



บทที่ 2  
ผลงานในอดีต

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักผูก เรือกลางน้ำและวิธีการออกแบบหลักผูก เรือกลางน้ำตามวิธีการของ Empfehlungen des Arbeitsausschusses 'Uferei nfassungen' (EAU 1980) The Overseas Coastal Area Development Institute to Japan (OCDI) British Standards Institution (BSI) โดยจะกล่าวถึงลักษณะและวิธีการออกแบบแต่ละวิธีโดยย่อรวมทั้งตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ

2.1 หลักผูกเรือกลางน้ำ (Dolphins) (1)

หลักผูกเรือกลางน้ำเป็นโครงสร้างในน้ำชนิดหนึ่งใช้สำหรับผูก เรือมักจะใช้ร่วมกับท่าเทียบเรือ (Piers) และท่าเรือ (Wharves) เพื่อลดความยาวของโครงสร้างทั้ง 2 ชนิดและหลักผูกเรือกลางน้ำนี้จะใช้เป็นส่วนสำคัญในการขนถ่ายสินค้าถุง (Bulk cargo) โดยจะใช้เป็นที่ผูก เรือกลางลำน้และท่าการขนถ่ายสินค้าจากเรือลาหนึ่งไปยังอีกลาหนึ่งเลย หลักผูกเรือกลางน้ำมี 2 ชนิดคือหลักรับแรงกระแทก (Breasting dolphins) และหลักผูกเรือ (Mooring dolphins)

1. หลักรับแรงกระแทก (Breasting dolphins) มักจะมีขนาดใหญ่มากกว่าหลักผูกเรือ (Mooring dolphins) ออกแบบไว้เพื่อรับแรงกระแทกของเรือขณะเข้าจอดและรับแรงที่เกิดจากลมพัดคั่นตัวเรือ ดังนั้นหลักรับแรงกระแทกจึงต้องมียางรับแรงกระแทก (Fenders) เพื่อลดแรงกระแทกจากเรือให้น้อยลงและป้องกันไม่ให้หลักผูกเรือและตัวเรือได้รับความเสียหายขณะเข้าจอดด้วย

2. หลักผูกเรือ (Mooring dolphins) จะใช้สำหรับผูก เชือกจากเรือเพื่อไม่ให้เรือไหลไปตามกระแสน้ำหรือเคลื่อนที่ไปตามแรงลมที่พัดปะทะตัวเรือ หลักผูกเรือนี้จะอยู่บริเวณหัวและท้ายเรือแนวของหลักผูกเรือจะอยู่หลังแนวของหลักรับแรงกระแทก เนื่องจากไม่ได้ออกแบบไว้เพื่อรับแรงกระแทกจากเรือ หลักผูกเรือจะอยู่ในแนว 45 องศา ของหัวเรือและท้ายเรือ เชือกที่ใช้ผูกจะยาวไม่น้อยกว่า 200 ฟุตและยาวไม่เกิน 400 ฟุต การใช้หลักผูกเรือเพียง 2 หลักต่อเรือ 1 ลา คือใช้ผูกหัวและท้ายเรือจะเป็นแบบที่มีประสิทธิภาพที่สุด แต่ถ้าวเรือมีขนาดใหญ่มากจะต้องเพิ่มหลักผูกเรือเพิ่มขึ้นอีกโดยจะเพิ่มบริเวณกลางลาเรือ หลักผูกเรือจะมีทุ๊ก (Bollards) และก๊ว้น (Capstans) เพื่อใช้สำหรับผูกเชือกลากเรือ แรงดึงสูงสุดสำหรับเชือกหนึ่งเส้นจะไม่เกิน 50 ตัน

หลักผูกเรือกลางน้ำสามารถที่จะนำมาทำเป็นท่าจอดเรือ (Fixed - mooring berth) ได้ โดยจะใช้หลักผูกเรือมาประกอปกันเป็นโครงสร้างใช้ผูก

เรือและมีฐาน (Platform) ยึดระหว่างหลักผูกเรือไว้เป็นที่วางสินค้าและ เครื่องมือที่ใช้ในการยกขน

## 2.2 การออกแบบหลักผูกเรือกลางน้ำ

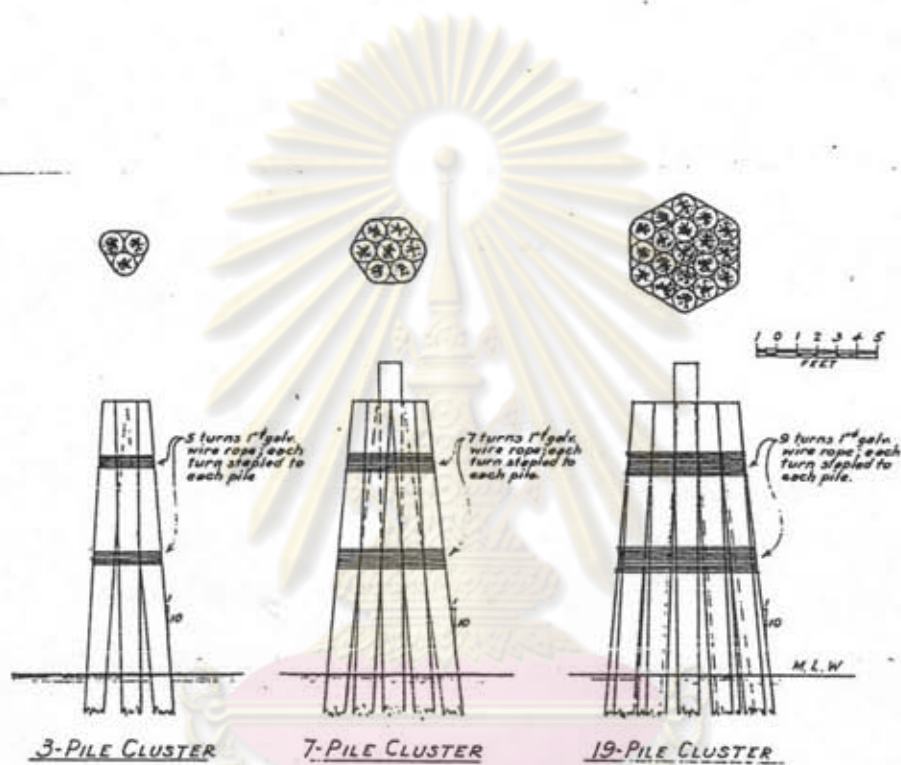
หลักการสำคัญของ การออกแบบหลักผูกเรือกลางน้ำ คือ ออกแบบให้สามารถรับแรงในแนวราบที่เกิดจากการกระแทกของเรือ ลมที่พัดปะทะตัวเรือและ กระแสน้ำ ซึ่งจะเกิดขึ้นขณะ เรือเข้าจอดและระหว่างที่ผูกเรืออยู่กับหลักผูกเรือ หลักผูกเรือกลางน้ำออกแบบได้ 2 อย่างคือ

- Flexible Type

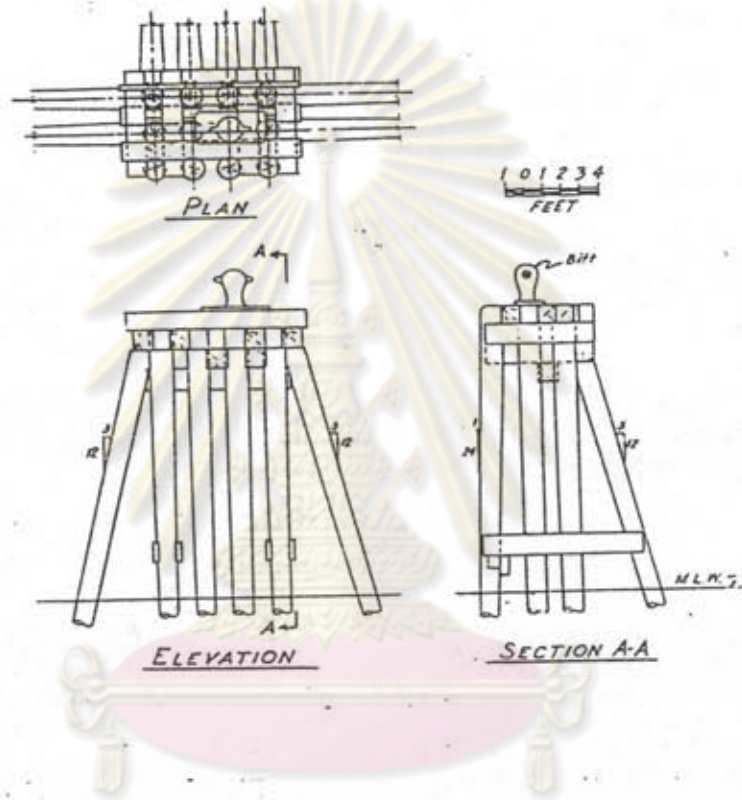
- Rigid Type

Flexible type ใช้สำหรับผูกเรือขนาดไม่เกิน 5,000 DWT (Dead-Weight tonnage) เสาเข็มไม้ที่มีคร่อมกันเป็นกลุ่มเป็นแบบที่ใช้กันมาก่อนแรก ๆ ภายหลังจะคอกเป็นกลุ่ม ๆ มีจำนวน 3, 7, 19 และอื่น ๆ แล้วมีคร่อมกันด้วย Galvanized cable ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้สามารถที่จะทำเป็นโครง (Framing) ดังรูปที่ 2.2 ต่อมาได้มีการใช้เหล็กเข้ามาแทนไม้โดยใช้เสาเข็มทรงกระบอกขนาดใหญ่ (Large steel cylinders) และกลุ่มของ Steel-pipe piles มาใช้เป็น Flexible dolphins ดังรูปที่ 2.3, 2.4, 2.5 การออกแบบหลักผูกเรือแบบนี้จะต้องพิจารณาสภาพของดินด้วย เนื่องจากถ้าดินอ่อนมากจะไม่เหมาะสมเพราะเมื่อเรือเข้าจอดกระแทกกับหลักรับแรงกระแทกแล้ว หลักจะไม่สามารถคืนตัว (Rebound) กลับมายังตำแหน่งเดิมได้และความสามารถในการรับพลังงาน (Energy absorbing ability) การคด (Deflection) จะลดลง

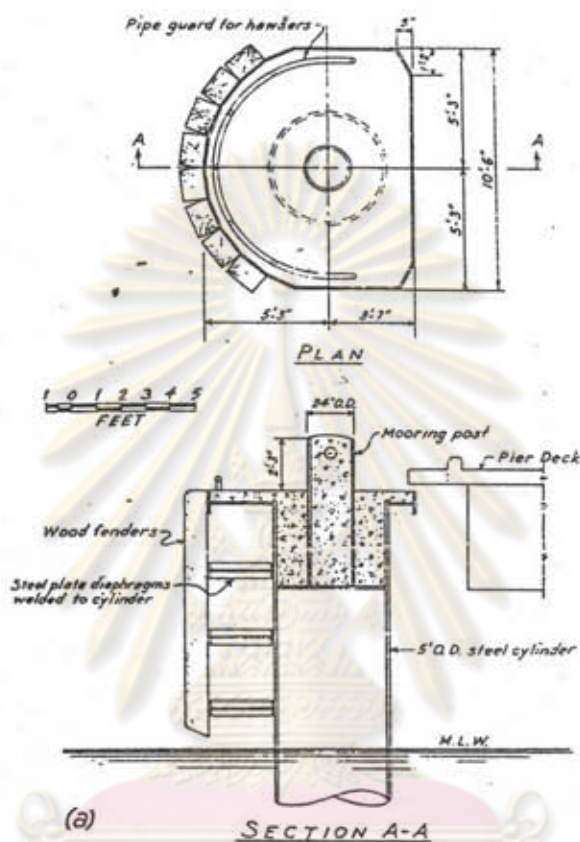
Rigid Type ใช้สำหรับผูกเรือขนาด 9,000 ถึง 17,000 DWT สามารถใช้วัสดุหลายชนิดในการก่อสร้าง เช่น ไม้ เหล็ก คอนกรีต Rigid Type ที่ใช้ไม้จะเป็นดังรูป 2.6 ฐานที่เป็นไม้จะมีน้ำหนักเบา ดังนั้นความสามารถในการรับแรงทางราบจะขึ้นกับความสามารถในการรับแรงดึงของเสาเข็มไม้ ถ้าจะให้รับแรงมากขึ้นต้องขยายความกว้างของกลุ่มเสาเข็มให้มากขึ้น ตามธรรมชาติที่เป็นไม้นี้จะใช้เมื่อมีแรงในทางราบ 40-50 ตัน ถ้าแรงมากกว่านี้จะหาให้มีขนาดใหญ่มากและเหอะทะเกินไป



ศูนย์วิทยพัทยากร  
รูปที่ 2.1 Typical wood-pile dolphins  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

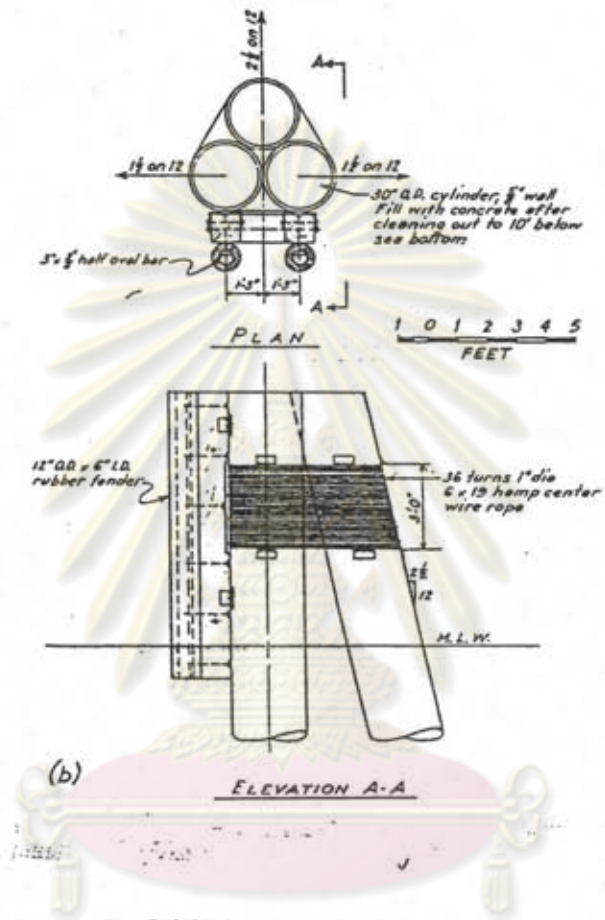


รูปที่ 2.2 Typical wood-pile dolphin with timber framing  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

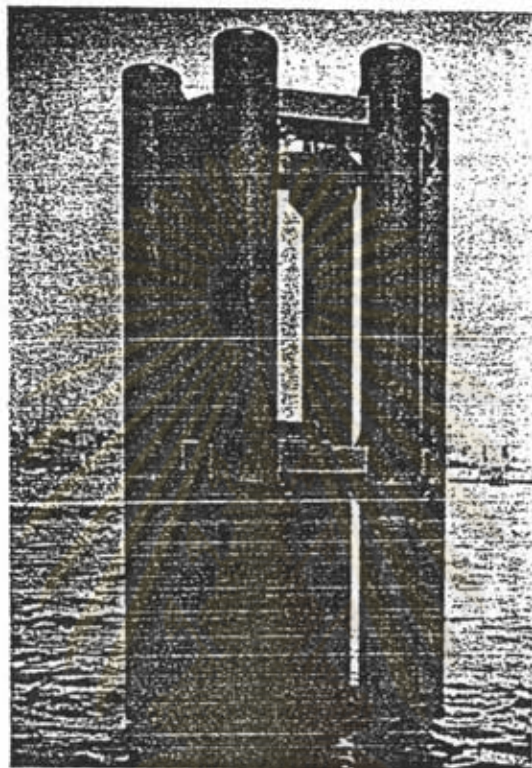


รูปที่ 2.3 Flexible steel-cylinder dolphin

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

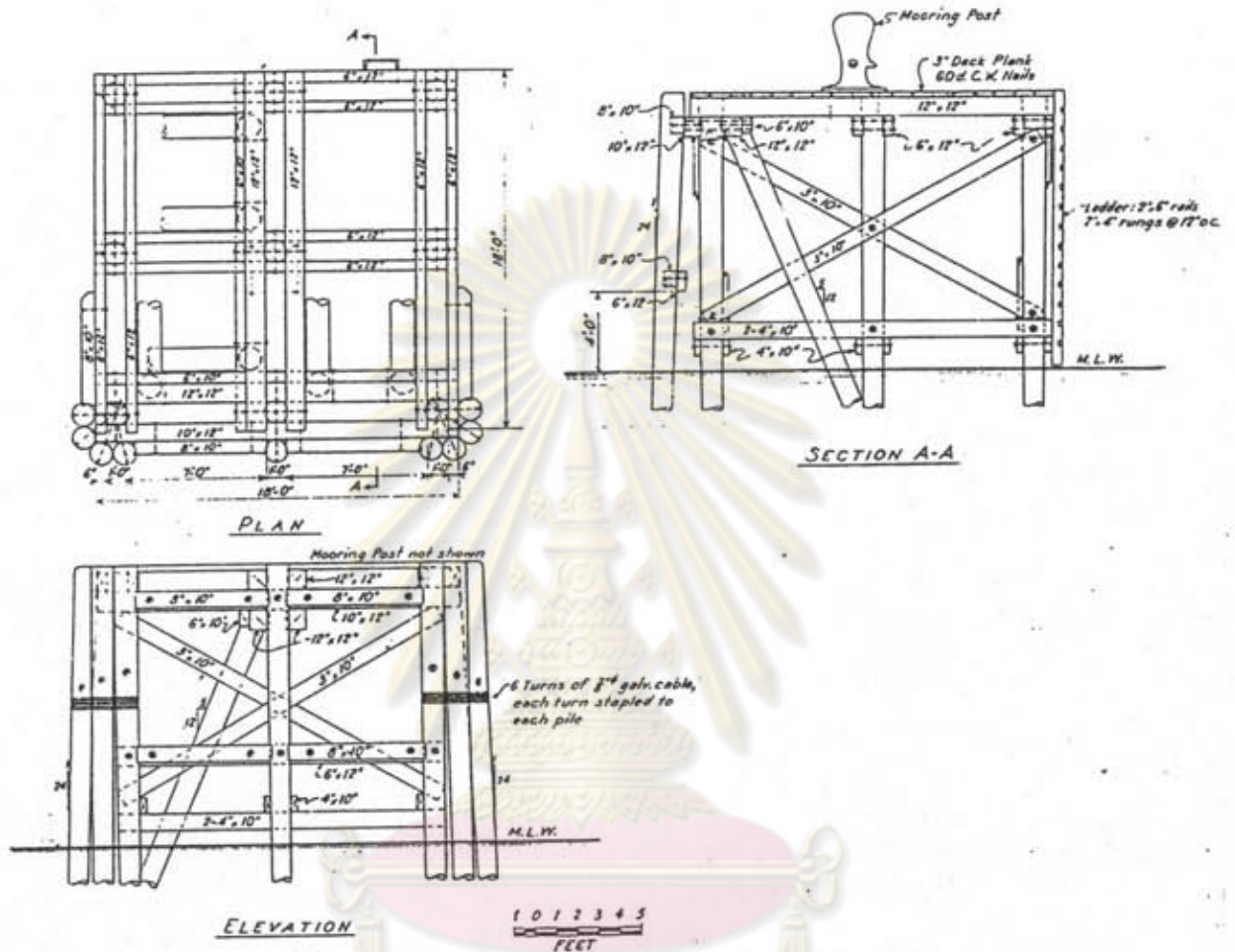


รูปที่ 2.4 Flexible dolphin with steel-pipe piles  
 ศูนย์วิทยพัชระ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 Flexible dolphin with steel-pipe and steel framing

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 Rigid dolphin with wood piles and timber framing  
 ศูนย์วิทยุโทรคมนาคม  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ถ้าสภาพดินที่จะใช้แบบ Sheet-pile cells เพราะสามารถออกแบบให้ต้านทานต่อแรงกระทำจากเรือขนาดใหญ่ได้ก็และเหมาะสมกับเป็นหลักกลับเรือ (Turning dolphins) เนื่องจากรูปร่างเป็นวงกลม ดังรูปที่ 2.7 จะเหมาะสมกับเรือขนาด 35,000 DWT หลักผูกเรือแบบนี้จะปิดหัวด้วยแผ่นคอนกรีต (Heavy concrete slab) ใตยมีหูกฝังอยู่เมื่อเรือเข้าจอดจะใช้ก๊ว้นเพื่อลากเชือกจากเรือเพื่อเข้าผูกกับหูกได้

เมื่อเรือมีขนาดใหญ่ขึ้น การออกแบบหลักผูกเรือกลางน้ำจะใช้เป็นชานคอนกรีต (Heavy concrete platform slabs) รองรับคยเสาเข็มเหล็กซึ่งคอกในแนวตั้งและแนวเอียงดังรูปที่ 2.8 หลักผูกเรือแบบนี้จะใช้จอกผูกเรือขนาดใหญ่มากสามารถรับแรงทางราบได้ถึง 450 ตัน

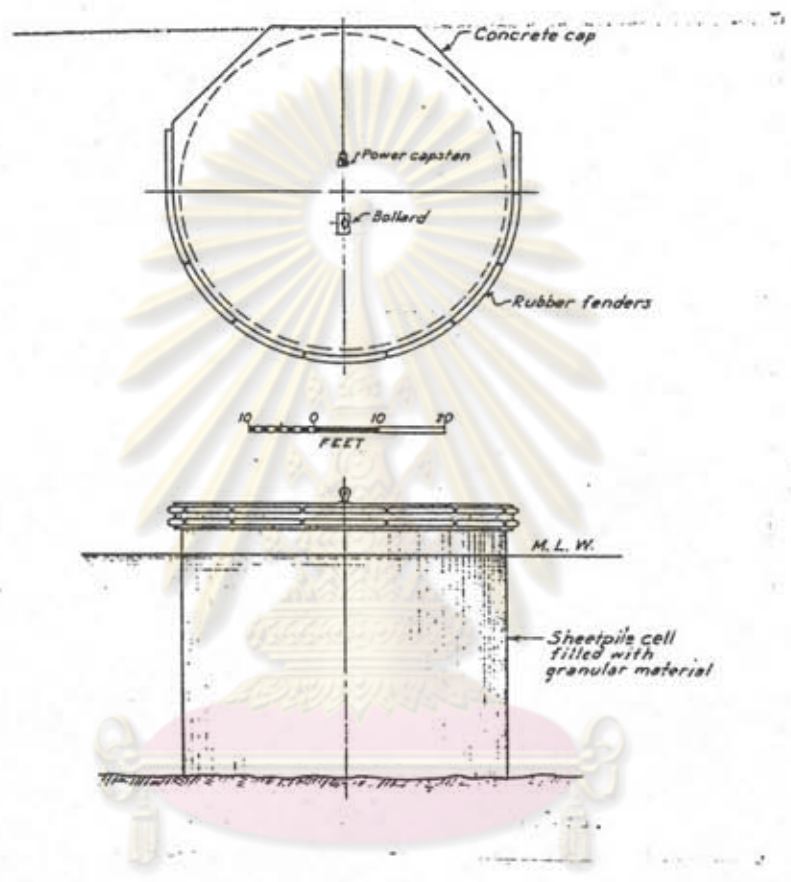
หลักผูกเรือที่บางหัวเสื่อใช้ผูกเรือขนาด 3,000 GRT ถึง 12,000 GRT ดังนั้นจึงเป็นแบบ Flexible Type ซึ่งงานการออกแบบประกอบด้วยค้วแปรหลายประเภท ซึ่งพอจะแบ่งออกได้เป็นกลุ่มดังนี้

1. ค้วแปรที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการกิจการเดินเรือ

- การเดินเรือในแม่น้ำเจ้าพระยา
- ขนาดและจำนวนของ เรือที่จะจอด
- วิธีการเข้าจอด
- วิธีการผูก เรือ
- วิธีการออก เรือจากที่จอด
- สถานที่จอดเรือลาเสียงขนาดเล็ก
- วิธีการดำเนินการจัดไฟเดินเรือ

2. ค้วแปรที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม

- อุณหภูมิของอากาศ
- ปริมาณความชื้น
- ปริมาณน้ำฝน
- แรงลมและพายุ
- ระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุด
- ความเร็วของกระแส น้ำ
- ความสูงของคลื่น
- ความลึกของน้ำ
- คุณภาพของน้ำ
- การกักกร่อน
- สภาพพิชที่ขึ้นในน้ำ
- สภาพของดิน



รูปที่ 2.7 Cellular sheet-pile dolphin

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบทางโครงสร้าง
  - แรงที่กระทำกับโครงสร้าง
  - ชนิดของวัสดุที่ใช้
4. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง
5. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษา

สำหรับวิธีการออกแบบหลักผูก เรือกลางน้ำนั้นได้มีหน่วยงานหรือองค์การที่เกี่ยวข้องได้ทำการศึกษาและ เสนอแนะวิธีออกแบบไว้ ซึ่งวิธีการออกแบบนั้น อาจจะได้มาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีหรือจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและผลที่ได้จากการทดสอบตามสภาพการใช้งานจริงร่วมกันซึ่งวิธีการออกแบบหลักผูก เรือกลางน้ำนั้นได้แก่ วิธีการของ *Empfehlungen des Arbeitsausschusses 'Ufereinpassungen' (EAU)*, *The Overseas Coastal Area development Institute of Japan (OCDI)*, *British Standards Institution (BSI)* โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดวิธีการออกแบบข้อกำหนด และขั้นตอนของวิธีการออกแบบต่าง ๆ ดังนี้คือ

#### 2.2.1 Empfehlungen des Arbeitsausschusses 'Ufereinpassungen' (EAU) Method(3)

หลักการและวิธีการออกแบบ

ในการคำนวณเพื่อออกแบบหลักผูก เรือแบบยัดหุ้มนั้นจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของดินเดิม แรงกระแทกสูงสุดที่ยอมให้ได้และการค้ำของหลักผูก เรือ ซึ่งจากการคำนวณจะได้ระยะที่ต้องฝังลงในดิน (Embedment) และหน้าตัด (Cross-section) ของหลักผูก เรือที่สามารถรับแรงกระแทกจากเรือได้ นอกจากแรงกระแทกแล้วยังมีแรงดึงของ เชือกจาก เรือขณะที่ยกด้วย การออกแบบที่ดีจะต้องประหยัคที่สุดโดยที่ยังคงทำงานได้ตามความต้องการ

ขั้นตอนในการออกแบบ

- ขนาด (Dimensions) และเครื่องมือ (Equipment) ของเรือที่จะเข้าจอดจะต้องรู้ถึงข้อมูลของ เรือขนาดใหญ่ที่สุดและเล็กที่สุดที่จะเข้าออก เช่น ความยาว ความกว้างกินน้ำลึกน้ำหนักบรรทุก เป็นต้น เพื่อใช้พิจารณาการออกแบบ ข้อมูลมาตรฐานของเรือขนาดต่าง ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก
- ออกแบบระดับความลึกของท้องน้ำ (Design River Bed Level) จะต้องพิจารณาถึงความลึกที่มากที่สุดในอนาคตที่จะเกิดขึ้น ต้องพิจารณา ร่วมกับลักษณะของดินเดิมและวิธีคำนวณที่ใช้ในการออกแบบ
- ออกแบบความเร็วลม จะต้องรู้ถึงความเร็วและทิศทางของลมที่พัดผ่านบริเวณหลักผูก เรือ เพื่อที่จะนำเอาข้อมูลลมที่มีมากำหนดความเร็วลมที่ปะทะตัวเรือเพื่อใช้ในการออกแบบ
- ออกแบบความเร็วกระแสน้ำ จะต้องรู้ถึงความเร็วสูงสุดของ

กระแสน้ำขณะ เกิดน้ำขึ้นน้ำลง

- ออกแบบความเร็วของ เรือที่แล่นผ่าน (Hydrodynamic Influence) ของ เรือขนาดใหญ่ที่แล่นผ่านหลักผูก เรือถ้าความเร็ว 6 หรือ 10 น๊อตที่ระยะห่าง 60-150 เมตร จะต้องนำมาพิจารณาหาแรงที่เพิ่มขึ้นที่กระทำกับหลักผูก เรือด้วย

- ออกแบบความเร็วเรือที่เข้าจอด เมื่อพิจารณาถึงความเสียหายที่เกิดกับหลักผูก เรือ เมื่อเรือเข้าจอดโดยใช้ความเร็วสูงทั้งความเสียหายที่เกิดกับหลักผูก เรือเองหรือค่าใช้จ่ายและ เวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมจะเป็นการศึกษาที่จะกำหนดความเร็วของ เรือที่จอดเข้าที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย ความเร็วที่กำหนดไว้คือ 0.25 เมตร/วินาที ในทิศทางตั้งฉากกับแนวหลักรับแรง กระแทก

- ตำแหน่งที่เรือเข้ากระแทก (Ship Position during Berthing Impact) โดยทั่วไปในการจอดเรือ เรือจะเข้าจอดโดยหามุม 0 องศา ถึง 15 องศา กับแนวหลักรับแรงกระแทกและ Excentrecity ของ Center of Gravity ของเรือขณะเข้าจอดกับ Center ของหลักจะต้องไม่มากกว่า 15 เมตร

- Hydrodynamic Effects ขณะเข้าจอด  
หาได้จากสูตร 
$$C_m = 1 + \frac{2D}{B} \quad (4) \quad (2.1)$$

โดยที่  $D =$  ระยะกินน้ำลึกของเรือ

$B =$  ความกว้างของเรือ

- Elastic Energy Absorption ของลำเรือขณะเข้าจอด จะพิจารณาจากชนิดของเรือและลักษณะของยางกันกระแทก (Fender) จะกำหนดไว้ว่าลำตัวเรือจะ Absorbed หลังงานได้ 5%ของพลังงานที่เกิดขึ้นขณะเรือเข้ากระแทก ดังนั้นจะมีพลังงาน 95% ที่กระทำกับหลักรับแรงกระแทก

- ผังบริเวณหลักผูกเรือ (Layout of Dolphin Facilities)

- ออกแบบ Energy Absorption Capacity เมื่อเรือเข้าจอด จะมีการเคลื่อนที่ในแนวแกนและมีการหมุนรอบ center of gravity ของตัวเรือเอง ในตอนแรกที่เจ้าจอดมีหลักรับแรงกระแทกเพียงหลัก เดียวที่ผูกชน ดังรูป 2.8 ความเร็วที่เข้าชนคือ  $V_e$  ซึ่งขนาดและทิศทางสามารถเขียนในรูป Vector ได้ 2 องค์ประกอบคือ  $V$  และ  $\omega.r$  ซึ่งหลักรับแรงกระแทกและยางรับแรง กระแทกจะ Absorp Energy จน  $V_r = 0$  Absorption Capacity หาได้จากสูตร

$$A = \frac{G \cdot C_m \cdot C_s}{2 \cdot g \cdot (k^2 + r^2)} [V^2 (k^2 + r^2 \cos^2 \gamma) + 2 \cdot V \cdot \omega \cdot r \cdot k^2 \cdot \sin \gamma + \omega^2 \cdot k^2 \cdot r^2] \quad (2.2)$$

- โดยที่
- A = Energy absorption capacity (KNm)
  - G = Water displacement of the berthing ship (kn)
  - g = Acceleration = 9.81 m/s<sup>2</sup>
  - k = Radius of gyration of the ship (m)  
สำหรับเรือขนาดคานู 0.2.1
  - l = Length of ship between perpendiculars (m)
  - r = Distance of ship's center of gravity from point of contact with fender (m)
  - V = Translatory velocity of motion of the ship's center of gravity at time of first contact with the fender (m/s)
  - $\omega$  = Turning speed of the ship at time of first contact with the fender [angle in radian measure per sec = 1/s]
  - $\gamma$  = Angle between the velocity vector and the distance (degree)
  - V<sub>2</sub> = Resulting impact velocity of the ship on the fender (m/s)
  - C<sub>m</sub> = Mass factor according to the following comment
  - C<sub>s</sub> = Stiffness factor according to the following comment

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 แสดงการเข้าจอดของเรือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ออกแบบแรงค้ำ (Design Mooring loads) การหาแรงค้ำสูงสุดต้องพิจารณาในขณะที่มีกรณีข้างล่างนี้พร้อมกัน
    - + แรงค้ำของเรือขนาดใหญ่สุด 2 ลำที่จอดติดกันในขณะที่บรรทุกเต็ม
    - + ความเร็วของกระแสน้ำสูงสุด
    - + ความเร็วของลมสูงสุด
    - + มีเรือลาอื่นแล่นผ่านด้วยความเร็ว 10 น๊อต
  - Horizontal deflections ของหลักผูกเรือภายใต้แรงสูงสุด
- Horizontal deflection ของ elastic dolphin ขณะเรือกระแทกหาได้จากสูตร

$$y = \frac{2.E}{P} \quad (2.3)$$

โดยที่ E = Energy absorption capacity

P = The force of impact

ถ้าข้างกันกระแทกมีคุณภาพสูง Maximum deflection ที่จุดกระแทกควรอยู่ระหว่าง 0.75 - 1.50 m

- การหาระยะฝังและหน้าตัดของหลักผูกเรือ ได้กำหนดค่าต่าง ๆ ที่ไว้ดังนี้

ความหนาแน่น (Density) ค่า Submerged density  $\gamma'$  ของดินจะกำหนดค่าให้เป็น effective density Angle of Wall Friction ค่ามุมเสียดทาน (Angle of wall friction) ของ passive earth pressure จะเป็น  $\delta_p = -2/3 \phi'$  ในกรณีมี  $\Sigma V = 0$  เป็นจริง passive earth pressure จะกระทำในทิศทางราบ

แรงในแนวค้ำจะกระทำจากบนล่าง แรงที่เกี่ยวข้องคือ น้ำหนักของหลักผูกเรือ น้ำหนักของดินในหลักผูกเรือ แรงเสียดทานของผิวหลักผูกเรือกับดิน (Ultimate vertical skin friction) และแรงประกอบในแนวค้ำของ Equivalent force C ซึ่งจะหาได้จาก การคำนวณระยะฝัง (Embedment)

Equivalent Force C รูป 2.9

จากรูป Equivalent force C สามารถหาได้จากเงื่อนไข  $\Sigma H = 0$  โดยสูตร

$$C = \gamma' K_p \cos \delta_p \cdot D_o^2 \cdot (3b + D_o) / 6 - p \quad (2.4)$$

โดยจะไม่คิดผลจาก active earth pressure

ทิศทางที่แรงกระทำจะเป็น  $\delta_p = + 2/3 \phi'$

ระยะฝัง (Embedment)

ระยะฝังที่เพิ่มขึ้น (Additional embedment  $\Delta D$ ) ไว้เพื่อรับ

equivalent force C สามารถหาได้จากสูตร

$$D = \frac{C}{\gamma K_p \cos \phi} D_o (2b + D_o) \quad (2.5)$$

ออกแบบขนาดหลักผูกเรือ (Structural Design)

เลือก grade ของเหล็ก the allowable stress และพื้นที่หน้าตัดที่สามารถรับ Moment ได้

2.2.2 วิธีการออกแบบของ THE OVERSEAS COASTAL AREA DEVELOPMENT INSTITUTE OF JAPAN (5)

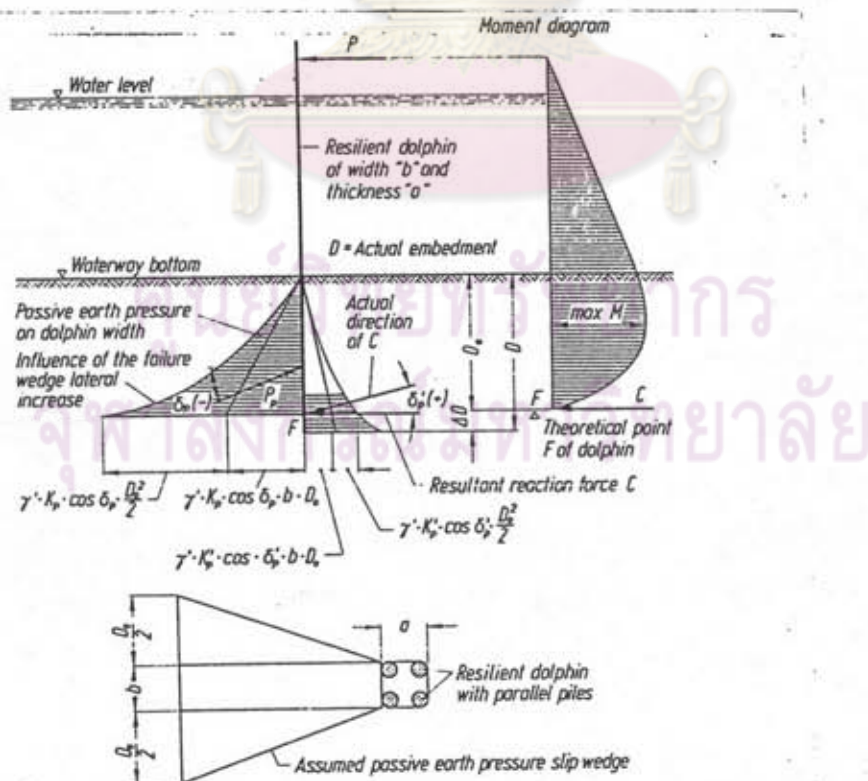


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



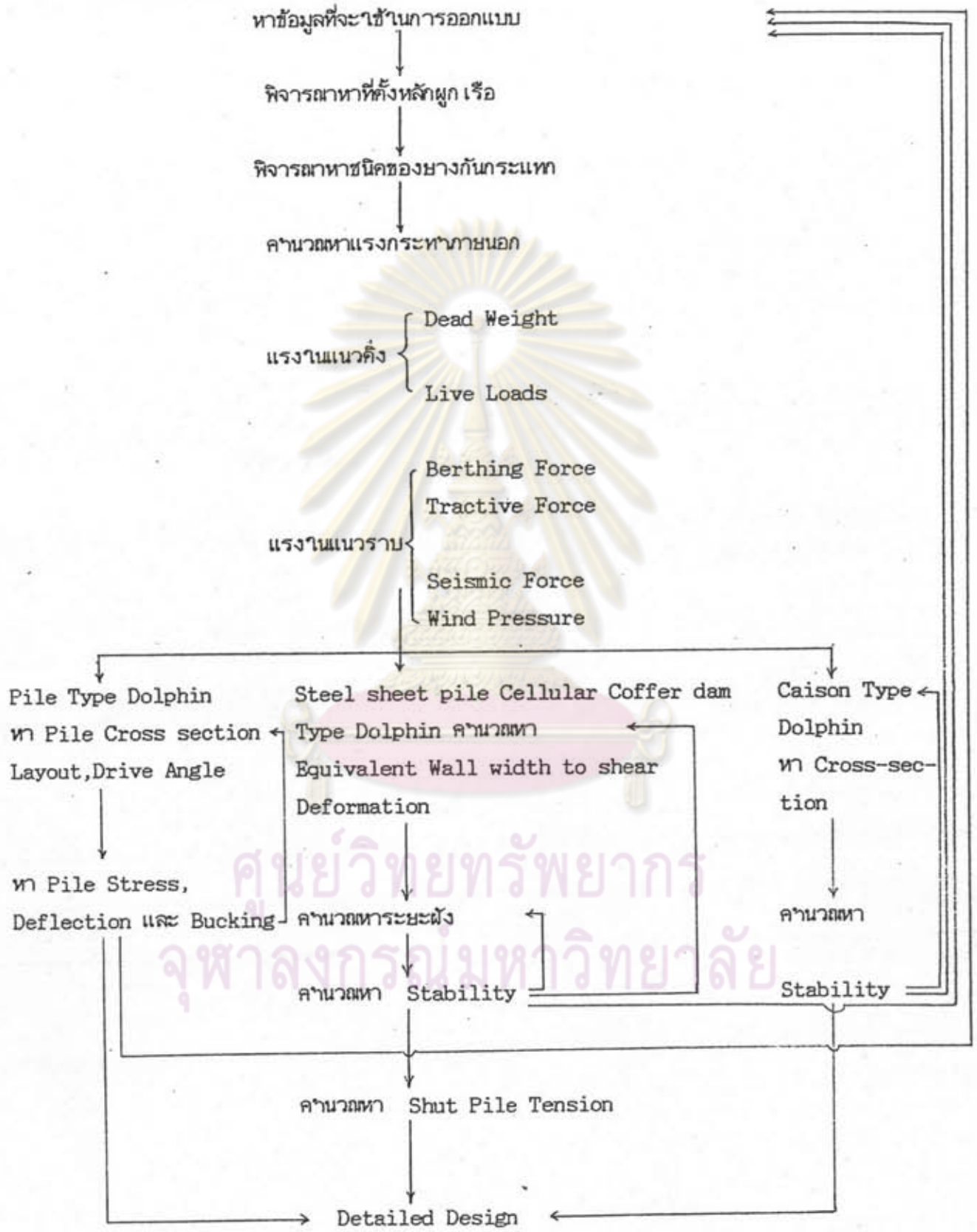
Condition	Approach	Berthing Velocity			
		Transverse to Berth (m/s)			
		up to 1000 GRT	up to 5000 GRT	up to 10000 GRT	Larger ships
Strong wind and heavy sea	Difficult	0.75	0.55	0.40	0.30
Strong wind and heavy sea	Favorable	0.60	0.45	0.30	0.20
Moderate wind and heavy sea	Moderate	0.45	0.35	0.20	0.15
Protected	Difficult	0.25	0.20	0.15	0.10
Protected	Favorable	0.20	0.15	0.10	0.10

ตารางที่ 2.1 แสดงความเร็วในการเข้าจอด



รูปที่ 2.9 แสดง Passive earth pressure ที่ใช้ในการคำนวณ

ขั้นตอนของการออกแบบวิธีของ OCDI จะเป็นไปตามผังข้างล่าง



## Layout

Layout ของหลักผูกเรือหาได้จากพิจารณาขนาดของเรือที่จะจอด ความลึกของน้ำ ทิศทางลม ทิศทางคลื่น และกระแสน้ำ รวมทั้งต้องไม่ทำให้เกิดการกีดขวางการสัญจรของเรือบริเวณนั้น

แรงภายนอกที่กระทำกับหลักผูกเรือ

### 2.2.2.1. Berthing Force

#### 2.2.2.1.1 Berthing Velocity

การออกแบบความเร็วที่ใช้ในการจอดเรือต้องพิจารณาจากขนาดของเรือ (จากตารางที่ 2.1) เงื่อนไขของแรงกระทำ ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะโครงสร้างของท่าเทียบเรือ ลักษณะภูมิอากาศและสภาพทางชลศาสตร์ ความสามารถและขนาดของเรือโยง (tugboat) รวมทั้งศึกษาข้อมูลเดิมเกี่ยวกับการวัดความเร็วของเรือขณะเข้าจอด

ตามธรรมเนียมการเข้าจอดเทียบท่า จะต้องหยุดเรือขนานกับท่า ระยะห่างประมาณ 10-20 เมตร แล้วใช้เรือโยง (Tugboat) คันเข้าจอดเทียบท่าอย่างช้า ๆ แต่ถ้ามีลมพัดเข้าหาท่าเทียบเรือจะใช้เรือโยง (Tugboat) คึงเรือแทนการคันเพื่อใช้เรือเข้าเทียบท่าอย่างช้า ๆ โดยความเร็วในการเข้าเทียบท่าประมาณ 10-15 ซม.ต่อวินาที

ในกรณีที่เป็นเรือชนิดพิเศษ เช่น เรือคอนเทนเนอร์ (Container ship) เรือน้ำมันขนาดใหญ่ วิธีที่ใช้เทียบท่าจะต่างออกไปแล้วแต่ชนิดของเรือซึ่งความเร็วในการเทียบท่าจะต้องใช้การวัด

#### 2.2.2.1.2 Effective Berthing Energy of ship

##### 2.2.2.1.2.1 เมื่อท่าเทียบเรือมียางกันกระแทก

(Fender) เพียงพอ the effective berthing energy จะหาได้จากสูตร

$$E = \frac{wv^2}{4g} \quad (2.6)$$

เมื่อ

E = Effective berthing energy ของเรือ (tf.m)

g = Acceleration of gravity (m/s<sup>2</sup>)

w = Virtual weight of ship (tf)

v = Berthing velocity of ship (m/s)

ตารางที่ 2.2 แผนภาพรายละเอียด

(units in m)

Type	Tonnage	Overall length	Molded breadth	Molded depth	Full load draft	Type	Tonnage	Overall length	Molded breadth	Molded depth	Full load draft
Passenger ship	Gross tonnage						Dead weight tonnage				
	500	51	10.2	4.0	2.9	Oil tanker	2,000	73	11.4	5.6	5.1
	1,000	68	11.9	5.0	3.6		3,000	85	12.8	6.4	5.9
	2,000	92	13.9	6.2	4.5		5,000	102	14.7	7.6	6.9
	3,000	109	15.3	7.1	5.1		10,000	139	19.0	9.9	8.1
	4,000	123	16.3	7.0	5.6		15,000	157	21.7	11.3	9.0
	5,000	135	17.2	8.4	6.0		20,000	171	23.8	12.4	9.8
	6,000	138	17.0	10.6	7.4		30,000	194	27.2	14.1	10.9
	7,000	144	18.6	11.1	7.7		40,000	211	29.9	15.4	11.7
	8,000	150	19.3	11.6	7.8		50,000	226	32.1	16.5	12.5
	9,000	155	20.0	12.0	8.0		70,000	250	35.9	18.4	13.6
	10,000	160	20.6	12.3	8.2		100,000	270	39.0	19.2	14.6
	15,000	181	23.1	13.9	8.8		150,000	291	44.2	23.0	17.9
	20,000	197	25.1	15.1	9.2		200,000	325	47.2	24.5	19.0
	30,000	223	28.2	17.0	10.0		250,000	348	51.8	25.6	20.0
General cargo ship	Dead weight tonnage					Ore carrier	Dead weight tonnage				
	700	51	8.5	4.6	3.0		10,000	140	10.7	10.5	8.1
	1,000	58	9.5	5.1	4.2		15,000	157	21.5	11.9	9.0
	2,000	74	11.7	6.3	5.1		20,000	170	23.7	12.9	9.6
	3,000	86	13.2	7.2	5.9		30,000	192	27.3	14.5	10.6
	4,000	95	14.4	8.4	6.4		40,000	208	27.2	15.0	10.6
	5,000	103	15.4	9.5	6.8		50,000	222	32.6	16.8	11.9
	6,000	124	16.9	10.0	7.2		70,000	244	37.8	18.7	13.3
	7,000	129	17.6	10.4	7.5		90,000	250	38.5	19.7	14.5
	8,000	135	18.3	10.8	7.8		100,000	275	42.0	23.0	16.1
	9,000	139	18.9	10.8	8.0		150,000	313	44.5	24.7	18.0
	10,000	144	19.4	11.2	8.2						
	15,000	162	21.7	12.7	9.1		Gross tonnage				
	20,000	177	23.4	13.8	10.0		1,000	75	13.4	5.0	4.0
	30,000	199	26.1	15.7	11.0		2,000	90	16.2	9.8	4.3
40,000	217	28.3	17.2	11.9		3,000	105	17.7	10.5	5.0	
50,000	232	30.0	18.4	12.7		4,000	122	20.0	11.2	5.3	
Oil tanker	Dead weight tonnage					Ferryboat	Dead weight tonnage				
	700	50	8.5	4.0	3.7		8,000	155	21.8	13.2	6.1
	1,000	57	9.4	4.5	4.2		10,000	168	24.0	14.7	6.5

2.2.2.1.2.2 เมื่อท่าเทียบเรือมีขางกันกระแทก (Fender) เป็นขวง ๆ The effective berthing energy หาได้จาก การพิจารณาวิธีการเข้าจอดและการจัดเรียงขางกันกระแทก วิชาใช้สูตร

$$E = \frac{WV^2}{2g} \frac{l}{1 + \frac{l}{r}} \quad (2.7)$$

เมื่อ

E = Effective berthing energy (tf.m)

g = Acceleration of gravity (m/s<sup>2</sup>)

W = Virtual weight of ship (tf)

V = Berthing velocity (m/s)

l = ความยาวจากจุดที่เรือสัมผัสท่าถึง Center of gravity ของเรือโดยวัดขนานกับท่าเทียบเรือ (m) ดังรูป 2.10

r = Radius of gyration about the vertical axis through the Center of gravity of the ship in a horizontal plane (m)

2.2.2.1.3 น้ำหนักของเรือ (Virtual weight) จะเป็น ผลรวมของ Displacement tonnage ของเรือซึ่งจะหาได้จากตาราง 2.2 และ The added weight ซึ่งจะหาได้จากสูตร

$$W_a = \frac{\pi}{4} D^2 L W_o \quad (2.8)$$

เมื่อ

W<sub>a</sub> = Added weight (tf)

D = เรือกินน้ำลึก (m)

L = ความยาวเรือ (m)

W<sub>o</sub> = ความหนาแน่นของน้ำทะเล (tf / m<sup>3</sup>)

2.2.2.2. ความดันลมที่กระทาคือเรือ (Wind Pressure on Ship)

ความดันลม จะหาได้จากสูตร

$$R = 1/2 \rho C U^2 (A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta) \quad (2.9)$$

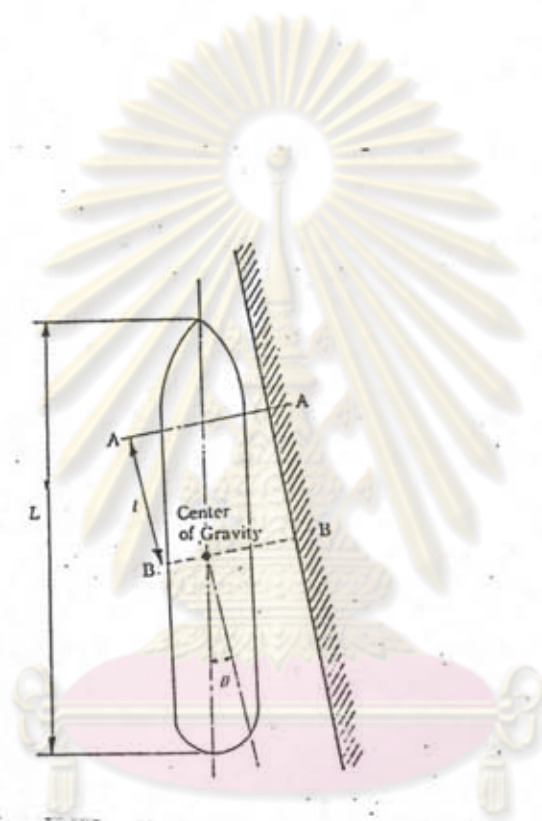
เมื่อ R = แรงเนื่องจากความดันลม

$\rho$  = Air density,  $\rho = 0.123$  (kgf)(s<sup>2</sup> / m<sup>4</sup>)

U = ความเร็วลม (m/s)

A = Area of projection of the front of ship above water surface (m<sup>2</sup>)

B = Area of projection of the side of ship above water surface (m<sup>2</sup>)



รูปที่ 2.10 แสดงการเข้าจอของเรือ

ศูนย์วิทยพัชร์พยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$O$  = Angle of the wind direction to the center line of the hull (degree)

$C$  = Coefficient of wind pressure (6)

จากรูป 2.11

### 2.2.2.3. ความดันน้ำที่กระทำต่อตัวเรือ (Fluid Pressure on Ship)

ความดันน้ำที่กระทำกับเรือสามารถหาได้จากสูตร

2.2.2.3.1 ความดันน้ำที่เกิดจากกระแสที่พัดวนทิศทาง

จากหัวเรือไปท้ายเรือจะหาได้จากสูตร

$$R_f = 0.14 S V^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ

$R_f$  = แรงที่เกิดจากกระแส (kgf)

$S$  = พื้นที่ของเรือที่จมอยู่ในน้ำ ( $m^2$ )

$V$  = ความเร็วของกระแส (m/s)

2.2.2.3.2 แรงที่เกิดจากกระแสที่พัดปะทะทางข้างเรือจะ

หาได้จากสูตร

$$R = 1/2 \rho C V^2 B'$$

เมื่อ

$R$  = แรงที่เกิดเนื่องจากกระแส (kgf)

$\rho$  = Seawater density,  $\rho = 104.5$  (kgf) ( $s^2/m^4$ )

$C$  = Coefficient of fluid pressure (รูปที่ 2.12)

$V$  = ความเร็วของกระแส (m/s)

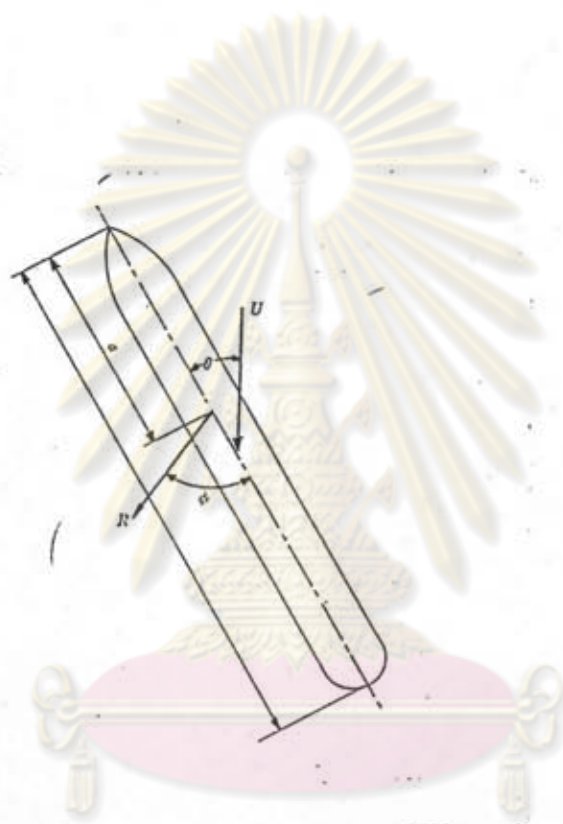
$B'$  = พื้นที่ของเรือที่ต่ำกว่าระดับน้ำ ( $m^2$ )

2.2.2.4. แรงดึงที่เรือกระทำต่อหลักผูกเรือ (Tractive Force Acting on Mooring Post) แรงดึงที่กระทำหลักผูกเรือสามารถหาได้ดังนี้

2.2.2.4.1 แรงดึงที่กระทำกับ Bollard จะแสดงในตารางที่ 2.3 โดยเป็นแรงในแนวราบและ  $1/2$  ของค่าในตารางจะเป็นแรงในแนวตั้ง ซึ่งแรงทั้งสองจะกระทำพร้อมกัน

2.2.2.4.2 แรงดึงที่กระทำกับ Bitt จะแสดงในตารางที่ 2.3 โดยจะกระทำในทุกทิศทาง

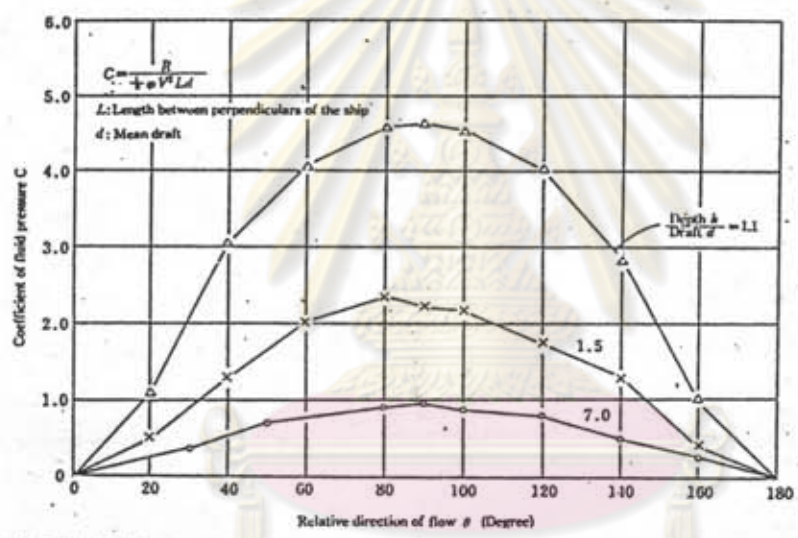
2.2.2.4.3 แรงดึงของเรือที่ไม่ได้แสดงไว้ในตาราง 2.3 คือเรือที่มีระวางชั้นน้ำน้อยกว่า 200 คันและเกิน 100,000 คันและเรือที่จอดบริเวณที่มีสภาพไม่เหมาะสม เช่น ในทะเลที่มีคลื่นลมแรง แรงดึงของเรือจะหาจากการวัดในสภาพนั้น ๆ



รูปที่ 2.11 แสดงการคำนวณแรงค้ำลม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.12 Coefficient of Fluid Pressure C

ศูนย์วิทยพัชการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2.5. แรงงานแนวตั้งเนื่องจาก Dead weight และน้ำหนักจร (Live loads)

การออกแบบหลักผูกเรือจะต้องการ

- Stresses ที่เกิดขึ้นกับหลักผูกเรือ (Stress ที่เกิดจากแรงงานแนวตั้ง แรงงานแนวราบและแรงบิด)
- ระยะฝังของหลักผูกเรือ
- การแอนตัวของหลักผูกเรือ ความยาวและการแอนตัวของหลักผูกเรือจะต้องตรวจสอบดังต่อไปนี้

1. ความสามารถที่ยอมรับได้ในการรับแรงกดในแนวแกนของเสาเข็ม (Axial allowable Bearing Capacity of Piles) ความสามารถที่ยอมรับได้ในการรับแรงกดในแนวแกนของเสาเข็มจะหาได้โดยการหารความสามารถในการรับแรงกดประลัยในแนวแกนของเสาเข็ม (The Axial Ultimate Bearing Capacity of Piles) ด้วย Safety Factor ตามตารางที่ 2.4 วิศวกรจะต้องพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ด้วย

- หน่วยแรงอัดของวัสดุที่ใช้เสาเข็ม (Compressive Stress of Pile Material)
- อิทธิพลของรอยต่อ (Influence of Jointing)
- อัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio)
- Negative Skin friction
- ผลของเสาเข็มกลุ่ม (Group Effect of Piles)
- การทรุดตัวของเสาเข็ม (Settlement of Piles)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tractive Forces of Ships

Gross Tonnage	Tractive Force on Bollard (tf)	Tractive Force on Bitt (tf)
200 ~ 500	15	10
501 ~ 1,000	25	15
1,001 ~ 2,000	35	15
2,001 ~ 3,000	35	25
3,001 ~ 5,000	50	25
5,001 ~ 10,000	70	35 (25)
10,001 ~ 15,000	100	50 (25)
15,001 ~ 20,000	100	50 (35)
20,001 ~ 50,000	150	70 (35)
50,001 ~ 100,000	200	100 (50)

The parenthesized values are for the force on a midship mooring post having no more than 2 spring lines.

ตารางที่ 2.3 แรงดึงของเรือ

Ordinary	2.5 or more
Bearing Pile	1.5 or more
Earthquake	
Friction Pile	2.0 or more

Safety Factor

ตารางที่ 2.4

ความสามารถในการรับแรงกดประลัยในแนวแกนของเสาเข็ม (The Axial Ultimate Bearing Capacity of Piles) ทาให้ดังนี้  
 ทาความสามารถในการรับแรงกดประลัยในแนวแกนของเสาเข็มโดยวิธีทดสอบการรับน้ำหนัก (Estimation of Axial Ultimate Bearing Capacity by Loading Tests)

ความสามารถในการรับแรงกดประลัยในแนวแกนของเสาเข็มสามารถหาได้แน่นอนจากแรงประลัย (Ultimate Load) ซึ่งได้จาก Load-Settlement Curve หรือถ้าได้แรงประลัยไม่แน่นอนอาจใช้ 1.2 เท่าของ Yield load เป็นแรงประลัยได้

ทาความสามารถในการรับแรงกดประลัยในแนวแกนของเสาเข็มโดยวิธีใช้สูตร (Estimation of Axial Ultimate Capacity by Statical Bearing Capacity Formulae)

- ทาความสามารถในการรับแรงกดประลัยของเสาเข็มที่คอกใน Sandy Soil สามารถหาได้จากสูตร

$$R_u = 40 N_{Ap} + \frac{\bar{N} A_s}{5} \quad (7) \quad (2.12)$$

เมื่อ

$R_u$  = ความสามารถในการรับแรงกดประลัย (ตัน)

$A_p$  = พื้นที่หน้าตัดปลายเสาเข็ม (เมตร<sup>2</sup>)

$A_s$  = ผลรวมของพื้นที่ผิวของเสาเข็ม (เมตร<sup>2</sup>)

$N$  = ค่า  $N$  ของชั้นดินที่ปลายเสาเข็ม

$\bar{N}$  = ค่าเฉลี่ยของค่า  $N$  ตลอดระยะฝังของเสาเข็ม

$N$  สามารถหาได้จากสูตร

$$N = \frac{\bar{N}_1 + \bar{N}_2}{2} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$\bar{N}_1$  = ค่าเฉลี่ยค่า  $N$  ในช่วงที่ค่าจากปลายเสาเข็มมา 2B' หรือค่าน้อยที่สุดของค่า  $N$  ที่ปลายเสาเข็ม

$\bar{N}_2$  = ค่าเฉลี่ยของค่า  $N$  ในช่วงที่เหนือปลายเสาเข็มขึ้นมา 10 B

$B$  = เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็ม (เมตร)

เมื่อชั้นดินเป็น Fine sand หรือ Silty sand ซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated with water) และมีค่า  $N = 15$  หรือมากกว่า ค่า  $N$  หาได้จากสูตร

$$N = 15 + 1/2 (N' - 15) \quad (2.14)$$

เมื่อ

$N'$  = ค่า  $N$  ที่วัดได้

- ความสามารถในการรับแรงกดประลัยของ เสาค้ำที่ตอกใน Cohesive Soil หาได้จากสูตร

$$R_u = 8 C_p A_p + \bar{C}_a A_s \quad (2.15)$$

เมื่อ  $C_p$  = Cohesion ที่ปลายเสาค้ำ (ตัน/เมตร<sup>2</sup>)

$\bar{C}_a$  = ค่า Adhesion เฉลี่ยตลอดระยะฝังของเสาค้ำ (ตัน/เมตร<sup>2</sup>)

หาความสามารถในการรับแรงกดประลัยของ เสาค้ำโดยใช้สูตรการตอกเสาค้ำ (Pile Driving Formular) และข้อมูลที่มีอยู่เดิม (Existing Data)

ในกรณีที่มีข้อมูลเชื่อถือได้ค่อนข้างเพียงพอ ความสามารถในการรับแรงกดประลัยของ เสาค้ำอาจหาได้จากข้อมูลเหล่านั้น แต่ไม่ควรใช้ความสามารถในการรับแรงกดประลัยของ เสาค้ำที่หาได้จากสูตรการตอกเสาค้ำมาใช้ในการออกแบบ

- ตรวจสอบหน่วยแรงอัดของวัสดุที่ใช้ทำเสาค้ำ ความสามารถที่ยอมให้ในการรับแรงกดในแนวของ เสาค้ำต้องไม่เกินค่าที่ได้จากหน่วยแรงกดที่ยอมให้ของเสาค้ำ (The allowable compressive stress of pile material) คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดประลัยผลของเสาค้ำ (The effective cross section area of the pile)

- ลดความสามารถในการรับแรงกดลง เมื่อมีการต่อเสาค้ำเมื่อมีการต่อเสาค้ำแต่ละรอยต่อจะต้องลดความสามารถที่ยอมให้ในการรับแรงกดในแนวแกนของเสาค้ำลง 20% นอกจากความสามารถในการรับแรงกดหาได้จาก การทดลองบรรทุกน้ำหนัก (Loading tests) แต่ถ้ารอยต่อได้ทำการต่ออย่างดี จากโรงงานหรือมีการควบคุมการต่ออย่างดี อาจไม่ต้องลดความสามารถที่ยอมให้ในการรับแรงกดในแนวแกนของเสาค้ำ

- ลดความสามารถในการรับแรงกดลง เนื่องจากอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) ในกรณีนี้เสาค้ำมีอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่าศูนย์กลางมากจะต้องลดความสามารถที่ยอมให้ในการรับแรงกดในแนวแกนของเสาค้ำลง นอกจากความสามารถในการรับแรงกดหาได้จาก การทดลองบรรทุกน้ำหนัก

การลดความสามารถในการรับแรงกดของ เสาค้ำสามารถหาได้ดังนี้

ในกรณีที่ความยาวของเสาค้ำ  $L > 60 \times$  เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาค้ำ  $D$

$$\frac{(D - 60)/100}{L} \quad \text{อัตราส่วนของการลดค่า (Decreasing Ratio) =} \quad (2.16)$$

ในกรณีที่ความยาวของเสาเข็ม  $L > 120$  x เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม  $D$  (สำหรับเสาเข็มเหล็ก) (Decreasing Ratio) =  $\frac{(L - 120)/100}{D}$  (2.17)

- พิจารณา Negative Skin Friction เมื่อเสาเข็มตอกผ่านชั้นดินที่มีการยุบตัว (Consolidation layer) ความสามารถที่ยอมรับในการรับแรงกดในแนวแกนที่จะใช้จะต้องพิจารณาถึง Negative Skin Friction ด้วย อย่างไรก็ตามอิทธิพลของ Negative skin Friction อาจไม่จำเป็นต้องคิดก็ได้สำหรับแรงที่กระทำในระยะสั้น (Short-term load) เช่น แรงขณะเกิดแผ่นดินไหว ในการพิจารณาอิทธิพลของ Negative Skin Friction ที่มีผลต่อความสามารถที่ยอมรับในการรับแรงกดในแนวแกนสามารถทำได้ดังนี้

ความสามารถที่ยอมรับในการรับแรงกด  $R_a$  จะต้องเป็นไปตามสูตรทั้ง 2 คือ

$$R_a + R_{nf, \max} < \frac{1}{1.2} R_p \quad (2.18)$$

$$R_a + R_{nf, \max} < \sigma_f A_e \quad (2.19)$$

เมื่อ

$R_a$  = ความสามารถที่ยอมรับในการรับแรงกด (ตัน)

$R_p$  = ความสามารถในการรับแรงกดที่ปลายของเสาเข็ม (ค่าประลัย) (ตัน)

$R_{nf, \max}$  = ค่ามากที่สุดของ Negative skin Friction (ตัน)

$\sigma_f$  หน่วยแรงอัดที่จุดกลางของวัสดุที่ใช้เป็นเสาเข็มหรือ 1.5 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมรับในระยะยาว (The Long-term Allowable Compression Stress) (ตัน/เมตร<sup>2</sup>)

$A_e$  = พื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของเสาเข็ม (เมตร<sup>2</sup>)

- ระยะห่างของเสาเข็ม เสาเข็มแต่ละต้นควรห่างกัน 2.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มหรือมากกว่า

- ความสามารถในการรับแรงกดของเสาเข็มกลุ่ม เมื่อ Friction piles ใช้เป็นกลุ่ม ความสามารถในการรับแรงกดจะพิจารณาเป็นแบบฐานรากลึก โดยคิดพื้นที่ผิวที่รับแรง เฉพาะพื้นที่ผิวขอบนอกของเสาเข็มกลุ่ม

- พิจารณาการทรุดตัวของเสาเข็ม การทรุดตัวของเสาเข็มจะต้องไม่มากกว่าการทรุดตัวที่ยอมรับได้โดยพิจารณาจากการใช้งานของโครงสร้างเหนือดิน

## 2. ความต้านทานแรงดึงที่ยอมรับของเสาเข็ม (Allowable Pulling Resistance of Piles)

ความต้านทานแรงดึงที่ยอมรับของเสาเข็มหาได้จากความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเสาเข็มหารด้วย Safety Factor 3 หรือมากกว่า และต้องพิจารณาสิ่งต่อไปนี้ด้วย

- หน่วยแรงดึงของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม (Tensile Stress of pile Material)
- อิทธิพลของรอยต่อ (Influence of Splice)
- ผลของเสาเข็มกลุ่ม (Effect of piles group)
- การเคลื่อนที่ขึ้นของหัวเสาเข็ม (Upward displacement of piles head)
- ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเสาเข็มเดี่ยว (Maximum Pulling Resistance of Single Pile) ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเสาเข็มเดี่ยวสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองบรรทุกน้ำหนักหรือจากสูตรหาความสามารถในการรับแรงกด ความต้านทานแรงดึงสูงสุดหาได้จากสูตรหาความสามารถในการรับแรงกดประลัยในแนวแกนของเสาเข็มโดยไม่คิดความสามารถในการรับแรงกดที่ปลายของเสาเข็ม

ก. ในกรณีของดินทราย (Sandy Soil)

$$R_{ut} = \frac{\bar{N} A_s}{5} \quad (2.20)$$

ข. ในกรณีของดินเหนียว (Cohesive Soil)

$$R_{ut} = \bar{c} a A_s \quad (2.21)$$

เมื่อ

- $R_{ut}$  = ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเสาเข็ม (ตัน)  
 $\bar{N}$  = ค่าเฉลี่ยของ N value ตลอดระยะฝังของเสาเข็ม  
 $A_s$  = ผลรวมของพื้นที่ผิวของเสาเข็ม (เมตร<sup>2</sup>)  
 $\bar{c} a$  = ค่า adhesion เฉลี่ยตลอดระยะฝังของเสาเข็ม (ตัน/เมตร<sup>2</sup>)

ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเสาเข็มสามารถหาได้จากสูตรของ Terzaghi เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสูตรที่แล้ว

$$R_{ut} = R_f = \phi L f_s \quad (2.22)$$

$$\bar{f}_s = \frac{\sum (c_{ai} + K s q_i \mu) l_i}{L} \quad (2.23)$$

เมื่อ

- $R_{ut}$  = ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเสาเข็ม (ตัน)  
 $R_f$  = ความฝืดของผิวของเสาเข็ม (ตัน)  
 $\phi$  = เส้นรอบรูปของเสาเข็ม (เมตร)

- $L$  = ระยะฝังของเสาเข็ม ( เมตร )  
 $\bar{f}_s$  = ค่าเฉลี่ยความเข้มของความฝืดผิว ( คตัน/เมตร<sup>2</sup> )  
 Mean Intensity of Ship Friction  
 $C_{ai}$  = Adhesion ระหว่างดินกับเสาเข็ม ( คตัน/เมตร<sup>2</sup> )  
 $C_i$  = Cohesion ( คตัน/เมตร<sup>2</sup> )  
 $K_s$  = สัมประสิทธิ์ของความดันดินในแนวราบที่กระทำกับเสาเข็ม  
 (Coefficient of Horizontal Earth Pressure  
 Acting on the Pile)  
 $q_i$  = ค่าเฉลี่ยของ Effective soil Overburden  
 Pressure ( คตัน/เมตร<sup>2</sup> )  
 $\mu$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดิน  
 $l_i$  = ความหนาของชั้นดิน ( เมตร )  
 สิ่งที่ควรสนใจในการพิจารณาความต้านทานแรงดึงที่ยอม

#### ไว้ของเสาเข็ม

- ความต้านทานแรงดึงที่ยอมไว้ของเสาเข็มต้องไม่มากกว่าค่าที่ได้จากหน่วยแรงดึงที่ยอมไว้ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็มคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

- ในกรณีที่เป็นเสาเข็มต่อแรงต้านทานต่อการดึงของส่วนที่อยู่ต่ำกว่ารอยต่อจะไม่คิด แต่ถ้ารอยต่อได้รับการต่ออย่างดี เช่น เสาเข็มเหล็กแรงต้านทานการดึงของเสาเข็มส่วนที่อยู่ต่ำกว่ารอยต่อจะน้อยกว่าความต้านทานแรงดึงที่ยอมไว้ของรอยต่อ

- ในกรณีที่เป็นเสาเข็มกลุ่มความต้านทานแรงดึงจะคิดจากพื้นที่ผิวขอบนอกของเสาเข็มกลุ่ม

- ความต้านทานแรงดึงที่ยอมไว้ของเสาเข็มจะถูกจำกัดโดยระยะที่ยอมไว้ของการเคลื่อนที่ขึ้นของหัวเสาเข็มโดยพิจารณาจากการใช้งานของโครงสร้างเหนือดิน

### 3. ความสามารถที่ยอมไว้ในการรับแรงกดทางด้านข้างของเสาเข็ม (Lateral Allowable Bearing Capacity of Piles)

ความสามารถที่ยอมไว้ในการรับแรงกดทางด้านข้างของเสาเข็มเกี่ยวจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของเสาเข็มขณะที่รับแรงทางด้านข้าง เมื่อเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างตั้งฉากกับแกนของเสาเข็มจะเกิดโมเมนต์คดและการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม ถ้าโมเมนต์คดเกินกำลังที่ได้รับของเสาเข็ม เสาเข็มจะหักและถ้าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มมากก็จะทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างส่วนบน ดังนั้นการหาความสามารถที่ยอมไว้ในการรับแรงกดทางด้านข้างของเสาเข็มจะต้องคำนึงถึง



1. หน่วยแรงคัตที่เกิดในเสาเข็มจะต้องไม่เกินหน่วยแรงคัตที่ยอมมาห้ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม
2. การแอ่นตัวของเสาเข็มต้องไม่เกินการแอ่นตัวที่ยอมมาห้ของโครงสร้างชนิดต่าง ๆ

พฤติกรรมของ เสาเข็มขณะรับแรงทางค้ำยันข้างจะหาได้ดังนี้

1. หาได้จาก การทดลองบรรทุกน้ำหนัก (Loading Tests) ค่าที่หาได้จากวิธีนี้จะต้องพิจารณาถึงความแตกต่างของสภาพของเสาเข็มที่ใช้ในการทดลองกับเสาเข็มที่ใช้งานจริงด้วย
2. หาได้จาก การวิเคราะห์ (Estimation by Analysis) แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

วิธีของ The Port and Harbour Research Institute (PHRI) วิธีนี้คิดจะถูกแบ่งเป็นชนิด s และชนิด c สูตร 2.24 และ 2.25 แสดงความเกี่ยวข้องของแรงปฏิกิริยาของดินกับการแอ่นตัวของเสาเข็มในดินแต่ละชนิด

$$\text{ดินชนิด s} : p = k_s x y^{0.5} \quad (2.24)$$

$$\text{ดินชนิด c} : p = k_c y^{0.5} \quad (2.25)$$

- เมื่อ  $p$  : แรงปฏิกิริยาของดินต่อหน่วยพื้นที่ที่มีความลึก (กิโลกรัม/เซนติเมตร<sup>2</sup>)  
 $k_s$  : ค่าคงที่ของแรงค้ำยันทางข้างในดินชนิด S (กิโลกรัม/เซนติเมตร<sup>3.5</sup>)  
 $k_c$  : ค่าคงที่ของแรงค้ำยันทางข้างในดินชนิด C (กิโลกรัม/เซนติเมตร<sup>2.5</sup>)  
 $x$  : ความลึกจากระดับผิวดิน (เซนติเมตร)  
 $y$  : การเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ความลึก  $x$  (เซนติเมตร)

การแบ่งชนิดของดินเป็น s และ c ค่า  $k_s$  และ  $k_c$  หาได้จาก N-value ของดิน วิธีนี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากต้องใช้คณิตศาสตร์ชั้นสูง เข้าช่วยในการแก้สมการ ถึงแม้ว่าผลที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากก็ตาม

วิธีของ Chang(8) เป็นที่ยอมรับมากกว่าเพราะง่ายต่อการวิเคราะห์และได้ผลใกล้เคียงกับพฤติกรรมของเสาเข็มพอสมควร

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{เหนือดิน} \quad EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} = 0 \quad (0 \geq x \geq -h) \quad (2.26)$$

$$\text{อยู่ในดิน} \quad EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_s y_2 = 0 \quad (u \geq 0)$$

ถ้าให้  $E_s$  คงที่ การหาค่าโมเมนต์และการเคลื่อนตัวจะเป็นแบบ 4 แบบดังนี้

หัวเสาเข็มอิสระ  $h = 0$  (รูปที่ 2.13)

$$Y_{top} = Y_0 = \frac{T}{2EI\beta^3} \quad (2.27)$$

$$M_{max} = -T/\beta e^{-\pi/4} \sin \pi/4 = -0.322T/\beta \quad (2.28)$$

$$ly_1 = \pi/2\beta$$

$$li_1 = 3\pi/4\beta$$

$$lm_1 = \pi/\beta$$

$$lm_{,max} = \pi/4\beta \quad (2.29)$$

หัวเสาเข็มยึดแน่น  $h = 0$  (รูป 2.14)

$$Y_{top} = Y_0 = \frac{T}{4EI\beta^3} \quad (2.30)$$

$$M_{max-t} = \frac{T}{2\beta} \quad (2.31)$$

$$M_{max-t} = \frac{-T}{2\beta} e^{-\pi/2} = 0.104 T/\beta$$

$$ly_1 = 3\pi/4\beta$$

$$li_1 = \pi/\beta \quad (2.32)$$

$$lm_1 = 5\pi/4\beta$$

$$lm_{max} = \pi/2\beta$$

หัวเสาเข็มอิสระ  $h > 0$  (รูป 2.15)

$$Y_{top} = \frac{2(1 + \beta h)^3 + 1}{6EI\beta^3} T = \frac{Th^3 \phi \Delta(\beta h)}{3EI} \quad (2.33)$$

$$Y_0 = \frac{1 + \beta h}{2EI\beta^3} T = \frac{Th^3 \phi f(\beta h)}{2EI}$$

$$M_{max} = -h \left\{ \frac{\sqrt{(1 + 2\beta h)^2 + 1}}{2h} \exp\left(-\tan^{-1} \frac{1}{1 + 2\beta h}\right) T \right.$$

$$T = -Th \phi_m(\beta h) \quad (2.34)$$

$$ly_1 = 1/\beta \tan^{-1} \frac{1 + \beta h}{\beta h}$$

$$li_1 = 1/\beta \tan^{-1} \left\{ \begin{array}{l} -(1 + 2\beta h) \\ -\beta h \end{array} \right\}$$

$$lm_1 = 1/\beta \tan^{-1} \frac{\beta h}{1 + \beta h}$$

$$lm_{,max} = 1/\beta \tan^{-1} \frac{1}{1 + 2\beta h} \quad (2.35)$$

ท้าวเสาเข็มยึดแน่น  $h > 0$  (รูป 2.16)

$$Y_{top} = \frac{(1+\beta h)^3 + 2}{12 EI \beta^3} T = \frac{Th^3}{12EI} \quad (h)$$

$$Y_o = \frac{1 + \beta h}{4 EI \beta^3} T = \frac{Th^3}{4EI} \phi f(h) \quad (2.36)$$

$$M_{max-t} = (1 + \beta h) T = Th \phi \quad (h)$$

$$M_{max-1} = -h \left[ \frac{2\beta}{\sqrt{1 + (\beta h)^2}} \exp\left(-\tan^{-1} \frac{1}{\beta h}\right) \right] T = -Th \phi m^{\beta h} \quad (2.37)$$

$$ly_1 = \frac{1/\beta \tan^{-1} \beta h + 1}{\beta h - h - 1}$$

$$li_1 = \frac{1}{\beta \tan^{-1} (-\beta h)}$$

$$lm_1 = \frac{1}{\beta (\tan^{-1} \frac{1 - \beta h}{1 + \beta h} + \pi)}$$

$$lm, max = \frac{1}{\beta \tan^{-1} \frac{1}{\beta h}}$$

- เมื่อ
- $Y_1$  : การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเหนือดิน (ซ.ม.)
  - $Y_2$  : การเคลื่อนตัวของเสาเข็มในดิน (ซ.ม.)
  - $h$  : ความสูงของแรงที่กระทำ (ซ.ม.)
  - $i_1$  : มุมคค (Deflection angle) เหนือดิน (เรเดียน)
  - $i_2$  : มุมคคในดิน (เรเดียน)
  - $Kh_1$  : สัมประสิทธิ์ของแรงปฏิกิริยาด้านข้างของดินสำหรับแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 30 ซม. (กก./ซม.<sup>3</sup>) (Coefficient of Lateral Subgrade reaction For a 30 cm regular Square plate)
  - $kh$  : สัมประสิทธิ์ของแรงปฏิกิริยาด้านข้างของดิน (กก./ซม.<sup>3</sup>) (Coefficient of Lateral Subgrade reaction)
  - $l_{11}$  : ความลึกของจุดแรกที่มีมุมคคเป็นศูนย์สำหรับเสาเข็มหัวอิสระหรือจุดที่สองที่มีมุมคคเป็นศูนย์สำหรับเสาเข็มหัวยึดแน่น (ซ.ม.) (Depth of the first Zero point of deflection angle for a free-head pile or of the Second Zero point of deflection angle for a fixed-head pile)

- $L_{m1}$  : ความลึกของจุดแรกที่มีโมเมนต์ค้ำ เป็นศูนย์สำหรับเสาเข็มหัวอิสระหรือจุดที่สองที่มุมค้ำ เป็นศูนย์สำหรับเสาเข็มยึดแน่น (ช.ม.)
- $L_{y1}$  : ความลึกของจุดแรกที่การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเป็นศูนย์ (ช.ม.)
- $l_{m,max}$  : ความลึกของจุดที่มีโมเมนต์ค้ำสูงสุด (ช.ม.)
- $m_1$  : โมเมนต์ค้ำเหนือดิน (กก.ช.ม.)
- $m_2$  : โมเมนต์ค้ำในดิน (กก.ช.ม.)
- $M_{max}$  : โมเมนต์ค้ำสูงสุดของเสาเข็มหัวอิสระ (กก.ช.ม.)
- $M_{max-t}$  : โมเมนต์ค้ำของหัวเสาเข็มสำหรับเสาเข็มหัวยึดแน่น (กก.ช.ม.)
- $M_{max-1}$  : โมเมนต์ค้ำสูงสุดของเสาเข็มหัวยึดแน่นในดิน (กก.ช.ม.)
- $N$  : ค่า Standard penetration test
- $S_1$  : แรงเฉือนเหนือดิน (กก.)
- $S_2$  : แรงเฉือนในดิน (กก.)
- $np$  : สัมประสิทธิ์ของแรงปฏิกิริยาค้ำข้างของดิน (กก./ช.ม.<sup>3</sup>)
- $T$  : แรงในแนวราบที่กระทำที่หัวเสาเข็ม (กก.)
- $Y_0$  : การเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ผิวดิน (ช.ม.)
- $Y_{top}$  : การเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม (ช.ม.)
- $E_s$  : โมดูลัสยืดหยุ่นของดิน (กก./ช.ม.<sup>2</sup>)
- $B$  : ความกว้างของเสาเข็มหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง (ช.ม.)
- $EI$  : Pile flexural rigidity (กก.ช.ม.<sup>2</sup>)
- $\beta$  :  $\beta = \sqrt[4]{kh/4EI}$  (ช.ม.<sup>-1</sup>)

3. หากได้จากข้อมูลเดิม ถ้าเป็นโครงสร้างเล็ก ๆ ที่ไม่รับแรงค้ำข้างมากนักก็สามารถใช้ข้อมูลเดิมที่มีอยู่ใช้ได้โดยไม่ต้องใช้วิธีทดลองบรรทุกน้ำหนักหรือวิธีวิเคราะห์

เมื่อเราใช้เสาเข็มกลุ่มอิทธิพลของเสาเข็มกลุ่มที่มีต่อพฤติกรรมของเสาเข็มจำเป็นต้องพิจารณาด้วย แต่ถ้าระยะห่างของเสาเข็มเกินค่าที่กำหนดตาราง 2.5 อิทธิพลของเสาเข็มกลุ่มก็ไม่จำเป็นต้องพิจารณา

### 2.2.3 วิธีการออกแบบของ British Standards Institution(9)

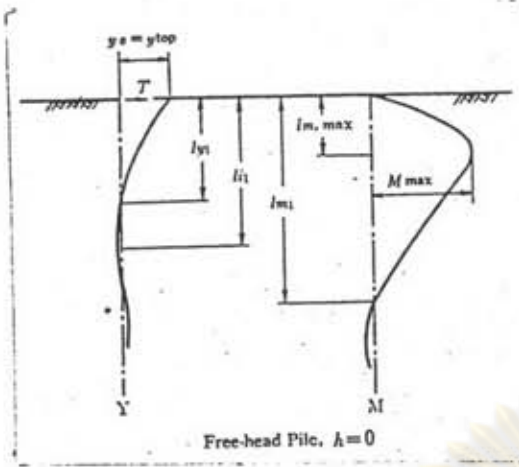
หลักการและวิธีการออกแบบ

โครงสร้างที่ออกแบบจะต้องพิจารณาถึง

#### 1. น้ำหนักบรรทุก (Dead Loads)

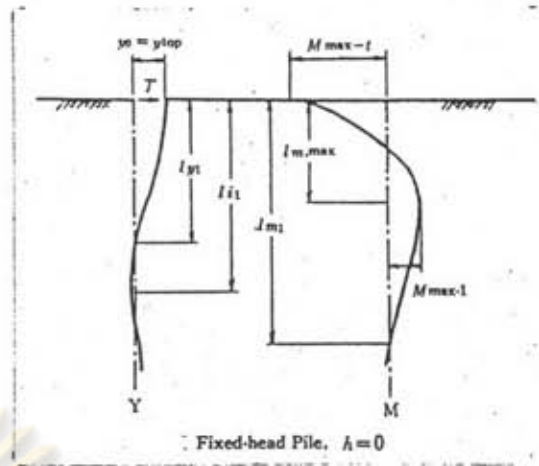
น้ำหนักบรรทุกจะประกอบไปด้วยน้ำหนักของหลักผูก

เรือและเครื่องมือ เครื่องหมายที่อยู่บนหลักผูกเรือ



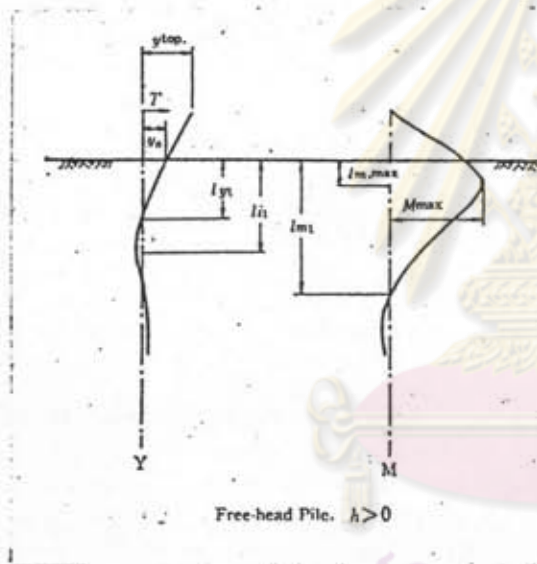
รูปที่ 2.13

การแอนตัวและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น



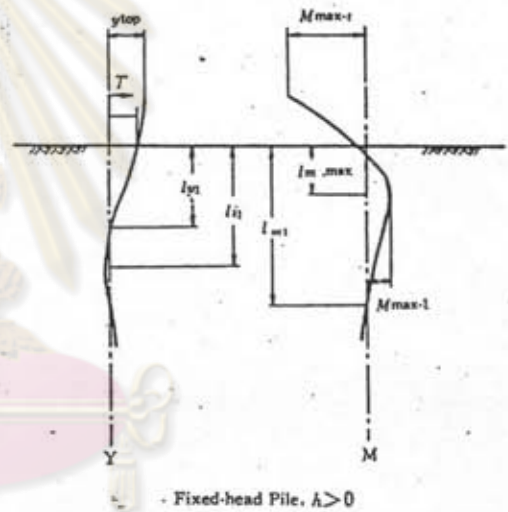
รูปที่ 2.14

การแอนตัวและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.15

การแอนตัวและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.16

การแอนตัวและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	! Transverse	! 1.5 times the pile diameter!
! Sandy Soil	! Lengthwise	! 2.5 times the pile diameter!
	! Transverse	! 3.0 times the pile diameter!
! Cohesive Soil	! Lengthwise	! 4.0 times the pile diameter!

ตารางที่ 2.5 ระยะห่างของเสาเข็ม

## 2. แรงที่เกิดขณะทำงาน

- แรงกระแทกของเรือขณะเข้าจอด โครงสร้างจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะไม่เกิดเสียหายขณะที่จอดเรือกระแทก แรงกระแทกจะขึ้นกับความเร็วของเรือขณะเข้าจอด ความเร็วในการเข้าจอดจะขึ้นกับขนาดของเรือ เช่น เรือขนาด 2500 ตันเนส (Tonnes) จะใช้ความเร็ว 0.5 เมตร/วินาทีในการเข้าจอด ในการคำนวณจะใช้ทฤษฎีโมเมนตัมโดยคิดว่าหลักรับแรงกระแทกจะรับพลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมดไว้

- แรงที่เกิดจากการผูกเรือกับหลัก เกิดจากลมและกระแส น้ำที่พัดปะทะตัวเรือขณะจอดทำให้เกิดแรงดันระหว่างเรือกับหลักผูกเรือ

## 3. แรงลม

จะต้องรู้ความเร็วและทิศทางลม เนื่องจากแรงลมจะทำให้ขนาดของคลื่นและกระแสน้ำเพิ่มขึ้นและแรงลมที่พัดปะทะเรือจะทำให้เรือมีแรงดันที่กระทำต่อหลักผูกเรือมากขึ้นจะทำให้การเก็บข้อมูลลมในระยะ 50 ปี ความเร็วลมที่จะใช้ในการออกแบบแสดงไว้ในตาราง 2.6

## 4. แรงจากกระแสน้ำ

ต้องมีการเก็บข้อมูลของกระแสน้ำเพื่อหาความเร็วสูงสุดและกระแสน้ำขณะเกิดน้ำขึ้นน้ำลง

หลักผูกเรือแบบยึคหยุ่นจะใช้เป็นแบบท่อเหล็กกลม (Tubular Steel Piles) โดยการออกแบบจะต้องหาเส้นผ่าศูนย์กลาง ความหนาของท่อ และระยะผนังที่สามารถรับแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ ความสามารถของหลักผูกเรือที่จะรับแรงจะได้จากความสามารถในการรับแรงประลัยหารด้วยความสามารถในการรับแรงประลัย

$$Q_d = Q_f + Q_p = fA_s + qA_p$$

เมื่อ

$Q_d$  : ความหนาแน่นในการรับแรงประลัย

$Q_f$  : แรงฝืดประลัย (The Ultimate Skin Friction Resistance)

$Q_p$  : The ultimate end bearing

$f$  : The unit skin friction or adhesion capacity

Category	A	B	C	D
	3 s gust speeds	5 s gust speeds	15 s mean speeds	1 min mean speeds
Height, M	Individual members, etc	Small structures	Large structures	For use with maximum wave
5	0.95	0.93	0.88	0.78
10	1.00	0.98	0.93	0.85
20	1.05	1.03	0.99	0.93
30	1.09	1.07	1.02	0.97
40	1.11	1.09	1.05	1.00
50	1.13	1.11	1.08	1.03
60	1.14	1.13	1.00	1.05
80	1.17	1.16	1.12	1.09
100	1.19	1.18	1.14	1.12
120	1.21	1.20	1.16	1.15
150	1.23	1.22	1.19	1.17

ตารางที่ 2.6 Wind speed factor

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$A_s$  = พื้นที่ผิวของเสาเข็ม

$q$  = The unit end bearing capacity

$A_p$  = The gross end area of pile

Skin friction และ end bearing ในดินเหนียว  $f$  ที่ใช้จะต้องน้อยกว่า  $C_u$  (Undrain Shear strength) โดยที่

$c_u < 25 \text{ kn/m}^2$

จะใช้  $f = c_u$

$25 < c_u < 75 \text{ kn/m}^2$  จะใช้  $f =$  อัตราส่วนตรงระหว่าง  $c_u:25 \text{ kn/m}^2$  กับ  $c_u/2$

เมื่อ  $c_u = 75 \text{ kn/m}^2$

$75 < c_u$

จะใช้  $f = c_u/2$

$q$  ที่ใช้เท่ากับ  $9 c_u$  แต่ถ้าเป็น Sensitive clay ใช้เท่ากับ  $5 c_u$

Skin friction และ end bearing ในทรายและ Silt

$$f = K P_o \tan \delta \quad (2.40)$$

เมื่อ

$K$  = Coefficient of lateral earth pressure at rest ( 0.7)

$P_o$  = The effective overburden pressure

$\delta$  = The angle of soil friction on pile wall

$$q = P_o N_q \quad (2.41)$$

เมื่อ

$N_q$  = The bearing capacity factor ดังแสดงน

ตาราง 2.7

Soil type	$\phi$	$\delta$	$N_q$
Sand and gravel	40	35	over 100
Clean sand	35	30	40
Silty sand	30	25	20
Sandy silt	25	20	12
Silt	20	15	8

ตารางที่ 2.7 The bearing capacity factor



เมื่อ  $\phi$  = The angle of internal friction of soil  
 ความสามารถในการรับแรงดึงของเสาเข็ม (Pile  
 capacity for axial pull - out loads)

ใช้สูตรเดียวกับที่ใช้หาแรงกดโดยจะหารด้วย factor  
 of Safety, 2.0, และค่า K ที่ใช้จะต้องไม่เกิน 0.5

แรงปฏิกิริยาของดินต่อเสาเข็มที่รับแรงในแนวราบ  
 (Soil reaction on laterally loaded piles) ผลของแรงปฏิกิริยา  
 ของดินที่กระทำต่อเสาเข็มที่รับแรงในแนวราบจะใช้ในการพิจารณาหาหน้าตัดของเสา  
 เข็มเพื่อใช้คำนวณแรงค้ำจะต้องใช้  $p - y$  curves ซึ่งแสดงความสัมพันธ์  
 ระหว่างแรงต้านทานของดิน (P) กับการแอ่นตัวในแนวราบของดิน (Lateral  
 soil deflection)  $y - p - y$  curves สามารถหาได้จากข้อมูลความเค้นและ  
 ความเครียดของดินที่ได้จากการทดลองในห้องทดลอง

การหาความหนาของเสาเข็ม (Pile wall thickness)  
 สำหรับโครงสร้างรูปทรงกระบอกที่รับแรงในแนวแกนและ  
 รมเมนต์ค้ำจะต้องตรวจสอบ Local buckling จาก

$$\frac{D}{t} > \frac{22800}{Y_s} \quad (2.42)$$

เมื่อ  $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลาง (m.m)

$t$  = ความหนา (m.m)

$Y_s$  = จุดคานของวัสดุ (yield strength of the  
 material) N/m.m<sup>2</sup>

โครงสร้างทรงกระบอกที่รับแรงกดและแรงค้ำ ค่าแรงที่  
 เกิดจะต้องเป็นไปตามสมการ

$$\frac{f_{ac} + C_m \sqrt{f_b \cdot c_x^2 + f_b \cdot c_y^2}}{P_{ac}} (1 - \frac{f \cdot a_c}{P' e}) P_b \leq 1.0 \quad (2.43)$$

$$\frac{f_{ac}}{N Y_s} + \frac{\sqrt{f_b \cdot c_x^2 + f_b \cdot c_y^2}}{P_{bc}} < 1.0 \quad (2.44)$$

เมื่อ

$N$  = 0.6

$P_{ac}$  = ค่าหน่วยแรงในแนวแกนที่ยอมรับได้

$f_{ac}$  = ค่าหน่วยแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้น

$f_{bc}$  = ค่าหน่วยแรงค้ำที่เกิดขึ้น

$C_m$  = Amplification reduction factor (ดูตาราง 2.7)

$P_b$  = 0.60  $Y_s$

$$P'e = \frac{12 \pi^2 E}{23 (KI)^2} r \quad (E = \text{Young's Modulus})$$

แต่ถ้า  $f_{ac}/P_{ac} \leq 0.15$  จะใช้สมการต่อไปนี้แทน 2.43 และ

2.44

$$\frac{f_{ac}}{P_{ac}} + \frac{\sqrt{f_{b.cx^2} + f_{b.cy^2}}}{P_{bc}} \leq 1.0 \quad (2.45)$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย