資 料

Tarbela ダムにおける土木地質的問題 (その 2)

—湛水に伴うトラブルと対策—

中 村 康 夫*

Engineering Geological Problems on Tarbela Project, Part 2

—Troubles due to Impounding and Their Remedial Works—

Yasuo NAKAMURA

Tarbela ダムはパキスタン国を流れるインダス川に建設された世界最大の堤体積を有するロックフィルダムである。ダムの概要、地質状況、施工方法などに関しては応用地質, Vol. 26, No. 4 に (その 1) として記述した。(その 2) は、湛水に伴って生じた右岸水路トンネル T2 の崩壊, 同 T3 減勢池の浸食, 左岸常用洪水吐プランジプールの浸食などのトラブルと対策工, 湛水による地震活動の変化等について紹介したものである。

6. 湛水に伴うトラブル

1974 年 7 月 1 日から試験湛水が開始されると 8 月 21 日の右岸水路トンネル T2 の崩壊をはじめ, 表-1 (その 1, p. 31) に示すような一連のトラブルが発生した。以下, 主要なトラブルについてその経緯, 被害状況, 復旧工法等を記述する。

6.1 水路トンネル 2 の崩壊

6.1.1 経 緯

1973 年 9 月 29 日, バットレスダムのゲートを閉塞して T1 および T2 (取水口標高 1,106 ft, el. 332 m) に転流することによって工事は最終ステージに入った。74 年 6 月 15 日には貯水位が T3 および T4 の取水口標高 1,180 ft (el. 354 m) に達し, T3 および T4 に転流が開始され, 7 月 1 日から公式に試験湛水が始まった。7 月 15 日, T2 の 3 つのゲートを総て閉塞したところ, 逆流によって発電所保護用矢板の基礎が浸食されたのでゲート操作が改められた。続いて, T1 のゲートを全開してから 9 日後, さらに矢板の基礎が浸食されたので, T2 のセンターゲートを閉塞しようとしたが可動長 14.5 m のうち, 4.7 m しか動かなかったため再び全開した。

7 月 31 日, リヒター震度 6.5 の地震が 2 回発生した。当日は異常が認められなかったが, 8 月 2 日, T2 の放流水中に岩塊とコンクリート塊が混入しているのが発見された。8 月 7 日, T2 のセンターゲートを再び閉じようとしたが不可能であった。翌 8 日, 貯水位の上昇を防ぐため T3 および T4 のゲートを一部開いた。8 月 13 日, T3 出口のスチールライニングが破壊したので T3 および T4 のゲートを閉塞した。調査の結果, 両トンネルともキャビテーションによる被害を受けていることがわかった。8 月 15 日, T2 のセンターゲート全開直後, 放流水中に土砂および岩塊が多量に混入しているのが発見されたので閉じようとしたが, 同じ場所で再び動かなくなった。8 月 16 日, T1 のゲートの 1 つも半開状態で作動しなくなった。8 月 21 日, 午前 0 時直前, 取水塔付近から大きな爆発音が聞こえ, アバットメントが強く振動するとともに, T2 からの流量が 4 倍 ($1,000 \text{ m}^3/\text{sec} \rightarrow 4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$) に急増した。このため直ちに緊急水位低下が実施された。貯水位は標高 1,462 ft, el. 438.6 m (貯水深約 100 m) であった^{1)~3)}。

6.1.2 被害状況

緊急水位低下は順調にすすみ, 23 日間で 100 m 低下させることができた。(このような急激な水位低下でも間隙水圧は適切に消散しており, 堤体の安全性が確認された)。水位低下の結果, T2 は取水塔と地山入口を連結している長さ 75 m の部分のインバートおよび右半分が 60 m にわたって崩壊しており, トンネルおよび取水塔の基礎岩盤が深く洗掘されていることがわかった。また, トンネルの破壊部から $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ に達する地山および $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ に達するフィル材が流失していた。また取水塔ゲートやセンターゲートのピアも破壊され, T1

* 水資源開発公団試験所

の内部コンクリートも被害を受けていた^{8),4)}。さらに後述するように、ブランケットに大小さまざまな規模のシンクホールが多数発達しているのが発見された^{5),6)}。

6.1.3 復旧工事

トンネル周辺の岩盤が大量に浸食された結果、地質状況が悪いことが判明したので(その1, 図-9に示すように)地山流失部分は石灰岩、千枚岩、石灰質片岩の薄層が複雑に分布しており、構造運動の影響を受けて岩盤は劣化している)、復旧工事はまず、トンネル周辺を良好な岩盤に達するまで掘削することから始まった⁴⁾。標高1,081 ft (el. 324 m, 取水口標高は332 m)まで掘削した時点で比較的良好な岩盤が露出したので、同標高で掘削を中止し、ロールクリート(rollcrete)で埋め戻して人工岩盤とした。崩壊したトンネルは除去する時間的余裕がなかったので、そのまま新トンネルの型枠として利用した。このため、新トンネルの内径は11 m (旧トンネル内径は13.7 m)となり、下流の地山非破壊部にインサイド・スリーブとして、ある程度延長された。ロールクリートによる埋め戻しは $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ に達し、さらにこの上を $3.7 \times 10^5 \text{ m}^3$ のロック材で埋め戻した後、表面を $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ のリップラップ材で保護した。埋め戻し作業は75年3月22日に終了し7月中旬には試験湛水に必要なすべての工事を完了した。8月7日には貯水位は標高1,508 ft (el. 452 m)に達し常用洪水吐から初めて $790 \text{ m}^3/\text{sec}$ の水が流下した⁷⁾。

このトラブルは、T2のセンターゲートが半開状態で動かなくなったことによって生じたキャビテーションが原因とされている⁹⁾。

6.2 水路トンネル T3 および T4 減勢池の浸食

6.2.1 経緯

1974年8月に発生したT2崩壊のため水位を下げた時点で、T3およびT4のシュートの上流部が浸食されているのが発見され、修理された。この時、両者の減勢池内には大量の土石が推積していたが、T2の復旧に全力を注いだため、これらを除去する時間がなかった。その結果、減勢池の詳細な被害調査は行なわれず、浸食被害は74年には発見されなかった。75年春、T3およびT4が再び使用され、減勢池の土石が流失した。4月から7月にかけて実施された調査によって、減勢池の厚さ3 mのコンクリート製床板が全体的に深さ0.6~0.9 m、部分的には2.4~3 m浸食されているのが明らかになった。しかし、貯水位が洪水吐標高に達していなかったため、農業用水をT3およびT4から放流し続けなければならなかった。貯水位の上昇とともに放流量は多くな

り、8月15日には $2,500 \text{ m}^3/\text{sec}$ に達した。8月15日夕方T3減勢池内の流況が変化し、波が隔壁を越え、16日未明、岩石片やコンクリート片が減勢池から飛び出した。このため、直ちにT3およびT4の4つの放流ゲートを全閉して潜水調査を実施した^{8),9)}。

6.2.2 被害状況

調査の結果、図-13に示すように両減勢池とも広範囲に浸食を受けていることがわかった。特にT3減勢池は厚さ3 mのコンクリート床板が完全に浸食されその下の基礎岩盤が深さ18 mまで浸食されていた。T4減勢池も浸食を受けていたが、基礎岩盤には達していなかった。さらに隔壁も著しく浸食されて、ダイバーが両減勢池を自由に往来できる程度の大きさの穴があいた(図-14)⁹⁾。

6.2.3 復旧工事

図-14に示すように、隔壁は下部が著しく浸食されていたので、排水すると水圧の減少によって崩壊する恐れがあった。このため、排水せずに実施可能な工法としてプレキャストコンクリートとトレミーコンクリートによる埋め戻しが検討されたが、より速やかな工事が可能である後者が採用された。トレミーコンクリートは9月15日から打設を開始し、10月15日に $43,200 \text{ m}^3$ の打設を終了した。トレミー管は直径30 cm 長さ2.4 mのものをつぎ足して使用し、最長40 mに達した⁹⁾。

トレミーコンクリート打設終了後、水没状態のまま隔壁のアンダーピニングが実施された。アンダーピニングは隔壁に存在する直径20 cmの9個のドレーンホールからそれぞれワイヤーロープを降ろし、直径1,500 mmの鋼管をダイバーの助力を借りてドレーンホール直下に設置することによって達成された(図-15)。その後ドレーンホールを利用して鋼管にコンクリートを充填した後、排水して復旧工事を行った⁹⁾。

この浸食は74年8月のT2崩壊に伴う緊急水位低下時におけるトンネルのゲートの不規則な操作によるものと考えられている⁹⁾。

6.3 水路トンネル T3 減勢池の再浸食

6.3.1 経緯および被害状況

1975年8月のT3およびT4減勢池の浸食の復旧工事が完了し、76年4月21日に3時間の試験でT3減勢池に軽度の浸食が、4月26日の18時間の試験で著しい浸食がみられた。このため直ちに潜水調査が実施され、コンクリート床板が広範囲に深さ1.5 mまで浸食され、隔壁も1.4 m四方が深さ0.75 m程度浸食されているのが発見された。被害は75年8月と同じ場所に生じてい

図-13 水路トンネル T3 および T4 減勢池の浸食状況⁹⁾ (平面図, 実線のハッチングは 1974 年におけるコンクリート床板の深さ 60 cm 程度の浸食を, 破線のハッチングは 1975 年における基礎岩盤を含む深い浸食域を示す)

図-14 水路トンネル T3 および T4 減勢池の浸食状況 (断面図)⁹⁾

たが 同様な操作をしたにもかかわらず, T4 減勢池には全く被害を生じていなかった¹⁰⁾。

6.3.2 復旧工事

今回は, T3 減勢池のみ被害を受けたので, 同減勢池をロックアンカーと鋼繊維補強コンクリートで復旧することにした。T4 減勢池に関してはタイプの変更を含め慎重に検討することとした^{11)~13)}。

地質調査の結果, 減勢池内には緑泥片岩, 石灰質片岩, 石灰岩, 石膏等が複雑に分布しており, 硫酸塩含有量が多いことが示された。このため, ロックアンカーは腐食

防止をはかることを目的として, ポリエチレンシースをかぶせ, 内部にグリースを封入した。緊張力は流水による揚圧力および岩盤状況を考慮して 2,060~2,490 kN とし, 定着長は 6 m とした。しかし, 石灰質片岩の地質状況は悪く, 定着長を 9 m とした (576 本中 23 本)。長さは基礎状況を反映して種々変化している (図-16)。削孔径は 157 mm および 171 mm であり, ロータリー式あるいはロータリーパーカッション式削孔機を用いた。また, 岩盤の安定性と水密性を改善するため削孔終了後 3 Lu を目標として耐硫酸セメントでグラウチング

図-15 隔壁のアンダーピニング工法⁹⁾

を実施した。使用されたロックアンカーは計 576 本、340 トンであった。

ロックアンカー完了後、キャビテーションに対する抵抗性を増すため減勢池表面 6,000 m² を厚さ 50 cm の鋼繊維補強コンクリートで被覆した。鋼繊維の長さは 2.5 cm であり、総量は 200 t に達した¹²⁾。以上の復旧工事は 77 年 3 月末までに完了し、1 ケ月間の養生期間を経て 5 月 1 日から T3 が運用再開されているが、現在まで良好に機能している。

T4 減勢池については、フリップバケットへの型式変更が可能か否か検討され¹¹⁾、77 年同型式に変更するこ

とが WAPDA から提案された¹⁴⁾。しかしながら、T3 減勢池の復旧工事を優先し、さらに後述する常用洪水吐プランジプール浸食の復旧工事のため実現が遅れているうちに、T4 の放水口付近にさらに発電所を建設することが計画され、型式変更は中止された^{15), 16)}。

6.4 常用洪水吐プランジプールの浸食

6.4.1 経緯および被害状況

常用洪水吐は 1975 年から使用されたが、最初の 2.5 週間で当初標高 1,200 ft (el. 365.8 m) のプランジプール底の岩盤は大部分標高 1,100 ft (el. 335 m) まで浸食され、右岸の珪質石灰岩付近は、さらに深さ 20 m 程度浸食された。75 年後半には標高 1,300 ft (el. 396 m) の幅 46 m の小段に陥没孔が発生した。さらに 76 年 6 月 12 日、流量 6,500 m³/sec の時点で 400,000 m³ に達する岩すべりが発生して右岸の浸食が加速されたので、流量を 5,100 m³/sec に制限し、それ以上の場合是非常用洪水吐を使用することとした。左岸の浸食も 75 年使用開始直後より始まり、同年後半には塩基性貫入岩の直上流側が当初掘削線より 25 m 山側まで浸食された。76 年 10 月にはプランジプールはもとの掘削線に沿って全体的に標高 1,070 ft (el. 326 m) まで浸食されたが、フリップバケット近くの河床低下は起こらなかった。しかしながら、貫入岩および珪質石灰岩は浸食されにくいので、1,200 ft (el. 366 m) に保たれており、これに沿って流水は右岸側に流れた。右岸側の浸食は 77 年も進行し、強い時計回りの水流と波によって湾状に浸食された、この浸食は上流方向に進行してフリップバケット基礎を保護しているコンクリート壁 (その 1、図-10 参照) が露出し、断層に沿ってフリップバケットが右岸側へ約 1 cm 移動した (図-17)¹⁷⁾、このため、常用洪水吐ゲートは 8 月 15 日閉鎖された⁵⁾。

図-16 水路トンネル T3 減勢池の復旧工法¹⁸⁾

図-17 常用洪水吐ブランジプールの浸食状況¹⁷⁾ (実線は1977年11月18日の状況を, 破線は当初掘削線を示す)

6.4.2 復旧工事

76~77年の低水期には, 差別浸食によって生じた河床部の凹凸を平坦化し, 右岸側に水が流入しないようにするため Dal Darra 出口付近の貫入岩および珪質石灰岩の凸部を掘削した。77~78年の低水期には, さらに貫入岩等が掘削された他, 右岸側にコンクリートの水制, フリップバケット端部にロールクリート製(コンクリート被覆)のバットレス, 左岸側にロールクリート製の保護壁等を設置した。78~79年の低水期にはブランジプールがほぼ左右対称となるよう両岸ともロールクリート製(コンクリート被覆)の保護壁が設置された(図-18)。ブランジプール底は厚さ4.6mのコンクリートで被覆され, 長さ20mのロックアンカーで補強された。被覆コンクリート厚は Dal Darra 出口に向かって漸減し, 出口では1.5mである^{17), 18)}。以上の復旧工事では 1.15×10^6

m³の地山が掘削され, 72,000 m³のロールクリートおよびコンクリート, 550本(450t)のロックアンカーが使用され, 80年の低水期に全工事が完了した¹⁶⁾。

6.5. シンクホール

6.5.1 ブランケット

1974年8月のT2崩壊事故に伴う緊急水位低下によって, 同年10月貯水池の底が見えるようになるとブランケットに多数のシンクホールが発達しているのが発見された^{5), 6)}。直径は1m以下から大きいものは10mに達し, その数は400⁵⁾あるいは600¹⁹⁾と報告されている。これらのシンクホールは総てコア材を充填して修復し, 再貯水時には音波探査が実施された。その結果, 修復したシンクホールに穴があいたり, 新しいシンクホールが多数形成されていることがわかった。これらのシンクホールは発達し続ける恐れがあったため, 再貯水時か

図-18 常用洪水吐ブランジブールの復旧工法¹⁷⁾ (実線は 1979 年の復旧工事完了後の状況を, 破線は 1978 年 8 月 13 日の状況を示す)

ら継続的に音波探査が実施され, 修復が続けられているが, 発達速度は年々低下している¹⁹⁾。

シンクホールは, 沖積層中に分布している openwork cobble gravel (細粒分を全く含まないゆるい礫層) に砂分が吸い込まれ, その空隙にブランケット材が陥没することによって生じたと考えられている^{6), 19)}。

6.5.2 ダム堤体

1976 年 8 月, ブランケットのシンクホールの発達状況を調査するために実施された音波探査記録を調べていたところ, 水深 60 m のダム上流右岸側リップラップに長さ 6 m, 幅 4 m, 深さ 1.5~3 m のシンクホールが発見された²⁰⁾。このため過去の記録を調べた結果, 同年 6 月には少なくとも存在していたことがわかった。堤体の安全性には影響を及ぼさないと考えられたが, 安全のため水位を当初予定より 6 m 下に制限した。さらに原因を調査するため, 水位が低下した 77 年 5 月, 直径 2 m,

深さ 12 m の立坑を掘削した²¹⁾。

7. 地震活動の変化

7.1 Tarbela 地域の地震活動

3 (その 1), で述べたように, ダムサイトは地震活動の活発な地域に位置しているため, 既往地震に関する調査が実施されたが, ダムサイト近傍では過去に大地震の発生した記録がないことがわかった。しかしながら, 貯水池北東 80 km に Indus-Kohistan Seismic Zone (IKSZ) 南西約 60 km に Hazara Low Seismic Zone (HLSZ) があり (その 1, 図-4), 堤体直下に Darband 断層と考えられる比高 200 m に達するほぼ垂直な地下の急崖 (その 1, 図-6, 第四紀断層ではないと判断された) が発見されたうえ, 工事中にいくつかの有感地震が発生し, さらに湛水による誘発地震に関する論議が活発になりつつあったので, 湛水 1 年前の 73 年 8 月から微小地震観測

図-19 1973年8月15日～1974年7月12日におけるダムサイト (TA) 周辺のマグニチュード0以上の微小地震の分布 (▲: 高度 3,000 m 以上の山頂, ⊙: 1974年12月28日発生したマグニチュード6.0のPattan地震, ダムサイト周辺の長方形は図-20の微小地震観測範囲を示す)²²⁾

が実施された。

図-19は、73年8月15日から74年7月12日(湛水前)の間に発生したマグニチュード0以上の地震の分布を示したものである²²⁾。同図で貯水池北東約80kmに位置する幅20～40km、長さ約100kmの北西-南東方向(MBTと同方向)の地震密集帯がIKSZである。これに対しHLSZでは地震の発生頻度は低い、比較的規模の大きい地震が発生している。また、1961年から1974年にかけて実施された地震観測では、IKSZとHLSZはほぼ同程度の活動度を有することがわかった²²⁾。

発震機構の研究から、本地域内に分布する地震学的に活発な断層はIKSZを除いて急傾斜していることが示された。これらの断層は互いに共役な関係にあり、走向は北西-南東(IKSZに平行)および北東-南西(HLSZに平行)で、ほぼ同数の横ずれ断層と高角度の逆断層から構成される。両者とも本地域が南北方向の圧縮力を受けていることを反映しており、プレートテクトニクスによる説明と合致する。このように、貯水池は圧縮応力下にある地震活動の高い地域に位置している。

7.2 微小地震観測結果

図-20(a)、(b)はそれぞれ1974年、1975年において、ダムサイトから北東-南西方向17.5km、北西-南東

方向15kmの長方形(図-19の長方形)内で深度20km以浅に発生したマグニチュード-3以上の微小地震を時系列的にプロットしたものである²³⁾。同図横軸下の枠内の数字は、貯水位との関連で区分した一定期間内の平均地震発生回数(回/日)を示す。なお、同図(a)で貯水位曲線が三角形を呈しているのは74年8月21日のT2の崩壊に伴う緊急水位低下を行ったためである。74年の地震発生頻度は同図(a)の下欄に示すように、湛水前1.1回/日、水位上昇中0.5回/日、水位降下中0.7回/日、水位降下後0.6回/日であり、水位の上昇に伴って地震発生頻度が減少し、水位が降下すると回復している。また、75年の地震発生頻度は同図(b)の下欄に示すように、湛水前0.85回/日、水位上昇中0.65回/日、水位一定後0.85回/日であり、水位の上昇に伴って地震発生頻度は減少し、水位が一定になると回復している。

図-21はダムサイトから半径100km以内で観測された地震の規模と頻度の関係を湛水前と湛水中について比較したものである²³⁾。同図に示すように、総ての規模の地震の発生頻度は湛水前の方が1.6倍程度高く、湛水に伴って地震の発生が減少している。

7.3 結論および考察

2年間の微小地震観測結果のみであるため、図-20お

図-20 貯水位と地震発生頻度の関係 (図-19 の長方形内)²⁸⁾ 図-21 湛水に伴う地震活動の変化 (ダムサイトから半径 100 km 以内)²⁸⁾

よび 21 に示す地震発生頻度の変化が湛水に伴う現象か、自然界における地震活動の盛衰の一端を示すにすぎないのかを明確に判断することは困難であるが、Tarbela ダムの場合湛水によって地震活動の変化が起こるとすれば、減少であって増加ではないと言える。これは、前述したように、本地域が圧縮応力下 (最大主応力軸が水平) にあるので湛水による上載圧が拘束力の増加として働

き、岩盤が破壊しにくくなり、地震発生頻度が減少するためと報告されている²⁸⁾。地震発生頻度の回復に関しては、水の浸透による間隙水圧の増加に伴う有効応力の低下、あるいは地殻歪の急速な蓄積による水平方向の圧縮応力の増加等が考えられるが、地殻内部の直接的なデータがないので断定できない。

Tarbela ダムは地殻活動の活発な地域に位置しているため、ダムの有無にかかわらず、将来大規模な地震に襲われることは構造地質学的に避けられない。しかし、貯水池の存在が地震発生の時期や場所等に何らかの影響を与えることも考えられる。例えば、貯水位の急激な降下中あるいは降下直後は、水による上載荷重が急速に除去されるのに対して、岩盤中の間隙水圧の消散が遅れる状況にあるため、地震が発生する可能性を否定できないとする報告もある²⁸⁾。

8. おわりに

Tarbela ダムは 1974 年 7 月に事実上完成し、試験湛水を開始して以来種々のトラブルに悩まされてきたが、この原因はプロジェクトの規模の巨大さに求めることができる。例えば、主ダムの堤体積は世界最大であり、2つの副ダムと合計した堤体積はパナマ運河掘削土量のほぼ 2/3 に、また直径 13.7 m の 4 本の水路トンネルは最大級の道路トンネルに匹敵する。加えてサイトの地質状況

は極めて複雑であり、各種の調査試験が実施され、調査数量は膨大なものとなっているが、単位体積当りの調査量に換算すると普通規模の大ダムに比較して、その量はかなり少ないといえよう。複雑な層相を有する沖積層上に Tarbela ダムのような巨大ダムを建設するには、現実には不可能であるが、数 10 倍程度の調査を行う必要があると思われる。

Tarbela ダムは次々に発生するトラブルを克服し、1977 年 5 月には初めて発電に成功した²⁴⁾。1980 年にブラジプールの浸食問題を解決して以来順調に機能しており、84 年 6 月にはダムサイトから 1,300 km 離れたカラチまで送電設備が完成し²⁵⁾、パキスタンの農業および工業の発展にとって極めて重大な役割を果たしている。発電設備は 2,100 MW を目標に順次整備されてきたが、電力需要が増大したので最終発電容量が 3,150 MW に変更された^{26)~28)}。

本文をまとめるにあたり、水資源開発公団試験所菅原捷第三試験課長には原稿を読んでいただき、有益な御助言をいただいた。また、資料の収集に際しては建設省土木研究所地質研究室協坂安彦研究員に協力していただいた。ここに厚く謝意を表する。

文 献

- 1) Rapid drawdown at Tarbela after failure (1974), WPDC (International Water Power and Dam Construction の略、以下同様), Vol. 26, No. 10, pp. 310.
- 2) Remedial measures and findings at Tarbela (1974), WPDC, Vol. 26, No. 12, pp. 388.
- 3) Measures to repair damage at Tarbela after tunnel collapse (1975), WPDC, Vol. 27, No. 1, pp. 34-36.
- 4) Repair and reconstruction of the tunnels at Tarbela (1975), WPDC, Vol. 27, No. 6, pp. 254-257.
- 5) Major erosion hits Tarbela dam again (1977), Engineering News Record, Vol. 199, No. 12, pp. 37-38.
- 6) Binger, W. V. (1978): Tarbela: plans, problems and success, WPDC, Vol. 30, No. 7, pp. 29-34.
- 7) Vital repair work at Tarbela completed (1975): WPDC, Vol. 27, No. 8, pp. 272.
- 8) Yet more problems at Tarbela (1975), WPDC, Vol. 27, No. 10, pp. 342.
- 9) Tremie concrete techniques used at Tarbela (1976), WPDC, Vol. 28, No. 1, pp. 21-24.
- 10) More trouble at Tarbela (1976), WPDC, Vol. 28, No. 6, pp. 3.
- 11) Go ahead for Tarbela (1976), WPDC, Vol. 28, No. 9, pp. 3.
- 12) Tarbela gets needled (1976), WPDC, Vol. 28, No. 12, pp. 3.
- 13) Use of rock anchors at Tarbela (1978), WPDC, Vol. 30, No. 2, pp. 44-47.
- 14) Second flip bucket for Tarbela? (1977), WPDC, Vol. 29, No. 8, pp. 3.
- 15) Tarbela's spillway now in trouble (1977), WPDC, Vol. 29, No. 11, pp. 3.
- 16) Tarbela's spillway now ready (1980), WPDC, Vol. 32, No. 8, pp. 5.
- 17) Lowe III, J., Chao, P. C. and Luecker, A. R. (1979): Tarbela service spillway plunge pool development, WPDC, Vol. 31, No. 11, pp. 85-90.
- 18) Tests to start on Tarbela model (1978), WPDC, Vol. 30, No. 2, pp. 3.
- 19) Stapledon, D. H. (1976): Geological hazards and water storage, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., No. 14, pp. 249-262.
- 20) Tarbela's depression not shared by TAMS (1976), WPDC, Vol. 28, No. 11, pp. 3.
- 21) Tarbela's depression to be examined (1977), WPDC, Vol. 29, No. 5, pp. 3.
- 22) Armbruster, J., Seeber, L. and Jacob, K. H. (1978): The northwestern termination of the Himalayan mountain front—Active tectonics from micro-earthquakes, Jour. Geophys. Research, Vol. 83, No. B 1, pp. 269-282.
- 23) Jacob, K. H., Pennington, W. D., Armbruster, J., Seeber, L. and Farhatulla, S. (1979): Tarbela reservoir, Pakistan—A region of compressional tectonics with reduced seismicity upon initial reservoir filling, Bull. Seismol. Soc. Amer., Vol. 69, No. 4, pp. 1175-1192.
- 24) First power from Tarbela (1977), WPDC, Vol. 29, No. 6, pp. 3.
- 25) Tarbela's energy reaches Karachi (1984), WPDC, Vol. 36, No. 6, pp. 5.
- 26) Tarbela's irrigation water will yield energy (1982), WPDC, Vol. 34, No. 4, pp. 3.
- 27) Tarbela to be extended with help from ADB (1983), WPDC, Vol. 35, No. 2, pp. 2.
- 28) Tarbela extension approved (1985), WPDC, Vol. 37, No. 1, pp. 8.

(昭和 60 年 10 月 1 日受付, 昭和 61 年 1 月 14 日受理)