

九州大学 正 賢 樽 木 武
九州大学 学生員 〇能登原 功

1 まえがき

支保工、覆工などのトンネル構造物は、外周が地山と接しているため、空間に位置している構造物に比べて、その力学的取り扱いが複雑となる。特に、地山の力学的性状がトンネル構造物の耐力に与える影響は非常に大きいものである。前報においては地山を線形バネとして、各種の荷重状態、構造物の支承条件、構造物と地山との初期空隙などを考慮し鋼アーチ支保工の弾塑性挙動の解析を行なったが、その結果、鋼アーチ支保工の終局耐力が、地上構造物に比して相当大きいものであること、偏圧荷重を受ける場合には地山の剛性の影響が極めて大きいこと、支保工断面を大きくしても偏圧荷重の場合には等圧荷重に比して差程大きな終局耐力の増大が期待できないことなどが明らかになった。

しかし、これらの結果は第1近似として、地山を線形バネによりモデル化した結果であるため、実情と相当異なると思われる。そこで、より実情に即した解析が必要になるがその一つとして、地山を弾塑性バネによりモデル化して解析することが考えられ、さらに、時間要素を考慮した粘弾性バネも考えることができる。本研究は地山をこれらのモデルによって置換し、より厳密なかつ実情に即した鋼アーチ支保工の終局耐力に関する特性を求めんとするものである。

2 解析方法

A 支保工部材要素の弾塑性解析について

支保工部材要素の弾塑性解析については前報と同じであるが、要約すれば以下のとおりである。すなわち、解析の対象とする円形H型鋼アーチ支保工を18要素からなる直線部材要素に置き換え、頂部は解析上ヒンジとする。部材の降伏関数としては地山の拘束により軸力の影響が大きくなることが予想されるので、これをも考慮した降伏関数として次式を用いるものである。

$$f = \frac{M}{M_p} \quad \text{ただし} \quad 0 \leq N < 0.15 N_p \quad \text{ここで} \quad M_p: \text{全塑性曲げモーメント}$$

$$f = \frac{M}{M_p} + 1.18 \left(\frac{|N|}{N_p} - 1 \right) \quad \text{ただし} \quad 0.15 N_p \leq N \leq N_p \quad N_p: \text{全塑性軸力}$$

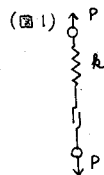
降伏後の部材端においては、塑性流動理論より求められた新しい剛性マトリックスとなり²⁾、部材端が降伏する毎に入れ換えて計算を行った。なお計算は荷重漸増法によるものであるが、演算労力を減ずる意味から荷重倍数法による降伏点追跡を行なった。

B 地山の弾塑性モデルについて

図1に示すような弾完全塑性体を考えるものとすれば、その特性は周知の通りであり、ある変位 u までは弾性的に挙動し、変位 u が u_0 を越えた場合には一定荷重 P_0 のもとで変位は増加していく。解析手順としては、まず地山を弾性バネとして解き、上述の荷重倍数法により部材力の計算、降伏点の検おを行ない、変位 u が u_0 を越えた場合にはその節点に $u_0 - P_0$ を荷重として加えて、地山が塑性域に達した時の支保工—地山系を解くものである。また、これによりおうたに発生した降伏点の検出を行なうのち、荷重を増加する。

C 地山の粘弾性モデルについて

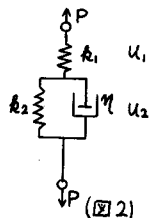
図2に示すような要素からなる粘弾性モデルを考える。このモデルの任意の時間 t における荷重—変位構



成式は次のとおりである。

$$(1+\alpha)P_k + \frac{\alpha P}{\rho} \left(\frac{dP}{dt} \right)_k = \alpha k_1 u_k + \frac{\alpha P}{\rho} k_1 \left(\frac{du}{dt} \right)_k \quad \dots (1)$$

ただし $\alpha = -\frac{k_2}{k_1}$, $\beta = \frac{\rho k_2}{k_1}$
と置き換えた無次元数



式(1)における微分係数を次の差分近似(前進差分)を行えば次のとおりである。

$$\left(\frac{dP}{dt} \right)_k = \frac{1}{\Delta t} \left(-\frac{1}{2} P_{k+2} + 2P_{k+1} - \frac{3}{2} P_k \right), \quad \left(\frac{du}{dt} \right)_k = \frac{1}{\Delta t} \left(-\frac{1}{2} u_{k+2} + 2u_{k+1} - \frac{3}{2} u_k \right) \quad \dots (2)$$

式(2)を式(1)に代入すれば $P_{k+2} = k_1 u_{k+2} + \bar{P}_{k+2} \quad \dots (3)$ ただし $\bar{P}_{k+2} = 4P_{k+1} - (3 - \frac{2\beta}{\alpha} - 2\beta)P_k - 4k_1 u_{k+2} + (3 - 2\beta)k_1 u_k$
式(3)において $\bar{P}_{k+2}$ は、考えている時間 $(k+2)$ よりも以前の $(k+1)$, k の時間段階においてのこのモデルに働いていた軸方向力、および軸方向変位からなっており、それらは既知の値である。ゆえに式(3)により任意の時間における軸方向力-軸方向変位の構成式が求まる。ただし初期値 $x=0$ においては $P_0 = P_E$, $u_0 = u_E$ (P_E , u_E は弾性解より得られた値) また $x=1$ においては P なる u に u の対称性を仮定し $P=P_1$, $u_1 = u_{-1}$ とすると次のようになる。

$P_k = \frac{3\alpha}{3\alpha+1} k_1 u_k \quad \dots (4)$ すなわちこの仮定を行なうことは、最初の時間段階においてはこのモデルをバネ定数 k_1 を $3\alpha/(3\alpha+1) \cdot k_1$ に減じた弾性バネと考えていることになる。ちなみに α を ∞ にするとすなわち k_2 を ∞ にするとこのモデルはバネ定数 k_1 のみからなる弾性バネと等価になり、式(4)において α を ∞ にすると $P_k = k_1 u_k$ となり一致することから、この近似にはある程度の妥当性があると思われる。

次に図3に示すように、この粘弾性モデル上の梁を考える。変位関数として3次式を用いると、任意点の変位 $u(x)$ は $u(x) = N(x) \{Y\}^T$ となる。

$$\text{ただし } N(x) = \left[1 - 3\frac{x^2}{L^2} + 2\frac{x^3}{L^3}, \quad x - 2\frac{x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2}, \quad 3\frac{x^2}{L^2} - 2\frac{x^3}{L^3}, \quad -\frac{x^3}{L^3} \right]$$

$$\{Y\}^T = [u_1, \theta_1, u_2, \theta_2]$$

任意点における任意の時間 t における地盤反力 Q は $Q = (k_1 u_k + \bar{P}_k) B$ B : 部材幅

この系に仮想仕事の原理を適用して、支保工-地山系の剛性マトリックスを求めれば次のとおりである。

$$\{R\} = (K_E + K_G) \{Y\} + \{R_0\} \quad \dots (5) \quad \text{ただし } K_E: \text{梁の剛性マトリックス}$$

K_G : 弾性バネとした場合の地山の剛性マトリックス

$$\{R_0\} = \{R_0\}^T = B \cdot \bar{P}_k \cdot \begin{bmatrix} 0 & \frac{L}{2} & \frac{L^2}{2} & 0 & \frac{L}{2} & -\frac{L^2}{2} \end{bmatrix}$$

式(5)より任意の時間 t における支保工-地山系の荷重-変位関係が求まる。 $\{R_0\}$ は時間 t 以前の既知地盤反力、および変位からなるものでこれを見かけの荷重として左辺に移項し、それを解く事により任意の時間 t における変位が求まる。変位が収束した時をもって、この荷重における支保工-地山系の変位、および部材力を算出し、あらたに降伏点が生じたかどうかを判定し、次の荷重段階に進んでいく。

以上 B, C に述べた地山モデルを用いて支保工の解析を進めるとき、支保工に多数の降伏点が発生し、ついに機構化に近い状態、またはその変位が許容変位よりも大きくなることになり、この時をもって支保工の耐力とするのである。

具体的な演算結果については紙面の都合上割愛し講演時に発表することにする。

参考文献

- 1) American Institute of Steel Construction Specification for the Design, Fabrication and Erection of Steel for Building 1961
- 2) 星見嶋, 平尾 軸力の影響を考慮した平面剛滑節構造物の-自由弾塑性解析 土論第202号, PP.11-24, 6, 1972.
- 3) 上田, 松石, 山川, 赤松 マトリックス法による骨組構造物の弾塑性解析 日本造船学会論文第124号, PP.183-191, 6, 1968.
- 4) 櫻木 武 マトリックス構造解析法 共立出版, PP.283-301, 1972
- 5) 櫻木 武, 山本 修司 鋼アーチ支保工の耐力 昭和49年度土木学会西部支部研究発表会議演集, PP.21-22, 2, 1975.