

水力機器の最近の解析技術

赤羽 賢太郎(あかはね けんたろう)

鈴木 良治(すずき りょうじ)

① まえがき

今日、水力機器の受注から現地据付け、試験までの各段階において、さまざまな形でコンピュータが使われている。

水力機器における解析技術の歴史は、ランナ設計への流れ解析技術の導入に始まり、コンピュータの高速化・大容量化とともに発展してきた。すなわち、模型試験による試行錯誤方式の古典的な性能向上手法から、コンピュータによる流れ解析と性能予測技術による性能向上手法への変遷である。さらに水車の大形化・高落差化に伴って、有限要素法 (FEM) による強度・振動解析手法が導入され、最適な構造設計の実現に寄与してきた。今日では、水車の計画、設計の各段階で、さまざまな数値解析技術が駆使されている。

ここでは水力機器で日常的に行っている解析の技術について、その大略を紹介する。

② 流れ解析技術

水車・ポンプ水車の設計ツールとしての流れ解析は、1960年代の二次元非粘性流れ解析手法に始まり、その後1970年代から準三次元解析が使用され、威力を発揮してきた。準三次元法は流れの領域を数枚から十数枚の軸対称な回転流面に分割し、個々の流面上の流れの解析と、その結果を用いた流面形状の修正とを繰り返して収束計算を行う手法である。比較的小さな記憶容量しか必要とせず、計算時間も短いため、現在でも簡便な設計ツールとして利用されている。しかし、この手法は軸対称な回転流面上を流体が流れるという近似に基づいており、はるかに複雑な実際の水車・ポンプ水車内部の流れを細部にわたって把握するためには、やや力不足となってきた。例えば、比較的低落差の地点に適用される高比速度フランシスランナでは、圧力面上の流れは回転流面とほぼ直角な方向に向かうことが分かっているが、このような流れの様相を準三次元法で求めることは原理的に不可能である。また近年は、最高効率点付近だけでなく、より広い運転範囲での安定な運転に

対する要求から、最高効率点から遠く離れた運転条件下の内部流れを把握する必要性が高まっている。準三次元法はこのような悪条件下では計算の収束性が悪くなり、流れに関する詳細な情報を準三次元流れ解析から得ることはあまり期待できない。

近年の三次元粘性解析技術の導入によって、水車内部の複雑な流動現象が把握できるようになり、また設計点を大きくはずれた領域での解析精度も飛躍的に向上した。例えば、高落差・低落差運転時や部分負荷運転時におけるランナ内部の流れのはく離や流路渦の形成、可動羽根水車の翼先端すきまからの漏れ流れ、ポンプ水車の高揚程運転時の入口逆流などの流れの様相が明らかになりつつある。このような解析技術の進歩により、設計段階で従来より多くの詳細な情報が得られるようになった。実際の流れと解析結果との整合性が高まったことにより、模型試験結果を設計にフィードバックする際にも、よりの確な設計判断が下せるようになった。しかしその反面、解析データの作成や解析計算には、従来の準三次元解析に比べてはるかに多くの時間を要する。したがって、準三次元解析と三次元粘性解析を適宜組み合わせ使用しているのが現状である。

流れ解析技術の発展によって設計の精度や信頼性は徐々に向上してきた。模型試験の繰返しによる性能向上という旧来の方式は、流れ解析の繰返しによって最適設計を見いだして模型で確認する方式へと次第に移り変わりつつある。とはいうものの模型試験を完全に省略しうるかどうかという議論は、厳密なナビエ・ストークス方程式の直接解法が卓上コンピュータで手軽に実行できるようになり、その精度と信頼性が世の中で認知されてからのことであり、当分は現実的ではない。また、解析結果を検証するうえでも模型試験は有効な手段である。

流れ解析技術は、従来設計者の勘やセンスに依存していた部分を定量化し、設計技術の進歩を促す力を秘めている。不安定現象の発生範囲を移動したり現象の強弱を調整することにより、水力機器の安定運転範囲の拡大に寄与できるものと考えている。



赤羽 賢太郎

水車、ポンプ水車の設計・開発に従事。現在、エネルギー製作所水力部長。



鈴木 良治

水車、ポンプ水車の設計・開発に従事。現在、エネルギー製作所水力部課長。

③ 強度解析技術

前述のようにコンピュータの高速化・大容量化により、計算量が膨大であるために事実上不可能であった FEM が 1970 年ころから二次元レベルで計算できるようになり、1970 年代半ばからは三次元 FEM が可能となった。この技術は水車およびポンプ水車の主要な構造物の強度解析にも適用されるようになり、当初は二次元問題や軸対称問題が中心で、要素も簡便なシェル要素やビーム要素が用いられたが、次第に三次元ソリッド要素を用いて複雑かつ大規模な解析が行われるようになった。また、単純支持や完全固定だけでなく、必要に応じて多点拘束など、より実際に近い拘束条件も使用できるようになった。近年では卓上のエンジニアリングワークステーションやパーソナルコンピュータで手軽に FEM 解析が行えるようになっている。静的、動的な応力と変位がより正確に求まるようになり、疲労強度を含めた機器の信頼性向上に大きく寄与している。

高落差用の水車・ポンプ水車では、高い水圧に耐えうるよう各部品に必要な剛性を確保することが主眼となる。入口弁や二分割ランナなどにおける、大径ボルトによって締結されたフランジの口開きに伴うボルト張力の急増現象など、非線形問題も取り扱われている。一方これと対照的に、低落差用のバルブ水車は薄板の大形構造物となるので、加工・組立・据付け中の変形量を正確に予測することが重要となる。また、運転時の変形解析結果を考慮した現地での据付け方法が採られている。

この解析法に支えられて、応力と変位のバランスを考慮して機器全体を柔構造化することで全体の質量低減も図られている。

④ 振動解析技術

FEM による固有値解析は共振問題を発生させないために一般的に実施されている。

ポンプ水車においては、経済性を向上させるために高落差化・大容量化の傾向にあり、高い信頼性が求められる。高落差化に伴って各部に作用する水圧加振力は増大するので、特にランナについては水中での振動解析が必要になる。ランナが水中にあると振動加速度に比例した流体反力が作用し、これが付加質量効果となって固有振動数を低下させる。また固定部である上カバー、下カバーの影響を受けるので、ランナ周囲の流体と固定部を含めた流体-構造連成振動解析を行って変動応力の周波数が十分に共振周波数を回避していることを確認することが必要である。現在、解析ソフトウェアと実落差試験設備による変動応力測定試験の両面から検証が行われている。

一方、低落差用のバルブ水車では、水車・発電機本体の剛性が低く、固有振動数が低下するため、全体モデルでの固有値解析を実施している。

特殊な例としては、高落差揚水発電所建屋の振動解析による、建屋振動低減のためのポンプ水車構造の有効性の確認などが挙げられる。この解析結果は現地での実測値と比較され、よい一致が得られている。

⑤ 過渡現象解析技術

水車の過渡現象の解析、特に負荷遮断時の水圧上昇 (ΔP)、速度上昇 (ΔN) およびこれらと密接に関係する所要はずみ車効果 (GD^2) の計算は、水力発電所構造物および機器の保護だけでなく、コストに直接影響を与えるので、受注計画段階で必ず実施される。すなわち、許容の ΔP 、 ΔN を満たしながら所要の GD^2 を最小にするための水車ガイドベーンの開鎖方法はどのようにすべきかの検討である。

また放水路が長い圧力水路になっている場合には、負荷遮断時に吸出し管内の圧力が蒸気圧まで低下していわゆる水柱分離現象が発生し、水柱再結合時に異常水圧上昇が発生するおそれがあるので、水圧の挙動をシミュレーションしておくことが必要である。さらに、水圧鉄管の分岐やサージタンクなどが複雑に組み合わされた水路系においては、ガバナ制御の安定性の確認も時として必要な解析である。

特殊な解析例としては、水圧鉄管の途中から一般の強度の低い水道管が分岐している発電所において、水車の負荷遮断が水道配管に及ぼす影響をシミュレートした例などもある。

⑥ あとがき

富士電機の水力機器における解析技術を、その歴史と最近の技術について概観した。本特集号の別稿で、「高落差ポンプ水車ランナの振動解析技術」と「水車・ポンプ水車設計への流れ解析技術の適用」について紹介するので、ご一読いただければ幸甚である。

参考文献

- (1) 妹尾泰利・中瀬敬之：ターボ機械の羽根車内の流れ（第 1 報，翼間理論），日本機械学会論文集（第 2 部），Vol.37, No.302, p.1927 (1971)
- (2) 中瀬敬之・妹尾泰利：ターボ機械の羽根車内の流れ（第 2 報，翼間流れを考慮した回転流面の決定法），日本機械学会論文集（第 2 部），Vol.38, No.308, p.800 (1972)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。