

Ⅲ-584

トンネルのFEM解析における覆工の最適要素表現

中央復建コンサルタンツ 正会員 室谷耕輔 金沢工業大学 正会員 土屋敬
 鉄道総合技術研究所 正会員 朝倉俊弘 正会員 小島芳之

1 まえがき

トンネルの掘削解析等を行う場合に地山を含めたモデル全体から見て非常に薄い要素となる覆工をどのように要素表現するかは解析の精度に大変関係する。特に覆工の応力に着目する場合は重要である。本研究はトンネル上部で盛土及び切取りが行われる場合の影響解析を行うに当たり、その解析条件を定めるために行ったものである。平面要素、ビーム要素、ラティス要素について比較する。ここにラティス要素とは4辺と2本の斜材の計6本のロッドで構成される格子構造であり、軸剛性、曲げ剛性が等しくなるように断面積を定める。検討は2段階について行い、先ず等分布荷重を受ける単純ばりで比較し、次にトンネル上部の盛土、切土による影響解析において比較する。

2 単純ばりにおける各要素の比較

覆工を想定しスパン6m、けた高0.5m、弾性係数 $2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、等分布荷重 10 t/cm について解析解との比較をおこなう。

a) 平面要素

要素数を多くし、四角形要素の縦横比を1:1に近づけるほど精度の良い結果が得られるのは一般に知られているところである。先ず縦横比を1:5の一定とし要素数を60(5×12)、240(10×24)、960(20×48)と増加させ、変位及び縁応力を理論解析値と比較する。この場合平面要素の応力は要素中心での応力と考え、縁応力は外挿して求める。表-1に結果を示すが、FEM解析値が常に理論解析値より小さく、要素数の少ない場合は40%の差があり、要素数の多い場合に5%の差であった。次に要素数を240に保ち縦横比を1:20(20×12)、1:5(10×24)、1:1.25(5×48)に変化させて比較する。表-2に結果を示すが、縦横比が小さい場合は差が小さい。

表-1 要素数を変化させた解析結果(縦横比1:5)

要素数	理論解析値		F E M 解析値			
	$\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	$y \text{ (cm)}$	$\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	差	$y \text{ (cm)}$	差
60	± 108	-0.770	± 66	39 %	-0.465	40 %
240			± 93	14 %	-0.660	14 %
960			± 104	4 %	-0.735	5 %

表-2 要素の縦横比率を変化させた解析結果(要素数240)

縦横比	理論解析値		F E M 解析値			
	$\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	$y \text{ (cm)}$	$\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	差	$y \text{ (cm)}$	差
1:20	± 108	-0.770	± 66	39 %	-0.470	39 %
1:5			± 93	14 %	-0.660	14 %
1:1.25			± 104	4 %	-0.730	5 %

b) ビーム要素

6要素と12要素の比較を行う。表-3に結果を示すが、応力は全く同じとなり、変位は前者で2%後方で1%と小さかった。

表-3 ビーム要素の解析結果

要素数	理論解析値		F E M 解析値			
	$\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	$y \text{ (cm)}$	$\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	差	$y \text{ (cm)}$	差
6	± 108	-0.770	± 108	0%	-0.755	2%
12			± 108	0%	-0.768	1%

c) ラティス要素

図-1にラティスモデルを示す。1要素長は1mとしけた高0.5mの他に0.15mも扱う。表-4に結果を示すが、両ケースとも応力で6%、変位で1%の差に収まっている。

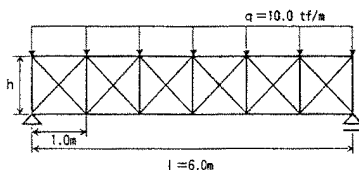


図-1 単純ばりのラティス要素モデル

表-4 ラティス要素の解析結果

h (m)	理論解析値		F E M 解析値			
	$\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	$y \text{ (cm)}$	$\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	差	$y \text{ (cm)}$	差
0.5	± 108	-0.770	± 102	6%	-0.675	1%
0.15	± 1200	-28.570	± 1134	6%	-28.250	1%

3 ビーム要素とラティス要素のトンネル覆工への適用性

以上の結果、薄肉部材を平面要素で精度よく表現するには莫大なる数の要素が必要であり実際には困難であるから、ビーム要素とラティス要素に絞り、トンネル覆工への適合性をさらに検討する。トンネル構造はインバートなし、ありの両方の場合について、トンネル上の盛土、切土によるモーメントの変化に着目し検討する。

a) 盛土、インバートなし(図-2)

トンネル上部に盛土を施工した場合、天端部に正の、側壁部から脚部に負のモーメントが発生する。図において脚部のモーメントはビームの場合0となっているのは、ビームと地山の結合をヒンジとして扱ったためである。一方、ラティスの場合、正のモーメントを生じているのは剛結として扱われたためである。実際にはこの中間となるのであろう。

b) 盛土、インバートあり(図-3)

ビームでは施工性を考慮し側壁とインバートの接合部をヒンジとして扱ったためその部分でのモーメントは0となっている。ラティスでは連続接合となるので側壁部のモーメントを引き継ぎ、接合部に負のモーメントが発生している。ただし接合部でのラティスのモデル化の際に、直交する2方向の剛性に合う断面積を選ぶことは一般に不可能であり、ある程度の誤差を生ずる。

c) 切土、インバートなし(図-4)

ビーム要素とした場合ほとんどゼロとなっているが、ラティス要素とした場合側壁部のモーメントは正となっている。ビーム要素では地山との結合をヒンジとしたため無抵抗となり、ラティスでは格子の両足が地山と結合され抵抗するためモーメントを生ずる。

覆工の厚さと直角方向の剛性はほぼ無限大であるから、ビームの場合に無限大の曲げ剛性を有するビームを1スパン伸ばして地山の接点に結んで解析すれば、図に示すようにラティスの場合に近いモーメント図が得られる。

d) 切土、インバートあり(図-5)

これまで同様ビームは接合部でモーメント0であり、ラティスでは若干のモーメントを示す。しかし全体的に見て、ほぼ同じ傾向を示しており大差はない。

4 結論

平面、ビーム、ラティスの3要素のトンネル覆工としての適合性を検討した。単純ばりの等分布荷重による比較において平面要素は精度を得るための必要な要素数が非常に多くなるので除外した。ビーム、ラティスではともに少ない要素数でも比較的良好な結果が得られた。一長一短あるが、ビームは両端のモーメントが得られるのに対し、ラティスは平均が得られ少し小さくなる傾向があるので安全側を考慮しビーム要素を用いる。また必要要素数もビームが少ない。なお、より薄い覆工、例えばNATMの一次覆工である吹付けコンクリートはクラックの発生を許容あるいは容認せざるを得ないとし、従来よりロッド要素によりモデル化している。

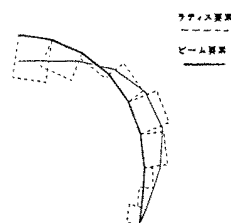


図-2 盛土、インバートなしのモーメント図

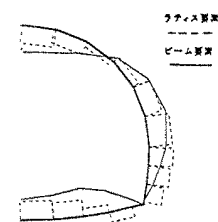


図-3 盛土、インバートありのモーメント図

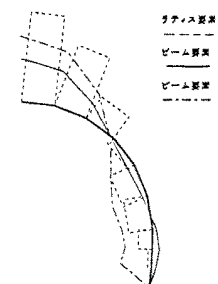


図-4 切土、インバートなしのモーメント図

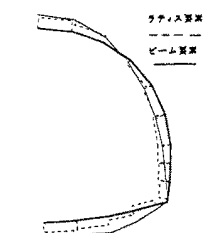


図-5 切土、インバートありのモーメント図