รายการอ้างอิง

[1] Winter G. Lateral bracing of columns and beams. Proc. ASCE 84(ST2) (1958) : 1561-1-1561-22.

[2] Yura J.A. Winter's bracing approach revisited. Engineering Structure 18(10) (1996): 821-825.

[3] พรรณนภา เหราบัตย์ และ ประกิจ เปรมธรรมกร. การทดลองวัดแรงในค้ำยันด้านข้างของคานเหล็กสำเร็จรูป. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่5 (2542) : 63-68.

[4] American Institute of Steel Construction (AISC). Specification for Structural Steel Building. USA, 2005.

[5] Iwicki P. Comparison of classical Winter's bracing requirements of compressed truss chord with stability analysis of 3D truss-model. Proc. Appl. Math. Mech 9(1) (2009) : 247-248.

[6] ยศ มีอนันต์ และคณะ. การวิเคราะห์โครงขอหมุนสามมิติแบบไร้เชิงเส้น. โครงงานระดับปริญญาตรี. ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.

[7] Ahmed B. Arc-Length Technique for Nonlinear Finite Element Analysis. Journal of Zhejiang University SCIENCE 5 (2004) : 618-628.

[8] Ivanco.V. Nonlinear Finite Element Analysis. University of Kosice's, 2006.

[9] Smittakorn W. JSM as a Toolbox for Structural Analysis and Design Application. The 13th National Convention on Civil Engineering (2008).

[10] McGuire W., Gallagher R.H. and Ziemian R.D. Matrix Structural Analysis 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2000.

[11] ปณิธาน ลักคุณประสิทธิ์. การวิเคราะห์โครงสร้าง. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

[12] Connor J. Structural Analysis and Control. Massachusetts Institute of Technology : Free Graduate Level MIT Course on Structural Systems Analysis, 2009.

[13] Levy R. Analysis of Geometrically Nonlinear Structures. Kluwer Academic Publishers, 2003.

[14] Ghali A., Neville A.M. and Brown T.G. Structural Analysis A Unified Classical and Matrix Approach 5^{th}. New York: Spon Press, 2003.

[15] Ghassemieh and Kukreti A.R. An algorithm for the analysis of problem with combined material and geometric nonlinearities. Computers & Structures 35(5) (1990) : 579-591.

[16] Glenn A.H. Geometrically Nonlinear Static Analysis of 3D Trusses Using Arc-Length Method. USA : NASA Langley Research Center, 2000.

[17] Weaver W. and Paul R.J. Finite Elements for Structural Analysis. Prentice-Hall,1983.

[18] Chapra S.C. and Canale R.P. Numerical Method for Enngineer 5^{th} Edition. New York: McGraw Hill, 2006.

[19] Bathe K.J. and Dvorkin E.N. On The Automatic Solution of Nonlinear Finite Element Equations. Computers & Structures 17(5-6) (1983) : 871-879.

[20] Grecoa M., Gesualdoa F.A.R., Venturinib W.S. and Codab H.B. Nonlinear positional formulation for space truss analysis. Finite Elements in Analysis and Design (2006) : 1079–1086.

[21] George E.B. Large Deformation Analysis of Inelastic Space Truss Structures. Journal of Structural Engineering 122(4) (April 1996) : 407-415.

[22] Elishakoff I. Probabilistic Theory of Structures 2^{nd} Edition. Mineola: Dover Publication, 1999.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การหาค่าจีโอเมตริกซ์สติฟเนส

สมการสมดุลที่จุดต่อในการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น $[N]^T\{F\} = \{P\}$ เมื่อน้ำหนักบรรทุกภายนอก มีการเปลี่ยนแปลง จะสามารถหาแรงที่เปลี่ยนแปลงได้จากอนุพันธ์ของสมการโดยใช้กฎลูกโซ่ จะได้ว่า

$$d[N^T]\{F\} + [N^T]d\{F\} = d\{P\} \tag{ก.1}$$

โดยพจน์ $[N^T]d\{F\}$ เป็นเทอมการเปลี่ยนแปลงแรงภายในชิ้นส่วนและ $[N]$ มีค่าคงที่ ดังนั้น

$$[N^T]\, d\,\{F\} = [K_E]\,\{\delta\} \tag{ก.2}$$

พจน์ $d[N^T]\{F\}$ นั้น $\{F\}$ จะมีค่าคงที่ ส่วนเทอมของ $[N]$ มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะแสดงถึงจีโอเมทริกซ์สติฟเนส ดังนั้น

$$d[N^T]\{F\} = [K_G]\,\{\delta\} \tag{ก.3}$$

สมการที่(ก.3) สามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์เกรเดียนได้ คือ

$$\nabla f = \frac{df}{dx}$$

ดังนั้นจะได้ว่า $\quad f = N^T F$

$$\nabla f = (\nabla N^T)F = K_G \tag{ก.4}$$

เนื่องจาก N^T เป็นฟังก์ชันของพิกัด x_A, y_A, z_A และ x_A, y_A, z_A จากกฎของลูกโซ่จะได้ว่า

$$\left(dN^T\right)F = \left[\nabla\left(N^T\right).dx\right]F = \left[\frac{\partial N^T}{\partial x_A}(dx_A) + \frac{\partial N^T}{\partial y_A}(dy_A) + \frac{\partial N^T}{\partial z_A}(dz_A) + \frac{\partial N^T}{\partial x_C}(dx_C) + \frac{\partial N^T}{\partial y_C}(dy_C) + \frac{\partial N^T}{\partial z_C}(dz_C)\right]F$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} dx_A &= \left(\delta_A\right)_x ; dx_C = \left(\delta_C\right)_x \\ dy_A &= \left(\delta_A\right)_y ; dy_C = \left(\delta_C\right)_y \\ dz_A &= \left(\delta_A\right)_z ; dz_C = \left(\delta_C\right)_z \end{aligned} \tag{ก.5}$$

เป็นการเปลี่ยนพิกัดโดยหมายถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดต่อ จะได้ว่า

$$\left(dN^{T}\right)_F = \left[\nabla\left(N^{T}\right).(\delta)\right]_F = \left[\frac{\partial N^{T}}{\partial x_A}(\delta_A)+\frac{\partial N^{T}}{\partial y_A}(\delta_A)+\frac{\partial N^{T}}{\partial z_A}(\delta_A)+\frac{\partial N^{T}}{\partial x_C}(\delta_C)+\frac{\partial N^{T}}{\partial y_C}(\delta_C)+\frac{\partial N^{T}}{\partial z_C}(\delta_C)\right]_F$$

(ก.6)

เพราะฉะนั้นจีโอเมตริกซ์สติฟเนส สามารถเขียนได้ดังนี้

$$(K_G)=\nabla(N^{T}F)=F\begin{array}{cc} \text{colA} & \text{colC} \end{array}$$
$$(K_G)=\nabla(N^{T}F)=F\begin{bmatrix} \nabla(N^{T})^{AA} & -\nabla(N^{T})^{AC} \\ -\nabla(N^{T})^{CA} & \nabla(N^{T})^{CC} \end{bmatrix}\begin{array}{l} \text{rowA} \\ \text{rowC} \end{array} \quad (ก.7)$$

โดยที่เมตริกซ์ย่อยของแต่ละเทอม เป็นการหาค่าแรงภายในของแต่ละจุดต่อ โดยการพิจารณาให้อีกจุดหนึ่งของชิ้นส่วนเดียวกันเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งหนึ่งหน่วย ดังนั้นค่าที่ได้จากเมตริกซ์เกรเดียนท์ของสมการสมดุลของจุดต่อแต่ละจุดของสมการที่(ก.7) แสดงดังต่อไปนี้

$$\nabla(N^{T})^{AA}=\begin{bmatrix} \frac{\partial(n)_x}{\partial x_A} & \frac{\partial(n)_x}{\partial y_A} & \frac{\partial(n)_x}{\partial z_A} \\ \frac{\partial(n)_y}{\partial x_A} & \frac{\partial(n)_y}{\partial y_A} & \frac{\partial(n)_y}{\partial z_A} \\ \frac{\partial(n)_z}{\partial x_A} & \frac{\partial(n)_z}{\partial y_A} & \frac{\partial(n)_z}{\partial z_A} \end{bmatrix}, \quad \nabla(N^{T})^{AC}=\begin{bmatrix} \frac{\partial(n)_x}{\partial x_C} & \frac{\partial(n)_x}{\partial y_C} & \frac{\partial(n)_x}{\partial z_C} \\ \frac{\partial(n)_y}{\partial x_C} & \frac{\partial(n)_y}{\partial y_C} & \frac{\partial(n)_y}{\partial z_C} \\ \frac{\partial(n)_z}{\partial x_C} & \frac{\partial(n)_z}{\partial y_C} & \frac{\partial(n)_z}{\partial z_C} \end{bmatrix}$$

$$\nabla(N^{T})^{CC}=-\begin{bmatrix} \frac{\partial(n)_x}{\partial x_C} & \frac{\partial(n)_x}{\partial y_C} & \frac{\partial(n)_x}{\partial z_C} \\ \frac{\partial(n)_y}{\partial x_C} & \frac{\partial(n)_y}{\partial y_C} & \frac{\partial(n)_y}{\partial z_C} \\ \frac{\partial(n)_z}{\partial x_C} & \frac{\partial(n)_z}{\partial y_C} & \frac{\partial(n)_z}{\partial z_C} \end{bmatrix}, \nabla(N^{T})^{CA}=-\begin{bmatrix} \frac{\partial(n)_x}{\partial x_A} & \frac{\partial(n)_x}{\partial y_A} & \frac{\partial(n)_x}{\partial z_A} \\ \frac{\partial(n)_y}{\partial x_A} & \frac{\partial(n)_y}{\partial y_A} & \frac{\partial(n)_y}{\partial z_A} \\ \frac{\partial(n)_z}{\partial x_A} & \frac{\partial(n)_z}{\partial y_A} & \frac{\partial(n)_z}{\partial z_A} \end{bmatrix} \quad (ก.8)$$

พจน์ต่างๆในสมการที่ (ก.8) สามารถหาได้ดังนี้

พิจารณาพจน์ $(n)_x$

$$(n)_x = (x_A - x_C) / \left[\left(x_A - x_C\right)^2 + \left(y_A - y_C\right)^2 + \left(z_A - z_C\right)^2 \right]^{1/2} \qquad (ก.9)$$

ทำการหาอนุพันธ์ย่อยของสมการที่(ก.9) เทียบกับ $x_{A,} y_A$ และ z_A ได้ดังต่อไปนี้

$$\partial(n)_x / \partial x_A = \frac{1}{L} - \frac{1}{2}\left[\left(x_A - x_C\right) / L^3 \right] 2\left(x_A - x_C\right)$$

$$\partial(n)_x / \partial x_A = \left[1 - (n)_x^2 \right] \frac{1}{L} \qquad (ก.10)$$

$$\partial(n)_x / \partial y_A = \frac{1}{L} - \frac{1}{2}\left[\left(x_A - x_C\right) / L^3 \right] 2\left(y_A - y_C\right)$$

$$\partial(n)_x / \partial y_A = \left[(n)_x (n)_y \right] \frac{1}{L} \qquad (ก.11)$$

$$\partial(n)_x / \partial z_A = \frac{1}{L} - \frac{1}{2}\left[\left(x_A - x_C\right) / L^3 \right] 2\left(z_A - z_C\right)$$

$$\partial(n)_x / \partial z_A = \left[(n)_x (n)_z \right] \frac{1}{L} \qquad (ก.12)$$

พจน์ $(n)_y$ และ $(n)_Z$ ทำเหมือนกับพจน์ $(n)_X$ ดังนั้น นำสมการ (ก.8)-(ก.12) แทนลงสมการ (ก.7) จะสามารถหาค่าจีโอเมทริกซ์สติฟเนสขององค์อาคารในระบบพิกัดหลัก ดังสมการ (ก.13) และ(ก.14)

$$\left[K_G\right] = \begin{bmatrix} \left[K_G\right]^{AA} & -\left[K_G\right]^{AA} \\ -\left[K_G\right]^{AA} & \left[K_G\right]^{AA} \end{bmatrix} \qquad (ก.13)$$

$$\left[K_G\right]^{AA} = \frac{F}{L} \begin{bmatrix} 1-(n)_x^2 & -(n)_x (n)_y & -(n)_x (n)_z \\ -(n)_y (n)_x & 1-(n)_y^2 & -(n)_y (n)_z \\ -(n)_z (n)_x & -(n)_z (n_i)_y & 1-(n)_z^2 \end{bmatrix} \qquad (ก.14)$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ศศิธร บรรจงกุลลิขิต เกิดวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนรุจิเสรีวิทยา จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนสามเสนวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา พ.ศ.2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2550