

## フィルダム 監査廊の応力解析

藤 居 良 夫\*

---

Stress Analysis of Fill Dam Gallery

Yoshio FUJII

---

This paper describes the influence of foundation rock properties (elastic modulus, Poisson's ratio) on the stress characteristics of the cross section of the fill dam gallery subjected to embankment load which has three shapes of the lateral side by using the finite element analysis. And the following results are obtained. (1) Tensile stresses at the top of the opening and the shoulder in the gallery decrease when Poisson's ratio of foundation rock is large. (2) Tensile stress at the shoulder and compressive stress at the contact area between the base plate and the side plate decrease when elastic modulus of foundation rock is large. (3) It is desirable to select the gallery which has the steep slope of the lateral side to prevent the occurrence of crack.

### I. ま え が き

フィルダム完成後における基礎岩盤内の異常を監視し、異常の発生があれば、その対処を容易にすることを意図して、近年、フィルダムに監査廊を設置するケースが多くなっている。最近のダム建設では、堤体断面が大きく堤高が高くなる傾向にあり、異常の発生位置を検証する上で監査廊の役割は大きいといえる。

この監査廊は構造上からコンクリート構造物となり、その剛性は基礎岩盤や堤体と比べて非常に大きくなる。近年では、良好なダムサイトが少なくなり、劣悪な基礎岩盤上に監査廊を設置する機会が多いことを考えると、監査廊と基礎岩盤との剛性の相異や基礎岩盤の物性、監査廊の形状等が監査廊断面の応力特性に及ぼす影響を把握して、合理的な設計を行う必要がある。

本報告は、基礎岩盤を含めた複合体としてカルバート型監査廊の横断面を考え、有限要素法によってその力学の挙動を解析し、基礎岩盤の物性（弾性係数とポアソン

比）の変化の影響を3種類の監査廊断面で検討したものである。

### II. 解析モデルと解析方法

本解析で考えたモデルは、Fig. 1 に示すような左右対称な左半分の横断面の3種類モデルである。すなわち、Fig. 1(a) で示すような監査廊側面が鉛直である場合（断面モデルA）、Fig. 1(b) で示すような監査廊側面の傾斜角が約73°の場合（断面モデルB）、さらにFig. 1(c) で示す監査廊側面の傾斜角が約65°と緩やかな場合（断面モデルC）の3種類である。解析モデルの境界条件は、中心断面および側面で水平方向固定、鉛直方向滑動とし、底面では水平および鉛直方向ともに固定とした。また、監査廊と基礎岩盤の接触部は完全に拘束され一体構造であると考え、平面ひずみ条件で解析した。さらに、監査廊断面の挙動の基本特性を知る目的から、荷重条件として、監査廊と基礎岩盤の上面に堤高約100m程度の堤体を想定した1.96 MPaの等分布鉛直荷重を考えた。なお、解析モデルについて、断面モデルA

\* 農業施設工學研究室

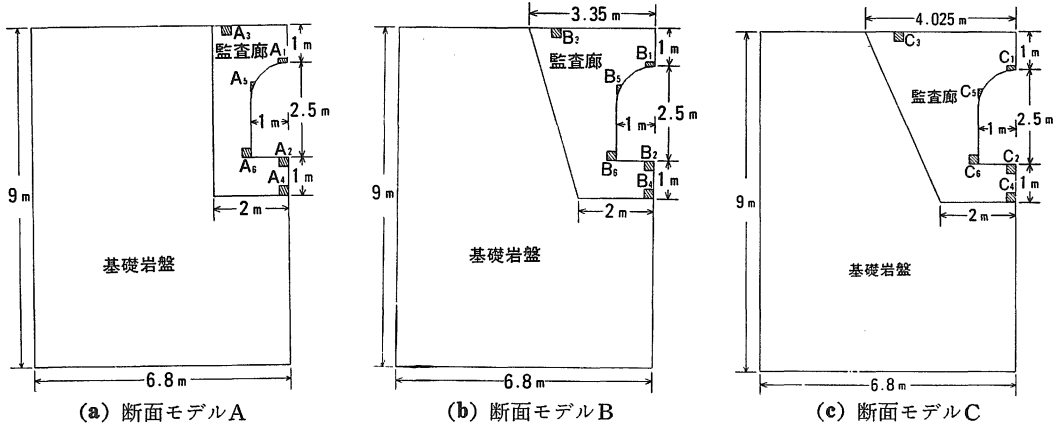


Fig. 1 解析モデルと解析結果の比較を行った要素

Table 1 解析に用いた材料の物性値

監査廊 コンクリート	圧縮強度	25.1 MPa
	引張強度	2.94 MPa
	初期弾性係数 $E_{co}$	$2.06 \times 10^4$ MPa
	ポアソン比 $\nu_c$	0.18
	単位体積重量	2500 kg/m <sup>3</sup>
基礎岩盤	弾性係数 $E_r$	$k \times E_{co} \left( k = \frac{1}{35}, \frac{1}{21}, \frac{1}{6} \right)$
	ポアソン比 $\nu_r$	0.2, 0.25
	単位体積重量	2600 kg/m <sup>3</sup>

で要素数 267, 節点数 283, 断面モデル B で要素数 314, 節点数 328, 断面モデル C で要素数 334, 節点数 347 である。

監査廊コンクリートと基礎岩盤の物性値として Table 1 に示す値を用いた。すなわち、監査廊コンクリートの物性値は一定として標準的な値を用いた。一方、基礎岩盤の物性が監査廊の応力特性に及ぼす影響を調べるため、その弾性係数を 3 種類 (監査廊コンクリートの初期弾性係数に対する割合で表わした) およびポアソン比を 2 種類についての代表的な結果を示した。

解析方法として、コンクリート材料は非弾性挙動を示し、多軸応力場にあると考えるとより実際であるから、監査廊コンクリート<sup>1)</sup>に対して Bazant 等が提案した endochronic 構成関係を用い、基礎岩盤に対して弾性構成関係を用いた。endochronic 構成関係を用いた有限要素解析については既報の手順に従い、作用させた堤体荷重を 10 分割した増分型繰返し計算を行った。

### III. 解析結果と考察

基礎岩盤の弾性係数比  $k = E_r/E_{co} = 1/35$ , ポアソン比  $\nu_r = 0.2$  とした場合の監査廊横断面の主応力状態を

代表例として Fig. 2 に示した。この図の (a), (b), (c) はそれぞれ、3 種類の監査廊断面 (断面モデル A, B, C) についてである。一般的な傾向として、監査廊断面の上版部内面と、上版外面肩部および底版部内面の水平方向に引張応力が発生している。さらに、監査廊の側面が鉛直である断面モデル A では、底版外面端部で引張応力の発生が見られる。また、側版部の鉛直方向および底版外面中央部の水平方向に圧縮応力の発生が顕著である。

基礎岩盤の物性が上述と同様で、とくに断面モデル B について、その主応力分布と変形状態を Fig. 3 に示した。この図の (a), (b), (c) はそれぞれ、最大主応力分布と最小主応力分布および変形状態を表わす。ただし、断面応力は引張応力を正、圧縮応力を負としている。監査廊上版肩部付近と底版部内面に引張応力の集中が見られる。また、底版部内面から水平打継目部にかけ圧縮応力の集中があり、側版部の鉛直方向の圧縮応力発現が顕著である。さらに、堤体荷重による変形状態については、監査廊が基礎岩盤中へ貫入するように沈下して、水平方向変位が監査廊上面では引張側に、底版下面では圧縮側になるような変形をしている。

以上のことを考慮に入れて、基礎岩盤の物性が 3 種類の監査廊断面形状に及ぼす影響を調べるため、Fig. 1 の斜線部分で示す代表的な要素 (断面モデル A について  $A_1 \sim A_6$ , 断面モデル B について  $B_1 \sim B_6$ , 断面モデル C について  $C_1 \sim C_6$ ) について、各断面応力を比較した。応力の比較に当たっては、Fig. 4~Fig. 9 に示すように、作用させた堤体荷重  $P$  に対する断面応力  $\sigma$  の割合 (応力比  $\sigma/P$ ) で整理した。各図の記号は、Table 2 に示すような基礎岩盤の物性を表わす。

#### 1 上版部内面の引張応力

Fig. 1 に示す斜線部要素  $A_1, B_1, C_1$  の最大引張主応力について、断面モデルと応力比の関係を Fig. 4 に

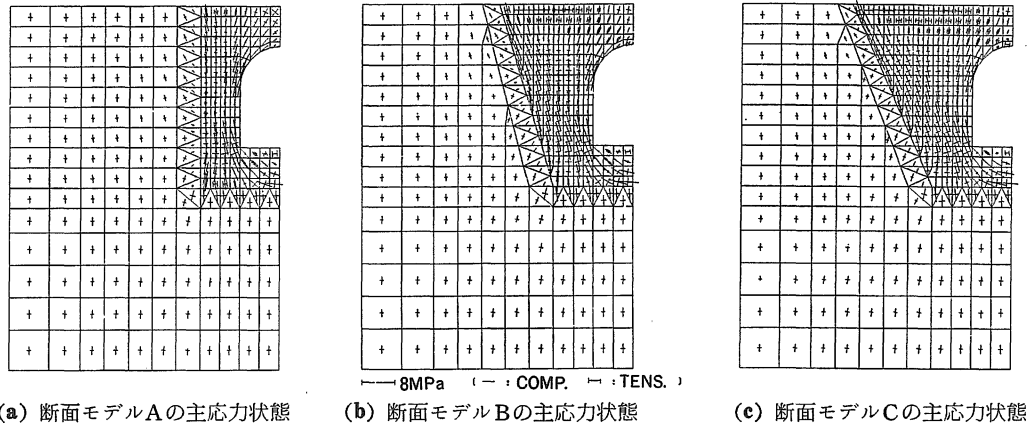


Fig. 2 監査廊横断面の主応力状態

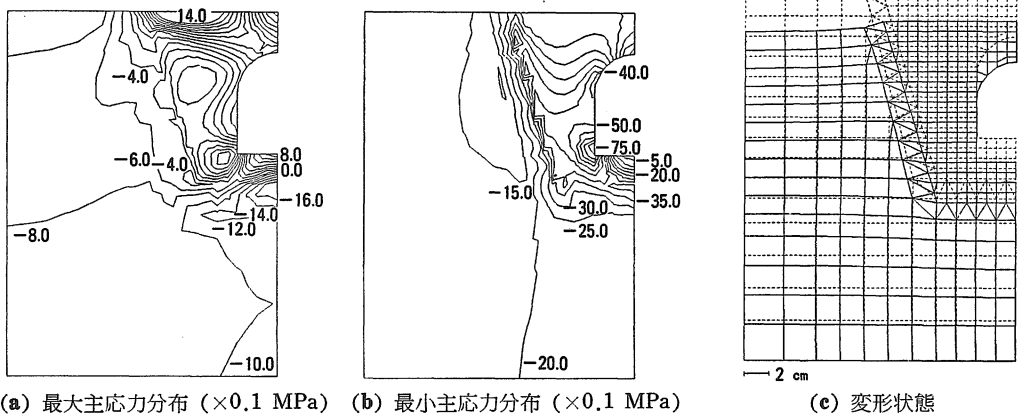


Fig. 3 断面モデルBの主応力分布と変形状態

Table 2 Fig. 4~Fig. 9 の凡例 ( $k=E_r/E_{co}$ )

○—○	$k=1/35, \nu_r=0.2$
○- - -○	$k=1/35, \nu_r=0.25$
□—□	$k=1/21, \nu_r=0.2$
□- - -□	$k=1/21, \nu_r=0.25$
△—△	$k=1/6, \nu_r=0.2$
△- - -△	$k=1/6, \nu_r=0.25$

示す。基礎岩盤のポアソン比を大きくした場合ほど引張応力は減少しており、この影響は監査廊側面が傾斜している場合に大きい。基礎岩盤の弾性係数比の影響は顕著でない。また、監査廊の形状では、側面の傾斜角が緩やかな場合ほど引張応力が增大している。これは、ポアソン比の増大により基礎岩盤の水平方向変位が大きくなり、監査廊上版部の水平変位が抑えられるためと考えられるが、上版部幅が小さいとき、その程度は大きいといえる。

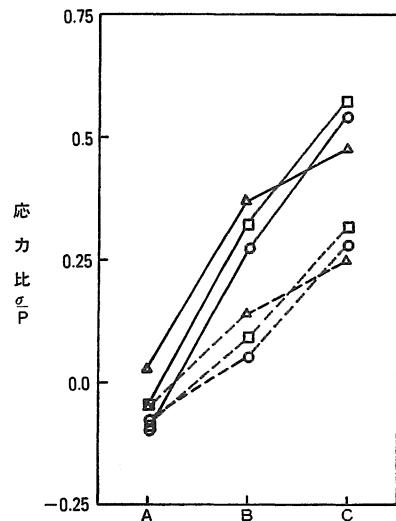


Fig. 4 A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>要素の引張応力比

2 底版部内面の引張応力

Fig. 1 に示す斜線部要素A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>の最大引張主応力について、断面モデルと応力比の関係を Fig. 5

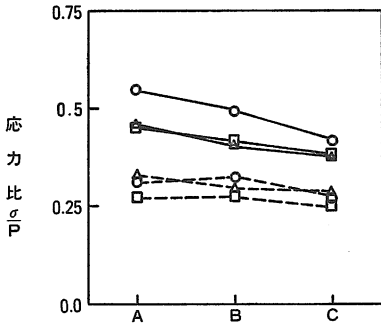


Fig. 5 A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>要素の引張応力比

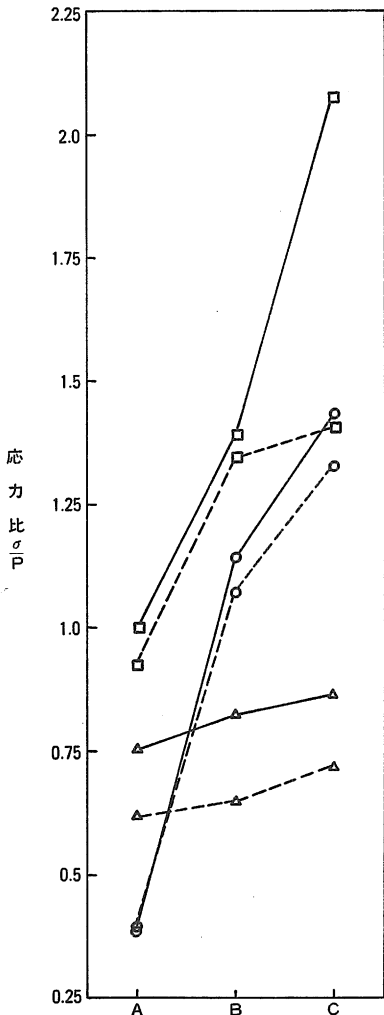


Fig. 6 A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>要素の引張応力比

に示す。この場合も、基礎岩盤の弾性係数比の影響は見うけられないが、基礎岩盤のポアソン比を大きくするほど引張応力は減少してくる。監査廊の形状では、側面の傾斜角が緩やかな場合、引張応力はやや減少することがわかる。これは、監査廊の構造的特徴が中空断面の両側版と底版を基礎岩盤で支持する梁状構造であるため、側面の傾斜角が緩やかで上版幅が大きい場合ほど上版部の水平方向変位が大きくなり、かえって底版部の水平変位が抑えられるためと考えられる。

3 上版外面肩部の引張応力

Fig. 1 に示す斜線部要素A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>の最大引張主応力について、断面モデルと応力比の関係を Fig. 6 に示す。基礎岩盤のポアソン比が大きくなると引張応力は減少する傾向にあるが、この影響は、側面の傾斜角が緩やかなほど著しい。基礎岩盤の弾性係数比を大きくしていく場合、つまり基礎岩盤を堅固であると見なすとき、引張応力は一旦増加するが、以降減少する傾向にある。また、監査廊の形状では、側面の傾斜角が緩やかになるほど引張応力は増大することがわかる。これは、上版幅が大きいほど監査廊上表に作用する堤体荷重が増大し、基礎岩盤との剛性の相異から梁の曲げに似た挙動を示すためと考えられる。

4 底版部外面の圧縮応力

Fig. 1 に示す斜線部要素A<sub>4</sub>, B<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>の最大圧縮主応力について、断面モデルと応力比の関係を Fig. 7 に示す。基礎岩盤の弾性係数比が大きくなり、基礎岩盤が堅固であると考えられるほど水平方向の圧縮応力は減少している。これは、監査廊側面の傾斜角が緩やかである形状ほど大きく影響する。基礎岩盤のポアソン比による影響

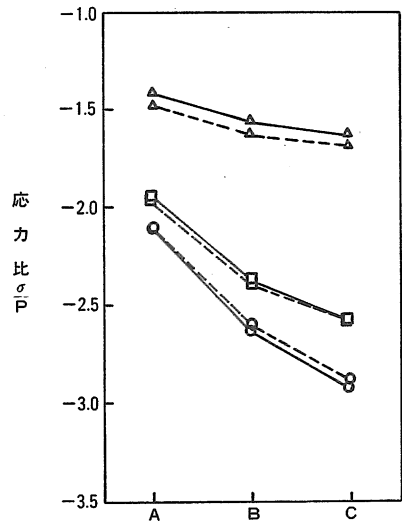


Fig. 7 A<sub>4</sub>, B<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>要素の圧縮応力比

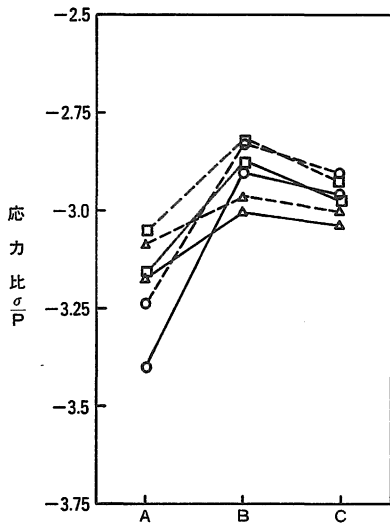


Fig. 8 A<sub>5</sub>, B<sub>5</sub>, C<sub>5</sub>要素の圧縮応力比

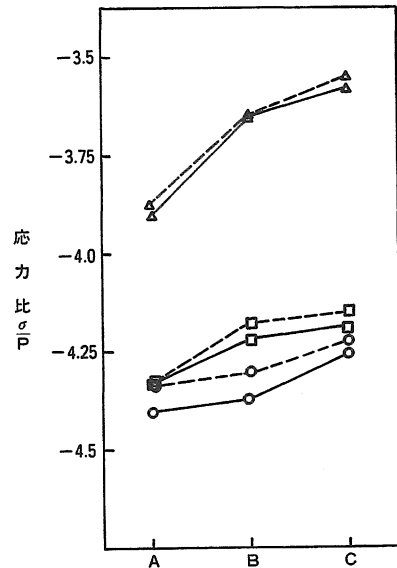


Fig. 9 A<sub>6</sub>, B<sub>6</sub>, C<sub>6</sub>要素の圧縮応力比

は顕著でない。また、監査廊の形状では、側面の傾斜角が緩やかになるほど水平方向の圧縮応力が增大してくることがわかる。

#### 5 側版部内面の圧縮応力

Fig. 1 に示す斜線部要素 A<sub>5</sub>, B<sub>5</sub>, C<sub>5</sub> の最大圧縮主応力について、断面モデルと応力比の関係を Fig. 8 に示す。基礎岩盤のポアソン比が大きくなるほど、圧縮応力は減少している。基礎岩盤の弾性係数比の影響は監査廊側面が鉛直である形状において大きく、基礎岩盤が堅固であると考えるほど圧縮応力は減少する傾向にある。監査廊の形状では、側面が鉛直である場合に圧縮応力は大きく発現し、側面が傾斜するとき圧縮応力は減少する傾向にあるが、傾斜角がかなり緩やかになると却って圧縮応力がやや増加に転ずる傾向が見られる。

#### 6 水平打継目部の圧縮応力

Fig. 1 に示す斜線部要素 A<sub>6</sub>, B<sub>6</sub>, C<sub>6</sub> の最大圧縮主応力について、断面モデルと応力比の関係を Fig. 9 に示す。基礎岩盤の弾性係数比を大きくとり基礎岩盤が堅固であると考えられる場合、圧縮応力は減少してくる。基礎岩盤のポアソン比が大きくなる時、圧縮応力はやや減少する傾向にある。また、監査廊の形状に関しては、側面の傾斜角が緩やかになるほど圧縮応力は減少してくることがわかる。

### IV. あとがき

本報告では、カルバート型監査廊の横断面を対象とし

て、基礎岩盤の物性が側面の傾斜を考えた3種類の監査廊断面の応力特性に及ぼす影響を検討した。これらの結果から以下のことが述べられる。

- (1) 基礎岩盤のポアソン比はとくに、上版部内面と外面肩部の引張応力に影響して、ポアソン比を大きくとるほど引張応力の減少が顕著である。
- (2) 基礎岩盤の弾性係数はとくに、水平打継目部の圧縮応力と上版外面肩部の引張応力に影響して、弾性係数を大きくとる場合に各応力は減少する傾向にある。

したがって、監査廊の設計においては、基礎岩盤のポアソン比と弾性係数を小さく評価することが安全側の設計であるといえる。

- (3) 監査廊は堤体の止水を担う重要部分の基礎に設置されるコンクリート構造物である点から、ひび割れ発生に十分注意する必要がある。そのため、上版部内面と外面肩部、さらに底版部内面の引張応力の発生を小さくする断面形状を検討する必要がある。

したがって、監査廊の設置の際の岩盤掘削における岩のすべり等により、側面が少々傾斜してくることを考慮に入れ、さらに、水平打継目部の圧縮応力が增大し、底版外面端部に少々引張応力が発生するが、コンクリートの耐力を考えると、これらの重大な影響はないと思われる。また、前述の重大な引張応力の発生が抑制される点を考慮すると、側面が鉛直に近い形状の監査廊が好ましい。

また、実際の監査廊設計では、今回は考えなかった以下の点を検討することが必要である。

(4) 監査廊はマスコンクリート構造物であるから、コンクリート打設後の外部拘束および内部拘束による温度応力を検討して、ひび割れ発生を防ぐ設計を確立する。

(5) 監査廊と基礎岩盤の接触部の拘束度を考慮して、より実際の挙動を検討する。

フィルダム監査廊の設置に関する経験は浅く、その実挙動は明らかでないのが現状である。そこで、以上述べたような点を十分に考慮して、安全性が確保される監査廊の設計が望まれる。

最後に、本研究をすすめるに当たり、御指導を賜った京都大学農学部長谷川高士教授、および本報告をまとめる機会を与えて下さった本学農学部鳥山暁司教授、野中資博助教授に深謝の意を表わします。

なお、本解析は京都大学大型計算機センター M-382 を利用した。

## 引用文献

1. BAZANT, Z. P. and C. L. SHIEH: Nuclear Engineering and Design 47: 305-315, 1978
2. 藤居良夫・長谷川高士: 農土学会 論文集 118: 43-51, 1985.