บทที่ 2

การพิจารณาทฤษฎีเบื้องต้น

(Basic Theoretical Consideration)

2.1 มโนทัศน์เกี่ยวกับเสถียรภาพของคลอง

เสถียรภาพของคลอง โดยความหมายของคำแล้ว หมายถึง ความสามารถของคลองที่ยังคงรักษารูปลักษณะและแนวของคลองตลอดอายุเวลาการใช้งานของคลอง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจจะมีสาเหตุเนื่องจากการพังทลายของฝั่งคลอง การกัดเซาะและกัดกร่อนของฝั่งและท้องคลอง หรือการตื้นเขินจากการทับถมของตะกอน ทว่า โดยความจริงที่ปรากฏขึ้นตามธรรมชาติแล้ว คลองที่จะมีคุณสมบัติในด้านเสถียรภาพตามความหมายดังกล่าว มีน้อยมากหรือไม่มีเลย ดังนั้น โดยทางปฏิบัติแล้ว คลองที่สามารถคงรูปลักษณะและแนวคลอง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยหรือมีน้อยมากโดยประมาณ และยังสามารถใช้งานได้ดี ในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่งที่นานพอสมควร เช่น 5, 10 หรือ 15 ปีขึ้นไป อาจจะถือได้ว่าเป็นคลองที่มีเสถียรภาพ ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาขีดของความเปลี่ยนแปลงที่ยอมให้ หรือระยะเวลาสำหรับการพิจารณา ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการพิจารณาหรือการใช้งานเป็นหลัก

การพิจารณาปัญหาเชิงวิศวกรรมของเสถียรภาพของคลอง แบ่งออกเป็น 2 หลักใหญ่ ๆ ด้วยกัน อันได้แก่ การพิจารณาทางด้านกลศาสตร์ของดิน (soil mechanics) และทางด้านชลศาสตร์ (hydraulics) ซึ่งมีการพิจารณาที่แตกต่างกันไป

การพิจารณาทางด้านกลศาสตร์ของดิน มักจะหยิบยกปัญหาในเชิงสแตติคส์ (statics) ของการพังถล่ม (sloughing) หรือการเลื่อนทลาย (sliding) ของลาดเอียงฝั่งคลอง (bank slopes) อันเนื่องมาจากน้ำหนักของดินในสภาวะต่าง ๆ เช่น ดินแห้ง ดินเปียก เป็นต้น องค์ประกอบสำหรับการพิจารณาเสถียรภาพของฝั่งลาดเอียง (slope stability) คือ ขนาดของอนุภาคดิน (particle size) ชนิดของดิน ลักษณะการผสมของอนุภาคดิน ขนาดและชนิดต่าง ๆ (soil composition) ความแน่นการอัดตัวของมวลดิน (degree of compactioness) ความ

ความสูงของลาดเอียง (slope height) และสภาวะการแห้งชื้นและเปียกของดิน เป็นต้น

สำหรับการพิจารณาทางด้านชลศาสตร์ (hydraulics) มักจะคลุมปัญหาที่กว้างขวางและค่อนข้างไดนามิคส์ (dynamics) กับการไหลของน้ำ เช่นการกัดเซาะและการกัดกร่อนของลาดฝั่งและท้องคลอง (scouring and erosion) การพัดพาและทับถมของตะกอน เป็นต้น องค์ประกอบใหญ่ ๆ สำหรับการพิจารณา มีดังนี้คือ ชนิด ขนาด รูปร่างและลักษณะการผสมของอนุภาคดิน (type, size, shape and composition of soil particles) ความเร็วการไหลของน้ำในคลอง การกระจายของความเร็วการไหล (velocity distribution) แนวคลอง (channel alignment) การเปลี่ยนแปลงการไหล (flow variation) ความลาดเอียงของท้องคลอง (bed slope) ความลึกของการไหลหรือรัศมีของชลศาสตร์ (flow depth or hydraulic radius) สภาพการปั่นป่วนและการสั่นสะเทือนของการไหลของน้ำ (degree of turbulence and oscillation of flow) ลักษณะและความเข้มข้นของตะกอนในน้ำไหล (characteristics and concentration of sediment in flowing water). เป็นต้น

สำหรับการศึกษาเสถียรภาพของคลองนี้ ได้มุ่งที่จะศึกษาปัญหาการพิจารณาในด้านชลศาสตร์ (hydraulics) ซึ่งเป็นการพิจารณาเชิงไดนามิคส์ (dynamics) ในขณะที่การพิจารณาทางด้านกลศาสตร์ของดิน เป็นการพิจารณาปัฐหาเชิงสแตติคส์ (statics) ซึ่งได้มีการศึกษาอย่างละเอียดและกว้างขวางภายใต้ชื่อ เสถียรภาพของพื้นลาดเอียง (slope stability) และได้มีผลสรุปที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไป ดังจะหาอ่านได้จากตำรากลศาสตร์ของดินโดยทั่วไป เช่น Terzaghi and Peck (1967), Taylor (1959) และ Lambe (1979) เป็นต้น ในการศึกษานี้จะกล่าวถึงปัญหาทางกลศาสตร์ของดินพอเป็นสังเขปเท่านั้น

2.2 <u>ทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล</u>(Theoretical Fluid Mechanics)

โดยทั่วไป การไหลของน้ำในคลองอาจแยกออกเป็น การไหลแบบลามินาร์ (Laminar

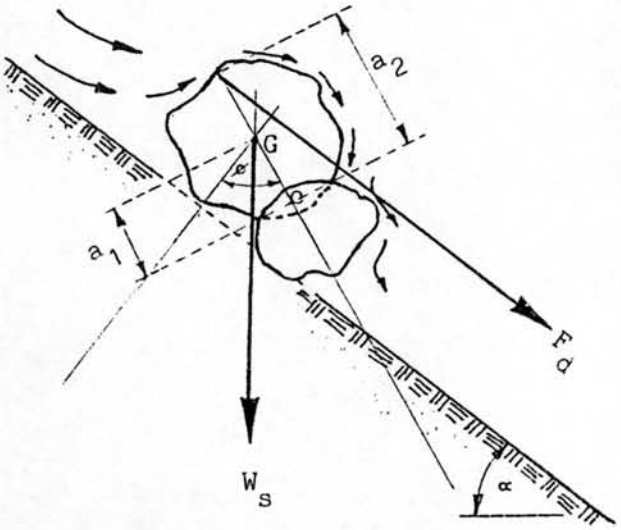
flow) ซึ่งเป็นการไหลของน้ำที่มีความเร็วการไหลต่ำและความลึกการไหลน้อย ค่า Reynolds Number น้อยกว่า 500 (Chow, 1959) ซึ่งการไหลจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของความหนืดของน้ำ (viscous effect) เป็นหลัก ในขณะที่การไหลแบบเทอร์บูเล้นท์ (Turbulent flow) จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของความเฉื่อยของมวลน้ำไหล (Inertial effect) ซึ่งจะเป็นการไหลของน้ำมีความเร็วสูงและความลึกมากขึ้น และมีค่า Reynolds Number สูงกว่า 2000 โดยประมาณ (Chow, 1959)

เสถียรภาพของวัสดุที่หยุดนิ่งอยู่บนลาดท้องคลองอาจจะสูญสภาพได้จากการกระจายของแรงที่กระทำบนพื้นผิวของวัสดุ เช่น แรงลากดึง (drag force) แรงยก (lift force) และแรงหนืด (viscous force) เมื่อผลลัพธ์ของแรงเหล่านี้มากกว่าผลลัพธ์ของแรงที่รักษาสภาวะเสถียรภาพของวัสดุ คือ แรงจากความโน้มถ่วงและแรงยึดติด (cohesion) ของอนุภาค เป็นต้น วัสดุที่จะเริ่มเคลื่อนที่ สำหรับแรงยึดติดนั้นจะมีความสำคัญเฉพาะกับวัสดุจำพวกดินเหนียวและดินตะกอนหรือพวกตะกอนละเอียด ขนาดของแรงจะขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ลักษณะและรูปแบบของวัสดุ ตำแหน่งการสัมผัสอยู่ของวัสดุ ความเร็วเฉลี่ยของการไหลและความผันแปรของความเร็วการไหล (velocity fluctuations) [Overbeek (1980)] เป็นต้น

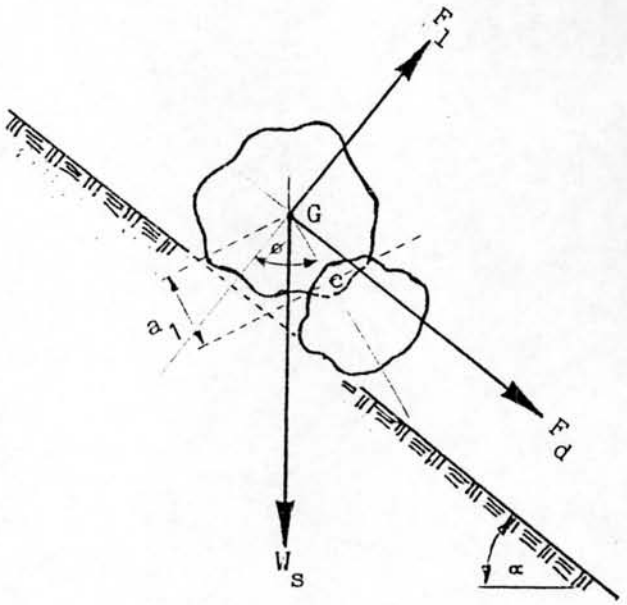
ในการพิจารณาสภาวะการเริ่มเคลื่อนที่ (incipient or initial of motion) ของอนุภาควัสดุที่ประกอบเป็นมวลของวัสดุลาดฝั่งและท้องคลอง อันเป็นสาเหตุเบื้องต้นของการกัดกร่อนและกัดเซาะของวัสดุประกอบคลองเพื่อจะนำไปสู่การพิจารณาเสถียรภาพของคลอง อาจเริ่มต้นจากการพิจารณาถึงแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่ออนุภาคของวัสดุ ดังแสดงในรูป 2-1 สำหรับการไหลแบบลามินาร์และรูป 2-2 สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเล้นท์

โดยทั่วไป แรงที่กระทำต่อวัสดุประกอบท้องคลอง (bed materials เมื่อมีการไหลของน้ำในคลอง ได้แก่ น้ำหนักของวัสดุในน้ำ (submerged weight, W_s) แรงลากดึง (drag force, F_d) แรงยก (lift force, F_l) แรงยึดติดระหว่างอนุภาค (cohesive force, F_c) [เฉพาะวัสดุประเภทที่มีแรงยึดติดระหว่างอนุภาค (cohesive materials)]

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-1 แสดงแรงกระทำบนอนุภาคดิน
ในการไหลแบบลามินาร์
(Laminar Flow)



รูปที่ 2-2 แสดงแรงกระทำบนอนุภาคดิน
ในการไหลแบบเทอร์บูเลนท์
(Turbulent Flow)

น้ำหนักของวัสดุในน้ำอธิบายได้โดยสมการ (2-1) อันประกอบด้วย น้ำหนักของวัสดุในสภาพแห้ง และแรงลอยตัวของวัสดุ (bouyancy force) ซึ่งแรงลอยตัวของวัสดุ (bouyancy force) ได้รวมอยู่ในสมการนี้แล้ว

$$W_s = C_1(\rho_s - \rho)gD_s^3 \qquad \text{.....(2-1)}$$

สมการของแรงลากดึง อันเนื่องจากโมเมนตัม (momentum) ของมวลน้ำไหลในรูปของความเร็วการไหลใกล้ท้องคลอง

$$F_d = C_d C_2 D_s^2 \frac{\rho u_b^2}{2} \qquad \text{.....(2-2)}$$

สมการของแรงยก อันเนื่องจากการกระทำของน้ำ จากผลของความเร็วการไหลในลักษณะเทอร์บูเลนท์ ความผันแปรของความเร็วการไหล (velocity fluctuations) ความผันแปรของความดันไฮโดรสแตติคส์ (fluctuation hydrostatic pressure) ซึ่งแปรเปลี่ยนขนาดไปตลอดบนผิวของอนุภาค เป็นต้น

$$F_l = C_l C_3 D_s^2 \frac{\rho u_b^2}{2} \qquad \text{.....(2-3)}$$

เมื่อ C_1, C_2, C_3 = สัมประสิทธิ์หรือองค์ประกอบรูปลักษณ์ ของวัสดุ (form coefficient or shape factor)

C_d = สัมประสิทธิ์แรงลากดึง (drag coefficient)

C_l = สัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient)

D_s = ขนาดประสิทธิผลของวัสดุ (effective size)

u_b = ความเร็วการไหลของน้ำใกล้ท้องคลอง (velocity near the bottom)

ρ_s = ความหนาแน่นของวัสดุ

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

g = อัตราเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก

α = มุมความลาดเอียงของท้องคลอง

ϕ = ค่ามุมผลักของวัสดุ (angle of repose)

การกัดเซาะหรือกัดกร่อนจะเริ่มต้นเมื่อเกิดความไม่สมดุลย์ของแรงกระทำ เหล่านี้ อันเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคของดินถูกยกออกจากที่เดิมและหลุดออกไป เกิดการเคลื่อนที่ไปตามกระแสน้ำ ขบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องและขยายตัวออกไป เป็นบริเวณกว้าง

2.3 <u>สมการความเร็ววิกฤติ</u> (Critical Velocity Equation)

เมื่อการไหลของน้ำเป็นแบบลามินาร์ จะมีผลของความหนืดอย่างเด่นชัดและลักษณะการไหลจะไปตามแนวของลักษณะของวัสดุ แรงลากดึงจะกระทำเหนือจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงของอนุภาค (จุด G ดูรูปที่ 2-1)

004121

จากรูปที่ 2-1 โมเมนต์ของแรงต่าง ๆ รอบจุด C

$$C_1(\rho_s - \rho)gD_s^3 \sin(\phi - \alpha)a_1 = C_d C_2 D_s^2\left[\frac{\rho u_b^2}{2}\right]a_2 \cos\alpha$$

ที่สภาวะวิกฤติ (critical condition) ของการเริ่มเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุ $u_b = (u_b)_{cr}$ ดังนั้น

$$\frac{(u_b)_{cr}^2}{(\rho_{s/\rho} - 1)gD_s} = \frac{2C_1 a_1}{C_d C_2 a_2} \cos(\tan\phi - \tan\alpha)$$

$$A' = \frac{2C_1 a_1}{C_d C_2 a_2} \cos(\tan\phi - \tan\alpha)$$

$$\frac{(u_b)_{cr}^2}{(\rho_{s/\rho} - 1)gD_s} = A' \qquad \text{.....(2-4)}$$

เมื่อการไหลเป็นแบบเทอร์บูเล้นท์ จะมีผลของความเฉื่อยอย่างเด่นชัด แรงลัพธ์ลากดึงจะกระทำที่จุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงของอนุภาค ดูรูปที่ 2-2

จากรูปที่ 2-2 โมเมนต์ของแรงต่าง ๆ รอบจุด C

$$a_1 C_1 (\rho_s - \rho) g D_s^3 \sin(\phi - \alpha) - a_1 C_1 C_3 D_s^2 \left[\frac{\rho u_b^2}{2}\right] \sin\phi = a_1 C_d C_3 D_s^2 \left[\frac{\rho u_b^2}{2}\right] \cos\phi$$

$$\frac{(u_b)_{cr}^2}{(\rho_{s/\rho} - 1) g D_s} = \frac{2 a_1 C_1 \sin(\phi - \alpha)}{(a_1 C_1 C_3 \sin\phi + a_1 C_d C_2 \cos\phi)}$$

$$= \frac{2 a_a C_1 (\tan\phi \cos\alpha - \sin\alpha)}{(a_1 C_d C_2 + a_1 C_1 C_3 \tan\phi)}$$

$$A'' = \frac{2 a_1 C_1 (\tan\phi \cos\alpha - \sin\alpha)}{(a_1 C_d C_2 + a_1 C_1 C_3 \tan\phi)}$$

$$\frac{(u_b)_{cr}^2}{(\rho_{s/\rho} - 1) g D_s} = A'' \qquad \text{.....(2-5)}$$

A', A" = สัมประสิทธิ์ตะกอน (sediment coefficient ซึ่งขึ้นกับ

- ลักษณะของวัสดุ ขนาดของวัสดุ, ความสม่ำเสมอ (uniformity) รูปร่าง (shape), การกระจายขนาดวัสดุ (size distribution) เนื้อวัสดุ (texture) และอื่น ๆ
- พลศาสตร์ของการไหล (dynamics of flow)
- ความลาดเอียงของท้องคลอง
- ค่าของมุมผลักของวัสดุ (angle of repose) เป็นต้น

2.4 สมการหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical Shear Stress Equations)

การอธิบายสภาวะการเริ่มเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุ (incipient or initial of motion) ด้วยหน่วยแรงเคลื่อนที่กระทำต่ออนุภาคของวัสดุ

หน่วยแรงเฉือนดังกล่าว จะเป็นสัดส่วนกับความลาดเอียงท้องคลอง รัศมีชลศาสตร์ หรือความลึกของการไหล DuBuate (1786) เป็นบุคคลแรกที่ให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้ ดังสมการข้างล่าง

$$\tau = wRS$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของแรงเฉือนกับความเร็วการไหลของน้ำ จากความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนกับความเร็วเฉือนและความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนกับความเร็วการไหลของน้ำ คือ

$$\tau = \rho u_*^2$$

และ $u_b = k_1 u_*$

ดังนั้น $\tau = k_2 u_b^2$

และที่สภาวะวิกฤติจะได้

$$\tau_{cr} = k_2 (u_b)_{cr}^2 \qquad \text{.....(2-6)}$$

จากสมการ (2-5), (2-6) จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\frac{\tau_{cr}}{(\rho_{s/\rho} - 1) g D_s} = \frac{2a_1 C_1 (\tan \phi \cos \phi - \sin \alpha) k_2}{(a_1 C_d C_2 + a_1 C_1 C_3 \tan \phi)}$$

$$A''' = A'' k_2$$

$$\frac{\tau_{cr}}{(\rho_{s/\rho} - 1) g D_s} = A''' \qquad \text{.....(2-7)}$$

w, = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (unit weight of water)

u_* = ความเร็วเฉือน (shear velocity)

R = รัศมีชลศาสตร์ของคลอง (hydraulic radius)

S = ความลาดเอียงของเส้นพลังงาน (slope of grade line)

k_1, k_2 = ค่าคงที่

การวิเคราะห์มิติ (Dimensional Analysis) พบว่า กลุ่มตัวแปรมิติศูนย์ (dimensionless), $\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma) D_s}$ เป็นอัตราส่วนของแรงลากดึงต่อแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก จึงเป็นรูปแบบหนึ่งของ Froude number ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของวัสดุและความเร็วเฉือน (shear velocity)

โดยทั่วไปอาจกล่าวได้ว่าในสภาวะการเริ่มเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นจะขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ คือ

$$b,\ d,\ D_s,\ g,\ \rho_s,\ \rho,\ \nu,\ u_{*cr}$$

โดยการวิเคราะห์มิติศูนย์ (dimensionless analyses) ได้

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma) D_s} = \frac{\rho u_{*cr}^2}{\gamma'_s D_s} = f\left(\frac{D_s}{b}, \frac{D_s}{d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{u_{*cr} D_s}{\nu}\right) \qquad \text{.....(2-8)}$$

เมื่อ $\gamma'_s = (\gamma_s - \gamma)$

b = ความกว้างของคลอง

d = ความลึกของคลอง

ν = (kinematic viscosity)

u_{*cr} = ความเร็วเฉือนที่สภาวะเริ่มเคลื่อนที่

ในสภาวะสมดุลย์ของอนุภาค ในทางปฏิบัติแล้ว อนุภาคที่ละเอียดเราสามารถละผลของ $\frac{D_s}{b}$, $\frac{D_s}{d}$ ถ้า ρ_s คงที่ผลของ $\frac{\rho_s}{\rho}$ สามารถจะรวมอยู่ในรูปของ

$$\frac{\rho u_{*cr}^2}{\gamma_s' D_s} = f\left(\frac{u_{*cr} D_s}{\nu}\right) \qquad \text{.....(2-9)}$$

[รายละเอียดของการพิจารณาทฤษฎีเบื้องต้น สามารถหาอ่านได้จาก Graf (1971), Simons & Senturk (1977), Overbeek (1980) เป็นต้น]