

การหาความเหมาะสมของการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณด้วยวิธีความน่าเชื่อถือ
สำหรับอาคารโครงการศูนย์บริการอินเทอร์เน็ตสาธารณะ (USO Net)
RELIABILITY DESIGN OPTIMIZATION DESIGN FOR THE STEEL BUILDING OF
PUBLIC INTERNET SERVICE CENTER (USO NET)

พันกฤษ โยธินธนะรัชต์¹ และ สหรัฐ พุทธวรณะ²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding author; E-mail address: punkrit@yahoo.co.th, bsaharat@yahoo.com

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์หาความปลอดภัยของโครงสร้างอาคารในประเทศไทยใช้ข้อกำหนด (CODE) และมาตรฐานการออกแบบ (STANDARD DESIGN) เช่น ACI Code, ASCE, AISC, EURO Code และ วสท., มยผ., เทศบัญญัติ กทม. เป็นต้น เพื่อให้หาค่าผลการคำนวณออกแบบที่เป็นแบบรูปการรวมทั้งรายการประกอบแบบทางโครงสร้างต่าง ๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการออกแบบ (Criteria Condition) และควบคุมกระบวนการคำนวณหาตัวเลขด้วยค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก (Load Factor) กับค่าตัวคูณลดกำลังต้านทาน (Resistance Factor) ค่าการโก่งตัวที่ยอมรับ และการตรวจสอบความมั่นคงของโครงสร้าง (Stability) ซึ่งเป็นการคำนวณออกแบบด้วยสถานะขีดจำกัด (Limit State) การวิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง (Reliability of Structure) นั้นเป็นการใช้การวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นของความปลอดภัยของโครงสร้าง (Probability of Survival) โดยมองที่ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ (Probability of Failure) ที่เป็นค่าตรงข้ามกันถ้ารวมกันแล้วต้องมีค่าเท่ากับ 1 และควบคุมด้วยค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index) เมื่อคำนวณได้ค่าออกมาแล้วต้องไม่เกินค่าดัชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมาย (Reliability Index Target) ที่กำหนดวางไว้ ซึ่งอาศัยการรวบรวมข้อมูลจากทางงานที่มีการก่อสร้างมาเข้ารูปแบบตารางสถิติแล้วหาค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ต้องใช้ในสมการเพื่อคำนวณต่อไปได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ค่าความแปรปรวน (Covariance) ค่าเอนเอียง (Bias)

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของระบบโครงสร้าง, การวิเคราะห์หาความเหมาะสมในการออกแบบด้วยวิธีความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง, ดัชนีความน่าเชื่อถือ, ความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติ, ดัชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมาย, จุดออกแบบ

Abstract

Analysis of the safety of building structures in Thailand uses code and standard design standards such as ACI Code, ASCE, AISC, EURO Code and EIT, Code of Bangkok, etc., to find out the results of the result is based on criteria condition and controls the process of calculating the number by the load factor and the resistance factor. The probability of survival looking at the probability of failure as the opposite value if combined must be equal to 1. The value has been calculated cannot exceed the reliability index target relies on the collection of information from the construction site to a statistical table then find the statistical parameters required in the equation to calculate the following: Average (Mean) Standard Deviation Covariance, Bias.

Keywords: System Structure Reliability Analysis, Reliability Base Optimization (ROB), Reliability Index, Probability of Failure, Design Point, Reliability Index Target

1. คำนำ

ความสำคัญที่จะดำเนินการก่อสร้างให้สำเร็จตามเป้าหมายและแผนงานที่วางไว้คือการก่อสร้าง (Construction Process) ค่า Error ที่เกิดขึ้นอาจเกินค่าที่ยอมรับให้อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย (Safety Factor) ลดลงจนต่ำกว่าค่าที่คำนวณออกแบบไว้แต่ต้นนั้นหมายถึงโอกาสของความน่าจะเป็นในการเกิดการวิบัติขึ้นจึงควรมีการวัดผลในการก่อสร้างเพิ่มเติมด้วยวิธีการทางสถิติโดยวิธีหาความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง (Reliability Structure Analysis) เปรียบเทียบกับค่าการออกแบบไว้ เพื่อให้ได้ค่าความเหมาะสมของการออกแบบ (Optimize Base Design) ที่กำหนดสำหรับการออกแบบนั้นไว้ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ที่ได้มาจากกระบวนการขั้นตอนทางสถิติ ได้แก่ กำลังแรงดึงเหล็ก (f_t), ค่าเยื้องศูนย์กลางเหล็กรูปพรรณ, ค่าระยะ

คลาดเคลื่อนศูนย์กลางคานเหล็กรูปพรรณเพื่อนำไปหาค่า ค่าเฉลี่ย(μ),ค่า ความแปรปรวน (σ),สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (cov),ค่าความเอนเอียง (bias) ที่ต้องการซึ่งค่าเหล่านี้เป็นตัวแปรในสมการออกแบบที่เป็นฟังก์ชัน สภาวะขีดจำกัด (Limit State Function) เพื่อนำไปหาค่าดัชนีความ น่าเชื่อถือ (Reliability Index), β ความน่าจะเป็น ของการวิบัติ (Probability of failure), P_f งานวิจัยนี้หาค่าความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง เพื่อหาความเหมาะสมของการออกแบบโดยใช้หลักการทางด้าน วิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือที่มีการกำหนดจุดออกแบบ (Design Point) ที่ ใช้ข้อมูลจากการเก็บรวบรวมจากหน้างานก่อสร้างของโครงการศูนย์บริการ อินเทอร์เน็ตสาธารณะ (USO Net) จำนวน 137 ศูนย์ของที่มีอยู่จำนวน 763 ศูนย์ในแผนของปี 2561 แล้วเสร็จ ปี 2562 ค่าของกำลังวัสดุที่นำมา พิจารณาในงานวิจัยนี้ เป็นค่ากำลังต้านทานที่ออกแบบตามข้อกำหนดและ มาตรฐานการออกแบบของ ACI Code ในส่วนของวิธีออกแบบด้วยกำลัง ประลัย (Ultimate Strength Design, USD) สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก และ AISC Code ในส่วนของวิธีออกแบบเหล็กด้วยวิธีกำลังและความ ต้านทาน (Load-Resistance Factor Design, LRFD) และใช้ค่าตัวคูณเพิ่ม น้ำหนักกับตัวคูณลดกำลัง ทั้งของ วสท.,เทศบัญญัติ กทม. เปรียบเทียบกับ ของ ACI Code, EURO Code และ AISC Code โดยที่ กำลังประลัยของ เหล็กโครงสร้างรูปพรรณกำลังต้านทานแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรมาตรฐาน ASTM A6 หรือมาตรฐาน อุตสาหกรรม มอก.1227 สำหรับเหล็กขึ้นรูปร้อน กับเหล็กชุบตัวซีเหล็ก กล้อง มอก.1228 สำหรับขึ้นรูปเย็น

เครื่องมือคำนวณออกแบบ ใช้ทั้งโปรแกรมคำนวณด้วยหลักไฟไนท์เอลิเมนต์ ได้แก่ Matlab, Robot ร่วมกับ SPEADSHEET ตารางคำนวณใน ส่วนของการหาค่าทางสถิติและขั้นตอนคำนวณหาความน่าเชื่อถือรวมถึงหา ค่าจุดออกแบบที่เหมาะสม

2. ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบสุ่ม

2.1 การแจกแจงแบบปกติ (normal Distribution)

ดังแสดงในสมการที่ (1),(2),(3)

$$f(x, k) = \frac{1}{k} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\sum x_i}{k} \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{k} \quad (3)$$

2.2 การแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal Distribution)

เมื่อ Y เป็นตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงแบบปกติเป็น $N(\mu, \sigma)$ การแจกแจงของฟังก์ชัน $X = \exp[Y]$ เป็นล็อกปกติ, $\log N(\mu, \sigma)$ ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (The probability density) ของตัวแปรแบบ ล็อกปกติ (log-normal variable) คือ

$$\frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

และค่าเฉลี่ยและความแปรปรวน

$$E(X) = \exp\left\{\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right\} \quad (5)$$

$$Ver(X) = \exp\{2\mu\} \cdot (\omega^2 - \omega) \quad (6)$$

$$\text{โดยที่ } \omega = \exp\{\sigma^2\} \quad (7)$$

$$\text{ค่าฐานนิยม (Mode) คือ } Mo_x = \frac{\exp\{\mu\}}{\omega} \quad (8)$$

$$\text{ค่ามัธยฐาน (Median) คือ } Me_x = \exp\{\mu\} \quad (9)$$

$$\text{ความเบ้ (Skewness) คือ } \gamma_1 = (\omega - 1)^{0.5} (\omega + 2) \quad (10)$$

$$\text{ความโค้ง (kurtosis) คือ } \gamma_2 = \omega^4 + 2\omega^3 + 3\omega^2 - 6 \quad (11)$$

3. ทฤษฎีพื้นฐานและวิธีการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ

3.1 Ultimate Limit State (ULS) สภาวะขีดจำกัด

ความน่าจะเป็นเกิดการวิบัติ (Probability Failure) พิจารณาอิทธิพล จากผลกระทบของน้ำหนักที่กระทำ (Load effect ,Q (demand)) และ กำลังต้านทานของโครงสร้าง (Structural Resistance ,R(supply)) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้
กรณีพื้นฐานทั่วไป

$$Q < R \quad (12)$$

$$G = R - Q \quad (13)$$

$$\sigma_G^2 = \sigma_R^2 - \sigma_Q^2 \quad (14)$$

3.2 การแปลง (Transformation)

การแปลง (Transformation) ของฟังก์ชัน G ไปยังตัวแปร มาตรฐาน (standardized variable) เท่ากับ

$$U = \frac{(G - \mu_G)}{\sigma_G} \quad (15)$$

สำหรับ $G = 0$ ตัวแปรมาตรฐาน เท่ากับ

$$U_0 = \frac{(0 - \mu_G)}{\sigma_G} \quad (16)$$

ฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัด (Limit state function) เท่ากับ

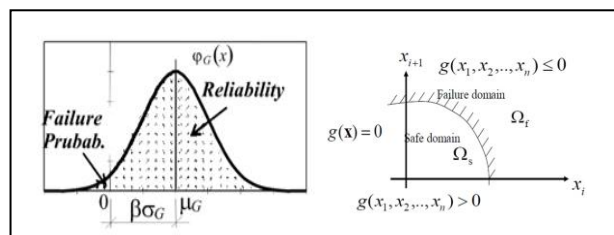
$$G(X) = G = R - Q = 0 \quad (17)$$

3.3 ความน่าจะเป็นเกิดการวิบัติ (Probability Failure) ด้วยวิธี

Probabilistic Approach

ค่าความน่าจะเป็นเกิดการวิบัติหาได้จากสมการ

$$P_f = \iint_{Z(X) < 0} \phi_r(r) \phi_q(q) dr dq \quad P(Z < 0) \quad (18)$$



รูปที่ 1 กราฟแสดงค่า Reliability Index

3.4 ดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง (Reliability Index of Structures) β

$$\beta = -u_0 = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_R - \mu_E}{(\sigma_X^2 + \sigma_E^2)^{1/2}} \quad (19)$$

3.5 จุดออกแบบ (Design Point)
กำลังต้านทานจุดออกแบบ

$$R^* = \mu_R - \frac{\beta \sigma_R^2}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (20)$$

น้ำหนักกระทำที่จุดออกแบบ

$$Q^* = \mu_Q - \frac{\beta \sigma_Q^2}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (21)$$

3.6 ตัวคูณกำลังต้านทานและตัวคูณน้ำหนักกระทำ (Load and Resistance Factor, LRFD)

D_n คือน้ำหนักคงที่ระบุ (nominal dead load) และ γ_g (dead load factor), L_n (nominal live load), γ_l (live load factor), R_n (nominal resistance), ϕ (resistance factor)

$$\gamma_D D_n + \gamma_L L_n \leq \phi R_n \quad (22)$$

$$\gamma_D = \frac{D^*}{D_n} \quad (23)$$

$$\gamma_L = \frac{L^*}{L_n} \quad (24)$$

$$\phi = \frac{R^*}{R_n} \quad (25)$$

$$P_f = \int_{G(X) \leq 0} f_x(X) dX = \int \dots \int_{G(X) \leq 0} f_x(X) dX$$

$$= \int \dots \int_{\Omega} I[G(X)] f_x(X) dX$$

$$= \int \dots \int_{\Omega} F(X) dX \quad (26)$$

โดยที่

X หมายถึงตัวแปรสุ่มที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่ได้รับการประเมิน

$G(X)$ เป็นฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด ดังนั้น จะได้

$G(X) > 0$ สำหรับ X ในโครงสร้างที่ปลอดภัย

$G(X) = 0$ สำหรับ X บนพื้นผิวของขีดจำกัด กรณีพิจารณา 3 มิติ

$G(X) < 0$ สำหรับ โครงสร้างที่วิบัติ

$f_X(X)$ คือฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ X .

$I[G(X)]$ คือฟังก์ชันตัวบ่งชี้

ส่วนค่าของ $1 - P_f$ คือความเชื่อถือได้ของโครงสร้าง นั่นคือดัชนีความเชื่อมั่น β หมายถึง

$$\beta = -\phi^{-1}(P_f) \quad (27)$$

หรือจะได้

$$P_f = \phi(-\beta) \quad (28)$$

3.7 วิธี First-Order Reliability method (FORM)

ค่าน้ำหนักกระทำ (Load), Q และกำลังต้านทาน (Resistance), R ถือว่าเป็นตัวแปรและฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัด $g(\cdot)$ ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรเหล่านี้สำหรับสภาวะขีดจำกัดที่มุ่งไปที่ความสามารถในการใช้งานสภาวะขีดจำกัดใช้งานหรือสภาวะขีดจำกัดกำลังประลัย (serviceability or ultimate state) โดยที่หาได้จากสมการ

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_{x^*} \quad (29)$$

$$M = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (30)$$

เมื่อ x_i^* เป็นจุด linearization และอนุพันธ์ย่อยจะถูกประเมินที่จุดนั้น ในวิธี FOSM จุด linearization จะเป็นค่าใน set ของค่าเฉลี่ย ($E(x_1), E(x_2), \dots, E(x_n)$) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance) ของ M จะประมาณด้วย

เมื่อ $M < 0$

$$P_f = P[M \leq 0] = F_M(0) = F_{GM} \left(\frac{-\mu_m}{\sigma_m} \right) = F_{GM}(-\beta) \quad (30)$$

เมื่อ $\beta = \frac{\mu_m}{\sigma_m}$ คือค่าดัชนีความปลอดภัย (Safety Index) ซึ่งเป็น

ส่วนกลับของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (COV) ของ Safety Margin M ,

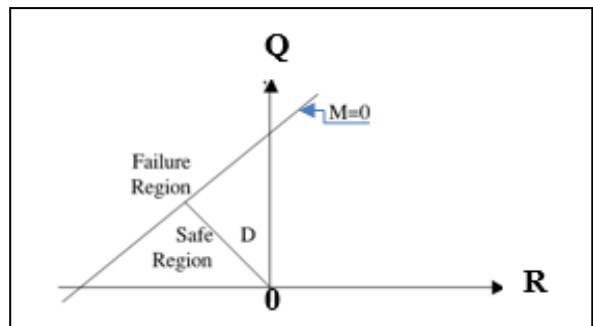
$$M = g(x_1, x_2) = g(Q, R) \quad (31)$$

$$\mu_m = \mu_R - \mu_Q \quad (32)$$

$$\sigma_m^2 = \sigma_R^2 - \sigma_Q^2 \quad (33)$$

$M = 0$ เป็นสภาวะขีดจำกัด (Limit State) ตัวแปรปกติมาตรฐานของ Q และ R

$$Q' = \frac{Q - \mu_Q}{\sigma_Q}; R' = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (34)$$



รูปที่ 2 ฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัดในระนาบความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$M = \sigma_Q Q' - \sigma_R R' + \mu_Q - \mu_R = 0 \quad (35)$$

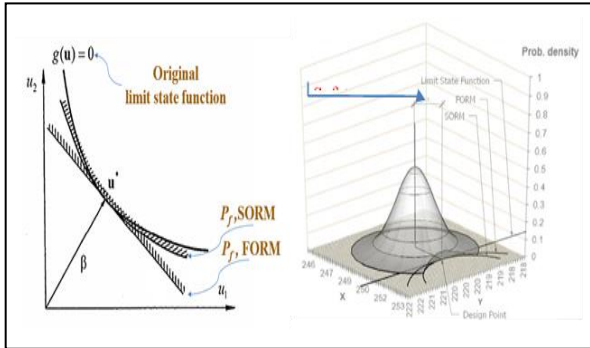
$$\beta = D = \frac{\mu_m}{\sigma_m} = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_Q^2}} \quad (36)$$

$$P_f = \phi(-D) \quad (37)$$

3.8 วิธี Second -Order Reliability method (SORM)

$$P_f \approx \phi(-\beta) \sum_{j=1}^k \left[\prod_{i=1}^{n-1} (1 - \beta \cdot \kappa_i) \right]^{-0.5} \quad (38)$$

โดยที่ κ_i คือลำดับ i เส้นโค้งหลักของพื้นผิวสถานะขีดจำกัด (Limit State) $g(y^*) = 0$ ที่ y^* วิธีนี้สามารถประมาณปัญหาขนาดใหญ่ที่มีตัวแปรพื้นฐานจำนวนมากหรือที่ฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด (Limit State Function) ความสัมพันธ์ ระหว่าง FORM, SORM และ Limit State Function



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ของ FORM,SORM และค่าดัชนี β

3.9 การคำนวณหาความน่าเชื่อถือ Deterministic reliability Calculation

ค่าความปลอดภัยเดียว (Single safety factor)

$$G + Q < \frac{R}{\sigma} \quad (39)$$

เมื่อ Safety Factor > 1 สำหรับน้ำหนักกระทำและ Safety Factor < 1 สำหรับกำลังต้านทาน G คือ สภาวะขีดจำกัด, Q คือ น้ำหนักกระทำ, R คือ กำลังต้านทาน, σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าความปลอดภัยเดียว (Single safety factor)

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R} \{G_k \gamma_G + Q_k \gamma_Q\} = S_d \quad R_d = \quad (40)$$

โดยที่

S_d = ความปลอดภัยย่อย

R_d = กำลังต้านทานย่อย

R_k = กำลังต้านทานที่ค่าลักษณะเฉพาะ

G_k = สภาวะวิบัติที่ค่าลักษณะเฉพาะ

3.10 ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (P_f , Probability of failure)

สามารถหาได้ตามสมการ

$$P_f = P(R - Q < 0) \quad (41)$$

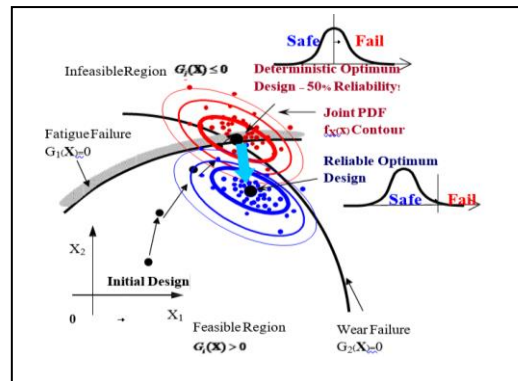
และค่าความน่าเชื่อถือ Reliability (Probability of Survival)

หาได้จากสมการ

$$P_s = 1 - P_f \quad (42)$$

3.11 ความเหมาะสมของการออกแบบโดยใช้ความน่าเชื่อถือ (Reliability-Based Design Optimization (RBDO))

เมื่อเริ่มต้นออกแบบ (Initial Design) จะได้ค่าความเหมาะสมในการออกแบบค่าหนึ่งซึ่งอยู่ในพื้นที่ Feasible Region โดยที่ฟังก์ชัน $G(X) > 0$ และค่าขีดจำกัดของฟังก์ชันสถานะขีดจำกัดจะกำหนดให้การหาค่า Optimum Design คือการกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นของความปลอดภัย (Safety) มากกว่าค่าความน่าจะเป็นในการวิบัติ (Failure) เรียกว่า “Reliable Optimum Design” ซึ่งถูกตีกรอบการคำนวณโดย จุด “Deterministic Optimum Design” เป็นจุดที่เป็นจุดตัดของเส้นฟังก์ชันความสัมพันธ์ของ Wear Failure ที่ $G_2(X) = 0$ กับ Fatigue Failure ที่ $G_1(X) = 0$ และให้ค่าความน่าจะเป็นของความปลอดภัย (Safety) เท่ากับค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Failure) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ Joint PDF ของความเหมาะสมของการออกแบบโดยใช้ความน่าเชื่อถือ(RBDO)

ดังนั้น การหาค่าความน่าจะเป็นของความปลอดภัย (Probability of Survival) หาได้จากสมการที่ 42 โดยเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณจากคุณสมบัติของหน้าตัดชิ้นส่วนที่เก็บข้อมูลจากจำนวน 137 ศูนย์ (อาคารก่อสร้าง) ที่เป็นกลุ่มตัวอย่าง จากจำนวน 637 ศูนย์ (อาคารก่อสร้างทั้งหมด) ที่เป็นจำนวนประชากรทั้งหมด

4. ผลการศึกษา/ทดลอง (Results)

ผลการศึกษาเก็บข้อมูลตัวอย่างของโครงสร้างเสาเหล็กรูปพรรณ H-150X150x7x10 mm. และโครงสร้างคานอะเสเหล็กรูปพรรณ H-150X75x6x9 mm. ได้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 เมื่อนำไปคำนวณตามกระบวนการวิธีความน่าเชื่อถือจะได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 3 เป็นค่าดัชนีความน่าเชื่อถือของเสาเหล็กรูปพรรณ (β_c) กับดัชนีโครงสร้างเหล็กเสารูปพรรณ (P_{fc}) กับความน่าจะเป็นเกิดการวิบัติของโครงสร้างคานเหล็กรูปพรรณ (P_{fb}) ความน่าเชื่อถือของคานเหล็กรูปพรรณ (β_b) จากนั้นคำนวณหาความน่าจะเป็นเกิดการวิบัติของ

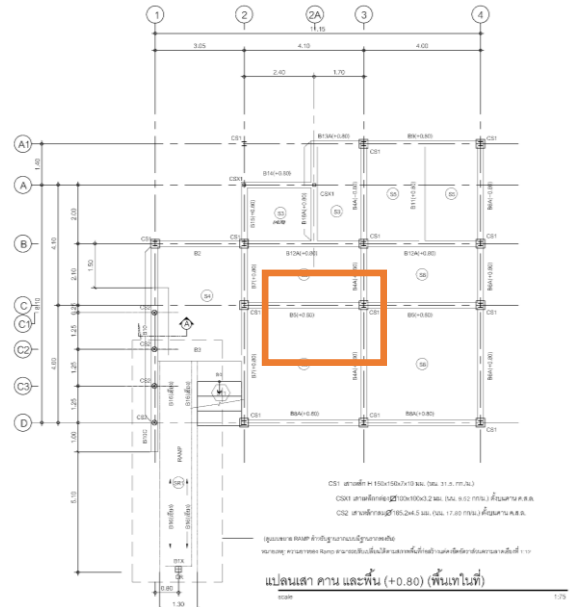
ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติหน้าเสาเหล็กรูปพรรณและค่าพารามิเตอร์

คุณสมบัติหน้าตัดเสาเหล็กรูปพรรณ H-150X150x7x10 mm.						
		Normal	Mean, μ_{xi}	SD, σ_{xi}	COVxi = $\frac{\sigma_{xi}}{\mu_{xi}}$	
	H	mm	150.000	149.125	-0.875	0.59%
	h	mm	136.000	135.559	-0.441	0.33%
	B	mm	150.000	149.624	-0.376	0.25%
	b	mm	140.000	140.082	0.082	0.06%
	t1	mm	7.000	6.783	-0.217	3.20%
	t2	mm	10.000	9.542	-0.458	4.80%
	Area	cm ²	34.600	33.233	-1.367	4.11%
	Sx	cm ³	171.207	164.562	-6.645	4.04%
	Mmax	kg-m	12.000	13.080	1.080	8.26%
	Qall (Fb = 0.6fy)	ksc	1440.000	1383.109	-56.891	4.11%
Z = Mmax/Fb	cm ³	8.333	9.457	1.124	11.88%	
Plastic Moment Capacity; Mp = Fb.Sx	kg-m	2465.379	2276.072	-189.306	8.32%	
Pmax	kg	20480.000	19670.881	-809.119	4.11%	
Pmax/A	ksc	591.908	591.908	0.000	0.00%	
Allowable Compressive Stress (Fa)	ksc	2062.000	1975.169	-86.831	4.40%	

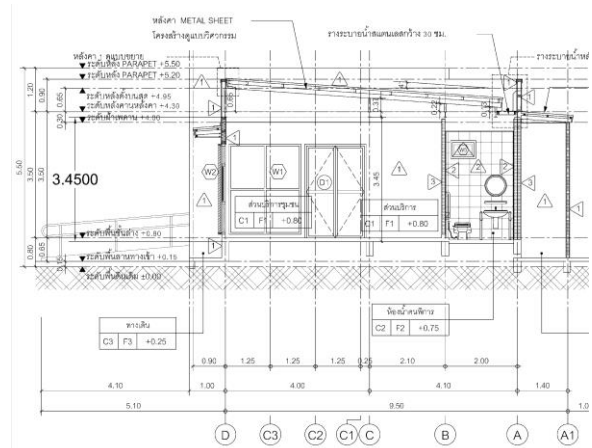
ตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณค่าความน่าเชื่อถือของเสาเหล็กรูปพรรณ

Structural Reliability เสาเหล็กรูปพรรณ H-150X150x7x10 mm.			
$\sigma_{Fb}^2 =$		3236.605	
$\sigma_Q^2 =$		654673.323	
$\sigma_A^2 =$		1.869	
$\sigma_{lnFall}^2 =$		8.083	
Mean of $\ln(Fall) = \ln \bar{Fall} - \frac{1}{2} \sigma_{lnFall}^2$		3.194	
$\sigma_{lnQ}^2 =$		13.392	
Mean of $\ln(Q) = \ln \bar{Q} - \frac{1}{2} \sigma_{lnQ}^2$		0.153	
$\sigma_{lnA}^2 =$		1.054	
Mean of $\ln(A) = \ln \bar{A} - \frac{1}{2} \sigma_{lnA}^2$		3.924	
$X_0 = \ln \left(\frac{Fall.A}{Q} \right)$			
Mean $\bar{Y} = \ln(X_0) = \ln \bar{Fall} + \ln \bar{A} - \ln \bar{Q}$		6.964	
SD; $\sigma_Y = \sigma_{lnFall}^2 + \sigma_{lnQ}^2 + \sigma_{lnA}^2$		22.528	
$P_f = P \left(\frac{P}{Q} < 1 \right) = P \left[\left(\frac{Fall.A}{Q} < 1 \right) \right] = \Phi \left[\frac{\ln(1) - \bar{Y}}{\sqrt{\sigma_Y}} \right]$	$\Phi[-1.467]$	0.0721	
Structural reliability index	β	-	1.4530
Probability of failure	P_f	-	0.0721
Probability of Survival	P_s	-	0.9279

กรณีของชิ้นส่วนเสาเหล็กรูปพรรณขนาดหน้าตัด H 150x150x7x10 mm. ตามตารางที่ 1 และชิ้นส่วนคานเหล็กรูปพรรณขนาดหน้าตัด H-150x75x6x9 mm. ตามตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติของหน้าตัดปรากฏ (Nominal) ในช่อง Norminal ได้แก่ค่า H,h,B,b,t1,t2,Area,Sx ส่วนค่า โมเมนต์สูงสุด (Mmax), แรงอัดในแนวแกนสูงสุด (Pmax) คำนวณได้จากชิ้นส่วนอาคารตามรูปที่ 5 โดยพิจารณาพื้นที่น้ำหนักกระทำและนำไปคำนวณค่า โมดูลัสหน้าตัด (Z) จากค่าหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ Qall ได้จาก Fb = 0.6Fy จะทำให้สามารถคำนวณค่าของโมเมนต์พลาสติกที่ทำให้เกิดจุดหมุนพลาสติก (Hinge) รวมถึงค่าแรงในแนวแกนจากน้ำหนักกระทำในตำแหน่ง Gridline 3-C ความสูงของเสาไร้การค้ำยันด้านข้างเท่ากับ 3.45 ม. ตามรูปที่ 6



รูปที่ 5 แล่นเสาเหล็ก คานและพื้น



รูปที่ 6 รูปตัดขยายอาคารแสดงความสูงเสาไร้หลังคา

หลังได้ค่าจากการเก็บข้อมูล H,h,B,b,t1,t2 แล้วคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติจึงได้ค่าเฉลี่ย (Mean), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (COV) เพื่อนำค่ามาคำนวณค่า Area,Sx ส่วนค่าโมเมนต์หาจากโมเมนต์ปรากฏ (Nominal) ที่คิดในแนวพิกัดหน้าตัด X-Y ถ้าเกิดการเอียงศูนย์ของเสาในการก่อสร้างจริง(ค่าที่เก็บจากหน้างานจริงมีค่าสูงสุด +2.5/-2.5 มม.)กับค่าหน้าตัดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วจึงนำมาค่าโมเมนต์เบี่ยงเบน,โมเมนต์เฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนโมเมนต์ต่อไป

ต่อจากนั้นจึงทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับหาค่าความน่าเชื่อถือตามตารางที่ 2 สำหรับเสาเหล็กรูปพรรณ และตารางที่ 4 สำหรับคานเหล็กรูปพรรณ

จากนั้นคำนวณค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติ (P_f) ของเสาและ (P_f) สำหรับคาน ได้จากค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (β) ของเสาเหล็ก และ คานเหล็ก ตามตารางที่ 2 และ ตารางที่ 4

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติหน้าตัดคานเหล็กรูปพรรณและค่าพารามิเตอร์

คุณสมบัติหน้าตัดคานเหล็กรูปพรรณ H-150X75x6x9 mm.					
	Normalinal	Mean, μ_{xi}	SD, σ_{xi}	COVxi = $\frac{\sigma_{xi}}{\mu_{xi}}$	
	H	mm = 150	149.125	-0.875	0.59%
	h	mm = 138	137.159	-0.841	0.61%
	B	mm = 75	74.090	-0.910	1.23%
	b	mm = 66	65.510	-0.490	0.75%
	t1	mm = 6	5.983	-0.017	0.28%
	t2	mm = 9	8.580	-0.420	4.90%
	Area	cm ² = 21.420	20.634	-0.786	3.81%
	Sx	cm ³ = 88.52	85.69	-2.840	3.31%
	Mmax	kg-m = 1,200	1308	108.000	8.26%
	Qall (Fb = 0.6fy)	ksc = 1,440	1,387	-52.850	3.81%
	Z = Mmax/Fb	cm ³ = 833.333	942.941	109.607	11.62%
	Plastic Moment Capacity; Mp = Fb.Sx	kg-m = 1,274.76	1,188.58	-86.175	7.25%

ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณค่าความน่าเชื่อถือของคานเหล็กรูปพรรณ

Structural Reliability คานเหล็กรูปพรรณ H-150X75x6x9 mm.			
$\sigma_{Fb}^2 =$			2793.156
$\sigma_Q^2 =$			11664.000
$\sigma_{Sx}^2 =$			8.063
$\sigma_{lnFb}^2 =$			7.935
Mean of $\ln(Fb) = \ln \bar{Fb} - \frac{1}{2} \sigma_{Fb}^2$			3.267
$\sigma_{lnQ}^2 =$			9.364
Mean of $\ln(Q) = \ln \bar{Q} - \frac{1}{2} \sigma_Q^2$			2.167
$\sigma_{lnSx}^2 =$			2.204
Mean of $\ln(Sx) = \ln \bar{Sx} - \frac{1}{2} \sigma_{Sx}^2$			3.349
$X_0 = \ln \left(\frac{Fb.Sx}{Q} \right)$			
Mean $\bar{Y} = \ln(X_0) = \ln \bar{Fb} + \ln \bar{Sx} - \ln \bar{Q}$			4.449
SD; $\sigma_Y = \sigma_{lnFb}^2 + \sigma_{lnQ}^2 + \sigma_{lnSx}^2$			19.504
$P_f = P \left(\frac{Mp}{Q} < 1 \right) = P \left[\left(\frac{Fb.Sx}{Q} < 1 \right) \right] = \Phi \left[\frac{\ln(1) - \bar{Y}}{\sqrt{\sigma_Y}} \right]$	$\Phi[-1.007]$		0.1379
Structural reliability index	β	-	1.0770
Probability of failure	P_f	-	0.1379
Probability of Survival	P_s	-	0.8621

5. บทสรุป

จากการทดลองสุ่มเก็บข้อมูลตัวอย่าง ความหนาของปีกเหล็กเสา, ความหนาของเหล็กแผ่นตั้งเหล็กเสา, ความกว้างเสาเหล็ก, ความลึกเสาเหล็ก, ความสูงของเสาเหล็กรับคานหลังคาเหล็กรูปพรรณ, น้ำหนักกระทำกับ กำลังต้านทาน แล้วเพื่อนำไปคำนวณหาโมดูลัสหน้าตัด (Section Modulus) ในสมการฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัด (Limit State Function) เมื่อนำมาคำนวณหาค่า Probability of failure, P_f ของโครงสร้างคานเหล็กรูปพรรณได้เท่ากับ 13.786% ซึ่งมาจากค่า reliability index, β เท่ากับ 1.0770 สามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่างที่สุ่มให้ค่าทางสถิติที่นำไปสู่การวิเคราะห์ด้วยวิธีความน่าเชื่อถือของโครงสร้างเสาเหล็ก ได้ผลลัพธ์ของความน่าจะเป็นของความปลอดภัยเท่ากับ 86.21%

และเมื่อทำการคำนวณวิเคราะห์โครงสร้างเสาเหล็กรูปพรรณรับโครงสร้างหลังคาเหล็ก โดยการพิจารณาถึงความหนาของปีกเหล็กเสา, ความหนาของเหล็กแผ่นตั้งเหล็กเสา, ความกว้างเสาเหล็ก, ความลึกเสา

เหล็ก, ความสูงของเสาเหล็กรับคานหลังคาเหล็กรูปพรรณ, น้ำหนักกระทำกับ กำลังต้านทาน แล้ว จะได้ค่า Probability of failure, P_f ได้เท่ากับ 7.214% ซึ่งมาจาก ค่า reliability index, β เท่ากับ 1.4530 ได้ผลลัพธ์ของความน่าจะเป็นของความปลอดภัยเท่ากับ 92.79% จะเห็นว่าเสารับโครงสร้างหลังคามีค่า reliability index, β ที่สะท้อนถึงค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ซึ่งมีค่าสูงกว่าคานเหล็กรูปพรรณจะสอดคล้องกับการออกแบบให้เสามีความแข็งแรงกว่าคานเพื่อให้คานมีความยืดหยุ่นมากกว่าเสาเพื่อให้สามารถรับแรงทางด้านข้าง(แรงแผ่นดินไหว)ได้

และควรพิจารณาองค์ประกอบของตัวคูณเพิ่มค่าน้ำหนักกระทำกับตัวคูณลดค่ากำลังต้านทานเป็นดัชนีพิจารณาที่บ่งบอกถึงการจัดวางน้ำหนักกระทำที่พิจารณาจากการใช้งานจริงเป็นหลัก

แต่การพิจารณาด้วยค่าทางสถิติเป็นการสุ่มเก็บค่าตัวอย่างที่ใช้ค่าเฉลี่ย, ค่าเบี่ยงเบน, ค่าความแปรปรวน มาพิจารณาซึ่งยังต้องมีการเก็บค่าความหนา, ความกว้าง, ความยาว ของหน้าตัดเสาเหล็กรูปพรรณที่เป็นตัวแปรในสมการออกแบบ (Limit State Function) เพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีความน่าเชื่อถือแต่จำนวนชิ้นส่วนโครงสร้างตัวอย่างที่นำมาพิจารณาใช้คาน 1 คานกับเสา 1 เสาของแต่ละอาคารจำนวน 137 อาคารจากทั้งหมด 763 อาคาร ซึ่งเป็นปัจจัยในการเก็บตัวอย่างข้อมูลที่จำกัดเนื่องจากอาคารมีการเริ่มงานพร้อมกันทั้งนี้ผลการศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งเพื่อพิจารณาประกอบเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.E. Barlow, F. Proschan, *Mathematical theory of reliability* (Wiley, New York, 1965)
- [2] T.J. Aven, U. Jensen, *Stochastic Models in Reliability*. Series in Applications of Mathematics: Stochastic Modeling and Applied Probability, vol. 41 (Springer, New York, 1999)
- [3] H.O. Madsen, S. Krenk, N.C. Lind, *Methods of Structural Safety* (Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1986)
- [4] R.E. Melchers, *Structural Reliability-Analysis and Prediction* (Ellis Horwood, Chichester, 1999)
- [5] E.E. Lewis, *Introduction to Reliability Engineering* (Wiley, New York, 1994)
- [6] A. Haldar, S. Mahadevan, *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design* (Wiley, New York, 2000)
- [7] A.I. Johnson, *Strength, Safety and Economical Dimensions of Structures*, vol. 22 (Statens Kommitte for Byggnadsforskning, Meddelanden, Stockholm, 1953)
- [8] C.A. Cornell, Bounds on the reliability of structural systems. *ASCE-J. Struct. Div.* **93**, 171–200 (1967)
- [9] C.A. Cornell, Probability-based structural code. *J. Am. Concr. Inst. (ACI)* **66**(12), 974–985 (1969)
- [10] J. Ferry-Borges, Implementation of probabilistic safety concepts in international codes, *Proceedings of the*

International Conference on Structural Safety and Reliability Verlag, Dusseldorf, Aug 1977, pp. 121–133

- [11] A. Pugsley, *The Safety of Structures* (Edward Arnold, London, 1966)
- [12] A.M. Hasofer, N.C. Lind, Exact and invariant second moment code format. ASCE J. Eng. Mech. Div. **100**, 111–121 (1974)
- [13] D. Veneziano, Contributions to second moment reliability theory. Research Report R-74-33, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, MA, 1974
- [14] Canadian Standard Association (CSA), Standards for the design of cold-formed steel members in buildings. CSA-S-136, Canada, 1974
- [15] T. Bedford, R. Cooke, *Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods* (Cambridge University Press, Cambridge, 2001)
- [16] A.S. Nowak, K.R. Collins, *Reliability of Structures* (McGraw Hill, Boston, 2000)
- [17] K.C. Kapur, L.R. Lamberson, *Reliability in Engineering Design* (Wiley, New York, 1977)
- [18] M. Finkelstein, *Failure Rate Modeling for Risk and Reliability* (Springer, New York, 2008)
- [19] I.B. Gerstbakh, *Reliability Theory with Applications to Preventive Maintenance* (Springer, New York, 2000)
- [20] D. Kececioglu, F. Sun, *Environmental Stress Screening: Its Quantification, Optimization, and Management* (Prentice Hall, New York, 1995)
- [21] A.H-S. Ang, W.H. Tang, *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering* (Wiley, New York, 2007)
- [22] Madsen, H.O. , Krenk, S. & Lind, N.C., *Methods of Structural Safety*, Prentice Hall, Engle- wood Cliffs, N.J. 1986.