

## เครื่องมือทดสอบ เครื่องมือวัด วิธีการทดสอบ และวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

### 2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ จำลองโครงสร้างทางแบบผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ แล้วจำลองการให้น้ำหนักบรรทุกจรด้วยการให้น้ำหนักกระทำที่ผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตแบบเข้าไปเข้ามาผ่านทางฐานรากจำลองย่อส่วน (จำลองลึกรจากฐานราก) การจำลองโครงสร้างทางดังกล่าว ประกอบด้วยวัสดุสองประเภทกล่าวคือชั้นทรายรองพื้น และชั้นผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตซึ่งเสริมแรงและไม่เสริมแรง ดังรายละเอียดที่กล่าวถึงดังต่อไปนี้

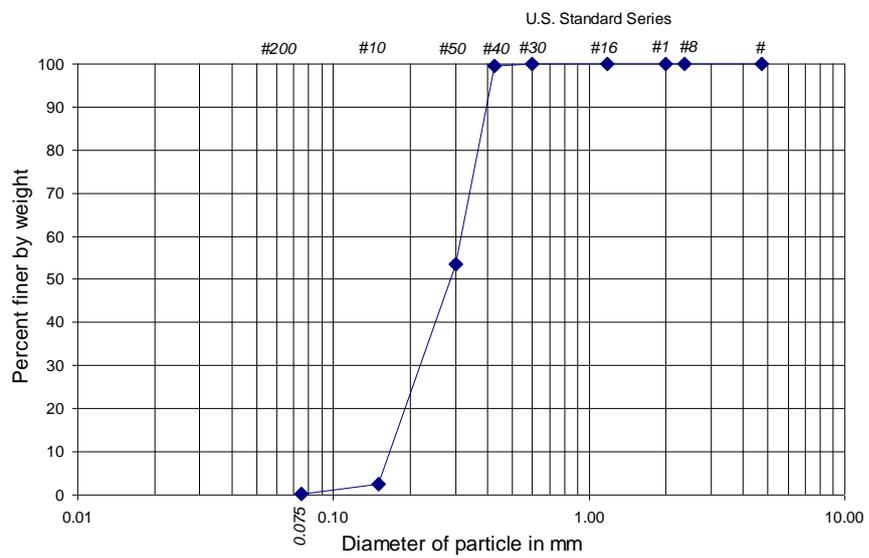
### 2.2 วัสดุที่ใช้ในการจำลองผิวทาง

#### 2.2.1 ทรายรองพื้นทาง

ทรายรองพื้นเตรียมจากทรายแม่น้ำ (รูปที่ 2-1) ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยการร่อนผ่านตะแกรง ให้มีการกระจายขนาดของอนุภาคแบบสม่ำเสมอ (รูปที่ 2-2) และนำไปล้างน้ำจนสะอาดจนไม่เหลือฝุ่น แล้วจึงนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งวันเพื่อกำจัดอินทรีย์สารและทำให้ทรายแห้ง ซึ่งคุณสมบัติของทรายที่นำมาใช้แสดงในตารางที่ 2-1 ในการเตรียมชั้นทรายรองพื้น จะทำโดยการโปรยให้อนุภาคเมล็ดทรายผ่านตะแกรงขนาดใหญ่หลายๆชั้น (air-pluviator) (รูปที่ 2-3) ลงไปยังกล่องบรรจุจำลองโครงสร้างดินย่อส่วนที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งเมื่อเมล็ดทรายผ่านตะแกรงชั้นสุดท้าย จะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ทำให้ชั้นทรายที่เตรียมมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ในส่วนของกล่องบรรจุจำลองโครงสร้างดินย่อส่วนมีขนาดกว้างเท่ากับ 180 ซม ลึกเท่ากับ 40 ซม และสูงเท่ากับ 80 ซม ดังแสดงในรูปที่ 2-4 โครงสร้างของกล่องบรรจุทำงานจากโลหะเป็นส่วนใหญ่ โดยมีผิวด้านหน้าและด้านหลังทำมาจากแผ่นอะคริลิกที่มีโครงโลหะรองรับแรงกระทำอีกที



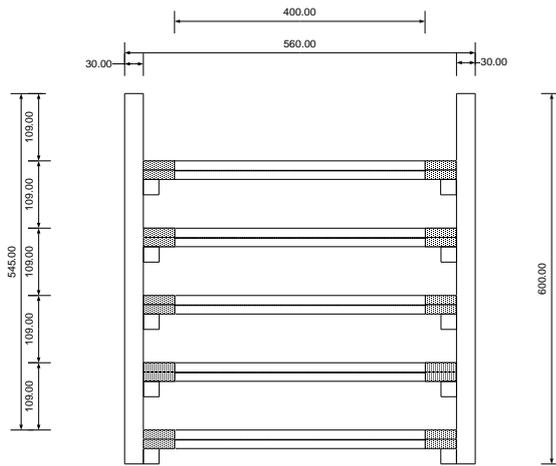
รูปที่ 2-1 ทราयरองพื้น



รูปที่ 2-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคทรายแม่น้ำหลังทำการปรับปรุง

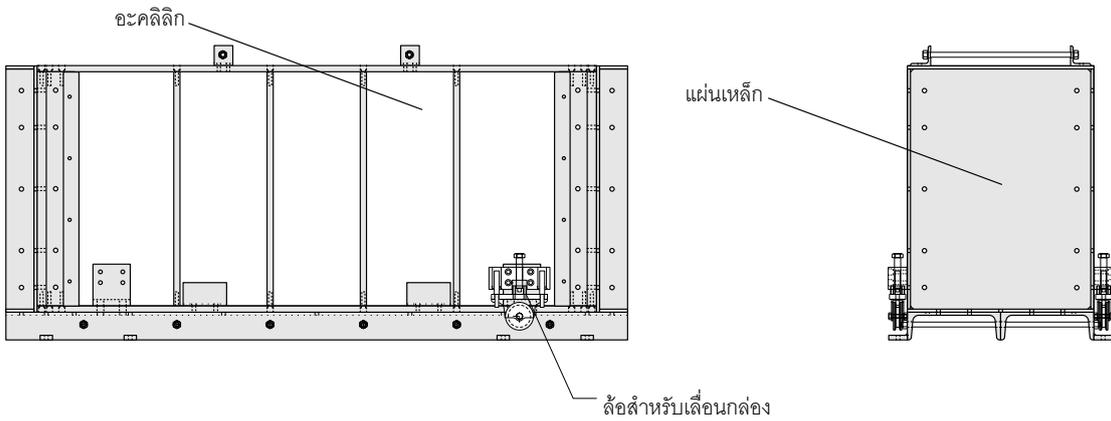


a)



b)

รูปที่ 2-3 a) air-pluviator และ b) รายละเอียดภายในของ air-pluviator



a)



b)

รูปที่ 2-4 a) ภาพวาดกล่องบรรจุจำลองโครงสร้างดินย่อยส่วน และ b) กล่องบรรจุจำลองโครงสร้างดินย่อยส่วนภายหลังการบรรจุทรายรองพื้น

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติดัชนีของทรายแม่น้ำที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว

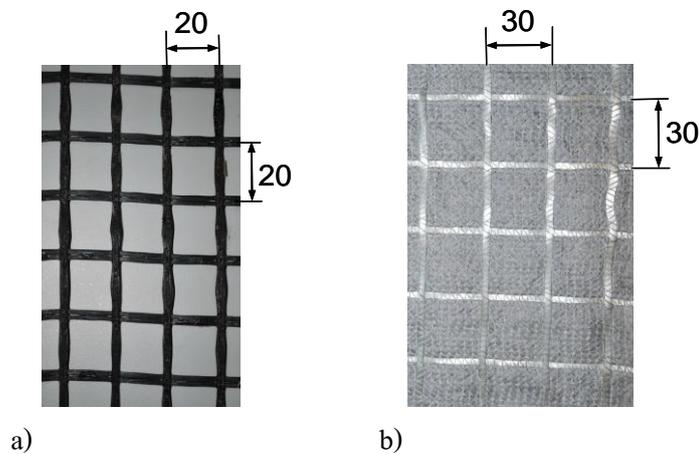
Specific gravity $G_s$	Limit void ratio		Particle distribution			Particle shape
	Max. void ratio, $e_{max}$	Min. void ratio, $e_{min}$	Mean particle size, $D_{50}$ (mm)	Uniformity coefficient, $C_u$	Coefficient of Gradation, $C_c$	
2.64	1.06	0.71	0.285	1.879	0.946	Sub-angular

### 2.2.2 แผ่นใยสังเคราะห์

แผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสองประเภท ดังนี้

1. จีโอกริด (Geogrid) มีชื่อทางการค้าว่า PGG 50 มีลักษณะมีรูปเปิด ทำมาจาก Fiber glass ซึ่งทนความร้อนได้ดี เคลือบด้วยวัสดุจำพวกอีพ็อกซี ทั้งนี้เป็นวัสดุที่ออกแบบมาเพื่อการเสริมแรงของผิวทางยึดหยุ่นโดยเฉพาะ

2. จีโอเท็กซ์ไทล์ (Geotextile) มีชื่อทางการค้าว่า PGM-G 50/50 มีลักษณะเป็นพื้นเต็ม ทำมาจากวัสดุผสมระหว่าง Geotextile ประเภทไม่มีการถัก ซึ่งมีเส้นใยต่อเนื่องกันกับเส้นใยของ Fiber glass ซึ่งทนความร้อนได้ดี



รูปที่ 2-5 ประเภทแผ่นใยสังเคราะห์ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้: a) Geogrid และ b) Geotextile

ตารางที่ 2-2 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของ Geogrid PGG - 50			
Property	Test Standard	Unit	Value
Tensile strength (warp)	ISO 10319	kg/m	50
Tensile elongation (warp)	ISO 10319	%	4
Tensile strength (weft)	ISO 10319	kg/m	50
Tensile elongation (weft)	ISO 10319	%	4
Aperture size	-	mm	20 x 20
Mass per unit area (g/m <sup>2</sup> )	ISO 9864, ASTM D5261	g/m <sup>2</sup>	335

ตารางที่ 2-3 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของ Geotextile PGM-G 50/50			
Property	Test Standard	Unit	Value
Asphalt retention	Texas DOT Item 3099 ASTM D6140-97	kg/m <sup>2</sup>	1.1
Tensile strength (md/cd)	-	kN/m	50 / 50
Elongation at break	ISO 3341	%	3
Strength at 2 % strain	-	kN/m	34 / 34
E-Modulus of the glass filaments	-	MPa	73,000
Mesh width of the glass filaments	-	mm	40 x 40
Mass per unit area	EN ISO 9864	g/m <sup>2</sup>	300

### 2.2.3 แผ่นแอสฟัลต์ติกคอนกรีต

แผ่นแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่จำลองขึ้นมาในห้องปฏิบัติการมีความหนาประมาณ 6 cm ซึ่งย่อขนาดลงมาจากของจริง ในการเตรียม จะผสมหินคลุกที่มีการลดขนาดตามมาตรฐานที่ใช้ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตในประเทศไทย แต่มีการลดขนาดเฉลี่ยลง กับแอสฟัลต์ติกซีเมนต์เกรด AC 60/70 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในประเทศเขตร้อน โดยมีอัตราส่วนผสมคือ หินคลุกต่อแอสฟัลต์ติกซีเมนต์เท่ากับ 100 ต่อ 5 และจะทำการผสมเข้าด้วยกันด้วยเทคนิคการผสมร้อน (รูปที่ 2-6a) แล้วจึงบรรจุส่วนผสมร้อนที่ได้ลงในแบบหล่อทำการบดอัด (รูปที่ 2-6b) ให้ได้ความหนาแน่นควบคุมที่ต้องการตามลักษณะของผิวทางที่จำลองดังแสดงในตารางที่ 2-4 จนกระทั่งมีความหนาเท่ากับ 6 cm ในกรณีที่จำลองผิวทางใหม่ ในกรณีที่จำลองผิวทางใหม่บนผิวทางเดิมที่มีความเสียหาย จะบรรจุส่วนผสมร้อนที่ได้ลงในแบบหล่อแล้วจึงบดอัดจนมีความหนาเพียงครึ่งหนึ่ง แล้วทา Tack coat แล้วปูแผ่นใยสังเคราะห์ที่ผิวด้านบนดังแสดงในรูปที่ 2-6c จากนั้นจึงบรรจุ

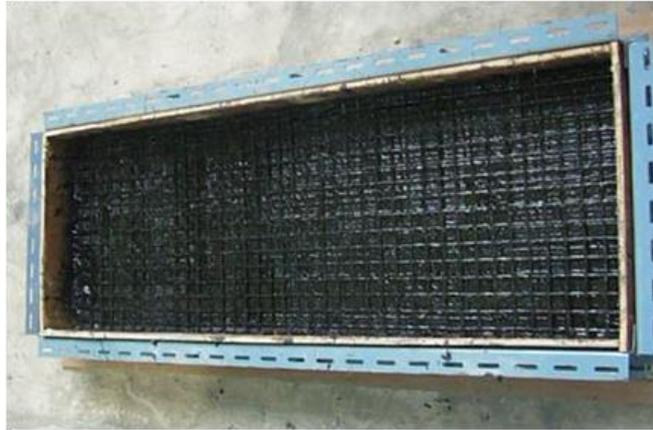
ส่วนผสมร้อนเพิ่มแล้วบดอัดจนมีความหนาทั้งหมดเท่ากับ 6 cm จะได้แผ่นแอสฟัลต์ติกคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 2-6d



a)



b)



c)



d)

รูปที่ 2-6 การเตรียมแผ่นแอสฟัลต์ติกคอนกรีต: a) การผสมร้อนหินคลุกเข้ากับแอสฟัลต์ติกซีเมนต์, b) การบดอัดแอสฟัลต์ติกคอนกรีต, c) แอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่ทา Tack coat แล้วปูวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์และ d) แอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่บดอัดเรียบร้อยแล้ว

ตารางที่ 2-4 ค่าความหนาแน่นของแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่เงื่อนไขความเสียหายแตกต่างกัน

กรณี	ค่าความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )
ผิวทางใหม่	2.1
ผิวทางเดิมที่เสียหายปานกลาง (Moderate)	1.8
ผิวทางเดิมที่เสียหายมาก (Severe)	1.5

### 2.3 โครงให้น้ำหนักกดและรูปแบบของแรงกระทำ

โครงให้น้ำหนักประกอบด้วย 2 ส่วนหลักดังแสดงในรูปที่ 2-7 คือ ส่วนของกระบอกกลมและส่วนของฐานรากจำลอง ซึ่งส่วนของกระบอกกลมประกอบด้วยแผ่นเหล็กสำหรับติดตั้งกระบอกกลม 4 กระบอก ต่อเข้ากับเพลลา และบุชตามแนวแกนเพื่อลดการเยื้องศูนย์ แรงจะถูกส่งถ่ายไปยังส่วนของฐานรากจำลอง ซึ่งจะให้

หน่วยแรงกระทำโดยการให้แรงในแนวตั้งกระทำผ่านฐานรากจำลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 6 เซนติเมตร และที่เพลาส่วนที่ต่อเข้ากับด้านล่างของ โหลดเซลล์จะมีตัวคอบและบุชเพื่อควบคุมการทรุดตัวของฐานรากจำลอง ให้เป็นแนวตั้งเท่านั้น เพื่อถ่ายแรงลงบนผิวทางจำลอง ซึ่งวางอยู่บนทรายรองพื้น แรงกระทำจะส่งผ่านฐานรากลงสู่ผิวทางจำลองเปรียบเสมือนแรงที่มาจากล้อที่กระทำจากการจราจร

หน่วยแรงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้จำลองมาจากการแปลงสภาพของน้ำหนักเพลามาตรฐาน 18 kips ซึ่งกระจายลงไปยังตำแหน่งของล้อในแต่ละด้านเท่ากับ 9 kips ตามมาตรฐานของ AASHTO โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการจำลองสภาวะการรับแรงดังแสดงในรูปที่ 2-8

การจำลองค่าของหน่วยแรงสำหรับทำการทดสอบแบบจำลองย่อส่วน จำเป็นต้องทำการแปลงค่าน้ำหนักที่กระทำในรูปที่ 2-9 ให้เป็นค่าที่เรียกว่า Standard single wheel load (ESWL,  $P_s$ ) โดยใช้หลักการของ Stress Factors ที่นำเสนอโดย Boussinesq ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\frac{P_s}{P_d} = \frac{\sigma_z / q_d}{\sigma_z / q_s} \quad (2.1)$$

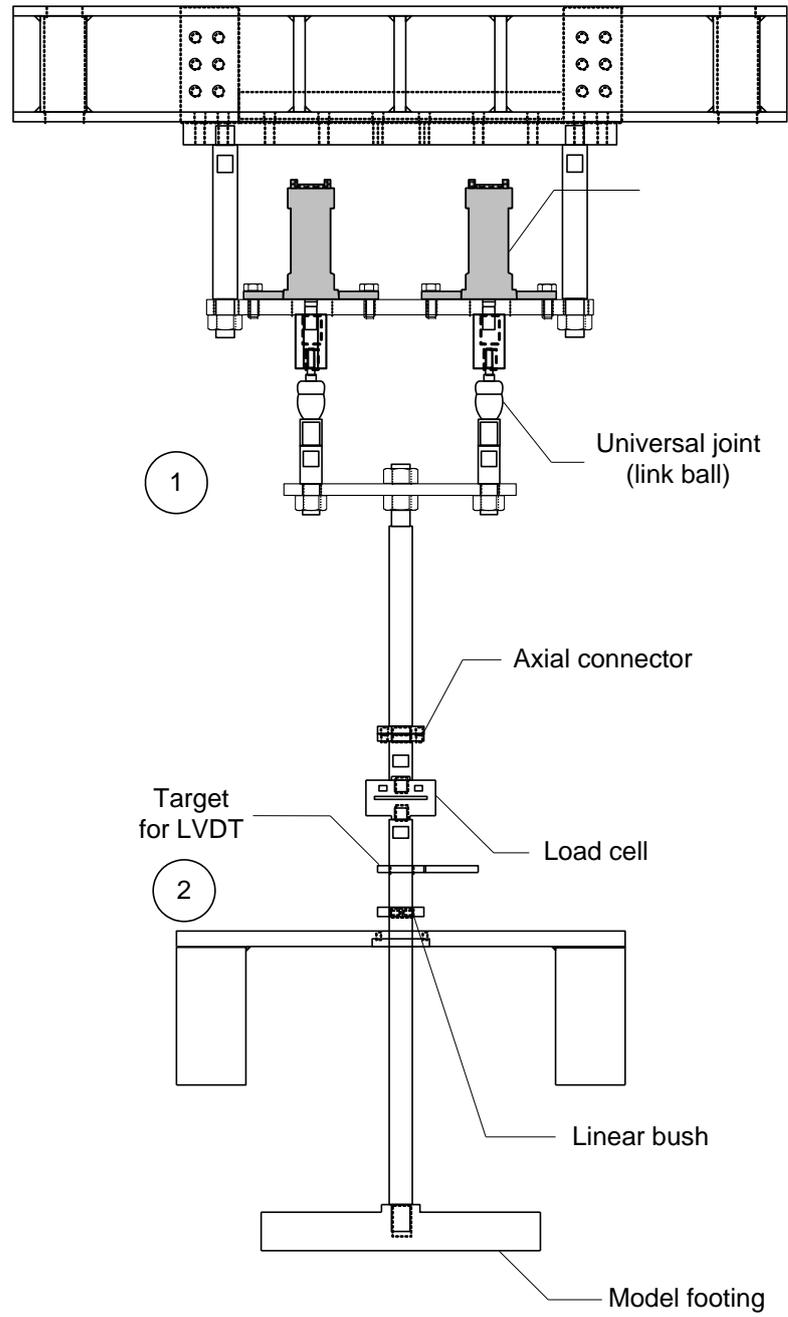
เมื่อ  $P_s$  น้ำหนักล้อกระทำแบบเดี่ยว (ESWL) ที่ได้จากการแปลงค่าจากน้ำหนักล้อคู่  
 $P_d$  น้ำหนักที่ถ่ายลงล้อคู่ในแต่ละล้อ  
 $\sigma_z$  หน่วยแรงในแนวตั้ง  
 $q_d, q_s$  แรงดันสัมผัสด้านใต้น้ำหนักของล้อ  $P_d, P_s$

สมการที่ 2.1 สามารถหาค่าน้ำหนักล้อกระทำแบบล้อเดี่ยว (ESWL) จากรูปที่ 2-8 โดยการหาค่า stress factor ที่ระดับความลึกค่าหนึ่ง ซึ่งในที่นี้กำหนดไว้ที่ระดับความลึก 13.5 นิ้วดังแสดงในตารางที่ 2-5

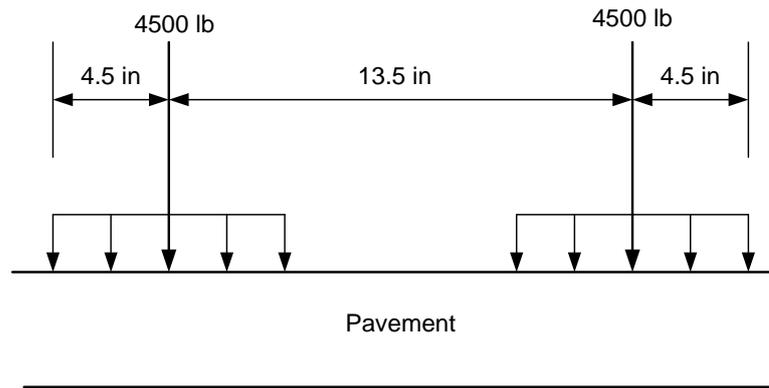
สำหรับ ESWL ค่า stress factor ที่จุด A (ในรูปที่ 2-8) จากรูปที่ 2-9 มีค่าเท่ากับ 0.143 และค่าที่ใกล้กับจุด A มากที่สุดคือค่าที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งมีค่า stress factor เท่ากับ 0.179 ดังนั้นค่า ESWL คำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$P_s = \frac{\sigma_z / q_d}{\sigma_z / q_s} P_d = \frac{0.179}{0.143} \times 4500 = 5630 \text{ lb.} \approx 25.1 \text{ kN}$$

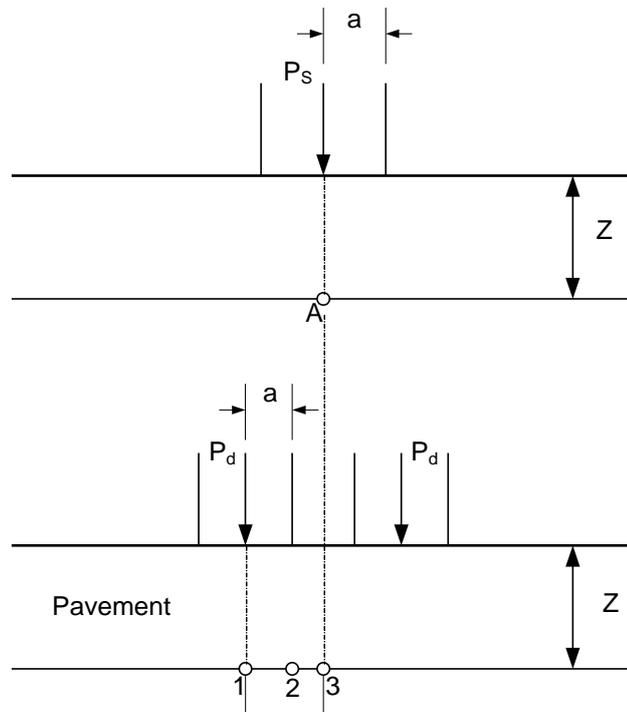
ซึ่งคิดเป็นหน่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบบนฐานรากที่กว้าง 6 ซม ยาว 40 ซม เท่ากับ 1,045.8 kPa และเพื่อให้สอดคล้องกับหลักการ scale effect ที่ใช้ในการลดค่าขนาดของวัสดุและมิติของโครงสร้างในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จึงคิดค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 40% จากค่าที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นหน่วยแรงที่ใช้ทดสอบจึงมีค่าเท่ากับ 400 kPa โดยค่าที่ได้จะถือว่าเป็นค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบแรงกระทำซ้ำ (Cyclic loading) ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเท่ากับ 9,600 N และกำหนดค่าหน่วยแรงต่ำสุดเท่ากับ 240 kPa ซึ่งเท่ากับ 480 N ด้วยอัตราการเพิ่มและลดแรงที่กระทำเท่ากับ 2,400 N/min (รูปที่ 2-11)



รูปที่ 2-7 โครงให้น้ำหนัก



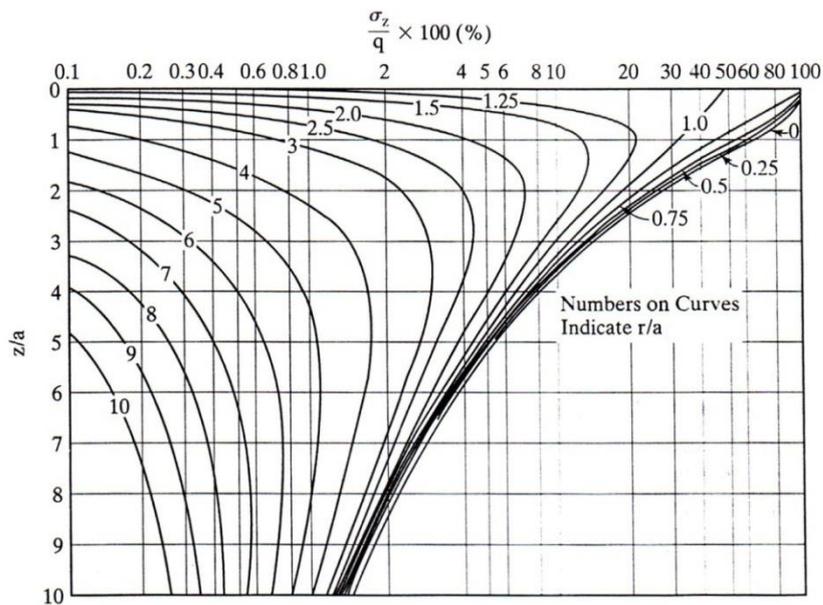
รูปที่ 2-8 ลักษณะของการกระจายน้ำหนักของล้อสำหรับกรณีศึกษา



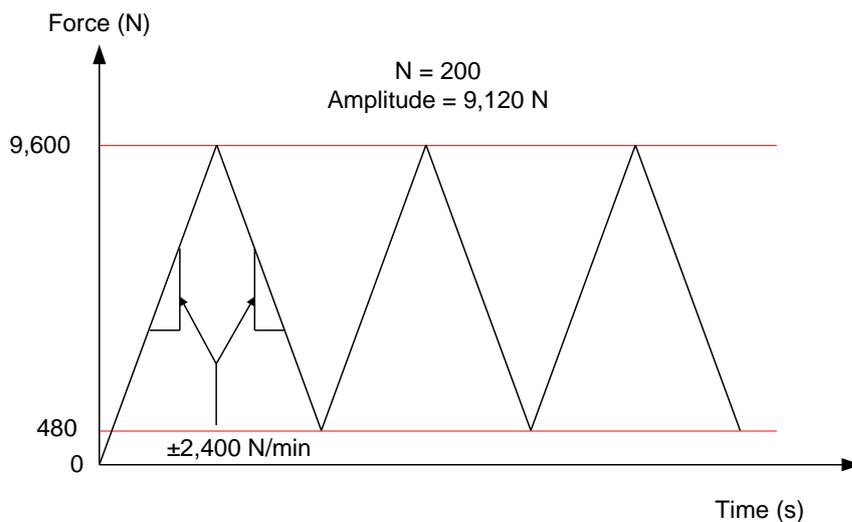
รูปที่ 2-9 ลักษณะการแปลงค่าน้ำหนักจากล้อคู่เป็นล้อเดี่ยว

ตารางที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress factor กับค่าระดับความลึกต่อ 1 หน่วยรัศมีของล้อ

Point no.	Left wheel		Right wheel		Sum
	r/a	$\sigma_z / q_s$	r/a	$\sigma_z / q_s$	
1	0	0.143	3	0.03	0.173
2	0.75	0.126	2.25	0.053	0.179
3	1.5	0.088	1.5	0.088	0.176



รูปที่ 2-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึก กับ stress factor



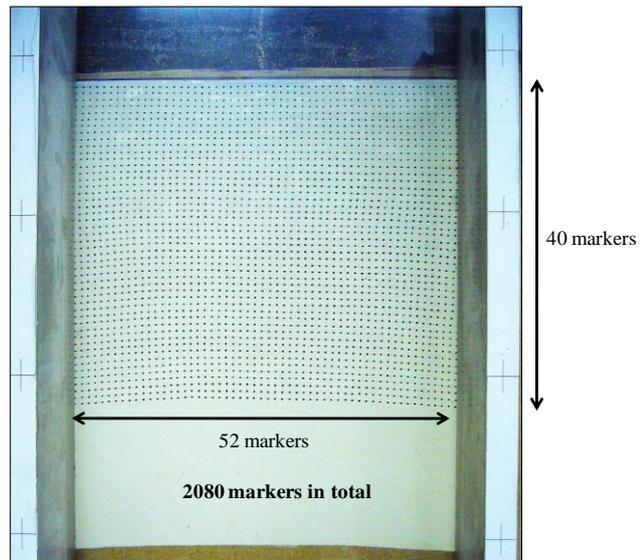
รูปที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อตัวอย่างกับระยะเวลาการทดสอบ

## 2.4 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

- การวัดแรงกระทำการทรุดตัว ความเครียดของชั้นใต้ผิวทาง และการบันทึกข้อมูล มีรายละเอียดดังนี้
1. การวัดค่าแรงกระทำวัดผ่าน Load cell ที่ต่อจากเพลา และต่อเข้ากับฐานรากจำลอง
  2. การวัดค่าการทรุดตัวของผิวทางวัดโดย LVDT สำหรับการวัดบริเวณกึ่งกลางของฐานรากจำลอง และ Laser sensors จำนวน 2 ตัว สำหรับวัดการโก่งตัวของผิวทางที่ห่างจากกึ่งกลางของฐานราก เป็นระยะ 60 และ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ
  3. การวัดการกระจายความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นทรายรองพื้น (strain localization) จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย (photogrammetric analysis) ซึ่งกระทำได้โดย marker จุดลงบนแผ่นยางพารา และนำไปติดกับกล่องบรรจุทราย ก่อนที่จะบรรจุทรายลงกล่องดังแสดงในรูปที่ 2-12a โดยที่ marker แต่ละจุดจะมีระยะห่างเท่ากับ 5 มิลลิเมตร และมีจำนวน 52 จุดในแนวนอน และ 40 จุดในแนวตั้ง รวมทั้งหมด 2080 จุด (รูปที่ 2-12b)
  4. การบันทึกข้อมูลทำโดยระบบบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติผ่านทางคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 2-13)



a)



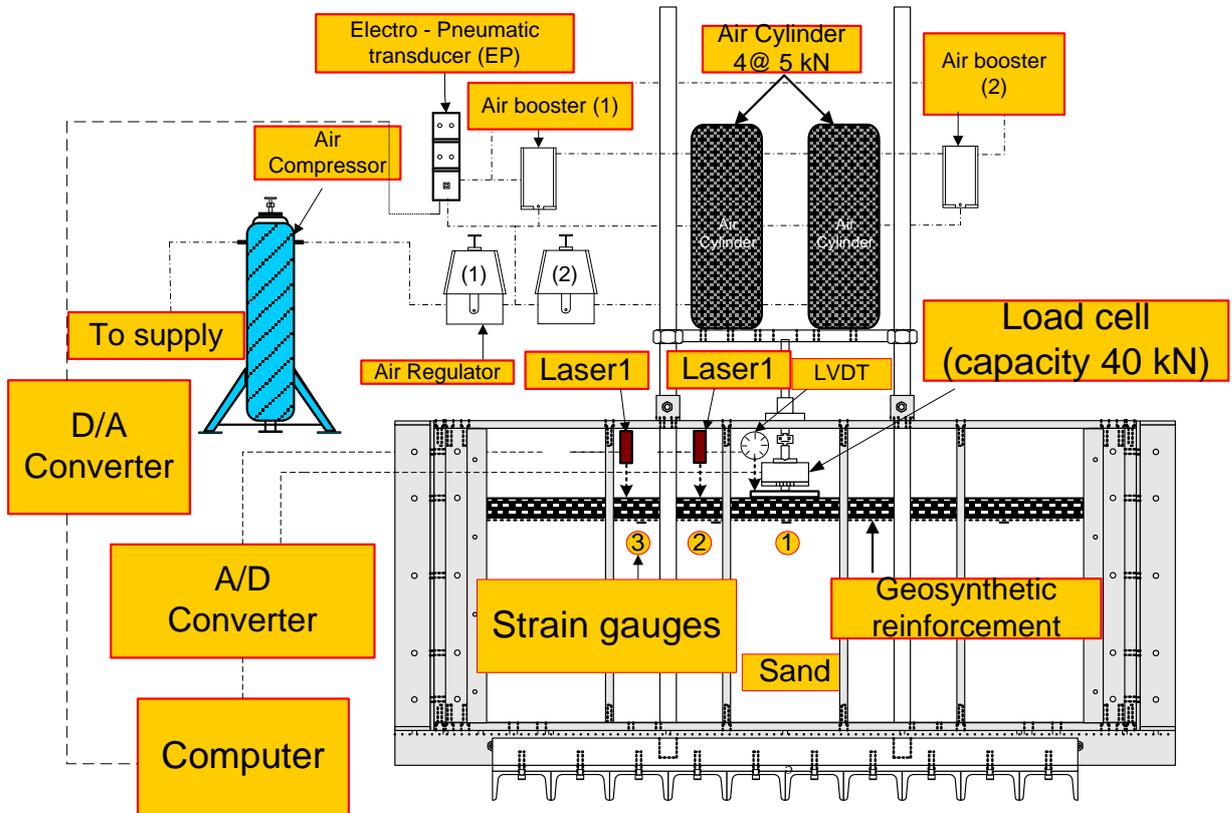
b)

รูปที่ 2-12 a) การติดแผ่นยางพารากับกล่องบรรจุทราย สำหรับวิเคราะห์ภาพถ่าย และ b) รายละเอียดของ marker บนแผ่นยางพารา



รูปที่ 2-13 ชุดคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทดสอบแบบอัตโนมัติ

เมื่อทำการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าเรียบร้อย จะได้รูปแบบการวางและติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-14 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด

## 2.5 โปรแกรมการทดสอบ

การทดสอบสามารถแบ่งเป็นกรณีใหญ่ ๆ ได้ 3 กรณีคือ

1. การปูผิวทางใหม่
2. การปูผิวทางใหม่ที่ทับผิวทางเดิมที่ผิวทางเดิมเสียหายปานกลาง (Moderate)
3. การปูผิวทางใหม่ที่ทับผิวทางเดิมที่ผิวทางเดิมเสียหายมาก (Severe)

โดยจะทำการทดสอบทั้งหมด 11 กรณีศึกษา ทั้งที่มีการเสริมแรงและไม่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 กรณีศึกษาทั้งหมดในงานวิจัยนี้

กรณีที่	ผิวทาง	ชื่อตัวอย่าง	การเสริมแรง
1	ผิวทางใหม่	NPNO	ไม่เสริมแรง
2		NPGG	เสริมแรงด้วย Geogrid
3		NP GT	เสริมแรงด้วย Geotextile
4	ผิวทางใหม่ที่ทับผิวทางเดิม ที่ผิวทางเดิมเสียหายปาน กลาง (moderate)	D50NO	ไม่เสริมแรง
5		D50GG	เสริมแรงด้วย Geogrid
6		D50GT	เสริมแรงด้วย Geotextile
7		D50GGGT	เสริมแรงด้วย Geogrid และ Geotextile
8	ผิวทางใหม่ที่ทับผิวทางเดิม ที่ผิวทางเดิมเสียหายมาก (severe)	D80NO	ไม่เสริมแรง
9		D80GG	เสริมแรงด้วย Geogrid
10		D80GT	เสริมแรงด้วย Geotextile
11		D80GGGT	เสริมแรงด้วย Geogrid และ Geotextile