

# ผลของระดับน้ำหน้าเขื่อนต่อการเปลี่ยนแปลงระยะฐาน ของการออกแบบเขื่อนคอนกรีตกรวดที่แบบไม่ให้น้ำไหลข้ามสันเขื่อน Effect of Headwater to the Change in Base Length of the Non-Overflow Concrete Gravity Dam Design

ปณยวีร์ ประคองเนตร<sup>1</sup> และ ธนพร สุปรียศิลป์<sup>2,\*</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

\*Corresponding author; E-mail address: thanaporn@eng.cmu.ac.th

## บทคัดย่อ

ในการออกแบบเพื่อหาระยะฐานสำหรับเขื่อนคอนกรีตแบบไม่ให้น้ำไหลข้ามสันเขื่อนด้วยวิธีออกแบบขั้นตอนเดียวนั้น จะต้องระบุค่าระดับต่างๆที่สำคัญ เช่น ค่าระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน ค่าระดับตะกอน ค่าความสูงของเขื่อนและระยะสันของเขื่อนต่างๆ ก่อน และหาระยะฐานออกมา โดยให้ระยะฐานนั้นเป็นฟังก์ชันของการวิเคราะห์แรงต่างๆที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็แรงเนื่องจากความดันน้ำ ความดันยกของน้ำใต้ฐานเขื่อน ความดันตะกอน น้ำหนักตัวเขื่อนและฐานราก แผ่นดินไหว เป็นต้น ทั้งนี้ระยะที่สำคัญอย่างมากและมีความเกี่ยวข้องกับแรงหลายประเภทคือระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระยะฐานจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน โดยมีเงื่อนไขให้แรงลัพท์ที่เกิดขึ้นต้องตกอยู่ในระยะ middle third ของฐาน และต้องมีเสถียรภาพจากการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำ ผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ของระยะฐานที่ปลอดภัยมีความสัมพันธ์กับค่าระดับน้ำหน้าเขื่อนในลักษณะสมการพหุนามกำลังสอง และนอกจากนี้ยังพบว่าหากอัตราส่วนระหว่างระยะฐานที่ได้ต่อระดับน้ำมีค่าน้อยกว่า 0.9 ระยะฐานที่ได้จะมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องทำการขยายฐาน

คำสำคัญ: เขื่อนคอนกรีตกรวดที่แบบไม่ให้น้ำไหลข้ามสันเขื่อน, การออกแบบขั้นตอนเดียว, ระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน, ระยะฐานเขื่อน

## Abstract

In order to determine the base length of the non-overflow gravity dam using single step design, several heights such as headwater, sediment depth, height of dam and other dimensions related to the shape of dam have to be specified first by the designer. The base length is then determined by assign the base length as the function of forces such as forces due to hydrostatic pressure, uplift pressure, silt deposition near the heel of dam, weight of dam and foundation, and earthquake. The most important height, which is related to most of the forces, is the headwater. Therefore, this study aims to determine the effect of the headwater to the change in base length. This is done under the condition that the resultant forces have to fall in the middle third of base length and the designed dam is safe against sliding and overturning. The results found that the safe base length has relation with the headwater in

quadratic equation form. Moreover, if the ratio between the base length and the headwater is less than 0.9, the designed dam is safe against sliding and overturning without the need to extend base length.

Keywords: Non-overflow Concrete Gravity Dam, Single Step Design, Headwater, Base Length

## 1. คำนำ

เขื่อนคอนกรีตแบบ Gravity dams นั้น แบ่งได้เป็นแบบไม่ให้น้ำไหลข้ามสันเขื่อน (Non-overflow concrete gravity dam) และแบบที่ยอมให้น้ำไหลข้ามสันเขื่อนได้ (Overflow concrete gravity dam) ในบทความนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการออกแบบเขื่อนคอนกรีตแบบไม่ให้น้ำไหลข้ามสันเขื่อนเท่านั้น ทั้งนี้เสถียรภาพของเขื่อนคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของตัวเขื่อน น้ำหนักของตัวเขื่อน และกำลังของคอนกรีต [1] จากการทบทวนเอกสารตำราเรียนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเขื่อนคอนกรีตแบบ Gravity dams ในไทยนั้น มักจะมีแนวทางการออกแบบอยู่ 2 ประเภท ใหญ่ๆคือ แบบแรก มีการกำหนดลักษณะรูปร่างรวมถึงระยะฐานของตัวเขื่อนไว้ก่อน จากนั้นจึงวิเคราะห์แรง แล้วจึงตรวจสอบเสถียรภาพความสามารถในการต้านทานการเลื่อนไถล (Sliding) และการพลิกคว่ำ (Overturning) ซึ่งเอกสารที่แสดงแนวทางการออกแบบในลักษณะนี้ เช่น งานของ [2-4] สำหรับแบบที่ 2 จะเป็นการกำหนดลักษณะรูปร่างของเขื่อนไว้ก่อน แต่จะหาระยะฐานภายหลัง โดยการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับตัวเขื่อนจะติดตัวแปรที่เกี่ยวกับระยะฐานไว้ แล้วใช้หลักการที่ว่า แรงลัพท์ที่เกิดขึ้นจะต้องตกอยู่ในช่วงระยะ Middle-third ของฐาน ทั้งในกรณีอ่างเก็บน้ำมีน้ำเต็ม และไม่มีน้ำในอ่างเก็บน้ำ ก็จะสามารถหาค่าของระยะฐานที่เหมาะสมได้ จากนั้นจึงนำไปตรวจสอบเสถียรภาพของเขื่อน ซึ่งหากไม่ผ่านจะต้องทำการขยายฐานและย้อนกลับมาตรวจสอบให้แรงลัพท์ต้องตกอยู่ในช่วง Middle-third ของฐานอีกครั้ง [5] ซึ่งการออกแบบแบบที่ 2 นี้ จะทำให้สามารถวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของระยะฐานที่เหมาะสมกับระดับน้ำด้านหน้าเขื่อนหรือระยะความสูงต่างๆได้ ซึ่งในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ที่จะหาความสัมพันธ์ของระยะฐานที่ปลอดภัย(มีเสถียรภาพ) กับระดับความสูงของน้ำด้านหน้าเขื่อน โดยใช้หลักการออกแบบในรูปแบบที่ 2

## 2. ทฤษฎีและวิธีการวิเคราะห์

### 2.1 แรงที่ใช้ในการออกแบบ

การออกแบบเขื่อนคอนกรีตกรวดแบบไม่ให้น้ำไหลข้ามสันเขื่อนนี้จะมีหลักการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 2 ตามตำราของ [5] โดยจะมีแรงกระทำที่นำมาคิดในการออกแบบดังนี้

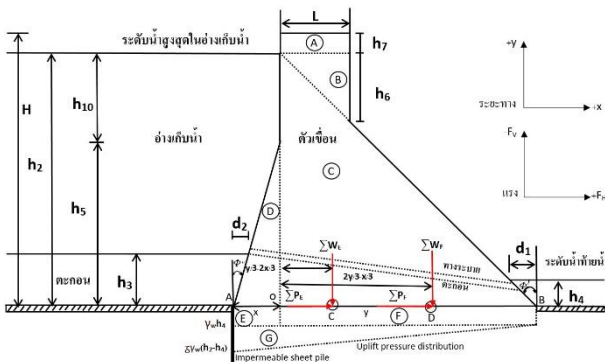
- ก) แรงเนื่องจากความดันของน้ำ (Force due to water pressure)
- ข) แรงเนื่องจากความดันของตะกอน (Force due to silt pressure)
- ค) แรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเขื่อน (Force due to weight of the dam)
- ง) แรงเนื่องจากน้ำหนักของฐานราก (Force due to weight of the foundation)

จ) แรงเนื่องจาก Uplift Pressure ของน้ำ (Force due to uplift pressure)

ฉ) แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (Force due to earthquake)

โดยการวิเคราะห์แรงดันต่างๆจะคิดต่อ 1 หน่วยความยาวของเขื่อนเป็นหลัก

ในการออกแบบด้วยวิธีออกแบบขั้นตอนเดียว (Single step design) นั้น จะต้องมีการกำหนดระยะความสูงและสัดส่วนต่างๆของเขื่อนก่อน จากนั้นจะวิเคราะห์เพื่อหาระยะฐานของเขื่อน รูปที่ 1 แสดงระยะความสูงและสัดส่วนของเขื่อน ในขณะที่ตารางที่ 1 แสดงสูตรที่ใช้ในการคำนวณแรงต่างๆ



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของระยะต่างๆที่ใช้ในการออกแบบเขื่อนคอนกรีตแบบไม่ให้น้ำไหลข้ามสันเขื่อน [5]

ทั้งนี้สัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบมีรายละเอียดต่างๆดังนี้

- $H$  = ความสูงของเขื่อน, ม.
- $L$  = ความกว้างของสันเขื่อน, ม.
- $X+Y$  = ความกว้างของฐานเขื่อน, ม.
- $X$  = ความกว้างของฐานเขื่อน วัดจากเส้นในแนวตั้งที่ลากมายังฐานเขื่อน ไปทางด้านหน้าเขื่อนดังรูปที่ 1, ม.
- $Y$  = ความกว้างของฐานเขื่อน วัดจากเส้นในแนวตั้งที่ลากมายังฐานเขื่อน ไปทางด้านท้ายเขื่อนดังรูปที่ 1, ม.
- $h_2$  = ความลึกของน้ำในอ่างเก็บน้ำ, ม.
- $h_3$  = ความหนาของชั้นตะกอน, ม.
- $h_4$  = ความลึกของน้ำด้านท้ายน้ำ, ม.
- $h_5$  = ความสูงของส่วนลาดของผิวเขื่อนด้านหน้า, ม.
- $h_6$  = ความสูงของส่วนตั้งของผิวเขื่อนด้านหลัง, ม.
- $h_7$  = ระยะ Freeboard (จากระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำถึงสันเขื่อน), ม.
- $h_{10}$  = ความสูงของส่วนตั้งของผิวเขื่อนด้านหน้า, ม.

- $\Phi'$  = มุมของความลาดชันของผิวเขื่อนเอียงด้านหลัง
- $\Phi''$  = มุมของความลาดชันของผิวเขื่อนเอียงด้านหน้า
- $\gamma_w$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ = 1,000 กก./ม.<sup>3</sup>
- $\gamma_c$  = น้ำหนักจำเพาะของคอนกรีต = 2,400 กก./ม.<sup>3</sup>
- $\gamma_{silt}$  = น้ำหนักจำเพาะของตะกอน, กก./ม.<sup>3</sup>
  - ใช้  $\gamma_{sub}$  กรณี Reservoir full และ
  - ใช้  $\gamma_{sat}$  กรณี Reservoir empty
- $\Phi$  = Angle of internal friction ของตะกอน
- $\sigma$  =  $(1-\sin\Phi)/(1+\sin\Phi)$
- = Coefficient of active earth pressure
- $\delta$  = Uplift intensity factor หาได้จาก Flow net ลอดใต้เขื่อน
- $f$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของคอนกรีต
- $r$  = หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ย/หน่วยแรงเฉือนสูงสุดของคอนกรีต
- $S_a$  = ค่าของหน่วยแรงเฉือนสูงสุดของคอนกรีต, กก./ม.<sup>2</sup>
- $S_{sf}$  = Shear-friction factor of safety, มีค่า 5.0
- $P_{i\ allow}$  = แรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต, กก./ม.<sup>2</sup>
- $\alpha$  = อัตราเร่งของ Shock Wave/อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, ใช้ค่า 0.1
- $C_e$  = Earthquake factor, มีค่า 828 กก./ม.<sup>2</sup>

ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดแรงและแขนของโมเมนต์

รายการ	แรง	แขนโมเมนต์
ก. แรงในแนวตั้ง		
คอนกรีต (A)	$+Y_c \cdot L \cdot h_7$	$\frac{L}{2}$
คอนกรีต (B)	$+Y_c \cdot L \cdot \frac{h_6}{2}$	$\frac{2L}{3}$
คอนกรีต (C)	$+Y_c \cdot h_2 \cdot \frac{y}{2}$	$\frac{y}{3}$
คอนกรีต (D)	$+Y_c \cdot h_5 \cdot \frac{x}{2}$	$\frac{-x}{3}$
น้ำด้านเหนือของเขื่อน	$+Y_w \cdot h_{10} \cdot x$	$\frac{-x}{2}$
	$+Y_w \cdot h_5 \cdot \frac{x}{2}$	$\frac{-2x}{3}$
น้ำด้านท้ายของเขื่อน	$+Y_w \cdot h_4 \cdot \frac{d_1}{2}$	$y - \frac{d_1}{3}$
ตะกอน*	$+Y_{silt} \cdot \frac{h_3^2 \cdot x}{2h_5}$	$-x \cdot (1 - \frac{h_3}{3h_5})$
แรงพุ่งตัวของน้ำส่วน E	$-Y_w \cdot h_4 \cdot x$	$\frac{-x}{2}$
แรงพุ่งตัวของน้ำส่วน F	$-Y_w \cdot h_4 \cdot y$	$\frac{y}{2}$
แรงพุ่งตัวของน้ำส่วน G	$-\delta \cdot Y_w \cdot (h_2 - h_4) \cdot \frac{x+y}{2}$	$\frac{y}{3} - \frac{2x}{3}$
ข. แรงในแนวราบ		
น้ำด้านเหนือของเขื่อน	$+Y_w \cdot \frac{h_2^2}{2}$	$\frac{h_2}{3}$
น้ำด้านท้ายของเขื่อน	$-Y_w \cdot \frac{h_4^2}{2}$	$\frac{h_4}{3}$
ตะกอน*	$+ \sigma \cdot Y_{silt} \cdot \frac{h_3^2}{2}$	$\frac{h_3}{3}$

รายการ	แรง	แขนโมเมนต์
ค.แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว		
คอนกรีต (A)**	$\pm\alpha$ (แรงลำดับที่ 1)	$h_2 + \frac{h_7}{2}$
คอนกรีต (B)**	$\pm\alpha$ (แรงลำดับที่ 2)	$h_2 - \frac{h_6}{3}$
คอนกรีต (C)**	$\pm\alpha$ (แรงลำดับที่ 3)	$\frac{h_2}{3}$
คอนกรีต (D)**	$\pm\alpha$ (แรงลำดับที่ 4)	$\frac{h_5}{3}$
น้ำด้านเหนือของเขื่อน	$+2C_e \cdot \alpha \cdot \frac{h_2^2}{3}$	$0.40h_2$
ตะกอน	ไม่คิด	-

หมายเหตุ: ก. \* ในกรณี Reservoir full ใช้  $\gamma_{silt} = \gamma_{sub}$  และในกรณี Reservoir empty ใช้  $\gamma_{silt} = \gamma_{sat}$   
ข. \*\* ในกรณี Reservoir full ใช้เครื่องหมายบวก และในกรณี Reservoir empty ใช้เครื่องหมายลบ  
ค. แขนของโมเมนต์ในตารางนี้เป็นระยะที่แรงในแต่ละลำดับอยู่ห่างจากจุด O ในรูปที่ 1

## 2.2 กฎว่าด้วยการออกแบบ (Rules Governing the Design)

### 2.2.1 กฎข้อที่ 1: ว่าด้วยตำแหน่งของแรงลัพท์

แรงลัพท์ที่เกิดขึ้นต้องตกภายใน Middle-third ของฐานทั้งในกรณีที่อ่างเก็บน้ำมีน้ำเต็ม (Reservoir full) และอ่างเก็บน้ำไม่มีน้ำ (Reservoir empty)

### 2.2.2 กฎข้อที่ 2(ก.): ว่าด้วยความต้านทานต่อเลื่อนไถล (Sliding) โดยไม่คิดแรงเฉือนในเนื้อคอนกรีต

ค่า Tangent ของมุม  $\theta$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างแนวแรงลัพท์,  $\Sigma R$  กับแนวตั้งที่ Horizontal planes ใดๆ ต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (Coefficient of friction),  $f$  ของวัสดุที่ใช้ทำเขื่อนนั้น

$$\tan \theta (= \Sigma P / \Sigma W) \leq f \quad (1)$$

### 2.2.3 กฎข้อที่ 2(ข.): ว่าด้วยความต้านทานต่อ Sliding โดยคิดแรงเฉือนในเนื้อคอนกรีตด้วย

แรงต้านทานต่อ Sliding ที่ Horizontal planes ใดๆ ต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแรงเฉือนกระทำ ด้วยค่าอัตราส่วนของความปลอดภัย (Factor of safety),  $F.S$  ที่เหมาะสม

$$\Sigma P \leq (f \cdot \Sigma W + r \cdot S_a \cdot A) / S_{s-f} \quad (2)$$

### 2.2.4 กฎข้อที่ 3: ว่าด้วยหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น

หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อน หรือฐานราก จะต้องไม่มากกว่าค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (Allowable compressive stress),  $P_{i\ allow}$  ของวัสดุนั้น

$$P (= P_v + \tan^2 \Phi (P_v - P_n)) \leq P_{i\ allow} \quad (3)$$

## 2.3 การหาระยะฐานที่ปลอดภัย

จากตารางที่ 1 ให้หาผลรวมของแรงในแนวราบ ( $\Sigma P_F$ ,  $\Sigma P_E$ ) แรงในแนวตั้ง ( $\Sigma W_F$ ,  $\Sigma W_E$ ) และโมเมนต์ที่เกิดขึ้น ( $\Sigma M_F$ ,  $\Sigma M_E$ ) โดยแยก

เป็น 2 กรณีคือกรณีอ่างเก็บน้ำมีน้ำเต็ม และไม่มีน้ำในอ่างเก็บน้ำ เมื่อพิจารณาจากข้อที่ 1 จะได้สมการดังนี้

กรณี Reservoir Full:

$$\Sigma W_F \left( \frac{2y}{3} - \frac{x}{3} \right) = \Sigma M_F \quad (4)$$

กรณี Reservoir Empty:

$$\Sigma W_E \left( \frac{y}{3} - \frac{2x}{3} \right) = \Sigma M_E \quad (5)$$

เมื่อแทนค่าผลรวมของแรงในแนวตั้งและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นลงในสมการที่ (4) และ (5) จะได้ระยะฐาน (ค่า  $X$  และ  $Y$ ) ตามเงื่อนไขของกฎข้อที่ 1 ซึ่งเมื่อแทนค่า  $X$  และ  $Y$  จะได้ผลรวมของแรงในแนวราบ แรงในแนวตั้ง และโมเมนต์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะต้องเอาเทอมเหล่านี้ไปแทนค่าในสมการที่ (1), (2) เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพด้านการต้านทานการเลื่อนไถล ในสมการที่ (1) และการพลิกคว่ำในสมการที่ (2) ซึ่งหากไม่ผ่านเกณฑ์ในสมการที่ (1) จะต้องขยายฐานเนื่องจากเกณฑ์เสถียรภาพด้านการเลื่อนไถล หรือหากไม่ผ่านเกณฑ์ในสมการที่ (2) ให้แทนวิเคราะห์เสถียรภาพโดยสมการที่ (3) โดยหากไม่ผ่านเกณฑ์ในสมการที่ (3) จึงจะทำการขยายฐานเนื่องจากเกณฑ์เสถียรภาพด้านการพลิกคว่ำ เมื่อทำการขยายฐานแล้ว จะต้องคำนวณหาน้ำหนักตัวเขื่อนที่เพิ่มขึ้นจากเดิม แล้วนำไปตรวจสอบว่าแรงลัพท์ที่เกิดขึ้นตกอยู่ใน middle third ของระยะฐานใหม่ตามกฎข้อที่ 1 หรือไม่ หากเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ก็จะได้ระยะฐานที่ปลอดภัย หากไม่เป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ก็ต้องปรับระยะฐานจนกว่าจะสอดคล้องกับกฎข้อที่ 1

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ที่จะหาความสัมพันธ์ของระยะฐานที่ปลอดภัยกับระดับความสูงของน้ำด้านหน้าเขื่อน จึงได้กำหนดค่าคงที่ต่างๆ ที่ต้องใช้ดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma_w &= 1 \text{ ตัน/ลบ.ม.} & \gamma_c &= 2.4 \text{ ตัน/ลบ.ม.} & \gamma_{sub} &= 0.92 \text{ ตัน/ลบ.ม.} \\ \gamma_{sat} &= 1.92 \text{ ตัน/ลบ.ม.} & S_a &= 550 \text{ ตัน/ตร.ม.} & C_e &= 0.83 \text{ ตัน/ตร.ม.} \\ L &= 8 \text{ ม.} & h_4 &= 5 \text{ ม.} & h_6 &= 10.7 \text{ ม.} \\ P_{i\ allow} &= 250 \text{ ตัน/ตร.ม.} & f &= 0.75 & r &= 0.5 \\ \Phi &= 32^\circ & S_{s-f} &= 5 & \sigma &= 0.29 \\ \alpha &= 0.10 & \delta &= 0.65 \end{aligned}$$

สำหรับสัดส่วนของตัวเขื่อนนั้นได้กำหนดให้มีความสัมพันธ์กับระดับความสูงของน้ำด้านหน้าเขื่อน ( $h_2$ ) ดังนี้  $H$ ,  $h_5$  และ  $h_3$

ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ในหลายๆกรณีดังนี้

- ก) เมื่อ  $h_2 = 90\%$  ของ  $H$  และ  $h_5 = 65\%$  ของ  $H$  และ  $h_3$  คงที่
- ข) เมื่อ  $h_2 = 95\%$  ของ  $H$  และ  $h_5 = 65\%$  ของ  $H$  และ  $h_3$  คงที่
- ค) เมื่อ  $h_2 = 85\%$  ของ  $H$  และ  $h_5 = 65\%$  ของ  $H$  และ  $h_3$  คงที่
- ง) เมื่อ  $h_2 = 90\%$  ของ  $H$  และ  $h_5 = 65\%$  ของ  $H$  และ  $h_3 = 15\%$  ของ  $h_2$
- จ) เมื่อ  $h_2 = 90\%$  ของ  $H$  และ  $h_5 = 65\%$  ของ  $H$  และ  $h_3 = 20\%$  ของ  $h_2$
- ฉ) เมื่อ  $h_2 = 90\%$  ของ  $H$  และ  $h_5 = 70\%$  ของ  $H$  และ  $h_3 = 15\%$  ของ  $h_2$

## 3. ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์

เมื่อกำหนด  $h_5 = 65\%$  ของ  $h_2$  และ  $h_3$  คงที่ และเปลี่ยนค่าระยะฐานเป็น  $h_2 = 90\%$ ,  $95\%$ , และ  $85\%$  ของ  $H$  (กรณี ก ข และ ค) ดังแสดงใน

ตารางที่ 2, 3, และ 4 ตามลำดับ พบว่าหากอัตราส่วนระหว่างระยะฐานที่ได้ ( $X+Y$ ) ต่อระดับน้ำมีค่าน้อยกว่า 0.90 ระยะฐานที่ได้จะมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องทำการขยายฐาน และการเปลี่ยนแปลงค่าระยะ  $h_2$  เป็น 90%, 95%, และ 85% ของ  $H$  ก็ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนดังกล่าวนี้เท่าใดนัก และเมื่อนำระยะฐานที่คำนวณได้จากตารางที่ 2 3 และ 4 ไปแสดงความสัมพันธ์กับระยะ  $h_2$  จะได้ผลดังรูปที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ของระยะฐานที่ปลอดภัยจะมีความสัมพันธ์กับค่าระดับน้ำหน้าเขื่อนในลักษณะสมการพหุนามกำลังสอง โดยจะเห็นว่าเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเส้นกราฟระยะ  $Y$  กับ  $h_2$  และเส้นกราฟระยะ  $X$  กับ  $h_2$  การเพิ่มขึ้นของระยะ  $h_2$  จะส่งผลกับระยะ  $Y$  ค่อนข้างมากเนื่องจาก slope ของกราฟค่อนข้างชันเมื่อเทียบกับเส้นกราฟของระยะ  $X$  กับ  $h_2$  หมายความว่า  $h_2$  จะเป็น เป็น 90%, 95%, และ 85% ของ  $H$  ก็ตาม นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสมการในรูปที่ 2 3 และ 4 ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะฐานกับระยะ  $h_2$  จะเห็นได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะฐานกับระยะ  $h_2$  เมื่อเพิ่มค่าของ  $h_2$  จาก 85% (รูปที่ 4) เป็น 90% (รูปที่ 2) และ 95% ของ  $H$  (รูปที่ 3) จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 2 ระยะฐานเมื่อ  $h_2=90\%$  ของ  $H$  และ  $h_5=65\%$  ของ  $H$  และ  $h_3$  คงที่ (กรณี ก)

H (m.)	$h_2$ (m.)	$h_3$ (m.)	$h_5$ (m.)	x (m.)	y (m.)	x+y (m.)	(x+y)/ $h_2$ (m.)
55.6	50.0	10.0	36.1	5.8	37.9	43.7	0.9
66.7	60.0	10.0	43.3	6.6	46.1	52.8	0.9
77.8	70.0	10.0	50.6	7.4	54.4	61.8	0.9
88.9	80.0	10.0	57.8	8.2	62.7	70.9	0.9
100.0	90.0	10.0	65.0	10.0	79.4	89.5	1.0
111.1	100.0	10.0	72.2	12.1	98.6	110.7	1.1
122.2	110.0	10.0	79.4	14.4	119.9	134.3	1.2
133.3	120.0	10.0	86.7	16.8	143.4	160.2	1.3
144.4	130.0	10.0	93.9	19.5	168.9	188.4	1.4
155.6	140.0	10.0	101.1	22.4	196.5	218.9	1.6
166.7	150.0	10.0	108.3	25.4	226.2	251.6	1.7
177.8	160.0	10.0	115.6	28.7	258.0	286.7	1.8
188.9	170.0	10.0	122.8	32.1	292.0	324.1	1.9
200.0	180.0	10.0	130.0	35.7	328.0	363.7	2.0
211.1	190.0	10.0	137.2	39.6	366.1	405.7	2.1
222.2	200.0	10.0	144.4	43.6	406.3	449.9	2.2

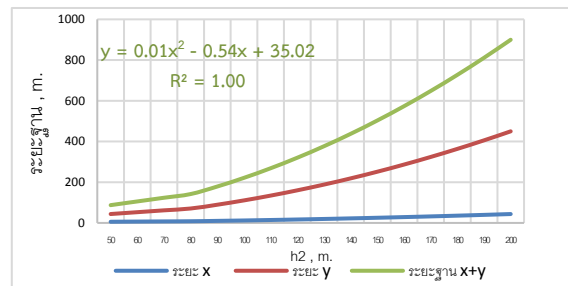
ตารางที่ 3 ระยะฐานเมื่อ  $h_2=95\%$  ของ  $H$  และ  $h_5=65\%$  ของ  $H$  และ  $h_3$  คงที่ (กรณี ข)

H (m.)	$h_2$ (m.)	$h_3$ (m.)	$h_5$ (m.)	x (m.)	y (m.)	x+y (m.)	(x+y)/ $h_2$ (m.)
52.6	50.0	10.0	34.2	5.2	39.0	44.2	0.9
63.2	60.0	10.0	41.1	5.9	47.4	53.3	0.9
73.7	70.0	10.0	47.9	6.7	55.8	62.5	0.9
84.2	80.0	10.0	54.7	7.4	64.2	71.5	0.9
94.7	90.0	10.0	61.6	9.0	80.8	89.8	1.0
105.3	100.0	10.0	68.4	10.9	100.2	111.2	1.1
115.8	110.0	10.0	75.3	13.0	121.8	134.9	1.2
126.3	120.0	10.0	82.1	15.3	145.6	160.9	1.3
136.8	130.0	10.0	88.9	17.8	171.4	189.2	1.5
147.4	140.0	10.0	95.8	20.5	199.3	219.8	1.6

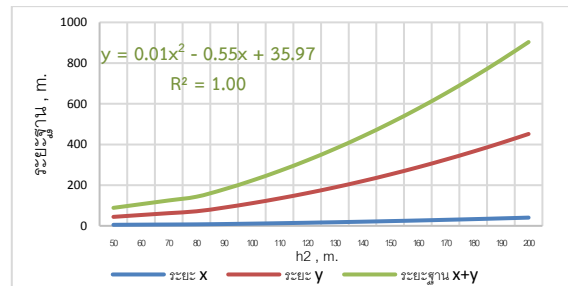
H (m.)	$h_2$ (m.)	$h_3$ (m.)	$h_5$ (m.)	x (m.)	y (m.)	x+y (m.)	(x+y)/ $h_2$ (m.)
157.9	150.0	10.0	102.6	23.3	229.4	252.7	1.7
168.4	160.0	10.0	109.5	26.4	261.5	287.9	1.8
178.9	170.0	10.0	116.3	29.6	295.8	325.4	1.9
189.5	180.0	10.0	123.2	33.0	332.1	365.2	2.0
200.0	190.0	10.0	130.0	36.7	370.6	407.3	2.1
210.5	200.0	10.0	136.8	40.5	411.2	451.7	2.3

ตารางที่ 4 ระยะฐานเมื่อ  $h_2=85\%$  ของ  $H$  และ  $h_5=65\%$  ของ  $H$  และ  $h_3$  คงที่ (กรณี ค)

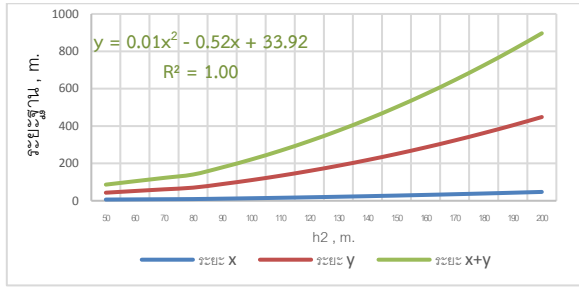
H (m.)	$h_2$ (m.)	$h_3$ (m.)	$h_5$ (m.)	x (m.)	y (m.)	x+y (m.)	(x+y)/ $h_2$ (m.)
58.8	50.0	10.0	38.2	6.5	36.7	43.2	0.9
70.6	60.0	10.0	45.9	7.4	44.9	52.3	0.9
82.4	70.0	10.0	53.5	8.3	52.9	61.2	0.9
94.1	80.0	10.0	61.2	9.1	61.1	70.2	0.9
105.9	90.0	10.0	68.8	11.2	78.0	89.3	1.0
117.6	100.0	10.0	76.5	13.5	96.9	110.4	1.1
129.4	110.0	10.0	84.1	16.0	117.9	133.9	1.2
141.2	120.0	10.0	91.8	18.6	141.0	159.7	1.3
152.9	130.0	10.0	99.4	21.5	166.2	187.7	1.4
164.7	140.0	10.0	107.1	24.6	193.5	218.0	1.6
176.5	150.0	10.0	114.7	27.9	222.8	250.7	1.7
188.2	160.0	10.0	122.4	31.3	254.3	285.6	1.8
200.0	170.0	10.0	130.0	35.0	287.8	322.8	1.9
211.8	180.0	10.0	137.6	38.9	323.4	362.3	2.0
223.5	190.0	10.0	145.3	43.0	361.1	404.1	2.1
235.3	200.0	10.0	152.9	47.3	400.9	448.2	2.2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฐานกับระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน กรณี ก



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฐานกับระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน กรณี ข



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฐานกับระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน กรณี ค

เมื่อกำหนดให้ค่า  $h_2$  เป็น 90% ของ  $H$  และ  $h_5 = 65%$  ของ  $h_2$  แล้ววิเคราะห์ที่ค่า  $h_3$  เป็น 15% (กรณี ง) และ 20% ของ  $h_2$  (กรณี จ) จะได้ผลดังตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่า ค่าระยะฐาน ( $X+Y$ ) ของกรณี จ จะน้อยกว่ากรณี ง เล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อเพิ่มค่า  $h_3$  5% ของ  $h_2$  ระยะฐานที่ปลอดภัยจะมีระยะที่สั้นลงกว่าเดิมเล็กน้อย และเมื่อกำหนดให้ค่า  $h_2$  เป็น 90% ของ  $H$  และ  $h_3$  เป็น 15% ของ  $h_2$  โดยเปลี่ยนค่าจาก  $h_5 = 65%$  ของ  $H$  (กรณี ง) และ  $h_2$  เป็น  $h_5 = 70%$  ของ  $h_2$  (กรณี ฉ) จะได้ผลดังตารางที่ 5 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ค่าระยะฐาน ( $X+Y$ ) ของกรณี ฉ จะน้อยกว่ากรณี ง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มค่า  $h_5$  5% ของ  $h_2$  ระยะฐานที่ปลอดภัยจะมีระยะที่สั้นลงกว่าเดิมแม้จะไม่มากนัก แต่มากกว่าเมื่อเพิ่มค่า  $h_3$  โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนขึ้นเมื่อระยะ  $h_2$  เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของ  $h_5$  มีผลต่อระยะฐานที่ปลอดภัยมากกว่าการเพิ่มขึ้นของ  $h_3$

ตารางที่ 5 ระยะฐานเมื่อ  $h_2 = 90%$  ของ  $H$  และ  $h_5 = 65%$  ของ  $H$  และ  $h_3 = 15%$  ของ  $h_2$  (กรณี ง)

H (m.)	$h_2$ (m.)	$h_3$ (m.)	$h_5$ (m.)	x (m.)	y (m.)	x+y (m.)	(x+y)/ $h_2$ (m.)
55.6	50.0	7.5	36.1	5.8	38.0	43.8	0.9
66.7	60.0	9.0	43.3	6.6	46.2	52.8	0.9
77.8	70.0	10.5	50.6	7.4	54.4	61.8	0.9
88.9	80.0	12.0	57.8	8.2	62.7	70.9	0.9
100.0	90.0	13.5	65.0	10.1	79.3	89.4	1.0
111.1	100.0	15.0	72.2	12.2	98.5	110.7	1.1
122.2	110.0	16.5	79.4	14.5	119.8	134.2	1.2
133.3	120.0	18.0	86.7	17.0	143.1	160.1	1.3
144.4	130.0	19.5	93.9	19.7	168.6	188.3	1.4
155.6	140.0	21.0	101.1	22.5	196.2	218.7	1.6
166.7	150.0	22.5	108.3	25.6	225.8	251.5	1.7
177.8	160.0	24.0	115.6	28.9	257.6	286.5	1.8
188.9	170.0	25.5	122.8	32.4	291.4	323.8	1.9
200.0	180.0	27.0	130.0	36.1	327.4	363.4	2.0
211.1	190.0	28.5	137.2	40.0	365.4	405.4	2.1
222.2	200.0	30.0	144.4	44.1	405.5	449.6	2.2

ตารางที่ 6 ระยะฐานเมื่อ  $h_2 = 90%$  ของ  $H$  และ  $h_5 = 65%$  ของ  $H$  และ  $h_3 = 20%$  ของ  $h_2$  (กรณี จ)

H (m.)	$h_2$ (m.)	$h_3$ (m.)	$h_5$ (m.)	x (m.)	y (m.)	x+y (m.)	(x+y)/ $h_2$ (m.)
55.6	50.0	10.0	36.1	5.8	37.9	43.7	0.9
66.7	60.0	12.0	43.3	6.7	46.1	52.8	0.9
77.8	70.0	14.0	50.6	7.5	54.3	61.8	0.9
88.9	80.0	16.0	57.8	8.3	62.6	70.8	0.9

H (m.)	$h_2$ (m.)	$h_3$ (m.)	$h_5$ (m.)	x (m.)	y (m.)	x+y (m.)	(x+y)/ $h_2$ (m.)
100.0	90.0	18.0	65.0	10.1	79.2	89.4	1.0
111.1	100.0	20.0	72.2	12.2	98.4	110.6	1.1
122.2	110.0	22.0	79.4	14.5	119.6	134.2	1.2
133.3	120.0	24.0	86.7	17.0	143.0	160.0	1.3
144.4	130.0	26.0	93.9	19.8	168.4	188.2	1.4
155.6	140.0	28.0	101.1	22.7	196.0	218.6	1.6
166.7	150.0	30.0	108.3	25.8	225.6	251.4	1.7
177.8	160.0	32.0	115.6	29.1	257.3	286.4	1.8
188.9	170.0	34.0	122.8	32.6	291.1	323.7	1.9
200.0	180.0	36.0	130.0	36.3	327.1	363.3	2.0
211.1	190.0	38.0	137.2	40.2	365.1	405.2	2.1
222.2	200.0	40.0	144.4	44.3	405.1	449.4	2.2

ตารางที่ 7 ระยะฐานเมื่อ  $h_2 = 90%$  ของ  $H$  และ  $h_5 = 70%$  ของ  $H$  และ  $h_3 = 15%$  ของ  $h_2$  (กรณี ฉ)

H (m.)	$h_2$ (m.)	$h_3$ (m.)	$h_5$ (m.)	x (m.)	y (m.)	x+y (m.)	(x+y)/ $h_2$ (m.)
55.6	50.0	7.5	38.9	6.0	37.6	43.6	0.9
66.7	60.0	9.0	46.7	6.9	45.8	52.7	0.9
77.8	70.0	10.5	54.4	7.7	54.0	61.7	0.9
88.9	80.0	12.0	62.2	8.6	62.2	70.7	0.9
100.0	90.0	13.5	70.0	10.5	78.8	89.3	1.0
111.1	100.0	15.0	77.8	12.7	97.8	110.5	1.1
122.2	110.0	16.5	85.6	15.1	118.9	134.0	1.2
133.3	120.0	18.0	93.3	17.7	142.1	159.8	1.3
144.4	130.0	19.5	101.1	20.5	167.4	187.9	1.4
155.6	140.0	21.0	108.9	23.5	194.7	218.3	1.6
166.7	150.0	22.5	116.7	26.7	224.2	250.9	1.7
177.8	160.0	24.0	124.4	30.2	255.7	285.9	1.8
188.9	170.0	25.5	132.2	33.8	289.3	323.1	1.9
200.0	180.0	27.0	140.0	37.7	325.0	362.6	2.0
211.1	190.0	28.5	147.8	41.7	362.7	404.5	2.1
222.2	200.0	30.0	155.6	46.0	402.6	448.6	2.2

	ไม่ต้องขยายฐาน
	ขยายฐาน

#### 4. บทสรุป

ในการออกแบบเพื่อหาระยะฐานสำหรับเขื่อนคอนกรีตแบบไม่ให้น้ำไหลข้ามสันเขื่อนด้วยวิธีออกแบบขั้นตอนเดียวนั้น จะต้องระบุค่าระดับต่างๆที่สำคัญ เช่น ค่าระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน ค่าระดับตะกอน ค่าความสูงของเขื่อนและระยะสัดส่วนของเขื่อนต่างๆ ก่อน และหาระยะฐานออกมาโดยให้ระยะฐานนั้นเป็นฟังก์ชันของการวิเคราะห์แรงต่างๆที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ระยะที่สำคัญอย่างมากและมีความเกี่ยวข้องกับแรงหลายประเภทคือระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงระยะฐานจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน โดยมีเงื่อนไขให้แรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นต้องตกอยู่ในระยะ Middle third ของฐาน และต้องมีเสถียรภาพจากการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำ โดยได้ทำการวิเคราะห์เป็น 6 กรณีด้วยกัน ได้ผลการศึกษาดังนี้ เมื่อกำหนด  $h_5 = 65%$  ของ  $h_2$  และ  $h_3$  คงที่ และเปลี่ยนค่าระยะฐานเป็น  $h_2 = 90%, 95%$ , และ

85% ของ พบว่าหากอัตราส่วนระหว่างระยะฐานที่ได้ต่อระดับน้ำมีค่าน้อยกว่า 0.90 ระยะฐานที่ได้จะมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องทำการขยายฐาน และการเปลี่ยนแปลงค่าระยะ  $h_2$  เป็น 90%, 95%, และ 85% ของ  $H$  ก็ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนดังกล่าวนี้เท่าใดนัก นอกจากนี้ยังพบว่าความสัมพันธ์ของระยะฐานที่ปลอดภัยมีความสัมพันธ์กับค่าระดับน้ำหน้าเขื่อนในลักษณะสมการพหุนามกำลังสอง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสมการที่เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะฐานกับระยะ  $h_2$  จะเห็นได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะฐานกับระยะ  $h_2$  เมื่อเพิ่มค่าของ  $h_2$  จาก 85% เป็น 90% และ 95% ของ  $H$  จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของระยะ  $h_5$  กับระยะ  $h_3$  โดย  $h_5$  คือความสูงของส่วนลาดเอียงด้านหน้าเขื่อน และ  $h_3$  คือความสูงของตะกอน จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มค่า  $h_5$  5% ระยะฐานที่ปลอดภัยจะมีระยะที่สั้นลงกว่าเดิมแม้จะไม่มากนัก แต่มากกว่าเมื่อเพิ่มค่า  $h_3$  โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนขึ้นเมื่อระยะ  $h_2$  เพิ่มมากขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยเฉพาะ รศ.พิชัย บุญยะกาญจน ที่ได้ให้ความรู้แก่ผู้เขียนในด้านวิศวกรรมชลศาสตร์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] U.S. Army Corps of Engineers. (1995). *Gravity Dam Design*. Engineer manual, EM 1110-2-2200, pp. 2-1.
- [2] วิโรจน์ ชัยธรรม. (2544). *วิศวกรรมชลศาสตร์*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, หน้า 1-24 ถึง 1-30.
- [3] โชติไกร ไชยวิจารณ์. (2546). *วิศวกรรมชลศาสตร์*. สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 323 ถึง 333.
- [4] เสรี จันทโรยธา และ ชัยพันธุ์ รักริฉัย. *วิศวกรรมชลศาสตร์*. สำนักพิมพ์ บริษัทอำนาจเวปพริ้นติ้ง จำกัด, กรุงเทพฯ, หน้า 7-22 ถึง 7-36.
- [5] พิชัย บุญยะกาญจน (2537). *วิศวกรรมแหล่งน้ำ*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, หน้า 270-320.