

パソコンによる泥炭地埋設パイプの FEM 解析

東山 勇・吉田 力・石田朋靖・月舘光三*

(山形大学農学部農業造構学研究室,

*弘前大学農学部農業工学科)

(昭和60年9月2日受理)

Finite Element Analysis of Buried Flexible Pipe in Peaty Land Used with a Micro Computer System

Isamu HIGASHIYAMA, Chikara YOSHIDA, Tomoyasu ISHIDA and Kōzō TSUKIDATE*

Laboratory of Soil Mechanics, Faculty of Agriculture, Yamagata University, Tsuruoka 997, Japan,

*Agricultural Engineering Department, Faculty of Agriculture, Hirosaki University

(Received September 2, 1985)

1. はじめに

山形県庄内地方は、4万 ha の水田をかかえる我が国でも屈指の米作地帯であるが、農業用パイプラインの敷設にさいし、下層に介在する低位泥炭が施工上の問題を惹起した¹⁾。泥炭は降伏値は非常に小さいが、拘束条件によっては、かなり大きな値を期待することも可能で、しかも、圧縮よりは引張りに強い材料である。こうした泥炭が圧縮材料である粘性土と混在することは、安定解析を著しく複雑なものとする。この場合、有限要素法解析は非常に有効な手段となるが、拘束条件によって広い範囲で降伏値が変化することに対処するためには、こまわりのきくパソコン利用が適切な方法と考えられる。このような経緯で数年前にはじめられた本研究も、その後、都市や農村環境整備における軟弱な下層での下水管の埋設など、ますます、研究の必要性が増大することとなった。

2. 研究の経緯

それまで大型電算機でしかとりあげられなかった有限要素法による平面ひずみ解析を、パソコンで試みはじめた当初は、節点や要素数を少し多くとるだけで、すぐメモリーがパンクして悩まされたが、バンドマトリクスによるメモリー節約や、出力用の配列を節約するため、荷重項のデータを取りだしたあとに、計算結果の変位をいれるといった工夫を、一つ一つ積重ねていった²⁾。それでも研究をさらに発展させて、弾塑性解析を行なうためには、少なくとも数百、あるいはそれ以上の要素を必要と

した。そこで、ユニット分割にヒントを得て、問題の全体剛性マトリクスを、一旦、フロッピーディスクのような外部記憶装置に書きこんでおいたものから、いくつかのブロックに分割して、CPUのラムにとりこんで計算させる方法を開発した³⁾。

しかしながら、その後、短時日にパソコンの能力は飛躍的に増大するとともに、パソコンで有限要素法をとりあげる方法を解説した良書も多数出版されるようになった⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。特に、NEC PC-9801 シリーズのような16ビットパソコンでは、640K バイトのラムをようする1メガバイトのアドレス空間をもち、マニュアルによれば増設ラムは、すべて配列に利用できるとのことで、膨大な配列を必要とする弾塑性解析も充分可能であるかのような印象をうける。

しかし実際に機種を購入してみると、必ずしも事情はそう単純でないことがわかった。本研究は、これまで開発したブロック分割の方法なども紹介しながら、NEC PC-9801 シリーズに限定して、この機種の特長を生かしながら数百ないし1,000をこえるような要素について有限要素法を行なうにはどうすればよいか、若干の整理を試みたものである。

3. 数値配列要素の制限

全体剛性マトリクス TK は普通 2次元配列で宣言されるが、2次元配列の制限値は機種によって異なる。その様子を調べてみたのが表-1で、配列は0から使用できるので、実際に DIM 宣言の数値は、1をひいた値になる。これをみても明らかなように、8ビットパソコン⁸⁾

表一 数値配列宣言可能個数

機種	2次元配列		1次元配列	
	整数	単精度	整数	単精度
NEC PC8801	78 11.8 ^{KB}	55 11.8 ^{KB}	315 0.6 ^{KB}	145 0.6 ^{KB}
OKI if-800	92 16.5 ^{KB}	65 16.5 ^{KB}	8,506 16.6 ^{KB}	4,252 16.6 ^{KB}
TEAC PS-80	136 36 ^{KB}	96 36 ^{KB}	18,759 36.6 ^{KB}	9,379 36.6 ^{KB}
NEC PC 9801E	181 64 ^{KB}	127 63 ^{KB}	32,767 64 ^{KB}	16,383 64 ^{KB}

では、配列宣言は普通10キロバイトから10数キロバイト程度で、特別の機種でない限り20キロバイトをこえることはない。また、大型電算機も端末で利用するときは、普通20キロバイト程度に制限を受けることがある。16ビットパソコンの PC-9801 シリーズでは、単精度2次元配列は63キロバイトに制限されている。ラム増設により、かりにラムが640キロバイトあったとしても、配列の数は127個であり、節点数は $127 \div 2 = 63$ が最大値となる。ただし、この場合、DIM(126, 126)の2次元配列が6個まで、残りは DIM(126)の1次元配列が6個までとることができる。

4. PC-9801Eにおける配列宣言のしくみ

機種を PC-9801E に限定して説明すると、配列のデータが格納されているアドレスは、セグメント60Hの 6A2H, 6A3H に示される。また配列の情報は、配列変数テーブルとして、セグメントポインタ (1410H, 1411H) の示すセグメント (通称シンボルテーブル・セグメント) のオフセット0004H, 0005Hより、単精度、整数といった配列の型、変数名、次数と順次格納され、最後は配列の大きさとして2バイト(FFFFで64KB)となっている。また BASIC インタプリタワーク・エリア領域 6D0H, 6D1H に配列データセルエリアの未使用先頭番地を16で割った値がはいっているが、この値が1404H~1405H番地に格納された値を越えると、“out of memory” エラーとなるしくみとなっている。

5. ブロック分割法のポイント

ブロック分割法³⁾は、全体剛性マトリクスを分割して次々と配列にいれてゆく方法で、その原理を図一に示

```

10 DIM TK1(100,2),TK2(100,2)
20 FOR I=1 TO 200:IF I<101 THEN 30 ELSE 40
30 FOR J=1 TO 2:TK1(I,J)=I:NEXT J:GOTO 50
40 K=I-100:FOR J=1 TO 2:TK2(K,J)=I:NEXT J
50 NEXT I
70 FOR I=1 TO 200:IF I<101 THEN 80 ELSE 90
80 J=1:PRINT TK1(I,J):GOTO 100
90 K=I-100:J=1:PRINT TK2(K,J)
100 NEXT I
    
```

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81
82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99
100	101	102	103	104	105	106	107	108
109	110	111	112	113	114	115	116	117
118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135
136	137	138	139	140	141	142	143	144
145	146	147	148	149	150	151	152	153
154	155	156	157	158	159	160	161	162
163	164	165	166	167	168	169	170	171
172	173	174	175	176	177	178	179	180
181	182	183	184	185	186	187	188	189
190	191	192	193	194	195	196	197	198
199	200							

図一 1 ブロック分割の原理

した。かりに100で宣言した配列に、通し番号で200までの数をいれたいとすると、100の配列2ケを用いて図一のような方法で可能となる。このように複数個の配列をつないでいくことにより、大きな要素配列を実現することができるが、実際のプログラムでは、入力段階でフロッピーディスクに書きこみ出力はそれをよびだすことになるため、かりに、もし最大配列 TK1 1個しか宣言できないとすれば TK1 によみこんだ数値で計算終了後、計算値をフロッピーディスクに書きこんだあと、新にTK1に次の100個のデータをよみこめばよいことになる。しかし、幸い PC-9801E のように最大配列が複数個宣言できるときは、分割したデータを次々と複数の配列にいれておけばよい。

しかしながら、こうしたわづらわしさは、BASICでの DIM 宣言に頼っているからで、ここで配列とは何かを、今一度考えてみたい。DIM 宣言とは、ある一続きのメモリーを確保する命令で、確保する場所(アドレス)やしかた(整数型なら2バイトとか単精度なら4バイトといったこと)をコンピュータがやってくれるので、ユーザは心配する必要がないということである。したがって、もし DIM の代りに、ユーザが空きエリアを確保し、先頭アドレスを明確にすることができれば、それは全く同じことといえる。例えば、話を簡単にするために整数型の10個の配列Aを図一2上段の BASIC プログラムのように宣言したとする。同じことを機械語で下段のように、空きエリアの先頭にインデックスレジスタ SI をセ

```

10 DEF INT A
20 DIM A(9)

0000 @EDB      MOV     DS,AX
0002 @E0001    MOV     SI,0100
0005 @90A00    MOV     CX,000A
0008 @C3       RET
    
```

図一 2 機械語による配列宣言

ットし、配列の数 (10個は16進で000A) を CX にいれる。空きエリアのセグメントを AX, 先頭オフセットを SI (かりに、いま100Hとする) とすると下段に示したようになる。

配列をこのように機械語でとることを考えて増設ラム (PC-9801E の場合 512KB) を利用するか、ラム増設がない場合でも、96キロバイトもあるビデオラム (VRAM) を利用するか、フロッピーディスクのような外部記憶装置を用いる前に、CPU のラムを有効に利用する方法がまだ残されていることがわかる。そして埋設パイプのような長方形物体ではバンド幅も50前後におさえられるから、バンドマトリクスを用いれば、ラムのような内部記憶装置だけでも、かなりの大要素をあつかうことができることがわかる。そして、そのような方法を考えるさい、全体剛性マトリクスは2次元配列よりも、1次元配列の方が、はるかに扱いやすい。最近、出版されたスミスの弾塑性解析の著書⁹⁾でも、全体剛性マトリクスを1次元配列でとった弾塑性解析のプログラムが紹介されているが、かんじんの1次元配列の全体剛性マトリクスの部分については、プログラムが記載されていない。そこで全体剛性マトリクスをバンドマトリクスとして1次元化すること⁵⁾⁷⁾について若干の考察を行いたい。

6. 全体剛性マトリクスの1次元配列化

図一3上段は、簡単な例として、10元の連立方程式でバンド幅5のものについて示したものである。右端は、荷重項で、 x_1, x_2, \dots, x_{10} の値が、1, 2, $\dots, 10$ になるように数値をえらんである。この場合、2次元配列の全体剛性マトリクス TK (I, J) は、図一3中段のようになる。これは行列の下三角部分をとりだしたものであるが、第1行は対角項となり、対角線方向に走査していることになっている。いま、この2次元配列 TK (I, J) を、1次元配列 TK(I)におきかえることを考える。

1次元配列 TK(I)にとりこむ順序は図一4のようにする。TK(I)の出力を比較しやすいように TK(I, J)の出力形式にそろえて出力したものが図一5である。このように、図一5と図一3中段を比較すると、何等かわるところはないことがわかる。ただし、図一4からわかるよ

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	か*19
1	2	3	4	5	0	0	0	0	0	55
2	1	9	8	7	0	0	0	0	0	127
3	1	4	5	6	7	0	0	0	0	140
4	9	4	4	5	2	1	9	0	0	156
5	8	5	3	5	7	8	9	0	0	303
0	7	6	2	6	5	4	3	2	2	220
0	0	7	1	7	5	7	8	9	1	294
0	0	0	9	8	4	8	7	6	7	343
0	0	0	0	9	3	9	7	8	8	343
0	0	0	0	0	2	1	6	8	10	239

図一 3 10元連立方程式のバンドマトリクス

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ans.
1	6	11	16	21	26	31	35	38	40	
2	7	12	17	22	27	32	36	39		
3	8	13	18	23	28	33	37			
4	9	14	19	24	29	34				
5	10	15	20	25	30					

図一 4 1次元配列にとりこむ順序

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	3	6	5	8	7	8
2	1	4	3	6	5	7	4	9	6
3	9	5	2	7	4	9	6		
4	8	6	1	8	3	1			
5	7	7	9	9	2				

図一 5 1次元配列での出力結果

```

110 DIM TK(50),TF(10),IO(10),T(10,10)
120 N=10:MB=5
240 GOSUB 1400:GOSUB 1500:GOSUB 5300:GOSUB 2000
290 END
600 DATA 1,2,3,4,5,0,0,0,0,0,55
610 DATA 2,2,1,9,8,7,0,0,0,0,127
620 DATA 3,1,3,4,5,6,7,0,0,0,140
630 DATA 4,9,4,4,3,2,1,9,0,0,156
640 DATA 5,8,5,3,5,6,7,8,9,0,303
650 DATA 0,7,6,2,6,6,5,4,3,2,220
660 DATA 0,0,7,1,7,5,7,8,9,1,294
670 DATA 0,0,0,9,8,4,8,8,7,6,343
680 DATA 0,0,0,0,9,3,9,7,9,8,343
690 DATA 0,0,0,0,0,2,1,6,8,10,239
700
1400 FOR I=1 TO N:11=MB*(I-1)+1:12=I+MB-N-1
1410 IF I+MB>N+1 THEN 11=11-12*(12-1)/2
1420 IO(I)=11:NEXT I:RETURN
1490
1500 K=0
1510 FOR I=1 TO N:FOR J=1 TO N:READ D1
1530 IF (J-I)<0 THEN 1570
1540 IF I+MB<N+1 THEN 1550 ELSE 1560
1550 IF J-I>MB-1 THEN 1570
1560 K=K+1:TK(K)=D1
1570 NEXT J
1580 READ TF(I):NEXT I:RETURN
2000
2010 RESTORE 600:LPRINT I:LPRINT
2020 FOR I=1 TO N:FOR J=1 TO N:READ D1
2030 IF (J-I)<0 THEN 2060
2040 IJ=J-I+1:IF IJ>MB THEN 2060
2050 T(IJ,I)=D1
2060 NEXT J:READ TF(I):NEXT I
2070 FOR J=1 TO MB:FOR I=1 TO N:LPRINT USING "###":T(J,I);
2080 NEXT I:LPRINT :NEXT J:RETURN
5300
5310 FOR J=1 TO MB:IK=N-J+1:FOR I=1 TO IK:I1=IO(I)
5320 LPRINT USING "###":TK(I1+J-1);NEXT I:LPRINT :NEXT J:RETURN
    
```

図一 6 1次元配列にとりこむ方法を示すプログラム

うに、例えば TK(3, 4)は TK(18)となっているだけである。なお、メモリー節約のため、不要なゼロはとりこんでいない。このようにしてバンドマトリクスを解かせれば、2次元配列の場合と同様な操作で解を求めること



写真-1 試験パイプは現在幹線農道下

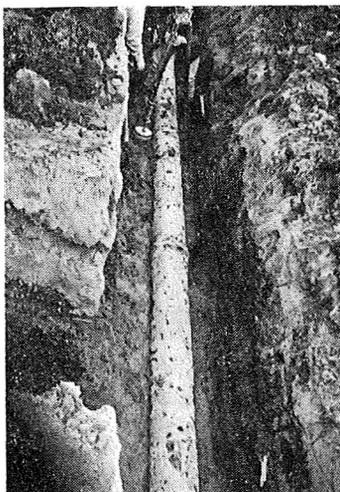


写真-2 掘りおこした試験パイプ



写真-3 Vu 250 の試験パイプ

ができる¹⁰⁾。ここで用いた1次元配列にとりこむプログラムを図-6に示す。図-6のプログラムでは、1,500番の1次元配列と比較するため、2,000番に2次元配列のルーチンも示してある。

全体剛性マトリクスが、このように1次元化されたので、数百程度の要素をとくのであれば、前述のように、CPUのラムに書きこんでもよいし、1,000をこえるものであれば、フロッピーディスクのような外部記憶装置に書きこめばよい。ただし表-1でわかるようにPC-9801シリーズでは1次元配列の方が2次元配列よりは、さらに1キロバイトも多くとれるので、バンド幅さえ、小さければ、かなりの要素をとりあつかうことができる。また、埋設パイプのような細長い解析例では、バンド幅を小さくすることが可能であるから、こうした方法には非常に適しているといえることができる。

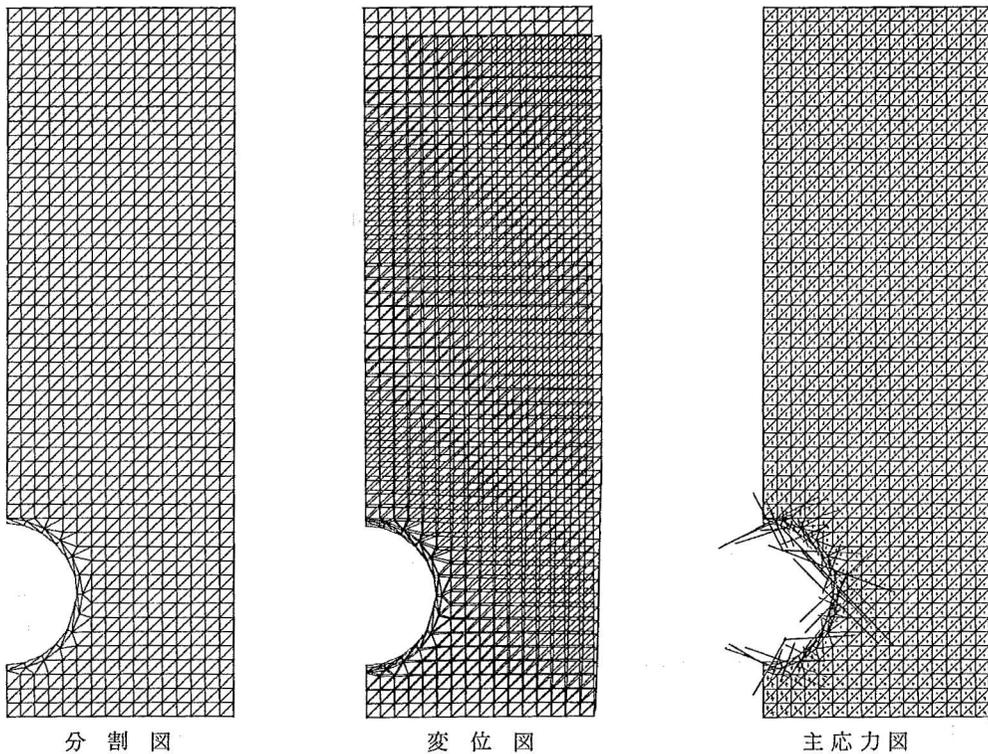
7. 広野泥炭地埋設パイプの解析例

埋設パイプの実験地は、山形県酒田市広野の泥炭地で、灌漑用パイプラインの試験パイプVu 250 mm管を、土かぶり90 cmで昭和56年3月20日に埋設、各種実験を行なった¹²⁾。その後、その場所は写真-1に示すような、舗装無しの幹線農道の下になっていたが、舗装計画があるため、その前に試験パイプを掘り起し、その後の管の状況や変形、変位などを調査することになった。写真-2、写真-3は、今回(昭和59年4月10日)試験パイプを掘り出したところである。

この現場条件を想定し、節点数837、要素数1,537でFEM解析を行なった。パソコンはNEC PC-9801Eを使用した。表-2に広野泥炭の理工学性を示す、FEM解析の入力条件は、Vu 250 mm管のヤング率30,000 kgf/cm²、ポアソン比0.35、泥炭はヤング率3 kgf/cm²、ポアソン比0.45、砂3,000 kgf/cm²、0.25、荷重は、地表に11

表-2 広野泥炭の理工学性

含水比	w	約 450 %
比重	G _s	2.12
乾燥密度	r _d	0.183 g/cm ³
分解度		75 %
最大乾燥密度	r _{dmax}	0.590 g/cm ³
最適含水比	w _{opt}	71.13 %
一軸圧縮強さ	q _u	0.32 kgf/cm ²



図一七 Vu250, 敷砂なし (節点数 837, 要素数 1,537)

ton バックホー (UH04-5 型 シュー幅 710 mm, 接地圧 0.33 kgf/cm²) 载荷とした。図一七には要素分割図, 敷砂なしの場合の変位図と主応力図を示した。主応力は引張りと圧縮を色わけして書かせるので, 実際は見やすくなっている。また要素数が非常に多くなったので自動分割を採用している。FEM 解析プログラムは, キーボードからの入力のほかに, 自動分割, デジタイザーによる入力¹¹⁾, 他のパソコンよりのファイル転送など, 色々な入力形式が選択できるようになっている¹⁰⁾。

8. おわりに

泥炭地に農業用パイプラインを敷設することに端を発したパソコンによる FEM 解析の研究も, 最大要素数 40 から出発して, 要素数 1,537 のものを扱えるところまで来た。この数字は, 埋設パイプに限らず, 小規模な農業構造物の FEM 解析や弾塑性解析が, パソコンでも充分可能であることを明らかに示している。今後, そうしたもののへの応用が期待されるであろう。

本研究を進めるに当たり, 色々な御便宜を与えて頂い

た, 山形県庁ならびに県赤川土地改良事務所の関係各位, また試験パイプ掘出調査に機会を与えて頂いた塩化ビニル管・継手協会の関係各位に心から御礼申し上げます。

さらにまた当研究室技官山崎加津子氏, 卒論実験として, 山口正明, 市川 東, 高橋浩徳の諸氏の協力を得たことに深く謝意を表したい。

最後に本研究は文部省科学研究費の助成があったことを付記し, 感謝の意を表するものである。

引用文献

- 1) 鎌田隆二, 志喜屋孝市, 青笹 要: 硬質塩化ビニル管の埋設挙動について—山形県庄内水田地帯における実験報告, 農土学会東北支部大会講演誌, 1981.
- 2) 東山 勇: マイクロコンピュータ利用による埋設とう性管の有限要素法解析, 山形大学紀要, 9 卷 1 号, pp. 79-91 1982.
- 3) 東山 勇: 泥炭を含む有機質土の弾塑性解析とレオロジー的考察, 山形大学紀要, 9 卷 4 号 pp. 93-

- 112, 1985.
- 4) 戸川隼人：マイコンによる有限要素解析，培風館，pp. 127-149, pp. 249-268, 1982.
 - 5) 戸川隼人：続マイコンによる有限要素解析，培風館，pp. 142-174, 1983.
 - 6) 大地羊三：土木のための有限要素法入門，オーム社，pp. 147-175, 1982.
 - 7) 小貫 天・根本佐久良雄：有限要素法入門，オーム社，pp. 73-86, 1983.
 - 8) 東山 勇：パソコンとは，農業土木学会誌，53(1)，pp. 5-12, 1985.
 - 9) I. M. スミス(戸川隼人訳)：有限要素法のプログラミング，啓学出版，pp. 171-223, 1984.
 - 10) 東山 勇：パソコンによる FEM プログラムについての二，三の考察，山形農林学会報，第42号，1985.
 - 11) 東山 勇：2台の異なるパソコン間のデータ転送，山形農林学会報，第41号，pp. 31-36, 1984.
 - 12) Isamu Higashiyama, Kōzō Tsukidate and Chikara Yoshida: Cadmium Pollution and the Physical Properties of Peat Soil —The case of the Ōyachi peat area of the Yoshino River drainage basin—, Jour. Irri. Eng. and Rural Plan. No. 4, pp. 15-22, 1983.

Summary

Peat and muck soils in Tōhoku cover about 150,000 ha., or 9.08% of the total area of the region's plains. This percentage exceeds even that of Hokkaidō, where peaty soils cover about 200,000 ha., or only 6.06% of the plains' acreage.

Rice is grown in most of the alluvial plains, basins, and river terraces in the region, and in these areas, peaty soils are fairly widespread(12). In recent years, the rearrangement and reclamation of rice paddy fields has included construction of pipeline systems for irrigation. However, many problems have arisen with the earth works of these pipeline systems (1, 2). The purpose of this project is to conduct a Finite Element analysis of flexible buried pipelines in such peaty organic soils.

To promote the project investigations we have provided specially designed triaxial compression

equipment which can serve as two-way systems for stress or strain control (3). Furthermore, new computer programs have been designed by the project investigations to solve problems of elasto-plastic deformation by means of Finite Element Analysis in micro-computer system. The program (Fig. 6) shows how to provide one dimensional array TK(I) instead of two dimensional array TK (I, J) usually used as overall stiffness matrix TK (I, J). By using one dimensional array TK(I), we can promote more easily transfer data from external memory (floppy disk) to internal memory (RAM) in solving Gauss' elimination method.

For example, we can treat with 837 nodal points and 1537 elements in FEM Analysis in this time, though solving at 219 nodal points and 361 elements in previous paper (3).