

中部電力株式会社 正員 ○宮 ロ 友 延
総合技術研究所 正員 戸 田 五 郎

1. まえがき

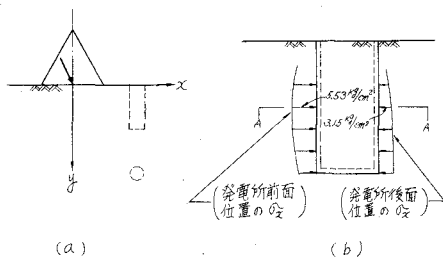
近年水力発電設備の増設に際して、特にその経済性の観点から、地下式または半地下式発電所の建設が各所で行われてきた。当社でも高根寺2発電所の建設に当り、放水路およびトンネルの工事費節減を目的として開発方式を検討した結果、ダム直下流のダム軸より45mの位置に地表下30mの円筒構造を設け、その中に水車および発電機を設置する計画となった。

このようにダムに近接して建設される地下式円筒周壁は当然ダムからの伝達応力をうける。このような円筒周壁の応力を解明するために、一様な荷重状態の二次元無限板の弾性理論解を求め、いくつかの弾性定数によって応力を計算し、弾性定数の変動や発電所周壁と周辺岩盤の接合条件が応力分布に与える影響を検討して、さらにモデル化した荷重状態での光弾性実験および有限要素法による計算を行い、それぞれの結果によって比較した。

2. 発電所位置のダムからの伝達応力

右図(a)に示すようにダム基礎を半無限体として、高根寺2発電所の場合についてダムからの伝達応力の水平成分を発電所位置で求めると、右図(b)のような分布となる。

発電所構造から考えて、円筒周壁の設計を行うには、円筒の適当な水平断面について応力解析を行えば十分であるから、右図(b)のA-A断面について検討した。



(図-1)

しかしこのように三次元問題を二次元問題としてとりあつかうところに、発電所前面と後面で伝達応力が異なると言う困難な問題が生じるのであるが、まず一様な応力状態の場合の理論解を導き、さらにA-A断面の応力状態をモデル化して光弾性実験および有限要素法による応力解析を行った。

3. 弾性理論解とその計算結果

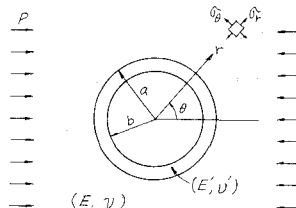
右図に示すように外径 a 、内径 b のリング(弾性係数 E' 、ポアソン比 ν')の孔をもつ無限板(弾性係数 E 、ポアソン比 ν)の無限縁に荷重 p が作用する場合を考える。

Airyの応力函数 (ϕ) をリング内および無限板に於て、それぞれ

$r \geq a$ のとき

$$\phi = Ar^2 + B \log r + (Dr^2 + Gr^2 + F) \cos 2\theta \quad \dots \dots (1)$$

$a \geq r \geq b$ のとき



(図-2)

$$\phi = A'r^2 + B'\log r + (C'r^4 + D'r^2 + G'r^2 + F') \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

とおき、各応力および変位成分を求めると、

$r \geq a$ のとき

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= 2A + B'r^{-2} - (6D'r^4 + 2G + 4F'r^2) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= 2A - B'r^{-2} + (6D'r^4 + 2G) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= -(6D'r^4 - 2G + 2F'r^2) \sin 2\theta \\ U_r &= \frac{1}{E} [2(1-\nu)Ar - (1+\nu)B'r^{-1} + \{2(1+\nu)D'r^3 - 2(1+\nu)Gr + 4F'r^{-1}\} \cos 2\theta] \\ U_\theta &= \frac{1}{E} [2(1+\nu)D'r^3 + 2(1+\nu)Gr - 2(1-\nu)F'r^{-1}] \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$a \leq r \leq b$ のとき

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= 2A' + B'r^{-2} - (6D'r^4 + 2G' + 4F'r^2) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= 2A' - B'r^{-2} + (12C'r^2 + 6D'r^4 + 2G') \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= (6C'r^2 - 6D'r^4 + 2G' - F'r^2) \sin 2\theta \\ U_r &= \frac{1}{E} [2(1-\nu)A'r - (1+\nu)B'r^{-1} + \{-4\nu C'r^2 + 2(1+\nu)D'r^3 - 2(1+\nu)G'r + 4F'r^{-1}\} \cos 2\theta] \\ U_\theta &= \frac{1}{E} [2(3+\nu)C'r^2 + 2(1+\nu)D'r^3 + 2(1+\nu)G'r - 2(1-\nu)F'r^{-1}] \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

となる。こゝらの各成分に境界条件を代入し、定数 $A, B, \dots\dots\dots A', B', \dots\dots\dots$ を決定すれば解が得られるのであるが、ここでは次の二つの場合について解を求めた。

境界条件 1 ; リングと無限板の境界面で剪断力が伝達される場合。

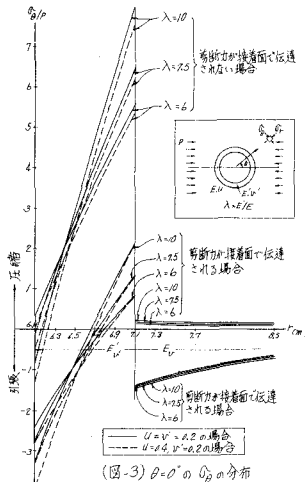
$$\left. \begin{aligned} r = \infty &\longrightarrow \sigma_r = \frac{P}{2}(1 + \cos 2\theta), \quad \sigma_\theta = \frac{P}{2}(1 - \cos 2\theta), \quad \tau_{r\theta} = -\frac{P}{2} \sin 2\theta \\ r = a &\longrightarrow \sigma_r = \sigma_r', \quad \tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}', \quad U_r = U_r', \quad U_\theta = U_\theta' \\ r = b &\longrightarrow \sigma_r' = 0, \quad \tau_{r\theta}' = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

境界条件 2 ; リングと無限板の境界面で剪断力が伝達されない場合。

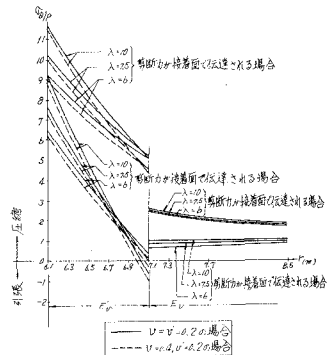
$$\left. \begin{aligned} r = \infty &\longrightarrow \sigma_r = \frac{P}{2}(1 + \cos 2\theta), \quad \sigma_\theta = \frac{P}{2}(1 - \cos 2\theta), \quad \tau_{r\theta} = -\frac{P}{2} \sin 2\theta \\ r = a &\longrightarrow \sigma_r = \sigma_r', \quad \tau_{r\theta} = 0, \quad \tau_{r\theta}' = 0, \quad U_r = U_r' \\ r = b &\longrightarrow \sigma_r' = 0, \quad \tau_{r\theta}' = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

以上の解により、いくつかの弾性定数の組合せについて、

$\theta = 0^\circ$ および $\theta = 90^\circ$ の σ_θ の分布を求めると (図-3), (図-4) のようになり、弾性定数をかなり大きく変化させてもリング内の応力分布はそれほど変化しないことがわかる。また境界面で剪断力が伝達されない場合は、伝達される場合と比べリング内の最大圧縮応力および最大引張応力がともに減少するので、前



(図-3) $\theta = 0^\circ$ の σ_θ の分布



(図-4) $\theta = 90^\circ$ の σ_θ の分布

者の場合より安全側であると云える。

剪断力が伝達される場合に、 μ を発電所前面の応力値 (5.53 kg/cm^2) とした場合の、周壁内面の σ_{θ} の計算結果は(図-8)に示す。

4. 光弾性実験による解析

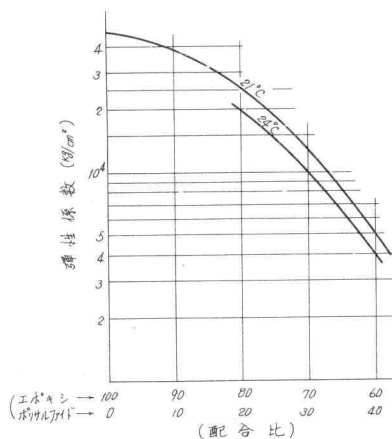
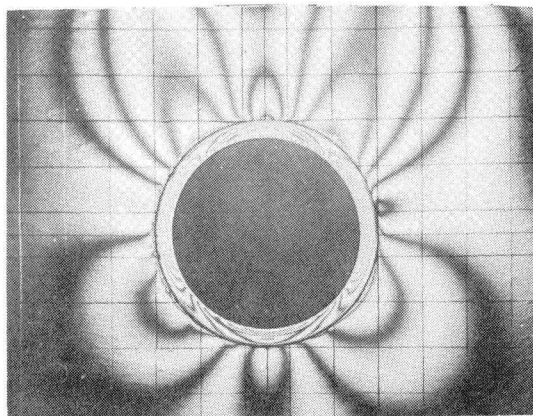
(図-1)の水平断面の応力状態をモデル化するために、半無限板に等分布载荷を行なった場合の対称軸上の軸方向応力の分布をもとめておき、対称軸上のある2点でその応力値の比が、(図-1)の発電所前面位置と後面位置の伝達応力の比 ($5.53:31.5$) になるような2点を求め、その2点を通る円を岩盤と発電所周壁の接着円としたモデルを作り、等分布载荷により実験を行なった。

ある中の等分布荷重に対してこのような接着円は当然無数に存在するのであるが、1)円の近傍では対称軸方向応力の横分布が一様であると考えられること、2)分布荷重位置からこの円が十分離れていること、3)モデルの寸法(持ちリングの厚さ)が実験可能な大きさであること、等により(図-5)の寸法のモデルとした。

モデル材料は、無限板(岩盤材)としてエポキシラバー(エポキシ・ポリサルファイド共重合体)を用い、リング(周壁コンクリート材)として同じくエポキシ樹脂であるアラルグイト(B)を用い、両者を接着してモデルを作った。

エポキシラバーは反射皮膜法の皮膜材として通常用いられている材料であって、ポリサルファイドの附加量により広範囲に弾性係数変化する特徴をわっている。ポリサルファイドの附加量と弾性係数の関係はテストの結果(図-6)のようになった。モデルの弾性係数と光弾性感度は表の値である。

	弾性係数	光弾性感度
エポキシラバー	$5,700 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	$0.174 \frac{\text{cm}}{\text{kg}}$
アラルグイト	32,000	0.103



(図-6) エポキシラバーの弾性係数

