บทที่ 3

ข้อจำกัดของขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุด

ข้อจำกัดของขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุด ประกอบด้วยข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรม ข้อจำกัดทางเศรษฐศาสตร์ ข้อจำกัดทางสภาพสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่เป็นปัจจัยกำหนดขนาดความสูงที่สุดของการเสริมสันเขื่อน โดยที่การเสริมสันเขื่อนนี้จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวเขื่อนเดิม การเก็บกักทรัพยากรน้ำ การดำเนินงานอ่างเก็บน้ำ ตลอดจนความเสียหายต่อสภาพสิ่งแวดล้อมทางกายภาพและชีวภาพทั้งในบริเวณอ่างเก็บน้ำและรอบอ่างเก็บน้ำ ข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรมได้แก่ ข้อจำกัดทางภูมิประเทศของบริเวณที่ตั้งเขื่อน ชนิดของเขื่อนเดิม ความมั่นคงของเขื่อนที่เสริมขึ้น ข้อจำกัดด้านฐานรากของเขื่อนเดิม ฯลฯ ข้อจำกัดทางด้านอ่างเก็บน้ำคือ ข้อจำกัดของทรัพยากรน้ำ สภาพทางอุตุ-อุทกวิทยา สภาพภูมิประเทศบริเวณรอบอ่างเก็บน้ำ อาคารโครงสร้างทางด้านชลประทานและการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีอยู่ นอกจากนี้การเสริมสันเขื่อนยังต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดทางด้านการเงิน เช่น ค่าใช้จ่ายลงทุน แหล่งเงินทุน อัตราผลตอบแทนที่ได้จากโครงการ เป็นต้น ดังนั้นการเสริมสันเขื่อน จึงต้องทำการวิเคราะห์หาขนาดความสูงของสันเขื่อนที่สามารถเสริมขึ้นได้ และมีความเหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของแต่ละเขื่อน ข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาดังได้กล่าวมาแล้ว มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ข้อจำกัดของตัวเขื่อนและอาคารประกอบ

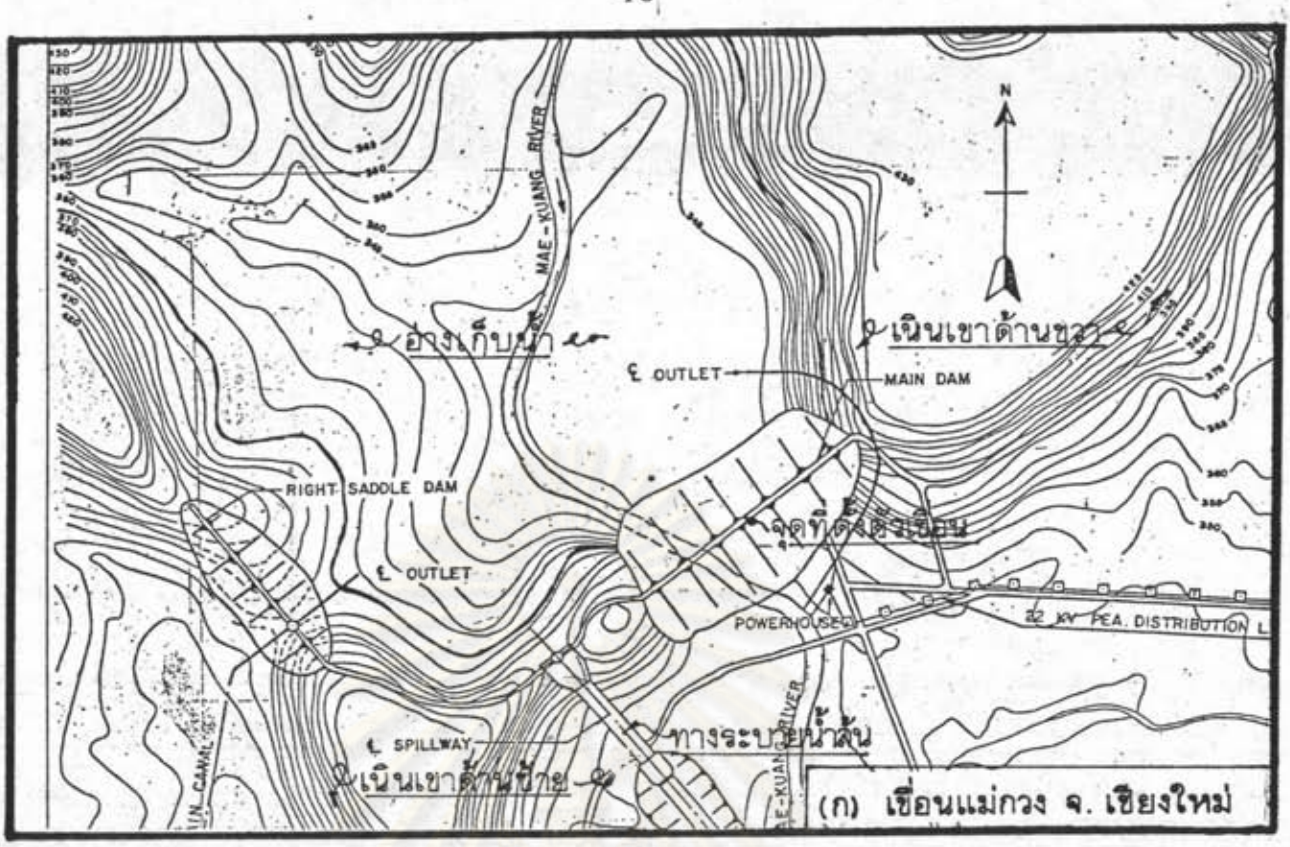
ข้อจำกัดของตัวเขื่อนได้แก่ สภาพภูมิประเทศของที่ตั้งตัวเขื่อน ชนิดและอายุของตัวเขื่อนเดิม ความมั่นคงของเขื่อนทางด้านต่าง ๆ เช่น ความมั่นคงต่อความลาดในกรณีที่เป็นเขื่อนดิน ความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำ ความมั่นคงต่อการเลื่อนไถล ฯลฯ ข้อจำกัดของอาคารประกอบได้แก่อาคารโครงสร้างต่าง ๆ เช่น อาคารทางด้านการชลประทาน และอาคารโครงสร้างเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีอยู่ เช่น ทางระบายน้ำล้น เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าด้วยพลังน้ำ ประตูระบายน้ำที่ปากคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งซ้ายและฝั่งขวาเป็นต้น ซึ่งโครงการเขื่อนและอ่างเก็บน้ำแต่ละโครงการจะจำกัดขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุดได้แตกต่างกันไป ดังนี้

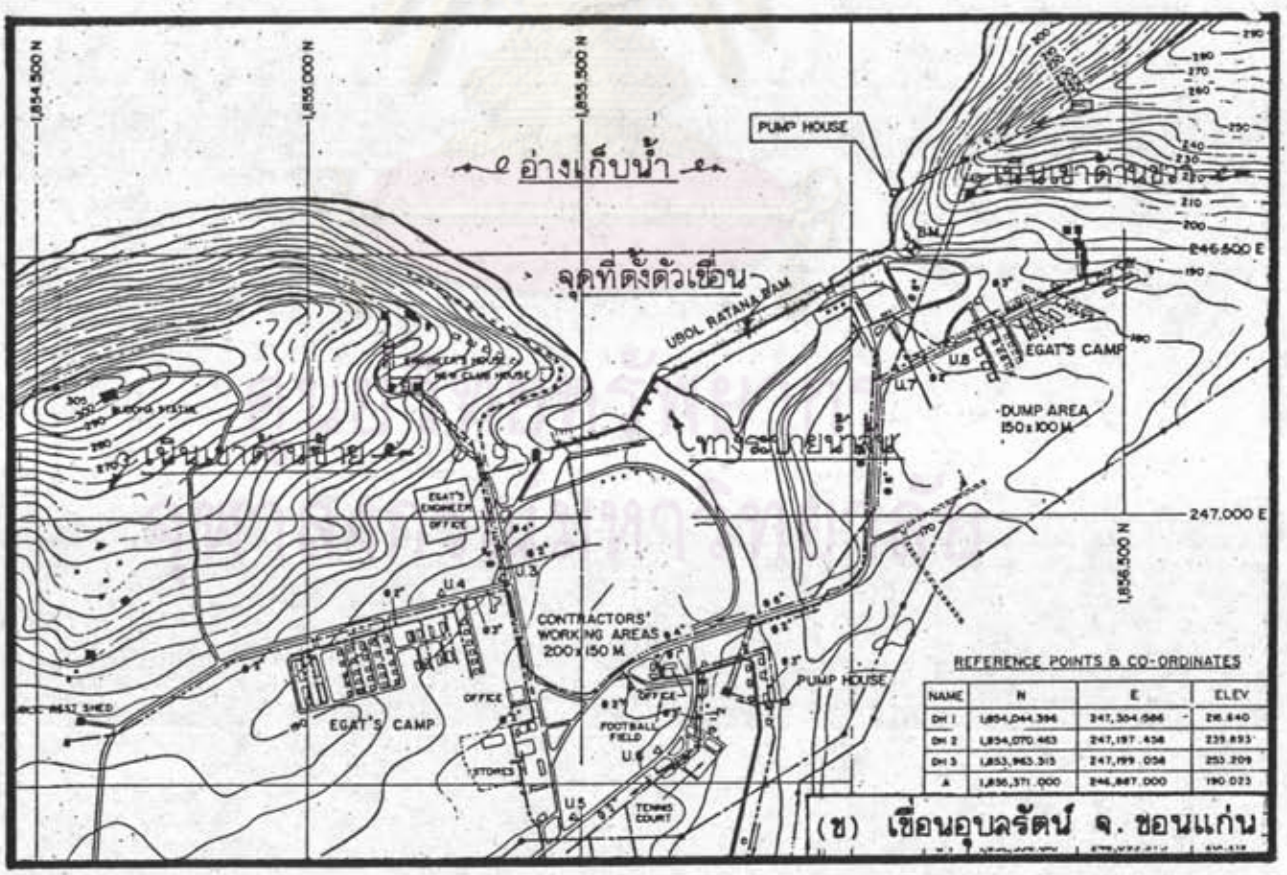
3.1.1 ลักษณะทางภูมิประเทศของที่ตั้งตัวเขื่อน

โดยทั่วไป การเลือกบริเวณที่ตั้งเขื่อนเก็บกักน้ำ หรือเขื่อนระบายน้ำ จะต้องคำนึงถึงบริเวณที่มีลักษณะทางภูมิประเทศที่เหมาะสม เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างน้อย ถ้าเป็นเขื่อนเก็บกักน้ำ อ่างเก็บน้ำเหนือเขื่อน จะต้องสามารถเก็บกักน้ำได้ตามปริมาณที่ต้องการ สามารถก่อสร้างทางระบายน้ำล้นและอาคารประกอบต่าง ๆ ที่เหมาะสมได้ ในกรณีของเขื่อนทดน้ำหรือเขื่อนระบายน้ำ เขื่อนที่ก่อสร้างต้องสามารถยกระดับน้ำให้สูงพอที่จะส่งน้ำให้แก่พื้นที่เพาะปลูกได้ตามปริมาณ ขนาดพื้นที่และเวลาที่ต้องการ ดังนั้นที่ตั้งตัวเขื่อนโดยทั่วไปจึงมักจะเลือก บริเวณที่เป็นร่องน้ำแคบ ๆ อยู่ระหว่างเนินเขาสูงชันทั้งสองด้าน เนื่องจากจะทำให้ตัวเขื่อนมีขนาดสั้น เสียค่าก่อสร้างน้อยแต่สามารถกักเก็บน้ำได้มากตามปริมาณที่ต้องการ ในการเสริมสันเขื่อน ขนาดความสูงชันของเนินเขาทั้งสองด้านจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุด กล่าวคือ ถ้าเนินเขาทั้งสองด้านลาดมากและอยู่ห่างกัน จะทำให้สันเขื่อนยาว ต้องเสียค่าใช้จ่ายลงทุนสูง ส่วนในด้านความสูงเขื่อนที่เสริมขึ้นจะสูงกว่าเนินเขาไม่ได้ ระดับความสูงของเนินเขาจึงเป็นตัวกำหนดขนาดการเสริมเขื่อนสูงสุด ดังนั้นข้อจำกัดของลักษณะทางภูมิประเทศบริเวณที่ตั้งตัวเขื่อน กำหนดขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุดจากความสูงของเนินเขาและสภาพภูมิประเทศทั้งสองด้านของตัวเขื่อน ขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุดจะต้องไม่สูงไปกว่าระดับความสูงของเนินเขาด้านที่ต่ำกว่า ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงลักษณะภูมิประเทศของบริเวณที่ตั้งเขื่อนแม่กวง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเนินเขาทางด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือมีระดับสูงสุดประมาณ +430.00 เมตร รทก.และเนินเขาทางด้านทิศตะวันตกเฉียงใต้ สูงระดับ +405.00 เมตร รทก. ดังนั้นระดับสูงสุดของการเสริมสันเขื่อนคือ +405.00 เมตร รทก.

3.1.2 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า

ในกรณีของโครงการเขื่อนและอ่างเก็บน้ำ ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังน้ำรวมอยู่ด้วย โรงไฟฟ้าจะตั้งอยู่ทางด้านท้ายน้ำโดยมีท่อหรืออุโมงค์ส่งน้ำ นำน้ำจากอ่างเก็บน้ำเหนือเขื่อนให้ไหลเข้าสู่โรงไฟฟ้าเพื่อหมุนเครื่องกังหันน้ำ เป็นการเปลี่ยนพลังงานศักย์ของน้ำให้กลายเป็นพลังงานจลน์ จากการที่น้ำไหลตกมาจากที่สูงเป็นแรงหมุน และส่งแรงไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ติดตั้งหรือขนาดที่ออกแบบไว้ จึงเป็นข้อกำหนดขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุด เนื่องจากการเสริมสันเขื่อนเป็นการเพิ่มความสูงของน้ำในอ่างเก็บน้ำที่จะไหลผ่านท่อส่งน้ำและกังหันน้ำ และขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กับขนาดของกังหันน้ำแต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับการออกแบบให้ใช้งานที่ความสูงของน้ำช่วงหนึ่ง ถ้าความสูงของน้ำสูง





NAME	N	E	ELEV
DH 1	1,854,044.396	247,304.586	216.640
DH 2	1,854,070.463	247,197.436	239.893
DH 3	1,853,963.315	247,199.058	253.209
A	1,856,371.000	246,847.000	190.023

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะทางภูมิประเทศ ของที่ตั้งตัวเขื่อน โดยทั่วๆไป

กว่าความสูงออกแบบสูงสุด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ ประสิทธิภาพของการผลิตจะต่ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจชำรุดเสียหายได้

เนื่องจากในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังน้ำ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านกังหันน้ำและความสูงของน้ำที่ไหลตกลงมา คือ

$$P = e_n . \gamma . Q . H_{design} \qquad 3.1$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้ ในกรณีที่ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านโรงไฟฟ้า จำกัดโดยกังหันน้ำคือ

$$P_{max} = e_n . \gamma . Q . H_{max}$$

หรือ

$$H_{max} = P_{max} / (E_n . \gamma . Q) \qquad 3.2$$

ดังนั้นขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุด เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ

$$\Delta H = H_{max} - H_{design} \qquad 3.3$$

โดยที่ ΔH คือ ขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุด

H_{design} คือ ความสูงออกแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง

H_{max} คือ ความสูงออกแบบสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

P_{max} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

e_n คือ ประสิทธิภาพของการผลิตซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ท่อส่งน้ำ กังหันน้ำ ฯลฯ

γ คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

3.1.8 ความมั่นคงของเขื่อนที่เสริม

ในการเสริมสันเขื่อนเพื่อเพิ่มระดับเก็บกักน้ำด้านหน้าเขื่อน แรงดันของน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้อาจทำให้ตัวเขื่อนขาดความมั่นคงได้ ความมั่นคงของเขื่อนโดยทั่วไปแล้วประกอบด้วยความมั่นคงต่อ

การเลื่อนไถล ความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำ ความมั่นคงต่อความลาดและความมั่นคงต่อความเค้นสูงสุด ซึ่งมีลักษณะการจำกัดต่อการเสริมสันเขื่อน ดังนี้

1) ความมั่นคงต่อการเลื่อนไถล (Sliding)

ในบางกรณี การพังทะลาย (Failure) ของตัวเขื่อนอาจเกิดขึ้นจากการเลื่อนไถลของตัวเขื่อน ที่ระดับฐานรากหรือระดับใด ๆ ซึ่งมีแรงกระทำตามแนวราบมากกว่าแรงต้านทานการเลื่อนไถล แรงกระทำตามแนวราบประกอบด้วย แรงดันของน้ำด้านหน้าเขื่อน แรงดันของตะกอน แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ฯลฯ ส่วนแรงต้านทานการเลื่อนไถลประกอบด้วย แรงดันน้ำด้านท้ายเขื่อน แรงเสียดทานและแรงเฉือน เป็นต้น ซึ่งแรงต่าง ๆ เหล่านี้ กระทำต่อตัวเขื่อนในลักษณะและทิศทางต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

ก) แรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเขื่อน (W) จะกระทำผ่านจุดศูนย์ถ่วงของรูปหน้าตัดตัวเขื่อน น้ำหนักของตัวเขื่อนจะคำนวณได้ละเอียดถูกต้องมากน้อยแค่ไหน ขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักจำเพาะของวัสดุก่อสร้างมีความใกล้เคียงถูกต้องมากน้อยแค่ไหน

ข) แรงดันน้ำ (P) ได้แก่แรงดันสถิตย์ในแนวราบ ทั้งด้านหน้าเขื่อนและท้ายเขื่อน ซึ่งมีจุดกระทำอยู่ที่ระยะหนึ่งส่วนสามของความลึกวัดจากท้องน้ำ

ค) แรงดันจากดินตะกอน (P_s) ในกรณีที่มีตะกอนมาตกทับถมด้านหน้าเขื่อน เมื่อมีปริมาณมากจะทำให้เกิดแรงดันเช่นเดียวกับแรงดันของน้ำ คือ

$$Ps = 1/2\ \gamma'_s\ .h_s^{\,2}\ \frac{(1-\sin\phi)}{(1+\sin\phi)}$$

โดยที่ γ_s' คือ น้ำหนักจำเพาะสุทธิใต้น้ำของดินตะกอน

h_s คือ ความลึกของชั้นดินตะกอน

ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของดิน

P_s คือ แรงดันจากดินตะกอน ซึ่งกระทำที่ระยะหนึ่งในสามของ h_s

ง) แรงยกตัวใต้ฐานเขื่อน (U) มักจะสมมุติให้การกระจายของความดันเป็นเส้นตรงในกรณีที่เขื่อนตั้งอยู่บนฐานรากที่เป็นหินแข็ง เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง น้ำก็จะซึมผ่านรอยแตกของหินทำให้เกิดแรงดันใต้ฐานรากขึ้นได้ ซึ่งมีผลต่อความมั่นคงแข็งแรงของเขื่อน จากการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำ

จ) แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (Few) เมื่อเกิดแผ่นดินไหว คลื่นความสั่นสะเทือนจะทำให้ตัวเชื่อนเกิดการเคลื่อนไหวด้วยอัตราเร่งค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำต่อตัวเชื่อนทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง โดยปกติแล้วความเร่งเนื่องจากการสั่นสะเทือนจะคิดเป็นเปอร์เซนต์ของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และสามารถคำนวณหาแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวได้จากสมการ

$$Few = M.a$$
$$= (W/g).a.g = a.W$$

โดยที่ Few คือ แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

a คือ อัตราส่วนของความเร่งเนื่องจากการสั่นสะเทือนต่อแรงโน้มถ่วงของโลก

W คือ น้ำหนักของตัวเชื่อน

แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อเชื่อนในแนวราบทั้งหมดจะสามารถทำให้ตัวเชื่อนเกิดการเลื่อนไถลตามแนวราบได้ ดังนั้นในการออกแบบเชื่อนจึงจำเป็นต้องให้ผลลัพธ์รวมของแรงเหล่านี้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัยที่ยอมให้ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าเกณฑ์ความปลอดภัยได้จากสมการ

$$FS_s = \frac{\text{แรงต้านทานการเลื่อนไถล}}{\text{แรงกระทำตามแนวราบ}}$$
$$= \frac{(\Sigma W - U)f + As\tau + P_2}{P} \qquad 3.4$$

โดยที่ FS_s คือ ค่าเกณฑ์ความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถล ดูตารางที่ 3.1

f คือ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง

As คือ พื้นที่การเลื่อนไถลเนื่องจากแรงเฉือน

τ คือ แรงเฉือนของดิน

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานและเกณฑ์ความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถล ที่ยอมให้

วัสดุที่ใช้ก่อสร้าง	ค่า f	เกณฑ์ความปลอดภัย
งานคอนกรีต	0.8	1.00-1.50
วัสดุแข็งและพื้นขรุขระ	0.7	1.00-1.50
หินชนิดต่าง ๆ	0.4	1.00-1.50
กรวดและทรายหยาบ	0.3	2.50
หินชั้น	0.3	2.50
ดินตะกอนทรายและดินเหนียว	0.3	2.50

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าเกณฑ์ความปลอดภัยเนื่องจากการเลื่อนไถลของเขื่อนจำแนกตามวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2.5 ดังนั้นข้อจำกัดของขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุดประการหนึ่งคือ เมื่อเสริมสันเขื่อนแล้วค่าเกณฑ์ความปลอดภัย จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าที่กำหนดไว้ เนื่องจากระดับน้ำหน้าเขื่อนที่สูงขึ้นจะทำให้ผลรวมของแรงตามแนวราบเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันน้ำหนักของตัวเขื่อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลรวมของแรงต้านทานเพิ่มขึ้นเช่นกัน

2) ความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำ (Overturning)

แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อตัวเขื่อน ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 นอกจากจะทำให้เขื่อนเกิดการเลื่อนไถลแล้วยังอาจทำให้เขื่อนเกิดการพลิกคว่ำ โดยเขื่อนหมุนรอบจุดปลายด้านท้ายเขื่อน ในการออกแบบและก่อสร้างเขื่อนจึงต้องคำนวณกำหนดให้ผลลัพธ์ของแรงที่กระทำต่อตัวเขื่อนทั้งหมด จะไม่ทำให้เขื่อนเกิดการพลิกคว่ำโดยที่ค่าความปลอดภัย เนื่องจากการพลิกคว่ำอยู่ภายในเกณฑ์ที่กำหนด ค่าความปลอดภัยเนื่องจากการพลิกคว่ำคำนวณได้จาก

$$Fs_o = \frac{\text{โมเมนต์เนื่องจากแรงต้านทาน}}{\text{โมเมนต์เนื่องจากแรงกระทำ}}$$

$$= \Sigma MR / \Sigma MD \qquad 3.5$$

โดยที่ ΣMD คือผลรวมของโมเมนต์เนื่องจากแรงต้านทาน

ΣMR คือผลรวมของโมเมนต์เนื่องจากแรงกระทำ

FS_o คือค่าความปลอดภัยเนื่องจากการพลิกคว่ำ

โดยทั่วไปค่าเกณฑ์ความปลอดภัยเนื่องจากการพลิกคว่ำของเขื่อนประเภทต่างๆ กำหนดค่าระหว่าง 2.0 ถึง 3.0 สำหรับเขื่อนขนาดเล็กค่าจะต้องมากกว่านี้ ในกรณีที่ค่าเกณฑ์ความปลอดภัยต่ำกว่า 2.0 เขื่อนจะมีโอกาสพลิกคว่ำมากจึงควรเปลี่ยนลักษณะของเขื่อนใหม่ เช่น การเปลี่ยนรูปร่างหรือวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง โดยปกติเขื่อนจะไม่ค่อยมีโอกาสพังทะลายเนื่องจากการพลิกคว่ำ เพราะแนวโน้มเขื่อนจะพังทะลายเนื่องจากการเลื่อนไถลจะมากกว่า ในการเสริมสันเขื่อนเพื่อเก็บกักน้ำในระดับที่สูงขึ้น แรงดันน้ำด้านหน้าเขื่อนที่เพิ่มขึ้นนี้ อาจทำให้ตัวเขื่อนมีโอกาสพลิกคว่ำได้ ดังนั้นความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำของเขื่อนที่ได้รับการเสริมขึ้นจึงเป็นข้อจำกัดขนาดสูงสุดของการเสริมสันเขื่อนข้อหนึ่ง

3) ความมั่นคงต่อความลาด (Slope Stability)

สำหรับเขื่อนที่วัสดุโครงสร้างเป็นดิน จะประสบปัญหาการพังทะลายประการหนึ่งคือ เมื่อดินมีความลาดเอียงจะเกิดแรงที่พยายามให้ดินเลื่อนตัวจากจุดที่สูงกว่ามายังจุดที่ต่ำกว่า แรงกระทำได้แก่แรงดึงดูดของโลกหรือน้ำหนักของดิน และแรงกระทำจากการไหลซึมของน้ำ ส่วนแรงต้านทานได้แก่ แรงเสียดทานภายในและแรงเชื่อมแน่นของดิน สำหรับรูปแบบของการพังทะลาย (Type of failure) ส่วนใหญ่แล้ว แนวการเคลื่อนตัวของดินจะมีลักษณะเป็นโค้งของวงกลม ซึ่งมีอยู่ 3 ลักษณะคือ Slope failure, Toe failure และ Base failure ดังรูปที่ 3.3

ขนาดของความมั่นคงเนื่องจากความลาดของดิน พิจารณาได้จากเกณฑ์ความปลอดภัย กล่าวคือความลาดเอียงของดินที่เกิดขึ้นจากการขุดหรือถมจะมีความมั่นคงอยู่ได้เมื่อมีค่าเกณฑ์ความปลอดภัยมากหรือเท่ากับกว่าหนึ่ง โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$FS_L = \frac{\text{แรงต้านทานการเลื่อนตัว (หรือโมเมนต์ของแรงต้านทาน)}}{\text{แรงกระทำ (หรือโมเมนต์ของแรงกระทำ)}}$$

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าแรงต้านทานการเคลื่อนตัวและแรงกระทำ หรือโมเมนต์ของแรงต้านทานและโมเมนต์ของแรงกระทำ อาจกระทำได้โดยการสมมุติให้แนวการเลื่อนตัวเป็นส่วน

โค้งของวงกลม แล้วแบ่งส่วนของดินที่อยู่เหนือแนวการพังทะลายออกเป็นส่วน ๆ ตามแนวดิ่ง คำนวณค่าน้ำหนักและจุดศูนย์ถ่วงของมวลดินในแต่ละส่วน แสดงดังรูปที่ 3.4 ในการสมมุติแนวส่วนโค้งของการพังทะลาย แล้วคำนวณหาเกณฑ์ความปลอดภัย ต้องเปรียบเทียบหาแนวโค้งที่ให้ค่าเกณฑ์ความปลอดภัยต่ำสุด เป็นค่าที่เกิดขึ้นของความลาดเอียงของดินนั้น ๆ ในการคำนวณสามารถพิจารณาที่หนึ่งส่วนความหนา ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข) ซึ่งแนวการเลื่อนตัวของดินทำมุม α กับแนวราบ มวลดินมีน้ำหนักกระทำตามแนวดิ่ง W สามารถแตกแรงตามแนวตั้งฉากและแนวสัมผัสกับส่วนโค้งของการเลื่อนตัว ได้เป็น $N = W.\cos\alpha$ และ $T = W.\sin\alpha$ ตามลำดับ

แรงต้านทานการเลื่อนตัวของดินโดยทั่วไปประกอบด้วย แรงเชื่อมแน่นกับแรงเสียดทาน ส่วนแรงกระทำคือ น้ำหนักของมวลดินเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ดังนั้น ค่าแรงต้านทานและแรงกระทำจึงคำนวณได้จาก

$$\text{แรงต้านทาน} = C.S + N.\tan\phi \qquad 3.6$$

$$\text{แรงกระทำ} = W.\sin\alpha \qquad 3.7$$

โดยที่ C.S คือ ค่าแรงเชื่อมแน่นทั้งหมดมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างแรงเชื่อมแน่นและระยะตามแนวการพังทะลายของดิน

$N.\tan\phi$ คือ ค่าแรงต้านทานของดิน

ϕ คือ ค่าความต้านทานภายในของดิน

W คือ น้ำหนักตามแนวดิ่งของดิน

α คือ มุมที่ส่วนของการพังทะลายของดินกระทำกับแนวราบ

ดังนั้น โมเมนต์ของแรงต้านทาน และโมเมนต์ของแรงกระทำทั้งหมดที่กระทำกับความลาดของดิน สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{โมเมนต์ของแรงต้านทาน} = C.R.\beta + \tan\phi\ N \qquad 3.8$$

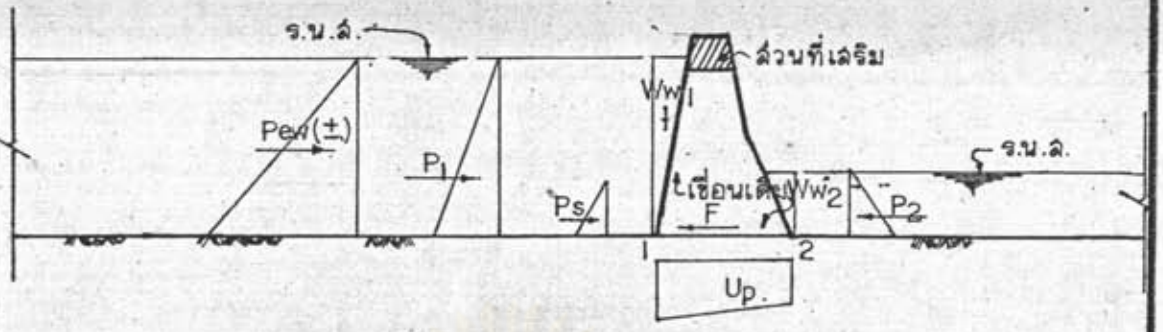
$$\text{โมเมนต์ของแรงกระทำ} = R.\Sigma W.\sin\alpha$$

$$= R.S.T \qquad 3.9$$

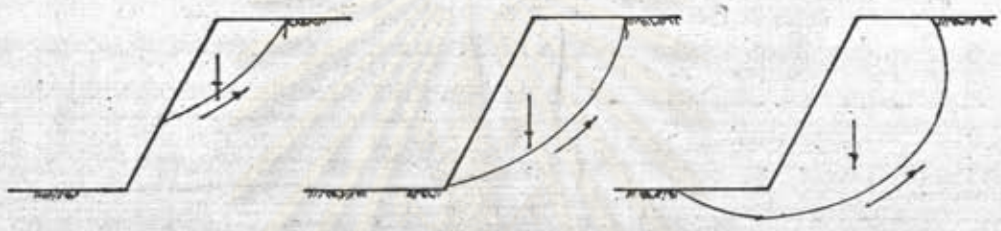
โดยที่ R คือ รัศมีของส่วนโค้งแนวการพังทะลาย

T คือ แรงกระทำให้เกิดการเลื่อนตัว

α คือ มุมที่จุดศูนย์กลางของส่วนโค้งของวงกลม

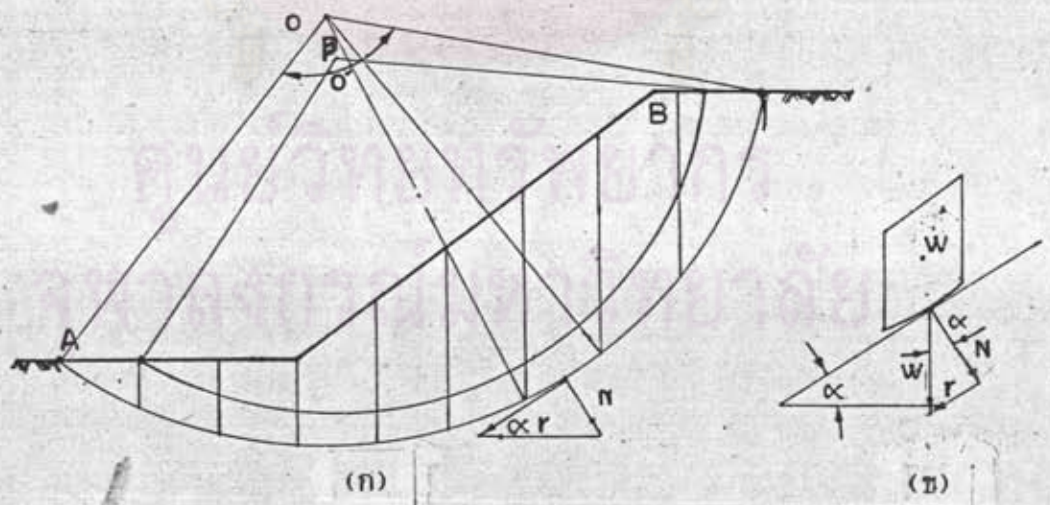


รูปที่ 3.2 แสดงแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อตัวเขื่อน



(ก) Slope failure (ข) Toe failure (ค) Base failure

รูปที่ 3.3 แสดงแนวการพังทะลายของดิน เนื่องจากความลาดแบบต่าง ๆ



รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของดินโดยวิธี Slice Method

ดังนั้นจะได้ $$FS_L = \frac{C.S + N.\tan\alpha}{W.\sin\alpha} \quad 3.10$$

หรือ $$FS_L = \frac{C.F.B + \tan\alpha\ \Sigma N}{R\ \Sigma\ T} \quad 3.11$$

ถ้าดินไม่มีความเชื่อมแน่น คือ C.S=0 และเงื่อนไขที่สภาพสมดุลย์ คือ FS_L=1.00 จากสมการที่ 3-10 ' จะได้ $N.\tan\phi = W.\sin\alpha$ แต่ $N = W.\cos\alpha$ ดังนั้น $\tan\phi = \tan\alpha$ ดังนั้นผิวดินจะมีความมั่นคงก็ต่อเมื่อ มุมความลาดเอียงมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ)

ดังนั้นการเสริมสันเขื่อนให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความปลอดภัยเนื่องจากความลาดของดินลดลง ระดับน้ำด้านหน้าเขื่อนที่สูงขึ้นจะทำให้การกระจายของแรงดันน้ำ (Pore Pressure) ด้านท้ายเขื่อนสูงขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าแรงเชื่อมแน่นและแรงเสียดทานภายในลดลง และในขณะเดียวกันน้ำหนักของน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้แรงกระทำซึ่งมีค่าเท่ากับ $W\sin\alpha$ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย การเสริมสันเขื่อนให้สูงขึ้นจึงมีโอกาสทำให้ค่าความปลอดภัยลดลง จนดินอาจพังทะลายได้ ดังนั้นการเสริมสันเขื่อนให้สูงขึ้นจะต้องไม่ทำให้ค่าเกณฑ์ความปลอดภัยของเขื่อนมีค่าน้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมให้ ซึ่งค่าเกณฑ์ความปลอดภัยนี้สัมพันธ์กับสภาพอุทกวิทยาและธรณีวิทยา เช่นกรณีการเก็บกักและเงื่อนไขการลดระดับน้ำ การเกิดแผ่นดินไหว ฯลฯ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

4) ความมั่นคงต่อความเค้นสูงสุด (Over Stress)

ความเค้น คือค่าหน่วยแรงกดที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่รับแรงกดนั้น ความมั่นคงต่อความเค้นสูงสุดที่ต้องพิจารณาในการก่อสร้างคือต้องพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นที่ฐานรากของเขื่อนเมื่อมีการเก็บกักน้ำถึงระดับสูงสุด และความเค้นที่เกิดขึ้นภายในตัวเขื่อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1) ความเค้นที่ฐานราก จากรูปที่ 3.5 (ก) แรงที่กระทำต่อตัวเขื่อนได้แก่ผลรวมของแรงตามแนวราบและผลรวมของแรงตามแนวดิ่ง โดยแรงลัพธ์ของผลรวมของแรงกระทำตามแนวราบและแนวดิ่ง ติดฐานเขื่อนที่จุด E พิจารณาต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเขื่อน ถ้าไม่มีแรงดันใต้ฐานรากมากระทำ แรงปฏิกิริยาที่ฐานรากแสดงดังรูปที่ 3.5 (ข)

ความเค้น A1 และ B2 สามารถคำนวณได้จากหลักการของแรงกระทำที่ระยะเยื้อง คือ

$$\sigma = \frac{\Sigma W}{A} \pm \frac{M.c}{I} \qquad 3.12$$

เมื่อพิจารณาหนึ่งหน่วยความยาวของเขื่อน ความเค้นที่จุด aและ b หาได้จาก

$$\sigma A_1 = \frac{\Sigma W}{T}\left(1-\frac{6e}{T}\right) \qquad 3.13$$

$$\sigma B_2 = \frac{\Sigma W}{T}\left(1+\frac{6e}{T}\right) \qquad 3.13$$

ในกรณีมีแรงยกตัวด้านหน้าเขื่อนที่จุด a มากกว่า A1 แรงกระทำที่ฐานรากจะมีค่าเปลี่ยนไป แสดงดังรูป 3.5 (ง) และสามารถคำนวณได้โดยคำนวณโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางที่ฐานเขื่อน คือ

$$e' = \frac{\Sigma M}{\Sigma W - As.T}$$

$$T1 = 3(T/3 - e')$$

และความเค้นที่จุด b หาได้จาก

$$\sigma B5 = \frac{2(\Sigma W - A3.T) + A3}{T1} \qquad 3.15$$

ความเค้นที่คำนวณได้ที่จุด a และ b นี้เป็นแรงที่ระทำที่ฐานรากของตัวเขื่อน ถ้ามีการเสริมสันเขื่อน และเก็บกักน้ำในระดับที่สูงขึ้นจะทำให้ผลรวมของแรงตามแนวดิ่งและแนวราบเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นจะต้องไม่มากกว่าความเค้นสูงสุดที่ยอมให้ของฐานราก

4.2) ความเค้นภายในตัวเขื่อน การคำนวณความเค้นภายในตัวเขื่อนทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ วิธีแรงโน้มถ่วง โดยสมมุติให้ตัวเขื่อนประกอบด้วยคานยื่นตามแนวดิ่งเป็นจำนวนมาก คานแต่ละตัวจะมีความกว้างหนึ่งหน่วยและรับแรงโดยไม่เกี่ยวข้องกัน บนระนาบตามแนวราบใด ๆ ความเค้นจะกระจายเป็นแนวเส้นตรงตลอดแนว ในการคำนวณนี้ จะต้องไม่นำเอาแรงยกตัวเนื่องจากน้ำมาพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เพราะว่าบนผิวเขื่อนจะไม่มีความเค้นบนระนาบของ

ผิวเขื่อน อีกระนาบหนึ่งซึ่งตั้งฉากกับผิวเขื่อนจะมีความเค้นหลัก ความเค้นเฉือนเท่ากับศูนย์ จากรูปที่ 3.6 พิจารณาผลรวมของแรงตามแนวดิ่งเท่ากับศูนย์ และสามารถแตกแรงตามแนวดิ่ง จะได้

$$\Sigma v = 0.00$$

$$\sigma_v A = \sigma_{max} (A.\cos\beta) \cos\beta$$

และแตกแรงตามแนวราบจะได้

$$\sigma A = \sigma_{max} (A.\cos\beta) \sin\beta$$

$$= \frac{\sigma_v \cdot A.\sin\beta}{\cos\beta}$$

$$\tau = \sigma_v \tan\beta \qquad 3.16$$

และ

$$\sigma_{max} = \sigma v/\cos^2\beta$$

$$= \sigma_v(1+\tan^2\beta) \qquad 3.17$$

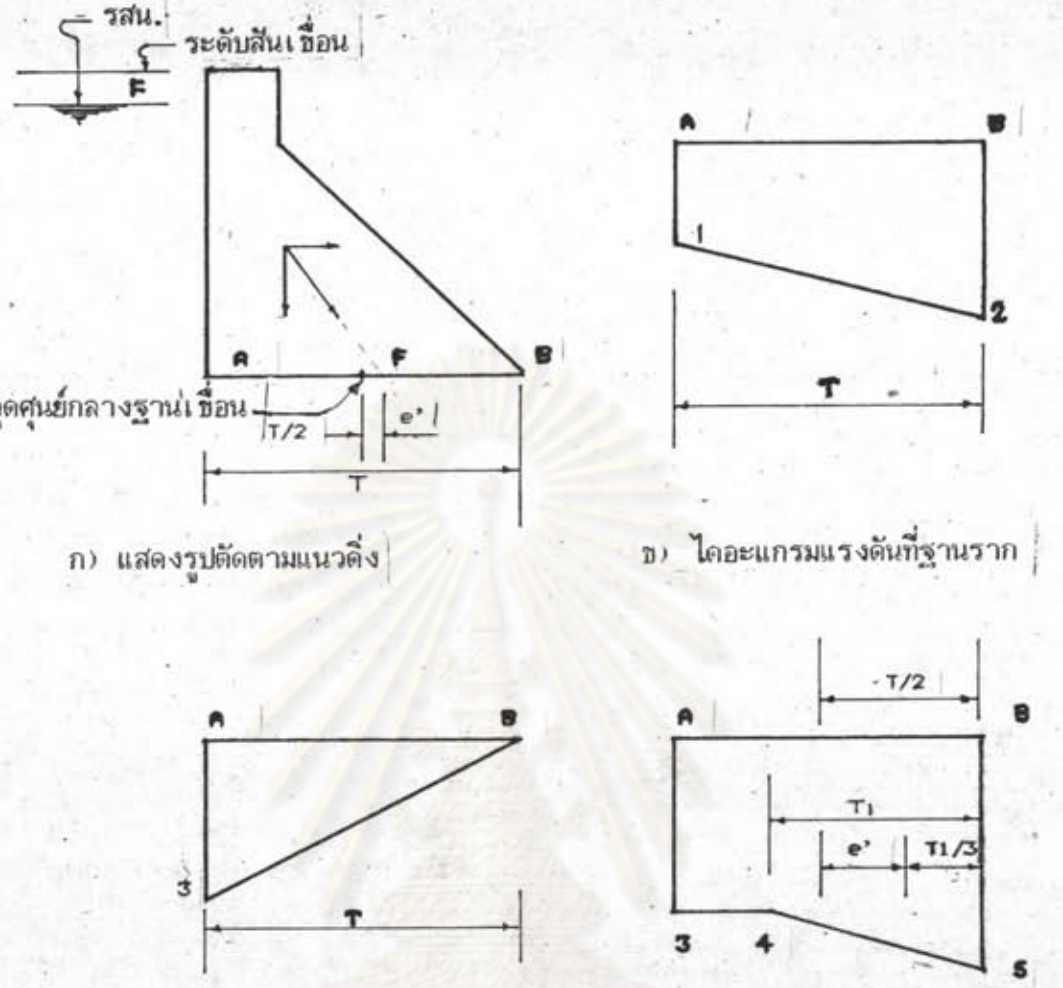
โดยที่ σ_{max} คือความเค้นหลักสูงสุด (Principal Stress)

σ_v คือความเค้นในแนวดิ่ง (Normal Stress)

การคำนวณในลักษณะเดียวกันนี้ ควรกระทำที่ด้านหน้าเขื่อนด้วย ในกรณีไม่มีน้ำในอ่างเก็บน้ำ การเสริมสันเขื่อนให้สูงขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเค้นในแนวดิ่ง σv มีค่ามากขึ้น จากสมการที่ 3.17 ถ้าความเค้นหลักสูงสุด ที่เกิดขึ้น มีค่ามากกว่าเกณฑ์ความเค้นปลอดภัยที่วัสดุสามารถรับได้ในการออกแบบ จะทำให้เขื่อนพังเสียหายได้

3.1.4 ชนิดของเขื่อนเดิมและข้อจำกัดอื่น ๆ

เขื่อนสามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆ ได้หลายวิธีตามวัตถุประสงค์ของการจำแนก ซึ่งในการศึกษานี้ กำหนดวิธีการจำแนก 3 วิธีคือ จำแนกตามลักษณะการใช้งานตามวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างและตามลักษณะการออกแบบทางด้านชลศาสตร์ ดังนี้



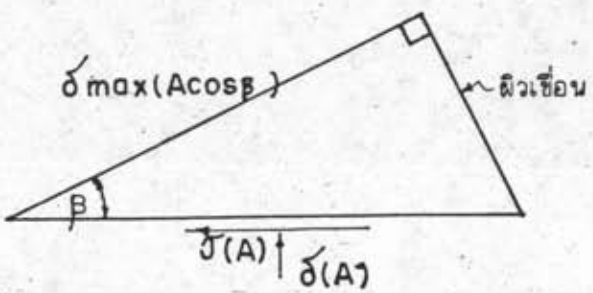
ก) แสดงรูปตัดตามแนวดิ่ง

ข) ไดอะแกรมแรงดันที่ฐานราก

ค) ไดอะแกรมแรงยกตัวที่ฐานราก

ง) ไดอะแกรมผลรวมของแรงยกตัวและแรงดันที่ฐานราก

รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมแสดงแรงดันใต้ฐานราก(Foundation Base Pressures)สำหรับเขื่อนคอนกรีต



รูปที่ 3.6 แสดงไดอะแกรมของแรงที่เกิดขึ้นต่อตัวเขื่อน

1) จำแนกตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ เขื่อนเก็บกักน้ำและเขื่อนทดน้ำ โดยที่เขื่อนเก็บกักน้ำเป็นเขื่อนที่ก่อสร้างเพื่อเก็บกักน้ำตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า การชลประทาน การพักผ่อนหย่อนใจ การอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม การเพาะพันธุ์ปลาและเป็นแหล่งของสัตว์ป่า ฯลฯ เช่น เขื่อนอุบลรัตน์ อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น และเขื่อนภูมิพล จ.ตากเป็นต้น ส่วนเขื่อนทดน้ำ สร้างเพื่อทดน้ำสำหรับส่งน้ำให้พื้นที่เพาะปลูก การพักผ่อนหย่อนใจ เพื่อการบรรเทาอุทกภัย ฯลฯ เช่นเขื่อนเจ้าพระยา จ.ชัยนาท เขื่อนวชิราลงกรณ์ จ.กาญจนบุรี เป็นต้น

2) จำแนกตามวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างได้แก่เขื่อนดิน เขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียว เขื่อนคอนกรีตแบบแรงโน้มถ่วง ฯลฯ

3) จำแนกตามการออกแบบทางด้านชลศาสตร์ คือเขื่อนแบบไหลล้น ซึ่งยอมให้มีการระบายน้ำส่วนเกินให้ไหลล้นข้ามสันเขื่อนได้ และเขื่อนแบบไม่ไหลล้น

ข้อจำกัดของขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุดของเขื่อนแต่ละประเภทจะแตกต่างกัน โดยทั่วไปขนาดสูงสุดของการเสริมสันเขื่อนสัมพันธ์กับวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อน สำหรับเขื่อนดินและเขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียว สามารถทำการเสริมสันเขื่อนได้ง่ายโดยการออกแบบเพิ่มความหนาและความสูงของชั้นกันน้ำ ขยายฐานเขื่อนที่เป็นดินถมหรือหินทิ้งให้กว้างขึ้นสำหรับอายุของเขื่อนเดิมมักจะไม่มีผลต่อความมั่นคงของตัวเขื่อน แต่ถ้าเป็นเขื่อนที่มีวัสดุโครงสร้างเป็นคอนกรีต การเสริมสันเขื่อนจะดำเนินการได้ยาก อายุของเขื่อนเดิมและการเสื่อมสภาพของคอนกรีต จะทำให้เขื่อนที่เสริมมีความมั่นคงน้อยลง ในบริเวณที่ประสบปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือน เช่นในพื้นที่ ที่คาดว่าจะมีโอกาสเกิดแผ่นดินไหว การออกแบบควรจะได้พิจารณาปัญหาการรับแรงสั่นสะเทือนโดยการลดความชันของเขื่อนทั้งลาดด้านหน้าและลาดด้านท้ายน้ำ เพิ่มความกว้างของสันเขื่อนและคันกั้นน้ำ ซึ่งการเพิ่มขนาดของเขื่อนนี้ จะทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นมีผลต่อความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการ

3.2 <u>ข้อจำกัดของฐานรากที่รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น</u>

ในการเสริมสันเขื่อนเดิมให้สูงขึ้น และมีการเก็บกักน้ำเหนือเขื่อนสูงขึ้น จะทำให้สภาพฐานรากของตัวเขื่อนต้องรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น ดังนั้นการตรวจสอบและพิจารณาการรับน้ำหนักของฐานรากจึงมีความสำคัญมาก มีเขื่อนเป็นจำนวนมากที่เสียหายหรือเกิดการพังทะลายเนื่องจากการก่อสร้างบนฐานรากไม่เหมาะสม ดังนั้นการเสริมสันเขื่อน จึงต้องมีการตรวจสอบสภาพทั้งหิน และดินที่อยู่ข้างใต้ตัวเขื่อนเพื่อคำนวณหาปริมาณน้ำที่ซึมผ่านใต้เขื่อน แรงของน้ำที่กระทำต่อตัวเขื่อน และการทรุดตัวของฐานราก ดังต่อไปนี้

3.2.1 การไหลซึมผ่านใต้ฐานราก

เขื่อนที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ จะมีน้ำซึมผ่านใต้ฐานของเขื่อน แม้แต่กรณีที่สภาพทางธรณีใต้ฐานรากจะเป็นดินเหนียวซึ่งน้ำซึมผ่านได้ยากก็ตาม น้ำก็ยังสามารถซึมผ่านไปได้ การซึมของน้ำใต้ฐานรากสืบเนื่องมาจากความดันหรือระดับน้ำเหนือเขื่อนและท้ายเขื่อนแตกต่างกัน ความสามารถที่น้ำซึมผ่านได้นี้เรียกว่า ความซึมได้ของน้ำ การที่น้ำสามารถซึมผ่านฐานรากได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ขนาดของเม็ดดิน ความคละและโครงสร้างของชั้นดิน เช่นดินที่มีพวกกรวด หรือทรายผสมอยู่มาก น้ำจะสามารถ ผ่านไปได้ในอัตราที่สูง

การไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดิน จะเป็นการไหลแบบคงที่ช้า ๆ ผ่านไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ในขณะเดียวกันแรงดันของน้ำ ก็จะลดลงเนื่องจากเกิดพลังงานสูญเสียไปเพราะแรงเสียดทานของผิวช่องเม็ดดิน ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านใต้ฐานเขื่อน สามารถคำนวณได้จาก กฎของดาร์ซี (Darcy) ปริมาณน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = k\ i\ A \qquad 3.18$$

โดยที่ Q คือปริมาณน้ำที่ซึมผ่านได้ฐานเขื่อน

k คือสัมประสิทธิ์ความซึมได้ ดูตารางที่ 3.3

i คือความชันทางชลศาสตร์ = h/L

h คือความสูงต่างระดับน้ำในช่วงความยาวการไหลซึม

L คือช่วงความยาวของการไหลซึม

A คือพื้นที่หน้าตัดที่น้ำซึมผ่าน

เมื่อน้ำซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดิน จะเกิดแรงเสียดทานบนเม็ดดินขึ้น ซึ่งในกรณีที่พิจารณาแรงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร-แรงที่เกิดขึ้นคือ แรงดันของการไหลซึม (Seepage Pressure) ดังนั้น ถ้าเก็บกักน้ำด้านหน้าเขื่อนสูงขึ้น ความต่างระดับน้ำเหนือเขื่อนและท้ายเขื่อนจะเพิ่มขึ้น จนถึงระดับที่สภาวะวิกฤติเกิดขึ้น ดินบริเวณท้ายเขื่อนจะไม่มีเสถียรภาพไม่สามารถต้านแรงดันของน้ำที่ไหลซึมผ่านได้ ถ้าน้ำดันให้ดินใต้เขื่อนไหลออกจากจุดเดิมไปที่อื่น ก็จะเกิดรูโพรงขึ้น ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อตัวเขื่อนมากที่สุด การลดอันตรายที่เกิดขึ้นนี้อาจทำได้หลายวิธี เช่น จำกัดระดับเก็บกักสูงสุด ก่อสร้างฐานรากให้มีความยาวของการไหลซึมมากขึ้น ทำชั้นทึบน้ำบนผิวลาดด้านหน้าเขื่อน และปูวัสดุทึบน้ำที่ท้องน้ำด้านหน้าเขื่อน เป็นต้น

3.2.2 การทรุดตัวของฐานราก (Settlement)

การทรุดตัวของฐานรากหรือการยุบอัดตัวของดินใต้ฐานราก ของเขื่อนลงในแนวดิ่ง เนื่องจากมีน้ำหนักกดทับและมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชั้นดิน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เขื่อนเกิดการพังเสียหายขึ้นได้ จำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

ก) การทรุดตัวจากคุณสมบัติยืดหยุ่นของดิน เกิดขึ้นทันทีเมื่อมีแรงมากระทำ

ข) การทรุดตัวจากการยุบอัดตัวของดิน จะเกิดขึ้นตลอดเวลา และมีระยะยาวนานมากกว่าจะสิ้นสุดการทรุดตัว

ค) การทรุดตัวจากคุณสมบัติพลาสติกของดิน การทรุดตัวในลักษณะนี้มีอัตราการทรุดตัวน้อยมาก

การทรุดตัวจากการยุบอัดตัวของดินจะมีความสำคัญและเป็นอันตรายมากที่สุด ต่อการทรุดตัวของอาคารหรือเขื่อน ถ้าเป็นดินเหนียวหรือดินตะกอน จะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันระยะเวลานาน การทรุดตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$S_c = m_v \Delta P . h$$

$$= \frac{e_o - e_1}{1+e_o} . h$$

$$= \frac{h}{1+e_o} . C_c \log \frac{P_1}{P_o} \qquad 3.19$$

โดยที่ m_v คือค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการยุบอัดตัว

h คือความหนาของชั้นดิน

S_c คือค่าการทรุดตัว

C_c คือดรรชนีของการกดอัด (Compression Index)

e_o คืออัตราส่วนช่องว่างของดินเดิมที่แรงกด P_o

e_1 คืออัตราส่วนช่องว่างของดินที่แรงกด P_1

P_o และ P_1 คือแรงกดที่ระดับความลึก h ของดินก่อนและหลังการทรุดตัว

การทรุดตัวของดินที่เกิดขึ้นจากชั้นของดินที่ได้รับน้ำหนักกดทับ ทำให้ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงนี้ ถ้าเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยสามารถซ่อมแซมได้ แต่ถ้าเกิดขึ้นมากอาจทำให้อาคารหรือเขื่อนพัง

ทะลายเสียหายได้ ดังนั้น สภาพการทรุดตัวของตัวเขื่อน จึงเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการเสริมสันเขื่อน

3.3 ข้อจำกัดของอ่างเก็บน้ำ

การเสริมสันเขื่อนเดิมให้สูงขึ้น เพื่อเพิ่มปริมาตรเก็บกักของอ่างเก็บน้ำ จะมีผลทำให้ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำและพื้นที่น้ำท่วมเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดขนาดของการเสริมสันเขื่อนสูงสุดเนื่องจากข้อจำกัดของอ่างเก็บน้ำได้แก่ ลักษณะภูมิประเทศรอบอ่างเก็บน้ำ สภาพทางธรณีวิทยา ปริมาณน้ำรั่วซึมออกจาอ่างเก็บน้ำ การพังทะลายของตะลิ่งรอบ ๆ อ่างเก็บน้ำ พื้นที่สำคัญที่ยอมให้น้ำท่วมไม่ได้ และผลกระทบที่เกิดจากการดำเนินงานอ่างเก็บน้ำด้านอื่น ๆ

3.3.1 ลักษณะภูมิประเทศและสภาพทางธรณีวิทยาของอ่างเก็บน้ำ

สำหรับพื้นที่น้ำท่วมของอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมสันเขื่อนและเก็บกักน้ำในระดับที่สูงขึ้น สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและพื้นที่น้ำท่วม ซึ่งก่อนที่จะพิจารณาการเสริมสันเขื่อน ควรจะได้ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและพื้นที่น้ำท่วม ของอ่างเก็บน้ำใหม่ เนื่องจากหลังการใช้งาน สภาพภูมิประเทศใต้อ่างเก็บน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลง และระดับน้ำที่สูงขึ้น จะทำให้พื้นที่บางส่วนรอบ ๆ อ่างเก็บน้ำซึ่งเคยเป็นพื้นที่ป่าไม้ เกษตรกรรมหรือชุมชนที่อยู่อาศัย ซึ่งอาจจำเป็นต้องดำเนินการอพยพราษฎรที่อาศัยอยู่รอบอ่างเก็บน้ำไปตั้งถิ่นฐานในพื้นที่แห่งใหม่และพัฒนาสิ่งอำนวยความสะดวกพื้นฐานด้านการศึกษา การสาธารณสุข ฯลฯ ให้แก่ราษฎรด้วย ซึ่งค่าใช้จ่ายสำหรับการอพยพตั้งถิ่นฐานนี้ ต้องนำมาพิจารณาเป็นค่าลงทุนอย่างหนึ่งของการเสริมสันเขื่อน ถ้าสภาพภูมิประเทศรอบอ่างเก็บน้ำมีช่องเขาหรือระดับสันปันน้ำไม่สูงเพียงพอ น้ำอาจไหลออกจากอ่างเก็บน้ำได้ สภาพภูมิประเทศใต้อ่างเก็บน้ำ ถ้าเพิ่มระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำให้สูงขึ้นอาจถูกน้ำท่วมได้รับความเสียหาย สภาพธรณีวิทยาใต้อ่างเก็บน้ำอาจเป็นข้อจำกัดการเสริมสันเขื่อนได้จากการรั่วซึมออกจากอ่างตามชั้นของดิน รอยแยกแตกของหินผุหรือรูโพรง ทำให้ปริมาณน้ำจำนวนมากซึมออกจากอ่างไปทำความเสียหายให้แก่พื้นที่รอบอ่างเก็บน้ำได้ โดยปกติน้ำจะซึมออกจากอ่างเมื่อระดับน้ำใต้ดินรอบอ่างเก็บน้ำมีระดับต่ำกว่าระดับน้ำในอ่างเสมอ

3.3.2 การพังทะลายของเนินเขา

การพังทะลายของเนินเขาและลาดตลิ่งของอ่างเก็บน้ำที่ถูกน้ำท่วมอาจเกิดและเป็นปัญหาขึ้นได้ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับสภาพลักษณะของชั้นดินหรือหินในบริเวณที่ถูกน้ำท่วมถึง การเก็บกักน้ำจะทำให้มี

การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในอ่าง ทำให้ความมั่นคงลาดตลิ่งและเนินเขาลดลง เนื่องจากน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อดินหรือหินจนถึงจุดอิ่มตัว จะทำให้เกิดแรงกดดันมีน้ำหนักมากขึ้น ขณะเดียวกันแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของดินและแรงเสียดทานลดลง ทำให้ปริมาตรดินและหินเกิดการพังทะลายลงไปในอ่างเก็บน้ำอันเป็นผลทำให้ความจุของอ่างเก็บน้ำลดลง จนอาจไม่สามารถใช้อ่างเก็บน้ำต่อไปได้ นอกจากนี้การพังทะลายยังทำให้เกิดกระแสคลื่นของน้ำพัดไปกระทบฝั่งและเกิดการกัดกร่อนทำให้ตลิ่งพัง อาจมีผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างของอาคารต่าง ๆ หรือทำให้อายุใช้งานลดลง ดังนั้นบริเวณที่เคยเกิดการเลื่อนตัวของชั้นหินหรือเคยมีการพังทะลายของลาดตลิ่งมาก่อน ไม่ควรเสริมสันเขื่อนเดิมให้สูงขึ้น จนระดับการเก็บกักน้ำสูงถึงระดับที่ตลิ่งอาจเกิดการพังทะลายได้ นอกจากในกรณีที่มีการสำรวจลักษณะภูมิประเทศรอบอ่างเก็บน้ำ จนมั่นใจได้ว่าจะไม่เกิดกรณีนี้ขึ้น

3.3.3 พื้นที่สำคัญที่ยอมให้น้ำท่วมไม่ได้

ในบางกรณีระดับเก็บกักหรือขนาดสูงสุดของการเสริมสันเขื่อน จะถูกจำกัดให้น้อยกว่าที่ต้องการ อันเนื่องมาจากพื้นที่สำคัญที่ยอมให้น้ำท่วมไม่ได้ เช่น เขตชุมชนที่อยู่ใกล้บริเวณอ่างเก็บน้ำ การพัฒนาเขตชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมในบริเวณพื้นที่หุบเขาของอ่างเก็บน้ำ การมีโบราณสถานโบราณวัตถุ หรือสถานที่ศักดิ์สิทธิ์ ตลอดจนป่าสงวนหรืออุทยานแห่งชาติที่สำคัญ ซึ่งไม่สามารถก่อสร้างทดแทนได้ สิ่งเหล่านี้ก็จะเป็นข้อจำกัดระดับสูงสุดของน้ำในอ่าง และในการสำรวจปริมาตรเก็บกักชั่วคราวไว้สำหรับบรรเทาอุทกภัยทางด้านท้ายเขื่อน พื้นที่น้ำท่วมบางแห่งซึ่งอาจเป็นทางหลวง ทางรถไฟ สะพาน เขื่อน หรือฝายอื่น ๆ อาจจะเป็นตัวกำหนดขนาดความจุสูงสุดของอ่างได้ ทั้งนี้เพราะค่าลงทุนในการก่อสร้างอาคารทดแทนต่าง ๆ หรือยกระดับให้สูงขึ้นไปให้พ้นระดับน้ำท่วมถึงอาจจะสูงเกินกว่าผลประโยชน์ที่จะได้รับ ดังนั้นระดับเก็บกักน้ำที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมสันเขื่อนจะต้องไม่สูงเกินกว่าระดับที่ไม่ยอมให้น้ำท่วมเหล่านี้ และเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการเสริมสันเขื่อน

3.3.4 ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณค่าทางเศรษฐกิจ

ก่อนที่จะกำหนดขนาดของการเสริมสันเขื่อนหรือขนาดของพื้นที่น้ำท่วม ควรมีการสำรวจสภาพทางเศรษฐกิจในบริเวณใกล้อ่างเก็บน้ำ โดยเฉพาะแหล่งแร่ ป่าไม้ พื้นที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่า สิ่งแวดล้อมเหล่านี้อาจเป็นทรัพยากรที่เหลืออยู่ไม่มากนักของประเทศหรือมีมูลค่าสูง ซึ่งอาจประมาณค่ามิได้ จึงควรมีการศึกษาผลกระทบและการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ในกรณีที่การเสริมสันเขื่อนจะก่อให้เกิดการเสียหายมาก อาจต้องลดขนาดของการเสริมสันเขื่อนลง หรือเปลี่ยนกำหนดเวลาการก่อสร้างเสริมสันเขื่อนออกไป เพื่อนำเอาแหล่งแร่และทรัพยากรเหล่านี้ขึ้นมาใช้ประโยชน์ก่อน

นอกจากนี้ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มขึ้นอาจมีผลกระทบต่อระดับน้ำใต้ดิน และพืชพันธุ์บางชนิดในบริเวณอ่างเก็บน้ำ ตลอดจนทำให้ประสิทธิภาพของการใช้ดินลดลงเพราะปริมาณน้ำที่ไหลซึมออกจากอ่างเก็บน้ำบางส่วนจะไหลลงไปใต้ดิน ทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นจนก่อให้เกิดความเสียหายได้

3.4 ข้อจำกัดทางด้านอุตุ-อุทกวิทยา

วัตถุประสงค์สำคัญของการเสริมสันเขื่อนคือ การเพิ่มความจุเก็บกักจากปริมาณน้ำส่วนเกินที่ต้องปล่อยทิ้งไป ที่ทางระบายน้ำล้นและป้องกันการไหลล้นข้ามสันเขื่อน ในกรณีที่เกิดอุทกภัย ซึ่งมีปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสูงกว่าที่ออกแบบไว้ อ่างเก็บน้ำจะต้องทำหน้าที่เก็บกักน้ำ ส่วนเกินความต้องการจากช่วงเวลาที่มีปริมาณน้ำมาก สำรองไว้ใช้ในเวลาที่มีปริมาณน้ำน้อย เป็นการควบคุมปริมาณน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติและไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำ ให้ระบายออกจากอ่างเก็บน้ำตามที่ต้องการด้วยการควบคุมปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและเก็บกักน้ำไปใช้ในด้านต่าง ๆ ให้เพียงพอทั้งปริมาณและเวลาที่ต้องการ ขนาดสูงสุดของอ่างเก็บน้ำจึงสัมพันธ์กับสภาพทางอุตุ-อุทกวิทยา ได้แก่ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงอ่างเก็บน้ำ ปริมาณน้ำที่ระเหยและรั่วซึม และขนาดความจุสูงสุดของอ่างเก็บน้ำ ดังนั้นขนาดของการเสริมสันเขื่อนสูงสุด จะต้องมีขนาดไม่สูงเกินกว่าขนาดความจุสูงสุดของอ่างเก็บน้ำที่สามารถมีน้ำเต็มอ่างเก็บน้ำได้

3.5 ข้อจำกัดทางด้านการเงิน

ปัจจัยทางด้านการเงินที่มีผลต่อการก่อสร้างเขื่อนหรือเสริมสันเขื่อน ได้แก่ ค่าลงทุนก่อสร้าง ค่าซื้อที่ดิน ค่าสึกหรอรายปี ค่าดอกเบี้ยเงินกู้ ค่าการจัดการและบำรุงรักษาซ่อมแซม ผลกำไรหรือค่าตอบแทนที่พึงจะได้รับ ค่าลงทุนก่อสร้างของโครงการขึ้นอยู่กับขนาดของโครงการ ลักษณะทางภูมิประเทศที่ตั้งเขื่อนและอ่างเก็บน้ำ การออกแบบและชนิดของเขื่อนเดิม ฯลฯ ซึ่งโดยทั่วไปค่าลงทุนทั้งหมดของโครงการจะต้องไม่สูงมากจนไม่สามารถจะจัดหางบประมาณ และเงินกู้มาดำเนินการได้ นอกจากนั้นค่าเงินลงทุนที่สูงมากเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลประโยชน์ที่จะได้รับเพิ่มขึ้น อาจจะไม่คุ้มค่ากับการลงทุนก็ได้ ดังนั้นถ้ามีเงินลงทุนอยู่อย่างจำกัด ค่าเงินลงทุนทั้งหมดนี้จะเป็นข้อจำกัดขนาดสูงสุดของการเสริมสันเขื่อนประการหนึ่ง

3.6 สรุปข้อจำกัดของขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุด

ในการศึกษานี้ เป็นการศึกษาและพัฒนาหาข้อจำกัดของการเสริมสันเขื่อนสูงสุดของโครงการเขื่อนและอ่างเก็บน้ำโดยทั่ว ๆ ไป เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาขนาดสูงสุดของการเสริมสันเขื่อน

ของโครงการต่าง ๆ ต่อไป จากผลการศึกษา สามารถสรุปผลข้อจำกัดของการเสริมสันเขื่อนสูงสุดได้ดังต่อไปนี้

3.6.1 ข้อจำกัดของตัวเขื่อนและอาคารประกอบ ที่ต้องพิจารณาคือ

1) ลักษณะทางภูมิประเทศของที่ตั้งเขื่อน ได้แก่ระดับความสูงของภูเขาหรือเนินเขาทั้งสองด้านของตัวเขื่อน ซึ่งความสูงของเขื่อนที่เสริมขึ้นจะสูงกว่าเนินเขาไม่ได้

2) เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าด้วยพลังน้ำ จำกัดขนาดสูงสุดของการเสริมสันเขื่อนจากความสูงของน้ำสูงสุดและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้

3) ความมั่นคงของเขื่อนที่เสริม การออกแบบการเสริมสันเขื่อน ขนาดสูงสุดที่สามารถเสริมได้ ต้องพิจารณาจากข้อจำกัดของความมั่นคงของตัวเขื่อนที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

3.1) ความมั่นคงต่อการเลื่อนไถล

3.2) ความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำ

3.3) ความมั่นคงต่อความลาด เนื่องจากการไหลซึมแบบคงที่ (Steady Seepage) และจากการที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown)

3.4) ความมั่นคงต่อความเค้นสูงสุด

4) ชนิดของเขื่อนเดิมและข้อจำกัดอื่น ๆเช่นอายุของเขื่อนเดิม การเสื่อมสภาพของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง รวมทั้งปัญหาการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว เป็นต้น

3.6.2 ข้อจำกัดของฐานรากที่รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ

1) การไหลซึมผ่านใต้ฐานราก ปริมาณน้ำและความเร็วของการไหลซึม จะต้องไม่มากจนก่อให้เกิดความเสียหายได้

2) การทรุดตัวของฐานราก ขนาดของเขื่อนที่เสริมจะต้องไม่สูงมาก จนน้ำหนักของตัวเขื่อนที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ฐานรากทรุดตัวมากจนอาคารหรือเขื่อนพังเสียหายได้

3.6.3 ข้อจำกัดของอ่างเก็บน้ำ สิ่งที่กำหนดขนาดสูงสุดของการเสริมสันเขื่อน ได้แก่

1) ลักษณะทางภูมิประเทศและสภาพทางธรณีวิทยาของอ่างเก็บน้ำ จะต้องตรวจสอบและศึกษาถึงการไหลรั่วออกจากอ่างเก็บน้ำ พื้นที่น้ำท่วมที่เพิ่มขึ้นและปริมาณการรั่วซึมออกจากอ่างเก็บน้ำ

2) การพังทะลายของเนินเขาที่ถูกน้ำท่วม ซึ่งจะทำให้ปริมาตรของอ่างเก็บน้ำลดลง และเกิดคลื่นน้ำอาจทำความเสียหายต่ออาคารต่าง ๆ ได้

3) พื้นที่สำคัญที่ยอมให้น้ำท่วมไม่ได้ เช่น ถาววรวัตถุต่าง ๆ อาคารหรือสิ่งก่อสร้างที่สำคัญ ทางรถยนต์ ทางรถไฟ ชุมชนที่พักอาศัย ฯลฯ

4) ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณค่าทางเศรษฐกิจ ได้แก่ การสูญเสียโอกาสในการพัฒนาแหล่งแร่ ป่าไม้ ฯลฯ

3.6.4 ข้อจำกัดทางด้านอุตุ-อุทกวิทยา ได้แก่ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ การระเหยและการรั่วซึม ปริมาณน้ำฝน ซึ่งสามารถทำให้อ่างเก็บน้ำสามารถเก็บกักน้ำเต็มความจุได้

3.6.5 ข้อจำกัดทางด้านการเงิน คือค่าลงทุนจะต้องไม่สูงจนเกินไป จนอาจไม่สามารถหาแหล่งเงินมาลงทุนก่อสร้างได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าเกณฑ์ความปลอดภัยต่อความลาดที่ยอมให้

เงื่อนไขความปลอดภัย	เกณฑ์ความปลอดภัยต่ำสุด			
	ไม่มีกรณีแผ่นดินไหว		กรณีมีแผ่นดินไหว	
	เหนือน้ำ	ท้ายน้ำ	เหนือน้ำ	ท้ายน้ำ
1) End of Construction	1.25	1.25	1.00	1.00
2) Rapid Drawdown	1.25	-	1.00	1.00
3) Steady Seepage	-	1.50	-	1.25
4) Partial pool with Steady Seepage	1.50	-	1.25	-

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึม (k) ของชั้นดินชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ขนาด (มม.)	k (ซม./วินาที)
กรวด	4 -7	2.40 -4.00
กรวดเม็ดเล็ก	2 -4	1.00 -3.50
ทรายหยาบ	0.50	0.01 -1.00
ทรายผสม	0.10 -0.30	0.005-0.01
ทรายละเอียด	0.10	0.001-0.05
ดินตะกอนทราย	0.02 -0.01	0.0001-0.002
ดินตะกอน	0.002-0.02	0.00001-0.0005
ดินเหนียว	0.002 และน้อยกว่า	10^{-4} - 10^{-6}

ตารางที่ 3.4 สรุปข้อจำกัดของขนาดการเสริมสันเขื่อนสูงสุดสำหรับกรณีของโครงการเขื่อนและอ่างเก็บน้ำโดยทั่วๆ ไป

ข้อจำกัด	สิ่งที่จำกัดขนาดของการเสริมสันเขื่อน
1) ข้อจำกัดของตัวเขื่อนและอาคารประกอบ	1.1 ลักษณะทางภูมิประเทศของที่ตั้งเขื่อน 1) ความสูงของภูเขาหรือเนินเขาด้านที่ต่ำสุด 1.2 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าด้วยพลังน้ำ 1) ความสูงออกแบบสูงสุด (Design Head) 2) พลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้ 1.3 ความมั่นคงของเขื่อนที่เสริม 1) การเลื่อนไถล (Sliding) 2) การผลิกคว่ำ (Overturning) 3) ความมั่นคงเนื่องจากความลาด 4) ความมั่นคงต่อความเค้นสูงสุด
2) ข้อจำกัดของฐานรากที่รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น	2.1 การไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก 2.2 การทรุดตัวของฐานราก (Settlement)
3) ข้อจำกัดของอ่างเก็บน้ำ	3.1 ลักษณะทางภูมิประเทศของอ่างเก็บน้ำ 1) ความสูญเสียทางเศรษฐกิจของพื้นที่น้ำท่วม 2) การรั่วซึมของน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ 3) การไหลล้นออกจากอ่างเก็บน้ำ 4) การอพยพประชากรออกจากพื้นที่น้ำท่วม 3.2 การพังทะลายของตลิ่งและเนินเขา 3.3 พื้นที่สำคัญที่ยอมให้น้ำท่วมไม่ได้ 3.4 ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณค่าทางเศรษฐกิจ
4) ข้อจำกัดทางด้านอุตุ-อุทกวิทยา	4.1 ปริมาณน้ำท่า Inflows มีจำกัด 4.2 ปริมาณน้ำที่ระเหยและการรั่วซึม
5) ข้อจำกัดทางด้านการเงิน	5.1 ค่าลงทุนเสริมสันเขื่อนสูงสุด (Max-cost) 5.3 ค่าดูแลและบำรุงรักษา (M & O)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย