ベトナム国ソンラ水力発電所設計レビュー業務

SON LA HYDROPOWER PROJECT TECHNICAL DESIGN REVIEW IN THE SOCIALIST REPUBLIC OF VIETNAM

河戸則和*・荒木一郎*・小玉　勉*
Norikazu KAWATO, Ichiro ARAKI and Tsutomu KODAMA

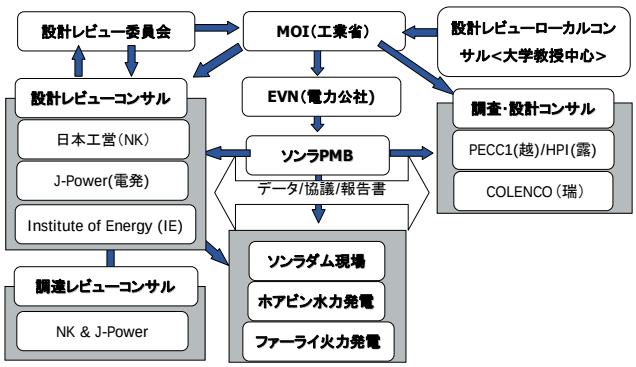
Construction works for the Son La Hydropower Project commenced with river diversion in 2004. The Project will have a 2,400 MW capacity making it the largest hydropower project in Vietnam. The Project is located about 250 km northwest of the Capital Hanoi, about 190 km upstream of the existing Hoa Binh Hydropower Station. Commercial operation is scheduled to commence in late 2010.

A joint venture composed of Nippon Koei, J-Power, and the Institute of Energy (Vietnam) took part in the Project as the Review Consultants who have reviewed the basic and detailed designs made by the Design Consultants consisting of PECC1 (Vietnam), Institute HydroProject (Russia) and Colenco (Switzerland).

Key Words : *RCC dam and flyash, Diversion, Earthquake faults, Spillway, Reservoir optimized operation*

1. 本業務の概要

本業務は、ベトナム国工業省（MOI: Ministry of Industry）傘下のベトナム電力公社（EVN: Electricity of Vietnam）が実施する国家プロジェクト、ソンラ水力発電計画の内、Design Consultants（ベトナム国 PECC1、ロシア国 Institute HydroProject、スイス国 Colenco の J/V）が実施した設計に対し、日本工営(株)を幹事とする電源開発(株)とベトナム国 Institute of Energy（IE）との J/V による Review Consultants が、MOI 調達の設計レビューを実施するものである。**図－1** に設計段階のソンラ水力発電事業の組織図を示す。



図－1　設計段階での組織図（2004-2006）

設計レビュー業務は、2005 年 3 月～5 月（基本設計）と 2006 年 3 月～6 月（詳細設計）に分け実施された。なお、これらコンサルタント調達費用はベトナム自国資金により賄われている。

本プロジェクトは、急速な経済成長を続け、今後さらに水力電源開発が進められるベトナム国において、2010 年 1 号機商業運転開始、総事業費 US$25.2 億の国家プロジェクトと位置づけられている。本稿では、本プロジェクトの技術的特長を紹介する。

2. プロジェクトの概要

本プロジェクトは、ベトナム国最大となる水力発電事業（次頁の諸元参照）であり、首都ハノイから約 250km 北西、また 1994 年に運転開始したホアビン水力発電所（紅河最大の支流ソンダ川）より約 190km 上流に位置する。事業目的は、①工業団地などの拡張で急増する電力需要に対する電力供給、②紅河デルタ地帯の洪水対策（下流にある既設ホアビン貯水池を含む総調節容量は 70 億 m^3）および給水、③開発が遅れている北西部地域の社会経済的発展である。

本プロジェクトは、下流のホアビン水力発電所と共にソンダ川流域の水資源有効利用を目的とし、1960 年代から調査が行われてきた。その後、1987 年の予備調査において事業の必要性が確認され、1990 年および 1992 年に Pre-F/S ステージ 1 およびステージ 2 がそれぞれ実施された。さら

*　コンサルタント海外事業本部　都市社会事業部　事業開発部

に、1998 年より実施された F/S 調査が 2004 年 1 月に承認され、これを基に主要構造物に関する基本および詳細設計がステージ 1 とステージ 2 に分けて実施されたものである。なお、本プロジェクトでは、常時満水位が EL215m に決定されたことにより、約 10 万人の住民移転が予定されている。

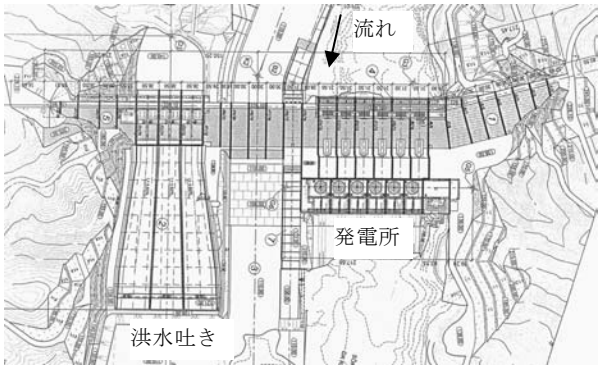
基本諸元および工程計画は下記の通り（**図－2、図－3** 参照）。

基本諸元

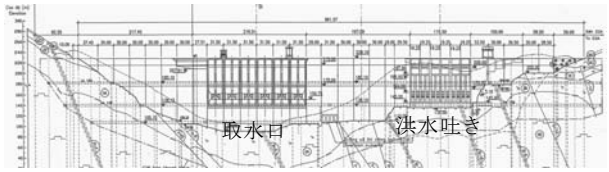
- ダム形式　：RCC 重力式ダム
- ダム高/堤長　：138.1m/961.6m
- コンクリート堤体積　：5.2 百万 m^3
- 集水面積　：43,760km^2
- PMF 洪水量　：60,000m^3/s
- 総/有効貯水容量　：93 億 m^3/65 億 m^3
- 設備容量　：2,400MW（400MW×6 基）
- 年間供給電力量　：9,429GWh
- 最大使用水量　：3,462m^3/s
- 最大有効落差　：101.6m

工程計画

- 2004 年 06 月コンクリート仮排水路着工
- 2005 年 12 月本工事開始（右岸転流完了）
- 2007 年 06 月 RCC 打設開始予定
- 2010 年 10 月第 1 号機（400MW）運転開始予定
- 2012 年 11 月全 6 基運転開始予定（全工事完了）



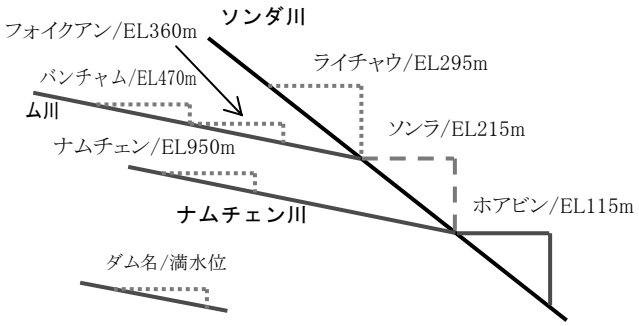
図－2　ダム平面図



図－3　ダム縦断図（上流俯瞰）

3. 貯水池最適運用

図－4 にソンダ川および支川の水力発電計画を示す。同図に示される通り、ソンラ水力発電所下流には既設のホアビン発電所が運転されており、上流にはライチャウ、フォイクアン、バンチャの各発電所が、2010～2013 年頃に運転開始する予定である。



図－4　ソンダ川水力発電計画

上記計画の下、Design Consultants により提案されたシミュレーションによるソンラ、ホアビン貯水池運用計画をレビューするため、最適化モデルを用いて検討を行った。以下に検討内容および結果を述べる。

(1) 解析の基本条件

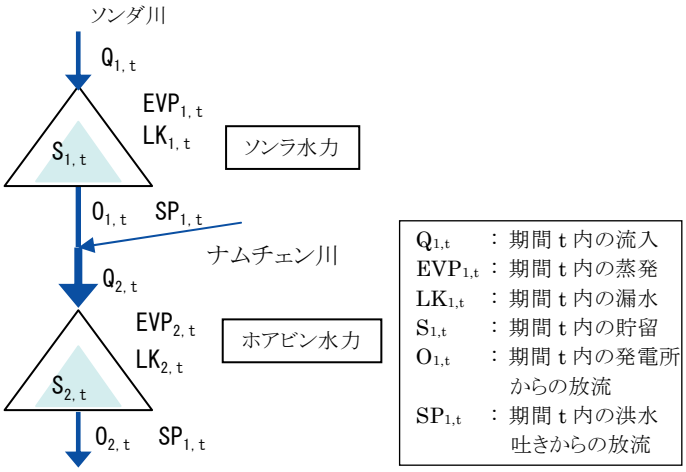
表－1 に解析の基本条件を示す。

表－1　解析の基本条件

項目	基本条件
ソンラ発電所上流の 3 発電所計画	ライチャウ、フォイクアン、バンチャ水力発電所によって調整された流量を、最適化モデルに組み込み、ソンラおよびホアビン発電所の貯水池運用を検討する。
ソンラ貯水池の常時満水位	EL215.0m とする。
洪水調整	ソンラおよびホアビン貯水池の洪水調整総容量は 70 億 m^3 とする。
下流への水供給	下流域への都市、工業および灌漑用水の供給は考慮しない。

(2) 解析対象の水資源系統

水資源系統は、**図－5** に示すソンラ水力発電所と既存のホアビン水力発電所からなる。



図－5　貯水池運用検討の水資源系統概念

(3) 解析モデルの作成

最適化モデルの目的関数は以下の通り定義され、経済性を高めるため保証出力および保証発生電力量を最大とすることを目的として解析することとした。

$$Maximize \sum_{1902}^{2003} \sum_{1}^{12} \{(GE^{S}_{y,t} - FirmGE^{s}) + ((GE^{S}_{y,t} - FirmGE^{s})\} * 0.0001 + FirmGE^{S} + FirmGE^{H}$$

ここに、

$GE^{S}_{y,t}$ ：ソンラ水力発生電力量（y 年 t 月）
$GE^{H}_{y,t}$ ：ホアビン水力発生電力量（y 年 t 月）
Firm $GE^{S}_{y,t}$ ：ソンラ水力保証発生電力量（y 年 t 月）
Firm $GE^{H}_{y,t}$ ：ホアビン水力保証発生電力（y 年 t 月）

(4) 解析結果およびまとめ

各検討ケースにおいて、Design Consultants によるシミュレーション結果と、本最適化モデルによる解析結果を比較する。

検討ケース 1

検討条件：1902 年 3 月から 2003 年 4 月まで 102 年間の流量データを使用した。

表－2 にシミュレーション結果および最適化モデルによる解析結果を纏める。

表－2　貯水池運用比較検討（ケース 1）

ケース	シミュレーション Design Consultants			最適化モデル Review Consultants		
発電所	ソンラ	ホアビン	合計	ソンラ	ホアビン	合計
貯水池水位(m)						
常時満水位 (FSL)	215	115	-	215	115	-
最低運転水位 (MOL)	175	80	-	175	84	-
洪水期制限水位	194	99	-	202	94	-
貯水容量 (10^6m)						
総貯水容量	9,260	9,450	18,710	9,260	9,450	18,710
有効貯水容量	6,504	5,650	12,154	6,504	5,190	11,694
洪水調節量	4,000	3,000	7,000	2,749	4,251	7,000
発電						
設備容量(MW)	2,400	1,920	4,320	2,400	1,920	4,320
保証出力(MW)	593	739	1,332	548	790	1,338
年間発生電力量（GWh)	9,106	9,827	18,727	9,187	10,314	19,500

表－2 の MOL および洪水調節容量において、シミュレーションと最適化モデルの解析結果に大きな差がある。しかし、年間発生電力量の差は 4%と小さく、また保証出力の差は 0.2%と微細であり、保証出力と保証発生電力量の最大化を目的とする点から、シミュレーションの運転ルールと洪水調節容量を採用可能と考えた。以上から、シミュレーションによる貯水池運用（MOL、洪水調節容量、運転ルール）は適切であることが確認された。

検討ケース 2

検討条件：50 年後の堆砂による発電量減少を考慮した。

Design Consultants の貯水池堆砂検討結果によると、50 年後、ソンラ貯水池への堆砂は 13.8 億 m^3 に達すると推定されている。その結果、ソンラ貯水池の容量は 92.6 億 m^3 から 78.8 億 m^3 に減少すると推定される。この 50 年間の貯水池堆砂による発電量への影響が、シミュレーションにより検討された。

そこで、最適化モデルの解析により、将来の堆砂がどの程度発電に影響を及ぼすかを評価した。**表－3** にシミュレーション結果および本最適化結果を纏める。

表－3　貯水池運用比較（ケース 2）

項目	シミュレーション Design Consultants		最適化計算 Review Consultants	
	初年度	50 年後	初年度	50 年後
保証出力 (MW)				
- ソンラ水力	593	572	548	519
- ホアビン水力	739	727	790	749
- 合計	1,332	1,299	1,338	1,268
保証出力減少分(MW)		33 (2.5%)		70(5.2%)
年発生電力量 (GWh)				
- ソンラ水力	9,106	8,976	9,187	9,263
- ホアビン水力	9,827	9,751	10,314	10,203
- 合計	18,933	18,727	19,500	19,466
電力量減少分		206(1.1%)		34(0.2%)

保証出力はソンラ水力が 519MW に、ホアビン水力が 749MW にそれぞれ減少する。50 年間の堆砂により合計で 70MW（5.2%）減少する。これに対し、年間発生電力量はソンラ水力が 9,263GWh、ホアビン水力が 10,203GWh 計 19,466GWh で、34GWh（0.2%）の減少に留まる。

以上から、貯水池堆砂によって、年間発生電力量への影響は小さく、保証出力への影響が大きいことが確認された。

尚、シミュレーションによる検討でも、保証出力の減少は 33MW（2.5%）、電力量の減少は 206GWh（1.1%）と、同様の傾向が確認できた。

また、Design Consultants のシミュレーションにおいて、ライチャウ貯水池への堆砂は考慮されたが、ホアビン貯水池への堆砂は考慮されていない。従って、ホアビン貯水池への堆砂を考慮した検討を推奨した。

4. ダムサイトの地質および地震被災の検討

(1) 地質および断層

ダムサイト周辺の地質は、基本的に三畳紀の比較的均質な玄武岩から成る。また、ダム右岸部付近には陸源性の砂岩が分布する。また、洪水吐き下流右岸には部分的であるが、石灰岩が分布する。

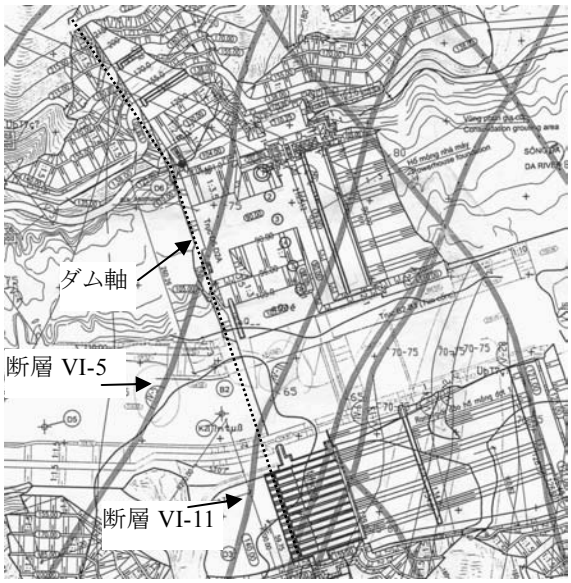
ダム直下には、地震を誘発する長さが 5km 以上の Grade I または II に分類される断層は存在しないが、**表－4** に示す通りダム近傍には存在するため、(2)に述べる詳細な検討を行った。

表－4　主要断層

No.	断層名	ｸﾞﾚｰﾄﾞ	ﾀﾞﾑｻｲﾄへの最短距離	走向	観測史上最大ﾏｸﾞﾆﾁｭｰﾄﾞ	位置
1	Da River 断層	II	8 km	NW-SE	4.7	Da 川沿いの貯水池上流からダムサイト南方
2	Son La 断層	I	31 km	NW-SE	6.7 1983 年	ダムサイト南東
3	Muong La – Bac Yen 断層	II	5 km	NW-SE	4.7	ダムサイト北東

一方、長さが 1km 以下の Grade IV 断層に属する IV-5 および IV-11 はダム直下に存在するが、入手可能な地震記録によるとこれらは現在活動しておらず、また将来的にも地震を引き起こすものではない。しかし、可能性は極めて低いながらも、上記の 3 断層が引き起こす地震によりこれらの断層が動くことは否定できない（**図－6** 参照）。

従って、これら二つの断層の活動痕跡を検証するため、トレンチ掘削による調査を推奨した。調査の結果、痕跡が確認されなかった場合でも、ピエゾメーターホールや排水孔を利用して、地下水の将来にわたるモニタリング実施を推奨している。地下水モニタリング項目として、揚圧力、流量、化学的水質、水温、pH、電気伝導度などの項目が挙げられる。



図－6　ダムサイト断層位置図

(2) 地震被災の検討

本ダムサイト近傍には地震断層が多数存在するため、地震時検討が重要となる。また、地震解析により求められるスペクトルは、ダム堤体の動的地震解析に用いられる。

以下に地震解析レビューの要点を述べる。

最大加速度（PGA）

ソンラおよび近隣地域の地震記録を元に、最大加速度（PGA）の確率的検討を行った。ソンラダムサイトの加速度は、各々の地震に対し、Cornell の式により推定した。その結果、各確率年の最大加速度を**表－5** に示す。

表－5　ソンラダムサイトにおける PGA

確率年（years）	10,000	1,000	500	150
最大加速度（cm/s²）	227	167	149	118

本結果を、Design Consultants が推定した最大想定地震（MCE）および運転基準地震（OBE）に対する最大加速度と比較すると以下の通りである。

表－6　PGA の比較

最大加速度 PGA	Design Consultants (cm/s²)	Review Consultants (cm/s²)
MCE（確率年 10,000 年）	234	227
OBE（確率年 475 年または 145 年）	107.7 (475) 70 (145)	149 (500) 118 (150)

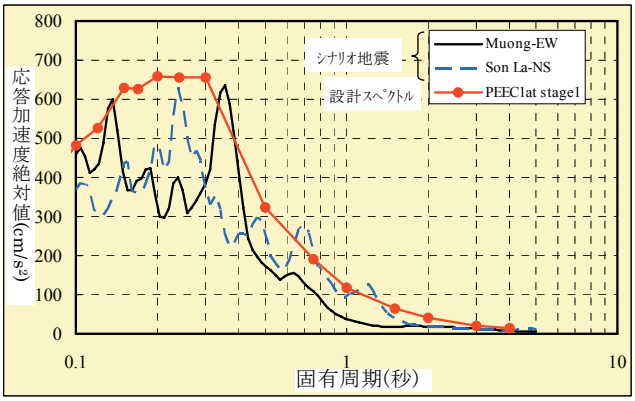
MCE の加速度は両値とも近く、Design Consultants の値は妥当と言える。これに対し、OBE の加速度は、大きな差異が確認されるため、設計上安全側となる Review Consultants の値を用いることを推奨した。

シナリオ地震

統計的グリーン関数法により、**表－6** の各断層における MCE、OBE それぞれに対するシナリオ地震を作成した。シナリオ地震は、以下に述べる設計加速度応答スペクトルの妥当性検証に用いられる。

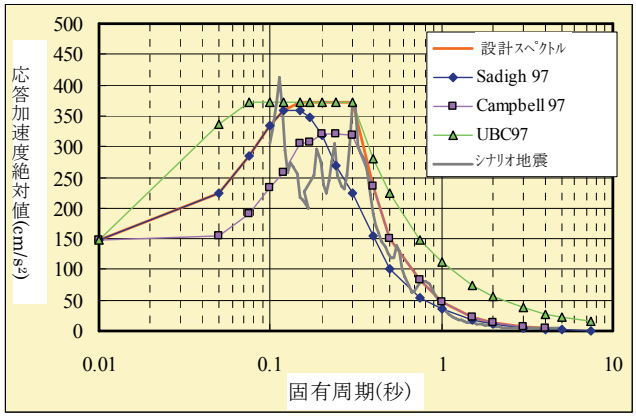
水平設計加速度応答スペクトル

Design Consultants は Campbell の式を用い、MCE（PGA=234 cm/s²）における水平設計加速度応答スペクトルを作成した。設計スペクトルは**図－7** に示す通り、Muong La-Bac Yen 断層および Son La 断層のシナリオ地震を包括しており、妥当と言える。

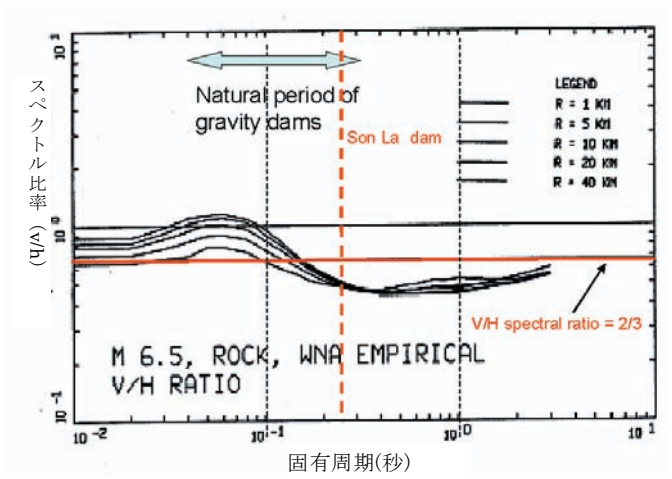


図－7　水平加速度応答スペクトル（MCE）

一方、**図－8** に示す通り、Design Consultants 作成の OBE（PGA=149 cm/s²）における水平設計加速度応答スペクトルは、シナリオ地震および Sadigh 97、Campbell 97、UBC 97 の各スペクトルをほぼ包括しており、妥当と言える。



図－8　水平加速度応答スペクトル（OBE）



図－9　Silva（1997）による加速度スペクトル鉛直-水平比率

鉛直設計加速度応答スペクトル

Design Consultants は、鉛直加速度応答スペクトル（V）に、水平加速度応答スペクトル（H）の一律 2/3 を採用した。一方、近年の研究によると、V/H は震源からサイトまでの距離、地震マグニチュード、振動周期などに依存することが報告されている。そこで**図－9** に示す通り、Silva（1997）によるスペクトル率 V/H と、V/H=2/3 を比較した結果、0.2 秒以下の短周期では V/H>2/3 となっているものの、0.2－0.3 秒と推定されるソンラダムの固有周期では、V/H<2/3 の範囲にあり、V/H=2/3 は設計上安全側と判断した。

5. コンクリート材料

ソンラ水力計画で検討された主なコンクリート材料について、以下に概要を述べる。

(1) セメント

ベトナム北部に位置し、工事現場に供給可能なセメント工場として 4 箇所の候補が上げられた。**表－7** に示す通り、試験練り結果から、But Son 工場のものが強度的に優れている。また、Mai Son 工場は現在建設中であるが、工事現場まで 40km と近く、運搬上有利である。しかし、新設工場のセメント品質は不安定であり、高水圧部の打設には課題が多い。

表－7 の通り、全てのセメントは ASTM C-150 を満足するが、セメント工場間だけでなく同じ工場であっても生産時期によって、強度に大きな変動が見られる。例えば、But Son 工場製品は現場試験において他の室内試験（ステージ 1、2）より 27%以上も強度が増した。凝結時間の変動も大きい。

セメントの品質は、供給水量、コンクリートの凝結時間、強度などに影響するため、均質化を目的とした品質管理には十分注意を払う必要がある。

表－7　セメント均質性（PC40）

工場			But Son			Hoang Mai	Bim Son	Mai Son
項目	単位	ASTM C 150 Type I	室内試験 ステージ 1	室内試験 ステージ 2	現場試験	室内試験 ステージ 1	CVC 試験練り	CVC 試験練り
1. 強度								
3 日	N/mm²	≥ 12	22.5	22.5	37.4	22.1	23.5	21.5
28 日	N/mm²	(≥ 28)	41.2	41.2	52.6	42.4	44.1	40.0
2. 凝結時間								
始発	h-min	≥ 0-45	3-42	3-30	2-25	2-40	3-10	2-30
終結	h-min	≤ 6-15	4-50	4-30	3-30	5-50	4-05	3-20
3. 粉末度								
0.08mmR	%	—			2.8	7.1	8.3	10.5
比表面積	cm²/g	≥ 2800	3555	4210	3399	3802	3947	3875

(2) 混和材

混和材として、Pha Lai 火力発電所のフライアッシュの他に、4 種類の混和材（ソンラ粉末玄武岩、石灰塵、Mon Chanh 天然ポゾラン、Nui Don 天然ポゾラン）を試験練りにより品質検討した。ワーカビリティー、強度、耐久性の全てにおいて、フライアッシュが優っていた。フライアッシュ試験結果の詳細は(4)に後述する。

(3) 骨材

Ban Penh 原石山（ダム軸 2km 上流左岸側）の骨材を、現場試験にて検討した。他の骨材を用いた試験に比べ、高い減水効果が確認され、この骨材の使用が最適である。

(4) フライアッシュ

供給源

フライアッシュが供給可能な国内石炭火力発電所として、Pha Lai 1, 2 発電所（出力合計 1,040MW、現場まで

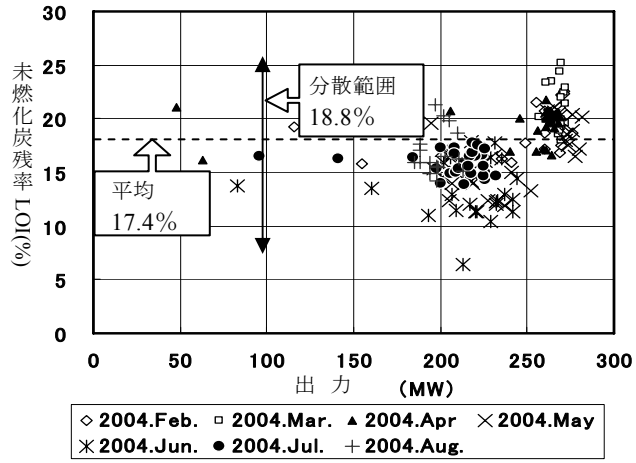
340km）および Ninh Binh 発電所（出力 100MW、現場まで 420km）を検討した。品質、供給量、ダム現場までの距離共に Pha Lai 発電所が優っているため、この材料を用いて下記の通り品質検討を行った。

なお、国内での供給不足に備えて、輸入灰の使用も検討したが、課題が多く現実的でない。

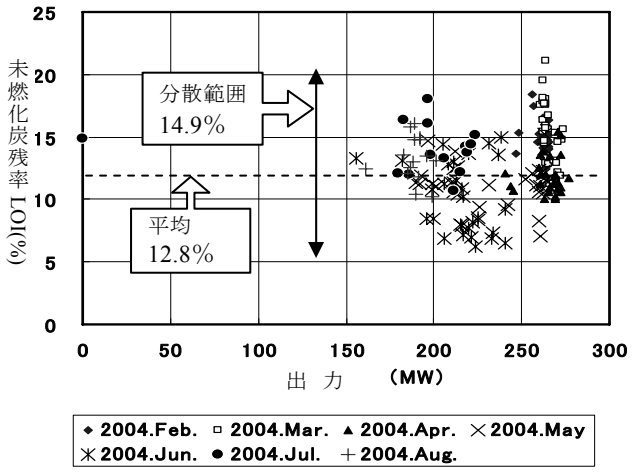
フライアッシュの品質検討結果

フライアッシュの混合は、RCC 品質の要となるもので、廉価で入手できれば、コンクリートの低発熱化に寄与するだけでなく、ワーカビリティーの増加など施工性にも貢献する。しかし、ベトナム国内の火力発電所で使用されている国内炭は、多くが無煙炭であり、発熱量が高く良質であるものの、排出されるフライアッシュに残存炭素量が高くなるという欠点がある。また、この残量比率が高いだけでなく、数値にばらつきがあることから、錬り上がりコンクリートの練り混ぜ水を中心とした品質管理に課題を残している。

Pha Lai 2 火力発電所の 1 号機および 2 号機のフライアッシュ LOI（Los of Ignittion：未燃化炭残率） 分布を**図－10**、**図－11** に示す。それぞれ約 19%と 15%の広範囲に分散しており、平均値も約 17%、13%と高いことがわかる。



図－10　Pha Lai 2 LOI 分散（1 号機 2004 年 2 月-8 月）



図－11　Pha Lai 2 LOI 分散（2 号機 2004 年 2 月-8 月）

低品質フライアッシュがダムコンクリートに及ぼす影響を調べるために行われた日本国内でのダムの配合試験結果を**表－8** に示した。同表から、LOI の 5.7 ポイント差により、4kg/m³ の水量差がもたらされていることが分かる。これに従えば、10 ポイントの LOI 差異は 7kg/m³ の水量差をもたらすと推測できる。一方、一般的に 10kg/m³ の水量差は、5cm のスランプ差をもたらす。従って、10 ポイントの LOI 差異により、水管理を怠れば 3.5cm のスランプ差を発生させることとなる。日本国内で使用する RCD ダムのフライアッシュ配合は、最大でも 60kg/m³ であるため、160kg/m³ 混合というハイペーストが主流の RCC ダムでは、この影響はさらに顕著な影響となり、コンクリート品質管理の根本を揺るがす問題となる可能性が高い。

表－8　日本国内 RCD ダムにおける LOI による品質特性

LOI	フライアッシュ置換率 (F/C+F)	水セメント比 (W/C+F)	細骨材率	単位体積重量(kg/m³) C	F	W
2.7 %	30 %	83 %	26 %	84	36	99
	40 %	82 %	26 %	72	48	98
	50 %	79 %	25 %	60	60	95
8.4 %	30 %	86 %	26 %	84	36	103
	40 %	85 %	26 %	72	48	102
	50 %	83 %	25 %	60	60	99

Note :		
	max aggregate size	150mm
	Total binder content(C+F)	120kg/m³
	Slump	4±1cm (wet screened with 40mm sieve)
	Air content	3±1%
	Admixture	Water reducing agent, Air entraining agent

Pha Lai 2 火力発電所での LOI 分布は、現場のエンジニアが制御できる範囲を超えていることを示している。従って、広く分散している LOI に対して、何らかの調整対策をとる必要がある。ダムコンクリートは通常、以下の範囲となるように配合設計される。

・有スランプコンクリート　：スランプ/2±1cm
・RCC コンクリート　　：VeBe 値/20±10 秒

スランプの範囲を±1cm に制御するためには、LOI を±2 ポイントに抑えることが望ましい。また、フライアッシュの品質は ASTM C618 に従うと、LOI は 6%以下に抑える必要があるとしている。すなわち、この値以下であれば、±2 ポイントの制御は可能である。

一般に、燃焼石炭の品質改善、燃焼炉の改善など火力発電所側でもフライアッシュの改質は可能であるが、ベトナムの場合、国内炭を優先する政策が取られている以上、排出されたフライアッシュを改質する以外方法はない。フライアッシュ改質方法には何通りか検討されているが、実用化レベルにあるのは**表－9** に示す、サイクロン法、静電法、ペースト法の 3 通りがある。総合的にはペースト法が推奨

されるが、毎月 2 万トン以上ものフライアッシュを改質した事例はどの手法にもなく、リスクを伴うプラント建設となる。

工事を管理する EVN は、国際入札でプラントの導入を図るとしているが、応札する業者がいない状況であり、最大の問題に直面している。ベトナムでは、コンクリートダム建設が急増しており、ソンラダムに限らずフライアッシュの確保が問題となっている現状である。従って、今後、ベトナム側の要求に応じて、現地状況に対応した供給体制を検討していきたい。

表－9　フライアッシュ改質方法

	サイクロン法	静電法	再燃法	表面改質法	フライアッシュペースト法
乾湿	乾燥			湿潤(後に乾燥可能)	
原理	風力により分離する	静電気により不燃炭を抽出する	炭素を再燃焼させる	薬剤を用い、ペースト状のフライアッシュから炭素を分離	ペースト状のフライアッシュから炭素を分離
LOI削減効果	まずまず 主目的は細粒度の調整	大変良い			良い 主目的は容器中のフライアッシュの安定化
設備費用	高価	高価	炉またはヒーターを借りることで節約できる	高価	程々
改質場所	発電プラント	発電プラント−建設現場間			建設現場
Pha Laiの石炭灰源	フライアッシュサイロ(乾燥)			フライアッシュ池(湿潤)	
実績	多数のプラントで実施済み	アメリカで若干の実績有り	商業化には至っていない		奥只見ダムのみ
総合評価	それ程効果的でない	プロジェクトに間に合わず	大容量処理には適さず	プロジェクトに間に合わず	実施可能

RCC 配合

暫定的に決められている配合は**表－10** に示す通りである。但し、これはセメント量 50、60、70kg/m^3 の 32 供試体での試験練り結果であり、現在も配合試験は続けられている。

表－10　RCC 配合（暫定）

番号	材料	配合量
1	セメント量	60 kg/m^3 (But Son 工場 PC40)
2	フライアッシュ	160 kg/m^3
3	粗骨材	1,410 kg/m^3 (50-5mm)
4	細骨材	830 kg/m^3
5	水	145 kg/m^3
6	添加剤	2.2 l/m^3

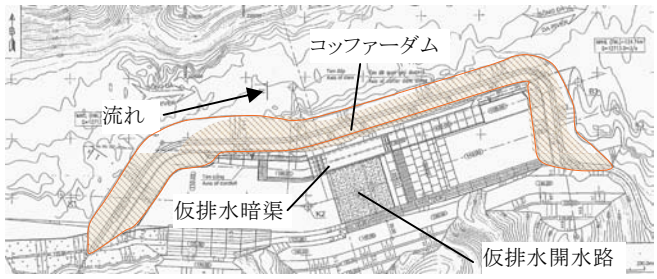
6. コンクリート施工

(1) コンクリート施工の流れ

3 期にわたる転流工を伴うダム、洪水吐、発電所のコンクリート施工手順を示すと以下の通りである。

1) 仮排水路工事（2004 年 6 月着工 2005 年 10 月完成）

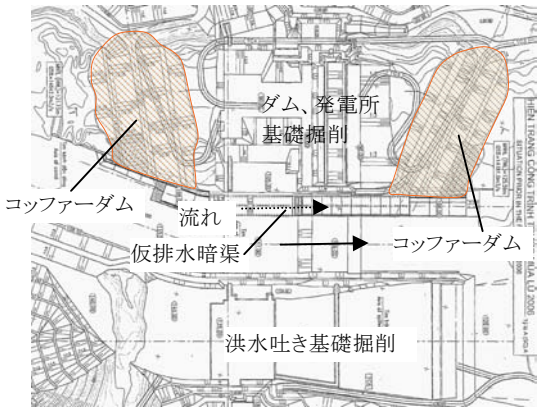
右岸を中央遮水壁式のコッファーダムで囲み、中央寄りに鉄筋コンクリート暗渠(高さ 13m、幅 12m、全長約 300m、2 連）の工事を実施した。コンクリートは、10 数基のクローラークレーンで打設した。また、右岸部は仮排水開水路として掘削した（**図－12** 参照）。



図－12　施工平面図(1)

2) 本工事（2005 年 12 月転流開始）

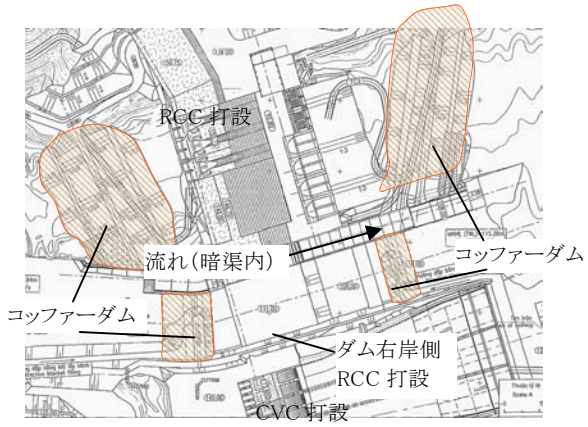
コンクリート暗渠に導水後、仮排水開水路の上流・下流側を締切り、左岸に設ける発電所の基礎掘削を開始した。その後発電所打設および左岸部分の堤体打設を実施する（**図－13** 参照）。



図－13　施工平面図(2)

3) 再転流（乾期中の 2008 年 12 月予定）

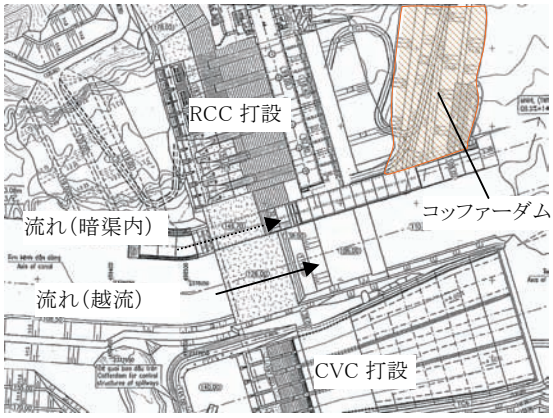
左岸の堤体が EL147m になった時点で、流れをコンクリート暗渠に集中させ、ダム右岸の打設を行う。雨期には洪水がコンクリート堤体部分を越流する（**図－14** 参照）。



図－14　施工平面図(3)

4) 上流コッファーダム除去（雨期前の 2009 年 4 月予定）

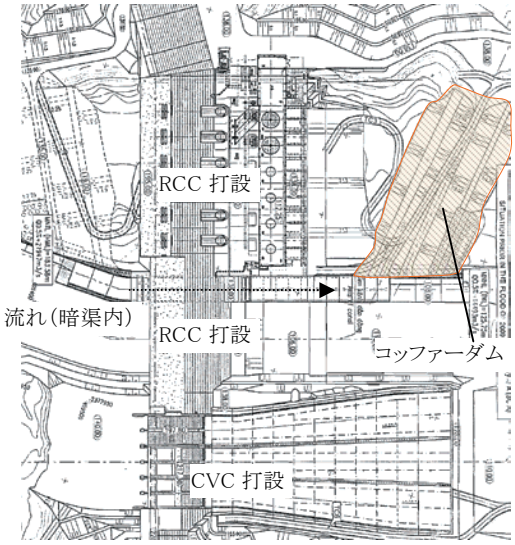
湛水開始に備え、上流側のコッファーダムを全て撤去する（**図－15** 参照）。



図－15　施工平面図(4)

5) 水路部 RCC 打設（乾期中の 2010 年 1 月予定）

湛水が開始され、越流の心配がなくなった後、EL185m より上部のコンクリート打設を行う（図－16 参照）。



図－16　施工平面図(5)

6) RCC/CVC 打設終了（2010 年 9 月予定）

EL228.1m の堤頂部までの打設が全て完了する。この頃、第 1 号発電機の運転が開始される。

(2) 堤体上下流面遮水部の細部技術：GEVR（GROUT ENRICHED VIBRATABLE RCC）の採用

従来、RCC ダムや RCD ダムでは、上流および下流面の型枠接触面と転圧コンクリートとの間に、透水性の低い材料として有スランプコンクリート（CVC）を打設する手法が用いられてきた。しかし、品質の全く異なる 2 種のコンクリートを同時に打設する必要があり、2 重の設備投資が必要性となることや打設効率が低下するという面で、種々の問題点が指摘されていた。

この問題を解決するため、上流部に遮水効果の高い皮膜材を貼り付ける方法や、配筋によりクラック発生を防ぐことが試みられてきた。これらの方法によっても施工の効率化改善には寄与し難く、更なる手法の開発が望まれていた。ここ数年で中国のダム建設で研究が進み、最近では広く採用されることとなった GEVR という手法を本計画でも採用することとした。以下に GEVR 施工の概要を示す。

① 型枠や岩盤、パイプ構造物との接触面から 30cm 手前までは、通常に RCC を敷き均し打設する。

② 2 接触面近くも RCC を人力の補助を得て、敷き均し打設する。

③ 各 RCC 打設面にホースまたは柄杓でグラウト材（モルタル）を散布する。実際に必要なモルタル散布量は現場試験打設で決定される。

④ 一般にモルタル散布割合は、30cm 厚のレイヤー毎に、基礎岩盤面で 5 lit/m、鉛直型枠面で 8 lit/m 程度である。

⑤ 30 分以内に散布し、50mm のハンドバイブレーターで締め固める。モルタルは、重量比で水セメント比 0.5～0.75 である。セメント量は、約 50 kg/m^3 程度である。

⑥ 小型振動ローラーにて、RCC 部と同様に締め固める。

7. 洪水吐き

ソンラダム洪水吐きはダム堤体右岸側に設置され、越流型洪水吐き（ラジアルゲート 6 門、高さ 11.2m ×幅 15.0m、設計流量 17,380m^3/s）およびボトムアウトレット（ラジアルゲート 12 門、高さ 9.6m×幅 6.0m、設計流量 24,530m^3/s）からなる。越流水は勾配 4.6%、長さ 285m の開水路シュートを流下し、スキージャンプ式で放流される。

大陸河川で洪水量が大きい上、左岸側は発電所が設置されるため、限られたスペースに多段構造洪水吐きで放流することとなる。設計流量は上下合わせて 41,910m^3/s である（図－17 参照）。

洪水吐き詳細形状は、水理模型実験（縮尺 1/48 および 1/100）を通して検証された。以下に、設計レビューにより改善が提案された主な点を記す。

(1) 洪水吐き平面形状

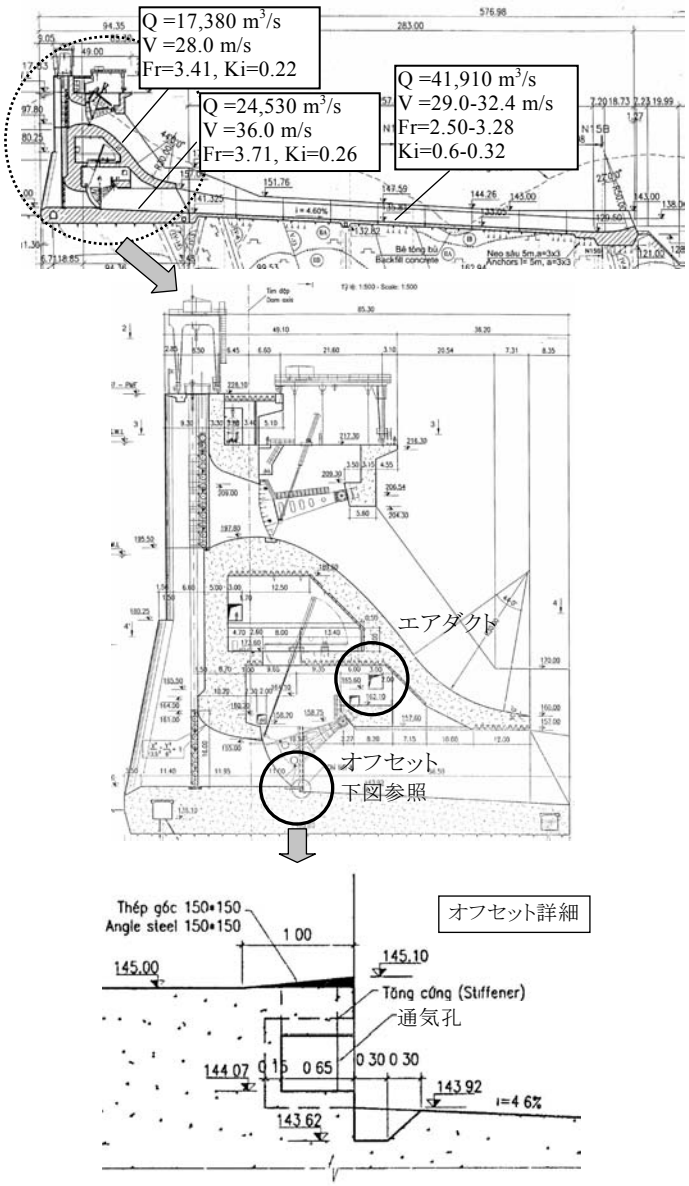
流出時の単位幅流量を下げることで、下流洗掘抑制に配慮し、詳細設計では図－2 に示す裾広がりの平面形状が設計された（呑み口部幅 111.5m、フリップバケット部幅 171.66m）。

洪水流および洪水吐き下流洗掘の状況を確認するため、現地形状を再現した水理模型実験（縮尺 1/100）を以下 2 通りのケースで実施した（表－11）。実験結果を、図－18、19 に示す。

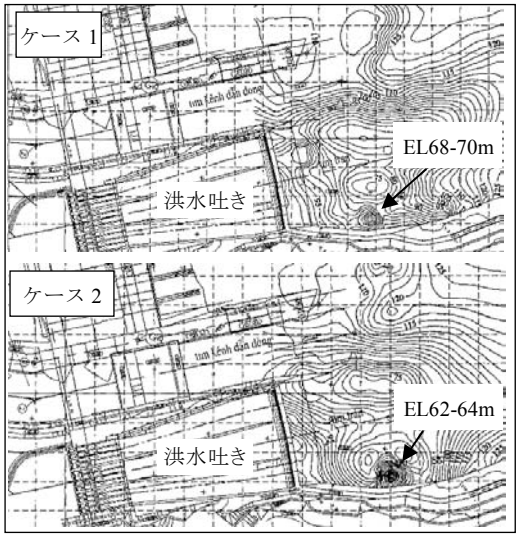
表－11　実験ケース概要

実験ケース	1	2
流量 (m^3/s)	38,250	38,250
河床材料 d50-d60 (mm)*	150-200	150-200
導流壁	有	無

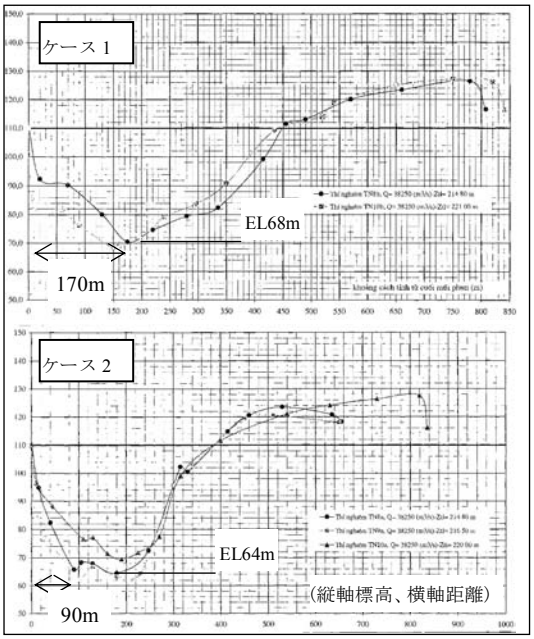
* 原型換算



図－17　洪水吐き断面図



図－18　設計洪水放流後の地形コンター



図－19　縦断洗掘形状

洗掘形状に着目すると、概して右岸側が深く洗掘される様子が確認できる。また、導流壁を設置したケースでは、洗掘地点がより遠くなり、洗掘形状も整っている。導流壁により流れが整い、流速が加速されたためと考えられる。

以上の結果をもとに、導流壁を持つ均一幅の洪水吐きを提案した。均一幅にすることで最大洗掘点を右岸斜面から離すことができる。また、シュート断面が均一となるため、拡幅形状に比べ流れが安定することが期待される。

尚、均一幅案についても水理模型実験を実施し、形状と導流壁の有効性を確認している。

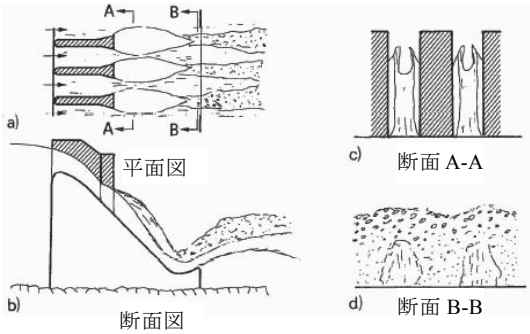
(2) キャビテーション

洪水時にキャビテーションによる被害を防止するため、空気供給エアダクトおよびオフセットが**図－17** に示す通り設計されている。模型実験における計測結果から、キャビテーション係数（Ki）を推定すると、同図に示す通りキャビテーション発生の下限値である 0.2 を上回っている。しかし、実験は、底部洪水吐に十分な空気供給下で行われた。このため、より実際に近い空気供給状況下で実験を実施し、流れの状況を確認するよう提言した。

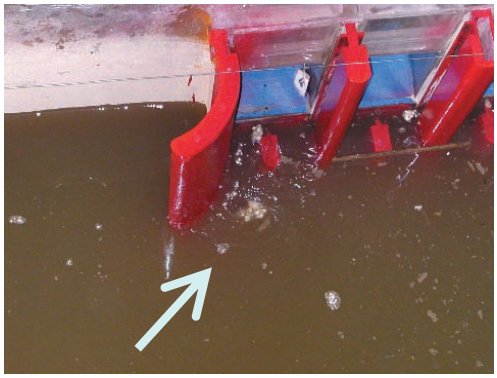
(3) その他

導流壁下流に、**写真－1** に見られる衝撃波が確認されたため、**図－20** に示す側壁形状の改善を提案した。また、**写真－2** では、越流型洪水吐き呑み口部の両端側壁付近に乱流が認められたため、軽減策として**写真－3** に示す側壁形状の改善を提案した。

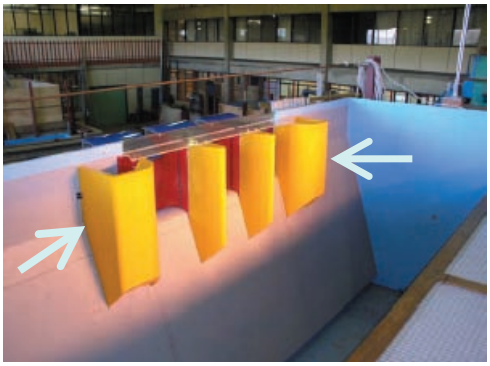
写真－1　導流壁下流衝撃波



図－20　改善提言したゲートピア形状



写真－2　洪水吐き呑み口部流況



写真－3　洪水吐き呑み口部乱流抑制対策

以上のように、水理模型実験およびそのレビューを通し、洪水吐きの基本形状から細部形状まで種々の改善を提案した。

8. 終わりに

ベトナムの電源構成は、2004 年現在、火力 43%、水力 39%、その他火力 IPP を中心に 18%である。経済成長に伴い、増え続ける電力需要に対応するため、電源構成の多様化を図り、2020 年の本格稼動を国家目標として、原子力発電技術の研究が進められている。しかしながら当面の間、地球温暖化ガスを排出しないクリーンな電源として、また輸入に頼らない貴重な自国電源として、水力発電はベトナムの経済発展を支えていくものと思われる。

近年ベトナムでの水力電源開発の資金調達手段として、従来の ODA に加え、民間資金を活用する IPP や、今回のソンラ水力のように自国資金で実施するケースが増加している。それに伴い、ベトナム側が外国コンサルタントに求める立場も変化してきており、設計や施工管理を全面的に任せるのではなく、設計のレビューや施工の助言を求めたりするアドバイザー的な立場でのプロジェクトへの参画を求める方向に向かっている。

このような背景の下、国家プロジェクトであるソンラ水力発電計画に携わり、レビューコンサルタントとして顧客であるベトナム国工業省の要求を満たすサービスを提供できたことは、当社にとって有意義であった。

本稿執筆中の 7 月末現在、ソンラ水力の RCC 施工および水門と発電機器の据付け工事の施工管理業務の国際入札が行われており、日本工営は SMEC（豪州）と J-Power との J/V で応札することとしている。今回の経験を足がかりに首尾よく受注し、今後も日本工営がベトナムでの水力開発に積極的に貢献していければと思う。

参考文献

1) Nippon Koei, J-Power, IE : Final Review Report on Civil Works & Construction Organization and Hydro-mecha., Electro-mecha. & Control Equipment、Son La HPP Design Review Consultant Package Stage 2、2006
2) Nippon Koei, J-Power, IE : Complehensive Review Report、Son La HPP Design Review Consultant Package Stage 1、2005
3) Silva (1997): “Characteristics of Vertical Strong Ground Motions for Applications to Engineering Design” Proceedings of the FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Ground Motion for New and Existing Highway Facilities, Burlingame, CA、September 22, 1997
4) Campbell, K.W. : Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra, Seism. Res. Lett., Vol.68 , 1997, pp.154-179.
5) Cornell, C.A. (1968)：Engineering seismic risk analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606.