

필댐의 파이핑 안정성 검토를 위한 흙의 침식 저항능력 평가



임 석 산

(주)삼성물산 건설부문 토목ENG팀 차장
hsl22@choi.com



임 희 대

충남대학교 토목공학과 교수

1. 머리말

본 기사는 토목학회지 2008년 11월호에 게재된 “필댐의 내부침식과 파이핑 메커니즘”에 후속하는 내용으로, 필댐 붕괴의 주원인으로 주목받고 있는 내부침식 및 파이핑의 예방 혹은 위험성 평가를 위하여 중요한 참고자료로 이용되는 흙의 침식저항능력에 대하여 설명하고, 이를 적절히 활용하여 필댐의 손상과 붕괴 예방에 관련된 방재 업무에 도움을 주고자 작성한 것이다. 국내의 파이핑 검토 시방기준은 제체를 구성하고 있는 재료의 침식저항능력은 별도로 고려하지 않고 있으나, 제체의 파이핑 메커니즘을 고려할 경우 필댐 재료의 침식저항 능력은 파이핑 안정성 평가에 중요한 항목 중의 하나로 볼 수 있다. 흙 재료의 침식 저항능력에 대한 연구는 제체의 파이핑 연구에 도움이 될 뿐 아니라 하상이나 관계수로의 세굴방지, 농경지나 산림의 토양유출 예방에도 필요한 항목이다. 본 기사에서는 흙의 침식저항 능력에 관련된 내용 중 특히 필댐이나 저수지 제체의 파이핑 안정성 검토에

필요한 내용을 중점적으로 다루었다. 본 기사에 수록된 내용은 지난 7년간 호주 UNSW(Univ. of New South Wales) 대학의 댐 연구실에서 필자가 동료 연구자들과 함께 연구한 내용 중 기술적으로 국내에 소개할 필요성이 높은 것을 정리한 것이다.

2. 파이핑 안정성 검토 방법

2.1 국내의 시방기준에 의한 방법

필댐을 포함한 제체의 파이핑 안정성 검토에 관련한 국내의 시방기준은 한국수자원학회의 하천설계기준(2005)과 건설교통부의 댐설계기준(2005)이 있다. 두 시방기준이 유사한 내용을 설명하고 있으므로 댐설계기준(2005)의 내용을 설명하면 다음과 같다.

댐설계기준(2005)은 수치해석을 이용하여 한계유속에 의한 방법과 한계동수경사에 의한 방법을 사용하도록 하고 있다. 한계유속에 의한 방법은 제체에 대하여 침투

표 1. 입경별 한계유속 (댐설계기준, 2005)

| 재료번호 | 입경(mm) | 한계유속(cm/sec) |
|------|---------------|--------------|
| 1 | 4.0 - 4.8 | 20.0 |
| 2 | 2.8 - 3.4 | 17.0 |
| 3 | 1.0 - 1.2 | 10.0 |
| 4 | 0.7 - 0.85 | 8.5 |
| 5 | 0.4 - 0.7 | 7.0 |
| 6 | 0.25 - 0.5 | 4.2 |
| 7 | 0.11 - 0.25 | 3.5 |
| 8 | 0.075 - 0.11 | 2.5 |
| 9 | 0.044 - 0.075 | 2.0 |

류 해석을 실시한 후 얻어진 침투류의 유속이 표 1에 나타난 입경별 한계유속의 1/100 이하가 되도록 하는 것이다. 한계동수경사에 의한 방법은 침투류 해석을 실시한 후 얻어진 동수경사가 식 1에 나타난 테르자기(Terzaghi)의 한계동수경사 i_c 의 1/2 이하가 되도록 하는 것이다.

$$i_c = \frac{h}{d} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = (1 - n)(G_s - 1) \quad (\text{식 1})$$

- 여기서, i_c = 한계동수 경사,
- h = 저수지 전수두(m),
- d = 분사지점의 수두(m),
- G_s = 토립자의 비중,
- e = 흙의 간극비,
- n = 흙의 간극율

위 두 방법은 모두 침투류 해석에서 얻어진 유속과 동수경사를 이용하는 방법으로 위의 조건을 만족하는 경우 대부분의 제체에서 침투경로가 길어지고 침투유속이 낮아져 파이핑의 가능성을 현저히 낮추게 된다. 하지만 파이핑은 제체내에 유로가 형성되는 현상을 다루는 것으로 일단 유로가 형성되면 제체내의 흐름이 침투류 해석의 기본이 되는 Darcy's의 법칙을 따르지 않게 되고, 제체내의 일부 흐름은 관수로의 흐름과 유사하게 되는 현상이 발생

되는 등, 위의 방법만을 가지고 파이핑이 발생하는 모든 메커니즘을 고려하기는 현실적으로 어려운 점이 있다.

2.2 파이핑 메커니즘에 의한 평가 방법

필댐의 파이핑 안정성을 검토하는 또 다른 방법은 필댐의 파이핑 메커니즘을 고려하여 "Event Tree Method"를 이용한 "Risk Assessment"를 실시하는 것이다. 필댐의 파이핑 메커니즘은 토목학회지 2008년 11월호에 기재된 "필댐의 내부침식과 파이핑 메커니즘"에 설명되어 있으며, "Event Tree Method"를 이용한 "Risk Assessment" 방법은 Forster and Fell(2000)에 비교적 상세히 설명되어 있다. 이 방법은 정량적인 방법은 아니지만 필댐의 파이핑 메커니즘을 충분히 고려하여 파이핑에 대한 안정성을 검토하는 것으로 UNSW(Univ. of New South Wales) 대학의 댐 연구실을 중심으로 연구되어 현재는 많은 댐 기술자들에 의하여 국제적으로 빈번히 사용되는 방법이다.

3. 흙의 침식 저항능력 평가

3.1 정의

제체 하부의 기초지반 혹은 제체를 구성하는 재료의 침식 저항능력에 대한 정보를 획득하게 되면 파이핑 안정성 평가에 직/간접적으로 이용하는 것이 가능하다. 국내에서 사용되는 한계유속법 혹은 한계동수경사법을 이용하는 경우는 침식저항 능력이 낮은 재료를 피하여 제체를 축조하거나 원지반인 경우는 치환 하는 등 파이핑의 가능성을 낮추는 작업을 하는 것이 가능하며, "Event Tree Method"를 이용하여 "Risk Assessment"를 실시하는 경우는 흙의 침식저항 능력을 "Risk Assessment" 과정 중에 하나의 변수로 사용하게 된다.

흙의 침식 저항 능력은 흙의 강도, 투수계수 등과 같이 각각의 흙이 서로 다른 값을 가지는 고유한 물성 값의 하나이다. 흙의 침식저항 능력은 식 (2)와 같이 정의하며

그림 1과 같은 일반적인 특성을 가지고 있다. 흙의 침식 저항 능력을 가늠하는 가장 중요한 변수는 C_e (침식 계수)이며 이 값이 낮을수록 침식저항 능력이 커지게 된다. 침식 저항 능력을 평가하는 또 다른 변수는 τ_c (한계수리전단력)으로 유수에 의하여 흙의 표면에 가해지는 수리전단력이 한계수리전단력 이상이어야 재료의 침식이 발생된다.

$$\dot{\epsilon} = C_e (\tau - \tau_c) \quad (\text{식 2})$$

여기서, $\dot{\epsilon}$ = 단위 면적당 침식율(Erosion rate, kg/s/m²),
 C_e = 침식 계수 (Coefficient of Soil Erosion, kg/s/m²/Pa 혹은 s/m),
 τ = 수리전단력 (Hydraulic shear stress, N/m² 혹은 Pa),
 τ_c = 한계수리전단력 (Critical hydraulic shear stress, N/m² 혹은 Pa).

그림 1은 흙의 입경에 따른 한계수리전단력의 범위를 나타내는 것으로 평균입경 (D_{50})이 0.1mm 이상인 조립토의 경우는 입경의 크기에 비례하여 최초 침식을 유발하는 한계수리전단력이 커지게 된다. 이는 조립토가 침식에 저항하는 원리가 입자 자체의 무게에 기인하는 바가 크기

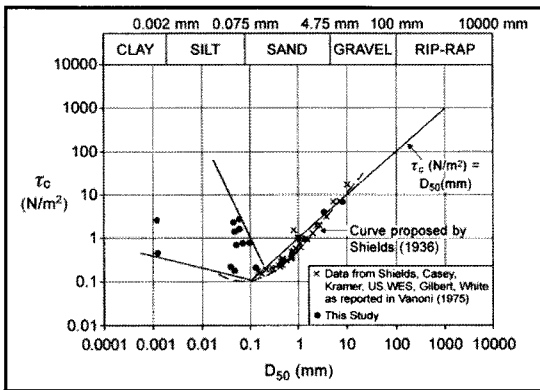


그림 1. 흙의 입경에 따른 한계수리전단력(Critical hydraulic shear stress)의 범위 (Shields' (1936) chart revised by Briaud 등, 2001)

때문이다. 반면 세립토의 경우는 함유하고 있는 점토분의 량과 성질에 따라서 한계수리전단력의 범위가 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 여기서 변화되는 한계수리전단력의 크기가 점성토의 종류에 따라서 100배 이상 차이가 나는 경우가 흔하기 때문에 필름의 차수 재료로 이용되는 점성토의 경우는 별도의 절차를 거쳐서 침식저항 능력을 평가하는 것이 필요하다.

점토질 흙의 침식저항 능력을 평가하는 방법은 직접적인 침식시험(Erosion Test)을 이용하는 방법과 다짐, PI, LI, 입도분포, 분산도(dispersion) 등의 일반적인 흙의 성질로부터 추정하는 방법이 있다.

3.2 직접적인 시험에 의한 평가

필름의 파이핑 안정성 검토에 주로 사용되는 방법 위주로 설명하였으며, 세굴이나 하천의 형상변화 등의 수리학적 접근에 많이 사용되며 설치된 실험실 수가 비교적 많은 Flume test는 설명에서 제외 하였다.

1) Pinhole Test

본 시험은 ASTM D4647, BS1377 혹은 AS1289.3.8.3으로 규정되어 있는 시험 방법으로 비교적 간단하며, 시험 자체는 점성토의 분산도(Dispersion)를 알아보기 위하여 개발된 것이다. 시험은 흙 샘플 내에 지름 1mm, 길이 25mm의 작은 구멍을 이용하여 증류수를 통과시킨

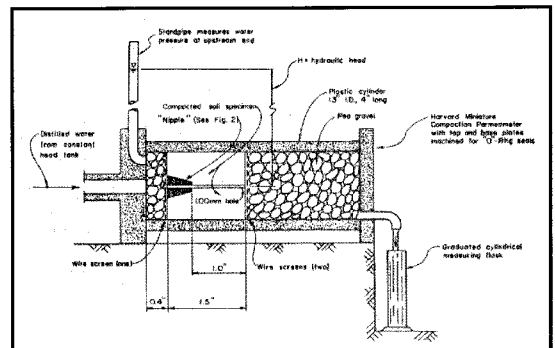


그림 2. Pinehole Test 시험장비 모식도(최초 개발 시의 제원)

후 통과 된 증류수의 탁도 변화를 관찰하여 이를 D1, D2, ND4, ND3, ND2, ND1의 6단계로 구분하여 D1, D2는 분산형 점토(Dispersive Clay)로 분류하고 ND2, ND1는 비분산형 점토(Non-dispersive Clay)로 분류한다. 이 시험은 가장 초보적인 침식시험(Erosion Test)이지만 시험이 간단하고, 침식저항 능력이 매우 약한 흙의 하나인 분산형 점토(Dispersive Clay)를 쉽게 구분해 낼 수 있는 장점이 있어 많은 시험실에서 이용된다.

2) Slot Erosion Test

Slot Erosion Test은 UNSW 댐 연구실에서 개발된 시험으로 필댐의 제체내에 발생하는 유로를 모사하여 그림 3과 같이 폭 2.2mm, 깊이 10mm, 길이 1000mm의 긴 흙을 흙 시료에 형성한 후 흙을 통하여 많은 량의 물을 흐르게 한다. 이때 시료에 성형된 흙의 변화를 디지털 영상 기록 장치를 이용하여 기록하고 시험시의 유량과 유속 및 시간에 따른 흙의 크기 변화를 이용하여 흙 시료의 침식 저항 능력을 측정한다. 이 시험 방법은 비교적 정확한 결과를 제공하고 필댐의 제체내에서 일어나는 침식현상을 비교적 유사하게 모사할 수 있는 특징이 있으나 한 번의 시험에 사용되는 시료의 량이 많고 시험 시간도 오래 걸려 상업용으로 사용되는 경우는 많지 않다.

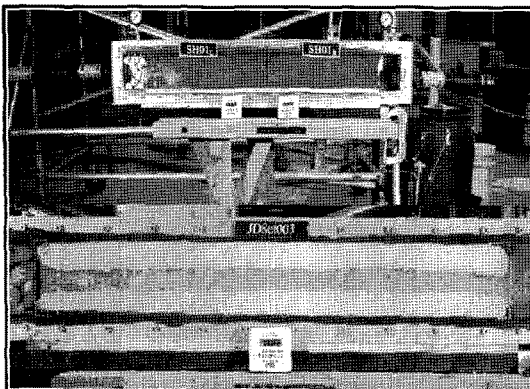


그림 3. Slot Erosion Test 시험 전경(Wan and Fell, 2004)

3) Hole erosion Test

필댐의 파이핑 안정성 검토와 관련된 흙의 침식저항 능력 측정을 위하여 상업적으로 가장 빈번히 이용되는 방법으로, 위에서 설명한 Slot Erosion Test 시험의 상업용 축소판 이라고 할 수 있다. 시험은 표준다짐 시험용 몰드에 시료를 다짐하고 가운데에 직경 6mm의 구멍을 뚫은 후 구멍을 통하여 물을 흘려보내고 시간에 따른 유량과 수두차의 변화를 측정하여 시료의 침식저항 능력을 측정한다. 시험이 비교적 간단하며 손쉽게 설치할 수 있고, 상업적으로 검증되어 현업에 이용된 사례가 많으므로 관련 자료의 획득이 용이한 점 등을 고려할 때 국내에서도 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 참고로, 필자의 경우는 호주에서 그림 4의 Hole Erosion Test를 이용하여 약 20개 정도의 운영 중인 저수지 필댐 차수재의 침식저항 능력을 분석한 바 있다. 시험 결과는 침식률 지수(Erosion rate Index), I_{HET} 로 나타내며 식 2와 식 3을 이용하여 구한다. 침식률 지수 I_{HET} 는 주로 1~6 사이의 숫자로 나타내며 숫자가 클수록 침식저항 능력이 큰 것을 의미한다. 침식률 지수 I_{HET} 의 평가는 4장의 표 2를 따른다.

$$I_{HET} = -\log(C_e) \quad (\text{식 3})$$

여기서, C_e 는 식 2에서 설명한 침식 계수이다.

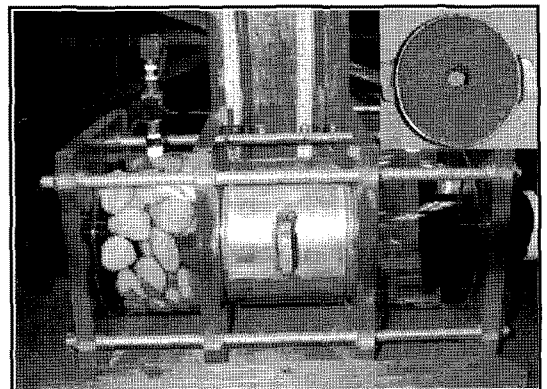


그림 4. Hole Erosion test 시험 방법(Wan and Fell 2004)

기술 기사 3

4) Rotating cylinder Test

이 방법은 상업용으로는 잘 이용되지 않지만 가장 정밀한 침식시험(Erosion Test) 방법으로 인정받고 있는 시험법이다. 시험은 그림 5와 같은 실린더형 시험 장비에 시료를 고정시키고 실린더에 물을 담은 후 고속으로 회전시켜 시료의 표면에 수리전단력을 발생시킨다. 이때 발생된 수리전단력에 의하여 시료의 표면에 가해지는 회전력을 시료를 고정시키고 있는 축의 반력으로 측정하고, 실험이 종료된 후 실린더에서 회수한 물을 증발시켜 씻겨 나온 흙의 양은 측정한다. 이 방법은 흙의 표면에 가해지는 수리전단력의 크기와 침식된 흙의 양을 매우 정밀하게 측정할 수 있고, 다양한 침식조건을 유발할 수 있으므로 이론적 연구에 자주 활용된다.

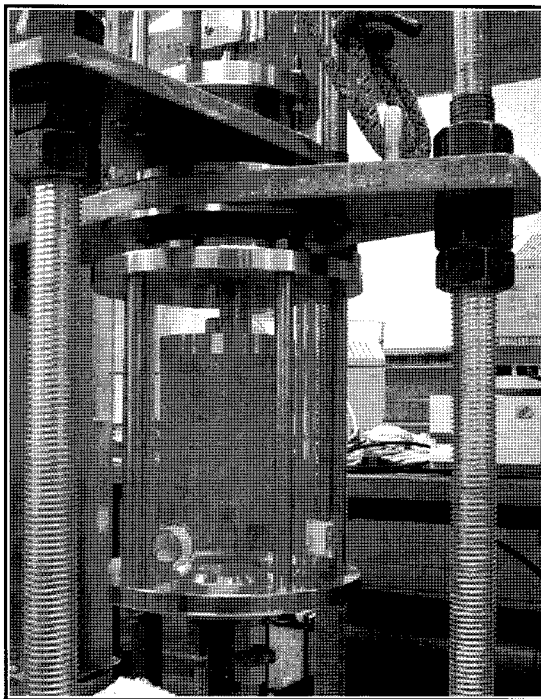


그림 5. Rotating cylinder test (Lim, 2006)

3.3 일반적인 흙의 성질로부터 추정

흙의 침식 저항 능력을 직접적인 시험에 의하여 알아내는 것은 다소 번거로운 과정을 거쳐야 하므로 일반적인 흙의 성질로부터 침식저항능력을 추정하기 위한 시도가 많은 연구자에 의하여 이루어졌다. 그 대표적인 방법 중의 하나가 흙의 연경도(Plasticity)를 이용하는 것으로 많은 초기 연구자에 의하여 시도 되었다. 그림 6은 이러한 시도의 결과를 종합적으로 나타낸 것으로 흙의 연경도(Plasticity Chart)를 이용하여 침식저항 능력을 추정하는 방법은 그 정확도가 낮아 실제 프로젝트에 사용이 어렵다는 것을 보여주었다. 과거에는 고소성 점토가 침식 저항 능력이 높은 것으로 인식되었으나 많은 예외가 발견되어 현재는 연경도를 이용하는 방법을 실무에는 사용하지 않고 있다.

보다 많은 연구 자료를 바탕으로 Wan and Fell (2004)에 의하여 제안된 방법으로 식 4가 있다. 이 방법은 침식 특성이 다른 조립토와 세립토를 구분하여 다루고, 고소성 점토의 침식에 많은 영향을 미치는 분산특성(Dispersive Behavior)을 Pinhole Test 결과를 이용하여 식에 반영하였다. 이 식은 Hole Erosion Test의 결과로 얻어지는 침식률 지수(Erosion Rate Index), I_{HET} 를 흙의 다른 성질

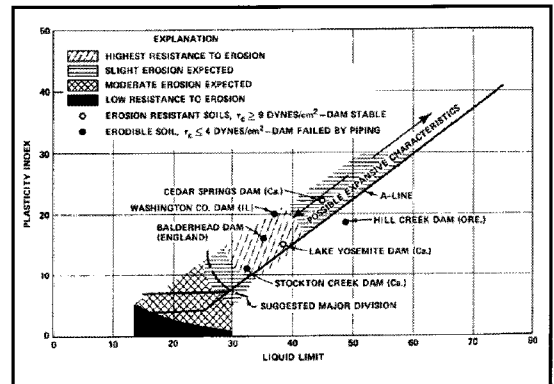


그림 6. 흙의 연경도와 한계수리전단력(Critical shear stress)의 관계 (Arulanandan and Perry, 1983)

즉, 다짐도, 세립분 함량, 점토분 함량, 연경도, Pinhole Test 결과 등을 이용하여 구하는 것이다. 식에 의하여 구해진 침식률 지수를 표 2에 의하여 평가한다. 이 방법은 주로 예비조사 단계에 사용하며 본 조사 단계에서는 직접 Hole Erosion Test 등의 침식시험을 실시하여 검증하는 것이 일반적이다.

[조립토의 경우]

$$\hat{I}_{HET} = 6.623 - 0.016\rho_d - 0.104 \rho_d / \rho_{d_{max}} - 0.044\omega - 0.074\Delta\omega_r + 0.113S + 0.061Clay(US)$$

[세립토의 경우] (식 4)

$$\hat{I}_{HET} = -10.201 + 9.572\rho_d - 0.042 \rho_d / \rho_{d_{max}} + 0.103\omega + 0.0097\Delta\omega_r - 0.0056Fines + 0.042Clay(US) - 0.090LL + 0.111I_p + 0.443Pinhole$$

여기서, Fines = 세립분 함량의 백분율(Percent of < 0.075mm),

LL = 액성한계(%),

I_p = 소성지수(%),

Clay(US) = 점토분 함량 백분율(% of < 0.005 mm),

Pinhole = pinhole 시험 결과를 정수로 나타낸 값(D1=1, D2=2, ..., ND2=5,

ND1=6),

ρ_d = 건조밀도(Mg/m³),

$\rho_d / \rho_{d_{max}}$ = 다짐도(%),

ω = 함수비(%),

$\Delta\omega_r = \frac{(\omega - OMC)}{OMC} \times 100\%$ 최적함수비에 대한 함수비 비율 (%).

4. 침식저항능력 평가기준

흙의 침식저항능력은 최근 상업적으로 가장 많이 이용되고 있는 Hole Erosion Test 결과를 기준으로 하여 표 2와 같이 평가한다. 표 2의 설명은 제체내에 내부침식에 의한 파이프가 형성되는 경우 침식의 속도를 개략적으로 가늠할 수 있도록 하며, 침식률 지수가 3이하인 경우는 제체의 재료로 적합하지 않고 3-5인 경우는 엄격한 필터 조건의 적용 등 내부침식을 제어할 다른 수단을 강구하는 것이 필요하며, 5이상인 경우는 내부침식이 발생되어도 진행속도가 느려 급격한 제체의 손상은 제어될 가능성이 높다는 것을 의미한다.

흙의 침식저항 능력에 영향을 미치는 인자는 흙의 종류(통일분류), 점토분 함량, 포화도, 다짐정도, 분산특성(Dispersive Behavior), 함수비 등으로 매우 다양하다. 이들 중 분산특성(Dispersive Behavior)을 제외한 나머지 인자가 흙의 침식저항 능력에 미치는 영향을 표 3과 표 4에 나타내었다. 이 표는 예비조사 단계에서 주로 이

표 2. 침식저항능력 평가 기준(침식률 지수(Erosion Rate Index), I_{HET} 기준)

| 흙의 분류 | 침식률 지수(Erosion Rate Index) | 설명(침식의 속도) |
|-------|----------------------------|------------|
| 1 | < 2 | 극단적 빠른 |
| 2 | 2 - 3 | 매우 빠른 |
| 3 | 3 - 4 | 적당히 빠른 |
| 4 | 4 - 5 | 적당히 느린 |
| 5 | 5 - 6 | 매우 느린 |
| 6 | > 6 | 극단적 느린 |

기술기사 3

표 3. 흙의 침식저항 능력 사전 평가를 위한 침식가능성 예측도표(조립토)

| 구분 | 값 | Erosion Rate Index(침식율 지수) | | | | | |
|--------------------------------|--------|----------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|
| 침식속도 | | 극단적 빠른 | 매우 빠른 | 적당히 빠른 | 적당히 느린 | 매우 느린 | 극단적 느린 |
| Erosion Rate Index | | < 2 | 2 - 3 | 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | > 6 |
| USCS 통일분류 | SM | 매우 높은 | 높은 | 높은-중립 | 낮은 | 매우 낮은 | |
| | SC | 높은-중립 | 높은 | | 높은-중립 | 낮은 | 매우 낮은 |
| 포화도 Degree of Saturation | < 70% | 매우 높은 | 높은 | 중립-낮은 | 낮은 | 매우 낮은 | |
| | 70-80% | 높은 | 매우 높은 | | 높은 | 낮은 | 매우 낮은 |
| | > 80% | 중립 | 높은 | 매우 높은 | 높은-중립 | 낮은 | 매우 낮은 |
| 세립분 함량 Fine content (<0.075mm) | < 30% | 매우 높은 | 높은-중립 | 낮은 | 매우 낮은 | | |
| | 30-40% | 중립-높은 | 매우 높은 | | 높은-중립 | 낮은 | 매우 낮은 |
| | 40-50% | 낮은-중립 | 높은 | 매우 높은 | 높은 | 중립-낮은 | 낮은 |
| 점토분 함량 Clay content (<0.002mm) | < 10% | 매우 높은 | 높은-중립 | 낮은 | 매우 낮은 | | |
| | 10-20% | 매우 높은 | | | 높은-중립 | 낮은 | 매우 낮은 |
| | > 20% | 낮은 | 높은-중립 | 매우 높은 | 높은-중립 | 낮은 | |

표 4. 흙의 침식저항 능력 사전 평가를 위한 침식가능성 예측도표(세립토)

| 구분 | 값 | Erosion Rate Index (침식율 지수) | | | | | |
|--------------------------|---|-----------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|
| 침식속도 | | 극단적 빠른 | 매우 빠른 | 적당히 빠른 | 적당히 느린 | 매우 느린 | 극단적 느린 |
| Erosion Rate Index | | < 2 | 2 - 3 | 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | > 6 |
| USCS 통일분류 | CH | 매우 낮은 | 낮은-중립 | 높은 | | 매우 높은 | |
| | MH | 낮은 | 높은 | 매우 높은 | | 높은 | |
| | CL | 낮은-중립 | 높은 | 매우 높은 | 높은 | | |
| | CL-ML | 중립-높은 | 매우 높은 | | 중립-높은 | 낮은 | |
| | ML | 높은 | 매우 높은 | 높은-중립 | 낮은 | 매우 낮은 | |
| 포화도 Degree of Saturation | < 70% | 높은-중립 | 매우 높은 | | 높은-중립 | 낮은 | 매우 낮은 |
| | 70-80% | 낮은 | 중립-높은 | 매우 높은 | | 낮은 | |
| | > 80% | 낮은 | 낮은-중립 | 높은 | | 매우 높은 | |
| 점토광물 Clay Mineralogy | Kaolin, Illite, Chlorite Only | 낮은 | | | 중립-높은 | 매우 높은 | 높은 |
| | Smectite, Vermiculite | 낮은 | 높은 | 매우 높은 | | 높은 | 낮은 |
| | Cementing Materials (iron oxide, gypsum, etc) | 낮은 | | | 중립-높은 | 매우 높은 | |

용되며 “Event Tree Method”를 이용한 “Risk Assessment”에도 사용된다.

5. 맺음말

파이핑은 월류와 더불어 필댐 붕괴의 주요 원인으로서 필댐 안정성 평가시 반드시 검토하여야 하는 항목이다.

국내의 파이핑 안정성 검토에 대한 시방 규정은 침투류 해석결과에 의한 “한계유속”과 “한계 동수경사”를 분석하도록 규정하고 있다. 하지만, 이러한 방법으로 복잡한 파이핑 메커니즘 모두를 고려하는 것은 어려우므로 이에 더하여 필댐 체체의 축조 재료인 차수재의 침식저항 능력을 평가하여 파이핑 안정성 검토에 이용하는 경우 검토

결과의 신뢰성을 한층 높일 수 있다. 본 기사는 이러한 필요성에 부합할 수 있도록 흙의 침식저항 능력 평가에 필요한 기본적인 내용을 개략적으로 설명하였으며, 흙의 침식저항 능력 평가가 필댐의 설계, 시공, 유지관리에 도움이 되기를 기대한다.

[참고문헌]

1. 건설교통부, 댐설계기준, 2005
2. 한국수자원학회, 하천설계기준, 2005
3. Briaud, et al. (2001): Erosion function Apparatus for score rate predictions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127(2), 105-113.
4. Foster, M.A. and Fell, R. (2000): *Use of Event Trees to Estimate the Probability of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping*. Transactions, Twentieth International Congress on Large Dams, 19 - 22 September 2000, Beijing, China, Volume 1, Q.76, R.15, pp. 237-259.
5. Lim, S. S. (2006): *Experimental Investigation of Erosion in Variably Saturated Clay Soils*. PhD. Thesis, UNSW, Sydney, Australia.
6. Wan, C. F. and Fell, R. (2004): Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 130, No. 4, pp. 373-380.