

บทที่ 3

ความน่าเชื่อถือทางโครงสร้าง

3.1 ทฤษฎีความน่าจะเป็น

เนื่องจากในงานด้านวิศวกรรมเกี่ยวข้องกับจำนวนตัวเลข มีสูตรการคำนวณต่างๆที่ต้องมีการเก็บข้อมูล ศึกษา ทดลองจากตัวอย่างจำนวนมากแล้วจึงนำสรุปออกมาเป็นแบบจำลองต่างๆ เพื่อจะใช้แทนพฤติกรรมจนกระทั่งออกมาเป็นสูตรที่ใช้ในการคำนวณ แต่การได้มาซึ่งข้อมูลต่างๆตลอดจนการทดลองนั้นอาจจะประกอบไปด้วยความไม่แน่นอนและความไม่สมบูรณ์ ต่างๆมากมาย ซึ่งจะส่งผลให้ความน่าเชื่อถือในข้อมูลหรือในสูตรไม่เป็นไปอย่างเต็มที่ แต่จะอยู่ในรูปของความน่าจะเป็นไปได้ ดังนั้นในการคำนวณออกแบบทางวิศวกรรม จึงควรมีพื้นฐานมาจากความน่าจะเป็น

3.1.1 ตัวแปรสุ่ม (Random Variables) และ การกระจายของตัวแปรสุ่ม

เหตุการณ์สุ่มคือเหตุการณ์ที่เราไม่สามารถทำนายได้ว่าจะเกิดขึ้นจริงหรือไม่ เราสามารถทำนายได้เพียงโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์นั้นเท่านั้น เราสามารถจำลองเหตุการณ์สุ่มได้ด้วยตัวแปรสุ่ม และการกระจายของความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มนั้น

การกระจายของความน่าจะเป็นอาจแทนได้ในเทอมของฟังก์ชันการกระจายสะสม (Cumulative Distribution Function) ซึ่งเขียนได้ในรูปสมการดังนี้

$$F_x(x) = P(X \leq x) \quad (3.1)$$

เป็นความน่าจะเป็นที่ X จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ x

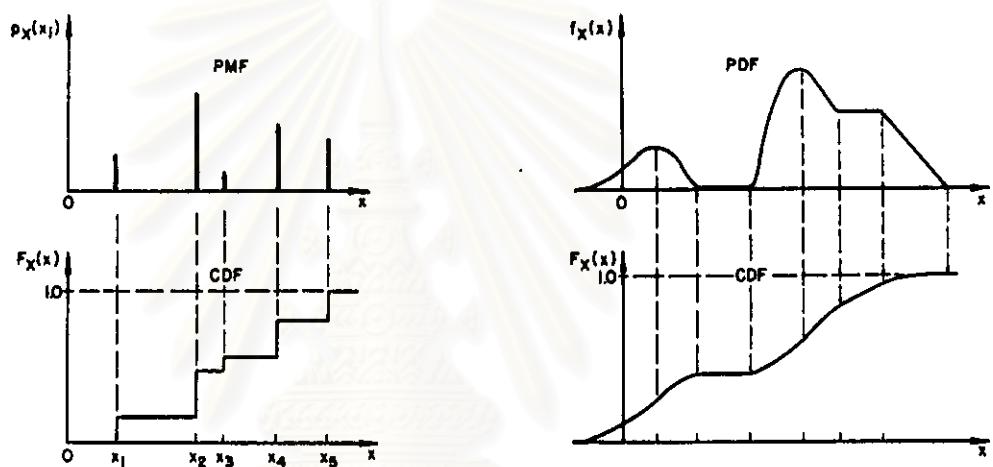
ซึ่งสามารถแบ่งการพิจารณาได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. ค่า X ที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ X คือ ความน่าจะเป็นที่ X จะมีค่าเท่ากับ x_i จะเขียนเป็นสมการได้คือ

$$P_x(x_i) = P(X = x_i) \quad (3.2)$$

2. ค่า X ที่ต่อเนื่อง (Continuous) การกระจายของความน่าจะเป็นของ x อาจเขียนแทนในรูปของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function , $f(x)$) พื้นที่ใต้กราฟระหว่าง x_1 และ x_2 เป็นค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ในช่วง x_1 ถึง x_2 ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยสมการ

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = F_x(x_2) - F_x(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (3.3)$$



ก. ชนิดไม่ต่อเนื่อง

ข. ชนิดต่อเนื่อง

รูปที่ 3.1 ลักษณะการกระจายของตัวแปรสุ่ม

3.1.2 ค่าสำคัญของการกระจาย (Main Descriptor)

ก. ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวัง (Mean or Expected Value)

เนื่องจากค่าของตัวแปรสุ่มนั้นเป็นกลุ่มของค่าหลายๆค่าหรือเป็นช่วง ดังนั้นจึงควรสนใจค่ากลางบางค่าแทน เช่น ค่าเฉลี่ย และเนื่องจากค่าที่แตกต่างกันของตัวแปรสุ่มมีค่าความน่าจะเป็นที่ต่างกันด้วย จึงต้องคำนึงถึงค่าเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ในรูปของสมการ

ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มไม่ต่อเนื่อง

$$\mu_x \equiv E(X) = \sum_{all x_i} x_i p_x(x_i) \quad (3.4)$$

ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง

$$\mu_x \equiv E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf_x(x)dx \quad (3.5)$$

ข. ค่าความแปรปรวนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Variance and Standard Deviation)

ใช้วิธีการกระจายของตัวแปรสุ่มเมื่อเทียบกับค่ากลางว่าตัวแปรสุ่มเหล่านั้นมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่ากลางเพียงใด

ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มไม่ต่อเนื่อง ค่าความแปรปรวน สามารถเขียนแทนได้ในรูปของสมการ

$$Var(X) = E[(X - \mu_x)^2] = \sum_{all x_i} (x_i - \mu_x)^2 p_x(x_i) \quad (3.6)$$

ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง ค่าความแปรปรวน สามารถเขียนแทนได้ในรูปของสมการ

$$Var(X) = E[(X - \mu_x)^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_x)^2 f(x)dx \quad (3.7)$$

$$Var(X) = E(X^2) - \mu_x^2 \quad (3.8)$$

เพื่อให้การวัดการกระจายสะดวกยิ่งขึ้น จึงใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับรากที่สองของความแปรปรวน คือ

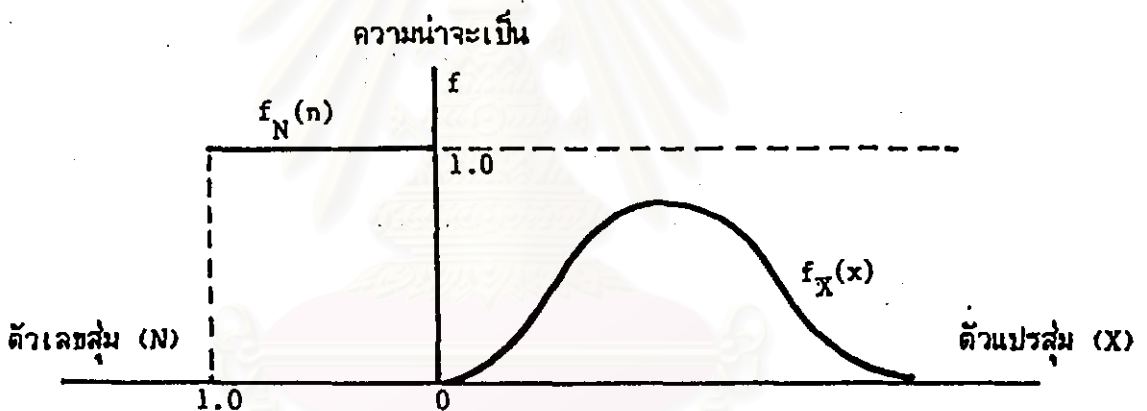
$$\sigma_x = \sqrt{Var(X)} \quad (3.9)$$

ค. สัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (Coefficient of Variation) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยในรูปของเปอร์เซ็นต์ สามารถเขียนแทนในรูปสมการได้ดังนี้

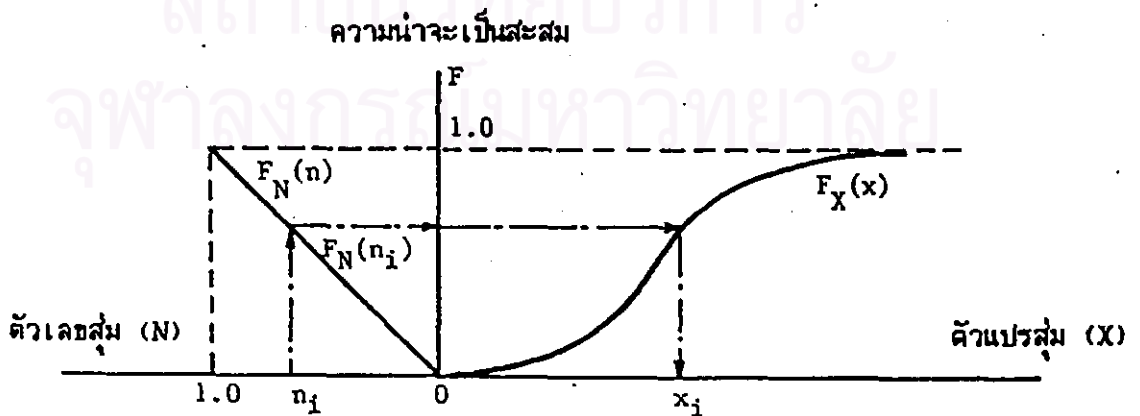
$$\delta = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \times 100 \quad (3.10)$$

ง. การเลือกค่าตัวแปรสุ่มโดยวิธีสุ่มแบบมอนติ-คาร์โล⁽⁴³⁾

เป็นวิธีการเลือกค่าของตัวแปรสุ่มโดยจำลองลักษณะของการเกิดเหตุการณ์สุ่มดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 โดยมีหลักการคือ ตัวเลขสุ่มค่าหนึ่งจะถูกสุ่มขึ้นมาที่มีค่าเท่ากับ n , ตัวเลขสุ่มนี้จะต้องสุ่มมาจากกลุ่มของตัวเลขที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และมีการกระจายของความน่าจะเป็นแบบสม่ำเสมอ คือโอกาสสุ่มที่จะได้ตัวเลขแต่ละตัวจะเท่ากัน ดังนั้นค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของตัวเลขสุ่มทุกตัวจะมีค่าเท่ากันและมีค่าเท่ากับ 1 และสามารถเขียนกราฟของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นได้ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นก็คำนวณค่าการกระจายของตัวเลขสุ่ม $F_N(n_i)$ จะพบว่าถ้าตัวเลขสุ่ม (N) มีการกระจายแบบสม่ำเสมอจะได้ค่าฟังก์ชันของการกระจายสะสมเมื่อ $N=n$, มีค่าเท่ากับ x , ถ้าเราทราบฟังก์ชันการกระจายสะสมของตัวแปรสุ่ม X เราก็จะสามารถหาค่า x , ที่ทำให้ฟังก์ชันของการกระจายสะสมของ X ที่ $X=x$, มีค่าเท่ากับฟังก์ชันของการกระจายสะสมของ N ที่ $N=n$, ค่า x , ที่ได้ก็จะเป็ค่าของตัวแปรสุ่มที่เลือกได้



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของตัวเลขสุ่มและตัวแปรสุ่ม



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันของการกระจายสะสมของตัวเลขสุ่มและตัวแปรสุ่ม

ถ้า Y เป็นฟังก์ชันของ X_1, X_2, \dots, X_n และทราบฟังก์ชันของการกระจายสะสมของตัวแปร X เหล่านี้ เราจะทำการศึกษาค่าของตัวแปรต่างๆทุกตัว แล้วนำมาแทนค่าในฟังก์ชัน $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ก็จะได้ค่าของ Y และเมื่อทำการสุ่มเช่นนี้หลายๆครั้งก็จะได้กลุ่มของค่า Y ดังนี้

$$Y_1 = g_1(x_{1,1}, x_{2,1}, \dots, x_{n,1}) \quad \text{จากการสุ่มครั้งที่ 1}$$

$$Y_2 = g_2(x_{1,2}, x_{2,2}, \dots, x_{n,2}) \quad \text{จากการสุ่มครั้งที่ 2}$$

$$Y_m = g_m(x_{1,m}, x_{2,m}, \dots, x_{n,m}) \quad \text{จากการสุ่มครั้งที่ m}$$

แล้วนำกลุ่มของค่า Y ที่ได้ไปหาค่า \bar{Y} และ σ_y และ การกระจายของ Y

3.1.3 ฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น (Probability Distribution Function)

การกระจายของความน่าจะเป็นใดๆสามารถเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น ได้ โดย ฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็นที่มักพบบ่อย ในทางสถิติได้แก่

ก. การกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) เป็นรูปแบบของการกระจายที่รู้จักกันดี และใช้กันมาก เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การกระจายแบบเกาส์ (Gaussian Distribution) ซึ่งฟังก์ชันการกระจายของความน่าจะเป็นคือ

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty < x < \infty \quad (3.11)$$

ข. การกระจายแบบปกติ-มาตรฐาน (Standard Normal Distribution) เป็นการกระจายแบบปกติที่มีค่า $\bar{x} = 0$ และ ค่า $\sigma = 1$ ซึ่งฟังก์ชันการกระจายของความน่าจะเป็นคือ

$$f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right), \quad -\infty < z < \infty \quad (3.12)$$

โดยที่

$$z = (x - \bar{x}) / \sigma \quad (3.13)$$

ค. การกระจายแบบล็อก-ปกติ (Log-Normal Distribution) ฟังก์ชันการกระจายของความน่าจะเป็นคือ

$$f_x(x) = \frac{1}{\xi x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right], \quad 0 < x < \infty \quad (3.14)$$

เมื่อ

$\lambda = E(\ln X) =$ ค่าเฉลี่ยของ $\ln X$

$\xi = \sqrt{Var(\ln X)} =$ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\ln X$

ง. การกระจายแบบเบตา (Beta Distribution) ฟังก์ชันการกระจายของความน่าจะเป็นคือ

$$f_x(x) = \frac{1}{B(q,r)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}}, \quad a \leq x \leq b \quad (3.15)$$

= 0 ในบริเวณอื่น

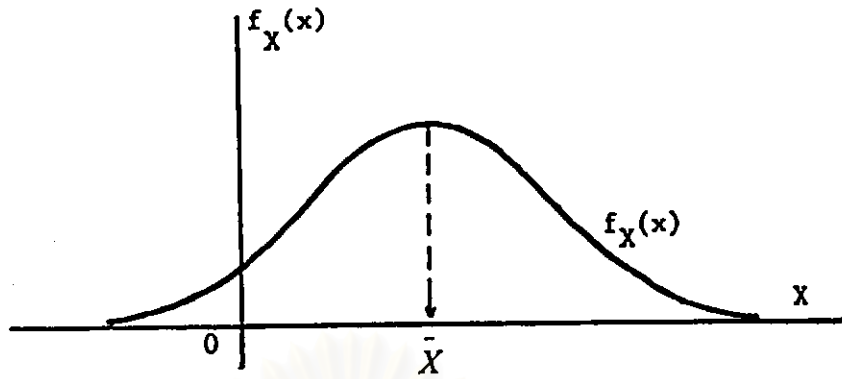
จ. การกระจายแบบอื่นๆ

นอกจากลักษณะการกระจายของข้อมูลในรูปแบบต่างๆข้างต้นแล้ว ยังมีฟังก์ชันการกระจายลักษณะพิเศษแบบอื่นๆอีก ซึ่งอาจจะเหมาะสมกับข้อมูลในงานนั้นๆ ได้แก่ การกระจายแบบ t การกระจายแบบโคสควาร์ การกระจายแบบ F

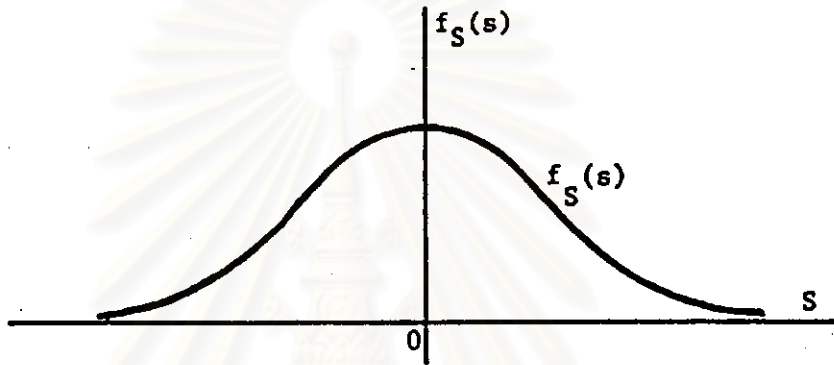
3.1.4 การจำลองฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น

ฟังก์ชันทุกฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติตามข้อ 3.1.3 สามารถที่จะเป็นฟังก์ชันของการกระจายสะสมได้ แต่มีเพียงบางฟังก์ชันเท่านั้นที่มีความเหมาะสมและให้ลักษณะที่ใกล้เคียงกับการกระจายที่เกิดขึ้นจริงของตัวแปรสุ่มหนึ่งๆ

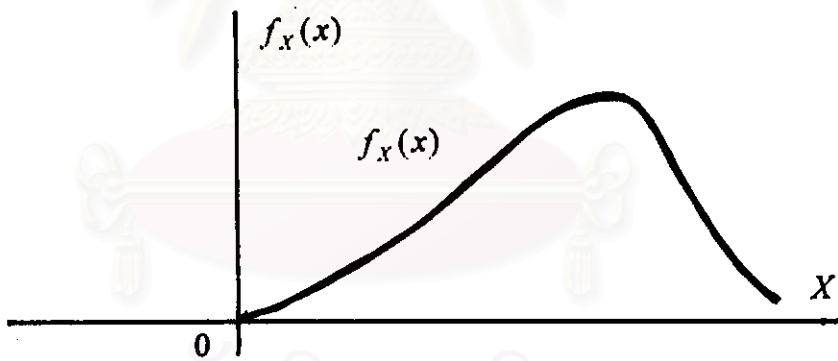
เนื่องจากการสร้างฟังก์ชันของการกระจายสะสมขึ้นเองนั้นมีความยุ่งยาก ในที่นี้จึงได้มีการพยายามนำฟังก์ชันที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป มาเลือกใช้ให้เหมาะสมโดยการทดสอบแบบโคสควาร์⁽⁴³⁾ (Chi-Square Test) ซึ่งมีวิธีการดังนี้



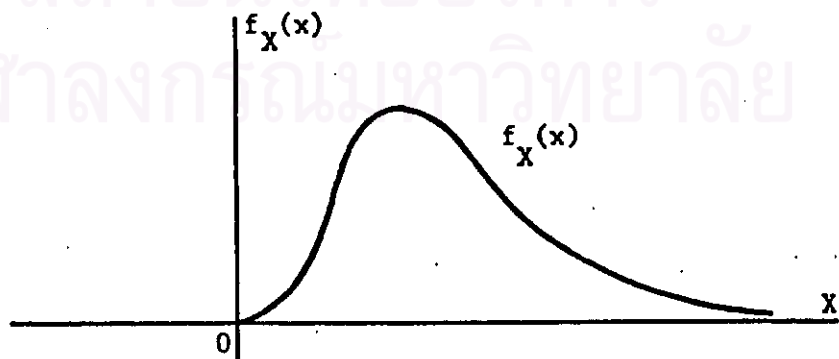
(ก.) การกระจายแบบปกติ



(ข.) การกระจายแบบปกติมาตรฐาน



(ค.) การกระจายแบบลือก-ปกติ



(ง.) การกระจายแบบเบตา

รูปที่ 3.4 กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น

พิจารณาข้อมูล n ตัว ที่จัดข้อมูลเป็นช่วงๆ k ช่วง มีความถี่ในแต่ละช่วง (จำนวนของข้อมูลที่มีค่าอยู่ในช่วงต่างๆที่แบ่งให้) เป็น $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$ และค่าความถี่ที่ได้ตามฟังก์ชันของการกระจายสะสมที่เลือกในแต่ละช่วงเป็น $e_1, e_2, e_3, \dots, e_k$ นำมาหาค่า χ^2 โดย

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n_i - e_i)^2 / e_i \quad (3.16)$$

ซึ่งมีการกระจายแบบไคสแควร์ โดยมีระดับขั้นความเสรี (Degree of Freedom) $f = k - 1$ อย่างไรก็ตาม ถ้ามีพารามิเตอร์บางตัวของฟังก์ชันของการกระจายสะสมที่ไม่สามารถหาค่าได้ และต้องประมาณจากข้อมูล จะต้องลดขั้นของความอิสระออกไปทีละ 1 สำหรับพารามิเตอร์แต่ละตัวที่ประมาณขึ้นมา โดยหลักการนี้ถ้าฟังก์ชันของการกระจายสะสมที่เลือกค่า

$$\sum_{i=1}^k (n_i - e_i)^2 / e_i < C_{1-\alpha} \quad (3.17)$$

โดยที่ $C_{1-\alpha}$ เป็นค่าที่เหมาะสมของการกระจายแบบไคสแควร์ ที่ความน่าจะเป็นสะสม $1 - \alpha$ แล้ว การกระจายทางทฤษฎีที่เลือกจะเป็นแบบจำลองที่ยอมรับได้โดยมีระดับนัยสำคัญ (Significance Level) เท่ากับ α การใช้การทดสอบแบบไคสแควร์เพื่อทดสอบฟังก์ชันการกระจายสะสมที่จะนำมาใช้กับข้อมูลนั้น โดยทั่วไปแล้วจะได้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือเมื่อค่า $k > 5$ และค่า $e_i > 5$

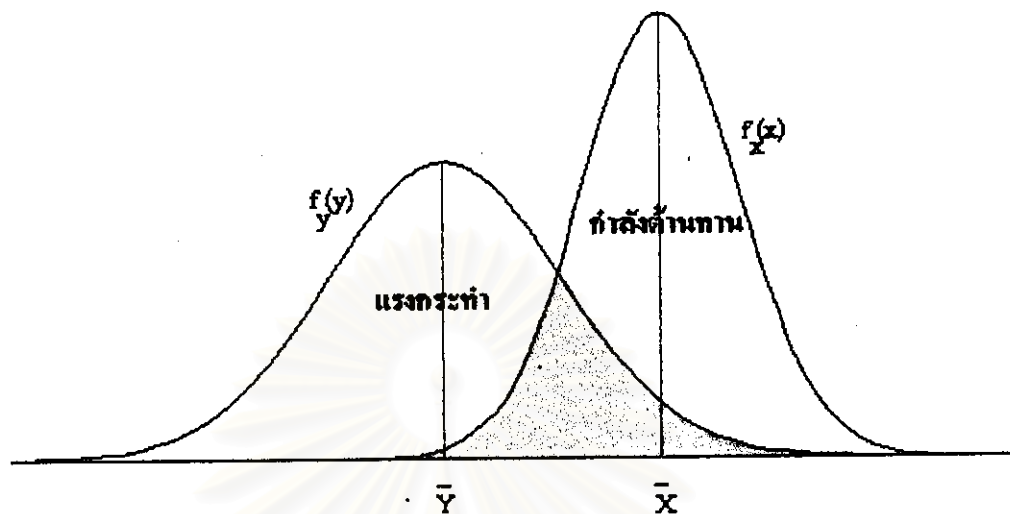
3.2 วิธีการทางสถิติสำหรับค่าความปลอดภัยของโครงสร้าง

ในการวิเคราะห์ผลความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง เราต้องให้เหตุการณ์ที่กำลังด้านทานมีค่ามากกว่าแรงกระทำ จึงจะถือว่าโครงสร้างนั้นๆ เชื่อถือได้ (Reliable)

ถ้ากำหนดให้ X เป็นกำลังด้านทาน (Resistance)
 Y เป็นแรงกระทำ (Load)
 P_f เป็นความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ

โอกาสที่จะเกิดความวิบัติขึ้นอยู่กับ

1. อัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของ X ต่อ ค่าเฉลี่ยของ Y
2. การกระจายหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ X และ Y



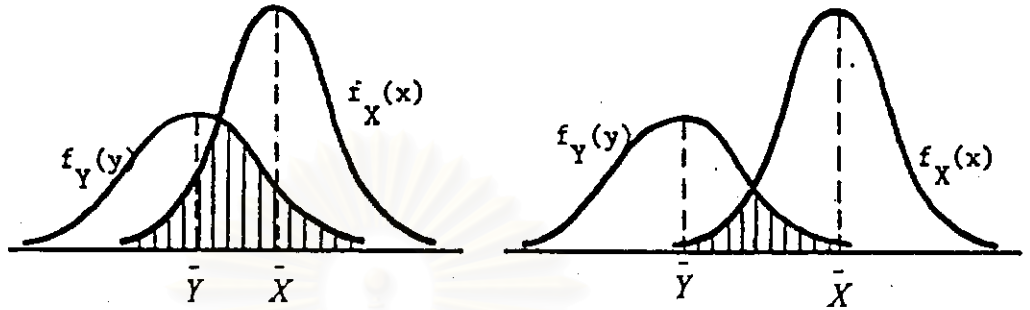
รูปที่ 3.5 แสดงฟังก์ชันการกระจายของความน่าจะเป็นของ $f_x(x)$ และ $f_y(y)$

เมื่อ X และ Y เป็นอิสระเชิงสถิติ (Statistically Independent) ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติจะเท่ากับ

$$P_f = \int_{x \leq y} f_x(x) f_y(y) dx dy \tag{3.18}$$

เนื่องจากการหาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติ (P_f) ตามวิธีการดังกล่าวข้างต้นมีความยุ่งยากเพราะมักจะไม่ทราบฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่แท้จริงของ X และ Y เนื่องจากข้อมูลมีไม่เพียงพอ หรือถึงแม้จะทราบฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นก็ตาม แต่ก็ต้องทำการอินทิเกรตฟังก์ชันที่ยุ่งยากซับซ้อน จึงอาจไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในทางปฏิบัติ

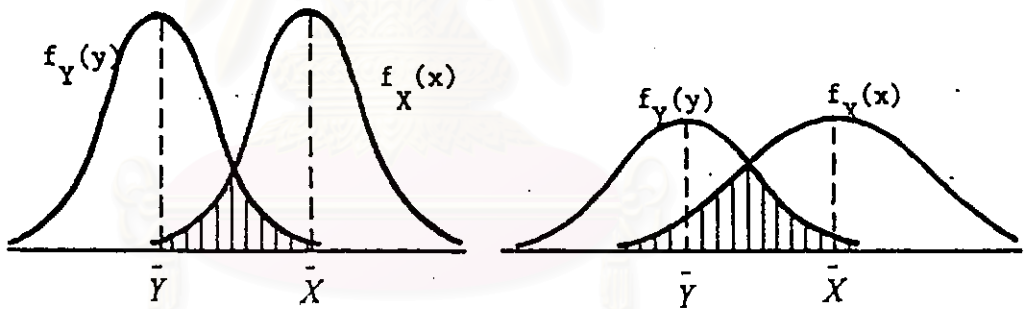
โดยทั่วไปข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จะเพียงพอสำหรับหาค่ากลาง และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลได้เท่านั้น ดังนั้น วิธีการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือทางโครงสร้างจึงใช้ค่าทางสถิติเพียงสองตัวนี้



ก. ค่าเฉลี่ยของ X และ Y ต่างกันน้อย

ข. ค่าเฉลี่ยของ X และ Y ต่างกันมาก

รูปที่ 3.6 ผลของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของ X และ Y



ก. X และ Y มีการกระจายน้อย

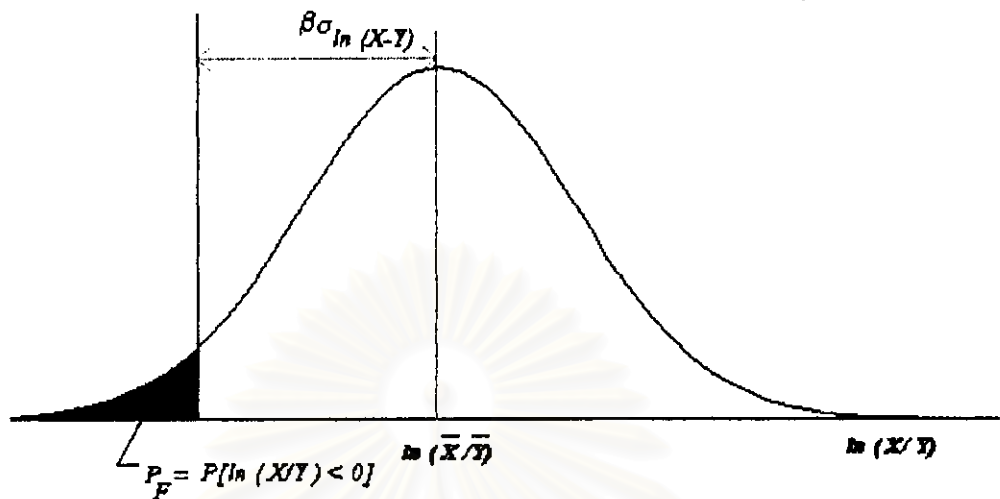
ข. X และ Y มีการกระจายมาก

รูปที่ 3.7 ผลของการกระจายของ X และ Y

วิธีการประมาณอันดับที่หนึ่ง (First Order Approximation)^(45,47,48)

ในสภาพการใช้งานจะต้องกำหนดให้ฟังก์ชันการใช้งาน (Performance Function) ในรูปของ

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \tag{3.15}$$



รูปที่ 3.8 แสดงการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือทางโครงสร้าง

เมื่อ X_1, X_2, \dots, X_n เป็นตัวแปรที่มีผลต่อความน่าเชื่อถือทางโครงสร้าง เช่น กำลังขององค์อาคาร และ แรงที่กระทำขององค์อาคาร โดยในที่นี้จะกำหนดให้

$$Z = g(X, Y) \leq z_0 \quad (3.16)$$

โดยที่ z_0 เป็นขอบเขตของการใช้งาน ซึ่งในกรณีนี้ z_0 มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ถ้า Z มากกว่า 0 โครงสร้างยังใช้งานได้ แต่ถ้า Z มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 โครงสร้างนั้นจะเกิดการวิบัติ ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ จึงมีค่าเท่ากับ ความน่าจะเป็นที่ Z จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 ซึ่งเขียนเป็นสมการได้คือ

$$P_F = P(z \leq 0) \quad (3.17)$$

จากรูปที่ 3.8 แสดงการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ โดยในส่วนของรูปที่ 3.8 หมายถึง โอกาสที่ $\ln(X/Y) < 0$ ซึ่งแทนเหตุการณ์ที่จะเกิดการวิบัติ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ มีค่าเท่ากับ ความน่าจะเป็นที่ $\ln(X/Y) < 0$ ค่าดัชนีความปลอดภัย (β) จะมีค่าเท่ากับ

$$\beta = \frac{\lambda_z}{\xi_z} = \frac{\ln(\bar{X}/\bar{Y})}{\sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}} \quad (3.18)$$

ดังนั้น ถ้า X และ Y มีการกระจายแบบ ล็อก-ปกติ จะต้องให้

$$\frac{\lambda_z}{\xi_z} \rightarrow \beta \quad (3.19)$$

ซึ่งค่า X/Y จะมีการกระจายเป็นแบบล็อก-ปกติ ด้วย และ $Z = \ln(X/Y)$ จะมีการกระจายแบบปกติ ซึ่งมีค่าเฉลี่ย λ_z เท่ากับ

$$\lambda_z = \lambda_x - \lambda_y \quad (3.20)$$

$$\lambda_z = [\ln(\bar{X}) - 0.5\xi_x^2] - [\ln(\bar{Y}) - 0.5\xi_y^2] \quad (3.21)$$

$$\lambda_z = \ln(\bar{X}/\bar{Y}) - 0.5[\ln(1 - \Omega_x^2) - \ln(1 - \Omega_y^2)] \quad (3.22)$$

$$\lambda_z = \ln(\bar{X}/\bar{Y}) - \ln \sqrt{\frac{1 - \Omega_x^2}{1 - \Omega_y^2}} \quad (3.23)$$

$$\lambda_z = \ln \left(\frac{\bar{X}}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{1 - \Omega_y^2}{1 - \Omega_x^2}} \right) \quad (3.24)$$

และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ξ_z มีค่าเท่ากับ

$$\xi_z^2 = \xi_x^2 + \xi_y^2 \quad (3.25)$$

$$\xi_z^2 = \ln(1 + \Omega_x^2) + \ln(1 + \Omega_y^2) \quad (3.26)$$

$$\xi_z^2 = \ln[(1 + \Omega_x^2)(1 + \Omega_y^2)] \quad (3.27)$$

ซึ่งถ้า Ω_x และ Ω_y มีค่าน้อยกว่า 0.3 จะได้ $\frac{1 - \Omega_y^2}{1 - \Omega_x^2}$ มีค่าประมาณ 1 ทำให้

$$\lambda_z = \ln(\bar{X}/\bar{Y}) \quad (3.29)$$

และ

$$\xi_z^2 = \ln(1 + \Omega_x^2) + \ln(1 + \Omega_y^2) \quad (3.30)$$

$$\xi_z^2 = \ln[(1 + \Omega_x^2)(1 + \Omega_y^2)] \quad (3.31)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\ln(\bar{X}/\bar{Y}) > \beta \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2} \quad (3.32)$$

ที่ขอบเขตการใช้งาน

$$\ln(\bar{X}/\bar{Y}) = \beta \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2} \quad (3.33)$$

โดยการประมาณจะได้

$$\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2} = 0.75(\Omega_x + \Omega_y) \quad (3.34)$$

$$\bar{X} \exp(-0.75\beta\Omega_x) = \bar{Y} \exp(0.75\beta\Omega_y) \quad (3.35)$$

3.3 ค่าดัชนีของความปลอดภัย (Safety Index)

ค่าดัชนีของความปลอดภัย β หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าค่าดัชนีของความน่าเชื่อถือ (Reliability Index) ซึ่งนิยามโดยสมการที่ (3.18) จะถูกกำหนดขึ้นตามลักษณะของการวิบัติ ความสำคัญขององค์อาคาร และผลหรืออันตรายที่จะตามมาของการวิบัตินั้น ถ้าการวิบัติเป็นแบบวัสดุเปราะหรือผลที่ตามมาของการวิบัติมีอันตราย ค่าดัชนีของความปลอดภัยก็ต้องมีค่าสูง แต่ถ้าหากว่า การวิบัติเป็นแบบวัสดุเหนียว ค่าดัชนีของความปลอดภัยก็อาจใช้ค่าต่ำกว่าก็ได้ จากรูปที่ 3.8 แสดงการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือทางโครงสร้าง ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติได้คือ

$$P_F = 1 - \Phi(\beta) \quad (3.36)$$

เมื่อ $\Phi(\beta)$ เป็นค่าฟังก์ชันของการกระจายสะสมของการกระจายปกติมาตรฐานที่ $s = \beta$

เราจะสามารถหาค่าตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor) ได้โดยกำหนดค่าดัชนีความปลอดภัยก่อนแล้วจึงย้อนกลับไปหาค่าได้ ในการออกแบบจะต้องทำให้

$$P_F < 1 - \Phi(\beta) \quad (3.37)$$

สำหรับค่าดัชนีของความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบตามมาตรฐานสากลได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 โดยในการศึกษานี้ได้พิจารณาค่าดัชนีของความปลอดภัย โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติอยู่ที่ 10^{-3} และพิจารณากการวิบัติของคอนกรีตเป็นแบบเปราะ ส่วนเหล็กเสริมเป็นแบบเหนียว ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงพิจารณาใช้ ค่า β เท่ากับ 3.5 และ 3.0 สำหรับคอนกรีตและเหล็กเสริมตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ กับค่าดัชนีของความปลอดภัย

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ (P_F)	ค่าดัชนีของความปลอดภัย (β)
0.50	0
0.25	0.67
0.10	1.28
0.01	2.33
10^{-3}	3.10
10^{-4}	3.72
10^{-5}	4.25
10^{-6}	4.75

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 ค่าดัชนีของความปลอดภัย β ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างของ American National Standard ⁽⁴⁹⁾

ผลของการวิบัติ	ลักษณะของการวิบัติ	
	แบบเหนียว	แบบเปราะ
ไม่รุนแรง	2.5-3.0*	3.0-3.5*
รุนแรง	3.0-3.5	4.0 หรือมากกว่า

หมายเหตุ * เป็นค่าที่ใช้ในการศึกษานี้

ตารางที่ 3.3 ค่าดัชนีของความปลอดภัย β ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างของ Nordic Committee on Building Regulation (NKB) ⁽⁵⁰⁾

ผลของการวิบัติ	ลักษณะของการวิบัติ		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
ไม่รุนแรง	3.09	3.71	4.26
รุนแรง	3.71	4.26	4.75
รุนแรงมาก	4.26	4.75	5.20

ลักษณะของการวิบัติ

ชนิดที่ 1 การวิบัติของวัสดุเหนียว ที่มีการเมื่อกำลังของวัสดุเนื่องจาก Strain Hardening

ชนิดที่ 2 การวิบัติของวัสดุเหนียว ที่ไม่มีการเมื่อกำลังของวัสดุ

ชนิดที่ 3 การวิบัติของวัสดุเปราะและไม่มีเสถียรภาพ

3.4 ตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุก (Load Factor)

จากวิธีการประมาณอันดับที่ 1 ซึ่งได้เสนอมานี้แล้วข้างต้น สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ แรงที่กระทำ และกำลังต้านทานของสมการที่ (3.35) ได้ในรูปของตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุก และส่วนประกอบปลอดภัยได้ ดังสมการ

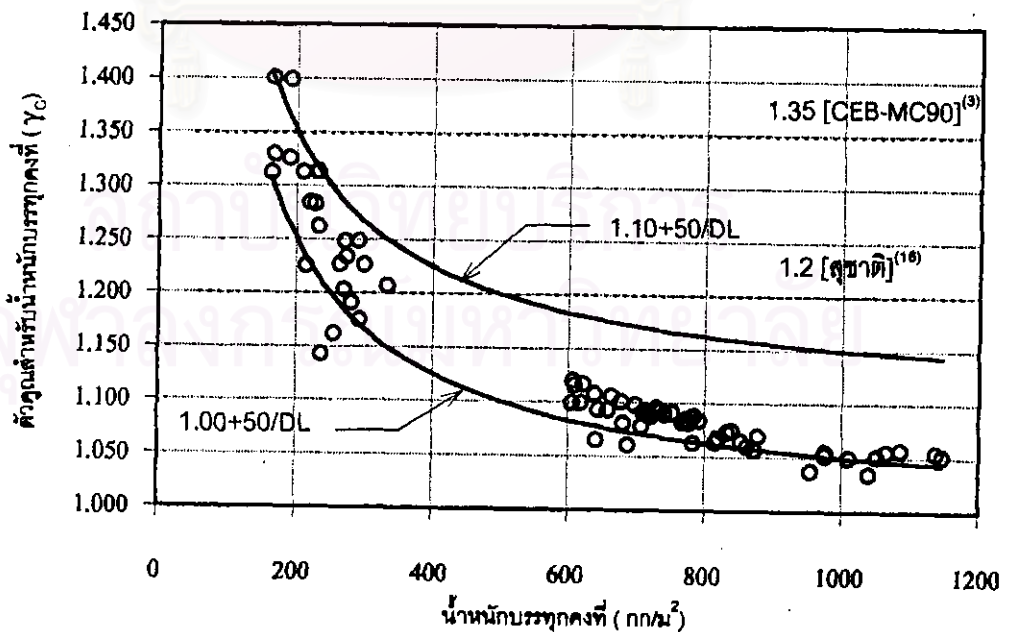
$$\frac{\bar{X}}{\gamma_m} = \gamma \bar{Y} \tag{3.38}$$

ซึ่งจะได้ค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ

$$\gamma = \exp[0.75\beta\Omega_y] \tag{3.39}$$

การวิเคราะห์ค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุก ได้ใช้ข้อมูลจากสภาพการก่อสร้างจริงตามการศึกษารายของ สุชาติ⁽¹⁶⁾ และโดยอาศัยวิธีการประมาณอันดับที่ 1 ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 โดยที่การกระจายของน้ำหนักบรรทุกคงที่ และการกระจายของน้ำหนักบรรทุกจากรากการทดสอบตัวแปรสุ่ม⁽¹⁵⁾ เป็นได้ทั้ง การกระจายแบบ ปกติ และ แบบ ล็อก-ปกติ

3.4.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)



รูปที่ 3.9 ตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่

ผลการวิเคราะห์ค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ พบว่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่มี การกระจายค่าอยู่ระหว่าง 1.05 ถึง 1.40 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.140 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.098

ตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ ได้ทำการวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis) ของชุดข้อมูลดังกล่าวในรูปของสัดส่วนของน้ำหนักบรรทุกคงที่ ($1/DL$) ต่อตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (γ_G) จะได้สมการ

$$\gamma_G = 1.00 + \frac{50}{DL} \quad (3.40)$$

ซึ่งอาจจะพิจารณาขอบเขตบนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ

$$\gamma_G = 1.10 + \frac{50}{DL} \quad (3.41)$$

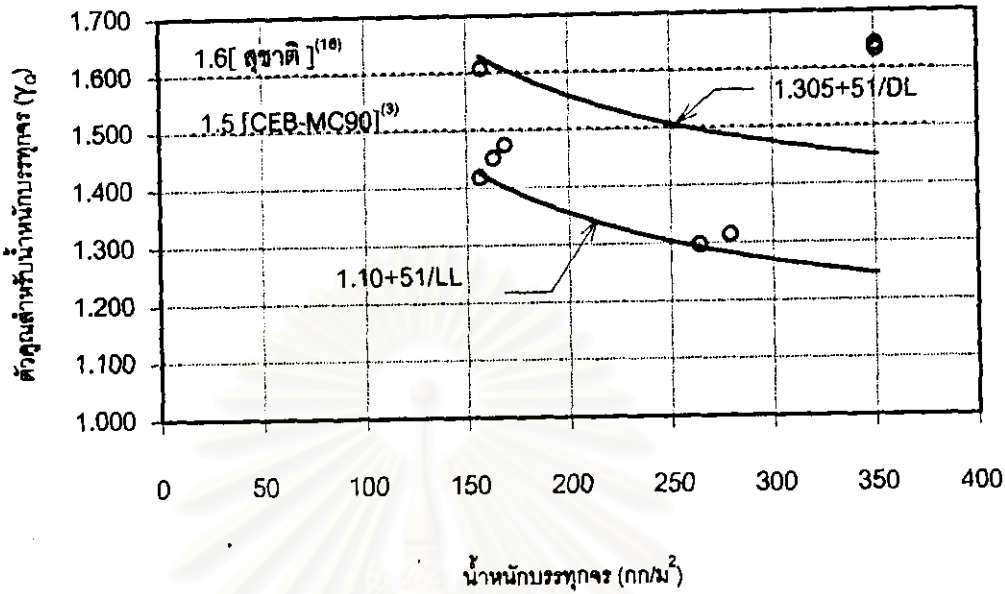
โดยอาจจะพิจารณาใช้ค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (γ_G) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 1.30 อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของสุชาติ⁽¹⁰⁾ ได้เสนอค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ เท่ากับ 1.20 และ CEB-MC90⁽⁸⁾ ได้กำหนดค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ เท่ากับ 1.35

3.4.2 น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

ผลการวิเคราะห์ค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกจร พบว่าค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่มี การกระจายค่าอยู่ระหว่าง 1.26 ถึง 1.64 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.480 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.137

ตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกจรมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกคงที่ ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้ทำการวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis) ของชุดข้อมูลดังกล่าวในรูปของสัดส่วนของน้ำหนักบรรทุกคงที่ ($1/LL$) ต่อค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกจร (γ_Q) จะได้สมการ

$$\gamma_Q = 1.10 + \frac{51}{LL} \quad (3.42)$$



รูปที่ 3.10 ตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุก

ซึ่งอาจจะพิจารณาขอบเขตบนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ

$$\gamma_o = 1.305 + \frac{51}{LL} \tag{3.43}$$

โดยอาจจะพิจารณาใช้ค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุก (γ_o) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 1.70 อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของสุชาติ⁽¹⁶⁾ ได้เสนอค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุก เท่ากับ 1.60 และ CEB-MC90⁽⁹⁾ ได้กำหนดค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุก เท่ากับ 1.50

3.5 ส่วนประกอบปลอดภัย (Partial Safety Factor)

จากความสัมพันธ์ของตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุก และ ส่วนประกอบปลอดภัยโดยวิธีการประมาณ อันดับที่ 1 จากสมการที่ (3.46) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของส่วนประกอบปลอดภัย ได้ดังสมการ

$$\gamma_m = \frac{1}{\exp[-0.75\beta\Omega_x]} \tag{3.44}$$

การวิเคราะห์ค่าส่วนประกอบปลอดภัย ได้ใช้ข้อมูลจากสภาพการก่อสร้างจริงตามการศึกษาของ อัญญ⁽¹⁵⁾ และข้อมูลเชิงสถิติกำลังอัดของคอนกรีตจาก บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด ซึ่งได้แสดงไว้ใน

ตารางที่ 3.8 - 3.12 และ ตัวอย่างแสดงการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของหน้าตัดของคอนกรีต ตามข้อแนะนำของ CEB⁽⁶⁾ ไว้ในตารางที่ 3.13 โดยที่การกระจายของกำลังอัดของคอนกรีต และการกระจายของกำลังของเหล็กเสริม เป็นการกระจายแบบ ล็อก-ปกติ

3.5.1 คอนกรีต

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความไม่แน่นอนของคอนกรีตประกอบด้วยค่าความไม่แน่นอนของกำลังอัดของคอนกรีต และ ความคลาดเคลื่อนของขนาดของหน้าตัดจากการก่อสร้าง ค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลซึ่งอาจแทนด้วย สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน พบว่า สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงที่ทำการศึกษามีค่ากระจายอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.25 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของขนาดของหน้าตัด มีค่ากระจายอยู่ระหว่าง 0.005 ถึง 0.025 ดังแสดงในรูปที่ 3.12

จากการพิจารณาชุดของข้อมูลสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของกำลังอัดของคอนกรีตในรูปที่ 3.11 และ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของหน้าตัดคอนกรีต รูปที่ 3.12 จะพบว่าค่าความแปรปรวนของหน้าตัดมีผลน้อยมากต่อค่าความแปรปรวนรวมของคอนกรีต เมื่อเทียบกับค่าความแปรปรวนเนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งค่าความแปรปรวนของหน้าตัดมีค่าโดยเฉลี่ยเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าความแปรปรวนเนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าส่วนของความปลอดภัยของคอนกรีตโดยรวมผลของความแปรปรวนทั้งผลของกำลังอัดและหน้าตัดคอนกรีต โดยทำการวิเคราะห์สมการถดถอย ระหว่างส่วนของความปลอดภัยของคอนกรีตเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ชุดข้อมูลดังกล่าวได้แสดงในรูปที่ 3.13

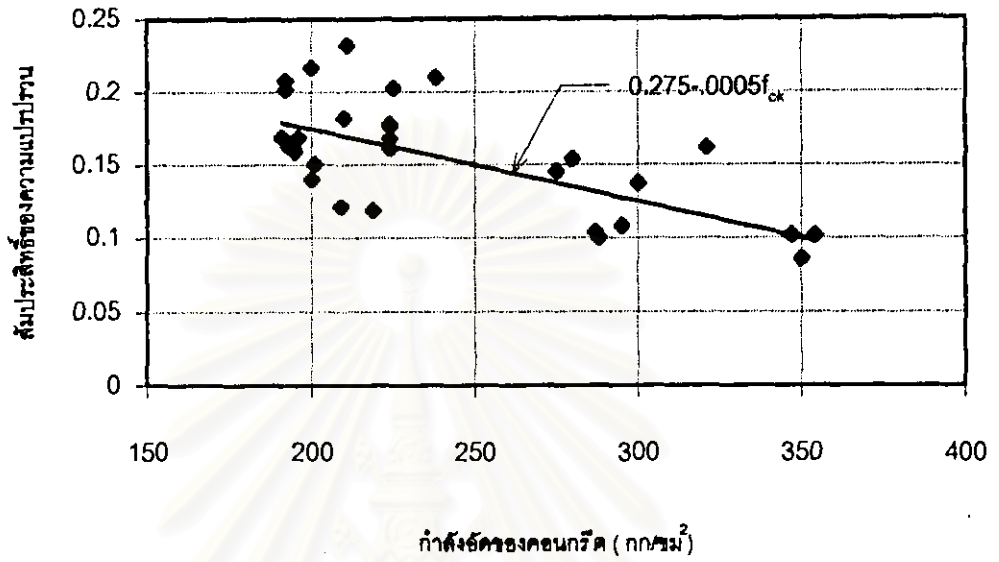
ผลจากการวิเคราะห์จะพบว่าแนวโน้มของส่วนประกอบปลอดภัยของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดของคอนกรีตเช่นเดียวกับ ค่าความแปรปรวนของกำลังอัดของคอนกรีต โดยส่วนประกอบปลอดภัยของคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 1.25 ถึง 2.10 โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 1.499 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.138 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ในรูปแบบการถดถอยได้ในรูป

$$\gamma_c = 2.00 - 0.002f_{ck} \quad (3.45)$$

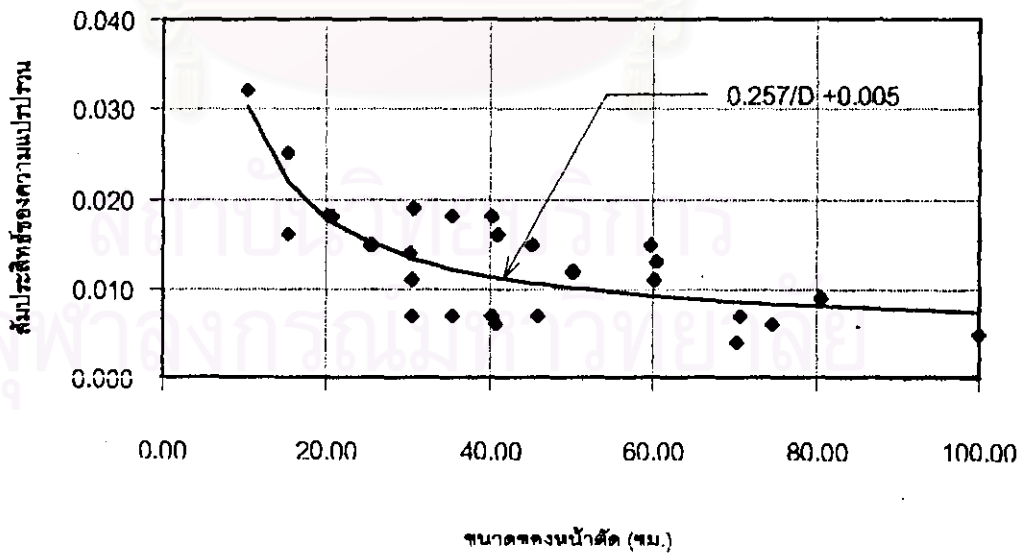
ซึ่งอาจจะพิจารณาขอบเขตบนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ

$$\gamma_c = 2.49 - 0.002f_{ck} \quad (3.46)$$

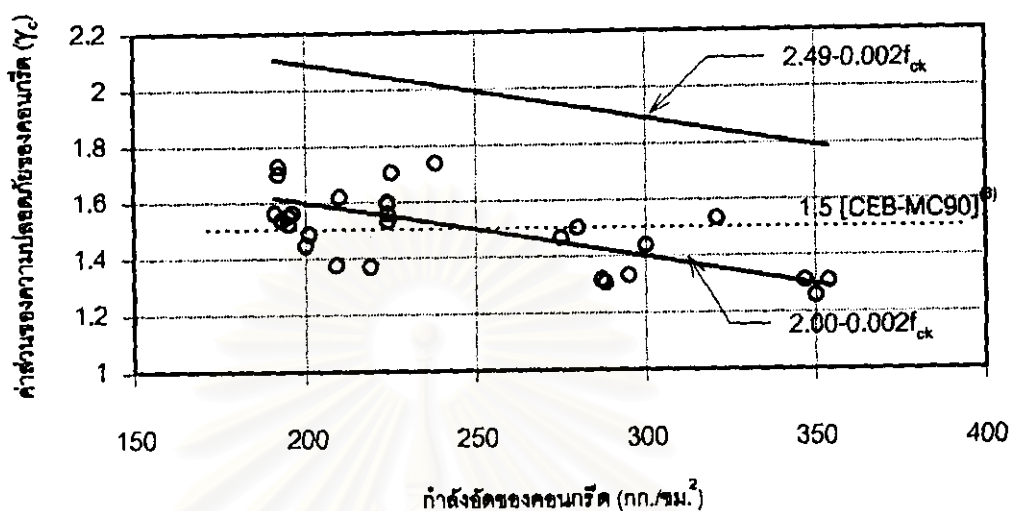
โดยอาจจะพิจารณาใช้ส่วนประกอบปลอดภัยของคอนกรีต (γ_c) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 1.73 อย่างไรก็ตาม CEB-MC90⁽⁹⁾ ได้กำหนดค่าส่วนความปลอดภัยของคอนกรีต เท่ากับ 1.50



รูปที่ 3.11 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของกำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 3.12 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของหน้าตัดคอนกรีต

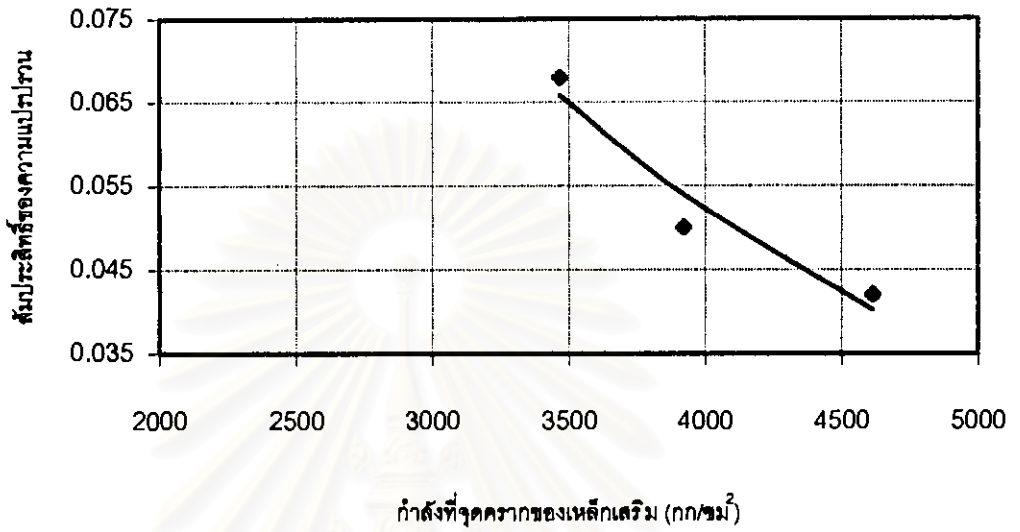


รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบปลอตกภัยของคอนกรีต

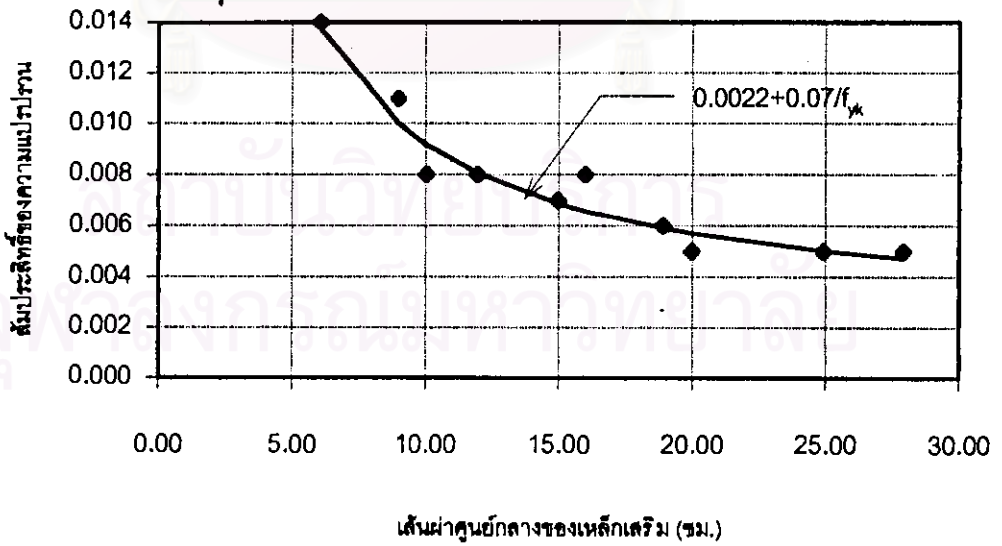
3.5.2 เหล็กเสริม

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความไม่แน่นอนของเหล็กเสริมประกอบด้วยค่าความไม่แน่นอนของกำลังครากของเหล็กเสริม และ ความคลาดเคลื่อนของขนาดของหน้าตัดของเหล็กเสริมจากการผลิต ค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลซึ่งอาจแทนด้วย สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน พบว่า สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน ของกำลังครากของเหล็กเสริม มีค่ากระจายอยู่ระหว่าง 0.04 ถึง 0.07 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของเส้นผ่าศูนย์กลาง มีค่ากระจายอยู่ระหว่าง 0.005 ถึง 0.015 ดังแสดงในรูปที่ 3.15

จากการพิจารณาชุดของข้อมูลสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของค่ากำลังครากของเหล็กเสริม และ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม จะพบว่าค่าความแปรปรวนของหน้าตัดมีผลน้อยมากต่อค่าความแปรปรวนรวมของเหล็กเสริม เมื่อเทียบกับค่าความแปรปรวนเนื่องจากกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม ซึ่งค่าความแปรปรวนของหน้าตัดมีค่าโดยเฉลี่ยเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าความแปรปรวนเนื่องจากกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์หาค่าส่วนของความปลอตกภัยของเหล็กเสริม โดยรวมผลของความแปรปรวนทั้งหมดของกำลังที่จุดครากและหน้าตัดของเหล็กเสริม และทำการวิเคราะห์สมการถดถอย ระหว่างส่วนประกอบปลอตกภัยของเหล็กเสริม เทียบกับกำลังครากของเหล็กเสริม ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ชุดข้อมูลดังกล่าวได้แสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.14 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของกำลังครากของเหล็กเสริม



รูปที่ 3.15 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเหล็กเสริม

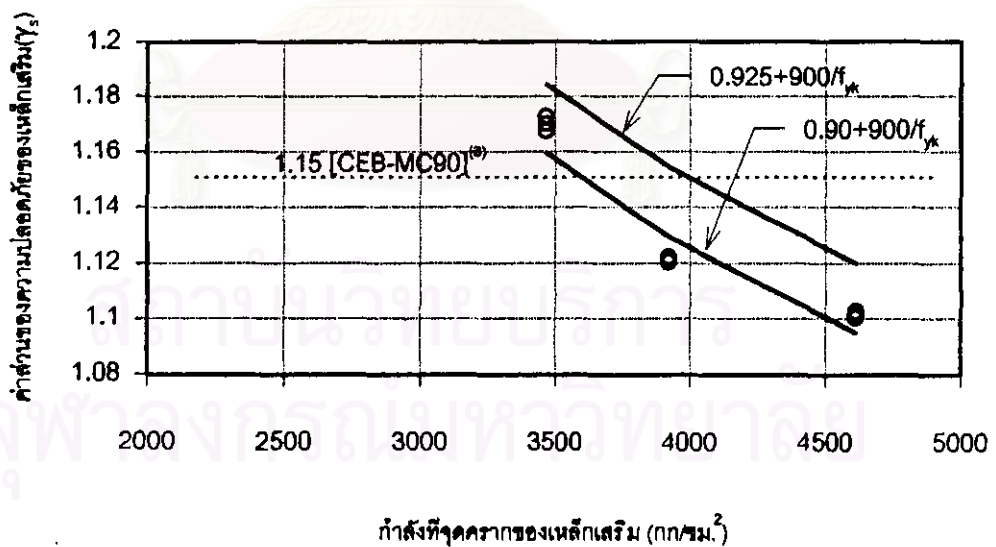
ผลจากการวิเคราะห์จะพบว่าแนวโน้มของส่วนประกอบของความปลอดภัยของเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลงตามกำลังครากของเหล็กเสริม เช่นเดียวกับ ส่วนประกอบปลอดภัยของของคอนกรีต โดยส่วนประกอบปลอดภัยของเหล็กเสริม มีค่าอยู่ระหว่าง 1.10 ถึง 1.19 โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 1.222 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.025 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ในรูปแบบการถดถอยได้ในรูป

$$\gamma_s = 0.90 + \frac{900}{f_{yk}} \quad (3.47)$$

ซึ่งอาจจะพิจารณาขอบเขตบนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ

$$\gamma_s = 0.925 + \frac{900}{f_{yk}} \quad (3.48)$$

โดยอาจจะพิจารณาใช้ค่าส่วนประกอบความปลอดภัยของเหล็กเสริม (γ_s) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 1.163 อย่างไรก็ตาม CEB-MC90 ได้กำหนดค่าค่าส่วนประกอบความปลอดภัยของเหล็กเสริมเท่ากับ 1.15



รูปที่ 3.16 ส่วนประกอบปลอดภัยของเหล็กเสริม

ตารางที่ 3.4 แสดงการวิเคราะห์ ค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของ พื้น
ตามสภาวะที่มีการควบคุมแบบที่ 1 (มีวิศวกรควบคุม)

ค่าที่ออกแบบ (กก./ม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ม. ²)	ค่าเบี่ยงเบน (กก./ม. ²)	Ω	D/Dn	γ_G
293	307	18.9	0.062	1.048	1.175
166	177	22.7	0.128	1.066	1.400
214	226	17.5	0.077	1.056	1.225
167	178	19.3	0.108	1.066	1.329
191	204	26.1	0.128	1.068	1.399
264	277	21.6	0.078	1.049	1.227
163	173	17.9	0.103	1.061	1.312
208	220	22.8	0.104	1.058	1.313
229	242	25.1	0.104	1.057	1.313
300	314	24.4	0.078	1.047	1.226
291	305	25.8	0.085	1.048	1.249
271	284	24.0	0.085	1.048	1.248
334	348	25.0	0.072	1.042	1.208
274	288	23.1	0.080	1.051	1.234
281	294	19.6	0.067	1.046	1.191
227	241	22.9	0.095	1.062	1.283
231	244	25.3	0.104	1.056	1.313
231	244	25.3	0.104	1.056	1.313
232	246	21.8	0.089	1.060	1.262
237	247	12.6	0.051	1.042	1.143
189	202	21.7	0.107	1.069	1.326
255	269	15.4	0.057	1.055	1.162
270	284	20.0	0.070	1.052	1.203
219	232	22.1	0.095	1.059	1.284

ค่าเฉลี่ย 1.264

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.069

ตารางที่ 3.5 แสดงการวิเคราะห์ ค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของ พื้น
ตามสภาวะที่มีการควบคุมแบบที่ 2 (ไม่มีวิศวกรควบคุม)

ค่าที่ออกแบบ (กก./ม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ม. ²)	ค่าเบี่ยงเบน (กก./ม. ²)	Ω	D/Dn	γ_G
293	300	18.7	0.062	1.024	1.178
166	171	22.1	0.129	1.030	1.404
214	220	17.1	0.078	1.028	1.226
167	172	18.8	0.109	1.030	1.332
191	197	25.5	0.129	1.031	1.405
264	271	21.2	0.078	1.027	1.228
163	168	17.6	0.105	1.031	1.317
208	214	22.4	0.105	1.029	1.316
229	235	24.6	0.105	1.026	1.316
300	307	24.0	0.078	1.023	1.228
291	298	25.4	0.085	1.024	1.251
271	277	23.6	0.085	1.022	1.251
334	341	24.7	0.072	1.021	1.209
274	281	22.7	0.081	1.026	1.236
281	287	19.2	0.067	1.021	1.192
227	234	22.5	0.096	1.031	1.287
231	237	24.8	0.105	1.026	1.316
231	237	24.8	0.105	1.026	1.316
232	238	21.3	0.089	1.026	1.265
237	242	12.4	0.051	1.021	1.144
189	195	21.2	0.109	1.032	1.330
255	262	15.2	0.058	1.027	1.164
270	277	19.7	0.071	1.026	1.205
219	225	21.7	0.096	1.027	1.288

ค่าเฉลี่ย 1.267

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.070

ตารางที่ 3.6 แสดงการวิเคราะห์ ค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของ คาน
ตามสภาวะที่มีการควบคุมแบบที่ 1 (มีขีดการควบคุม)

ค่าที่ออกแบบ (กก./ม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ม. ²)	ค่าเบี่ยงเบน (กก./ม. ²)	Ω	D/Dn	γ_G
815	835	19.6	0.023	1.025	1.064
716	735	24.2	0.033	1.027	1.090
975	995	19.2	0.019	1.021	1.052
819	838	20.9	0.025	1.023	1.068
606	627	27.1	0.043	1.035	1.120
1065	1087	22.4	0.021	1.021	1.056
782	799	18.5	0.023	1.022	1.063
720	740	23.7	0.032	1.028	1.088
729	749	25.9	0.035	1.027	1.095
710	730	24.6	0.034	1.028	1.092
609	628	26.2	0.042	1.031	1.116
741	760	24.9	0.033	1.026	1.090
735	754	25.4	0.034	1.026	1.092
1086	1107	23.5	0.021	1.019	1.057
975	996	20.3	0.020	1.022	1.055
618	638	23.1	0.036	1.032	1.100
697	716	25.6	0.036	1.027	1.098
638	656	25.6	0.039	1.028	1.108
833	854	23.0	0.027	1.025	1.073
955	971	13.6	0.014	1.017	1.037
605	625	22.6	0.036	1.033	1.100
640	659	15.8	0.024	1.030	1.065
681	700	20.9	0.030	1.028	1.082
778	799	23.8	0.030	1.027	1.081

ค่าเฉลี่ย 1.081

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.022

ตารางที่ 3.7 แสดงการวิเคราะห์ ค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของ คาน
ตามสภาวะที่มีการควบคุมแบบที่ 2 (ไม่มีวิศวกรควบคุม)

ค่าที่ออกแบบ (กก./ม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ม. ²)	ค่าเบี่ยงเบน (กก./ม. ²)	Ω	D/Dn	γ_G
815	830	19.6	0.024	1.018	1.064
716	731	24.1	0.033	1.021	1.090
975	992	19.3	0.019	1.017	1.052
819	834	21.0	0.025	1.018	1.068
606	622	26.9	0.043	1.026	1.120
1065	1084	22.4	0.021	1.018	1.056
782	797	18.5	0.023	1.019	1.063
720	736	23.7	0.032	1.022	1.088
729	744	25.7	0.035	1.021	1.095
710	725	24.3	0.034	1.021	1.092
609	622	26.0	0.042	1.021	1.116
741	756	24.7	0.033	1.020	1.090
735	749	25.3	0.034	1.019	1.093
1086	1103	23.4	0.021	1.016	1.057
975	991	20.3	0.020	1.016	1.055
618	633	22.9	0.036	1.024	1.100
697	711	25.2	0.035	1.020	1.098
638	651	25.2	0.039	1.020	1.107
833	848	23.0	0.027	1.018	1.074
955	968	13.8	0.014	1.014	1.038
605	620	22.5	0.036	1.025	1.100
640	653	15.7	0.024	1.020	1.065
681	694	20.9	0.030	1.019	1.082
778	795	24.0	0.030	1.022	1.082

ค่าเฉลี่ย 1.081

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.022

ตารางที่ 3.8 แสดงการวิเคราะห์ ค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของ เสา
ตามสภาวะที่มีการควบคุมแบบที่ 1 (มีวิศวกรควบคุม)

ค่าที่ออกแบบ (กก./ม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ม. ²)	ค่าเบี่ยงเบน (กก./ม. ²)	Ω	D/Dn	γ_G
861	882	19.6	0.022	1.024	1.060
775	796	24.2	0.030	1.027	1.083
1010	1031	19.2	0.019	1.021	1.050
852	872	20.9	0.024	1.023	1.065
621	643	27.1	0.042	1.035	1.117
1147	1171	22.5	0.019	1.021	1.052
872	891	18.7	0.021	1.022	1.057
768	789	23.8	0.030	1.027	1.082
784	806	25.9	0.032	1.028	1.088
773	795	24.7	0.031	1.028	1.085
663	683	26.3	0.039	1.030	1.106
792	813	24.9	0.031	1.027	1.084
782	802	25.5	0.032	1.026	1.087
1137	1159	23.5	0.020	1.019	1.055
1051	1074	20.4	0.019	1.022	1.051
658	679	23.1	0.034	1.032	1.093
752	773	25.6	0.033	1.028	1.091
677	697	25.6	0.037	1.030	1.101
877	899	23.1	0.026	1.025	1.070
1040	1059	13.8	0.013	1.018	1.035
644	665	22.7	0.034	1.033	1.094
686	706	15.8	0.022	1.029	1.061
707	727	20.9	0.029	1.028	1.078
840	863	23.8	0.028	1.027	1.075

ค่าเฉลี่ย 1.076

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.020

ตารางที่ 3.9 แสดงการวิเคราะห์ ค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของ เสา
ตามสภาวะที่มีการควบคุมแบบที่ 2 (ไม่มีวิศวกรควบคุม)

ค่าที่ออกแบบ (กก./ม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ม. ²)	ค่าเบี่ยงเบน (กก./ม. ²)	Ω	D/Dn	γ_G
861	877	19.6	0.022	1.019	1.060
775	792	24.2	0.031	1.022	1.084
1010	1029	19.3	0.019	1.019	1.050
852	868	21.0	0.024	1.019	1.066
621	638	26.9	0.042	1.027	1.117
1147	1169	22.4	0.019	1.019	1.052
872	889	18.7	0.021	1.019	1.057
768	785	23.7	0.030	1.022	1.082
784	801	25.7	0.032	1.022	1.088
773	790	24.4	0.031	1.022	1.084
663	677	26.1	0.039	1.021	1.106
792	809	24.8	0.031	1.021	1.084
782	797	25.4	0.032	1.019	1.087
1137	1151	23.4	0.020	1.012	1.055
1051	1070	20.4	0.019	1.018	1.051
658	674	22.9	0.034	1.024	1.093
752	768	25.3	0.033	1.021	1.090
677	692	25.3	0.037	1.022	1.101
877	893	23.1	0.026	1.018	1.070
1040	1056	14.2	0.013	1.015	1.036
644	661	22.5	0.034	1.026	1.093
686	701	15.8	0.023	1.022	1.061
707	721	21.0	0.029	1.020	1.079
863	860	54.1	0.063	0.997	1.180

ค่าเฉลี่ย 1.080

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.029

ตารางที่ 3.10 แสดงการวิเคราะห์ ค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุก

ประเภทของอาคาร	ค่ากำหนด (กก./ม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ม. ²)	δ	Ω	L/L_0	γ_Q
สำนักงาน	250	350.8	0.182	0.189	1.403	1.642
สำนักงานประเภทการเงิน	250	351.4	0.18	0.187	1.406	1.634
สถานีขนส่ง	400	279.1	0.091	0.104	0.698	1.314
สถานีขนส่ง	400	264.2	0.086	0.099	0.661	1.297
มหาวิทยาลัย	300	163.3	0.133	0.142	0.544	1.452
มหาวิทยาลัย	300	168.9	0.139	0.148	0.563	1.475
มหาวิทยาลัย	300	156.4	0.123	0.133	0.521	1.418
ที่จอดรถ	400	157.2	0.174	0.181	0.393	1.608

ค่าเฉลี่ย 1.480

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.137

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.11 แสดงการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนตลอดท้ายสำหรับพื้นที่เขตนครใต้
(สภาพการก่อสร้างที่มีวิศวกรควบคุม)

ความหนาพื้น (ซม.)	f_{ck} กก./ซม ²	δ_{kfs}	δ_{10}	δ_{10}	Ω_{10}	Y_{e10}
10	240	0.119	0.086		0.170	1.563
12.5	240	0.119	0.060		0.146	1.468
20	240	0.119	0.028		0.125	1.390
30	240	0.119	0.033		0.128	1.399
10	280	0.154	0.086		0.196	1.674
12.5	280	0.154	0.060		0.176	1.567
20	280	0.154	0.028		0.159	1.518
30	280	0.154	0.033		0.161	1.526
10	280	0.210	0.086		0.243	1.891
12.5	280	0.210	0.060		0.226	1.812
20	280	0.210	0.028		0.214	1.752
30	280	0.210	0.033		0.215	1.759

ค่าเฉลี่ย

1.811

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

0.165

ตารางที่ 3.12 แสดงการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนตลอดท้ายสำหรับพื้นที่เขตนครใต้
(สภาพการก่อสร้างที่มีวิศวกรควบคุม)

ความหนาพื้น (ซม.)	f_{ck} กก./ซม ²	δ_{kfs}	δ_{10}	δ_{10}	Ω_{10}	Y_{e10}
8	120	0.121	0.057		0.145	1.465
10	120	0.121	0.030		0.128	1.400
8	200	0.232	0.057		0.246	1.905
10	200	0.232	0.030		0.236	1.857
8	280	0.145	0.057		0.166	1.546
10	280	0.145	0.030		0.151	1.467

ค่าเฉลี่ย

1.610

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

0.216

ตารางที่ 3.13 : แสดงการวิเคราะห์ส่วนประกอบปลอกคีย์สำหรับคานคอนกรีต (สภาพการก่อสร้างที่มีวิศวกรควบคุม)

ความกว้าง (ซม.)	f_{ck} กก./ซม. ²	$\delta_{กึ่ง}$	$\delta_{ครึ่ง}$	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนตามค่าความลึกของคาน					สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนรวม					ค่าส่วนประกอบปลอกคีย์				
				δ_{40}	δ_{45}	δ_{50}	δ_{60}	δ_{100}	Ω_{40}	Ω_{45}	Ω_{50}	Ω_{60}	Ω_{100}	γ_{40}	γ_{45}	γ_{50}	γ_{60}	γ_{100}
10	240	0.119	0.032	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.126	0.125	0.124	0.125	0.123	1.391	1.389	1.386	1.389	1.383
15	240	0.119	0.016	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.123	0.122	0.121	0.122	0.120	1.380	1.377	1.375	1.377	1.371
20	240	0.119	0.018	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.123	0.122	0.122	0.122	0.121	1.381	1.378	1.376	1.378	1.372
25	240	0.119	0.015	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.123	0.122	0.121	0.122	0.120	1.380	1.377	1.374	1.377	1.371
30	240	0.119	0.011	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.122	0.121	0.121	0.121	0.120	1.378	1.375	1.373	1.375	1.369
40	240	0.119	0.007	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.122	0.121	0.120	0.121	0.119	1.377	1.374	1.372	1.374	1.368
10	280	0.154	0.032	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.159	0.159	0.158	0.159	0.157	1.519	1.517	1.515	1.517	1.512
15	280	0.154	0.016	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.157	0.158	0.156	0.156	0.155	1.510	1.507	1.505	1.507	1.502
20	280	0.154	0.018	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.157	0.156	0.156	0.156	0.155	1.511	1.508	1.506	1.508	1.503
25	280	0.154	0.015	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.157	0.156	0.156	0.156	0.155	1.509	1.507	1.505	1.507	1.502
30	280	0.154	0.011	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.156	0.156	0.155	0.156	0.155	1.508	1.505	1.503	1.505	1.500
40	280	0.154	0.007	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.156	0.156	0.155	0.156	0.154	1.507	1.505	1.502	1.505	1.499
10	280	0.210	0.032	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.214	0.213	0.213	0.213	0.213	1.753	1.751	1.750	1.751	1.747
15	280	0.210	0.016	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.212	0.212	0.211	0.212	0.211	1.745	1.743	1.741	1.743	1.739
20	280	0.210	0.018	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.212	0.212	0.211	0.212	0.211	1.746	1.744	1.742	1.744	1.739
25	280	0.210	0.015	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.212	0.212	0.211	0.212	0.211	1.745	1.743	1.741	1.743	1.738
30	280	0.210	0.011	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.212	0.211	0.211	0.211	0.210	1.744	1.742	1.740	1.742	1.737
40	280	0.210	0.007	0.018	0.015	0.012	0.015	0.005	0.212	0.211	0.211	0.211	0.210	1.743	1.741	1.739	1.741	1.736

ค่าเฉลี่ย 1.543
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.152

ตารางที่ 3.14 : แสดงการวิเคราะห์ค่าส่วนประกอบโดยเฉลี่ยสำหรับคานคอนกรีต

(สภาพการก่อสร้างที่ไม่มีวิศวกรควบคุม)

ความกว้าง (ซม.)	f_c กก./ซม ²	δ_{sh}	δ_{rh}	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนตามความลึกของคาน				สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนรวม				ค่าส่วนประกอบโดยเฉลี่ย			
				δ_{s1}	δ_{s2}	δ_{s3}	δ_{s4}	Ω_{s1}	Ω_{s2}	Ω_{s3}	Ω_{s4}	γ_{s1}	γ_{s2}	γ_{s3}	γ_{s4}
15	120	0.121	0.025	0.012	0.011	0.007	0.009	0.125	0.125	0.124	0.124	1.387	1.387	1.385	1.385
20	120	0.121	0.018	0.012	0.011	0.007	0.009	0.124	0.123	0.123	0.123	1.383	1.382	1.380	1.381
25	120	0.121	0.015	0.012	0.011	0.007	0.009	0.123	0.123	0.122	0.123	1.381	1.381	1.379	1.380
30	120	0.121	0.019	0.012	0.011	0.007	0.009	0.124	0.123	0.123	0.123	1.383	1.383	1.381	1.382
35	120	0.121	0.018	0.012	0.011	0.007	0.009	0.124	0.123	0.123	0.123	1.383	1.382	1.380	1.381
40	120	0.121	0.016	0.012	0.011	0.007	0.009	0.123	0.123	0.122	0.123	1.382	1.381	1.379	1.380
15	200	0.232	0.025	0.012	0.011	0.007	0.009	0.234	0.234	0.234	0.234	1.848	1.848	1.846	1.847
20	200	0.232	0.018	0.012	0.011	0.007	0.009	0.233	0.233	0.233	0.233	1.845	1.844	1.843	1.844
25	200	0.232	0.015	0.012	0.011	0.007	0.009	0.233	0.233	0.233	0.233	1.844	1.843	1.842	1.843
30	200	0.232	0.019	0.012	0.011	0.007	0.009	0.233	0.233	0.233	0.233	1.845	1.845	1.843	1.844
35	200	0.232	0.018	0.012	0.011	0.007	0.009	0.233	0.233	0.233	0.233	1.845	1.844	1.843	1.844
40	200	0.232	0.016	0.012	0.011	0.007	0.009	0.233	0.233	0.233	0.233	1.844	1.844	1.842	1.843
10	280	0.145	0.025	0.012	0.011	0.007	0.009	0.148	0.148	0.147	0.148	1.475	1.475	1.473	1.474
15	280	0.145	0.018	0.012	0.011	0.007	0.009	0.147	0.147	0.146	0.147	1.471	1.471	1.469	1.470
20	280	0.145	0.015	0.012	0.011	0.007	0.009	0.147	0.147	0.146	0.146	1.470	1.469	1.467	1.468
25	280	0.145	0.019	0.012	0.011	0.007	0.009	0.147	0.147	0.147	0.147	1.472	1.471	1.469	1.470
30	280	0.145	0.018	0.012	0.011	0.007	0.009	0.147	0.147	0.146	0.147	1.471	1.471	1.469	1.470
40	280	0.145	0.016	0.012	0.011	0.007	0.009	0.147	0.147	0.146	0.146	1.470	1.470	1.468	1.469

ค่าเฉลี่ย 1.566

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.202

ตารางที่ 3.15 แสดงการวิเคราะห์ค่าส่วนประกอบตลอดภัยของเหล็กเสริม

f_y (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน		Ω	R/R _y	γ_s
		$\delta_{กส}$	$\delta_{หน้าตัด}$			
2400	3467	0.068	0.020	0.071	1.445	1.173
2400	3467	0.068	0.016	0.070	1.445	1.170
2400	3467	0.068	0.011	0.069	1.445	1.168
3000	3921	0.050	0.011	0.051	1.307	1.122
3000	3921	0.050	0.010	0.051	1.307	1.122
3000	3921	0.050	0.011	0.051	1.307	1.122
3000	3921	0.050	0.008	0.051	1.307	1.121
3000	3921	0.050	0.007	0.050	1.307	1.120
3000	3921	0.050	0.007	0.050	1.307	1.120
3000	3921	0.050	0.007	0.050	1.307	1.120
4000	4614	0.042	0.011	0.043	1.154	1.103
4000	4614	0.042	0.010	0.043	1.154	1.102
4000	4614	0.042	0.011	0.043	1.154	1.103
4000	4614	0.042	0.008	0.043	1.154	1.101
4000	4614	0.042	0.007	0.043	1.154	1.101
4000	4614	0.042	0.007	0.043	1.154	1.101
4000	4614	0.042	0.007	0.043	1.154	1.101

ค่าเฉลี่ย 1.122

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.025

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย