

블투과형 사방댐에 대한 설계기준 분석

Analysis of design method on closed-type erosion control dam

김운형¹⁾, Woon-Hyung Kim, 송병웅²⁾, Byung-Woong Song, 김범석³⁾, Burm-Suck Kim

¹⁾ ㈜다산컨설턴트 기술연구소 책임연구원, R&D Center, Dasan Consultants Co., Ltd.

²⁾ ㈜다산컨설턴트 기술연구소 수석연구원

³⁾ ㈜다산컨설턴트 기술연구소 선임연구원

SYNOPSIS : A closed-type erosion control dam were suggested as an effective method to protect from debris flow damages caused by seasonal rainstorm, typhoon, and local heavy rain. However, design method on a closed-type erosion control dam currently practiced in the engineering is not well established with respect to type of the dam, design parameters, maintenance and so forth. In this study, design parameters for closed-type erosion control dam were evaluated and the comparison of design parameters used in Korea and Japan was performed. Based on the results of this study, modification of design method for closed-type erosion control dam are recommended.

Keywords : Close-type erosion control dam, Debris flow, Design parameters

1. 서론

장마철 집중호우로 인한 도로 인근 비탈면에서의 토사유출 발생으로 재산 및 인명피해를 발생시키고 있으며, 피해복구 비용이 기하급수적으로 증가함에 따라 국가에서는 피해 저감을 위해 총력을 기울이고 있다. 2002년 태풍 매미 이후 강원권역내에서만 약 440개 정도의 사방댐이 시공되었으나 기존 사방댐에 대한 설계 자료가 미흡하고 상세한 자료수집에 어려움을 겪고 있는 상황이다(그림1, 김운형 등, 2009a, 2009b).

최근 20여 년 동안 전국에 연도별로 설치된 사방댐의 종류 및 형식을 분석한 결과 콘크리트댐, 버트리스형식, 슬리트형식의 댐 순으로 나타났으며, 2000년대에 들어 기존의 콘크리트 댐 이외에 버트리스형식의 댐이 많이 사용되는 것을 알 수 있다(그림 2, 김운형 등, 2009b).

국내 사방시설에 관한 설계 자료로는 사방공학(1983), 하천설계기준(2005) 및 산악지 도로설계 매뉴얼(2007) 등이 있으며 사방댐이란 유역 상류지역 또는 단지개발에 따른 토사유입 예상지역에 시공하여 유송된 모래나 자갈들을 저류 또는 조절하는 댐이라고 정의 하고 있다(하천설계기준, 2005). 문헌상에 나타난 각종 설계기준 검토 시, 사방공학(1983)은 산림공학자를 위하여 토석류 발생이론, 유속 및 유량 계산방법, 야계사방, 해안사방 및 계간공사 등에 관한 정보를 제공하고 있으며, 산악지 도로설계 매뉴얼(2007)은 토석류 및 유송(流送)잡물의 정의, 유송잡물 설계, 차단시설 계획, 발생조사, 차단시설 종류, 예정지 선정, 차단시설의 결정, 설치 장소의 특성 파악, 설치가능 차단시설의 대안선정, 최적대안의 선정 및 유송잡물 차단시설의 유지관리 등에 관한 정보를 제공하고 있다.

그러나, 토석류 차단시설인 사방댐 설계를 위한 명확한 설계기준은 없는 실정으로, 본 연구에서는 우리나라 사방댐 설계기술의 제고를 위하여 기존의 설계방법을 분석하여 보다 나은 설계방법을 제시하고자 한다. 특히, 블투과형 사방댐 설계방법 중 설계인자들에 대한 적정성 검토를 수행하여 우리나라 현지실정에 적합한 설계방안을 제시하고자 한다.

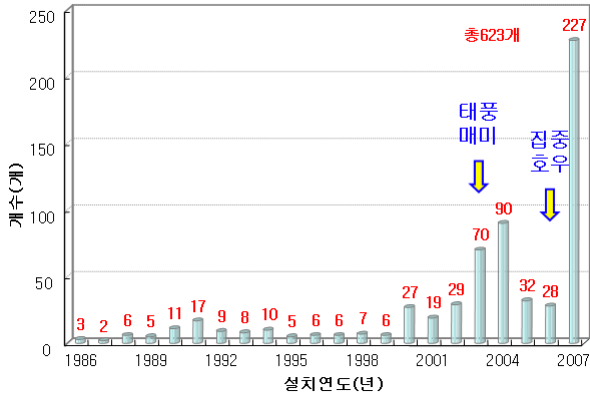


그림 1. 설치년도별 사방댐 시공 현황

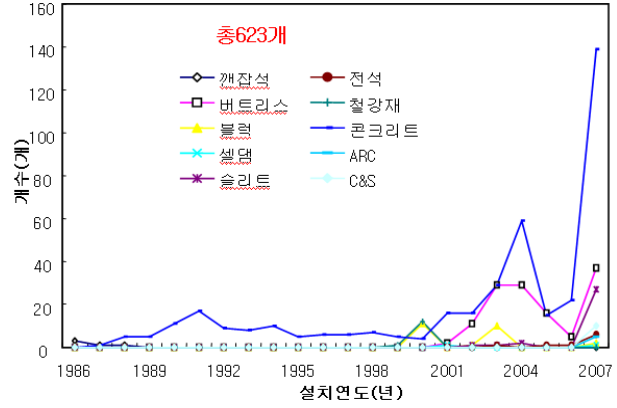
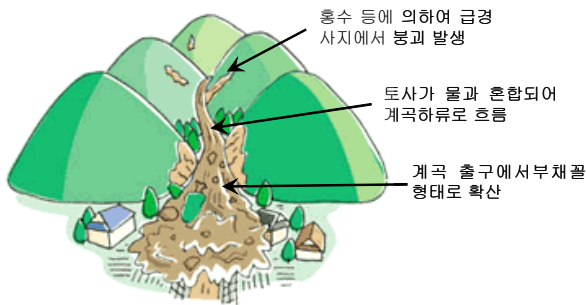


그림 2. 설치년도별 사방댐의 종류

2. 토석류 발생 조건 및 흐름 개념

2.1 토석류의 발생 조건

토석류란 토사와 물의 혼합물이 급경사진 계곡을 따라 상류에서 하류로 흐르는 현상을 말하며, 발생 조건을 살펴보면 급경사 계곡, 토사, 충분한 물의 공급 등 세 가지 조건이 갖춰진 곳에서 발생하는 것으로 알려져 있다 (地盤工學會, 2003). 특히, 산 정상부 혹은 중턱부의 급경사지에서 홍수와 같은 큰 비가 내리면 토사의 붕괴가 발생하고 하류로 향할수록 물과 섞여 더 빠른 속도로 흐름이 발생하며 계곡 출구에서는 부채꼴 형태의 모습을 나타낸다. 만약 계곡 하류에 도로, 가옥, 공장 같은 시설물들이 존재하는 경우 이러한 토석류 발생은 커다란 재산상 피해는 물론 심한 경우 인명의 손상을 일으키는 것으로 조사되었다 (그림 3).



(a) 토석류 발생 개념도



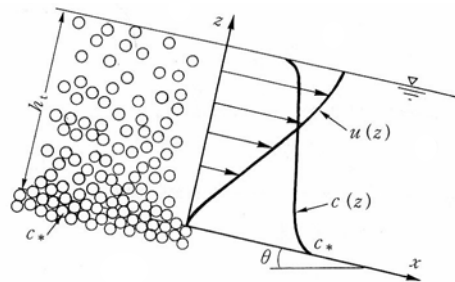
(b) 피해사례

그림 3. 토석류의 발생 개념도 및 피해 사례 (廣島縣, 2009; 嶋, 2009 加筆)

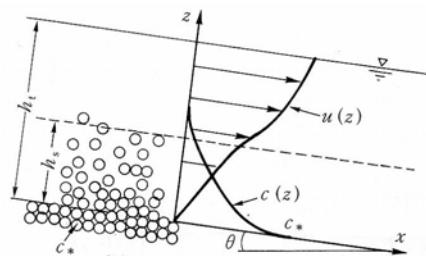
2.2 토석류 흐름 개념

물은 중력에 의해 반드시 위에서 아래로 흐르지만, 흙은 안식각을 갖고 있어서 기울기가 완만하면 흐르지 않는다. 토석류는 물과 흙 흐름의 중간 상태를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 상층은 유동하여도 하층에서는 유동하지 않는 층이 존재하는 것으로 알려져 있다. 또한, 토석류 흐름은 물과 달리 일정 구배 이하에서는 정지하는 특징이 있으며 이러한 흐름은 물의 흐름과 본질적으로 다르므로 Newton의 유체 유동원리를 따르지 않는 것으로 알려져 있다(地盤工學會, 2003).

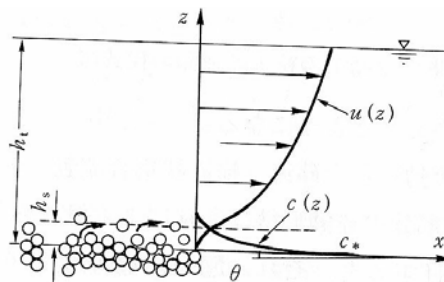
토석류 흐름 개념을 살펴보면 그림 4(a)와 같이 사력입자가 흐르는 물의 표면까지 존재하는 흐름으로서 사력이 모여서 유동하고 있는 것과 같이 보이므로 집합유동이라고 부른다. 이러한 흐름이 발생하는 구배는 최저 12~15°전후 인 것으로 알려져 있다(地盤工學會, 2003). 이보다 작은 기울기에서의 사력입자는 그림 4(b)와 같이 집합유동이 상층에서는 나타나지 않고 하층에서만 나타나며 이러한 형태를 토사류 또는 소류형 집합유동이라고 부른다. 한편 토사류보다 더 기울기가 완만한 경우에는 그림 2(c)와 같이 전형적인 소류사류라는 흐름을 나타낸다. 그림 4에서 $U(z)$ 는 유속, $C(z)$ 는 입자의 체적농도, C^* 은 계상퇴적토사의 체적농도, θ 는 溪床의 기울기, h_t 는 계곡의 수심, h_s 는 토사만의 층두께를 각각 나타낸다.



(a) 토석류(집합유동)



(b) 토사류(소류형 집합유동)



(c) 소류사류

그림 4. 토사 흐름의 개념도(國土交通省, 2007)

3. 토석류 설계기법 분석

토석류에 의한 인적, 재산상의 피해를 방지 혹은 최소화 하는 일반적인 방법의 하나로 토석류 흐름 진행방향에 대한 인공 사방댐을 설치하는 방안이 있다. 국내외 사방댐 설계를 위한 순서를 살펴보면 계획규모의 설정, 토석류·유목의 처리계획 책정 및 제석계획으로 대별할 수 있으나(그림 5), 우리나라의 경우 선진국에서 고려하고 있는 퇴적된 퇴석류를 제거하기 위한 방법까지는 아직 포함하고 있지 못하는 현실이다. 참고로 일본에서 사용되고 있는 토석류 발생구간에 따른 사방댐 선정기준은 다음과 같다(國土交通省, 2007).

- 계상구배 15° 이상인 토석류 발생구간
: 토석류 및 유목 발생 억제
- 계상구배 10~20°인 토석류 발생구간 및 계상구배 2~15°인 퇴적구간
: 토석류 및 토사, 유목 포착 / 제석 / 평상시 계상유지관리

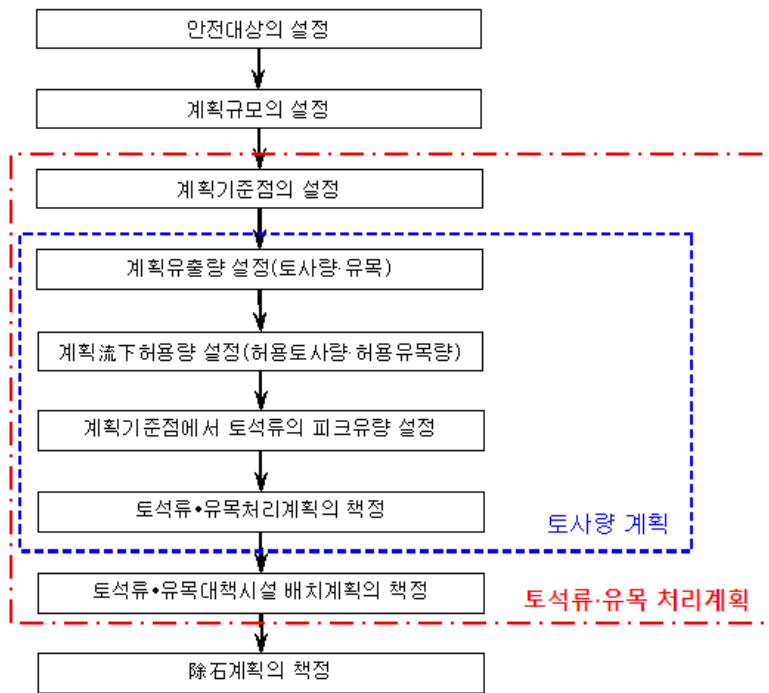


그림 5. 일본의 토석류·유목대책계획(國土交通省, 2007)

3.1 계획유출량 설정

3.1.1 계획유출토사량 산정

계획유출토사량은 사방댐 설치 지역에서 예상되는 이동가능 토사량(불안정 토사) V_{d1} 과 운반가능 토사량 V_{d2} 을 일차적으로 검토한다(그림 6). 그림 6과 같이 이동가능 토사량이 많아도 비가 적게 오는 지역이라면 운반가능량은 당연히 이동가능 토사량보다 작을 것이므로 이러한 지역에 대규모의 사방댐을 설치하는 것은 적절치 않은 것으로 알려져 있다. 한편, 이동가능 토사량 V_{d1} 은 식 (1)과 (2) 및

그림 7로 설명할 수 있다.

$$A_{dy1} = B_d \times D_e \tag{1}$$

$$V_{dy1} = L_{dy1} \times A_{dy1} \tag{2}$$

여기서, B_d 는 토석류 발생시 침식이 예상되는 평균계곡 하부폭(m), D_e 는 토석류 발생시 침식이 예상되는 계곡 바닥에 퇴적된 토사의 심도(m), L_{dy1} 은 이동 및 붕괴가 가능한 계곡부 길이(m)를 나타낸다. 즉, 이동가능한 계곡부 퇴적 토사량과 붕괴가능 토사량을 모두 합한 값을 이동가능 토사량이라고 산정하며, 운반가능토사량 V_{dy2} 은 식 (3)으로 나타낼 수 있고, 계획유출토사량은 이동가능 토사량 V_{dy1} 과 운반가능 토사량 V_{dy2} 을 비교하여 그 중에서 작은 값을 적용하여 사방댐의 규모를 설정하게 된다.

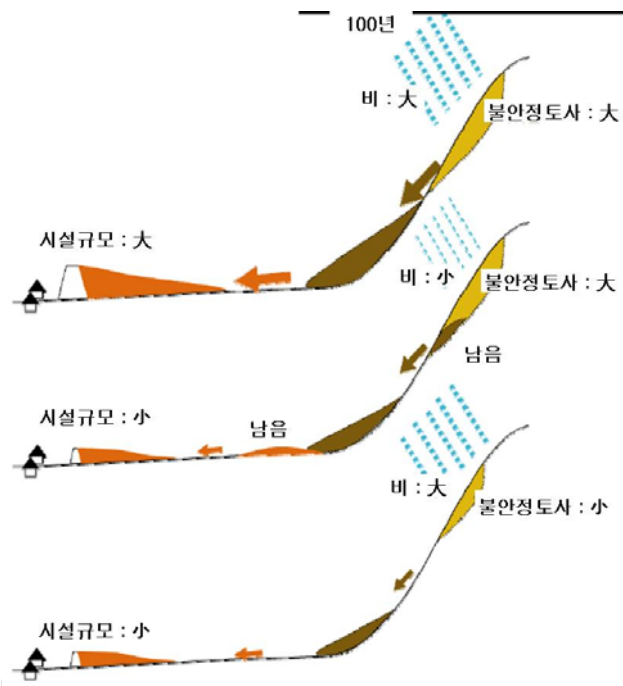


그림 6. 계획유출토사량 검토 방법(嶋, 2009 加筆)



그림 7. 패러미터의 정의(嶋, 2009 加筆)

$$V_{dy2} = \frac{P_p \cdot A \cdot 10^3}{1 - K_v} \left(\frac{C_d}{1 - C_d} \right) K_{f2} \quad (3)$$

$$C_d = \frac{\rho \tan \Theta}{(\sigma - \rho)(\tan \Phi - \tan \Theta)} \quad (4)$$

여기서, P_p 는 계획규모년초과 확률강우량(mm), A 는 유역면적(km²), C_d 는 유동 중 토석류농도, K_{f2} 는 유출보정률, K_v 는 공극률이며 보통 0.4정도를 사용한다. 한편, σ 는 자갈의 밀도 (2,600 kg/m³ 정도), ρ 는 물의 밀도 (1,200 kg/m³ 정도), Φ 는 계상퇴적토사의 내부마찰각(°, 보통 30°~40° 정도로 평균 35° 적용), Θ 는 계상구배(°)이다. 한편, 토석류 피크유량을 산출할 때 계상구배는 현계상구배 Θ_o (°)를 이용한다.

그러나, 식(1)에서 (4)는 흙의 거동에 따른 토석류에 대한 메커니즘 분석을 통하여 제안된 식이라기보다는 경험에 의해서 제안된 식으로서 이동가능 토사량 V_{dy1} 과 운반가능 토사량 V_{dy2} 의 예측시 설계자의 판단에 따라 발생 토석류량의 차이가 많은 것으로 나타나 있다.

3.1.2 계획유출유목량 산정

계획유출유목량은 추정된 발생유목량 V_{wy} 에 유목유출률을 곱해서 계산하며 계획유출유목량(발생한 유목의 계곡 출구에서의 유출률)은 토석류·유목대책시설이 없는 경우 0.8~0.9 정도라고 보고되었다(石川 등, 1989).

$$V_{wy} = \frac{B_d \times L_{dy13}}{100} \times \sum V_{wy2} \quad (5)$$

$$V_{wy2} = \pi \cdot H_w \cdot R_w^2 \cdot \frac{K_d}{4} \quad (6)$$

여기서, V_{wy} 는 발생유목량(m³), B_d 는 토석류 발생시에 침식이 예상되는 평균 계상폭 (m), L_{dy13} 은 발생유목량을 산출하는 지점에서 유역의 최고 도달점까지의 유로를 따라 측정한 거리 (m), V_{wy2} 는 재료의 단위중량(m³), $\sum V_{wy2}$ 는 샘플일 조사 100 m²당 목재의 부피(m³/100m²), H_w 는 수목의 높이 (m), R_w 는 흉고직경 (m), K_d 는 흉고계수이다(國土交通省, 2007). 식 (5) 및 (6)을 사용하여 강우에 의한 발생 예상 유목량 추정을 위한 방법은 결국 토석류 발생시 침식이 예상되는 평균 계곡 하부폭 B_d 이하에 분포하고 있는 수목 중 흉고계수 K_d 라는 확률론적 계수를 곱하여 몇 %가 하류로 떠내려 갈 것인가를 추정하는 단순한 방법으로, 현재 경험적 방법을 통하여 흉고계수 K_d 를 사용하고 있지만 아직까지 명확하게 규명되어 못하는 부분이다.

3.2 토석류피크유량 산출방법

토석류피크유량 산출방법은 유출토사량을 근거로 구하는 것이 기본이나, 동일유역에서 실측치가 있어 토석류 피크유량 추정이 가능한 경우 그 값을 이용 한다. 평균 피크유량과 토석류 총유량의 관계는 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$Q_{sp} = 0.01 \sum Q \quad (7)$$

$$\sum Q = \frac{C_* \cdot V_{dap}}{C_d} \quad (8)$$

여기서, Q_{sp} 는 토석류피크유량(m^3/s), $\sum Q$ 는 토석류 총유량(m^3), V_{dap} 은 1과 토석류에 의해 유출하는 것으로 생성된 토사량(공극포함; m^3), C_d 는 토석류 농도, C_* 는 계상퇴적토사의 용적농도(0.6정도)이다. 식(7)에서 일본의 경우 토석류 피크유량 Q_{sp} 은 토석류 총유량 $\sum Q$ 의 1%로 예상하고 있으나 경험적인 수치로서 이론에 근거한 명확한 설명이 부족한 부분으로 향후 연구를 통하여 보다 명확히 제안되어야 할 것이다.

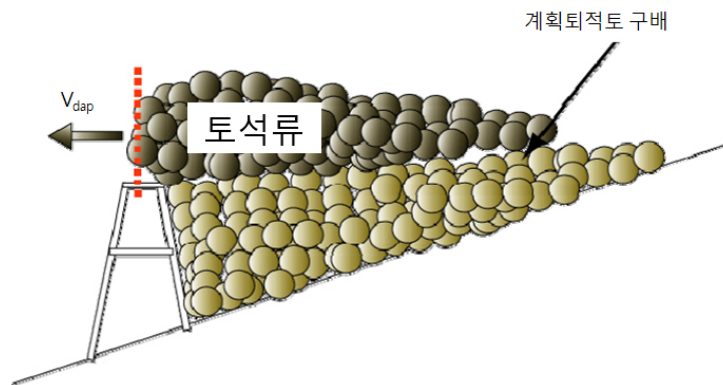
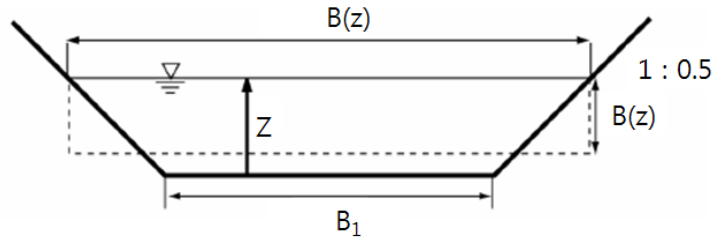


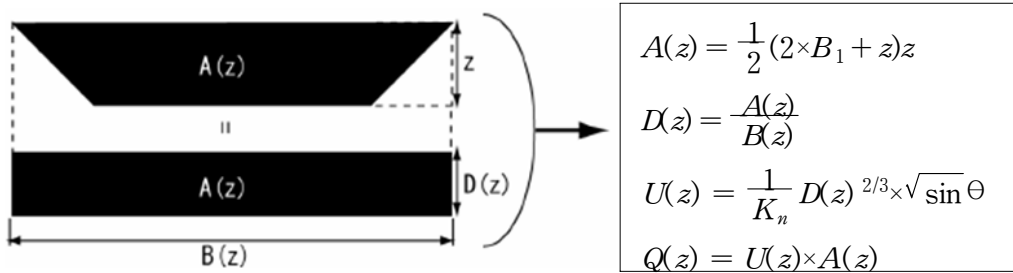
그림 8. 1과 토석류에 의해 유출된 토석류 V_{dap} 의 정의(嶋, 2009 加筆)

3.3 토석류피크유량에 대한 월류수심 계산

식 (7)에서 구한 토석류피크유량 Q_{sp} 에 대하여 월류수심 Z 을 구하는 방법은 그림 9(a)와 같이 계상 단면을 산정한 후 가정한 수심 z 를 계속 변화 시키면서 계산되는 토석류 유량 $Q(z)$ 가 토석류 피크유량 Q_{sp} 와 같아 질 때까지 반복해서 수행하며 구한다. 그림 9에서 z 는 가정한 수심(m), $B(z)$ 는 흐름의 폭(m), $A(z)$ 는 토석류 피크유량의 유하단면적(m^2), $D(z)$ 는 토석류의 수심(m), $U(z)$ 는 토석류의 유속(m^3/sec), $Q(z)$ 는 토석류 유량(m^3), K_n 은 Manning의 조도계수(0.1 : 자연가능 프런트부)를 나타낸다.



(a) 토석류 발생 계상 단면



(b) 토석류 피크유량에 대한 원류수심 추적원리

그림 9. 토석류 피크유량에 대한 원류수심 계산 방법(嶋, 2009 加筆)

3.4 홍수시 토석류 유량

불투과형 사방댐의 경우 홍수시 월류량, Q_{sp} 을 검토해야 하며 식 (9)를 사용하여 계산한다. 그러나, 식 (9)는 역학적 토석류의 거동을 분석한 것이 아니라 기존 자료를 통계 분석하여 제안된 식이므로 보다 합리적인 추정 방법에 대한 연구가 필요한 것으로 알려져 있다.

$$Q_{sp} = (0.71D_h + 1.77B_1) D_h^{3/2} \quad (9)$$

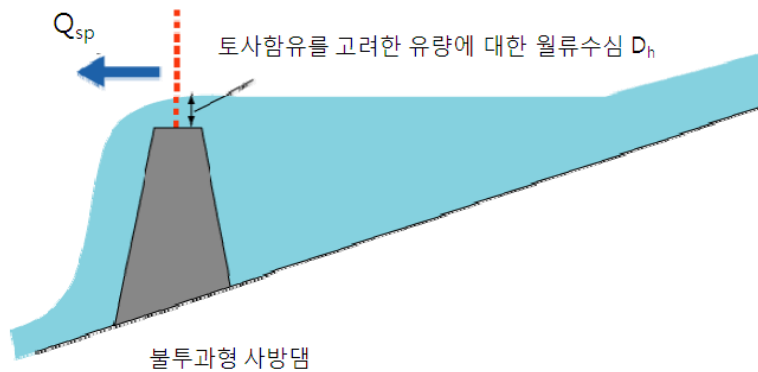


그림 10. 불투과형 사방댐에서 홍수시 월류량 고려 방법

3.5 불투과형 사방댐의 안정검토

불투과형 사방댐의 안정검토는 중력식 옹벽 안정검토와 원리는 대동소이하며, 사방댐 구체의 부분별 안정검토를 수행한다. 일본에서는 표 1과 같이 사방댐 높이 15m를 기준으로 설계외력의 조합을 서로 달리 적용하고 있으나 우리나라의 이러한 외력 조합을 반영하고 있지 못한 실정이다.

표 1. 설계외력의 조합방법(嶋 大尙, 2009 加筆)

불투과형 사방댐 높이	평상시	토석류시	홍수시
15m 미만	/	정수압, 퇴사압, 토석류유체력	정수압
15m 이상		정수압, 퇴사압, 양압력, 토석류유체력	정수압, 퇴사압, 양압력

일본에서 1995년 효고현 남부지진(일명 코베지진)이후 관측기록을 살펴보면 15m 미만의 사방댐에서는 지진으로 의한 토석류가 주변 민가에 직접적인 피해를 일으킨 중대한 사례가 없는 것으로 알려져 있으며, 동적해석결과 안전성을 확보한 것으로 판단하고 있다고 한다. 이에 따라 15m미만의 불투과형 사방댐에 대하여 동적해석은 필요 없을 것으로 판단된다(嶋, 2009).

3.6 제석계획

선진국의 경우 토석류·유목처리계획상 제석이 필요한 경우에는 반출로 부설 등 토사 및 유목 반출방법 및 반출토 야적 장소, 제석(유목 제거 포함)의 실시 빈도 등 제석(유목 제거 포함)계획을 토석류·유목처리계획에서 검토하나 국내의 경우 뚜렷한 규정이 없는 현실이다.

제석에는 정기적 제석과 긴급제석이 있으며 정기적 제석은 평상시 유출된 토사 및 유목 등으로부터 주로 계획 퇴적량을 확보하기 위하여 행하며, 긴급제석은 토석류 발생 등의 出水에 의해서 유출된 토사 및 유목으로부터 계획 포착량·계획퇴적량을 확보하기 위하여 수행한다.

한편, 제석을 실시할 때에는 투과부 단면을 폐색한 자갈이 느슨해지면서 돌발적으로 하류로 흘러내려갈 위험이 있으므로 제석은 하류에서가 아니라 상류에서 실시한다.

4. 결론

국지성 홍우 혹은 집중호우로 인한 강원권내 사면붕괴 및 토사유출 등이 자주 발생되고 있으며 이로 인한 피해는 지속적으로 증가하고 있는 상황이다. 이에 대한 대책으로 강원권내 사방시설이 최근 수년간 큰 폭으로 많이 시공되고 있지만 아직까지 이에 관한 명확한 설계 자료가 부족한 상황이다.

불투과형 사방댐 설계 방법에 대하여 국내 설계 수준을 향상시키고자 일본의 최신의 설계 자료를 분석 비교, 검토하여 보았다. 불투과형 사방댐 설계방법 분석 결과, 계획유출토사량 산정 방법도 결국 추정된 토석류 발달 사면의 면적에 토석류 발달 예상 구간(연장)을 곱하고 그 체적값에 보정치를 적용하여 사용하고 있으며, 토석류 피크유량도 토석류 총유량의 1%로 추정하는 등 토석류의 역학적 거동 분석보다 경험에 의존한 설계를 수행하고 있는 실정이다. 향후 개선 사항으로서는 선진국에서 시행하고 있는 제석계획을 우리나라도 설계기준에 반영하여 퇴적 토석류에 대한 보다 섬세한 사후관리를 시행해야 할 것으로 사료된다. 또한, 불투과형 사방댐 설계기준 적용시 구체적이고 상세한 계산식에 의한 토석류 산정 및 사방댐 설계에 국한시키기 보다는 합리적인 설계를 통한 효과적인 토석류 관리가 시급한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 #08지역기술혁신 B01-01)에 의해 수행되고 있는 과제로서 국토해양부와 수충부 및 토석류 방재기술개발 연구단 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 국토해양부(2005), 하천 설계기준, pp. 805~820.
2. 국토해양부(2007), 산악지 도로 설계 매뉴얼. pp. 63~98
3. 김운형, 송병웅, 이국현, 김범석 (2009a), “토석류·유목 대책에 관한 설계인자 분석”, 한국지반환경공학회 논문집, 제10권, 제2호, 2009년 2월 pp. 69~76.
4. 김운형, 송병웅, 이국현, 김범석 (2009b), “토석류 대책 구조물에 관한 국내·외 설계인자 분석”, 2009년 성과 및 봄학술발표회, Apr. 10. 일산, pp. 281~
5. 향문사(1983), 사방공학, pp.1~310.
6. 石川芳治, 水山高久, 福澤誠(1989), 土石流に伴う龍木の發生及び流下機構, 砂防學會誌, 42(3), pp. 4~9.
7. 國土交通省 (2007), 砂防基本計畫策定指針(土石流・流木對策編)解説, pp.1~74.
8. 嶋 大尚 (2009), 土石流・流木對策施設の計畫・設計, 社団法人砂防・地スベリ技術センター、
http://open.nat.gov.tw/OpenFront/report/show_file.pdf.
9. 地盤工學會 (2003), ジオテクノート12-土石流, 社団法人地盤工學會, pp. 5~45.
10. 廣島縣 (2009), <http://www.pref.hiroshima.lg.jp/page/1171538334545/index.html>.