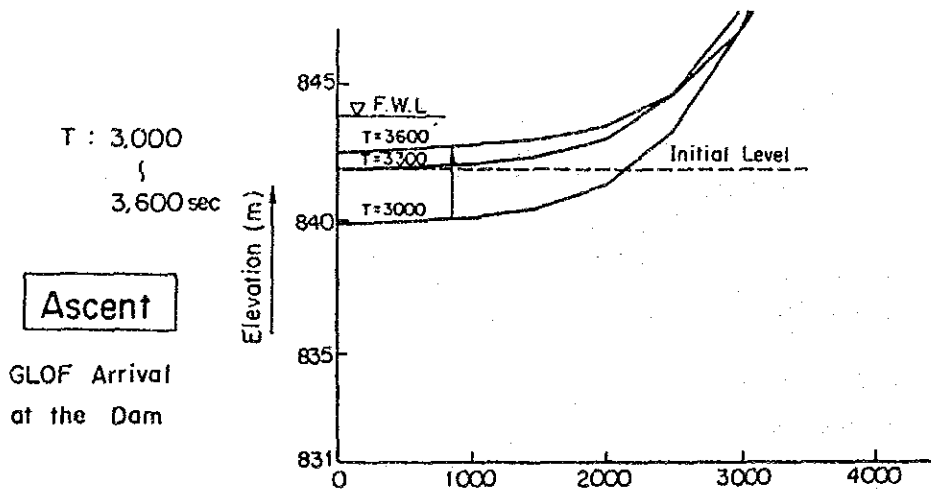
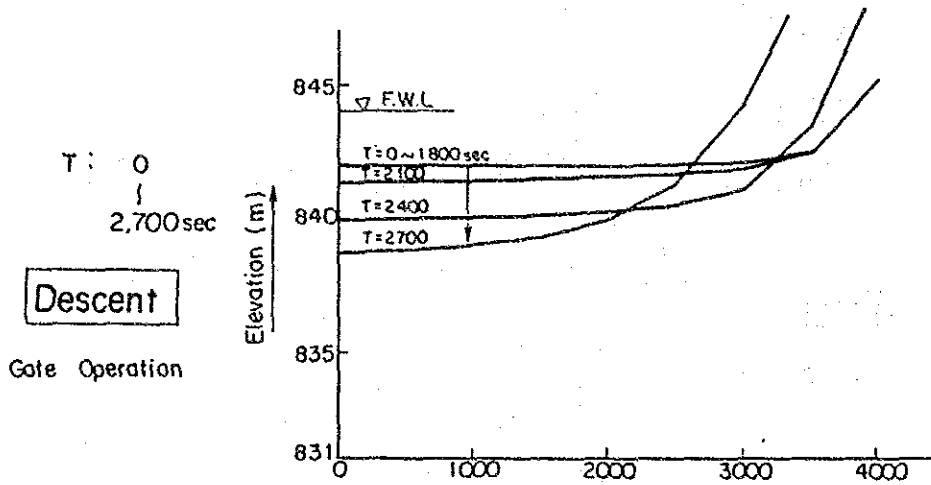


Fig. 5-20 (7) Change of Water Level in Arun Reservoir

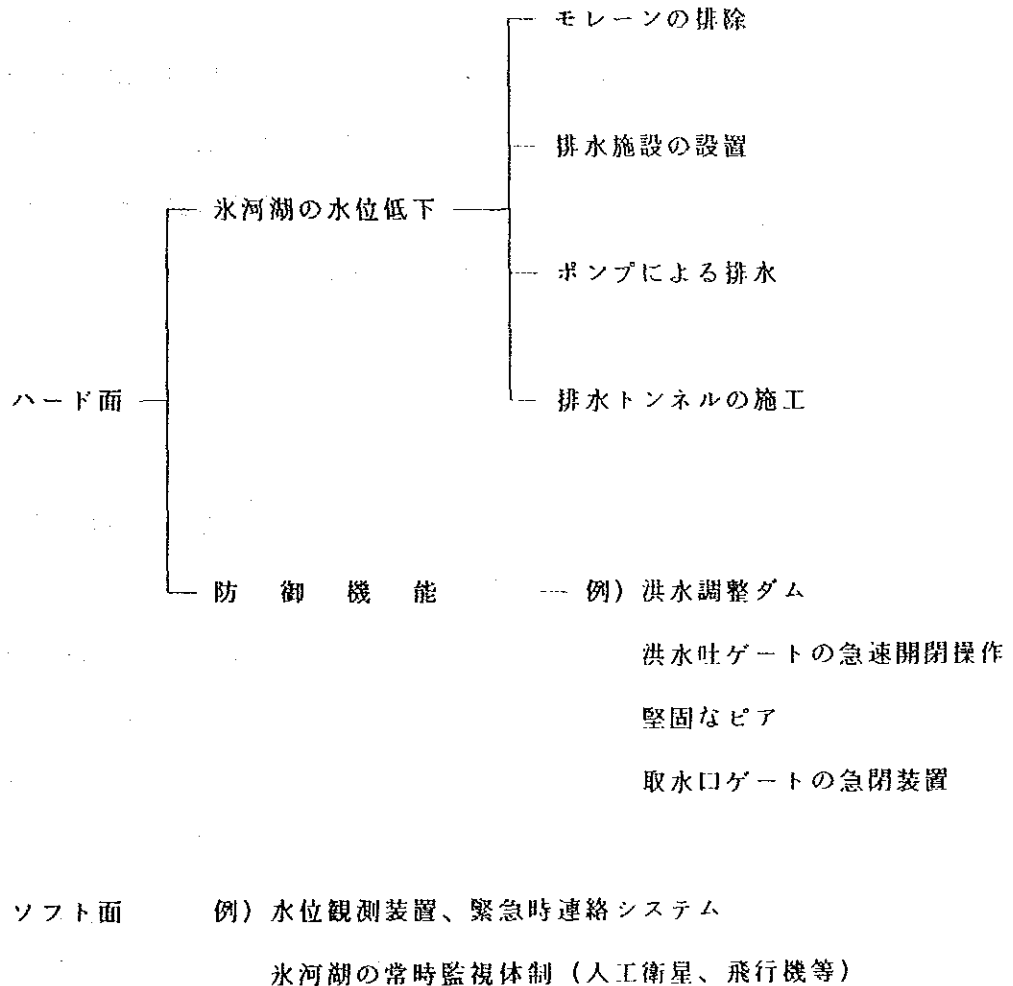
Case-042



5.7.6 GLOFの警戒システム

(1) 一般

GLOFに対応するには、洪水を軽減させる方法、GLOFに耐えうる工作物の設置及びあらかじめGLOFの発生を検知して、被害を未然に防止するなどの手段について検討しなければならない。その大要を図示すると次のようになる。



WECSのGLOFレポートでは、以上の方法の内、ネパールヒマラヤにおいては、モレーンを人為的に切り崩す方法と、蛇かご等のフレキシブルな材料により排水施設をエンドモレーンに築造することをすすめている。また一方で危険と思われる氷河湖に常時監視体制を敷くことにより、被害を未然に防げるとも述べている。

(2) 当地点の防御方法

アルン川上流に発生するGLOFに対処するには、上述したように原因となる氷河湖の水位を下げる方法が最も確実なことは言うまでもない。しかし、発生源と考えら

れる氷河湖がヒマラヤ周辺に限ってみると、いずれも高標高部に位置し、水位低下工事を実施するには、資材の運搬や作業環境において非常に困難と言わざるを得ない。そこでアルン流域に築造するダム等の河川構造物をGLOFの被害から防ぐには、第1に上流各所に水位観測所やセンサー等を設置し、この装置とゲートの開閉装置を直接連携させることにより、GLOFがダムに到達するまでに貯水位を下げ、ダムの越流を防ぐことが重要となる。(5.7.5参照) 特にチベット地域で発生する恐れがあるGLOFについては、連絡体制を密接にとる必要がある。さらに、危険と思われる氷河湖については、モンスーン期間中に限って常時監視体制をとる必要があるかもしれない。以上の警戒システムをまとめるとFig. 5-21のようになる。図に示したのは一例にすぎないが、いずれにしても何重もの監視体制を敷くことがGLOFに対する安全性を高める唯一の方法であると言える。

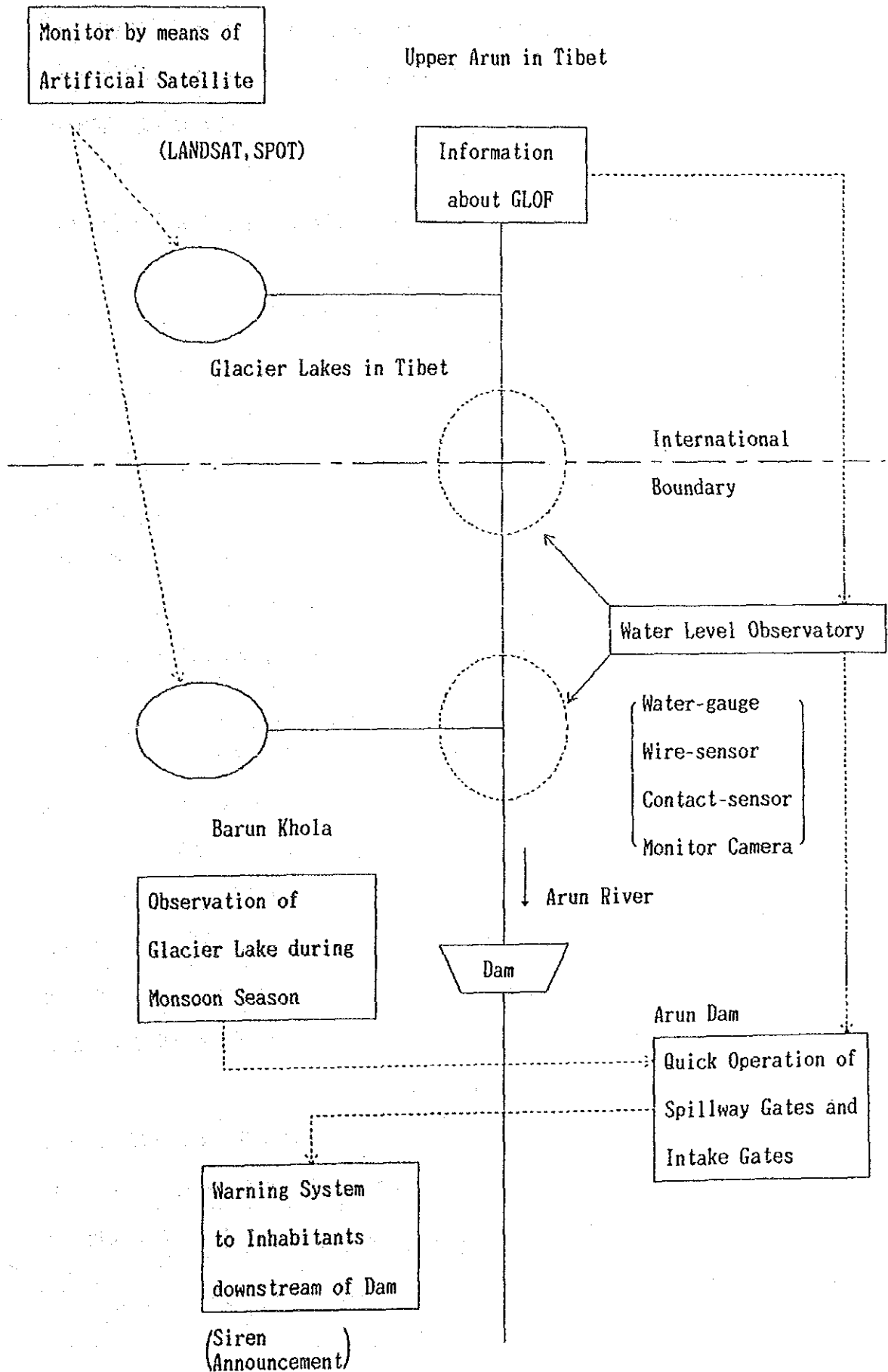
5.7.7 まとめ

以上GLOFについて、その事例、メカニズム、氷河湖の分布、シミュレーション計算、警戒システムについて述べてきた。

GLOFの現象そのものが、未だ十分解明されていない現在、その対応策を事前に講じるのは極めて困難ではあるが、今回のスタディによって次のことが判明した。

- (i) 1964年頃アルン川流域(恐らく発生源はチベット側と思われる)においてGLOFが発生している。
- (ii) アルン川流域を始め、ネパールヒマラヤ周辺はモレーンあるいはアイスコアを含むモレーンダムによる氷河湖が一般的であり、アイスダムによる氷河湖はほとんど例がない。
- (iii) 上記モレーンダムの崩壊は数10分から数時間という単位で進行する。
- (iv) GLOFの時は同時に多量の土砂も流下するが、その量は未知であり、また計算手法も確立されていない。
- (v) アルン川上流の内ネパール側で確認された氷河湖は Barun Khola及び Iswa Khola 上流部であり、規模は大きくてもせいぜい $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 以下と思われる。
- (vi) チベット側では Karma Chhu にいくつかの氷河湖が存在する可能性があり、また Karma Chhuより上流の支流にも 10^7 m^3 級の氷河湖が存在する恐れがある。そのため、今後 LANDSAT、SPOT等の画像を利用することにより、研究の精度を向上させるだけでなく、中国の協力を得て、現地調査を実施することが望ましい。また今回はアル

Fig. 5-21 Warning System against GLOF



ン川流域の内、比較的ダムサイトに近い付近に調査を限ったが、今後、流域全域にわたって調査範囲を広げる必要がある。

(vii) シミュレーションの結果、事前にGLOFの発生をキャッチし、(ピーク到達30分以前)水位を下げておけば、 10^7m^3 級のGLOFが発生してもダムに悪影響を及ぼさない。

なお、この時の最大放流量は約 $7,000\text{m}^3/\text{s}$ であり、5.6で決定した設計洪水量 $7,700\text{m}^3/\text{s}$ を下回っている。

(viii) GLOFの警戒体制としては、中国側と密接な連絡体制を確立し、なおかつ、何重にも検知装置を設置することが望ましい。

5.8 堆砂

5.8.1 一般

ガンジス川のようにヒマラヤ地域に水源を有する河川は、非常に大量の浮遊砂を含んでおり、既設の貯水池にとって堆砂は深刻な問題となっている。この理由は、ヒマラヤ山脈という激しい造山運動による地質のせい弱化と、一方でモンスーン期の激しい降雨による下方侵食作用が相互に作用しあっていることに起因している。このような自然侵食作用に加え、人為的な植生の破壊も流出土砂量の増加を促進する要因になっている。

ガンジス川の大支流である Sapt Kosi河は、特に多量の浮遊砂を含んでおり、Summary of Erosion Data in Nepal(Dep. of Soil and Water Conservation)によると、1年当たりの浮遊砂量は1kmに換算して約 $2,000\text{m}^3/\text{km}/\text{Yr}$ と報告されている。この値は世界的レベルで見てもかなり大きいと言える。Sapt Kosi河の支流の中でも浮遊砂量が最も多いのは Tamur川であり、次いでSun Kosi川、アルン川となっているが、アルン川は他の2支流に比べ比較的浮遊砂が少ないと報告されている。この理由はアルン川の流域の大部分がチベット地域に属しており、この地域での生産土砂量が比較的少ないことに起因していると思われる。

本節では現地採取した水資料により、ダムサイトでの年間浮遊砂量を推定し、尚且つチベットとネパール側における実測値に基づく数値による裏付けを行うと共に、堆砂シミュレーション計算により、堆砂形状を推定した上でアルン3ダムの完成後に必要と思われる排砂方法にまで言及した。

5.8.2 採水資料による堆砂量の推定

3.5.3で示したように、ダムサイト近傍において水質分析を行うことを目的に合計10ヶのサンプルを収集した。なお同表の流量欄にはTumlingtar測水所のデータを掲載しているため、これに0.76の係数を乗じて(5.5.3参照)ダム地点流量とし、浮遊砂と流量の関係を次式で近似した。

$$q_s = 0.00045 Q^{2.16}, \quad r = 0.90$$

ここに q_s : 浮遊砂量 (mg/ℓ)

Q : ダム地点流量 (m³/s)

この式よりさらに年間の浮遊砂量を算出するには次式を用いる。

$$\begin{aligned} Q_s &= \sum_{i=1}^{365} (Q_i \times q_{s,i} \times 86,400) \\ &= \sum_{i=1}^{365} (Q_i \times 0.00045 \times Q_i^{2.16} \times 86,400) \end{aligned}$$

ここに Q_s : 年浮遊砂量 (g)

Q_i : i 日のダム地点流量 (m³/s)

$q_{s,i}$: i 日のダム地点浮遊砂量 (mg/ℓ)

以上の結果を Table 5-14 に示す。

Table 5-14 Annual Suspended Load Concentration

Unit: 10³ ton

| Year | Qs | Year | Qs |
|------|--------|---------|--------|
| 1975 | 5,293 | 1981 | 10,184 |
| 1976 | 4,717 | 1982 | 3,009 |
| 1977 | 6,412 | 1983 | 5,337 |
| 1978 | 5,356 | 1984 | 4,220 |
| 1979 | 6,654 | 1985 | 4,614 |
| 1980 | 18,118 | Average | 6,719 |

上記年平均値を流域面積で割ると、単位面積当りの平均年浮遊砂量として

$$6719 \times 10^3 \text{ ton} / 29,310 \text{ km}^2 = 229 \text{ ton} / \text{km}^2 / \text{Yr}$$

が得られる。次に貯水池の堆砂量を推定するに当たり、掃流砂の割合を仮定しなければならぬが、ここでは20%とした。また捕捉率についてはBruneによる図が一般に用

いられている。同図によるとアルン貯水池の場合、総貯水容量 $11.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ に対し、年間総流入量約 $10,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ から導き出される capacity-inflow ratio は 0.1% となり、殆ど捕捉することなく流下するという結果になってしまうため、とりあえずここでは 0.2 とした。以上より年堆砂量は、

$$6,719 \times 10^3 \text{ ton} \times (1 + 0.2) \times 0.2 = 1,613 \times 10^3 \text{ ton/Yr}$$

ここで、密度を 1.4 とすると、

$$1,613 \times 10^3 \text{ ton} / 1.4 = 1,152 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{Yr}$$

となる。この量で年々堆砂が進むと仮定すると、湛水後 4 年目にはダムクレスト (BL. 828.0m, 容量 約 $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3$) まで達することになる。ただし、現段階では捕捉効果に対して何ら有用な情報が提供されていないため、4 年とは限定せずに数年というオーダーでダムクレストにまで堆砂が達するという表現にとどめておきたい。

5.8.3 アルン川近傍地点における浮遊砂の実績

アルン川はその流域の大部分がチベット地域に属しているため、他のガンジス川支流とは浮遊砂量において、かなり異なった性格を有している。5.8.2 で算出した年間浮遊砂量 $229 \text{ ton/km}^2/\text{Yr}$ という数字は他の支流に比べオーダーで 1 桁も異なっているが、これはチベット地域での生産土砂量がヒマラヤ山脈の南側斜面に比べ格段に少ないことを物語っている。

Table 5-15 (1)、(2) にそれぞれ Sapt Kosi 河およびチベット地域の各河川の浮遊砂量を示す。同表より Sapt Kosi 河の年平均堆砂量は、 $1,800 \text{ m}^3/\text{km}^2$ であり、密度換算すると約 $2,500 \text{ t/km}^2$ となる。一方、チベット地域の平均値は 127 t/km^2 とその比は 20 倍にもなる。

ヒマラヤを水源に持つ河川の浮遊砂量が多い理由は、急激な造山運動と多量の降水量、そして人為的な植生破壊の複合作用ということは既に述べた。一方、チベット地域の河川の浮遊砂が比較的少ない理由は、まず降水量が少なくしかも河川勾配が緩いために侵食活動が不活発であるということと、人口が少なく耕地面積が少ないことに、主に起因している。さらに降水量の少ないことと関連して土砂を大量に移動させるような洪水が発生しないことや、河川水の主要成分が地下水に依存していることも要因の一つと考えられる。

ここで 1 つの試算として、アルンダム地点の浮遊砂量を次式により推定してみた。

アルンダム地点における流域面積の内

Table 5-15 (1) Sedimentation Load of Sapt Kosi River

| River | Catchment Area (km ²) | Annual Sedimentation Load (m ³) | Annual Sedimentation Load per km ² (m ³ /km ²) |
|-----------|-----------------------------------|---|--|
| Sun Kosi | 19,000 | 54 × 10 ⁶ | 2,840 |
| Arun | 36,000 | 35 × 10 ⁶ | 970 |
| Tamur | 6,000 | 30 × 10 ⁶ | 5,000 |
| Sapt Kosi | 61,000 | 110 × 10 ⁶ | 1,800 |

Source : Summary of Erosion data in Nepal, FAO/UNDP, Dep. of Soil and Water Conservation

Table 5-15 (2) Sedimentation Load of Rivers in Tibet

| River | Catchment Area (km ²) | Annual Sedimentation Load (m ³) | Annual Sedimentation Load per km ² (m ³ /km ²) |
|----------------|-----------------------------------|---|--|
| Jinsha Jiang | 187,507 | 15.7 × 10 ⁶ | 84 |
| Lancan Jiang | 84,220 | 20.7 × 10 ⁶ | 246 |
| Nu Jiang | 118,760 | 19.6 × 10 ⁶ | 165 |
| Yarlung Zangbo | 106,378 | 14.5 × 10 ⁶ | 136 |
| Yarlung Zangbo | 189,843 | 19.0 × 10 ⁶ | 100 |
| Nyang Qu | 6,216 | 0.9 × 10 ⁶ | 145 |
| Lhasa He | 26,225 | 1.0 × 10 ⁶ | 37 |
| Total | 719,149 | 91.4 × 10 ⁶ | (Average) 127 |

Source : Rivers and Lakes of Xizang

チベット流域 27,929 km²

ネパール側流域 1,381 km²

チベット流域の年浮遊砂量 127ton/km²

ネパール側流域の年浮遊砂量 2,500ton/km²

ダムサイトにおける年浮遊砂量

$$= \frac{27,929 \times 127 + 1,381 \times 2,500}{27,929 + 1,381} = 239 \text{ ton/km}^2$$

ここで得られた数値は5.8.2で実測試料を元に算定した値229ton/km²/Yrとほぼ同じであり、両者の計算の妥当性が証明された。

5.8.4 堆砂形状の予測

以上の検討より貯水池内の堆砂量の概略の数値が算定されたが、本項では堆砂形状を予測するためのシミュレーション計算を行った。(EPDC/KCC FLOW 700 MODEL)

(1) 計算手順

- (i) 初期河床状態について不等流計算を行なう。
- (ii) 各断面について摩擦速度 u_* を求める。
- (iii) 粒径毎に流砂量式(Lane・Kalinskeの式を採用)より流砂量を求めた後、総流砂量を計上する。
- (iv) 連続式により、河床変動量を求め、河床高を決定する。
- (v) 以上の計算を日単位で繰り返す。

(2) 計算条件

(i) 粒度分布

粒度分布はダムサイト付近の河床堆積物の実測値を用いた。(Appendix A.3 参照)

ただし、年間を通じて進行する堆砂の支配成分は浮遊砂であると仮定して粒径1.1mm以下に限定して計算の対象とし、かつ下記の粒度分布をもつものと仮定した。

| | | | | | |
|-----------|-----|------|------|------|------|
| 代表粒径 (mm) | 1.1 | 0.54 | 0.37 | 0.23 | 0.14 |
| 支配率 (%) | 10 | 20 | 40 | 20 | 10 |

(ii) 流量データ

流量データは5.5.3で求めたダム地点流量を用い、計算開始年は1975年1月1

日とした。

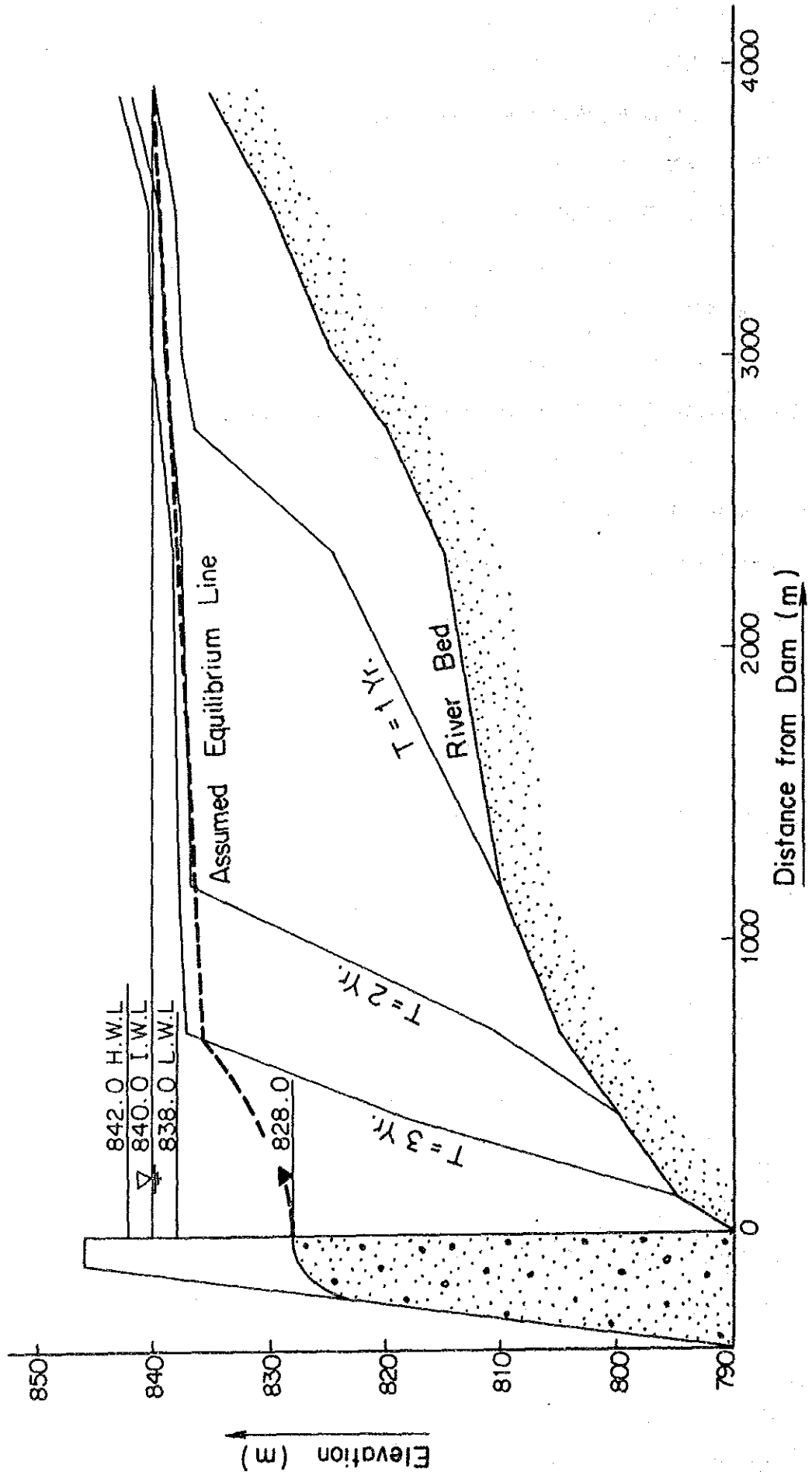
(iii) 水位

水位は基準取水水位 840.0mとした。

(3) 計算結果

Fig. 5-22に結果を示す。同図より計算上3年で堆砂の前面がダム近くまで達することが予想される。また貯水池の背水端付近の堆砂により有効容量が減少するため、適切なフラッシングにより堆砂を貯水池内に誘導することが必要である。アルン3ダムにおいては雨季のほぼ全期を通じて、ゲート放流を行うことになるため、堆砂面は図中点線で示した線で平衡すると考えられるが、それでも、貯水池末端における堆砂は継続的に進行するので、洪水を利用したフラッシングを毎年行なうことが必要であろう。

Fig. 5-22 Reservoir Sedimentation Profile



第6章 レイアウトの比較検討

第6章 レイアウトの比較検討

| | 頁 |
|---------------------|------|
| 6.1 レイアウト検討 | 6-1 |
| 6.1.1 一般 | 6-1 |
| 6.1.2 レイアウト検討 | 6-1 |
| 6.2 ダムサイト | 6-4 |
| 6.3 取水位 | 6-8 |
| 6.3.1 取水位 | 6-8 |
| 6.3.2 所要調整池容量 | 6-10 |
| 6.4 沈砂池 | 6-14 |
| 6.5 トンネルレイアウト | 6-14 |
| 6.6 発電所サイト | 6-15 |

LIST OF TABLES

| | |
|-----------|---|
| Table 6-1 | Outline of Projects shown in Previous Reports |
| Table 6-2 | General Features of Proposed Dam Sites |
| Table 6-3 | Simulation of Hourly Operation in 2006 |
| Table 6-4 | Main Features of Pikhuwa and Kaguwa Schemes |

LIST OF FIGURES

| | |
|----------|--|
| Fig. 6-1 | Alternative Scheme Layout |
| Fig. 6-2 | Location of Dam Site |
| Fig. 6-3 | Cross Section at Two Dam Sites |
| Fig. 6-4 | Typical Cross Section of Dam |
| Fig. 6-5 | Daily Peak Load Forecast and Ideal Arun 3 Operation Rule |
| Fig. 6-6 | Arun 3 Reservoir Storage Capacity |

第6章 レイアウトの比較検討

6.1 レイアウト検討

6.1.1 一般

本章の目的は、ダム地点、取水位、沈砂池および導水路の配置、発電所の位置など、主として土木工作物の位置、配列の代案を検討して、第7章の最適規模検討のための基本レイアウトを選定することである。

基本レイアウトの選定には、上記の要素に加えて、取付道路、電気機器、送変電設備などについても同様の検討を行なう必要があるが、それらはそれぞれ第8章、第9章およびVol. II (アクセス道路)で行われているので、本章から除外した。しかし最適規模検討に必要なインプットデータは、これらについても考慮して規模検討を実施している。

6.1.2 レイアウト検討

本地点に関しては、今までに2度の調査が実施されている。コシ河流域における水資源利用に関するマスタープラン調査がJICAにより実施され(1982~1983)、アルン3地点は選定された52地点の中でも最も有力な地点であることが明らかとなった。これに続いて当時の電気局は本地点のプレ・フェージビリティ調査を行なった(1985)。これら2度の調査により、精度に差はあるが、2つの比較案が提案されている。マスタープラン調査では、延長7.1kmの導水路トンネルとSolakhani地点に設けられた発電所で、最大出力240MWを発電する計画となっている。引続き実施されたプレ・フェージビリティ調査では、上記マスタープラン調査で示された計画を含め2つの比較案に関する詳細な検討が実施された。これらの比較案のうち、導水路延長を11.4kmとし、Kaguwa地点で最大出力400MWを発電する案が最良であると判定されている。

マスタープラン調査とプレフェージビリティ調査に示された計画、概要をTable 6-1に示す。

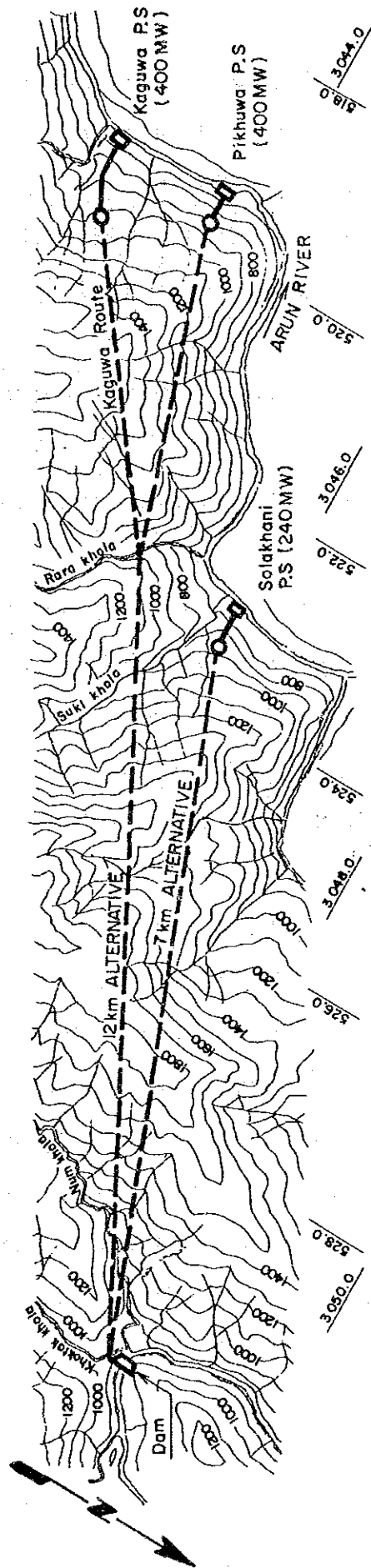
Table 6-1 Outline of Projects
shown in Previous Reports

| Item | Master Plan | Pre F.S. |
|---|----------------|---|
| Catchment Area (km ²) | 32,332 | 30,031 |
| Regulating Pondage | | |
| HWL (ELm) | 810 | 840 |
| Available Drawdown (m) | 0 | 4 |
| Capacity 10 ⁶ m ³ | 0 | 1.4 |
| Dam | | |
| Type | Concrete Grav. | Concrete Grav. |
| Height x Length (m) | 23 x 120 | 54 x 125 |
| Power Tunnel | | |
| Type | Nonpressure | Pressure |
| Dia. x Length (m) | 10 x 7,100 | 10 x 11,300 (7x11,300x2) ^{1/} |
| Power Generation | | |
| Max Discharge (m ³ /s) | 156 | 156 |
| Gross Head (m) | 194 | 308 |
| Installed Capacity (MW) | 240 | 400 |

^{1/} : Figure in parenthesis is for the alternative.

今回のフィージビリティ調査では、上記の比較案のほか、発電所をPikhuwa 地点に設けるもうひとつの計画案が加えられた。従前の比較案には、その精度に差があり、また取水ダムの位置も異なっているため、Fig. 6-1 に示すように同一取水地点（上流ダム地点）を基準にして再評価を行った。その結果、Solakhani 地点は、明らかに他の2地点に較べてその経済性が劣ることが判明したので、以降の調査、検討から除外した。以下は、ダム、取水口および沈砂池の位置、導水路の配置、発電所位置などについて、400MW計画を対象とした検討を行なった。

Fig. 6-1 Alternative Scheme Layout



6.2 ダムサイト

計画ダム地点としてふたつの地点があげられる。ひとつは、Khoktak Khola および Num Khola がア alun 川に合流する点から約 250m 上流地点—上流案であり、もうひとつは、上記合流点より約 500m 下流側—下流案である。

河床幅とダム地点での河床堆積物は、それぞれ 50~60m と 10~15m と推定される。しかし、下流ダム地点では右岸での調査ボーリング (DBH-1) のみで、河の中央部の正確な岩盤標高は不明である。

ふたつのダム地点の河床標高はそれぞれ、約 EL 794 と約 EL 786 であり、下流地点は約 8 m 標高が低い。

ふたつのダム地点の地形・地質上の特徴を Table 6-2 と Fig. 6-2 および Fig. 6-3 に概括した。

- (i) 上流ダム地点は、Khoktak、Num Khola とア alun 川の合流点の上流側に位置しているため、ダム本体、取水口その他の付属構造物は、Num Khola に発生が予想される大規模な土石流による直接影響は受けないであろう。
- (ii) 上流ダム地点のケースでもダム軸の通る上流、右岸側に地すべりの可能性をもつ地形がみえる。しかし、標高が HWL よりも 30m 高い位置であることや、予想規模が $30 \sim 50 \times 10^3 \text{ m}^3$ と特定できるので、対応が容易であろう。
- (iii) 地形的な条件から、上流ダム地点のダム掘削とコンクリート体積は、同一取水位の比較の場合、上流ダムでは、下流地点のそれらよりも小さいであろう。概略検討によれば、例えば取水位 EL 840 とした場合、上流ダム地点の体積は約 $160 \times 10^3 \text{ m}^3$ であり、下流ダム地点の場合のそれは $280 \times 10^3 \text{ m}^3$ と大差がある。
- (iv) 同一ダム高によって概略比較すると、下流地点のダム体積は上流地点のそれよりも 50% 増加し、なおかつ有効落差を約 8 m 損失するであろう。

以上のように現地における、地表踏査と地質調査および地形測量に基づく各種検討から上流ダム地点の技術的・経済的優位性が判明した。従って、以下の検討は上流ダム地点のみをとりあげ、下流ダム地点は除外した。

Table 6-2 General Features of Proposed Dam Sites

| | Upstream Dam Site | Downstream Dam Site |
|-----------------|---|---|
| (1) Location | Approx. 250 m upstream of junction of Num Khola with Arun river | Approx. 500 m downstream of junction of Num Khola with Arun river |
| (2) Topography | Refer to Fig. 6-1 | Refer to Fig. 6-1 |
| ◦ River width | ◦ 52 m at river surface (dry season) | ◦ 62 m at river surface (dry season) |
| ◦ River deposit | ◦ 12.5 m (confirmed by UDH-1 and UDH-6) | ◦ 15 m or deeper (estimated by DDH-1) |
| ◦ River surface | ◦ EL.794 m (dry season) | ◦ EL.786 m (dry season) |
| (3) Geology | | |
| ◦ Bed rock | ◦ Hard, massive augen gneiss | ◦ Hard augan gneiss intercalated with pegmatite, partly cracky |
| ◦ Overburden | ◦ Very thin at both banks | ◦ Very thin at left bank, however, right bank is covered with thick talus deposit, especially at its lower portion (SLD-1, SLD-4, DL-5) |
| ◦ Landslide | ◦ Possibility at locations upstream of dam site on the main stream and Indua Khola. Magnitude would be limited. | ◦ At upper reach of Num Khola, large surface landslide is taking place. |

Fig. 6-2 Location of Dam Site

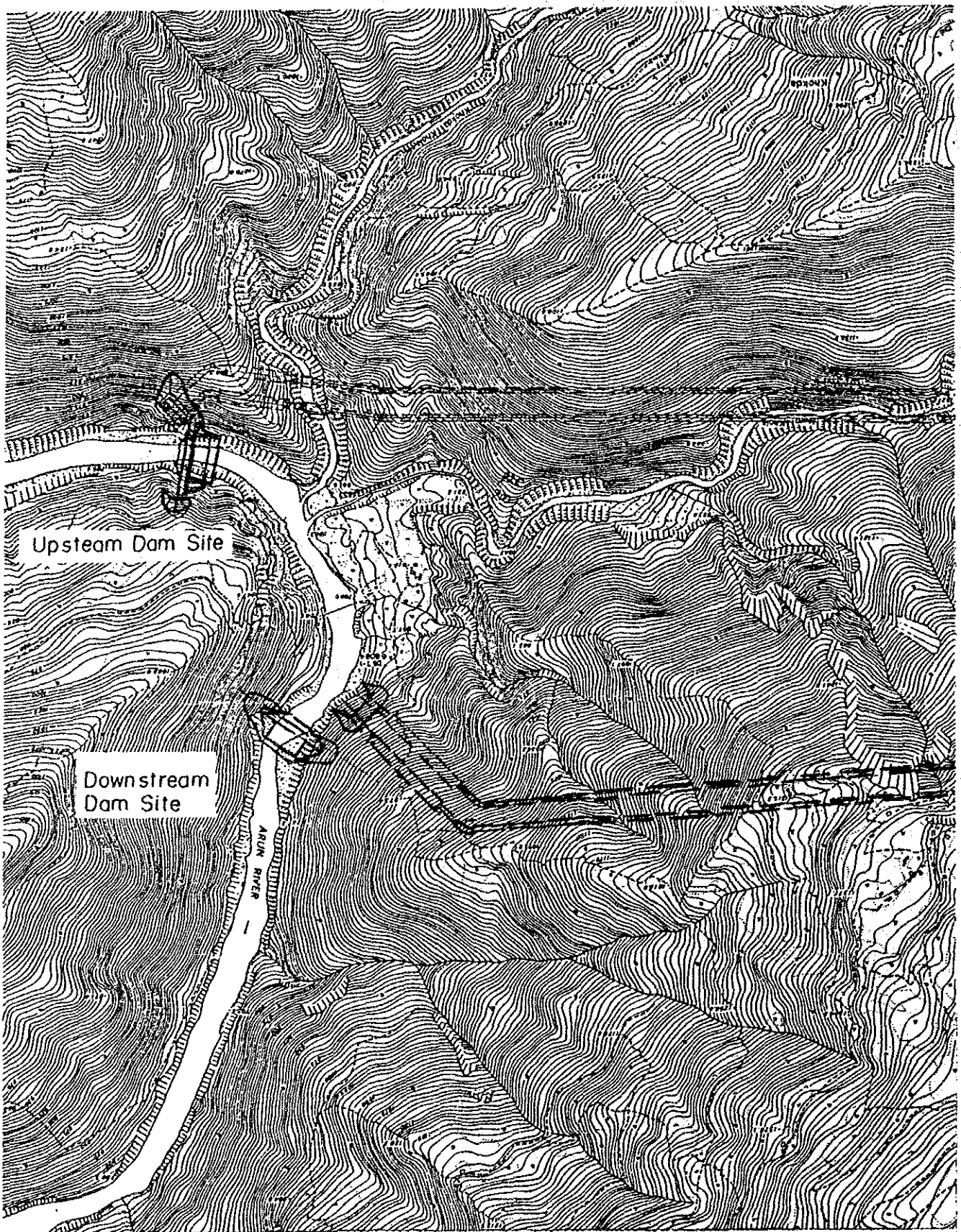


Fig. 6-3 Cross Section at Two Dam Sites

