



# ความแม่นยำของการคาดคะเนระยะทຽดตัวสำหรับฐานแผ่น

## ในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

### Accuracy of Settlement Predictions for Spread Footing in Chiang Mai University

อัครราชติปันธง\* และ สุเทพ นิมนานุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Akkarachart Pinthong\* and Suthep Nimnuan

Department of Civil Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200, Thailand

E-mail: akka\_elbo@hotmail.com\*

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการคาดคะเนระยะทຽดตัวสำหรับฐานแผ่นในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ใช้โครงการก่อสร้างอาคารเรียนและปฏิบัติการ 5 ชั้น คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เป็นกรณีศึกษา คาดคะเนระยะทຽดตัวของฐานรากอาคาร โดยวิธีความเครียดมิติดิเอวา, วิธีความเครียดมิติรวมกับระยะทຽดตัวเริ่มต้น โดยวิธีทฤษฎีการขึ้นดินหยุ่น และ วิธีทฤษฎีการขึ้นดินหยุ่น แล้วเปรียบเทียบระยะทຽดตัวที่ได้กับระยะทຽดตัวที่เกิดขึ้นจริง คาดคะเนโดยวิธีของ Asaoka, A. (1978) ผลการเปรียบเทียบระยะทຽดตัวบ่งชี้ว่า วิธีคาดคะเนระยะทຽดตัวทั้งสามวิธีให้ระยะทຽดมากกว่าที่วัดได้และในสามวิธีนี้ วิธีทฤษฎีการขึ้นดินหยุ่นให้ค่าระยะทຽดตัวแม่นยำกว่าอีกสองวิธีที่เหลือ

#### ABSTRACT

The purpose of this research is to investigate the accuracy of settlement predictions for spread footing in Chiang Mai University, using the five-storeyed building of the faculty of education Chiang Mai University construction project as a case study. The predict settlement of building foundation was done by the one-dimensional strain method, the one-dimensional strain plus initial settlement method and the elastic theory method. Settlements obtained are then compared with the settlements measured which are predicted by the method of Asaoka, A. (1978). The results of comparison of settlements indicate that settlements from all the three settlement prediction methods are greater than settlements measured, moreover among the three settlement prediction methods, the elastic theory method is more accurate than the other two methods.

#### 1. บทนำ

การทຽดตัวของฐานรากเป็นสิ่งหนึ่งที่วิศวกรผู้ออกแบบต้องคำนึงถึง เพราะการทຽดตัวของดินบริเวณฐานรากอาจทำให้โครงสร้างแตกร้าวเสียหายจนใช้การไม่ได้ และถึงแม้ว่าการทຽดตัวจะไม่เกิดอันตรายในทันที

แต่ก็มีผลกับความสวยงามและประโยชน์ใช้สอยของโครงสร้างได้ นอกจากนี้ในกรณีที่ฐานรากเกิดการทຽดตัวมากเกินไปหรือทຽดตัวต่างกันมาก ย่อมทำให้เกิดแรงในชั้นล่างโครงสร้างส่วนบนและแรงที่เกิดขึ้นนี้มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนโครงสร้างรับไม่ไหวและวินาศในที่สุด ดังนั้นการ

ออกแบบฐานรากจึงต้องใช้วิธีการคาดคะเนระยะทrukตัวและหาทางควบคุมการทrukตัวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

วิธีการคาดคะเนระยะทrukตัวนั้นมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีสมมุติฐานและรากฐานของการวิเคราะห์ต่างกัน จึงทำให้ได้คำตอบไม่เหมือนกัน อีกทั้งคืนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีคุณสมบัติซับซ้อนไม่สามารถจำลองพฤติกรรมได้ครบถ้วน

วิธีการคาดคะเนระยะทrukตัวต่างๆ จึงแม้จะตั้งอยู่บนสมมุติฐานและทฤษฎีที่เชื่อถือได้ แต่หากข้อมูลที่ใช้ในการคาดคะเนไม่ถูกต้องตามคุณสมบัติจริงของชั้นดิน สิ่งที่ตามมาคือผลการคาดคะเนจะคลาดเคลื่อน เนื่องจากมีข้อมูลอยู่หลาຍประเทกที่ใช้ในการคาดคะเนระยะทrukตัว จึงต้องทำความเข้าใจเสียก่อนว่าข้อมูลที่จะหาได้ประกอบด้วยข้อมูลใดบ้างซึ่งจัดแบ่งเป็น 3 ประเทกคือประเทกแรกเป็นข้อมูลเกี่ยวกับชั้นดิน ประเทกที่สองคือข้อมูลเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกและฐานราก ส่วนข้อมูลประเทกที่สามคือข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของมวลดิน ข้อมูลประเทกที่หนึ่งและสองเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐาน แต่สำหรับข้อมูลประเทกที่สามนั้นจะต้องเลือกใช้เฉพาะค่าที่มีความจำเป็นในการคาดคะเนแต่ละกรณีไป ข้อมูลประเทกที่สามเป็นข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของมวลดินซึ่งจะแสดงออกมากในรูปตัวของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการเลือกใช้ตัวแปรดังกล่าวเนี้ี้ด้องพิจารณาเลือกใช้อ้างถูกต้อง เหมาะสมกับวิธีการคาดคะเนระยะทrukตัวเพื่อให้ได้ผลการคาดคะเนใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด จากเหตุผลดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการค้นคว้าและวิจัยที่มุ่งตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการคาดคะเนระยะทrukตัวที่ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการคาดคะเนระยะทrukตัวสำหรับฐานแผ่นดินไป

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการคาดคะเนระยะทrukตัวของฐานแผ่นดินตามวิธีทฤษฎีการขีดหยุ่น (Elastic Theory), วิธีความเครียดมิติเดียว (One-dimensional

strain method) และวิธีความเครียดมิติเดียวรวมระยะทrukตัวเริ่มต้น

## 3. วิธีดำเนินการวิจัย

ใช้ข้อมูลจากการสังเกตการณ์การทrukตัวของโครงการก่อสร้างอาคารเรียนและปฏิบัติการ 5 ชั้น คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เป็นกรณีศึกษา ซึ่งโครงการดังกล่าว ตัวอาคารเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น โครงสร้างแผ่นพื้นแต่ละชั้นเป็นคอนกรีตอัดแรงไร้คาน ฐานรากของอาคารเป็นฐานแผ่นดินที่มีทั้งฐานแผ่นเดี่ยวและฐานแผ่นร่วมเป็นฐานแผ่นรองรับเสาตอม่อ 2 ตัน โดยมีแผนผังการวางฐานรากดังรูปที่ 1 และระดับความลึกของฐานแผ่นร่วมทั้งจากการดับดินเดิมโดยประมาณแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับความลึกของฐานแผ่นร่วมทั้งโดยประมาณจากระดับดินเดิม (หน่วยเมตร)

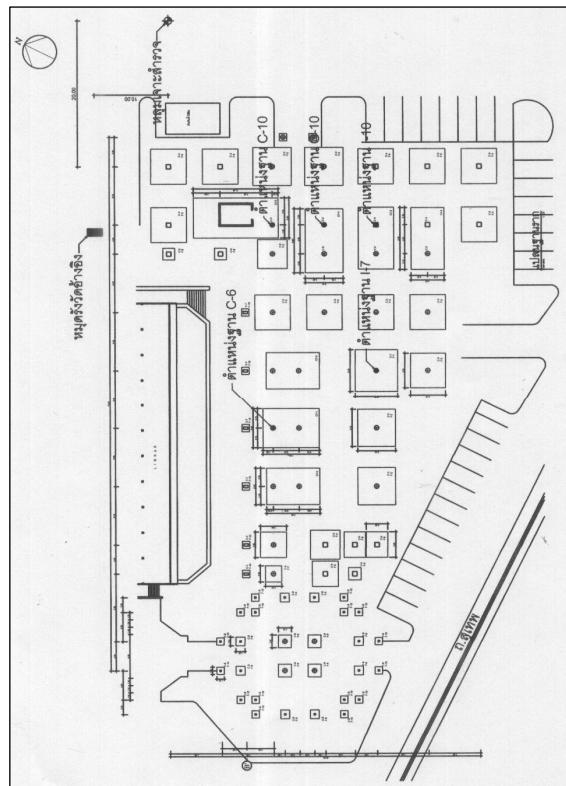
GRID LINE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	-	-	-	-	-	-	-	-	2.44	2.44	3.83	-
B	-	-	-	-	-	-	-	2.37	-	3.60	-	-
B'	-	-	1.25	1.30	1.20	1.13	1.17	1.30	-	-	-	-
C	-	-	2.00	2.50	-	-	-	2.00	2.40	2.40	3.50	-
D	2.00	2.14	-	-	2.80	2.80	2.75	-	-	-	-	1.25
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	2.10	2.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.50
G	-	-	2.50	2.43	-	-	-	2.00	2.40	2.00	-	-
H	-	-	1.85	2.00	-	-	-	-	-	-	-	-
I	-	-	-	2.00	2.35	2.50	2.30	2.20	-	2.40	2.17	-
J	-	-	-	-	-	-	-	2.15	2.00	2.44	2.00	-
K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00	1.97	-

โครงการดังกล่าวตั้งอยู่ต่ำกว่าระดับบริเวณถนนสุเทพ ใกล้เชิงคอหงส์สุเทพ สภาพทางธารน้ำที่ไหลผ่านที่โครงการโดยทั่วไปเป็นดินตะกอนลานตะพกน้ำ มีระดับดินต่ำกว่าทิศตะวันตกเฉียงใต้ลงไปในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือมุมเอียงลาดประมาณด้วยสายตาไม่เกิน 3 องศา

### 3.1 การวัดระยะทrukตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

งานวิจัยเริ่มจากทำการวัดระยะทrukตัวคือ หมุดอ้างอิง 1 จุด และกำหนดจุดวัดระยะการทrukตัวภายในอาคาร 5 จุด ได้แก่ ตำแหน่ง C – 10, G – 10, I – 10, I – 7 และ C – 6 ตามลำดับดังรูปที่ 1 โดยยึดถือความสะดวกในการปักดิ่งงานเป็นหลัก เพื่ออ้างอิงการเก็บข้อมูลระยะทrukตัวของอาคาร

เพื่อลดปัจจัยทางการท่าหมุดอ้างอิงเกี่ยวกับการดูแลรักษาอันเนื่องจากบริเวณพื้นที่ทำงานเป็นสถานที่ก่อสร้างมีการทำงานตลอดเวลาจึงใช้สานของอาคารข้างเคียงด้านทิศเหนือของโครงการห่างออกไปจากขอบอาคารด้านขาวเป็นระยะประมาณ 10 เมตรเป็นหมุดอ้างอิง



รูปที่ 1 แผนผังฐานราก, หมุดรังวัดอ้างอิง, หลุมเจาะสำรวจน้ำ และ ตำแหน่งฐานที่พิจารณาจะระยะทรุดตัว

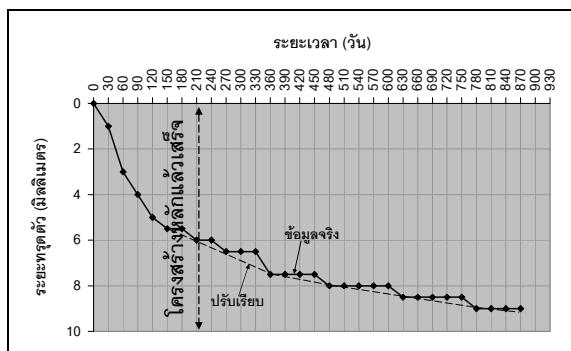
เริ่มวัดระยะทรุดตัวในสนามเมื่อโครงการก่อสร้างดำเนินการก่อสร้างพื้นชั้นที่ 2 แล้วเสร็จการวัดระยะทรุดตัวในสนามดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ค่าระดับจากหมุดอ้างอิงไปยังตำแหน่งวัดระยะทรุดตัวแต่ละจุดโดยใช้มาตราระดับน้ำ ประกอบด้วยท่อสายยางซึ่งมีน้ำบรรจุไว้อยู่ภายใน วัดตำแหน่งของระดับน้ำ ในการวัดจะนำมาตรวัดระดับน้ำมาไว้บนจุดที่ต้องการวัดระยะทรุดตัวที่อยู่บนเส้นของโครงสร้างตำแหน่ง C - 10 และอีกข้างของเครื่องมือจะแบนอ้างอิงอยู่บนหมุดรังวัด ผลต่างของค่าที่อ่านได้บนสายวัดคลับเมตรซึ่งมีความละเอียด

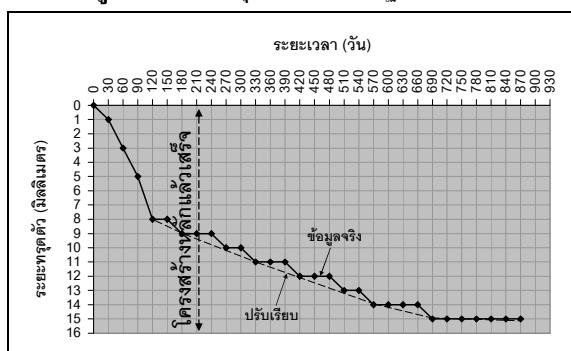
1 มม. บ่งบอกถึงความต่างระดับระหว่างจุดทั้งสองที่นำเครื่องมือไปแบรน

2) เมื่อถ่ายระดับจากหมุดรังวัดมาไว้ที่เสาของโครงสร้างตำแหน่ง C - 10 ใช้เป็นหมุดอ้างอิงเพื่อวัดระดับของตำแหน่ง G - 10, I - 10, I - 7 และ C - 6 ที่เหลือตามลำดับโดยปฏิบัติเช่นเดียวกันในขั้นตอนที่ 1

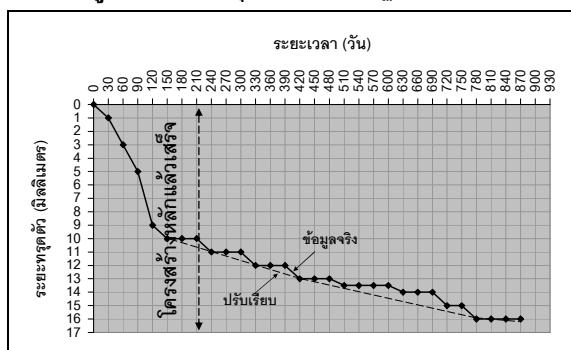
3) บันทึกผลการวัดระยะทรุดตัวทุกจุดที่ต้องการในสนามตามความถี่และระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน ลงจุดแสดงความล้มพังหรือห่วงเวลา กับระยะทรุดตัวดังแสดงในรูปที่ 2 ถึง 6



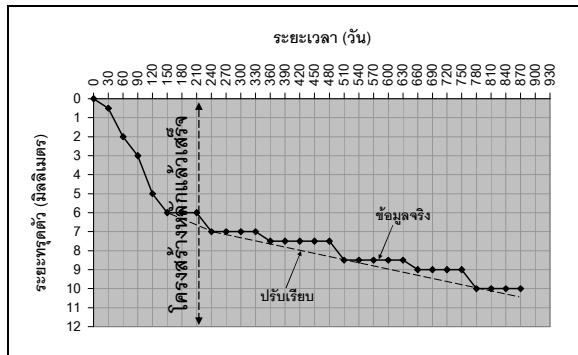
รูปที่ 2 ระยะทรุดตัวตามเวลา ฐาน C - 10



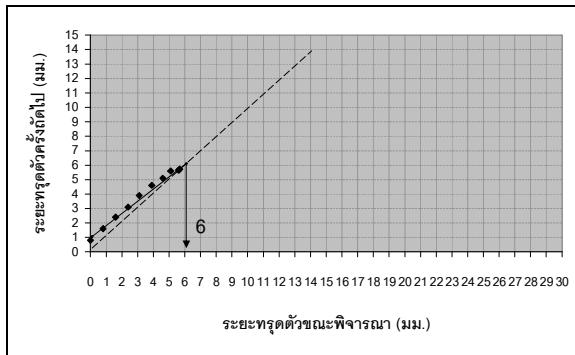
รูปที่ 3 ระยะทรุดตัวตามเวลา ฐาน G - 10



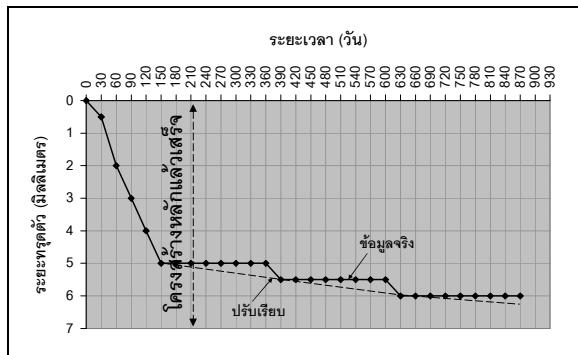
รูปที่ 4 ระยะทรุดตัวตามเวลา ฐาน I - 10



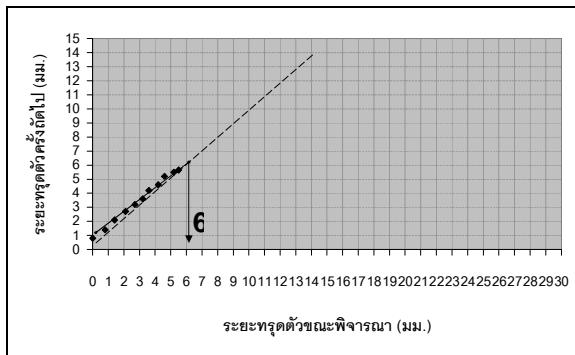
ຮູບທີ 5 ຮະຢະທຽດຕົວທາມເວລາ ສ້ານ I – 7



ຮູບທີ 8 ຮະຢະທຽດຕົວຍາວານາສ້ານ G – 10

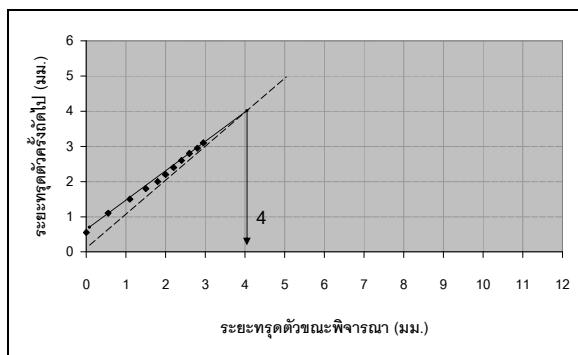


ຮູບທີ 6 ຮະຢະທຽດຕົວທາມເວລາ ສ້ານ C – 6

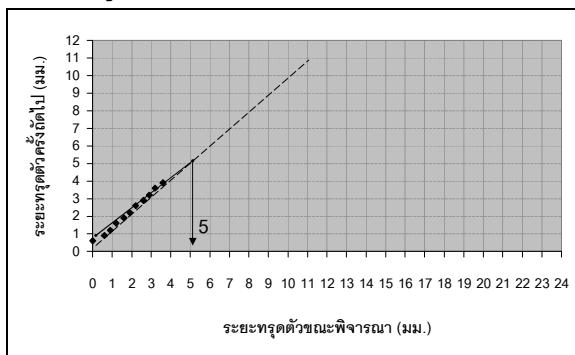


ຮູບທີ 9 ຮະຢະທຽດຕົວຍາວານາສ້ານ I – 10

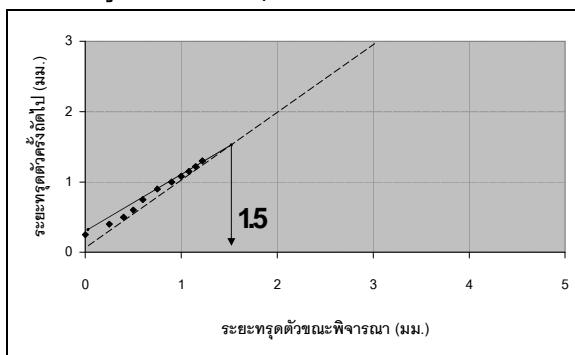
ຄາດຄະນະຮະບະທຽດຕົວໂຄຍໄຊວິຊີ່ຂອງ Asaoka (1978) [1] ຜົນໃນການດໍາເນີນການວິຈີ້ນີ້ເລືອກໃຫ້ຄ່າໜ່ວຍເວລາ  $\Delta t$  ເກົ່າກັນ 60 ແຕ່ເນື້ອງຈາກໃນໜ່ວຍເວລາເລີຍ 210 ວັນ ສ້ານແພ່ທຽດຕົວໜ້າ ຮະບະທຽດຕົວໃນໜ່ວຍທີ່ວັດໄມ້ຄື່ງ 1 ມມ. ໄດ້ເສັ້ນໄດ້ກິ່ງຄວາມສັນພັນຮ່ວມຮ່ວມຮະບະທຽດຕົວກັບເວລາໄໝ່ຮ່ານເຮັບດັ່ງນັ້ນຈຶ່ງປັບເສັ້ນໄດ້ໃນໜ່ວຍທີ່ໄໝ່ຮ່ານເຮັບກ່ອນແລ້ວອ່ານຄ່າຮະບະທຽດຕົວຈາກເສັ້ນໄດ້ກຳປັບແລ້ວໄປຄາດຄະນະຮະບະທຽດຕົວທາມວິຊີ່ຂອງ Asaoka (1978) ຂອງແຕກສ້ານ ດັ່ງຮູບທີ 7 ດັ່ງ 11



ຮູບທີ 7 ຮະຢະທຽດຕົວຍາວານາສ້ານ C – 10



ຮູບທີ 10 ຮະຢະທຽດຕົວຍາວານາສ້ານ I – 7



ຮູບທີ 11 ຮະຢະທຽດຕົວຍາວານາສ້ານ C – 6

### 3.2 การหาข้อมูลที่ใช้ในการคาดคะเนระยะทรุดตัว

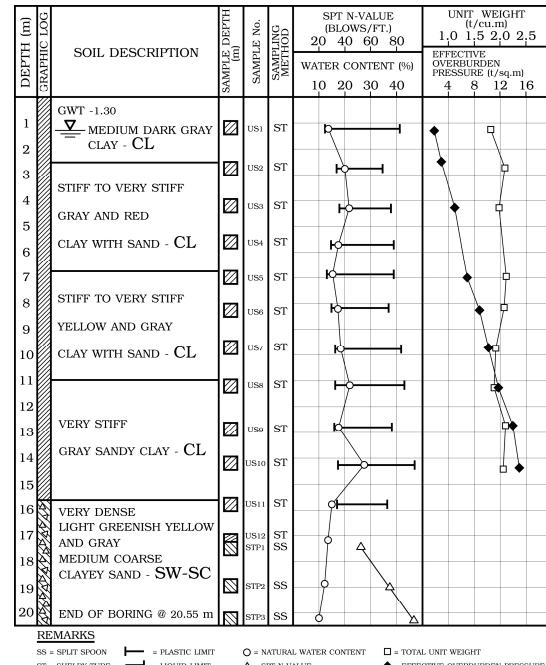
ใช้ข้อมูลคุณสมบัติของดินทั้งจากในสนามและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้มาจาก การเจาะหลุมสำรวจสภาพดิน ทดสอบดินในสนาม และเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

กำหนดตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจดังรูปที่ 1 ดำเนินการเจาะสำรวจโดยใช้สว่านชนิดตีบลายก้านเหล็ก ก้านเหล็กขันลงด้วยกว้าน เจาะตลอดความลึกของหลุมสำรวจ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว การเก็บตัวอย่างดินจะเก็บทุกระยะความลึก 1.00 ม. แบ่งการเก็บเป็น 2 ชนิดตามลักษณะของดิน โดยเก็บตัวอย่างดินหนี่งด้วยระบบอกบาง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 3 นิ้ว ความหนา 1.50 - 2.00 มม. ความยาว 50 - 60 ซม. ดินที่มีปริมาณทรัพย์สูงจะใช้ระบบอกผ่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ใน การเก็บตัวอย่างดินเก็บตัวอย่างคงสภาพทุกระยะ 1.00 ม. ไปจนถึงระดับความลึก 17.20 ม. จากนั้นจึงเปลี่ยนหัวเก็บจากระบบอกบางเป็นระบบอกผ่าซีกเพื่อใช้เก็บตัวอย่างแบบสภาพและทดสอบในสนามด้วยวิธีทดสอบทะลวงมาตรฐาน เก็บตัวอย่างแบล็งสภาพทุกระยะ 1.00 ม. ต่อเนื่องไปจนถึงระดับความลึก 20.55 ม. ซึ่งเป็นชั้นทรายแน่นมาก จึงหยุดการเจาะสำรวจไว้ที่ระดับความลึกนี้ บันทึกข้อมูลที่ได้ลงในแบบฟอร์มนักทึก จากนั้นนำตัวอย่างที่ขันส่งไปเก็บไว้ในห้องเก็บตัวอย่างเพื่อเตรียมไว้สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป

ดินจากระบบอกบาง ทดสอบในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานทดสอบวัสดุของอเมริกา (ASTM) ดังนี้ คือ การทดสอบการอัดตัวอย่างตาม ASTM D2435 จำนวน 9 ตัวอย่าง การทดสอบแรงอัดสามแคนตาม ASTM D4767-95 จำนวน 6 ตัวอย่าง

ดินจากในสนามที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุของอเมริกา (ASTM) ดังนี้ คือ ความชื้นธรรมชาติ ทดสอบตาม ASTM D2216-98, วิเคราะห์ขนาดเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงและไซโตรนิเตอร์ ตาม ASTM D422 จำนวน 14 ตัวอย่าง ขึ้นจำกัดอัตราเบริกตาม ASTM D4318-00

จำนวน 14 ตัวอย่าง นำข้อมูลที่ทดสอบໄให้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการทำภาคตัดชั้นดินและคุณสมบัติทั่วไป ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ภาคตัดชั้นดินและคุณสมบัติทั่วไป

### 3.3 การเลือกข้อมูลและการคาดคะเนระยะทรุดตัว

ขั้นตอนการคาดคะเนระยะทรุดตัวประกอบด้วย

- การเลือกข้อมูลที่ใช้คาดคะเนระยะทรุดตัว
  - แปลงความhardค่าไม่ดูลัลซีดหยุ่นของตัวอย่างทดสอบ
  - การคาดคะเนระยะทรุดตัวในช่วงเริ่มต้น
  - การคาดคะเนระยะทรุดตัวในช่วงยาวนาน
- การเลือกข้อมูลที่ใช้คาดคะเนระยะทรุดตัว

หากำไรไม่ดูลัลซีดหยุ่นของดินหนี่งจากข้อมูลการทดสอบแรงอัดสามแคนในห้องปฏิบัติการ ทดสอบแบบอัดตัวอย่างดินเท่ากันทุกพื้นที่ เพิ่มความเที่ยวน์ในแบบแคน เนื่องแบบไม่ระบายน้ำ อัดความดันภายในห้องตัวอย่างให้เท่ากับความเค็นกดทับประสิทธิผลของตัวอย่าง คำนวณความเค็นกดทับประสิทธิผล ณ ระดับความลึกต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ ลงจุดแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค็นเบี่ยงแบบกับความเครียดในแบบแคนของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด

### แปลความหมายโมดูลัสยึดหยุ่นของตัวอย่างทดสอบ

สมมุติว่าคินตัวอย่างเป็นวัสดุยึดหยุ่นเชิงเส้น เอกพันธุ์ และมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกพิเศษทาง จากทฤษฎีการยึดหยุ่น เนื่องจากสภาวะความเค้นที่ใช้ทดสอบตัวอย่างเป็นสภาวะความเค้นหลักจึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักกับความเครียดหลักในรูปส่วนเพิ่มของความเค้นดังนี้ โมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำ Lambe,T.W. and Whitman, R.V. (1979) [2] ให้ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยึดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ กับส่วนเพิ่มของความเครียดและส่วนเพิ่มของความเค้น ดังสมการ

$$E = \frac{(\Delta\sigma_z + 2\Delta\sigma_r)(\Delta\sigma_z - \Delta\sigma_r)}{\Delta\sigma_r(\Delta\epsilon_z - 2\Delta\epsilon_r) + \Delta\sigma_z\Delta\epsilon_z} \quad (1)$$

$E$  คือ โมดูลัสยึดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ

$\Delta\sigma_r$  คือ ส่วนเพิ่มความเค้นแนวรัศมี

$\Delta\sigma_z$  คือ ส่วนเพิ่มความเค้นแนวตั้ง

$\Delta\epsilon_r$  คือ ส่วนเพิ่มความเครียดแนวรัศมี

$\Delta\epsilon_z$  คือ ส่วนเพิ่มความเครียดแนวตั้ง

ในการทดสอบให้  $\Delta\sigma_r = 0$  จากผลดังกล่าวได้ส่วนเพิ่ม

ความเค้นเบี้ยงเบน  $\Delta(\sigma_z - \sigma_r) = \Delta\sigma_z$  ดังนี้

$$E = \frac{(\Delta\sigma_z)(\Delta\sigma_z)}{\Delta\sigma_z\Delta\epsilon_z - \Delta\epsilon_z} = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\epsilon_z} \quad (2)$$

เลือกส่วนเพิ่มความเค้นเบี้ยงเบนเท่ากับส่วนเพิ่มความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งที่เกิดขึ้นอ่อนต้านค่าส่วนเพิ่มความเครียดในแนวแกนจากเส้น โถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี้ยงเบนกับความเครียดในแนวแกน

โมดูลัสแบบระบายน้ำ คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเดือนกับโมดูลัสยึดหยุ่น

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{E'}{2(1+\nu')} = \frac{E}{3} \quad (3)$$

$$E' = 2(1+\nu') \frac{E}{3} \quad (4)$$

$G$  คือ โมดูลัสเดือน

$E'$  คือ โมดูลัสยึดหยุ่นแบบระบายน้ำ

$\nu$  คือ อัตราส่วนของปั๊สช่องแบบไม่ระบายน้ำ

$\nu'$  คือ อัตราส่วนของปั๊สช่องแบบระบายน้ำ

จัดทำภาคตัดขั้นคืนสำหรับเลือกค่าโมดูลัสยึดหยุ่นคำนวณ ความเค้นแห่งกระยาดตามความลึกเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคำนวณความเค้นประสิทธิผลแห่งกระยาดตามความลึกเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใต้ฐานแผ่นหางเคียงที่ระดับความลึกใดๆ โดยใช้หลักการซ้อนทับความเค้นใต้ฐานของพื้นที่สีเหลืองผืนผ้า ตามสูตรการคาดคะเนความเค้นของ Newmark (1935) [3] โดยสมมุติว่าพื้นดินมีผิวน้ำฐานแผ่นแต่ละฐานเป็นฐานแผ่นผิวน้ำและโถงได้อย่างสมบูรณ์ วางอยู่ใต้ผิวน้ำ คิดอิทธิพลของความลึกฐานแผ่น การคิดอิทธิพลของความลึกฐานแผ่น ณ จุดที่พิจารณาเพิ่มขึ้นของความเค้น มีหลักการว่าหากจุดที่พิจารณาอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นฐานแผ่นหางเคียงที่ทำให้เกิดความเค้น ให้ใช้ระยะความลึกในการคำนวณเท่ากับระยะตามแนวตั้งจากพื้นฐาน แผ่นหางเคียงถึงจุดที่พิจารณา แต่ถ้าจุดที่พิจารณาอยู่เหนือหรืออยู่ระดับเดียวกับพื้นฐานแผ่นหางเคียง คิดความเค้นที่เพิ่มขึ้นเท่ากับศูนย์

หาค่าโมดูลัสยึดหยุ่นที่ระดับความเค้นแห่งกระยาดตามความลึก ณ ความลึกต่างๆ

นำข้อมูลภาคตัดขั้นคืนและข้อมูลความเค้นแห่งกระยาดตามความลึกเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก คิดอิทธิพลของฐานหางเคียง มาประกอบการพิจารณาเลือกค่าโมดูลัสยึดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำตามความลึกที่พิจารณา โดยใช้โมดูลัสเส้นตัด (Secant Modulus) ได้ผลคำนวณค่าโมดูลัสยึดหยุ่นแบบระบายน้ำจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยึดหยุ่นแบบระบายน้ำและโมดูลัสยึดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ ใช้ค่าอัตราส่วนของปั๊สช่องเท่ากับ 0.3 สรุปผลค่าโมดูลัสยึดหยุ่นที่ได้ทั้งแบบไม่ระบายน้ำและระบายน้ำ ดังตารางที่ 2 และ 3

หาค่าความเครียดในแนวแกนจากเส้น โถึงการอัดตัวได้ของดินเหนียว จากการทดสอบอัดตัวดินน้ำในห้องปฏิบัติการทดสอบตาม ทดสอบแบบไม่คืนตัว ใช้เครื่องมือแบบธรรมชาติประเทกานังค์ อัตราส่วนการเพิ่มกดน้ำหนักเท่ากับหนึ่ง ระยะเวลาการทดสอบในหนึ่งชั่วโมงเท่ากับ 24 ชม. ใช้ชุดน้ำหนักกด 8 ขั้นน้ำหนัก (ต่ำกว่าชั้นน้ำหนักกดทับประสิทธิผล 2 ชั้น สูงกว่าน้ำหนักกด

หันประสิทธิผล 5 ขั้น) ครอบคลุมน้ำหนักที่ให้ค่าความเก็บกอดหันประสิทธิผลรวมน้ำหนักที่เพิ่มจากน้ำหนักบรรทุกลง จุดแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดตามแนวแกนกับความเก็บประสิทธิผลแนวคี่ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด จัดทำภาคตัดขั้นคินเพื่อคำนวณความเก็บแห่งร่างกายตามความลึกเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

ตารางที่ 2 โมดูลัสยึดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (ตัน/ตร.ม.)

ความลึก (ม.)	ตำแหน่งฐาน				
	I - 7	C - 6	C - 10	G - 10	I - 10
4.25	568	568	568	581	581
6.95	3080	2977	2977	2485	1943
8.35	5838	5838	5838	5838	5838
11.35	4538	4538	4538	4538	4538
12.85	5231	5231	5231	5231	5231
14.35	2762	2762	2293	1750	1750

ตารางที่ 3 โมดูลัสยึดหยุ่นแบบระบายน้ำ (ตัน/ตร.ม.)

( $\nu' = 0.3$ )

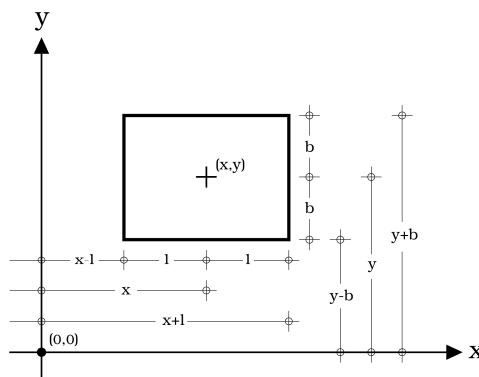
ความลึก (ม.)	ตำแหน่งฐาน				
	I - 7	C - 6	C - 10	G - 10	I - 10
4.25	492	492	492	503	503
6.95	2669	2580	2580	2153	1684
8.35	5060	5060	5060	5060	5060
11.35	3933	3933	3933	3933	3933
12.85	4533	4533	4533	4533	4533
14.35	2393	2393	1988	1517	1517

จัดทำภาคตัดขั้นคินร่วมกับคำแนะนำการแบ่งขั้นคินให้ฐานสำหรับการคำนวณระยะทรุดตัวของ Sower (1962) [4] เมื่อ B คือ ความกว้างของฐาน จะได้ภาคตัดขั้นคินสำหรับแต่ละฐานแผ่น

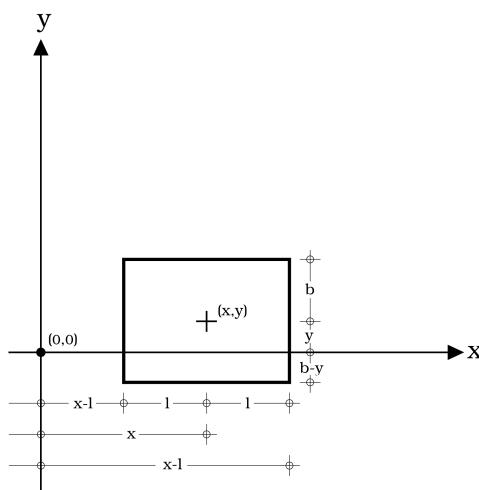
ตารางที่ 4 การแบ่งขั้นคินให้ฐานแผ่น (Sower, 1962)

ความลึกของจุดกึ่งกลางขั้นคิน	ความหนามากที่สุดของขั้นคิน
(1/2)B หรือ น้อยกว่า	(1/3)B
B	(1/2)B
2B	(2/3)B
3B	B

คำนวณความเก็บประสิทธิผลแห่งร่างกายตามความลึกเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกให้ฐานแผ่นที่ระดับความลึกใดๆ โดยใช้หลักการซ้อนทับความเก็บให้มุ่งของพื้นที่สี่เหลี่ยมพื้นผ้า ตามสูตรการคาดคะเนความเก็บของ Newmark (1935) ตำแหน่งกึ่งกลางฐานแผ่นที่พิจารณาเป็นจุดเริ่มต้นของพิกัดภาค 2 แทนและกึ่งกลางฐานแผ่นทางซ้ายคือพิกัด ( $x, y$ ) จากจุดเริ่มต้นดังรูปที่ 13 และ 14 ซึ่งแบ่งเป็นสองกรณีคือกรณีฐานซ้ายทางซ้ายอยู่แนวเทยงมุนกับฐานที่พิจารณาและกรณีที่ฐานซ้ายทางซ้ายอยู่แนวเดียวกับฐานที่พิจารณา โดยสมมุติว่าพื้นดินมีผิวนานฐานแผ่นแต่ละฐานเป็นฐานแผ่นพิภาระแอนโกลิงได้รับสมมุติฐานที่พิจารณาโดยสมมุติว่าพื้นดินมีผิวนานฐานแผ่นแต่ละฐานเป็นฐานแผ่นพิภาระแอนโกลิงได้อบจำกัดความสูงของฐานที่พิจารณาเพิ่มขึ้นของความเก็บถ้าจุดที่พิจารณาต่ำกว่าระดับพื้นฐานแผ่นที่ทำให้เกิดความเก็บใช้ระยะความลึกในการคำนวณเท่ากับระยะตามแนวคี่จากพื้นฐานแผ่นจุดที่พิจารณาแต่ถ้าจุดที่พิจารณาอยู่เหนือหรืออยู่ระดับเดียวกับพื้นฐานแผ่นคิดความเก็บที่เพิ่มขึ้นเท่าศูนย์



รูปที่ 13 ระบบพิกัดจากจุดเริ่มต้นที่พิจารณาถึงกี่กกลาง  
ฐานแพ้ข้างเคียงกรณีฐานข้างเคียงอยู่แนวทแยงกับ  
ฐานที่พิจารณา



รูปที่ 14 ระบบพิกัดจากจุดเริ่มต้นที่พิจารณาถึงกี่กกลาง  
ฐานแพ้ข้างเคียงกรณีฐานข้างเคียงอยู่แนวเดียวกัน  
ฐานที่พิจารณา

#### การคาดคะเนระยะทຽดตัวเริ่มต้น

วิธีทฤษฎีการขึ้น สมมุติว่าผิวดินอยู่ที่ระดับพื้นฐานแพ้ที่พิจารณา ฐานแพ้ข้างเคียงทุกฐานวางอยู่ที่ระดับเดียวกับฐานที่พิจารณา เป็นฐานแพ้แล้ว โถงได้สมบูรณ์ผิวเรียบ ระยะทຽดตัวได้ฐานแพ้ที่พิจารณาเกิดจากระยะทຽดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากฐานแพ้แต่ละฐานนำรวมกันเป็นระยะทຽดตัวทั้งหมด ระยะทຽดตัวคิดเป็นสองกุ่ม คือระยะทຽดตัวของฐานที่พิจารณาจุดภายใน และจุดภายนอก ระยะทຽดตัวที่เกิดจากฐานแพ้ที่พิจารณาที่เป็นระยะทຽดตัวกี่กกลางภายในพื้นที่ฐานแพ้มีค่าเท่ากับระยะทຽดตัว

ที่มุขของพื้นที่ฐานแพ้ที่มีขนาดกว้างครึ่งหนึ่งยาวครึ่งหนึ่งของฐานแพ้ที่พิจารณาสี่รูปรวมกัน

ระยะทຽดตัวที่เกิดจากฐานแพ้ข้างเคียงเป็นระยะทຽดตัวที่จุดอยู่ภายนอกของพื้นที่ฐานแพ้คือระยะทຽดตัวที่มุขของพื้นที่สี่เหลี่ยมสี่รูปซึ่งอนันกัน

ระยะทຽดตัวที่มุขของพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เกิดจากระยะทຽดตัวของชั้นดินที่อยู่ข้างใต้แต่ละชั้นรวมกัน

ระยะทຽดตัวของชั้นดินแต่ละชั้น เท่ากับระยะทຽดตัวของชั้นดินนั้นที่มีความหนาตั้งแต่ผิวดินลงมาจนถึงผิวล่างของชั้นดินนั้นลบตัวของระยะทຽดตัวของชั้นดินนั้นที่มีความหนาตั้งแต่ผิวดินจนถึงผิวนบนของชั้นดินนั้น ใช้หลักการแบ่งชั้นดินคิดชั้นดินแต่ละชั้นที่พิจารณาไม่มีความหนาถึงผิวดิน ระยะทຽดตัวที่ผิวดินที่มุขบนดินครึ่งหัวของวากศลับตัวของระยะทຽดตัวที่จุดมุขแต่มีความลึกเท่ากับผิวล่างชั้นดินบนดินครึ่งหัวของวาก

ระยะทຽดตัวที่มุขของพื้นที่รับแรงแผ่กระจายสมำ่เสมอ ( $q$ ) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งอยู่บนผิวดินที่มีขนาดครึ่งหัวของวาก Schleicher (1926) [5] ได้หาผลเฉลยระยะทຽดตัว ( $\Delta\rho'$ ) ที่มุขของพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังนี้

ได้ผลเฉลย

$$\Delta\rho' = qB \frac{1-\nu^2}{E} I_\rho \quad (5)$$

โดยที่ตัวประกอบอิทธิพล

$$I_\rho = \frac{1}{\pi} \left[ l \ln \frac{1 + \sqrt{l^2 + 1}}{l} + \ln \left( l + \sqrt{l^2 + 1} \right) \right]$$

$l = \frac{L}{B}$  คือ ตัวประกอบปรับแก้รูปร่างฐานแพ้

$B, L$  คือ ความกว้างและความยาวของพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า ระยะทຽดตัวที่มุขของพื้นที่รับแรงแผ่กระจายสมำ่เสมอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งอยู่บนผิวดินที่มีความหนาจำกัดชั้นเดียว

(Z) Steinbrenner (1934) [6] ได้หาผลเฉลยโดยประมาณดังนี้ระยะทຽดตัว ( $\Delta\rho$ ) ดังรูปที่ 15 ได้ผลเฉลย

$$\Delta\rho_i = q \frac{B}{E} I_\rho \quad (6)$$

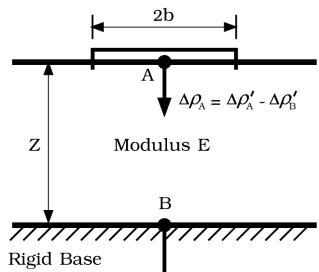
โดยที่ตัวประกอบอิทธิพล

$$I_\rho = (1 - \nu^2) F_1 + (1 - \nu - 2\nu^2) F_2$$

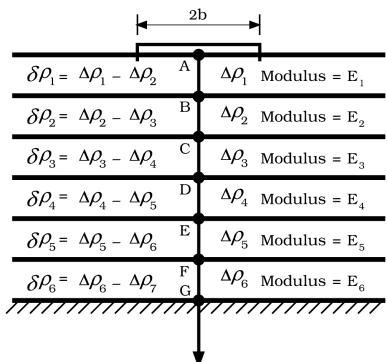
$$F_1 = \frac{1}{\pi} \left[ l \ln \frac{(1 + \sqrt{l^2 + 1}) \sqrt{l^2 + d^2}}{l (1 + \sqrt{l^2 + d^2 + 1})} + \ln \frac{(l + \sqrt{l^2 + 1}) \sqrt{1 + d^2}}{l + \sqrt{l^2 + d^2 + 1}} \right]$$

$$F_2 = \frac{d}{2\pi} \arctan \frac{l}{d \sqrt{l^2 + d^2 + 1}}$$

$d = D/B$  คือ ตัวประกอบปรับแก้ความหนาชั้นดินให้ฐาน  
แน่น



รูปที่ 15 ระบบทรุดตัวที่มุนของพื้นที่รับแรงแผ่กระจาย  
สม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าของนิวตัน  
มีความหนาจำกัดหลายชั้นเดียว



รูปที่ 16 ระบบทรุดตัวโดยประมาณสำหรับดินที่มี  
ความหนาจำกัดหลายชั้น

ระบบทรุดตัวที่มุนของพื้นที่รับแรงแผ่กระจาย  
สม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งอยู่บนผิวดินมีความหนา  
จำกัดหลายชั้น Butler (1974) [3] ได้หาผลเฉลย  
โดยประมาณของระบบทรุดตัวที่มุนของพื้นที่รับแรงแผ่  
กระจายสม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งอยู่บนผิวดิน สำหรับ  
ความหนาชั้นดินหลายชั้นดังรูปที่ 17 และ 18 ดังนี้

$$\rho = \sum_{i=1}^n \delta \rho_i \quad (7)$$

แบ่งการคาดคะเนระยะทรุดตัวที่มุนของพื้นที่รับแรงแผ่  
กระจายสม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งอยู่บนผิวดิน สำหรับ  
ความหนาชั้นดินหลายชั้นออกเป็น 2 กรณี  
กรณีแรก

$$\delta \rho_i = qB \left( \frac{1-\nu^2}{E_i} \right) [I'_{\rho} - I'_{\rho b}] \quad (8)$$

โดยที่ตัวประกอบอิทธิพล

$$I'_{\rho} = I_{\rho} = \frac{1}{\pi} \left[ l \ln \left( \frac{1 + \sqrt{l^2 + 1}}{l} \right) + \ln \left( l + \sqrt{l^2 + 1} \right) \right]$$

$$I'_{\rho b} = \frac{1}{\pi} \left[ l \ln \left( \frac{1 + \sqrt{l^2 + 1}}{l} \right) + \ln \left( l + \sqrt{l^2 + 1} \right) \right] - \frac{1}{\pi} \left[ l \ln \frac{\left( 1 + \sqrt{l^2 + 1} \right) \sqrt{l^2 + d_b^2}}{l \left( 1 + \sqrt{l^2 + d_b^2 + 1} \right)} + \ln \frac{\left( l + \sqrt{l^2 + 1} \right) \sqrt{1 + d_b^2}}{l + \sqrt{l^2 + d_b^2 + 1}} \right] - \frac{(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{d_b}{2\pi} \arctan \frac{l}{d_b \sqrt{l^2 + d_b^2 + 1}}$$

คือ ตัวประกอบอิทธิพลสำหรับความหนาชั้นดินลึกสุดที่  
รอยต่อด้านล่างของชั้นดินที่พิจารณาใช้ได้กับทุกรูปนี้

$$d_b = \frac{D_b}{B}, d_t = \frac{D_t}{B}$$

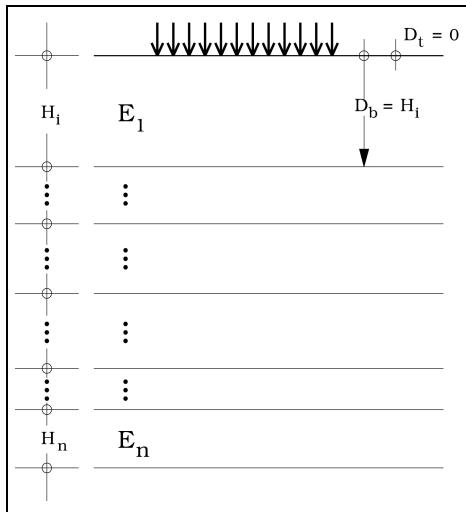
กรณีที่สอง

$$\delta \rho_i = qB \left( \frac{1-\nu^2}{E_i} \right) [I'_{\rho} - I'_{\rho t}] \quad (9)$$

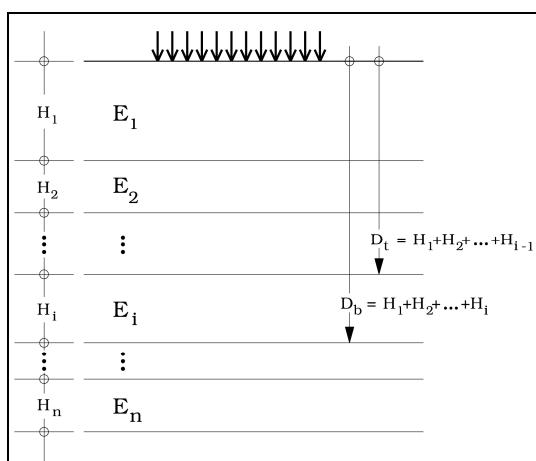
โดยที่ตัวประกอบอิทธิพล

$$I'_{\rho} = \frac{1}{\pi} \left[ l \ln \left( \frac{1 + \sqrt{l^2 + 1}}{l} \right) + \ln \left( l + \sqrt{l^2 + 1} \right) \right]$$

$$- \frac{1}{\pi} \left[ l \ln \frac{\left( 1 + \sqrt{l^2 + 1} \right) \sqrt{l^2 + d_t^2}}{l \left( 1 + \sqrt{l^2 + d_t^2 + 1} \right)} + \ln \frac{\left( l + \sqrt{l^2 + 1} \right) \sqrt{1 + d_t^2}}{l + \sqrt{l^2 + d_t^2 + 1}} \right] - \frac{(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{d_t}{2\pi} \arctan \frac{l}{d_t \sqrt{l^2 + d_t^2 + 1}}$$



รูปที่ 17 ชั้นดินและความลึกสำหรับพื้นที่รับแรงแผ่นกระจาด  
สม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนผิวดินมีความหนาจำกัด  
หลายชั้น คิดระยะทรุดตัวเฉลี่ดินชั้นแรก



รูปที่ 18 ชั้นดินและความลึกสำหรับพื้นที่รับแรงแผ่นกระจาด  
สม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนผิวดินมีความหนาจำกัด  
หลายชั้น คิดระยะทรุดตัวตั้งแต่ดินชั้นที่สองลงมา

ระยะทรุดตัวที่จุดอื่นหาได้โดยการซ้อนทับผลเฉลยระยะ  
ทรุดตัวที่มุ่ง อัตราส่วนของปั๊สซองมีอัธิพอน้อยและอยู่  
ในช่วงแคบคือ 0 ถึง 0.5 ในทางปฏิบัติใช้อัตราส่วน  
ของปั๊สซองเพียงค่าเดียวสำหรับดินทุกชั้น

### การคาดคะเนระยะทรุดตัวในช่วงยาวนาน

วิธีทฤษฎีการยึดหยุ่น ระยะทรุดตัวยาวนานใช้  
โมดูลัสแบบระบบยาน้ำ และอัตราส่วนของปั๊สซองแบบ  
ระบบยาน้ำ

วิธีความเครียดมิติเดียวคิดความเกินที่เพิ่มขึ้น  
เช่นเดียวกับที่หากความเกินที่เพิ่มขึ้นที่เลือกโมดูลัส  
สมมุติฐานคือเส้นโค้งการอัดตัวได้ในสนา�เหมือนกันใน  
ห้องทดสอบ เลือกความเครียดตามระดับความเกินที่  
เพิ่มขึ้นเมื่อได้ความเครียดมาแล้วจึงคูณด้วยความหนาชั้น  
ดินชั้นนั้นๆ ได้ระยะทรุดตัวแต่ละชั้น นำระยะทรุดตัวแต่ละ  
ชั้นรวมกันได้เป็นระยะทรุดตัวทั้งหมด

### 4. ผลการวิจัย

ผลการคาดคะเนระยะทรุดตัวเริ่มต้นจากวิธีทฤษฎี  
ยึดหยุ่นกับค่าระยะทรุดตัวเริ่มต้นที่วัดได้จากในสนา�  
แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระยะทรุดตัวเริ่มต้น

วิธี คาดคะเน	ระยะทรุดตัวเริ่มต้น (มม.)				
	I-7	C-6	C-10	G-10	I-10
ยึดหยุ่น*					
คิดฐานข้างเคียง	29	23	23	25	27
ไม่คิดฐาน ข้างเคียง	34	26	27	30	31
วัดในสนา� ก่อสร้างเสร็จ	6	5	6	9	10

ยึดหยุ่น\* – วิธีทฤษฎีการยึดหยุ่น

ผลการคาดคะเนค่าระยะทรุดตัวในช่วงยาวนาน  
ระหว่างวิธีทฤษฎียึดหยุ่น วิธีความเครียดมิติเดียวและวิธี  
ความเครียดมิติเดียวรวมกับระยะทรุดเริ่มต้นโดยวิธีทฤษฎี  
ยึดหยุ่นกับค่าระยะทรุดในช่วงยาวนานโดยใช้วิธีของ  
Asaoka (1978) แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระยะทรุดตัวในช่วงขາวนาน

วิธี คาดคะเน	ระยะทรุดตัวขາวนาน (มม.)				
	I-7	C-6	C-10	G-10	I-10
$\rho_{oed}^{**}$					
คิดฐานข้างเคียง	267	251	245	274	270
ไม่คิดฐาน ข้างเคียง	217	220	214	209	202
$\rho_{oed}$ รวมกับ เริ่มต้น ยึดหยุ่น***					
คิดฐานข้างเคียง	296	274	268	299	297
ไม่คิดฐาน ข้างเคียง	251	246	241	239	233
ยึดหยุ่น* $(\psi' = 0.3)$					
คิดฐานข้างเคียง	68	56	59	61	63
ไม่คิดฐาน ข้างเคียง	68	56	58	60	63
Asaoka	11	6.5	10	15	16

$\rho_{oed}^{**}$  – วิธีความเครียดมิติเดียว

เริ่มต้นยึดหยุ่น\*\*\* – วิธีความเครียดมิติเดียวรวมกับระยะ  
ทรุดตัวเริ่มต้นจากวิธีทฤษฎีการยึดหยุ่น

## 5. วิจารณ์ผลการวิจัย

### 5.1 ความแม่นยำของการคาดคะเนระยะทรุดตัวในช่วง ขາวนานโดยวิธีความเครียดมิติเดียว

การคาดคะเนระยะทรุดตัวโดยวิธีความเครียดมิติเดียว ตั้งอยู่บนสมมุติฐานหลัก คือ คินได้ฐานรากอัดตัวในมิติ เดียว และ การ อัดตัว ได้ที่ ได้จากการ ทดสอบ ใน ห้องปฏิบัติการ เมื่อ นัก ทดสอบ ใน สนาม แต่ ใน สภาพ จริง นั้น การ อัดตัว ได้ ข่อง คิน ได้ฐาน กีดขื้น ใน 3 มิติ

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คิน ขึ้น ที่ อยู่ ติด ฐาน ราก เมื่อ กีด การ อัดตัว ใน 3 มิติ หมายถึง คิน เกิด ตัว ของ ทาง ด้าน ข้าง ได้ จาก พฤติกรรม ดัง กล่าว ส่ง ผล ให้ การ ทรุดตัว ที่ กีด ขึ้น จริง มี ค่ามาก กว่า ค่า ที่ คาด คะเน ได้ จาก วิธี นี้ แต่ ผล ที่ ได้ จาก การ วิจัย กลับ แสดง ออก ใน ทาง ตรง ข้าม กว่า คือ ระยะ ทรุดตัว ที่ คาด คะเน ได้ มี ค่ามาก กว่า ระยะ ทรุดตัว ที่ กีด ขึ้น จริง นั้น เป็น สิ่ง ที่ ชี้ ว่า การ อัดตัว ใน ห้อง ปฏิบัติการ แตกต่าง จากการ อัด ตัว ใน สนาม อ่อน มาก และ แตกต่าง อ่อน กว่า ทาง กับ ผล ที่ ควร กีด ขึ้น เมื่อ คำนึง ถึง สมมุติฐาน และ สภาพ จริง ดัง ที่ ได้ กล่าว มา ทั้ง นี้ อาจ เป็น ไป ได้ว่า ด้วย คุณภาพ การ กีด ตัว อ่อน ยัง ส่ง ผล ให้ ตัว อ่อน ยัง คิน กระบวนการ ระเทือน ทำ ให้ โครงสร้าง ของ คิน เปลี่ยน แปลง ไป จาก เดิม โครงสร้าง ของ ก้อน คิน ตัว อ่อน แม้ว่า จะ มี องค์ ประกอบ ของ เนื้อ คิน ใหม่ อน ดิม กับ สภาพ ที่ อยู่ ใน ที่ แต่ ผล จากการ กีด ตัว อ่อน ทำ ให้ แรง กด ทับ บน ตัว อ่อน ยัง คิน ลดลง เมื่อ แรง กด ทับ ลดลง ตัว อ่อน ยัง คิน จึง ขยาย ตัว ขณะ เตรียม ตัว อ่อน เพื่อ ทำการ ทดสอบ ใน ห้อง ปฏิบัติการ และ จาก คุณสมบัติ ดัชนี ของ ตัว อ่อน ที่ นำ มา ทดสอบ มี ค่า ความ ชื้น ตาม ธรรมชาติ อยู่ ใกล้ กับ ขีด จำกัด การ ปั๊น ได้ (Plastic Limit) คุณสมบัติ นี้ บ่ง ชี้ ว่า ก้อน ตัว อ่อน เป็น คิน เชิง ซึ่ง คิน เชิง ที่ มี คุณสมบัติ ตาม ที่ ก่อ ลักษณะ ของ ตัว อ่อน นั้น จะ เกิด การ ขึ้น ตัว น่อง จากการ คลาย แรง กด ทับ เป็น อ่อน มาก นอก จาน นี้ นือ คิน ที่ นำ มา ทดสอบ เป็น คิน หนึ่ง ที่ มี ทรห ปน ด้วย นือ คิน ลักษณะ เช่น นี้ การ ตัด แต่ง ตัว อ่อน โดย ให้ เกิด ความ กระแทก ระเทือน น้อย ที่ สุด ได้ เป็น ที่ ทำ ได้ ยาก ทั้ง การ คืน ตัว ของ ตัว อ่อน ยัง คิน จากการ กีด ตัว อ่อน และ การ กระบวนการ ระเทือน ใน ระหว่าง การ ตัด แต่ง ตัว อ่อน เป็น สาเหตุ ให้ การ อัดตัว ได้ ของ ตัว อ่อน ยัง คิน เพิ่ม มาก ขึ้น โดย การ เปลี่ยน แปลง อัตรา ส่วน ช่อง ว่าง ที่ ระดับ ความ เค้น ต่ำ อาจ ส่ง ผล ให้ กีด การ เปลี่ยน แปลง ไป 4 ถึง 10 เท่า ของ การ เปลี่ยน แปลง อัตรา ส่วน ช่อง ว่าง ที่ กีด ขึ้น จริง ขึ้น อยู่ กับ คุณภาพ ของ ตัว อ่อน ที่ นำ มา ทดสอบ Peck et al. (1974) [7]

## 5.2 ความแม่นยำของการคาดคะเนระยะทຽดตัวในช่วง ยาวนานโดยวิธีความเครียดมิติเดียวรวมกับระยะทຽด เริ่มต้นจากวิธีทฤษฎีคิดหยุ่น

วิธีนี้เป็นวิธีที่มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงข้อจำกัด  
ของวิธีความเครียดมิติเดียว เนื่องจากวิธีความเครียดมิติ  
เดียวไม่คิดการทຽดตัวเริ่มต้นในเดินหนีบอั่มตัว นั่นคือ  
ระยะทຽดตัวเริ่มต้นจากวิธีความเครียดมิติเดียวท่าศูนย์ แต่  
ในสภาพจริงนั้นแม้ว่าเดินหนีบอั่มตัวจะไม่เปลี่ยน  
ปริมาตรเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกแต่ก็เกิดการวิรูป ซึ่งการ  
วิรูปนี้เองเป็นเหตุให้เกิดการทຽดตัว จากเหตุผลดังกล่าว  
การคิดรวมระยะทຽดตัวเริ่มต้นในสภาพที่น้ำไม่ระบายนอก  
จากมวลคินเข้ากับระยะทຽดตัวจากความเครียดมิติเดียวจึง  
ยกสีคีบการทຽดตัวจริงมากขึ้น เห็นได้ว่าการทຽดตัวในวิธี  
นี้มาจากการส่องสำรวจหลัก แต่ในผลการวิจัยนี้ค่าระยะทຽดจาก  
การคาดคะเนโดยวิธีความเครียดมิติเดียวห่างจากระยะทຽด  
ตัวที่เกิดขึ้นจริงมาก เมื่อนำค่าระยะทຽดตัวเริ่มต้นในสภาพ  
ที่น้ำไม่ระบายนอกภาระ เช่น ไปจึงทำให้ได้ค่าคาดคะเนล่อ่อน  
มากยิ่งขึ้น

## 5.3 ความแม่นยำของการคาดคะเนระยะทຽดตัวในช่วง ยาวนานโดยวิธีทฤษฎีการยืดหยุ่น

วิธีนี้จำลองคินเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น คิดการทຽด  
ตัวเกิดจากการอัดตัวได้ใน 3 มิติ ซึ่งใกล้เคียงสภาพจริง แต่  
คินไม่ใช้วัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นและเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง  
คินหนีบอั่มกับคินหนีบอ่อนในเชิงพฤติกรรมยืดหยุ่น  
เชิงเส้น คินหนีบอั่มเจ็บจะแสดงพฤติกรรมใกล้เคียงวัสดุ  
ยืดหยุ่นมากกว่าคินหนีบอ่อน แต่อาจจะไม่เป็นเชิงเส้น  
ชัดเจน

ความแม่นยำของการคาดคะเนโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับการ  
เลือกค่าตัวแปรที่สำคัญสองค่า คือโมดูลัสยืดหยุ่น และ<sup>1</sup>  
อัตราส่วนปัวส์ของ ทั้งสองตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อการ  
คาดคะเนระยะทຽดตัวต่างกัน อัตราส่วนปัวส์ของมีค่า  
ในช่วงแคบจึงทำไม่มีอิทธิพลต่อการคาดคะเนระยะทຽดตัว  
มากนักในการวิจัยนี้อัตราส่วนปัวส์ของเท่ากับ 0.3 ให้ค่าที่  
เหมาะสม ดังนั้ntัวแปรที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากคือ<sup>2</sup>  
โมดูลัสยืดหยุ่น เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ทำการทดสอบและ

เลือกค่าค่อนข้างยาก โมดูลัสยืดหยุ่นที่เลือกใช้นั้นจะ<sup>3</sup>  
เหมาะสมหรือไม่ขึ้นอยู่กับวิธีทดสอบและคุณภาพตัวอย่าง  
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าคินในธรรมชาตินั้นมิใช้วัสดุยืดหยุ่น<sup>4</sup>  
เชิงเส้น การเลือกค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจึงต้องเลือกตามระดับ  
ช่วงความเก็บแห่งรายชาติที่เกิดขึ้นจริงตามความลึกที่  
พิจารณา โดยโมดูลัสยืดหยุ่นจะลดลงตามขนาดความกันที่  
เพิ่มขึ้น การเลือกโมดูลัสยืดหยุ่นตามปกติจะเลือกใน  
ลักษณะของโมดูลัสเส้นตัดที่ระดับครึ่งหนึ่งหรือหนึ่งใน  
สามของความกันประดั้นจากเส้นโถงความสัมพันธ์ความ  
กันกับความเครียดในแนวแกนของตัวอย่างเดินทดสอบ ใน  
การวิจัยนี้เลือกโมดูลัสตามระดับช่วงความกันแห่งรายชาติ  
ที่เกิดขึ้นจริงตามความลึกที่พิจารณาโดยค่าที่ได้ส่วนมาก  
อยู่ในช่วงของครึ่งหนึ่งหรือหนึ่งในสามของความกัน  
ประดั้นจากเส้นโถงความสัมพันธ์ความกันกับความเครียด  
ในแนวแกนของตัวอย่างเดินทดสอบยกเว้นคินชั้นบนที่อยู่  
ใต้ฐานซึ่งมีระดับความกันนี้มากกว่ารายชาติในชั้นที่  
ลึกกว่าเจ็บได้โมดูลัสที่ได้ต่ำให้ระยะทຽดตัวมากกว่าความ  
เป็นจริง

## 6. สรุปผลการวิจัย

### 6.1 วิธีความเครียดมิติเดียว

ใช้ข้อมูลจากเส้นโถงการอัดตัวได้แสดง  
ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับความกัน  
ประสิทธิผลแนวตั้งในมาตรฐานส่วนลอการิทึม จากการ  
ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยไม่มีการปรับแก้ผลจาก  
กระบวนการต่อตัวอย่างและทดสอบโดยให้น้ำหนักบรรทุก  
แบบไม่มีการคืนตัว ให้ผลการคาดคะเนระยะทຽดตัวได้  
เกินกว่าค่าที่สังเกตได้จากในสนามอย่างมาก

### 6.2 วิธีความเครียดมิติเดียวรวมกับระยะทຽดตัวเริ่มต้นที่ ได้จากทฤษฎีการยืดหยุ่น

ใช้ผลการคาดคะเนระยะทຽดตัวจากวิธีความเครียด  
มิติเดียวรวมกับระยะทຽดตัวเริ่มต้นโดยทฤษฎีการยืดหยุ่น<sup>5</sup>  
ซึ่งใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำจากข้อมูลการ  
ทดสอบแรงอัดสามแกนอัดตัวอย่างน้ำเท่ากันทุกทิศทาง  
เท่ากับความกันประดั้นประสิทธิผลลดทันภาคตัดชั้นดิน และ

ระดับความเค้นแผ่นกระจาดตามความลึก คาดคะเนโดยใช้ วิธีประมาณของ Butler (1974) [8] ประยุกต์ใช้หลักการซ้อนทับ (Super position) สำหรับตำแหน่งพิจารณาที่จุดมุมของพื้นที่ที่น้ำหนักบรรทุกกระทำกรณ์ไม่คิดอิทธิพลฐานข้างเคียงให้ผลการคาดคะเนเกินกว่าค่าที่สังเกตได้จากในสถานมากที่สุด

### 6.3 วิธีทฤษฎีการยึดหยุ่น

ใช้ค่าโมดูลัสยึดหยุ่นแบบรายน้ำจากข้อมูลการทดสอบแรงอัดสามแคน, ภาคตัดชั้นดิน และ ระดับความเค้นแผ่นกระจาดตามความลึก คาดคะเนโดยใช้วิธีประมาณของ Butler (1974) ประยุกต์ใช้หลักการซ้อนทับ (Super position) สำหรับตำแหน่งพิจารณาที่จุดมุมของพื้นที่ที่น้ำหนักบรรทุกกระทำกรณ์ไม่คิดอิทธิพลฐานข้างเคียงและตำแหน่งที่จุดกึ่งกลางในพื้นที่น้ำหนักบรรทุกกระทำกรณ์ไม่คิดอิทธิพลฐานข้างเคียง เลือกใช้อัตราส่วนปัวร์เชอง

เท่ากับ 0.3 ให้ผลการคาดคะเนระหบศรุดตัวໄใด้แม่นมากกว่า วิธีความเครียดมิติเดียวและวิธีความเครียดมิติเดียวรวมกับระหบศรุดตัวเริ่มต้นโดยวิธีทฤษฎีการยึดหยุ่น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอรับพระคุณคณศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อนุญาตให้เข้าดำเนินการวิจัยในพื้นที่ภายในคณะ และ คุณนิคม บัววงศ์ ป้อง ท่อนุเคราะห์ แบบรุปโครงการก่อสร้างอาคารเรียนและปฏิบัติการ 5 ชั้น คณศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ รวมถึงบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Asaoka, A. (1978). Observation Procedure of Settlement Prediction. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.18, No.4.
- [2] Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979). Soil Mechanics. SI Version, New York: John Wiley & Sons.
- [3] Newmark, N.M. (1935). Simplified Computation of Vertical Pressures in Elastic Foundation. Univ. Illinois Eng.Exper. Sta.Circular 24.
- [4] Sowers, G.F. (1962). Shallow Foundations. Chater 6 of Foundation Engineering, Leonards, G.A. (edit.), Newyork: McGraw-Hill Book Company.
- [5] Schleicher, F. (1926). Zur Theorie des Baugrundes. Der Bauingenieur, vol.7, pp. 931 – 935, 949 – 952.
- [6] Steinbrenner, W. (1934). Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, vol.1, pp.121 – 124.
- [7] Peck, R.B. et al. (1974). Foundation Engineering 2<sup>nd</sup>Ed. New York: John Wiley & Sons..
- [8] Butler, F.G. (1974). Heavily overconsolidated clays. Proc.Conf. on Settlement of Structures, Cambridge, pp. 531-578.