

京都大学工学研究科 正会員 田村 武
 京都大学工学部 学生会員 ○森永 浩

1. はじめに

NATM 工法に用いられる吹き付けコンクリートは薄肉柔支保構造であり、等方的な圧力を得ることで大きな荷重にも耐える支保となる。本研究ではまず、簡単な実験によりこの「NATM の支保機構」を確かめた。また、実際のトンネルでは掘削断面に凹凸があるため、吹き付けコンクリートはある程度湾曲して吹き付けられる。そこで、支保形状が周期的に湾曲している場合の支保の挙動について考察した。

2. 解析方法

本研究では、吹き付けコンクリート内部に働く応力、および周辺地盤から吹き付けに作用する荷重に着目して解析を行う。解析モデルとしては図 1 に示すように、吹き付けコンクリートを剛棒回転ばね系で、吹き付けコンクリートが変形した時に周辺地盤から受ける反力を弾性ばねで表現したモデル(剛棒ばねモデル)^{1) 2)}を用いる。図 1 では剛棒要素が 6 本であるが、解析ではこれを 40 本にしたモデルを用いた。土圧は被り土圧を用い、各節点に集中荷重を作用させた。そして各節点における力の釣り合い式をたて、この釣り合い式を解くことで釣り合い状態での節点変位および剛棒に作用する軸力を求めた。さらに求めた軸力と曲げモーメントを用いて、次式から吹き付けコンクリートの縁応力を求めた

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{N}{A} + \frac{|M|}{W} \\ \sigma_{\min} &= \frac{N}{A} - \frac{|M|}{W}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで A とは吹き付けの断面積、 W とは断面係数である。ここでは単位奥行きあたりで考えているので、吹き付け厚さ t を用いて $A = t$ 、 $W = t^3/6$ と表せる。

3. 薄肉柔支保構造の変形に関する実験の結果

ここでは、薄肉柔支保構造である吹き付けコンクリートを紙のリングに見立て、この薄肉柔支保構造が側圧を得られる場合と得られない場合に、どのような変形をするか考察する。また、剛棒ばねモデルを用いて実験と同じ状況を再現し、有限変形解析によってこの実験を追跡した。実験と解析の結果を図 2、図 3 に示す。これによると、側圧を得ることによって鉛直方向の荷重に対する剛性が高まっている。これは吹き付けコンクリートが周辺地盤から側圧を得て大きな支持力を発揮することと原理的には同じであると考えられる。また、剛棒ばねモデルを用いて、薄肉柔支保構造の変形形状が高い精度で追跡できることも確認できた。

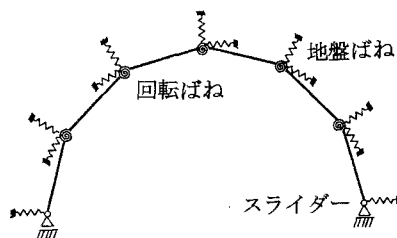


図1 剛棒ばねモデル

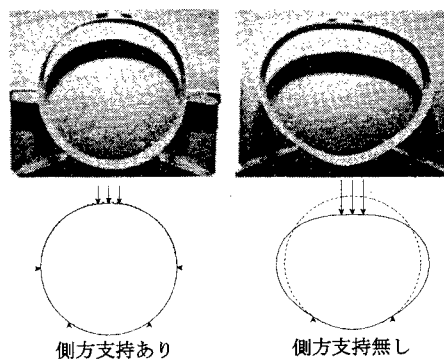


図2 2グラム載荷時の支保の変形

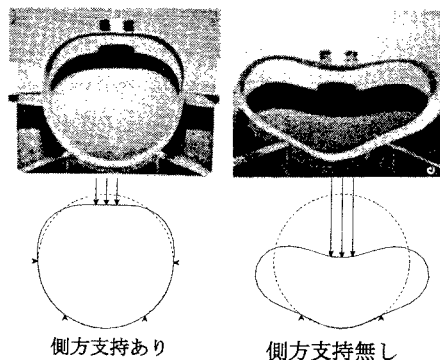


図3 5グラム載荷時の支保の変形

4. 吹き付けコンクリートが湾曲している場合の支保の挙動

ここでは図4のように吹き付けコンクリートの初期形状を周期的に湾曲させた場合に、支保にどのような変形や応力が発生するかを考察した。図5、図6は表1に示す条件下の解析結果で、(a)は変形前の支保の形状(太い点線)、変形前に支保に作用していた初期土圧(細い点線)、変形後の支保形状(太い実線)、変形後の支保が周囲から受ける圧力(細い実線)を示す。(b)は支保の内部に作用する曲げモーメント、(c)は式(1)より求まる縁応力を示す。図6によると、湾曲がある場合、外に凸な部分はさらに外側にはらみ出し、凹部は内側に窪むように変形する。この結果、荷重分布が不均一になり曲げモーメントも増大する。曲げモーメントが増大すると、図6(c)のように支保の縁応力も不均一になり、過大な圧縮力や引っ張りが発生しやすくなる。

図7には吹き付けコンクリートが設計可能となる範囲を示した。設計が可能となる範囲とは次の2条件をともに満たす共通範囲である。①吹き付けコンクリート内には引っ張り応力は発生しない。②吹き付けコンクリート内には 180kgf/cm^2 以上の圧縮応力は発生しない。図7においてハッチングした範囲は上の2条件を満たしているので設計が可能だが、それ以外の範囲ではどちらかの条件が満たされずに吹き付けコンクリートの許容応力度を上回ってしまう。なお、①の条件による制約を実線で、②による制約を点線で示した。さてこれによると、湾曲が存在することによって、設計可能範囲は狭くなっている。よって、吹き付けがアーチとして正常に働けば、地盤反力が小さくても支保に過大な応力が発生しないが、その効果が崩れると過大な応力が発生しやすくなることが分かる。

5. 結論

本研究では、剛棒ばねモデルを用いて薄肉柔支保構造の挙動を考察し、以下の結論を得た。

- ①薄肉柔支保構造は側方からの反力を得ると、鉛直方向の荷重に対し大きな支持力を発揮する。
- ②支保に湾曲が存在すると、もとの湾曲が更に増幅されるような変形を起こす。
- ③したがって、湾曲の頂点には大きなモーメントが発生し、吹き付けコンクリートに曲げ破壊が生じる可能性がある。

参考文献

- 1) 梅田 昌彦：薄肉柔支保工の力学挙動に関する基礎的研究、京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文、1996
- 2) 田村 武、岡部 哲也：剛棒ばねモデルによる NATM の支保機構に関する研究、平成9年度関西支部年次学術講演会概要

トンネル外径	$D(\text{m})$	10.0
吹き付け厚さ	$t(\text{cm})$	10.0
土被り比	H/D	1.0
土の単位体積重量	$\gamma(\text{kgf/m}^3)$	2.0×10^3
地盤反力係数	$k(\text{kgf/cm}^3)$	0.5
側方土圧係数	λ	0.5
支保形状に与える湾曲の振幅	$a_0(\text{cm})$	5.0
支保形状に与える湾曲の波数	n_f	3

表1 解析に用いた値

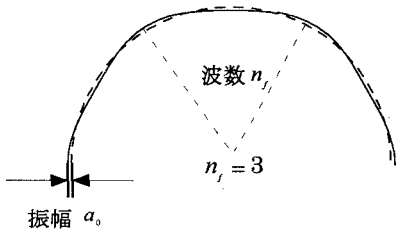


図4 支保の初期形状に与える湾曲

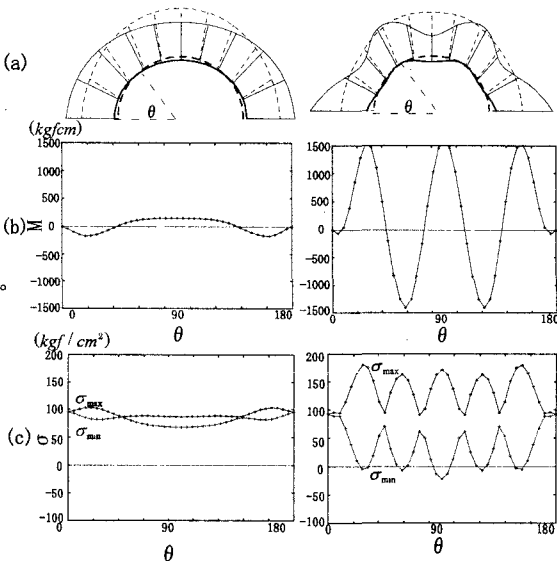


図5 支保形状が真円の場合の支保の挙動

図6 支保形状が湾曲している場合の支保の挙動

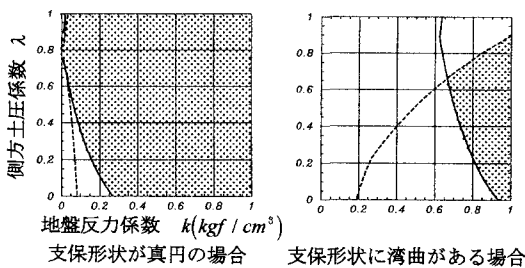


図7 吹き付けコンクリートの設計可能範囲