

名古屋大学工学部土圧研究施設 正員 市原 松平

〃 〃 〇桑山 忠

1. まえがき

土構造物であるフィルダムには、施工中、施工後の安全性を管理するために各種の観測計器が埋設される。土中土圧計もそのうちの1つとして埋設されるが、間けき水圧計、沈下計などにくらべ、計測値をそのまま安全性の検討に利用できないため、埋設しても計測値のまま放置され、観測計器としての本来の目的をはたしていない場合が多い。この報告では、すでに完成しているフィルダムの土中土圧計の計測値を解析し、結果の表示方法およびフィルダムの管理への適用法について提案した。

2. 土中土圧計の計測原理および解析

一般に用いられる土圧計は受圧面に垂直な方向の土圧のみを測定する構造になっている。一方、土中の応力は6成分($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$)によって表示されるので、測定した垂直土圧より応力の6成分を知ることが必要となる。空間座標(x, y, z)のある面に作用する垂直応力 σ_z は次式で与えられる。

$$\sigma_z = l_z^2 \sigma_x + m_z^2 \sigma_y + n_z^2 \sigma_z + 2l_z m_z \tau_{xy} + 2m_z n_z \tau_{yz} + 2n_z l_z \tau_{zx} \quad (l_z, m_z, n_z \text{ は方向余弦}) \quad (1)$$

2.1 二次元土圧計

二次元の場合、任意面の法線と z 面とは 90° で交差するので、 $m_z = 0$ となり、(1)式は次のようになる。

$$\sigma_z = l_z^2 \sigma_x + n_z^2 \sigma_z + 2n_z l_z \tau_{zx} \quad (2)$$

(2)式より、3つ以上の任意面の垂直応力を測定すれば、 $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{zx}$ が決定でき、主応力の大きさと方向が次式で求まる。

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} \{ (\sigma_x + \sigma_z) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{zx}^2} \} \quad (3)$$

$$l_{1,2} = \frac{\tau_{zx}}{\sqrt{(\sigma_{1,2} - \sigma_x)^2 + \tau_{zx}^2}} \quad (4)$$

$$\theta_{1,2} = \cos^{-1} l_{1,2} \quad (5)$$

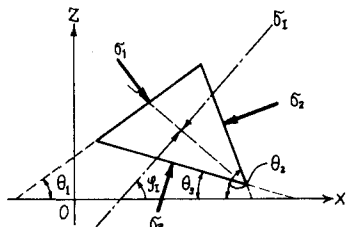


図-1 二次元土圧計の計測原理

表-1 方向余弦

	l	m
σ_1	$-\sin \theta_1$	$\cos \theta_1$
σ_2	$\sin \theta_2$	$\cos \theta_2$
σ_3	$-\sin \theta_3$	$-\cos \theta_3$

図-1のような垂直応力($\sigma_x, \sigma_z, \sigma_z$)を測定すれば、表-1の方向余弦をつかって式(3),(4),(5)により主応力の大きさと作用方向が容易に求めらるようになる。

2.2 三次元土圧計

三次元の場合には、6つ以上の任意面の垂直応力を測定し、6つの応力成分を求めることとなる。(1)式によって、応力成分がわかれば、主応力は(6)式の3次方程式の3根として与えられる。また、主応力の作用方向は(4)式を連立させて、それぞれの主応力に対し方向余弦で与えられる。

$$\sigma^3 - \alpha \sigma^2 + \beta \sigma - \gamma = 0 \quad (6)$$

$$\alpha = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$\beta = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2$$

$$\gamma = \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}$$

$$\sigma = \sigma_x + \frac{m \cdot \tau_{xy} + n \cdot \tau_{yz}}{l} = \sigma_y + \frac{l \cdot \tau_{xy} + m \cdot \tau_{yz}}{m} = \sigma_z + \frac{l \cdot \tau_{zx} + m \cdot \tau_{yz}}{n} \quad (7)$$

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (8)$$

この種の土中土圧計としては正12面体のうち、互いに平行でない6面に土圧計を取付けられたもの、正6面体の各

頂点を切り落とし、互いに平行でない7面に土圧計を取付けたものなどがある。7面体土圧計は(4)式を解くに必要な直応力が1個余計にあるため、測定値が検定できるという利点を有している。

3. 解析結果の表示方法

土中土圧計の解析結果として得られた主応力の大きさと方向は二次元土圧計の場合、容易に表示されるが、三次元土圧計の場合は平面上に表示するのが困難である。しかし、鉱物の結晶面を表示するために、ステレオ投影法が使われており、この方法が三次元の主応力方向を表示するのに利用できる。この場合、方向余弦を(4)式によって経緯度に変換し、これを赤道面に投影する(図-2参照)。

$$\left. \begin{aligned} \text{経度 } \theta &= \tan^{-1}(m/l) & 0 \leq \theta < 360^\circ \\ \text{緯度 } \varphi &= \cos^{-1} n & -90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{aligned} \right\} \text{--- (9)}$$

図-3はこの方法によって3つの主応力の方向を実測値でプロットしたものであり、主応力の作用方向の動きが容易によみとることができる。また、主応力は応力履歴で示すことにより、盛土材料の試験結果、あるいは設計強度と対応させることができ、フィルダムの安定性について検討を加えることができる。

4. 解析例

ここで解析した土中土圧計は二次元の3面体土圧計、三次元の6面体土圧計、7面体土圧計の3種である。図-4,5,6は応力履歴を示したものであり、図-3は7面体土圧計のNo.1の主応力の方向をステレオ投影したものである。これらの解析例はすべて全応力解析であるため、図-5,6には野水圧の影響がでてきており、応力履歴は類似した経路をたどっていることがわかる。図-4では応力履歴に同時期に変曲点が見られ、これと対応して、図-3の主応力方向にも変化が見られる。このように、施工中、施工後のダム内部の応力状態の変化がわかり、その原因について多くのことが考察される。

5. 施工管理への適用

解析結果の施工管理への適用では、図-4,5,6に示したように、設計強度(あるいは試験強度)と対応させ、これを超えないように盛土を制御することが1つの方法として考えられる。また、この方法は施工後の管理にも適用できるが、この場合には、調査によって完成後の試験強度を把握することが大切となろう。

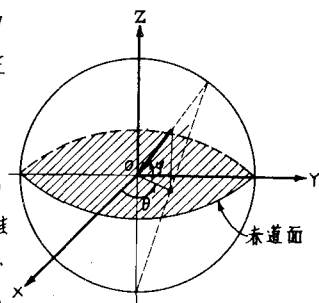


図-2 ステレオ投影法

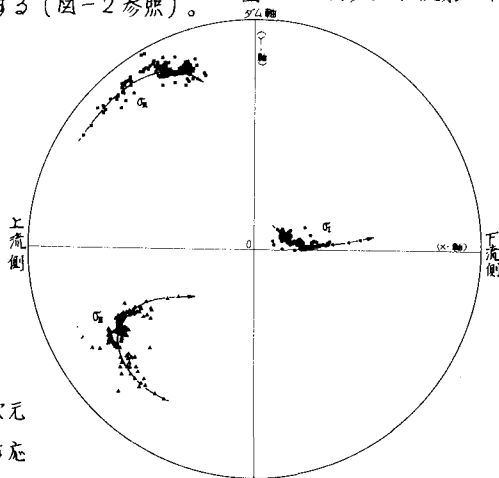


図-3 主応力作用方向のステレオ投影(7面体土圧計)

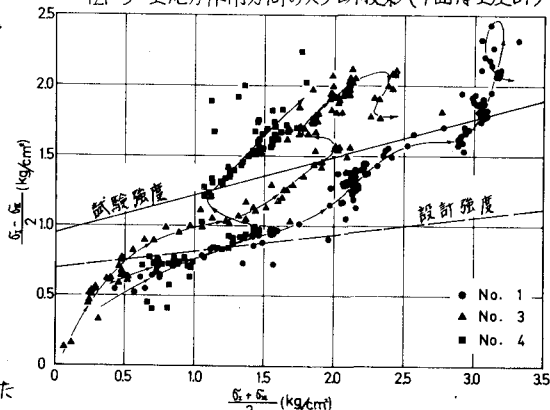


図-4 応力履歴(7面体土圧計)

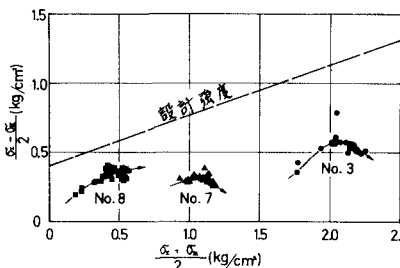


図-5 応力履歴(6面体土圧計)

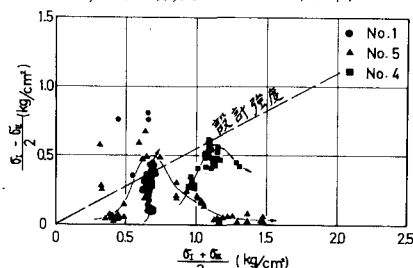


図-6 応力履歴(3面体土圧計)