การเปรียบเทียบแรงลมระหว่างมาตรฐานต่างๆกับข้อมูลการทดลองในอุโมงค์ลม : ส่วนที่ 1 การเปรียบเทียบวิธีการคำนวณ

Wind Load Comparisons among Several Codes with Wind Tunnel Experiment Data : Part 1 Comparisons of Calculation Method

วิโรจน์ บุญญภิญโญ อลงกรณ์ กฤตรัชตนันต์ และ กำธร เจนศุภเสรี
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12120
โทร. 0-2564-3001 ถึง 9 โทรสาร. 0-2564-3010
E-mail : bvirote@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินและเปรียบเทียบการคำนวณหน่วยแรงลมและการตอบสนองของอาคารเนื่องจากแรงลม โดยใช้การเปรียบเทียบวิธีการคำนวณตามมาตรฐานต่างๆดังต่อไปนี้ 1. มาตรฐานการคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารของประเทศไทยฉบับใหม่ตามข้อกำหนด National Building Code ของแคนาดา 2. มาตรฐานของสหรัฐอเมริกา 3. ข้อแนะนำของญี่ปุ่น 4. มาตรฐานของทวีปยุโรป และ 5. มาตรฐานของออสเตรเลีย สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 1 นี้ได้ทำการศึกษาถึงหลักการ วิธีการคำนวณ และข้อกำหนดต่างๆ และการวิจารณ์มาตรฐานของแต่ละมาตรฐาน และส่วนที่ 2 ของงานวิจัยจะทำการเปรียบเทียบตัวอย่างการคำนวณโดยมาตรฐานต่างๆกับผลการทดลองในอุโมงค์ลม

Abstract

An evaluation and comparison of wind load estimations and building responses is presented. The world's major building codes and standards highlighted by this research are those of: 1. Thai based on the National Building Code of Canada, 2. the United States, 3. Japan, 4. Australia, and 5. Europe. Part 1 presents the principles, calculation methods, specification and commentary of those standards. Part 2 presents the comparisons of standards by using the numerical examples and wind tunnel experiment data.

1. บทนำ

การก่อสร้างในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยี และวิธีการก่อสร้าง ที่มีความทันสมัยสามารถผลิตวัสดุในการก่อสร้างที่ให้กำลังสูงขึ้น ทำให้ขนาดองค์อาคารมีขนาดเล็กลง อีกทั้งมีความแม่นยำในการคำนวณเนื่องจากมีการใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ ทำให้ทราบน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น ทำให้สามารถลดขนาดขององค์อาคารได้ ซึ่งสาเหตุต่างๆที่กล่าวมาแล้วมีผลทำให้โครงสร้างมีความอ่อนตัวมากขึ้น อีกทั้งในปัจจุบันปัญหาด้านประชากรและพื้นที่ใช้สอยทำให้มีความต้องการในการก่อสร้างอาคารสูงเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อโครงสร้างถูกแรงกระทำแบบพลวัตเช่น แรงลม ทำให้โครงสร้างเหล่านี้มีการตอบสนองค่อนข้างสูงต่อแรงภายนอก ซึ่งมีผลทำให้ผู้ใช้เกิดความรู้สึกไม่สบาย รวมทั้งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้

การสั่นไหวของอาคารสูงเนื่องจากแรงลมโดยทั่วไปมีทั้งการสั่นไหวในทิศทางลม การสั่นไหวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และการบิดของอาคาร การสั่นไหวของอาคารในทิศทางลมเกิดจากการแปรปรวนของแรงดันลมในด้านต้นลมและท้ายลม ซึ่งเป็นไปตามกฎการไหล ในช่วงความถี่ต่ำ ดังนั้นการวิเคราะห์แรงพลศาสตร์ต่ออาคารในทิศทางลมสามารถใช้ทฤษฎี quasi-steady และ strip ได้โดยที่การตอบสนองทางพลศาสตร์สามารถแสดงได้โดยวิธีค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม (gust factor approach) [Davenport 1967; Vellozzi&Cohen 1968; Vickery 1970; Simiu 1976; Solari 1982; ESDU 1989; Gurley&Kareem 1993] โดยใช้หลักการของการสั่นไหวแบบสุ่ม(random vibration) สำหรับการสั่นไหวของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม เกิดจากการแปรปรวนของแรงดันลมทางด้านข้างของอาคารเป็นผลมาจากการแปรปรวนของการแยกชั้นของแรงเฉือนและแรงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น [Kareem 1982] ทำให้การวิเคราะห์โดยทฤษฎี quasi-steady และ strip นั้นไม่ถูก

RECEIVED 8 September, 2003
ACCEPTED 28 March, 2005

ต้อง เช่นเดียวกับการบิดของอาคารซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมดุลของแรงดันลมที่กระทำบนพื้นผิวอาคารชั่วขณะหนึ่ง ผลกระทบของแรงเหล่านี้จะมากขึ้นเมื่อแรงดังกล่าวกระทำต่ออาคารที่มีลักษณะไม่สมมาตรซึ่งเป็นผลของการควบคู่ของความเฉื่อย (inertial coupling) [Kareem 1985] ทั้งนี้เนื่องจากความซับซ้อนในการหาการตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและการบิดของอาคาร การทำแบบจำลองทางกายภาพทดลองในอุโมงค์ลม [Claes and Svend 1996 ; Simui and Scanlan 1996; วานิช ชัย และคณะ 2537; Lukkunaprasit and Phiensusom 1992] จึงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถหาค่าแรงลมและการตอบสนองของอาคารทางพลศาสตร์ได้อย่างถูกต้อง แต่ข้อเสียของการใช้แบบจำลองคือ ต้องใช้เวลา ค่าใช้จ่ายและอุปกรณ์ต่างๆมากมาย นอกจากนี้ในการออกแบบในช่วงแรก ต้องคำนวณประมาณจำนวนรูปร่างของอาคารที่จะนำมาทดสอบการตอบสนองเนื่องจากแรงลมผลของการตอบสนองเป็นข้อจำกัดในการตัดแบบจำลองที่ไม่เหมาะสมทาง aerodynamic ออกไป ดังนั้นจึงมีประเทศต่างๆมากมายทั่วโลกศึกษาและพัฒนาความสัมพันธ์ หลักเกณฑ์ต่างๆ เพื่อประมาณแรงลมที่กระทำกับอาคาร ค่าการตอบสนองของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และการบิดของอาคาร [Bungale and Tarana 1989; Claes and Svend 1996; Ginger et al. 1999; Suwatparnich 1995] ประเทศต่างๆได้เสนอมาตรฐานในการคำนวณแรงลม และการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงลม อาทิเช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย และ ยุโรป เป็นต้น ซึ่งมาตรฐานของแต่ละประเทศมีหลักการ และข้อจำกัดต่างๆ ที่เหมือนหรือแตกต่างกันบ้าง ซึ่งทำให้ผลการคำนวณหน่วยแรงลมและการตอบสนองต่างๆ ของอาคารเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอุโมงค์ลมแตกต่างกัน

ในปัจจุบันประเทศไทยยังใช้วิธีการคำนวณแรงลม ตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร (ข้อกำหนดกฎกระทรวง) พ.ศ. 2522 ที่ใช้อยู่ยังไม่เหมาะสมหลายประการ เพราะคำนึงถึงความสูงของอาคารแต่เพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงเขตที่มีความเร็วลมแตกต่างกัน รวมทั้งไม่ได้พิจารณาถึงสภาพภูมิประเทศ ของบริเวณที่ตั้งอาคารว่าเป็นพื้นที่โล่งชานเมือง หรือในเมืองใหญ่ ดังนั้นในช่วงที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารสูงในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก เช่น ลักคุณะประสิทธิ์ และคณะ [2538] Suwatparnich [1995] และบุญญภิญโญ [2541] ต่อมาคณะทำงานร่างมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างรับแรงลมของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้เสนอมาตรฐานการคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารในประเทศไทยในปี พ.ศ.2546 [ว.ส.ท.2546]โดยประยุกต์จากหลักการการออกแบบอาคารของประเทศแคนาดา 1995 [NBC 1995] ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณที่มีความละเอียดถูกต้อง เนื่องจากได้คำนึงถึงความเร็วลมอ้างอิง ในเขตต่างๆ ลักษณะภูมิประเทศ, รูปร่างของอาคาร และคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร ลักคุณประสิทธ์ และคณะ[2538] และบุญญภิญโญ [2541] พบว่า หน่วยแรงลมตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ให้ค่าหน่วยแรงลมที่น้อยกว่าค่อนข้างมากสำหรับอาคารที่มีความสูงมาก และตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบโล่ง แต่จะให้หน่วยแรงลมที่มากเกินไปสำหรับอาคารเตี้ยและตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศของบริเวณศูนย์กลางเมืองใหญ่

ปัจจุบันการพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างแบบไร้พรมแดนมีมากขึ้น ดังนั้นความรู้ความเข้าใจในมาตรฐานแรงลมของประเทศต่างๆจึงมีความสำคัญ และนำไปสู่แนวทางในการพัฒนามาตรฐานแรงลมของประเทศต่างๆให้เป็นรูปแบบเดียวกัน ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาเปรียบเทียบการคำนวณด้วยมาตรฐานต่างๆ [Zhou et al. 2002; Kareem and Kijewski 1998; Lee and Ng 1988; Loh and Isymov 1985] Lee และ Ng [1988] ได้เปรียบเทียบค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม Kareem and Kijewski [1998]ได้เปรียบเทียบค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมและการตอบสนองของอาคาร และเมื่อเร็วๆนี้ Zhou และคณะ [2002] ได้เปรียบเทียบค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม การตอบสนองของอาคาร และแรงลม แต่ได้ศึกษาเฉพาะความเร็วลมอ้างอิงเดียว และไม่ได้เปรียบเทียบกับผลการศึกษาในอุโมงค์ลม สำหรับประเทศไทยเมื่อเร็วๆนี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการคำนวณด้วยมาตรฐานต่างๆ [คงทรัพย์ และคณะ 2539; ทรงจิตรักษา และ บำรุง กิตติกุล 2540; พันธ์ชูเชิด และคณะ 2540] แต่การศึกษายังไม่ได้ครอบคลุมถึงทุกมาตรฐานที่สำคัญ และยังไม่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอุโมงค์ลม สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำมาตรฐานต่างๆ มาเปรียบเทียบ เพื่อชี้ให้เห็นถึงหลักการ วิธีการ ในการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร ข้อดี และข้อเสียของแต่ละมาตรฐาน นอกจากนี้จะทำการเปรียบเทียบตัวอย่างการคำนวณโดยมาตรฐานต่างๆกับผลการทดลองในอุโมงค์ลม มาตรฐานซึ่งทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ มาตรฐานการคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารของประเทศไทยฉบับใหม่ [ว.ส.ท. 2546] ตามข้อกำหนด National Building Code 1995 ของแคนาดา [National Building Code of Canada 1995] มาตรฐาน ASCE7-95 ของสหรัฐอเมริกา [ASCE Standard 1995] ข้อแนะนำ Architectural Institute 1996 ของญี่ปุ่น [AIJ Recommendation for Loads on Buildings 1993; AIJ Recommendation for Loads on Buildings 1996] มาตรฐาน Eurocode1 ของทวีปยุโรป [European Prestandard 1995] และมาตรฐาน AS1170-1989 ของออสเตรเลีย [Australian Standard 1989; Holmes et al. 1990] ดังนั้นผลการศึกษาของงานวิจัยที่นำเสนอนี้ทำให้สามารถทราบความถูกต้องของมาตรฐานไทยเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างๆและผลการทดสอบกับอุโมงค์ลม และยังสามารถนำข้อดีของมาตรฐานต่างๆมาปรับใช้กับการคำนวณหน่วยแรงลมของประเทศไทยต่อไป

2. การคำนวณแรงลม

มาตรฐานการคำนวณแรงลมต่างๆในการศึกษานี้ ได้แบ่งลักษณะภูมิประเทศออกเป็น 3-5 แบบ ซึ่งมีลักษณะของความเร็วลมต่าง

กัน ความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบมีค่าเท่ากับ ผลคูณของความเร็วลมพื้นฐานและค่าปรับแก้โดยคำนึงถึงผลของลักษณะภูมิประเทศ และสภาพความขรุขระของพื้นที่ ในส่วนของผลกระทบทางด้านพลศาสตร์ต่ออาคารจากการแปรปรวนของลม ได้ถูกพิจารณาด้วยค่าประกอบทางด้านการกระโชกของลม (gust factor) โดยคำนึงถึงผลของการแปรปรวนทั้งในมิติของเวลาและความแปรปรวน ณ ตำแหน่งต่างๆ สำหรับโครงสร้างขนาดเล็ก การพิจารณาผลของการแปรปรวนของลมจากข้อมูลในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น การใช้ความเร็วลมกระโชกในเวลา 3 วินาที ถือว่าเพียงพอในการคำนึงถึงผลกระทบจากการกระโชก ซึ่งในกรณีนี้ค่าองค์ประกอบทางด้านการกระโชกของลม มีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่เมื่อใช้ช่วงเวลาความเร็วลมกระโชกที่นานขึ้นค่าความแปรปรวนของความเร็วลมจะมีค่าลดลง ในกรณีนี้ค่า gust factor จะมีค่ามากกว่า 1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ระยะเวลาที่ใช้ในการหาค่าความเร็วลมกระโชก ลักษณะภูมิประเทศ ขนาดและคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของอาคาร แม้ว่าในมาตรฐานต่างๆ จะใช้ความเร็วลมอ้างอิง ณ ตำแหน่งที่สูงจากพื้นดิน 10 เมตร ในภูมิประเทศแบบโล่งเหมือนกัน แต่ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการหาการกระโชกของลมมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบมาตรฐานต่างๆ จึงต้องมีการปรับแก้ให้เป็นความเร็วลมอ้างอิงเดียวกัน

การคำนวณแรงลมด้วยการแปลงผลกระทบทางด้านพลศาสตร์จากการแปรปรวนของลม และผลของคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของอาคาร ให้เป็นแรงสถิตเทียบเท่า โดยใช้ค่าประกอบการกระโชกของลม สามารถกระทำได้โดยใช้วิธี Stochastic Random Vibration ค่าประกอบการกระโชกของลม เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึง ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ในทางสถิติของค่าเฉลี่ยของความเร็วลมหรือผลตอบสนองของอาคาร ซึ่งสามารถหาได้โดยหลักการทางสถิติ เช่น ค่าความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุด ที่คาดว่าจะเกิดในระยะเวลา T ใดๆ มีค่าเท่ากับ ผลรวมของความเร็วลมเฉลี่ยและผลคูณของ ค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด (peak factor) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความเร็วลม ดังนั้นค่าสูงสุดของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม X ใดๆ ซึ่งสัมพันธ์กับ แรงกระทำหรือผลตอบสนองของโครงสร้าง สามารถแสดงได้ในรูป

$$\overline{X}_{\max} = \overline{X} + g\sigma_X \qquad (1)$$

$$G = \frac{\overline{X}_{\max}}{\overline{X}} = 1 + g\frac{\sigma_X}{\overline{X}} \qquad (2)$$

โดย g คือค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด(peak factor) σ_x คือค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของ X G คือค่าประกอบการกระโชกของลม σ_x มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของ power spectral density ของ X ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนการตอบสนองแบบกึ่งสถิตย์ (background component) และ ส่วนการตอบสนองแบบกำทอน (resonant component) โดยส่วนของการตอบสนองแบบกำทอน จะมีผลมากต่อโครงสร้างที่มีความอ่อนมาก ในขณะที่โครงสร้างที่มีสติฟเนสสูงพฤติกรรมการตอบสนองจะประกอบด้วยส่วนการตอบสนองแบบกึ่งสถิตย์เป็นหลัก ในการคำนวณค่าแรงลม มาตรฐานต่างๆ มิได้คำนึงถึงผลของเทอมที่เป็นกำลัง2 ของความเร็วลมแปรปรวน ซึ่งโดยปกติถือว่ามีค่าน้อย โดยหากจะพิจารณาผลของเทอมที่มีกำลังสูงขึ้นในการคำนวณ ค่า peak factor สามารถหาได้จากทฤษฎี Gaussian Distribution [Kaleem 1997]

3. มาตรฐานการคำนวณแรงลมสำหรับประเทศไทยฉบับใหม่ [ว.ส.ท.2546] ตามข้อกำหนดการคำนวณแรงลม National Building Code of Canada [NBC 1995]

3.1 การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า

วิธีการกำหนดแรงลมมี 3 วิธี คือ วิธีการอย่างง่ายสำหรับอาคารเตี้ย วิธีการอย่างละเอียดสำหรับอาคารสูงเกิน 120 เมตรและมีความสูงเกิน 4 เท่าของความกว้าง มีน้ำหนักเบา มีความถี่ธรรมชาติของอาคาร และความหน่วงของอาคารต่ำ และวิธีการทดสอบโดยอุโมงค์ลม

หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวของอาคารสามารถคำนวณได้จากสมการ(3)

$$p = q\ C_e C_g C_p \qquad (3)$$

โดยที่

p = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่ากระทำตั้งฉากกับพื้นผิวภายนอกอาคาร โดยเรียกว่า "หน่วยแรงดัน " ถ้ามีทิศเข้าหาพื้นผิว หรือ " หน่วยแรงดูด " ถ้ามีทิศพุ่งออกจากพื้นผิว มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเมตร

q = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (reference velocity pressure)

C_e = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (exposure factor)

C_g = ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (gust effect factor)

C_p = ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (external pressure coefficient)

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q) สามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$q = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{g}\right)\overline{V}^2 \qquad (4)$$

โดยที่

q ที่คำนวณได้มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (แรง) ต่อ ตารางเมตร

ρ = ความหนาแน่นของมวลอากาศ (ซึ่งมีค่าโดยประมาณ

1.25 กิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับความดันบรรยากาศปกติและอุณหภูมิของอากาศ ประมาณ 15 องศาเซลเซียส ถึง 45 องศาเซลเซียส)

$\bar{V}$ = ค่าความเร็วลมอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที^{2})

ความเร็วลมอ้างอิง คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศโล่ง (open exposure) ที่คาบเวลากลับ 30 ปี

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) เป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลมให้แปรเปลี่ยนตามความสูงตามพื้นดินและสภาพภูมิประเทศ โดยคำนวณได้จาก 2 วิธีดังนี้

วิธีการอย่างง่าย การคำนวณค่า C_e สามารถคำนวณได้จากสมการ (5)

$$C_e = \left(\frac{Z}{10}\right)^{0.2} \quad (5)$$

โดยที่ Z = ความสูงจากพื้นดิน (หน่วยเป็นเมตร) ณ ตำแหน่งที่คำนวณค่าหน่วยแรงลม อนึ่งถ้า C_e ที่คำนวณจากสมการ (5) มีค่าน้อยกว่า 0.9 กำหนดให้ใช้ค่า $C_e = 0.9$

วิธีการอย่างละเอียด การคำนวณค่า C_e ต้องคำนึงถึงสภาพภูมิประเทศดังนี้

- สภาพภูมิประเทศแบบ A เป็นสภาพภูมิประเทศแบบโล่งซึ่งมี อาคาร ต้นไม้ หรือ สิ่งปลูกสร้างอยู่กระจัดกระจายห่างๆกัน หรือเป็นบริเวณชายฝั่งทะเลให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (6a)

$$C_e = \left(\frac{Z}{10}\right)^{0.28} \quad (6a)$$

โดยที่ถ้า C_e ที่คำนวณได้จากสมการ (6a) มีค่าน้อยกว่า 1.0 หรือมากกว่า 2.6 ให้ใช้ค่า C_e เท่ากับ 1.0 หรือ 2.6 ตามลำดับ

- สภาพภูมิประเทศแบบ B เป็นสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง หรือพื้นที่ที่มีต้นไม้ใหญ่หนาแน่น หรือบริเวณศูนย์กลางของเมืองขนาดเล็ก ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (6b)

$$C_e = 0.5\left(\frac{Z}{12.7}\right)^{0.5} \quad (6b)$$

โดยที่ถ้า C_e ที่คำนวณได้จากสมการ (6b) มีค่าน้อยกว่า 0.5 หรือมากกว่า 2.6 ให้ใช้ค่า C_e เท่ากับ 0.5 หรือ 2.6 ตามลำดับ

- สภาพภูมิประเทศแบบ C เป็นสภาพภูมิประเทศ ของบริเวณศูนย์กลางของเมืองใหญ่ ที่มีอาคารสูงอยู่หนาแน่นโดยที่อาคารไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ต้องมีความสูงเกิน 4 ชั้น ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (6c)

$$C_e = 0.4\left(\frac{Z}{30}\right)^{0.72} \quad (6c)$$

โดยที่ถ้า C_e ที่คำนวณได้จากสมการ (6c) มีค่าน้อยกว่า 0.4 หรือมากกว่า 2.6 ให้ใช้ค่า C_e เท่ากับ 0.4 หรือ 2.6 ตามลำดับ

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม(C_g) คืออัตราส่วนระหว่างผลของแรงลมสูงสุดต่อผลของแรงลมเฉลี่ยเป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลมโดยผลรวมที่เกิดจาก การแปรปรวนของความเร็วลม (random wind gusts) ที่พัดเข้าหาอาคาร การผันผวนของหน่วยแรงลมจากผลของระลอกลม (wake-induced fluctuating pressures) โดยรอบอาคาร และ การตอบสนองด้านพลศาสตร์ของอาคาร ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (C_g) สามารถคำนวณได้ดังวิธีต่อไปนี้

- วิธีการอย่างง่าย สำหรับหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับพื้นผิวภายในอาคาร ให้ใช้ค่า C_g เท่ากับ 1.0 หรือ 2.0 ขึ้นอยู่กับลักษณะและปริมาณช่องเปิด (opening) ของอาคาร สำหรับหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคารให้ใช้ค่า C_g เท่ากับ 2.0 ในการออกแบบโครงสร้างหลักด้านแรงลม และให้ใช้ค่า C_g เท่ากับ 2.5 ในการออกแบบผนังภายนอกอาคาร (cladding)

- วิธีการอย่างละเอียด ค่า C_g ให้คำนวณจากสมการ (7)

$$C_g = 1 + g_p\left(\frac{\sigma}{\mu}\right) \quad (7)$$

โดยที่

g_p = ค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด (statistical peak factor) หาค่าได้จากสมการ (8)

$$g_p = \sqrt{2\log_e \nu T} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e \nu T}} \quad (8)$$

σ = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองด้านอาคารเนื่องจาก ความผันผวนของแรงลม (root-mean-square loading effect)

μ = ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของอาคารเนื่องจากแรงลม (mean loading effect)

ν = ค่าความถี่เฉลี่ยของการตอบสนองของโครงสร้าง (average fluctuation rate) มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หาได้จากสมการ (9)

$$\nu = n_0\sqrt{\frac{sF}{sF + \beta B}} \quad (9)$$

T = 3600 วินาที

S = ตัวคูณลดเนื่องจากขนาดของอาคาร (size reduction factor) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ W/H และความถี่ธรรมชาติลดรูป (reduction frequency of structure , $\frac{n_D H}{V_H}$) และหาค่าได้จากสมการ (10)

$$s = \frac{\pi}{3}\left[\frac{1}{1+\frac{8n_0H}{3V_H}}\right]\left[\frac{1}{1+\frac{10n_0W}{V_H}}\right] \quad (10)$$

n_D = ค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร สำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางลม (fundamental natural frequency in along-wind direction) มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz)ซึ่งค่านี้อาจหาได้จากการวิเคราะห์โดยตรงจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของอาคาร ในกรณีที่เป็นอาคารสูงสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กอาจประมาณค่าความถี่ธรรมชาติจากสูตร $n_D = 46/H$

V_H = ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ระดับความสูงของยอดอาคาร มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที คำนวณได้จาก $V_H = \bar{v}\sqrt{C_{eH}}$

F = อัตราส่วนพลังงานของการแปรปรวนของลม ณ ความถี่ธรรมชาติของอาคาร (gust energy ratio at the nutural frequency of the structure) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ จำนวนคลื่นต่อเมตร (wave number, n_D/V_H) หาค่าได้จากสมการ (11)

$$F = \frac{x_0^2}{\left(1+x_0^2\right)^{4/3}} \quad (11)$$

โดยที่

$$x_0 = \frac{1220n_0}{V_H} \quad (12)$$

β = อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) ของการสั่นไหวในทิศทางลมซึ่งค่านี้ควรกำหนดให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดอาคารจริงที่มีลักษณะใกล้เคียงกับอาคารที่ออกแบบโดยทั่วไปสำหรับอาคารโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาจใช้ค่า β เท่ากับ 0.01 และ 0.02 ตามลำดับ

B = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกึ่งสถิตต่อการแปรปรวนของลม (background turbulence factor) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของความกว้างต่อความสูงของอาคาร (W/H) หาได้จากสมการ (13)

$$B = \frac{4}{3}\int_0^{914/H}\left[\frac{1}{1+\frac{zH}{457}}\right]\left[\frac{1}{1+\frac{zW}{122}}\right]\left[\frac{z}{\left(1+z^2\right)^{4/3}}\right]dz \quad (13)$$

W = ความกว้างของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม มีหน่วยเป็นเมตร

H = ความสูงของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม มีหน่วยเป็นเมตร

อัตราส่วน σ/μ สามารถคำนวณได้จากสมการ (14)

$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}}\left(B+\frac{sF}{\beta}\right)} \quad (14)$$

โดยที่

K = ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามความขรุขระของสภาพภูมิประเทศโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ

0.08 สำหรับภูมิประเทศแบบ A

0.10 สำหรับภูมิประเทศแบบ B

0.14 สำหรับภูมิประเทศแบบ C

C_{eH} = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่ระดับความสูงของยอดอาคาร

$\frac{sF}{\beta}$ = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลม (resonance factor)

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p) ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคาร ทิศทางลม และลักษณะการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมตามความสูงอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม ที่กระทำภายนอกอาคารและภายในอาคารสำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคารและระบบโครงสร้างหลักของอาคารที่มีรูปทรงอย่างง่าย ในกรณีของอาคารเตี้ยที่มีความสูงต่อความกว้าง $\left(\frac{H}{W}\right)$ น้อยกว่า 1 และมีความสูงอ้างอิง (reference height) น้อยกว่า 20 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมได้ถูกนำมารวมกับค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายใน (C_{pi})ใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงลมภายในอาคาร ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบผนังภายนอกอาคาร และระบบโครงสร้างหลักต้านแรงลม ค่าสัมประสิทธิ์นี้ขึ้นอยู่กับการกระจายตัว ขนาดของรอยรั่วซึม และช่องเปิดบนผนังภายนอกอาคาร ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ใช้ค่า $C_{pi} = 0$ ถึง -0.3 และ $C_g = 1.0$ ทั้งนี้ให้ใช้ค่าC_{pi} ที่ทำให้เกิดแรงสูงสุดในองค์อาคาร (ผนังภายนอก ตัวยึดและอื่นๆ) กรณีนี้ใช้กับอาคารที่ปราศจากช่องเปิด ขนาดใหญ่ แต่อาจมีช่องเปิดเล็กๆ กระจายสม่ำเสมอ โดยมีพื้นที่ช่องเปิดรวมน้อยกว่า 0.1% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด

กรณีที่ 2 ใช้ค่า $C_{pi} = 0.7$ ถึง -0.7 และ $C_g = 1.0$ กรณีนี้ใช้กับอาคาร ที่มีการรั่วซึมซึ่งกระจายไม่สม่ำเสมอ โดยที่อาจมีช่องเปิดขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่ต้องได้รับการปิดสนิท เมื่อเกิด พายุและมีความแข็งแรงเพียงพอ

กรณีที่ 3 ใช้ค่า C_{pi} =0.7 ถึง −0.7 และ C_g =2.0 กรณีนี้ใช้กับอาคารที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ โดยที่ความแปรปรวนของลมภายนอกอาคาร สามารถส่งผลเข้าไปภายในได้

ค่าตัวแปรต่างๆในมาตรฐานนี้สามารถหาได้จากภาพหรือตารางใน มาตรฐานการคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารสำหรับประเทศไทยฉบับใหม่ [ว.ส.ท. 2546] หรือข้อกำหนดการคำนวณแรงลม National Building Code of Canada [NBC 1995]

3.2 การคำนวณการโก่งตัวด้านข้างและการสั่นไหวของอาคาร

การสั่นไหวของอาคาร

อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบในทิศทางลม (a_D) สามารถหาได้จากสมการ(15)

$$a_D = 4\pi^2 n_D^2 \sqrt{\frac{KsF}{C_{eH}\beta_D}} \cdot \frac{\Delta}{C_g} \qquad (15)$$

อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม (a_w) มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที^{2} สามารถคำนวณโดยประมาณได้จากสมการ (16)

$$a_W = n_W^2 g_p \sqrt{WD} \cdot \frac{78.5\times10^{-3}}{\rho_B g\sqrt{\beta_W}} \cdot \left[\frac{V_H}{n_W \cdot \sqrt{WD}}\right]^{3.3} \qquad (16)$$

โดยที่

n_W = ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานใน ทิศตั้งฉากกับทิศทางลม มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที (Hz)

β_D = อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ของการสั่นไหวในทิศทางลม

β_W = อัตราส่วนความหน่วง ในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม

Δ = การโก่งตัวทางด้านข้างสูงสุดในทิศทางลม ณ ตำแหน่งยอดอาคาร

ρ_B = ความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร(average density of the building) กล่าวคือ ค่ามวลทั้งหมดของอาคารหารด้วยปริมาตรทั้งหมดของอาคารที่ถูกห่อหุ้มด้วย พื้นผิวภายนอกอาคาร (enclosure volume) มีหน่วยเป็น กิโลกรัม(มวล)ต่อเมตร^3 สำหรับอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมอาจคำนวณได้จาก (มวลทั้งหมดของอาคาร / (*WDH*)) โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 150-300 กิโลกรัม(มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร

ค่าอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบทั้งในทิศทางลม และทิศตั้งฉากกับทิศทางลม ที่เกิดจากสภาพลมที่มีคาบเวลากลับ 10 ปี ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (14) และ(15) จะต้องมีค่าไม่เกินกว่า 0.15 เมตรต่อวินาที^{2} ในกรณีของอาคารที่พักอาศัย (residential buildings) หรือ 0.20 เมตรต่อวินาที^{2} ในกรณีของอาคารพาณิชย์ (commercial buildings)

3.3 การวิจารณ์มาตรฐาน

เนื่องจากในวิธีการคำนวณแบบละเอียด มีการหาค่าตัวแปรต่างๆจากภาพหลายค่า ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากมนุษย์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาพที่เป็นกราฟลอการิทึม ซึ่งภาพส่วนใหญ่ก็เป็นกราฟในลักษณะนี้ อย่างไรก็ตามเราก็สามารถลดความผิดพลาดได้โดยการคำนวณจากสมการซึ่งอยู่ในภาพนั้นๆได้ มาตรฐานนี้ให้ความสำคัญต่อผลการตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม โดยมีการพิจารณาถึงทั้งความรู้สึกสบายของผู้อยู่อาศัยและการใช้งาน โดยแสดงออกมาเป็นค่าอัตราเร่งในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม สำหรับการคำนวณค่าอัตราเร่งสูงสุดของอาคารในทิศทางลม และทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมสมารถคำนวณได้โดยไม่เสียเวลามากนักเนื่องจากมีการใช้ตัวแปรต่างๆร่วมกันหลายค่า ในมาตราฐานนี้ไม่พิจารณาถึงการบิดของอาคาร แม้ว่านักวิจัยชาวแคนาดาจะทำการศึกษาถึงการตอบสนองทางการบิดของอาคาร แต่ยังคงไม่ได้ออกเป็นมาตรฐานสำหรับมาตรฐานฉบับนี้

4. มาตราฐานการคำนวณแรงลมของประเทศสหรัฐอเมริกา [ASCE Standard 1995]

4.1 การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า

วิธีการกำหนดแรงลมมี 3 วิธี คือ วิธีการอย่างง่ายใช้ในการคำนวณค่าหน่วยแรงลม สำหรับออกแบบอาคารที่ไม่ต้องพิจารณาผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ได้แก่อาคารเตี้ย (Low-rise building) หรืออาคารที่ไม่สูงมากนัก วิธีการอย่างละเอียดใช้ในการคำนวณค่าหน่วยแรงลมสำหรับออกแบบอาคารที่จะต้องพิจารณาผลของการตอบสนองทางพลศาสตร์ และวิธีการทดสอบโดยอุโมงค์ลม

หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวของอาคารสามารถคำนวณได้จากสมการ (17)

$$p_z = q_z G C_p \qquad (17)$$

โดยที่

p_z = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่ความสูง z เหนือพื้นดิน มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตาราง เมตร

q_z = หน่วยแรงลมเนื่องจากความเร็วลมที่ความสูง z (Velocity pressure) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร

G = ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (Gust effect factor)

C_p = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม สามารถคำนวณได้จากสมการ (18) และ สมการ (19)

$$q_z = 0.0637 K_z K_{zt} V^2 I \quad (18)$$

$$q_h = 0.0637 K_h K_{zt} V^2 I \quad (19)$$

โดยที่

K_h, K_z = ค่าสัมประสิทธิ์ประกอบลักษณะภูมิประเทศที่ยอดอาคารและที่ความสูง Z จากพื้นดินหาได้จากสมการ (20)

$$K_z = 2.01\left(\frac{z}{z_g}\right)^{2/\alpha} \quad \text{สำหรับ } 4.57 \text{ เมตร} < Z < Z_g$$

$$K_z = 2.01\left(\frac{4.57}{z_g}\right)^{2/\alpha} \quad \text{สำหรับ } Z < 4.57 \text{ เมตร} \quad (20)$$

Z_g = ความสูงลาด (gradient height)

α = สัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient) แปรเปลี่ยนตามลักษณะภูมิประเทศซึ่งแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ เมืองใหญ่ เมืองเล็ก ที่โล่ง และชายทะเล หรือ A B C และ D ตามลำดับ

I (Important factor) = ค่าประกอบความสำคัญเป็นตัวประกอบที่คำนึงถึง ระดับที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและความเสียหายต่อทรัพย์สินในกรณีที่อาคารเกิดความเสียหายขึ้น

K_{zt} = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศเป็นค่าซึ่งแสดงถึงผลของการแบ่งแยกของภูเขากับเนินเขาซึ่งตั้งอยู่ในภูมิประเทศแบบ B,C และ D สามารถหาได้จากสมการ (21)

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3) \quad (21)$$

โดยที่

K_1 = ค่าซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะทางภูมิศาสตร์ และความเร็ว ในการเพิ่มขึ้นของระยะทางระหว่างด้านต้นลมกับด้านท้ายลมของยอดเขา

K_2 = ค่าซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วในการลดลงของระยะทางระหว่างด้านต้นลมกับด้านท้ายลมของยอดเขา

K_3 = ค่าซึ่งสัมพันธ์กับการลดลงของความเร็วของความสูง ซึ่งอยู่เหนือระดับพื้นดิน

ในกรณีที่อาคารตั้งอยู่บนพื้นที่ราบปกติ ค่า K_{zt} เท่ากับ 1

V = ความเร็วลมอ้างอิง เป็นค่าความเร็วลมกระโชก 3 วินาที ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดินในสภาพภูมิประเทศแบบโล่งสำหรับคาบเวลา50 ปี

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกลม (G) เป็นค่าที่พิจารณาถึงผลจากความปั่นป่วนของลมในทิศทางลม (Along-wind direction) และผลจากส่วนขยายทางพลศาสตร์(Dynamic amplification)สำหรับอาคารที่อ่อน(Flexible buildings), Vortex shedding, ความไม่มีมีเสถียรภาพ (Instabilities)แบบ Galloping และแบบFlutter และผลจากการบิดทางพลศาสตร์ (Dynamic torsional effect)

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกลม ในมาตรฐาน ASCE7-95 แบ่งออกเป็น 3 กรณี ตามลักษณะโครงสร้างดังต่อไปนี้

- วิธีอย่างง่าย (Rigid structure-simplified method) วิธีนี้ใช้กับโครงสร้างที่มีความแข็งแรง และมีขนาดเล็กโดยกำหนดให้ใช้ค่า G เท่ากับ 0.80 สำหรับโครงสร้างซึ่งตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A และ B 0.85 สำหรับโครงสร้างซึ่งตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ C และ D
- วิธีการแบบละเอียดใช้กับโครงสร้างที่มีความแข็งแรง(Rigid structure-complete analysis) วิธีนี้ใช้กับโครงสร้างที่มีความแข็งแรง โดยค่า G สามารถคำนวณได้จากสมการ (22)

$$G = 0.9\left(\frac{1 + 7I_{\bar{z}}Q}{1 + 7I_{\bar{z}}}\right) \quad (22)$$

โดยที่ $I_{\bar{z}}$ = ความเข้มของการผันผวนของลม ที่ความสูง $\bar{z}$ คำนวณได้จากสมการ(23)

$$I_{\bar{z}} = C\left(\frac{10.06}{\bar{z}}\right)^{1/6} \quad (23)$$

$\bar{z}$ = ความสูงเทียบเท่าของอาคาร = $0.6h \geq z_{min}$

z_{min}, C = ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศ

Q = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกึ่งสถิตต่อการแปรปรวนของลมคำนวณได้จากสมการ (24)

$$Q^2 = \frac{1}{1 + 0.63\left(\frac{b+h}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}} \quad (24)$$

b = ความกว้างของอาคาร

h = ความสูงของอาคาร

$L_{\bar{z}}$ = ค่าความยาวอินทิกรัลของความผันผวนที่ความสูง $\bar{z}$ มีค่าดังสมการ (25)

$$L_{\bar{z}} = l\left(\frac{\bar{z}}{10.06}\right)^{\varepsilon} \quad (25)$$

l และ ε เป็นค่าคงที่

- วิธีการแบบละเอียด ใช้กับโครงสร้างที่มีความอ่อนตัว และมีความไวต่อการสั่นไหว (Flexible or dynamically sensitive building)

วิธีการนี้ใช้กับ อาคารที่ชะลูด ซึ่งมีความถี่ธรรมชาติน้อยกว่า 1

เฮริตซ์ รวมทั้งอาคารที่มีความสูง (h) เกิน 4 เท่าของขนาดในแนวราบที่น้อยที่สุด ค่ากระกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (G_f) จะรวมถึงผลกระทบเนื่องจากแรงในทิศทางลม เนื่องจากความผันผวนของลม,แรงกระทำระหว่างอาคาร และการเพิ่มทางพลศาสตร์เนื่องจากความอ่อนตัวของโครงสร้างแต่ไม่รวมถึงผลทางด้านตั้งฉากกับทิศทางลม vortex shedding ความไม่เสถียรภาพเนื่องจาก galloping หรือ flutter และ ผลกระทบเนื่องจากแรงบิดพลศาสตร์ ซึ่งค่าเหล่านี้ควรหาด้วยวิธีการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งจะให้ค่าที่ถูกต้องมากกว่า

ค่ากระกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม(G_f) สามารถหาได้จากสมการ (26)

$$G_f = \frac{1+2gI_{\bar{z}}\sqrt{Q^2+R^2}}{1+7I_{\bar{z}}} \tag{26}$$

โดยที่

R = ค่าตอบสนองแบบสั่นพ้อง (Resonance response factor) ซึ่งสามารถ คำนวณได้จากสมการ (27)

$$R^2 = \frac{1}{\beta} R_n R_h R_b (0.53+0.47Rd) \tag{27}$$

$$R_n = \frac{7.465N_1}{\left(1+10.302N_1\right)^{5/3}} \tag{28}$$

$$N_1 = \frac{n_1 L_{\bar{z}}}{\bar{V}_{\bar{z}}} \tag{29}$$

$$R_l = \begin{cases} \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2}(1-e^{-2\eta}) & for \quad \eta > 0 \\ 1 & for \quad \eta = 0 \end{cases} \tag{30}$$

$(l = b,h,d)$

$R_l = R_h$ กำหนดให้ $\eta = 4.6n_1 h/\bar{V}_{\bar{z}}$

$R_l = R_b$ กำหนดให้ $\eta = 4.6n_1 b/\bar{V}_{\bar{z}}$

$R_l = R_d$ กำหนดให้ $\eta = 15.4n_1 d/\bar{V}_{\bar{z}}$

β = อัตราส่วนความหน่วงของอาคาร

$\bar{V}_{\bar{z}}$ = ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงที่ความสูง $\bar{z}$

$$\bar{V}_{\bar{z}} = \bar{b}\left(\frac{\bar{z}}{10.06}\right)^{\bar{\alpha}} \hat{V}_{\text{ref}} \tag{31}$$

$\bar{b}$ และ $\bar{\alpha}$ เป็นค่าคงที่

g = peak factor = 3.5

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร ขึ้นอยู่กับ รูปทรงของอาคาร เช่น เมื่อมีลมมาประทะตรงๆกับ อาคารอาคารที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยม ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันและแรงดูดที่กระทำภายนอกอาคารมีค่าเป็นบวกในทิศทางด้านต้นลมและเป็นลบในทิศทางด้านท้ายลม ด้านข้าง และด้านบน (หลังคา) การกระจายของแรงดันจะมีความซับซ้อนขึ้น ถ้ามีลมที่กระทำกับอาคารเป็นมุม การกระจายของแรงดันทางด้านบวกและลบ มีอิทธิพลมาจากสัดส่วนขนาดของอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร

ค่าตัวแปรต่างๆในมาตรฐานนี้สามารถหาได้จากภาพหรือตาราง ใน มาตรฐานการคำนวณแรงลมของประเทศสหรัฐอเมริกา [ASCE Standard 1995]

4.2 การคำนวณการสั่นไหวของอาคาร

มาตรฐานการคำนวณแรงลมของประเทศสหรัฐอเมริกา (ASCE7-95 Standard) สามารถหาอัตราเร่งรากกำลังสองเฉลี่ยในทิศทางลมจากสมการ(32)

$$\sigma_{\ddot{x}}(z) = \frac{0.85\phi(z)\rho bhC_{fx}\bar{V}_{\bar{z}}^2}{m_1} I_{\bar{z}} KR \tag{32}$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของมวลอากาศ

C_{fx} = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมในทิศทางลมเฉลี่ย

$\phi(z)$ = mode shape มูลฐาน หาได้จากสมการ (33)

$$\phi(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^{\xi} \tag{33}$$

ξ = ค่า mode exponent

m_1 = ค่า modal mass สามารถประมาณค่าได้โดยสมการ (34)

$$m_1 = \int_0^h \mu(z)\phi^2(z)dz \tag{34}$$

$\mu(z)$ = ค่ามวลต่อหน่วยความสูงของอาคาร

และ K สามารถหาได้จากสมการ (35)

$$K = \frac{(1.65)\alpha}{\alpha+\xi+1} \tag{35}$$

4.3 การวิจารณ์มาตรฐาน

มาตรฐานนี้สามรถหาค่าตัวแปรต่างๆได้ง่าย เนื่องจากมีตารางซึ่งระบุค่านั้นๆไว้แล้วโดยที่ไม่ต้องอ่านค่าจากกราฟซึ่งอาจมีความผิดพลาดเนื่องจากผู้ใช้ได้ สำหรับการใช้ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมในมาตรฐานนี้มีความน่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากในวิธีการคำนวณทั้ง 3 แบบนั้น ค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงมีเพียงค่าเดียวคือค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม ส่วนตัวแปรอื่นๆในการวิเคราะห์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง มาตรฐานนี้มีข้อจำกัดเช่นเดียวกับมาตรฐานอื่นๆคือ ไม่มีการพิจารณาถึงผลการตอบสนองของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและการบิดของอาคาร

5. ข้อแนะนำการคำนวณแรงลมของประเทศญี่ปุ่น [AIJ 1996]

5.1 การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า

การกำหนดค่าหน่วยแรงลมมี 3วิธี ได้แก่ Simplified Procedure (SP) Detailed Procedure I (DP I) และ Detailed Procedure II (DP II)

แรงลมสถิตเทียบเท่า W_f สามารถคำนวณได้จากสมการ (36)

$$W_f = q_H C_f G_f A \tag{36}$$

โดยที่

W_f = แรงลมสถิติเทียบเท่า มีหน่วยเป็น กิโลกรัม

q_H = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม ณ ตำแหน่งใดๆ มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเมตร

C_f = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร

G_f = ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (gust effect factor)

A = พื้นที่ด้านรับลม มีหน่วยเป็นตารางเมตร

หน่วยแรงลมอ้างอิง เนื่องจากความเร็วลม (q_H) สามารถคำนวณได้จากสมการ(37)

$$q_H = \frac{1}{2}\rho U_H^2 \tag{37}$$

การแบ่งสภาพภูมิประเทศ แบ่งออกเป็น 5 ประเภทได้แก่ พื้นที่โล่งชายทะเล พื้นที่โล่งมีสิ่งกีดขวางเล็กน้อยเช่น ทุ่งนา พื้นที่เขตชานเมือง มีอาคารสูงเล็กน้อย พื้นที่ในเมือง มีอาคารสูงปานกลาง พื้นที่ใจกลางเมืองใหญ่ หรือ I II III IV และ V ตามลำดับ

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (gust effect factor (G_f)) คำนวณได้จาก 2 วิธี ดังนี้

- วิธีการอย่างง่าย การคำนวณค่า G_f จะไม่นำเทอมของการทำทอนต่อการแปรปรวนของลม (resonant term) มาคำนวณ แต่ยังคงมีค่าประกอบเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าสูงสุด (peak factor) สามารถหาค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม ได้จากสมการ (38)

$$G_f = 1+4r_f \tag{38}$$

โดยค่า peak factor = 4 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับอาคารส่วนใหญ่

- วิธีการอย่างละเอียด การคำนวณค่า G_f จะนำเทอมของการทำทอนต่อการแปรปรวนของลม(resonant term) มาคำนวณด้วย สามารถหาค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม ได้จากสมการ (39)

$$G_f = 1+g_f r_f \sqrt{B_f + R_f} \tag{39}$$

การสั่นสะเทือนของอาคารในทิศทางลมเกิดจากแรงลมแบบแปรปรวน (Turbulent Wind) ที่กระทำกับอาคาร ลักษณะของลมที่มีความแปรปรวนนี้ ขึ้นกับรูปทรงของอาคาร และลักษณะของแรงลมที่ไม่สม่ำเสมอ

เมื่อสมมุติโหมดแรกของการสั่นเป็นเส้นตรงและมวลของอาคารกระจายสม่ำเสมอตลอดความสูง สามารถคำนวณแรงลมในทิศทางตั้งฉากลม (W_L) ได้จากสมการ (40)

$$W_L = 3q_H C'_L A \frac{Z}{H} g_L \sqrt{1 + R_L} \tag{40}$$

ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์กลับของการผันผวนรากกำลังสองเฉลี่ย (rms. overturning moment coefficient , C'_L) จะแสดงในรูปของค่า side ratio ดังสมการ (41)

$$C'_L = 0.0082(D/B)^3 - 0.071(D/B)^2 + 0.22(D/B) \tag{41}$$

Wind force spectrum (F_L) จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปหน้าตัดของอาคารและพฤติกรรมของลม เมื่อ D/B $<$ 3 จะเกิดค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเดียว สามารถสังเกตเห็นได้ที่ค่าVortex shedding frequency (n_{s1}) ใน power spectral density และเมื่อ D/B $\geq$3 จะเกิดจุดสูงสุด 2 ตำแหน่งที่ n_{s1} และ n_{s2} ใน power spectral density ค่า power spectral density หาได้จากสมการ (42)

$$F_L = \sum_{J=1}^{N} \frac{4K_j(1+0.6\beta_j)\beta_j}{\pi} \frac{(n_0/n_{s1})^2}{\left\{1-(n_0/n_{s1})^2\right\}^2 + 4\beta_j^2(n_0/n_{sj})^2} \tag{42}$$

ค่าตัวแปรต่างๆในมาตรฐานนี้สามารถหาได้จากภาพหรือตารางในข้อแนะนำ การคำนวณแรงลมของประเทศญี่ปุ่น [AIJ Recommendation for Loads on Buildings 1993; AIJ Recommendation for Loads on Buildings 1996]

5.2 การคำนวณการสั่นไหวของอาคาร

การตอบสนองของโครงสร้าง (response acceleration)

อัตราเร่งรากกำลังสองเฉลี่ยในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมสามารถคำนวณได้จากสมการ (43)

$$\sigma_{\ddot{y}} = 3q_H C'_L \frac{B}{m}\frac{Z}{H}\sqrt{R_L} \tag{43}$$

ค่าอัตราเร่งรากกำลังสองเฉลี่ยในทิศทางลมสามารถคำนวณได้จากสมการ (44)

$$\sigma_{\ddot{x}} = (2\pi n_0)^2 \sigma_x(z) \sqrt{\frac{R_f}{B_f + R_f}} \tag{44}$$

ค่าอัตราเร่งสูงสุดในทิศทางลมสามารถหาได้โดยการคูณด้วยค่าประกอบเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าสูงสุด (peak factor) ที่เหมาะสม ซึ่งหาได้จากสมการ (45)

$$g_{\ddot{x}} = \sqrt{2\ln(600n_0)} + 1.2 \qquad (45)$$

แรงบิด (Torsional Loads)

การสั่นสะเทือนแบบบิดมีสาเหตุมาจากความไม่สมดุลของการกระจายของลมที่ กระทำต่อพื้นผิวทางด้านต้นลม ท้ายลม และด้านข้าง วิธีการในการคำนวณหาแรงบิด เหมือนกับการคำนวณหาแรงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม เนื่องจากว่าแรงบิดที่กระทำต่ออาคาร ในกรณีส่วนใหญ่ พิจารณาโดยการรวมกันของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม เราสามารถหา ค่าอัตราเร่งเชิงมุมของการบิด (torsional response angle acceleration , $\sigma_{\ddot{\theta}}$) ได้จากสมการ (46) ต่อไปนี้

$$\sigma_{\ddot{\theta}} = \frac{2\rho C_T n_0^2 \sqrt{BD}}{L\rho_b \sqrt{n_f}} K_T U^*(\beta_T + 2) \qquad (46)$$

5.3 การวิจารณ์มาตรฐาน

มาตรฐานนี้ แสดงออกมาในลักษณะของการสอน คือมีคำอธิบายโดยละเอียด ในแต่ละขั้นตอนการคำนวณของมาตรฐาน มาตรฐานนี้ได้มีการศึกษาและพัฒนาทฤษฎีต่างๆ โดยแสดงขอบเขตอย่างมีเหตุผล มาตรฐานนี้เป็นเพียงมาตรฐานเดียวที่มีการคำนึงถึงการตอบสนองของอาคารในทิศทางลม ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และการบิดของอาคาร โดยแสดงออกมาเป็นค่าอัตราเร่งรากกำลังสองเฉลี่ย อย่างไรก็ตาม วิธีการในการพิจารณาค่าการโก่งตัวทางด้านข้าง และอัตราเร่งในทิศทางลม ควรที่จะทำให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นในเรื่องของตัวแปรต่างๆ และขั้นตอนในการคำนวณ รวมทั้งการกำหนดความเร็วลมและแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสำหรับภูมิประเทศแบบต่างๆ นอกจากนี้มาตรฐานนี้ควรที่จะแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสูตรซึ่งใช้ในมาตรฐานกับข้อมูลจริงเพื่อยืนยันความถูกต้องของมาตรฐาน

6. มาตรฐานการคำนวณแรงลมของยุโรป [European Prestandard 1995]

6.1 การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า

วิธีการกำหนดแรงลมมี 3 วิธีคือ วิธีการอย่างง่าย วิธีการอย่างละเอียด และวิธีการทดสอบในอุโมงค์ลม

หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำบนพื้นผิวอาคารสามารถคำนวณได้จากสมการ (47)

$$W = q_{ref} C_e(z) C_p \qquad (47)$$

โดยที่

W = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำต่อพื้นผิวของอาคาร มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเมตร

q_{ref} = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องความเร็วลมเฉลี่ย (the reference mean wind velocity pressure)

$C_e(z)$ = ค่าสัมประสิทธิ์ เนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (the exposure coefficient)

C_p = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (the pressure coefficient)

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องความเร็วลมเฉลี่ย (q_{ref}) สามารถคำนวณได้จากสมการ(48)

$$q_{ref} = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{g}\right) v_{ref}^2 \qquad (48)$$

ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากสภาพภูมิประเทศ ($C_e(z)$) เป็นค่าซึ่งรวมผลของความขรุขระ ของพื้นผิวลักษณะภูมิประเทศ ความเข้ม และระดับความสูงของความเร็วลมเฉลี่ย นอกจากนี้ยังรวมผลเนื่องจากการแปรปรวนของลมอีกด้วย ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากสภาพภูมิประเทศสามารถคำนวณได้จากสมการ (49)

$$C_e(z) = \frac{q(z)(1+2k_p I_v(z))}{q_{ref}} \qquad (49)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร(C_p) ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคาร ทิศทางลม และลักษณะการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมตามความสูงอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันและแรงดูดที่กระทำภายนอกอาคารสำหรับอาคารที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมโดยทั่วไป กำหนดให้มีค่าเป็น +0.8 ทางด้านต้นลมและ –0.5 ทางด้านท้ายลม

ค่าประกอบพลศาสตร์(C_d) เป็นค่าซึ่งรวมผลของการลดลงเนื่องจาก ความไม่ต่อเนื่องของแรงดันลมที่กระทำต่ออาคาร และ การเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ความถี่ของลมแปรปรวน มีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ค่าประกอบพลศาสตร์สามารถหาค่าได้จากสมการ (50)

$$C_d = \frac{1+2k_p I_v(z_{equ})\sqrt{Q_0^2 + R_x^2}}{1+7I_v(z_{equ})} \qquad (50)$$

ค่าตัวแปรต่างๆในมาตรฐานนี้สามารถหาได้จากภาพหรือตาราง ใน มาตรฐานการคำนวณแรงลมของยุโรป [European Prestandard 1995]

6.2 การคำนวณการสั่นไหวของอาคาร

การสั่นไหวของอาคาร

อัตราเร่งรากกำลังสองเฉลี่ยในแนวราบในทิศทางลมของอาคารสามารถคำนวณได้จากสมการ(51)

$$\sigma_{\ddot{x}} = \frac{\Phi_{1,x}\rho b C_f V_m^2(z_{equ})}{m_{1,x}} I_v(z_{equ}) R_x K_x \qquad (51)$$

6.3 การวิจารณ์มาตรฐาน

มาตรฐานนี้มีความละเอียดอย่างมาก และมีประโยชน์อย่างยิ่งในเรื่องค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม อย่างไรก็ตามการคำนวณหาค่าอัตราเร่งเฉลี่ยรากกำลังสองเฉลี่ย ในมาตรฐานนี้สมการต่างๆมากจนเกินไป ไม่มีการจำกัดขอบเขตให้แคบลงเพื่อความสะดวกในการใช้ ทำให้เสียเวลาอย่างมากในการคำนวณ นอกจากนี้ข้อเสียของมาตรฐานนี้อีกประการหนึ่งคือ มาตรฐานนี้ยังไม่มีการคำนึงถึงผลการตอบสนองของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และการบิดของอาคาร

7. มาตรฐานการคำนวณแรงลมของออสเตรเลีย [Australian Standard 1989]

7.1 การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า

วิธีการกำหนดแรงลมแบ่งออกเป็น 3 วิธีได้แก่ วิธีอย่างง่าย (Simplified Procedure) วิธีอย่างละเอียด วิเคราะห์โดยวิธีสถิตยศาสตร์ (Detailed Procedure : Static Analysis) และวิธีอย่างละเอียด วิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ (Detailed Procedure : Dynamic Analysis)

หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวอาคารสามารถคำนวณได้จากสมการ (52)

$$\overline{F}_z = \sum C_{p,e}\overline{q}_z A_z \qquad (52)$$

โดยที่

$\overline{F}_z$ = แรงลมเฉลี่ยสุทธิในเวลาหนึ่งชั่วโมงที่กระทำต่ออาคารในแนวราบที่ความสูง z มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเมตร

$C_{p,e}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (pressure coefficient)

$\overline{q}_z$ = หน่วยแรงดันลมอิสระเฉลี่ยในเวลาหนึ่งชั่วโมง (free stream hourly mean dynamic wind pressure) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร

มาตราฐานการคำนวณแรงลมของออสเตรเลีย แบ่งลักษณะภูมิประเทศออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้ ภูมิประเทศแบบที่ 1 ได้แก่ พื้นที่เปิดโล่ง บริเวณท้องทะเล มีสิ่งกีดขวางน้อยมากหรือไม่มี ภูมิประเทศแบบที่ 2 ได้แก่ พื้นที่เปิด บริเวณทุ่งกว้าง มีสิ่งกีดขวางน้อย ภูมิประเทศแบบที่ 3 ได้แก่ พื้นที่เขตชานเมือง หรือศูนย์กลางเมืองเล็ก มีอาคารหนาแน่นปานกลาง และภูมิประเทศแบบที่ 4 ได้แก่ พื้นที่ศูนย์กลางเมืองใหญ่ อาคารส่วนใหญ่เป็นอาคารสูง มีความหนาแน่นของอาคารมาก

ความเร็วลมอ้างอิง (V) คือค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงที่ความสูง 10เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศโล่งมีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร ผู้ใช้อาจจะเลือกค่าสัมประสิทธิ์แรงดันเป็น 0.8 หรือ 0.7 ค่าแรกเป็นค่าที่เหมาะสมมากกว่าสำหรับอาคารซึ่งมีค่าอัตราส่วนความสูง โดยที่มีความสูงมากกว่าความกว้างหรือความลึกของอาคาร แต่สำหรับอาคารส่วนใหญ่ซึ่งมีความสูงประมาณ 20 เมตร ค่าที่สองจะมีความเหมาะสมมากกว่า

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (Gust Factor, G) สามารถหาได้จากสมการ (53)

$$G = 1 + r\sqrt{g_v^2 B(1+w)^2 + (g_f^2 SE)/\xi} \qquad (53)$$

ค่าตัวแปรต่างๆในมาตรฐานนี้สามารถหาได้จากภาพหรือตารางใน มาตรฐานการคำนวณแรงลมของออสเตรเลีย [Australian Standard 1989; Holmes et al. 1990]

7.2 การคำนวณการโก่งตัวทางด้านข้างและการสั่นไหวของอาคาร

การโก่งตัวทางด้านข้าง ($\hat{x}$)หรือ ค่าการเคลื่อนที่สูงสุด (peak displacement) สามารถหาได้จากสมการ (54)

$$\mathfrak{x} = \frac{\hat{M}}{M_I} = \frac{\hat{M}}{\frac{1}{3}\rho bdh(2\pi n_a)^2} \qquad (54)$$

การสั่นไหวของอาคาร(Building Motion)

อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบในทิศทางลม ($\hat{\ddot{x}}$) สามารถหาได้จากสมการ (55)

$$\hat{\ddot{x}} = \mathfrak{x}(2\pi n_a)^2 \qquad (55)$$

อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ($\hat{\ddot{y}}$) สามารถหาได้จากสมการ(56)

$$\hat{\ddot{y}} = \frac{(1.5 g_f \overline{q}_h b)}{m_0}(0.76 + 0.24k)\sqrt{(\pi C_{fs})/\xi} \qquad (56)$$

7.3 การวิจารณ์มาตรฐาน

มาตรฐานนี้อธิบายค่าตัวแปรต่างๆ และการใช้ได้อย่างละเอียด คำอธิบายและตารางต่างๆสามารถใช้ได้ง่าย ทำให้การคำนวณค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม ค่าโมเมนต์ดัด และการตอบสนองของอาคารสามารถทำได้อย่างไม่ยุ่งยาก ข้อดีประการหนึ่งของมาตรฐานนี้คือมีการพิจารณาถึงค่าการตอบสนองของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมโดยการใช้สัมประสิทธิ์สเปกตรัมของแรงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมในลักษณะของโหมดเชิงเส้น อย่างไรก็ตามค่าสเปกตรัมของแรงต้องพิจารณาจากสเปกตรัมซึ่งจำกัดโดยรูปร่างลักษณะของอาคาร และ อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของอาคาร ดังนั้นอาจจะต้องใช้การประมาณค่าโดยวิธีการ interpolation ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของอาคารที่ต้องการไม่เท่ากับภาพในมาตรฐาน หรือในกรณีที่ต้องเลือกรูปร่างของอาคารที่มีความใกล้เคียงที่สุดในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สเปกตรัมของแรง ถ้ารูปร่างของอาคารที่ต้องการนั้นไม่ตรงกับภาพใน

มาตรฐาน เช่นเดียวกับการทดลองในอุโมงค์ลมโดยการทดสอบอาคารหลายๆอาคารซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของอาคาร ทำให้ค่าสเปกตรัมมีค่าหลากหลาย ดังนั้นในการประมาณค่าโดยวิธีการ interpolation จะสะสมความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่ากระตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัมของแรงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมมีความไวต่อระดับของความปั่นป่วนในการไหลของลม และค่าอัตราส่วนความสูงของอาคารต่อความกว้างของอาคารอย่างมากดังแสดงในรายงานผลการทดลองในอุโมงค์ลมของ Simui และ Scanlan [1996] ความไวนี้เป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากในการศึกษาการทดลองในอุโมงค์ลมแบบต่างๆนั้น แม้ว่าจะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ส่วนที่มีความแตกต่างกันก้คือการแปรเปลี่ยนของความปั่นป่วนของลมตลอดความสูงของแบบจำลอง มาตรฐานนี้เป็นเพียงมาตรฐานเดียวซึ่งตีพิมพ์เรื่องของอาคารที่เป็นจตุรัสซึ่งรับแรงลมแบบปั่นป่วนด้วย

8. การทดสอบในอุโมงค์ลม

วิธีการในการตรวจสอบหาหน่วยแรงลมที่กระทำต่ออาคาร และการตอบสนองของอาคารต่อแรงลมที่ให้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุดคือการตรวจวัดอาคารในสถานที่จริงซึ่งเป็นเรื่องที่ทำได้ยากในทางปฏิบัติ นอกจากนี้การคำนวณตามทฤษฎีก็เป็นสิ่งที่สามารถทำได้ยากมากเช่นกัน เนื่องจากสมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายกลศาสตร์ของอากาศที่เคลื่อนที่ มีความซับซ้อนมาก และมีพารามิเตอร์หลายอย่างในระบบที่ต้องเป็นไปภายใต้เงื่อนไขของสมการ เงื่อนไขเหล่านี้แสดงถึงลักษณะของอาคารและสภาพแวดล้อม แม้ว่าจะมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์การคำนวณ โดยวิธีนิวเมอร์ริคัล สำหรับการคำนวณแรงลมที่กระทำต่ออาคารภายใต้การเคลื่อนที่ของลมแบบปั่นป่วน จะสามารถให้ค่าที่ถูกต้องแน่นอนได้เพียงบางกรณีเท่านั้น อย่างไรก็ตามศักยภาพของคอมพิวเตอร์ที่มีการพัฒนาในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา และงานวิจัยทางด้านการคำนวณแรงลมได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีความคาดหวังว่าจะสามารถใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาหน่วยแรงลมที่กระทำต่ออาคารได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น

วิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคารคือการทดสอบโดยการใช้แบบจำลองทดสอบในอุโมงค์ลม โดยเฉพาะกับอาคารลักษณะพิเศษแบบต่างๆ ซึ่งไม่ครอบคลุมอยู่ในมาตรฐานการคำนวณแรงลม หลักการของแบบจำลอง [Wind Tunnel Studies 1999; Claes and Svend 1996; Simiu and Scanlan 1996] คือ แบบจำลองจะแสดงถึงเงื่อนไขสำหรับการทดสอบแบบจำลอง และผลการทดสอบที่ตรงกับต้นแบบ แบบจำลองที่สร้างขึ้นต้องเป็นแบบจำลองที่ให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางกายภาพโดยทั่วไป หลักการของแบบจำลองถูกกำหนดโดยจำนวนพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ หรือโดยคำนึงถึงระบบของสมการซึ่งทราบ เพื่อแสดงถึงลักษณะของปรากฏการณ์ที่สัมพันธ์กัน ในส่วนของวิศวกรรมทางด้านลม แล้วมีจำนวนพารามิเตอร์มากมาย ซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะสามารถทำให้ถูกต้องได้ทุกเงื่อนไข ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดจำนวนพารามิเตอร์ซึ่งมีความสำคัญน้อยออกไป

อุโมงค์ลมที่มีการพัฒนาใช้กันมาจนถึงปัจจุบัน มีลักษณะทั่วๆไปดังนี้ คือ ความกว้าง 6 -12 ฟุต (2-4 เมตร) ความสูง 6-10 ฟุต (2-3 เมตร) และความยาว 50-100 ฟุต (15-30เมตร) ค่าความเร็วลมสูงสุดอยู่ในช่วง 25-100 ไมล์/ชั่วโมง (10-45 เมตร/วินาที) อุโมงค์ลมมีทั้งแบบระบบเปิดและระบบปิด

ในปัจจุบันประเทศไทยเริ่มมีการศึกษาวิจัยการตอบสนองของอาคารโดยการทดสอบในอุโมงค์ลม [Lukkunaprasit and Phiensusom 1992; วานิชชัย และคณะ 2537] ซึ่งคาดว่าในอนาคตจะมีการใช้วิธีนี้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น

9. สรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบหลักการ และวิธีการในการคำนวณหาค่าแรงลมและการตอบสนองของอาคารต่อแรงลม โดยวิธีการตามมาตรฐานต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระดับขั้นตอนในการวิเคราะห์หาแรงลม และการตอบสนองของอาคาร โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ระดับในระดับแรกใช้สำหรับอาคารเตี้ย หรืออาคารไม่ต้องคำนึงถึงผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ ระดับที่สองใช้สำหรับอาคารที่ต้องคำนึงถึงผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของอาคารด้วย และระดับสุดท้ายใช้สำหรับอาคารที่มีความอ่อนไหวอย่างยิ่งต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์ ซึ่งในระดับสุดท้ายนั้นบางมาตรฐานกำหนดให้ใช้การวิเคราะห์โดยการทดลองในอุโมงค์ลม

2. การแบ่งลักษณะภูมิประเทศ ตามมาตรฐานต่างๆแบ่งออกได้เป็น 3 ถึง 5 ประเภท ซึ่งลักษณะภูมิประเทศเหล่านี้มีผลกระทบต่อลักษณะของลมที่กระทำกับอาคาร และการตอบสนองของอาคาร

3. มาตรฐานต่างๆมีวิธีในการหาค่าความเร็วลมอ้างอิง เหมือนและแตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปจะทำการวัดที่ความสูง และลักษณะภูมิประเทศซึ่งคล้ายคลึงกัน สำหรับช่วงเวลาในการหาค่าความเร็วลมอ้างอิงของมาตรฐานมีความแตกต่างกันบ้าง ซึ่งมีผลอย่างยิ่งต่อการกระโชกของลมในช่วงเวลานั้นๆส่งผลทำให้ค่าแรงลมที่กระทำกับอาคาร และค่าการตอบสนองต่างๆของอาคารมีความแตกต่างกัน

4. ในการหาแรงลมที่กระทำกับอาคารทางด้านท้ายลมโดยทั่วไปคิดที่ความสูงครึ่งหนึ่งของความสูงของอาคาร มีเพียงมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ซึ่งคิดที่ความสูงของยอดอาคาร

5. สำหรับการคำนวณหาการตอบสนองของอาคารนั้น มีเพียงมาตรฐานเดียวซึ่งมีการวิเคราะห์หาผลการตอบสนองของอาคารทั้งในทิศทางลม ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และการบิดของอาคารนั่นคือ วิธีการคำนวณแรงลมของญี่ปุ่น มาตรฐานซึ่งมีการวิเคราะห์หาการตอบสนองของอาคารในทิศทางลมและและทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมได้แก่

มาตรฐานของไทย แคนาดา และออสเตรเลีย สำหรับมาตรฐานซึ่งมีการวิเคราะห์การตอบสนองของอาคารในทิศทางลมเท่านั้น ได้แก่มาตรฐานของสหรัฐอเมริกา และ ยุโรป

10. เอกสารอ้างอิง

AIJ Recommendation for Loads on Buildings (1993), Architectural Institute of Japan, Japan.

AIJ Recommendation for Loads on Buildings (1996), Architectural Institute of Japan, Japan.

ASCE Standard (1995), ASCE7-95: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (1995), American Society of Civil Engineers, New York.

Australian Standard (1989), Minimum Design Loads on Structures (known as the SAA Loading Code) Part 2 : Wind Loads, Standards Australia, Sydney.

National Building Code of Canada (1995), National Research Council of Canada .

Boggs, D.W., and Peter, J.A. (1989), "Aerodynamic model tests of tall buildings," *J. of Eng. Mech., ASCE,* Vol. 115(3), pp. 618-635

Bungale, S., and Tarana (1989),TH. Structural analysis and design of tall buildings. 1Ed.: McGraw-Hill.

Claes, D.,and Svend, O.H. (1996). Wind loads on structures. : John Wiley &Sons, New York, N.Y. .

Davenport, A.G. (1967), "Gust loading factors" *J.of Str. Div.,* ASCE, Vol.93 (ST3), pp. 11-34

ESDU (1989), "Calculation methods for along-wind loading. Part 3 : Response of buildings and plate-like structures to atmospheric turbulence." Item No.88019, with amendments A & B. ESDU International, London, March.

European Prestandard (1995), Ratified European Text, Eurocode 1 : Basis of design and actions on structures-Part 2-4 : Actions on Structures-Wind Actions, European Committee for Standardization.

Gurley, K. and Kareem, A.(1993), "Gust loading factors for tension leg platforms" *App. Ocean Research,* Vol.15(3), pp.137-154.

Ginger J.D., Reardon G.F., Whitbread B.J. (1999), Wind load effects and equivalent pressures on low-rise house roofs, Engineering Structures : ELSEVIER.

Holmes J.D., Melbourne W.H., Walker G.R. (1990), A commentary on the Australian standard for wind loads, Australian Wind Engineering Society, Australia.

Kareem. A.(1982), "Acrosswind response of buildings", *J. of Structural Engineering ASCE.,* Vol.108(ST4), pp. 869-887.

Kareem. A. (1985), "Lateral-torsional motion of tall buildings to wind loads" , *J. of Structural Engineering ASCE.,* Vol.111(11), pp. 2749-2496.

Kareem. A., Tognarelli. M., and Gurley K. (1997), "Modeling and analysis of quadratic term in the wind effects on structures", *Proc. of The 2nd European Conf. On Wind Eng.,* Genova, Italy.

Kareem. A., and Kijewski T. (1998), "Dynamic wind effects: a comparative study of provisions in codes and standards with wind tunnel data", *J. of Wind and Structures.,* Vol.1, pp.77-109.

Lee. B.E., and Ng. W.K. (1988), "Comparisons of estimated dynamic along-wind responses", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol.30, pp.153-162.

Loh, P., and Isyumov, N. (1985), "Comparisons of wind loads on tall buildings and comparisons with code values", *Proc. Of the 5th US Natl. Conf. On Wind Eng.,* Lubbock, Texas

Lukkunaprasit, P., and Phiensusom, P. (1992), "Final report on wind tunnel studies of Jewelry Trade Center Complex", 1992

National Building Code of Canada (1995), Canadian Commission on Building and the Codes, National Research Council, Canada

Simui, E. (1976), "Equivalent static wind loads for tall building design" *J. of Struct. Div., ASCE,* Vol.102(4), pp. 719-737.

Simiu, E., and Scanlan, R.H. (1996), *Wind effect on structures Fundamentals and Applications to Design*, 3Ed., John Willey & Sons, New York, N.Y.

Solari, G. (1982), "Alongwind response estimation. Closed from solution" *J. of Struct. Div., ASCE,* Vol.108(1), pp. 225-244.

Suwatparnich A. (1995), "Development of wind-resistant design code for buildings in Thailand." *Master Thesis*, Asian Institute of Technology, Thailand

Tamura Y., Kawai H., Uematsu Y., Marukawa H., Fujii K., and Taniike Y. (1996), "Wind load and wind-induced response estimations in The Recommendations for Loads on Buildings , AIJ 1993 , *J. of Engineering Structures*, Vol.18, pp. 399-411.

Tamura Y., Ohkuma T., Okada H., Kanda. J. (1999), " Wind loading standards and design criteria in Japan", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol.83, pp.555-566.

Vellozi, J. and Cohen, H. (1968), "Gust response factors" *J. Struct. Div., ASCE*, Vol.97(6), pp. 1295-1313.

Vickery, P.J., *et al* (1985), "On the reliability of gust loading factors" *Proc. of Technical Mtg. : Wind Loads*, NBS. Washington, D.C.

Wind Tunnel Studies of Building and Structures (1999), Task Committee on Wind Tunnel Testing of Buildings and Structures, ASCE.

Zhou, Y., KijewskiT., Kareem A. (2002), "Along wind load effects on tall buildings: comparative study of major international codes and standards " *J. of Structural Engineering ASCE.*, Vol.128(6), pp. 788-796.

ทวิสัณห์ คงทรัพย์ , ทรงฤทธิ์ ชยานันท์ และ ภูษิต อัสสมงคล (2539) "การคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารสูงในประเทศไทย" ปริญญานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปณิธาน ลักคุณประสิทธิ์, พูลศักดิ์ เพียรสุสม และ นรินทร์ เอื้อศิริวรรณ (2538) "หน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารสูงในประเทศไทย" เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 2, หน้า 51-61, เชียงใหม่

ประพฤทธิ์ ทรงจิตรักษา และ รัฐพล บำรุงกิตติกุล (2540) "การเปรียบเทียบมาตรฐานหน่วยแรงลม ASCE7-5 และ NBC 1990" ปริญญานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เป็นหนึ่ง วานิชชัย , สุกิตย์ เทพมังกร, ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ และ วรศักดิ์ กนกนุกูลชัย (2537) "การศึกษาพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารพัทยาพาร์ค ทาวเวอร์ เมื่อรับแรงลม โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม", เอกสารการประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2537, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, เล่มที่ 1, หน้า CE-239 ถึง CE-259

พนมกร พันธ์ชูเชิด , จักรา กวีวรากร และ สุวิทย์ พันธ์มานะเจริญผล (2540) "การคำนวณเปรียบเทียบแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารสูงโดยใช้มาตรฐานของประเทศไทย แคนาดา และญี่ปุ่น" ปริญญานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

วิโรจน์ บุญญภิญโญ (2541) "การคำนวณเปรียบเทียบแรงลมและแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบอาคารสูงในประเทศไทย" เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติเรื่อง การออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหว, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย และ Japan, International Cooperation Agency, หน้า 416-432, เชียงใหม่

สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (2546), มาตรฐานการคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบอาคาร