การวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่เกิดจากยานพาหนะต่อการกระจายความเค้นและ ความถี่ธรรมชาติของเสาบอกทางจราจรโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Analysis of Vehicle-Induced Gusts Effect on Stress Distribution and Natural Frequency of Traffic Sign Post Using Finite Element Method

ธงชัย ฟองสมุทร¹ และ ประกอบ ชาติภุกต์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

โทร 053-944146 ต่อ 964¹, โทรสาร 053-944145¹, E-mail : Thongchai@dome.eng.cmu.ac.th¹, p_chartpuk@yahoo.com²

Thongchai Fongsamootr¹ and Prakorb Chartpuk²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University 239 Huay Kaew Rd.,Meaung, Chiang Mai 50200

Tel: 053-944146 Ext: 964¹, Fax: 053-944145¹, E-mail: Thongchai@dome.eng.cmu.ac.th¹, p_chartpuk@yahoo.com²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้น และความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นภายในเสาบอกทางจราจรแบบแขวนยื่น และวิเคราะห์ความเหมาะสมของขนาดโครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์ โดยนำผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์มาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์สองวิธีคือ วิธีการคำนวณ ตามสมการทางคณิตศาสตร์ และวิธีการทดสอบจริงกับเสาบอกทาง ้จราจรแบบแขวนยื่นจำลองที่มีขนาด 1 ใน 6 ของขนาดเสาบอกทาง จราจรจริง ภาระที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งสามวิธีกำหนดเป็นแรงเนื่องจาก ้น้ำหนักของตัวโครงสร้างเสาบอกทางจราจรเท่านั้น ซึ่งผลการ เปรียบเทียบที่ได้มีค่าความสอดคล้องกันทั้งสามวิธี โดยเฉพาะการ ้เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับวิธีการคำนวณตามสมการทางคณิตศาสตร์ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความ คลาดเคลื่อน 1เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์นั้นสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของเสาบอกทางจราจร แบบแขวนยื่นนี้ได้ สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นและความถี่ธรรมชาติ ในเสาบอกทางจราจรขนาดจริง ภาระที่เกิดขึ้นจริงนั้นมีองค์ประกอบมา ้จากสองส่วนหลักคือ แรงเนื่องจากน้ำหนักโครงสร้าง และความดันจาก แรงลมซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถยนต์ ภาระในแบบที่สองนี้ ้คิดคันโดย A.Sanz-Andres,et al. ซึ่งแสดงในรูปแบบสมการของแรงที่ ขึ้นกับเวลา กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงความดันของแรงที่กระทำกับป้าย ้จราจรอันเกิดขึ้นเนื่องมาจากการไหลที่ไม่คงที่เมื่อมีรถวิ่งผ่านไปในแต่ ละครั้ง โดยลักษณะของแรงขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 อย่าง คือขนาดของป้าย บอกทางจราจร พื้นที่หน้าตัดของตัวรถ และระยะระหว่างป้ายจราจรกับ

ตัวรถ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในเสา บอกทางจราจรขนาดจริงนี้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 52.5 เมกกะปาสคาล ที่ บริเวณโคนของเสา มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 4.5 แต่ถ้าพิจารณา ชิ้นส่วนหลักอื่น ๆ จะพบว่ามีค่าความปลอดภัยสูงถึง 6.7 และความถึ่ ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1.69 เฮริทซ์ จึงสรุปได้ว่า ขนาดของเสาบอก ทางจราจรแบบแขวนยื่นที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งสร้างขึ้นโดยยึดตามแบบของ กรมทางหลวงนั้น มีขนาดที่ใหญ่เกินความเหมาะสม และได้ออกแบบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาใหม่จาก 318.5 เป็น 267.4 มิลลิเมตร และลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของคานจาก 165.2 เป็น 139.8 มิลลิเมตร ส่งผลให้มีค่าความปลอดภัยใหม่เป็น 3.5 และ 3.3 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดชิ้นส่วนอื่น ๆ ให้เป็นไปตามที่กรมทาง หลวงได้กำหนดไว้แต่เดิม

Abstract

This research is an analysis of stress distribution and natural frequency in the overhanging traffic sign post and analyzed appropriate of structure by using finite element method. The FEA results were compared with the closed form equation results and the experiment results, the overhanging traffic sign post with model 1:6 of real size. The analyzed methods were force by reason between of body force and traffic sign structure only. The compared results showed a good agreement between three methods. Especially, the compared results between the FEA and closed form equation results are much closed. The percent error

ME NETT 20th หน้าที่ 473 CST015

between these two methods is 1%. Therefore, we can conclude that the Finite Element analysis model of traffic sign post can be used for solving any problems of this traffic sign post. The analyzed load of stress and natural frequency of real size of overhanging traffic post. Therefore body force and vehicle induced force on traffic sign panel which prove by A.Sanz-Andres, et al. The equation of vehicle induced force show that in form force depend time. The vehicle induced force on traffic sign panel was change of unsteady flow when a vehicle passes closed to traffic sign panel. The characteristic of force is proportional to a parameter that involves the sign size, the vehicle cross-section area and the distance of the sign to the middle plane of the vehicle. The analyzed results of real size of the overhanging traffic sign post showed that the maximum stress occurred at the main pole of the traffic sign post is about 52.5 MPa. The maximum stress can be use to determine the value of safety factor. It is showed that the safety factor of this traffic sign post is about 4.5. And for other main parts of the traffic sign post, the highest safety factor is about 6.7 and minimum natural frequency is about 1.69 Hz. It can be concluded that the size of traffic sign panel at present was oversize. Therefore we can reduce outside diameter size of column from 318.5 to 267.4 millimeter. And reduce outside diameter size of beam from 165.2 to 139.8 millimeter. The affect of safety factors were 3.5 and 3.3 respectively. The detail of other part still used classical pattern.

1. บทนำ

ป้ายจราจรเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องหมายจราจร ตามประกาศ คณะกรรมการการจัดระบบจราจรทางบก ซึ่งใช้ติดตั้งในเขตทางหลวง หรือถนนต่างๆ ทำหน้าที่ในการบังคับควบคุม เตือน และแนะนำ รวมทั้งให้ข้อมูลข่าวสารที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ทาง ในงานวิจัยนี้ได้ให้ ความสำคัญกับโครงสร้างรองรับป้ายจราจรแบบโครงยื่น ดังรูปที่ 1 ซึ่ง เรียกว่า เสาบอกทางจราจรแบบแขวนยื่น (Overhanging Traffic Sign) โดยจะได้ทำการศึกษาถึงค่าความปลอดภัยของเสาบอกทางจราจร ้ดังกล่าว เพื่อเป็นการยืนยันถึงความปลอดภัยของเสาบอกทางจราจรใน ้ลักษณะดังกล่าว เนื่องจากเสาบอกทางจราจรแบบแขวนยื่นที่ใช้อยู่นั้นมี ความซับซ้อนในส่วนของโครงสร้างค่อนข้างมาก ในการคำนวณโดยใช้ สมการทางคณิตศาสตร์ก็สามารถทำได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น โดยที่ยังมี ข้อจำกัดในบางส่วน ตัวอย่างเช่นไม่สามารถที่จะรวมเอารายละเอียด ของเสาไปได้มากนัก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้วิธีอื่นเข้ามาช่วย ในการวิเคราะห์โครงสร้างดังกล่าว วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) เป็นวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างวิธีหนึ่งที่ได้รับความ ้นิยมในปัจจุบัน ซึ่งมีการนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างโดยทั่วไปที่มี ้ความสลับซับซ้อนและได้ผลดี อีกทั้งวิธีนี้สามารถแสดงผลลัพธ์ที่ได้ ้ออกมาได้อย่างชัดเจน ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้ดียิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น การแสดงเป็นภาพของการกระจายตัวของความเค้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้เลือกที่จะใช้วิธีไฟไนด์เอลิเมนด์ในการวิเคราะห์โครงสร้างของเสา บอกทางจราจรแบบแขวนยื่นดังกล่าวต่อไป



รูปที่ 1 เสาบอกทางจราจรแบบแขวนยื่น (Overhanging Traffic Sign)

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะมี การเน้นหนักไปที่การศึกษาผลของลมที่มีผลต่อป้ายบอกทางจราจรเสีย ส่วนใหญ่และจะเป็นลักษณะของการคำนวณทางตัวเลขเท่านั้น A.D.Quinn, et al.[1] ได้ทำการทดสอบและวัดแบบเต็มรูปแบบ (Full Scale Measurements) เพื่อเก็บข้อมูลเกี่ยวกับแรงลมที่เกิดจากการ เคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะกระทำกับป้ายจราจรและแผงกั้นคนเดิน ถนน ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแรงที่เกิดจากลมสามารถคิดแยก ้ส่วนออกจากแรงที่เกิดจากยานพาหนะ เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านของ ยานพาหนะส่วนมากจะสร้างสนามความดันขนาดสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ้อันเกิดจากการเคลื่อนตัวของยานพาหนะที่สัมพัทธ์กับป้ายจราจร แต่ ไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนตัวของอากาศโดยปกติทั่วไป จากการศึกษา A.D.Quinn, et al. สรุปว่า ลักษณะรูปร่างของป้ายจราจรจะไม่มีอิทธิพล ที่มีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์ของแรงโดยรวมที่เกิดจากยานพาหนะ เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ของแรงถูกอ้างจากความเร็วของยานพาหนะและ พื้นที่ของตัวป้ายจราจร เกณฑ์อีกข้อหนึ่งที่มีอิทธิพลสำคัญเช่นกันได้แก่ การตั้งหัว (Orientation) ของป้ายจราจรเมื่อเทียบกับทิศทางการเคลื่อน ้ตัวของยานพาหนะ ป้ายจราจรที่วางตั้งฉากกับแนวถนนจะพบกับแรง ้สูงสุดในทิศตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนตัวของยานพาหนะ ซึ่ง เกิดขึ้นใกล้ๆ กับขณะที่ขอบของยานพาหนะส่วนที่อย่ด้านหน้า (Vehicle Leading Edge) เคลื่อนผ่านป้ายจราจร ในขณะที่ป้ายจราจรที่ ้วางขนานกับทิศทางของถนนมีลักษณะโยกตัวออกห่างจากถนนเมื่อ ยานพาหนะกำลังเคลื่อนที่เข้าหาและยื่นเข้าหาถนนเมื่อขอบของ ยานพาหนะส่วนที่อยู่ด้านหน้าเคลื่อนผ่านป้ายจราจร และจากการวิจัย ของ Philip M.Cali and Eugene E.Covert [2] น้ำเสนอผลการทดสอบ กับป้ายจราจรและแบบจำลองยานพาหนะที่มาตราส่วน 1:30 สำหรับ ภาระในแนวระดับที่เกิดกับโครงสร้างป้ายจราจรบนถนนทางหลวงแบบ ติดตั้งเหนือศีรษะ (Overhead Highway Sign Structures) อันมาจาก กระแสลมที่เกิดจากแบบจำลองยานพาหนะที่เคลื่อนตัวลอดผ่านป้าย ้จราจร มีการทดสอบค่าในหลายๆ เกณฑ์ เช่นมีการพิจารณาความเร็ว ของยานพาหนะ รูปร่าง ความยาวของยานพาหนะ และความสูงของ ป้ายจราจร ในการทดสอบดังกล่าว มีการแยกแยะและระบุลักษณะของ

18-20 October 2006, Mandarin Golden Valley Hotel & Resort Khao Yai, Nakhon Ratchasima

CST015

ภาระประเภทต่างๆ ซึ่งดูเหมือนจะครอบคลุมยานพาหนะทุกประเภท ได้แก่ ภาระสูงสุดที่ปรากฏในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนตัวของ ยานพาหนะ และเกิดขึ้นเมื่อขอบของยานพาหนะส่วนที่อยู่ด้านหน้า ้เคลื่อนตัวเข้าใกล้กับส่วนหน้าของป้ายจราจร และหลังจากนั้นก็สามารถ ระบุแรงลมที่เปลี่ยนแปลงในป้ายจราจรได้ เช่นเดียวกับที่ A.D.Quinn, et al. ระบุไว้ ในขณะที่มีชุดข้อมูลจากการทดลองเพียงจำนวนจำกัด A.D.Quinn, et al., Philip M.Cali and Eugene E.Covert ยังขาด แบบจำลองทางทฤษฎีที่จะช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ และ ต่อมา A.Sanz–Andres, et al.[3] ได้นำเสนอแบบจำลองทางทฤษฏี แบบง่ายๆ เป็นการนำเสนอในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่ง สมการที่ได้สามารถอธิบายพฤติกรรมของแรงที่กระทำได้ คือการ เปลี่ยนแปลงความดันของแรงที่กระทำกับป้ายจราจรเกิดขึ้น เนื่องมาจากการใหลที่ไม่คงที่เมื่อมีรถวิ่งผ่านไปในแต่ละครั้ง โดย ลักษณะของแรงลมจะขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 อย่างคือขนาดของป้ายบอก ทางจราจร พื้นที่หน้าตัดของตัวรถและระยะระหว่างป้ายบอกทางจราจร กับตัวรถ โดยมีเป้าหมายในการอธิบายปรากฏการณ์ที่สังเกตพบในการ ทดลองที่ได้ดำเนินไปข้างต้น แม้ว่ารูปแบบที่พัฒนาขึ้นจะเป็นแบบง่ายๆ ทว่าผลทางทฤษฎี (Theoretical Results) ก็ยังสามารถทำให้คาดหมาย ได้ถึงค่าของเกณฑ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้อย่างใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก การสังเกตในการทดลอง ซึ่งสิ่งนี้เองทำให้เราพอจะมองเห็นความ เป็นไปได้ของการพัฒนาแบบจำลองที่มีรายละเอียดมากยิ่งขึ้นต่อไปใน อนาคต สำหรับทั้งยานพาหนะและรูปแบบทางเรขาคณิตของป้ายจราจร ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้นำสมการทางคณิตศาสตร์ของ A.Sanz– Andres, et al.มาประยุกต์ใช้ในการกำหนดภาระที่เกิดขึ้นกับป้ายจราจร เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้น ภายในเสาบอกทางจราจรแบบแขวนยื่นโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นอกเหนือจากนี้ จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับรอยต่อของเสา เช่น Osman Hag Elsafi,et al.[4] ได้ทำการออกแบบฐานรองรับเสาและ ฐานรองรับคานยื่นแบบใหม่โดยใช้ทฤษฏีการโก่งของคาน แผ่นบางและ การบิด สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์เกี่ยวกับแรง โมเมนต์ และความเค้นซึ่งค่าที่คำนวณเหล่านี้ จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของตัว ฐานรองรับ โครงสร้างของเสาโดยรวมและภาระภายนอก ฐานแบบใหม่ นี้ มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสใช้สลักเกลียวยึด 4 จุด นำสมการทาง คณิตศาสตร์ไปเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณ และออกแบบได้เร็วยิ่งขึ้น สามารถหาความเค้นที่สลักเกลียวและขนาด ของฐานรองรับ อีกทั้งยังมีการเปรียบเทียบค่าความหนาที่ออกแบบมา กับระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้ค่าความหนาที่ใกล้เคียงกันมาก จึงได้นำเสนอโปรแกรมการคำนวณที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ไว้ออกแบบเกี่ยวกับ ตัวฐานรองรับ

การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในเสาบอกทางจราจร ขนาด 1 ใน 6 จากขนาดจริง

การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในเสาบอกทางจราจรจะ แยกออกเป็น 3 วิธีคือ 1.การทดลอง 2.การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟในต์เอลิ เมนต์(FEM) และ 3.การคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ทั้งสามวิธี นี้จะใช้วิเคราะห์กับเสาบอกทางจราจรขนาด 1 ใน 6 จากขนาดจริง เพื่อ ยืนยันความถูกต้องและยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์ด้วย FEM ซึ่งมี รายละเอียดในแต่ละวิธีดังนี้

2.1 การหาความเค้นและความเครียดจากการทดลอง

2.1.1 การสร้างเสาบอกทางจราจร

การสร้างเสาบอกทางจราจรจะกำหนดมาตราส่วนจากของจริง 1 ใน 6 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดมาตรฐานของวัสดุที่มีการผลิตอยู่ในปัจจุบัน โดยอ้างอิงแบบการสร้างของจริงจากกรมทางหลวง และต้องคำนึงถึง ขนาดชิ้นส่วนทั้งหมดของตัวเสาบอกทางจราจรว่าเมื่อลดขนาดลง มาแล้วได้มาตราส่วนเท่ากันทุกชิ้นส่วน ซึ่งต้องเลือกใช้ Stainless Steel Grad 304 ในการสร้างทั้งหมด

2.1.2 วิธีการทดลองเสาบอกทางจราจร

นำเสาบอกทางจราจรที่สร้างมากำหนดจุดที่จะติดตั้ง Strain Gages โดยแยกเป็นสองแนวที่ตรงข้ามกันแนวละ 3 จุดให้แนวที่หนึ่ง เป็นมุมมองซ้ายซึ่งมีจุดที่ 1, 2 และ 3 อยู่สูงจากฐานเสา 75, 370 และ 815 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนแนวที่สองเป็นมุมมองขวาซึ่งมีจุดที่ 4, 5 และ 6 อยู่สูงจากฐานเสา 815, 370 และ 75 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูป ที่ 2 โดยต้องติดตั้งในสภาวะที่เสาไม่เกิดการแอ่นโดยใช้ Strain Gages KYOWA ชนิด KFG-5-120-C1-11L3M2R มี Gage Resistance เท่ากับ 120.0-120.8 Ω ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 24 °C, 50 %RH เครื่องมือที่ใช้อ่านค่าความเครียดคือ Strain Indicator Model SM -60D และ Switching Balance Box SS 24 R หลักการหาค่า ความเครียดคือต้องปรับค่าความเครียดให้เป็นศูนย์เมื่อเสาไม่แอ่นและ ทำการอ่านค่าความเครียดเมื่อเสาตั้งตรงโดยรับภาระเป็นน้ำหนักของ ตัวโครงสร้างเสาบอกทางจราจร



รูปที่ 2 (ก) ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain Gages (ข) การติดตั้งเครื่องมือ ตรวจวัดและอ่านค่าความเครียดขณะเสาแอ่น

2.2 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องสร้าง แบบจำลองสามมิติด้วยมาตราส่วน 1 : 6 เช่นเดียวกับการทดลองโดย ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks ซึ่งขนาดต่างๆของเสาต้องวัดมาจาก ขนาดของเสาที่ใช้ในการทดลอง การวิเคราะห์ได้เลือกใช้โปรแกรม สำเร็จรูป Cosmos โดยมีขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังนี้

ME NETT 20th หน้าที่ 475 CST015

18-20 October 2006, Mandarin Golden Valley Hotel & Resort Khao Yai, Nakhon Ratchasima

CST015

2.2.1 การ Pre-Processing กำหนดคุณสมบัติของวัสดุเป็นชนิด ยึดหยุ่นเชิงเส้นและมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง โดย ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 193 กิกกะปาสคาล อัตราส่วน-ปัวซองเท่ากับ 0.3 ความแข็งแรงทางแรงดึงเท่ากับ 520 เมกกะ ปาสคาล ความหนาแน่นทางมวลเท่ากับ 8000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร กำหนดภาระเป็นแรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างเสาบอก ทางจราจรเท่านั้น เอลิเมนต์ที่เลือกใช้คือ Ten Nodes Tetrahedral (3D Solid Element) และ Six Nodes Tetrahedral (Shell Element) ซึ่ง เหมาะสมกับแบบจำลองที่มีขอบโค้งและรูปร่างชับซ้อน จำนวนเอลิ เมนต์ที่ใช้คือ 88600, 111000, 132000, 163000 และ 214000 เอลิ เมนต์

2.2.2 การ Solve-Processing วิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหา เวกเตอร์ของการขจัดรวม ความเค้น และความเครียด

2.2.3 การ Post-Processing โดยค่าความเค้นและความเครียดที่ นำเสนอต้องเป็นความเค้นและความเครียดที่ผิวนอกสุดในทิศทางตาม ความยาวเสาสอดคล้องกับตำแหน่งในการหาค่าความเค้นและ ความเครียดในการทดลอง

2.3 การคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

การคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียดด้วยสมการทาง คณิตศาสตร์ โดยกำหนดภาระที่เกิดขึ้นเป็นแรงเนื่องจากน้ำหนักเสา บอกทางจราจร ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาจึงเกิดขึ้นจากแรงในแนวแกน เสาซึ่งเป็นแรงกดอัดและเกิดขึ้นจากโมเมนต์ดัด ดังนั้นต้องทำการรวม ความเค้นเข้าด้วยกันของแต่ละหน้าตัดเสาในทิศทางตามความยาวเสา เมื่อวัดเทียบจากฐานเสาขึ้นไป น้ำหนักเสาจะมีค่าลดลงตามระยะที่มาก ขึ้น ต้องทำการหาค่าน้ำหนักเสาพร้อมกับจุดศูนย์กลางมวลในแต่ละ หน้าตัดออกมา โดยแต่ละหน้าตัดจะมีระยะห่างเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เริ่มต้นที่ระยะจากฐานเสาบอกทางจราจร (พิกัด x = y = z = 0) เท่ากับ 75 มิลลิเมตร และสิ้นสุดที่ระยะความสูงของเสาบอกทางจราจรเท่ากับ 815 มิลลิเมตร ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์หามวลของแบบจำลอง นั้นคือค่าความหนาแน่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 8,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร และทำการหาค่าต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 3 แสดงตัวแปรทางกายภาพสำหรับหน้าตัดเสาบอกทางจราจร

พิจารณารูปที่ 3 แสดงการกำหนดตัวแปรทางกายภาพที่หน้าตัด ใด ๆ ของเสาบอกทางจราจรและมีความหมายต่าง ๆ ดังนี้

- X คือ พิกัดในแนวแกน X
- Z คือ พิกัดในแนวแกน Z
- X_i คือ ดำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของโครงสร้างเสาบอกทางจราจรใน
 แนวแกน X ที่หน้าตัดใดๆ

- Z_i คือ ดำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของโครงสร้างเสาบอกทางจราจรใน แนวแกน Z ที่หน้าตัดใด ๆ
- r; คือ ความยาวเชิงเส้นที่หน้าตัดใด ๆ จากตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล ของโครงสร้างเสาบอกทางจราจรถึงจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเสา บอกทางจราจร
- $heta_i$ คือ มุมของความยาวเชิงเส้น r_i ที่หน้าตัดใด ๆ เทียบกับแกน X
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาบอกทางจราจร
- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเสาบอกทางจราจร
- *a*, คือ ดำแหน่งใด ๆ ที่ผิวนอกสุดของเสาบอกทางจราจรในแนวความ
 ยาวเชิงเสัน *r*; ซึ่งอยู่ในทิศทางแกน -X
- b, คือ ดำแหน่งใด ๆ ที่ผิวนอกสุดของเสาบอกทางจราจรในแนวความ
 ยาวเชิงเส้น r; ซึ่งอยู่ในทิศทางแกน +X
- c, คือ ดำแหน่งใด ๆ ที่ผิวนอกสุดของเสาบอกทางจราจรในแนวแกน
 X และอยู่ในแนวที่ 1 (Left View)
- *d*_i คือ ดำแหน่งใดๆ ที่ผิวนอกสุดของเสาบอกทางจราจรในแนวแกน
 X และอยู่ในแนวที่ 2 (Right View)
- e_i และ f_i คือ ตำแหน่งใดๆ ที่ผิวนอกสุดของเสาบอกทางจราจร ทั้งสอง ดำแหน่งนี้มีแนวทำมุม θ_i เทียบกับแกน Z ในทิศทางตามเข็ม นาพิกา

กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของเสาเท่ากับ A และโมเมนต์ที่สองของ พื้นที่รอบแกน e_i , f_i เท่ากับ I ในกรณีที่พิจารณาแรงในแนวแกน เท่านั้นจะทำให้เกิดความเค้นอัดในเสาตามความยาวเสา ดังนั้นจะได้

$$\sigma_p = -\frac{P}{A} \tag{1}$$

และในกรณีที่พิจารณาโมเมนต์เท่านั้นก็จะทำให้เกิดความเค้นในทิศทาง ตามแนวยาวของเสาเช่นกัน จะได้

$$\sigma_m = \pm \frac{MC}{I} \tag{2}$$

ดังนั้นความเค้นรวมที่เกิดขึ้นในเสาเท่ากับ

$$\sigma = -\frac{P}{A} \pm \frac{MC}{I} \tag{3}$$

เมื่อโมเมนด์ที่สองของพื้นที่เท่ากับ $\pi (D^4 - d^4)/64$ และพื้นที่หน้าดัด เสาเท่ากับ $\pi (D^2 - d^2)/4$

3. ผลการเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดจากวิธีต่าง ๆ

ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดนี้มี จุดประสงค์เพื่อยืนยันความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองทาง คอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SolidWorks และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cosmos โดยนำผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนด์เอลิเมนต์ไป เปรียบเทียบความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดลอง และการ คำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เมื่อผลการวิเคราะห์ทั้งสามวิธี ให้ผลที่สอดคล้องกัน จึงนำวิธีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม SolidWorks และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cosmos

ไปใช้ในการสร้างและวิเคราะห์กับเสาบอกทางจราจรที่มีขนาดจริงตาม แบบของกรมทางหลวงต่อไป โดยมีการเปรียบเทียบของผลการ วิเคราะห์ทั้งสามวิธีดังแสดงในรูปที่ 4-5 และมีรายละเอียดดังนี้

 จากรูปที่ 4-5 และรูปที่ 2 (ก) ความเค้นที่หาได้ในแต่ละแนว โดยใช้วิธีการที่ต่างกันดังกล่าว ข้างดันให้ผลที่สอดคล้องกันอย่างมาก ในช่วงความยาวเสาประมาณ 75-800 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบการ วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมการทางคณิตศาสตร์และการ ทดลองให้ผลที่แตกต่างกัน 1 เปอร์เซ็นต์ และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

 จากรูปที่ 4-5 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ สามารถอธิบายการกระจายความเค้นและให้ผลที่ถูกต้องในช่วงระยะ ความยาว 75-800 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการกระจายความเค้นตลอดความยาวเสาในแนวที่ หนึ่ง (มุมมองด้านช้าย)





 ที่ระยะความยาวเสา 0-75 มิลลิเมตรและ 815-1230 มิลลิเมตร การวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เบื้องดันไม่สามารถอธิบาย การกระจายความเค้นของเสาบอกทางจราจรได้ทั้งหมด ซึ่งเป็นปัญหา มาจาก End Effect ทั้งสองด้านของปลายเสาตามหลักการของ Saint -Venant ดังนั้นการหาความเค้นในทุกส่วนของเสาที่ซับซ้อนนี้ จำเป็นต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟในต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ความเค้นและความถี่ธรรมชาติในเสาบอกทาง จราจรขนาดจริงและผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ความเค้นและความถี่ธรรมชาติของเสาบอกทาง จราจรขนาดจริงจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของ เสาบอกทางจราจรด้วยโปรแกรม SolidWorks โดยใช้ขนาดของเสาเป็น ขนาดจริงอ้างอิงตามแบบของกรมทางหลวง (สำนักงานนโยบายและ แผนการขนส่งและจราจร. 2548) และกำหนดค่าคุณสมบัติทางกลตาม ชนิดของวัสดุที่นำมาสร้างเสาบอกทางจราจรจริงคือวัสดุ JIS G3444 Grad STK41 และสำหรับแผ่นป้ายจราจรทำมาจากวัสดุ ASTM A36 Steel ซึ่งวัสดุทั้งสองเป็นวัสดุชนิดยึดหยุ่นเชิงเส้นและมีคุณสมบัติทาง กลเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง โดยมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง ที่ 1 ภาระที่กระทำกับโครงสร้างมีสองแบบคือ ภาระเนื่องจากน้ำหนัก ของตัวโครงสร้างเสาบอกทางจราจรและภาระแรงลมที่เกิดจากการ เคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะที่คิดค้นโดย A.Sanz-Andres, et al.[3] แสดงในรูปแบบสมการของแรงที่ขึ้นกับเวลาดังที่กล่าวไว้ในบทนำซึ่งมี รูปสมการดังสมการ (4)

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่ใช้สร้างเสาบอกทางจราจร และแผ่นป้ายจราจร

Material Name	Tensile Strength (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Strength (MPa)	Mass Density (kg/m ³)	Elastic Modulus (GPa)
JIS G3444 STK41	402	0.3	235.4	7850	200
ASTM A 36 Steel	400	0.26	250.0	7850	200

$$F_{C} = \frac{\rho h B^{2} U_{\infty}^{2} A_{b}}{4} \left\{ \frac{2 U_{\infty}^{2} t^{2} - d^{2}}{\left[\left(U_{\infty} t \right)^{2} + d^{2} \right]^{5/2}} \right\}$$
(4)

พิจารณาสมการ (4) มีตัวแปรต่างๆ ซึ่งมีค่าและความหมายดังนี้

- ρ คือ ความหนาแน่นทางมวลของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.2 กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร
- h คือ ความสูงของตัวแผ่นป้ายจราจรเท่ากับ 2.4 เมตร
- *B* คือ ครึ่งของความกว้างของป้ายจราจรเท่ากับ 1.75 เมตร
- U_∞ คือ ความเร็วสูงสุดของรถบรรทุกเท่ากับ 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- d คือ ระยะจากจุดกึ่งกลางของพื้นที่หน้าตัดรถยนต์ถึงจุดกึ่งกลางของ
 ป้ายจราจรในแนวระนาบหรือแนวดิ่งเท่ากับ 4.5 เมตร
- A_b คือ สองเท่าของพื้นที่หน้าตัดรถบรรทุกเท่ากับ 18.75 ตารางเมตร เมื่อความสูงหน้าตัดรถเท่ากับ 3.75 เมตร และความกว้างหน้า ตัดรถเท่ากับ 2.5 เมตร
- t คือ เวลามีหน่วยเป็นวินาที โดยเริ่มที่ -1 ถึง 1 วินาที

จากการแทนค่าลงในสมการ (4) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงเทียบ กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของแรงลมเทียบกับเวลา

ME NETT 20th หน้าที่ 477 CST015

School of Mechanical Engineering , Suranaree University of Technology

The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand

18-20 October 2006, Mandarin Golden Valley Hotel & Resort Khao Yai, Nakhon Ratchasima

CST015

เอลิเมนต์ที่เลือกใช้คือ Ten Nodes Tetrahedral (3D Solid Element) และ Six Nodes Tetrahedral (Shell Element) มีขนาด 30 มิลลิเมตร และมีจำนวน 170,535 เอลิเมนต์ จากการวิเคราะห์สามารถ แสดงตำแหน่งการเกิดความเค้นสูงสุดและการกระจายของความเค้นที่ เกิดขึ้นในโครงสร้างเสาบอกทางจราจร ด้วยทฤษฏีพลังงานการเสียรูป สูงสุด (Distortion Energy Criterion) ได้ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งการเกิดความเค้นสูงสุดและการกระจายความเค้น ในเสาบอกทางจราจรด้วยขนาดที่ใช้อยู่จริงในปัจจุบัน



รูปที่ 8 แสดงตำแหน่งการเกิดความเค้นสูงสุดและการกระจายความเค้น ในคานยื่นด้วยขนาดที่ใช้อยู่จริงในปัจจุบัน

ตารางที่ 2 แสดงความเค้นสูงสุดและค่าความปลอดภัยของโครงสร้างที่ มีขนาดตามแบบกรมทางหลวง

Name Part	Outside Diameter (mm)	Thickness (mm)	Maximum Stress (MPa)	Maximum Displacement at Stress Head Column (MPa) (mm)	
Column	318.5	6.0	52.5	23.3	4.5
Beam	165.2	5.0	34.8	-	6.7

หมายเหตุ ขนาดพื้นที่ป้ายจราจรเท่ากับ 3,500 x 2,400 ตารางมิลลิเมตร

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเสา บอกทางจราจรที่มีขนาดตามแบบกรมทางหลวง

ลำดับรูปแบบการสั่น	1	2	3	4	5
ความถี่ (Hz)	1.69	1.73	4.64	7.94	12.53

ตารางที่ 4 แสดงผลของความเค้นสูงสุดและค่าความปลอดภัยจากการ ออกแบบขนาดเสาใหม่ร่วมกับขนาดของคานใหม่

Name Part	Outside Diameter (mm)	Thickness (mm)	Maximum Stress (MPa)	Displacement at Head Column (mm)	SF.
Column	267.4	6.0	66.1	35.3	3.5
Beam	139.8	4.5	70.0	-	3.3

หมายเหตุ ขนาดพื้นที่ป้ายจราจรเท่ากับ 3,500 x 2,400 ตารางมิลลิเมตร

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเสา บอกทางจราจรขนาดใหม่

ลำดับรูปแบบการสั่น	1	2	3	4	5
ความถี่ (Hz)	1.34	1.38	3.70	6.54	10.77

หมายเหตุ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาและคานเท่ากับ 267.4 และ 139.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 9 แสดงชื่อเรียกชิ้นส่วนเสาบอกทางจราจรและคานยื่นสำหรับการ ปรับเปลี่ยนขนาด

ผลการวิเคราะห์เสาบอกทางจราจรจรที่มีขนาดตามแบบของกรม ทางหลวงนั้น สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 2-3 ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้ เป็นผลที่ได้จากการพิจารณาความเป็นไปได้สูงสุดของภาระแรงที่ เกิดขึ้นอันมีตัวแปรเป็นไปดังกล่าวในตอนต้น เช่น ความเร็วสูงสุดของ รถ (ในที่นี้กำหนดเป็นรถบรรทุกขนาดใหญ่) โดยปกตินั้นภาระสูงสุดนี้ ้ไม่ได้เกิดขึ้นบ่อยครั้งนัก ในตารางที่ 2 เป็นการแสดงค่าความเค้นสูงสุด ที่เกิดขึ้นที่เสา(Column) มีค่าเท่ากับ 52.5 เมกกะปาสคาล และมีค่า ความปลอดภัยเท่ากับ 4.5 ซึ่งหากลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาจาก 318.5 ลงมาเป็น 267.4 มิลลิเมตร จะมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 66.1 เมกกะปาสคาล และค่าความปลอดภัยลดลงเป็น 3.5 อีกทั้งเมื่อ พิจารณาระยะแอ่นสูงสุดของเสาที่เปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 2 ผู้วิจัย ้เห็นว่าระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นนั้นยังอยู่ในเกณฑ์ 1/300 (ระยะแอ่นที่เกิดขึ้น เทียบกับความสูงของตัวเสา) ซึ่งจากที่กล่าวมาก็น่าจะมีความเหมาะสม แล้วสำหรับตัวเสาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาใหม่ คือ 267.4 ้มิลลิเมตร แต่หากพิจารณาต่อไปในตารางที่ 2 พบว่ามีบางชิ้นส่วนของ โครงสร้างเสาบอกทางจราจรที่มีขนาดใหญ่เกินความเหมาะสม เช่น ้คาน(Beam) ที่ต่อยื่นจากเสาตั้งหลักมีค่าความปลอดภัยสูงถึง 6.7

School of Mechanical Engineering , Suranaree University of Technology

ดังนั้นต้องทำการวิเคราะห์ใหม่ทั้งตัวเสาและตัวคานพร้อมกันซึ่งได้ผล ดังตารางที่ 4 และ 5 ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอนำเสนอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกของเสาและของคานที่เหมาะสมเป็น 267.4 และ 139.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่งผลให้มีค่าความปลอดภัยใหม่เป็น 3.5 และ 3.3 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดชิ้นส่วนอื่นๆให้เป็นไปตามที่กรมทางหลวง ได้กำหนดไว้แต่เดิม

5. สรุปผล

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมา เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สองวิธีคือ วิธีการคำนวณตาม สมการทางคณิตศาสตร์ และวิธีการทดสอบจริงกับเสาบอกทางจราจร แบบแขวนยื่นจำลองที่มีขนาด 1 ใน 6 ของขนาดเสาบอกทางจราจรจริง โดยที่ผลการเปรียบเทียบที่ได้มีค่าความสอดคล้องกัน โดยเฉพาะการ เปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับวิธีการ คำนวณตามสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความ คลาดเคลื่อน 1 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์นั้น สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างเสาบอก ทางจราจรแบบแขวนยื่นนี้ได้

ในการวิเคราะห์โครงสร้างเสาบอกทางจราจรแบบแขวนยื่นขนาด จริงด้วยวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลภายใต้เงื่อนไขดังนี้ 1). ภาระที่กระทำมีสองแบบคือภาระเนื่องจากน้ำหนักโครงสร้างเสา บอกทางจราจรและภาระแรงลมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านของ ยานพาหนะ ซึ่งยังไม่รวมภาระแรงลมที่เกิดจากกรรมชาติ 2). ยานพาหนะกำหนดเป็นรถบรรทุกที่มีขนาดความสูงเฉพาะหน้าตัด รถเท่ากับ 3.75 เมตร และความกว้างหน้าตัดรถเท่ากับ 2.50 เมตร รถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็ว 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยรถบรรทุกอยู่ห่าง จากป้ายจราจรเท่ากับ 4.50 เมตร

ป้ายจราจรมีขนาดกว้างดูณสูงเท่ากับ 3.50 × 2.40 m²

จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นสูงสุดของเสาบอกทางจราจร ้จะเกิดที่โคนเสา โดยมีระยะจากฐานเสาวัดขึ้นไปตามความยาวเสาหรือ ตามแกน Y เท่ากับ 278 มิลลิเมตร (เสาขนาดจริง) มีค่าความเค้นสูงสุด เท่ากับ 52.5 เมกกะปาสคาล ที่บริเวณโคนของเสาตั้งหลักดังรูปที่ 7 ซึ่ง เป็นตำแหน่งการเกิดความเค้นที่ไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วย สมการทางคณิตศาสตร์ได้ ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัย ้จะพบว่ามีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 4.5 แต่ถ้าพิจารณาชิ้นส่วนหลัก ้อื่นๆ เช่นในส่วนของคานยื่นที่ต่อจากเสาเพื่อยึดแผ่นป้ายจราจร มีค่า ความเด้นสูงสุดเท่ากับ 34.8 เมกกะปาสคาล และค่าความปลอดภัยใน ส่วนนี้มีค่าสูงถึง 6.7 ความถี่ธรรมชาติเกิดขึ้นต่ำสุดเท่ากับ 1.69 เฮริทซ์ ้จากการศึกษานี้สรุปได้ว่า ขนาดของเสาบอกทางจราจรแบบแขวนยื่นที่ ้ใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งสร้างขึ้นโดยยึดขนาดตามแบบของกรมทางหลวงนั้น มีขนาดใหญ่เกินไป สามารถที่จะลดขนาดเสาและคานลงได้ ผู้วิจัยจึงทำ การออกแบบขนาดเสาบอกทางจราจรและคานใหม่ และขอเสนอขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาบอกทางจราจรโดยลดขนาดลงจาก เดิม 318.5 เป็น 267.4 มิลลิเมตร และลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกของคานจากเดิม 165.2 เป็น 139.8 มิลลิเมตร ส่งผลให้ค่า ความปลอดภัยของเสาบอกทางจราจรและของคานลดลงเป็น 3.5 และ

3.3 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดชิ้นส่วนอื่น ๆ ให้เป็นไปตามที่กรมทาง หลวงได้กำหนดไว้แต่เดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- A.D.Quinn, C.J.Baker, N.G.Wright. 2001. Wind and Vehicle induced Forces on Flat Plates-Part 2: Vehicle Induced Force. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volume 89, Issue 9 (July 2001): pp 831-847.
- [2] Philip M. Cali and Eugene E. Covert. 2000. Experimental measurements of the loads induced on an overhead highway sign structure by vehicle-induced gusts. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volume84, Issue1 (January 2000): pp 87 - 100.
- [3] A.Sanz Andres, J. Santiago Prowald, C. Baker and A Quinn.
 2003. Vehicle induced loads on traffic sign panels. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volume 91, Issue 7 (June 2003): pp 925 942.
- [4] Osman Hag Elsafi, Sreenivas Alampalli and Frank Owens. 2001. Computer-aided implementation of a new procedure for design of end-plates and base-plates for traffic support structures. Journal of Engineering Structures. Volume23, Issue11 (November 2001): pp 1503 - 1511.
- [5] Robert D.Cook, David S. Malkus and Michael E. Plesha.
 1989. Concept and applications of Finite Element Analysis.
 3rd Edition. New York: John Wiley & Son.
- [6] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. 2548. มาตรฐานความปลอดภัยการจราจรและขนส่ง [ออนไลน์]. จาก http://www.otp.go.