**ข้อแนะนำในการพิจารณาออกแบบความหนาแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนดินเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกกองเก็บวัสดุ**

ผศ. ชัชวาลย์ พูนลาภพานิช *

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอรายละเอียดการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนดินเพื่อรับน้ำหนักกองเก็บวัสดุ โดยวิธีของ Portland Cement Association เนื้อหาบทความกล่าวถึง ทฤษฎีที่ใช้ออกแบบ ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และตัวอย่างผลวิเคราะห์ วิธีออกแบบนี้ใช้หลักการหน่วยแรงใช้งานโดยกำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้จากค่ากำลังดัดของคอนกรีตหารด้วยค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 2.0 การวิเคราะห์หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นซึ่งพิจารณาให้รับน้ำหนักบรรทุกแผ่ คำนวณโดยสมการผลเฉลยเฉพาะของสมการเชิงอนุพันธ์ที่กำหนดขึ้นจากโจทย์ปัญหาคานวางบนวัสดุยืดหยุ่น สุดท้ายผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักแผ่ที่ยอมให้ใช้กองเก็บวัสดุกับคุณสมบัติของแผ่นพื้น คำนวณได้จากการกำหนดเงื่อนไขให้ค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดของแผ่นพื้นเท่ากับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ผลของการวิเคราะห์ดังกล่าวถูกนำเสนอในรูปตารางช่วยการออกแบบ โดยจัดทำไว้ทั้งกรณีการวางน้ำหนักบรรทุกแบบไม่จัดวางผัง(Variable Layout) และกรณีการวางน้ำหนักบรรทุกแบบจัดผังตายตัว (Fixed Layout)

**Abstract**

**This article presents guidelines for thickness design of industrial concrete floors on grade subjected to stationary loading, which recommended by Portland Cement Association. This article also describes design theory, related parameters, design procedures, and sample of design results. The entire design procedure is based on flexure. The allowable working stress is concrete flexural strength divided by factor of safety approximately 2.0. Flexural stresses in slabs, subjected to uniformly distributed loads, can be analyzed by using the solution of the governing differential equations based on the beam on elastic foundation problems. The correlation between allowable distributed loads and slab properties can be determined by equating critical tensile stresses to allowable working stress. The results of this analysis considered in two loaded-area cases, variable and fixed layouts. These results were presented in tabular form.**

---

*อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

**บทนำ**

น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากการกองเก็บวัสดุ(Stationary live load) เป็นน้ำหนักบรรทุกแผ่วางโดยตรงบนแผ่นพื้นครอบคลุมพื้นที่กว้าง ซึ่งเป็นกิจกรรมที่เกิดขึ้นเป็นปกติในอาคารโรงงาน หรือ โกดัง ถึงแม้ว่าผลจากภาระน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวจะวิกฤติน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเป็นจุด เช่นน้ำหนักเสา (post loads) ขาชั้นวางสินค้า(rack-storage-leg loads) หรือน้ำหนักกดจากล้อยานพาหนะที่ใช้ขนย้ายวัสดุอุปกรณ์ในอาคาร แต่การตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้น รวมทั้งความสามารถที่จะคาดการณ์ขีดจำกัดของค่าน้ำหนักที่กองเก็บได้สูงสุดบนแผ่นพื้นก็เป็นข้อมูลที่ผู้ใช้งานควรทราบ บทความนี้นำเสนอรายละเอียดวิธีออกแบบพื้นคอนกรีตวางบนดินรับน้ำหนักแผ่เนื่องจากการกองเก็บวัสดุ โดยวิธีของPortland Cement Association (PCA) เรียงลำดับเนื้อหาตั้งแต่พื้นฐานของแนวคิดวิธีออกแบบ ความรู้เรื่องคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง ทฤษฎีวิเคราะห์หน่วยแรงและความหนาของแผ่นพื้น ตารางช่วยออกแบบ จนถึงข้อแนะนำในการก่อสร้าง

**แนวคิดของวิธีออกแบบ**

แนวคิดของวิธีออกแบบพื้นคอนกรีตวางบนดินคือ การเลือกค่ากำลังของคอนกรีตและความหนาของแผ่นพื้นที่ให้ผลค่ากำลังดัดมากพอจะรองรับผลรวมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ เช่นน้ำหนักบรรทุกบนพื้น ความล้า การยืดหดของเนื้อคอนกรีต แรงเสียดทานระหว่างแผ่นพื้นกับดินคันทาง ฯลฯ โดยไม่ให้แผ่นพื้นแตกร้าวขณะอยู่ในช่วงอายุการใช้งานที่ตั้งไว้ สำหรับการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนดินของ PCA ใช้วิธีประเมินค่าหน่วยแรงในแผ่นพื้นที่น้ำหนักบรรทุกแผ่กระทำโดยทฤษฎี Beam on Elatic Foundations ของ Hetényi(1946) โดยระบุความหนาของแผ่นพื้นที่ออกแบบได้โดยกำหนดให้หน่วยแรงดัดสูงสุดของแผ่นพื้นเท่ากับหน่วยแรงใช้งาน ผลวิเคราะห์ที่ได้จะเป็นความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีตล้วน (plain concrete)

**โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต(Modulus of Rupture, MR)**

ค่าโมดูลัสแตกร้าวเป็นค่ากำลังดัดของคอนกรีต(Flexural strength) ที่ใช้ออกแบบคำนวณความหนาแผ่นพื้น ค่าโมดูลัสแตกร้าวได้จากการทดสอบแรงดัดคานคอนกรีตล้วนแบบเธิร์ดพอยท์ตามมาตรฐาน ASTM C78 (Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Third-Point Loading) วิธีทดสอบโดยสังเขปมีขั้นตอนคือ นำตัวอย่างคานคอนกรีตล้วนอายุคอนกรีต 28 วัน ขนาดมาตรฐานหน้าตัด 6”x 6” ที่จัดเตรียมความยาวให้มากพอจะวางพาดในช่วงคานระยะ 18” ใส่แรงกด 2 จุดบนคานทดสอบ ณ ตำแหน่งที่แบ่งช่วงคานออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆกัน ค่าโมดูลัสแตกร้าว วิเคราะห์ได้จากค่าหน่วยแรงดัดขณะคานแตกหัก ในทางปฏิบัติค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ใช้ออกแบบก่อสร้างแผ่นพื้นสามารถประเมินได้จากสมการความสัมพันธ์เชิงประจักษ์กับค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่ง PCA แนะนำให้ใช้ค่าระหว่าง $7.5\sqrt{f_c'}$ ถึง $10\sqrt{f_c'}$ ตามลำดับ โดย $f_c'$ คือค่ากำลังอัดประลัย(หน่วย psi) ของแท่งตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15ซม.×30ซม. อายุคอนกรีต 28 วัน

**ค่าตัวประกอบความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S. )**

หน่วยแรงใช้งาน (Working stress) เป็นค่าขีดจำกัดสูงสุดของหน่วยแรงดัดที่ยอมให้เกิดในแผ่นพื้นคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก คำนวณได้โดยใช้ค่ากำลังดัดของคอนกรีตหารด้วยค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่เหมาะสม ค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่นำมาใช้ออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนดินไม่ได้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นจาก Building Code แต่เป็นค่าเชิงประสบการณ์ที่มาจากการทดลองกำหนดค่าขึ้นใช้ออกแบบก่อสร้างจริงในภาคสนาม ควบคู่กับการสังเกตสภาพและปริมาณความเสียหายของแผ่นพื้นที่เกิดขึ้นตามมา ค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ใช้โดยทั่วไปมีดังนี้

F.S. = 2.0 เป็นค่า conservative value ที่นิยมเลือกใช้ เหมาะสมกับสภาพการออกแบบก่อสร้างที่ไม่สามารถกำหนดหรือระบุค่าพารามิเตอร์สำคัญบางตัวได้ใกล้เคียงสภาพขณะใช้งานจริง เช่น ค่าน้ำหนักบรรทุก คุณสมบัติของวัสดุชั้นทางที่รองรับแผ่นพื้น ฯลฯ ซึ่งมักเกิดขึ้นในการออกแบบขั้นต้น

F.S. = 1.7 เป็นค่า acceptant value ที่มาจากค่า load factor ของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เหมาะสมกับสภาพการออกแบบก่อสร้างที่สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆได้ เช่น คุณสมบัติของวัสดุก่อสร้าง ทราบค่าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ วิธีก่อสร้าง ฯลฯ

F.S. = 1.4 เป็นค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ค่อนข้างต่ำ ควรระมัดระวังเป็นพิเศษในการใช้งาน ใช้ออกแบบกรณีน้ำหนักบรรทุกที่มีวาระในการรับภาระนานๆครั้ง และไม่ใช่แรงกระแทก ซึ่งถ้าใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัยออกแบบปกติจะทำให้ความหนาแผ่นพื้นมาก ไม่ประหยัด ตัวอย่างเช่นน้ำหนักอุปกรณ์ที่ใช้ซ่อมบำรุงเครื่องจักรประจำปี

<u>หมายเหตุ</u> ค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่นำเสนอข้างต้น ยังไม่ได้พิจารณาร่วมกับผลคูณเพิ่มแรงกระแทก(impact factor)

สำหรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำซ้ำด้วยจำนวนรอบมากๆ เช่นน้ำหนักกดของล้อยานพาหนะของรถยก( forklift trucks) ที่สัญจรภายในโกดัง ความล้าจากแรงกระทำซ้ำไปมา ทำให้แผ่นพื้นเสื่อมสภาพและเสียหายมากกว่าผลจากน้ำหนักสถิตที่มีค่าเท่ากัน การออกแบบแผ่นพื้นจะใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัยซึ่งกำหนดขึ้นจากข้อมูลผลวิจัยของ Pavement Performance ที่ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมการทาง ซึ่ง PCA แนะนำค่าโดยสังเขปดังนี้

F.S. = 1.5-1.7 สำหรับปริมาณจราจรเบาบาง (light traffic)

F.S. = 1.7-2.0 สำหรับปริมาณจราจรปานกลางจนถึงมาก (moderate-to-heavy traffic)

F.S. = 2.0 สำหรับปริมาณจราจรจำนวนไม่จำกัด (unlimited repetitions)

**ค่า Modulus of subgrade reaction (k)**

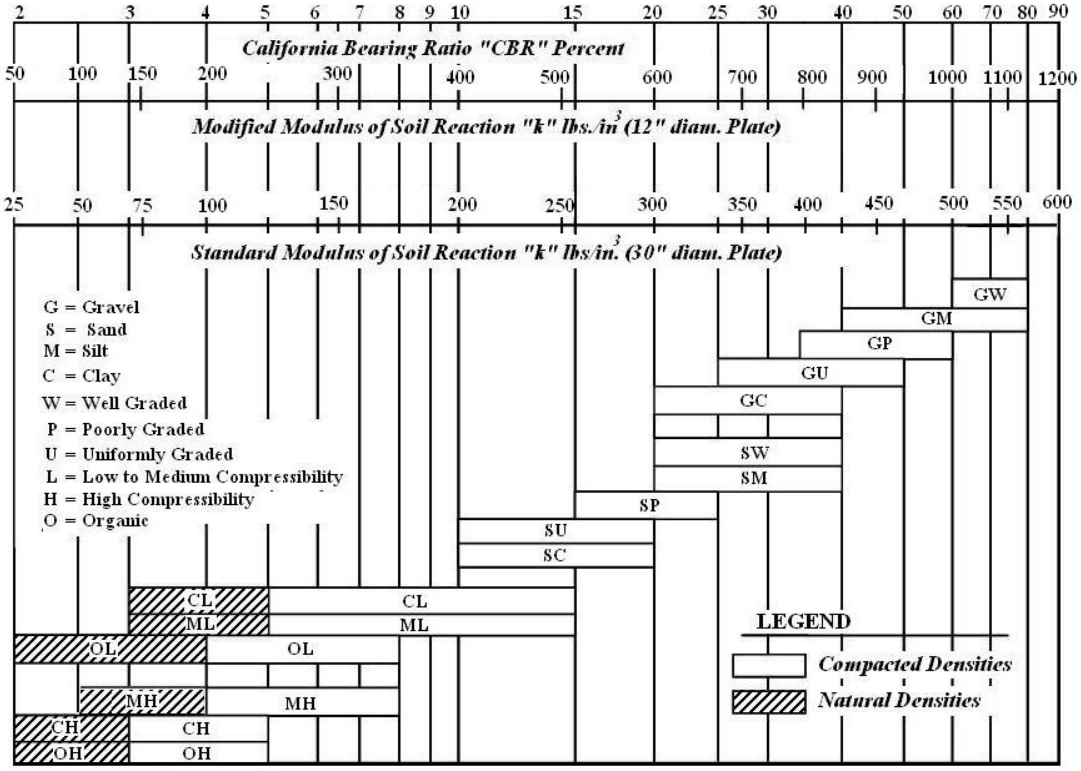
ปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมค่าหน่วยแรงดัดในแผ่นพื้นให้เกิดขึ้นน้อยหรือมากคือแรงปฏิกิริยาที่ตอบสนองกลับจากดินชั้นทางขณะเกิดแรงกดบนแผ่นพื้น ซึ่งทฤษฎีการออกแบบแผ่นพื้นวางบนดินของ Westergaard(1926) แทนค่าแรงปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยสปริงที่มีค่าคงที่ เท่ากับ k เรียกว่า "Modulus of subgrade reaction" ค่า k ได้จากการทดสอบกดน้ำหนักบรรทุกผ่านแผ่นเหล็กกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 นิ้ว (30-inch plate test) บนดินชั้นทาง โดยใช้ค่าหน่วยแรงกดในแผ่นเหล็กขณะแผ่นเหล็กทรุดตัว 0.05 นิ้วหารด้วยค่าการทรุดตัว ดังสมการ

$$k = \frac{load\ (psi)}{deflection\,(at\,0.05inch)}$$ หน่วย ปอนด์/ลบ.นิ้ว(pci)

แม้ว่าการทดสอบ 30-inch plate test เป็นวิธีที่ให้ค่าพารามิเตอร์ k ที่น่าเชื่อถือ แต่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ไม่คุ้มต่อการลงทุนทดสอบเพื่อนำค่า k ไปใช้ออกแบบแผ่นพื้นของอาคารอุตสาหกรรมพื้นที่เล็กๆ หรือวางน้ำหนักบรรทุกแผ่ที่มีความเข้มต่อพื้นที่ต่ำ ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบอาจเลือกใช้วิธีประเมินค่า k อย่างง่ายจากค่าโดยประมาณที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 กรณีต้องการค่า k ที่แม่นตรงมากขึ้นวิศวกรสามารถใช้ค่าสหสัมพันธ์ของค่า k กับพารามิเตอร์พื้นฐานของดินที่ทดสอบได้ง่ายและค่าใช้จ่ายราคาถูกกว่า ตัวอย่างเช่นค่าสหสัมพันธ์ของค่า k กับค่าเปอร์เซ็นต์California Bearing Ratio, ค่า $k_{12}$(Modulus of subgrade reaction จาก 12-inch plate test) ของดินที่จำแนกโดยวิธี Unified ตามที่ ACI แนะนำ ซึ่งแสดงแผนภาพของสหสัมพันธ์ไว้ในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า Modulus of subgrade reaction โดยประมาณของดินแต่ละประเภท

| ค่า Modulus of subgrade reaction, k | |
|---|---|
| ประเภทของดิน | pci |
| Silt and Clays | 50 - 100 |
| Sandy soil | 200 |
| Sand-gravels | 300 |




รูปที่ 1 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเปอร์เซ็นต์ California Bearing Ratio, $k_{12}$ และค่า Modulus of subgrade reaction ของดินชั้นทาง (ACI)

**<u>ทฤษฎีคานวางบนวัสดุยืดหยุ่น</u>**

Hetényi(1946) นำเสนอผลเฉลยคณิตศาสตร์ของโจทย์ปัญหาคานวางบนวัสดุยืดหยุ่น เมื่อคานที่รับน้ำหนักบรรทุกรูปแบบต่างๆ โดยพิสูจน์จากสภาพโจทย์ปัญหาของคานที่มีค่า Stiffness เท่ากับ EI เมื่อ E และ I คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าโมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัดคานตามลำดับ ให้คานวางบนจุดรองรับเป็นชุดของสปริงต่อเนื่องที่มีค่าคงที่ เท่ากับ k ซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์พื้นฐานเมื่อเกิดค่าการแอ่นตัวแนวดิ่ง = y ของคานดังนี้

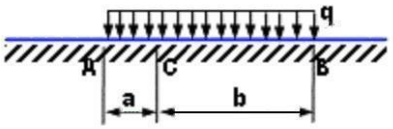
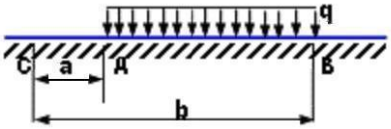
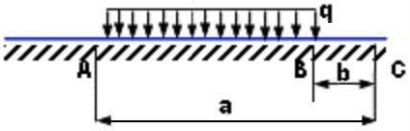
$$EI\frac{d^4y}{dx^4} = q = -ky \qquad ...(1)$$

กำหนดให้พจน์ $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$ ผลเฉลยทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ (1) คือ

$$y = e^{\lambda x}\left(C_1\cos\lambda x + C_2\sin\lambda x\right) + e^{-\lambda x}\left(C_3\cos\lambda x + C_4\lambda x\right) \quad ...(2)$$

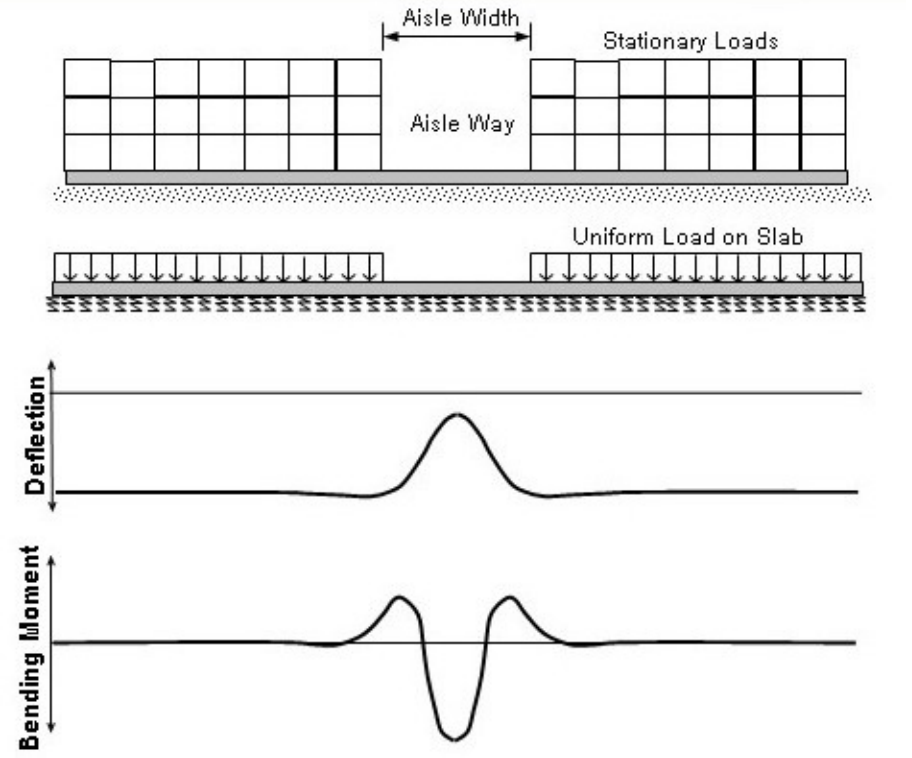
$C_1$ จนถึง $C_4$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการผลเฉลยทั่วไปที่วิเคราะห์หาได้เมื่อทราบรูปแบบของน้ำหนักบรรทุก และสภาพยึดรั้งที่ปลายคาน(end conditions) เมื่อกำหนดให้น้ำหนักบรรทุกแผ่สม่ำเสมอกระทำบนคานที่มีความยาวอนันต์จะได้สมการผลเฉลยเฉพาะ(closed-form solutions) สำหรับคำนวณ โมเมนต์ดัด แรงเฉือน การแอ่นตัวของคานดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงสมการผลเฉลยเฉพาะ(closed-form solutions) สำหรับคำนวณ โมเมนต์ดัด แรงเฉือน และการแอ่นตัวของคานวางบนวัสดุยืดหยุ่นกรณีรับน้ำหนักบรรทุกแผ่สม่ำเสมอ

| | |
|---|---|
| **POINT C IS UNDER LOAD**   | *DEFLECTION* : $y_c = \frac{q}{2k}(2 - D_{\lambda a} - D_{\lambda b})$<br>*MOMENT* : $M_c = \frac{q}{4\lambda^2}(B_{\lambda a} + B_{\lambda b})$<br>*SHEAR* : $Q_c = \frac{q}{4\lambda}(C_{\lambda a} - C_{\lambda b})$ |
| **POINT C IS LEFT OF LOAD**   | *DEFLECTION* : $y_c = \frac{q}{2k}(D_{\lambda a} - D_{\lambda b})$<br>*MOMENT* : $M_c = -\frac{q}{4\lambda^2}(B_{\lambda a} - B_{\lambda b})$<br>*SHEAR*: $Q_c = \frac{q}{4\lambda}(C_{\lambda a} - C_{\lambda b})$ |
| **POINT C IS RIGHT OF LOAD**   | *DEFLECTION*: $y_c = -\frac{q}{2k}(D_{\lambda a} - D_{\lambda b})$<br>*MOMENT*: $M_c = \frac{q}{4\lambda^2}(B_{\lambda a} - B_{\lambda b})$<br>*SHEAR*: $Q_c = \frac{q}{4\lambda}(C_{\lambda a} - C_{\lambda b})$ |

เมื่อ $A_{\lambda x} = e^{-\lambda x}(\cos \lambda x + \sin \lambda x)$ , $B_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \sin \lambda x$

$C_{\lambda x} = e^{-\lambda x}(\cos \lambda x - \sin \lambda x)$ , $D_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cos \lambda x$




รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองคานวางบนวัสดุยืดหยุ่นขณะวางน้ำหนักบรรทุกแผ่ และผลวิเคราะห์ การแอ่นตัว และค่าโมเมนต์ดัด

ในรูปที่ 2 แสดงผลวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัด และปริมาณการแอ่นตัวของแผ่นพื้นวางบนดินตามรูปตัดด้านยาวที่คำนวณจากสมการผลเฉลยเฉพาะข้างต้น วิธีจัดวางน้ำหนักบรรทุกกองเก็บวัสดุแทนด้วยน้ำหนักบรรทุกแผ่ซึ่งเว้นช่องว่าง(Aisle Way)ปราศจากน้ำหนักบรรทุกไว้ช่วงกลางคาน การจัดวางน้ำหนักบรรทุกรูปแบบนี้ให้ผลวิเคราะห์ค่าแรงดัดในแผ่นพื้นวิกฤติมากกว่าการวางน้ำหนักบรรทุกตลอดความยาว ผลวิเคราะห์ได้รูปโค้งของแนวการแอ่นตัวแผ่นพื้นเป็นโค้งฟังก์ชั่นซายน์ ที่มีค่าโมเมนต์ดัดวิกฤติสูงสุดเป็นลบที่ตำแหน่งกึ่งกลางแนวช่องว่าง โมเมนต์ดัดนี้มีค่าประมาณ 2 เท่าของโมเมนต์ดัดสูงสุดค่าบวก นอกจากนี้เมื่อแปรค่าระยะ Aisle Width โดยไม่เปลี่ยนค่าความเข้มของน้ำหนักบรรทุกแผ่ จะให้ผลวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดที่แปรค่าไปจนเกิดค่าสูงสุดเมื่อจัดระยะ Aisle Width เท่ากับ 2.209 $\ell$ (Packard , 1976) โดยค่า $\ell$ คือ ค่า Radius of Relative Stiffness

ผลศึกษาพฤติกรรมแผ่นพื้นรับน้ำหนักบรรทุกแผ่ดังกล่าวมีประโยชน์ต่อการออกแบบ เนื่องจากรูปแบบวิธีจัดผังพื้นที่วางน้ำหนักบรรทุกภายในอาคารมักจะเว้นช่อง Aisle way เพื่อการใช้สอยและเข้าขนย้ายวัตถุดิบหรือสินค้าไว้อยู่แล้ว ดังนั้นกรณีที่ต้องออกแบบความหนาแผ่นพื้นคอนกรีตที่ไม่ได้จัดผังวางน้ำหนักบรรทุกอย่างตายตัวหรือคาดว่าอาจเปลี่ยนแปลงผังพื้นที่กองเก็บวัสดุในอนาคต วิศวกรสามารถตรวจสอบหาค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุ ($W$) สูงสุดบนแผ่นพื้น จากวิธีจัดผังให้ได้ค่าแรงดัดสูงสุดดังกล่าว ซึ่งคำนวณได้โดยสมการที่เสนอโดย Packard (1976)

$$W = 0.123\, f_t \sqrt{hk} \qquad \ldots(3)$$

เมื่อ $W$ = ค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่สูงสุดที่ระบุให้ใช้กองเก็บวัสดุ (หน่วย psf)

$f_t$ = หน่วยแรงดัดใช้งานของแผ่นพื้นคอนกรีต $= \frac{MR}{FS.}$ (หน่วย psi)

$h$ = ความหนาแผ่นพื้นคอนกรีต (หน่วย นิ้ว)

$k$ = ค่า Modulus of Subgrade Reactionของดินชั้นทาง (หน่วย pci)

สมการที่(3) ได้จากสมมุติฐานการจัดวางแถบน้ำหนักบรรทุกแผ่กว้าง 300 นิ้ว และแทนพารามิเตอร์คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีต โดยใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, $E$ = 4,000 ksi ค่าอัตราส่วนพัวส์ซองของคอนกรีต, $\mu$ = 0.15 เพื่อความสะดวกในการนำข้อมูลไปใช้ตรวจสอบ จึงนำเสนอผลคำนวณบางส่วนของค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุ กรณีไม่จัดวางผังแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุ ($W$) บนแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนดิน กรณีไม่จัดวางผัง(Variable Layout)

| ความหนาแผ่นพื้น h (นิ้ว) | ค่าน.น.บรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุ, $W$ (psf) กำลังดัดของคอนกรีต , MR | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 550 psi | 600 psi | 650 psi | 700 psi |
| 5 | 756 | 825 | 894 | 963 |
| 6 | 829 | 904 | 979 | 1,055 |
| 7 | 895 | 976 | 1,058 | 1,139 |
| 8 | 957 | 1,044 | 1,131 | 1,218 |
| 9 | 1,015 | 1,107 | 1,199 | 1,292 |
| 10 | 1,070 | 1,167 | 1,264 | 1,361 |
| 11 | 1,122 | 1,224 | 1,326 | 1,428 |
| 12 | 1,172 | 1,278 | 1,385 | 1,491 |
| 14 | 1,266 | 1,381 | 1,496 | 1,611 |
| 16 | 1,353 | 1,476 | 1,599 | 1,722 |
| 18 | 1,435 | 1,566 | 1,696 | 1,826 |
| 20 | 1,513 | 1,650 | 1,788 | 1,925 |

NOTE:

- ค่าน.น.บรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุซึ่งนำเสนอในตารางที่ 3 คำนวณจากค่า k = 100 pci
- กำหนดหน่วยแรงใช้งานของแผ่นพื้นคอนกรีต, $f_t = \frac{MR}{FS.}$ โดยใช้ $FS. = 2.0$
- กรณีชั้นทางที่รองรับแผ่นคอนกรีตมีค่า modulus of subgrade reaction อื่นให้ประเมินโดยใช้ค่า ($W$) ในตารางคูณค่าปรับแก้ดังนี้

| Modulus of Subgrade reaction , k (pci) | 25 | 50 | 100 | 200 | 300 |
|---|---|---|---|---|---|
| ค่าปรับแก้ $= \sqrt{k/100}$ | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.4 | 1.7 |

สำหรับวิธีการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนดินที่จัดผังการวางน้ำหนักบรรทุกไว้แล้วนั้น สามารถคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุ โดยใช้สมการผลเฉลยเฉพาะในตารางที่ 2 โดยตรง เพื่อความสะดวกในการนำข้อมูลไปใช้ตรวจสอบ จึงนำเสนอผลคำนวณบางส่วนของค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุ กรณีจัดวางผังตายตัวแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุ ($W$) บนแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนดิน กรณีจัดผังตายตัว (Fixed Layout)

| ความหนาแผ่นพื้น (นิ้ว) | หน่วยแรงดัดใช้งาน (psi) | ค่า aisle width วิกฤต (ft.) | ค่าน.น.บรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุ, (psf) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ค่า aisle width วิกฤต | ค่า aisle width อื่น ๆ | | | | |
| | | | | 6 - ft. aisle | 8 - ft. aisle | 10 - ft. aisle | 12 - ft. aisle | 14 - ft. aisle |
| Modulus of subgrade reaction, k = 50 pci | | | | | | | | |
| 5 | 300 | 5.6 | 610 | 615 | 670 | 815 | 1,050 | 1,215 |
| | 350 | 5.6 | 710 | 715 | 785 | 950 | 1,225 | 1,420 |
| | 400 | 5.6 | 815 | 820 | 895 | 1,085 | 1,400 | 1,620 |
| 6 | 300 | 6.4 | 670 | 675 | 695 | 780 | 945 | 1,175 |
| | 350 | 6.4 | 785 | 785 | 810 | 910 | 1,100 | 1,370 |
| | 400 | 6.4 | 895 | 895 | 925 | 1,040 | 1,260 | 1,570 |
| 8 | 300 | 8.0 | 770 | 800 | 770 | 800 | 880 | 1010 |
| | 350 | 8.0 | 900 | 935 | 900 | 935 | 1025 | 1180 |
| | 400 | 8.0 | 1,025 | 1,070 | 1,025 | 1,065 | 1,175 | 1,350 |
| 10 | 300 | 9.4 | 845 | 930 | 855 | 850 | 885 | 960 |
| | 350 | 9.4 | 985 | 1085 | 1000 | 990 | 1035 | 1120 |
| | 400 | 9.4 | 1,130 | 1,240 | 1,145 | 1,135 | 1,185 | 1,285 |
| 12 | 300 | 10.8 | 915 | 1065 | 955 | 915 | 925 | 965 |
| | 350 | 10.8 | 1,065 | 1,240 | 1,115 | 1,070 | 1,080 | 1,125 |
| | 400 | 10.8 | 1,220 | 1,420 | 1,270 | 1,220 | 1,230 | 1,290 |
| 14 | 300 | 12.1 | 980 | 1225 | 1070 | 1000 | 980 | 995 |
| | 350 | 12.1 | 1,145 | 1,430 | 1,245 | 1,170 | 1,145 | 1,160 |
| | 400 | 12.1 | 1,310 | 1,630 | 1,425 | 1,335 | 1,310 | 1,330 |
| Modulus of subgrade reaction, k = 100 pci | | | | | | | | |
| 5 | 300 | 4.7 | 865 | 900 | 1,090 | 1,470 | 1,745 | 1,810 |
| | 350 | 4.7 | 1,010 | 1,050 | 1,270 | 1,715 | 2,035 | 2,115 |
| | 400 | 4.7 | 1,155 | 1,200 | 1,455 | 1,955 | 2,325 | 2,415 |
| 6 | 300 | 5.4 | 950 | 955 | 1,065 | 1,320 | 1,700 | 1,925 |
| | 350 | 5.4 | 1,105 | 1,115 | 1,245 | 1,540 | 1,985 | 2,245 |
| | 400 | 5.4 | 1,265 | 1,275 | 1,420 | 1,760 | 2,270 | 2,565 |
| 8 | 300 | 6.7 | 1,095 | 1,105 | 1,120 | 1,240 | 1,465 | 1,815 |
| | 350 | 6.7 | 1,280 | 1,285 | 1,305 | 1,445 | 1,705 | 2,120 |
| | 400 | 6.7 | 1,480 | 1,470 | 1,495 | 1,650 | 1,950 | 2,420 |
| 10 | 300 | 7.9 | 1,215 | 1,265 | 1,215 | 1,270 | 1,395 | 1,610 |
| | 350 | 7.9 | 1,420 | 1,475 | 1,420 | 1,480 | 1,630 | 1,880 |
| | 400 | 7.9 | 1,625 | 1,645 | 1,625 | 1,690 | 1,860 | 2,150 |
| 12 | 300 | 9.1 | 1,320 | 1,425 | 1,325 | 1,330 | 1,400 | 1,535 |
| | 350 | 9.1 | 1,540 | 1,665 | 1,545 | 1,550 | 1,635 | 1,795 |
| | 400 | 9.1 | 1,755 | 1,900 | 1,770 | 1,770 | 1,865 | 2,050 |
| 14 | 300 | 10.2 | 1,405 | 1,590 | 1,445 | 1,405 | 1,435 | 1,525 |
| | 350 | 10.2 | 1,640 | 1,855 | 1,885 | 1,640 | 1,675 | 1,775 |
| | 400 | 10.2 | 1,875 | 2,120 | 1,925 | 1,875 | 1,915 | 2,030 |
| Modulus of subgrade reaction, k = 200 pci | | | | | | | | |
| 5 | 300 | 4.0 | 1,225 | 1,400 | 1,930 | 2,450 | 2,565 | 2,520 |
| | 350 | 4.0 | 1,425 | 1,630 | 2,255 | 2,860 | 2,990 | 2,940 |
| | 400 | 4.0 | 1,630 | 1,865 | 2,575 | 3,270 | 3,420 | 3,360 |
| 6 | 300 | 4.5 | 1,340 | 1,415 | 1,755 | 2,395 | 2,740 | 2,810 |
| | 350 | 4.5 | 1,565 | 1,650 | 2,050 | 2,800 | 3,200 | 3,275 |
| | 400 | 4.5 | 1,785 | 1,890 | 2,345 | 3,190 | 2,655 | 3,745 |
| 8 | 300 | 5.6 | 1,550 | 1,550 | 1,695 | 2,045 | 2,635 | 3,070 |
| | 350 | 5.6 | 1,810 | 1,810 | 1,980 | 2,385 | 3,075 | 3,580 |
| | 400 | 5.6 | 2,065 | 2,070 | 2,615 | 2,730 | 3,515 | 4,095 |
| 10 | 300 | 6.6 | 1,730 | 1,745 | 1,775 | 1,965 | 2,330 | 2,895 |
| | 350 | 6.6 | 2,020 | 2,035 | 2,070 | 2,290 | 2,715 | 3,300 |
| | 400 | 6.6 | 2,310 | 2,325 | 2,365 | 2,620 | 3,105 | 3,860 |
| 12 | 300 | 7.6 | 1,890 | 1,945 | 1,895 | 1,995 | 2,230 | 2,610 |
| | 350 | 7.6 | 2,205 | 2,270 | 2,210 | 2,330 | 2,600 | 3,045 |
| | 400 | 7.6 | 2,520 | 2,595 | 2,525 | 2,660 | 2,972 | 3,480 |
| 14 | 300 | 8.6 | 2,025 | 2,150 | 2,030 | 2,065 | 2,210 | 2,480 |
| | 350 | 8.6 | 2,360 | 2,510 | 2,365 | 2,405 | 2,580 | 2,890 |
| | 400 | 8.6 | 2,700 | 2,870 | 2,705 | 2,750 | 2,950 | 3,305 |

**ข้อแนะนำเพิ่มเติม**

กระบวนการออกแบบก่อสร้างให้ได้แผ่นพื้นคอนกรีตวางบนดินที่มีคุณภาพ ไม่ควรให้ความสำคัญเฉพาะในขั้นตอนการออกแบบเท่านั้น การเกิดรอยแตกร้าวของแผ่นพื้นขณะก่อสร้างก็เป็นความเสียหายที่มักเกิดขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการรับภาระน้ำหนักบรรทุกที่ลดต่ำลงจากสภาพที่ออกแบบไว้ สาเหตุสำคัญของการเกิดรอยแตกร้าวดังกล่าวมาจากการหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียน้ำ(drying shrinkage) ความเสียหายนี้ป้องกันได้โดยการเลือกใช้คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัว(slump) ไม่สูงมากนัก มีค่าระหว่าง 4-6 นิ้วในการก่อสร้าง ร่วมกับการกำหนดระยะห่างรอยต่อระหว่างแผ่นที่พอเหมาะ สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตล้วน PCA แนะนำค่าระยะห่างของรอยต่อควบคุมการหดตัว(control joint) สูงสุดไม่เกินค่าที่แสดงในตารางที่ 5 นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้คือ การเลือกใช้ขนาดมวลรวมผสมคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ และการบ่มคอนกรีตโดยไม่ให้น้ำระเหยออกเร็วเกินไป

ตารางที่ 5 ระยะห่างสูงสุดของรอยต่อควบคุมการหดตัว สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตเปล่าวางบนดิน (หน่วย ฟุต)

| ความหนาแผ่นพื้น (นิ้ว) | ค่า slump ของคอนกรีตสดระหว่าง 4-6 นิ้ว | | ค่า slump ของคอนกรีตสดน้อยกว่า 4 นิ้ว |
|---|---|---|---|
| | ขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดไม่เกิน $\frac{3}{4}$ นิ้ว | ขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้วขึ้นไป | |
| 5 | 10 | 13 | 15 |
| 6 | 12 | 15 | 18 |
| 7 | 14 | 18 | 21 |
| 8 | 16 | 20 | 24 |
| 9 | 18 | 23 | 27 |
| 10 | 20 | 25 | 30 |

**บทสรุป**

พื้นคอนกรีตวางบนดินเป็นระบบแผ่นพื้นที่มีชั้นดินรองรับต่อเนื่องตลอดแผ่น ผลของน้ำหนักบรรทุกที่วางบนพื้นทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากโมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นเป็นสาเหตุหลัก การออกแบบมีจุดมุ่งหมายเพื่อระบุคุณสมบัติของวัสดุ (กำลังคอนกรีต, ค่า Modulus of subgrade reaction ของชั้นดินที่รองรับแผ่นพื้น) และความหนาแผ่นพื้นที่เพียงพอจะรับผลของค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น วิธีของ PCA ประเมินค่าโมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นขณะรับน้ำหนักบรรทุกกองเก็บวัสดุ โดยใช้ทฤษฎีคานวางบนวัสดุยืดหยุ่นวิเคราะห์โครงสร้างคานที่มีน้ำหนักบรรทุกแผ่สม่ำเสมอกระทำ ความหนาแผ่นพื้นคำนวณได้จากกำหนดเงื่อนไขค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดขณะวางน้ำหนักบรรทุกให้มีค่าเท่ากับหน่วยแรงที่ยอมให้ของแผ่นพื้น

PCA เลือกใช้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ที่สามารถเกิดได้ขณะใช้งานจริง 2 ค่าเพื่อออกแบบแผ่นพื้น ค่าแรกคือเมื่อผู้ใช้งานไม่ได้กำหนดผังวางกองวัสดุอย่างตายตัว จะใช้ค่าโมเมนต์ดัดที่วิเคราะห์จากการจัดวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกเพื่อให้ได้ค่าวิกฤติสูงสุด ดังนั้นค่าโมเมนต์ดัดนี้ค่อนข้าง conservative สำหรับใช้ออกแบบ ค่าที่สองเป็นค่า

โมเมนต์ดัดที่วิเคราะห์จากรูปผังที่ผู้ใช้งานกำหนดวิธีวางกองวัสดุอย่างตายตัว ผลการคำนวณออกแบบโดยวิธีของ PCA นำเสนอในรูปตารางตรวจสอบค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่ที่ยอมให้กองเก็บวัสดุบนแผ่นพื้น โดยจัดทำไว้ทั้งสองกรณี ข้อแนะนำเพิ่มเติมเพื่อป้องกันรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของแผ่นคอนกรีตขณะก่อสร้าง ปฏิบัติได้โดยการเลือกใช้คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวต่ำ ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ผสมคอนกรีต ควบคุมวิธีการบ่มคอนกรีตไม่ให้น้ำระเหยออกเร็ว รวมทั้งกำหนดระยะห่างรอยต่อของแผ่นพื้นให้เหมาะสม

**<u>บรรณานุกรม</u>**


1. ACI Committee360. (1997). ***Design of Slab on Grade (ACI 360R-9.)***. Michigan: American Concrete Institute.
2. American Society for Testing and Materials. (2000). ***Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading (ASTM C78-84).*** Pennsylvania.
3. Hetényi, M. (1946). ***Beam on Elastic Foundations***. Michigan :University of Michigan Press
4. Packard, R.G. (1976). ***Slab Thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade***. Illinois:The Portland Cement Association.
5. PCA (1992). ***Concrete Floors on Ground, 2$^{nd}$ Ed***. Illinois : The Portland Cement Association.
6. Ringo, B.C. and Anderson, R.B. (1992). ***Designing Floor Slab on Grade***. Illinois:The Aberdeen Group
7. Westergaard, H.M.(1926). ***Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Anaylsis***. Public Roads, V. 7, No. 2, Apr. 1926.