

京都大学工学部 後藤尚男, 白石成人

まえがき 昭和42年7月2日京都府下和知ダム水力発電所3号洪水吐テンターゲートの崩壊する事故が発生したが、従来テンターゲートに関する構造力学的解析はほとんど行われておらず、今回の事故は多くの問題点を生み出したように考えられる。著者は事故調査に関係したため、テンターゲートの構造特性のうち、その座屈現象に注目して、その考察を加えたのでここに報告する。

1. テンターゲートの構造特性と不安定問題

現在用いられているテンターゲートの構造例は図-1に示すように、水压を直接うける円弧型スキンプレート、縦桁とこれと交差する横主桁ならびに左右二つの脚柱部分より構成されている。このような構造の典型としての例が図示のようで、和知ダムの例では図-1のような上、中、下3本の脚柱があり、これらは中間継ぎ材によって連結されている。このような形

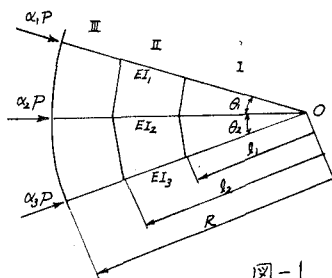


図-1

式は脚柱1本あたりの断面を小さくし、外力に対してその分担力を均等化して、構造物の全体的耐荷力を合理的に決定しようとするところから生じるものと思われるが、この結果、脚柱の剛性は在来のテンターゲートに比較して小さくなり、この部分の不安定性が構造物の安定・安全性の支配的因子となるに至ったと考えられる。

2. 構造解析結果

上記のように和知ダムテンターゲートの脚柱部は構造力学的には不安定性の解明によってその安全性を検討することのできると考えられ、とくに構造面内が生ずる面内座屈荷重が主要なパラメータとなる。この座屈条件式は次のようにして求められる。すなわち3本の脚柱 ($i=1, 2, 3$) は中間継ぎ材によって三つに分けられ ($j=I, II, III$)、したがって基礎方程式は9個求められ、そのおのおの4個の積分定数をもつため、計36個の定数となる。これに対して境界条件式も計36個うるため、座屈条件式はこれより求めることができる。いま α_i を図-1に示すような荷重比を与える荷重係数とすれば、

$$\text{基礎方程式: } (EI_i y_i^{(j)})'' + \alpha_i P (y_i^{(j)})'' = 0 \quad i=1, 2, 3, \quad j=I, II, III$$

$$\text{境界条件: } x=R \quad y_i^{(j)} = 0, \quad (y_i^{(j)})' = 0 \quad i=1, 2, 3$$

$$x=l_2 \quad y_i^{(j)} = y_i^{(j)}, \quad (y_i^{(j)})' = (y_i^{(j)})', \quad (y_i^{(j)})'' = (y_i^{(j)})'' \quad i=1, 2, 3$$

$$y_i^{(j)} = y_{i+1}^{(j)}, \quad i=1, 2$$

$$EI_1 \{ (y_1^{(I)})'' - (y_1^{(II)})'' \} \cos \theta_1 + EI_2 \{ (y_2^{(II)})'' - (y_2^{(III)})'' \} + EI_3 \{ (y_3^{(III)})'' - (y_3^{(I)})'' \} \cos \theta_2 = 0$$

$$x=l_1 \quad y_i^{(j)} = y_i^{(j)}, \quad (y_i^{(j)})' = (y_i^{(j)})', \quad (y_i^{(j)})'' = (y_i^{(j)})'' \quad i=1, 2, 3$$

$$y_i^{(j)} = y_{i+1}^{(j)}, \quad i=1, 2$$

$$EI_1 \{ (y_1^{(I)})'' - (y_1^{(II)})'' \} \cos \theta_1 + EI_2 \{ (y_2^{(II)})'' - (y_2^{(III)})'' \} + EI_3 \{ (y_3^{(III)})'' - (y_3^{(I)})'' \} \cos \theta_2 = 0$$

$$\begin{aligned}
 x=0 \quad y_i^* &= 0 \quad i=1, 2, 3 \\
 (y_i^*)' &= (y_{i+1}^*)' \quad i=1, 2 \\
 EI_1 (y_1^*)'' + EI_2 (y_2^*)'' + EI_3 (y_3^*)'' &= 0
 \end{aligned}$$

和知ダム3号ゲートの諸元を用いて、上の条件式より座屈荷重を求めれば、荷重係数比、 $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 1.10 : 1.22$ に対して、 $R_r = 93.5$ となり、中間継ぎ材を入れない場合 $R_r = 90.4$ であるから、中間継ぎ材による効果はほとんどないと考えられる。

以上の計算を遂行することにより座屈荷重を求めることができたが、図-1に示すような中間継ぎ材のみでは構造系の安全性は著しく低く留まることとなり、これを改善するためには、下図に示すような斜め補強材が必要であると思われる。斜め補強材をもつテンターゲート脚柱の面内座屈荷重も上の手法と同様の考えによりその計算式を誘導することができ、その形はかなり複雑となり、要する形式を比較するためには計算量は著しく増大すると思われる。本研究では、このため、等価回路を用いた Analog Simulation を行い、各種の斜め補強材の効果を比較検討した。

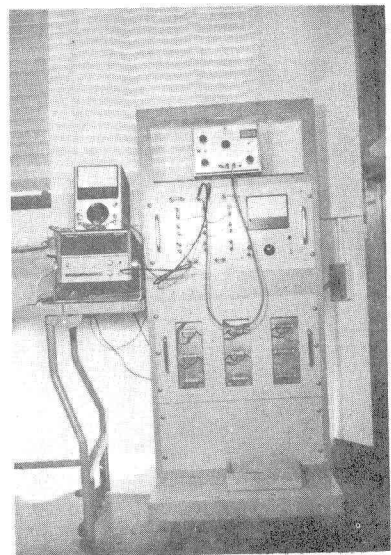
3. Analog Simulation

等価回路による構造解析は MacNeal, Russel, Keropyan 等多くの研究者によって行われているが、今回の和知ダムテンターゲートに対しては、いわゆる Russel Beam を応用し、脚柱を9素子に分割近似せしめた。この回路網は図-2のようであり、simulator は写真のように配線、配置した。また、等価回路の基本振動数を 1000 rad/sec としたため、これより、共振振動数を $f \text{ (KC)}$ とする場合座屈荷重は $R_r = (2\pi f)^2 \text{ (ton)}$ となる。実験に際しては、低周波共振器(菊水電子工業製 Model 4-17 RC oscillator)、電圧計(同社, Model 164 VTVM)、ならびに、デジタル・カウンタ(日本電波製 N-4004)を用いた。測定結果は図3~7に示すようであり、これを整理すれば、下表のようになる。

表

構 造 系	共振振動数	座屈荷重(実験値)	計算値
上脚柱	1.32 KC	69 t	69 t
中脚柱	1.47	86	109
下脚柱	1.72	119	134
	1.46	84	90
	1.37	74	94
	3.62	517	713*
	3.60	512	—
	3.63	520	678*

* 藤野・大坂の方法による計算値(内電事故調査委員会資料による)



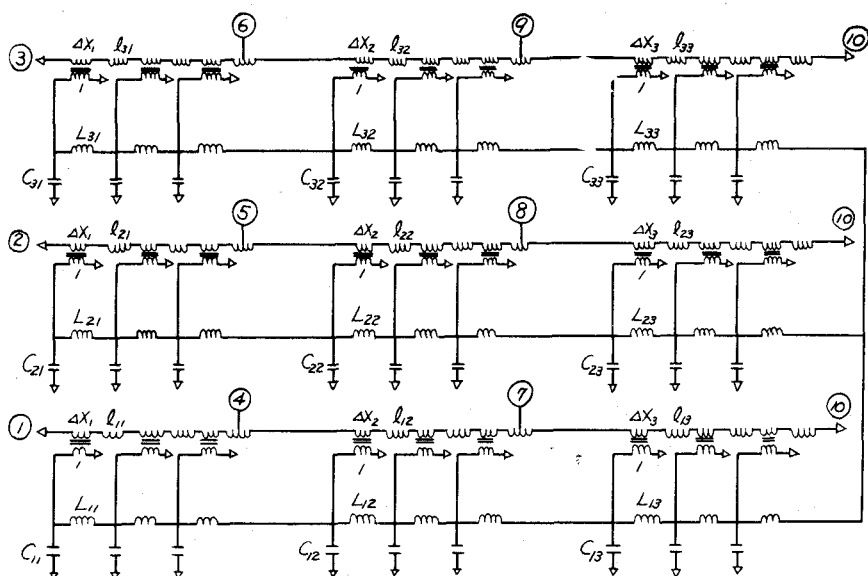


図 2 等価回路シュミレータ

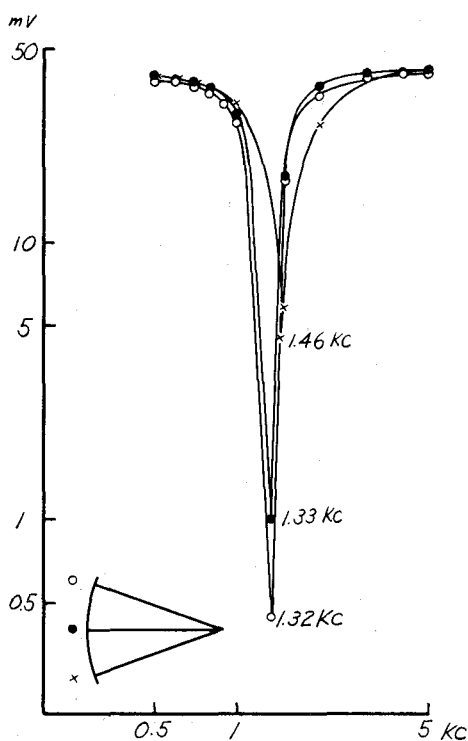


図 3

実験値と計算値は別々のようであり、中、下脚柱に対する共振振動数はやや低い値を与えるようである。図-3、図-4より、中間組む枝のある場合が逆に低い共振振動数をもつが、上記の誤差を加味すれば、ほぼ計算値に近くなる。しかし、この二つの構造物の不安定現象は極めて類似していることがわかる。斜め補強枝の影響については、図-5では上脚柱、図-6では上下脚柱、図-7では中脚柱が最終状態を決定していることがわかる。従って粗知大目の場合斜め補強枝をほどこせば、約520tの座屈荷重になると考えられる。

結 論

Analogy Simulation によるテラターゲットの不安定現象を考察したが、この結果は構造物の特性を明瞭に示めていると考えられる。また Simulator による解析実験は簡便であり、この種の構造物の設計段階で応用しようものと考えられる。

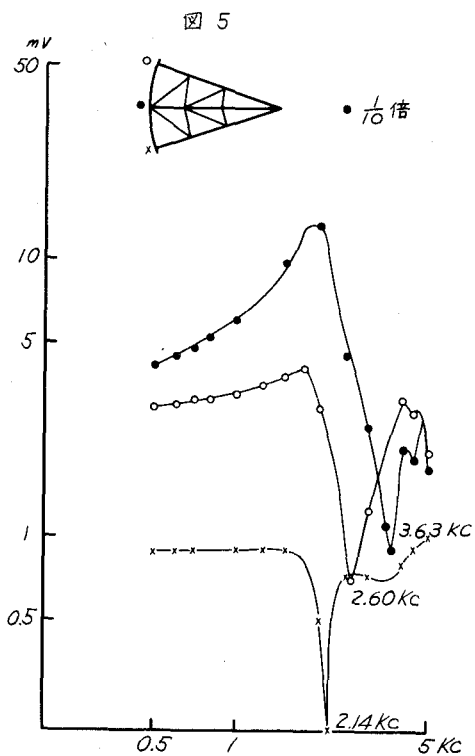
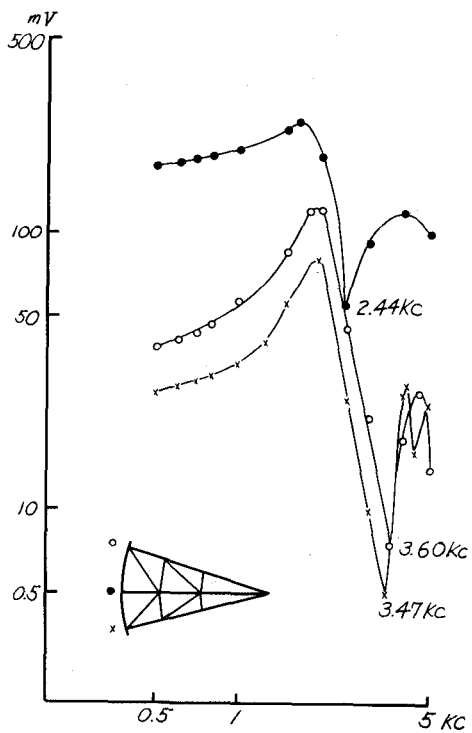
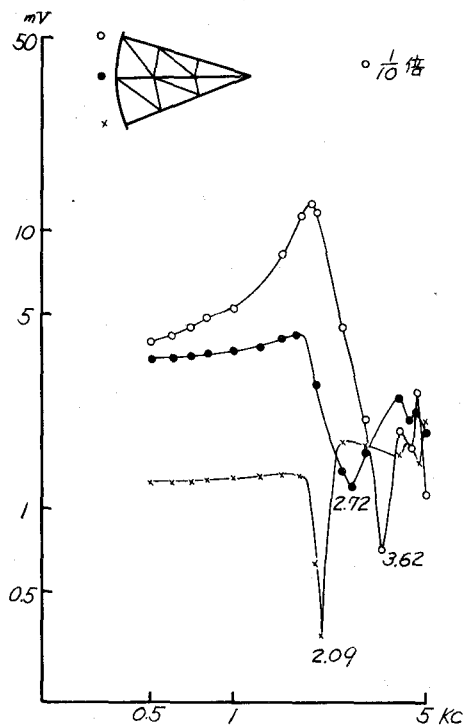
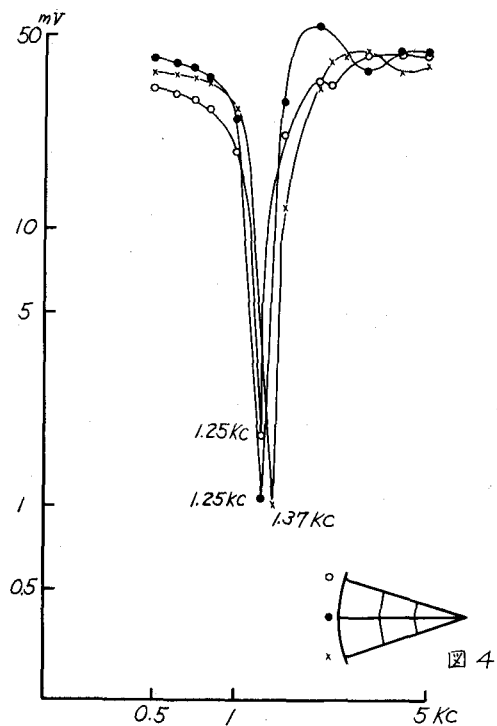


图 6

图 7