ポンレポンレダム（CFRD）の設計・施工及び挙動観測

DESIGN, CONSTRUCTION AND PERFORMANCE OF PONRE PONRE DAM（CFRD）

柚木裕二 *・イスプラスティア バスキ **・渋田健一 ***
Yuji YUNOKI, Isprasetya Baski, Kenichi SHIBUTA

The Ponre Ponre Dam Irrigation Sub-project was planned to provide sufficient water to an irrigation area of 4,400 ha in South Sulawesi Province in Indonesia. The main facility of the sub-project is the Ponre Ponre Dam, a 55 m high concrete faced rockfill dam（CFRD）with a reservoir with an active capacity of 40 MCM. The CFRD structure is generally cheaper, quicker, and safer than earth core rockfill dam, and has been the standard type of rockfill dam for the past four or five decades. The Ponre Ponre Dam is the fourth CFRD in Indonesia, and the first since completion of the Cirata Dam in West Java in 1987. This paper briefly describes the design, construction, and performance of the Ponre Ponre Dam.

Keywords : *CFRD, Rockfill Dam, Design, Construction, Cement Stabilized Method, Initial Impounding, observation of dam behavior*

1. はじめに

インドネシア共和国東部地域において、円借款により1991 年より実施されている小規模潅漑事業は現在第四期（DISIMP）が実施中である。DISIMP の一つのサブプロジェクトとして、南スラウェシ州を東西に流れるワラナエ川の支流、ティンチョ川流域にポンレポンレダム潅漑サブプロジェクトが計画された（**図－1**）。この事業は高さ55m、有効貯水容量約 40 百万㎥のポンレポンレダムを建設し、4,400 ヘクタールの農地に新たに建設する潅漑用水路を通して農業用水を供給するものである。

図－1　ポンレポンレダムの位置図

ポンレポンレダムは、1980 年の JICA 調査で最初に提案され、1991 年からは小規模潅漑事業の中で調査、検討が進められた。ダムタイプの比較の結果、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム（以下 CFRD）が選択された。

本稿では、ポンレポンレダム（**写真－1**）の設計施工、および湛水中の挙動観測結果などについて概略を述べる。また、2009 年 4 月にマカッサルにてインドネシアのダム関係者を一同に集めて開催された CFRD ナショナルセミナーに関しても概要を報告する。

写真－1　湛水試験中のポンレポンレダム（09 年 6 月撮影）

2. CFRD について

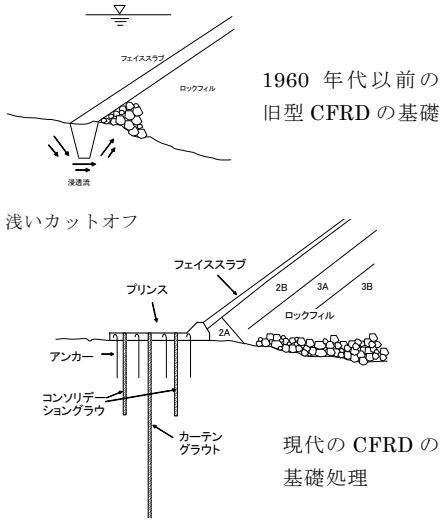
ポンレポンレダムで採用された CFRD（Concrete Faced Rock Fill Dam）は、ロック材によって建設されたダム堤体の上流側法面をコンクリートの板（フェイススラブ）で覆って遮水するという、いたってシンプルな構造である。19 世紀末にアメリカ西海岸で最初の CFRD が建設されたとされており、その後欧米各地で建設されるようになった[1)]。CFRD は日本では数少ないが、近代ダム工法の

*　コンサルタント海外事業本部副技師長
**　インドネシア公共事業省 BBWS Pompengan-Jeneberang 所長
***　DISIMP 開発事務所所長

中では最も古い工法である。

しかし、1950 年代までの CFRD は、ダム本体がいわゆる投石工法（Dumped Rockfill）によって建設されていたため施工後の堤体変形が大きく、フェイススラブの損傷による漏水が多かった。特に当時はフェイススラブがブロック打ちであったため目地が多く､漏水の原因となっていた。また、基礎からの浸透水に対してもフェイススラブ上流端部の浅いカットオフだけで対処していたため止水の効果は低かった。このように当時の CFRD は完成後も常に漏水の問題があったが、盛土がロック材だけで構成されているため漏水問題はダムの安定問題というより、むしろ経済問題と捉えられていたようである。

1960 年代に入り、振動ローラーによるロック材の締固めが一般に行われるようになってからは均質で良く締まった堤体（Compacted Rockfill）が建設できるようになり堤体変形によるフェイススラブの損傷も大幅に減少した[1)]。また、スリップフォームによるフェイススラブの連続打設が可能になり水平目地がなくなったことも漏水が減った大きな要因である。ダム基礎の漏水対策は、プリンスが開発されたことにより、プリンス幅の浸透流長が確保されるとともに、プリンスをキャップコンクリートとしてカーテングラウトが可能となり、基礎からの浸透流のほとんどが遮断できるようになった（**図－2**）。



図－2　CFRD の基礎処理の変遷

このような技術革新を経た結果、1960 ～ 70 年代以降は漏水量の少ない CFRD が建設されるようになり[1)]、1980 年代以降は高さ 100m を越える CFRD が世界各地で続々と建設されるようになった。2000 年代には 200m を越える高さの CFRD が建設されるに至った。現在世界最大の CFRD は 2009 年に中国に完成した Shuibuya Dam（233 m）である。

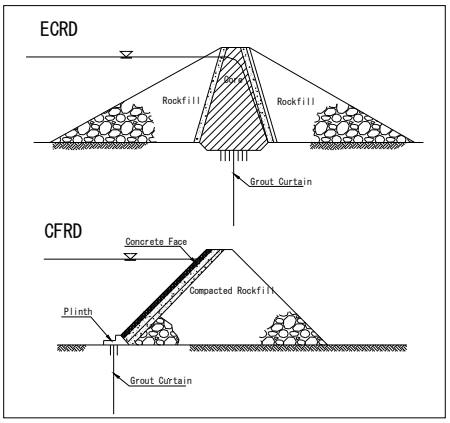
図－3 は CFRD と土質遮水壁型ロックフィルダム（以下 ECRD）の断面を比較した図である。一般に CFRD は ECRD に比して以下の点で有利であると言われている。

① 法勾配が 1：1.3 ～ 1.5 と急にできるので堤体が小さくできる。このため経済的で工期が短い。

② 盛土材料がすべてロック材なので工事が天候に左右されない。また工事中の越流も許容できる。

③ コアゾーン（土質遮水壁）にあたる部分が無いため、パイピングの心配が無く漏水に強い。

④ たとえ漏水しても、表面遮水であるため漏水箇所を見つけて修理できる。



図－3　ECRD と CFRD の比較

CFRD の耐震性に関しては、ロックフィルダムの地震時の挙動観測結果から高い耐震性を有すると言われてきたが、昨年中国で発生した四川大地震で震源から 17 km の Zipingpu Dam（高さ 154 m の CFRD）に致命的な損傷がなかったと報告[2)] されており、大規模 CFRD においても高い耐震性を有することが実証された。また、最近では沖積砂礫層上に建設された例（Dhauliganga Dam, India、2004 年完成[3)]）もあり、多様な地盤条件にも対応し得る工法であることが実証されている。

3.　ポンレポンレダムの設計

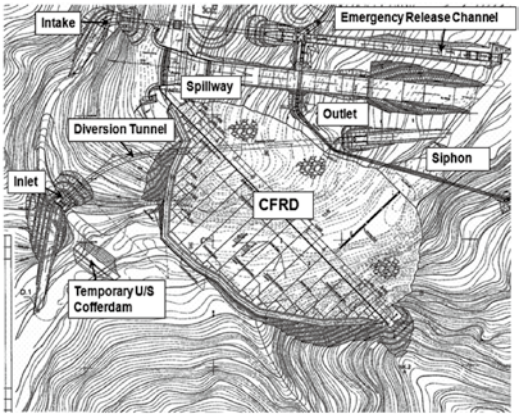
ポンレポンレダムの詳細設計は 2003 年 4 月～ 2004 年 5 月にかけて実施され[4)]、国家ダム安全委員と国際ダムパネル（オーストラリア人専門家）による設計審査を経て承認された。**図－4** にダムのレイアウトを、**表－1** にダム主要諸元を示す。ダム本体の設計は、オーストラリア大ダム会議（ANCOLD）が 1991 年に作成した Guideline（以下 ANCOLD Guideline）[5)] に基づいて行った。

1）地質、基礎処理

ダム基礎の地質は、第三紀の火山角礫岩、安山岩で構成されている。表層は風化が進行していたためプリンス基礎は弱風化層まで掘削することとし、3 ～ 5m の掘削を行うこととした。地質調査では基礎のかなりの部分で高い透水性（Lu > 30）を示していたため、カーテングラウトは二列で深さ 30 ～ 50m とした。

表－1　ダム主要緒

項　目		単位	諸　元
集水面積		km^3	78
年平均流入量		百万m^3	53.6
設計洪水（1000年確率）		m^3/s	873
可能最大洪水量、PMF		m^3/s	1,590
有効貯水容量		百万m^3	40.4
ダム	型式	－	CFRD
	最大高さ	m	55
	天端長さ	m	235
	堤体積	千m^3	510
	法勾配	-	上下流共1:1.4
	遮水壁厚さ	cm	30
	遮水壁面積	m^2	13,188
付帯設備	洪水吐容量	m^3/s	563
	導水路トンネル	m	D=2.5, L=108
	導水路容量	m^3/s	63.5
	仮排水路トンネル	m	D=4.0, L=235
	仮排水路容量	m^3/s	165



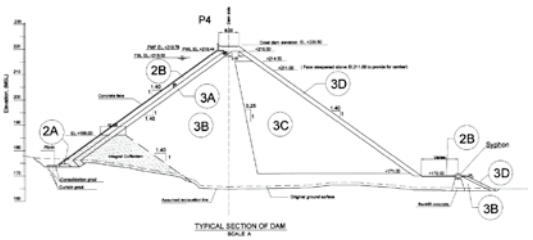
図－4　ポンレポンレダムの平面図

一方、ダム盛土基礎は表土及び強風化層の除去のみとした。

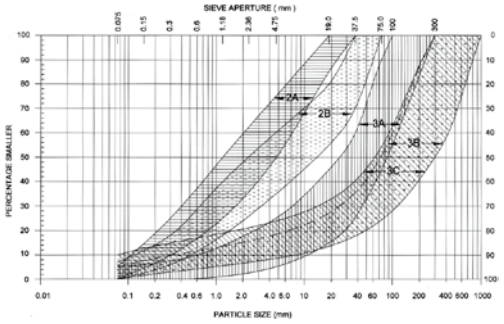
ダム直上流右岸側の原石山は、一部火山角礫岩を含む弱～中風化安山岩から成る。材料試験結果によると盛土材料としての要求は満たすがコンクリート骨材としては不適が約半数を占めたため、骨材は近隣の川から採取した河床砂礫を使用することとした。

2）ダム堤体盛土

ダムの標準断面を**図－5**に示す。ANCOLD Guideline では CFRD の法面勾配は上下流とも通常のロック材の安息角である 1：1.3 を標準とし、盛土材料の風化度や地震頻度などを考慮して決定するとしている。また、上流法面はフェイススラブを介して貯水池の水圧がかかるので常時安全率は 7 以上あるため安定計算の必要も無いとしている。一方、下流法面は開放面であるが、ICOLD Bulletin 70（1989）[1] によると下流法面の推奨勾配として弱～中震域では基礎および堤体天端の最大加速度の期待値に応じて 1：1.35 ～ 1.45 を推奨している。本プロジェクトはダムサイトが弱震地域であること、盛土材料が弱風化～中風化岩であることなどから、上下流とも勾配を 1：1.4 とした。また、下流法面安定は直線すべり法でも確認した。



図－5　ポンレポンレダムの標準断面図



図－6　各盛土材料の粒度の範囲

ダム堤体の地震時挙動の検討として、Makdisi-Seed（1978）の簡易推定法[6]、および Bureau ら（1985）の ESI（Earthquake Severity Index）法[7] によって地震時の天端沈下量を推定した。その結果、地震時の天端沈下量は 10 cm 以下と推定されたため、特別な配慮は必要ないものと判断した。

各ゾーンの粒度分布を**図－6**に示す。粒度分布は ICOLD Bulletin 70（1989）の推奨粒度分布[1] を基本に決定した。上流側ロックゾーン（3B）は貯水池からの水圧を基礎地盤に伝達するため内部に大きな応力が発生する。この応力による変形をできるだけ小さくしフェイススラブに影響を与えない配慮が必要である。このため 3B には新鮮～弱風化の安山岩を使用することとした。一方、下流側ロックゾーン（3C）は火山角礫岩を含むやや風化した材料や掘削ずり等も許容した。上流側表層のトランジションゾーン（3A）及びフィルターゾーン（2B）はフェイススラブを直接支える層であることから材料は新鮮な安山岩から生産することとした。

3）プリンス

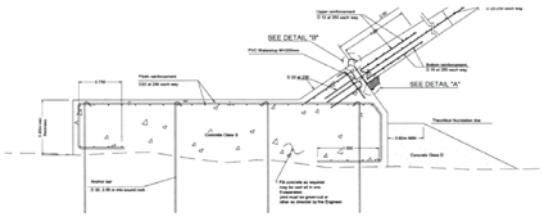
プリンスは、ダムの止水性を確保する上で、フェイススラブと並んで最も重要な構造物であり、カーテングラウトに対するキャップコンクリートとしての役割もある。また、可動構造物であるフェイススラブと基礎岩盤を繋ぐ周辺継ぎ目を供給する（継ぎ目に関しては後述）。プリンスの厚さは標準的な 40cm とし、幅は**表－2**を参照して決定した。許容動水勾配は基礎が弱風化層であることから 10 とし、最大水深が約 50m であることからプリンス幅は 5m 以上とした。

表－2　基礎岩盤と許容動水勾配（ANCOLD ガイドライン）

Foundation Erodibility in terms of Rock Condition	Acceptable Hydraulic Gradient
Fresh	20
Slightly to moderately weathered	10
Moderately to highly weathered	5
Highly weathered	2

プリンス背面の勾配は、湛水中のフェイススラブの変位を拘束して損傷を与えないよう配慮しなければならない。この勾配はプリンスの位置（標高）よって異なるが、Marulanda and Pinto（2000）[8] が示した簡易式によって求めることができる。

プリンスの厚さは基礎の掘削によって変化する。基礎が予想より悪く、設計掘削線より深い掘削となった場合、通常はバックフィルコンクリートによって設計掘削線まで埋め戻し、その上にプリンスを載せるが、バックフィルコンクリートとプリンスとの接合面が弱点になりやすい。本プロジェクトでは両者の一体性を高めるため、掘削深さに応じてプリンスの厚みを変化させ、配筋やアンカーも通常のプリンス同様に行うハイプリンス構造とした(**図－7**参照)。



図－7　プリンスの標準断面図

4) フェイススラブ

CFRD におけるフェイススラブは「不透水膜」という考え方であり、構造物としての強度より水密性や耐久性が重視される。ANCOLD Guideline ではスラブ厚は動水勾配 200 以下となるよう配慮し、最小厚さ 25 ～ 30 cm で、水深 1m に対して 2 ～ 5 mm 増厚するとしている（最近の傾向は 2 ～ 3mm)。ただし、ダム高 60 m くらいまでは 30 cm の一定厚が推奨されている。ポンレポンレダムは高さが 55m であることから、フェイススラブは 30cm の一定厚とした。スラブ幅は施工性を考慮して 12m、両アバット部は 6m とした。

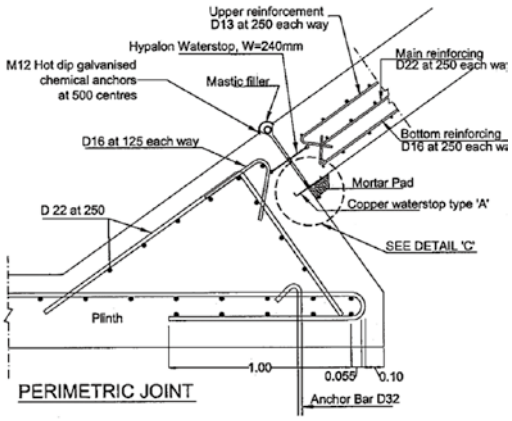
コンクリートの品質はスランプが通常よりやや小さい（打ち込み時で 6cm）という以外は特別な要求事項はない。一般に十分な強度（28 日強度で 20 ～ 24Mpa）を持ち、水セメント比（W/C）が 0.5 以下であれば、コンクリートは水密性や耐久性にも問題なく乾燥収縮クラックも入りにくいと言われていることから、本プロジェクトでは 28 日強度を 21 Mpa 以上として配合試験を行い、その結果をもとに W/C を 0.49 とした。

鉄筋量は断面積比で横断縦断ともに 0.4%程度の鉄筋量が推奨されている。本プロジェクトでは D22 を 25cm ピッチの格子状とし、スラブ厚の中央部に配置した。また、圧縮力が働くと予想される周辺継ぎ目やダム中央部の鉛直継ぎ目近傍にはスポーリング（圧縮破壊）防止のための補助鉄筋を配した。

5) 継ぎ目

プリンスとフェイススラブを繋ぐ周辺継ぎ目は、フェイススラブの変位を保障しなければならず、最も損傷の可能性が大きい。このため、銅製止水板、PVC 止水板、表層マスチックの三重構造とした（**図－5**)。一方、フェイススラブの鉛直継ぎ目は、湛水後両アバットメント近傍は開き（引張継目)、中央付近は閉じる（圧縮継目）傾向がある。このため引張継ぎ目は銅製止水板と表層マスチックの二重構造、圧縮継ぎ目は銅製止水板のみとした。

圧縮力が働くと予想される継ぎ目には、CFRD で実績の多い、瀝青剤を含浸させて防腐処理を施した厚み 12mm の軟質木材製のジョイントフィラーを配置した。100m 程度以下の高さの CFRD では鉛直継ぎ目にジョイントフィラーは不要との考え方もあるが、最近高 CFRD のダム中央部のフェイススラブでスポーリング（圧縮破壊）による損傷例が報告されており、ジョイントフィラーの使用が推奨される。



図－8　周辺ジョイント

4.　ポンレポンレダムの施工

工事は、2005 年の ICB（国際競争入札）を経て、日本の間組と地元業者である Brantas Abipraya 社の共同企業体が落札し、2006 年 1 月に着工した。2007 年 5 月に仮排水路トンネルが完成し、河川転流を行った。その後ダム盛土工事を本格化させ、2008 年 5 月よりフェイススラブの施工を開始し、2008 年 11 月には試験湛水を開始した。

1) 基礎掘削

盛土基礎の掘削は表土と強風化層の除去のみで、岩掘削はプリンス基礎だけである。ECRD がコア敷を全面掘削する

ことを考えると、CFRD の掘削量は非常に少ないと言える。

プリンス基礎は CM 級の岩まで掘削した（3 ～ 5m の岩掘削）。5 本の小規模な断層がプリンス基礎を横断していたが、弱層をコンクリートで置換える処置で対処した。右岸側アバット部では設計時の予想より風化層が厚く、かなり深い掘削となったためハイプリンスでは対応できずプリンス軸を最大 3m 外側に移す設計変更を余儀なくされた箇所があった。

2）盛土工事

盛土材料はほとんどすべてがロック材であるため、施工上の制約はあまりない。このため**写真－ 2** に示すように施工方法（手順）の自由度は高い。

写真－ 2　ダム盛土工事（右岸より撮影）

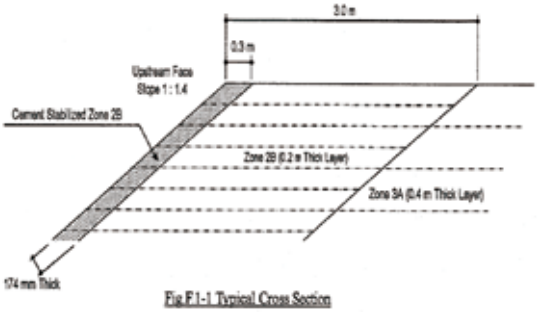
湛水後のフェイススラブや周辺継ぎ目の損傷を防ぐには施工後の変形の少ない盛土を作ることが求められる。特に上流側ロックゾーンの材料選定は重要で、厳しい品質管理を行い良質の材料で盛土した。また締固めは、施工後の変形量を最小化するため散水（体積比 15%）しながら 11 ton 振動ローラーで入念に締め固めた。**表－ 3** は各ゾーンの材料と施工方法である。

表－ 3　Materials and Compaction of Embankment Zones

Zone	Zone 2A	Zone 2B	Zone 3A	Zone 3B	Zone 3C	Zone 3D
Name	Filter	Filter	Transition	Rockfill U/S	Rockfill D/S	Riprap
Rock	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad or Vb	Ad or Vb
Degree of Weathering	F to SW	F to SW	F to SW	F to SW	F to Mw	F to SW
Thickness of layer (m)	0.2	0.4	0.4	1	1	-
Sprayed Water	-	-	15% of rock volume	15% of rock volume	-	-
No of passes of 11 ton vibratory roller	8 (Hand Tamper)	8	8	8	8	-
Max particle size (mm)	37.5	75	300	1000	1000	-

Note: Ad: Andesite, Vb: Volcanic Breccia, F: Fresh, SW: Slightly weathered, MW: Moderately weathered

フェイススラブを直接支える最上流のフィルター層は、法面上の締固めや法面保護剤の散布などが必要で CFRD の施工では最も苦労する仕事とされてきた。最近は盛土上流端に縁石を使う工法が普及し作業が簡素化されているが、この工法は湛水後フェイススラブにクラックを誘発するとも言われている。今回、コントラクターが上流法面の締固めと保護層形成を同時に短時間でできる「セメントスタビライズ工法」を提案し、現場試験で効果を確認した上で採用した（**図－ 9**）。フィルターゾーン（2B）の上流法面 30 cm 幅に 60kg/m^3 のセメントを混入した材料を 1 層 20 cm 厚で敷き、バックホーのバケットで上流側を抑えながらハンドタンパーで締固めた（**写真－ 3**）。この層はフェイススラブが施工されるまでの間、何度となく激しい降雨にさらされたが、良好な耐久性を示した。



図－ 9　セメントスタビライズ工法の概要

写真－ 3　ダム盛土工事（右岸より撮影）

3）基礎処理

コンソリデーショングラウト及びカーテングラウトは盛土工事とは独立してプリンス上から実施した。改良後の基礎のルジオン値をチェックホールで確認したが、すべて 3 以下であり良好な改良結果を示した。

4）フェイススラブ

フェイススラブの施工は、在来型車輪式スリップフォームを用い、最長 90m のスラブを連続打設した（**写真－ 4**）。施工時期が雨季と重なってしまい、降雨によるコンクリート打設の中断が心配されたが、打設領域とスリップフォームをすべてシートで覆う全天候型テント（**写真－ 5**）を採用することで中断することなく連続施工ができた。全体としてフェイススラブの施工は非常に順調に行われた。コンクリートスラブの打設速度は 2 ～ 3 m/hr で、コンクリートがスリップフォームから露出するまでの時間は 40 ～ 60 分であった。

フェイススラブ打設直後からスラブ全面に散水して養生を行ったにもかかわらず、コンクリート打設後 1 ヶ月くらいから多くの CFRD で見られるのと同様の多数の乾燥収縮クラックがスラブ表面に水平方向に発生した。

写真－4　スリップフォームによるコンクリート打設

写真－5　フェイススラブの施工（上流側から撮影）

ほとんどのクラックは補修の必要がない微細なクラックであったが、中にはコンクリートの水密性に影響すると言われている限界幅 0.2mm を超えるものが数箇所あり、約 2 ヶ月間のクラック幅の観測で変動が無いことを確認した後､湛水開始前にエポキシ系の補修剤を注入して修復した。

5.　試験湛水及び挙動観測

ダムの挙動観測としては、フェイススラブ、ダム天端、下流側法面の変位、周辺ジョイントの開き（3 箇所）、漏水量、両アバットメントの地下水位等である。

2008 年 11 月 20 日に試験湛水を開始した。現地は 5 月～ 7 月が雨季であるが、2009 年の雨季は雨がほとんど降らず、4 月以降水位上昇がほとんど止まっている状態である。2009 年 6 月末現在の貯水池水位は EL. 198.7m であり、満水位まであと約 17m である。

これまでに得られている観測結果は、フェイススラブの沈下量はほとんどゼロ、天端沈下も最大で僅か 3 cm である。周辺ジョイントの開きは最大 1 cm 程度で、漏水量も 2 ～ 3 L/sec と非常に少ない。また、両アバットメントの地下水位の変動は見られない。このように、現在のところ観測結果は、ポンレポンレダムが非常に高い品質で建設されたことを示している。

6.　CFRD ナショナルセミナー

2009 年 4 月 13 ～ 15 日に、ポンレポンレダムの完成に合わせて南スラウェシ州マカッサル市において、インドネシアのダム関係者を一同に集めて CFRD に関するナショナルセミナーが開催された。ポンレポンレダムの見学、設計・施工に関する講演などが行われ、熱心な議論が展開された。また、中国からも CFRD 専門家を招き、中国における最近の CFRD の開発に関する講演も行われた。CFRD 技術の普及、最新情報の共有という意味で非常に意義深いセミナーであった。

写真－6　CFRD ナショナルセミナーの様子

7.　おわりに

ポンレポンレダムは、現在試験湛水中であるが、これまでのところ非常に良好な観測結果が得られている。今後も注意深く観測を継続してゆく。

当社コンサルタント海外事業本部では、1990 年代にモハレダム（レソト、設計）、ダウリガンガダム（インド、設計）、天生橋 No.1 ダム（中国、施工監理）などの経験を通じ、CFRD 技術の蓄積を行ってきた。今回、ポンレポンレダムにおいて設計から施工監理までの一貫したサービスの提供、新たな施工技術の提案などを通じて CFRD 技術の最前線に立つことが出来た。今後、これらの経験を背景にさらなる CFRD プロジェクトの発掘、設計・施工技術の発展に貢献して行く所存である。

参考文献

1)　ICOLD: Bulletin 70, Rockfill Dams with Concrete Facing, 1989.

2)　Hydou China Technical Division: Behavior of Zipingpu CFRD under Magnitude 8 Earthquake, Charrette on Key Technology for High CFRD Construction, Hong Kong, 2008.

3)　S.P. Sen et al: Planning, Design and Construction Aspects of Dhauliganga CFRD (India) Founded on Deep Alluvium, Symposium on 20 Years Chinese CFRD Construction, 2005.

4)　Nippon Koei: Design Review Report fpr Ponre Ponre Dam and Associated Works Vol.1. Main Report, April 2004.

5)　ANCOLD : Guidelines on CFRD, 1991.

6)　Makdisi, F.I. and Seed , H.B. : Simplified Procedure for Estimating Dam and Embankment Earthquake-Induced Deformations, Journal of Geotechnical Eng., ASCE 1978.

7)　Gilles Bureau, et al : Seismic Analysis of Concrete Face Rockfill Dams, Symposium on CFRD, SACE, 1985.

8)　Marulanda, A, Pinto, N.L. de S.: Recent Experience on Design, Construction and Performance of CFRD Dams, J Barry Cooke Volume, CFRD, ICOLD 20th Congress, Beijins 2000.