หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ ๕

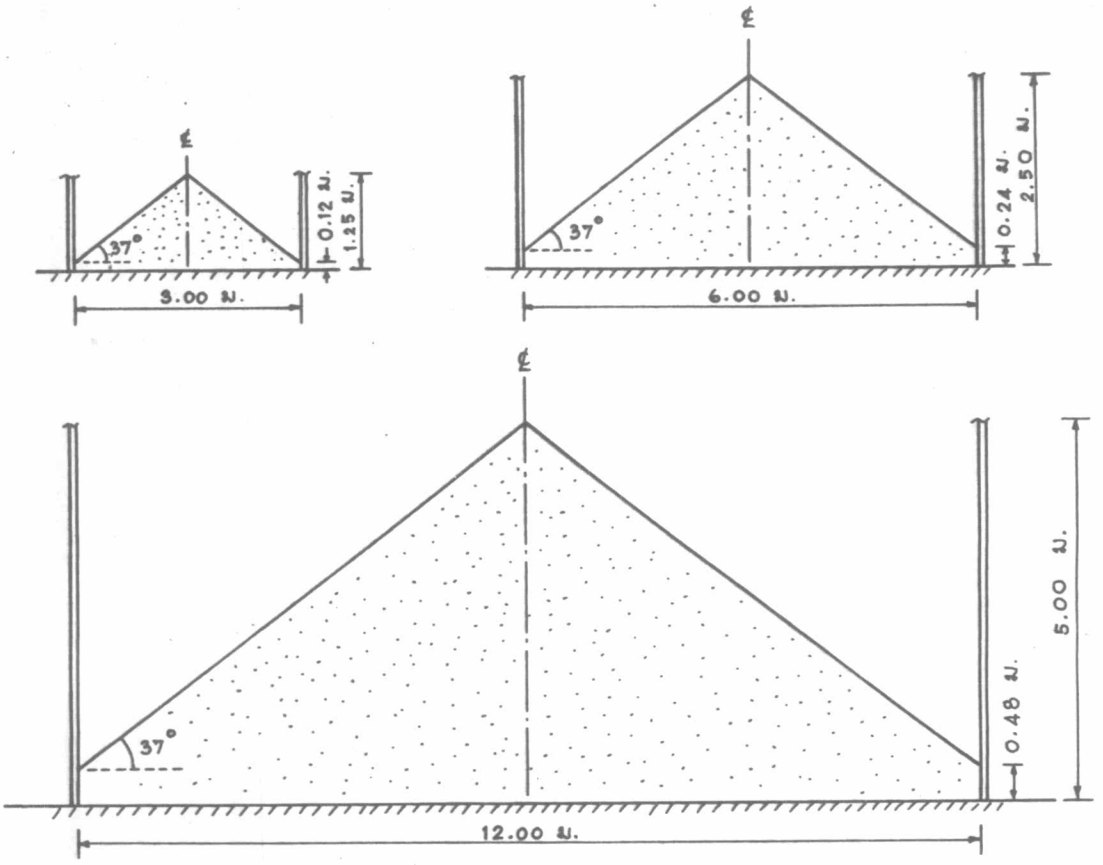
การวิเคราะห์พฤติกรรมระหว่างปูนซีเมนต์และไซโลที่ใช้บรรจุโดยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์

๕.๑ การจำลองมวลบรรจุของปูนซีเมนต์และไซโลสำหรับการวิเคราะห์

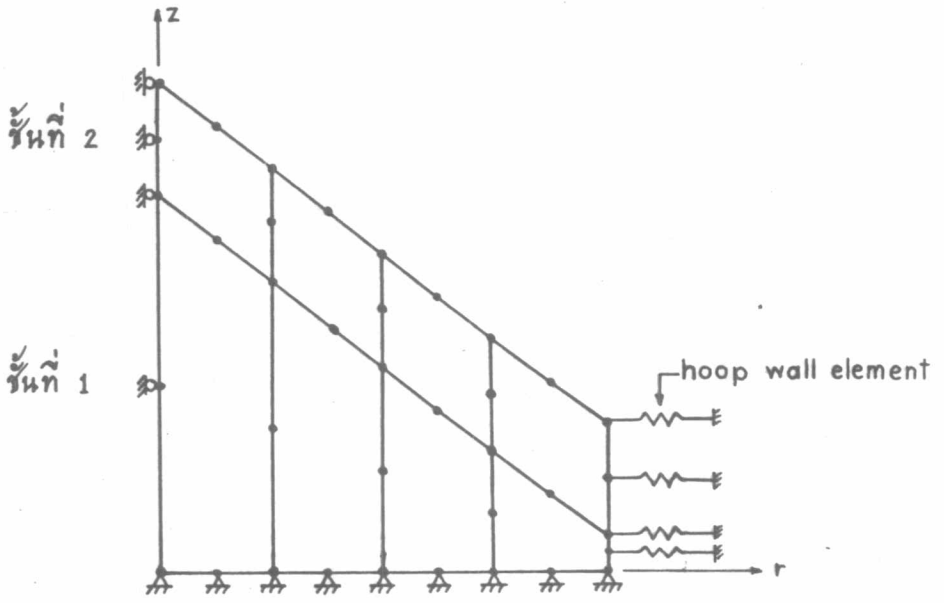
การวิเคราะห์พฤติกรรมทางโครงสร้างระหว่างปูนซีเมนต์และไซโลที่ใช้เก็บโดยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์นี้ได้ใช้ไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตร, สูง ๒๐ เมตร ไซโลนี้ทำด้วยเหล็กหนา ๓.๑๗๕ มิลลิเมตร (๑/๘นิ้ว) ซึ่งสมมุติให้เป็นวัสดุอิลัสติค ส่วนปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติแบบอิลัสติคไร้เชิงเส้นซึ่งได้จากผลของการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ ๔

ในการวิเคราะห์ได้พิจารณาจากสภาพเป็นจริงของการบรรจุปูนซีเมนต์เก็บในไซโล และทำการวิเคราะห์แบบลำดับขั้น โดยกำหนดให้การบรรจุปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็นชั้น ๆ ในชั้นที่เพิ่มนี้จะให้ปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นเริ่มต้นเฉลี่ย ๑.๓๓๗ ตันต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งได้จากผลการทดลอง การบรรจุปูนซีเมนต์นี้สมมุติให้มี ๒๐ ชั้น แต่ละชั้นจะมีความหนาที่จุดศูนย์กลาง ๑ เมตร ยกเว้นชั้นแรกเท่านั้นที่จะแตกต่างกันไปตามขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของไซโล โดยที่ชั้นแรกนี้จะมีความสูงที่จุดศูนย์กลางเท่ากับ ๑.๒๕, ๒.๕๐ และ ๕.๐๐ เมตร สำหรับไซโลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ ๕.๑ และมีมุมลาดชันเท่ากับ ๓๗ องศา ซึ่งได้จากผลของการทดลอง

เนื่องจากรูปทรงของไซโลเป็นแบบทรงกระบอกกลมจึงสามารถทำการวิเคราะห์แบบสมมาตรรอบแกนศูนย์กลาง (Axisymmetric) มวลของปูนซีเมนต์แต่ละชั้นถูกแบ่งออกเป็นเอลเม้นท์วงแหวนจำนวน ๔ เอลเม้นท์ และเป็นเอลเม้นท์แบบ Isoparametric ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยจุดที่เรียกว่า Nodal Points จำนวน ๘ จุด เอลเม้นท์แบบนี้มีชื่อเรียกว่า Quadrilateral Element รูปที่ ๕.๒ แสดงตัวอย่างการแบ่งมวลปูนซีเมนต์ ๒ ชั้นแรกเป็นไฟไนท์เอลเม้นท์ซึ่งยังไม่มีการทรุดตัว ในแต่ละชั้นยังประกอบด้วย Hoop Element ซึ่งเป็นเอลเม้นท์ที่ใช้แทนผนังไซโลสำหรับการวิเคราะห์ถึงผลของการเคลื่อนตัวของผนังไซโลในทิศทางด้านข้าง เอลเม้นท์เหล่านี้จะมีสภาพเหมือนกับที่



รูปที่ ๔.๑ การบรรจุปูนซีเมนต์ชั้นแรกของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ



รูปที่ ๔.๒ การจำลองมวลปูนซีเมนต์และผนังไซโลสำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์

รองรับยืดหยุ่น ค่าสติฟเนสของแต่ละเอลเม้นท์มีค่าดังนี้คือ

$$P_i = \frac{H_i E_i}{R} q_{r_i}$$

เมื่อ P_i = hoop forces ของเอลเม้นท์ i

q_{r_i} = ระยะเคลื่อนตัวในแกนรัศมีของเอลเม้นท์ i

H_i = ความสูงของเอลเม้นท์ i

E_i = hoop forces ต่อหนึ่งหน่วยความสูงของผนังซึ่งทำให้เกิดหนึ่งหน่วยสเตรน

R = รัศมีของไซโล

สติฟเนสของ hoop elements ถูกนำไปรวมเข้ากับสติฟเนสของโครงสร้างทำให้มีการต่อเนื่องกันระหว่าง hoop elements และเอลเม้นท์ของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ผลของความฝืดระหว่างมวลปูนซีเมนต์และผนังไซโลก็ทำให้เกิดแรงที่จะกระทำต่อมวลปูนซีเมนต์ ส่วนบริเวณพื้นล่างของไซโล เราสมมุติให้มีสภาพยึดแน่น ไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวดิ่งและแนวนอน เพื่อใช้แทนความแข็งและความฝืดของพื้นไซโล

๕.๒ <u>ผลของการวิเคราะห์พฤติกรรมระหว่างปูนซีเมนต์และไซโลที่ใช้บรรจุ</u>

ในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์แบบลำดับขั้นได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีขั้นตอนของการคำนวณแสดงไว้ในรูปที่ ๓.๕ ผลของการวิเคราะห์มีดังนี้

ตารางที่ ๕.๑ ได้แสดงความจุของไซโลทั้ง ๓ ขนาดซึ่งแทนด้วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเป็นขั้น ๆ ในที่นี้ไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร จะมีเพียง ๑๙ ชั้น ส่วนไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ และ ๑๒ เมตร มีครบ ๒๐ ชั้น ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุของการปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงทำให้ผลการวิเคราะห์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตรได้เพียง ๑๙ ชั้นเท่านั้น ซึ่งได้ความจุ รวม ๑๗๑.๘๕๘ ตัน ส่วนไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ และ ๑๒ เมตร มีความจุรวม ๗๒๒.๙๕๒ ตัน และ ๒๘๓๑.๑๗๔ ตันตามลำดับ จากตารางที่ ๕.๑ นี้เราจะเห็นได้ว่าน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นของแต่ละชั้นของไซโลทั้ง ๓ ขนาดจะหนักไม่เท่ากันทุกชั้นก็เพราะว่าวิธีการบรรจุชั้นถัดขึ้นไปนั้น เราให้ความสูงที่จุดศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ๑ เมตรจากระดับซึ่งมีการทรุดตัวแล้วของชั้นเดิม ส่วนจุดที่ห่างจากจุดศูนย์กลางออกไปจะลาดตามมุมลาดชันของปูนซีเมนต์ ดังนั้น

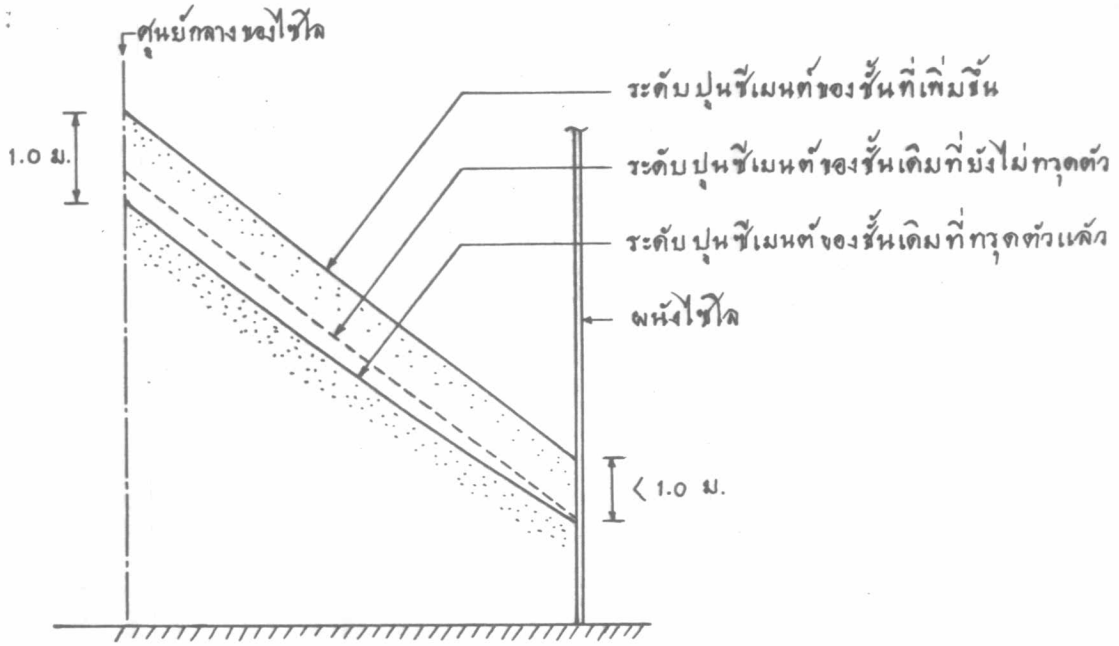
ตารางที่ ๕.๑ ลำดับความจุของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตร

การบรรจุปูนซีเมนต์ชั้นที่	น้ำหนักของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง					
	๓ เมตร		๖ เมตร		๑๒ เมตร	
	น้ำหนักแต่ละชั้น (ตัน)	น้ำหนักสะสม (ตัน)	น้ำหนักแต่ละชั้น (ตัน)	น้ำหนักสะสม (ตัน)	น้ำหนักแต่ละชั้น (ตัน)	น้ำหนักสะสม (ตัน)
๑	๔.๖๙๒	๔.๖๙๒	๓๗.๕๓๔	๓๗.๕๓๔	๓๐๐.๒๗๓	๓๐๐.๒๗๓
๒	๙.๒๙๘	๑๓.๙๙๐	๓๕.๒๖๕	๗๒.๗๙๙	๑๐๖.๔๑๕	๔๐๖.๖๘๘
๓	๙.๒๘๙	๒๓.๒๗๙	๓๕.๘๙๘	๑๐๘.๖๙๗	๑๓๖.๔๒๗	๕๔๓.๑๑๕
๔	๙.๒๘๔	๓๒.๕๖๓	๓๕.๙๐๘	๑๔๔.๖๐๕	๑๓๕.๕๑๖	๖๗๘.๖๓๑
๕	๙.๒๘๓	๔๑.๘๔๖	๓๖.๐๐๗	๑๘๐.๖๑๒	๑๓๔.๙๖๑	๘๑๓.๕๙๒
๖	๙.๒๙๒	๕๑.๑๓๘	๓๖.๐๖๘	๒๑๖.๖๘๐	๑๓๔.๕๙๘	๙๔๘.๑๙๐
๗	๙.๒๘๒	๖๐.๔๒๐	๓๖.๑๒๓	๒๕๒.๘๐๓	๑๓๔.๓๗๕	๑๐๘๒.๕๖๕
๘	๙.๒๘๒	๖๙.๗๐๒	๓๖.๑๐๙	๒๘๘.๙๑๒	๑๓๔.๒๓๙	๑๒๑๖.๘๐๔
๙	๙.๒๙๒	๗๘.๙๙๔	๓๖.๑๘๔	๓๒๕.๐๙๖	๑๓๔.๑๕๔	๑๓๕๐.๙๕๘
๑๐	๙.๒๙๐	๘๘.๒๘๔	๓๖.๑๕๒	๓๖๑.๒๔๘	๑๓๔.๑๐๐	๑๔๘๕.๐๕๘
๑๑	๙.๒๘๒	๙๗.๕๖๖	๓๖.๒๐๕	๓๙๗.๔๕๓	๑๔๓.๐๖๖	๑๖๑๙.๑๒๔
๑๒	๙.๒๘๒	๑๐๖.๘๔๘	๓๖.๑๘๗	๔๓๓.๖๔๐	๑๓๕.๕๕๗	๑๗๕๔.๖๘๑
๑๓	๙.๒๙๒	๑๑๖.๑๔๐	๓๖.๑๖๑	๔๖๙.๘๐๑	๑๓๔.๐๔๗	๑๘๘๘.๗๒๘
๑๔	๙.๒๙๐	๑๒๕.๔๓๐	๓๖.๑๕๕	๕๐๕.๙๕๖	๑๓๔.๐๐๖	๒๐๒๒.๗๓๔
๑๕	๙.๒๘๒	๑๓๔.๗๑๒	๓๖.๒๐๘	๕๔๒.๑๖๔	๑๓๓.๙๙๗	๒๑๕๖.๗๓๑
๑๖	๙.๒๘๒	๑๔๓.๙๙๔	๓๖.๑๔๙	๕๗๘.๓๑๓	๑๓๕.๓๔๒	๒๒๙๒.๐๗๓
๑๗	๙.๒๙๒	๑๕๓.๒๘๖	๓๖.๑๖๑	๖๑๔.๔๗๔	๑๓๔.๐๓๕	๒๔๒๖.๑๐๘
๑๘	๙.๒๙๐	๑๖๒.๕๗๖	๓๖.๑๖๔	๖๕๐.๖๓๘	๑๓๕.๔๕๘	๒๕๖๑.๕๖๖
๑๙	๙.๒๘๒	๑๗๑.๘๕๘	๓๖.๑๗๖	๖๘๖.๘๑๔	๑๓๔.๗๗๑	๒๖๙๖.๓๓๗
๒๐			๓๖.๑๓๘	๗๒๒.๙๕๒	๑๓๔.๘๓๗	๒๘๓๑.๑๗๔

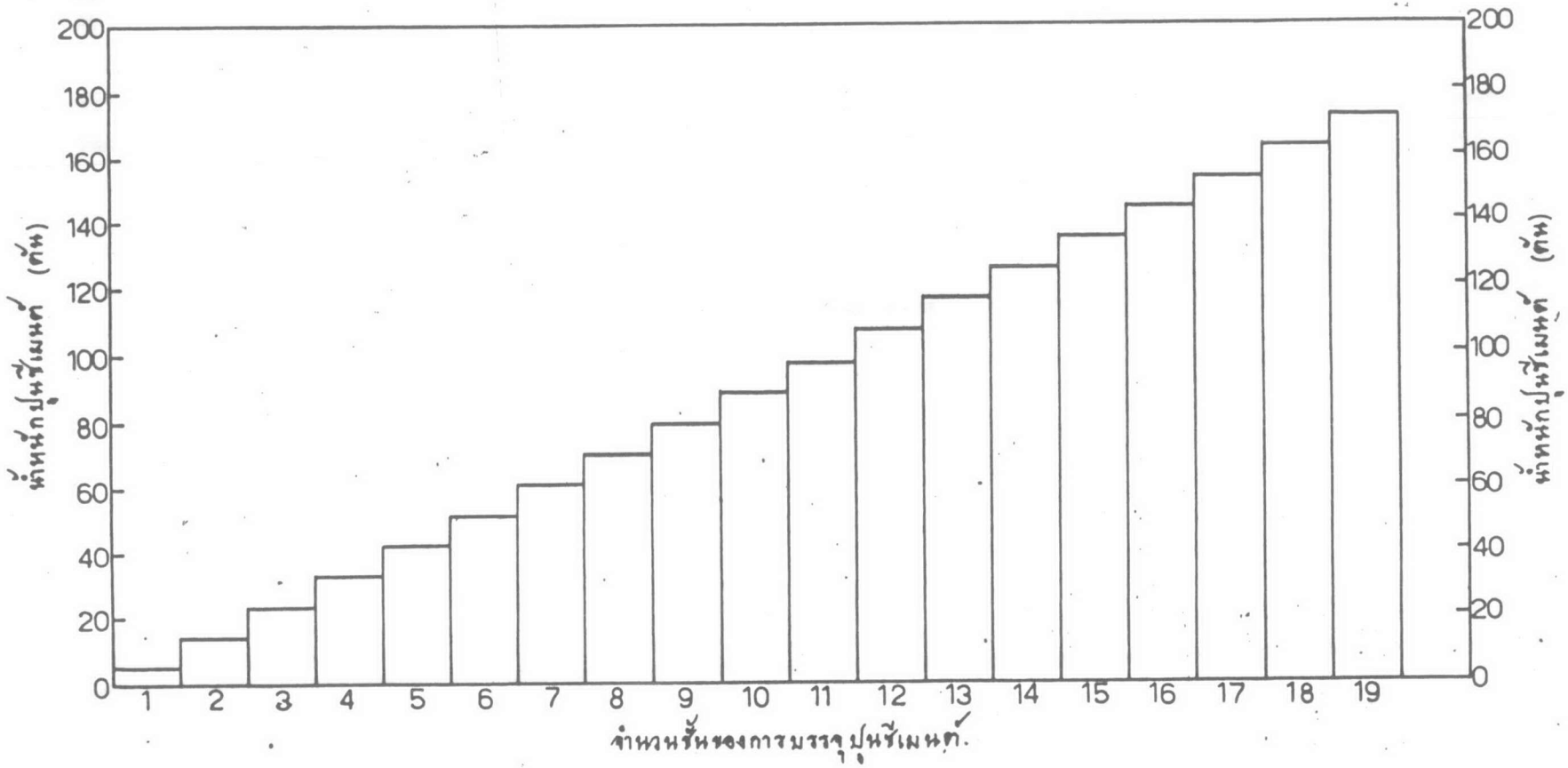
ถ้าการทรุดตัวของปูนซีเมนต์ในชั้นเดิมไม่สม่ำเสมอก็จะทำให้ความสูงของชั้นที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่เท่ากันตลอดทั้งชั้น ดังแสดงในรูปที่ ๕.๓ รูปที่ ๕.๔, ๕.๕ และ ๕.๖ แสดงลำดับน้ำหนักของปูนซีเมนต์เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์ถึงชั้นต่าง ๆ ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ

รูปที่ ๕.๗, ๕.๘ และ ๕.๙ แสดงการทรุดตัวของปูนซีเมนต์ครั้งสุดท้ายของแต่ละชั้นของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ ระดับของปูนซีเมนต์ทางด้านซ้ายของศูนย์กลางไซโลเป็นระดับแต่ละชั้นของปูนซีเมนต์ซึ่งยังไม่มีการทรุดตัว ส่วนทางด้านขวาของศูนย์กลางไซโลเป็นระดับแต่ละชั้นของปูนซีเมนต์ที่ทรุดตัวแล้วเมื่อได้บรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย เราจะเห็นได้ว่าการทรุดตัวของปูนซีเมนต์ที่จุดศูนย์กลางมีมากกว่าจุดอื่นที่ห่างออกไป และที่จุดสัมผัสกับผนังไซโลจะมีการทรุดตัวน้อยที่สุดเพราะแรงฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และผนังไซโล ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของไซโลทำให้น้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นในไซโลแต่ละขนาดแตกต่างกันมาก ดังนั้นการทรุดตัวของปูนซีเมนต์สำหรับไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตรจึงมากกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร และไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตรก็จะมีการทรุดตัวของปูนซีเมนต์มากกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร

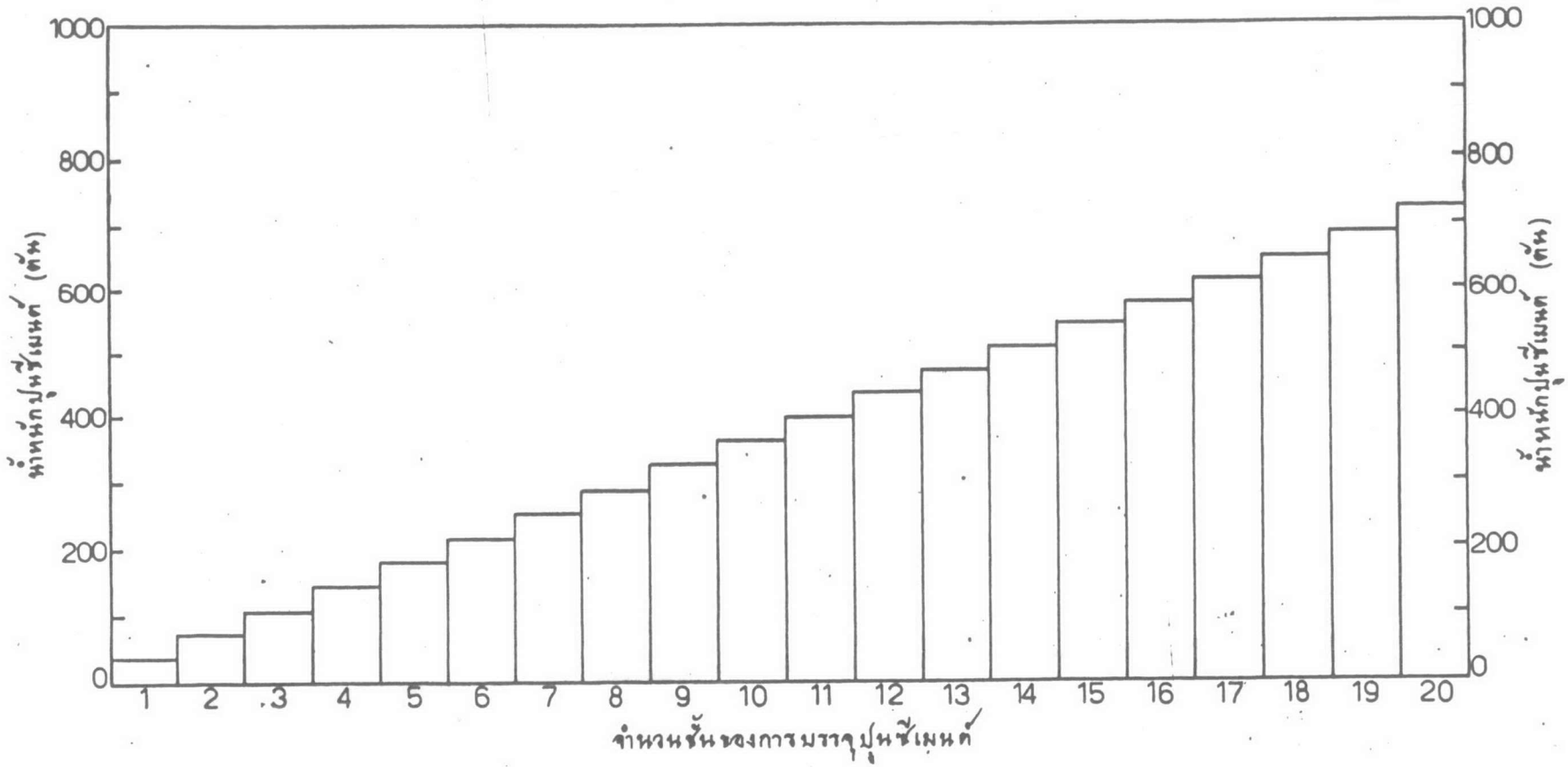
รูปที่ ๕.๑๐,๕.๑๑ และ ๕.๑๒ แสดงการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ และได้แสดงหน่วยแรงดันด้านข้างทุกครั้งของการบรรจุปูนซีเมนต์ เส้นที่ใช้แสดงหน่วยแรงดันด้านข้างนั้นประกอบด้วยเส้นประและเส้นทึบ ช่วงของเส้นประมีความหมายว่าในช่วงนั้นปูนซีเมนต์มีการลื่นไถล ส่วนเส้นทึบหมายถึงปูนซีเมนต์ไม่มีการลื่นไถลซึ่งเป็นผลของความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และผนังไซโล เราจะเห็นได้ว่าการลื่นไถลของปูนซีเมนต์ทำให้หน่วยแรงดันด้านข้างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่ระดับใกล้กับพื้นไซโลจะลดลงอย่างรวดเร็วและจะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่พื้นไซโล ทั้งนี้เนื่องมาจากการวิเคราะห์ซึ่งเราได้สมมุติให้มวลของปูนซีเมนต์มีสภาพยึดแน่นกับพื้นไซโล การกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ตามความสูงของไซโลนั้นในบางช่วงกลับมีค่าลดลง (รูปที่ ๕.๑๒) สาเหตุที่ทำให้หน่วยแรงดันด้านข้างลดลงนั้นอาจจะอธิบายได้ว่า มวลของปูนซีเมนต์ที่สัมผัสกับผนังของไซโลมีรอยแยกเกิดขึ้น (อันเป็นผลของความฝืดระหว่างมวลของปูนซีเมนต์และผนังไซโล) จึงทำให้มวลของปูนซีเมนต์ขาดความต่อเนื่องกัน และที่รอยแยกนี้จะมีค่าหน่วยแรงดันด้านข้างเท่ากับศูนย์



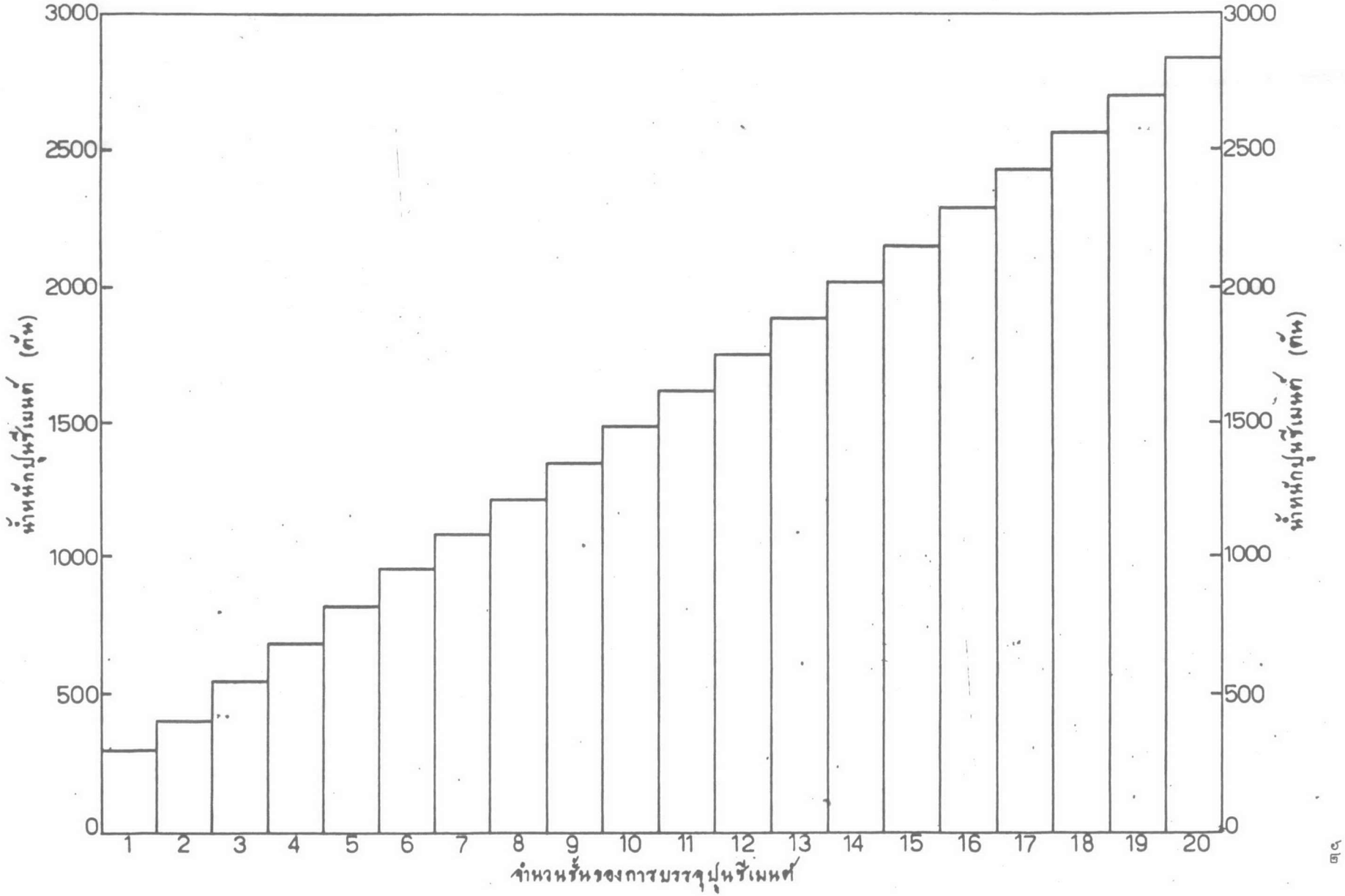
รูปที่ ๕.๓ การบรรจุปูนซีเมนต์ชั้นถัดขึ้นไปที่ใช้ในการวิเคราะห์



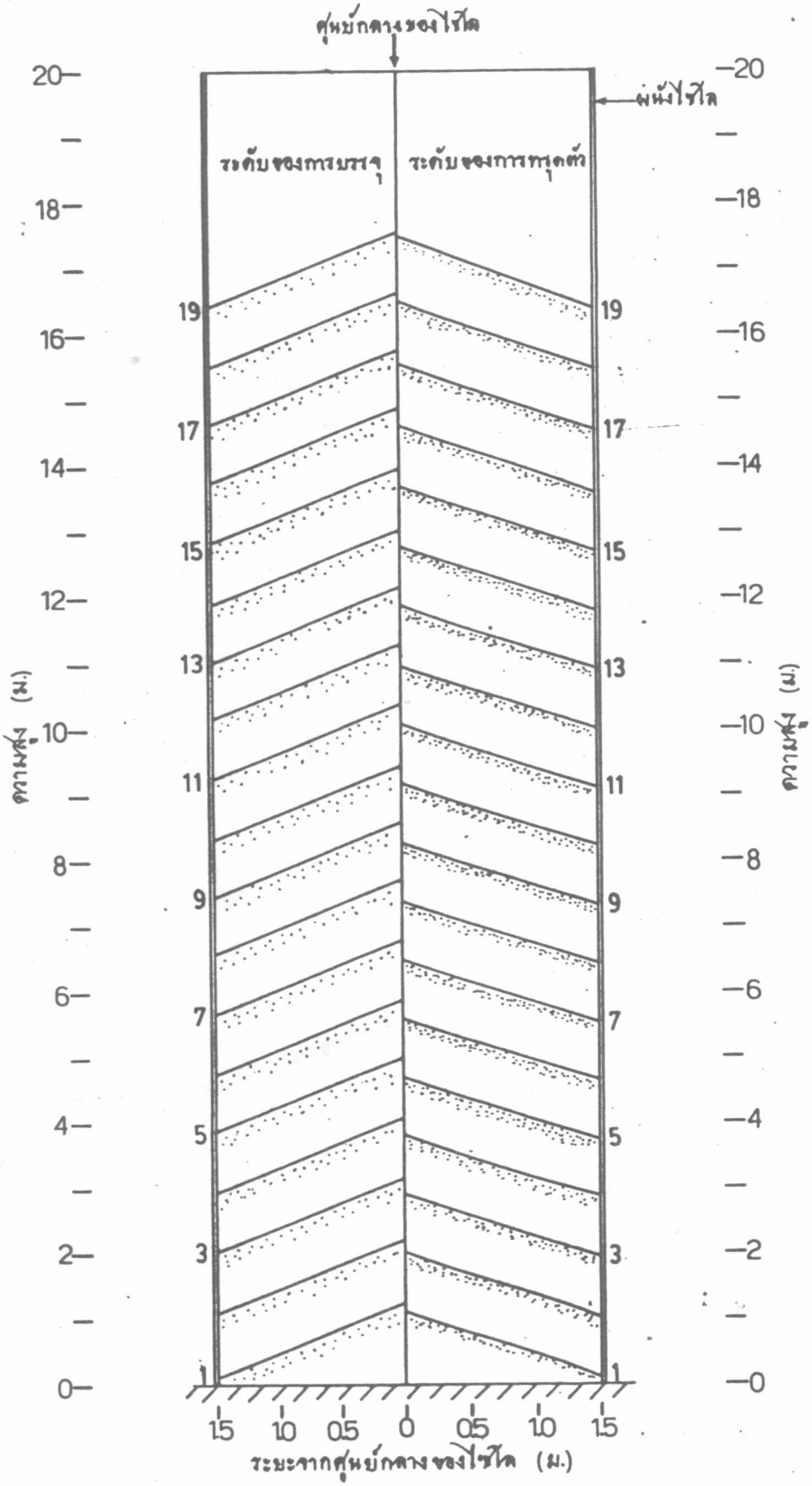
รูปที่ ๕.๔ ลำดับความจุของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร



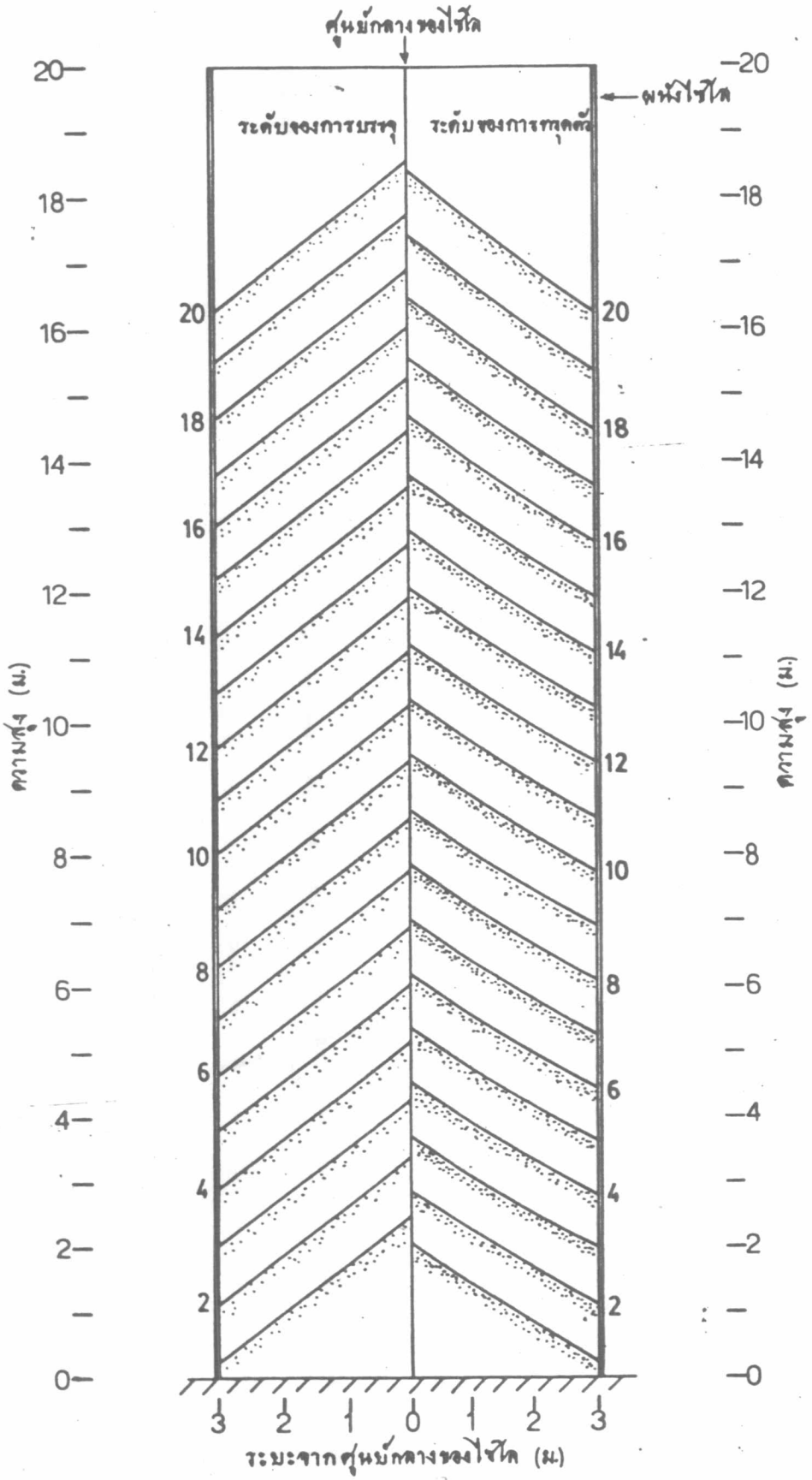
รูปที่ ๕.๕ ลำดับความจุของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร



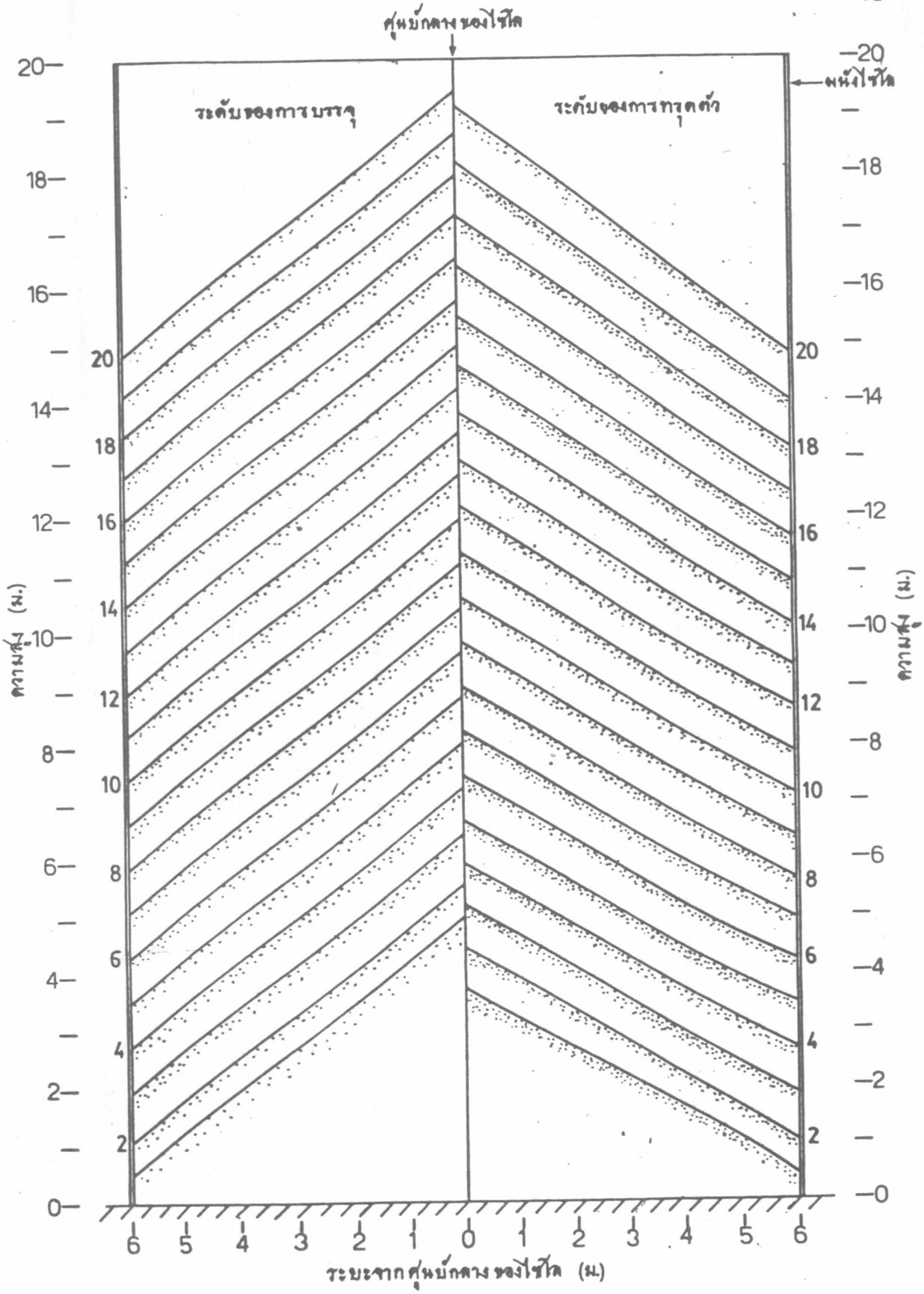
รูปที่ ๕.๖ ลำดับความจุของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร



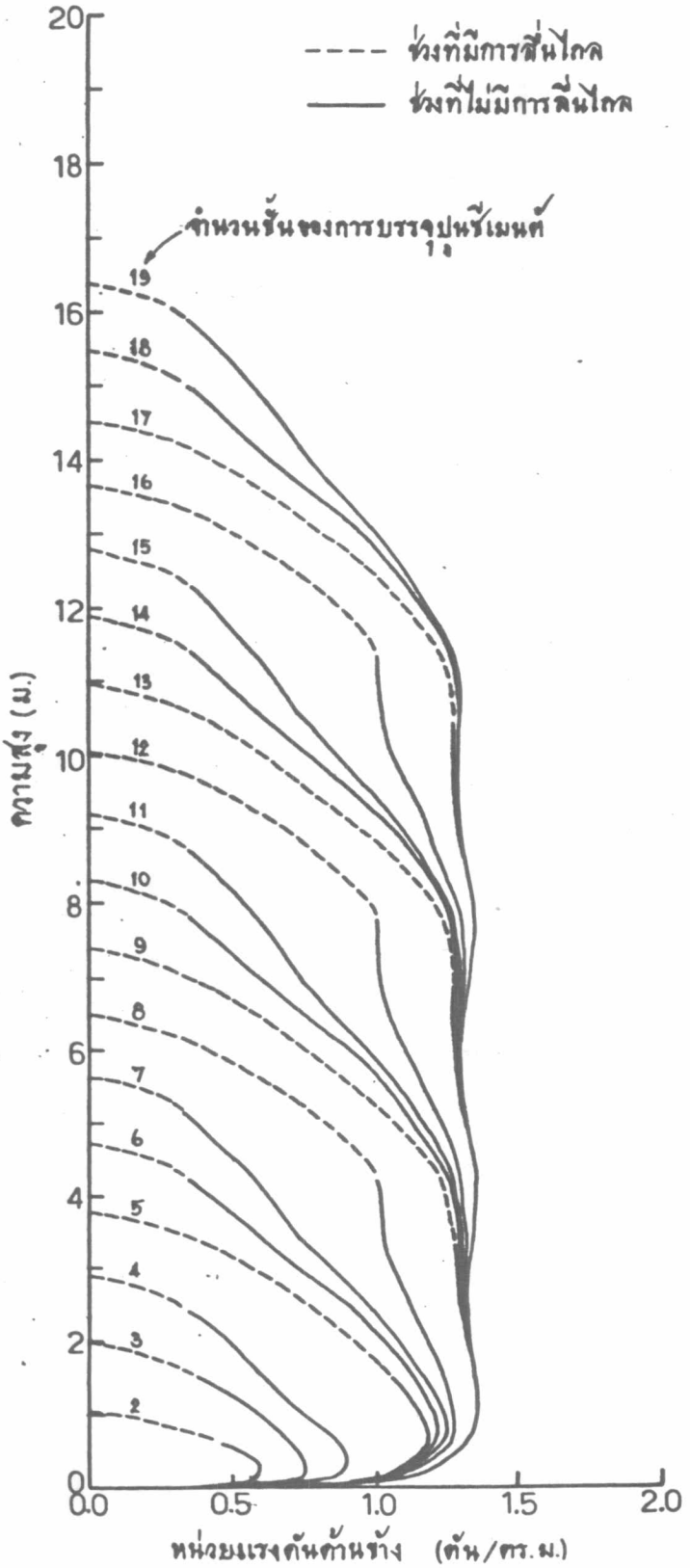
รูปที่ ๔.๗ การทรุดตัวของปูนซีเมนต์ในไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย



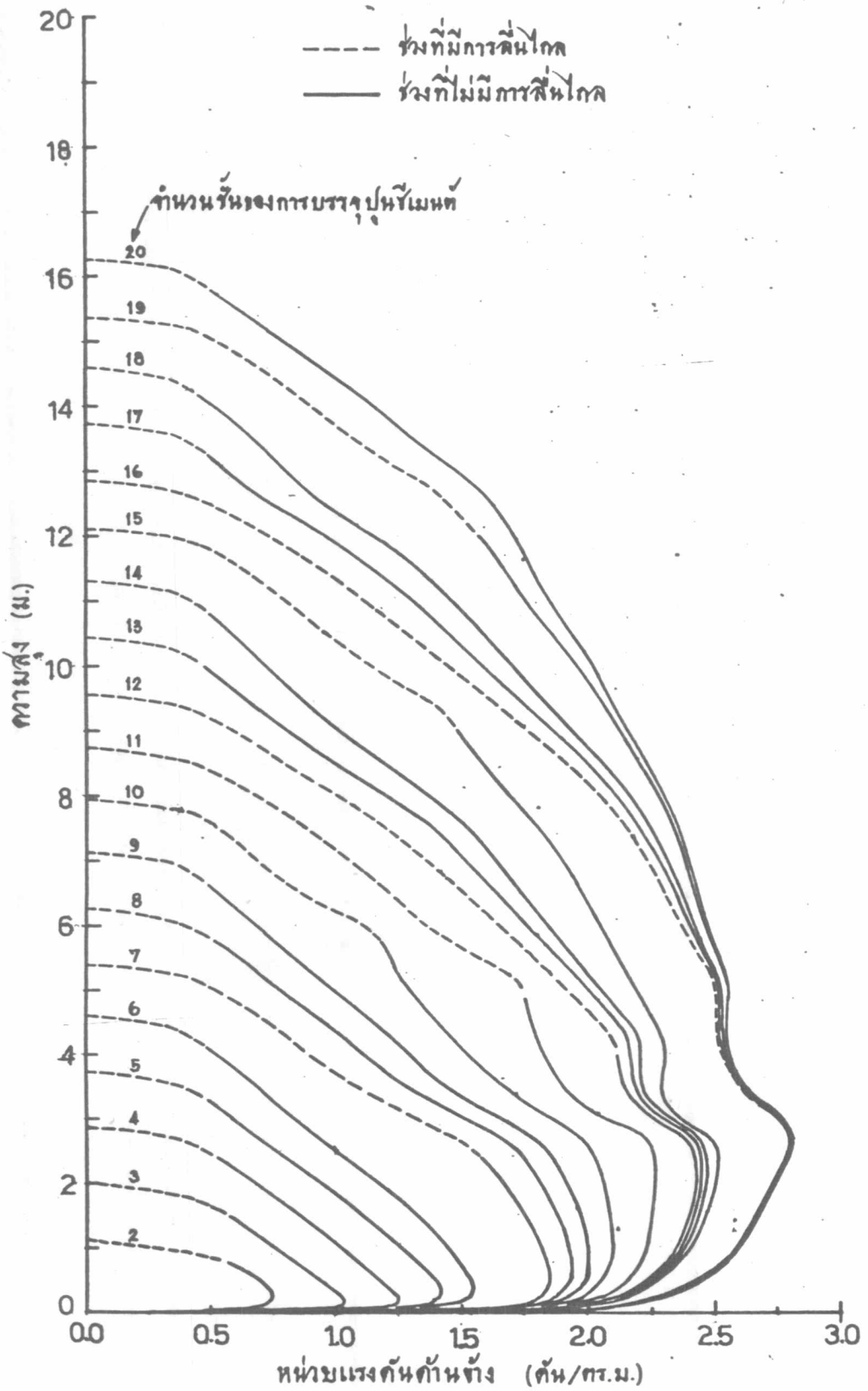
รูปที่ ๕.๘ การทรุดตัวของปูนซีเมนต์ในไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงขั้นสุดท้าย



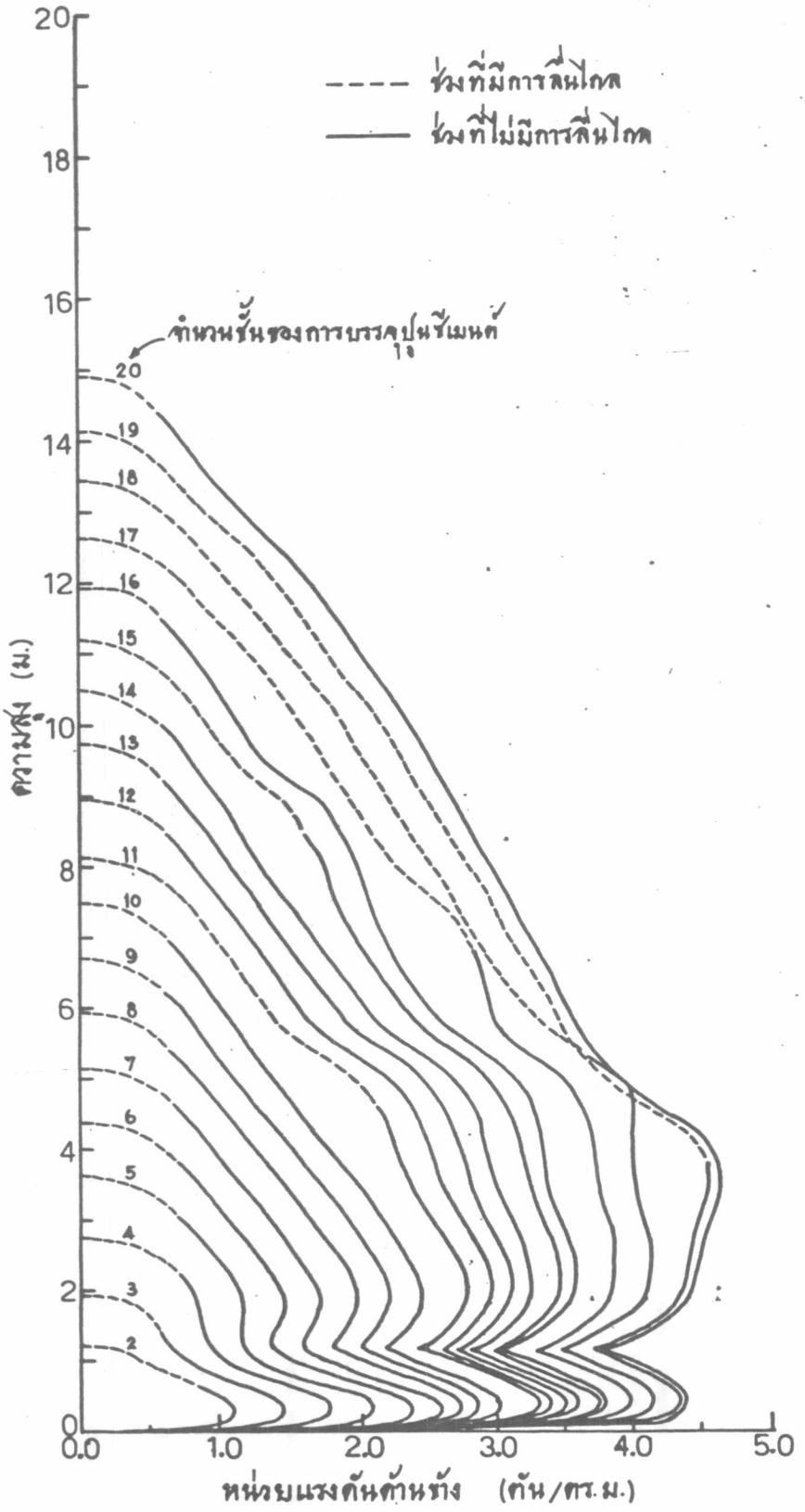
รูปที่ ๕.๙ การทรุดตัวของปูนซีเมนต์ในไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย



รูปที่ ๕.๑๐ ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร



รูปที่ ๔.๑๑ ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร

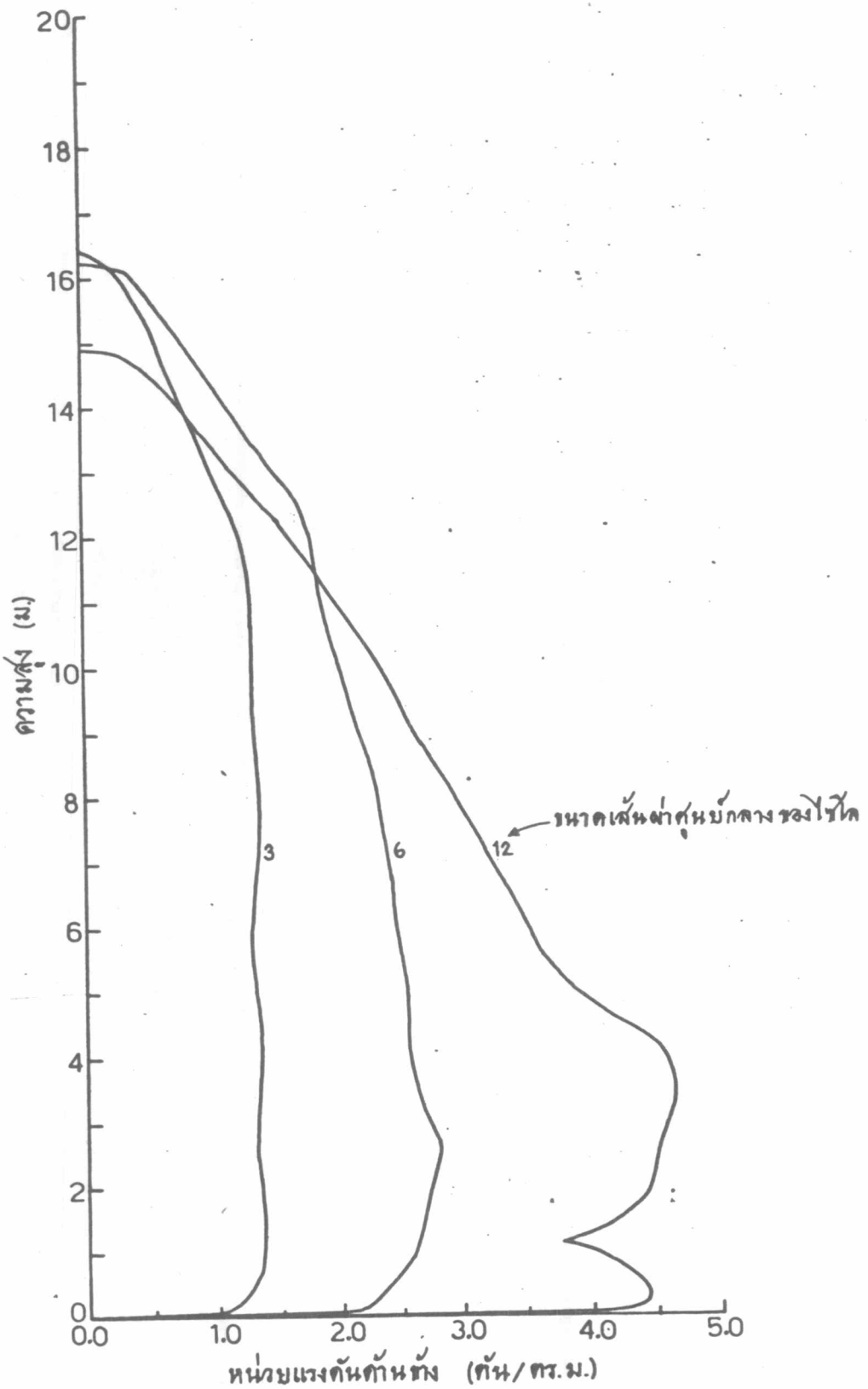


รูปที่ ๕.๑๒ ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไซโลขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร

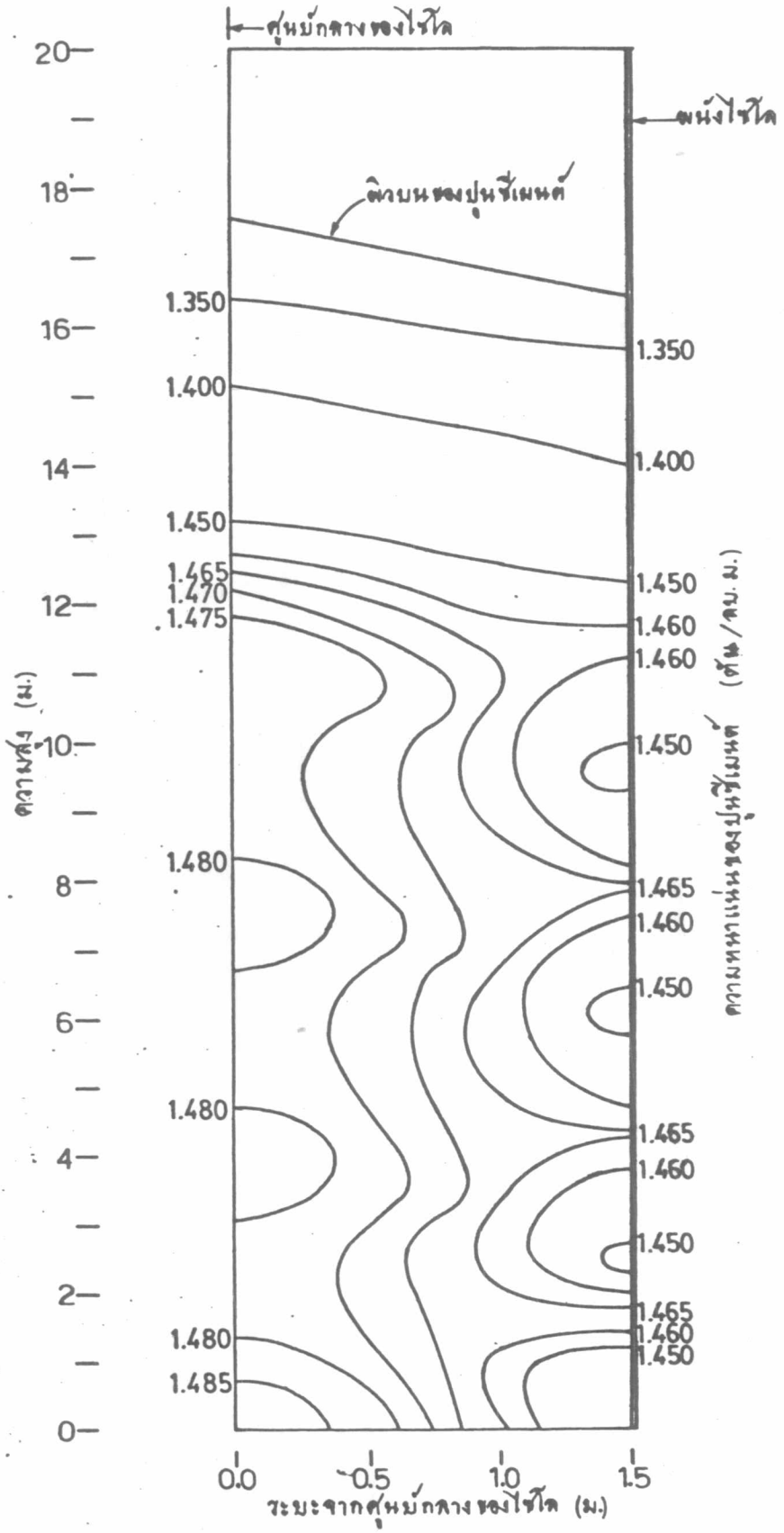
ดังนั้นที่ระดับใกล้กับรอยแยกนี้หน่วยแรงดันด้านข้างจึงมีค่าลดลง ในการวิเคราะห์นั้นเราสมมุติให้มวลของปูนซีเมนต์ทุกเอลเม้นท์มีความต่อเนื่องกันโดยตลอด แต่ผลของการวิเคราะห์ได้ให้แนวโน้มที่อาจจะเกิดรอยแยกขึ้นระหว่างเอลเม้นท์ของปูนซีเมนต์

รูปที่ ๕.๑๓ ได้เปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไซโลทั้ง ๓ ขนาด เมื่อมีการบรรจุปูนซีเมนต์ครบ ๒๐ ชั้น (ยกเว้นไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตรซึ่งมีการบรรจุปูนซีเมนต์ ๑๙ ชั้น) ไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตรจะมีหน่วยแรงดันด้านข้างมากที่สุด ๑.๓๖ ตันต่อตารางเมตรที่ความสูง ๔.๓ เมตรจากพื้น ไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตรจะมีหน่วยแรงดันด้านข้างมากที่สุด ๒.๔๑ ตันต่อตารางเมตรที่ความสูง ๒.๖ เมตรจากพื้น และไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตรจะมีหน่วยแรงดันด้านข้างมากที่สุด ๔.๖๓ ตันต่อตารางเมตรที่ความสูง ๓.๔ เมตรจากพื้น เราจะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของไซโลมีผลต่อการเพิ่มหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์

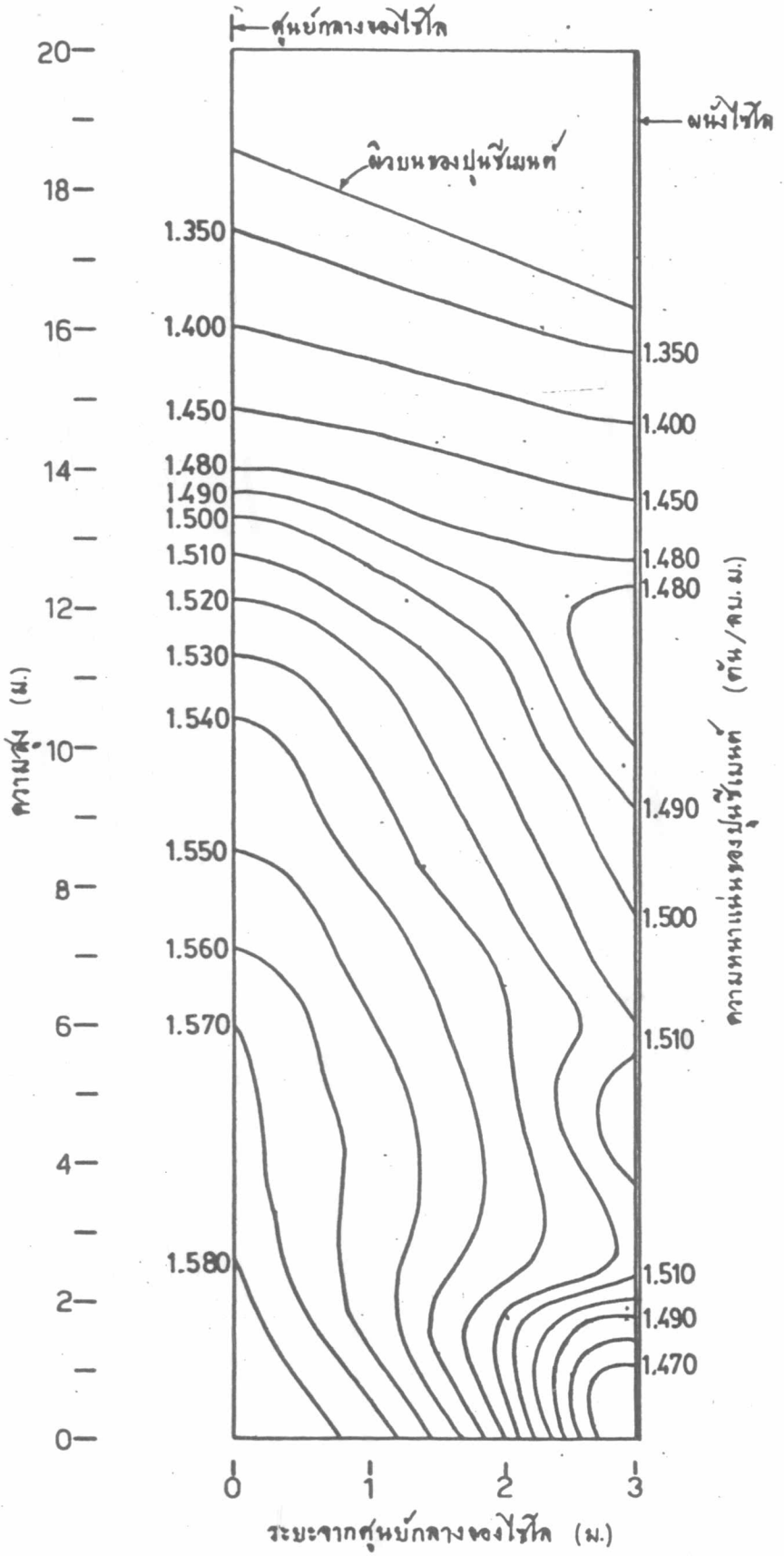
รูปที่ ๕.๑๔, ๕.๑๕ และ ๕.๑๖ แสดงคอนทัวร์ระดับความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ เมื่อมีการบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้ายในการวิเคราะห์กำหนดให้ปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นเริ่มต้นเฉลี่ย ๑.๓๓๗ ตันต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งได้จากผลการทดลอง การทรุดตัวของปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์โดยทั่วไปมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตรปูนซีเมนต์จะมีความหนาแน่นมากที่สุด ๑.๔๘๕ ตันต่อลูกบาศก์เมตรและมีความหนาแน่นเฉลี่ย ๑.๔๕ ตันต่อลูกบาศก์เมตร ไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร ปูนซีเมนต์จะมีความหนาแน่นมากที่สุด ๑.๕๘๐ ตันต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนาแน่นเฉลี่ย ๑.๕๐ ตันต่อลูกบาศก์เมตร ไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร ปูนซีเมนต์จะมีความหนาแน่นมากที่สุด ๑.๗๐๐ ตันต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนาแน่นเฉลี่ย ๑.๕๒ ตันต่อลูกบาศก์เมตร แสดงว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของไซโลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ ลักษณะของคอนทัวร์ระดับความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ซึ่งได้จากผลของการวิเคราะห์นี้ เราจะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ที่บริเวณมุมระหว่างพื้นและผนังไซโลมีความหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณศูนย์กลางของไซโล ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเงื่อนไขสภาพพื้นผิวและอิทธิพลของความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และผนังไซโล เมื่อนำลักษณะคอนทัวร์ระดับความหนาแน่นไปเปรียบเทียบกับการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์จะเห็นว่าบริเวณที่ปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นลดลงก็จะทำให้หน่วยแรงดันด้านข้างลดลงด้วยเช่นกัน



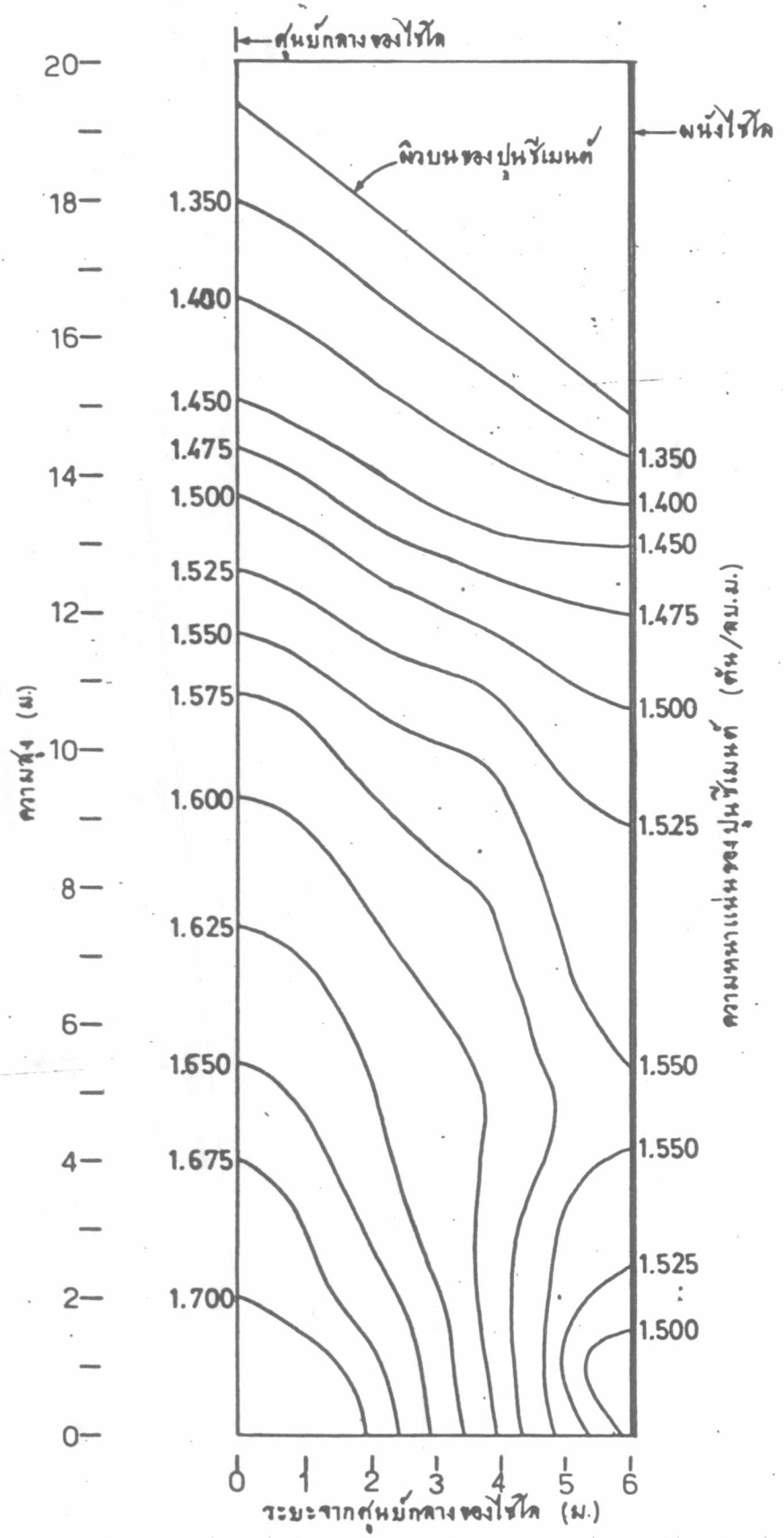
รูปที่ ๕.๑๓ การเปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย



รูปที่ ๕.๑๔ คอนทัวร์ระดับความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย



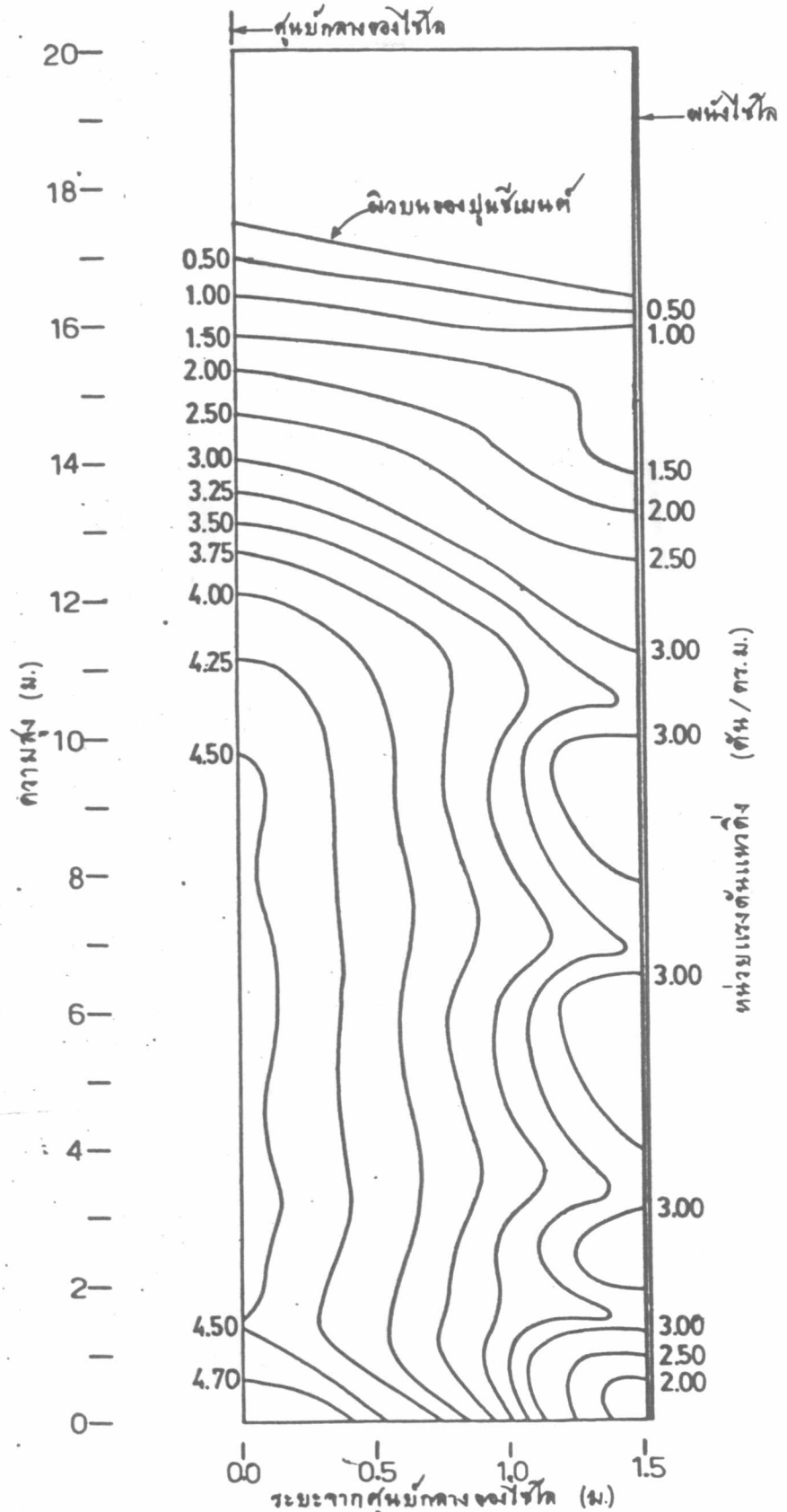
รูปที่ ๕.๑๔ คอนทัวร์ระดับความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงขั้นสุดท้าย



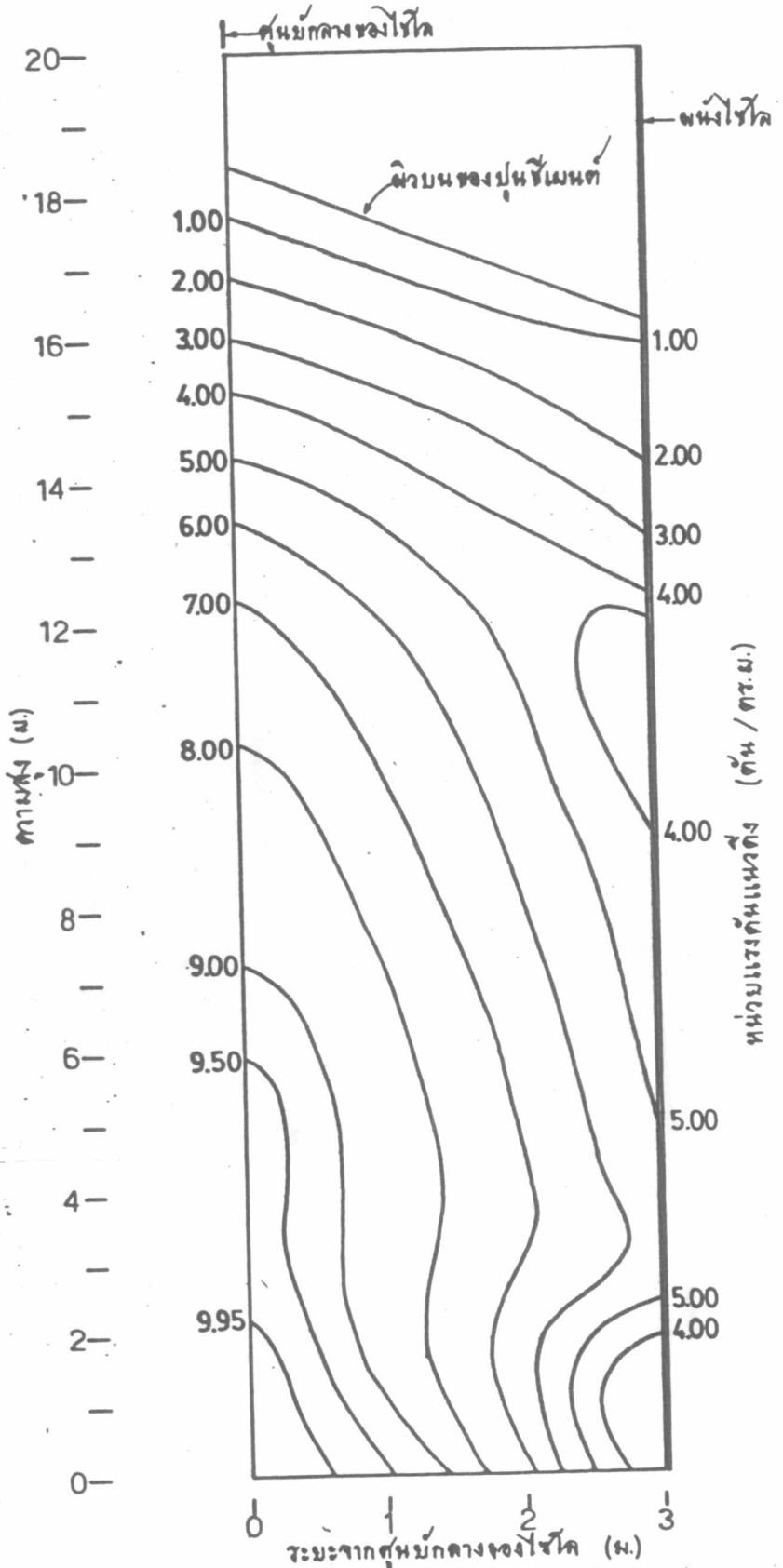
รูปที่ ๕.๑๖ คอนทัวร์ระดับความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย

รูปที่ ๕.๑๗, ๕.๑๘ และ ๕.๑๙ แสดงคอนทัวร์ระดับหน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ เมื่อมีการบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย คอนทัวร์ระดับหน่วยแรงดันแนวดิ่งจะมีลักษณะแบบเดียวกับคอนทัวร์ระดับความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นลดลงก็จะทำให้หน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ลดลงด้วยเช่นกัน ไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรมีคอนทัวร์ระดับหน่วยแรงดันแนวดิ่งมากที่สุดเท่ากับ ๔.๗, ๙.๔๕ และ ๑๙.๕ ตันต่อตารางเมตรตามลำดับ

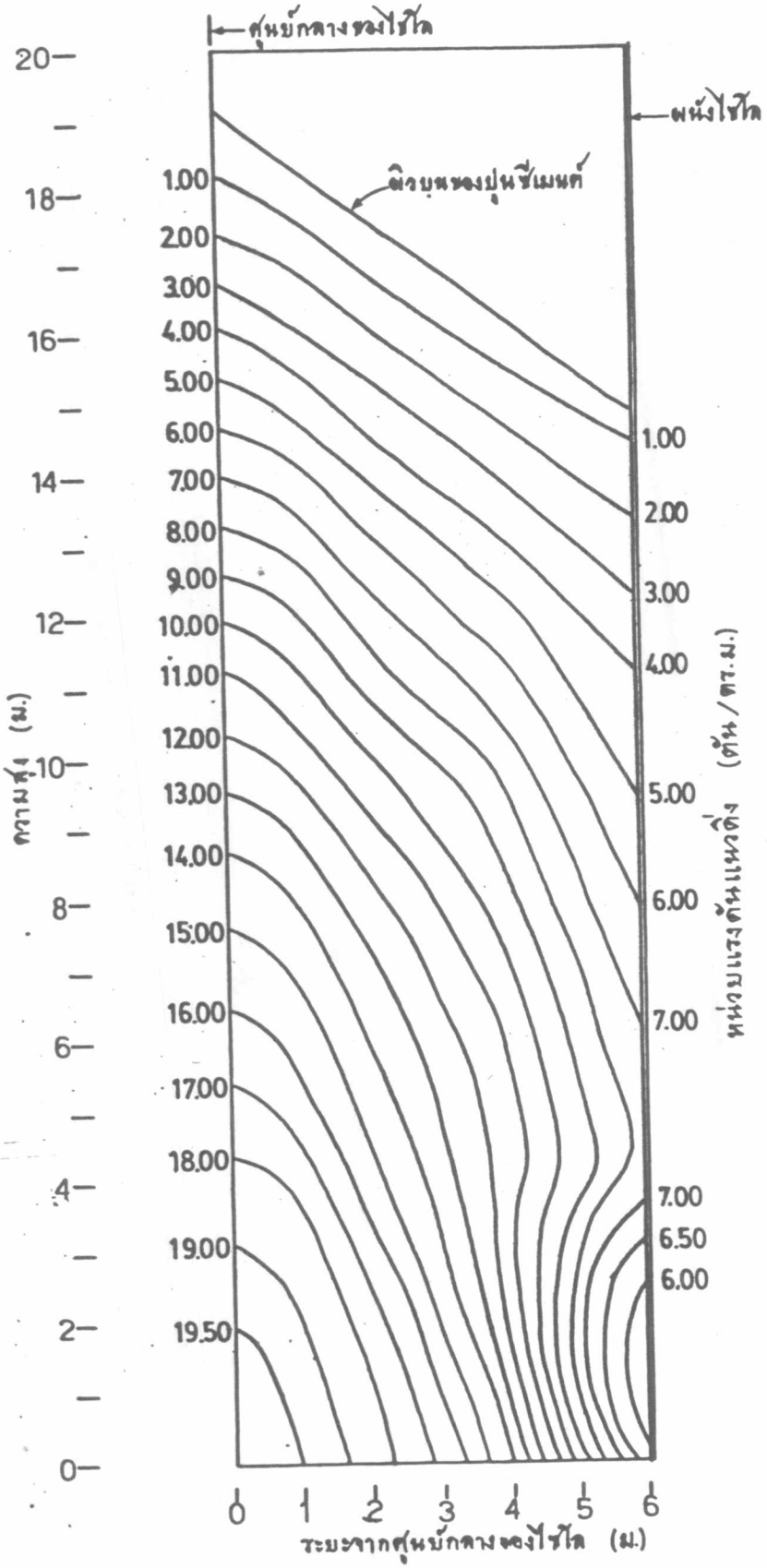
รูปที่ ๕.๒๐, ๕.๒๑ และ ๕.๒๒ แสดงหน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อพื้นล่างของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ โดยที่แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มของหน่วยแรงดันแนวดิ่งเมื่อมีการบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นต่าง ๆ ที่จุดศูนย์กลางของไซโลจะมีหน่วยแรงดันแนวดิ่งมากกว่าจุดที่อยู่ใกล้กับผนังไซโลเพราะการทรุดตัวของปูนซีเมนต์ที่จุดศูนย์กลางมีมากกว่าจุดที่อยู่ใกล้กับผนังไซโล (รูปที่ ๕.๗, ๕.๘ และ ๕.๙) การบรรจุปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นก็ทำให้หน่วยแรงดันแนวดิ่งเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่จุดศูนย์กลางของไซโลจะมีการเพิ่มหน่วยแรงดันแนวดิ่งมากกว่าจุดที่อยู่ใกล้กับผนังไซโล ส่วนอัตราการเพิ่มหน่วยแรงดันแนวดิ่งของการบรรจุปูนซีเมนต์ในแต่ละชั้นนั้นจะค่อย ๆ ลดลง ยกเว้นสำหรับบางชั้นเท่านั้นที่อัตราการเพิ่มของหน่วยแรงดันแนวดิ่งกลับเพิ่มมากขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากการลื่นไถลของปูนซีเมนต์ พิจารณารูปที่ ๕.๑๐ และ ๕.๒๐ ซึ่งแสดงหน่วยแรงดันด้านข้างและหน่วยแรงดันแนวดิ่งของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตรตามลำดับ เราจะเห็นได้ว่าเมื่อบรรจุปูนซีเมนต์ถึงชั้นที่ ๕ จะมีการลื่นไถลมากจึงทำให้หน่วยแรงดันด้านข้างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหน่วยแรงดันแนวดิ่งก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์ถึงชั้นที่ ๙ หน่วยแรงดันแนวดิ่งจะเพิ่มขึ้นทีละน้อย ส่วนหน่วยแรงดันด้านข้าง (บริเวณใกล้กับพื้นล่างของไซโล) ก็ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อบรรจุปูนซีเมนต์ต่อไปจนถึงชั้นที่ ๑๙ หน่วยแรงดันแนวดิ่งจะเพิ่มขึ้นเพียง ๐.๒๕ เปอร์เซนต์ (ที่จุดศูนย์กลางของไซโล) และหน่วยแรงดันแนวดิ่งที่จุดศูนย์กลางของไซโลมีค่ามากกว่าที่จุดใกล้กับผนังไซโลถึง ๒๒๕ เปอร์เซนต์ พิจารณารูปที่ ๕.๑๑ และ ๕.๒๑ ซึ่งแสดงหน่วยแรงดันด้านข้างและแนวดิ่งของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตรตามลำดับ เราจะเห็นว่าการลื่นไถลของปูนซีเมนต์จะทำให้หน่วยแรงดันแนวดิ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการบรรจุปูนซีเมนต์ถึงชั้นที่ ๗ และชั้นที่ ๑๖ ส่วนการบรรจุต่อไปจนถึงชั้นที่ ๒๐ นั้นหน่วยแรงดันแนวดิ่งจะเพิ่มขึ้นเพียง ๐.๔ เปอร์เซนต์ (ที่จุดศูนย์กลางของไซโล) และหน่วยแรงดันแนวดิ่งที่จุดศูนย์กลางของไซโลมีค่ามากกว่าที่จุดใกล้กับผนังไซโลถึง



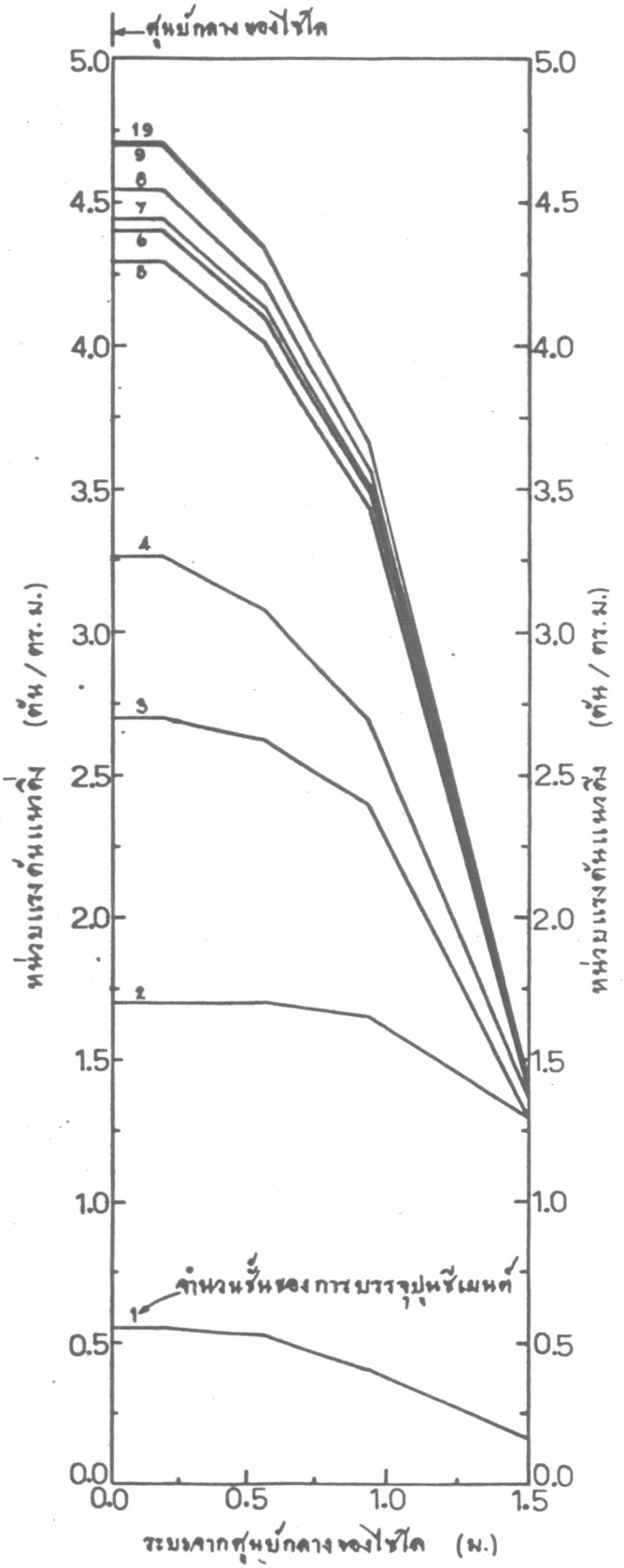
รูปที่ ๕.๑๗ คอนทัวร์ระดับหน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงขั้นสุดท้าย



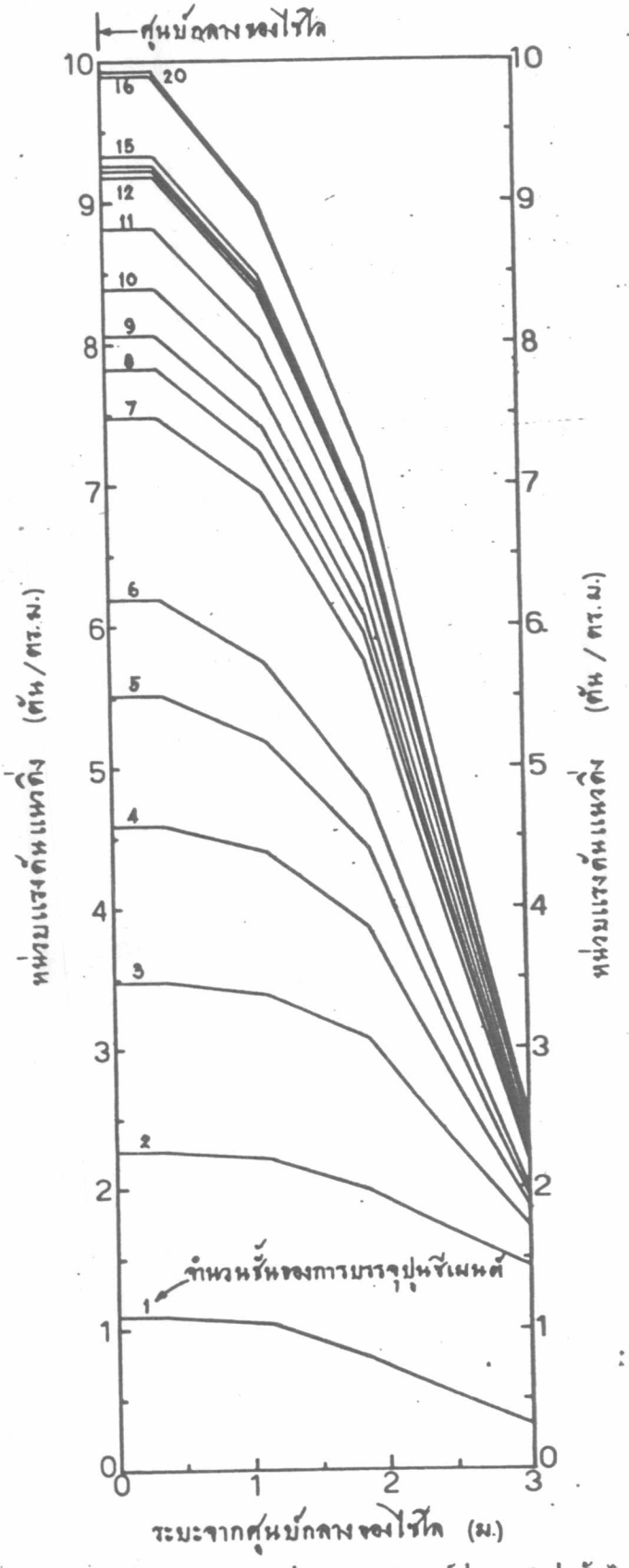
รูปที่ ๕.๑๘ คอนทัวร์ระดับหน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย



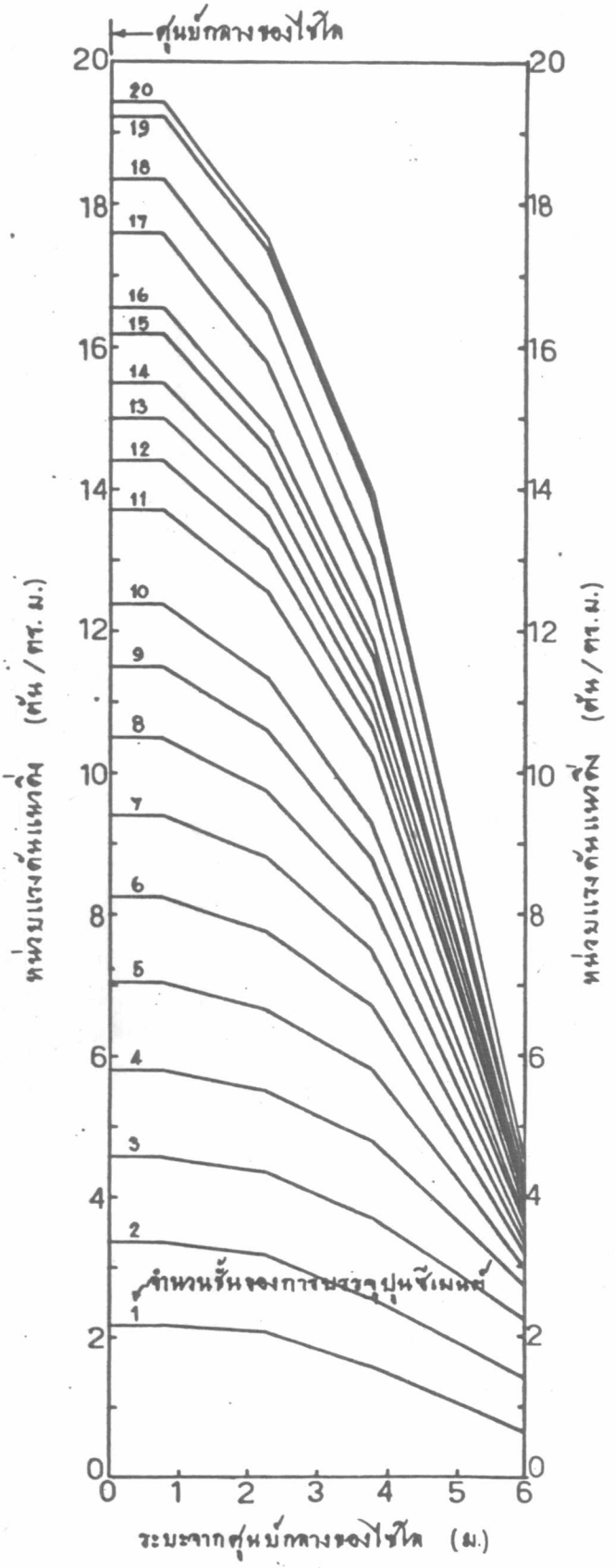
รูปที่ ๕.๑๙ คอนทัวร์ระดับหน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงขั้นสุดท้าย



รูปที่ ๔.๒๐ ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อพื้นไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร



รูปที่ ๕.๒๑ ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อพื้นไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร



รูปที่ ๕.๒๒ ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อฟิ้นไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร

๒๙๐ เปอร์เซนต์ เมื่อพิจารณารูปที่ ๕.๑๒ และ ๕.๒๒ ซึ่งแสดงหน่วยแรงดันด้านข้างและแนวดิ่งของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตรตามลำดับ ก็จะให้ผลในทำนองเดียวกัน และการบรรจุปูนซีเมนต์จนครบ ๒๐ ชั้นทำให้หน่วยแรงดันแนวดิ่งที่จุดศูนย์กลางของไซโลมีค่ามากกว่าที่จุดใกล้กับผนังไซโลถึง ๓๓๐ เปอร์เซนต์