

รายการอ้างอิง

ภาษาอังกฤษ

- Andrew Pytel and Ferdinand L. Singer. Strength of Materials. Fourth Edition. Singapore: Harper Collins Publishers, 1987.
- Banerjee, P.K. and Davies, T. G. The Behaviour of Axially and Laterally Loaded Single Piles Embedded in Non-homogeneous Soils. Geotechnique Vol. 28, No.3 (n.d.): 309-326.
- Broms, B. The lateral resistance of piles in cohesive soils, Journal of the Soil Mechanics Division, ASCE. Vol. 90, No. SM2 (March 1964): 27-63.
- Broms, B. The lateral resistance of piles in cohesionless soils, Journal of the Soil Mechanics Division, ASCE. Vol. 90, No. SM3 (May 1964): 123-156.
- Brown, D.A., Morrison Clark, Reese L.C. Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 114, No. 11 (n.d.): 1261-1276.
- Chari T. R. and Abdel-Salam M. N. Laterally loaded offshore piles: comparison of finite difference and finite element analyses. First indian conference on ocean engineering. Maras: I.I.T. , Feb 18-20, 1981.
- Dordi M. C. Horizontally loaded piles in layered soils. The effect of horizontal loads on piles, due to surcharge or seismic effect. Ninth international conference on soil mechanics and foundation engineering. (n.p.): Proceeding of the specialty session 10 July 14, 1977.
- Duncan J. M., Evans L. T. Jr. and O'Neil P. S. K. Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 120, No. 6 (1989): 1018-1050.
- Davies, T.G. Design equations for laterally loaded piles embedded in sand. Proceeding of the international conference on deep foundation Vol. 2, pp. 2.61-2.64. (n.d.)
- Davison, M.T. and Gill, H. L. Laterally-loaded piles in a layered soil system, Journal of the Soil Mechanics Division, ASCE. Vol. 89, No. SM3 (May 1963): 93-94.

- Desai, C.S. Analysis of Laterally Loaded Structures. Finite element in nonlinear mechanics. Vol. 2 (n.p.): 585-618.
- Dewaine Bogard and Hudson Matlock. Procedures for Analysis of Laterally Loaded Pile Groups in Soft Clay. In Stephen Wright (ed.), Geotechnical Practice in Offshore Engineering, pp. 499-535. New York: ASCE. 1983.
- Fenelli, G.B. Soil Modulus for Laterally Loaded Bored Piles in Pozzolana. Proceeding of the tenth International Conference on Soil mechanics and foundation, pp. 703-708. Stockholm 15-19 June 1981.
- Fleming, W.G.K., Weltman A.J., Randolph M.F., Elson W.K. Piling Engineering. 2nd Edition. (n.p.): John Wiley & Sons, 1992.
- Gill, H.L. Soil-pile interaction under lateral loading. pp.221-227. In situ investigation in soils and rocks. (n.d.)
- Jack M. Murchison and Michael W. O'Neill, Evaluation of P-Y Relationships in Cohesionless Soils. In Joseph Ray Meyer (ed.), Analysis and Design of Pile Foundations (Conference Proceeding), , pp. 174-191. (n.p.): 1984.
- James G. MacGregor. Reinforced Concrete Mechanics and Design. Third Edition. New York: Prentice Hall International Inc, 1997.
- Jamiolkowski, M. Soil Modulus for Laterally Loaded Piles. The effect of horizontal loads on piles, due to surcharge or seismic effect., Ninth international conference on soil mechanics and foundation engineering, pp. 43-58. Proceeding of the specialty session 10 July 14, 1977.
- Khadiikar, B.S. Analysis of laterally loaded piles in two-layered soils. International conference on soil mechanics and foundation engineering. Proc.2.1(1973)
- Khadiikar, B.S. and Dordi C. M. Effect if tip fixity on the laterally loaded piles. Proceeding of the IGS speciality session held during the fifth asian regional conference on SM&FE Vol 2, pp. 33-34. Moscow 1975.
- Kimura, M. Analysis of laterally loaded single pile. Proceeding Conference on deep foundation practice, pp. 111-118. (n.d.)

- Kyle M. Rollins, Kris T. Peterson and Thomas J. Weaver, Lateral Load Behavior of Full-Scale Pile Group in Clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 6 (June 1998): 468-478.
- Limin Zhang, Michael C. McVay and Peter Lai. Numerical Analysis of Laterally Loaded 3×3 to 7×3 Pile Groups in Sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 11 (November 1999): 936-946.
- M. Ashour, G. Norris and P. Pilling, Lateral Loading of a Pile in Layered Soil Using the Strain Wedge Model. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 4 (April 1998): 303-315.
- Matlock H. and Bryant L. M. Three Dimensional Analysis of Framed Structures with Nonlinear Pile Foundation. Proceeding 9th annual offshore technology conference. pp. 599-607. Houston, Texas, USA, 1977 Vol. 3, Paper no.OTC 2955.
- Matlock H. and Kelley A. E. Field Tests of the Lateral Load Behavior of Pile Groups in Soft Clay. Proceeding 12th annual offshore technology conference. pp. 163-174. Houston, Texas, USA, 1980 Vol. 4, Paper no.OTC 3871.
- Matlock, H. and Reese, L. C. Foundation analysis of offshore pile-supported structures. Proceedings of the 5th International Conference, pp. 91-97. ISSMFE, Paris, Vol. 2, 1961.
- Matlock, H. and Reese, L. C. Generalize solution for lateral load pile, Journal of the Soil Mechanics Division, ASCE, Vol. 86, No. SM5 (May 1960): 63-91.
- Mcvay, M. C., Casper, R., and Shang, T. Lateral Respond of three-row groups in loose to dense sand at 3D and 5D piles spacing. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 121, No. 5 (May 1995): 436-441.
- Michael Georgiadis. Development of P-Y Curves for Layered Soils. In Stephen Wright (ed.), Geotechnical Practice in Offshore Engineering, pp. 536-545. New York: ASCE, 1983.
- Mohamed Ashour and G. Norris. Modeling Lateral Soil Pile Response Based on Soil, Pile Interaction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, No. 5 (May 2000): 420-428.

- Muniram Budhu, and Trevor G. Davies. Analysis of Laterally Loaded Piles in Soft Clays. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 1 (January 1988): 21-39.
- Norris G. Theoretically Based BEF Laterally Loaded Pile Analysis. Numerical Method in Offshore Piling. pp. 361-386. Institution of Civil Engineers, London, U.K., 1979.
- O'Neill M. W. and Dunnavant T. W. Evaluation of Design Oriented Methods for Analysis of Vertical Pile Groups Subjected to Lateral Load. Numerical Method in Offshore Piling. pp. 303-316. Institution of Civil Engineers, London, U.K., 1979.
- Parker, Frazier, Jr. and Reese L. C. Experimental and analytical studies of behavior of single piles in sand under lateral and axial loading. Research report ; no. 117-2. Texas University. Center for Highway Research. Research report ; no. 117-2. pp.133-198.
- Randolph, M.F. The Response of Flexible Piles to Lateral Loading. Geotechnique, Vol. 31, No. 2 (June 1981): 247-259.
- Randolph, M.F. and Worth C. Peter. Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 104, No. 12 (December 1978): 1465-1488
- Reese, L.C. Laterally Loaded Piles in Layered Soils. Proceeding of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 2, pp. 819-822. (n.d.)
- Reese, L.C. Laterally loaded piles: program documentation. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 103, No. 4 (April 1977): 287-305.
- Reese, L.C. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay. 7th annual offshore technology conference. pp. 671-690. Houston, Texas, USA, Vol. 2, Paper no.OTC 2312, May 1975.
- Reese, L.C. and Van Impe W.F. Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading. Rotterdam: AA.Balkema, 2001.
- Reese, L.C. The interaction of structure and foundation. Proceeding of the Symposium held at the University of Birmingham 12-14th july, 1971

- Reese, L.C. The analysis of piles under lateral loading. The interaction of structure and foundation, Proceeding of the Symposium held at the University of Bermingham 12 – 14th July, 1971
- Robert L. Sogge. Laterally Loaded Pile Design. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 107, No. 9 (September 1981): 1179-1199.
- Sal M. Gaziglu and Michael W. O'Neill. Evaluation of P-Y Relationships in Cohesive Soils. In Joseph Ray Meyer (ed.), Analysis and Design of Pile Foundations, pp. 192-213, 1984.
- Shamsher Prakash and Hari D. Sharma. Pile foundations in engineering practice. New York: John Wiley and Sons 1990.
- Steven C. Chapra and Raynond P. Canale. Numerical Methods for Engineers. 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill 1990.
- Todd W. Dunnavant and Michael W. O'Neill. Experimental p-y Model for Submerged Stiff Clay. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 1 (January 1989): 95-114.
- Tomlinson M.J. Pile Design and Construction Practice. Fourth Edition. E&FN Spon. Chapman & Hall. 1995.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้กลับของผู้วิจัย

สำหรับในภาคผนวก ก. นี้ผู้วิจัยได้แสดงรายละเอียดของโปรแกรมของผู้วิจัย ซึ่งได้แบ่งหัวข้อดังนี้

ก.1. พิสูจน์สูตรสำหรับเสาเข็มรับแรงด้านข้างโดยใช้ทฤษฎีคานบนฐานรากยึดหยุ่น ซึ่งได้ทำการพิสูจน์ตามวิธีของ Reese and Matlock (1956)

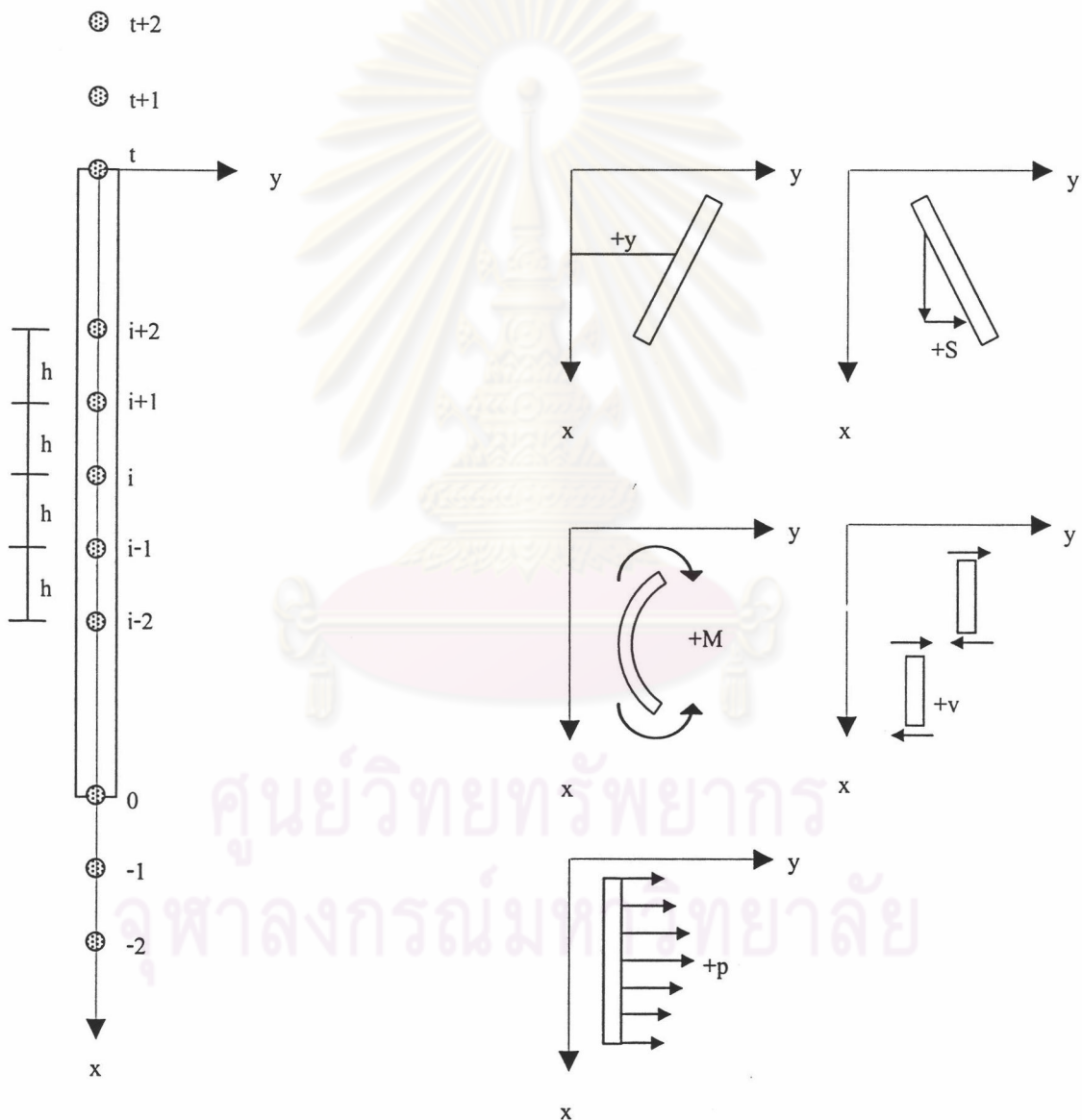
ก.2 พิจารณาผลของ $E_p I_p$ ที่ลดลงสำหรับเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสูตรที่ใช้และวิธีการคำนวณได้ใช้ตามสูตรของ Reese and Van Impe (2001) และ ACI Code

ก.3 นำสูตรที่ได้จากในข้อ 1 และ 2 มาประยุกต์เพื่อการวิเคราะห์ห้กลับโดยการคำนวณจะใช้โปรแกรมภาษา Visual Basic ใน Excel ซึ่งจะอธิบายการทำงานหลักๆของโปรแกรมด้วย Flow Chart และตามด้วย source code, excel user interface ทั้งหมดของโปรแกรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1 การพิสูจน์สมการคานบนฐานรากยึดหยุ่นโดยใช้ finite difference

จากสมการคานบนฐานรากยึดหยุ่นที่แสดงดังสมการที่ ก.1 (หรือสมการที่ 2.2 ในบททฤษฎีแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง) สามารถใช้วิธี finite difference แก้ได้โดยกำหนด node ที่มีระยะห่างเท่ากับ h ตลอดช่วงความยาวเสาเข็มดังรูปที่ ก.1 ทั้งนี้ได้เพิ่ม imaginary node ขึ้นอีก 4 จุดเพื่อที่จะสามารถกำหนด Boundary Condition ที่ปลายเสาเข็มและหัวเสาเข็มได้ ส่วน sign convention ก็ได้แสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.1 finite difference notation

รูปที่ ก.2 Sign Convention

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} + E_s y = 0 \quad \dots (ก.1)$$

โดยที่	p	=	soil pressure (= $-E_s / y$)	[F/L]
	y	=	ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม	[L]
	x	=	ความลึกจากผิวดิน	[L]
	P_x	=	Axial load	[F]
	$E_p I_p$	=	Pile Stiffness	[F*m ²]
	E_s	=	Soil Modulus	[F/L ²]
กำหนดให้	R	=	$E_p I_p$	

พยายามจัดรูปสมการที่ ก.1 ให้อยู่ในรูปของ Finite difference โดยอาศัยสมการของคาน (beam formula) คือ

$$S_i = \left(\frac{dy}{dx} \right)_i = \frac{1}{h} (y_{i-0.5} - y_{i+0.5}) \quad \dots(\text{ก.2})$$

$$\begin{aligned} M_i &= R_i \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_i = \frac{R_i}{h} \left(\frac{dy}{dx}_{i-0.5} - \frac{dy}{dx}_{i+0.5} \right) = R_i \frac{1}{h^2} [(y_{i-1} - y_i) - (y_i - y_{i+1})] \\ &= R_i \frac{1}{h^2} (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) \quad \dots(\text{ก.3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_i &= R_i \left(\frac{d^3 y}{dx^3} \right)_i = k_i \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_i = R_i \frac{1}{2h} \left[\left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{i-1} - \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{i+1} \right] \\ &= R_i \frac{1}{2h} \left[\left(\frac{y_{i-2} - 2y_{i-1} + y_i}{h^2} \right) - \left(\frac{y_i - 2y_{i+1} + y_{i+2}}{h^2} \right) \right] \\ &= R_i \frac{1}{2h^3} (y_{i-2} - 2y_{i-1} + 2y_{i+1} - y_{i+2}) \quad \dots(\text{ก.4}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(R \frac{d^4 y}{dx^4} \right)_i &= \frac{d^2 M_i}{dx^2} = \frac{\left(\frac{dM}{dx} \right)_{i-0.5} - \left(\frac{dM}{dx} \right)_{i+0.5}}{h} \\ &= \frac{1}{h} \left(\frac{M_{i-1} - M_i}{h} - \frac{M_i - M_{i+1}}{h} \right) = \frac{1}{h^2} (M_{i-1} - 2M_i + M_{i+1}) \\ &= \frac{1}{h^2} \left[\frac{R_{i-1}}{h^2} (y_{i-2} - 2y_{i-1} + y_i) - 2 \frac{R_i}{h^2} (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) + \frac{R_{i+1}}{h^2} (y_i - 2y_{i+1} + y_{i+2}) \right] \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{h^4} \left[R_{i-1}y_{i-2} + (-2R_{i-1} - 2R_i)y_{i-1} + (R_{i-1} + 4R_i + R_{i+1})y_i + (-2R_i - 2R_{i+1})y_{i+1} + R_{i+1}y_{i+2} \right] \quad \dots(\text{ก.5})$$

$$P_x \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P_x}{h^2} (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) \quad \dots(\text{ก.6})$$

แทนสมการที่ ก.2, ก.3, ก.4, ก.5 และ ก.6 ลงในสมการที่ ก.1

$$\frac{1}{h^4} \left[R_{i-1}y_{i-2} + (-2R_{i-1} - 2R_i)y_{i-1} + (R_{i-1} + 4R_i + R_{i+1})y_i + (-2R_i - 2R_{i+1})y_{i+1} + R_{i+1}y_{i+2} \right] + \frac{P_x}{h^2} (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) + E_{si}y_i = 0$$

$$R_{i-1}y_{i-2} + (-2R_{i-1} - 2R_i + P_x h^2)y_{i-1} + (R_{i-1} + 4R_i + R_{i+1} - 2P_x h^2 + E_{si}h^4)y_i + (-2R_i - 2R_{i+1} + P_x h^2)y_{i+1} + R_{i+1}y_{i+2} = 0 \quad \dots(\text{ก.7})$$

พิจารณาเงื่อนไขที่ขอบเขต (Boundary Condition) ที่ปลายเสาเข็มสำหรับกรณี Free Tip ได้ $M_0=0$, $V_0=0$

$$M_0 = 0 = y_{-1} - 2y_0 + y_1$$

$$y_{-1} = 2y_0 - y_1 \quad \dots(\text{ก.8})$$

$$V_0 = 0 = R_0 \left(\frac{d^3y}{dx^3} \right)_0 + P_x \left(\frac{dy}{dx} \right)_0$$

$$= \frac{R_0}{2h^3} (y_{-2} - 2y_{-1} + 2y_1 - y_2) + \frac{P_x}{2h} (y_{-1} - y_1)$$

$$y_{-2} = y_{-1} \left(2 - \frac{P_x h^2}{R_0} \right) - y_1 \left(2 - \frac{P_x h^2}{R_0} \right) + y_2 \quad \dots(\text{ก.9})$$

อันที่จริงแล้วสามารถนำสมการที่ ก.7 พร้อมทั้งทราบเงื่อนไขที่ขอบเขตมาแก้ปัญหาของสมการคานบนฐานรากยึดหยุ่นด้วยวิธี Gauss Elimination ได้ ทว่าคำตอบที่ได้ค่อนข้างมี Numerical Error พอสมควร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจัดพจน์ต่างๆ เพื่อลดขั้นตอนในวิธี Gauss Elimination ซึ่งส่งผลให้คำตอบที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น

จากสมการที่ ก.7 ที่ node $i=0$ (pile tip), โดยสมมติให้ $R_0=R_1=R_2$ ได้

$$R_0 y_{-2} + (-4R_0 + P_x h^2) y_{-1} + (5R_0 + R_1 - 2P_x h^2 + E_{s0} h^4) y_0 + (-2R_0 - 2R_1 + P_x h^2) y_1 + R_1 y_2 = 0$$

แทนค่า Boundary condition (สมการที่ ก.8 และสมการที่ ก.9), และพยายามจัดพจน์ให้อยู่ในรูปของ $y_0 = a_0 y_1 - b_0 y_2$

$$R_0 \left[y_{-1} \left(2 - \frac{P_x h^2}{R_0} \right) - y_1 \left(2 - \frac{P_x h^2}{R_0} \right) + y_2 \right] + (-4R_0 + P_x h^2) y_{-1} + (5R_0 + R_1 - 2P_x h^2 + E_{s0} h^4) y_0 + (-2R_0 - 2R_1 + P_x h^2) y_1 + R_1 y_2 = 0$$

$$R_0 y_{-1} \left(2 - \frac{P_x h^2}{R_0} - 4 + \frac{P_x h^2}{R_0} \right) + (5R_0 + R_1 - 2P_x h^2 + E_{s0} h^4) y_0 + (-2R_0 - 2R_1 + P_x h^2 - 2R_0 + P_x h^2) y_1 + (R_0 + R_1) y_2 = 0$$

$$R_0 (2y_0 - y_1) (-2) + (5R_0 + R_1 - 2P_x h^2 + E_{s0} h^4) y_0 + (-4R_0 - 2R_1 + 2P_x h^2) y_1 + (R_1 + R_1) y_2 = 0$$

$$(R_0 + R_1 - 2P_x h^2 + E_{s0} h^4) y_0 + (-2R_0 - 2R_1 + 2P_x h^2) y_1 + (R_0 + R_1) y_2 = 0$$

ได้
$$y_0 = \frac{(2R_0 + 2R_1 - 2P_x h^2) y_1 - (R_0 + R_1) y_2}{(R_0 + R_1 - 2P_x h^2 + E_{s0} h^4)}$$

$$= a_0 y_1 - b_0 y_2$$

โดย
$$a_0 = \frac{(2R_0 + 2R_1 - 2P_x h^2) y_1}{(R_0 + R_1 - 2P_x h^2 + E_{s0} h^4)} \quad \dots (ก.10)$$

$$b_0 = \frac{(R_0 + R_1) y_2}{(R_0 + R_1 - 2P_x h^2 + E_{s0} h^4)} \quad \dots (ก.11)$$

พยายามจัดสมการที่ ก.7 ให้อยู่ในรูป

$$y_i = a_i y_{i+1} - b_i y_{i+2} \quad \dots(\text{ก.12})$$

ได้โดยเริ่มจากรูปแบบข้างต้นได้

$$y_{i-1} = a_{i-1} y_i - b_{i-1} y_{i+1}$$

$$y_{i-2} = a_{i-2} y_{i-1} - b_{i-2} y_i$$

นำสมการทั้งสองแทนลงสมการที่ ก.7 แล้วจัดเทอม

$$R_{i-1}(a_{i-2}y_{i-1} - b_{i-2}y_i) + (-2R_{i-1} - 2R_i + P_x h^2)y_{i-1} + (R_{i-1} + 4R_i + R_{i+1} - 2P_x h^2 + E_{si} h^4)y_i + (-2R_i - 2R_{i+1} + P_x h^2)y_{i+1} + R_{i+1}y_{i+2} = 0$$

$$(R_{i-1}a_{i-2} - 2R_{i-1} - 2R_i + P_x h^2)y_{i-1} + (R_{i-1} + 4R_i + R_{i+1} - R_{i-1}b_{i-2} - 2P_x h^2 + E_{si} h^4)y_i + (-2R_i - 2R_{i+1} + P_x h^2)y_{i+1} + R_{i+1}y_{i+2} = 0$$

$$(R_{i-1}a_{i-2} - 2R_{i-1} - 2R_i + P_x h^2)(a_{i-1}y_i - b_{i-1}y_{i+1}) + (R_{i-1} + 4R_i + R_{i+1} - R_{i-1}b_{i-2} - 2P_x h^2 + E_{si} h^4)y_i + (-2R_i - 2R_{i+1} + P_x h^2)y_{i+1} + R_{i+1}y_{i+2} = 0$$

$$(R_{i-1}a_{i-2}a_{i-1} - 2R_{i-1}a_{i-1} - 2R_i a_{i-1} + P_x h^2 a_{i-1} + R_{i-1} + 4R_i + R_{i+1} - R_{i-1}b_{i-2} - 2P_x h^2 + E_{si} h^4)y_i + (-R_{i-1}a_{i-2}b_{i-1} + 2R_{i-1}b_{i-1} + 2R_i b_{i-1} - P_x h^2 b_{i-1} - 2R_i - 2R_{i+1} + P_x h^2)y_{i+1} + R_{i+1}y_{i+2} = 0$$

$$(R_{i-1} - 2a_{i-1}R_{i-1} - b_{i-2}R_{i-1} + a_{i-2}a_{i-1}R_{i-1} + 4R_i - 2a_{i-1}R_i + R_{i+1} + E_{si} h^4 - P_x h^2(2 - a_{i-1}))y_i + (2b_{i-1}R_{i-1} - a_{i-2}b_{i-1}R_{i-1} + 2b_{i-1}R_i - 2R_i - 2R_{i+1} + P_x h^2(1 - b_{i-1}))y_{i+1} + R_{i+1}y_{i+2} = 0$$

ได้สมการอยู่ในรูป $y_i = a_i y_{i+1} - b_i y_{i+2}$ แล้วโดย

$$a_i = \frac{-(2b_{i-1}R_{i-1} - a_{i-2}b_{i-1}R_{i-1} + 2b_{i-1}R_i - 2R_i - 2R_{i+1} + P_x h^2(1 - b_{i-1}))}{c_i} \quad \dots(\text{ก.13})$$

$$b_i = \frac{R_{i+1}}{c_i} \quad \dots(\text{ก.14})$$

$$c_i = (R_{i-1} - 2a_{i-1}R_{i-1} - b_{i-2}R_{i-1} + a_{i-2}a_{i-1}R_{i-1} + 4R_i - 2a_{i-1}R_i + R_{i+1} + E_{si}h^4 - P_x h^2(2 - a_{i-1})) \quad \dots(\text{ก.15})$$

ต่อมาพิจารณา Boundary condition at pile head โดยพยายามจัดเทอมดังกล่าวให้อยู่ในรูปของ a_i, b_i, c_i ซึ่งเป็นค่าที่สามารถหาค่าได้จากสมการที่ ก.13 - ก.15

1) ทราบค่าแรงกระทำทางด้านข้าง (P_t) และ โมเมนต์ที่กระทำ (M_t) ที่หัวเสาเข็ม

$$R_t \frac{1}{2h^3} (y_{t-2} - 2y_{t-1} + 2y_{t+1} - y_{t+2}) + \frac{P_x}{2h} (y_{t-1} - y_{t+1}) = P_t \quad \dots(\text{ก.16})$$

$$\frac{R_t}{h^2} (y_{t-1} - 2y_t + y_{t+1}) = M_t \quad \dots(\text{ก.17})$$

กำหนดให้

$$J_2 = \frac{M_t h^2}{R_t} \quad \dots(\text{ก.18})$$

$$J_3 = \frac{2P_t h^3}{R_t} \quad \dots(\text{ก.19})$$

$$E = \frac{P_x h^2}{R_t} \quad \dots(\text{ก.20})$$

จาก $y_t = a_t y_{t+1} - b_t y_{t+2}$ หรือ $y_{t+2} = \frac{a_t y_{t+1} - y_t}{b_t}$ (ก.21)

จากสมการที่ ก.17 ได้ $y_{t-1} - 2y_t + y_{t+1} = J_2$

$$(a_{t-1}y_t - b_{t-1}y_{t+1}) - 2y_t + y_{t+1} = J_2$$

$$y_{t+1} = \frac{J_2 + (2 - a_{t-1})y_t}{1 - b_{t-1}} = \frac{J_2 + G_1 y_t}{G_2} \quad \dots(\text{ก.22})$$

กำหนดให้

$$G_1 = 2 - a_{t-1} \quad \dots(\text{ก.23})$$

$$G_2 = 1 - b_{t-1} \quad \dots(\text{ก.24})$$

จากสมการที่ ก.16 ได้ $y_{t-2} - 2y_{t-1} + 2y_{t+1} - y_{t+2} + E(y_{t-1} - y_{t+1}) = J_3$

$$(a_{t-2}y_{t-1} - b_{t-2}y_t) - 2y_{t-1} + 2y_{t+1} - y_{t+2} + E(y_{t-1} - y_{t+1}) = J_3$$

$$(E + a_{t-2} - 2)(a_{t-1}y_t - b_{t-1}y_{t+1}) - b_{t-2}y_t + 2y_{t+1} - y_{t+2} + Ey_{t+1} = J_3$$

$$(a_{t-2}a_{t-1} - b_{t-2} + Ea_{t-1} - 2a_{t-1})y_t + (-a_{t-2}b_{t-1} - Eb_{t-1} + 2b_{t-1} + 2 - E)y_{t+1} - y_{t+2} = J_3$$

กำหนดให้ $H_1 = -2a_{t-1} + Ea_{t-1} - b_{t-2} + a_{t-2}a_{t-1} \quad \dots(\text{ก.25})$

$$H_2 = -a_{t-2}b_{t-1} + 2b_{t-1} + 2 - E(1 + b_{t-1}) \quad \dots(\text{ก.26})$$

แทนค่า

$$H_1y_t + H_2y_{t+1} - \frac{(a_t y_{t+1} - y_t)}{b_t} = J_3$$

$$\left(H_1 + \frac{1}{b_t}\right)y_t + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t}\right)y_{t+1} = J_3 \quad \dots(\text{ก.27})$$

นำสมการที่ ก.22 มาแทนค่าได้

$$\left(H_1 + \frac{1}{b_t}\right)y_t + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t}\right)\left(\frac{J_2 + G_1y_t}{G_2}\right) = J_3$$

$$\left(H_1 + \frac{1}{b_t}\right)y_t + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t}\right)\frac{J_2}{G_2} + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t}\right)\frac{G_1y_t}{G_2} = J_3$$

$$\left(H_1 + \frac{1}{b_t} + H_2\frac{G_1}{G_2} - \frac{a_t}{b_t}\frac{G_1}{G_2}\right)y_t + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t}\right)\frac{J_2}{G_2} = J_3$$

$$\left(H_1 + H_2\frac{G_1}{G_2} + \frac{1}{b_t}\left(1 - \frac{a_t G_1}{G_2}\right)\right)y_t = J_3 + \frac{a_t}{b_t}\frac{J_2}{G_2} - \frac{J_2 H_2}{G_2}$$

$$y_t = \frac{J_3 + \frac{a_t J_2}{b_t G_2} - \frac{J_2 H_2}{G_2}}{H_1 + H_2 \frac{G_1}{G_2} + \frac{1}{b_t} \left(1 - \frac{a_t G_1}{G_2}\right)} \quad \dots(\text{ก.28})$$

2) ทราบค่าแรงกระทำทางด้านข้าง (P_t) และความชัน (S_t) ที่หัวเสาเข็ม

จาก
$$S_t = \frac{1}{2h}(y_{t-1} - y_{t+1})$$

$$y_{t+1} = y_{t-1} - 2hS_t = y_{t-1} - J_1 \quad \dots(\text{ก.29})$$

โดย
$$J_1 = 2hS_t \quad \dots(\text{ก.30})$$

จากสมการที่ ก.12 สามารถเขียนใหม่ได้

$$y_{t-1} = a_{t-1}y_t - b_{t-1}y_{t+1}$$

แทนค่าลงสมการที่ ก.29 ได้

$$y_{t+1} = a_{t-1}y_t - b_{t-1}y_{t+1} - J_1$$

$$y_{t+1} = \frac{(a_{t-1}y_t - J_1)}{1 + b_{t-1}} = \frac{(a_{t-1}y_t - J_1)}{G_4} \quad \dots(\text{ก.31})$$

โดย
$$G_4 = 1 + b_{t-1} \quad \dots(\text{ก.32})$$

จากเราทราบค่า P_t ดังสมการที่ ก.16 ขั้นตอนการจัดเทอมจะเหมือนในส่วนที่แล้วจนถึงสมการที่ ก.27 ให้แทนสมการที่ ก.31 ลงไปได้

$$\left(H_1 + \frac{1}{b_t}\right)y_t + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t}\right)\left(\frac{a_{t-1}y_t - J_1}{G_4}\right) = J_3$$

$$\left(H_1 + \frac{1}{b_t}\right)y_t + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t}\right)\left(\frac{a_{t-1}y_t}{G_4}\right) + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t}\right)\left(\frac{-J_1}{G_4}\right) = J_3$$

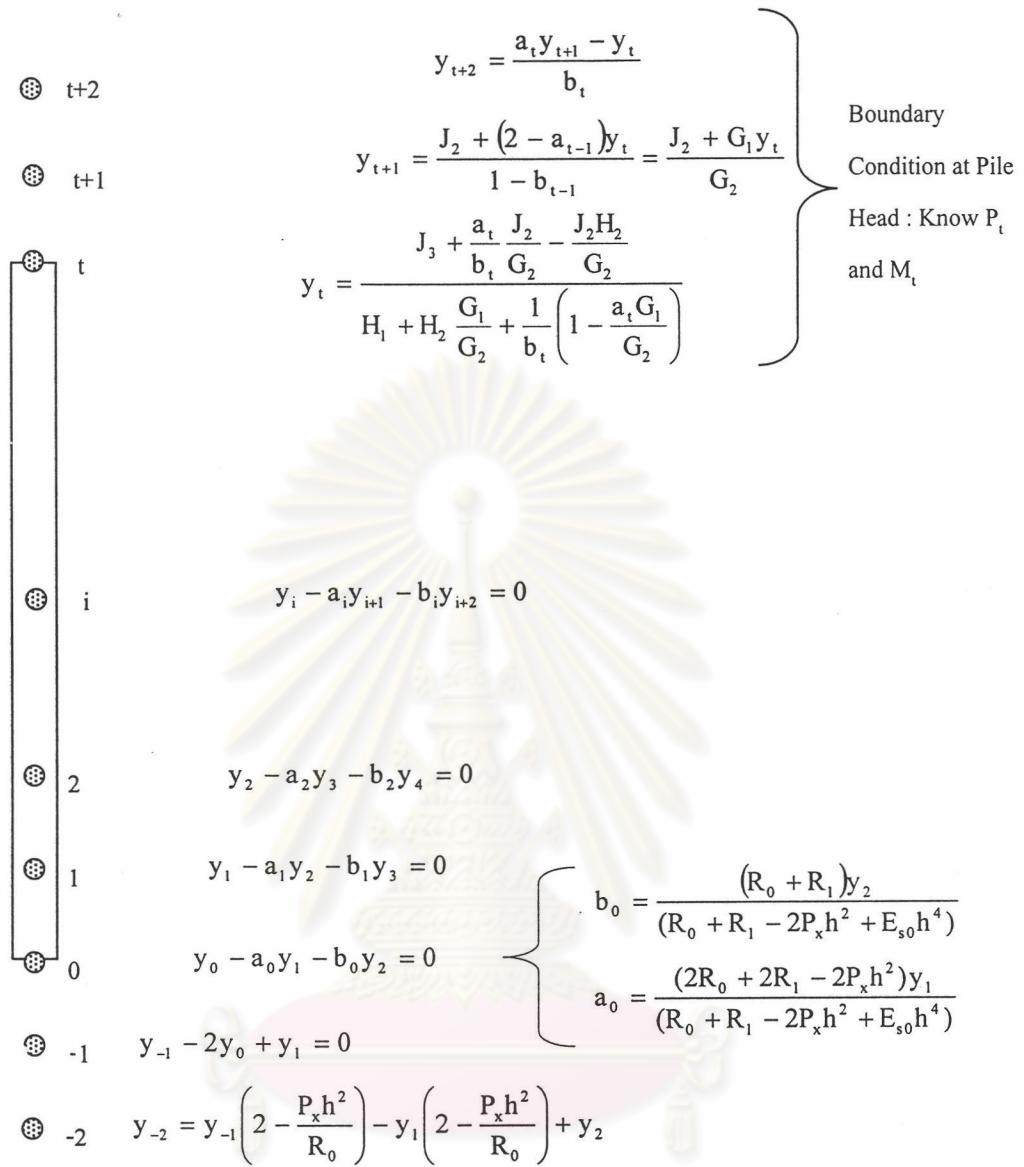
$$\left(H_1 + \frac{1}{b_t} + H_2 \frac{a_{t-1}}{G_4} - \frac{a_t}{b_t} \frac{a_{t-1}}{G_4} \right) y_t + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t} \right) \left(\frac{-J_1}{G_4} \right) = J_3$$

$$y_t = \frac{J_3 + \left(H_2 - \frac{a_t}{b_t} \right) \left(\frac{J_1}{G_4} \right)}{H_1 + \frac{1}{b_t} + H_2 \frac{a_{t-1}}{G_4} - \frac{a_t}{b_t} \frac{a_{t-1}}{G_4}} \quad \dots(\text{ก.33})$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เพื่ออำนวยความสะดวกเข้าใจจึงได้ทำการเขียนสูตรที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ ก.3



โดย

$$a_i = \frac{-(2b_{i-1}R_{i-1} - a_{i-2}b_{i-1}R_{i-1} + 2b_{i-1}R_i - 2R_i - 2R_{i+1} + P_x h^2(1 - b_{i-1}))}{c_i}$$

$$b_i = \frac{R_{i+1}}{c_i}$$

$$c_i = (R_{i-1} - 2a_{i-1}R_{i-1} - b_{i-2}R_{i-1} + a_{i-2}a_{i-1}R_{i-1} + 4R_i - 2a_{i-1}R_i + R_{i+1} + E_{si}h^4 - P_x h^2(2 - a_{i-1}))$$

รูปที่ ก.3 สูตรสูตรที่ใช้ในการคำนวณ

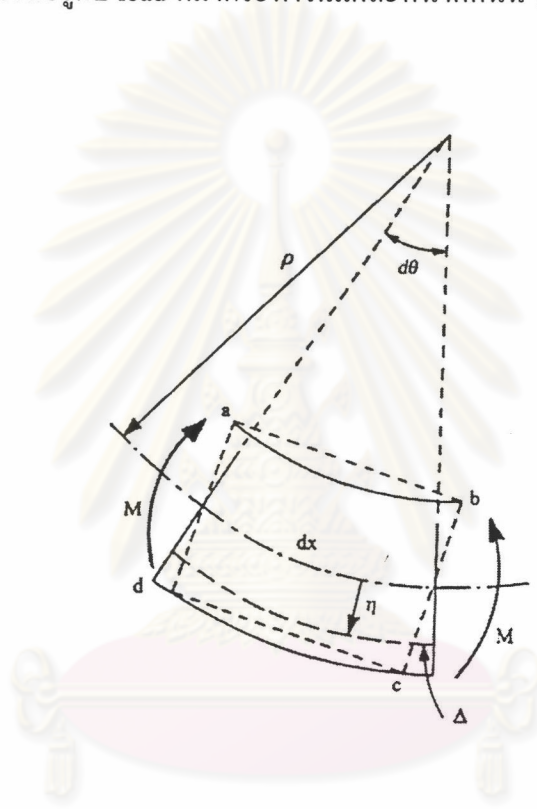
สำหรับขั้นตอนในการแก้ปัญหาเสาเข็มรับแรงกระทำทางด้านข้างด้วยสมการ finite difference ที่พิสูจน์มาแล้วข้างต้น มีขั้นตอนดังนี้ (ยกตัวอย่างกรณี Boundary Condition at pile head ทราบ P_t & M_t)

1. เริ่มแรกคำนวณ a_0, b_0 จากสมการที่ ก.10 และ ก.11 แล้วหาค่า a_1 ถึง a_t, b_1 ถึง b_t, c_1 ถึง c_t จากสมการที่ ก.13, ก.14 และ ก.15 (a_1, b_1 มีค่าเท่ากับ 2 และ 1 ตามลำดับ)
2. นำค่าสัมประสิทธิ์ a_i และ b_i ที่ได้หาค่า y_i ในสมการที่ ก.28, แล้วนำค่า y_i ที่ได้แทนค่าลงในสมการที่ ก.21 และ ก.22 ก็จะทราบค่าของ y_{t+2}, y_{t+1}
3. นำค่า y_i ที่ได้แทนกลับตั้งแต่ node $i = t - 1$ ถึง $i = -2$ ก็จะได้อาคตอบของทุก y_i
4. หากต้องการทราบค่า Slope , Moment , Shear , Soil Reaction ก็สามารถหาได้จากการแทนค่า y_i ลงในสมการที่ ก.2 ถึงสมการที่ ก.5

ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องของคำตอบในการแก้ระบบสมการ ควรกำหนดจำนวน node ไม่เกิน 200 และควรตรวจสอบความถูกต้องของระบบสมการด้วยการแทนค่าคำตอบที่ได้กลับลงในสมการเพื่อความมั่นใจในคำตอบที่ได้

ก.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง $E_p I_p$, Bending Moment และ Axial Load

ในการคำนวณหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจำเป็นต้องทราบค่า Bending Stiffness ($E_p I_p$) ของเสาเข็ม สำหรับที่แรงกระทำน้อยๆหรือมีค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างไม่มาก, ค่า $E_p I_p$ สามารถใช้เป็นค่าคงที่ตลอดความยาวเสาเข็มได้ อย่างไรก็ตามหากต้องการทราบ load ที่ทำให้เกิดการวิบัติ โดยจุดวิบัติอาจกำหนดด้วยค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างมากที่สุดหรือ plastic hinge (สำหรับกรณีกำหนดจุดวิบัติที่ plastic hinge ต้องหาค่า M_{ult} ด้วย) ค่า $E_p I_p$ ที่ใช้จะมีค่าไม่คงที่ตลอดความยาวเสาเข็มและมีค่าขึ้นอยู่กับ load ที่มากระทำในแต่ละหน้าตัดนั้นๆ



รูปที่ ก.4 แสดงชิ้นส่วนของคานที่ได้รับโมเมนต์

จากรูปที่ ก.4 แสดงชิ้นส่วนของคาน (beam element) โดยรูปร่างก่อนรับโมเมนต์เป็นเส้นประ abcd หลังจากชิ้นส่วนของคานได้รับโมเมนต์, รูปร่างก็จะเปลี่ยนไปซึ่งแสดงด้วยเส้นทึบ ในการพิสูจน์สูตรมีสมมุติฐานว่า 1) ระนาบของหน้าตัดคานยังคงเป็นระนาบหลังจากได้รับโมเมนต์ load 2) หน้าตัดมีความสมมาตร

$$\epsilon_x = \frac{\Delta}{dx} \quad \dots (ก.34)$$

โดย Δ = ค่าการยุบตัว (deformation)

dx = ความยาวของชิ้นส่วน
จากสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{\rho}{dx} = \frac{\eta}{\Delta} \quad \dots(\text{ก.35})$$

โดย η = ระยะทางจากแกนสะเทิน
 ρ = รัศมีความโค้งของแกนสะเทิน
จากสมการที่ ก.34 และสมการที่ ก.35 ได้

$$\epsilon_x = \frac{\eta}{\rho} \quad \dots(\text{ก.36})$$

จาก Hooke 's law

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad \dots(\text{ก.37})$$

โดย σ_x = แรงเค้น (stress)
 E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
จากสมการที่ ก.36 และสมการที่ ก.37 ได้

$$\epsilon_x = \frac{E\eta}{\rho} \quad \dots(\text{ก.38})$$

จาก Flexure Formula

$$\sigma_x = \frac{M\eta}{I} \quad \dots(\text{ก.39})$$

โดยที่ M คือค่าโมเมนต์ที่มากระทำ, I คือค่า Moment of Inertia ของหน้าตัด
จากสมการที่ ก.38 และสมการที่ ก.39

$$\frac{M}{EI} = \frac{1}{\rho} \quad \dots(\text{ก.40})$$

จากรูปที่ ก.4 ได้

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} = \phi_\theta \quad \dots(\text{ก.41})$$

โดย ϕ_θ = angle of rotation

จากสมการที่ ก.40 และสมการที่ ก.41 โดยสำหรับเสาเข็มได้ (ใส่ subscript ลงไปที่ EI)

$$E_p I_p = \frac{M}{\phi_\theta} \quad \dots(\text{ก.42})$$

และจาก $\Delta = \eta d\theta$, $\epsilon_x = \Delta / dx$ แทนลงในสมการที่ ก.42 ได้

$$\epsilon_x = \phi_\theta \eta \quad \dots(\text{ก.43})$$

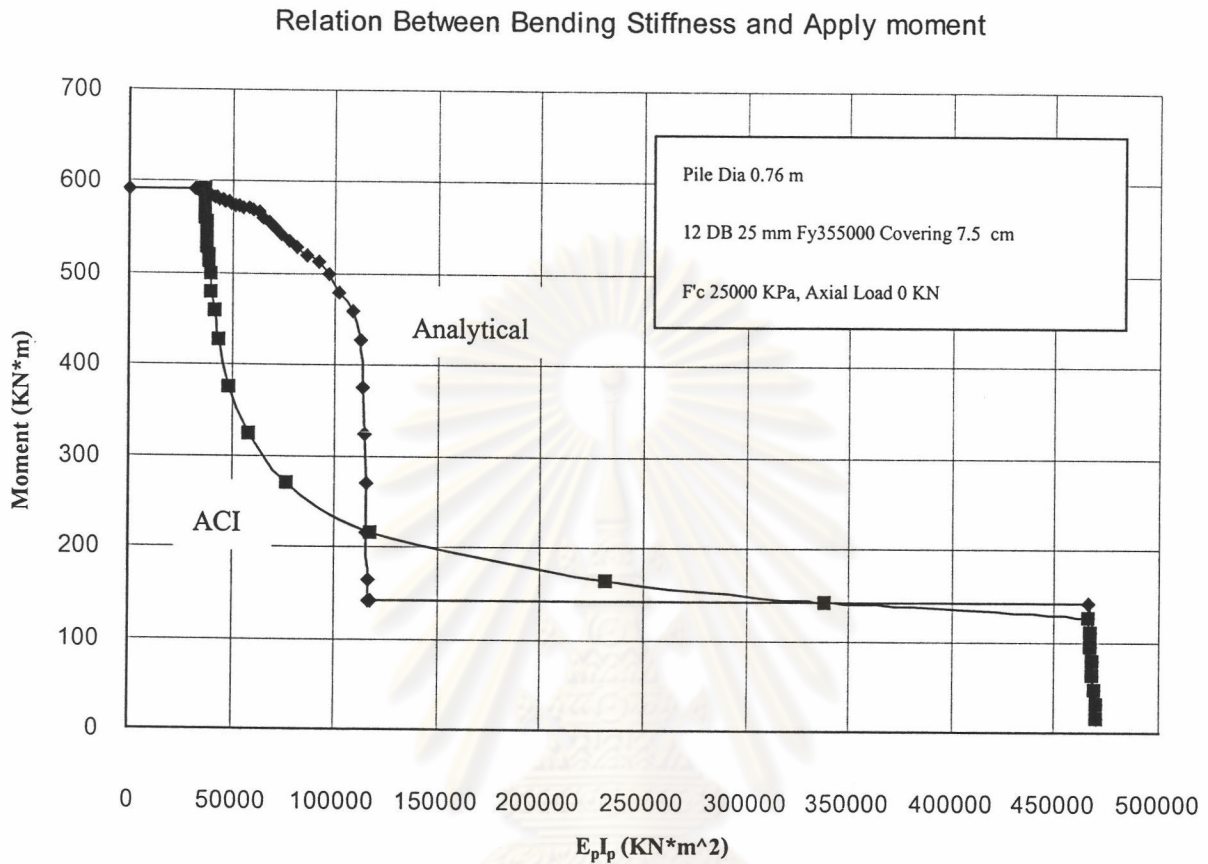
การคำนวณสำหรับหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก เริ่มจากการสมมุติค่า ϕ_θ และทำการสุ่มตำแหน่งของแกนสะเทิน แล้วใช้สมการที่ ก.43 หาค่า strain ตลอดหน้าตัดของคาน เมื่อทราบค่า strain ก็สามารถหาค่า stress หรือ force ในคอนกรีตหรือเหล็กเสริมได้ (ซึ่ง stress-strain curve สำหรับคอนกรีตและเหล็กแสดงในหัวข้อถัดไป) จากนั้นเช็คสมดุลของหน้าตัดโดย $\Sigma F=0$ ซึ่งหากมีแรงภายนอกตามแนวแกน (external axial load) ก็ให้พิจารณาด้วย ถ้าหน้าตัดยังไม่สมดุลก็ให้สุ่มตำแหน่งของแกนสะเทินใหม่จนกระทั่งได้สมดุลของหน้าตัด

ส่วนค่าโมเมนต์คดได้จากการนำแรงในคอนกรีต, แรงภายนอกและเหล็กเสริมมา take moment รอบจุด C.G. แล้วได้ค่า $E_p I_p$ จากการนำค่าโมเมนต์คดที่ได้แทนลงในสมการที่ ก.42

ทำการเพิ่มค่า ϕ_θ เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง M , $E_p I_p$, ϕ_θ ให้ทำการเพิ่มค่า ϕ_θ จนกระทั่งถึงค่า strain มากสุดที่กำหนดให้จุดวิบัติซึ่ง ณ จุดดังกล่าวจะได้ค่า M_{ult} (Ultimate bending moment) ด้วย

นอกจากนั้นในระหว่างขั้นตอนการคำนวณ หากค่า tensile stress บนหน้าตัดของคอนกรีตมีค่ามากกว่า f_t (modulus of rupture) ก็สมมุติให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีต (ในส่วนของรับแรงดึง) จนถึงตำแหน่งแกนสะเทิน นั่นคือคอนกรีตในส่วนที่แตกร้าวจะรับ stress ไม่ได้ (กำหนดให้ stress=0 ในส่วนของรับแรงดึงเมื่อพบว่าการแตกร้าวเกิดขึ้นแล้ว) จากผลการสมมุติดังกล่าวทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $E_p I_p$ กับ โมเมนต์คดมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันที่จุดที่คอนกรีตในส่วนรับแรงดึงเริ่มแตกร้าวดังแสดงในรูปที่ ก.5 ซึ่งส่งผลทำให้การวิเคราะห์กลับได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้สูตรของ ACI ซึ่งเป็นวิธี empirical ที่ให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $E_p I_p$ กับ โมเมนต์คดต่อเนื่องและราบเรียบกว่า อย่างไรก็ตามการคำนวณโดยใช้สูตรของ ACI จำเป็นต้อง

ทราบค่า M_{ult} และ I_{cr} (moment inertia of section of crack section) ซึ่งจำเป็นต้องใช้วิธี Analytical ดังวิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ ก.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $E_p I_p$ กับโมเมนต์ดัดที่คำนวณด้วยวิธี Analytical และวิธีของ ACI

ก.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress - strain สำหรับคอนกรีตธรรมดา (normal weight concrete) และเหล็กเสริม

stress - strain สำหรับคอนกรีตธรรมดามีอยู่หลายโมเดล ทว่าในที่นี้เลือกใช้โมเดลของ Hognestand, 1951 ดังรูปที่ ก.6 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_c'' = 0.85f_c' \quad [\text{kPa}] \quad \dots(\text{ก.44})$$

$$f_c = f_c'' [2 * \epsilon / \epsilon_0 - (\epsilon / \epsilon_0)^2] \quad [\text{kPa}] \quad \dots(\text{ก.45})$$

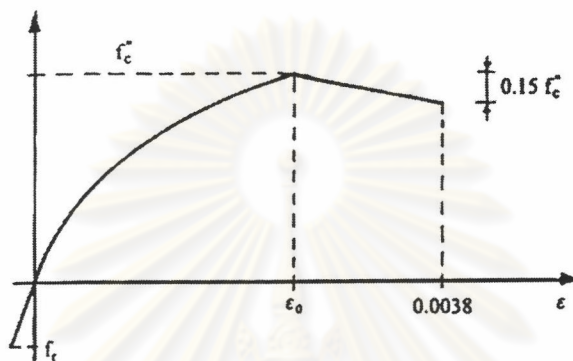
$$f_r = 19.7(f_c')^{0.5} \quad [\text{kPa}] \quad \dots(\text{ก.46})$$

$$E_c = 151000(f_c')^{0.5} \quad [\text{kPa}] \quad \dots(\text{ก.47})$$

$$\epsilon_0 = 1.8 f_c'' / E_c \quad \dots(\text{ก.48})$$

- โดย f'_c = กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ที่อายุ 28 วัน
- E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
- f_r = ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต (Modulus of Rupture)

สำหรับ stress-strain curve ในส่วนที่รับแรงดึงของคอนกรีต ประมาณได้ด้วยเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ E_c และมี maximum stress เท่ากับ f_r

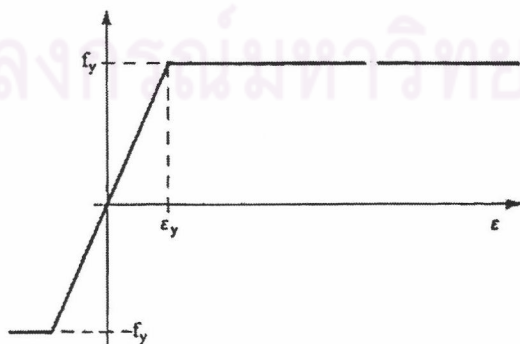


รูปที่ ก.6 Stress-Strain curve สำหรับคอนกรีตธรรมดา

สำหรับเหล็กเสริมมี stress-strain curve ที่เป็น idealized elastic-plastic ดังรูปที่ ก.7 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\epsilon_y = f_y/E \quad \dots (ก.49)$$

$$E = 200000 \quad [\text{MPa}]$$



รูปที่ ก.7 Stress-Strain curve สำหรับเหล็กเสริม

ก.2.2 โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล (Effective moment of inertia ACICode, 1989)

จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวนมากทำให้ได้ empirical equation ดังสมการที่ ก.36 ซึ่งให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่มากกระทำกับ $E_p I_p$ ที่ต่อเนื่องและราบเรียบกว่าวิธี Analytical ในหัวข้อก่อนหน้านี้

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad \dots (ก.50)$$

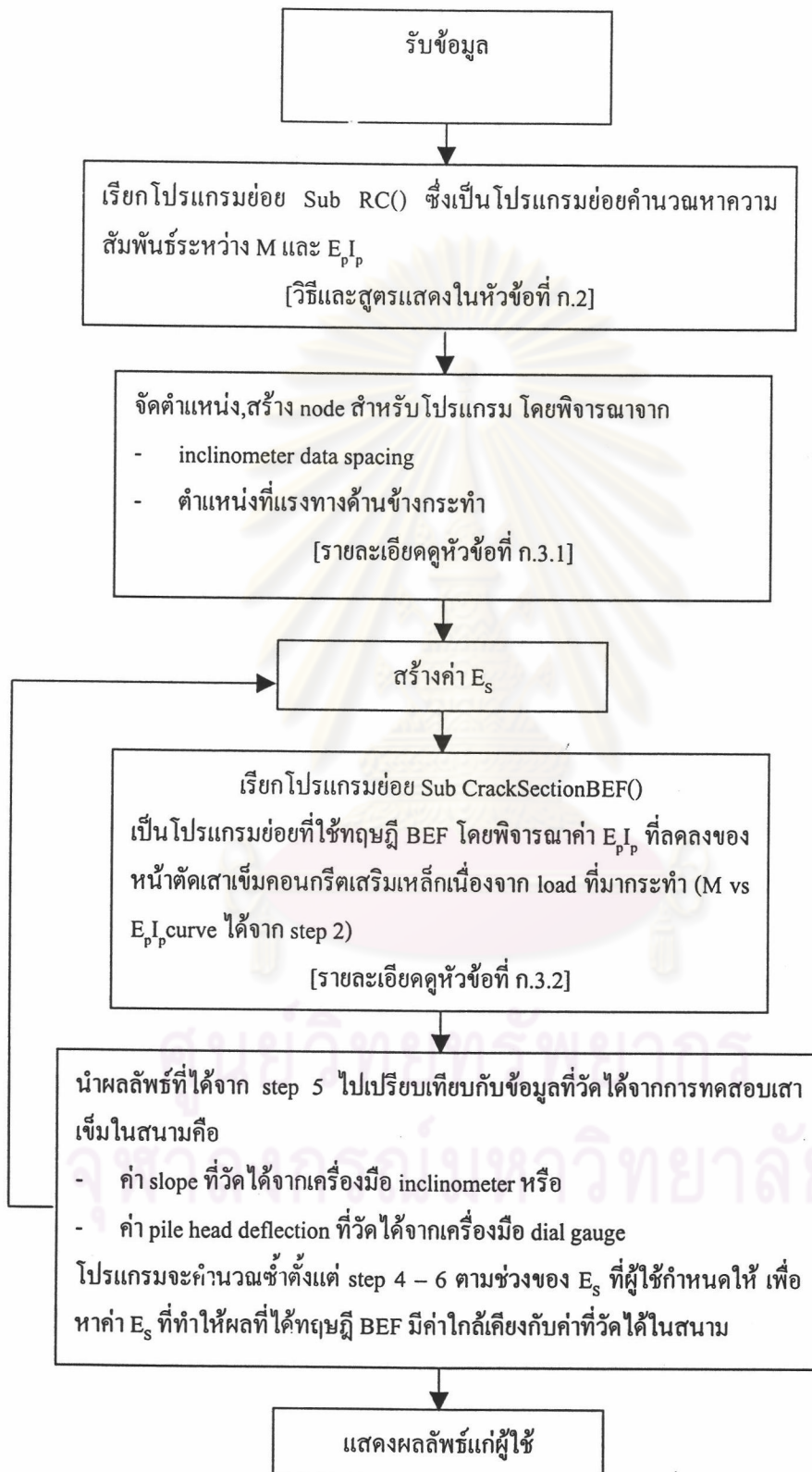
โดย	M_{cr}	=	$f_t I_g / y_c$	[KN*m]
	I_e	=	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลสำหรับคำนวณค่าการโก่งตัว	[m ⁴]
	I_g	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด, ไม่พิจารณาเหล็กเสริม	[m ⁴]
	y_c	=	ระยะทางจาก C.G. ของหน้าตัดถึงผิวขอบที่รับแรงดึง	[m]
	I_{cr}	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดที่แตกร้าว	[m ⁴]
	M_a	=	โมเมนต์ที่มากกระทำ	[KN*m]

ทั้งนี้สมการที่ ก.50 ใช้ได้ก็ต่อเมื่อไม่มีแรงตามแนวแกน (axial force) มากกระทำ ดังนั้นหากเสาเข็มที่รับทั้งแรงกระทำทางด้านข้างและแรงตามแนวแกนเสาเข็มสมการที่ ก.50 จะใช้ไม่ได้ ต้องใช้วิธี Analytical แทน

และโปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนขึ้นสำหรับส่วนนี้มีข้อจำกัดคือใช้ได้เฉพาะกรณีที่ $P_x = 0$ เท่านั้น (จริงๆแล้วได้เขียนโปรแกรมในส่วนนี้เป็นกรณีที่แรงแกนเสาเข็มมีค่าน้อยกล่าวคืออยู่ในช่วงที่การกระจายของหน่วยแรงบนหน้าตัดเสาเข็มยังเป็นรูปสามเหลี่ยมอยู่ ซึ่งหากค่าแรงตามแนวแกนมีค่ามากพอจนทำให้การกระจายหน่วยแรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โปรแกรมในส่วนนี้จะไม่สามารถคำนวณได้) เนื่องจากผลการทดสอบเสาเข็มทั้งหมดในงานวิจัยนี้ไม่มีแรงกระทำตามแนวแกนเสาเข็ม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.3 รายละเอียดการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ ก.8 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมโดยรวม

ก.3.1 การสร้าง node ของโปรแกรม

เนื่องจากข้อมูลที่วัดในสนามอาจมีระยะห่างระหว่างข้อมูลไม่เท่ากันหรือตำแหน่ง node ในโปรแกรมกับตำแหน่งของข้อมูลที่วัดในสนามไม่ตรงกันดังรูปที่ ก.9 ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ Finite Difference ที่ต้องกำหนดให้ node spacing มีค่าเท่ากันตลอด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการ Linear Interpolate ผลที่ได้จากโปรแกรมเพื่อที่สามารถเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ในสนาม ทั้งนี้ควรกำหนดใช้ node spacing สำหรับโปรแกรมให้มีค่าน้อยกว่า spacing ที่วัดในสนาม (สำหรับงานวิจัยนี้ ปกติแล้ว inclinometer data spacing = 0.5 m ,และผู้วิจัยกำหนดใช้ node spacing = 0.25 m)

สำหรับการกำหนดตำแหน่ง node ในโปรแกรม ต้องมีการกำหนด node ที่ผิวดินด้วยเพื่อที่จะสามารถกำหนดค่า E_s เหนือผิวดินมีค่าเป็นศูนย์ได้ นอกจากนี้ในกรณีที่แรงกระทำทางด้านข้างกระทำเหนือผิวดินโปรแกรมซึ่งปกติแล้วผู้ใช้งานไม่สามารถกำหนด node ให้ตรงกับตำแหน่งที่แรงกระทำทางด้านข้างกระทำจริงๆต่อเสาเข็มได้ง่ายเหมือนดังรูปที่ ก.9(c) ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนด node เพิ่มและทำการย้ายแรงไปยัง node นั้นดังรูปที่ ก.9(b) ทั้งนี้หากทำการย้ายแรงลงไปที่ผิวดินจะทำให้ไม่สามารถหาค่า slope , deflection ณ. ตำแหน่งที่แรงกระทำได้ ส่วนการย้ายแรงขึ้นไปในทิศทาง $-x$ จะให้ผลลัพธ์ที่ต้องตั้งแต่ปลายเสาเข็มจนถึงตำแหน่งที่แรงกระทำก่อนการย้ายแรง

จากรูปที่ ก.9 ตัวแปรต่างๆที่อยู่ในรูปมีคำอธิบายดังนี้

x_{ci} = ค่าความลึกโดยวัดจากผิวดิน

x_{cp} = ค่าความลึกของโปรแกรมโดยวัดจาก node t

CoordinateConvert คือระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นของแกน x_{ci} กับ x_{cp} เป็นค่าที่มีไว้เพื่อแปลงค่าความลึกระหว่างแกนทั้งสอง โดยมีค่าเท่ากับ $AddpointP \times h$

h = Program node spacing

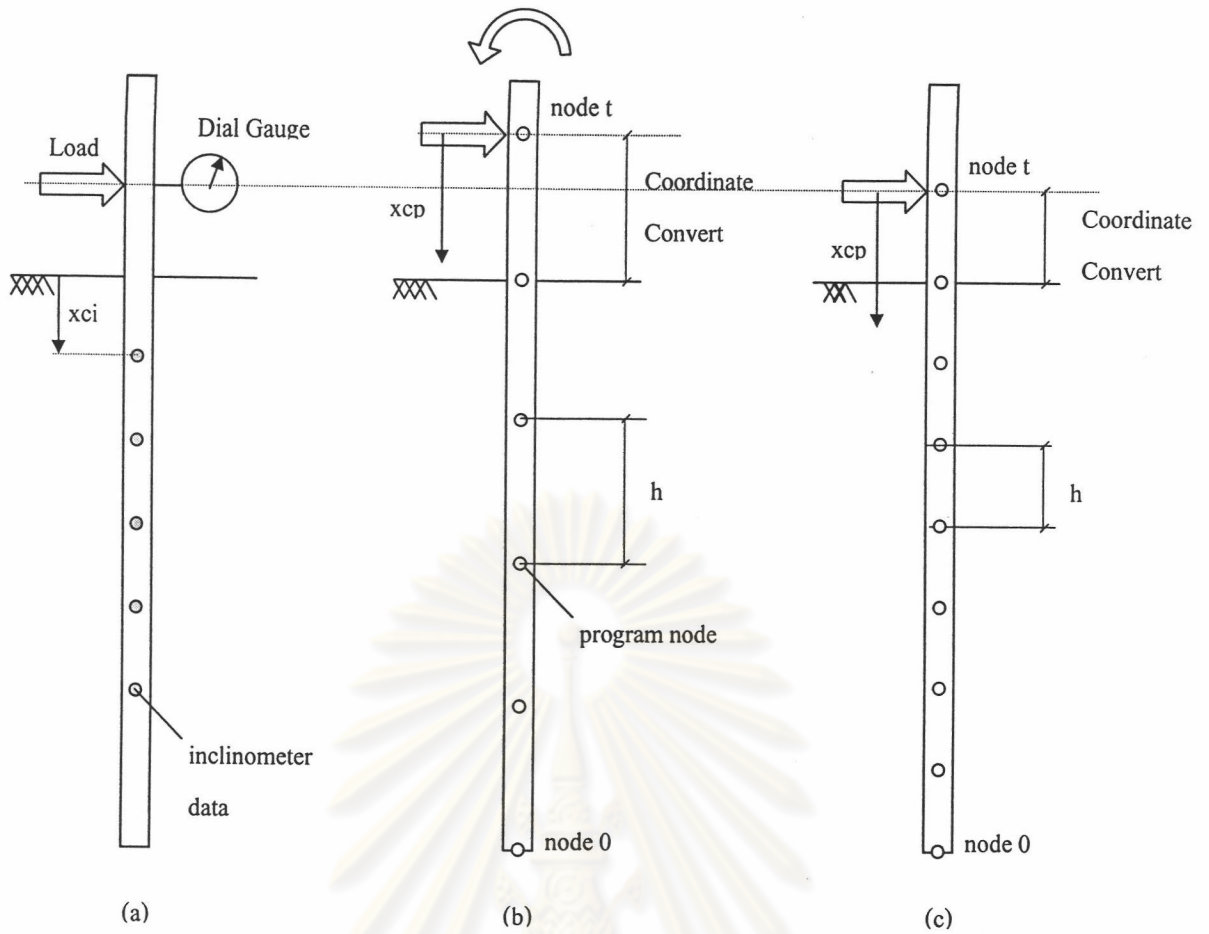
$AddpointP$ = จำนวน node ของโปรแกรมที่กำหนดเพิ่มขึ้นจากผิวดินสำหรับการย้ายแรง (ย้ายในทิศทาง $-x$)

= บัดค่าลง(ตำแหน่งที่แรงกระทำเหนือผิวดิน / h)+1 ในกรณีที่ตำแหน่งของแรงกระทำไม่ตรงกับ node ของโปรแกรม

= บัดค่าลง(ตำแหน่งที่แรงกระทำเหนือผิวดิน / h)+0 ในกรณีที่ตำแหน่งของแรงกระทำที่ node ของโปรแกรมพอดี

t = top node ของโปรแกรม

= บัดค่าลง(ความยาวของเสาเข็ม / h)+ $Addpoint$



รูปที่ ก.9 แสดงการสร้าง node ของโปรแกรม a) แสดงข้อมูลที่วัดได้ในสนาม b) แสดงการสร้าง node ของโปรแกรมโดยทำการย้ายแรงในทิศทาง $-x$ c) แสดงการสร้าง node ของโปรแกรมโดยกำหนดให้ node แรกตรงกับตำแหน่งที่แรงกระทำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.3.2 การทำงานของโปรแกรมย่อย Sub CrackSectionBEF()

โปรแกรมย่อย Sub CrackSectionBEF() เป็นส่วนที่ใช้ทฤษฎี BEF และพิจารณาการลดลงของค่า $E_p I_p$ ของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี iterative โดยเริ่มแรกสมมุติใช้ค่า $E_p I_p$ ของหน้าตัดที่ยังไม่ได้รับแรงหรือยังไม่มี การแตกร้าวตลอดช่วงความยาวของเสาเข็ม และกำหนดให้ใช้แรงที่ 20 % ของขนาดแรงที่กระทำจริงๆ แล้วใช้ทฤษฎี BEF หาคำตอบซึ่งได้ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเสาเข็มไปปรับค่า $E_p I_p$ แล้วทำการคำนวณซ้ำจนค่า $E_p I_p$ Converse จากนั้นไปคำนวณที่ขนาดแรงต่อไปที่ 40 % โดยใช้ค่า $E_p I_p$ ต่อจากขั้นที่แล้ว ให้คำนวณแบบเดิมจนถึงขนาดแรง 100 %

สำหรับขั้นตอนปรับค่า $E_p I_p$ ต้องมีการ interpolate ค่าจากกราฟ M กับ $E_p I_p$ โดยกำหนดให้ค่า $E_p I_p$ ที่ interpolate ได้ต้องมีค่าลดลงหรือมีค่าเท่าเท่าเดิม และสำหรับเงื่อนไขสำหรับการ Converse ของค่า $E_p I_p$ คือ

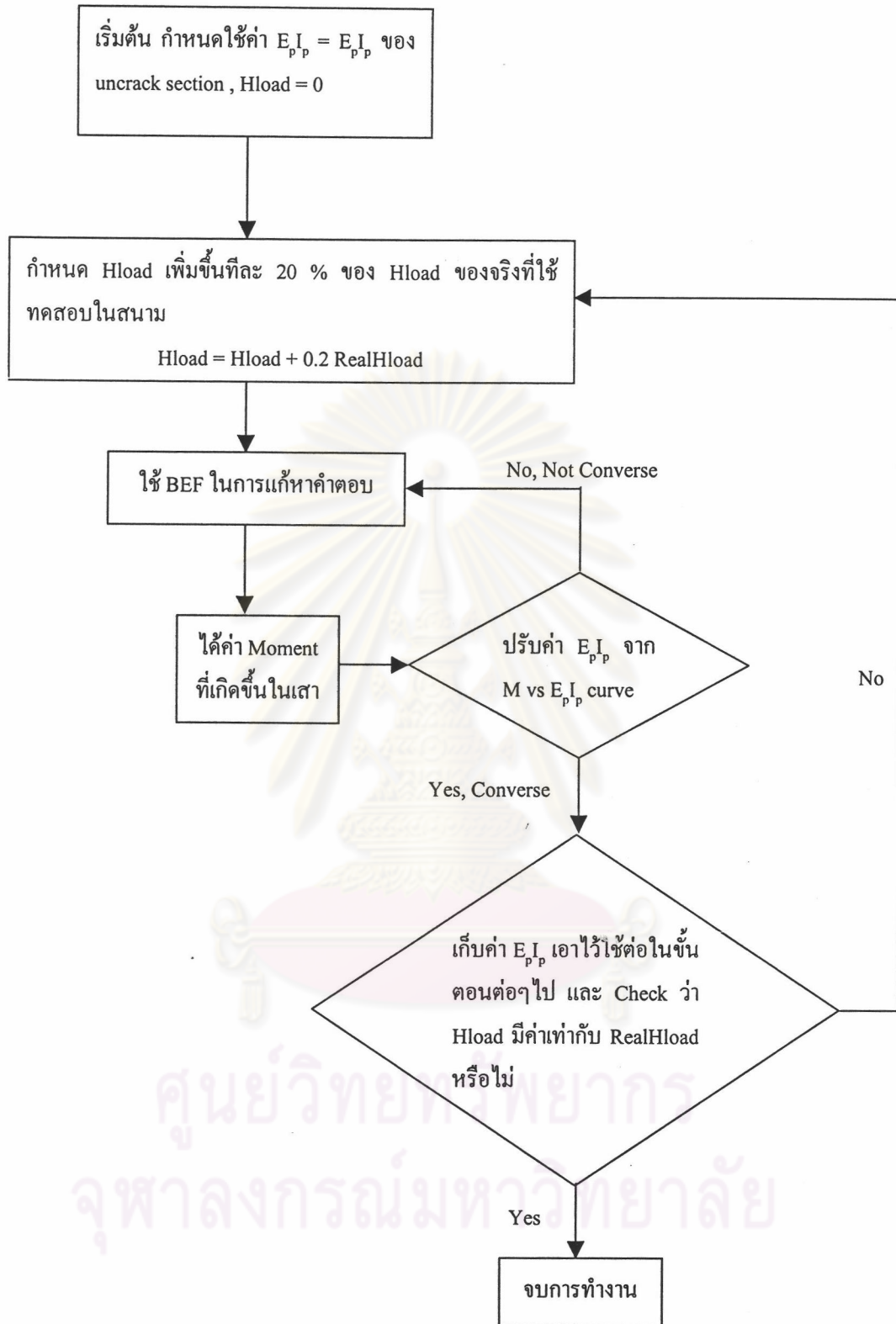
$$\left| \frac{(E_p I_p)_{AvNew} - (E_p I_p)_{AvOld}}{(E_p I_p)_{AvOld}} \right| \leq 0.01$$

โดย $(E_p I_p)_{AvOld}$ = ค่าเฉลี่ยของค่า $E_p I_p$ ตลอดความยาวของเสาเข็มก่อนการปรับค่าด้วยกราฟ M กับ $E_p I_p$

$(E_p I_p)_{AvNew}$ = ค่าเฉลี่ยของค่า $E_p I_p$ ตลอดความยาวของเสาเข็มหลังปรับค่าด้วยกราฟ M กับ $E_p I_p$

นอกจากนั้นยังกำหนดจำนวนครั้งที่ iterative น้อยสุดด้วย (ผู้วิจัยกำหนดค่าเท่ากับ 4) ซึ่งขั้นตอนการทำงานของส่วนนี้แสดงอยู่ในรูปที่ ก.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.10 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมย่อย Sub CrackSectionBEF0

ก.3.3 แสดง Source Code ของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา Visual Basic ใน Excel (version office97)

โปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนขึ้นจะไม่มี Input Interface อย่างสมบูรณ์สำหรับผู้ใช้งาน การใช้งานจะต้องไปใส่ค่า Input ใน Work Sheet ของ Excel (เช่น Inclinator Data, Dial Gauge Data, Load, Apply Load Location เป็นต้น) และต้องกำหนดช่วงของค่า E_s , ค่าติดตั้งต่างๆของโปรแกรม, รวมทั้ง Pile Properties (เช่น ชนิดและจำนวนของเหล็กเสริมที่ใช้, กำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอก, ความยาวของเสาเข็ม เป็นต้น) ใน Visual Basic Code (in Excel) ซึ่งสามารถเข้าไปแก้ไขค่าต่างๆได้โดยง่าย

สำหรับ Source Code มีดังนี้

Option Explicit

' Variable for Sub DimensionAdvEsSeeker()

Private EI(-2 To 202) As Double ' Pile Stiffness

Private GEI As Double ' Gross Pile Stiffness (Prismatic)

Private xci(-2 To 202) As Double ' Depth of inclinometer that measured

Private xcp(-2 To 202) As Double ' Depth of Program created for calculating (Equal Step)

Private locatey As String ' Cell Range in excel

Private locatey2 As String ' Cell Range in excel

Private RealHload As Double ' Horizontal load apply at Pile Head

Private Hload As Double ' Horizontal load apply at Pile Head

Private Px As Double ' Pile Axial Load

Private MomentLoad As Double ' Moment load apply at Pile Head

Private AslopeInclino(-2 To 202) As Double ' Slope get from inclinometer

Private t As Integer ' Pile top node number (pile tip number start at 0)

Private ti As Integer ' inclinometer top node number

Private tPlot As Integer ' Among of Plot point that user want, that may extended from ti

Private h As Double ' Node spacing of Program

Private PileLength As Single ' Pile length for program

Private RealPileLength As Single ' Real Pile length in field (include length over GL.)

Private a(-2 To 202) As Double ' Coeff in BEF eqn

Private b(-2 To 202) As Double ' Coeff in BEF eqn

Private c(-2 To 202) As Double ' Coeff in BEF eqn

Private Es(-2 To 202) As Double ' Soil Modulus (Modulus of horizontal Subgrade Reaction) Value

Private Ay(-2 To 202) As Double ' Deflection get from theory

Private AyInclino(-2 To 202) As Double ' Deflection that get from inclinometer
 Private Am(-2 To 202) As Double ' Moment get from theory
 Private Av(-2 To 202) As Double ' Shear get from theory
 Private Aslope(-2 To 202) As Double ' Slope get from theory
 Private Ap(-2 To 202) As Double ' Soil Resistance at pile side get from theory
 Private AddPointP ' Among of Additional Program Point(or Node) that Above GL.
 Private ApplyHLoadPosition As Double

' Variable for Sub Rc()

Private AngleofRotation As Single
 Private Strainx As Single
 Private Strain0 As Single ' Mean Stain0 in Stress-Stain curve of concrete
 Private NAX As Double ' Neutral Axis of Section
 Private NAXx As Double ' (Dummy)Neutral Axis of Section for Subroutine Function in program
 Private RcEI(1 To 5, 0 To 500) As Single ' Pile Stiffness
 Private moment(1 To 5, 0 To 500) As Single ' Moment of Section
 Private Moment1 As Single ' Moment of Section That Calculated only From Concrete
 Private moment2 As Single ' Moment of Section That Calculated only From Steel bar
 Private jIndex As Integer
 Private Lastj(1 To 5) As Integer ' Last j = j that make Ultimate of Section (Concrete Strain = 0.003)
 Private PileDia As Single ' Pile Diameter
 Private SteelNum(1 To 5) As Single ' Total Steel bar using
 Private Asteel As Single ' Area of Steel bar
 Private UltFc As Double ' Ultimate Strength of concrete (Cylinder)
 Private Fr As Single ' Modulus of Rupture of Concrete
 Private Fy As Double ' Yield Strength of Steel
 Private Esteel As Single ' Modulus of Elasticity of Steel
 Private Ec As Single ' Modulus of Elasticity of Concrete
 Private xSteel(1 To 50) As Single ' x-coordinate of steel bar (Origin Axis at center of pile section)
 Private ySteel(1 To 50) As Single ' y-coordinate of steel bar
 Private SectionStep As Integer ' A number for devide Pile Section
 Private PileSectionStepHigh As Single ' Hight of devided Pile Section
 Private PileSectionWidth As Single ' A width of devided Pile Section
 Private Fsteel(1 To 50) As Single ' Stress in Steel bar
 Private Fc(1 To 50) As Single ' Concrete Stress
 Private CalPart As Integer

```

Private strainR As Single ' Strain at bottom fiber that make concrete at bottom fiber = Fr
Private strainBott As Single ' Strain at bottom fiber of Section
Private SteelCageRange As Integer
Private SteelCageLength(1 To 5) As Single
Private p As Integer

```

```

'&Back Analysis Program for Find Es by know Testing data ie. Inclino or DialGauge &This Program
'based on Beam on Elastic Foundation Theory (BEF)& using finite different to solve differential eqn., Its will
'find Es that Good Fit between Slope-inclino and Slope-BEFpredicted OR can find Es good fit between y-dial
'gauge only at pile head and y-BEFpredicted
'###This Program will Find Dimensional Es (Seek in 1-layer system) in form  $Es=kx^n$  ( n is user guess)###

```

```

'Note: 1) GL. in this program may be means that CutOff Level or testing pile

```

```

'      2) user can input unequal space of inclino measured data - Program will use linear interpolate From
' BEF result to compare with measured data to get Best Fit Es value

```

```

'      3) user should carefully input all level of measured data, this program will set "User Zero Level" at Pile
' Cut of Level or GL. of Testing Pile,: Apply Load Point and DialGauge Measure Point and ... must refer that
' Reference...

```

```

'      4) This Program using Gauss Elimination to solve equation, that will limit Total of Equation or Number
' of node to approx. 200 for numerical accuracy.

```

```

' ## ----- ##

```

```

Private Sub DimensionAdvEsSeeker()

```

```

Dim i As Integer: Dim j As Integer: Dim a As Integer

```

```

Dim sum As Double

```

```

Dim sum2 As Double

```

```

Dim Expn As Single ' Exponent in  $Es=Kx^n$ 

```

```

Dim k As Single ' Constant k in  $Es=Kx^n$ 

```

```

Dim ExpnAns As Single ' Answer-exponent in  $Es=Kx^n$ 

```

```

Dim kAns As Single ' Answer-constant k in  $Es=Kx^n$ 

```

```

Dim Checker As Double

```

```

Dim Choice As Integer

```

```

Dim ExtraChoice As Integer

```

```

Dim CounterxciLess0 As Integer ' Among of Measured inclino data that above GL.and Below Load apply

```



```

Dim TotalCounterxciLess0 As Integer ' Total among of Measured inclino data that above GL.(xci data have -
sign)
Dim m As Double ' Slope of line that using in interpolate
Dim Interpolated As Double ' interpolate value
Dim CoordinateConvert As Double ' Value that convert Measured Coordinate and Program Coordinate
Dim NotUseInclinoData As Double ' Some inclino data that above load apply will not using

' ##User constant Define##
' Note that:at Es Seeker section User must defined range of Es too.
' (ie.pile length=38 ;inclino length =24.5 measured every 0.5 m....we should choose t = 76 [38/0.5]and
' ti = 49 [24.5/0.5] to keep node spacing 0.5 m or use another program spacing "h" -- program will using
' linear interpolated to answer)
h = 0.25 ' User spec program spacing
ti = 49 ' Top node of inclino data measured (!! we start at node 0 to ti !!) = total inclino data mesured - 1
tPlot = 76 ' Plot data, Default is plot entile pile length
RealPileLength = 38.1
GEI = Range("D3").Value ' Gross Pile Stiffness Properties
RealHload = Range("D4").Value ' Lateral Load Applied at pile head
Choice = 2 ' User choose 1=fit with inclinometer,; choose 2 = fit with DialGauge at pile head ExtraChoice =
' 1 This Option is Extend Extra Feature From Choice = 2 (that using fit with DialGauge at pile
' head) by major fit with DialGauge and minor consider fit with Inclinometer data too (this option
' will allow error in Fit pile head 0.05 mm to reserve better fit with inclinometer data)
' Note that: This option only good for Es = kx^n,(for Es = k or Es = kx should turn off this option)
' ::choose 1 means turn off this option,; choose 0 mean turn off this option
ApplyHLoadPosition = Range("D6").Value

ExtraChoice = 1

' ##Initialize program constant and recieve inclino data##
PileLength = Fix((RealPileLength - Abs(ApplyHLoadPosition)) / h) * h + Abs(ApplyHLoadPosition)
If ApplyHLoadPosition / h - Int(ApplyHLoadPosition / h) = 0 Then
    AddPointP = Fix(Abs(ApplyHLoadPosition) / h + 0) ' if apply load point at the same node in
Else
    ' program, +0
    AddPointP = Fix(Abs(ApplyHLoadPosition) / h + 1) ' mean that Round number down and +1=Round
End If
' up Number
t = Fix(PileLength / h) + AddPointP ' Get top node value for Program

```

CoordinateConvert = AddPointP * h

Call RC

' get slope-inclino data from excel (Node Number arrange from bottom {node 0} to top {node ti})

CounterxciLess0 = 0

TotalCounterxciLess0 = 0

For i = 0 To ti

 locatey = "A" & (i + 13)

 xci(ti - i) = Range(locatey).Value

 If xci(ti - i) < 0 And Abs(xci(ti - i)) <= Abs(ApplyHLoadPosition) Then ' Means that above

 CounterxciLess0 = CounterxciLess0 + 1 ' ground level and below Apply point load

 End If

 If xci(ti - i) < 0 Then ' Means that above ground level

 TotalCounterxciLess0 = TotalCounterxciLess0 + 1

 End If

' get slope from inclinometer

 locatey = "L" & (i + 13)

 AslopeInclino(ti - i) = Range(locatey).Value

Next i

NotUseInclinoData = TotalCounterxciLess0 - CounterxciLess0 ' some inclinodata will not use if they

For i = 0 To t ' measured above apply load

 xcp(i) = h * (t - i)

Next i

'##Main Part that will Seek Optimum Es(i)##

Checker = 500

For Expn = 0 To 2 Step 0.5 ' ## USER Choose Range Expn ##

 For k = 200 To 1500 Step 5 ' ## USER Choose Range k ##

 For i = 0 To t - AddPointP

 Es(i) = k * (xcp(i) - CoordinateConvert) ^ Expn ' Es for Program Calculation, Es above Ground

 Next i ' level = 0

Call CrackSectionBEF

```
sum = 0
```

```
sum2 = 0
```

```
Select Case Choice
```

```
Case 1 'fit with slope-inclino
```

```
For j = 0 To ti - NotUseInclinoData
```

```
For a = j To t ' For faster calculation, Run from j to t (Still correct if "h" is less than  
' inclinometer measured data spacing)
```

```
If xcp(a) - (xci(j) + CoordinateConvert) < 0 Then
```

```
    m = (Aslope(a - 1) - Aslope(a)) / h
```

```
    Interpolated = m * (xci(j) + CoordinateConvert) + Aslope(a) - m * xcp(a)
```

```
    sum = sum + (Interpolated - AslopeInclino(j)) ^ 2
```

```
Exit For
```

```
End If
```

```
Next a
```

```
Next j
```

```
If sum < Checker Then
```

```
    Checker = sum
```

```
    ExpnAns = Expn
```

```
    kAns = k
```

```
End If
```

```
Case 2 ' Fit with pile head deflection
```

```
For a = t To 0 Step -1
```

```
If xcp(a) - (ApplyHLoadPosition + CoordinateConvert) >= 0 Then
```

```
    m = (Ay(a) - Ay(a + 1)) / h
```

```
    sum = (m * (CoordinateConvert + ApplyHLoadPosition) + Ay(a) - m * xcp(a) - Abs(Range  
("I4").Value / 1000)) ^ 2
```

```
Exit For ' Note That: Range"I4" is a dial gauge measurement value (at the same position of
```

```
End If ' apply load) in mm
```

```
Next a
```

```
If ExtraChoice = 0 Then ' ExtraChoice turn off
```

```
If sum < Checker Then
```

```
    Checker = sum
```

```
    ExpnAns = Expn
```

```

    kAns = k
  End If
Else ' ExtraChoice turn on (Proper only for Es=kx^n or Es = k0+k1*x+k2*x^2 case)
  For j = 0 To ti - NotUseInclinoData
    For a = j To t
      If xcp(a) - (xci(j) + CoordinateConvert) < 0 Then
        m = (Aslope(a - 1) - Aslope(a)) / h
        Interpolated = m * (xci(j) + CoordinateConvert) + Aslope(a) - m * xcp(a)
        sum2 = sum2 + (Interpolated - AslopeInclino(j)) ^ 2
      Exit For
    End If
  Next a
Next j
If sum < 2.5 * 10 ^ -9 And sum2 < Checker Then
  Checker = sum2
  ExpnAns = Expn
  kAns = k
End If

End If

End Select

Next k
Next Expn

' Optimum Es Value to AyInclino, Or Es-Answer are store to es(i)
For i = 0 To t - AddPointP
  Es(i) = kAns * (xcp(i) - CoordinateConvert) ^ ExpnAns
Next i

' ##print output to excel##
' to get final answer, we must calculate again

Call CrackSectionBEF

```

For i = 0 To t

$Av(i) = (Am(i - 1) - Am(i + 1)) / (2 * h)$ ' or $Av(i) = EI(i) * (Ay(i - 2) - 2 * Ay(i - 1) + 2 * Ay(i + 1) - Ay(i + 2)) / (2 * h^3) + Px * (Ay(t - 1) - Ay(t + 1)) / (2 * h)$

$Ap(i) = -Es(i) * Ay(i)$ ' or $Ap(i) = EI * (Ay(i - 2) - 4 * Ay(i - 1) + 6 * Ay(i) - 4 * Ay(i + 1) + Ay(i + 2)) / (h^4)$

Next i

' Interpolate Program result to specific depth of inclino

For j = 0 To tPlot - NotUseInclinoData

For a = t To 0 Step -1

locatey = "A" & (13 + j + NotUseInclinoData)

sum = Range(locatey).Value + CoordinateConvert ' Coordinate of inclino measured data that

If xcp(a) - (sum) >= 0 Then ' converted to program coordinate

locatey = "Z" & (13 + j + NotUseInclinoData)

$m = (Ay(a) - Ay(a + 1)) / h$

Range(locatey) = (m * sum + Ay(a) - m * xcp(a)) * 1000 ' multiply 1000 for change mm to m

locatey = "AA" & (13 + j + NotUseInclinoData)

$m = (Es(a) - Es(a + 1)) / h$

Range(locatey) = m * sum + Es(a) - m * xcp(a)

locatey = "AB" & (13 + j + NotUseInclinoData)

$m = (Aslope(a) - Aslope(a + 1)) / h$

Range(locatey) = (m * sum + Aslope(a) - m * xcp(a))

locatey = "AG" & (13 + j + NotUseInclinoData)

$m = (Am(a) - Am(a + 1)) / h$

Range(locatey) = (m * sum + Am(a) - m * xcp(a))

locatey = "AH" & (13 + j + NotUseInclinoData)

$m = (Av(a) - Av(a + 1)) / h$

Range(locatey) = (m * sum + Av(a) - m * xcp(a))

locatey = "AJ" & (13 + j + NotUseInclinoData)

$$m = (EI(a) - EI(a + 1)) / h$$

$$\text{Range}(\text{locatey}) = (m * \text{sum} + EI(a) - m * \text{xcp}(a))$$

Exit For

End If

Next a

Next j

' Interpolate Program result to get pile head deflection (at DialGauge measured point)

For a = t To 0 Step -1

If xcp(a) - (ApplyHLoadPosition + CoordinateConvert) >= 0 Then

$$m = (Ay(a) - Ay(a + 1)) / h$$

$$\text{Range}(\text{"Z11"}).\text{Value} = (m * (\text{CoordinateConvert} + \text{ApplyHLoadPosition}) + Ay(a) - m * \text{xcp}(a)) * 1000 '$$

multiply 1000 for chang m to mm

Exit For

End If

Next a

' show value at GL. (or CutOff Level)

Range("Z12").Value = Ay(t - AddPointP) * 1000 ' multiply 1000 for chang m to mm

Range("AA12").Value = Es(t - AddPointP)

Range("AB12").Value = Aslope(t - AddPointP)

Range("AG12").Value = Am(t - AddPointP)

Range("AH12").Value = Av(t - AddPointP)

Range("AI12").Value = Ap(t - AddPointP)

Range("AJ12").Value = EI(t - AddPointP)

' Show Back Analysis Es Result and Method

Range("AA3").Value = kAns

Range("AA6").Value = ExpnAns

If Choice = 1 Then

Range("AA2").Value = " Fit Inclinator (Slope) "

ElseIf ExtraChoice = 1 Then

Range("AA2").Value = " Fit DialGauge+-0.05mm "

Else

```

Range("AA2").Value = " Fit DialGauge "
End If

' Sqdev Output
sum = 0
sum2 = 0
For j = 0 To ti - NotUseInclinoData
    locatey = "AB" & (13 + j + NotUseInclinoData)
    locatey2 = "L" & (13 + j + NotUseInclinoData)
    sum = sum + (Range(locatey).Value - Range(locatey2).Value) ^ 2

    locatey = "N" & (13 + j + NotUseInclinoData)
    locatey2 = "Z" & (13 + j + NotUseInclinoData)
    sum2 = sum2 + (Range(locatey).Value - Range(locatey2).Value) ^ 2
Next j
Range("AB7").Value = sum
Range("AA7").Value = sum2

For i = 0 To tPlot ' Soil reaction "p" will easy calculated by  $E_s = -p/y$  , not interpolate them
    locatey = "Z" & (13 + i)
    sum = Range(locatey).Value / 1000 'change mm to m
    locatey = "AA" & (13 + i)
    sum2 = Range(locatey).Value
    locatey = "AI" & (13 + i)
    Range(locatey).Value = -sum * sum2 'p=-Es*y
Next i

Call ErrorCheck ' The Last: Check Numerical Accuracy

End Sub

' ###-----###'

Sub CrackSectionBEF()
' Iterative Process to find EI of Crack Section (EI of Crack Section vs. Moment Relation Get From Sub RC())
Dim i As Integer: Dim j As Integer: Dim a As Integer: Dim k As Integer

```

```

Dim m As Double ' slope of linear line that using in interpolate
Dim Interpolated As Double ' interpolate value
Dim MinIter As Integer ' Maximum of Iterative
Dim Iter As Integer
Dim LoadLooper As Integer
Dim sum As Single
Dim EIavNew As Single
Dim EIavOld As Single
Dim EError As Single

MinIter = 4
Hload = 0
For LoadLooper = 1 To 5
    Hload = Hload + 0.2 * RealHload ' Simulate Pile Load Test That Gradually increase load
    MomentLoad = -Hload * (AddPointP * h - Abs(ApplyHLoadPosition)) ' (moment due to move load)
        ' always move RealHload up(-x direction)
If LoadLooper = 1 Then
    For i = 0 To t
        For p = 1 To SteelCageRange
            If i * h <= SteelCageLength(p) Then
                EI(i) = RcEI(p, 0) 'First Not mention about Crack Section
                Exit For
            End If
        Next p
    Next i
End If
EI(-1) = EI(0): EI(-2) = EI(0): EI(t + 1) = EI(t): EI(t + 2) = EI(t)

Iter = 0: EIavNew = 1
Do Until Iter > MinIter And EError < 0.01 ' Normally (From massive run this program) found that
    EIavOld = EIavNew ' after adjust EI (decrease) in first iter, Moment in pile in 2nd iter will decrease,
    Iter = Iter + 1 ' thus another follow iter will get the same EI as First Iter
    EI(-1) = EI(0): EI(-2) = EI(0): EI(t + 1) = EI(t): EI(t + 2) = EI(t)

    Call GenCoeff

```


For i = t To 0 Step -1 ' Start interpolate for every node i

For p = 1 To SteelCageRange ' Check node position is in which SteelCageLength

If i * h <= SteelCageLength(p) Then

Exit For

End If

Next p

For a = 1 To Lastj(p) ' "a" index represent point for M&EI curve for compare with node i

If Abs(Am(i)) - Abs(moment(p, a)) <= 0 Then ' note: Negative moment value in Lateral pile (in this thesis) are small thus writer will not program about adjust EI for Negative moment.

If (moment(p, a - 1) - moment(p, a)) <> 0 Then ' Because Flat Graph in Sub Rc will Bug

m = (RcEI(p, a - 1) - RcEI(p, a)) / (moment(p, a - 1) - moment(p, a))

Interpolated = m * Abs(Am(i)) + RcEI(p, a) - m * moment(p, a)

Else

Interpolated = RcEI(p, a)

End If

If Interpolated < EI(i) Then ' First use Uncrack EI, after calculation get Am.. then adjust EI

EI(i) = Interpolated ' by Iterative Process that EI should have value smaller, not greater

End If

Exit For

ElseIf Abs(Am(i)) - Abs(moment(p, Lastj(p))) > 0 Then ' Mean Am>Ult Moment resistance

EI(i) = RcEI(p, Lastj(p)) ' of pile section

MsgBox "Pile Fail (M>Mult), Program stopped", vbOKOnly, "Warning"

Stop

End If

Next a

Next i

sum = 0 ' calculate EI av for Iterative Check

For k = 0 To t

sum = sum + EI(i)

Next k

ElavNew = sum / t

EIerror = Abs(EIavNew - EIavOld) / EIavOld

Loop

Next LoadLooper

Call GenCoeff

End Sub

' ## ----- ## '

Sub GenCoeff()

'## More Detail see Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles by H. Matlock and L.C. Reese

'J. of soil mech and Foun Div, ASCE Vol.89 no.5 part1 October1960.

Dim i As Integer: Dim j As Integer

Dim G1 As Double

Dim G2 As Double

Dim H1 As Double

Dim H2 As Double

Dim J2 As Double

Dim J3 As Double

Dim E As Double

'#Generate coeff Part - Only FreeHead&FreeTip are consider For LoadCase=Force&Moment at Pile Head

a(-1) = 2

b(-1) = 1

a(0) = (2 * EI(0) + 2 * EI(1) - 2 * Px * h * h) / (EI(0) + EI(1) - 2 * Px * h * h + Es(0) * h ^ 4)

b(0) = (EI(0) + EI(1)) / (EI(0) + EI(1) - 2 * Px * h * h + Es(0) * h ^ 4)

For i = 1 To t

c(i) = (EI(i - 1) - 2 * a(i - 1) * EI(i - 1) - b(i - 2) * EI(i - 1) + a(i - 2) * a(i - 1) * EI(i - 1) + 4 * EI(i) - 2 * a(i - 1) * EI(i) + EI(i + 1) + Es(i) * h ^ 4 - Px * h * h * (2 - a(i - 1)))

b(i) = EI(i + 1) / c(i)

$$a(i) = (-2 * b(i - 1) * EI(i - 1) + a(i - 2) * b(i - 1) * EI(i - 1) - 2 * b(i - 1) * EI(i) + 2 * EI(i) + 2 * EI(i + 1) - Px * h * h * (1 - b(i - 1))) / c(i)$$

Next i

$$J2 = \text{MomentLoad} * (h^2) / EI(t)$$

$$J3 = 2 * \text{Hload} * (h^3) / EI(t)$$

$$E = Px * h * h / EI(t)$$

$$H1 = -2 * a(t - 1) + E * a(t - 1) - b(t - 2) + a(t - 1) * a(t - 2)$$

$$H2 = -a(t - 2) * b(t - 1) + 2 * b(t - 1) + 2 - E * (1 + b(t - 1))$$

$$G1 = 2 - a(t - 1)$$

$$G2 = 1 - b(t - 1)$$

$$Ay(t) = (J3 + a(t) * J2 / (b(t) * G2) - J2 * H2 / G2) / ((H1 + G1 * H2 / G2 + (1 - a(t) * G1 / G2) / b(t)))$$

$$Ay(t + 1) = (J2 + Ay(t) * G1) / G2$$

$$Ay(t + 2) = (a(t) * Ay(t + 1) - Ay(t)) / b(t)$$

'Back Substitutue

For i = t - 1 To -1 Step -1

$$Ay(i) = a(i) * Ay(i + 1) - b(i) * Ay(i + 2)$$

Next i

$$Ay(-2) = Ay(2) - (2 - Px * h * h / EI(0)) * Ay(1) + (2 - Px * h * h / EI(0)) * Ay(-1)$$

' compute As, Am

For i = -1 To t + 1

$$Aslope(i) = (Ay(i - 1) - Ay(i + 1)) / (2 * h)$$

$$Am(i) = EI(i) * (Ay(i - 1) - 2 * Ay(i) + Ay(i + 1)) / h^2$$

Next i

End Sub

' ## -----##'

Private Sub ErrorCheck()

' Check Error By substitute Ay that already solve, in Original Finite Diff Eqn. and sum them.

Dim sum As Double

Dim i As Integer

```

sum = 0
For i = 0 To t
    sum = sum + EI(i - 1) * Ay(i - 2) + (-2 * EI(i - 1) - 2 * EI(i) + Px * h * h) * Ay(i - 1) + (EI(i - 1) + 4 * EI(i)
+ EI(i + 1) - 2 * Px * h * h + Es(i) * h ^ 4) * Ay(i) + (-2 * EI(i) - 2 * EI(i + 1) + Px * h * h) * Ay(i + 1) + EI(i +
1) * Ay(i + 2)
    Next i

' Check Numerical Error
If sum > 0.0000000001 Then
    MsgBox "Sum of error in each eqn exceed Program limit", vbOKOnly, "Large Numerical Error"
    End
End If

End Sub

' ## ----- ##

Private Sub RC()
' Input in SI Unit: KN, m
' Output in SI Unit, but this Program will Convert to unit Ton, m for moment and EI
' This Subroutine can only use with Px = 0 only

Dim CoveringToCen(1 To 5) As Single ' Concrete Covering to Center of Reinforcement
Dim SteelBarDia(1 To 5) As Single
Dim Beta As Single ' Angel between each steel
Dim locatey As String
Dim i As Integer: Dim j As Integer: Dim n As Integer
Dim Mcr As Single ' Cracking moment
Dim Ma As Single ' Apply Moment
Dim ig As Single ' Moment of inertia of gross concrete section, neglect reinforcement
Dim icr As Single ' Moment of inertia of crack section

SteelCageRange = 3
Px = 0
PileDia = 1.5

```

SectionStep = 25

UltFc = 37.67 * 1000

Fy = 490500

Esteel = 200000000

SteelBarDia(1) = 40 * 10 ^ -3

SteelNum(1) = 0

SteelCageLength(1) = 14

CoveringToCen(1) = 0

SteelBarDia(2) = 32 * 10 ^ -3

SteelNum(2) = 21

SteelCageLength(2) = 12 + 14

CoveringToCen(2) = 0.075 + 16 * 10 ^ -3

SteelBarDia(3) = 40 * 10 ^ -3

SteelNum(3) = 21

SteelCageLength(3) = 12 + 14 + 12

CoveringToCen(3) = 0.075 + 20 * 10 ^ -3

' for addpointp, we should specify EI for them too, by using SteelCageRange (show benefit in Sub
' CrackSectionBEF())

SteelCageLength(SteelCageRange) = SteelCageLength(SteelCageRange) + AddPointP * h

For p = 1 To SteelCageRange

##Initailize Program Constant

PileSectionStepHigh = PileDia / SectionStep

'concrete and steel properties

Fr = 19.7 * (UltFc) ^ 0.5

Ec = 151000 * (UltFc) ^ 0.5

Strain0 = 1.8 * 0.85 * UltFc / Ec

Asteel = 3.14159265358979 * (SteelBarDia(p) ^ 2) / 4

'locate location of steel in pile

If SteelNum(p) <> 0 Then

```

Beta = 3.14159265358979 * 2 / SteelNum(p)
For i = 1 To SteelNum(p)
    xSteel(i) = (PileDia / 2 - CoveringToCen(p)) * Cos(Beta * (i - 1))
    ySteel(i) = (PileDia / 2 - CoveringToCen(p)) * Sin(Beta * (i - 1))
Next i
End If

strainR = -Fr / Ec
CalPart = 1
j = 0
For i = 2 To 20 Step 2 ' In Part 1 of Calculation Set 10 step (20/2)
    j = j + 1
    strainBott = i * strainR / 20

    Call Bisection ' Using Bisection Technic to get NAx. of Section
    Call CalMoment ' Calculate Moment of Section

    moment(p, j) = (Moment1 + moment2)
    RcEI(p, j) = moment(p, j) / AngleofRotation
Next i
Lastj(p) = j ' Special setting for case no reinforcement

If SteelNum(p) <> 0 Then
    j = j - 1
    n = 10
    CalPart = 2
    For jIndex = 2 To 6000 Step 2
        j = j + 1
        strainBott = jIndex * strainR

        Call Bisection ' Using Bisection Technic to get NAx. of Section
        Call CalMoment ' Calculate Moment of Section

        If AngleofRotation * (PileDia / 2 - NAx) >= 0.003 Then ' Limit concrete strain=0.003=Ultimate
            Lastj(p) = j - 1          ' Stage of Section
        Exit For
    
```

```

End If

moment(p, j) = (Moment1 + moment2)
RcEI(p, j) = moment(p, j) / AngleofRotation
If jIndex >= 6000 Then
    Stop
End If ' Not Reach Ultimate, Program should stop
Next jIndex
End If
moment(p, 0) = 0: RcEI(p, 0) = RcEI(p, 1)

' ACI Code : Crack Section (Valid only Px=0)
j = 0
If Px = 0 And SteelNum(p) < 0 Then
    ig = (3.14159265358979 * PileDia ^ 4) / 64
    Mcr = Fr * ig / (PileDia / 2)
    icr = RcEI(p, Lastj(p)) / Ec
    For i = 1 To Lastj(p)
        j = j + 1
        Ma = moment(p, j)
        If Ma > Mcr Then
            RcEI(p, j) = Ec * (ig * (Mcr / Ma) ^ 3 + (1 - (Mcr / Ma) ^ 3) * icr)
        End If
        RcEI(p, j) = RcEI(p, j) / 9.81
        moment(p, j) = moment(p, j) / 9.81
    Next i
Else
    For i = 1 To Lastj(p)
        j = j + 1
        RcEI(p, j) = RcEI(p, j) / 9.81
        moment(p, j) = moment(p, j) / 9.81
    Next i
End If

' Fixing Moment, that moment should constant or increase with increase Angle of Rotation
j = 0

```

```

For i = 1 To Lastj(p)
  j = j + 1
  If moment(p, j + 1) < moment(p, j) And Px = 0 Then
    moment(p, j + 1) = moment(p, j)
    RcEI(p, j + 1) = RcEI(p, j)
  Elseif moment(p, j + 1) < moment(p, j) And Px <> 0 Then
    moment(p, j + 1) = moment(p, j)
  End If
Next i
RcEI(p, 0) = RcEI(p, 0) / 9.81

j = 0 ' Also Fix bug in case of RcEI should Decrease with increase Angle of Rotation
For i = 1 To Lastj(p)
  j = j + 1
  If RcEI(p, j) < RcEI(p, j + 1) And Px = 0 Then
    moment(p, j) = moment(p, j - 1)
    RcEI(p, j) = RcEI(p, j - 1)
  End If
Next i

'Output to excel
j = 0
'For jIndex = 0 To Lastj(p)
  j = j + 1
  ' locatey = "A" & (10 + j)
  ' Range(locatey).Value = RcEI(p, j)
  'locatey = "B" & (10 + j)
  'Range(locatey).Value = moment(p, j)
Next jIndex

Next p
End Sub

' ## ----- ##'

Function FindEquilibrium(NAx As Single) As Double

```


Dim sumRc As Single

Dim sumConcreteForce As Single

Dim sumSteelForce As Single

Dim DistFromNAX As Single

Dim i As Integer: Dim j As Integer

NAX = NAXx

For i = 1 To SectionStep: Fc(i) = 0: Next i ' Clear array

sumConcreteForce = 0

sumRc = -PileSectionStepHigh / 2

For i = 1 To SectionStep

sumRc = sumRc + (PileSectionStepHigh) ' get center of each slice, Refer From Top of Pile Section

DistFromNAX = (PileDia / 2 - sumRc) - NAX 'convert coordinate to NA Axis, (First term is convert
'coordinate to global)

AngleofRotation = Abs(strainBott / -(NAX + PileDia / 2))

Strainx = AngleofRotation * DistFromNAX

Fc(i) = FcFunc(Strainx)

If Fc(i) < 0 And CalPart = 2 Then ' Tension Crack Check

Fc(i) = 0

End If

PileSectionWidth = 2 * ((PileDia / 2) ^ 2 - (PileDia / 2 - sumRc) ^ 2) ^ 0.5

sumConcreteForce = sumConcreteForce + Fc(i) * PileSectionWidth * PileSectionStepHigh

Next i

sumSteelForce = 0

For i = 1 To SteelNum(p)

DistFromNAX = ySteel(i) - NAX 'convert coordinate to NA Axis

Strainx = AngleofRotation * DistFromNAX

Fsteel(i) = (Esteel * Strainx)

If Abs(Fsteel(i)) > Fy Then

Fsteel(i) = Fy * (Fsteel(i) / Abs(Fsteel(i))) ' Last term will show sign of Fsteel

End If

sumSteelForce = sumSteelForce + Fsteel(i) * Asteel

Next i

FindEquilibrium = -Px + sumConcreteForce + sumSteelForce

End Function

' ## -----##'

Sub CalMoment()

Dim sumRc As Single

Dim DistFromNAX As Single

Dim i As Integer

Moment1 = 0

moment2 = 0

sumRc = -PileSectionStepHigh / 2

For i = 1 To SectionStep

 sumRc = sumRc + PileSectionStepHigh ' get center of each slice, Refer From Top of Pile Section

 DistFromNAX = (PileDia / 2 - sumRc) - NAX 'convert coordinate to NA Axis, (First term is
 'convert coordinate to global)

 PileSectionWidth = 2 * ((PileDia / 2) ^ 2 - (PileDia / 2 - sumRc) ^ 2) ^ 0.5

 Moment1 = Moment1 + (Fc(i) * PileSectionWidth * PileSectionStepHigh) * DistFromNAX

Next i

 Moment1 = Moment1 + Px * NAX

For i = 1 To SteelNum(p)

 DistFromNAX = ySteel(i) - NAX

 moment2 = moment2 + Fsteel(i) * Asteel * DistFromNAX

Next i

End Sub

' ## -----##'

Function FcFunc(Strainx As Single) As Double

 If Strainx <= Strain0 And Strainx > 0 Then

```

    FcFunc = 0.85 * UltFc * (2 * Strainx / Strain0 - (Strainx / Strain0) ^ 2)
ElseIf Strainx > Strain0 And Strainx > 0 Then
    FcFunc = 0.1275 * UltFc * (Strainx - Strain0) / (Strain0 - 0.0038) + 0.85 * UltFc
Else
    FcFunc = Ec * Strainx
End If

End Function

' ## -----'

Private Sub Bisection()

Dim XR As Single
Dim XL As Single
Dim XU As Single
Dim ErrorA As Double
Dim ErrorS As Double
Dim Test As Double
Dim XROld As Double

XL = -PileDia / 2.1
XU = PileDia / 2.1
ErrorS = 0.00001
ErrorA = 1
XROld = 0

Do Until ErrorA < ErrorS
    XR = (XL + XU) / 2
    If XR + XU < 0 Then
        ErrorA = Abs((XR - XROld) / (XR))
    End If
    Test = FindEquilibrium(XL) * FindEquilibrium(XR)
    If Test = 0 Then
        ErrorA = 0
    ElseIf Test < 0 Then XU = XR

```

```
ElseIf Test > 0 Then XL = XR  
End If  
XROld = XR  
Loop  
  
End Sub
```

สำหรับ interface ในExcel Work Sheet ที่โปรแกรมอ้างอิงตำแหน่งของเซลล์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ก.11 ซึ่งส่วนที่แรเงาเอาไว้ในรูปหมายถึงเป็นส่วนที่ผู้ใช้ต้องใส่ค่าลงไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Microsoft Excel - MRTA-BPI1-Example

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

Cordia New 14 75%

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL
1							Depth (m)	G3	Dial Gauge	mm																		
2								G2		mm																		
3								G1		mm																		
4					Load					ton																		
5					L					m																		
6					Apply Load at					m																		
7																												
8																												
9																												
10		depth	s+	s-	angle	s+	s-	angle	0																			
11		0	(* File Head Deflection)																									
12		0	(* Ground Level Set 0)																									
13																												
14																												
15																												
16																												
17																												
18																												

NUM

Ready

รูปที่ ก.11 แสดงเซลล์ต่างๆที่โปรแกรมใช้อ้างอิงและส่วนที่แรงมาเป็นส่วนที่ผู้ใช้ต้องใส่ค่า

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดของตัวอย่างการนำกราฟ $E_s / S_u \text{ avg vs. Pile Head Deflection / Pile Diameter}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์ห้กลับไปใช้งานออกแบบเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำทางด้านข้าง

ข้อมูลที่ใช้อ้างอิงในการแสดงตัวอย่างการนำกราฟในรูปที่ 4.67 (กรณี $E_s = k$) ไปใช้งานนั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลโครงการที่ 1 (คลองตัน) เสาเข็ม R1 ซึ่งมีข้อมูลคือ Pile Diameter (D) = 1.5 m, Pile Length (L) = 46.1 m, Gross $E_p I_p = 743566.2 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$ (ใช้ $I_p = \pi D^4 / 64$ นั่นคือเป็นการหาค่า $E_p I_p$ โดยไม่คำนึงถึงเหล็กเสริมในเสาเข็ม), $S_u \text{ avg}$ ของดิน Soft-Medium clay ในช่วงความลึก 8D มีค่าเท่ากับ 2.51 ton/m^2

สำหรับการคำนวณต้องใช้ชาร์ตไร้มิติของ Davisson and Gill, 1963 (กรณี $E_s = k$) ดังรูปที่ 2.7 และใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ห้กลับของผู้วิจัยดังรูปที่ 4.67 โดยการคำนวณอาจแบ่งได้เป็นสองแบบคือ

1) มีแรงกระทำทางด้านข้างที่หัวเสาเข็ม (Q) ต้องการทราบค่า Pile Head Deflection (Y_t)

ในกรณีนี้เริ่มแรกจะต้องหาค่า E_s จากกราฟในรูปที่ 4.67 ก่อนโดยจะต้องสมมุติค่า Y_t/D แล้วคำนวณหาค่า Y_t จากชาร์ตไร้มิติรูปที่ 2.7 แล้วทำการตรวจสอบค่า Y_t/D ที่ได้สมมุติเอาไว้กับค่า Y_t ที่ได้จากการใช้ชาร์ตไร้มิติว่ามีค่าสอดคล้องกันหรือไม่ ดังนั้นผู้ใช้งานจำเป็นต้องทำการ Trail Error หลายครั้ง ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ ข.1 – ข.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการคำนวณโดยใช้ชาร์ตไร้มิติของ (Davisson and Gill, 1963) โดยใช้พารามิเตอร์ E_s จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์หักลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 35 ton

Lateral Load 35 Ton							
Yt/D(%) Guess	k/Su ได้จาก รูปที่ 4.17	k (ton/m ²) (Column 2 * Su avg)	R $((E_p I_p / k)^{0.25})$	l max (L/R)	Y _{lq} ได้ จากรูปที่ 2.7	Yt (m) $(Q_{y_{lq}} R^3 / E_p I_p)$	Yt/D(%) obtain
0.1	1239.7	3111.6	3.93	11.73	1.42	0.004062	0.27
0.25	753.1	1890.2	4.45	10.35	1.42	0.005904	0.39
0.5	516.5	1296.4	4.89	9.42	1.42	0.007834	0.52
1	354.3	889.2	5.38	8.57	1.42	0.010394	0.69
Result							
Measured Yt	6.17	mm					
Es from Back Analysis	1655	ton/m ²					
Predict Yt	7.8	mm					
Predict Es	1296.4	ton/m ²					

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการคำนวณโดยใช้ชาร์ตไร้มิติของ (Davisson and Gill, 1963) โดยใช้พารามิเตอร์ E_s จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์หักลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 45 ton

Lateral Load 45 Ton							
Yt/D(%) Guess	k/Su ได้จาก รูปที่ 4.17	k (ton/m ²) (Column 2 * Su avg)	R $((E_p I_p / k)^{0.25})$	l max (L/R)	Y _{lq} ได้ จากรูปที่ 2.7	Yt (m) $(Q_{y_{lq}} R^3 / E_p I_p)$	Yt/D(%) obtain
0.5	1239.7	1296.4	4.9	9.4	1.42	0.0100719	0.67
0.7	753.1	1124.0	5.1	9.1	1.42	0.0112099	0.75
0.8	516.5	1039.8	5.2	8.9	1.42	0.0118839	0.79
1.0	354.3	914.3	5.3	8.6	1.42	0.0130871	0.87
Result							
Measured Yt	9.18	mm					
Es from Back Analysis	1375	ton/m ²					
Predict Yt	11.88	mm					
Predict Es	1039.8	ton/m ²					

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการคำนวณโดยใช้ชาร์ตไร้มิติ โดยใช้พารามิเตอร์ E_s จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ห้กลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 55 ton

Lateral Load 55 Ton							
Yt/D(%) Guess	k/Su ได้จาก รูปที่ 4.17	k (ton/m ²) (Column 2 * Su avg)	R (($E_p I_p / k$) ^{0.25})	l max (L/R)	Y _{iq} ได้ จากรูปที่ 2.7	Yt (m) ($Q_{y_{iq}} R^3 / E_p I_p$)	Yt/D(%) obtain
0.25	753.1	1890.2	4.45	10.35	1.42	0.009278	0.62
0.5	516.5	1296.4	4.89	9.42	1.42	0.01231	0.82
1	354.3	889.2	5.38	8.57	1.42	0.016334	1.09
1.5	313.8	787.5	5.54	8.32	1.42	0.030489	2.03
Result							
Measured Yt	17.28	mm					
Es from Back Analysis	820	ton/m ²					
Predict Yt	16.3	mm					
Predict Es	889.2	ton/m ²					

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการคำนวณโดยใช้ชาร์ตไร้มิติของ (Davisson and Gill, 1963) โดยใช้พารามิเตอร์ E_s จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ห้กลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 65 ton

Lateral Load 65 Ton							
Yt/D(%) Guess	k/Su ได้จาก รูปที่ 4.17	k (ton/m ²) (Column 2 * Su avg)	R (($E_p I_p / k$) ^{0.25})	l max (L/R)	Y _{iq} ได้ จากรูปที่ 2.7	Yt (m) ($Q_{y_{iq}} R^3 / E_p I_p$)	Yt/D(%) obtain
1.00	354.3	889.2	5.4	8.6	1.42	0.0193034	1.29
1.40	295.0	740.4	5.6	8.2	1.42	0.0221439	1.48
1.53	281.1	705.5	5.7	8.1	1.42	0.0229609	1.53
1.60	274.3	688.6	5.7	8.0	1.42	0.0233838	1.56
Result							
Measured Yt	26.66	mm					
Es from Back Analysis	660	ton/m ²					
Predict Yt	22.96	mm					
Predict Es	705.5	ton/m ²					

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการคำนวณโดยใช้ชาร์ตไร้มิติของ (Davisson and Gill, 1963) โดยใช้พารามิเตอร์ E_s จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ห้กลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 70 ton

Lateral Load 70 Ton							
Yt/D(%) Guess	k/Su ได้จาก รูปที่ 4.17	k (ton/m ²) (Column 2 * Su avg)	R (($E_p I_p / k$) ^{0.25})	l max (L/R)	Y _{iq} ได้ จากรูปที่ 2.7	Yt (m) ($Q_{y_{iq}} R^3 / E_p I_p$)	Yt/D(%) obtain
1.40	295.0	740.4	5.6	8.2	1.42	0.0238473	1.59
1.50	284.1	713.2	5.7	8.1	1.42	0.0245281	1.64
1.73	262.9	659.9	5.8	8.0	1.42	0.0259981	1.73
1.80	257.3	645.8	5.8	7.9	1.42	0.0264223	1.76
Result							
Measured Yt	28.58	mm					
Es from Back Analysis	650	ton/m ²					
Predict Yt	25.99	mm					
Predict Es	659.9	ton/m ²					

ในตารางที่ ข.1 – ข.5 ตารางส่วนบนแสดงการวิเคราะห์ห้กลับด้วยชาร์ตไร้มิติและใช้พารามิเตอร์ E_s จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ห้กลับของผู้วิจัย โดย Column 1 แสดง Yt/D ที่สมมุติจากนั้นนำค่าดังกล่าวไปอ่านค่าจากรูปที่ 4.67 ได้ค่าแสดงใน Column 2, คำนวณค่า R, l_{max} ได้จากสูตร $R = (E_p I_p / k)^{0.25}$ และ $l_{max} = L/R$ แล้วนำค่าที่ได้ไปอ่านชาร์ตไร้มิติในรูป 2.7 ที่ค่า $l = 0$ ($l = x/R$; x คือค่าความลึกจากผิวดิน) ได้ค่า Y_{iq} ดังแสดงใน Column 6 และจากสูตร $Yt = Q_{y_{iq}} R^3 / E_p I_p$ ได้ค่า Yt แสดงใน Column 7, นำผลที่ได้จาก Column 7 หารด้วย D ก็จะได้ค่า Yt/D obtain ใน Column 8

ได้คำตอบก็ต่อเมื่อ Yt/D ที่สมมุติใน Column 1 มีค่าใกล้เคียงกับค่า Yt/D obtain ใน Column 8 ดังเช่นในตารางที่ ข.1 พบว่าที่ Yt/D guess 0.5% ได้ Yt/D obtain 0.52% ซึ่งถือว่าค่า Yt/D ที่สมมุติกับค่า Yt/D ที่ได้มีค่าสอดคล้องกันแล้ว จึงได้คำตอบคือที่ Lateral Load 35 ton เกิด Yt = 7.8 mm

และตารางส่วนล่างของตารางที่ ข.1 – ข.5 จะแสดง Result โดย Measured Yt คือค่า Pile Head Deflection ที่ได้จากการทดสอบในสนาม, Es from Back Analysis คือค่า E_s ที่ได้จากรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ห้กลับด้วยโปรแกรมของผู้วิจัย, ส่วน Predict Yt และ Predict E_s เป็น Result ที่ได้จากการ Trial error ของตารางส่วนบน

โดยผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ ข.1 – ข.7 ได้นำไปพล็อตในกราฟ Apply Load vs. Pile Head Deflection เทียบกับผลการทดสอบในสนาม ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.70

2) หากจำกัดค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็ม (Y_t) เท่ากับ 6.17 mm, 17.28 mm ต้องการทราบค่าแรงกระทำทางด้านข้าง

สำหรับในกรณีนี้การคำนวณค่อนข้างง่ายกว่าในข้อแรก กล่าวคือไม่ต้องมีการ Trail Error แต่อย่างไร ซึ่งขั้นตอนมีเพียงอ่านค่า k/Su avg จากรูปที่ 4.67 แล้วใช้ชาร์ตไรมิตีก็จะได้คำตอบ

ตารางที่ ข.6 แสดงผลการคำนวณโดยใช้ชาร์ตไรมิตี โดยใช้พารามิเตอร์ E_s จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์กลับของผู้วิจัย กรณีกำหนดค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็มแล้วคำนวณหาค่า Lateral load ที่หัวเสาเข็ม

Y_t (m)	Y_t/D (%)	k/Su ได้จาก รูปที่ 4.17	k (ton/m ²) (Column 3 * Su avg)	R $((E_p I_p/k)^{0.25})$	l max (L/R)	Y_{lq} ได้จาก รูปที่ 2.7	Q (ton) $(Y_t = Q y_{lq} R^3 / E_p I_p)$
6.17E-3	0.41	574.4	1441	4.77	9.67	1.42	29.85
9.18E-03	0.61	462.7	1161	5.03	9.16	1.42	37.77
17.28E-3	1.15	328	823	5.48	8.41	1.42	54.92
2.67E-02	1.78	259.1	650	5.82	7.93	1.42	71.00
2.86E-02	1.91	249.5	626	5.87	7.85	1.42	73.98

จากตารางที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าการคำนวณไม่ยุ่งยาก โดยใน Column สุดท้ายสามารถหา Q ได้จากสมการ $Y_t = Q y_{lq} R^3 / E_p I_p$

โดยผลการทดสอบในสนามของเสาเข็ม R1 ณ. Y_t ที่ได้แสดงในตารางที่ ข.6 Column 1 เกิดจาก Lateral Load เท่ากับ 35, 45, 55, 65, 70 ton ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในตารางที่ ข.6 Column 8 จะพบว่าที่ Load 35, 45 ton การคำนวณได้ค่า Q น้อยกว่าค่า Lateral Load ในสนาม และที่ Load 65, 70 ton การคำนวณได้ค่า Q มากกว่าค่า Lateral Load ในสนาม ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณโดยใช้ชาร์ตไรมิตีต้องใช้ $E_p I_p$ ค่าคงที่ตลอดความยาวเสาเข็ม โดยผู้วิจัยใช้ $E_p I_p = \text{Gross } E_p I_p$ ซึ่งค่า $E_p I_p$ ที่เกิดขึ้นจริงในขณะการทดสอบเสาเข็มมีค่าเปลี่ยนแปลงได้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชลิต อินทร์นัยกิจ เกิดเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2519 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2542



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย