

# インドネシアにおけるコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム (CFRD)

## CONCRETE FACED ROCKFILL DAMS (CFRD) IN INDONESIA

佐藤周一\*・柚木裕二\*\*・森山 索\*\*

Shuichi SATO, Yuji YUNOKI and Saku MORIYAMA

The concrete faced rockfill dam (CFRD) has become the standard type of rockfill dam in the world over the past two decades. Indonesia has also developed CFRDs since the 1920s, the most recent of which is the Cirata Dam (125 m high), constructed in western Java in 1988. Some 17-years later, a new CFRD, the Ponre Ponre Dam (55 m high), has been planned in South Sulawesi Province to be completed by 2009 under the Decentralized Irrigation System Improvement Project in Eastern Region of Indonesia (DISIMP) under a JBIC loan. In relation to this planned dam, the Ministry of Public Works held a national workshop on the latest technology of CFRD in Jakarta in March 2005. This paper provides an overview of the development of CFRDs in Indonesia.

**Key Words :** concrete faced rockfill dam (CFRD), Indonesia, ICOLD Bulletin

### 1. はじめに

インドネシアにおけるダム開発は独立前の1910年代に開始され、現在までに約120のダム(堤高15m以上)が建設された。当社は、1970年代～1980年代に実施された東ジャワのブランタス川総合開発事業、北スマトラのアサハン発電開発事業をはじめとして、現在に至るまでインドネシア各地に建設された多くのダムにコンサルタントサービスを提供してきた。インドネシア国内の主要ダム50カ所(堤高30m以上)のうち半数以上の26カ所が当社の施工監理によるものである。

わが国の円借款の下で、当社が15年間にわたりインドネシア東方地域においてコンサルタントサービスを提供している小規模灌漑管理事業(SSIMP: Small Scale Irrigation Management Project)においても、1990年代以降7カ所の中規模ダムが建設された。同事業の第四期(2002年開始)からは事業名称をDISIMP(Decentralized Irrigation System Improvement Project in Eastern Region of Indonesia)と改め、通算8カ所目のダムとなるPonre Ponre Dam(南スラウェシ州)が、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム(CFRD)として設計され、間もなく工事が開始される。

Ponre Ponre Damは、インドネシアではCirata Dam(西ジャワ州)以来、約20年ぶりのCFRDである。CFRDは近年ロックフィルダムの標準タイプとなって来たが、Ponre Ponre Dam建設をきっかけにインドネシアでもCFRDが標準タイプのロックフィルダムとして認識される兆しがある。そこで本報文では、インドネシアにおけるCFRDの歴史、2005

年3月インドネシア公共事業省主催で開催されたCFRD最新技術に関するワークショップ、そしてPonre Ponre Damの概要を述べ、オランダ植民地時代から現在に至るまでのインドネシアにおけるCFRDの取り組みを概観する。

### 2. インドネシアのダムの現況とCFRDの歴史

インドネシア政府ダム安全委員会の統計によると、堤高15m以上で総貯水容量が10万m<sup>3</sup>以上のものを「ダム」と呼んでおり、全国に117カ所ある。また、堤高15m以下で総貯水容量が50万m<sup>3</sup>以上のものは「低ダム」と呼ばれ135ヶ所、そして、低ダム以下の規模のものは「ため池」と呼んで、3,500カ所余りあるとされている。既存の「ダム」を、図-1のように形式別に分類した<sup>1)</sup>。アースダムが全体の53%を占め最も多く、土質遮水壁型ロックフィルダムが28%、CFRDが4%で、フィルダムを合計すると全体の85%である。それ以外には、コンクリート重力式ダム(9%)の他アーチダム、石積ダムがある。

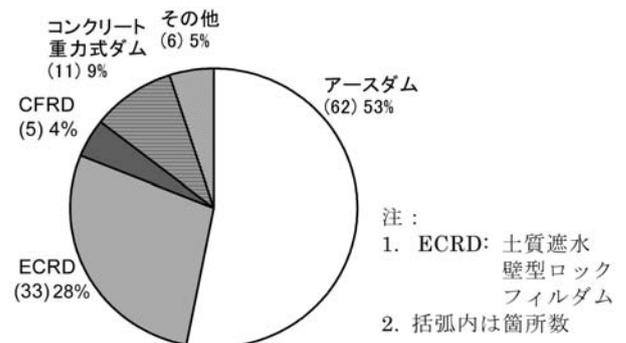


図-1 インドネシアにおける既存ダムの形式別分類

\* 海外カンパニー DISIMP開発事務所

\*\* 海外カンパニー 地域社会事業部 地域整備部

インドネシアで最初のダムは、独立前の1914年に、オランダ植民地政府の直轄工事により中部ジャワに完成した堤高21mの均一型アースダムである (Nglangon Dam)。これを含め、独立前にジャワ島に16カ所のアースダムが建設された。1945年の独立後は日本の円借款、世界銀行 (世銀) の資金を始め、長期的かつ総合的に水資源開発が進められ、インドネシア各地に多数のダムが建設された。

現在、インドネシアには表-1に示すように5カ所のCFRDが存在する。インドネシアで最初のCFRDは、1923年に中部ジャワに建設された堤高27mのDelingan Damである。しかし、このダムは図-2の断面図 (復元図) に示すように堤体はロックフィルではなくランダム材であり、アースダムの表面にコンクリートスラブを貼り付けた形である。また、独立前に建設されたもう一つのCFRDであるPacal Damもほぼ同様の形式である。これらのダムは現代の常識ではCFRDとは言えないかもしれないが、上流側の勾配が下流に比べかなり急であり、表面コンクリートスラブによる止水を意図していると思われるので、ここではCFRDに分類した。

表-1 インドネシアのCFRD一覧

ダム名	州名	堤高 (m)	堤体積 (千m <sup>3</sup> )	貯水量 百万m <sup>3</sup>	目的	完成年
Delingan	中部ジャワ	27.0	300	2	I	1923
Pacal	東ジャワ	35.0	91	39	I	1933
Darma	西ジャワ	37.5	165	34	I	1962
Batubesi (Larona)	南スラウェシ	32.0	120	585	E	1978
Cirata	西ジャワ	125.0	3,900	796	E	1988

備考 I = 灌漑、E = 発電

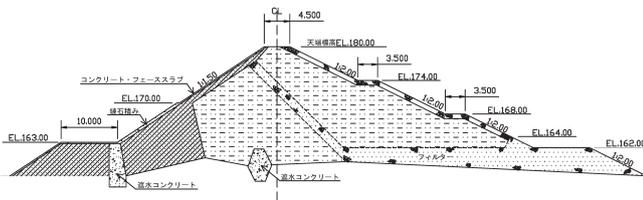


図-2 Delingan Damの断面図 (復元図)



写真-1 Delingan Dam (中部ジャワ州、1923年完成)

また、中部ジャワ州に1928年に完成したPlumbon Damは現存する図面によると表面コンクリートスラブを有するが、現況では上流側法面は碎石によるリップラップに置き換わっているためCFRDの分類には入れていない<sup>2)</sup>。

写真-1はDelingan Damの上流側法面である (2004年6月撮影)。同ダムは完成後すでに80年が経過し、コンクリートスラブにかなりの傷みが見られる。とくに水平継目が開いている箇所が多く観察され、満水時には漏水が多いため水位の上昇を制限しているとのことである。政府にも早急な補修工事が必要との認識はあるが、現実には放置された状態である。

独立後のインドネシアでは3カ所のCFRDが建設されている。CFRDは1970年代以降新しい建設技術を用いた大型のCFRDが世界各地でさかんに建設されるようになったが、Darma Dam (1962年)、Batubesi Dam (1978年) は、技術革新以前または過渡期のダムであり、この当時はまだまだ100mクラス的大型CFRDの建設は少なかった (表-2)。

1988年、西ジャワ州、Citarum川中流に世銀の融資によってCirata Damが完成した (写真-2)。このダムは表面コンクリートスラブを支えるフィルター層、振動ローラーにより転圧されたロックフィル、プリンスコンクリートおよび周辺継目構造など、現代のCFRD技術を構成する要件をほぼ満たす本格的な大型CFRDであると言える (図-3)。また、堤高125mは現在でもインドネシア第一位の高さを誇る。



写真-2 Cirata Dam (西ジャワ州、1988年完成)

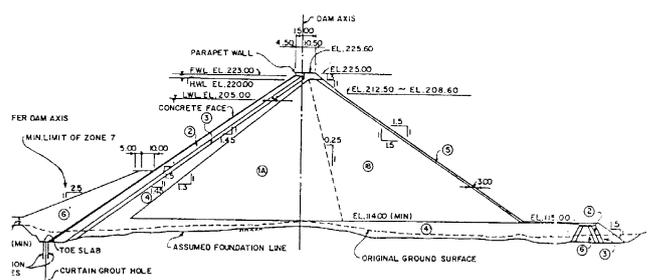


図-3 Cirata Damの断面図

### 3. CFRDワークショップ

#### (1) ワークショップの意義

インドネシアでは1988年に完成したCirata Dam以降、現在までCFRDは建設されていない。しかし、この間に世界ではCFRDの設計・施工技術は大きな進歩を遂げ、1990年代に入ってから、南米や中国で150mを超える大型CFRDが続々と建設されるようになった。また、2000年以降200m級のCFRDの計画（建設）も中国やマレーシアなどで進んでいる（表-2）。このような状況を鑑みると、今やCFRD技術は、低コスト、短い工期、しかも高い安全性を持つダム技術として、従来の土質遮水壁型ダムに代わってロックフィルダムの標準タイプとしての認識がすでに定着した感がある。

表-2 世界のCFRDの高さ、年代別の分類

Decade	Total Nos of CFRD	Number of CFRD by Height (m)							
		30 m ~ 59 m	60 m ~ 89 m	90 m ~ 119 m	120 m ~ 149 m	150 m ~ 179 m	180 m ~ 209 m	> 210 m	
Before 1930	5	4	1						
1930 ~ 1939	7	3	3	1					
1940 ~ 1949	4	2	2						
1950 ~ 1959	9	3	4	2					
1960 ~ 1969	12	7	3	1		1			
1970 ~ 1979	19	10	3	4	2				
1980 ~ 1989	52	20	20	5	6	1			
1990 ~ 1999	79	32	26	13	4	3	1		
2000 ~ 2009	84	14	26	18	17	2	6	1	
Grand Total	271	95	88	44	29	7	7	1	

注：“Hydropower & Dam World Atlas 2003”のデータをもとに集計

インドネシア政府公共事業省も上述したような世界のダム技術の変化を敏感に察知しており、Ponre Ponre Dam建設プロジェクトが同国ダム技術のターニングポイントとなることを強く期待している。このため、政府は同プロジェクトを開始するにあたり、最新のCFRD技術を同国内に広く普及させる目的でCFRDに関するナショナルワークショップの開催を計画し、弊社DISIMPチームにワークショップの企画、実施に関し協力を要請し、2004年8月準備作業が開始された。また、ワークショップの開催に当たっては、INACOLD（インドネシア大ダム会議）、JBIC（国際協力銀行）、PLN（国営電力会社）の全面的な協力・協賛が得られた。

#### (2) ワークショップの準備作業

折しもICOLD（国際大ダム会議）は、最近のCFRD技術の進歩に対応するため、1989年に発行したBulletin 70, "Rockfill Dams with Concrete Facing" に最新技術情報を取り入れた改訂版、"Concrete Face Rockfill Dam, Concepts for Design and Construction" の最終ドラフト完成に向け作業中であった。この状況を踏まえ、海外から著名なCFRDの専門家を招聘し、この改訂版CFRD Bulletinの内容を題材にインドネシアのダム技術関係者に対してCFRD最新情報を啓蒙することをワークショップの中心テーマに据えた。この目的でICOLDから改訂

版Bulletinの主筆兼編集責任者であるMr. David Kleinerを、またANCOLD（豪州大ダム会議）から、改訂版Bulletinに多くの引用があり、Ponre Ponre DamのDam PanelでもあるMr. Ranji Casinaderの二人の専門家に講演を依頼した。彼ら招待講演者および政府との綿密な打ち合わせを行い、表-3に示すプログラムや討論方法などを決定した。そして2005年3月、ジャカルタのHotel Sahid Jayaにおいて、インドネシア国内のダム技術者、研究者、政府関係者など約250人の出席者を得て、CFRDナショナルワークショップが開催された。

表-3 CFRDワークショップのプログラム（March 2005）

テーマ	講演者	備考
第一日目(3月15日)		
1. Registration		
2. Opening Speech	Mr. Eddy A.	公共事業省 東部建設局長
3. Welcome Speech	Mr. Ikuro Sato	JBICジャカルタ 首席駐在員
4. Keynote Speech & Opening Remarks	Mr. Djoko Kirmanto	公共事業大臣
5. Introduction & History of CFRD	Mr. Ranji Casinader	ANCOLD
6. Design Analysis	Mr. David Kleiner	ICOLD
7. Discussion Session 1 - Lunch -		
8. Foundation Excavation & Treatment	Mr. David Kleiner	ICOLD
9. Plinth Design & Construction	Mr. Ranji Casinader	ANCOLD
10. Discussion Session 2		
11. General Discussion		
12. Summary of the first day		
第二日目(3月16日)		
1. Embankment Zoning, Properties & Construction	Mr. David Kleiner	ICOLD
2. Concrete Face, Parapet, & Face joints	Mr. Ranji Casinader	ANCOLD
3. Discussion Session 3 - Lunch -		
4. Instrumentation & Performance	Mr. David Kleiner	ICOLD
5. Appurtenant Structures	Mr. Ranji Casinader	ANCOLD
6. Discussion Session 4		
7. General Discussion		
8. Brief Presentation on Cirata Dam	Mr. Soetomo	PLN (国営電力会社)
9. Summary & Closing Comments	Mr. Basoeki	公共事業省 水資源総局長
第三日(3月17日)		
Site Visit to Cirata Dam		PLN (国営電力会社)

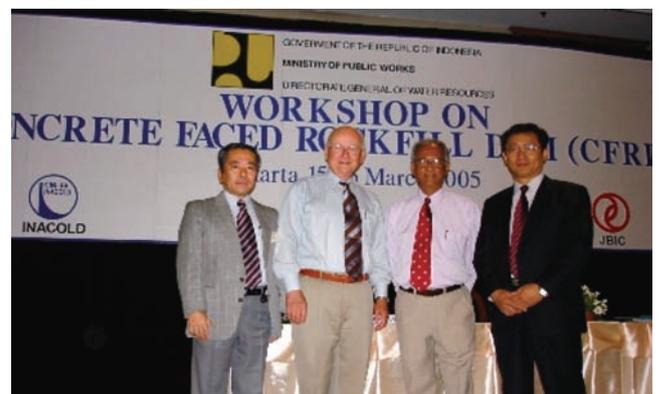


写真-3 筆者らと招待講演者（左から、佐藤、Mr. David Kleiner、Mr. Ranji Casinader、柚木）



写真-4 ワークショップでの講演風景

(3) ワークショップでの技術トピック

ワークショップではCFRDの最新技術や多くの施工例などが、招待講演者であるMr. David Kleiner とMr. Ranji Casinaderから紹介され、活発な議論がなされた。その話題の中で、いくつかの技術トピックを以下に述べる。

1) 法面勾配の設計

これまでにダムの安定や変形に関して簡易な解析方法が数多く提案され実測値によって検証されている。これらの解析を実施することにより建設時および湛水後のダムの挙動がかなりの程度まで推定できる。

法面勾配は、表層すべりのような簡易計算、地震時変形の簡易推定法による検討などにより決定される。表層すべり計算によると、ロック材の表層での摩擦角は最低でも50度はとれるので、法勾配1:1.3でも常時の安全率は1.55以上となり問題ない。材料が良ければ勾配1:1.2でも計算上は可能である。地震時は、盛土の全体変形の結果発生する天端の沈下が許容範囲内かどうかを検討する。検討方法は、過去の同規模ダムの地震時沈下の実測値との比較や、次式で定義されるESIを用いた推定、またMakdisi & Seedによる簡易応答解析法や近年USBRが提案した方法などによっても推定可能である<sup>4)</sup>。

$$\text{Earthquake Severity Index (ESI)} = \text{PGA} * (\text{M}-4.5) \quad (1)$$

ここに PGA: Peak horizontal ground acceleration

M : Earthquake Magnitude

しかし、法面勾配決定の際には、設計者は常に安全側の考え方 (Defensive Design Concepts) をとるべきである。

2) 漏水の予測と対応

CFRDの漏水には、基礎からの漏水と周辺継目や表面コンクリートのクラックからの漏水がある。基礎からの漏水は浸透流解析などの手法で事前に予測可能であり、その結果に応じた基礎改良設計がなされるが、継目やクラックからの漏水は予測できない。しかし、漏水がどこからきてい

るにせよ、設計施工が適切に行われていれば、たとえ漏水が発生しても、ECRD (土質遮水壁ロックフィルダム) におけるコアゾーンのようなパイピング現象が発生するゾーンは存在しないので基本的にはダム本体の安定に影響はない。しかし、もちろん漏水が発生すれば早期に適切な修理を行う必要がある (表面コンクリートの修理は比較的容易)。

3) プリンスの設計と基礎処理

プリンスはCFRDの止水性を確保する上で最も重要な構造物である。プリンスの下記の二つの役割を認識して、それぞれの目的に適合する設計をしなければならない。

- a) カーテングラウトを伴う止水構造物
- b) 可動構造物である表面コンクリートと不動の基礎岩盤との間を繋ぐ構造物

具体的には、上記a) に関してはグラウトキャップとしての機能および基礎の浸透水に対する適切で安定的な浸透流長の確保、b) に関しては変位を許容しつつ止水性を確保できる周辺ジョイント (perimeter joint) の適切な設計・施工である。

プリンスコンクリートの厚みは通常最低30~40cmで、水圧に応じて $0.3+0.003H$  (m) (H:水圧) により厚さを増加させるが、実際には一定厚で施工されることが多い。また、基礎岩盤が悪く部分的にプリンス基礎が設計ラインより深い掘削になってしまう場合、デンタルコンクリートのような貧配合コンクリートで設計ラインまで埋め戻してからプリンスを建設するのが基本であるが、打ち継目からの漏水の危険性があるため、最近掘削面から一体でプリンスコングリート打設する「ハイプリンス」も推奨されている。プリンス幅 (浸透流長L) に関しては、表-4に示す基礎岩盤の状態と、許容される動水勾配 (H/L) との関係で決まる。

表-4 基礎の分類と許容される動水勾配

基礎のタイプと分類		動水勾配
I	Non-erodible	18
II	Slightly erodible	12
III	Erodible	6
IV	Highly Erodible	3

周辺継目には通常三層の止水構造を設置する。一番下に銅製止水板、スラブ中央にプラスチックあるいはゴム止水板、そしてスラブ表面にアスファルト乳剤か細粒砂による止水装置を施す。堤高100m以下のダムでは表面の止水構造の無いダムもある。また、スラブ中央の止水板はその周辺の締固め不足による空隙の発生の可能性があるので注意を要する。

4) 盛土材料と施工

現在世界的に標準とされているCFRDのゾーニングは図-4に示すようなものである。ダム堤体は、周辺ジョイ

ント背面フィルターの2A（図-4では省略）、表面コンクリートスラブ背面フィルターの2B、トランジションの3A、上流側ロックゾーンの3Bおよび下流側ロックゾーンの3Cの各ゾーンから成っている。2A材は1A材（周辺ジョイント破壊時の止水材で非粘性性細粒土）との間でフィルター規定を満たさねばならない。また2B材は表面コンクリートスラブの支持層であるとともに、表面コンクリートのクラックから漏水が発生した時に、シルト分や細粒砂などに対するフィルター効果（目詰まり）が期待される。最近の施工実績では、1989年発行のBulletin 70で推奨された粒径より最大粒径が小さくより多くの細粒分を含む材料が推奨される。3A材は2B材から上流側ロックゾーンの3B材に応力を均一に伝達するための層であり、2B材および3B材との間にフィルター基準が満たされねばならない。3B材は表面コンクリートスラブが受ける水圧を基礎地盤に均一に伝達する役割であるため、長期的に安定して変形の少ないゾーンでなければならない。このため、良質な材料、十分な締固めが必要である。締固め時に100~250リッター/m<sup>3</sup>の散水をするのが推奨される。3C材は3B材よりは条件は厳しくない。

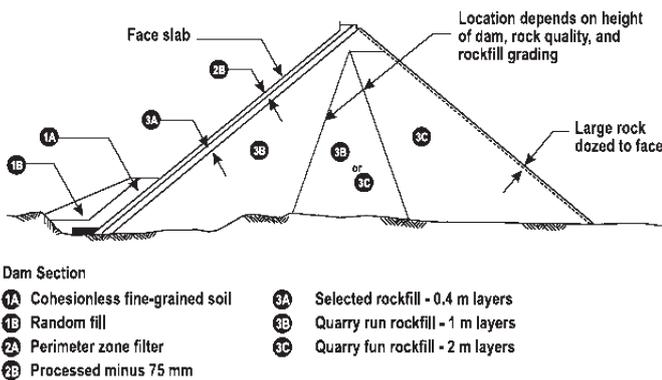


図-4 CFRDの標準ゾーニング

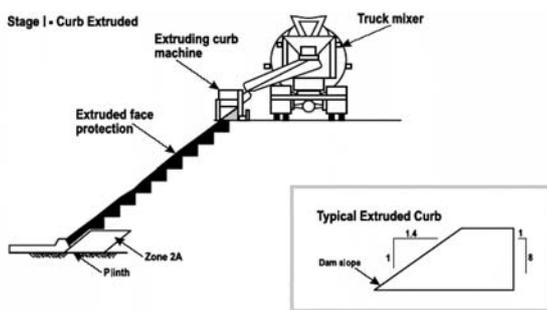


図-5 コンクリート縁石工法

最近開発された盛土の新工法としてコンクリート縁石工法が紹介された。上流側法面にコンクリート縁石を打設しながら2B材を盛り立ててゆく工法で、これまで盛土施工上最も困難な問題であった法面表層の締固めと、表面コンク

リートスラブ打設までの間の法面保護の問題を一挙に解決する画期的な工法である。

しかしながら、この工法が最初に採用されたブラジルのIta Dam（2000年完成）では湛水後表面コンクリートに多くのクラックが発生し、漏水が起きた。これは表面コンクリートと縁石が付着して、完成後の盛土の変形にコンクリートスラブが追随できなかったのが原因であるとする意見がある<sup>4)</sup>。また、縁石背面直近の2B材が締固め不足になる、あるいは盛土の変形に縁石が追随しないため、CFRD完成後コンクリート縁石背面に空隙ができることが原因であるとの指摘もある。縁石工法は、Ita Damでの漏水の反省から、表面コンクリートと縁石との間の付着を防ぐ改良が加えられ、最近の大型CFRDでも採用されている。しかし、湛水が完了して縁石工法の成功が確認できたCFRDはまだ無く、确实性に疑問が残る。

5) 表面コンクリートスラブとジョイント

表面コンクリートスラブは遮水壁であり、同時に水圧を盛土に伝達する構造物である。したがって、盛土の変形に追随すること、クラックを極力発生させないこと、変位を許容する止水ジョイントを適切に設計施工することなどが求められる。

表-5 表面コンクリートスラブの厚さ

水圧 H (m)	表面コンクリートスラブの厚さ (m)
> 100	0.3+0.002H to 0.3+0.004H
50 to 100	0.3
< 50	0.25

表面コンクリートスラブの厚さは、良質の締固められた碎石上に建設されることを条件として過去の経験から決められている。

最近採用されている設計値を表-5にまとめたが、以前より薄くなる傾向にある。

湛水による盛土の変形は図-6の矢印に示すような傾向があり、表面コンクリートスラブの継目は、ダム中心部分では圧縮、両アバット付近では引っ張りとなる。したがって、圧縮となるゾーンの継目構造はスラブの下の銅製止水版だけの簡単な構造で良いが、引っ張りとなる領域ではスラブ表面の止水構造も施す必要がある。

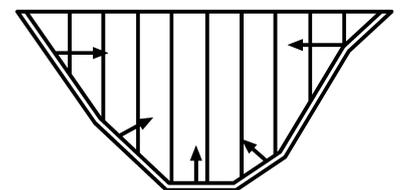


図-6 表面コンクリートスラブの変位

6) その他

ワークショップでは上記の話題以外にも計器設置および挙動観測結果、世界の大型CFRDの施工例など多くの話題が提供され活発な議論がなされたが、紙面の制約から割愛する。

4. PONRE PONRE DAMの概要

Ponre Ponre Damは、南スラウェシ州の州都マカッサルから北東に約70kmに位置し、下流の4,411haの水田に農業用水を供給する目的で計画された中規模CFRDである。このダムは1988年にUSAID（米国国際開発庁）により最初の調査が開始され、1992年にはコンクリート重力式ダムとして計画された。その後1997～98年にSSIMPで再調査した結果、CFRDに変更され、DISIMPで実施されることが2002年、インドネシア政府とJBICの間で合意された。

当社DISIMP設計チームは2003年4月より詳細設計レビューのための調査・設計を開始し、2004年9月に設計図書がインドネシア政府ダム安全委員会に提出された。2005年2月にはダム安全委員会が招聘したDam Panelが最新のCFRD技術に基づき設計のチェックを行い、若干の修正を経て入札設計が政府に承認された。2005年8月現在国際入札を実施中であり、2005年末には工事開始の予定である。表-6にダムの主要諸元を、図-7にダム施設の配置を示す。

表-6 Ponre Ponre Damの諸元

集水面積	78 km <sup>2</sup>
年平均流量	1.7m <sup>3</sup> /s
PMF	1,590 m <sup>3</sup> /s
有効貯水量	40.4 百万m <sup>3</sup>
最大高さ	55.0 m
天端長さ	235 m
堤体積	480千m <sup>3</sup>
法勾配	上下流共1:1.4

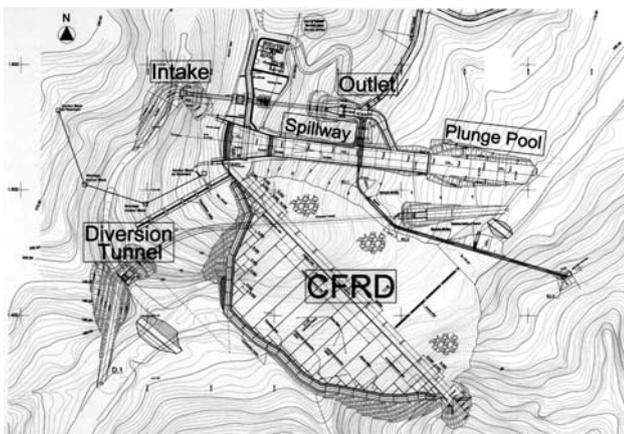


図-7 ダム施設配置図

1) ダム盛土

盛土材料は主にダム軸直上流右岸側の原石山から生産される安山岩および角礫凝灰岩を用いる。図-8に示した2A、

2B、3A、3B材は良質の安山岩のみを用い、3Cは角礫凝灰岩および掘削ズリも用いることとした。図-9に各ゾーンの粒度分布曲線を示す。表層すべり計算の結果、法面勾配は上下流とも1:1.4とした。また、Makdisi & Seedの簡易応答解析法による地震時沈下の推定値は10cm、ESI法による推定結果は6.1cmであり、地震時の変形も問題無いことを確認した。

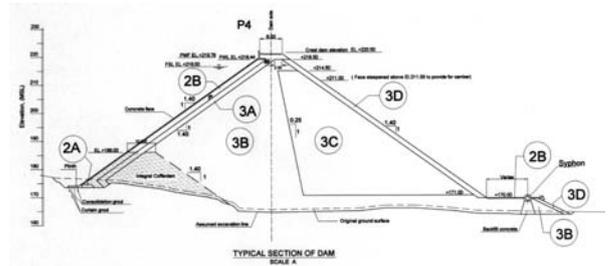


図-8 ダム盛土断面図

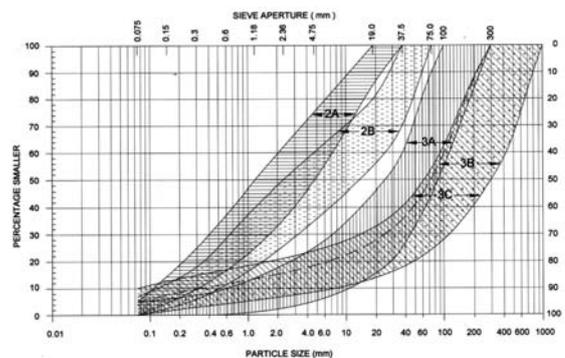


図-9 ダム材料の粒度分布

2) 表面コンクリートスラブおよびプリンス

スラブ厚は堤高55mであることを考慮し、30cmの一定厚とした（表-5）。また、水圧によるコンクリートスラブのたわみからひずみを試算した。最大ひずみは0.83 × 10<sup>-4</sup>と計算され、許容ひずみとされる1 × 10<sup>-4</sup>以下であることを確認した。

プリンスは基本的には厚み40cmとしたが、左岸側に一部地形的に設計ラインより深い場所があるため、図-10に示す様にハイプリンスを採用した。

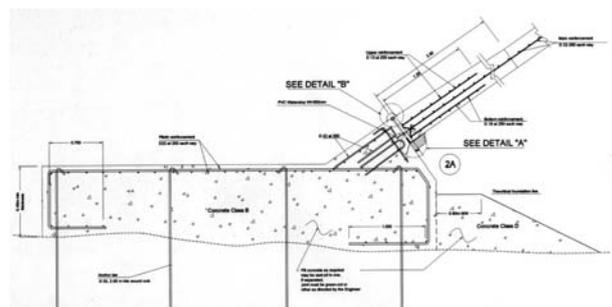


図-10 ハイプリンス

### 3) 上流側2B材法面の締固めと保護

当初、新技術であるコンクリート縁石工法の採用を検討したが、Dam Panelの助言により信頼性の高い在来工法、すなわち振動ローラーによる法面締固めとアスファルト乳剤散布による法面保護を採用した。

### 4) インテグラルコッフアダム

河川の転流の方法として、一次仮締め切り建設後二次仮締め切りを本体ダムとの間に独立して建設する方法と、本体ダムの一部を先行して完成させ、二次締め切りとして機能させる方法（インテグラルコッフアダム）がある。雨季と乾季がはっきりしている場合、後者の方法が可能であり建設コストが削減できる。したがって、本プロジェクトではインテグラルコッフアダム方式を採用した。

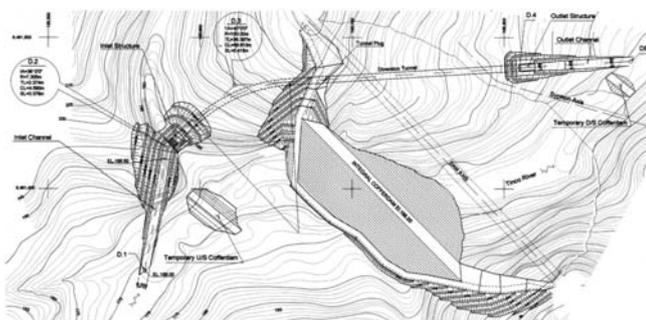


図-11 インテグラルコッフアダム

## 5. おわりに

インドネシアにおけるCFRDの歴史と現況、最新CFRD技術情報、Ponre Ponre Damの概要を述べた。Ponre Ponre Damは、上述のように最新技術を多く取り入れて設計されたインドネシアとしては久々のCFRDである。これを契機にインドネシアにおいてCFRD建設技術が発展してゆくことが期待され、弊社としても微力ながら貢献できればと考えている。

### 参考文献

- 1) 佐藤周一：東方インドネシアの中規模ダム開発、大ダム No.191、2005年4月
- 2) Bendungan Besar Indonesia、インドネシア公共事業省、1994年
- 3) Handout for Workshop on Concrete Faced Rockfill Dam、日本工営 DISIMP、2005年3月
- 4) ICOLD：DRAFT Bulletin, Concrete Faced Rockfill Dams, Concepts for Design and Construction, January 2005