บทที่ 2

หลักการการหาตำแหน่งการติดมาตรวัดความเครียดและกราฟสัญญาณความเครียด

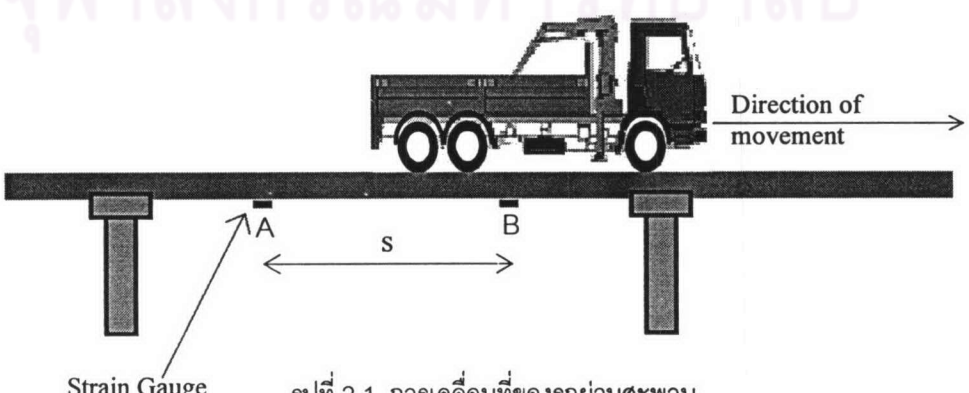
ระบบ Weigh-In-Motion (WIM) คือระบบที่ใช้ในการหาน้ำหนักเพลาของรถที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนถนนหรือสะพาน โดยข้อมูลจำพวก ระยะห่างระหว่างเพลา จำนวนเพลา และความเร็ว จะมีความสำคัญอย่างมากต่อความถูกต้องในการคำนวณหาน้ำหนักเพลา ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านๆมาจะพบว่าการนำระบบ WIM มาใช้กับสะพานจะมีข้อได้เปรียบมากกว่าการนำมาใช้กับผิวทางถนน โดยระบบ WIM ที่ใช้กับสะพานจะเรียกว่า Bridge Weigh-In-Motion (B-WIM)

ระบบ B-WIM จะทำการติดมาตรวัดความเครียดไว้ใต้สะพานเพื่อทำการหาน้ำหนักรถ และติดตัวตรวจจับเพลาไว้บนผิวสะพานเพื่อทำการวัดค่าความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา แต่เนื่องจากตัวตรวจจับเพลาจะเกิดการชำรุดได้ง่าย จึงมีการพัฒนาระบบที่ใช้มาตรวัดความเครียดที่ติดใต้สะพานเป็นตัวหาค่าความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลาไปพร้อมๆกันและเรียกว่าระบบ Free of Axle Detector (FAD) ซึ่งหลักการในการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลาของระบบ FAD นั้น Dempsey และ Znidaric ได้เสนอหลักในการคำนวณโดยมีสมมติฐานในการคำนวณ คือ รถต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ส่วนเวลาที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ (Δt)นั้นจะได้มาจากการสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1.2 โดย Δt ที่ได้จากวิธีดังกล่าวจะมีข้อผิดพลาดถ้าลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ได้ไม่เหมือนกัน และจะยิ่งผิดพลาดถ้ามีผลของสัญญาณรบกวนเข้ามารวมด้วย

2.1 หลักการในการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา

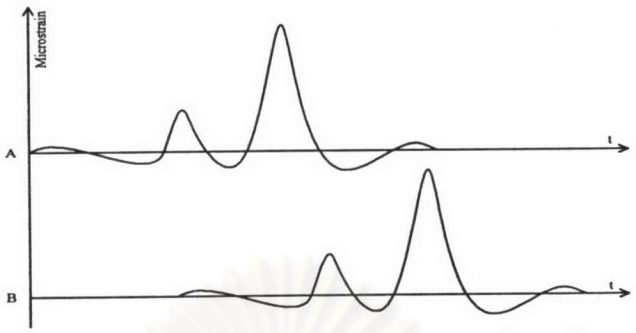
จากหลักการในการคำนวณความเร็วที่ Dempsey และ Znidaric ได้เสนอมานั้น มีสมมติฐานในการคำนวณคือ รถที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดนั้นต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงรถที่เคลื่อนที่ดังกล่าวอาจไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ โดยการใช้สมมติฐานดังกล่าวในการคำนวณอาจทำให้การคำนวณความเร็วเกิดความผิดพลาดมาก ดังนั้นหลักการที่จะนำเสนอต่อไปนี้จะตั้งสมมติฐานที่ว่ารถเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดทั้ง 2 ด้วยความเร่งคงที่ เพื่อเป็นการเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณ

การหาค่าความเร็วรถและระยะห่างระหว่างเพลาของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานนั้นจะใช้พิจารณาสำหรับรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานที่ติดมาตรวัดความเครียด โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่และรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.1



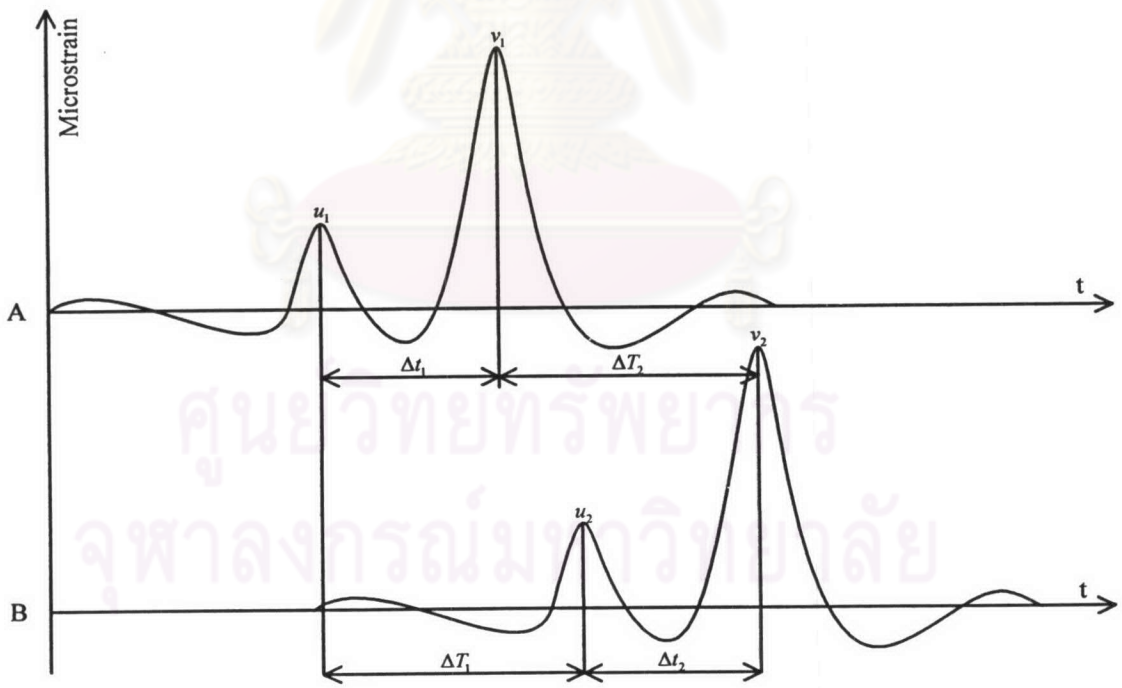
รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของรถผ่านสะพาน

ซึ่งสัญญาณความเครียดจากมาตรวัดความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดเมื่อรถเคลื่อนที่ผ่านสะพานจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดไว้ที่หน้าตัด A และ B

จากลักษณะของสัญญาณความเครียดดังกล่าวที่ได้จากมาตรวัดความเครียดแต่ละหน้าตัดจะได้ว่า ค่าความเครียดที่วัดได้จะมีค่าขึ้นสูงสุดครั้งแรกและครั้งที่ 2 เมื่อล้อหน้าและล้อหลังของรถอยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด ตามลำดับ โดยหากสมมติให้รถมีความเร่งคงที่ขณะที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน ซึ่งจากสัญญาณความเครียดที่ได้จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดดังกล่าวกับการเคลื่อนที่ของรถได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 รายละเอียดของสัญญาณความเครียด
เพื่อการคำนวณความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย ΔT_1 คือ เวลาที่ล้อหน้าใช้ในการเคลื่อนที่จากหน้าตัด A ไปยังหน้าตัด B

ΔT_2 คือ เวลาที่ล้อหลังใช้ในการเคลื่อนที่จากหน้าตัด A ไปยังหน้าตัด B

Δt_1 คือ เวลาที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด A

Δt_2 คือ เวลาที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด B

u_1 คือ ความเร็วต้นเมื่อล้อหน้าของรถเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด A

v_1 คือ ความเร็วปลายเมื่อล้อหลังของรถเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด A

u_2 คือ ความเร็วต้นเมื่อล้อหน้าของรถเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด B

v_2 คือ ความเร็วปลายเมื่อล้อหลังของรถเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด B

a คือ ความเร่งของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน

s_1 คือ ระยะห่างระหว่างหน้าตัดทั้ง 2 ที่ติดมาตรวัดความเครียด

s_2 คือ ระยะห่างระหว่างเพลาของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน

จากสมการการเคลื่อนที่ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 และ สมการที่ 2.2

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2 \tag{2.1}$$

และ

$$s = \left(\frac{u+v}{2}\right)t \tag{2.2}$$

จะได้ว่าระยะทางระหว่างหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.3 ถึง สมการที่ 2.6

$$s_1 = \left(\frac{u_1+u_2}{2}\right)\Delta T_1 \tag{2.3}$$

หรือ

$$s_1 = \left(\frac{v_1+v_2}{2}\right)\Delta T_2 \tag{2.4}$$

หรือ

$$s_1 = u_1\Delta T_1 + \frac{1}{2}a\Delta T_1^2 \tag{2.5}$$

หรือ

$$s_1 = v_1\Delta T_2 + \frac{1}{2}a\Delta T_2^2 \tag{2.6}$$

จากสมการที่ 2.3 และ สมการที่ 2.4 สามารถจัดรูปให้อยู่ในสมการที่ 2.7 และ สมการที่ 2.8 ตามลำดับ

$$u_1 + u_2 = \frac{2s_1}{\Delta T_1} \tag{2.7}$$

และ

$$v_1 + v_2 = \frac{2s_1}{\Delta T_2} \tag{2.8}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 2.5 และ สมการที่ 2.6 สามารถจัดรูปให้อยู่ในสมการที่ 2.9 และ สมการที่ 2.10 ตามลำดับ

$$a = \frac{2\left(s_1 - u_1\Delta t_1\right)}{\Delta t_1^2} \tag{2.9}$$

และ

$$a = \frac{2\left(s_1 - v_1\Delta t_2\right)}{\Delta t_2^2} \tag{2.10}$$

เนื่องจากความเร่งมีค่าคงที่ จากสมการที่ 2.9 และ สมการที่ 2.10 จะได้ว่า

$$\frac{2\left(s_1 - u_1\Delta t_1\right)}{\Delta t_1^2} = \frac{2\left(s_1 - v_1\Delta t_2\right)}{\Delta t_2^2} \tag{2.11}$$

หรือ

$$v_1 - u_1\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = s_1\Delta t_2\left(\frac{1}{\Delta t_2^2} - \frac{1}{\Delta t_1^2}\right) \tag{2.12}$$

ส่วนระยะห่างระหว่างเพลาของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.13 หรือ สมการที่ 2.14

$$s_2 = \left(\frac{u_1 + v_1}{2}\right)\Delta t_1 \tag{2.13}$$

หรือ

$$s_2 = \left(\frac{u_2 + v_2}{2}\right)\Delta t_2 \tag{2.14}$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$\left(\frac{u_1 + v_1}{2}\right)\Delta t_1 = \left(\frac{u_2 + v_2}{2}\right)\Delta t_2 \tag{2.15}$$

หรือ

$$u_1 - \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}u_2 - v_1 - \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}v_2 = 0 \tag{2.16}$$

จากสมการที่ 2.7 , สมการที่ 2.8 , สมการที่ 2.12 และ สมการที่ 2.16 จะสามารถเขียนให้อยู่รูปเมตริกได้ดังสมการ 2.17

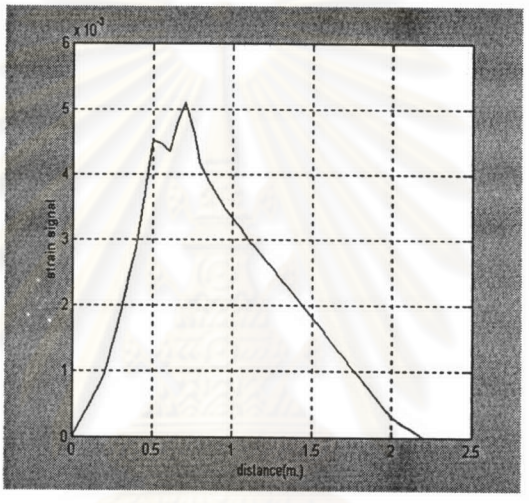
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -\Delta T_2/\Delta T_1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -\Delta t_2/\Delta t_1 & 1 & -\Delta t_2/\Delta t_1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2s_1/\Delta T_1 \\ 2s_1/\Delta T_2 \\ s_1\Delta T_2\left(1/\Delta T_2^2 - 1/\Delta T_1^2\right) \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2.17}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

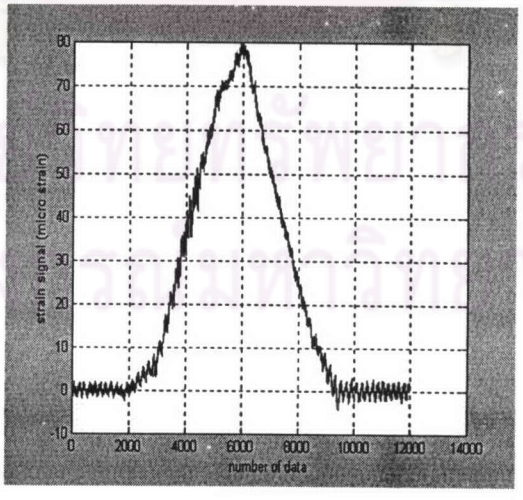
ซึ่งจากการแก้สมการที่ 2.17 จะสามารถหาค่าของ u_1 , u_2 , v_1 และ v_2 ได้ และนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างเพลา โดยค่าระยะห่างระหว่างเพลา (s_2) จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13 หรือ สมการที่ 2.14

2.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถที่ผ่านสะพานบนโปรแกรม LUSAS

โดยวิธีการทั่วไปในการหาความเร็วรถและระยะห่างระหว่างเพลาของรถที่เคลื่อนที่ สำหรับสะพานชนิดแผ่นพื้นทางเดียว จะใช้สัญญาณความเครียดจากมาตรวัดความเครียดที่ติดไว้ใต้สะพานที่ใช้วัดความเครียดในทิศทางที่รถเคลื่อนที่ มาใช้เป็นตัวบอกจุดเวลาที่รถเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งสัญญาณที่วัดได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 สัญญาณความเครียดที่ได้จากโปรแกรม LUSAS



รูปที่ 2.5 สัญญาณความเครียดที่ได้จากการทดลอง

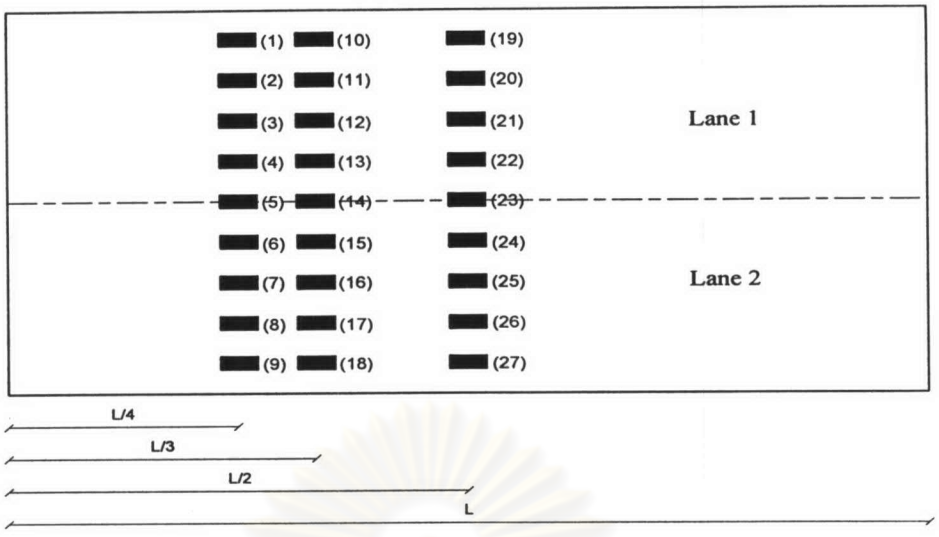
โดยลักษณะสัญญาณความเครียดที่ได้จากโปรแกรม LUSAS ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะทางที่รถเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะสามารถระบุตำแหน่งที่แน่นอน เมื่อล้อรถเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดได้ แต่จะสังเกตได้ว่าในความเป็นจริงจะมีผลของพลศาสตร์ของตัวสะพานและผลของสัญญาณรบกวน จะได้สัญญาณความเครียดที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนข้อมูล โดยทำการเก็บข้อมูลด้วยความถี่ 1024 ข้อมูลต่อวินาที และใช้เวลาในการทำการเก็บข้อมูลเท่ากับ 12 วินาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าการระบุจุดเวลาที่รถเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดนั้นจะทำได้ลำบากและมีความคลาดเคลื่อนสูง โดยจะส่งผลให้การหาค่า Δt นั้นมีความคลาดเคลื่อนและทำให้การหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลานั้นคลาดเคลื่อนตามไปด้วย ด้วยเหตุผลข้างต้นที่กล่าวมาจึงพอจะสรุปได้ว่าลักษณะของสัญญาณความเครียดจากวิธีการทั่วไปที่ใช้กันนั้น ยังไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความ เร็วและระยะห่างระหว่างเพลาของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน

ดังนั้นสัญญาณความเครียดที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา ควรจะมีลักษณะของสัญญาณที่สามารถระบุจุดเวลาเมื่อล้อหน้าและล้อหลังของรถที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดได้ชัดเจนโดยการศึกษาเพื่อหาลักษณะที่เหมาะสมในการติดมาตรวัดความเครียดเพื่อให้ได้สัญญาณความเครียดที่สามารถระบุจุดเวลาที่ล้อรถเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดได้ถูกต้องนั้น จะทำโดยอาศัยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถผ่านสะพาน โดยสะพานที่จำลองนั้นจะเป็นสะพานที่มีที่รองรับแบบธรรมดา (Simple support) ซึ่งแสดงได้ดังรูป 2.6

รูปที่ 2.6 รูปแบบของสะพานจำลองที่มีที่รองรับแบบธรรมดา

แล้วจึงทำการจำลองการติดมาตรวัดความเครียดตลอดหน้าตัด x=L/4 , x=L/3 และ x=L/2 (x=0.5 ม. , x=2/3 ม. และ x=1 ม.) โดยมีระยะห่างระหว่างมาตรวัดความเครียดแต่ละตัวเท่ากับ 5 ซม. เพื่อทำการวัดค่าความเครียด ซึ่งการติดมาตรวัดความเครียดบนสะพานจำลองจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และเมื่อทำการจัดกลุ่มของมาตรวัดความเครียดในหน้าตัดเดียวกันจะสามารถแบ่งมาตรวัดความเครียดออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยจะมีมาตรวัดความเครียดตัวกลางเป็นตัวแบ่ง ซึ่งกลุ่มที่ 1 จะอยู่บนเลนที่ 1 และกลุ่มที่ 2 จะอยู่บนเลนที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 แปลนแสดงการติดมาตรวัดความเครียดบนสะพานจำลอง

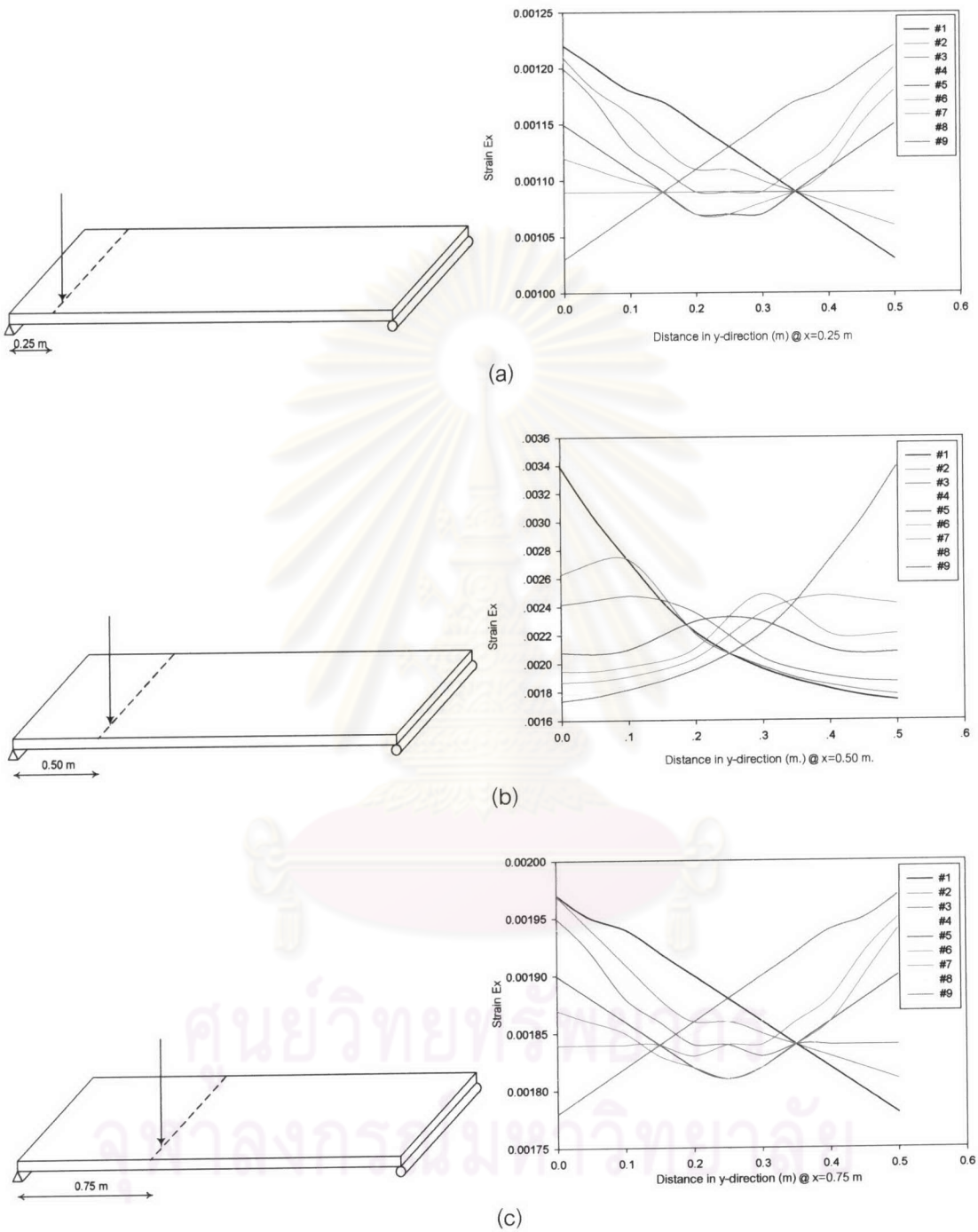
เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์หาลักษณะในการติดมาตรวัดความเครียดนั้นจะอาศัยการจำลองรูปแบบของสะพานที่แสดงในรูปที่ 2.6 และการติดมาตรวัดความเครียดตามแปลนที่แสดงในรูปที่ 2.7 บนโปรแกรม LUSAS

การจำลองบนโปรแกรม LUSAS นั้น จะพิจารณาใช้ชิ้นส่วนโครงสร้างแผ่น (Plate element) ชนิด QSC4 ที่มีขนาดของชิ้นส่วนเท่ากับ 0.05 ม. X 0.05 ม. ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งทฤษฎีของโครงสร้างแผ่นและโครงสร้างเปลือกสามารถดูได้ในภาคผนวก ก โดยจะพิจารณารถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานมีลักษณะเป็นน้ำหนักบรรทุกแบบจุด (Point load) ที่มีขนาด 1 ตัน เคลื่อนที่ทั้งในทิศ x และทิศ y ซึ่งจะจำแนกออกได้เป็น 2 กรณีคือ

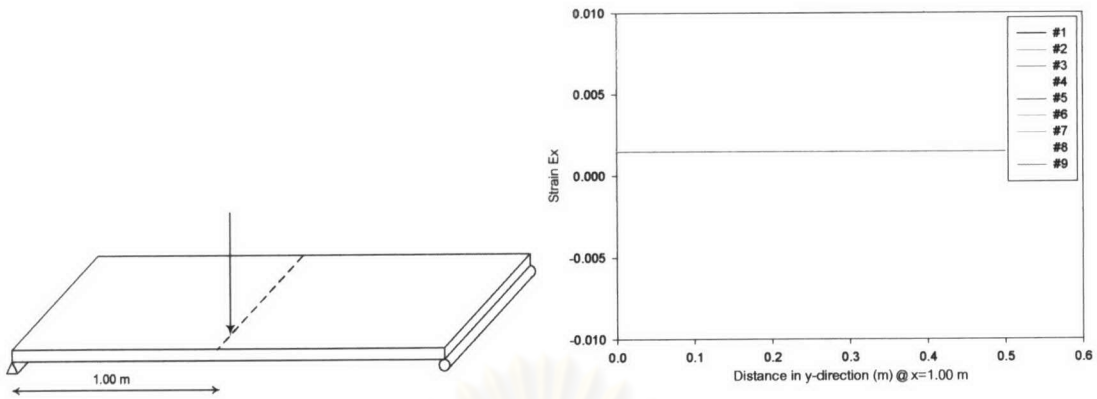
กรณีที่น้ำหนักบรรทุกแบบจุดเคลื่อนที่ในทิศทาง y จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่มาตรวัดความเครียดแต่ละตัววัดได้กับระยะทางที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ คือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

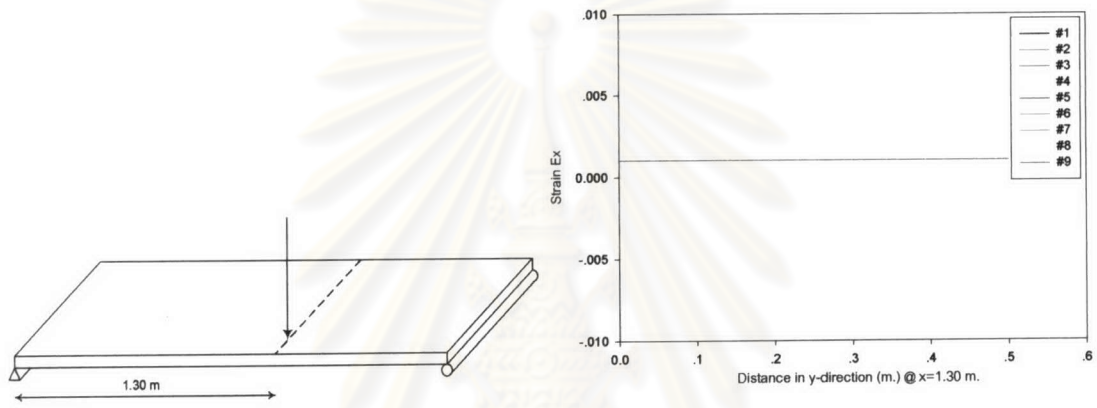
- สำหรับมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9



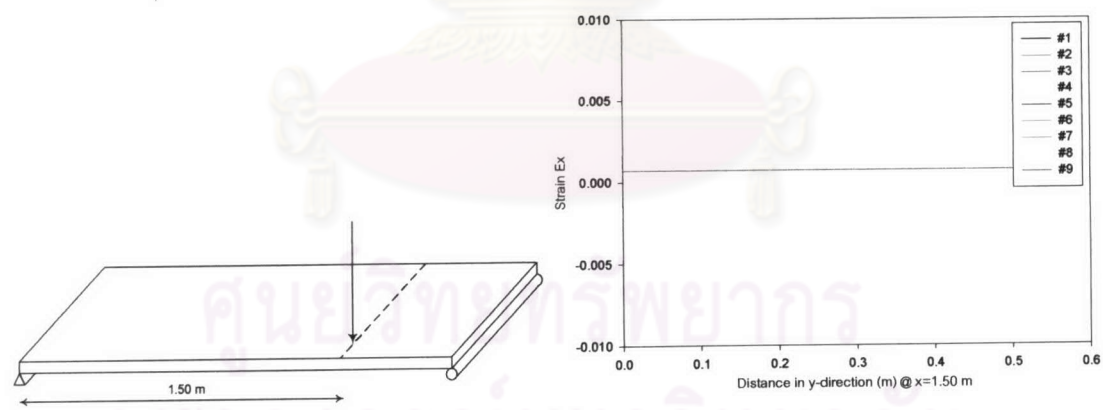
รูปที่ 2.8 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ



(a)



(b)

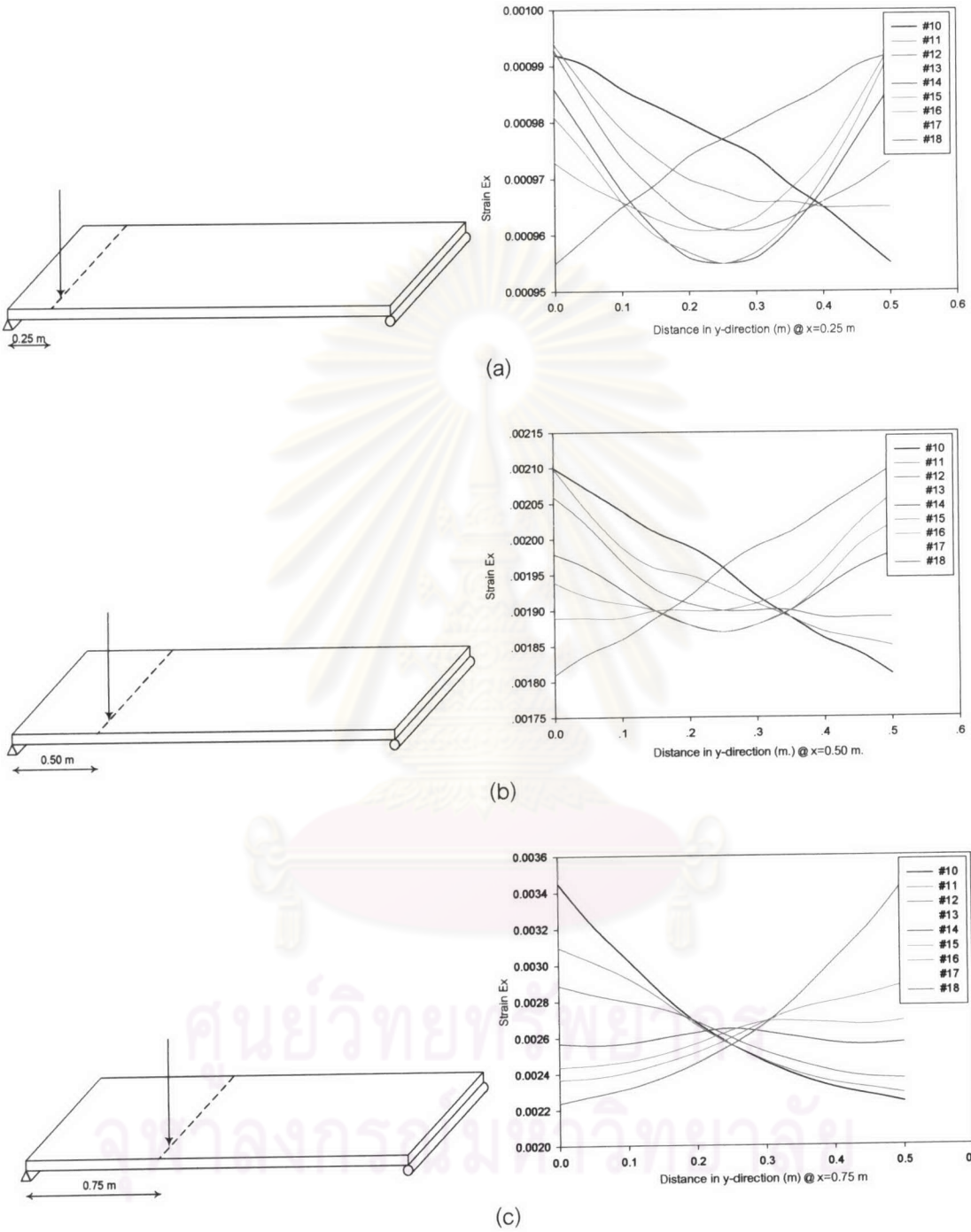


(c)

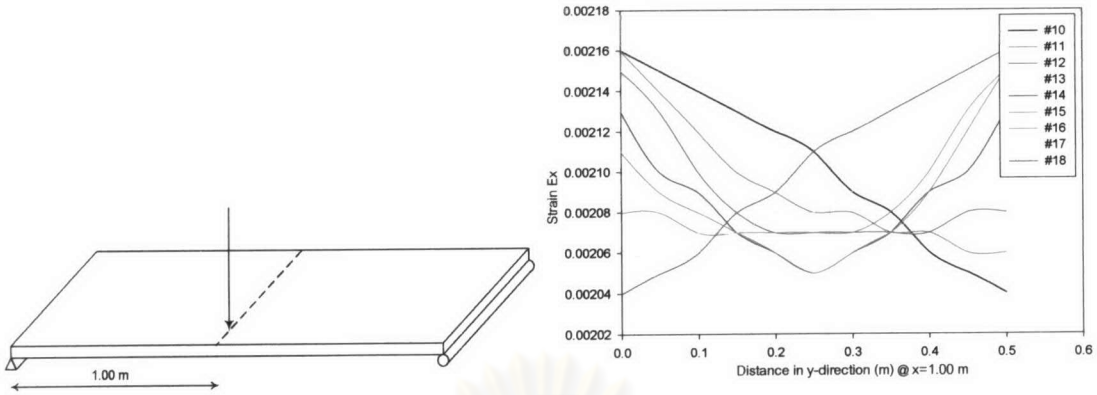
รูปที่ 2.9 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.)
เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

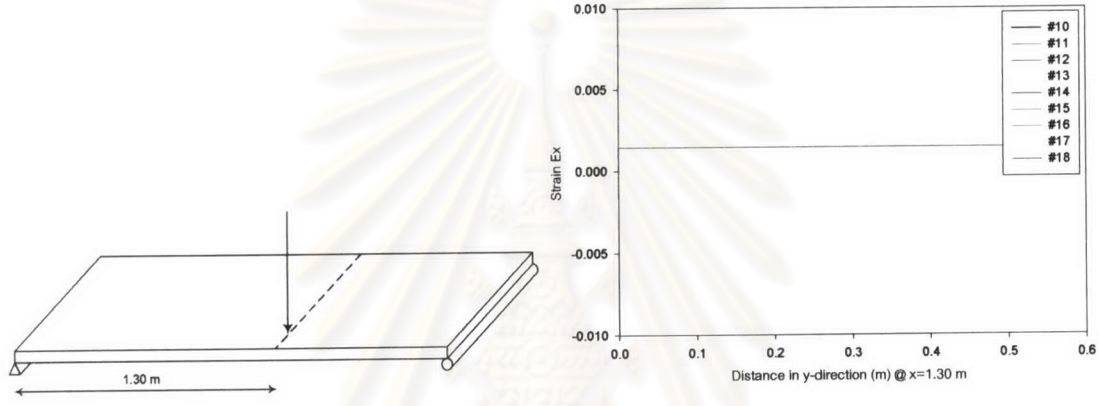
- สำหรับมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11



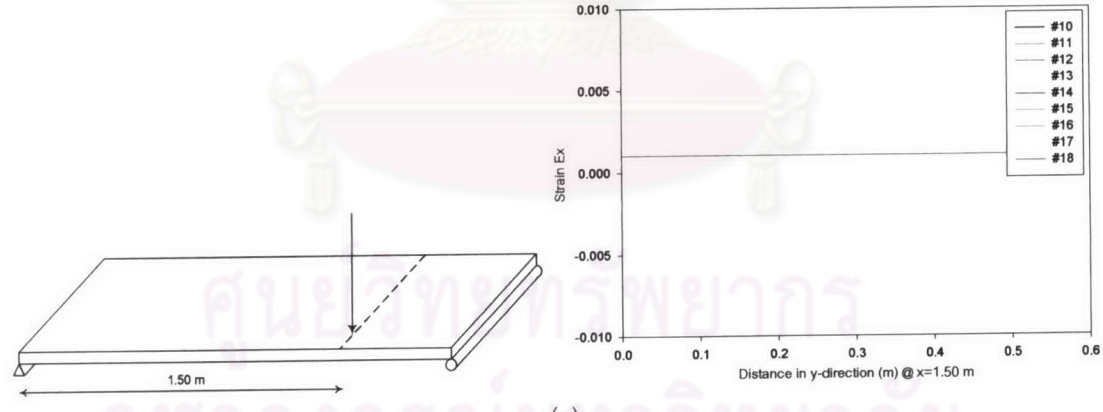
รูปที่ 2.10 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ



(a)



(b)

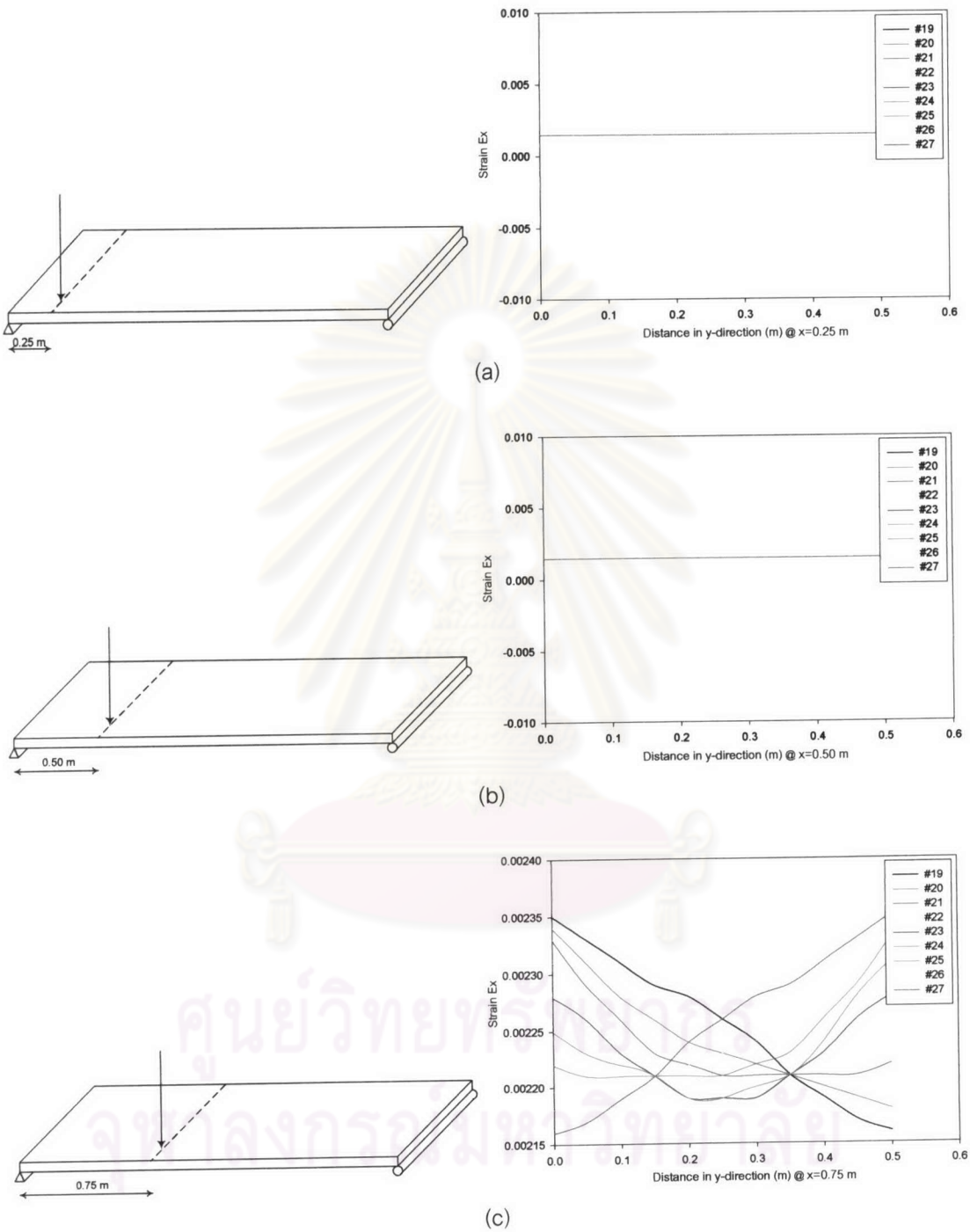


(c)

รูปที่ 2.11 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ

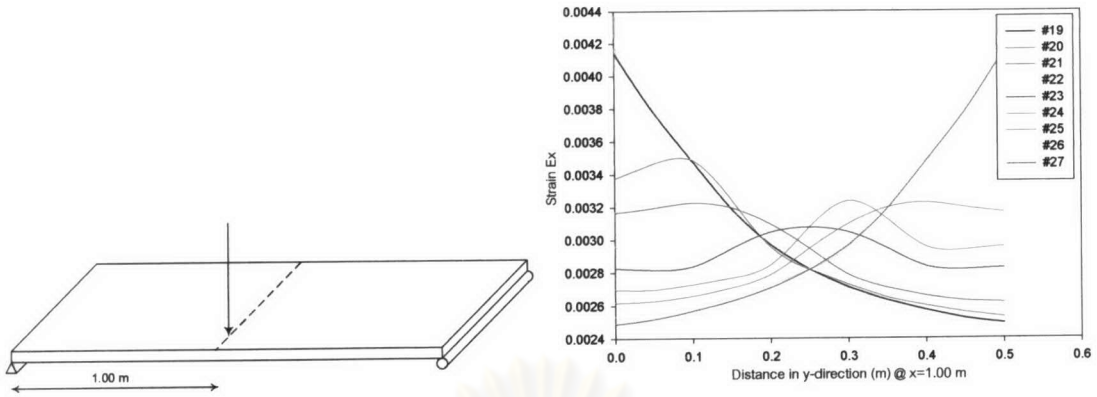
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- สำหรับมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13

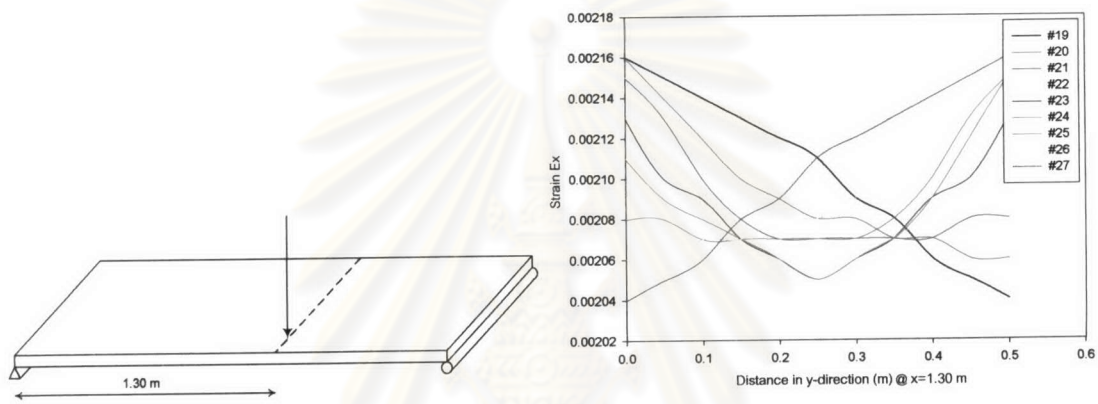


รูปที่ 2.12 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ

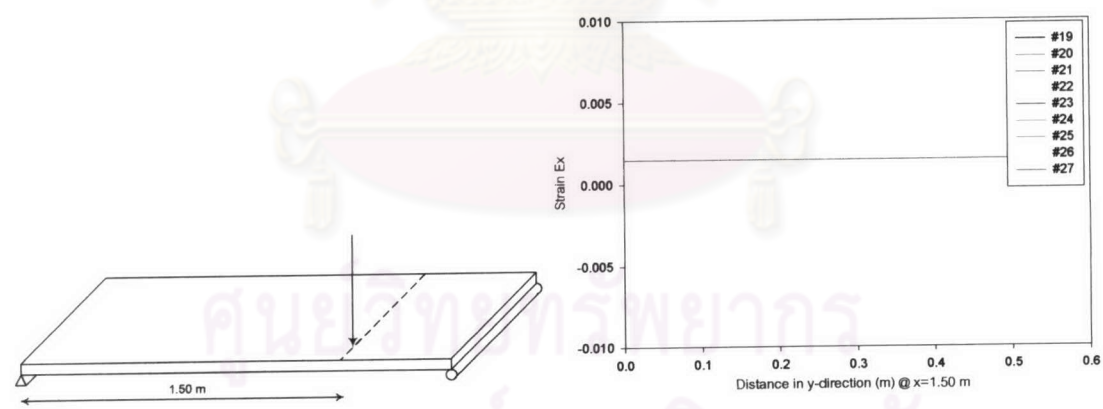
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)



(c)

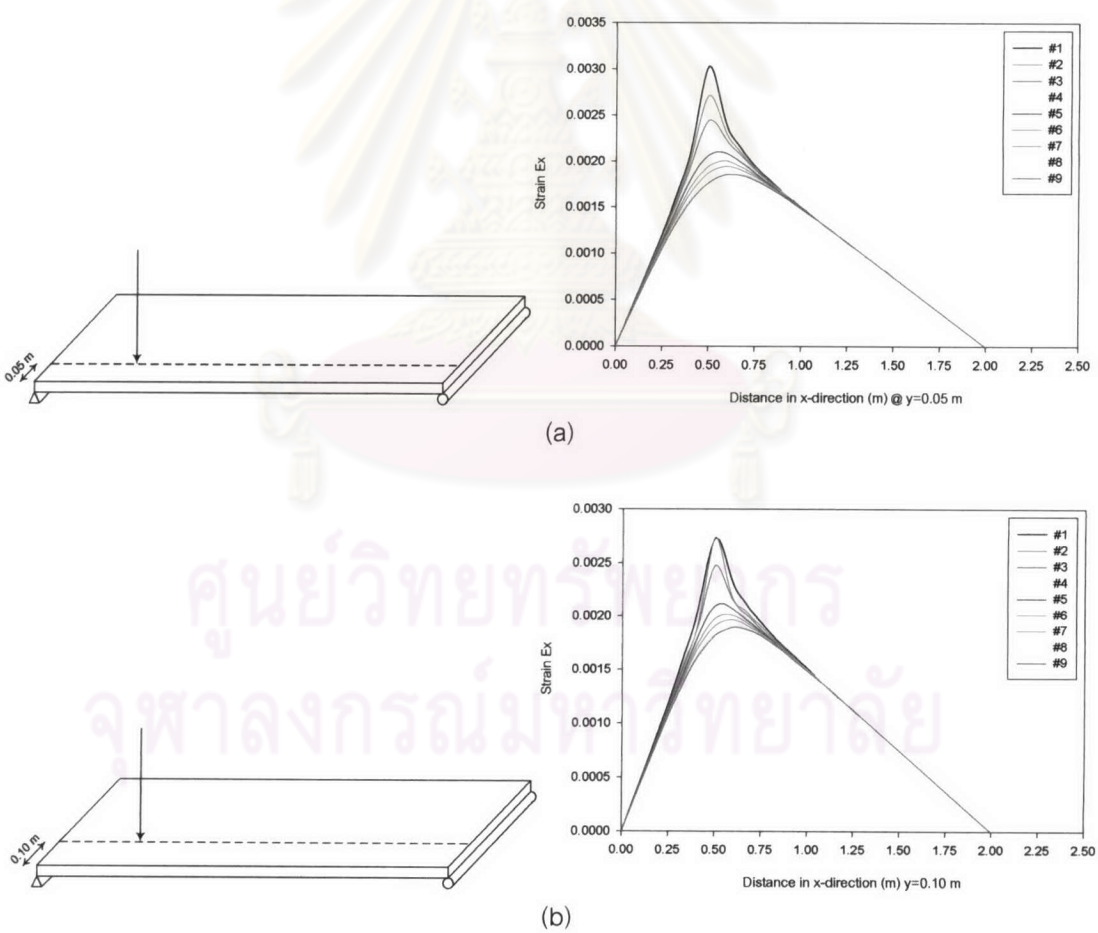
รูปที่ 2.13 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ε_x กับ y ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ถึงรูปที่ 2.13 จะสังเกตได้ว่าค่าความเครียดที่มาตรวัดความเครียดแต่ละตัววัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งหน้าตัดสำหรับกรณีที่น้ำหนักบรรทุกแบบจุดที่เคลื่อนที่บนหน้าตัดใดๆที่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด โดยเฉพาะที่หน้าตัดที่อยู่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดเป็นระยะทางมากกว่า 50 ซม. มาตรวัดความเครียดทุกตัวจะให้ค่า

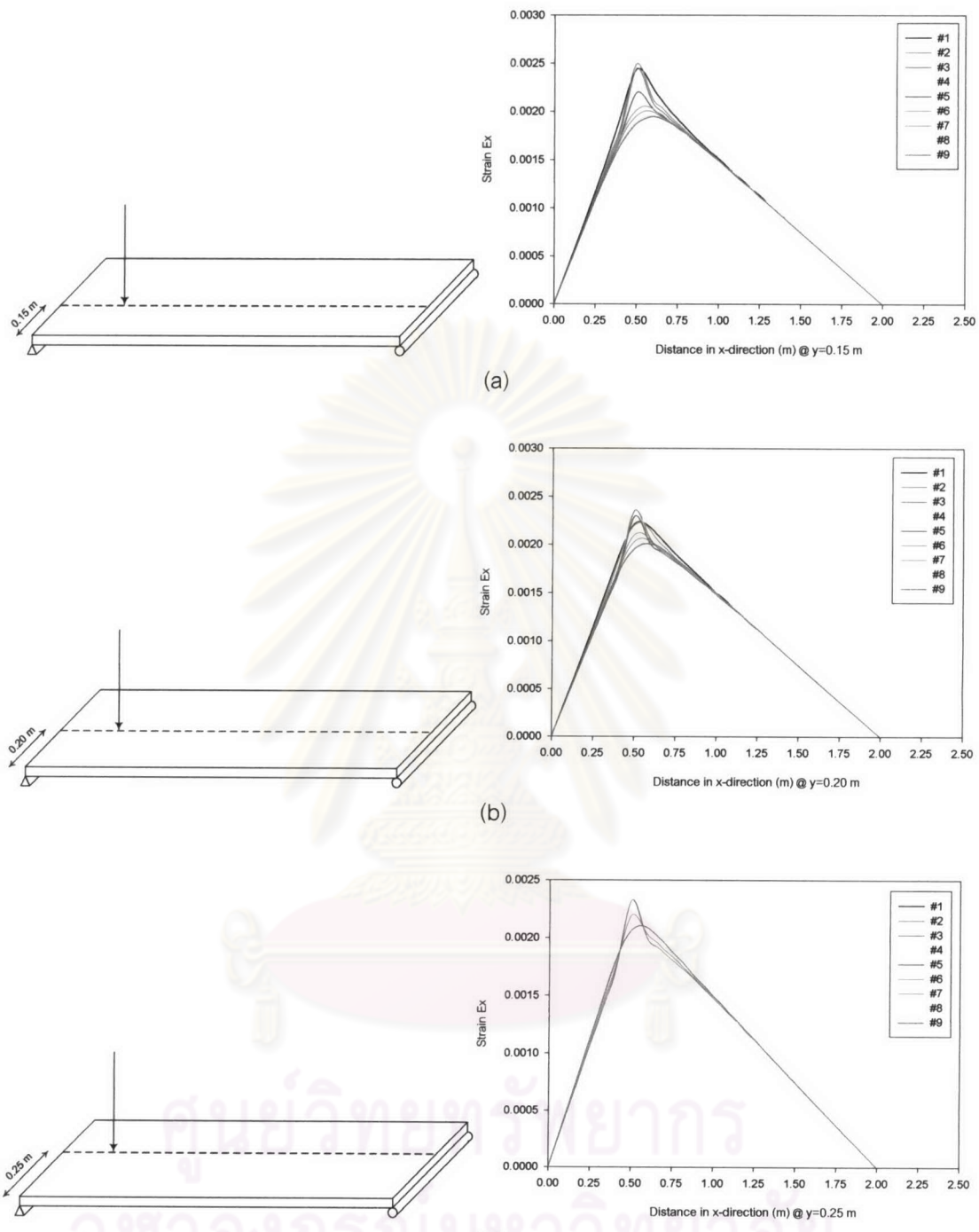
ความเครียดเท่ากันทั้งหน้าตัดไม่ว่าน้ำหนักบรรทุกจะเคลื่อนที่อยู่บนเลนใดก็ตาม และค่าความเครียดที่มาตรวัดความเครียดแต่ละตัววัดได้จะมีค่าต่างกันมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ใกล้กับหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด แต่ค่าความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดแต่ละตัวก็ยังมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับกรณีที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด โดยกรณีที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดนั้น มาตรวัดความเครียดกลุ่มที่อยู่บนเลนที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่จะให้ค่าความเครียดแตกต่างกันมากส่วนมาตรวัดความเครียดกลุ่มที่อยู่อีกเลนจะยังคงให้ค่าความเครียดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมาตรวัดความเครียดกลุ่มที่อยู่บนเลนที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่จะให้ค่าความเครียดสูงกว่ามาตรวัดความเครียดกลุ่มที่อยู่อีกเลนมาก

กรณีที่น้ำหนักบรรทุกแบบจุดเคลื่อนที่ในทิศทาง x จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่มาตรวัดความเครียดแต่ละตัววัดได้กับระยะทางที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ คือ

- สำหรับมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



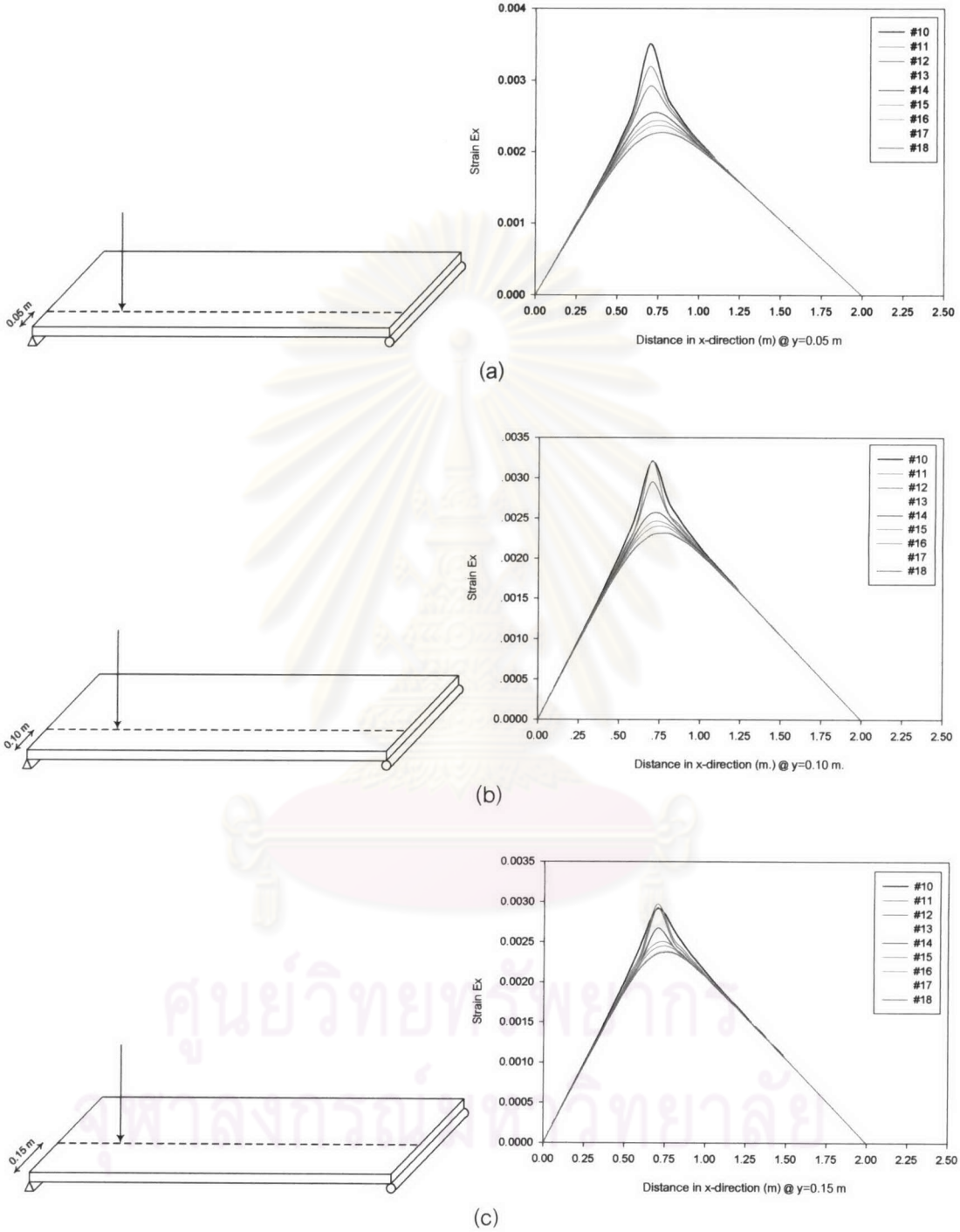
รูปที่ 2.14 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ



รูปที่ 2.15 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ

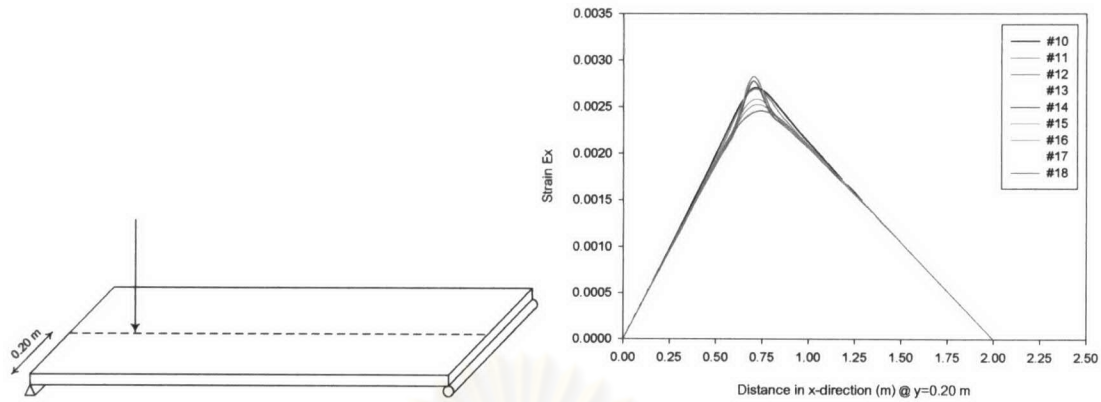
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- สำหรับมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17

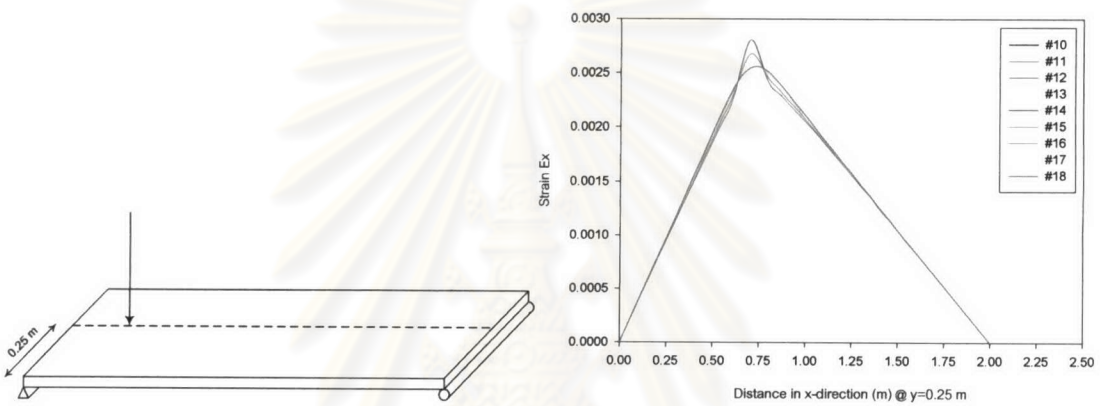


รูปที่ 2.16 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)

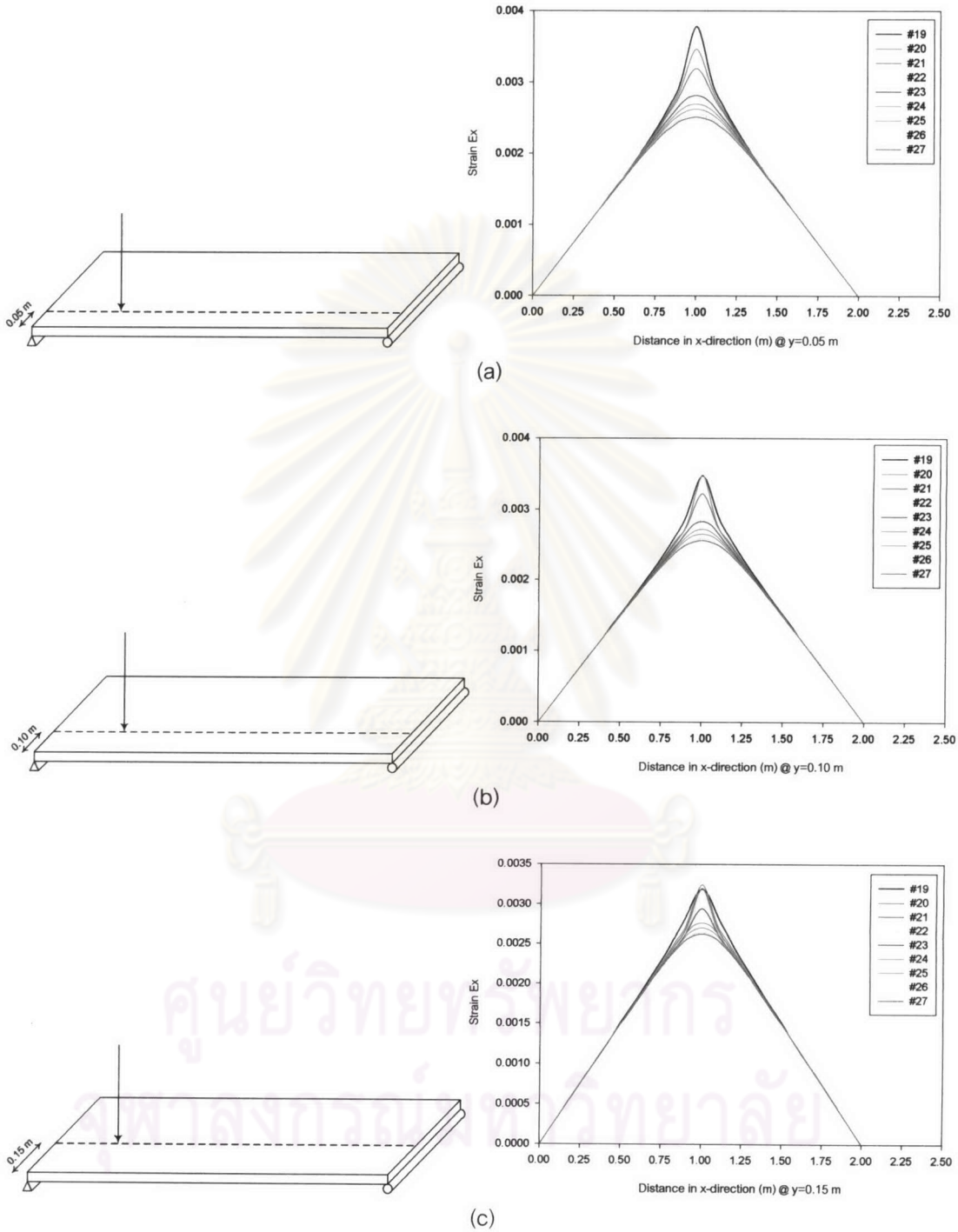


(b)

รูปที่ 2.17 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ

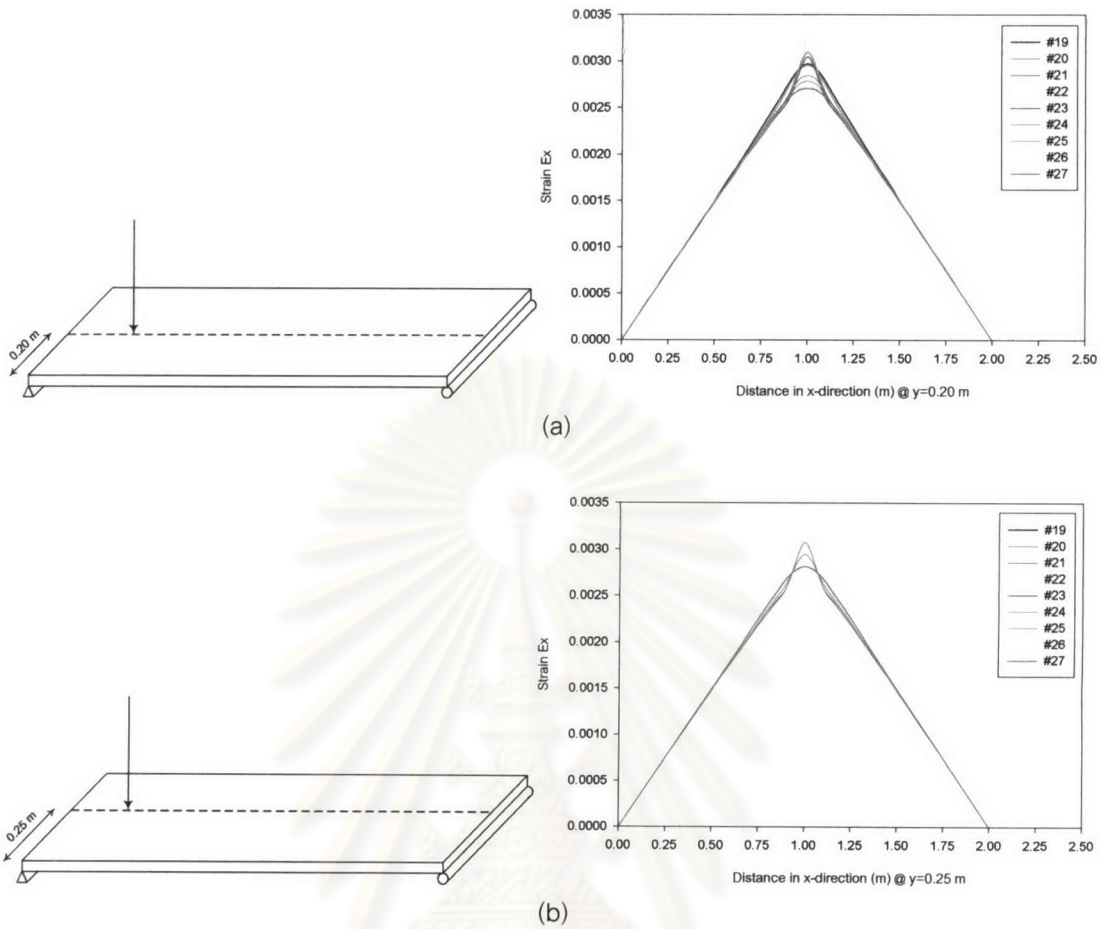
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- สำหรับมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



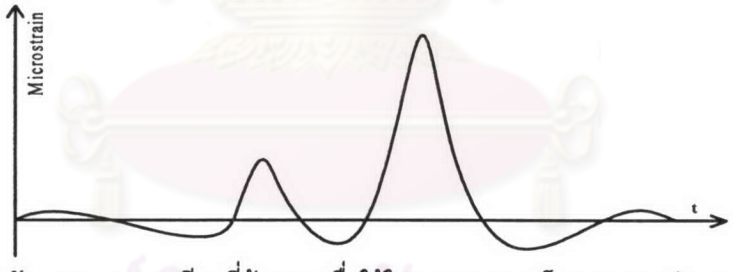
รูปที่ 2.19 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.)
เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ε_x กับ x ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ถึงรูปที่ 2.19 จะสังเกตได้ว่ามาตรวัดความเครียดแต่ละตัวจะให้ค่าความเครียดที่มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อน้ำหนักบรรทุกแบบจุดเคลื่อนที่ที่ระยะ x ใดๆที่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดดังที่เสนอไปแล้วในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกแบบจุดเคลื่อนที่ในทิศ ทาง y ซึ่งค่าความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดแต่ละตัวบนหน้าตัดเดียวกันจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อน้ำหนักบรรทุกแบบจุดเคลื่อนที่เข้าใกล้กับหน้าตัดที่ทำการติดมาตรวัดความเครียดนั้น โดยมาตรวัดความเครียดตัวที่ถูกทับพอดีจะให้ค่าความเครียดสูงสุด

2.3 การสร้างกราฟสัญญาณความเครียดเพื่อใช้ในการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา

จากวิธีการโดยทั่วไปในการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลาของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน จะใช้สัญญาความเครียดที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเป็นสัญญาณความเครียดที่เกิดมาจากผลของน้ำหนักบรรทุกผลทางพลศาสตร์ของตัวสะพาน และผลของสัญญาณรบกวน ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.2 ซึ่งสัญญาณความเครียดดังกล่าวยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา ดังนั้นการสร้างกราฟสัญญาณความเครียดเพื่อที่จะทำการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลาของรถที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านสะพานตามหลักการในหัวข้อที่ 2.1 นั้น กราฟสัญญาณความเครียดที่ต้องการควรจะสามารถระบุจุดเวลาที่แน่นอนได้เมื่อล้อหน้าและล้อหลังของรถที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด

กราฟสัญญาณความเครียด ที่จะใช้ในการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลาควรจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งลักษณะของสัญญาณความเครียดที่แสดงนั้นจะราบเรียบเมื่อน้ำหนักบรรทุกหรือรถบรรทุกเคลื่อนที่อยู่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด แต่จะมีค่าขึ้นสูงสุด 2 ครั้งเมื่อเพลาหน้าและเพลาหลังของรถเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด โดยสัญญาณความเครียดจะขึ้นสูงสุดครั้งแรกเมื่อเพลาหน้าของรถอยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด และจะขึ้นสูงสุดครั้งที่ 2 เมื่อเพลาหลังของรถอยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด ซึ่งลักษณะของสัญญาณความเครียดดังกล่าวนอกจากจะมีข้อดีในการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลาแล้วยังจะช่วยบอกจำนวณเพลาของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้ด้วย



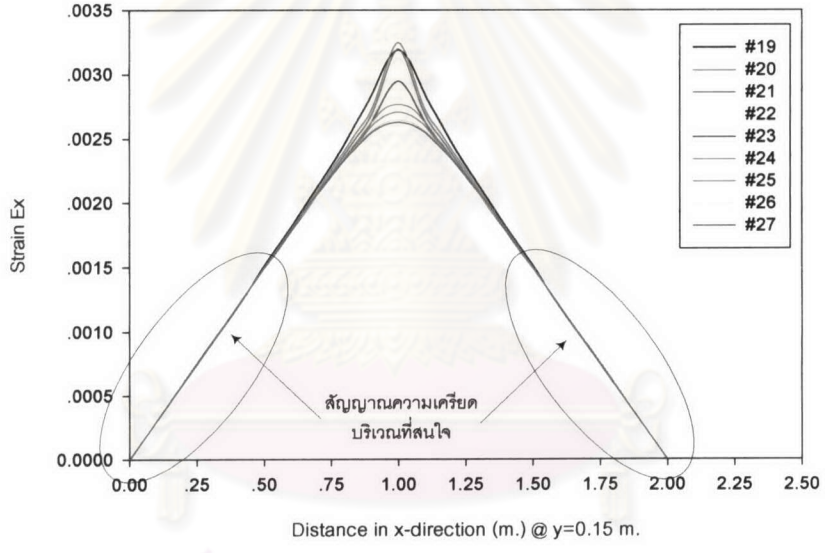
รูปที่ 2.20 สัญญาณความเครียดที่ต้องการเพื่อใช้ในการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา

การสร้างกราฟสัญญาณความเครียด ที่ต้องการดังที่กล่าวมาข้างต้นจะอาศัยสัญญาณความเครียดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม LUSAS โดยจากการจำลองด้วยโปรแกรม LUSAS ในหัวข้อที่ 2.2 นั้น กราฟสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดแต่ละตัวจะให้ค่าสูงสุดเมื่อน้ำหนักบรรทุกแบบจุดอยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด ดังนั้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะทางในทิศทาง x ที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่จะได้ว่า ระยะทางในทิศ x ที่ได้เมื่อค่าความเครียดสูงสุดคือตำแหน่งที่ติดมาตรวัดความเครียด ซึ่งเมื่อเทียบกับความเป็นจริงแล้ว สัญญาณความเครียดที่วัดได้นั้นจะเป็นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา ซึ่งพอที่จะสรุปได้ว่า เวลาที่มีค่าความเครียดสูงสุดก็คือ เวลาที่น้ำหนักบรรทุกอยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดนั่นเอง

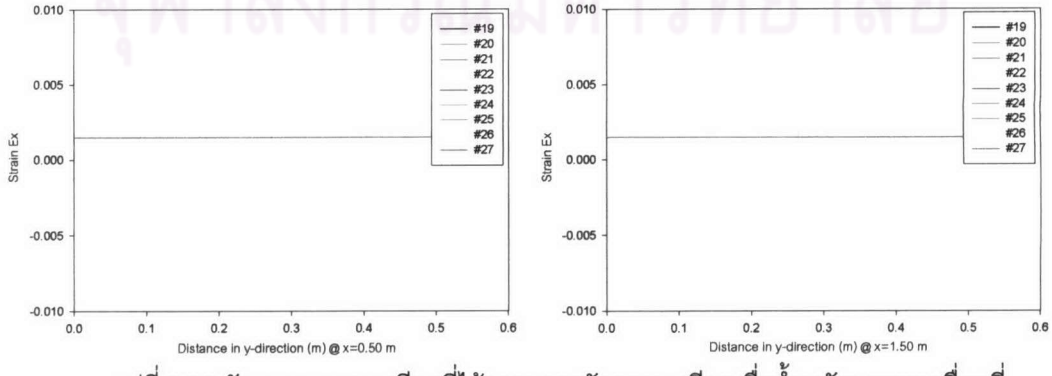
จากข้อสรุปที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ε_x กับ y และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ε_x กับ x ที่ว่า "ค่าความเครียดที่มาตรวัดความเครียดแต่ละตัววัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งหน้าตัดสำหรับกรณีที่

น้ำหนักบรรทุกแบบจุดที่เคลื่อนที่บนหน้าตัดใดๆที่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดไม่ว่าน้ำหนักบรรทุกนั้นจะเคลื่อนที่อยู่บนเลนใดก็ตาม แต่กรณีที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดนั้น มาตรวัดความเครียดกลุ่มที่อยู่บนเลนที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่จะให้ค่าความเครียดแตกต่างกันมากส่วนมาตรวัดความเครียดกลุ่มที่อยู่อีกเลนจะยังคงให้ค่าความเครียดที่ใกล้เคียงกันซึ่งมาตรวัดความเครียดกลุ่มที่อยู่บนเลนที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่จะให้ค่าความเครียดสูงกว่ามาตรวัดความเครียดกลุ่มที่อยู่อีกเลนมากโดยมาตรวัดความเครียดที่ถูกน้ำหนักบรรทุกทับพอดีจะมีค่าความเครียดสูงที่สุด"

ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่ติดมาตรวัดความเครียดบนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกแบบจุดเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ จะได้ว่า เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดเป็นระยะทางมากกว่า 50 ซม. สัญญาณความเครียดที่มาตรวัดความเครียดแต่ละตัววัดได้จะมีค่าเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 โดยค่าสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดแต่ละตัวจะเท่ากันไม่ว่าน้ำหนักบรรทุกจะเคลื่อนที่อยู่บนเลนไหนก็ตามดังแสดงได้ในรูปที่ 2.22

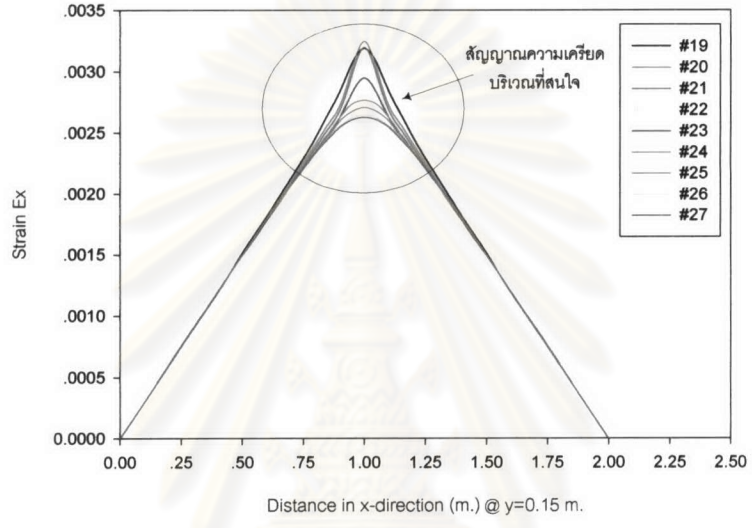


รูปที่ 2.21 สัญญาณความเครียดที่ได้เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดเป็นระยะทางมากกว่า 0.50 ม.

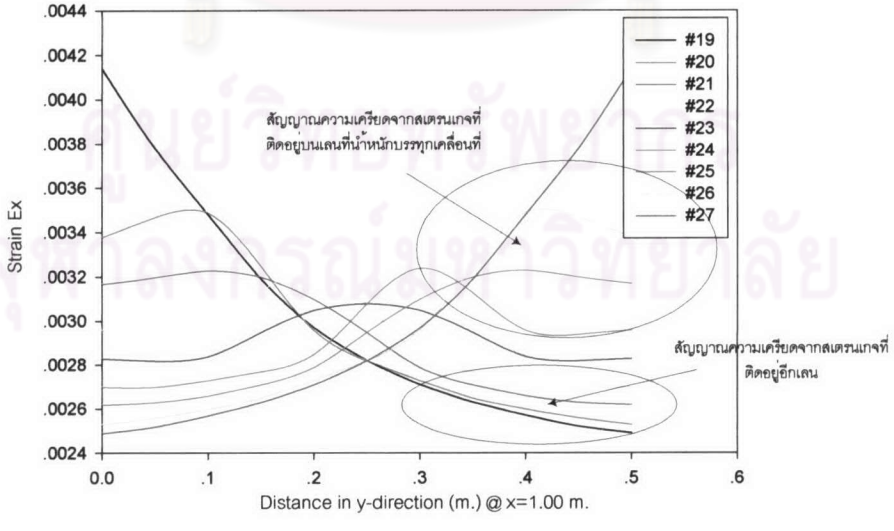


รูปที่ 2.22 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัด x=0.50 ม. และ x=1.50 ม.

ส่วนเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดเป็นระยะทางน้อยกว่า 50 ซม. สัญญาณความเครียดที่มาตรวัดความเครียดแต่ละตัววัดได้จะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่เข้าใกล้กับหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด และจะแตกต่างกันมากที่สุดเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดนั้นค่าสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่อยู่บนเลนที่น้ำหนักเคลื่อนที่จะมีค่าแตกต่างกันมาก แต่ทุกตัวจะให้ค่าความเครียดสูงกว่ามาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่อีกเลน ซึ่งมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่อีกเลนนั้นจะยังคงให้ค่าความเครียดที่มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 สัญญาณความเครียดที่ได้เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดเป็นระยะทางน้อยกว่า 0.50 m



รูปที่ 2.24 สัญญาณความเครียดที่ได้เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด

ซึ่งสำหรับมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.) และ บนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) จะยังคงให้ผลเหมือนกับกรณีที่ติดมาตรวัดความเครียดบนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) ที่กล่าวไปในข้างต้น และจากพฤติกรรมดังกล่าวที่เกิดขึ้นนั้น จะนำมาเป็นเกณฑ์ในการสร้างกราฟสัญญาณความเครียดเพื่อใช้ในการคำนวณหาความเร็วและระยะ ห่างระหว่างเพลา ซึ่งกราฟสัญญาณความเครียดดังกล่าวจะสร้างได้โดยการ "นำเอาค่าผลรวมของสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนเลนที่ 1 ลบออกด้วยค่าผลรวมของสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนเลนที่ 2" ดังแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.18

$$strain\ signal = \left(\Sigma \varepsilon_{x\#i}\right)_1 - \left(\Sigma \varepsilon_{x\#i}\right)_2 \qquad (2.18)$$

ซึ่ง $strain\ signal$ คือ ค่าสัญญาณความเครียดที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา

$\left(\Sigma \varepsilon_{x\#i}\right)_1$ คือ ค่าผลรวมของความเครียดในแนว x ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวที่ติดอยู่บนเลนที่ 1

$\left(\Sigma \varepsilon_{x\#i}\right)_2$ คือ ค่าผลรวมของความเครียดในแนว x ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวที่ติดอยู่บนเลนที่ 2

จากสมการที่ 2.18 จะได้ว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนเลนที่ 1 ค่า $strain\ signal$ จะมีค่าเป็นบวก เพราะผลรวมของความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดบนเลนที่ 1 จะสูงกว่าผลรวมของความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดบนเลนที่ 2 แต่ในทางกลับกันเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนเลนที่ 2 ค่า $strain\ signal$ จะมีค่าเป็นลบ อันเป็นผลเนื่องมาจากผลรวมของความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดบนเลนที่ 2 มีค่าสูงกว่าผลรวมของความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดบนเลนที่ 1 นั่นเอง ส่วนกรณีที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนกึ่งกลางสะพานจะให้ค่า $strain\ signal$ เป็นศูนย์ตลอด ซึ่งกรณีดังกล่าวจะไม่นำมาพิจารณาเพราะโอกาสในการเกิดนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีที่น้ำหนักเคลื่อนที่อยู่บนเลนที่ 1 หรือเลนที่ 2

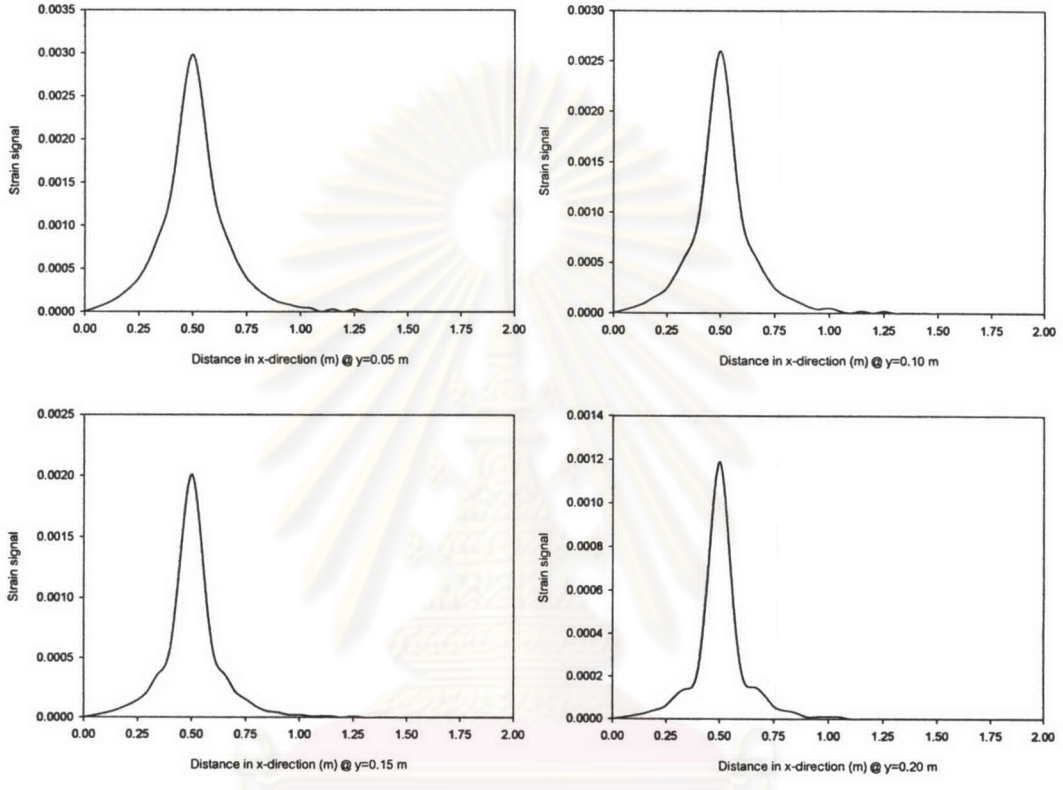
จากสมการที่ 2.18 จะได้กราฟสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทั้ง 3 หน้าตัดเมื่อน้ำหนักบรรทุกแบบจุดเคลื่อนที่บนเลนที่ 1 คือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>กรณีที่1</u> สัญญาณความเครียดจากมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.) ที่ได้จากสมการที่ 2.18 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.19

$$Strain\,signal = \left(\varepsilon_{x\#1} + \varepsilon_{x\#2} + \varepsilon_{x\#3} + \varepsilon_{x\#4}\right) - \left(\varepsilon_{x\#6} + \varepsilon_{x\#7} + \varepsilon_{x\#8} + \varepsilon_{x\#9}\right) \tag{2.19}$$

และแสดงได้ดังรูปที่ 2.25



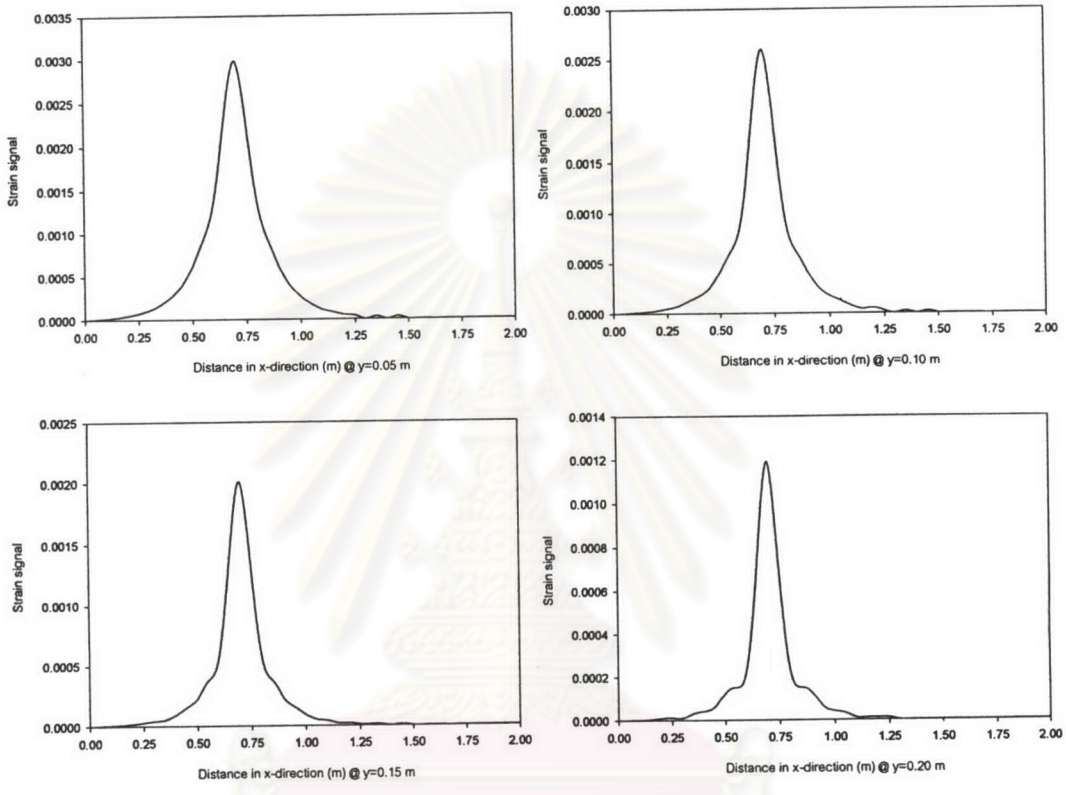
รูปที่ 2.25 สัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.19 ของมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>กรณีที่2</u> สัญญาณความเครียดจากมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) ที่ได้จากสมการที่ 2.18 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.20

$$Strain\,signal = \left(\varepsilon_{x\#10} + \varepsilon_{x\#11} + \varepsilon_{x\#12} + \varepsilon_{x\#13}\right) - \left(\varepsilon_{x\#15} + \varepsilon_{x\#16} + \varepsilon_{x\#17} + \varepsilon_{x\#18}\right) \tag{2.20}$$

และแสดงได้ดังรูปที่ 2.26



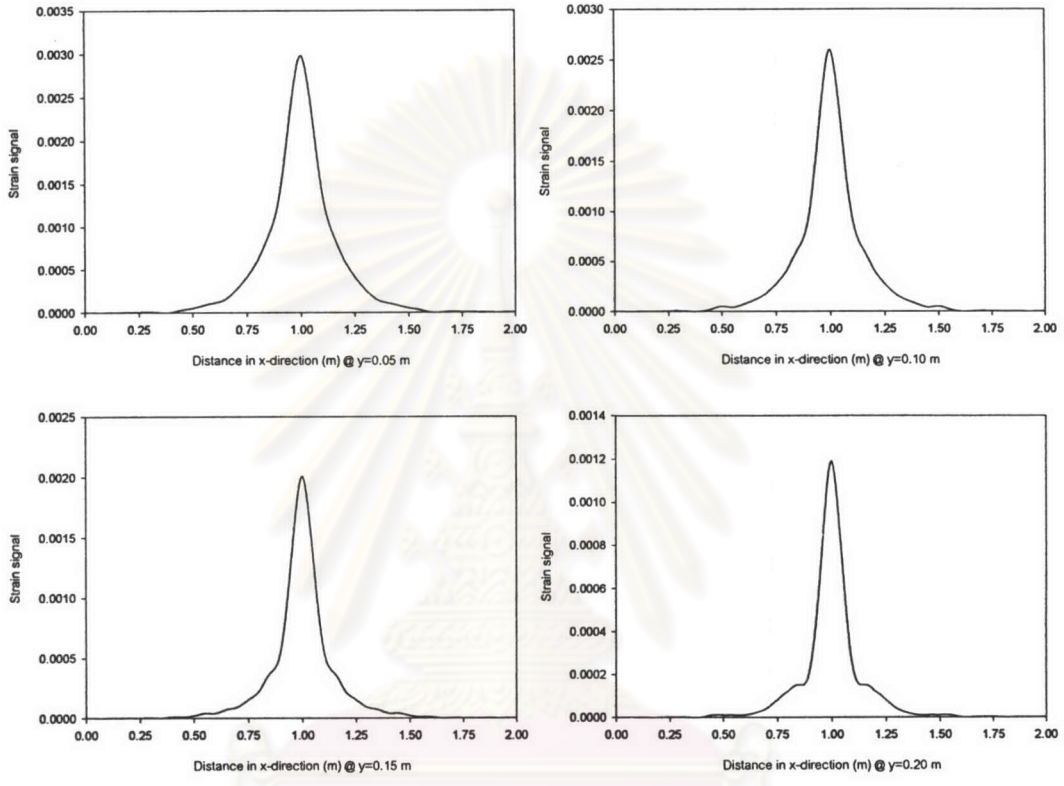
รูปที่ 2.26 สัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.20 ของมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>กรณีที่3</u> สัญญาณความเครียดจากมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนหน้าตัด x=L/2 (x=1 m) ที่ได้จากสมการที่ 2.18 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.21

$$Strain\,signal = \left(\varepsilon_{x\#19} + \varepsilon_{x\#20} + \varepsilon_{x\#21} + \varepsilon_{x\#22}\right) - \left(\varepsilon_{x\#24} + \varepsilon_{x\#25} + \varepsilon_{x\#26} + \varepsilon_{x\#27}\right) \tag{2.21}$$

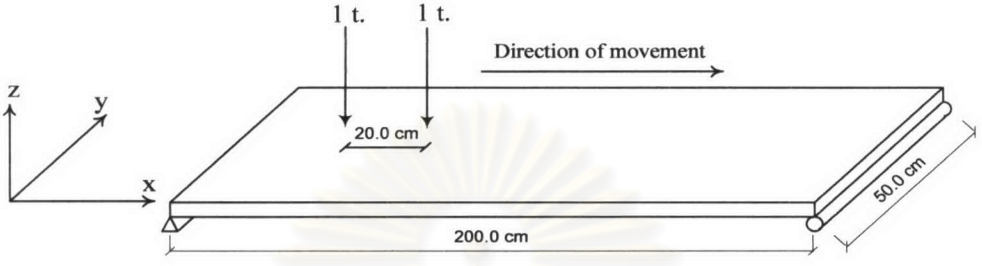
และแสดงได้ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 สัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.21 ของมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ

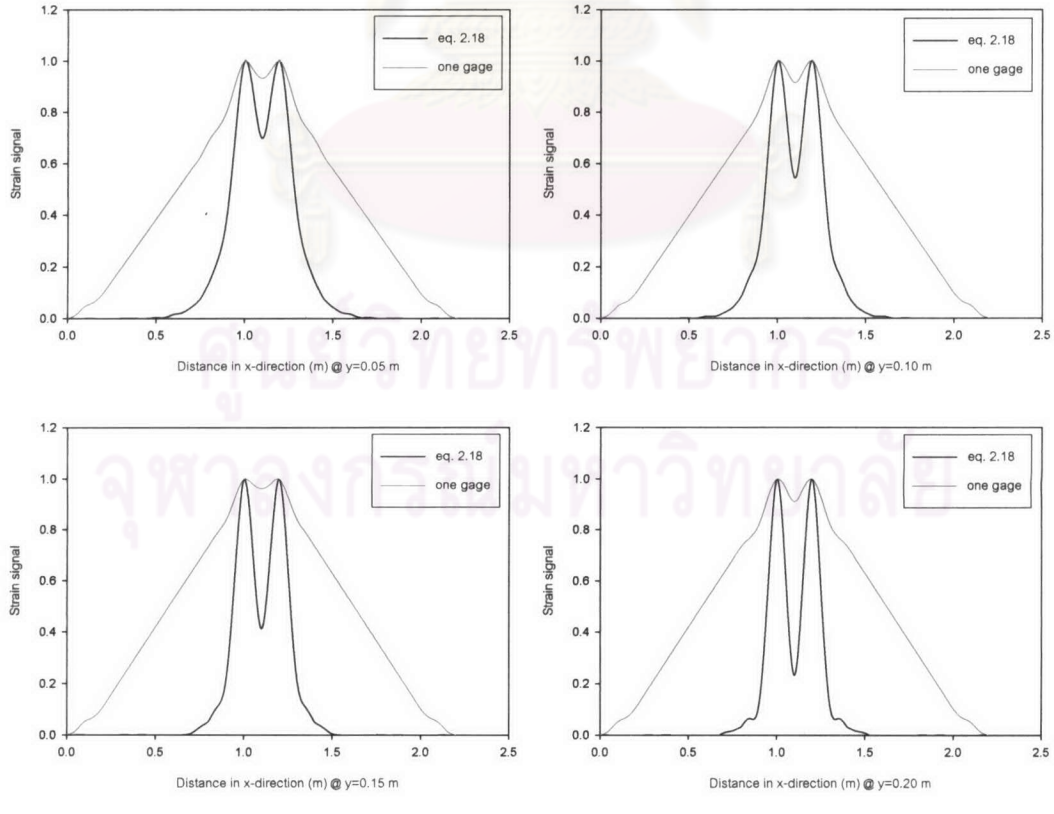
จากกราฟรูปที่ 2.25 ถึง รูปที่ 2.27 จะสังเกตได้ว่า เมื่อน้ำหนักบรรทุกแบบจุดเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ใดๆ สัญญาณความเครียดที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกัน คือ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ห่างจะหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด สัญญาณความเครียดที่ได้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่เข้าใกล้หน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดสัญญาณความเครียดที่ได้จะมีค่ามากขึ้น โดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียด

การเปรียบเทียบกราฟสัญญาณความเครียด ก่อนที่จะนำกราฟสัญญาณความเครียดที่สร้างขึ้นไปใช้คำนวณหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลานั้น จะต้องทำการเปรียบเทียบกราฟสัญญาณความเครียดที่สร้างขึ้นกับสัญญาณความเครียดทั่วไปที่นำมาใช้คำนวณเพื่อให้เห็นข้อดีและข้อเสียของสัญญาณความเครียดที่สร้างขึ้น โดยวิธีการเปรียบเทียบดังกล่าวจะทำการจำลองสะพานที่รับน้ำหนักบรรทุกแบบจุดที่มีเพลาหน้าและเพลาหลังหนักเพลาละ 1 ตัน โดยมีระยะห่างระหว่างเพลาเท่ากับ 20 ซม. กระทำ ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แบบจำลองสะพานที่รับน้ำหนักบรรทุกแบบจุดเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกราฟสัญญาณความเครียด

โดยน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวจะเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ แล้วจึงนำกราฟสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดตัวที่ถูกน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ผ่าน มาเปรียบเทียบกับกราฟสัญญาณความเครียดที่สร้างขึ้นจากสมการที่ 2.18 โดยกราฟสัญญาณความเครียดที่จะนำมาเปรียบเทียบจากทั้ง 2 วิธีนั้น จะถูกปรับให้มีขนาดมากที่สุดเท่ากับ 1 หน่วย โดยจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.29



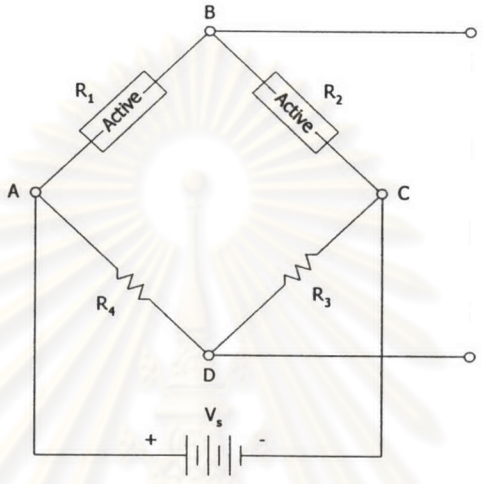
รูปที่ 2.29 การเปรียบเทียบสัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.18 และจากมาตรวัดความเครียดตัวที่ถูกน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านพอดี ของมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.)

ซึ่งรูปที่ 2.29 จะเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.18 และจากมาตรวัดความเครียดตัวที่ถูกน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านพอดี ของมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) โดยมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนหน้าตัด x=L/4 (x=0.5 ม.) และ บนหน้าตัด x=L/3 (x=2/3 ม.) ก็ยังคงให้กราฟสัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.18 เหมือนกันกับที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนหน้าตัด x=L/2 (x=1 ม.) โดยสัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.18 จะมีข้อดีกว่าคือ ลักษณะของกราฟสัญญาณจะสามารถระบุจุดเวลาที่ล้อหน้าและล้อหลังผ่านหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดได้แน่นอนกว่า และยังจะสามารถระบุจำนวนเพลาของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้ชัดเจนกว่าด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 การต่อมาตรวัดความเครียดในวงจรบริดจ์เพื่อใช้ในการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าการวัดการยืดหรือหดตัวของชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้าง (ความเครียด) จะอาศัยมาตรวัดความเครียดเป็นตัววัด โดยมาตรวัดความเครียดที่ใช้วัดความเครียดนั้นเป็นมาตรวัดความเครียดชนิดความต้านทานซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานในวงจรบริดจ์ที่ได้นำเสนอในภาคผนวก ก โดยวงจรบริดจ์ที่จะใช้ในการสร้างสัญญาณความเครียดที่ต้องการนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 วงจรบริดจ์ที่ใช้ในการต่อพวงมาตรวัดความเครียด

จากวงจรบริดจ์โดยทั่วๆไปเมื่อค่าความต้านทานของมาตรวัดความเครียดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปย่อมทำให้ค่าสัญญาณความต่างศักย์ที่วัดได้จากวงจรบริดจ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยดังสมการที่ 2.22

$$\Delta V_0 = \frac{r}{(1+r)^2}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}-\frac{\Delta R_2}{R_2}+\frac{\Delta R_3}{R_3}-\frac{\Delta R_4}{R_4}\right)\cdot V_s \qquad (2.22)$$

โดย ΔV_0 คือ ความต่างศักย์ของวงจรบริดจ์ที่เปลี่ยนแปลง (ความต่างศักย์ระหว่างจุด B และจุด D)

V_s คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายกระแสให้กับวงจรบริดจ์

r คือ อัตราส่วนระหว่าง R_2 ต่อ R_1

R_1 คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของมาตรวัดความเครียดที่ต่อเข้ากับขาที่ 1 ของวงจรบริดจ์

R_2 คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของมาตรวัดความเครียดที่ต่อเข้ากับขาที่ 2 ของวงจรบริดจ์

R_3 คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของมาตรวัดความเครียดที่ต่อเข้ากับขาที่ 3 ของวงจรบริดจ์

R_4 คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของมาตรวัดความเครียดที่ต่อเข้ากับขาที่ 4 ของวงจรบริดจ์

ΔR_1 คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของมาตรวัดความเครียดที่ต่อเข้ากับขาที่ 1 ของวงจรบริดจ์

ΔR_2 คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของมาตรวัดความเครียดที่ต่อเข้ากับขาที่ 2 ของวงจรบริดจ์

ΔR_3 คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของมาตรวัดความเครียดที่ต่อเข้ากับขาที่ 3 ของวงจรบริดจ์

ΔR_4 คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของมาตรวัดความเครียดที่ต่อเข้ากับขาที่ 4 ของวงจรบริดจ์

เมื่อ $r = R_2/R_1$, $\Delta R_3 = 0$ และ $\Delta R_4 = 0$ จะได้

$$\Delta V_0 = \frac{r}{(1+r)^2}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2}\right)\cdot V_s \qquad (2.23)$$

และสำหรับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของตัวมาตรวัดความเครียดเองนั้น จะมีความสัมพันธ์กับความเครียดที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 2.24

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon \qquad (2.24)$$

โดย R คือ ความต้านทานเริ่มต้นของมาตรวัดความเครียด

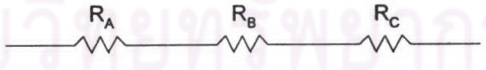
ΔR คือ ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของมาตรวัดความเครียดเมื่อมาตรวัดความเครียดเกิดการยืดหรือหดตัว

S_g คือ ค่าเกจแฟคเตอร์ (gage factor)

ε คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนตัวมาตรวัดความเครียด

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะสามารถเปลี่ยนสัญญาณความต่างศักย์ที่วัดได้จากวงจรให้เป็นสัญญาณความเครียดดังที่นำเสนอในข้อที่ 2.3 และสำหรับสัญญาณความเครียดที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอในหัวข้อที่ 2.3 เพื่อที่จะใช้ในการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลานั้น จะเป็นการนำมาตรวัดความเครียดที่อยู่บนหน้าตัดเดียวกันมาทำการต่อพ่วง ซึ่งจะเหมือนกับการนำตัวต้านทานมาต่อพ่วงกัน โดยการต่อตัวต้านทานจะมี 2 ลักษณะ คือ

การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.31

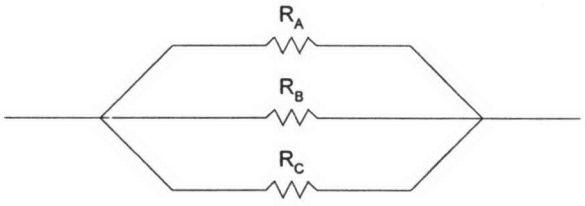


รูปที่ 2.31 แสดงลักษณะการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

จะได้ว่าค่าความต้านทานรวมจะเป็นไปตามสมการที่ 2.25

$$R_{total} = R_A + R_B + R_C \qquad (2.25)$$

การต่อตัวต้านทานแบบขนาน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

จะได้ว่าค่าความต้านทานรวมจะเป็นไปตามสมการที่ 2.26

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} \tag{2.26}$$

โดยสัญญาณความเครียดที่จะใช้ในการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลาในหัวข้อที่ 2.3 นั้นจะทำการพิจารณาเฉพาะกรณีที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนเลนที่ 1 หรือเลนที่ 2 เท่านั้น โดยสัญญาณความเครียดที่ได้จะแสดงได้ดังสมการที่ 2.27 ถึง สมการที่ 2.29 คือ

$$Strain\,signal = \left(\varepsilon_{x\#1} + \varepsilon_{x\#2} + \varepsilon_{x\#3} + \varepsilon_{x\#4}\right) - \left(\varepsilon_{x\#6} + \varepsilon_{x\#7} + \varepsilon_{x\#8} + \varepsilon_{x\#9}\right) \tag{2.27}$$

หรือ

$$Strain\,signal = \left(\varepsilon_{x\#10} + \varepsilon_{x\#11} + \varepsilon_{x\#12} + \varepsilon_{x\#13}\right) - \left(\varepsilon_{x\#15} + \varepsilon_{x\#16} + \varepsilon_{x\#17} + \varepsilon_{x\#18}\right) \tag{2.28}$$

หรือ

$$Strain\,signal = \left(\varepsilon_{x\#19} + \varepsilon_{x\#20} + \varepsilon_{x\#21} + \varepsilon_{x\#22}\right) - \left(\varepsilon_{x\#24} + \varepsilon_{x\#25} + \varepsilon_{x\#26} + \varepsilon_{x\#27}\right) \tag{2.29}$$

สำหรับมาตรวัดความเครียดที่ติดอยู่บนหน้าตัด x=L/4 , x=L/3 และ x=L/2 ตามลำดับ

ถ้าพิจารณาหน้าตัดที่ x=L/4 (x=1/2 ม.) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับค่าความต้านทานที่เปลี่ยน แปลงของมาตรวัดความเครียดดังสมการที่ 2.24 เมื่อนำค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดแต่ละตัวที่อยู่บนเลนเดียวกัน เช่น มาตรวัดความเครียดตัวที่ #1 ถึง #4 มารวมกันจะได้ว่า

$$\varepsilon_{x\#1} + \varepsilon_{x\#2} + \varepsilon_{x\#3} + \varepsilon_{x\#4} = \frac{1}{RS_g}\left(\Delta R_{\#1} + \Delta R_{\#2} + \Delta R_{\#3} + \Delta R_{\#4}\right) \tag{2.30}$$

ซึ่งจากพจน์ทางขวาของสมการที่ 2.30 จะพบว่าถ้าต้องการนำค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดแต่ละตัวมารวมกันจะต้องนำมาตรวัดความเครียดนั้นมาทำการต่อกันแบบอนุกรม ดังนั้นจึงทำการนำมาตรวัดความเครียดตัวที่ #1 ถึง #4 มาทำการต่อแบบอนุกรม แล้วต่อเข้าขาที่ 1 ของวงจรบริดจ์ ส่วนมาตรวัดความเครียด

ตัวที่ #5 ถึง #9 จะนำมาต่อแบบอนุกรมเช่นเดียวกัน แต่จะต่อเข้าขาที่ 2 ของวงจรซึ่งการต่อมาตรวัดความเครียดแบบอนุกรมนั้นจะได้ว่า

$$R_1 = R_{\#1} + R_{\#2} + R_{\#3} + R_{\#4} \quad \text{และ} \quad \Delta R_1 = \Delta R_{\#1} + \Delta R_{\#2} + \Delta R_{\#3} + \Delta R_{\#4} \tag{2.31}$$

$$R_2 = R_{\#6} + R_{\#7} + R_{\#8} + R_{\#9} \quad \text{และ} \quad \Delta R_2 = \Delta R_{\#6} + \Delta R_{\#7} + \Delta R_{\#8} + \Delta R_{\#9} \tag{2.32}$$

โดยมาตรวัดความเครียดทุกตัวที่ใช้จะมีค่าความต้านทานเท่ากัน คือ R ดังนั้นจะได้ว่า

$$R_1 = 4R \ , \ R_2 = 4R \ \text{และ} \ r = 1 \tag{2.33}$$

จะได้ว่า

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_{\#1} + \Delta R_{\#2} + \Delta R_{\#3} + \Delta R_{\#4}}{4R} \tag{2.34}$$

และ

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_{\#6} + \Delta R_{\#7} + \Delta R_{\#8} + \Delta R_{\#9}}{4R} \tag{2.35}$$

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปกับค่าความเครียดของมาตรวัดความเครียดแต่ละตัวดังสมการที่ 2.24 จะได้ว่า

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{S_g}{4}\left(\varepsilon_{\#1} + \varepsilon_{\#2} + \varepsilon_{\#3} + \varepsilon_{\#4}\right) \tag{2.36}$$

และ

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{S_g}{4}\left(\varepsilon_{\#6} + \varepsilon_{\#7} + \varepsilon_{\#8} + \varepsilon_{\#9}\right) \tag{2.37}$$

เมื่อแทนค่า $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ และ $\frac{\Delta R_2}{R_2}$ ในสมการที่ 2.23 จะได้ความสัมพันธ์ระห่างสัญญาณความเครียดที่วัดได้เพื่อใช้ในการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลาในหัวข้อที่ 2.3 กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปที่ได้จากวงจรบริดจ์ คือ

$$\Delta V_0 = \frac{V_s S_g}{16}\left[\left(\varepsilon_{\#1} + \varepsilon_{\#2} + \varepsilon_{\#3} + \varepsilon_{\#4}\right) - \left(\varepsilon_{\#6} + \varepsilon_{\#7} + \varepsilon_{\#8} + \varepsilon_{\#9}\right)\right] \tag{2.38}$$

หรือ

$$\left[\left(\varepsilon_{\#1} + \varepsilon_{\#2} + \varepsilon_{\#3} + \varepsilon_{\#4}\right) - \left(\varepsilon_{\#6} + \varepsilon_{\#7} + \varepsilon_{\#8} + \varepsilon_{\#9}\right)\right] = \frac{16\Delta V_o}{V_s S_g} \tag{2.39}$$

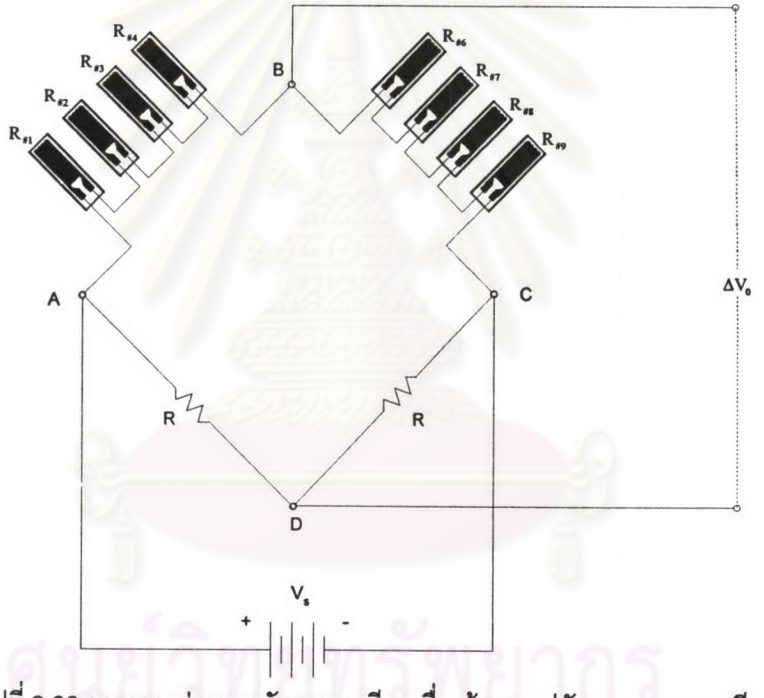
เมื่อทำโดยวิธีการเดียวกันกับหน้าตัด x=L/4 (x=1/2 ม.) สำหรับหน้าตัด x=L/3 (x=2/3ม.) และ x=L/2 (x=1 ม.) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความเครียดที่วัดได้เพื่อใช้ในการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลาในหัวข้อที่ 2.3 กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปที่ได้จากวงจรบริดจ์ คือ

$$\left[\left(\varepsilon_{\#10}+\varepsilon_{\#11}+\varepsilon_{\#12}+\varepsilon_{\#13}\right)-\left(\varepsilon_{\#15}+\varepsilon_{\#16}+\varepsilon_{\#17}+\varepsilon_{\#18}\right)\right]=\frac{16\Delta V_o}{V_s S_g} \tag{2.40}$$

และ

$$\left[\left(\varepsilon_{\#19}+\varepsilon_{\#20}+\varepsilon_{\#21}+\varepsilon_{\#22}\right)-\left(\varepsilon_{\#24}+\varepsilon_{\#25}+\varepsilon_{\#26}+\varepsilon_{\#27}\right)\right]=\frac{16\Delta V_o}{V_s S_g} \tag{2.41}$$

ซึ่งการที่จะได้มาซึ่งสัญญาณความเครียดดังกล่าวที่เป็นไปตามสมการที่ 2.39 , 2.40 และ 2.41 จำเป็นต้องทำการต่อมาตรวัดความเครียดดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 วงจรการต่อมาตรวัดความเครียดเพื่อสร้างกราฟสัญญาณความเครียดที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลา