

ダム—貯水池系の2・3次元有限要素解析

(貯水池面のヒズミについて)

篠 和 夫

(農学部 構築工学研究室)

Two and Three Dimensional Finite Element Analysis of Dam-Reservoir System

(On the Strain on the Reservoir Surface)

Kazuo SHINO

Laboratory of Construction Engineering, Faculty of Agriculture

Abstract : The objective of this paper is to discuss the static strain of Dam-Reservoir system that surface is covered with impervious materials. It seems that it is not sufficient to discuss the behaviour in the vicinity of the contact point between dam and natural ground by using two dimensional analysis. Therefore, in this paper, numerical computations are done with three dimensional finite element method and strains at the reservoir surface are obtained. This result is compared with the result obtained by using two dimensional finite element method. As the results, those were indicated that the maximum value of the strain was shown in the neighbourhood of the contact point, and that there is any difference in the strain distribution between two and three dimensional models.

緒

土木構造物は、複雑な境界形状、境界条件を有するのが普通であり、それらの条件に完全に適合するような厳密な構造解析を行うのは困難であることが多い。したがって、解析上必要とされる種々の変数を、或る仮定を設けて拘束、または無視したりして、その自由度を減少させることによって解析しやすい系とし、その系について考察しようとする。たとえばダム等のような、断面に垂直な方向の寸法が他に比べて弁分長いような構造物では、どのような断面をとっても同じ力学的状態にあると考え、平面問題として近似することにより解析するのが一般的であり、それで十分な精度を得られる場合も数多い。ダムや貯水池堤防など斜面部を有する土構造物では、2次元の応力状態を考え、2次元の有限要素法によったり、wedgeの理論、あるいは半無限体表面上に作用する荷重から生じる応力の積分表示の重ね合せに基いたりして解析を行う。しかし、構造物の種類によっては、上記のような2次元問題にそのままでは帰着することができないと考えられる場合がある。非軸対称構造物、とりわけ、不規則な形状変化や屈曲した部分があったりする場合がそれである。

表面遮水型フィルダムのような場合、静的・動的な外力による遮水面の変形は、その機能に重要な影響を及ぼす。ここでは、平面問題として取り扱うのに難点があると思われる地山部近傍の全面遮水型フィルダムを考え、3次元の有限要素法により、静的な弾性解析を行い、ダム—貯水池系のヒズミを調べた。得られた結果が、解析領域の大きさによってもたらされる影響を2、3の例について調べ、また、2次元有限要素解析との比較検討を試みた。

解 析 法

(1) 有限要素法については多くの文献¹⁾で論じられているので詳細は省略するが、ここで用いた2次元要素と3次元要素は以下のようなものである。

イ) 2次元要素

変位関数が次式で表わされるような線型の3角形要素を用いた (Fig. 1 参照)。ここで u, v は cartesian 座標系での x, y 方向の変位である。

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \\ v &= \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

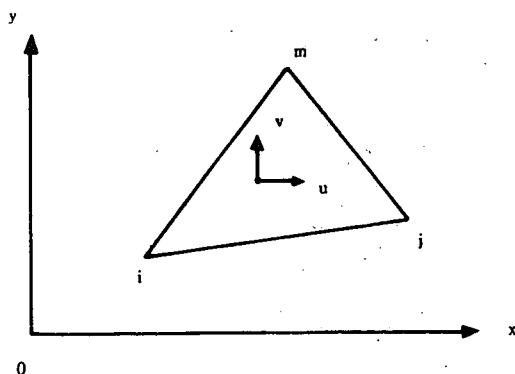


Fig. 1 Two dimensional finite element

ロ) 3次元要素.

変位関数が次式で表わされるような線型の4面体要素を用いた (Fig. 2 参照)。ここで u, v, w は cartesian 座標系での x, y, z 方向の変位である。

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \\ v &= \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 z \\ w &= \alpha_9 + \alpha_{10} x + \alpha_{11} y + \alpha_{12} z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

モデルの組立てにあたっては、3角柱要素を基本単位に考え、自動発生して求めた3個の4面体要素の和をその剛性行列として計算した。

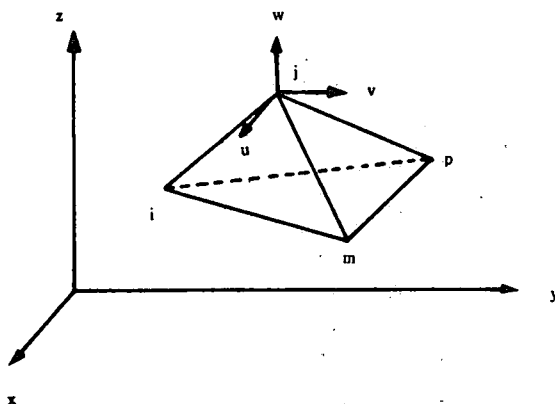


Fig. 2 Three dimensional finite element

- (2) 上記のような線型要素を用いたのは、
 イ) 特に3次元解析に際し、モデル化が容易であること、
 ロ) 縦ヒズミを表現しやすいこと、

の理由による。

解 析 例

(1) ダム-貯水池系の3次元モデル

Fig. 3 に示すように、地山部に近いダム堤体、地山部、基礎地盤を含む全面遮水貯水池系を例にとる。ダム堤体斜面部、地山斜面部ののりこう配はともに1:2とする。ダム高 H 、地盤深さ D 、池敷巾 W としたとき、モデル A (破線で囲まれた領域、 $H=20\text{ m}$ 、 $D=30\text{ m}$ 、 $W=20\text{ m}$)、水平方向に領域を拡大したモデル B ($H=20\text{ m}$ 、 $D=30\text{ m}$ 、 $W=40\text{ m}$)、さらに下方地盤内に領域を拡大したモデル C ($H=20\text{ m}$ 、 $D=60\text{ m}$ 、 $W=40\text{ m}$) の3例を用いた。それぞれのモデルの節点数、要素数は Table-1 に示す。

領域内の弾性係数は一様で、 $E=1,000\text{ kg/cm}^2$ とした。

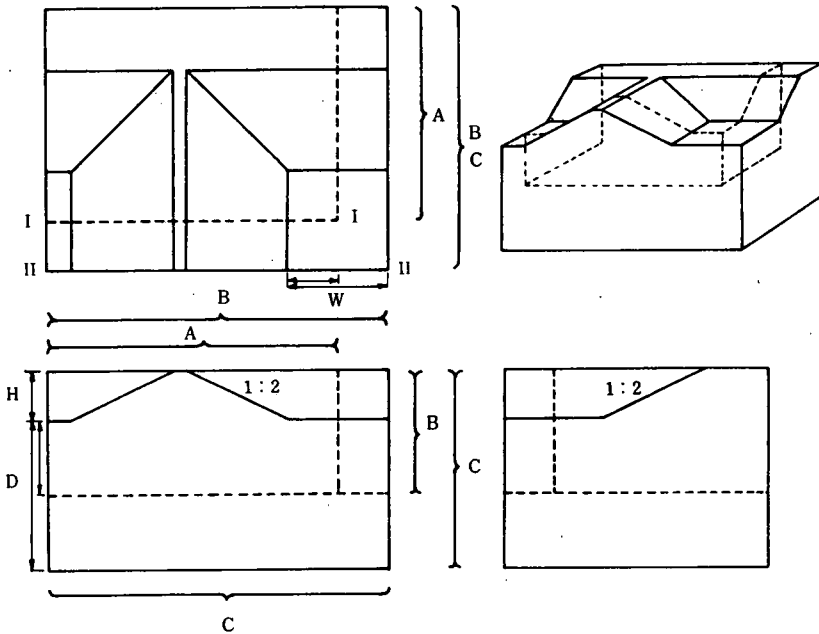


Fig. 3 Model of Dam-Reservoir system

(2) ダム-貯水池系の2次元モデル

ダム堤体を含む鉛直断面について2次元のモデルを作成した。断面あたりの要素の密度は3次元モデルに等しくした。Fig. 3のI-I断面、II-II断面について計算した。

(3) 外力

外力はダム高 H の $7/8$ を満水位の状態と考え、その静水圧を外力とした。

Table-1 Node numbers and element numbers

モデル	節点数	要素数
A	283	981
B	364	1302
C	442	1674

結果とその考察

(1) 変形について

イ) モデルA, B

Fig. 3 に示されたモデルAのI-I断面と、モデルBのII-II断面の2例について、ダム・池敷の貯水面の変形を描いたものが Fig. 4 である。又、Fig. 4 に示される代表的な点についての x , z 方向の変位量を示したものが Table-2 である。これにはモデルBについて得られたI-I断面と、モデルAと同じ断面形についての2次元モデルの断面の変位についても記してある。表の括弧内の数値は、各点におけるモデルBの変位量に対する比である。Fig. 4, Table-2 から、沈下量についてはほぼ4例とも一致した傾向にあると考えられる。一方、水平変位量については、モデルA, 2次元モデルともに側方拘束の影響がモデルBに比べ顕著である。又、モデルBのI-I断面とモデルAの同一断面とは、特に沈下量についてはよく一致しているが、このことは、モデルA程度の領域でも、その領域内での沈下量を比較的良好に表わしていると考えられるが、沈下量の最大値を表わすには領域が不足していることを示唆している。

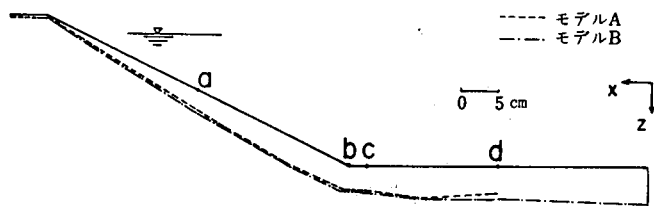


Fig. 4 Deformation of Dam-Reservoir system, Model A and B

Table-2 Displacement values of reservoir surface, Model A, B and two dimensional model

	a		b		c		d	
	x	z	x	z	x	z	x	z
B (II-II)	0.86	2.63	0.89	3.30	0.80	3.37	0.37	4.14
B (I-I)	0.75 (0.87)	2.41 (0.92)	0.81 (0.91)	3.02 (0.92)	0.67 (0.84)	3.27 (0.97)	0.32 (0.87)	4.14 (1.00)
A (I-I)	0.52 (0.61)	2.42 (0.92)	0.63 (0.71)	3.05 (0.92)	0.52 (0.65)	3.15 (0.94)	—	3.34 (0.81)
2 Dim.	0.76 (0.88)	2.45 (0.93)	0.71 (0.80)	3.35 (1.02)	0.57 (0.71)	3.52 (1.05)	—	4.32 (1.04)

; cm

ロ) モデルC

水平・鉛直方向ともに大きい領域のモデルCのII-II断面と、その断面と同じ領域の2次元モデルの2例について、ダム・池敷の表面の変形を描いたものが Fig. 5 である。又、Fig. 5 に示される代表的な点について、 x , z 方向の変位量を示したものが Table-3 である。これにはモデルCについて得られたI-I断面の変位量についても記してある。Fig. 5, Table-3 から、イ)と同様に沈下量についてはほぼ一致した傾向にある。3次元モデルのI-I断面とII-II断面についてもイ)と同様の傾向がある。2次元解析と3次元解析の結果を比べてわかることは、2次元解析

の方が3次元解析の結果よりもx方向の変位が比較的大きいことである。これはイ)のモデルAと2次元モデルとの間についても言えることである。又、I-I断面とII-II断面で、変位量に差異があり、これらのことから、地山部近傍では堤軸方向の断面が平面ヒズミ状態には無いという当然の結果を示している。

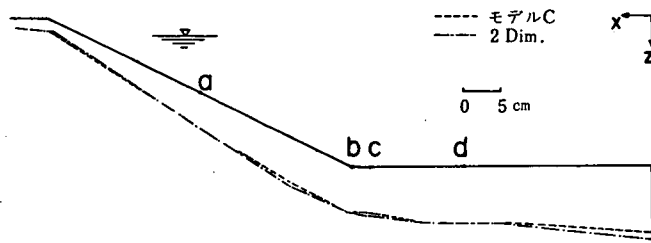


Fig. 5 Deformation of Dam-Reservoir system, Model C

Table-3 Displacement values of reservoir surface, Model C and two dimensional model

	a		b		c		d	
	x	z	x	z	x	z	x	z
C (II-II)	0.43	4.48	0.68	6.03	0.59	6.21	0.27	7.57
C (I-I)	0.31 (0.72)	4.10 (0.92)	0.62 (0.91)	5.50 (0.91)	0.50 (0.85)	5.85 (0.94)	0.22 (0.82)	7.25 (0.96)
2 Dim.	0.44 (1.02)	4.44 (0.99)	0.77 (1.13)	6.27 (1.04)	0.66 (1.12)	6.54 (1.05)	0.27 (1.00)	7.60 (1.00)

; cm

(2) ヒズミについて

Fig. 6, 7, 8 はそれぞれモデルA, B, Cのダム上流斜面, 地山部, 池敷部表面の変形の平面図と, 縦ヒズミ量を表わす。数値はその付近の線分のヒズミの大きさを表わしており, (一)は圧縮ヒズミである。比較のため, 2次元の有限要素モデルを作り, 貯水面のヒズミを調べた (Fig. 9 参照)。斜面部は3次元モデルよりメッシュを細かくしてある。

Fig. 6, 7 を比較すると, モデルAの側方の拘束のために境界付近のヒズミに差異があり, 特にI-I面に平行な断面では明らかに拘束の影響が強いと考えられる。その他の区域でも個々の数値に変動がみられるが, 隅角部付近では傾向はほぼ一致しているとみなすことができる。特に最大引張ヒズミの発生する地点は両モデルとも隅角部付近の同様の個所に表われており, この付近で最大引張ヒズミが生じることがわかる。Fig. 8の大領域モデルについても, Fig. 7と比較すると両者のヒズミ分布はほぼ一様であると言える。個々の数値に多少の変動がみられるが, それが下方地盤領域が深くなったことによる影響であるのか, あるいは数値計算上の誤差であるかどうかはこれだけで結論付けることはできない。

一方, 2次元モデルについてみると (Fig. 9, Table-4 参照), 最大引張ヒズミの大きさは 6.5×10^{-4} であり, 3次元解析においてダム軸に垂直な方向についての最大引張ヒズミは 5.9×10^{-4} であり, ダム軸に平方な方向の最大引張ヒズミは 8.4×10^{-4} である。これらのことから最大引張ヒズミのオーダーは2次元系から示唆されることができるとは思われるが, ヒズミ分布は2, 3次元系の間にかかなりの差異のあることがわかる。

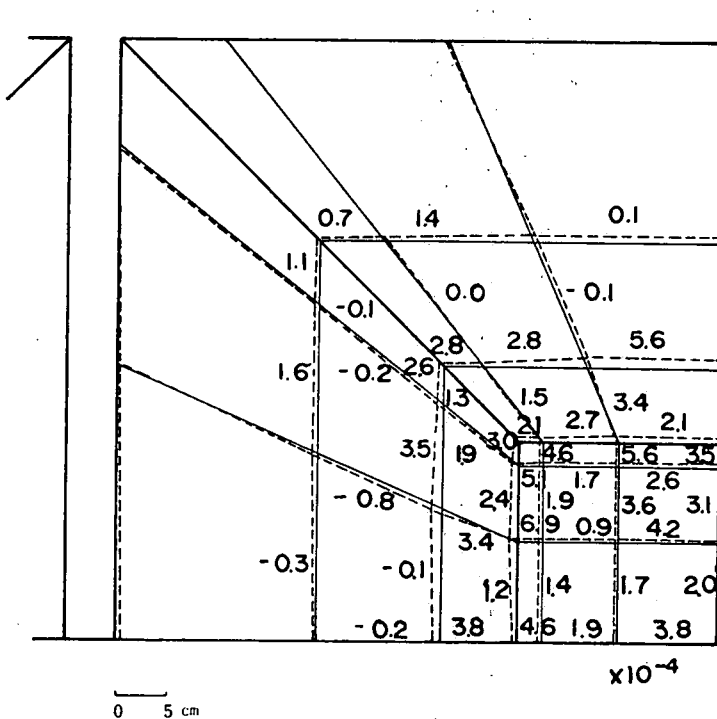


Fig. 6 Deformation of Dam-Reservoir system (ground plane) and the longitudinal strain, Model A

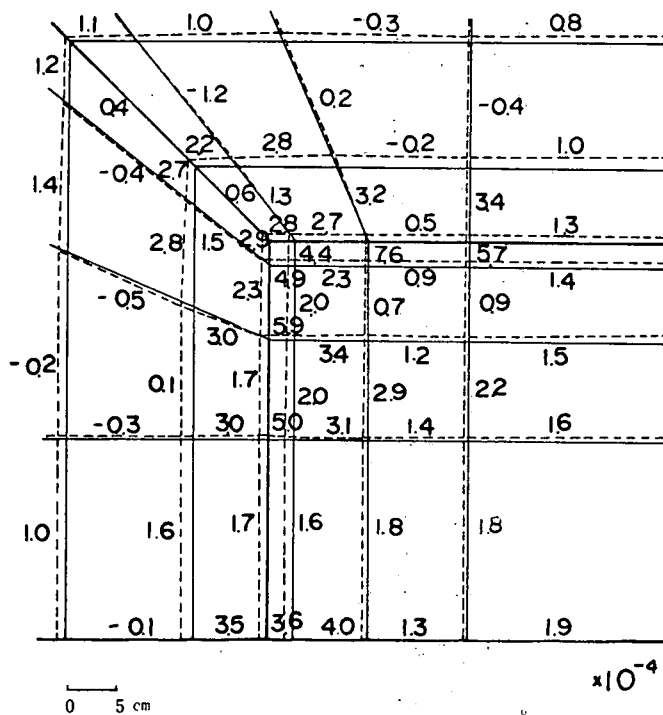


Fig. 7 Deformation of Dam-Reservoir system (ground plane) and the longitudinal strain, Model B

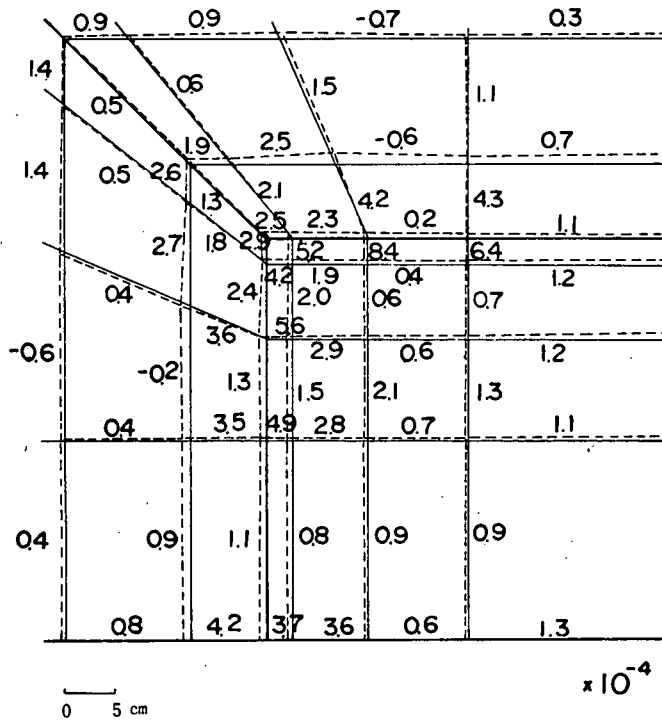


Fig. 8 Deformation of Dam-Reservoir system (ground plane) and the longitudinal strain, Model C

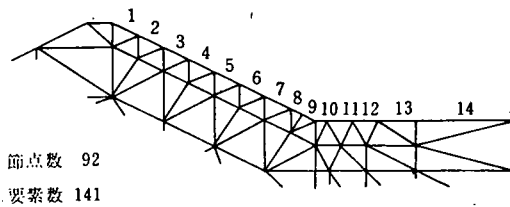


Fig. 9 Two dimensional finite element model for strain analysis

Table-4 Longitudinal strains on two dimensional model

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ヒズミ量	1.2	1.3	1.7	1.5	1.4	1.0	2.0	3.9	6.5	6.1	4.4	3.6	3.3	-0.3

$\times 10^{-4}$

結 語

ダム堤体、地山、地盤を含む3次元有限要素モデルと2次元有限要素モデルについて静水圧荷重による貯水面の変形、ヒズミを調べ、その特徴と、2、3次元モデルによる結果の比較、領域の変化による解析結果の比較検討を行った。その結果：

- (1) 変形からみて、ダム、地山、池敷の接合点に近づくとき、平面ヒズミ状態から遠くなる。
- (2) 沈下量については、2、3次元モデルで差異は僅少である。

(3) ヒズミからみて、水平方向の領域はモデル A では拘束の影響が強く、これより或る程度大きな領域（モデル B 程度）が必要である。

(4) 最大引張ヒズミは 2 次元系から示唆されるが、ヒズミ分布は 3 次元系とかなりの差異がある。

ことがわかった。

なお、本解析の計算は、京都大学大型計算機センターの FACOM 230—60, 230—75を使用した。

(昭和49年9月30日受理)

引用文献

- 1) Zienkiewicz O. C. : The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill (1971)