

รายการอ้างอิง

1. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
2. Anderson, T. L. Fracture mechanics : Fundamentals and applications. Boston : CRC Press Inc., 1991.
3. Chan, S. K., Tuba, I. S. and Wilson, W. K. On the finite element method in linear fracture mechanics. Engineering Fracture Mechanics 2 (1970) : 1-17.
4. Trecey, D. M. Finite elements for determination of crack tip elastic stress intensity factors. Engineering Fracture Mechanics 3 (1971) : 255-265.
5. Anderson, G. P., Ruggles, V. L. and Stibor, G. S. Use of finite element computer programs in fracture mechanics. International Journal of Fracture Mechanics 7 (1971) : 63-76.
6. Henshell, R. D. and Shaw, K. G. Crack tip finite elements are unnecessary. International Journal for Numerical Methods in Engineering 9 (1975) : 495-507.
7. Barsoum, R. S. On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics. International Journal for Numerical Methods in Engineering 10 (1976) : 25-37.
8. Barsoum, R. S. Triangular quarter-point elements as elastic and perfectly-plastic crack tip elements. International Journal for Numerical Methods in Engineering 11 (1977) : 85-98.
9. Raju, I. S. and Newman, J. C., Jr. Three-dimensional finite-element analysis of finite-thickness fracture mechanics. NASA TN D-8414, 1977.
10. Lynn, P. P. and Ingraffea, A. R. Transition elements to be used with quarter-point crack-tip elements. International Journal for Numerical Methods in Engineering Short communication (1978) : 1031-1036.
11. Hussain, M. A., Vasilakis, J. D. and Pu, S. L. Quadratic and cubic transition elements. International Journal for Numerical Methods in Engineering 17 (1981) : 1397-1406.
12. Banthia, V. Singularity of collapsed Q-8 finite element. International Journal for Numerical Methods in Engineering 21 (1985) : 959-965.
13. Manu, C. Quadratic isoparametric elements as transition elements. Engineering Fracture Mechanics 24 (1986) : 509-512.

14. Heyliger, P. R. On conventional and quarter-point mixed elements in linear elastic fracture mechanics. Engineering Fracture Mechanics 31 (1988) : 157-171.
15. Banks-Sills, L. Application of the finite element method to linear elastic fracture mechanics. Appl Mech Rev 44 (1991) : 447-461.
16. Lin, X. B. and Smith, R. A. Direct simulation of fatigue crack growth for arbitrary-shaped defects in pressure vessels. Proc Instn Mech Engrs 213C (1999) : 175-189.
17. Lin, X. B. and Smith, R. A. Finite element modelling of fatigue crack growth of surface cracked plates-Part I : The numerical technique. Engineering Fracture Mechanics 63 (1999) : 503-522.
18. Yavari, A., Moyer, E. T., Jr. and Sarkani, S. A reappraisal of transition elements in linear elastic fracture mechanics. International Journal of Fracture Mechanics 100 (1999) : 227-248.
19. Guinea, G. V., Planas, J. and Elices, M. K_I evaluation by the displacement extrapolation technique. Engineering Fracture Mechanics 66 (2000) : 243-255.
20. Inglis, C. E. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Transactions of the Institute of Naval Architects 55 (1913) : 219-241.
21. Griffith, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions 221A (1920) : 163-198.
22. Irwin, G. R. Fracture dynamics. Fracturing of Metals, pp.147-166. Cleveland : American society for testing metals, 1970.
23. Orowan, E. Fracture and strength of solids. Reports on Progress in Physics 12 (1948) : 185.
24. Irwin, G. R. Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminum alloys. Sagamore Research Conference Proceedings 2 (1956) : 289-305.
25. Saxena, A. Nonlinear fracture mechanics for engineer. New York : CRC Press Inc., 1997.
26. Suresh, S. Fatigue of materials. UK. : Cambridge University Press, 1994.
27. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N. Theory of elasticity. Third Edition. Singapore : McGraw-Hill, 1970.
28. ASTM E 647-95a. Standard Test method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995.

29. Dowling, N. E. Mechanical behavior of engineering material : Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. Second Edition. New Jersey : Prentice-Hall International Inc., 1999.
30. ASME E 399-90. Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Material. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.
31. Bananantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L. Fundamentals of metal fatigue analysis. New Jersey : Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1990.
32. Burnett, D. S. Finite element analysis from concepts to applications. New Jersey : Addison-Wesley, 1987.
33. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
34. Pickard, A. C. The application of 3-dimensional finite element methods to fracture mechanics and fatigue life prediction. London : Engineering materials advisory services ltd., 1986
35. Moes, N. Dolbow, J. and Belytschko, T. A finite element method for crack growth without remeshing. International Journal for Numerical Methods in Engineering 46 (1999) : 131-150.
36. Huebner, K. H., Thornton, E. A. and Byrom, T. G. The finite element method for engineers. Third Edition. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1995.
37. สุพัฒน์พงศ์ สิกขาบัณฑิต. เทคนิคการปรับขนาดไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์การไหลแบบหนึ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
38. Murakami, Y. (Editor) Stress intensity factors handbook. Oxford : Pergamon Press, 1987.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบขั้นทดสอบมาตรฐานที่ทำจากวัสดุ 2 ชนิด คือ

1. ASME SA-335 Gr P22 เป็นเหล็กที่มีชื่อเรียกตามมาตรฐานว่า "Seamless Ferritic Alloy Steel" และมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงได้ในตารางที่ ก.1
2. AL 6063-T6 หรือมีชื่อตามมาตรฐาน ASME ว่า "SB221" และมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงได้ในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 (wt.%)

Fe	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
97.184	0.087	0.531	0.014	0.007	0.230	1.186	0.761

ตารางที่ ก.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ AL 6063-T6 (wt.%)

Al	Si	Mg
98.90	0.40	0.70

โดยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 และ AL 6063-T6 แสดงได้ดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 และ AL 6063-T6

Material	σ_{YS} (MPa)	σ_U (MPa)	E (GPa)	% Elongation	ν	Hardness (BHN)
ASME SA-335 Gr P22	376	515	185	25	0.33	140
AL 6063-T6	214	241	68.3	12	0.33	73

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับชั้นทดสอบแบบ CT ของวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 2.400 ± 0.800 ตัน

ลำดับที่	จำนวนรอบของภาระ (รอบ)	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ย (มม.)
1	3,193,004	12.750
2	3,249,999	13.630
3	3,299,999	14.495
4	3,345,499	15.700
5	3,394,005	16.970
6	3,435,000	18.900
7	3,455,510	19.620
8	3,475,005	20.440
9	3,491,501	21.310
10	3,506,000	22.330
11	3,516,004	23.115
12	3,525,011	23.845
13	3,533,003	24.535
14	3,541,000	25.380
15	3,548,998	26.450
16	3,554,002	27.190
17	3,559,001	28.010
18	3,563,012	28.775
19	3,566,005	29.365
20	3,568,998	30.100
21	3,571,497	30.630
22	3,573,998	31.225
23	3,576,499	31.890
24	3,579,007	32.680
25	3,580,307	33.150

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับชิ้นทดสอบแบบคานัดัดสามจุดกดของวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 2.600 ± 0.867 ตัน

ลำดับที่	จำนวนรอบของภาระ (รอบ)	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ย (มม.)
1	755,004	12.700
2	794,002	13.210
3	840,003	13.845
4	885,023	14.590
5	948,001	15.565
6	1,010,003	16.620
7	1,062,999	17.670
8	1,115,201	18.895
9	1,162,104	20.305
10	1,189,002	21.325
11	1,215,704	22.575
12	1,239,302	24.135
13	1,257,003	25.660
14	1,266,003	26.740
15	1,272,002	27.685
16	1,274,998	28.090
17	1,280,002	28.920
18	1,284,501	29.720
19	1,289,001	30.595
20	1,293,502	31.785
21	1,296,400	33.020

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับชั้นทดสอบแบบ CT ของวัสดุ AL6063-T6 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 1.000 ± 0.333 ตัน

ลำดับที่	จำนวนรอบของภาระ (รอบ)	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ย (มม.)
1	303,209	12.750
2	320,002	13.035
3	330,005	13.225
4	355,000	13.725
5	385,004	14.250
6	405,004	14.805
7	450,000	16.050
8	489,430	17.350
9	510,091	18.675
10	526,502	19.455
11	540,016	20.245
12	554,011	21.350
13	570,002	22.135
14	585,151	24.335
15	591,001	25.075
16	598,004	26.530
17	603,023	28.570
18	605,501	30.005
19	607,526	30.710
20	609,502	32.530
21	610,002	33.150

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับชั้นทดสอบแบบคานัดัดสามจุดกดของวัสดุ AL6063-T6 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 1.000 ± 0.333 ดัน

ลำดับที่	จำนวนรอบของภาระ (รอบ)	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ย (มม.)
1	172,000	12.700
2	187,000	13.010
3	198,998	13.250
4	215,005	13.550
5	227,504	13.800
6	245,199	14.165
7	270,005	14.700
8	294,002	15.100
9	318,999	15.760
10	339,507	16.550
11	354,501	17.280
12	363,999	17.765
13	373,998	18.400
14	380,095	18.800
15	387,215	19.300
16	394,023	19.800
17	401,070	20.400
18	406,000	20.900
19	411,000	21.400
20	415,502	21.940
21	420,008	22.400
22	424,502	22.890
23	429,003	23.505
24	432,998	23.935
25	436,994	24.475
26	440,995	24.950
27	444,999	25.660
28	448,000	26.295
29	450,498	26.850

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับชั้นทดสอบแบบคานัดัดสามจุดกดของวัสดุ AL6063-T6 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 1.000 ± 0.333 ดัน (ต่อ)

ลำดับที่	จำนวนรอบของภาระ (รอบ)	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ย (มม.)
30	453,165	27.450
31	455,598	28.000
32	458,099	28.700
33	459,998	29.525
34	462,000	31.390
35	463,003	33.020

ภาคผนวก ค

รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ KFACTOR

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ KFACTOR ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นในบทที่ 6 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

```
C
C PROGRAM KFACTOR
C
C A FINITE ELEMENT CRACK ANALYSIS PROGRAM
C FOR TWO-DIMENSIONAL PLANE STRUCTURES
C
C THE VALUES DECLARED IN THE PARAMETER STATEMENT BELOW SHOULD
C BE ASSIGNED ACCORDING TO THE SIZE OF THE PROBLEMS
C
C MXPOI = MAXIMUM NUMBER OF NODES IN THE MODEL
C MXELE = MAXIMUM NUMBER OF ELEMENTS IN THE MODEL
C MXHBW = MAXIMUM NUMBER OF HALF-BANDWIDTH
C
C DATE : 14/07/2544
C
C PARAMETER (MXPOI=3000, MXELE=3000, MXHBW=3000)
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C PARAMETER (PI = 3.1415926535897932384626433832795)
C DIMENSION COORD(MXPOI,2), SYSK(MXPOI*2,MXHBW), SYSF(MXPOI*2)
C DIMENSION SXX(MXPOI), SYX(MXPOI), SYZ(MXPOI), ONE(MXPOI)
C CHARACTER*20 NAME1, TEXT
C
C INTEGER INTMAT(MXELE,6), IBC(MXPOI,2)
C
10 WRITE(*,15)
15 FORMAT(/, ' PLEASE ENTER THE INPUT FILE NAME:')
C
C READ(*, '(A)', ERR=10) NAME1
C
C L = len_trim (NAME1)
C
C FILE NAME OF THE PROBLEM = "NAME1.FEM"
C
C
C OPEN(UNIT=7, FILE=NAME1(1:L)//'.FEM', STATUS='OLD', ERR=10)
C OPEN(UNIT=9, file=NAME1(1:L)//'.NAS', STATUS='REPLACE')
C
C WRITE(*,25)
25 FORMAT(/, ' 2-D STRESS ANALYSIS',/,
C * ' ENTER PLANE CONDITION :',
C * ' 1. PLANE STRESS',
C * ' 2. PLANE STRAIN')
C READ(*,*) PLANE
C
C READ TITLE OF COMPUTATION:
C
C READ(7,*) NLINES
C NLINES = NO. LINE FOR TITLE DATA
C
C DO 100 ILINE=1,NLINES
C READ(7,*) TEXT
```

```

100 CONTINUE

C
C   READ INPUT DATA:
C
      READ(7,*) TEXT
      READ(7,*) NPOIN, NELEM, NFORCE

      IF(NPOIN.GT.MXPOI) WRITE(*,110) NPOIN
110  FORMAT(/, ' PLEASE INCREASE THE PARAMETER MXPOI TO ', I5)
      IF(NPOIN.GT.MXPOI) STOP
      IF(NELEM.GT.MXELE) WRITE(*,120) NELEM
120  FORMAT(/, ' PLEASE INCREASE THE PARAMETER MXELE TO ', I5)
      IF(NELEM.GT.MXELE) STOP

C
C   READ PROPERTIES OF MATERIAL
C
      READ(7,*) TEXT
      READ(7,*) ELAS, PR, THICK, CTNODE

C   REMARK : CTNODE = CRACK TIP NODE

      READ(7,*) TEXT

      DO 130 IP=1,NPOIN
      READ(7,*) I, (IBC(I,J), J=1,2), (COORD(I,K), K=1,2)
      IF(I.NE.IP) WRITE(*,135) IP
135  FORMAT(/, ' NODE NO.', I5, ' IN DATA FILE IS MISSING')
      IF(I.NE.IP) STOP
130  CONTINUE
      READ(7,*) TEXT

C
C   READ NO. NODE ON ELEMENT
C
C   I = NO. OF ELEMENT
C   J = NO. OF NODE
C
      DO 140 IE=1,NELEM
      READ(7,*) I, (INTMAT(I,J), J=1,6)
      IF(I.NE.IE) WRITE(*,150) IE
150  FORMAT(/, ' ELEMENT NO.', I5, ' IN DATA FILE IS MISSING')
      IF(I.NE.IE) STOP
140  CONTINUE

      NDF = 2
C   DEGREE OF FREEDOM ON NODE = 2 (U,V)

      NDOF = 12
C   DEGREE OF FREEDOM ON ELEMENT =12 (U1,V1,...,U12,V12)

      NEQ = NPOIN*NDF
C   NEQ = NO. OF EQUATIONS

C
C   SET INITIAL {F} = {0}
C
      DO 300 I=1,NEQ
      SYSF(I) = 0.
300  CONTINUE
      READ(7,*) TEXT

C
C   READ FORCE THAT APPLY ON NODE
C   FX = FORCE ON X-DIRECTION

```

```

C      FY = FORCE ON Y-DIRECTION
C
DO 310 II=1,NFORCE
READ(7,*) N, FX, FY
IEQ = (N-1)*NDF
SYSF(IEQ+1) = FX
SYSF(IEQ+2) = FY
310 CONTINUE

C
C      COMPUTE HALF-BANDWIDTH:
C
C      INITIAL VALUE FOR HALF-BANDWIDTH
NHBW = 0

C      LOOP FOR FIND NHBW
DO 400 IE=1,NELEM
MIN = 100000
C      MAX NO. OF NODE ON ELEMENT
MAX = 0
C      MIN NO. OF NODE ON ELEMENT

C      CALCULATE HALF-BANDWIDTH
DO 410 IN=1,6
II = INTMAT(IE, IN)
IF(II.GT.MAX) MAX = II
IF(II.LT.MIN) MIN = II
410 CONTINUE
NDIF = MAX - MIN + 1
IF(NDIF.GT.NHBW) NHBW = NDIF
400 CONTINUE

NHBW = NHBW*NDF
IF(NHBW.GT.MXHBW) WRITE(*,420) NHBW
420 FORMAT(/, ' PLEASE INCREASE THE PARAMETER MXHBW TO ', I5)
IF(NHBW.GT.MXHBW) STOP

C
C      SET INITIAL [SYSK]=[0]
C
DO 430 I=1,NEQ
DO 430 J=1,NHBW
SYSK(I,J) = 0.
430 CONTINUE

WRITE(*,435) NPOIN, NELEM
435 FORMAT(/, ' *** THE FINITE ELEMENT MODEL CONSISTS OF', I5,
*      ' NODES AND', I5, ' ELEMENTS ***')

C
C      WRITE THE MODEL FOR SHOW ON NASTRAN PROGRAM
C
K = 0
Z = 0.

DO 170 I = 1,NPOIN
WRITE(9,160) I,K, COORD(I,1), COORD(I,2), Z, K
160 FORMAT('GRID ',2I8,3F8.4,I8)
170 CONTINUE

JP = 1
DO 180 J = 1,NELEM
WRITE(9,175) J,JP, INTMAT(J,1), INTMAT(J,2), INTMAT(J,3), INTMAT(J,4),
*      INTMAT(J,5), INTMAT(J,6)
175 FORMAT('CTRIA6 ',8I8)
180 CONTINUE

```

```

WRITE(9,*) ' ENDDATA 6f4a842d'

C
C LOOP OVER ALL ELEMENTS TO COMPUTE ELEMENT MATRICES AND ASSEMBLE
C THEM FOR SYSTEM MATRICES IN THE FORM NEEDED FOR MINIMUM MEMORY
C REQUIREMENT:
C
WRITE(*,440)
440 FORMAT(/,' *** ESTABLISHING ELEMENT MATRICES AND',
*          ' ASSEMBLING ELEMENT EQUATIONS ***')

C COMPUTE ELEMENT MATRICES AND ASSEMBLE FOR SYSTEM MATRICES

CALL LST(NELEM, INTMAT, COORD, ELAS, PR, THICK, SYSK, MXPOI, MXELE
*        , MXHBW, E1, E2, E3, PLANE, AKAPPA)

WRITE(*,450)
450 FORMAT(/,' *** APPLYING BOUNDARY CONDITIONS ***')
CALL APPLYBC(NHBW, NPOIN, IBC, SYSK, SYSF, MXPOI, MXHBW)

WRITE(*,460)
460 FORMAT(/,' *** SOLVING A SET OF SIMULTANEOUS EQUATIONS',
*          ' FOR DISPLACEMENT SOLUTIONS ***')
WRITE(*,465) NEQ, NHBW
465 FORMAT(5X,' ( TOTAL OF', I5,' EQUATIONS WITH HALF-BANDWIDTH OF',
*          I4, ' )')

CALL SOLVE(NEQ, NHBW, SYSK, SYSF, MXPOI, MXHBW)

477 WRITE(*,*) ' ENTER OPERATION PATH FOR CALCULATE SIF : '
WRITE(*,*) ' [NODE1 = CRACK TIP] '
WRITE(*,*) ' [NODE2 = QUARTER POINT] '
WRITE(*,*) ' [NODE3 = ANOTHER POINT] '
READ(*,*) NODEK1, NODEK2, NODEK3

C
C PRINT OUT NODAL DISPLACEMENT SOLUTIONS:
C
C DISPLACEMENT & STRESS SOLUTION IS IN FILENAME "NAME1.OUT"
C
OPEN(UNIT=8, FILE=NAME1(1:L)//'.out', STATUS='REPLACE')
WRITE(8,490) NPOIN
490 FORMAT(' NODAL DISPLACEMENT SOLUTIONS [', I5, ']:', //, 2X, 'NODE'
*          , 13X, 'U', 13X, 'V', /)

I1 = 1
DO 500 IP=1,NPOIN
I2 = IP*NDF
WRITE(8,510) IP, (SYSF(I), I=I1,I2)
510 FORMAT(I6, 2E14.6)
I1 = I2 + 1
500 CONTINUE

C
C COMPUTE NODAL STRESSES:
C
C
C REMARK : FILE NAME "NAME1.F06" = FILE OF NASTRAN SOLUTION}
C FILE NAME "NAME1.V" = FILE CONTAIN VONMISES STRESS
C
OPEN(UNIT=14, file=NAME1(1:L)//'.f06', STATUS='REPLACE')

```

```

OPEN(UNIT=12, FILE=NAME1(1:L)//'.v', STATUS='REPLACE')

CALL STRESS(NPOIN, NELEM, INTMAT, COORD, SYSF,
*          SXX, SYY, SXY, ONE, MXPOI, MXELE,E1,E2,E3)

C
C COMPUTE STRESS INTENSITY FACTOR
C

XK1      = COORD(NODEK1,1)
XK3      = COORD(NODEK3,1)

YK1      = COORD(NODEK1,2)
YK3      = COORD(NODEK3,2)

DIFFX = XK3 - XK1
DIFFY = YK3 - YK1

ALENGTH = SQRT(DIFFX*DIFFX + DIFFY*DIFFY)

VA       = SYSF(2*NODEK2)
VB       = SYSF(2*NODEK3)

CALL CALK(ELAS, PR, AKAPPA, ALENGTH, VA, VB, PI, SIF)

STOP
END

C =====THE END OF MAIN PROGRAM=====

C=====
C
C          SUBROUTINE USED IN THIS PROGRAM
C
C          1. SUBROUTINE LST & BJ
C          2. SUBROUTINE ASSEMBLY
C          3. SUBROUTINE APPLYBC
C          4. SUBROUTINE SOLVE
C          5. SUBROUTINE STRESS
C=====

SUBROUTINE APPLYBC(NHBW, NPOIN, IBC, SYSK, SYSF, MXPOI, MXHBW)

C
C APPLY DISPLACEMENT BOUNDARY CONDITIONS WITH CONDITION CODES OF:
C          0 = FREE TO MOVE
C          1 = FIXED
C

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION SYSK(MXPOI*2,MXHBW), SYSF(MXPOI*2)

INTEGER IBC(MXPOI,2)

NDF = 2
DO 100 IN=1,NPOIN
DO 200 ID=1,NDF
IF(IBC(IN, ID).NE.1) GO TO 200

IEQ = (IN-1)*NDF + ID
SYSF(IEQ) = 0.

SYSK(IEQ,1) = 1.
DO 300 I=2,NHBW
SYSK(IEQ,I) = 0.
300 CONTINUE

```

```

      IF(IEQ.EQ.1) GO TO 450
      DO 400 N=1,IEQ-1
      IROW = IEQ - N
      ICOL = N + 1
      IF(ICOL.GT.NHBW) GO TO 450
      SYSK(IROW,ICOL) = 0.
400 CONTINUE
450 CONTINUE

200 CONTINUE
100 CONTINUE

      RETURN
      END

```

```

C=====

```

```

      SUBROUTINE ASSMBLE( IE, INTMAT, SGBL, SYSK, MXPOI, MXELE, MXHBW)

C
C   ASSEMBLE ELEMENT EQUATIONS INTO SYSTEM EQUATIONS
C

      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION SGBL(12,12)
      DIMENSION SYSK(MXPOI*2,MXHBW)

      INTEGER INTMAT(MXELE,6)

      NNODE = 6
      NDF = 2

      DO 100 NR=1,NNODE
      NODR = INTMAT(IE,NR)
      DO 100 MR=1,NDF

C
C   DENOTE: NSR = ROW POSITION IN THE SYSTEM EQS.
C           NER = ROW POSITION IN THE ELEMENT EQS.
C

      NSR = (NODR-1)*NDF + MR
      NER = (NR -1)*NDF + MR

      DO 200 NC=1,NNODE
      NODC = INTMAT(IE,NC)
      DO 200 MC=1,NDF

C
C   DENOTE: NSC = COLUMN POSITION IN THE SYSTEM EQS.
C           (AFTER ROTATION - READY FOR BANDED SOLVER)
C           NEC = COLUMN POSITION IN THE ELEMENT EQS.
C

      NSC = (NODC-1)*NDF + MC - NSR + 1
      NEC = (NC -1)*NDF + MC

      IF(NSC.GT.0) THEN
      SYSK(NSR,NSC) = SYSK(NSR,NSC) + SGBL(NER,NEC)
      ENDIF

200 CONTINUE

100 CONTINUE

      RETURN
      END

```


C=====

SUBROUTINE BJ(K, X, Y, XG, YG, BMAT, DETJAC)

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

DIMENSION XG(4), YG(4), BMAT(3,12), X(6), Y(6)

DIMENSION DNDA(6), DNDB(6), AJ(2,2), AJI(2,2)

C NG = NUMBER OF GUASS POINT

NG = 4

A = XG(K)

B = YG(K)

DNDA(1) = 4.*A - 3. + 4.*B

DNDA(2) = 4.*A - 1.

DNDA(3) = 0.

DNDA(4) = 4. - 8.*A - 4.*B

DNDA(5) = 4.*B

DNDA(6) = -4.*B

DNDB(1) = 4.*B - 3. + 4.*A

DNDB(2) = 0.

DNDB(3) = 4.*B - 1.

DNDB(4) = -4.*A

DNDB(5) = 4.*A

DNDB(6) = 4. - 4.*A - 8.*B

AJ(1,1) = DNDA(1)*X(1) + DNDA(2)*X(2) + DNDA(3)*X(3) +
* DNDA(4)*X(4) + DNDA(5)*X(5) + DNDA(6)*X(6)

AJ(1,2) = DNDA(1)*Y(1) + DNDA(2)*Y(2) + DNDA(3)*Y(3) +
* DNDA(4)*Y(4) + DNDA(5)*Y(5) + DNDA(6)*Y(6)

AJ(2,1) = DNDB(1)*X(1) + DNDB(2)*X(2) + DNDB(3)*X(3) +
* DNDB(4)*X(4) + DNDB(5)*X(5) + DNDB(6)*X(6)

AJ(2,2) = DNDB(1)*Y(1) + DNDB(2)*Y(2) + DNDB(3)*Y(3) +
* DNDB(4)*Y(4) + DNDB(5)*Y(5) + DNDB(6)*Y(6)

DETJAC = AJ(1,1)*AJ(2,2) - AJ(2,1)*AJ(1,2)

AJI(1,1) = AJ(2,2)/DETJAC

AJI(1,2) = -AJ(1,2)/DETJAC

AJI(2,1) = -AJ(2,1)/DETJAC

AJI(2,2) = AJ(1,1)/DETJAC

DO 10 I = 1,3

DO 10 J = 1,12

BMAT(I,J) = 0.

10 CONTINUE

DO 50 J = 1,6

BMAT(1,2*J-1) = AJI(1,1)*DNDA(J) + AJI(1,2)*DNDB(J)

BMAT(2,2*J) = AJI(2,1)*DNDA(J) + AJI(2,2)*DNDB(J)

BMAT(3,2*J-1) = BMAT(2,2*J)

BMAT(3,2*J) = BMAT(1,2*J-1)

50 CONTINUE

RETURN


```

AKAPPA = (3.-PR)/(1.+PR)

ELSE

C
C ----- FOR PLANE STRAIN -----
C
  FAC = ELAS/((1.+PR)*(1.-2.*PR))
  E1  = FAC*(1.-PR)
  E2  = FAC*PR
  E3  = FAC*(1-2.*PR)/2.

  AKAPPA = (3.-4.*PR)

  ENDIF

  C(1,1) = E1
  C(1,2) = E2
  C(1,3) = 0.
  C(2,1) = E2
  C(2,2) = E1
  C(2,3) = 0.
  C(3,1) = 0.
  C(3,2) = 0.
  C(3,3) = E3

C
C   DATA FOR ELEMENT MATRIX
C

C   SET INITIAL [SLST]=[0]

  DO 300 I=1,12
  DO 300 J=1,12
  SLST(I,J) = 0.
300 CONTINUE

  XG(1) = 1./3.
  XG(2) = 1./5.
  XG(3) = 3./5.
  XG(4) = 1./5.

  YG(1) = 1./3.
  YG(2) = 1./5.
  YG(3) = 1./5.
  YG(4) = 3./5.

  WG(1) = -27./48.
  WG(2) = 25./48.
  WG(3) = 25./48.
  WG(4) = 25./48.

C
C   AREA OF TRIANGLE MUST BE DIVIDED BY TWO
C

  WG(1) = WG(1)/2.
  WG(2) = WG(2)/2.
  WG(3) = WG(3)/2.
  WG(4) = WG(4)/2.

  DO 330 I = 1,12
  DO 330 J = 1,12
  DO 330 K = 1,NG

  CALL BJ( K, X, Y, XG, YG, BMAT, DETJAC)

```

```

      SLST(I,J) = SLST(I,J) + WG(K)*
*          ( BMAT(1,I)*C(1,1)+BMAT(2,I)*C(2,1)+BMAT(3,I)
*          *C(3,1))*BMAT(1,J) +
*          ( BMAT(1,I)*C(1,2)+BMAT(2,I)*C(2,2)+BMAT(3,I)
*          *C(3,2))*BMAT(2,J) +
*          ( BMAT(1,I)*C(1,3)+BMAT(2,I)*C(2,3)+BMAT(3,I)
*          *C(3,3))*BMAT(3,J))*DETJAC*THICK

330 CONTINUE

C
C      SET [K-ELE] BY SYMMETRY
C

      DO 600 I=1,12
      DO 600 J=I+1,12
      SLST(J,I) = SLST(I,J)
600 CONTINUE

C
C      ASSEMBLE THESE ELEMENT EQUATIONS INTO THE SYSTEM EQUATIONS:
C

      CALL ASSMBLE( IE, INTMAT, SLST, SYSK, MXPOI, MXELE, MXHBW)

5000 CONTINUE

      RETURN
      END

C=====

      SUBROUTINE SOLVE(NROW, NHBW, GSTIF, XL, MXPOI, MXHEW)

C
C      SOLVE A SET OF SIMULTANEOUS EQUATIONS USING GAUSS ELIMINATION.
C      THIS SOLVER ROUTINE CAN BE DESCRIBED BY USING AN EXAMPLE OF A
C      SET OF FOUR SIMULTANEOUS EQUATIONS (AFTER APPLYING BOUNDARY
C      CONDITIONS) AS SHOWN BELOW:
C
C      [ A11  A12  A13    0 ]   [ X1 ]   [ F1 ]
C      [          ]   [   ]   [   ]
C      [ A12  A22  A23  A24 ]   [ X2 ]   [ F2 ]
C      [          ]   [   ]   [   ]
C      [ A13  A23  A33  A34 ]   [ X3 ]   [ F3 ]
C      [          ]   [   ]   [   ]
C      [  0  A24  A34  A44 ]   [ X4 ]   [ F4 ]
C
C      WHERE THE VARIABLE XL IS THE LOAD VECTOR ON RHS OF THE EQUATIONS.
C      THE GLOBAL STIFFNESS MATRIX ABOVE IS STORED IN THE VARIABLE
C      GSTIF IN THE FORMAT SHOWN BELOW: (HERE NROW = 4 AND NHBW = 3)
C
C
C      [ A11  A12  A13 ]
C      [          ]
C      [ A22  A23  A24 ]
C      [ GSTIF ] = [          ]
C      [ A33  A34    0 ]
C      [          ]
C      [ A44    0    0 ]
C
C      AND THE OUTPUT SOLUTIONS WILL BE STORED IN THE VARIABLE XL.
C
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

      DIMENSION GSTIF(MXPOI*2,MXHBW), XL(MXPOI*2)

```

```

NR=NROW
NC=NHBW

C
C   DIAGONALIZATION THE MATRIX:
C

DO 10 I=1,NR
PIVOT1=GSTIF(I,1)
IF(ABS(PIVOT1).LT.10.E-10) THEN
WRITE(6,1025) I, PIVOT1
1025 FORMAT(' EQ. NO.', I5, ' HAS NEARLY ZERO PIVOT OF', E14.6)
WRITE(*,*) '   ** STOP **'
WRITE(*,*) '   *** CHECK NODE AND ELEMENT NUMBERING IN F.E. MODEL
*                                     ****'
STOP
ENDIF

XL(I)=XL(I)/PIVOT1
DO 20 J=1,NC
20 GSTIF(I,J)=GSTIF(I,J)/PIVOT1
MM=0
DO 30 II=I+1,NR
MM=MM+1
IF(MM+1.GT.NC) GOTO 30
PIVOT2=GSTIF(I,MM+1)*PIVOT1
XL(II)=XL(II)-XL(I)*PIVOT2
DO 40 JJ=1,NC
JJJ=JJ+MM
IF(JJJ.LE.NC) THEN
    GSTIF(II,JJ)=GSTIF(II,JJ)-GSTIF(I,JJJ)*PIVOT2
ENDIF
40 CONTINUE
30 CONTINUE
10 CONTINUE

C
C   BACK SUBSTITUTION:
C

DO 70 I=NR-1,1,-1
II=1
DO 80 J=I+1,NR
II=II+1
IF(II.LE.NHBW) XL(I)=XL(I)-GSTIF(I,II)*XL(J)
80 CONTINUE
70 CONTINUE

RETURN
END

C=====
SUBROUTINE STRESS(NPOIN, NELEM, INTMAT, COORD, SYSF,
*              SXX,  SYX,  SXY,  ONE,  MXPOI,  MXELE,E1,E2,E3)

C
C   COMPUTE NODAL STRESS COMPONENTS FOR LST ELEMENTS
C

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION  COORD(MXPOI,2), DISP(MXPOI*2), ONE(MXPOI), SYSF(MXPOI*2)
DIMENSION  SXX(MXPOI), SYX(MXPOI), SXY(MXPOI), SVM(MXPOI)
DIMENSION  SGXX(4), SGYY(4), SGXY(4), X(6), Y(6), EPS(3)
DIMENSION  BMAT(3,12), XG(4), YG(4), TR(6,4), C(3,3)

INTEGER  INTMAT(MXELE,6)

```

```

DO 10 I=1,NPOIN
SXX(I) = 0.
SYY(I) = 0.
SXY(I) = 0.
ONE(I) = 0.
10 CONTINUE

XG(1) = 1./3.
XG(2) = 1./5.
XG(3) = 3./5.
XG(4) = 1./5.

YG(1) = 1./3.
YG(2) = 1./5.
YG(3) = 1./5.
YG(4) = 3./5.

C
C LOOP OVER THE NUMBER OF ELEMENTS:
C

WRITE(8,*) ' '
WRITE(8,*) '===== '

DO 1000 IE = 1,NELEM

C
C FIND ELEMENT LOCAL COORDINATES:
C

II = INTMAT(IE,1)
JJ = INTMAT(IE,2)
KK = INTMAT(IE,3)
IJ = INTMAT(IE,4)
JK = INTMAT(IE,5)
IK = INTMAT(IE,6)

X(1) = COORD(II,1)
X(2) = COORD(JJ,1)
X(3) = COORD(KK,1)
X(4) = COORD(IJ,1)
X(5) = COORD(JK,1)
X(6) = COORD(IK,1)

Y(1) = COORD(II,2)
Y(2) = COORD(JJ,2)
Y(3) = COORD(KK,2)
Y(4) = COORD(IJ,2)
Y(5) = COORD(JK,2)
Y(6) = COORD(IK,2)

DO 5 I = 1,4
SGXX(I) = 0.
SGYY(I) = 0.
SGXY(I) = 0.
5 CONTINUE

C
C ELASTICITY MATRIX:
C
C
C          [ E1  E2  0 ]
C          [           ]
C          [ E2  E1  0 ]
C          [           ]
C          [ 0   0  E3 ]
C
C(1,1) = E1

```

```

C(1,2) = E2
C(1,3) = 0.
C(2,1) = E2
C(2,2) = E1
C(2,3) = 0.
C(3,1) = 0.
C(3,2) = 0.
C(3,3) = E3

C
C   GATHER ELEMENT NODAL DISPLACEMENTS:
C
      DO 200 J1=1,6
      I1 = INTMAT(IE,J1)
      IEQ = 2*I1
      DISP(2*J1-1) = SYSF(IEQ-1)
      DISP(2*J1)   = SYSF(IEQ)
200  CONTINUE

C
C   COMPUTE THE NODAL STRESSES:
C
C   NG = 4 USE 4 GAUSS POINT TO COMPUTE STRESS

      DO 590 K = 1,4

      CALL BJ( K, X, Y, XG, YG, BMAT, DETJAC)

      DO 550 J = 1,12

      EPS(1) = EPS(1) + BMAT(1,J)*DISP(J)
      EPS(2) = EPS(2) + BMAT(2,J)*DISP(J)
      EPS(3) = EPS(3) + BMAT(3,J)*DISP(J)

550  CONTINUE

      DO 500 I = 1,3

      SGXX(K) = SGXX(K) + C(1,I)*EPS(I)
      SGYY(K) = SGYY(K) + C(2,I)*EPS(I)
      SGXY(K) = SGXY(K) + C(3,I)*EPS(I)

500  CONTINUE

      DO 560 I = 1,3
      EPS(I) = 0.
560  CONTINUE

590  CONTINUE

C
C
C           [SXX_NODE]   [      ]   [SGXX]
C           [SYY_NODE] = [ TR  ] X [SGYY]
C           [SXY_NODE]   [      ]   [SGXY]
C
C
C
      TR(1,1) = 3./12.
      TR(1,2) = 23./12.
      TR(1,3) = -7./12.
      TR(1,4) = -7./12.

```

```

TR(2,1) =      3./12.
TR(2,2) =     -7./12.
TR(2,3) =     23./12.
TR(2,4) =     -7./12.

TR(3,1) =      3./12.
TR(3,2) =     -7./12.
TR(3,3) =     -7./12.
TR(3,4) =     23./12.

TR(4,1) =      3./12.
TR(4,2) =      8./12.
TR(4,3) =      8./12.
TR(4,4) =     -7./12.

TR(5,1) =      3./12.
TR(5,2) =     -7./12.
TR(5,3) =      8./12.
TR(5,4) =      8./12.

TR(6,1) =      3./12.
TR(6,2) =      8./12.
TR(6,3) =     -7./12.
TR(6,4) =      8./12.

DO 655 M = 1,6

K = INTMAT(IE,M)

DO 650 J = 1,4

SXX(K) = SXX(K) + TR(M,J)*SGXX(J)
SYY(K) = SYY(K) + TR(M,J)*SGYY(J)
SXY(K) = SXY(K) + TR(M,J)*SGXY(J)

650 CONTINUE

ONE(K) = ONE(K) + 1.

655 CONTINUE

1000 CONTINUE

C
C   RESULT STRESS ON NODE :
C

DO 1100 I=1,NPOIN
IF(ONE(I).EQ.0.) WRITE(*,1200) I
1200 FORMAT(' *** WARNING *** NO STRESS CONTRIBUTION AT NODE', I5)
IF(ONE(I).EQ.0.) ONE(I) = 1.
SXX(I) = SXX(I)/ONE(I)
SYY(I) = SYY(I)/ONE(I)
SXY(I) = SXY(I)/ONE(I)
AA      = (SXX(I)-SYY(I))*(SXX(I)-SYY(I))
SVM(I) = SQRT((AA+SXX(I)*SXX(I)+SYY(I)*SYY(I)+6.*SXY(I)*SXY(I))
*
/2.)
1100 CONTINUE

C
C   ***** COMPUTE STRESS ON NODE ALREADY *****
C

C   PRINT OUT THESE NODAL STRESSES:

WRITE(14,*) '0'
WRITE(14,1450)
1450 FORMAT(45X,'D I S P L A C E M E N T   V E C T O R',/,8X,'NO.',15X

```



```

*          , 'TX', 15X, 'TY', 15X, 'TZ', 14X, 'SVM', 14X, 'SXX', 14X, 'SYY')

C
C REMARK : FILE OUTPUT FOR NASTRAN = XXX.F06
C          T1 = X-TRANSLATION   ,   R1 = VONMISE   STRESS
C          T2 = Y-TRANSLATION   ,   R2 = X-NORMAL  STRESS
C          T3 = Z-TRANSLATION   ,   R3 = Y-NORMAL  STRESS
C
      WRITE(8,1300)  NPOIN
1300  FORMAT(///, ' NODAL STRESS SOLUTIONS [' , I5, ']:', //,
*       2X, 'NODE', 9X, 'SXX', 9X, 'SYY', 9X, 'SXY', 9X, 'SVM',/)

      ZERO = 0.

      DO 1400  I=1,NPOIN
      WRITE(8,1500)  I, SXX(I), SYI(I), SXY(I), SVM(I)
      WRITE(14,35)  I,SYF(2*I-1),SYF(2*I),ZERO,SVM(I),SXX(I),SYY(I)
      35  FORMAT(I10,'  G',6E18.9)
1500  FORMAT(I6, 4E14.6)
1400  CONTINUE

      WRITE(12,2020) NPOIN
2020  FORMAT(I5)

      DO 2030  I = 1, NPOIN
      WRITE(12,2025) I, SVM(I), SXX(I), SYY(I), SXY(I)
2025  FORMAT(I12, 4E16.8)
2030  CONTINUE

C
C   THE SECTION USE TO BUILT CONTOUR DATA FOR SHOW ON NASTRAN
C   ON FILE "FILENAME_.F06" (IN UNIT = 14)
C   AND BUILT THE VONMISE STRESS FILE FOR PROGRAM "SPACE"
C
      WRITE(14,45)
      45  FORMAT('1',75X,
* 'NOVEMBER 6, 2001 MSC.NASTRAN 8/25/01 PAGE 1')
      WRITE(14,*) ' '
      WRITE(14,*) ' '
      WRITE(14,*) ' '

      RETURN
      END

C=====
      SUBROUTINE CALK(ELAS, PR, AKAPPA, ALENGTH, VA, VB, PI, SIF)

      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

C
C   DISPLACEMENT EXTRAPOLATION METHOD
C
      FACTOR = ELAS/(3.*(1. + PR)*(AKAPPA + 1.))

      SIF          = FACTOR*SQRT(2.*PI/ALENGTH)*(8.*VA - VB)

      WRITE(8,*) ' '
      WRITE(8,*) '===== '

      WRITE(*,*) ' STRESS INTENSITY FACTOR [KI] :'
      WRITE(*,*) SIF

      WRITE(8,10) SIF

```

```
10 FORMAT(/, ' STRESS INTENSITY FACTOR [KI] :',/,/, F15.5,  
*    /,/, 1X, '=====')
```

```
RETURN  
END
```

C-----

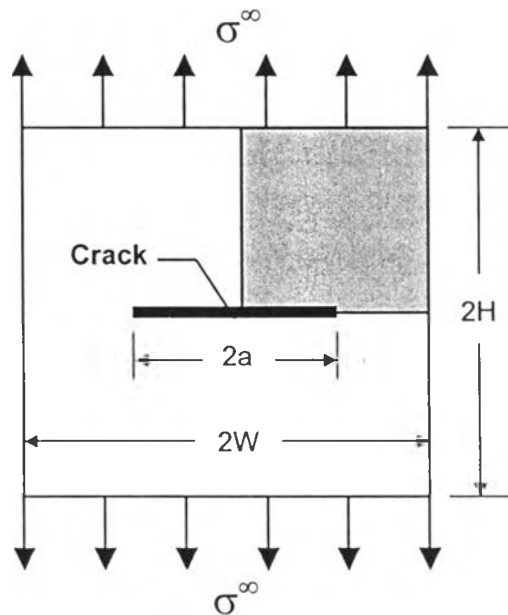
ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น

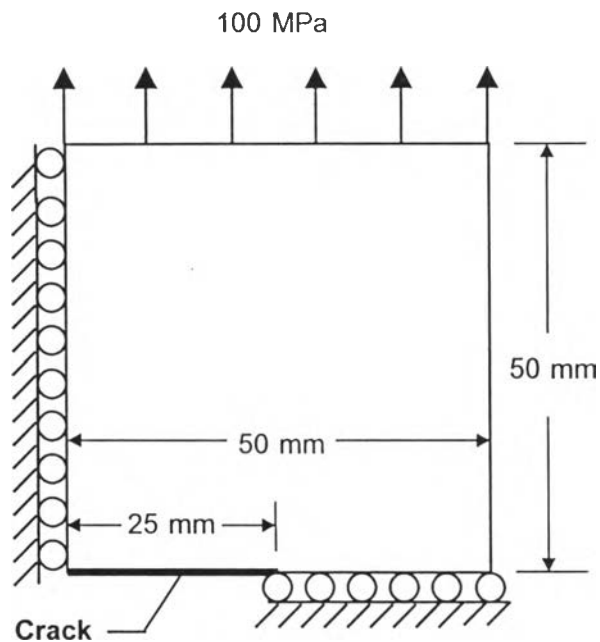
ตัวอย่างการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่นำมาแสดงในที่นี่จะยกมา 2 ตัวอย่าง โดยเป็นปัญหาที่มีความสมมาตรและไม่สมมาตรของรูปร่างปัญหา คือ ปัญหาแผ่นสี่เหลี่ยมแบนที่มีรอยร้าวตรงกลางภายใต้แรงดึงแสดงในบทที่ 8 และปัญหาการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระผสมแบบที่ 1 และ 2 ในแผ่นสี่เหลี่ยมแบนที่มีรอยร้าวตรงขอบด้านข้างภายใต้แรงเฉือนในบทที่ 9 ตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 1 ปัญหาการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นในแผ่นสี่เหลี่ยมแบนที่มีรอยร้าวตรงกลางภายใต้แรงดึง

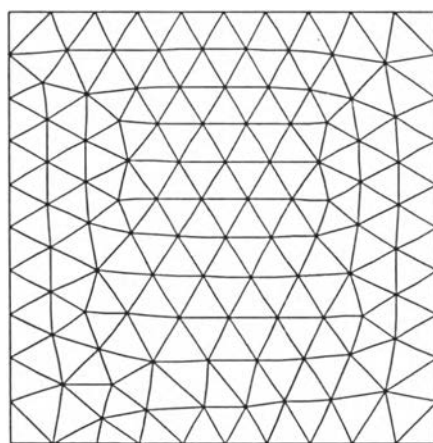
ปัญหามีลักษณะเป็นแผ่นแบนที่มีรอยร้าวอยู่ที่กึ่งกลางของแผ่น ซึ่งมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเท่ากับ 207 GPa อัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.3 และมีขนาดความยาวรอยร้าว ($2a$) เท่ากับ 50 mm ความสูง ($2H$) เท่ากับ 100 mm ความกว้าง ($2W$) เท่ากับ 100 mm และความหนา (t) เท่ากับ 30 mm โดยถูกกระทำด้วยภาระความเค้นดึงขนาด 100 MPa เนื่องจากความสมมาตรของปัญหา จึงสามารถพิจารณาเพียงหนึ่งในสี่ของปัญหาได้ดังส่วนที่แรงเงาของรูปร่างปัญหาในรูปที่ ง.1 ซึ่งสามารถแสดงรูปร่างของปัญหาที่นำมาพิจารณาได้ในรูปที่ ง.2 และรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มแรก (Initial mesh) ได้ดังรูปที่ ง.3 ประกอบด้วย 206 เอลิเมนต์ 453 จุดต่อ



รูปที่ ง.1 รูปร่างของปัญหาแผ่นแบนที่มีรอยร้าวอยู่ที่กึ่งกลางของแผ่น

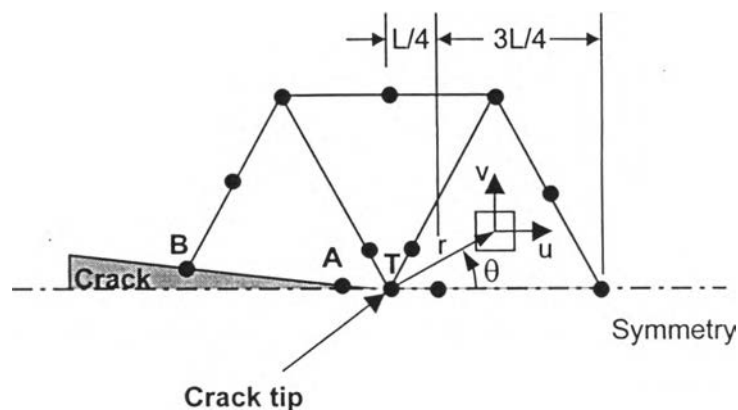


รูปที่ ง.2 รูปร่างและรายละเอียดของปัญหาที่นำมาพิจารณา



รูปที่ ง.3 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มแรกของปัญหาแผ่นแบนที่มีรอยร้าวอยู่กึ่งกลางของแผ่น

ในการประมาณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการประมาณด้วยความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวที่บริเวณปลายรอยร้าวกับค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น สำหรับปัญหานี้เป็นปัญหาที่มีความสมมาตรจะมีลักษณะการวางตัวของเอลิเมนต์สำหรับปลายรอยร้าวดังรูปที่ ง.4



รูปที่ ง.4 ลักษณะการวางตัวของของเอลิเมนต์สำหรับปลายรอยร้าวในปัญหาที่มีความสมมาตร

โดยตำแหน่งจุดต่อที่นำมาใช้ในการคำนวณคือ จุดต่อ A, B และ T และจะใช้สมการ (4.87) ในการคำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (K_I) ดังนี้

$$K_I = \frac{E}{3(1+\nu)(\kappa+1)} \sqrt{\frac{2\pi}{L}} [8v_A - v_B] \quad (ง.1)$$

โดยที่ $\kappa = 3 - 4\nu$ ในกรณีความเคียวระนาบ

$\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ ในกรณีความเค้นระนาบ

v_A, v_B แทนการเคลื่อนตัวในแนวแกน y ของจุดต่อ A และ B ตามลำดับ

L แทนความยาวของเอลิเมนต์บนด้าน TB

E แทนค่าคงที่ของการยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

ν แทนอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson ratio)

สำหรับตัวอย่างนี้จะมีตำแหน่งจุดต่อ A, B และ T ตรงกับจุดต่อที่ 128, 10 และ 2 ตามลำดับ โดยเอลิเมนต์สำหรับปลายรอยร้าวมีความยาวบนด้าน TB เท่ากับ 0.05 มม. และจากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะได้ดังตารางที่ ง.1

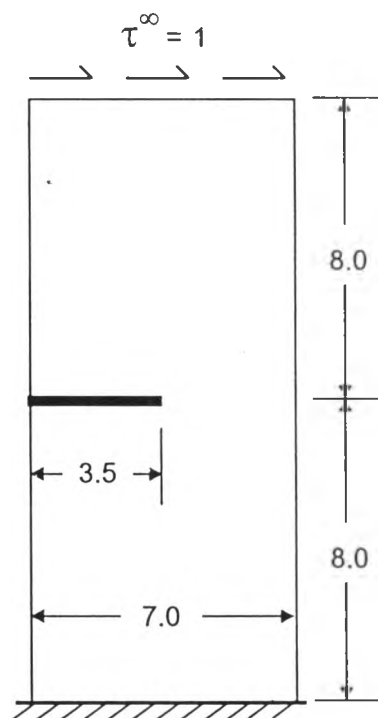
ตารางที่ ง.1 ผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาแผ่นแบนที่มีรอยร้าวอยู่ที่กึ่งกลางของแผ่น

Position	Node	u (mm)	v (mm)
A	128	3.098×10^{-02}	1.830×10^{-02}
B	10	2.659×10^{-02}	3.562×10^{-02}

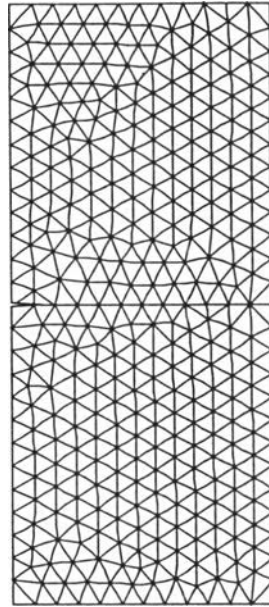
เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (ง.1) จะได้ $K_I = 2341.23 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$

ตัวอย่างที่ 2 ปัญหาการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาวะผสม
แบบที่ 1 และ 2

สำหรับปัญหานี้เป็นปัญหาแผ่นสี่เหลี่ยมแบนที่มีรอยร้าวที่ขอบด้านข้าง และถูกกระทำด้วยความเค้นเฉือนที่ขอบด้านบนในบทที่ 9 โดยรายละเอียดของปัญหาแสดงได้ดังรูปที่ ง.5 ซึ่งมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเท่ากับ 30000 หน่วย อัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.25 และมีขนาดความยาวรอยร้าว (a) เท่ากับ 3.5 หน่วย ความสูง ($2H$) เท่ากับ 16 หน่วย ความกว้าง (W) เท่ากับ 7 หน่วย โดยถูกกระทำด้วยภาวะความเค้นเฉือนขนาด 1 หน่วย ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มแรกของปัญหาได้ดังรูปที่ ง.6 ประกอบด้วย 668 เอลิเมนต์ 1425 จุดต่อ

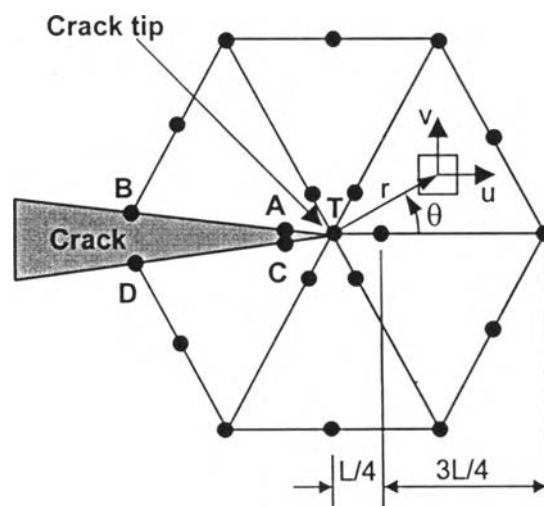


รูปที่ ง.5 รูปร่างของปัญหาแผ่นแบนที่มีรอยร้าวอยู่ที่ขอบภายใต้ความเค้นเฉือน



รูปที่ 3.6 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นของปัญหาแผ่นแบนที่มีรอยร้าวที่ขอบ และอยู่ภายใต้ความเค้นเฉือน

สำหรับการประมาณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นจะใช้วิธีการประมาณด้วยความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวที่บริเวณปลายรอยร้าวกับค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โดยตำแหน่งจุดต่อที่นำมาใช้คำนวณนี้ คือ A, B, C, D และ T ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะของเอลิเมนต์บริเวณปลายรอยร้าว

และเนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาไม่สมมาตร ดังนั้นการคำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นจะใช้สมการ (4.89) และ (4.90) ในการคำนวณ ดังนี้

$$K_I = \frac{E}{3(1+\nu)(\kappa+1)} \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \left[4(v_A - v_C) - \left(\frac{v_B - v_D}{2} \right) \right] \quad (ง.2)$$

$$K_{II} = \frac{E}{3(1+\nu)(\kappa+1)} \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \left[4(u_A - u_C) - \left(\frac{u_B - u_D}{2} \right) \right] \quad (ง.3)$$

สำหรับตัวอย่างนี้ตำแหน่งจุดต่อ A, B, C, D และ T ตรงกับจุดต่อที่ 115, 21, 378, 379 และ 2 ตามลำดับ โดยมีความยาวของเอลิเมนต์สำหรับปลายรอยร้าว (TB) เท่ากับ 1.1667 หน่วย และจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะได้ผลดังตารางที่ ง.2

ตารางที่ ง.2 ผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาแผ่นแบนที่มีรอยร้าวอยู่ที่ขอบ ภายใต้ความเค้นเฉือน

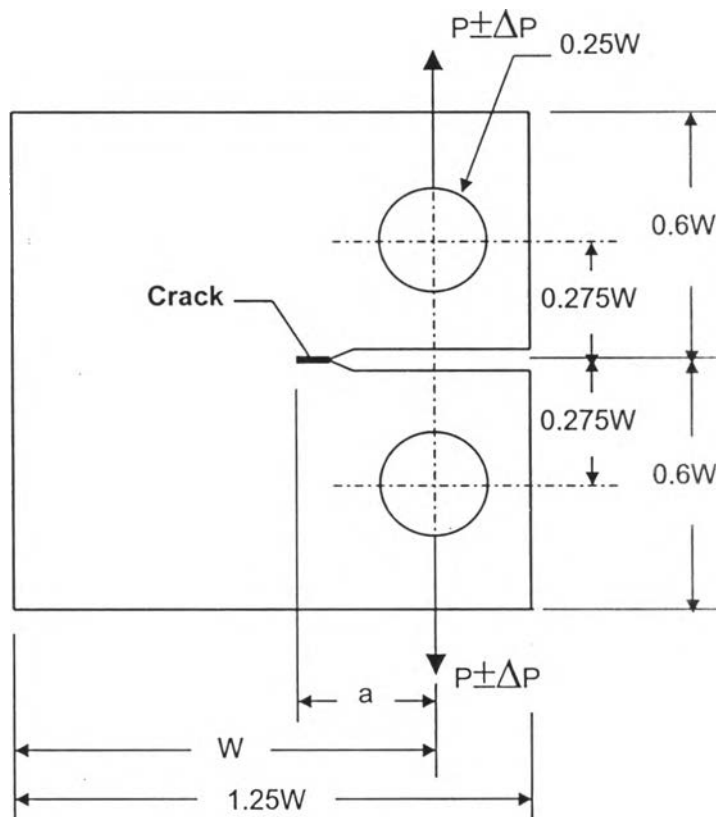
Position	Node	u (unit)	v (unit)
A	115	3.933×10^{-06}	2.810×10^{-06}
B	21	4.001×10^{-06}	5.286×10^{-06}
C	378	3.704×10^{-06}	9.046×10^{-07}
D	379	3.593×10^{-06}	9.143×10^{-07}

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (ง.1) จะได้ $K_I = 33.648$ หน่วย และ $K_{II} = 4.403$ หน่วย

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างการคำนวณอายุความล้าของรอยร้าว

สำหรับตัวอย่างที่จะยกมาในที่นี้ เป็นปัญหาการทำนายอายุความล้าของรอยร้าวในชิ้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 ในบทที่ 9 ซึ่งมีรูปร่างและรายละเอียดของปัญหาดังรูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 รูปร่างและรายละเอียดของชิ้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT

ชิ้นทดสอบดังกล่าวมีความยาวเริ่มต้น (a_i) เท่ากับ 12.75 mm. ความยาวรอยร้าวสุดท้าย (a_f) เท่ากับ 33.15 mm และกำหนดให้ความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น (Δa) ในแต่ละรอบการคำนวณเท่ากับ 2.55 mm. สำหรับภาระที่มากกระทำกับชิ้นทดสอบนี้จะเป็นภาระแบบรอบ (Cyclic load) ซึ่งมีขนาดภาระเท่ากับ 2.04 ± 0.8 ตัน

อัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าจะมีความสัมพันธ์กับค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ΔK) ดังนั้นการทำนายอายุความล้าของรอยร้าวจึงจำเป็นต้องคำนวณหาค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.14) ดังนี้

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (\text{จ.1})$$

เมื่อ K_{\max} แทนค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระสูงสุด
และ K_{\min} แทนค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระต่ำสุด

ในการหาค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ΔK) สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น เมื่อขึ้นทดสอบถูกกระทำด้วยภาระที่มีค่าสูงสุด (K_{\max}) และค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น เมื่อขึ้นทดสอบถูกกระทำด้วยภาระที่มีค่าต่ำสุด (K_{\min}) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นจึงทำการหาผลต่างของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นดังกล่าว เพื่อหาค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น โดยในขึ้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 ซึ่งมีความยาวรอยร้าวเริ่มต้น (a_i) ขนาด 12.75 mm ถึง ความยาวรอยร้าวสุดท้าย (a_f) ขนาด 33.15 mm และกำหนดความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการคำนวณ (Δa) เท่ากับ 2.55 mm. จะได้ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ดังตารางที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 ผลการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ความยาวรอยร้าวต่างๆ สำหรับขึ้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT ซึ่งรับภาระแบบรอบขนาด 2.04 ± 0.8 ดัน

No.	a (mm)	Δa (mm)	K_{\max} (MPa-m ^{1/2})	K_{\min} (MPa-m ^{1/2})	$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ (MPa-m ^{1/2})
1	12.75	-	23.437	10.2331	13.204
2	15.30	2.55	27.178	11.866	15.311
3	17.85	2.55	32.253	14.083	18.171
4	20.40	2.55	34.884	15.231	19.653
5	22.95	2.55	39.904	17.423	22.481
6	25.50	2.55	46.240	20.189	26.051
7	28.05	2.55	54.535	23.811	30.724
8	30.60	2.55	65.622	28.652	36.970
9	33.15	2.55	81.016	35.373	45.643

ผลจากการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวในชิ้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT และคานัดัดสามจุดกุด สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 จะได้สมการแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวในรูปแบบของปารีสภายใต้ภาระที่กระทำต่อรอยร้าวในรูปแบบที่ 1 คือ

$$\frac{da}{dN} = 1.027 \times 10^{-8} \cdot \Delta K^{2.807} \quad (\text{จ.1})$$

โดยที่ $\frac{da}{dN}$ แทนอัตราการเติบโตของรอยร้าว มีหน่วยเป็น mm/cycle
 ΔK แทนพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น มีหน่วยเป็น MPa-m^{1/2}

และจากสมการ (จ.1) นี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาอายุความล้าของรอยร้าวเป็นจำนวนรอบในแต่ละช่วงย่อยของความยาวรอยร้าวดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2.2 จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับความยาวรอยร้าวสองตำแหน่งที่อยู่ติดกัน แล้วจึงใช้อัตราการเติบโตของรอยร้าวเฉลี่ยนี้ในการคำนวณหาจำนวนรอบของภาระที่ใช้ในช่วงการเติบโตของรอยร้าว นั้นด้วยสมการ (3.26) คือ

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{(da/dN)_{avg}} = \frac{2 \cdot (a_{n+1} - a_n)}{(da/dN)_n + (da/dN)_{n+1}} \quad (\text{จ.2})$$

โดยที่ $(da/dN)_{avg}$ แทนอัตราการเติบโตของรอยร้าวเฉลี่ยสำหรับความยาวรอยร้าวสองตำแหน่งที่อยู่ติดกัน
 ΔN แทนจำนวนรอบของภาระที่ใช้ในแต่ละช่วงการเติบโตของรอยร้าว
 Δa แทนความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการคำนวณ
 และตัวห้อย n แทนตำแหน่งความยาวรอยร้าวที่ n

ทำการหาจำนวนรอบของภาระเช่นนี้ทุกๆ ช่วงย่อยของความยาวรอยร้าวทั้งหมด และเมื่อรวมจำนวนรอบของภาระทั้งหมด ($\sum \Delta N$) ที่ทำให้รอยร้าวเติบโตจากความยาวรอยร้าวเริ่มต้น (a_i) ไปจนถึงความยาวรอยร้าวสุดท้าย (a_f) จะได้ค่าประมาณของอายุความล้าทั้งหมด โดยการคำนวณแสดงได้ในตารางที่ จ.2

ตารางที่ จ.2 การคำนวณหาค่าประมาณของอายุความล้าในชั้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr P22

No.	a (mm)	Δa (mm)	ΔK (MPa-m ^{1/2})	da/dN (mm/cycle)	(da/dN) _{avg} (mm/cycle)	ΔN (cycles)
1	12.75	-	13.204	1.452x10 ⁻⁰⁵	-	-
2	15.30	2.55	15.311	2.202x10 ⁻⁰⁵	1.827x10 ⁻⁰⁵	139,583
3	17.85	2.55	18.171	3.562x10 ⁻⁰⁵	2.882x10 ⁻⁰⁵	88,487
4	20.40	2.55	19.653	4.440x10 ⁻⁰⁵	4.001x10 ⁻⁰⁵	63,734
5	22.95	2.55	22.481	6.478x10 ⁻⁰⁵	5.459x10 ⁻⁰⁵	46,711
6	25.50	2.55	26.051	9.801x10 ⁻⁰⁵	8.140x10 ⁻⁰⁵	31,328
7	28.05	2.55	30.724	1.558x10 ⁻⁰⁴	1.269x10 ⁻⁰⁴	20,091
8	30.60	2.55	36.970	2.621x10 ⁻⁰⁴	2.090x10 ⁻⁰⁴	12,202
9	33.15	2.55	45.643	4.739x10 ⁻⁰⁴	3.680x10 ⁻⁰⁴	6,929

จากผลการคำนวณจำนวนรอบของภาระที่กระทำในแต่ละช่วงย่อยของความยาวรอยร้าว เมื่อทำการรวมจำนวนรอบของภาระทั้งหมด ($\sum \Delta N$) จะได้อายุความล้าโดยประมาณของชั้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 ที่ทำให้รอยร้าวเติบโตจากความยาวรอยร้าวเริ่มต้น (a_i) ไปจนถึงความยาวรอยร้าวสุดท้าย (a_f) เท่ากับ 409066 รอบ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนวัช ศรีเจริญชัย เกิดเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2541

