บทที่ 3
รายละเอียดของโปรแกรม

3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำการศึกษาถึงปัญหาการแทรกในดินของโครงสร้างใต้ดินในลักษณะต่าง ๆ โดยจะอาศัยวิธีการประยุกต์ใช้งาน (Practical Method) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีความเครียดน้อยในการวิเคราะห์ปัญหามวลดินที่เกิดการเคลื่อนตัวมาก (Large Deformation) และยังให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ สำหรับหลักการโดยทั่ว ๆ ไปของวิธีประยุกต์ใช้งานจะประกอบด้วย การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดทีละน้อย ๆ ของวัตถุ (Infinitesimal Strain) และวิเคราะห์ผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งใช้คุณสมบัติของวัสดุแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear Material) ประกอบกับการปรับปรุงพิกัดของโครงข่ายของชิ้นส่วน (Update Mesh) จนกระทั่งโครงข่ายที่ถูกปรับปรุงพิกัดเกิดการเสียรูปไปอย่างมาก แล้วทำการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนขึ้นมาใหม่ให้เป็นระเบียบ และแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้ได้ตามขนาดที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปัญหาในวงรอบถัดไป พร้อมทั้งทำการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรง ณ ตำแหน่งที่ต้องการพิจารณาจากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิมไปสู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่ ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพดังกล่าว จึงจำเป็นที่จะต้องใช้โครงข่ายของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมแบบไร้โครงสร้าง (Unstructured Triangular Element) และ วิธีการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ (Automatic Mesh Generation) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

ขั้นตอนหลัก ๆ ของวิธีประยุกต์ใช้งานสามารถสรุปได้ดังนี้

1) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ**
2) กำหนดค่าหน่วยแรงเริ่มต้นภายในขอบเขตของปัญหา
3) วิเคราะห์ผลเฉลยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเพิ่มค่าการทรุดตัวทีละน้อย ๆ
4) ปรับปรุงชุดข้อมูลค่าหน่วยแรง รวมทั้งค่าพิกัดของโครงข่ายชิ้นส่วนสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมาก
5) หาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยในแต่ละชิ้นส่วน
6) ปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน ในกรณีที่ชิ้นส่วนนั้น ๆ มีค่าความคลาดเคลื่อนเกินกว่าพิกัดที่ยอมให้
7) ถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ ณ ตำแหน่งที่พิจารณาจากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิมไปสู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่
8) เพิ่มค่าการทรุดตัวสำหรับวงรอบถัดไป

ทำซ้ำขั้นตอน (3) - (8) จนกระทั่งได้ผลเฉลยของค่าการทรุดตัวที่ต้องการ

**ขั้นตอนการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติมีดังนี้

1) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนจากจุดต่อ ที่บริเวณขอบเขตของปัญหา โดยอาศัยฟังก์ชันความหนาแน่น หรืออาศัยการกำหนดจุดต่อโดยสมการอนุกรมเรขาคณิต
2) เพิ่มจำนวนจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหาควบคุมโดยสมการความหนาแน่น
3) เชื่อมจุดต่อโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยใช้สามเหลี่ยมเดอลอเน
4) ปรับปรุงรูปร่างโครงข่ายของชิ้นส่วนด้วยวิธี Mesh Smoothing

ทำซ้ำขั้นตอน (2) - (4) จนกระทั่งไม่สามารถเพิ่มจุดต่อของชิ้นส่วนจากสมการความหนาแน่นได้ ต่อจากนั้น เพิ่มระดับขั้นความเสรีของชิ้นส่วน (Transformation) จากชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสามจุดต่อเป็นชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ หรือชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสิบห้าจุดต่อ

5) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา
6) วิเคราะห์ผลเฉลยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเพิ่มค่าการทรุดตัวทีละน้อย ๆ
7) หาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลย และขนาดของชิ้นส่วนใหม่
8) ปรับปรุงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วน (Mesh Adaptation)
9) เพิ่มระดับขั้นความเสรีของชิ้นส่วน (Transformation) จากชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสามจุดต่อเป็นชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ หรือชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสิบห้าจุดต่อ

ทำซ้ำขั้นตอน (5) - (9) จำนวนสิบวงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัว ซึ่งจะได้โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรมหลัก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติจนกระทั่งได้โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นในการวิเคราะห์ปัญหา รายละเอียดของการคำนวณในขั้นตอนต่าง ๆ ของโครงสร้างการทำงานจะได้กล่าวต่อไป

3.2 การสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ

ในการวิเคราะห์ปัญหา จะใช้โครงข่ายของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ และสิบห้าจุดต่อแบบไร้โครงสร้าง (6-Node and 15-Node Unstructured Triangular Element) และใช้วิธีการสร้างโครงข่ายชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ เพื่อใช้เป็นโครงข่ายเริ่มต้นสำหรับการคำนวณด้วยระเบียบ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างการบันทึกข้อมูล จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ โดยการป้อนข้อมูลพิกัดของจุดต่อทั้งหมดจะกระทำในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ณ ขอบเขตของปัญหา และบันทึกลงในแฟ้มข้อมูล "Input Mesh" จากนั้นโปรแกรมจะทำการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดย ระเบียบวิธีอัตโนมัติ ซึ่งมีวิธีการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

3.2.1 การสร้างจุดต่อบริเวณขอบเขตของปัญหาโดยอาศัยสมการอนุกรมเรขาคณิต

การสร้างจุดต่อบริเวณขอบเขตของปัญหาโดยอาศัยสมการอนุกรมเรขาคณิต (Geometric Sequence Equation) จะกระทำโดยเรียกโปรแกรมย่อย Boundary1 เพื่อกำหนดจุดต่อ ณ ขอบเขต ของปัญหา โดยจะสามารถคำนวณระยะห่างระหว่างจุดต่อสองจุดที่อยู่ติดกันได้ จากสมการที่ 2.8 ซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 2 สำหรับข้อกำหนดต่าง ๆ ของสมการอนุกรมเรขาคณิตมีดังต่อไปนี้

(1) การกำหนดค่า Characteristic Length (C.H.) ที่ตำแหน่งจุดต่อเป็นตัวแปรสำคัญในการ กำหนดระยะห่างระหว่างจุดต่อแต่ละจุด

(2) ทำการกระจายตำแหน่งจุดต่อบนแนวเส้นขอบเขตของปัญหาระหว่างจุดต่อสองจุดใด ๆ ในรูปแบบของสมการอนุกรมเรขาคณิต

(3) หลังจากเพิ่มจุดต่อที่ขอบเขตของปัญหาแล้ว โปรแกรมจะทำการจัดเรียงลำดับหมายเลข ของจุดต่อ ณ ขอบเขตของปัญหา โดยเริ่มจากจุดต่อแรก ณ ขอบของฐานราก และเรียง ลำดับหมายเลขในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และเก็บค่าจำนวนจุดต่อที่บริเวณขอบของ ปัญหาทั้งหมดลงตัวแปร NCE

3.2.2 การสร้างจุดต่อบริเวณขอบเขตของปัญหาโดยอาศัยฟังก์ชันความหนาแน่น

การสร้างจุดต่อบริเวณขอบเขตของปัญหาโดยอาศัยฟังก์ชันความหนาแน่น (Mesh Density Function) จะกระทำโดยเรียกโปรแกรมย่อย Boundary เพื่อกำหนดจุดต่อ ณ ขอบเขตของปัญหา ดังสมการ $f_d = Ae^{Bd}$ ที่ได้อธิบายในบทที่ 2 ฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วนมีข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้

(1) ค่าของฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วนจะถูกกำหนดขึ้นโดยอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ขนาด ของโครงข่ายของชิ้นส่วนที่เหมาะสมในการคำนวณ

(2) ตรวจสอบระยะระหว่างจุดต่อของชิ้นส่วนที่ขอบเขตของปัญหาว่า สามารถที่จะเพิ่มจุด ต่อ จากฟังก์ชันความหนาแน่นระหว่างสองจุดต่อเดิมของชิ้นส่วน ได้หรือไม่

(3) หลังจากเพิ่มจุดต่อที่ขอบเขตของปัญหาแล้ว โปรแกรมจะทำการจัดเรียงลำดับหมายเลข ของจุดต่อ ณ ขอบเขตของปัญหา โดยเริ่มจากจุดต่อแรก ณ ขอบของฐานราก และเรียง

ลำดับหมายเลขในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และเก็บค่าจำนวนจุดต่อที่บริเวณขอบของปัญหาทั้งหมดลงตัวแปร NCE

3.2.3 การเพิ่มจำนวนจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา

การเพิ่มจำนวนจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา จะกระทำโดยเรียกโปรแกรมย่อย Internal โดยอาศัยฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วนดังสมการ $f_d = Ae^{Bd}$ เช่นเดียวกับการสร้างจุดต่อบริเวณขอบเขตของปัญหา แต่มีข้อกำหนดที่แตกต่างกันเล็กน้อย ดังนี้

(1) ค่าของฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วนจะถูกกำหนดขึ้นโดยอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ขนาดของโครงข่ายของชิ้นส่วนที่เหมาะสมในการคำนวณ

(2) ตรวจสอบระยะจุดต่อของแต่ละชิ้นส่วนว่าสามารถจะเพิ่มจุดต่อ โดยอาศัยฟังก์ชันความหนาแน่นภายในขอบเขตของปัญหา ณ บริเวณจุดศูนย์ถ่วงของชิ้นส่วน ได้หรือไม่

(3) หลังจากเพิ่มจำนวนจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหาจนครบแล้ว โปรแกรมจะทำการจัดเรียงลำดับหมายเลขของจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา โดยเรียงลำดับหมายเลขต่อเนื่องจากหมายเลขจุดต่อที่บริเวณขอบของปัญหา (จำนวน NCE) ไปจนครบทุกจุดต่อ และทำการเก็บค่าจำนวนจุดต่อทั้งหมดของปัญหาลงตัวแปร NPTS

3.2.4 การเชื่อมจุดต่อโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยใช้สามเหลี่ยมเดอลอเน (Delaunay - Triangulation)

ภายหลังจากทำการกำหนดจุดต่อที่บริเวณขอบเขต และภายในขอบเขตของปัญหาเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ ทำการเชื่อมจุดต่อต่าง ๆ เหล่านั้นให้เป็นโครงข่ายชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสามจุดต่อ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการเชื่อมจุดต่อต่าง ๆ โดยอาศัยสามเหลี่ยมเดอลอเน ซึ่งเรียกใช้โดยโปรแกรมย่อย Triang

โปรแกรมย่อย Triang เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกเขียนและพัฒนาขึ้น เพื่อช่วยในการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนหรือเป็นการแบ่งโครงสร้างของปัญหา ออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ โดยการเชื่อมจุดต่อต่าง ๆ ภายในขอบเขตของปัญหา ให้เป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างสามเหลี่ยมสามจุดต่อและมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา นอกจากนี้จุดต่อภายในขอบเขตของปัญหาจะถูกกำหนดและควบคุม โดยสมการของ Mesh Density Function และ Mesh Smoothing

3.2.5 การปรับปรุงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)

โปรแกรมย่อย Smooth จะถูกเรียกใช้เพื่อปรับปรุงรูปร่างโครงข่ายของชิ้นส่วน โดยอาศัยวิธี Laplacian Mesh Smoothing เพื่อวางตำแหน่งพิกัดของจุดต่อต่าง ๆ อย่างเหมาะสมและจะได้รูปร่างของชิ้นส่วนสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.6 การเพิ่มระดับขั้นความเสรีของชิ้นส่วน (Transformation)

เรียกโปรแกรมย่อย Transform เพื่อเพิ่มระดับขั้นความเสรีของชิ้นส่วน โดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วนจากชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสามจุดต่อทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเป็นชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ หรือสิบห้าจุดต่อทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และทำการเก็บสำรองชุดข้อมูลจำนวน และพิกัดของจุดต่อ ไว้ในแฟ้มข้อมูล “Mesh” พร้อมทั้งหาจำนวน และหมายเลขจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมดภายใต้ฐานรองรับ เพื่อเก็บสำรองชุดข้อมูล ไว้ในแฟ้มข้อมูล “Loaded_nodes” หลังจากนั้น จะนำชุดข้อมูลนี้มาบันทึกเป็นส่วนหนึ่งของแฟ้มข้อมูล “Snac input” เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าหน่วยแรงกระทำบนจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมด ที่อยู่ภายใต้แรงกระทำของฐานรองรับ

3.2.7 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

เรียกโปรแกรมย่อย Restr1 และ Restr2 เพื่อใช้ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และข้อบังคับของแบบจำลองของปัญหา โดยจะคำนึงถึงสภาพความเป็นจริง ลักษณะของผิวสัมผัสของฐานรองรับกับมวลดิน และหลักการของความสมมาตรของปัญหา ดังรูปที่ 3.8 ชุดข้อมูลจะถูกบันทึกลงในแฟ้มข้อมูล “Nodal Restraints”

หลังจากนั้น จะทำการบันทึกข้อมูลที่ได้จาก การสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนที่ถูกควบคุมด้วยสมการความหนาแน่น ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของมวลดินในแบบจำลอง ค่าตัวแปรของวิธีการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ เงื่อนไขขอบเขตและข้อบังคับของแบบจำลอง ตลอดจนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในแฟ้มข้อมูล “Snac input” เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นตอนต่อไป

3.2.8 โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา

ภายหลังจากทำการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนที่ถูกควบคุมโดยสมการความหนาแน่นเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะเป็นการสร้างโครงข่ายสำหรับใช้เป็นโครงข่ายเริ่มต้นในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยขั้นตอนหลัก ๆ มีดังนี้คือ วิเคราะห์หาค่าผลเฉลยจากการเพิ่มค่าการทรุดตัว ΔS และนำค่าผลเฉลยที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับ ค่าผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี

Superconvergent Patch Recovery (SPR) เพื่อทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลย จากนั้นปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน โดยการเพิ่มจุดต่อลงในตำแหน่งศูนย์ถ่วงของแต่ละชิ้นส่วนที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเกินกว่าค่าที่ยอมให้ ทำซ้ำขั้นตอนดังกล่าวจนครบ 10 วงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัว ซึ่งจะได้โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา สำหรับชุดข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกลงในแฟ้มชุดข้อมูล "Snac input" เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขั้นตอนต่อไป

สำหรับการกำหนดให้ทำการวิเคราะห์จำนวน 10 วงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัวนั้น ผู้ทำวิจัยได้ทำการทดสอบ โดยวิเคราะห์จำนวน 5, 10, 15 และ 20 วงรอบ เพื่อเปรียบเทียบหาจำนวนครั้งที่ดีที่สุด และสามารถให้ข้อสรุปได้ว่า การวิเคราะห์จำนวน 10 วงรอบนั้น สามารถคำนวณผลได้อย่างรวดเร็ว และให้โครงข่ายชิ้นส่วนเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุด

3.3 การกำหนดค่าหน่วยแรงเริ่มต้นภายในขอบเขตของปัญหา

โปรแกรมย่อย Stress in ถูกเรียกใช้ เพื่อหาค่าหน่วยแรงเริ่มต้นภายในโครงข่ายของชิ้นส่วนจากค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน โดยจะทำการหาค่าหน่วยแรงทั้งที่บริเวณจุดเกาส์ และบริเวณจุดต่อของแต่ละชิ้นส่วนไปพร้อม ๆ กัน และสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma_y = \gamma z \qquad \text{..... (3.1)}$$

$$\sigma_x = K_0 \sigma_Y \qquad \text{..... (3.2)}$$

$$\sigma_z = K_0 \sigma_y \qquad \text{..... (3.3)}$$

$$\tau_{xy} = 0 \qquad \text{..... (3.4)}$$

โดยที่ γ คือ ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน

z คือ ค่าพิกัดแนวดิ่งจากผิวบนสุดของแบบจำลอง ถึงตำแหน่งที่พิจารณาในแต่ละชิ้นส่วน

K_0 คือ ค่า Earth pressure coefficient

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หมายเลขของจุดเกาส์ และจุดต่อจะมีความสัมพันธ์กัน ณ ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 3.9 แสดงหมายเลขและตำแหน่งของจุดต่อในแต่ละชิ้นส่วน

3.4 การวิเคราะห์ผลเฉลยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเพิ่มค่าการทรุดตัวทีละน้อย ๆ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ Finite Element Code ตามหลักเกณฑ์ของ SNAC (Soil Nonlinear Analysis Code) ซึ่งทำการศึกษาและวิจัยโดย Abbo และ Sloan (1997) โดยจะเรียกใช้โปรแกรมย่อย Execut เป็นโปรแกรมย่อยหลักในการเรียกใช้โปรแกรมย่อยในส่วนคำนวณอื่น ๆ นอกจากนี้ยังจะใช้หลักการของการกำหนดเงื่อนไขของจุดต่อให้มีค่าการทรุดตัวคงที่ภายใต้ฐานรองรับ และทำการเพิ่มค่าการทรุดตัวทีละน้อย ๆ ในแต่ละช่วงของการคำนวณ โดยถ้าค่าหน่วยแรงบนจุดเกาส์ของแต่ละรอบการคำนวณมีค่าเกินกว่าระนาบการวิบัติของวัตถุ โปรแกรมจะทำการปรับแก้ค่าของหน่วยแรงกลับเข้ามาสู่ระนาบการวิบัติของวัตถุได้โดยอัตโนมัติ สำหรับชุดข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณต่าง ๆ จะถูกเรียกจากแฟ้มข้อมูล "Snac Input" ที่ได้ถูกบันทึกไว้ก่อนหน้านี้

สำหรับแบบจำลองดินที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วย Elastic-Perfectly Plastic Material, Mohr-Coulomb Failure Criterion และ Modified Cam-Clay

3.5 การปรับปรุงชุดข้อมูล

หลังจากวิเคราะห์ผลเฉลยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเพิ่มค่าการทรุดตัวทีละน้อย ๆ ในแต่ละวงรอบของการคำนวณเสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลผลเฉลยจะถูกเรียกเก็บในแฟ้มข้อมูลต่าง ๆ อย่างเป็นระเบียบ อาทิเช่น ข้อมูลค่าของหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น ณ จุดเกาส์ของแต่ละชิ้นส่วนจะถูกเก็บในแฟ้มข้อมูล "D_Tensor" ข้อมูลค่าของความเครียดที่เพิ่มขึ้น ณ จุดเกาส์ของแต่ละชิ้นส่วนจะถูกเก็บในแฟ้มข้อมูล "D_Strain" เป็นต้น และจะมีการเรียกใช้ข้อมูลดังกล่าวทุก ๆ ครั้งภายหลังเสร็จสิ้นการคำนวณในแต่ละวงรอบ เพื่อทำการปรับปรุงชุดข้อมูลค่าของหน่วยแรง และความเครียดสำหรับเป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณในวงรอบถัดไป อย่างไรก็ตาม ถ้าชนิดของการวิเคราะห์เป็นแบบ Large Deformation โปรแกรมจะทำการเก็บบันทึกข้อมูล ค่าการเคลื่อนตัวที่จุดต่อของแต่ละชิ้นส่วนลงในแฟ้มข้อมูล "D_Coord" และทำการปรับปรุงค่าพิกัดของโครงข่ายชิ้นส่วนขึ้นใหม่ทั้งหมด

3.5.1 การปรับปรุงชุดข้อมูลค่าของหน่วยแรง และความเครียด

หลังจากการวิเคราะห์ผลเฉลยโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการปรับปรุงชุดข้อมูลค่าของหน่วยแรงและค่าความเครียด จากสมการดังต่อไปนี้

$$Stress_{i+1} = Stress_i + \Delta\sigma_h \qquad \text{..... (3.5)}$$

$$Strain_{i+1} = Strain_i + \Delta\varepsilon_h \qquad \text{..... (3.6)}$$

โดยที่ $Stress_{i+1}$ คือ ค่าของหน่วยแรง ณ จุดเกาส์ของแต่ละชิ้นส่วน ที่ถูกปรับปรุงแล้ว

$Strain_{i+1}$ คือ ค่าของความเครียด ณ จุดเกาส์ของแต่ละชิ้นส่วน ที่ถูกปรับปรุงแล้ว

$Stress_i$ ค่าของหน่วยแรง ณ จุดเกาส์ของแต่ละชิ้นส่วน ที่ยังไม่ได้ถูกปรับปรุง

$Strain_i$ คือ ค่าของความเครียด ณ จุดเกาส์ของแต่ละชิ้นส่วน ที่ยังไม่ได้ถูกปรับปรุง

$\Delta\sigma_h$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น ณ จุดเกาส์ ที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

$\Delta\varepsilon_h$ คือ ค่าของความเครียดที่เพิ่มขึ้น ณ จุดเกาส์ ที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับตัวแปร Stressและ Strain จะถูกเก็บในแฟ้มข้อมูล "Stress" และ "Strain" ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณวงรอบถัดไป

3.5.2 การปรับปรุงค่าพิกัดของโครงข่ายชิ้นส่วน

ถ้าชนิดของการวิเคราะห์เป็นแบบ Large Deformation โปรแกรมจะทำการปรับปรุงชุดข้อมูลพิกัดที่จุดต่อของโครงข่ายชิ้นส่วน ดังนี้

$$Coord_{i+1} = Coord_i + \Delta U \qquad \text{..... (3.7)}$$

โดยที่ $Coord_{i+1}$ คือ ค่าพิกัดที่จุดต่อของโครงข่ายชิ้นส่วน(x, y) ที่ถูกปรับปรุงแล้ว

$Coord_i$ คือ ค่าพิกัดที่จุดต่อของโครงข่ายชิ้นส่วน(x, y) ที่ยังไม่ได้ถูกปรับปรุง

ΔU คือ ค่าการเคลื่อนตัวที่จุดต่อของแต่ละชิ้นส่วน$(\Delta x, \Delta y)$

สำหรับตัวแปร Coord จะถูกเก็บในแฟ้มข้อมูล "Mesh" เพื่อใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณวงรอบถัดไป

3.6 การหาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยในแต่ละชิ้นส่วน

การหาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยในแต่ละชิ้นส่วนมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดควบคุมโครงข่ายชิ้นส่วนของปัญหาไม่ให้เกิดการเสียรูปไปมาก โดยพิจารณาให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้ อย่างไรก็ตามถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเกินกว่าค่าที่ยอมให้ โปรแกรมก็จะทำการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนขึ้นมาใหม่ โดยจะทำการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนบริเวณที่เกิดความคลาดเคลื่อน ให้ได้ขนาดที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในวงรอบถัดไป

รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม เพิ่มจุดต่อและปรับปรุงพิกัด ภายในโครงข่ายของปัญหา

3.6.1 การประมาณค่าความเครียด ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ โดยวิธี SPR

การเรียกโปรแกรมย่อย SPR นี้เป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

(1) กำหนดให้จุดต่อจุดแรกของชิ้นส่วน ที่อยู่ภายในขอบเขตของปัญหา เป็นจุดรวมชิ้นส่วนจุดแรก และกำหนดหมายเลขเริ่มต้นที่ NCE+1 จากรูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างของตำแหน่งจุดรวมชิ้นส่วน

(2) หาจำนวน และหมายเลขของกลุ่มชิ้นส่วนที่อยู่ล้อมรอบ หรือกลุ่มชิ้นส่วนที่มีอิทธิพลต่อจุดรวมชิ้นส่วนที่พิจารณา ดังรูปที่ 3.11

(3) กำหนดตำแหน่งและหมายเลขของจุดต่อที่ต้องการทราบค่าความเครียด SPR จากกลุ่มชิ้นส่วนที่อยู่ล้อมรอบ หรือกลุ่มชิ้นส่วนที่มีอิทธิพลต่อจุดรวมชิ้นส่วน สำหรับโครงข่ายของชิ้นส่วน 6 จุดต่อ และ 15 จุดต่อ ดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 ตามลำดับ

(4) จากสมการ $\Delta\varepsilon_n^* = Pa$ สามารถคำนวณหาตัวแปรไม่ทราบค่า a ภายในกลุ่มจุดเกาส์ที่มีอิทธิพลรอบจุดรวมชิ้นส่วนที่พิจารณาได้ดังนี้ $\{a\} = [A]^{-1}\{b\}$ โดยที่ $[A]$ เป็นฟังก์ชันของพิกัดกลุ่มจุดเกาส์ทั้งหมด และ $\{b\}$ ฟังก์ชันของค่าความเครียด ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

(5) แทนค่าพิกัดจุดต่อที่ต้องการทราบค่า, P ลงในสมการ $\Delta\varepsilon_n^* = Pa$ ดังกล่าว จะได้ค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งจุดต่อของชิ้นส่วนที่พิจารณา

(6) ทำซ้ำขั้นตอน (1) – (5) โดยพิจารณาที่จุดรวมชิ้นส่วน ณ จุดต่ออื่น ๆ จนครบทุกจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา

(7) ถ้าบริเวณจุดต่อใด ๆ มีการหาค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นโดย SPR ซ้ำกัน ก็ให้ทำการบวกรวมกัน และหาค่าเฉลี่ย

(8) หลังจากได้ค่าความเครียด SPR ที่จุดต่อของชิ้นส่วนทั้งระบบในขอบเขตของปัญหาแล้ว สามารถหาค่าความเครียด SPR ที่จุดเกาส์ของชิ้นส่วน จากฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วน (Shape Function) ดังนี้

$$\Delta\varepsilon^* = \sum_{i=1}^{k} N_i \Delta\varepsilon_{ni}^* \qquad \text{..... (3.8)}$$

โดยที่ $\Delta\varepsilon^*$ คือ ค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ ที่คำนวณได้จาก "SPR"

N_i คือ ฟังก์ชันรูปร่าง ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ของชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ และ 15 จุดต่อ

k คือ จำนวนจุดต่อในแต่ละชิ้นส่วน (6 จุดต่อ และ 15 จุดต่อ)

รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม Superconvergent Patch Recovery of Strain (SPR)

3.6.2 การประมาณค่าความคลาดเคลื่อน

การประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจะกระทำโดยเรียกใช้โปรแกรมย่อย Error_analysis ซึ่งเป็นโปรแกรมตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละชิ้นส่วน โดยจะหาค่าจากการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่ได้จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ ค่าความเครียดที่ได้จากโปรแกรมย่อย SPR

(1) คำนวณค่าความเครียด และค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วน ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\left\|U^*\right\|_{2l} = \left(\sum_{i=1}^{nip}\left(\Delta\varepsilon^*\right)_i^T\left(\Delta\varepsilon^*\right)_i * \det_i * weight_i\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{..... (3.9)}$$

$$\left\|e^*\right\|_{2l} = \left(\sum_{i=1}^{nip}\left(\Delta\varepsilon^* - \Delta\varepsilon_h\right)^T\left(\Delta\varepsilon^* - \Delta\varepsilon_h\right) * \det_i * weight_i\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{..... (3.10)}$$

(2) คำนวณค่าความเครียด และค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมทั้งระบบ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\left\|U^*\right\|_{2g} = \left(\sum_{i=1}^{Ne}\left\|U^*\right\|_{2l}^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{..... (3.11)}$$

$$\left\|e^*\right\|_{2g} = \left(\sum_{i=1}^{Ne}\left\|e^*\right\|_{2l}^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{..... (3.12)}$$

(3) กำหนดค่าความความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยรวมที่ยอมให้ , η_a แล้วทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\|e\|_a = \eta_a \frac{\left\|U^*\right\|_{2g}}{\sqrt{Ne}} \quad \text{..... (3.13)}$$

โดยที่ $\|e\|_a$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน

η_a คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยรวมที่ยอมให้

กำหนดให้ η_a = 0.05 สำหรับการคำนวณโครงข่ายชิ้นส่วนเริ่มต้นก่อนการวิเคราะห์ปัญหา

η_a = 0.05 - 0.10 สำหรับขั้นตอนระหว่างการวิเคราะห์ปัญหา

ค่า η_a ที่ได้กำหนดไว้ จากการทดลองในการวิเคราะห์คำนวณจะได้ขนาดของชิ้นส่วนที่ไม่ใหญ่หรือเล็กจนเกินไป ถ้าค่า η_a มีค่าที่น้อยจนเกินไปจะทำให้โครงข่ายของชิ้นส่วนมีความละเอียดมากทั้งระบบ เป็นเหตุให้ไม่ประหยัดเวลาในการวิเคราะห์คำนวณ และจะเป็นผลเสียต่อการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงได้

ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วน มีค่ามากกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน ด้วยเหตุอันเนื่องมาจากชิ้นส่วนมีขนาดใหญ่มากจนเกินไป จะทำการเรียกโปรแกรมย่อย Adaptation เพื่อแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลง แล้วทำการเรียกโปรแกรมย่อย Interpolation เพื่อถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะจากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิมไปสู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่

3.7 **การปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน** (Mesh Adaptation)

การปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยเรียกโปรแกรมย่อย Adaptation จะกระทำก็ต่อเมื่อ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วน มีค่าเกินกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน โดยจะทำการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลง และปรับปรุงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนภายในวงรอบที่กำหนดไว้ สำหรับขนาดเล็กสุดของชิ้นส่วนที่ได้รับการปรับปรุงแล้วจะมีขนาดไม่เล็กกว่า 1% ของความกว้างฐานรองรับ

ขั้นตอนและวิธีการในการปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน แสดงได้ดังนี้

(1) อ่านค่าข้อมูลพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม และคำนวณหาขนาดพื้นที่ของแต่ละชิ้นส่วนเพื่อเก็บลงตัวแปร h_{old}

(2) จากข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วน $\|e^*\|_{2l}$,ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน $\|e\|_a$ และขนาดพื้นที่ของชิ้นส่วนเดิม h_{old} สามารถคำนวณขนาดของชิ้นส่วนที่จะสร้างขึ้นใหม่ h_{ncw} ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$h_{ncw} = h_{old}\left(\frac{\|e\|_a}{\|e^*\|_{2l}}\right)^{1/P} \qquad \text{..... (3.14)}$$

โดยที่ P มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับโครงข่ายของชิ้นส่วน 6 จุดต่อ

P มีค่าเท่ากับ 4 สำหรับโครงข่ายของชิ้นส่วน 15 จุดต่อ

(3) ในวิทยานิพนธ์นี้ขนาดของชิ้นส่วน, h จะกล่าวถึงพื้นที่ของแต่ละชิ้นส่วนภายในขอบเขตของปัญหา และการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลง จะทำได้โดยการแทรกจุดต่อใหม่ ณ ตำแหน่งศูนย์ถ่วงของแต่ละชิ้นส่วน ส่วนในกรณีที่บริเวณขอบของปัญหาขนาดของชิ้นส่วน, h จะกล่าวถึงความยาวด้านของชิ้นส่วนที่เป็นขอบเขตของปัญหา และการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลง จะทำได้โดยการแทรกจุดต่อใหม่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางด้านของชิ้นส่วนที่เป็นขอบเขตของปัญหา

(4) ถ้าขนาดของชิ้นส่วนเดิม $h_{old} > 1.5 h_{new}$ จะทำการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนเดิมให้เล็กลงภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นส่วนที่มีความเหมาะสม

(5) หลังจากเสร็จขั้นตอนต่าง ๆ แล้ว จะเรียกโปรแกรมย่อย Mesh_3 เพื่อทำการเชื่อมจุดต่อต่าง ๆ ภายในโครงข่ายของชิ้นส่วน

3.8 การถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ (State Variable Mapping)

ค่าของตัวแปรสถานะ คือค่าที่บอกถึงสภาพของหน่วยแรง ความเครียด และคุณสมบัติต่าง ๆ ของมวลดิน ณ พิกัดของตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า เมื่อมีการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนขึ้นมาใหม่ภายในขอบเขตของโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม จะทำให้ค่าพิกัดและรูปร่างของโครงข่ายชิ้นส่วนมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าตัวแปรสถานะเปลี่ยนค่าไปจากเดิม ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะภายในแบบจำลอง จากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิมสู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่เพื่อใช้เป็นโครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาในวงรอบถัดไป

โปรแกรมย่อย Interpolation มีวัตถุประสงค์เพื่อถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ จากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิมไปสู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่ ภายหลังจากขั้นตอนการปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) อ่านข้อมูล ค่าหน่วยแรง ค่าความเครียด และค่าความเชื่อมแน่นของดิน ซึ่งคำนวณจากวิธี SPR ที่บริเวณจุดต่อของชิ้นส่วน ทั้งระบบจากแฟ้มข้อมูล “Nstress” , “Nstrain” และ “Ncohesion” ตามลำดับ

(2) หาพิกัดตำแหน่งจุดเกาส์ของชิ้นส่วนใหม่ และตรวจสอบว่าพิกัดตำแหน่งของจุดเกาส์ดังกล่าวอยู่ภายในชิ้นส่วนหมายเลขใดของโครงข่ายชิ้นส่วนเดิม

(3) สำหรับชิ้นส่วนที่ถูกพิจารณา ทำการเรียกโปรแกรมย่อย Powall เพื่อเปลี่ยนค่าพิกัดตำแหน่งจุดเกาส์ (x, y) ของชิ้นส่วนใหม่ให้อยู่ในรูป ค่าพิกัดธรรมชาติ $(L_1,\ L_2,\ L_3)$

ของชิ้นส่วนดังกล่าว โดยอาศัยความสัมพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วน โดยในขั้นตอนนี้จะต้องอาศัยการแก้สมการ Nonlinear Equation และในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการเรียกใช้โปรแกรมย่อย DNEQNF จาก IMSL Math/Library ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่า L_1 และ L_2 และสามารถคำนวณค่า L_3 ได้จากสมการ $L_3 = 1 - L_1 - L_2$

(4) การถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะจากจุดต่อของโครงข่ายชิ้นส่วนเดิม ไปสู่จุดเกาส์ของโครงข่ายชิ้นส่วนใหม่ สามารถกระทำได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V^+ = N_1 V_{n1}^* + N_2 V_{n2}^* + N_3 V_{n3}^* + \cdots + N_k V_{nk}^* \qquad \text{..... (3.15)}$$

$$V^+ = \sum_{i=1}^{k} N_i V_{ni}^* \qquad \text{..... (3.16)}$$

โดยที่ V^+ คือ ค่าของตัวแปรสถานะที่จุดเกาส์ของชิ้นส่วนใหม่ ที่ได้จากการถ่ายโอน

V_{ni}^* คือ ค่าของตัวแปรสถานะที่จุดต่อของชิ้นส่วนเดิม

N_i คือ ฟังก์ชันรูปร่าง ของชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ และ 15 จุดต่อ

k คือ จำนวนจุดต่อในแต่ละชิ้นส่วน (6 จุดต่อ และ 15 จุดต่อ)

สำหรับค่าตัวแปรสถานะ, V^+ ที่ทำการถ่ายโอนมีดังต่อไปนี้

1) ค่าหน่วยแรง : $V^+ = \sigma_{xx}$, σ_{yy} , τ_{xy} , σ_{zz}

2) ค่าความเครียด : $V^+ = \varepsilon_{xx}$, ε_{yy} , γ_{xy} , ε_{zz}

3) ค่าความเชื่อมแน่นของดิน : V^+ = Cohesion

รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม ถ่ายโอนค่าตัวแปรสถานะจากจุดต่อของชิ้นส่วนเดิมไปสู่จุดเกาส์ของชิ้นส่วนใหม่

3.9 การคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดิน

เรียกโปรแกรมย่อย Bearing_Data เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดิน และค่าการทรุดตัวของฐานรองรับในแต่ละวงรอบการคำนวณ

(1) คำนวณค่าแรงกระทำบนจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมดที่อยู่ภายใต้แรงกระทำของฐานรองรับ

(2) คำนวณค่าหน่วยแรงเฉลี่ยของขอบที่พิจารณา โดยสำหรับขั้นตอนแรก ทำการรวมค่าแรงกระทำบนจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมดภายใต้ฐานรองรับ จากสมการดังต่อไปนี้

$$Force = \int \sigma_n . dL \qquad \text{..... (3.17)}$$

จากนั้นนำค่า $Force$ ที่ได้มาหารด้วยขนาดความกว้างของฐานรองรับ ซึ่งจะได้เป็นค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดิน นำค่าที่ได้บันทึกลงในแฟ้มข้อมูล "Bearing Data" สำหรับแต่ละวงรอบของการคำนวณ

รูปที่ 3.14 แสดงการรวมค่าแรงกระทำบนจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมดภายใต้ฐานรองรับ เพื่อคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดิน

3.10 การป้อนข้อมูลต่าง ๆ เพื่อใช้ในการคำนวณ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะแบ่งการทำงานของโปรแกรมออกเป็นสองส่วน ดังนี้

3.10.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก (Visual Basic Language, VB)

การป้อนข้อมูล และถ่ายโอนชุดข้อมูล จะกระทำให้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน โดยมีแฟ้มข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก ดังต่อไปนี้

(1) แฟ้มข้อมูล "Input Data" เก็บรวบรวมข้อมูล ชนิดผิวสัมผัส ขนาด รูปร่างของฐานรองรับ ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของมวลดิน รวมทั้งชนิดของการวิเคราะห์ปัญหา โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

M_F คือ ค่าของตัวแปรบอกชนิดของการวิเคราะห์ปัญหา

T_F คือ ค่าของตัวแปรบอกชนิดผิวสัมผัสระหว่างมวลดินกับฐานรองรับ

S_F คือ ค่าของตัวแปรบอกลักษณะรูปร่างของฐานรองรับ

CU คือ ค่าความเชื่อมแน่นของดิน Cohesion (c)

PHI คือ ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน Angle of internal friction (ϕ)

PSI คือ ค่า Dilation angle (φ)

$GAMMA$ คือ ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน (γ)

$EPK0$ คือ ค่า Earth pressure coefficient (K_0)

E คือ ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น

ν คือ ค่าอัตราส่วนปัวซองของดิน Poisson's ratio (ν)

(2) แฟ้มข้อมูล "Input Mesh" เก็บรวบรวมชุดข้อมูล จำนวนและพิกัดของจุดต่อ ภายในขอบเขตของปัญหา

(3) แฟ้มข้อมูล "Homo Data" เก็บรวมรวมข้อมูลการวิเคราะห์ปัญหาแบบมวลดินที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งระบบ (Non-Homogeneous) โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

$HOMO$ คือ ค่าของตัวแปรบอกชนิดการวิเคราะห์ปัญหาว่าเป็นแบบ Homogeneous หรือ Non-Homogeneous

C_TOP คือ ค่าความเชื่อมแน่นของดิน ที่ขอบเขตบนสุดของปัญหา

C_BOT คือ ค่าความเชื่อมแน่นของดิน ที่ขอบเขตล่างสุดของปัญหา

(4) แฟ้มข้อมูล "Mcc Data" เก็บรวมรวมข้อมูลการวิเคราะห์ปัญหา กรณีที่แบบจำลองมวลดินเป็นแบบ Modified Cam-Clay ตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

MCC คือ ค่าของตัวแปรบอกชนิดของแบบจำลองมวลดิน (สำหรับแบบจำลองมวลดิน Modified Cam-Clay : ค่า MCC = 1)

$FRIC$ คือ ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน

$LAMB$ คือ ค่าความชันของกราฟ Normal Consolidation Line (λ)

$KAPP$ คือ ค่าความชันของกราฟ Overconsolidation Line (κ)

$VOID$ คือ ค่า Void Ratio (e_n)

(5) แฟ้มข้อมูล "Check Run Time" แสดงสถานะการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน ว่าอยู่ในสภาพกำลังทำงาน หรือจบการทำงาน

(6) แฟ้มข้อมูล "Stop" ใช้สำหรับถ่ายโอนข้อมูลระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน โดยมีตัวแปรที่สำคัญ ๆ ดังนี้

DIS คือ ค่าของตัวแปรบอกขนาดของการทรุดตัวในแต่ละวงรอบ (ΔS)

$INCS$ คือ ค่าของตัวแปรบอกจำนวนวงรอบของการคำนวณ

RUN คือ ค่าของตัวแปรสำหรับการคำนวณต่อเนื่อง โดยถ้า RUN = 0 หมายถึง การวิเคราะห์คำนวณเกิดขึ้นเป็นครั้งแรก และโปรแกรมจะเรียกชุดข้อมูลในการสร้างโครงข่ายชิ้นส่วนจากแฟ้มข้อมูล "Input Mesh" แต่ถ้า RUN > 0 หมายถึง การวิเคราะห์คำนวณเคยเกิดขึ้นมาแล้ว และได้หยุดการคำนวณเอาไว้ เมื่อต้องการคำนวณต่อเนื่อง ก็สามารถทำได้โดยอ่านชุดข้อมูลเก่าซึ่งได้บันทึกเอาไว้ในแฟ้มข้อมูล "Backup Data"

$VSTOP$ คือ ค่าของตัวแปรสำหรับแสดงสถานะการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน

รูปที่ 3.15 แสดงหน้าจอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก สำหรับการป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

3.10.2 **โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน** (Fortran Language)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน ถูกกำหนดให้ใช้เป็นโปรแกรมหลักในการคำนวณหาค่าผลเฉลยของปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งข้อมูลที่ถูกป้อนเข้าโดยผู้ใช้โปรแกรม จะได้รับการถ่ายโอนค่าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก ผ่านทางแฟ้มข้อมูลต่าง ๆ อีกทีหนึ่ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คำนวณในขั้นต่อไป สำหรับขั้นตอนหลัก ๆ ในการวิเคราะห์ปัญหาสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนได้ดังนี้คือ

(1) ระบบการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ

- ประมาณค่าความเครียด ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ โดยวิธี SPR
- ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเครียดในแต่ละชิ้นส่วน
- การเพิ่มจุดต่อ และปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน
- การถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ
- เก็บบันทึกข้อมูลโครงข่ายชิ้นส่วนที่สร้างขึ้นใหม่ลงในแฟ้มข้อมูล "Snac Input" เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในวงรอบถัดไป

(2) ระบบการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อาศัยหลักเกณฑ์ของ SNAC (Soil Nonlinear Analysis Code) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการปรับปรุงหลักเกณฑ์ของ SNAC ในส่วนของการเพิ่มขั้นตอน การถ่ายโอนชุดข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ปัญหาลงในแฟ้มข้อมูลต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบ ปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วน และทำการถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ สำหรับวงรอบของการคำนวณที่ได้กำหนดไว้

3.11 **การแสดงผลการวิเคราะห์**

การแสดงผลของโปรแกรมจะอยู่ในรูปของแฟ้มข้อมูล (Text File) ต่าง ๆ เพื่อใช้แสดงผลการวิเคราะห์ปัญหา และเก็บสำรองชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาต่อเนื่อง ดังนี้

3.11.1 แฟ้มข้อมูล (Text Files) สำหรับแสดงผลการวิเคราะห์ปัญหา

(1) แฟ้มข้อมูล "Bearing Data" แสดงผลข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดิน และค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ

(2) แฟ้มข้อมูล "Tecplot" แสดงความสัมพันธ์ของโครงข่ายของชิ้นส่วน หมายเลขจุดต่อ หมายเลขชิ้นส่วน ตลอดจนค่าการเคลื่อนตัวและความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของค่าหน่วยแรงในแต่ละจุดต่อ จากการตรวจสอบผลของการวิเคราะห์สามารถนำแฟ้มข้อมูลนี้แสดงผลทางกราฟิกได้ โดยการใช้โปรแกรม Tecplot ในการแสดงผลเพื่อพิจารณาเฉพาะส่วนที่สนใจได้

(3) แฟ้มข้อมูล "Initial body forces" แสดงค่าของหน่วยแรงเริ่มต้นภายใต้ฐานรองรับ

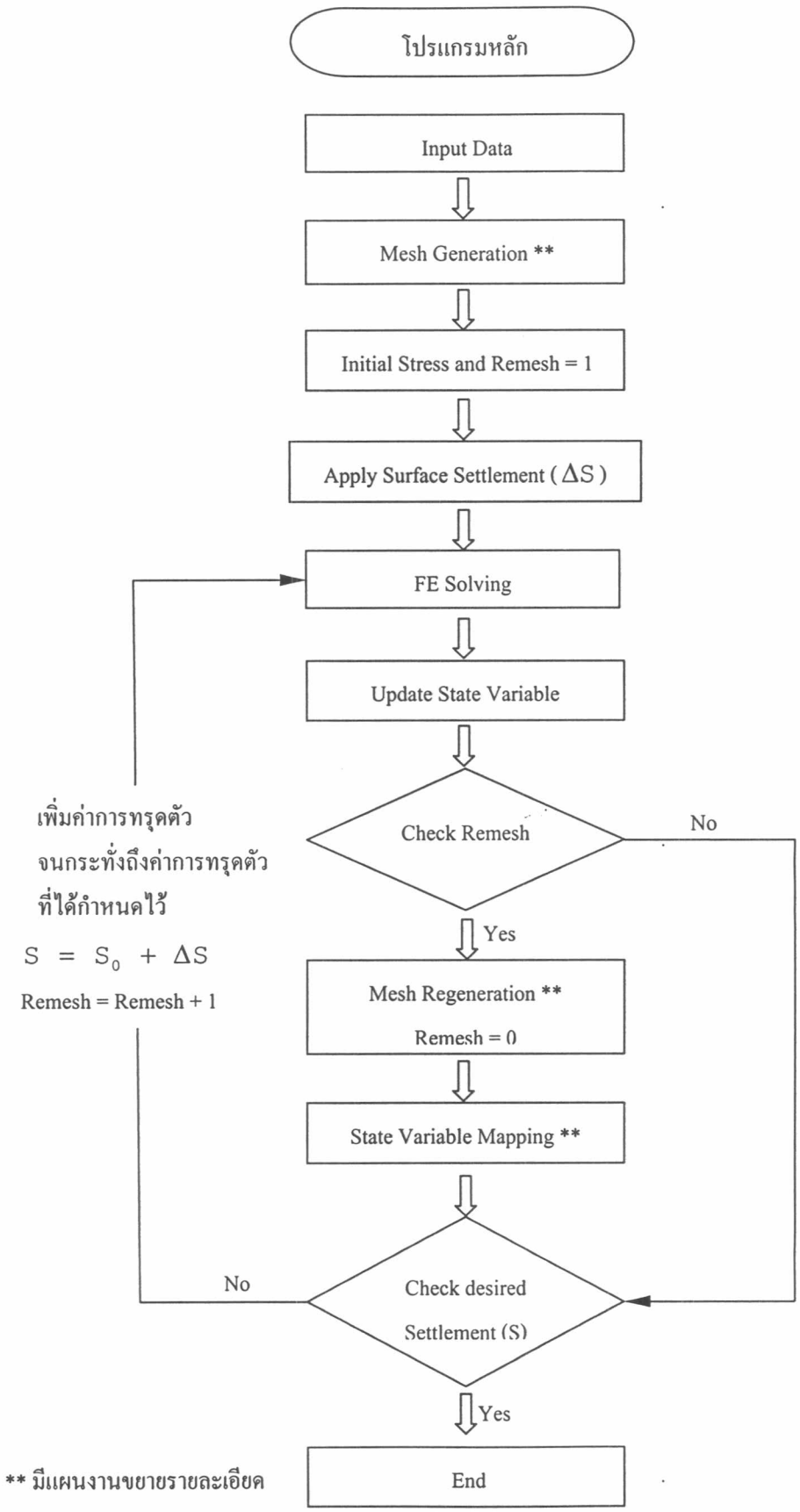
(4) แฟ้มข้อมูล "Output Time" แสดงผลระยะเวลาในการคำนวณของโปรแกรม

3.11.2 แฟ้มข้อมูล (Text Files) สำหรับเก็บสำรองข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่อเนื่อง

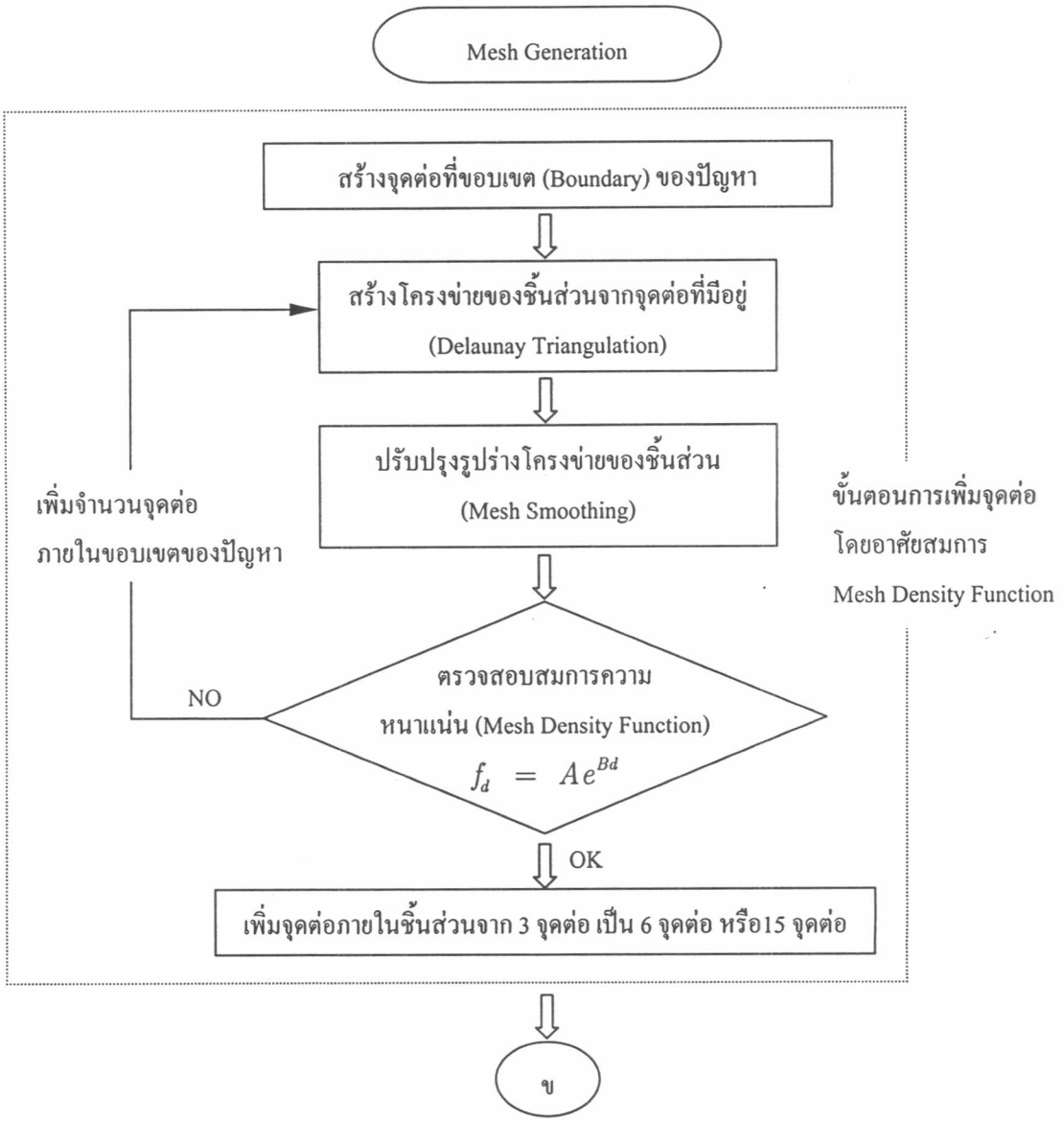
(1) แฟ้มข้อมูล "Backup Data" ประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณต่อเนื่อง

(2) แฟ้มข้อมูล "Backup Old" ประกอบด้วยชุดข้อมูลค่าของหน่วยแรง ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ ทั้งหมดในวงรอบของการคำนวณที่ผ่านมา รวมทั้งชุดข้อมูลหมายเลข และพิกัดทั้งหมดของจุดต่อ

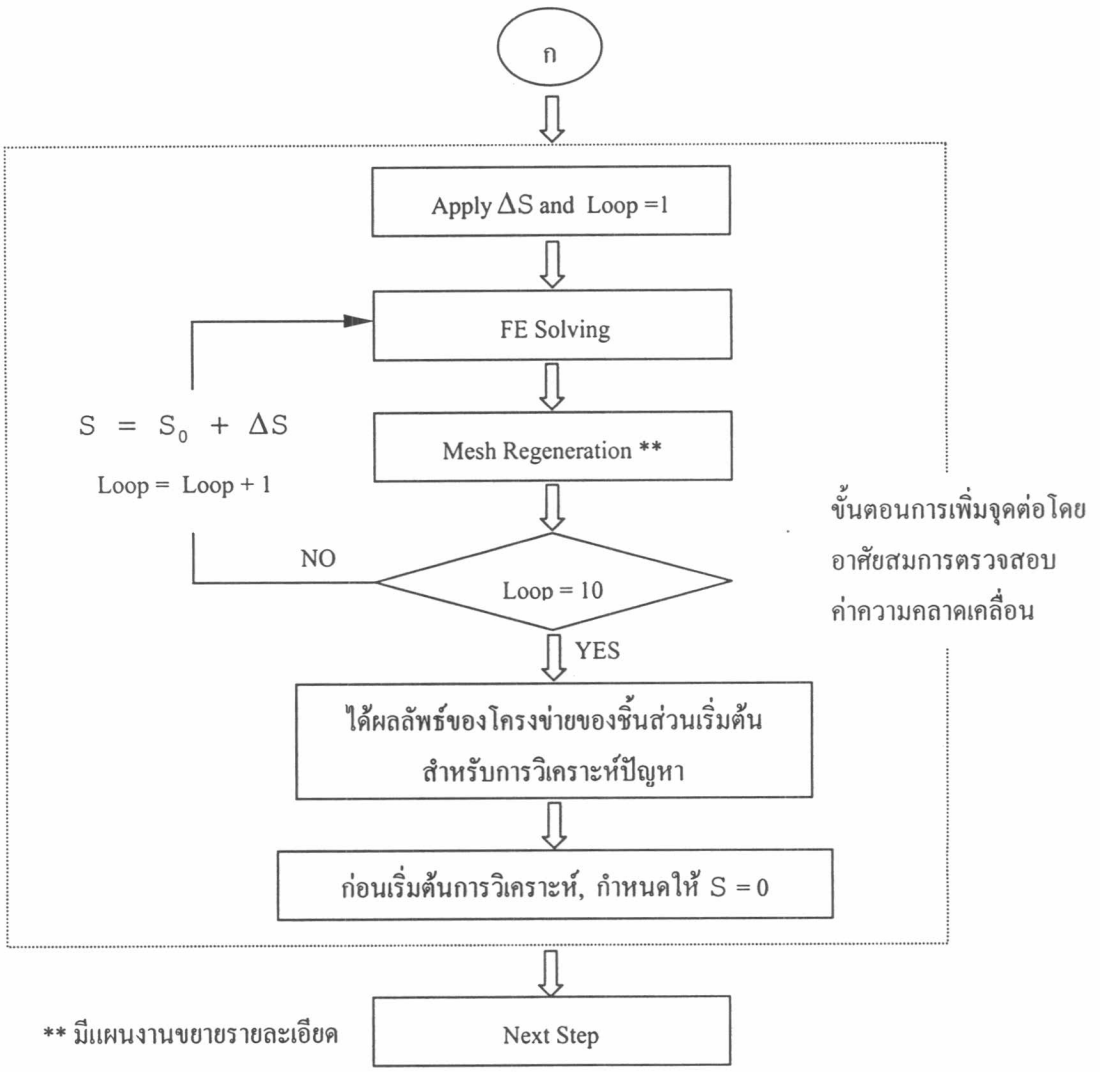
(3) แฟ้มข้อมูล "Backup Bearing" ประกอบด้วยชุดข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดิน และค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ



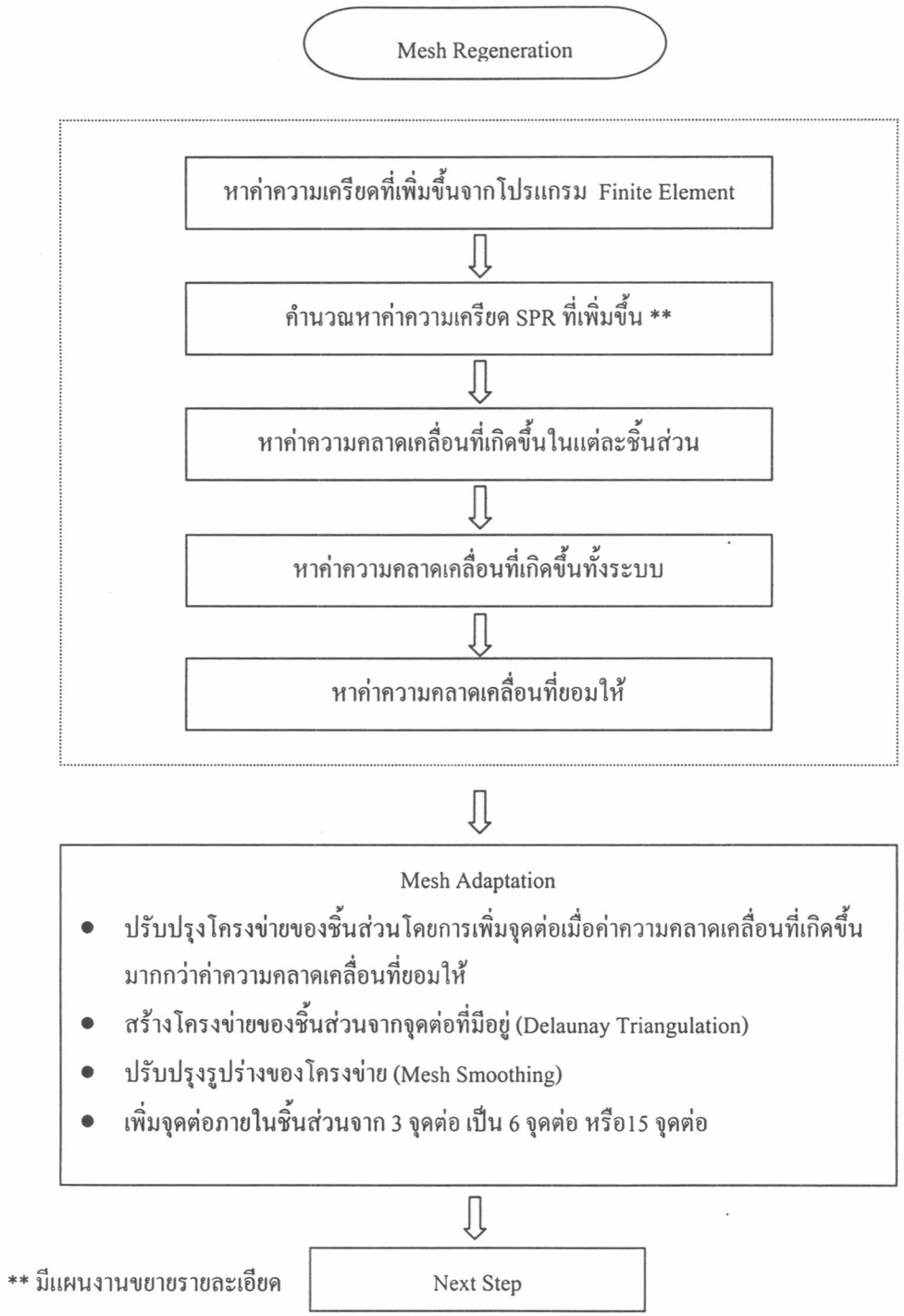
รูปที่ 3.1 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมหลัก



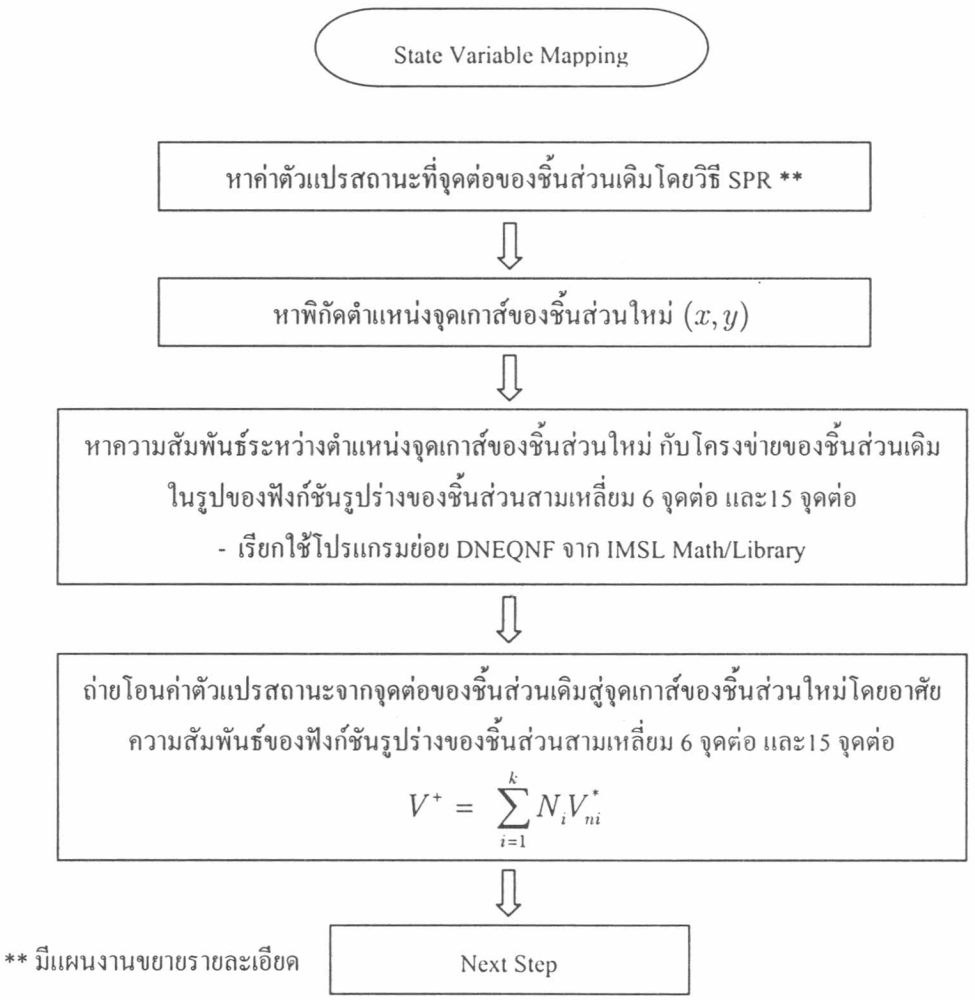
รูปที่ 3.2 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ (ขั้นตอน ก: โครงข่ายของชิ้นส่วนควบคุมโดยสมการความหนาแน่น)



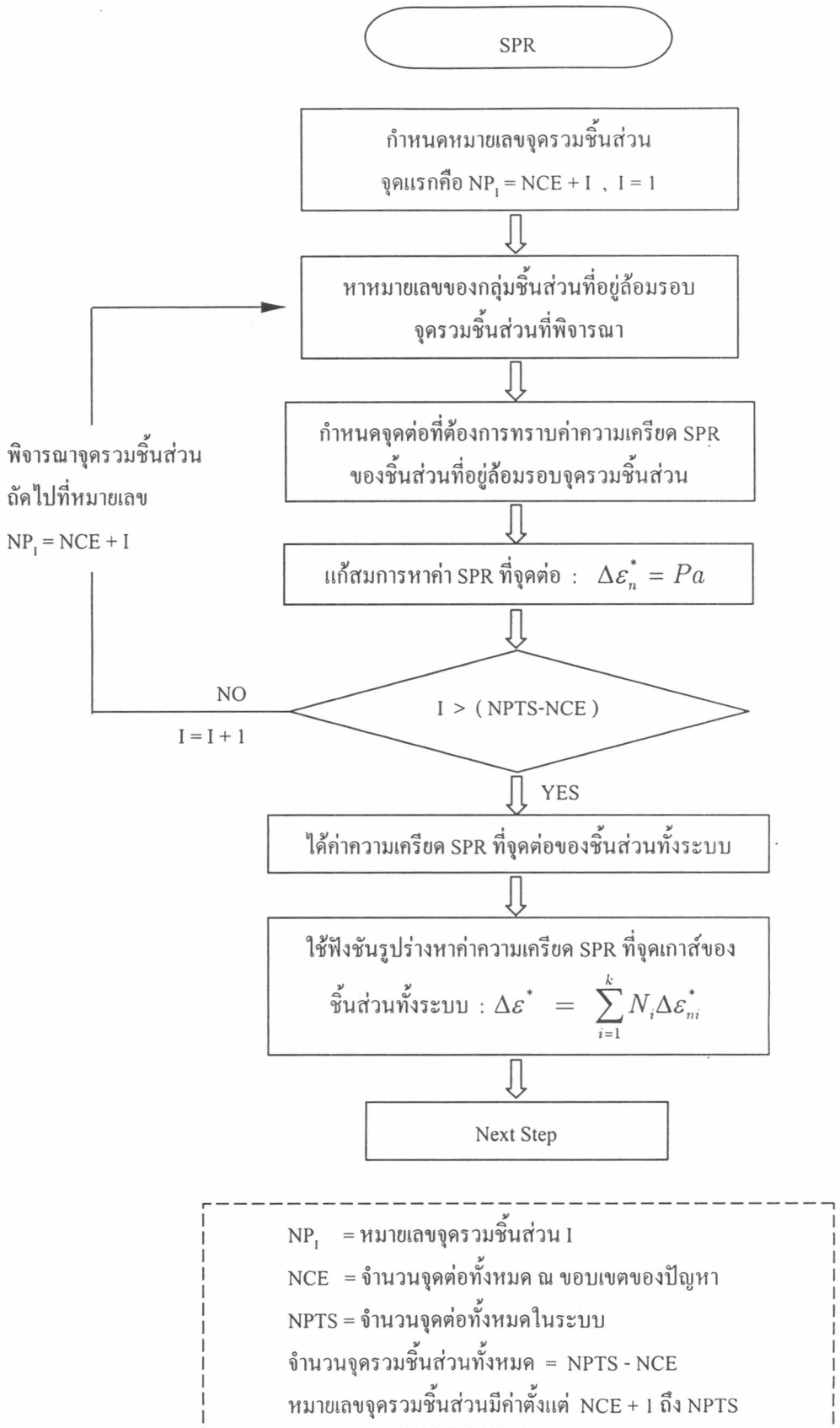
รูปที่ 3.3 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ (ขั้นตอน ข: โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นในการวิเคราะห์ปัญหา)



รูปที่ 3.4 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม เพิ่มจุดต่อและปรับปรุงพิกัดภายในโครงข่ายของปัญหา

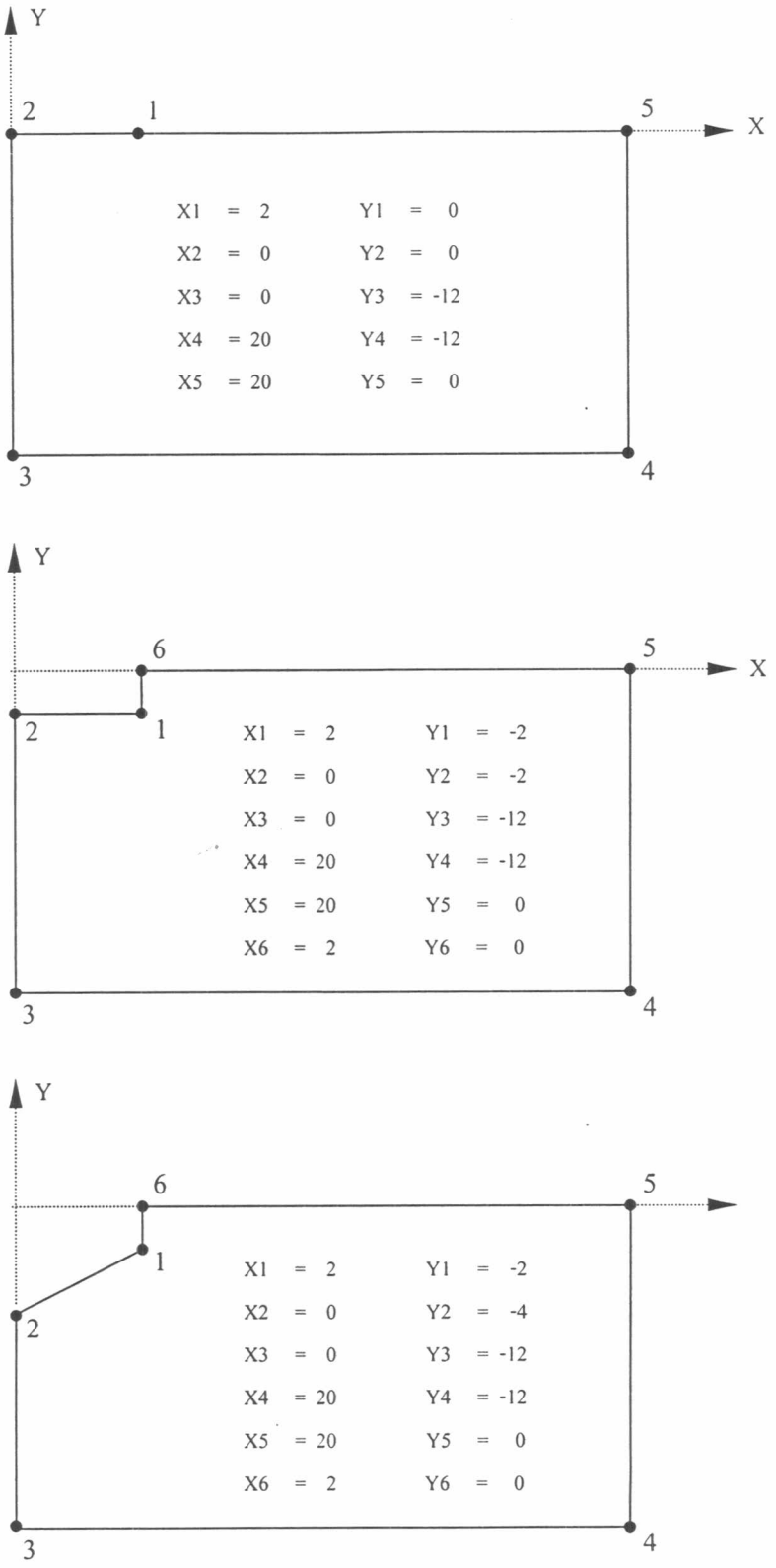


รูปที่ 3.5 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม ถ่ายโอนค่าตัวแปรสถานะ จากจุดต่อของชิ้นส่วนเดิม ไปสู่จุดเกาส์ของชิ้นส่วนใหม่

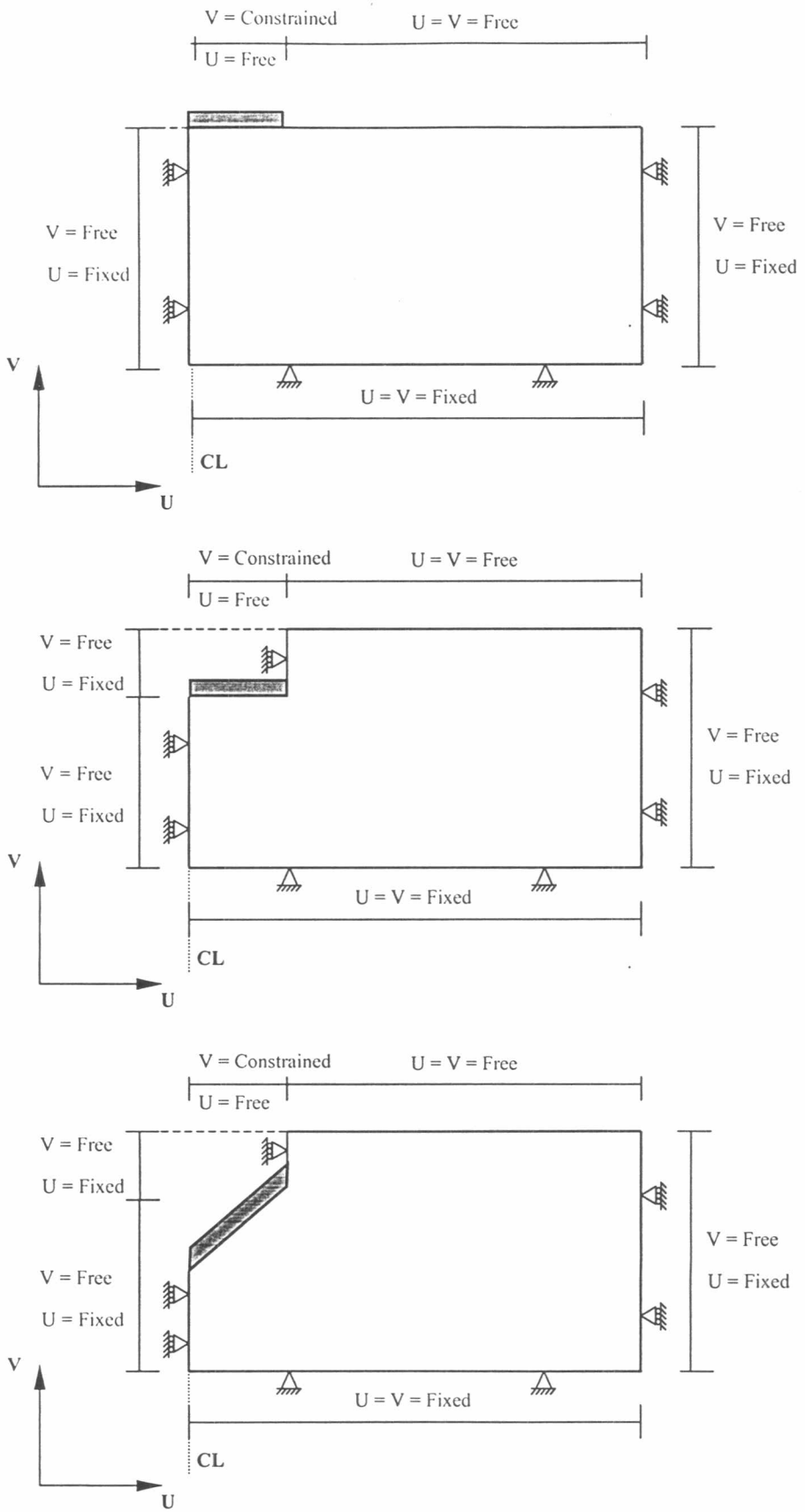


รูปที่ 3.6 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม

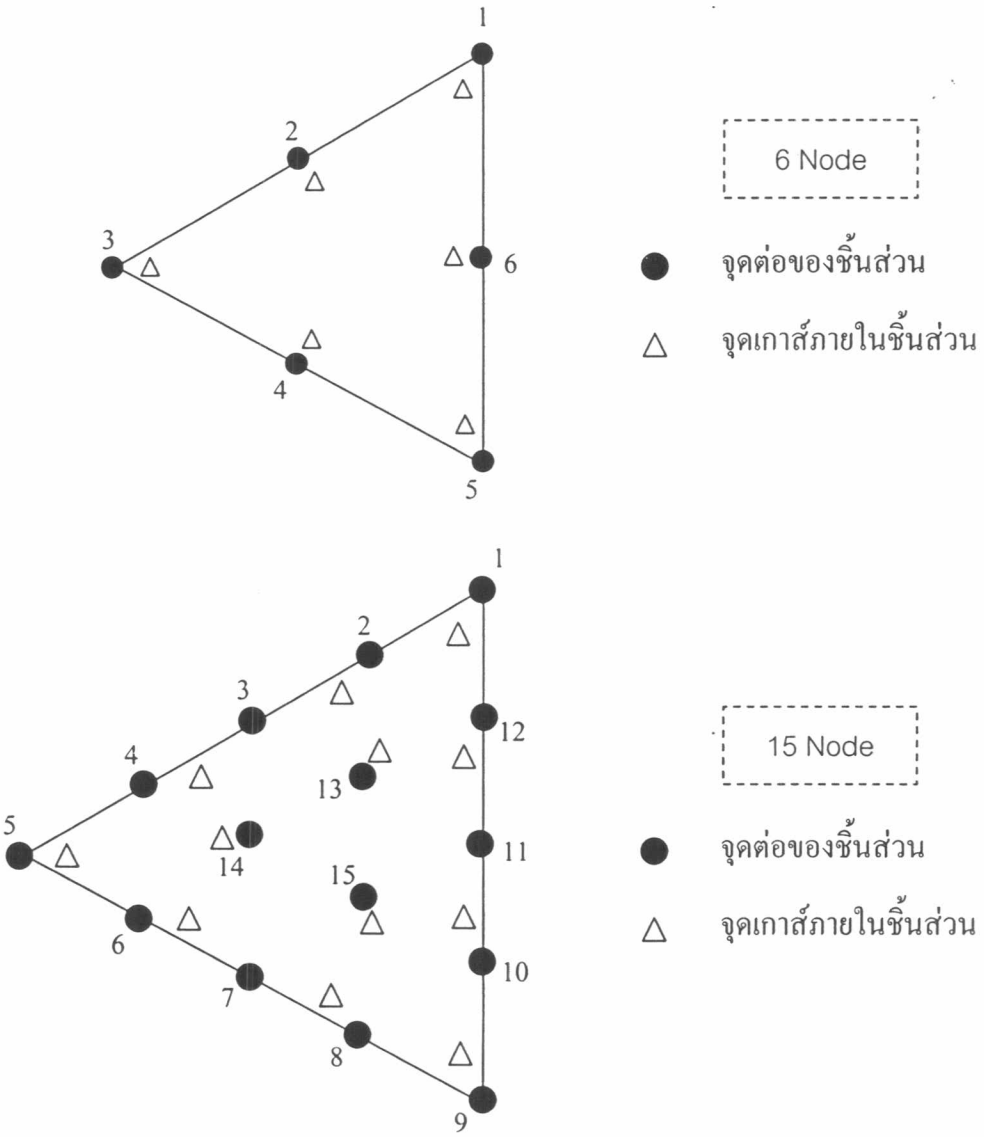
Superconvergent Patch Recovery of Strain (SPR)



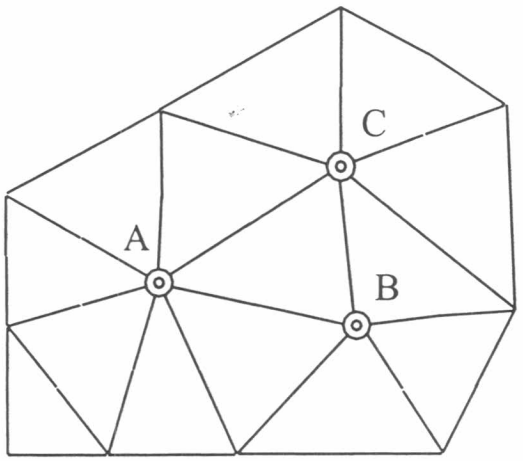
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูล จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ



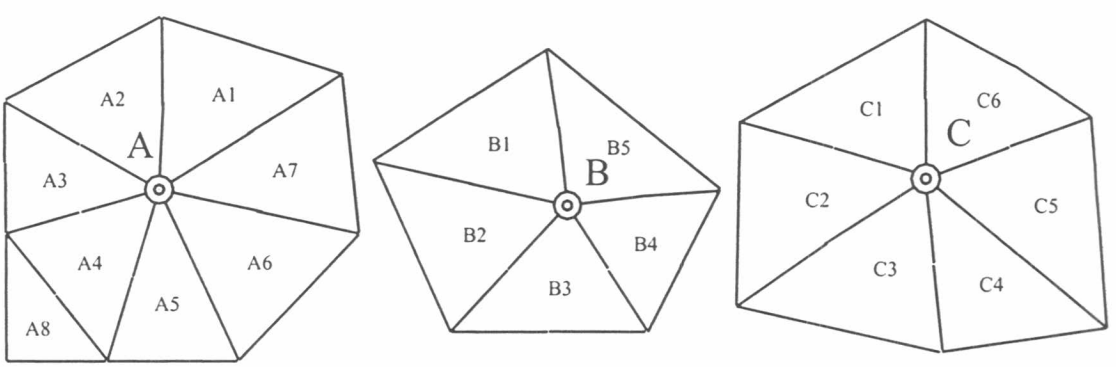
รูปที่ 3.8 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition)



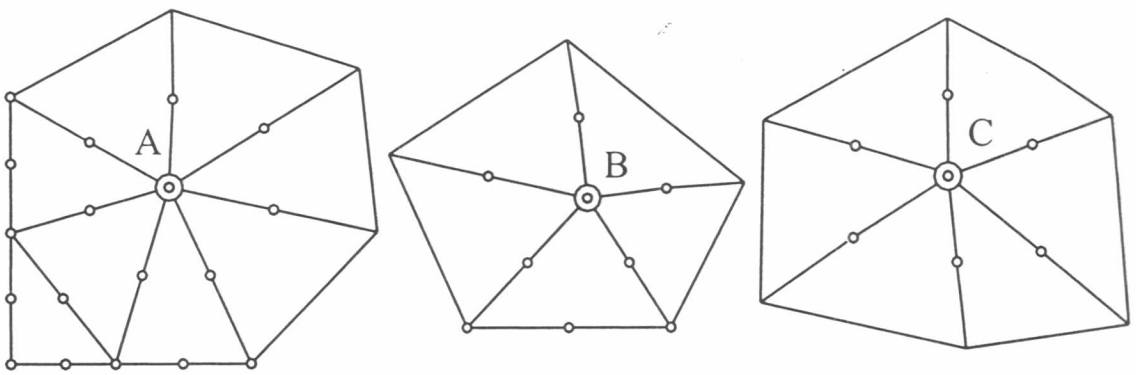
รูปที่ 3.9 หมายเลขและตำแหน่งของจุดต่อ ในแต่ละชิ้นส่วน



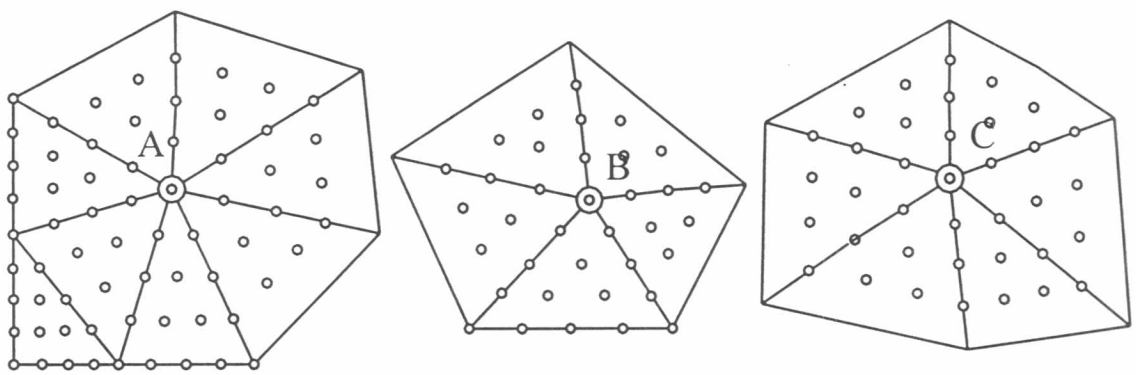
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งตัวอย่างของจุดรวมชิ้นส่วน A, B และ C ตามลำดับ



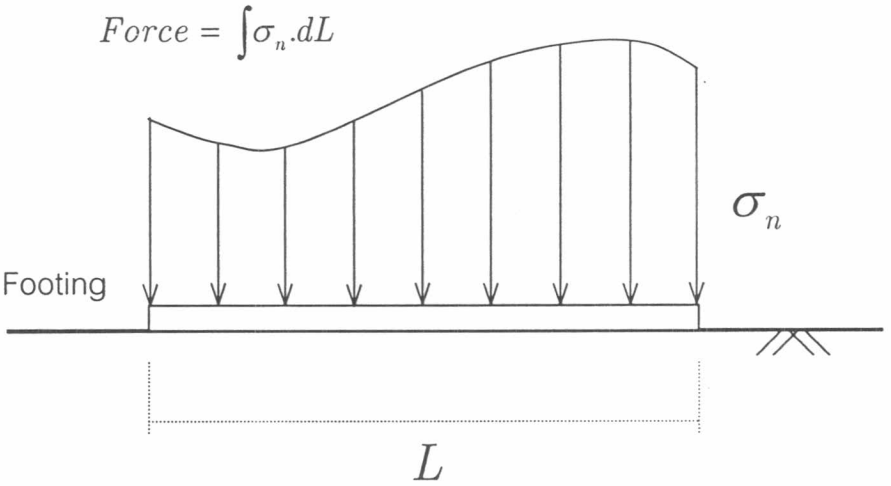
รูปที่ 3.11 ชิ้นส่วนที่อยู่ล้อมรอบ หรือ ชิ้นส่วนที่มีอิทธิพลต่อ จุดรวมชิ้นส่วน



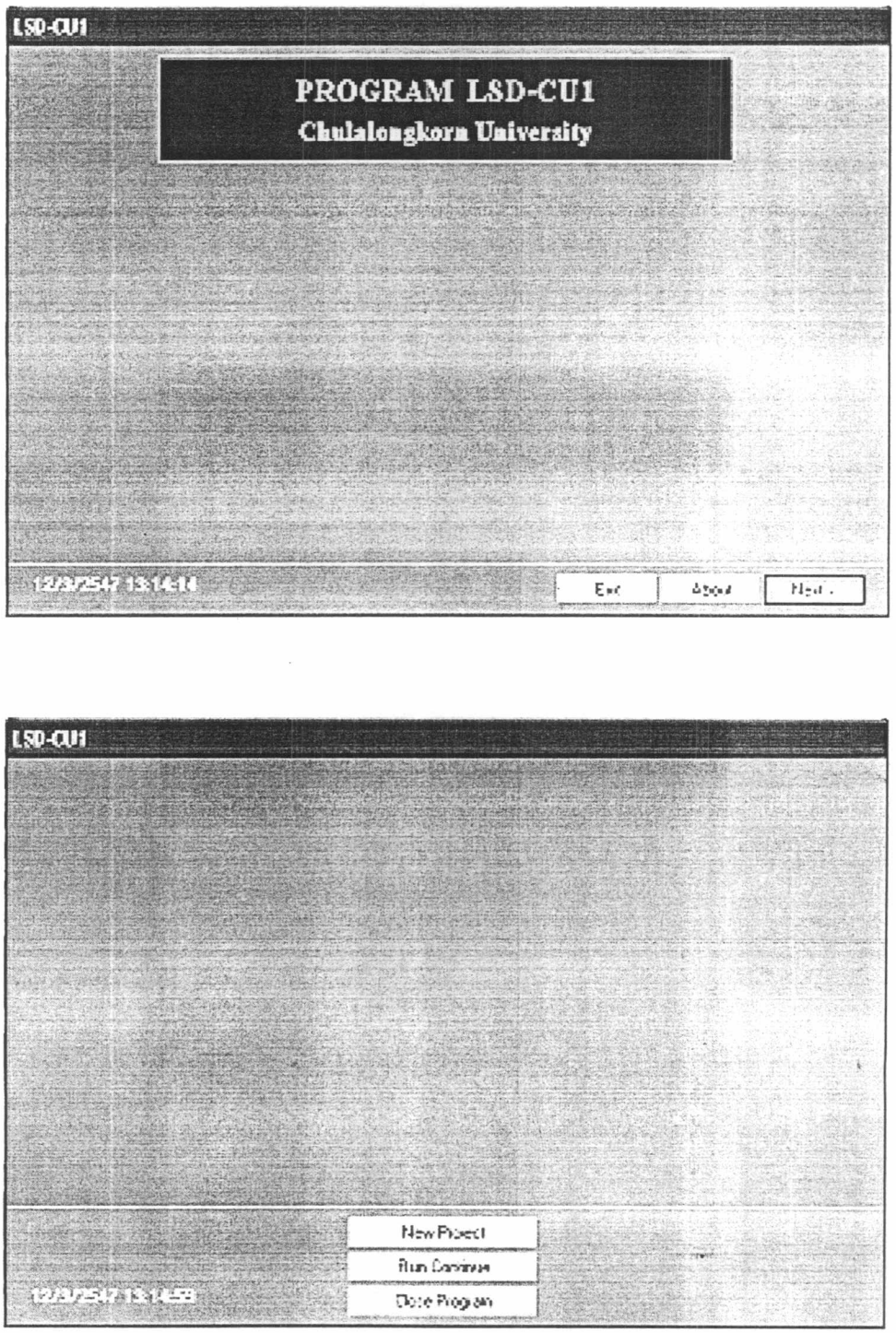
รูปที่ 3.12 จุดต่อภายในกลุ่มของชิ้นส่วนที่ต้องการทราบค่าความเครียด SPR สำหรับโครงข่ายของชิ้นส่วน 6 จุดต่อ



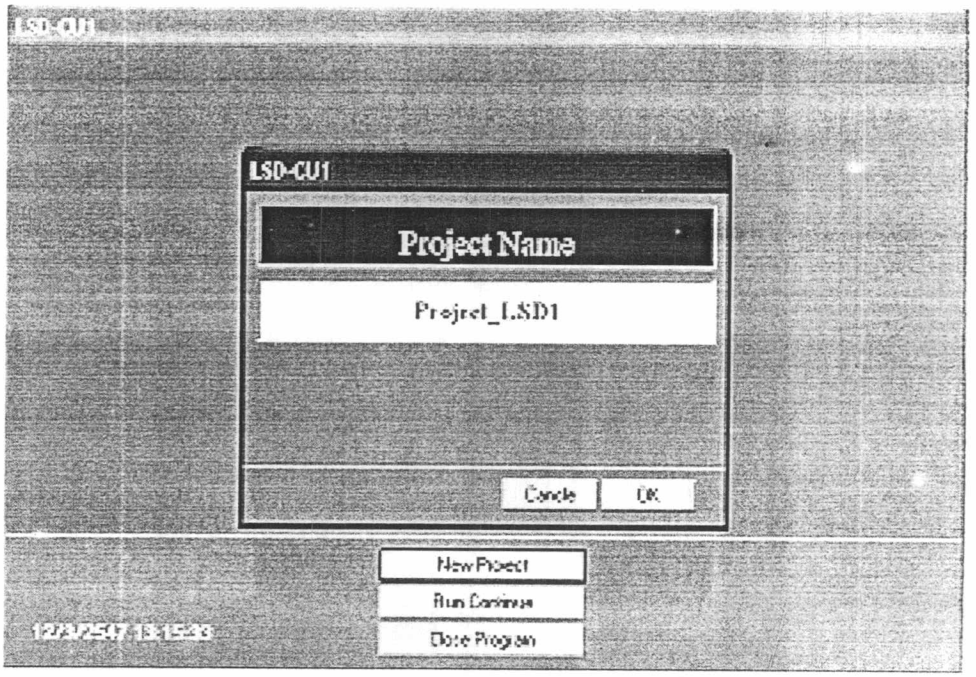
รูปที่ 3.13 จุดต่อภายในกลุ่มของชิ้นส่วนที่ต้องการทราบค่าความเครียด SPR สำหรับโครงข่ายของชิ้นส่วน 15 จุดต่อ

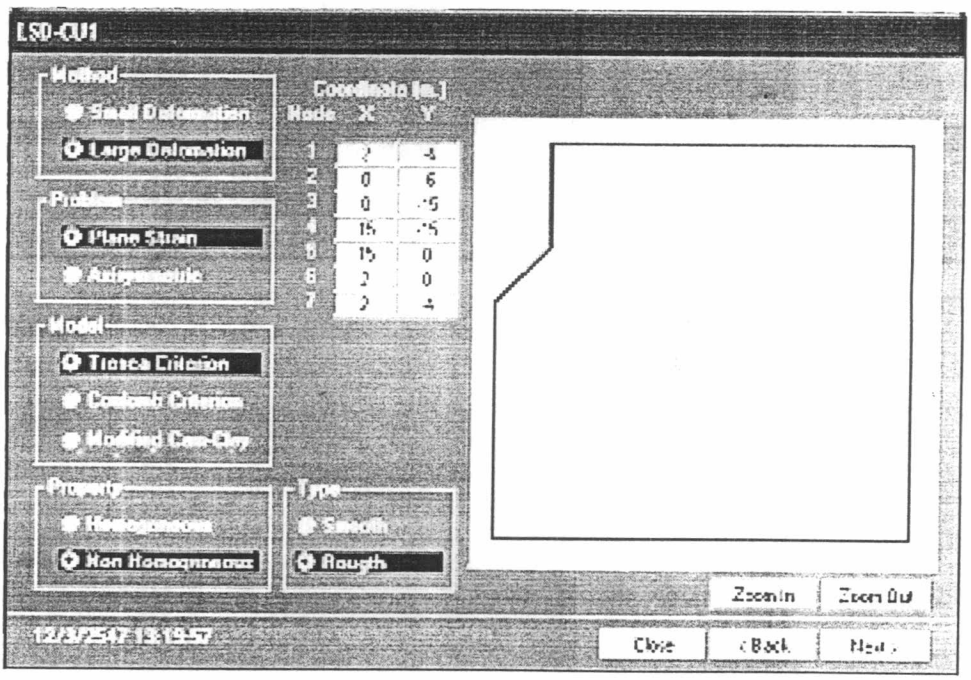


รูปที่ 3.14 การรวมค่าแรงกระทำบนจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมด ภายใต้ฐานรองรับ

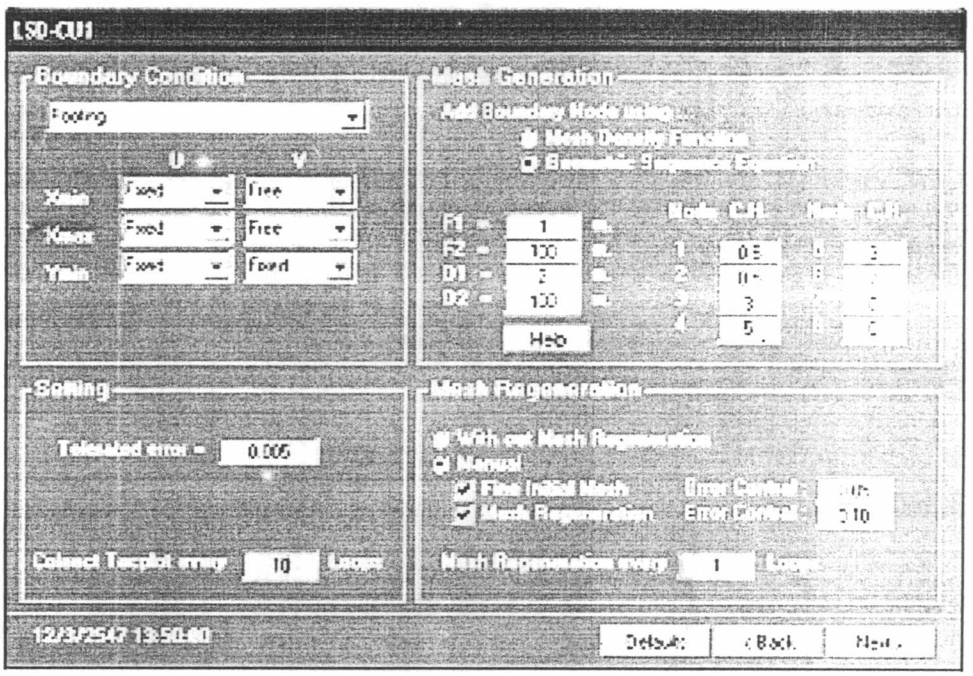


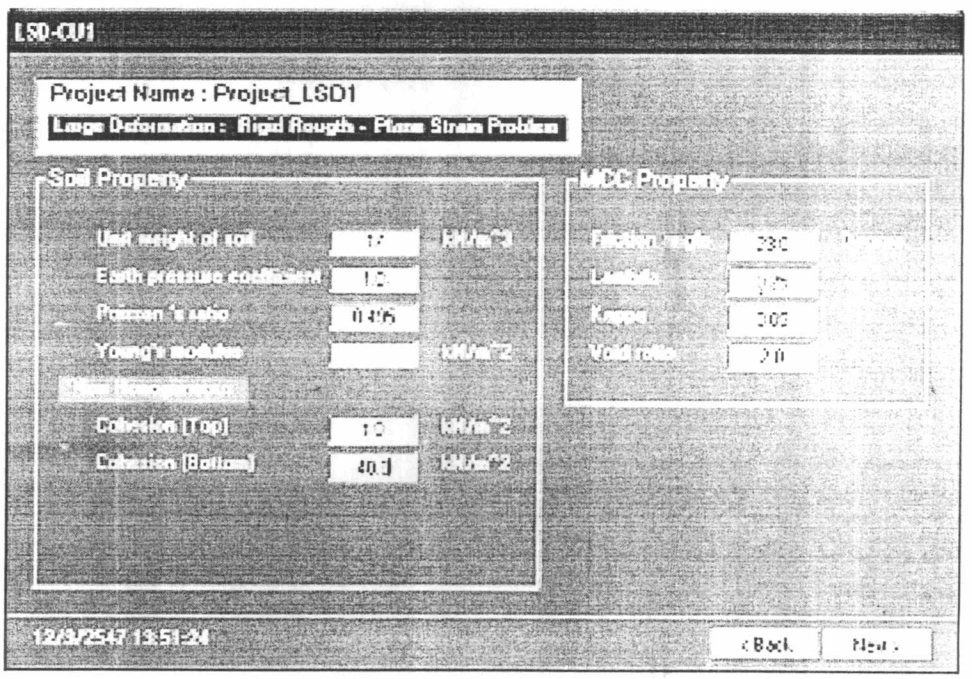
รูปที่ 3.15 หน้าจอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก สำหรับการป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ



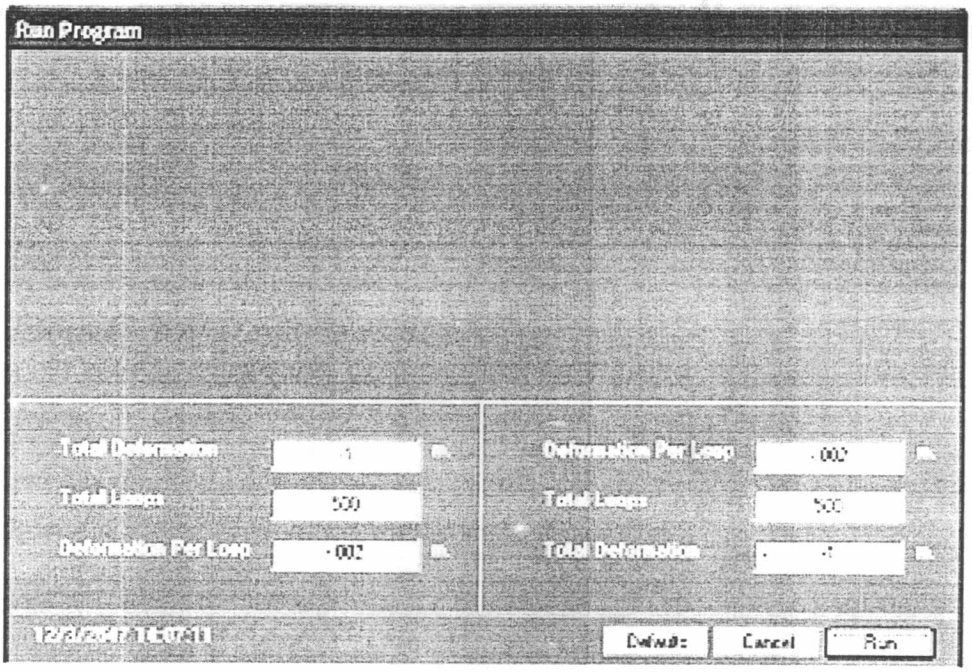


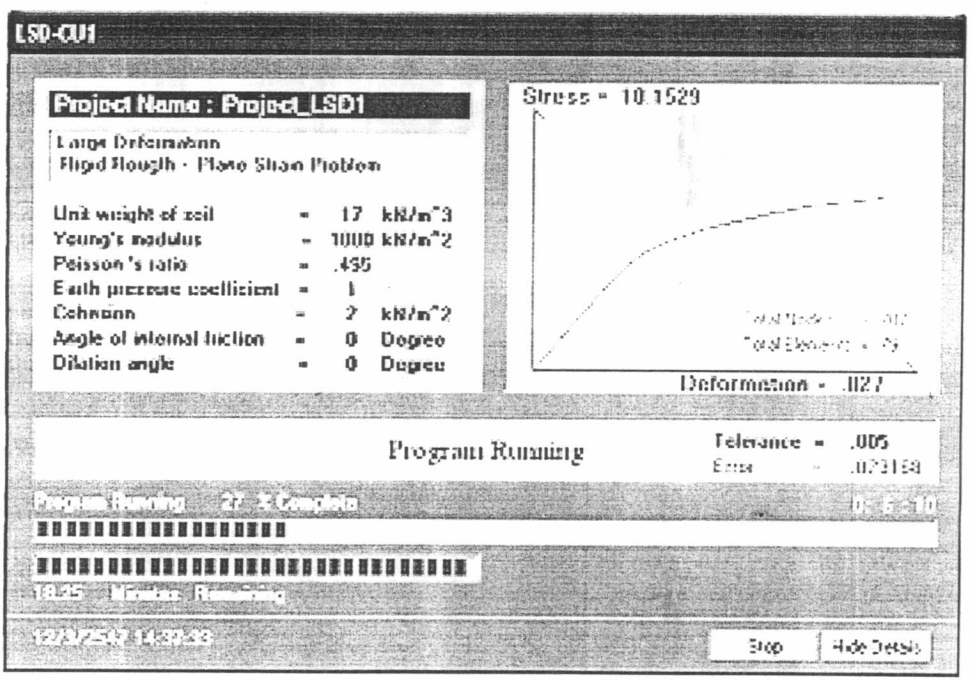
รูปที่ 3.15(ต่อ) หน้าจอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก สำหรับการป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ



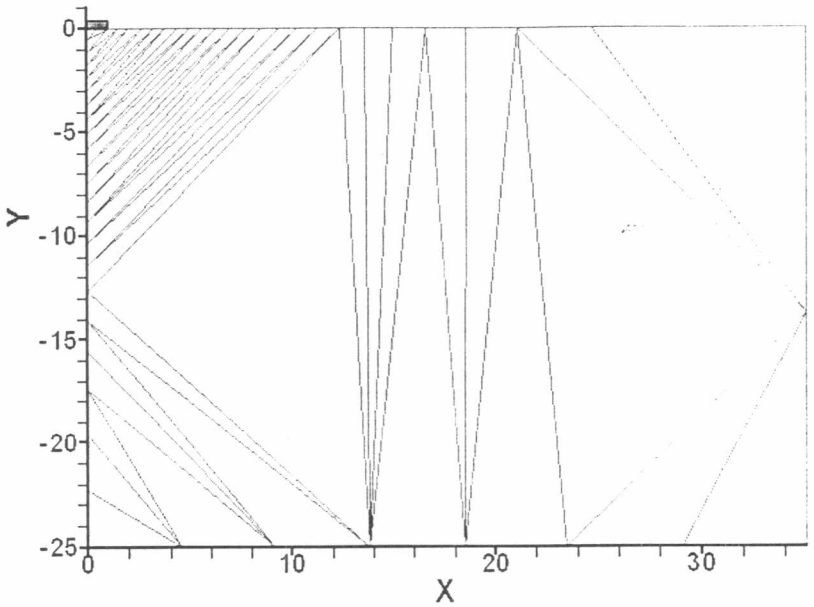


รูปที่ 3.15(ต่อ) หน้าจอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก สำหรับการป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

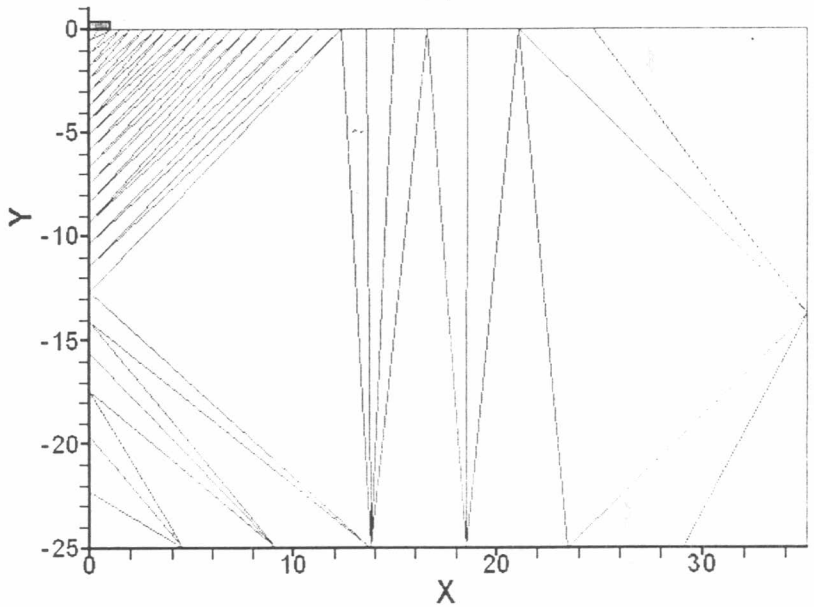




รูปที่ 3.15(ต่อ) หน้าจอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก สำหรับการป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ



(ก)

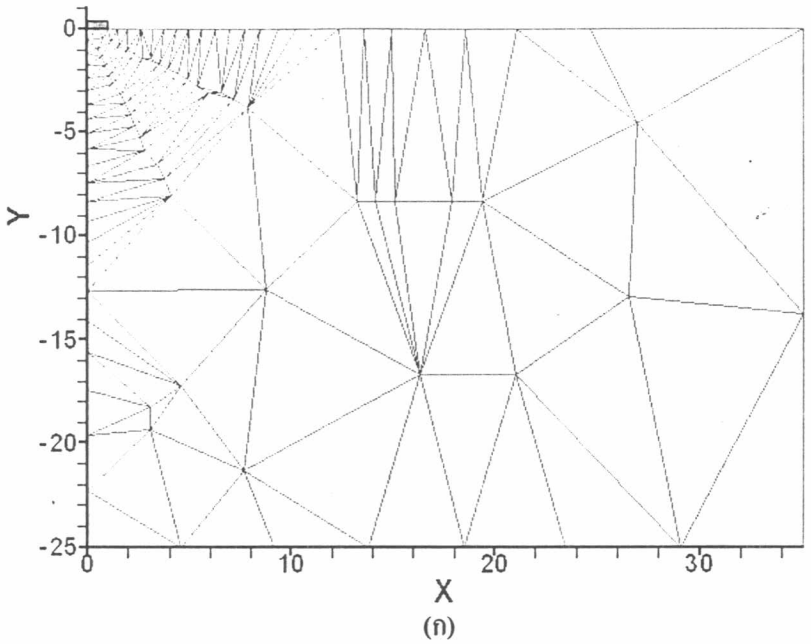


(ข)

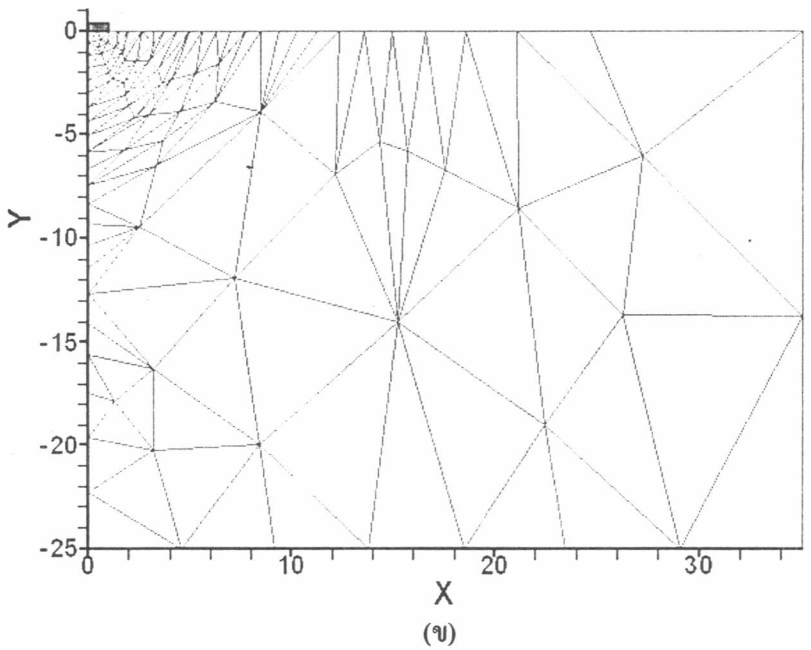
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 1) แสดงการเพิ่มจุดต่อที่ขอบเขตของปัญหา

(ก) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)

(ข) ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)



(ก)

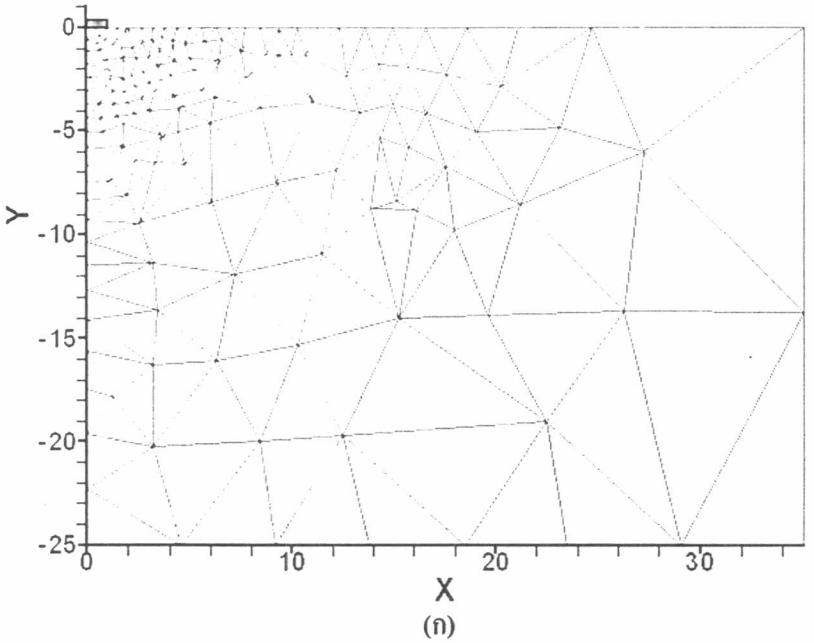


(ข)

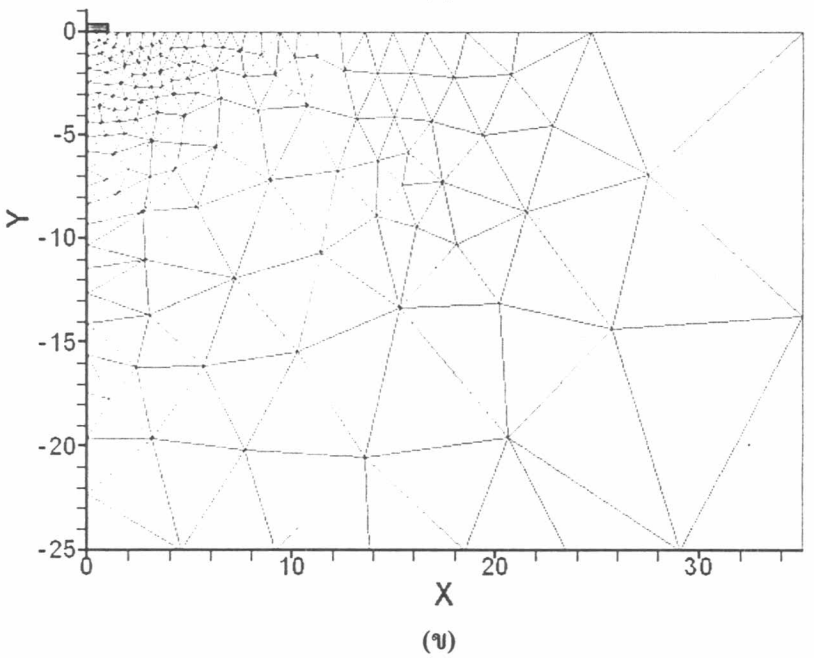
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 2) แสดงการเพิ่มจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา

(ก) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)

(ข) ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)

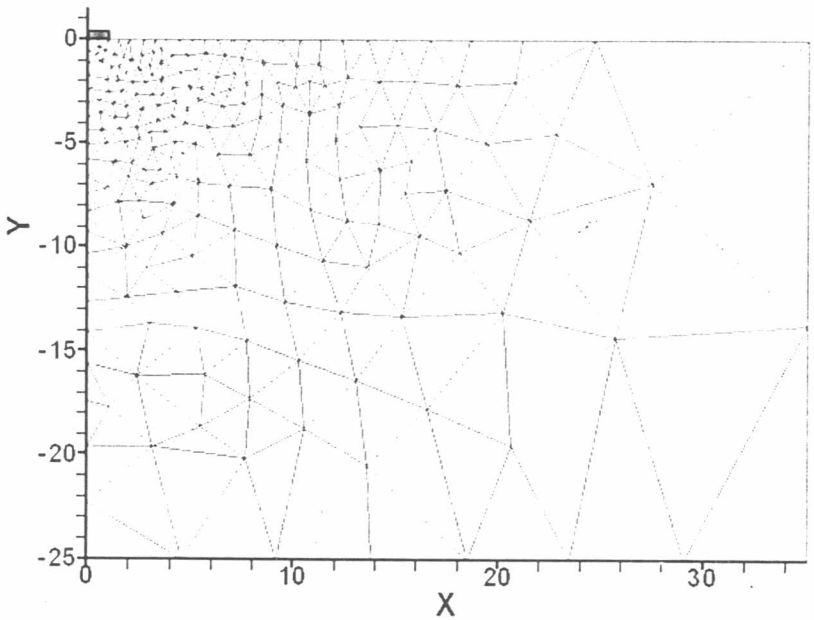


(ก)

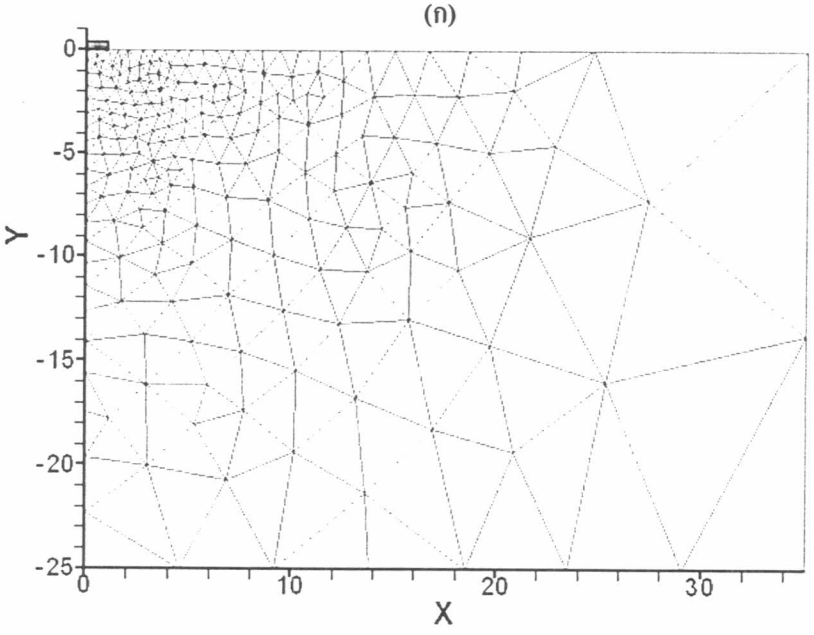


(ข)

รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 3) แสดงการเพิ่มจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา
(ก) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)
(ข) ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)

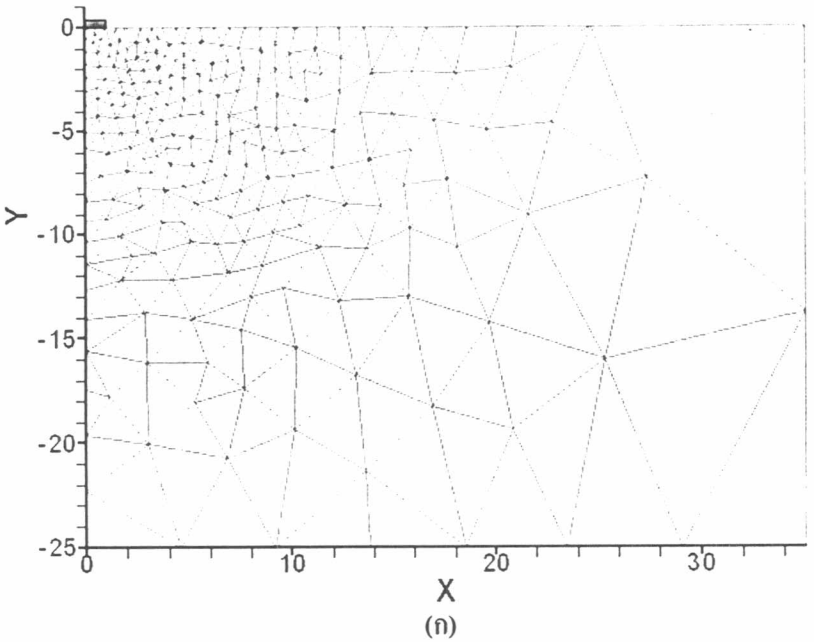


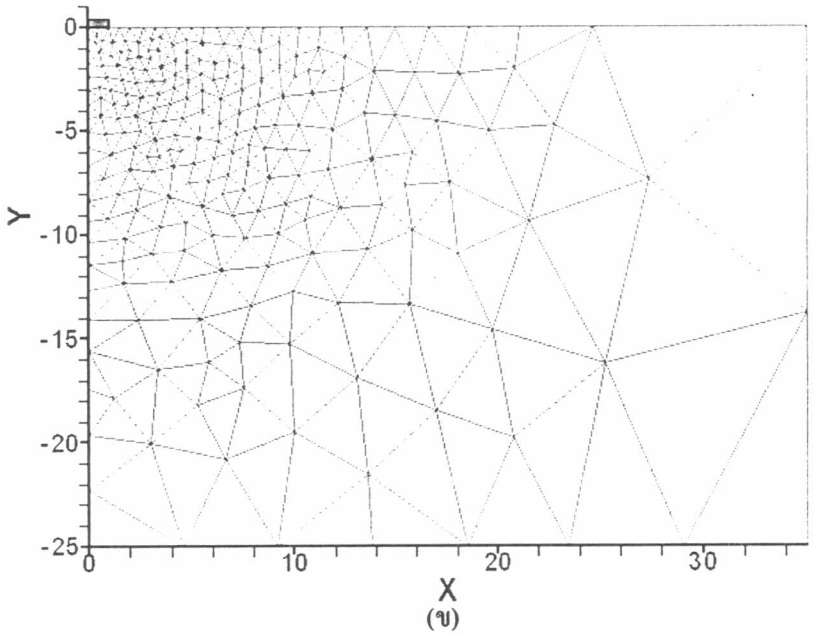
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.19 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 4) แสดงการเพิ่มจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา
(ก) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)
(ข) ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)

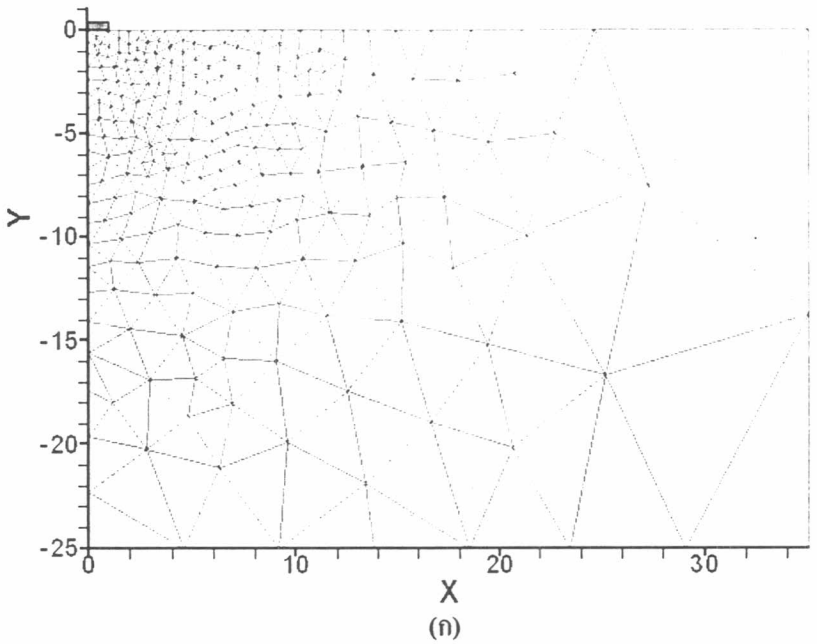




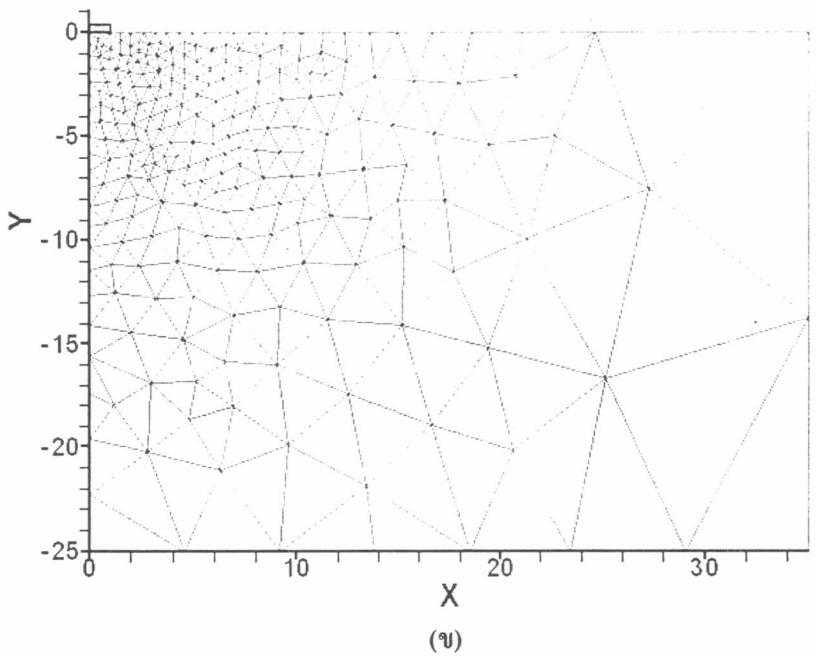
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 5) แสดงการเพิ่มจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา

(ก) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)

(ข) ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.21 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ n) จนกระทั่งไม่สามารถเพิ่มจุดต่อที่ขอบเขตของปัญหาจากสมการความหนาแน่น และไม่สามารถเคลื่อนย้ายพิกัดจากการปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing) ดังนั้นจะได้โครงข่ายของชิ้นส่วนที่ควบคุมโดยสมการความหนาแน่น