ダム地質のモデル化と F.E.M. による地質工学的検討

野田 貞次*・松木 省吾*・飯島 弘*

On the Modification of Geological Structure of Damsite and Geotechnical Analysis by the Finite Element Method

Sadazi NODA, Shogo MATSUKI, Hiroshi IJIMA

Abstract

The Finite Element Method (F.E.M.) has been used as a Means of the stbilty investigation of a dam and it's foundation in the field of dam engineering.

In this case, the most important things are the modification of the geological structure of the damsite and geotechnical costants, such as modulus of elasticity, technical cohesion and frictional cefficient of rock mass.

In this paper, they mainly take up the process of the modification of geological structure of damsite and some examples of geological models and refer to the outline of results by F.E.M. analysis.

1. はじめに

マルバッセダムの破壊 (1959), バイオントダム左岸の大規模な岩すべり (1963) を契機として, ダムの基礎岩盤の安定性についての関心がダム技術者の間に高まってきた。特に, ダムの安定性は, ダム本体の安定性と基礎岩盤の安定性の両者が相まって始めて確保されるものであって, ダム基礎も構造物の一部と考えるべきであるとする認識が広がってきた。このような背景から, ダムの調査・設計の一連の作業の中で基礎岩盤の安全性をどのような手段で評価し, 判定するかが重要な課題となってきた。

最近, 基礎岩盤の安定性を判定する一手段として, コンピューターを利用して種々のシミュレーションを行なって設計に採り入れる試みが行なわれるようになってきた。即ち, 岩盤内部の応力状態や最小点安全率の分布状態, さらには地質条件による堤体内部応力を把握し, ダム軸の決定, 掘削線の決定および基礎処理の範囲の決定などの基礎資料を得る手法として有限要素法 (F.E.M.) が利用されている。

F.E.M. 解析の具体的な手法や計算技術に関することは他の文献に譲ることにして, 本報告書では複雑なダムサイトの地質構造を F.E.M. 解析のためにどのような考

え方で単純化したか, その具体例を報告することにする。

2. F.E.M. 解析の手順

2.1. F.E.M. 解析手順の概要

図-1 にダムの調査・設計作業の流れを簡略化して表示したフローチャートを示す。

本報告書の主題である F.E.M. 解析の作業は 図-1 の破線で囲った部分にあたる。解析に先立って, 十分な地質調査と地質解析が行なわれ, かつ岩盤の工学的評価としての岩級区分および現位置岩盤試験などによるデータが集積されていることが前提条件となる。

2.2. 解析断面の選定

ダムサイトの調査が精査段階に入り, 地質構造解析が行なわれる時点には地質調査と並行してダム軸の比較検討を主な目的とする予備設計が行なわれる。これによってダムから基礎に伝達される外力の大きさや方向がほぼ決まり, 地質条件との関係からダム全体の中でどのブロックが他のブロックより安全率が低くなるかが判断される。このようにして安定上問題があると判断されたブロックが解析の対象となる。

なお, 本文では, 重力式コンクリートダムの場合の地質構造のモデル化の実例を取りあげているが一般に重力式コンクリートダムの安定計算はダム軸に直交する鉛直断面 (ブロックジョイント沿い) について検討されるの

* 八千代エンジニアリング株式会社

図-1 F.E.M. 地質解析のフローチャート

が普通である。

2.3. 地質構造のモデル化

モデル化は解析結果に最も大きな影響を与えるもので、その方向を誤ると現実の地質条件と大幅に異なるものとなり、誤った結論を引出す恐れがある。ボーリング、横坑、岩盤試験などから得られた大量の地質資料の中からコンピューターの能力に合わせて、ある部分は単純化し、またある部分は誇張するなどして適切なインプットデータを作成する作業がモデル化である。

解析断面の範囲は、図-2 に示すように地質条件によって異なるが、上下流方向でダム底幅の2~3倍、深さ

図-2 モデル化の範囲

方向ではダム高の1~2倍を採る場合が多い。従って、この範囲内の岩盤については地質調査が行届き、地質工学的な資料も揃えて置かなければならない。

2.4. アウトプットデータ

モデル化によって地質パターンが決まり、岩盤各部分の弾性係数、摩擦係数およびせん断強度（参考までに F.E.M. 解析に用いた岩盤の物理常数の例を表-1 に示す）が決定されると演算に移る。

表-1 F.E.M. 解析に用いた岩盤の物理常数

岩 盤 種 類	(a) ゴ ー ル		(b) ゴ ー ル		せん断強度
	弾性係数	摩擦係数	弾性係数	摩擦係数	
(OH)	—	—	60,000	1.0	15
(OM)	20,000	1.0	9	30,000	1.0
(OM) ~ (OL)	—	—	20,000	0.8	8
(OL) ~ (OM)	10,000	0.8	6	—	—
(OL)	—	—	10,000	0.7	5
(D)	2,000	0.6	5,000	0.5	2
コンクリート	200,000	—	200,000	—	—

演算の結果は Element の節点変位量、主応力の値と方向、点安全率の値と方向などがプリンターによって印刷されてアウトプットされる。

図-3 (a), (b), (c) は変位量図、主応力図および点安全

図-3 (a) 変位量図

図-3 (b) 主応力図

図-3 (c) 点安全率分布図

率分布図の模式図である。

2.5. 解析結果の解釈

アウトプットデータをどのように解釈するかは極めて重要な問題となる。解析結果を正しく読み取り、結果を正しく解釈するためには、地質のモデル化や岩盤に与えた物理常数の条件を十分に知り、かつ F.E.M. の手順とダム設計に関する豊富な経験をもつ技術者が当る必要がある。また通常、解釈を誤まらないために基礎岩盤が最も単純な場合を想定し、均一な基盤よりなるケースを解析し、次第に複雑なケースを加えてゆく方法がとられる。

3. 地質構造のモデル化の実例と解析結果の概要

3.1. A ダムの例

A ダムは高さ 46 m の重力式コンクリートダムである。

1) 地質概況

A ダムは、いわゆるグリーンタフ地域に計画されている。ダムサイトの地質は安山岩と緑色凝灰岩よりなる。両岩は漸移の関係にあり、量的には凝灰岩が卓越しているが、局部的に熱水変質を受けかなり軟質化している部分もある。ダムサイトで約 20 本の断層が確認されている。

2) 解析の主目的

ダムサイトの河床部には、図-4 (a) に示すようにダムの下流端近くに、F-3, F-5 および F-6 断層が存在し、④～⑥級の劣化部が認められる。

3) 地質構造のモデル化の問題点

モデル化の上で特に配慮した断層はダム下流端付近の岩盤劣化の主要因となっている F-5 および F-6 断層と F-3 断層である。Fd, Ff および Fe 断層はいずれも規模が小さくダムの安定性の上で大きな影響を与えるものとは考えられないのでモデル断面では省略した。

まず、F-5 および F-6 断層は同系統の断層であり、しかも河床部で非常に近接しているので幅 10 m (断層部および周辺の破碎部を含む) の 1 本の断層 (F-5 断層と表示) とした。

次に、F-3 断層については、破碎幅は約 1 m であるが、これを実際の寸法で表示すると断層部の Element 数が他の部分に比し極端に小さくなり、かつ全体の Element 数も増えるという計算技術上の問題が出てくる。従って、これを避ける意味でモデル化にあたっては、断層の幅を 3 倍に誇張して表示するとともに、弾性係数の方も 2.5 倍にし断層自体の総変形量が

(a) 地質断面

(b) モデル断面

図-4 A ダムの地質断面およびモデル断面 (J+90)

ほぼ等しくなるように考慮した。

4) 解析結果の設計への適用

9 ケースの解析結果のうち代表的な 2 ケースをピックアップして表-2 に示す。

表-2 主要計算結果 (A ダム)

比較	最大主応力 (MPa)				最小主応力 (MPa)				最小安全率		
	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側	ダム本体	中央部	下流側
(I)	7.9	5.9	10.3	10.8	-3.6	-3.6	0.0	-0.9	2.3	4.0	1.9
(II)	7.4	5.7	29.2	29.3	-3.0	-3.3	0.5	-1.2	2.5	4.0	3.0

ケース [I] はダム軸を 20 m 上流に移し、ダム下流端付近の断層置換を行ない、かつ下流にフィレットを設けた場合である。ケース [II] はダム軸を 30 m 上流に移し、断層置換だけを行なって下流フィレットを設けない場合である。

2 ケースの結果をみると、ダム下流部の本体および岩盤の最大主応力はケース [II] はケース [I] の約 3 倍の値を示している。しかし、その絶対値は約 30

kg/cm² 弱で大きな問題はない。最小主応力については両者に差はみられない。最小点安全率は下流側で最も差が大きく、ケース〔Ⅰ〕で $n=1.9$ 、ケース〔Ⅱ〕で $n=3.0$ となっている。

上記の資料からみると、重力式ダムの安定上最も重要なダム下流端付近の点安全率がケース〔Ⅱ〕はケース〔Ⅰ〕に比較して約 50% 増となることが明らかになった。即ち、ダム軸を 20 m 上流に移し、断層置換を行ない、かつフィレットを設ける案よりも、ダム軸を思い切って 30 m 上流に移し、断層置換だけを行なった方がより効果的であることが解析により明らかとなった。この資料をもとにダム軸を 30 m 上流に移して設計が行なわれた。

3.2. B ダムの例

B ダムは高さ 120 m の重力式コンクリートダムである。

1) 地質概況

ダムサイトの地質は古生層の粘板岩、砂岩およびチャートよりなるが、量的には粘板岩が卓越している。地層の走向は、概ね東西方向で北に傾く同斜構造をなしている。従って、右岸は流れ盤、左岸はさし目となっている。ダムサイトには東西性の断層群 (F-9 および F-8 グループ) や緩傾斜の断層群 (F-18 グループ) があり、それらによって基礎岩盤はブロック化され、複雑な構造をしている。

2) 解析の主目的

B ダムの右岸側の地形、地質条件は比較的良好である。これに対し、左岸側は半島状のヤセ尾根となっており、しかも基礎中には F-18、F-8 および F-9 等の断層が錯綜している。このような尾根に対しダムをどのように取付けるべきかについて検討した結果、図-3 (a) に示すようにヤセ尾根の上流側にダムがもたれかかるような形で取付ける案が有力になった。しかし上流側に急傾斜する基礎の上にダムを乗せた場合、上記の断層が存在することから、低水位時における低角度断層 (F-18 断層) 沿いの上流側へのすべりおよび断層の変形に伴う堤体内応力の 2 点が問題となり、その検討のために F.E.M. による解析が行なわれた。

3) 地質構造のモデル化の問題点

上流側へのすべりを考える場合、まず問題となるのは図-3 (a) に示すように F-18 断層グループと F-8 断層グループの存在である。

F-18 断層グループは、ダム本体直下では ㉔～㉔ 級の中石を挟む 2 本の断層として表示してあるが、F-8 断層の上流側では地山深部にさし込んでおり、せん断

図-5 Bダムの地質断面およびモデル断面 (J-11)

破壊の対象となり得ないことから思いきって省略してある。また上流端にある F-8 断層グループは幅約 10 m の 1 本の破砕帯として取扱った。

ダムの下流部にみられる F-9 断層グループは多くの断層に枝分かれしており、特に上部標高では全体としてかなりルーズな岩盤となっている。従って、下流側の上部標高部は F-18 断層をそのまま地表まで延長し、岩盤全体のランクを ㉔～㉔ 級に落した。

4) 解析結果の設計への適用

F.E.M. で検討した主な内容は次の 2 項目である。

- ① 断層および中石等の岩盤条件の変化による堤体並びに基礎岩盤の安定性。
- ② ダム形状の変化による堤体並びに基礎岩盤の安定性。

①については岩盤条件をいろいろ変え 8 ケースの計算を行なった。その結果、中石部分の岩盤の弾性係数がダム本体の応力状態に大きく影響を与えることが明

表-3 主要計算結果 (Bダム)

	堤体形状	最大主応力 (MPa)			最小主応力 (MPa)			最小点安全率 (F-18断層沿い)
		位置	値	応力	位置	値	応力	
低水位時 (上流側)	A案	フィレット上流端	75	F-8断層置換部	-12	1.4	2.9	
	B案	〃	49	〃	-7	1.6	2.6	
	C案	〃	66	ダム軸付近の堤体内部	-13	1.5	2.5	
満水位時 (下流側)	A案	堤体下流端	46	〃	-29	19	9.2	
	B案	〃	50	〃	-20	2.0	7.8	
	C案	〃	47	〃	-11	2.1	5.1	

らかになり、断層を含めた中石の性状をより正確に把握するための諸調査が並行して実施された。

一方、②については、予め手計算ですべりのチェックをして選定された3つのダム形状(図-3.2(b)参照)について最悪の岩盤条件下で安定検討を行なった。それらの結果の一部は表-3に示すとおりである。

上表の結果をみると、最小点安全率は各案とも大差がない。

また平均安全率は低水位時でA,B案は $n=4\sim 5$, C案は $n=10$ であり、満水位状態ではいずれも $n>10$ となっており十分安全である。

しかし、応力状態はダム形状の違いによりかなり差がみられる。即ち、上表の応力値で特に問題になるのは、満水位時、ダム軸付近の接岩部で生じている最小主応力(堤体内テンションで $10\sim 30\text{ kg/cm}^2$)であり、堤体内応力を比較した場合、(B案はC案の2倍,A案3は倍となっている)C案が最も小さくなっている。上述のように、F.E.M.解析結果によれば、C案が応力的に最も問題が少ないことが判った。しかし、他の条件を比べた場合、特に揚圧力、施工性の点でC案はB案に比べ不利であり、現実的なダム形状としてB案が有利になった。これは、F.E.M.だけを重視せず、他の諸条件を考慮して改善の策を採用した例である。

4. あとがき

ダムの調査・設計の分野に適用されるようになった有

限要素法の手順と解析の実例についてその概要を紹介した。今後、このような解析はより普及し、より広い分野で利用されるようになるものと考えられる。ダムの調査・設計の分野には経験に裏打ちされた Engineering Judgement に頼って仕事を進める例が多かったし、今後も行なわれるものと思われる。しかし、F.E.M.などの手段を通じて、幾つかのケースについて予めシミュレートすることが可能となれば Judgement を下す際に大きな助けとなるものと考えられる。

一方、境界条件を与えてやりさえすれば電算機は各種の数字を打出してくる。打出された数字を無批判に信じ込むことは現実から遊離を招くことになり、多くの危険をはらんでいる。モデル化と結果の解釈がこの手法の最も重要な部分であることは論をまたない。

参 考 文 献

- 1) 石井文雄, 飯田隆一, 岸本貞男 (1966): 基礎岩盤の安定性検討方法の試み, 土木技術資料, Vol. 8, No. 5.
- 2) 飯田隆一, 小林茂敏 (1970): ダムの設計における有限要素法の利用, 土木技術資料, Vol. 12, No. 9.
- 3) 和泉正哲 (1975): 有限要素法の適用範囲と実用面からみた価値評価, 土木基礎, Vol. 23, No. 1.
- 4) 飯田隆一 (1975): コンクリートダムの基礎の設計, 土と基礎, Vol. 23, No. 9.
- 5) 飯島 弘 (1975): ダムの地質のモデル化とF.E.M.解析, 昭和 50 年度日本応用地質学会研究発表講演要旨