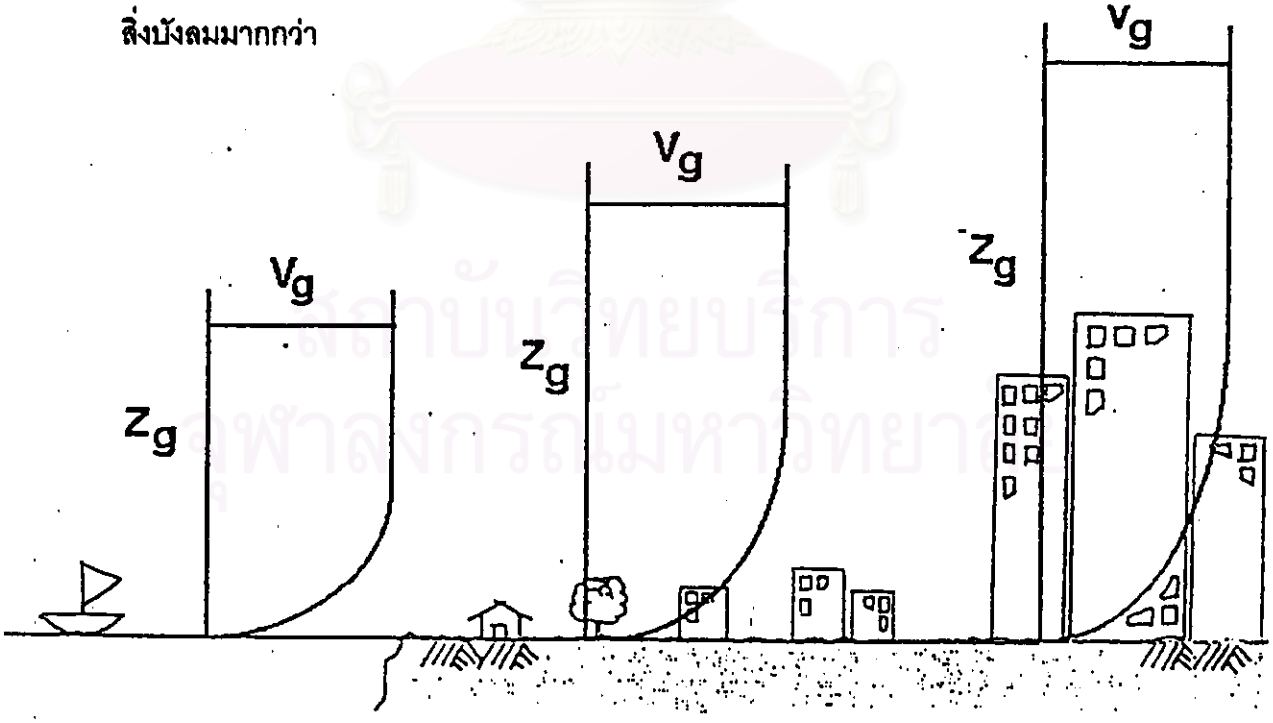
บทที่ 3
แรงด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้าง

3.1 ลมและธรรมชาติของลม

ลม คือ การเคลื่อนที่ของอากาศสัมพันธ์กับพื้นผิวโลก โดยพื้นฐานแล้วเกิดจากความแตกต่างของความดันอากาศที่ระดับความสูงเดียวกัน เนื่องจากความร้อนของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศระหว่างจุดที่มีความดันแตกต่างกัน

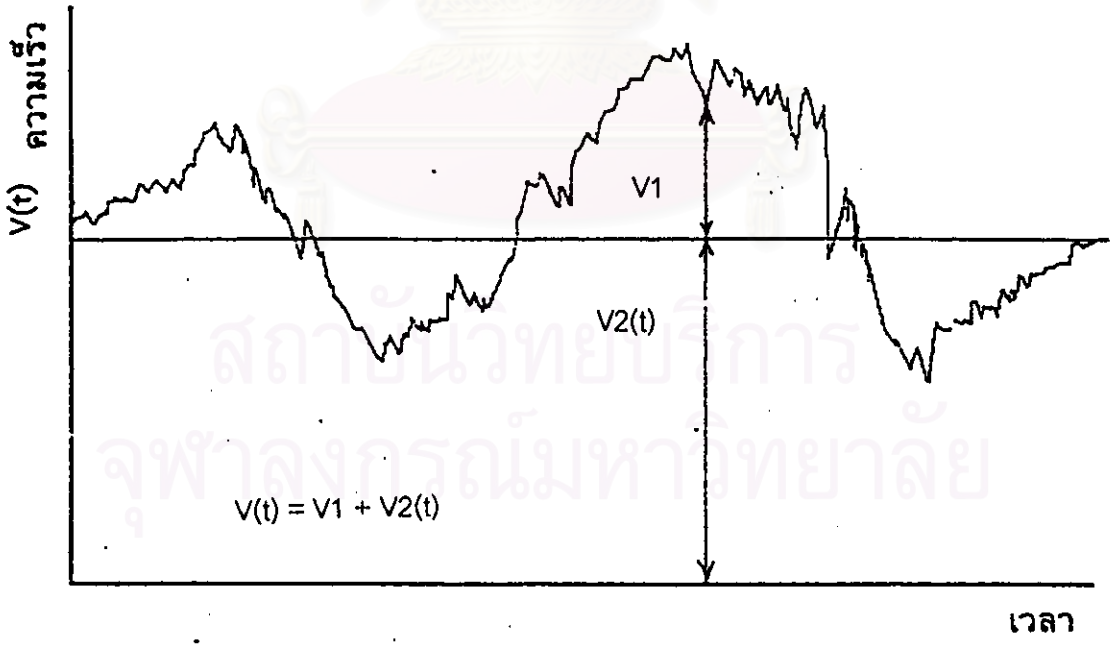
อากาศเป็นของเหลวชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติความหนืด คุณสมบัตินี้ทำให้การเคลื่อนที่ของอากาศบริเวณที่ติดกับผิวโลกมีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นที่ชั้นการไหลของอากาศบริเวณที่ติดกับผิวโลก และได้ส่งผลต่อการไหลของอากาศในชั้นถัดๆ ไปที่อยู่ติดกัน ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศในชั้นต่าง ๆ ถูกรบกวน มีค่าไม่คงที่ นอกจากนี้ ความเสียดทานเนื่องจากสภาพความขุรขระของผิวโลกมีผลรบกวนต่อการเคลื่อนที่ของอากาศด้วย โดยทำให้การไหลของอากาศเป็นไปแบบไม่ราบเรียบ (Turbulent flow) ซึ่งการไหลแบบนี้ ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศที่ลมพัดผ่านอิทธิพลนี้ส่งผลต่อรูปร่างและขนาดของการกระจายความเร็วลมเฉลี่ยตามระดับความสูงจากพื้นดิน (Wind profile) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากรูปเห็นได้ว่า ที่ระดับความสูงเดียวกัน ในพื้นที่ที่โล่งกว่า มีสิ่งบังลมน้อยกว่า จะมีขนาดความเร็วลมที่มากกว่า พื้นที่ที่มีสิ่งบังลมมากกว่า



รูปที่ 3.1 แสดงการกระจายความเร็วลมเฉลี่ยตามระดับความสูงในสภาพภูมิประเทศแบบต่าง ๆ

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศเมื่อเทียบกับผิวโลก จะเริ่มต้นจากเกือบมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณติดกับผิวโลก แล้วค่อย ๆ เพิ่มขนาดความเร็วตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ผลของการถูกรบกวนเนื่องจากสภาพภูมิประเทศต่อการเคลื่อนที่ของอากาศ จะมีจนถึงความสูงระดับหนึ่งเท่านั้น ถัดขึ้นไปจากระดับนี้แล้ว ความเร็วของลมจะเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลย และเรียกระดับความสูงนี้ว่า ความสูงเกรเดียนท์ (Gradient height, Zg) และเรียกความเร็วลมที่ระดับความสูงเกรเดียนท์นี้ว่า ความเร็วลมเกรเดียนท์ (Gradient wind speed, Vg) ช่วงความสูงที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศถูกรบกวนว่า ช่วงบรรยากาศชั้นขอบเขต (Boundary layer)

เนื่องจากอากาศมีความหนืดต่ำ มีการฟุ้งกระจายได้ง่าย เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ อาจเกิดการไหลแบบไม่ราบเรียบ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางของการไหลตลอดเวลา ในทางวิศวกรรมโครงสร้าง อาจคิดได้ว่าความเร็วลมในธรรมชาติ V(t) ประกอบด้วยสองส่วนคือ ความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลาที่พิจารณา V1 และความเร็วลมที่แกว่งไปมารอบ ๆ ความเร็วลมเฉลี่ยนั้น V2(t) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การแปรเปลี่ยนความเร็วลมตามเวลา

Davenport ได้เสนอวิธีการหาความเร็วลมที่ระดับความสูง Z ม.จากพื้นดิน โดยใช้กฎการยกกำลัง (Power law) ซึ่งแสดงดังสมการ (3.1)

$$\frac{V}{V_g} = \left(\frac{Z}{Z_g}\right)^{\alpha} \qquad (3.1)$$

เมื่อ V = ความเร็วลมที่ระดับความสูงจากพื้นดิน Z ม.

V_g = ความเร็วลมเกรเดียนท์ที่ระดับความสูงเกรเดียนท์

α = ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ

Davenport (1960) ศึกษาและรวบรวมสภาพภูมิประเทศแบบต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกระจายความเร็วลมที่ระดับความสูงต่าง ๆ ได้เสนอว่า ค่าตัวเลขยกกำลัง α มีค่าคงที่ ณ ความสูงเกรเดียนท์หนึ่ง ๆ และขึ้นอยู่กับความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ

Davenport ได้แบ่งลักษณะของความขรุขระของสภาพภูมิประเทศแบบต่าง ๆ ออกเป็น 8 แบบ ดังตารางที่ 3.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 แสดงการแบ่งลักษณะความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ ค่าความสูงเกรเดียนท์ และค่าตัวเลขยกกำลัง

แบบ	สภาพภูมิประเทศ	α	Zg (เมตร)
1	พื้นที่ผิวราบเรียบมาก เช่น สภาพผืนน้ำเปิดกว้างโล่ง	1 / 8.5	245
2	พื้นที่ราบ มีสิ่งบดบังผิวหน้าขนาดต่ำ เช่น ทุ่งหญ้ากว้าง ทะเลทราย	1 / 7.5	275
3	พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน มีสิ่งบดบังพื้นผิวขนาดใหญ่ขึ้น เช่น พื้นที่การเกษตรที่มีต้นไม้และสิ่งปลูกสร้างกระจัดกระจายห่างกันมาก ๆ	1 / 6.5	300
4	พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน มีวัตถุหรือแนวสิ่งกีดขวางทางลมขนาดเตี้ย เช่น ทุ่งนาโล่งมีแนวต้นไม้เตี้ย ๆ และมีสิ่งปลูกสร้างกระจัดกระจาย	1 / 5.5	335
5	พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน พื้นผิวกระจายไปด้วยสิ่งกีดขวางทางลมขนาดต่าง ๆ จำนวนมาก เช่น พื้นที่การเกษตรที่มีพื้นที่โล่งน้อย มีแนวต้นไม้กีดขวางทางลมหนาแน่นกว่าแบบที่ 4 หรือมีอาคารขนาด 2 ชั้นกระจัดกระจาย	1 / 4.5	365
6	พื้นที่ลุ่มดอนหรือพื้นที่ราบ มีสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากและสม่ำเสมอ เช่น ป่า ป่าแคระ หรืออุทยานป่า	1 / 3.5	410
7	พื้นที่กระจายเต็มไปด้วยสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่ เช่น พื้นที่ในเมืองหรือบริเวณรอบ ๆ เมืองขนาดใหญ่	1 / 3	460
8	พื้นที่เต็มไปด้วยสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่โตมาก เช่น บริเวณใจกลางเมืองหลวงขนาดใหญ่	1 / 2.5 – 1 / 1.5	550

ข้อกำหนดแรงลมของ National Building Code 1990

ตามข้อกำหนดมาตรฐานแรงลมของ National Building Code 1990 กำหนดว่าหน่วยแรงลมที่กระทำตั้งฉากกับผิวภายนอก สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$P = qC_eC_gC_p \qquad (3.2)$$

โดยที่ P = หน่วยแรงดันสถิตเทียบเท่า (Equivalent static pressure) ซึ่งกระทำในแนวตั้งฉากกับผิวอาคาร

q = หน่วยแรงลมอ้างอิง (Reference wind pressure)

$= \frac{1}{2}\rho V^2$

C_e = ตัวประกอบสภาพภูมิประเทศ (Exposure factor)

C_g = ตัวประกอบผลกรรโชก (Gust effect factor)

C_p = สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดัน (Pressure coefficient)

ในการคำนวณมีรายละเอียดและสิ่งต้องใช้ในการคำนวณ ดังนี้

1. ความเร็วลมอ้างอิง (Reference wind speed, V) คือความเร็วลมที่ระดับความสูง 10 ม. จากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศเปิดโล่ง.

2. หน่วยแรงลมอ้างอิง (Reference Wind Pressure, q) คือหน่วยแรงลมที่ระดับความสูงอ้างอิง 10 ม.

โดยที่ $q = CV^2$

$= \frac{1}{2}\rho V^2$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.2929 กก./ม^3 ที่ 0°C และความดันบรรยากาศมาตรฐานโดยทั่วไปมีค่า 1.25 กก./ม^3 ที่อุณหภูมิ 30°C

q = 0.0637 V^2 กก./ม^2

โดยที่ V มีหน่วยเป็น ม./วินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ตัวประกอบสภาพภูมิประเทศ (Exposure factor, Ce) คือ ตัวประกอบที่ใช้ในการคำนวณหาการกระจายแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างตามระดับความสูงต่าง ๆ จากระดับพื้นดิน สามารถแบ่งลักษณะสภาพภูมิประเทศออกเป็น 3 แบบ

แบบ A : สภาพภูมิประเทศแบบโล่ง มีอาคารหรือต้นไม้กระจัดกระจาย เช่น พื้นที่น้ำเปิดโล่ง หรือบริเวณชายฝั่งที่ราบเรียบ เป็นสภาพภูมิประเทศที่ใช้อ้างอิงถึงความเร็วลมอ้างอิง

$$Ce = (Z/10)^{0.28}$$

แบบ B : สภาพภูมิประเทศบริเวณชานเมือง หรือนอกเมืองหลวง หรือพื้นที่ป่าไม้อุดมสมบูรณ์ หรือบริเวณใจกลางเมืองเล็ก ๆ

$$Ce = 0.5 (Z/12.7)^{0.50}$$

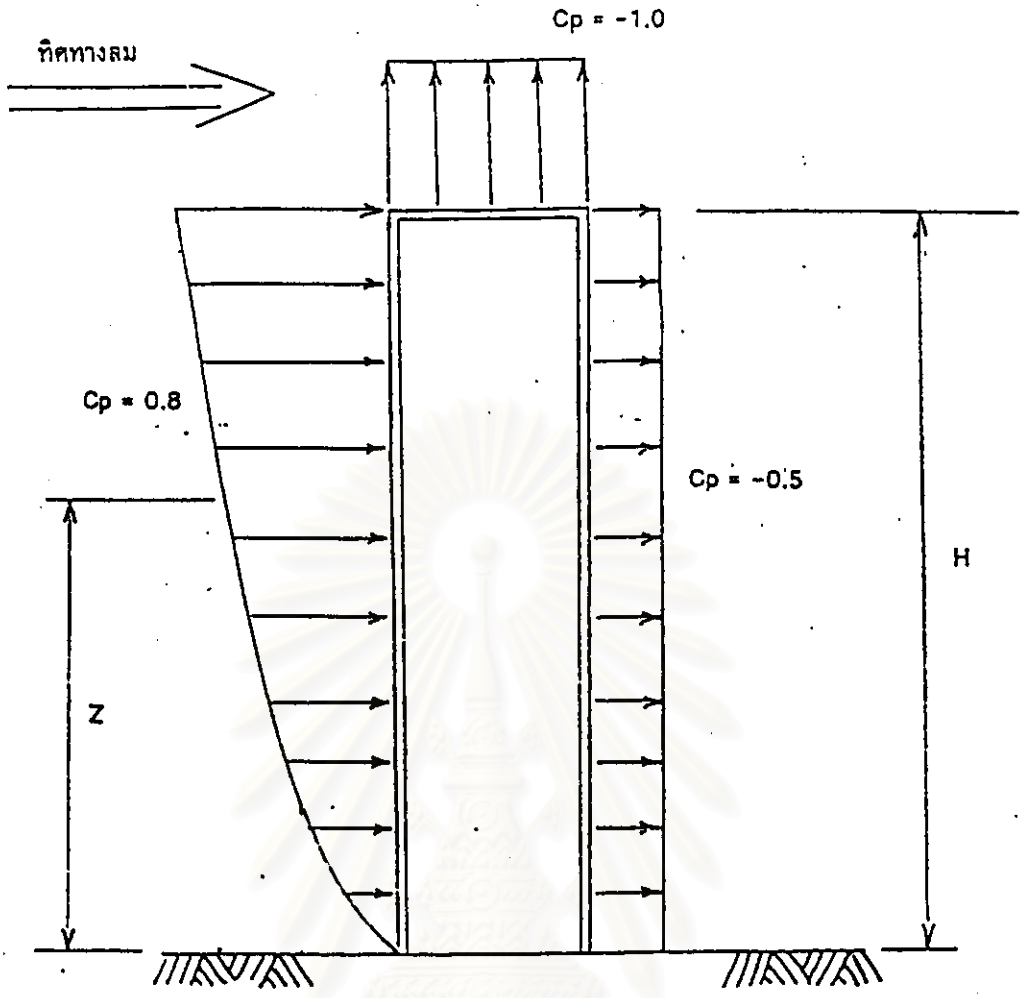
แบบ C : สภาพภูมิประเทศบริเวณใจกลางเมืองหลวง มีอาคารสูงหนาแน่น และอย่างน้อย 50% ของอาคารมีขนาดความสูงเกิน 4 ชั้น

$$Ce = 0.4 (Z/30)^{0.72}$$

4. ตัวประกอบผลการกรรโชก (Gust effect factor, C_g) คือ อัตราส่วนของผลสูงสุดต่อผลเฉลี่ยของการรับแรงของโครงสร้างในการคำนวณอย่างง่าย C_g มีค่าเท่ากับ 2.0 สำหรับส่วนของโครงสร้างทั้งหมด หรือเท่ากับ 2.5 สำหรับส่วนประกอบขนาดเล็กของโครงสร้าง

5. ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดัน (Pressure coefficient, Cp) คือ อัตราส่วนไร้มิติของหน่วยแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากแรงลมบนผิวอาคารต่อแรงดันพลศาสตร์ ที่ระดับความสูงอ้างอิง ค่า Cp สามารถหาได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม สำหรับอาคารที่มีรูปร่างในแนวราบเป็นสี่เหลี่ยม ค่า Cp ในด้านปะทะลมมีค่าเท่ากับ 0.80 และด้านหลบลมมีค่าเท่ากับ -0.50 ดังแสดงดังรูปที่ 3.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดัน Cp และแสดงการกระจายหน่วยแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารตามระดับความสูง

ในการแบ่งสภาพภูมิประเทศของ Davenport และ National Building Code 1990 สามารถเปรียบเทียบกันได้ดังนี้

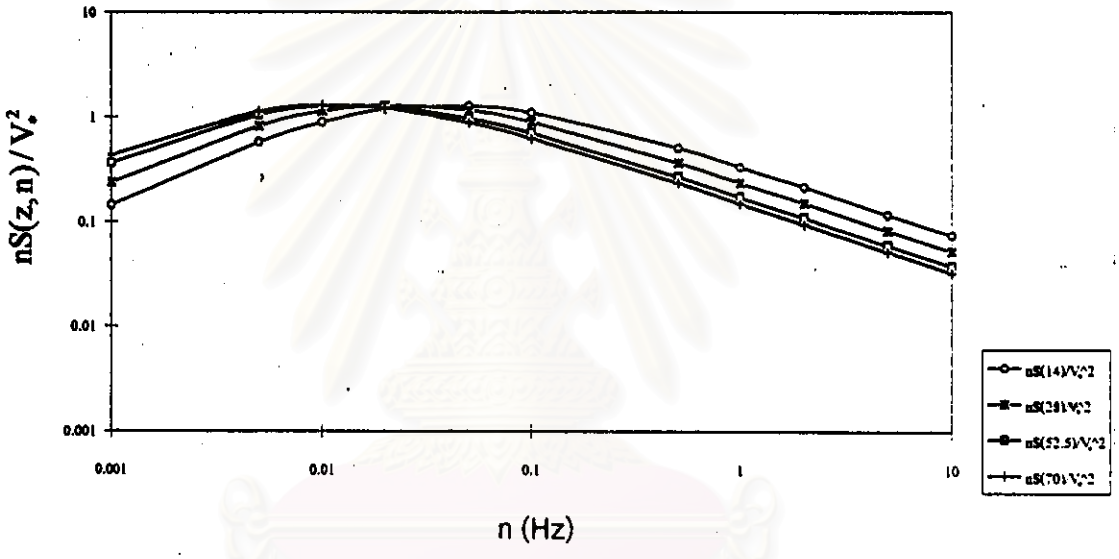
ตารางที่ 3.2 การเปรียบสภาพภูมิประเทศ ระหว่าง Davenport กับ NBC 1990

แบบ	สภาพภูมิประเทศ							
Davenport	1	2	3	4	5	6	7	8
NBC 1990	A				B		C	

3.2 สเปกตรัมของความเร็วลม

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าความเร็วลม แปรผันตามเวลา โดยจะมีลักษณะไม่ซ้ำกันเลย ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะหาความเร็วลมที่เป็นฟังก์ชันของเวลา เราจึงนิยมกำหนดความเร็วลมในรูปของ ความถี่ต่างๆ ถ้ากล่าวในเชิงแคลคูลัส นั่นก็คือ คู่อนุกรมฟูเรียร์ของ $V(z,t)$ กับ $S(z,n)$ นั่นเอง

Simiu (1985) ได้เสนอสเปกตรัมแรงลมเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้าง ซึ่งสเปกตรัมของความเร็วลมได้แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สเปกตรัมของความเร็วลม

สมการสเปกตรัมของความเร็วลมที่ Simiu (1985) ได้เสนอในรูปที่ 3.4 สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{nS(z,n)}{V_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \qquad (3.4)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ลดรูป (Reduced frequency)

$= nz / \bar{V}(z)$

V_* = ความฝืดของความเร็ว (Friction velocity) ซึ่งหาได้จาก

$$\bar{V}(z) = \frac{1}{k} V_* \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \qquad (3.5)$$

k = ค่าคงที่ Von Karman มีค่าเท่ากับ 0.4

z_0 = ความยาวขุรขระ (Roughness length)

d = ความสูงที่มี Friction velocity เท่ากับศูนย์

$\bar{V}(z)$ = ความเร็วลม ณ ระดับความสูง Z ม. จากพื้น

ค่า z_0 และ d สามารถหาได้จากตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่า z_0, α, d ที่สภาพภูมิประเทศต่าง ๆ (NBC 1990)

	z_0 (m)	α	d (m)
City center	0.7	0.33	15-25
Suburban terrain	0.3	0.22	5-10
Open terrain	0.03	0.14	0
Open sea	0.003	0.10	0

3.3 การเปลี่ยนฟังก์ชันความถี่ของความเร็วลมเป็นฟังก์ชันของเวลา

ในสมการ (3.4) แสดงถึงความสัมพันธ์ของความผันผวนของความเร็วลมที่ความถี่ต่างๆ แต่สิ่งที่เราต้องการคือความเร็วลมที่เวลาต่างๆ ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงฟังก์ชันความถี่ของความเร็วลมให้เป็นฟังก์ชันเวลาของความเร็วลม

โดยทั่วไปเราสามารถเขียนฟังก์ชั่นของเวลาให้อยู่ในรูปความถี่ได้โดยการใช้อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ได้ดังนี้

$$V(z,t) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cos(\omega_i t - \theta_i) \qquad (3.6)$$

โดยที่ $V(z,t)$ = ความเร็วลมที่ความสูง z ณ เวลา t

ω_i = ความถี่ของความเร็วลม

a_i = ค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ ω_i

θ_i = ค่ามุมเปลี่ยนแปลง (Phase lag)

ให้ $E[V(z,t)]$ คือ ค่าความคาดหวังของความเร็วลม

โดยที่ $$E[V(z,t)] = \sum_{i=1}^{n} a_i E[\cos(\omega_i - \theta_i)]$$

$$= \sum_{i=1}^{n} a_i \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(\omega_i - \theta_i) d\theta_i$$

$$= 0$$

$$E[V^2(z,t)] = E\left[\sum_{i=1}^{n} a_i \cos(\omega_i - \theta_i) . \sum_{j=1}^{n} a_j \cos(\omega_j - \theta_j)\right]$$

กรณี $i \neq j$

$$E[V^2(z,t)] = \sum_{i=1}^{n} a_i \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(\omega_i - \theta_i) d\theta_i \cdot \sum_{j=1}^{n} a_j \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(\omega_j - \theta_j) d\theta_j$$

$$= 0$$

กรณี $i = j$

$$E[V^2(z,t)] = \sum_{i=1}^{n} a_i^2 \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2(\omega_i - \theta_i) d\theta_i$$

$$= \sum_{i=1}^{n} a_i^2 \frac{1}{2\pi} (\pi)$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i^2}{2}$$

และ เนื่องจาก $E[V^2(z,t)] = \sum_{i=1}^{n} S_i(\omega)\Delta\omega$

ดังนั้น $$S_i(\omega)\Delta\omega = \frac{a_i^2}{2}$$

$$a_i = \sqrt{2S_i(\omega)\Delta\omega}$$

$$\therefore V(z,t) = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{2S_i(\omega)\Delta\omega}\cos(\omega_i - \theta_i) \qquad (3.7)$$

สมการ (3.7) เป็นสมการที่ใช้แปลงความเร็วลมจากฟังก์ชันความถี่ ให้เป็นฟังก์ชันของเวลา

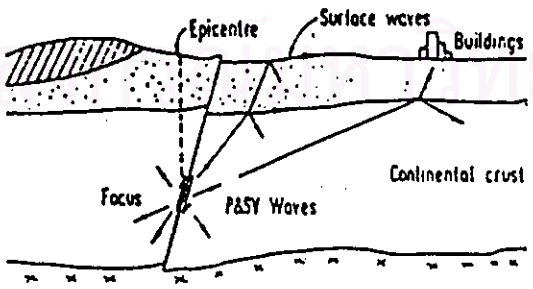
จากความสัมพันธ์ในหัวข้อ 3.1 , 3.2 และ 3.3 ทำให้เราสามารถหาแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างได้โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. หาสเปกตรัมความเร็วลมจากสมการ (3.4)
2. แปลงความเร็วลมที่ได้จากข้อ 1. ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ความถี่ต่าง ๆ มาเป็นความเร็วลมที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้สมการ (3.7)
3. แปลงความเร็วลมให้เป็นแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง โดยใช้สมการ (3.2) โดยให้ Cg = 1.0 เพื่อลดผลของตัวประกอบผลกรรโชก เพราะความเร็วลมที่ได้จากสมการ (3.7) เปลี่ยนแปลงตามเวลาอยู่แล้ว

3.4 แผ่นดินไหวและการจำลองคลื่นแผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว คือการสั่นของพื้นผิวโลก ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนตัวอย่างทันทีทันใดของเปลือกโลกซึ่งประกอบด้วยแผ่นชั้นหิน การที่แผ่นชั้นหินเคลื่อนตัวขึ้นเนื่องจากความร้อนภายในโลก และการหดตัวลงเนื่องจากการยึดรั้งระหว่างแผ่นชั้นหิน ทำให้เกิดหน่วยแรงความเค้นขึ้น และเมื่อหน่วยแรงความเค้นมีค่ามากเกินกว่าที่ผิวโลกจะรับได้ ก็จะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นมา ในขณะที่เกิดรอยแตกขึ้นมาจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแผ่นดินไหว ซึ่งประกอบด้วยคลื่น 2 ชนิด คือ คลื่น P (P-wave) ซึ่งเป็นคลื่นแรงอัด และคลื่น S (S-wave) ซึ่งเป็นคลื่นแรงเฉือน

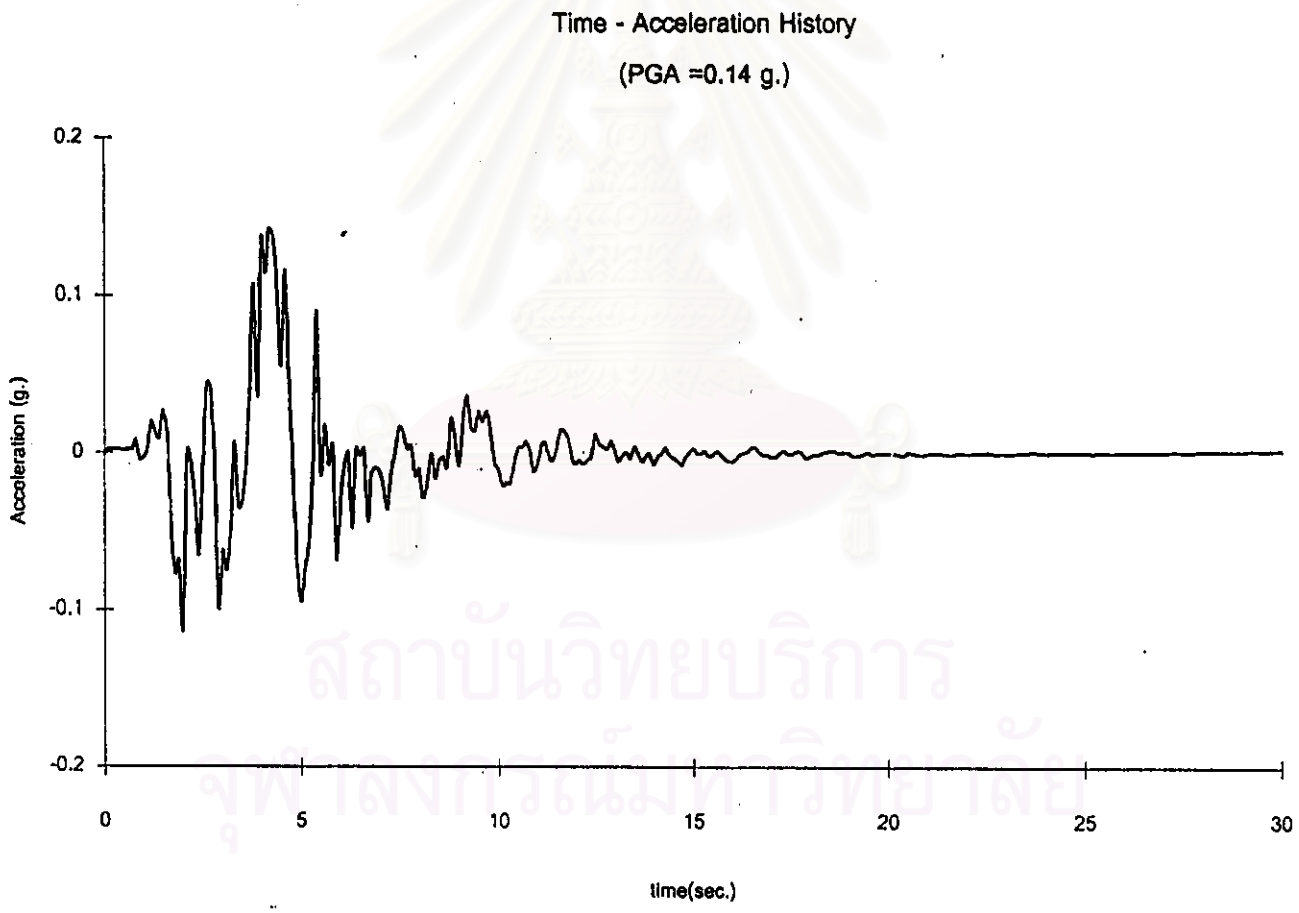
จุดเริ่มต้นของรอยแตกจะเรียกว่า Focus ดังแสดงในรูป 3.5 และ จุดที่อยู่บนพื้นดินที่ตรงกับจุด Focus เรียกว่า Epicenter



รูปที่ 3.5 สาเหตุการเกิดแผ่นดินไหว

เนื่องจากการบันทึกข้อมูลแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริงในอดีตของประเทศไทยมีน้อยมาก จึงมีจำเป็นต้องพึ่งวิธีการจำลองคลื่นแผ่นดินไหว เพื่อใช้สร้างบันทึกตามเวลา (Time history record) ของอัตราเร่งที่ผิวดินให้เป็นไปตามคุณลักษณะของแผ่นดินไหวที่ต้องการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์

การจำลองคลื่นแผ่นดินไหวในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SIMQKE ที่สร้างขึ้นโดย Gasparini and Vanmarcke (1976) โดยที่คลื่นแผ่นดินไหวจำลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6 โดยที่มีความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Peak ground acceleration , PGA) เท่ากับ 0.14 g ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองคลื่นแผ่นดินไหวนำมาจาก นพดล ดูหาทัสนะดีกุล (2539)



รูปที่ 3.6 แบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหว

I19063769