การจำลองพฤติกรรมการไหลของเม็ดแห้งและคุณสมบัติฝายช่องเปิด

Simulations for dry granular flows behavior and open check dam properties

ทศพล ทุ่งฝนภูมิ[1,*] ปริตา บุญชอบ[1] เอกรินทร์ สุดใจ[1] ปรัชญา แสนแปง[1] กรกฎ นุสิทธิ์[2] และ สุริยาวุธ ประอ้าย[3]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[2] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก
[3] ศูนย์ความเป็นเลิศ RS2GH คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
**Corresponding author; E-mail address: 63103777@up.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองการไหลของเม็ดแห้งในรางเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของเม็ดแห้งเมื่อผ่านฝายช่องเปิด ดำเนินการจำลองโดยใช้ Discrete element method (DEM) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของเม็ดแห้งที่มีรูปทรงหลายด้านจำเป็นต้องใช้วิธี Contact dynamics (CD) ตัวแปรสำคัญที่ต้องการศึกษาคือ รูปแบบและมุมภายในของฝายช่องเปิด ความลาดชันการไหลถูกกำหนด 30 องศาและระยะช่องว่างของฝาย $1.22d_{95}$ การศึกษาพบว่า ฝายรูปแบบรูปตัวอัลฟามีประสิทธิภาพการดูดซับแรงกระแทกและการดักจับมากกว่าฝายรูปแบบรูปตัววี ประสิทธิภาพการดักจับของฝายช่องเปิดสองรูปแบบนี้มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดของแต่ละช่วงมุมภายในของฝายมากกว่าการดูดซับแรงกระแทก ดังนั้นฝายช่องเปิดทุกฝายที่ได้ทำการศึกษาในการดูดซับแรงกระแทกไม่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของฝายช่องเปิดเมื่อมุมภายในเปลี่ยนไปในช่วง 60 ถึง 100 องศา แต่ประสิทธิภาพการดักจับบ่งบอกประสิทธิภาพของฝายได้อย่างชัดเจนเมื่อรูปแบบและมุมภายในของฝายที่ต่างกัน

คำสำคัญ: การไหลของเม็ดแห้ง, ฝายช่องเปิด, การดูดซับแรงกระแทก, ประสิทธิภาพการดักจับ

Abstract

This article presents a simulation of the flow of dry granules in a flume to study the flow behavior of dry granules when passing through an open check dam. The simulation was carried out using the Discrete element method (DEM) to study the flow behavior of polyhedral granules. The contact dynamics method (CD) is required. The important variables to be studied were the pattern and internal angles of open check dams. The flow slope was determined at 30 degrees, and the spacing of each pile was $1.22d_{95}$. In conclusion Alpha-shaped open check dams have reduced impact force and better trapping efficiency than V-shaped open check dams. The trapping efficiency of these two open check dam patterns differs clearly from each of the internal angles of the open check dams more than impact force reduction. Consequently, all the open check dams studied in impact force reduction were insignificant to the efficiency of the open check dams when the internal angle changed in the range of 60 to 100 degrees, but the trapping efficiency indicates the open check dam's effectiveness when different pattern and internal angles of the open check dam.

Keywords: Dry Granular Flow, Open Check Dam, Impact Force Reduction, Trapping Efficiency

1. คำนำ

การไหลของดินโคลนเป็นลักษณะการไหลของวัสดุหลายอย่างรวมกัน โดยปกติดินโคลนเหล่านั้นจะสะสมตะกอนหยาบส่วนใหญ่ เช่น หิน กรวด ทราย [1] การไหลลักษณะนี้เป็นหนึ่งในเหตุการณ์ที่อันตรายและทำลายล้างสูง ซึ่งเกิดขึ้นบนพื้นที่ภูเขาบ่อยครั้งในภาคเหนือของประเทศไทย เมื่อวันที่ 23 สิงหาคม 2563 บ้านห้วยผึ้ง ต.ห้วยผา อ.เมือง จ.แม่ฮ่องสอน [2] เกิดฝนตกหนัก น้ำป่าพัดพาดินโคลน และตะกอนทับถมเส้นทางหลายช่วงถนน ส่งผลให้ผู้ประกอบการชายแดนระหว่างไทยกับเมียนมาต้องหยุดชะงักกิจการชั่วคราว (รูปที่ 1) โดยเหตุการณ์เกิดการไหลบ่าของพื้นผิวขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของวัสดุที่เป็นของแข็งจำนวนมากบนเนินเขา มักเกิดพร้อมกับหรือเกิดหลังจากน้ำป่าไหลหลาก จนนำไปสู่การไหลของดินโคลนที่มีความสามารถทำลายล้างได้ [1,3]

โครงสร้างฝายช่องเปิดเป็นโครงสร้างที่มีช่องเปิดกว้างเกินครึ่งของความกว้างและความสูงของฝาย [4,5] โดยทั่วไปประกอบด้วยเสาเข็ม คุณสมบัติของฝายสามารถดักจับเศษหินและตะกอนต่าง ๆ มีการทดสอบรูปแบบรูปตัววีและแนวตรง [1] ในการศึกษานี้ต้องการพัฒนามาตรการบรรเทาภัยโดยใช้โครงสร้างควบคุมการไหลของเศษซาก ได้แก่ ฝายช่องเปิดเสาเข็ม วิธีการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการไหลและการสะสมของเศษซากหรือตะกอนที่ไหลไปตามกระแสน้ำ ปัจจุบันมีการใช้งานอย่าง

แพร่หลายทั่วโลกในมาตรการบรรเทาภัยระยะสั้น [4, 6-8] การออกแบบที่เหมาะสมทำให้ฝายช่องเปิดเสาเข็มจะปล่อยให้ตะกอนที่ละเอียดกว่าที่ดักจับไหลผ่านได้และไม่เป็นอันตรายเท่าตะกอนขนาดใหญ่ [1] ในการดักจับตะกอนบางส่วนเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมเพราะไม่ได้ปิดกั้นทางเดินน้ำ [8-10]

การใช้ Discrete Element Method (DEM) ในการจำลองเพื่อแก้ปัญหาเป็นการจำลองอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากเคลื่อนที่ในสถานการณ์ต่าง ๆ เนื่องจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมีความยุ่งยากและต้นทุนสูง จึงมีวิธีการแก้ปัญหาเหล่านั้นและแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพ [11-15] แต่ถึงกระนั้น การใช้ DEM ในการจำลองจำเป็นต้องใช้เวลานาน [16] จึงจำเป็นต้องมีการมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะจุดที่สำคัญ [17,18] การศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างแบบแยก [1,19] มีวัตถุประสงค์การศึกษาประสิทธิภาพการดักจับของฝายช่องเปิดและพฤติกรรมความดันบนร่องโครงสร้าง พบว่า ความกว้างของร่อง $1.0d_{95}$ ถึง $1.36d_{95}$ โดยที่ d_{95} คือ ขนาดเม็ดหินที่มีขนาดอื่นเล็กกว่านี้จำนวน 95 % สามารถดักจับตะกอนได้ดีเมื่อการปล่อยตะกอนสูงสุดไม่เกิน 6 m^2/s และความดันที่อยู่ใกล้ร่องโครงสร้างสูงกว่าบริเวณอื่นเกือบสองเท่า

ในการศึกษานี้ใช้ซอฟต์แวร์ LMGC90 ซึ่งเป็น open-source platform จำลองการไหล 3 มิติของเม็ดแห้งรูปทรงหลายด้าน โดยอาศัย Discrete Element Method (DEM) และ Contact Dynamic (CD) ซึ่งเป็นวิธีย่อยของ DEM โดยวิธี CD สามารถจำลองอนุภาคที่นอกเหนือจากทรงกลม [14] จุดมุ่งหมายการศึกษานี้คือ การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแรงกระแทกและการดักจับเมื่อมุมภายในของฝายช่องเปิดเปลี่ยนไปและรูปแบบต่าง ๆ ของฝายช่องเปิด เพื่อให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนและนำไปสู่การต่อยอดการศึกษาในการประยุกต์ใช้ที่เหมาะสมกับความต้องการดักจับตะกอนบางส่วน



รูปที่ 1 น้ำป่าไหลหลากพัดพาดินโคลน เศษซาก ทับถมเส้นทางเดินทาง วันที่ 23 สิงหาคม 2563 บ้านห้วยผึ้ง ต.ห้วยผา อ.เมือง จ.แม่ฮ่องสอน [1]

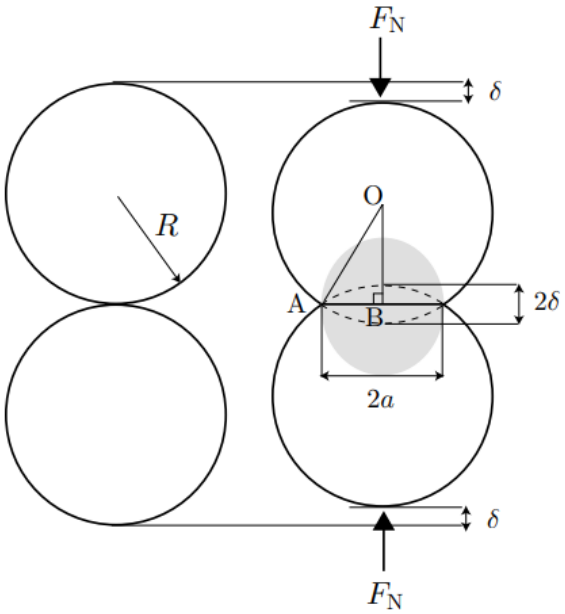
2. ทฤษฎีและวิธีการวิจัย

2.1 ปฏิสัมพันธ์ระดับอนุภาค

แรงสัมผัสระหว่างเม็ดแห้งสองเม็ดมักจะแบ่งออกเป็นแรงตั้งฉากและแรงสัมผัส อันดับแรกพิจารณาแรงตั้งฉากของอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่บีบเข้าด้วยกันจากแรงภายนอก (F_N) แรงนี้มาจากการเสียรูปยืดหยุ่นที่สัมผัสกัน 2δ (รูปที่ 2) [20,21] สามารถคำนวณการกระจายความเค้นและเรขาคณิตสัมผัสเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง F_N และ δ จากสมการ (1)

$$F_N = \frac{4E\sqrt{R}}{3(1-\nu_P^2)}\delta^{3/2} \quad \text{และ} \quad a = \sqrt{\delta R} \tag{1}$$

เมื่อ E คือ โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุ, a คือ รัศมีของพื้นที่สัมผัส ν_P คือ อัตราส่วนปัวซองของวัสดุ และ R คือ รัศมีของทรงกลม



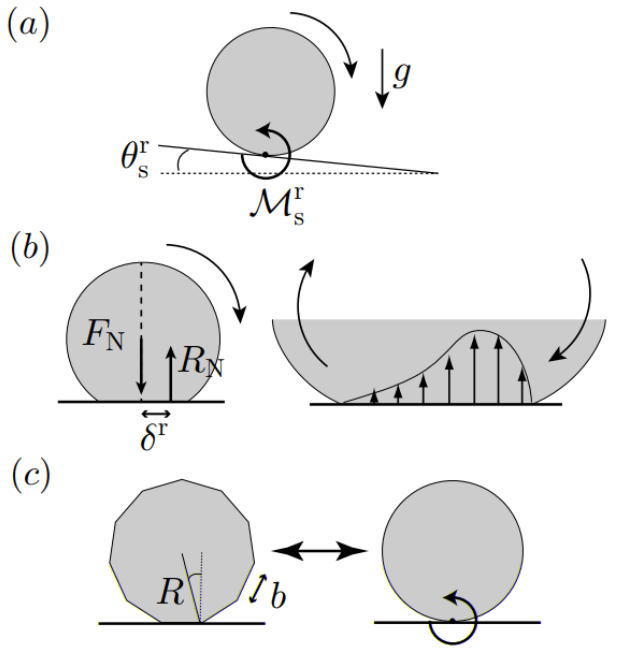
รูปที่ 2 การสัมผัสแบบยืดหยุ่นระหว่างสองอนุภาคและการเสียรูปเฉพาะที่ภายในโซนสีเทาของขนาด a [21]

2.2 แรงต้านทานการหมุน

แรงต้านทานต่อการเคลื่อนที่แบบหมุนเรียกว่าแรงเสียดทานจากการหมุน แรงเสียดทานของการหมุนสามารถจำลองได้โดยเพิ่มแรงปฏิกิริยาที่จุดสัมผัสด้วยแรงบิด M_s^r โดยเปรียบเทียบกับกฎ Amontons-Coulomb [21] ดังสมการ (2)

$$M_s^r = \mu_s^r R_N R \tag{2}$$

โดยที่ M_s^r คือ แรงบิดขั้นต่ำที่จำเป็นในการทำให้ทรงกลมเคลื่อนที่, R_N คือ แรงปฏิกิริยาตั้งฉาก และ μ_s^r คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุนแบบไดนามิก แผนผังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 (a) ความลาดชันต่ำที่สุด $\left(\theta_s^r\right)$ เพื่อให้อนุภาคเริ่มหมุนบนระนาบ โดยจำลองจากแรงเสียดทานจากการหมุน $\left(M_s^r\right)$, (b) ความต้านทานการหมุนมาจากความไม่สมดุลของแรงปฏิกิริยาที่บริเวณสัมผัสเมื่อใช้แรงที่ทำให้หมุน, (c) ความต้านทานการหมุนของอนุภาครูปหลายเหลี่ยมสามารถจับคู่กับอนุภาคทรงกลมที่มีการเสียดสีแบบหมุนได้ [21]

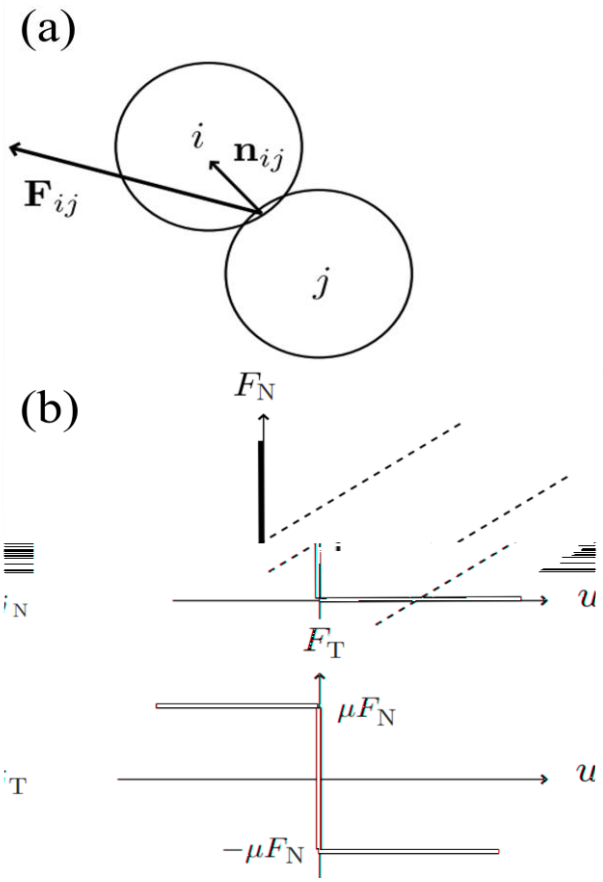
2.3 Contact laws

วิธี Contact Dynamic (CD) ขึ้นอยู่กับแนวคิดของอนุภาคที่แข็งอย่างสมบูรณ์แบบและตามกฎของคูลอมบ์ [22,23] การสัมผัสระหว่างสองอนุภาคสามารถอธิบายตามรูปที่ 4 โดยกฎสองข้อ คือ ข้อแรก อนุภาคทั้งสองไม่สามารถสอดแทรกได้ คือแรงตั้งฉากเป็นศูนย์หากไม่มีการสัมผัส ข้อสอง กฎคูลอมบ์ระบุว่าแรงสัมผัสเท่ากับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคูณแรงตั้งฉาก ถ้าความเร็วสัมผัสที่หน้าสัมผัสไม่เป็นศูนย์และน้อยกว่าค่าเกณฑ์นี้ วิธี CD นั้นใช้การแก้สมการการเคลื่อนที่โดยปริยายและกำหนดชุดของแรงสัมผัสในแต่ละขั้นตอนซึ่งเป็นไปตามกฎความไม่สม่ำเสมอ [21] สำหรับระบบสมการเบื้องต้นที่ไม่มีแรงเสียดทาน [13,24] เป็นการตรวจสอบการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วของอนุภาคจะถูกควบคุมโดยสมการ (4) ในช่วงเวลาที่กำหนดข้อจำกัดทางจลนศาสตร์ทั้งหมดที่แสดงเป็นนัยโดยการสัมผัสและการหมุนขององค์ประกอบ (element) ที่อาจเป็นไปได้จะถูกนำมาพิจารณาพร้อม ๆ กันเพื่อกำหนดความเร็วและแรงสัมผัสทั้งหมด

$$u_i^{t+1} = u_i^t + \frac{dt}{m}\left[\sum_{j\neq i} F_{ij}^t + F_t^{ext^t}\right] \quad (3)$$

$$u_i^{t+1} = u_i^t + \frac{dt}{m}\left[\sum_{k\neq i} F_{ik}^{t+1/2} + F_t^{ext}\right] \quad (4)$$

โดยที่ k คือดัชนีของอนุภาคที่สัมผัสกับอนุภาค i ความแตกต่างที่สำคัญจากสมการ (3) ที่ถูกใช้ในวิธี Molecular Dynamics (MD) [15,21] คือแรงสัมผัสก่อนหน้าไม่แสดงเวลา t แต่ในเวลาต่อมาแสดง $t+\frac{1}{2}$, F_i^{ext} คือ แรงภายนอก ณ เวลา t บนอนุภาค i (โดยปกติคือ แรงโน้มถ่วง), F_{ij} คือ การสัมผัสที่กระทำโดยอนุภาค j บน i, u_i คือ ความเร็วของอนุภาค และ m คือ มวลของอนุภาค

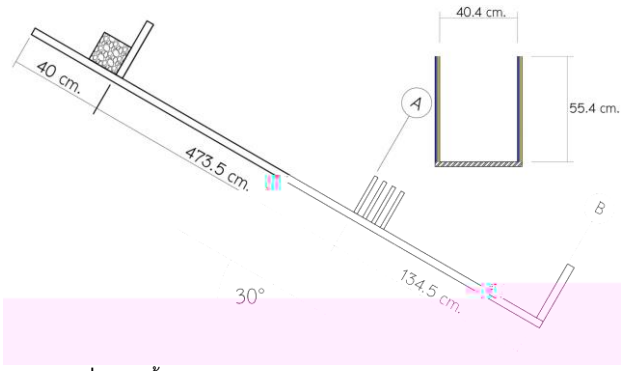


รูปที่ 4 (a) การสัมผัสระหว่างอนุภาค i และ j, (b) กฎการสัมผัสที่ไม่สม่ำเสมอจากกราฟแสดงแรงตั้งฉาก F_N และแรงสัมผัส F_T เป็นฟังก์ชันของความเร็วตั้งฉากและความเร็วสัมผัส u_{ij_N} และ u_{ij_T} [21]

2.4 แบบจำลอง

2.4.1 รางน้ำ

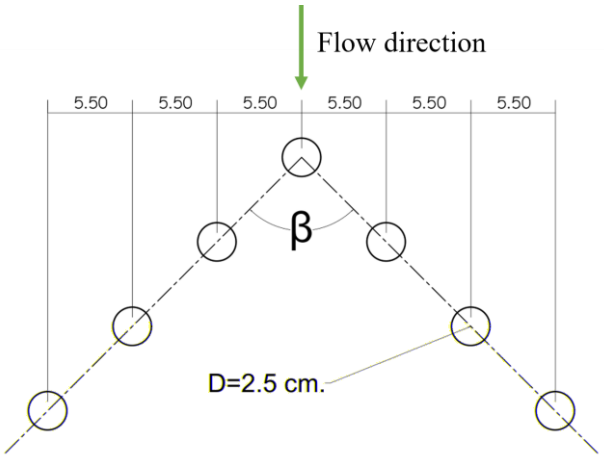
การจำลองการไหลในรางน้ำขนาดหน้าตัดกว้าง 40.4 ซ.ม. สูง 55.4 ซ.ม. ระยะทางการไหลของเม็ดแห้งตั้งแต่หน้ากองวัสดุถึงหน้าฝายช่องเปิด 473.5 ซ.ม. (จุด A ในรูปที่ 5) และระยะห่างหน้าฝายช่องเปิดถึงกำแพง 134.5 ซ.ม. (จุด B ในรูปที่ 5) การจำลองทุกการจำลองมีความชันการไหล 30 องศา ซึ่งเป็นความลาดชันที่เหมาะสมในการแสดงถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพของฝายช่องเปิดในการควบคุมตะกอน



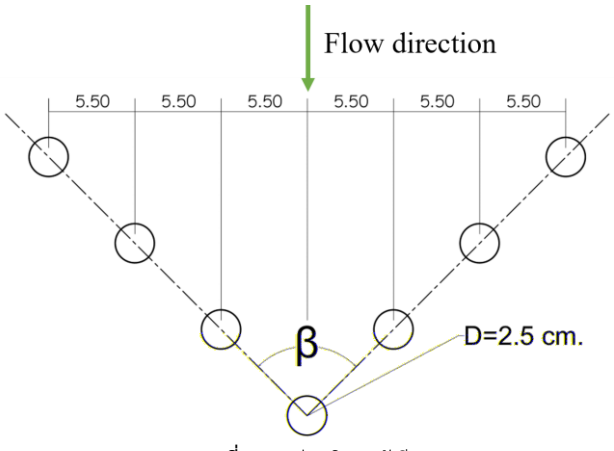
รูปที่ 5 รางน้ำ; A คือ ตำแหน่งฝายช่องเปิด, B คือ ตำแหน่งฝายทึบ

2.4.2 ฝายช่องเปิด

ลักษณะฝายช่องเปิดที่สร้างขึ้นเป็นรูปทรงกระบอก โดยสร้างรูปหลายเหลี่ยม 2 มิติ 16 ด้าน แล้วดึงให้ยาวออกเป็น 27 ซ.ม. ลักษณะการจัดเรียงแสดงไว้ดังรูปที่ 6, 7 สำหรับฝายช่องเปิดอัลฟา และตัววี ตามลำดับ มุมภายใน β = 60, 80, 90 และ 100 องศา ระยะห่างช่องว่างแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล (s) = 5.5-2.5 = 3 ซ.ม. สัญลักษณ์ที่แสดงในแผนภูมิยกตัวอย่างเช่น A90 หมายถึง การทดลองฝายช่องเปิดตัวอัลฟาที่มีมุมฝายใน 90 องศา ดังนั้นสัญลักษณ์ทั้งหมด ได้แก่ A60, A80, A90, A100, V60, V80, V90 และ V100



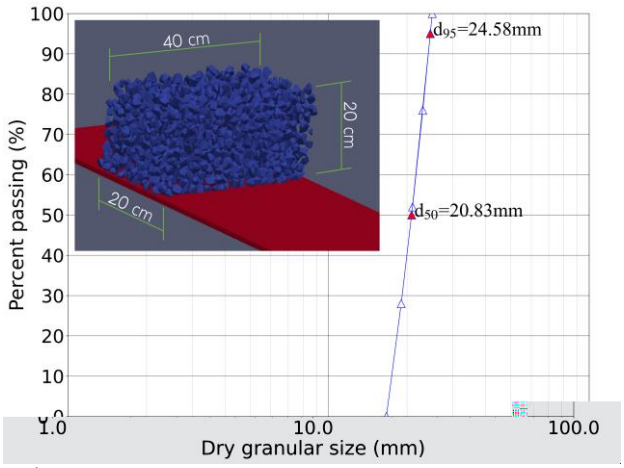
รูปที่ 6 ฝายช่องเปิดรูปตัวอัลฟา



รูปที่ 7 ฝายช่องเปิดรูปตัววี

2.4.3 เม็ดแห้ง

เม็ดแห้งถูกสร้างขึ้นในกล่อง 4 เหลี่ยม 3 มิติ มีความกว้าง 20 ซ.ม. ยาว 40 ซ.ม. และสูง 20 ซ.ม. เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการไหลของเม็ดแห้งมีการสร้างเป็นลักษณะกล่องสี่เหลี่ยมและขนาดกล่องที่สร้างขึ้นทำให้เม็ดแห้งมีขนาดที่เหมาะสมในการแสดงนัยสำคัญของประสิทธิภาพฝายช่องเปิด [1,12,19,26] ขั้นตอนการสร้างเม็ดแห้ง อย่างแรก สร้างเม็ดทรงกลมบรรจุในกล่องแล้วหลังจากนั้นตัดเฉือนให้เป็นรูปทรงหลายด้าน ได้แก่ 16, 24 และ 32 ด้าน แต่ละด้านมีขนาดไม่เท่ากันเป็นแบบสุ่ม (รูปที่ 8) การกระจายขนาดเม็ดแห้งซึ่งเป็นลักษณะการจายแบบสม่ำเสมอ d_{95} = 2.46 ซ.ม. ดังนั้น s/d_{95} = 1.22 ซึ่งเป็นอัตราส่วนช่องว่างที่ทำให้ฝายช่องเปิดสามารถดักจับตะกอนได้ดี [1] และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 8 แผนภูมิการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดแห้งและลักษณะการบรรจุเม็ดแห้งใน LMGC90 แบบ 3 มิติ

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

วัสดุที่เม็ดแห้งสัมผัส	เม็ดแห้ง	พื้นราง	ผนังราง	ฝายช่องเปิด	ฝายทึบ
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.89	0.35	0.35	0.35	0.35

2.5 ประสิทธิภาพการดักจับ

ประสิทธิภาพการดักจับของฝายคือปริมาณวัสดุที่ถูกฝายดักจับส่วนด้วยปริมาณทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการ (5) เมื่อ V_e คือ ปริมาตรของเม็ดแห้งทั้งหมด และ V_s คือ ปริมาตรของเม็ดแห้งที่ไหลผ่านฝาย [25]

$$E = \frac{V_e - V_s}{V_e} \quad (5)$$

อย่างไรก็ตาม จากการคำนวณของ LMGC90 โดยวิธีน้ำหนักของเม็ดแห้งบนรางในแต่ละช่วงของพื้นรางจึงต้องมีการแปลงสมการ

$$\rho = \frac{m}{v}, \qquad E = \frac{\frac{m_e}{\rho_e} - \frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_e}{\rho_e}}$$

เนื่องจากวัสดุเม็ดแห้งทั้งหมดมีความหนาแน่นเดียวกัน

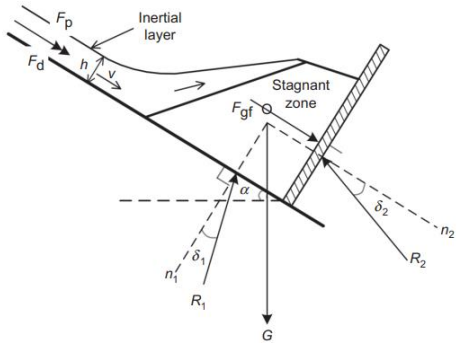
$$E = 1 - \frac{m_s}{m_e} \tag{6}$$

โดย m_s คือ มวลเม็ดแห้งที่ไหลผ่านฝาย และ m_e คือ มวลทั้งหมดของเม็ดแห้ง

2.6 แรงกระแทก

ปริมาณแรงกระแทกทั้งหมดที่กระทำต่อสิ่งกีดขวางแสดงดังรูปที่ 9 และจากสมการ (7) โดยที่ F_d คือ แรงหน่วงเป็นแรงที่ต้านการเคลื่อนที่ซึ่งวัตถุต้องเอาชนะแรงนี้จึงจะเกิดการเคลื่อนที่, F_p คือ แรงเนื่องจากแรงดันดินด้านข้าง และ F_{gf} คือ แรงที่ถูกสร้างจากการหยุดนิ่งของดินที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส [26] ในการจำลองปริมาณแรงกระแทกทั้งหมดที่กระทำต่อฝายทึบแสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับแรงกระแทกของฝายช่องเปิด

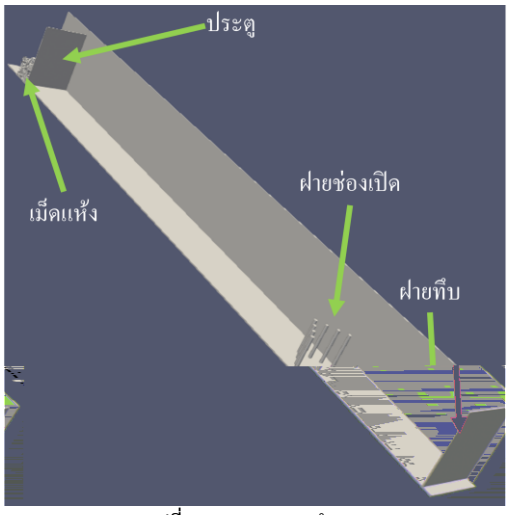
$$F = F_d + F_p + F_{gf} \tag{7}$$



รูปที่ 9 ภาพประกอบแผนผังการไหลของเม็ดกระทบกับกำแพงกันดิน [26]

2.7 การจำลอง

เริ่มต้นดำเนินการสร้างทรงกลมในกล่องสี่เหลี่ยมแล้วตัดแต่งให้เป็นรูปทรงหลายด้าน จากนั้นจึงสร้างพื้นราง ประตู ฝายช่องเปิด และฝายทึบ (รูปที่ 10) ในการจำลองการไหลของเม็ดเริ่มหลังจากเม็ดแห้งที่อยู่ในถังเก็บหยุดนิ่ง จากนั้นจึงทำการลบประตูออกเพื่อจำลองให้เสมือนว่าเกิดการพังทลายของหน้าดินหรือเศษหิน เม็ดแห้งจะไหลมาถึงหน้าฝายช่องเปิด เม็ดแห้งจะถูกดักจับและบางส่วนจะไหลผ่านฝายไปกระทบกับฝายทึบ ทุกการทดลองกำหนดความลาดเอียงของพื้นราง 30 องศา ฝายช่องเปิดที่ใช้ได้แก่ ฝายรูปตัวอัลฟาและตัววี โดยมี β = 60, 80, 90 และ 100 องศา จากฝายที่กล่าวมามีทั้งหมด 8 รูปแบบ ปริมาณแรงที่กระทำต่อฝายทึบแสดงถึงการดูดซับแรงกระแทกของฝายช่องเปิดเมื่อเม็ดแห้งไหลผ่านฝายช่องเปิดไปกระทบกับสิ่งกีดขวางข้างหลัง

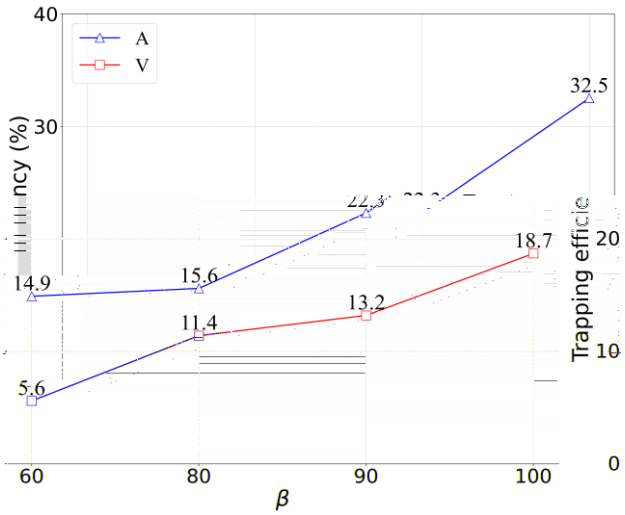


รูปที่ 10 ภาพรวมการจำลอง

3. ผลการศึกษา

3.1 ประสิทธิภาพการดักจับ

จากสมการ (5) ปริมาณเม็ดแห้งสุดท้ายเมื่อพฤติกรรมการไหลสิ้นสุดลงแสดงถึงประสิทธิภาพการดักจับของฝายช่องเปิดคือ อัตราส่วนปริมาตรเม็ดแห้งที่ถูกฝายดักจับกับปริมาตรของเม็ดแห้งทั้งหมด รูปที่ 11 แสดงประสิทธิภาพการดักจับ (A คือฝายช่องเปิดรูปตัวอัลฟา และ V คือฝายช่องเปิดรูปตัววี) จะเห็นได้ชัดว่า ฝายช่องเปิดรูปแบบรูปตัวอัลฟามีประสิทธิภาพการดักจับที่มากกว่าฝายรูปแบบรูปตัววี นอกจากนี้การเพิ่มมุมภายในของฝายทำให้ฝายมีประสิทธิภาพการดักจับที่มากขึ้น

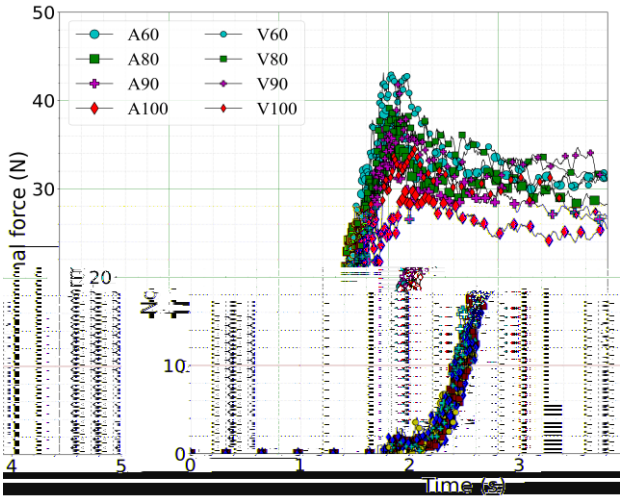


รูปที่ 11 ประสิทธิภาพการดักจับของฝายช่องเปิด

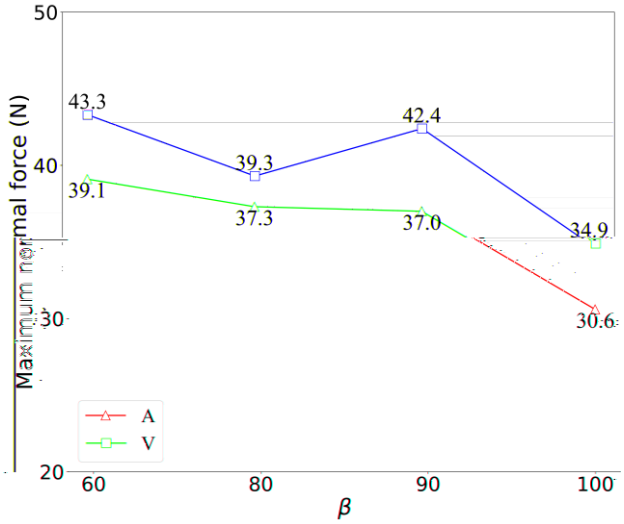
3.2 แรงกระแทก

รูปที่ 12 แสดงแรงตั้งฉากที่กระทำกับฝายทึบ ประมาณแรงตั้งฉากนี้สามารถบ่งบอกถึงการดูดซับของฝายช่องเปิด จะเห็นได้ว่าจากรูปที่ 13 ฝายช่องเปิดรูปแบบรูปตัวอัลฟาสามารถดูดซับแรงกระแทกสูงสุดได้ดีกว่ารูปตัววีและเมื่อมุมภายในของฝาย 100 องศา ดูดซับแรงกระแทกสูงสุด

เนื่องจากปริมาณแรงสูงสุดที่กระทำต่อฝายทึบน้อยที่สุดเพราะถูกดูดซับก่อนหน้านี้



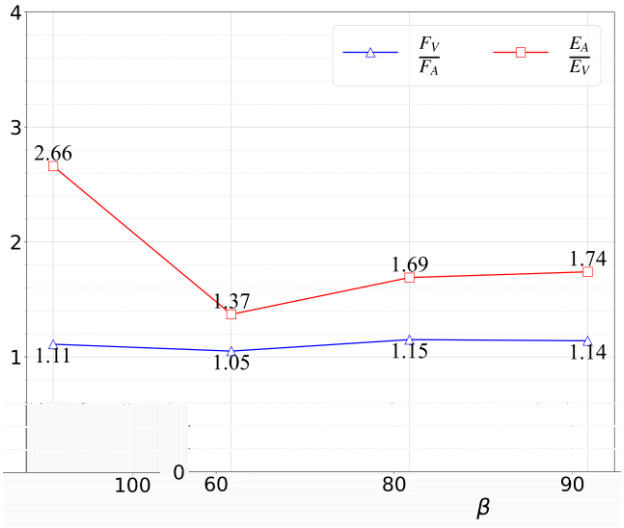
รูปที่ 12 แรงตั้งฉากที่กระทำต่อฝายทึบ



รูปที่ 13 แรงตั้งฉากสูงสุดที่กระทำต่อฝายทึบ

3.3 อัตราส่วนแรงกระแทกสูงสุดของฝายทึบและประสิทธิภาพการดักจับของฝายช่องเปิด

จากรูปที่ 15 แสดงอัตราส่วนที่แตกต่างของประสิทธิภาพของฝายช่องเปิดทั้งสองรูปแบบในการดูดซับแรงกระแทกและการดักจับ โดยที่ F_V และ F_A คือ แรงกระแทกสูงสุดบนฝายทึบเมื่อมีการช่วยดูดซับแรงโดยฝายช่องเปิดรูปตัววีและรูปตัวอัลฟา ตามลำดับ, E_A และ E_V คือ ประสิทธิภาพการดักจับของฝายช่องเปิดรูปตัวอัลฟาและตัววี ตามลำดับ พบว่า ทุกช่วงมุมภายในของฝายช่องเปิดสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ใกล้เคียงกันเมื่อรูปแบบฝายช่องเปิดเดียวกัน แต่เมื่อรูปแบบฝายช่องเปิดต่างกัน ฝายช่องเปิดรูปแบบรูปตัวอัลฟาสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าฝายช่องเปิดรูปแบบรูปตัววี มุมภายในของฝายช่องเปิด 60 องศา ฝายช่องเปิดรูปตัวอัลฟาสามารถดักจับได้มากกว่าฝายช่องเปิดรูปตัววี 2.66 เท่า และมุมภายของฝาย 80 องศา ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับของรูปแบบฝายทั้งสองแตกต่างน้อยที่สุด



รูปที่ 15 อัตราส่วนแรงตั้งฉากสูงสุดที่กระทำต่อฝายทึบ (F_V, F_A) และการดักจับของฝายช่องเปิด (E_A, E_V)

4. บทสรุป

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของเม็ดแห้งผ่านฝายช่องเปิดพบว่า ทุกช่วงมุมภายในของฝายช่องเปิดสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ใกล้เคียงกันเมื่อรูปแบบฝายช่องเปิดเดียวกัน แต่เมื่อรูปแบบฝายช่องเปิดต่างกัน ฝายช่องเปิดรูปตัวอัลฟาสามารถดูดซับแรงกระแทกและดักจับได้ดีกว่าฝายช่องเปิดรูปตัววี ดังนั้นฝายรูปแบบรูปตัวอัลฟามีประสิทธิภาพการดักจับและการดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าฝายรูปแบบรูปตัววีและการเพิ่มมุมภายในทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแรงและการดักจับของฝายช่องเปิดเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาที่ได้จัดสรรพื้นที่ในการติดตั้งการจำลองและขอขอบคุณ Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université de Montpellier ประเทศ ฝรั่งเศส ที่ได้ให้คำแนะนำและการใช้ Server (Secure Sell) ในการคำนวณ (Solutions) โดยมี Prof.Emillien Azéma และ Dr.Teechalit Binaree คอยให้คำปรึกษาอยู่เสมอ

เอกสารอ้างอิง

[1] Silva, M., Costa, S., Canelas, R.B., Pinheiro, A.N. and Cardoso, A.H. (2016). EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF SLIT-CHECK DAMS. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 11, pp. 107-118.

[2] แนวหน้า. พายุถล่ม'แม่ฮ่องสอน'ฝนตกหนักต่อเนื่อง น้ำท่วมฉับพลัน-ดินโคลนถล่ม. (2563). สืบค้นจาก. https://www.naewna.com/local/513521.

[3] Liu, HD., Li, DD., Wang, ZF., Geng, Z. and Li, LD. (2019). Physical modeling on failure mechanism of locked-

segment landslides triggered by heavy precipitation. *Landslides*, 17, pp. 459-469.

[4] Piton, G. and Recking, A. (2015). Design of Sediment Traps with Open Check Dams. II: Woody Debris. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2).

[5] Piton, G. and Recking, A. (2015). Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2).

[6] Marchi, L. and Cavalli, M. (2007). Procedures for the Documentation of Historical Debris Flows: Application to the Chieppena Torrent (Italian Alps). *Environmental Management*, 40, pp. 493-503.

[7] Campisano, A., Cutore, P. and Modica, C. (2014). Improving the Evaluation of Slit-Check Dam Trapping Efficiency by Using a 1D Unsteady Flow Numerical Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(7).

[8] Catella, M., Paris, E. and Solari, L. (2005). Case Study: Efficiency of Slit-Check Dams in the Mountain Region of Versilia Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131, pp. 145-152.

[9] Lien, H., (2003). Design of Slit Dams for Controlling Stony Debris Flows. *International Journal of Sediment Research*, 18(1), pp. 74-87.

[10] Wenbing, H. and Guoqiang, O. (2006). Efficiency of slit dam prevention against non-viscous debris flow. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 11, pp. 865-869.

[11] An, H., Ouyang, C. and Wang, D. (2020). A new two-phase flow model based on coupling of the depth-integrated continuum method and discrete element method. *Computer and Geosciences*, 14, pp. 104640.

[12] Azéma, E., Descantes, Y., Roquet, N., Roux, J.N. and Chevoir, F. (2012). Discrete simulation of dense flows of polyhedral grains down a rough inclined plane. *Physical Review E*, 86(1-3), pp. 031303.

[13] Sánchez, P., Renouf, M., Azéma, E., Mozul, R. and Dubois, F. (2021). A contact dynamics code implementation for the simulation of asteroid evolution and regolith in the asteroid environment. *Icarus*, 363(7), pp. 114441.

[14] Azéma, E., Radjai, F. and Saussine, G. (2009). Quasistatic rheology, force transmission and fabric properties of a packing of irregular polyhedral particles. *Mechanics of Materials*, 41(2), pp. 729-741.

[15] Donzé F.V., Richefeu V., Magnier S.A. (2009). Advances in Discrete Element Method Applied to Soil, Rock and Concrete Mechanics. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8.

[16] Wang, S., Zhang, Q. and Ji, S. (2021). GPU-based Parallel Algorithm for Super-Quadric Discrete Element Method and Its Applications for Non-Spherical Granular Flows. *Advances in Engineering Software*, 151, pp. 102931.

[17] Albaba, A., Lambert, S., Kneib, F., Chareyre, B. and Nicot, F. (2017). DEM Modeling of a Flexible Barrier Impacted by a Dry Granular Flow. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, pp. 3029-3048.

[18] Quezada, J.C., Chazallon, C. (2019). Complex modulus modeling of asphalt, concrete mixes using the Non-Smooth Contact Dynamics method. *Computers and Geotechnics*, 17, pp. 103255.

[19] Leonardi, A., Goodwin, G.R. and Pirulli, M. (2019). The force exerted by granular flows on slit dams. *Acta Geotechnica*, 14, pp. 1949-1963.

[20] Johnson, K.L. (1985). *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.

[21] Andreotti, B., Forterre, Y. and Pouliquen, O. (2013). *GRANULAR MEDIA*. Cambridge University Press, New York, NY, USA.

[22] Jean, M. and Moreau, J.J. (1992). Unilaterality and dry friction in the dynamics of rigid body collections. *1st Contact Mechanics International Symposium, Lausanne, Switzerland*, pp.31-48.

[23] Jean, M. (1999). The non-smooth contact dynamics method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 177 (3-4), pp. 235-257.

[24] Radjai, F. and Vincent, R. (2009). Contact dynamics as a nonsmooth discrete element method. *Mechanics of Materials*, 41, pp. 715–728.

[25] Silva, M., Costa, S. and Cardoso, A.H. (2015). Effect of plan layout on the sediment control efficiency of Slit-check dams for stony type debris flows mitigation. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 197, pp. 259-270.

[26] Jiang Y.-J. and Zhao, Y. (2015). Experimental investigation of dry granular flow impact via both normal and tangential force measurements. *Géotechnique Letters*, 5, pp. 33-38.