

ความเค้นที่สูญหายของมวลดินขณะการก่อสร้างอุโมงค์



นางสาวรัตมณี นันทสาร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543.

ISBN 974-347-256-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STRESS RELAXATION IN GROUND DUE TO TUNNEL EXCAVATION



MISS RATAMANEE NUNTASARN

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2000

ISBN 974-347-256-8



## บทคัดย่อวิทยานิพนธ์

รัตมณี นันทสาร : ความเค้นที่สูญหายของมวลดินขณะการก่อสร้างอุโมงค์. (STRESS RELAXATION IN GROUND DUE TO TUNNEL EXCAVATION) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 224 หน้า. ISBN 974-347-256-8.

การเกิดช่องว่างรอบอุโมงค์ขณะการก่อสร้างทำให้เกิด (1) การทรุดตัวที่ผิวดินและ (2) หน่วยแรงที่ถ่ายลงดาตอุโมงค์ลดลง ในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่ผิวดินกับหน่วยแรงที่หายไป โดยอาศัยผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งปัจจัยทางกายภาพที่ใช้ประกอบพิจารณาได้แก่ ขนาดของอุโมงค์, ความหนาของดินเหนืออุโมงค์, สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิตย์ และโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน โดยกำหนดให้ดินเป็นวัสดุอีลาสติกที่มีคุณสมบัติเท่ากันทุกด้านและเป็นเอกพันธ์ จากความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่ผิวดินกับหน่วยแรงที่หายไป วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอตัวแปรที่เรียกว่า Relaxation factor โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relaxation factor กับขนาดของอุโมงค์จะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินสถิตย์ โดยได้เสนอชุดของสมการยกกำลัง ที่เปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ไปตามค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิตย์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

## AN ABSTRACT

## 4170478021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: TUNNEL / STRESS RELAXATION / SURFACE GROUND LOSS / ELASTIC / FINITE ELEMENT ANALYSIS

RATAMANEE NUNTASARN : STRESS RELAXATION IN GROUND DUE TO TUNNEL EXCAVATION. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SUPOT TEACHAVORSINSAKUN, 224 pp. ISBN 974-347-256-8.

Due to the existence of cavity around the tunnel liner, external forces resulted from excavation are partly imposed on the surrounded soil. Increase in the proportion of these forces (call herein the stress relaxation) causes (1) increase in ground surface settlement and (2) decrease in liner stresses. In the present study, a link among the stress relaxation, ground surface settlement and liner stress to several physical factors is established based on the results of a series of FEM analyses. The factors considered are the tunnel diameter, thickness of overburden soil, coefficient of lateral stress and stiffness of the medium. Plain strain analyses on homogeneous linear isotropic elastic with media variation in those factors were done. The relaxation factor, which incorporates those events to the interested factors, is proposed. A relationship between the relaxation factor and tunnel diameter is found to be solely dependent to the coefficient of lateral stress. A series of power functions with their constants vary with the coefficient of lateral stress can provide the best fit to such relationships.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิติ .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์และ อาจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏาชน ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ต่างๆให้แก่ผู้เขียนเป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ได้ส่งเสริมให้ผู้เขียนสำเร็จการศึกษาจนมาถึงปัจจุบันนี้

รัตมณี นันทสาร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท

## บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
2. ทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การหลุดตัวเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์.....	4
2.2 หน่วยแรงที่สูญเสียของดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะ.....	9
3. วิธีการดำเนินการวิจัย.....	13
3.1 Finite Element Method (FEM).....	13
3.2 การคำนวณหาการสูญเสียมวลดิน ( Volume ground loss, $V_L$ ).....	19
4. ผลการวิเคราะห์และการประเมินผล.....	22
4.1 บทนำ.....	22
4.2 ปริมาณการสูญเสียมวลดิน.....	22
4.3 Relaxation factor.....	41
4.4 Moment Distribution.....	41
4.5 Case Study.....	61
5 Non-linearity of Stress Relaxation vs Surface ground loss.....	64
5.1 การทดสอบ.....	64
5.2 Finite element method.....	65

5.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite element.....	71
6. สรุปผล.....	77
6.1 สรุปผล.....	77
6.2 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงเพิ่มเติม.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	202
ประวัติผู้วิจัย.....	224



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียมวลดิน ( $V_L$ ) กับคุณภาพการก่อสร้าง.....	8
4.1ก รูปและรวบรวมค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกรณี $K_0 = 0.60$ .....	23
4.1ข รูปและรวบรวมค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกรณี $K_0 = 1.00$ .....	23
4.1ค รูปและรวบรวมค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกรณี $K_0 = 1.50$ .....	24
5.1ก แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Isotropic linear elastic ของ Seneviratne (1979).....	68
5.1ข แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Isotropic linear elastic ของ Taylor (1984).....	68
5.2ก แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Non-linear ของ Seneviratne (1979).....	69
5.2ข แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Non-linear ของ Taylor (1984).....	70

## สารบัญรูป

ญ

รูปที่		หน้า
1.1	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของการถ่ายแรงและการทรุดตัว.....	2
2.1	แสดงลักษณะการทรุดตัวที่ผิวดิน.....	4
2.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอุโมงค์ ความลึกของอุโมงค์ ชนิดของดิน และค่า $i$ .....	6
2.3	แสดงผลกระทบของการทรุดตัวเนื่องจากความลึกของอุโมงค์.....	7
2.4	แสดงค่า $K$ ของดินขณะการก่อสร้างอุโมงค์.....	10
2.5	หน่วยแรงบนดาดอุโมงค์.....	11
3.1	แนวแกนของอุโมงค์ในทิศทาง $x, y$ และ $z$ .....	13
3.2ก	แสดง Mesh ของอุโมงค์ที่มีระดับ Crown อยู่ที่ $-12.00$ เมตร.....	15
3.2ข	แสดง Mesh ของอุโมงค์ที่มีระดับ Crown อยู่ที่ $-15.00$ เมตร.....	16
3.2ค	แสดง Mesh ของอุโมงค์ที่มีระดับ Crown อยู่ที่ $-20.00$ เมตร.....	17
3.2ง	แสดง Mesh ของอุโมงค์ที่มีระดับ Crown อยู่ที่ $-24.00$ เมตร.....	18
3.3	แสดงการแบ่ง Element ออกเป็น Element เล็กๆ เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาตร การทรุดตัวที่ผิวดินต่อความยาวอุโมงค์ 1 เมตร.....	20
4.1ก	แสดงปริมาตรการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่าหน่วยแรงสูญหาย (SR) ต่างๆ.....	25
4.1ข	แสดงปริมาตรการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่าหน่วยแรงสูญหาย (SR) ต่างๆ.....	26
4.1ค	แสดงปริมาตรการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่าหน่วยแรงสูญหาย (SR) ต่างๆ.....	27
4.2ก	แสดงค่าความกว้างของ Settlement trough ( $i$ ).....	29
4.2ข	แสดงค่าความกว้างของ Settlement trough ( $2i/D$ ) กับความลึกของอุโมงค์ ( $Z/D$ ).....	30
4.3ก	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญหาย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss, $V_L$ ).....	31
4.3ข	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญหาย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss, $V_L$ ).....	32
4.3ค	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญหาย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss, $V_L$ ).....	33
4.3ง	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญหาย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss, $V_L$ ).....	34

รูปที่	หน้า
4.3จ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss, $V_L$ ).....	35
4.4ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalize ground loss , $V_L/(C/D)$ ).....	36
4.4ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalize ground loss , $V_L/(C/D)$ ) .....	37
4.4ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalize ground loss , $V_L/(C/D)$ ) .....	38
4.4ง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalize ground loss , $V_L/(C/D)$ ) .....	39
4.4จ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalize ground loss , $V_L/(C/D)$ ) .....	40
4.5ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของกราฟ SR กับ $V_L/(C/D)$ กับระดับของ Crown อุโมงค์ (C).....	42
4.5ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของกราฟ SR กับ $V_L/(C/D)$ กับระดับของ Crown อุโมงค์ (C) .....	43
4.5ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของกราฟ SR กับ $V_L/(C/D)$ กับระดับของ Crown อุโมงค์ (C) .....	44
4.6ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation factor (RF) กับระดับของ Crown อุโมงค์ (C).....	45
4.6ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation factor (RF) กับระดับของ Crown อุโมงค์ (C) .....	46

## สารบัญรูป (ต่อ)

ฎ

รูปที่

หน้า

4.6ค	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation factor (RF) กับระดับของ Crown อุโมงค์ (C) .....	47
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation factor (RF) กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง กลางของอุโมงค์ (D).....	48
4.8ก	กราฟแสดงค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ.....	49
4.8ข	กราฟแสดงค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ.....	50
4.8ค	กราฟแสดงค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ.....	51
4.9ค	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับระดับของ Crown อุโมงค์ (C).....	52
4.9ข	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับระดับของ Crown อุโมงค์ (C) .....	53
4.9ค	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับระดับของ Crown อุโมงค์ (C) .....	54
4.10ก	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D).....	55
4.10ข	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D).....	56
4.10ค	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D).....	57
4.10ง	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D).....	58
4.10จ	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D).....	60
4.11ก	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment factor (MF) กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง กลางของอุโมงค์ (D).....	62
4.11ข	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment factor (MF) กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง กลางของอุโมงค์ (D).....	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

๕

รูปที่	หน้า
5.1	ขนาดและลักษณะของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Seneviratne, 1979).....66
5.2	ขนาดและลักษณะของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Taylor, 1984).....67
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า $C/D$ (Normalize ground loss, $V_L/(C/D)$ )(ผลการทดสอบ).....72
5.4ก	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า $C/D$ (Normalize ground loss, $V_L/(C/D)$ )(เปรียบเทียบ Liner Elastic Model กับผลการทดสอบของ Seneviratne,1979).....73
5.4ข	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า $C/D$ (Normalize ground loss, $V_L/(C/D)$ )(เปรียบเทียบ Liner Elastic Model กับผลการทดสอบของ Taylor,1984).....74
5.5ก	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า $C/D$ (Normalize ground loss, $V_L/(C/D)$ ) (เปรียบเทียบ Non-liner Elastic Model กับผลการทดสอบของ Seneviratne,1979).....75
5.5ข	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า $C/D$ (Normalize ground loss, $V_L/(C/D)$ ) (เปรียบเทียบ Non-liner Elastic Model กับผลการทดสอบของ Taylor,1984).....76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สัญลักษณ์

$b$	=	ความยาวของอุโมงค์, เมตร
$C$	=	ระยะจากผิวดินถึง Crown อุโมงค์
$C/D$	=	Cover-to-diameter-ratio
$D$	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ (Diameter of tunnel)
$D_{217}$	=	การทรุดตัวในแนวตั้งของ Node ที่ 217
$E$	=	โมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus)
$E_c$	=	โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Young's modulus of concrete)
$E_{ini}$	=	Initial Young's modulus
$(E_{ini})_p$	=	โมดูลัสความยืดหยุ่นเริ่มต้นเมื่อ mean stress = $p$
$(E_{ini})_{p_{ref}}$	=	โมดูลัสความยืดหยุ่นเริ่มต้น ณ จุดอ้างอิง เมื่อ mean stress ณ จุดอ้างอิง มีค่า = $p_{ref}$
$E_{tan}$	=	tangential Young's modulus
$E_{tan}/E_{ini}$	=	Normalized
$e$	=	อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio)
$g$	=	แรงโน้มถ่วงโลก
$h$	=	ความหนาของอุโมงค์, เมตร
$I$	=	โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia)
$i$	=	Settlement trough
$K$	=	Coefficient of lateral earth pressure
$K'$	=	The effective bulk modulus
$K_0$	=	สัมประสิทธิ์แรงดันดินสถิตย (Coefficient of earth pressure at rest)
$k$	=	สัมประสิทธิ์ค่าหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดดิน
$MF$	=	Moment factor
$m$	=	Parameter ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ Non-linear Elastic ของ สุพจน์ เตชวร- สินสกุล และ วรณิภา แซ่เตี๋ยว
$n$	=	Parameter ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ Non-linear Elastic ของ สุพจน์ เตชวร- สินสกุล และ วรณิภา แซ่เตี๋ยว
$n_{4m}$	=	Gravity scaling factor at centrifuge radius of 4 m.

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

$P$	=	ความดันในอุโมงค์ที่ลดลงของ Harischadra Nimal Seneviratne
$P_{ini}$	=	ความดันในอุโมงค์ ณ. ตอนเริ่มต้นก่อนการทดสอบของ Harischadra Nimal Seneviratne
$P_0'$	=	The mean normal stress at the end of 1-D normally consolidation
$p$	=	Mean stress เริ่มต้น
$p'$	=	Mean effective stress
$p_{ref}$	=	Mean stress เริ่มต้น ณ. จุดอ้างอิง
$q$	=	Deviator stress
$RF$	=	Relaxation factor
$S$	=	การหดตัวที่ผิวดิน
$SR$	=	หน่วยแรงที่สูญหาย (Stress Relaxation)
$S_{max}$	=	การหดตัวที่ผิวดินที่มากที่สุด ณ. ตำแหน่งจุดศูนย์กลางอุโมงค์
$V_L$	=	การสูญเสียมวลดิน (Ground loss)
$V_{sT}$	=	Volume of settlement trough
$V_T$	=	Volume of tunnel
$V_L/(C/D)$	=	Normalized ground loss with C/D
$X_{217}$	=	ตำแหน่งของ Node ที่ 217 ในแนวแกน x
$x$	=	ระยะในแนวราบจากจุดศูนย์กลางอุโมงค์
$Z_0$	=	ระยะจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางอุโมงค์
$\epsilon$	=	Axial strain
$\Delta V_{DC}$	=	Dilation and contraction of soil mass
$\Delta V_L$	=	Volume of ground loss
$\Delta \sigma_{soil}$	=	หน่วยแรงในดินที่ลดลง
$\gamma$	=	Shear strain
$\gamma_t$	=	หน่วยน้ำหนักดินรวม (Total unit weight of soil)
$K$	=	The gradient of the swelling line
$\nu$	=	Poisson's ratio

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

- $\sigma$  = หน่วยแรงในดิน (Stress)
- $\sigma_{ini}$  = หน่วยแรงในดินเริ่มต้น (Initial Stress)
- $\sigma_T$  = ความดันในอุโมงค์ ณ. ตอนเริ่มต้นก่อนการทดสอบของ Richard Niel Taylor
- $\sigma_t$  = ความดันในอุโมงค์ที่ลดลงของ Richerd Niel Taylor



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทรุดตัวเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์คือได้ว่าเป็นปัญหาที่มีความสำคัญที่สุดในการก่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน ซึ่งโดยทั่วไปเป็นอุโมงค์ที่อยู่ไม่ลึกนัก (Shallow Tunnel) การทรุดตัวส่วนใหญ่เกิดจากการเกิดช่องว่างระหว่าง Liner และมวลดินโดยรอบที่บริเวณส่วนหางของหัวเจาะ (Tail) ซึ่งโดยทั่วไปเรียกย่อๆว่า Tail void การเกิดและควบคุมปริมาณ Tail void จึงเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดคปริมาณการทรุดตัวและความสำเร็จของงานก่อสร้างนั้นๆ

การตรวจวัดปริมาณ Tail void นั้นทำได้ยากมาก (หรือเกือบจะไม่ได้เลย) ในทางปฏิบัติจะใช้ตัวแปรที่เรียกกันว่า Surface ground loss ในการประมาณผลกระทบของ Tail void โดยค่า Surface ground loss จะเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้น รวมถึงสัดส่วนของหน่วยแรงที่ถูกถ่ายโอนไปยังมวลดิน ได้มีความพยายามที่จะประยุกต์นำเอาตัวแปรดังกล่าวมาใช้ในการคาดการณ์ปริมาณการทรุดตัวโดยวิธี Finite element analysis อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวเป็นเพียงขบวนการทำ Curve Fitting ทั้งนี้เนื่องจาก

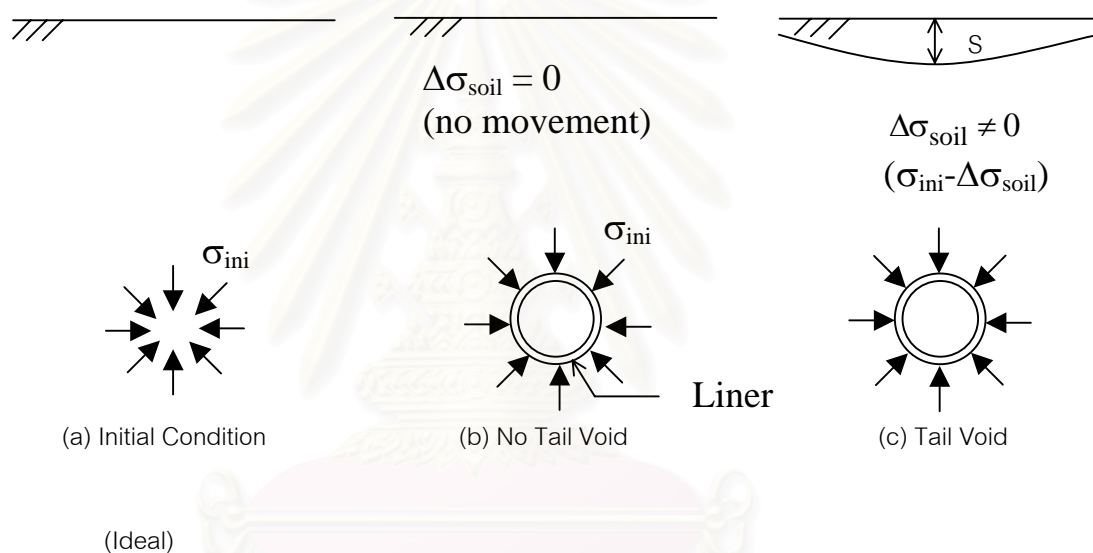
1. ปริมาณ Surface ground loss นั้นจะสามารถทราบค่าได้ต่อเมื่อการก่อสร้างในบริเวณดังกล่าวใกล้จะสิ้นสุดลงแล้ว ดังนั้นตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณจึงเป็นเพียงการประมาณการขั้นต้นเท่านั้น

2. หากทราบปริมาณ Surface ground loss และ Material constitutive equation แล้วก็จะสามารถคำนวณค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งเกือบเป็นค่าคงที่อยู่แล้ว

จะเห็นได้ว่าการคาดการณ์การทรุดตัวโดยใช้ Surface ground loss นั้นไม่ได้ให้ข้อมูลที่ถูกต้องเลยโดยปริมาณการทรุดตัวสามารถคำนวณได้จากปริมาณ Surface ground loss เองอยู่แล้ว ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณ contraction หรือ dilation ของมวลดินนั้นมีค่าไม่มากเท่าไรนัก

ความสำคัญของการใช้ Surface ground loss ในการคำนวณจึงน่าจะอยู่ที่การคำนวณหาขนาดของหน่วยแรงที่กระทำต่อดาดอุโมงค์ (Liner) เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดของดาดอุโมงค์ให้ถูกต้องและเหมาะสม ในการศึกษาเรื่องนี้จึงเป็นความพยายามที่จะหาความเป็นไปได้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง Surface ground loss กับหน่วยแรงที่หายไป (Stress relaxation, SR) ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่ถูกถ่ายลงสู่มวลดิน หน่วยแรงที่เหลืออยู่ (1-SR) จึงเป็นหน่วยแรงจริงที่เหลืออยู่และ

ต้องรับไว้โดยคาดอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 หากสมมติให้ค่าหน่วยแรงเริ่มต้นก่อนการก่อสร้างมีค่าเป็น  $\sigma_{ini}$  แล้ว ในกรณีที่การก่อสร้างมีสภาพสมบูรณ์ หน่วยแรงเริ่มต้นดังกล่าวจะต้องถูกถ่ายให้แก่คาดอุโมงค์ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (b) อย่างไรก็ตามเนื่องจาก Tail void เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ (แต่สามารถทำให้มีน้อยได้ โดยการควบคุมการก่อสร้างที่ดี) ดังนั้นก่อนที่คาดอุโมงค์จะเริ่มรับแรง มวลดินโดยรอบจะเคลื่อนตัวเข้ามาเพื่อลดช่องว่างและเกิดการสัมผัสกันระหว่างคาดอุโมงค์และมวลดิน ในขบวนการเคลื่อนตัวเพื่อปิดช่องว่างดังกล่าว หน่วยแรงเริ่มต้นบางส่วนจะถูกกระจายไปให้แก่มวลดินโดยรอบ ก่อให้เกิดการหลุดตัวขึ้น ปริมาณของหน่วยแรงที่ถ่ายทอดให้แก่มวลดินข้างเคียงนี้เรียกว่า Stress Relaxation, (SR) ดังนั้นหากช่องว่างมีขนาดใหญ่ปริมาณ SR ก็จะมีปริมาณมากตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้แรงที่ถ่ายให้แก่คาดอุโมงค์ลดลงในสัดส่วนเดียวกัน



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของการถ่ายแรงและการหลุดตัว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของการหลุดตัวอันเนื่องมาจากการก่อสร้างอุโมงค์ รวมทั้งการศึกษายัจจัยที่มีผลควบคุมการหลุดตัวดังกล่าว
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress Relaxation, SR) กับ การสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) เพื่อใช้ช่วยในการออกแบบคาดอุโมงค์ (Liner)

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ชนิดต่างๆในเอกสารอ้างอิง โดยมุ่งเน้นไปที่การตรวจวัดหน่วยแรงและปริมาณการหลุดตัวที่เกิดขึ้นจริงทั้งในห้องปฏิบัติการและงานก่อสร้างจริง
2. ใช้โปรแกรม Finite Element “CRISP” ในการคำนวณหา หน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) และการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ )
3. ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress Relaxation, SR) กับ การสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ )



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

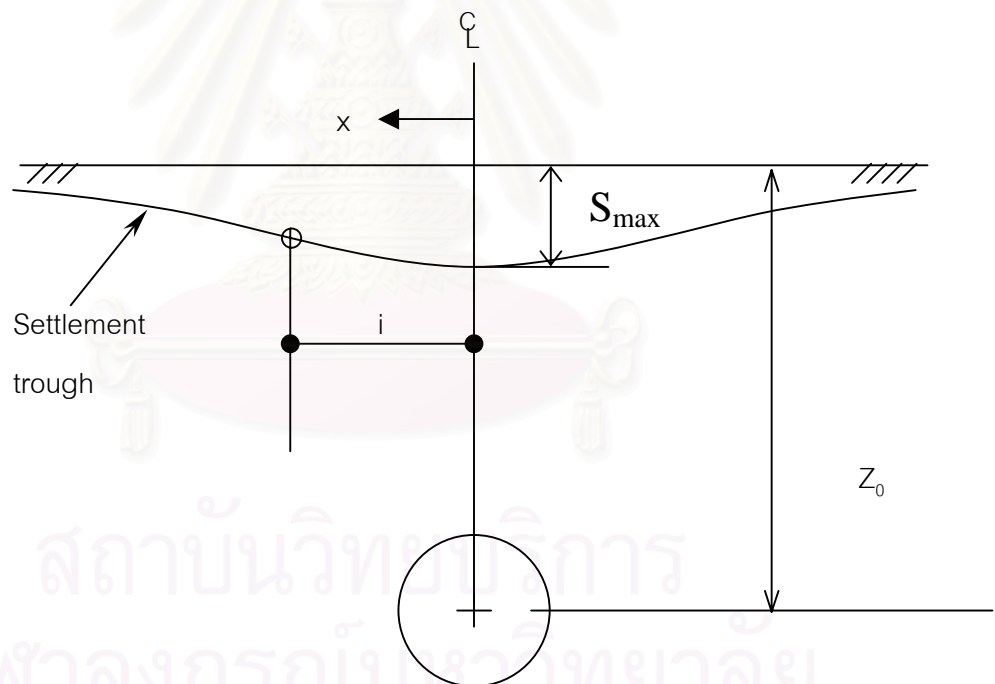
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีตที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การทรุดตัวของดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์

การทรุดตัวเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์นั้นสามารถประเมินได้โดยใช้สมการ ที่เสนอไว้โดย Peck (1969) โดยสมมติให้การทรุดตัวที่ผิวดินมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำดังแสดงโดยสมการที่ 2.1

$$S = S_{max} \exp\left[-\frac{x^2}{2i^2}\right] \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการทรุดตัวที่ผิวดิน

โดยที่  $S$  คือค่าการทรุดตัวของผิวดินที่ระยะตามขวาง  $x$  ใดๆจากจุดศูนย์กลางอุโมงค์  
 $S_{max}$  คือค่าการทรุดตัวสูงสุดซึ่งโดยมากจะเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางของอุโมงค์

- i คือค่าความกว้างของ Settlement trough
- x คือระยะตามแนวราบจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอุโมงค์ ความลึกของอุโมงค์ ชนิดของดินและค่า  $i$  แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2

ในการนี้ O'Reilly (1982) ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณความกว้างของ Settlement trough (i) ได้ดังสมการที่ 2.2

$$i = kZ_0 \quad (2.2)$$

โดยที่  $Z_0$  คือระยะจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ (ดูรูปที่ 2.1)

$k$  คือค่าสัมประสิทธิ์ค่าหนึ่งอยู่กับชนิดของดินเป็นหลัก

O'Reilly (1982) ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุดของผิวดินไว้ดังนี้

$$S_{max} = \frac{0.313V_L D^2}{kZ_0} \quad (2.3)$$

โดยที่  $V_L$  = การสูญเสียมวลดิน (Ground loss (%))

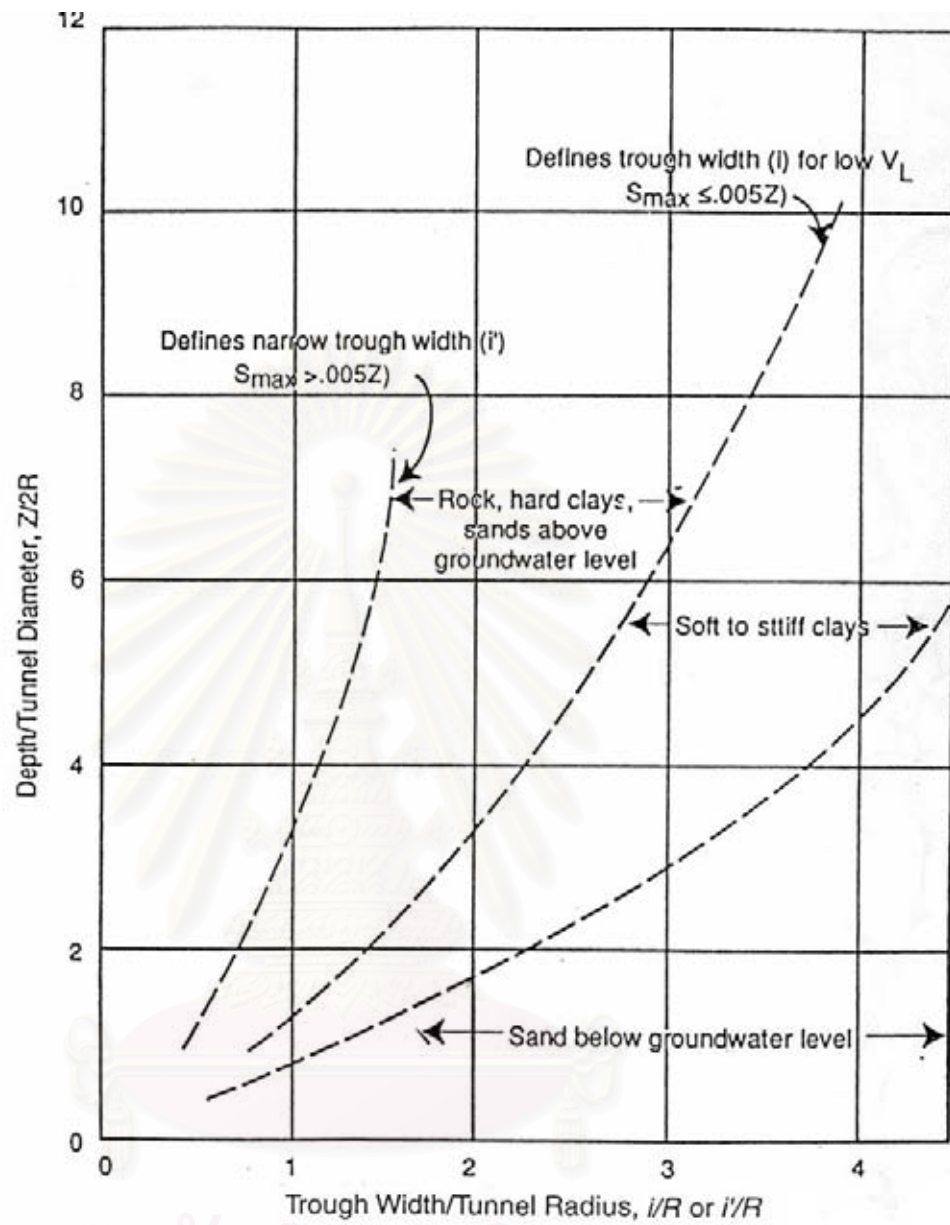
$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์

$k$  = สัมประสิทธิ์

$S_{max}$  = ค่าการทรุดตัวสูงสุด

จะเห็นได้ว่าถ้าอุโมงค์มีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าการทรุดตัวสูงสุดจะมีความมากขึ้นอย่างมาก โดยจะเพิ่มเป็นกำลังสอง จากสมการที่ (2.3) ค่าการสูญเสียมวลดินสามารถคำนวณได้จาก

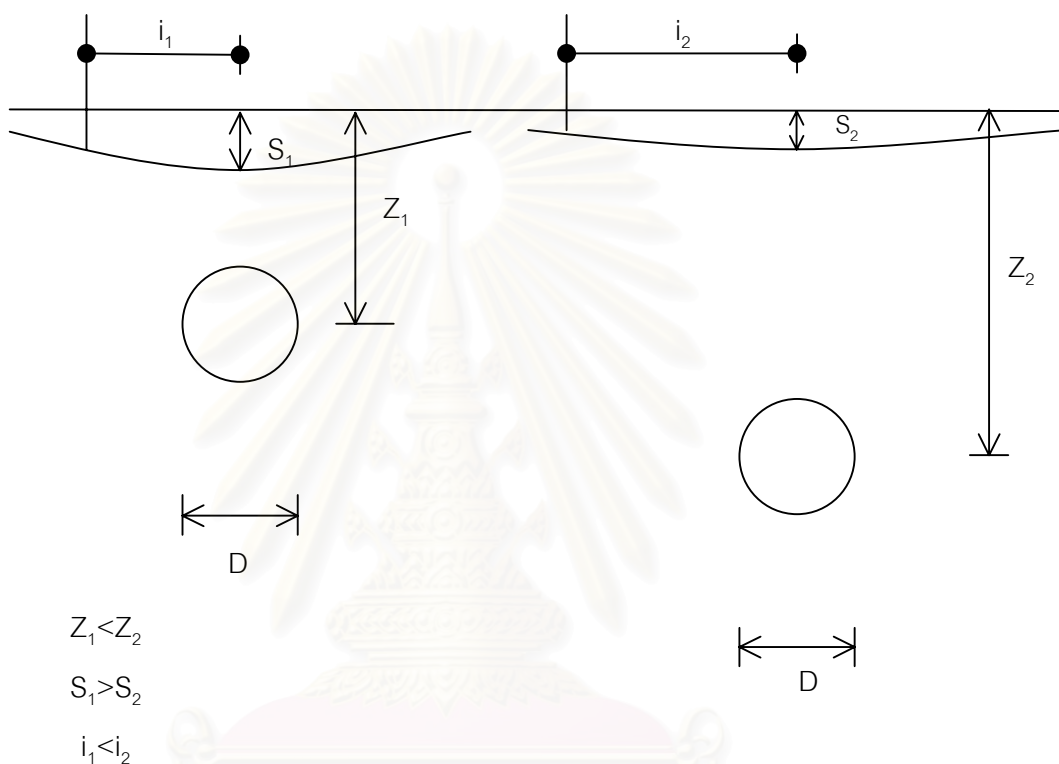
$$V_L = \frac{S_{max}(kZ_0)}{0.313D^2} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของอุโมงค์ ความลึกของอุโมงค์ ชนิดของดินและ

ค่า  $i$

จากสมการที่ (2.3) หากอุโมงค์อยู่ลึก ( $Z_0$  มีค่ามาก) ถึงแม้ว่าการทรุดตัวสูงสุดจะมีค่าลดลง ก็ตาม อุโมงค์ลึกจะทำให้ค่าการสูญเสียมวลดินสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของการทรุดตัวแผ่ขยายออกไปมากขึ้น (หรือ Differential settlement น้อยลง) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงผลกระทบของการทรุดตัวเนื่องจากความลึกของอุโมงค์

ค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) นั้นใช้กันมากในการควบคุมงานก่อสร้างอุโมงค์ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) จะคำนวณได้ก็ต่อเมื่อมีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินระหว่างการก่อสร้าง โดยทั่วไปค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$V_L (\%) = \frac{\Delta V_L}{V_T} \times 100 \quad (2.5)$$

$$\Delta V_L = V_{ST} + \Delta V_{DC}$$

โดยที่  $\Delta V_L$  = Volume ground loss

$V_{ST}$  = Volume of settlement trough

$\Delta V_{DC}$  = Dilation or contraction of soil mass

$V_T$  = Volume of tunnel

ค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) เป็นตัวเลขที่สำคัญที่บ่งถึงคุณภาพของการก่อสร้างดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของมวลดินนั้นค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) ก็มีบทบาทสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพียงแต่การใช้ค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) ประกอบการวิเคราะห์นั้นเพียงแต่เป็นการทำ Curve fitting เท่านั้นไม่ใช้การ prediction ที่สมบูรณ์

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) และคุณภาพของการก่อสร้าง

Case	$V_L$ (%)
Good practice in firm ground	0.5
Good practice in medium ground	1.5
Fair practice in soft ground	2.5
Poor practice in soft clay	4.0 or more

N. Loganathan และ H. G. Poulos (1998) ได้เสนอคำนิยามของพารามิเตอร์การสูญเสียมวลดิน (Ground loss parameter) ใหม่โดยจัดให้อยู่ในรูปของ “equivalent ground loss ( $\mathcal{E}$  parameter)” โดยได้เสนอความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างพารามิเตอร์ช่องว่าง (Gap parameter,  $g$ ) และ Ground loss นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีการวิเคราะห์การคาดคะเนการเคลื่อนที่ของดินรอบๆ อุโมงค์ในดินเหนียว ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,

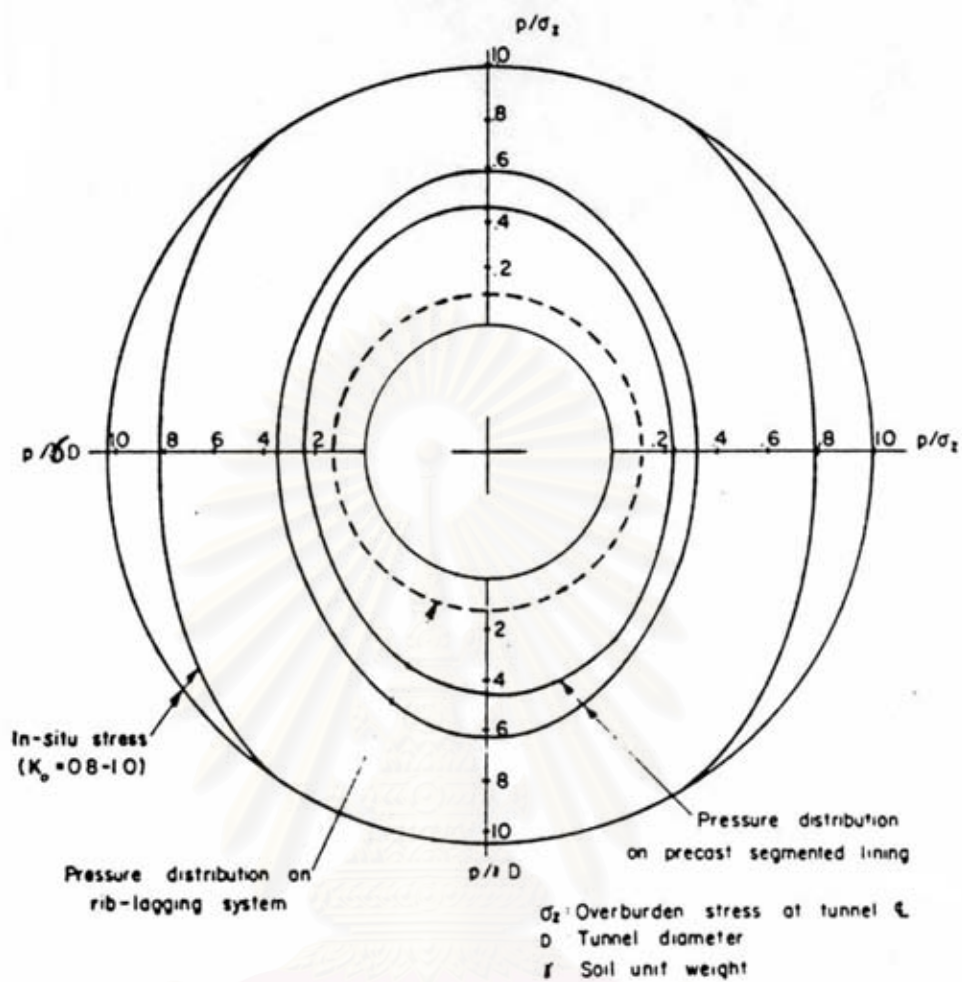


$V_L$ ) โดยนำไปคาดคะเนค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ), คาดคะเนค่า  $i$  (Settlement trough), คาดคะเนการทรุดตัวและการเคลื่อนที่ในแนวนอนในอุโมงค์ในดินเหนียว 5 แห่ง ซึ่งเป็นดินเหนียวที่อยู่ในช่วงตั้งแต่ดินเหนียวอ่อน (Soft clay) จนถึงดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า ในดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) ที่คำนวณได้ให้ผลที่ดีใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในสนาม แต่ในดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ค่าที่ได้จากการคาดคะเนมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้ในสนาม สำหรับค่า  $i$  (settlement trough) ที่คาดคะเนได้นั้นมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จริงในสนาม (ความกว้างของการทรุดตัวที่คาดคะเนมากกว่าความเป็นจริง) แต่อย่างไรก็ตามอุโมงค์ในดินเหนียวชั้นเดียว (Uniform clay) ค่าการทรุดตัวและการเคลื่อนที่ในแนวนอนให้ผลที่ดีใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในสนาม

## 2.2 หน่วยแรงที่สูญหายของดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะ

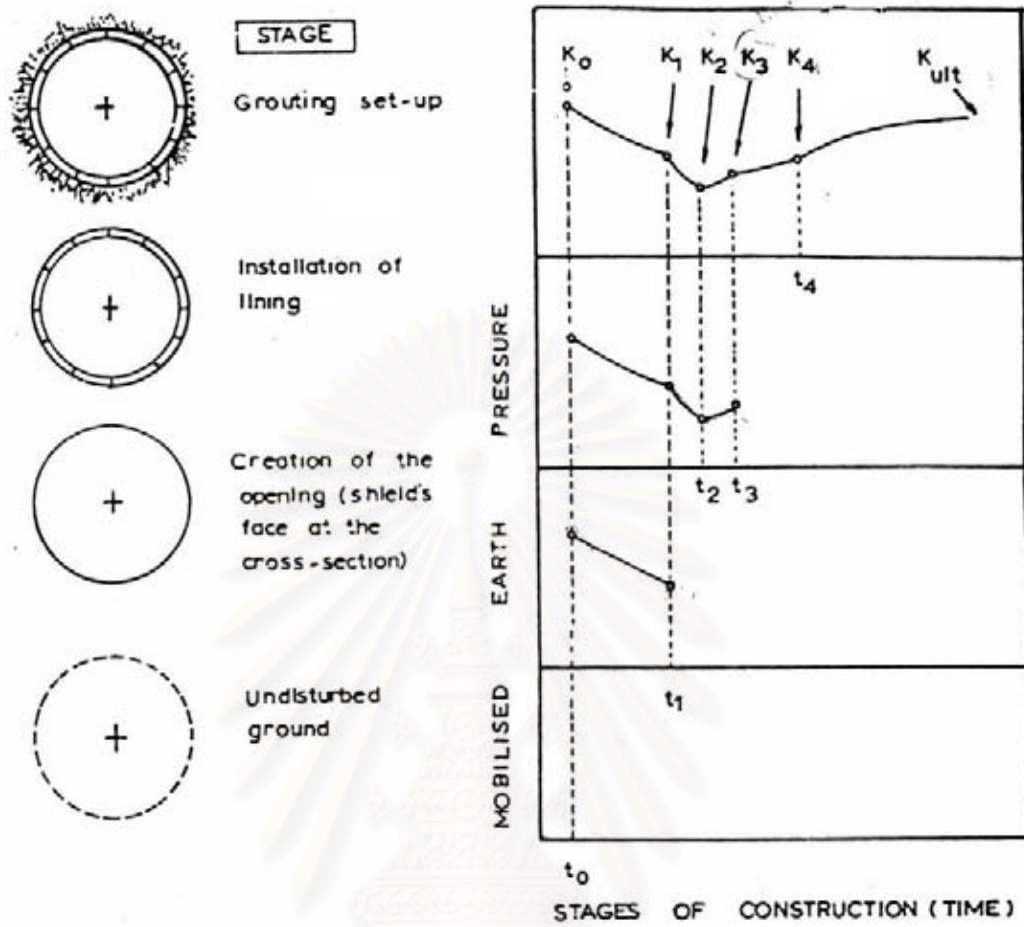
จากการศึกษาในประเทศกรีซโดย Michael L. Myrianthis (1981) พบว่าก่อนจะมีการขุดอุโมงค์ดินจะอยู่ในสภาพที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed) ภายใต้อุโมงค์โดยเปิดช่องหน้าหัวเจาะ (Face of shield) ดินจะไหลเข้ามา ( $\sigma_n$  จะลดลง) ดินจะอยู่ในสภาพ active ค่า  $K$  จะลดลง เมื่อทำการปิดช่องว่างดินบางส่วนยังคงไหลอยู่ทำให้ค่า  $K$  ลดลงอีกเล็กน้อย เมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ไปด้านหน้าจะเกิดแรงเสียดทานขึ้นระหว่างที่ผิวด้านท้ายหัวเจาะกับดินทำให้ค่า  $K$  เพิ่มขึ้น เมื่อทำการติดตั้งค้ำดินอุโมงค์ดินจะอยู่ในสภาพ passive จนกระทั่งเสร็จสิ้นการ grout (Surrounding pressure < Filling pressure) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

จากการศึกษาอุโมงค์ใน Stiff silty clay ในเมือง เอ็ดมอนตัน, ประเทศแคนาดาโดย Z. Eisenstein, F. El-Nahas และ S. Thomson (1981) โดยศึกษาอุโมงค์ที่มีค้ำดินอุโมงค์ (Liner) ที่ทำจาก Steel ribs และ timber lagging และคอนกรีต และค้ำดินอุโมงค์ที่เป็นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast concrete) เมื่อทำการวัดหน่วยแรงของค้ำดินอุโมงค์ (Lining pressure) ทั้งสองแบบพบว่า (รูปที่ 2.5) ในค้ำดินอุโมงค์แบบที่ 1 Steel ribs และ lagging หน่วยแรงในค้ำดินอุโมงค์ (Lining pressure) เป็น Uniform radial pressure มีค่าลดเหลือเพียง 12% ของ Overburden pressure และในค้ำดินอุโมงค์แบบที่สอง แบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ หน่วยแรงของค้ำดินอุโมงค์เป็นแบบ Elliptical pressure ซึ่งหน่วยแรงในแนวตั้งมีค่าระหว่าง 45 ถึง 59% ของ Overburden stress และในแนวนอน หน่วยแรงมีค่าระหว่าง 27 ถึง 36% ของ Overburden stress หน่วยแรงที่ค้ำดินอุโมงค์ (Lining pressure) ที่มีค่าที่แตกต่างกันเนื่องจากค่า Young's modulus,  $E$  ของค้ำดินอุโมงค์ และวิธีการติดตั้งค้ำดินอุโมงค์ โดยที่ค้ำดินอุโมงค์แบบที่ 1 Steel ribs-lagging จะเกิดช่องว่าง (Gap หรือ Tail void) มากกว่าแบบที่ 2 (แบบคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป (Precast concrete))



รูปที่ 2.5 หน่วยแรงดินบนตาดอุโมงค์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 แสดงค่า K ของดิน ขณะการก่อสร้างอุโมงค์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Toshi Nomoto และคณะ (1999) ได้สร้างตัวอย่างแบบจำลองแรงเหวี่ยงสำหรับจำลอง การก่อสร้างชุดเจาะอุโมงค์ในทรายแห้ง (Dry Sand) โดยที่หัวเจาะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และได้จำลองขบวนการก่อสร้างที่แตกต่างกันโดยแบ่งออกเป็น 3 ชุด ชุดที่ 1 เป็นการฝัง ท่อลงไปในทรายเพื่อทำการวัดหน่วยแรงดินบนดาดอุโมงค์ภายใต้แรงเหวี่ยง ชุดที่ 2 เป็นการสร้าง แบบจำลองช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างอุโมงค์กับดินรอบๆ และชุดที่ 3 เป็นการสร้างแบบจำลองการ ก่อสร้างอุโมงค์ หน่วยแรงบนดาดอุโมงค์, การทรุดตัวในแนวตั้งและแนวนอนที่ผิวดิน และหน่วย แรงดินรอบอุโมงค์ที่ถูกวัดภายใต้ความเร่ง 25 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลก (25g, เมื่อ g คือแรงโน้มถ่วง โลก) การคาดคะเนหน่วยแรงบนดาดอุโมงค์ที่ระดับ Crown ด้วย Terzaghi's loosening earth pressure นั้นให้ผลที่ดี จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จริงในสนามกับการทดสอบทั้งสาม ชุดเป็นการยืนยันได้ว่าขบวนการก่อสร้างอุโมงค์สามารถถูกจำลองในแรงเหวี่ยงได้ดี และผล จากการทดลองพบว่าทรุดตัวที่ผิวดินเป็น function ของ tail void thickness และค่า C/D เมื่อ C= ระยะจากผิวดินถึง Crown อุโมงค์ และ D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

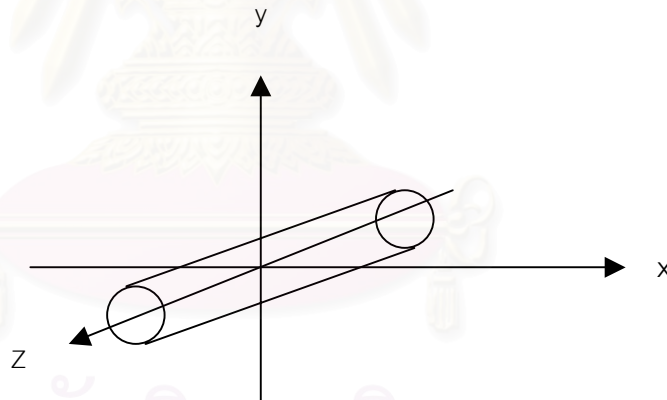
## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

#### 3.1 Finite Element Method (FEM)

ในการศึกษาหาความเป็นไปได้ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress relaxation, SR และค่า Surface ground loss,  $V_L$  มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. สมมติให้ดินเป็นวัสดุ Homogeneous Isotropic Elastic
2. สมมติให้ดินอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition)
3. สมมติให้ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวแกน  $Z=0$  ( $\epsilon_{zz} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$ ) โดยแนวแกน  $Z$  คือแนวแกนตามความยาวของอุโมงค์ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแนวแกนของอุโมงค์ในทิศทาง x, y และ z

ซึ่งในการศึกษานี้จะอาศัยผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Finite element “CRISP” (CRITICAL State Program) ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถใช้วิเคราะห์แบบไม่ระบายน้ำ, แบบระบายน้ำ หรือวิเคราะห์แบบอัดตัวคายนํ้าในระบบ 3 มิติหรือ 2 มิติของ plain strain หรือ axisymmetry ของวัสดุของแข็งและรูปแบบของแบบจำลองของดินที่สามารถวิเคราะห์ได้มีทั้งแบบ Anisotropic elasticity, in – homogeneous elastic, Critical State soil และ Elastic-perfectly plastic โดยรูป

แบบของแบบจำลองของดินที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้คือ Isotropic linear elastic แบบไม่ระบายน้ำ ในระบบ 2 มิติของ Plane Strain ซึ่ง  $\epsilon_{33}=\gamma_{23}=\gamma_{31}=0$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ 0 \\ \gamma_{xy} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

ซึ่งจะได้ค่า  $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$  แต่ค่า  $\sigma_{33}$  จะไม่เป็นศูนย์ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

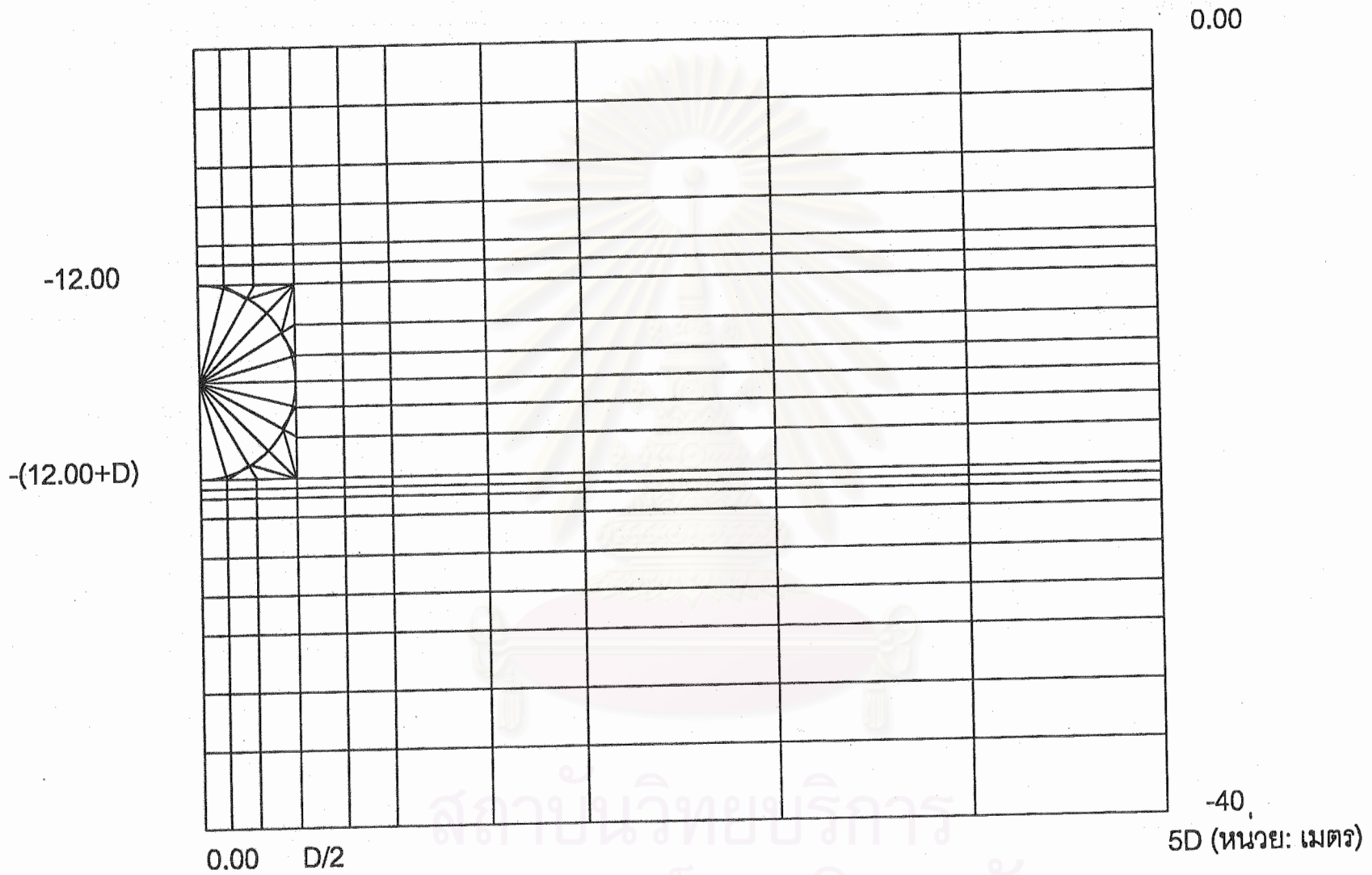
$$\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (3.2)$$

ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CRISP นั้น Mesh ที่ใช้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยกำหนดให้ Mesh มีความกว้างเท่ากับ 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ และ มีความลึกอยู่ที่ระดับ -40.00 เมตรจากผิวดิน โดยขนาดของอุโมงค์จะอยู่ในช่วงระหว่าง 2.00 ถึง 10.00 เมตร และมีค่า C/D อยู่ในช่วง 1.2 ถึง 12 ซึ่งอุโมงค์เหล่านี้จะอยู่ในดินที่มีหน่วยน้ำหนักดิน ( $\gamma$ ) เท่ากับ 18 kN/m<sup>3</sup>, ค่า Poisson ratio ( $\nu$ ) เท่ากับ 0.49, ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E) เท่ากับ 6600, 10000 และ 25000 kPa, และค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินสถิตย (K) เท่ากับ 0.60, 1.00 และ 1.50

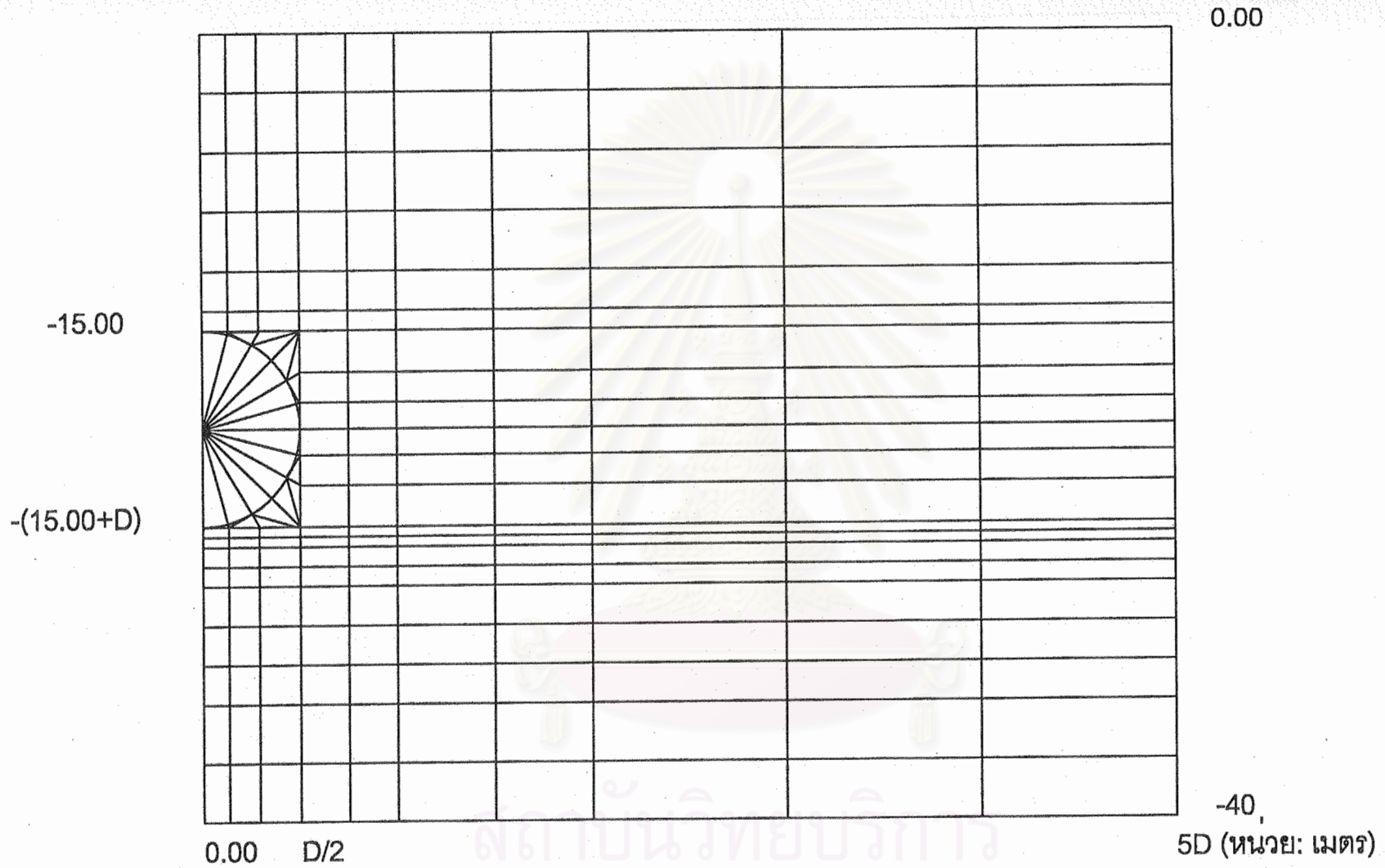
โดยในการวิเคราะห์จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองแบบคือการวิเคราะห์แบบที่ไม่มีดาดอุโมงค์ (Unliner) และการวิเคราะห์แบบที่มีดาดอุโมงค์ (Liner) ซึ่งการวิเคราะห์แบบที่ไม่มีดาดอุโมงค์ (Unliner) นั้นจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณการหลุดตัวที่เกิดขึ้นที่ค่า SR ต่างๆ เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress relaxation, SR กับ Surface ground loss,  $V_L$  ส่วนการวิเคราะห์แบบที่มีดาดอุโมงค์ (Liner) นั้นจะใช้ในการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในดาดอุโมงค์จะเป็นโดยตัวแปรของดาดอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ( $E_c$ ) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $3.1 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup>
2. ความหนาของดาดอุโมงค์ ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.30 เมตร
3. โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia, I) ของคอนกรีต หาได้จากสมการ

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.3)$$

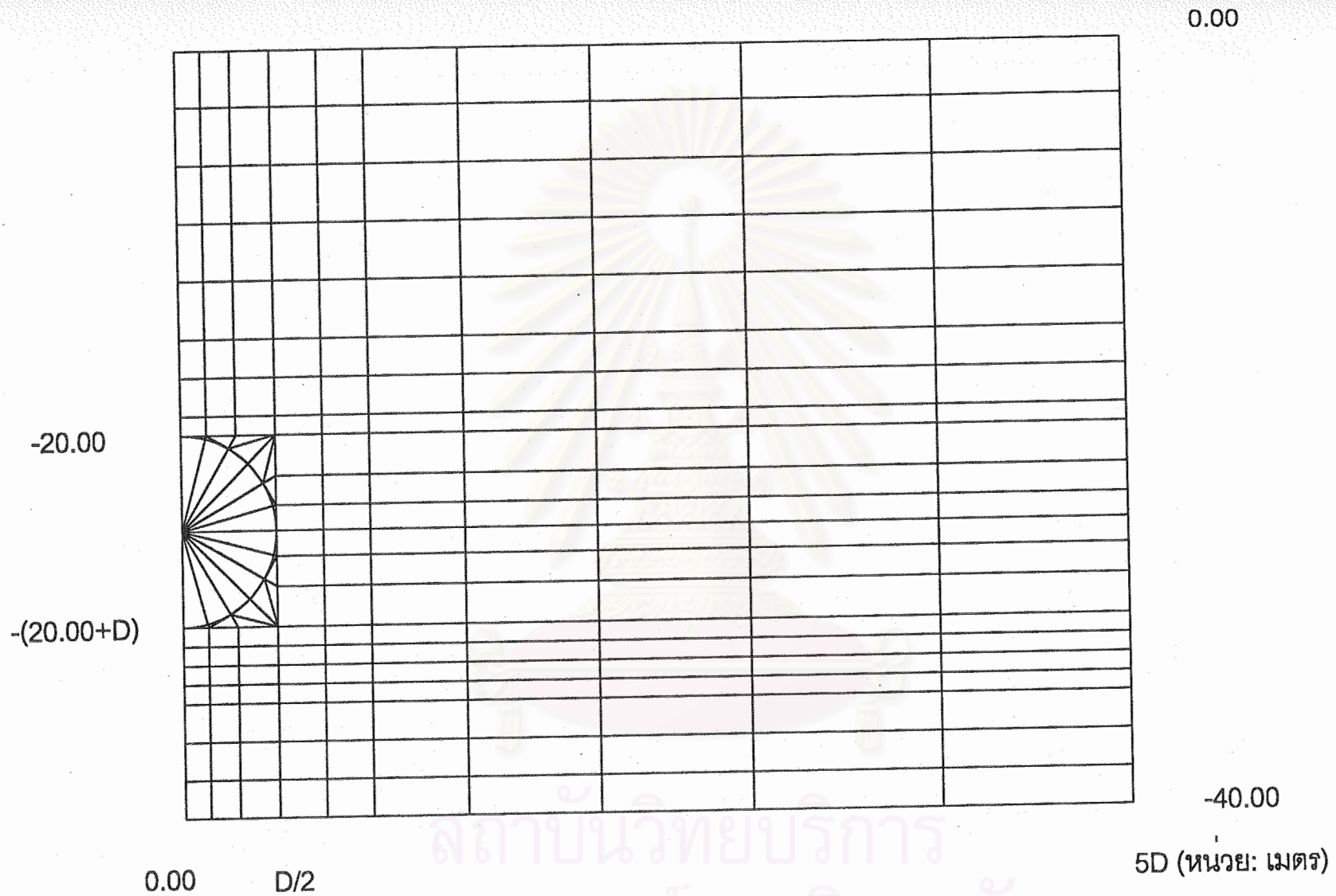


รูปที่ 3.2ก แสดง Mesh ของอุโมงค์ที่มีระดับของ Crown อุโมงค์อยู่ที่ -12.00 เมตร

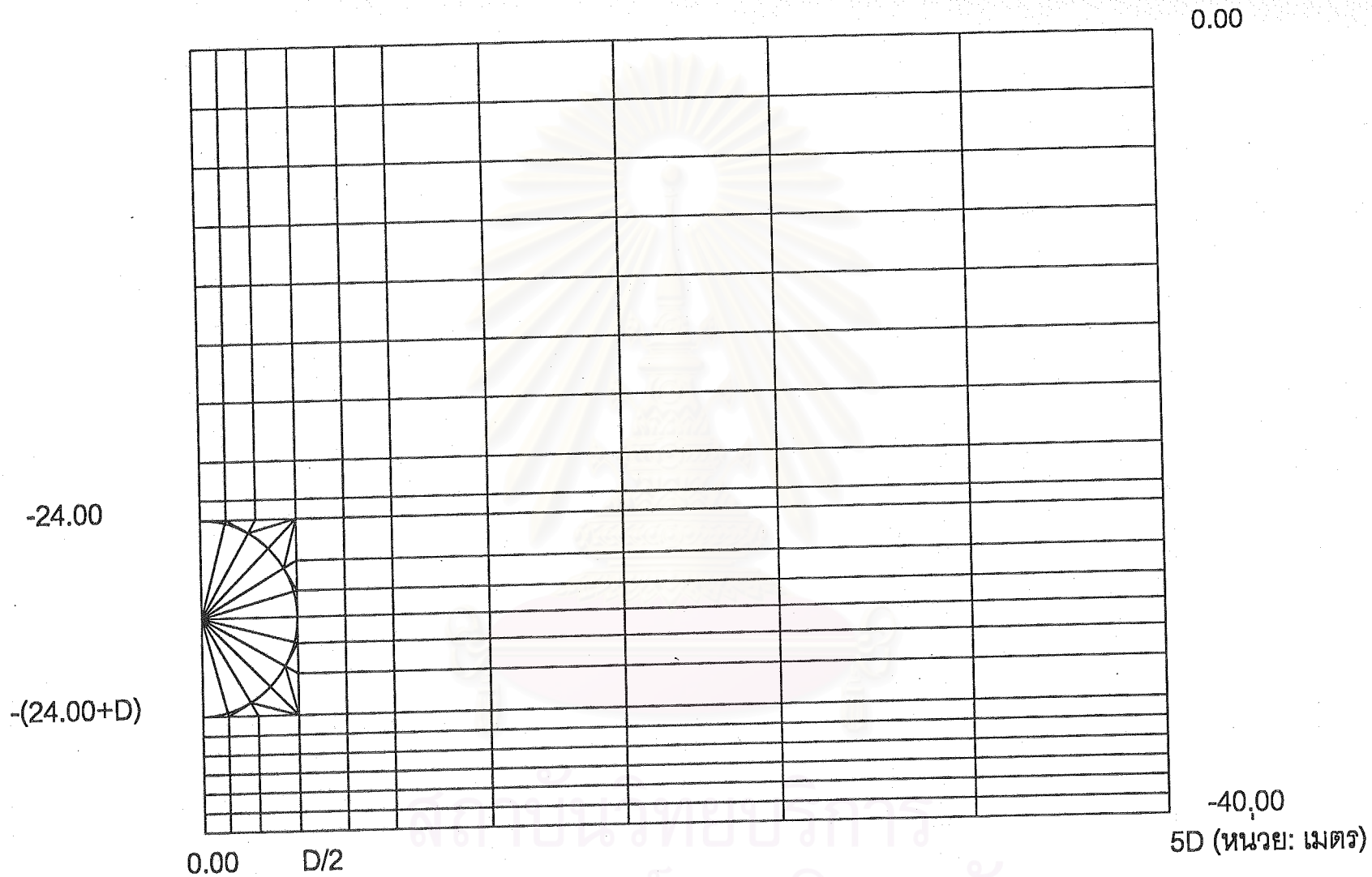


รูปที่ 3.2x แสดง Mesh ของอุโมงค์ที่มีระดับของ Crown อุโมงค์อยู่ที่ -15.00 เมตร





รูปที่ 3.2ค แสดง Mesh ของอุโมงค์ที่มีระดับของ Crown อุโมงค์อยู่ที่ -20.00 เมตร



รูปที่ 3.2ง แสดง Mesh ของอุโมงค์ที่มีระดับของ Crown อุโมงค์อยู่ที่ -24.00 เมตร

โดยที่  $b$  = ความยาวของอุโมงค์

= 1 เมตร

$h$  = ความหนาของตาดอุโมงค์

= 0.30 เมตร

ซึ่งจะได้ว่า โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia,  $I$ ) มีค่าเท่ากับ  $0.00225 \text{ m}^4/\text{m}$

4. Poison ratio ของคอนกรีต ให้เท่ากับ 0.25

### 3.2 การคำนวณหาปริมาตรการสูญเสียมวลดิน (Volume ground loss, $V_L$ )

ผลจากการวิเคราะห์หาปริมาณการทรุดตัวของผิวดินด้วยโปรแกรม CRISP นั้นจะถูกนำมาคำนวณหาปริมาตรการสูญเสียมวลดินสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$V_L = \frac{V_s}{V_{exc}} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $V_L$  = ปริมาตรการสูญเสียมวลดิน (Volume Ground loss) ต่อความยาว 1 เมตร

$V_s$  = ปริมาตรการทรุดตัวของผิวดินต่อความยาว 1 เมตร

$V_{exc}$  = ปริมาตรของอุโมงค์ที่ขุดต่อความยาว 1 เมตร

โดยปริมาตรการทรุดตัวของผิวดิน ( $V_s$ ) ต่อความยาว 1 เมตร สามารถคำนวณได้จากการแบ่ง Element ออกเป็น Element เล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เมื่อ  $D_{217}$  = การทรุดตัวในแนวตั้งของ Node 217

$x_{217}$  = ตำแหน่งของ Node 217 ในแนวแกน  $x$

217 = Node ที่ 217

● = Node

① = ปริมาตรการทรุดตัวของผิวดินที่ Element ย่อยที่ 1 ต่อความยาว 1 เมตร



$$\boxed{6} = \left[ \left( \frac{x_{222} - x_{221}}{2} \right) + \left( \frac{x_{223} - x_{222}}{2} \right) \right] \times D_{222} \quad (3.10)$$

$$\boxed{7} = \left[ \left( \frac{x_{223} - x_{222}}{2} \right) + \left( \frac{x_{224} - x_{223}}{2} \right) \right] \times D_{223} \quad (3.11)$$

$$\boxed{8} = \left[ \left( \frac{x_{224} - x_{223}}{2} \right) + \left( \frac{x_{225} - x_{224}}{2} \right) \right] \times D_{224} \quad (3.12)$$

$$\boxed{9} = \left[ \left( \frac{x_{225} - x_{224}}{2} \right) + \left( \frac{x_{226} - x_{225}}{2} \right) \right] \times D_{225} \quad (3.13)$$

$$\boxed{10} = \left[ \left( \frac{x_{226} - x_{225}}{2} \right) + \left( \frac{x_{227} - x_{226}}{2} \right) \right] \times D_{226} \quad (3.14)$$

$$\boxed{11} = \left( \frac{x_{227} - x_{226}}{2} \right) \times D_{227} \quad (3.15)$$

โดยผลรวมของปริมาตรของ Element ย่อยตั้งแต่ Element ที่ 1 ถึง Element ที่ 11 คือ ปริมาตรกรวยตันที่ผิวดินทั้งหมดต่อความยาว 1 เมตร ( $V_s$ )

ส่วนปริมาตรของอุโมงค์ต่อความยาว 1 เมตร หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_{exc} = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \frac{1}{1} \quad (3.16)$$

เมื่อ  $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์, เมตร

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์และการประเมินผล

#### 4.1 บทนำ

การวิเคราะห์ทาง FEM ในขั้นตอนนี้จะดำเนินการวิเคราะห์เพื่อศึกษาหาความเป็นไปได้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation) และปริมาณการสูญเสียมวลดิน (Surface ground loss) โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์มีดังนี้

- (ก) คำนวณหาหน่วยแรงเริ่มต้น โดยสมมติให้ชั้นดินมีความสม่ำเสมอ (Uniform) กล่าวคือเป็นดินที่มีคุณสมบัติเพียงชุดเดียว
- (ข) มวลดินมีพฤติกรรมเป็น Isotropic elastic material
- (ค) หลังจากกำหนดค่าหน่วยแรงเริ่มต้นแล้วจึงจำลองการขุดดินโดยการเคลื่อนย้ายเอา Element ภายในอุโมงค์ออก แล้วแปลงหน่วยแรงใน Element เหล่านั้น ให้เป็นแรงภายนอก กระทำที่บริเวณขอบของอุโมงค์
- (ง) สัดส่วนของแรงภายนอกเหล่านี้จะเรียกว่า ค่าหน่วยแรงสูญเสีย (Stress relaxation) โดยที่ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณครั้งนี้ประกอบด้วย
  - (ก) ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ (D)
  - (ข) ตำแหน่งของ Crown ของอุโมงค์ (C)
  - (ค) สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (K)
  - (ง) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E)

#### 4.2 ปริมาณการสูญเสียมวลดิน

รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่าหน่วยแรงสูญเสีย (SR) ต่างๆกันในกรณีต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ค่อนข้างชัดเจนว่า เมื่อหน่วยแรงสูญเสีย (SR) มีค่าเพิ่มมากขึ้นการทรุดตัวที่ผิวดินก็มีค่ามากขึ้น ยกเว้นในกรณีที่ค่า  $K = 1.5$  (Overconsolidated) ซึ่งค่าการทรุดตัวที่บริเวณห่างจากตัวอุโมงค์มีค่าสูงกว่าบริเวณจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ ค่าหน่วยแรงสูญเสีย (SR) แสดงถึงปริมาณหน่วยแรงที่ถ่ายทอดให้แก่มวลดินข้างเคียง เมื่อค่าหน่วยแรงสูญเสีย (SR) มีค่าสูงขึ้น มวลดินที่เหลืออยู่ (จากการขุด) จะต้องรับแรงมากขึ้น ก็ย่อมก่อให้เกิดให้เกิดการทรุดตัวมากขึ้นตามมาด้วย โดยการใช้สมการของ Peck (1969) สามารถคำนวณหาความกว้างของ Settlement trough (i)

ตารางที่ 4.1ก สรุปรวบรวมค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกรณี  $K_0 = 0.60$

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ คูโมงค์ (D), เมตร	ตำแหน่งของ Crown คูโมงค์ (C), เมตร	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E), kPa
2	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
3	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
4	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
6	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
8	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
10	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000

ตารางที่ 4.1ข สรุปรวบรวมค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกรณี  $K_0 = 1.00$

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ คูโมงค์ (D), เมตร	ตำแหน่งของ Crown คูโมงค์ (C), เมตร	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E), kPa
2	12, 15, 20, 24	10,000
3	12, 15, 20, 24	10,000
4	12, 15, 20, 24	10,000
6	12, 15, 20, 24	10,000
8	12, 15, 20, 24	10,000
10	12, 15, 20, 24	10,000

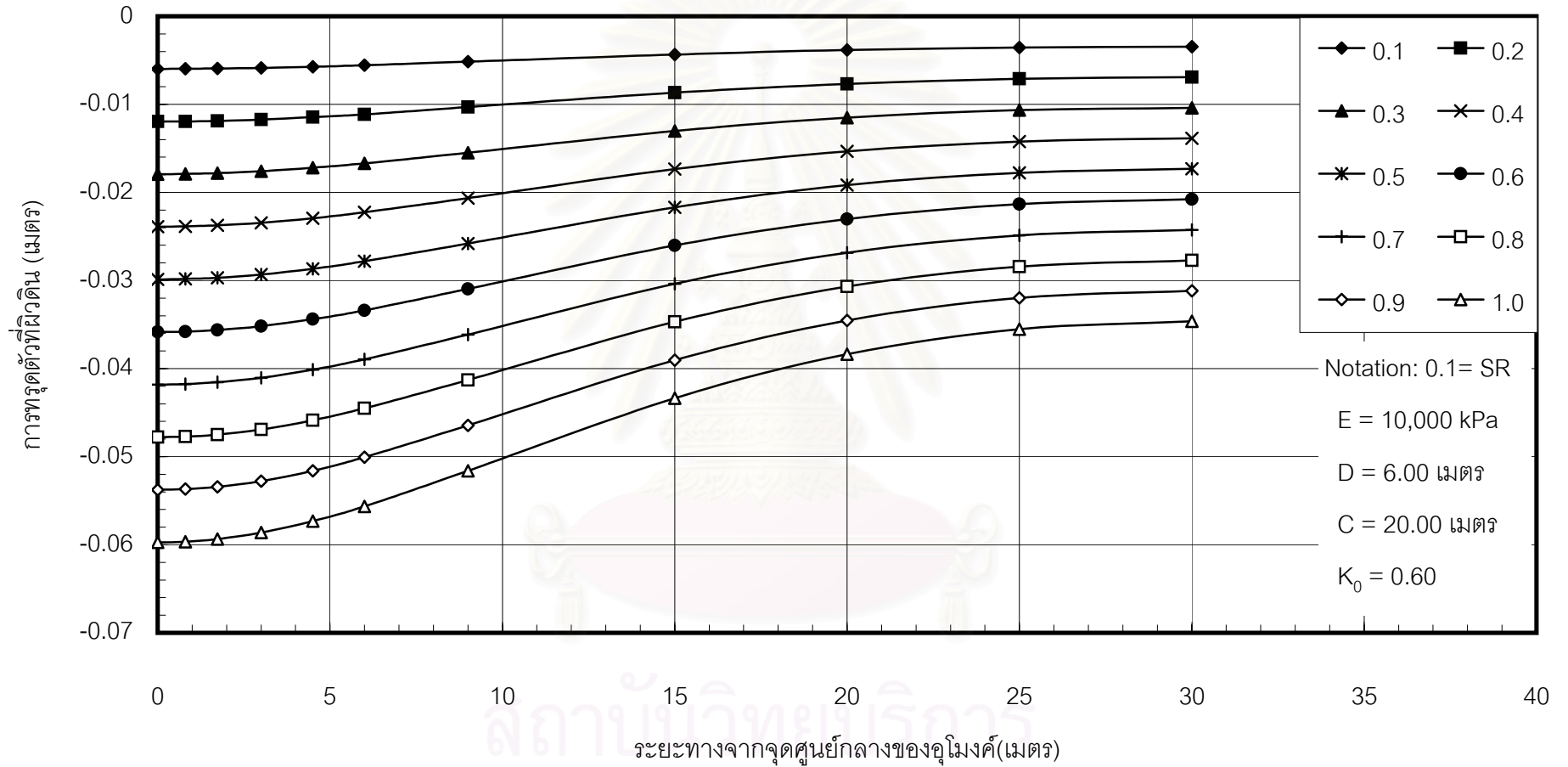
ตารางที่ 4.1ค สรุปรวบรวมค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกรณี  $K_0 = 1.50$

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ คูโมงค์ (D), เมตร	ตำแหน่งของ Crown คูโมงค์ (C), เมตร	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E), kPa
2	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
3	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
4	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
6	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
8	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000
10	12, 15, 20, 24	6600, 10000, 25000

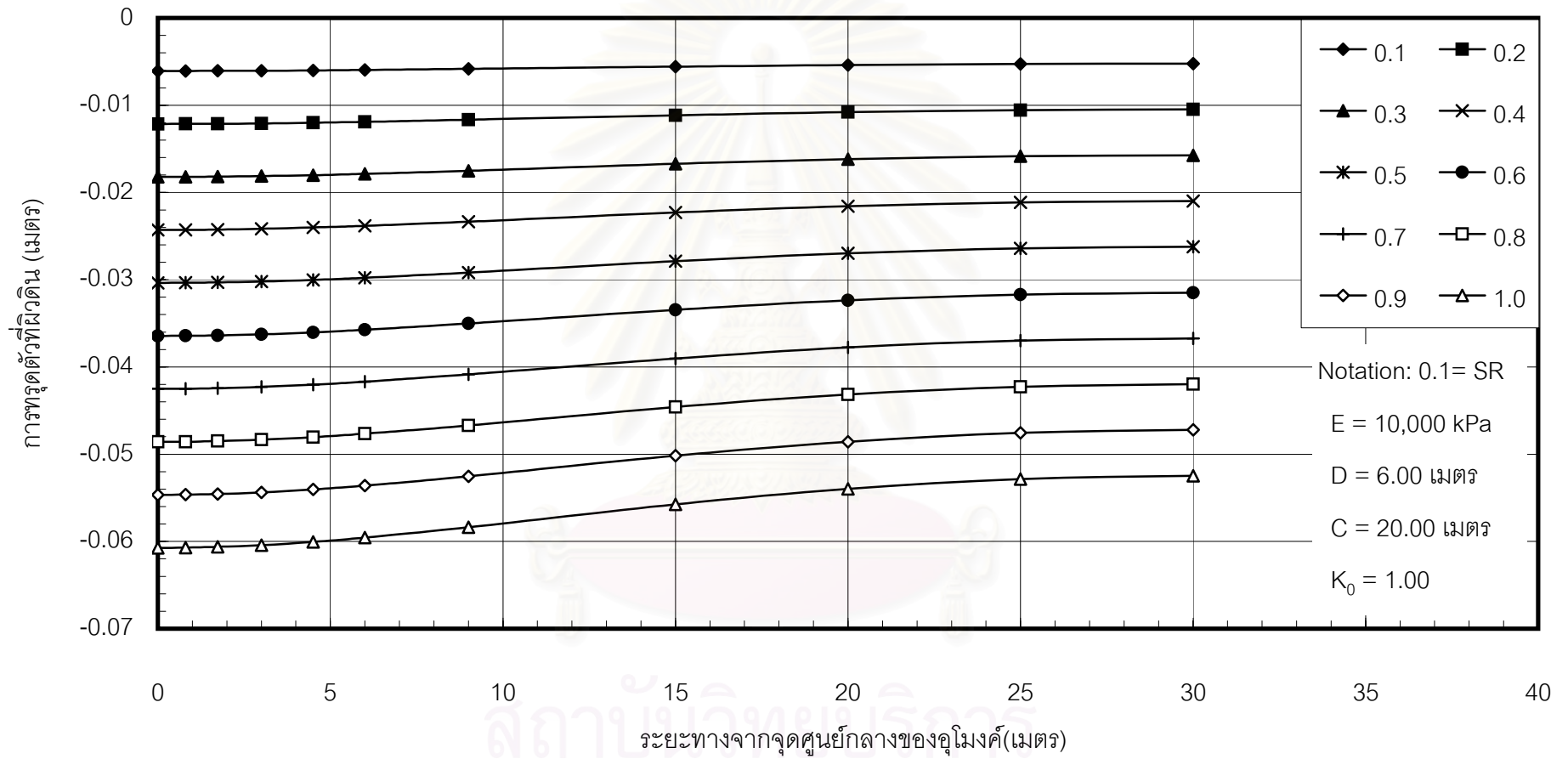


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

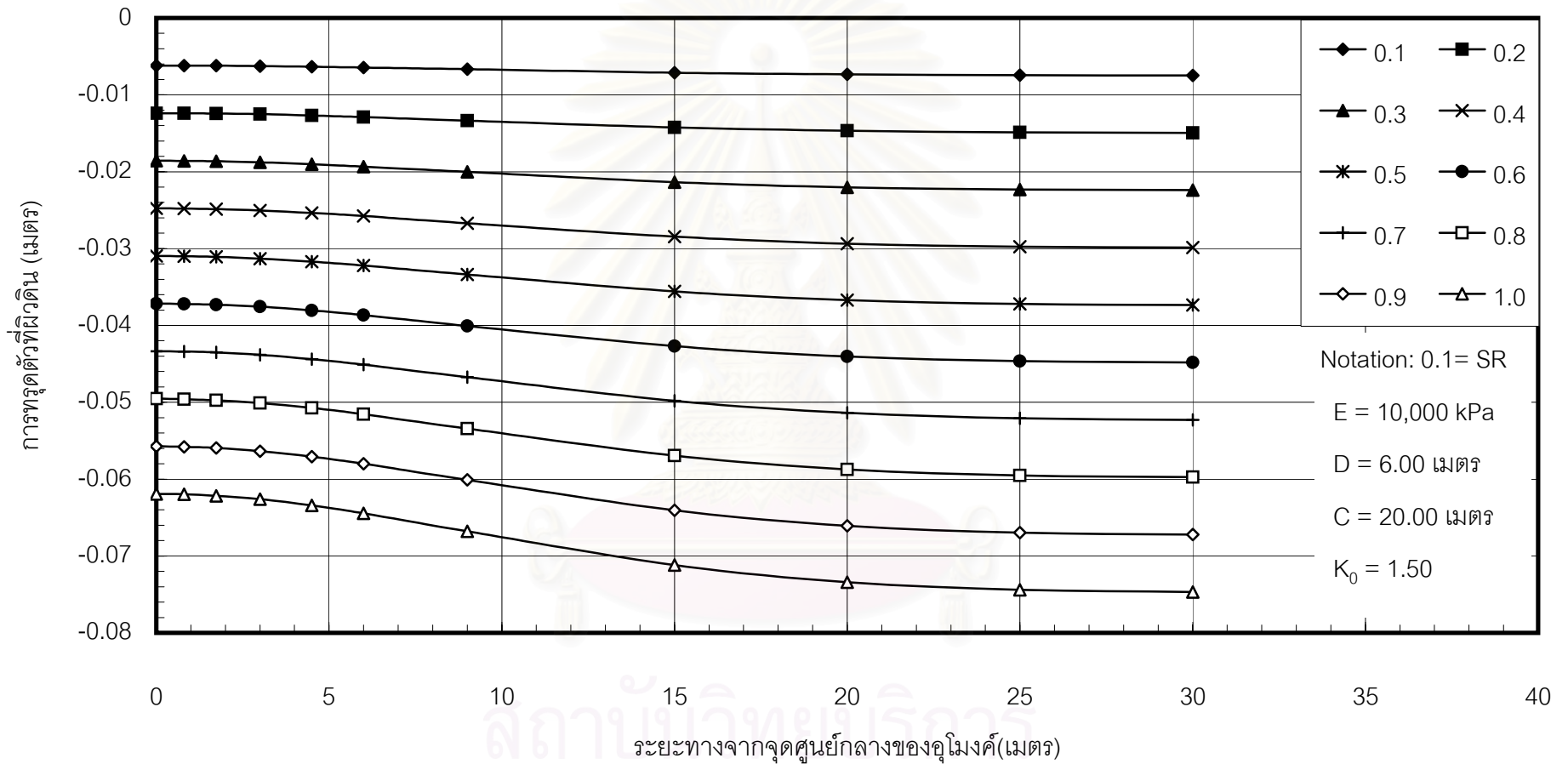




รูปที่ 4.1ก แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ 4.1ข แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



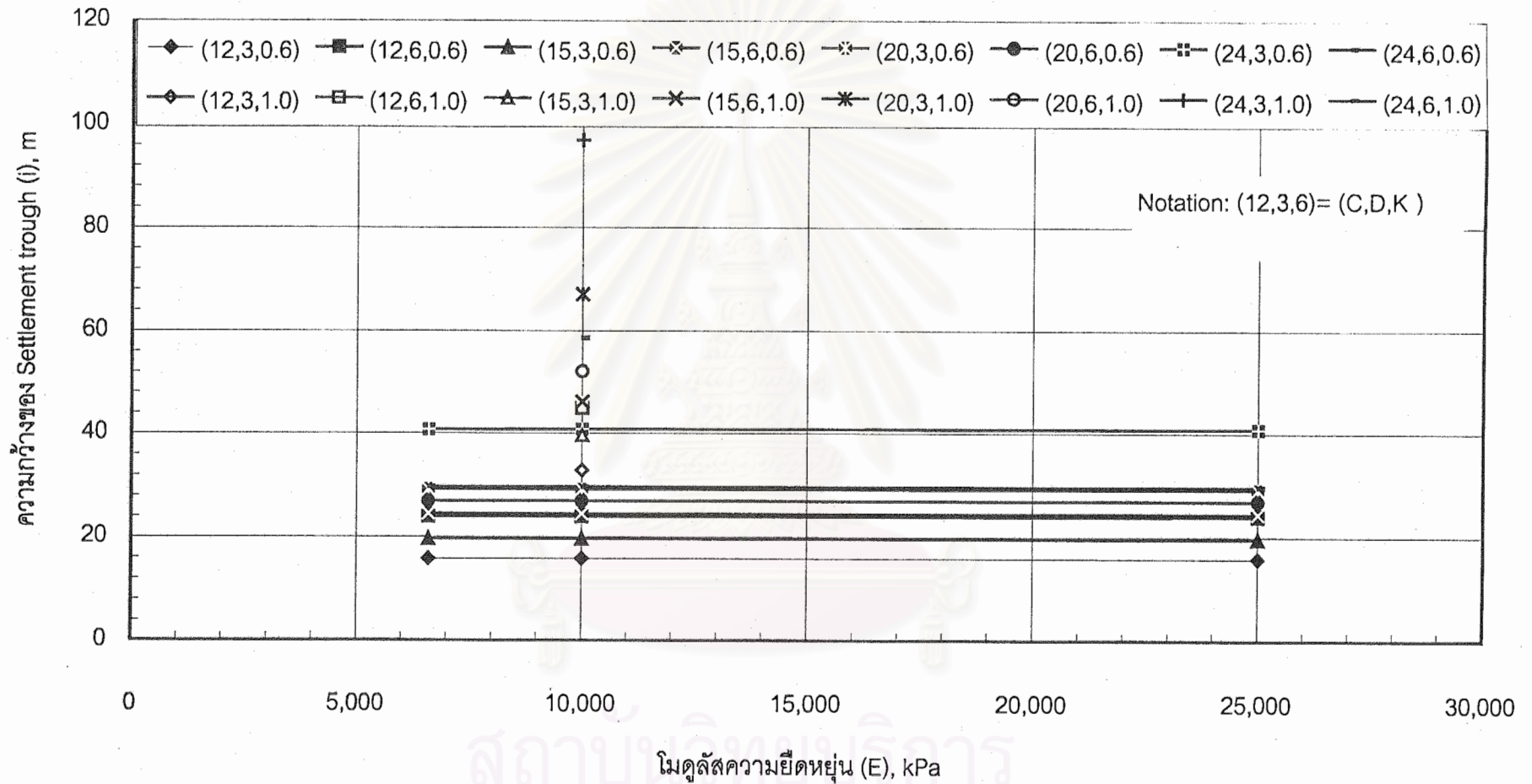
รูปที่ 4.1ค แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

ได้ โดยพบว่าค่า (i) ไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามค่าหน่วยแรงสูญหาย (SR) มากนักแต่กลับถูกระทบ โดยค่า E และ K ของค่าการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) โดยจะเห็นได้ว่า ผลกระทบของค่า E โดยจะเห็นได้ว่าผลกระทบของค่า E นั้นมีไม่มากนัก (รูปที่ 4.2ก) เมื่อเทียบกับผลกระทบของค่า K (รูปที่ 4.2ข) กล่าวคือในดินที่มีค่า K มีค่าน้อย ในกรณีที่ดินมีค่า K สูงขึ้น ความกว้างของ Settlement trough จะกว้างกว่า

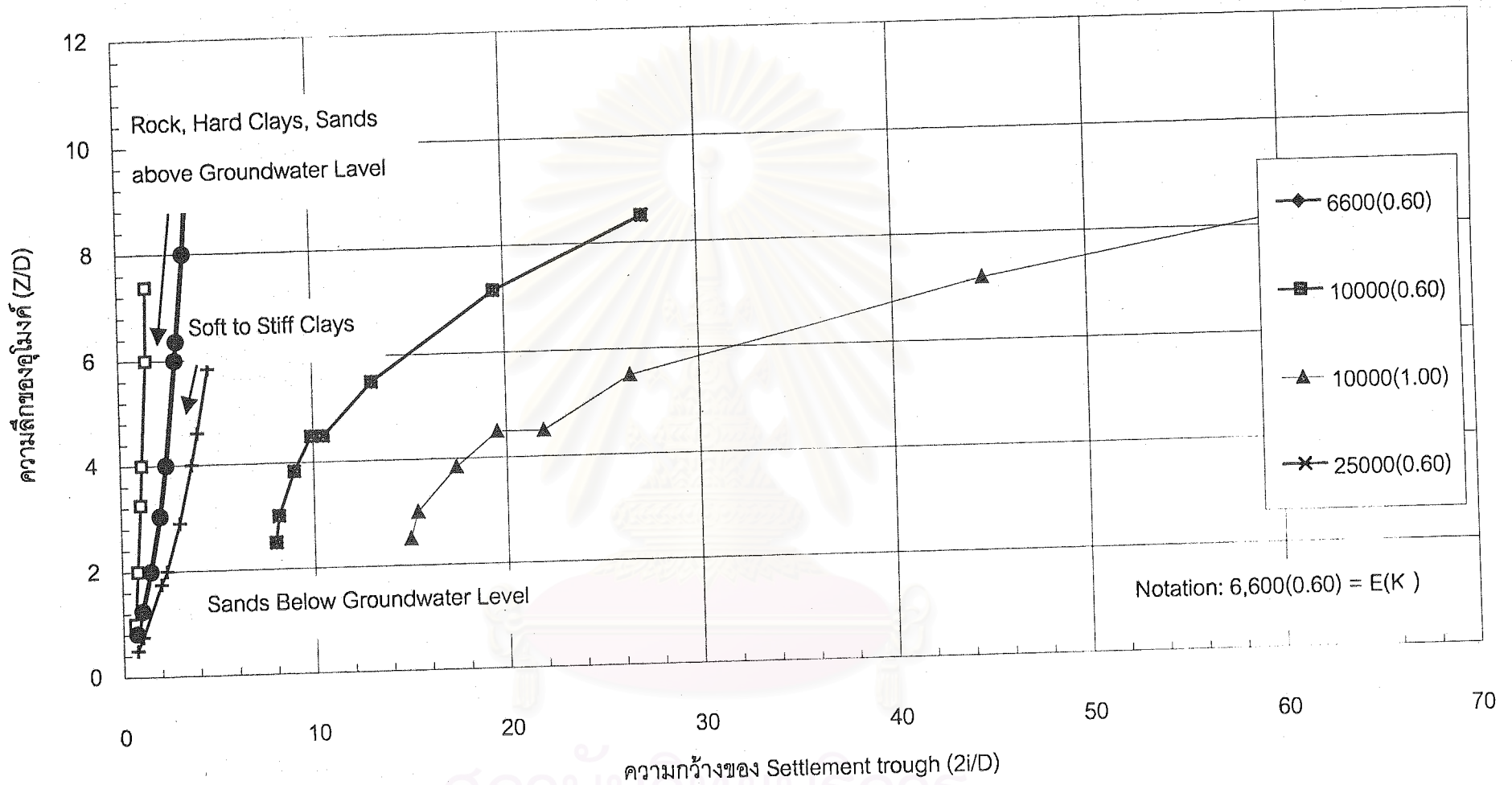
ปริมาณการสูญเสียมวลดิน ( $V_L$ ) สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 4.1 (ถึงแม้จะไม่ถูกต้องทั้งหมด ทั้งนี้เพราะการเกิด Dilation หรือ Contraction ของมวลดินไม่ได้ถูกนำมาพิจารณา) อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าปริมาณการสูญเสียมวลดิน ( $V_L$ ) มาเขียนกราฟร่วมกับค่าหน่วยแรงที่สูญหาย (SR) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากรูปจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ทำได้ค่อนข้างยาก โดยผลกระทบของขนาดของอุโมงค์ (D) และค่าสัดส่วน C/D นั้นให้ผลที่ซ้ำซ้อนกันทำให้แยกผลกระทบของทั้งสองปัจจัยออกได้ค่อนข้างยาก อย่างไรก็ตามจะสามารถสังเกตได้ว่าหากอุโมงค์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันแล้วอุโมงค์ที่มีสัดส่วน C/D สูงจะให้ค่าการสูญเสียมวลดินสูงกว่า และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 (ข), (ค), (ง) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในกรณีที่มีค่า E เท่ากับ 10,000 kPa ในทุกกรณีแต่ค่า K เปลี่ยนแปลงจาก 0.60, 1.00 และ 1.50 ตามลำดับแล้ว จะเห็นว่าเมื่อค่า K มีค่าสูงขึ้นหน่วยแรงด้านข้าง (ในสถานะเริ่มต้น)จะมีค่าสูงขึ้นประกอบกับพฤติกรรมของอุโมงค์ในส่วนของ Spring line นั้นจะมีพฤติกรรมที่เกิดการลดแรง (Unloading) โดยตรง ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้การทรุดตัวตามแนวดิ่งเพิ่มตามขึ้นไปด้วย

เพื่อให้การประเมินผลกระทบของปัจจัยภายนอกที่กล่าวมาแล้วนั้นได้อย่างถูกต้อง จึงทำการ Normalize ค่าปริมาณการสูญเสียมวลดินด้วยสัดส่วน C/D ดังแสดงในรูปที่ 4.4 หลังจากการ Normalize ด้วยสัดส่วน C/D แล้วจะเห็นว่า กราฟจากกรณีของอุโมงค์ที่มีขนาดเดียวกัน (D เท่ากัน) เริ่มจับกลุ่มเข้าด้วยกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุโมงค์ที่มีขนาดเล็ก (D เล็ก) เส้นกราฟเหล่านี้ที่มีค่า C/D ต่างๆ กันเกือบจะซ้อนทับกัน ในขณะที่เมื่ออุโมงค์มีขนาดใหญ่ขึ้นเส้นกราฟจะกระจายออก โดยที่อุโมงค์ที่มีค่า C/D มากกว่าจะให้ค่าความลาดชันจากเส้นกราฟมากกว่า

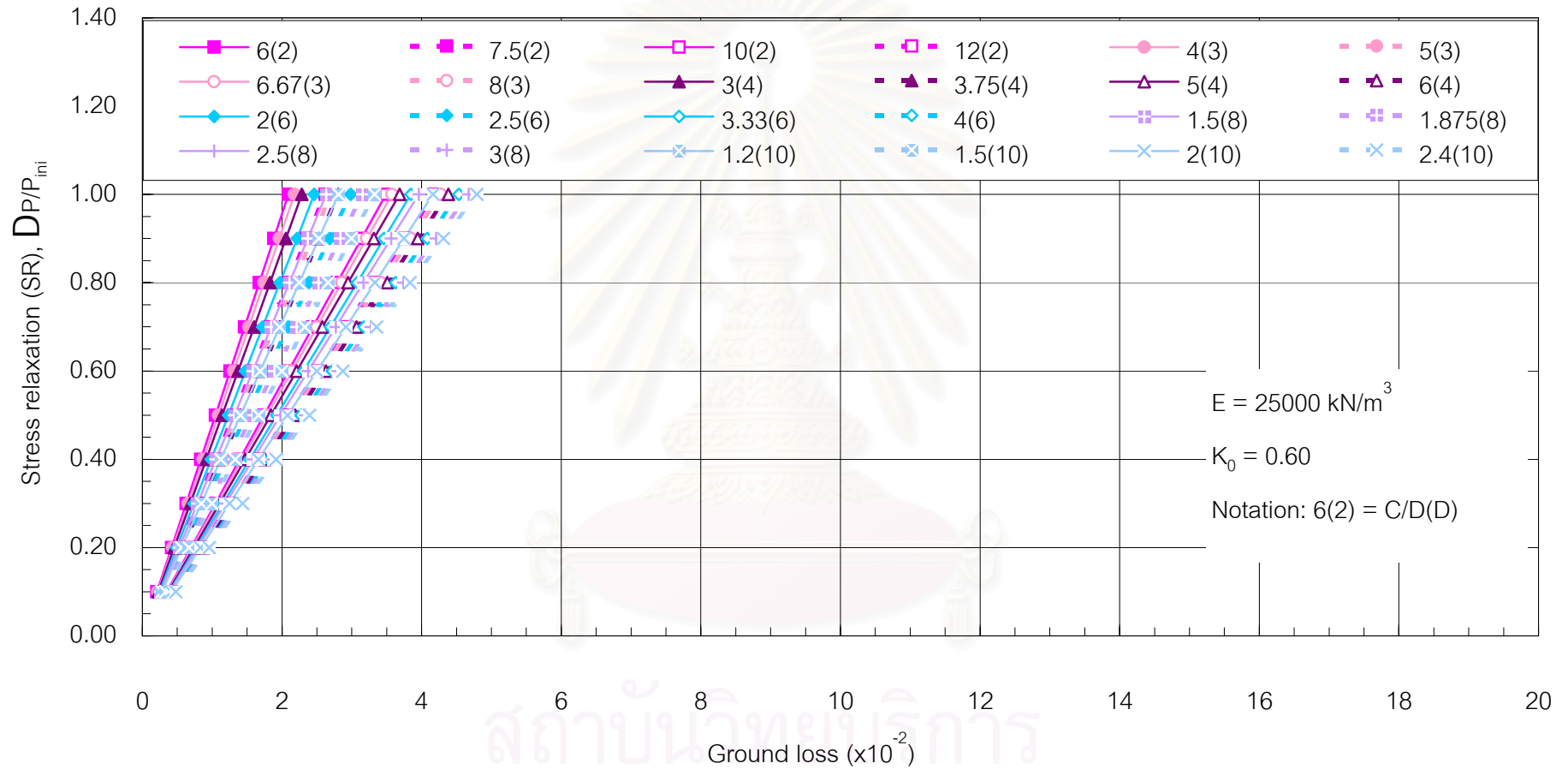
อนึ่งการที่เส้นกราฟรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear relationship) นั้นเป็นเพราะแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณเป็นแบบจำลองประเภท Isotropic linear elastic นั้นเอง ลักษณะการจับกลุ่มของเส้นกราฟ เมื่อมีการ Normalize ค่าการสูญเสียมวลดินด้วยค่าสัดส่วน C/D นั้นพบได้ในทุกกรณีของการวิเคราะห์



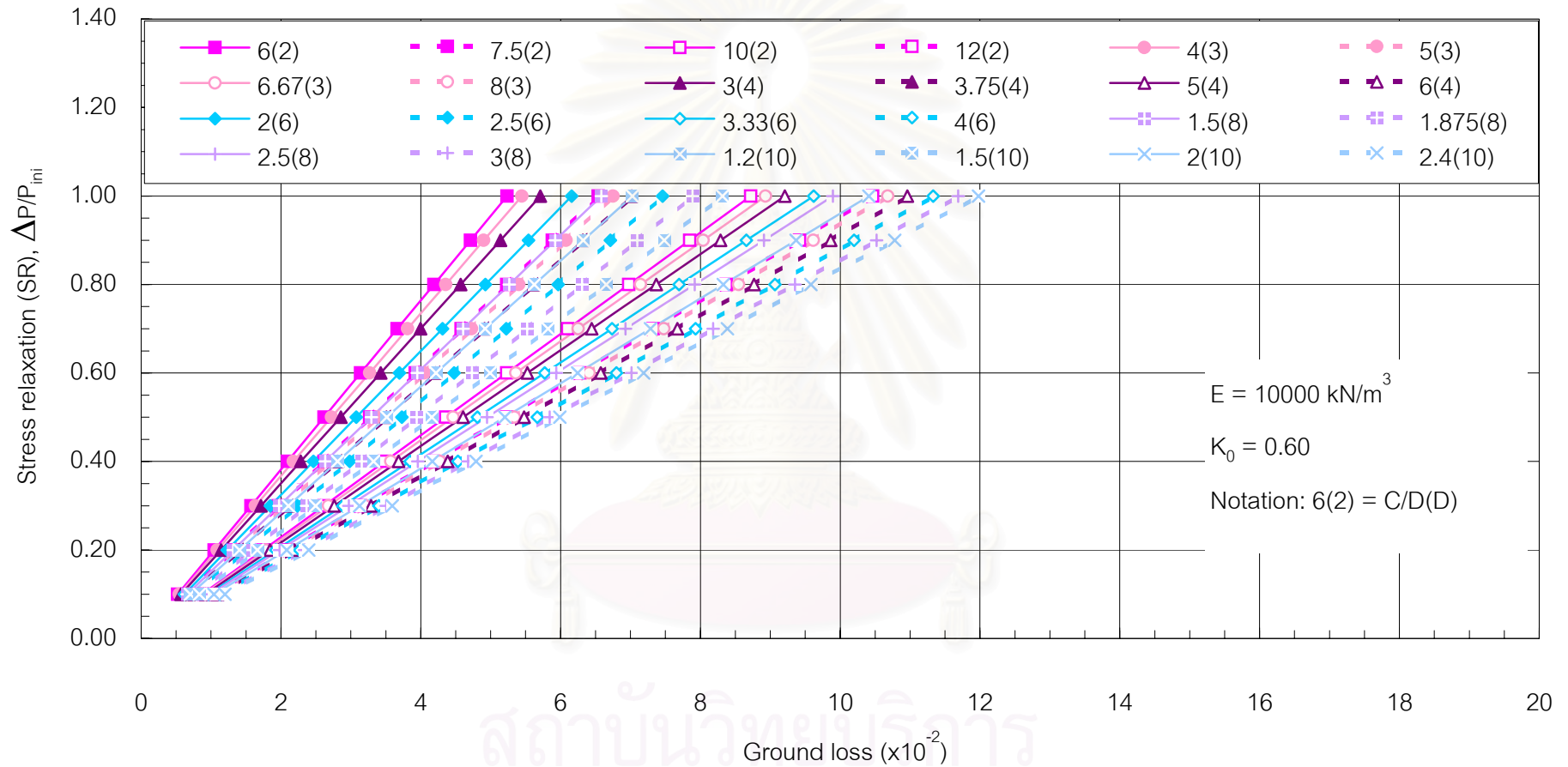
รูปที่ 4.2ก แสดงค่าความกว้างของ Settlement trough (i)



รูปที่ 4.2x แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของ Settlement trough (2i/D) กับความลึกของอุโมงค์ (Z/D)

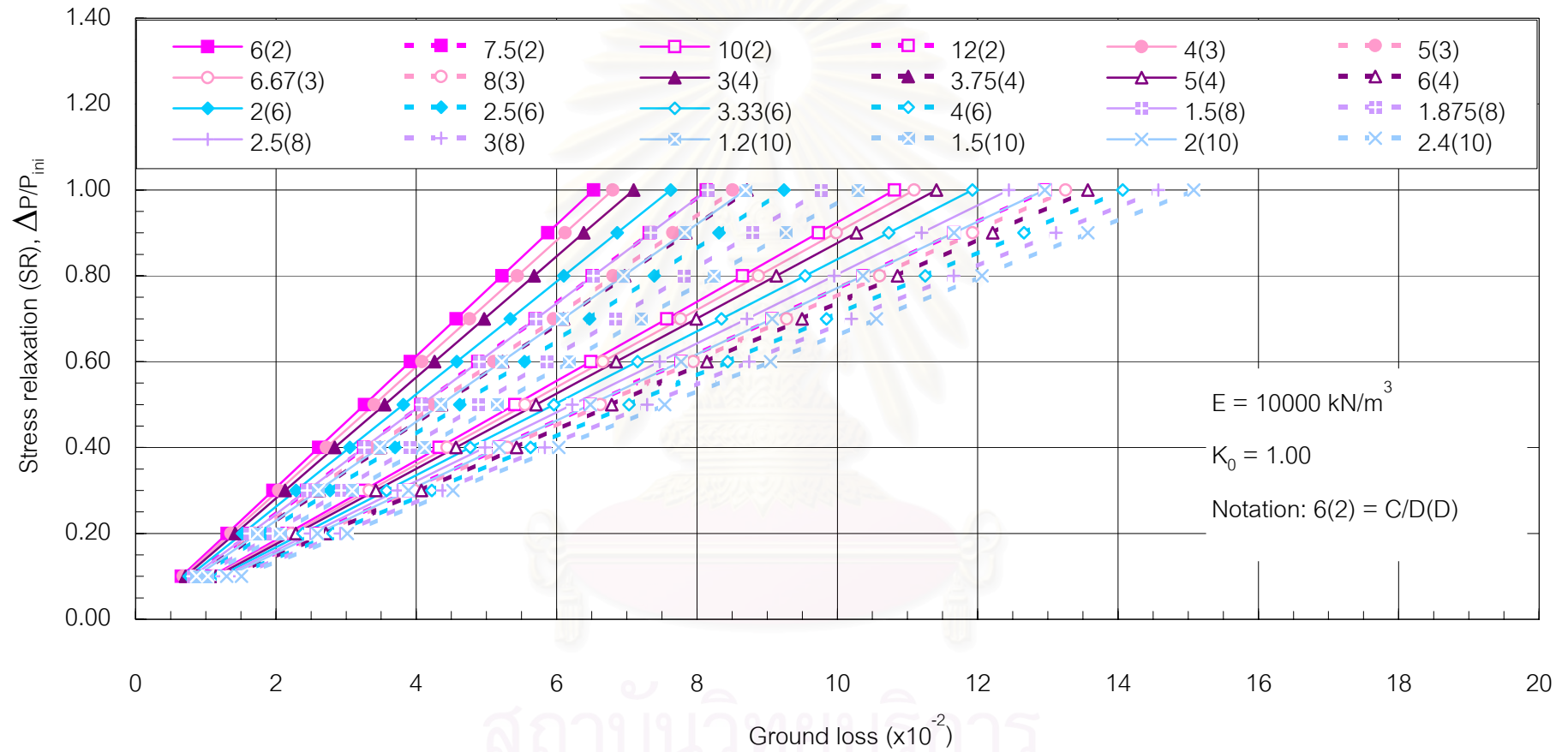


รูปที่ 4.3ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ )

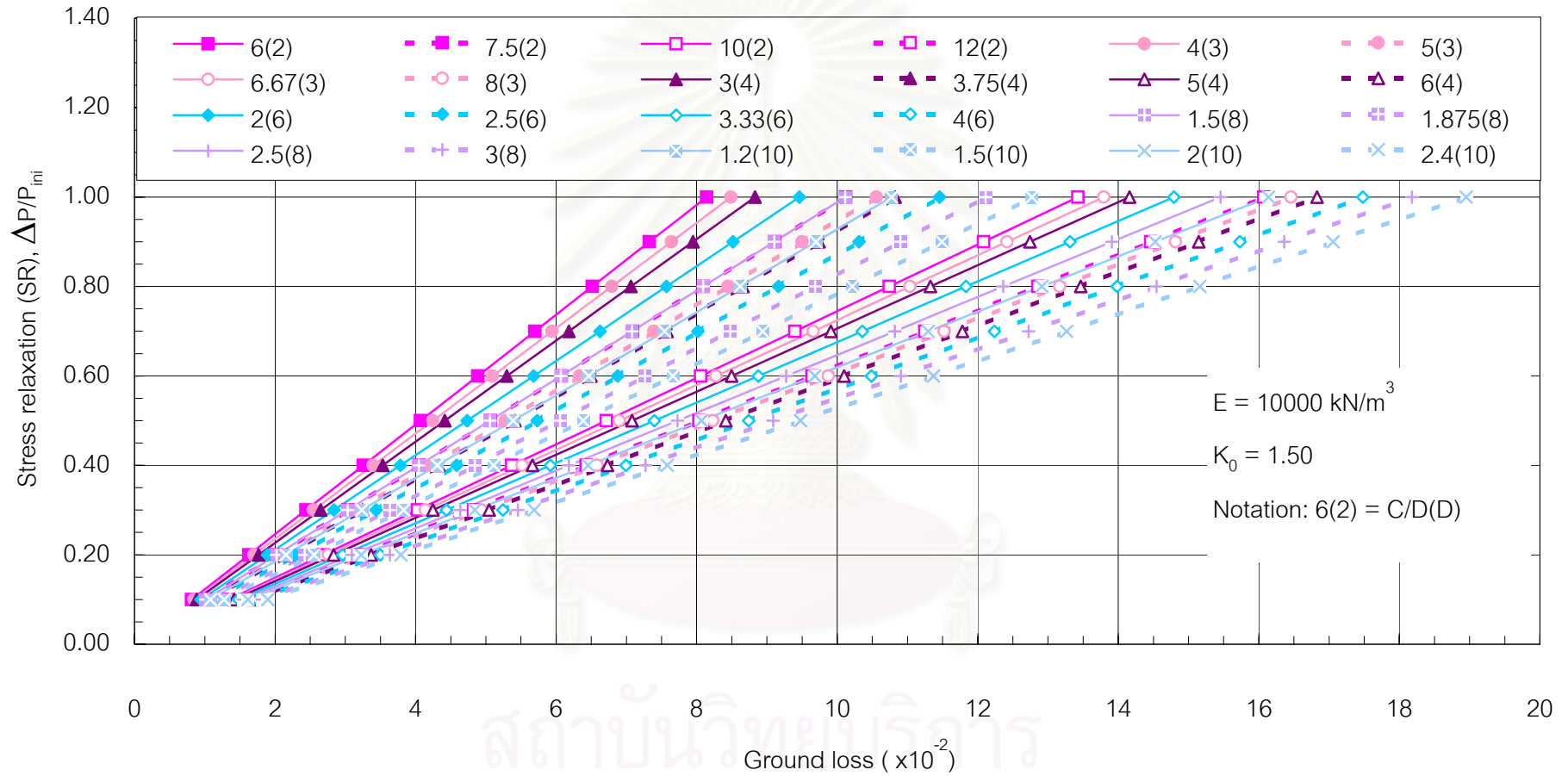


รูปที่ 4.3 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ )

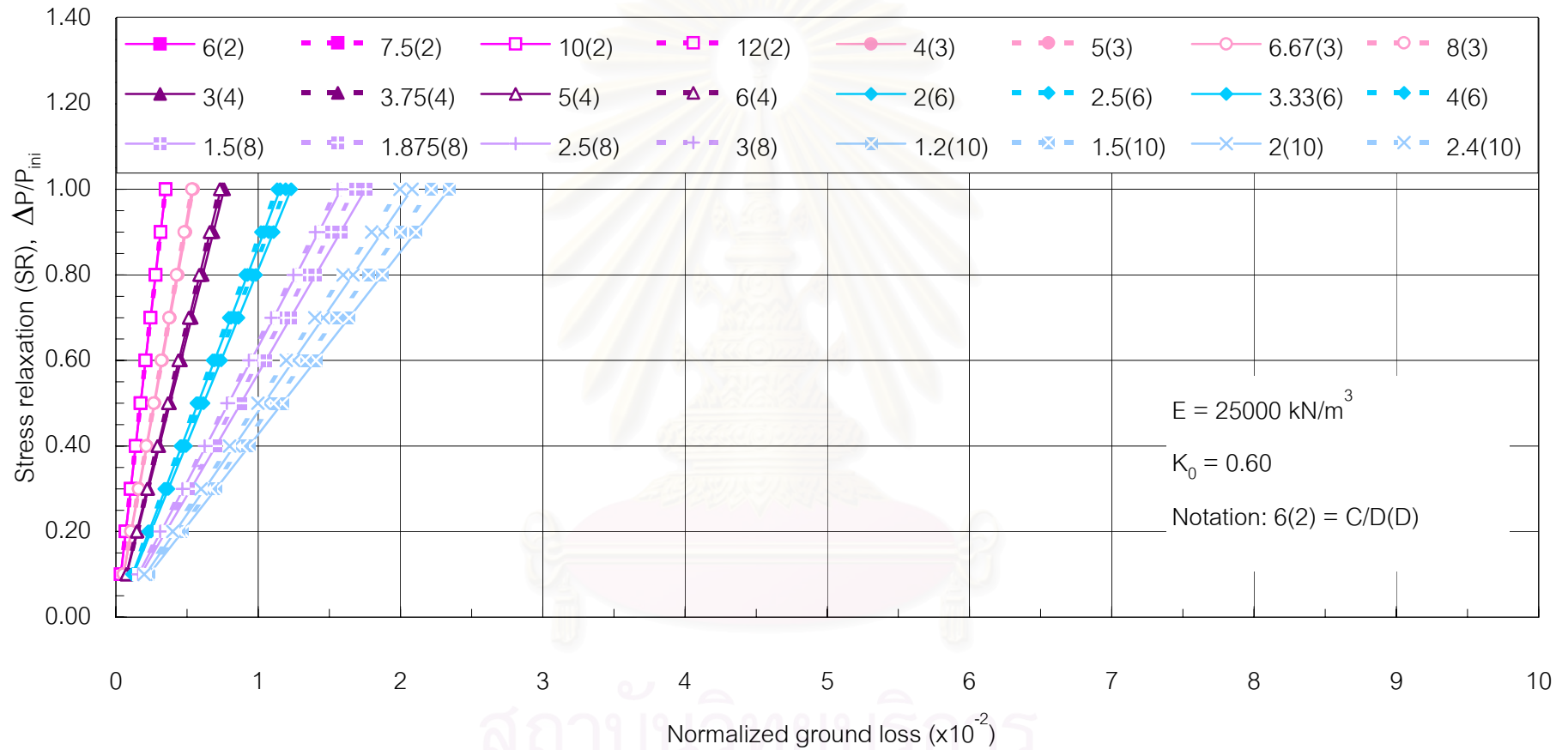




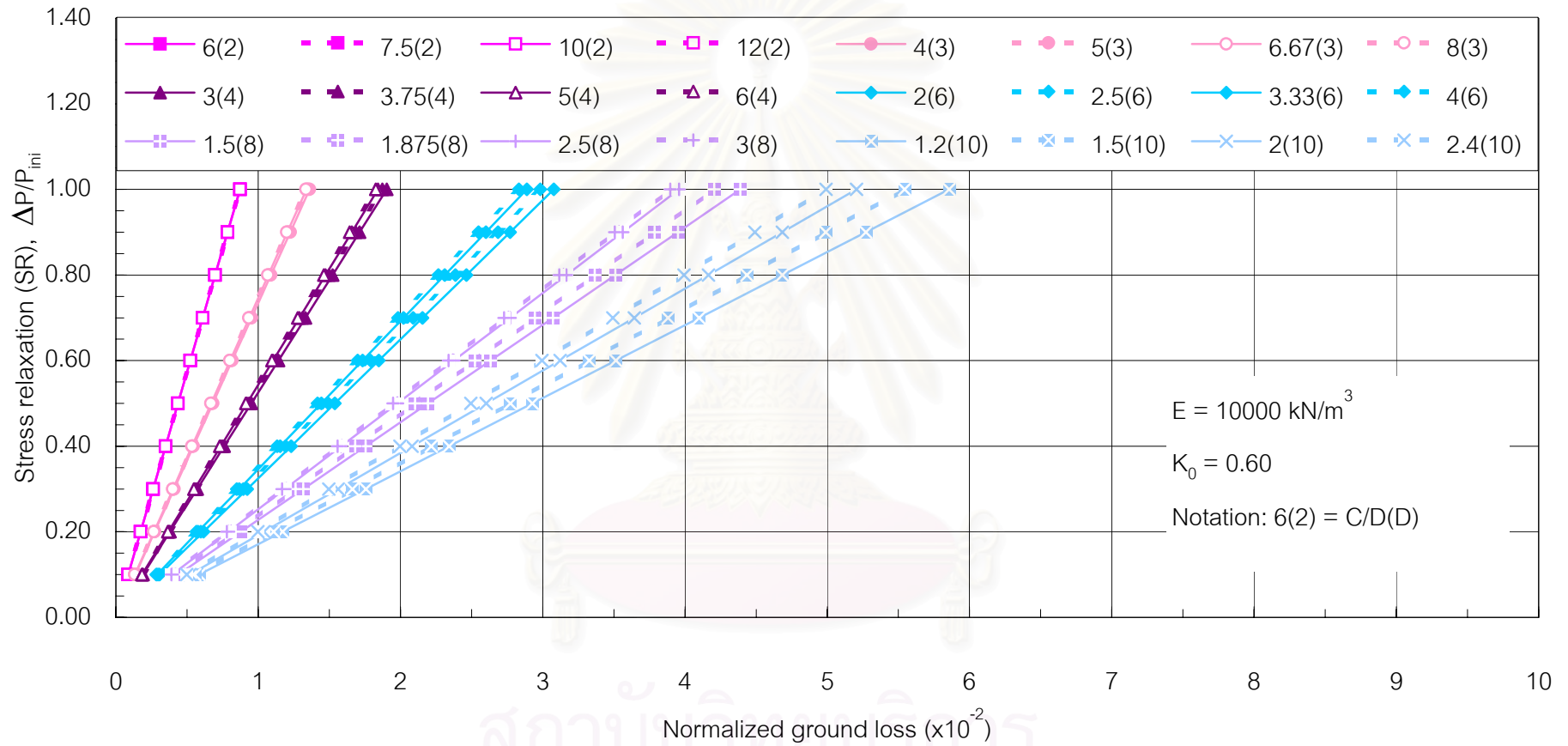
รูปที่ 4.3ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ )



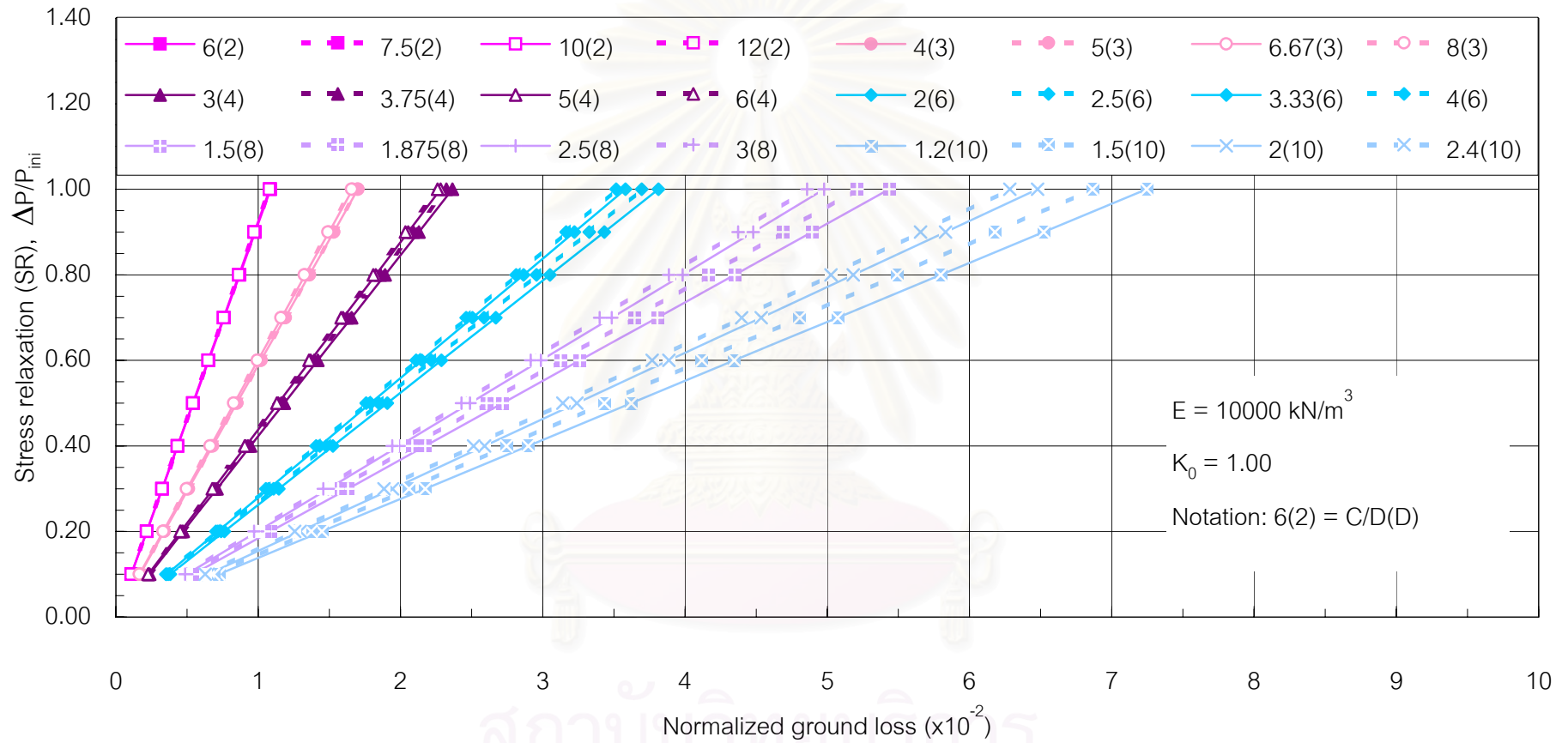
รูปที่ 4.3ง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ )



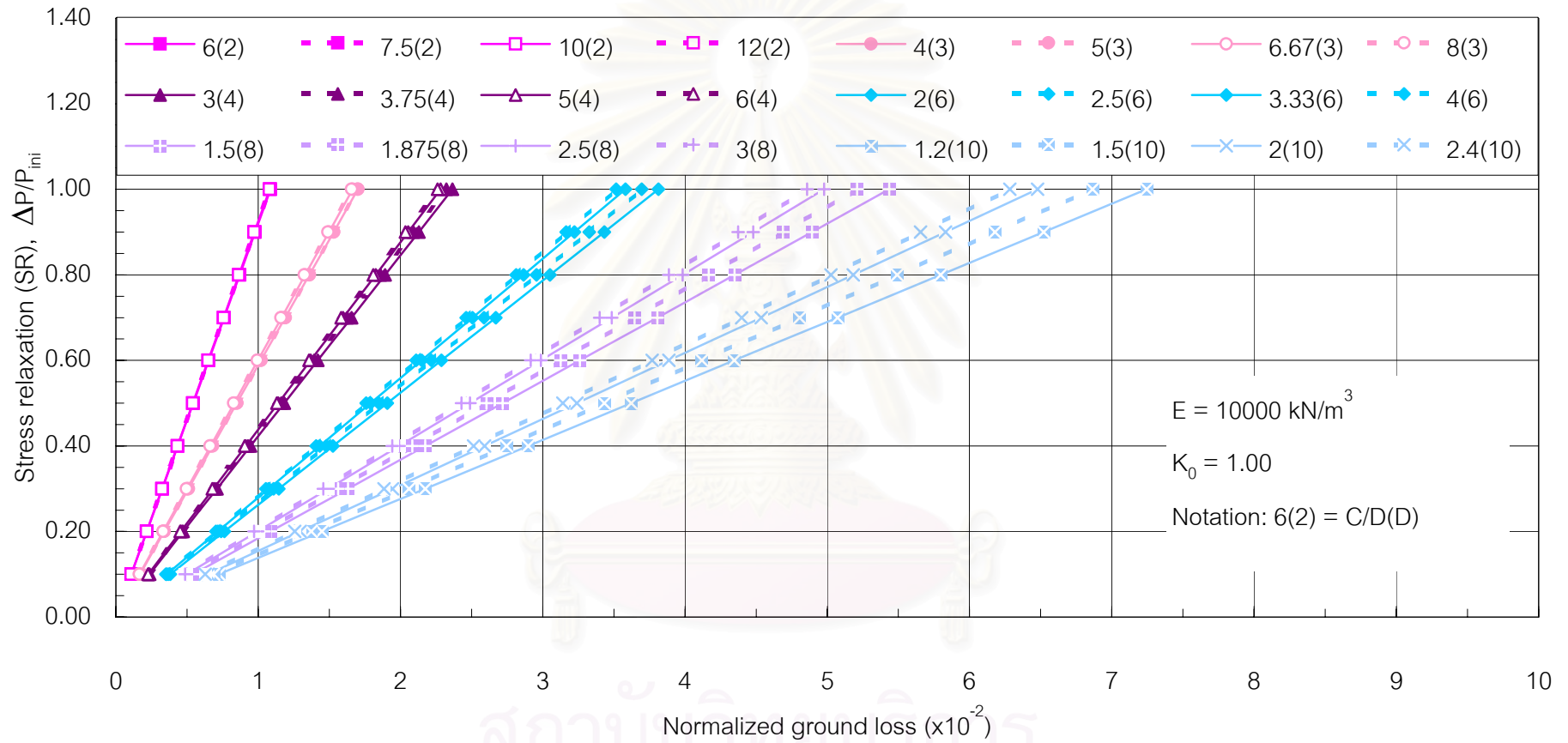
รูปที่ 4.4ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสียหาย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ )



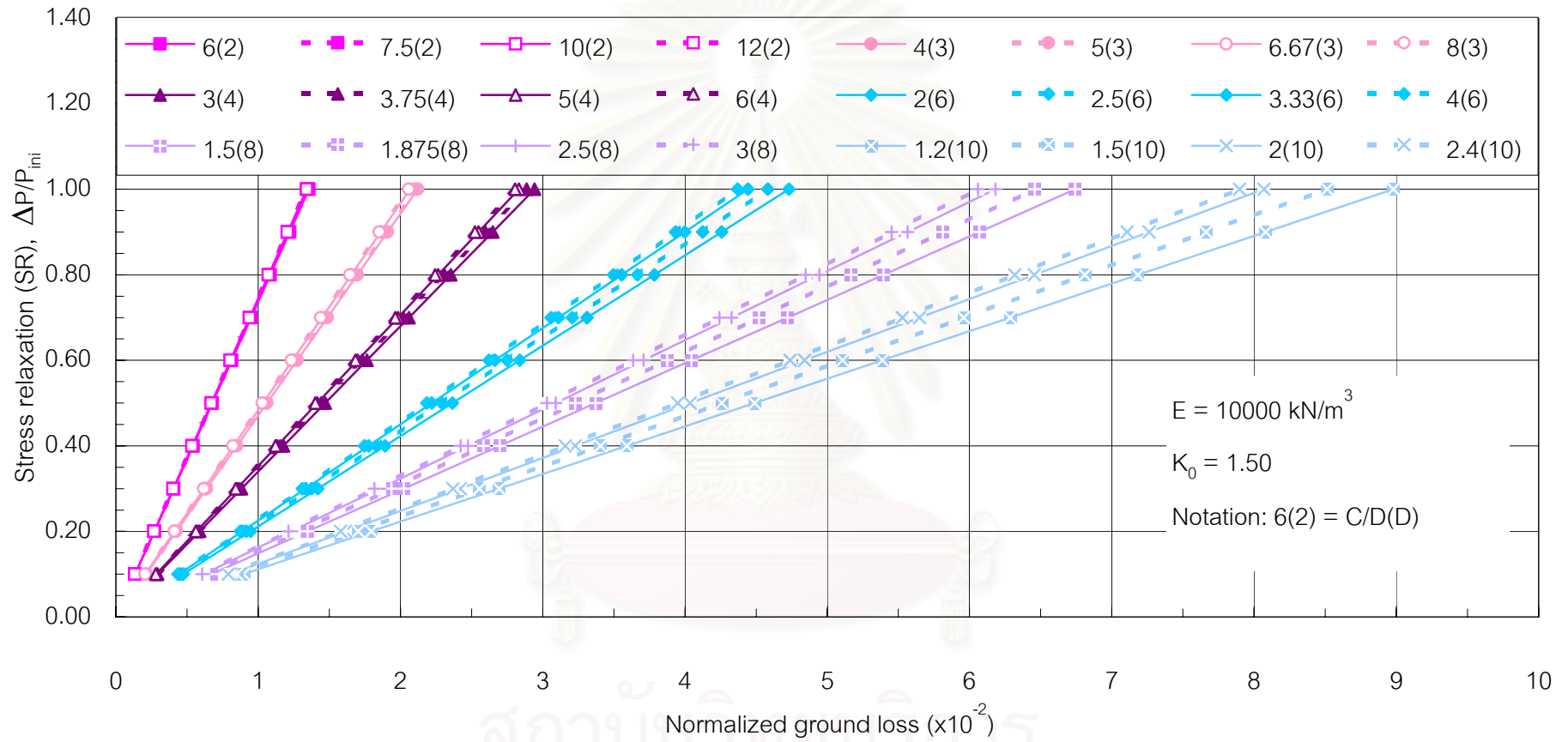
รูปที่ 4.4x กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสียหาย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ )



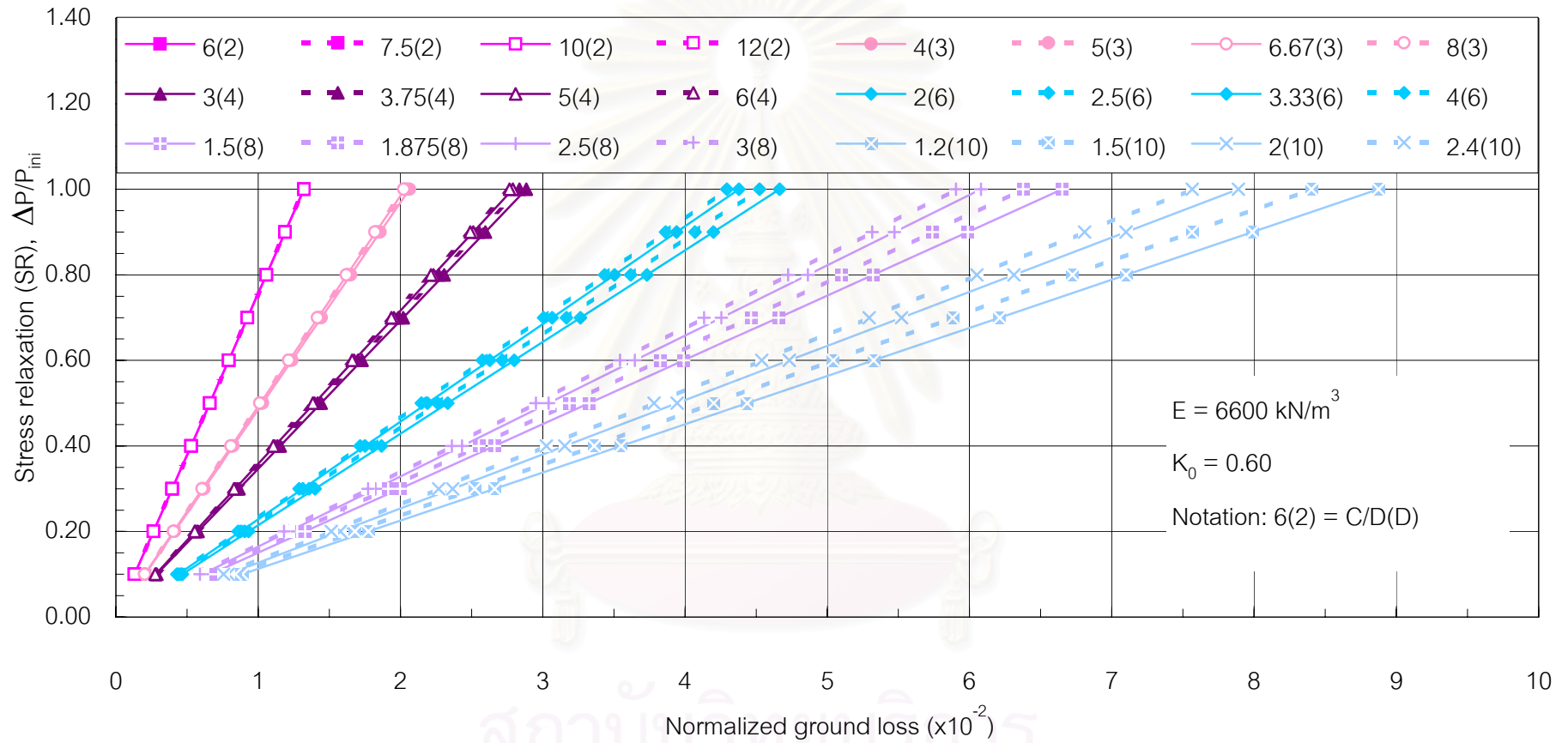
รูปที่ 4.4ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสียหาย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ )



รูปที่ 4.4ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสียหาย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ )



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ )



รูปที่ 4.4จ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสียหาย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ )



### 4.3 Relaxation factor

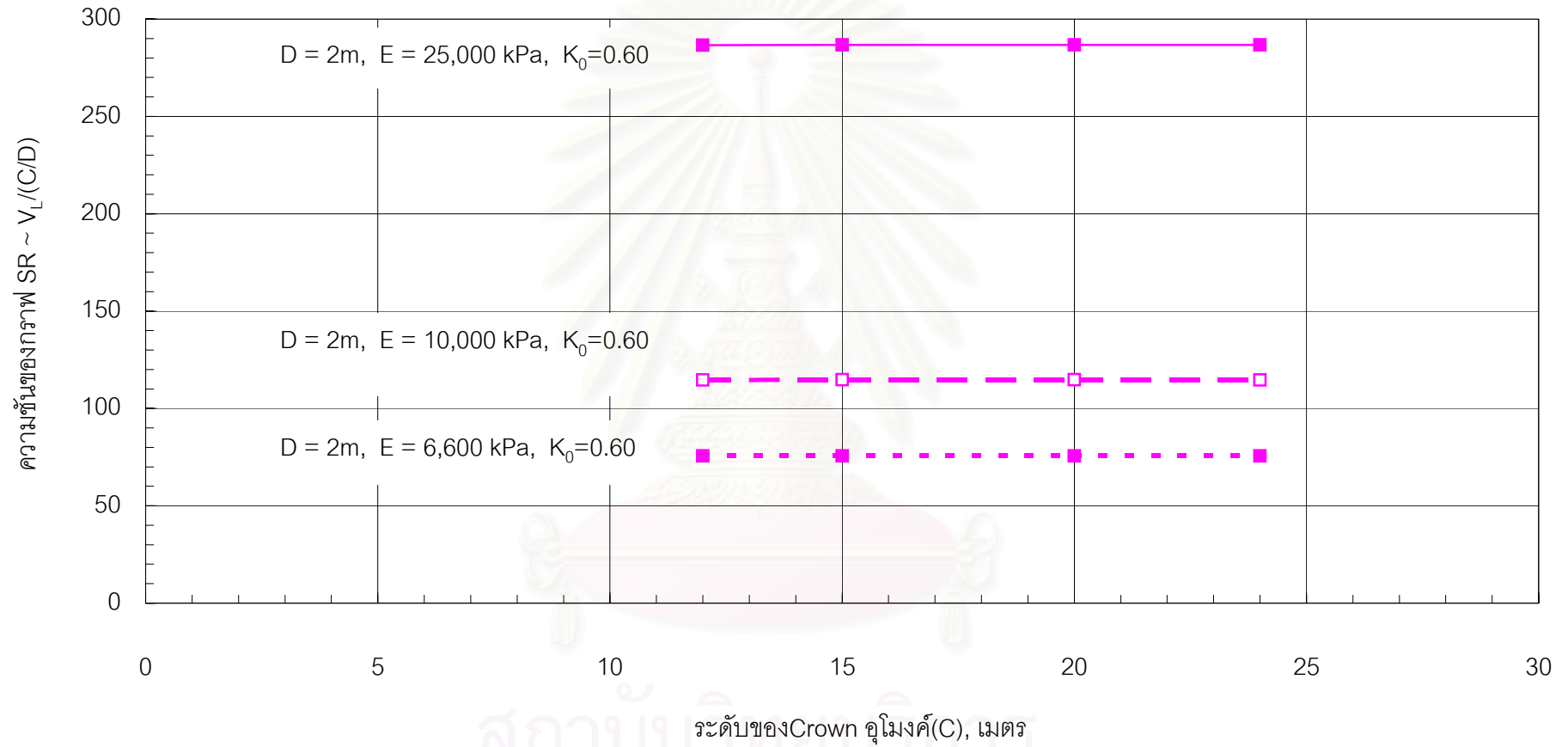
รูปที่ 4.5 แสดงถึงความชันของเส้นกราฟในรูปที่ 4.4 ที่ค่า E ต่างๆ โดยจะเห็นได้ว่า อุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า E มากกว่าจะให้ค่าความลาดชันของเส้นกราฟมากกว่า กล่าวคืออุโมงค์ที่อยู่ในดินที่แข็งกว่าจะมีปริมาณการสูญเสียมวลดินน้อยกว่า โดยอัตราส่วนระหว่างความชันของเส้นกราฟ  $SR \sim V_L/(C/D)$  กับค่า E จะเรียกว่า “Relaxation factor, RF” ซึ่งในอุโมงค์ขนาดหนึ่งจะมีค่า RF เพียงค่าเดียวดังแสดงในรูปที่ 4.6 แต่เมื่อนำเอารูปที่ 4.6 (ก), (ข) และ (ค) มาเปรียบเทียบกันพบว่า อุโมงค์ที่มีขนาดเดียวกันแต่อยู่ในดินที่มีค่า K ต่างกันก็จะมีค่า RF ไม่เท่ากัน โดยอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า K สูงกว่าจะให้ค่า RF ต่ำกว่า ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า RF, K และ D โดยความสัมพันธ์ของค่าทั้งสามค่านี้สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการยกกำลัง ได้ดังสมการที่ (4.1)

$$RF = \frac{K}{D^{1.13}} \quad (4.1)$$

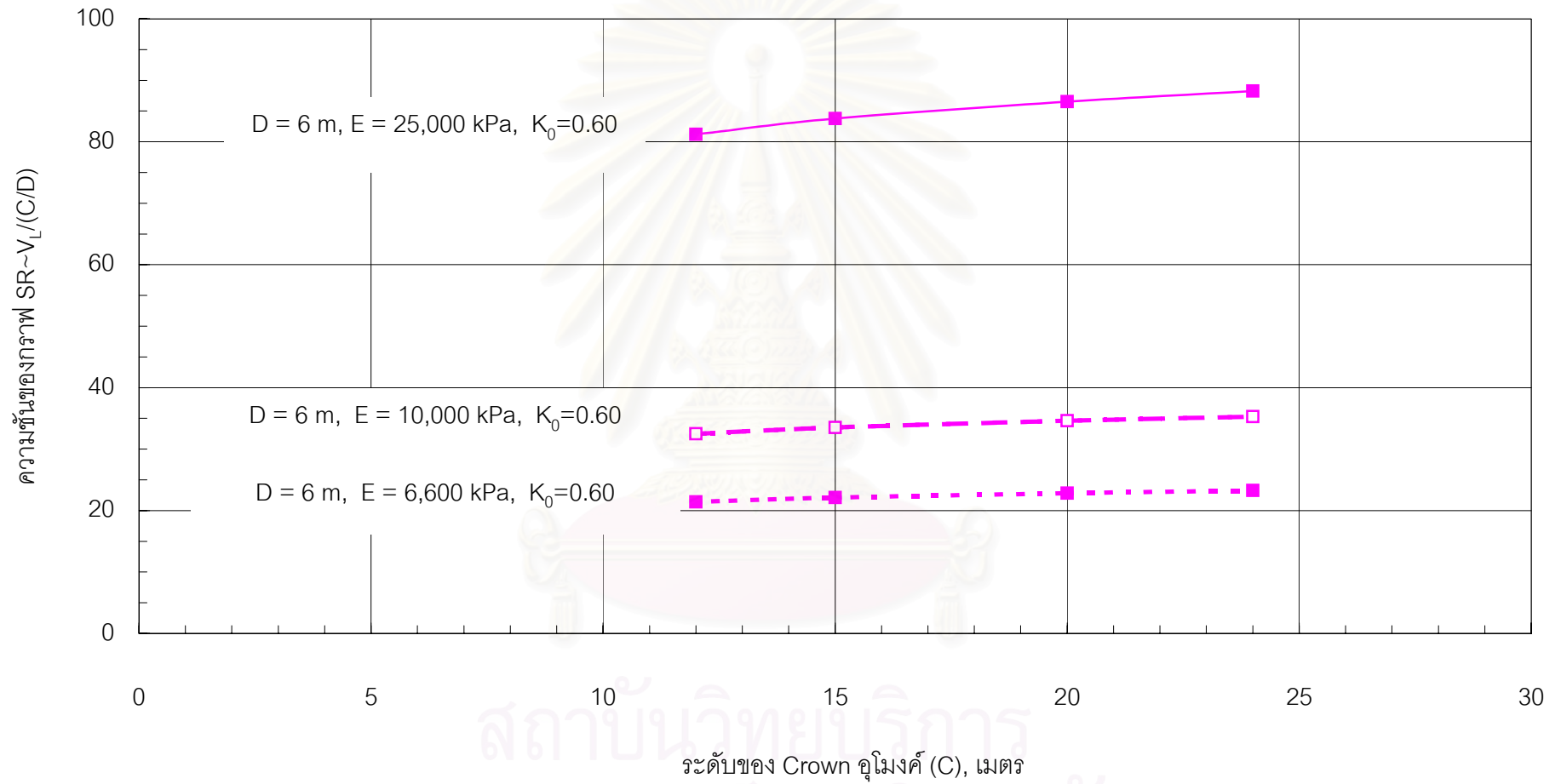
เมื่อ RF = Relaxation factor,  $m^2/kN$   
 D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์  
 K เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับค่า K ของดิน

### 4.4 Moment Distribution

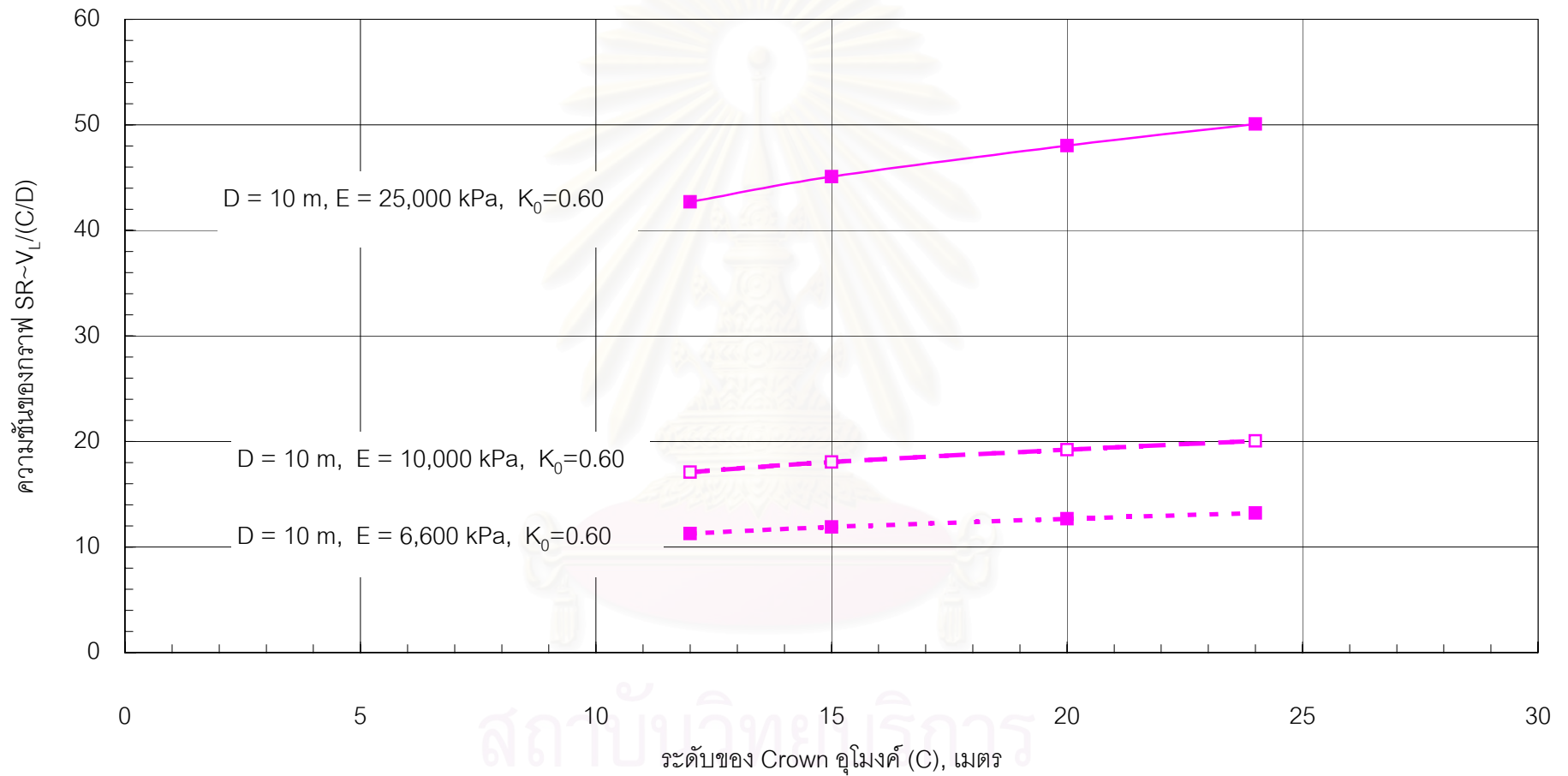
รูปที่ 4.8 แสดงถึงค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของตาดอุโมงค์ที่ค่า K ต่างๆ ซึ่งค่า  $SR = 0$  โดยจะเห็นว่าอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า  $K = 1.50$  โมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆของอุโมงค์เป็นโมเมนต์บวกทั้งหมด โดยโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบริเวณ Spring-line ของอุโมงค์เป็นโมเมนต์สูงสุด ( $IM_{max}$ ) เช่นเดียวกับกับอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า  $K = 0.60$  แต่โมเมนต์ที่เกิดขึ้นบริเวณ Spring-line ของอุโมงค์ ซึ่งเป็นค่าโมเมนต์สูงสุดนั้นกลับเป็นโมเมนต์ลบ ส่วนที่บริเวณ Crown และ Invert ของอุโมงค์จะเป็นโมเมนต์บวก ส่วนอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า  $K = 1.00$  นั้นโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆของอุโมงค์เป็นโมเมนต์บวกทั้งหมด แต่โมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของอุโมงค์แต่ละชิ้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันจะไม่แตกต่างกันมากเหมือนกับอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า  $K = 1.50$  และ  $0.60$  และมีตำแหน่งของโมเมนต์สูงสุดไม่แน่นอน ซึ่งค่าโมเมนต์สูงสุดของอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า  $K = 1.00$  มีค่าน้อยที่สุดและค่าโมเมนต์สูงสุดของอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า  $K = 1.50$  มีค่าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อนำค่าโมเมนต์สูงสุดมาเขียนกราฟร่วมกับค่า C/D ดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าอุโมงค์ที่มี



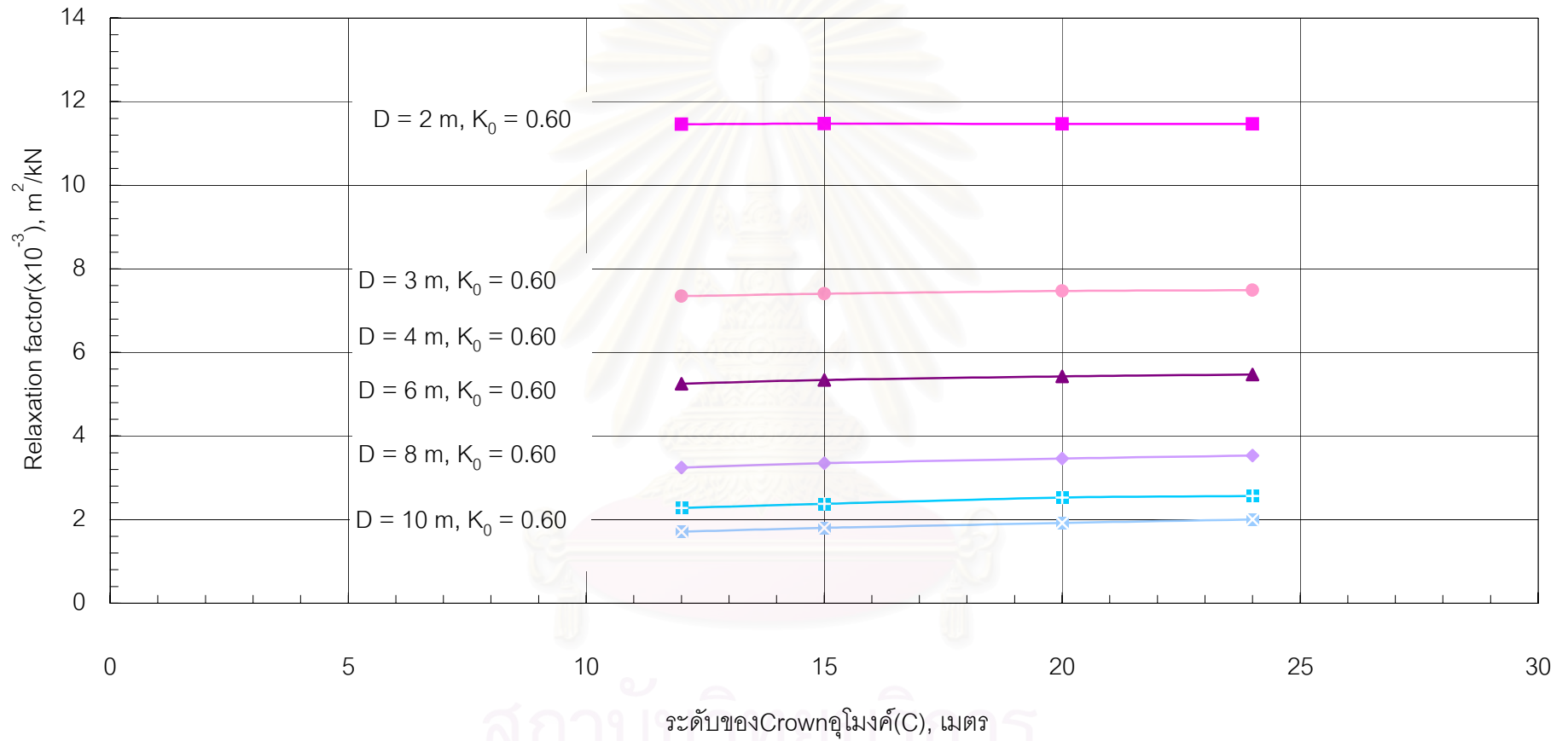
รูปที่ 4.5ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของกราฟ  $SR \sim V_L/(C/D)$  กับระดับของ Crown อุโมงค์(C)



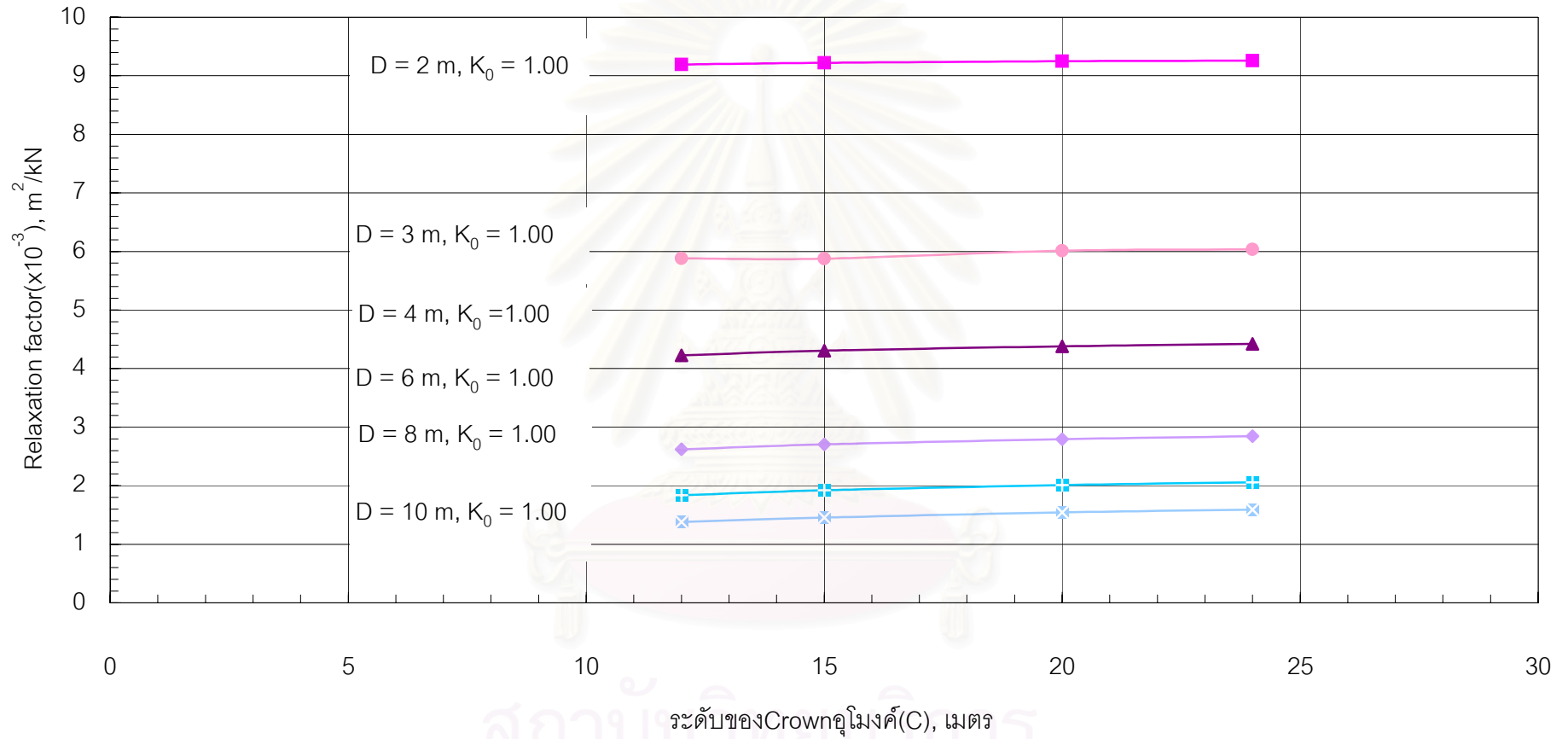
รูปที่ 4.5x กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของกราฟ  $SR \sim V_L/(C/D)$  กับระดับของ Crown อุโมงค์(C)



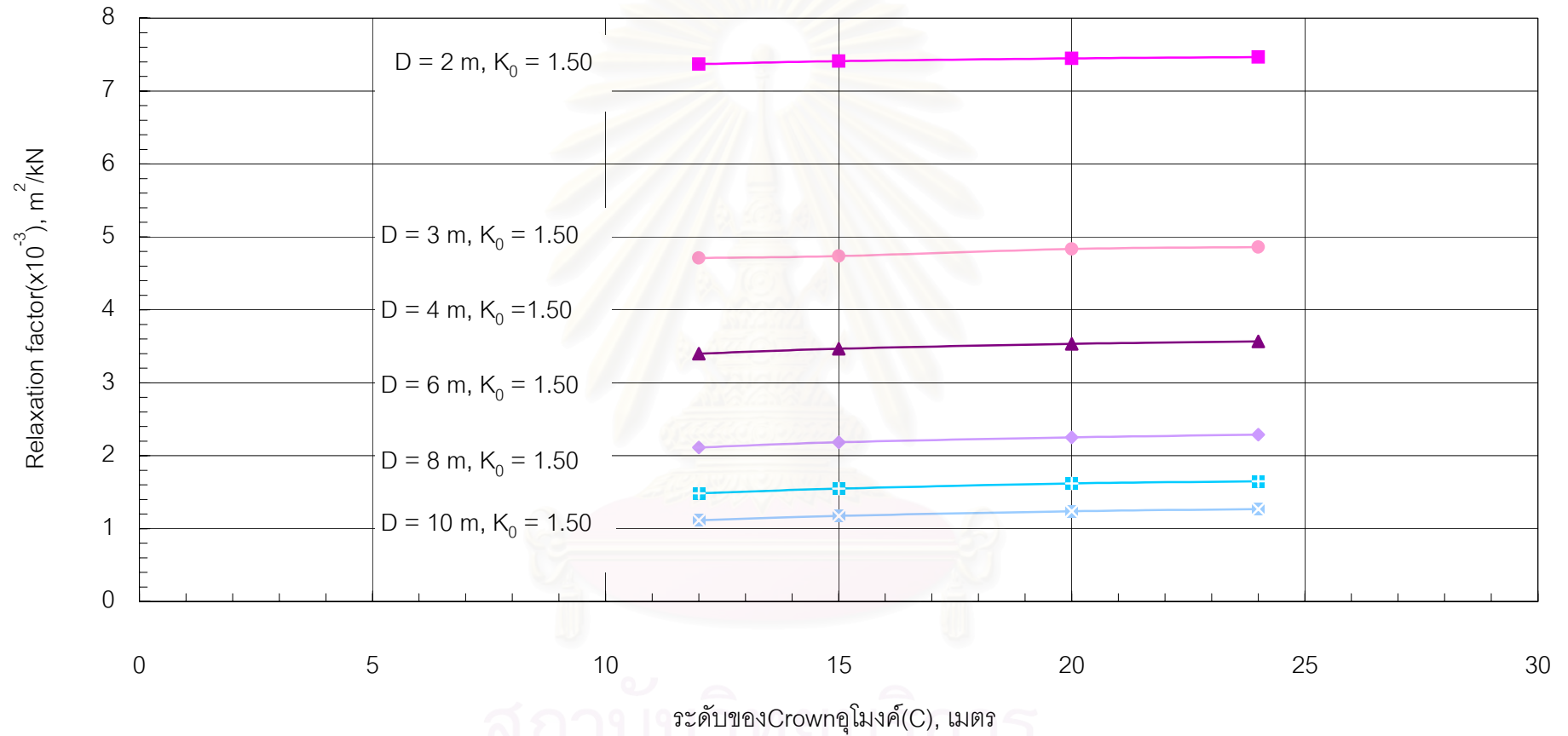
รูปที่ 4.5ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของกราฟ  $SR \sim V_L/(C/D)$  กับระดับของ Crown อุโมงค์(C)



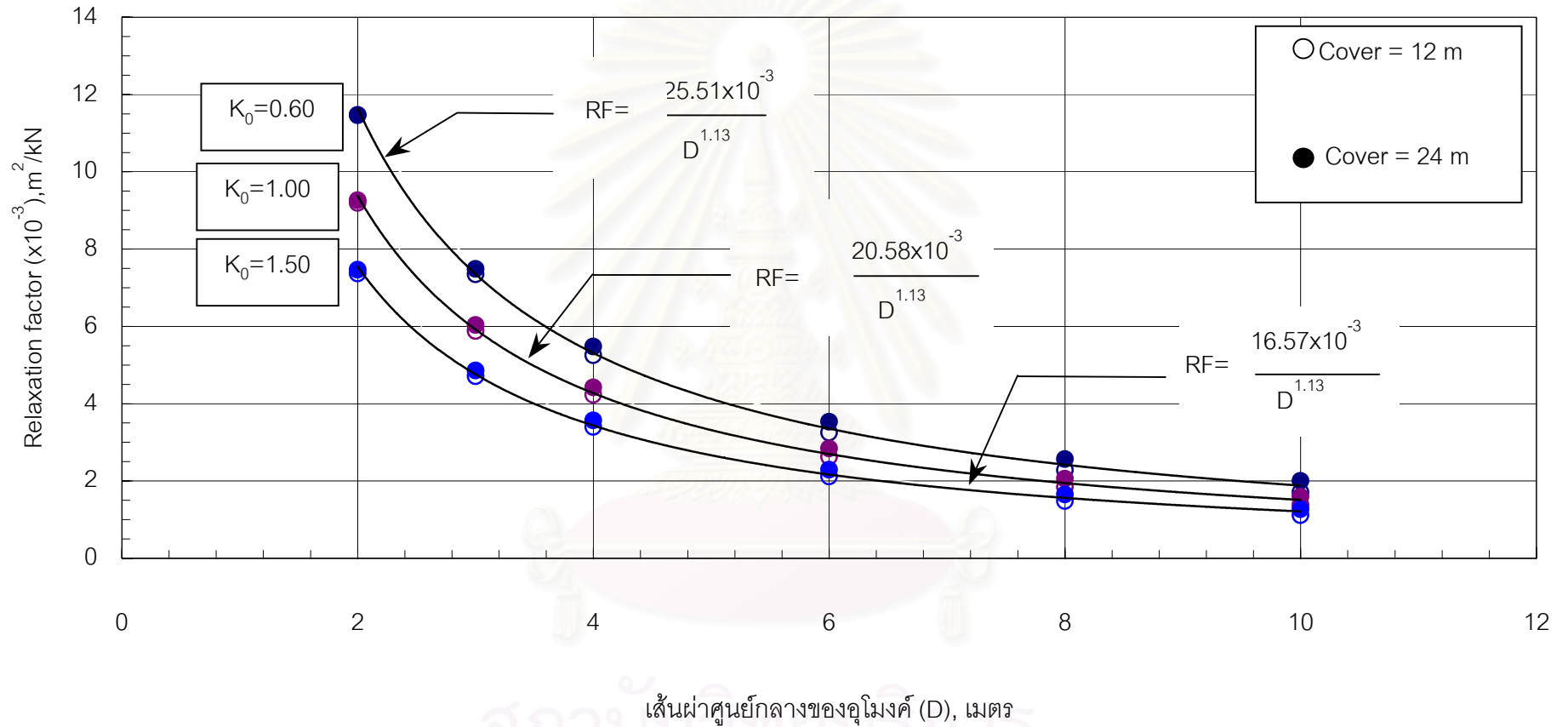
รูปที่ 4.6ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation factor(RF) กับระดับของ Crown คูโมงค์ (C)



รูปที่ 4.6x กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation factor (RF) กับระดับของ Crown อุโมงค์ (C)

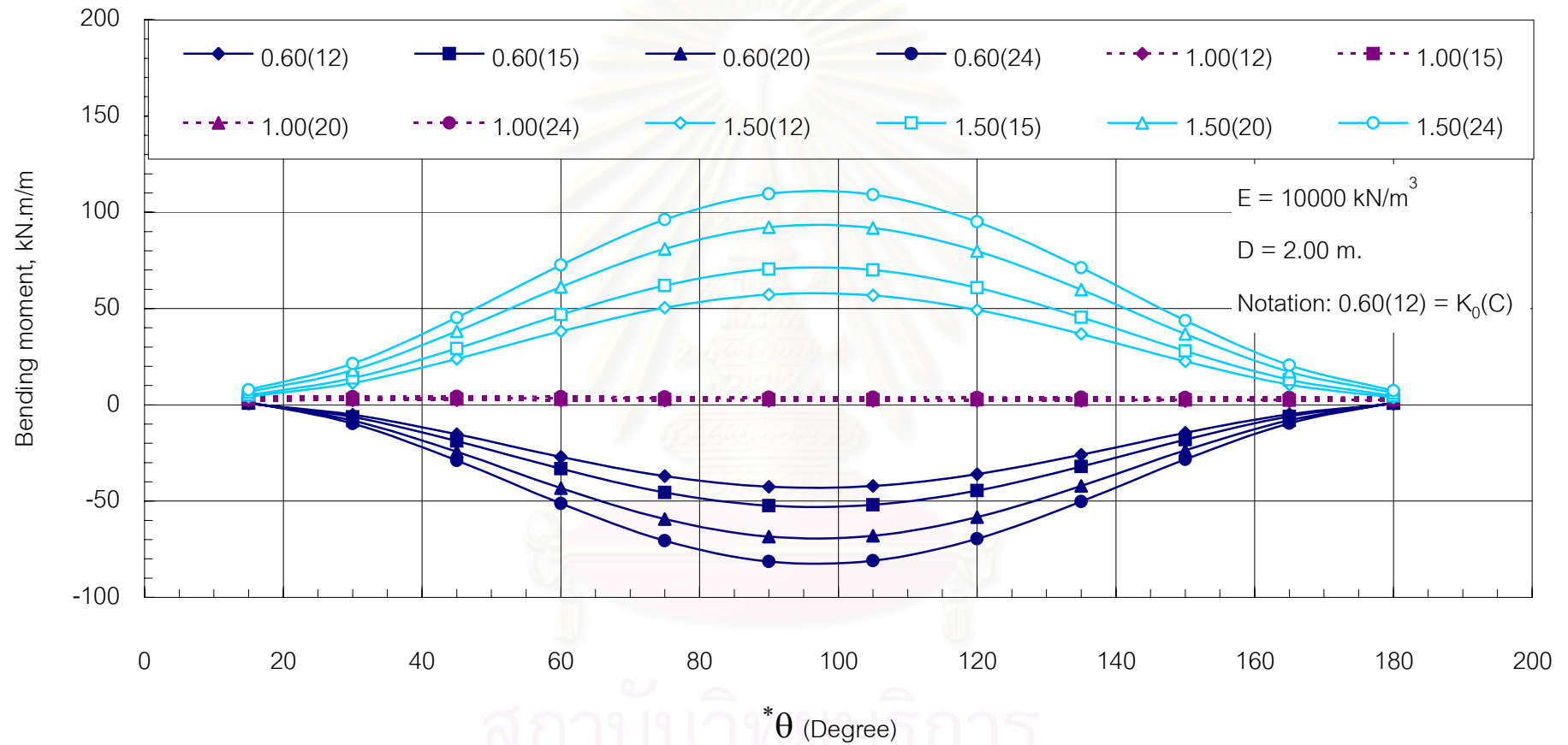


รูปที่ 4.6ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation factor(RF) กับระดับของ Crown อุโมงค์ (C)

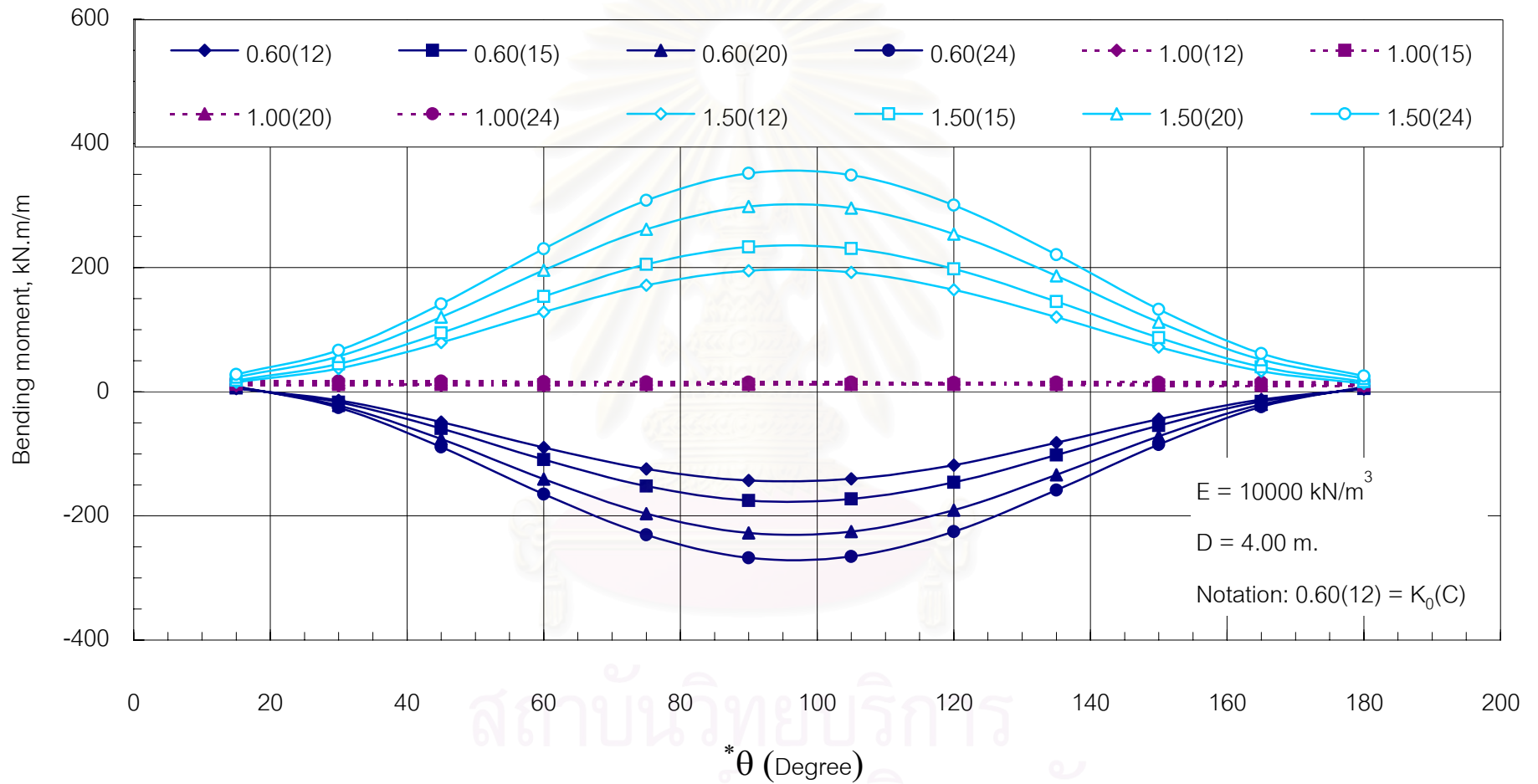


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation factor (RF) กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์(D)

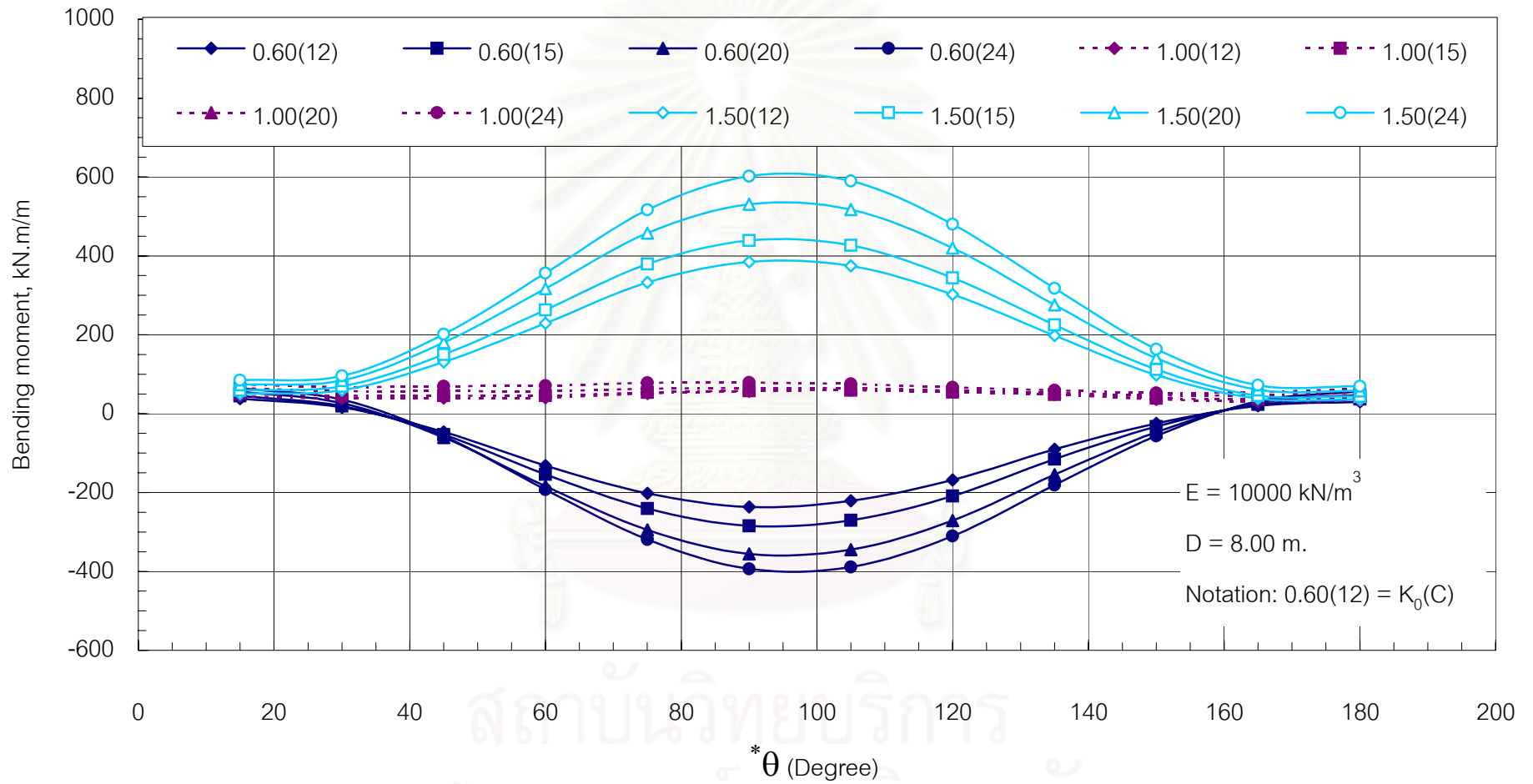




รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในส่วนของอุโมงค์ต่างๆ

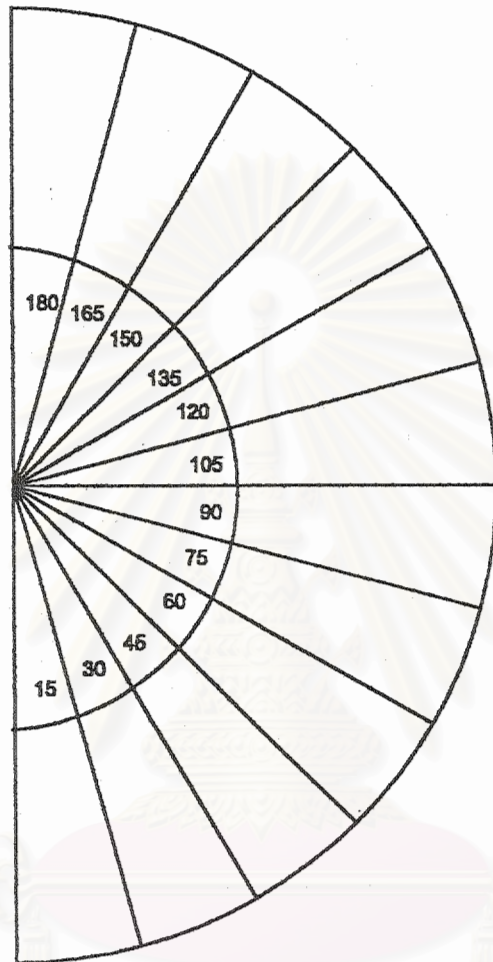


รูปที่ 4.8x กราฟแสดงค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนของอุโมงค์ต่างๆ



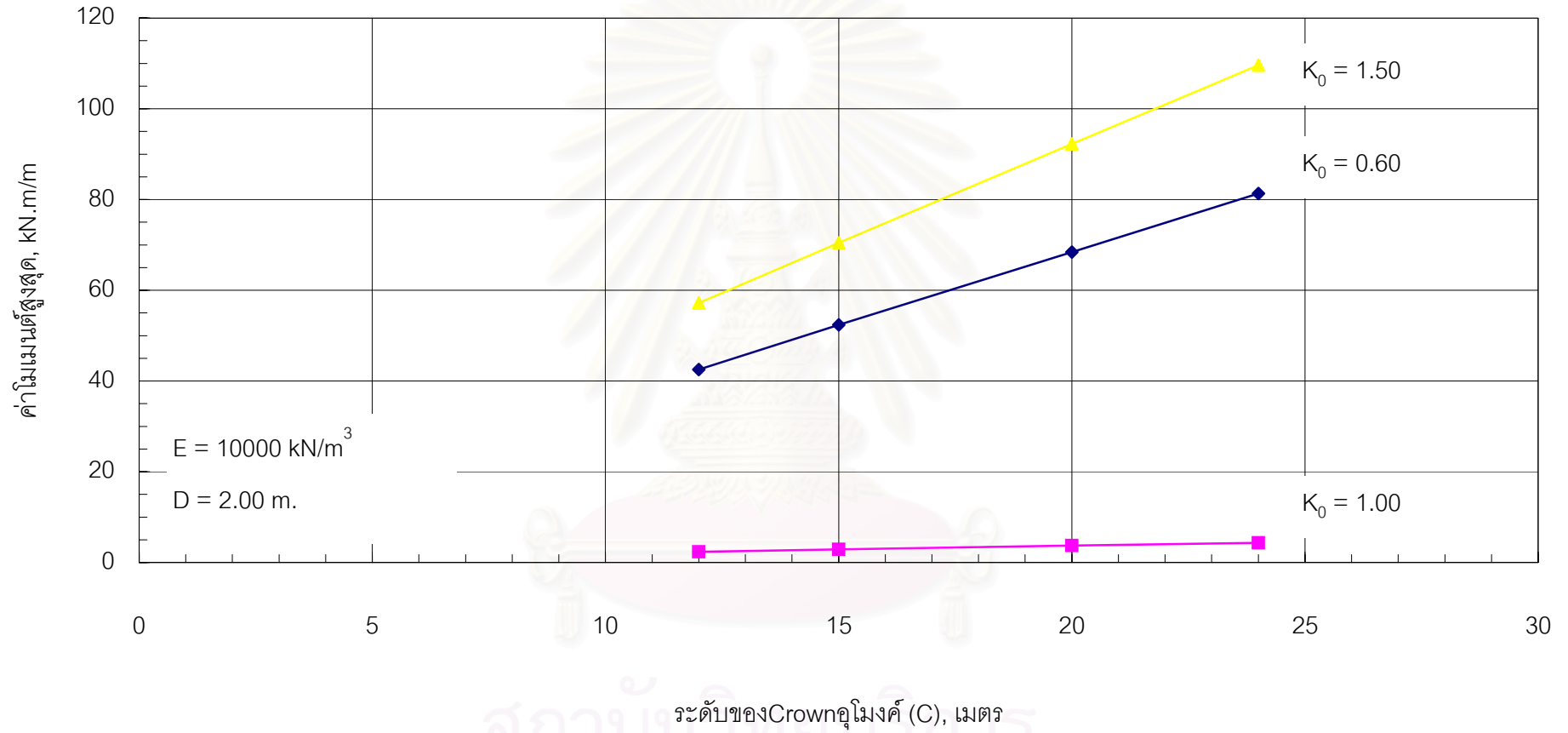
รูปที่ 4.8ค กราฟแสดงค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนของอุโมงค์ต่างๆ

\*หมายเหตุ

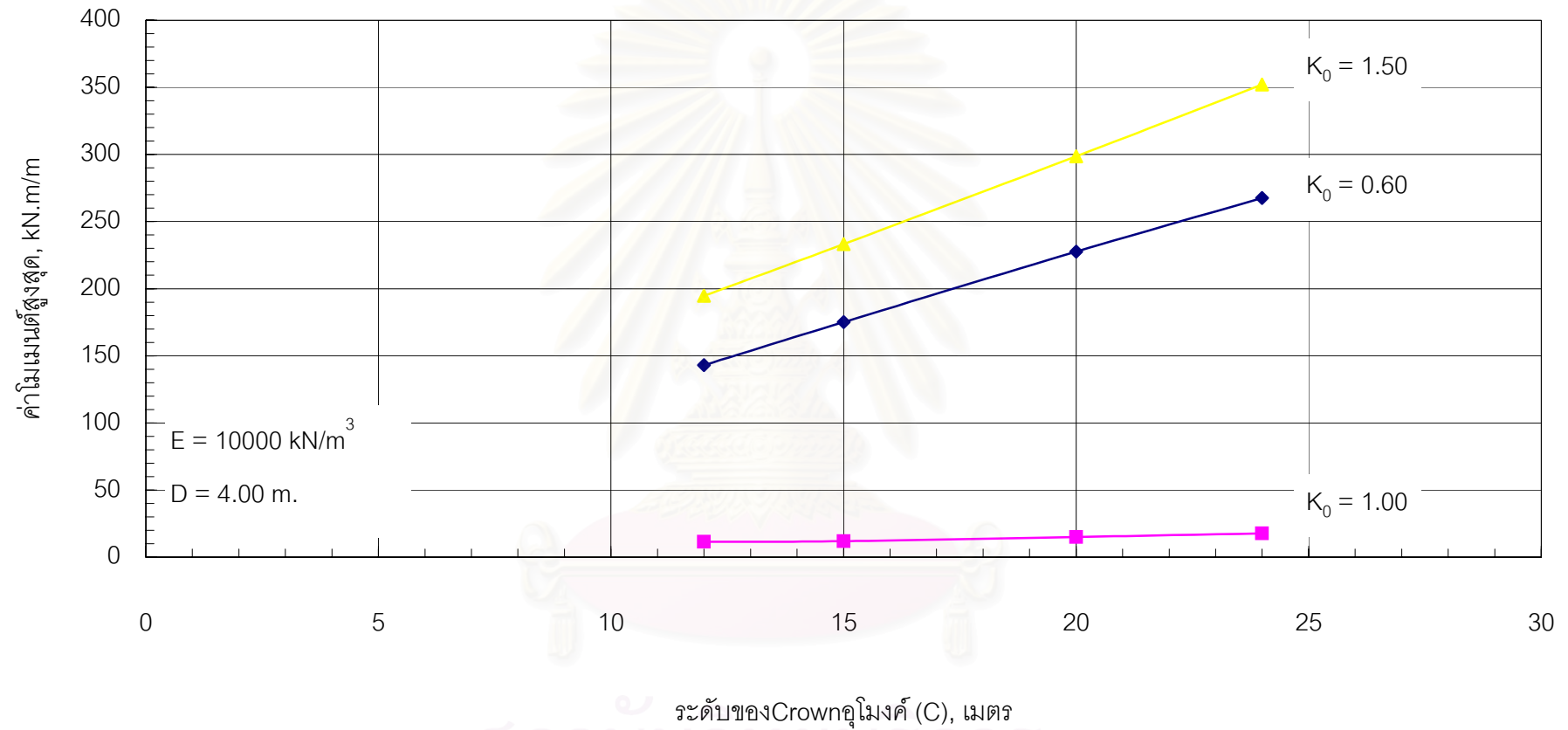


Unit: Degree

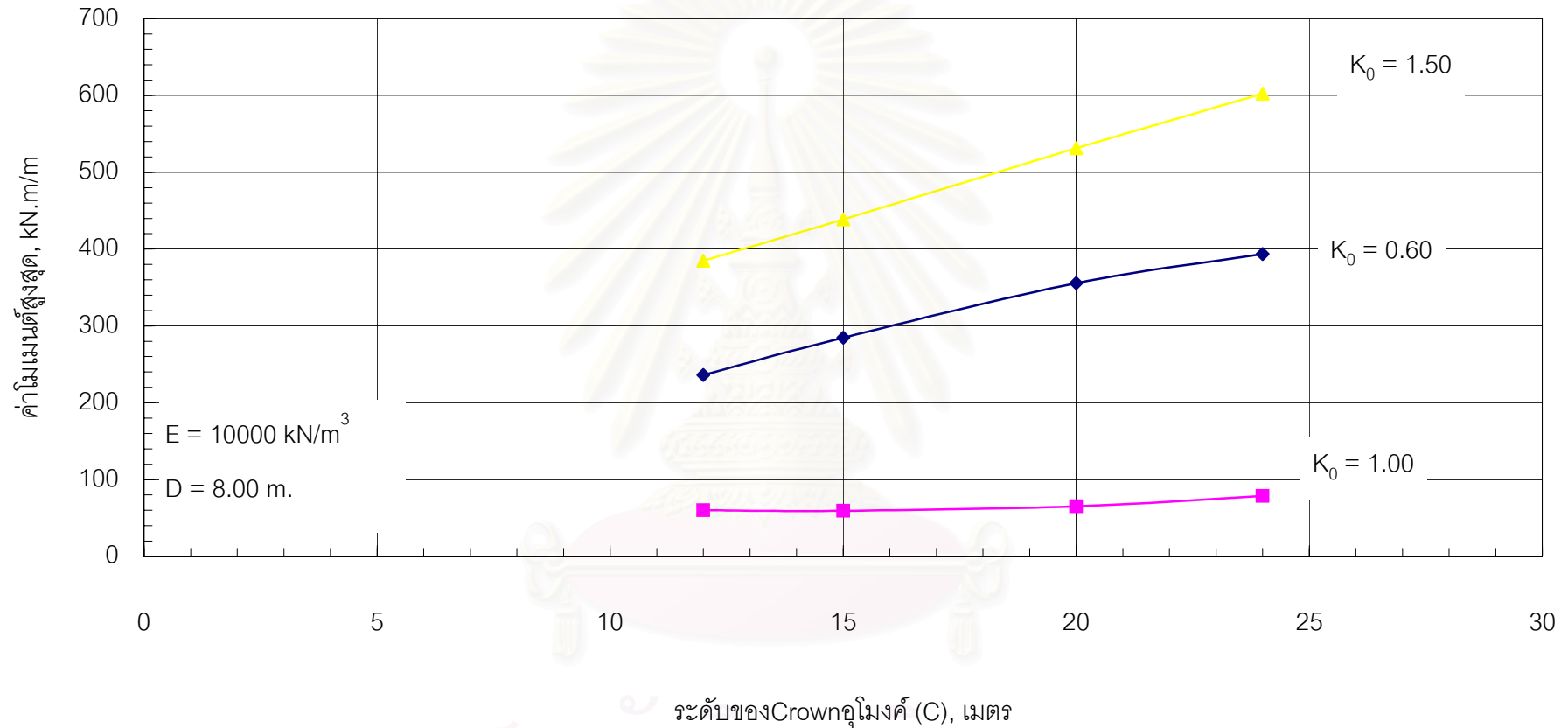
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



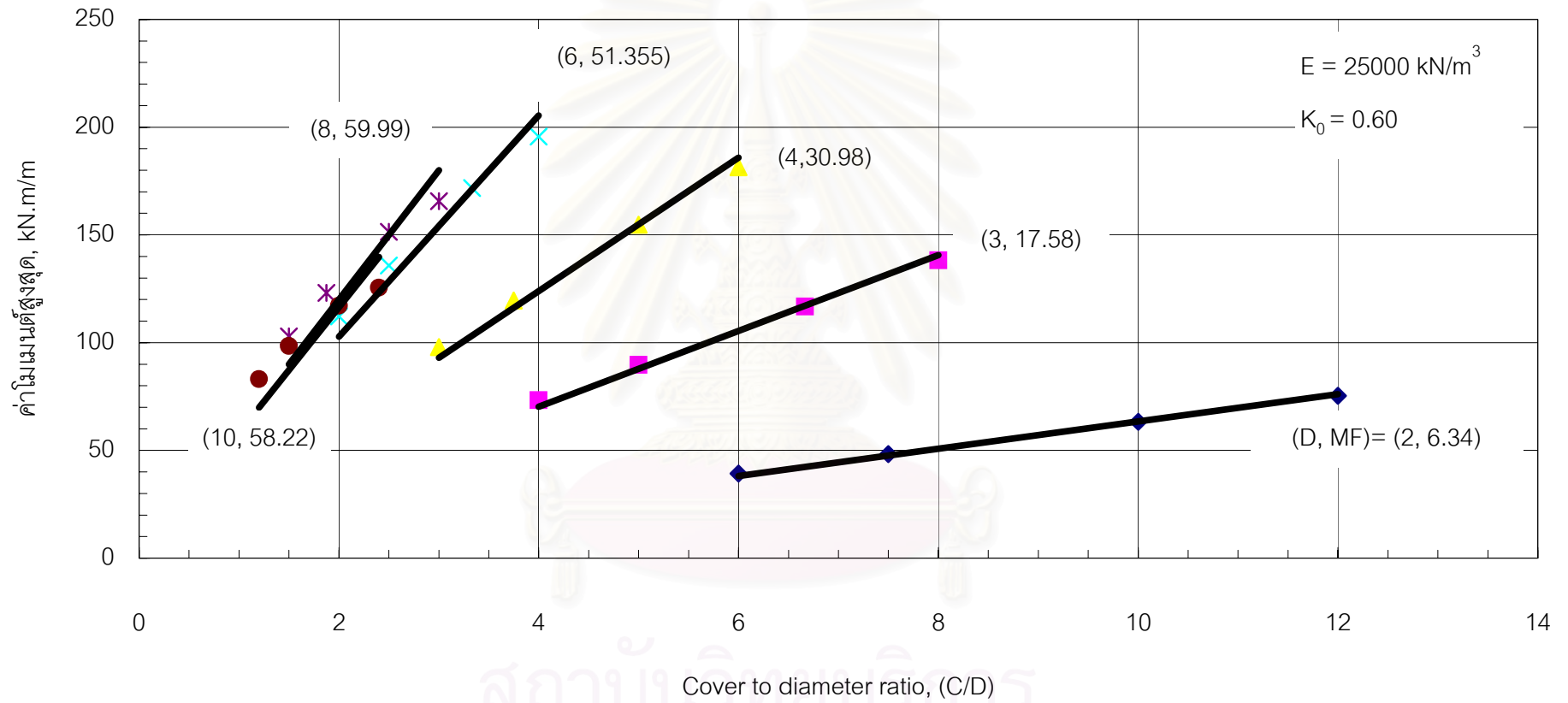
รูปที่ 4.9ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับระดับของ Crown คูโมงค์ (C)



รูปที่ 4.9ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับระดับของ Crown คูโมงค์ (C)

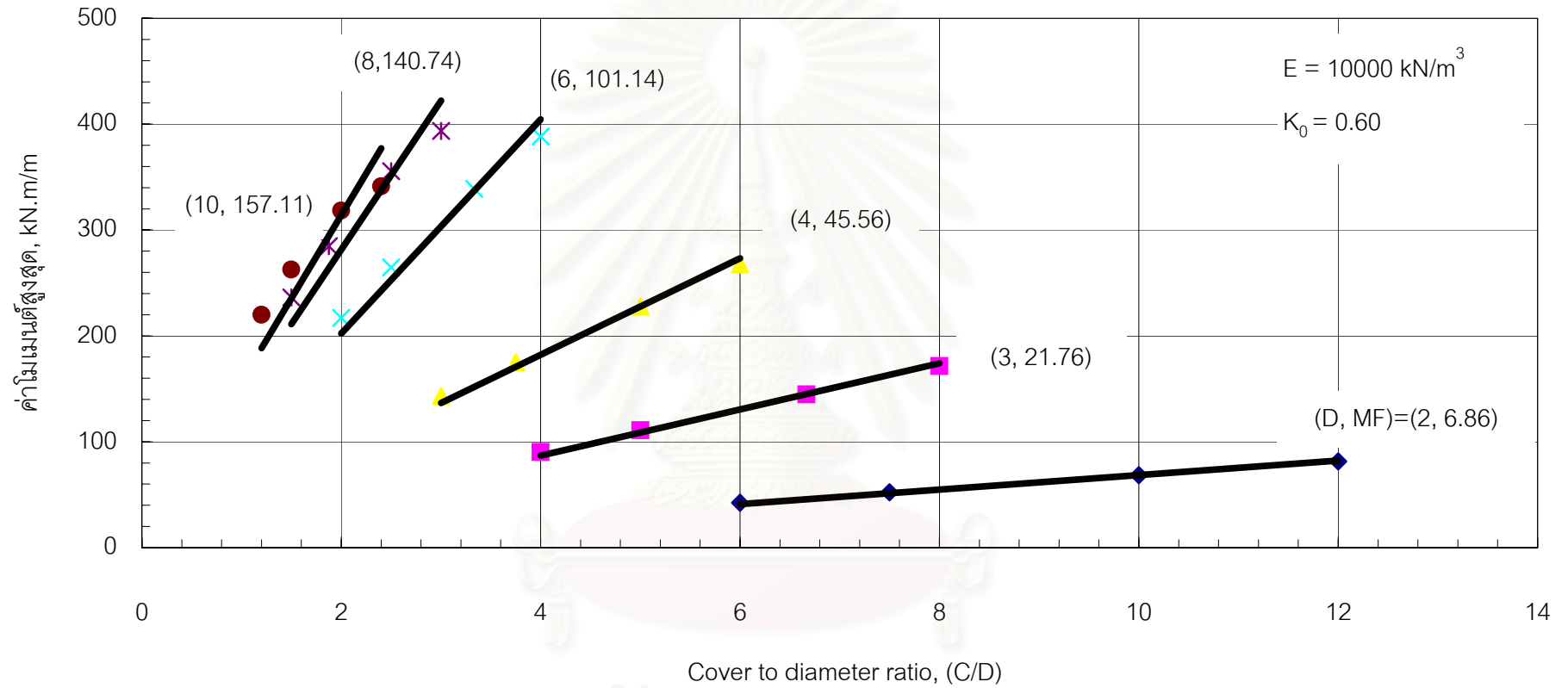


รูปที่ 4.9ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับระดับของ Crown อุโมงค์ (C)

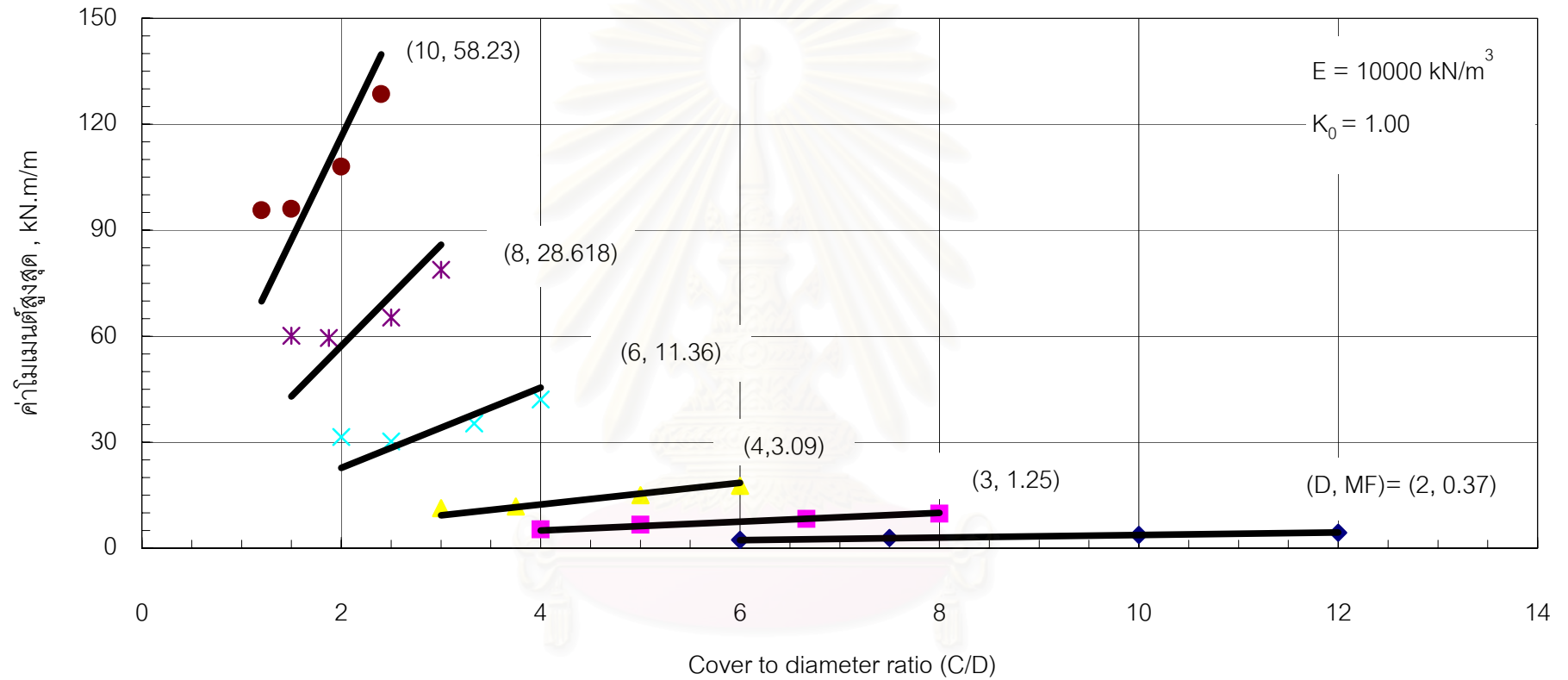


รูปที่ 4.10ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D)

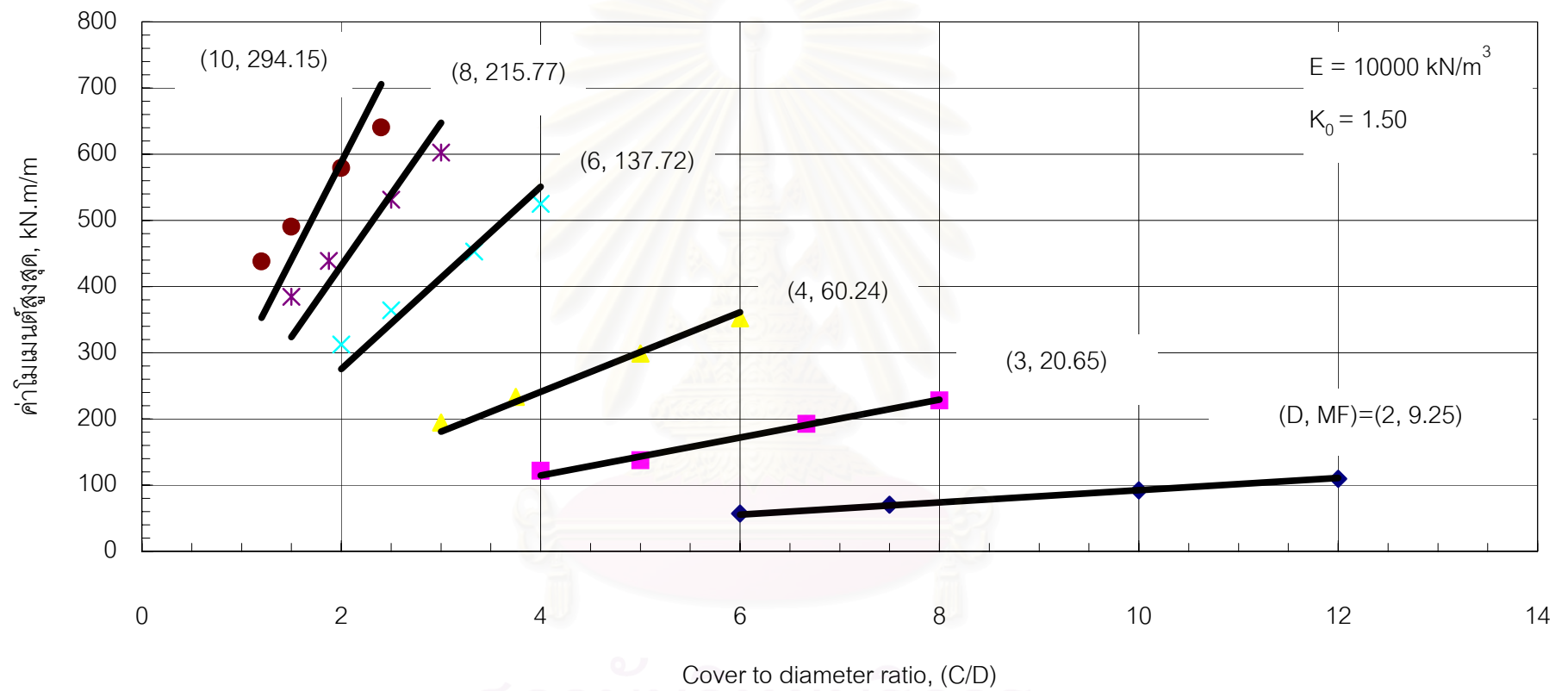




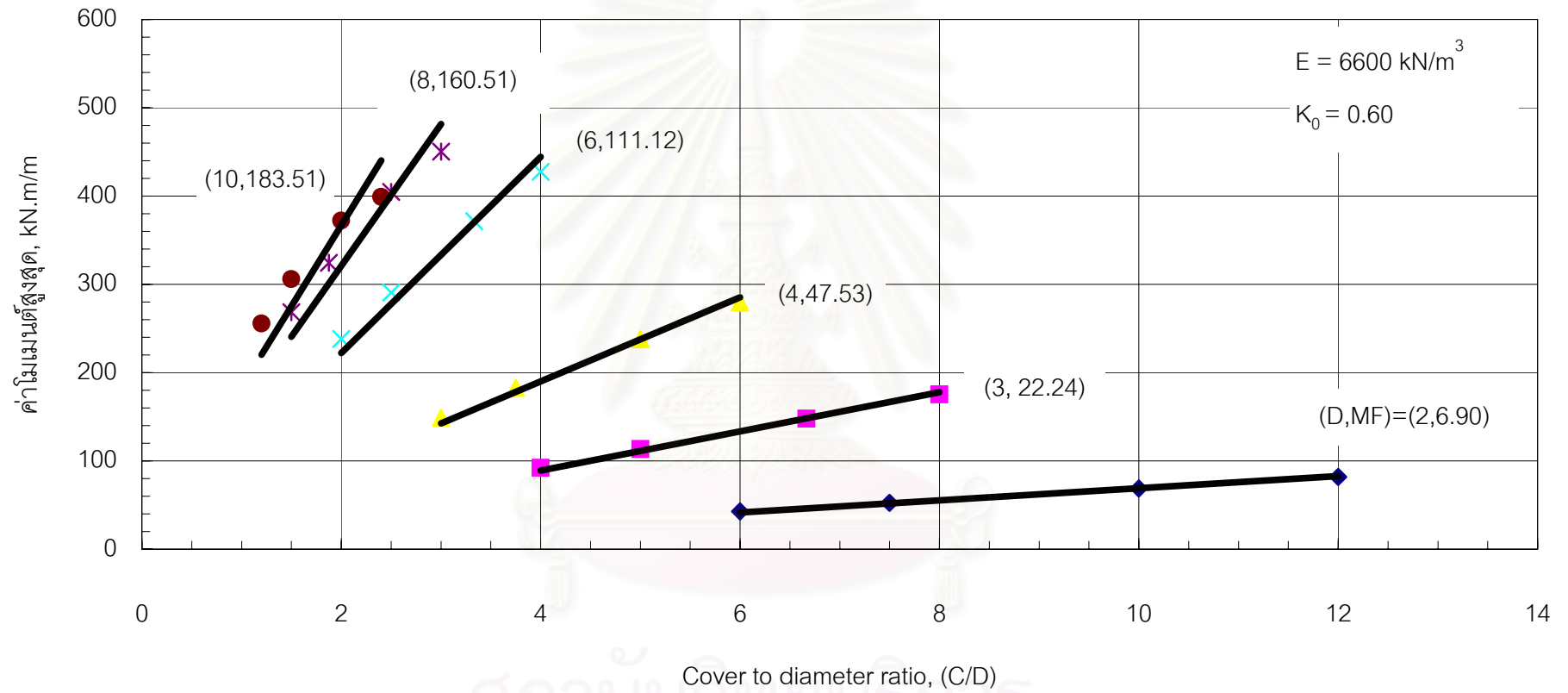
รูปที่ 4.10ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D)



รูปที่ 4.10ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D)



รูปที่ 4.10ง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D)



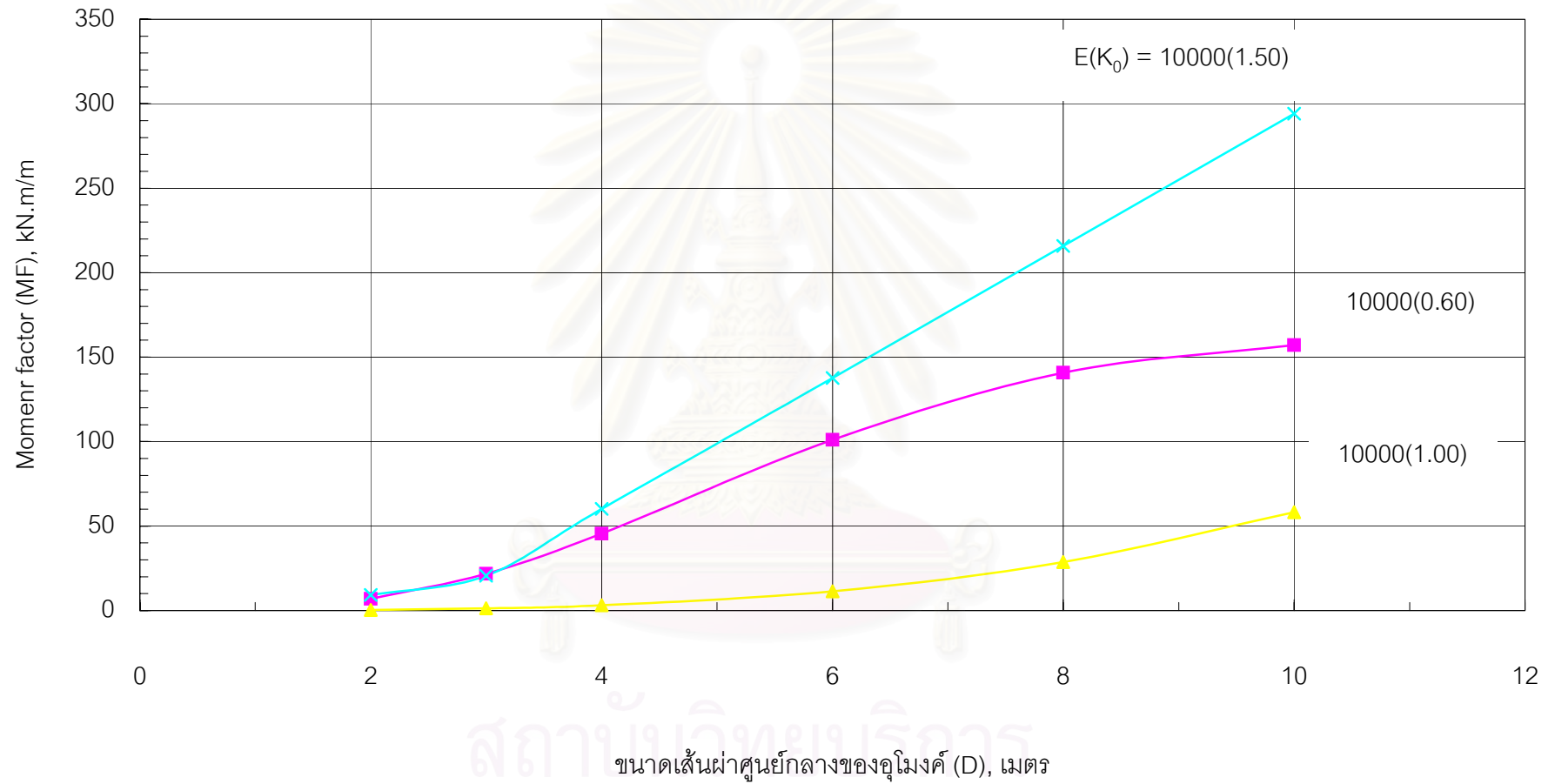
รูปที่ 4.10จ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์สูงสุดกับค่า Cover to diameter ratio (C/D)

ขนาดใหญ่กว่าจะให้ค่าความชันของเส้นกราฟมากกว่า โดยค่าความชันของเส้นกราฟนี้เรียกว่า “Moment factor, MF” ซึ่งอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า K เดียวกันอุโมงค์ในดินแข็ง (ค่า E มาก) จะมีค่าของ MF มากกว่าอุโมงค์ในดินอ่อน ดังรูปที่ 4.11 (ก) และอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า K = 1.50 มีค่า MF สูงกว่าอุโมงค์ที่อยู่ในดินที่มีค่า K = 0.6 และ 1.00 ดังรูปที่ 4.11 (ข)

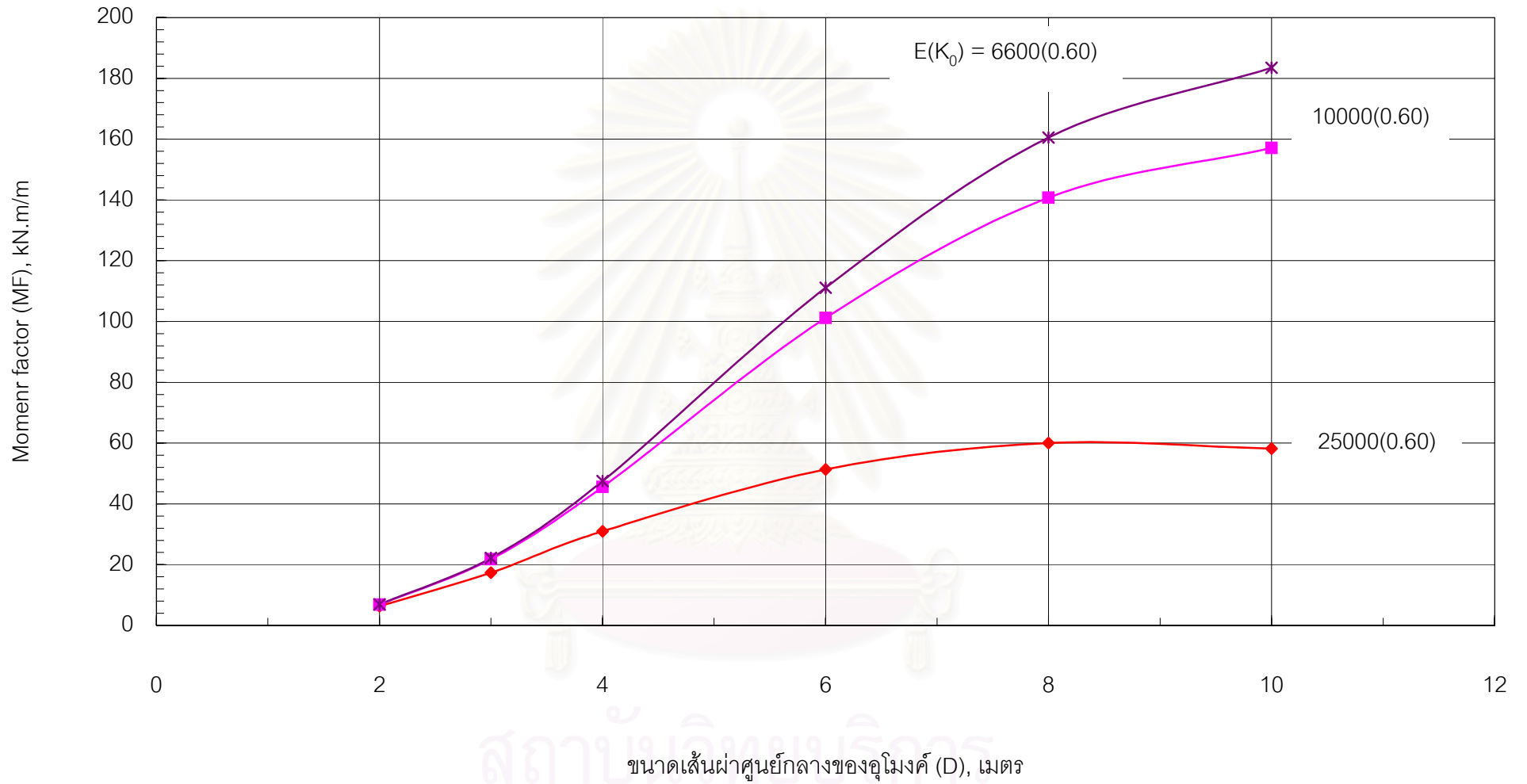
#### 4.5 Case Study

จากกราฟรูปที่ 4.7 และ 4.11 เมื่อทราบขนาดและระดับความลึกของอุโมงค์ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (E) และ ค่า K ของดิน ก็สามารถหาแรงที่กระทำกับดาดอุโมงค์และโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นกับดาดอุโมงค์ เพื่อนำไปช่วยในการออกแบบดาดอุโมงค์ได้ ดังเช่นตัวอย่างต่อไปนี้ กำหนดให้ดินมีค่า E = 15,000 kPa และค่า K = 0.6 อุโมงค์มีขนาด (D) = 5 เมตร, C = 15 เมตร จากรูปที่ 4.7 จะได้ค่า  $RF = 4.07 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN}$  ดังนั้นความชันของเส้นกราฟ  $SR \sim V_L/(C/D)$  มีค่าเท่ากับ  $4.07 \times 10^{-3} \times 15,000 = 61.05$  ถ้าคาดว่า  $V_L$  ที่จะเกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 2 % จะได้ค่า  $SR = 0.4$  ดังนั้นแรงที่มากกระทำกับอุโมงค์จะมีค่าเท่ากับ 60% ของหน่วยแรงดินเริ่มต้นก่อนถูกขุด

จากรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MF กับ ขนาดของอุโมงค์ (D) ที่ K และ E ต่างๆ ดังนั้นเมื่อ D = 5 เมตร, E = 15,000 kPa จะได้ค่า MF = 63 kN-m/m และเมื่อค่า C/D = 3 จะได้ค่า  $M_{\max} = 189 \text{ kN-m/m}$  (SR = 0) และจากตัวอย่างข้างต้นค่า SR มีค่าเท่ากับ 0.4 ดังนั้นโมเมนต์ที่จะเกิดขึ้นในดาดอุโมงค์จะมีค่าเท่ากับ  $0.6 \times 189 = 113 \text{ kN-m/m}$



รูปที่ 4.11ก การแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment factor (MF) กับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ (D)



รูปที่ 4.11ข การแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment factor (MF) กับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ (D)

## บทที่ 5

### Non-linearity of Stress Relaxation vs Surface ground loss

#### 5.1 บทนำ

Harischadra Nimal Seneviratne (1979) และ Richard Neil Taylor (1984) ได้ศึกษาถึงปริมาณการทรุดตัวของผิวดินเมื่อความดันในอุโมงค์ลดลง โดยได้สร้างแบบจำลองอุโมงค์ตันที่ไม่มีดาอุโมงค์ในดินเหนียว Kaolin ขึ้น ซึ่งขนาดของอุโมงค์ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเท่ากับ 6 cm. โดย Seneviratne ใช้ Rubber membranes เป็นอุปกรณ์ในการให้ความดันที่กระทำบนผิวดินด้านบนและในอุโมงค์ ซึ่งในช่วงเริ่มต้นก่อนการทดสอบความดันกระทำบนผิวดินด้านบนและในอุโมงค์ มีค่าเท่ากับคือ  $138 \text{ kN/m}^2$  หลังจากนั้นจะทำการลดความดันภายในอุโมงค์ทุกๆ 5 นาที โดยค่า C/D ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.00 และ 1.45 ส่วนในการทดสอบของ Taylor (1984) นั้นจะใช้การ Centrifuge โดยให้มีความเร่งเท่ากับ 75 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลก ( $75g$ ) ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วของ Centrifuge น้ำหนักของดินก็จะเพิ่มขึ้น และความดันภายในอุโมงค์จะเพิ่มขึ้นเพื่ออุโมงค์มีเสถียรภาพ โดยความดันภายในอุโมงค์จะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_T = n_{4m} \gamma \left( C + \frac{D}{2} \right) \quad (5.1)$$

เมื่อ  $\sigma_T$  = ความดันในอุโมงค์ ( $\text{kN/m}^2$ )

$$n_{4m} = 75$$

$\gamma$  = หน่วยน้ำหนักดินรวม ( $\text{kN/m}^3$ )

C = ความหนาของดินเหนียวอุโมงค์ (เมตร)

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ (เมตร)

จากนั้นจะทำการลดความดันภายในอุโมงค์ โดยค่า C/D ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.67 และ 3.00

ผลที่ได้จากการทดสอบนำไปคำนวณค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) และหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) ซึ่งจะได้แสดงในส่วนต่อไป



## 5.2 Finite Element Method

จากแบบจำลองอุโมงค์ดินที่ไม่มีตาตุ่มในดินเหนียว Kaolin ของ Seneviratne (1979) และ Taylor (1984) ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ที่ผิวดินด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) “CRISP” ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Isotropic Linear Elastic และ Non-linear Elastic ซึ่งลักษณะของ Mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 โดยตัวแปรที่ใช้ในแสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Non-linear elastic ที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เป็นแบบจำลองที่ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล และ วรณิภา แซ่เตียว สร้างขึ้นใน ปี ค.ศ. 1998 โดยอาศัยผลจากการทดลอง Triaxial แบบ Isotropically Consolidated Undrained Extension (CIUE) พบว่าเมื่อนำค่า Normalized Young's Modulus ( $E_{tan}/E_{ini}$ ) และค่า mean total stress ratio ( $q/p'$ ) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์จะได้ความสัมพันธ์ในรูปสมการ

$$\frac{E_{tan}}{E_{ini}} = n \exp m \left( \frac{q}{p'} \right) \quad (5.2)$$

เมื่อ  $E_{tan}$  และ  $E_{ini}$  = Tangential and initial Yong's Modulus

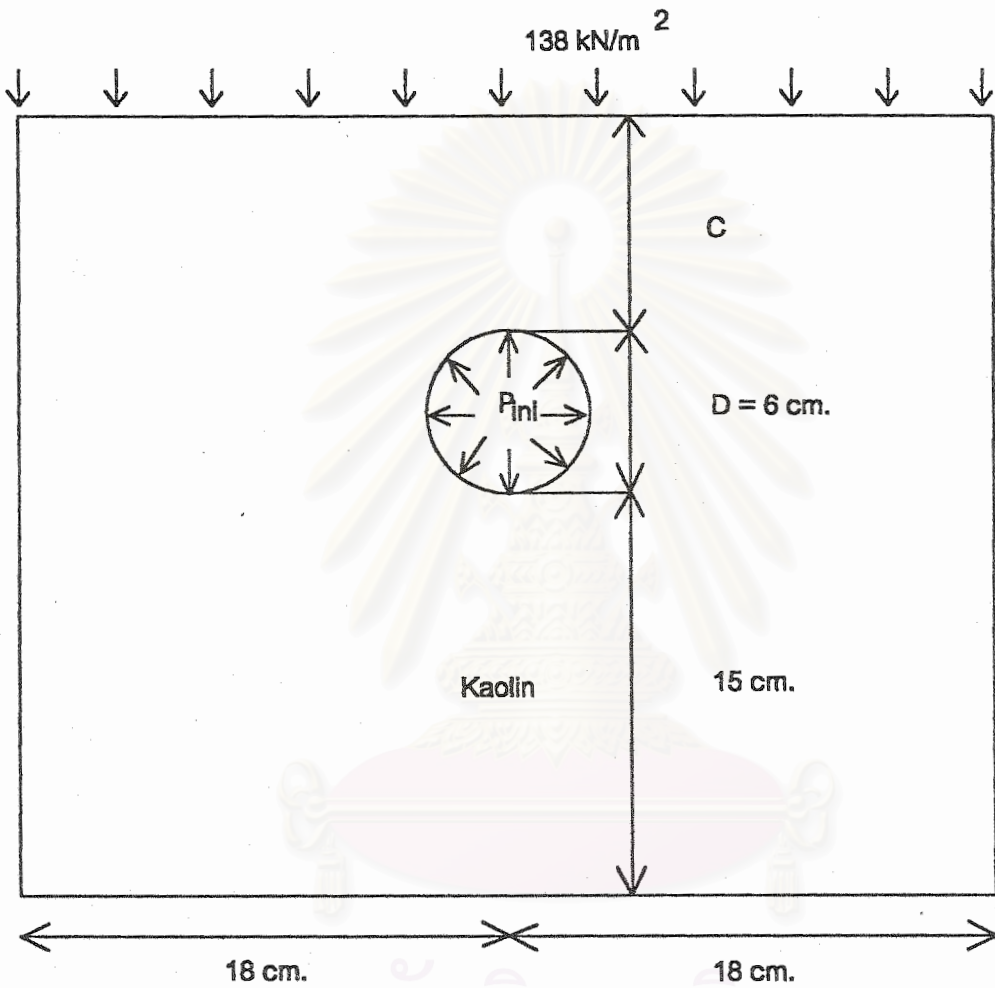
$q$  = Deviator stress

$p'$  = Mean effective stress

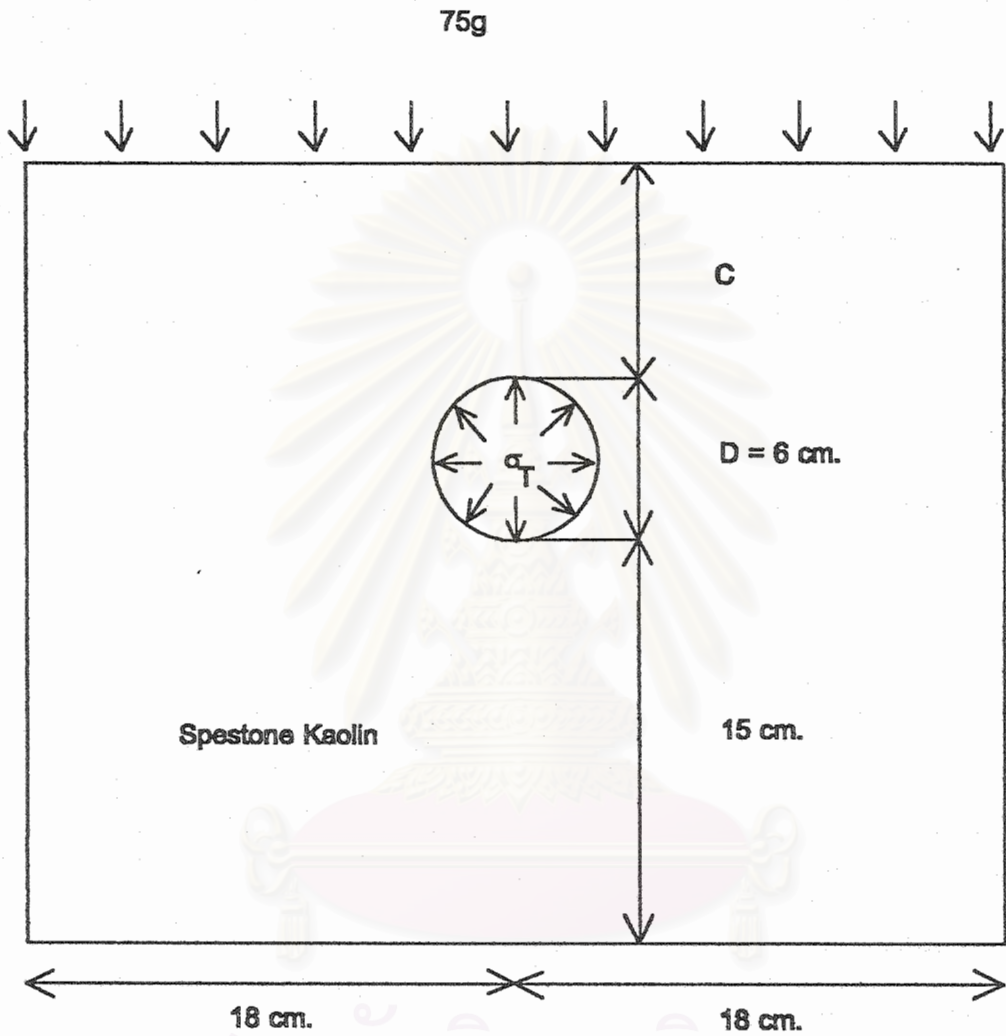
$n = 1.00$

$m$  เป็นค่าคงที่ (โดยในการวิเคราะห์ครั้งนี้ใช้  $m = -10$ )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 ขนาดและลักษณะของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์  
(Seneviratne, 1979)



รูปที่ 5.2 ขนาดและลักษณะของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

(Taylor, 1984)

ตารางที่ 5.1 ก แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Isotropic Linear Elastic ของ Seneviratne (1979)

พารามิเตอร์	ค่า
โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E)	7,406.79 kN/m <sup>3</sup>
สัมประสิทธิ์แรงดันสถิตย (Coefficient of earth pressure at rest, K <sub>0</sub> )	0.64
อัตราส่วนพัชของส์ (Poisson's ratio, $\nu$ )	0.49
หน่วยน้ำหนักดิน (Unit weight of soil, $\gamma$ )	16.00 kN/m <sup>3</sup>

ตารางที่ 5.1 ข แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Isotropic Linear Elastic ของ Taylor (1984)

พารามิเตอร์	ค่า
โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E)	4,700 kN/m <sup>3</sup>
สัมประสิทธิ์แรงดันสถิตย (Coefficient of earth pressure at rest, K <sub>0</sub> )	1.00
อัตราส่วนพัชของส์ (Poisson's ratio, $\nu$ )	0.49
หน่วยน้ำหนักดิน (Unit weight of soil, $\gamma$ )	16.00 kN/m <sup>3</sup>

ตารางที่ 5.2ก แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Non - Linear Elastic ของ Seneviratne (1979)

พารามิเตอร์	ค่า	
	C/D = 1.00	C/D = 1.45
โมดูลัสความยืดหยุ่นเริ่มต้น ((E <sub>ini</sub> ) <sub>p</sub> ) เมื่อ mean stress เริ่มต้น (p) เท่ากับ 138 kN/m <sup>3</sup>	7,406.79 kN/m <sup>3</sup>	7,406.79 kN/m <sup>3</sup>
Mean stress เริ่มต้นที่จุดอ้างอิง (p <sub>ref</sub> )	138 kN/m <sup>2</sup>	138 kN/m <sup>2</sup>
โมดูลัสของความยืดหยุ่นเริ่มต้นที่จุดอ้างอิง (E <sub>ref</sub> ) $\frac{(E_{ini})_p}{(E_{ini})_{p_{ref}}} = \sqrt{\frac{p}{p_{ref}}}$	7,406.79 kN/m <sup>3</sup>	7,406.79 kN/m <sup>3</sup>
สัมประสิทธิ์แรงดันสถิตย (Coefficient of earth pressure at rest, K <sub>0</sub> )	0.64	0.64
อัตราส่วนพัชของส์ (Poisson's ratio, ν)	0.49	0.49
หน่วยน้ำหนักดิน (unit weight of soil, γ)	16.00 kN/m <sup>3</sup>	16.00 kN/m <sup>3</sup>

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.2x แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Non - Linear Elastic ของ Taylor (1984)

พารามิเตอร์	ค่า	
	C/D = 1.67	C/D = 3.00
โมดูลัสของความยืดหยุ่นเริ่มต้น $(E_{ini})_p$ เมื่อ mean stress เริ่มต้น $(p)$ เท่ากับ $90 \text{ kN/m}^3$	$4,700 \text{ kN/m}^3$	$4,700 \text{ kN/m}^3$
Mean stress เริ่มต้นที่จุดอ้างอิง $(p_{ref})$	$156.24 \text{ kN/m}^2$	$252 \text{ kN/m}^2$
โมดูลัสของความยืดหยุ่นเริ่มต้นที่จุดอ้างอิง $(E_{ref})$ $\frac{(E_{ini})_p}{(E_{ini})_{p_{ref}}} = \sqrt{\frac{p}{p_{ref}}}$	$6,192.6 \text{ kN/m}^3$	$7,864.6 \text{ kN/m}^3$
สัมประสิทธิ์แรงดันสถิตย (Coefficient of earth pressure at rest, $K_0$ )	1.00	1.00
อัตราส่วนพัชของส์ (Poisson's ratio, $\nu$ )	0.49	0.49
หน่วยน้ำหนักดิน (Unit weight of soil, $\gamma$ )	$16.00 \text{ kN/m}^3$	$16.00 \text{ kN/m}^3$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite element

ผลที่ได้จากการทดลองของ Seneviratne (1979) และ Taylor (1984) พบว่าเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง SR กับ  $V_L/(C/D)$  เส้นกราฟจะจับกลุ่มกันเนื่องจากอุโมงค์ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเท่ากัน และพฤติกรรมของดินเป็น Non - linear ดังรูปที่ 5.3 แต่ผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองประเภท Isotropic linear elastic ความสัมพันธ์ SR กับ  $V_L/(C/D)$  จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังรูปที่ 5.4 ส่วนผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองประเภท Non - linear จะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 5.5 ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง SR กับ  $V_L/(C/D)$  ได้ดังต่อไปนี้

Seneviratne (1979)

$$C/D = 1.00: \quad SR = 0.16981 \ln \left( \frac{V_L}{C/D} \right) + 0.2879 \quad (5.3)$$

$$C/D = 1.45: \quad SR = 0.1835 \ln \left( \frac{V_L}{C/D} \right) + 0.371 \quad (5.4)$$

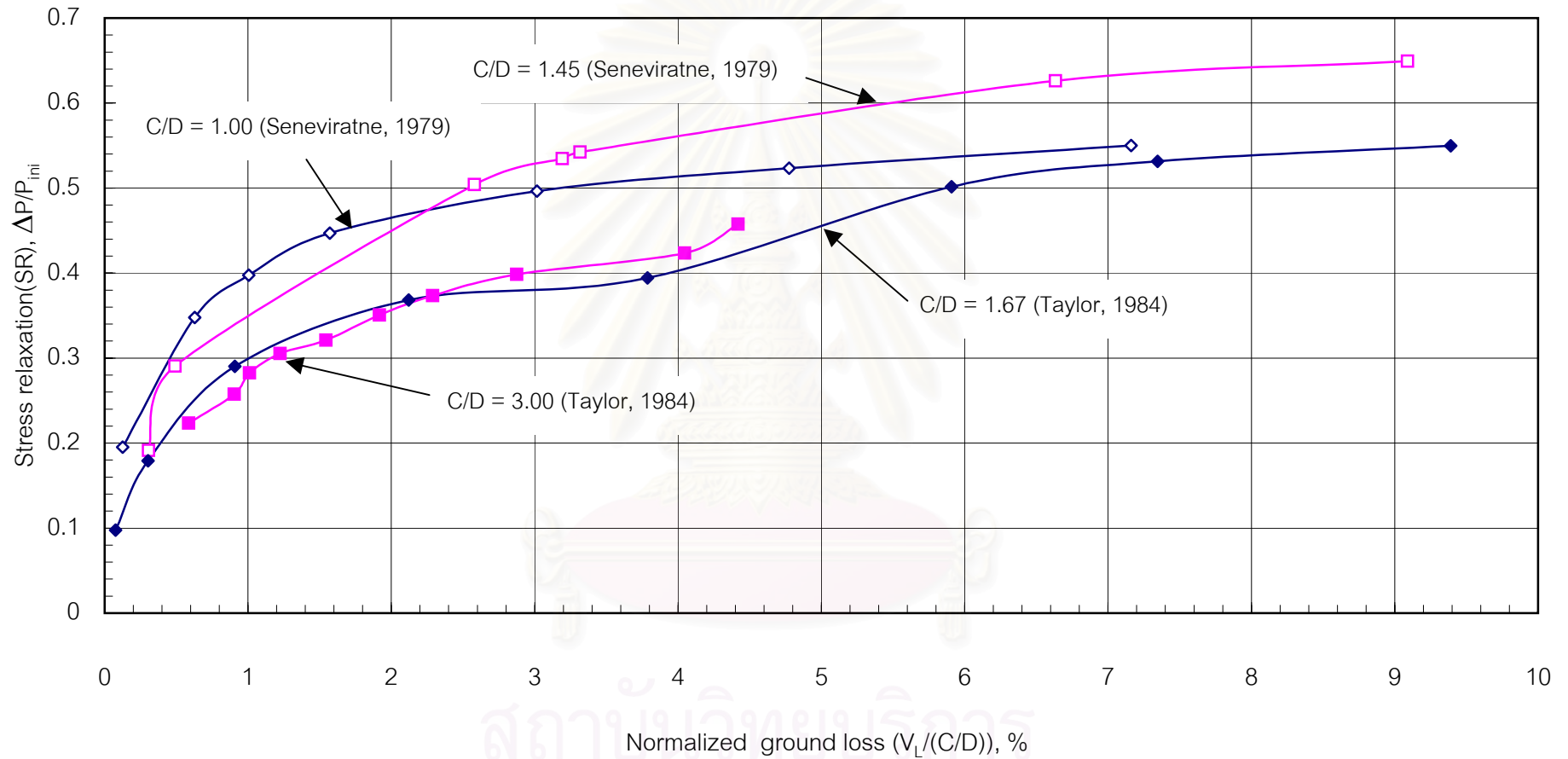
Taylor (1984)

$$C/D = 1.67: \quad SR = 0.1187 \ln \left( \frac{V_L}{C/D} \right) + 0.1865 \quad (5.5)$$

$$C/D = 3.00: \quad SR = 0.1314 \ln \left( \frac{V_L}{C/D} \right) + 0.2329 \quad (5.6)$$

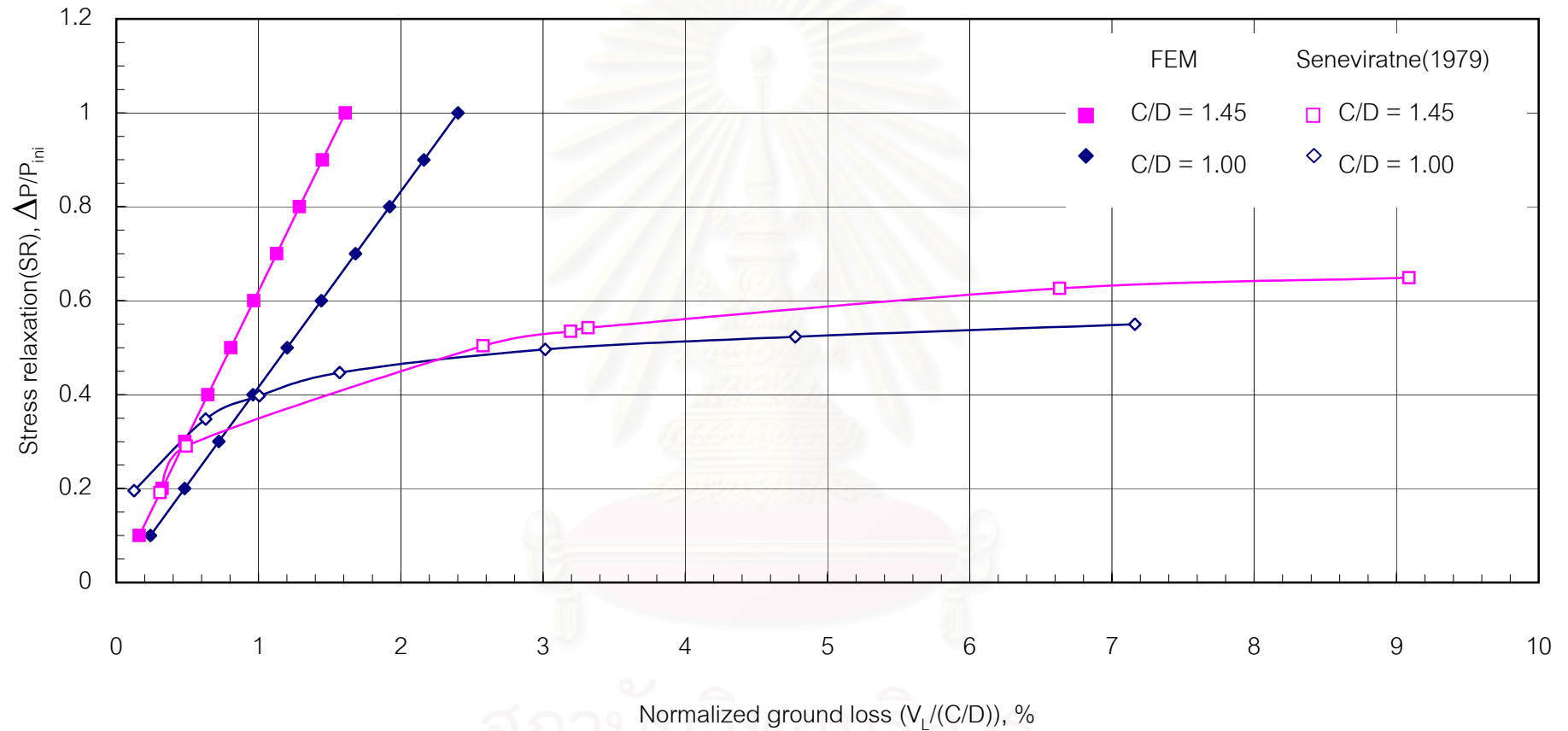
จะเห็นได้ว่า พฤติกรรมของอุโมงค์นั้นเป็นแบบ Non-linear โดยการวิเคราะห์แบบ Linear- elastic จะสามารถประมาณความสัมพันธ์  $SR \sim V_L$  ได้ในช่วงต้นๆ เท่านั้นถ้าหากค่า  $V_L$  (หรือค่า SR) มีมากขึ้นแล้วแบบจำลองแบบ Linear elastic จะ Underestimate ปริมาณการทรุดตัว (หรือ  $V_L$ )

แบบจำลอง Non-linear elastic สามารถคาดการณ์พฤติกรรมของอุโมงค์ได้เป็นอย่างดี

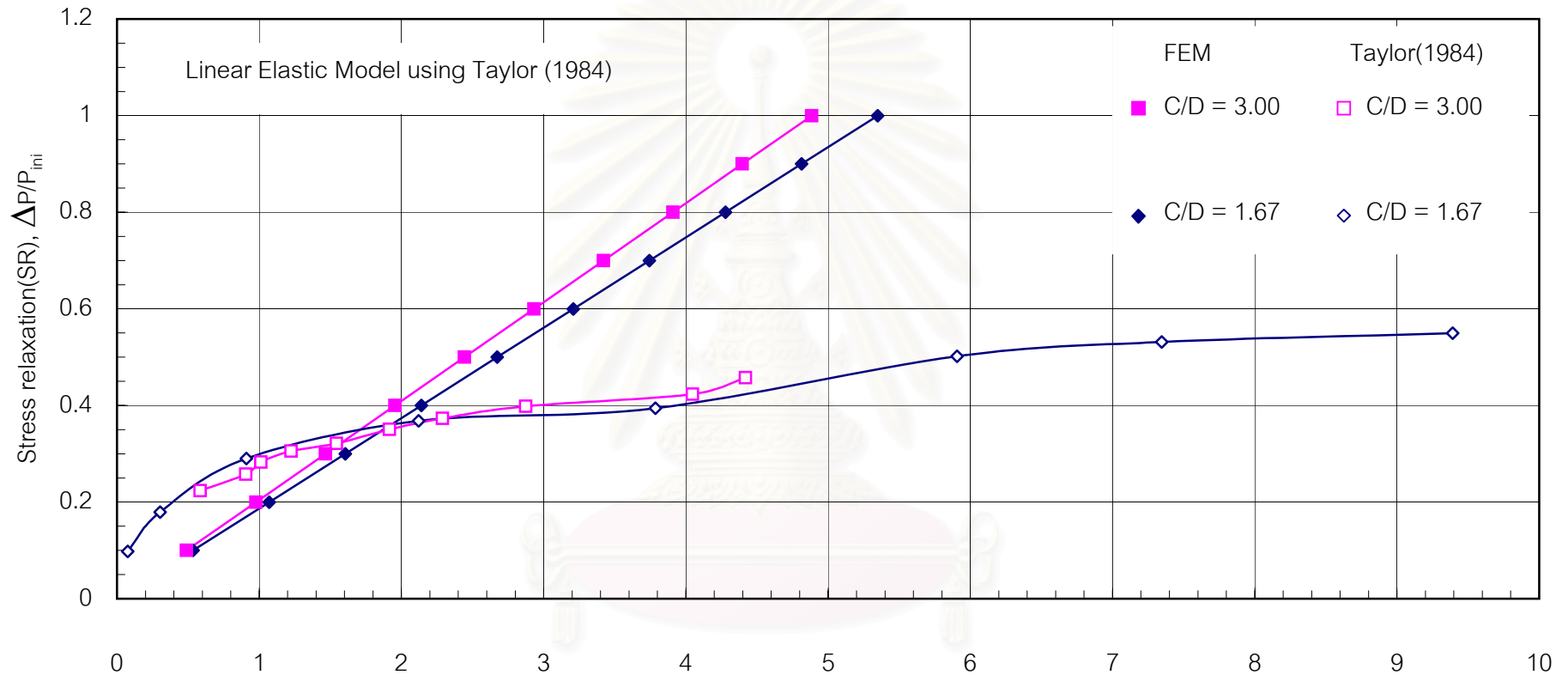


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ ) (ผลการทดสอบ)

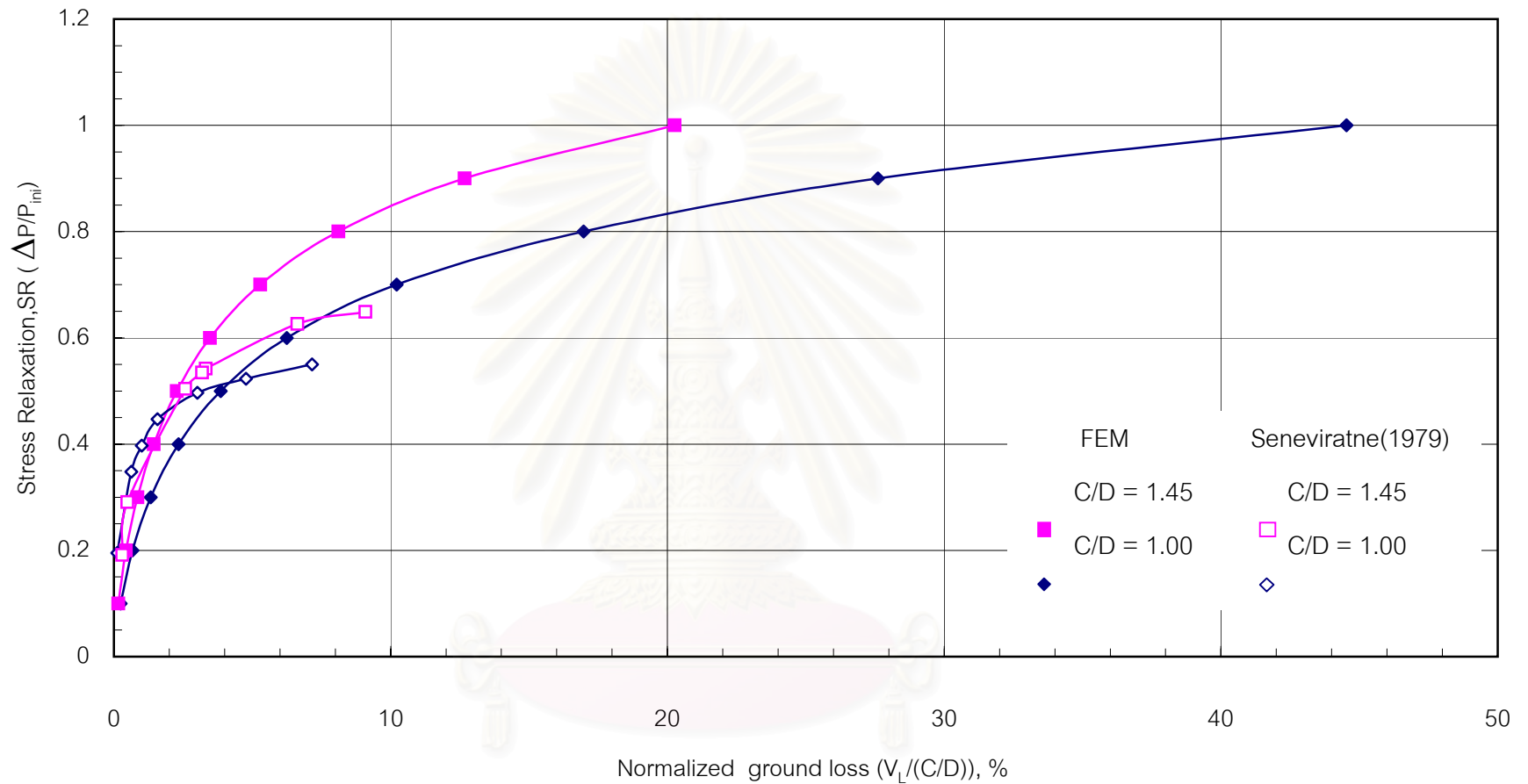




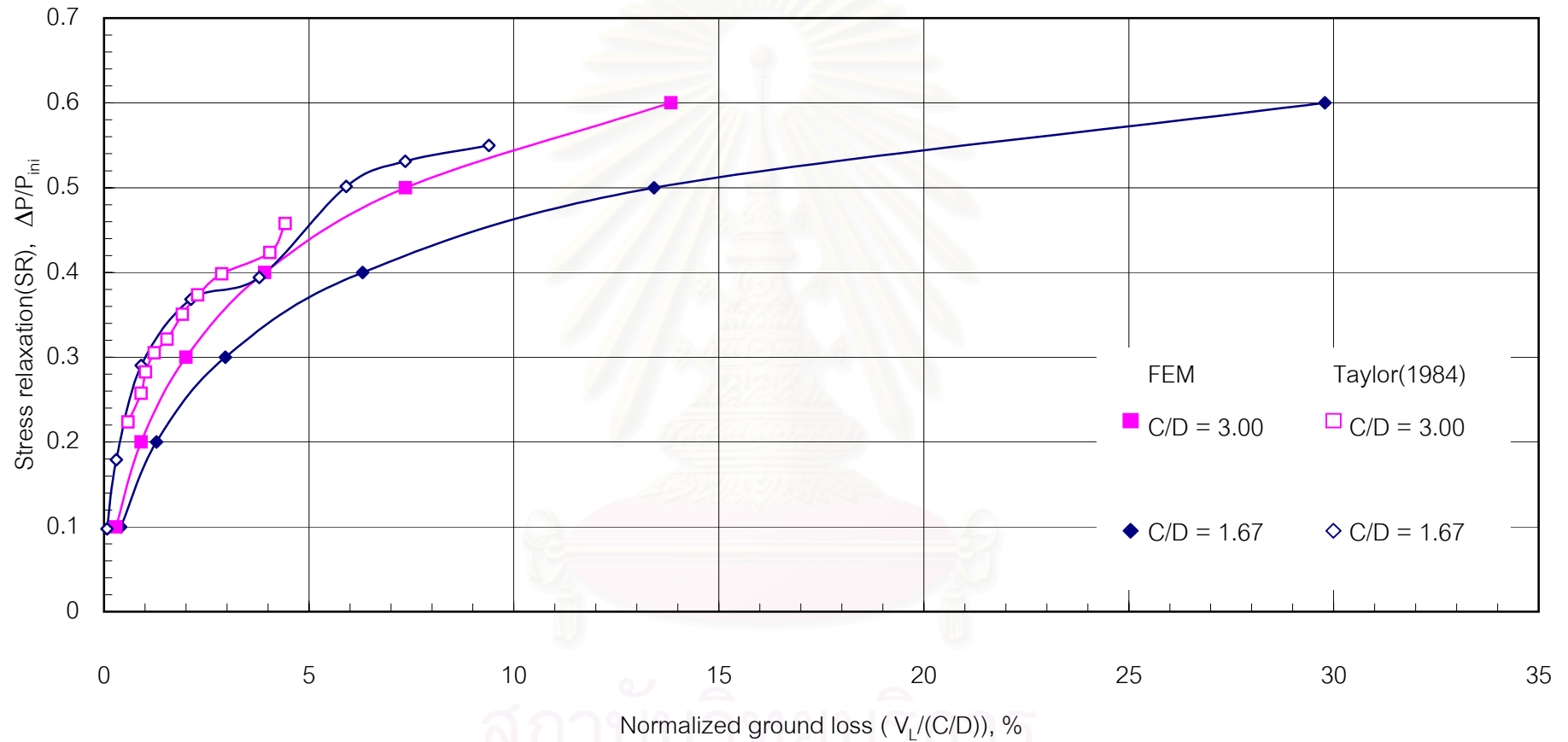
รูปที่ 5.4ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า  $C/D$  (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ ) (เปรียบเทียบ Linear elastic model กับผลการทดสอบของ Seneviratne (1979))



รูปที่ 5.4 ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ ) (เปรียบเทียบ Linear elastic model กับผลการทดสอบ ของ Taylor (1984))



รูปที่ 5.5ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ ) (เปรียบเทียบ Non-linear elastic model กับผลการทดสอบของ Seneviratne (1979))



รูปที่ 5.5x กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่สูญเสีย (Stress relaxation, SR) กับการสูญเสียมวลดินที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D (Normalized ground loss,  $V_L/(C/D)$ ) (เปรียบเทียบ Non-linear elastic model กับผลการทดสอบของ Taylor (1984))

## บทที่ 6

### สรุปผล

#### 6.1 สรุปผล

1. จากการวิเคราะห์อุโมงค์แบบไม่มีตาอุโมงค์ด้วยโปรแกรม Finite Element “CRISP” นำไปสู่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสลาย (Stress relaxation, SR) กับค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) ที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D ซึ่งความชันของเส้นกราฟนี้เมื่อนำมาหารด้วยค่าโมดูลัสของดินที่นำมาวิเคราะห์จะได้ค่า Relaxation factor (RF) ซึ่งนำเอาไปใช้ในการออกแบบอุโมงค์ พบว่าค่า Relaxation factor (RF) จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินสถิตย์ (Coefficient of later stress, K) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ (D) โดย

$$RF = \frac{K}{D^{1.13}}$$

ซึ่งค่า K จะเปลี่ยนไปตามค่า K

2. จากการวิเคราะห์อุโมงค์แบบมีตาอุโมงค์เพื่อหาค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนตาอุโมงค์นั้นพบว่าดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินสถิตย์ (Coefficient of later stress, K) ต่างกันตำแหน่งการเกิดโมเมนต์สูงสุดจะต่างกัน ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์สูงสุดกับค่า C/D จะเรียกว่า Moment factor (MF) จากกราฟระหว่างค่า MF กับค่า C/D พบว่าจะขึ้นอยู่กับ ค่าโมดูลัสของยืดหยุ่น (Young's modulus) และค่า สัมประสิทธิ์แรงดันดินสถิตย์ (Coefficient of later stress, K)
3. จากการทดลองของ Harischadra Nimal Seneviratne และ Richard Neil Taylor ในการลดความดันภายในอุโมงค์และวัดการทรุดตัวที่ผิวดินเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสลาย (Stress relaxation, SR) กับค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) ที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D พบว่าพฤติกรรมของดินจะไม่เป็นเส้นตรง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเส้นกราฟที่ได้ทั้งสองเส้นจากการทดสอบที่มีค่า C/D ต่างกัน เกือบจะทับกันเป็นเส้นเดียว
4. เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Linear elastic ที่ใช้วิเคราะห์แบบจำลองทดสอบของ Harischadra Nimal Seneviratne และ Richard Neil Taylor จะสามารถประมาณความสัมพันธ์  $SR \sim V_L$  ได้ในช่วงต้นๆ เท่านั้นถ้าหากค่า  $V_L$  (หรือค่า SR) มีมากขึ้นแล้วแบบจำลองแบบ Linear elastic จะ Underestimate ปริมาณการทรุดตัว (หรือ  $V_L$ )

5. เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Non - linear elastic ที่ใช้วิเคราะห์แบบจำลองทดสอบของ Harischadra Nimal Seneviratne และ Richard Neil Taylor โดย b parameter ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ  $-10$  สามารถคาดการณ์พฤติกรรมของอุโมงค์ได้เป็นอย่างดี

## 6.2 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงเพิ่มเติม

1. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูญหาย (Stress relaxation, SR) กับค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) ที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) “Crisp” โดยใช้แบบจำลอง Non-Linear Elastic โดยปรับปรุงค่า b parameter ให้ถูกต้อง
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูญหาย (Stress relaxation, SR) กับค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss,  $V_L$ ) ที่ถูก Normalize ด้วยค่า C/D โดยให้มีดินไม่คุณสมบัติเป็นเอกพันธ์ (Non-homogeneous)

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

วรรณิกา แซ่เตียว. 2541. การคาดคะเนการทรุดตัวของชั้นดินกรุงเทพมหานครเนื่องจากการก่อ  
สร้างอุโมงค์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

Britto, A.M. and Gunn, M.J. 1987. Critical State Soil Mechanics via Finite Element. (n.p.):  
Ellis Horwood.

Chen, W.F. and Mizuno, E. 1990. Nonlinear Analysis in Soil Mechanics. (n.p.): Elsevier  
Science.

Longanathan, N. and Poulos, H.G., Analytical Prediction for Tunneling - Induced Ground  
Movements in Clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental  
Engineering (1998, September): 846-856.

Nomoto T., Immura S., Hagiwara T., Kusakabe O., and Fujii N., Shield Tunnel  
Construction in Centrifuge, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental  
Engineering (1999, April): 289-300.

Seneviratne H.N.. 1979. Deformations and Pore-Pressures around model tunnels in Soft  
Clay, Ph.D. Dissertation University of Cambridge.

Taylor, R.N.. 1984. Ground Movement Associated with Tunnels and Trenches, Ph.D.  
Dissertation University of Cambridge.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

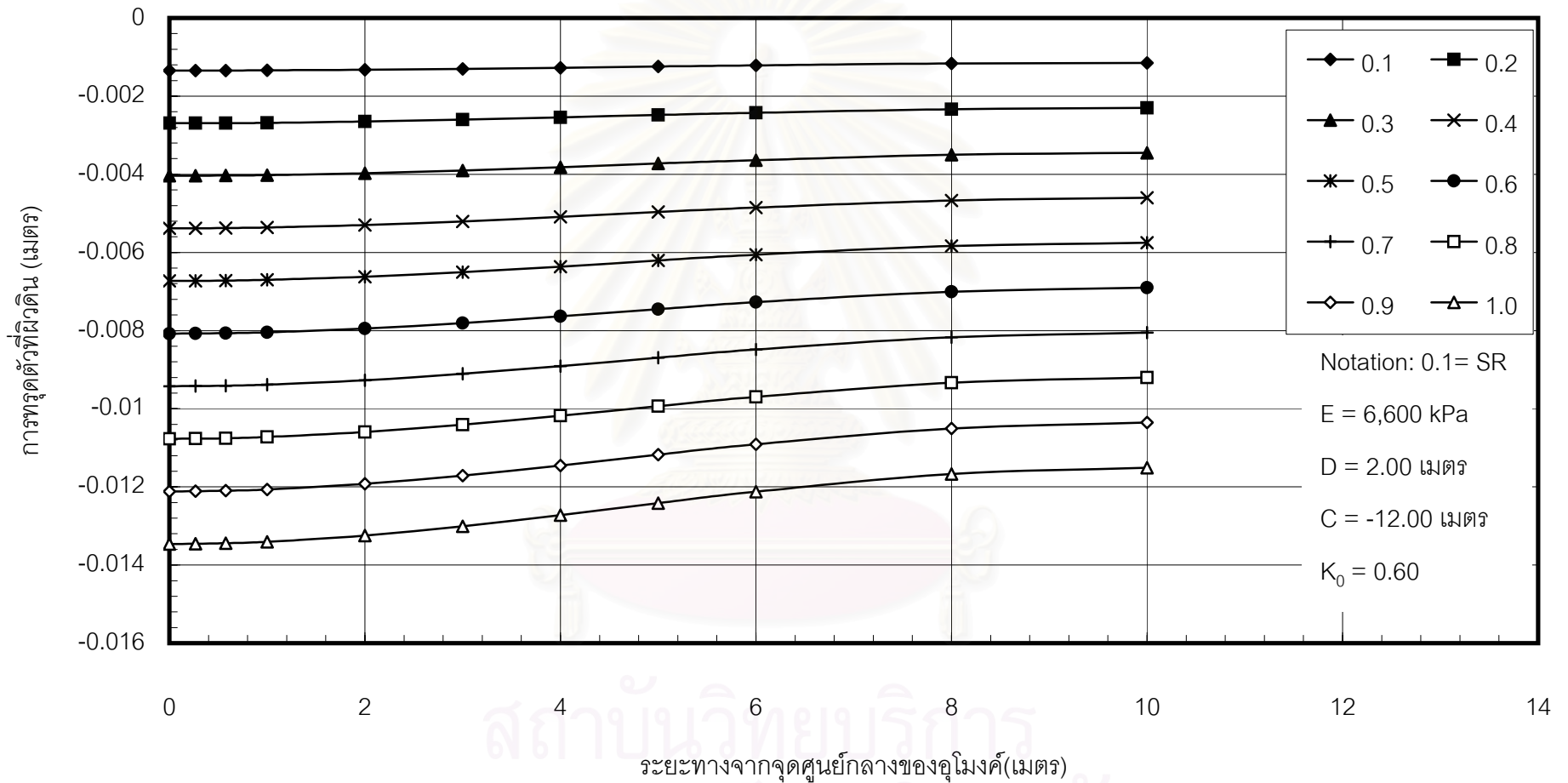
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



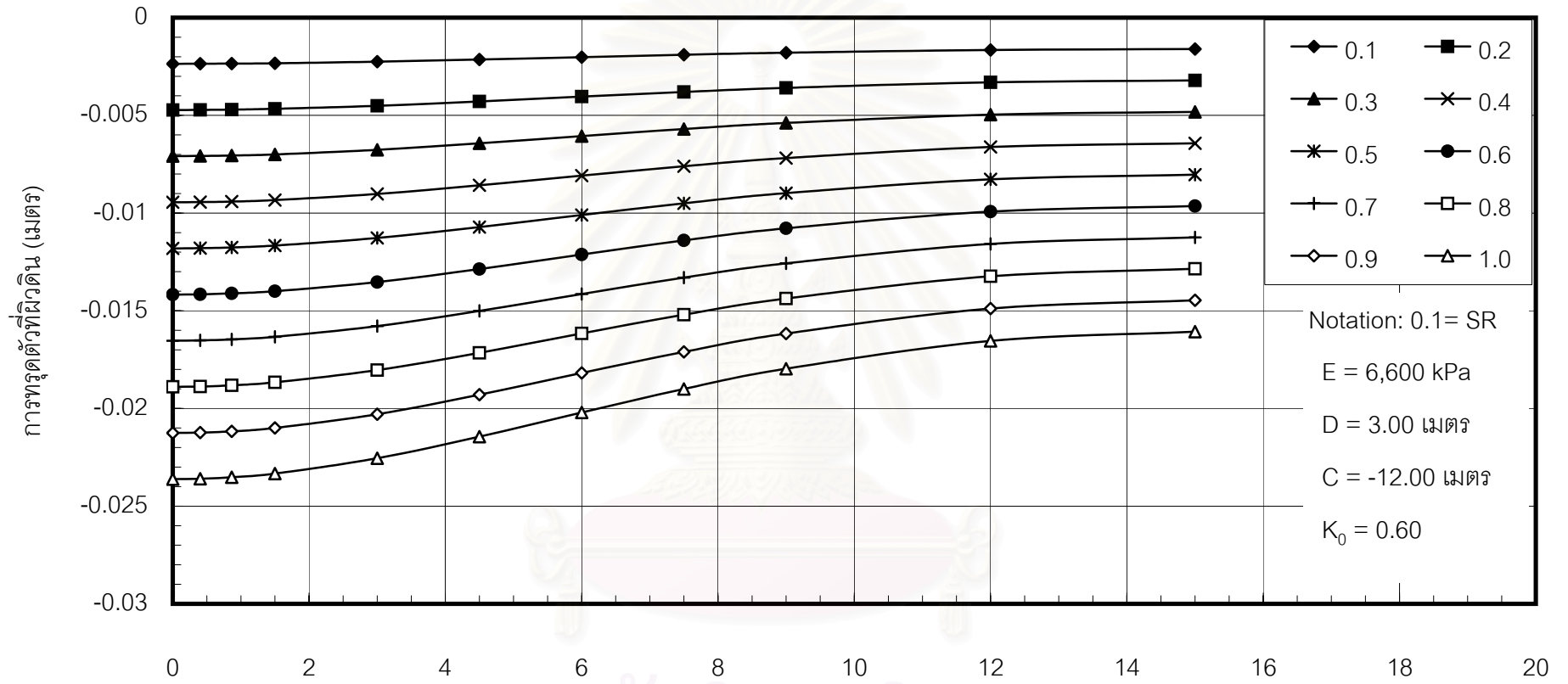


ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

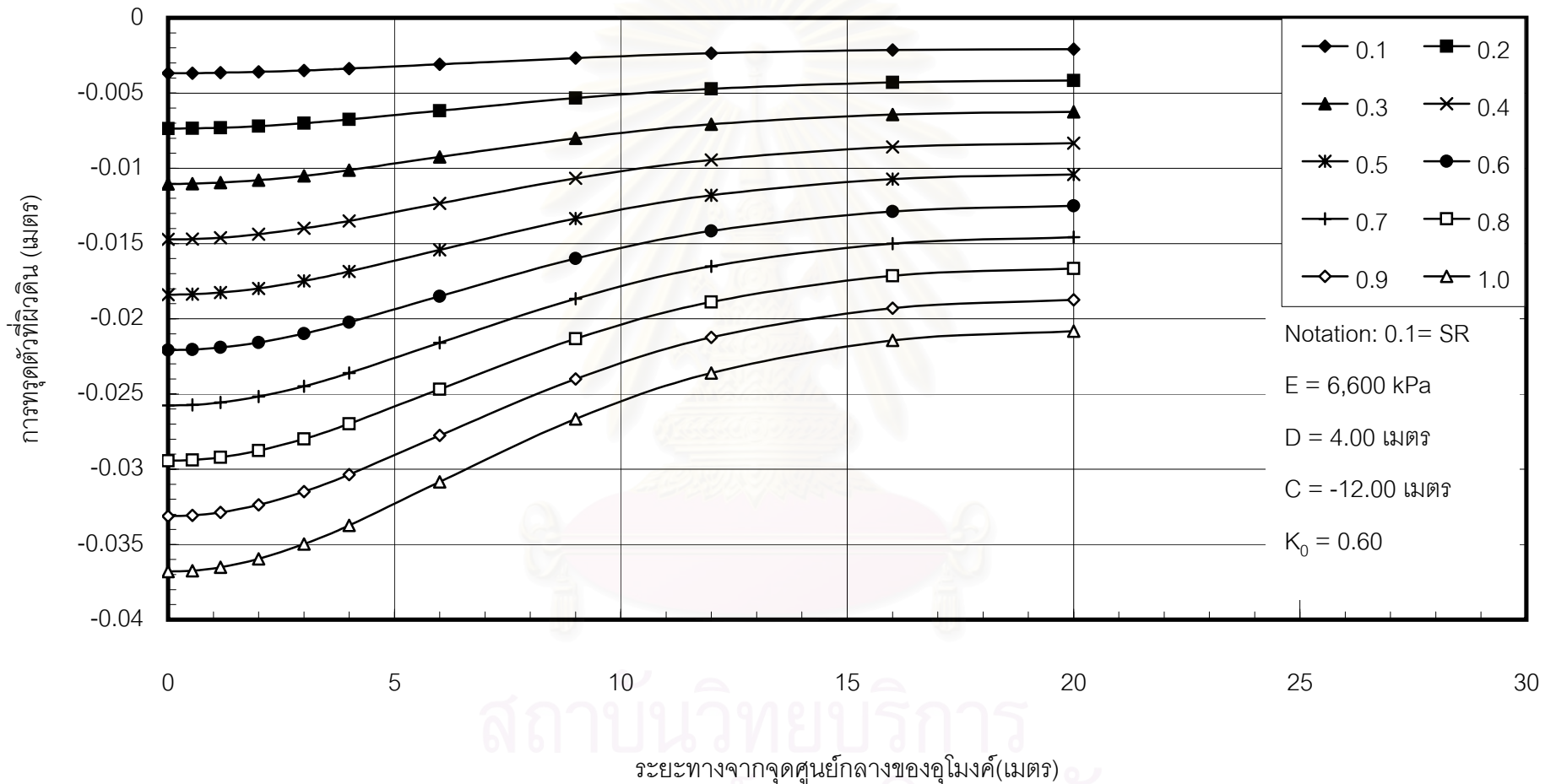


รูปที่ ก.1 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

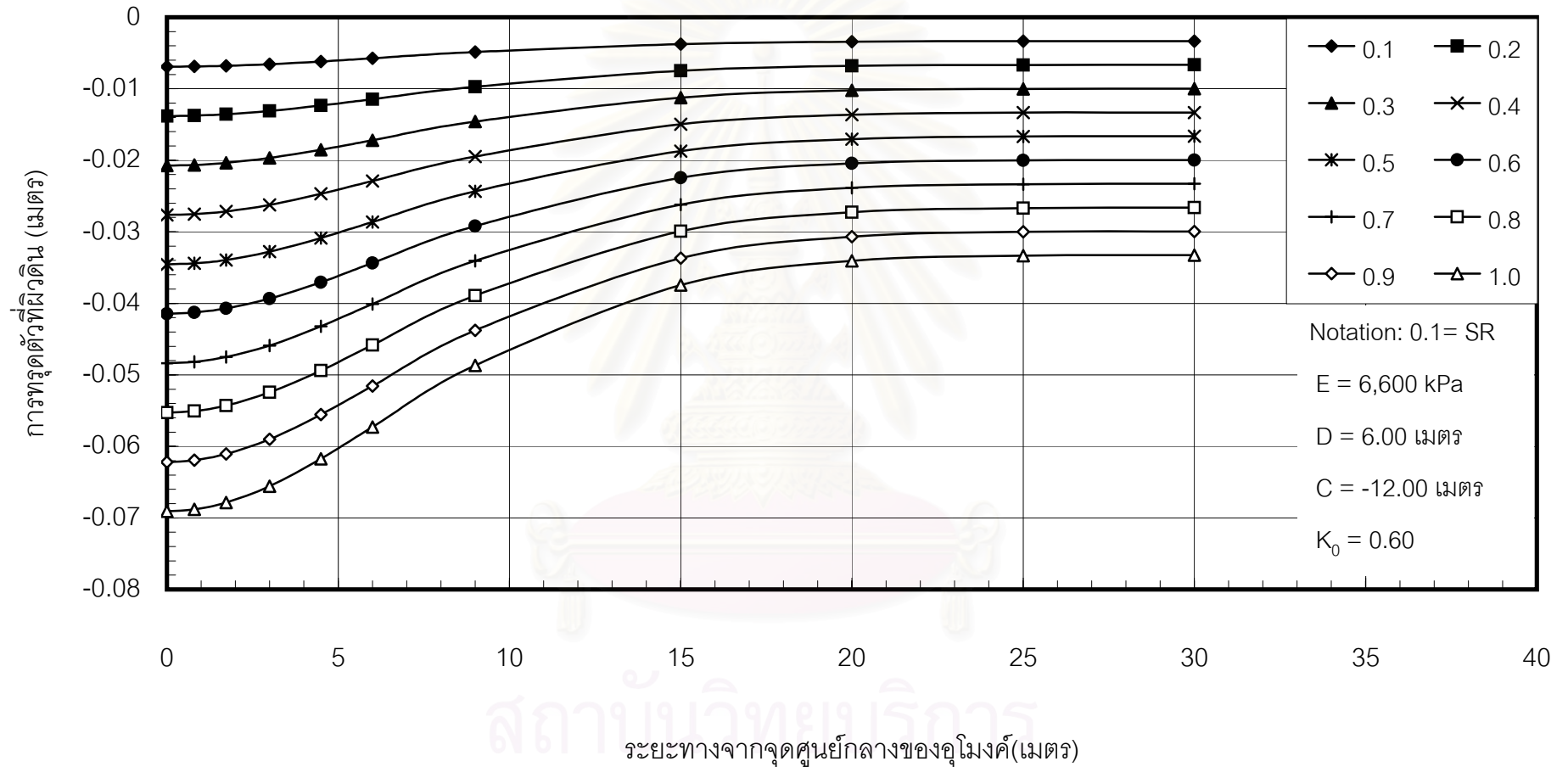


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

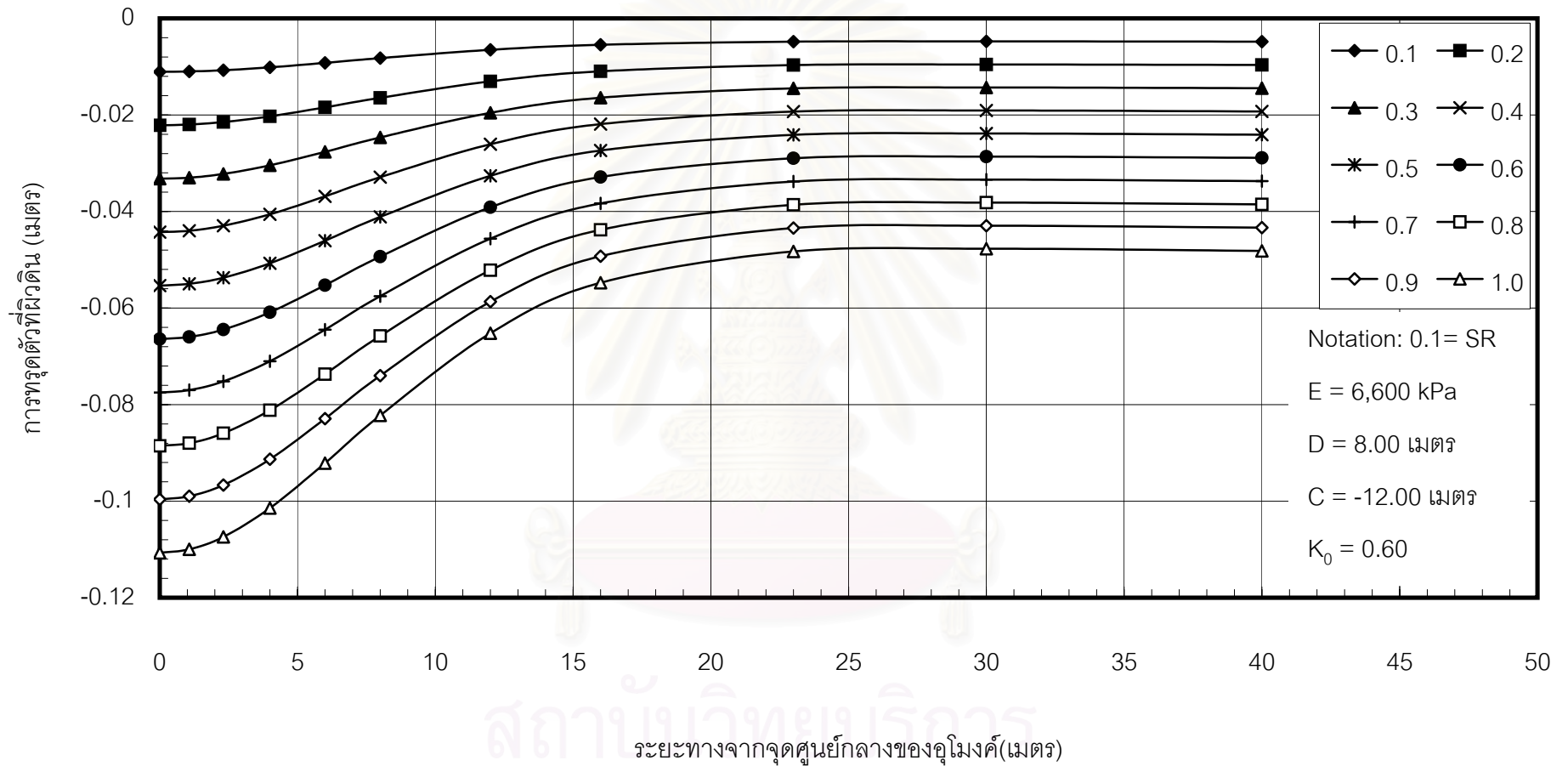
รูปที่ ก.2 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



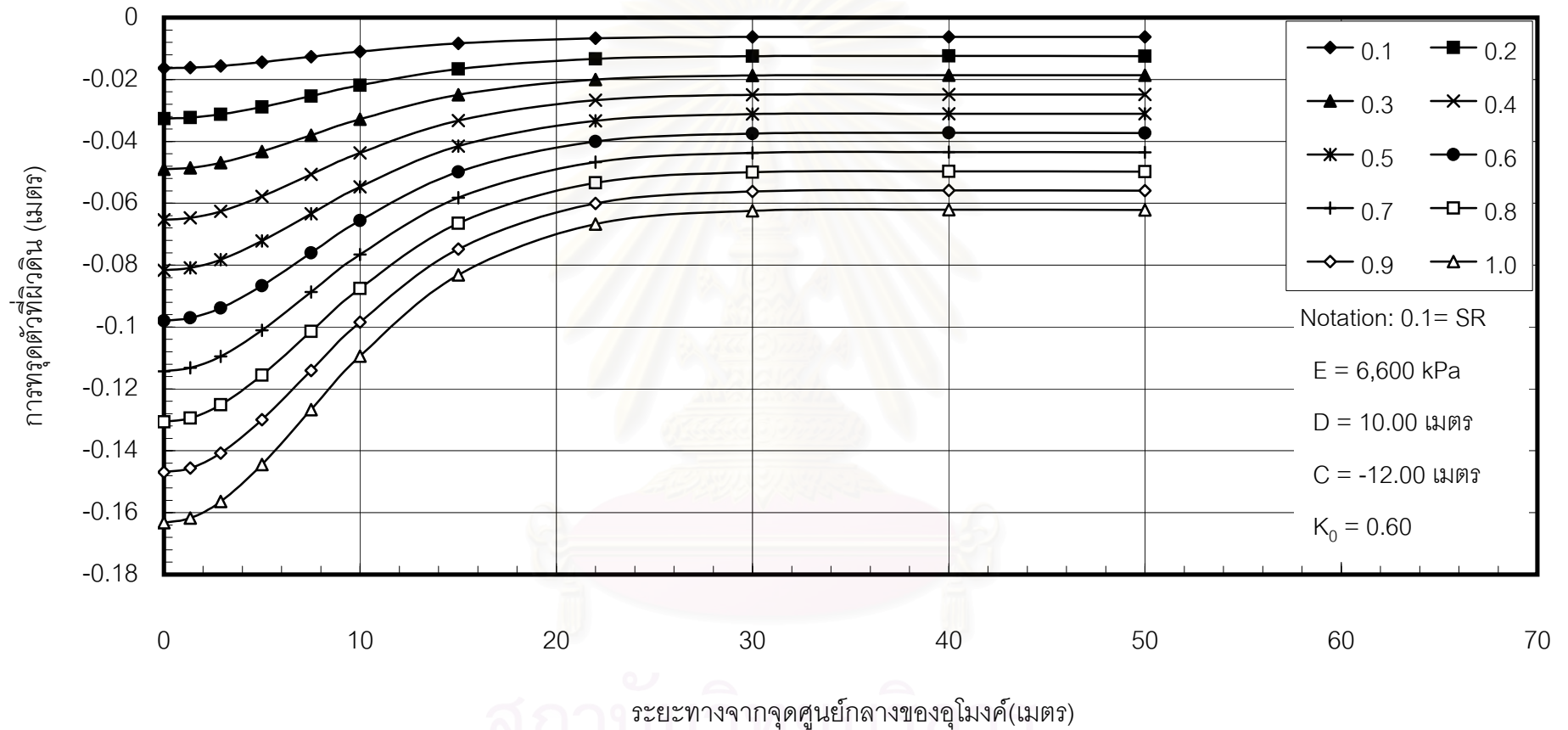
รูปที่ ก.3 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



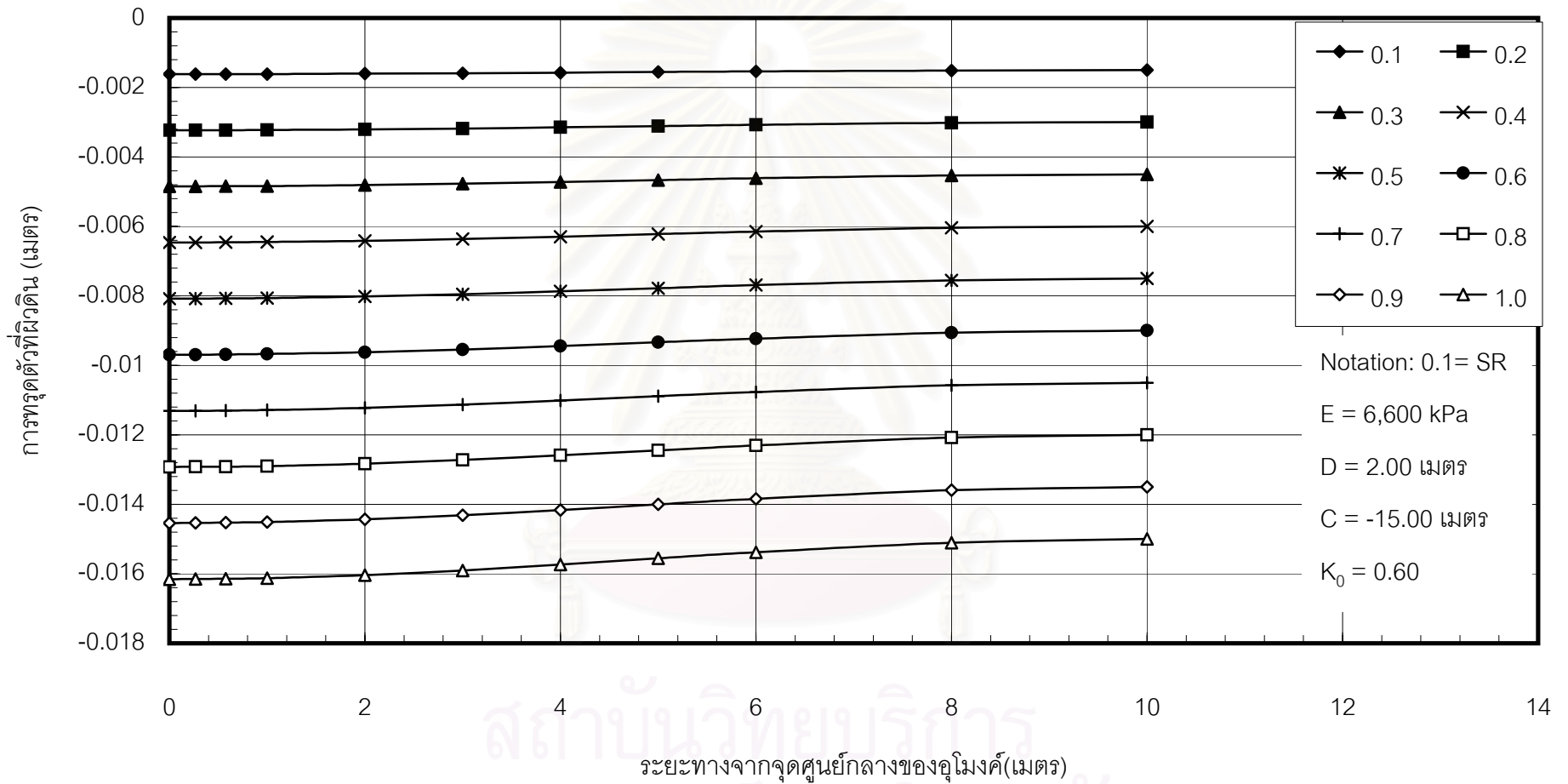
รูปที่ ก.4 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.5 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

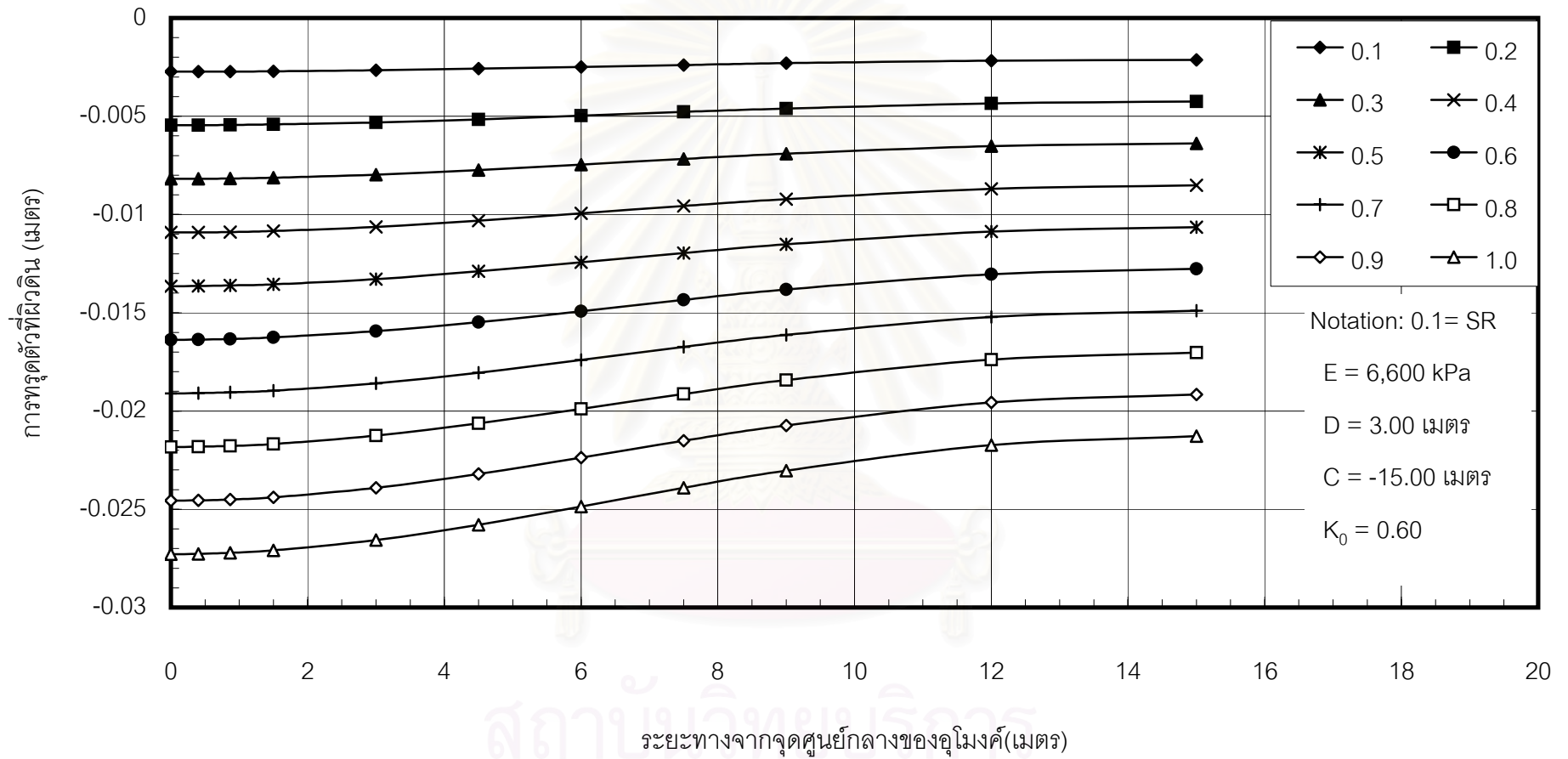


รูปที่ ก.6 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

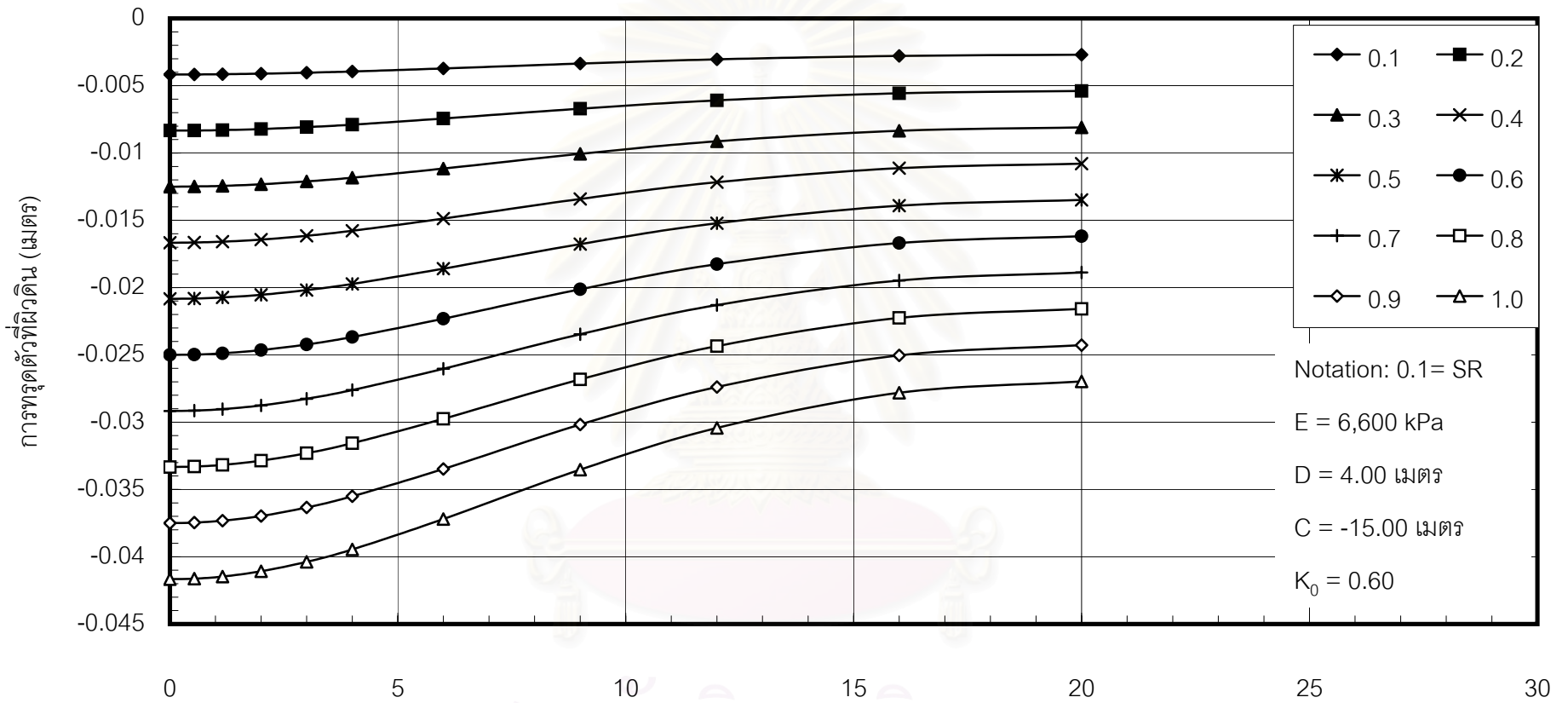


รูปที่ ก.7 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

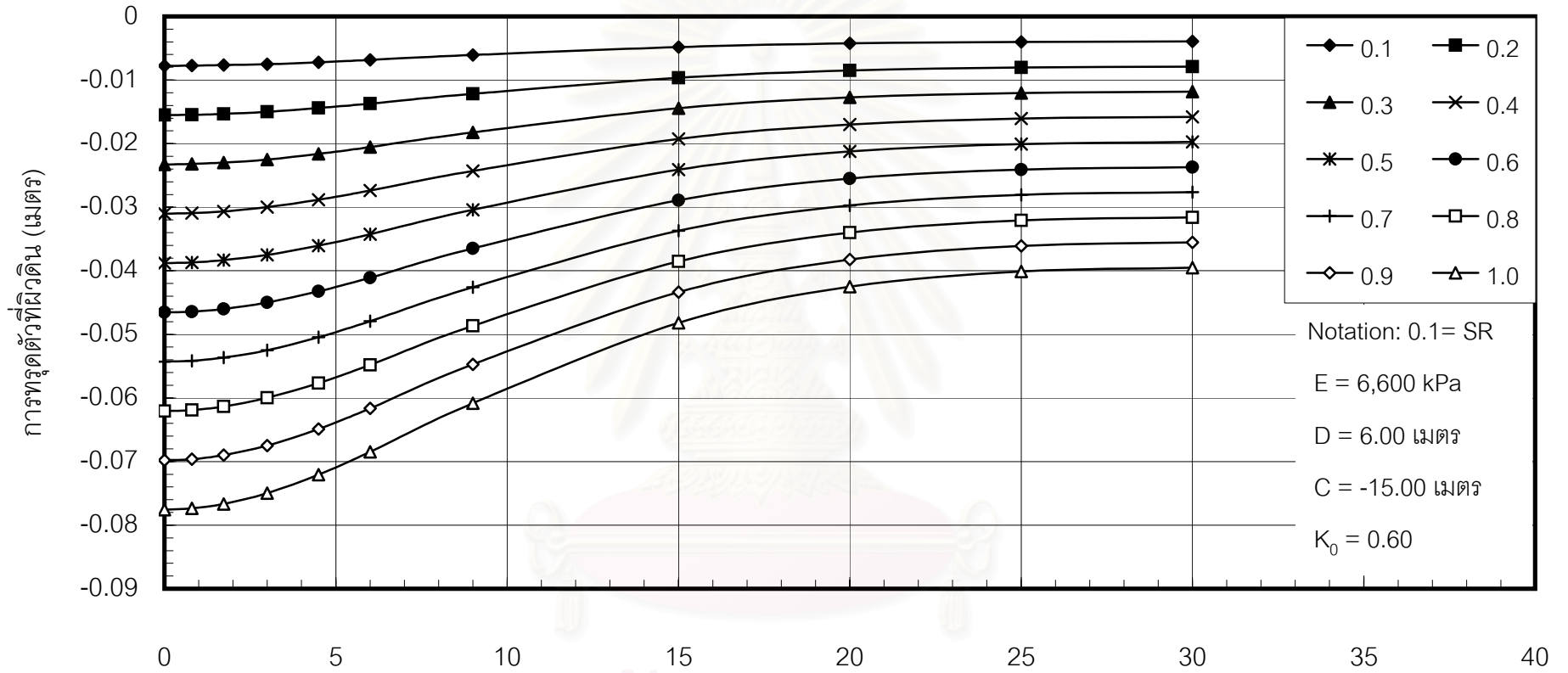




รูปที่ ก.8 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

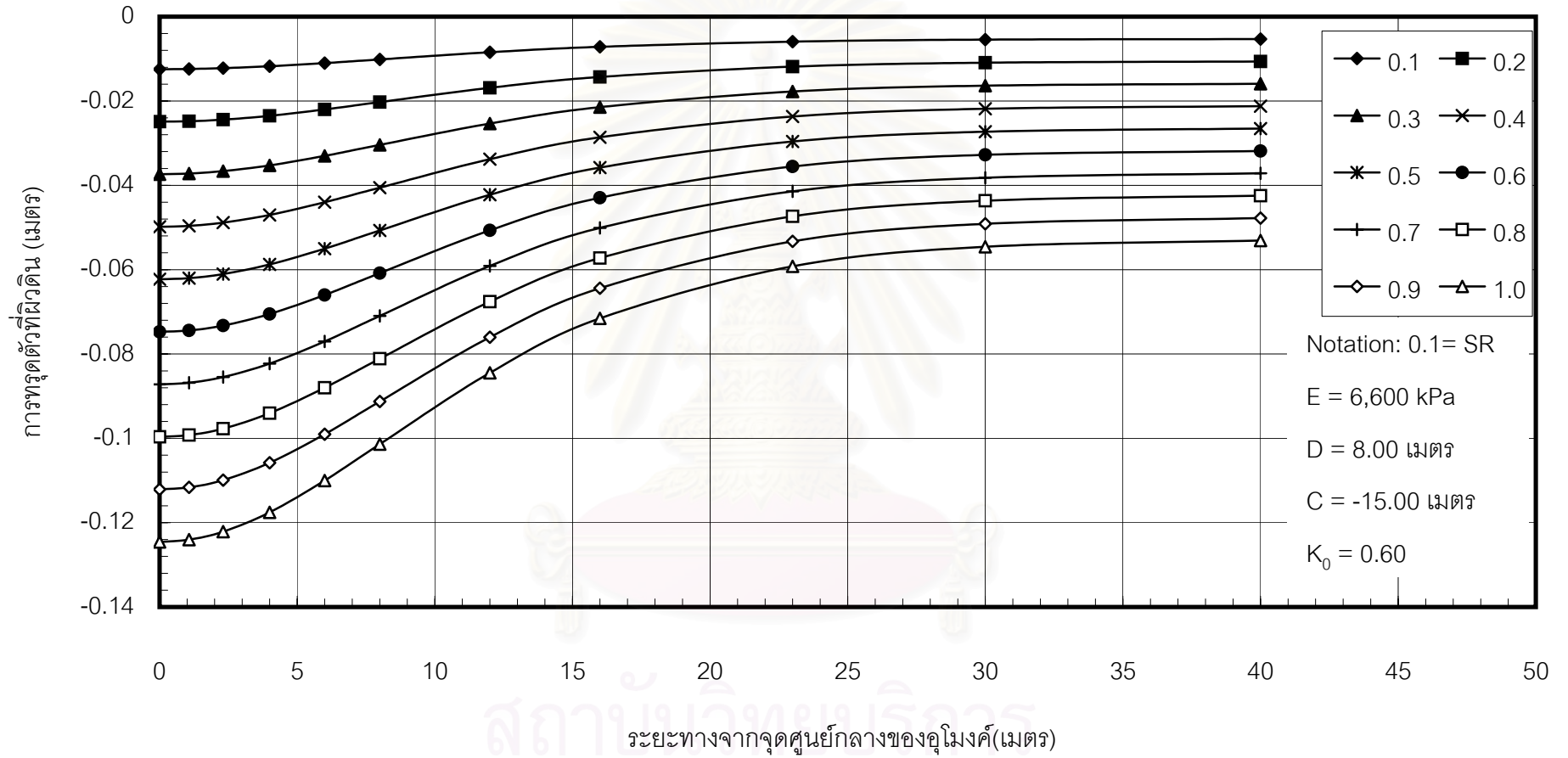


รูปที่ ก.9 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

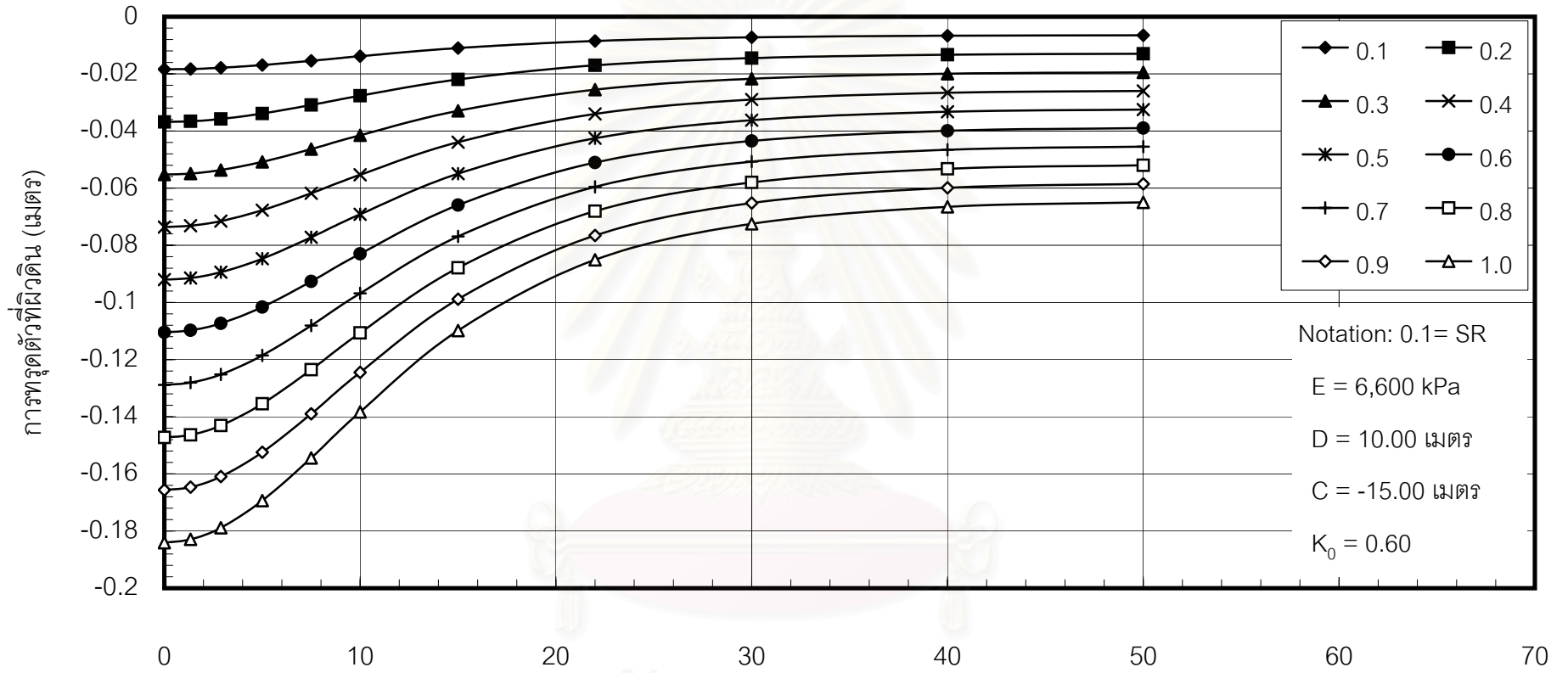


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.10 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

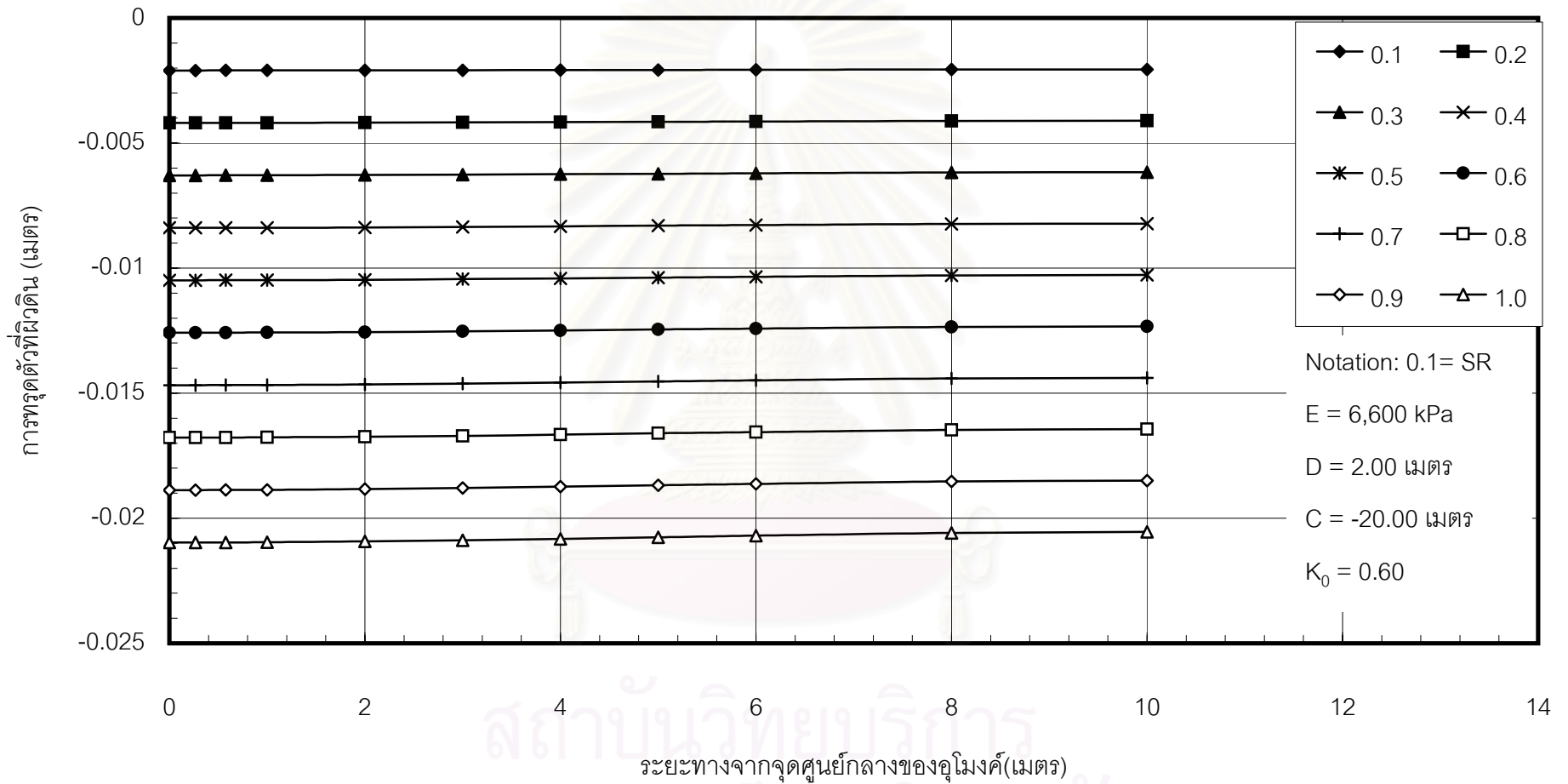


รูปที่ ก.11 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

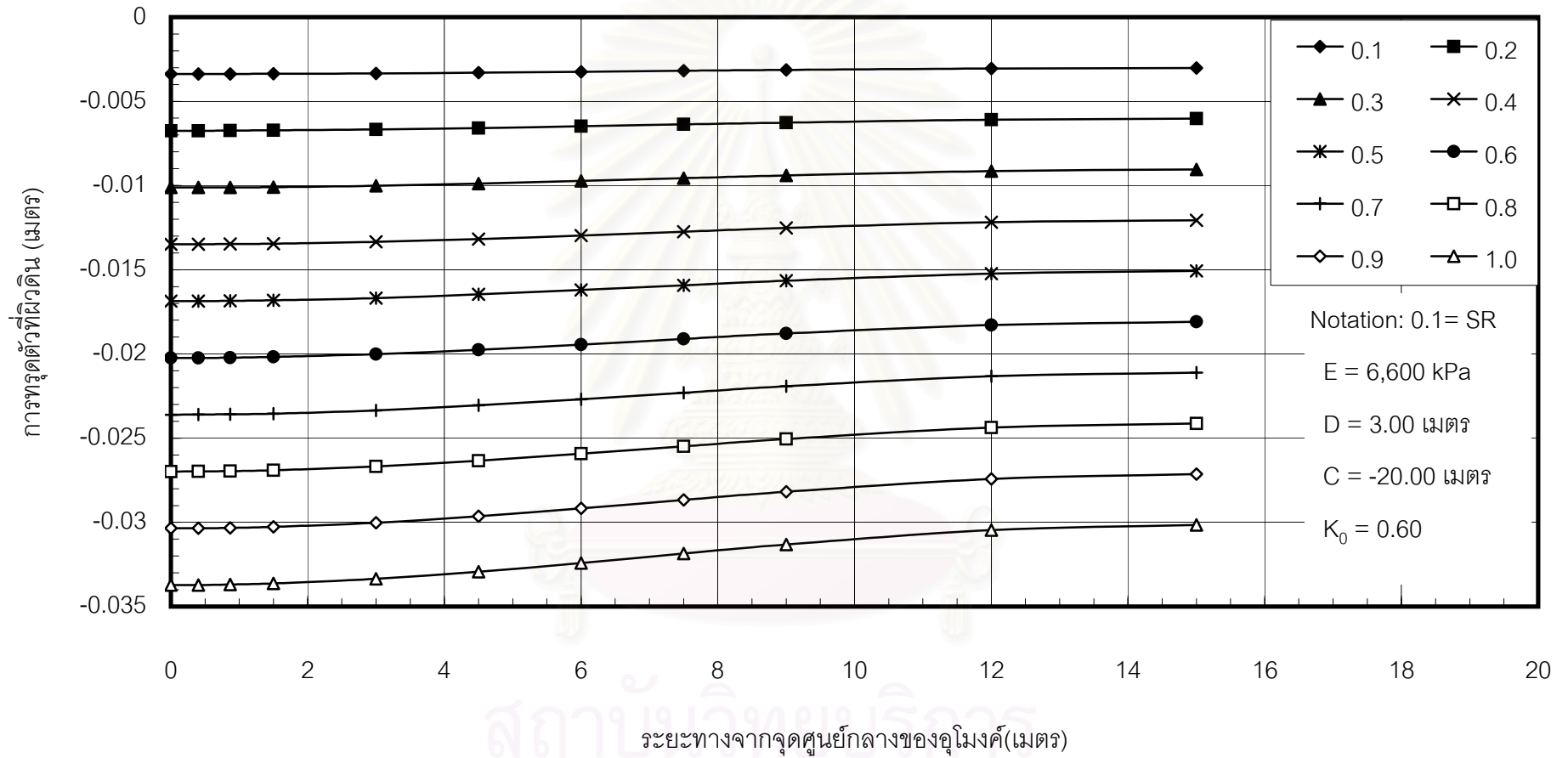


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

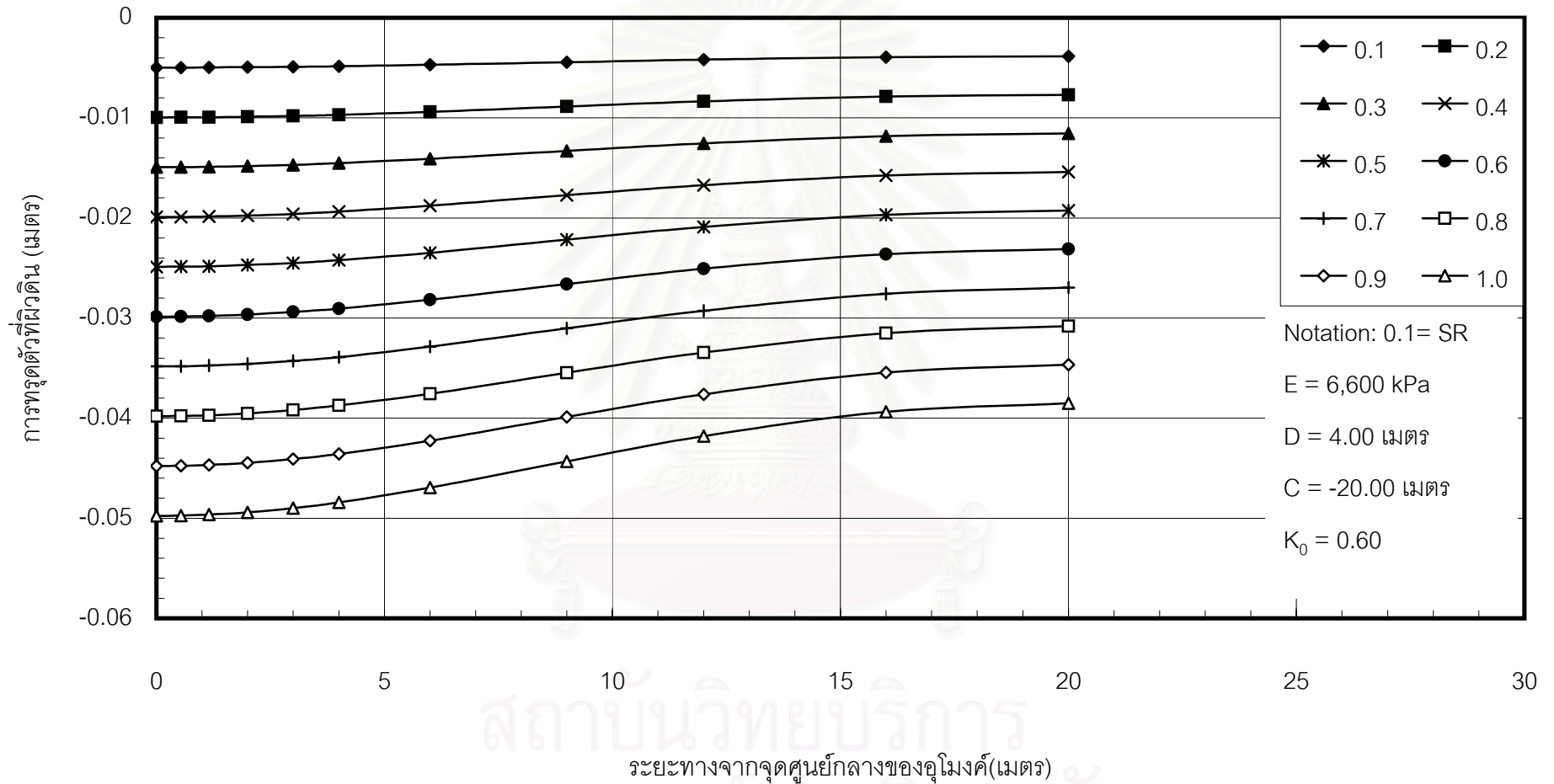
รูปที่ ก.12 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.13 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

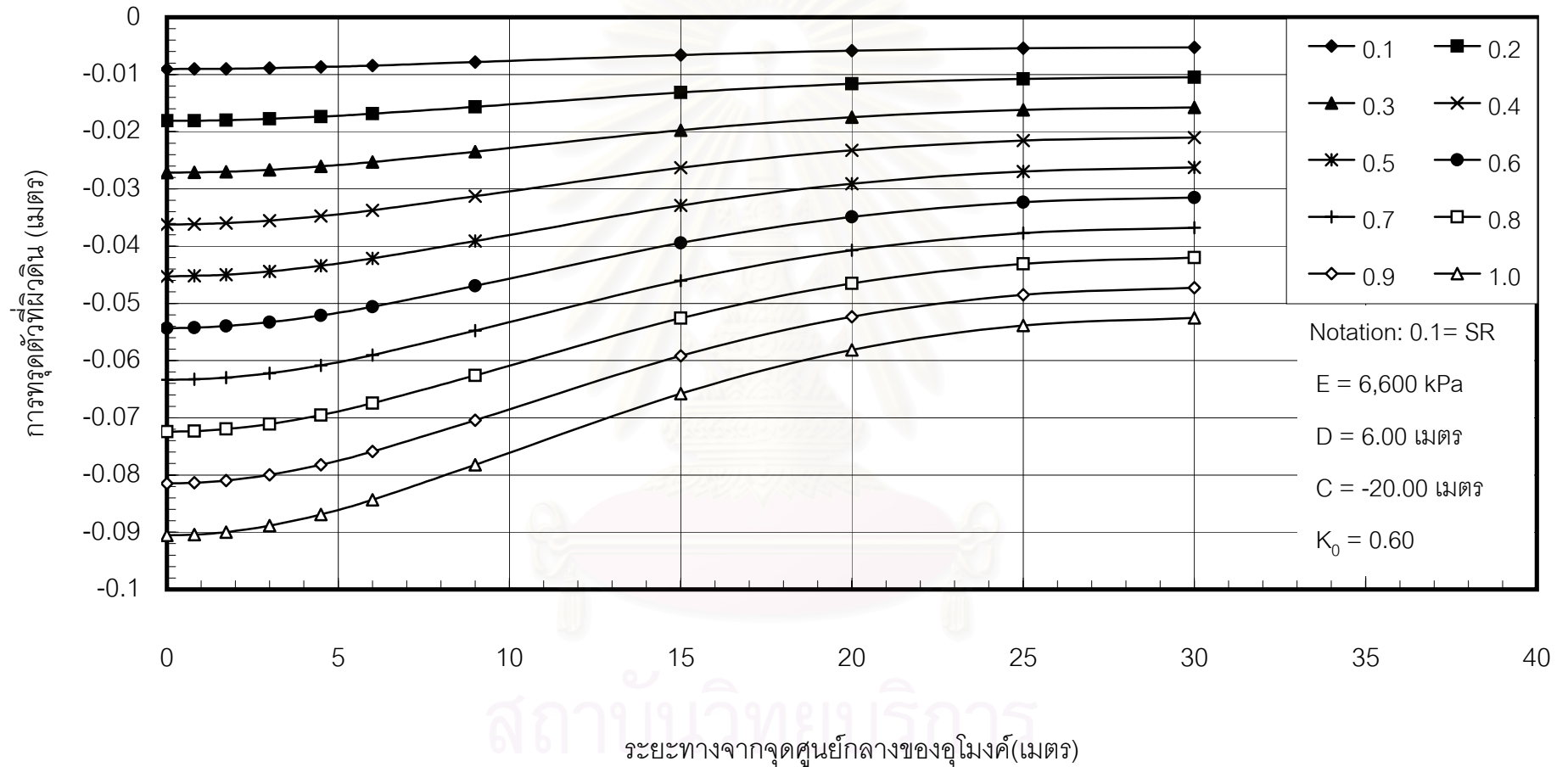


รูปที่ ก.14 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

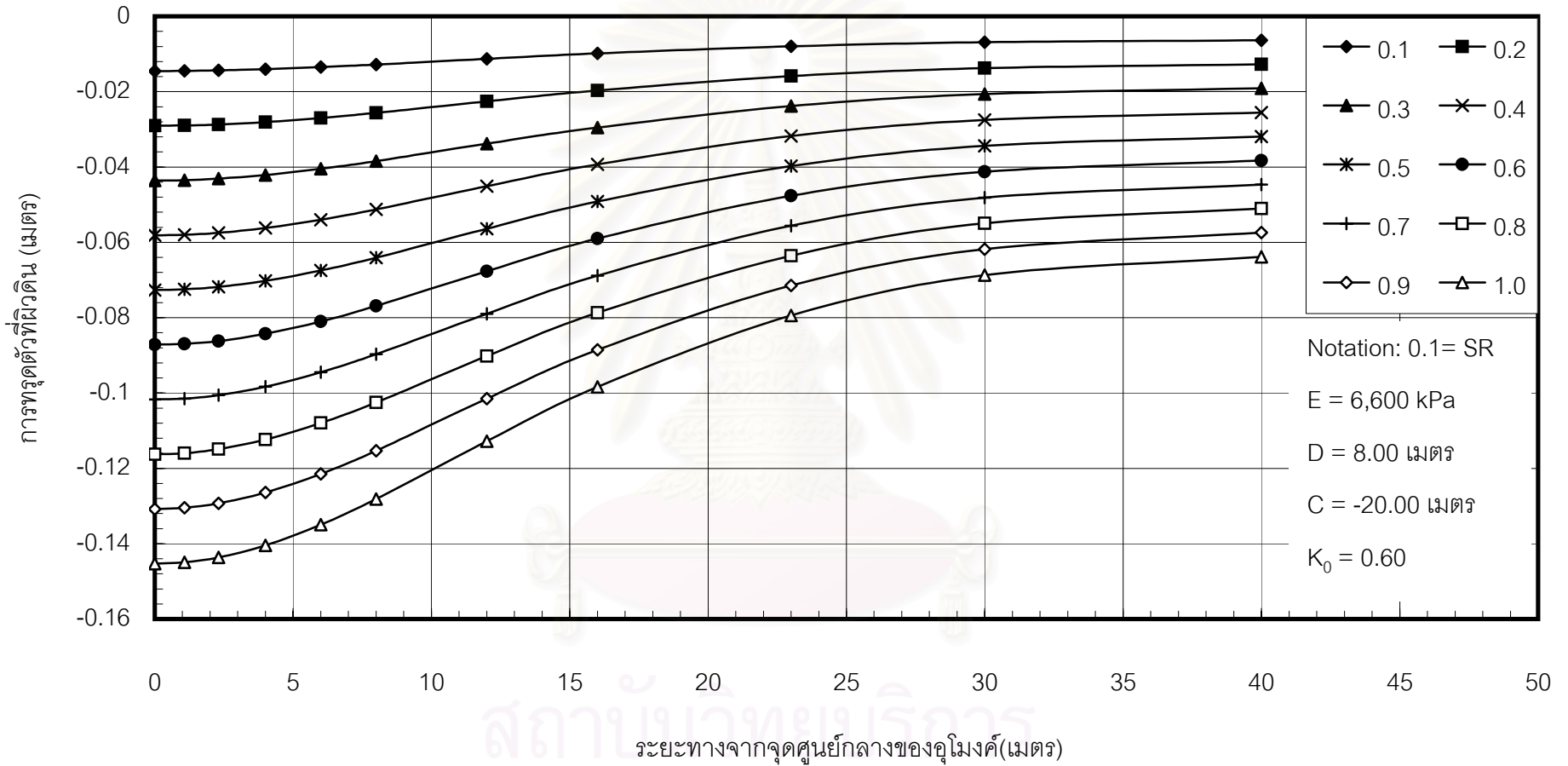


รูปที่ ก.15 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

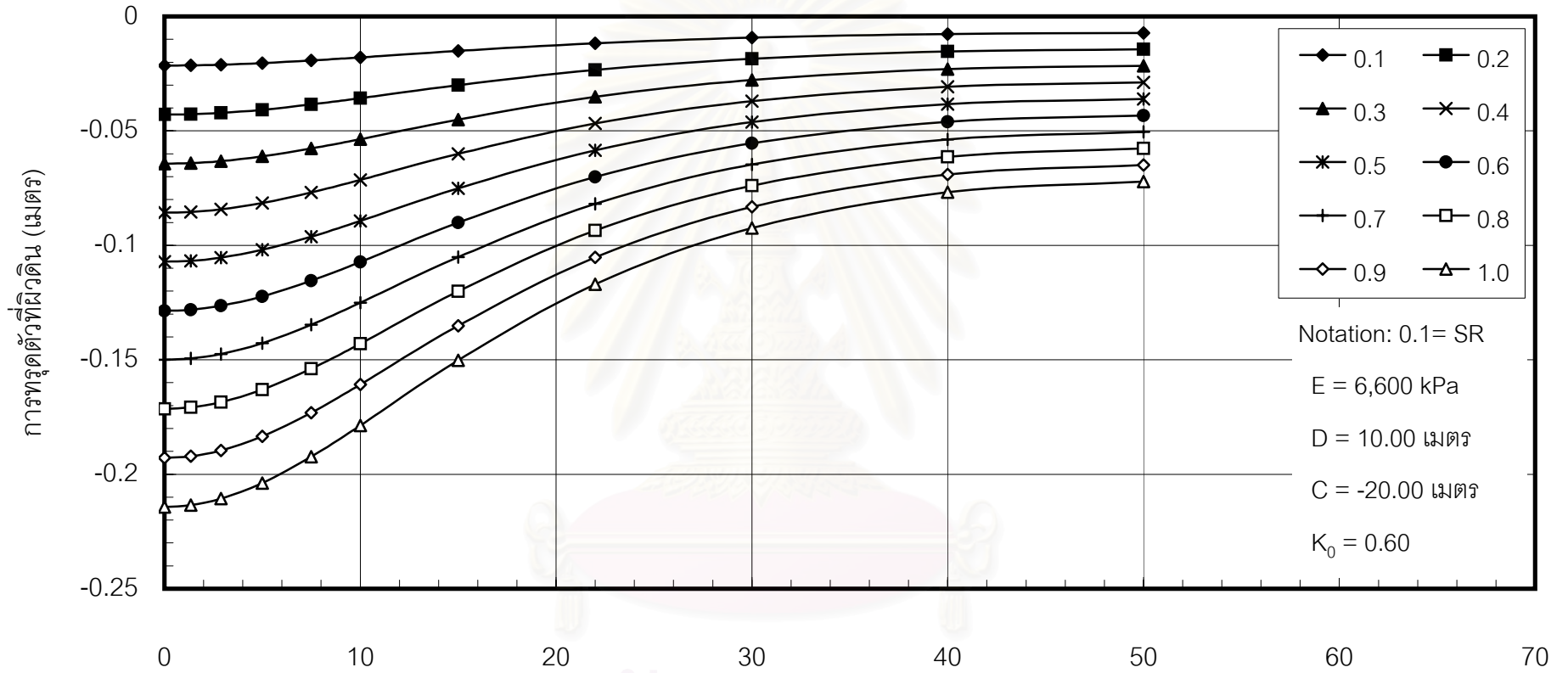




รูปที่ ก.16 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

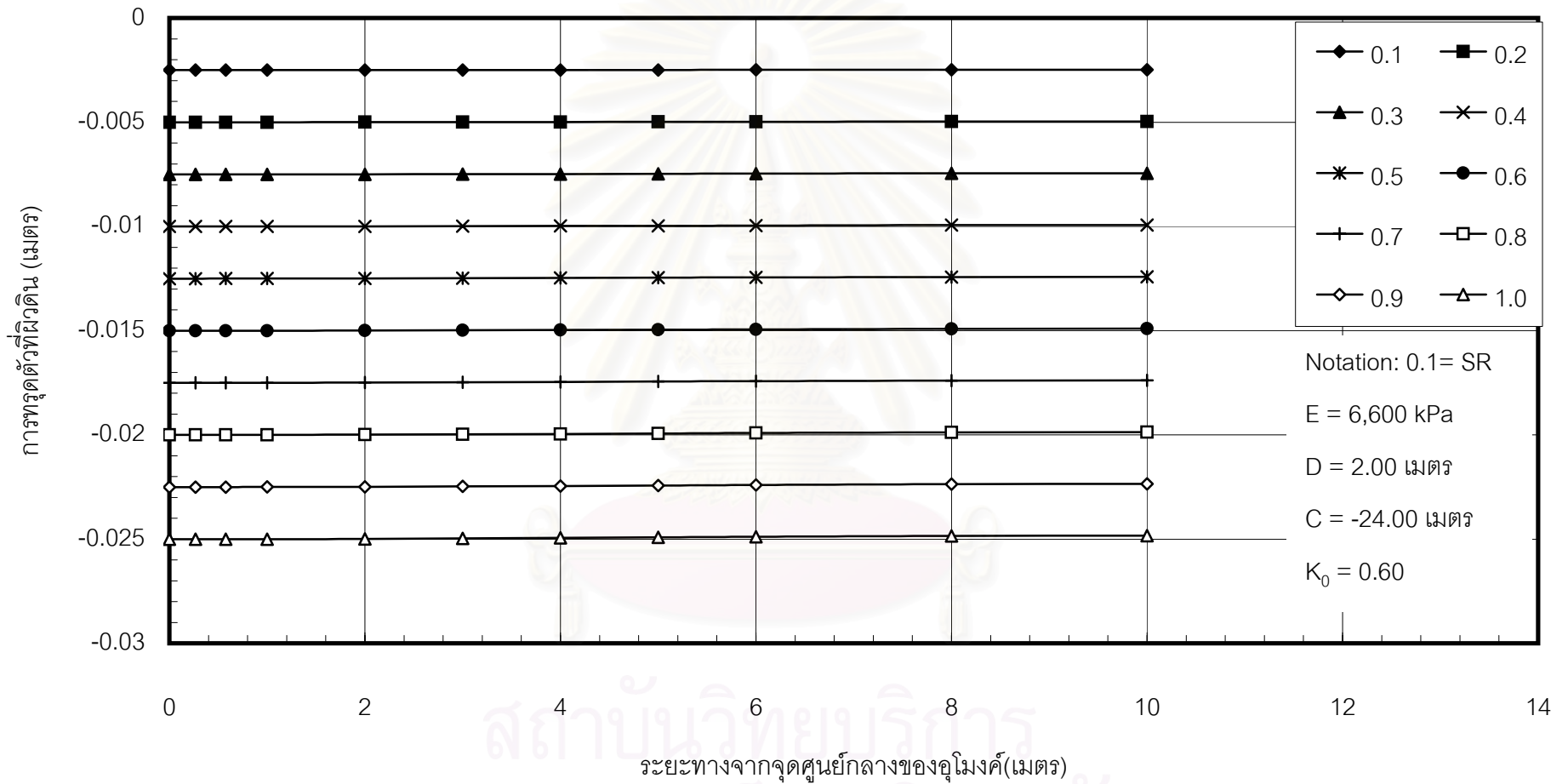


รูปที่ ก.17 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

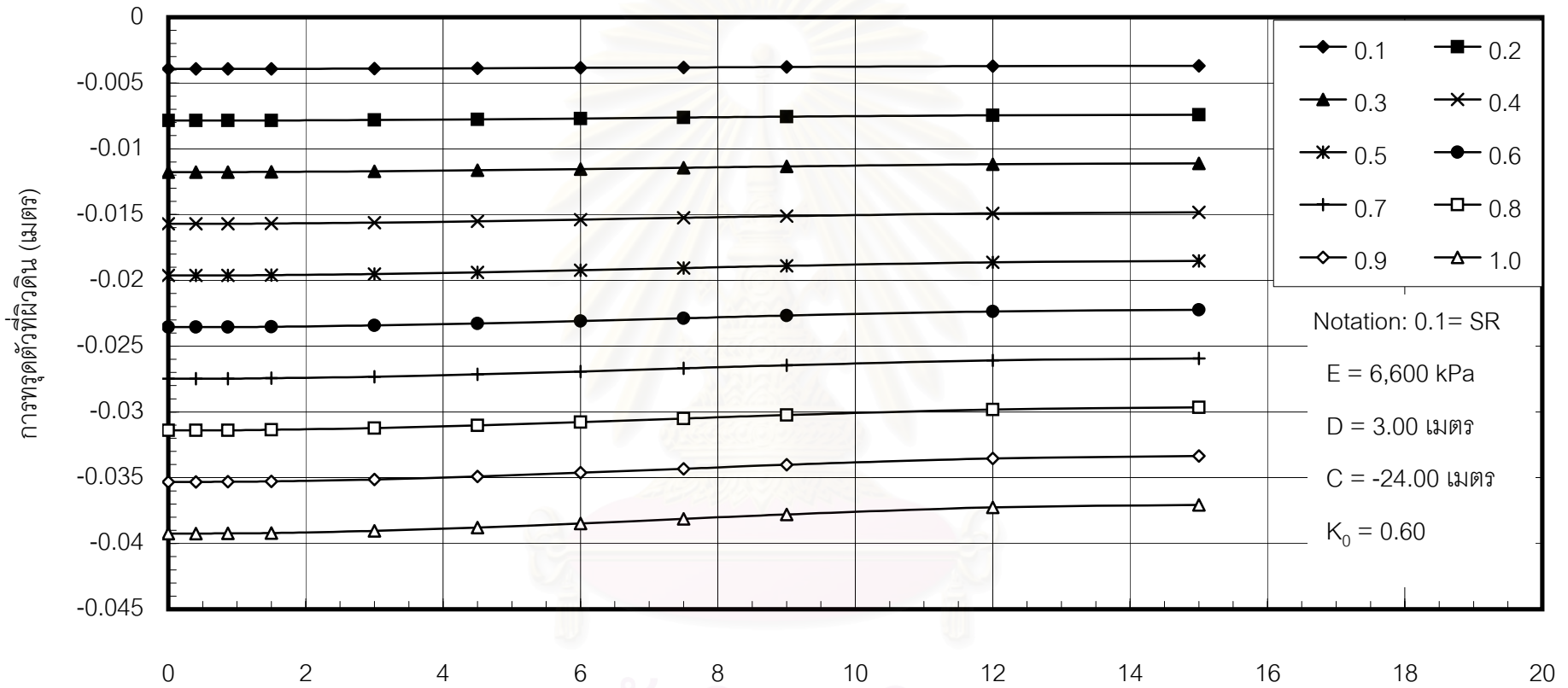


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.18 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

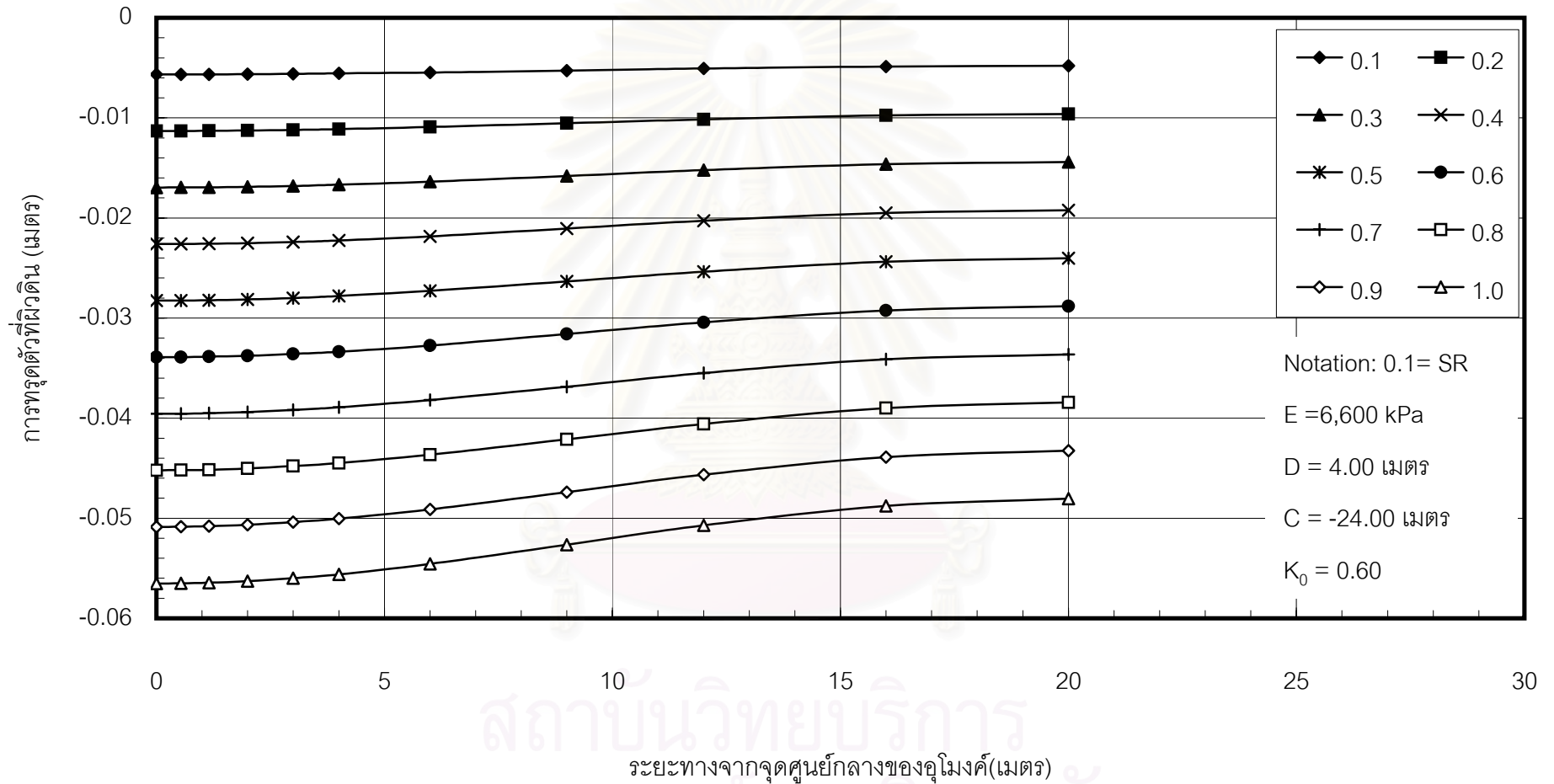


รูปที่ ก.19 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

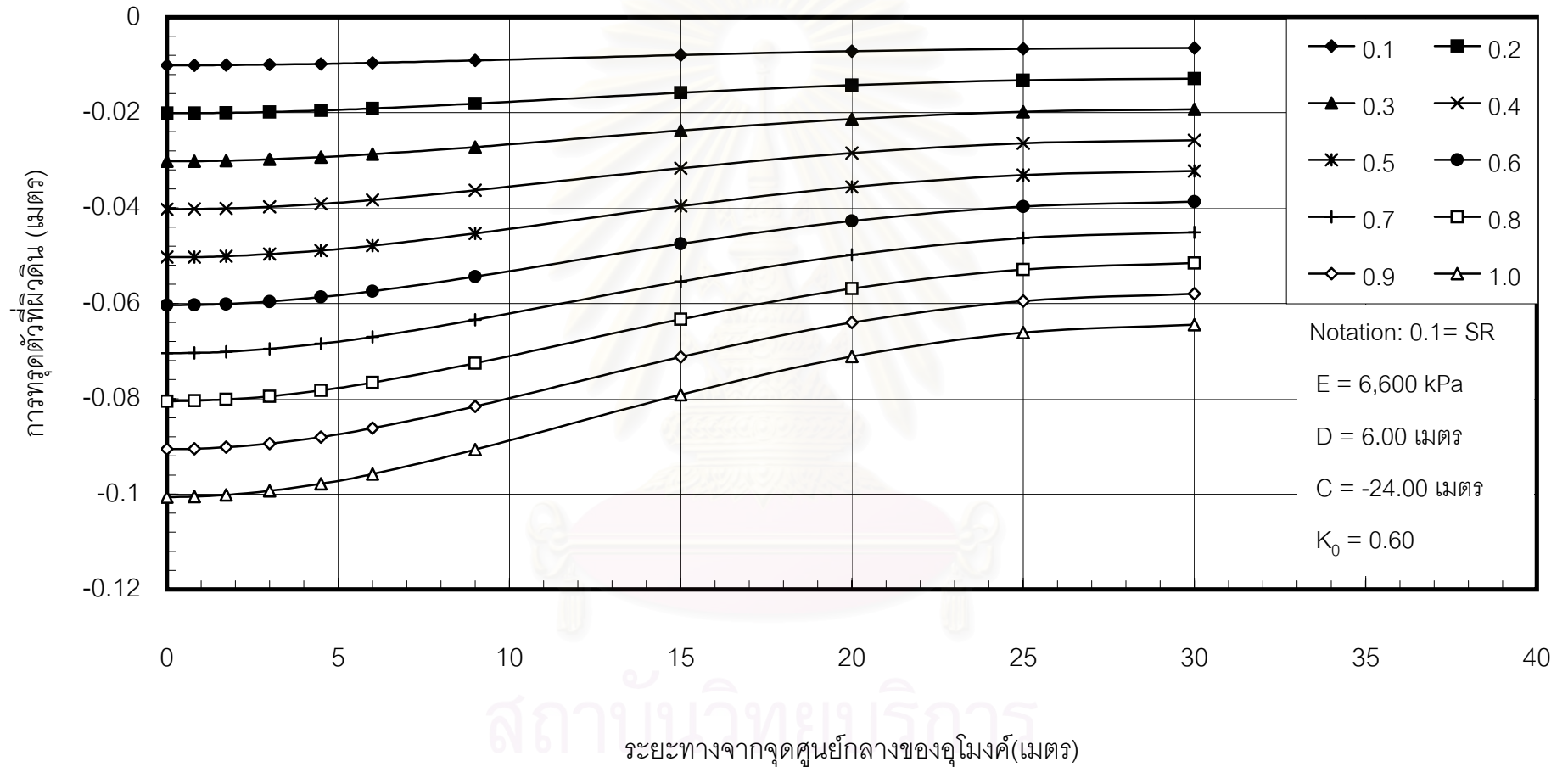


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

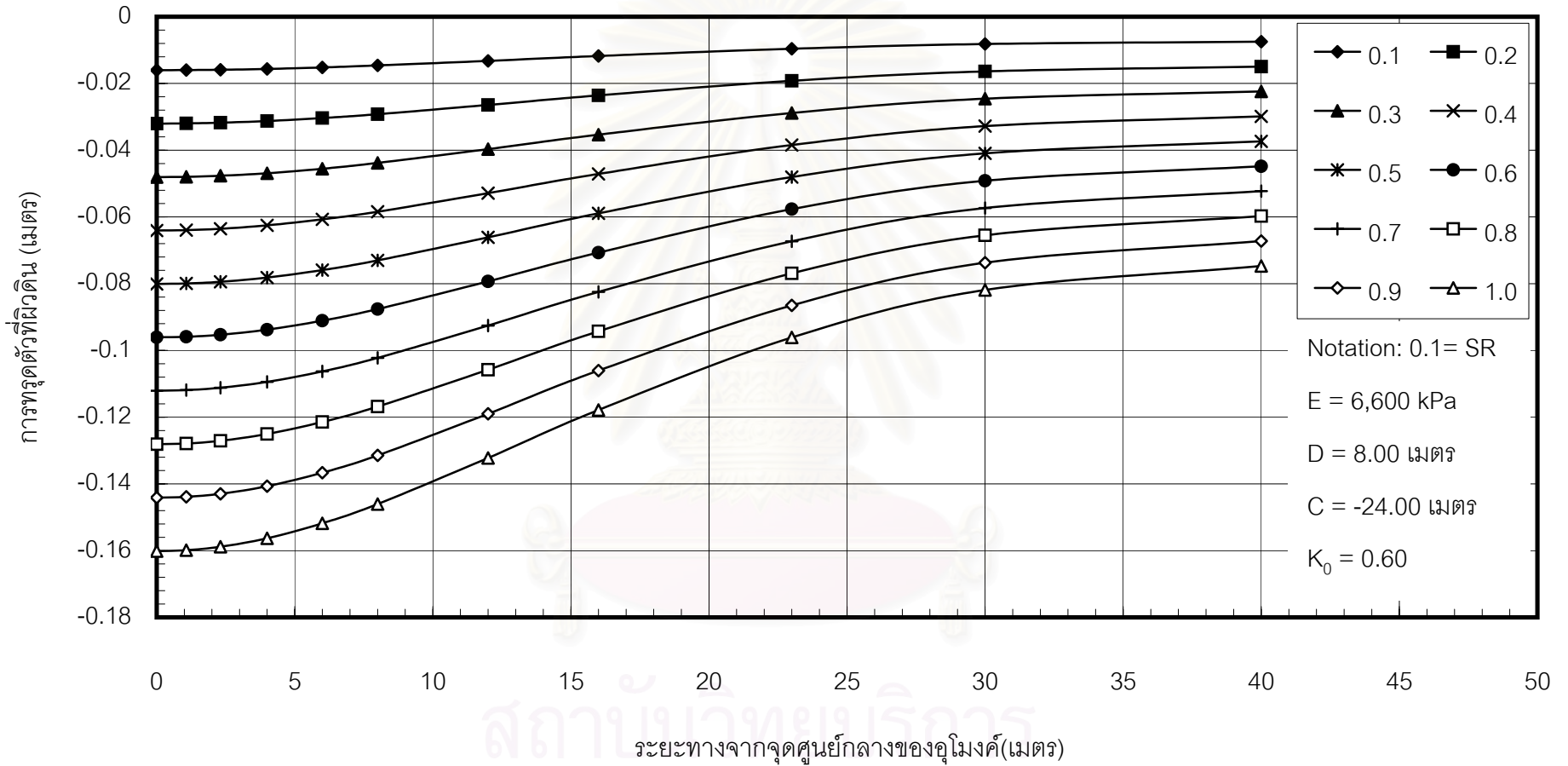
รูปที่ ก.20 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.21 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

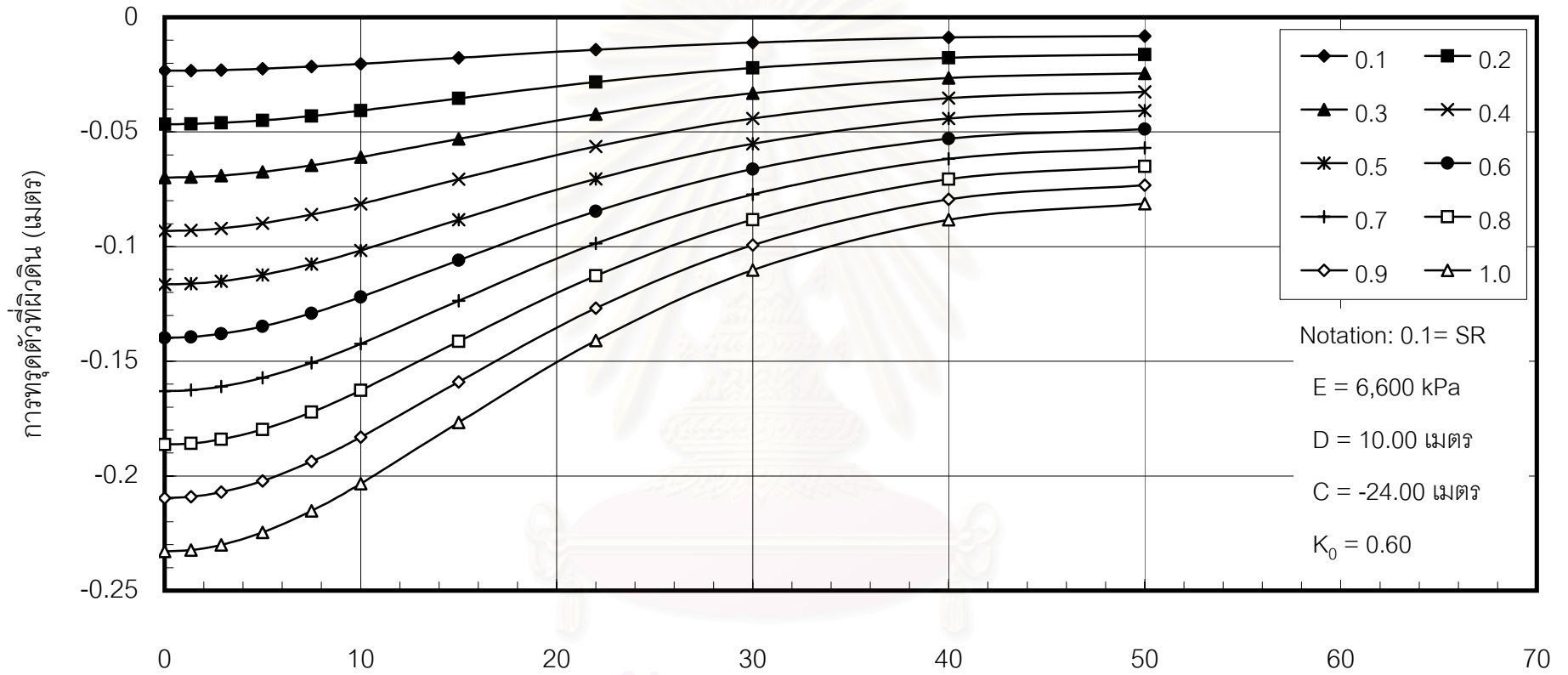


รูปที่ ก.22 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



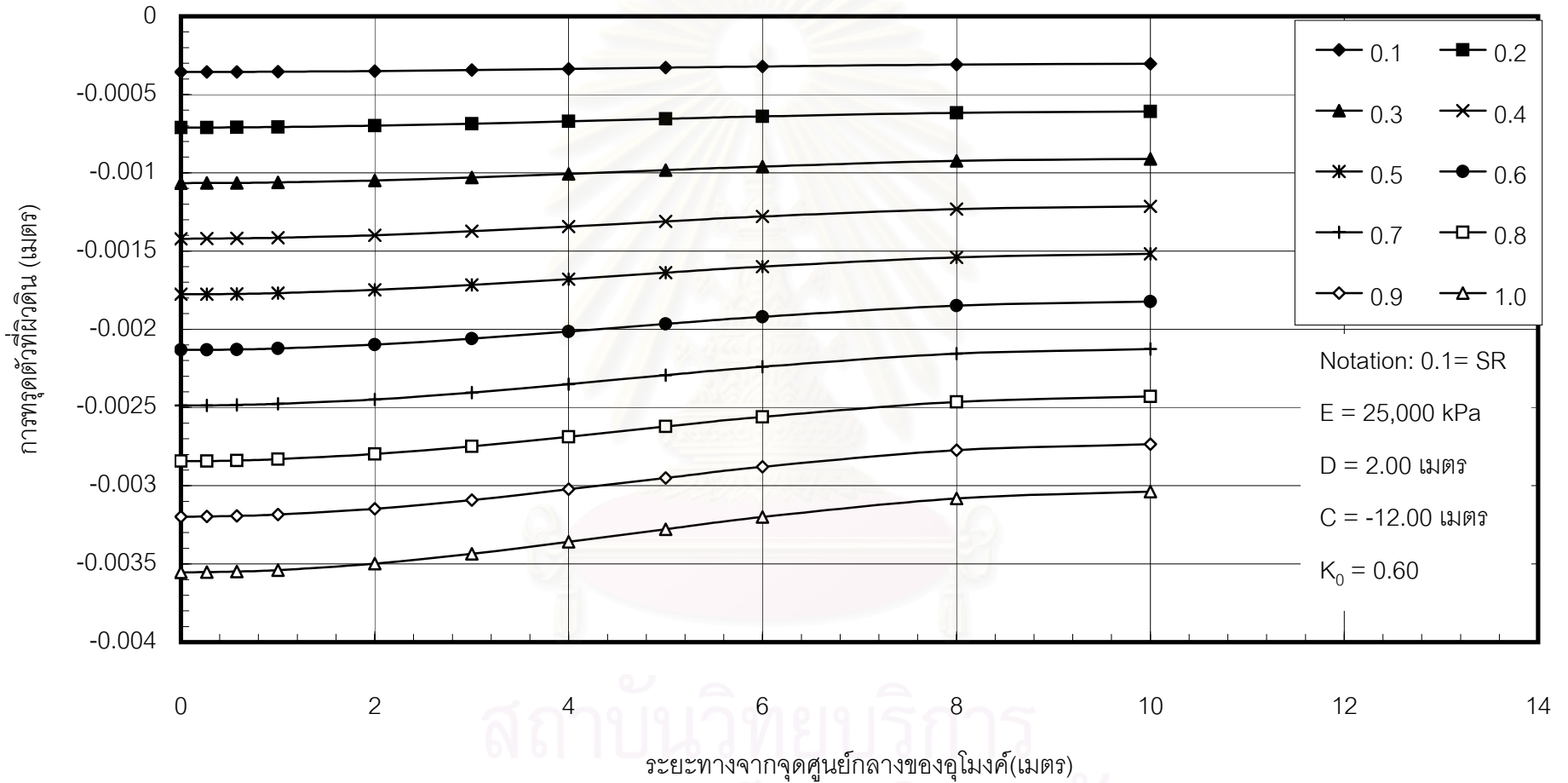
รูปที่ ก.23 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



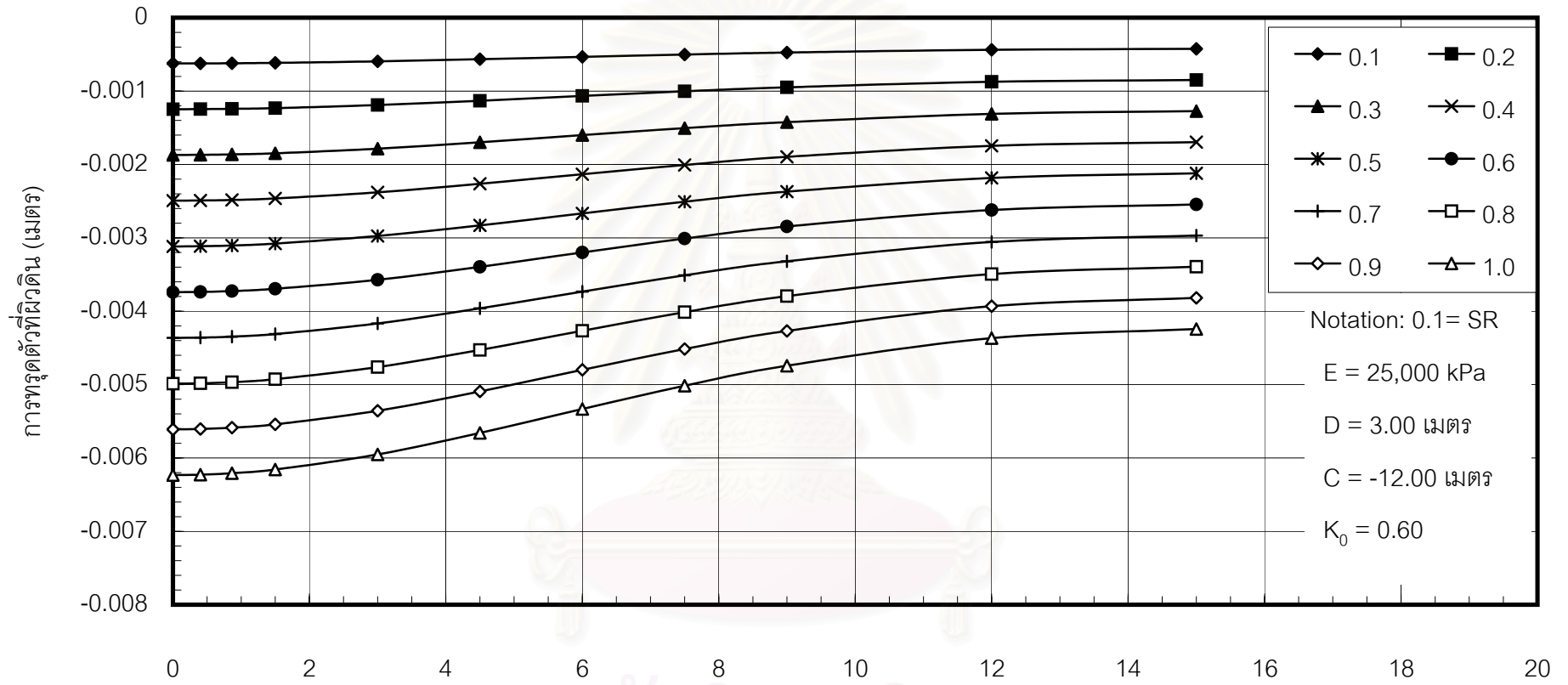


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.24 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

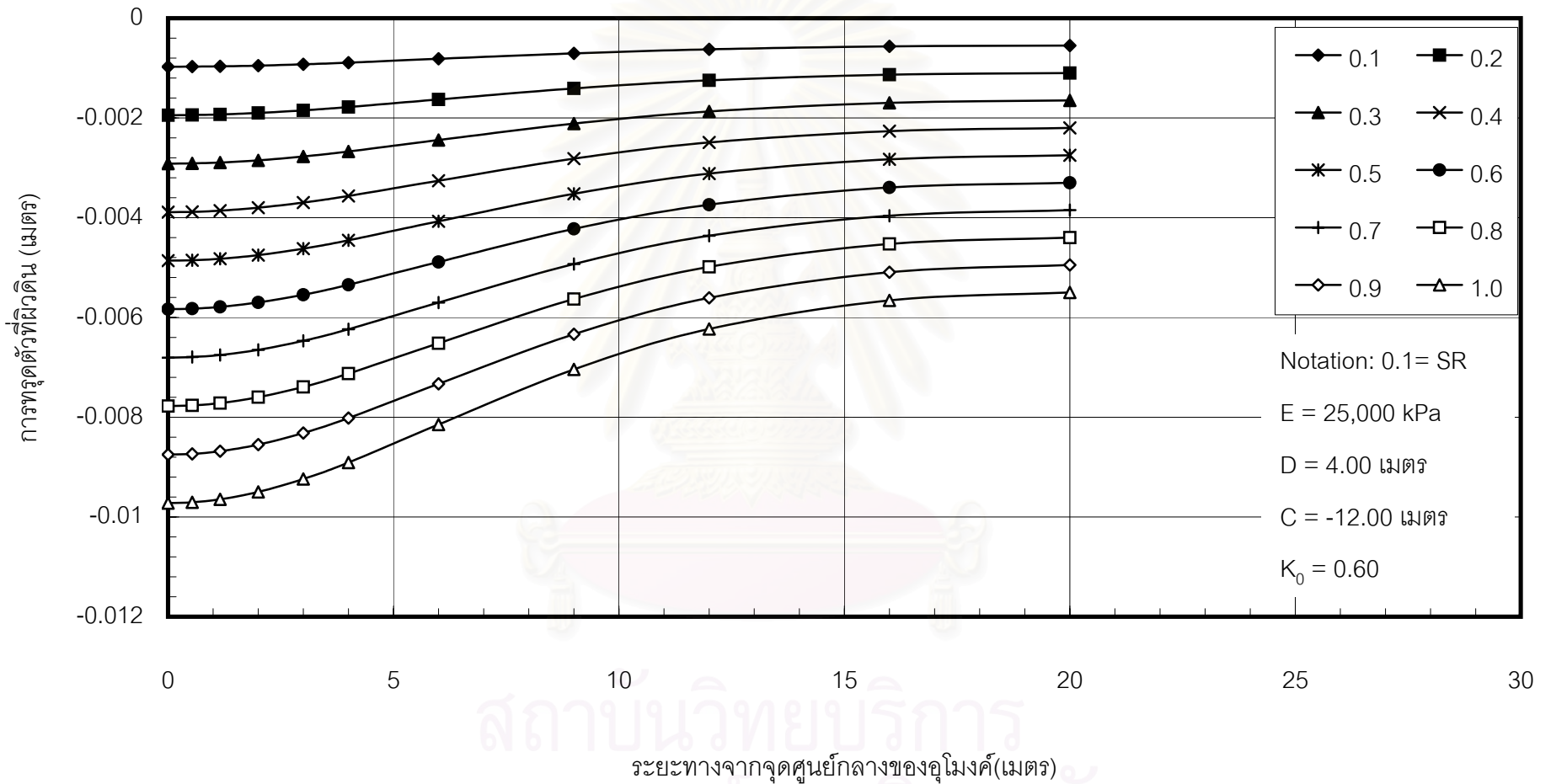


รูปที่ ก.25 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

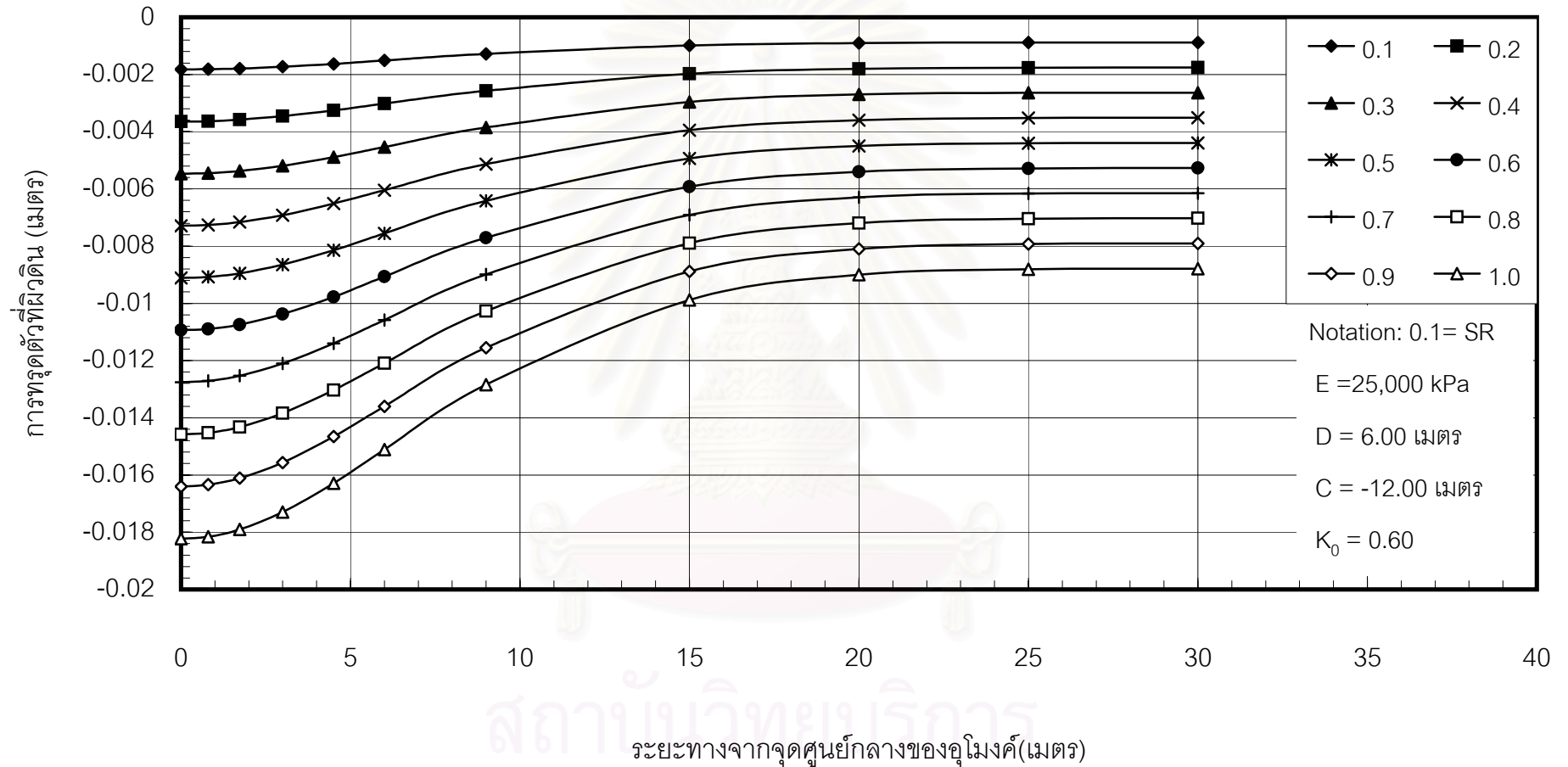


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

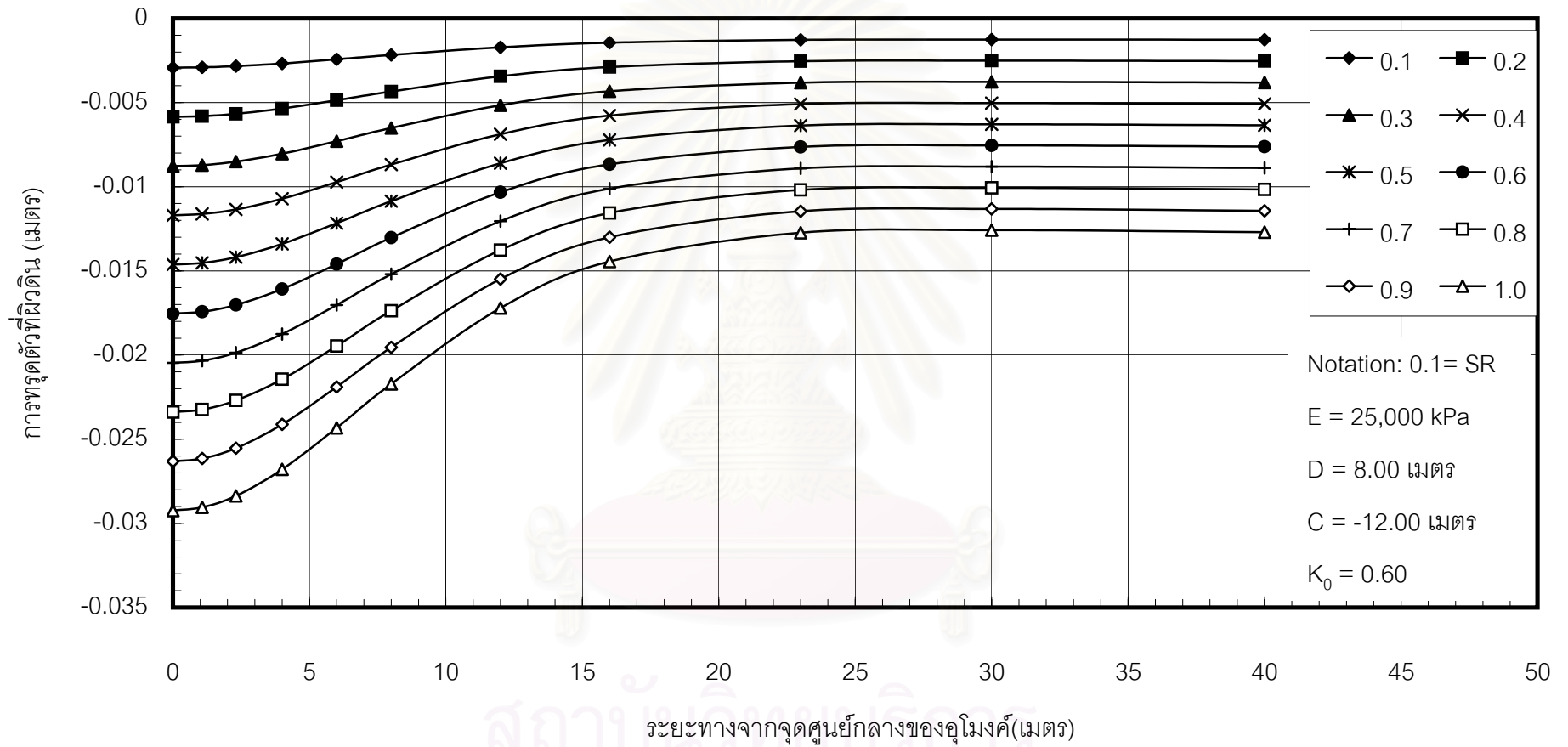
รูปที่ ก.26 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



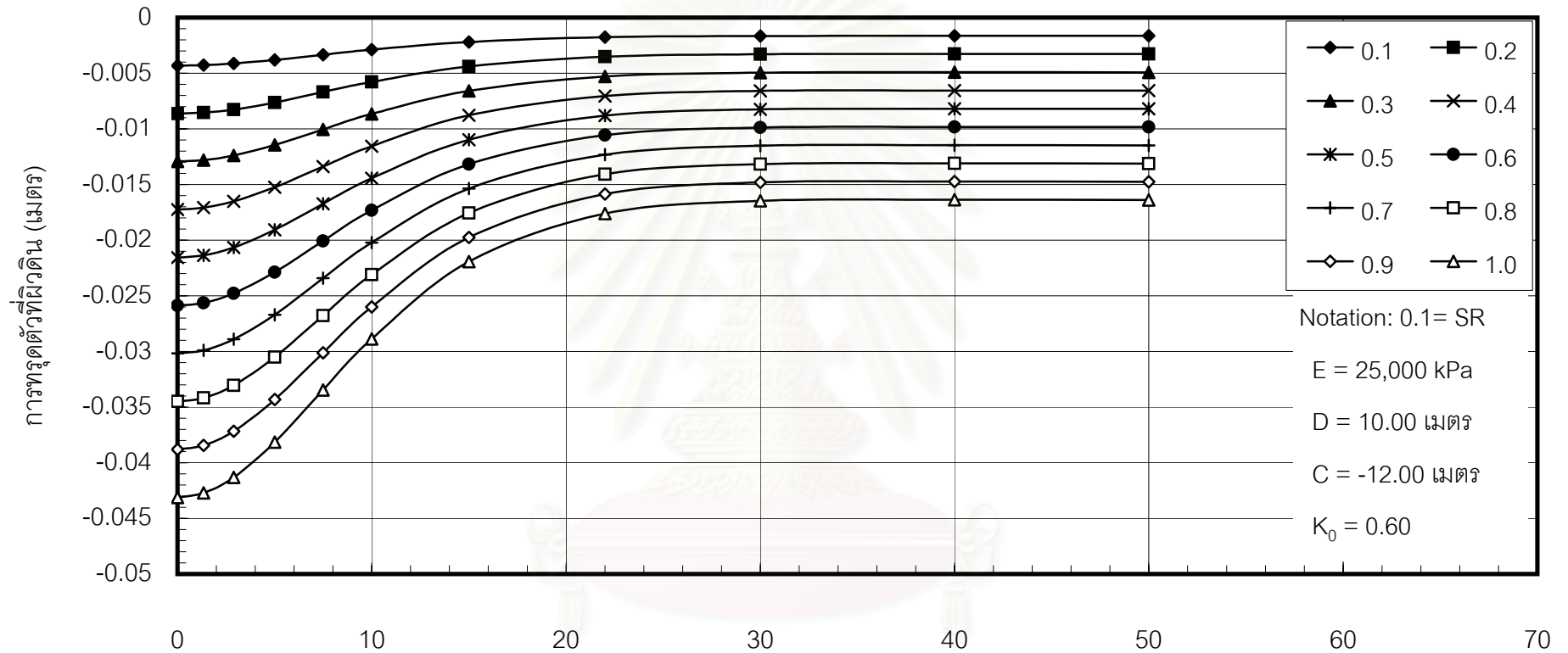
รูปที่ ก.27 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.28 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

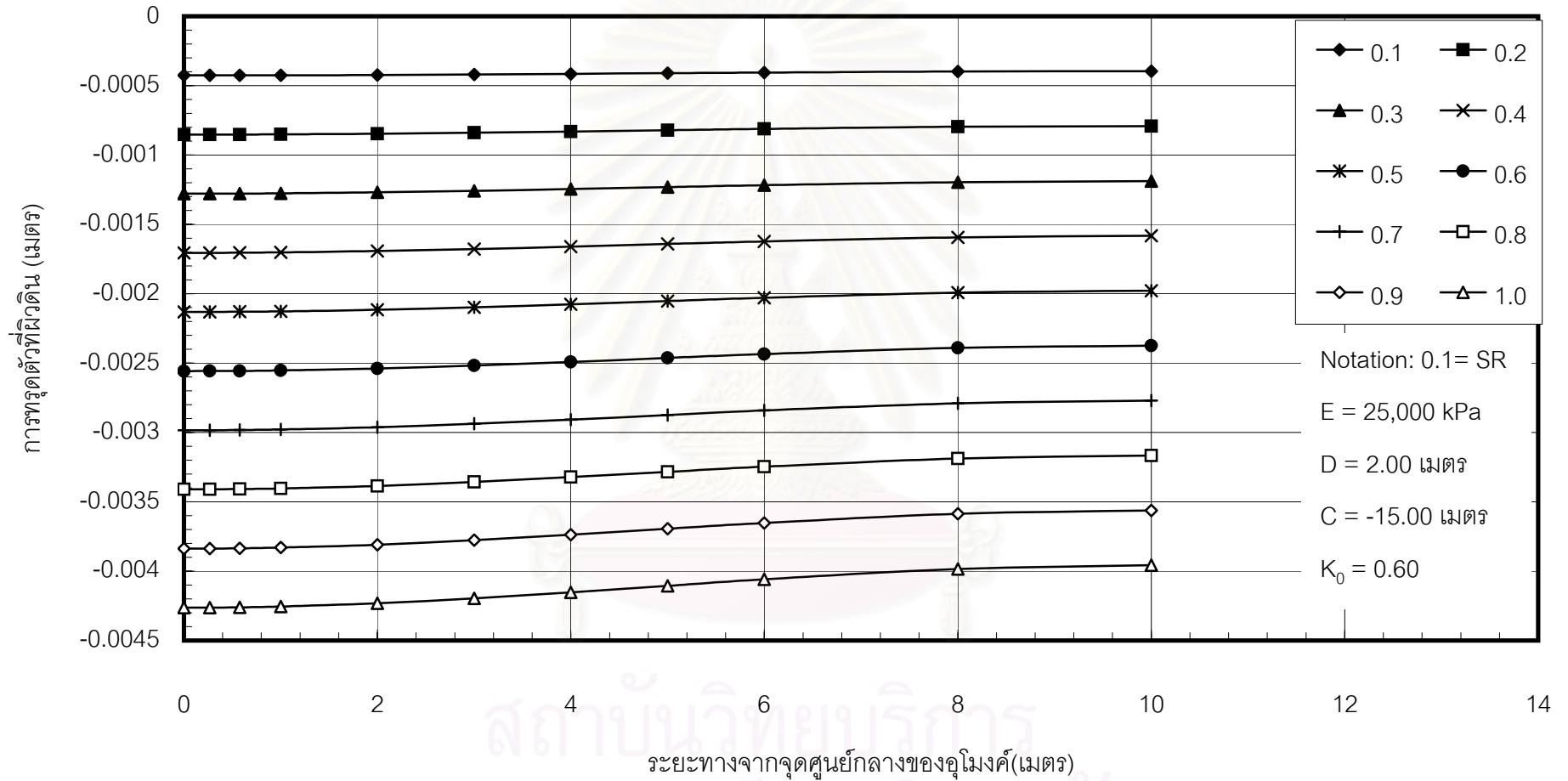


รูปที่ ก.29 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



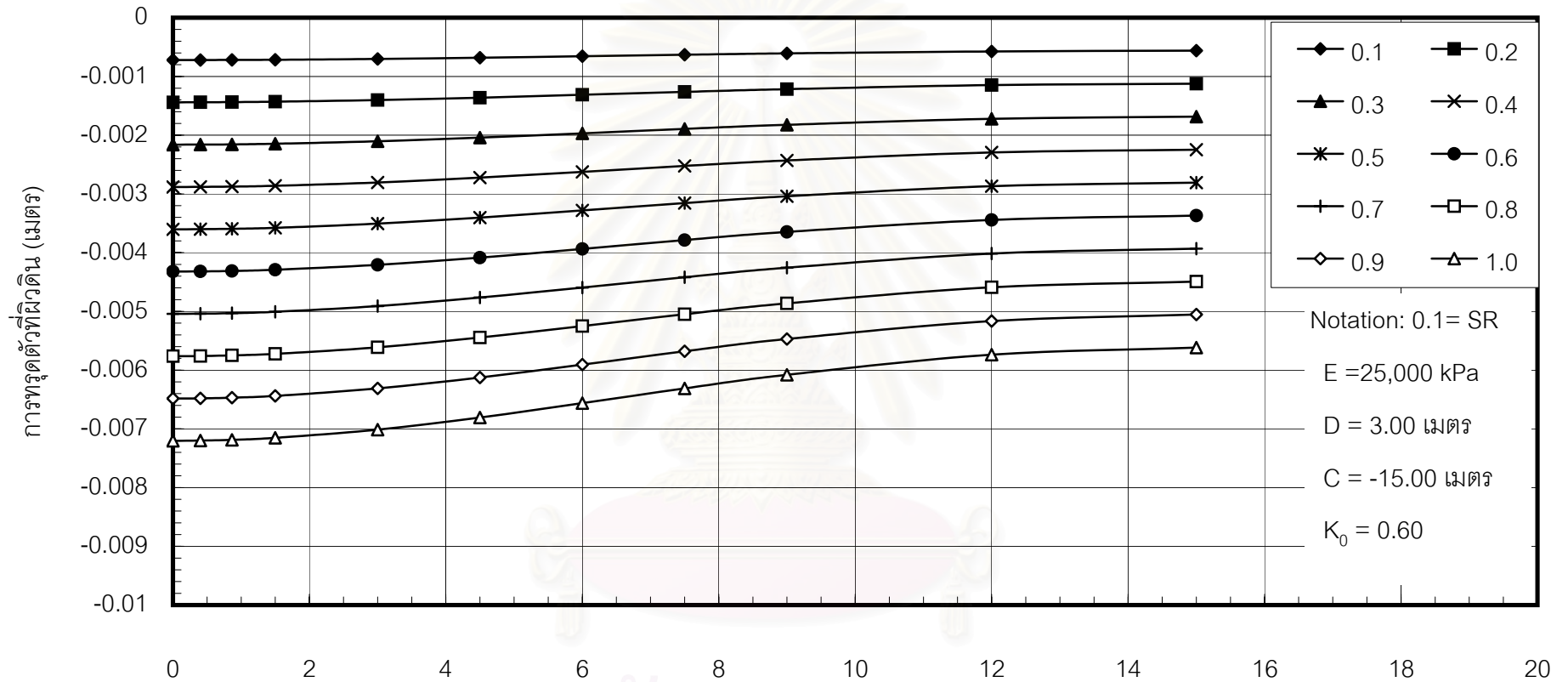
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.30 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

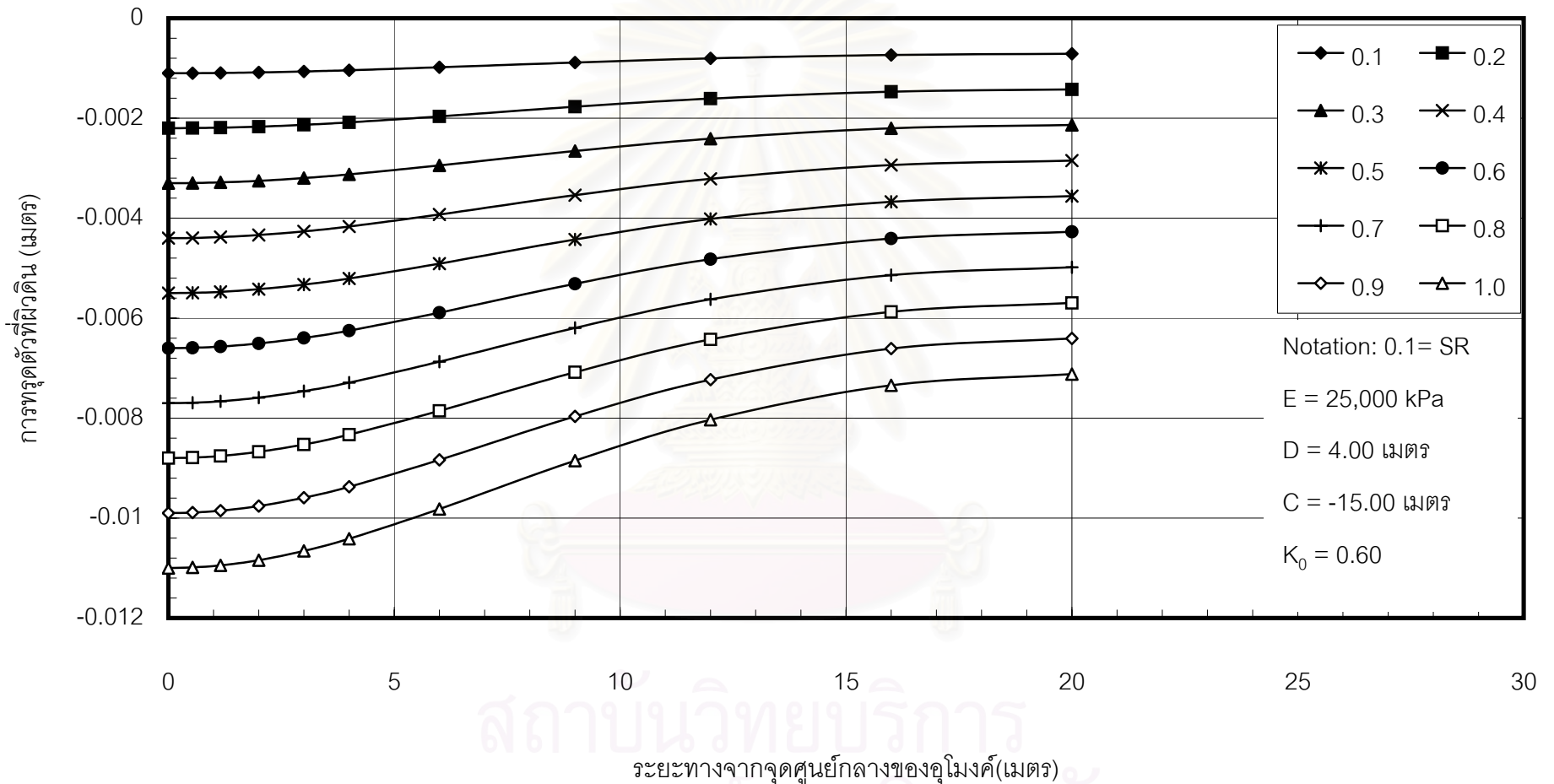


รูปที่ ก.31 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

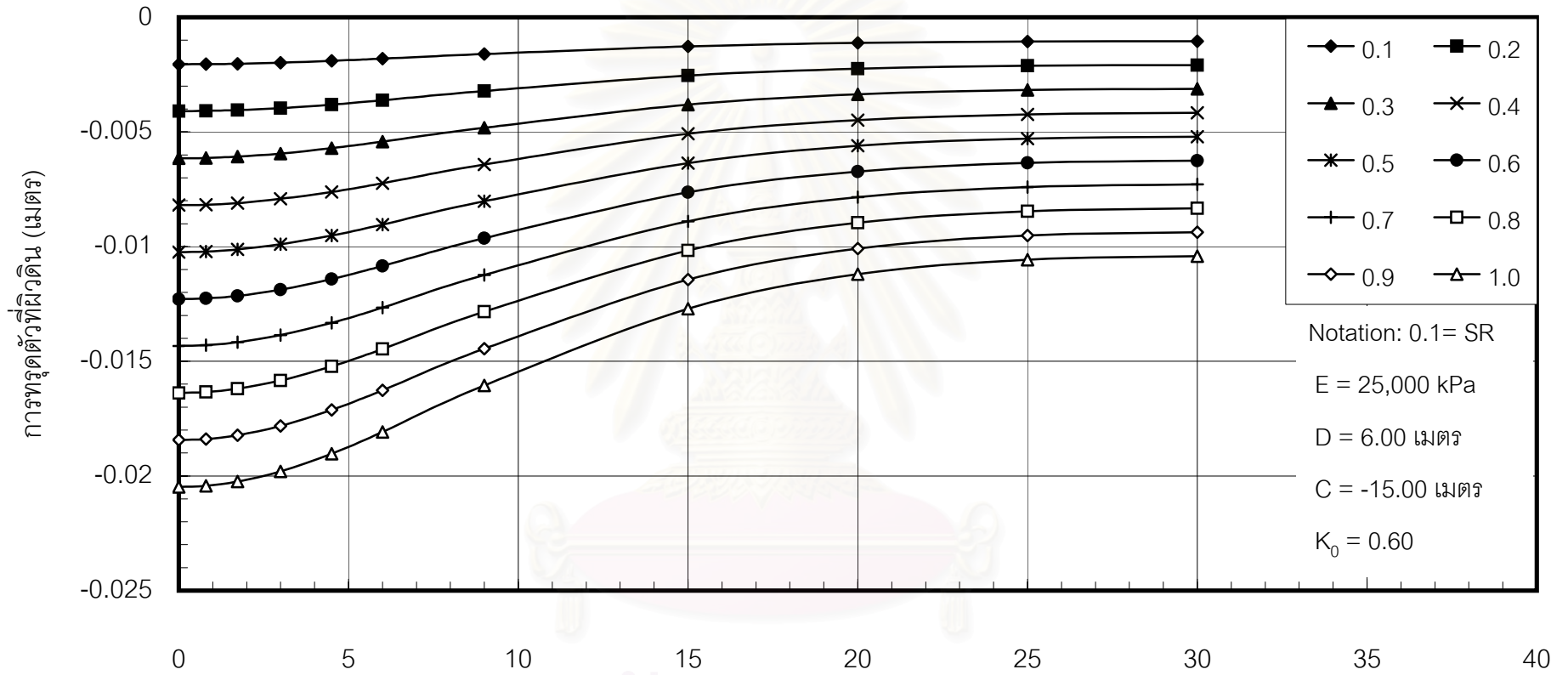




รูปที่ ก.32 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

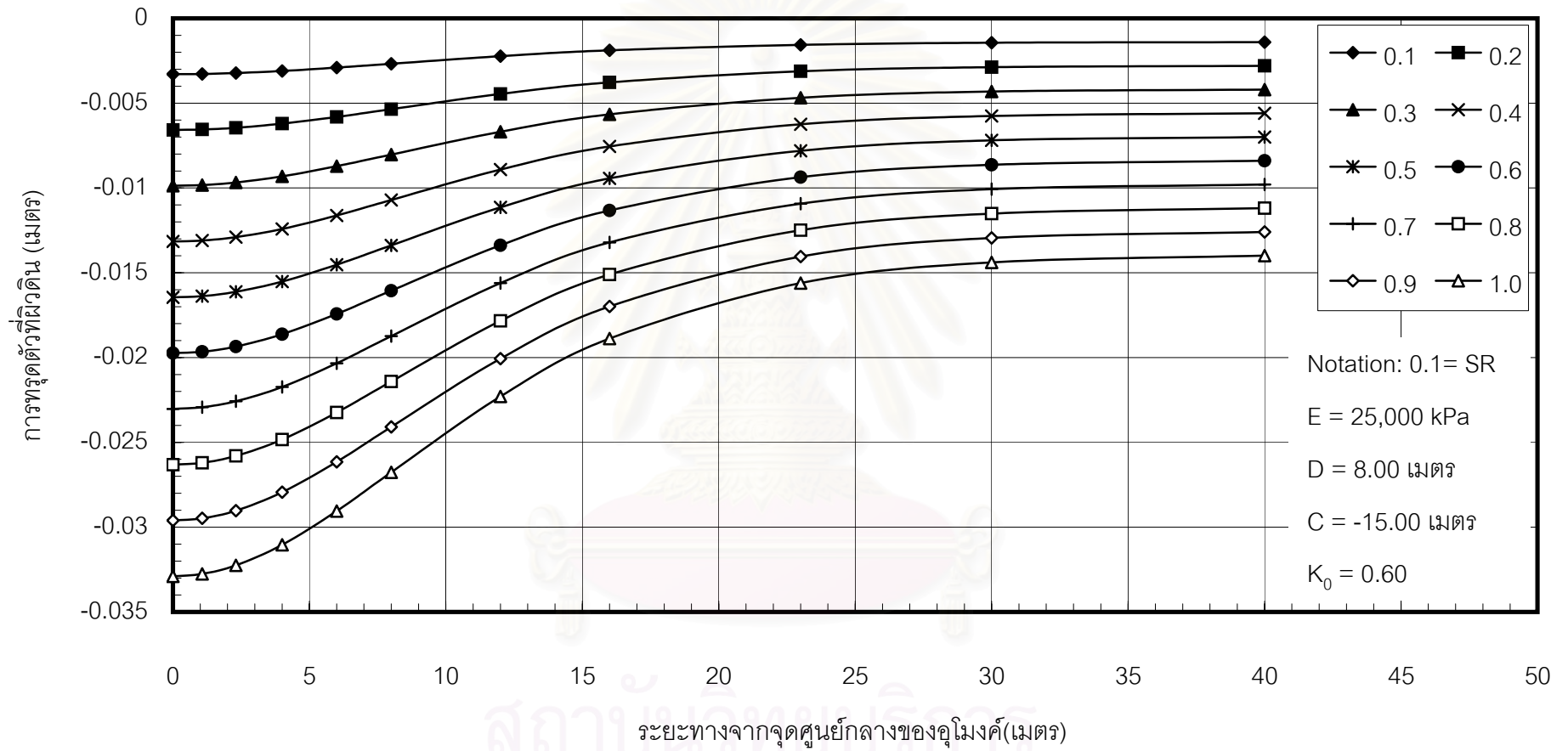


รูปที่ ก.33 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

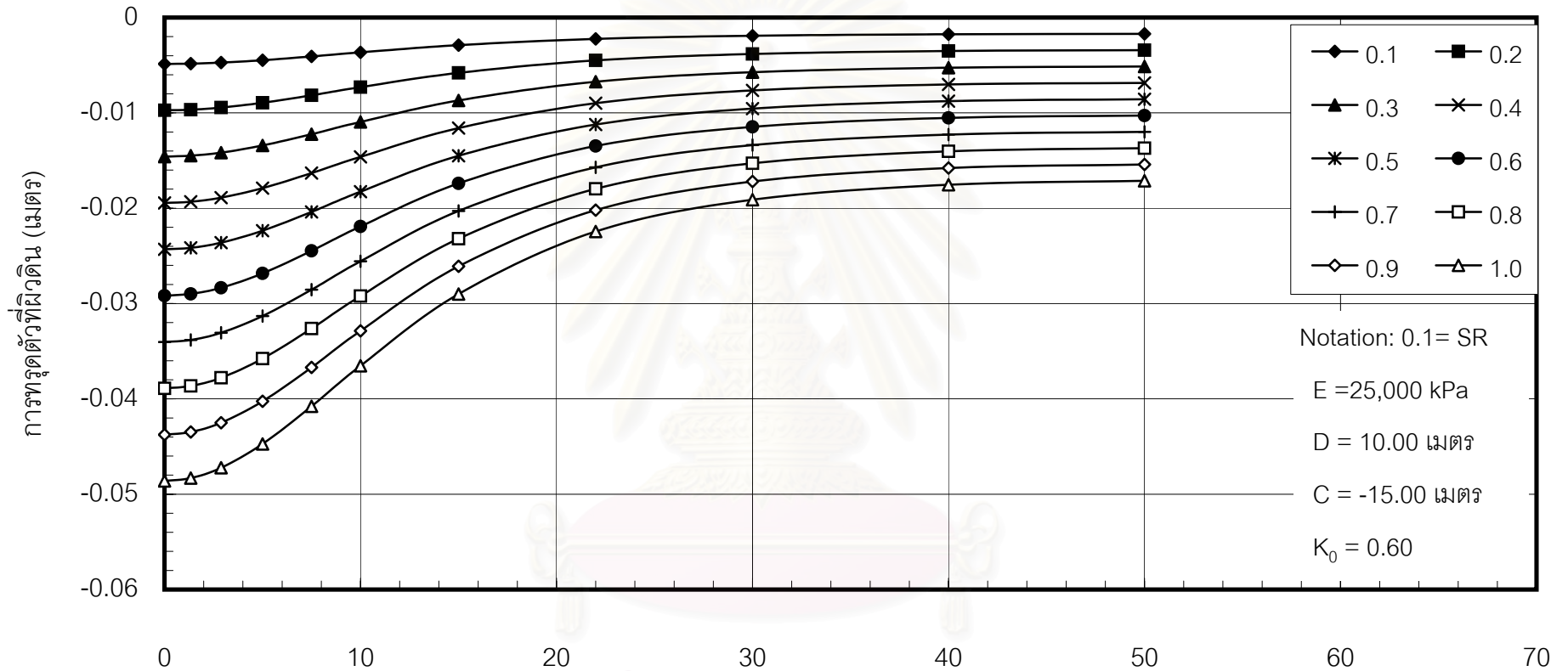


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.34 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

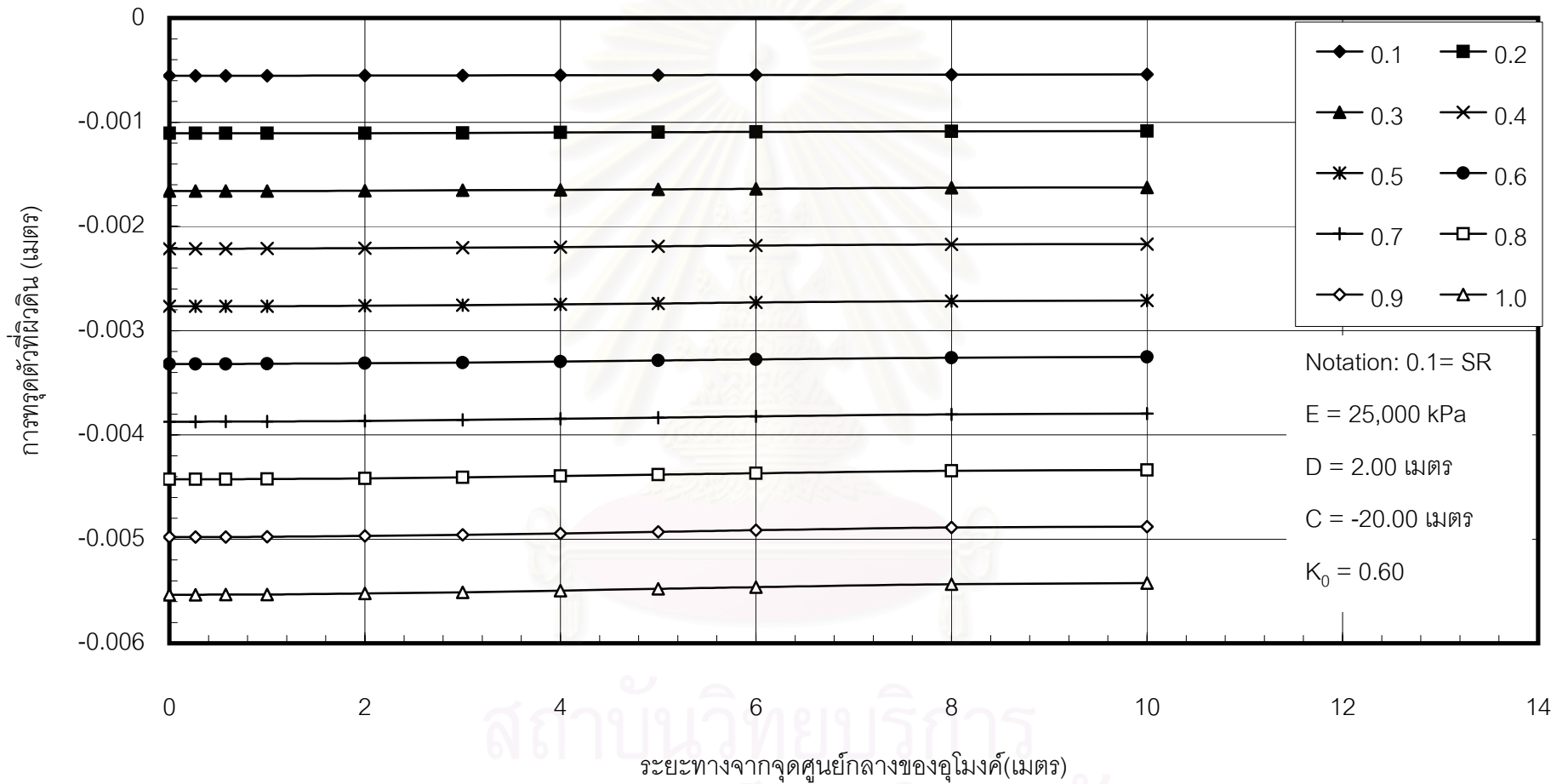


รูปที่ ก.35 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

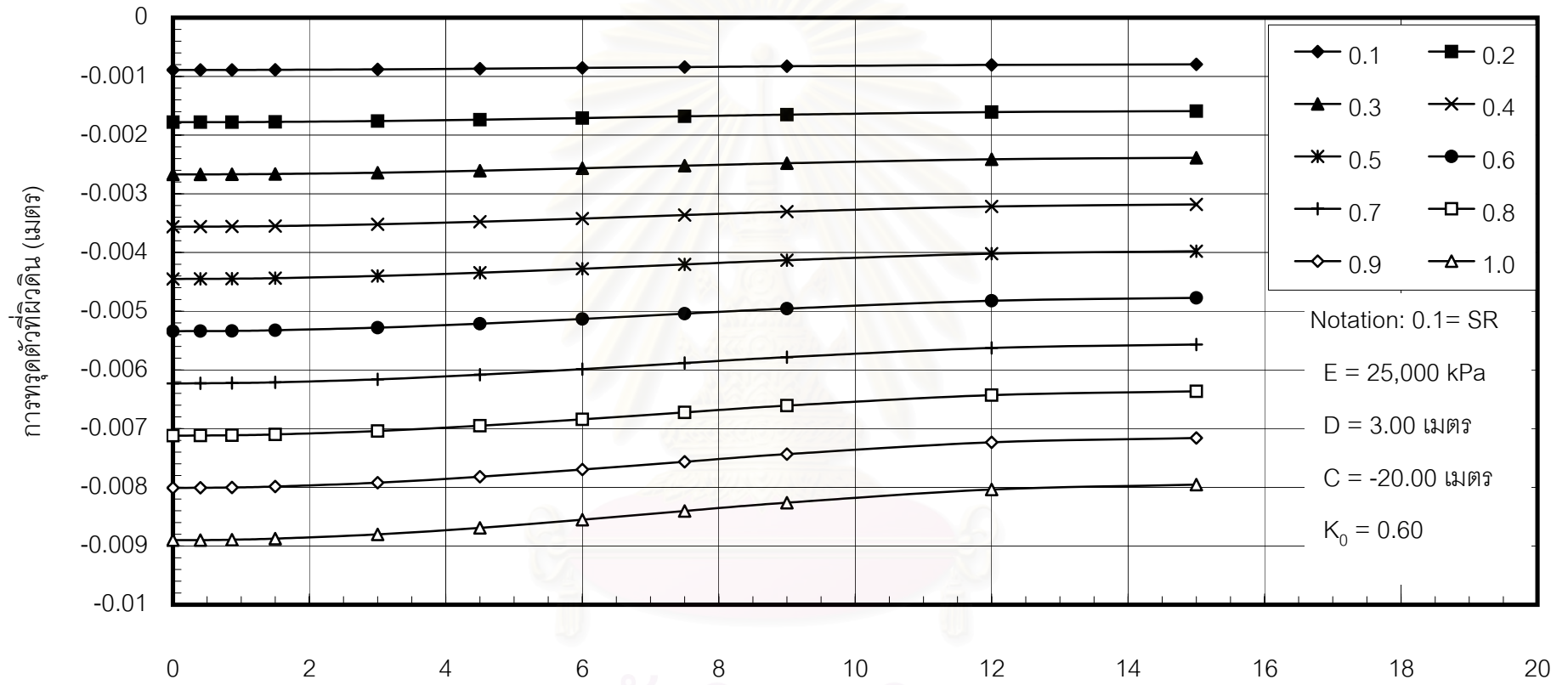


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.36 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

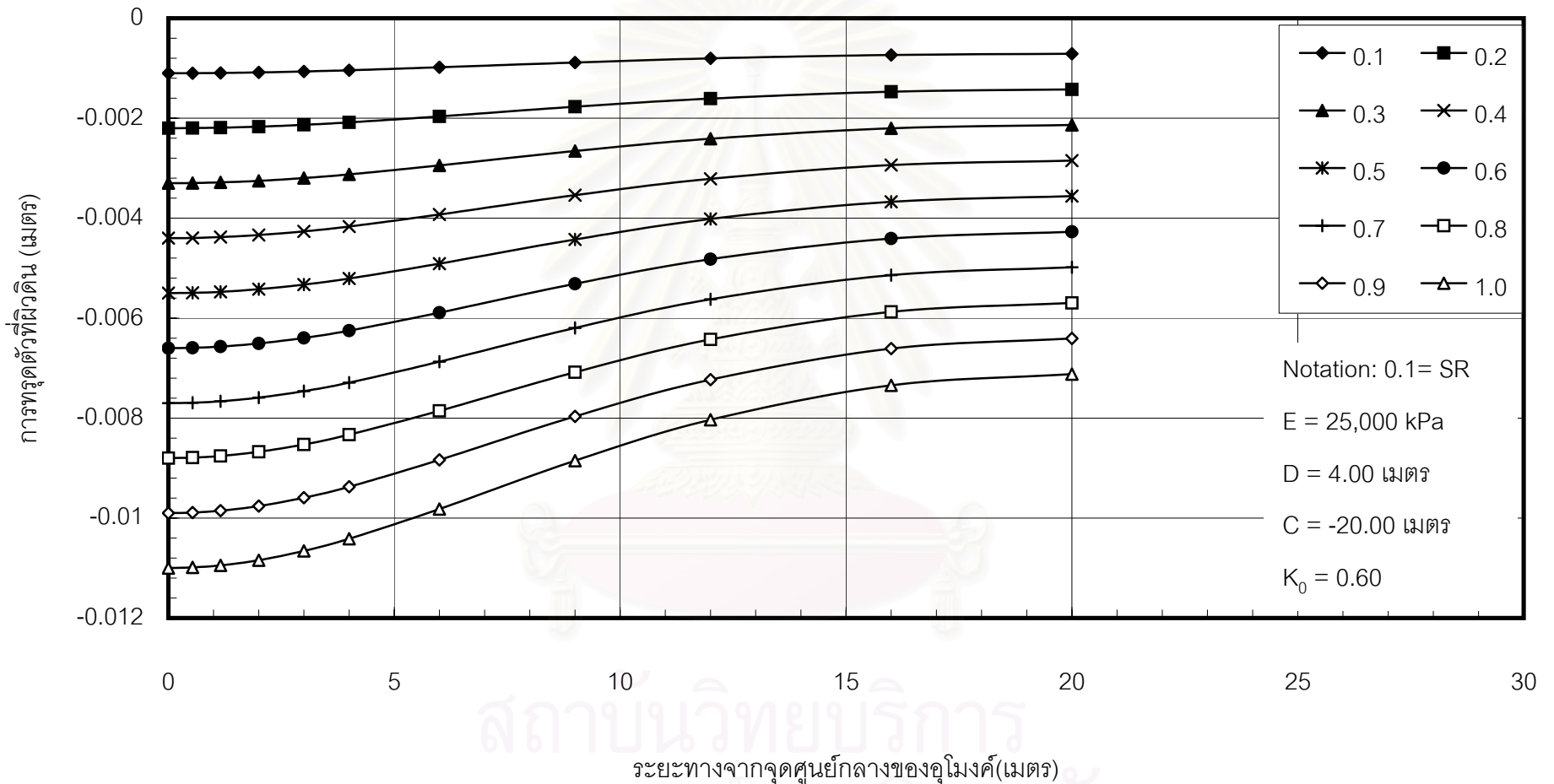


รูปที่ ก.37 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



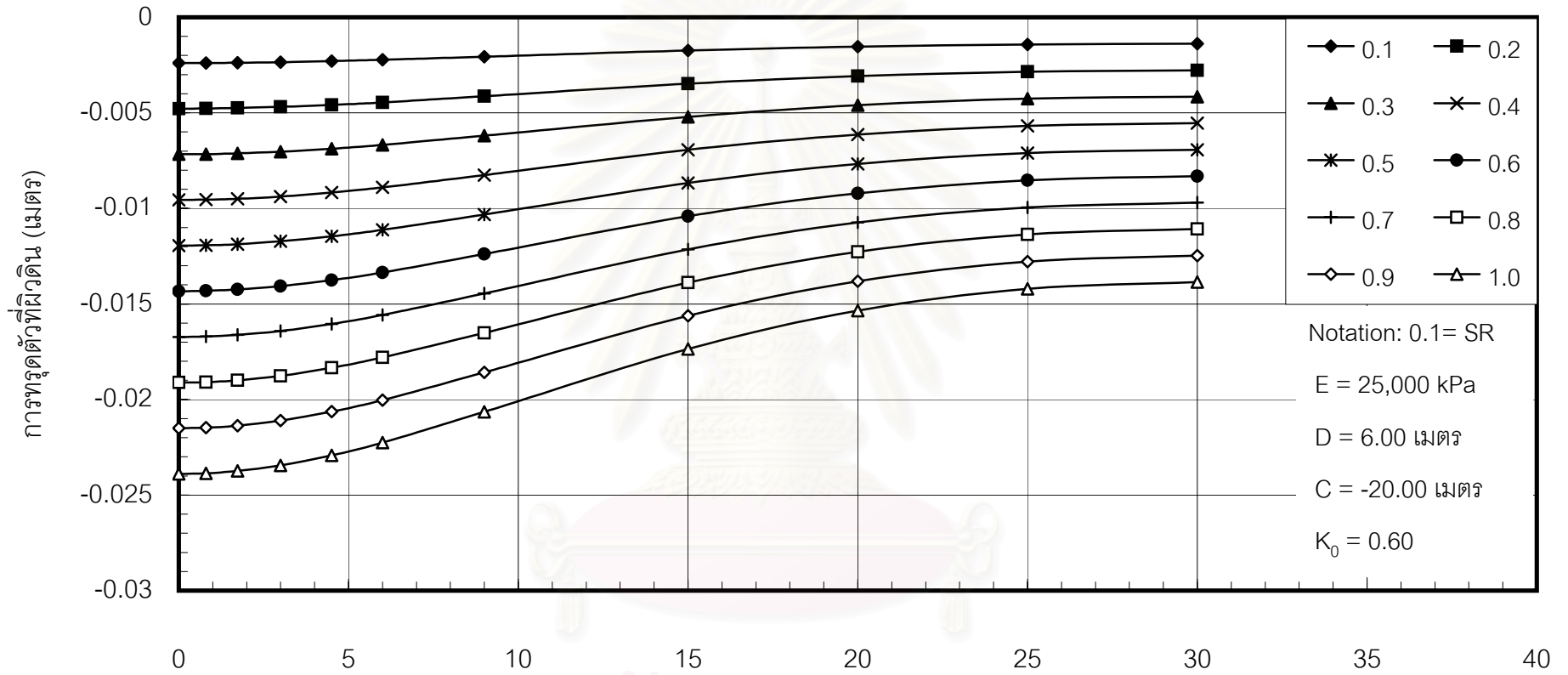
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.38 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



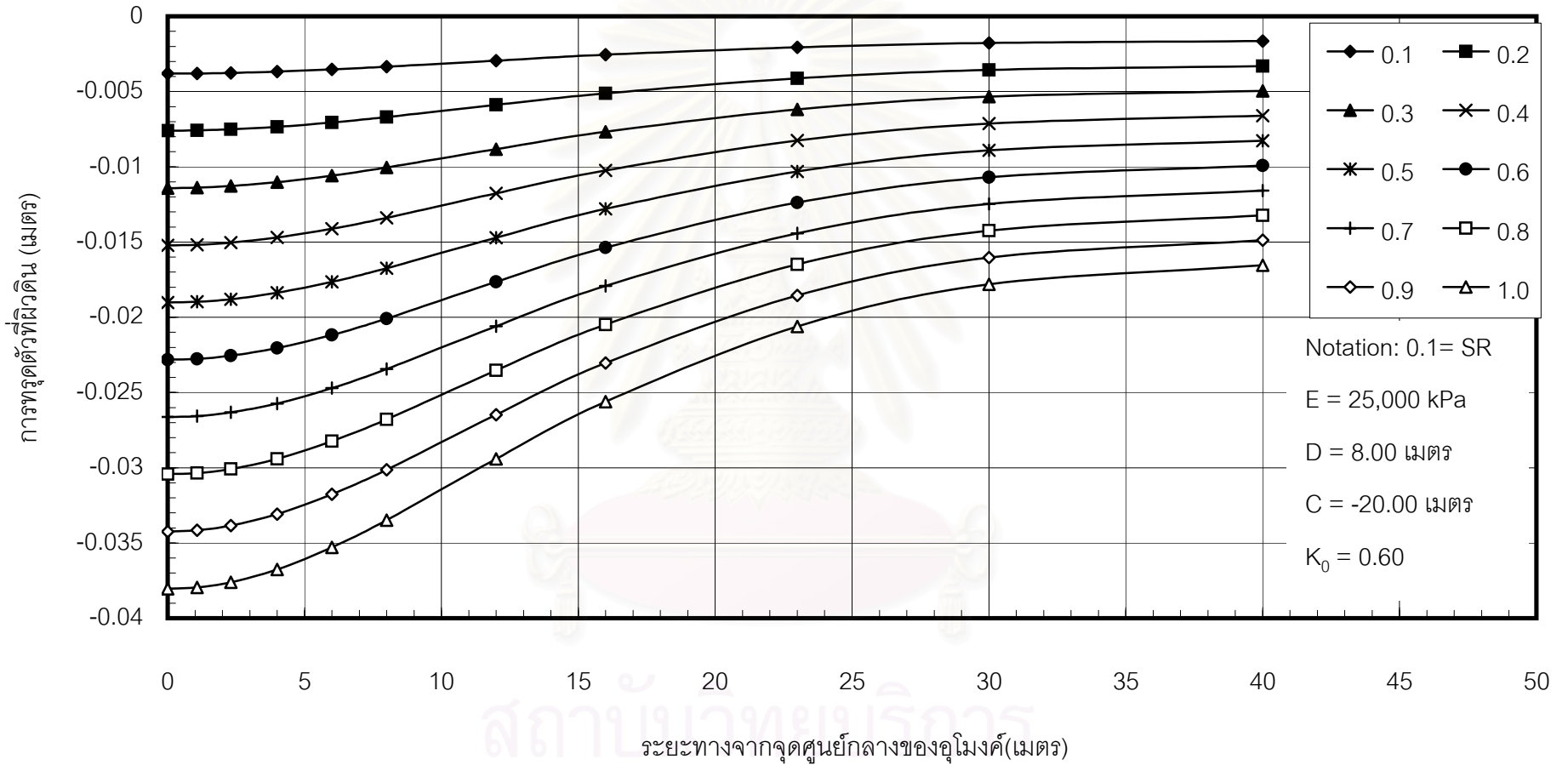
รูปที่ ก.39 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



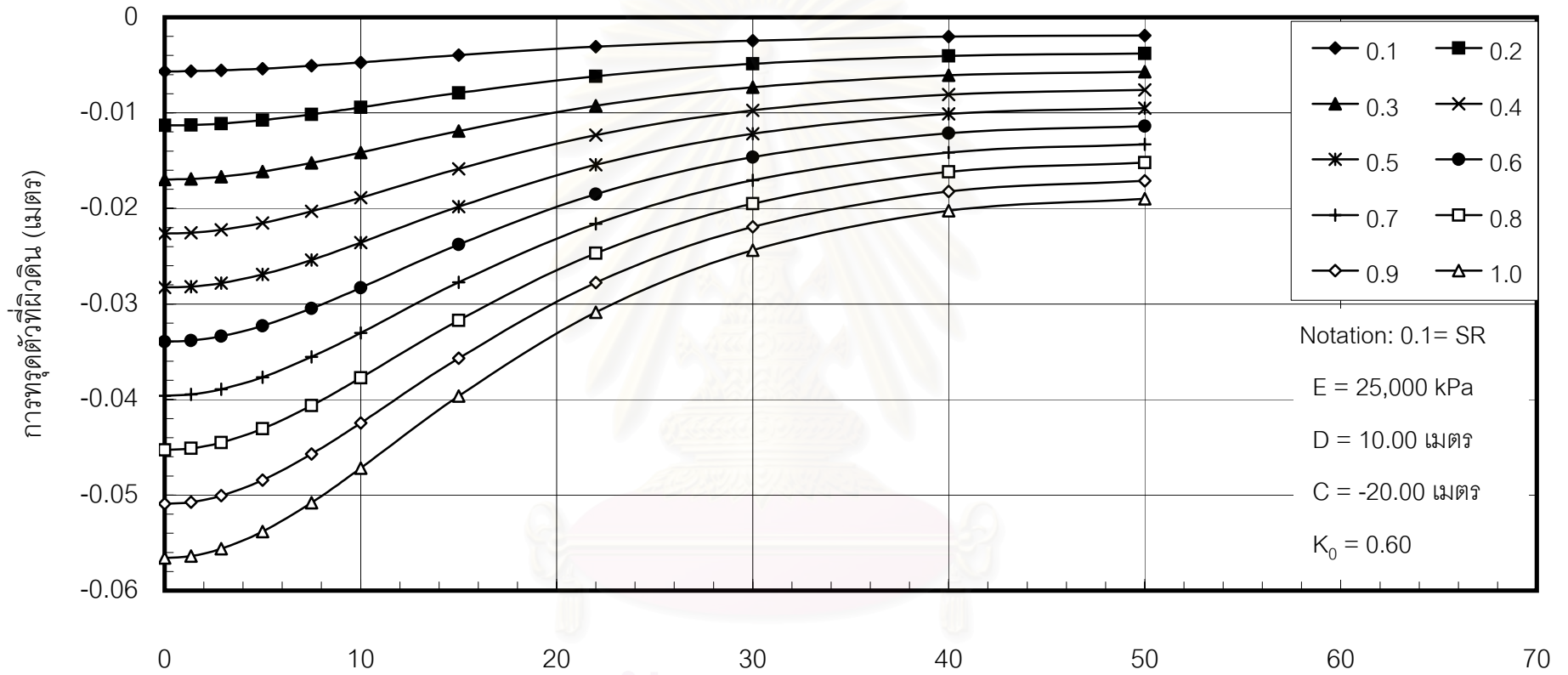


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.40 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

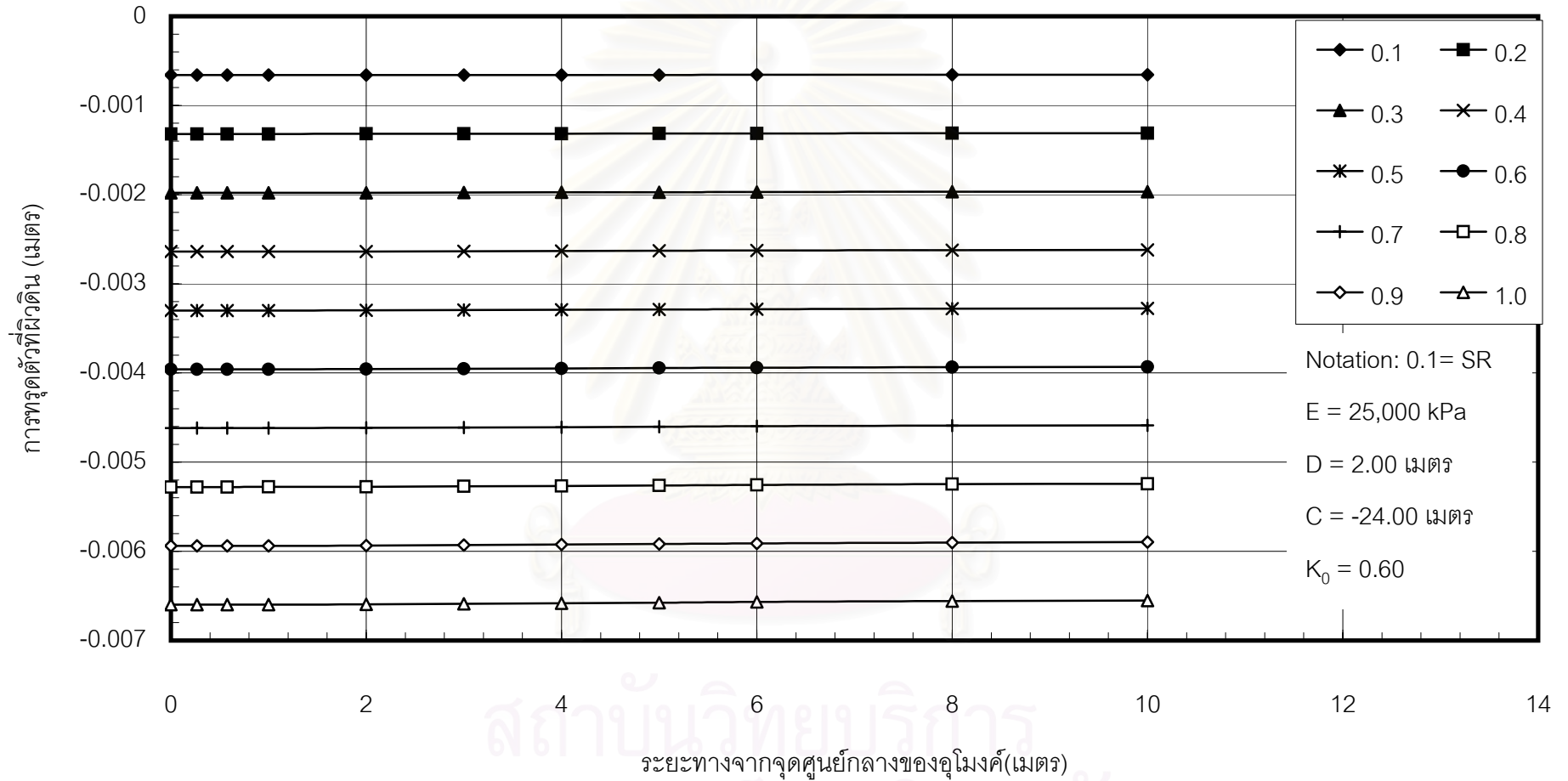


รูปที่ ก.41 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

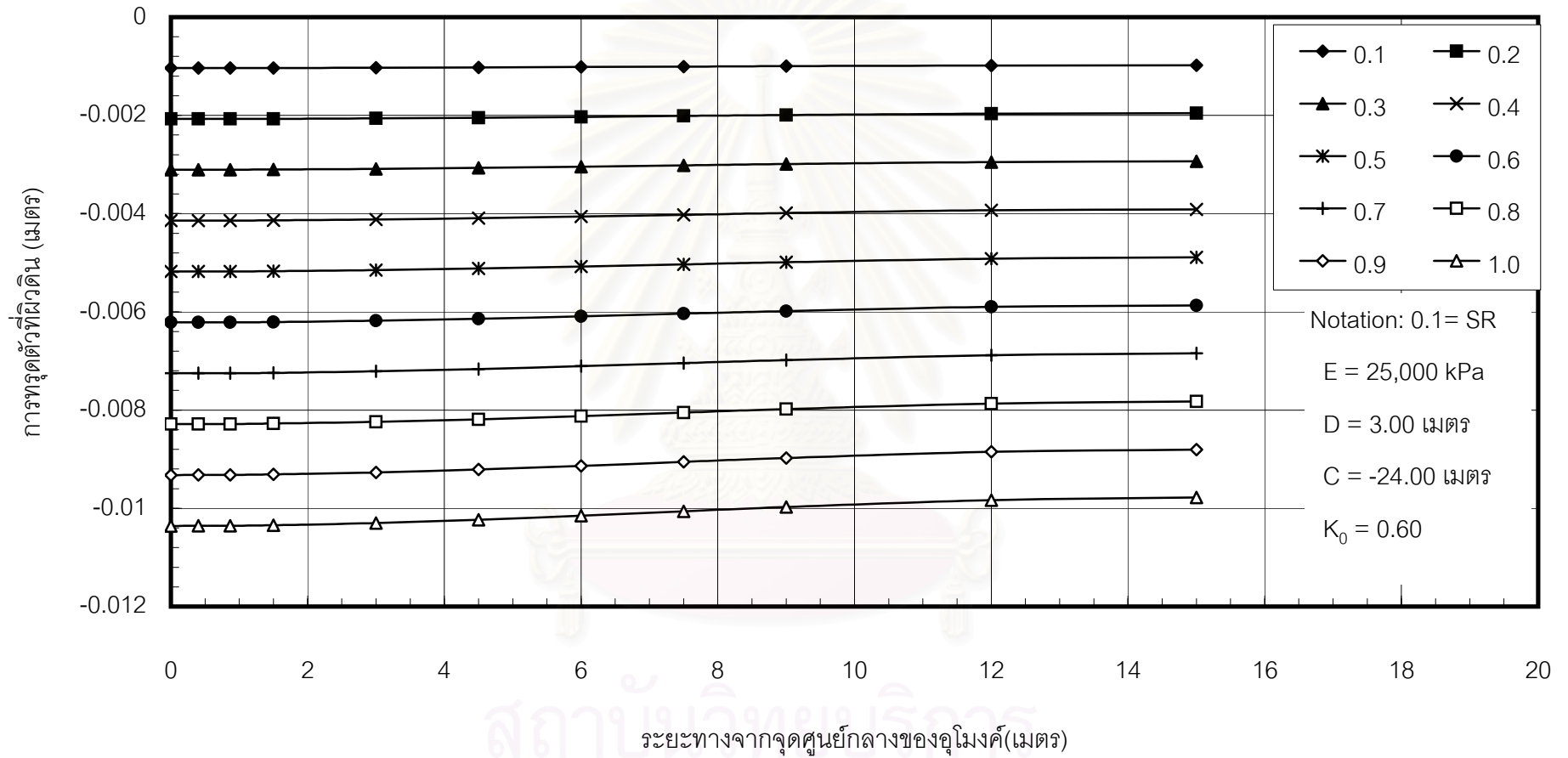


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

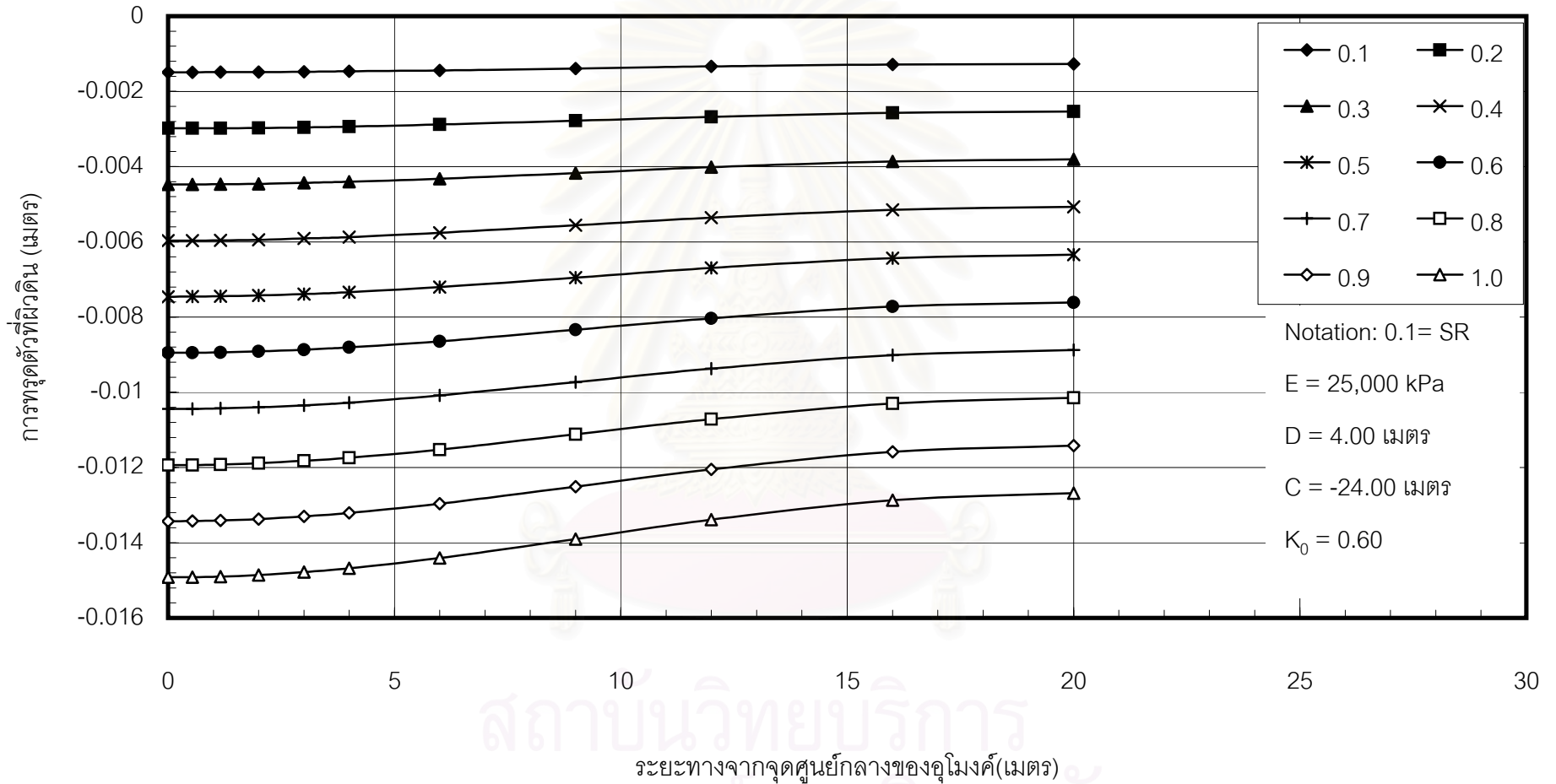
รูปที่ ก.42 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



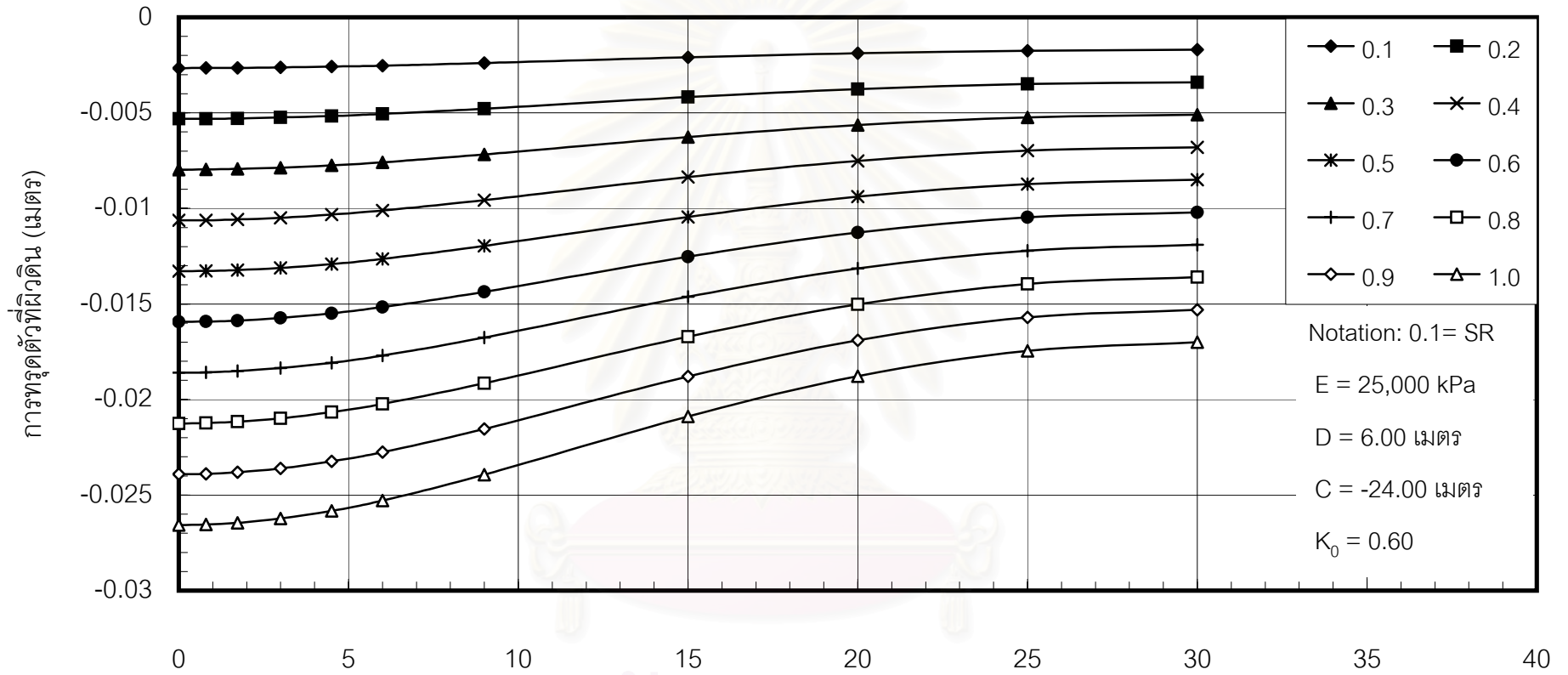
รูปที่ ก.43 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.44 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

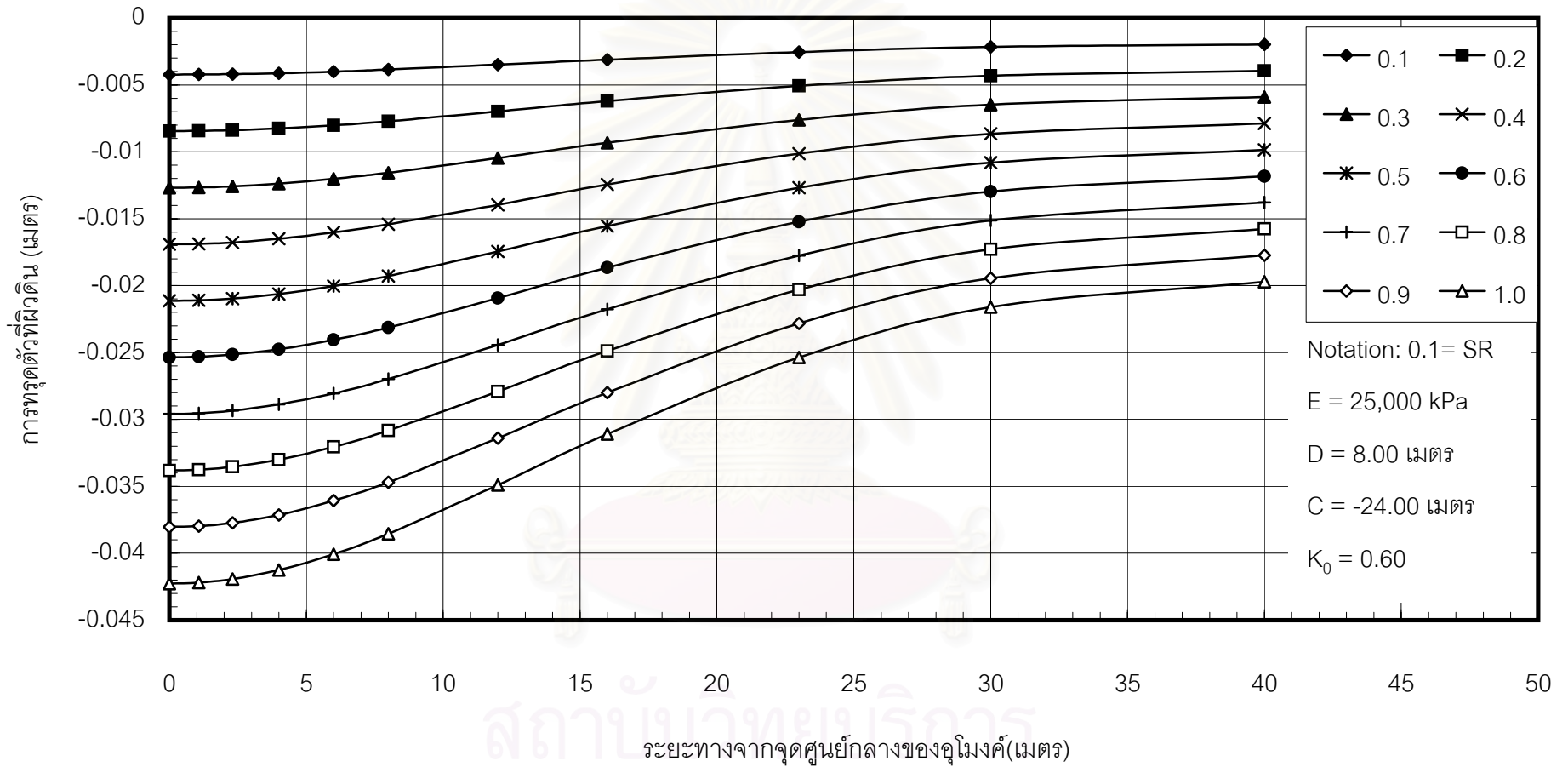


รูปที่ ก.45 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



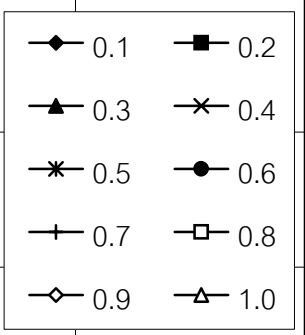
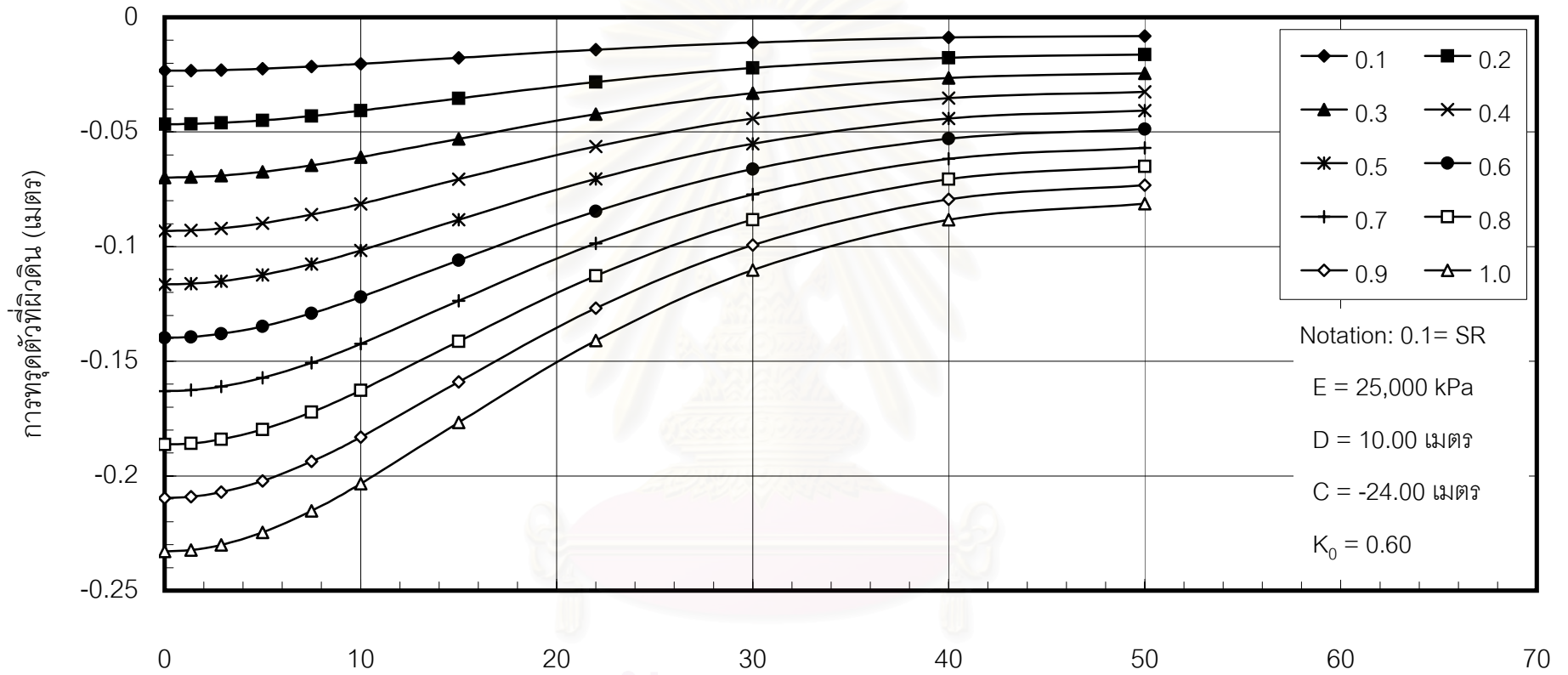
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.46 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.47 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

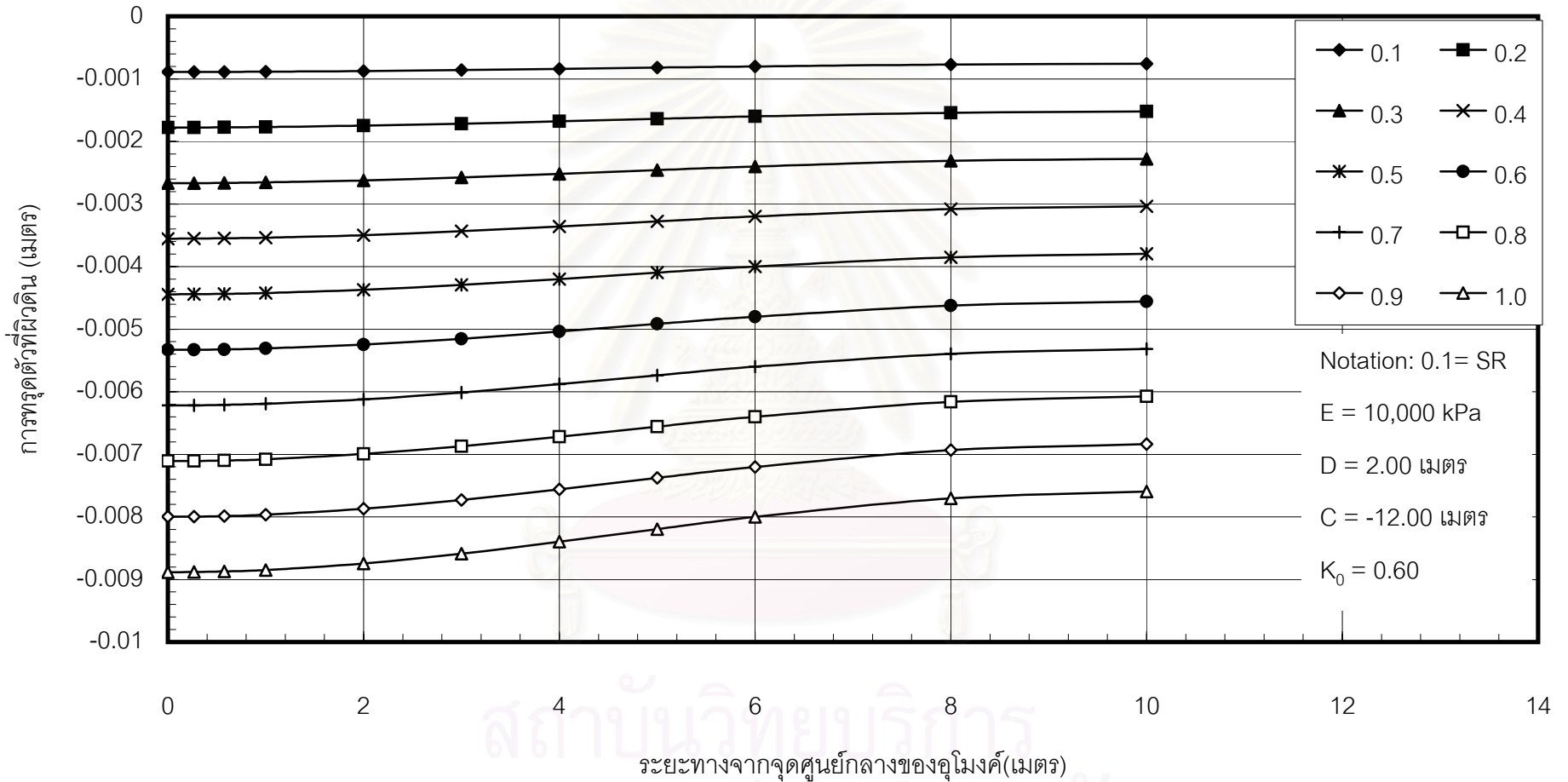




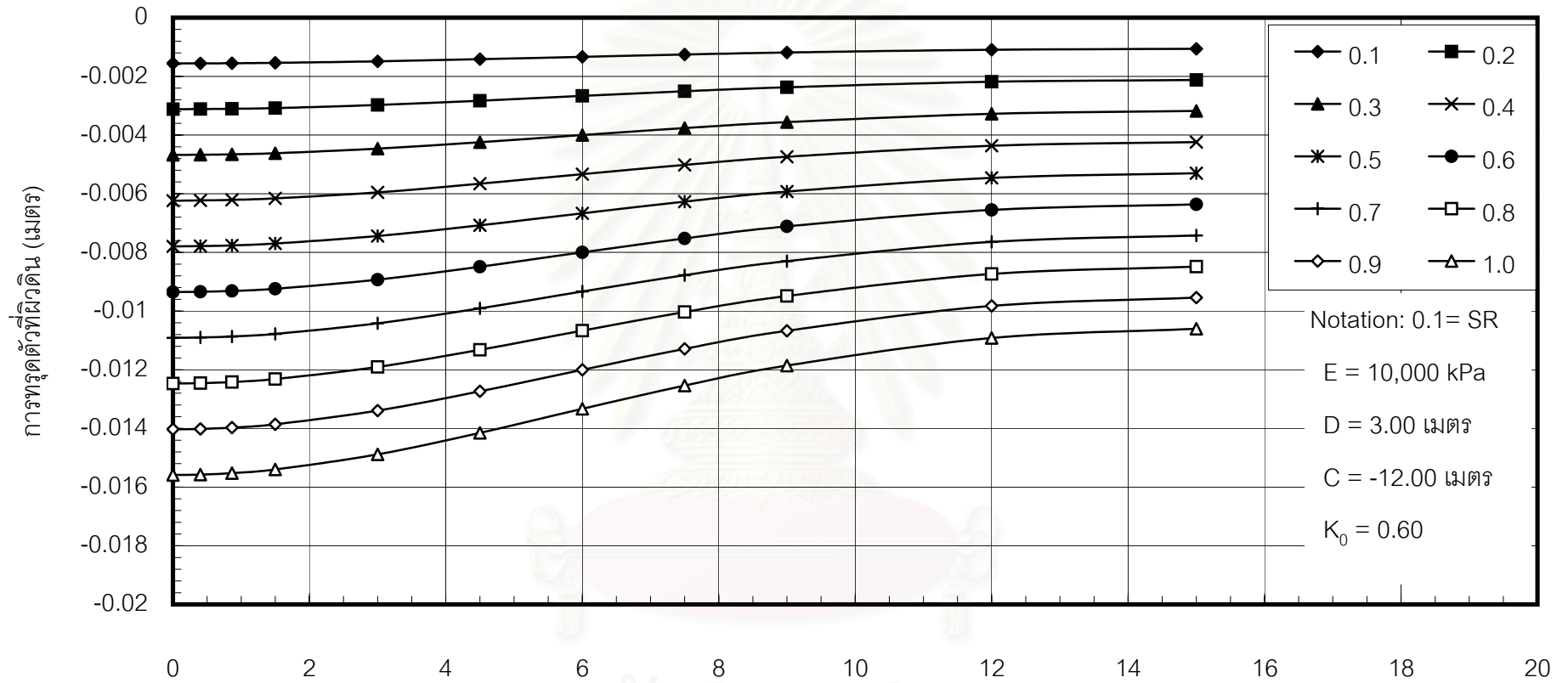
Notation: 0.1= SR  
 E = 25,000 kPa  
 D = 10.00 เมตร  
 C = -24.00 เมตร  
 K<sub>0</sub> = 0.60

ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.48 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

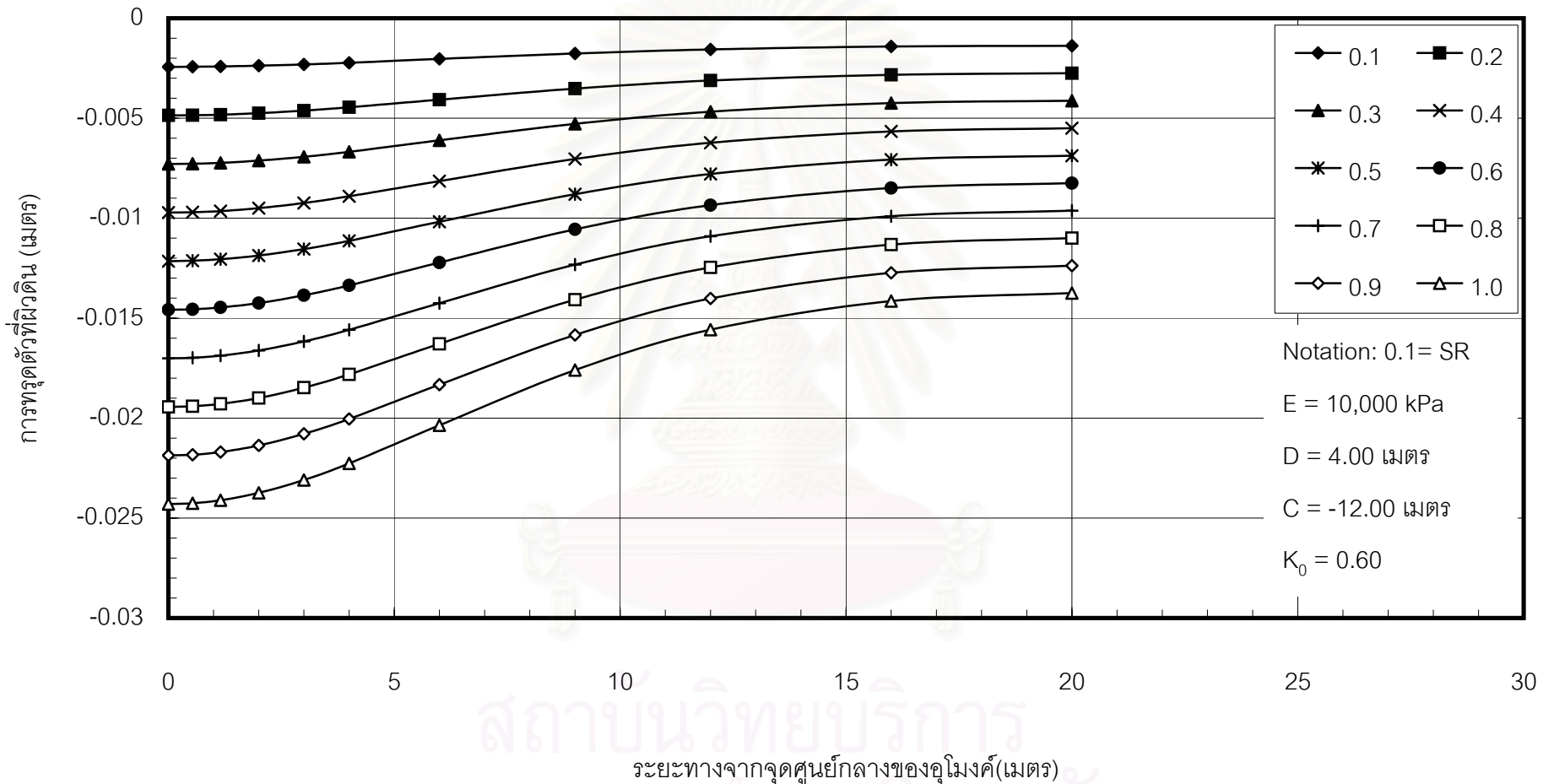


รูปที่ ก.49 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

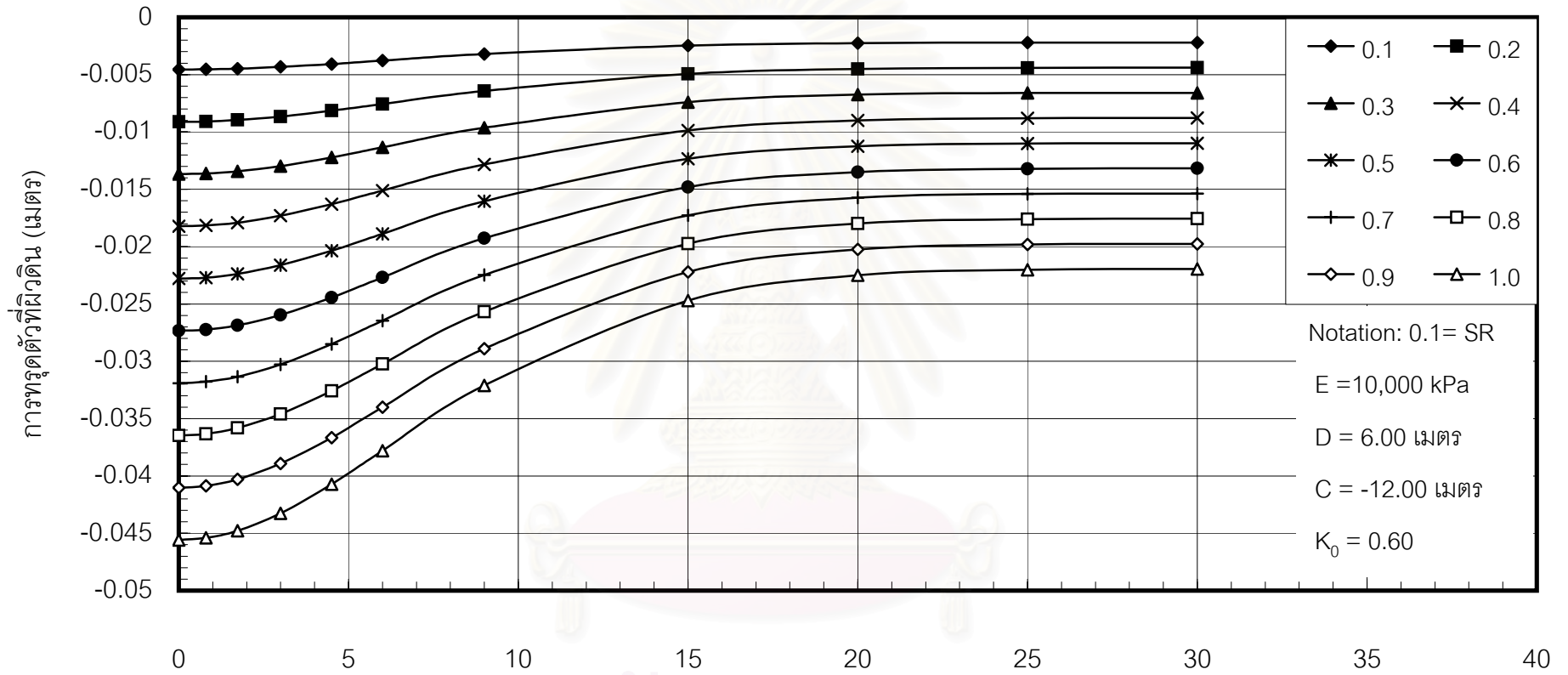


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

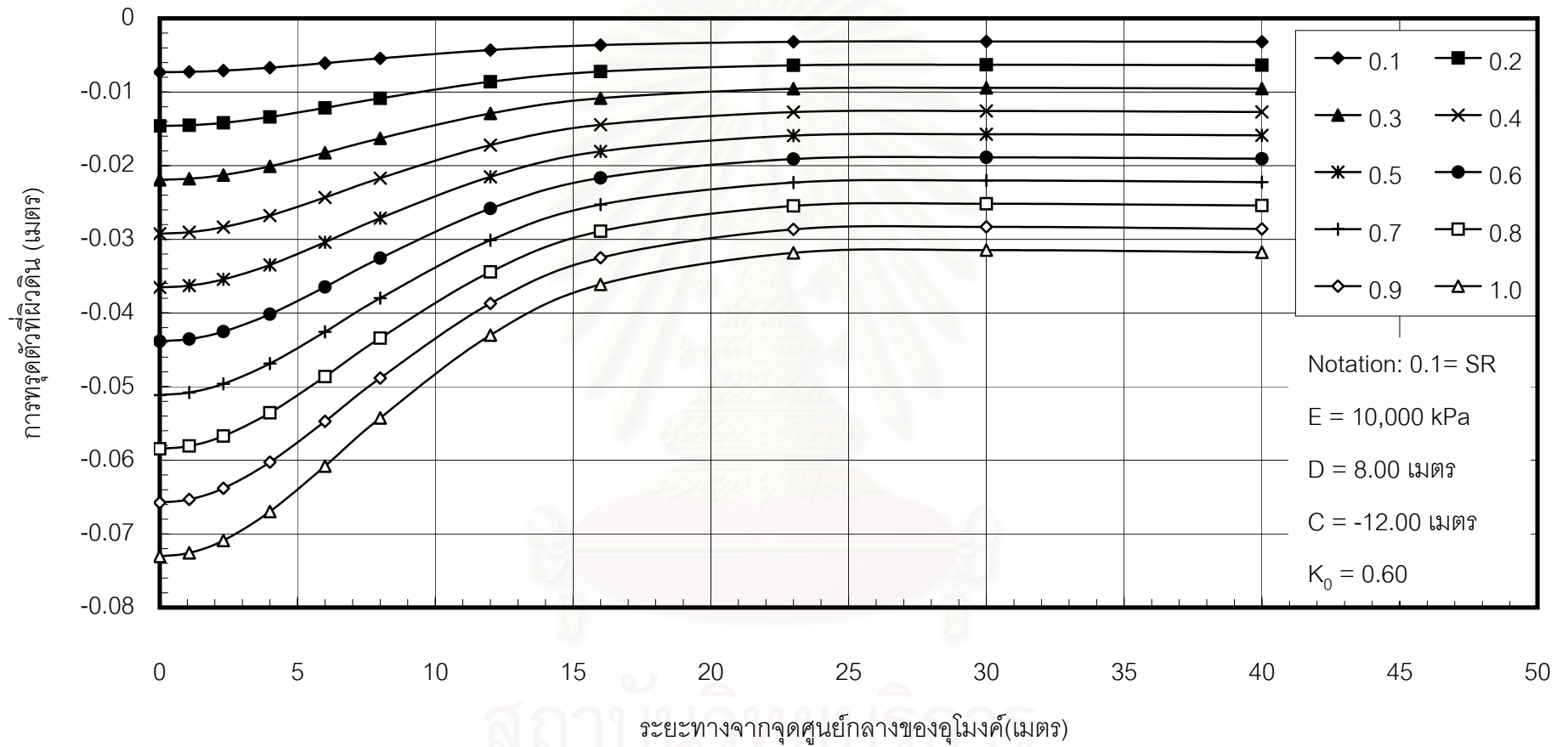
รูปที่ ก.50 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



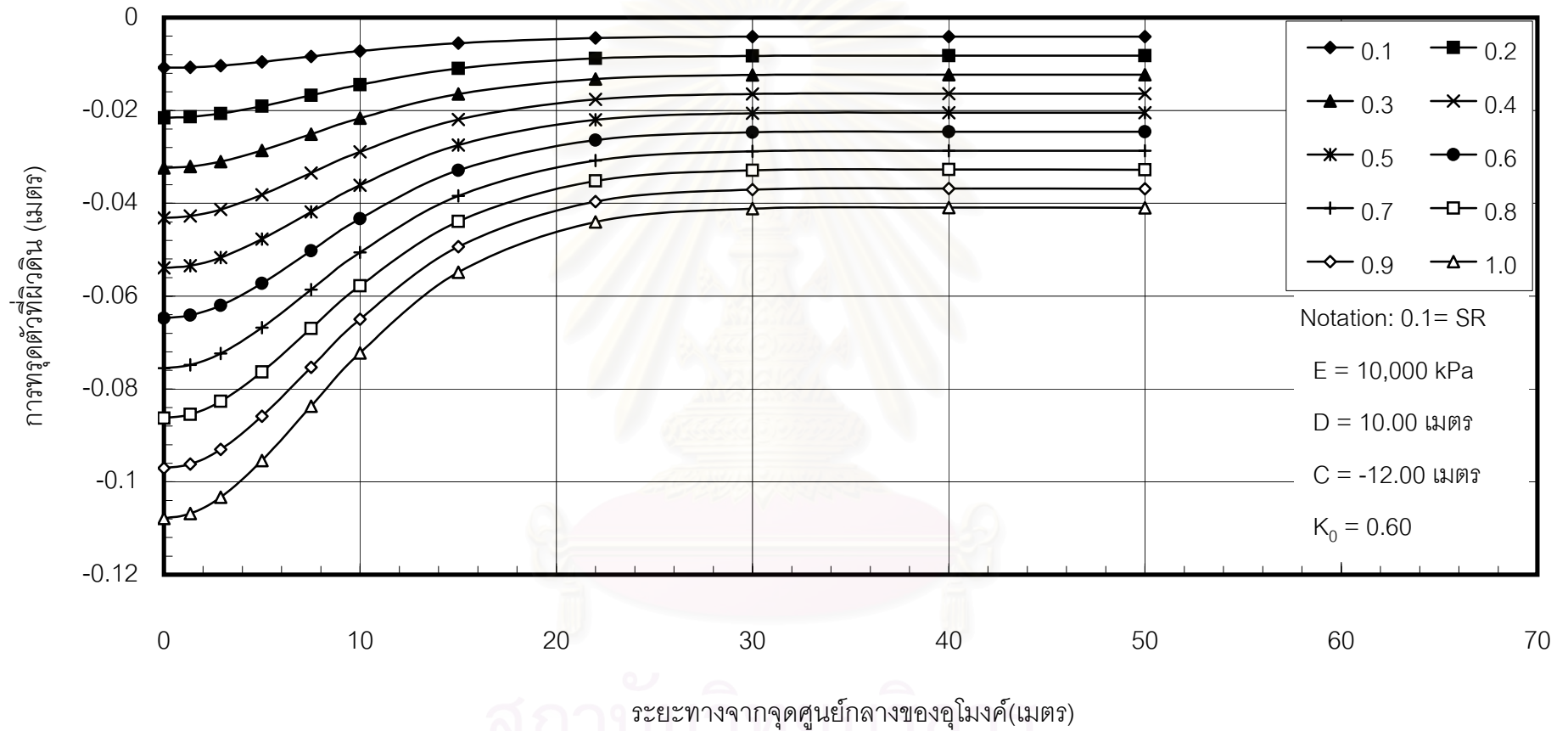
รูปที่ ก.51 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



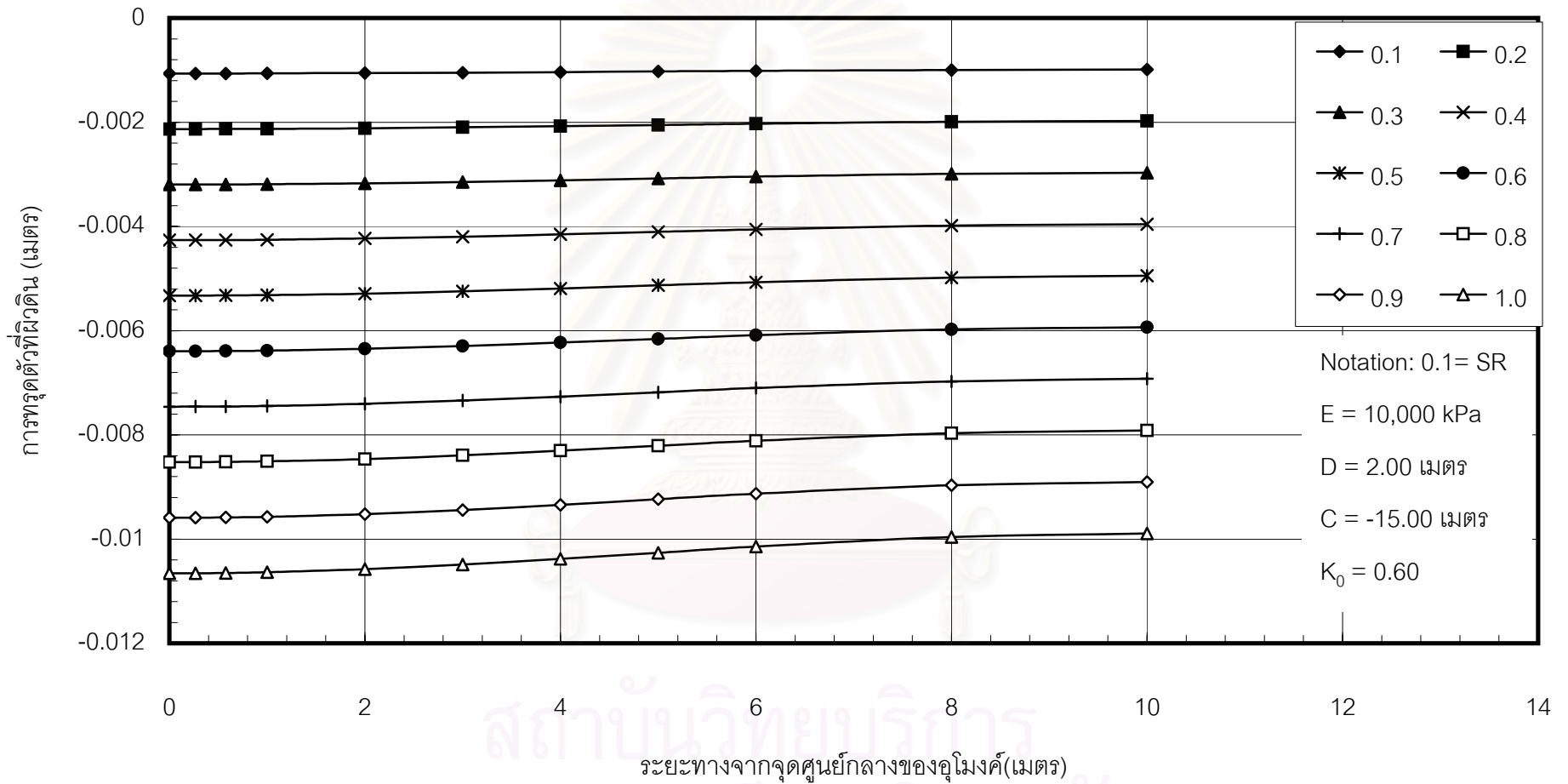
รูปที่ ก.52 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.53 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

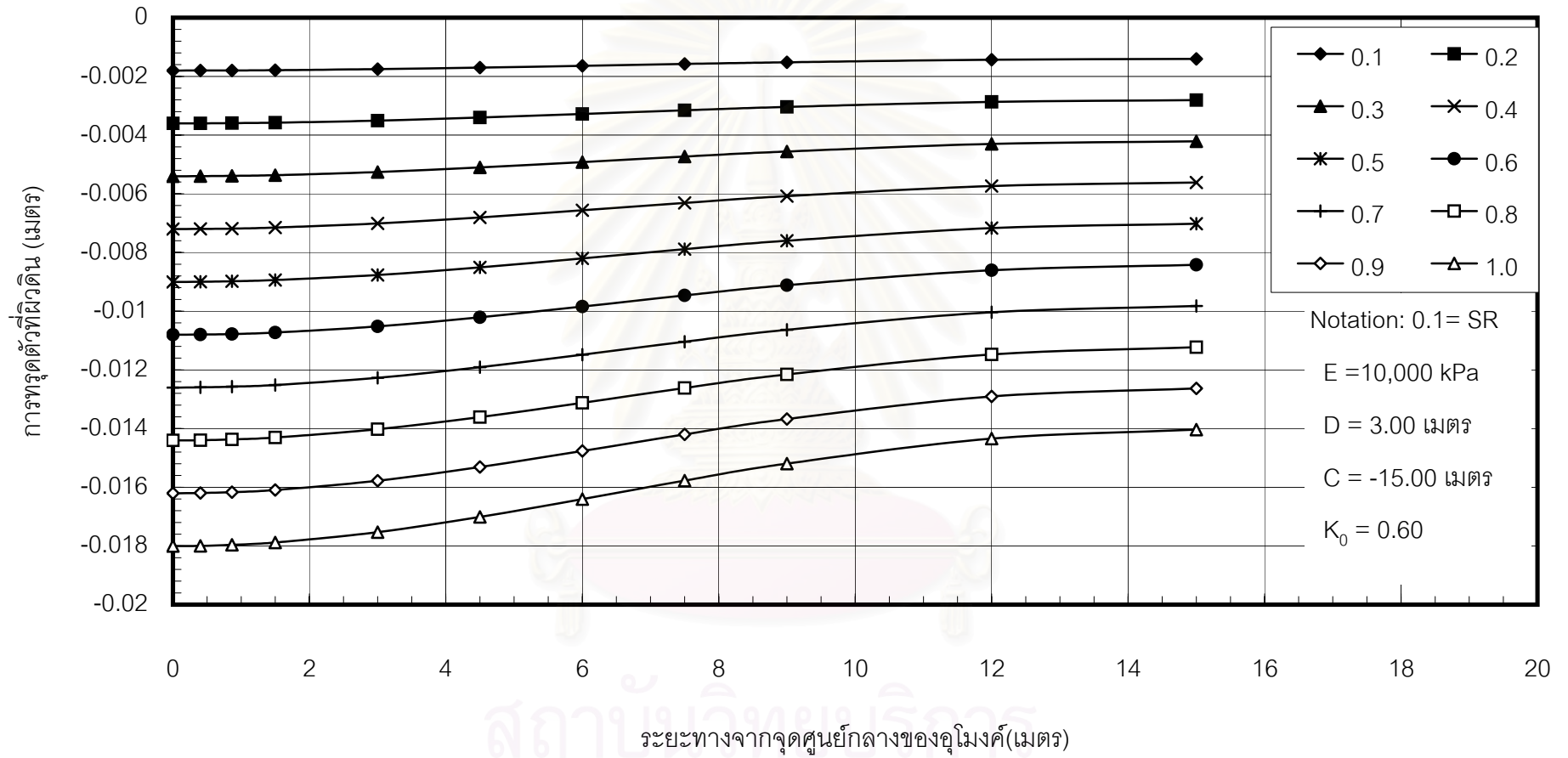


รูปที่ ก.54 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

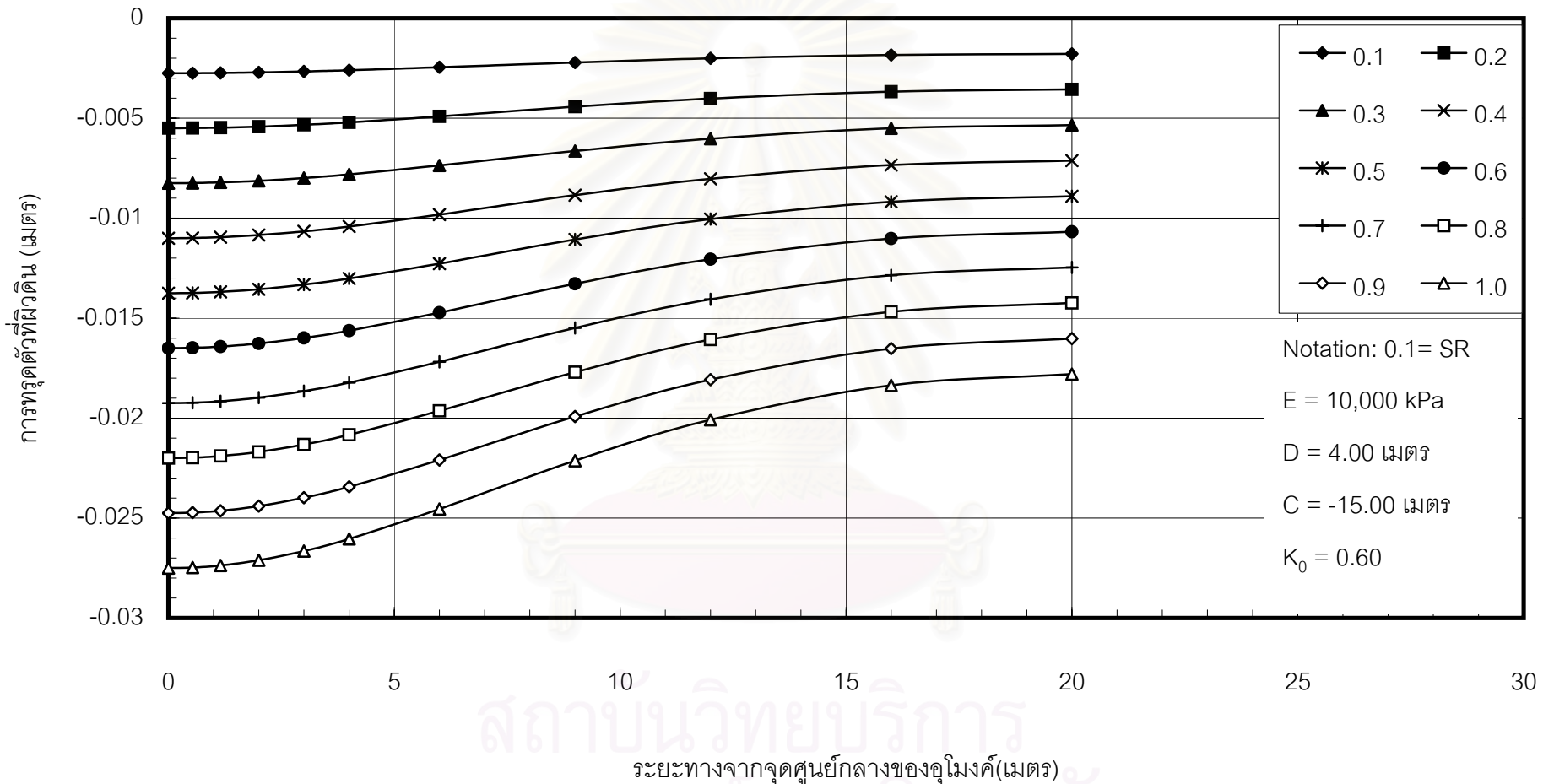


รูปที่ ก.55 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

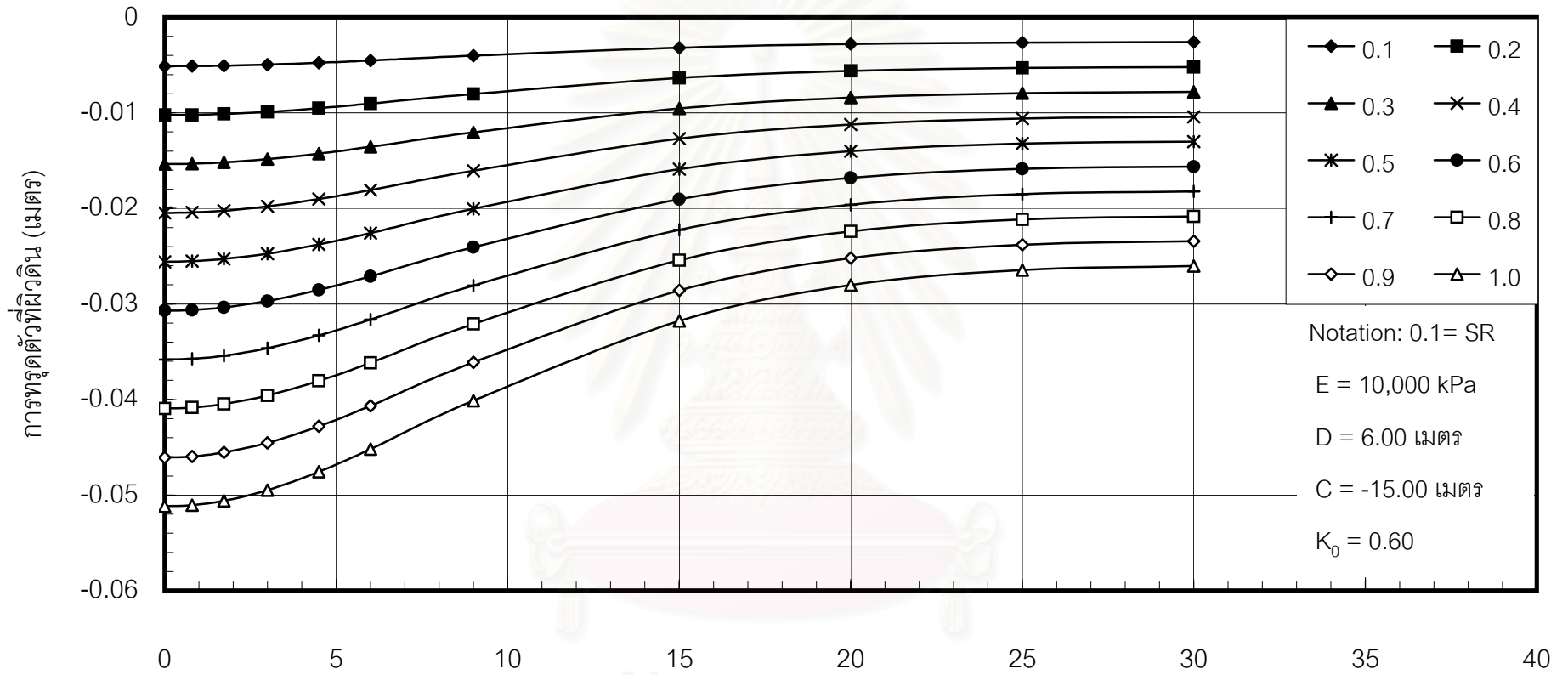




รูปที่ ก.56 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

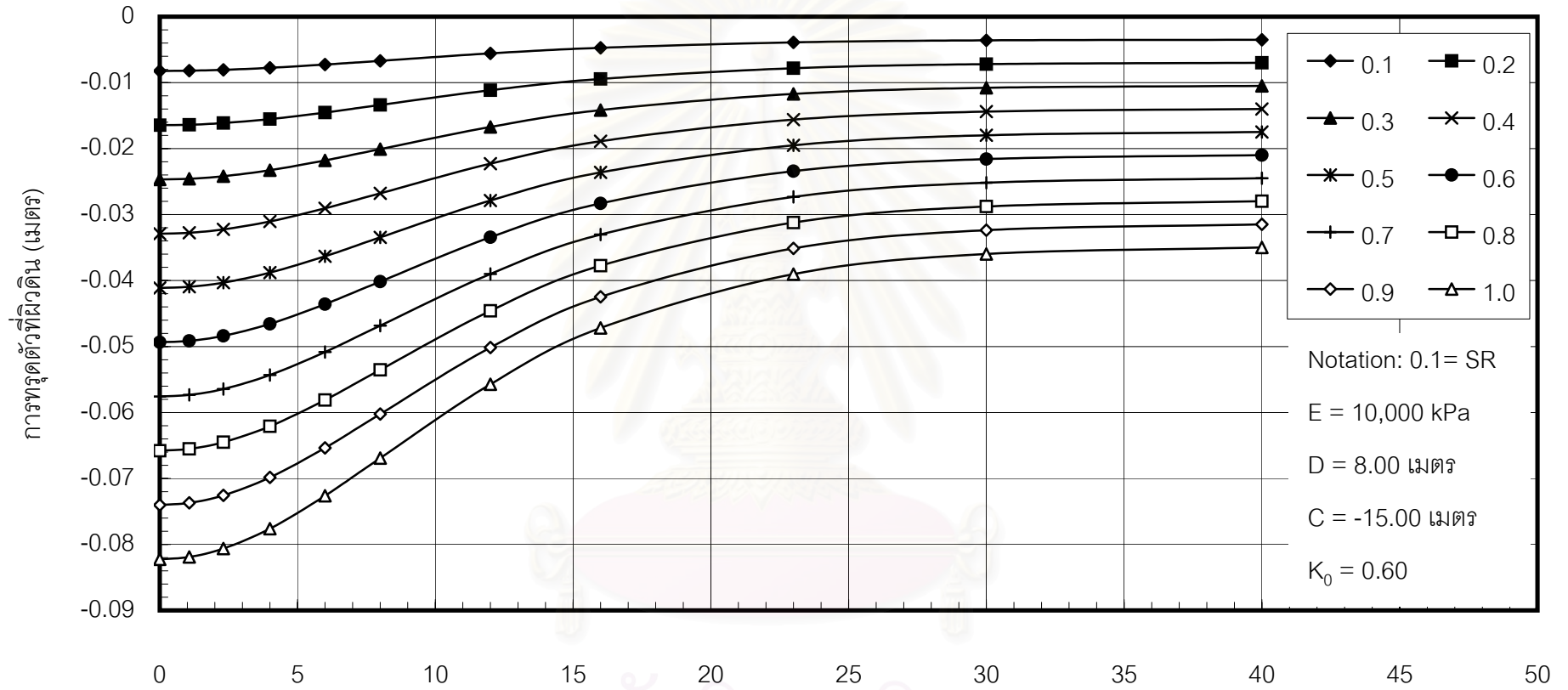


รูปที่ ก.57 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

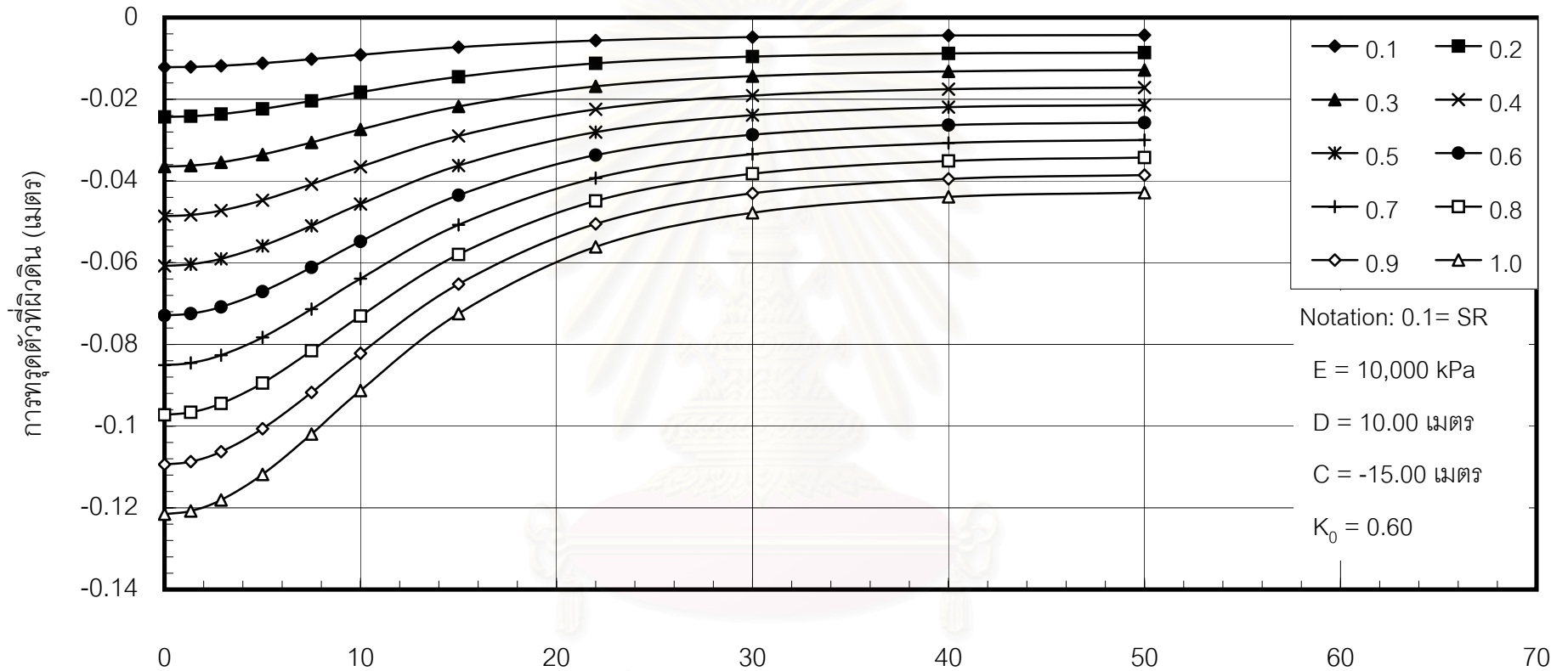


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.58 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

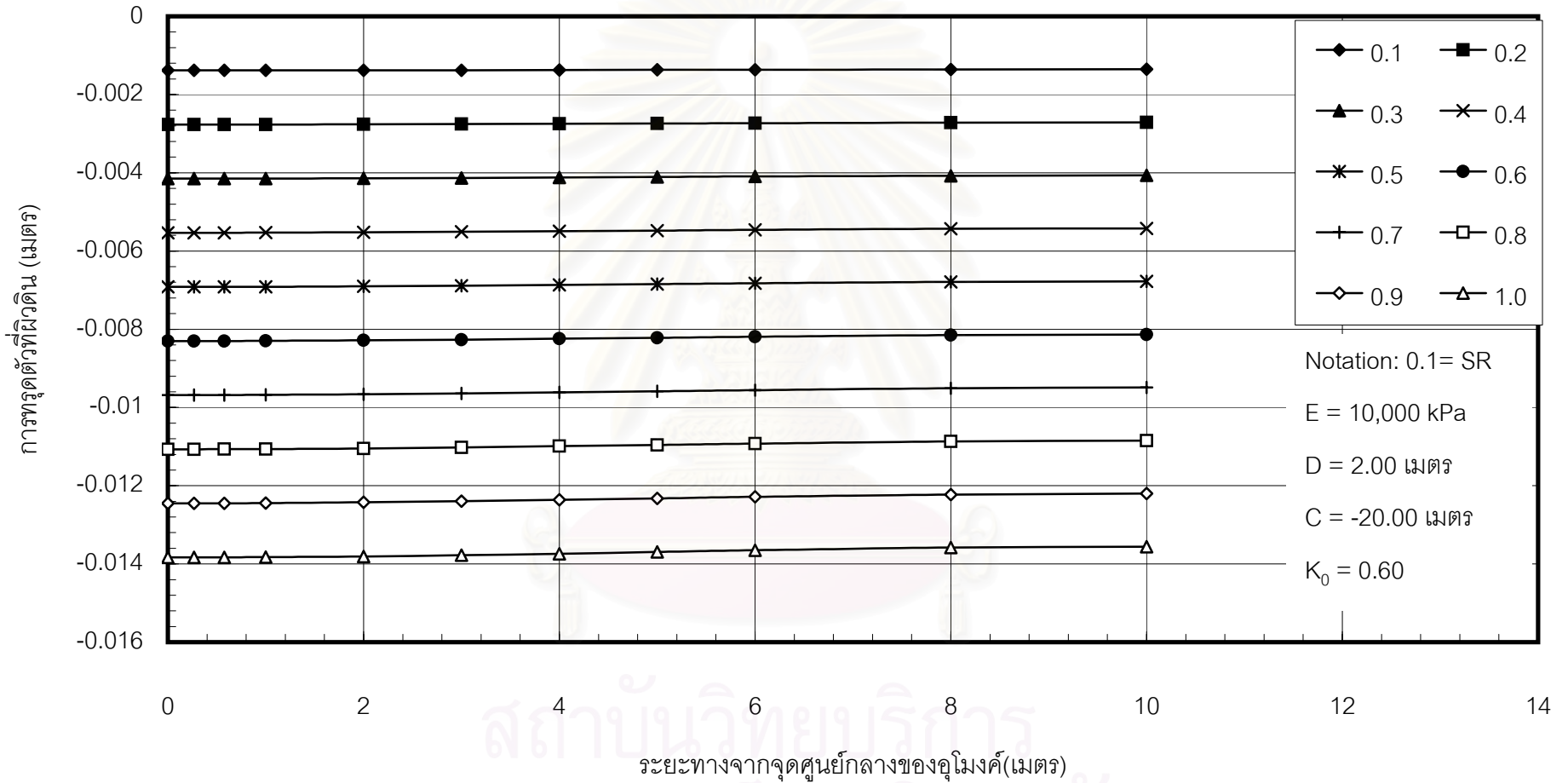


รูปที่ ก.59 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

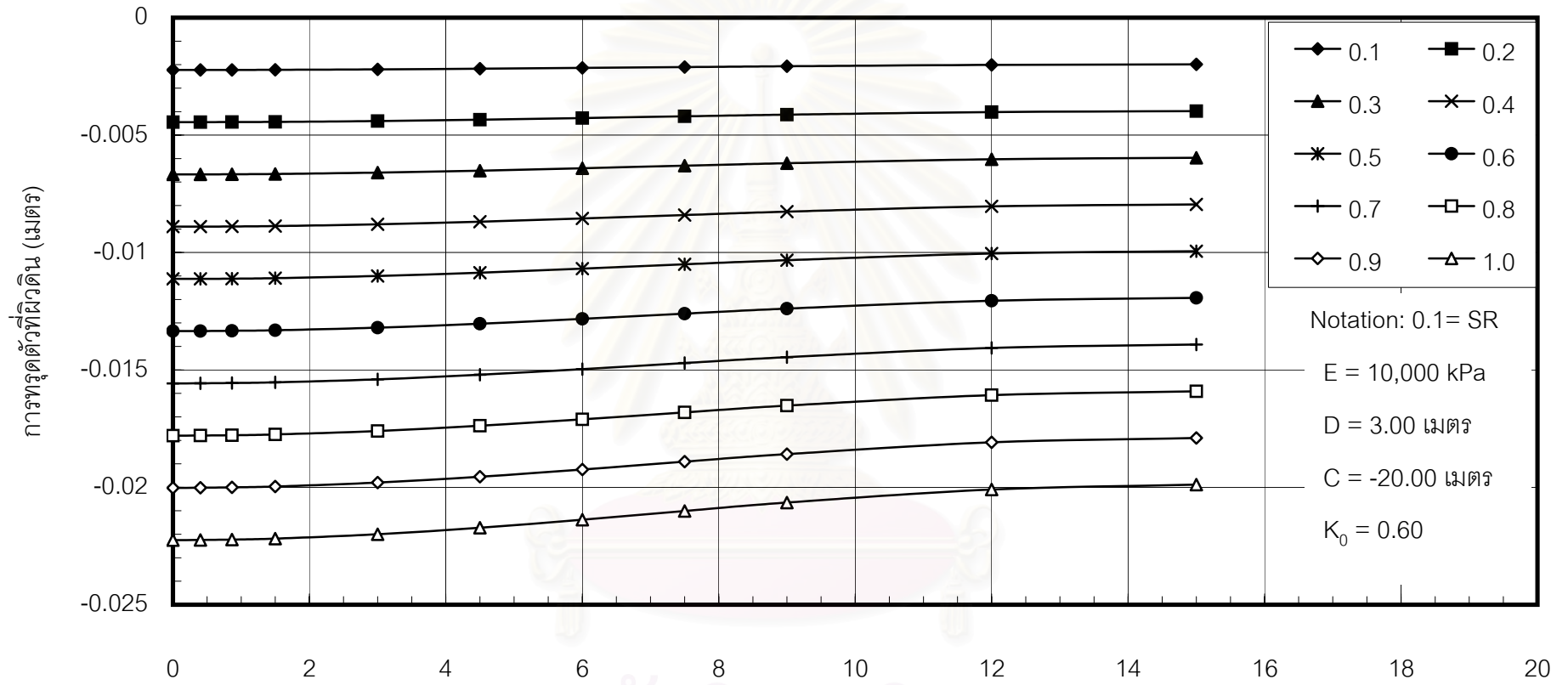


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.60 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

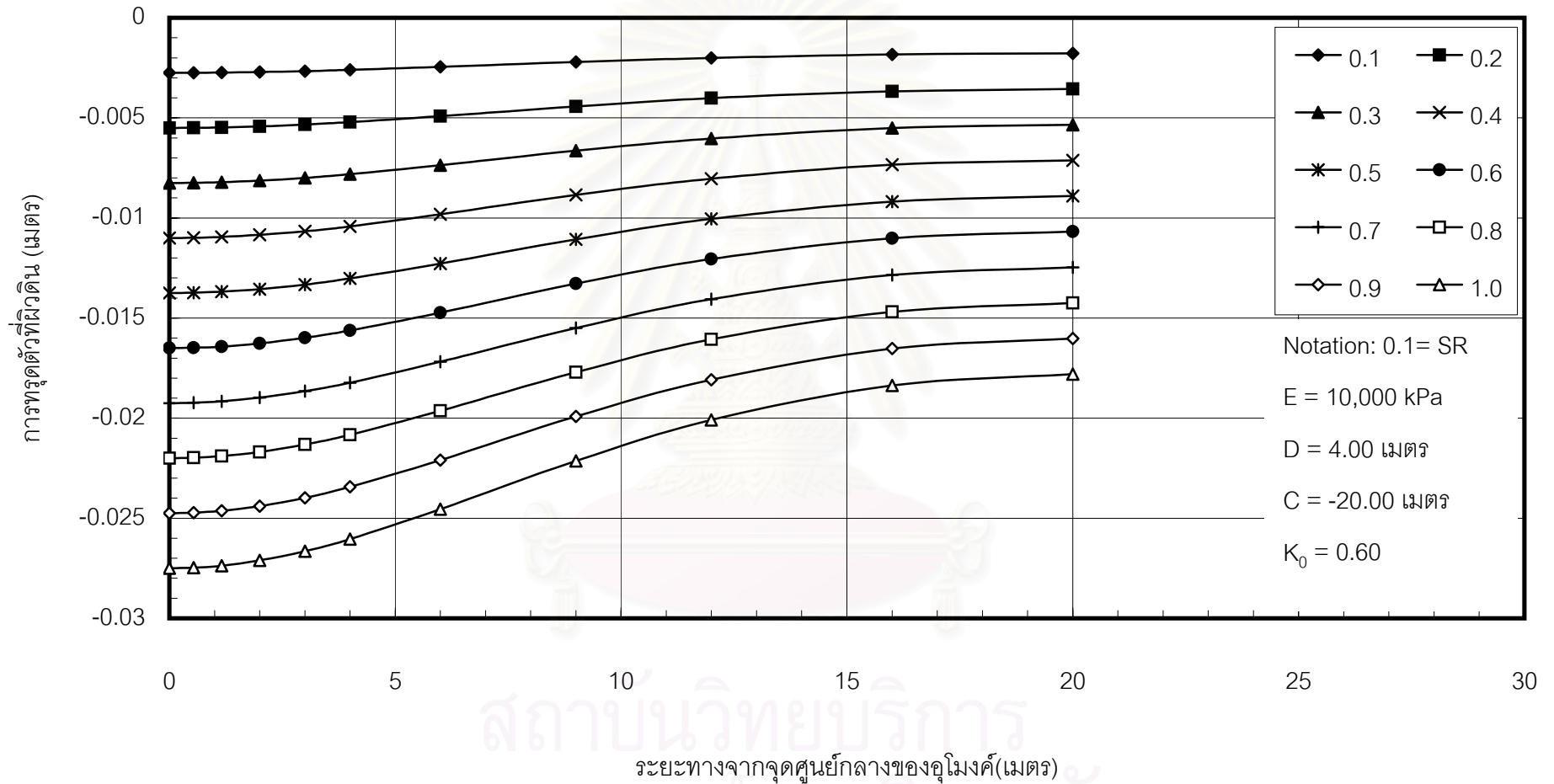


รูปที่ ก.61 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



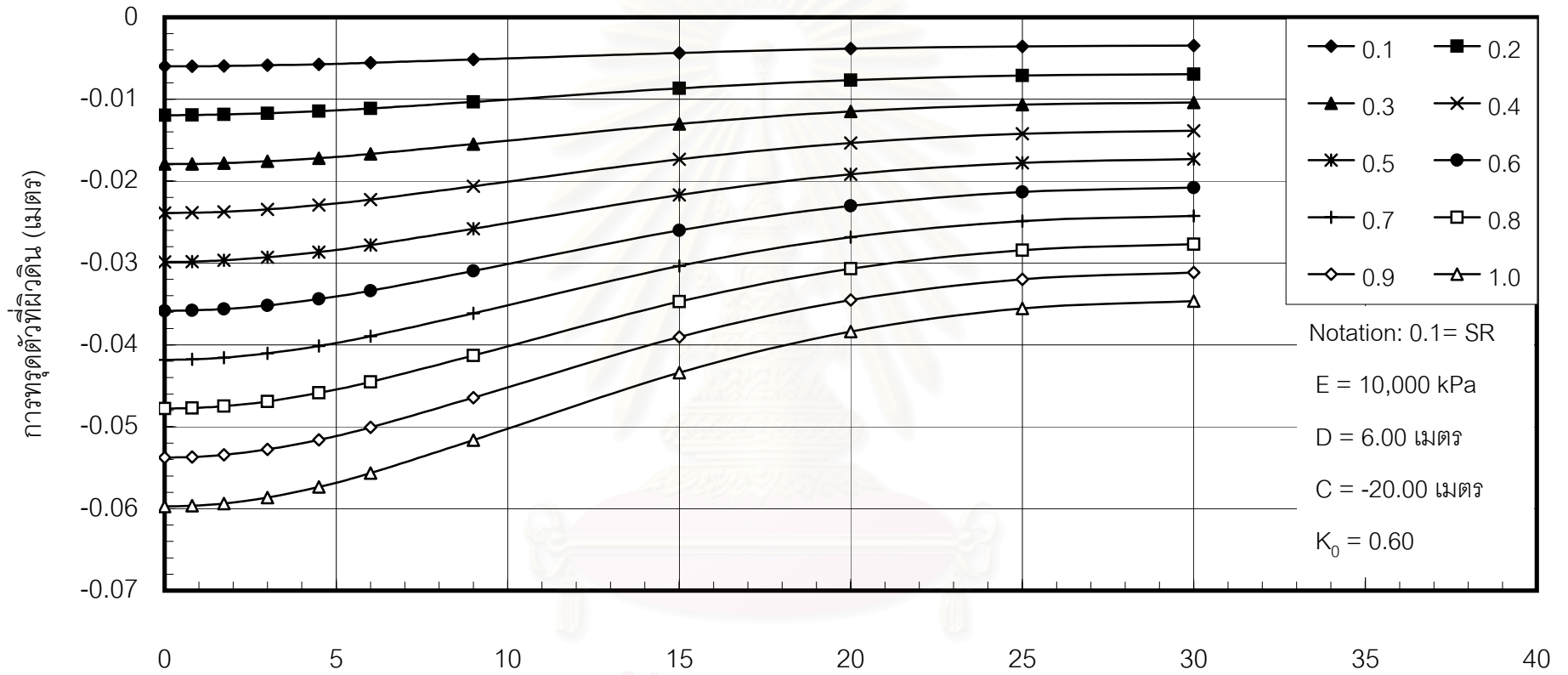
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.62 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

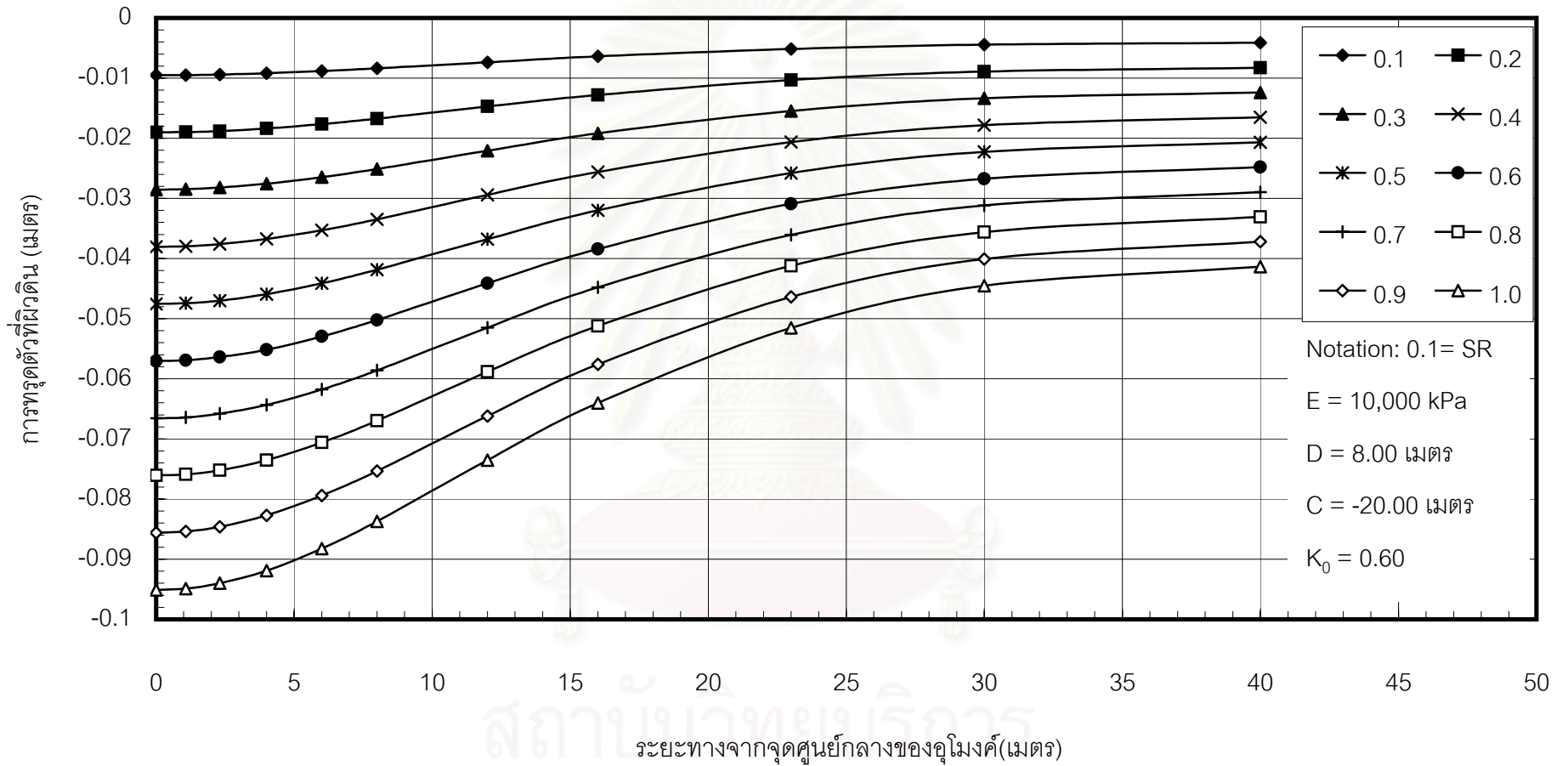


รูปที่ ก.63 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

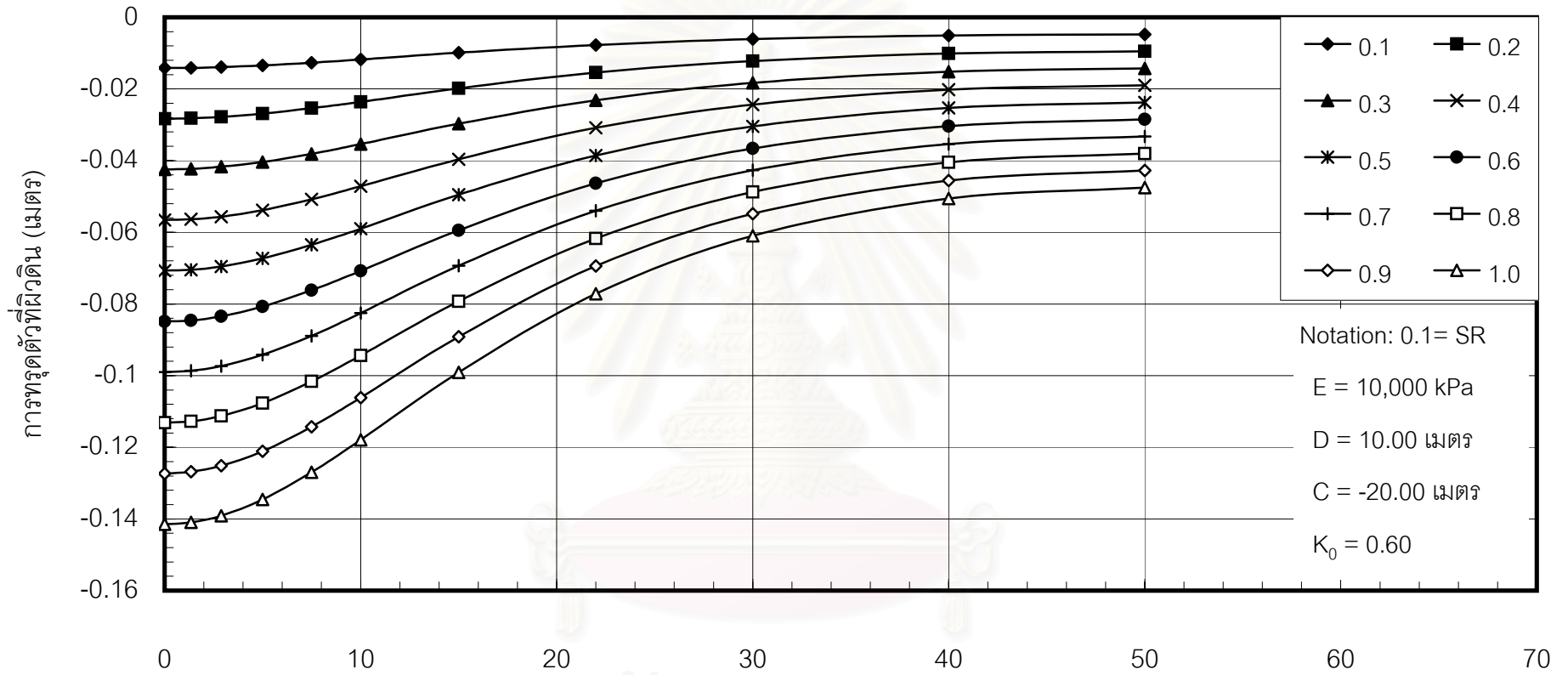




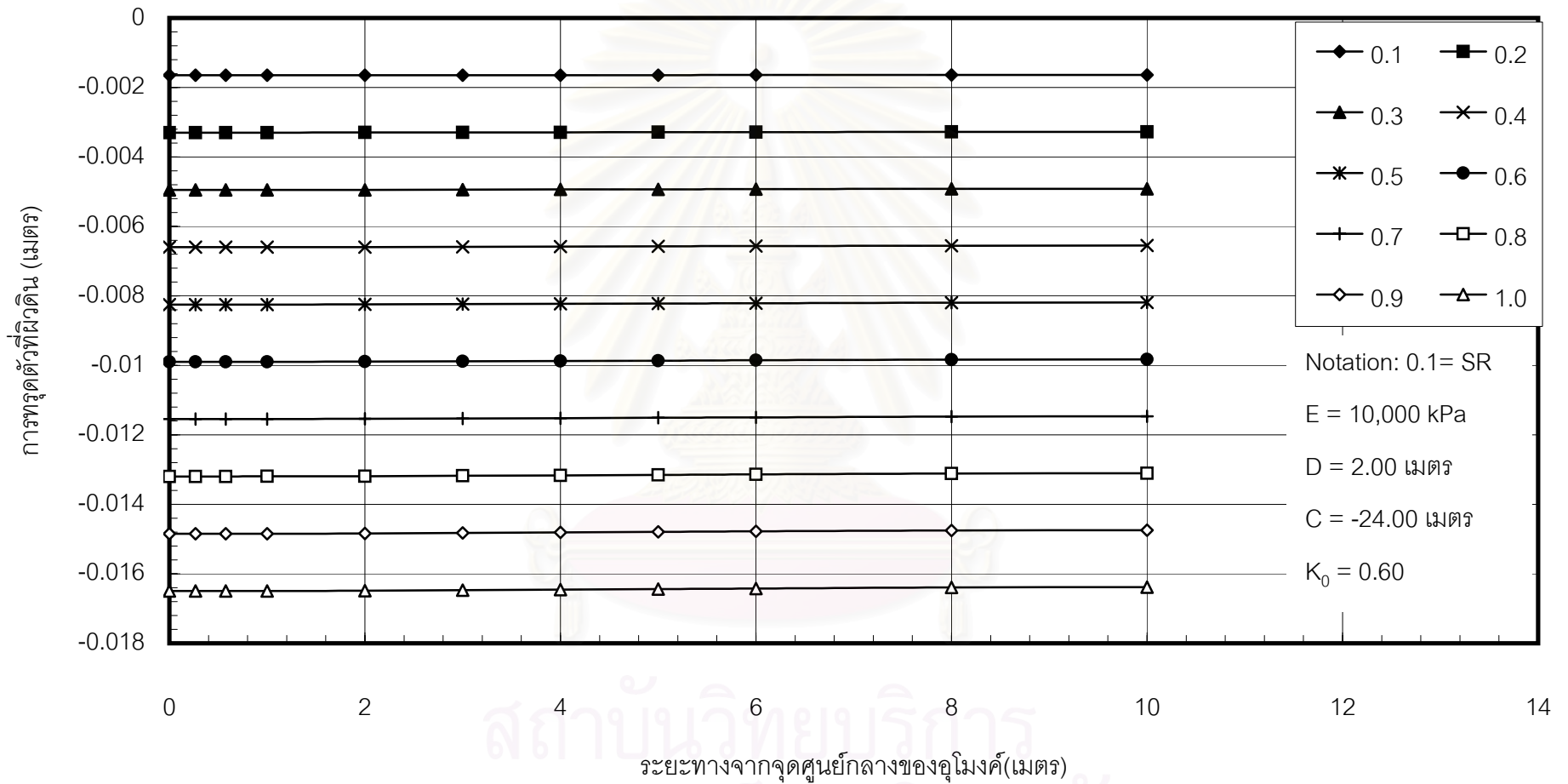
รูปที่ ก.64 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



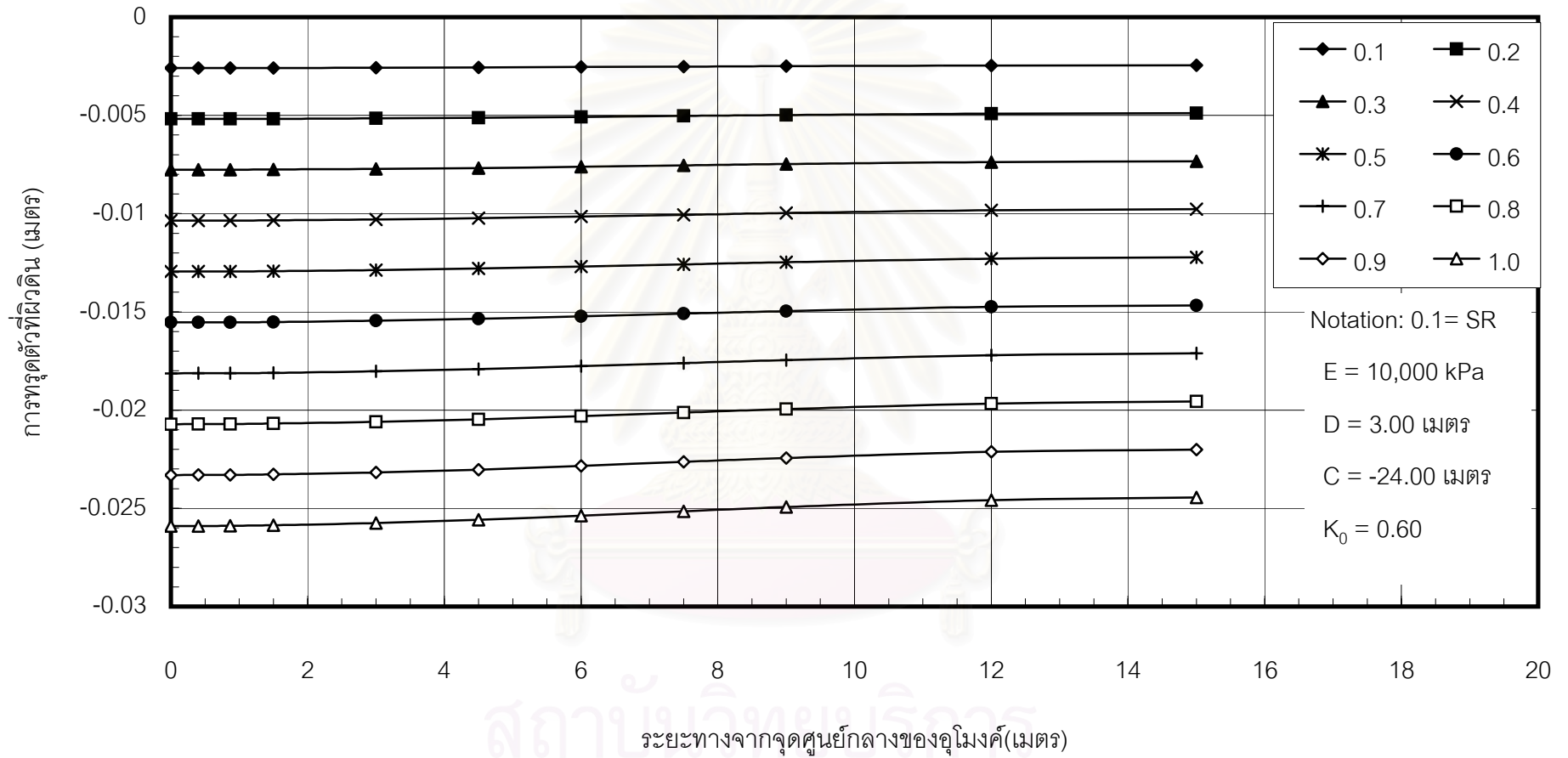
รูปที่ ก.65 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



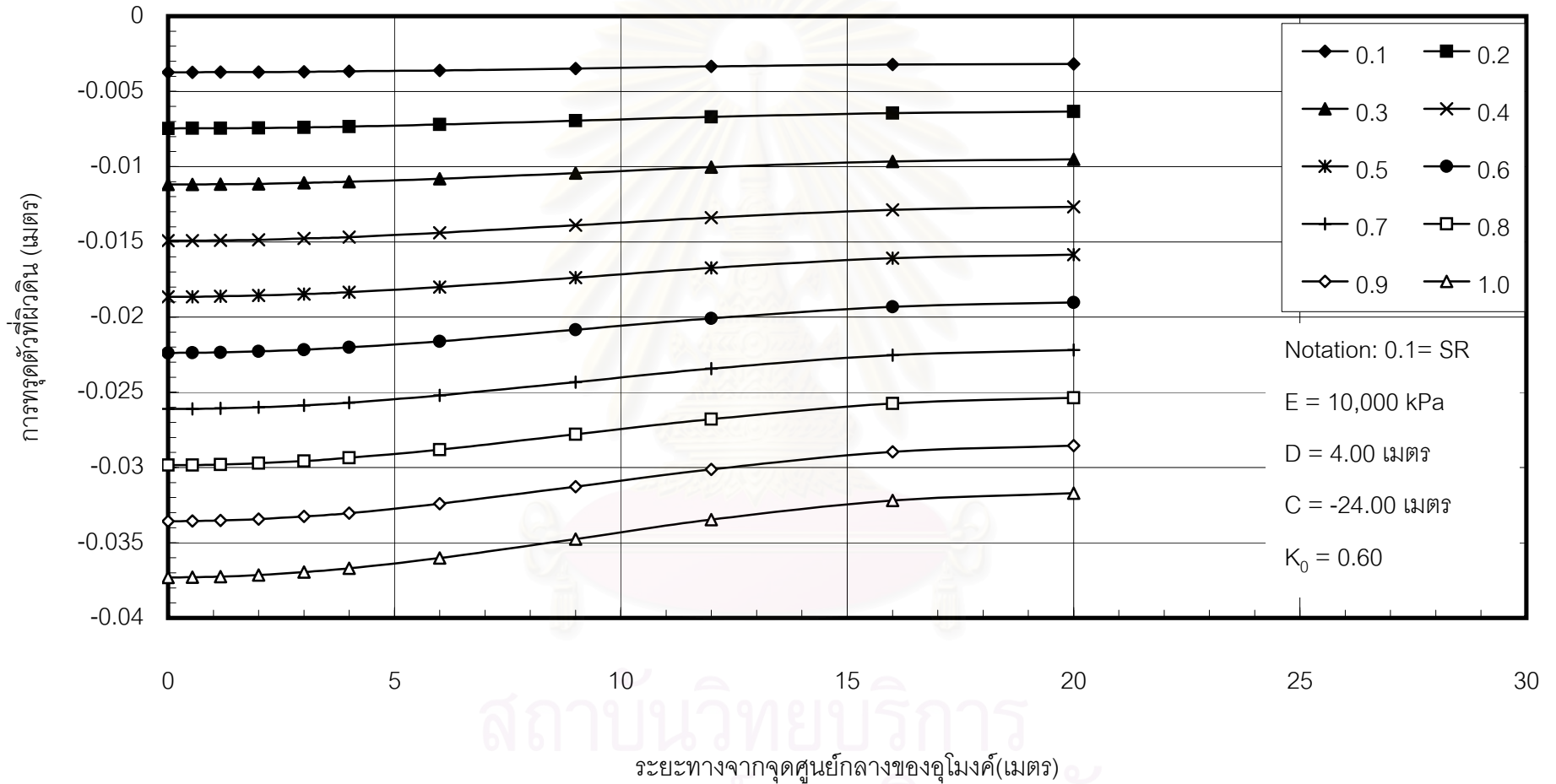
รูปที่ ก.66 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



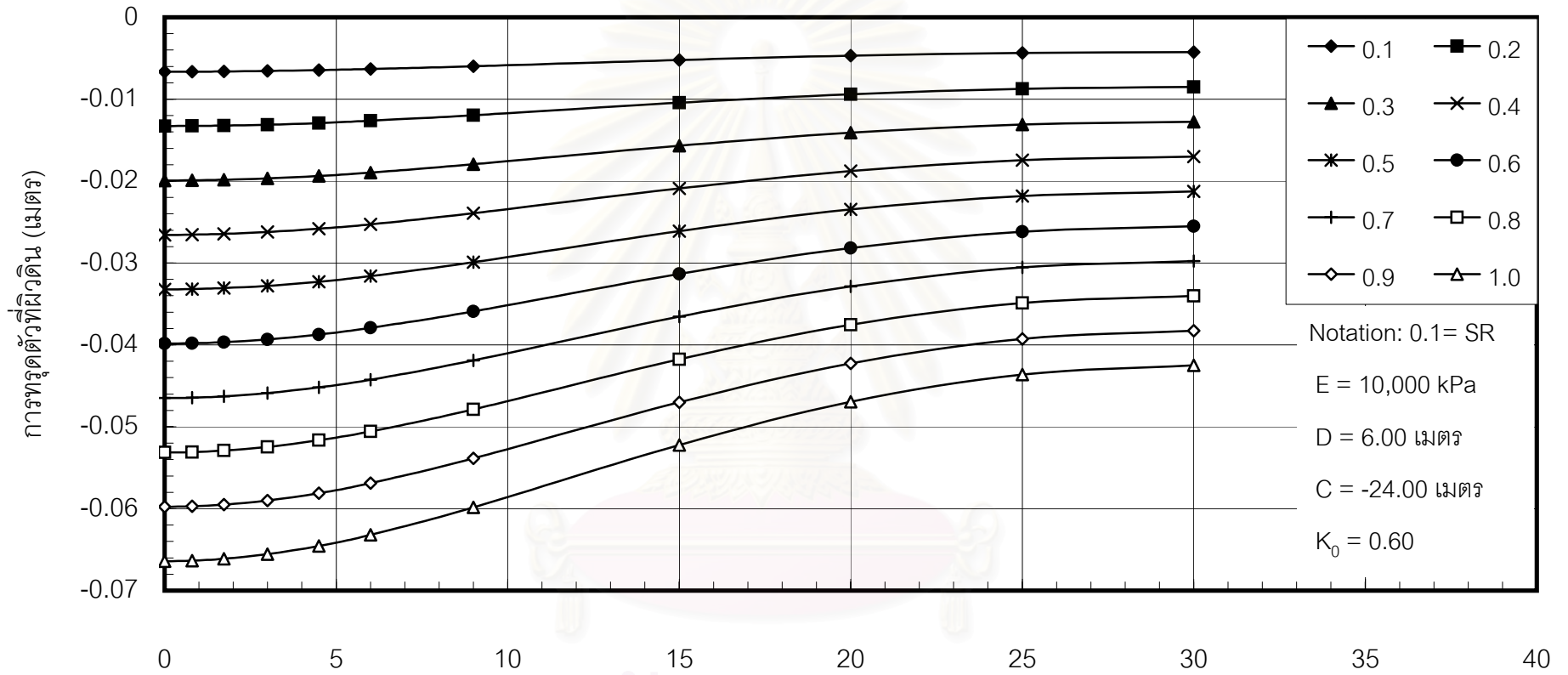
รูปที่ ก.67 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.68 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

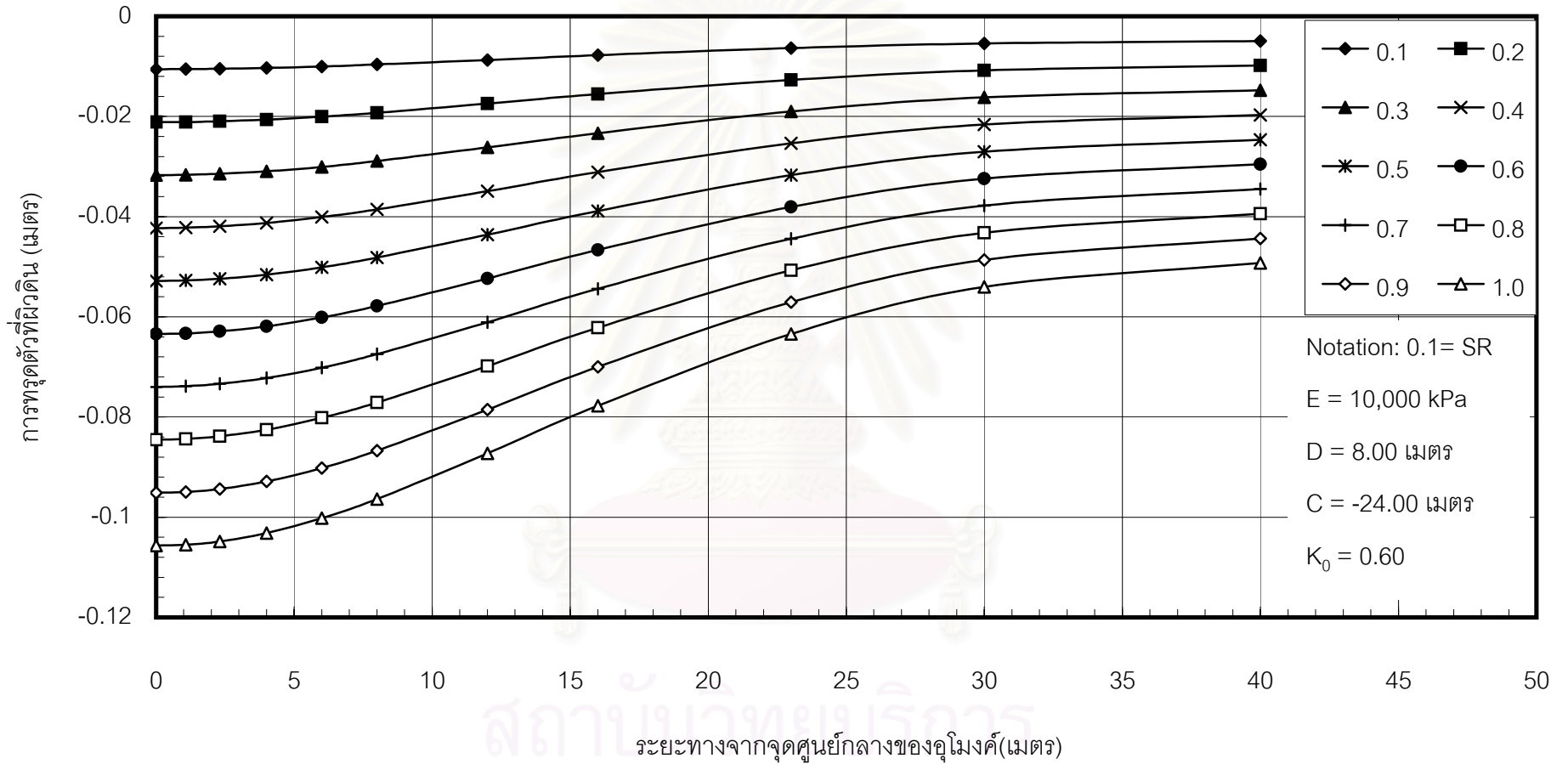


รูปที่ ก.69 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



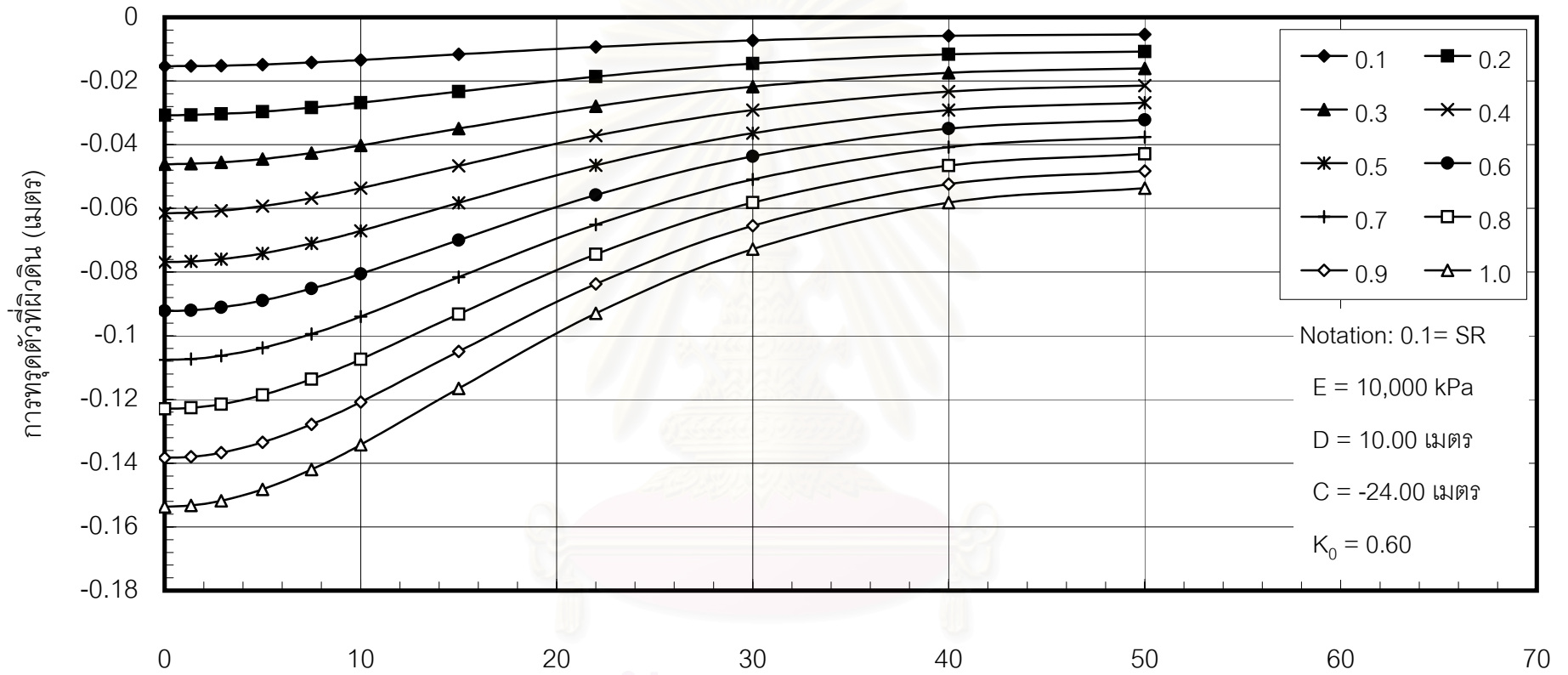
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.70 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



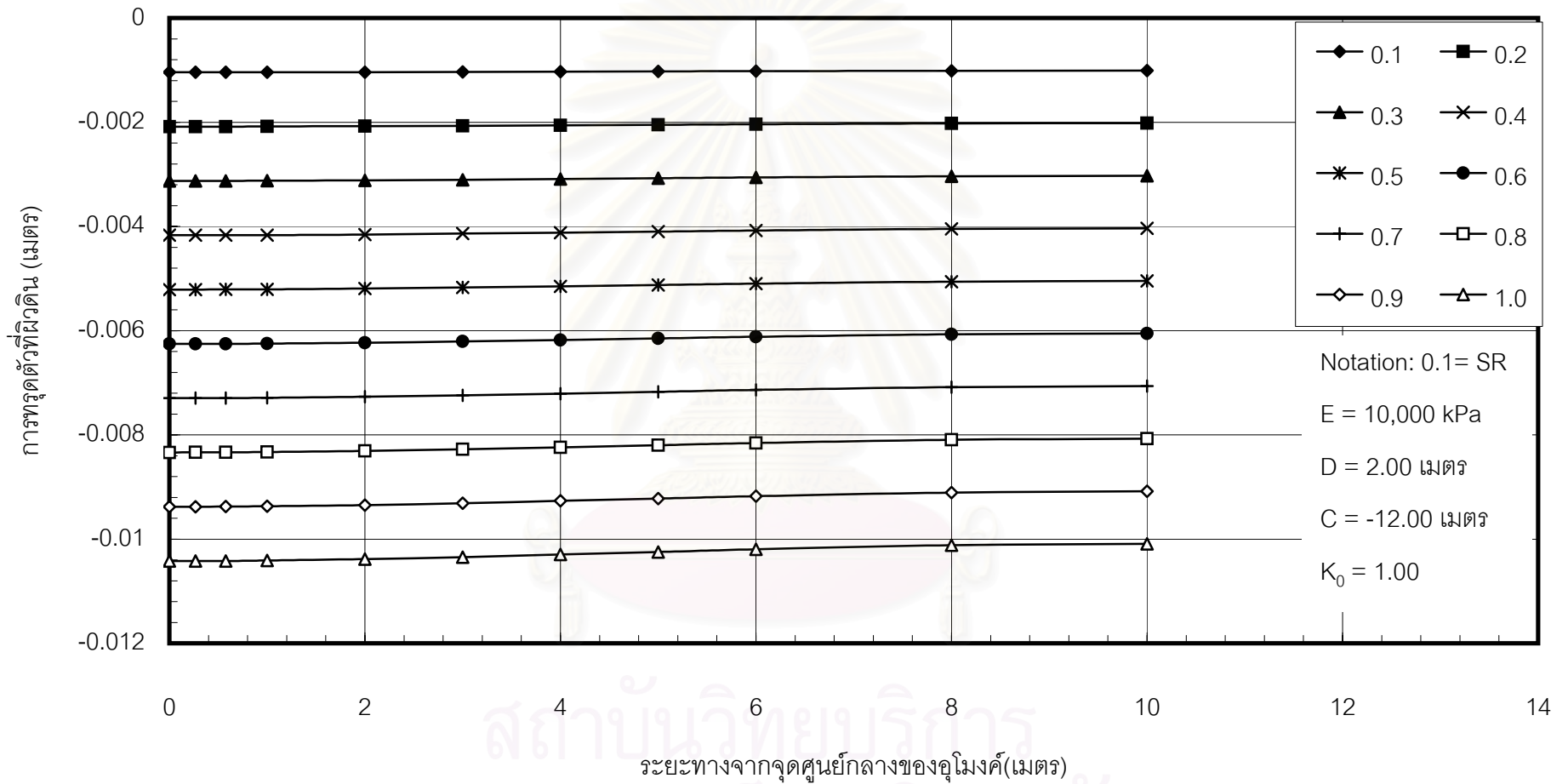
รูปที่ ก.71 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



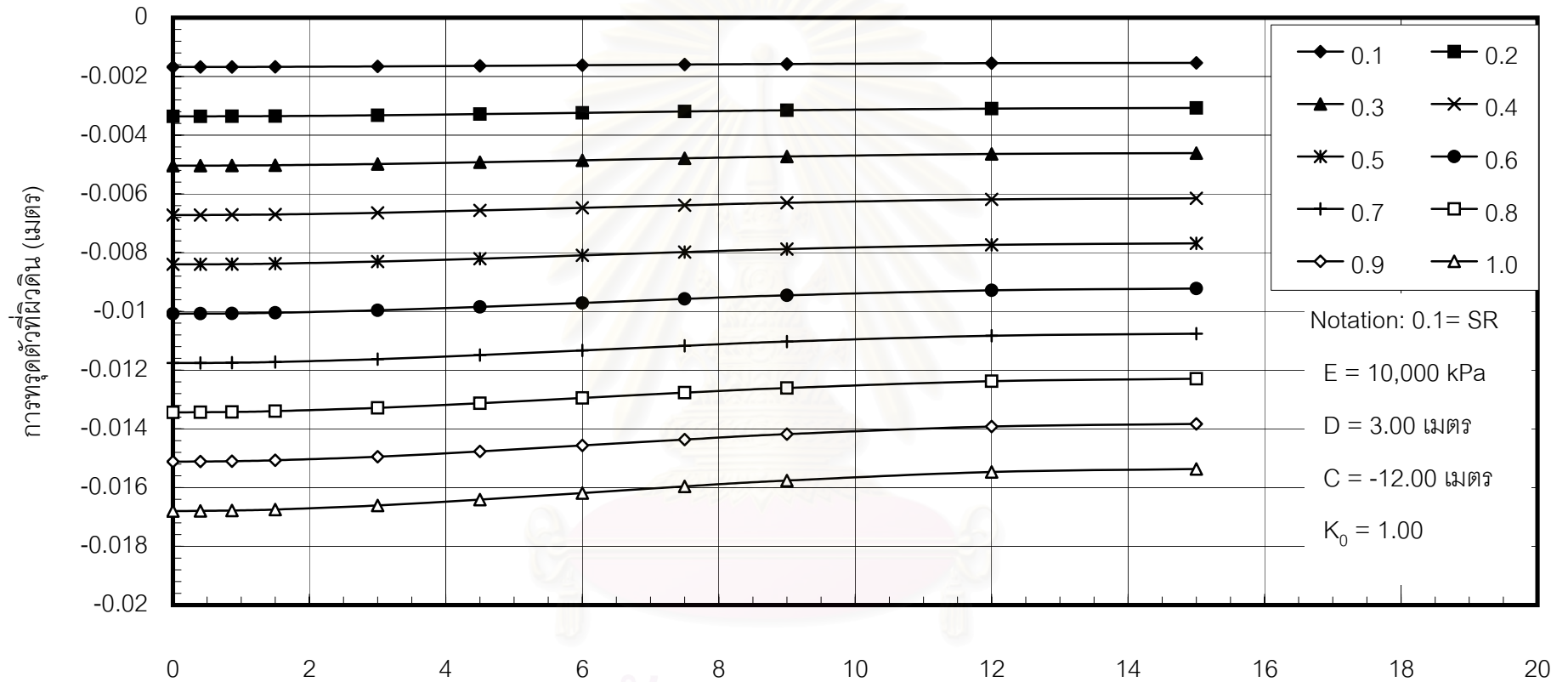


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.72 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



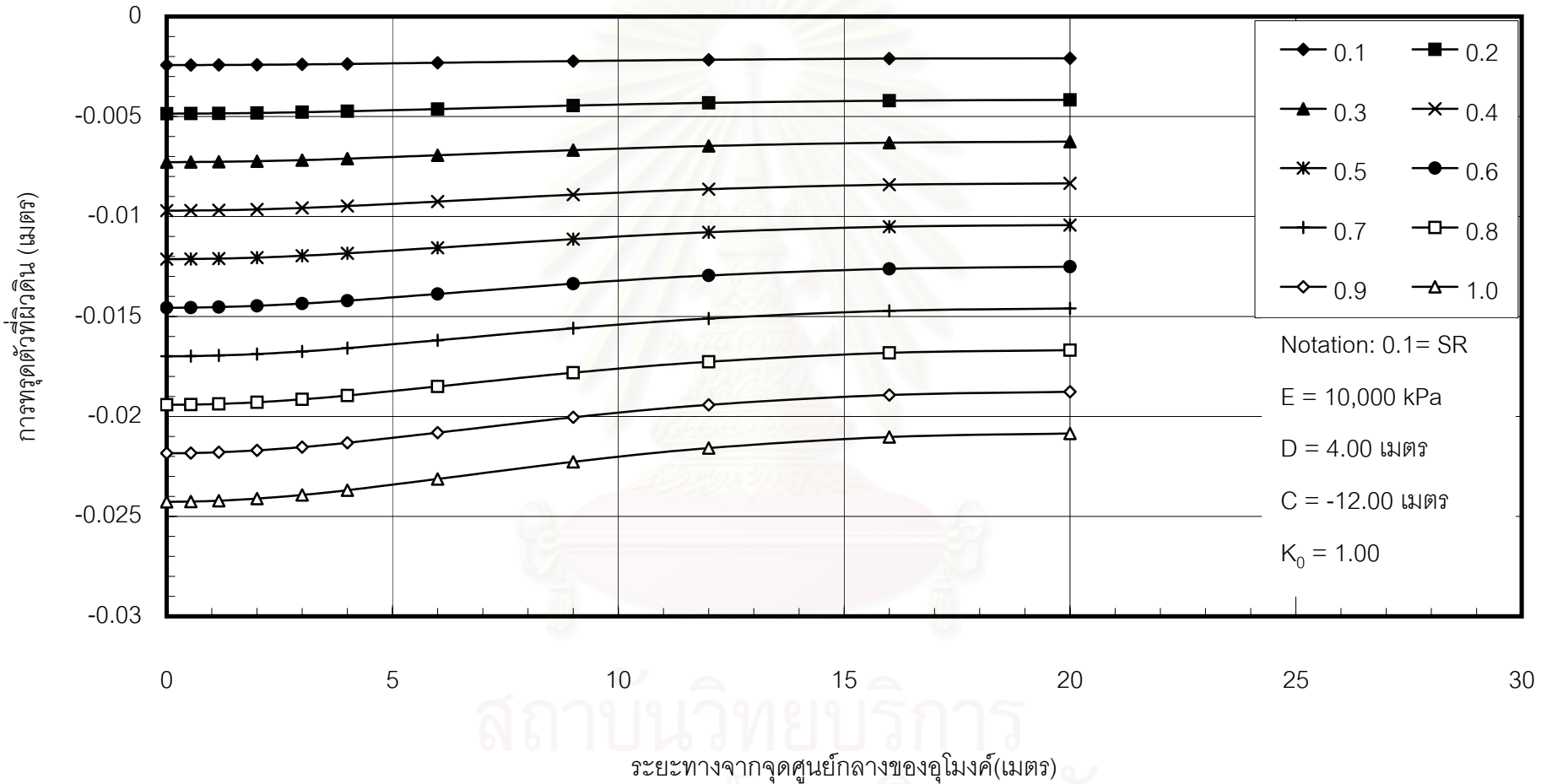
รูปที่ ก.73 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



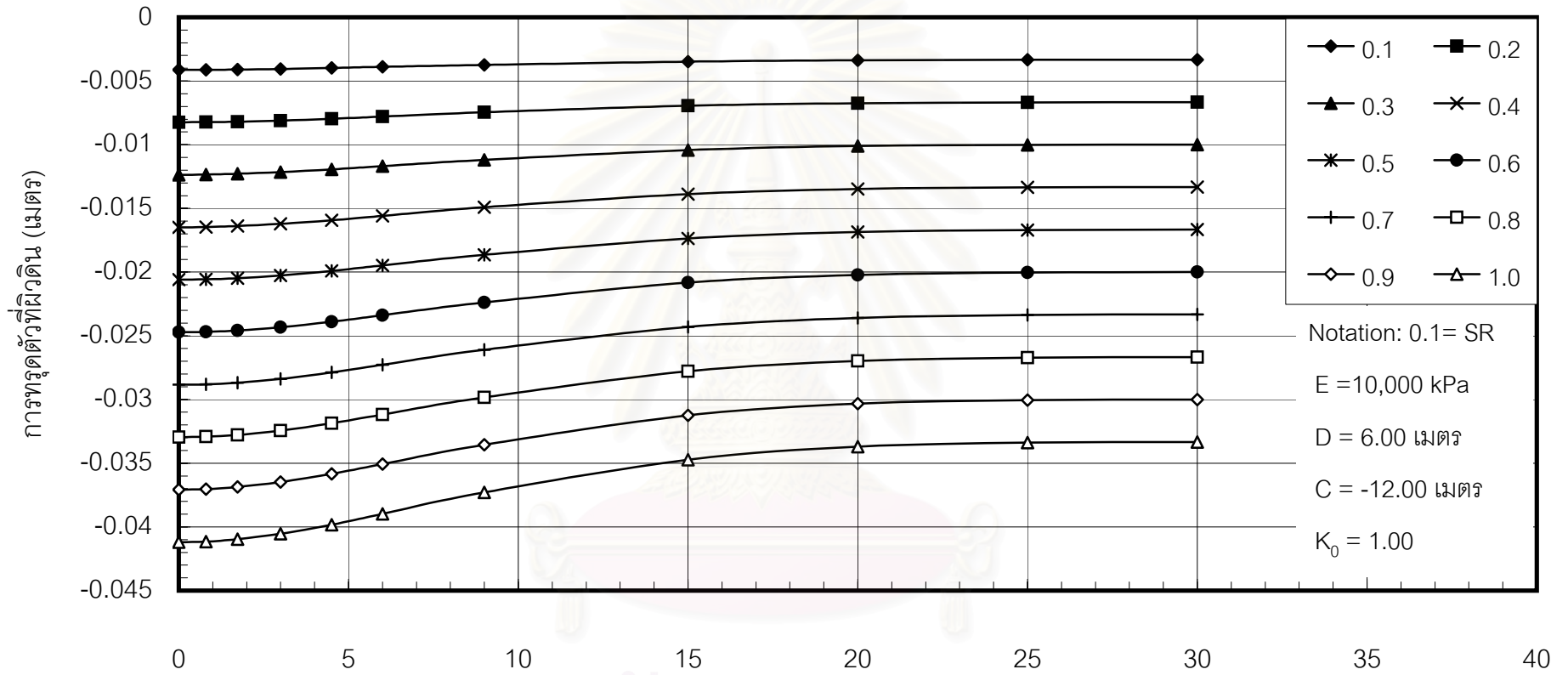
Notation: 0.1= SR  
 E = 10,000 kPa  
 D = 3.00 เมตร  
 C = -12.00 เมตร  
 K<sub>0</sub> = 1.00

ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

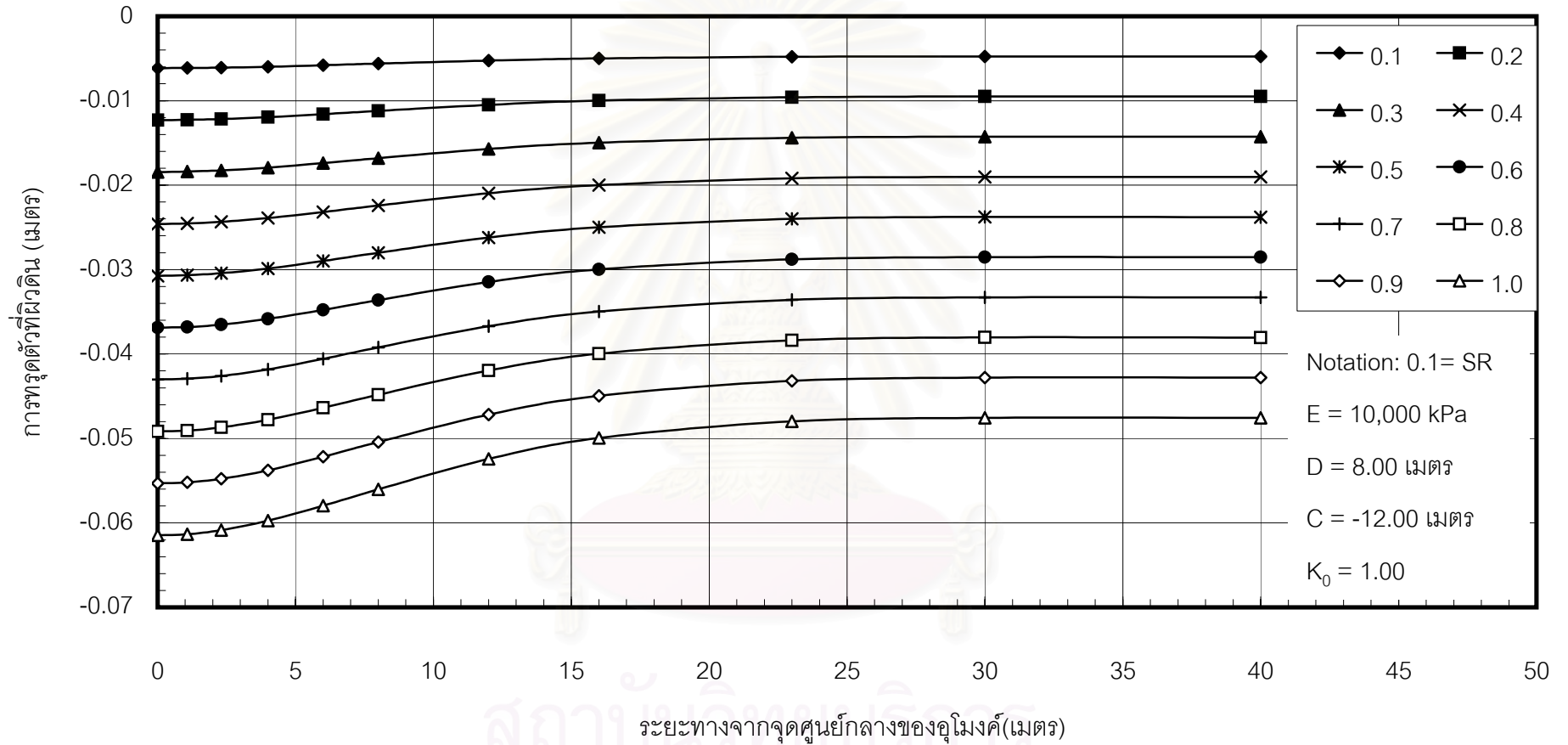
รูปที่ ก.74 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



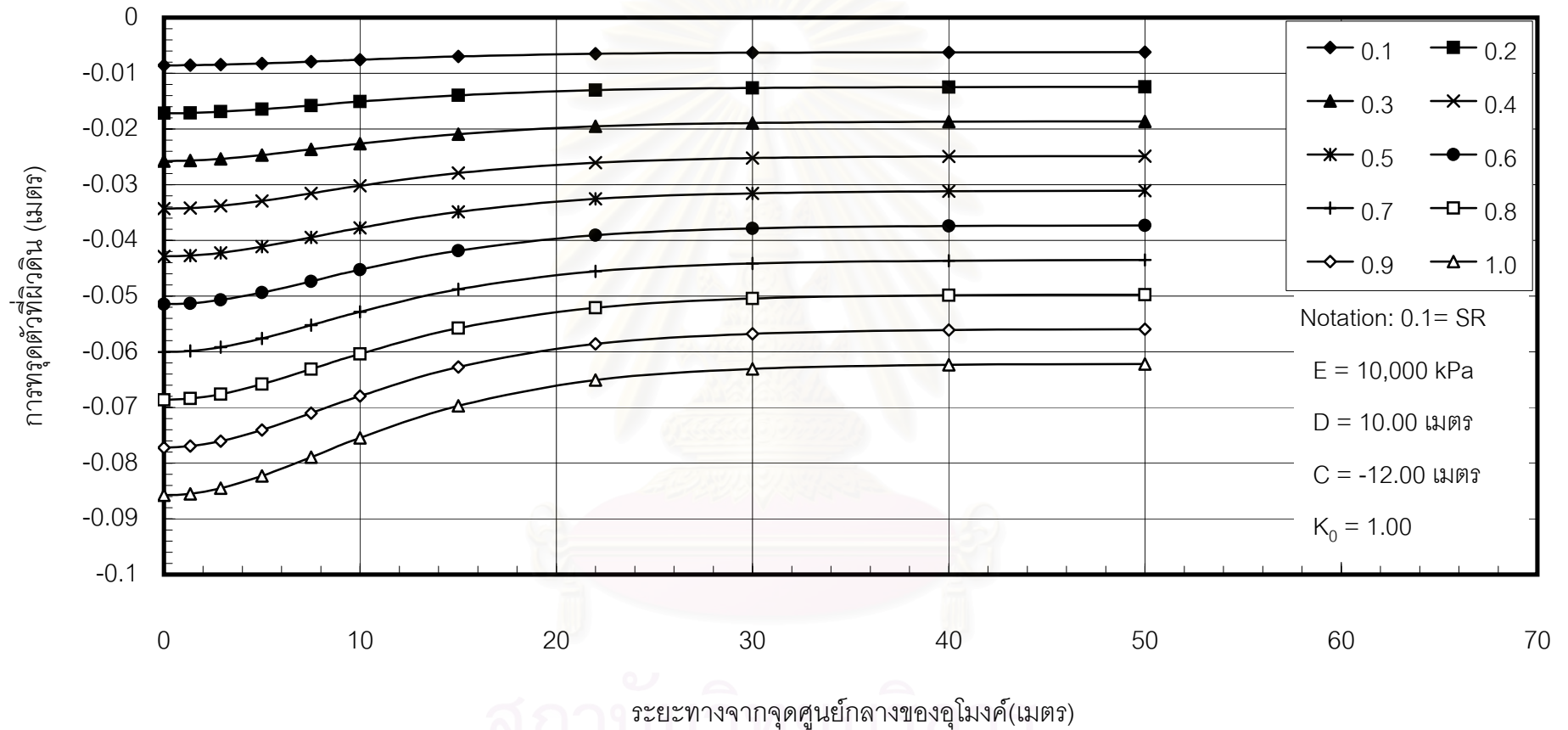
รูปที่ ก.75 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



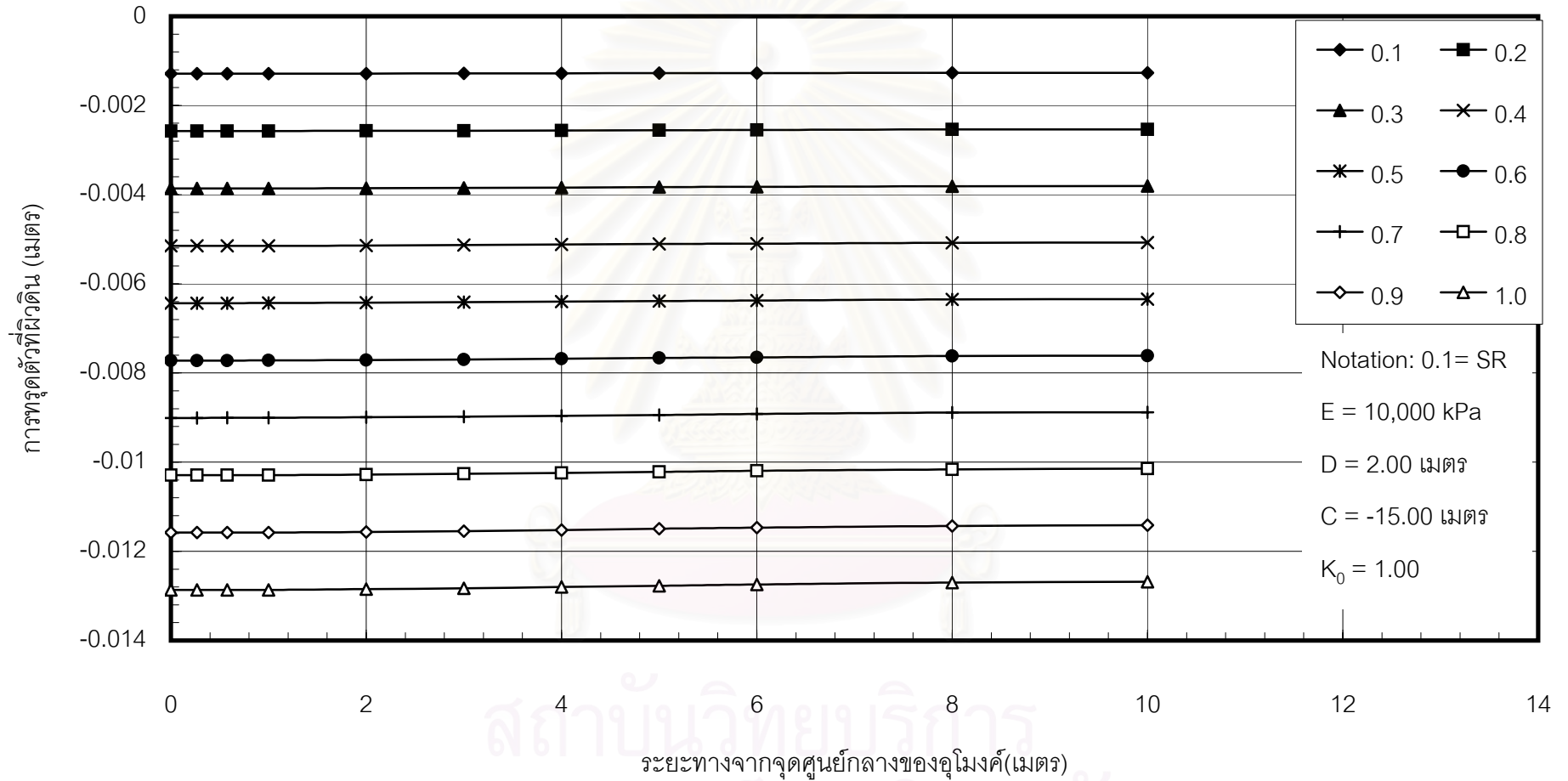
รูปที่ ก.76 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.77 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

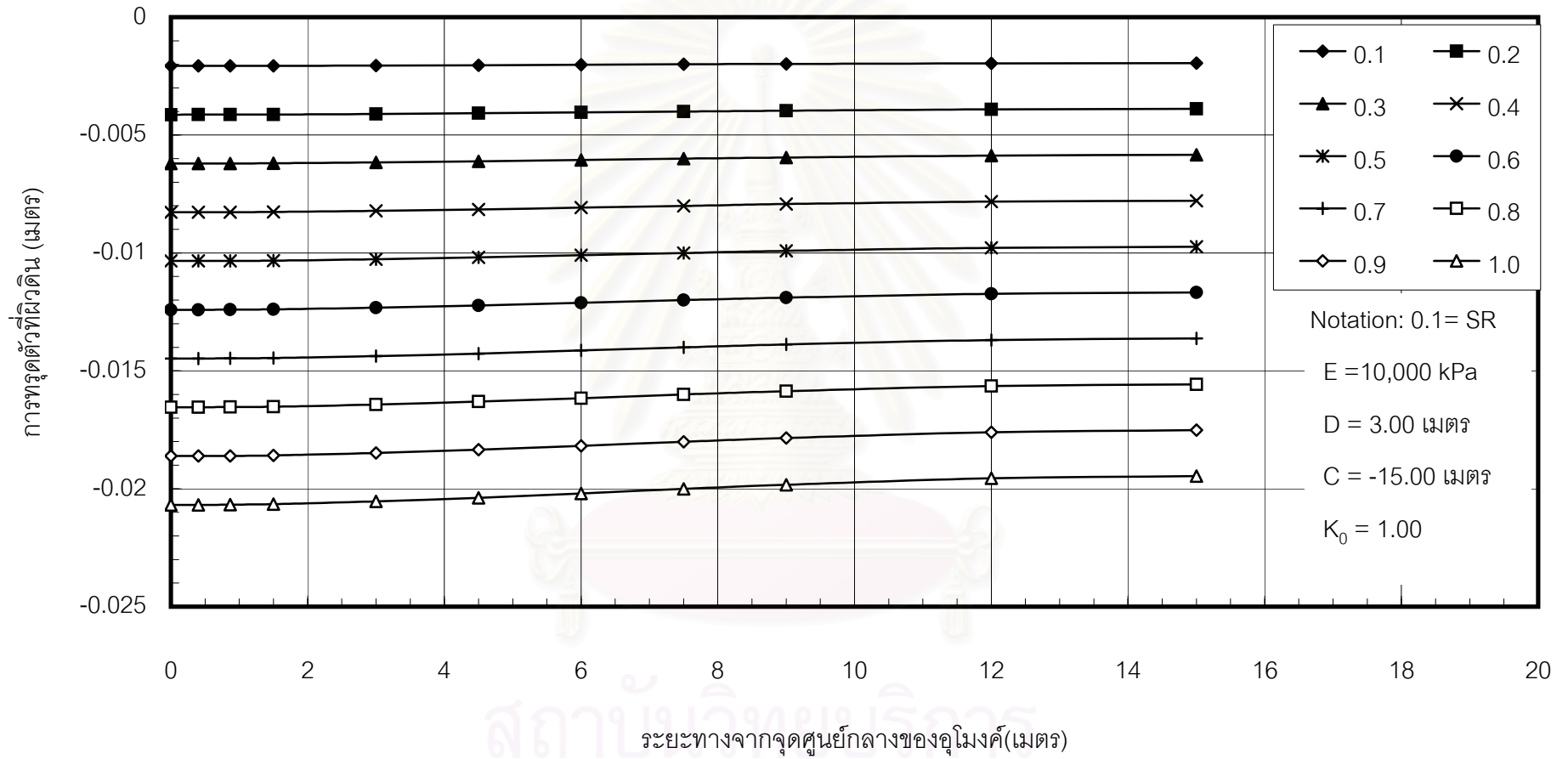


รูปที่ ก.78 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

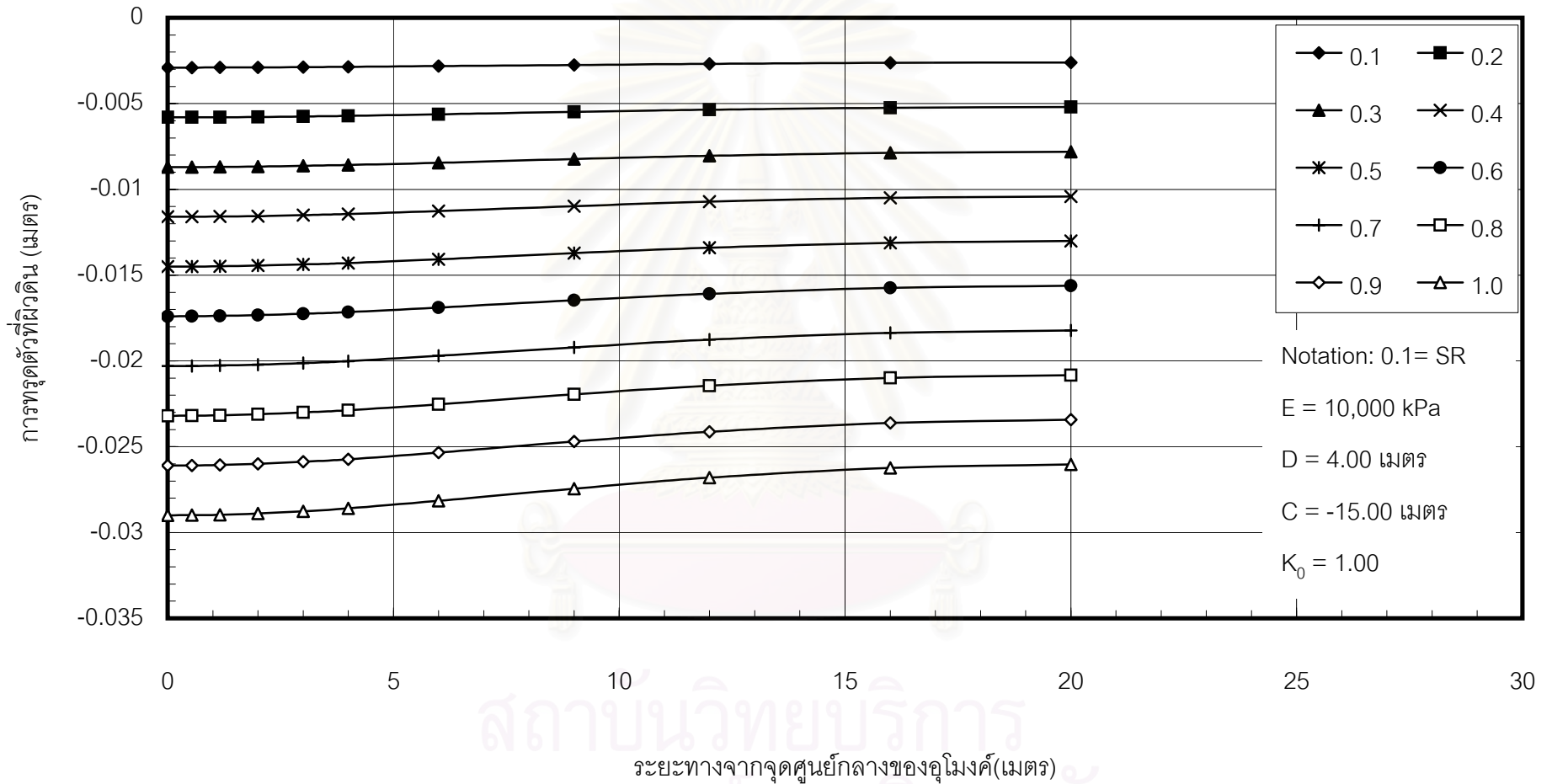


รูปที่ ก.79 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

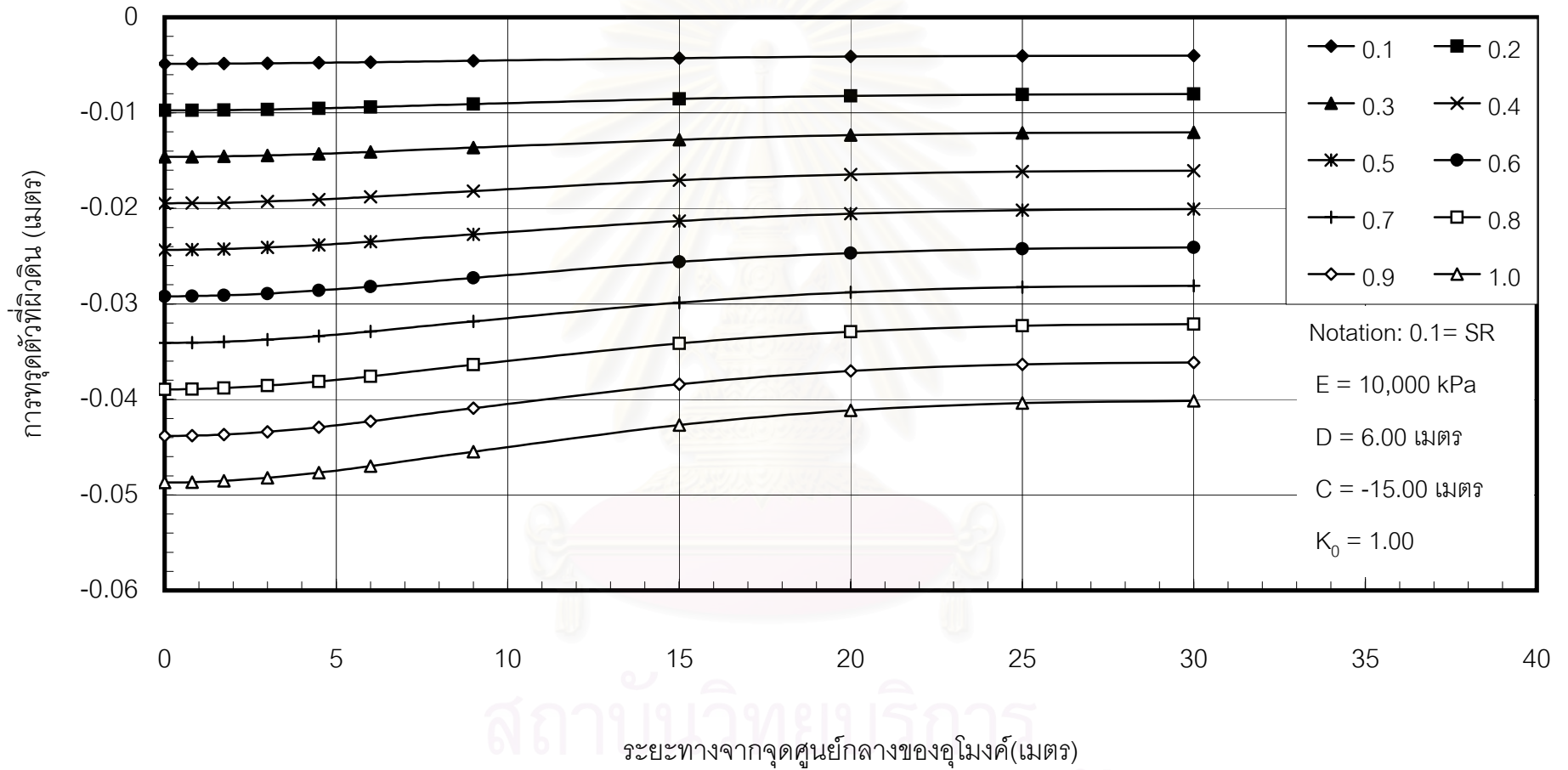




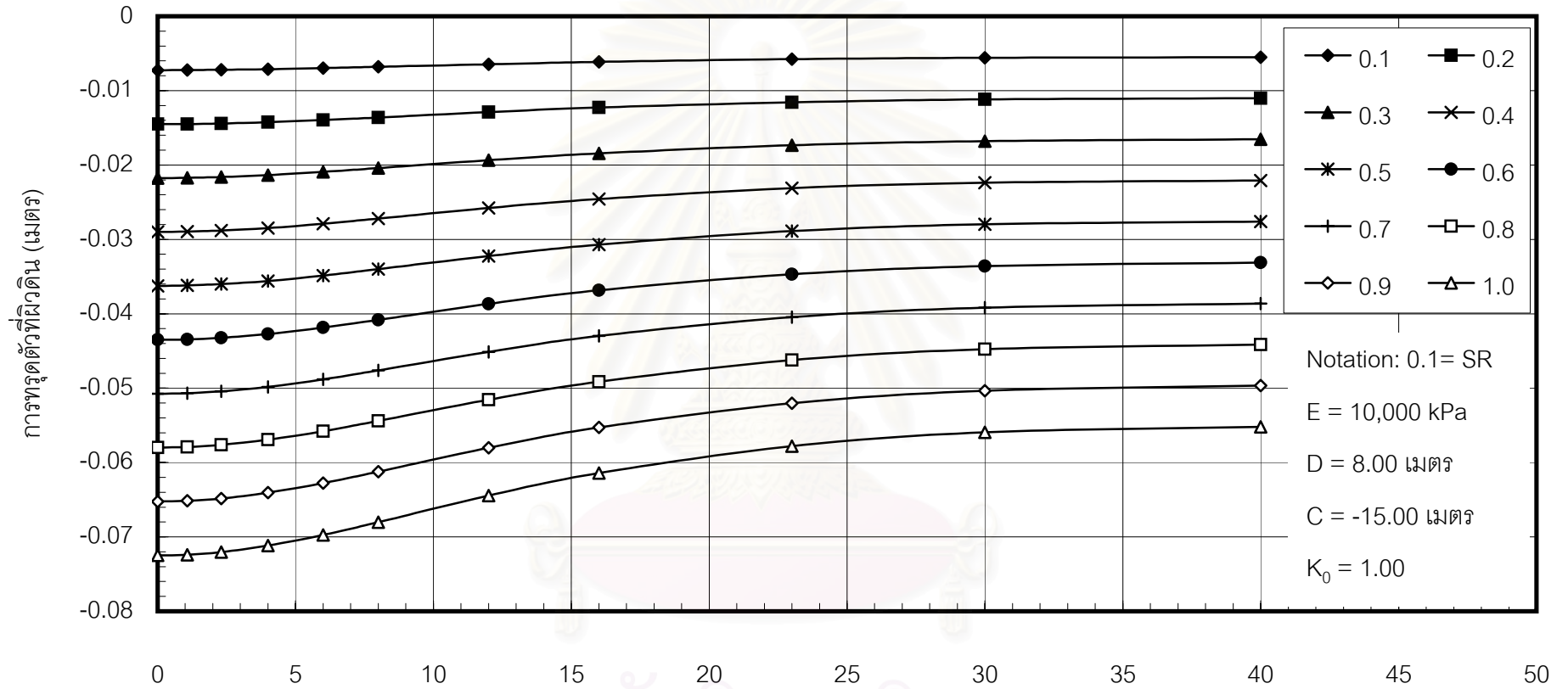
รูปที่ ก.80 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.81 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

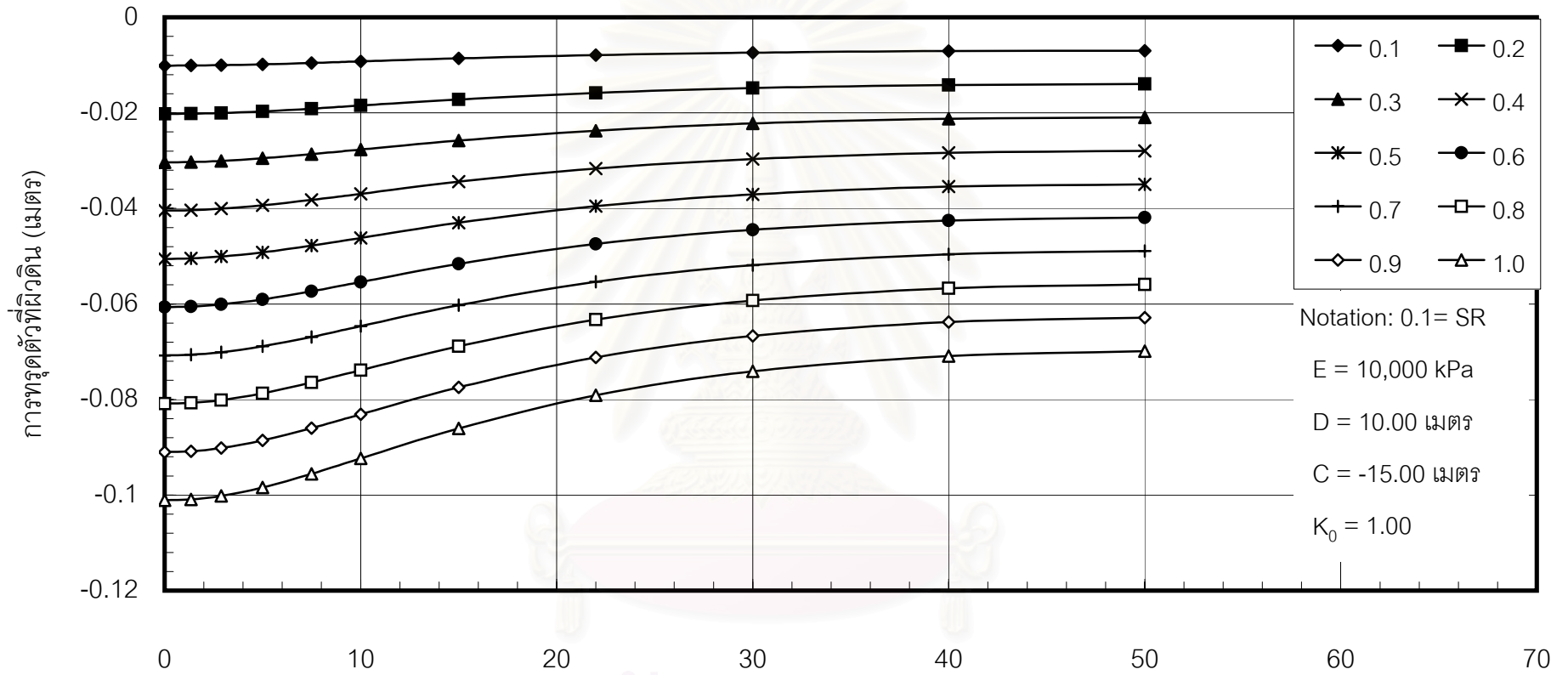


รูปที่ ก.82 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



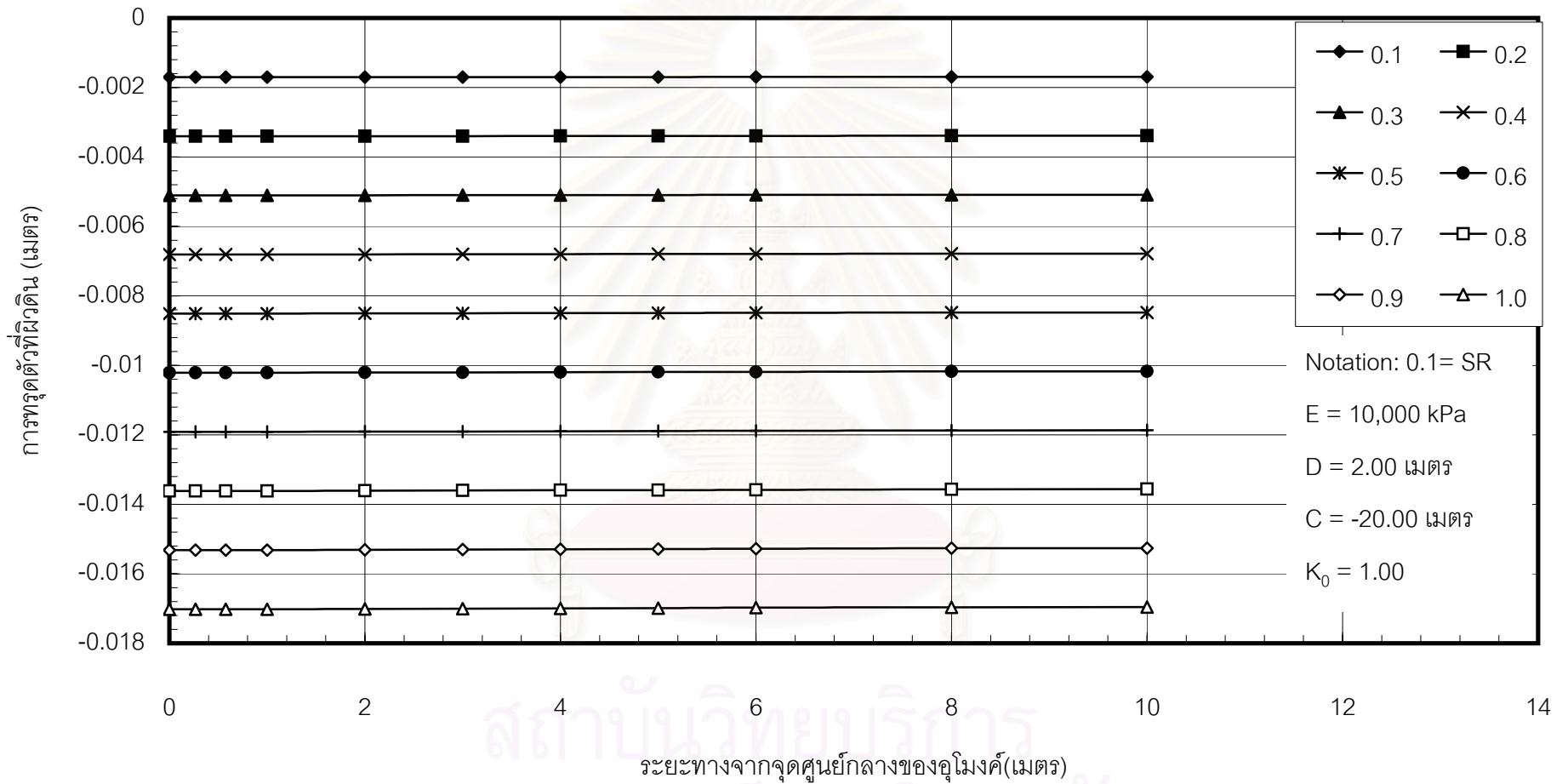
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.83 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

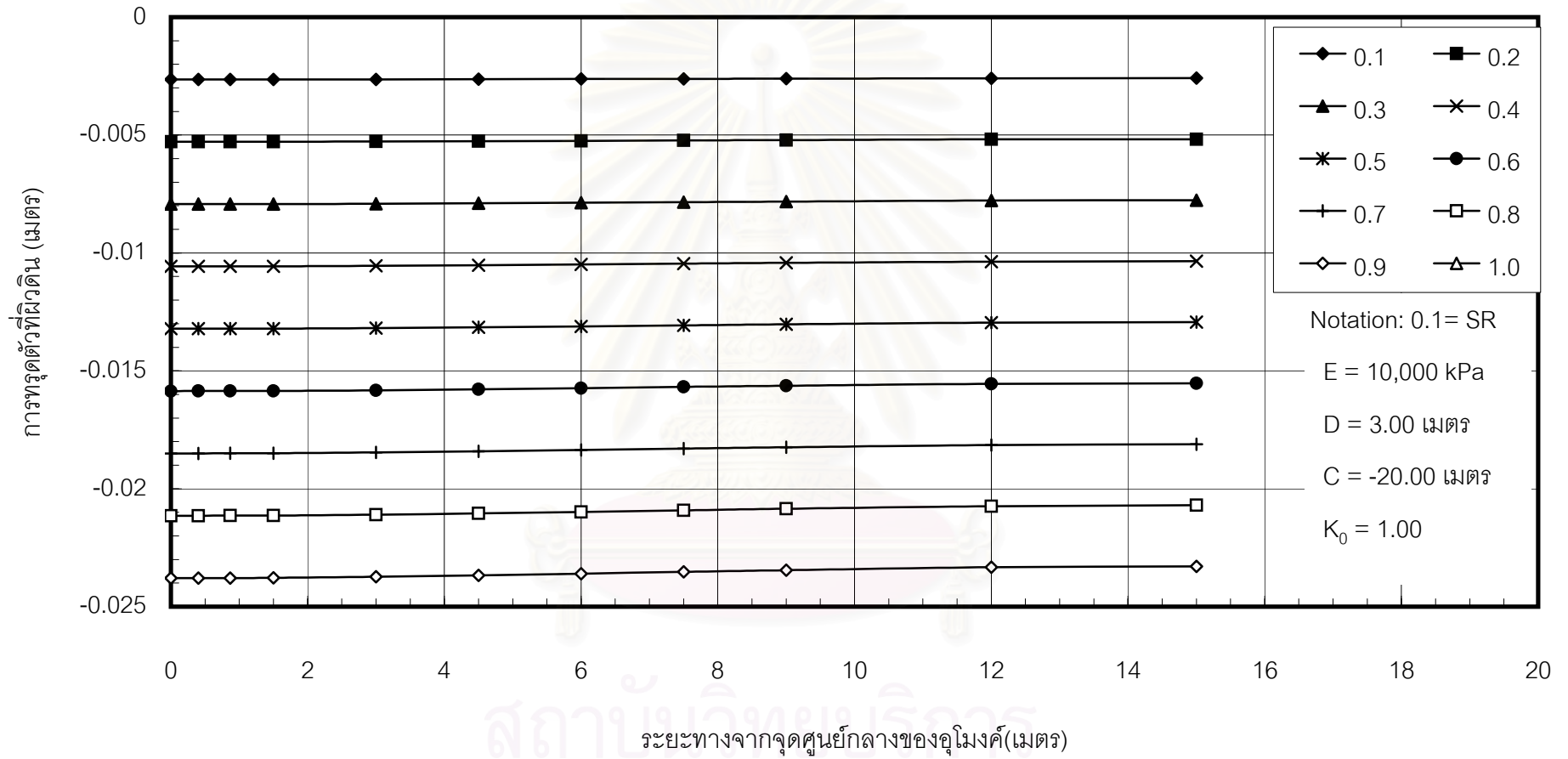


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

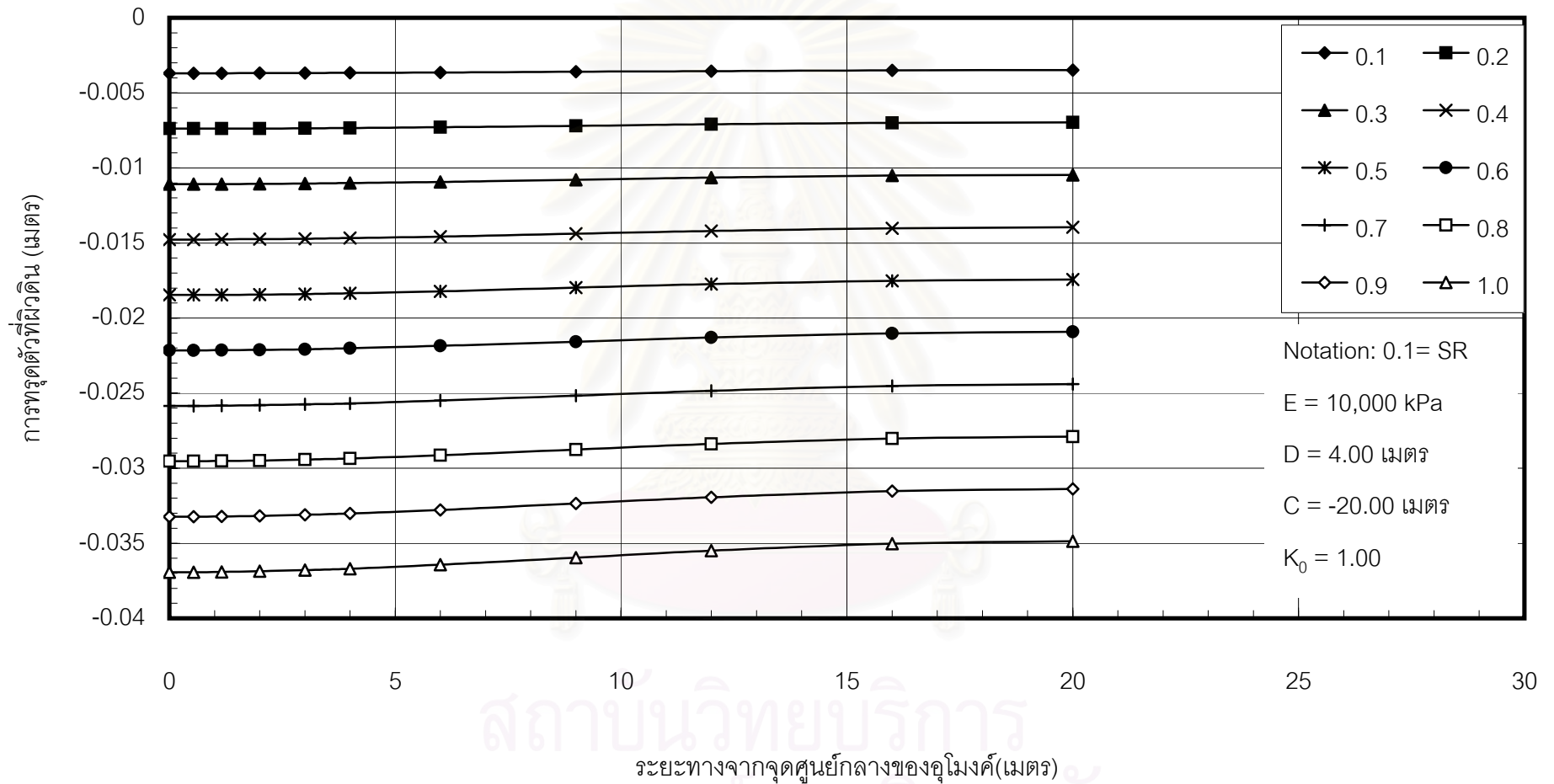
รูปที่ ก.84 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.85 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

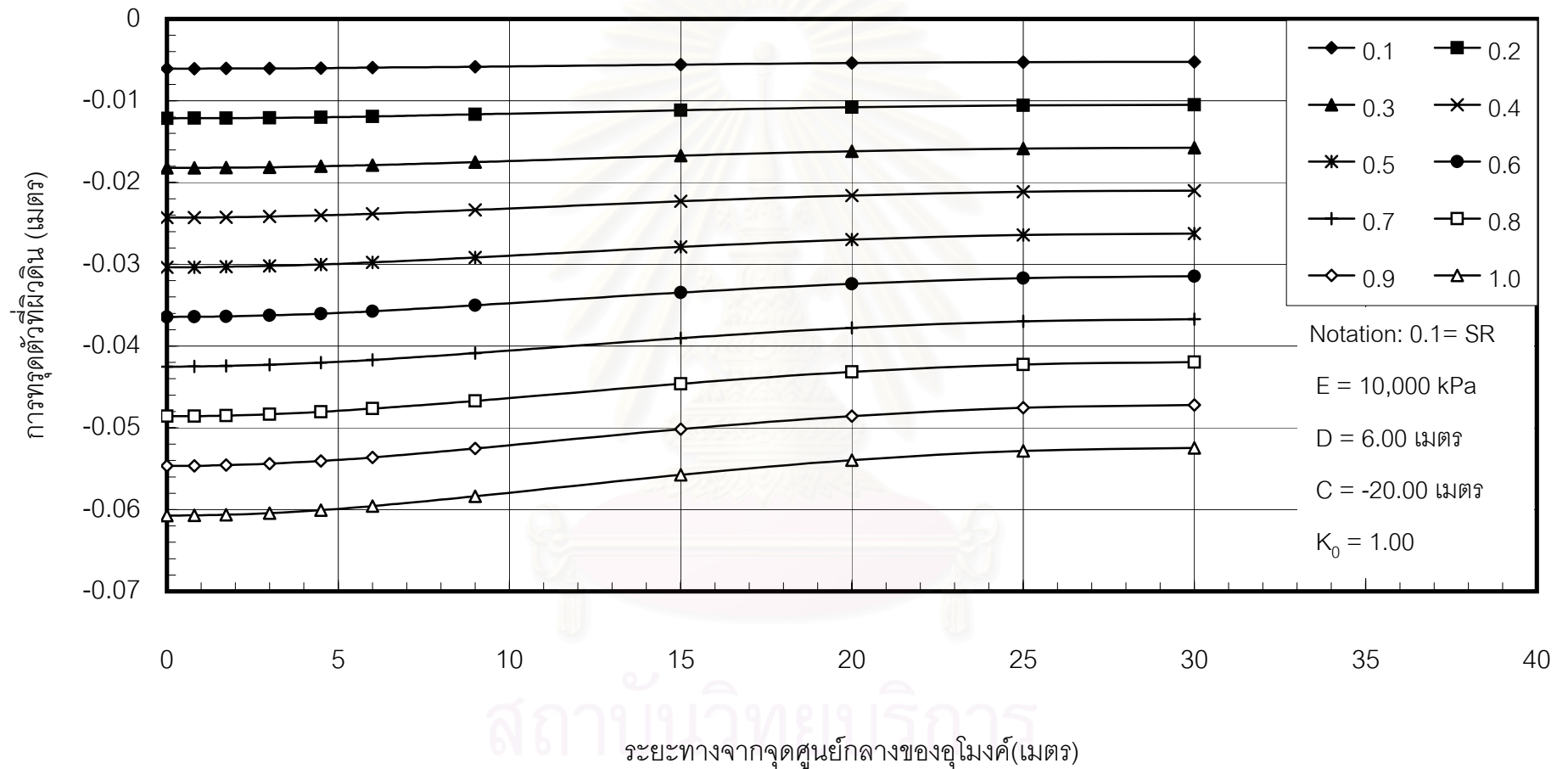


รูปที่ ก.86 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

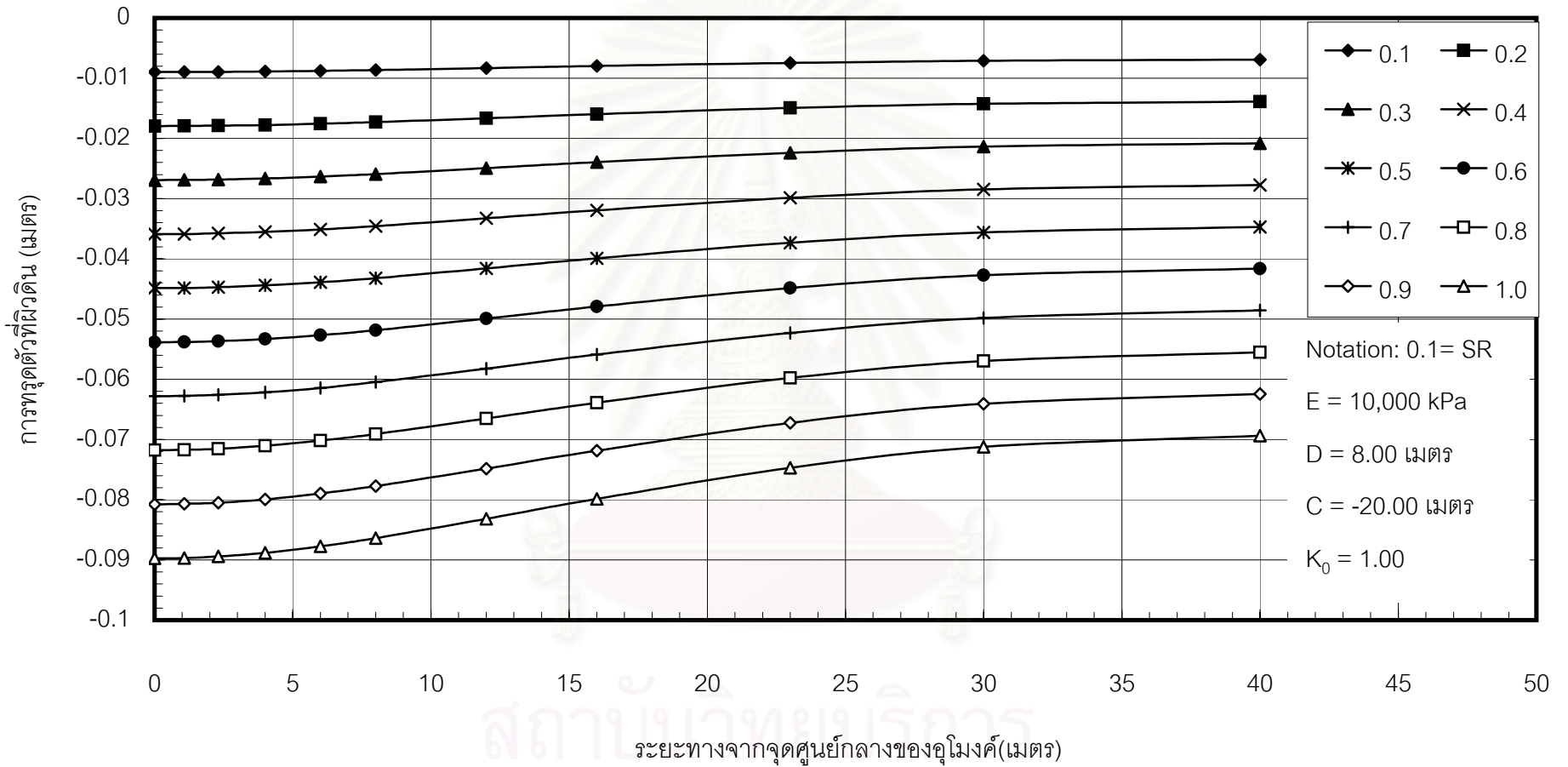


รูปที่ ก.87 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

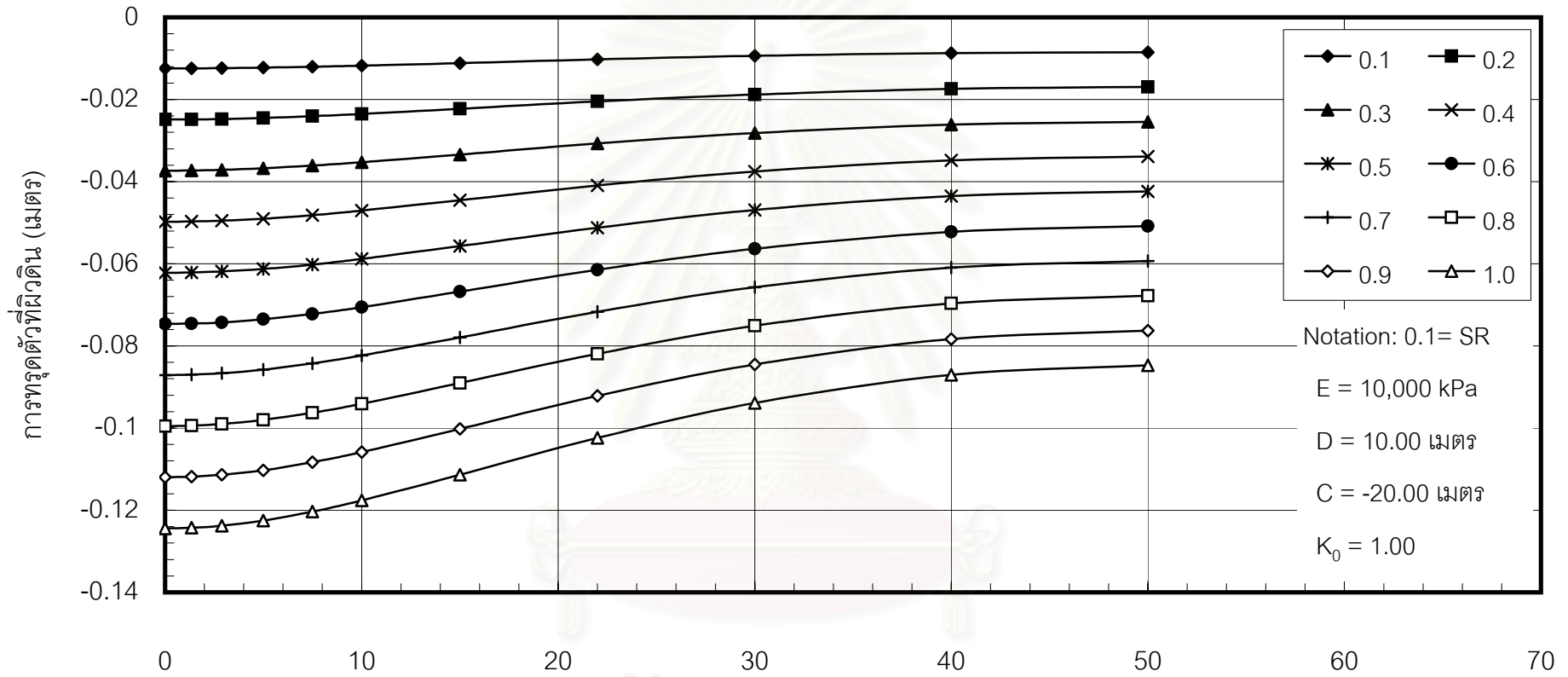




รูปที่ ก.88 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

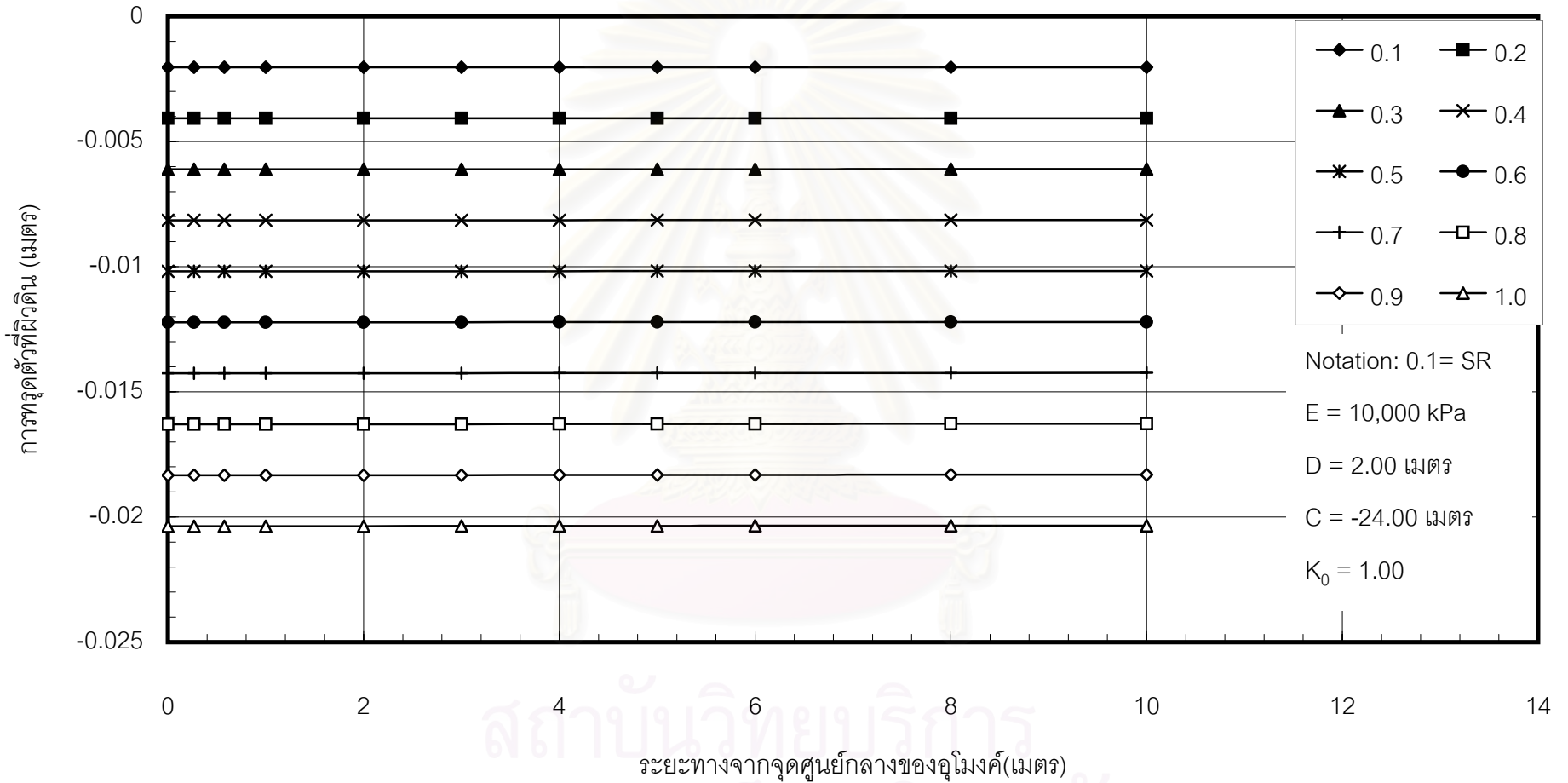


รูปที่ ก.89 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

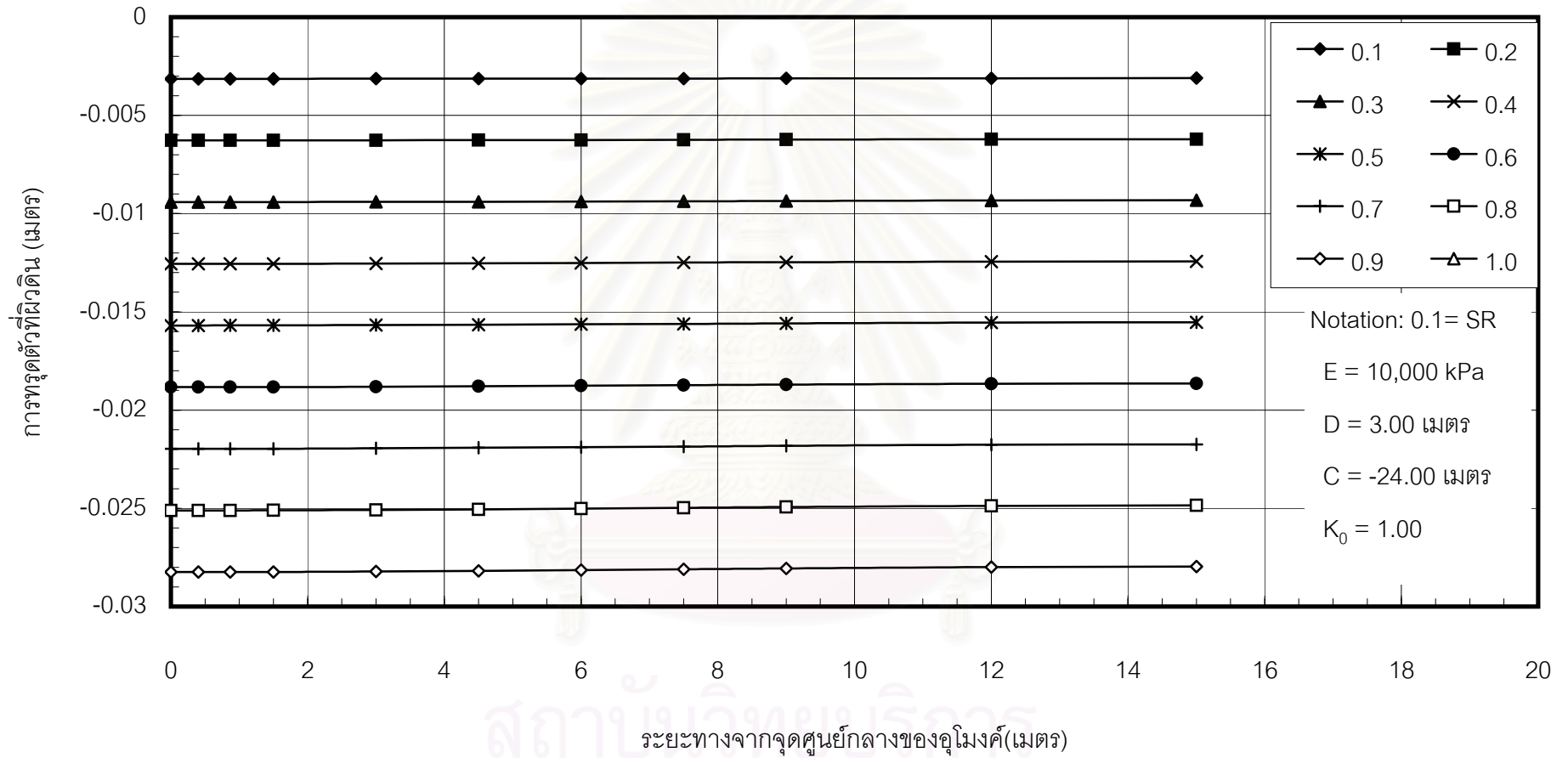


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

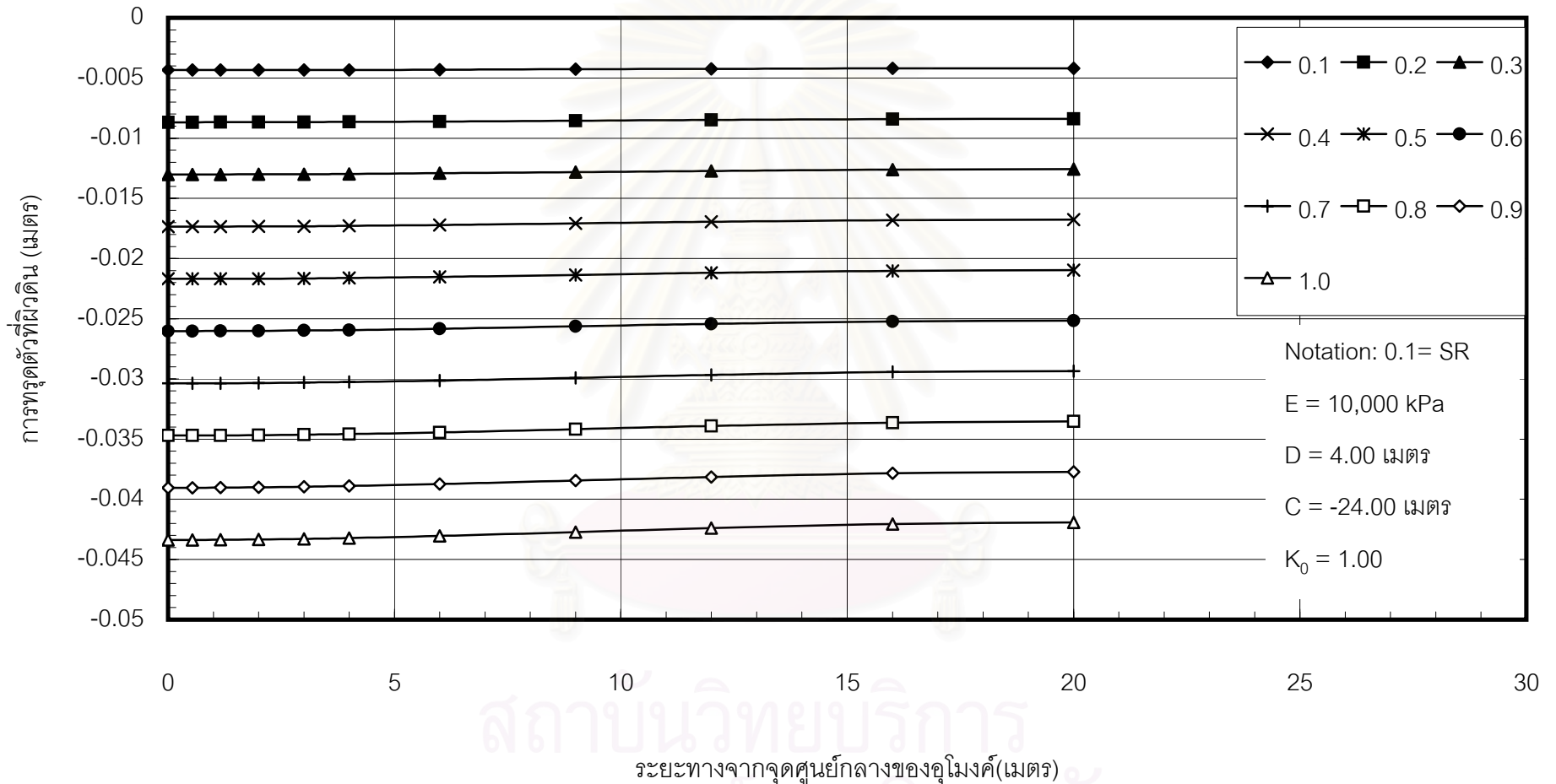
รูปที่ ก.90 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



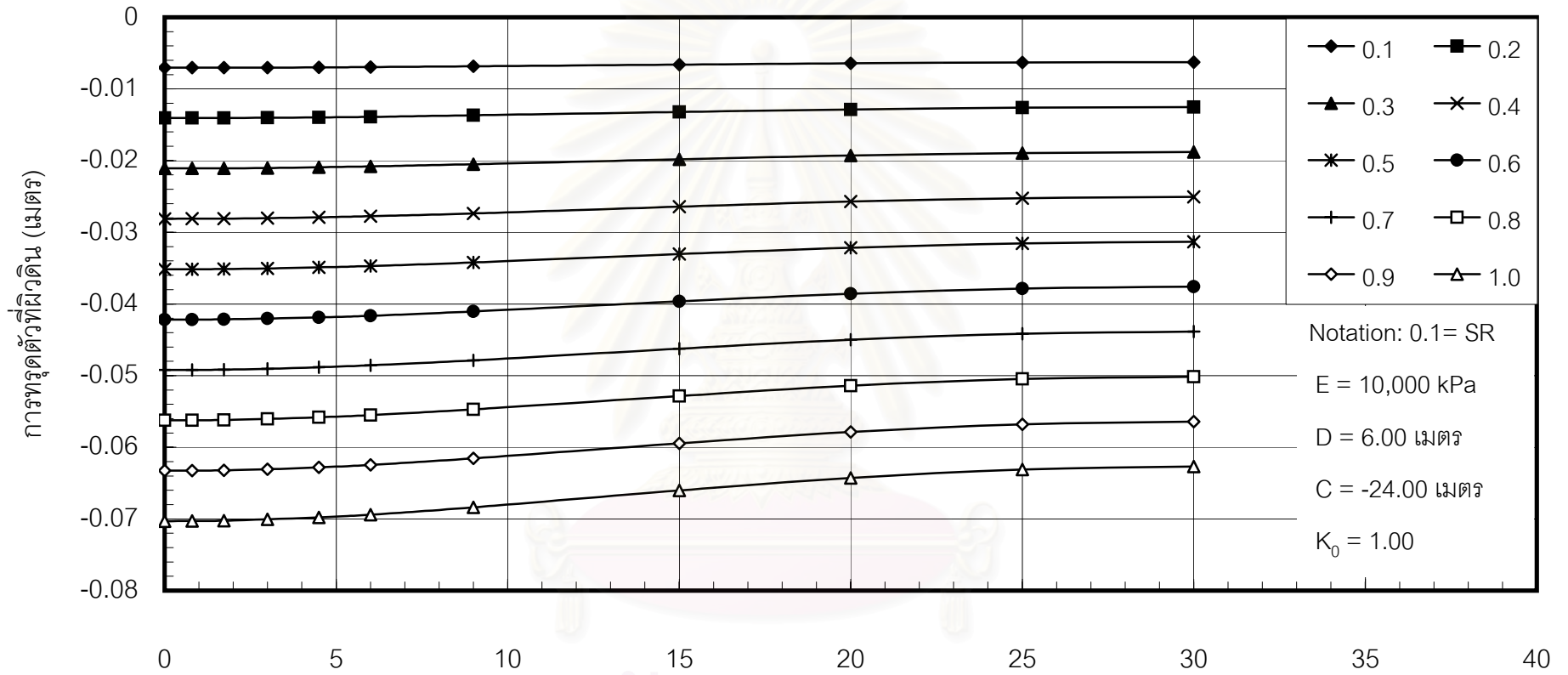
รูปที่ ก.91 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.92 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

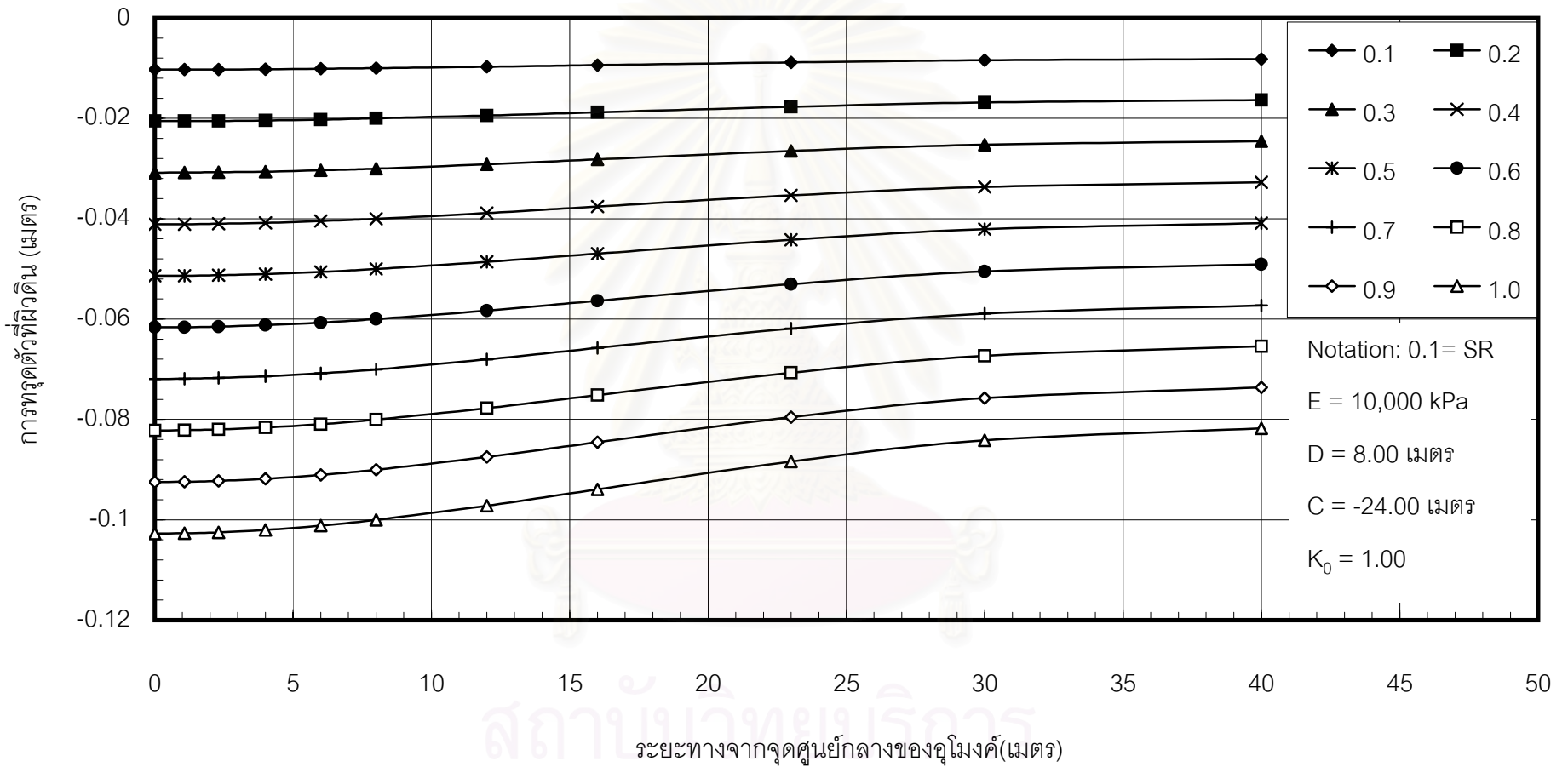


รูปที่ ก.93 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



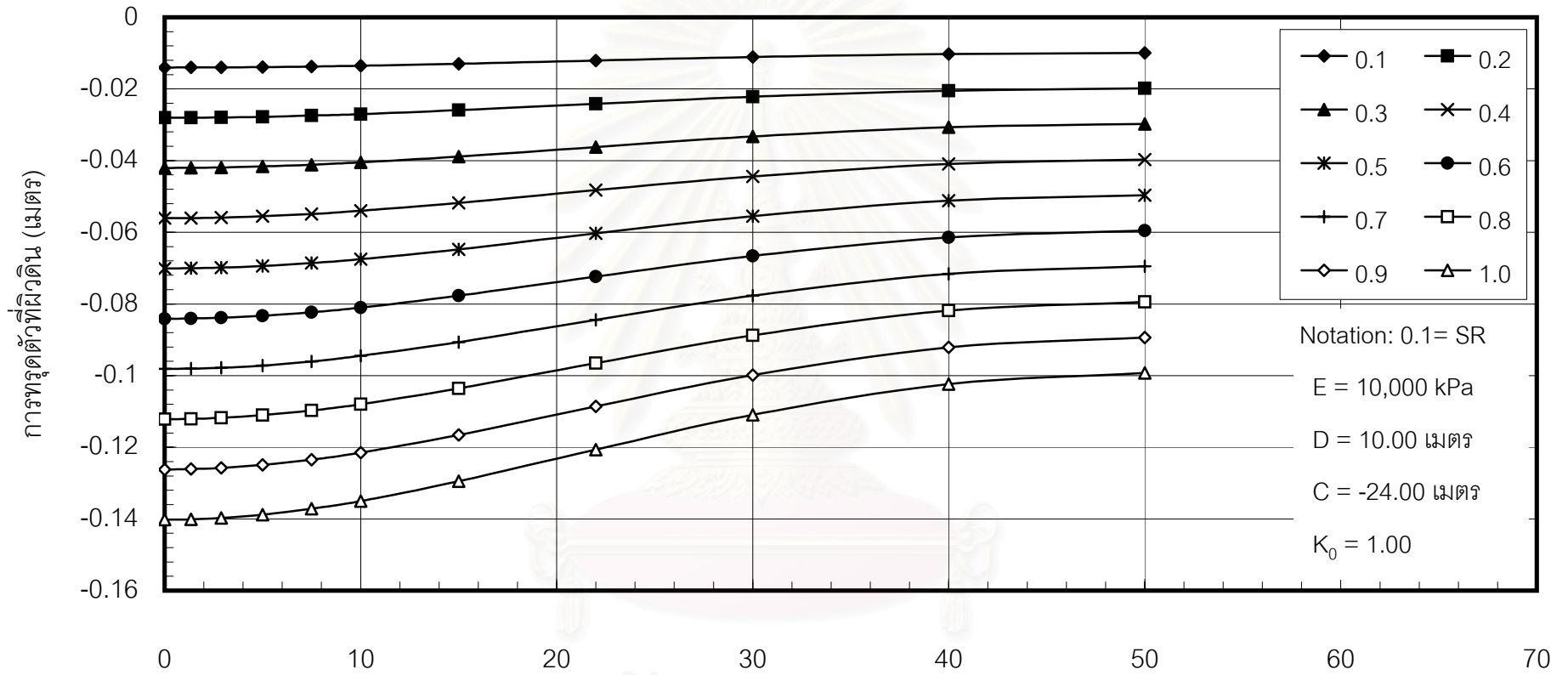
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.94 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



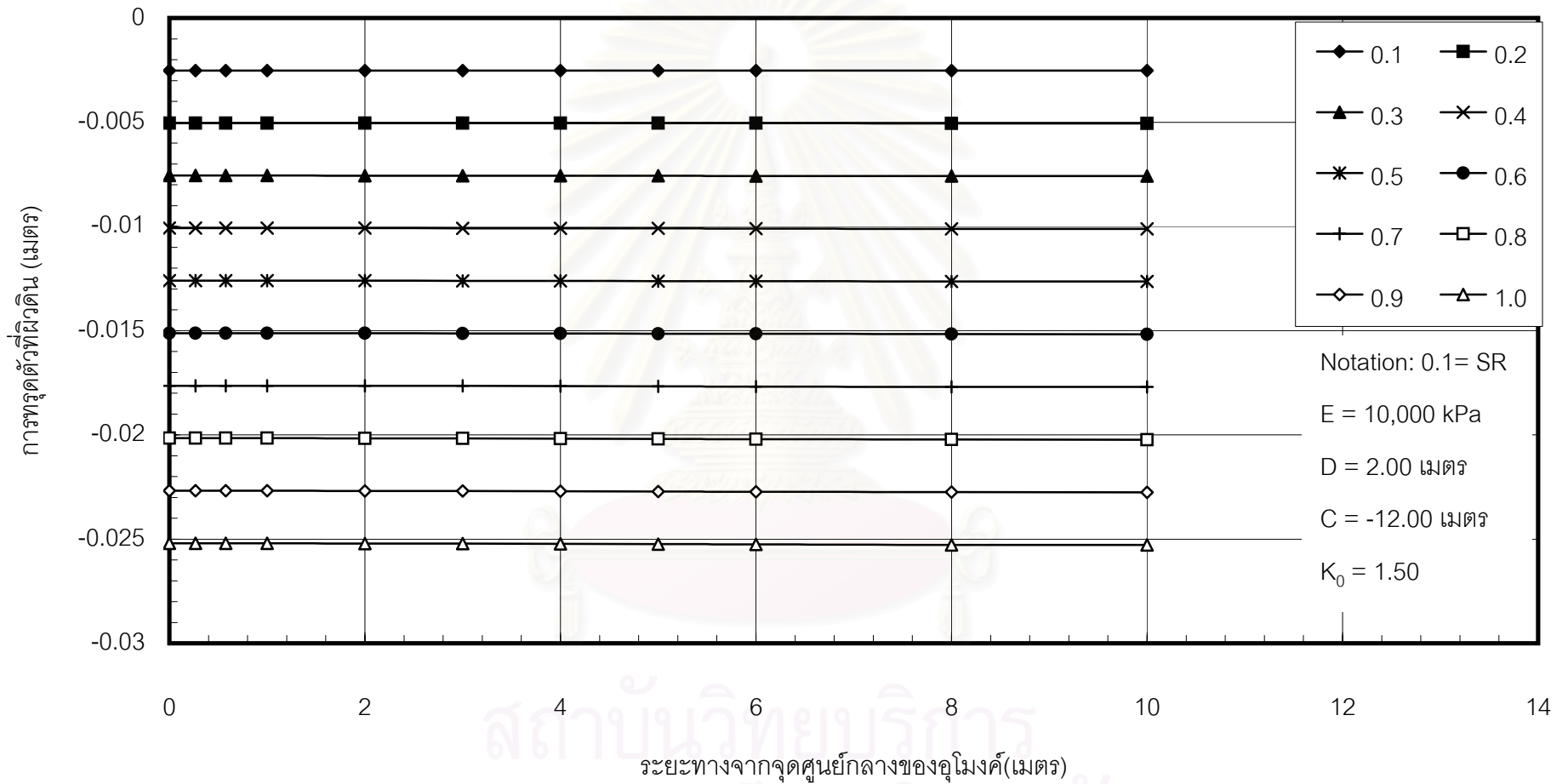
รูปที่ ก.95 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



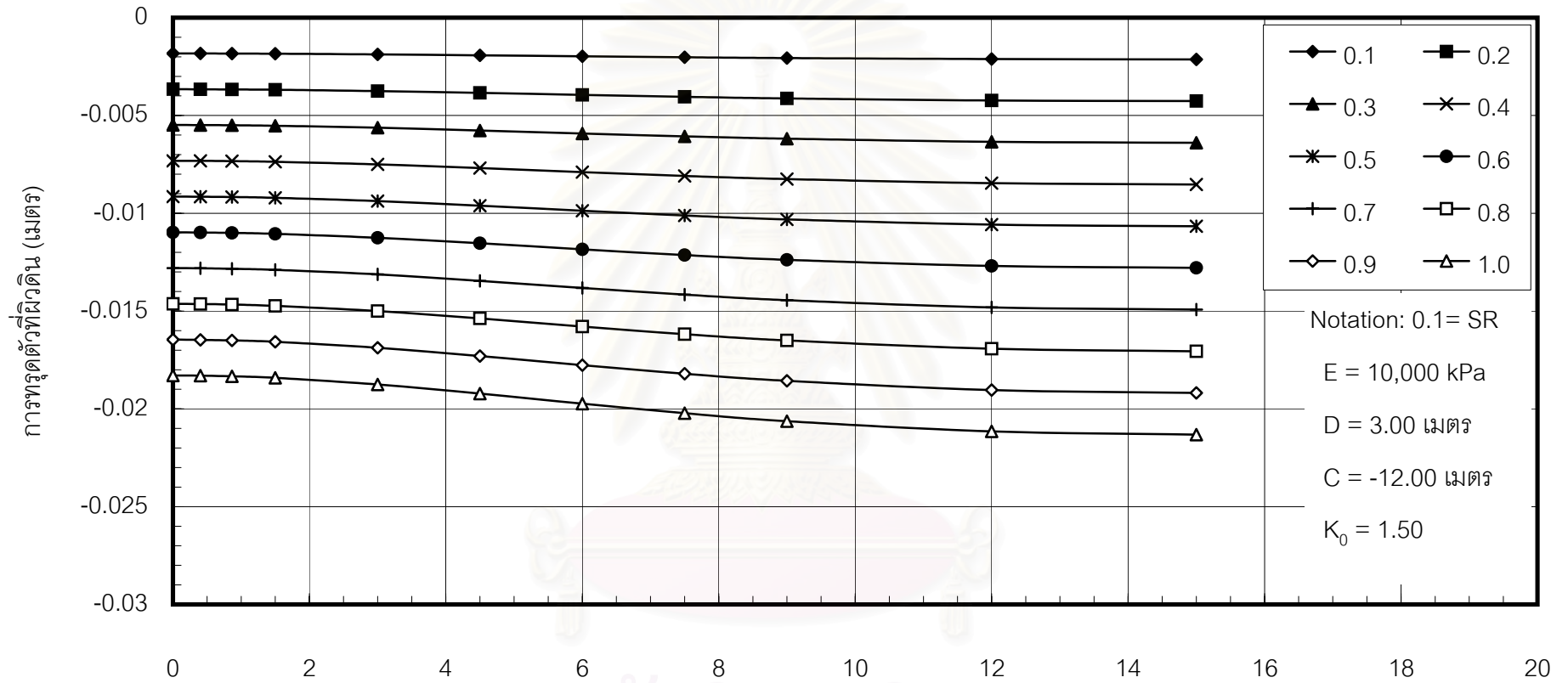


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.96 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

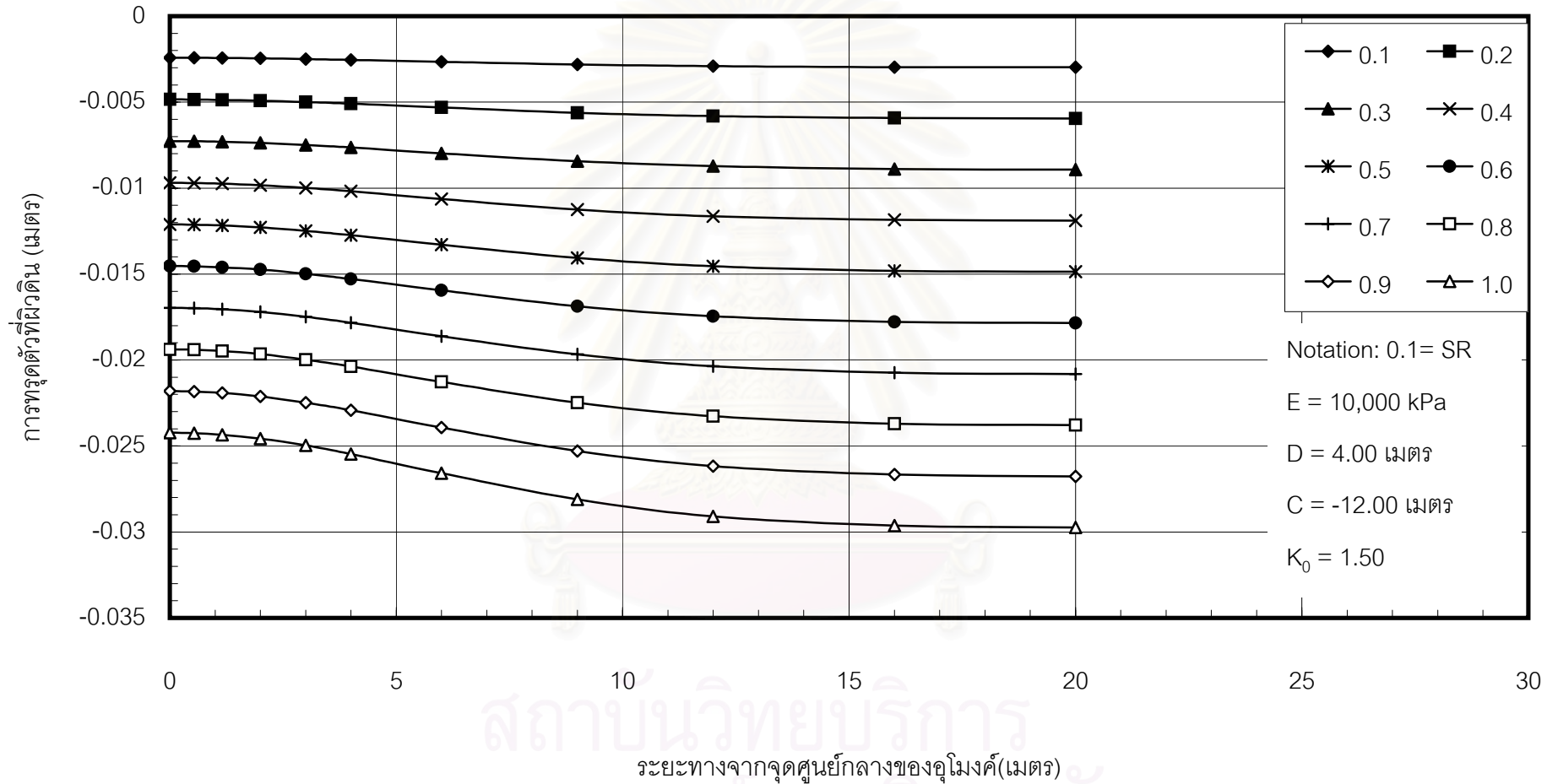


รูปที่ ก.97 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

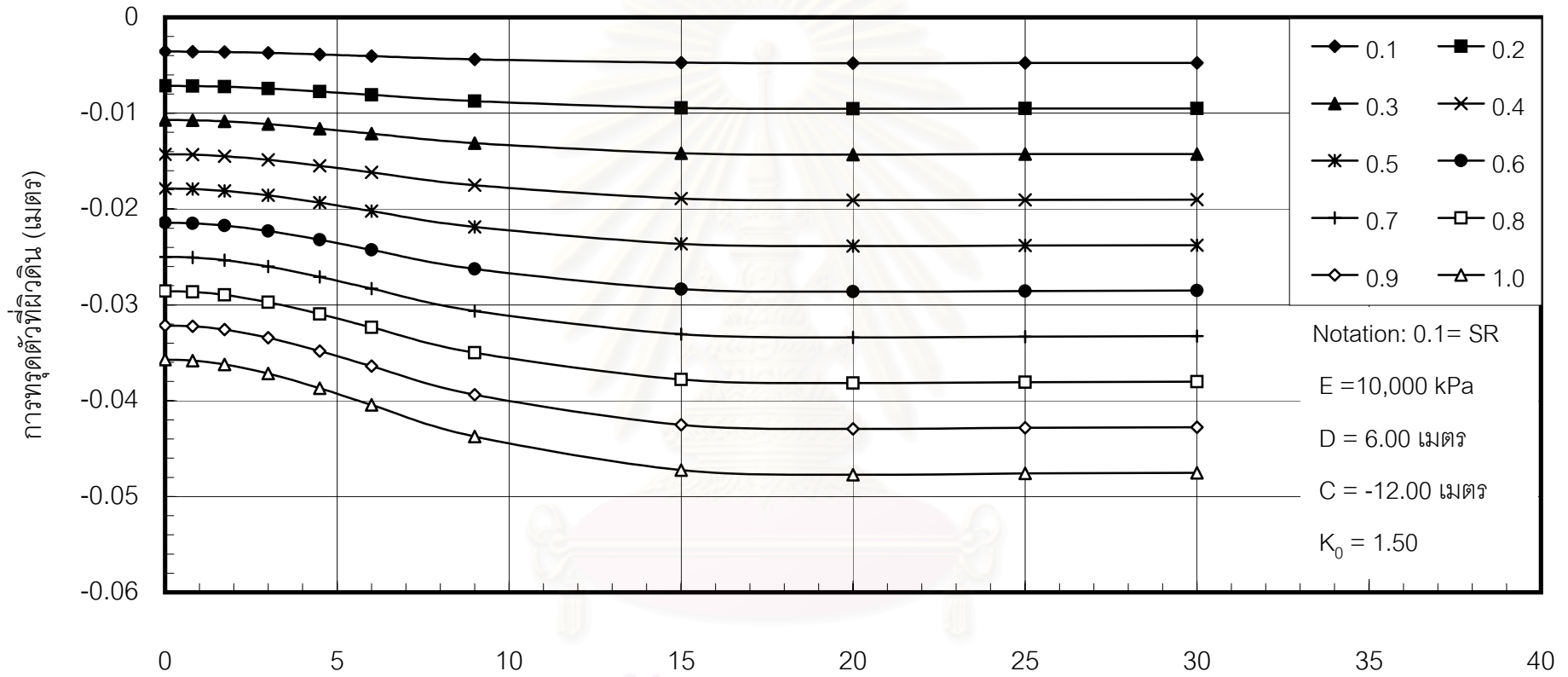


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

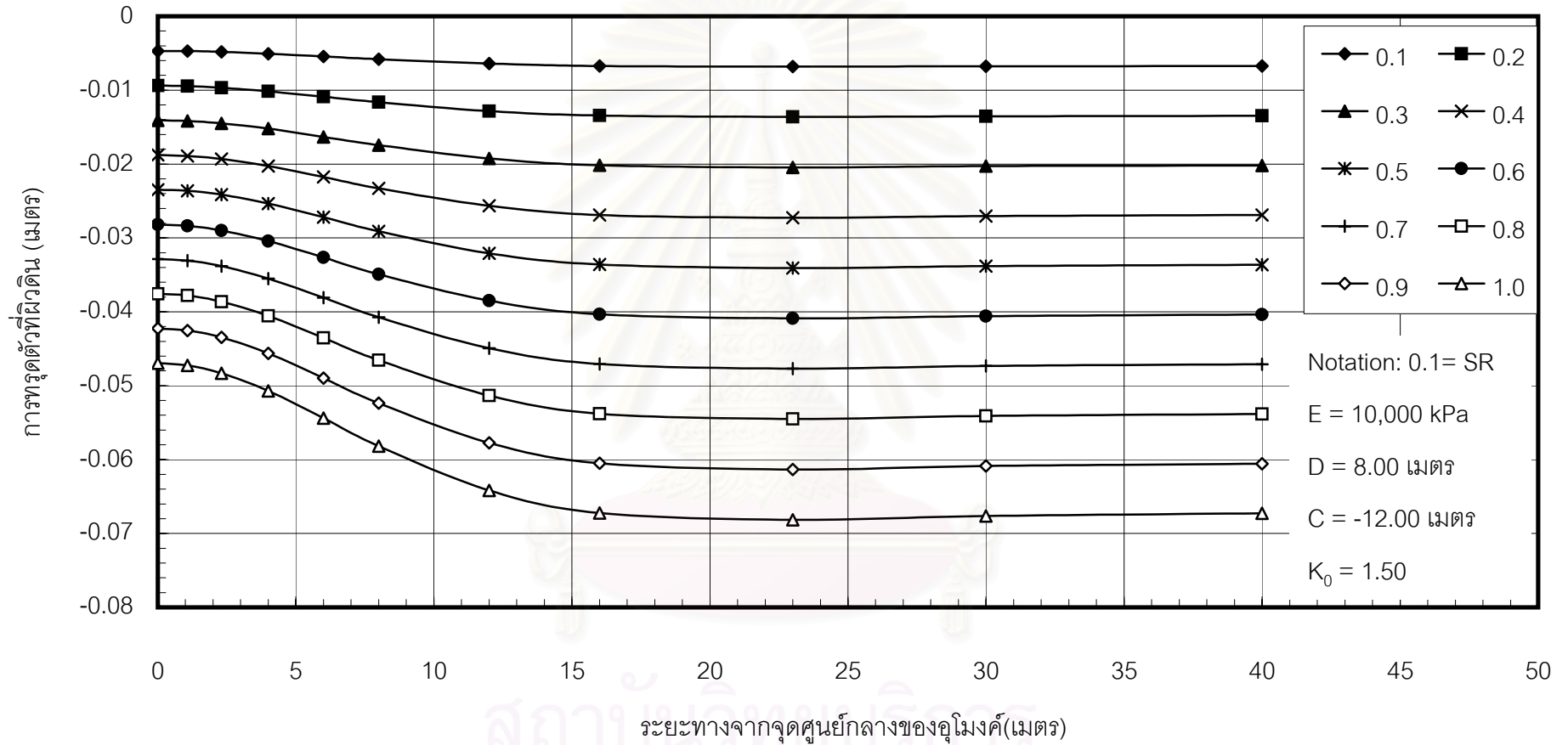
รูปที่ ก.98 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



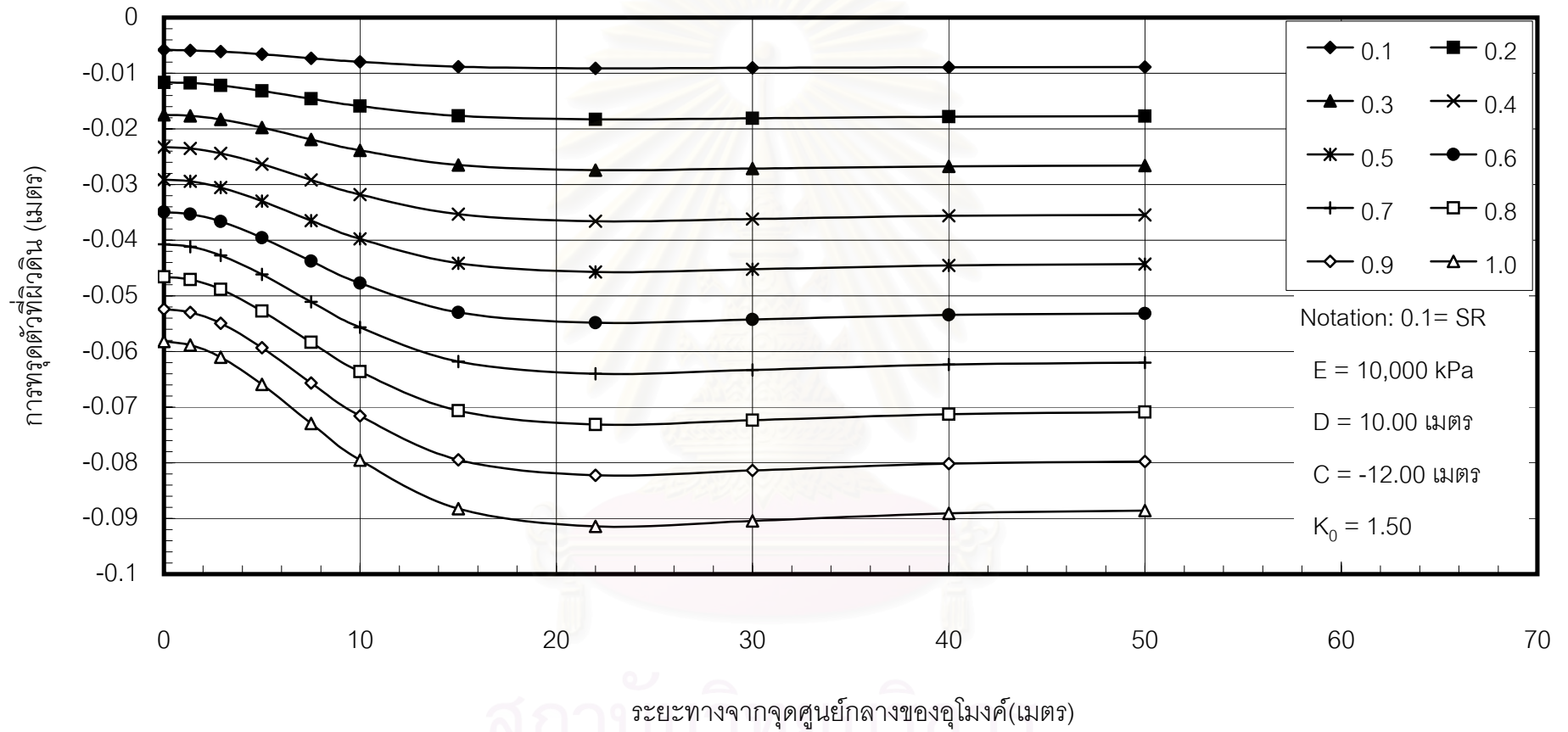
รูปที่ ก.99 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



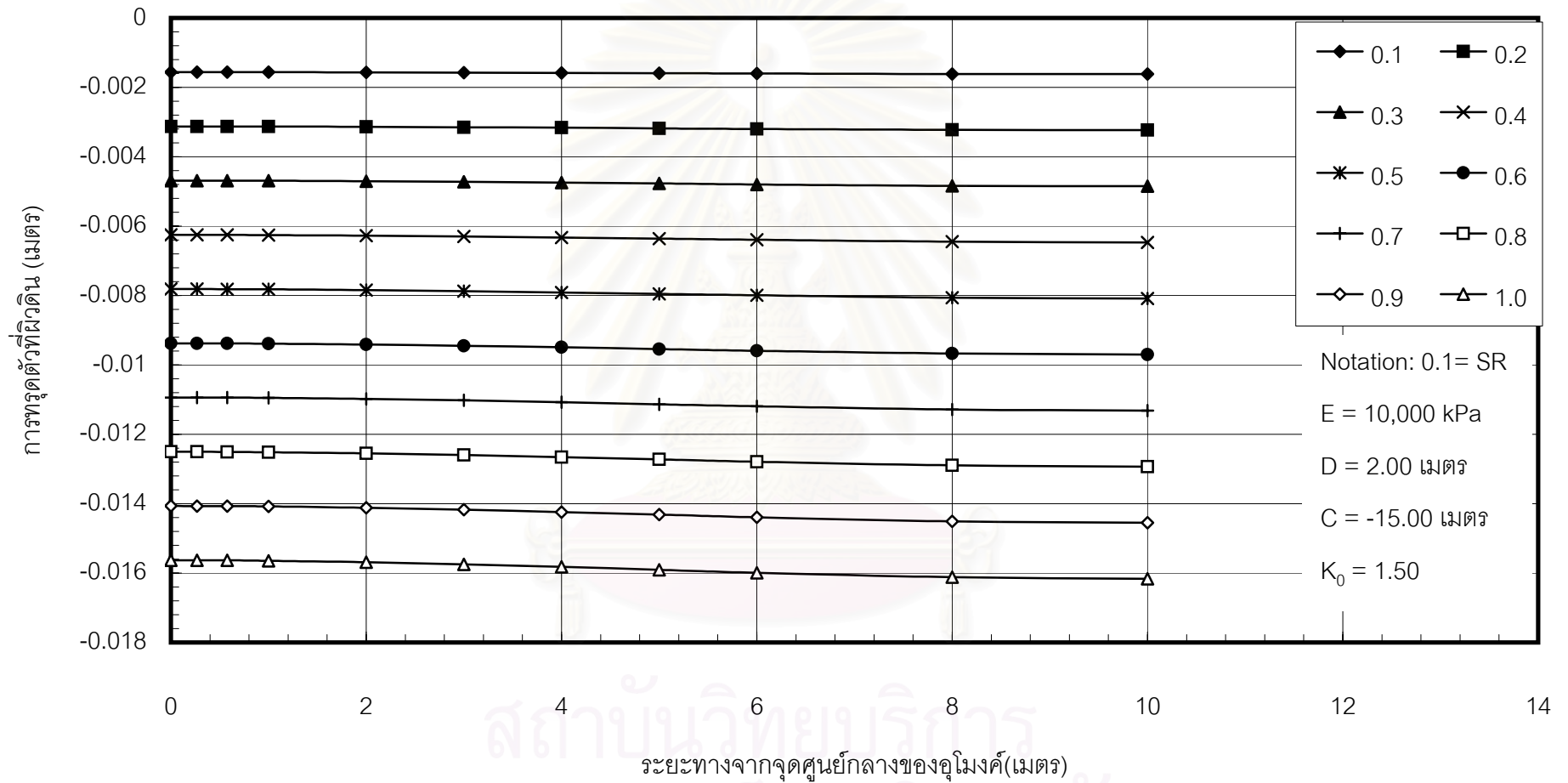
รูปที่ ก.100 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.101 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

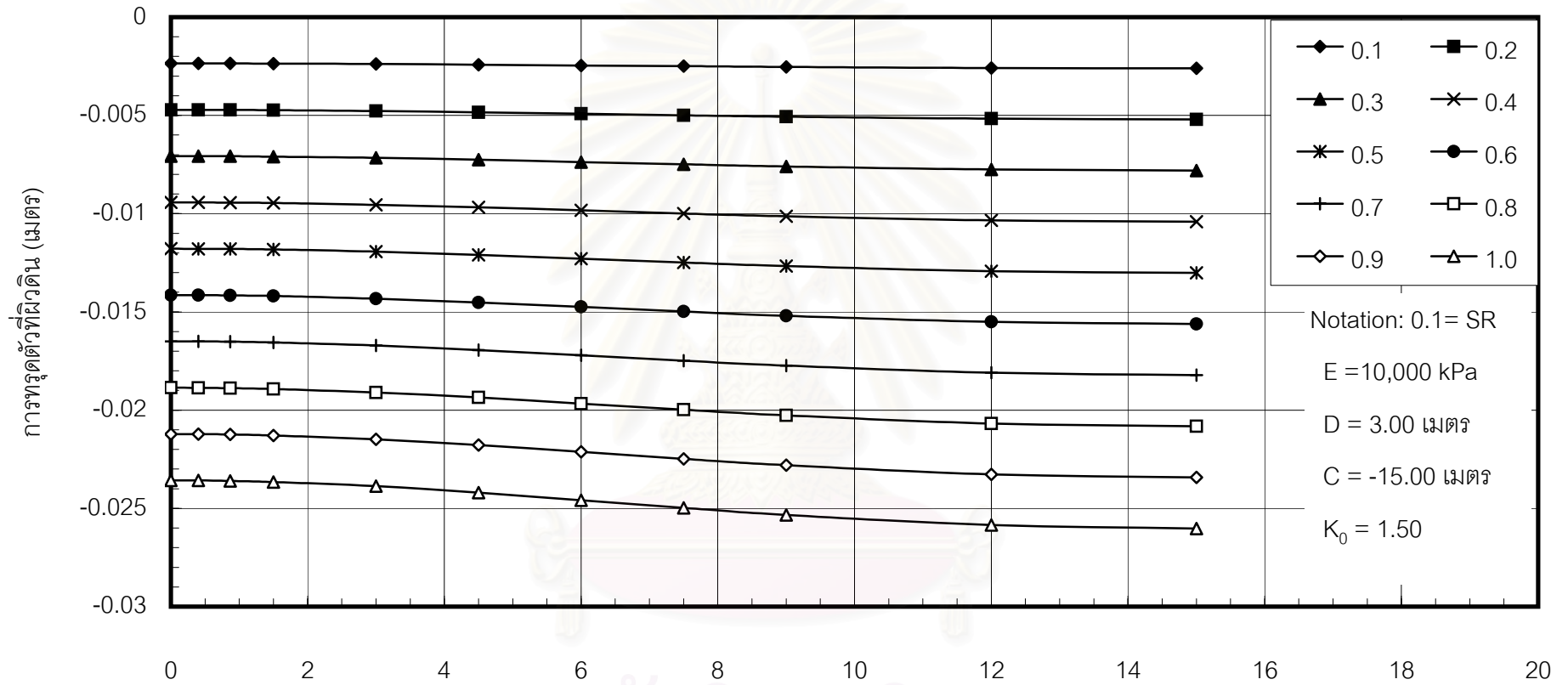


รูปที่ ก.102 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



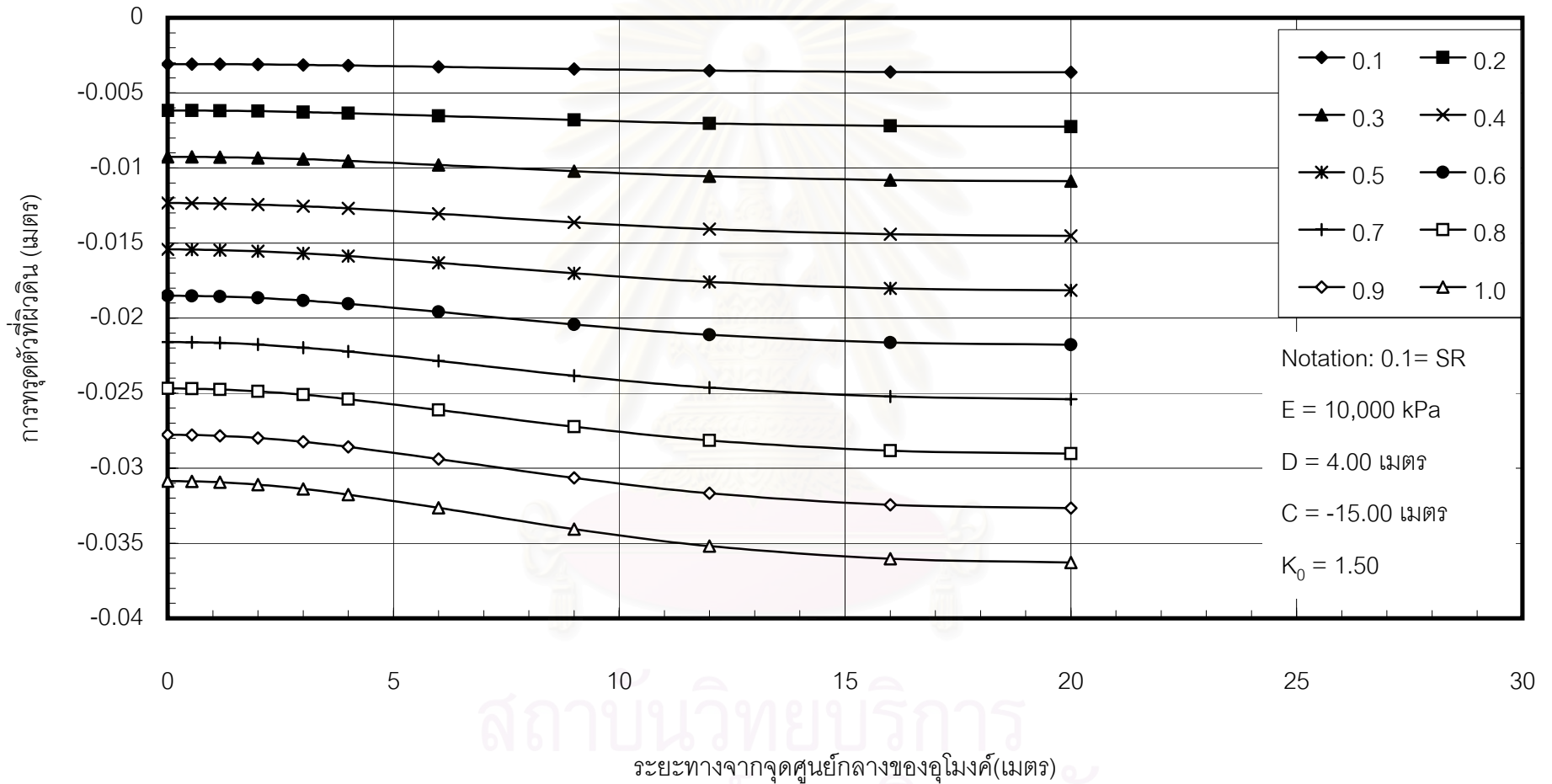
รูปที่ ก.103 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



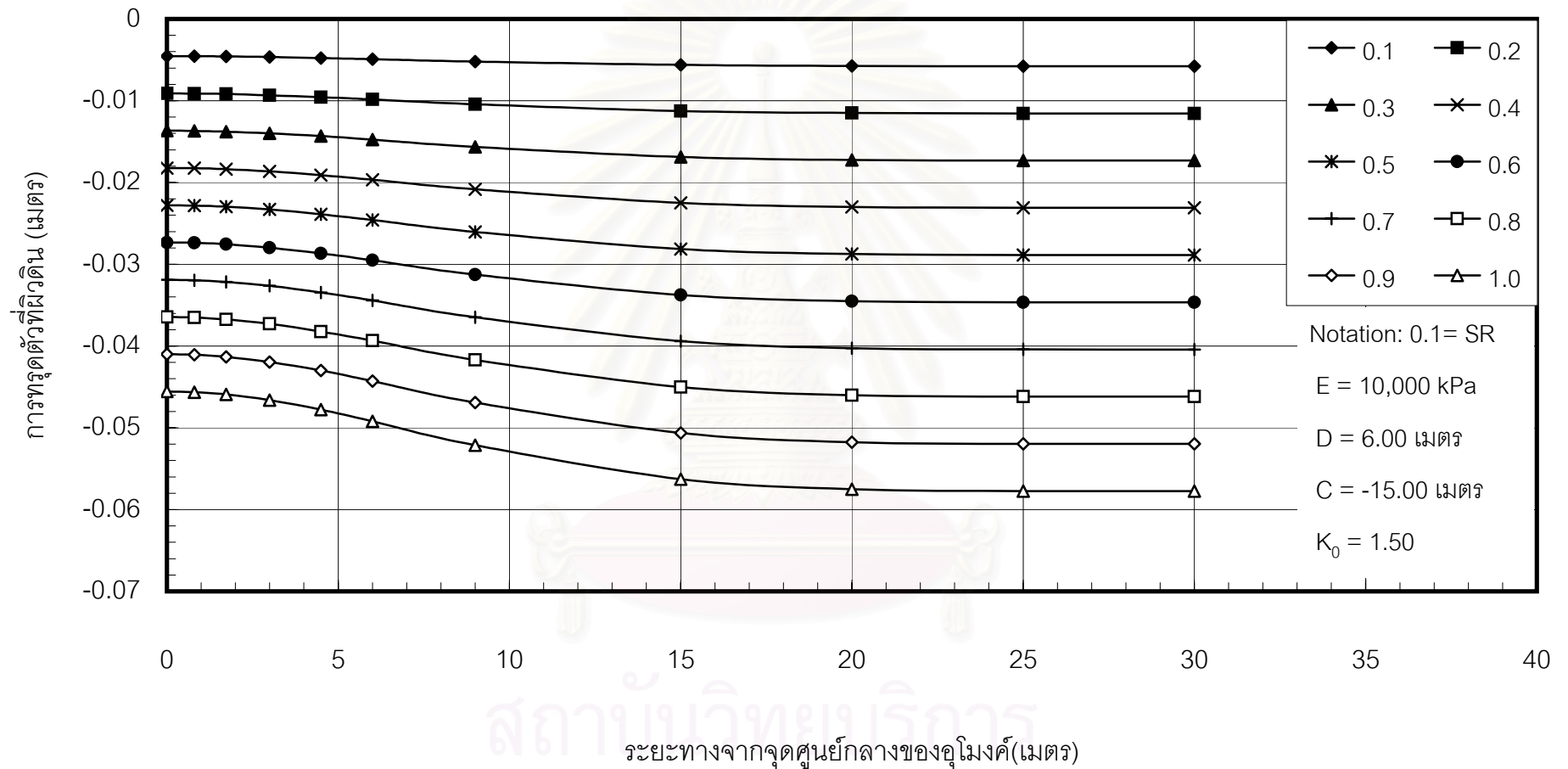


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

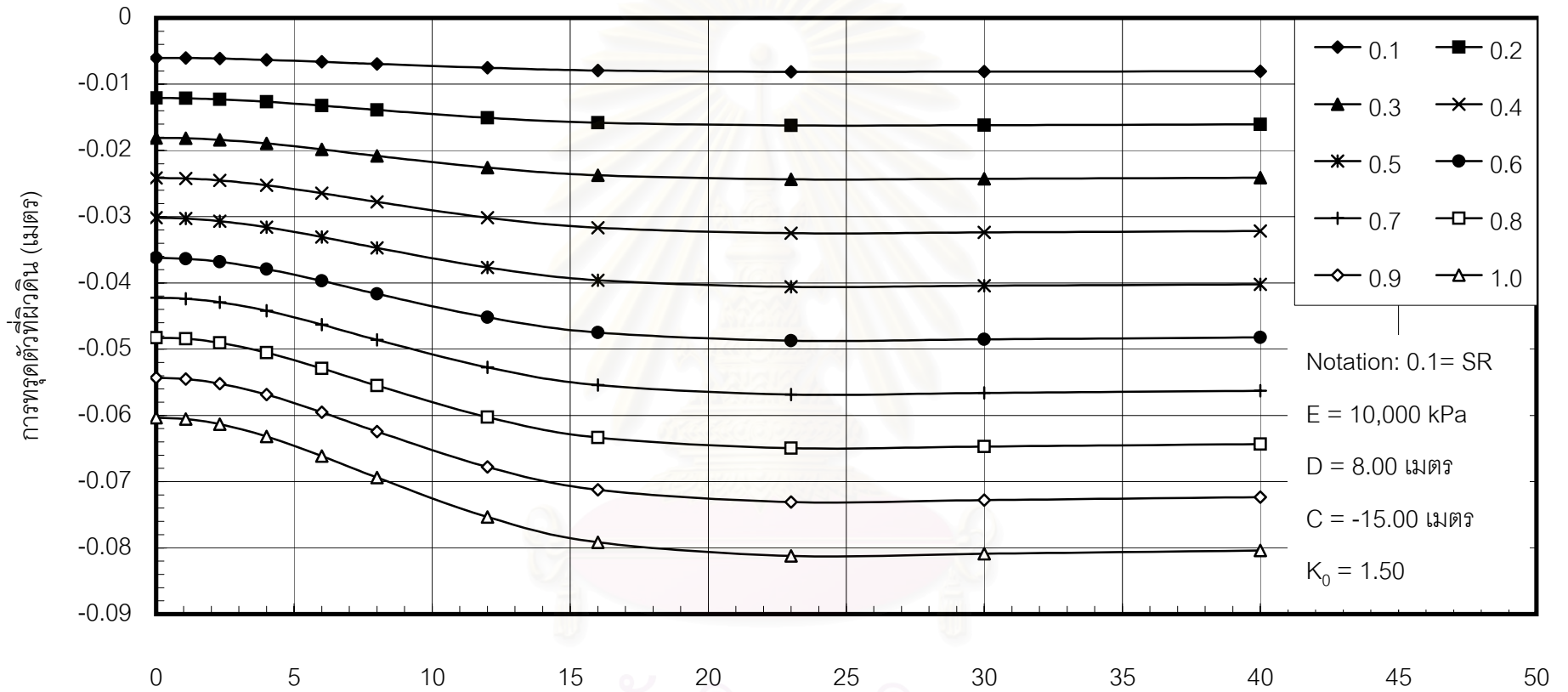
รูปที่ ก.104 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.105 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

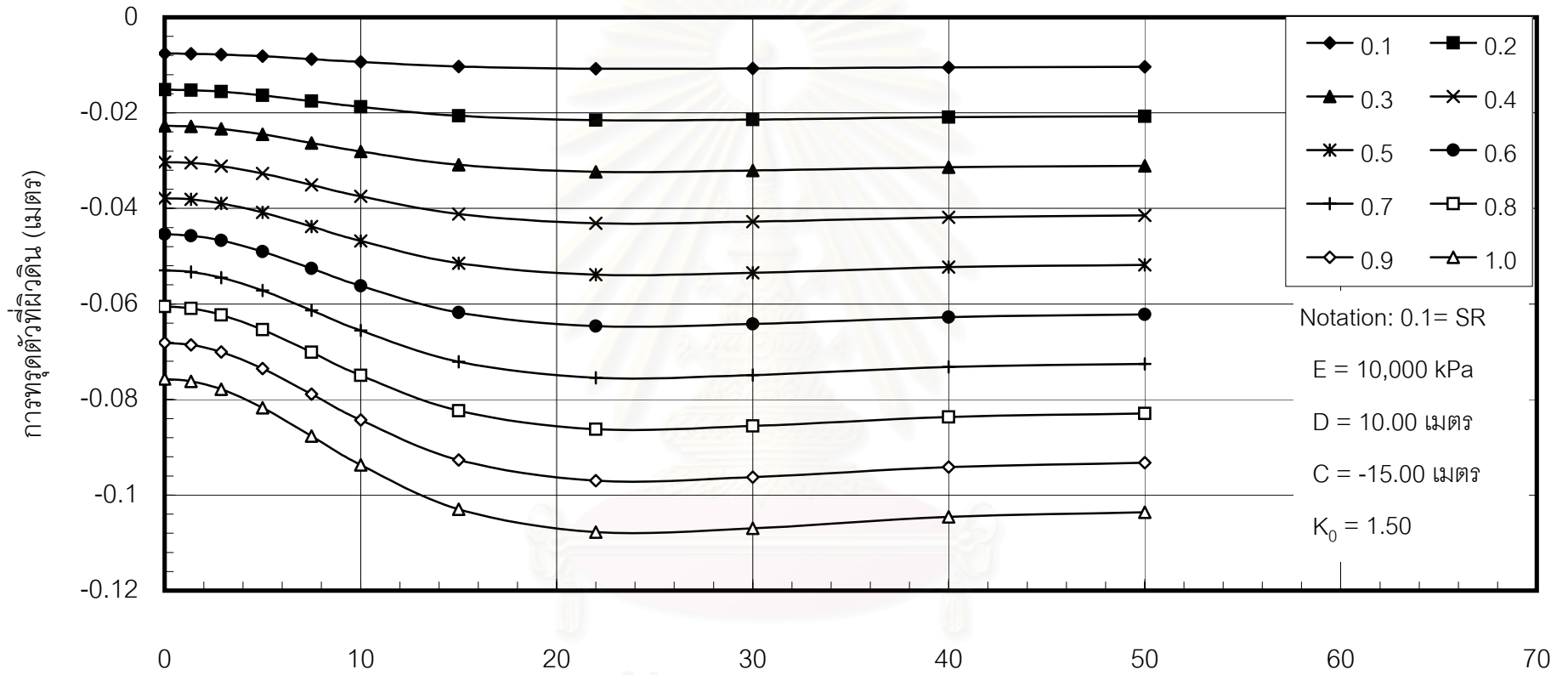


รูปที่ ก.106 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



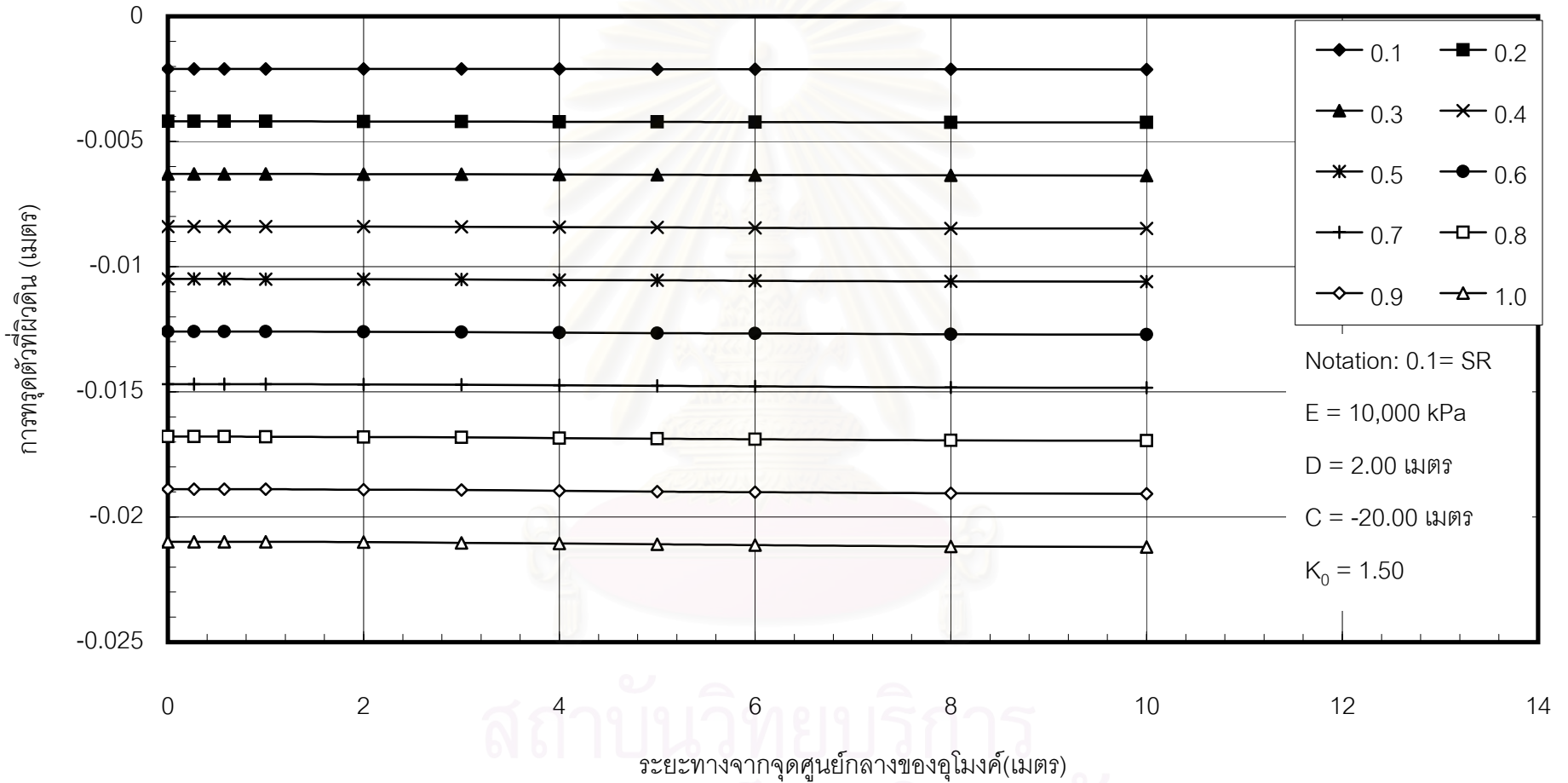
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.107 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

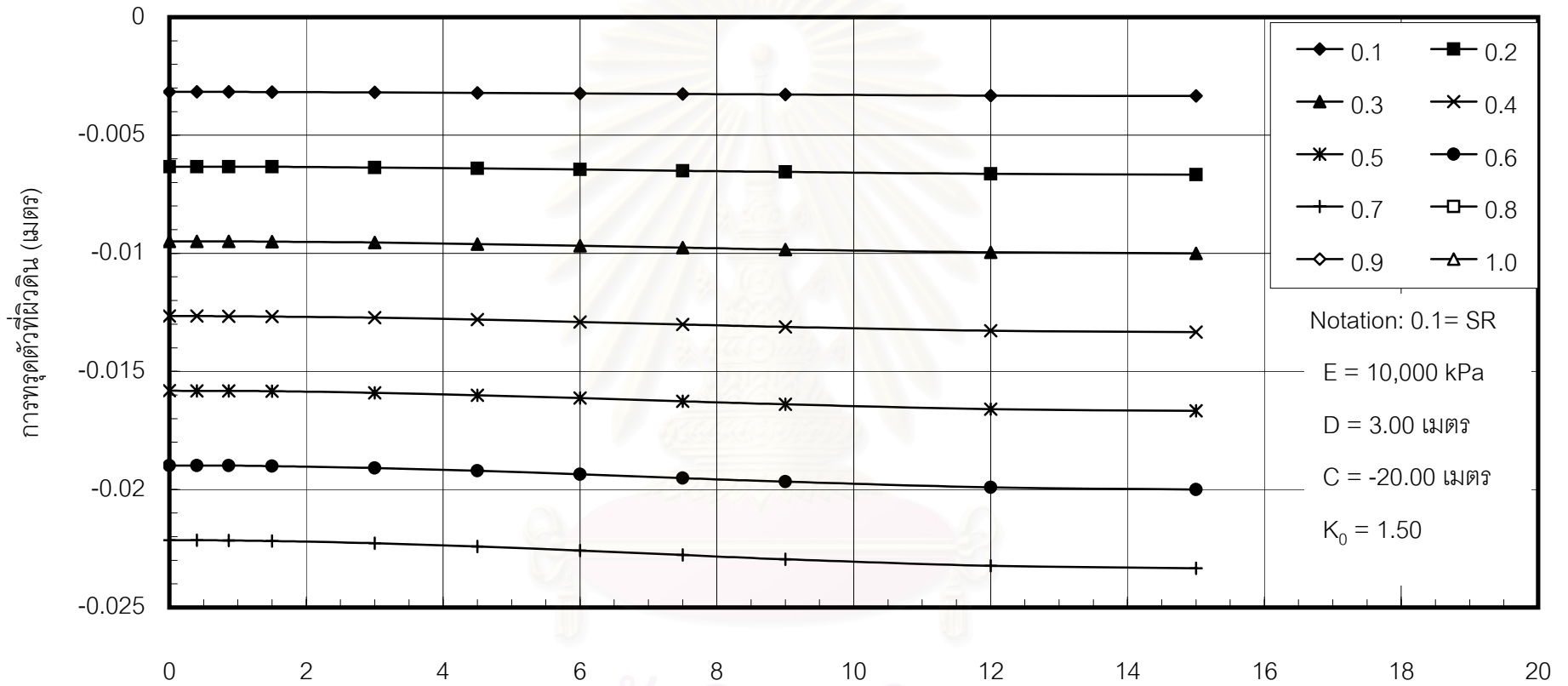


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.108 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

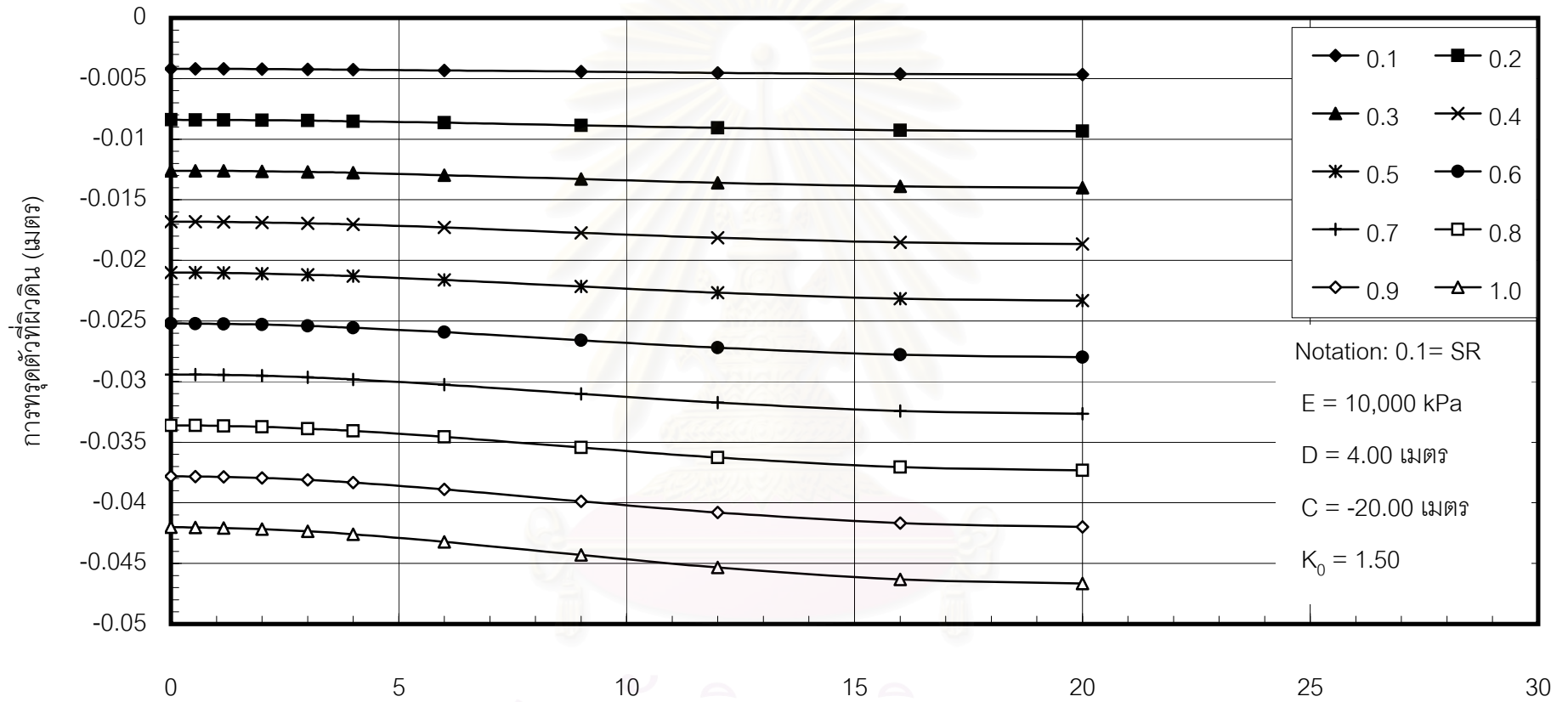


รูปที่ ก.109 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

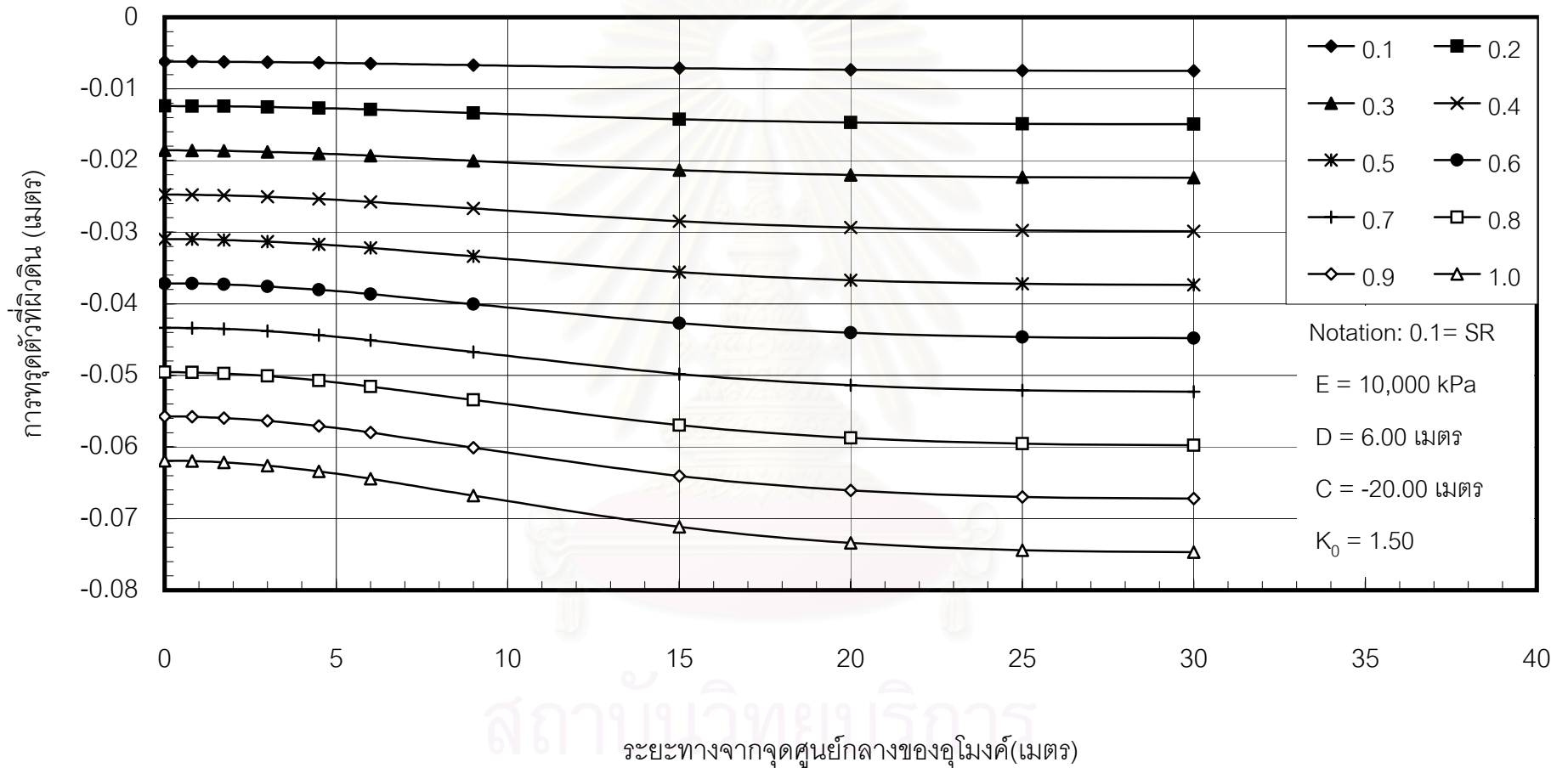
รูปที่ ก.110 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



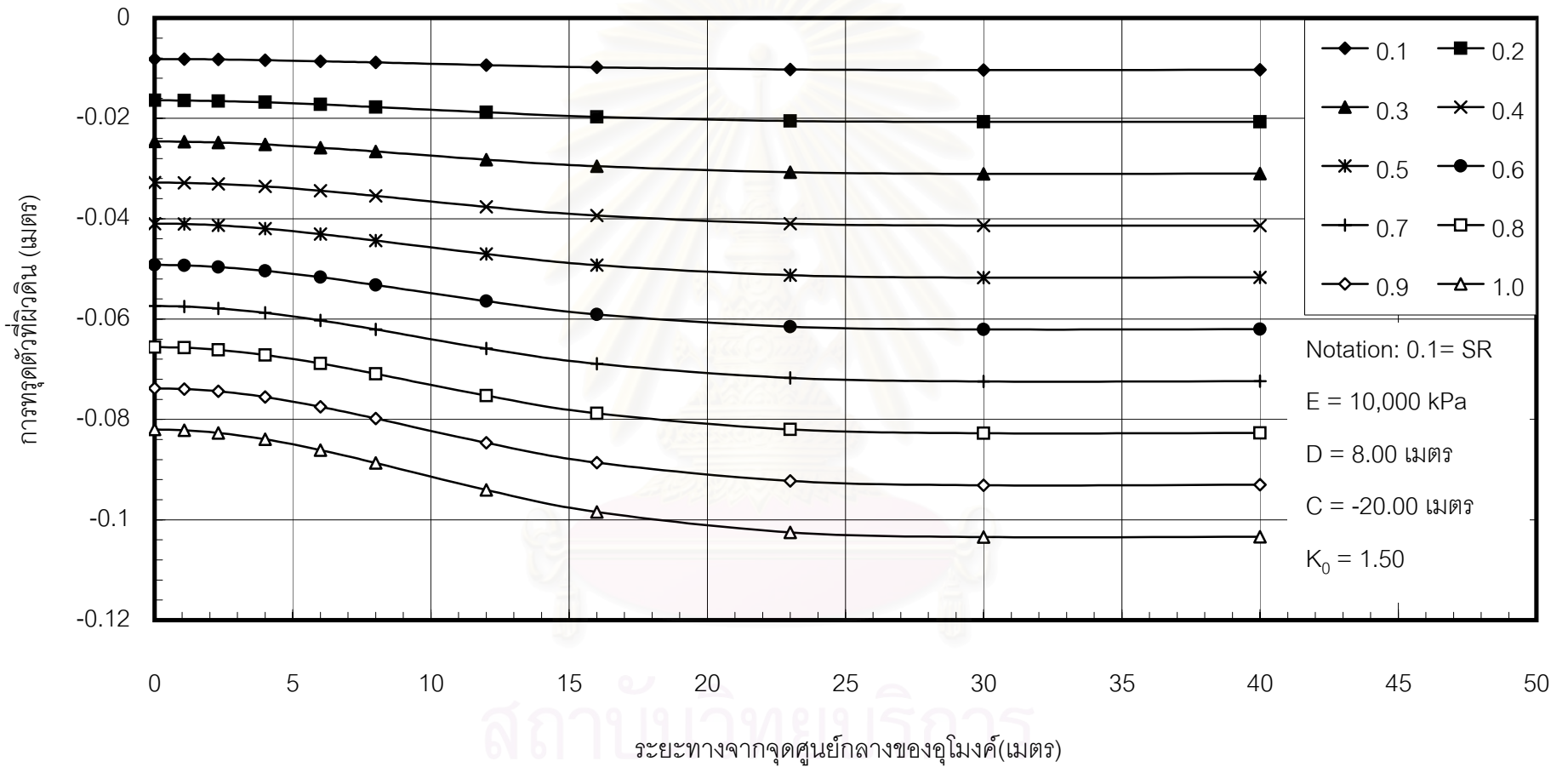
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของคูโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.111 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

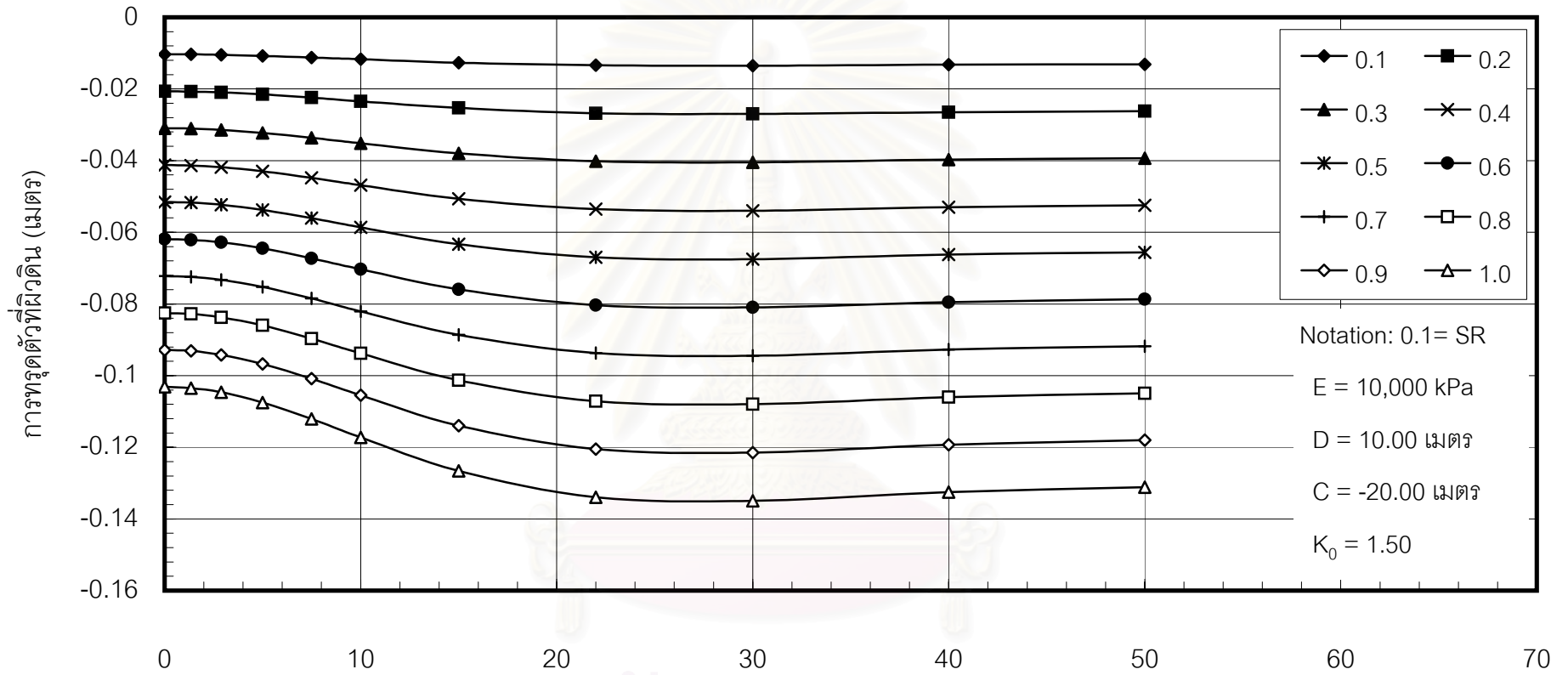




รูปที่ ก.112 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

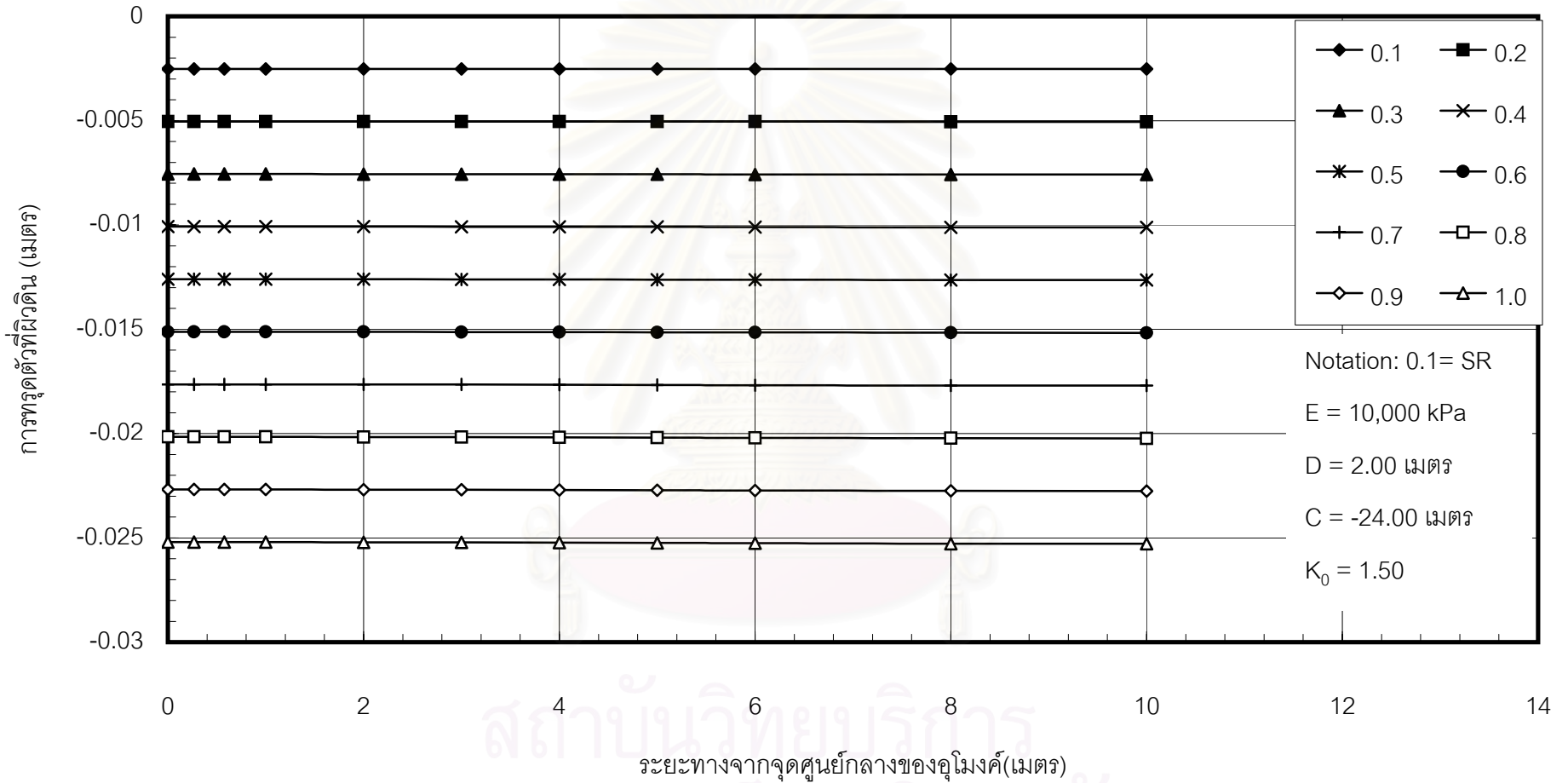


รูปที่ ก.113 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

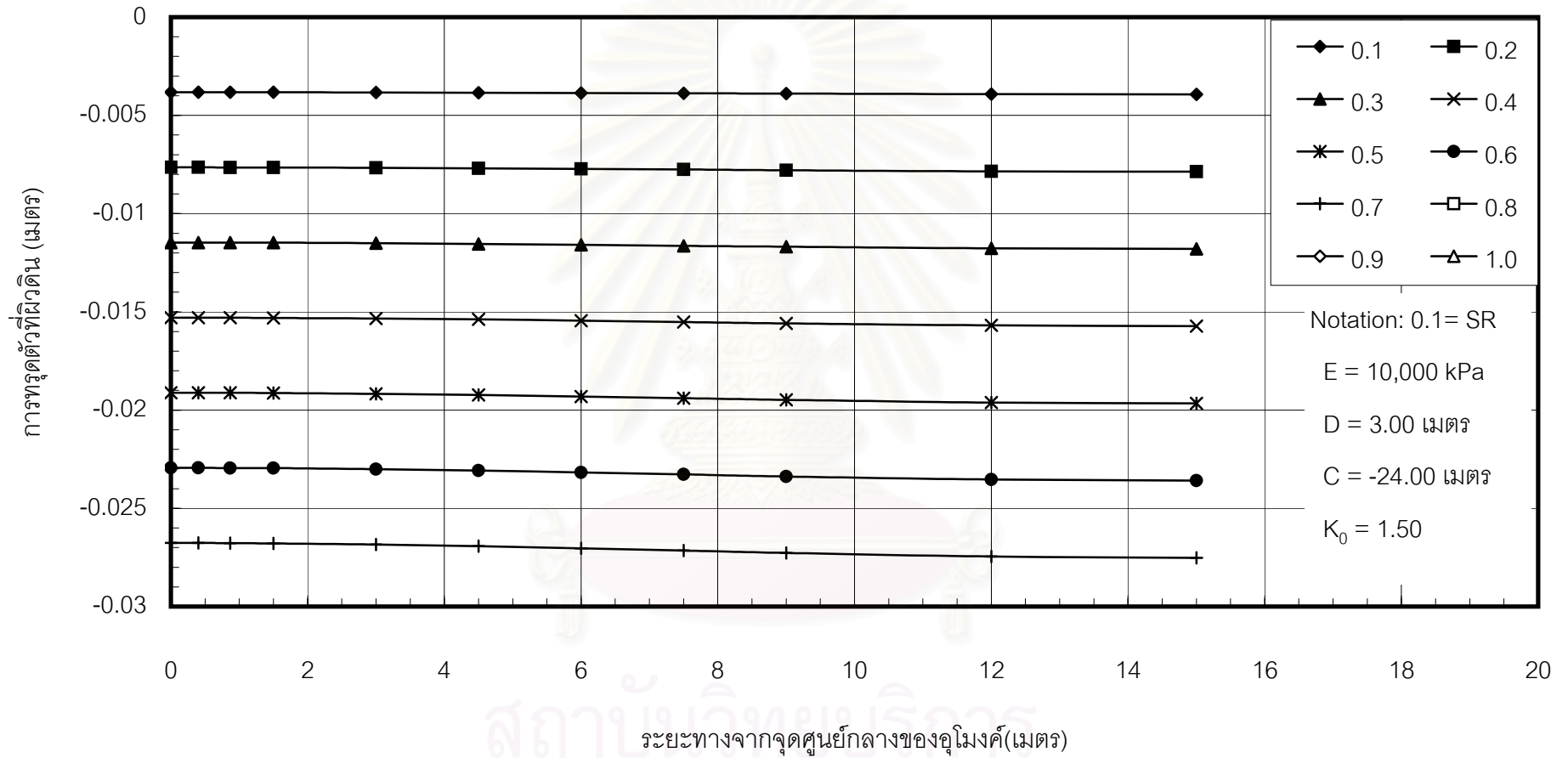


ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

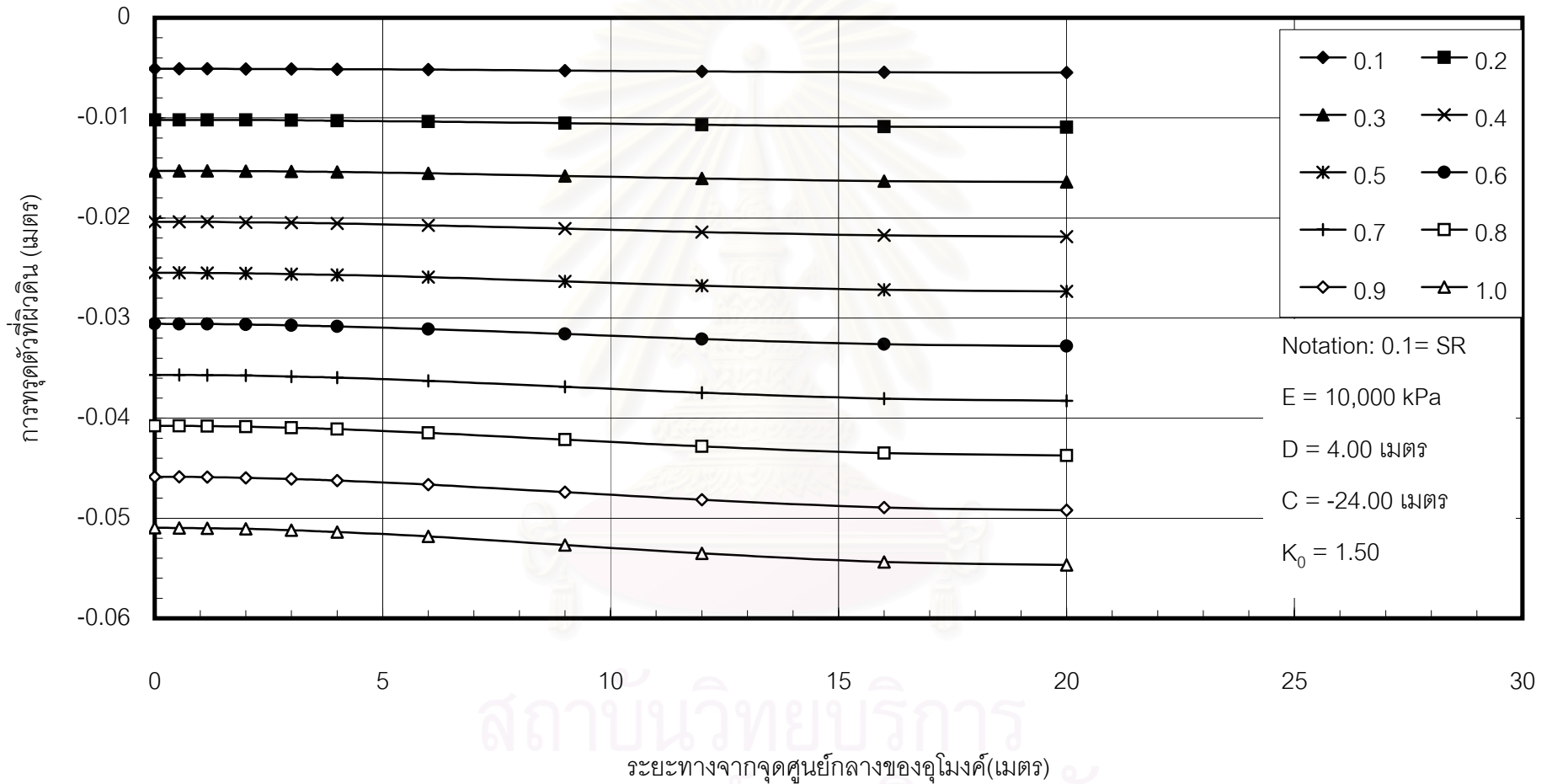
รูปที่ ก.114 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



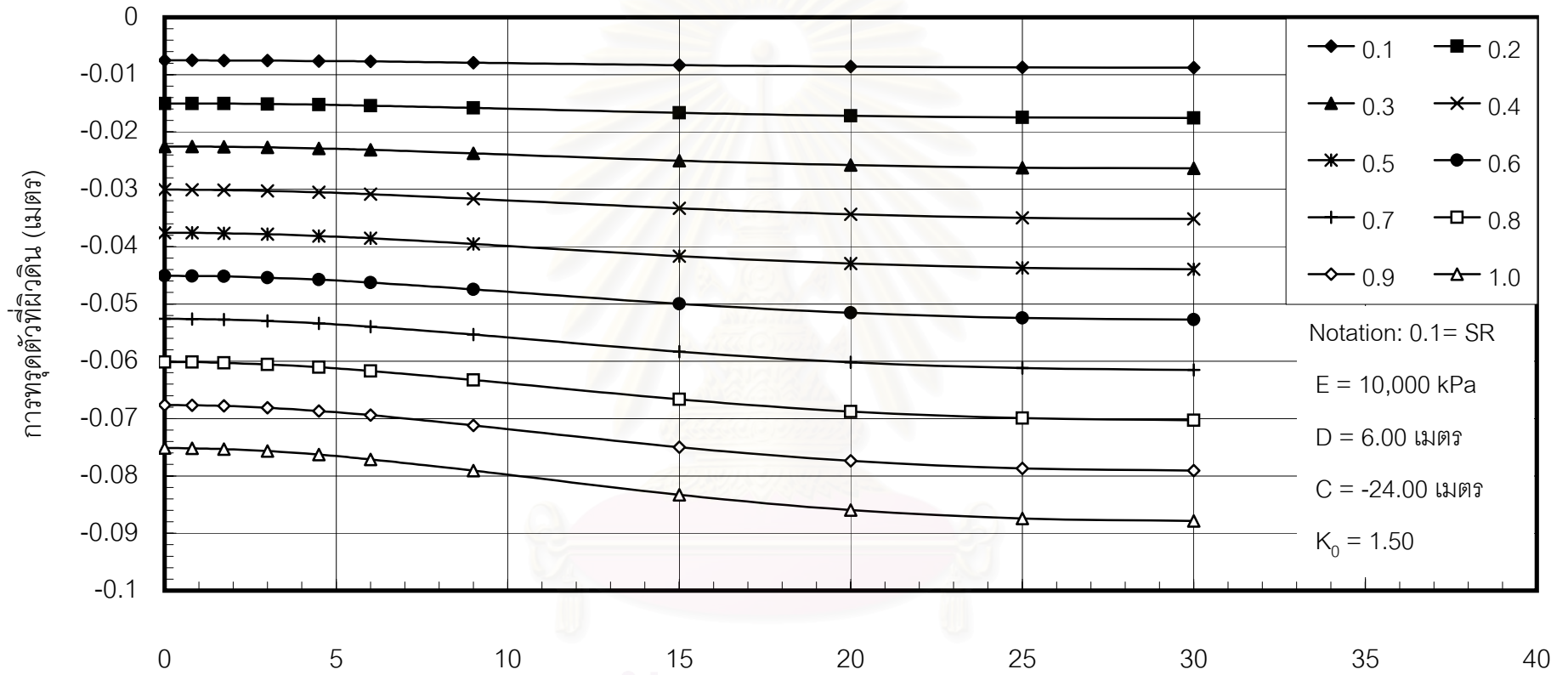
รูปที่ ก.115 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.116 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

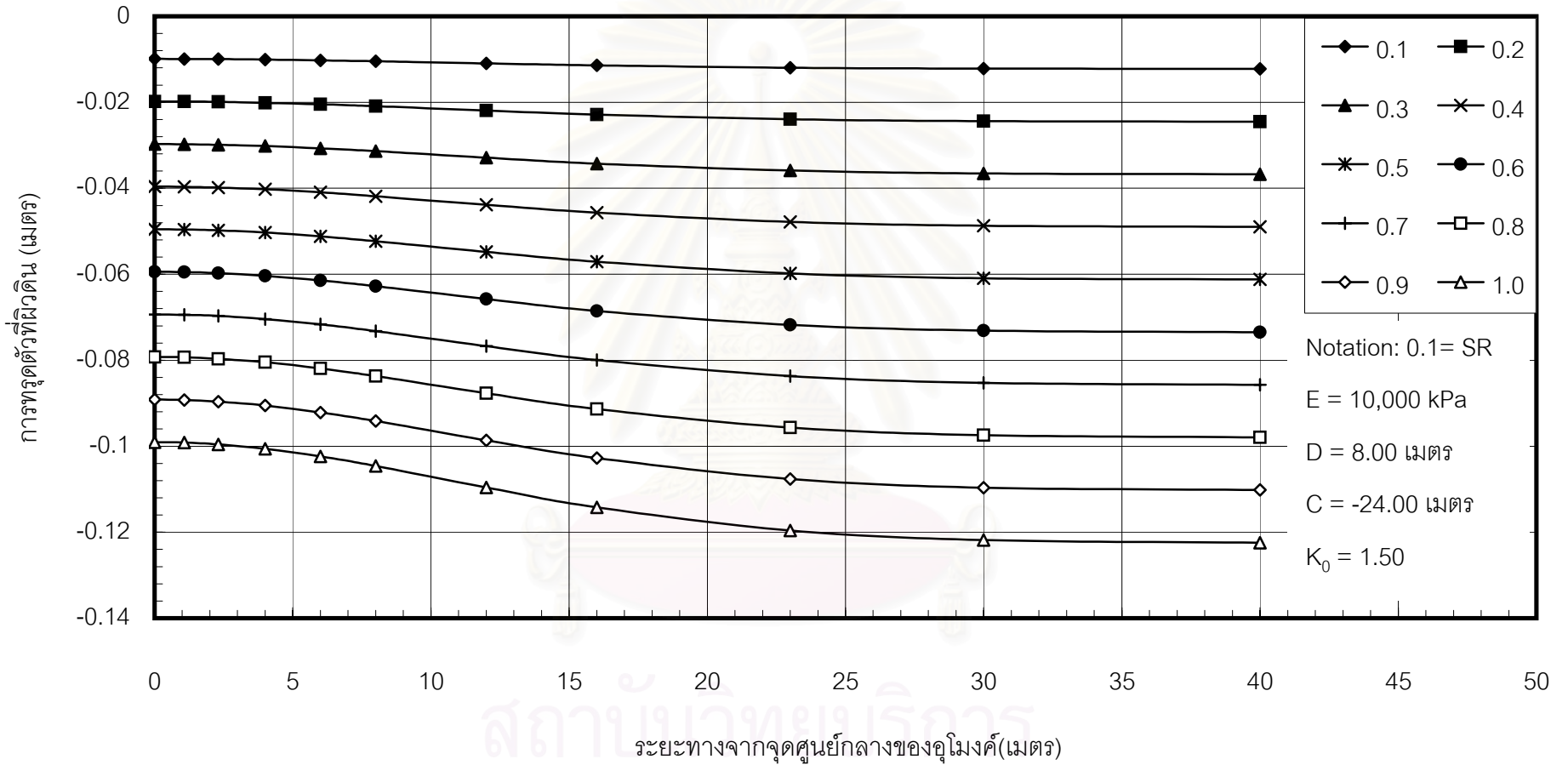


รูปที่ ก.117 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



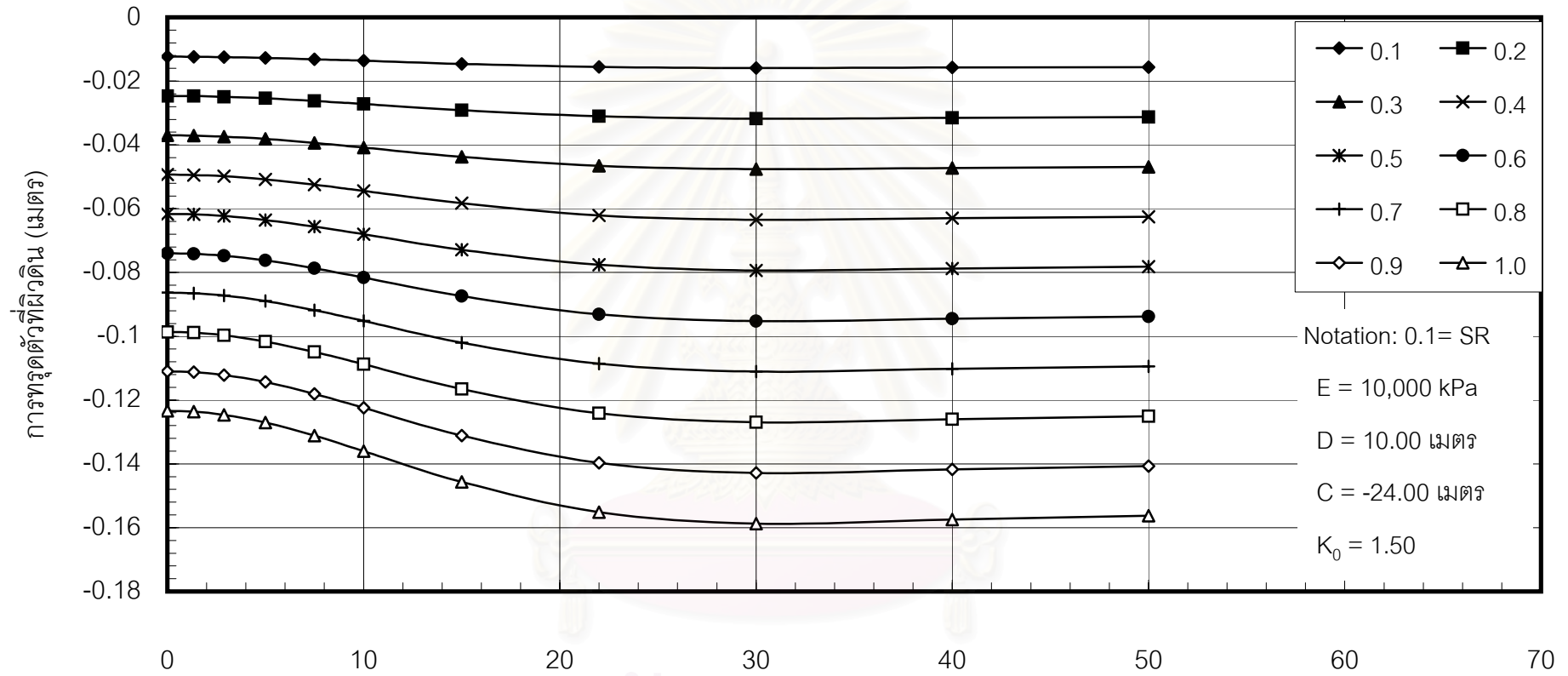
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.118 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ



รูปที่ ก.119 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ





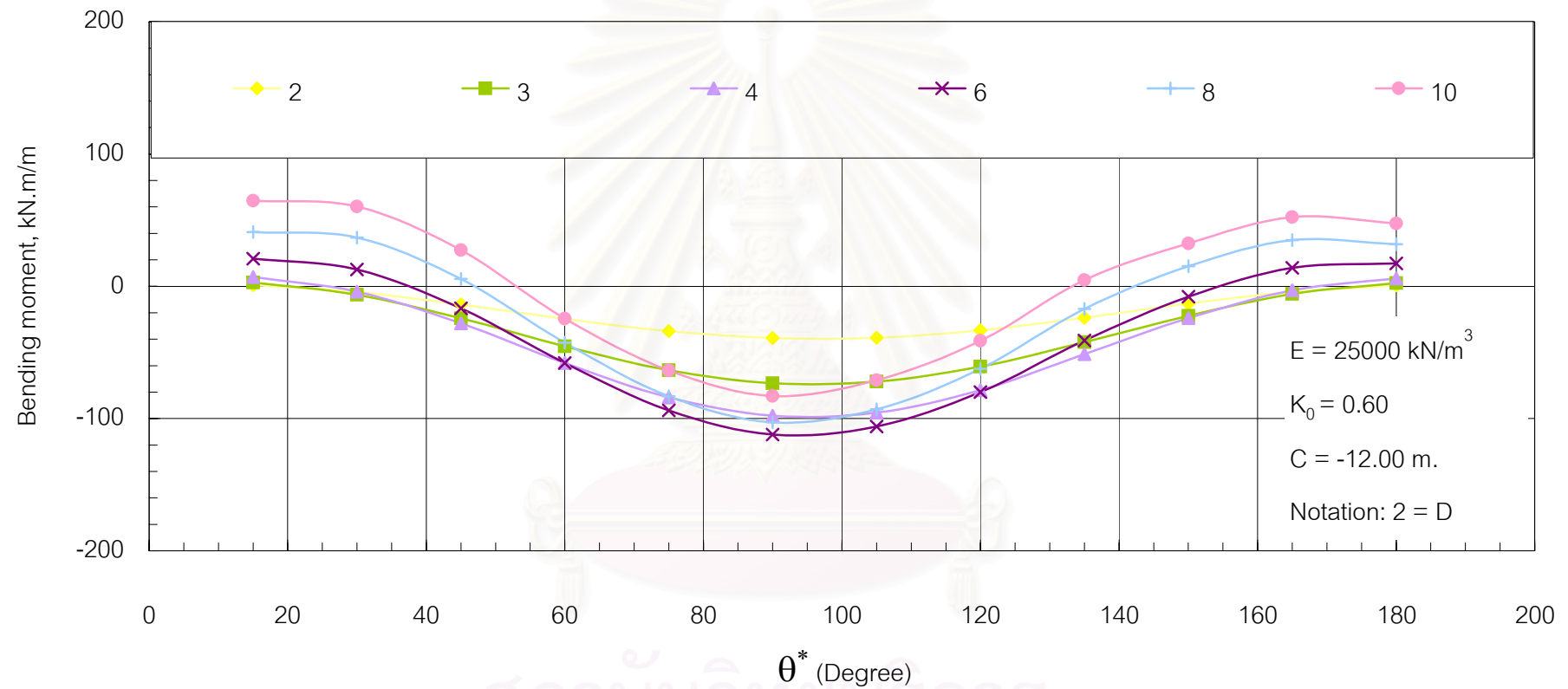
ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์(เมตร)

รูปที่ ก.120 แสดงปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ค่า SR ต่างๆ

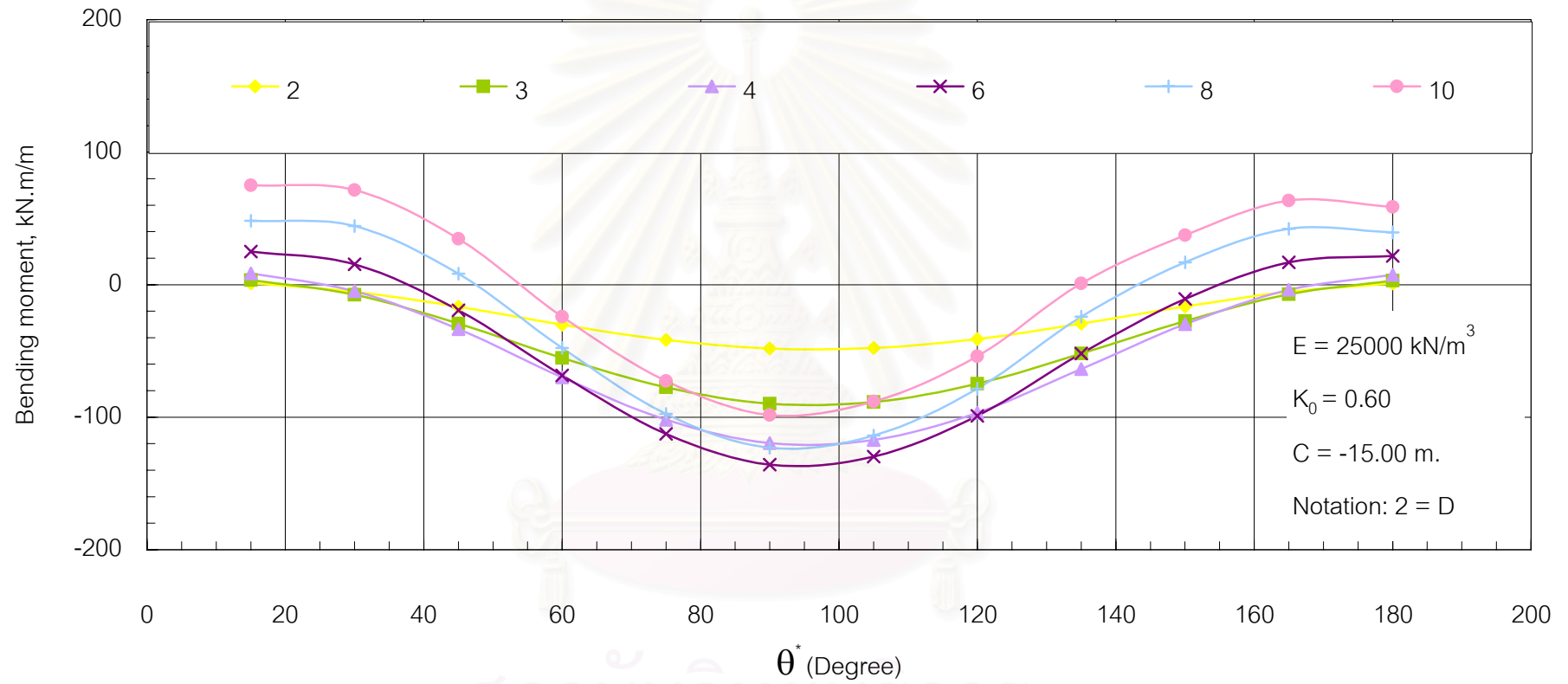


ภาคผนวก ข

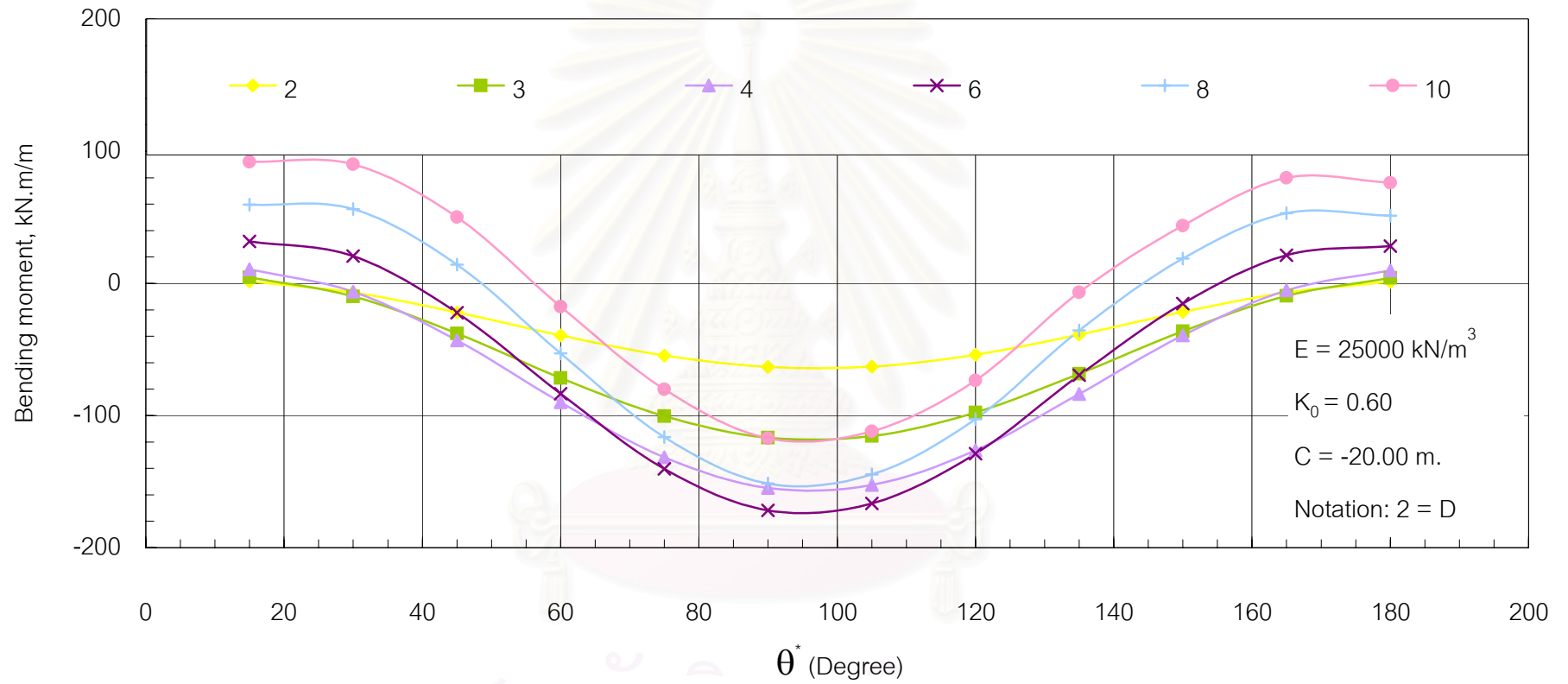
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



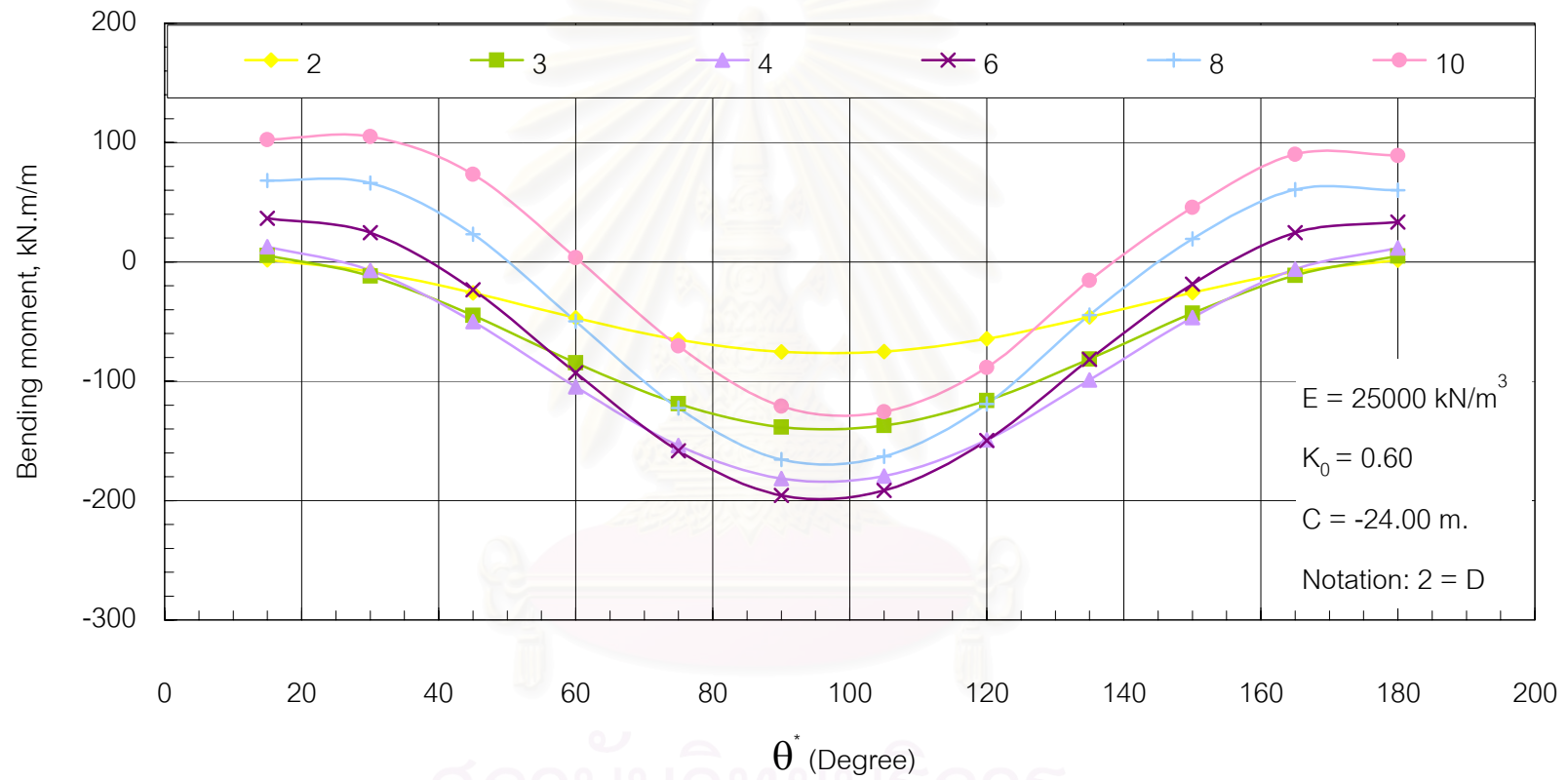
รูปที่ ข.1 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ



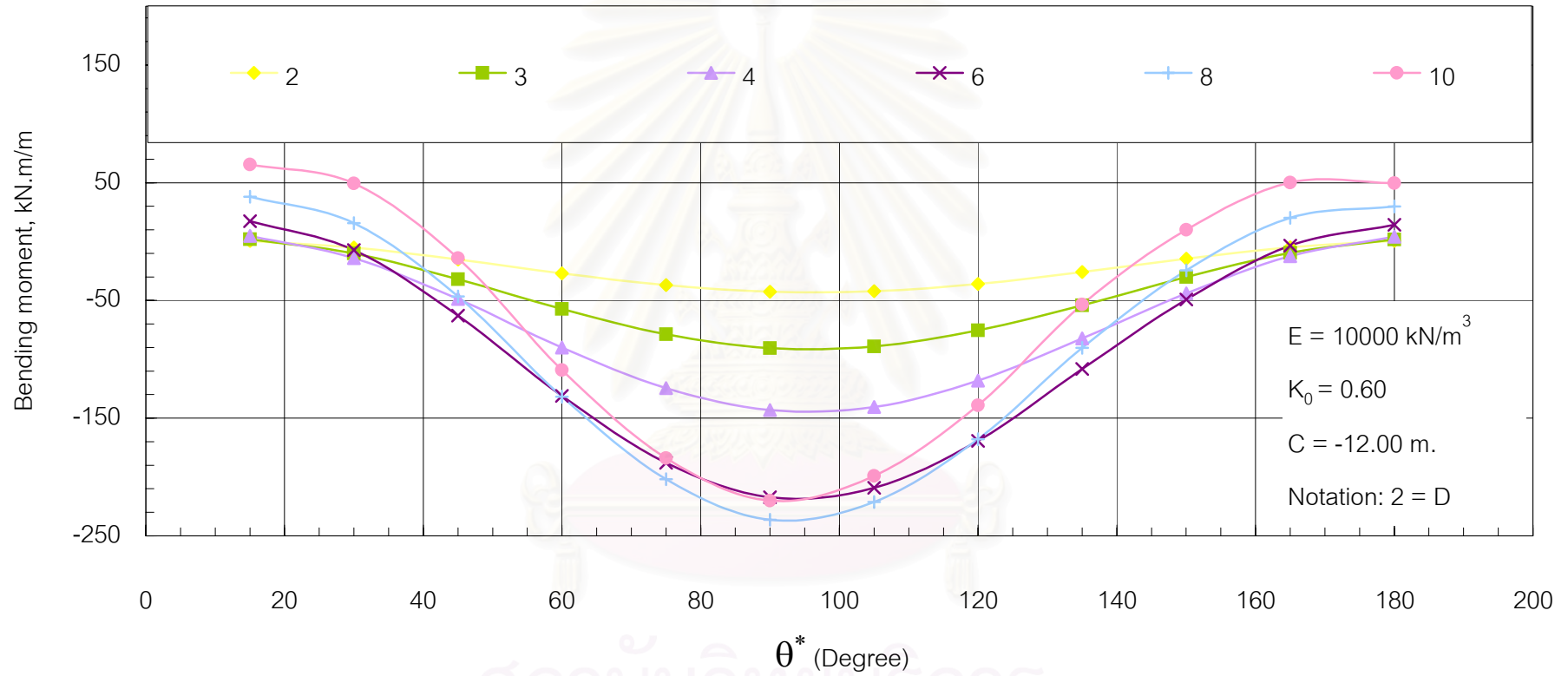
รูปที่ ข.2 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ



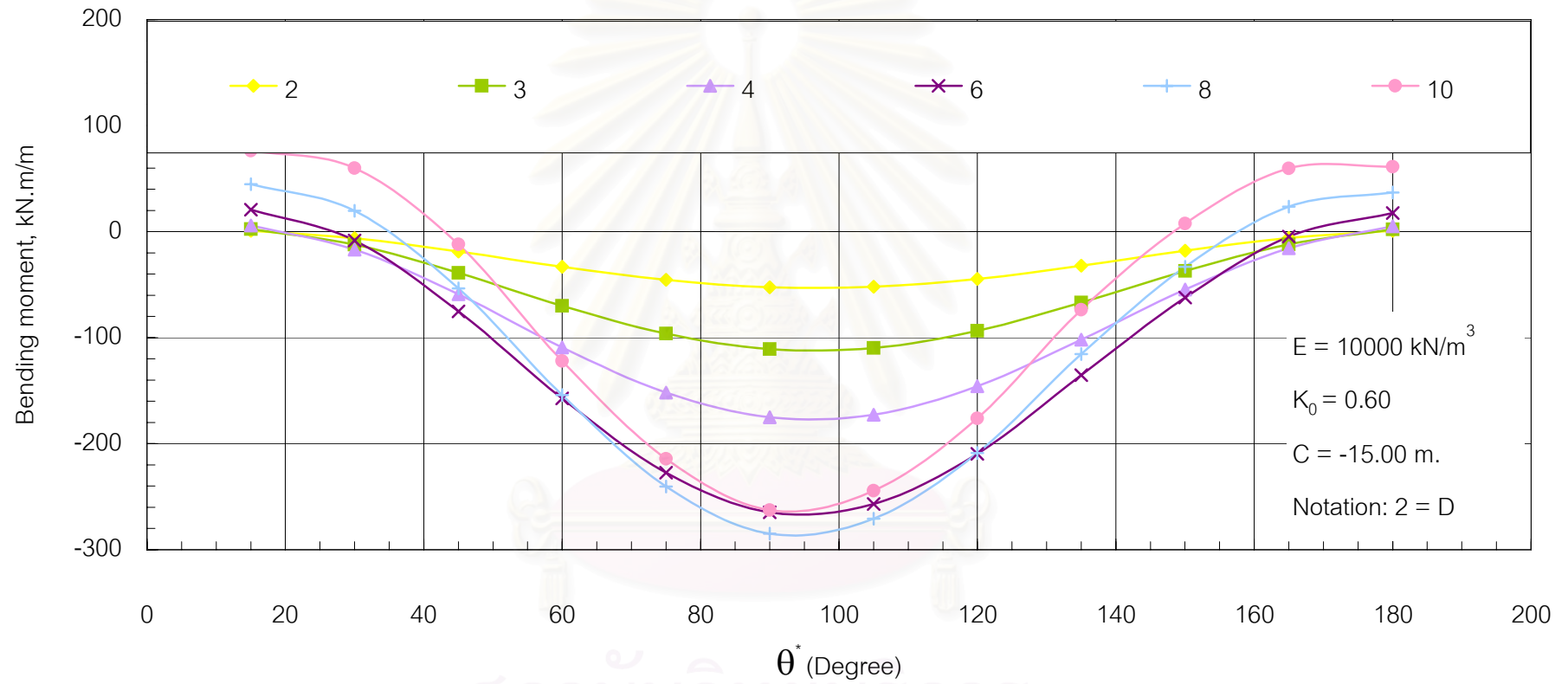
รูปที่ ข.3 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ



รูปที่ ข.4 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

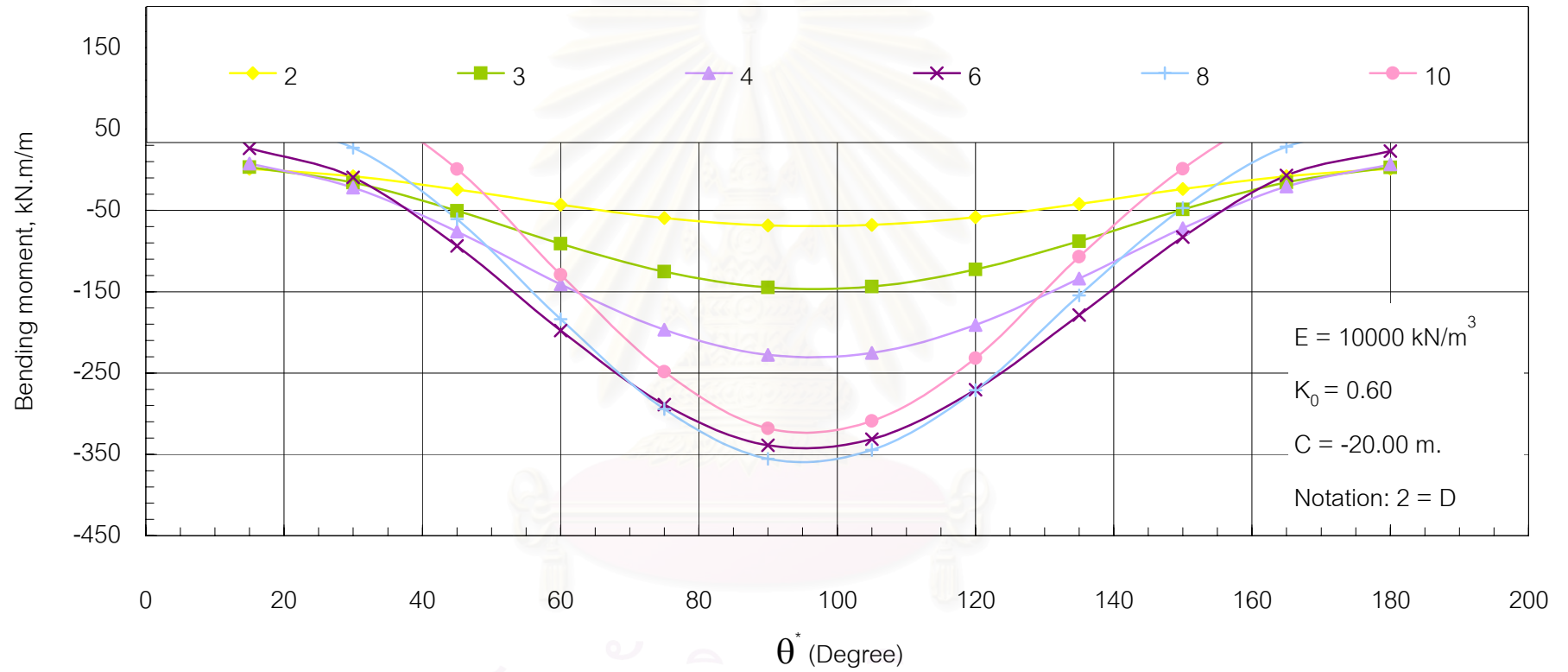


สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 รูปที่ ข.5 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

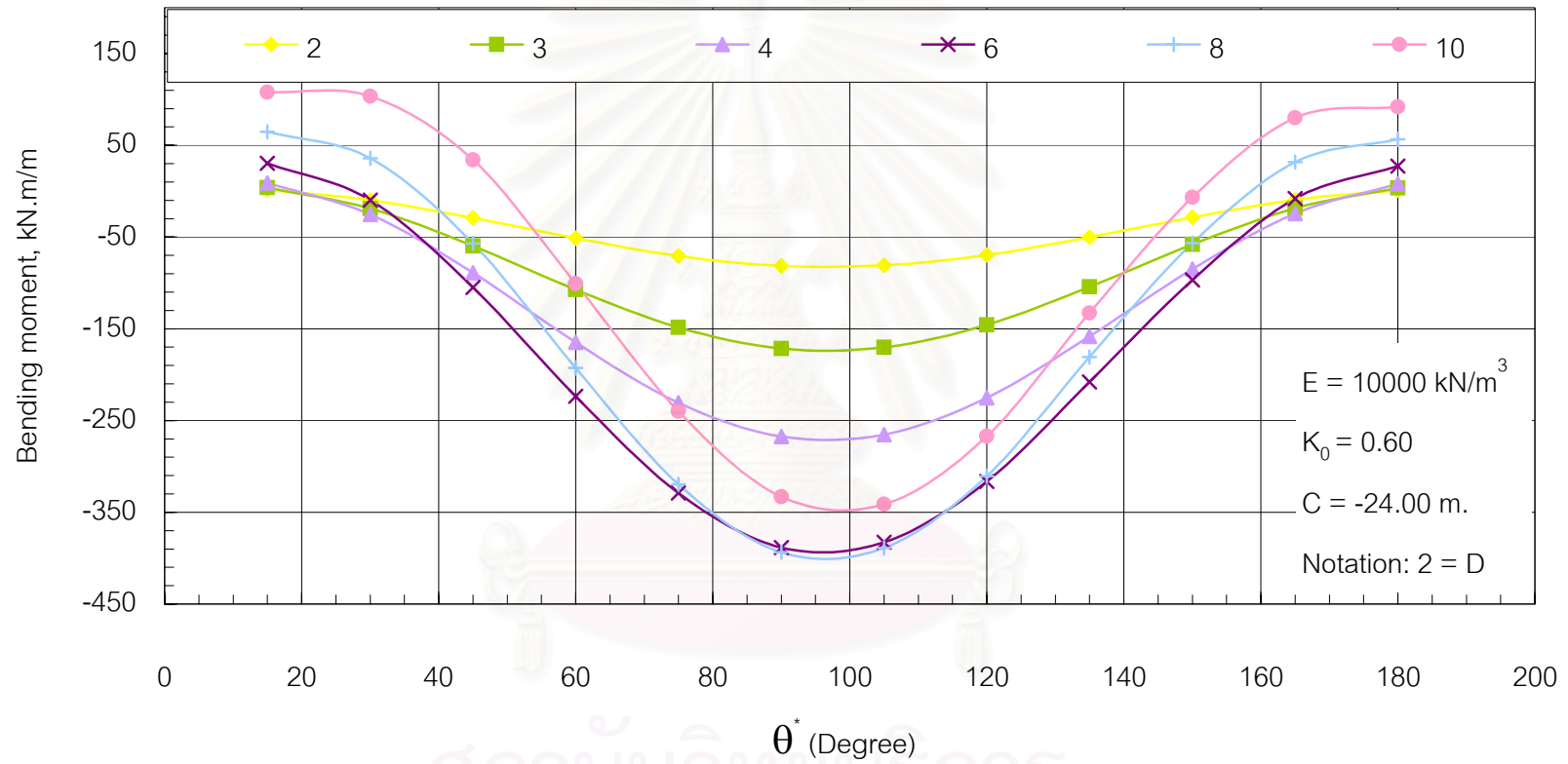


รูปที่ ข.6 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

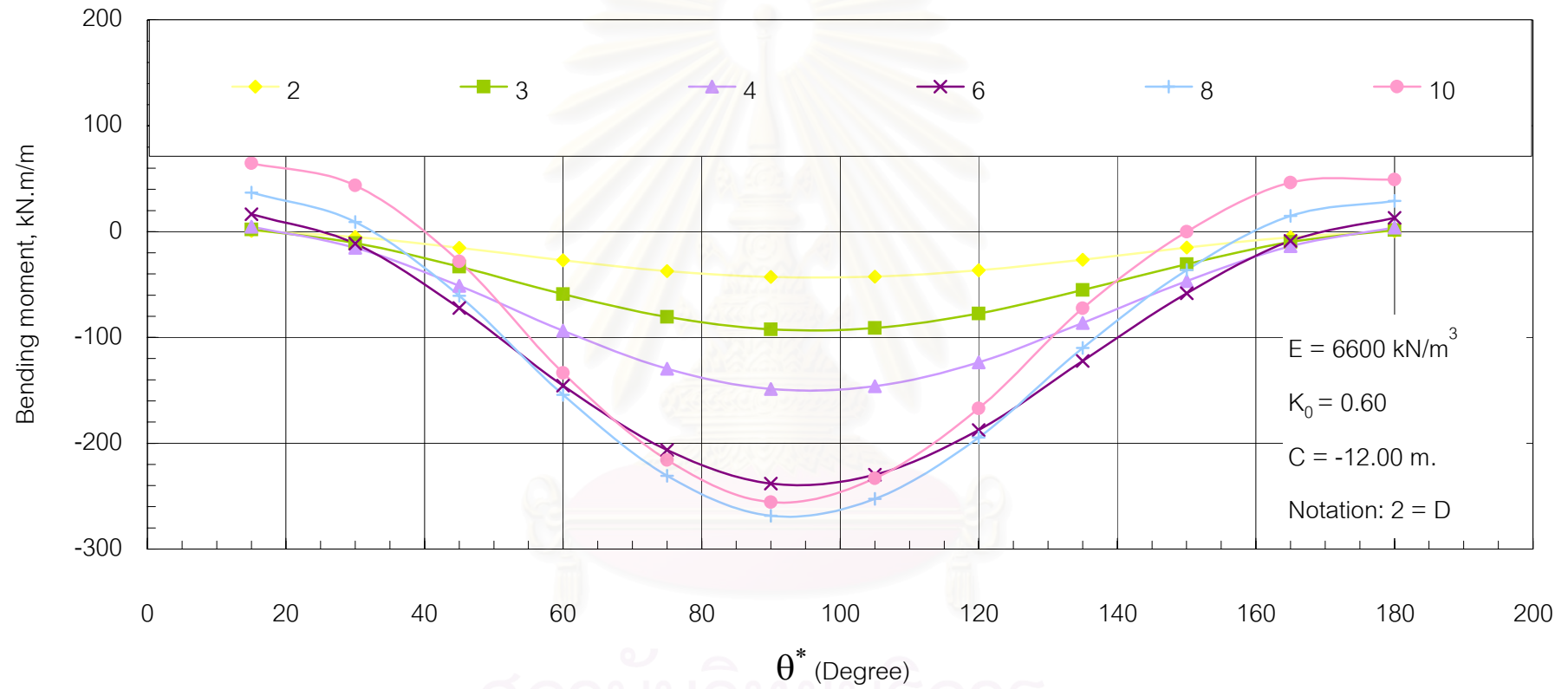




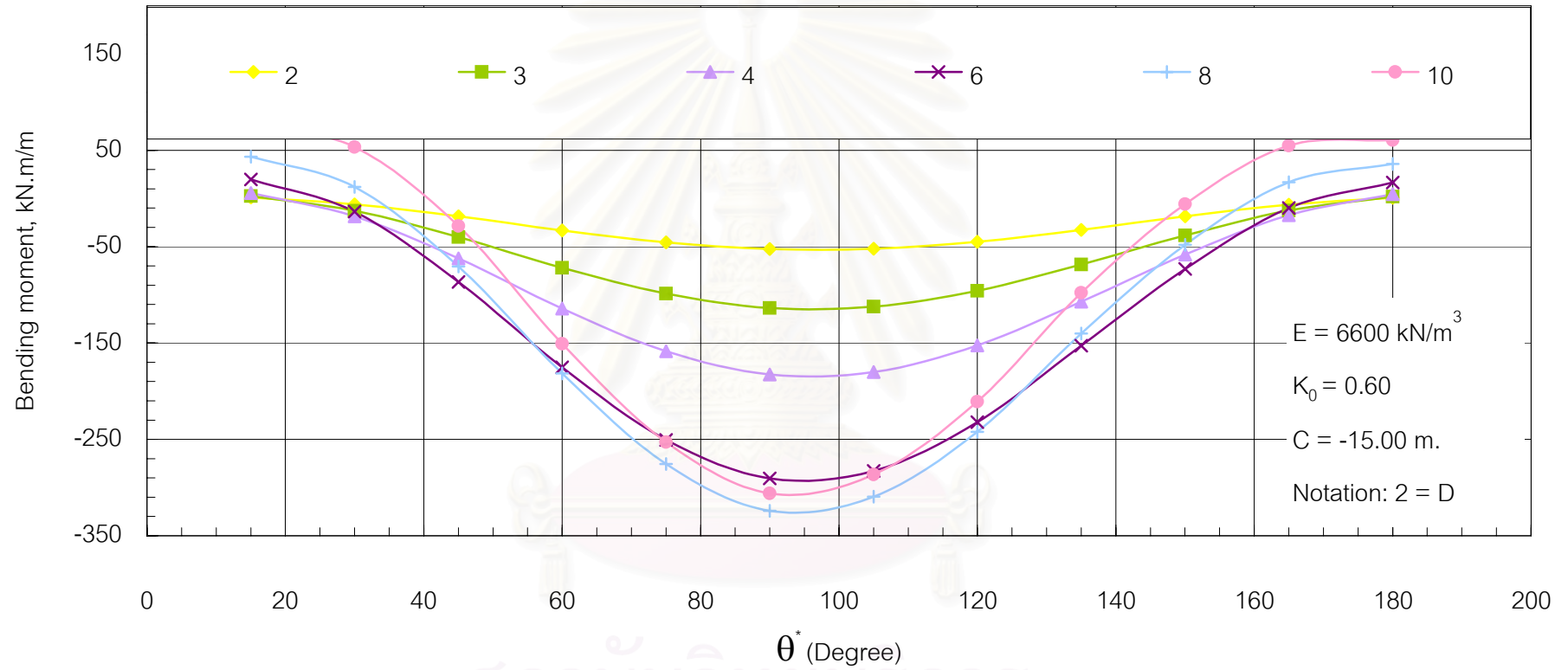
รูปที่ ข.7 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ



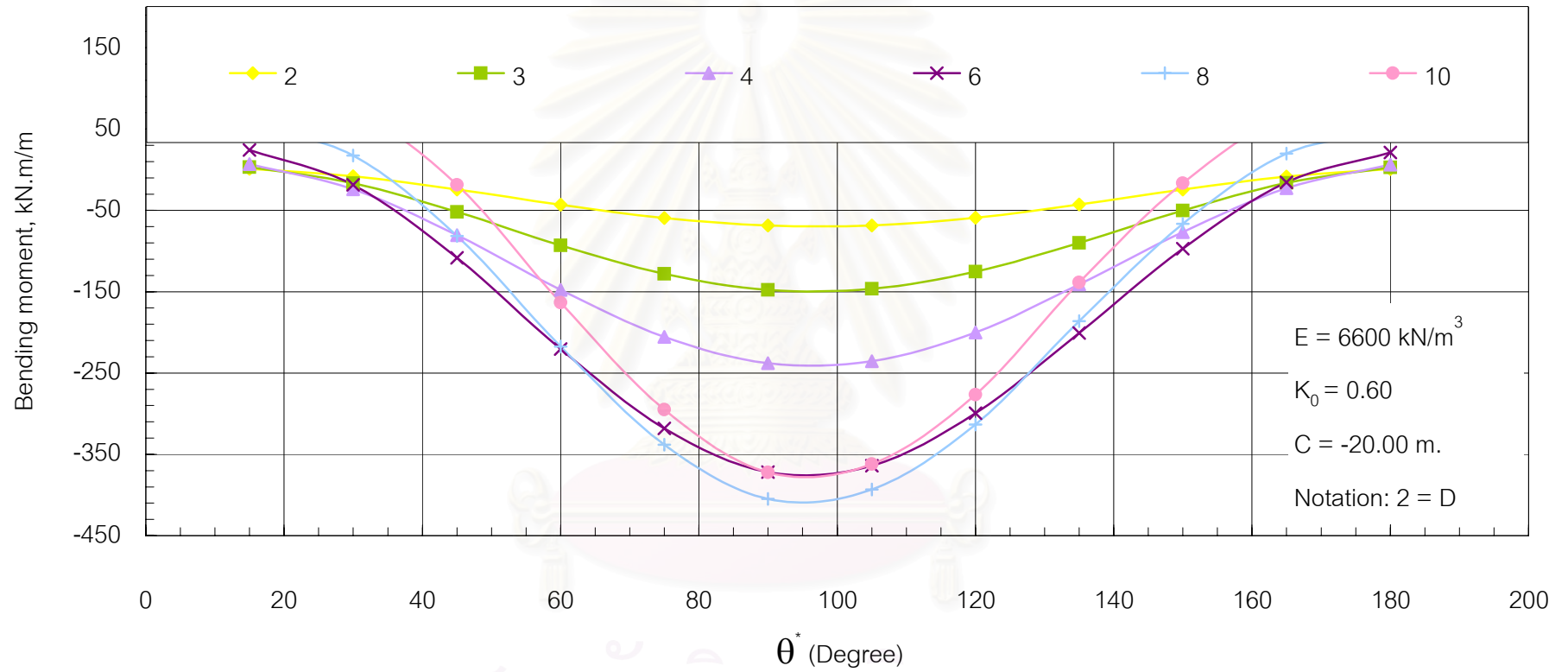
สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 รูปที่ ข.8 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอนุโมงค์ต่างๆ



สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 รูปที่ ข.9 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

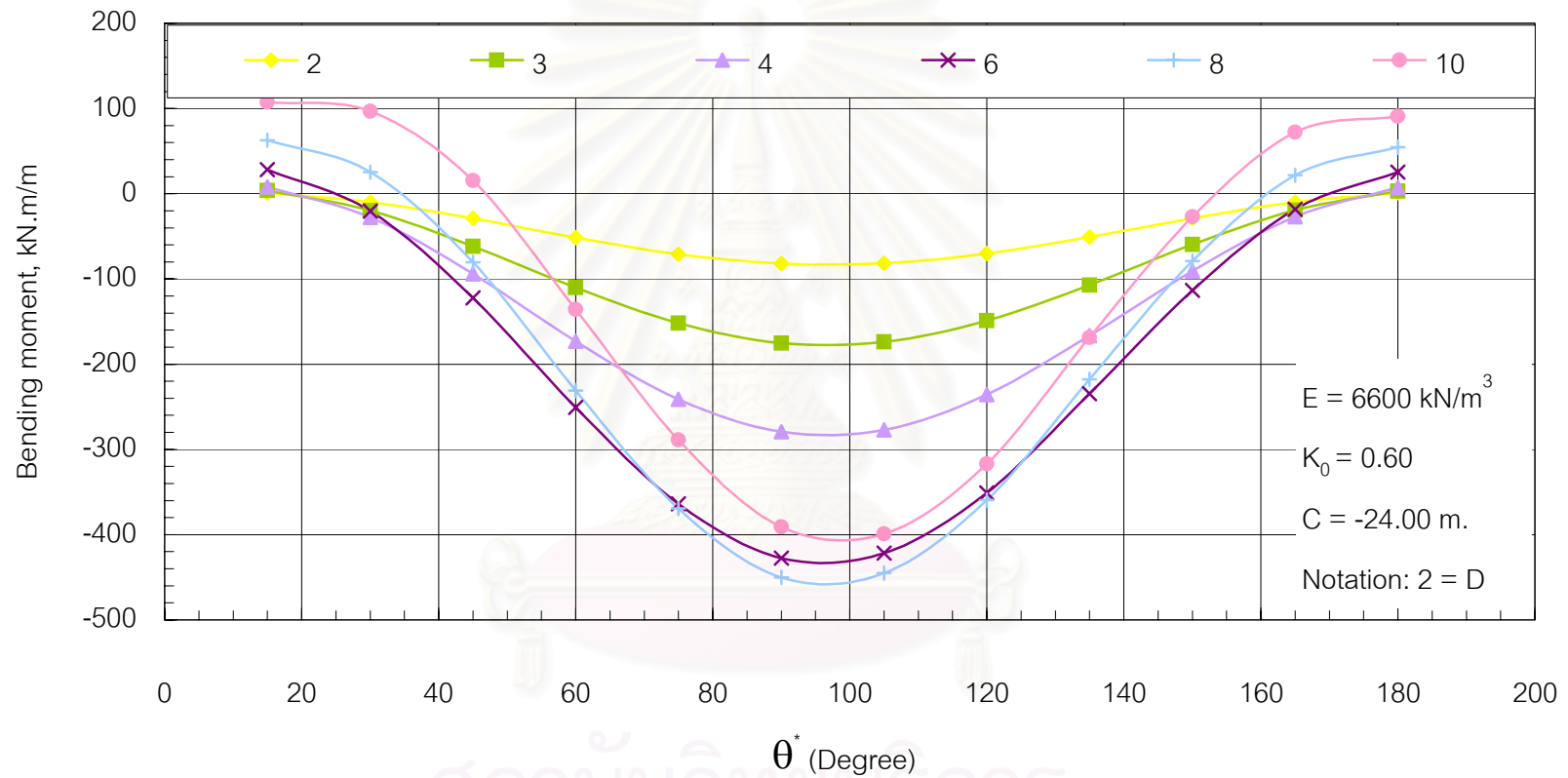


รูปที่ ข.10 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ



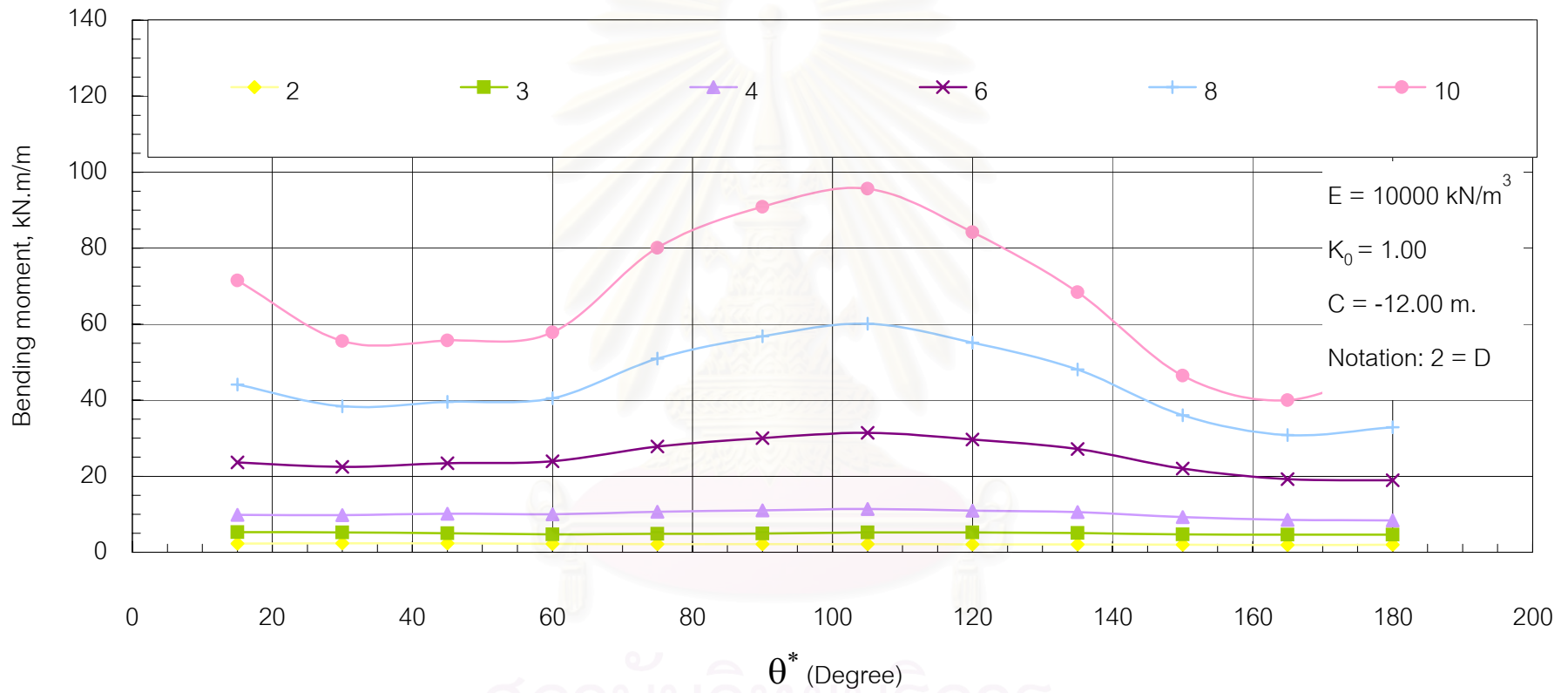
รูปที่ ข.11 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

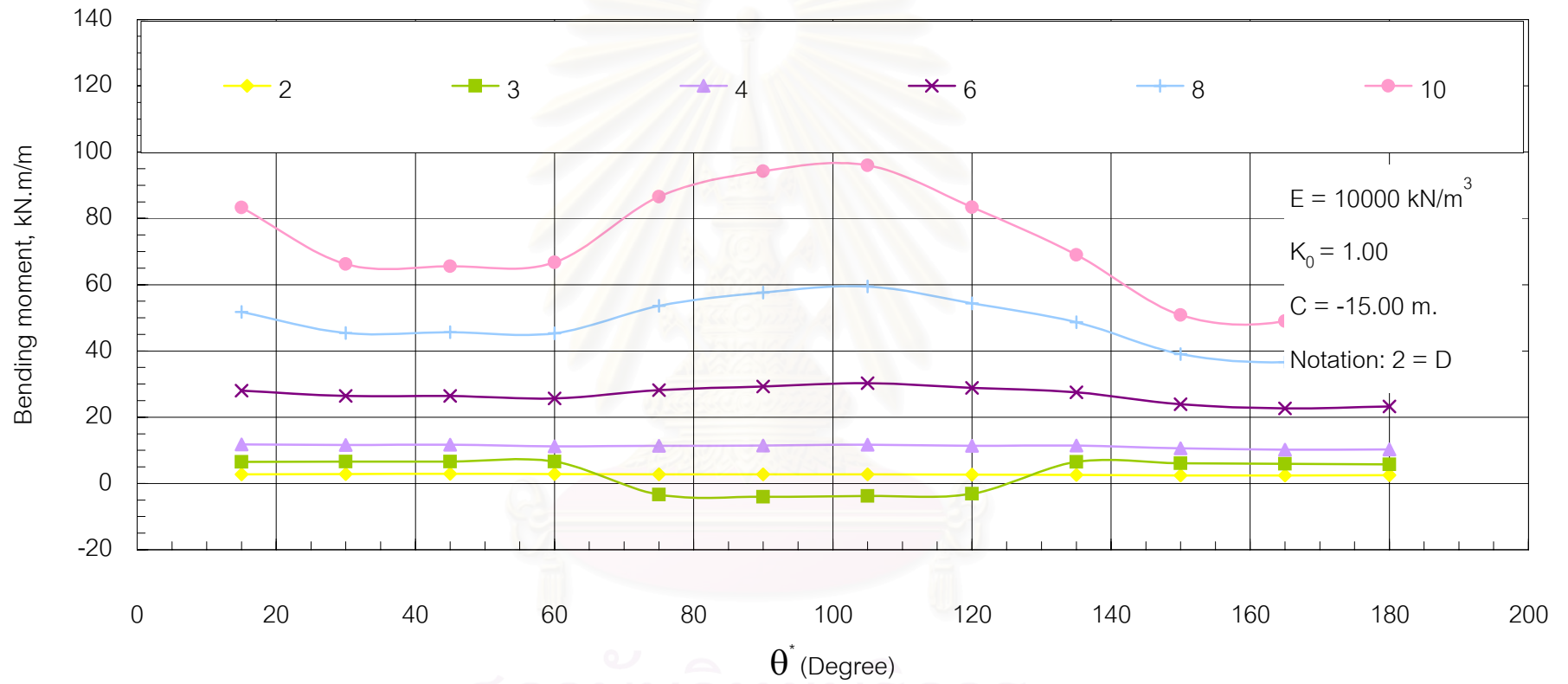


สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข.12 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

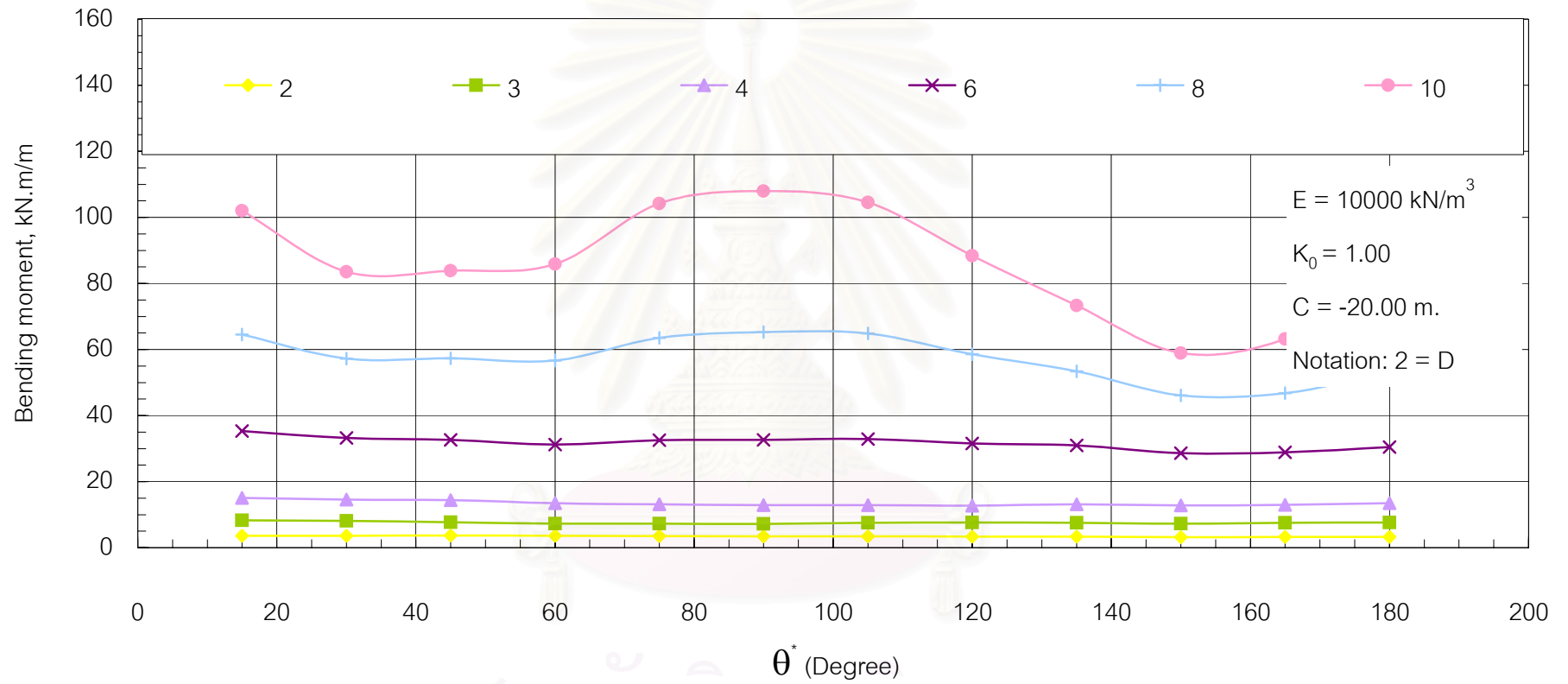


รูปที่ ๑.13 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชั้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

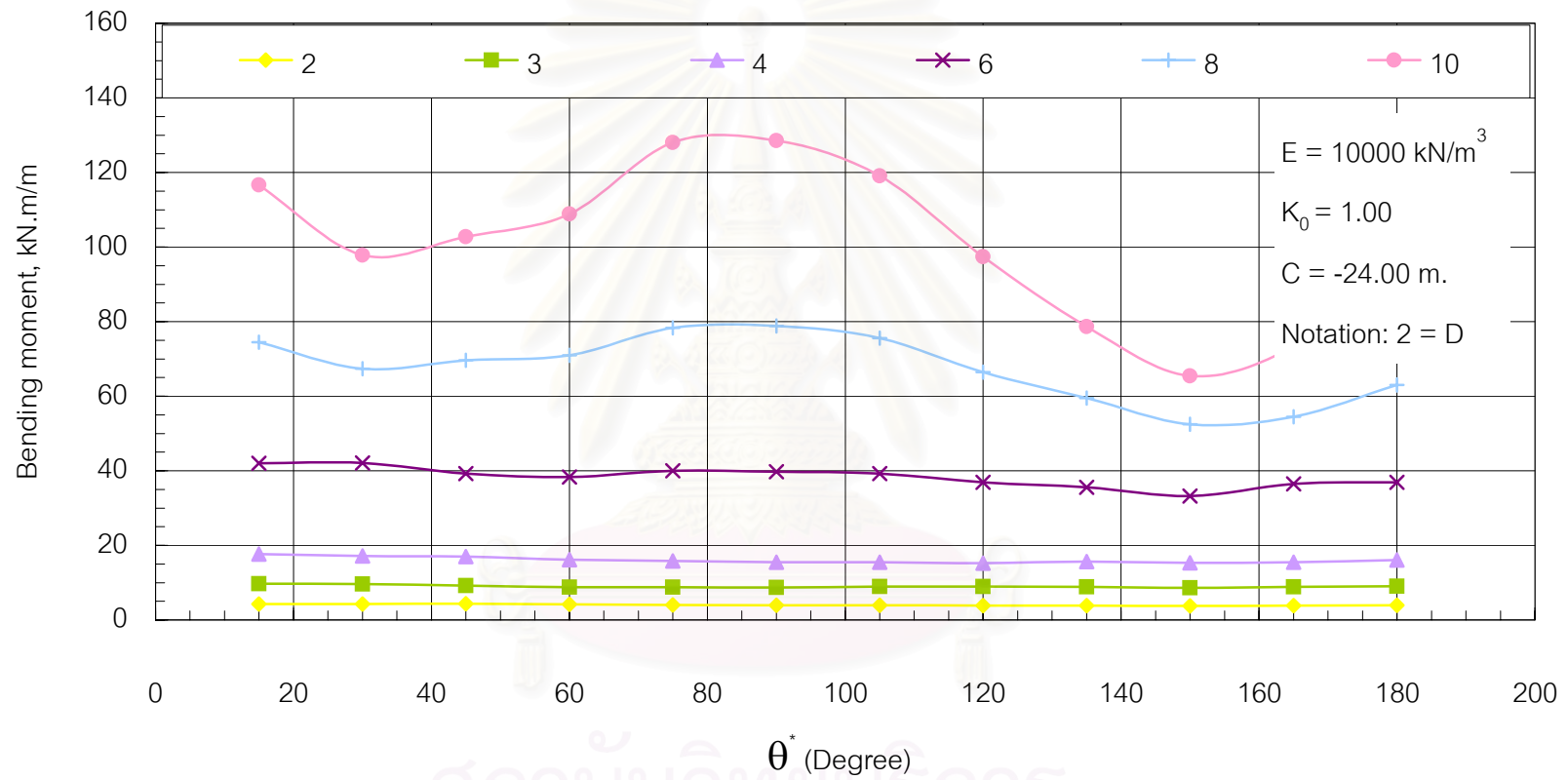


รูปที่ ข.14 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

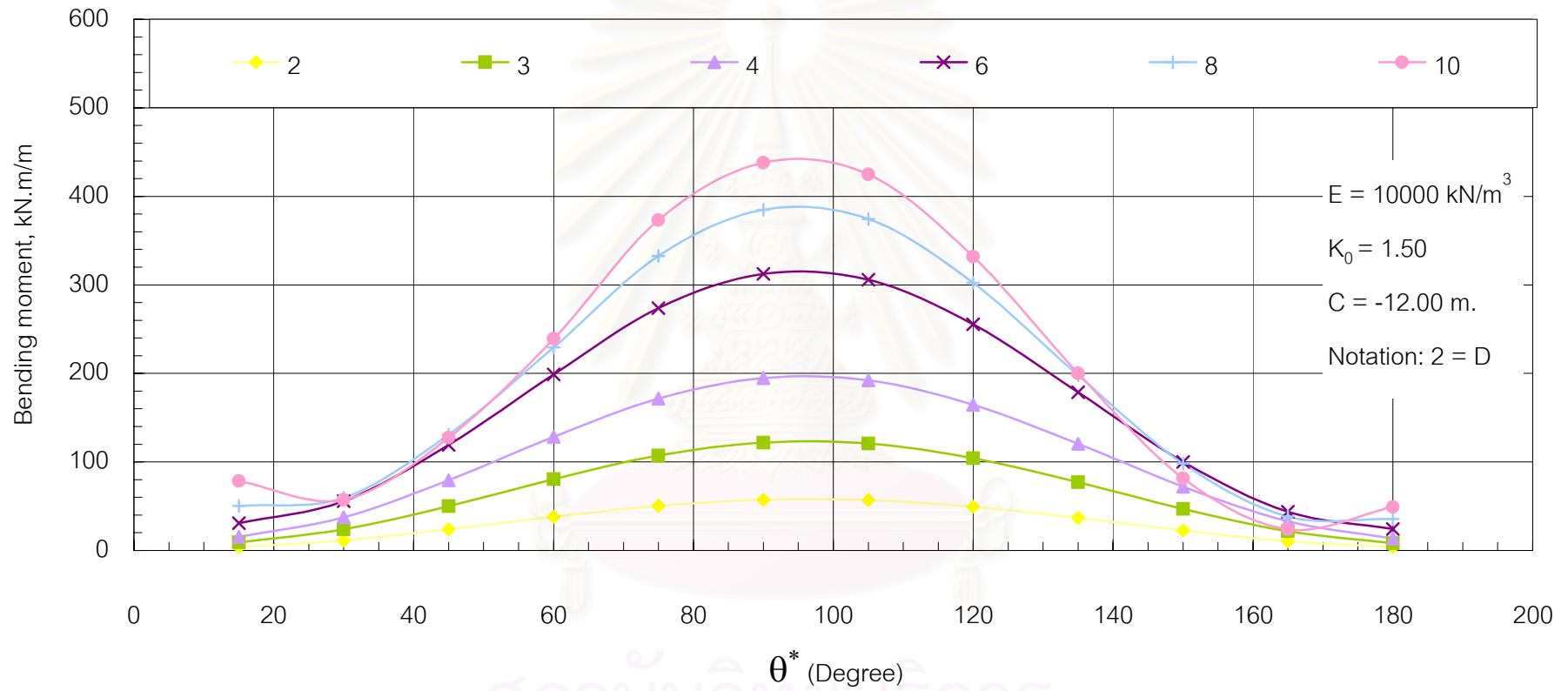




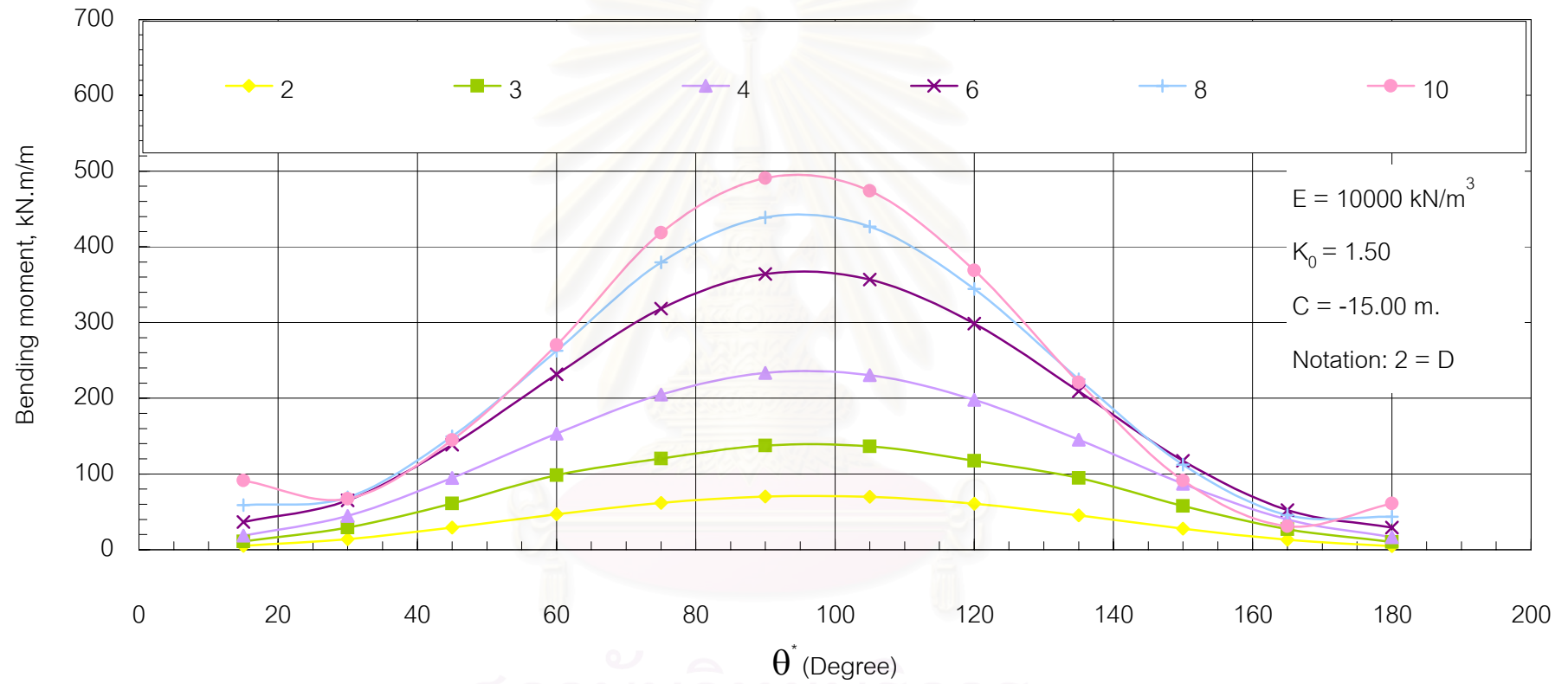
รูปที่ ข.15 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ



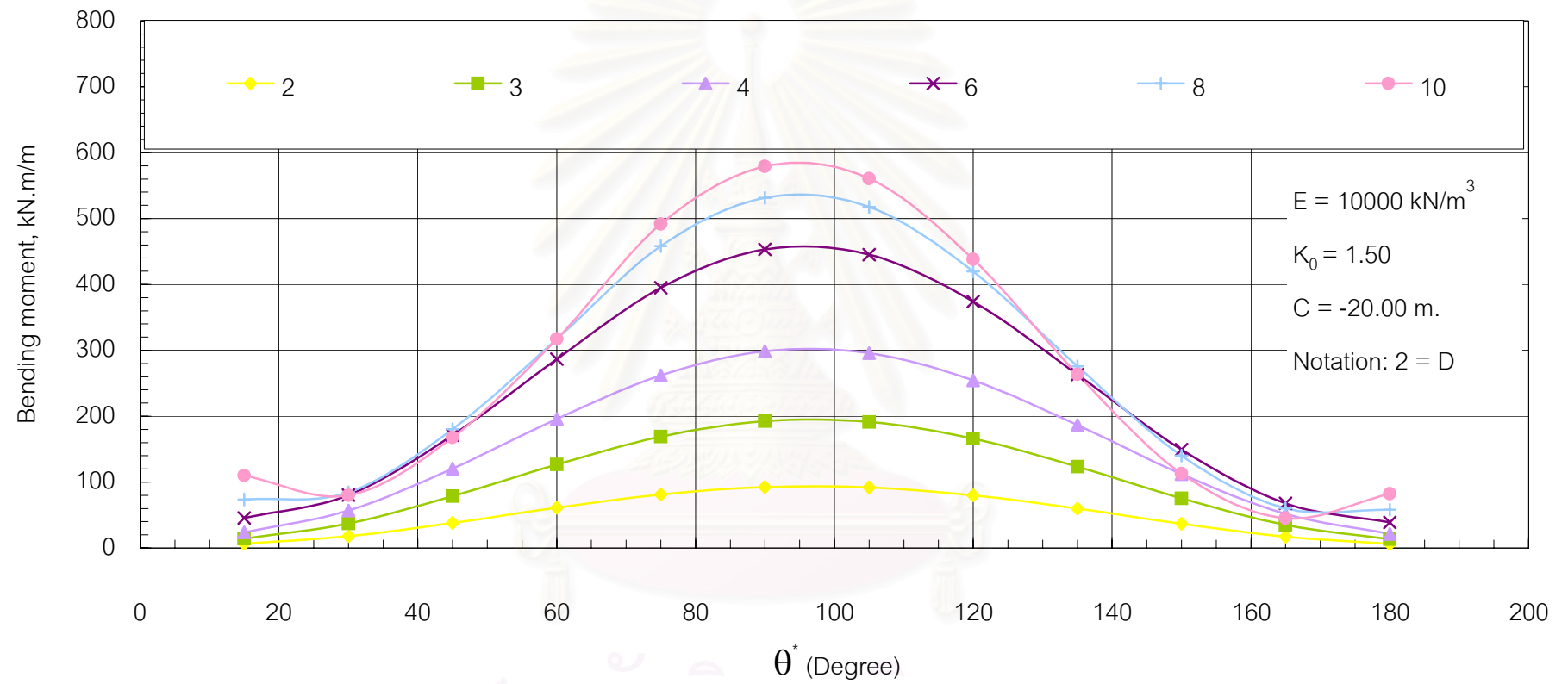
รูปที่ ข.16 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ



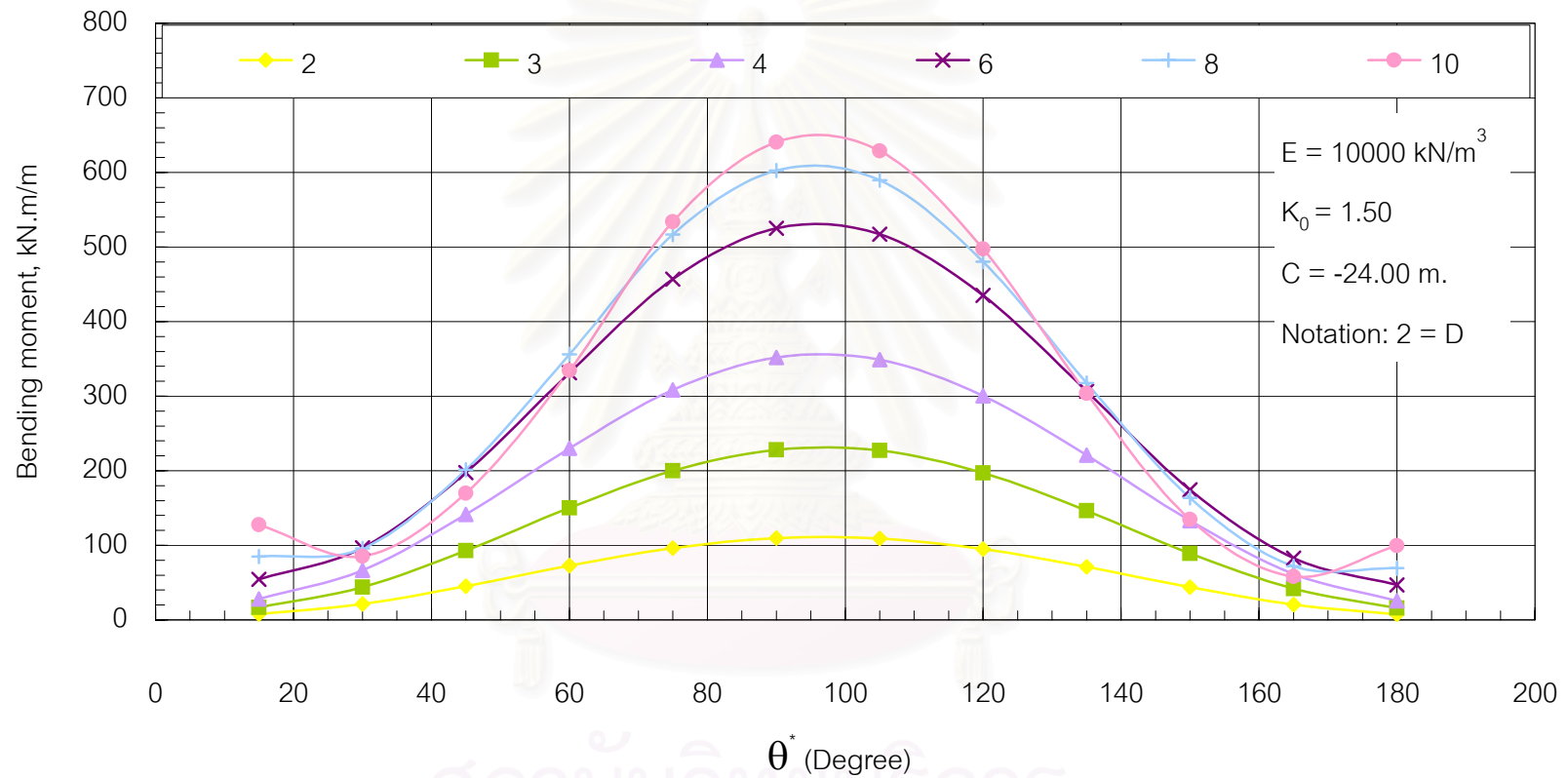
รูปที่ ๑.17 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชั้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ



รูปที่ ข.18 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

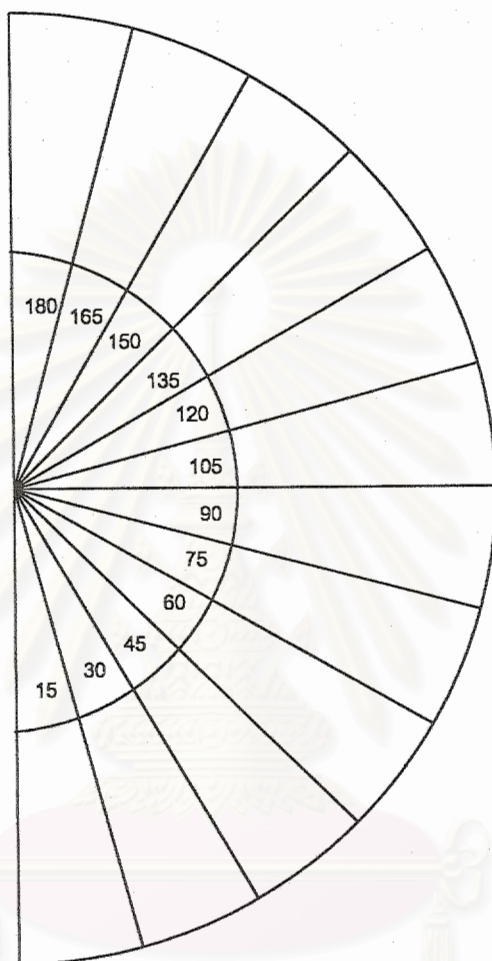


รูปที่ ข.19 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ



รูปที่ ข.20 กราฟแสดงค่า bending moment ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนอุโมงค์ต่างๆ

\* หมายเหตุ



Unit: Degree

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้วิจัย

นางสาวรัตมณี นันทสาร เกิด วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2519 กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย