

# Batutegi Damの初期湛水時の挙動観測

## BEHAVIOR OF THE BATUTEGI DAM DURING INITIAL IMPOUNDING

柚木裕二\*・バンバン ハルゴノ\*\*  
Yuji YUNOKI, and Bambang Hargono

The Batutegi Dam was constructed in Lampung Province in southern Sumatra Island, Indonesia. During the initial impounding of the Batutegi reservoir from August 2001 to March 2004, we observed the instrumentation installed in and on the dam body to monitor the dam behavior during filling. The various data collected show that the dam displayed typical behavior of a large scale embankment dam. Based on these data, it has been confirmed that the initial impoundment was carried out safely and the performance of the Batutegi Dam is satisfactory.

**Key Words :** earth core rockfill dam, initial impounding, instrumentation, monitoring of dam behavior, deformation of dam, settlement, porewater pressure, leakage

### 1. はじめに

Batutegi Damは、インドネシア共和国、スマトラ島最南端のランポン州を流れるスカンポン川上流に農業用水と発電を目的として建設された中央土質遮水壁型ロックフィルダムである。表-1に同ダムの主要諸元を示すが、高さ(122m)ではインドネシア国内第二位、堤体積(9.6百万m<sup>3</sup>)では同第一位という大規模なダムである。また、貯水量も6億トン近い大容量を有し、下流の66,000haの広大な農地へ農業用水を供給する計画である。

本プロジェクトは、1970年代後半に最初の調査が実施され、1980年代始めに世界銀行(世銀)の融資で米国のコンサルタントが詳細設計を実施した。しかし、その後世銀が撤退したため1992年に日本の円借款プロジェクトとして再開され、1994年1月に当社と台湾SINOTEC社のJVによって入札補助および工事監理業務が開始された。1995年9月に仮排水路トンネル工事が開始され、1996年5月にはダムの基礎掘削を開始した。そして2001年6月にダム盛土が完成した。同年8月に仮排水路を締め切り初期湛水が開始されたが、2002年の大洪水や電力不足のため予定外の発電を行ったため、満水位に達したのは計画より一年遅れの2004年3月であった。この間、継続的に埋設計器やダム表面観測点などによるダムの挙動観測を行った<sup>1)</sup>。

初期湛水時のダムの挙動観測は、初期湛水を安全に完了させる為であることはもちろんだが、ダムの長期的挙動観測の原点となるデータを蓄積することも重要な目的である。したが、ダムの施工監理業務は、初期湛水時の計測デー

タの整理・蓄積ができて初めて完了したと言えるのである。

本報文は、Batutegi Damの2年半に及ぶ初期湛水時の計測データの一部をとりまとめたものであり、大型フィルダムの初期湛水時の典型的挙動を示すものである。今後の同種のダム工事監理の参考にしていただければ幸いである。

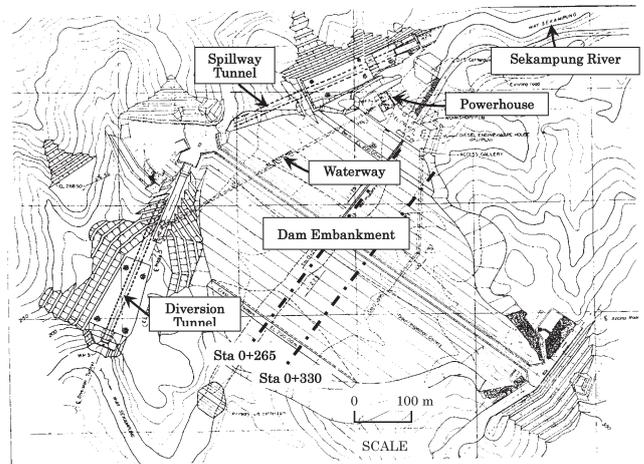


図-1 Batutegi Dam平面図

表-1 Batutegi Dam基本諸元

集水面積	424 km <sup>2</sup>	ダム最大高	122m
年平均流量	22.4m <sup>3</sup> /s	ダム堤体積	9.6 百万 m <sup>3</sup>
PMF*	5,350 m <sup>3</sup> /s	ダム天端長	701 m
有効貯水容量	578 百万 m <sup>3</sup>	洪水吐容量	1,930 m <sup>3</sup> /s
発電設備容量	28 MW	導水路容量	180 m <sup>3</sup> /s

\*PMF: Probable Maximum Flood (最大可能洪水)

\* 地域社会事業部 地域整備部

\*\* インドネシア共和国公共事業省河川局東部建設部長

## 2. ダム盛土材料

### (1) コア材

ダム下流右岸側尾根表層の堆積層をコア材として用いた。物性値を表一2に示す。コア材としてはやや高塑性な材料ではあるが、単独で用いても締固め特性、透水係数とも優れており、扱いやすい良質な材料であったと言える。

表一2 コア材 (Zone 1) の物性値

項目		平均値	標準偏差
自然含水比	%	28.3	5.1
液性限界	%	55.1	4.9
塑性指数		25.2	3.9
乾燥密度	t/m <sup>3</sup>	1.542	0.04
締固め度	%	101.1	1.2
wn - OMC*	%	1.7	0.5
現場透水係数	cm/s	1.9x10 <sup>-6</sup>	-

\*wn-OMC: 自然含水比と最適含水比との差

### (2) フィルター材、ロック材

ダム基礎および周辺の地質は主に珪岩で構成されているが、ダム右岸側に玄武岩の貫入岩体があり、これを原石山としてフィルター材、ロック材などの盛土材料およびコンクリート骨材を生産した。フィルター材、ロック材の物性値を表一3に示す。

原石山から生産された盛土材料は非常に堅硬だが節理が多く、硬く鋭利な角を持つ扁平な形状の粒子が多かった。この性質のため締固め前のロック層で作業中の重機のタイヤが頻繁にパンクしたり、盛土からの大きな反発力のため振動ローラーの故障が相次いだりという施工上の問題があったが、盛土材料としては特段の問題はなく、良質な材料であった。

表一3 フィルター材、ロック材の物性値

項目	Zone 2	Zone 3A	Zone 3B	Zone 3C	Zone 4
各層の呼名	shell	F.F.	C.F.	R.F.	transition
最大粒径 mm	800	10	40	150	400
細粒分含有率 %	0	5	3	-	0
平均相対密度 %	-	81.7	83.4	85.0	-
平均乾燥密度 t/m <sup>3</sup>	2.06	-	-	-	2.06
平均透水係数 cm/s	-	3.6x10 <sup>-3</sup>	1.3x10 <sup>0</sup>	6.5x10 <sup>-1</sup>	-

F.F.: Fine Filter, C.F.: Coarse Filter, R.F.: Regular Filter

(表中の Zone は図一2を参照)

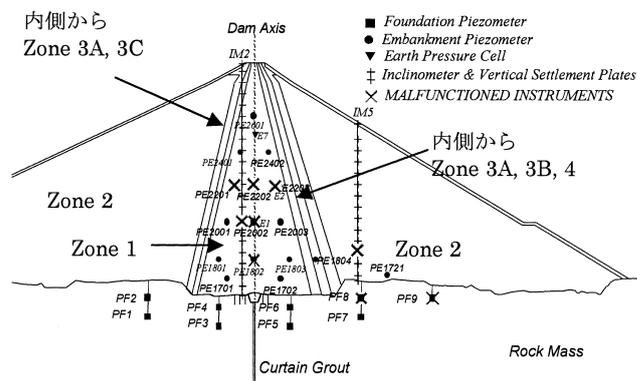
## 3. 計器の配置

ダム堤体の主観測断面は、図一1に示すように河床を通る最大断面Sta. 0+265とし、右岸寄りのSta.0+330にも計器を設置した。図一2に主観測断面の埋設計器配置を示す。また、表一4に今回設置した全埋設計器を示す。間隙水圧計、土圧計は、安価で耐久性がある振動弦タイプのセンサーを

用いた。層別沈下計は傾斜計パイプに沈下測定用の永久磁石が装填されたものである。

表一4には計器の破損率も示したが、破損はコアゾーン内に埋設された計器（盛土間隙水圧計、土圧計、傾斜計）に多い。これはコアの沈下によりセンサーのケーブルが破断したり、傾斜計埋設パイプが座屈したことが原因であると推測される。海外のダムは、コア材が比較的高塑性であることが多く、建設中の沈下量が大きい。とくに高さ100m以上の大型ダムでコアに埋設した計器の破損率が大きいという傾向があるようである。通常、埋設計器のケーブルはコアゾーン内か上下流のフィルター層内を天端に向かって立ち上げるか、あるいは水平方向に敷設して下流法面に出すが、この方法ではケーブルに余裕を持たせても完全に破断を防ぐことは困難である。大型ダムではケーブルをコアゾーン最下部の監査廊に繋ぐ方法を検討するべきであろう。また、傾斜計パイプの座屈は埋設パイプ継ぎ手の余裕を通常以上に十分大きくとることで回避可能である。

本プロジェクトでは幸いダムの全体的な挙動把握には支障がなかったため、埋設計器の追加設置は必要なしと判断した。



図一2 主観測断面Sta.0+265の埋設計器の配置

表一4 埋設計器一覧

計器	設置数量	破損率 (%)
基礎間隙水圧計	16	25
盛土間隙水圧計	32	41
監査廊間隙水圧計	26	15
土圧計	7	57
傾斜計	5	40
層別沈下計	5	20
ダム表面観測点	36	0
天端観測点	40	0
漏水量観測計	3	0
監査廊簡易水圧計	55	0
強震計	3	0
地下水位観測井	6	0

#### 4. 初期湛水中の間隙水圧分布

##### (1) ダム基礎の間隙水圧分布

貯水池水位の変動にともなうダム基礎の間隙水圧の変化を観測することにより、基礎の浸透流の状況やカーテングラウトの効果把握することが可能である。

図-3に貯水池水位とダム基礎間隙水圧の経時変化を示す。貯水池水位は雨季にのみ上昇し、乾季には漸減している。図に示すように水位が常時満水位 (NHWL) に到達したのは湛水開始から3度目の雨季であった。

図には主計測断面Sta.0+265に設置した間隙水圧計の値の変化を水圧標高 (hydraulic elevation) に換算して示した。カーテングラウトより上流側の間隙水圧計 (PF2, PF4) の値は貯水池水位との間に明確な連動が見られるが、下流側の間隙水圧計 (PF6, PF7) はダム下流の水位に近い値を示すのみで、貯水池水位の影響をまったく受けていない。これはカーテングラウトによるダム基礎の改良 (目標値Lu<5) が良好であったことを示すものである。図-4はやはり主計測断面の基礎間隙水圧分布 (水圧標高) の貯水池水位による変化を断面図上に示したものであるが、カーテングラウトを挟んで間隙水圧が低下している様子が良くわかる。

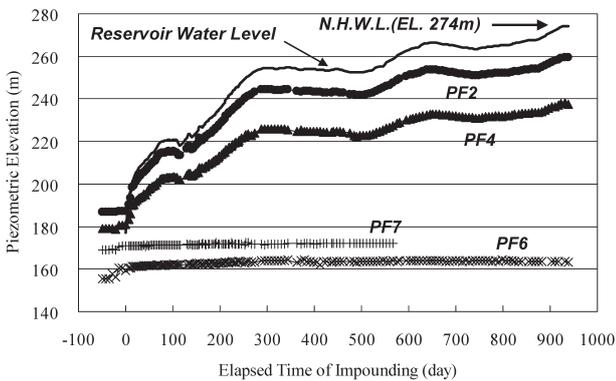


図-3 ダム基礎間隙水圧の経時変化 Sta 0+265

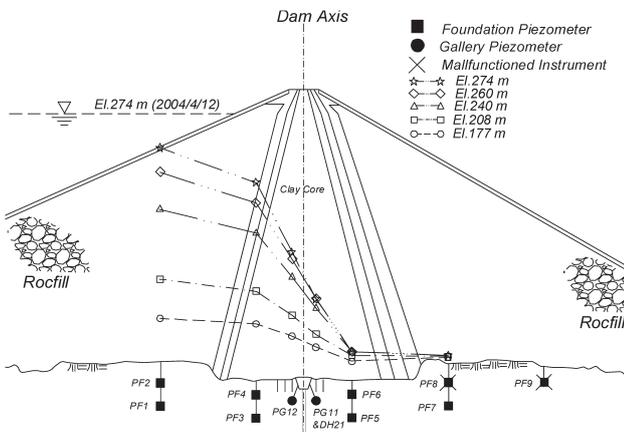


図-4 ダム基礎間隙水圧分布の変化 Sta 0+265

図-3や図-4に見られる傾向はダム基礎間隙水圧の典型的な傾向であり、基礎浸透流が期待された状態であることを示すものである。

##### (2) コアゾーンの間隙水圧分布

コアゾーン内の過剰間隙水圧の消散の様子、浸透流の状況、また貯水池水位との連動などの様子を知るため、コアゾーン内に間隙水圧計を設置した。

図-5、6は、貯水池水位とコアゾーン内の間隙水圧の関係を示している。図-5はコアゾーン内の上流側に設置された水圧の変化であるが、水位上昇と共にほぼ一貫して間隙水圧が上昇している。一方、図-6はコアゾーン下流側に設置された間隙水圧計で間隙水圧消散傾向が卓越している。

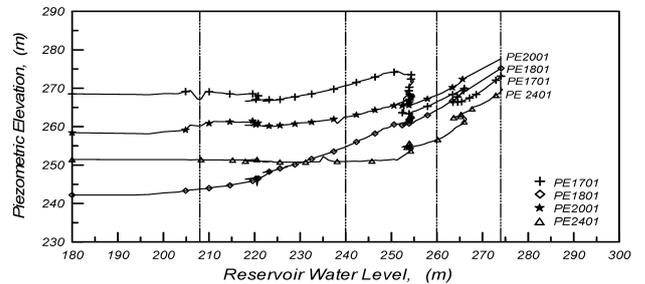


図-5 コアゾーン上流側間隙水圧と貯水池水位との関係

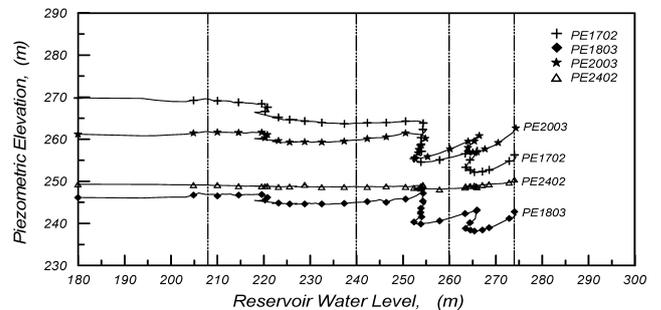


図-6 コアゾーン下流側間隙水圧と貯水池水位との関係

図-7は初期湛水開始直後のコアゾーン内の等間隙水圧線の分布である。図中の数字は間隙水圧 (tf/m<sup>2</sup>) の値を示す。貯水池水位上昇前の間隙水圧は言わばすべて過剰間隙水圧である。しかし、湛水とともにコアゾーンに浸透してくる浸透流が静水圧を持つため、過剰間隙水圧は計測値と静水圧の差となる。圧密とは過剰間隙水圧の消散過程と考え、湛水終了後にコアゾーンに過剰間隙水圧が残留していれば、圧密沈下も残留していることになる。

図-8に初期湛水終了時のコアゾーン内の等間隙水圧線を示す。コアゾーン内の間隙水圧はほぼ貯水池の静水圧の値に近づいているが、盛土下方に一部過剰間隙水圧が残留しているのが観察される (静水圧より高い部分)。この部分の過剰間隙水圧の消散がコアゾーンの圧密沈下の残留分となる。

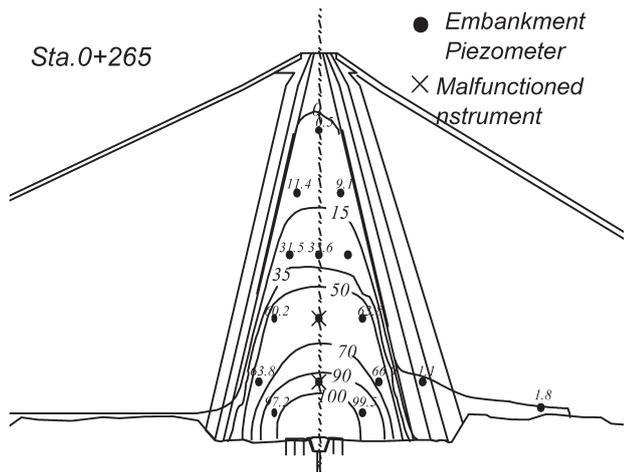


図-7 初期湛水開始時のコアゾーン間隙水圧分布

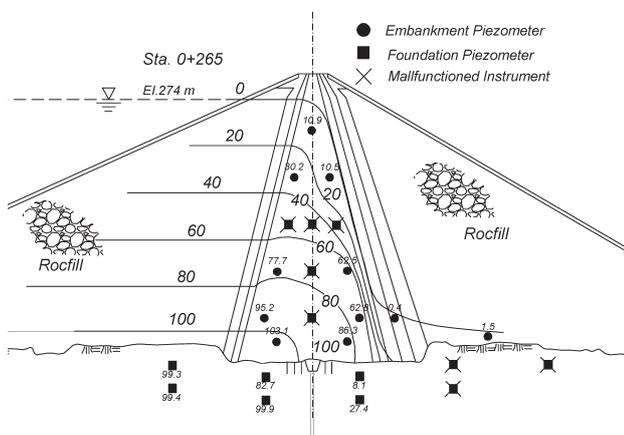


図-8 初期湛水終了時のコアゾーン間隙水圧分布

## 5. 初期湛水中のダム堤体の沈下

### (1) コアゾーンの沈下

層別沈下計、天端の観測点により初期湛水終了時のコアゾーンの沈下量を計測した。図-9にコアゾーンの3箇所に設置した層別沈下計の湛水終了時の沈下量（累積値）の深度分布を示す。IM2はパイプが座屈したため計測不能部分は推定値を示した。図からコアゾーン全層にわたって沈下が発生していることがわかる。

図-10は、ダム中央部の天端上下流端に設置した沈下観測点を水準測量により計測した結果である。初期湛水中は時間に対して直線的に沈下量が増加しているが、湛水完了後は沈下が収まる傾向が見える。湛水完了後のデータを用いた双曲線近似による沈下予測によると、今後数年間はまた毎年4~5cm程度の沈下が発生するが、その後沈下量は徐々に小さくなるものと予想される。前節の結論から過剰間隙水圧消散による一次圧密沈下量はすでに小さく、二次圧密沈下（クリープ変形）が続くものと考えられる。

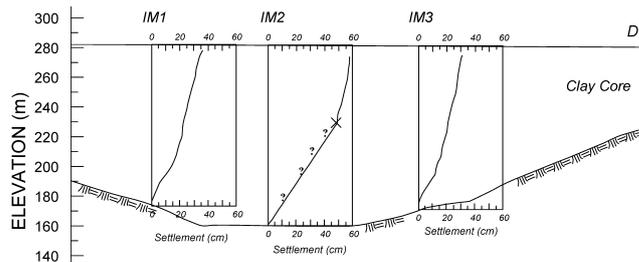


図-9 初期湛水後のコアゾーン内部の累積沈下の深度分

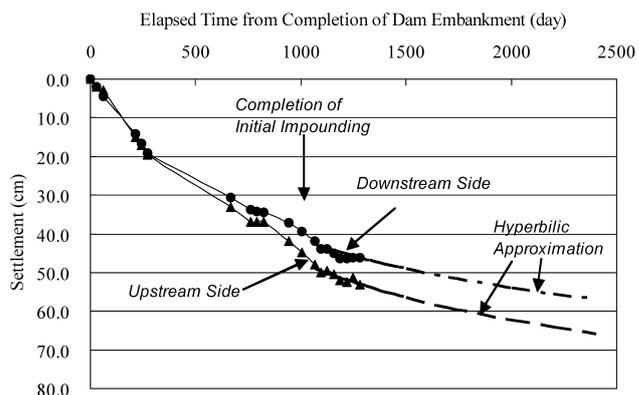


図-10 初期湛水中の天端の沈下と双曲線近似による予測

### (2) ロックゾーンの沈下

下流側ロックゾーンにも層別沈下計を設置し、湛水中の沈下を計測した。湛水完了後の累積沈下量の深度分布を図-11に示す。下流側ロックゾーンは貯水池の湛水から直接的な影響を受けないにもかかわらず、湛水期間中に合計で15~20cmという沈下量が計測された。この沈下量は圧縮ひずみで0.2~0.3%程度に相当する。ロック材料が堅硬な玄武岩であり、15トン振動ローラー4回走行で締固めたことを考えると比較的大きい沈下量と言える。雨水の影響などでロック材の鋭利な接点がつぶれたことや、盛土全体のクリープ変形などが沈下の要因であろう。上流側ロックゾーンの沈下は、計測はできないが水浸の影響があるため少なくとも下流側より大きいはずである。

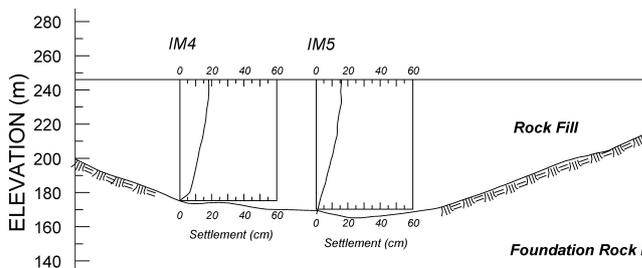


図-11 下流側ロックゾーンの累積沈下の深度分布

6. 初期湛水中のダム堤体の水平変位

(1) ダム外部変形

ダム下流側斜面上に設置した観測点の湛水開始前と湛水完了時の座標の差を水平変位量として図-12、13に示した。図-12は下流側斜面の上下流方向への変位を示しているが、天端部分を除き、全体に下流側へ変位したことを示している。変位の最大値は斜面中央部で17cmであった。図-13はダム軸方向の変位であるが、左右ダムアバットからダム中央部方向への変位が見られる。変位量はアバットに近いほど大きく、ダム中央部分でゼロである。また、同じ断面では標高が高いほど変位量が大きく天端で最大となっている。これらの変位現象はダム下流斜面の典型的な変位挙動である。

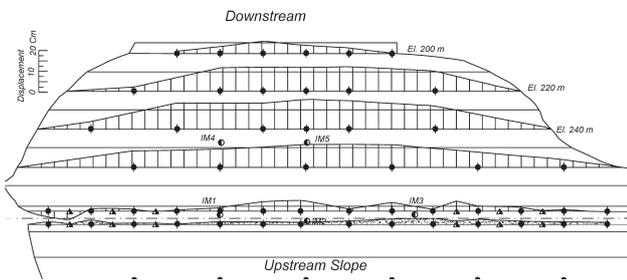


図-12 ダム下流側斜面の上下流方向水平変位

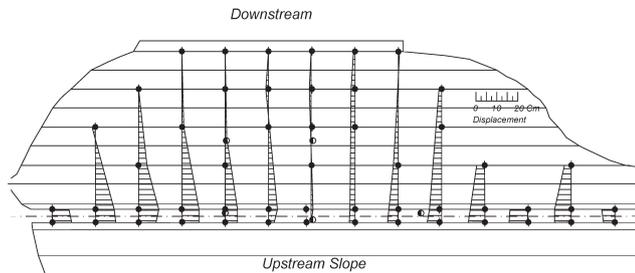


図-13 ダム下流側斜面のダム軸方向水平変位

ダム天端の観測点のデータを用い、天端の初期湛水時の上下流方向の水平変位を貯水池水位に対してプロットしてみた。結果を図-14に示す。湛水初期から天端は上流側へと移動し、貯水池水位の上昇とともに上流側へ最大60mm変位した。しかし、水位がダム高の2/3くらいに達したあたりから、一転して下流側へ向かって変位が戻るような挙動を示し始め、湛水完了時には変位がゼロかやや上流側へ残留するという結果となった。

なぜダム天端の水平変位がこのような挙動をするのであろうか。この理由を考える上で興味深いデータが、以下の傾斜計の観測で得られている。

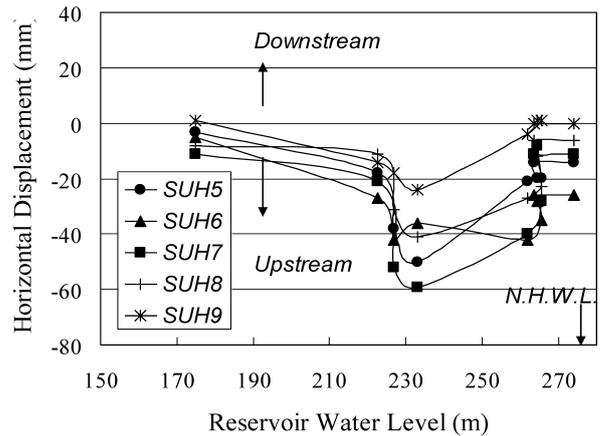


図-14 ダム天端の上下流方向水平変位

図-15に初期湛水完了時のコアゾーンと下流ロックゾーンの傾斜計計測結果を示す。傾斜計はダム盛土建設中にパイプが座屈したため、湛水中はダム天端から約50m位の深さまでしか計測できなかったが、コアゾーンは初期湛水期間中一貫して上流側に傾斜していたのに対して、ロックゾーンは一貫して下流側に変位した。両者でまったく逆の、矛盾した結果となっている。しかし、これはコアゾーンの破損箇所の座標を固定して描いているためで、図-13に示すダム天端の挙動を考え合わせると、初期湛水中、実際にはコアゾーン（とくに天端に近い上部部）は上流に傾斜しつつ、全体として下流側に移動したと考えられる。

初期湛水中にコアゾーンが上流側に傾斜するのは上流側ロックゾーンが水浸沈下するためであろう<sup>2)</sup>。また、コアゾーンおよび下流側ロックゾーン全体が下流側へ変位するのはコアゾーンにかかる水圧に押されるからである。初期湛水中は水位上昇とともにこの二つの現象が同時に進行していると考えられるが、湛水前半は水浸沈下が卓越し、後半には下流側へ押されて変位する現象が卓越すると考えると、図-13の天端の変位挙動が理解できる。このような現象は多かれ少なかれ、どのダムでも初期湛水時に発生していると思われる。

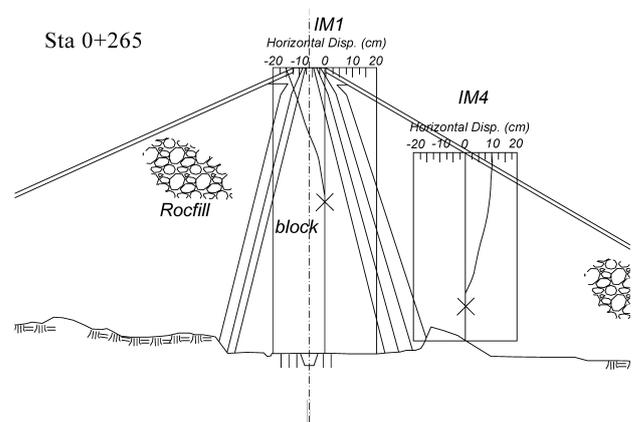


図-15 傾斜計によるコアゾーンとロックゾーンの水平変位

(2) ダム天端のクラック

初期湛水中にダム天端両端のアバット付近にダム上下流方向に2~20mmの開きを持つクラックが多数発生した。クラックはいずれも天端道路の緑石の継ぎ目に現れたのみで、アスファルト舗装には顕著なクラックは見られなかった。

クラック発生の原因を探るため、図-16に示すようにダム天端の各観測点間の水平変位量からダム軸方向の線ひずみを計算し、その分布を描いて見た。図で明らかなように、天端の両アバットに近い部分は引っ張り領域、ダム中央付近は圧縮領域となっており、図-13に示したように、ダム天端が左右両アバットから中央に向かって変位する傾向と一致している。これはダム高が高い中央付近ほど沈下が大きく、両端アバット付近では沈下が小さいために起きる現象である。

図-16にはクラックの発生位置も示したが、クラックは左右両アバット付近の引っ張り領域で起きていることがわかる。すなわち、この種のクラックはコアゾーンの沈下の過程で出現する両アバット付近の引っ張り領域で発生するものであり、ある程度の規模のダムでは起こりうるものと考えられる。しかしながら、このようなクラックはコアゾーンの沈下と連動している為、沈下が収まる傾向にあればクラックもそれ以上進行することなく、クラック開口幅が大きくなければ、観測を継続することとして特別な対策を講じる必要はないであろう。

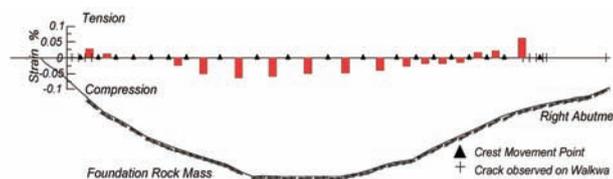


図-16 ダム天端の線ひずみ分布

7. 初期湛水中の漏水量

ダム基礎およびコアゾーン内の間隙水の浸透が正常であれば、ダム下流漏水量観測用三角堰で観測される漏水量は貯水池水位に連動するはずである。もし、貯水池水位が一定あるいは低下している時に漏水量が急増するようであればパイピングなどの危険な状態が起きていることを示唆しており、なんらかの対応が必要となる。

しかしながら通常のダムでは、ダム下流側斜面や周辺域に降った降雨や両アバットからの地下水位の流入も三角堰で同時に計測されてしまい、貯水池からの漏水量だけを分離して計測することは不可能であり、貯水池水位との連動を常に正確にモニターすることは難しい。

図-17にBatutegi Damの湛水中の貯水池水位と漏水量の関係を示す。雨水や地下水の影響は常に漏水量を多くする

方向に働くため、グラフの下限値の包絡線を真の漏水量と考えることも可能であろう。そのように考えると、図中破線で示したように水位と漏水量との関係はほぼ直線関係があることがわかり、漏水量は貯水池水位と連動していると言える。Batutegi Damの観測では、降雨によって漏水量が急増してもその後観測値がこの包絡線付近まで戻るかどうかを確かめることによって漏水量が正常な範囲であるかどうかを判断した。

図-17によると、Batutegi Damの漏水量は満水位で毎秒約10リットル程度であった。高さ100m以上の大規模ダムの漏水量としては比較的少ないと思われる。

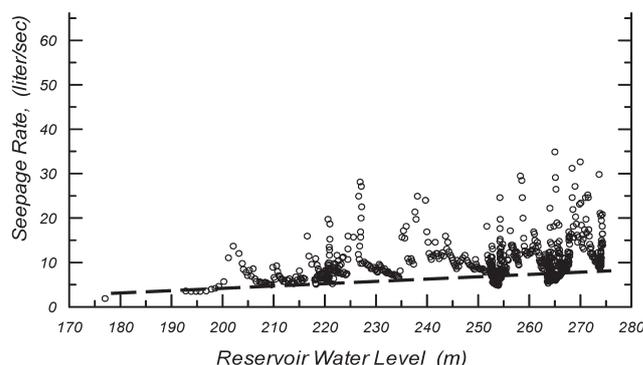


図-17 貯水池水位と漏水量の関係

8. おわりに

以上述べたように、Batutegi Damの初期湛水は各種観測データにより極めて正常で安全な状態であったことが確認された。2005年8月現在、満水位に達してからすでに1年半が経とうとしているが、今後もダムの挙動をモニターし、長期的観測データを蓄積して行きたいと考えている。

謝辞：最後に、データ収集に協力いただいたBatutegi Dam管理事務所の方々および本報文のこうえいフォーラムへの掲載を快諾していただいた、インドネシア共和国公共事業省河川局ディアイ局長に深謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Nippon Koei & Associates : Report on Final Inspection and Evaluation on Initial Impounding of Batutegi Dam, Way Sekampung Irrigation Project, April 2004
- 2) 向後雄二：フィルダムの貯水時の挙動特性とその解析方法、大ダムNo.171, 2000-4