บทที่6
สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติค่าโมดูลัสคืนตัว(Resilient Modulus) ของวัสดุดินลูกรังซึ่งทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุในชั้นพื้นทาง โดยทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว ด้วยวิธี Repeated Load Unconfined Compressive Test ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำไปใช้ในการกำหนดขอบเขตค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างทางด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์(Analytical Method) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม KENLAYER มาช่วยในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างทาง

ท้ายที่สุดผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทาง ผู้วิจัยได้นำมาใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำกราฟเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างทาง(Design Chart) ของถนนชนิดยืดหยุ่นที่มีชั้นพื้นทางเป็นวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบโครงสร้างถนนดังกล่าวทำได้อย่างสะดวกรวดเร็วเหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุ สภาพแวดล้อม และมาตรฐานการก่อสร้าง

6.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ

ดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษาทั้ง3แหล่ง มีคุณสมบัติดังนี้

- ตัวอย่างดินลูกรัง SA ซึ่งเก็บตัวอย่างจากจังหวัดสระแก้ว มีลักษณะเป็นดินลูกรังปนหินผุสีน้ำตาลแดง มีขนาดตั้งแต่ 3/4 นิ้ว จนถึงผ่านตะแกรงเบอร์200 เมื่อจำแนกดินตามมาตรฐาน AASHTO จะอยู่ในกลุ่ม A-2-4 และเมื่อจำแนกตามมาตรฐาน Unified Soil Classification พบว่าเป็นดินในกลุ่ม SP ซึ่งมีลักษณะเป็นดินปนทรายที่มีขนาดคละไม่ดีนัก และมีมวลรวมละเอียดปนเล็กน้อย

- ตัวอย่างดินลูกรัง PR ซึ่งเก็บตัวอย่างจากจังหวัดปราจีนบุรี มีลักษณะเป็นดินลูกรังปนหินผุสีน้ำตาล มีขนาดตั้งแต่ 3/4 นิ้ว จนถึงผ่านตะแกรงเบอร์200 เมื่อจำแนกดินตามมาตรฐาน AASHTO จะอยู่ในกลุ่ม A-2-6 และเมื่อจำแนกตามมาตรฐาน Unified Soil Classification พบว่าเป็นดินในกลุ่ม SP ซึ่งมีลักษณะเป็นดินปนทรายที่มีขนาดคละไม่ดีนัก และมีมวลรวมละเอียดปนเล็กน้อย

- ตัวอย่างดินลูกรัง CB ซึ่งเก็บตัวอย่างจากจังหวัดชลบุรี มีลักษณะเป็นดินลูกรังปนกรวดสีน้ำตาล มีขนาดตั้งแต่ 3/8 นิ้ว จนถึงผ่านตะแกรงเบอร์200เมื่อจำแนกดินตามมาตรฐาน AASHTO จะอยู่ในกลุ่ม A-1-a และเมื่อจำแนกตามมาตรฐาน Unified Soil

Classification พบว่าเป็นดินในกลุ่ม SP ซึ่งมีลักษณะเป็นดินปนทรายที่มีขนาดคละไม่ดีนัก และมีมวลรวมละเอียดปนเล็กน้อย

6.2 สรุปผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว(Resilient Modulus)

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ค่าส่วนผสมของซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้ค่า Unconfined Compressive Strength ของแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ทำการบดอัดตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108/2517 "วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน" มีค่าไม่น้อยกว่า 1717 kPa (250 psi) เมื่อทำการบ่มเป็นเวลา 7 วัน และแช่น้ำก่อนทำการทดสอบ 2 ชั่วโมง ซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่าปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแหล่ง SA แหล่ง PR และแหล่ง CB มีค่าเท่ากับร้อยละ4.5 ร้อยละ6.6 และร้อยละ2.0 ของน้ำหนักดินตามลำดับ

หลังจากได้ส่วนผสมของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่เหมาะสมแล้ว จะนำค่าส่วนผสมดังกล่าวมาใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ Repeated Load Unconfined Compressive Test โดยจะทำการบ่มตัวอย่างในถุงพลาสติกเป็นเวลา 28 วัน และนำตัวอย่างไปแช่น้ำก่อนทำการทดสอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลจากการทดสอบ Repeated Load Unconfined Compressive Test ของตัวอย่างดินลูกรังผสมซีเมนต์แต่ละแหล่งจำนวนแหล่งละ 30 ตัวอย่าง พบว่าตัวอย่างจากแหล่ง SA และPRจะมีค่าเฉลี่ย โมดูลัสคืนตัวที่ใกล้เคียงกันคือ 985.08 MPa และ973.55 MPa ตามลำดับ ส่วนผลทดสอบจากตัวอย่างดินแหล่ง CB จะได้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสคืนตัวที่มีค่าค่อนข้างสูงคือ 3096.74 MPa

จากผลทดสอบทำให้ทราบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของดินลูกรังผสมซีเมนต์จะมีค่าแปรผันแตกต่างกันไปเมื่อดินที่ใช้มีความแตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีการควบคุมค่ากำลังรับแรงอัดให้มีค่าใกล้เคียงกันก็ตาม จากผลการทดสอบสามารถแบ่งกลุ่มของดินลูกรังผสมซีเมนต์ออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกจัดเป็น Soft Lateritic Soil-Cement ซึ่งจะกำหนดค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 1,000 MPa (เป็นค่าประมาณใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากการทดสอบดินลูกรังผสมซีเมนต์จากแหล่ง SA และPR) ส่วนกลุ่มที่สองจัดเป็น Hard Lateritic Soil-Cement ซึ่งจะกำหนดค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 3,000 MPa (เป็นค่าประมาณใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากการทดสอบดินลูกรังผสมซีเมนต์จากแหล่ง CB) ซึ่งค่า โมดูลัสคืนตัวที่กำหนดทั้งสองกลุ่มจะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางที่มีชั้นพื้นทางเป็นวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์ต่อไป

6.3 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางโดย โปรแกรม KENLAYER

ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางโดยโปรแกรม KENLAYER จะกำหนดคุณสมบัติวัสดุเป็นแบบ Linear Elastic ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่า Poisson's Ratio ของวัสดุแสดงในตารางที่6.1

ตารางที่6.1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่า Poisson's Ratio ของวัสดุที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างทาง

วัสดุ	โมดูลัสยืดหยุ่น	Poisson's Ratio
แอสฟัลท์คอนกรีต	1,200 MPa	0.4
พื้นทางดินลูกรังผสมซีเมนต์		
Soft Lateritic Soil-Cement	1,000 MPa	0.2
Hard Lateritic Soil-Cement	3,000 MPa	0.2
รองพื้นทาง Unbound Granular	180 MPa	0.35
Subgrade	10 ,20 ,50 ,100 และ150 MPa	0.45

รูปแบบโครงสร้างทางที่ทำการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ

1.โครงสร้างทางซึ่งมีชั้นพื้นทางเป็นวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์ โครงสร้างดังกล่าวมีผิวทางเป็นแอสฟัลท์คอนกรีต ชั้นพื้นทางเป็นดินลูกรังผสมซีเมนต์ ชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุ Unbound Granular ชั้นสุดท้ายเป็นชั้น Subgrade ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในรูปที่5.2 และตารางที่5.1

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางด้วยโปรแกรม KENLAYER พบว่าการเพิ่มขึ้นของ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพื้นทางดินลูกรังผสมซีเมนต์ ความหนาของพื้นทางดินลูกรังผสมซีเมนต์ ความหนาของชั้นรองพื้นทาง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นSubgrade ล้วนทำให้ค่า Tensile Strain ใต้ชั้นพื้นทางดินลูกรังผสมซีเมนต์ และค่า Compressive Strain บนชั้นSubgrade มีค่าลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ถนนมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ(Allowable Load Repetitions) เพิ่มมากขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ค่า Allowable Load Repetitions ของโครงสร้างทางแบบที่1ถึง4 สามารถสรุปเป็นกราฟเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางDesign Chart1-4 ดังแสดงในภาคผนวก ข. ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงค่าความหนาของชั้นพื้นทางดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่ต้องการสำหรับโครงสร้างทางแบบที่1-4 เมื่อมีค่าน้ำหนักกระทำซ้ำอยู่ในช่วง 10^3 ถึง 10^8 เที่ยว และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นSubgrade อยู่ในช่วง 10 MPa ถึง150 MPa

2. **โครงสร้างทางซึ่งมีชั้นผิวทางและพื้นทางเป็นแอสฟัลท์คอนกรีต** โครงสร้างดังกล่าวมีชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางเป็นแอสฟัลท์คอนกรีต ชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุ Unbound Granular ชั้นสุดท้ายเป็นชั้น Subgrade ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในรูปที่ 5.3 และตารางที่ 5.2

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางด้วยโปรแกรม KENLAYER พบว่าการเพิ่ม ความหนาของชั้นแอสฟัลท์ตอนกรีต ความหนาของชั้นรองพื้นทาง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นSubgrade ล้วนทำให้ค่า Tensile Strain ใต้ชั้นแอสฟัลท์คอนกรีต และค่า Compressive Strain บนชั้นSubgrade มีค่าลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ถนนมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ(Allowable Load Repetitions) เพิ่มมากขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ค่า Allowable Load Repetitions ของโครงสร้างทางแบบที่ 5 และแบบที่ 6 สามารถสรุปเป็นกราฟเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างทาง Design Chart 5 และแบบที่ 6 ดังแสดงในภาคผนวก ข. ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงค่าความหนาของชั้นแอสฟัลท์คอนกรีตที่ต้องการสำหรับโครงสร้างทางแบบที่ 5 และแบบที่ 6 เมื่อมีค่าน้ำหนักกระทำซ้ำอยู่ในช่วง 10^3 ถึง 10^8 เที่ยว และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้น Subgrade อยู่ในช่วง 10 MPa ถึง150 MPa ซึ่ง Design Chart ดังกล่าวจะใช้สำหรับปรับเปลี่ยนค่าความหนาของชั้นผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตของโครงสร้างทางที่มีชั้นพื้นทางเป็นดินลูกรังผสมซีเมนต์

สำหรับวิธีการใช้กราฟออกแบบโครงสร้างทาง (Design Charts) สามารถศึกษาได้จากตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างทางที่มีพื้นทางเป็นวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค.

6.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์ด้วยวิธีการทดสอบอื่นๆเช่น วิธี Repeated Load Flexural Test หรือวิธี Repeated Load Indirect Tensile Test เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติค่าPoisson's Ratio ของวัสดุ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการใช้ออกแบบโครงสร้างทางด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method)

3. ควรมีการศึกษาถึงค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุอื่นๆเช่น แอสฟัลท์คอนกรีต หรือ Unbound Granular ซึ่งมีแหล่งวัสดุในประเทศไทย เพื่อทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุและเป็นข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างทางได้อย่างถูกต้อง

4. ควรทำการศึกษาถึง Fatigue Criteria Model ของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างทางในประเทศไทย