# การพัฒนาระเบียบวิธีการใช้ทฤษฎีความเครียดน้อยสำหรับ
# วิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน

นาย ดำรงค์ฤทธิ์ พรหมณีวัฒน์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2553-1

A DEVELOPMENT OF PROCEDURE USING SMALL STRAIN THEORY

FOR ANALYZING LARGE SOIL DEFORMATION PROBLEMS

Mr. Dumrongrit Prommanewat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974 -17 -2553 -1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาระเบียบวิธีการใช้ทฤษฎีความเครียดน้อยสำหรับวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน

โดย นายดำรงค์ฤทธิ์ พรหมณีวัฒน์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฎชน

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

............................................... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

............................................... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวี ธนะเจริญกิจ)

............................................... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฎชน)

............................................... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี)

นาย ดำรงค์ฤทธิ์ พรหมณีวัฒน์: การพัฒนาระเบียบวิธีการใช้ทฤษฎีความเครียดน้อยสำหรับวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน. (A DEVELOPMENT OF PROCEDURE USING SMALL STRAIN THEORY FOR ANALYZING LARGE SOIL DEFORMATION PROBLEMS) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. บุญชัย อุกฤษฎชน, 132 หน้า. ISBN 974 - 17 - 2553 - 1.

วิทยานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและปรับปรุง หลักการของวิธีการประยุกต์ใช้งานโดยใช้ทฤษฎีความเครียดน้อยสำหรับวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน และ นำวิธีการประยุกต์ใช้งานที่ปรับปรุงใหม่มาวิเคราะห์ปัญหา 2 มิติ ของฐานราก

หลักการของวิธีการประยุกต์ใช้งานที่ปรับปรุงใหม่ ประกอบด้วยการสร้างโครงข่ายแบบอัตโนมัติของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อแบบไร้โครงสร้าง การปรับปรุงโครงข่ายด้วยการควบคุมค่าความคลาดเคลื่อน การสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่แบบอัตโนมัติ และการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงสำหรับโครงข่ายใหม่

วิธีการประยุกต์ใช้งานที่ปรับปรุงใหม่ได้นำมาทดสอบวิเคราะห์ปัญหาฐานรากต่อเนื่องและฐานรากวงกลมเคลื่อนตัวลงไปในชั้นดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ การวิเคราะห์พิจารณา 2 กรณีคือ 1) กรณีที่ไม่มีการเสียรูปของมวลดินหรือกรณีความเครียดน้อย (SSC) และ 2) กรณีที่มีการเสียรูปของมวลดินหรือกรณีความเครียดมาก (LSC) สำหรับกรณี SSC และไม่พิจารณาหน่วยน้ำหนักของดิน การวิเคราะห์สามารถจำลองกราฟหน่วยแรงและการทรุดตัวได้อย่างแม่นยำและถูกต้องโดยที่เมื่อการทรุดตัวมีค่ามาก กราฟจะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งเท่ากับกำลังรับน้ำหนักของฐานรากและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากวิธีเชิงประสบการณ์ สำหรับกรณี LSC เมื่อไม่คำนึงถึงหน่วยน้ำหนักของดิน การวิเคราะห์สามารถจำลองพฤติกรรมของกราฟหน่วยแรงและการทรุดตัวได้อย่างสมเหตุสมผล โดยที่แรงกระทำของกรณี LSC เท่ากับกำลังรับน้ำหนักของกรณี SSC ที่อัตราส่วนการทรุดตัว S/B (LSC) เท่ากับอัตราส่วนความลึก D/B (SSC) สำหรับกรณี LSC เมื่อคำนึงถึงหน่วยน้ำหนักของดิน พบว่ากราฟหน่วยแรงและการทรุดตัว แสดงการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับน้ำหนักของฐานรากอย่างมากซึ่งมีผลมาจากมวลดินด้านนอกที่อยู่ชิดกับขอบฐานรากยกตัวขึ้นและเพิ่มผลน้ำหนักบรรทุกเมื่อฐานรากเคลื่อนตัวจมลึกลงไปในดิน กำลังรับน้ำหนักของฐานรากที่ได้จากวิธี Superposition ของสมการ Terzaghi จากส่วนประกอบค่าความเชื่อมแน่นของดินและน้ำหนักบรรทุกมีค่าสูงกว่าค่าที่วิเคราะห์ได้อย่างมาก ซึ่งแสดงว่าสมการ Terzaghi ไม่ปลอดภัยและไม่เหมาะสมในการออกแบบฐานรากในสภาวะการทรุดตัวมาก

ประโยชน์หลักที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้คือสามารถนำวิธีที่เสนอไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดินทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค เช่น ฐานรากที่วางบนชั้นดินเหนียวอ่อนหรือดินชายฝั่งทะเล หรือการทดสอบการกดแท่งโคน เป็นต้น

ภาควิชา......วิศวกรรมโยธา...... ลายมือชื่อนิสิต..............................

สาขาวิชา......วิศวกรรมโยธา...... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..............................

ปีการศึกษา......2545......

# # 4370297021: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: LARGE STRAIN / FOOTING / FINITE ELEMENT

DUMRONGRIT PROMMANEWAT: A DEVELOPMENT OF PROCEDURE USING SMALL STRAIN THEORY FOR ANALYZING LARGE SOIL DEFORMATION PROBLEMS. THESIS ADVISOR: ASST. PROF.BOONCHAI UKRTICHON, Sc.D., 132 pp.

ISBN 974 -17 -2553 - 1.

The objectives of this thesis are to study and improve a practical method using small strain theory for analyzing large soil deformation problems, and to apply the improved method for analyzing two dimensional problems of footing.

The principles of the new improved practical method are consisted of the automatic mesh generation of six-noded unstructured triangular element, adaptation mesh generation with error control, automatic remeshing, and stress transfer for new mesh.

The improved practical method is tested and applied to analyze problems of strip and circular footings penetrating into clay layer in an undrained condition. The analyses consider two cases: 1) the un-deformed soil geometry case or small strain case (SSC); and 2) the deformed soil geometry case or large strain case (LSC). For SSC case and weightless soil, the analyses are able to simulate load-displacement curve accurately and correctly, where for large settlement ratio, all curves approach to constant values corresponding to the bearing capacity of footing, and matching with those from empirical method. For LSC case and weightless soil, the analyses can simulate the load-settlement curve realistically, where the normalized applied loads of LSC are equal to the bearing capacity of SSC at the same ratios of S/B (LSC) as D/B (SSC). For LSC case and soil self-weight, the load-settlement curves show an increase in bearing capacity considerably, since the outside soils adjacent to footing edge heave largely, which adding surcharge effect as the footing penetrates deeply into soil. Bearing capacity values from the superposition method of Terzaghi's equation for cohesion and surcharge components are significantly larger than computed values, indicating that the Terzaghi's equation is not safe and not appropriate in designing footings associated with large settlement.

The main benefit from this thesis is that the proposed method can be applied for analyzing large soil deformation problems in geotechnical engineering such footing resting on soft clay layer or offshore area or cone penetration test, etc.

Department.........Civil Engineering......... Student's signature…………………………………

Field of study.........Civil Engineering......... Advisor's signature…………………………………

Academic year……2002…….

# กิตติกรรมประกาศ


วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ต้อง ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลา ให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ พร้อมทั้งยังช่วยเหลือในการติดต่อและให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ธนะเจริญกิจ และ อาจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี ประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำรวมทั้งแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอแสดงความขอบคุณ ผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามทุกท่านที่ชี้แนะ และมีส่วนร่วมในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และ ครูบาอาจารย์ ทุกท่านที่ให้การดูแล อบรม สั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้กับผู้เขียนตลอดมา

ดำรงค์ฤทธิ์ พรหมณีวัฒน์

# สารบัญ

หน้า

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

## สารบัญตาราง

ตารางประกอบ หน้า

# สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

# สัญญาลักษณ์

| | |
|---|---|
| ALE | Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation |
| $[A]$ | เมทริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายนอกและความเค้นของชิ้นส่วน |
| B | ความกว้างของฐานราก |
| $B'$ | ครึ่งหนึ่งของความกว้างของฐานราก |
| $[B]$ | เมทริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวกเตอร์ของการเคลื่อนตัว |
| CU | ค่าความเชื่อมแน่นของดิน Cohesion $(c)$ |
| DET, $\lvert\ \rvert$ | ค่าสมบูรณ์, Determinant |
| $[D]$ | เมทริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด |
| DIS | ขนาดของการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น $(\Delta S)$ |
| $D_e$ | Isotropic Linear Elastic Stress-Strain Relations |
| $D_p$ | Plastic Stress-Strain Relations |
| $D_{PL}$ | Elasto-Plastic Stress-Strain Relations |
| D , $D_f$ | ระยะความลึกจากฐานรองรับถึงผิวดิน (Depth footing) |
| E | โมดูลัสของการยืดหยุ่นYoung’s modulus |
| EPK0 | Earth pressure coefficient $(K_0)$ |
| $\lVert e_a \rVert$ | ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน |
| $\lVert e^*_{2g} \rVert$ | ขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมทั้งระบบ |
| $\lVert e^*_{2l} \rVert$ | ขนาดของความคลาดเคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วน |
| $F_{cd}$ | Cohesion depth factor |
| $F_{mc}$ | Mohr-Coulomb Failure Criterion |
| $\{F\}$ | เวกเตอร์ของแรงภายนอกกระทำต่อวัตถุ (Body Force Traction) |
| f | ค่าปรับแก้หน่วยแรงภายในของวัตถุ |
| $f_d$ | ฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วน |
| $F_{NEW}$ | ค่าของหน่วยแรงที่กระทำ ณ ช่วงเวลาถัดไป |
| $F_{OLD}$ | ค่าของหน่วยแรงที่มีอยู่เดิม |
| GAMA | หน่วยน้ำหนักของมวลดิน $(\gamma)$ |
| $h_{all}$ | ขนาดของชิ้นส่วนใหญ่สุดที่ยอมให้ |
| $h_{old}$ | ขนาดของชิ้นส่วนเดิม |
| INCS | จำนวนรอบของการคำนวณ |
| $[K]$ | สทิฟเนสเมทริกรวมของระบบ |

## สัญญาลักษณ์ (ต่อ)

| | |
|---|---|
| LSC | การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีการประยุกต์ใช้งานซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับหลักการของ Large Strain |
| M _ F | ค่าของตัวแปรบอกชนิดของการวิเคราะห์ปัญหา |
| N | ฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วน |
| NCE | จำนวนจุดต่อทั้งหมด ณ ขอบเขตของปัญหา |
| Ne | จำนวนชิ้นส่วนในระบบ |
| nip | จำนวนจุดเกาส์ในแต่ละชิ้นส่วน |
| $NP_I$ | หมายเลขจุดรวมชิ้นส่วน I |
| NPTS | จำนวนจุดต่อทั้งหมดในระบบ |
| P | กำลังพหุนามของฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function Polynomial) |
| PHI | มุมเสียดทานภายในของดิน angle of internal friction $(\phi)$ |
| PSI | Dilation angle $(\varphi)$ |
| RUN | ค่าตัวแปรเพื่อใช้ในการคำนวณต่อเนื่อง |
| $q_{net}$ | ค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดินสุทธิภายใต้ฐานรองรับ |
| $q_u$ | ค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดินภายใต้ฐานรองรับ |
| $r_i$ | ค่าพิกัดของแต่ละจุดต่อของชิ้นส่วนจากแกนฐานรากวงกลม |
| S | ค่าการทรุดตัวภายใต้ฐานรองรับ (Settlement) |
| SNAC | Soil Nonlinear Analysis Code |
| SPR | Superconvergent Patch Recovery |
| SSC | การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีการประยุกต์ใช้งานใช้หลักการของ Small Strain |
| S _ F | ค่าของตัวแปรบอกลักษณะรูปร่างของฐานรองรับ |
| T _ F | ค่าของตัวแปรบอกชนิดผิวสัมผัสระหว่างมวลดินกับฐานรองรับ |
| TL | Total Lagrangian Formulation |
| UL | Updated Lagrangian Formulation |
| $\{U\}$ | เวกเตอร์ของการเคลื่อนตัว |
| $\lVert U^*_{2g} \rVert$ | ขนาดของค่าความเครียดของชิ้นส่วนโดยรวมทั้งระบบ |
| $\lVert U^*_{2l} \rVert$ | ขนาดของค่าความเครียดในแต่และชิ้นส่วน |
| VSTOP | ตัวแปรของชุดข้อมูลในการแสดงสถานะของการทำงานของโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน |
| $\eta_a$ | ค่าความความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยรวมที่ยอมให้ |
| $\eta^*_g$ | ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยรวม |
| $\gamma$ | ความเครียดเฉือน |

## สัญญาลักษณ์ (ต่อ)

| | |
|---|---|
| $\varepsilon$ | ความเครียด (Strain) |
| $\Delta S$ | ขนาดของการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น |
| $\Delta\varepsilon^{*}$ | ค่าความเครียด SPR ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ ของชิ้นส่วน |
| $\Delta\varepsilon_{n}^{*}$ | ค่าความเครียด SPR ณ ตำแหน่งจุดต่อ ของชิ้นส่วน |
| $\nu$ | อัตราส่วนปัวซอง Poisson's Ratio |
| $\sigma$ | ความเค้น (Stress) |
| $\Delta\sigma_{h}$ | ค่าของหน่วยแรงที่จุดเกาส์ของชิ้นส่วนเดิม |
| $\Delta\sigma_{n}$ | ค่าของหน่วยแรงที่จุดต่อของชิ้นส่วนเดิม |
| $\Delta\sigma^{+}$ | ค่าของหน่วยแรงที่จุดเกาส์ของชิ้นส่วนใหม่ |
| [ ] | เมทริกสี่เหลี่ยม |
| [ ] | เมทริกแถว |
| { } | คอลัมน์เมทริก |
| $[\ ]^{-1}$ | เมทริกผกผัน (Inverse matrices) |

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันทฤษฎีการวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพี ที่มีใช้ในทางปฏิบัติ เช่น การวิเคราะห์ปัญหาของฐานรากตื้น งานดินขุด จะสมมุติให้การเคลื่อนตัวของมวลดินอยู่ในพิกัดที่เกิดขึ้นไม่มาก ซึ่งสามารถที่จะประยุกต์ใช้ ทฤษฎีความเครียดน้อย (Small Strain Theory) ในการวิเคราะห์แก้ปัญหาได้ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วมวลดินสามารถที่จะเคลื่อนตัวได้มากบนชั้นดินเหนียวอ่อนหรือดินชายฝั่งทะเล ซึ่งก่อให้เกิดค่าของความเครียดและการหมุนของวัตถุ ที่เกินกว่าพิกัดที่ยอมให้ในทางทฤษฎีความเครียดน้อย จึงทำให้ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อต้องการที่จะได้ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ปัญหาของมวลดิน สอดคล้องตามพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง วิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาการวิเคราะห์ปัญหาของการเคลื่อนตัวมากของดิน โดยวิธีการประยุกต์ใช้งาน (Practical Method) เพื่อเป็นแนวทางและกระตุ้นนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาต่าง ๆ ทางวิศวกรรมปฐพีในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป

โดยปกติแล้วในการวิเคราะห์ เพื่อแก้ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิเคราะห์จะทำการป้อนข้อมูลของชิ้นส่วน กำหนดจุดต่อ และ ความหนาแน่นของโครงข่ายของชิ้นส่วนเอง ซึ่งจะทำให้เสียเวลา และ ได้โครงข่ายของชิ้นส่วนที่ยังไม่เหมาะสมเพียงพอในการวิเคราะห์ปัญหา ดังเช่น การวิเคราะห์ปัญหาของฐานรากลึก (Deep Foundation) ซึ่งจะมีความกว้างของขอบเขตของปัญหามาก ถ้ากำหนดโครงข่ายของชิ้นส่วนที่มีขนาดของชิ้นส่วนหยาบมากเกินไปจะทำให้ได้ค่าของผลการคำนวณที่สูงกว่าความเป็นจริง หรือ ถ้ากำหนดโครงข่ายของชิ้นส่วนที่มีขนาดของชิ้นส่วนละเอียดมากเกินไปจะทำให้ไม่ประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ปัญหา ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ การสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ พร้อมทั้งยังหาค่าความคลาดเคลื่อนของปัญหาอันเนื่องมาจากขนาดของชิ้นส่วนที่ยังไม่เหมาะสม และโปรแกรมจะทำการปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วนจนกว่าจะได้ขนาดของชิ้นส่วนตามค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ส่วนหนึ่งของงานวิจัยชุดนี้ เพื่อที่จะสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนให้ได้ตามขนาดที่เหมาะสม และ ประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ปัญหา

และวัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์นี้คือ เพื่อปรับปรุงวิธีการประยุกต์ใช้งานที่ใช้ทฤษฎีความเครียดน้อยเพื่อประยุกต์วิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพี ในสภาวะการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน โดยการปรับปรุงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนในแต่ละวงรอบของการเคลื่อนตัวของปัญหา ตรวจสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเครียดในแต่ละชิ้นส่วนของปัญหา เพื่อแบ่งและปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วนให้ได้ขนาดที่เหมาะสม พร้อมถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงในการคำนวณปัญหาในวงรอบถัดไป

**1.2. งานวิจัยที่ผ่านมา**

ในสองทศวรรษที่ผ่านมา มีความพยายามที่จะใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง ในการแก้ปัญหา กลศาสตร์ต่อเนื่องของวัตถุ (Continuum Mechanics) ในสภาวะของการเคลื่อนตัวมาก (Large Deformation) เช่นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทฤษฎีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของวัตถุในสภาวะของการเคลื่อนตัวมากควบคู่กับ กลศาสตร์ต่อเนื่องของวัตถุมีสามทฤษฎีดังนี้คือ

(1) Eulerian Formulation

(2) Total Lagrangian Formulation (TL)

(3) Updated Lagrangian Formulation (UL)

นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาวิธีการใหม่ที่เรียกว่า Arbitrary Lagrangian–Eulerian Formulation (ALE) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาของมวลดินในสภาวะของการเคลื่อนตัวมาก

Eulerian Formulation คือการวิเคราะห์ปัญหาในสภาวะของการเคลื่อนตัวมากของวัสดุ โดยที่ ค่าเวกเตอร์ของการเคลื่อนตัว จะต้องอ้างอิงหรือเป็นฟังก์ชัน ของพิกัดหลังจากการเคลื่อนตัวของวัตถุ (Deformed Configuration) โดยทั่วไปในทางปฏิบัติ วิธี Eulerian จะเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ปัญหา กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) โดยพิจารณาให้การเคลื่อนตัวของวัสดุไหลผ่านโครงข่ายของชิ้นส่วน และ ขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition) ที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในการวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินที่เป็นแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมวลดินและโครงสร้าง (Soil-Structure Interaction) โครงข่ายของชิ้นส่วนซึ่งใช้จำลองสภาพของมวลดินและขอบเขตของปัญหาจะมีการเปลี่ยนแปลงพร้อมกับการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นถ้าต้องการใช้ วิธี Eulerian ในการวิเคราะห์ปัญหาของมวลดิน จำเป็นต้องมีการสร้างขอบเขตขึ้นมาใหม่ รวมทั้งการปรับปรุง สมการอัตราการเคลื่อนตัวที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะมีความยุ่งยากมากในการประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาของมวลดินทางธรณีเทคนิค

Lagrangian Formulation คือการวิเคราะห์ปัญหาในสภาวะของการเคลื่อนตัวมากของวัตถุ โดยที่ค่าเวกเตอร์ของการเคลื่อนตัวจะต้องอ้างอิงหรือเป็นฟังก์ชันของพิกัดก่อนการเคลื่อนตัวของวัตถุ (Undeformed Configuration) ในการวิเคราะห์ปัญหายังแบ่งแยกออกเป็น 2 รูปแบบคือ Total Lagrangian Formulation (TL) และ Updated Lagrangian Formulation (UL) ซึ่งวิธีทั้งคู่ใช้ในงานที่เป็น Large Displacement, Large Rotation และ Large Strain โดยที่ความแตกต่างระหว่าง 2 วิธี เกิดจากการหาค่าของความเครียดที่เพิ่มขึ้น (Strain Increment) โดยการอ้างถึงช่วงเวลาของตำแหน่งรูปร่างของวัตถุที่เสียรูปไปเทียบกับตำแหน่งรูปร่างของวัตถุที่พิจารณา (Fung, 1977; Chen and Mizuno, 1990)

ตารางที่ 1.1 แสดงการจำแนกการวิเคราะห์ปัญหาของวัสดุแบบไร้เชิงเส้น (Non-Linear Analysis) ซึ่งสรุปลักษณะของปัญหาและรูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของวัตถุในสภาวะของการเคลื่อนตัวมาก (Bathe, 1996)

ในวิธี TL การหาค่าความเครียด ความเค้น และ หน่วยแรงกระทำ ที่เพิ่มขึ้น จะอ้างอิงจากตำแหน่งรูปร่างเริ่มต้นของวัตถุ (Undeformed Configuration) ในทางปฏิบัติจะใช้สำหรับแก้ปัญหาของวัตถุในสภาวะของการเคลื่อนตัวมากแต่มีความเครียดน้อยเพียงเท่านั้น หรือไม่ก็ใช้กฎเกณฑ์ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเครียดที่ซับซ้อน (Complex Stress-Strain Law) ซึ่งเป็นเหตุเป็นผลในการนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหา ของวัสดุที่มีความเครียดมาก ข้อดีของวิธี TL คือสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาอนุภาคของแข็งและโครงสร้างในสภาวะการเคลื่อนตัวมาก ที่ขอบเขตของปัญหามีการเปลี่ยนแปลงพร้อมกับการเคลื่อนตัวของวัตถุอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามข้อเสียของ วิธี TL คือจะมีสทิฟเนสเมทริก (Stiffness matrix) ค่อนข้างที่จะซับซ้อนพอสมควร

ในวิธี UL การหาค่าความเครียดและความเค้นที่เพิ่มขึ้น จะอ้างอิงจากตำแหน่งรูปร่างปัจจุบันของวัตถุ (Current Configuration) โดยที่เมื่อมีหน่วยแรงภายนอกมากระทำ ตำแหน่งรูปร่างของวัตถุจะถูกปรับปรุงพิกัดในแต่ละช่วงเวลาของการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น (Updated Mesh) ข้อดีของวิธี UL คือจะมีสทิฟ-เนสเมทริก (Stiffness matrix) ที่ไม่ซับซ้อนมากเมื่อเทียบกับวิธี TL อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธี UL คือจะเกิดการเสียรูปของโครงข่ายของชิ้นส่วนอย่างมากเมื่อนำมาวิเคราะห์ปัญหาที่มีการเคลื่อนตัวมาก ๆ

รูปที่ 1.1 แสดงข้อเสียของวิธี UL เห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อมวลดินได้รับแรงกดจากฐานรากในสภาวะของการเคลื่อนตัวมาก มวลดินจะเกิดการยกตัว (Heave) และ เคลื่อนตัวออกทางด้านข้าง โดยที่โครงข่ายของชิ้นส่วนที่จำลองสภาพของมวลดินจะเกิดการเสียรูปอย่างมาก พร้อมทั้งยังแสดงผลการของทรุดตัวของมวลดินที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนหรือการแอ่นตัวขึ้นอย่างมากภายในโครงสร้างของฐานราก สาเหตุเนื่องมาจาก ผลของการวิเคราะห์ปัญหาของฐานรากในสภาพยืดหยุ่น (Flexible Foundation) ดังนั้นในงานวิจัยชุดนี้จะวิเคราะห์ปัญหาของฐานรากตื้นที่มีสภาพเป็น Rigid Foundation ซึ่งจะได้ผลของการทรุดตัวของมวลดินในสภาวะของการเคลื่อนตัวมากที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยควบคุมขนาดและทิศทางของการทรุดตัวภายใต้ฐานราก ในการวิเคราะห์ปัญหา

นอกจากนั้นยังมีความพยายามโดยนักวิจัยที่จะแก้ปัญหาและข้อเสียของ Eulerian Formulation และ Lagrangian Formulation โดยเสนอวิธีการใหม่ที่เรียกว่า Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation (ALE) ซึ่งพัฒนาโดย Hirt, etal. (1974) และต่อมาได้มีการปรับปรุงวิธีการ ALE มาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมในรูปแบบต่าง ๆ (Haber, 1984; Liu, etal. 1986; Ghosh, 1990; Ghosh and Kikuchi, 1991)

ในวิธี ALE ปัญหาการเสียรูปภายในโครงข่ายของชิ้นส่วนสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการแยกการเคลื่อนตัวของโครงข่ายของชิ้นส่วนออกจากการเคลื่อนตัวของวัตถุ โดยที่ค่าของความเครียดที่เกิดขึ้นในวัตถุจะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของวัสดุที่ไหลผ่านโครงข่ายของชิ้นส่วน (Eulerian) และคุณสมบัติของวัสดุที่มีการเคลื่อนตัวพร้อมกับโครงข่ายของชิ้นส่วน (Lagrangian) จะแปรผันได้อย่างไร้กฎเกณฑ์ (Arbitrary Rule) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของวัสดุที่นำไปสู่สภาวะของการเคลื่อนตัวมาก อย่างไรก็ตาม ALE มีรูปแบบสมการต่าง ๆ ที่ซับซ้อนมากและยุ่งยากต่อการประยุกต์ใช้ในการเขียนและปรับปรุง

โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยหลายท่านประยุกต์ใช้วิธี ALE นี้เขียนและปรับปรุงโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง

นอกจากนั้นยังมีนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เพื่อแก้ปัญหาของวัตถุซึ่งนำไปสู่สภาวะของการเคลื่อนตัวมาก ที่เรียกว่า วิธีการประยุกต์ใช้งาน (Practical Method) นำเสนอโดย Hu and Randolph (1998) เป็นระเบียบวิธีที่คล้ายคลึงเช่นเดียวกันกับ วิธี ALE โดยการวิเคราะห์จะประกอบด้วย การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดทีละน้อย ๆ (Infinitesimal Strain) ของวัตถุ ประกอบกับการปรับปรุงพิกัดของโครงข่ายของชิ้นส่วน (Updated Mesh) จนกระทั่งโครงข่ายที่ถูกปรับปรุงพิกัดเกิดการเสียรูปไปอย่างมาก แล้วทำการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน ใหม่ให้เป็นระเบียบด้วยการปรับขนาดชิ้นส่วนโดยอัตโนมัติ พร้อมทั้งประมาณหาค่าของความเค้น ณ ตำแหน่งที่ต้องการพิจารณาภายในขอบเขตของปัญหา ข้อดีของวิธีการประยุกต์ใช้งาน คือ สามารถนำหลักการมาปรับปรุงโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ใช้ทฤษฎีความเครียดน้อย เพื่อวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินในสภาวะของการเคลื่อนตัวมาก และให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับ วิธี ALE ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงประโยชน์และความสามารถของ วิธีการประยุกต์ใช้งานนี้ เพื่อนำมาใช้ศึกษาปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดินในวิทยานิพนธ์นี้

**1.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

วิธีการประยุกต์ใช้งานมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

การสร้างสามเหลี่ยมเดอลอเน (Delaunay Triangulation) เป็นวิธีที่เก่าแก่ที่มีจุดประสงค์เพื่อเชื่อมจุดต่อต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็นรูปสามเหลี่ยมจำนวนมากที่ไม่ซ้อนทับกัน จึงสามารถรับประกันได้ว่าชิ้นส่วนที่ได้สร้างขึ้นมาจะไม่ออกนอกขอบเขตของปัญหา เมื่อได้มีผู้พัฒนาวิธีการต่าง ๆ จนกระทั่งสามารถกำหนดและสร้างชิ้นส่วนสามเหลี่ยมภายในขอบเขตของปัญหาได้ ขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วนขึ้นอยู่กับวิธีการสร้างจุดต่อแยกออกมาต่างหาก

การปรับขนาดของชิ้นส่วนโดยวิธีอัตโนมัติ จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีขั้นตอนที่สำคัญคือ การหาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลย เพื่อใช้ลดขนาดของชิ้นส่วนในบริเวณที่มีค่าความคลาดเคลื่อน มากเกินกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องหาค่าความเครียด SPR ของชิ้นส่วน ที่ให้ค่าความเครียดภายในชิ้นส่วนต่อเนื่องกันทั้งระบบ เปรียบเทียบกับผลเฉลยของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งค่าความเครียดในแต่ละชิ้นส่วนจะไม่มีความต่อเนื่องกันทั้งระบบและจะมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละชิ้นส่วน

ประมาณหาค่าของหน่วยแรง ณ ตำแหน่งที่ต้องการพิจารณาภายในขอบเขตของปัญหา โดยการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงหรือค่าของความเชื่อมแน่นของดิน จากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม สู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่ ที่มีอยู่มากมายหลายวิธี ในงานวิจัยชุดนี้ผู้ทำการวิจัยได้เสนอวิธีใหม่ซึ่งง่ายต่อการใช้งานและยังให้ผลลัพธ์ ที่แม่นยำมากกว่าวิธีการที่ผ่าน ๆ มา

### 1.4. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

(1) เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ปัญหาเชิงตัวเลขของมวลดินในสภาวะของการเคลื่อนตัวมาก โดยวิธีการประยุกต์ใช้งาน

(2) เพื่อปรับปรุงวิธีการประยุกต์ใช้งาน ควบคู่กับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ทฤษฎีความเครียดน้อย ให้มีประสิทธิภาพสูงและง่ายต่อการใช้งานจริง

(3) เพื่อทดสอบวิธีการประยุกต์ใช้งาน-ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ปรับปรุงขึ้น โดยนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาของฐานรากต่อเนื่องและฐานรากวงกลม

### 1.5. ขอบเขตของการวิจัย

(1) ศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้งาน (Practical Method) เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหาของมวลดินในสภาวะของการเคลื่อนตัวมาก

(2) ปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยภาษาฟอร์แทรน (Fortran)

(3) วิเคราะห์ปัญหาของฐานรากตื้นที่มีลักษณะเป็นฐานรากต่อเนื่อง และ ฐานรากวงกลม ในสภาวะของการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน โดยใช้แบบจำลอง Elastic-Perfectly Plastic Material และ Mohr - Coulomb Failure Criterion

(4) วิเคราะห์ผลการศึกษา ของฐานรากตื้นในสภาวะของการเคลื่อนตัวมาก และหาข้อจำกัดของวิธี Classical Method ของสมการ Terzaghi 's Bearing Capacity (1943)

(5) หาแนวทางและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับวิธีการวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินโดยวิธีการประยุกต์ใช้งาน เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์แก้ปัญหาทางธรณีเทคนิค ในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป

### 1.6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้วิธีการวิเคราะห์ปัญหาในสภาวะการเคลื่อนตัวมากของมวลดินที่เหมาะสมกับการใช้งานในทางปฏิบัติ

(2) เป็นแนวทางและกระตุ้นในการศึกษาวิเคราะห์ปัญหาของวัสดุใด ๆ ในสภาวะของการเคลื่อนตัวมาก

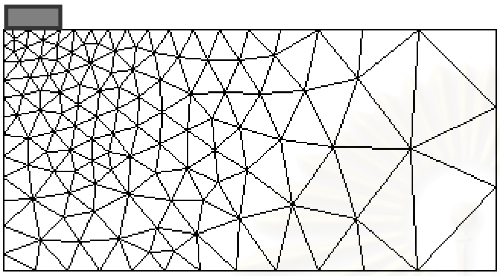
(3) ได้ปรับปรุงโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับวิเคราะห์ปัญหาฐานรากตื้นในสภาวะการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน สามารถนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาต่าง ๆ ทางวิศวกรรมปฐพีในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป

(4) ได้ทราบถึงข้อจำกัดของสมการ Terzaghi 's Bearing Capacity (1943) ที่ได้จาก ทฤษฎีความเครียดน้อย ในการใช้คำนวณกำลังรับน้ำหนักของฐานรากตื้น

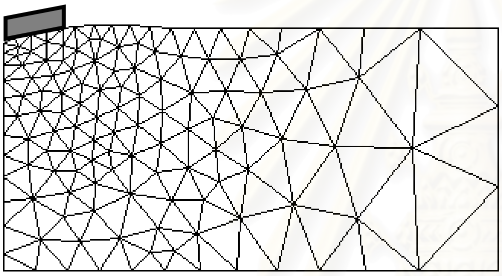
**ตารางที่ 1.1 จำแนกการวิเคราะห์ปัญหาของวัสดุแบบไร้เชิงเส้น**

**Classification of Nonlinear Analysis (Bathe, 1996)**

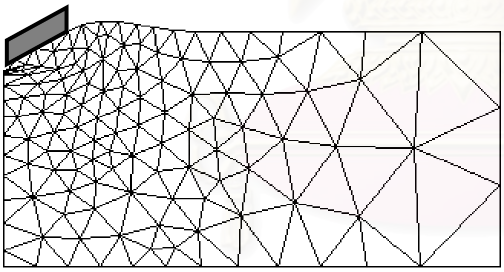
| ชนิดของการวิเคราะห์ | ลักษณะของปัญหาที่ใช้งาน | รูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ | รูปแบบของ ความเค้น และ ความเครียด ที่ใช้ในการวิเคราะห์ |
|---|---|---|---|
| Infinitesimal Displacement | การเคลื่อนตัวของวัตถุ และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในวัตถุ มีค่าน้อย | Materially Nonlinear-Only | Engineering Stress and Strain |
| Large Displacement Large Rotation But Small Strain | วัตถุมีการเคลื่อนตัวมาก โดยที่ การหมุนของวัตถุจะมีค่ามากแต่ความเครียด | Total Lagrangian (TL) | Second Piola-Kirchhoff, Green Lagrangian Strain. |
| | ที่เกิดขึ้นในวัตถุจะมีค่าน้อย | Update Lagrangian (UL) | Cauchy Stress, Almansi Strain. |
| Large Displacement Large Rotation And Large Strain | วัตถุมีการเคลื่อนตัวมาก โดยที่ ค่าการหมุนและค่าความเครียด ของวัตถุ | Total Lagrangian (TL) | Second Piola-Kirchhoff, Green Lagrangian Strain. |
| | ทั้งคู่ต่างก็มีค่ามาก | Update Lagrangian (UL) | Jaumann Stress Rate, Velocity Strain. |



โครงข่ายของชิ้นส่วน(Mesh) ซึ่งจำลองสภาพของมวลดิน
ก่อนมีหน่วยแรงภายนอกมากระทำ



เมื่อมีหน่วยแรงภายนอกมากระทำ
ตำแหน่งรูปร่างของมวลดินจะถูกปรับปรุงพิกัดในแต่ละ
ช่วงเวลาของการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น (Update Mesh)



- แสดงการเสียรูปภายในโครงข่ายของชิ้นส่วน
  เนื่องจากการเคลื่อนตัวอย่างมากของมวลดิน
- รูปร่างของฐานรากเกิดการแอ่นตัวและยืดตัวเพิ่มขึ้น
  ตามการเคลื่อนตัวของโครงข่ายของชิ้นส่วน

**รูปที่ 1.1 ข้อเสียของวิธี Updated Lagrangian Formulation (UL)**

# บทที่ 2

# แนวทางและทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

## 2.1. การวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Zienkiewicz, 1977; Reddy, 1985; Bathe, 1996) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (Elastic) หรือในสภาพพลาสติก (Plastic) หลักการทั่วไปคือจะแบ่งโครงสร้างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ซึ่งเรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ จุดที่ชิ้นส่วนเหล่านี้ มาบรรจบกัน เรียกว่าจุดต่อ (Node) โดยที่จุดต่อเป็นตำแหน่งของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของปัญหา

Equilibrium Equation $[A]$ คือสมการเมทริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงภายนอกและความเค้น ของชิ้นส่วน ดังสมการ

$$\{F\} = [A]\{\sigma\} \tag{2.1}$$

Constitutive Equation $[D]$ คือสมการเมทริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียด ณ บริเวณจุดที่ต้องการพิจารณา ดังสมการ

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \tag{2.2}$$

Compatibility Equation $[B]$ คือสมการเมทริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดบริเวณจุดที่ต้องการพิจารณาและเวกเตอร์ของการเคลื่อนตัวที่บริเวณจุดต่อของชิ้นส่วน ดังสมการ

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\} \tag{2.3}$$

Element Equation $[K]$ คือสมการเมทริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงภายนอกและเวกเตอร์ของการเคลื่อนตัว กระทำที่บริเวณจุดต่อของชิ้นส่วน จากความสัมพันธ์ของสมการต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกได้ดังนี้

$$\{F\} = \left([A][C][B]\right)\{U\} \quad \Longrightarrow \quad \{F\} = [K]\{U\} \tag{2.4}$$

รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถ้าทราบค่าพิกัดต่าง ๆ บริเวณจุดต่อและตำแหน่งของชิ้นส่วน ก็จะสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนและแรงกระทำที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนนั้นได้ โดยทั่วไปความสัมพันธ์จะเขียนอยู่ในรูปของเมทริก เมื่อทราบค่าการเคลื่อนตัวที่จุดต่อ ต่าง ๆ ก็จะสามารถหาค่าของความเครียดได้จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดและค่าการเคลื่อนตัว และในทำนองเดียวกันก็จะสามารถหาค่าความเค้นจาก สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดได้ ตามลำดับ

## 2.2. การสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทน (Fortran Language) ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยวิธีอัตโนมัติซึ่งเป็นการแบ่งโครงสร้างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ภายในขอบเขตของปัญหาที่ได้กำหนดไว้ และง่ายต่อการควบคุมความหนาแน่นของโครงข่ายของชิ้นส่วน และจะได้รูปร่างของชิ้นส่วนที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อีกด้วย (Ho-Le, 1988)

โดยขั้นตอนแรก จะกำหนดพิกัดขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่จะนำมาวิเคราะห์ จากนั้นโปรแกรมก็จะทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของโครงข่ายของชิ้นส่วนได้ตามที่ต้องการ แล้วทำการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยเชื่อมจุดต่อ (Node) ต่าง ๆ ให้เป็นชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสามจุดต่อ โดยวิธี Delaunay Triangulation หลังจากนั้นโปรแกรมก็จะทำการปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing) และขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ คือการเพิ่มระดับขั้นความเสรีของชิ้นส่วน (Transformation) จากชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อเป็นชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมหกจุดต่อ แล้วแสดงผลของหมายเลขและพิกัดของจุดต่อเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

## 2.3. โครงข่ายสามเหลี่ยมเดอลอเน (Delaunay Triangulation)

ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ วิธีการสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมเดอลอเน (Delaunay Triangulation) ในการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน แบบไร้โครงสร้าง (Unstructured Mesh) เป็นการแบ่งโครงสร้างของปัญหา ออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ โดยการเชื่อมจุดต่อ ต่าง ๆ ภายในขอบเขตของปัญหา ให้เป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างสามเหลี่ยมสามจุดต่อ และมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยที่จุดต่อภายในขอบเขตของปัญหาจะถูกกำหนดและควบคุม โดยสมการของ Mesh Density Function และ Mesh Smoothing โปรแกรมจะเชื่อมต่อจุดต่าง ๆ อย่างอิสระภายใต้เงื่อนไขของ Delaunay Triangulation ที่ได้ถูกกำหนดไว้ (Sloan, 1987, 1993)

รูปที่ 2.2 การสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมเดอลอเน ข้อดีในการใช้โครงข่ายคือโปรแกรมจะพยายามเชื่อมจุดต่อของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสามจุดต่อโดยอัตโนมัติ ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าด้วยขนาดของชิ้นส่วน

สามเหลี่ยม จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นมุมป้านหรือมุมแหลม มากจนเกินไป และส่วนประกอบของ สามเหลี่ยมเดอลอเน แสดงไว้ ดัง รูปที่ 2.3

### 2.4. ฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วน (Mesh Density Function)

การที่จะได้ผลการวิเคราะห์รวดเร็วที่สุดและถูกต้องแม่นตรงสำหรับการคำนวณด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะต้องมีการควบคุมความหนาแน่นของโครงข่ายของชิ้นส่วน (Hu and Randolph, 1998a) ณ บริเวณของขอบเขตใดซึ่งมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือหน่วยแรงในชิ้นส่วน ที่มีความแปรผันหรือมีค่าสูง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีความหนาแน่นของโครงข่ายของชิ้นส่วน ณ บริเวณขอบเขตนั้นสูง และ ณ บริเวณของขอบเขตใดที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือหน่วยแรงในชิ้นส่วนที่มีความแปรผันหรือมีค่าน้อย บริเวณนั้นก็จะมีความหนาแน่นของโครงข่ายของชิ้นส่วน น้อยลงตามลำดับ รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างโครงข่ายของชิ้นส่วนที่ไม่ได้และได้ควบคุมความหนาแน่นของชิ้นส่วน

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วนซึ่งเสนอโดย Hu and Randolph (1998a) ดังสมการต่อไปนี้

$$f_d = Ae^{Bd} \tag{2.5}$$

โดยที่ $f_d$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วน
$d$ คือ ระยะทางจากพิกัดอ้างอิง $(x_0, y_0)$ ถึงพิกัดที่พิจารณา
$A$ และ $B$ คือ ค่าคงที่

$$B = \frac{\log(F_2 / F_1)}{(D_2 - D_1)} \tag{2.6}$$

$$A = \frac{F_1}{e^{(B*D_1)}} \tag{2.7}$$

โดยที่ $F_1$ และ $F_2$ คือ ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วน ณ ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
$D_1$ และ $D_2$ คือ ระยะทางจากพิกัดอ้างอิง $(x_0, y_0)$ ถึงพิกัดที่พิจารณา ณ ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

### 2.5. การปรับปรุงรูปร่างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)

การปรับปรุงรูปร่างโครงข่ายของชิ้นส่วน เพื่อหาตำแหน่งพิกัดของจุดต่อที่เหมาะสม จะนำมาซึ่งรูปร่างของชิ้นส่วน ที่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ บ่อยครั้งในการสร้างชิ้นส่วนสามเหลี่ยมโดยวิธีอัตโนมัติที่ใช้วิธี Delaunay Triangulation เชื่อมจุดต่อ (Node) ของโครงข่ายของชิ้นส่วน ยังคงได้รูปร่างของชิ้นส่วนที่ไม่เหมาะสมเพียงพอในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในกรณีนี้จะต้องมีการปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วนให้มีรูปร่างที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยใช้วิธี Laplacian smoothing ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากในการปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วนสามเหลี่ยม (Herman, 1976; Hu and Randolph, 1998a)

หลักการของ Laplacian Smoothing คือพยายามปรับปรุงตำแหน่งของจุดต่ออ้างอิงให้อยู่ในตำแหน่งจุดศูนย์กลาง ของจุดต่อที่ล้อมรอบ จุดต่ออ้างอิง จากสมการดังต่อไปนี้

$$x_i = \frac{1}{2N_i}\sum_{n=1}^{N_i}\left(x_{n_j} + x_{n_k}\right); \; i = 1 \rightarrow I \tag{2.8}$$

$$y_i = \frac{1}{2N_i}\sum_{n=1}^{N_i}\left(y_{n_j} + y_{n_k}\right); \; i = 1 \rightarrow I \tag{2.9}$$

โดยที่ $x_i, y_i$ คือ พิกัดของจุดต่ออ้างอิง $i$ ที่มีการปรับปรุงพิกัดโดยวิธี Laplacian Smoothing

$N_i$ คือ จำนวนของชิ้นส่วนทั้งหมดรอบจุดต่ออ้างอิง $i$ ที่จะปรับปรุงพิกัด

$I$ คือ จำนวนจุดต่อทั้งหมดภายในขอบเขตโครงสร้างของปัญหา

$n_k, n_j$ คือ จุดต่อที่อยู่ล้อมรอบ จุดอ้างอิง $i$ หรือจุดต่อข้างเคียงของชิ้นส่วน $n$

รูปที่ 2.5 แสดงพิกัดของจุดต่อ $i$ และพิกัดข้างเคียง และ รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างโครงข่ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและที่ได้ปรับปรุงรูปร่าง

### 2.6. แบบจำลองไอโซพาราเมทริกของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ

หลักสำคัญของวิธีไอโซพาราเมทริกคือจะใช้ฟังก์ชันรูปร่างเป็นตัวกำหนดรูปร่างหรือพิกัดของชิ้นส่วนและเป็นตัวกำหนดการกระจัดของชิ้นส่วนด้วย การหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ต่าง ๆ ด้วยวิธีไอโซพาราเมทริกจะใช้พิกัดธรรมชาติ $L_1$, $L_2$, $L_3$ เป็นตัวกำหนดพิกัดของจุดต่อและจุดเกาส์ของชิ้นส่วน ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับพิกัดรวมหรือพิกัดจริงของชิ้นส่วน $x$, $y$ ของระบบเป็นไปตามเมทริกถ่ายโอน

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โครงข่ายของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ (6-Noded Triangular element) ทิศทางของจุดต่อและจุดเกาส์ของชิ้นส่วนเรียงทวนเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 2.7

สามารถเขียนฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function) ของชิ้นส่วน ได้ดังนี้

$$N_1 = L_1(2L_1 - 1) \qquad N_2 = 4L_1L_2$$

$$N_3 = L_2(2L_2 - 1) \qquad N_4 = 4L_2L_3$$

$$N_5 = L_3(2L_3 - 1) \qquad N_6 = 4L_3L_1 \tag{2.10}$$

ฟังก์ชันรูปร่าง N เป็นฟังก์ชันกำลังสอง บางครั้งเรียกชิ้นส่วนของสามเหลี่ยมชนิดนี้ว่าเอลิเมนต์สามเหลี่ยมกำลังสอง

สามารแสดงค่าพิกัดธรรมชาติ ณ ตำแหน่งเกาส์ของชิ้นส่วนได้ดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| ตำแหน่งเกาส์ที่1 : | $L_1$ = 0.8168475729804590 | $L_2$ = 0.0915762135097710 |
| ตำแหน่งเกาส์ที่2 : | $L_1$ = 0.4459484909159650 | $L_2$ = 0.4459484909159650 |
| ตำแหน่งเกาส์ที่3 : | $L_1$ = 0.0915762135097710 | $L_2$ = 0.8168475729804590 |
| ตำแหน่งเกาส์ที่4 : | $L_1$ = 0.1081030181680700 | $L_2$ = 0.4459484909159650 |
| ตำแหน่งเกาส์ที่5 : | $L_1$ = 0.0915762135097710 | $L_2$ = 0.0915762135097710 |
| ตำแหน่งเกาส์ที่6 : | $L_1$ = 0.4459484909159650 | $L_2$ = 0.1081030181680700 |

โดยที่ $L_3 = 1 - L_1 - L_2$

$L_1, L_2, L_3$ คือพิกัดธรรมชาติ (Local Coordinate) ของชิ้นส่วน มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

$weight_i$ ณ ตำแหน่งเกาส์ที่ 1, 3, 5 เท่ากับ 0.0549758718276610

$weight_i$ ณ ตำแหน่งเกาส์ที่ 2, 4, 6 เท่ากับ 0.1116907948390055

$weight_i$ คือค่าตัวคูณตำแหน่งเกาส์ของชิ้นส่วนในการหาค่าอินทิเกรทเชิงตัวเลข

## 2.7. แบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหา

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองความเค้นความเครียด (Constitutive Equation) แบบ Elastic-Perfectly Plastic Material โดยกฎการวิบัติของดินใช้แบบ Mohr-Coulomb Failure Criterion วิเคราะห์ปัญหาของมวลดินเหนียวในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition)

### 2.7.1. ค่าของหน่วยแรงที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Stress Invariant)

ในปัญหา 2 มิติ (Plane Strain Problem) สภาวะค่าของหน่วยแรง ณ บริเวณจุด ใด ๆ ของวัตถุที่ถูกแรงกระทำ สามารถแสดงค่าของหน่วยแรง ให้อยู่ในแนวแกนพิกัด Cartesian จะได้ค่าของหน่วยแรง (Stress Tensor) ดังนี้

$$\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\} \tag{2.11}$$

และสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของค่าหน่วยแรงในแนวแกนหลัก (Principle Stress) ที่กระทำบนระนาบ Orthogonal ดังนี้

$$\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\} \tag{2.12}$$

การหา ค่าของหน่วยแรงในแนวแกนหลัก (Principle Stress) ในจุดที่ต้องการพิจารณาจากแนวแกนพิกัด Cartesian เพื่อความสะดวกจะอาศัยหลักของความสัมพันธ์ของค่าคงที่ (Invariants) โดยที่ค่าคงที่ $(\sigma_m, J_2, \theta)$ มีความสัมพันธ์กับสภาวะค่าของหน่วยแรงในแนวแกนพิกัด Cartesian ดังนี้

$$\sigma_m = \frac{1}{3}\left(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}\right) \tag{2.13}$$

$$s_x = \sigma_{xx} - \sigma_m \tag{2.14}$$

$$s_y = \sigma_{yy} - \sigma_m \tag{2.15}$$

$$s_z = \sigma_{zz} - \sigma_m \tag{2.16}$$

$$J_2 = \frac{1}{2}\left(s_x^2 + s_y^2 + s_z^2\right) + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2 \tag{2.17}$$

$$J_3 = s_x s_y s_z - s_x\tau_{yz}^2 - s_y\tau_{zx}^2 - s_z\tau_{xy}^2 + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} \tag{2.18}$$

$$\theta = \frac{1}{3}\arcsin\left(\frac{-4.5J_3}{J_2^{3/2}\sqrt{3}}\right) \tag{2.19}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\sigma_m = \frac{1}{3}\left(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}\right) \tag{2.20}$$

$$\overline{\sigma} = \sqrt{J_2} \tag{2.21}$$

ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าของหน่วยแรงในแนวแกนหลัก (Principle Stress) และ ค่าคงที่ (Invariants) ได้ดังนี้

$$\sigma_1 = \sigma_m + \frac{2}{3}\overline{\sigma}\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{2.22}$$

$$\sigma_2 = \sigma_m + \frac{2}{3}\overline{\sigma}\sin\theta \tag{2.23}$$

$$\sigma_3 = \sigma_m + \frac{2}{3}\overline{\sigma}\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{2.24}$$

**2.7.2. Mohr-Coulomb Failure Criterion**

ขั้นตอนแรกโดยการเขียนหน่วยแรงในแนวแกนหลัก (Principal stresses) จากรูปร่างเรขาคณิตของ Mohr Circle ดังรูปที่ 2.8 ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\sin\phi - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - c\cos\phi = 0 \tag{2.25}$$

นำค่า $\sigma_1$ และ $\sigma_3$ จากสมการ 2.22, 2.24 แทนค่าลงในสมการ 2.25 จะสมการความสัมพันธ์ของ Mohr-Coulomb Failure Criterion ดังนี้

$$F_{mc} = \sigma_m \sin\phi + \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}\left(\cos\theta - \frac{\sin\theta\sin\phi}{\sqrt{3}}\right) - c\cos\phi \tag{2.26}$$

โดยที่ $c$ คือค่าความเชื่อมแน่นของดิน

$\sigma_m$ คือ Mean Stress

$\bar{\sigma}$ คือค่า Deviator Stress

**2.7.3. Incrementally Linearized Elasto Plastic Model**

วิธีความเค้นเริ่มต้นคือการหาค่าของหน่วยแรงเริ่มต้นภายในขอบเขตของปัญหาสำหรับ Linear - Elasticity มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นของวัตถุเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\Delta\sigma = D_e \Delta\varepsilon \tag{2.27}$$

และสำหรับ Elastic Plasticity จะมีสมการคือ

$$\Delta\sigma = D_{PL} \Delta\varepsilon \tag{2.28}$$

เมื่อ $$D_{PL} = D_e - D_P \tag{2.29}$$

สำหรับในช่วงที่ว่าด้วยกฎของวัสดุที่เป็น Perfect Plasticity สมมุติว่ามีความเค้น ณ จุดหนึ่งเข้าสู่พื้นผิววิบัติ (Failure Surface) และต่อมาจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มค่าของความเค้น ณ บริเวณจุดนั้นโดยจะขยายขอบเขตของพื้นผิววิบัติ แต่ยังคงมีความสัมพันธ์ภายใต้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma}\Delta\sigma = 0 \tag{2.30}$$

ยอมรับสำหรับความเป็นไปได้ของสมการ Associated Flow Rule ในการเพิ่มขึ้นของความเครียดพลาสติก

$$\Delta\varepsilon_{P} = \lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \tag{2.31}$$

จากความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดสามารถนำมาหาค่าของ $\lambda$ ได้ดังนี้

$$\Delta\varepsilon_{PL} = \Delta\varepsilon_{e} + \Delta\varepsilon_{P} \tag{2.32}$$

$$\Delta\varepsilon_{PL} = D_e^{-1}\Delta\sigma + \lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \tag{2.33}$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^{T} D_e \Delta\varepsilon_{PL} = \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^{T} \Delta\sigma + \lambda \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^{T} D_e \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \tag{2.34}$$

จากความสัมพันธ์ ในสมการ 2.30 ดังนั้น $\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^{T} \Delta\sigma = 0$

$$\lambda = \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^{T} D_e \Delta\varepsilon_{PL}}{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^{T} D_e \frac{\partial Q}{\partial \sigma}} \tag{2.35}$$

แสดงสมการของการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้น ที่แปรผันตามค่าตัวแปรของ $D_e$ ได้ดังนี้

$$\Delta\sigma = D_e \left( \Delta\varepsilon_{PL} - \lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right) \tag{2.36}$$

แทนค่า สมการ 2.35 ลงในสมการ 2.36 จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\Delta\sigma = D_e \left( \Delta\varepsilon_{PL} - \frac{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^{T} D_e \Delta\varepsilon_{PL}}{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^{T} D_e \frac{\partial Q}{\partial \sigma}} \right) \tag{2.37}$$

$$\Delta\sigma = \left( D_e - \frac{D_e \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D_e}{\left( \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D_e \frac{\partial Q}{\partial \sigma}} \right) \Delta\varepsilon_{PL} \tag{2.38}$$

เขียนความสัมพันธ์ของ $D_p$ ให้อยู่ในรูปสมการของ $D_e$ ได้ดังนี้

$$D_p = \frac{D_e \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D_e}{\left( \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D_e \frac{\partial Q}{\partial \sigma}} \tag{2.39}$$

แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกระทำต่อวัตถุกับค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นในสภาวะของการเคลื่อนตัวแบบพลาสติกในการเขียนโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ดังนี้

$$P_b^i = \sum_{elements}^{all} \int B^T (D_p \Delta\varepsilon)^i \, d(element) \tag{2.40}$$

รูปที่ 2.10 ช่วงแรกวัตถุจะอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น และจากการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงกระทำต่อวัตถุเป็นเหตุให้ ณ บริเวณบางแห่งของวัตถุ ได้เข้าสู่สภาวะพลาสติกเป็นครั้งแรก ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีค่าปรับแก้หน่วยแรงภายในของวัตถุ ดังสมการ

$$D_p = fD_p \tag{2.41}$$

เมื่อ
$$f = \frac{F_{NEW}}{F_{NEW} - F_{OLD}} = FAC \tag{2.42}$$

$f$ คือ ค่าปรับแก้หน่วยแรงภายในของวัตถุ

$F_{OLD}$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่มีอยู่เดิม

$F_{NEW}$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่กระทำ ณ ช่วงเวลาถัดไป

### 2.8. โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SNAC (Soil Nonlinear Analysis Code)

ในวิทยานิพนธ์นี้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาใช้ตามหลักเกณฑ์ของ SNAC (Soil Nonlinear Analysis Code) วิเคราะห์ปัญหาของมวลดิน 2 มิติ ในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained - Analysis) โดยกำหนดเงื่อนไขของจุดต่อให้มีค่าการทรุดตัวคงที่ภายใต้ฐานรองรับ และจากการคำนวณในแต่ละช่วงของการเพิ่มค่าการทรุดตัว ถ้าค่าของหน่วยแรงบนจุดเกาส์ออกจากระนาบวิบัติ (Yield Surface)

ของวัสดุ โปรแกรมจะทำการปรับแก้ค่าของหน่วยแรงกลับเข้ามาสู่ระนาบวิบัติ (Yield Surface) ของวัสดุได้โดยอัตโนมัติ (Abbo and Sloan, 1997)

นอกจากนี้โปรแกรม SNAC ยังสามารถวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินในสภาพระบายน้ำ (Drained-Analysis) และในสภาวะการอัดตัวคายน้ำของมวลดิน (Consolidation) จากนั้นยังมีการพัฒนาโปรแกรม SNAC ใช้งานในแบบจำลองอื่น ๆ อีกเช่น แบบจำลอง Modified Cam clay เป็นต้น

แบบจำลองของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา จะขึ้นอยู่กับชนิดของแบบจำลองของมวลดินที่ใช้งานด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ (6–Nodes Triangular Element) วิเคราะห์ปัญหาของแบบจำลองมวลดิน Elasto-plastic Material ตามกฎเกณฑ์ของ Associated Flow Rule และในการวิเคราะห์ปัญหาเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้พิกัดธรรมชาติหกจุดเกาส์ (6-Gauss Points) ภายในชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ

### 2.9. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Constitutive Equation) ของวัตถุแบบ Linear Elastic

กำหนดให้ $D_e$ (Elastic Stress-Strain Matrices) คือค่าของเมทริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัตถุในสภาวะยืดหยุ่น (Timoshenko and Goodier, 1951) สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาแบบสองมิติสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Problem) สามารถหาค่า $D_e$ จากความสัมพันธ์ของสมการ $\{\sigma\} = [D]\,\{\varepsilon\}$ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 & \nu \\ \nu & 1-\nu & 0 & \nu \\ 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2} & 0 \\ \nu & \nu & 0 & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} \qquad (2.43)$$

และ สำหรับปัญหาสองมิติเคลื่อนตัวในระนาบ (Plane Strain Problem) สามารถหาค่า $D_e$ จากความสัมพันธ์ของสมการ $\{\sigma\} = [D]\,\{\varepsilon\}$ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 & \nu \\ \nu & 1-\nu & 0 & \nu \\ 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2} & 0 \\ \nu & \nu & 0 & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} \qquad (2.44)$$

ดังนั้นค่า $D_e$ จากกรณีปัญหาสองมิติสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Problem) และกรณีปัญหาสองมิติเคลื่อนตัวในระนาบ (Plane Strain Problem) มีค่าดังนี้

$$[D_e] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 & \nu \\ \nu & 1-\nu & 0 & \nu \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ \nu & \nu & 0 & 1-\nu \end{bmatrix} \tag{2.45}$$

โดยที่ $E$ คือค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Young's modulus)

$\nu$ คืออัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

$\{\sigma\}$ คือเวกเตอร์ของค่าความเค้น (Stress)

$\{\varepsilon\}$ คือเวกเตอร์ของค่าความเครียด (Strain)

**2.10. ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนตัว (Compatibility Equation)**

จากความสัมพันธ์ $\{\varepsilon\} = [B]\{U\}$ สามารถหาค่า $[B]$ คือค่าของเมทริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวกเตอร์ของการเคลื่อนตัวของวัตถุ (Smith and Griffiths, 1998)

โดยที่งานวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ความสัมพันธ์ ของค่าความเครียดและการเคลื่อนตัว จากทฤษฎีความเครียดน้อย (Small Strain)

กรณีปัญหาสองมิติสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Problem) สามารถหาค่า $[B]$ เขียนอยู่ในรูปของเมทริก ขนาด $(4 \text{ x } 12)$ ได้ดังนี้

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial r} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial r} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial r} & 0 & \frac{\partial N_5}{\partial r} & 0 & \frac{\partial N_6}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_5}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_6}{\partial z} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_1}{\partial r} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial r} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial r} & \frac{\partial N_4}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial r} & \frac{\partial N_5}{\partial z} & \frac{\partial N_5}{\partial r} & \frac{\partial N_6}{\partial z} & \frac{\partial N_6}{\partial r} \\ \frac{N_1}{r} & 0 & \frac{N_2}{r} & 0 & \frac{N_3}{r} & 0 & \frac{N_4}{r} & 0 & \frac{N_5}{r} & 0 & \frac{N_6}{r} & 0 \end{bmatrix} \tag{2.46}$$

กรณีปัญหาสองมิติเคลื่อนตัวในระนาบ (Plane Strain Problem) สามารถหาค่า $[B]$ เขียนอยู่ในรูปของเมทริก ขนาด $(4 \text{ x } 12)$ ได้ดังสมการที่ 2.47

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_5}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_6}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_5}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_6}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & \frac{\partial N_5}{\partial y} & \frac{\partial N_5}{\partial x} & \frac{\partial N_6}{\partial y} & \frac{\partial N_6}{\partial x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.47}$$

โดยที่ $r = N_1 r_1 + N_2 r_2 + N_3 r_3 + N_4 r_4 + N_5 r_5 + N_6 r_6$ (2.48)

$N_i$ คือ ฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ

$r_i$ คือ พิกัดของแต่ละจุดต่อของชิ้นส่วนจากแกนฐานรากวงกลม

## 2.11. การใช้วิธี SPR ประมาณหาค่าความเครียด ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ ของชิ้นส่วน

การประมาณค่าความคลาดเคลื่อน จะประมาณจากผลเฉลยของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลเฉลยที่แม่นยำกว่า หน่วยแรงที่ได้จากผลเฉลยของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในแต่ละชิ้นส่วนจะไม่มีความต่อเนื่องกันทั้งระบบและจะมีความแต่ต่างกันไปในแต่ละชิ้นส่วน งานวิทยานิพนธ์นี้จะประมาณหาค่าความเครียด ที่ต้องการพิจารณา ในแต่ละชิ้นส่วนให้มีความต่อเนื่องกันทั้งระบบโดยวิธี (SPR) Superconvergent Patch Recovery of Strain (Zienkiewicz and Zhu, 1992a, 1992b: Hu and Randolph, 1998b)

จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายในโครงข่ายชิ้นส่วน ตำแหน่งจุดเกาส์ จะมีค่าของหน่วยแรงที่แม่นยำมากกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้นเราสามารถประมาณหาค่าความเครียด ณ จุดต่อของชิ้นส่วนได้โดยประมาณค่าความเครียด ของกลุ่มจุดเกาส์ที่มีอิทธิพลรอบจุดต่อนั้น ดังรูปที่ 2.11

ข้อดีของวิธี SPR คือ สามารถลดปัญหาของการไม่ต่อเนื่องของค่าความเครียด ณ บริเวณจุดต่อของชิ้นส่วนและด้านประชิดกันของแต่ละชิ้นส่วน และ สามารถคำนวณความเครียด SPR ณ จุดที่ต้องการพิจารณาภายใน Element Patch ที่สนใจได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta\varepsilon_n^* = Pa \tag{2.49}$$

โดยที่ $\Delta\varepsilon_n^*$ คือค่าความเครียด SPR ณ ตำแหน่งจุดต่อ ของชิ้นส่วน

$P$ คือ ค่าพิกัด ของกลุ่มจุดเกาส์ที่มีอิทธิพลรอบจุดต่อที่ต้องการทราบค่า

$a$ คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของกลุ่มจุดเกาส์ที่มีอิทธิพลรอบจุดต่อที่ต้องการทราบค่า

สำหรับปัญหาสองมิติของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อจะใช้ค่า P และ a ดังนี้

$$P = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 \end{bmatrix} \tag{2.50}$$

$$a = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \end{bmatrix}^T \tag{2.51}$$

จากหลักการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดคือต้องหาตัวแปร a ในกรณี 2 มิติ เศษตกค้างของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าความเครียดที่ได้จากผลเฉลยของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับ ค่าความเครียด SPR ที่ประมาณการ ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ ตามสมการต่อไปนี้

$$F(a) = \sum_{i=1}^{n} \left[\Delta\varepsilon_h(x_i, y_i) - \Delta\varepsilon^*(x_i, y_i)\right]^2 \tag{2.52}$$

$$F(a) = \sum_{i=1}^{n} \left[\varepsilon_h(x_i, y_i) - P(x_i, y_i)a\right]^2 \tag{2.53}$$

โดยที่ $n = mk$ คือ จำนวนทั้งหมดของจุดเกาส์ของ Element Patch

$(x_i, y_i)$ คือ พิกัดของกลุ่มจุดเกาส์ของชิ้นส่วน

$\Delta\varepsilon_h$ คือ ของค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น ณ จุดเกาส์ จากการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

$k$ คือ จำนวนของจุดเกาส์ในแต่ละชิ้นส่วน

$m$ คือ จำนวนของชิ้นส่วนทั้งหมด (Element Patch) ณ จุดรวมชิ้นส่วน

การหาค่าคงตัวเพื่อให้ได้เศษตกค้างต่ำสุด ทำได้โดยกำหนดค่าอนุพันธ์ของเศษตกค้างให้เท่ากับศูนย์ โดยหาอนุพันธ์เทียบกับค่าคงตัวและจะได้สมการซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนของค่าคงตัวดังนี้

$$\sum_{i=1}^{n} P^T(x_i, y_i)P(x_i, y_i)a = \sum_{i=1}^{n} P^T(x_i, y_i)\varepsilon_h(x_i, y_i) \tag{2.54}$$

จากสมการที่ 2.54 เขียนแสดงอยู่ในรูปของเมทริกได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum y_i & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum y_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i^3 & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i y_i^2 \\ \sum y_i & \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i y_i^2 & \sum y_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i^4 & \sum x_i^3 y_i & \sum x_i^2 y_i^2 \\ \sum x_i y_i & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i y_i^2 & \sum x_i^3 y_i & \sum x_i^2 y_i^2 & \sum x_i y_i^3 \\ \sum y_i^2 & \sum x_i y_i^2 & \sum y_i^3 & \sum x_i^2 y_i^2 & \sum x_i y_i^3 & \sum y_i^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum \varepsilon_{hi} \\ \sum x_i \varepsilon_{hi} \\ \sum y_i \varepsilon_{hi} \\ \sum x_i^2 \varepsilon_{hi} \\ \sum x_i y_i \varepsilon_{hi} \\ \sum y_i^2 \varepsilon_{hi} \end{Bmatrix}$$

$$[A]\{a\} = \{b\} \tag{2.55}$$

หลังจากคำนวณหาค่าคงตัว $a$ สามารถคำนวณหาค่าความเครียด SPR ที่จุดต่อของชิ้นส่วนภายในกลุ่มจุดเกาส์ที่มีอิทธิพลรอบจุดต่อนั้น ได้โดยการแทนค่าพิกัดที่จุดต่อที่ต้องการทราบค่า ดังนี้

$$\Delta\varepsilon_n^* = Pa \tag{2.56}$$

$P$ คือ ค่าพิกัด ของจุดต่อที่ต้องการทราบค่า ภายในกลุ่มจุดเกาส์ที่มีอิทธิพลรอบจุดต่อ

การหาค่าความเครียด SPR ที่จุดต่อของชิ้นส่วน จะมีบางจุดต่อที่มีการหาค่าซ้ำกันกับจุดรวมชิ้นส่วนอื่นก็จะนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาค่าหาค่าเฉลี่ย หลังจากทราบค่าความเครียด SPR ที่จุดต่อของชิ้นส่วนทั้งระบบในแบบจำลองแล้ว สามารถหาค่าความเครียด SPR ที่ตำแหน่งเกาส์ ในแต่ละชิ้นส่วน จากฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วน (Shape Function) ดังนี้

$$\Delta\varepsilon^* = N_1\Delta\varepsilon_{n1} + N_2\Delta\varepsilon_{n2} + N_3\Delta\varepsilon_{n3} + N_4\Delta\varepsilon_{n4} + N_5\Delta\varepsilon_{n5} + N_6\Delta\varepsilon_{n6} \tag{2.57}$$

$$\Delta\varepsilon^* = \sum_{i=1}^{nip} N_i\Delta\varepsilon_{ni}^* \tag{2.58}$$

$N$ คือ ฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วน

$\Delta\varepsilon^*$ คือค่าความเครียด SPR ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ ของชิ้นส่วน

เพื่อหลีกเลี่ยงการหาค่าของเมทริก $A$ ในบางกรณีที่ไม่สามารถหาค่าได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงจำกัดขอบเขตของกลุ่มชิ้นส่วน แล้วหาค่าพิกัดอ้างอิง ใช้ในการคำนวณหาเมทริก $A$ ดังสมการ

$$x_i' = -1 + 2\frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{2.59}$$

$$y_i' = -1 + 2\frac{y_i - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \tag{2.60}$$

$x_{max}$ และ $x_{min}$ คือ ค่าที่มากและน้อยที่สุด ในกลุ่มของชิ้นส่วน ตามแนวแกนนอน

$y_{max}$ และ $y_{min}$ คือ ค่าที่มากและน้อยที่สุด ในกลุ่มของชิ้นส่วน ตามแนวแกนตั้ง

$x_i'$ และ $y_i'$ คือ พิกัดอ้างอิงตามแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1

**2.12. การประมาณค่าความคลาดเคลื่อน (Error Estimation)**

ในงานวิทยานิพนธ์นี้การประมาณค่าความคลาดเคลื่อน (Error Estimation) ได้หลักการที่นำเสนอโดย Zienkiewicz and Zhu (1992b) โดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการนำมาใช้ในการคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนที่เหมาะสมของระบบในการวิเคราะห์ ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากหลักการที่นำเสนอโดย Zienkiewicz and Zhu (1992b) ค่าความเครียดในแต่และชิ้นส่วน $\|U^*_{21}\|$ หาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\|U^*_{21}\| = \left(\int_\Omega (\Delta\varepsilon_h)^T (\Delta\varepsilon_h) d\Omega\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.61}$$

$$\|U^*_{21}\| = \left(\sum_{i=1}^{nip} (\Delta\varepsilon_h)_i^T (\Delta\varepsilon_h)_i \ * \ \mathtt{det}_i * \ \mathtt{weight}_i\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.62}$$

nip คือ จำนวนจุดเกาส์ในแต่ละชิ้นส่วน

ค่าความคลาดเคลื่อน $\|e^*_{21}\|$ คือผลต่างระหว่าง ขนาดของค่าความเครียดที่ได้จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ ขนาดของค่าความเครียดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี SPR ของแต่ละชิ้นส่วน ดังสมการ

$$\|e^*_{21}\| = \left(\int_\Omega (\Delta\varepsilon_h - \Delta\varepsilon^*)^T (\Delta\varepsilon_h - \Delta\varepsilon^*) d\Omega\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.63}$$

$$\|e^*_{21}\| = \left(\sum_{i=1}^{nip} (\Delta\varepsilon_h - \Delta\varepsilon^*)_i^T (\Delta\varepsilon_h - \Delta\varepsilon^*)_i \ * \ \mathtt{det}_i * \ \mathtt{weight}_i\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.64}$$

ดังนั้นการคำนวณขนาดของความเครียดและความคลาดเคลื่อนโดยรวมทั้งระบบคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\|U^*_{2g}\| = \left(\sum_{i=1}^{Ne} \|U^*_{21}\|^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.65}$$

$$\|e^*_{2g}\| = \left(\sum_{i=1}^{Ne} \|e^*_{21}\|^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.66}$$

$$\eta^*_g = \frac{\|e^*_{2g}\|}{\|U^*_{2g}\|} \tag{2.67}$$

โดยที่ $\|U_{2g}^{*}\|$ คือ ขนาดของค่าความเครียดของชิ้นส่วนโดยรวมทั้งระบบ

$\|e_{2g}^{*}\|$ คือ ขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมทั้งระบบ

$\eta_{g}^{*}$ คือ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยรวม

Ne คือ จำนวนชิ้นส่วนในระบบ

จากค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดที่ได้นี้ สามารถนำค่ามาคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนที่เหมาะสมในระบบ ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

### 2.13. การประมาณขนาดของชิ้นส่วน

เนื่องจากความคลาดเคลื่อนแปรผันตามขนาดของชิ้นส่วนยกกำลังด้วยกำลังของพหุนามในฟังก์ชันฐาน ดังนั้นถ้ารู้ค่าความคลาดเคลื่อนและขนาดของชิ้นส่วนปัจจุบัน เราสามารถคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนที่มีค่าความคลาดเคลื่อน เท่ากับค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ (Kelly, etal. 1983; Zienkiewicz and Zhu, 1992a) ดังสมการ

$$\|e\| = Ch^{P} \tag{2.68}$$

โดยที่ $\|e\|$ คือค่าความคลาดเคลื่อน

C คือ ค่าคงตัวที่ไม่ทราบค่า

h คือขนาดของชิ้นส่วน

P คือ กำลังพหุนามของฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function Polynomial)

เมื่อ เราทราบค่าขนาดของชิ้นส่วนเดิม $h_{old}$ และ ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วน $\|e_{21}^{*}\|$ จากนั้นคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน $\|e_{a}\|$ เพื่อนำมาคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนใหญ่สุดที่ยอมให้ $h_{all}$ ดังสมการต่อไปนี้

$$h_{all} = h_{old}\left(\frac{\|e_{a}\|}{\|e_{21}^{*}\|}\right)^{\frac{1}{P}} \tag{2.69}$$

$h_{all}$ คือ ขนาดของชิ้นส่วนใหญ่สุดที่ยอมให้

$h_{old}$ คือ ขนาดของชิ้นส่วนเดิม

$\|e_{a}\|$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน

$\|e_{21}^{*}\|$ คือ ขนาดของความคลาดเคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วน

ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วน มีค่ามากกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วนด้วยเหตุอันเนื่องจากชิ้นส่วนมีขนาดใหญ่มากจนเกินไป $h_{old} > h_{all}$ จะทำการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลง

ในวิทยานิพนธ์นี้ขนาดของชิ้นส่วนจะกล่าวถึงพื้นที่ของของแต่ละชิ้นส่วนภายในขอบเขตของปัญหา และการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลงโดยการแทรกจุดต่อใหม่ ณ จุดศูนย์ถ่วงของแต่ละชิ้นส่วน และในกรณีขอบเขตของปัญหาขนาดของชิ้นส่วนจะกล่าวถึงความยาวด้านของชิ้นส่วนที่เป็นขอบเขตของปัญหา และการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลงโดยการแทรกจุดต่อใหม่ ณ จุดกึ่งกลางด้านของชิ้นส่วนที่เป็นขอบเขตของปัญหา

การหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วนนั้น หาได้จากการกำหนดค่าความความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยรวมที่ยอมให้ แล้วทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วนจากสมการ

$$\left\| e_a \right\| = \eta_a \frac{\left\| U_{2g}^{*} \right\|}{\sqrt{Ne}} \tag{2.70}$$

$\left\| e_a \right\|$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน

$\eta_a$ คือ ค่าความความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยรวมที่ยอมให้

**2.14. แบบแผนการถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ (State Variable Mapping)**

เนื่องจากการปรับปรุงพิกัด และ รูปร่างของโครงข่ายของชิ้นส่วน โดยการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนขึ้นมาใหม่ภายในขอบเขตของโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะภายในแบบจำลอง จากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม สู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่

ค่าของตัวแปรสถานะคือค่าที่สามารถบอกถึงสภาพของหน่วยแรง และคุณสมบัติของมวลดิน ณ พิกัดของตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า ในวิทยานิพนธ์นี้คุณสมบัติของมวลดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งระบบ ดังนั้นการถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะจะถ่ายโอนเฉพาะค่าของหน่วยแรงภายในระบบ

ก่อนที่จะทำการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงของจุดเกาส์ จากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม สู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่ ขั้นตอนแรกเราต้องทราบค่าของหน่วยแรงที่จุดต่อของชิ้นส่วนเดิม โดยนำโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม ถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงจากจุดเกาส์ที่ทราบค่าสู่จุดต่อในแต่ละชิ้นส่วนของชิ้นส่วนเดิม ดังสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยอาศัย Quadratic Shape Function ดังนี้

$$\Delta\sigma_h = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \tag{2.71}$$

ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า $\{a\}$ สามารถคำนวณได้จากการแทนค่า $(x_1, y_1, \Delta\sigma_{h1}), (x_2, y_2, \Delta\sigma_{h2}), \ldots, (x_6, y_6, \Delta\sigma_{h6})$ ลงในสมการข้างต้น จะได้สมการเมทริกดังนี้

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{h1} \\ \Delta\sigma_{h2} \\ \Delta\sigma_{h3} \\ \Delta\sigma_{h4} \\ \Delta\sigma_{h5} \\ \Delta\sigma_{h6} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4^2 & x_4y_4 & y_4^2 \\ 1 & x_5 & y_5 & x_5^2 & x_5y_5 & y_5^2 \\ 1 & x_6 & y_6 & x_6^2 & x_6y_6 & y_6^2 \end{bmatrix}^{-1} \tag{2.72}$$

โดยที่ $\Delta\sigma_h$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่จุดเกาส์ของชิ้นส่วนเดิม
$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \ldots, (x_6, y_6)$ คือ ค่าพิกัดของจุดเกาส์ของชิ้นส่วนเดิม

หลังจากหาค่าเวกเตอร์ได้แล้วขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณค่าของหน่วยแรงที่จุดต่อของแต่ละชิ้นส่วนดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta\sigma_n = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \tag{2.73}$$

โดยที่ $\Delta\sigma_n$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่จุดต่อของชิ้นส่วนเดิม
$x$ , $y$ คือ ค่าพิกัดของจุดต่อของชิ้นส่วนเดิม
$a$ คือค่าตัวแปรที่หาได้จากสมการ 2.72

รูปที่ 2.12 แสดงการถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ จากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิมไปสู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่ โดยที่ นำค่าพิกัดตำแหน่งเกาส์ของชิ้นส่วนใหม่ ตรวจสอบว่าอยู่ในชิ้นส่วนหมายเลขที่เท่าไรของชิ้นส่วนเดิม แล้วหาค่าพิกัดตำแหน่งเกาส์ $(x, y)$ ของชิ้นส่วนใหม่ ให้อยู่ในค่าพิกัดธรรมชาติ $(L_1, L_2, L_3)$ กับโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วน หลังจากนั้นก็สามารถถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ ที่ต้องการทราบค่าของแบบจำลอง จากสมการดังนี้

$$\Delta\sigma^+ = N_1\Delta\sigma_{n1} + N_2\Delta\sigma_{n2} + N_3\Delta\sigma_{n3} + N_4\Delta\sigma_{n4} + N_5\Delta\sigma_{n5} + N_6\Delta\sigma_{n6} \tag{2.74}$$

$$\Delta\sigma^+ = \sum_{i=1}^{nip} N_i\Delta\sigma_{ni} \tag{2.75}$$

$$N_1 = L_1(2L_1 - 1) \qquad N_2 = 4L_1L_2$$

$$N_3 = L_2(2L_2 - 1) \qquad N_4 = 4L_2L_3$$

$$N_5 = L_3(2L_3 - 1) \qquad N_6 = 4L_3L_1 \tag{2.76}$$

โดยที่ $\Delta\sigma^{+}$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่จุดเกาส์ของชิ้นส่วนใหม่ ที่ได้จากวิธีการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรง

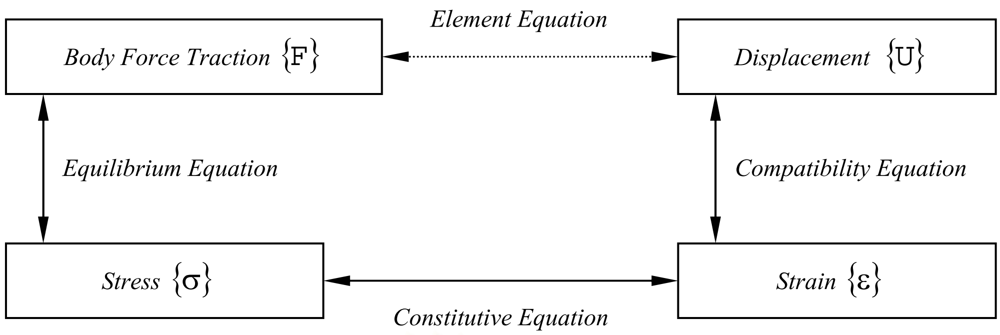
$\Delta\sigma_{n}$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่จุดต่อของชิ้นส่วนของโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม

N คือ ฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ

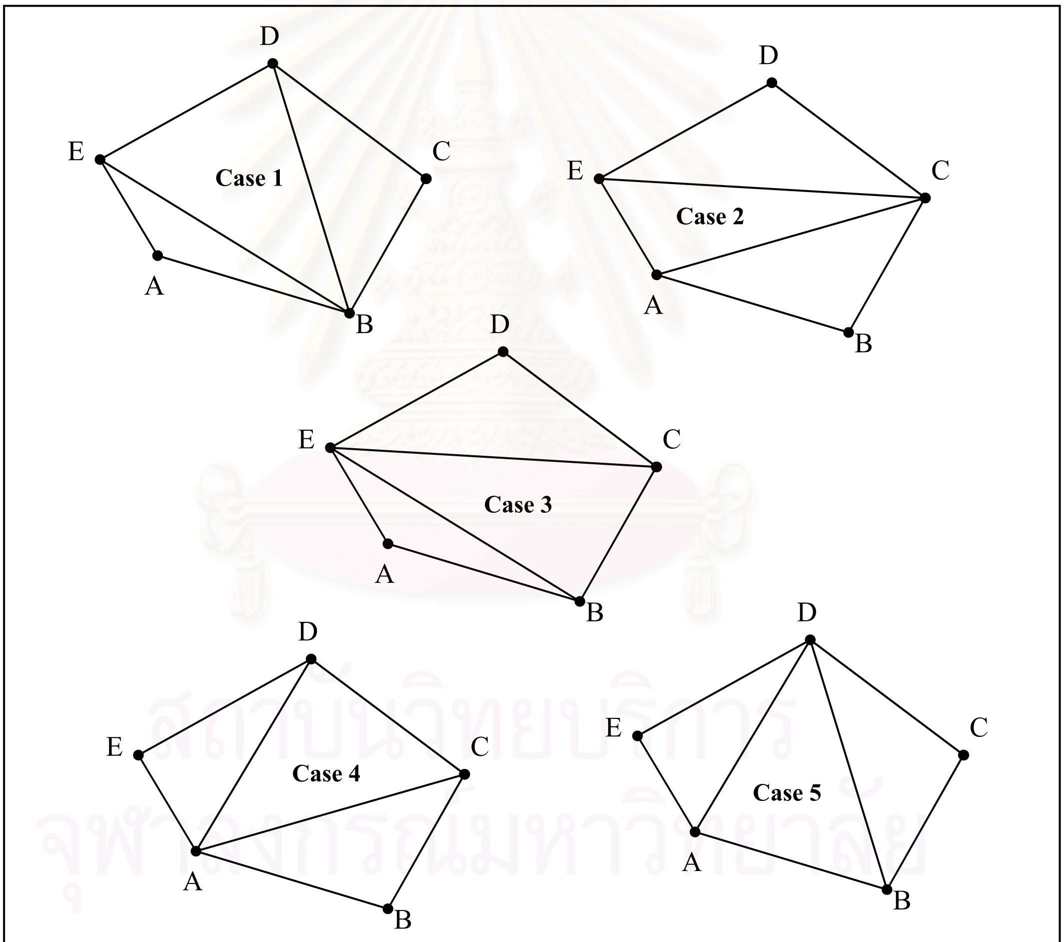
nip คือจำนวนจุดเกาส์ในแต่ละชิ้นส่วน

x, y คือพิกัดปกติของจุดเกาส์ (โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่)

$L_1$, $L_2$, $L_3$ คือพิกัดธรรมชาติของจุดเกาส์ (โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่) เทียบกับ โครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

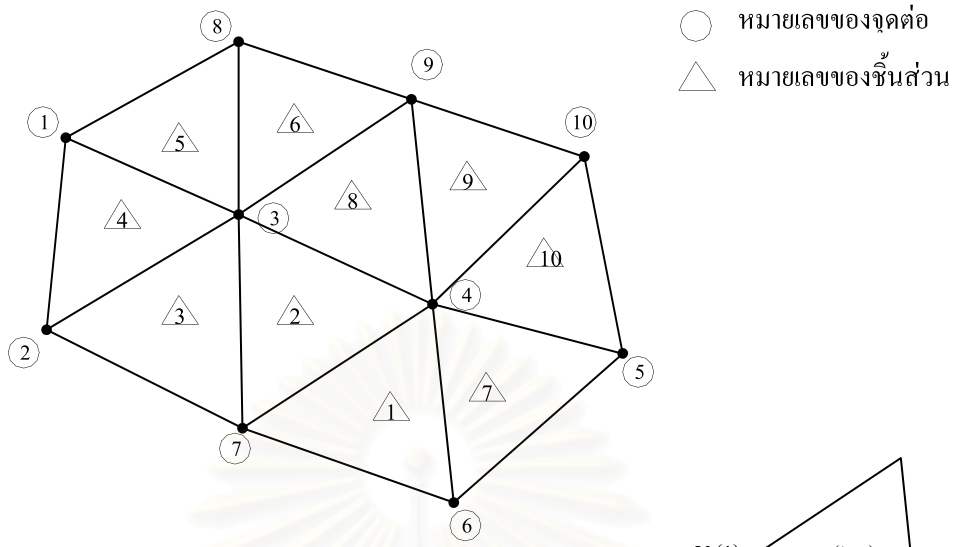


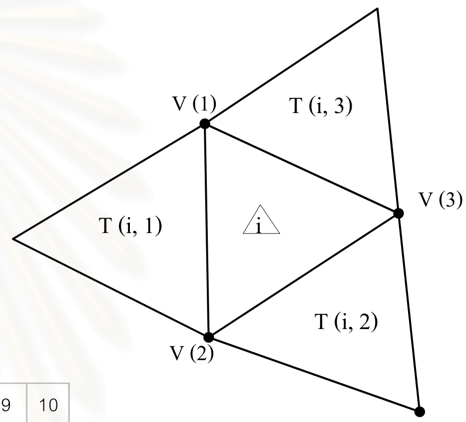

**รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**




การสร้างชิ้นส่วนจากจุดต่อที่มีอยู่ ของสามเหลี่ยมเดอลอเน จะใช้เงื่อนไข ต่าง ๆ สร้างชิ้นส่วนที่ไม่เป็นมุมแหลมหรือมุมป้านมากจนเกินไป จากรูปจะได้ ผลของการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยใช้ วิธีสามเหลี่ยมเดอลอเน ดัง กรณีที่ 4 หรือ กรณีที่ 5

**รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยใช้สามเหลี่ยมเดอลอเน**




| | | หมายเลขของชิ้นส่วนหลัก | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Vertex (V) | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| | 2 | 7 | 7 | 7 | 2 | 3 | 9 | 6 | 4 | 10 | 5 |
| | 3 | 6 | 4 | 3 | 3 | 8 | 8 | 5 | 9 | 9 | 10 |

| | | หมายเลขของชิ้นส่วนหลัก | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Adjacent Triangle (T) | 1 | 2 | 3 | 0 | 0 | 4 | 8 | 1 | 2 | 10 | 7 |
| | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 6 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 |
| | 3 | 7 | 8 | 4 | 5 | 0 | 5 | 10 | 6 | 8 | 9 |

Vertex (V) คือ การเรียงลำดับหมายเลขของจุดต่อของชิ้นส่วนหลัก เรียงทวนเข็มนาฬิกา

Adjacent Triangle (T) คือ การเรียงลำดับหมายเลขของชิ้นส่วนที่อยู่ด้านประชิดกับชิ้นส่วนหลัก

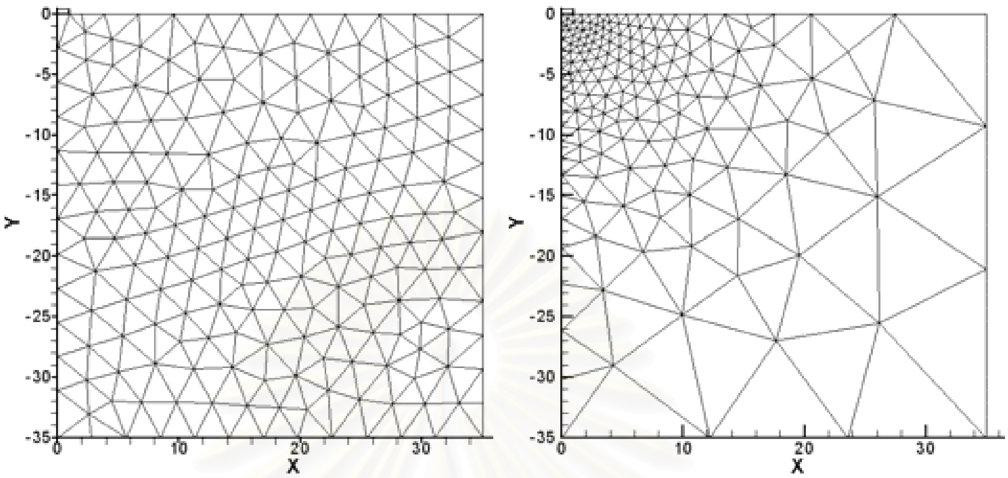
Adjacent Triangle (1) = หมายเลขของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมที่ติดกับด้านของจุดต่อ V (1) กับ V (2)

Adjacent Triangle (2) = หมายเลขของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมที่ติดกับด้านของจุดต่อ V (2) กับ V (3)

Adjacent Triangle (3) = หมายเลขของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมที่ติดกับด้านของจุดต่อ V (3) กับ V (1)

Adjacent Triangle มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีชิ้นส่วนที่ติดอยู่กับด้านของจุดต่อที่กำหนด

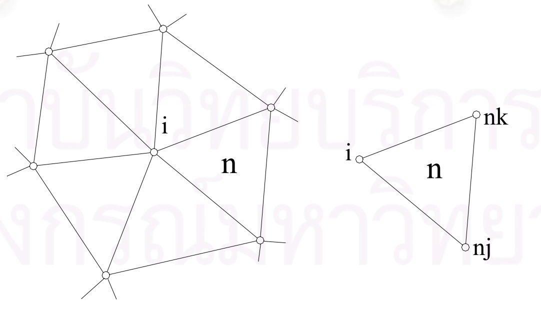
**รูปที่ 2.3 รายละเอียดของชิ้นส่วน Delaunay Triangulation**



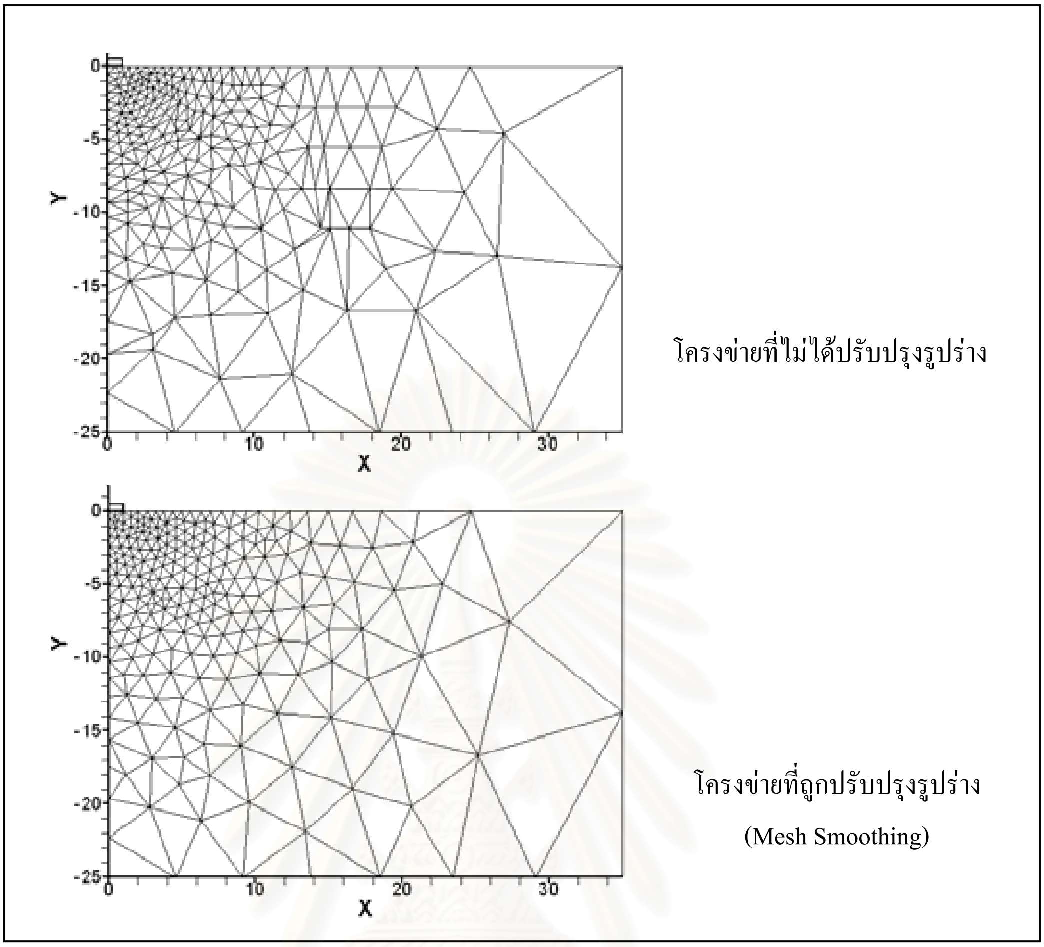

โครงข่ายของชิ้นส่วนที่ไม่ได้ควบคุมความหนาแน่น

โครงข่ายของชิ้นส่วนที่ได้ควบคุมความหนาแน่นด้วย Density Function

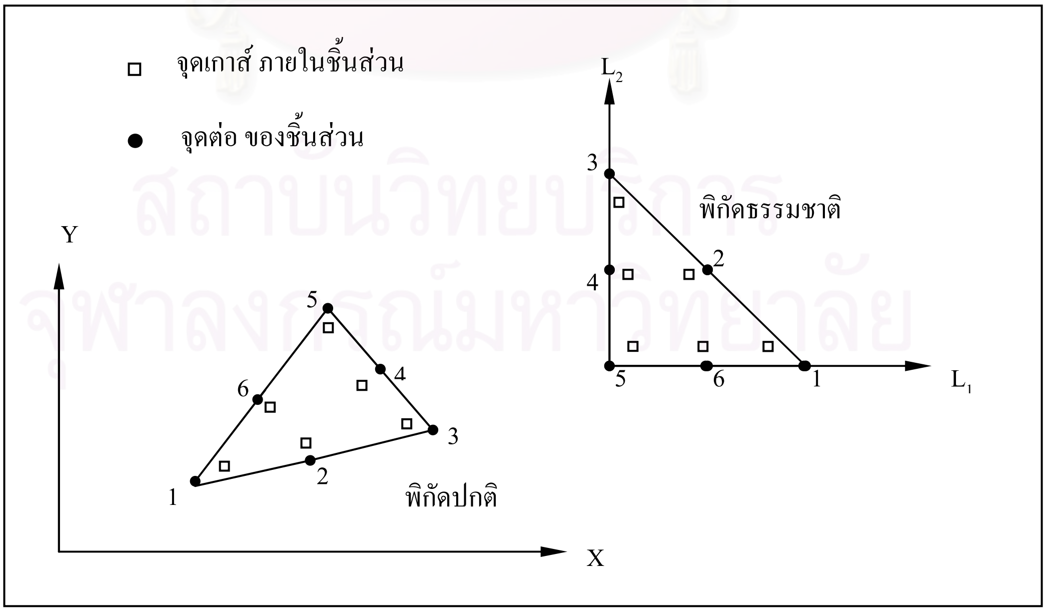
**รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างโครงข่ายของชิ้นส่วนที่ไม่ได้และได้ควบคุมความหนาแน่นของชิ้นส่วน**



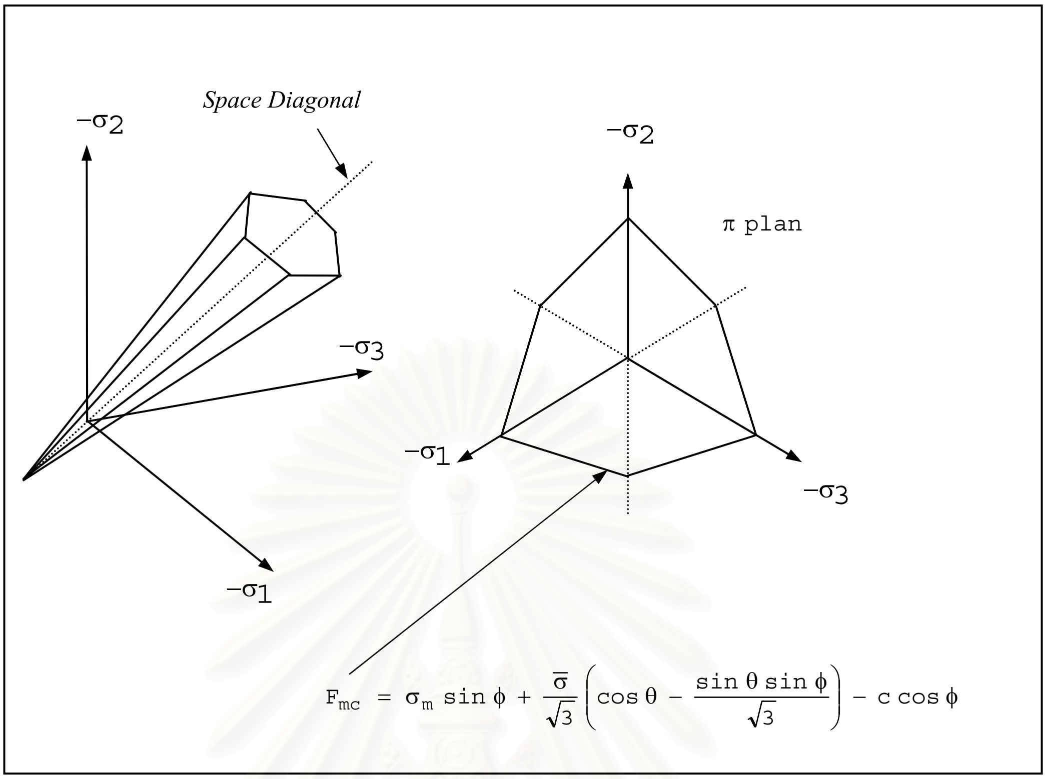

**รูปที่ 2.5 พิกัดของจุดต่อ** i **และพิกัดข้างเคียง**



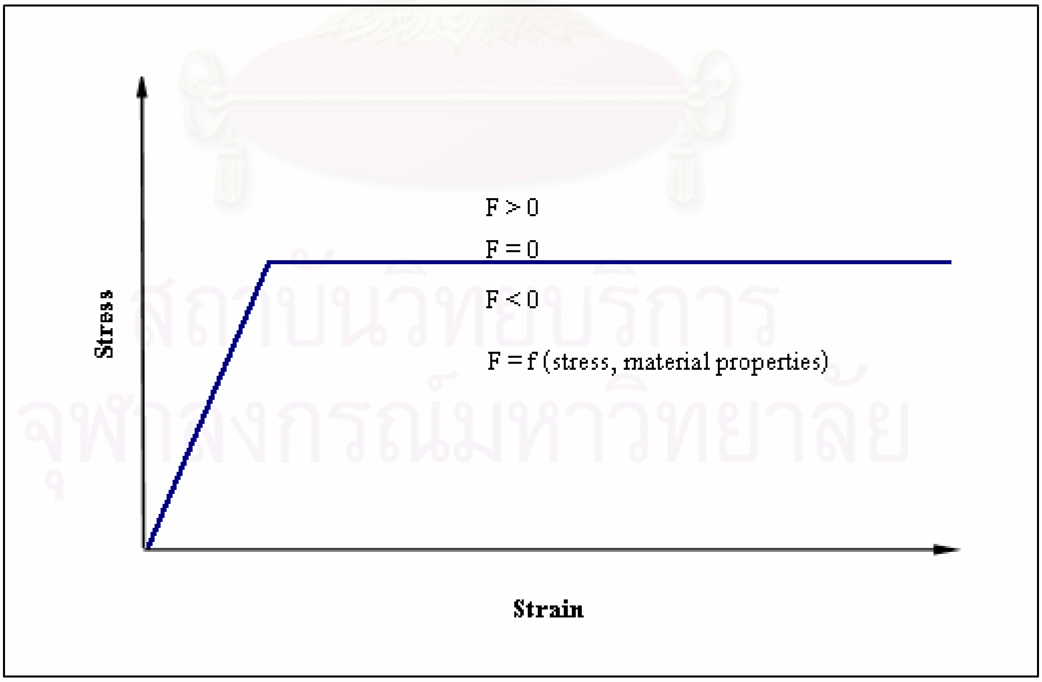

**รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างโครงข่ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและที่ได้ปรับปรุงรูปร่าง**



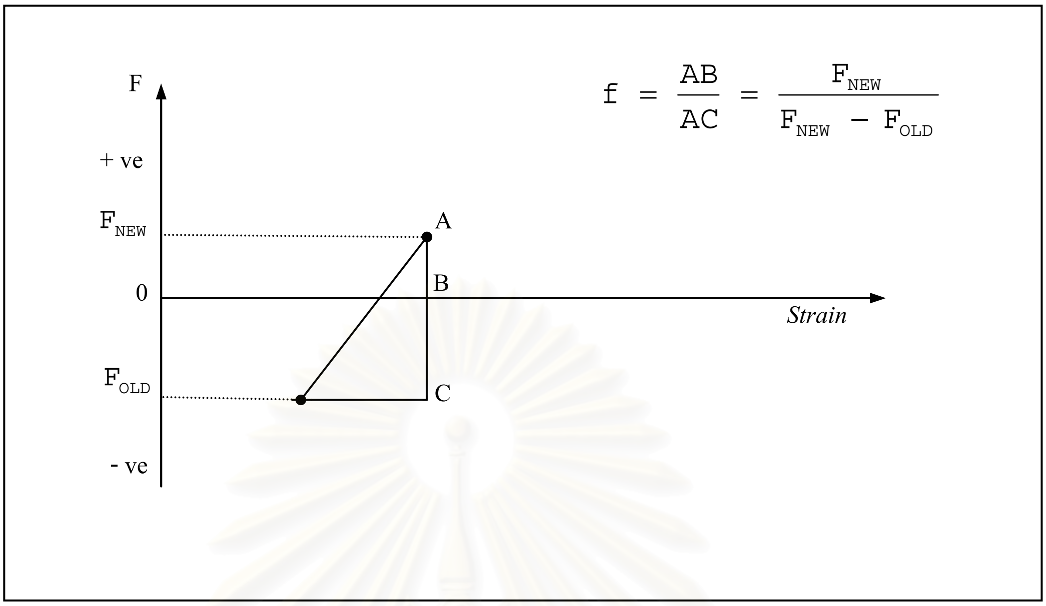

**รูปที่ 2.7 ชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ (6-Noded Triangular element)**



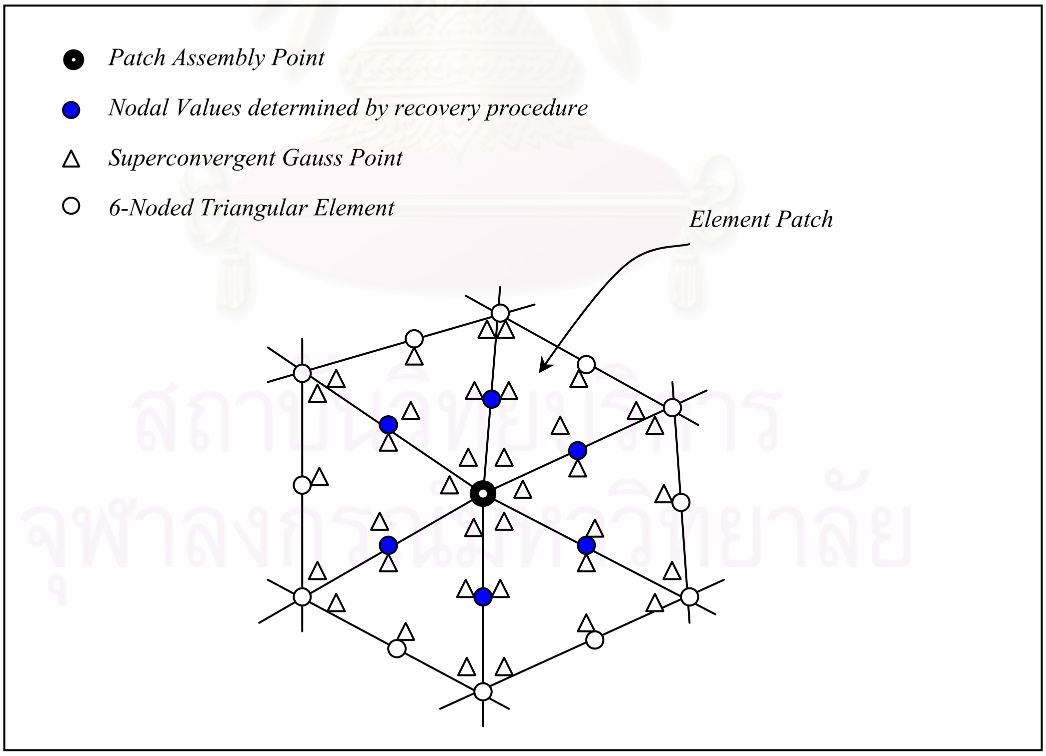

**รูปที่ 2.8 Mohr-Coulomb Failure Criterion**



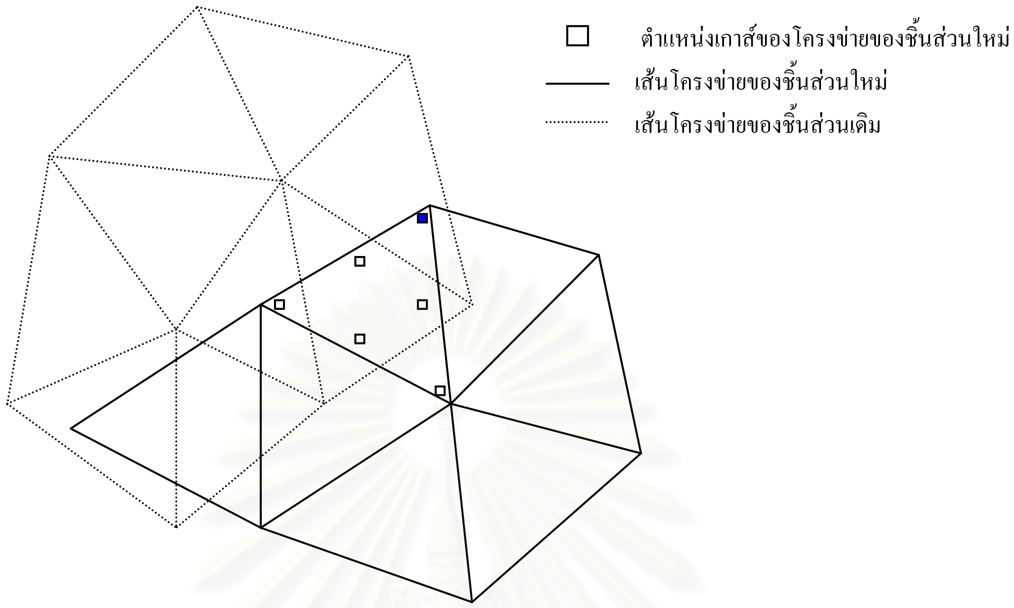

**รูปที่ 2.9 แบบจำลอง Elastic-Perfectly Plastic Material**




**รูปที่ 2.10 การปรับแก้ค่าของหน่วยแรงสำหรับวัตถุที่เข้าสู่สภาวะพลาสติก**




**รูปที่ 2.11 จุดรวมชิ้นส่วน (Element Patch) ของวิธี SPR**




พิจารณาตำแหน่งเกาส์ที่แรเงา หาค่าพิกัดตำแหน่งเกาส์ $(x, y)$ ของชิ้นส่วนใหม่ ให้อยู่ในค่าพิกัดธรรมชาติ $(L_1, L_2, L_3)$ กับโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วน

**รูปที่ 2.12 การถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ (State Variable Mapping)**

# บทที่ 3

# รายละเอียดของโปรแกรม

## 3.1. วิธีการประยุกต์ใช้งาน (Practical Method)

การวิเคราะห์ปัญหาจะประกอบด้วย การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียด ทีละน้อย ๆ ของวัตถุ (Infinitesimal Strain) และวิเคราะห์ผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งใช้คุณสมบัติของวัสดุแบบไร้เชิงเส้นประกอบกับการปรับปรุงพิกัดของโครงข่ายของชิ้นส่วน (Update Mesh) จนกระทั่งโครงข่ายที่ถูกปรับปรุงพิกัดเกิดการเสียรูปไปอย่างมาก แล้วทำการการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนขึ้นมาใหม่ให้เป็นระเบียบ และแบ่งขนาดของชิ้นส่วน ให้ได้ตามขนาดที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปัญหาในวงรอบถัดไป พร้อมทั้งประมาณหาค่าของหน่วยแรง ณ ตำแหน่งที่ต้องการพิจารณาภายในขอบเขตของปัญหา ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพดังกล่าวจึงจำเป็นที่จะต้องใช้โครงข่ายของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมแบบไร้โครงสร้าง (Unstructured Triangular Element)และวิธีการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ (Automatic Mesh Generation) ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

ขั้นตอนการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติมีดังนี้

1) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนจากจุดต่อควบคุมโดยสมการความหนาแน่นที่ขอบเขตของปัญหา
2) กำหนดจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหาควบคุมโดยสมการความหนาแน่น
3) เชื่อมจุดต่อโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยใช้สามเหลี่ยมเดอลอเน
4) ปรับปรุงพิกัดของโครงข่ายของชิ้นส่วน

ทำซ้ำ (2) - (4) จนกระทั่งไม่สามารถเพิ่มจุดต่อของชิ้นส่วนจากสมการความหนาแน่น ต่อจากนั้นปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วนจากสามเหลี่ยมสามจุดต่อเป็นสามเหลี่ยมหกจุดต่อ

5) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา
6) วิเคราะห์ผลเฉลยจากการเพิ่มค่าการทรุดตัว
7) หาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยและขนาดของชิ้นส่วนใหม่
8) ปรับปรุงพิกัดของโครงข่ายของชิ้นส่วน
9) ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วนจากสามเหลี่ยมสามจุดต่อเป็นสามเหลี่ยมหกจุดต่อ

ทำซ้ำ (5) - (10) สิบวงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัว จะได้โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา

วิธีการประยุกต์ใช้งานมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา
2) หาค่าหน่วยแรงเริ่มต้นภายในโครงข่ายของชิ้นส่วน
3) วิเคราะห์ผลเฉลย จากการเพิ่มค่าการทรุดตัว
4) ปรับปรุงพิกัดของชิ้นส่วน ถ้า วิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของดิน
5) หาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลย ปรับปรุงและสร้างโครงข่ายของชิ้นใหม่ส่วนทุก ๆ สิบวงรอบของการเคลื่อนตัวพร้อมด้วยการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงภายในโครงข่ายของชิ้นส่วน
6) เพิ่มค่าการทรุดตัวในวงรอบถัดไป

ทำซ้ำ (3) - (6) จนกระทั่งได้ผลเฉลยของค่าการทรุดตัวที่ต้องการ

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรมหลัก ในวิทยานิพนธ์นี้ รูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธี อัตโนมัติจนกระทั่งได้โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นในการวิเคราะห์ปัญหา รายละเอียดของการคำนวณในขั้นตอนต่าง ๆ ของโครงสร้างการทำงานจะได้กล่าวต่อไป

### 3.2. การกำหนดขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

วิทยานิพนธ์นี้ จะแบ่งการทำงานของโปรแกรมออกเป็นสองส่วน ดังนี้

#### 3.2.1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก (Visual Basic Language, VB)

การป้อนและถ่ายโอนชุดข้อมูลจะกระทำให้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน แฟ้มข้อมูล ที่เกี่ยวข้องกับ VB มีดังนี้

(ก) แฟ้มข้อมูล “Input data” กำหนด ชนิด ขนาด รูปร่าง ของฐานรองรับ และ คุณสมบัติ ต่าง ๆ ของมวลดิน ภายใต้ฐานรองรับ ลงในแฟ้มข้อมูล ดังนี้

M _ F คือ ค่าของตัวแปรบอกชนิดของการวิเคราะห์ปัญหา

T _ F คือ ค่าของตัวแปรบอกชนิดผิวสัมผัสระหว่างมวลดินกับฐานรองรับ

S _ F คือ ค่าของตัวแปรบอกลักษณะรูปร่างของฐานรองรับ

CU คือ ค่าความเชื่อมแน่นของดิน Cohesion $(c)$

PHI คือ มุมเสียดทานภายในของดิน Angle of internal friction $(\phi)$

PSI คือ Dilation angle $(\varphi)$

GAMA คือ หน่วยน้ำหนักของมวลดิน $(\gamma)$

EPK0 คือ Earth pressure coefficient $(K_0)$

E คือ โมดูลัสของการยืดหยุ่น

V คือ อัตราส่วนปัวซองของดิน Poisson’s ratio $(\nu)$

(ข) แฟ้มข้อมูล “Input mesh” แสดงชุดข้อมูลจำนวน และ พิกัดของจุดต่อ ณ ขอบเขตของปัญหา

(ค) แฟ้มข้อมูล “Check run time” แสดงวงรอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน ว่าอยู่ในสถานะกำลังทำงาน หรือจบการทำงาน

(ง) แฟ้มข้อมูล “Stop” ใช้ถ่ายโอนข้อมูลระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน มีค่าของตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

DIS คือ ขนาดของการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น ($\Delta S$)

INCS คือ จำนวนรอบของการคำนวณ

RUN คือ กำหนดค่าตัวแปรเพื่อใช้ในการคำนวณต่อเนื่อง ถ้า RUN = 0 โปรแกรมจะเรียกชุดข้อมูลในการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนจากแฟ้มข้อมูล “Input Mesh” และ ถ้า RUN > 0 โปรแกรมจะเรียกชุดข้อมูลในการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนจากแฟ้มข้อมูล “Backup Data”

VSTOP คือ ตัวแปรของชุดข้อมูลในการแสดงสถานะของการทำงานของโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน

### 3.2.2. การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน (Fortran Language)

โปรแกรมภาษาฟอร์แทรน (Fortran Language) ใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือ

(ก) ระบบการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ หาค่าความเครียด SPR ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเครียด การเพิ่มจุดต่อ และ ปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วนตลอดจนการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรง หลังจากการปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วนในวงรอบของการคำนวณที่ได้กำหนดไว้ การสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ จะถูกบันทึกลงในแฟ้มข้อมูล “Snac input” เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในส่วนถัดไป

(ข) ระบบการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามหลักเกณฑ์ของ SNAC (Soil - Nonlinear Analysis Code) วิทยานิพนธ์นี้มีการแก้ไขปรับปรุงหลักเกณฑ์ ของ SNAC ถ่ายโอนชุดข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ปัญหาลงในแฟ้มข้อมูล ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบ ปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วน และ ถ่ายโอนค่าของหน่วยแรง ในวงรอบของการคำนวณที่ได้กำหนดไว้

## 3.3. การสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ

รูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8 กำหนดขอบเขตของปัญหา โดยการป้อนข้อมูลพิกัดของจุดต่อทั้งหมดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ณ ขอบเขตของปัญหา บันทึกลงในแฟ้มข้อมูล “Input Mesh” จากนั้นโปรแกรมจะทำการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติตามขั้นตอนต่อไปนี้

### 3.3.1. การสร้างจุดต่อที่ขอบเขตของปัญหา

การสร้างจุดต่อที่ขอบเขตของปัญหาจะกระทำโดยเรียกโปรแกรมย่อย Boundary กำหนดจุดต่อ ณ ขอบเขตของปัญหา ตามฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วน (Mesh Density Function) ดังสมการ $f_d = Ae^{Bd}$ ที่ได้อธิบายในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วน

(ก) ค่าของฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วนจะถูกกำหนดขึ้นโดยอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ขนาดของโครงข่ายของชิ้นส่วนที่เหมาะสมในการคำนวณ

(ข) ตรวจสอบระยะระหว่างจุดต่อของชิ้นส่วนที่ขอบเขตของปัญหา ว่าสามารถที่จะเพิ่มจุดต่อจากฟังก์ชันความหนาแน่นระหว่างสองจุดต่อเดิมของชิ้นส่วน ได้หรือไม่

(ค) หลังจากเพิ่มจุดต่อที่ขอบเขตของปัญหาแล้ว โปรแกรมจะทำการจัดเรียงลำดับหมายเลขของจุดต่อ ณ ขอบเขตของปัญหา โดยเริ่มจากจุดต่อแรก ณ ขอบของฐานราก เรียงหมายเลขทวนเข็มนาฬิกา

### 3.3.2. การสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนจากจุดต่อที่มีอยู่ (Delaunay Triangulation)

โปรแกรมย่อย Triang เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกเขียนและพัฒนาขึ้น เพื่อช่วยในการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนหรือเป็นการแบ่งโครงสร้างของปัญหา ออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ โดยการเชื่อมจุดต่อต่าง ๆ ภายในขอบเขตของปัญหา ให้เป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างสามเหลี่ยมสามจุดต่อและมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยที่ในงานวิทยานิพนธ์นี้ จุดต่อภายในขอบเขตของปัญหาจะถูกกำหนดและควบคุม โดยสมการของ Mesh Density Function และ Mesh Smoothing และ โปรแกรมจะเชื่อมต่อจุดต่าง ๆ อย่างอิสระภายใต้เงื่อนไขของ Delaunay Triangulation ที่ได้ถูกกำหนดไว้

### 3.3.3. การปรับปรุงรูปร่างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)

โปรแกรมย่อย Smooth จะปรับปรุงรูปร่างโครงข่ายของชิ้นส่วน โดย วิธี Laplacian Smoothing เพื่อหาตำแหน่งพิกัดของจุดต่อที่เหมาะสม จะนำมาซึ่งรูปร่างของชิ้นส่วน ที่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.3.4. การเพิ่มจำนวนจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา

กำหนดจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา ตามฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วน (Mesh Density Function) ดังสมการ $f_d = Ae^{Bd}$

(ก) ค่าของฟังก์ชันความหนาแน่นของชิ้นส่วนจะถูกกำหนดขึ้นโดยอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ขนาดของโครงข่ายของชิ้นส่วนที่เหมาะสมในการคำนวณ

(ข) ตรวจสอบระยะจุดต่อของชิ้นส่วนว่าสามารถที่จะเพิ่มจุดต่อจากฟังก์ชันความหนาแน่นภายในขอบเขตของปัญหา ณ จุดศูนย์ถ่วงของชิ้นส่วน ได้หรือไม่

(ค) จัดเรียงลำดับหมายเลขจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา โดยเรียงลำดับหมายเลขต่อเนื่องจากหมายเลขจุดต่อ ของขอบเขตของปัญหา (NCE) จะได้จำนวนจุดต่อทั้งหมดของปัญหา (NPTS)

ทำซ้ำขั้นตอน หัวข้อที่ 3.3.2 ถึง 3.3.4 จนกระทั่งไม่สามารถที่จะเพิ่มจำนวนจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหาอีกต่อไปได้

### 3.3.5. เพิ่มระดับขั้นความเสรีของชิ้นส่วน (Transformation)

เรียกโปรแกรมย่อย Transform เพื่อเพิ่มระดับขั้นความเสรีของชิ้นส่วนโดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วนจากชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสามจุดต่อทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเป็นชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เก็บสำรองชุดข้อมูลจำนวน และพิกัดของจุดต่อ ไว้ในแฟ้มข้อมูล “Mesh”

พร้อมทั้งหาจำนวนหมายเลขของจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมดภายใต้ฐานรองรับ เก็บสำรองชุดข้อมูล ไว้ในแฟ้มข้อมูล “Loaded_nodes” ต่อมา นำชุดข้อมูลนี้ มาบันทึกเป็นส่วนหนึ่งของแฟ้มข้อมูล “Snac input” เพื่อใช้ในการคำนวณ หาค่าแรงกระทำบนจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมด ที่อยู่ภายใต้แรงกระทำของฐานรองรับ

### 3.3.6. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

เรียกโปรแกรมย่อย Restr1 และ Restr2 ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตข้อบังคับของแบบจำลองของปัญหา จะคำนึงถึงสภาพความเป็นจริง ลักษณะของผิวสัมผัสของฐานรองรับกับมวลดิน และ หลักการของความสมมาตรของปัญหา ดังรูปที่ 3.9 ชุดข้อมูลจะบันทึกลงในแฟ้มข้อมูล “Nodal Restraints”

จากนั้น บันทึกข้อมูลที่ได้จากการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนที่ถูกกำหนดด้วยสมการความหนาแน่น ค่าคุณสมบัติ ต่าง ๆ ของมวลดินในแบบจำลอง ค่าตัวแปรของวิธีการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ เงื่อนไขขอบเขตข้อบังคับของแบบจำลอง ตลอดจนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในแฟ้มข้อมูล “Snac input” เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขั้นตอนต่อไป

### 3.3.7. โครงข่ายของชิ้นส่วน เริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา

หลังจากได้โครงข่ายของชิ้นส่วนที่ถูกกำหนดด้วยสมการความหนาแน่น ขั้นตอนต่อไปคือวิเคราะห์ผลเฉลยจากการเพิ่มค่าการทรุดตัว $\Delta S$ พร้อมทั้งหาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยแล้วปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วนทำซ้ำจนครบ 10 วงรอบ ของการเพิ่มค่าการทรุดตัวจะได้โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา ชุดข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกลงในแฟ้มชุดข้อมูล “Snac input” เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขั้นตอนต่อไป

### 3.4. กำหนดและหาค่าของหน่วยแรงเริ่มต้น

เรียกโปรแกรมย่อย Stress in เพื่อหาขนาดของหน่วยแรงเริ่มต้นภายในโครงข่ายของชิ้นส่วน จากหน่วยน้ำหนักของดินดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma_Y = \gamma z \tag{3.1}$$

$$\sigma_x = K_0\sigma_Y \tag{3.2}$$

$$\sigma_z = K_0\sigma_y \tag{3.3}$$

$$\tau_{xy} = 0 \tag{3.4}$$

โดยที่ $\gamma$ คือ หน่วยน้ำหนักของมวลดิน

$z$ คือ ค่าพิกัดแนวดิ่งจากผิวบนสุดของแบบจำลอง ถึงตำแหน่งเกาส์ในแต่ละชิ้นส่วน

$K_0$ คือ ค่าEarth pressure coefficient

ในงานวิจัยชุดนี้ หมายเลข ของจุดเกาส์ และ จุดต่อ จะมีความสัมพันธ์กัน ณ ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน จาก รูปที่ 3.10 แสดงหมายเลขและตำแหน่งของจุดต่อ ในแต่ละชิ้นส่วน

### 3.5. วิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ใช้แบบจำลอง Elastic-Perfectly Plastic Material และ Mohr-Coulomb Failure Criterion ใช้หลักเกณฑ์ ของ SNAC (Soil Nonlinear Analysis Code) วิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการเรียกชุดข้อมูล “Snac input” วิทยานิพนธ์นี้จะใช้หลักการของการกำหนดเงื่อนไขของจุดต่อให้มีค่าการทรุดตัวคงที่ภายใต้ฐานรองรับ และมีการแก้ไขปรับปรุงหลักเกณฑ์ ของ SNAC ถ่ายโอนชุดข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ปัญหาลงในแฟ้มข้อมูล ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบ ปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วนและถ่ายโอนค่าของหน่วยแรง ในวงรอบของการคำนวณที่ได้กำหนดไว้

### 3.6. ปรับปรุงชุดข้อมูล

#### 3.6.1. ปรับปรุงชุดข้อมูลค่าของหน่วยแรง

หลังจากการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการปรับปรุงชุดข้อมูลค่าของหน่วยแรงจากสมการ ดังนี้

$$\text{Tensor} = \text{Tensor} + \Delta\sigma_h \tag{3.5}$$

โดยที่ Tensor คือ ค่าของหน่วยแรงที่จุดเกาส์

$\Delta\sigma_h$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น ณ จุดเกาส์ ที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.6.2. ปรับปรุงชุดข้อมูลพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วน

ถ้าชนิดของการวิเคราะห์เป็น Large Deformation โปรแกรมจะทำการปรับปรุงชุดข้อมูลพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วน ดังนี้

$$\text{Coord} = \text{Coord} + \Delta U \tag{3.6}$$

โดยที่ Coord คือ พิกัดที่จุดต่อของโครงข่ายของชิ้นส่วน $(x, y)$

$\Delta U$ คือขนาดค่าการเคลื่อนตัวที่จุดต่อของโครงข่ายของชิ้นส่วน $(\Delta x, \Delta y)$

## 3.7. หาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากขนาดของชิ้นส่วนที่ไม่เหมาะสม

การหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากขนาดของชิ้นส่วนที่ไม่เหมาะสมเป็นส่วนหนึ่งของขบวนการปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน (Mesh Regeneration) รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม เพิ่มจุดต่อและปรับปรุงพิกัดภายในโครงข่ายของปัญหา

### 3.7.1. การใช้วิธี SPR ประมาณหาค่าความเครียด ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ ของชิ้นส่วน

การเรียกโปรแกรมย่อย SPR นี้เป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ มีขั้นตอนดังนี้

(ก) กำหนดจุดต่อจุดแรกของชิ้นส่วนภายในขอบเขตของปัญหา (NCE + 1) เป็นจุดรวมชิ้นส่วนจุดแรก

(ข) จากรูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างของตำแหน่งจุดรวมชิ้นส่วน จากนั้นหาจำนวนและหมายเลขของชิ้นส่วนที่มีอิทธิพลหรือกลุ่มของชิ้นส่วนที่อยู่ล้อมรอบ จุดรวมชิ้นส่วน ดังรูปที่ 3.12

(ค) ขั้นตอนแรกต้องการทราบค่าความเครียด SPR ที่จุดต่อของชิ้นส่วนทั้งระบบ โดยกำหนดจุดต่อที่ต้องการทราบค่าความเครียด SPR จากกลุ่มของชิ้นส่วนที่อยู่ล้อมรอบหรือมีอิทธิพลต่อจุดรวมชิ้นส่วน ดังรูปที่ 3.13

(ง) จากสมการ $\Delta\varepsilon_n^* = Pa$ สามารถหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า $a$ ภายในกลุ่มจุดเกาส์ที่มีอิทธิพลรอบจุดรวมชิ้นส่วนจากสมการดัง ต่อไปนี้ $\{a\} = [A]^{-1}\{b\}$ โดยที่ $P$ คือพิกัดของกลุ่มจุดเกาส์ที่มีอิทธิพลรอบจุดรวมชิ้นส่วน

(จ) หาค่าความเครียด SPR ณ จุดต่อของชิ้นส่วนที่ต้องการทราบค่า จากสมการดังนี้ $\Delta\varepsilon_n^* = Pa$ โดยที่ $P$ คือพิกัดของจุดต่อที่ต้องการทราบค่าภายในกลุ่มจุดเกาส์ที่มีอิทธิพล รอบจุดรวมชิ้นส่วน

(ฉ) หลังจากนั้นย้ายจุดรวมชิ้นส่วน ไปเรื่อย ๆ จนครบทุกจุด ภายในขอบเขตของปัญหา

(ช) ณ จุดต่อใดที่มีการหาค่าความเครียดของจุดต่อ ซ้ำกันให้บวกรวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย

(ซ) หลังจากได้ค่าความเครียด SPR ที่จุดต่อของชิ้นส่วนทั้งระบบในแบบจำลองแล้ว สามารถหาค่าความเครียด SPR ที่จุดเกาส์ของชิ้นส่วน จากฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วน (Shape Function) ดังนี้

$$\Delta\varepsilon^{*} = N\Delta\varepsilon_{n}^{*} \tag{3.7}$$

โดยที่ $\Delta\varepsilon^{*}$ คือ ค่าความเครียด SPR ณ ตำแหน่งจุดเกาส์ ของชิ้นส่วน

$N$ คือ ฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดต่อ

รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม Superconvergent Patch Recovery of strain (SPR)

### 3.7.2. การประมาณค่าความคลาดเคลื่อน

การประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจะกระทำโดยเรียกโปรแกรมย่อย Error_analysis เป็นโปรแกรมตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเครียดที่ได้จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ ค่าความเครียดที่ได้จาก โปรแกรมย่อย SPR

(ก) คำนวณค่าความเครียดและค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วนจากสมการดังนี้

$$\left\|U_{2l}^{*}\right\| = \left(\sum_{i=1}^{nip}\left(\Delta\varepsilon_{h}\right)_{i}^{T}\left(\Delta\varepsilon_{h}\right)_{i} * \det_{i} * \mathrm{weight}_{i}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.8}$$

$$\left\|e_{2l}^{*}\right\| = \left(\sum_{i=1}^{nip}\left(\Delta\varepsilon_{h} - \Delta\varepsilon^{*}\right)_{i}^{T}\left(\Delta\varepsilon_{h} - \Delta\varepsilon^{*}\right)_{i} * \det_{i} * \mathrm{weight}_{i}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.9}$$

(ข) คำนวณค่าความเครียดและค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมทั้งระบบจากสมการดังนี้

$$\left\|U_{2g}^{*}\right\| = \left(\sum_{i=1}^{Ne}\left\|U_{2l}^{*}\right\|^{2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.10}$$

$$\left\|e_{2g}^{*}\right\| = \left(\sum_{i=1}^{Ne}\left\|e_{2l}^{*}\right\|^{2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.11}$$

(ค) กำหนดค่าความความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยรวมที่ยอมให้ $\eta_a$ แล้วทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วนจากสมการ

$$\left\|e_a\right\| = \eta_a \frac{\left\|U_{2g}^{*}\right\|}{\sqrt{Ne}} \tag{3.12}$$

โดยที่ $\left\|e_a\right\|$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน

$\eta_a$ คือ ค่าความความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยรวมที่ยอมให้

กำหนดให้ $\eta_a = 0.05$ สำหรับการคำนวณโครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นก่อนการวิเคราะห์ปัญหา

$\eta_a = 0.20$ สำหรับขั้นตอนระหว่างการวิเคราะห์ปัญหา ทุก ๆ 10 วงรอบของการเคลื่อนตัว $\Delta S$

ค่า $\eta_a$ ที่ได้กำหนดไว้ จากการทดลองในการวิเคราะห์คำนวณจะได้ขนาดของชิ้นส่วนที่ไม่ใหญ่หรือเล็กจนเกินไป ถ้าค่า $\eta_a$ มีค่าที่น้อยจนเกินไปจะทำให้โครงข่ายของชิ้นส่วนมีความละเอียดมากทั้งระบบ เป็นเหตุทำให้ไม่ประยัดเวลาในการวิเคราะห์คำนวณและจะเป็นผลเสียต่อการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงได้

ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วน มีค่ามากกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน ด้วยเหตุอันเนื่องจากชิ้นส่วนมีขนาดใหญ่มากจนเกินไปจะทำการเรียก โปรแกรมย่อย Adaptation เพื่อแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลง แล้วทำการเรียกโปรแกรมย่อย Interpolation เพื่อถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงจากโครงข่ายของชิ้นส่วนเก่า สู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่

### 3.8. การปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน (Mesh Adaptation)

การปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วนจะกระทำโดยเรียกโปรแกรมย่อย Adaptation เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเครียดเกิดขึ้นเกินกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน เพื่อแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลง และ ปรับปรุงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนภายในวงรอบที่กำหนด ขนาดเล็กสุดของชิ้นส่วนเท่ากับ 1% ของความกว้างของฐานรองรับและสามารถกำหนดและเปลี่ยนแปลงค่าได้จากโปรแกรมวิชวลเบสิก

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน 1 ครั้งต่อสิบวงรอบของการวิเคราะห์ปัญหา และในกรณีที่วิเคราะห์ด้วย SSC จะสิ้นสุดการปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน เมื่อค่ากำลังรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในแต่ละวงรอบ มีค่าน้อยกว่า 0.01 $kN/m^2$

3.8.1. เรียกพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม

3.8.2. นำขนาดพื้นที่ของชิ้นส่วนเดิม $h_{old}$ มาคำนวณหาขนาดพื้นที่ของชิ้นส่วนใหญ่สุดที่ยอมให้ $h_{all}$ ให้มีขนาดที่สอดคล้องกับ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละชิ้นส่วน

3.8.3. ถ้าขนาดของชิ้นส่วนเดิม $h_{old} > 1.5h_{all}$ จะทำการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนเดิมให้เล็กลงภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นส่วนใหม่ ที่เหมาะสม

3.8.4. กรณีขนาดของชิ้นส่วนเดิมอยู่ภายในรัศมี 4.00 เมตรจากขอบของฐานราก ดังนั้นเมื่อ $h_{old} > 1.2h_{all}$ จะทำการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนเดิมให้เล็กลง ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นส่วนใหม่ ที่เหมาะสม

3.8.5. ในกรณีขนาดของชิ้นส่วนเดิมอยู่ภายในรัศมี 0.50 เมตรจากขอบของฐานราก ดังนั้นเมื่อ $h_{old} > 0.5h_{all}$ จะทำการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนเดิมให้เล็กลง ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นส่วนใหม่ ที่เหมาะสม

3.8.6. ในวิทยานิพนธ์นี้ขนาดของชิ้นส่วนจะกล่าวถึงพื้นที่ของของแต่ละชิ้นส่วนภายในขอบเขตของปัญหา และการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลงโดยการแทรกจุดต่อใหม่ ณ จุดศูนย์ถ่วงของแต่ละชิ้นส่วน และในกรณีขอบเขตของปัญหาขนาดของชิ้นส่วนจะกล่าวถึงความยาวด้านของชิ้นส่วนที่เป็นขอบเขตของปัญหา และการแบ่งขนาดของชิ้นส่วนให้เล็กลงโดยการแทรกจุดต่อใหม่ ณ จุดกึ่งกลางด้านของชิ้นส่วนที่เป็นขอบเขตของปัญหา

3.8.7. เสร็จแล้ว เรียกโปรแกรมย่อย Mesh_3 เพื่อเชื่อมจุดต่อภายในโครงข่ายของชิ้นส่วน

## 3.9. ถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ (State Variable Mapping)

ค่าของตัวแปรสถานะคือค่าที่สามารถบอกถึงสภาพของหน่วยแรง และคุณสมบัติของมวลดิน ณ พิกัดของตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า ในวิทยานิพนธ์นี้คุณสมบัติของมวลดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งระบบ ดังนั้นการถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะจะถ่ายโอนเฉพาะค่าของหน่วยแรงภายในระบบ

โปรแกรมย่อย Interpolation มีวัตถุประสงค์เพื่อถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงหรือค่าคุณสมบัติของมวลดิน จากโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม สู่โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่ หลังจากขั้นตอนการปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วนดังนี้

3.9.1. นำโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิมถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงหรือค่าคุณสมบัติของมวลดิน ถ่ายโอนจากจุดเกาส์ที่ทราบค่า สู่จุดต่อในแต่ละชิ้นส่วน ขั้นตอนนี้ จะทำการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรง ก่อนขั้นตอนการปรับปรุงชุดข้อมูลพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วน แล้วบรรจุค่าลงในแฟ้มข้อมูล “Backup olds”

3.9.2. หาตำแหน่งเกาส์ของชิ้นส่วนใหม่ ตรวจสอบว่าพิกัดของตำแหน่งเกาส์ใหม่อยู่ในชิ้นส่วนหมายเลขที่เท่าไรของชิ้นส่วนเดิม

3.9.3. เรียกโปรแกรมย่อย Powall หาค่าพิกัดตำแหน่งเกาส์ $(x, y)$ ของชิ้นส่วนใหม่ ให้อยู่ในค่าพิกัดธรรมชาติ $(L_1, L_2, L_3)$ กับโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วน

3.9.4. การถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงจากจุดต่อของโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม สู่จุดเกาส์ของโครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่ สามารถกระทำได้จากสมการดังนี้

$$\Delta\sigma^{+} = N_1\Delta\sigma_{n1} + N_2\Delta\sigma_{n2} + N_3\Delta\sigma_{n3} + N_4\Delta\sigma_{n4} + N_5\Delta\sigma_{n5} + N_6\Delta\sigma_{n6} \quad (3.13)$$

$$\Delta\sigma^{+} = \sum_{i=1}^{nip} N_i \Delta\sigma_{ni} \tag{3.14}$$

โดยที่ $\Delta\sigma^{+}$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่จุดเกาส์ของชิ้นส่วนใหม่ ที่ได้จากวิธีการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรง

$\Delta\sigma_n$ คือ ค่าของหน่วยแรงที่จุดต่อของชิ้นส่วน ของโครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม

$N$ คือ ฟังก์ชันรูปร่างของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมสามจุดต่อ

$nip$ คือจำนวนจุดเกาส์ในแต่ละชิ้นส่วน

$x, y$ คือพิกัดปกติของจุดเกาส์ (โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่)

$L_1, L_2, L_3$ คือพิกัดธรรมชาติของจุดเกาส์ (โครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่) เทียบกับ โครงข่ายของชิ้นส่วนเดิม มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

3.9.5. วิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ค่าการทรุดตัว $\Delta S = \Delta S$ *0.0001 เพื่อปรับแก้ให้ค่าของหน่วยแรงที่ถูกถ่ายโอนเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium Correction) ก่อนการคำนวณปัญหาในวงรอบถัดไป

3.9.6. จากนั้นวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเพิ่มค่าการทรุดตัวในวงรอบถัดไป

รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม ถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงจากจุดต่อ ของชิ้นส่วนเดิมสู่จุดเกาส์ ของชิ้นส่วนใหม่

## 3.10. ค่ากำลังรับน้ำหนักของดินภายใต้ฐานรองรับ

เรียกโปรแกรมย่อย Bearing_data หาค่าความสัมพันธ์ ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักของดิน และ ค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ

3.10.1. หาค่าแรงกระทำบนจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมด ที่อยู่ภายใต้แรงกระทำของฐานรองรับ

3.10.2. หาค่ากำลังรับน้ำหนักของดิน โดยรวมแรงกระทำบนจุดต่อทั้งหมดภายใต้ฐานรองรับหาร ด้วยความกว้าง ของฐานรองรับ บันทึกค่าลงในแฟ้มข้อมูล “Bearing Data”

## 3.11. การแสดงผลการวิเคราะห์

การแสดงผลของโปรแกรมอยู่ในรูปของแฟ้มข้อมูล (Text File) ต่าง ๆ เพื่อใช้แสดงผลการวิเคราะห์ปัญหา และเก็บสำรองชุดข้อมูลในการวิเคราะห์ปัญหาต่อเนื่อง ดังนี้

3.11.1. แฟ้มข้อมูล (Text Files) แสดงผลของการวิเคราะห์ปัญหา

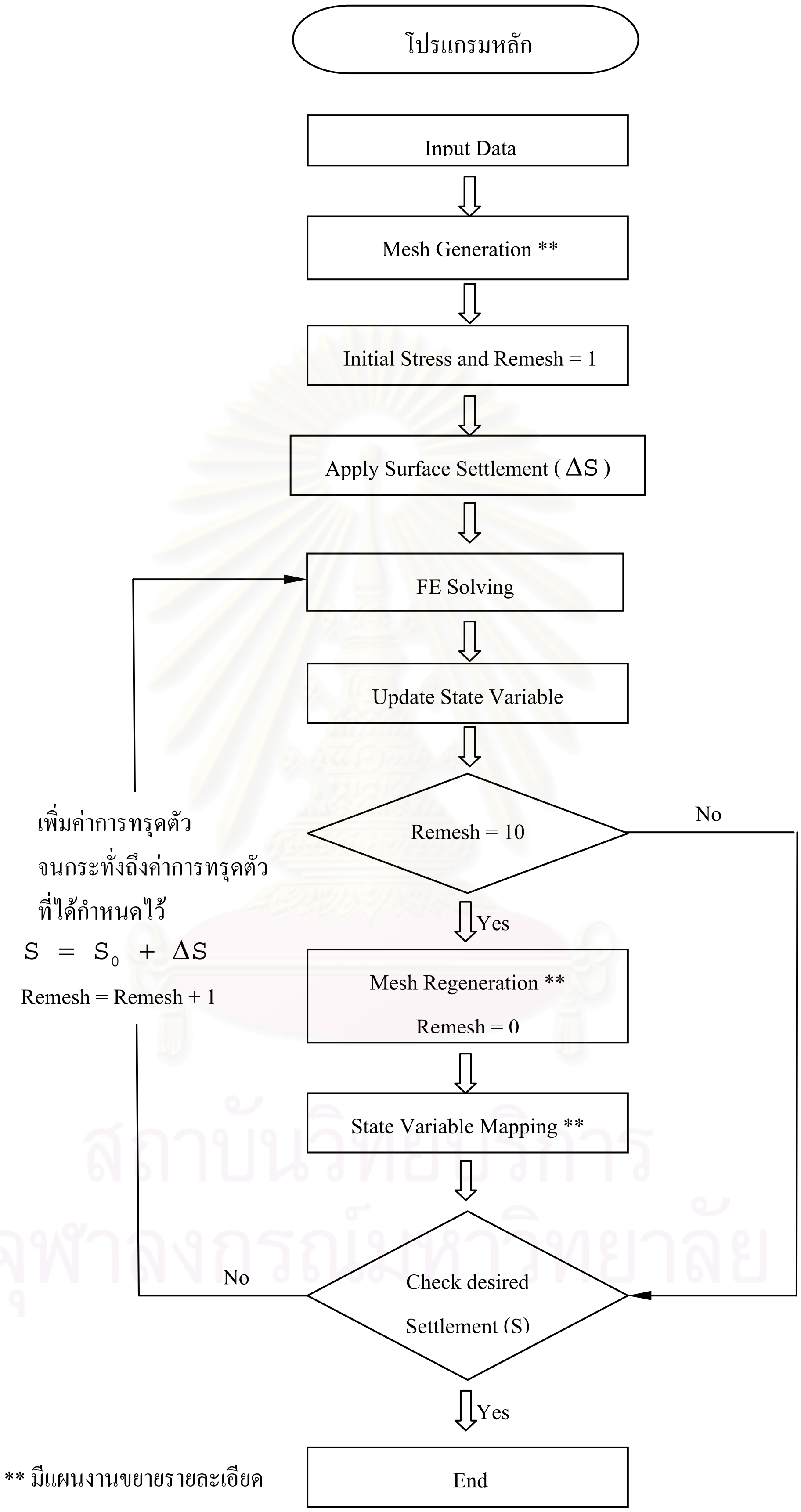
- แฟ้มข้อมูล “Output Time” แสดงผลของระยะเวลาของการคำนวณโปรแกรม
- แฟ้มข้อมูล “Bearing Data” แสดงผลระหว่างค่าของการเคลื่อนตัว และ หน่วยแรงแบกทานภายใต้ฐานราก

- แฟ้มข้อมูล “Tecplot” แสดงความสัมพันธ์ ของ โครงข่ายของชิ้นส่วน หมายเลขจุดต่อ หมายเลขชิ้นส่วน ตลอดจนค่าของการเคลื่อนตัวและความสัมพันธ์ ต่าง ๆ ของหน่วยแรงในแต่ละจุดต่อ จากการตรวจสอบผลของการวิเคราะห์ สามารถนำแฟ้มข้อมูลนี้แสดงผลทางกราฟิกได้ โดยการใช้ โปรแกรม Tecplot ในการแสดงผลเพื่อพิจารณาเฉพาะส่วนที่สนใจได้
- แฟ้มข้อมูล “Initial body forces” แสดงค่าของหน่วยแรงเริ่มต้นภายใต้ฐานรองรับ

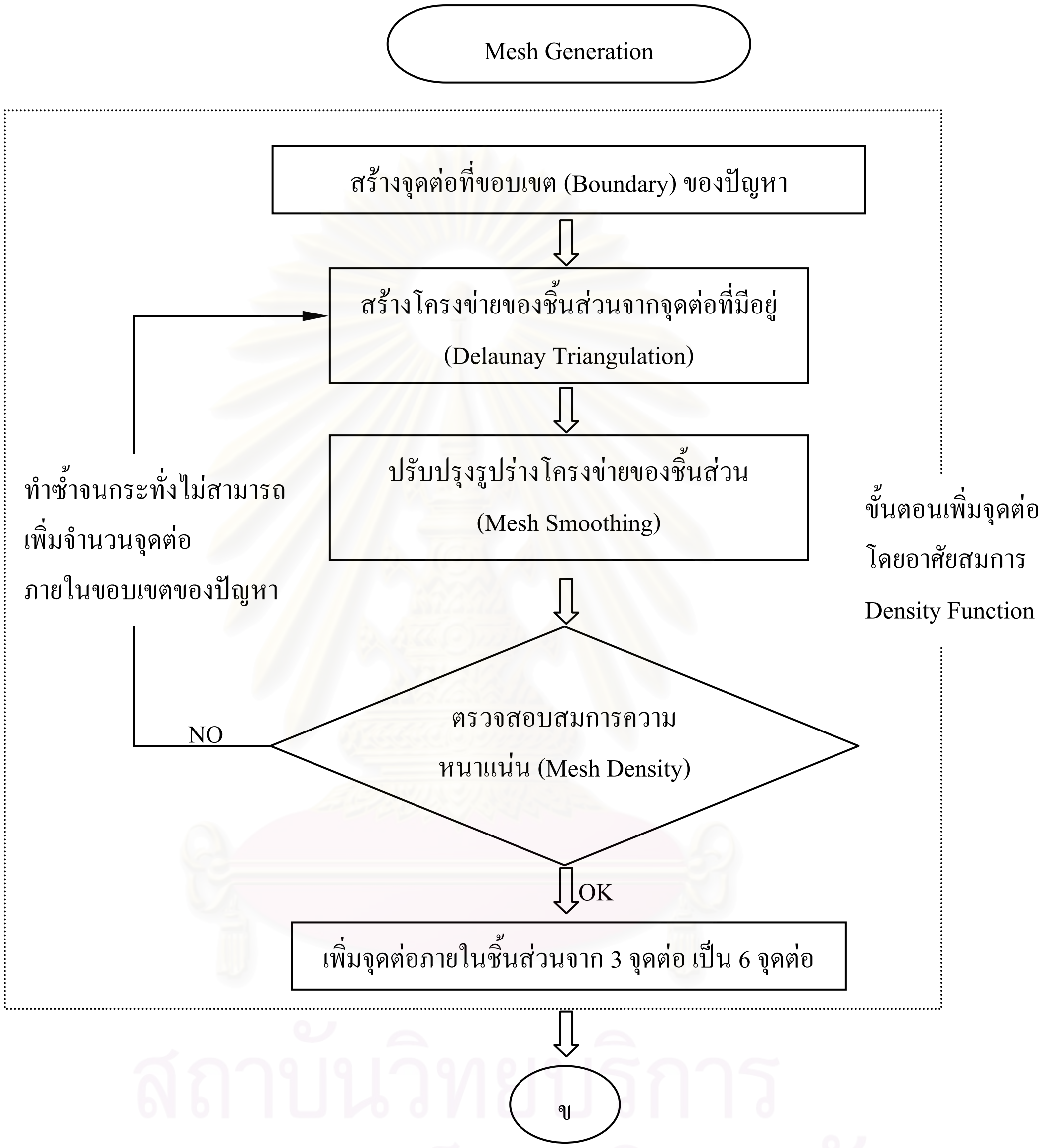
3.11.2.เรียกโปรแกรมย่อย Backup_data ทำการสำรองชุดข้อมูลต่าง ๆ ที่สำคัญ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา การคำนวณต่อเนื่อง

- แฟ้มข้อมูล “Backup data” ประกอบด้วยค่าของเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณต่อเนื่อง
- แฟ้มข้อมูล “Backup old” ประกอบด้วยด้วยชุดข้อมูล ค่าของหน่วยแรง ณ ตำแหนงเกาส์ทั้งหมดในวงรอบของการคำนวณที่ผ่านมา รวมทั้งชุดข้อมูลหมายเลข และ พิกัด ทั้งหมดของจุดต่อ
- แฟ้มข้อมูล “Backup bearing” ประกอบด้วยชุดข้อมูล ค่าความสัมพันธ์ ของการทรุดตัว และหน่วยแรงแบกทานในดิน

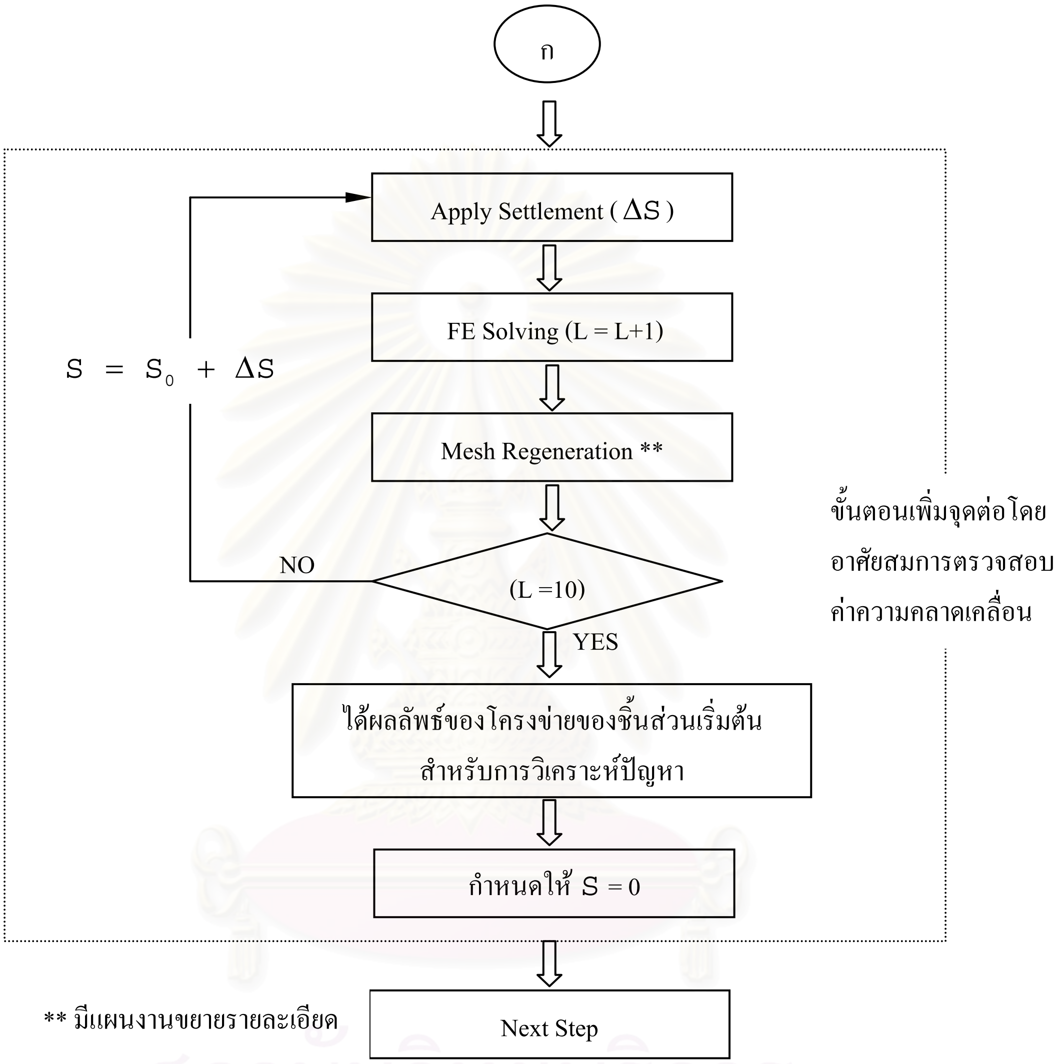
จากนั้นเพิ่มขนาดของการทรุดตัวในวงรอบถัดไป และ จะสิ้นสุดการวิเคราะห์ปัญหา เมื่อได้ขนาดของการทรุดตัวตามที่กำหนดไว้



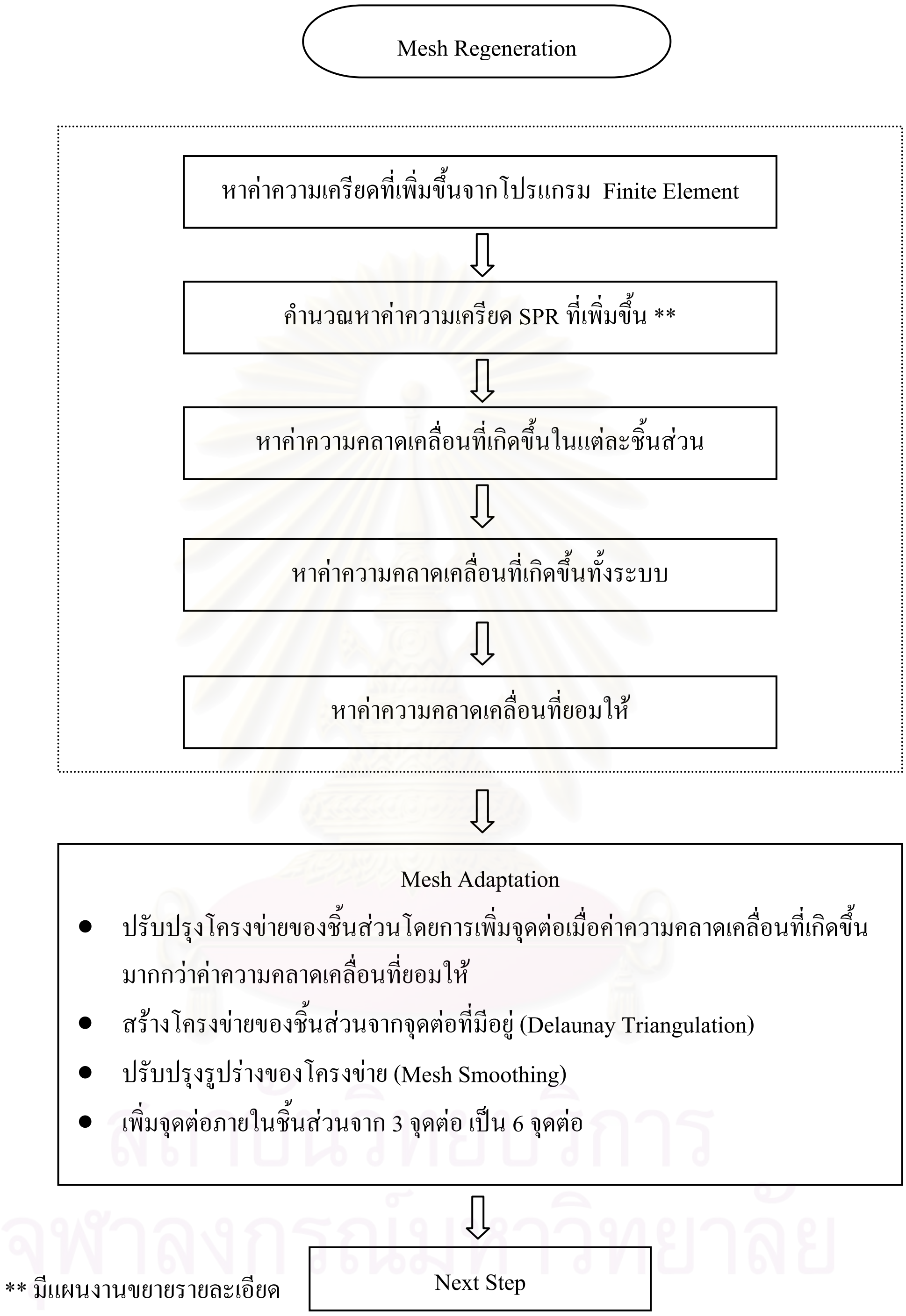

**รูปที่ 3.1 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมหลัก**




**รูปที่ 3.2 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ (ขั้นตอน ก: โครงข่ายของชิ้นส่วนควบคุมโดยสมการความหนาแน่น)**



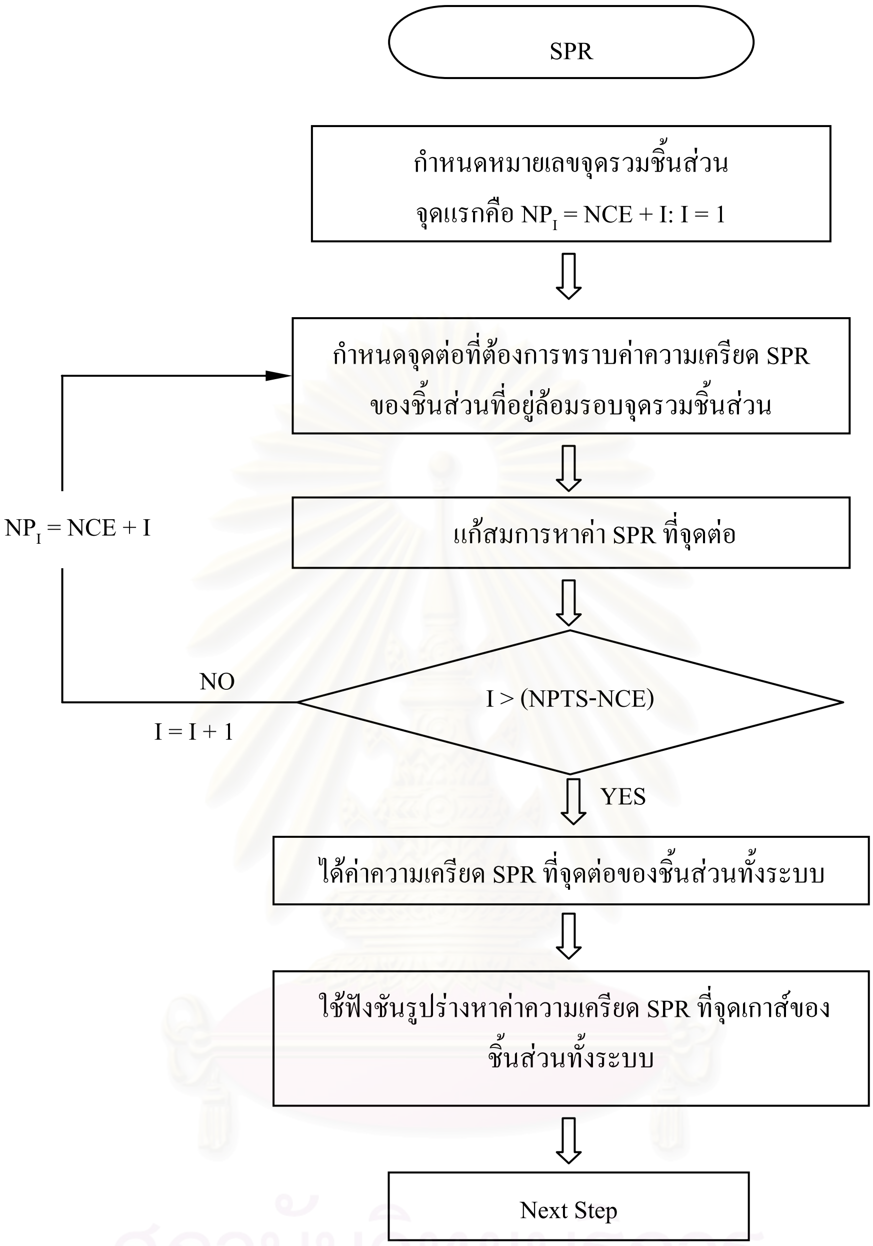

**รูปที่ 3.3 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนโดยระเบียบวิธีอัตโนมัติ (ขั้นตอน ข: โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นในการวิเคราะห์ปัญหา)**




**รูปที่ 3.4 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม เพิ่มจุดต่อและปรับปรุงพิกัดภายในโครงข่ายของปัญหา**




**รูปที่ 3.5 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม ถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะจากจุดต่อ ของชิ้นส่วนเดิมสู่จุดเกาส์ ของชิ้นส่วนใหม่**




NP$_I$ = หมายเลขจุดรวมชิ้นส่วน I

NCE = จำนวนจุดต่อทั้งหมด ณ ขอบเขตของปัญหา

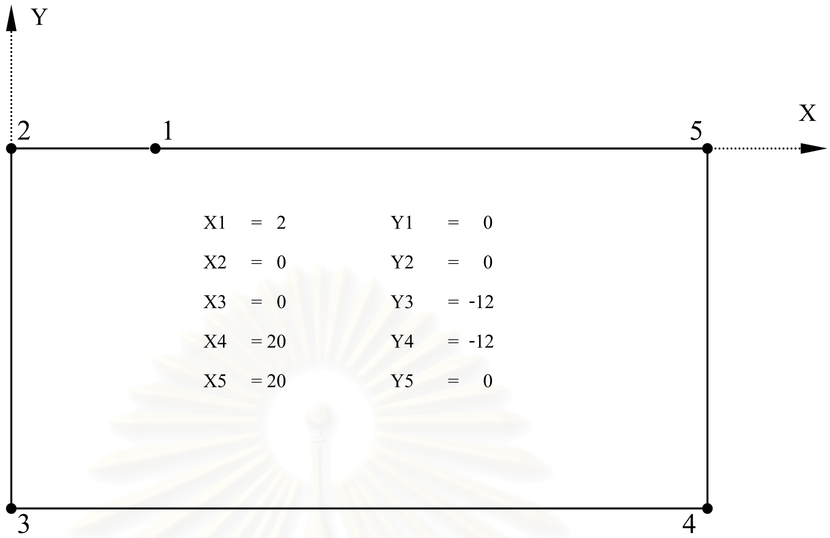
NPTS = จำนวนจุดต่อทั้งหมดในระบบ

จำนวนจุดรวมมวลทั้งหมด = NPTS - NCE

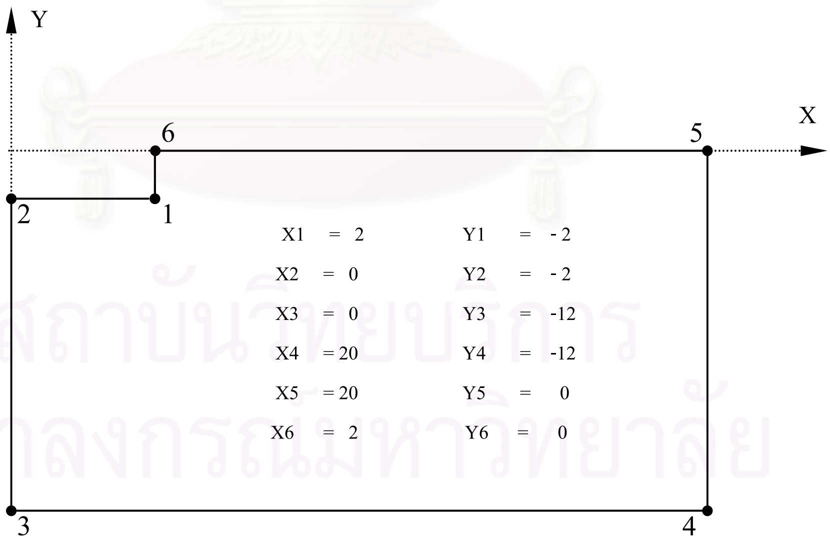
หมายเลขจุดรวมมวลมีค่าตั้งแต่ NCE + 1 ถึง NPTS

**รูปที่ 3.6 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม**

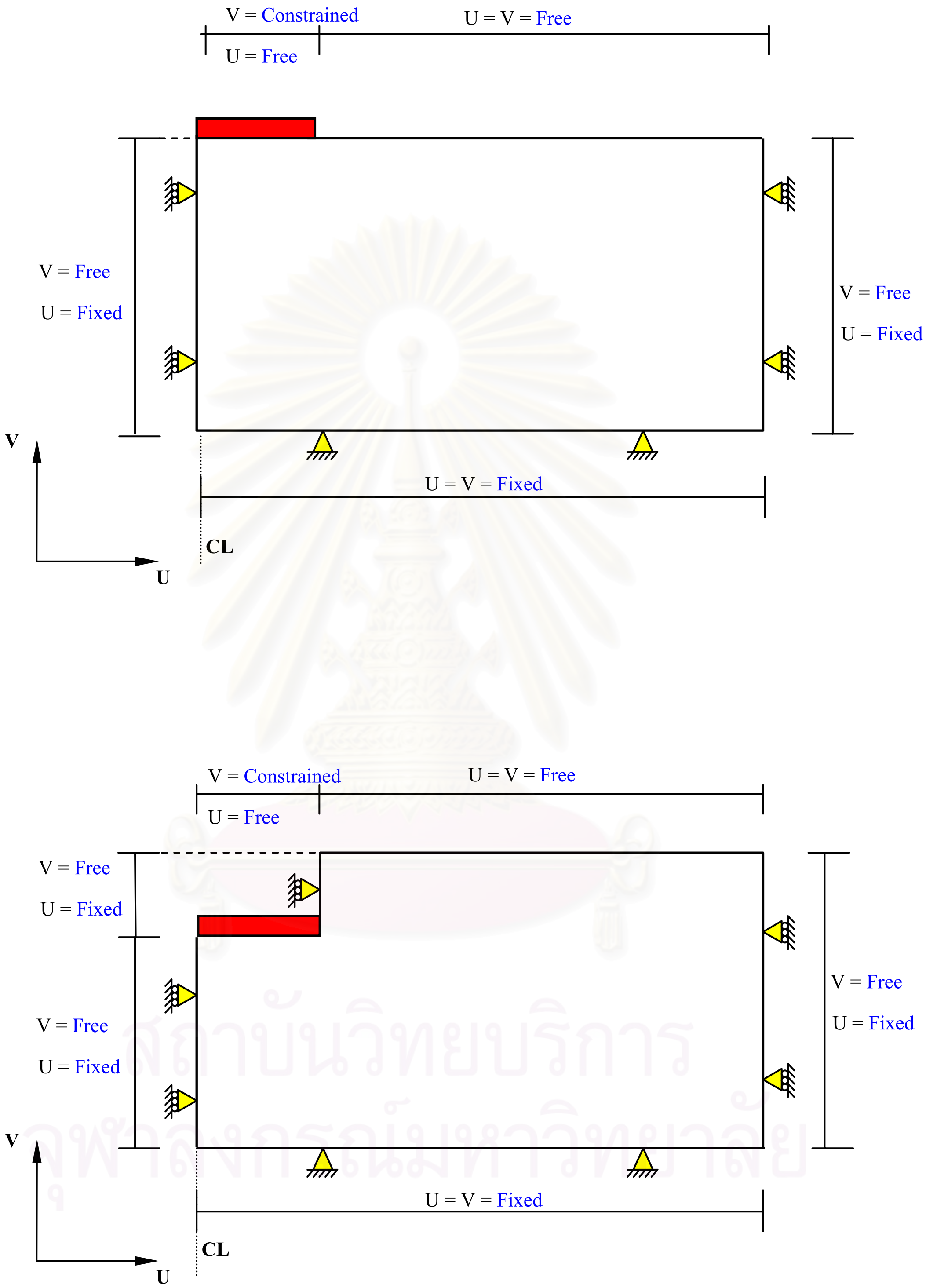
**Superconvergent Patch Recovery of Strain (SPR)**



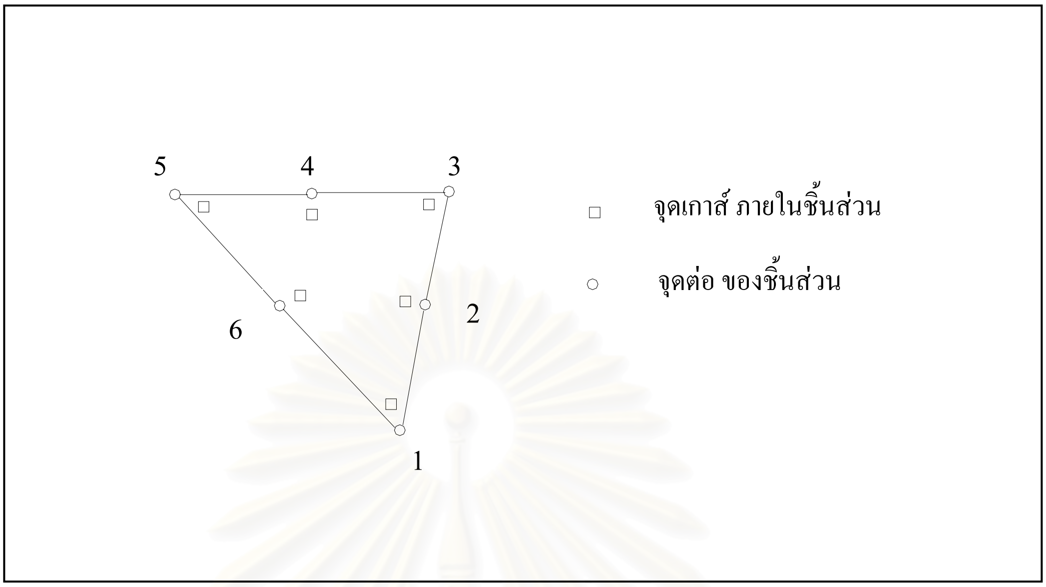

**รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูล จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ**



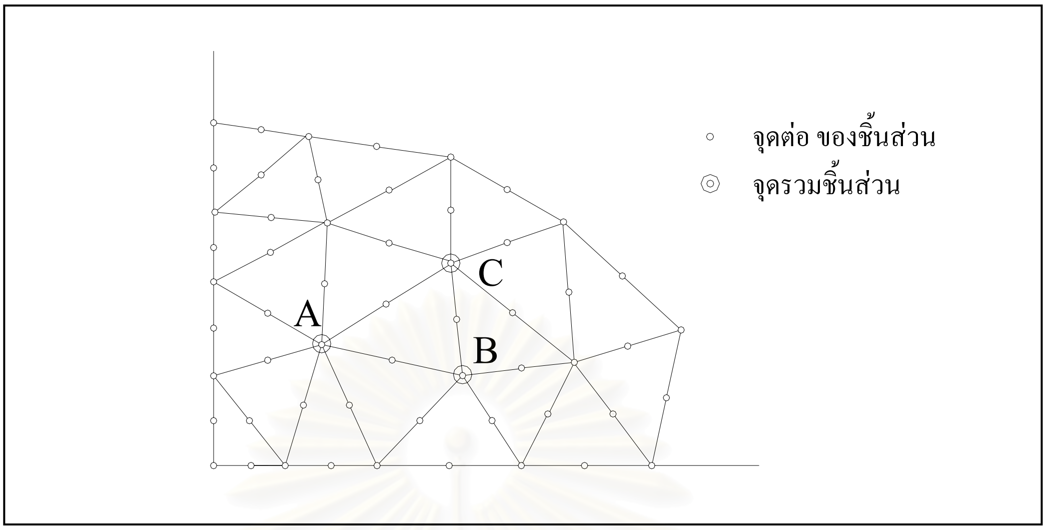

**รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูล จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ**



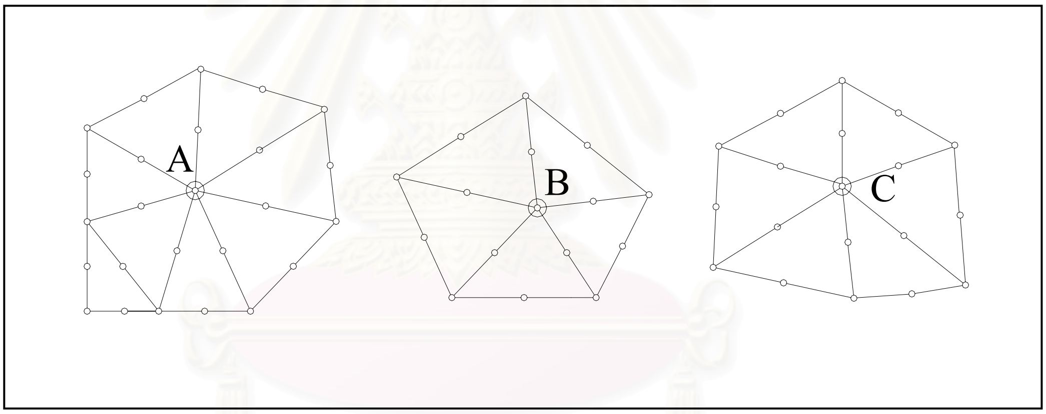

**รูปที่ 3.9 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition)**




**รูปที่ 3.10 หมายเลขและตำแหน่งของจุดต่อ ในแต่ละชิ้นส่วน**

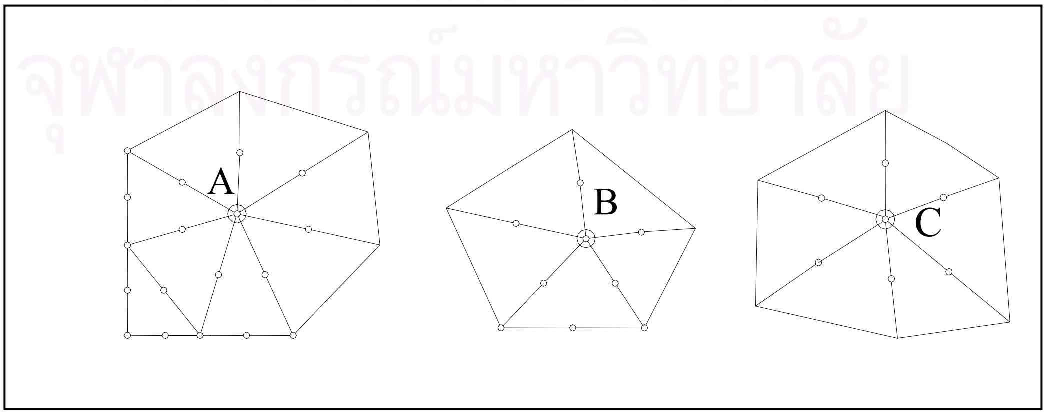



**รูปที่ 3.11 ตำแหน่งตัวอย่างของจุดรวมชิ้นส่วน A, B และ C ตามลำดับ**

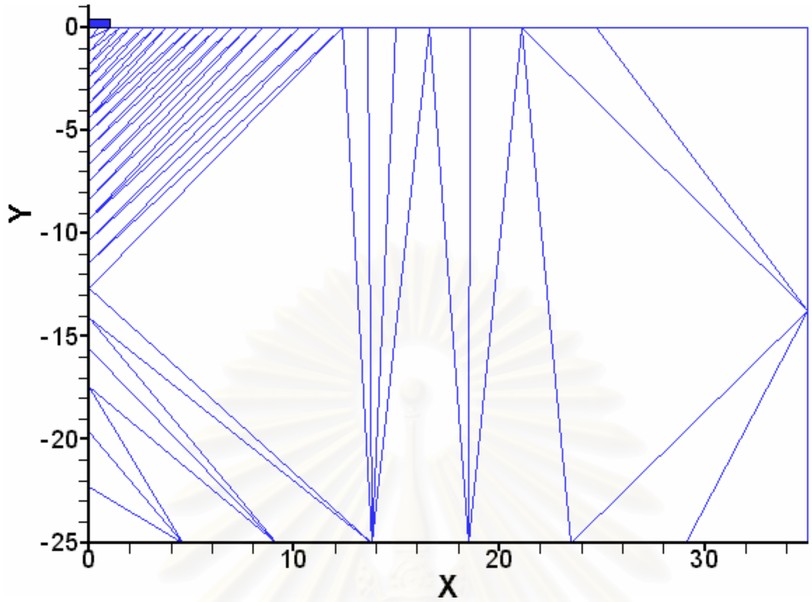



**รูปที่ 3.12 ชิ้นส่วนที่อยู่ล้อมรอบ หรือ ชิ้นส่วนที่มีอิทธิพลต่อ จุดรวมชิ้นส่วน**

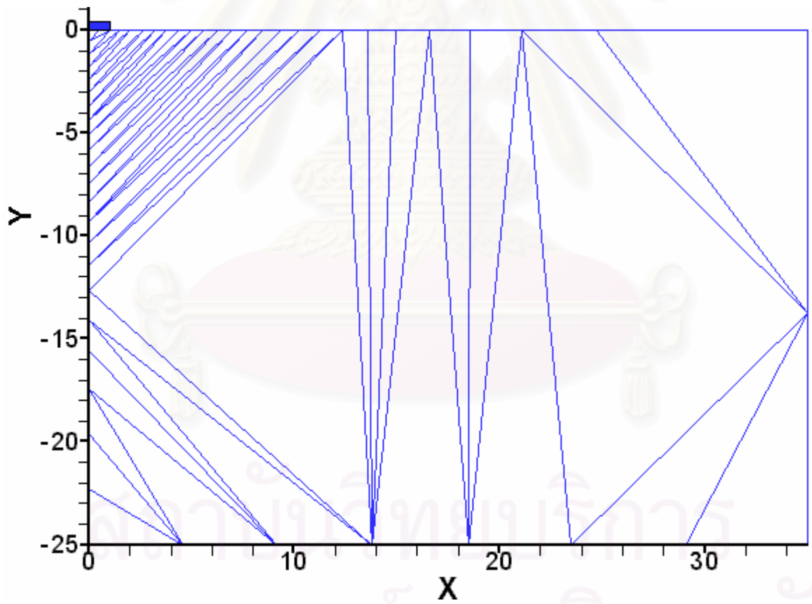





**รูปที่ 3.13 จุดต่อภายในกลุ่มของชิ้นส่วนที่ต้องการทราบค่าความเครียด SPR**



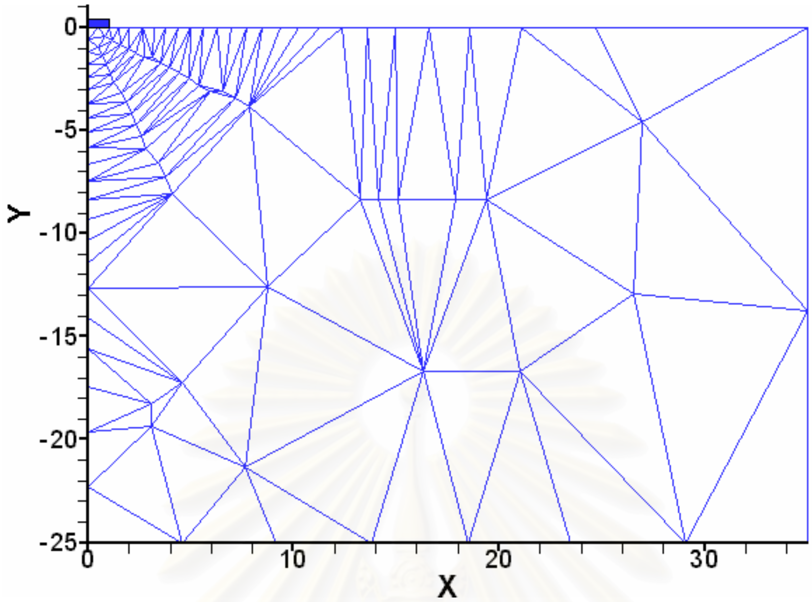

(ก)



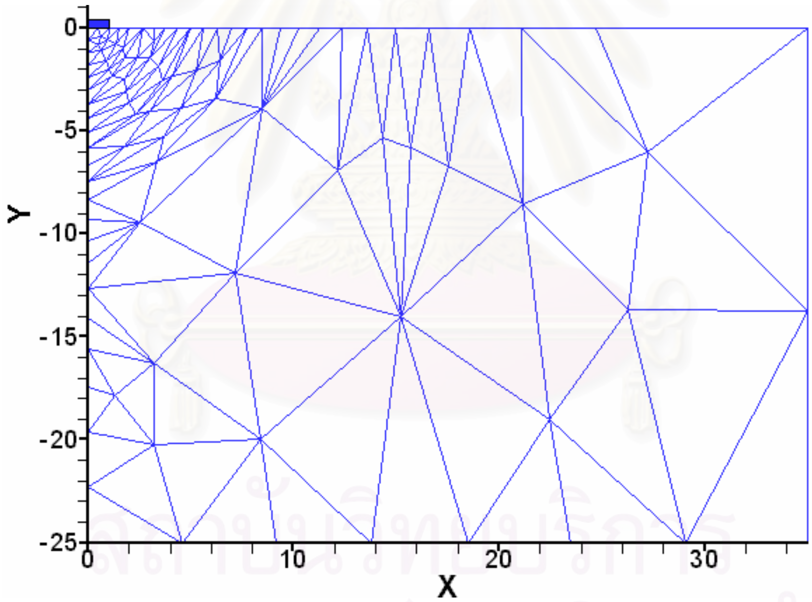

(ข)



**รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 1)**
**แสดงการเพิ่มจุดต่อที่ขอบเขตของปัญหา**
**(ก)สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)**
**(ข)ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)**



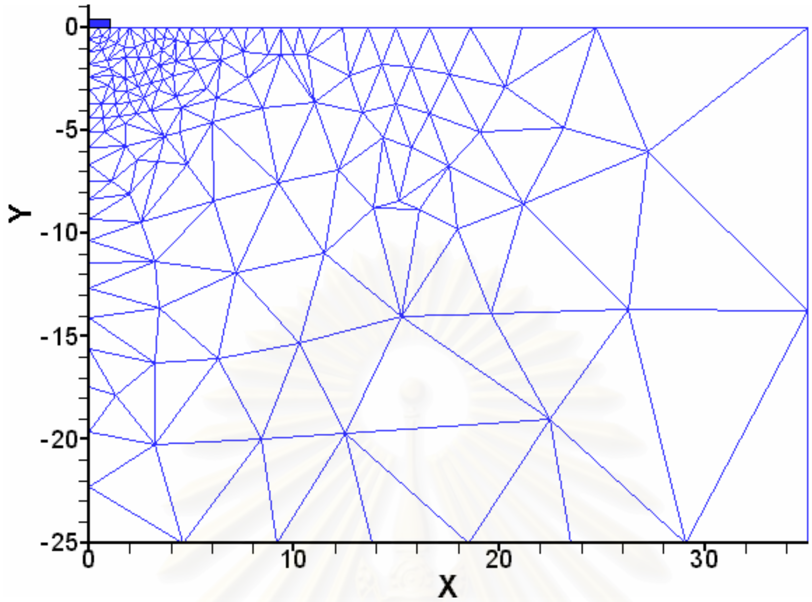

(ก)



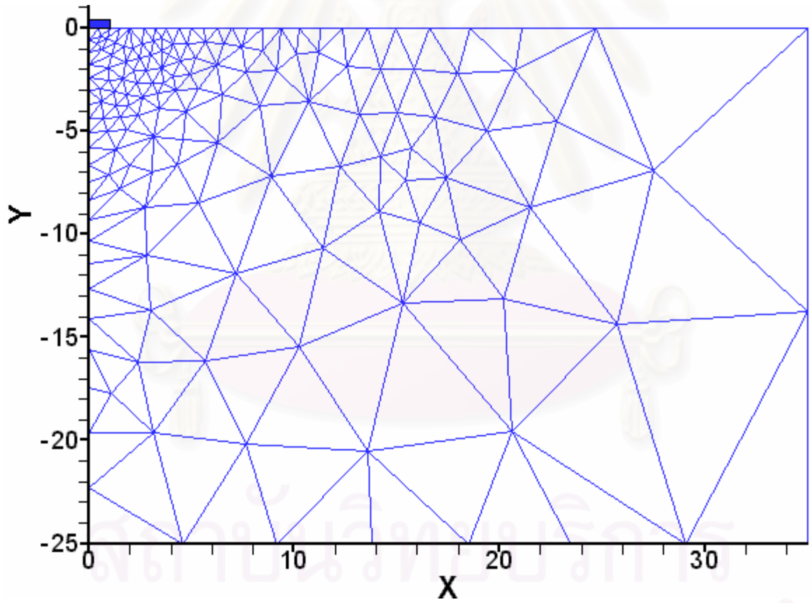

(ข)



**รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 2)**
**แสดงการเพิ่มจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา**
**(ก)สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)**
**(ข)ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)**




(ก)



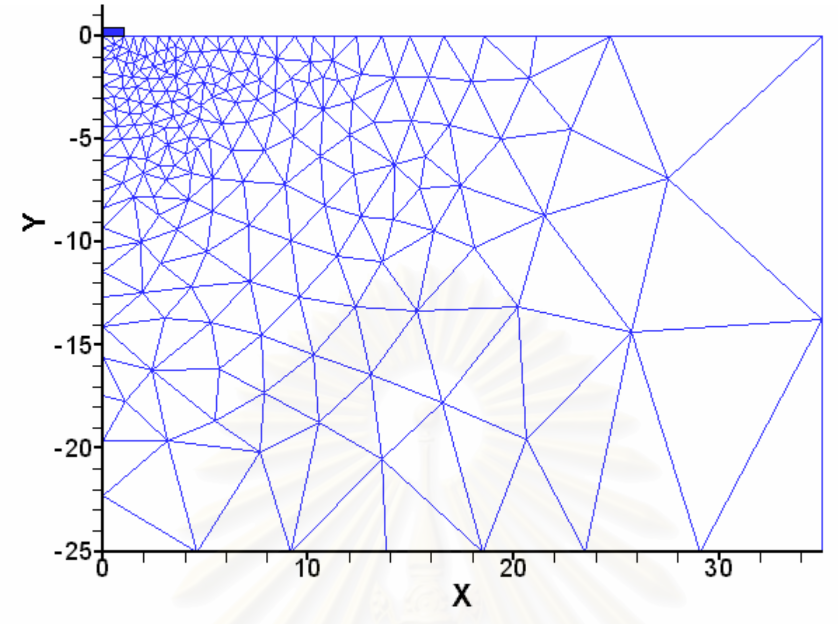

(ข)

**รูปที่ 3.16 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 3)**

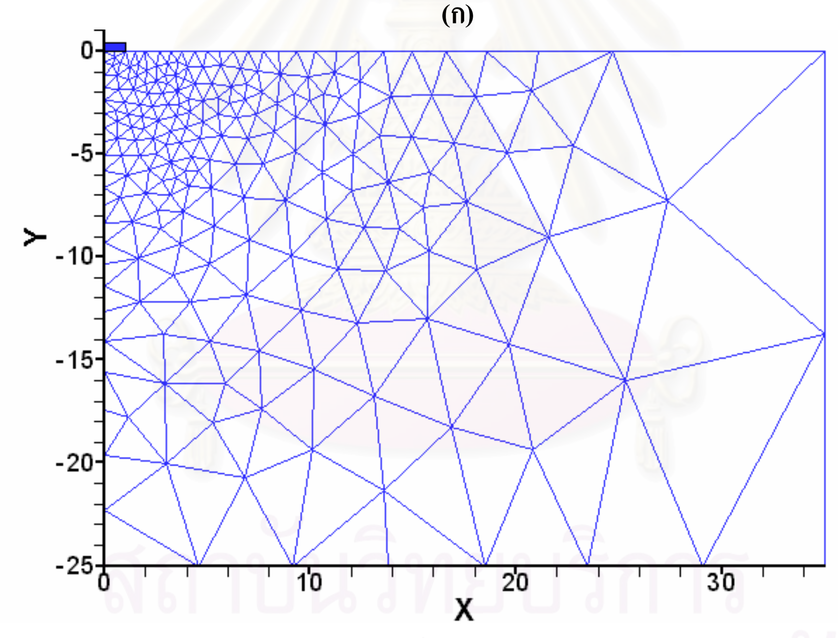
**แสดงการเพิ่มจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา**

**(ก)สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)**

**(ข)ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)**



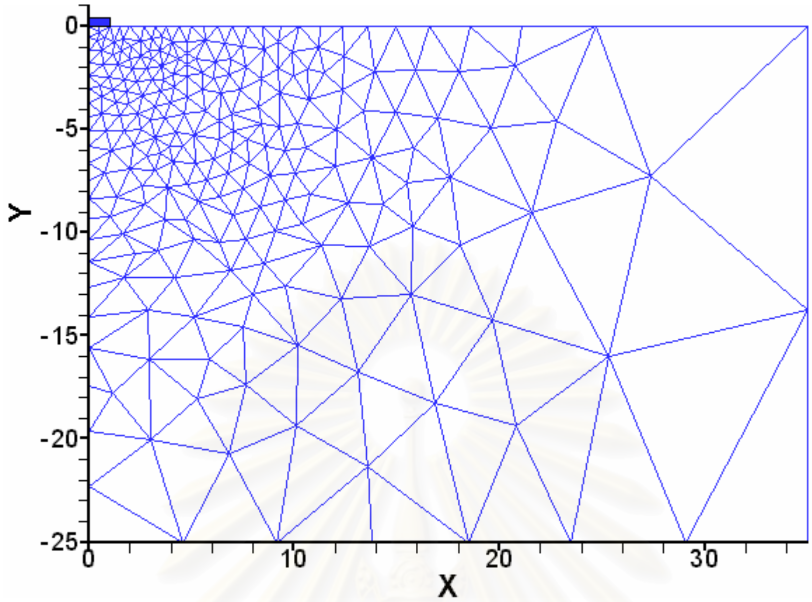

(ก)



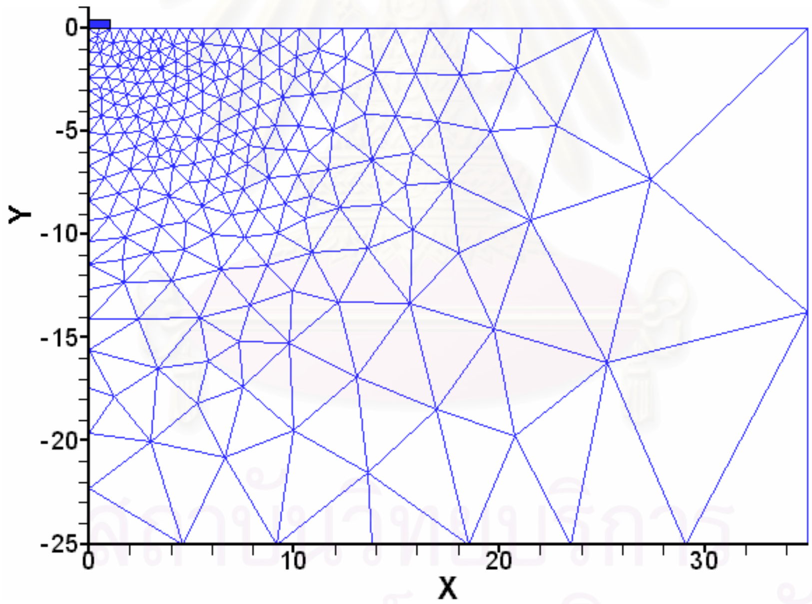

(ข)



**รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 4)**
**แสดงการเพิ่มจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา**
**(ก)สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)**
**(ข)ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)**



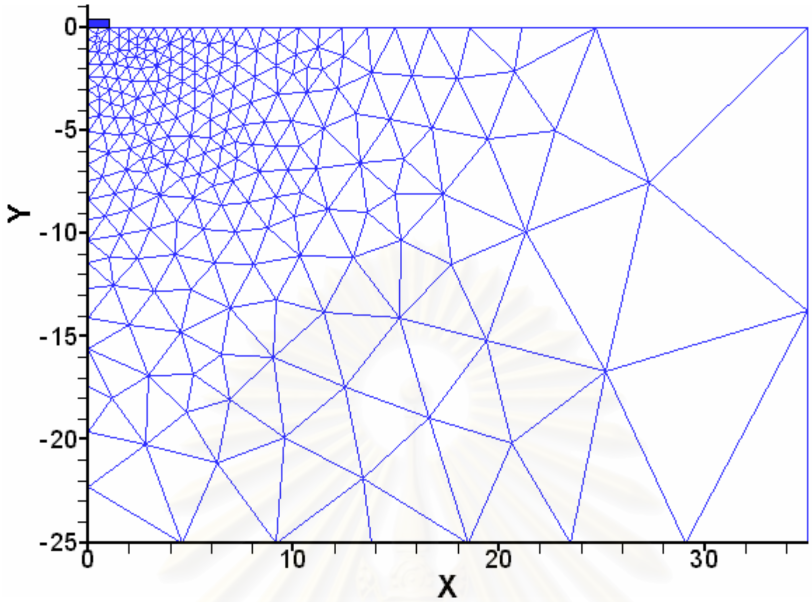

(ก)



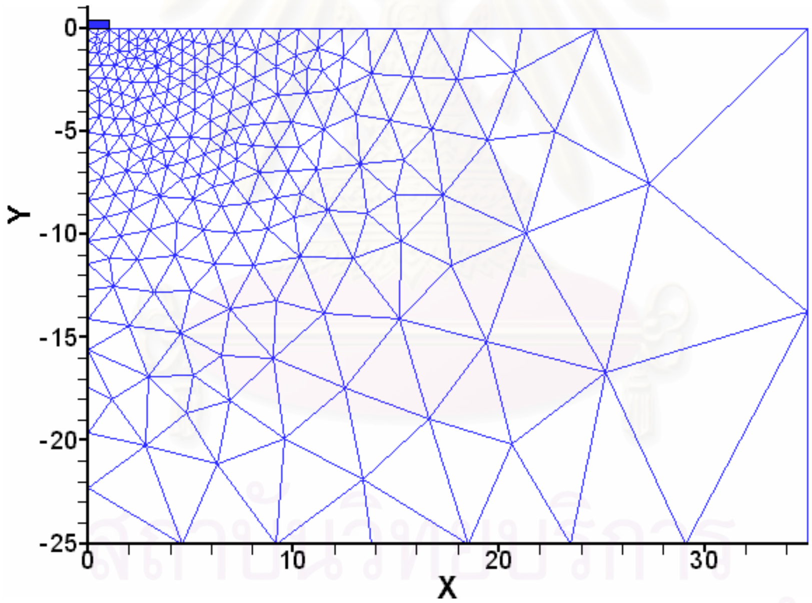

(ข)



**รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ 5)**
**แสดงการเพิ่มจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา**
**(ก)สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (Delaunay Triangulation)**
**(ข)ปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing)**




(ก)




(ข)



**รูปที่ 3.19 ตัวอย่างการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วน (วงรอบที่ n) จนกระทั่งไม่สามารถเพิ่มจุดต่อที่ขอบเขตของปัญหาจากสมการความหนาแน่น และไม่สามารถเคลื่อนย้ายพิกัดจากการปรับปรุงรูปร่างของชิ้นส่วน (Mesh Smoothing) ดังนั้นจะได้โครงข่ายของชิ้นส่วนที่ควบคุมโดยสมการความหนาแน่น**

# บทที่ 4

# การทดสอบความสามารถของระบบการคำนวณ

## 4.1. บทนำ

หลักการของวิธีการประยุกต์ใช้งานที่ปรับปรุงใหม่ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถแบ่งวิธีการวิเคราะห์ปัญหาออกเป็น 2 รูปแบบคือ การวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินกรณีที่ไม่มีการเสียรูปของมวลดิน (SSC) และ กรณีที่มีการเสียรูปของมวลดิน(LSC) การวิเคราะห์ปัญหากรณี SSC หรือ หลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย คือจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนจากการวิเคราะห์ปัญหาในแต่ละวงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ แต่จะมีการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนและถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะภายหลังจากการปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วน สำหรับการวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC หรือกรณีความเครียดมาก คือ จะมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนจากการวิเคราะห์ปัญหาในแต่ละวงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ พร้อมทั้งการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนและถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะภายหลังจากการปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วน

4.1.1. ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแฟคเตอร์ของฐานราก (Depth Factor) นำเสนอโดย Meyerhof (1963) และ Hansen (1970) รูปที่ 4.1 แสดงค่า Bearing Capacity factor, $N_C$ ของ Embedded Footing (Skempton, 1951)

4.1.2. วิเคราะห์ปัญหาของฐานรองรับ $B = 2$ เมตร โปรแกรมจะวิเคราะห์ปัญหาครึ่งหนึ่งของความกว้างของฐานรองรับ $B' = 1$ เมตร โดยมีขอบเขตของปัญหา กว้าง 35 เมตร และ ลึก 35 เมตร เพิ่มอัตราการทรุดตัวของฐานรองรับ $\Delta S/B = 0.0005$ ดังนั้น $\Delta S$ เท่ากับ 0.001 เมตรต่อรอบ

ขอบเขตของปัญหาภายในแบบจำลองของมวลดิน มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดินภายใต้ฐานรองรับ และวิทยานิพนธ์นี้ ใช้ขอบเขตที่กว้างมากเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินที่เป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอดภายในแบบจำลองของปัญหา

คุณสมบัติของดิน ค่าความเชื่อมแน่นของดิน $S_u = 1$ kN/m$^2$. มุมเสียดทานภายในของดิน, $\phi$ และ Dilation angle, $\psi$ เท่ากับ 0 ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น $E = 500$ kN/m$^2$. ค่าอัตราส่วนปัวซอง $\nu = 0.495$

**4.2. การวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินกรณีที่ไม่มีการเสียรูปของมวลดิน**

การวิเคราะห์ปัญหากรณี SSC หรือ หลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย คือจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนจากการวิเคราะห์ปัญหาในแต่ละวงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ แต่จะมีการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนและถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะภายหลังจากการปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วน

(ก) **ตัวอย่างที่ 1** วิเคราะห์ปัญหา Embedded Footing ของฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบ กรณี Small Strain (SSC) และมีค่าคุณสมบัติของมวลดิน พร้อมด้วยขนาด และ ขอบเขตของฐานรองรับตามหัวข้อที่ 4.1.2 โดยสมมุติ ว่า $\gamma = 0$ kN /m$^3$ จากรูปที่ 4.2 แสดงค่า Load Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื่องที่มีค่าอัตราส่วน D/B = 0, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 และ ได้ผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาที่มีค่า $F/(BS_u)$ ลู่เข้าสู่ค่าคงที่ จากความแปรผันของอัตราส่วน D/B ตามลำดับ ดังนี้ 5.19, 5.68, 6.11,6.46, 6.74, 7.26, 7.68, 7.95, 8.26 จากรูปที่ 4.3 นำผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาเปรียบเทียบค่า Nc ระหว่างวิธีไฟไนเอลิเมนต์ กับ Empirical Method และค่า $N_c$ จากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์ สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า $N_c$ เทียบกับค่า D/B ในรูปของสมการดังนี้

$$N_c = (2+\pi) * \left(1 + k * \mathrm{Tan}^{-1}(D/B)\right) \tag{4.1}$$

$$N_c = (2+\pi) * F_{cd} \tag{4.2}$$

$$F_{cd} = 1 + k * \mathrm{Tan}^{-1}(D/B) \tag{4.3}$$

จากผลของ Regression Analysis ได้ค่าคงที่ k มีค่าเท่ากับ 0.41 เมื่อ D/B > 0 และมีค่า Coefficient of Correction, $R^2 = 0.9433$

จากการวิเคราะห์ปัญหาเปรียบเทียบค่า $N_c$ ระหว่างวิธีไฟไนเอลิเมนต์ กับ Empirical Method ในรูปที่ 4.3 พบว่าค่า $N_c$ ที่นำเสนอโดย Meyerhof (1963) มีช่วงที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน เมื่อค่าอัตราส่วน $D/B > 2$ และ ค่า $N_c$ ที่นำเสนอโดย Hansen (1970) มีช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน เมื่อค่าอัตราส่วน $D/B > 1$ ส่วนค่า $N_c$ นำเสนอโดย Skempton (1951) ใช้งานได้ทุกช่วงอัตราส่วนตั้งแต่ $D/B \geq 0$

จากรูปที่ 4.4 สามารถนำเสนอ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nc เทียบกับค่า D/B จากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์ ได้ทั้งหมด 3 แนวทาง โดยที่แนวทางที่ 1 แสดงไว้ดังรูปที่ 4.3

ส่วนแนวทางที่สองได้แบ่งค่า $N_c$ ออกเป็นสองช่วงคือ $D/B < 1$ และ $D/B \geq 1$ พบว่าในช่วง $0.5 < D/B < 1$ ได้ค่า $N_c$ ที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

และในแนวทางที่สาม ได้แบ่งค่า $N_c$ ออกเป็นสองช่วงคือ $D/B < 0.5$ และ $D/B \geq 0.5$ ซึ่งเป็นอีกแนวทางที่ ค่า $N_c$ ใช้งานได้ทุกช่วงอัตราส่วนตั้งแต่ $D/B \geq 0$ และค่า $N_c$ ที่ได้จะมีค่าที่

ใกล้เคียงกับผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์ มากที่สุดจากสามแนวทางที่ได้มีการนำเสนอมา

(ข) **ตัวอย่างที่ 2** วิเคราะห์ปัญหาของฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบกรณี SSC เมื่อ D/B = 0.5 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน ระหว่างกรณี $\gamma = 0$ kN/m$^3$ และ $\gamma = 16$ kN/m$^3$ กำหนดค่าคุณสมบัติของมวลดิน พร้อมด้วยขนาด และ ขอบเขตของฐานรองรับตามหัวข้อที่ 4.1.2

รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ปัญหาเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน $q_{net}$ ระหว่างกรณี $\gamma = 0$ kN/m$^3$ และ $\gamma = 16$ kN/m$^3$ ให้ค่าของผลเฉลยที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่า $q_{net} \approx 6.447$ kN/m$^2$

การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถหาคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดิน $q_u$ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_u = q_{net} + \gamma D \tag{4.4}$$

ค่าตัวแปร $\gamma D$ จะเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูล “Initial body forces”

จากผลของการวิเคราะห์ปัญหากรณี $\gamma = 16$ kN/m$^3$ ค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน $q_{net} = 6.447$ kN/m$^2$ และค่า $\gamma D$ จากแฟ้มข้อมูล “Initial body forces” มีค่า $\gamma D = 16.279$ kN/m$^2$ ดังนั้น สามารถหาค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดินที่รับได้ $q_u$ มีค่าเท่ากับ 22.726 kN/m$^2$

จากผลเฉลยของการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถหาพฤติกรรมของค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดินที่รับได้ และสามารถประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาพฤติกรรมของมวลดินในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป เช่น กรณี $K_0 \neq 1$

(ค) **ตัวอย่างที่ 3** วิเคราะห์ปัญหา Embedded Footing ของฐานรากวงกลมผิวเรียบ กรณี Small Strain (SSC) และมีค่าคุณสมบัติของมวลดิน พร้อมด้วยขนาด และ ขอบเขตของฐานรองรับตามหัวข้อที่ 4.1.2 โดยสมมุติ ว่า $\gamma = 0$ kN /m$^3$ พร้อมทั้งการเปรียบเทียบค่า $N_C$ ที่ได้จากวิธีไฟไนเอลิเมนต์ระหว่างฐานรากต่อเนื่อง กับ ฐานรากวงกลม

รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า $N_C$ ที่ได้จากวิธีไฟไนเอลิเมนต์ระหว่างฐานรากต่อเนื่องวางบนผิวดิน ($N_C$=5.19) กับ ฐานรากวงกลมวางบนผิวดิน ($N_C$=6.02) ค่าอัตราส่วนระหว่าง $N_C$ ของฐานรากวงกลม ส่วนด้วย $N_C$ ของฐานรากต่อเนื่อง เท่ากับ 1.16

ค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของฐานรากวงกลมจากสมการของ Terzaghi’s Bearing Capacity (1943) กรณี $\phi = 0$ ตามเงื่อนไข $D \leq B$ มีค่าดังสมการ

$$q_u = 1.3 * cN_c + \gamma D \tag{4.5}$$

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ ปัญหาและค่าสัดส่วนระหว่างค่า $N_C$ ของฐานรากวงกลมต่อค่า $N_C$ ของฐานรากต่อเนื่อง

ผลการวิเคราะห์ปัญหาฐานรากวงกลม

1) กราฟ Load Settlement Curve มีแนวโน้มไม่ลู่เข้าสู่ค่าคงที่กรณี D/B=3
2) กราฟตัดกันเองกรณี D/B=1, 2, 3 และ 4

กรณีที่กราฟ Load Settlement Curve ไม่ลู่เข้าสู่ค่าคงที่ เพราะว่าชิ้นส่วนที่ในการวิเคราะห์ปัญหาอาจจะมีความยืดหยุ่นไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาของฐานรากวงกลม (Axisymmetric Problem) การแก้ไขปัญหาในกรณีนี้จะทำการเพิ่มจุดต่อของชิ้นส่วนจากชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ เป็น ชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 15 จุดต่อในการวิเคราะห์ปัญหา

รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่า $N_c$ ระหว่างวิธีไฟไนเอลิเมนต์ กับ Empirical Method ของฐานรากวงกลม

รูปที่ 4.9 แสดงผลของ Unit Weight ที่มีต่อค่า Load Settlement Curve ของฐานรากวงกลม D/B = 0.5 ระหว่างกรณี $\gamma$ = 0 kN/m$^3$ และ $\gamma$ = 16 kN/m$^3$
กรณี $\gamma$ = 0 kN/m$^3$ $q_{net} \approx$ 7.87 kN/m$^2$

ผลของการวิเคราะห์ปัญหากรณี $\gamma$ = 16 kN/m$^3$ ค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน $q_{net}$ = 8.00 kN/m$^2$ และค่า $\gamma D$ จากแฟ้มข้อมูล “Initial body forces” มีค่า $\gamma D$ =16.213 kN/m$^2$ดังนั้นสามารถหาค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดินที่รับได้ $q_u$ มีค่าเท่ากับ 24.213 kN/m$^2$

จากภาคผนวก ก แสดงตัวอย่างโครงข่ายของชิ้นส่วน ค่าของ Failure zone, ทิศทางของความเค้นหลักเทียบกับแนวแกนดิ่ง ($\delta$ , องศา) และ ค่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวของมวลดินภายใต้ฐานรองรับ ของผลเฉลยจากการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC) กรณี D/B=0 และ D/B=2

## 4.3. การวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินกรณีที่มีการเสียรูปของมวลดิน

การวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC หรือกรณีความเครียดมาก คือ จะมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนจากการวิเคราะห์ปัญหาในแต่ละวงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ พร้อมทั้งการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนและถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะภายหลังจากการปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วน

(ก) **ตัวอย่างที่ 4** วิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน Large Strain (LSC) เทียบกับผลการวิเคราะห์ปัญหา Embedded Footing ของฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบ กรณี Small Strain (SSC) และมีค่าคุณสมบัติของมวลดิน พร้อมด้วยขนาด และ ขอบเขตของฐานรองรับตามหัวข้อที่ 4.1.2 โดยสมมุติว่า

$\gamma = 0$ kN/m$^3$

รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบ Load Settlement Curve และ ความสัมพันธ์ระหว่าง Small Strain (SSC) กับ Large Strain (LSC) เมื่อ $\gamma = 0$ kN/m$^3$ โดยที่ ค่า SR = S/B (กรณี LSC) = D/B (กรณี SSC)

จากผลการวิเคราะห์ ค่า Nc เมื่อ $\gamma = 0$ kN/m$^3$ กรณี LSC เทียบกับ กรณี SSC มีค่าใกล้เคียงกันมาก และมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากขั้นตอน การถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงหลังจากที่ได้มีการปรับปรุงโครงข่ายของชิ้นส่วน ผลเฉลยที่ได้จะมีค่าที่กระโดดเพียงเล็กน้อยแต่ท้ายที่สุดค่าผลเฉลยที่ได้ก็จะลู่เข้าสู่ค่า ปกติที่ควรจะเป็น

จากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินในสภาวะการเคลื่อนตัวมากโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อ $\gamma = 0$ kN/m$^3$ หลักการในวิทยานิพนธ์นี้สามารถหาพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน กับ ค่าการเคลื่อนตัวในสภาวะการเคลื่อนตัวมากของมวลดินได้ ดังนั้นเราสามารถประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวมากของมวลดินในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป

(ข) **ตัวอย่างที่ 5** วิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน Large Strain (LSC) กรณีฐานรากต่อเนื่อง $\gamma \neq 0$ kN/m$^3$ มีค่าคุณสมบัติของมวลดิน พร้อมด้วยขนาด และ ขอบเขตของฐานรองรับตามหัวข้อที่ 4.1.2

จากหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย สามารถหาค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดิน จากวิธี Superposition ได้ค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดินดังสมการ

$$q_u = cN_cF_{cd} + \gamma DF_{qd} \tag{4.6}$$

และผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหา กรณี LSC ค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดินภายใต้ฐานราก ที่ควรจะเป็นดังสมการ

$$q_u = cN_cF_{cd} + \gamma SF_{qd} \tag{4.7}$$

D คือระยะความลึกจากฐานรองรับถึงผิวดิน (Depth footing) และ S คือค่าการทรุดตัวภายใต้ฐานรองรับ (Settlement)

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบ Load Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื่อง ระหว่าง กรณี SSC กับ กรณี LSC มีค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน $\gamma = 0, 13, 16, 21$ kN/m$^3$

จากภาคผนวก ข แสดงรูปตัวอย่างการเคลื่อนตัวโครงข่ายของชิ้นส่วน ของวัตถุเคลื่อนตัวจากผิวดินจมลงไปในมวลดิน พบว่าค่าการทรุดตัวของฐานรองรับที่จมลงไปในมวลดินไม่มีความสัมพันธ์ หรือ

ไม่มีผลต่อการเพิ่มค่า $q_u$ ของมวลดินภายใต้ฐานรองรับและค่า $q_u$ ของมวลดินที่เพิ่มขึ้นภายใต้ฐานรองรับ มาจากค่าการยกตัวของมวลดินจากระดับผิวดินเดิม

ในวิทยานิพนธ์นี้ การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้หลักการสมดุลระหว่างค่าของหน่วยแรงภายในแบบจำลอง กับ แรงกระทำภายนอกที่กระทำบนฐานรองรับ ได้ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ปัญหาที่เปรียบเทียบผลของ ความลึก กรณี S = D เพิ่มเติมดังนี้

- ผลที่ได้จากการคำนวณนี้อยู่ในการวิเคราะห์ แบบ Short Term
- กรณี LSC กำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดิน ($q_u$) มีค่าเท่ากับกำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน ($q_{net}$) เมื่อวิเคราะห์ปัญหาฐานรากวางบนผิวดิน D/B = 0
- ค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดินภายใต้ฐานราก $q_{net}$ กรณี LSC จะมีค่าที่สูงกว่ากรณี SSC เนื่องมาจากค่าการยกตัวของมวลดินจากระดับผิวดินเดิม
- การวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินภายใต้ของฐานรองรับเมื่อ $\gamma \neq 0$ kN/m$^3$ กรณี SSC และ กรณี LSC มีพฤติกรรมที่ไม่สอดคล้องกันและแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง
- กราฟหน่วยแรงและการทรุดตัว แสดงการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับน้ำหนักของฐานรากอย่างมากซึ่งมีผลมาจากมวลดินด้านนอกที่อยู่ชิดกับขอบฐานรากยกตัวขึ้นและเพิ่มผลน้ำหนักบรรทุกเมื่อฐานรากเคลื่อนตัวจมลึกลงไปในดิน กำลังรับน้ำหนักของฐานรากที่ได้จากวิธี Superposition ของสมการ Terzaghi จากส่วนประกอบค่าความเชื่อมแน่นของดินและน้ำหนักบรรทุกมีค่าสูงกว่าค่าที่วิเคราะห์ได้อย่างมาก ซึ่งแสดงว่าสมการ Terzaghi ไม่ปลอดภัยและไม่เหมาะสมในการออกแบบฐานรากในสภาวะการทรุดตัวมาก

- กราฟหน่วยแรงและการทรุดตัวแสดงการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับน้ำหนักของฐานรากอย่างมากซึ่งมีผลมาจากมวลดินด้านนอกที่อยู่ชิดกับขอบฐานรากยกตัวขึ้น และจะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าคงที่เมื่อ มวลดินหยุดการยกตัว

(ค) **ตัวอย่างที่ 6** เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC เมื่อ D/B = 0 และ D/B = 5 ของฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบ $\gamma = 0$ kN/m$^3$ คุณสมบัติของมวลดิน พร้อมด้วยขนาดและขอบเขตของฐานรองรับตามหัวข้อที่ 4.1.2

รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ การทรุดตัว S/B ของฐานรองรับ D/B = 5 เมื่อ S/B = 0.35 $q_{net}$ = 8.92 kN/m$^2$ และจากผลการวิเคราะห์ เมื่อ S/B < 0.25 จะได้ค่าที่สอดคล้องกับสมการที่ 4.1 ถึงสมการที่ 4.3 และ S/B > 0.25 จะได้ค่า $q_{net}$ ที่สูงกว่าสมการดังกล่าวเล็กน้อย ดังนั้นสามารถใช้สมการ 4.1 ถึง 4.3 ในการคำนวณหาค่า $q_{net}$ ในการออกแบบฐานรองรับได้

- จากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC เมื่อ $\gamma = 0$ kN/m$^3$ และ $\gamma = 16$ kN/m$^3$ มีค่า $q_{net}$ ใกล้เคียงกันตามพฤติกรรมดังรูปที่ 4.13 เพราะค่าการยกตัวของมวลดินจากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหามีค่าเพียงเล็กน้อย

● ค่า $q_u$ หาได้จากสมการ $q_u = q_{net} + \gamma D$

● ค่า $\gamma D$ =160.284 kN/m$^2$ หาได้จากแฟ้มข้อมูล “Initial body forces” และ $\gamma D$ = 160 kN/m$^2$ จากการคำนวณโดยใช้วิธีสถิตศาสตร์

(ง) **ตัวอย่างที่ 7** วิเคราะห์ปัญหาระหว่างกรณี SSC กับ กรณี LSC-1 ของฐานรากต่อเนื่องปลายแหลมผิวหยาบ (Rough footing) เมื่อ D/B = 4 และ $\gamma$ =16 kN/m$^3$ ดังรูป 4.14

ค่าคุณสมบัติของมวลดิน พร้อมด้วยขนาด และ ขอบเขตของฐานรองรับตามหัวข้อที่ 4.1.2 จากผลการวิเคราะห์กรณี SSC แสดงค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดินภายใต้ฐานรองรับ $q_{net} \approx$ 7.9 kN/m$^2$ และ ผลการวิเคราะห์กรณี LSC เมื่อ S/B = 0.1 แสดงค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดินภายใต้ฐานรองรับ $q_{net} \approx$ 6.12 kN/m$^2$ จากผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน กรณี LSC จะให้ค่าที่ต่ำ กว่าการวิเคราะห์ กรณี SSC ในช่วงการทรุดตัวช่วงแรก

● จากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC เมื่อ $\gamma$ = 0 kN/m$^3$ และ $\gamma$ = 16 kN/m$^3$ มีค่า $q_{net}$ ใกล้เคียงกันตามพฤติกรรมดังรูปที่ 4.14 เพราะค่าการยกตัวของมวลดินจากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหามีค่าเพียงเล็กน้อย

● ผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหากรณี SSC จะใช้ค่า $q_{net}$ เมื่อค่าลู่เข้าสู่ค่าคงที่

● ผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC จะพิจารณาใช้ค่า $q_{net}$ ตามขนาดค่าการทรุดตัว S/B ที่ค่า $q_u$ หาได้จากสมการ $q_u = q_{net} + \gamma D$

● ค่า $\gamma D$ =142.68 kN/m$^2$ หาได้จากแฟ้มข้อมูล “Initial body forces” และ $\gamma D$ = 141.86 kN/m$^2$ จากการคำนวณโดยใช้วิธีสถิตศาสตร์

จากภาคผนวก ข แสดงตัวอย่างโครงข่ายของชิ้นส่วน ค่าของ Failure zone, ทิศทางของความเค้นหลักเทียบกับแนวแกนดิ่ง ($\delta$ , องศา) และ ค่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวของมวลดินภายใต้ฐานรองรับ ของผลเฉลยจากการวิเคราะห์ปัญหาในสภาวะการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน (LSC) ในรูปแบบ ต่าง ๆ

**ตารางที่ 4.1 ค่าแฟคเตอร์ความลึกของฐานรากต่อเนื่อง (Depth Factor)**

| Factor | Relationship | Source |
|---|---|---|
| Depth<br>$\phi = 0$ | $F_{cd} = 1 + 0.2\left(\frac{D_f}{B}\right)$<br>$F_{qd} = 1$<br>$F_{\gamma d} = 1$ | Meyerhof (1963) |
| | Condition : $\frac{D_f}{B} \leq 1$<br>$F_{cd} = 1 + 0.4\left(\frac{D_f}{B}\right)$<br>$F_{qd} = 1$<br>$F_{\gamma d} = 1$<br>Condition : $\frac{D_f}{B} > 1$<br>$F_{cd} = 1 + 0.4\tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)$<br>$F_{qd} = 1$<br>$F_{\gamma d} = 1$ | Hansen (1970) |

$$q_u = cN_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma BN_qF_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i}$$

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$ = Shape factor

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$ = Depth factor

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$ = Load inclination factor

$N_c, N_q, N_\gamma$ = Baring capacity factor

The factor $\tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)$ is in radians.

สำหรับกรณี $\phi = 0$ , $N_c = (2+\pi)$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$

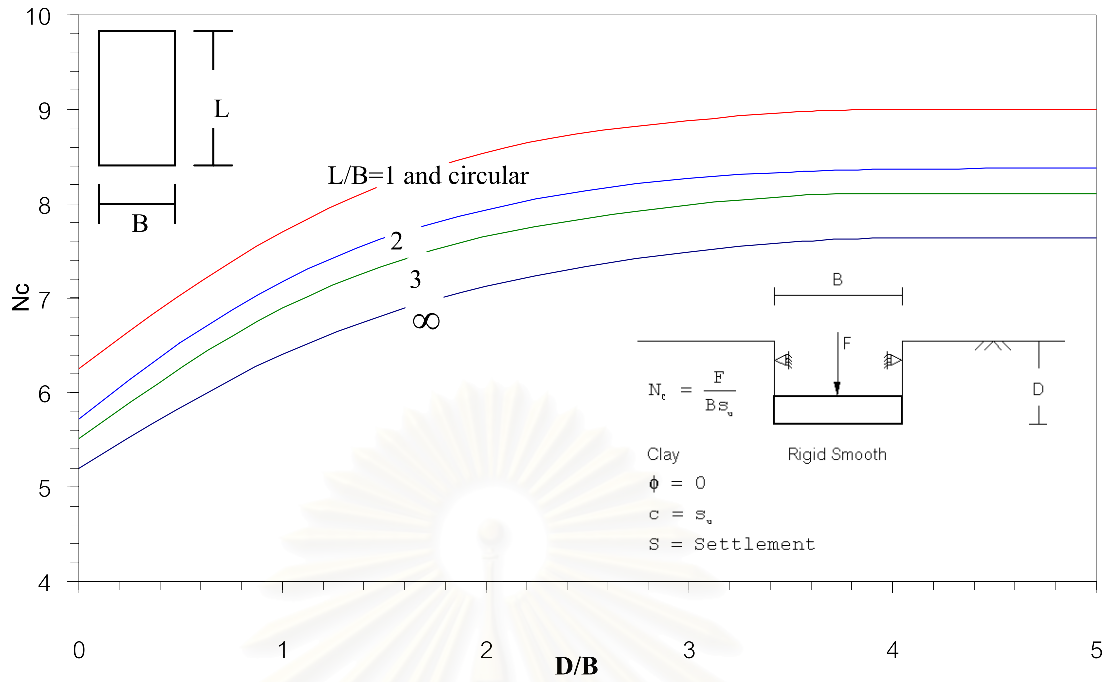
ฐานรากต่อเนื่อง $F_{cs} = F_{qs} = F_{\gamma s} = 1$

แรงกระทำอยู่แนวดิ่ง $F_{ci} = F_{qi} = F_{\gamma i} = 1$

ดังนั้นจะได้ $q_u = cN_cF_{cd} + q$

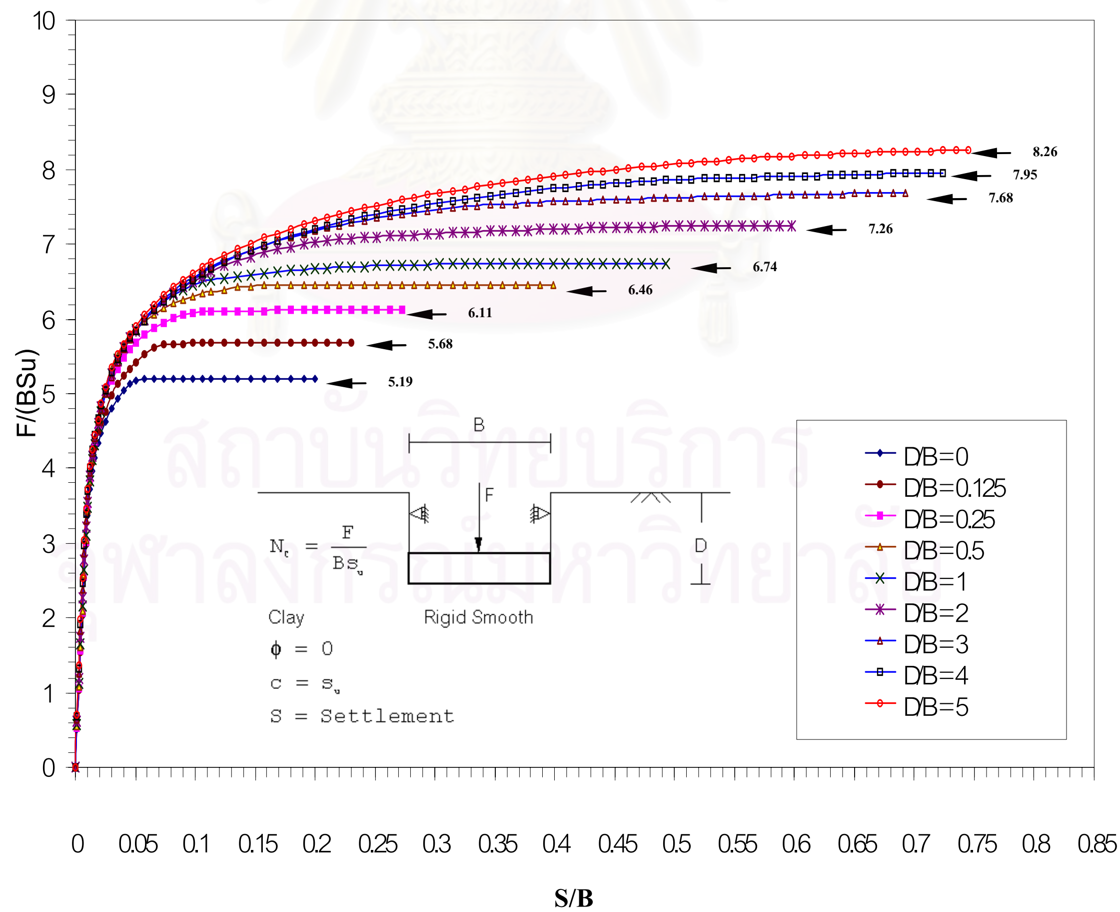
**ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปัญหา กรณี Small Strain (SSC)**

| D/B | Nc (Strip footing) | Nc (Circular footing) | Factor Nc(Cir / Str) |
|---|---|---|---|
| 0 | 5.19 | 6.02 | 1.16 |
| 0.075 | 5.61 | - | - |
| 0.125 | 5.68 | - | - |
| 0.175 | 5.95 | - | - |
| 0.25 | 6.11 | 7.72 | 1.26 |
| 0.35 | 6.23 | - | - |
| 0.5 | 6.46 | 7.95 | 1.23 |
| 1 | 6.74 | 9.41 | 1.39 |
| 2 | 7.26 | 10.22 | 1.41 |
| 3 | 7.68 | 10.75 | 1.40 |
| 4 | 7.95 | 10.69 | 1.34 |
| 5 | 8.26 | - | - |
| สมการ Terzaghi 's Bearing Capacity (1943) กรณี $\phi = 0$ ;Factor Nc(Cir / Str) = 1.3 ตามเงื่อนไข D/B $\leq$ 1 | | | |

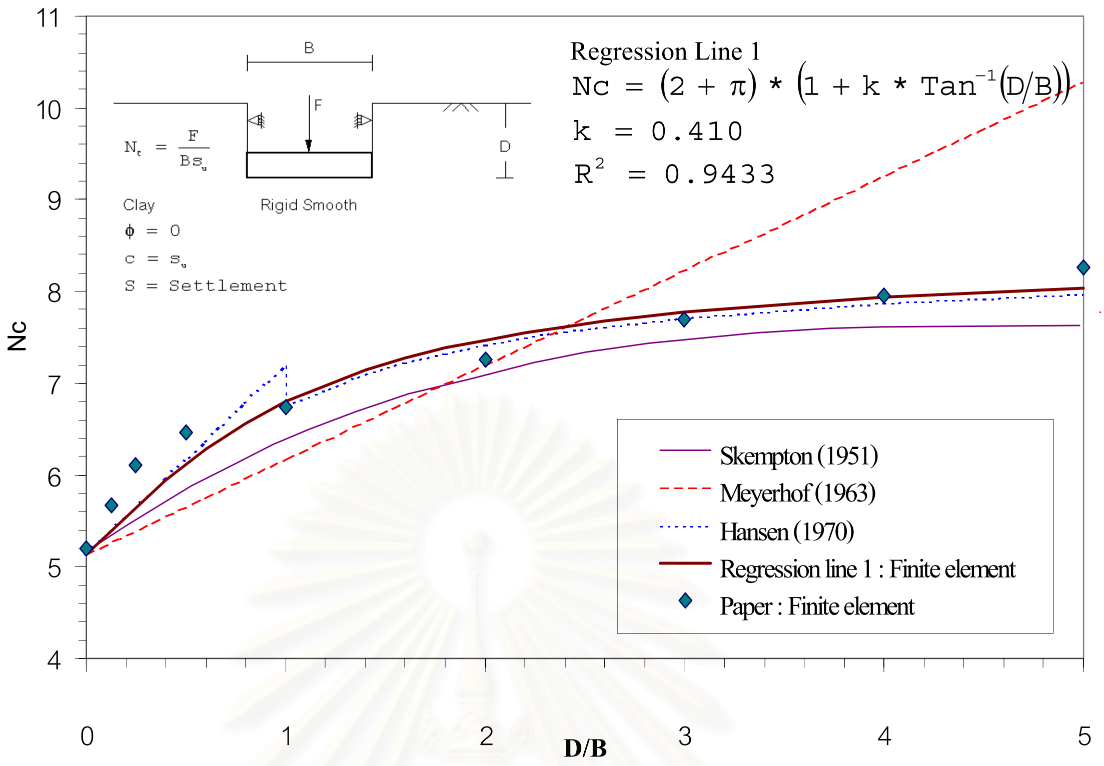



**รูปที่ 4.1 ค่า Bearing Capacity factor, $N_C$ ของ Embedded Footing**

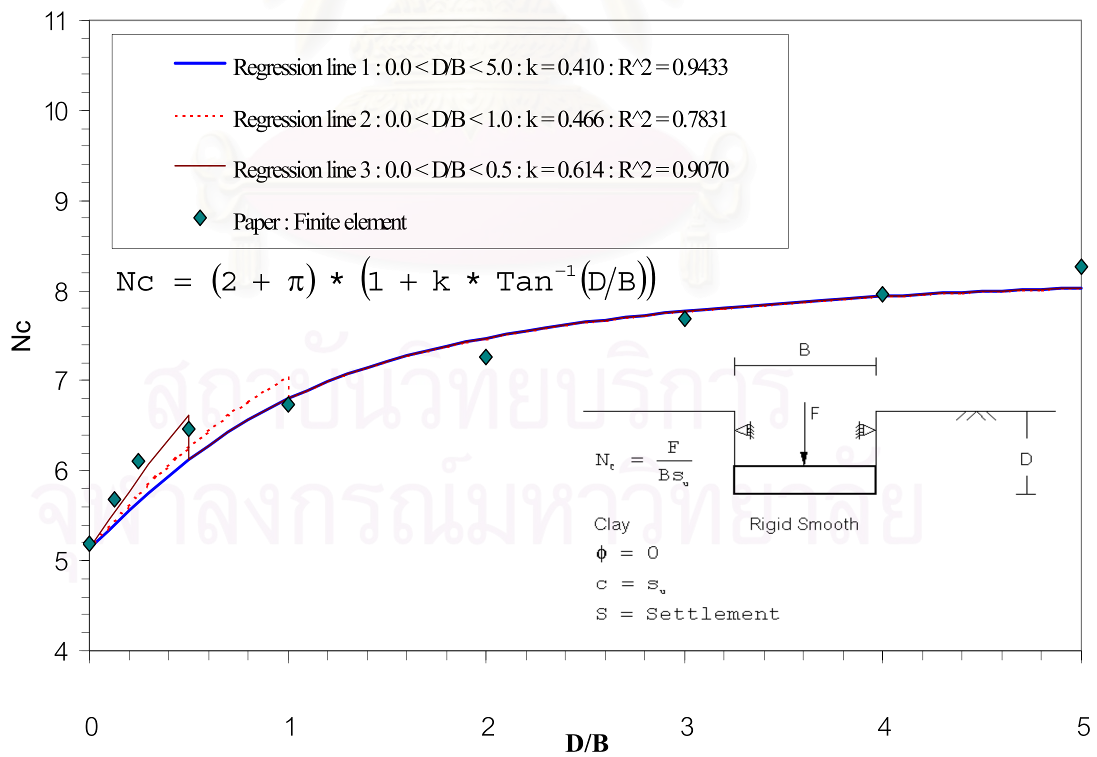
**(Skempton's equation, 1951)**



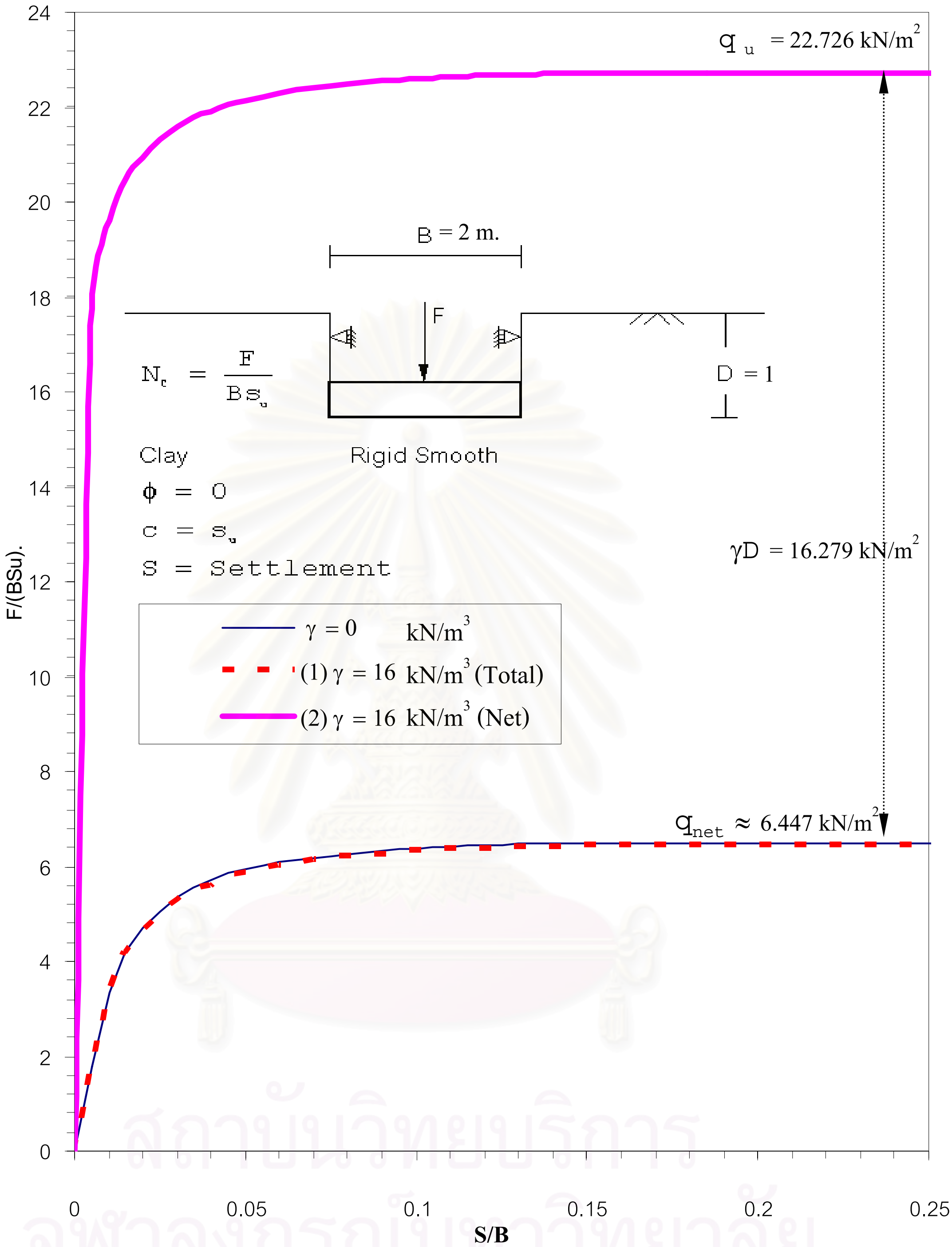

**รูปที่ 4.2 Load Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื่อง กรณี Small Strain (SSC)**




**รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า $N_C$ ระหว่างวิธีไฟไนเอลิเมนต์ กับ Empirical Method ของฐานรากต่อเนื่อง กรณี Small Strain (SSC)**

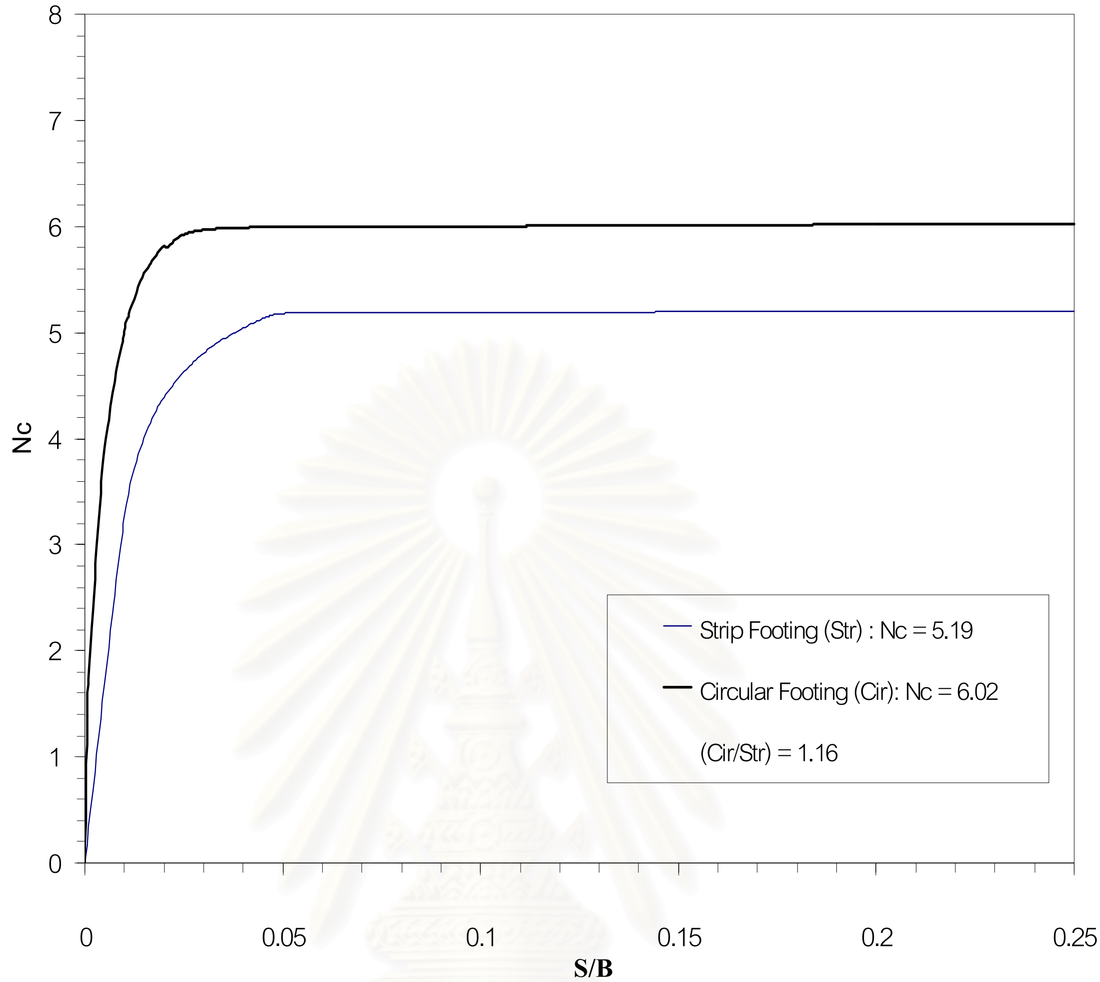



**รูปที่ 4.4 การใช้ Curve Fitting Regression Method เพื่อประมาณค่า $N_C$ ที่ได้จากไฟไนเอลิเมนต์ของฐานรากต่อเนื่อง กรณี Small Strain (SSC)**

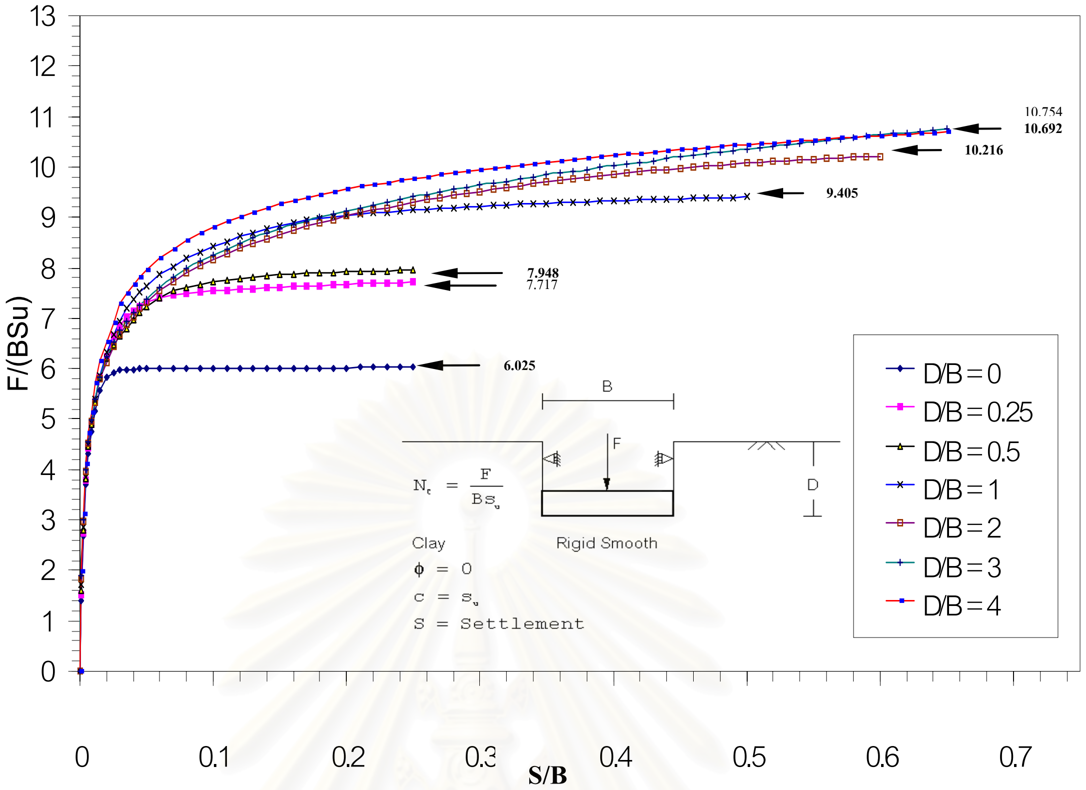



**รูปที่ 4.5 ผลของ Unit Weight ที่มีต่อค่า Load Settlement Curve**

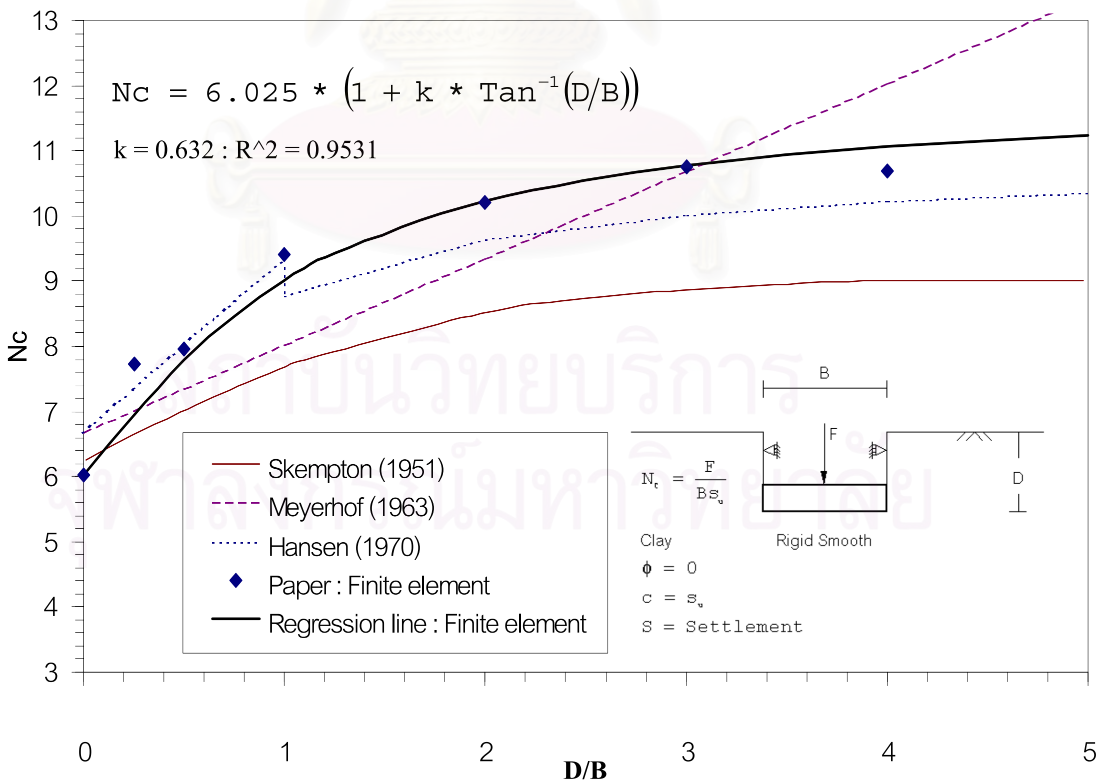
**ของฐานรากต่อเนื่อง D/B = 0.5 กรณี Small Strain (SSC)**




**รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่า $N_C$ ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**
**ระหว่าง ฐานรากต่อเนื่อง กับ ฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC)**

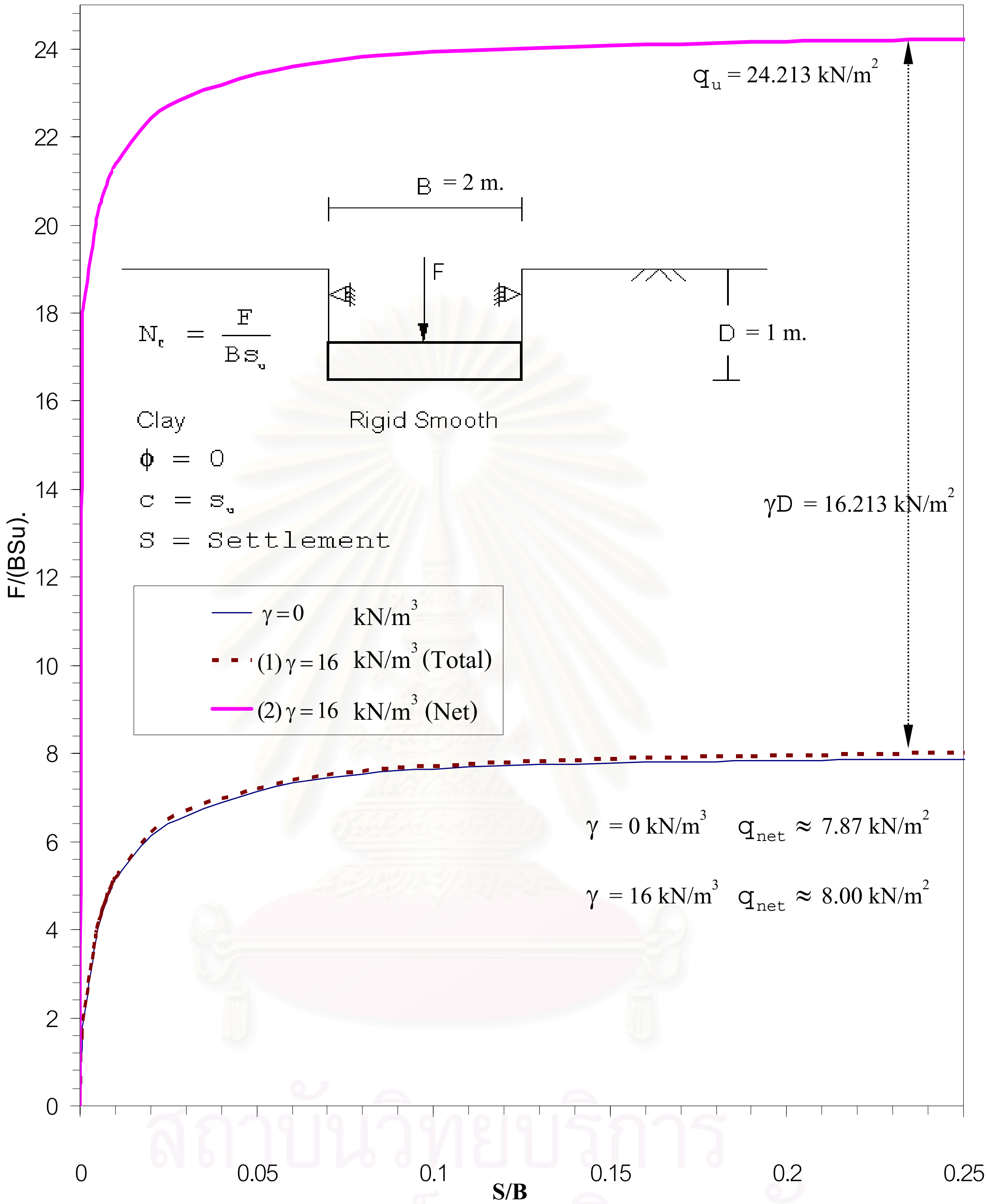



รูปที่ 4.7 Load Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC)




รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่า $N_C$ ระหว่างวิธีไฟไนเอลิเมนต์ กับ Empirical Method

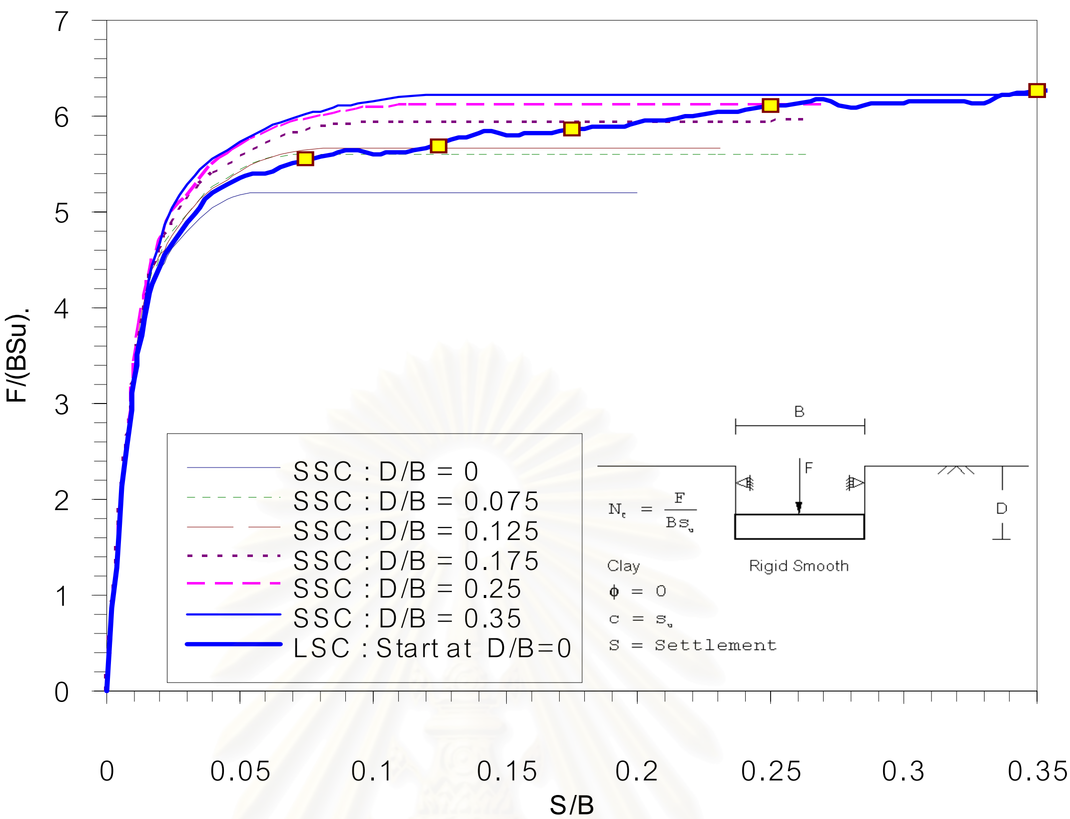
ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC)

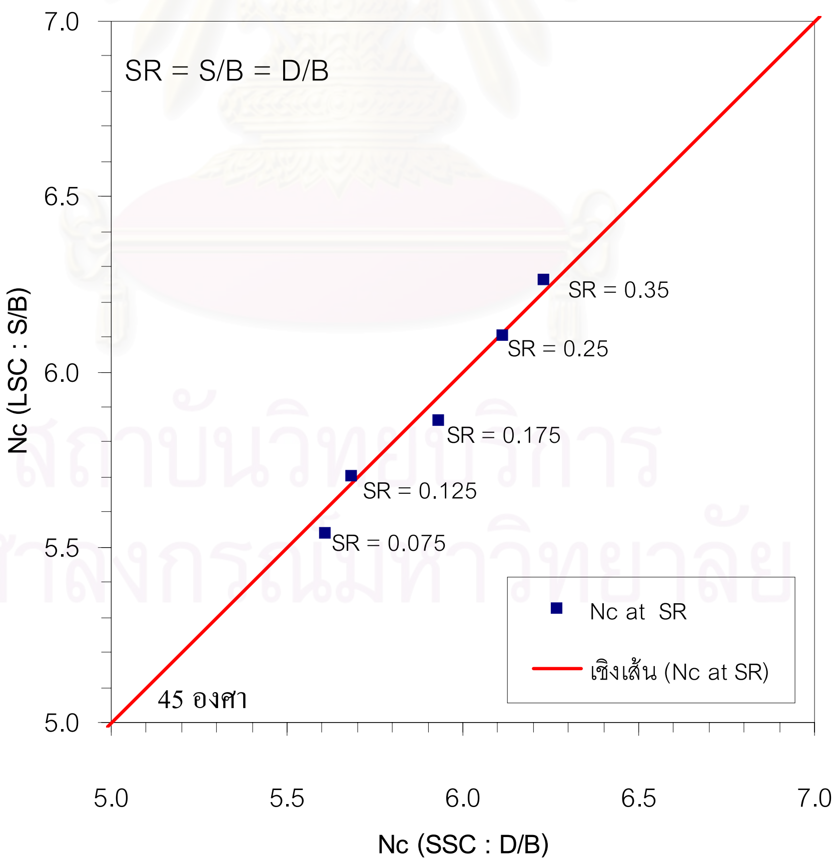




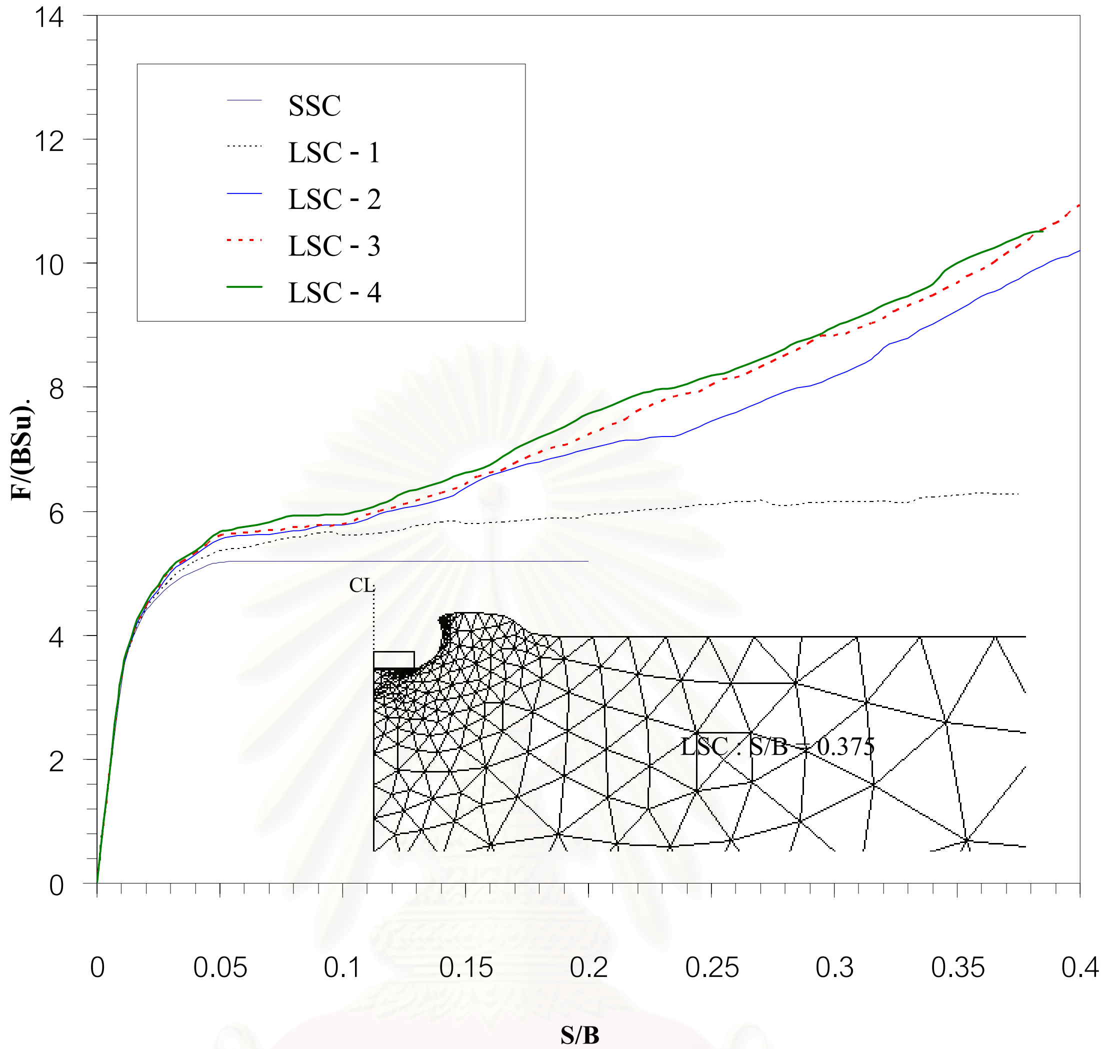

**รูปที่ 4.9 ผลของ Unit Weight ที่มีต่อค่า Load Settlement Curve**

**ของฐานรากวงกลม D/B = 0.5 กรณี Small Strain (SSC)**




**รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบ Load Settlement Curve และ ความสัมพันธ์ระหว่าง Small Strain (SSC) กับ Large Strain (LSC) เมื่อ $\gamma = 0$ kN/m$^3$**




**รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบ Load Settlement Curve ระหว่าง กรณี**

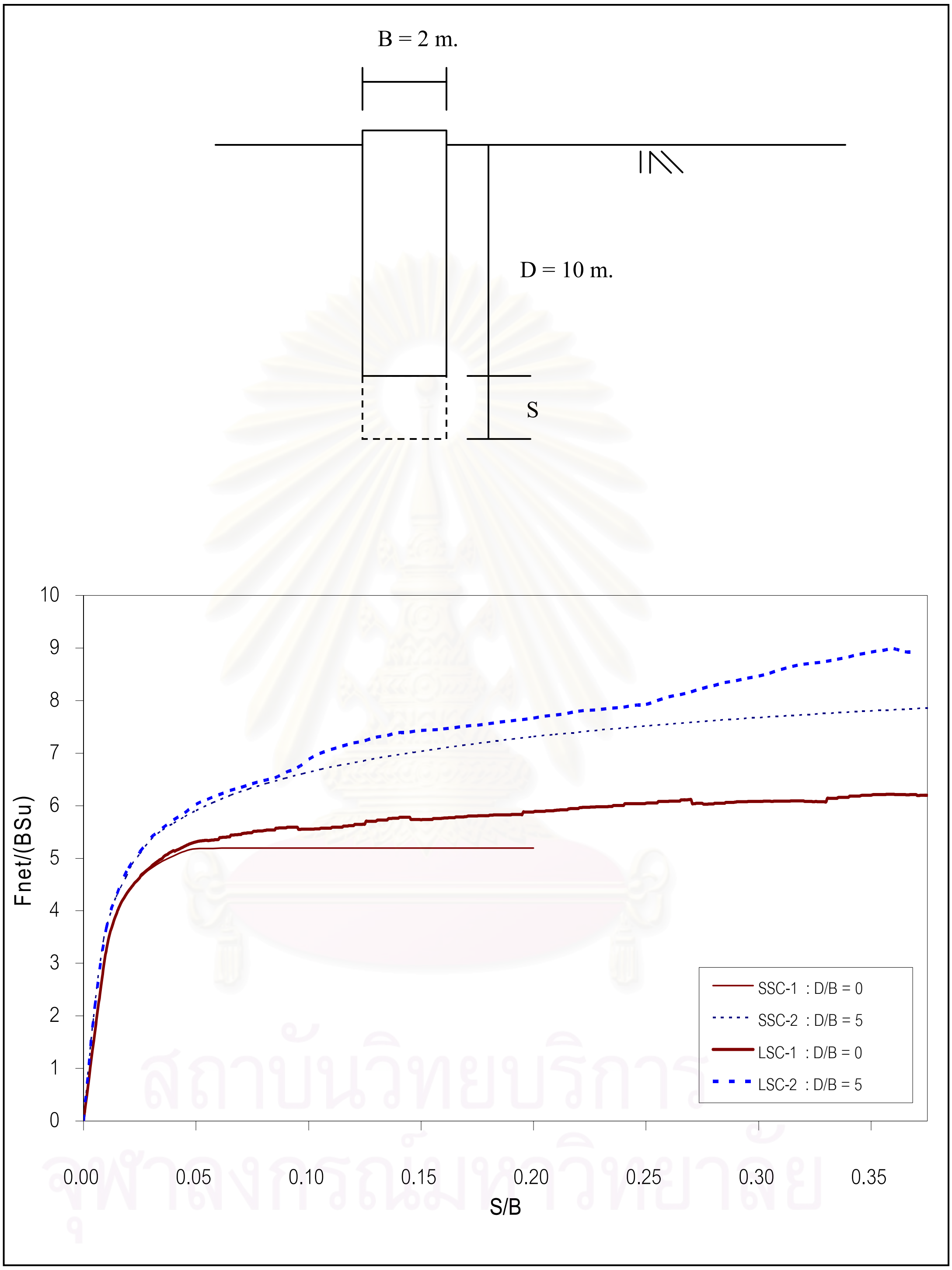
**1) Small Strain (SSC)**

**2) Large Strain (LSC-1) เมื่อ $\gamma = 0$ kN/m$^3$**

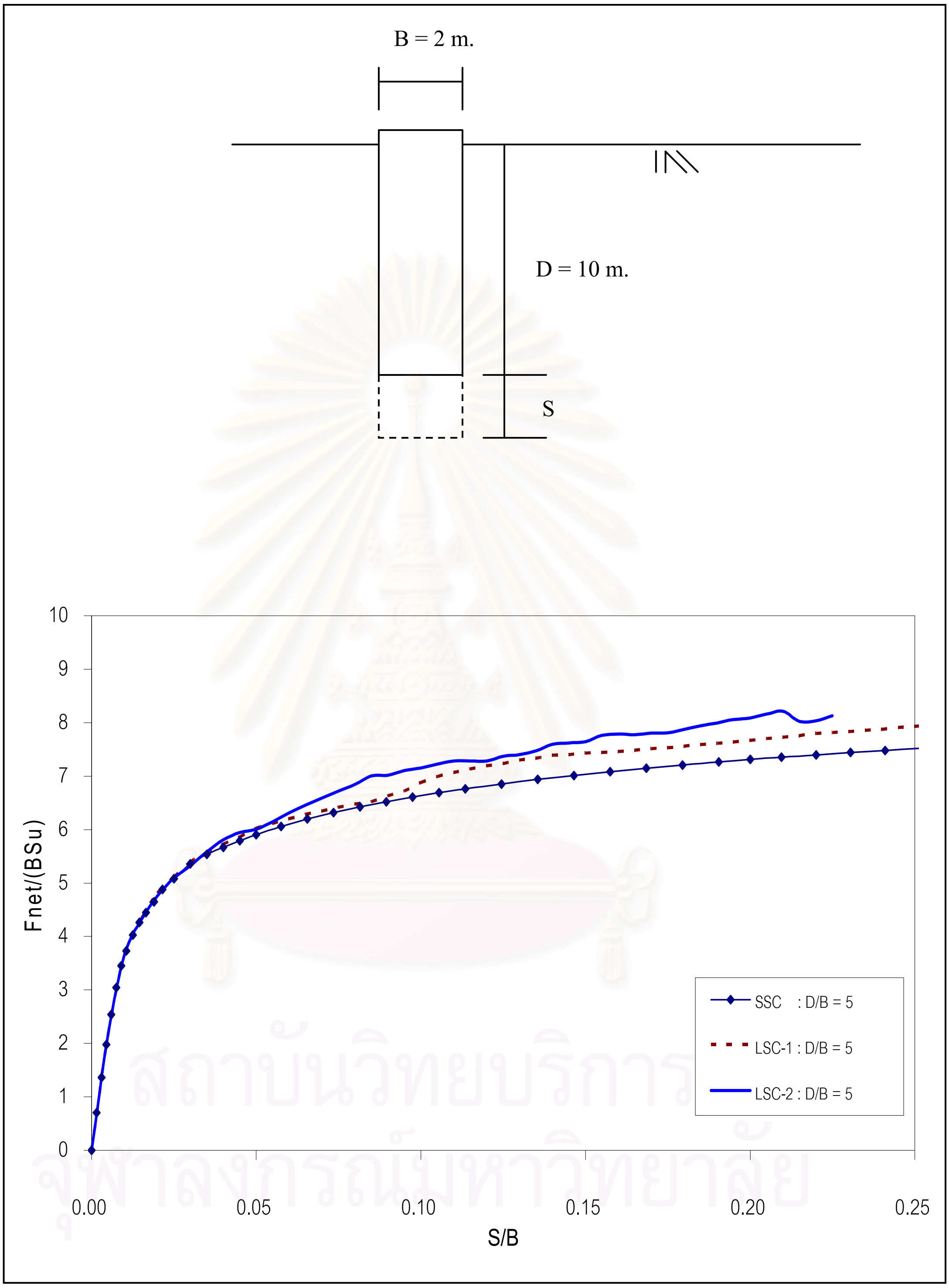
**3) Large Strain (LSC-2) เมื่อ $\gamma = 13$ kN/m$^3$**

**3) Large Strain (LSC-3) เมื่อ $\gamma = 16$ kN/m$^3$**

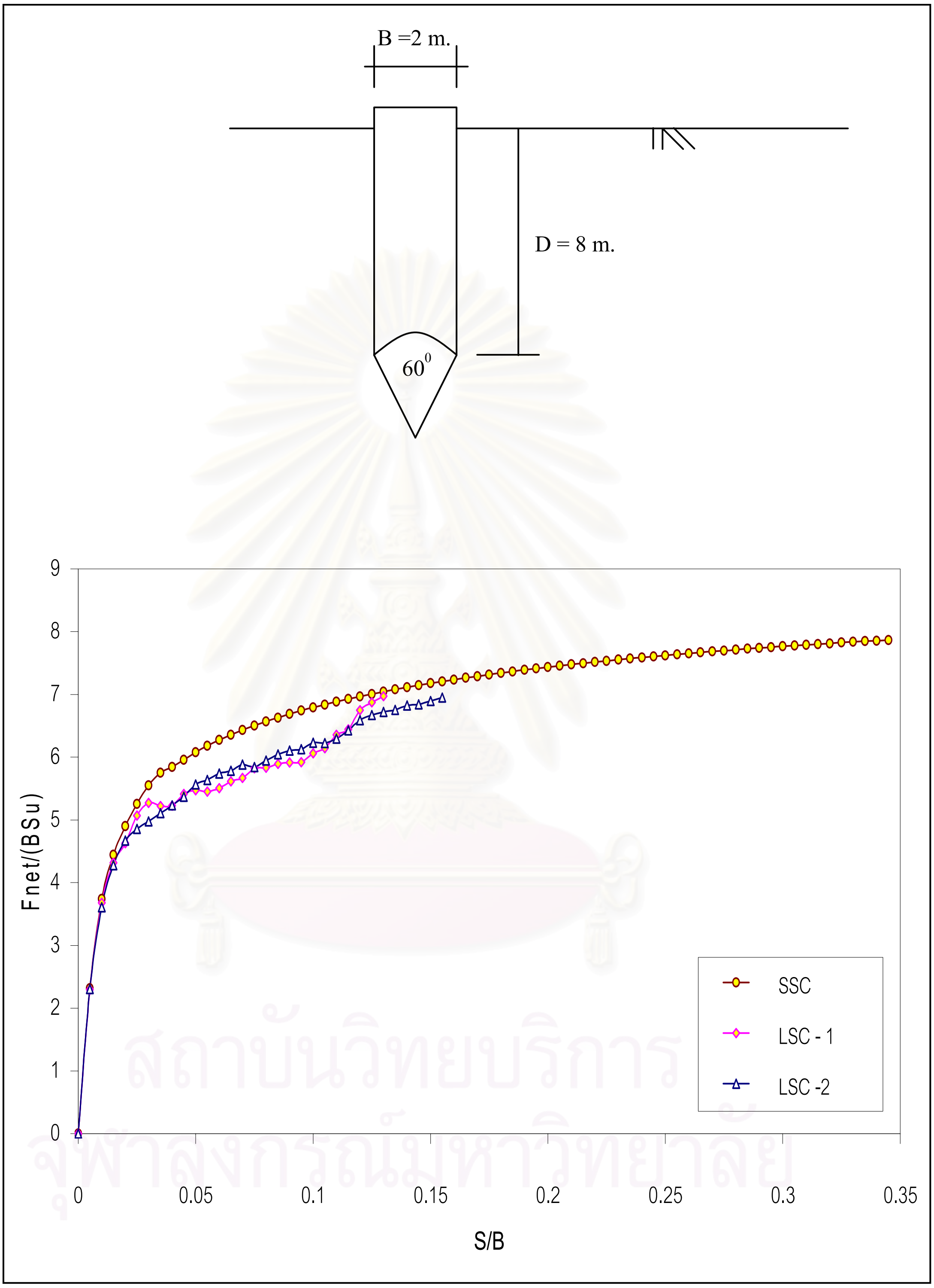
**3) Large Strain (LSC-4) เมื่อ $\gamma = 21$ kN/m$^3$**




**รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC เมื่อ D/B = 0 และ D/B = 5 ของฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบ $\gamma = 0$ kN/m$^3$**




**รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปัญหาของฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบ เมื่อ D/B = 5 กรณี LSC-1: $\gamma = 0$ kN/m$^3$ และ กรณี LSC-2: $\gamma = 16$ kN/m$^3$**




**รูปที่ 4.14 วิเคราะห์ปัญหาของฐานรากต่อเนื่องผิวหยาบปลายแหลม D/B = 4**

**กรณี SSC และ กรณี LSC-1: $\gamma$ =16 kN/m$^3$**

**กรณี LSC-2: $\gamma$ =0 kN/m$^3$**

# บทที่ 5

# สรุป

## 5.1. บทนำ

### 5.1.1. หลักการของวิธีการประยุกต์ใช้งานที่ปรับปรุงใหม่

การวิเคราะห์ปัญหาจะประกอบด้วย การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียด ทีละน้อย ๆ ของวัตถุ (Infinitesimal Strain) และวิเคราะห์ผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งใช้คุณสมบัติของวัสดุแบบไร้เชิงเส้นประกอบกับการปรับปรุงพิกัดของโครงข่ายของชิ้นส่วน (Update Mesh) จนกระทั่งโครงข่ายที่ถูกปรับปรุงพิกัดเกิดการเสียรูปไปอย่างมาก แล้วทำการการสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนขึ้นมาใหม่ให้เป็นระเบียบ และแบ่งขนาดของชิ้นส่วน ให้ได้ตามขนาดที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปัญหาในวงรอบถัดไป

### 5.1.2. ขั้นตอนของวิธีการประยุกต์ใช้งานที่ปรับปรุงใหม่

1) สร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา
2) หาค่าหน่วยแรงเริ่มต้นภายในโครงข่ายของชิ้นส่วน
3) วิเคราะห์ผลเฉลย จากการเพิ่มค่าการทรุดตัว
4) ปรับปรุงพิกัดของชิ้นส่วน ถ้า วิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของดิน
5) หาค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลย ปรับปรุงและสร้างโครงข่ายของชิ้นใหม่ส่วนทุก ๆ สิบวงรอบของการเคลื่อนตัวพร้อมด้วยการถ่ายโอนค่าของหน่วยแรงภายในโครงข่ายของชิ้นส่วน
6) เพิ่มค่าการทรุดตัวในวงรอบถัดไป

ทำซ้ำ (3) - (6) จนกระทั่งได้ผลเฉลยของค่าการทรุดตัวที่ต้องการ

### 5.1.2. ข้อดีของวิธีการประยุกต์ใช้งานที่ปรับปรุงใหม่

1) ใช้หลักการของทฤษฎีความเครียดน้อยในการวิเคราะห์ปัญหา

2) ใช้เทคนิคการปรับปรุงและสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่และถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะสามารถแสดงผลเฉลยของการทดลอง กรณี SSC และ LSC ได้อย่างสมเหตุผล

3) ผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ตามหลักการของวิทยานิพนธ์นี้สามารถใช้ประมาณการหาค่าที่เกิดขึ้นในภายแบบจำลองของมวลดินได้ตามต้องการ

## 5.2. สรุปปัญหากรณีศึกษา

กรณีศึกษาประกอบด้วยกรณีที่ไม่มีการเสียรูปของมวลดิน (SSC) และ กรณีที่มีการเสียรูปของมวลดิน (LSC) การวิเคราะห์ปัญหากรณี SSC จะวิเคราะห์ปัญหาของฐานรากต่อเนื่องและฐานรากวงกลม สำหรับการวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC จะวิเคราะห์ปัญหาฐานรากต่อเนื่องและฐานรากต่อเนื่องปลายแหลม โดยทั้ง 2 กรณีจะวิเคราะห์ปัญหาที่ไม่คำนึงและคำนึงถึงหน่วยน้ำหนักของมวลดิน

### 5.2.1. การวิเคราะห์ปัญหากรณี SSC หรือ กรณีความเครียดน้อย

การวิเคราะห์ปัญหากรณี SSC หรือ กรณีความเครียดน้อย คือจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนจากการวิเคราะห์ปัญหาในแต่ละวงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ แต่จะมีการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนและถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะภายหลังจากการปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วน

1) สามารถจำลองกราฟหน่วยแรงและการทรุดตัวได้อย่างสมเหตุผล เพราะว่ากราฟจะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งเท่ากับกำลังรับน้ำหนักของฐานรากและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากวิธีเชิงประสบการณ์

2) เสนอสมการ Embedment Factor จากผลการวิเคราะห์ปัญหาของฐานรองรับต่อเนื่อง $N_c = (2+\pi) * F_{cd}$ โดยที่ $F_{cd} = 1 + k * Tan^{-1}(D/B)$ และ $k = 0.41$ $R^2 = 0.9433$

3) พบว่าค่า $N_c$ ที่นำเสนอโดย Meyerhof (1963) มีช่วงที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน เมื่อค่าอัตราส่วน $D/B > 2$

4) ค่า $N_c$ ที่นำเสนอโดย Hansen (1970) มีช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน เมื่อค่าอัตราส่วน $D/B > 1$

5) ค่า $N_c$ นำเสนอโดย Skempton (1951) ใช้งานได้ทุกช่วงอัตราส่วนตั้งแต่ $D/B \geq 0$

6) ผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาจะใช้เมื่อค่าลู่เข้าสู่ค่าคงที่

7) ขอบเขตของปัญหามีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดิน

### 5.2.1. การวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC หรือกรณีความเครียดมาก

การวิเคราะห์ปัญหากรณี LSC หรือกรณีความเครียดมาก คือ จะมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดโครงข่ายของชิ้นส่วนจากการวิเคราะห์ปัญหาในแต่ละวงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ พร้อมทั้งการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนและถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะภายหลังจากการปรับปรุงขนาดของชิ้นส่วน

1) ผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาจะพิจารณาใช้ค่ากำลังรับน้ำหนักตามขนาดผลของการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

2) จากการวิเคราะห์ปัญหากรณี D/B ที่มีความลึกมาก ๆ จะมีการยกตัวของมวลดิน ณ ขอบของฐานรองรับน้อยลง

3) กรณี LSC เมื่อไม่คำนึงถึงหน่วยน้ำหนักของดิน การวิเคราะห์สามารถจำลองพฤติกรรมของกราฟหน่วยแรงและการทรุดตัวได้อย่างสมเหตุสมผล โดยที่แรงกระทำของกรณี LSC เท่ากับกำลังรับน้ำหนักของกรณี SSC ที่อัตราส่วนการทรุดตัว S/B (LSC) เท่ากับอัตราส่วนความลึก D/B (SSC)

4) กรณี LSC เมื่อคำนึงถึงหน่วยน้ำหนักของดิน การยกตัวของมวลดิน ณ ขอบของฐานรองรับสามารถเพิ่มค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดินได้

5) กรณี LSC เมื่อคำนึงถึงหน่วยน้ำหนักของดิน ไม่ควรนำวิธี Superposition ของสมการ Terzaghi ประกอบด้วยค่าความเชื่อมแน่นของดินและหน่วยน้ำหนักบรรทุกมาคำนวณพฤติกรรมของมวลดินที่มีการเคลื่อนตัวมากเช่นฐานรองรับวางบนชั้นดินอ่อน หรือดินชายฝั่งทะเล

6) กรณี LSC เมื่อคำนึงถึงหน่วยน้ำหนักของดิน กราฟหน่วยแรงและการทรุดตัวแสดงการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับน้ำหนักของฐานรากอย่างมากซึ่งมีผลมาจาก มวลดินด้านนอกที่อยู่ชิดกับขอบฐานรากยกตัวขึ้น และจะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าคงที่เมื่อมวลดินหยุดการยกตัว

**5.3. ปัญหาและอุปสรรค**

1) ปัญหาที่สำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือการสร้างแบบจำลองที่มีความเหมาะสมและมีค่าของผลเฉลยที่สมเหตุผล นำมาวิเคราะห์ปัญหากรณี SSC และจะต้องมีค่าของกราฟลู่เข้าสู่ค่าคงที่ เพื่อใช้เป็นกรณีทดสอบระบบการคำนวณทั้งหมด

2) ชิ้นส่วนของการวิเคราะห์ปัญหาในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ได้เฉพาะชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ ไม่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาสองมิติแบบสมมาตรรอบแกน เมื่อ D/B>1

3) ระบบการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีอัตโนมัติจะทำให้ขั้นตอนของการทำงานของโปรแกรมหลักมีความยุ่งยากซับซ้อน ตลอดจนการถ่ายโอนค่าของตัวแปรต่าง ๆ ระหว่างการป้อนข้อมูลด้วยโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิก และการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน

4) แบบจำลอง SNAC สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้หลากหลายรูปแบบมีการถ่ายโอนค่าของตัวแปรที่ไม่จำเป็นมากเกินกว่าการวิเคราะห์ปัญหาในบางกรณี ดังนั้นจึงยากต่อการเจาะลึกถึงรายละเอียดของแบบจำลองของปัญหาได้

5) ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังมีไม่แพร่หลาย และผลการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดินที่มีอยู่ยังน้อยต่อการนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบปัญหา

6) ผลการวิเคราะห์ปัญหาฐานรากกรณี LSC เมื่อ $\gamma = 0$ ไม่สามารถเพิ่มค่าการทรุดตัวมากเกินกว่า S/B = 0.375 สาเหตุเพราะข้อจำกัดในเรื่องของเวลาในการวิเคราะห์ปัญหา

7) การวิเคราะห์ปัญหาบางกรณีไม่สามารถเพิ่มค่าการทรุดตัวมาก ๆ ได้เพราะมีข้อจำกัดของจำนวนจุดต่อของปัญหาในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดจุดต่อของชิ้นส่วนทั้งหมด 5000 จุดต่อ

8) ควรมีการลบจุดต่อหรือเพิ่มขนาดของชิ้นส่วนในบางช่วงตำแหน่งของชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กจนเกินไป เนื่องจากการเคลื่อนตัวของโครงข่ายของชิ้นส่วน

9) ไม่ควรสร้างโครงข่ายของชิ้นส่วนใหม่ (Remeshing) บ่อยมากจนเกินไปเพราะจะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมอย่างมากจากการถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ

**5.4. ข้อเสนอแนะ**

1) ควรมีการพัฒนาโปรแกรมให้มีความสามารถวิเคราะห์ปัญหาในสภาพระบายน้ำ ในการศึกษาหาค่ากำลังรับน้ำหนักประสิทธิผลของมวลดิน

2) ควรมีการพัฒนาโปรแกรมในการวิเคราะห์ปัญหาของมวลดินที่มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งในระบบ

3) ควรมีการปรับปรุงและนำเสนอวิธีการถ่ายโอนค่าของตัวแปรสถานะ ให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น

4) ควรมีการพัฒนารูปร่างของชิ้นส่วนให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาของชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ เพื่อความแม่นตรงยิ่งขึ้นในการวิเคราะห์ปัญหาสองมิติแบบสมมาตรรอบแกน

**5.5. ข้อดีของวิทยานิพนธ์**

1) เป็นวิธีที่สะดวกและง่ายสำหรับประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน (large - deformation , large strain) ได้ง่ายกว่า large strain ของไฟไนต์เอลิเมนต์เช่น

- Eulerian Formulation
- Total Lagrangian Formulation (TL)
- Updated Lagrangian Formulation (UL)

2) สามารถวิเคราะห์ปัญหา Embedment footing ที่มีขอบเขตของปัญหาที่กว้างและได้ค่าของผลเฉลยที่สมเหตุผล

3) สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาCone penetration test และปัญหาของเสาเข็ม

4) สามารถวิเคราะห์ปัญหาบนชั้นดินเหนียวอ่อน และ ดินชายฝั่งทะเล

5) ประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวมากของดินในการทดสอบ Unconfined - Compression Test

6) นำโปรแกรมย่อยที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ มาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองของมวลดิน อื่น ๆ ได้

# รายการอ้างอิง


Abbo A.J. and Sloan S.W. 1997. A Finite element program for the analysis of elastoplasticity and consolidation. Department of Civil, Surveying and Enviromental Engineering, University of Newcastle.

Bathe K.J. 1996. Finite element procedures. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hill

Chen W.F. and Mizuno E. 1990. Nonlinear analysis in soil mechanics. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier

Fung Y. C. 1977. A first course in continuum mechanics. second edition: Prentice-Hill

Ghosh S. 1990. Finite element simulation of some extrusion processes using the arbitrary Lagrangian-Eulerian description. ASM Int. J. Mater. Shaping Technol., 8: 53-64.

Ghosh S. and Kikuchi N. 1991. An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for large deformation analysis of elastic-viscoplastic solid. Comput. Meth. Appl. Mech. Engng., 86: 127-188.

Haber R. B. 1984. A mixed Eulerian-Lagrangian displacement model for large deformation analysis in solid mechanics. Comp. Methods Appl. Mech. Eng., 43: 277-292.

Hansen, J. B. 1970 A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geotechnical institute, Bulletin 28, Copenhagen

Herman L. R. 1976. Laplacian-isoparametric grid generation scheme. J. Engng. Mech. Div.ASCE., 102: 749-759.

Ho-Le K. 1988 Finite element mesh generation method: a review and classification. Comput. Aided desg, 20: 27-38.

Hu Y. and Randolph M. F. 1998a. A practical numerical approach for large deformation problems in soil. Int. J. Num. and Anal. Method in Geomech., 22: 327-350.

Hu Y. and Randolph M. F. 1998b. H-adaptive FE analysis of Elasto-plastic non-homogeneous soil with large deformation. Computers and Geotechnics., 23: 61-83.

Kelly D.W., J.P. de S.R. Gago, Zienkiewicz O. C and I. Babuska 1983. A posteriori error analysis and Adaptive processes in the finite element method: part I-error analysis. Int. J. num. Meth.engng, 19: 1593-1619

Liu W. K., Belytschko T. and Chang H. 1986. An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for path dependent materials. Comput. Meth. Appl. Mech. Engng., 68: 259-310.

Reddy 1985. An introduction to the finite element method. International Student Edition. New York: McGraw-Hill.

Skempton A. W. 1951. <u>The bearing capacity of clays</u>. Building Research Congress, England.

Sloan S.W. 1987 <u>A fast algorithm for constructing Delaunay Triangulations in the plane.</u> Advances in Engng Software., 9: 34-55.

Sloan S.W. 1993 <u>A fast algorithm for constructing Constrained Delaunay Triangulations.</u> Computer & Structures., 47: 441-450.

Smith I. M. and Griffiths D. V. 1998. <u>Programming the finite element method.</u> John Wiley & Sons ltd.

Steven Oven <u>A survey of unstructured mesh generation technology.</u> Department of Civil and Environmental engineering, Carngie Mellon University. <u>Http//www.andrew.cmu.edu/user/sowen/survey/postsurv.html</u>

Terzaghi K. 1943. <u>Theoretical soil mechanics.</u> New York: Wiley.

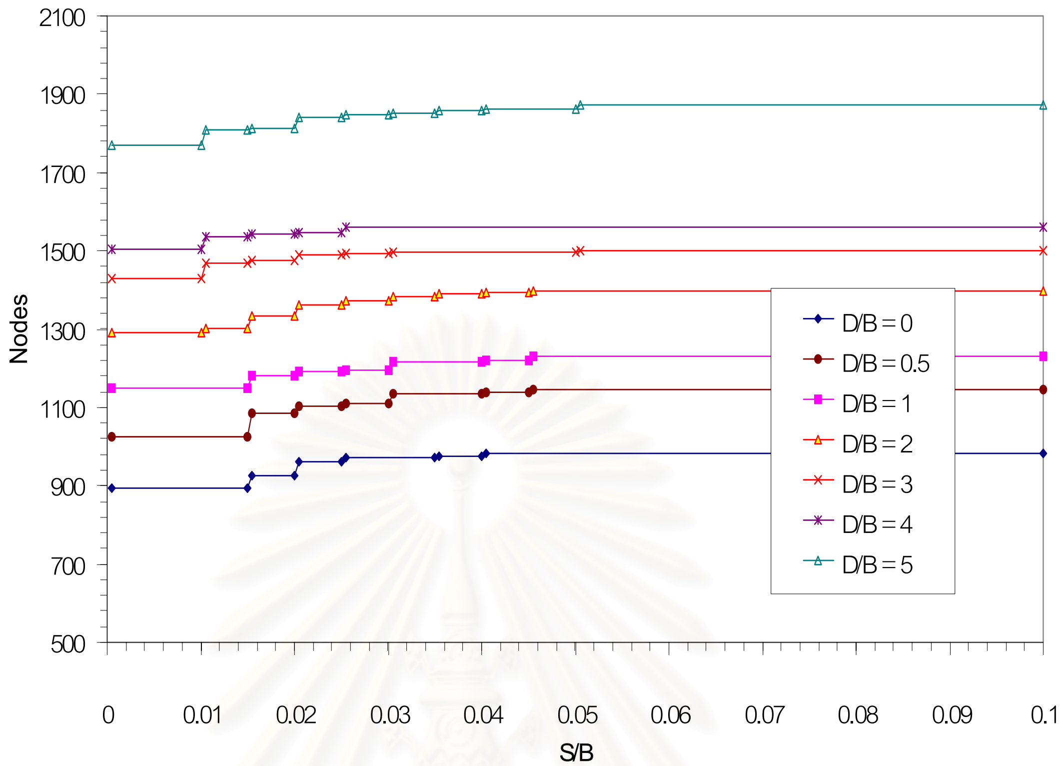
Timoshenko S. P. Goodier J.N. 1951. <u>Theory of Elasticity</u>. New York: McGraw-Hill.

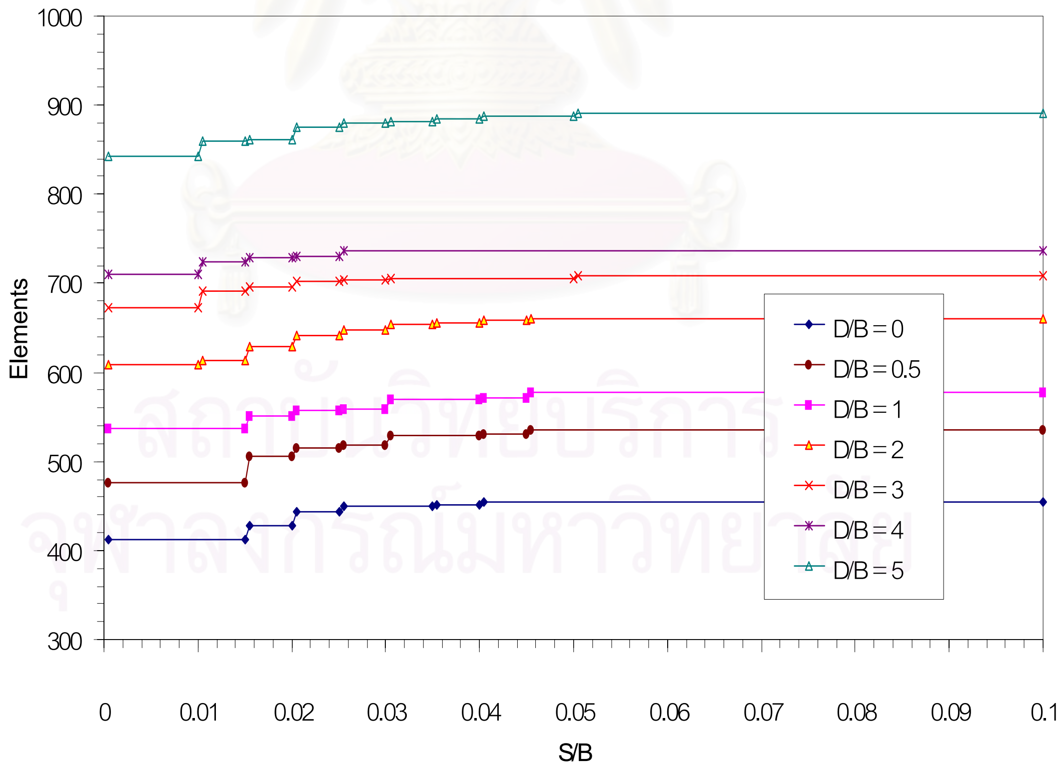
Zienkiewicz O. C. 1977. <u>The finite element method.</u> The third expanded and revised ed. UK: McGraw-Hill.

Zienkiewicz O. C. and Zhu J. Z. 1992a. <u>The superconvergent patch recovery (SPR) and adaptive finite element refinement.</u> Comp. Methods Appl. Mech. Eng., 101: 207-224.

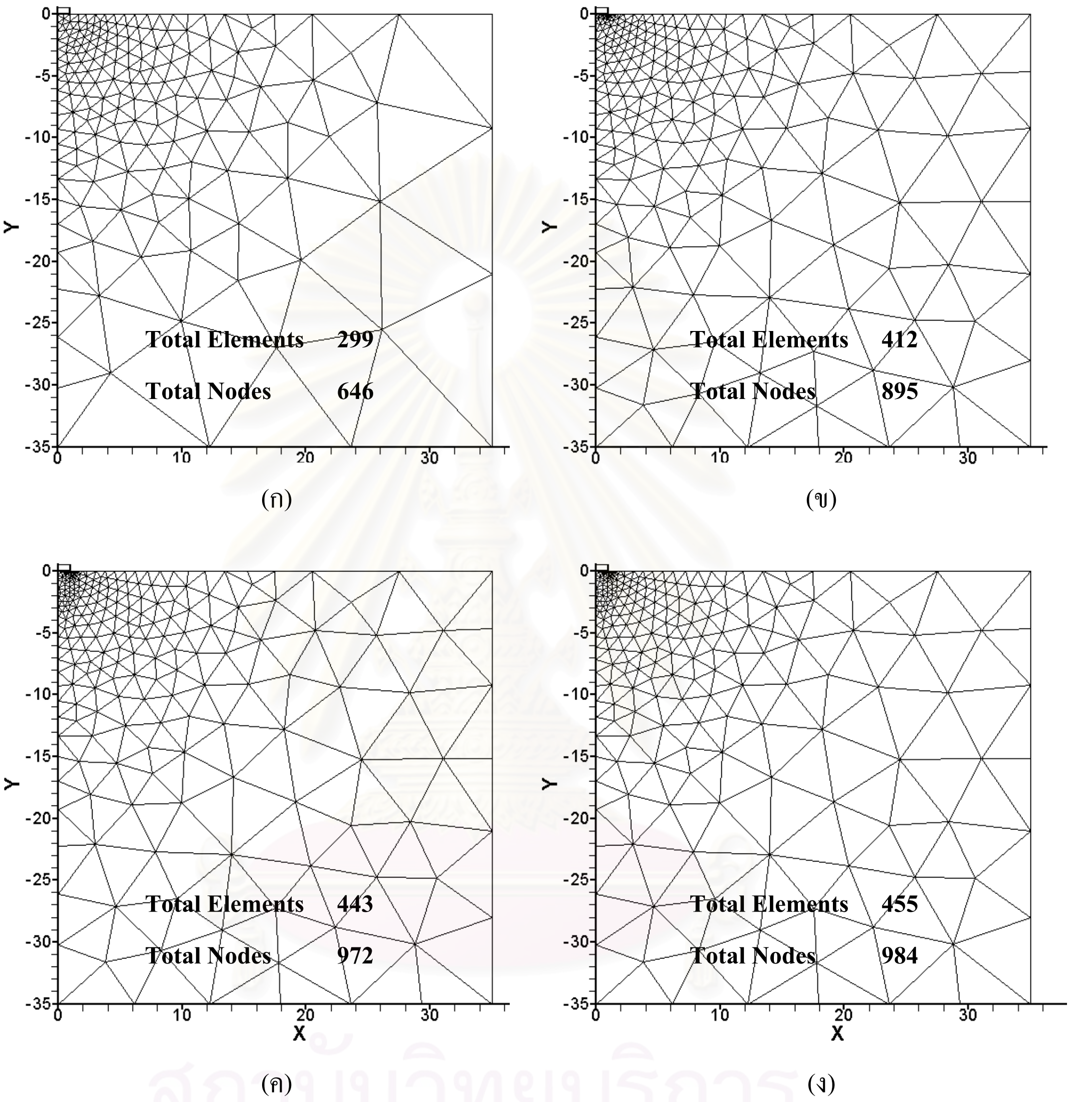
Zienkiewicz O. C. and Zhu J. Z. 1992b. <u>The superconvergent patch recovery and a posteriori error estimates.Part 1: The recovery technique.</u> Int. J. Numer. Methods Eng., 33: 1331-1364.

# ภาคผนวก ก

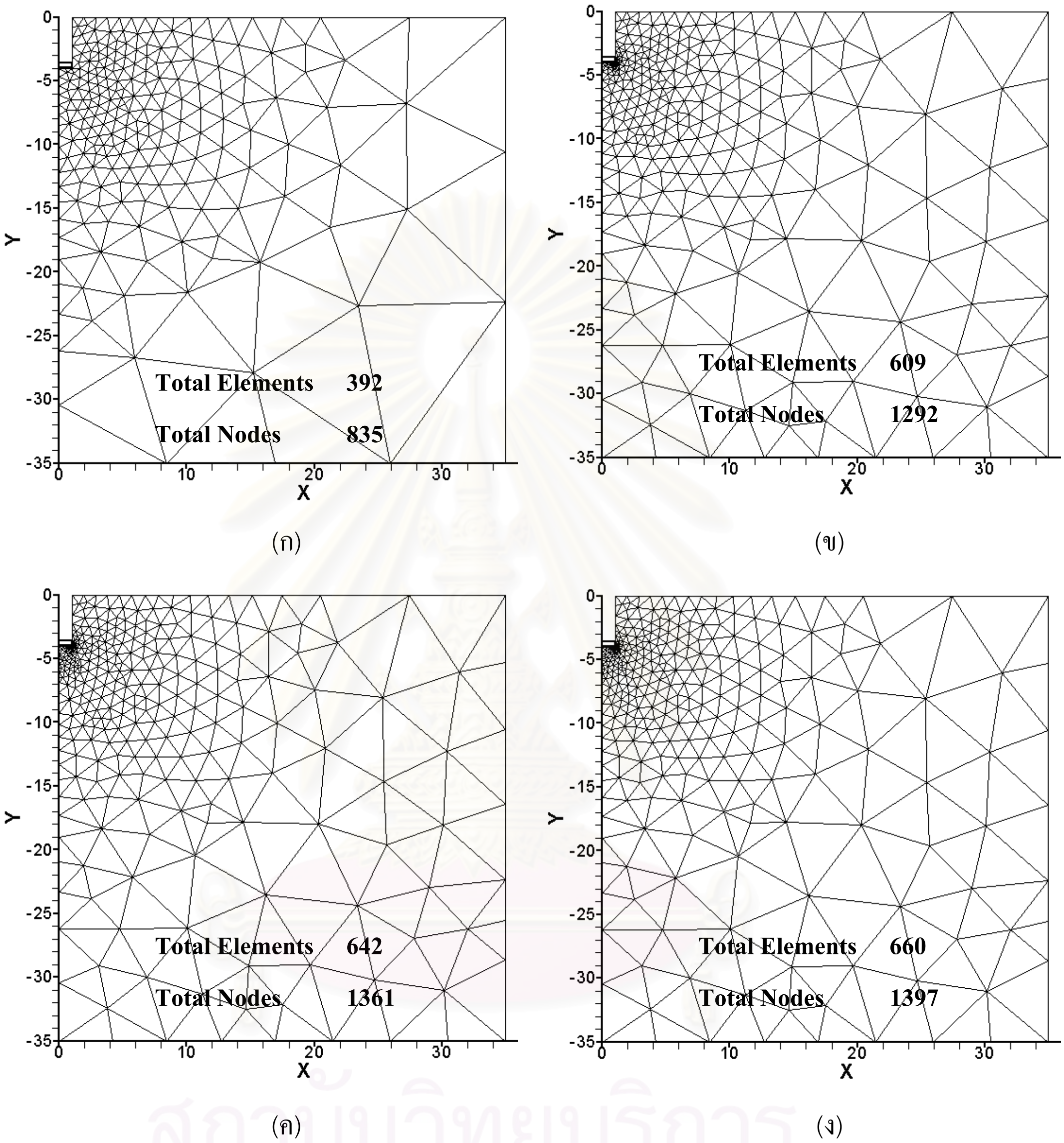


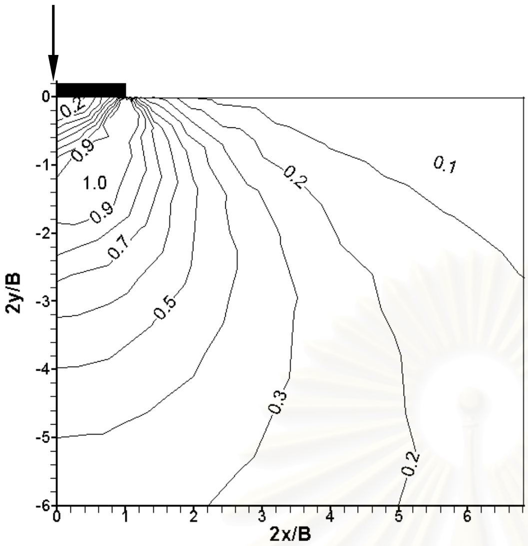

**รูปที่ ก.1 จำนวน จุดต่อ และชิ้นส่วน ของฐานรากต่อเนื่อง ณ ตำแหน่งการทรุดตัวที่ระดับ D/B ต่าง ๆ วิเคราะห์โดยหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC)**



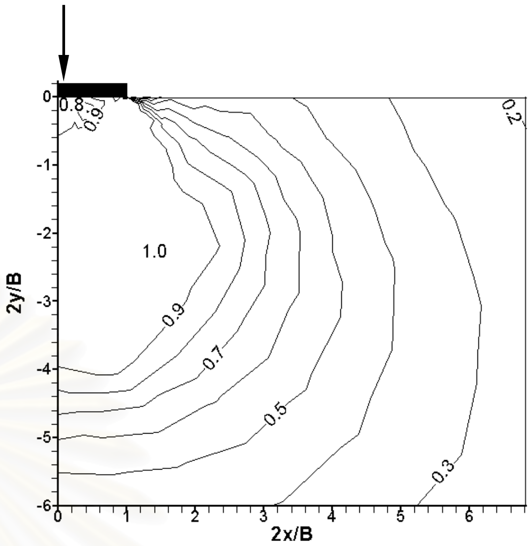

**รูปที่ ก.2 การเปรียบโครงข่ายของชิ้นส่วนของฐานรากต่อเนื่อง D/B = 0 กรณี Small Strain (SSC) (ก)โครงข่ายของชิ้นส่วนควบคุมโดยสมการความหนาแน่น (ข) โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้น (ค) โครงข่ายของชิ้นส่วนเมื่อ S/B=0.025 (ง) โครงข่ายของชิ้นส่วนเมื่อ S/B=0.2**



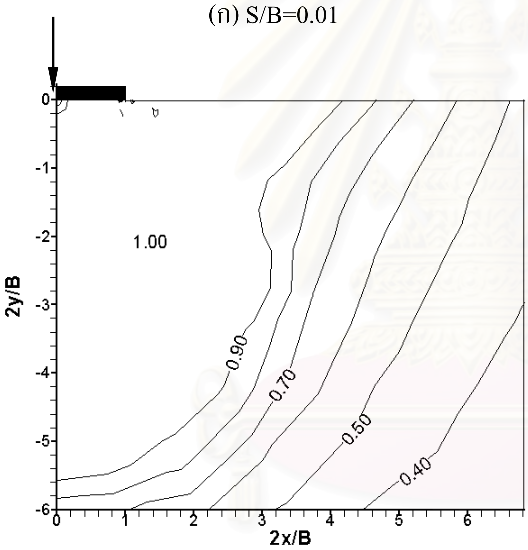

**รูปที่ ก.3 การเปรียบเทียบโครงข่ายของชิ้นส่วนของฐานรากต่อเนื่อง D/B = 2 กรณี Small Strain (SSC) (ก)โครงข่ายของชิ้นส่วนควบคุมโดยสมการความหนาแน่น (ข) โครงข่ายของชิ้นส่วนเริ่มต้น (ค) โครงข่ายของชิ้นส่วนเมื่อ S/B=0.025 (ง) โครงข่ายของชิ้นส่วนเมื่อ S/B=0.6**



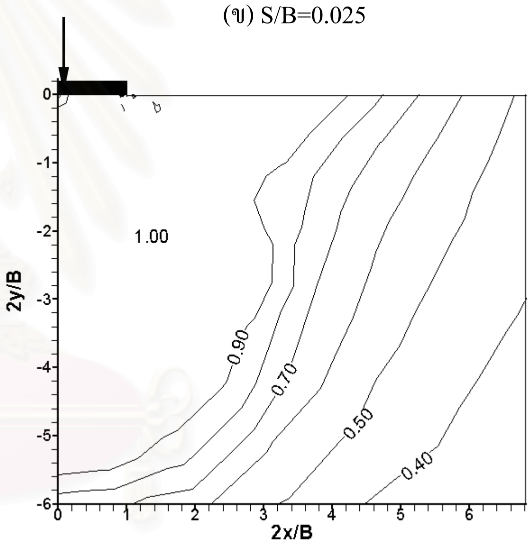

(ก) S/B=0.01




(ข) S/B=0.025




(ค) S/B=0.1

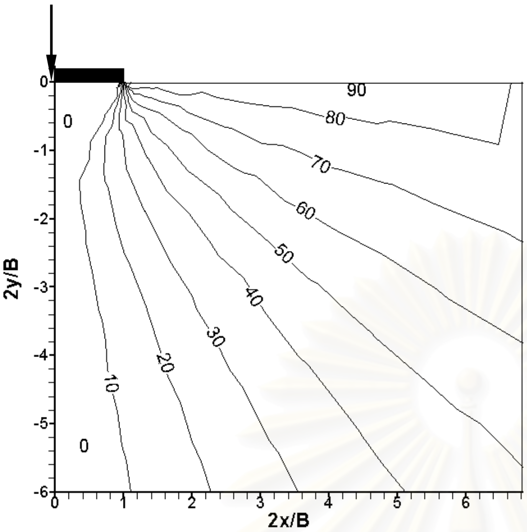



(ง) S/B=0.2

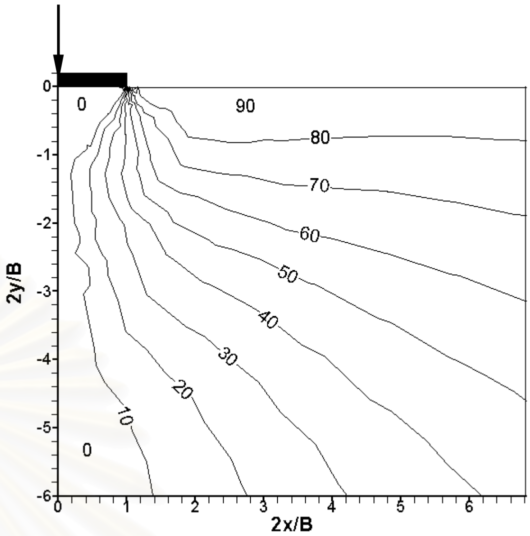


**รูปที่ ก.4 Failure zone $(\sigma_1 - \sigma_3)/(2s_u)$ ของฐานรากต่อเนื่อง D/B=0**

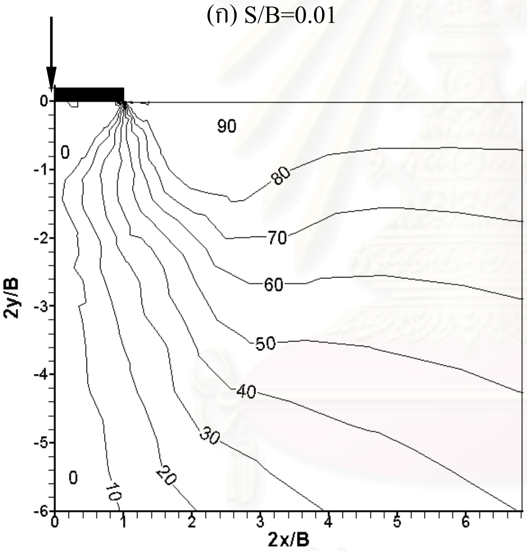
**วิเคราะห์โดยหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC)**



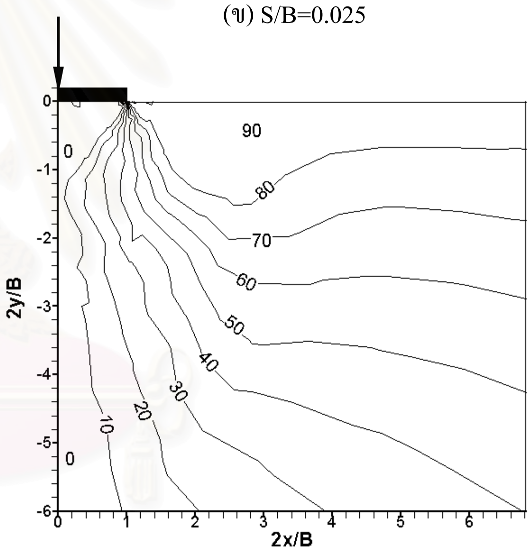

(ก) S/B=0.01




(ข) S/B=0.025

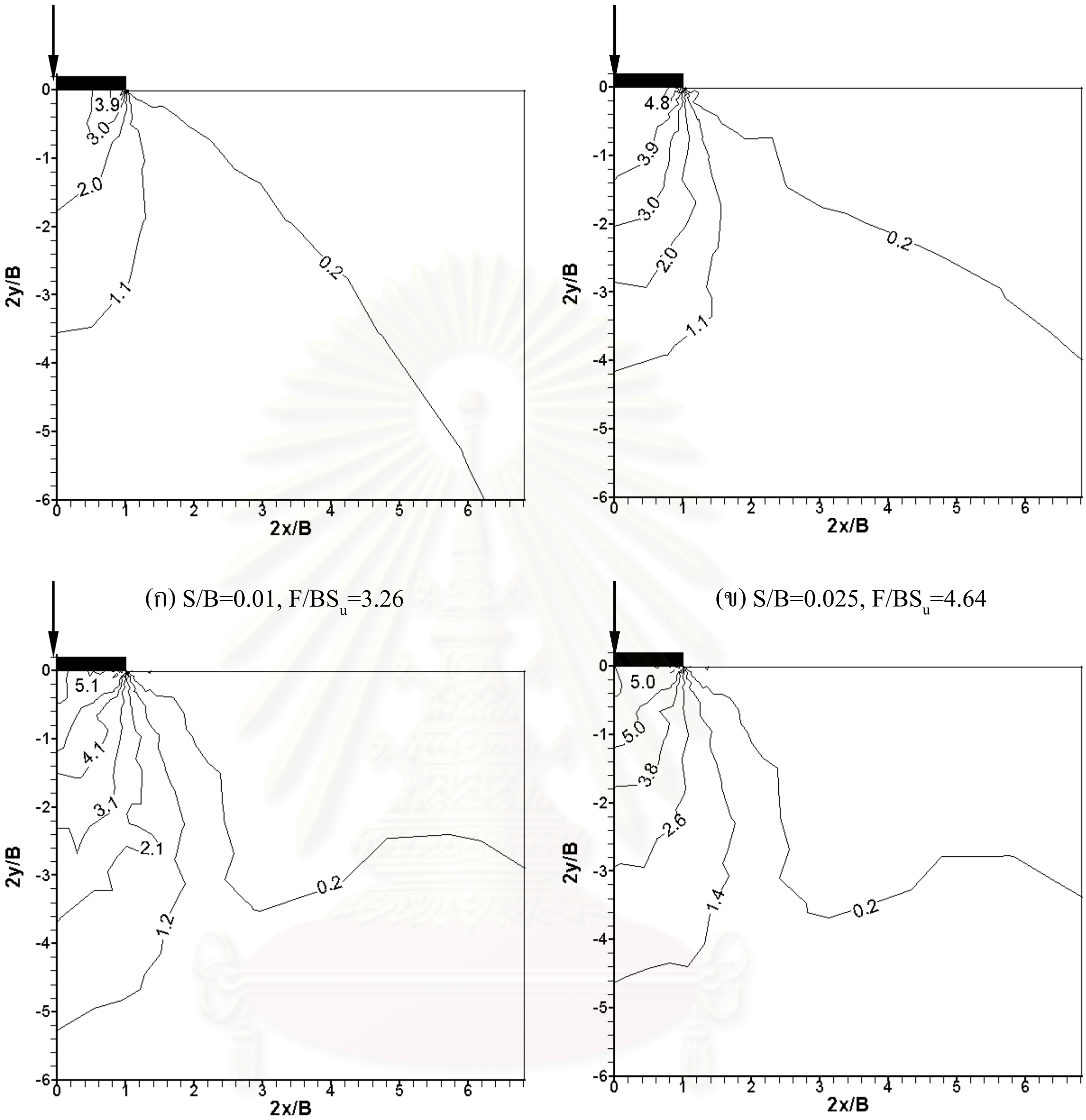



(ค) S/B=0.1




(ง) S/B=0.2

**รูปที่ ก.5 ทิศทางของความเค้นหลักเทียบกับแนวแกนดิ่ง ($\delta$ ,องศา)**
**ของฐานรากต่อเนื่อง D/B=0 วิเคราะห์โดยหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC)**




(ก) S/B=0.01, $F/BS_u$=3.26

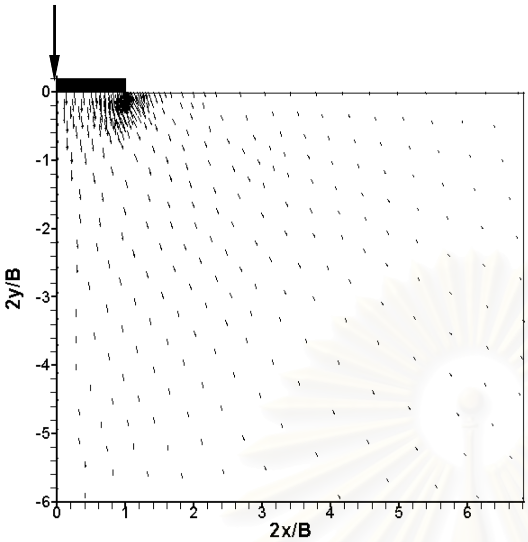
(ข) S/B=0.025, $F/BS_u$=4.64

(ค) S/B=0.1, $F/BS_u$=5.17

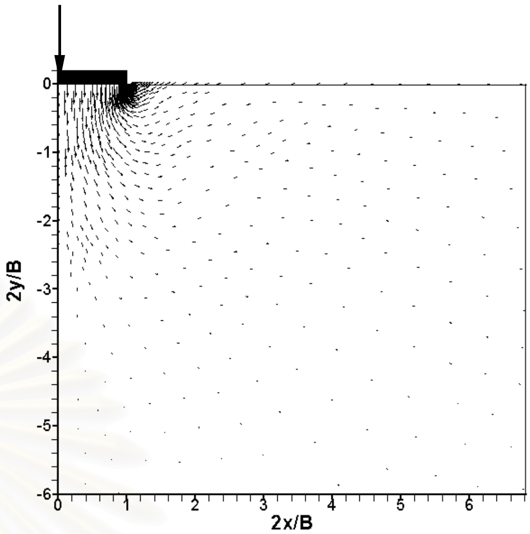
(ง) S/B=0.2, $F/BS_u$=5.18

**รูปที่ ก.6 กราฟ Contour ของความเค้นแนวแกนดิ่ง $(\sigma_v/s_u)$**

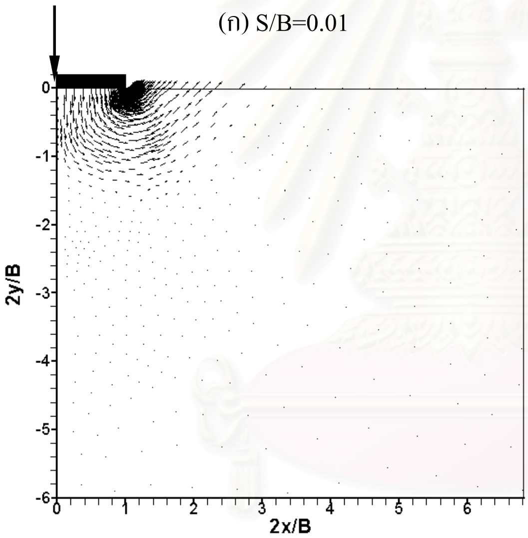
**ของฐานรากต่อเนื่อง D/B=0 วิเคราะห์โดยหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC)**



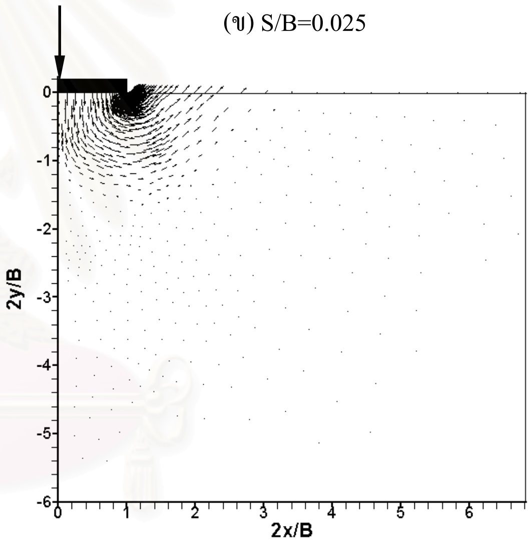

(ก) S/B=0.01




(ข) S/B=0.025



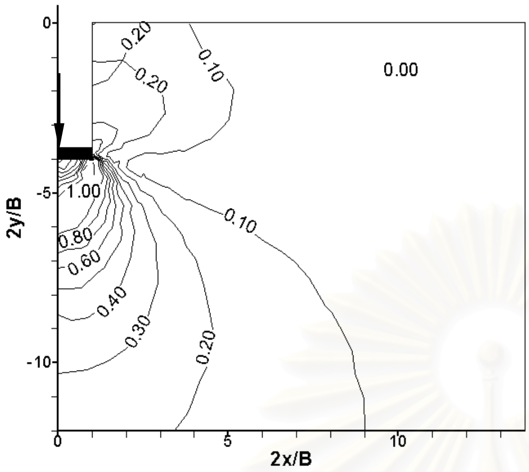

(ค) S/B=0.1



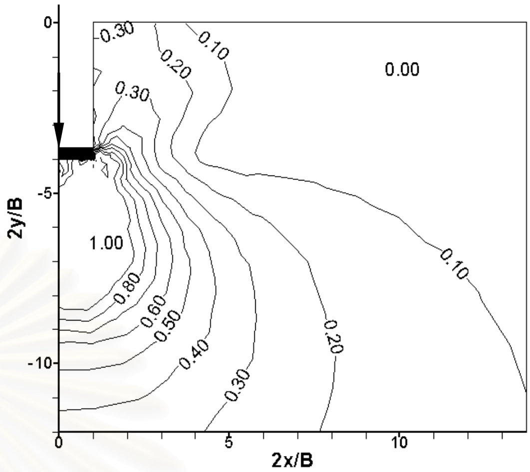

(ง) S/B=0.2

**รูปที่ ก.7 ค่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวของฐานรากต่อเนื่อง D/B=0**

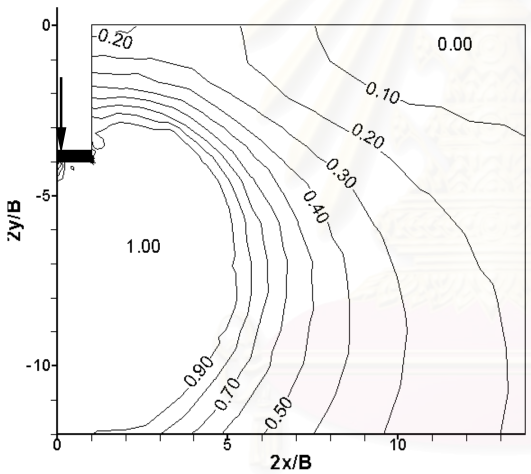
**วิเคราะห์โดยหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC)**



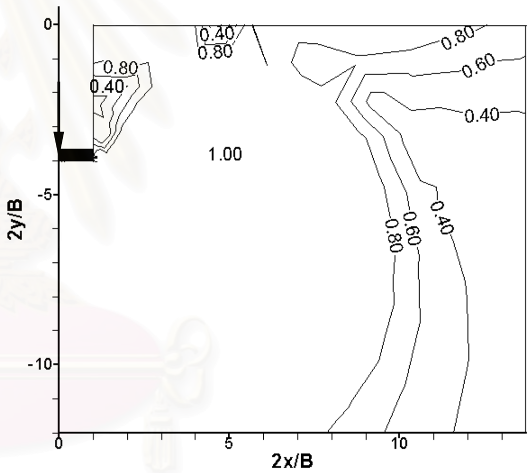

(ก) S/B=0.01




(ข) S/B=0.025

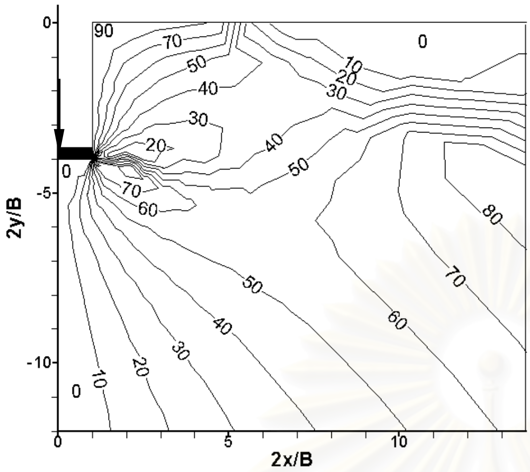



(ค) S/B=0.1

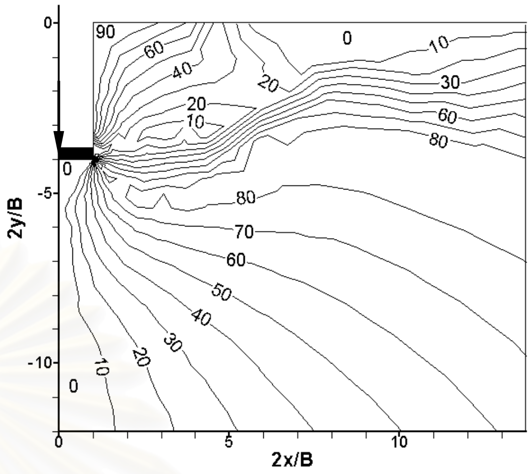



(ง) S/B=0.6

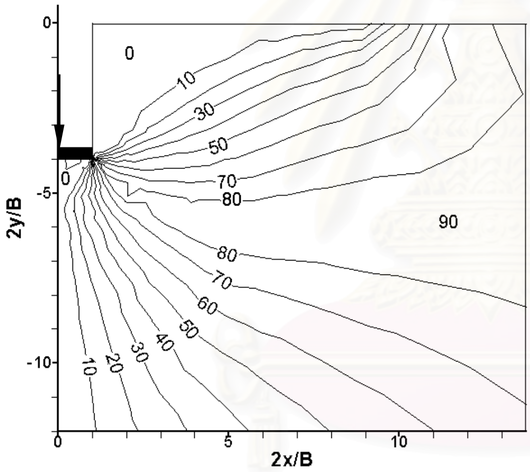
**รูปที่ ก.8 Failure zone $(\sigma_1 - \sigma_3) / (2s_u)$ ของฐานรากต่อเนื่อง D/B=2**
**วิเคราะห์โดยหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC)**



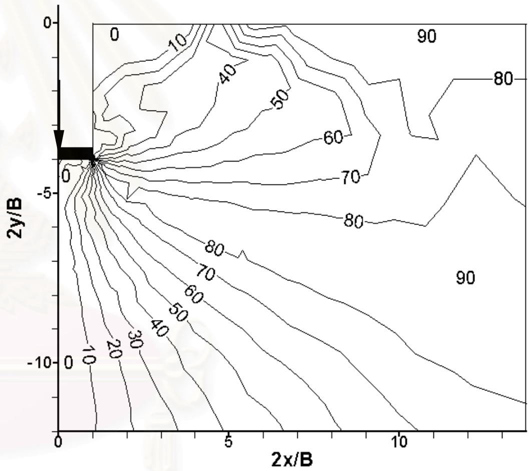

(ก) ) S/B=0.01




(ข) S/B=0.025



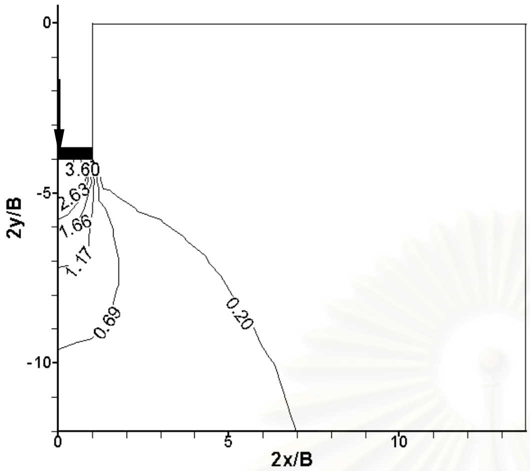

(ค) S/B=0.1



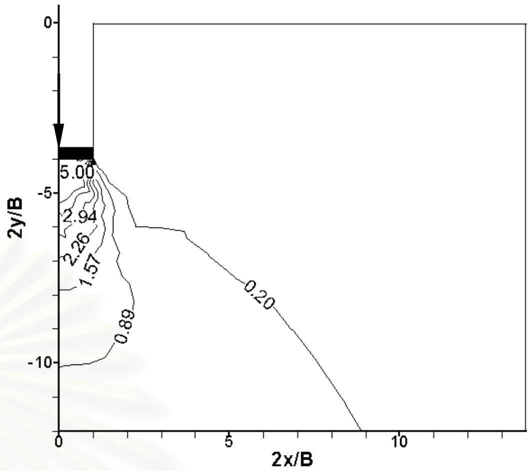

(ง) S/B=0.6

**รูปที่ ก.9 ทิศทางของความเค้นหลักเทียบกับแนวแกนดิ่ง ( $\delta$ ,องศา)**

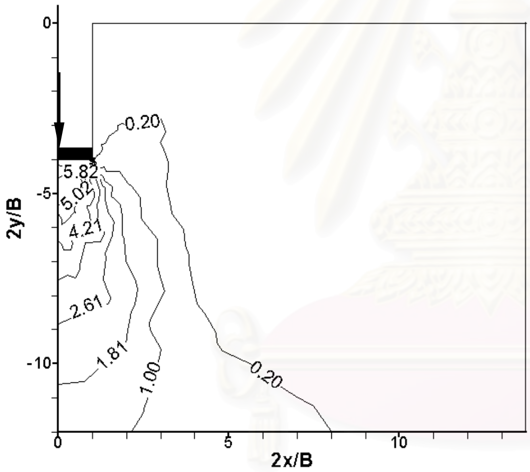
**ของฐานรากต่อเนื่อง D/B=2 วิเคราะห์โดยหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC)**



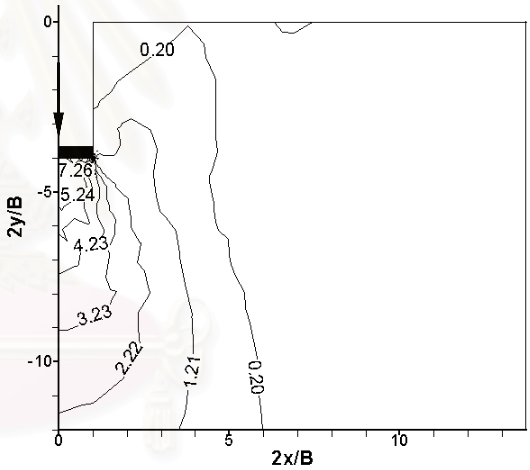

(ก) S/B=0.01, $F/BS_u$=3.46




(ข) S/B=0.025, $F/BS_u$=5.04



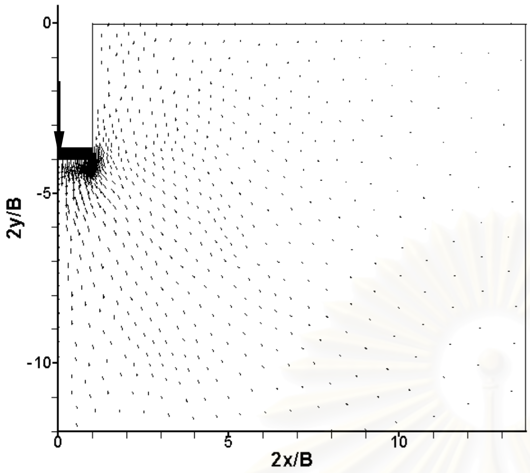

(ค) S/B=0.1, $F/BS_u$=5.83



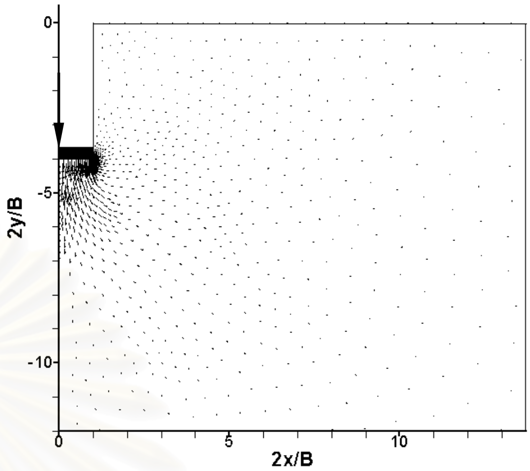

(ง) S/B=0.6, $F/BS_u$=7.26

**รูปที่ ก.10 กราฟ Contour ของความเค้นแนวแกนดิ่ง $\left(\sigma_v / s_u\right)$**

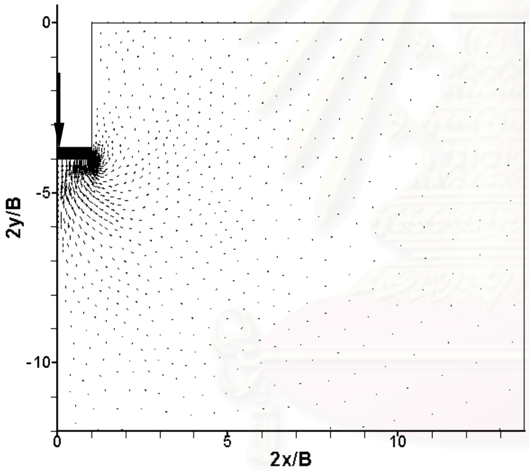
**ของฐานรากต่อเนื่อง D/B=2 วิเคราะห์โดยหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC)**



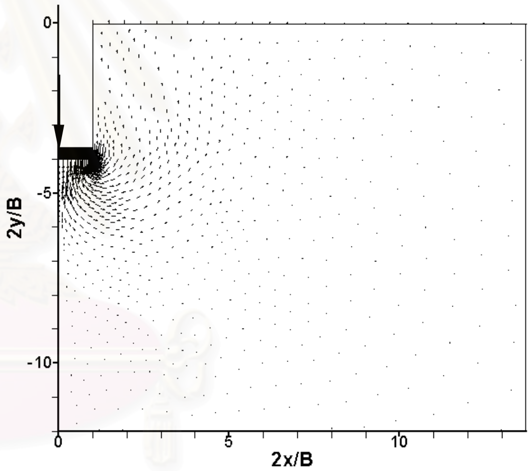

(ก) S/B=0.01




(ข) S/B=0.025




(ค) S/B=0.1



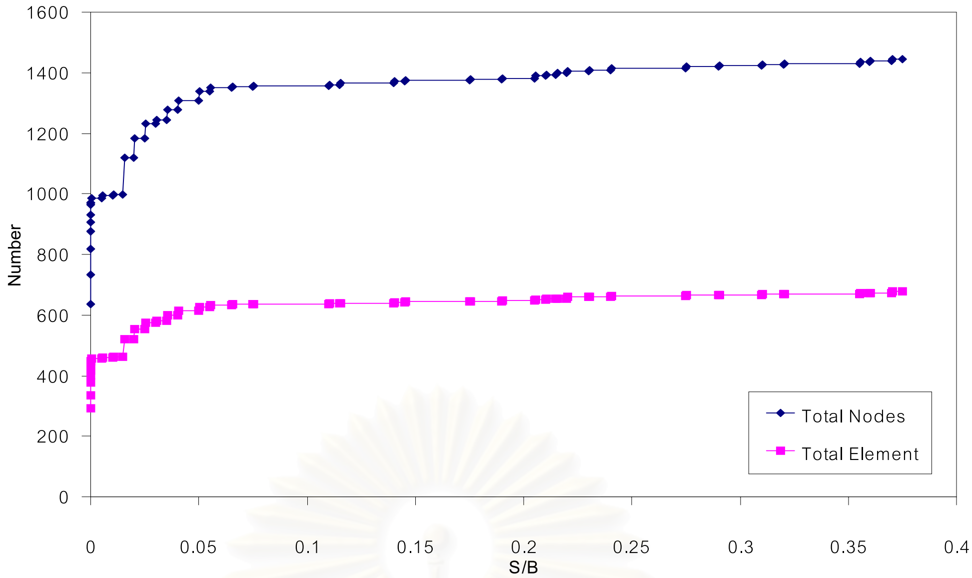

(ง) S/B=0.6



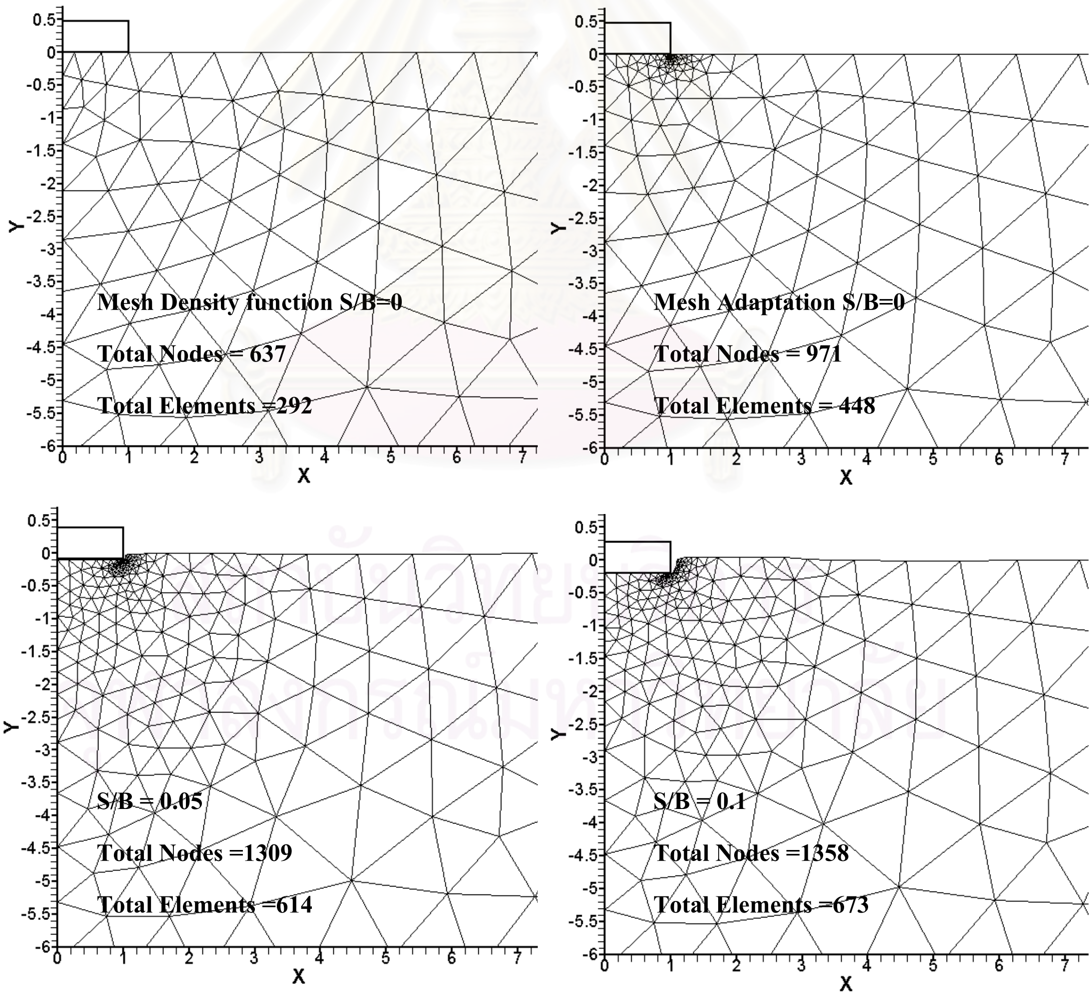
**รูปที่ ก.11 ค่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวของฐานรากต่อเนื่อง D/B=2**

**วิเคราะห์โดยหลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย (SSC)**

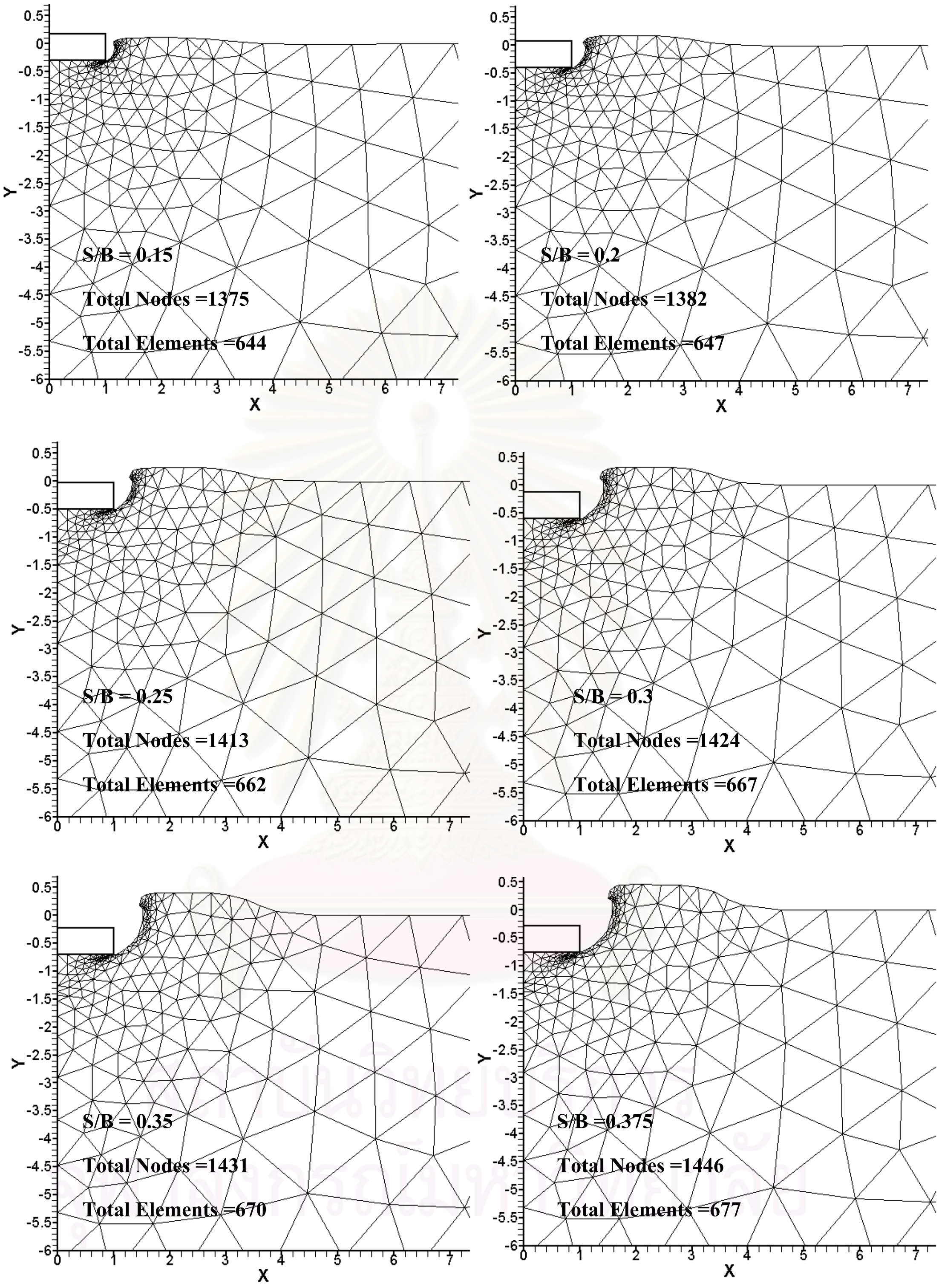
**ภาคผนวก ข**



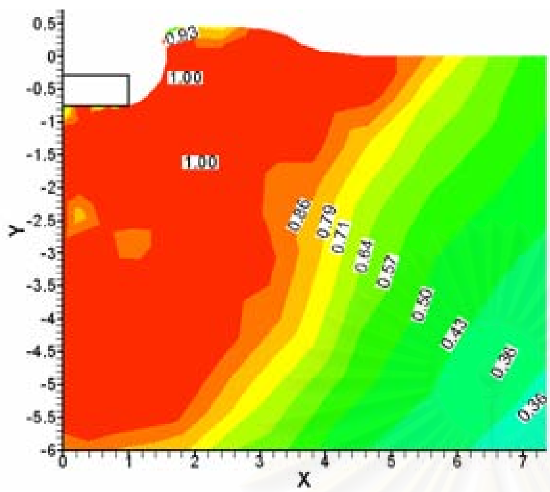

**รูปที่ ข.1 จำนวน จุดต่อและชิ้นส่วน ของฐานรากต่อเนื่องวางบนผิวดิน ณ ตำแหน่งการทรุดตัวที่ระดับ S/B ต่าง ๆ กรณี LSC**



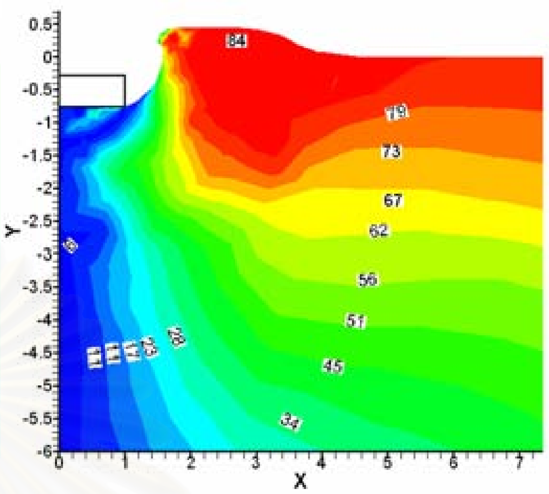

**รูปที่ ข.2 แสดงโครงข่ายของชิ้นส่วนฐานรองรับต่อเนื่องวางบนผิวดิน จากการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน (LSC)**



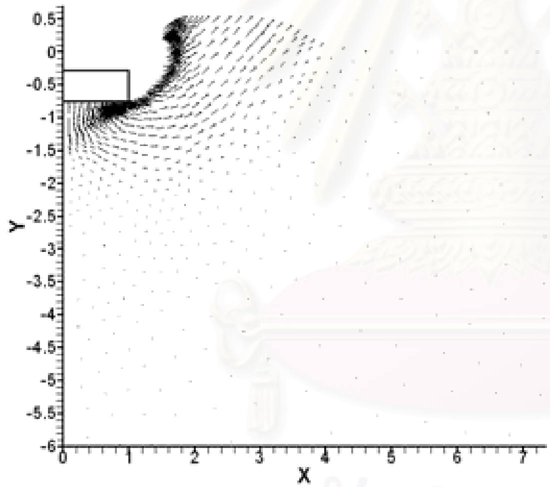

**รูปที่ ข.2(ต่อ) แสดงโครงข่ายของชิ้นส่วนฐานรองรับต่อเนื่องวางบนผิวดิน จากการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน (LSC)**



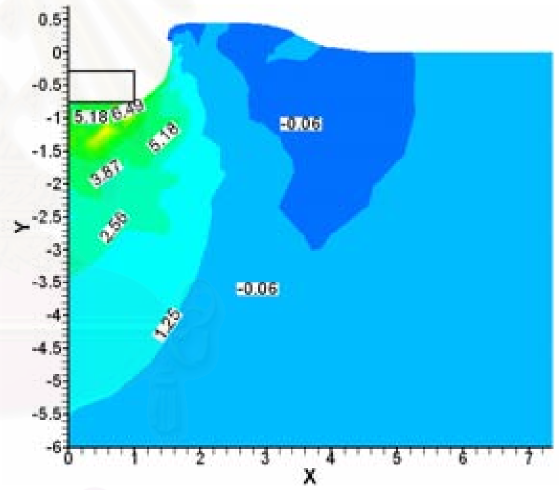

(ก)




(ข)




(ค)




(ง)

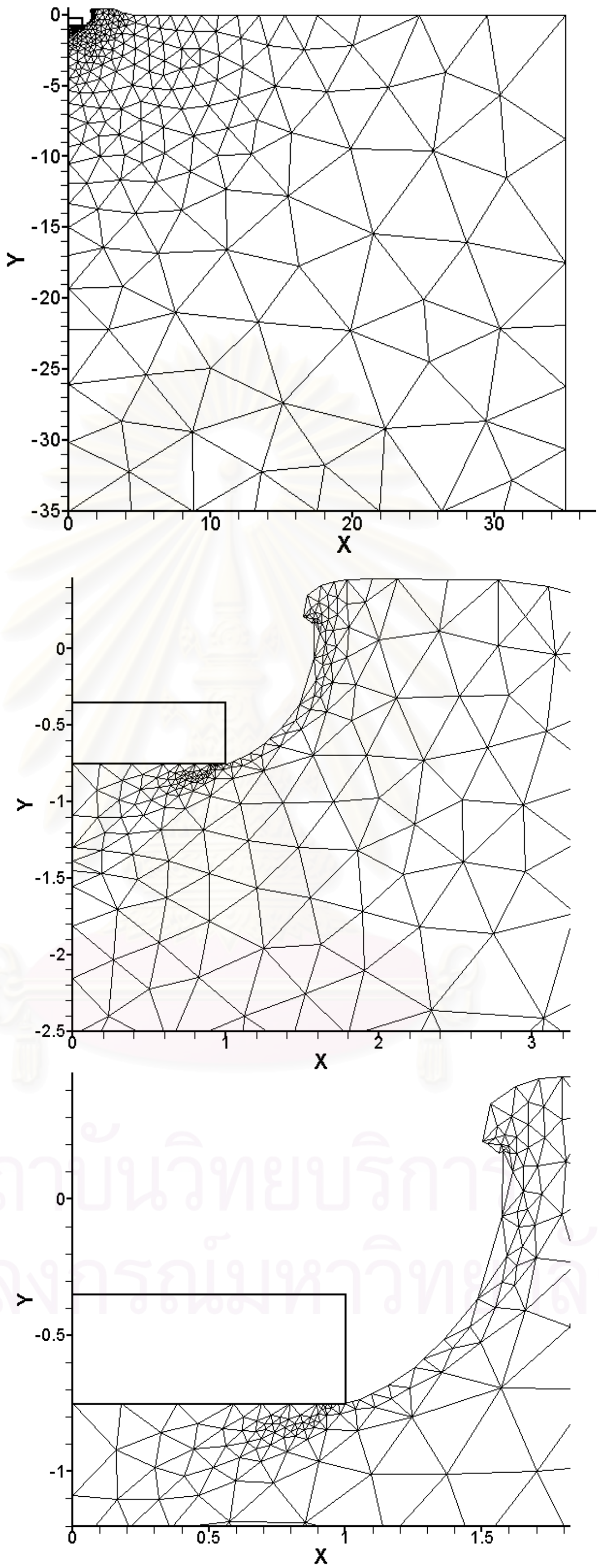
**รูปที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของฐานรากต่อเนื่องวางบนผิวดิน กรณี LSC**

**(ก) Failure zone** $(\sigma_1 - \sigma_3)/(2s_u)$

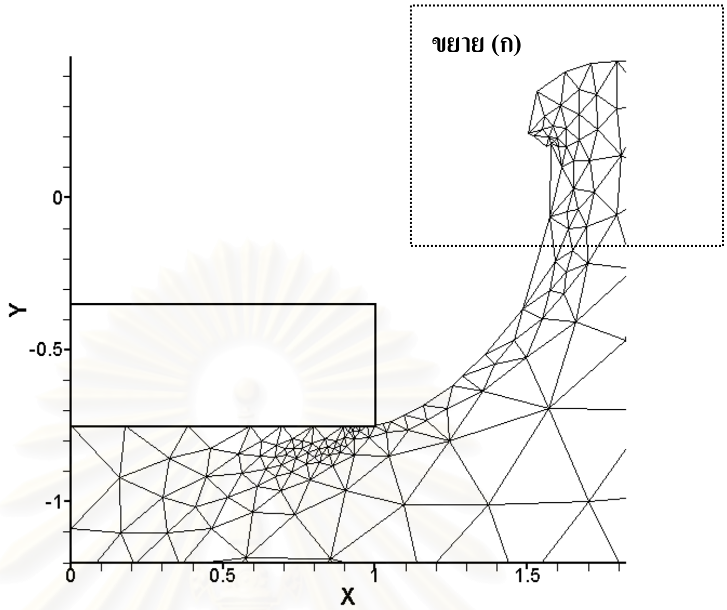
**(ข) ทิศทางของความเค้นหลักเทียบกับแนวแกนดิ่ง (** $\delta$ **, องศา),**

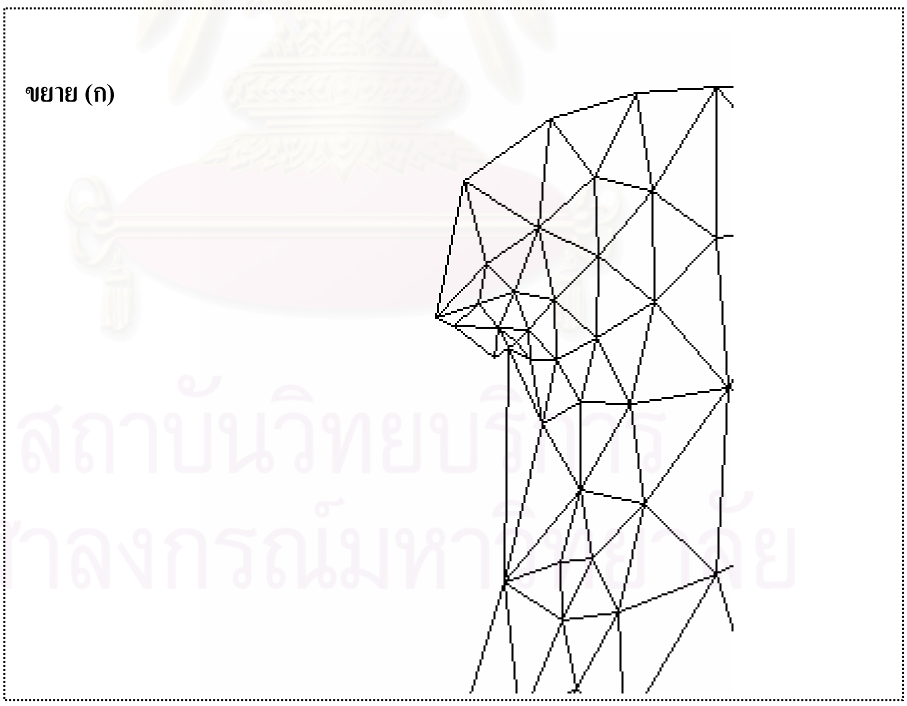
**(ค) ค่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวของฐานราก**

**(ง) กราฟ Contour ของความเค้นแนวแกนดิ่ง** $(\sigma_v/s_u)$



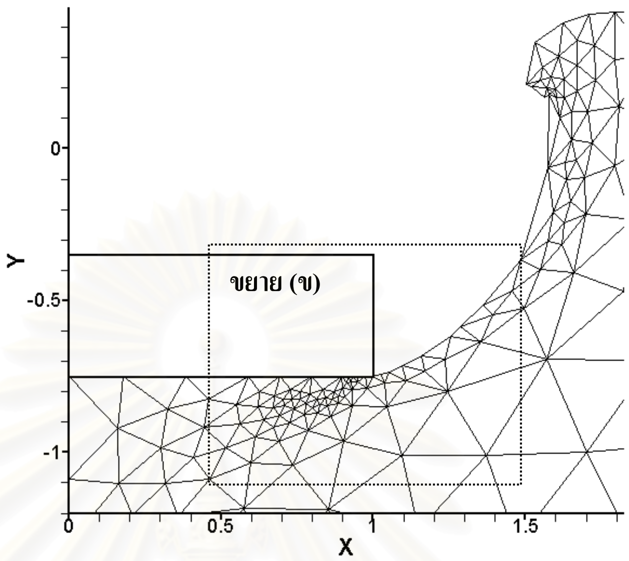

**รูปที่ ข.4 การเสียรูปโครงข่ายของชิ้นส่วน ของฐานรากต่อเนื่อง S/B=0.375 กรณี LSC**

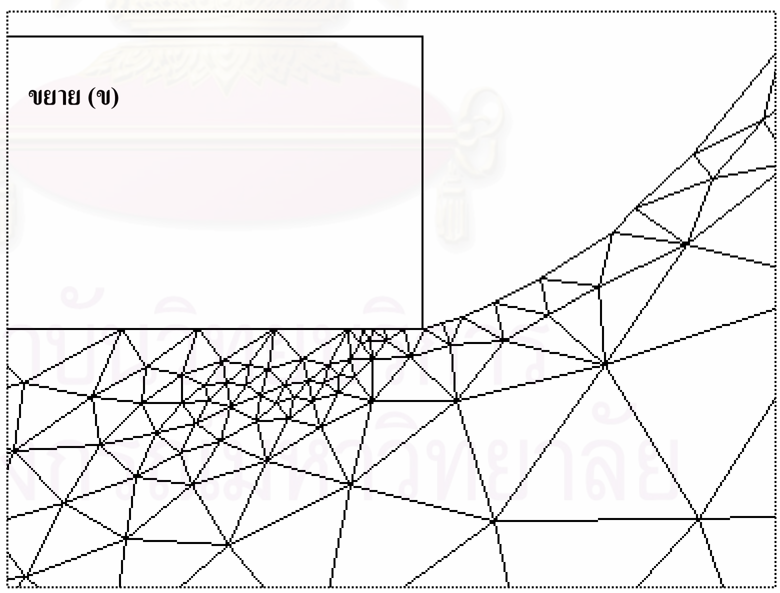


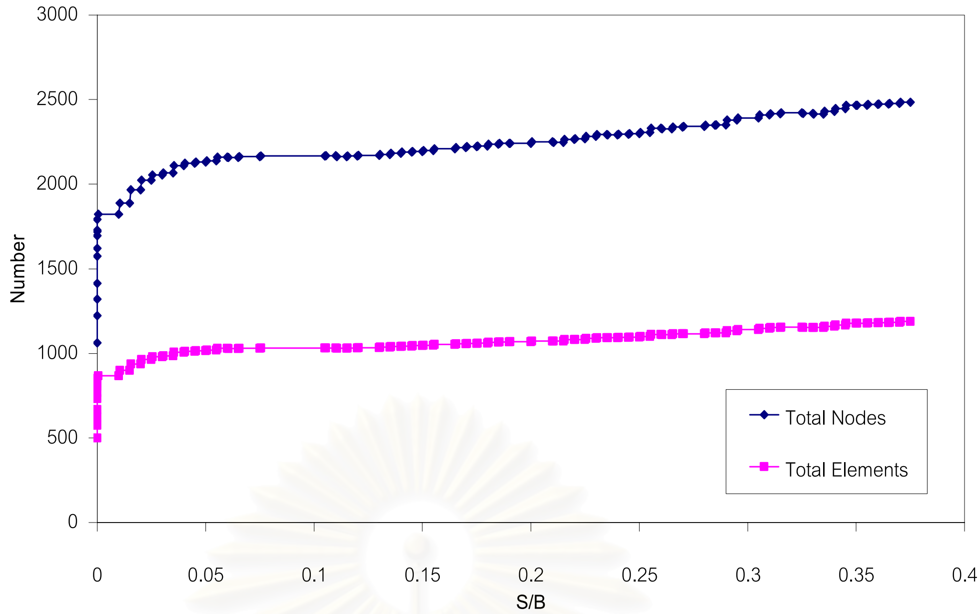



**รูปที่ ข.4 (ต่อ) การเสียรูปโครงข่ายของชิ้นส่วน ของฐานรากต่อเนื่อง S/B=0.375 กรณี LSC**



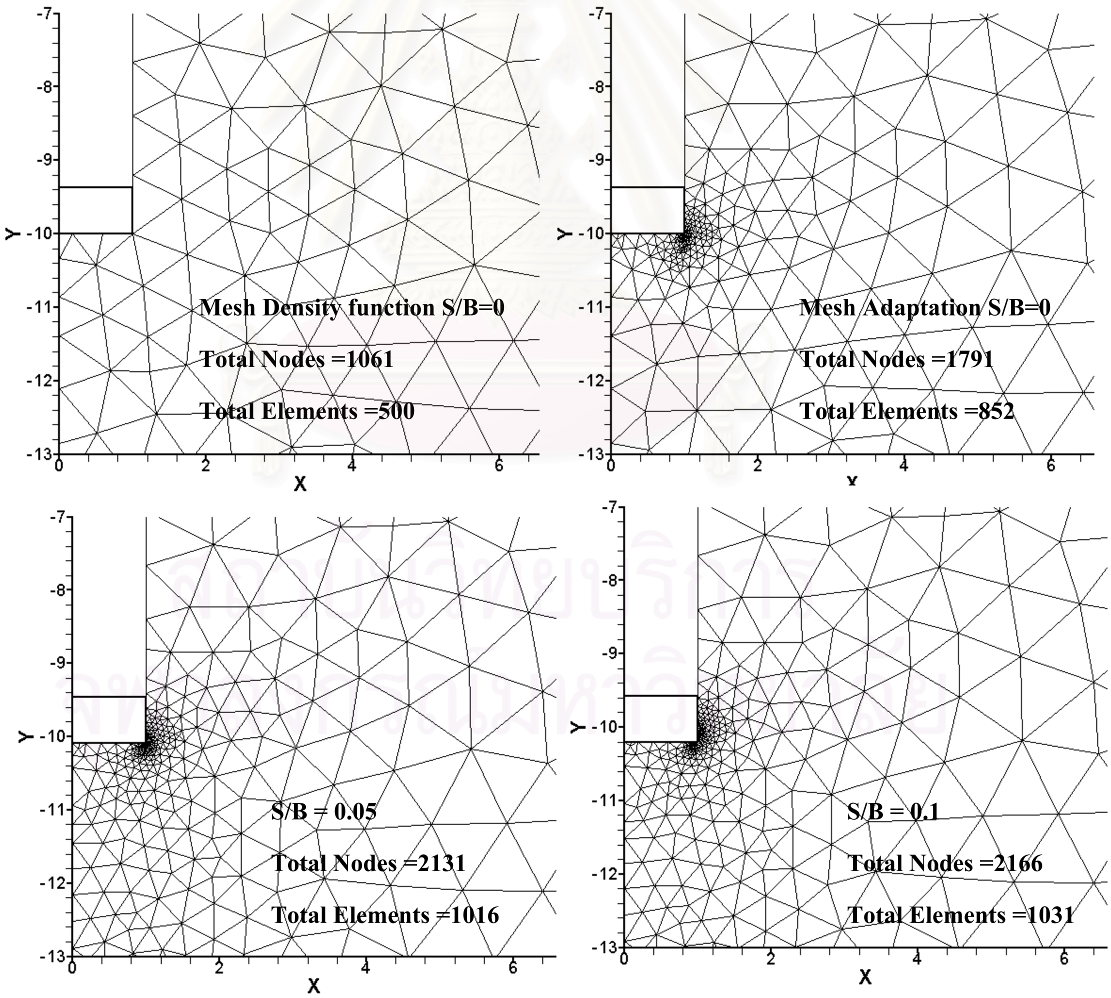




**รูปที่ ข.4 (ต่อ) การเสียรูปโครงข่ายของชิ้นส่วน ของฐานรากต่อเนื่อง S/B=0.375 กรณี LSC**



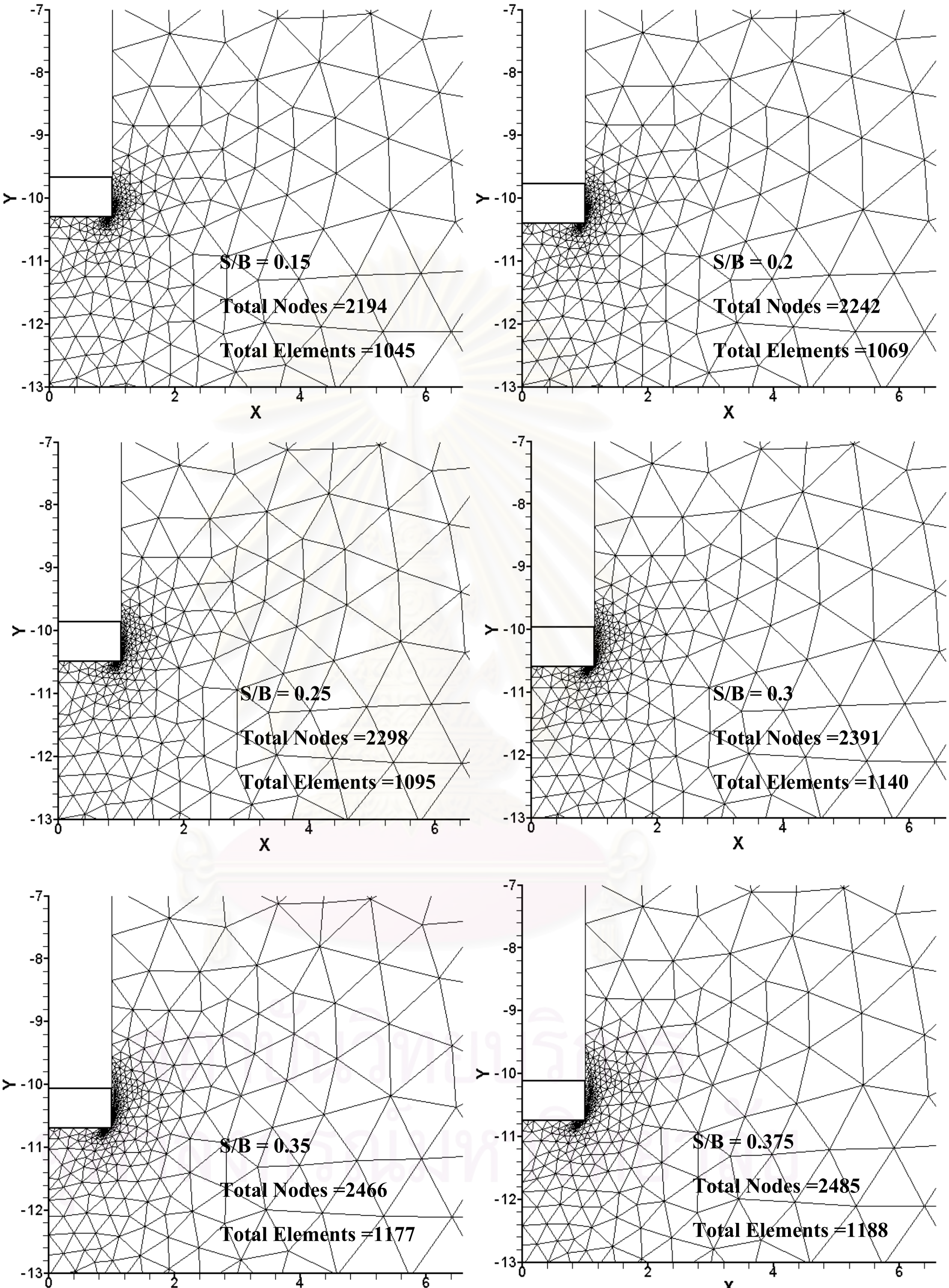

**รูปที่ ข.5 จำนวน จุดต่อและชิ้นส่วน ของฐานรากต่อเนื่อง D/B=5**

**ณ ตำแหน่งการทรุดตัวที่ระดับ S/B ต่าง ๆ กรณี LSC**

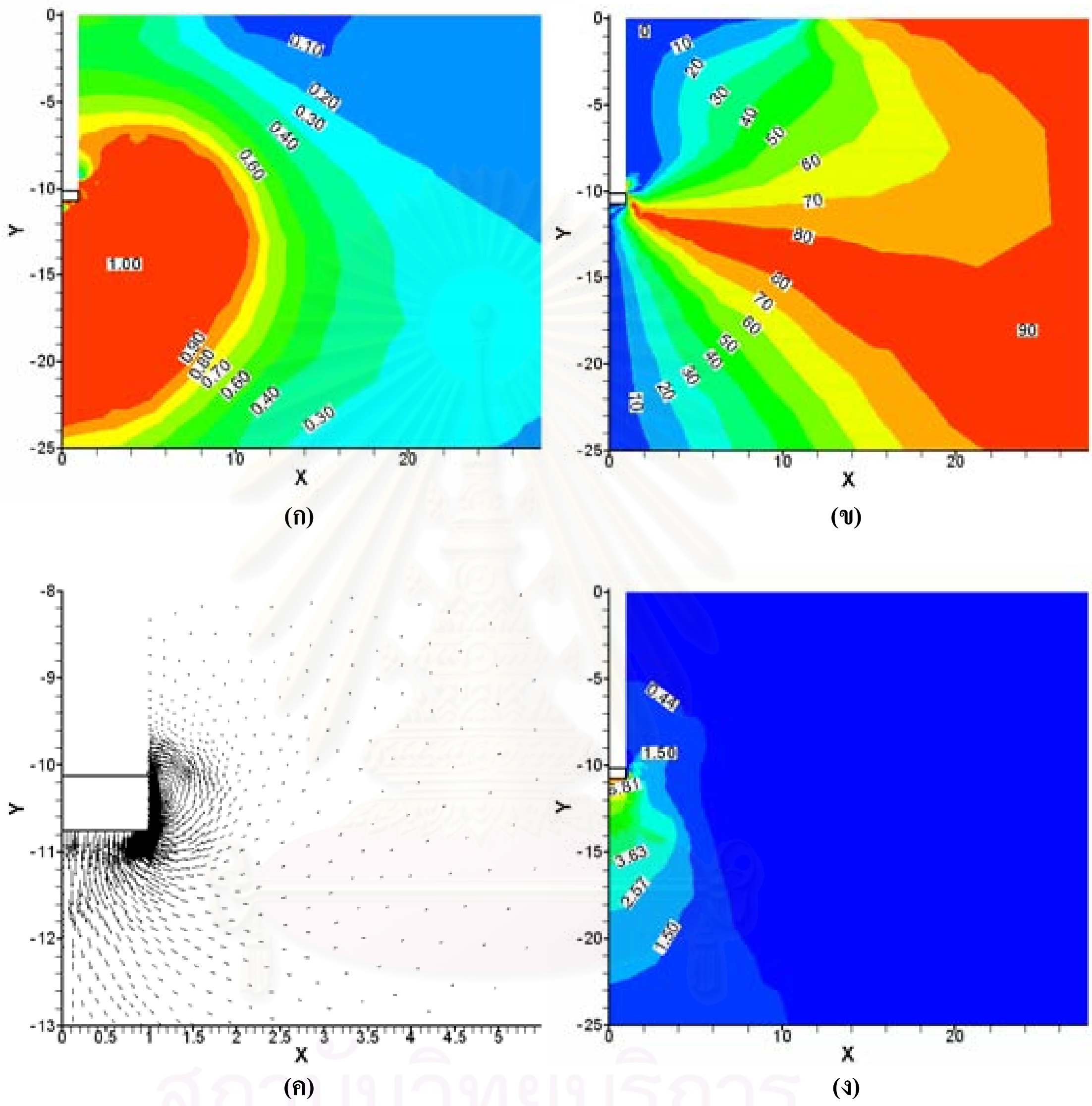



**รูปที่ ข.6 แสดงโครงข่ายของชิ้นส่วนฐานรองรับต่อเนื่อง D/B=5**

**จากการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน (LSC)**




**รูปที่ ข.6(ต่อ) แสดงโครงข่ายของชิ้นส่วนฐานรองรับต่อเนื่อง D/B=5**
**จากการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน (LSC)**





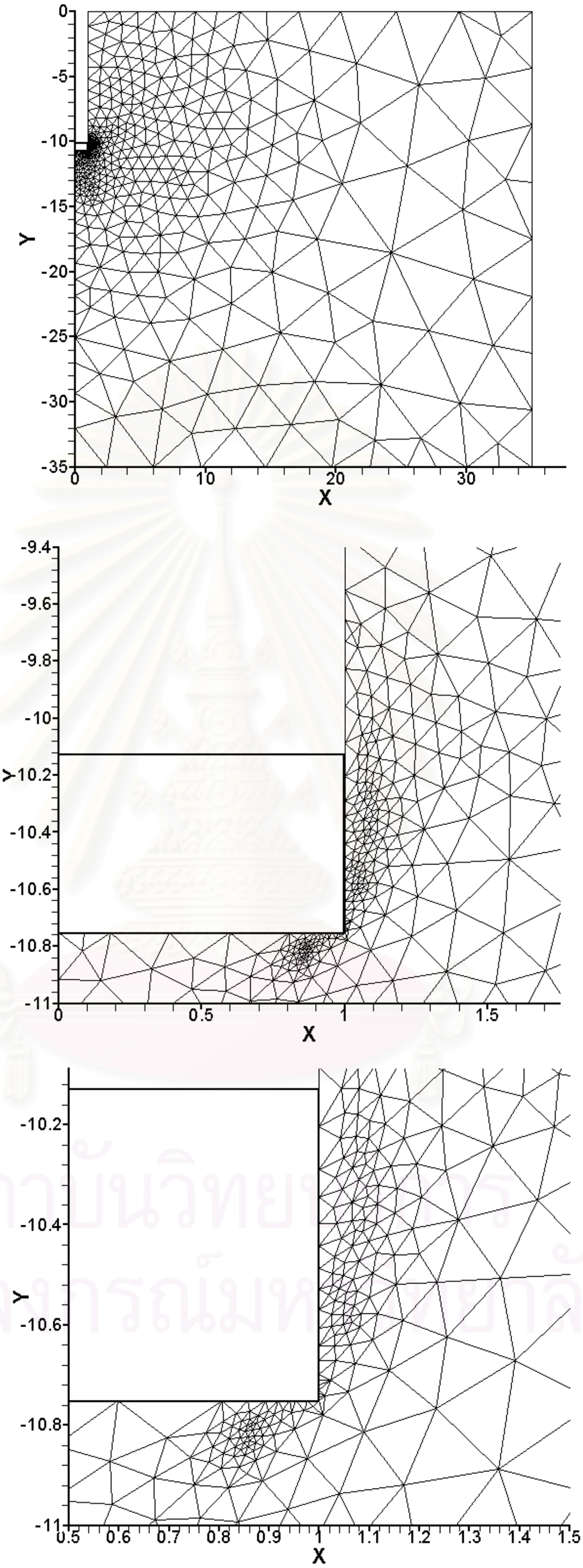

**รูปที่ ข.7 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของฐานรากต่อเนื่อง D/B=5, S/B=0.375 และ $\gamma = 0$ kN/m$^2$ กรณี LSC**

**(ก) Failure zone $(\sigma_1 - \sigma_3)/(2s_u)$**

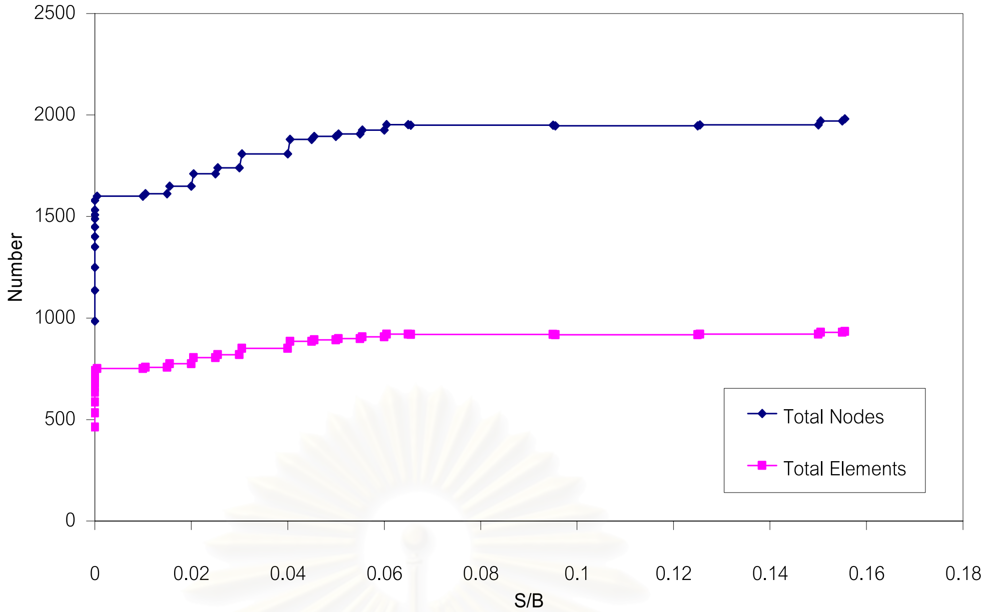
**(ข) ทิศทางของความเค้นหลักเทียบกับแนวแกนดิ่ง ($\delta$ , องศา),**

**(ค) ค่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวของฐานราก**

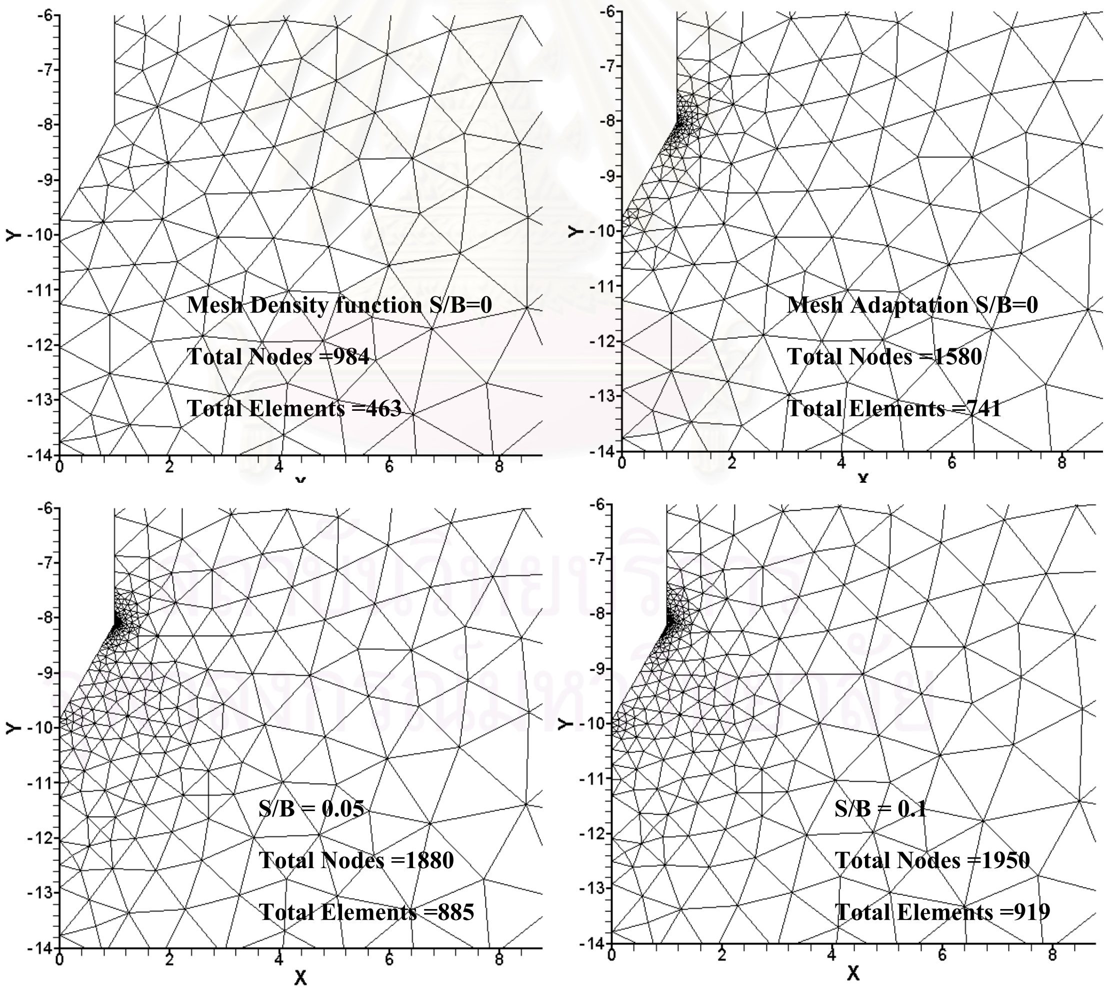
**(ง) กราฟ Contour ของความเค้นแนวแกนดิ่ง $(\sigma_v/s_u)$**



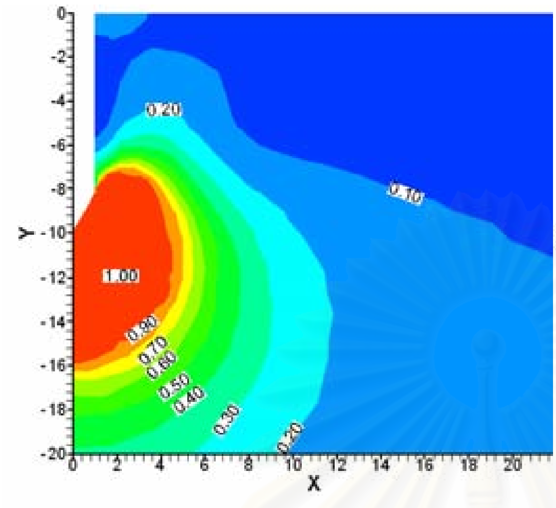

**รูปที่ ข.8 โครงข่ายของชิ้นส่วน ของฐานรากต่อเนื่อง D/B=5 และ S/B=0.375 กรณี LSC**



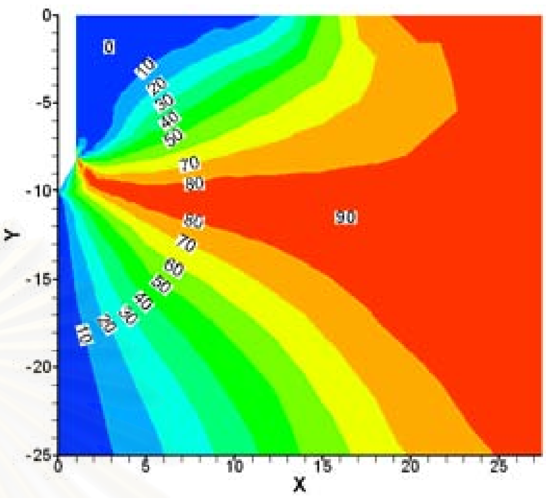

**รูปที่ ข.9 จำนวน จุดต่อ และชิ้นส่วน ของฐานรองรับต่อเนื่องปลายแหลม D/B=4**
**ณ ตำแหน่งการทรุดตัวที่ระดับ S/B ต่างๆ กรณี LSC**



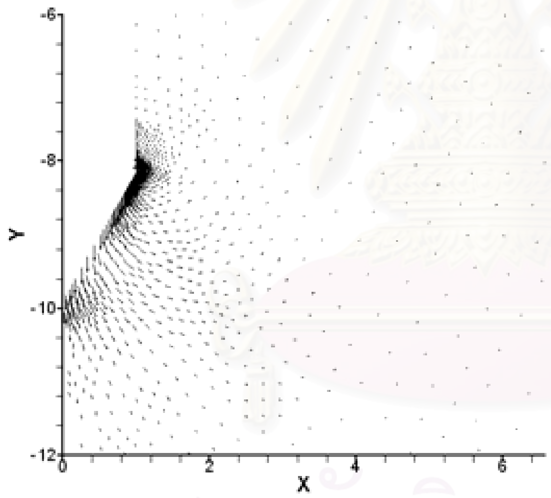

**รูปที่ ข.10 แสดงโครงข่ายของชิ้นส่วนฐานรองรับต่อเนื่องปลายแหลม D/B=4**
**จากการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน (LSC)**



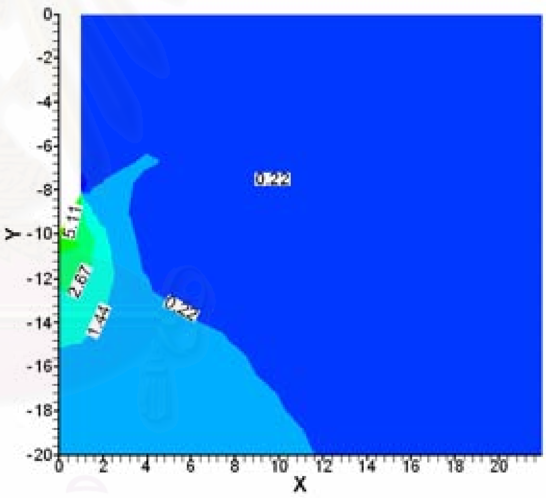

(ก)




(ข)




(ค)




(ง)

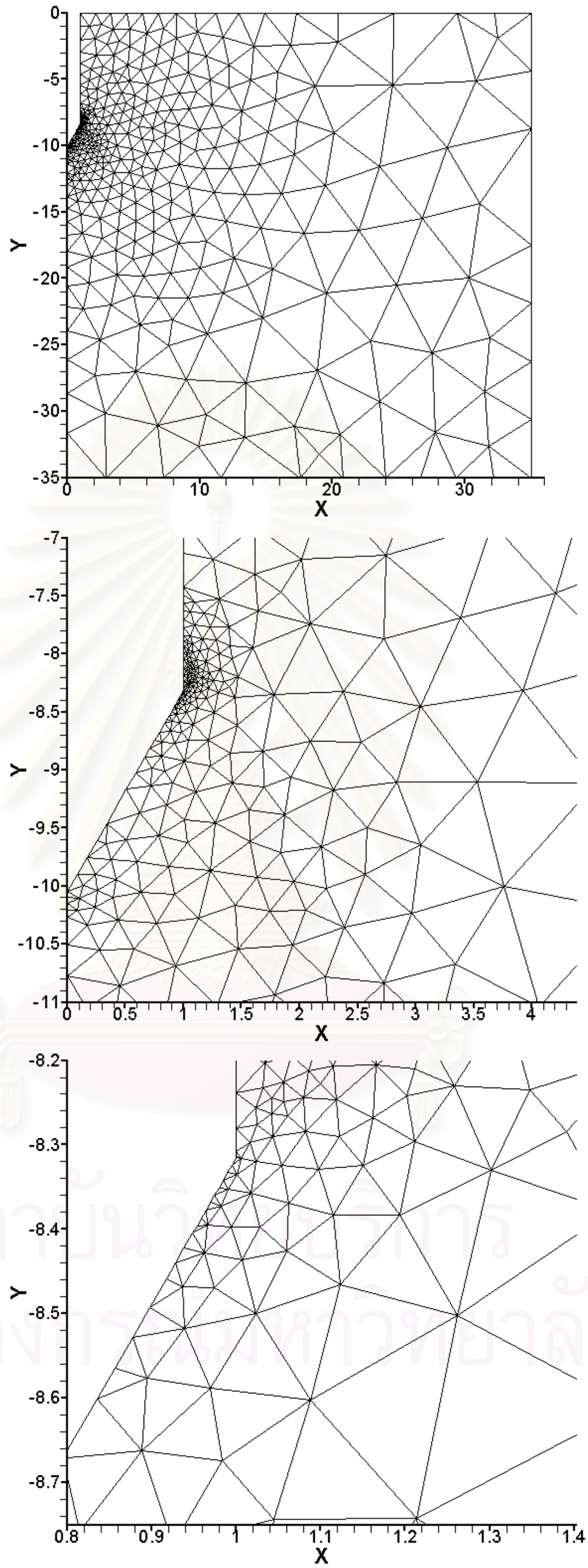
**รูปที่ ข.11 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของฐานรองรับต่อเนื่องปลายแหลม D/B = 4, S/B=0.155 และ $\gamma$ = 0 kN/m$^2$ กรณี LSC**

**(ก) Failure zone $(\sigma_1 - \sigma_3) / (2s_u)$**

**(ข) ทิศทางของความเค้นหลักเทียบกับแนวแกนดิ่ง ($\delta$, องศา),**

**(ค) ค่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวของฐานราก**

**(ง) กราฟ Contour ของความเค้นแนวแกนดิ่ง $(\sigma_v / s_u)$**




**รูปที่ ข.12 การเสียรูปโครงข่ายของชิ้นส่วนของฐานรองรับต่อเนื่องปลายแหลม จากการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวมากของมวลดิน (LSC) เมื่อ D/B=4 และ S/B=0.155**

# ประวัติผู้เขียน

นาย ดำรงค์ฤทธิ์ พรหมณีวัฒน์ เกิดวันที่ 6 กันยายน 2520 ที่จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543