หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษาลักษณะการพองตัวของดินเหนียวที่บดอัดได้ศึกษาถึงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

4.2 การบดอัด

4.3 ความดันพองตัวและการพองตัว

4.4 การทดสอบบรรทุกน้ำหนักเป็นรอบ ๆ (Cyclic Loading Test)

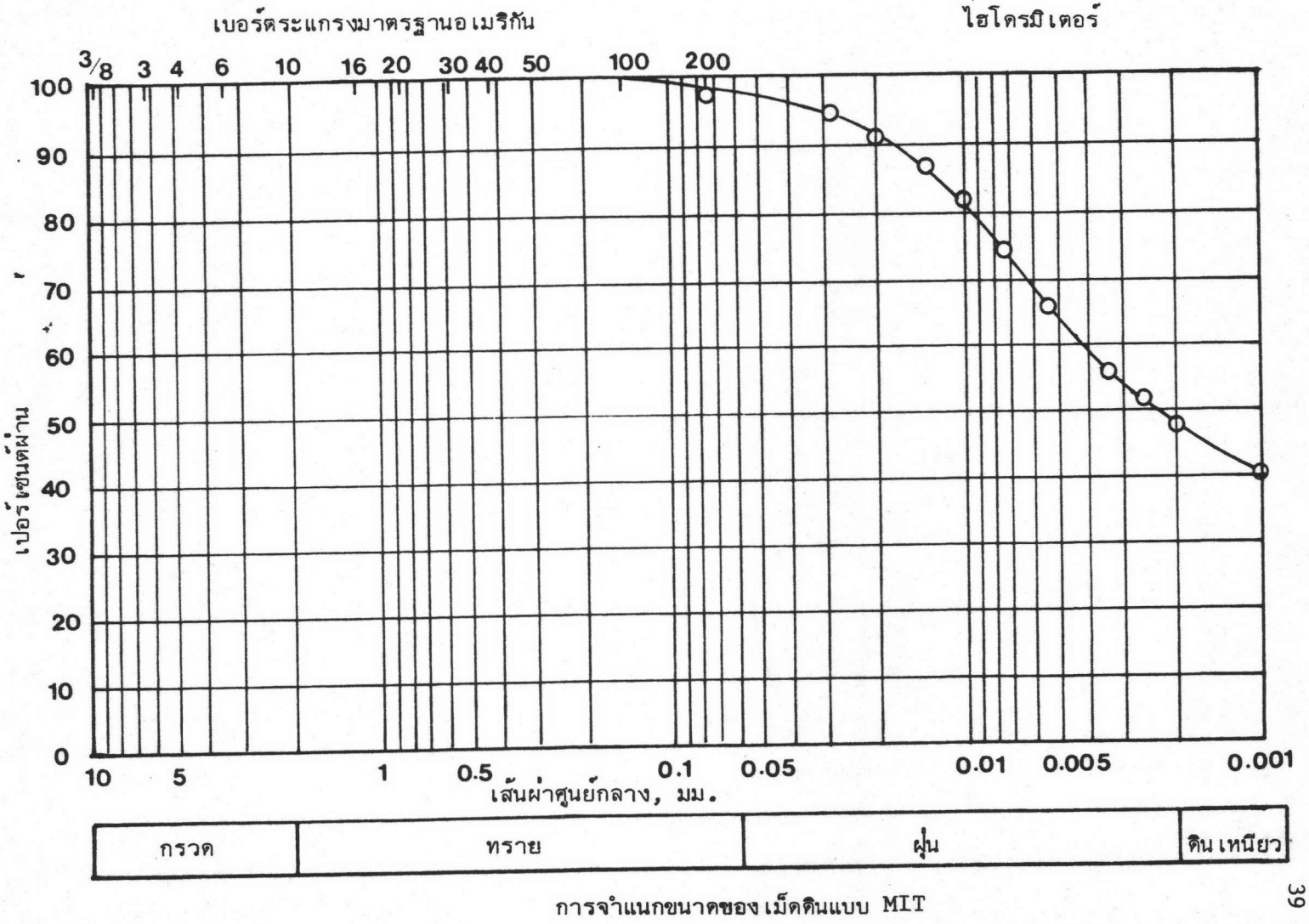
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

ก่อนจะศึกษาเกี่ยวกับการพองตัว ได้ทำการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวอย่างดิน

ความถ่วงจำเพาะ	2.72
Liquid Limit , %	81.8
Plastic Limit , %	38.0
Plasticity Index , %	43.8
Shrinkage Limit , %	17.4
การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน :	
ทราย (sand) , %	2.5
ฝุ่น (silt) , %	49.5
ดินเหนียว (Clay) , %	48.0

ผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ขนาดของตัวอย่างดิน

แร่ดินเหนียวที่สำคัญของดินแถบกรุงเทพฯ และบริเวณใกล้เคียงมีอยู่ 3 ชนิด คือ คาโอลิไนท์ อิลไลท์ และมอนท์โมริลโลไนท์ ซึ่งมอนท์โมริลโลไนท์มีผลต่อการพองตัวของดินมากเมื่อได้รับน้ำ ดังนั้นจึงได้หาปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Differential Thermal Analysis) ซึ่งได้ผลว่าตัวอย่างดินมีปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ประมาณ 15-20 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักดินทั้งหมด รายละเอียดการวิเคราะห์หาปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

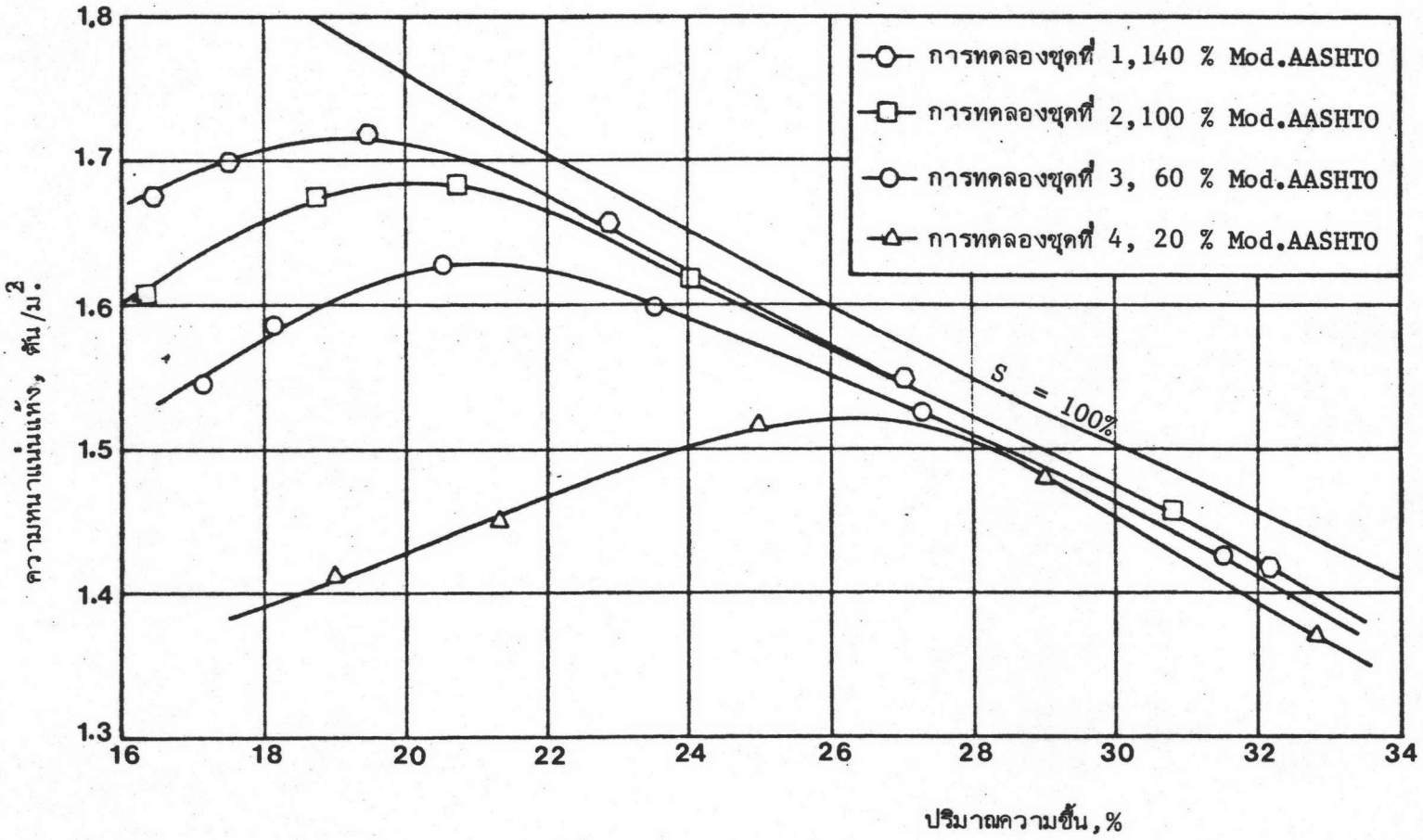
4.2 การบดอัด

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของตัวอย่างดิน เมื่อบดอัดโดยใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ซึ่งพอสรุปผลได้ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปผลของการบดอัด

การทดลองชุดที่	พลังงานที่ใช้บดอัด, % Mod AASHTO	ปริมาณความชื้น, optimum, %	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด, ตัน/ม.^{3}
1	140	19.2	1.72
2	100	20.0	1.69
3	60	21.2	1.63
4	20	26.5	1.52

ในการบดอัดตัวอย่างดิน โดยใช้พลังงานเท่ากัน เมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น ความหนาแน่นแห้งจะสูงขึ้น จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งความหนาแน่นแห้งจะสูงสุด ซึ่งเรียกปริมาณความชื้นนี้ว่า "ปริมาณความชื้น optimum" เมื่อปริมาณความชื้นสูงกว่านี้ ความหนาแน่นแห้งจะลดลงเรื่อย ๆ ที่เป็นเช่นนี้ สามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีเคมี - ฟิสิกส์ ของ LAMBE คือ เมื่อปริมาณความชื้นต่ำ ๆ จะมีน้ำใน double layer น้อย ความเข้มข้นของสารละลายจึงสูง ทำให้แรงดึงดูดระหว่าง particles



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินยดอัดโดยใช้พลังงานที่แตกต่างกัน

มาก เมื่อถูกบดอัด particles จะไม่จัดเรียงตัวกันมากนัก โครงสร้างดินยังคงอยู่กันอย่างระเกะระกะ จึงทำให้ดินมีช่องว่างมากและได้ความหนาแน่นแห้งต่ำ เมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น double layers จะขยายตัว แรงผลักระหว่าง particles จะมากขึ้น แรงดึงดูดจะลดลง เมื่อบดอัดดินจะจัดเรียงตัวกันได้ดีขึ้น ทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงปริมาณความชื้น optimum ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปอีก น้ำส่วนนี้จะไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าในการบดอัดตัวอย่างดิน ทางด้านแห้งของปริมาณความชื้น optimum ถ้าปริมาณความชื้นเท่ากัน เมื่อเพิ่มพลังงานที่ใช้บดอัดให้สูงขึ้น จะได้ความหนาแน่นแห้งสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะทางด้านแห้งของปริมาณความชื้น optimum ดินมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบระเกะระกะ เมื่อเพิ่มพลังงานในการบดอัดจะทำให้ particles ของดินจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากขึ้นและจะเป็นการไล่อากาศออกจากช่องว่างในดิน ทำให้ช่องว่างในดินลดลง ความหนาแน่นจึงสูงขึ้น

สำหรับดินที่บดอัดเกินปริมาณความชื้น optimum ถึงแม้จะเพิ่มพลังงานในการบดอัดอีก ก็มีส่วนเพิ่มความหนาแน่นแห้งน้อยมาก ทั้งนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Theory) ของ OLSON คือ ที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ ความดันในช่องว่าง (pore pressure) จะสูง ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินต่ำ เวลาบดอัดแทนที่การเพิ่มพลังงานจะไปเพิ่มความหนาแน่นของดิน แต่กลับไปทำให้เกิดการยุบตัวของดินมากกว่า ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับฐานรากตื้น (shallow foundation) ถ้าตุ้มจมลงไปในดินที่บดอัดลึก ดินนั้นก็จะสามารถต้านกับความดันที่ปลายตุ้ม (foot pressure) ได้ ดังนั้นพลังงานที่เพิ่มเข้าไป จึงทำให้เกิดการยุบตัวมากในการกระแทกแต่ละครั้ง แต่จะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นน้อยมาก

นอกจากนี้ยังได้ศึกษา California Bearing Ratio (CBR) ของดินซึ่งบดอัดโดยใช้พลังงานเท่ากับ Modified AASHTO ที่ปริมาณความชื้น optimum ทั้งแช่น้ำและไม่แช่น้ำ ผลปรากฏว่าได้ CBR ที่ไม่แช่น้ำเท่ากับ 32.1 และเมื่อแช่น้ำ CBR จะลดลงเหลือ 3.2 เท่านั้น

4.3 การพองตัวและความดันพองตัว

ในการศึกษาการพองตัวของดินเหนียวบดอัด จะขอกล่าวเป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

4.3.1 ความดันพองตัว

ในการศึกษาเกี่ยวกับความดันพองตัวนั้น มีหลักการอยู่ว่า ต้องหาน้ำหนักบรรทุกมากดทับเพื่อมิให้ตัวอย่างดินพองตัวออก เมื่อแช่น้ำความดันที่ใช้กดให้ดินมีปริมาตรคงที่ตลอดเวลานี้เรียกว่า "ความดันพองตัว"

หลังจากเติมน้ำให้ท่วมตัวอย่างดิน ความดันพองตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก ๆ และจะช้าลง ๆ จนได้ความดันพองตัวสูงสุด ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 16:9 เปอร์เซนต์ จนถึง 32.0 เปอร์เซนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันพองตัวและเวลาได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข คือ รูปที่ ข.1, ข.2, ข.3, ข.4, ข.5, ข.6,ข.7,และ ข.8

ตัวอย่างดินที่บดอัดทางด้านแห้งของปริมาณความชื้น optimum ถ้าใช้พลังงานสูง ๆ จะได้ความดันพองตัวสูงสุดช้ากว่าการใช้พลังงานต่ำ ๆ เช่น รูปที่ ข.1 ซึ่งเป็นการบดอัดตัวอย่างดินที่ปริมาณความชื้น 16.9 เปอร์เซนต์ ถ้าใช้พลังงาน 140 เปอร์เซนต์ของ Modified AASHTO (SP-11) จะได้ความดันพองตัวสูงสุดในเวลาประมาณ 300 นาที แต่ถ้าใช้พลังงานเท่ากับ 20 เปอร์เซนต์ ของ Modified AASHTO (SP-41) ได้ความดันพองตัวสูงสุดในเวลาประมาณ 30 นาที ทั้งนี้เพราะดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานสูงจะได้ความหนาแน่นแห้งสูงกว่า และมีช่องว่างน้อยกว่า น้ำจึงซึมผ่านเข้าไปถึงแต่ละ particles ของดินได้ช้ากว่า ตัวอย่างดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานต่ำ ดังนั้นจึงได้ความดันพองตัวสูงสุดช้ากว่า

ส่วนดินที่บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้น optimum เช่น รูปที่ ข.8 ซึ่งตัวอย่างดินบดอัดที่ปริมาณความชื้น 32.0 เปอร์เซนต์ เมื่อใช้พลังงานที่แตกต่างกันในการบดอัด ก็จะได้ความดันพองตัวที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนเวลาที่ได้ความดันพองตัวสูงสุดก็ไม่ค่อยแน่นอน

ตารางที่ ค.1 เป็นการสรุปผลการทดสอบเกี่ยวกับความดันพองตัวของ ตารางที่ 3.3

4.3.2 การพองตัว

ศึกษาโดยปล่อยให้ดินที่บดอัดแล้วพองตัวขึ้นในแนวดิ่ง โดยมีน้ำหนักบรรทุก 0.6 ตันต่อตารางเมตรกดทับอยู่ ซึ่งแทนน้ำหนักของพื้นหรือถนนที่อยู่บนดินที่บดอัดนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างการพองตัวและเวลาได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข คือ รูปที่ ข.9, ข.10 และ ข.11 และได้สรุปผลการทดลองเกี่ยวกับการพองตัวไว้ในตารางที่ ค.3

4.3.3 ผลของปริมาณความชื้นที่มีต่อความดันพองตัวและการพองตัว

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่าความดันพองตัวและการพองตัวของตัวอย่างดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานเท่ากัน จะไม่ขึ้นกับความหนาแน่นแห้ง แต่จะขึ้นกับปริมาณความชื้น คือเมื่อปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้น optimum ความดันพองตัวและการพองตัวจะสูง และเมื่อปริมาณความชื้นสูงเกินปริมาณความชื้น optimum ความดันพองตัวจะลดต่ำลงมาก ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นจากสาเหตุที่สำคัญ 3 ประการคือ

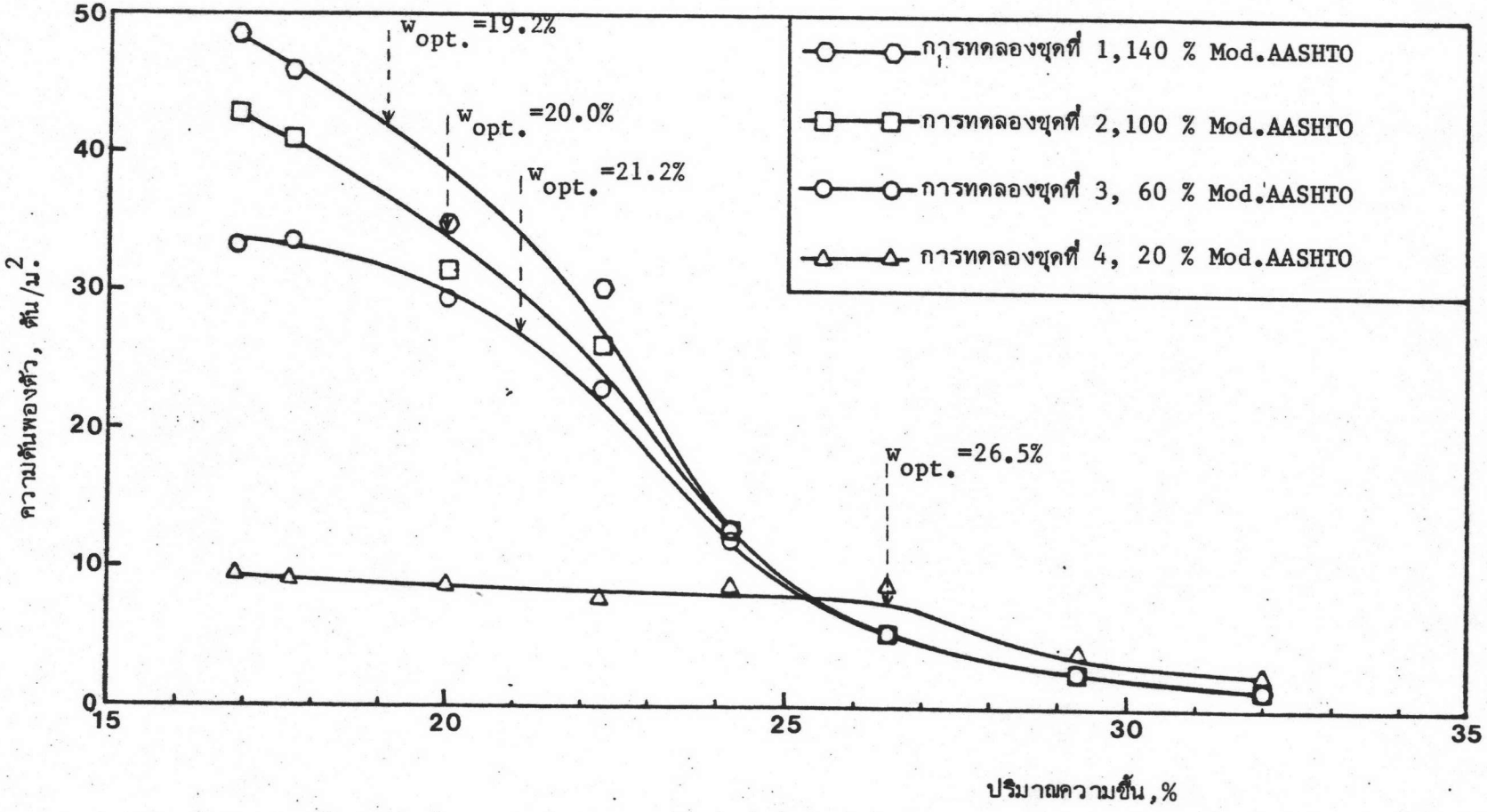
1. ดินจะพองตัวได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดน้ำเข้าไปในเนื้อดิน ซึ่งที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ ความสามารถในการดูดน้ำเข้าไปในดินจะสูง ทั้งนี้เนื่องจาก

(ก) ที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้น optimum ความขาดแคลนน้ำ (water deficiency) จะสูง (LAMBE, 1962)[1] เนื่องจากสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (degree of saturation) ต่ำ ดังนั้นจึงยังเกิดแรงที่จะดูดน้ำเข้าไปในดินได้มาก รูปที่ 4.5 ได้แสดงถึงการเพิ่มของปริมาณความชื้นเมื่อนำตัวอย่างดินไปแช่น้ำเพื่อวัดความดันพองตัว จะเห็นว่าดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นเริ่มแรกต่ำกว่าปริมาณความชื้น optimum การเพิ่มของปริมาณความชื้นจะสูงกว่าดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นเริ่มแรกสูงเกินปริมาณความชื้น optimum

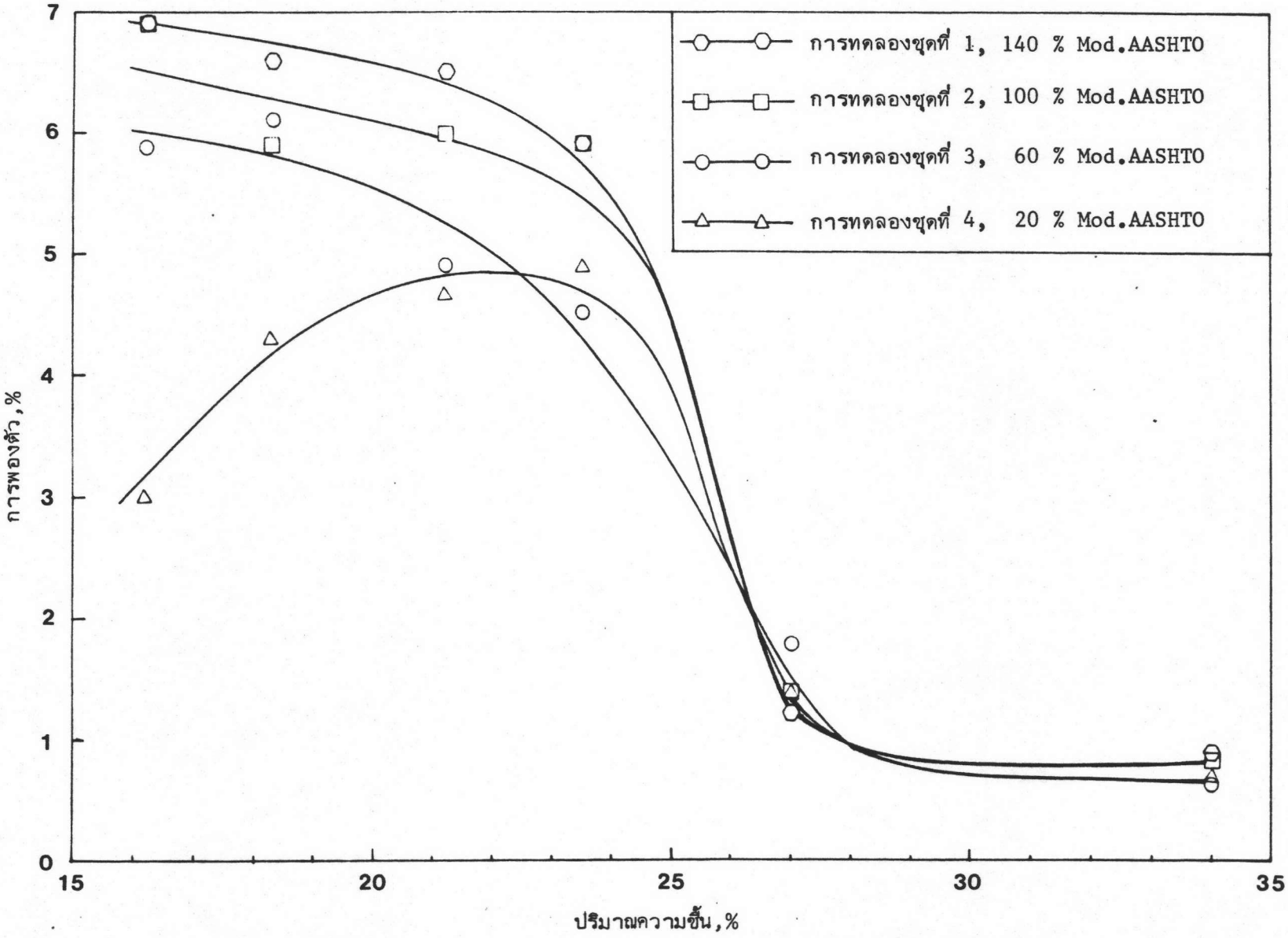
(ข) ในการบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ โดยเฉพาะทางด้านแห้งของปริมาณความชื้น optimum จะเกิดความดันในช่องว่าง (pore pressure, Δu) เป็นลบ (OLSON, 1963) ดังนั้นเมื่อได้รับน้ำดินจึงพยายามดูดน้ำเข้าไป เพื่อทำให้ความดันในช่องว่างสูงขึ้นจนเท่ากับความดันน้ำภายนอก

---

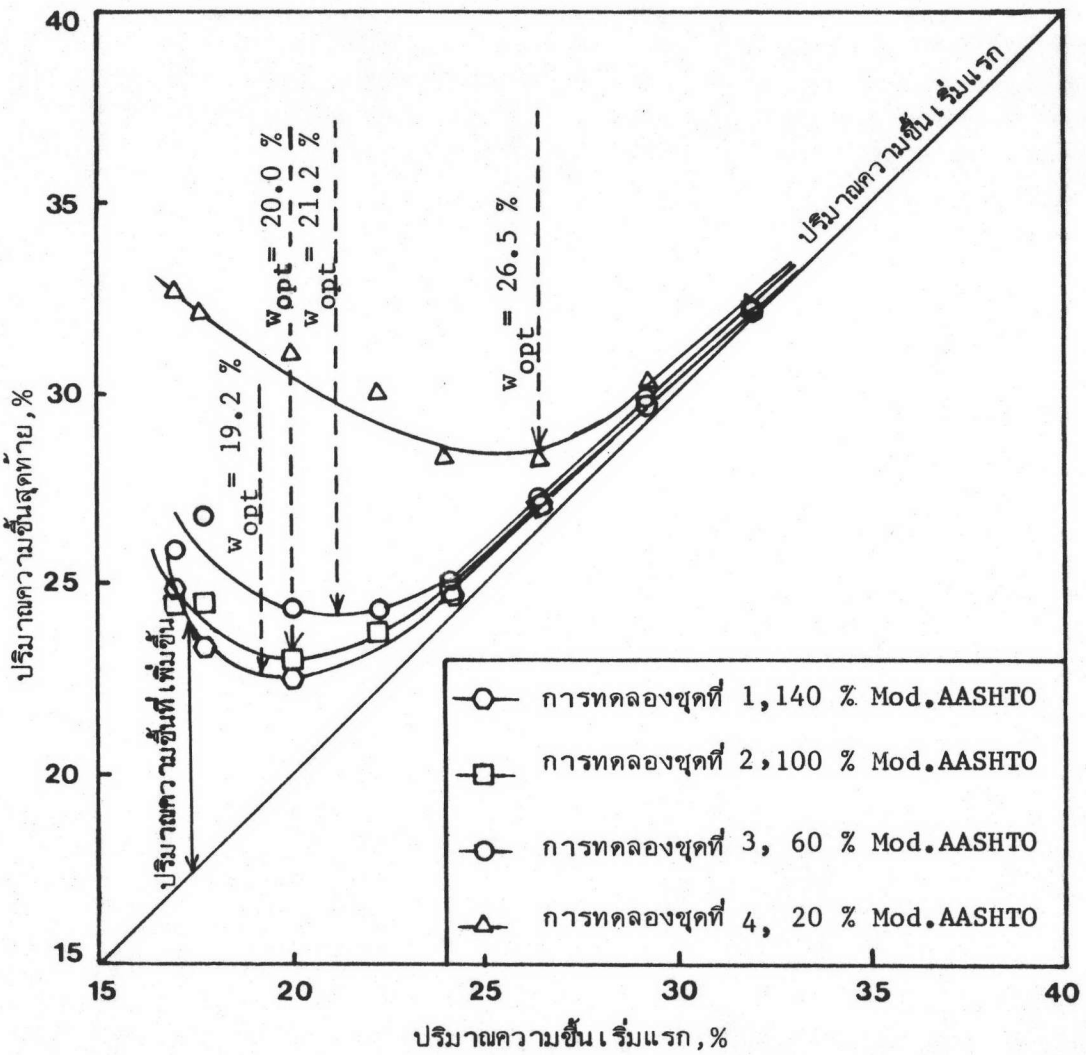
[1] LAMBE, "Soil Stabilization." In Foundation Engineering, G.A.Leonard(ed.) New York : Mc.Graw-Hill Book Co., 1962.



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันพองตัวและปริมาณความชื้น บดอัดตัวอย่างดินโดยใช้พลังงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการพองตัวและปริมาณความชื้น ของตัวอย่างดินซึ่งบดอัดโดยใช้พลังงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.5 การเพิ่มของปริมาณความชื้น เมื่อนำตัวอย่างดินไปแช่น้ำ โดยควบคุมปริมาตรให้คงที่ตลอดเวลาในการวัดความดันพองตัว

2. ความดันออสโมติก (osmotic pressure) เนื่องจากที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ ความเข้มข้นของสารละลายระหว่าง particles จะสูงกว่าที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ และจะสูงกว่าสารละลายหรือน้ำภายนอก น้ำจึงไหลเข้าไประหว่าง particles เช่นเดียวกับขบวนการออสโมซิส ทำให้เกิดแรงที่จะผลัก particles ให้แยกจากกันได้มาก

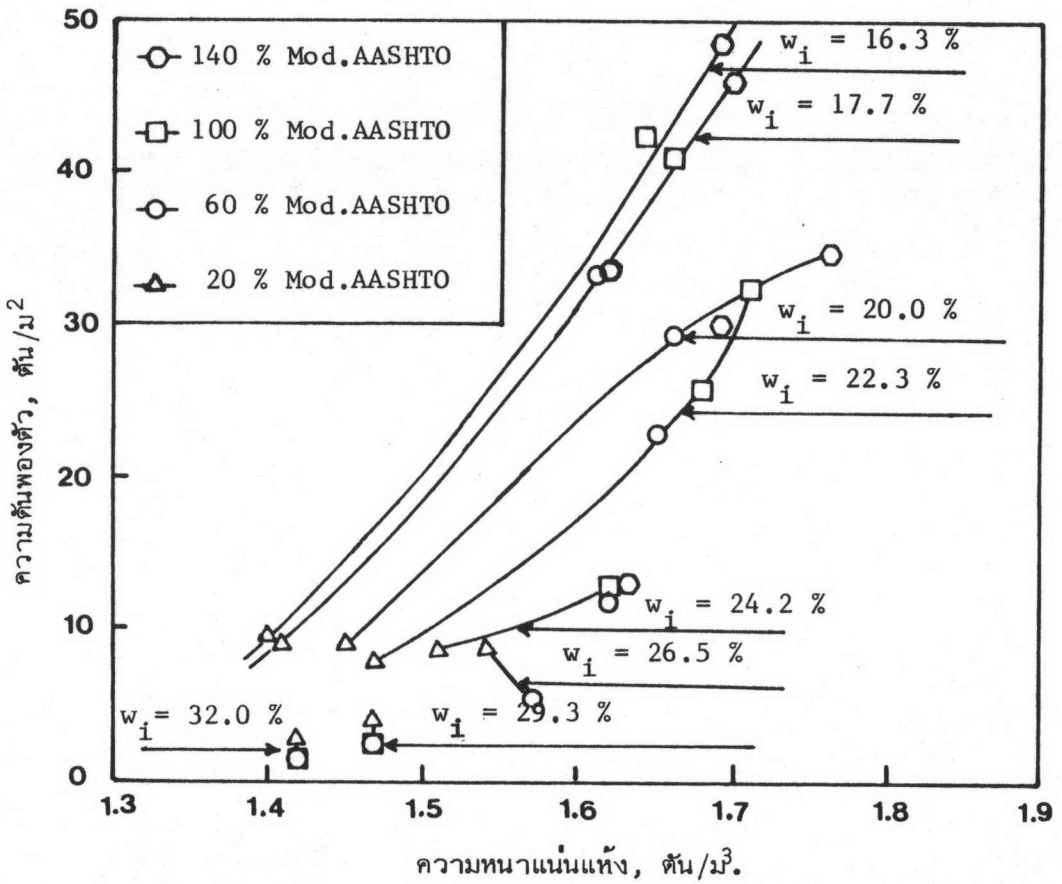
3. การขยายตัวของ double layer ดินที่บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ จะมี double layer แคบ แต่เมื่อได้รับน้ำ double layer จะกว้างขึ้นจนไปเกี่ยวกัน เนื่องจากประจุใน double layer ส่วนใหญ่จะเป็นประจุบวกเหมือนกัน จึงผลักกัน ทำให้เกิดแรงผลักระหว่าง particles เป็นผลให้ดินเกิดการพองตัวสูง

ส่วนดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ โดยเฉพาะเมื่อสูงเกินปริมาณความชื้น optimum ความสามารถในการดูดน้ำเข้าไปในดินจะต่ำ เนื่องจากสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำสูง และความดันในช่องว่างจะสูงขึ้นหรือเป็นลบน้อยลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดน้ำน้อยลง เนื่องจากปริมาณความชื้นสูงขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายระหว่าง particles จะลดลง จึงทำให้ความดันออสโมติกลดลง และ double layer ได้ขยายตัวไปบ้างแล้วเมื่อปริมาณความชื้นสูง ๆ ดังนั้น double layer จึงไม่ขยายตัวเพิ่มขึ้นอีกมากนัก

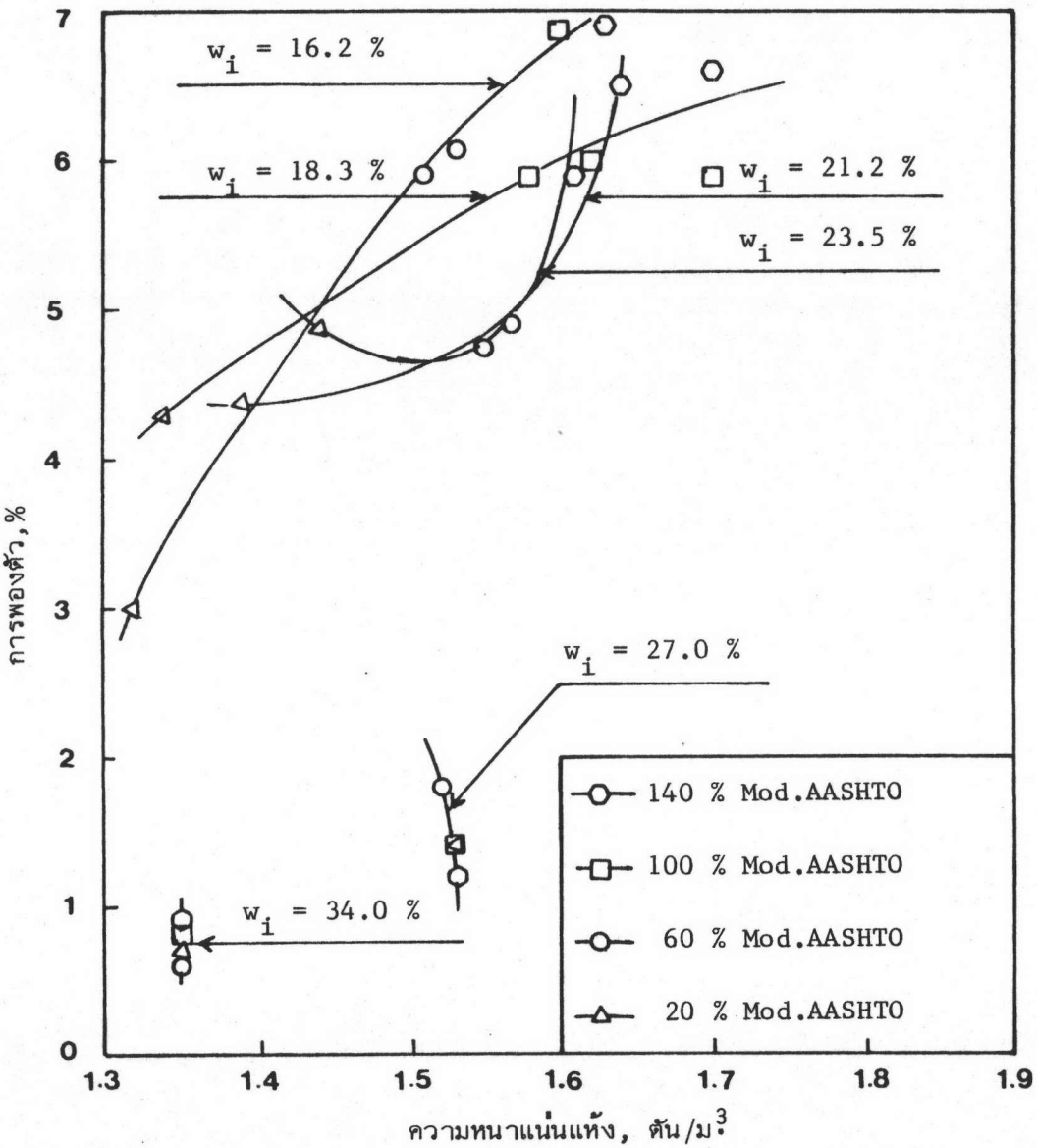
ด้วยเหตุผลทั้งหมดนี้ทำให้ดินซึ่งบดอัดทางด้านแห้งของปริมาณความชื้น optimum เมื่อแช่น้ำ จะเกิดความดันพองตัวและการพองตัวสูงกว่า ดินซึ่งบดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้น optimum

4.3.4 <u>ผลของพลังงานซึ่งใช้ในการบดอัดที่มีต่อความดันพองตัวและการพองตัว</u>

เมื่อบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ โดยเฉพาะต่ำกว่าปริมาณความชื้น optimum ตัวอย่างดินซึ่งบดอัดโดยใช้พลังงานที่สูงกว่า ซึ่งได้ความหนาแน่นแห้งสูงกว่า จะได้ความดันพองตัวและการพองตัวสูงกว่าตัวอย่างดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานต่ำ ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นจากสาเหตุที่สำคัญ 3 ประการ คือ



รูปที่ 4.6 ผลของความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นเริ่มแรกที่มีต่อความคันพองตัว เมื่อบดอัดตัวอย่างดินโดยใช้พลังงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.7 ผลของความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นเริ่มแรกที่มีต่อการพองตัวเมื่อบดอัดตัวอย่างดินโดยใช้พลังงานที่แตกต่างกัน

(1) เมื่อพลังงานในการบดอัดสูงกว่า ดินจะมีการสะสมพลังงานที่บดอัดไว้สูงกว่า เมื่อได้รับน้ำจึงมีการคืนตัว เนื่องจาก elastic rebound ของ particles ดินและจะมีลักษณะคล้ายกับการ rebound ในการทดสอบการยุบอัดตัวของดิน (Consolidation test)

(2) เมื่อใช้พลังงานในการบดอัดสูงกว่า จะทำให้เกิดความดันในช่องว่าง (Δu) เป็นลบมากกว่า เมื่อได้รับน้ำจึงเกิดแรงที่จะดูดน้ำเข้าไปในดินได้มากกว่า ซึ่งทำให้ได้ความดันพองตัวและการพองตัวสูงกว่าดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานต่ำ

การที่เกิดแรงที่จะดูดน้ำเข้าไปในดินสูงนี้ มีสาเหตุอีกประการหนึ่ง คือ ดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานสูง จะมีความหนาแน่นมาก และมีช่องว่างน้อย ยังผลให้แรง capillary ที่จะดูดน้ำเข้าไปในดินมีมาก

(3) เมื่อใช้พลังงานในการบดอัดสูงกว่า ดินจะอยู่ในสภาพที่แน่นกว่า particles จึงอยู่ชิดกันมากกว่า การพองตัวซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของ double layer จึงมีมากกว่า

ส่วนดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ โดยเฉพาะทางด้านเปียกของปริมาณความชื้น optimum จะได้ความดันพองตัวและการพองตัวใกล้เคียงกันทั้งนี้เพราะที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ ถึงแม้จะใช้พลังงานที่สูงกว่าในการบดอัด แต่ก็ไม่ได้ช่วยให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นมากนัก พลังงานที่เพิ่มขึ้นเพียงแต่ทำให้เกิดการยุบตัวมากในการกระแทกแต่ละครั้งเท่านั้น (OLSON , 1963) ความดันในช่องว่างซึ่งเป็นลบจะไม่แตกต่างกันมาก จึงไม่ค่อยมีผลในการดูดน้ำเข้าไปในดิน การพองตัวเนื่องจาก elastic rebound ของ particles ก็มีน้อย เพราะดินมีการสะสมพลังงานไม่มาก ส่วนการขยายตัวของ double layer นั้น ที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ double layer จะกว้างขึ้นบ้างแล้ว จึงมีผลให้เกิดแรงผลักระหว่าง particles ไม่มากเมื่อได้รับน้ำ

ดังนั้นทำให้ดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ จะไม่พองตัวมาก ถึงแม้จะบดอัดโดยใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ผลที่ได้จะไม่ค่อยแตกต่างกัน ส่วนที่ยังแตกต่างกันอยู่บ้างคงเป็นเพราะความคลาด

เคลื่อนในการทดลอง เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดิน และผนังของ consolidation ring มากกว่า

4.3.5 ชนิดของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อการพองตัว

เรื่องแร่ดินเหนียวนั้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ดินแถบกรุงเทพฯ มีแร่ดินเหนียวที่สำคัญอยู่ 3 ชนิด คือ คาโอลิไนท์ อิลไลท์และมอนท์โมริลโลไนท์ การพองตัวของดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์เป็นส่วนใหญ่ เพราะเป็นแร่ดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวมาก คือประมาณ 800 ตารางเมตรต่อกรัม (YONG and WARKENTIN, 1975) พื้นที่ผิวที่มากนี้จะสามารถรับน้ำได้มาก เมื่อ double layer กว้างขึ้นจนมาเกี่ยวกัน ประจุใน double layer ซึ่งเหมือนกันจะผลักกัน จึงเกิดแรงผลักให้ particles แยกจากกันได้มาก ถ้าไอออนในสารละลายเป็นชนิดเดียวกันและความเข้มข้นมีเท่ากันจะได้ double layer ของแร่ดินเหนียวหนาใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อแร่ดินเหนียวหนักเท่ากัน ปริมาตรของมอนท์โมริลโลไนท์จะเพิ่มขึ้นได้มากกว่าเมื่อได้รับน้ำ เพราะมีปริมาตรของ double layer ที่จะต้องกว้างขึ้นมากกว่า

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ซึ่งได้ประมาณ 15-20 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักดินทั้งหมด เป็นผลที่สอดคล้องกับการทดลอง คือได้ความดันพองตัวและการพองตัวค่อนข้างสูง โดยเฉพาะเมื่อบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ

4.4 การทดสอบบรรทุกน้ำหนักเป็นรอบ ๆ (Cyclic Loading Test)

ในกรณีดินเหนียวบดอัดได้รับน้ำแล้วเกิดการพองตัวขึ้น ถ้าต้องการให้ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นนี้ลดลงบ้าง อาจจะใช้วิธีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก ซึ่งจะทำให้ปริมาตรของดินลดลงเนื่องจากการอัดตัวของส่วนที่เป็นของแข็ง ส่วนที่เป็นน้ำหรืออากาศภายในช่องว่าง และอาจเกิดการไล่น้ำและอากาศออกจากช่องว่าง

ดินที่ได้รับน้ำและพองตัวแล้ว จะมีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (degree of saturation) เกือบ 100 เปอร์เซนต์ จึงสามารถนำทฤษฎีการยุบอัดตัวของ TERZAGHI มาประยุกต์ใช้กันได้

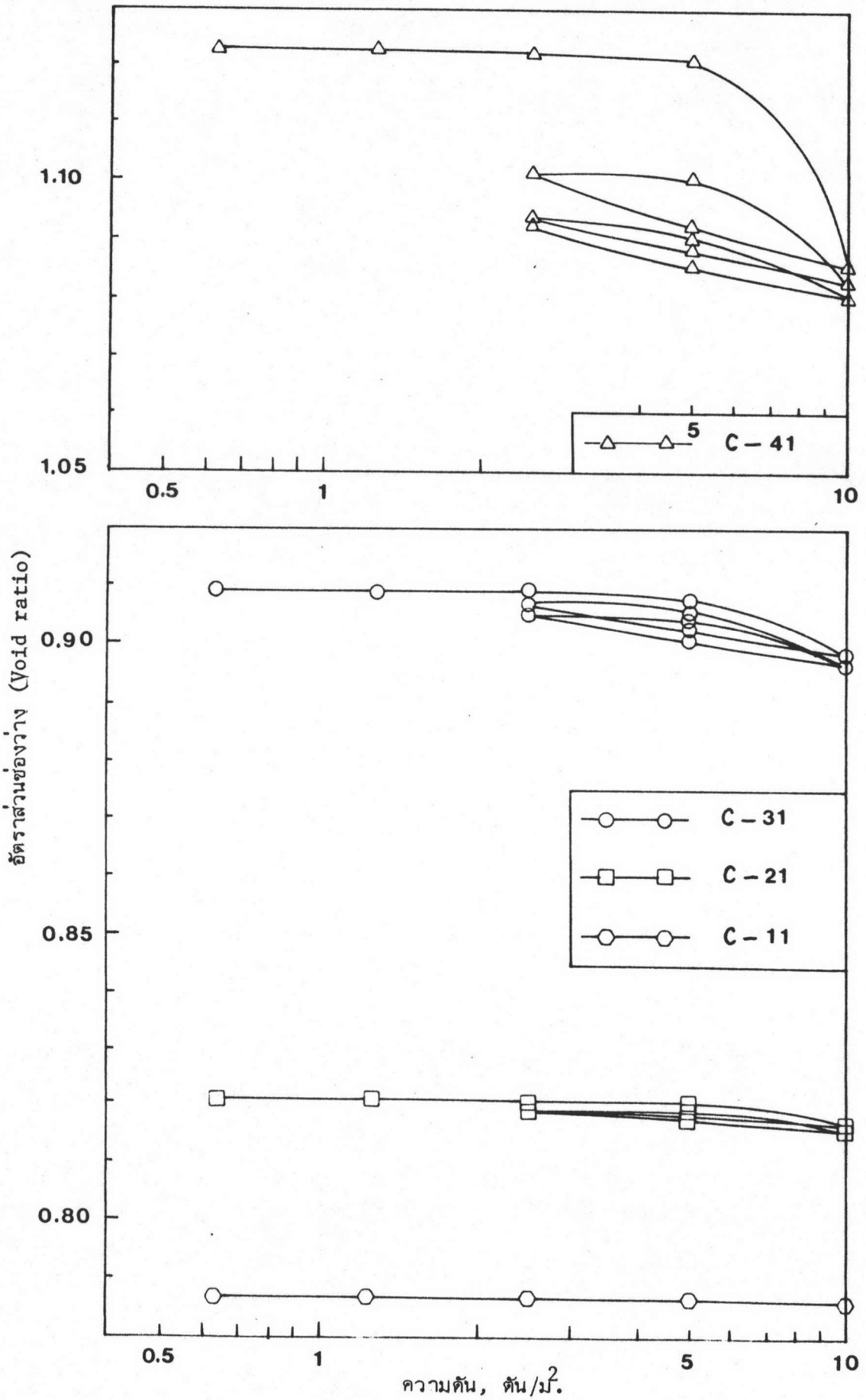
ในการทดสอบบรรทุกน้ำหนักเป็นรอบๆ นี้ มีจุดมุ่งหมายที่จะลดปริมาตรของดินที่พองตัวแล้วลงบ้าง โดยศึกษาจากตัวอย่างดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานเท่ากับ 20, 60, 100, 140 เปอร์เซนต์ Modified AASHTO ปริมาณความชื้นเริ่มแรกของตัวอย่างดินตั้งแต่ 16.2 จนถึง 34.0 เปอร์เซนต์ ตัวอย่างดินปล่อยให้พองตัวในแนวดิ่งภายใน consolidation ring โดยมีน้ำหนักบรรทุกกดทับอยู่ 0.6 ตันต่อตารางเมตรซึ่งแทนน้ำหนักจากพื้น หรือ ถนน

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดันที่ใช้กดตัวอย่างดินได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 และ 4.13 จะเห็นว่าดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ โดยใช้พลังงานต่ำ ๆ เช่น ตัวอย่างดิน C-41 (20% Modified AASHTO) เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก จะเกิดการยุบตัวมากกว่าดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานสูง ๆ เช่น ตัวอย่างดิน C-11 (140% Modified AASHTO) ทั้งนี้เพราะดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานต่ำ ๆ จะมีความหนาแน่นน้อยกว่าและมีช่องว่างมากกว่า จึงมีความสามารถที่จะต้านกับแรงที่กดได้น้อยกว่า ดังนั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจึงทำให้ตัวอย่างดินที่บดอัดโดยใช้พลังงานต่ำ ๆ เกิดการยุบตัวมากกว่า

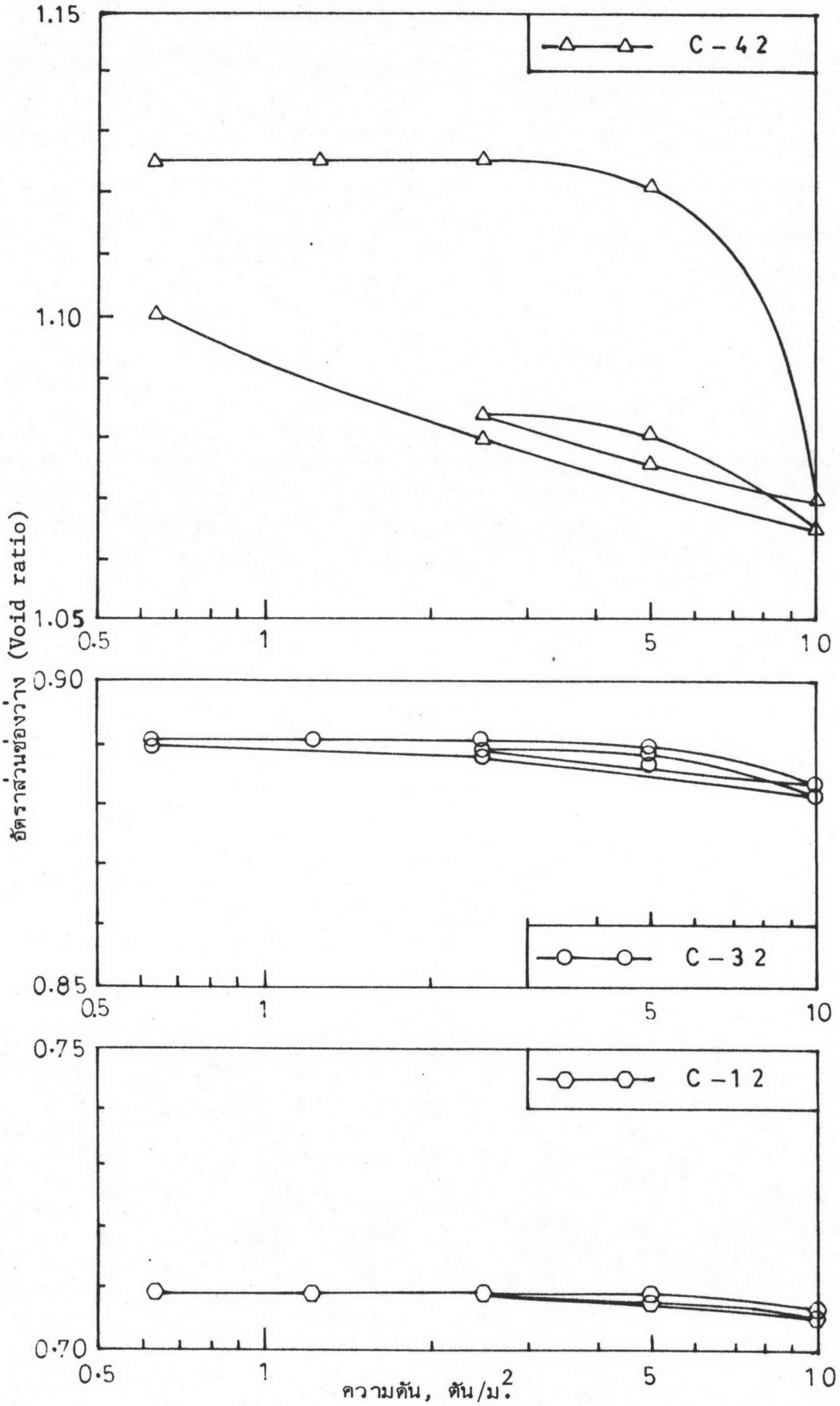
ดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ แต่ใช้พลังงานสูง ๆ เช่น 100 และ 140 เปอร์เซนต์ของ Modified AASHTO ซึ่ง particles จะจัดเรียงตัวกันแบบระเกะระกะแต่อยู่ในสภาพที่แน่นมาก จึงมีลักษณะคล้ายวัสดุอีลาสติก (elastic material) คือ เมื่อเพิ่มน้ำหนักจาก 0.6 ตันต่อตารางเมตร ไปจนถึง 10 ตัน ต่อตารางเมตร เมื่อลดน้ำหนักมาเป็น 0.6 ตันต่อตารางเมตร อีก ดินที่ยุบตัวลงไปบ้างในขณะเพิ่มน้ำหนัก จะกลับคืนตัวมาอยู่ในสภาพเดิม หรือ เกือบเท่าสภาพเดิม

ส่วนดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ และใช้พลังงานต่ำ ถึงแม้โครงสร้างของดินจะเป็นแบบระเกะระกะก็ตาม แต่ดินจะอยู่ในสภาพหลวม ๆ เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกโครงสร้างดินจะเกิดการยุบตัว และจัดเรียงตัวใหม่ในสภาพที่เป็นระเบียบกว่าเดิม เมื่อลดน้ำหนักบรรทุก ดินจึงไม่สามารถกลับคืนไปที่เดิมได้ จึงเกิดการยุบตัวที่ถาวรขึ้น

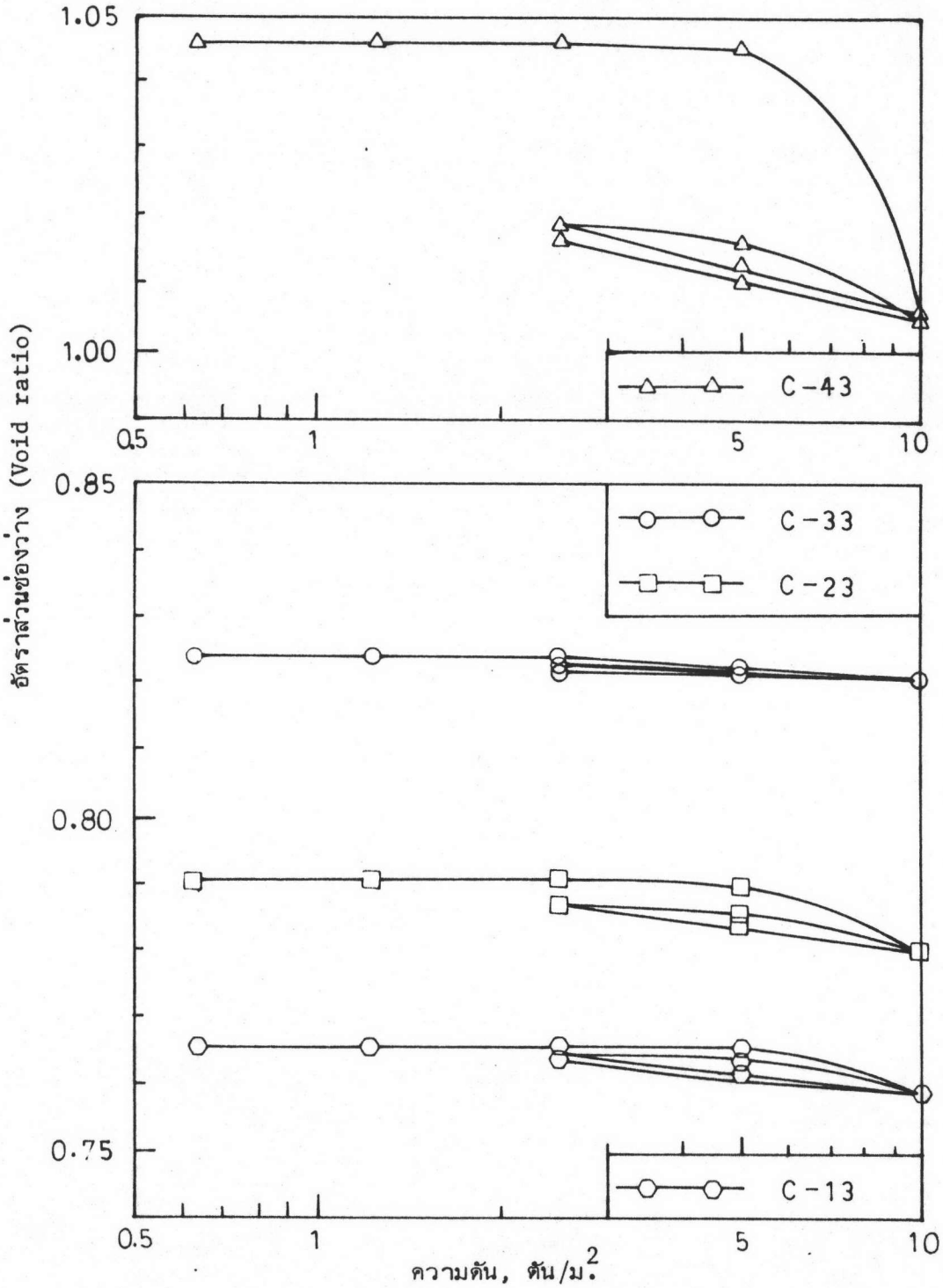
สำหรับดินที่บดอัดที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ เช่นจากรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดันของตัวอย่างดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้น 34.0 เปอร์เซนต์ ถึงแม้จะใช้



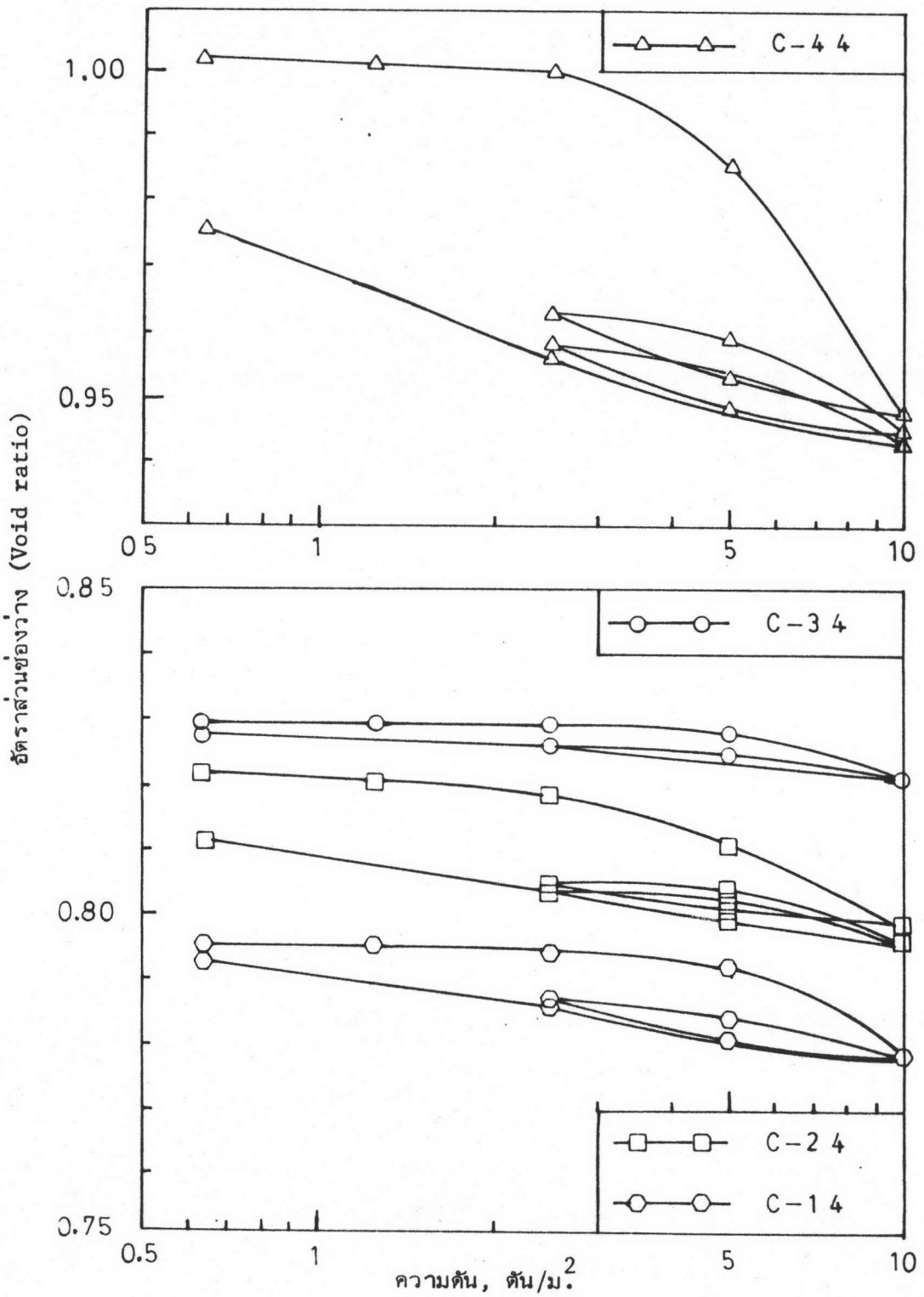
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดันในการทำ Cyclic loading test ของตัวอย่างดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณ



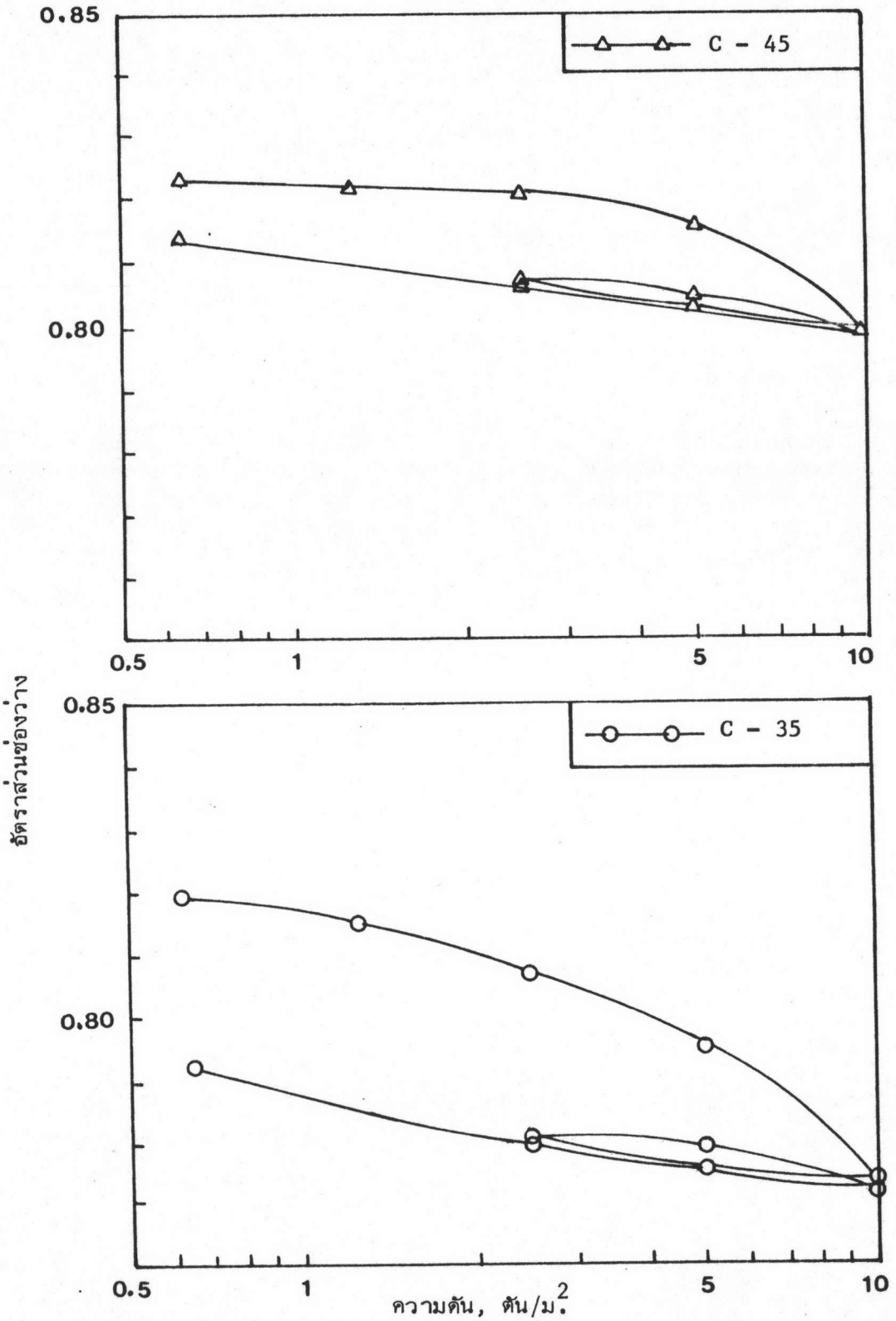
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดันในการทำ Cyclic loading test ของตัวอย่างดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้น 18.3 %



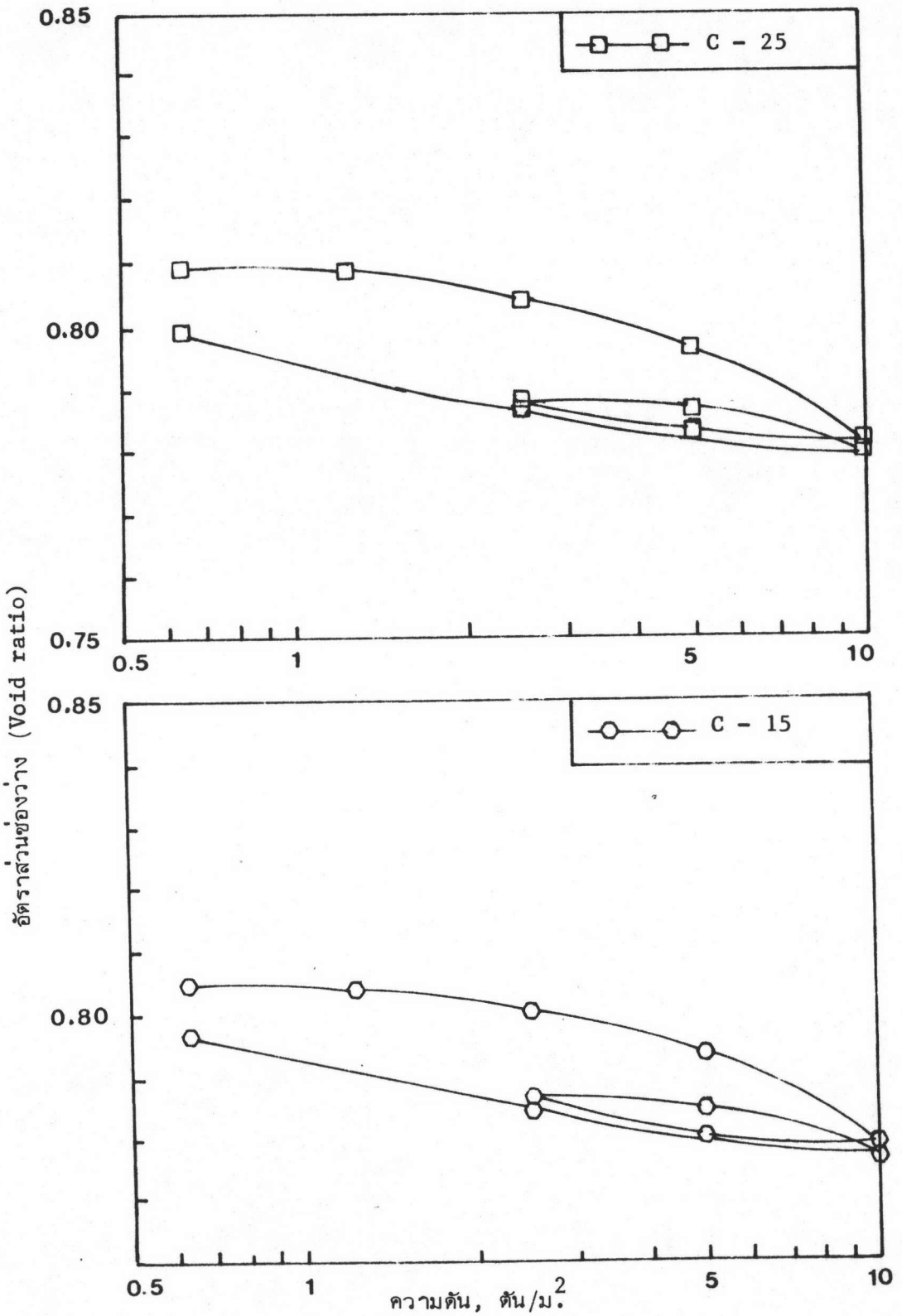
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดันในการทำ Cyclic loading test ของตัวอย่างดินซึ่งดอัดที่ปริมาณความชื้น 21.2 %



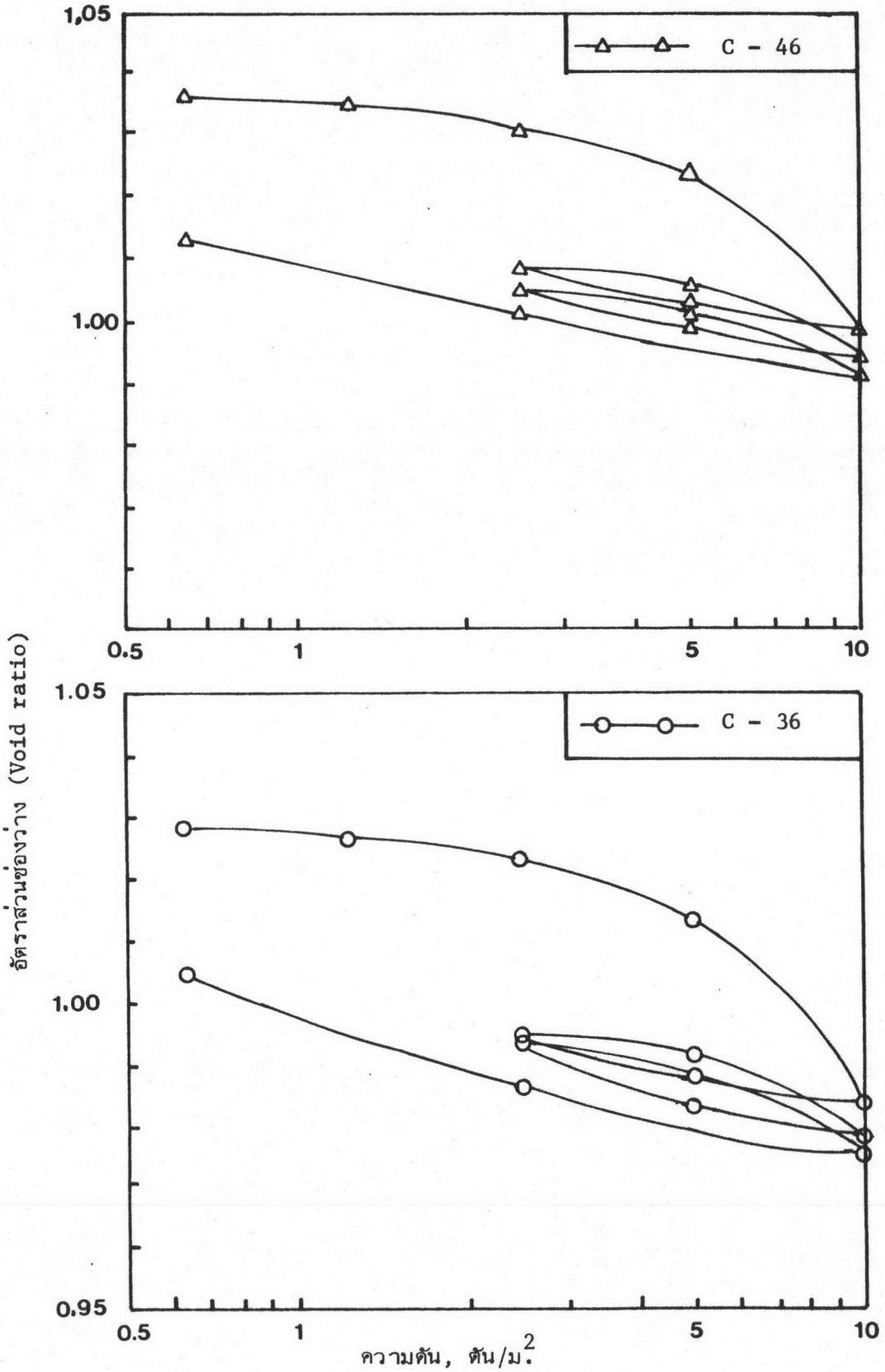
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดันในการทำ Cyclic loading test ของตัวอย่างดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้น 23.5 %



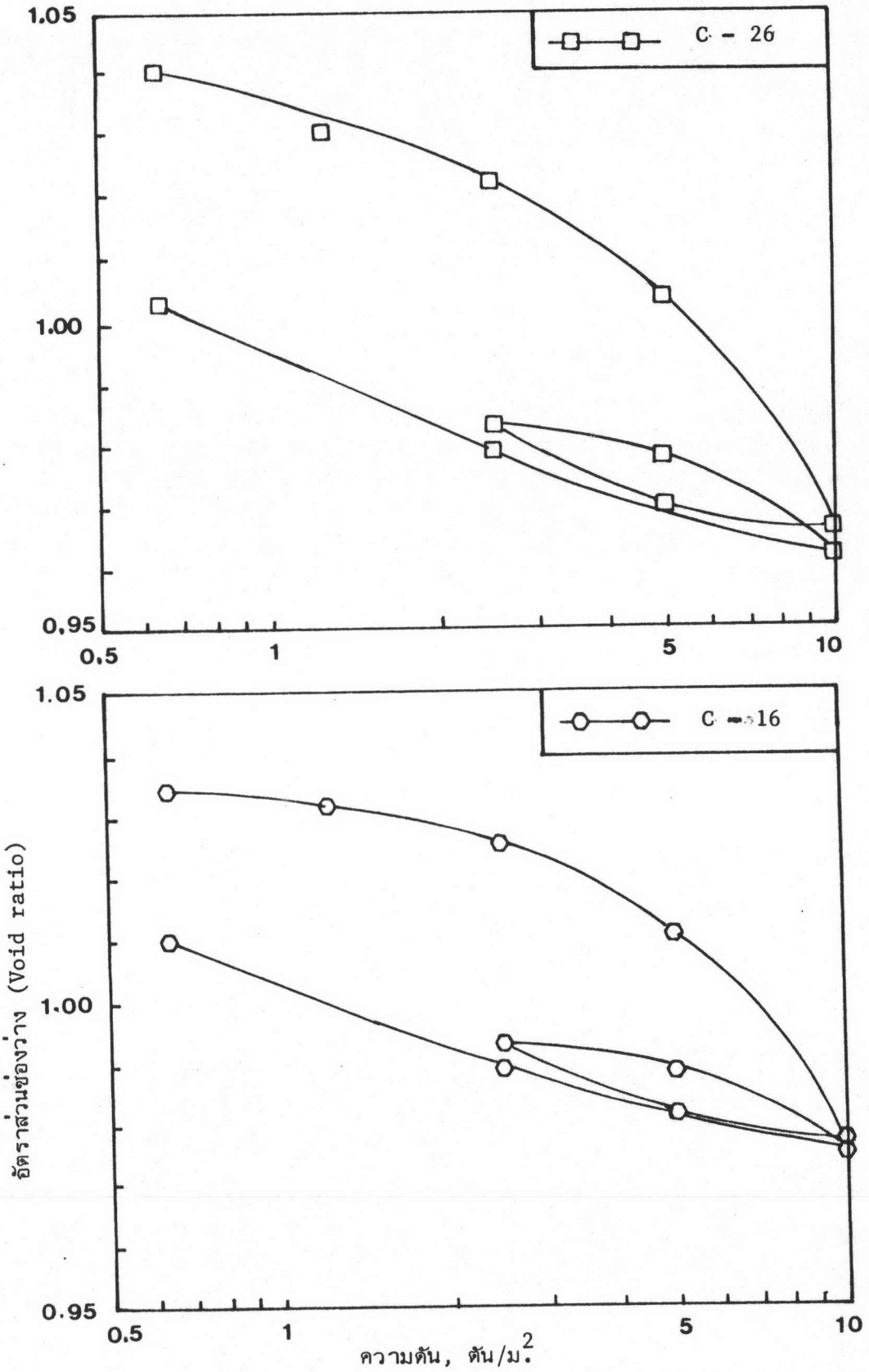
รูปที่4.12(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดัน ในการทำ Cyclic loading test ของตัวอย่างดิน ซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้น 27.0 %



รูปที่4.12(ข)แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดัน
ในการทำ Cyclic loading test ของตัวอย่างดิน
ซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้น 27.0 %



รูปที่4.13(ก)แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดันในการทำ Cyclic loading test ของตัวอย่างดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้น 34.0 %



รูปที่4.13(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและความดัน ในการทำ Cyclic loading test ของตัวอย่างดิน ซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้น 34.0 %

พลังงานที่แตกต่างในการบดอัด แต่ก็ได้ผลใกล้เคียงกัน เพราะดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ จะได้ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และได้โครงสร้างของดินค่อนข้างเป็นระเบียบเหมือน ๆ กัน

ในการทดสอบบรรทุกน้ำหนักเป็นรอบ ๆ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในรอบแรกน้ำจะถูกไล่ออกจากช่องว่างของดินและดินจะเกิดการยุบตัว โครงสร้างดินจะเปลี่ยนไปในลักษณะที่เป็นระเบียบมากขึ้น เมื่อลดน้ำหนักบรรทุกดินจะพองตัวออก แต่ไม่สามารถกลับคืนตัวไปที่เดิมได้ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในรอบที่สอง ดินจะเกิดการยุบตัวมากกว่าเดิม ที่เป็นเช่นนี้เพราะดินมิใช่วัสดุอีลาสติกอย่างแท้จริง เมื่อถูกแรงกระทำโครงสร้างจึงเปลี่ยนไป หลังจากที่สิ้นสุดการบรรทุกน้ำหนักในรอบแรกโครงสร้างดินจะเปลี่ยนไปจากเดิมแล้ว เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในรอบที่สอบจะทำให้โครงสร้างดินเปลี่ยนไปอีกเล็กน้อย จึงเกิดการยุบตัวเพิ่มขึ้นอีก ยิ่งถ้าบรรทุกน้ำหนักหลาย ๆ รอบ โครงสร้างดินจะเปลี่ยนแปลงน้อยลง ๆ จนไม่เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง C_v (สัมประสิทธิ์ของการยุบอัดตัว) และความดันของตัวอย่างดินซึ่งบดอัด โดยใช้พลังงานที่ต่างกัน คือ 20 และ 100 เปอร์เซนต์ของ Modified AASHTO ซึ่งจะเห็นว่าดินซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ เช่น 18.3 เปอร์เซนต์ (รูปที่ 4.14) จะได้ค่า C_{vc}* และ C_{vs}** สูง เมื่อใช้ความดันต่ำกว่า 10 ตันต่อตารางเมตร คือ อยู่ระหว่าง 10^{-3} - 26 x 10^{-3} ซม.^{2}/วินาที แต่เมื่อใช้ความดันสูงขึ้นค่า C_v จะลดลง

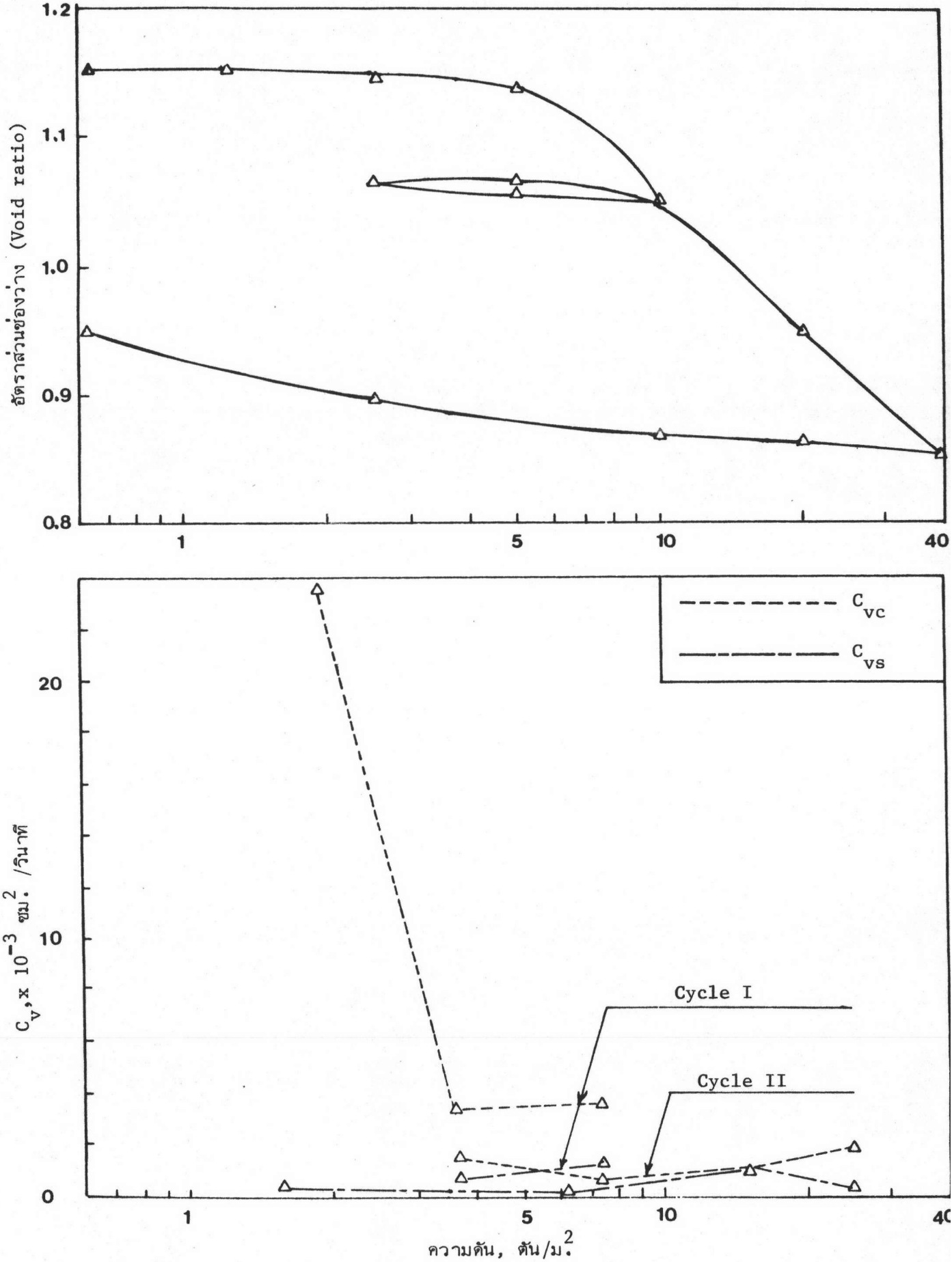
สำหรับดินที่บดอัดที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ เช่น 26.7 เปอร์เซนต์ (รูปที่ 4.15) จะได้ค่า C_v ต่ำ คือ อยู่ระหว่าง 0.5 x 10^{-3} - 14 x 10^{-3} ซม.^{2}/วินาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่า C_v ของตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน ซึ่งเก็บจากระดับความลึกและบริเวณเดียวกัน ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งได้ค่า C_v อยู่ในช่วง 10^{-4} - 20 x 10^{-4} ซม.^{2}/วินาที

ในการที่ค่า C_v ของดินที่บดอัดมีการปรวนแปรมาก และมีค่าค่อนข้างสูง อาจเกิดขึ้นเนื่องจากดินยังอิ่มตัวไม่เต็มที่ ถึงแม้สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิน 90 เปอร์เซนต์ก็ตาม ส่วนดินที่ไม่ถูกรบกวนซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำอยู่แล้ว ค่า C_v จึงต่ำกว่า

---

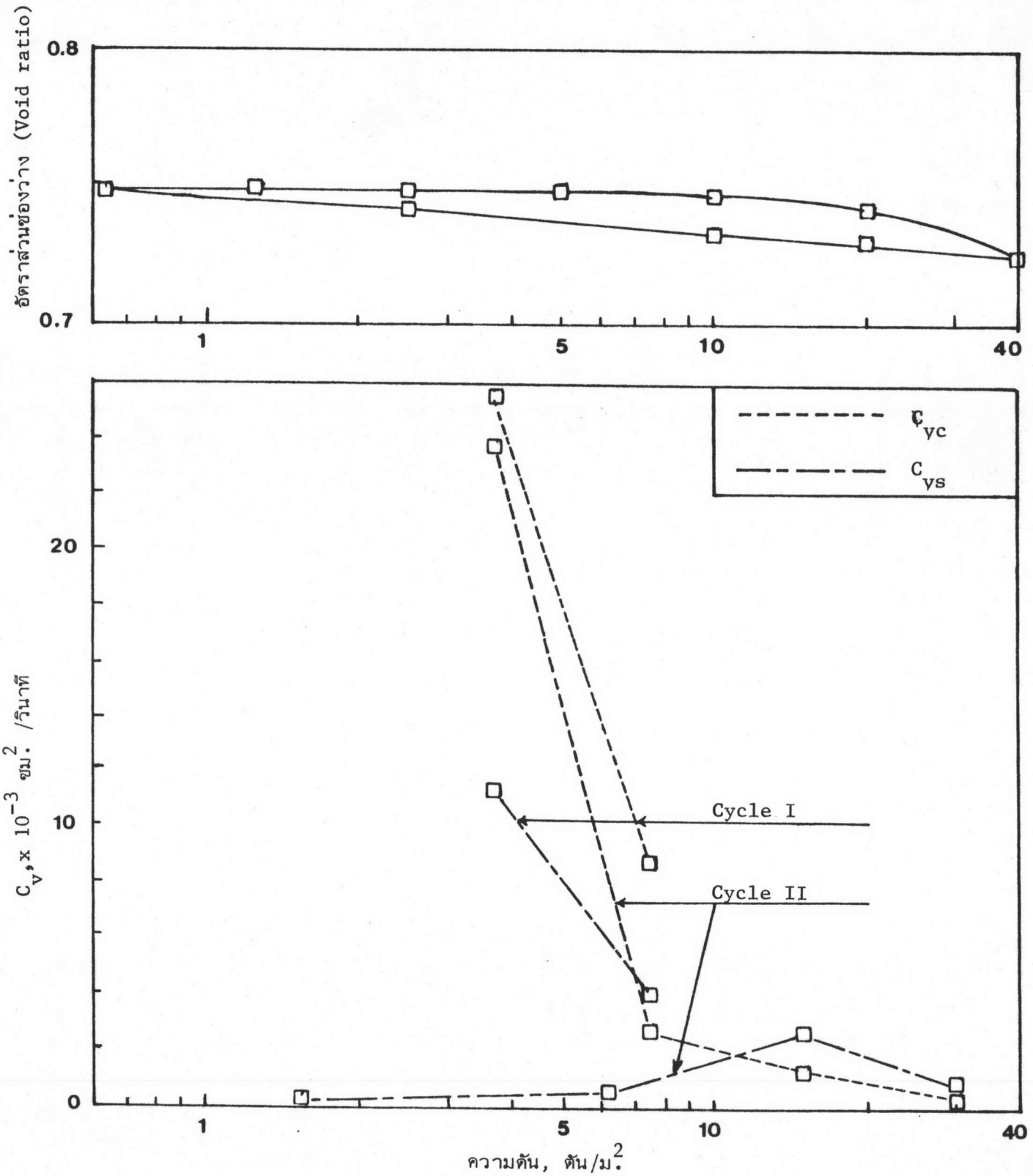
* C_{vc} = สัมประสิทธิ์ของการยุบอัดตัว (coefficient of consolidation)

** C_{vs} = สัมประสิทธิ์ของการพองตัว (coefficient of swelling)

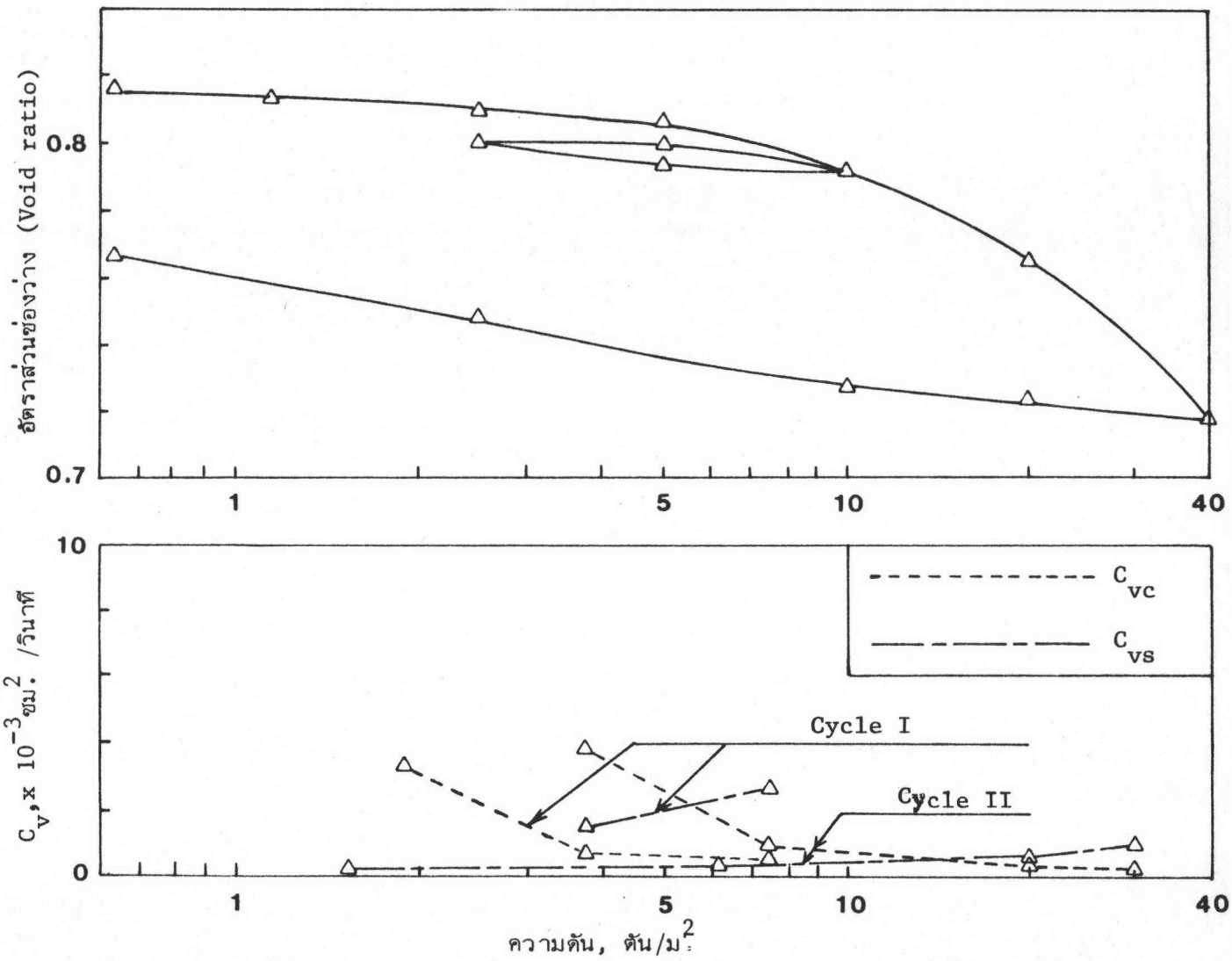


รูปที่4.14(ก)แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง C_v และความดันของตัวอย่างดินซึ่งบดอัด

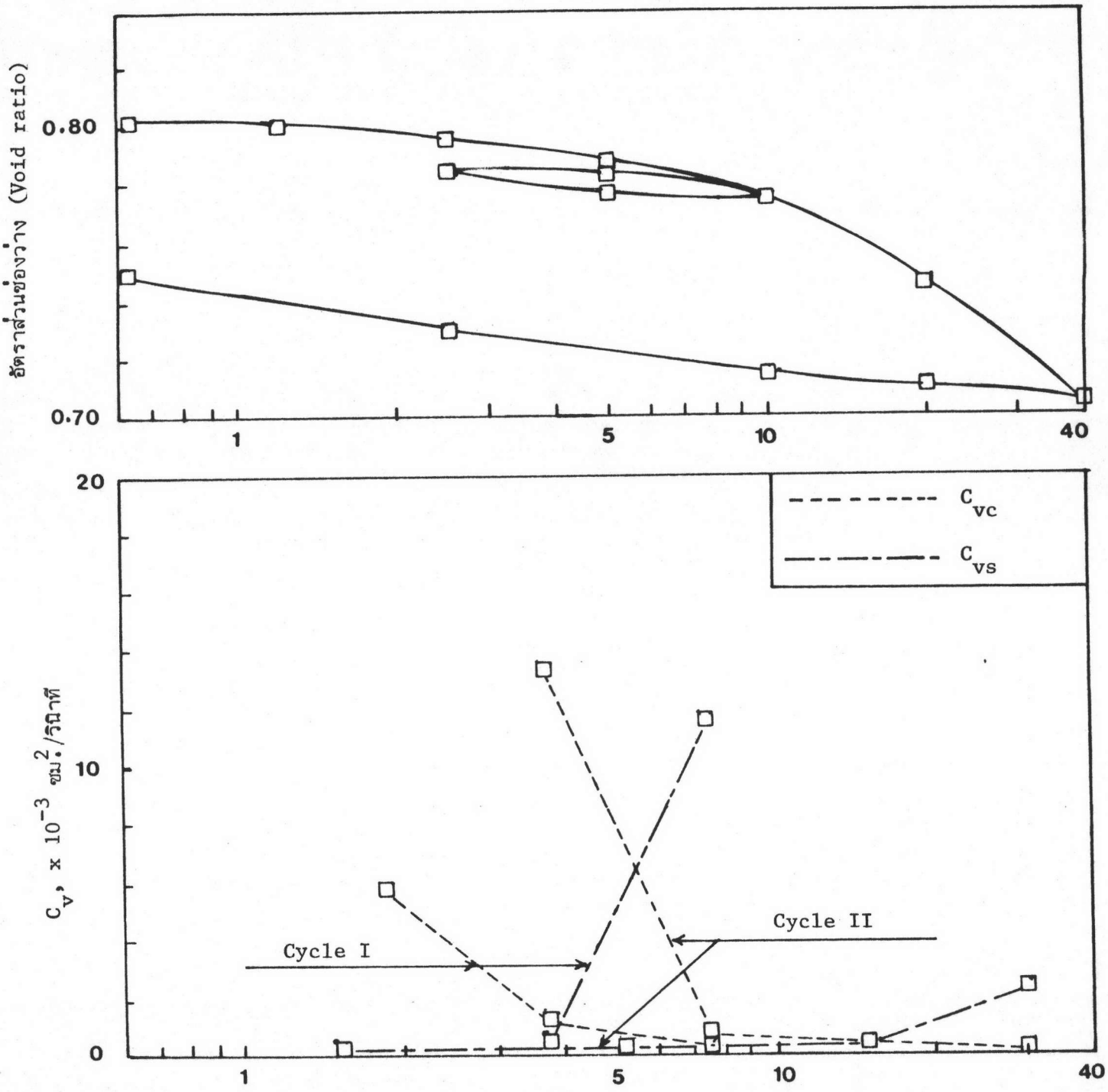
โดยใช้พลังงานเท่ากับ 20 % Modified AASHTO (w_c = 18.3 %)



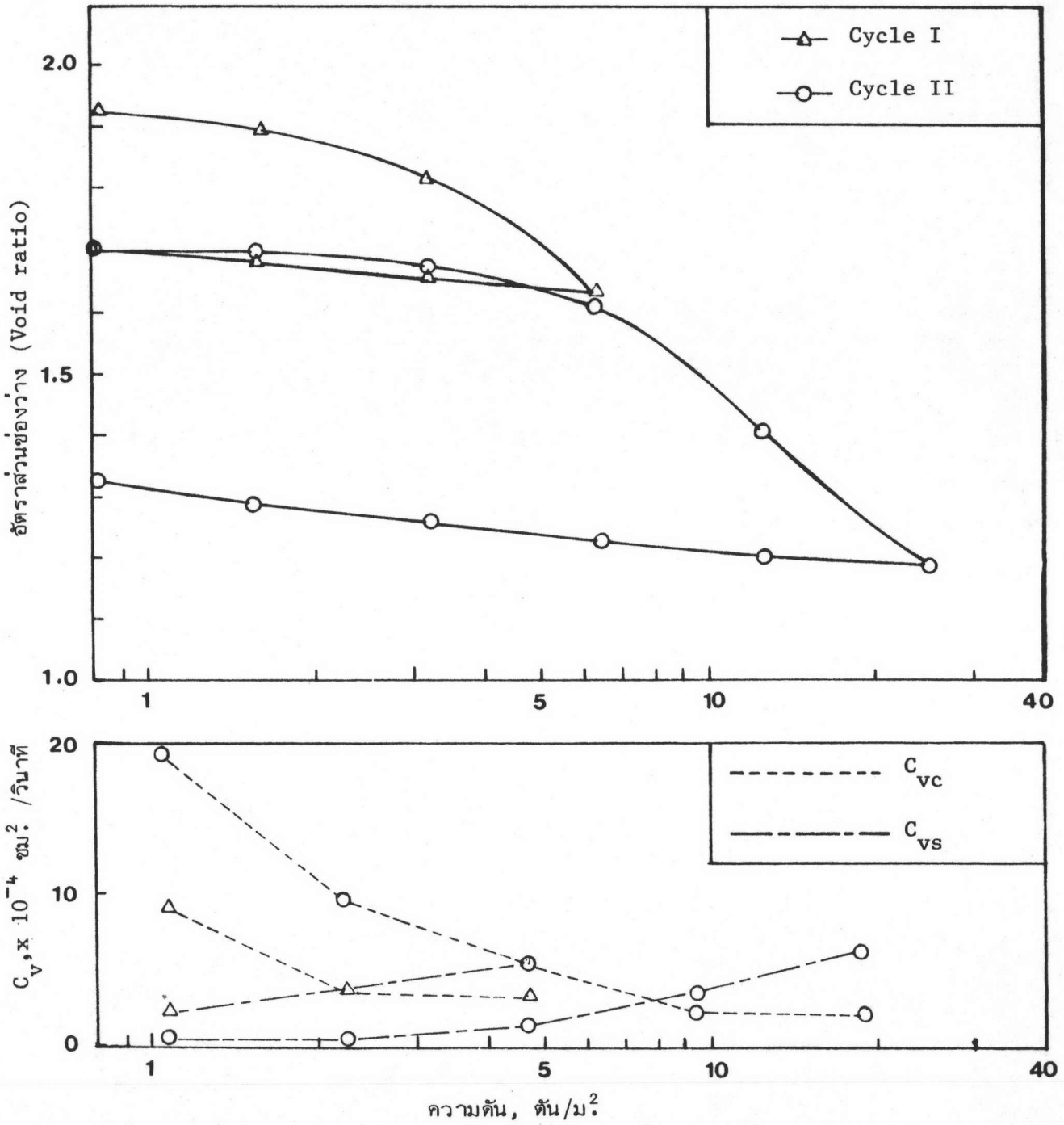
รูปที่4.14(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง และความดันของตัวอย่างดินซึ่งบดอัด โดยใช้พลังงานเท่ากับ Modified AASHTO (w_i = 18.3 %)



รูปที่ 4.15(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง C_v และความดันของตัวอย่างดิน ซึ่งบดอัดโดยใช้พลังงานเท่ากับ 20 % Modified AASHTO (w_i = 26.7 %)



รูปที่4.15(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง C_v และความดันของตัวอย่างดินซึ่งบดอัดโดยใช้พลังงานเท่ากับ Modified AASHTO (w_i = 26.7 %)



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อัตราส่วนช่องว่างและ C_v ของตัวอย่างดิน ที่ไม่ถูกรบกวน (ความลึกประมาณ 1.8 - 2.0 เมตร, w_i = 72.7 %)