



รายงานการวิจัย

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึ่มผ่านแบบ Falling Head –Rising Tail

Design and Construct Falling Head – Rising Tail Testing Apparatus

สมมาตร สวัสดิ์

Sommart SWASDI

จำรุง สมบูรณ์

Chumroon SOMBOON

อาศิส อัยรักษ์

Arsit IYARUK

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณเงินรายได้ประจำปี พ.ศ. 2554

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านแบบ Falling Head –Rising Tail

สมมาตร สวัสดิ์ จำรูญ สมบูรณ์ และ อาศิส อัยรักษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและสร้างชุดทดสอบ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบเขื่อน ถนน บ่อฝังกลบขยะ บ่อกักเก็บน้ำ งานถมบดอัด ชุดดิน อุโมงค์ กำแพงกันดิน และเสถียรภาพความลาดชัน จึงทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านแบบความดันแปรเปลี่ยนหัวท้าย เพื่อจำลองการซึมผ่านของน้ำในดิน โดยการนำข้อดีของชุดทดสอบแบบความดันคงที่และความดันแปรเปลี่ยนมาปรับแก้ ซึ่งชุดทดสอบนี้สามารถแก้ปัญหาที่เกิดกับการทดสอบแบบความดันคงที่และความดันแปรเปลี่ยน โดยสามารถจำลองสภาพดินตัวอย่างได้ใกล้เคียงกับสภาพในธรรมชาติจริงก่อนเก็บตัวอย่าง และสามารถตรวจสอบการอิ่มตัวของตัวอย่างได้เช่นเดียวกับการทดสอบแรงอัดสามแกน และเซลล์บรรจุตัวอย่างจะเป็นแบบผนังอ่อน ตัวอย่างดินที่บรรจุอยู่ในเซลล์สามารถให้แรงดันโดยรอบตัวอย่างได้ จึงทำให้ผนังเซลล์แนบสนิทกับดินป้องกันการซึมผ่านของน้ำทางด้านข้างได้ ทำให้ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินที่ได้ใกล้เคียงกับดินในธรรมชาติ

ผลการศึกษาพบว่าค่าที่ได้จากชุดทดสอบแบบความดันแปรเปลี่ยนหัวและท้ายมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่น้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของชุดทดสอบแบบความดันคงที่และความดันแปรเปลี่ยน ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้กำหนดไว้เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทดสอบแบบความดันคงที่และความดันแปรเปลี่ยน นอกจากนี้ยังสามารถลดเวลาในการทดสอบตัวอย่างดินและเพิ่มแรงดันได้สูงขึ้น มีผลทำให้สามารถใช้ทดสอบกับดินที่มีค่าการซึมผ่านต่ำๆ ได้ดี ดังนั้นชุดทดสอบที่สร้างขึ้นมานี้สามารถนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จริง

คำสำคัญ : สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ความดันแปรเปลี่ยนหัวท้าย ความดันคงที่ ความดันแปรเปลี่ยน

Design and Construct Falling Head – Rising Tail Testing Apparatus

Sommart SWASDI Chumroon SOMBOON and Arsit IYARUK

ABSTRACT

This research was design and constructs the apparatus for testing the coefficient of permeability of soil (k) which is important for design a dam, street, landfills, water retention pond, compaction work, excavation work, tunnel, retaining walls and slop stability. We propose to construct of a permeability testing apparatus on Falling Head – Rising Tail which simulate a permeability of soil. We are studied a weakness of Constant Head and Variable Head (Falling Head) testing apparatus (Conventional Method) exists which have been a new concept for troubleshooting the problems with design and construct of a permeability testing apparatus by Falling Head – Rising Tail method. This apparatus can be simulated the soil samples state nearest the natural soil state before sampling the samples which can be checked the saturated of samples like the Triaxial testing and the wall around the soil sample is a flexible wall that it can be reduced the leakage of fluid between the soil sample and the rigid wall.

The results of study is found the values of k from Falling Head – Rising Tail testing apparatus are less than the values of k from Conventional Method that the hypothesis is defined to troubleshoot the problems. The Falling Head – Rising Tail testing apparatus can be reduced the time for testing and increasing the pressure to higher which can be testing with the very low k soil. Thus, the Falling Head – Rising Tail testing apparatus can be used to test the coefficient of permeability of soil.

Keyword : Coefficient of Permeability, Falling Head – Rising Tail, Constant Head, Variable Head

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยเรื่อง การออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านแบบ Falling Head – Rising Tail ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยงบประมาณเงินรายได้ประจำปี พ.ศ. 2554 สำเร็จลงได้ด้วยดีทางคณะกรรมการผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย นักศึกษาผู้ช่วยวิจัยอันประกอบด้วย นายเพชร สายสลา นายยุทธนา มณีวรรณ และนายวรทัศน์ ชูสุทธิ คณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะในการทำวิจัย คุณถาวร เกื้อสกุล เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิคและการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนครอบครัวของคณะกรรมการผู้วิจัยที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจเรื่อยมาตลอดการทำวิจัย

สมมาตร สวัสดิ์
จำรูญ สมบูรณ์
อาศิส อัยรักษ์



บทที่ 1

บทนำ

มวลดินในสภาพธรรมชาติประกอบด้วยชั้นดินต่างๆ ที่ตกตะกอนทับถมกัน และมีน้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล (Ground Water Table) อยู่ด้วย ปกติทั่วไประดับของน้ำใต้ดินจะอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นผิวดิน (Ground Level) และมีแนวขนานกับแนวระดับพื้นผิวดิน การเคลื่อนที่หรือการไหลซึมของน้ำในมวลดินมีได้ทั้งแนวอนและแนวตั้ง ซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวอนของน้ำในมวลดินเกิดจากความต่างระดับของความดันของน้ำ โดยในลักษณะธรรมชาติน้ำจะไหลจากที่ซึ่งมีความดันสูงกว่าไปยังที่ซึ่งมีความดันต่ำกว่าเสมอ ผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งเรียงตัวคดเคี้ยวไปมาต่อเนื่องกัน ส่วนการเคลื่อนที่สูงหรือต่ำลงของระดับน้ำใต้ดินจะเป็นไปตามปรากฏการณ์ตามธรรมชาติหรือเกิดภาวะน้ำท่วมขัง น้ำจะไหลซึมลงไป ซึ่งระดับน้ำใต้ดินจะสูงขึ้น แต่เมื่อมีการสูบน้ำใต้ดินออก ระดับน้ำใต้ดินจะลดลง อัตราการไหลซึมของน้ำจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดิน อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน รูปร่างลักษณะผิวของเม็ดดิน ตลอดจนแร่ธาตุประกอบในมวลดิน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, Hydraulic Conductivity, k) ของน้ำในดินมีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering) ซึ่งจะนำไปใช้ในงาน เช่น ถนน บ่อฝังกลบขยะ บ่อกักเก็บน้ำ งานถมบดอัด งานขุดดิน อุโมงค์ กำแพงกันดิน เสถียรภาพความลาดชัน ซึ่งในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน โดยทั่วไปจะทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเก็บตัวอย่างจากในสนามมาทดสอบ โดยการทดสอบนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลักๆ คือ การทดสอบแบบความดันคงที่ (Constant Head) และการทดสอบแบบความดันแปรเปลี่ยน (Falling Head หรือ Variable Head) ซึ่งทั้ง 2 วิธี นั้นมีข้อดีของการทดสอบ คือ สามารถให้แรงดันได้น้อย (Pressure Head) เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ ไม่สามารถจำลองตัวอย่างดินให้มีสภาพที่เหมือนกับธรรมชาติของดินก่อนการเก็บตัวอย่าง ไม่สามารถควบคุมแรงดันทางด้านทางน้ำออกและทั้ง 2 วิธีนั้น ตัวอย่างดินจะถูกรรจอยู่ภายในเซลล์ทดสอบแบบผนังแข็ง (Rigid Wall) จึงทำให้การไหลของน้ำมีโอกาสที่จะไหลซึมผ่านไปทางด้านข้างของผนังเซลล์ช่องว่างระหว่างดินกับผนังเซลล์ ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีความผิดพลาด คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

ดังนั้น จึงได้มีแนวความคิดที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการออกแบบและสร้างชุดทดสอบ การซึมผ่านแบบความดันแปรเปลี่ยนหัวท้าย (Falling Head – Rising Tail) โดยชุดทดสอบนี้สามารถ แก้ปัญหาที่เกิดกับวิธีทดสอบแบบความดันคงที่และความดันแปรเปลี่ยน เพราะชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail นี้สามารถควบคุมแรงดัน ได้ทั้งทางน้ำเข้าและทางน้ำออกของตัวอย่าง ดิน สามารถให้แรงดันสูงๆ กับตัวอย่าง ได้ สามารถจำลองสภาพดินตัวอย่าง ได้ใกล้เคียงกับสภาพใน ธรรมชาติจริงก่อนเก็บตัวอย่างสามารถตรวจสอบการอิ่มตัวของตัวอย่าง (B Check) เช่นเดียวกับการ ทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) และเซลล์บรรจุตัวอย่างจะเป็นแบบผนังอ่อนตัว (Flexible Wall) บรรจุอยู่ในเซลล์รับแรงดัน (Pressure Cell) ซึ่งสามารถอัดแรงดันกอครัดด้านข้าง (Confining Pressure) แก่ตัวอย่างดินได้จึงทำให้ผนังเซลล์แบบสนิทกับดินป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ ซึ่งจะทำ ให้ได้ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินที่ใกล้เคียงกับดินในธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำในดินจากชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail กับชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head

1.3 ขอบเขต

ทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail โดยชุดทดสอบสามารถสร้างแรงดันได้ทั้งด้านทางน้ำเข้าและทางน้ำออกของตัวอย่างทดสอบ ได้สูงสุดไม่น้อยกว่า 700 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (7 bar) หรือสามารถสร้างความสูงของน้ำได้ ประมาณ 100 เมตร โดยใช้ปั๊มลมขนาดไม่น้อยกว่า 1,000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร สำหรับสร้าง แรงดันสำหรับเซลล์สามารถบรรจุตัวอย่างได้เส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 3.5 มิลลิเมตรพร้อม ฐานรองตัวอย่าง (Base Plate) และหัวปิดตัวอย่าง (Top Cap) โดยเซลล์บรรจุตัวอย่างมีวาล์วเปิดปิด ควบคุมแรงดันไม่น้อยกว่า 3 วาล์ว สำหรับควบคุมแรงดันภายในเซลล์บรรจุตัวอย่าง (Confining Pressure) สำหรับควบคุมแรงดันทางด้านน้ำเข้า (Falling Head) และควบคุมแรงดันทางด้านน้ำออก (Rising Tail) สำหรับควบคุมแรงดันจะใช้ตัวปรับควบคุมแรงอัดโนมัติ (Regulator) ติดตั้งพร้อม มาตรวัดแรงดัน (Pressure Gauge) ซึ่งสามารถวัดแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 700 กิโลนิวตันต่อตาราง เมตรจำนวนไม่น้อยกว่า 3 ชุด พร้อมกับชุดวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ (Volume Change) จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ชุด นอกจากนั้นจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ประกอบ เช่น สายยางทนแรงดัน

สูง แผลงติดตั้งอุปกรณ์พร้อมขาตั้งอุปกรณ์ยึดจับลงยางบรรจุตัวอย่าง (Rubber Membrane) หินพรุน (Porous Stone) และอื่นๆ เมื่อออกแบบและสร้างชุดทดสอบดังกล่าวเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำในดินของดินตัวอย่าง เปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลการทดสอบแบบ Constant Head และแบบ Falling Head

1.4 ขอบเขตของพื้นที่

ศึกษาโดยการสร้างชุดทดสอบแบบ Falling Head-Rising Tail ณ ห้องปฏิบัติการทดสอบ ปฐพีกลศาสตร์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail สำหรับทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำในดินที่สามารถควบคุมแรงดันทั้งทางน้ำเข้าและทางน้ำออกของตัวอย่างดิน และสามารถลดการซึมของน้ำผ่านทางด้านข้างของผนังเซลล์บรรจุตัวอย่างซึ่งมักเกิดกับกรณีที่บรรจุตัวอย่างในเซลล์แบบผนังแข็ง

1.5.2 ได้ชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินเพื่อการเรียนการสอนในวิชาปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

1.5.3 เป็นแนวทางในการออกแบบ พัฒนา และสร้างเครื่องมือหรือชุดทดสอบแบบอื่นๆ ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การซึมผ่านของน้ำมีความสำคัญต่องานด้านวิศวกรรมโยธาในส่วนที่เกี่ยวกับเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ การระบายน้ำในดิน ความสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของดินเพราะเป็นเหตุให้ความดันของน้ำในมวลดินเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลกระทบต่อหน่วยประสิทธิผลในเม็ดดิน และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งปริมาตรและกำลังของดิน

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

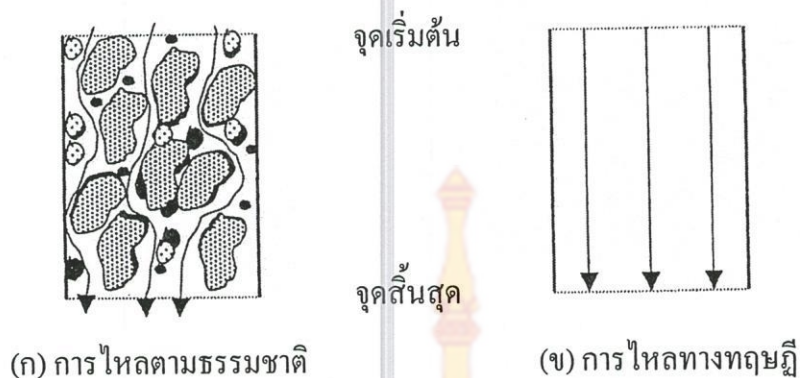
2.1.1 การใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวในชั้นกันซึมของบ่อกลบมูลฝอย [20]

ธนิต เกลิมยานนท์ (2550) ได้สรุปไว้ว่าดินเหนียวบดอัดมักถูกใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย เพื่อลดการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยไม่ให้ไปปนเปื้อนชั้นน้ำใต้ดินด้านล่าง งานวิจัยนี้ได้ศึกษาศักยภาพของการใช้ทรายผสมผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว เพื่อเป็นวัสดุในชั้นกันซึมปูพื้นของบ่อฝังกลบมูลฝอยในสถานที่ฝังกลบมูลฝอยสำหรับโลหะหนัก 5 ชนิด อันได้แก่ แคดเมียมตะกั่ว สังกะสี โครเมียมและนิกเกิล ผลการศึกษาคุณสมบัติของดิน พบว่า เบนโทไนต์ เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง ส่วนดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวมารินเกาะขอย เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเบนโทไนต์สูงกว่าดินเหนียวมารินเกาะขอยและดินลูกรังคองหงส์ ตามลำดับ การศึกษาคุณสมบัติการดูดติดผิวของดินด้วยวิธีการทดสอบแบบเบนซ์ พบว่า เบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดโลหะหนักมาติดผิวได้ดีกว่าดินเหนียวมารินเกาะขอยและดินลูกรังคองหงส์ ตามลำดับ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของเบนโทไนต์และดินเหนียวมารินเกาะขอยสอดคล้องกับสมการ Langmuir ในขณะที่ไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินลูกรังคองหงส์ สอดคล้องกับสมการ Freundlich ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายที่ผสมเบนโทไนต์ร้อยละ 3 ก็เพียงพอที่จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านน้อยกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ ร้อยละ 5 ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวมารินเกาะขอยมีค่าเท่ากับ 5.15×10^{-9} , 3.39×10^{-8} และ 5.67×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมเบนโทไนต์ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวมารินเกาะขอยยังคงมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ 500 วัน ถ้าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมไม่สูงกว่า 0.001 ไมครอนสำหรับทรายผสมเบนโทไนต์และดินลูกรังคองหงส์ และไม่เกิน 0.01 ไมครอนสำหรับดินเหนียวมารินเกาะขอย ตามลำดับ

ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักในดินที่ได้จากการทดสอบแบบสดมภ์ มีค่าดังต่อไปนี้ ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ ร้อยละ 5 มีค่า Diffusion Coefficient (D) อยู่ในช่วง $1.12 \times 10^{-5} - 1.77 \times 10^{-5}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที มีค่า Retardation factor (R) อยู่ในช่วง 90 - 130 ดินเหนียวมารินเกาะยอ มีค่า Diffusion Coefficient (D) อยู่ในช่วง $1.80 \times 10^{-7} - 9.14 \times 10^{-7}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที มีค่า Retardation factor (R) อยู่ในช่วง 37- 81 ดินลูกรังคองหงส์มีค่า Diffusion Coefficient (D) อยู่ในช่วง $1.00 \times 10^{-5} - 6.14 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยมีค่า Retardation factor (R) อยู่ในช่วง 1- 36 ความหนาของชั้นกันซึมคำนวณจากค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ พบว่าการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ ร้อยละ 5 และดินลูกรังคองหงส์ สำหรับเป็นชั้นกันซึมหนา 60 เซนติเมตร ตามมาตรฐานกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) ไม่สามารถลดการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยลงน้ำใต้ดินในระยะเวลา 100 ปีได้ แต่สำหรับการใช้ดินเหนียวมารินเกาะยอเพื่อเป็นชั้นกันซึม ที่มีความหนาประมาณ 30 เซนติเมตร จะสามารถลดการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมในระยะเวลา 100 ปีได้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของน้ำภายในมวลดินธรรมชาติ มีความสำคัญในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมโยธาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering) เพราะจะมีผลต่อคุณสมบัติของมวลดิน เราต้องเรียนรู้ถึงวิธีการและลักษณะการไหลของน้ำภายในเสียก่อน เป็นที่ทราบอยู่แล้วว่าช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Voids) ในมวลดินในๆ นั้น สามารถต่อเนื่องถึงกันได้โดยตลอด แม้แต่ในดินประเภทเม็ดละเอียด (Fine Grained Soil) ซึ่งช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดเล็กมาก การไหลของน้ำภายในมวลดินธรรมชาติจะไหลเป็นทางคดเคี้ยวไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Void Channels) จากช่องว่างหนึ่งไปสู่อีกช่องว่างหนึ่งและธรรมชาติของการไหลของน้ำจะพยายามใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดในการไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในมวลดินนั้น ดังในรูปที่ 2.1 ด้วยความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ แล้วแต่ขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่น้ำนั้นไหลผ่านอย่างไรก็ตามในทางทฤษฎีเราสมมุติว่าน้ำไหลผ่านมวลดินใดๆ ในแนวเส้นตรงความเร็วคงที่ระหว่างจุดสองจุดใดๆ ที่กำหนดให้ เมื่อมวลดินที่น้ำไหลผ่านเป็นมวลดินที่มีเนื้อเดียวกัน โดยตลอดหรือเราเรียกว่ามวลดินเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Soil)



รูปที่ 2.1 การไหลของน้ำผ่านช่องว่างของมวลดินระหว่างจุด 2 จุด

2.2.1 ความดันของน้ำ (Heads)

การไหลของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างจุดสองจุดใดๆ มีสาเหตุมาจากความแตกต่างของพลังงาน (Energy) ที่มีอยู่ในของเหลวเมื่อคิดเปรียบเทียบ ณ จุดทั้งสองจุดนั้น พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำในดินมีทั้งพลังงานศักย์ (Potential Energy) และพลังงานจลน์ (Energy per Unit Mass) พลังงานรวมที่มีอยู่ในน้ำ ณ จุดใดๆ ภายในมวลดินเรียกว่า ความดันน้ำรวม (Total Head) สามารถเขียนแสดงในรูปของ Bernoulli's Equation ได้ดังนี้

$$H = h + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{V^2}{2g} \quad (2.1)$$

- หรือ Total Head = Elevation Head + Pressure Head + Velocity Head
- โดยที่ H คือ ความดันน้ำรวม (Total Head)
- h คือ ความดันน้ำเนื่องจากระดับแตกต่างกัน (Elevation Head)
- u คือ แรงดันน้ำ (Pressure)
- v คือ ความเร็วกระแส น้ำ (Velocity)
- g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (Acceleration due to Gravity)
- γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ (Unit Weight of Water)

การไหลของน้ำในมวลดินตามปกติแล้วจะเป็นการไหลด้วยความเร็วช้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลของน้ำบนผิวดินโดยทั่วไป ดังนั้น ความดันของน้ำเนื่องจากความเร็วกระแสน้ำ (Velocity Head) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ Bernoulli's Equation จากระดับแตกต่างกัน (Elevation Head) ของน้ำ ณ จุดใดๆ ในมวลดิน เราจึงสมมุติให้ความดันของน้ำเนื่องจากความเร็วกระแสน้ำ ณ จุดใดๆ ในมวลดินมีค่าเป็นศูนย์โดยไม่มีผลกระทบต่อค่าความดันน้ำรวม (Total Head) ของน้ำในมวลดิน ณ จุดนั้นๆ เลย ดังนั้น Bernoulli's Equation ในกรณีนี้ จึงได้เขียนได้ในรูปของ

$$H = h + \frac{u}{\gamma_w} \quad (2.2)$$

หรือ Total Head = Elevation Head + Pressure Head

เมื่อ H หรือ Total Head ในที่นี้ก็คือ ความดันน้ำใต้ดิน ณ จุดภายใต้การพิจารณาภายในมวลดินนั่นเอง

สาเหตุที่ทำให้เกิดการไหลของน้ำจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในมวลดินซึ่งมีช่องการไหลระหว่างเม็ดดินต่อถึงกันได้ เป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันน้ำรวม (Total Head) ระหว่างจุดสองจุดนั้น โดยน้ำจะไหลจากจุดที่มีค่าความดันน้ำรวมสูงกว่าไปยังจุดที่มีค่าความดันน้ำรวมต่ำกว่า ในขณะที่การไหลของน้ำในมวลดินไม่จำเป็นจะต้องเป็นไหลจากจุดที่มีระดับสูงกว่าไปยังจุดที่มีระดับต่ำกว่าเสมอไป เพราะความดันน้ำรวม ณ จุดใดๆ ในมวลดินเป็นผลเนื่องมาจากระดับความสูง (Elevation) และมีความดันน้ำในโพรงดิน (Pore Pressure) ร่วมกัน เมื่อจุดสองจุดใดๆ ในมวลดินมีค่าความดันของน้ำรวมต่างกัน การไหลของน้ำจะเกิดขึ้นในลักษณะที่พยายามไหลผ่านช่องการไหลระหว่างเม็ดดินที่มีระยะทางสั้นที่สุดระหว่างจุดสองจุดนั้น ในการคำนวณค่าความดันน้ำเนื่องจากระดับแตกต่างกัน (Elevation Head) และความดันน้ำเนื่องจากความดัน (Pressure Head) นี้จะเป็นการคำนวณในลักษณะเปรียบเทียบจึงจำเป็นต้องมีมาตรฐานของการเปรียบเทียบคือ

1) ความดันน้ำเนื่องจากระดับแตกต่างกัน (Elevation Head) จะต้องกำหนดเส้นอ้างอิงทางระดับ (Datum Line) ระดับใดระดับหนึ่งการคำนวณค่าความดันน้ำเนื่องจากระดับแตกต่างกันที่เกี่ยวข้องกันทุกครั้งจะต้องใช้เส้นอ้างอิงทางระดับที่อยู่ระดับเดียวกันเสมอ

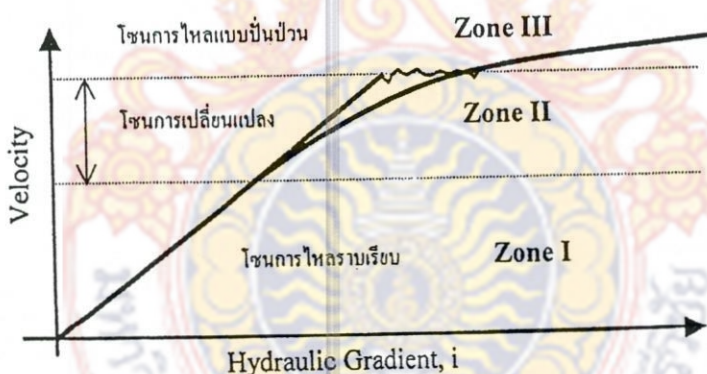
2) ความดันน้ำเนื่องจากความดัน (Pressure Head) โดยปกติกำหนดให้ความดันน้ำเนื่องจากความดัน ณ ระดับผิวน้ำมีค่าเท่ากับศูนย์ใช้เป็นเส้นอ้างอิงทางระดับของความดันน้ำ

เนื่องจากความดัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ปัญหาค่าของความดันน้ำรวม ณ จุดใดๆ จะเปลี่ยนแปลงไปได้ขึ้นอยู่กับระดับที่กำหนดให้เป็นเส้นอ้างอิงทางระดับของความดันน้ำเนื่องจากระดับแตกต่างกัน (Elevation Head) และค่าความดันน้ำรวม (Total Head) ณ จุดใดๆ ในมวลดินจะไม่ใช้ค่าคุณสมบัติสมบูรณ์ (Absolute Property) แต่เป็นเพียงค่าเปรียบเทียบกับเส้นอ้างอิงทางระดับที่กำหนดไว้เท่านั้น

โดยทั่วไปการผันแปรระหว่างความเร็วในการไหลของน้ำ (Velocity, v) กับความลาดชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient, i) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะแบ่งออกได้เป็น 3 โซน คือ

- 1) โซนการไหลราบเรียบ (Laminar Flow Zone, Zone I)
- 2) โซนการไหลเปลี่ยนแปลง (Transition Zone, Zone II)
- 3) โซนการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow Zone, Zone III)

ในการไหลนั้นค่า v กับ i จะเป็นสัดส่วนเฉพาะใน Zone I เท่านั้นในดินส่วนใหญ่แล้วการซึมผ่านของน้ำในมวลดินจะไหลช้ามากดังนั้นในการพิจารณาจะเป็นการไหลแบบราบเรียบเท่านั้น



รูปที่ 2.2 ความผันแปรระหว่างความเร็วในการไหลของน้ำ (v) กับความลาดชลศาสตร์ (i)

2.2.2 กฎของดาร์ซี (Darcy's Law)

ดาร์ซี (Darcy) ชาวฝรั่งเศสได้ติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบดังในรูปที่ 2.3 เพื่อศึกษาความดันต่างกันและมีระยะทางการไหลภายในต่างกันด้วย ทั้งนี้เพื่อบันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างมวลดินนั้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาในการไหลของน้ำแต่ละครั้ง สามารถสรุปได้ว่าการที่น้ำไหลผ่านมวลดินในทิศทางเดียวกัน (One - Dimensional Flow) และตัวอย่างมวลดินที่ใช้ทดสอบอยู่ในสภาวะอิ่มตัวตลอดเวลาปริมาณการไหลของน้ำผ่านมวลดิน จะแปรผันไปกับองค์ประกอบสามประการ คือ

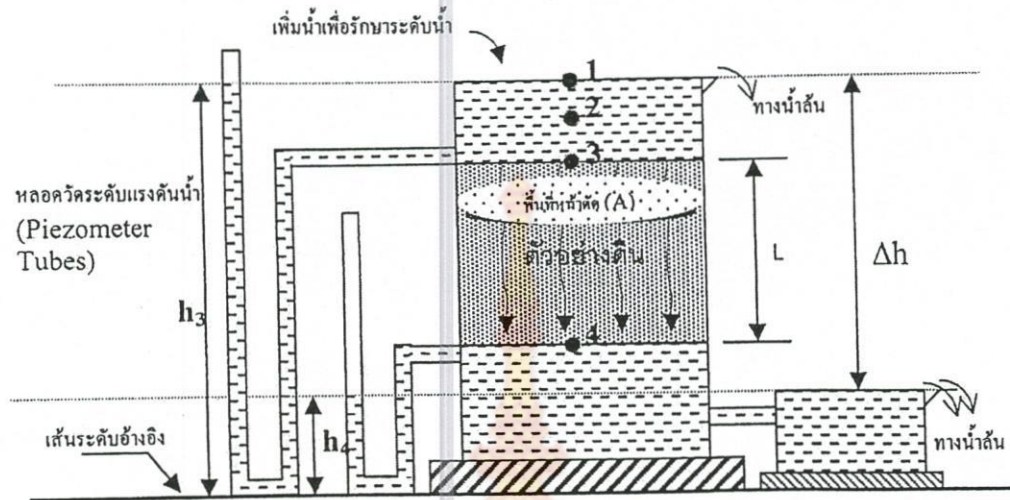
- ก. ค่าแตกต่างระหว่างจุดสองจุดภายใต้การพิจารณา (Total Head Difference)
 ข. พื้นที่หน้าตัดของมวลดินที่น้ำไหลผ่าน
 ค. ระยะทางการไหลของน้ำในมวลดิน

ซึ่งคาร์ซี สามารถนำมาเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$q \propto \frac{\Delta h}{L} A \quad (2.3)$$

- เมื่อ q คือ ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านมวลดินในหนึ่งหน่วยเวลา (อัตราการไหลของน้ำ)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างมวลดินบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ
 L คือ ระยะทางที่น้ำไหลระหว่างจุดสองจุดภายใต้การพิจารณาภายในมวลดิน
 ในการทดสอบของ คาร์ซี นี้ระยะทาง L ก็คือความยาวของตัวอย่างมวลดินที่ใช้
 ในการทดสอบแต่ละครั้งนั่นเอง
 Δh คือ ความแตกต่างของค่าความดันน้ำรวม (Total Head) ระหว่างจุดที่น้ำไหลเข้าสู่มวล
 ดินจุด 3 และจุดที่น้ำไหลออกจากมวลดินจุด 4 จากรูปที่ 2.3 นี้พบว่า

$$\Delta h = (h_3 - h_4)$$



รูปที่ 2.3 เครื่องมือทดสอบการไหลซึมของคาร์ซี

เมื่อนำสมการที่ 2.3 มาวิเคราะห์หาค่าต่อไปจะพบว่า

$$q \propto \frac{\Delta h}{L} A$$

$$q \propto \frac{(h_3 - h_4)}{L} A$$

$$q \propto i A$$

$$q = kiA$$

(2.4)

เมื่อ i คือ ความลาดชันศาสตร์ (Hydraulic Gradient) ของการไหลของน้ำในมวลดิน ระหว่างจุดที่ 3 และจุดที่ 4 หรือ

$$i = \frac{(h_3 - h_4)}{L}$$

(2.5)

และ k คือ ค่าคงที่ของการแปรผัน เรียกว่า ค่าคงที่ของดาร์ซี (Darcy's Constant) หรือเรียกโดยทั่วไปว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) มีหน่วยของระยะทางต่อหนึ่งหน่วยเวลา

หากเราต้องการวิเคราะห์เกี่ยวกับความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านมวลดิน เราจะพบว่าเมื่อเราใช้ความสัมพันธ์ $v = \frac{q}{A}$ กับสมการที่ 2.4 จะได้

$$v = ki \quad (2.6)$$

เมื่อ v ในที่นี้ คือ ความเร็วโดยเฉลี่ยของน้ำที่ไหลผ่านมวลดินบนที่หน้าตัดเป็น A (Cross Sectional Area, A) ของมวลดินนั้น แต่การที่น้ำไหลผ่านมวลดินโดยการไหลไปในช่องการไหลระหว่างเม็ดดินมีค่าสูงกว่าความเร็วโดยเฉลี่ยของน้ำที่ไหลผ่านมวลดิน (Approach Velocity, v) ความเร็วของการไหลของน้ำภายในช่องการไหลระหว่างเม็ดดินภายในมวลดิน สามารถประเมินได้โดยอาศัยกฎการไหลต่อเนื่อง (Law of Continuity) คือ ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่การทดสอบเท่ากับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านช่องการไหลระหว่างเม็ดดินในมวลดินเท่ากับปริมาณน้ำที่ไหลออกจากการทดสอบ ในหนึ่งหน่วยเวลาเดียวกัน หรือ

$$q_{in} = vA = v_s A_v = q_{out} \quad (2.7)$$

เมื่อ v_s คือความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านช่องการไหลระหว่างเม็ดดินภายในมวลดิน โดยที่พื้นที่หน้าตัดของช่องการไหลระหว่างเม็ดดินบนพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินทั้งหมดมีค่า A_v ค่า A_v นี้ถือว่าเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับตลอดความยาว L ของตัวอย่างดิน หรือ มวลดินภายใต้การพิจารณา v_s นี้เรียกว่า ความเร็วการซึมผ่าน (Seepage Velocity) เมื่อวิเคราะห์สมการที่ 2.7 พบว่า

$$v_s = v \frac{A}{A_v} = v \frac{AL}{A_v L} = v \frac{V}{V_v} = v \frac{1}{n}$$

$$v_s = \frac{ki}{n} \quad (2.8)$$

โดยที่ L คือ ระยะที่น้ำไหลผ่านมวลดิน หรือความยาวของตัวอย่างมวลดิน
ตั้งในรูปที่ 2.3

AL คือ ปริมาตรรวมของตัวอย่างมวลดิน (V)

A_vL คือ ปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีอยู่ภายในตัวมวลดินนั้น
หรือ อีกนัยหนึ่ง คือ ปริมาตรของช่องว่างการไหลระหว่างเม็ด
ดินภายในตัวอย่างมวลดิน (V_v)

$\frac{V_v}{V}$ คือ ความพรุน (Porosity, n) ของตัวอย่างมวลดิน

v คือ ki จากสมการที่ 2.6

จากสมการที่ 6 เราสามารถให้คำจำกัดความของสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, k) ได้ว่าเป็นอัตราการไหลของน้ำผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ของมวลดิน ภายใต้อันหนึ่งหน่วยเวลา ค่าความลาดชัน (Hydraulic Gradient, i) มีหน่วยเป็นหน่วยของความเร็วจน เช่น เซนติเมตรต่อวินาที หรือ เมตรต่อวัน เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านนี้มีอิทธิพลต่อสมบัติที่คงที่ของมวลดินใดๆ สามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ขึ้นอยู่กับ

ก. ความพรุนของมวลดิน

ข. ขนาดและลักษณะช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งประกอบกันขึ้นเป็นช่องการไหลระหว่างเม็ดดิน (Flow Channels) ภายในมวลดิน

ค. ความหนาแน่น และความหนืด (Viscosity) ของของเหลว

ดังนั้นมวลดินซึ่งประกอบไปด้วยเม็ดดินชนิดเดียวกันสามารถที่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน แตกต่างกันได้โดยปกติแล้วมวลดินธรรมชาติจะประกอบไปด้วยชั้นดินต่างๆ กันแต่ละชั้นมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมไม่เหมือนกันหรือมีฉะนั้นก็อาจเป็นมวลดินประเภทเดียวกันที่มีคุณสมบัติภายในแตกต่างกัน เหตุเหล่านี้สามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของมวลดินนั้นๆ เปลี่ยนแปลงไปได้มาก ที่เห็นได้ชัด คือ มวลดินชนิดเดียวกันซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินลงไปจะมีความหนาแน่นสูงขึ้นมีผลให้ช่องการไหลระหว่างเม็ดดินของน้ำในมวลดินแคบและมีปริมาณน้อยลง ทำให้น้ำไหลผ่านมวลดินที่ระดับลึกๆ ไหลได้ยากกว่าการไหลผ่านมวลดินในส่วนที่อยู่ ณ ระดับใกล้ผิวดิน นอกจากนั้นการจัดตัวของเม็ดดินในทิศทางต่างๆ เช่น ในแนวราบ และในแนวตั้ง ก็ยังแตกต่างกันออกไป หรือ การที่มวลดินมีลักษณะไม่เหมือนกันทุกทิศทาง (Anisotropic Soils) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ณ จุดใดๆ ในมวลดินมีค่าแตกต่างกันไปด้วยเมื่อทิศทางการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น เพื่อมิให้เกิดความยุ่งยากเกินความจำเป็นในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของน้ำในมวลดินค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่นำมาใช้ปกติจะถือเป็นค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของมวลดินภายใต้การพิจารณาในทุกทิศทางและตลอดระยะความลึกที่เกี่ยวข้อง เรียกว่า สัมประสิทธิ์การซึมผ่านเทียบเท่า (Equivalent Coefficient of Permeability) หรือ อีกนัยหนึ่งเป็นการสมมุติว่ามวลดินที่พิจารณาอยู่นั้นมีสภาพเป็นดินเนื้อเดียวกันและเหมือนกันทุกทิศทาง (Homogeneous Isotropic Soils) สมมุติฐานนี้จะนำมาใช้ได้ในการที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในมวลดินนั้น ไม่แตกต่างกันมากนัก ไม่ว่าจะ เป็น ณ จุดใดในมวลดินหรือในทิศทางใดก็ตาม

2.2.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของมวลดินในห้องปฏิบัติการ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, k) ของมวลดินชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้ในการคำนวณโดยปกติจะได้มาจากการทดสอบประกอบกับการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีการทดสอบเพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของมวลดินมีทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการนี้เป็นการทดสอบอย่างง่าย โดยสมมุติให้การไหลของน้ำผ่านตัวอย่างมวลดินเป็นการไหลแบบมิติเดียว (One - Dimensional Flow) ซึ่งเหมาะสมที่จะทำการทดสอบกับมวลดินจากแหล่งดินประเภทดินเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Soil) ที่มีการไหลของน้ำในทิศทางเดียวโดยตลอดตัวอย่างมวลดินที่ใช้ในการทดสอบถ้าจะให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงควรเป็นตัวอย่างประเภทไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Sample) แต่ถ้าเป็นดินที่มีทรายปนมากหรือเป็นทรายล้วนๆ การทำตัวอย่างขึ้นใหม่โดยใช้แบบ (Remolded Sample) ขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยให้มีคุณสมบัติต่างๆ

ใกล้เคียงกับสภาพของมวลดินที่ต้องการทำการทดสอบมากที่สุดก็สามารถใช้ทำการทดสอบได้ การทดสอบเพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในห้องปฏิบัติการที่เป็นวิธีการ โดยตรง (Direct Method) และนิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน มี 2 วิธี คือ วิธีความดันน้ำคงที่ (Constant Head) และวิธีความดันน้ำแปรเปลี่ยน (Falling Head หรือ Variable Head) ส่วนวิธีการทางอ้อม (Indirect Method) สามารถทำการทดสอบได้โดยใช้การทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) กับตัวอย่างมวลดิน ซึ่งนิยมใช้ทำการทดสอบกับมวลดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำหรือมวลดินที่มีคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับดินประเภทที่บึ้นน้ำ (Impermeable Soil) วิธีการโดยตรงทั้งสองวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นที่นิยมใช้ทำการทดสอบกับมวลดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงถึงปานกลางหรือมวลดินที่จัดไว้ประเภทดินที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Permeable Soil)

ตาราง 2.1 ค่าทั่วไปของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน [19]

ชนิดของดิน	ค่า k (เซนติเมตรต่อวินาที)
กรวด	$1 - 10^2$
กรวดเม็ดละเอียด, ทรายหยาบ	$1 - 10^{-3}$
ทรายละเอียดและซิลต์อัดไม่แน่น	$10^{-3} - 10^{-5}$
ซิลต์อัดแน่นและซิลต์ปนดินเหนียว	$10^{-5} - 10^{-6}$
ดินเหนียวปนซิลต์และดินเหนียว	$10^{-6} - 10^{-9}$

2.2.4 วิธีความดันคงที่ (Constant Head)

เป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า ชุดการทดสอบความสามารถการซึมผ่านแบบความดันคงที่ ซึ่งมีลักษณะวิธีการทดสอบคล้ายกับวิธีการและอุปกรณ์ของคาร์ซี ลักษณะสำคัญของการทดสอบ คือ การปล่อยให้ น้ำไหลผ่านตัวอย่างดินเพื่อทำการวัดค่าอัตราการไหล (Flow Rate, q) แต่ละครั้ง ภายใต้ความดันที่คงที่ (Constant Head) ระหว่างจุดสองจุดใดๆ ในมวลดิน (จุด A และ B ในรูปที่ 2.4) เมื่อทำการบันทึกปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านออกมาจากชุดทดสอบการซึมผ่านในช่วงระยะเวลาที่กำหนดไว้แล้วสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, k) ได้จากสมการที่ 2.9

$$k = \frac{QL}{tA \Delta h} = \frac{q}{A} i \quad (2.9)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านออกมาจากชุดทดสอบการซึมผ่านในระยะเวลา

$$t(Q = q \times t)$$

t คือ ช่วงระยะเวลาที่กำหนดไว้สำหรับการทดสอบแต่ละครั้ง

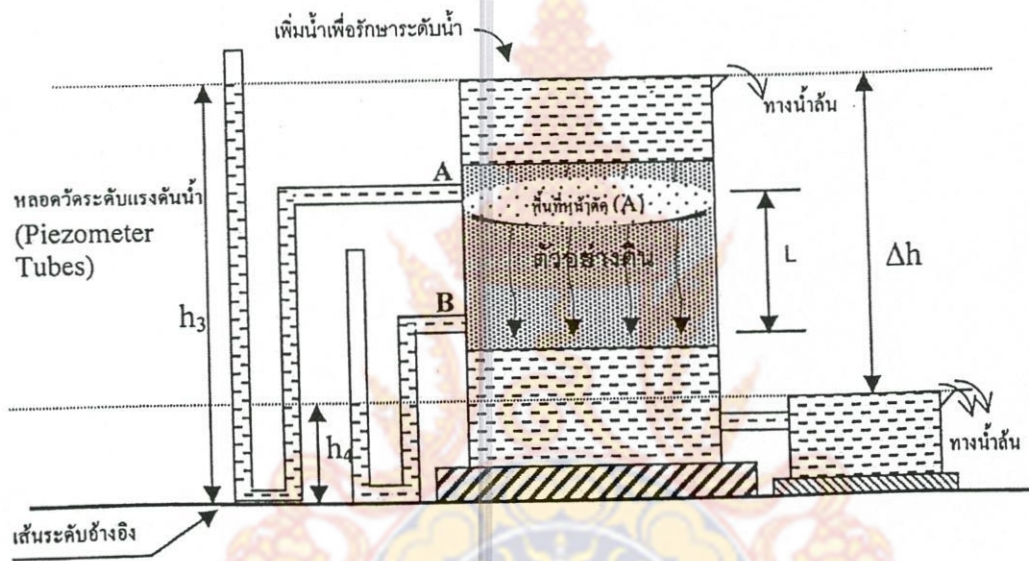
A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินที่น้ำไหลผ่าน

L คือ ระยะทางระหว่างจุดสองจุดใดๆ ภายใต้การพิจารณาในมวลดิน

Δh คือ ค่าความแตกต่างของความดันน้ำรวม (Total Head) ระหว่างจุดสองจุดระยะทาง L ในมวลดินนั้น

การทดสอบเพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของมวลดินโดยวิธีนี้ ในขณะที่ทำการทดสอบเพื่อบันทึกอัตราการไหลของน้ำ มวลดินจะต้องอยู่ในสภาพอิ่มตัวเพื่อให้การไหลของน้ำผ่านตัวอย่างมวลดินเป็นไปในลักษณะการไหลคงที่ (Steady Flow) และจะต้องรักษาระดับน้ำในอ่างน้ำชั้นบนให้คงที่อยู่ตลอดเวลาการทดสอบ (Constant Level) การทดสอบอาจทำได้หลายๆ ครั้งโดยเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในอ่างน้ำชั้นบนเพื่อให้ค่า Δh แตกต่างกันไป ในการบันทึกอัตราการไหลของน้ำแต่ละครั้งหรืออาจเปลี่ยนแปลงระยะ L ระหว่างจุดสองจุดภายใต้การพิจารณา

ในมวลดินตัวอย่าง รวมทั้งเปลี่ยนแปลงระยะเวลา t ที่กำหนดไว้เป็นช่วงเวลาสำหรับบันทึกปริมาณการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างมวลดิน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างมวลดินที่คำนวณได้จากการทดสอบแต่ละครั้งอาจเปลี่ยนไปได้ แต่ค่าที่จะนำไปใช้ควรจะเป็นค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่คำนวณได้จากทุกค่า วิธีการทดสอบนี้นิยมใช้กับตัวดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.4 ชุดทดสอบการซึมผ่านแบบความดันน้ำคงที่

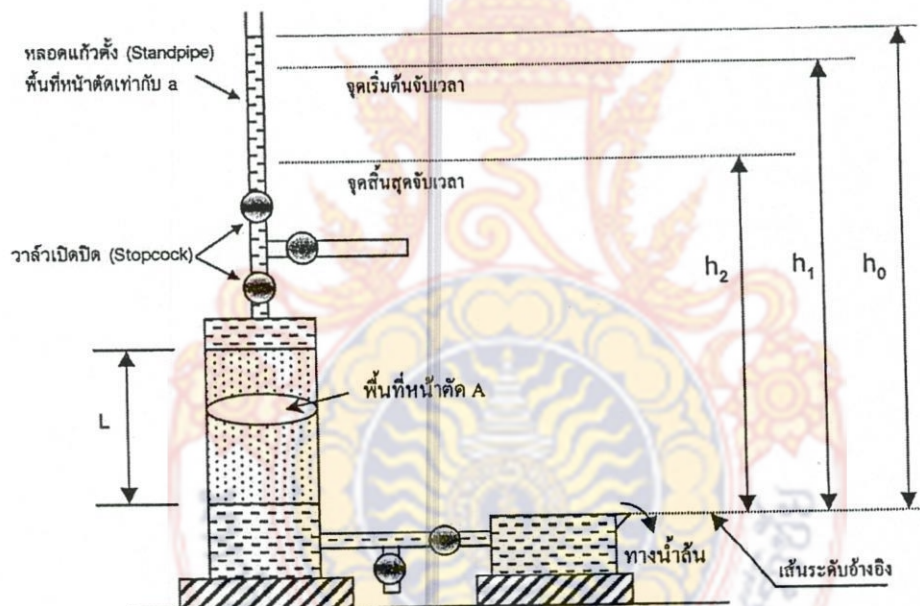
2.2.5 วิธีความดันแปรเปลี่ยน (Falling Head หรือ Variable Head)

วิธีนี้ใช้เครื่องมือในการทดสอบเรียกว่า ชุดทดสอบการซึมผ่านแบบความดันแปรเปลี่ยน (Variable Head Permeameter) ซึ่งมีลักษณะการจัดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อเริ่มต้นการทดสอบตัวอย่างมวลดินจะต้องอยู่ในสภาพอิ่มตัวและมีน้ำในหลอดแก้วตั้ง (Stand Pipe) มากพอที่ใช้ทำการทดสอบแต่ละครั้งได้โดยต่อเนื่องกัน เริ่มทำการทดสอบโดยเปิดวาล์วเปิดปิดให้น้ำจากหลอดแก้วตั้งไหลซึมผ่านตัวอย่างมวลดินจนสังเกตเห็นได้ว่าระดับน้ำในหลอดแก้วตั้งลดลงด้วยอัตราความเร็วคงที่ แล้วจึงอ่านค่าระดับน้ำในหลอดแก้วตั้ง ที่ระดับ h_1 พร้อมกับที่เวลาจากนาฬิกาจับเวลา t_1 ปล่อยให้ให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างมวลดินต่อไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง แล้วบันทึกค่า

ระดับน้ำในหลอดแก้วตั้งที่ระดับ h_2 พร้อมๆ กับบันทึกเวลา t_2 จากนั้นก็จับเวลา ในการทดสอบนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาที่การไหลของน้ำเพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างของความดันของน้ำรวมที่ดันให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างมวลคินจะลดลงและปริมาณน้ำที่ไหลผ่านมวลคินออกไปจากชุดทดลองการซึมผ่าน คือปริมาณน้ำที่ตกลงในหลอดแก้วตั้งนั่นเอง เมื่อให้ a เป็นพื้นที่หน้าตัดภายในของหลอดแก้วตั้ง ปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างมวลคินในช่วงเวลา dt ใดๆ Q จะมีค่าเท่ากับ $-a dh$

เมื่อ dh คือ ระยะที่ระดับน้ำลดลงในหลอดแก้วตั้งในช่วงเวลา dt และมีค่าเป็นลบ

q คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างมวลคิน (Flow Rate) จะเท่ากับ $-a \frac{dh}{dt}$



รูปที่ 2.5 ชุดทดสอบการซึมผ่านแบบความดันแปรเปลี่ยน

โดยอาศัยสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 พบว่า

$$v = \frac{q}{A} = k i \quad (2.10)$$

ดังนั้น

$$-\frac{a}{A} \frac{dh}{dt} = k \frac{h}{L}$$

$$-\frac{dh}{h} = \frac{Ak}{aL} dt$$

$$-\int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = \frac{Ak}{aL} \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$-\ln \frac{h_2}{h_1} = \frac{Ak}{AL} (t_2 - t_1)$$

$$\ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{Ak}{aL} t \quad \text{เมื่อ } t = (t_2 - t_1)$$

$$k = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2.10a)$$

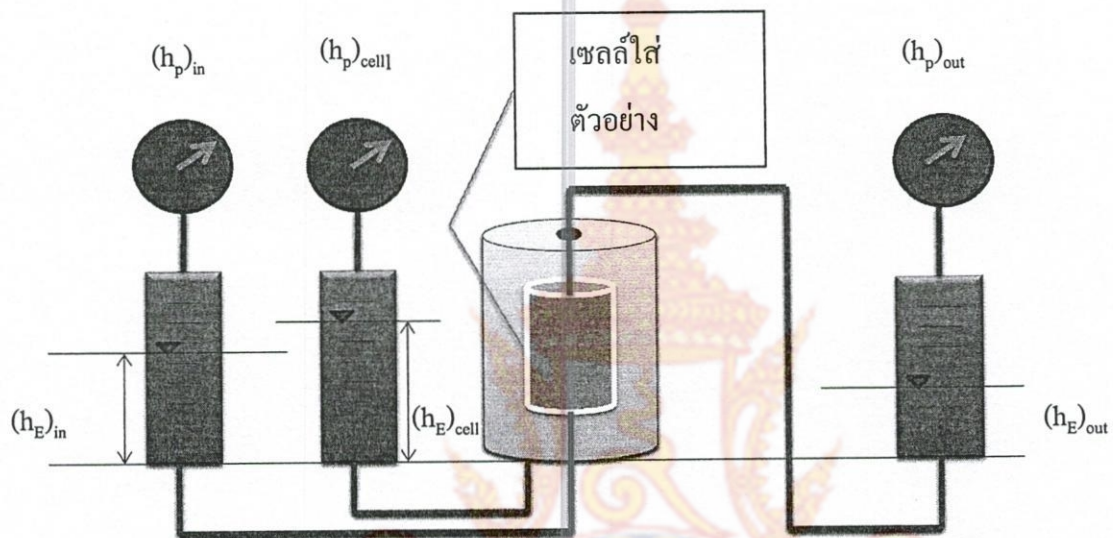
หรือ

$$k = 2.3 \frac{aL}{At} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (2.10b)$$

วิธีการทดสอบนี้ เหมาะที่จะใช้กับตัวอย่างมวลดินซึ่งมีเม็ดดินประเภทเม็ดละเอียด (Fine Grain Soils) ปนอยู่มากพอประมาณ หรือ ตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Soil Samples) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านปานกลางจนถึงค่อนข้างต่ำ

2.2.6 การซึมผ่านของน้ำในดินแบบ (Falling Head – Rising Tail)

จากการทดลองของชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ (Falling Head – Rising Tail) วิธีนี้ใช้หาค่า k หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน จากการทดลองได้ค่า ดังนี้



รูปที่ 2.6 ชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail

การคำนวณการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail

$$k = \frac{a_{in} a_{out} L}{A (t_2 - t_1) (a_{in} + a_{out})} \ln\left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}\right) \quad (2.11)$$

$$\Delta h_1 = [(h_E + h_p)_{in} - (h_E + h_p)_{out}] \text{ at } t_1 \quad (2.11a)$$

$$\Delta h_2 = [(h_E + h_p)_{in} - (h_E + h_p)_{out}] \text{ at } t_2 \quad (2.11b)$$

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ Falling Head – Rising Tail

k คือ Coefficient of Permeability

h_E คือ Elevation Head

h_p คือ Pressure Head

a_{in} คือ พื้นที่หน้าตัดของหลอด Stand Pipe ของน้ำเข้า (Head Pressure)

a_{out} คือ พื้นที่หน้าตัดของหลอด Stand Pipe ของน้ำออก (Tail Pressure)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของดินตัวอย่าง

L คือ ความยาวของตัวอย่างดิน

t_1 คือ เวลาเริ่มทดสอบ

t_2 คือ เวลาหลังทดสอบ



บทที่ 3
วิธีการดำเนินโครงการ

3.1 แผนการดำเนินงาน

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail มีแผนการดำเนินงานดังแสดงตาราง 3.1

ตาราง 3.1 แผนการดำเนินงานการสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail

		กันยายน 2555	ตุลาคม 2555	พฤศจิกายน 2555	ธันวาคม 2555	มกราคม 2556	กุมภาพันธ์ 2556
กิจกรรมที่ 1 เก็บข้อมูล	P	————					
	A					
กิจกรรมที่ 2 ออกแบบ	P		———				
	A					
กิจกรรมที่ 3 ตัดเหล็ก	P		—————				
	A					
กิจกรรมที่ 4 ประกอบตาม แบบ	P			———			
	A					
กิจกรรมที่ 5 ติดตั้งชุดทดสอบ	P			—————			
	A					
กิจกรรมที่ 6 ทำการทดสอบ	P				—————	—————	
	A				
กิจกรรมที่ 7 สรุปผล	P						—————
	A					

————

แสดงแผนการดำเนินงาน (Plan)

.....

แสดงการดำเนินงานจริง (Action)

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 ศึกษาข้อมูลและรายละเอียดและการทำงานของชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail

3.2.2 ออกแบบสำหรับสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail

3.2.3 จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail

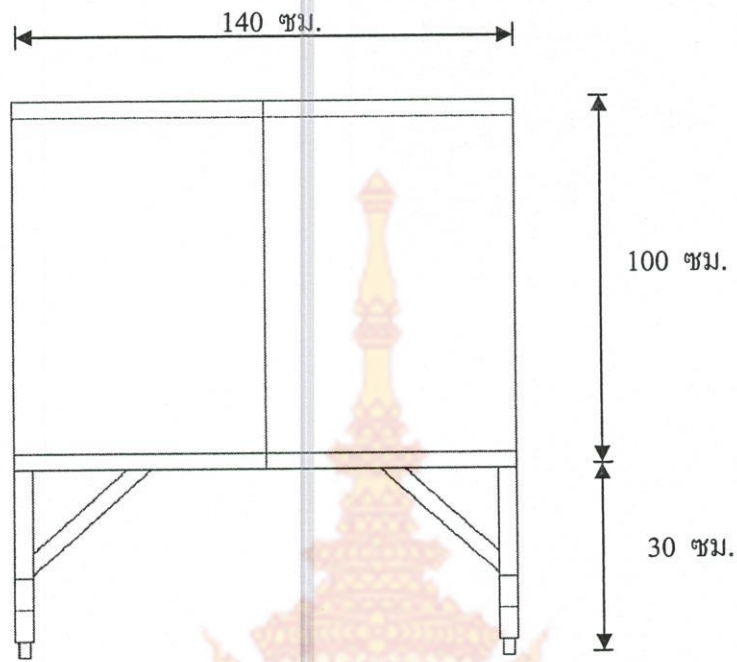
3.2.4 ทดสอบการทำงานของชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail

3.2.5 ทดสอบเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail กับการทดสอบแบบ Constant Head และ แบบ Falling Head

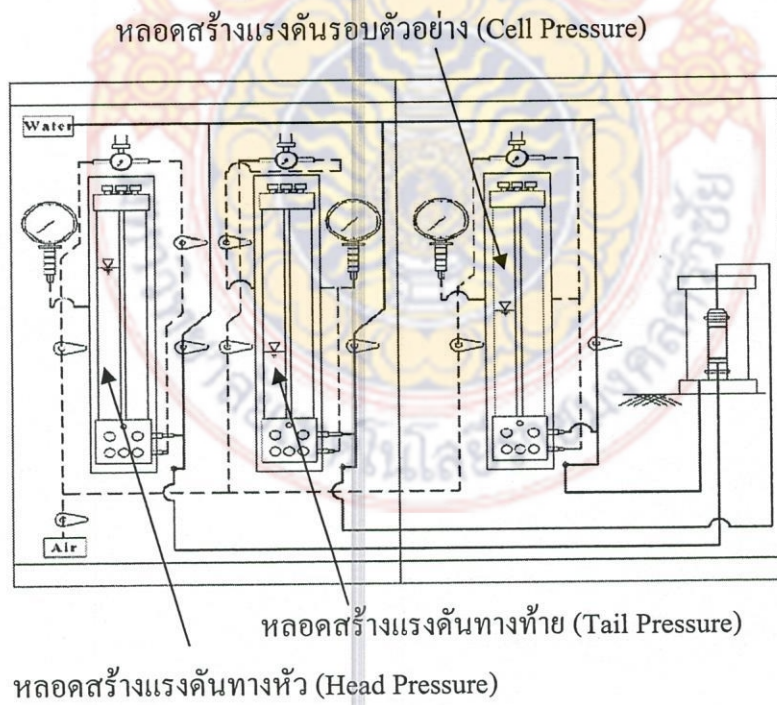
3.2.6 วิเคราะห์ผลที่ได้ สรุปผลการวิจัย และจัดทำเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ พร้อมทั้งเผยแพร่ผลงานวิจัย

3.3 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

รูปแบบของชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail จะคล้ายกับชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ที่เราเห็นทั่วไป การออกแบบชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail ได้ออกแบบเป็นบอร์ด (Board) สามารถเคลื่อนย้ายได้เพื่อง่ายต่อการทดสอบและสังเกตพฤติกรรมของดิน และง่ายต่อการทำความสะอาดชุดการทดลองนี้จะเป็นบอร์ด ซึ่งมีความกว้าง 140 เซนติเมตร สูง 130 เซนติเมตร ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 บอร์ด (Board)



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของหลอดสร้างแรงดันของชุดทดสอบ Falling Head – Rising Tail

3.4 ทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ

นำตัวอย่างดินที่ต้องการไปหาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดิน เช่น ทดสอบค่าความหนาแน่น (Density) ทดสอบค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) หาปริมาตร (Volume) ของตัวอย่างดิน และอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Void Ratio)

3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

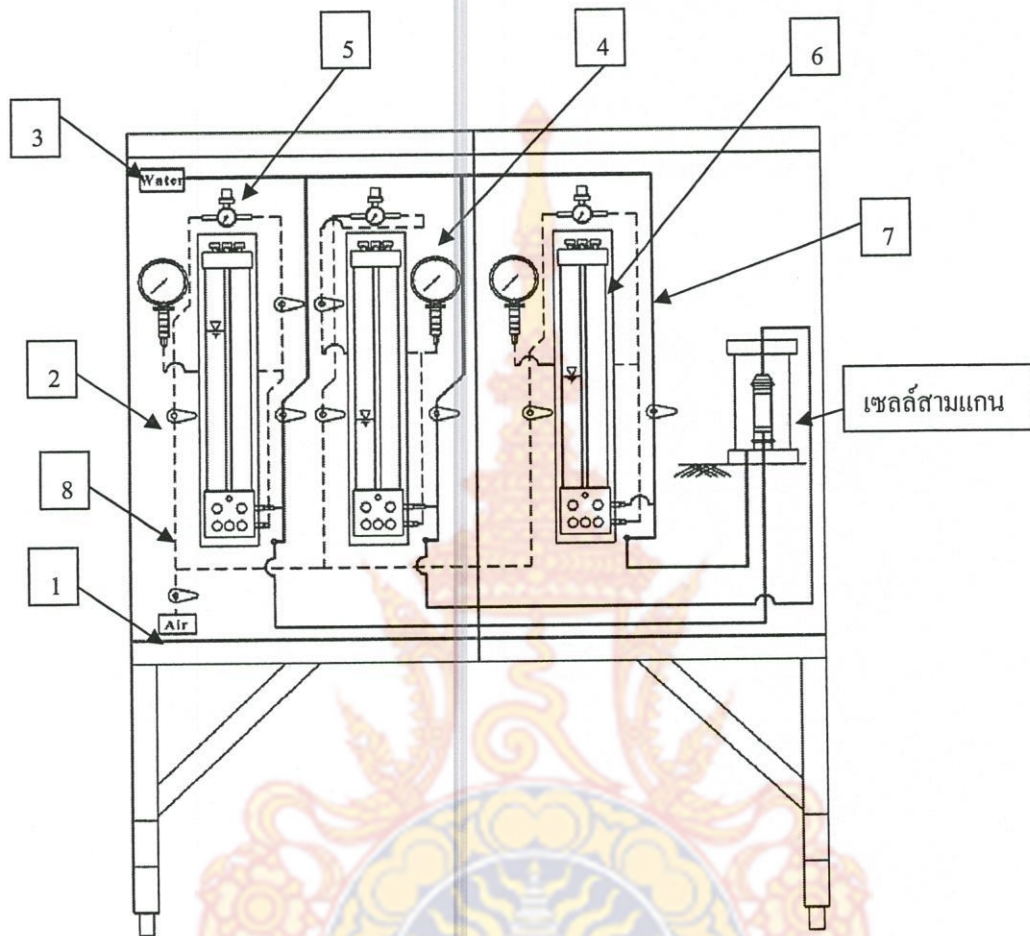
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

- 1) ถังเก็บน้ำ (Water Tank)



รูปที่ 3.3 ถังเก็บน้ำ (Water Tank)

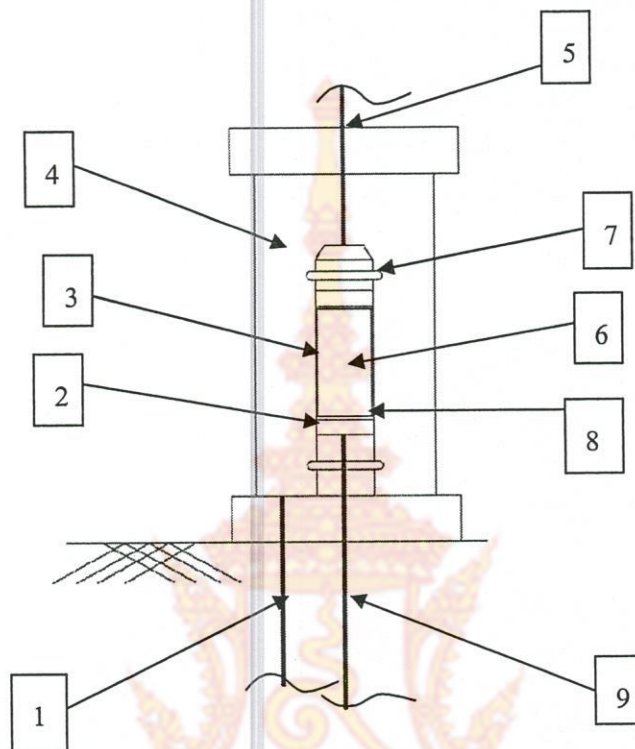
2) ชุดการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ประกอบชุดทดสอบ Falling Head – Rising Tail

1. ทางเข้าอากาศต่อจากปั๊มลม (Air)
2. วาล์วเปิด – ปิด (Valve)
3. ทางเข้าน้ำต่อจากถังด้านหลัง (Water)
4. เกจวัดแรงดัน (Pressure Gauge)
5. ตัวควบคุมแรงดัน (Regulator)
6. หลอดแก้วบรรจุน้ำ (Twin Burette)
7. เส้นทางเดินน้ำ (Water Line)
8. เส้นทางเดินอากาศ (Air Line)

3) เซลล์สามแกน (Triaxial Cell)



รูปที่ 3.5 เซลล์สามแกน (Triaxial Cell)

1. แรงดันรอบตัวอย่าง (Cell Pressure)
2. หินพรุน (Porous Stone)
3. ปลอกยาง (Rubber Membrane)
4. น้ำรอบตัวอย่าง (Water)
5. แรงดันทางท้าย (Tail Pressure)
6. ดินตัวอย่าง (Soil Sample)
7. ยางวงแหวน (O ring)
8. กระดาษกรอง (Filter Paper)
9. แรงดันทางหัว (Head Pressure)

5) อุปกรณ์และวัสดุต่างๆ ในการเตรียมตัวอย่าง เช่น ตัวถังยางวงแหวน หินพรุน กระดาษกรอง ปลายยาง และยางวงแหวน



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์และวัสดุในการเตรียมตัวอย่าง

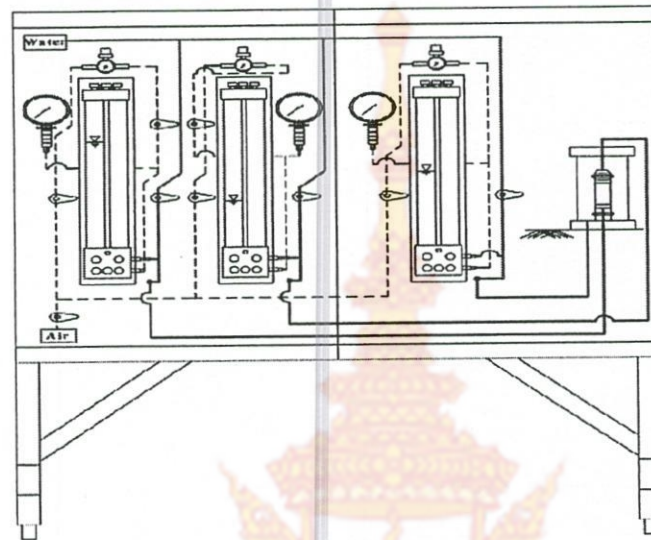
6) ปั๊มลม (Air Pump)



รูปที่ 3.7 ปั๊มลม (Air Pump)

3.6 ขั้นตอนการดำเนินการสร้าง

1) ออกแบบชุดทดสอบการซึมผ่านแบบ Falling Head – Rising Tail



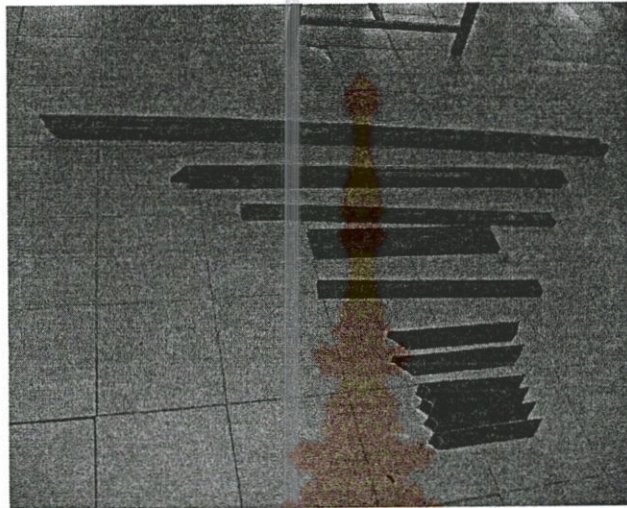
รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบที่ออกแบบที่ Falling Head – Rising Tail

2) ตัดเหล็กให้ได้ตามขนาดตามแบบที่ได้ออกแบบของโครงสร้าง



รูปที่ 3.9 การตัดเหล็ก

3) เชื่อมชิ้นส่วนโครงสร้างให้ได้ตามแบบที่ออกแบบมา



รูปที่ 3.10 ชิ้นส่วนเหล็กที่ตัดตามขนาด

4) นำแผ่นอลูมิเนียมมาตัดและดัดขึ้นรูปตามแบบ



รูปที่ 3.11 การขึ้นรูปเหล็ก

5) นำแผ่นอลูมิเนียมที่ขึ้นรูปแล้วมาประกอบกับโครงสร้างที่ได้เชื่อมไว้แล้ว



รูปที่ 3.12 การประกอบแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับ โครงเหล็ก

6) ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับชุดทดสอบบนบอร์ด (Board) สแตนเลส



รูปที่ 3.13 การติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดสอบ

3.7 ขั้นตอนการทดสอบ

3.7.1 ขั้นตอนการเตรียมชุดทดสอบ

3.7.1.1 นำดินที่เตรียมไว้แล้วใส่ในเซลล์สามแกนที่รองด้วยหินพรุน แล้วใส่ปลอกยางให้หุ้มตัวอย่างดิน แล้วรัดด้วยยางวงแหวนกั้นน้ำรั่วซึม ปิดเซลล์ให้แน่นแล้วเติมน้ำให้เต็ม

3.7.1.2 ทำการต่อสายทนแรงดัน (สาย PU) จากปั๊มลมเข้ากับแผงควบคุมความดัน

3.7.1.3 เติมน้ำเข้าหลอดสร้างแรงดัน Head Pressure Tail Pressure และ Cell Pressure ให้ได้ระดับตามต้องการ

3.7.1.4 ปรับตัวควบคุมแรงดันให้เป็นศูนย์ทุกหลอดสร้างแรงดัน พร้อมทดสอบ

3.7.2 วิธีการใช้ชุดทดสอบแบบ Falling Head Rising Tail

3.7.2.1 จากรูปที่ 3.2 และ 3.5 ต่อเซลล์สามแกนเข้ากับหลอดสร้างแรงดันทั้งสามหลอด คือ หลอด Head Pressure ($a_{in} = 4.10$ ตารางเซนติเมตร) หลอด Tail Pressure ($a_{out} = 4.10$ ตารางเซนติเมตร) และ หลอด Cell Pressure ($a = 4.10$ ตารางเซนติเมตร) สำหรับหลอด Cell Pressure จะสร้างแรงดันรอบๆ ดินตัวอย่าง จึงทำให้ผนังบางด้านข้างสามารถแนบสนิทกับตัวอย่าง ทำให้ลดปัญหาของการซึมของน้ำทางด้านข้างของตัวอย่างดิน ดังเช่นกรณีของการใช้เซลล์ผนังแข็ง

3.7.2.2 ให้แรงดันในหลอด Cell Pressure มากกว่าหลอด Head Pressure เสมอ (เพราะจะทำให้แรงดันกดโดยรอบตัวอย่าง ถ้า Head Pressure มากกว่า Cell Pressure ตัวอย่างดินจะบวมตัวและอาจจะวิบัติได้) จากนั้นรอกจนกว่าตัวอย่างดินจะอึดตัว ถ้าดินยังไม่มีอาการอึดตัวให้เพิ่มแรงดันขึ้นไปเรื่อยๆ ตามกระบวนการการทำ B Check

3.7.2.3 เมื่อตัวอย่างดินอึดตัวและปริมาตรของน้ำที่ไหลเข้าตัวอย่างเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ไหลออก ($Q_{in} = Q_{out}$) แสดงว่าดินตัวอย่างพร้อมที่จะทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดิน

3.7.2.4 การทดสอบจะเพิ่มแรงดันในหลอด Head Pressure ให้มากกว่าหลอด Tail Pressure และหลอด Cell Pressure จะมากกว่า Head Pressure เสมอ โดยการให้แรงดันแก่ตัวอย่างดินจะต้องกระทำอย่างระมัดระวัง ไม่ทำให้ตัวอย่างดินวิบัติหรือถูกรบกวนมากกว่าดินที่เป็นอยู่ในธรรมชาติก่อนการเก็บตัวอย่าง

3.7.2.5 เริ่มทดสอบโดยการอ่านระดับน้ำเริ่มต้นในหลอด Head Pressure Tail Pressure และ Cell Pressure แล้วจับเวลาเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไปก็ให้ทำการบันทึกค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละหลอด อุณหภูมิ และเวลาในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับประเภทของดินที่นำมาทดสอบ เช่น ถ้าเป็นดินเหนียวจะใช้เวลาที่นานกว่าดินทราย

3.7.2.6 นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน โดยการใช้สมการที่ 2.11

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะนำเสนอ การนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ในดินจากชุดทดสอบแบบ Falling Head-Rising Tail กับชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head ซึ่งจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์จากการสร้างกราฟในแต่ละแบบ

4.1 ผลการทดสอบ

ตาราง 4.1 แสดงผลการทดสอบ

Soil Properties.	บ่อดิน ทวดเสือ	บ่อดินปาก ช่อง	บ่อดินบ้าน ตريب	บ่อดิน คอน จี้เหล็ก	บ่อดินนา ป่อง	บ่อดิน ทวดเขา แดง
Liquid limit (LL)	41.82	35.3	35.25	43.6	34	28.5
Plasticity Index (PI)	27.84	14.27	6.01	8.54	9.31	4.46
Specific gravity (Gs)	2.777	2.719	2.665	2.749	2.757	2.648
% Finer (%)	65.11	26.9	57.02	56.75	26.1	43.02
Type of Soil	CL	SC	ML	OL	SM	SM

CL คือ ดินเหนียวที่มีความเหนียวต่ำ ดินเหนียวปนทรายหรือปนดินเหนียวตะกอน

SC คือ ทรายที่มีดินเหนียวปน

ML คือ ดินตะกอน หินฝุ่นหรือดินทรายละเอียดที่มีดินเหนียวหรือดินตะกอนปนที่มีความเหนียวต่ำ

OL คือ ดินตะกอนอินทรีย์หรือดินเหนียวปนดินตะกอนอินทรีย์ ที่มีความเหนียวต่ำ

SM คือ ทรายที่มีดินตะกอนปน

หมายเหตุ FH-RT คือ Falling Head - Rising Tail

γ_d คือ Dry Unit Weight

FH คือ Falling Head

e คือ Void Ratio

CH คือ Constant Head

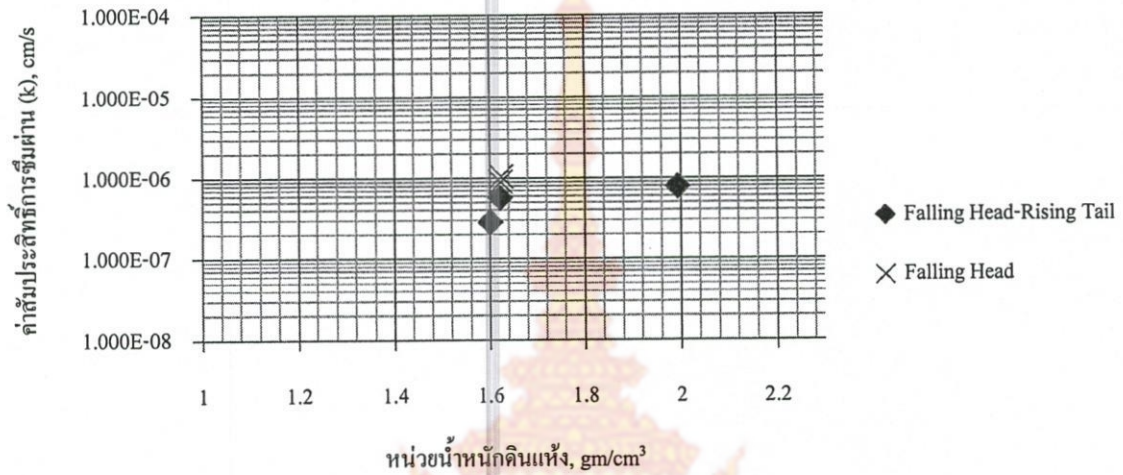
w คือ Water Content

ตาราง 4.1 แสดงผลการทดสอบ (ต่อ)

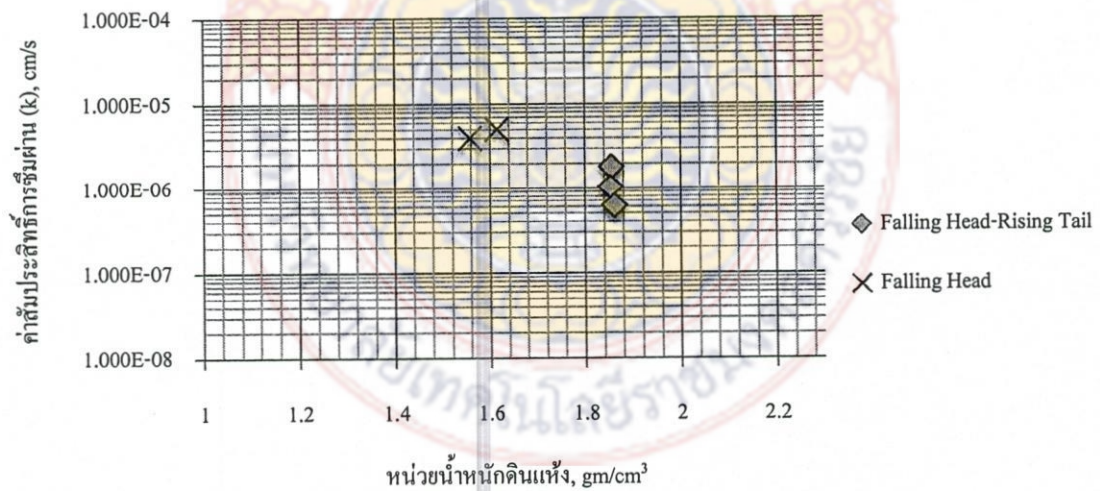
Soil Properties.	บ่อดินทวด เสือ	บ่อดินปาก ช่อง	บ่อดินบ้าน ตรับ	บ่อดินคอน จี้เหล็ก	บ่อดินนา ป่อง	บ่อดินทวด เขาแดง
FH – RT ค่า k ตย. 1, cm/s	7.807E-07	1.827E-06	5.899E-06	6.029E-08	1.159E-05	9.344E-08
FH – RT ค่า k ตย. 2, cm/s	5.658E-07	1.042E-06	4.174E-06	3.992E-08	1.335E-05	8.458E-08
FH – RT ค่า k ตย. 3, cm/s	2.809E-07	6.129E-07	1.838E-06	-	1.209E-05	-
FH ค่า k ตย. 1, cm/s	1.056E-06	5.253E-06	8.726E-05	2.702E-05	9.003E-05	4.612E-07
FH ค่า k ตย. 2, cm/s	8.997E-07	3.736E-06	1.574E-05	1.795E-05	4.133E-05	4.562E-07
FH ค่า k ตย. 3, cm/s	-	-	-	-	-	-
CH ค่า k ตย. 1, cm/s	1.057E-06	5.259E-06	8.731E-05	2.705E-05	9.008E-05	4.617E-07
CH ค่า k ตย. 2, cm/s	9.008E-07	3.740E-06	1.576E-05	1.797E-05	4.137E-05	4.567E-07
CH ค่า k ตย. 3, cm/s	-	-	-	-	-	-
FH-RT ค่า γ_d ตย.1, g/cm ³	1.993	1.855	1.589	1.645	1.857	1.985
FH-RT ค่า γ_d ตย.2, g/cm ³	1.622	1.853	1.934	1.685	1.811	2.004
FH-RT ค่า γ_d ตย.3, g/cm ³	1.601	1.861	1.605	-	1.792	-
FH ค่า γ_d ตย.1, g/cm ³	1.624	1.615	1.638	1.672	1.712	1.743
FH ค่า γ_d ตย.2, g/cm ³	1.623	1.558	1.641	1.672	1.719	1.761
FH ค่า γ_d ตย.3, g/cm ³	-	-	-	-	-	-
FH-RT ค่า w ตย.1, %	19.81	14.37	18.50	21.67	8.98	14.73
FH-RT ค่า w ตย.2, %	24.37	16.10	13.52	21.93	8.98	14.73
FH-RT ค่า w ตย.3, %	25.03	17.50	22.00	-	8.98	-
FH ค่า w ตย.1, %	20.64	17.71	13.86	17.03	10.58	13.60
FH ค่า w ตย.2, %	20.64	17.71	13.86	17.03	10.58	13.60
FH ค่า w ตย.3, %	-	-	-	-	-	-
FH-RT ค่า e ตย.1, %	39.34	46.57	67.71	67.11	48.46	33.00
FH-RT ค่า e ตย.2, %	71.21	46.73	37.79	63.14	52.23	31.74
FH-RT ค่า e ตย.3, %	73.45	46.10	66.04	-	53.85	-
FH ค่า e ตย.1, %	71.00	68.34	62.70	64.41	61.04	51.92
FH ค่า e ตย.2, %	71.10	74.51	62.40	64.41	60.38	50.37
FH ค่า e ตย.3, %	-	-	-	-	-	-

4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบ

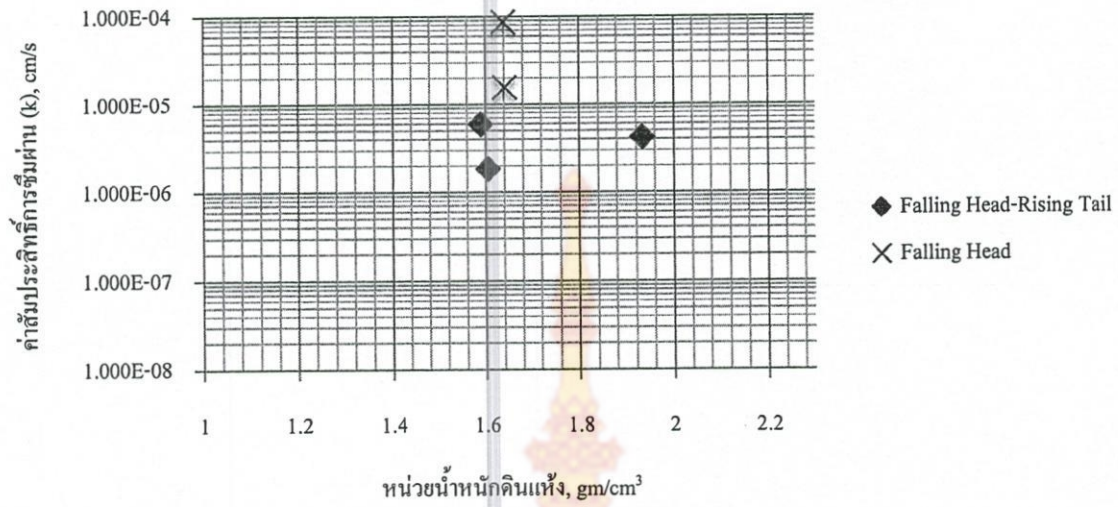
4.2.1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินกับหน่วยน้ำหนักดินแห้ง



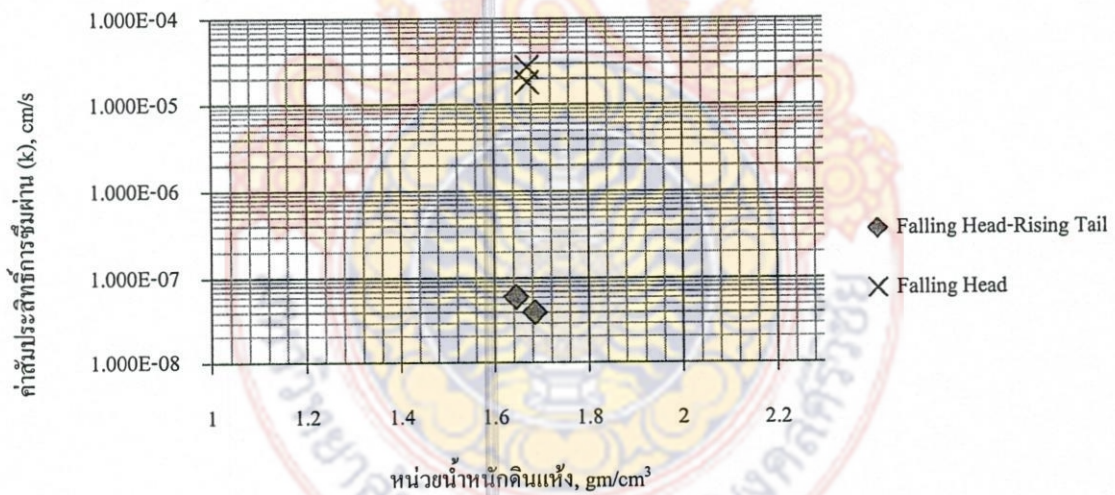
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินทวดเสือ



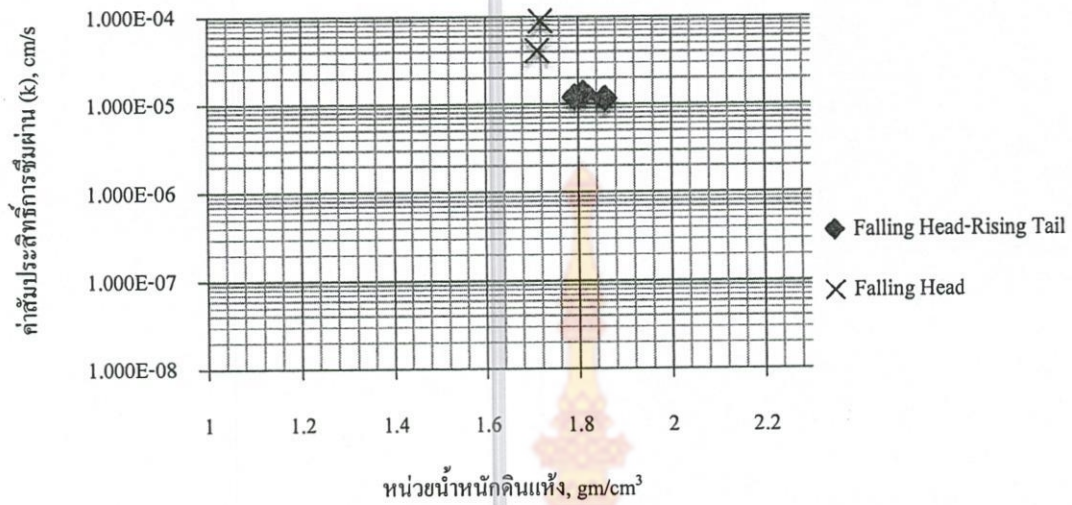
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินปากช่อง



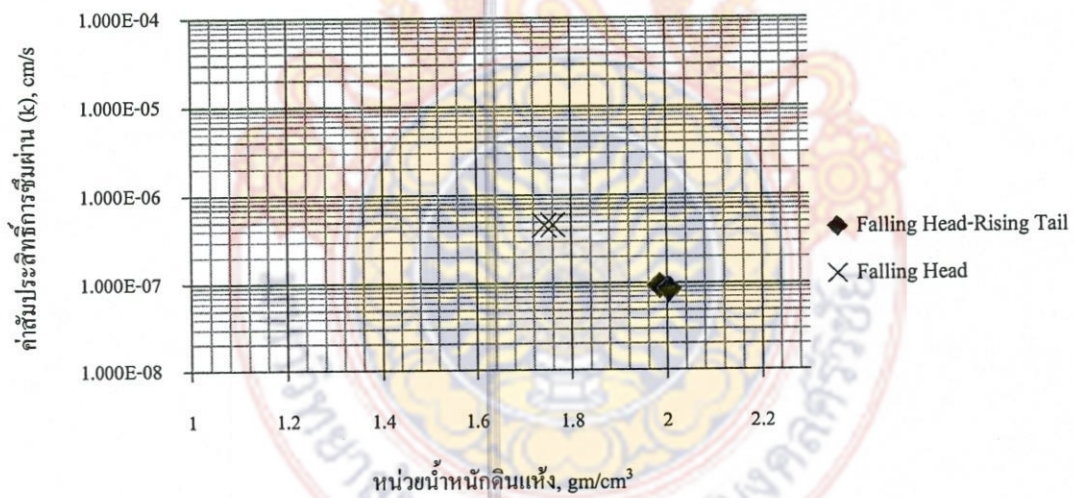
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ
บ่อดินบ้านตรับ



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ
บ่อดินคอนกรีตเหล็ก



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินนาบ้อง

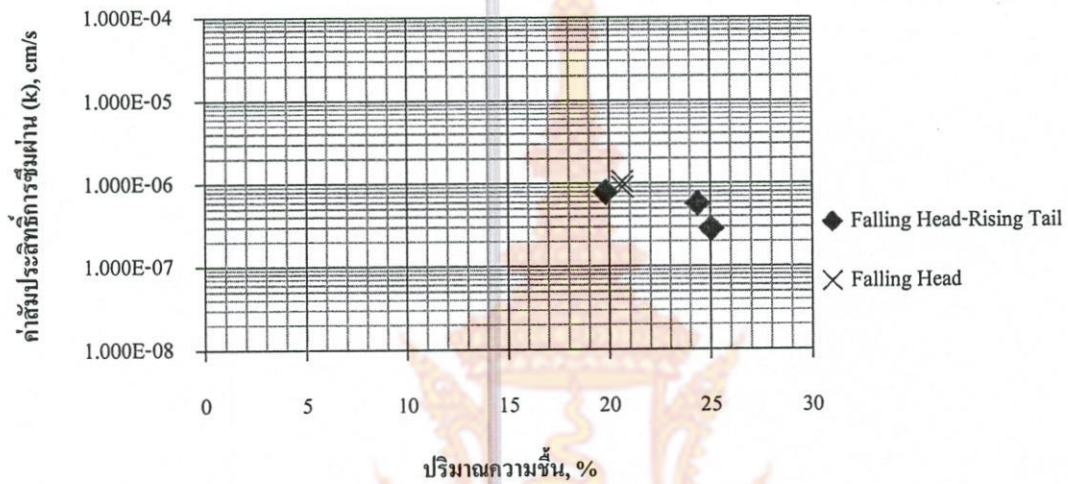


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินเขาแดง

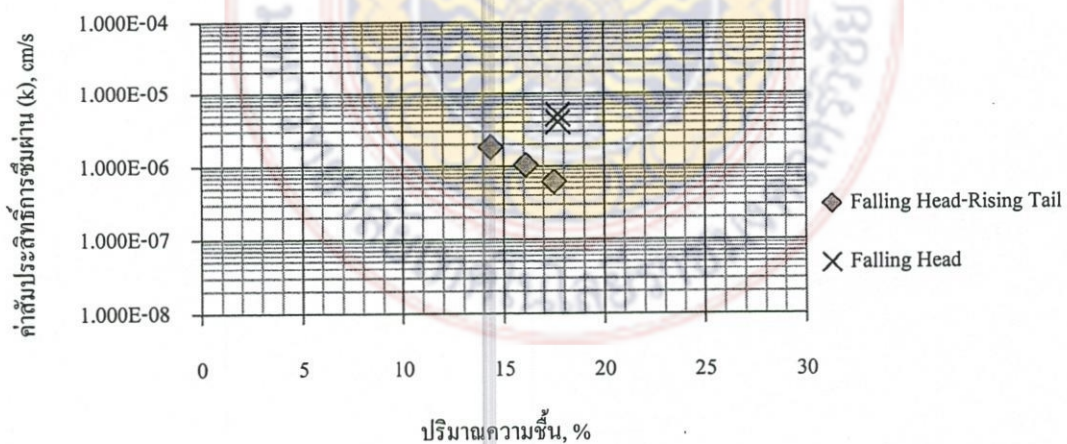
จากรูปที่ 4.1 – 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ได้จากชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail จะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ได้

จากชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head ในทุกตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติเมื่อดูจากคุณสมบัติของดิน

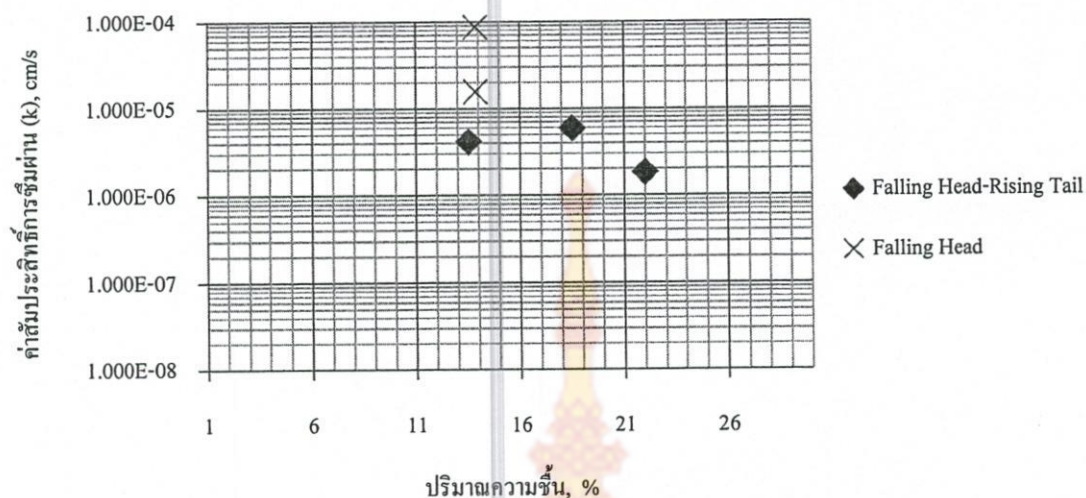
4.2.1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินกับปริมาณความชื้น



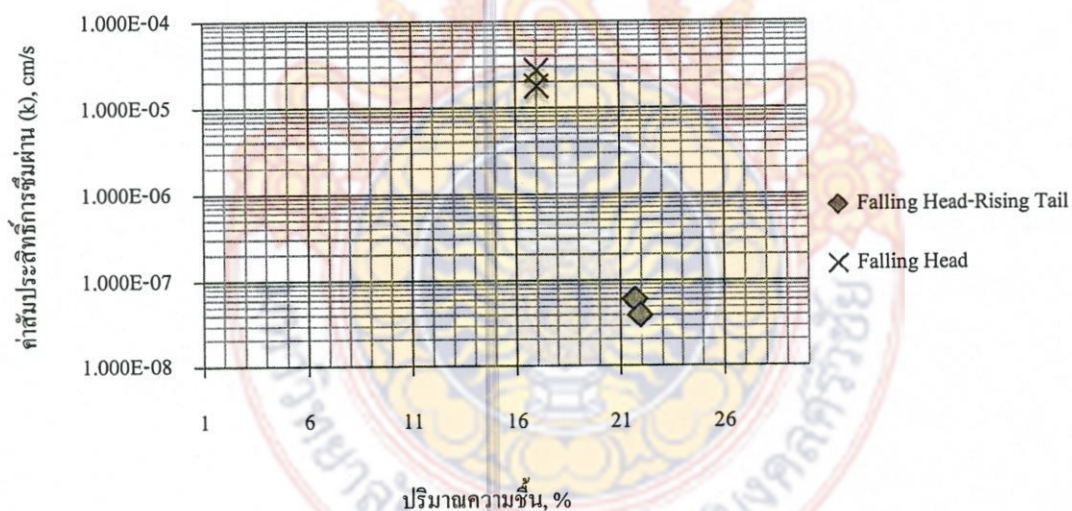
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดิน ทวดเสื่อ



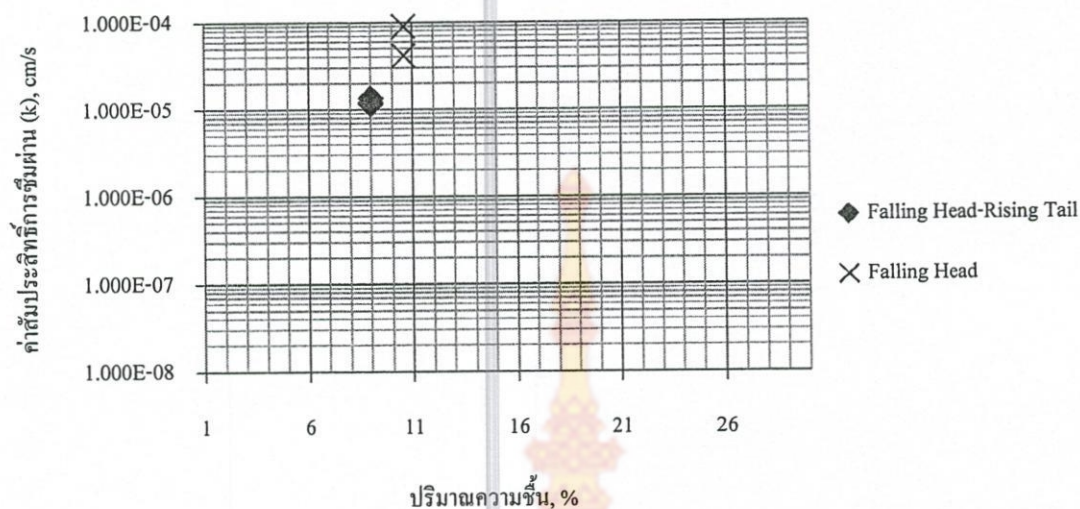
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดิน ปากช่อง



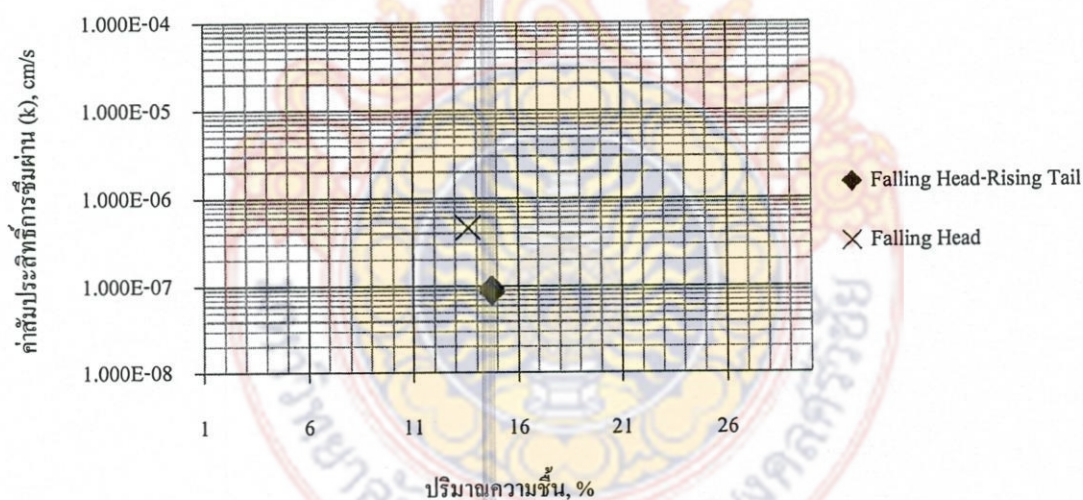
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินบ้านตรับ



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินดอนขี้เหล็ก



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินนาบียง

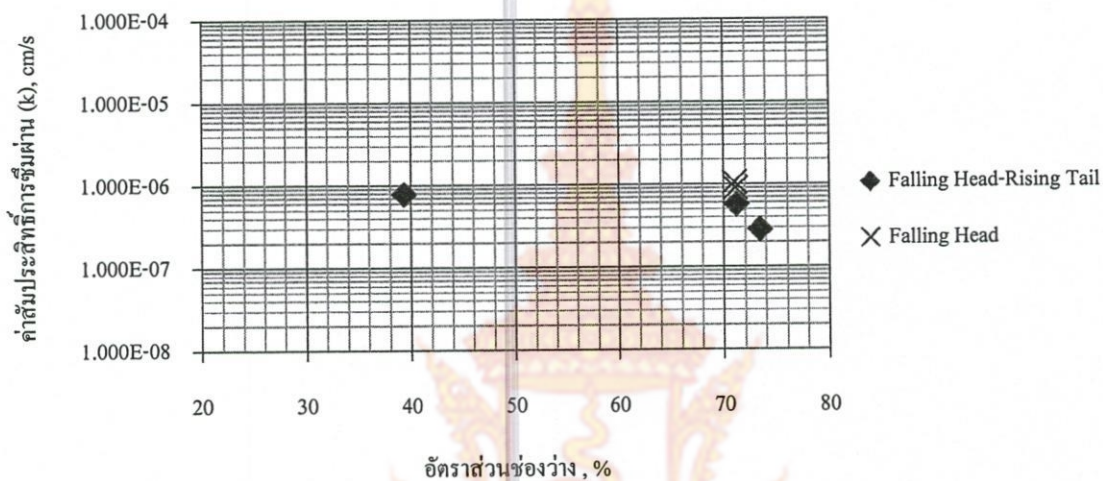


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินทวดเขาแดง

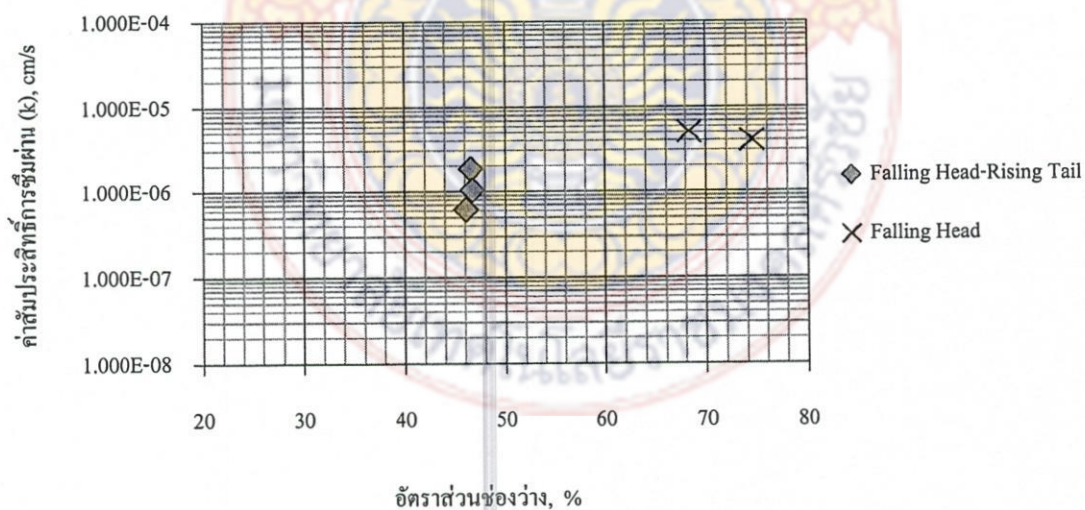
จากรูปที่ 4.7 – 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ได้จากชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail จะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ได้จากชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุด

ทดสอบแบบ Falling Head ในทุกตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติเมื่อดูจากคุณสมบัติของดิน

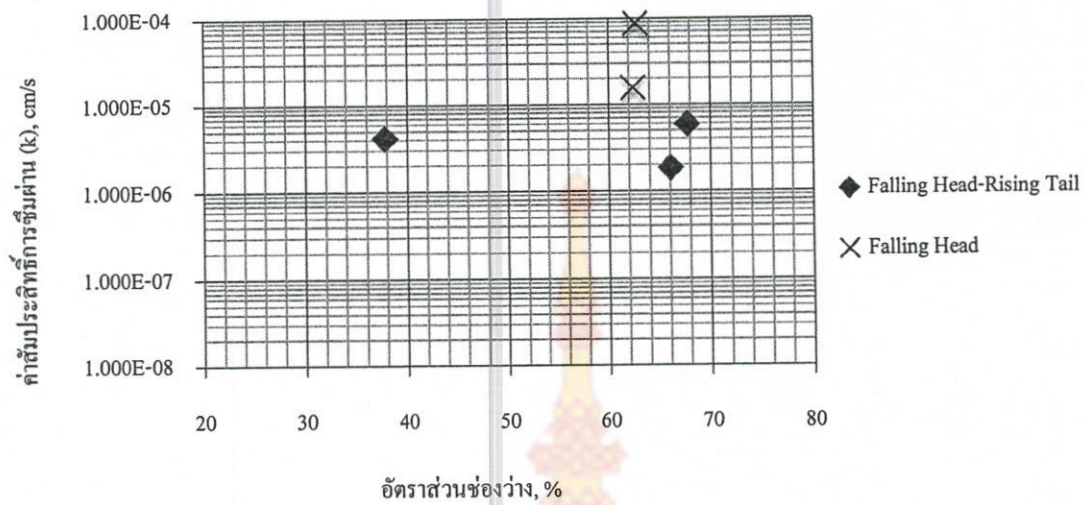
4.2.1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินกับอัตราส่วนช่องว่าง



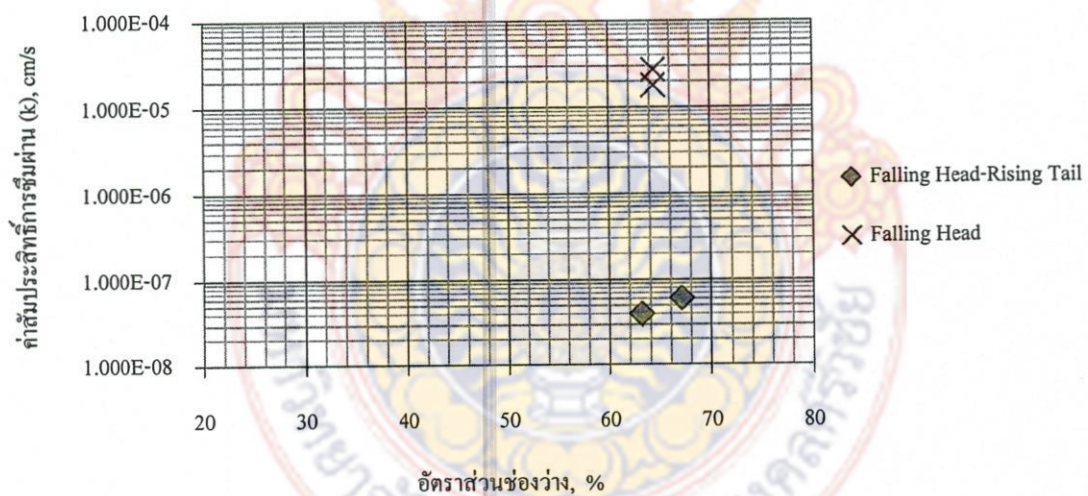
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินทวดเสื่อ



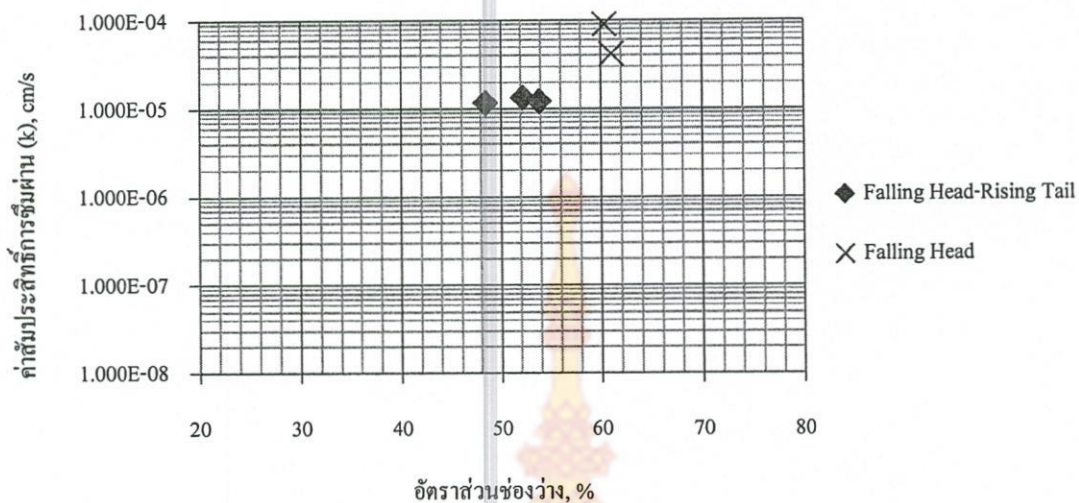
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินปากช่อง



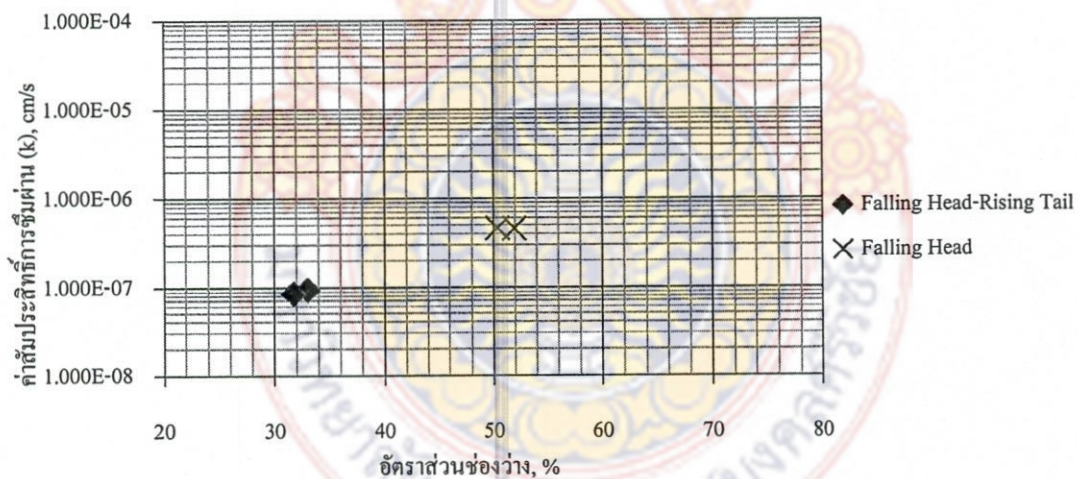
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินบ้านตรับ



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินดอนขี้เหล็ก



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินเหนียว



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินเขาแดง

จากรูปที่ 4.13 – 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ได้จากชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail จะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ได้จากชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head ในทุกตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติเมื่อดูจากคุณสมบัติของดิน



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail สามารถทราบถึงพฤติกรรมการซึมผ่านของน้ำในดิน ว่ามีความแตกต่างในการซึมผ่านของดินแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินจากชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail กับชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head ซึ่งได้ผลการศึกษา ดังนี้

5.1.1 ผลจากชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head – Rising Tail ที่ได้จะมีความใกล้เคียงในสภาพธรรมชาติได้ดีกว่าชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head

5.1.2 การทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail พบว่าใช้เวลาในการทดสอบน้อยกว่าชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head

5.1.3 การทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail พบว่าสามารถใช้ได้กับดินทุกประเภท

5.1.4 การทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail เห็นได้ว่าสามารถเพิ่มความดันน้ำได้สูงถึง 70 เมตร

5.1.5 ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ซึ่งชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้

5.1.6 ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail ใช้พื้นที่ในการทดสอบน้อยกว่าชุดทดสอบแบบ Constant Head และชุดทดสอบแบบ Falling Head

5.1.7 การทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail จะเห็นได้ว่า ช่วยลดช่องว่างระหว่างเม็ดดินกับผนังเซลล์ของชุดทดสอบ

5.1.8 ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail สามารถจำลองสภาพดินตัวอย่างได้ใกล้เคียงกับสภาพในธรรมชาติจริงก่อนเก็บตัวอย่างสามารถตรวจสอบการอิ่มตัวอย่างได้โดยการทำ B Check

5.1.9 ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ทดสอบดินในห้องปฏิบัติการได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษานี้ได้ผลการศึกษาของดินที่มาทดสอบเพียง 6 แหล่งเท่านั้น ถ้าหากต้องการศึกษาเพิ่มเติมอาจนำดินชนิดอื่นๆ มาศึกษาเพิ่มเติมได้

5.2.2 การศึกษานี้ได้ผลการศึกษาของความดันน้ำได้เพียงแค่ 70 เมตร

5.2.3 การทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail สามารถใช้ในการศึกษาหรือหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินที่สามารถนำไปใช้ในการใช้งานได้จริง



บรรณานุกรม

- [1] A.S.T.M. Standards, Soil and Rock 1 (1997). "Annual Book of A.S.T.M. Standard", Volume 04.08, American Society for testing Materials, U.S.A.
- [2] A.S.T.M., Soil and Rock (1976). "Annual Book of A.S.T.M. Standard", Standards part 19, American Society for testing Materials, U.S.A.
- [3] Bowles J.E. (1970). "Engineering Properties of Soil and Their Measurement", Fourth Edition, McGraw – Hill, U.S.A.
- [4] Bowles J.E. (1996). "Foundation Analysis and Designs", 5th edition, McGraw-Hill Book Company, U.S.A.
- [5] Das B.M. (1985). "Principles of Geotechnical Engineering", Third Edition, PWS Publishers, U.S.A.
- [6] Lambe W.T. (1951). "Soil Testing for Engineering", John Wiley & Sons, Inc., U.S.A.
- [7] ชัย มุกตพันธุ์ และกาญจนา โตะ นาคาชาวา (2527). "ปฏิวัติศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก", สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ, ก.ท.ม.
- [8] ประดับ พุ่มสุวรรณ (2541). "ปฏิวัติศาสตร์ ภาคการทดลอง", กรุงเทพมหานคร.
- [9] มณเฑียร กังสศิเทียม (2531). "กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม", พิมพ์ครั้งที่ 2, สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์, ก.ท.ม.
- [10] มานะ อภินิพนธ์มนตรี (2529). "วิศวกรรมปฏิวัติและฐานราก", พิมพ์ครั้งที่ 1, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), ก.ท.ม.

- [11] วรากร ไม้เรียง, จิรวัดน์ โชติไกร และประทีป ดวงเดือน (2525). “ปฐพีกลศาสตร์ ทฤษฎี และปฏิบัติการ”, (พิมพ์ครั้งที่ 4), ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ก.ท.ม.
- [12] วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร (2532). “ปฐพีกลศาสตร์”, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ก.ท.ม.
- [13] วิวัฒน์ สุทธิวิภากร และสมพร เจริญมโนรมย์ (2537). “ปฏิบัติการทดลองวิชา 220-321 ปฐพีกลศาสตร์ 1”, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- [14] สถาพร คูวิจิตรจารุ (2541). “ทดลองปฐพีกลศาสตร์”, สำนักพิมพ์ไลบารี นาย, ก.ท.ม.
- [15] สถาพร คูวิจิตรจารุ (2541). “ปฐพีกลศาสตร์”, สำนักพิมพ์ไลบารี นาย, ก.ท.ม.
- [16] สรวุช จริตงาม (2545). “กลศาสตร์ของดิน”, พิมพ์ครั้งที่ 1, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- [17] สรวุช จริตงาม (2548). “คู่มือทฤษฎีและปฏิบัติการทดสอบ”, พิมพ์ครั้งที่ 1, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- [18] สันชัย อินทพิชัย และพานิช วุฒิพฤกษ์ (2547). “ปฐพีกลศาสตร์”, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ก.ท.ม.
- [19] สาราณ ขอดอุปถัมภ์ (2543). “ปฐพีกลศาสตร์เบื้องต้น”.
- [20] ธนิต เฉลิมยานนท์ (2550). “การใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวในชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย”. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ตารางผลการทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของบ่อดินต่างๆ



ตาราง ก.1 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อน้ำมันปากช่อง โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –
Rising Tail ตัวอย่างที่ 1

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	19.10	2400	26.60	2000	13.50	1000	-	-
900	19.00	2400	26.10	2000	14.00	1000	1.00	1.88E-06
1800	19.10	2400	25.60	2000	14.50	1000	1.00	1.88E-06
2700	18.90	2400	25.10	2000	15.00	1000	1.00	1.88E-06
3600	19.00	2400	24.60	2000	15.50	1000	1.00	1.88E-06
4500	18.70	2400	24.10	2000	15.90	1000	1.25	1.69E-06
5400	18.70	2400	23.50	2000	16.50	1000	1.00	2.26E-06
6300	18.70	2400	23.20	2000	17.00	1000	0.60	1.51E-06
7200	18.70	2400	22.70	2000	17.40	1000	1.25	1.70E-06
8100	18.70	2400	22.20	2000	17.90	1000	1.00	1.89E-06
9000	18.70	2400	21.70	2000	18.30	1000	1.25	1.70E-06
Average								1.83E-06

ตาราง ก.2 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านปากช่อง โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –
Rising Tail ตัวอย่างที่ 2

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	16.60	2400.00	27.60	2000.00	8.50	1000.00	-	-
1800	16.60	2400.00	26.90	2000.00	9.00	1000.00	1.40	1.12E-06
3600	16.60	2400.00	26.50	2000.00	9.50	1000.00	0.80	8.40E-07
5400	16.60	2400.00	25.90	2000.00	10.00	1000.00	1.20	1.03E-06
6300	16.60	2400.00	25.50	2000.00	10.30	1000.00	1.33	1.31E-06
7200	16.60	2400.00	25.40	2000.00	10.60	1000.00	0.33	7.48E-07
8100	16.60	2400.00	25.00	2000.00	10.90	1000.00	1.33	1.31E-06
9000	16.60	2400.00	24.70	2000.00	11.10	1000.00	1.50	9.37E-07
Average								1.04E-06

ตาราง ก.3 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านปากช่อง โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –
Rising Tail ตัวอย่างที่ 3

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	11.30	2400.00	25.60	2000.00	16.50	1000.00	-	-
1800	11.30	2400.00	25.10	2000.00	16.90	1000.00	1.25	8.47E-07
3600	11.30	2400.00	24.70	2000.00	17.20	1000.00	1.33	6.60E-07
5400	11.30	2400.00	24.40	2000.00	17.50	1000.00	1.00	5.66E-07
7200	11.30	2400.00	24.10	2000.00	17.80	1000.00	1.00	5.66E-07
9000	11.30	2400.00	23.90	2000.00	18.00	1000.00	1.00	3.78E-07
10800	11.30	2400.00	23.50	2000.00	18.30	1000.00	1.33	6.61E-07
Average								6.13E-07

ตาราง ก.4 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อคินบ่อคินทวดเกลือ โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –
Rising Tail ตัวอย่างที่ 1

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	16.90	2400.00	26.20	2000.00	10.90	1000.00	-	-
960	16.30	2400.00	25.90	2000.00	11.10	1000.00	1.50	8.77E-07
2220	16.40	2400.00	25.70	2000.00	11.40	1000.00	0.67	6.69E-07
4140	16.40	2400.00	25.30	2000.00	11.90	1000.00	0.80	7.90E-07
6300	16.50	2400.00	24.80	2000.00	12.40	1000.00	1.00	7.81E-07
8100	16.50	2400.00	24.30	2000.00	12.80	1000.00	1.25	8.45E-07
9900	16.50	2400.00	23.90	2000.00	13.20	1000.00	1.00	7.51E-07
10800	16.50	2400.00	23.60	2000.00	13.30	1000.00	3.00	7.52E-07
Average								7.81E-07

ตาราง ก.5 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินทวดเสื่อ โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –

Rising Tail ตัวอย่างที่ 2

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	12.90	2400.00	23.20	2000.00	12.10	1000.00	-	-
900	12.90	2400.00	23.00	2000.00	12.30	1000.00	1.00	7.52E-07
1800	12.90	2400.00	22.70	2000.00	12.70	1000.00	0.75	1.32E-06
2700	12.90	2400.00	22.50	2000.00	12.80	1000.00	2.00	5.64E-07
3600	12.90	2400.00	22.40	2000.00	12.90	1000.00	1.00	3.76E-07
4680	12.90	2400.00	22.30	2000.00	13.00	1000.00	1.00	3.14E-07
5400	12.90	2400.00	22.20	2000.00	13.10	1000.00	1.00	4.70E-07
6420	12.90	2400.00	22.10	2000.00	13.20	1000.00	1.00	3.32E-07
8100	12.90	2400.00	21.90	2000.00	13.40	1000.00	1.00	4.03E-07
9000	12.90	2400.00	21.80	2000.00	13.60	1000.00	0.50	5.65E-07
Average								5.66E-07

ตาราง ก.6 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินทวดเกลือโดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –

Rising Tail ตัวอย่างที่ 3

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	11.40	2400.00	29.80	2000.00	11.40	1000.00	-	-
1200	11.40	2400.00	29.70	2000.00	11.50	1000.00	1.00	2.80E-07
2520	11.40	2400.00	29.60	2000.00	11.60	1000.00	1.00	2.54E-07
3720	11.40	2400.00	29.50	2000.00	11.70	1000.00	1.00	2.80E-07
4800	11.40	2400.00	29.40	2000.00	11.80	1000.00	1.00	3.11E-07
6000	11.40	2400.00	29.30	2000.00	11.90	1000.00	1.00	2.80E-07
7200	11.40	2400.00	29.20	2000.00	12.00	1000.00	1.00	2.80E-07
Average								2.81E-07

ตาราง ก.7 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านตรับ โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head – Rising
Tail ตัวอย่างที่ 1

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	32.90	2400.00	34.30	2000.00	12.50	1000.00	-	-
300	32.90	2400.00	33.50	2000.00	13.00	1000.00	1.60	7.25E-06
1800	32.90	2400.00	31.00	2000.00	15.30	1000.00	1.09	5.37E-06
3600	32.90	2400.00	28.20	2000.00	18.40	1000.00	0.90	5.53E-06
7200	32.90	2400.00	22.40	2000.00	24.10	1000.00	1.02	5.44E-06
Average								5.90E-06



ตาราง ก.8 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านศรีรับ โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head – Rising Tail ตัวอย่างที่ 2

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	17.10	2000.00	18.60	1600.00	17.30	1000.00	-	-
720	17.10	2000.00	18.20	1600.00	18.30	1000.00	0.40	5.53E-06
1980	17.10	2000.00	17.10	1600.00	19.40	1000.00	1.00	4.98E-06
3600	17.10	2000.00	16.90	1600.00	20.80	1000.00	0.14	2.83E-06
5400	17.10	2000.00	16.10	1600.00	22.10	1000.00	0.62	3.35E-06
Average								4.17E-06



ตาราง ก.9 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านตรับ โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head – Rising Tail ตัวอย่างที่ 3

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	28.20	2200.00	22.60	2000.00	30.40	1000.00	-	-
900	28.20	2200.00	21.90	2000.00	30.90	1000.00	1.40	2.30E-06
1800	28.20	2200.00	21.40	2000.00	31.50	1000.00	0.83	2.11E-06
2700	28.20	2200.00	20.90	2000.00	31.90	1000.00	1.25	1.73E-06
3600	28.20	2200.00	20.30	2000.00	32.40	1000.00	1.20	2.11E-06
4500	28.20	2200.00	19.80	2000.00	32.80	1000.00	1.25	1.73E-06
5400	28.20	2200.00	19.40	2000.00	33.30	1000.00	0.80	1.73E-06
6000	28.20	2200.00	19.20	2000.00	33.50	1000.00	1.00	1.16E-06
Average								1.84E-06

ตาราง ก.10 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อน้ำมันคอนกรีตเหล็ก โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head – Rising Tail ตัวอย่างที่ 1

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	13.00	3000.00	26.00	2600.00	13.00	250.00	-	-
3600	13.00	3000.00	25.80	2600.00	13.20	250.00	1.00	8.04E-08
7200	13.00	3000.00	25.70	2600.00	13.30	250.00	1.00	4.02E-08
10800	13.00	3000.00	25.50	2600.00	13.40	250.00	2.00	6.03E-08
Average								6.03E-08



ตาราง ก.11 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อน้ำมันคอนกรีตเหล็ก โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head – Rising Tail ตัวอย่างที่ 2

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	32.90	2400.00	27.50	2000.00	10.50	1000.00	-	-
3720	32.90	2400.00	27.40	2000.00	10.60	1000.00	1.00	9.04E-08
7260	32.90	2400.00	27.30	2000.00	10.70	1000.00	1.00	9.50E-08
10860	32.90	2400.00	27.20	2000.00	10.80	1000.00	1.00	9.34E-08
Average								9.34E-08



ตาราง ก.12 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านนาป่อง โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –
Rising Tail ตัวอย่างที่ 1

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	11.70	1400.00	36.80	1000.00	9.60	500.00	-	-
960	11.70	1400.00	34.60	1000.00	11.80	500.00	1.00	1.49E-05
1920	11.60	1400.00	32.60	1000.00	13.70	500.00	1.05	1.33E-05
2700	11.70	1400.00	31.10	1000.00	15.20	500.00	1.00	1.27E-05
3600	11.70	1400.00	29.90	1000.00	16.70	500.00	0.80	9.97E-06
4500	11.70	1400.00	27.80	1000.00	18.50	500.00	1.17	1.45E-05
5400	11.70	1400.00	26.40	1000.00	19.80	500.00	1.08	1.01E-05
6360	11.70	1400.00	24.70	1000.00	21.60	500.00	0.94	1.23E-05
7200	11.70	1400.00	23.40	1000.00	22.80	500.00	1.08	1.01E-05
8100	11.70	1400.00	22.30	1000.00	23.90	500.00	1.00	8.37E-06
9000	11.70	1400.00	21.00	1000.00	25.10	500.00	1.08	9.55E-06
Average								1.16E-05

ตาราง ก.13 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านนาป่อง โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –
Rising Tail ตัวอย่างที่ 2

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	17.30	1400.00	31.90	1000.00	9.50	500.00	-	-
960	17.30	1400.00	29.20	1000.00	12.10	500.00	1.04	1.82E-05
1800	17.30	1400.00	27.40	1000.00	14.00	500.00	0.95	1.46E-05
2700	17.30	1400.00	25.30	1000.00	16.10	500.00	1.00	1.56E-05
3600	17.30	1400.00	23.30	1000.00	18.10	500.00	1.00	1.50E-05
4500	17.30	1400.00	21.40	1000.00	20.10	500.00	0.95	1.47E-05
5520	17.30	1400.00	19.00	1000.00	22.20	500.00	1.14	1.51E-05
6300	17.30	1400.00	17.70	1000.00	23.50	500.00	1.00	1.15E-05
7560	17.30	1400.00	15.60	1000.00	25.80	500.00	0.91	1.21E-05
8160	17.30	1400.00	14.40	1000.00	26.60	500.00	1.50	1.17E-05
9000	17.30	1400.00	13.10	1000.00	28.10	500.00	0.87	1.17E-05
9900	17.30	1400.00	11.60	1000.00	29.60	500.00	1.00	1.18E-05
10800	17.30	1400.00	10.80	1000.00	30.90	500.00	0.62	8.29E-06
Average								1.34E-05

ตาราง ก.14 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านนาป้อมโดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –
Rising Tail ตัวอย่างที่ 3

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	17.30	1200.00	35.50	800.00	9.80	500.00	-	-
900	17.30	1200.00	34.40	800.00	11.10	500.00	0.85	1.40E-05
1800	17.30	1200.00	33.30	800.00	12.40	500.00	0.85	1.42E-05
2700	17.30	1200.00	32.30	800.00	13.50	500.00	0.91	1.25E-05
3600	17.30	1200.00	31.30	800.00	14.50	500.00	1.00	1.20E-05
4500	17.30	1200.00	30.10	800.00	15.50	500.00	1.20	1.32E-05
5400	17.30	1200.00	29.30	800.00	16.50	500.00	0.80	1.09E-05
6300	17.30	1200.00	28.70	800.00	17.00	500.00	1.20	6.69E-06
7200	17.30	1200.00	27.90	800.00	17.70	500.00	1.14	9.16E-06
8100	17.30	1200.00	27.20	800.00	18.20	500.00	1.40	7.36E-06
9000	17.30	1200.00	26.50	800.00	19.10	500.00	0.78	9.86E-06
10800	17.30	1200.00	22.80	800.00	22.80	500.00	1.00	2.31E-05
Average								1.21E-05

ตาราง ก.15 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินทวดเขาแดง โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –
Rising Tail ตัวอย่างที่ 1

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Q _{in} /Q _{out} (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	H _p (cm)	He (cm)	H _p (cm)	He (cm)	H _p (cm)		
0	18.40	4000.00	24.40	3600.00	18.70	250.00	-	-
3600	18.40	4000.00	24.10	3600.00	19.10	250.00	0.75	9.91E-08
5400	18.40	4000.00	23.90	3600.00	19.30	250.00	1.00	1.13E-07
7260	18.40	4000.00	23.80	3600.00	19.40	250.00	1.00	5.48E-08
9000	18.40	4000.00	23.70	3600.00	19.50	250.00	1.00	5.86E-08
10800	18.40	4000.00	23.40	3600.00	19.70	250.00	1.50	1.42E-07
Average								9.34E-08

ตาราง ก.16 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินทวดเขาแดง โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head –
Rising Tail ตัวอย่างที่ 2

Time (sec)	Cell Pressure		Head Pressure		Tail Pressure		Qin/Qout (cc/cc)	k (cm/sec)
	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)	He (cm)	Hp (cm)		
0	19.60	4000.00	26.40	3600.00	7.20	250.00	-	-
1800	19.60	4000.00	26.20	3600.00	7.30	250.00	2.00	8.46E-08
3600	19.60	4000.00	26.10	3600.00	7.40	250.00	1.00	5.64E-08
5400	19.60	4000.00	26.00	3600.00	7.60	250.00	0.50	8.46E-08
7200	19.60	4000.00	25.90	3600.00	7.80	250.00	0.50	8.46E-08
9000	19.60	4000.00	25.60	3600.00	7.90	250.00	3.00	1.13E-07
Average								8.46E-08

หมายเหตุ : A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน มีค่าเท่ากับ 8.55 ตารางเซนติเมตร
L คือ ความสูงตัวอย่างดิน มีค่าเท่ากับ 7.14 เซนติเมตร
a คือ พื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้ว มีค่าเท่ากับ 4.1 ตารางเซนติเมตร

ตาราง ก.17 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านปากช่อง โดยการทดสอบแบบความดันคงที่ และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 1

บ่อดินบ้านปากช่อง					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	17.56	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	593.6	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	590.7	cm
ความสูงตัวอย่าง	9.07	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.899	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.615	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	11.89	cc	ผลต่างระดับน้ำ	592.15	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	5.259E-06	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	5.253E-06	

ตาราง ก.18 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านปากช่อง โดยการทดสอบแบบความดันคงที่ และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 2

บ่อดินบ้านปากช่อง					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	17.71	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	593	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	590.8	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.5	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.834	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.558	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	9.02	cc	ผลต่างระดับน้ำ	591.9	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	3.740E-06	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	3.736E-06	

ตาราง ก.19 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อคินบ้านตรับ โดยการทดสอบแบบความดันคงที่และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 1

ชื่อบ่อคินบ้านตรับ					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	g	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	13.86	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	93.2	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	85.8	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.92	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.864	g/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.637	g/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	30.34	cc	ผลต่างระดับน้ำ	89.5	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	8.731E-05	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	8.726E-05	

ตาราง ก.20 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อคินบ้านตรับ โดยการทดสอบแบบความดันคงที่และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 2

ชื่อบ่อคินบ้านตรับ					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	g	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	13.86	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	94.3	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	92.9	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.9	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.869	g/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.641	g/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	5.74	cc	ผลต่างระดับน้ำ	93.6	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	1.576E-05	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	1.574E-05	

ตาราง ก.21 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านนาป่อง โดยการทดสอบแบบความดันคงที่ และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 1

ชื่อบ่อดินบ้านนาป่อง					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	10.58	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	94.8	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	86.9	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.75	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.901	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.719	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	32.39	cc	ผลต่างระดับน้ำ	90.85	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	9.008E-05	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	9.003E-05	

ตาราง ก.22 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านนาป่อง โดยการทดสอบแบบความดันคงที่ และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 2

ชื่อบ่อดินบ้านนาป่อง					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	10.57	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	94.6	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	90.9	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.76	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.893	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.712	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	15.17	cc	ผลต่างระดับน้ำ	92.75	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	4.137E-05	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	4.133E-05	

ตาราง ก.23 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินทวดเสื่อ โดยการทดสอบแบบความดันคงที่และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 1

ชื่อบ่อดินทวดเสื่อ					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	20.64	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	1902	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	1900	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.49	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.959	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.624	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	8.2	cc	ผลต่างระดับน้ำ	1901	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	1.057E-06	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	1.056E-06	

ตาราง ก.24 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินทวดเสื่อ โดยการทดสอบแบบความดันคงที่และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 2

ชื่อบ่อดินทวดเสื่อ					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	20.64	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	1897.8	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	1896.1	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.49	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.959	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.624	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	6.97	cc	ผลต่างระดับน้ำ	1896.9	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	9.008E-07	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	8.997E-07	

ตาราง ก.25 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านดอนจี้เหล็ก โดยการทดสอบแบบความดันคงที่และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 1

ชื่อบ่อดินบ้านดอนจี้เหล็ก					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	17.03	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	101.8	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	99.1	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.5	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.957	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.672	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	11.07	cc	ผลต่างระดับน้ำ	100.45	cm
k Constant Head	มีหน่วยเป็น cm/sec			2.705E-05	
k Falling Head	มีหน่วยเป็น cm/sec			2.702E-05	

ตาราง ก.26 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินบ้านดอนจี้เหล็ก โดยการทดสอบแบบความดันคงที่และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 2

ชื่อบ่อดินบ้านดอนจี้เหล็ก					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	17.03	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	101.7	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	99.9	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.5	cm	หน่วยน้ำหนักดินในธรรมชาติ	1.957	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัดหลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.672	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	7.38	cc	ผลต่างระดับน้ำ	100.8	cm
k Constant Head	มีหน่วยเป็น cm/sec			1.797E-05	
k Falling Head	มีหน่วยเป็น cm/sec			1.795E-05	

ตาราง ก.27 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินทวดเขาแดง โดยการทดสอบแบบความดันคงที่ และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 1

บ่อดินทวดเขาแดง					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	13.6	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	2800.7	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	2799.4	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.4	cm	หน่วยน้ำหนักดินใน ธรรมชาติ	1.980	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัด หลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.743	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	5.33	cc	ผลต่างระดับน้ำ	2800.05	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	4.617E-07	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	4.612E-07	

ตาราง ก.28 แสดงข้อมูลการหาค่า k ของบ่อดินทวดเขาแดง โดยการทดสอบแบบความดันคงที่ และแบบความดันแปรเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 2

บ่อดินทวดเขาแดง					
น้ำหนักดินก่อนอัด	160	gm	เวลา	3600	sec
ปริมาณความชื้น	13.6	%	ศักย์ความสูงน้ำ (h1)	2800.8	cm
พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง	9.62	cm ²	ศักย์ความสูงน้ำ (h2)	2799.5	cm
ความสูงตัวอย่าง	8.31	cm	หน่วยน้ำหนักดินใน ธรรมชาติ	2.001	gm/cm ³
พื้นที่หน้าตัด หลอดแก้ว	4.1	cm ²	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง	1.761	gm/cm ³
ปริมาณน้ำไหลออก	5.33	cc	ผลต่างระดับน้ำ	2800.15	cm
k Constant Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	4.567E-07	
k Falling Head			มีหน่วยเป็น cm/sec	4.562E-07	

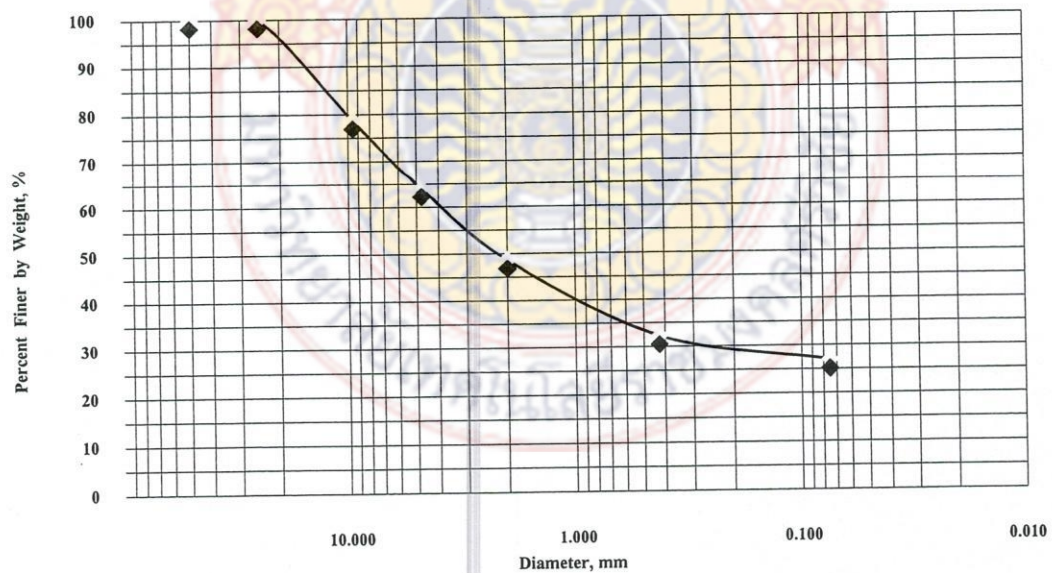
ภาคผนวก ข

ตารางค่าคุณสมบัติต่างๆ ของดินแต่ละชนิด



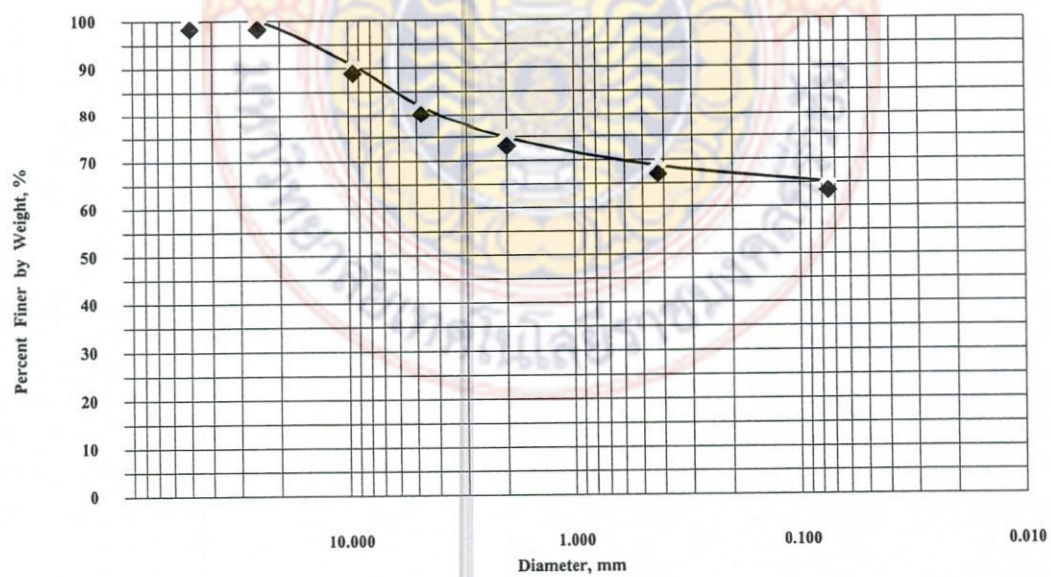
ตาราง ข.1 ข้อมูลการทดสอบหาขนาดผลของบ่อดินบ้านปากช่อง

SIEVE ANALYSIS				
Sieve Number	Weight Sample , (gm)	Weight Sample Retained, (%)	Percent of Cumulative Retained, (%)	Percent of Finner or Passing, (%)
2"	0.0	0.00	0.00	100.00
1"	0.0	0.00	0.00	100.00
3/8"	319.4	21.29	21.29	78.71
No. 4	221.4	14.76	36.06	63.94
No. 10	228.5	15.23	51.29	48.71
No. 40	246.9	16.46	67.75	32.25
No. 200	80.3	5.35	73.10	26.90
pan	403.5	26.90	100.00	-
	1,500.0			



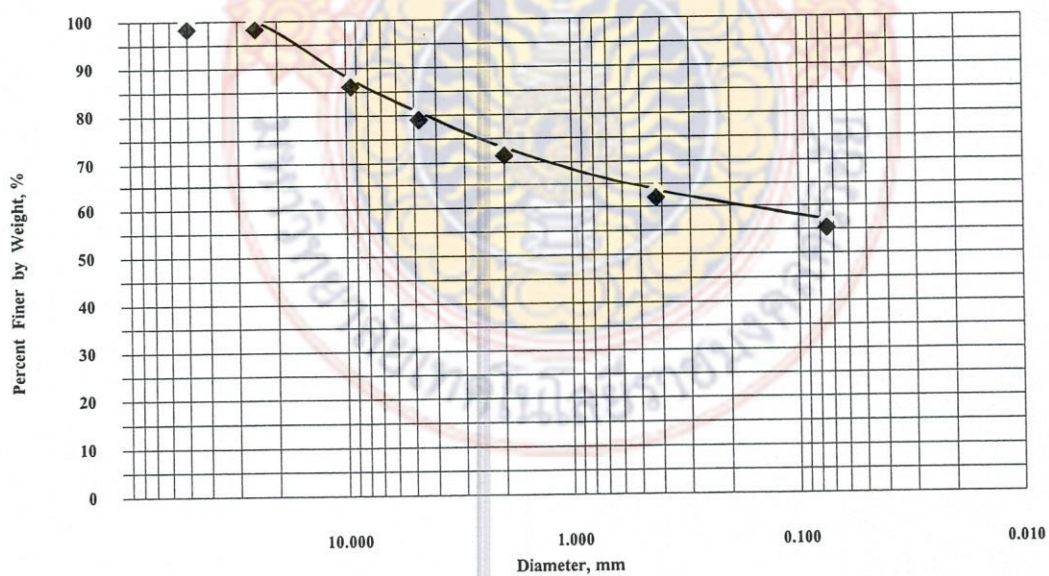
ตาราง ข.2 ข้อมูลการทดสอบหาขนาดคละของบ่อดินบ้านทวดเสือ

SIEVE ANALYSIS				
Sieve Number	Weight Sample , (gm)	Weight Sample Retained, (%)	Percent of Cumulative Retained, (%)	Percent of Finner or Passing, (%)
2"	0.0	0.00	0.00	100.00
1"	0.0	0.00	0.00	100.00
3/8"	140.8	9.38	9.38	90.62
No. 4	131.4	8.76	18.14	81.86
No. 10	105.4	7.03	25.17	74.83
No. 40	92.4	6.16	31.33	68.67
No. 200	53.5	3.57	34.89	65.11
pan	976.6	65.11	100.00	-
	1,500.0			



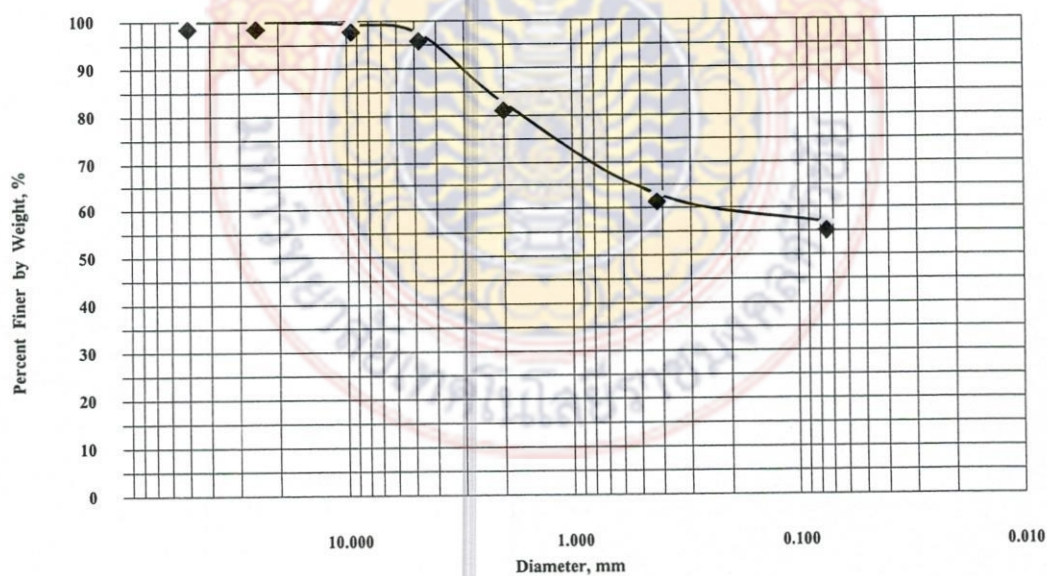
ตาราง ข.3 ข้อมูลการทดสอบหาขนาดกะของบ่อดินบ้านตรับ

SIEVE ANALYSIS				
Sieve Number	Weight Sample , (gm)	Weight Sample Retained, (%)	Percent of Cumulative Retained, (%)	Percent of Finner or Passing, (%)
2"	0.0	0.00	0.00	100.00
1"	0.0	0.00	0.00	100.00
3/8"	184.2	12.28	12.28	87.72
No. 4	105.3	7.02	19.30	80.70
No. 10	113.6	7.57	26.87	73.13
No. 40	144.1	9.61	36.48	63.52
No. 200	97.6	6.50	42.98	57.02
pan	855.3	57.02	100.00	-
	1,500.0			



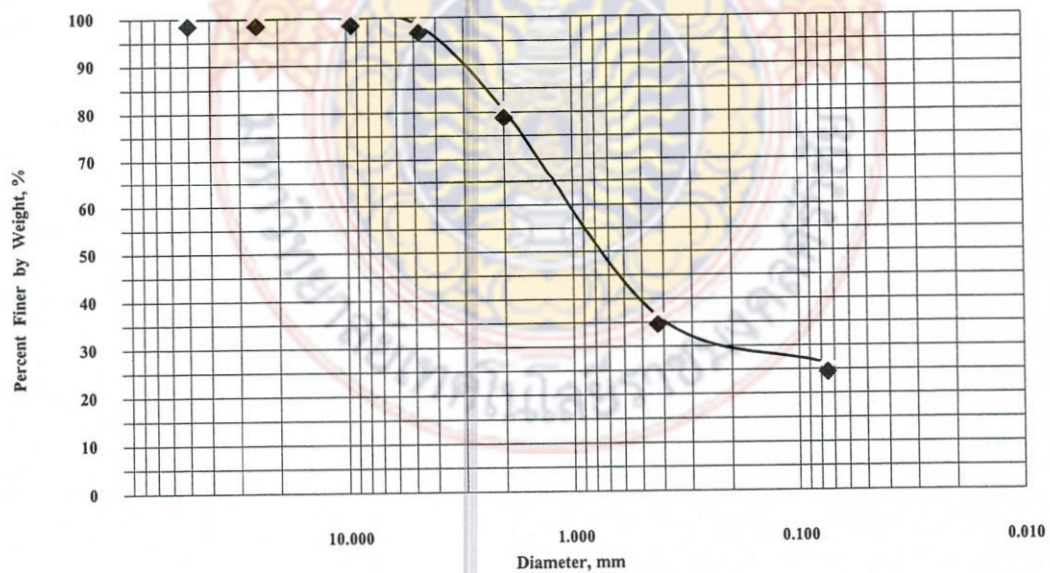
ตาราง ข.4 ข้อมูลการทดสอบหาขนาดคละของบ่อดินบ้านดอนขี้เหล็ก

SIEVE ANALYSIS				
Sieve Number	Weight Sample , (gm)	Weight Sample Retained, (%)	Percent of Cumulative Retained, (%)	Percent of Finner or Passing, (%)
2"	0.0	0.00	0.00	100.00
1"	0.0	0.00	0.00	100.00
3/8"	10.3	0.68	0.68	99.32
No. 4	29.1	1.94	2.63	97.37
No. 10	220.4	14.69	17.32	82.68
No. 40	297.5	19.83	37.15	62.85
No. 200	91.5	6.10	43.25	56.75
pan	851.3	56.75	100.00	-
	1,500.0			



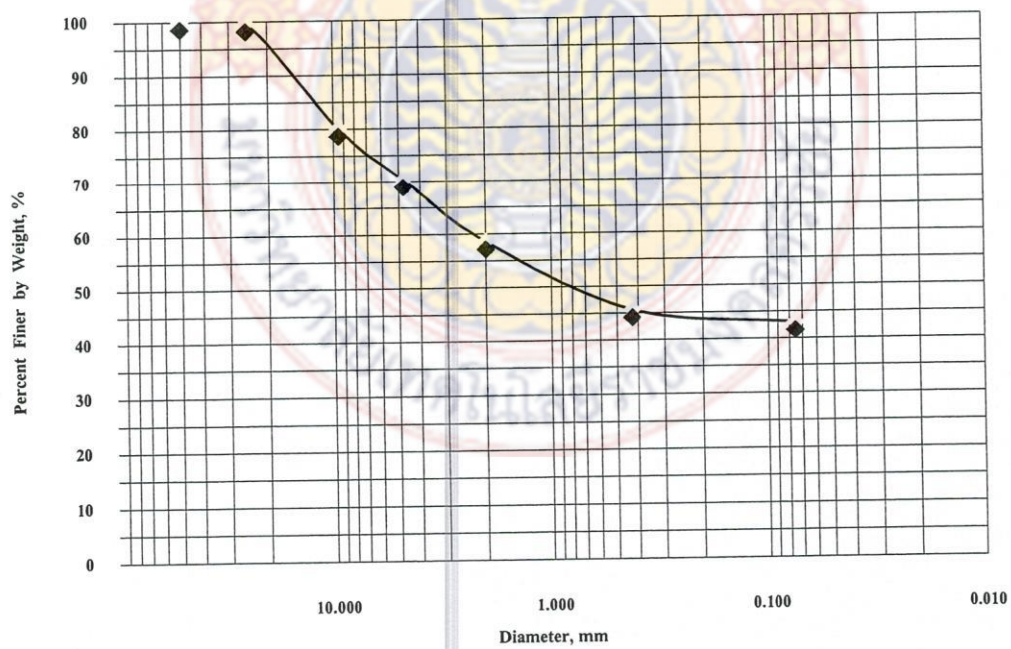
ตาราง ข.5 ข้อมูลการทดสอบหาขนาดกะของบ่อดินบ้านนาป่อง

SIEVE ANALYSIS				
Sieve Number	Weight Sample , (gm)	Weight Sample Retained, (%)	Percent of Cumulative Retained, (%)	Percent of Finner or Passing, (%)
2"	0.0	0.00	0.00	100.00
1"	0.0	0.00	0.00	100.00
3/8"	0.0	0.00	0.00	100.00
No. 4	24.5	1.63	1.63	98.37
No. 10	269.4	17.96	19.59	80.41
No. 40	661.2	44.08	63.67	36.33
No. 200	153.5	10.23	73.90	26.10
pan	391.4	26.10	100.00	-
	1,500.0			



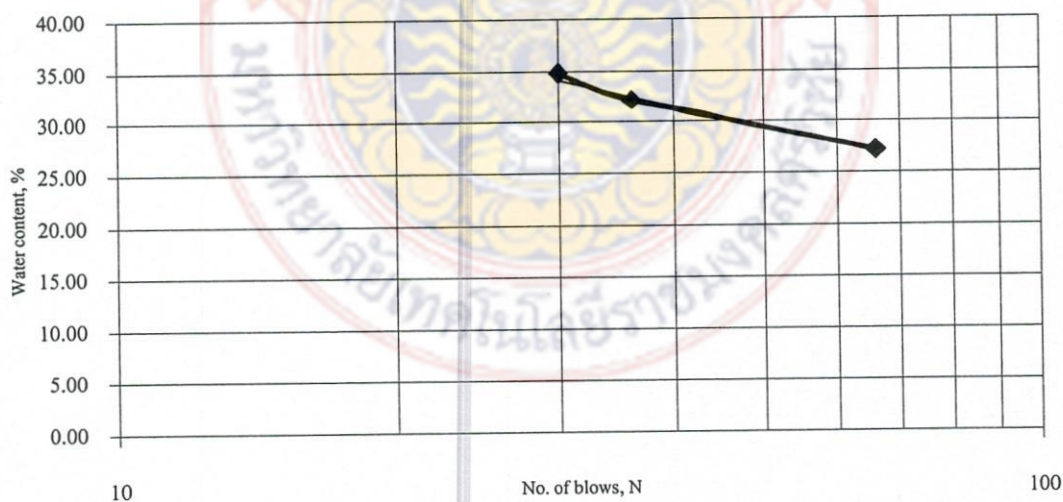
ตาราง ข.6 ข้อมูลการทดสอบหาขนาดคละของบ่อดินทวดเขาแดง

SIEVE ANALYSIS				
Sieve Number	Weight Sample , (gm)	Weight Sample Retained, (%)	Percent of Cumulative Retained, (%)	Percent of Finner or Passing, (%)
2"	0.0	0.00	0.00	100.00
1"	6.0	0.40	0.40	99.60
3/8"	292.9	19.53	19.93	80.07
No. 4	145.9	9.73	29.65	70.35
No. 10	176.5	11.77	41.42	58.58
No. 40	193.4	12.90	54.32	45.68
No. 200	40.0	2.67	56.98	43.02
pan	645.3	43.02	100.00	-
	1,500.0			



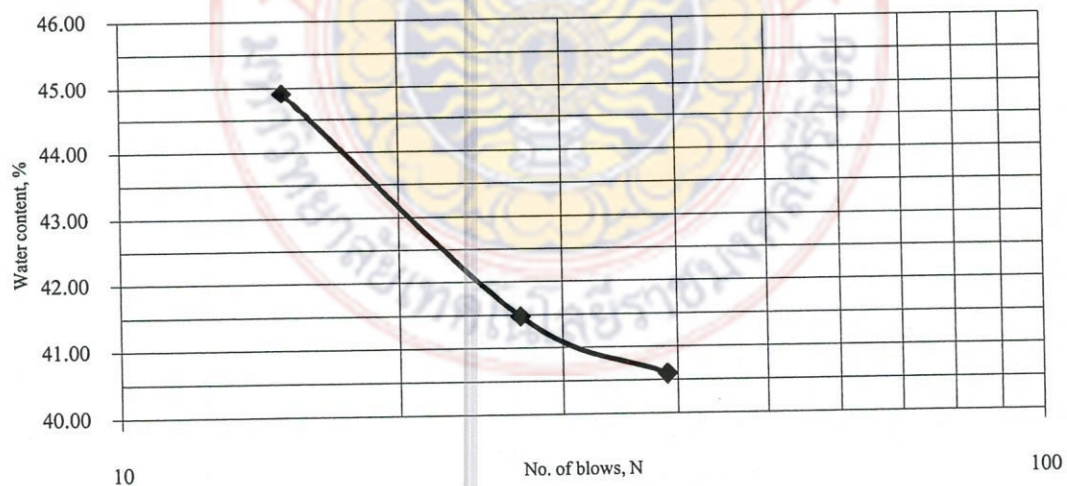
ตาราง ข.7 ข้อมูลการทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์กของบ่อดินบ้านปากช่อง

Water Content Determination	Liquid Limit, LL			Natural water content, w_n	Plastic Limit, PL		
	1	2	3		1	2	3
Container Number							
Wet soil + container, gm	30.27	33.48	32.25	30.21	20.95	22.89	20.10
Dry soil + container, gm	26.82	29.47	28.90	30.07	20.23	21.76	19.63
Water, gm	3.45	4.01	3.35	0.14	0.72	1.13	0.47
Container, gm	16.92	17.03	16.58	17.42	17.34	16.76	16.61
Dry soil, gm	9.90	12.44	12.32	12.65	2.89	5.00	3.02
Water content, %	34.85	32.23	27.19	1.11	24.91	22.60	15.56
Number of blows	30	36	66	1.11	21.03		
Average, %	31.42						
Liquid limit	35.30						
Plasticity Index, PI = LL-PL	14.27						



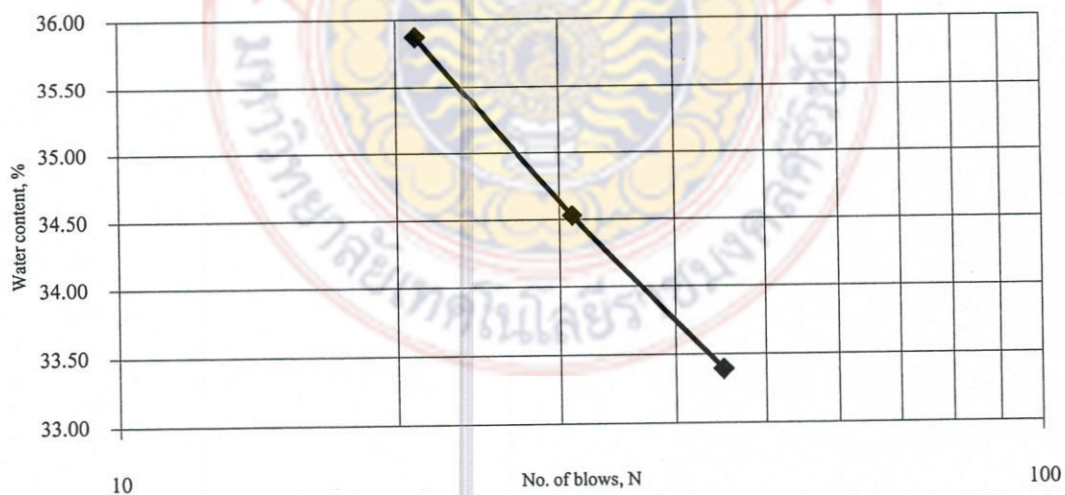
ตาราง ข.8 ข้อมูลการทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเบอร์ร็อกของบ่อดินทวดเสือ

Water Content Determination	Liquid Limit, LL			Natural water content, w_n	Plastic Limit, PL		
	1	2	3		1	2	3
Container Number							
Wet soil + container, gm	36.48	30.22	35.36	55.04	20.49	18.17	18.23
Dry soil + container, gm	30.83	26.35	29.54	54.62	20.20	18.04	17.94
Water, gm	5.65	3.87	5.82	0.42	0.29	0.13	0.29
Container, gm	16.91	17.02	16.58	16.48	16.48	16.81	16.71
Dry soil, gm	13.92	9.33	12.96	38.14	3.72	1.23	1.23
Water content, %	40.59	41.48	44.91	1.10	7.80	10.57	23.58
Number of blows	39	27	15	1.10	13.98		
Average, %	42.33						
Liquid limit	41.82						
Plasticity Index, PI = LL-PL	27.84						



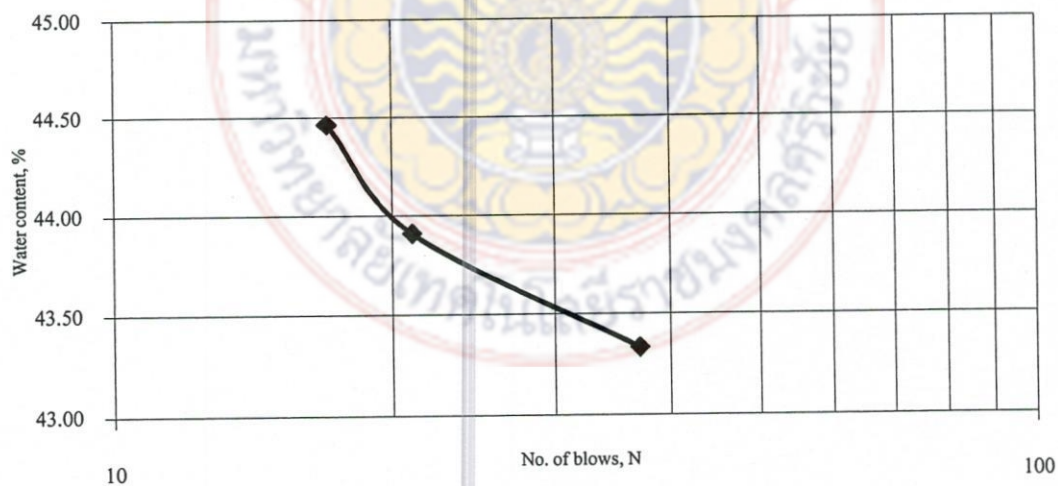
ตาราง ข.9 ข้อมูลการทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์กของบ่อดินบ้านตรับ

Water Content Determination	Liquid Limit, LL			Natural water content, w_n	Plastic Limit, PL		
	1	2	3		1	2	3
Container Number							
Wet soil + container, gm	33.45	30.34	27.94	55.44	20.78	19.76	20.17
Dry soil + container, gm	29.48	26.97	25.16	54.96	19.86	19.20	19.26
Water, gm	3.97	3.37	2.78	0.48	0.92	0.56	0.91
Container, gm	17.59	17.21	17.41	16.68	16.67	16.80	16.70
Dry soil, gm	11.89	9.76	7.75	38.28	3.19	2.40	2.56
Water content, %	33.39	34.53	35.87	1.25	28.84	23.33	35.55
Number of blows	45	31	21	1.25	29.24		
Average, %	34.60						
Liquid limit	35.25						
Plasticity Index, PI = LL-PL	6.01						



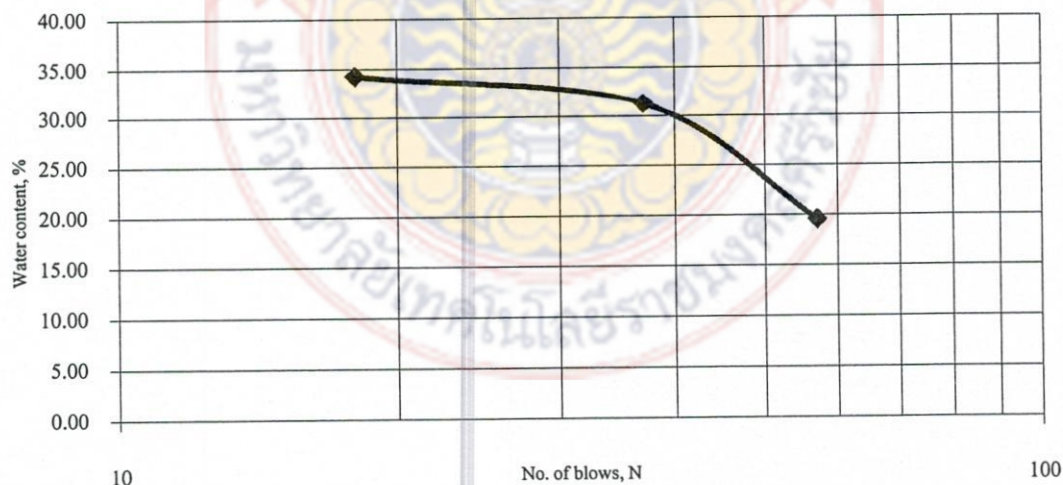
ตาราง ข.10 ข้อมูลการทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเบอร์ร็อกของบ่อดินบ้านคอนจี้เหล็ก

Water Content Determination	Liquid Limit, LL			Natural water content, w_n	Plastic Limit, PL		
	1	2	3		1	2	3
Container Number							
Wet soil + container, gm	28.25	30.39	25.56	48.01	19.85	20.17	20.38
Dry soil + container, gm	24.87	26.39	23.07	44.00	19.20	19.45	19.54
Water, gm	3.38	4.00	2.49	4.01	0.65	0.72	0.84
Container, gm	17.07	17.28	17.47	11.78	17.06	17.57	17.24
Dry soil, gm	7.80	9.11	5.60	32.22	2.14	1.88	2.30
Water content, %	43.33	43.91	44.46	12.45	30.37	38.30	36.52
Number of blows	37	21	17	12.45	35.06		
Average, %	43.90						
Liquid limit	43.60						
Plasticity Index, PI = LL-PL	8.54						



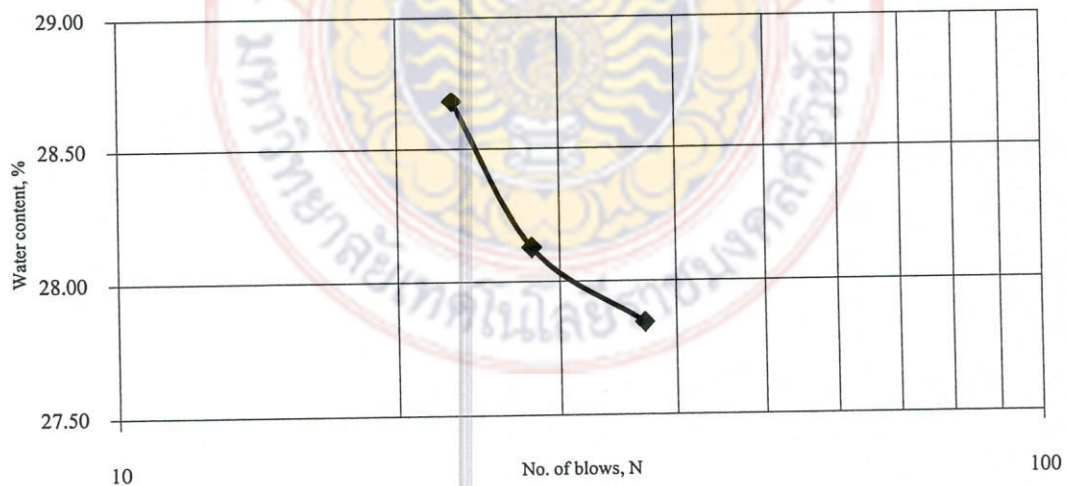
ตาราง ข.11 ข้อมูลการทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์กของบ่อดินบ้านนาป้อง

Water Content Determination	Liquid Limit, LL			Natural water content, w_n	Plastic Limit, PL		
	1	2	3		1	2	3
Container Number							
Wet soil + container, gm	28.90	31.28	33.31	96.79	23.21	21.08	17.96
Dry soil + container, gm	27.01	27.97	29.30	94.34	22.13	20.39	16.74
Water, gm	1.89	3.31	4.01	2.45	1.08	0.69	1.22
Container, gm	17.34	17.38	17.60	17.42	17.32	17.66	12.11
Dry soil, gm	9.67	10.59	11.70	76.92	4.81	2.73	4.63
Water content, %	19.54	31.26	34.27	3.19	22.45	25.27	26.35
Number of blows	57	37	18	3.19	24.69		
Average, %	28.36						
Liquid limit	34.00						
Plasticity Index, PI = LL-PL	9.31						



ตาราง ข.12 ข้อมูลการทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเบอร์กของบ่อดินทวดเขาแดง

Water Content Determination	Liquid Limit, LL			Natural water content, w_n	Plastic Limit, PL		
	1	2	3		1	2	3
Container Number							
Wet soil + container, gm	36.98	38.00	43.66	58.36	17.85	22.79	25.01
Dry soil + container, gm	32.82	33.48	37.89	57.39	17.05	21.80	24.14
Water, gm	4.16	4.52	5.77	0.97	0.80	0.99	0.87
Container, gm	17.88	17.41	17.77	20.63	13.68	17.64	20.60
Dry soil, gm	14.94	16.07	20.12	36.76	3.37	4.16	3.54
Water content, %	27.84	28.13	28.68	2.64	23.74	23.80	24.58
Number of blows	37	28	23	2.64	24.04		
Average, %	28.22						
Liquid limit	28.50						
Plasticity Index, PI = LL-PL	4.46						



ตาราง ข.13 ข้อมูลการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินแต่ละบ่อดิน

ข้อมูล	บ่อดิน					
	ทวด เสื่อ	ปากช่อง	บ้านตรับ	ดอน จี้เหล็ก	นาป่าอง	เขาแดง
Flask., gm	141.86	157.25	147.85	145.47	145.97	144.53
Flask+ Water, gm	639.31	654.42	644.98	643.05	642.37	642.11
Flask+ Water+Soil, gm	670.67	685.68	676.68	673.26	673.26	673.46
Weight of Dry Soil, gm	48.97	49.89	49.78	48.5	49.4	49.15
Specific Gravity of Water at 27 °C	0.99671	0.99671	0.99671	0.99671	0.99671	0.99671
Specific Gravity of Soil	2.777	2.719	2.749	2.648	2.665	2.757



ภาคผนวก ก

การเผยแพร่ผลงานวิจัย





การออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่าน
แบบความดันแปรเปลี่ยนหัวท้าย
Design and Construct
Falling Head – Rising Tail Testing Apparatus

สมมาตร สวัสดิ์¹ จำรูญ สมบูรณ์² และ อาศิษ อัยรักษ์³

^{1,2,3} สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดทดสอบ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบเขื่อน ถนน บ่อฝังกลบขยะ บ่อกักเก็บน้ำ งานถมบดอัด ชุดดินอุโมงค์ กำแพงกันดิน และเสถียรภาพความลาดชัน ดังนั้น จึงได้ทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านแบบความดันแปรเปลี่ยนหัวท้าย เพื่อจำลองการซึมผ่านของน้ำในดิน โดยการนำข้อด้อยของชุดทดสอบแบบความดันคงที่ และความดันแปรเปลี่ยนมาปรับแก้ ซึ่งชุดทดสอบนี้สามารถแก้ปัญหาที่เกิดกับการทดสอบแบบความดันคงที่ และความดันแปรเปลี่ยน โดยสามารถจำลองสภาพดินตัวอย่างได้ใกล้เคียงกับสภาพในธรรมชาติจริงก่อนเก็บตัวอย่าง และสามารถตรวจสอบการอิ่มตัวของตัวอย่างได้เช่นเดียวกับการทดสอบแรงอัดสามแกน และเซลล์บรรจุตัวอย่างจะเป็นแบบผนังอ่อน ตัวอย่างดินที่บรรจุอยู่ในเซลล์สามารถให้แรงดันโดยรอบตัวอย่างได้ จึงทำให้ผนังเซลล์แนบสนิทกับดิน ป้องกันการซึมผ่านของน้ำทางด้านข้างได้ ทำให้ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินที่ได้ใกล้เคียงกับดินในธรรมชาติ ผลการศึกษาพบว่า ค่าที่ได้จากชุดทดสอบแบบความดันแปรเปลี่ยนหัวท้าย มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่น้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของชุดทดสอบแบบความดันคงที่ และความดันแปรเปลี่ยน ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้กำหนดไว้เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทดสอบแบบความดันคงที่ และความดันแปรเปลี่ยน นอกจากนี้ยังสามารถลดเวลาในการทดสอบตัวอย่างดิน และเพิ่มแรงดันได้สูงขึ้น มีผลทำให้สามารถใช้ทดสอบกับดินที่มีค่าการซึมผ่านต่ำๆ ได้ดี ดังนั้นชุดทดสอบที่สร้างขึ้นมานี้สามารถนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จริง

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน, ความดันแปรเปลี่ยนหัวท้าย, ความดันคงที่, ความดันแปรเปลี่ยน

Abstract

This study is the design and constructs the apparatus for testing the coefficients of soil permeability which are important for designing dams, streets, landfills, water retention ponds, compaction work, excavation work, tunnels, retaining walls and slope stability. Thus, the design and construction of the permeability testing apparatus on Falling Head-Rising Tail used for simulating the soil permeability was proposed herein by correcting the shortcomings of the Constant Head and Variable Head (Falling Head) testing apparatus (conventional methods). The proposed apparatus can simulate the in situ soil state before soil sampling and can check the saturation of the samples as same as the tri-axial testing apparatus does. The wall around the soil samples is flexible and can reduce the leakage of the fluid between the soil sample and the wall. The results of the study indicate that the coefficients of permeability of Falling Head-Rising Tail testing apparatus are less than those of the conventional methods, corresponding to the hypothesis that was set up to solve the problems. The Falling Head-Rising Tail testing apparatus can reduce the testing time, increasing the pressure to be higher. This allows the apparatus to be used for the soils with very low coefficient of permeability. Therefore, the Falling Head-Rising Tail testing apparatus proposed herein can be really used for determining the coefficients of soil permeability.

Keywords: coefficient of permeability, Falling Head – Rising Tail, Constant Head, Variable Head

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: sswasdi@hotmail.com

1. คำนำ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, Hydraulic Conductivity, k) ของน้ำในดินมีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering) ซึ่งจะนำไปใช้ในงาน เช่น ถนน บ่อฝังกลบขยะ บ่อกักเก็บน้ำ งานถมบ่ออัดงานขุดดิน อุโมงค์ กำแพงกันดิน เสถียรภาพความลาดชัน ซึ่งในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน โดยทั่วไปจะเก็บตัวอย่างดินจากในสนามมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลักๆ คือ การทดสอบแบบความดันคงที่ (Constant Head) และการทดสอบแบบความดันแปรเปลี่ยน (Variable Head หรือ Falling Head) ซึ่งทั้ง 2 วิธี นั้นมีข้อดีของการทดสอบ คือ สามารถให้แรงดันของของไหลได้น้อย (Pressure Head) เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ ไม่สามารถจำลองตัวอย่างดินให้มีสภาพที่เหมือนกับธรรมชาติของดินก่อนการเก็บตัวอย่าง ไม่สามารถควบคุมแรงดันน้ำทางด้านเข้าและออก และทั้ง 2 วิธีนั้น ตัวอย่างดินจะถูกบรรจุอยู่ในเซลล์ทดสอบแบบผนังแข็ง (Rigid Wall) จึงทำให้การไหลของน้ำมีโอกาสที่จะไหลซึมผ่านไปทางด้านข้างของผนังเซลล์ช่องว่างระหว่างดินกับผนังเซลล์ ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีความผิดพลาด กล่าวเคลื่อนจากความไม่เป็นจริง

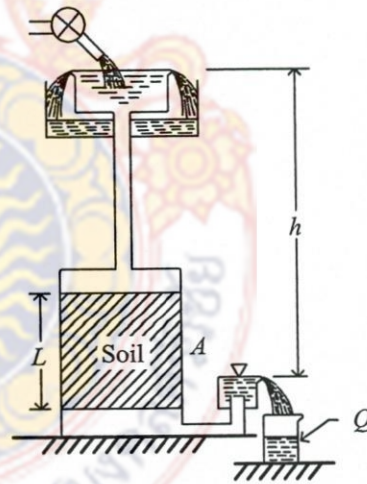
ดังนั้น จึงได้มีแนวความคิดที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านแบบ Falling Head – Rising Tail โดยชุดทดสอบนี้จะสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีทดสอบแบบความดันคงที่และแบบความดันแปรเปลี่ยน เพราะชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail นี้สามารถควบคุมแรงดันได้ทั้งทางน้ำเข้าและทางน้ำออกของตัวอย่างดิน สามารถให้แรงดันสูงๆ กับตัวอย่างได้ สามารถจำลองสภาพของดินตัวอย่างได้ใกล้เคียงกับสภาพในธรรมชาติจริงก่อนเก็บตัวอย่าง สามารถตรวจสอบการอิมตัวของดินตัวอย่างได้โดยการทำ B – Check เช่นเดียวกับการทดสอบแรงอัดสามแกน (Tri-axial Test) และเซลล์บรรจุตัวอย่างจะเป็นแบบผนังอ่อนตัว (Flexible Wall) บรรจุอยู่ในเซลล์รับแรงดัน (Pressure Cell) ซึ่งสามารถอัดแรงดันกอครัดด้านข้าง (Confining Pressure) แก่ตัวอย่างดินได้ จึงทำให้ผนังของเซลล์แนบสนิทกับดิน ป้องกันการซึมผ่านของน้ำทางด้านข้างได้ ซึ่งจะทำให้ได้ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินที่ใกล้เคียงกับดินในธรรมชาติ และสามารถใช้ทดสอบกับดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำๆ (ค่อนข้างทึบน้ำ) ได้

2. การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดิน

2.1 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) ของมวลดินในห้องปฏิบัติการ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) ของมวลดินชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้ในการคำนวณ โดยปกติจะได้มาจากการทดสอบประกอบกับการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎี การทดสอบเพื่อประเมินค่า k ของมวลดินในห้องปฏิบัติการเป็นการทดสอบอย่างง่าย โดยสมมุติให้การไหลของน้ำผ่านตัวอย่างมวลดินเป็นการไหลแบบทิศทางเดียว ซึ่งเหมาะสมที่จะทำการทดสอบกับมวล

ดินจากแหล่งดินประเภทเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Soils) ที่มีการไหลของน้ำในทิศทางเดียวโดยตลอดตัวอย่างมวลดินที่ใช้ในการทดสอบ ถ้าจะให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงควรเป็นตัวอย่างประเภทไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Samples) แต่ถ้าเป็นดินที่มีทรายนมาก หรือเป็นทรายล้วนๆ การทำตัวอย่างขึ้นใหม่โดยใช้แบบ (Remolded Samples) ในห้องปฏิบัติการ โดยทำให้มีคุณสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับสภาพของมวลดินในธรรมชาติก่อนเก็บตัวอย่างมากที่สุด ก็สามารถใช้ทำการทดสอบได้ การทดสอบเพื่อประเมินค่า k ในห้องปฏิบัติการที่เป็นวิธีการทดสอบโดยตรง (Direct Methods หรือ Conventional Methods) และนิยมใช้กันอยู่มี 2 วิธีคือ วิธีความดันน้ำคงที่ (Constant Head) และวิธีความดันน้ำแปรเปลี่ยน (Variable Head หรือ Falling Head) [1] ส่วนวิธีการทางอ้อม (Indirect Methods) สามารถหาค่า k ได้จากการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ซึ่งนิยมใช้ทำการทดสอบกับมวลดินที่มีค่า k ต่ำหรือมวลดินที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดินประเภททึบน้ำ (Impermeable Soils) วิธีการโดยตรงทั้งสองวิธีที่กล่าวถึงในที่นี้เป็นที่นิยมใช้ทำการทดสอบกับมวลดินที่มีค่า k สูงถึงปานกลาง หรือมวลดินที่จัดไว้ในประเภทดินที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Permeable Soils) ส่วนดินที่มีค่า k ต่ำๆ (ทึบน้ำ) ไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีโดยตรง ดังที่กล่าวมาแล้ว จึงได้มีแนวความคิดที่จะออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านแบบ Falling Head – Rising Tail เพื่อใช้ทดสอบหาค่า k ของดินที่มีค่า k ต่ำๆ เช่น ดินเหนียว (Clays) โดยแก้ไขจุดที่เป็นข้อดีของชุดทดสอบการซึมผ่านแบบโดยตรง เช่น ผนังเซลล์บรรจุตัวอย่าง และระยะเวลาในการทดสอบ



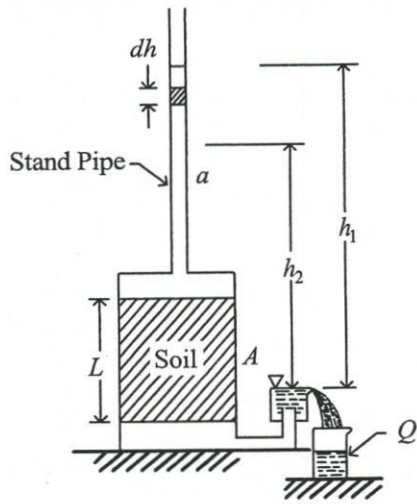
รูปที่ 1 การทดสอบ Constant Head

สมการสำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Constant Head แสดงในสมการที่ (1) และการซึมผ่านแบบ Falling Head แสดงในสมการที่ (2)

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad (1)$$

โดย k คือ ค่าการซึมผ่านของน้ำในดิน, Q คือ ปริมาตรที่ไหลออกจากตัวอย่างในช่วงเวลา t , L คือ ความยาวของตัวอย่างดิน, A คือ พื้นที่หน้าตัด

ดินตัวอย่าง, h คือ ผลต่างของระดับน้ำก่อนไหลเข้าและออกจากตัวอย่าง และ t คือ เวลาที่วัดปริมาตรน้ำไหลออกจากตัวอย่างดิน [1-3]



รูปที่ 2 การทดสอบ Falling Head

$$k = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

โดย k คือ ค่าการซึมผ่านของน้ำในดิน, Q คือ ปริมาตรที่ไหลออกจากตัวอย่างในช่วงเวลา t โดย $Q = a(h_1 - h_2)$, L คือ ความยาวของตัวอย่างดิน, A คือ พื้นที่หน้าตัดดินตัวอย่าง, h_1 คือ ความสูงของระดับน้ำในหลอด Stand Pipe วัดจากระดับน้ำสันทางออกก่อนจับเวลา t (ก่อนทดสอบ), h_2 คือ ความสูงของระดับน้ำในหลอด Stand Pipe วัดจากระดับน้ำสันทางออกหลังจากจับเวลา t (หลังทดสอบ), a คือ พื้นที่หน้าตัดของหลอด Stand Pipe โดยสามารถคำนวณจากค่า $a = Q/(h_1 - h_2)$ และ t คือ เวลาที่วัดปริมาตรน้ำไหลออกจากตัวอย่างดิน การทดสอบแบบ Falling Head ส่วนใหญ่ มักจะใช้ทดสอบกับดินที่มีค่า k น้อยกว่า 10^{-3} cm/sec [1], [3-4]

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินโดยทั่วไปสามารถแสดงในตารางที่ 1

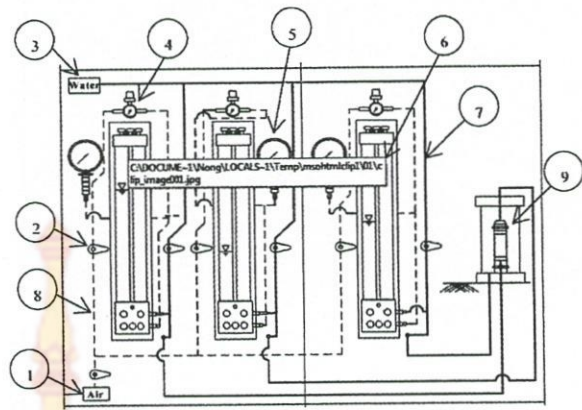
ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินชนิดต่างๆ [5-7]

ชนิดของดิน	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k), cm/sec
Medium to Coarse Gravel	Greater than 10^{-1}
Coarse to Fine Sand	10^{-1} to 10^{-3}
Fine Sand, Silty Sand	10^{-3} to 10^{-5}
Silt, Clayey Silt, Silty Clay	10^{-4} to 10^{-6}
Clays	10^{-7} or less

2.2 ชุดทดสอบ Falling Head - Rising Tail

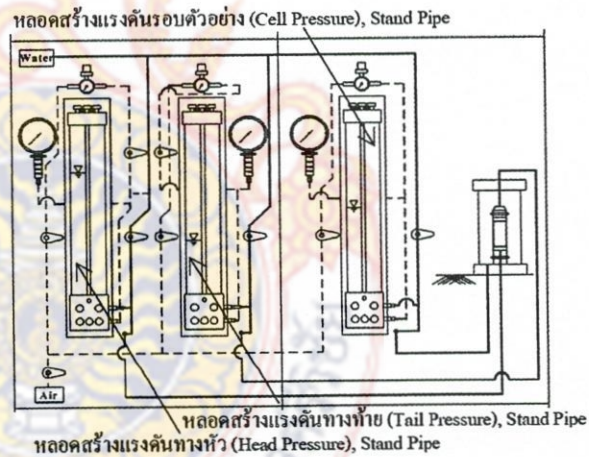
จากการออกแบบและสร้างสามารถได้ชุดทดสอบการซึมผ่านแบบ Falling Head - Rising Tail ดังแสดงในรูปที่ 3 ถึง รูปที่ 10 ซึ่งเป็นการแสดงส่วนประกอบ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการทดสอบ ตลอดจนแสดงถึงตำแหน่ง และการวัดค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้สำหรับการ

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head - Rising Tail

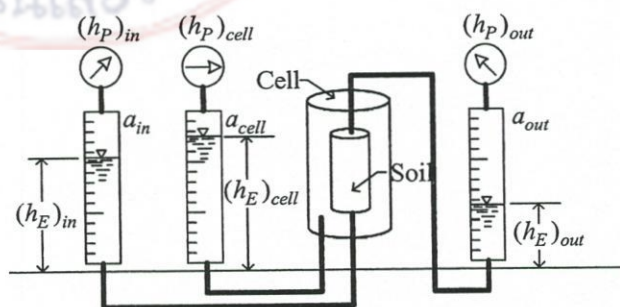


รูปที่ 3 อุปกรณ์ประกอบชุดทดสอบ Falling Head - Rising Tail

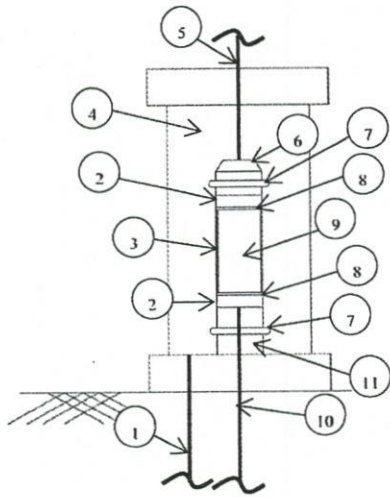
โดย 1 คือ ทางเข้าอากาศจากปั๊มลม (Air), 2 คือ วาล์วเปิด - ปิด (Valve), 3 คือ ทางเข้าของน้ำต่อจากถังด้านหลังบอร์ด (Water), 4 คือ ตัวควบคุมแรงดันให้คงที่ (Regulator), 5 คือ เกจวัดแรงดัน (Pressure Gauge), 6 คือ หลอดแก้ววัดปริมาตรน้ำ (Twin Burette) หรือ หลอด Stand Pipe, 7 คือ เส้นทางการเดินของน้ำ (Water Line), 8 คือ เส้นทางการเดินของอากาศ (Air Line) และ 9 คือ เซลล์บรรจุตัวอย่าง (Tri-axial Cell)



รูปที่ 4 ตำแหน่งของหลอดสร้างแรงดันของชุดทดสอบ Falling Head - Rising Tail

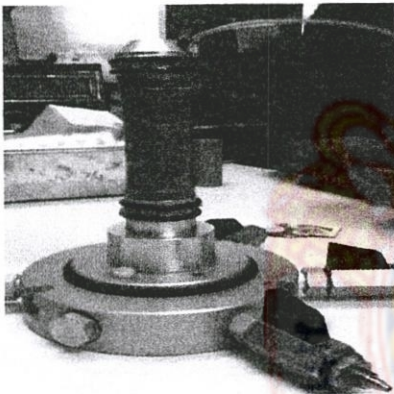


รูปที่ 5 ตัวแปรในการวัดแรงดันของชุดทดสอบ Falling Head - Rising Tail

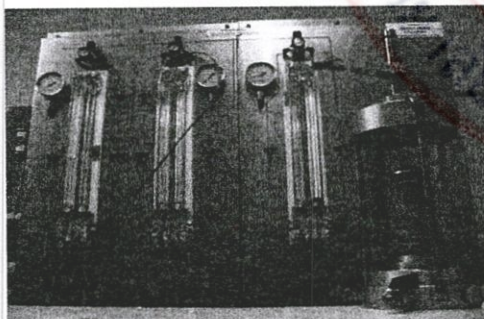


รูปที่ 6 ขยายเซลล์บรรจุตัวอย่าง (Tri-axial Cell)

โดย 1 คือ แรงดันรอบตัวอย่าง (Cell Pressure), 2 คือ หินพรุน (Porous Stone), 3 คือ ปลอกยาง (Rubber Membrane), 4 คือ น้ำรอบตัวอย่าง (Water), 5 คือ แรงดันทางท้าย (Tail Pressure), 6 คือ ฐานปิดหัวตัวอย่าง (Top Cap), 7 คือ ขางวงแหวน (O-Ring), 8 คือ กระดาษกรอง (Filter Paper), 9 คือ ดินตัวอย่าง (Soil Sample), 10 คือ แรงดันทางหัว (Head Pressure) และ 11 คือ ฐานรองตัวอย่าง (Bottom Cap)



รูปที่ 7 การติดตั้งตัวอย่างกับเซลล์บรรจุตัวอย่าง



รูปที่ 8 ชุดทดสอบ Falling Head - Rising Tail หลังจากการสร้างเสร็จ

สำหรับสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแบบ Falling Head - Rising Tail นั้นมีความแตกต่างจากสมการของ Constant Head และ Falling Head ซึ่งสามารถแสดงได้ในสมการที่ (3)



รูปที่ 9 ถังเก็บน้ำ (Water Tank) หลังแฉกควบคุม



รูปที่ 10 บั๊มลม (Air Pump) สำหรับสร้างแรงดันทดสอบ

$$k = \frac{a_{in} a_{out} L}{A (t_2 - t_1) (a_{in} + a_{out})} \ln\left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}\right) \quad (3)$$

$$\Delta h_1 = [(h_E + h_P)_{in} - (h_E + h_P)_{out}] \text{ at } t_1 \quad (4)$$

$$\Delta h_2 = [(h_E + h_P)_{in} - (h_E + h_P)_{out}] \text{ at } t_2 \quad (5)$$

โดย k คือ ค่าการซึมผ่านของน้ำในดิน (Coefficient of Permeability, Hydraulic Conductivity), h_P คือ Pressure Head, h_E คือ Elevation Head, a_{in} คือ พื้นที่หน้าตัดของหลอด Stand Pipe ของน้ำเข้า (Head Pressure), a_{out} คือ พื้นที่หน้าตัดของหลอด Stand Pipe ของน้ำออก (Tail Pressure), A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน, L คือ ความยาวของตัวอย่างดิน, t_1 คือ เวลาเริ่มทดสอบ และ t_2 คือ เวลาหลังทดสอบ

2.3 ขั้นตอนการทดสอบ Falling Head - Rising Tail

2.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชุดทดสอบ

1. นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้แล้วบรรจุในเซลล์สามแกนที่รองด้วยหินพรุน กระดาษกรอง ใส่ปลอกยางหุ้มตัวอย่างดิน รัศปลอกยางหุ้มตัวอย่างด้วยขางวงแหวนกันน้ำรั่วซึม ปิดเซลล์ให้แน่นแล้วเติมน้ำให้เต็ม
2. ทำการต่อสายท่นแรงดันสูง (สาย PU) จากบั๊มลมเข้ากับแฉกควบคุมแรงดัน
3. เติมน้ำเข้าหลอดสร้างแรงดัน Head Pressure, Tail Pressure และ Cell Pressure ให้ได้ระดับตามต้องการ

4. ปรับตัวควบคุมแรงดันให้เป็นศูนย์ทุกหลอดสร้างแรงดัน พร้อมทดสอบ

2.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ Falling Head – Rising Tail

1. จากรูปที่ 4 และ 6 ต่อเซลล์สามแกนเข้ากับหลอดสร้างแรงดันทั้งสามหลอด คือ หลอด Head Pressure ($a_{in} = 4.10$ ตารางเซนติเมตร) หลอด Tail Pressure ($a_{out} = 4.10$ ตารางเซนติเมตร) และ หลอด Cell Pressure ($a_{cell} = 4.10$ ตารางเซนติเมตร) สำหรับหลอด Cell Pressure จะสร้างแรงดันรอบๆ ดินตัวอย่าง จึงทำให้ผนังบางด้านข้างสามารถแนบสนิทกับตัวอย่างดิน ทำให้ลึกลับปัญหาของการซึมของน้ำทางด้านข้างของตัวอย่างดิน ดังเช่นกรณีของการใช้เซลล์ผนังแข็ง

2. ทำการตรวจสอบการอิมตัวของดินตัวอย่าง โดยกระบวนการการทำ B-Check (เหมือนการทดสอบ Tri-axial) ซึ่งค่า B จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ถึงจะแสดงว่าดินตัวอย่างอิมตัว จากนั้นตรวจสอบปริมาตรของน้ำที่ไหลเข้าตัวอย่างจะต้องเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่าง ($Q_{in} = Q_{out}$)

3. ถ้าหากต้องการทำการ Consolidate ตัวอย่างดิน (เหมือนการทดสอบ Tri-axial) ก็ยังสามารถทำได้ โดยการเพิ่ม Cell Pressure ตามขนาดของแรงดันที่ต้องการ Consolidate (ใกล้เคียงแรงดันที่กระทำในธรรมชาติก่อนเก็บตัวอย่าง หรือสภาวะที่ต้องการใช้งาน) และวัดปริมาตรน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดิน รอนจนกระทั่งน้ำหยุดไหลออกจากตัวอย่างดิน แสดงว่า กระบวนการ Consolidate เสร็จสิ้น ตัวอย่างดินพร้อมทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดิน

4. การให้แรงดันในหลอด Cell Pressure จะต้องให้แรงดันมากกว่าหลอด Head Pressure เสมอ (เพราะจะทำให้แรงดันกดโดยรอบตัวอย่าง ถ้า Head Pressure มากกว่า Cell Pressure ตัวอย่างดินจะบวมตัวและอาจจะวิบัติได้) โดยขนาดของ Cell Pressure ที่จะกระทำกับตัวอย่างดินจะต้องใกล้เคียงกับแรงดันที่กระทำอยู่รอบๆ ตัวอย่างดินก่อนทำการเก็บตัวอย่าง (สภาวะใกล้เคียงธรรมชาติ หรือสภาวะใช้งานของดินตัวอย่าง) สำหรับ Head Pressure และ Tail Pressure ก็เช่นเดียวกัน จะต้องมีความใกล้เคียง หรือเหมือนกับสภาวะการไหลของน้ำในธรรมชาติ หรือสภาวะที่ต้องการใช้งาน เพื่อให้ได้ค่า k ที่ใกล้เคียงสภาวะการใช้งานจริง

5. ในกรณีทดสอบจะต้องเพิ่มแรงดันในหลอด Head Pressure ให้มากกว่าหลอด Tail Pressure และหลอด Cell Pressure จะต้องมากกว่า Head Pressure เสมอ โดยการให้แรงดันแก่ตัวอย่างดินจะต้องกระทำอย่างระมัดระวังและรอบคอบ ไม่ทำให้ตัวอย่างดินวิบัติ หรือถูกรบกวนมากกว่าดินที่เป็นอยู่ในธรรมชาติก่อนการเก็บตัวอย่าง

6. เริ่มทำการทดสอบโดยการบันทึกค่า Head Pressure, Tail Pressure และ Cell Pressure อ่านระดับน้ำเริ่มต้นในหลอด Stand Pipe ของหลอด Head Pressure, Tail Pressure และ Cell Pressure และจับเวลาเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไปก็ให้ทำการบันทึกค่า แรงดัน และระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละหลอด Stand Pipe อุณหภูมิ และเวลาในแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ หรือตามที่กำหนด ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับประเภทของดินที่นำมาทดสอบ เช่น ถ้าเป็นดินเหนียวจะใช้เวลานานกว่าดินทราย

7. นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน โดยการใช้สมการที่ (3), (4) และ (5)

3. ผลการทดสอบ

หลังจากออกแบบและสร้างชุดทดสอบการซึมผ่านแบบ Falling Head – Rising Tail ได้ทำการทดสอบการใช้งานของเครื่องมือ โดยทำการทดสอบกับดินเม็ดละเอียดที่แตกต่างกัน จำนวน 6 ตัวอย่าง พร้อมทั้งทำการทดสอบการซึมผ่านแบบ Constant Head และ Falling Head เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่า k ในแต่ละวิธีการทดสอบ ซึ่งได้ผลการทดสอบ ดังนี้

3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างทดสอบ

คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบหาค่า k โดยใช้ชุดทดสอบ Falling Head – Rising Tail แสดงในตารางที่ 2

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบเพื่อหาค่า k จะทำการเตรียมตัวอย่างดินในแต่ละชุดตัวอย่าง (Sample) โดยการบดอัดดินในแต่ละชนิดตัวอย่างโดยใช้ความชื้นที่เท่ากัน และทำการบดอัดโดยใช้พลังงานในการบดอัดที่ไม่เท่ากัน เพื่อให้ได้ค่าหน่วยน้ำหนักดินแห้ง หรือความหนาแน่นของดินแห้งที่แตกต่างกัน เพื่อจะได้ดูการเปลี่ยนแปลงของค่า k ตามลักษณะของความหนาแน่นของดิน โดยทำการบดอัดตัวอย่างดินโดยใช้ชุดบดอัดแบบ Harvard

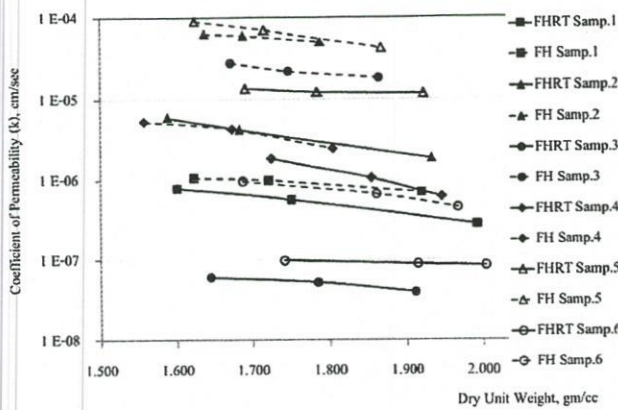
ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

Soil Properties	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Liquid limit (LL)	41.82	35.25	43.60	35.30	34.00	28.50
Plasticity Index (PI)	27.84	6.01	8.54	14.27	9.31	4.46
Specific Gravity (G_s)	2.777	2.665	2.749	2.719	2.757	2.648
% Finer (%)	65.11	57.02	56.75	26.90	26.10	43.02
Type of Soil	CL	ML	ML	SC	SM	SM

โดย CL คือ ดินเหนียวที่มีความเหนียวต่ำ, ML คือ ดินทรายแป้งที่มีความเหนียวต่ำ, SC คือ ดินทรายปนดินเหนียว และ SM คือ ดินทรายปนดินทรายแป้ง

3.2 ผลการทดสอบค่า k จากชุดทดสอบ Falling Head – Rising Tail กับชุดทดสอบ Constant Head และ Falling Head

จากผลการศึกษาของดินตัวอย่างพบว่า ค่า k ที่ได้จากการทดสอบแบบ Constant Head (CH) และ Falling Head (FH) มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงขอเปรียบเทียบค่า k ที่ได้จากการทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบแบบ Falling Head – Rising Tail (FHRT) กับชุดทดสอบแบบ FH ซึ่งผลของการทดสอบของดินทั้ง 6 ตัวอย่าง สามารถแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับค่า k จากการทดสอบ FHRT และ FH

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า ค่า k ที่ได้จากการทดสอบโดยชุดทดสอบ FHRT จะมีค่า k ที่ต่ำกว่าค่า k ที่ได้จากการทดสอบจากชุดทดสอบ FH ทุกตัวอย่างที่นำมาทดสอบ และจะเห็นได้ว่าค่า k มีค่าน้อยลงเมื่อค่าความแน่นของดินเพิ่มขึ้น สำหรับค่า k ที่ได้จากการทดสอบแบบ FHRT จะเห็นได้ว่าอยู่ในช่วงที่เป็นค่า k ของดินที่ค่อนข้างตึบน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริง เพราะดินตัวอย่างเป็นดินเหนียว ดินทรายแป้ง และดินทรายปนดินทรายแป้ง กล่าวคือ ดินเหนียวจะมีค่า k อยู่ในช่วง 10^{-7} หรือน้อยกว่า 10^{-7} cm/sec ดินทรายแป้ง หรือดินทรายแป้งปนดินเหนียว มีค่า k อยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-5} cm/sec และดินทรายละเอียดและดินทรายปนดินทรายแป้ง จะมีค่า k อยู่ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-5} cm/sec

4. บทสรุป

จากผลการทดสอบของดินตัวอย่างจะเห็นได้ว่าค่า k ที่ได้จากการทดสอบแบบ FHRT มีค่าที่น้อยกว่าการทดสอบแบบ FH และน่าจะใกล้เคียงกับค่า k ที่เป็นจริงของดินมากกว่า ทั้งนี้อาจจะสอดคล้องตามสมมติฐานที่ว่าชุดทดสอบ FHRT เป็นชุดทดสอบที่มีผนังเซลล์ที่อ่อนตัว (Flexible Wall) กอปรกับคอนทอสบสามารถให้แรงดันรอบตัวอย่าง (Cell Pressure) จึงทำให้ผนังเซลล์แบบสนิทกับตัวอย่าง ซึ่งทำให้สามารถลดการไหลของน้ำผ่านทางด้านข้างของเซลล์ เป็นการบังคับให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างดินจริงๆ ซึ่งจะแตกต่างกับการทดสอบแบบ FH ที่ผนังเซลล์เป็นแบบแข็ง (Rigid Wall) และไม่สามารถเพิ่มแรงดันรอบตัวอย่างได้ จึงทำให้ผนังเซลล์ไม่สามารถแบบสนิทกับตัวอย่างดินได้เพียงพอ จึงมีโอกาสน้ำบางส่วนหรือทั้งหมดจะซึมไปตามช่องว่างระหว่างด้านข้างของตัวอย่างกับผนังเซลล์ แทนที่จะไหลซึมผ่านตัวอย่างดินจริงๆ ซึ่งตรงจุดนี้เป็นการแก้ไขจุดที่เป็นจุดด้อยของการทดสอบแบบ FH และจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าชุดทดสอบ FHRT ที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถใช้ทดสอบหาค่า k ของดินที่มีการซึมผ่านต่ำๆ ได้เป็นอย่างดี

และจากผลการศึกษายังพบว่าชุดทดสอบแบบ FHRT สามารถช่วยลดเวลาของการทดสอบหาค่า k ของดินที่มีการซึมผ่านต่ำๆ ได้เมื่อเทียบกับการทดสอบแบบ FH เพราะสามารถเพิ่มแรงดันของน้ำให้ไหลผ่านตัวอย่างดินได้เร็วขึ้น และยังสามารถลดการระเหยของน้ำในหลอด Stand Pipe เมื่อ

ทำการทดสอบตัวอย่างดินนานๆ เนื่องจากชุดทดสอบ FHRT เป็นระบบปิดน้ำในหลอด Stand Pipe ไม่สามารถระเหยออกไปได้ และชุดทดสอบแบบ FHRT สามารถจำลองสถานะของดินได้ใกล้เคียงกับสภาพของดินในธรรมชาติในขณะที่เกิดการไหลของน้ำผ่านมวลดิน เพราะสามารถสร้างแรงดันด้านข้างของตัวอย่างดินได้เสมือนในธรรมชาติ และยังสามารถสร้าง Head ของน้ำที่จะไหลผ่านตัวอย่างดินได้ด้วย Head Pressure และสามารถควบคุมแรงดันตอนน้ำไหลออกจากตัวอย่างได้ด้วย Tail Pressure นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบการอิ่มตัวของตัวอย่างได้เช่นเดียวกับการทดสอบ Tri-axial คือ สามารถทำ B - Check ได้ และสามารถทำกระบวนการ Consolidate ดินตัวอย่างได้เช่นเดียวกัน

ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแบบ FHRT ที่สร้างขึ้นมาเมื่อเทียบกับชุดทดสอบแบบ CH และ FH พบว่าสามารถจำลองสภาพของดินตัวอย่างได้ใกล้เคียงกับสภาพของดินในธรรมชาติก่อนการเก็บตัวอย่าง สามารถตรวจสอบการอิ่มตัวของตัวอย่างทดสอบได้ สามารถลดเวลาของการทดสอบหาค่า k ให้สั้นลงในกรณีที่ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียว สามารถใช้ทดสอบได้ทั้งดินเหนียวและดินทราย สามารถลดปัญหาเรื่องของการซึมของของเหลวทางด้านข้างของผนังแข็ง เพราะผนังเซลล์เป็นแบบอ่อนตัว จึงสามารถแบบสนิทกับตัวอย่างทดสอบได้ดีโดยใช้แรงดันรอบตัวอย่าง และสามารถควบคุมแรงดันของของเหลวก่อนและหลังการซึมผ่านตัวอย่างดินได้ โดยสรุปแล้วชุดทดสอบ FHRT นี้สามารถใช้ทดสอบหาค่า k ได้ดีเมื่อเทียบกับการทดสอบแบบ CH และ FH

สำหรับแนวทางการพัฒนาชุดทดสอบ FHRT ในอนาคตจะพัฒนาในเรื่องของการบันทึกค่าผลการทดสอบ คือ แทนที่จะใช้คนในการบันทึกค่าการทดสอบจะประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในการบันทึกค่าการทดสอบแบบอัตโนมัติ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณประจำปี 2554 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และขอขอบคุณ นายพร สายस्ता นายยุทธนา มณีวรรณ นายวรทัศน์ ชุสุทธิ ที่ช่วยดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.E. Bowles. *Foundation analysis and design*. 5th edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996, pp. 46-55.
- [2] A.S.T.M. Standards, "Section 4 Volume 04.08 Soil and Rock (1): D 420 - D 4914", *Annual Book of A.S.T.M. Standard*, American Society for Testing Materials, U.S.A., 1999, pp. 205-209.
- [3] สถาพร คูวิจิตรจารุ, *ทดลองปฐพีกลศาสตร์*, สำนักพิมพ์ไลบารี นาย, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2541, หน้า 10-1 - 10-17.
- [4] A. Pedescoll, R. Samsó, E. Romero, J. Puigagut and J. García, "Reliability, repeatability and accuracy of the falling head method

for hydraulic conductivity measurements under laboratory conditions”, *Ecological Engineering* 37, 2011, pp. 754-757.

- [5] B.M. Das. *Principles of foundation engineering, SI*. 7th edition, Cengage Learning, U.S.A., 2011, pp. 25-31.
- [6] B.M. Das. *Principles of geotechnical engineering*. 4th edition, PWS Publishing Company, U.S.A., 1998, pp. 159-225.
- [7] K. Spitz and J. Moreno. *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*. John Wiley & Sons, Inc., 1996, pp. 342-354.

