

有限要素法による地盤と遮水壁のズレを考慮したロックフィルダムの解析

齋藤 二郎
藤原 紀夫

Finite Element Analysis of Rockfill Dams Considering Shearing Displacement at Adjoining Plane between Materials

Jiro Saito
Toshio Fujiwara

Abstract

When the finite element method is used for analysis of a soil structure, the result does not explain the actual behavior of the structure unless shearing displacement at the adjoining plane between soil and another material is taken into account. This problem will arise when analyzing rockfill dams with cutoff walls, behaviors of open-cut walls, and effects of protective sheet piling when sinking caissons or excavating shield tunnels. This report gives an explanation of the joint element for analyzing shearing displacement and describes application to rockfill dams using the incremental analysis concept. Stresses and deformations in embankments are shown. It is thus demonstrated that the finite element method should become a major research tool in the field of soil mechanics.

概 要

有限要素法を土構造物の解析に用いた場合、地盤の中に含まれる異物質と地盤との間のズレを考慮しなければ、実際の現象と一致しないものとなる。このような問題は、遮水壁をもったロックフィルダム、土留壁の挙動、ケーソン沈設時の防護矢板の効果、シールド掘進時の隣接構造物の防護壁の効果などを解析する時に生ずる。この報告は、異種材料との接触部のズレを考慮できるジョイント要素の考え方を示し、これをロックフィルダムの解析に適用した例について述べたものである。ダムの解析方法は、多層解析と呼ばれる方法で、築造過程を数段階の盛立てに分けて解析するもので、これらの段階ごとに地盤内の変位・応力などについて述べている。

1. まえがき

筆者らは、長年にわたって、有限要素法を土質力学の分野に応用することを試みてきた¹⁾。この際、問題となるのは、地盤の中に含まれる異物質たとえば矢板壁、地中連続壁と地盤との間のズレを考慮しなければ実際の現象と一致しないものとなることである。遮水壁をもつロックフィルダムの挙動、土留壁背面の地盤挙動、ケーソンの周囲防護矢板の効果、シールド掘進時の隣接建造物の防護壁の効果などを解析する場合にこのような問題が生じる。

以下に、異種材料との接触面のズレを考慮できるジョイント要素の考え方を示し、これをロックフィルダムの解析に適用した例について述べる。

2. ジョイント要素

有限要素法を土構造物の解析に用いる場合、二次元で平面ヒズミ問題として取扱うことが多い。ここでもそのような取扱いをする。有限要素法の一般的な事柄については他の文献にも詳しく、著者らも数多く発表してきているので省略する。

さて、従来の有限要素解析では、不連続性を考慮する場合、幅の狭い変形係数の低い要素に分割し、その部分の剛性を低下させるような方法をとることが多かった。しかし、その場合には、全体としての剛性マトリックスの特性が悪くなって解の収束性が著しく悪化し、実用解を得ることができないこともあった。

これに対して、安定した解を得るために、不連続面における力学特性を考慮して、不連続特性のモデル化が種々考えられている。ここでは、その一つである Goodman²⁾ のジョイント要素と呼ばれるものを用いる。

ジョイント要素として図-1に示すものを考える。長

長さL, 幅ゼロ, 4節点で(1, 4), (2, 3)のペアーで表わすものとする。以下途中まで, 座標系は(x, y)の局所座標系で考える。

貯えられるエネルギー ϕ は相対変位{w}と単位長さあたりの力{p}の積を積分したもので次式で表わすことができる。

$$\phi = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \{w\}^T \{p\} dx \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに, $\{w\} = \begin{Bmatrix} w_s^{top} - w_s^{bottom} \\ w_n^{top} - w_n^{bottom} \end{Bmatrix}$, $\{p\} = \begin{Bmatrix} p_s \\ p_n \end{Bmatrix}$

{P}は単位剛性[k]と相対変位{W}, の積で次式で示される。

$$\{p\} = [k] \{w\} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \{w\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

したがって, (2)式を(1)式に代入すると,

$$\phi = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \{w\}^T [k] \{w\} dx \quad \dots\dots\dots(3)$$

変位ベクトルは節点変位 u_i と v_i で示すことができる。ジョイント要素の下面に沿った変位を示すと,

$$\begin{Bmatrix} w_s^{bottom} \\ w_n^{bottom} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - \frac{2x}{L} & 0 & 1 + \frac{2x}{L} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{2x}{L} & 0 & 1 + \frac{2x}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

同様にジョイント要素の上面に沿った変位も計算できるので相対変位{W}は,

$$\{w\} = \begin{Bmatrix} w_s^{top} - w_s^{bottom} \\ w_n^{top} - w_n^{bottom} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -A & 0 & -B & 0 & B & 0 & A & 0 \\ 0 & -A & 0 & -B & 0 & B & 0 & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここに, $A=1-(2x/L)$, $B=1+(2x/L)$ である。(5)式をマトリックス式にすると,

$$\{w\} = -\frac{1}{2} [D] \{u\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

結局, (3)式は,

$$\phi = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{4} \{u\}^T [D]^T [k] [D] \{u\} dx \quad \dots\dots(7)$$

(7)式に含まれる $[D]^T [k] [D]$ を求めると, A^2, B^2, AB を含んだマトリックスとなる。 A^2, B^2, AB を $-L/2$ から $L/2$ まで積分すると, それぞれ $4(L/3), 4(L/3), 2(L/3)$ となる。

これらの結果を用いると(7)式は次式となる。

$$\phi = \frac{1}{2} L \{u\}^T [K] \{u\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

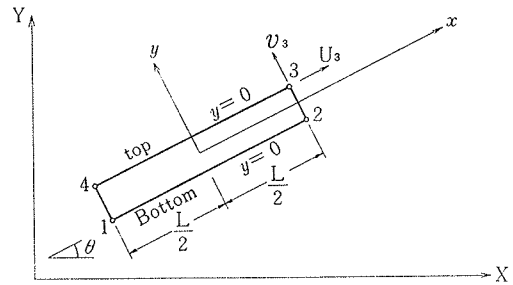


図-1 ジョイント要素

ここに,

$$[K] = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -2k_s & 0 \\ & 2k_n & 0 & k_n & 0 & -k_n & 0 & -2k_n \\ & & 2k_s & 0 & -2k_s & 0 & -k_s & 0 \\ & & & 2k_n & 0 & -2k_n & 0 & -k_n \\ \text{Sym.} & & & & 2k_s & 0 & k_s & 0 \\ & & & & & 2k_n & 0 & k_n \\ & & & & & & 2k_s & 0 \\ & & & & & & & 2k_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(9)$$

(9)式は単位長さあたりのジョイント要素の剛性マトリックスである。

さて, 上述の剛性マトリックスは局所座標系(x, y)のものであり, 全体座標系(X, Y)になおす必要がある。(x, y)座標系の変位{u}と(X, Y)座標系の変位{U}の間には, 次の関係が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ V \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots(10)$$

(8)式に(10)式を代入すると次式を得る。

$$\phi = \frac{1}{2} L \{U\}^T [K_\theta] \{U\} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに,

$$[K_\theta] = \begin{bmatrix} C & -S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & -S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S & C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C & -S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C & -S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S & C \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} C & S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -S & C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C & S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -S & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C & S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S & C \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 $C = \cos \theta$, $S = \sin \theta$ である。

(12)式はマトリックスの掛け算であり、これを一つのマトリックスに演算することは容易である。 $[K_0]$ は全体座標系における単位長さあたりのジョイント要素の剛性マトリックスである。

一方、局所座標系における応力マトリックスを $\langle SS \rangle$ とすると、

$$[SS] = \frac{1}{2L} \int_{-L/2}^{L/2} [k] [D] dx \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -k_n & 0 & -k_n & 0 & k_n & 0 & k_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(14)$$

また、(10)式を用いて全体座標系に対する応力マトリックス $[SS_0]$ を計算すると次のように求まる。

$$[SS_0] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -k_s C - k_s S & -k_s C - k_s S & k_s C & k_s S & k_s C & k_s S \\ k_n S & -k_n C & k_n S & -k_n C & -k_n S & k_n C & -k_n S & k_n C \end{bmatrix}$$

ここに、 $C = \cos \theta$, $S = \sin \theta$ である。

3. 解析モデル

解析のモデルダムとして、安山岩熔岩の基盤の上に、層厚 40 m の河川堆積層があり、この上にセンターコアタイプのロックフィルダムを造るものを選ぶ。堤体の高さは 50 m、堤頂幅は 12 m とし、堤体の勾配は上流側で 1:3、下流側は 1:2 である。コアは堤頂で幅 6 m、堤の底で 26 m とし、その両側に 3 m 厚さのフィルター

を設ける。遮水壁はコアの下から基盤までで、壁厚 60 cm のものを設けるものとする。

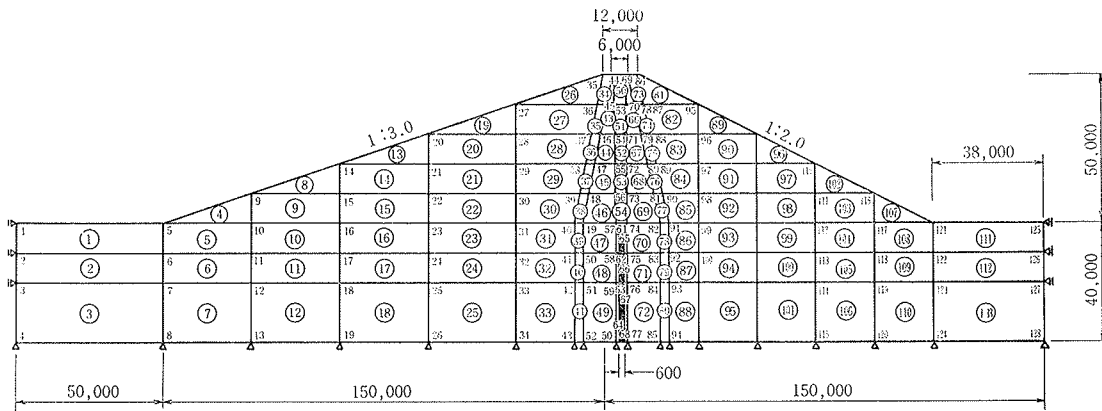
図-2 は有限要素解析のための要素分割図である。要素 113、節点数 128 である。このうちジョイント要素は遮水壁のまわりで 55 から 61 番までである。

境界拘束条件は、下端の安山岩熔岩では水平・鉛直方向とも固定とし、両側端境界は水平固定、鉛直自由とする。

解析に用いる地盤定数等は、図-2 の左下の表に与えてある。ロック材、フィルター材、コア材のヤング率はこの順序で少しずつ大きな値とした。遮水壁は 2 種類 (I と II) の定数を考える。I はコンクリート壁のようなものを想定し、II はアスファルトコンクリートのものを想定している。ジョイント要素の定数は、セン断方向 K 値; $k_s = 1,000 \text{ t/m}^2/\text{m}$ を、鉛直方向 K 値; $k_n = 10,000 \text{ t/m}^2/\text{m}$ を仮定した。

4. 解析方法

有限要素法によるフィルダムの解析方法を大別すると、一層解析 (Single lift analysis) と多層解析 (Multi lift analysis or Incremental analysis) になる。前者はダムの築造が一度に完了するものとして、その自重を鉛直方向に一度に作用させるものである。この解析においては、変位の結果は実際のものとは一致しないが、応力については実際のものとはほぼ一致する。



地盤定数						
材料	定数	E (t/m ²)	ポアソン比	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	ϕ (deg)
ロック材		3,000	0.3	1.8	1.0	42
フィルター材		4,000	0.3	1.9	1.0	38
コア材		5,000	0.3	1.9	3.0	27
河床堆積層		10,000	0.35	2.0	5.0	35
止水壁	材料 I	1,000,000	0.25	2.3	100.0	40
	材料 II	10,000	0.35	2.0	5.0	35
ジョイント要素		$k_s = 1,000 \text{ t/m}^2/\text{m}$		$k_n = 10,000 \text{ t/m}^2/\text{m}$		

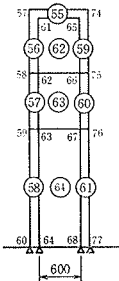


図-2 有限要素分割と材料定数

多層解析とは、一層解析が変位について実状に即さないため工夫された方法で、実際の築造過程と同様に、多層に分けて各盛土高さごとに解析を進めるものである。実際のフィルムダム築造においては、積み上げられていく層数は莫大なものであるが、本解析では5層を考慮することにする。

具体的には、Clough & Woodward (1967) が提案している方法³⁾に準ずる。すなわち、新しく積み上げられる層は重い液体のように考え、新しく積まれる層と前に積み上げられている層との間に生じるせん断力は無視し、かつ新しく積まれた層の頂部における変位はないものとする。したがって、新しく積み上げられる層は、その

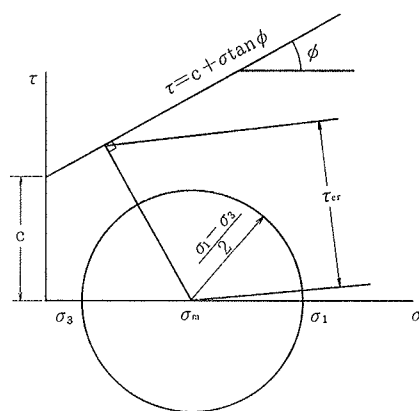


図-3 モール・クーロンの破壊基準

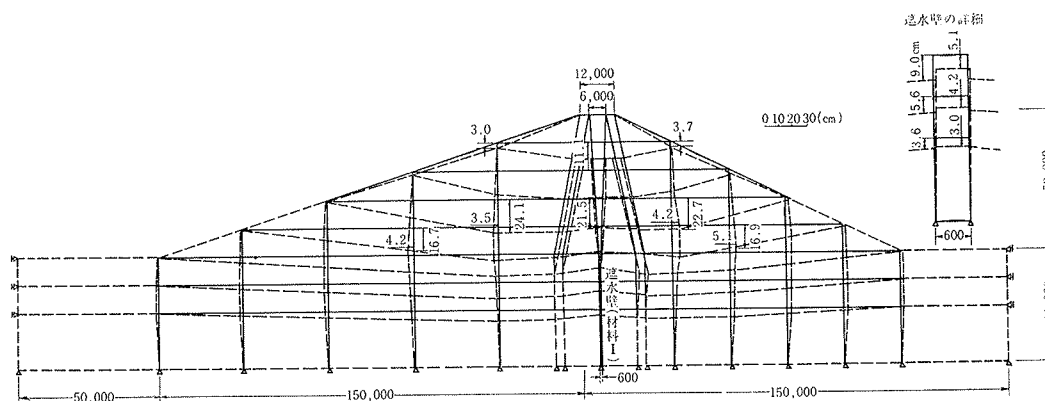


図-4 盛立て完了時における堤体内部の変位図

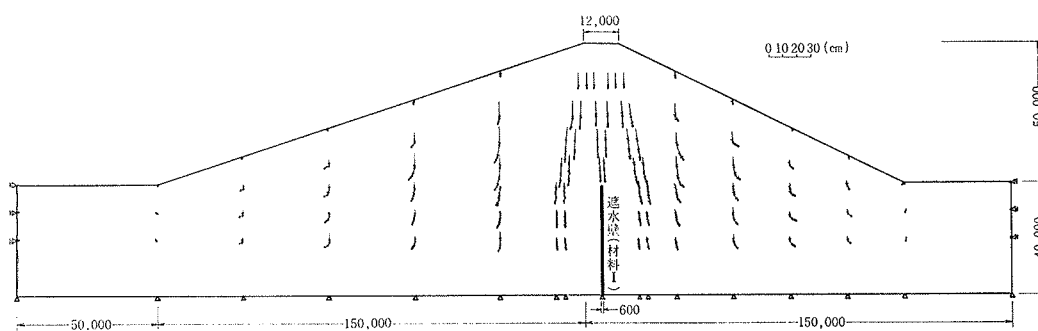


図-5 築造過程の変位ベクトル図

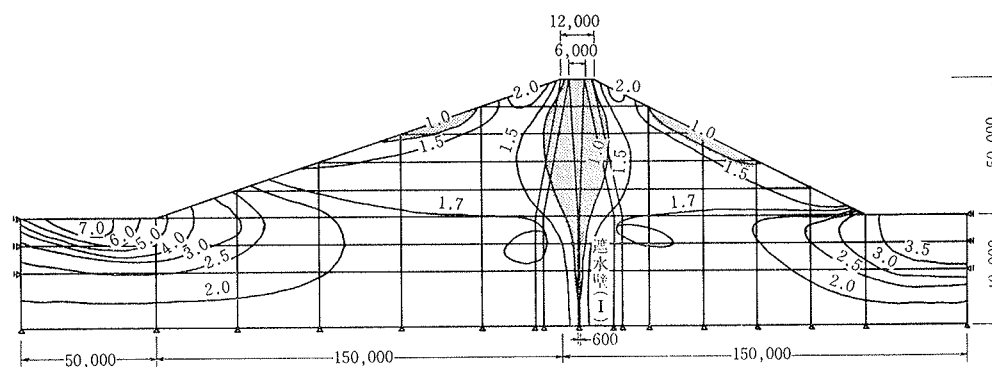
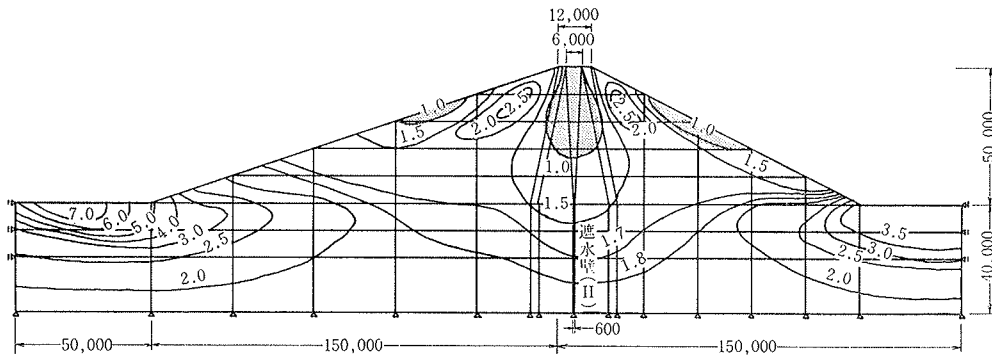
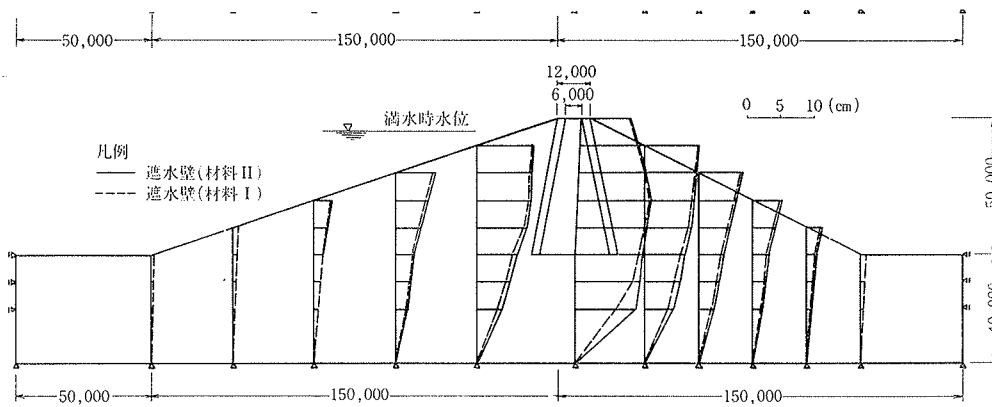


図-6 盛立て完了時の堤体内部の安全率の等高線(遮水壁, I)



図一七 盛立て完了時の堤体内部の安全率の等高線(遮水壁, II)



図一八 満水時水圧による堤体の水平変位

重量に等価な鉛直方向の節点荷重で代表させることにする。この際、荷重が作用する面から上の要素はその厚さをほとんどゼロ (0.00001 m) とおき剛性がないとし、荷重作用面から上の変位と応力は考慮の対象外とする。計算される変位と応力は各盛土段階ごとに順次加え合せたものを各盛土段階の応力と変位と考える。

計算された応力を用いて、堤体内部の安全率を次のように定義する。土の破壊基準として、モール・クーロンの破壊基準を用いる。

図一三を参考にして、安全率(SF)を次式で表わす。

$$SF = \tau_{cr} / \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = C \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 τ_{cr} ; 最大せん断抵抗, C; 粘着力, ϕ ; 内部マサツ角, σ_1, σ_3 ; 主応力

5. 解析結果

図一四は盛立て完了時(第5層)における堤体内部の変位図である。堤体の中央部分が他より大きく変位しているのがみられる。遮水壁(Iの材料)によって堤体が支えられている様子もみられる。また、遮水壁部分を拡

大してわかりやすくした図が右上に示してあるが、これに見られるように遮水壁はコアーの中に、 $9.0 - 5.1 = 3.9$ cm だけ頭をつっこんだ形になっている。

図一五は各堤体築造段階において生じた変位をベクトル図にして示したものである。

図一六と図一七はそれぞれ、遮水壁がIとIIの材料の場合における盛立て完了時の堤体内部の“安全率”の等高線図である。図中で黒く塗りつぶした部分は安全率が1.0以下となる領域である。当然のことながら、Iの材料の方が安全率が1.0を下まわる領域が広い。

図一八は満水時の水圧による堤体の水平変位を示したものである。満水時の水の影響を考えるには、松井氏⁴⁾が行なっているように、浮力の作用、浸水による材料定数の低下、堤体の重量などを順序だてて考慮する方法を用いなければならないが、ここでは、一番簡単な考え方として、浮力を無視して、静水圧の水平成分だけをコアと遮水壁に作用させた。図中の実線は遮水壁の材料Iの、破線は材料IIの場合を示している。この両者には大きな差はなく、当然のことながら、遮水壁には水平変位を拘束する力は小さい。

6. むすび

以上に、地盤と遮水壁のズレを考慮したロックフィルダムの有限要素解析について述べてきた。ここでは紙面の都合で示すことができなかつたが、同じ解析法をケーソンや土留壁の問題にも適用し、実測値と比較している。当然のことながら、ズレを考慮すれば実測値に近く、実際の挙動をよく表わすことができた。また、本文中においてはジョイント要素の材料定数 (k_s と k_n) の決定方法についてはまったくふれていない。しかしこれは最も重要な問題であり、今後とも研究すべき課題である。

最後に、この研究の一部は、日大学生堀内秀和君が卒業論文として実施してくれたものである。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 斎藤, 藤原, 吉岡: 有限要素によるシールド外周地盤の挙動解析, 土と基礎, (1977. 3)
- 2) Goodman, R. E., et al.: A Model for the Mechanics of Jointed Rock, Proc. ASCE, SM3, pp. 637~659, (1968)
- 3) Clough and Woodward: Analysis of Embankment Stresses and Deformations, Proc. ASCE, Vol. 93, SM4, (1967), pp. 529~549
- 4) 松井: ロックフィルダムの弾塑性解析, 電研報告 72012, (昭和48. 4)