

อุปกรณ์วัดแรงสามมิติ

ดร.กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ผู้เขียนได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์วัดสัญญาณขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการวัดค่าของแรงที่กระทำบนผิวสัมผัสของล้อกับดินในสามทิศทาง จากการใช้คอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการบันทึกข้อมูลและการวิเคราะห์ไปพร้อม ๆ กัน ทำให้เราสามารถทราบค่าของแรงในทั้งสามทิศทางภายใต้สภาวะของการกระทำของแรงขนาดต่าง ๆ

Triaxial Force Transducer

Dr. Kittichai Triratanasirichai

Assistant Professor

Department of Mechanical Engineering

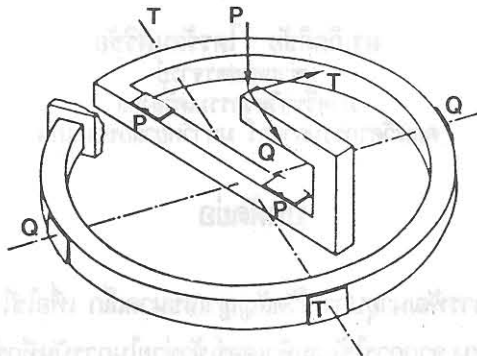
Faculty of Engineering Khon Kaen University

ABSTRACT

In this paper, the author developed a small transducer in order to measure the force in triaxial axis on the tire soil contact zone. With the computer synchronizing and processing the test recording, the output of the triaxial forces at various loads are obtained.

1. บทนำ

การปฏิสังสรรค์ระหว่างดินกับอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนเป็นสาขาหนึ่งของวิชาเทอร์ราเมคคานิกส์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำการศึกษเกี่ยวกับการทำนายสมรรถนะของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนบนพื้นผิวของดิน และทำนายผลกระทบของอุปกรณ์ขับเคลื่อนต่อโครงสร้างของดิน ซึ่งจะมีผลอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืชด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาดังนี้เพื่อที่จะทำให้เกิดการอัดตัวของดิน หลายปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์หลายคนพยายามที่จะคิดค้นหาวิธีการหรือเทคนิคอย่างง่าย ๆ สำหรับทำนายความสามารถในการเคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการที่สะดวกที่สุดได้แก่การใช้เทคนิคของ Cone-penetration ซึ่งใช้โลหะที่ทำเป็นรูปกรวยแล้วกดลงไปบนพื้นดินที่จะทำการตรวจสอบ ซึ่งความต้านทานของกรวยที่วัดได้เป็นค่าอย่างหยาบที่ใช้ออกความสามารถในการเคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีนักวิทยาศาสตร์หลายคนให้ความเห็นว่ายังไม่เหมาะสมทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับดินทุกชนิด[1] และผลของอุปกรณ์ดังกล่าวไม่ได้แสดงให้เห็นผลกระทบต่อโครงสร้างของดิน ต่อมา Bekker [2] จึงได้ทำการพัฒนาสมการ semi-empirical ขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาการปฏิสังสรรค์ระหว่างดินกับอุปกรณ์ขับเคลื่อนโดยใช้ความสัมพันธ์ของความดันและ penetration ซึ่งหาได้จากการใช้วิธีการทดสอบแบบ plate load test และ โดยใช้ความสัมพันธ์ของ shear-stress displacement ซึ่งหาได้จากการทดสอบ ring test



รูปที่ 1 ภาพสเกตของอุปกรณ์วัดแรงสามมิติ

2. การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

เซนเซอร์หรืออุปกรณ์วัดสัญญาณในที่นี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ Krick sensor[3] ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะประกอบด้วยคานโลหะทั้งชนิดคานตรงและคานโค้ง และทำการติดตั้ง Strain gauge ขึ้นไปบนคานดังกล่าวเพื่อใช้สำหรับวัดหาค่าแรง และจากลักษณะของคานที่เป็นแบบพิเศษรวมทั้งตำแหน่งในการติดตั้ง Strain gauge ที่เหมาะสมก็จะทำให้สามารถวัดหาค่าแรงในทิศทางทั้งสามได้อย่างเป็นอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 1

2.1. การวัดหาสัญญาณของแรง P

แรงที่กระทำในแนวแรง P จะทำให้เกิดโมเมนต์บิดบนคานตรง ซึ่งค่าของแรงจะวัดหาค่าได้โดยใช้ Strain gauge 4 อันติดไว้บนคานดังกล่าวในตำแหน่ง P_1 , P_2 , P_3 และ P_4 ซึ่งค่าโมเมนต์บิด M_{p1} , M_{p2} , M_{p3} และ M_{p4} จะมีค่าเท่ากับแรง P คูณกับระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของเซนเซอร์ไปยัง gauge (l_1 และ l_2) ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนี้

$$M_{p1} = -Pl_1$$

$$M_{p2} = Pl_2$$

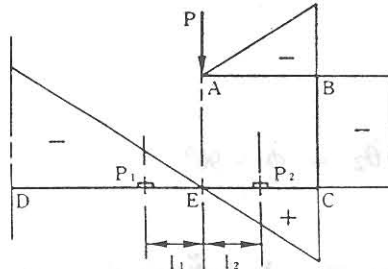
$$M_{p3} = Pl_1$$

$$M_{p4} = -Pl_2$$

และ Strain gauge จะต่อเข้าด้วยกันในลักษณะของ Wheatstone bridge และ output ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{output} &= k(R_{p1}R_{p4} - R_{p2}R_{p3}) \\ &= k'(-\Delta R_{p1} + \Delta R_{p2} + \Delta R_{p3} - \Delta R_{p4}) \\ &= K(-M_{p1} + M_{p2} + M_{p3} - M_{p4}) \\ &= 2KP(l_1 + l_2) = K'P \end{aligned} \quad (1)$$

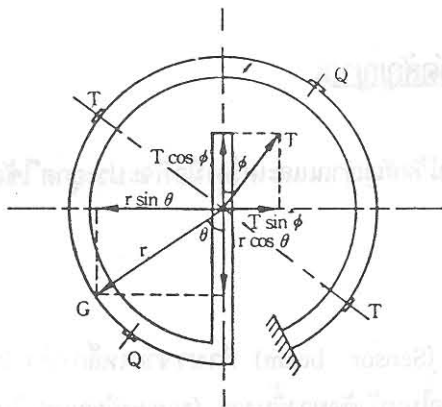
เมื่อ	k, k', K, K'	=	ค่าคงที่
	$R_{p1}, R_{p2}, R_{p3}, R_{p4}$	=	ค่าความต้านทานของ Strain gauge
	$\Delta R_{p1}, \Delta R_{p2}, \Delta R_{p3}, \Delta R_{p4}$	=	ค่าความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานของ Strain gauge



รูปที่ 2 โมเมนต์บิดของแรง P

2.2. การวัดค่าของแรง T และ Q

แรงในแนวสัมผัส T และ Q จะทำให้เกิดโมเมนต์บิดในแกนโค้ง และโดยการทำงานของ Strain gauge ทำให้สามารถวัดค่าของแรงทั้งสองได้ ซึ่งตำแหน่งที่จะติดตั้ง Strain gauge นั้นจะหาได้จากการคำนวณต่อไปนี้ พิจารณาจากรูปที่ 3



รูปที่ 3 โมเมนต์บิดที่จุด G โดยแรง T

พิจารณาโมเมนต์บิด M_G ที่จุด G ใด ๆ ซึ่งเกิดจากแรง T จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} M_G &= T r \cos \phi \sin \theta - T r \sin \phi \cos \theta \\ &= T r \sin(\theta - \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

ค่าโมเมนต์บิด M_G จะมีค่าสูงสุดเมื่อ

$$\sin(\theta_1 - \phi) = 1$$

หรือ

$$\theta_1 - \phi = 90^\circ \quad \text{และ} \quad \theta_1 = 90^\circ + \phi \quad (3)$$

ค่าโมเมนต์บิด M_G จะมีค่าต่ำสุดเมื่อ

$$\sin(\theta_2 - \phi) = -1$$

หรือ

$$\theta_2 - \phi = -90^\circ \quad \text{และ} \quad \theta_2 = \phi - 90^\circ \quad (4)$$

ในการที่จะวัดหาสัญญาณของแรง T จะต้องติดตั้ง Strain gauge จำนวน 2 ตัว เข้าไปที่ θ_1 และ θ_2 ซึ่งมุมทั้งสองจะอยู่ตรงกันข้ามกัน ค่าโมเมนต์บิด M_G ที่เกิดจากแรง T จะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ

$$\sin(\theta - \phi) = 0$$

$$\theta - \phi = 0 \quad \text{หรือ} \quad \theta = \phi$$

ตำแหน่งบนแกนโค้งที่ค่า $\theta = \phi$ และ $\theta = \phi + 180^\circ$ เป็นตำแหน่ง ideal สำหรับการติดตั้ง Strain gauge จำนวน 2 ตัว เพื่อที่จะวัดหาค่าสัญญาณของแรง Q และ gauge ที่ใช้วัดสัญญาณหาค่าแรง T และ Q จะต่อกันอยู่ในรูปของวงจร Wheatstone Bridge ในลักษณะเดียวกันกับวงจรที่ใช้วัดสัญญาณของแรง P

3. การสร้างและทดสอบอุปกรณ์วัดสัญญาณ

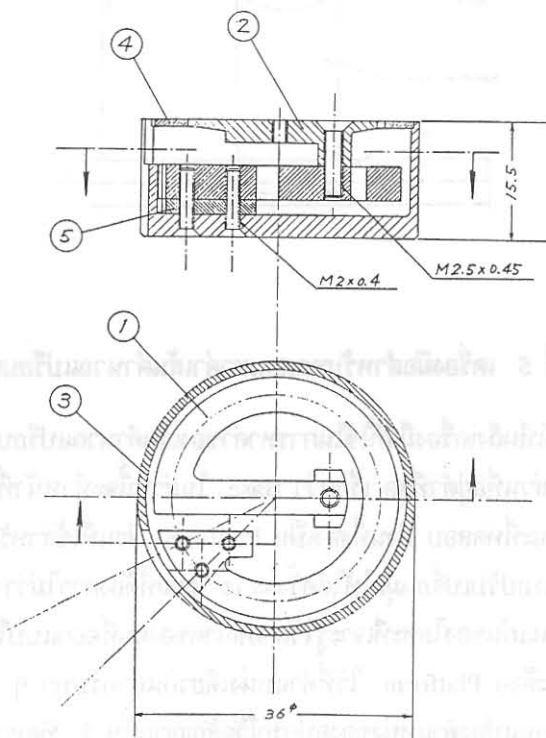
งานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างอุปกรณ์วัดสัญญาณและเครื่องมือที่จะประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดสัญญาณโดยมีรายละเอียดของการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 การสร้างอุปกรณ์วัดสัญญาณ

แกนของอุปกรณ์วัดสัญญาณ (Sensor beam) ทำมาจากเหล็กกล้า (S45C) และขึ้นรูปด้วย NC-machine ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในหน้าตัดของชิ้นงาน (รายละเอียดแสดงในรูปที่ 4) และบนแกนดังกล่าวนี้จะทำการติดตั้ง Strain gauges เพื่อใช้ในการวัดหาค่าของแรงที่เกิดขึ้น แต่ก่อนที่จะทำการติดตั้ง Strain gauges ควรจะทำความสะอาดผิวของแกนส่วนที่จะติดตั้งด้วยกระดาษทรายจนกระทั่งผิวบริเวณนั้นไม่มีร่องรอยของการขีดข่วนทำความสะอาดผิวด้วยน้ำยา CC14 (tetra) จึงทำการติดตั้ง Strain gauges ด้วยกาวยกพิเศษ หลังจากที่ได้ตรวจสอบตำแหน่งถูกต้องแล้วทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง แล้วเคลือบด้วยซิลิโคน สายไฟของ Strain gauges จะถูกยึดแน่นบนแกนทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้กระแสไฟฟ้าเกิดการลัดวงจร อีกทั้งยังเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากการที่สายไฟถูกดึงหรือถูกกระแทก กระบวนการในลักษณะดังกล่าวมาแล้วจะต้องดำเนินการจนกว่าจะติดตั้ง Strain gauges จะครบทั้ง 8 อัน

หลังจากที่ทำการติดตั้ง Strain gauges เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะนำเอาแกนอุปกรณ์รับสัญญาณไปประกอบเข้ากับเปลือกหุ้ม (Case) และปิดด้านบนด้วยฝาปิด (Sensor head) ก็จะได้อุปกรณ์วัดสัญญาณตามที่ได้ออกแบบไว้ ก่อนที่จะนำเอาอุปกรณ์นี้ไปใช้งาน ควรจะทำการตรวจสอบเสียก่อนว่า Strain gauges ทั้งหมดนั้นติดตั้งอยู่ในสภาพดีหรือไม่ ซึ่งในกรณีที่ Strain gauge มีการติดตั้งไม่ดีแล้ว วัสดุที่ใช้ทำ gauge (Copper foil) จะเกิดการสูญเสียรูปร่างการ ซึ่งเราสามารถที่จะทำการตรวจสอบได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

- ติดตั้ง gauge ให้อยู่ในวงจรของ Wheatstone Bridge ดังได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อข้างต้น
- วัดหาจุดที่ Strain meter อ่านค่าได้เป็นศูนย์
- ให้แรงกระทำเข้าไปยังบริเวณฝาปิดของอุปกรณ์วัดสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่ง
- หลังจากนั้นเอาแรงที่กระทำออก แล้วสังเกตดูว่า Strain meter จะอ่านค่ากลับไปเป็นศูนย์หรือไม่ ถ้าไม่แสดงว่าเกิดการสูญเสียขึ้นที่ Strain gauge หรือ gauge ติดตั้งไม่แน่นพอ



1. Sensor beam 2. Sensor head 3. Case
4. Sensor cover 5. Sensor support

รูปที่ 4 อุปกรณ์วัดสัญญาณ

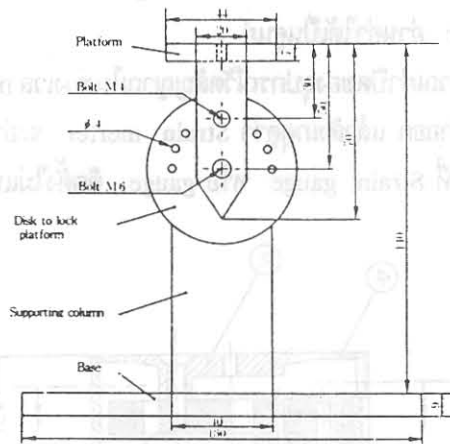
เมื่อทำการตรวจสอบการติดตั้ง gauge ทั้ง 8 ตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว อุปกรณ์วัดสัญญาณก็พร้อมที่จะนำไปทำการทดสอบอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งหาค่าเส้นคำนวณเปรียบเทียบค่าของการวัด (Calibration line) ต่อไป

3.2 เครื่องมือสำหรับการทดสอบ

ก่อนที่จะนำเอาอุปกรณ์วัดสัญญาณไปใช้ในการทดลอง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาค่าของเส้นคำนวณเปรียบเทียบค่าของการวัดของอุปกรณ์วัดสัญญาณแต่ละอัน เพื่อให้การดำเนินงานสำหรับวัตถุประสงค์ดังกล่าวข้างต้นบรรลุวัตถุประสงค์ เครื่องมือที่จะใช้ในการทดสอบควรมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

- มีความแข็งแรงอย่างเพียงพอที่จะรับน้ำหนักของอุปกรณ์วัดสัญญาณและกอนน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ
- สามารถประยุกต์แรงเข้าไปได้ในหลาย ๆ มุม

- มีเสถียรภาพเพียงพอที่จะทำให้อุปกรณ์วัดสัญญาณและก้อนน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในตำแหน่งเดิมได้ตลอดการวัดหาข้อมูล
- สามารถก่อสร้างและใช้งานได้อย่างง่าย



รูปที่ 5 เครื่องมือสำหรับทดสอบหาค่าเส้นค่านวนเปรียบเทียบ

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงเครื่องมือที่ใช้ในการหาค่าของเส้นค่านวนเปรียบเทียบ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่อยู่ต่ำที่สุด เรียกว่า Base ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ยึดติดเข้ากับแท่นหรือโต๊ะเพื่อความมั่นคงของเครื่องมือในขณะที่ทดสอบ ส่วนที่สองเป็น Platform ส่วนที่ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณซึ่งจะติดตั้งอยู่บนคานตรง สามารถปรับเปลี่ยนมุมให้ได้ครั้งละ α ตามที่ต้องการไม่ว่าจะหมุนไปทางด้านซ้ายมือหรือทางขวามือส่วนที่สาม จะเป็นแผ่นของโลหะที่เจาะรูไว้ตามขนาดของมุมที่ออกแบบไว้ เมื่อหมุน Platform ไปไว้ที่ตำแหน่งใด เราสามารถที่จะล็อก Platform ไว้ที่ตำแหน่งเดียวกันสำหรับทุก ๆ ครั้งของการวัดภายใต้มุม ในการทดสอบเราจะทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอุปกรณ์วัดสัญญาณใน 2 ทิศทางด้วยกัน คือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในระนาบที่อยู่ในแนวตั้ง (เปลี่ยนมุม α) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงในแนวตั้งฉากและแนวสัมผัสกับส่วนฝาปิดของอุปกรณ์วัดสัญญาณ และการเปลี่ยนแปลงในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของอุปกรณ์วัดสัญญาณ (เปลี่ยนมุม β) ทั้งนี้เพื่อเป็นการกระจายขนาดของแรงในแนวสัมผัสในทิศทาง T และ Q

4. การทดสอบ

ในการที่จะประยุกต์แรงเข้าไปที่อุปกรณ์วัดสัญญาณ เราจะทำก้อนน้ำหนักขึ้นมาในขนาดที่แตกต่างกัน 7 ก้อนด้วยกันคือ ขนาด 950 gm, 1447 gm, 2058 gm, 2555 gm, 297 gm, 3475 gm และ 4052 gm และในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนมุม α จาก -90° ถึง 90° จำนวน 8 ชั้น ๆ ละ 22.5° และจะเปลี่ยนมุม β จาก -90° ถึง 90° จำนวน 4 ชั้น ๆ ละ 45° โดยในระหว่างการทดสอบจะมีขั้นตอนของการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ติดตั้งก้อนน้ำหนักลงไปในฝาปิดของอุปกรณ์วัดสัญญาณ Platform จะต้องตั้งให้อยู่ในแนวตั้ง เราจะเริ่มเปลี่ยนมุม α ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจาก 0° ถึง -90° ในขั้นละ 22.5° หลังจากนั้นหมุน Platform

กลับไปยังตำแหน่งเดิมในตอนเริ่มต้นแล้วหมุน Platform เพื่อเปลี่ยนมุม α ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจาก 0° ถึง 90° ในขั้นละ 22.5° เท่ากัน เมื่อเสร็จสิ้นในขั้นตอนนี้แล้วให้หมุน Platform กลับไปที่ตำแหน่งเริ่มต้นและทำการวัดข้อมูลเป็นครั้งสุดท้าย ดังนั้นจากการทดลองจะพบว่าที่มุม $\alpha = 0^\circ$ จะมีการทดสอบซ้ำถึง 3 ครั้ง และในมุมอื่น ๆ จะมีการทดสอบ 1 ครั้งต่อก่อนหน้าหน้า 1 ก่อน การที่ทดสอบที่มุม $\alpha = 0^\circ$ ถึง 3 ครั้งก็เพื่อที่จะเป็นการตรวจสอบว่า Strain gauge ยังคงอยู่ในสภาพการใช้งานที่ดีอยู่หรือไม่ และเมื่อเสร็จสิ้นการเปลี่ยนแปลงมุม α แล้วขั้นต่อไปก็จะทำการเปลี่ยนแปลงมุม β เป็นมุมถัดไปและการวัดก็จะทำซ้ำในลักษณะเช่นเดียวกับขั้นตอนดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จนกระทั่งก่อนหน้าหน้าทุกก่อนได้ใช้ทดสอบจนหมดแล้วและอุปกรณ์วัดสัญญาณถูกเปลี่ยนกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น คือ มุม α และ β มีค่าเท่ากับ 0°

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะเป็นการบันทึกโดยตรงลงไปที่แผ่นเก็บข้อมูล (Floppy Disks) โดยใช้คอมพิวเตอร์และโปรแกรมช่วยในการทำงานพร้อมทั้งโปรแกรมสำหรับกราฟวิเคราะห์และคำนวณ

5. การคำนวณค่าแรงที่ให้เข้าไปทางทฤษฎี

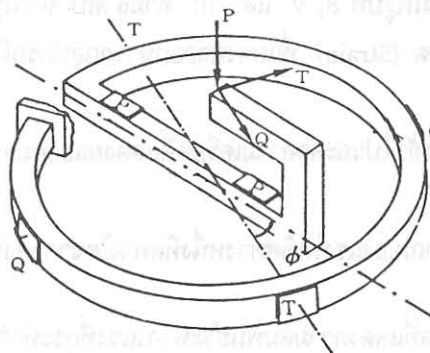
ในการเขียนเส้นคำนวณเปรียบเทียบของอุปกรณ์วัดสัญญาณเราจำเป็นที่จะต้องหาค่าทางทฤษฎีของแรงที่ให้เข้าไปสำหรับ P, T และ Q ที่ค่าต่าง ๆ ของมุม α และ β ในการที่จะหาค่าดังกล่าวนี้ได้เราจะต้องทราบค่าของมุมอีกมุมหนึ่งคือ ϕ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งได้จากการวัดหรือการคำนวณที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น

ในการคำนวณหาค่าแรง P จากรูปที่ 1 จะมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของฝ่าปิดของอุปกรณ์วัดสัญญาณ

$$P = W \times \cos\alpha \quad (5)$$

แรงในแนวสัมผัสกับระนาบฝ่าปิดของอุปกรณ์วัดสัญญาณ

$$\text{tangent force} = W \times \sin\alpha \quad (6)$$



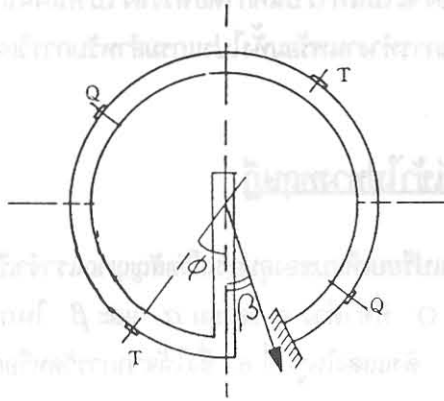
รูปที่ 6 มุม ϕ ในแกนโค้ง

และจากแรงในแนวสัมผัสสามารถที่จะคำนวณค่าของแรง T และ Q ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมุม β และ ϕ ดังแสดงในรูปที่ 7

$$T = W \times \sin\alpha \times \sin(\beta + \phi) \quad (7)$$

$$Q = W \times \sin\alpha \times \cos(\beta + \phi) \quad (8)$$

จากสมการที่ (5) (6) และ (7) เราสามารถที่จะคำนวณค่าเส้นคำนวณเปรียบเทียบได้



รูปที่ 7 แรง T และ Q ที่สัมพันธ์กับมุม β และ ϕ

6. ผลการทดสอบ

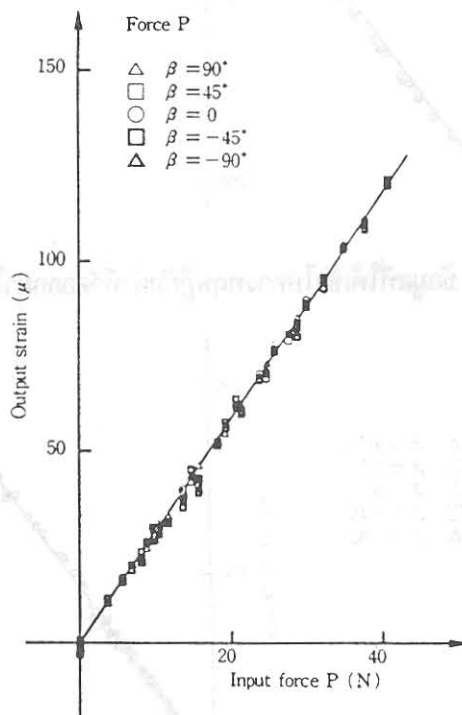
จากการทดลองและการคำนวณตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เราจะได้ผลของเส้นคำนวณเปรียบเทียบของแรง P , T และ Q ดังแสดงในรูปที่ 8, 9 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งในรูปดังกล่าวจะแสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ให้เข้าไปกับค่าของความเครียด (Strain) ที่แสดงผลออกมาจากอุปกรณ์วัดสัญญาณ ที่ค่าต่าง ๆ ของมุม β เราสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของแรงที่ให้เข้าไปและค่าความเครียดที่แสดงผลออกมาที่ Wheatstone Bridge จะเป็นเส้นตรงเสมอ
2. ไม่อิทธิพลของการวัดสัญญาณของแรงในทิศทางหนึ่งทิศทางใดจากแรงที่เหลืออีกสองแรง

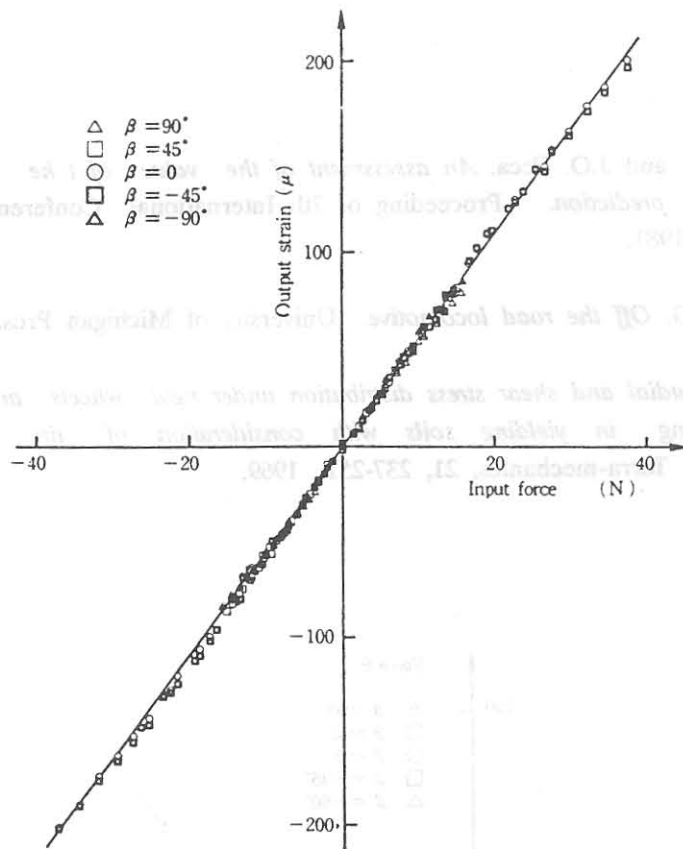
จากรูปที่ 8, 9 และ 10 แสดงข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับข้อมูลของความเครียดที่อ่านออกมาได้จาก Wheatstone Bridge ซึ่งจะมีค่าความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังนั้นเราจึงสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ของแรงกับความเครียดจะเป็นเชิงเส้นโดยมีสมการดังแสดงในรูป และค่าของแรงที่กระทำกับค่าของความเครียดที่อ่านออกมาได้จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าของมุม β

เอกสารอ้างอิง

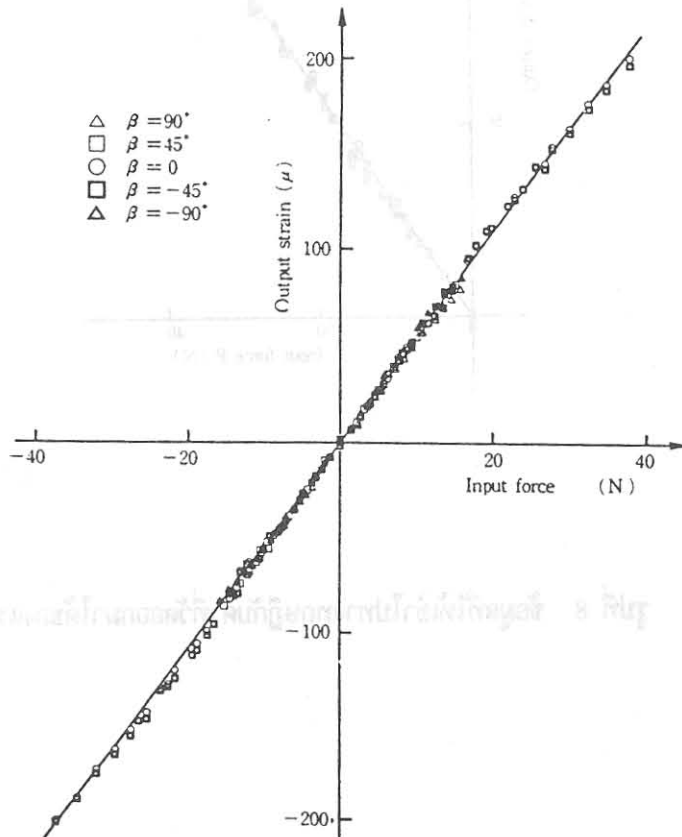
1. Reece, A.R. and J.O. Peca. *An assessment of the value of the cone penetrometer in mobility prediction.* Proceeding of 7th International Conference of ISTVS, 3, A1-A33, 1981.
2. Bekker, M.G. *Off the road locomotive.* University of Michigan Press, 1960.
3. Krick, G. *Radial and shear stress distribution under rigid wheels and pneumatic tires operating in yielding soils with consideration of tire deformation.* Journal of Terra-mechanics, 21, 237-251., 1969.



รูปที่ 8 ข้อมูลที่ให้เข้าไปทางทฤษฎีกับค่าที่วัดออกมาได้ของแรง P



รูปที่ 9 ข้อมูลที่ให้เข้าไปทางทฤษฎีกับค่าที่วัดออกมาได้ของแรง Q



รูปที่ 10 ข้อมูลที่ให้เข้าไปทางทฤษฎีกับค่าที่วัดออกมาได้ของแรง T