

自動分割機能を持つ有限要素法プログラムを利用したトンネル立体交差部地山応力・変形解析

清水建設(株) 計算センター ○大内智範

同 上 土木技術部 石井 卓

§ 1 まえがき

有限要素法は近年あらゆる工学上の問題に適用され増々応用分野を広げているが、有限要素法を使用して問題を解析する場合いくつかの問題点がある。それらを列挙すると以下のようになる。

- 1) 要素分割の仕方では計算精度に影響がでる。
- 2) 要素の形状の選択で計算精度に影響がでる。
- 3) 大規模な解析の場合には多元連立一次方程式の解法の選択が計算速度に影響する。
- 4) 多量のインプットデータ作成に労力がかかる。
- 5) 多量のアウトプットデータの整理に労力がかかる。

実用的解析をする上で上記の問題はすべて重要であるが、今回は利用者の立場より考えてデータ作成労力の軽減に注目して、節点データ及び要素データの自動作成法について述べ、またそれを組み込んだトンネル解析プログラムの説明とその応用事例について報告する。

§ 2 自動分割について

有限要素法では要素分割を細かくすればそれだけ精度がよく、通常の解析においても400～600要素に達してしまう。従来データ作成作業は入力で行ないその作業日数も2～3日費しているのが普通であり、またデータエラーの発生割合も非常に多い。このようなことから有限要素法プログラムの利用効率を上げるには極力少ないデータで節点データ及び要素データを自動作成することが考えられる。

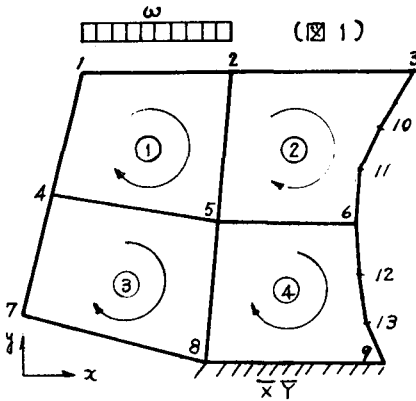
まず自動分割プログラムを作成するに際し考慮することを挙げてみる。

- 1) 入力データが複雑でないこと、少量データで複雑な機能を持たせようとする入力ルールが複雑になりデータ作成がわずらわしくなる。
- 2) 複雑な構造モデルに対する表現ができること、曲線部分の近似及びその周辺の要素分割がスムーズであり、全体の分割予想ができること。かつ自動分割が不可能な部分には手分割で調整できること。
- 3) 要素分割の粗密が与えられること、有限要素では分割を細かくすれば精度が向上するが、応力の出方の予想をして分割の粗密を考えることで計算コストの低減をはかる必要がある。
- 4) 支持条件、分布荷重もある程度自動的に与えられること。
- 5) 多元連立一次方程式の解法とのデータの関連性を考えること。BAND化して解く方法、分割して解く方法及びITERATION法で解く場合では節点番号付に関し各々ちがいがあある。
- 6) プログラムのロジックを複雑にしないよう考慮すること、すべてを自動化させる必要はなく、マニュアルインプットとの併用を考えた方が有利である。

つぎに具体的な自動分割の手順を平面構造体について述べてみる。

- 1) 解析する連続体の領域を要素分割のされ方を想定し、また要素分割の粗密の状態を考慮して幾つかの四辺形状ブロックに分割する。(図1)
- 2) ブロックの辺の分割数を与える。これにより全てのブロックは同数の三角形要素に分割される。大きなブロックは粗に、また小さなブロックは密に要素分割がされるわけである。
- 3) 各々のブロックの辺は直線または折線で与える。自動的に辺を分割する場合は直線と与え、曲線等の表現は折線で近似させる。一辺上の折線は辺の分割数と等しい数で構成する。(図1)(表3)
- 4) 四辺形状のブロック作成ができない部分は手分割で三角形要素を与える。
- 5) ブロックを構成する点、折線を作る点及び手分割をした要素を作る点に一連の節点番号を付け、それに座標値を与える。(表1)

- 6) 前記節点番号をもとに各四辺形ブロックの構成点を $i j k l$ で定義し、弾性係数 E 、ポアソン比 ν を与える。手分割をした要素についても $i j k$ で定義し同様に E, ν を与える。(表2)
- 7) $i-j$ には3)で述べた折点の他に分布荷重及び支持条件を与える。(表3)
- 8) 四辺形ブロックの結合状態を調べる。ブロック構成点の $i j k l$ は右廻りに付けるので隣り合うブロックの共有辺が認識できる。(表4)でブロック①の2辺はブロック②の4辺と共有辺である。
- 9) 節点番号表(表5)を作成する。表はブロックごとに2次元のマトリックスとし4隅はブロック構成点の $i j k l$ が入る。まず4辺について右まわりに新しい節点番号を付けてゆく、辺指定(表3)で与えた折点はそのままで与え、また共有辺上の節点ですでに他のブロックで番号が付けられていれば(表4)をもとにその番号を入れる。つぎにブロック内部の節点番号を順次付けてゆく。(図2)
- 10) 座標値の既知な節点をもとに全節点の座標値を求める。求める順序は(表5)に従う。
- 11) (表5)をもとに三角形要素に分割する。ブロックごとに表の隣り合う2列をとり、かつその上から4つずつの節点番号より2つの三角形を作ってゆく。この場合短かい対角線を2つの三角形の共有辺とすることで、ある程度偏平な三角形になることをさせることができる。(図3)
- 12) 最後に(表3)と(表5)を使って節点ごとに分布荷重、支持条件を割り当てる。



(図1)

節点座標
(表1)

NO	x	y
1	x_1	y_1
2	x_2	y_2
3	x_3	y_3
4	x_4	y_4
5	x_5	y_5
6	x_6	y_6
7	x_7	y_7
8	x_8	y_8
9	x_9	y_9
10	x_{10}	y_{10}
11	x_{11}	y_{11}
12	x_{12}	y_{12}
13	x_{13}	y_{13}

ブロック構成
(表2)

NO	i	j	k	l	E	ν
①	1	2	5	4	E_1	ν_1
②	2	3	6	5	E_2	ν_2
③	4	5	8	7	E_3	ν_3
④	5	6	9	8	E_4	ν_4

辺指定
(表3)

$i-j$	荷重	支持	点
1-2	ω		
3-6			10 11
6-9			12 13
9-8		$\bar{x} \bar{y}$	

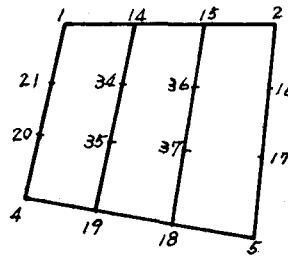
ブロック結合
(表4)

(1)	$i-j$	(ロ)	(ハ)	(ニ)
①	1-2	1		
	2-5	2		
	5-4	3		
	4-1	4		
②	2-3	1		
	3-6	2		
	6-5	3		
	5-2	4	①	2
	4-5	1	①	3
③	5-8	2		
	8-7	3		
	7-4	4		
	5-6	1	②	3
④	6-9	2		
	9-8	3		
	8-5	4	③	2

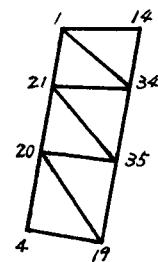
節点番号表
(表5)

	1	14	15	2
①	21	34	36	16
	20	35	37	17
	4	19	18	5
②	2	22	23	3
	16	38	40	10
	7	39	41	11
	5	25	24	6
	4	19	18	5
③	31	42	44	26
	30	43	45	27
	7	29	28	8
	5	25	24	6
④	26	46	48	12
	27	47	49	13
	8	33	32	9

(図2)



(図3)



- (イ) ブロック番号
(ロ) 辺番号
(ハ) 共有辺を持つブロック番号
(ニ) 共有辺番号

§ 3 トンネル解析プログラムについて

トンネル等初期応力を持つ構造物の一部を取り除いた影響を有限要素法で解析する場合は、穴を開ける前の状態で地盤の初期応力を求め、穴を開けるべき部分の要素に生ずる応力から等価節点外力を求め、さらにトンネルが開けられた状態で穴の内側にその等価節点外力を逆向きと与えて再度解く方法がとられる。また弾性範囲内の解析であればかさね合せの原理が適用できるので、次のように考えてもよい。まず穴の開けられた状態で解析し変位1を求め、つづいて穴を閉じた初期応力状態で解析して変位2を求める。これら2組の変位の差(変位1-変位2)がトンネルを開けた影響による変位とすることができる。

§ 4 解析適用例

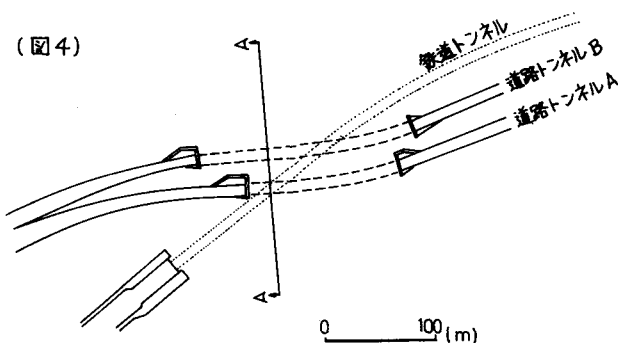
本プログラムの適用例として、立体交差する3本のトンネルが掘削される地山の応力・変形解析を紹介する。

鉄道トンネル(複線断面)は既に施工完了しているが、計画段階で、将来建設予定の道路トンネルA、B(2車線断面)が立体交差することが予想されていたので、覆工は鉄筋コンクリートとし、周辺地山に薬液注入を行なうなどの対策が行なわれた。トンネル相互の至近距離は、鉄道トンネルと道路トンネル間で9.5~16mである。一方、道路トンネルA、Bの軸間距離は31.4mである。土盛り高さは鉄道トンネルが約40mで、地山全体が風化花崗岩である。道路トンネルを掘削した場合に、鉄道トンネル周辺地山にどのような影響が生じるか解析する。(図4)

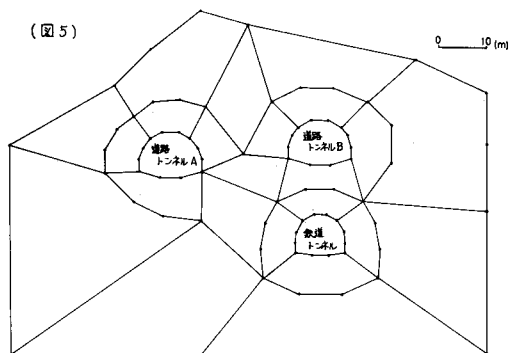
地山の岩盤物性はプレシオメータによる調査に基づき、弾性係数 $E = 6000 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、単位体積重量 $\gamma = 2.30 \text{ t/m}^3$ の均質な弾性地山と考え、AA断面について2次元弾性平面ひずみ状態で解析する。インプットデータはブロック分割図(図5)で作成し、メッシュ図(図6)のように自動分割した。支保工、コンクリートライニングは考慮せず、素掘り状態での地山の応力・変形を計算する。解析は、施工順序を考慮して次の3ケースについて行なう。

- 1) 鉄道トンネルを掘削した時
- 2) 鉄道トンネル既設の地山に道路トンネルBを掘削した時
- 3) 鉄道トンネル既設の地山に道路トンネルA、Bを掘削した時 (図7、図8)

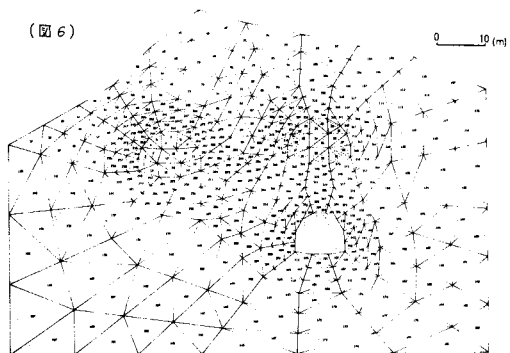
以上の計算は本プログラムを使用することにより省力化することができた。地山変位計による鉄道トンネル施工時の周辺地山変位計測結果(地表面を基準とした地山の相対沈下量)と比較すると、鉄道トンネルクラウン上7.0m地点で、計算値は実測値の70%であった。道路トンネルA、Bを掘削した時の鉄道トンネル周辺地山は、側壁部で1mm前後の内空変位、クラウン部は上部地山荷重の減少によって5mm前後の浮き上がり変位が計算された。弾性解による一次近似解析の結果から、将来の道路トンネル施工時には、現場計測に基づいて慎重な施工管理をする必要があると考えられる。



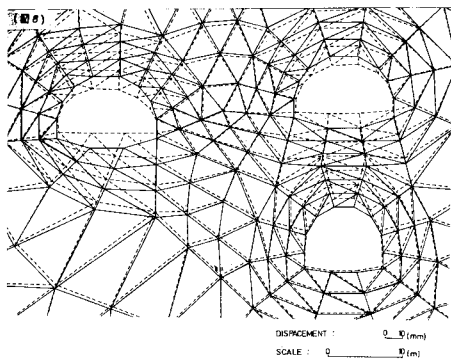
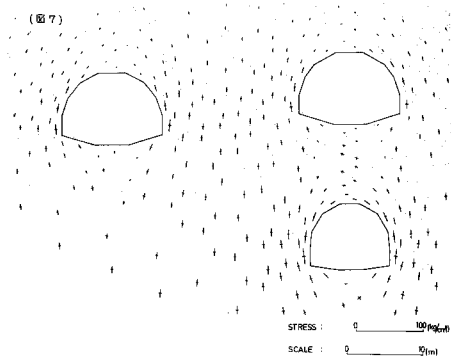
(図5)



(図6)



(図7)



§ 5 あとがき

有限要素法の平面構造物の自動分割について述べたが、立体型の自動分割についても適用する構造物の対象を限定することにより、プログラム化が可能であると考えている。