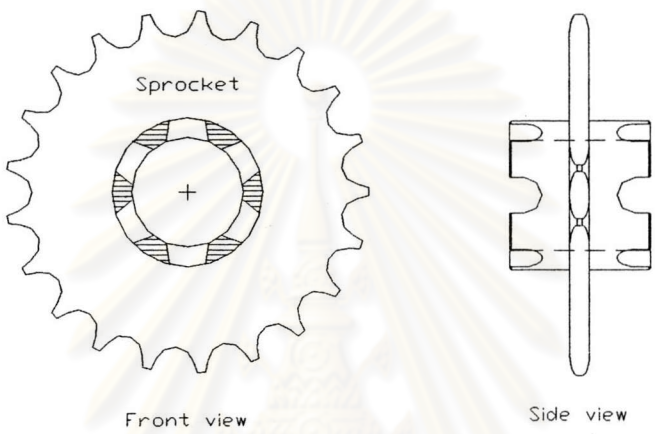
บทที่ 7

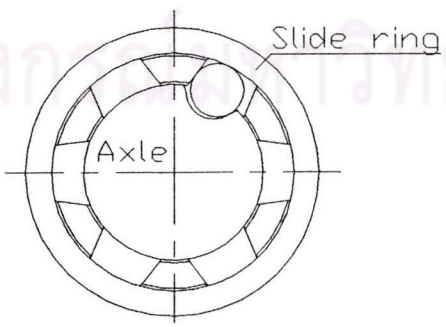
การศึกษาลักษณะทางกายภาพและการคำนวณแรงกระทำภายในคลัตช์ชนิดลูกปืน

7.1 ลักษณะทางกายภาพของคลัตช์ชนิดลูกปืน



รูปที่ 7.1 คลัตช์ชนิดลูกปืน

คลัตช์ชนิดลูกปืนจะทำงานร่วมกับโซ่และเฟืองโซ่ โดยที่จะติดตั้งอยู่บนเพลาที่อยู่ระหว่างเพลาล้อทั้งสองข้าง โดยที่กำลังที่ส่งมาจากเครื่องยนต์จนถึงเฟืองโซ่ที่เพลาล้อจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยคลัตช์ชนิดลูกปืนจะทำหน้าที่ตัดต่อกำลังที่ส่งไปยังเพลาล้อทั้งสองข้าง คลัตช์ข้างหนึ่งจะมีเม็ดลูกปืนอยู่ 6 เม็ดเป็นส่วนหนึ่งของกลไกในการรับแรงร่วมกับแหวนเลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 คลัตช์ข้างหนึ่งที่มีเม็ดลูกปืนและกลไกของแหวนเลื่อน

7.2 การคำนวณแรงกระทำภายในคลัตช์ชนิดลูกปืน

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.3 ในขณะที่คลัตช์เข้า แรงบิดที่เฟืองโซ่จะทำให้เกิดแรง P กระทำที่เม็ดลูกปืน ซึ่งจะสามารถคำนวณแรง P ได้จากสมการที่ 7.1

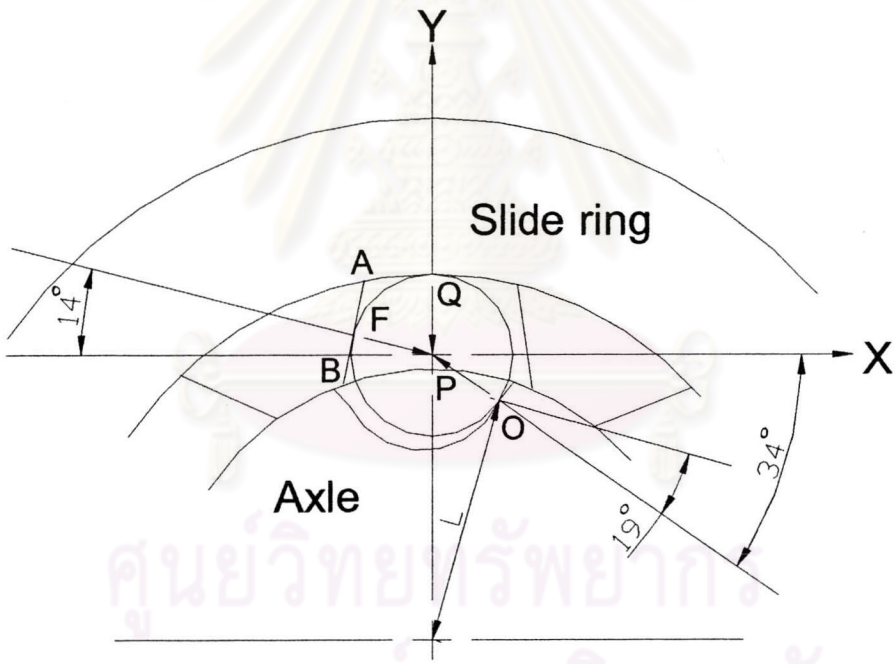
$$P = \frac{T}{NL\cos\theta} \qquad (7.1)$$

โดย T = แรงบิดที่เพลาล้อเพียงข้างเดียว (N-m)

N = จำนวนเม็ดลูกปืน = 6

L = ระยะจากจุดศูนย์กลางเพลาถึงจุดที่สัมผัสกับเม็ดลูกปืน = 0.0156 m.

θ = 19° จากรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 แรงกระทำที่คลัตช์ชนิดลูกปืน

แรง P นี้จะเป็นแรงที่ใช้ในการขับเพลาต่อไป โดยที่จะมีกลไกรับแรงนี้ 2 อัน คือ เขี้ยวของคลัตช์ลูกปืน และแหวนเลื่อน โดยมีเม็ดลูกปืนเป็นตัวส่งผ่านแรง เมื่อพิจารณาจากสมดุลของแรงในแนวแกน x และแนวแกน y จะสามารถหาแรงที่กระทำที่เม็ดลูกปืนเนื่องจากเขี้ยวของคลัตช์ชนิดลูกปืนและแหวนเลื่อนได้จากสมการที่ 7.2 และ 7.3 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$F\cos 14^{\circ} - P\cos 34^{\circ} = 0 \qquad (7.2)$$

$$P\sin 34^{\circ} - F\sin 14^{\circ} - Q = 0 \qquad (7.3)$$

โดย F = แรงที่เขี้ยวของคลัตช์กระทำกับลูกปืน (kN)
Q = แรงที่แหวนเลื่อนกระทำกับลูกปืน (kN)

ในการทำงานจริงของรถไถพรวนดินแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี เนื่องจากว่าล้อเกิดการลื่นไถลขึ้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์การลื่นจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนการฉุดลากสุทธิ (ρ, แรงขับเคลื่อนไปข้างหน้าของล้อต่อน้ำหนักรวมของรถไถพรวนดิน) โดยที่แรงขับเคลื่อนไปข้างหน้าของล้อจะมีค่าสูงสุดที่เปอร์เซ็นต์การลื่นอยู่ในช่วง 15-20 % และในช่วงนี้จะมีอัตราส่วนการฉุดลากสุทธิประมาณ 0.8 ซึ่งจะสามารถคำนวณแรงฉุดลากที่ล้อเนื่องจากน้ำหนักของรถไถพรวนดินได้ ดังสมการที่ 7.4

$$P_g = \rho \times W \qquad (7.4)$$
$$= 0.8 \times 100 \times 9.80665$$
$$= 784.532 \quad N$$

โดย P_g = แรงฉุดลากรวมที่ล้อของรถไถเดินตาม
W = น้ำหนักของรถไถพรวนดินรวมอุปกรณ์มีค่าเป็น 100 kg

7.3 อภิปรายผลการศึกษาและการคำนวณ

แรงฉุดลากที่ใช้ในการลากรถไถพรวนดินสามารถคำนวณได้จากกำลังเครื่องยนต์สูงสุดและน้ำหนักของรถไถพรวนดิน โดยที่เมื่อคำนวณแรงจากกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์นั้นเป็นการคำนวณแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนต่างๆ ภายในระบบส่งกำลังโดยไม่ได้คำนึงถึงสภาวะการทำงานจริงของรถไถพรวนดิน ซึ่งทำให้แรงที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าแรงที่ได้จากการคำนวณที่คำนึงถึงสภาวะการทำงานจริงของเครื่องยนต์เป็นหลัก จึงส่งผลให้ขนาดกลไกของคลัตช์ชนิดลูกปืนที่คำนวณมาจากกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ใหญ่เกินความจำเป็น

เมื่อพิจารณาแรงกระทำที่คลัตช์ชนิดลูกปืนในรูปที่ 7.3 จะเห็นว่าแรงบิดที่กระทำที่เฟืองโซ่จะมีความสัมพันธ์กับแรง P ตามสมการที่ 7.1 สมมติให้มุม 19° เป็นมุม θ ซึ่งถ้ามุม θ นี้มีขนาดมากขึ้น จุด O ซึ่งเป็นจุดสัมผัสระหว่างเพลากับเม็ดลูกปืนจะยิ่งเคลื่อนที่ต่ำลงมาทางใต้ของเม็ดลูกปืน และจะทำให้แรง P มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้เขี้ยวของคลัตช์ลูกปืนและแหวนเลื่อนต้องรับแรงมาก

ขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในทางกลับกัน ถ้ามุม θ มีขนาดเล็กลง จะทำให้แรง P มีค่าน้อยลง ส่งผลให้แรงที่เขี้ยวของคลัตช์ชนิดลูกปืนและแหวนเลื่อนได้รับมีค่าน้อยลงด้วยตามสมการที่ 7.2 และ 7.3 แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาลักษณะของกลไกคลัตช์ชนิดลูกปืนนี้แล้ว จะพบว่าถ้าต้องการให้มุม θ มีขนาดเล็กลง ตำแหน่งของจุด O จะต้องสูงขึ้นจนเกือบถึงแนวแกน x ซึ่งการที่จะเป็นเช่นนั้นได้ จุดศูนย์กลางเพลาอาจต้องเลื่อนออกห่างจากเม็ดลูกปืนออกไป เป็นผลทำให้ขนาดของเพลาใหญ่ขึ้น จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของจุด O ที่เหมาะสม จะช่วยในการดันเม็ดลูกปืนให้ติดกับแหวนเลื่อน ทำให้เม็ดลูกปืนเลื่อนเข้าไปในช่องรองรับลูกปืนของแหวนเลื่อนได้ดีในขณะคลัตช์จาก และไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดของเพลาหรือชิ้นส่วนอื่นของรถไถพรวนดินนั้น

เมื่อพิจารณาที่เขี้ยวของคลัตช์ชนิดลูกปืนทางด้าน A-B ที่สัมผัสกับเม็ดลูกปืน ดังแสดงในรูปที่ 7.3 แล้ว พบว่าถ้าด้าน A-B นี้ทำมุม 90° กับแกน x จะทำให้แรงที่กระทำที่เขี้ยวของคลัตช์ชนิดลูกปืนมีค่าลดลง แต่แรงที่กระทำที่แหวนเลื่อนจะมีค่าสูงขึ้น

7.4 การหาค่าความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบคลัตช์ชนิดลูกปืน

ในส่วนของการหาค่าความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบคลัตช์ชนิดลูกปืนนั้น เมื่อพิจารณาลักษณะของคลัตช์ชนิดลูกปืนและแรงกระทำที่คลัตช์ชนิดลูกปืนดังแสดงในรูปที่ 7.3 แล้วจะเห็นว่าเขี้ยวของคลัตช์เป็นจุดที่น่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด โดยที่เขี้ยวของคลัตช์จะต้องรับแรงอัดอันเนื่องมาจากแรงปฏิกิริยาจากเม็ดลูกปืน โดยที่ขนาดของแรงกระทำนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังที่ต้องการส่งผ่าน จะทำการพิจารณาหาค่าความปลอดภัยจากความเสียหายที่จะเกิดขึ้นเป็น 2 กรณี คือ กรณีเสียหายที่ผิวสัมผัสระหว่างเขี้ยวของคลัตช์กับเม็ดลูกปืน และกรณีเสียหายที่บริเวณโคนเขี้ยวของคลัตช์ชนิดลูกปืนเนื่องจากโมเมนต์ดัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

7.4.1 กรณีเสียหายที่ผิวสัมผัสระหว่างเขี้ยวของคลัตช์กับเม็ดลูกปืนเนื่องจากความเค้นอัด

ในการคำนวณจะใช้สมการความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวโค้งทรงกลม 2 อัน โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

1. บริเวณที่ผิวสัมผัสไม่มีแรงเสียดทาน
2. วัตถุที่สัมผัสกันเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Elastic body) มีลักษณะเนื้อเดียว (Homogeneous) มีคุณสมบัติเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) และผิวเรียบ
3. รัศมีของวัตถุทั้งสองใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดขอบเขตของพื้นผิวที่สัมผัสกัน

จะได้สมการความดันในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสเป็น [12]

$$p_O = 0.578\sqrt[3]{\frac{R_F(1/R_1+1/R_2)^2}{\Delta^2}} \quad (7.5)$$

$$\Delta = \frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (7.6)$$

โดย R_F = แรงปฏิกิริยาที่ลูกปืนกระทำกับเขี้ยวของคลัตช์ (N)

R_1 = รัศมีของวัตถุอันที่หนึ่ง

R_2 = รัศมีของวัตถุอันที่สอง

ν_1 = poison's ratio ของวัตถุอันที่หนึ่ง

ν_2 = poison's ratio ของวัตถุอันที่สอง

E_1 = Young Modulus ของวัตถุอันที่หนึ่ง

E_2 = Young Modulus ของวัตถุอันที่สอง

ซึ่งค่าความดัน p_o นี้ก็คือ ค่าความเค้นอัด (σ_z) นั่นเอง ในกรณีของเขี้ยวคลัตช์กับเม็ดลูกปืนดังแสดงในรูปที่ 7.3 นั้น เพื่อความสะดวกจึงพิจารณาให้ผิวสัมผัสเป็นผิวเรียบกับผิวทรงกลม โดยกำหนดให้ R_2 มีค่าเป็นอนันต์

7.4.2 กรณีเสียหายที่บริเวณโคนเขี้ยวของคลัตช์ชนิดลูกปืนเนื่องจากโมเมนต์ดัด

ในกรณีนี้จะทำการคำนวณหาความเค้นเนื่องจากโมเมนต์ดัด โดยใช้วิธีการพิจารณาเช่นเดียวกันกับกรณีของแรงกระทำที่ฟันของเฟืองชนิดฟันตรง โดยมีสมการความเค้นเป็น

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I}K_dK_o \quad (7.7)$$

ซึ่งจากรูปที่ 7.4 แรงปฏิกิริยาที่ลูกปืนกระทำกับเขี้ยวของคลัตช์มีตำแหน่งดังรูป จุด C เป็นจุดที่จะเกิดความเสียหายเนื่องจากโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรง R_F คูณกับระยะ I นั่นคือ

$$M = R_F w \quad (7.8)$$

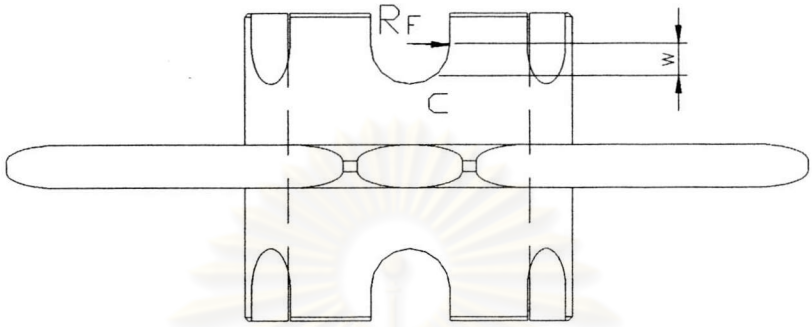
โดย M = โมเมนต์ดัดที่กระทำกับเขี้ยวคลัตช์ที่จุด C

w = เป็นระยะจากจุดที่แรงกระทำถึงจุด C

ค่า c จากสมการที่ 7.7 ประมาณได้จากสมการ

$$c = \frac{(a/2 + b/2)}{2} \qquad (7.9)$$

โดย a และ b เป็นระยะดังแสดงในรูปที่ 7.5

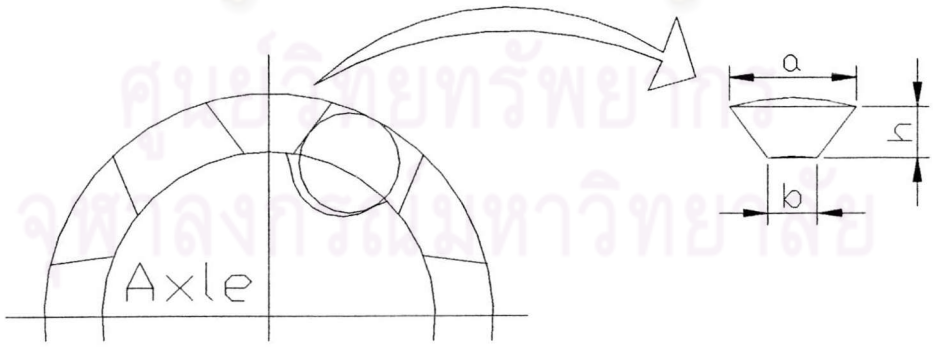


รูปที่ 7.4 ตำแหน่งของแรงกระทำที่เขี้ยวของคลัตช์ชนิดลูกปืน

ส่วนค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (I) หาได้จากการประมาณพื้นที่หน้าตัดของเขี้ยวคลัตช์เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ดังแสดงในรูปที่ 7.5 ซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการ [13]

$$I = \frac{h}{48}(a+b)(a^2+b^2) \qquad (7.10)$$

โดย h เป็นระยะดังแสดงในรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 การประมาณหน้าตัดเขี้ยวของคลัตช์ชนิดลูกปืนเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู

ค่า K_d และค่า K_o เป็นตัวประกอบการคูณในส่วนของพลศาสตร์ (Dynamic) และแรงกระแทก (Shock load) ตามลำดับ อนึ่งค่าทั้งสองนี้ได้มาจากการทดลองกับวัสดุต่างๆ ที่เงื่อนไขการทำงาน

ต่างๆ กัน และเนื่องจากไม่มีข้อมูลของตัวประกอบการคูณทั้งสองตัวนี้ในกรณีที่เป็นคลัตช์ชนิดลูกปืน จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของค่าทั้งสองนี้ในกรณีที่เป็นเฟืองชนิดฟันตรง โดย K_d จะมีค่าประมาณ 1-4 และ K_o จะมีค่าประมาณ 1-2.25 [12]

ในการออกแบบคลัตช์ชนิดลูกปืนนี้ ผู้ออกแบบจะต้องเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสม โดยจากตารางคุณสมบัติของวัสดุชนิดนั้นจะได้ค่าความต้านแรงดึงคราก (Yield strength, σ_y) และค่าความเค้นอัดสูงสุด (Ultimate compressive stress, σ_{uc}) ซึ่งจากคุณสมบัติเหล่านี้จะสามารถหาค่าความปลอดภัยได้จาก

กรณีเสียหายที่ผิวสัมผัสระหว่างเขี้ยวของคลัตช์กับเม็ดลูกปืน

$$(F.S.)_C = \frac{\sigma_{uc}}{\sigma_z} \qquad (7.11)$$

กรณีเสียหายที่บริเวณโคนเขี้ยวของคลัตช์ชนิดลูกปืนเนื่องจากโมเมนต์ดัด

$$(F.S.)_b = \frac{\sigma_{yb}}{\sigma_b} \qquad (7.12)$$

โดย $(F.S.)_c$ = ค่าความปลอดภัยในกรณีของความเค้นอัดที่ผิวสัมผัส

$(F.S.)_b$ = ค่าความปลอดภัยในกรณีของความเค้นดัดที่โคนเขี้ยวคลัตช์

ตัวอย่างการคำนวณค่าความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบคลัตช์ชนิดลูกปืน

1. พิจารณาการเสียหายที่ผิวสัมผัสระหว่างเขี้ยวของคลัตช์กับเม็ดลูกปืน

เนื่องจากไม่ทราบชนิดของวัสดุและกรรมวิธีในการผลิต จึงสมมติให้วัสดุที่ทำคลัตช์ทำจากเหล็กผสมอัลลอย (Alloy steel) ชุบแข็ง ซึ่งมีคุณสมบัติ [14] ดังนี้

$E = 207\times10^9$ N/m^2, $\sigma_y = 1.77\times10^9$ N/m^2

$\sigma_{uc} = 2.38\times10^9$ N/m^2 และ $\nu = 0.3$

และเม็ดลูกปืนทำจากแมกนีเซียมผสมอัลลอย (Magnesium alloy) ซึ่งมีคุณสมบัติ [12] ดังนี้

$E = 45\times10^9$ N/m^2, $\nu = 0.3$

จากสมการที่ 7.4 จะได้แรงฉุดลากรวมเป็น 784.532 N คิดเป็นแรงบิดที่เพลาล้อของรถไถพรวนดินได้จากสมการ

$$T_{aT} = P_g \times \frac{D_W}{2} \qquad (7.13)$$

โดย T_{aT} = แรงบิดที่เพลาล้อของรถไถพรวนดิน (N-m)

D_W = เส้นผ่าศูนย์กลางล้อรถไถพรวนดินมีค่า = 0.495 เมตร

จะได้ T_{aT} = 194.17 N-m

ในกรณีของรถพ่วงแรงบิดจะกระจายไปสู่เพลาล้อทั้งสองข้างโดยเท่าๆ กัน ดังนั้น แรงบิดที่เพลาล้อเพียงข้างเดียว

$$T = \frac{T_{aT}}{2} = 97.1 \text{ N-m}$$

นำไปแทนในสมการที่ 7.1 จะได้แรง P เป็น 1097.17 N จากนั้นจึงนำแรง P ที่ได้ไปแทนในสมการที่ 7.2 จะได้แรงที่เขี้ยวของคลัตช์กระทำกับเม็ดลูกปืนเป็น 937.44 N ซึ่งก็คือแรง R_F นั่นเอง

ในกรณีการเสียหายที่ผิวสัมผัสระหว่างเขี้ยวของคลัตช์กับเม็ดลูกปืน ให้นำค่าต่างๆ แทนในสมการที่ 7.5 และ 7.6 โดยให้รัศมีของเม็ดลูกปืนเป็น 5.12 มม. จะได้

$$\sigma_Z = 2.295 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

จากนั้นจึงนำไปแทนในสมการที่ 7.11 จะได้

$$(F.S.)_c = 1.04$$

2. พิจารณาการเสียหายที่โคนเขี้ยวของคลัตช์เนื่องจากโมเมนต์ดัด

จากสมการที่ 7.7-7.10 ทำการแทนค่าต่างๆ ดังนี้

R_F	=	937.44	N,	w	=	4	มม.
a	=	13.07	มม.,	b	=	4.7	มม.
h	=	5.2	มม.,	K_d	=	2	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และ K_o = 1.75

จะได้

$$\sigma_b = 157 \quad kN/m^2$$

แทนในสมการที่ 7.12 จะได้

$$(F.S.)_b = 11274$$

จากค่าความปลอดภัยที่คำนวณได้นี้ จะเห็นได้ว่าในกรณีของการเสียหายที่ผิวสัมผัสเนื่องจากความเค้นอัดจะมีค่าสูงมาก เนื่องจากพิจารณาให้เป็นการสัมผัสระหว่างผิวเรียบกับผิวทรงกลม ซึ่งจริงๆ แล้วควรเป็นการสัมผัสกันระหว่างผิวทรงกลมที่เป็นเม็ดลูกปืนกับผิวโค้งทรงกลมของเขี้ยวคลัตช์ที่เว้าเพื่อรองรับเม็ดลูกปืน ซึ่งจะทำให้ R_2 มีค่าเป็นลบ ส่งผลให้ความเค้นที่คำนวณได้มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามพบว่ากรณีการเสียหายที่ผิวสัมผัสระหว่างเขี้ยวของคลัตช์กับเม็ดลูกปืนเนื่องจากความเค้นอัดมีโอกาสเกิดขึ้นสูงกว่ากรณีการเสียหายที่โคนเขี้ยวคลัตช์เนื่องจากโมเมนต์ดัด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงควรพิจารณาเป็นพิเศษ อนึ่งในการออกแบบใช้งานจริงสำหรับชิ้นส่วนที่รับแรงกระแทกนั้นควรออกแบบโดยเลือกใช้ค่าความปลอดภัยประมาณ 5-7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย