

하천제방 침식에 대한 설계기법 검토

Design Techniques for Levee Erosion

윤광석*, 이성준**

Kwang Seok Yoon, Seong Jun Lee

요 지

본 연구에서는 제방의 침식에 대한 안정성 평가를 위하여 일본의 하천제방설계지침에서 사용하고 있는 설계기법을 도입하여 적용하였다. 일본은 호안 설계에 있어서 성능 규정에 의한 내력 및 외력을 산정하여 호안공의 안정성을 정량적으로 판단하고 있다. 국내 하천설계기준에서는 침식에 대해 호안을 설치토록 하고 있으나 확실한 안전성 평가기법은 제시되어 있지 않은 실정으로 호안공은 유속이 3m/s이상에서 설치하도록 제시하고 있어 호안공별 설계기준이 경험에 의존하게 된다. 이에 대해 정량적인 설계가 필요하며 적용성 검토를 위하여 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미'에 의해 침식피해가 발생한 지점에 대해서 현장조사를 수행하고, 이를 정량적으로 해석함으로써 침식에 대한 설계기법에 대한 검토를 수행하였다. 본 연구에서는 제방 비탈면이 식생으로 보호된 경우와 호안공(호안블럭, 돌망태 등)이 설치된 경우에 대해서 안정성을 해석하였으며, 내·외력 산정에 의한 안정성 평가의 적용성을 확인하였다.

핵심용어 : 하천제방, 침식, 안정성 평가, 호안공, 제방붕괴

1. 서 론

최근 빈번한 홍수로 인한 하천 제방의 침식으로 피해가 가중되고 있다. 조사된 바에 의하면 제방피해중 침식으로 인한 붕괴가 41%를 차지할 정도로 제방 비탈면 침식에 대한 설계의 중요성이 높다고 할 수 있다. 국내 하천설계기준에서는 침식에 대해 호안을 설치토록 하고 있으나 확실한 안전성 평가기법은 제시되어 있지 않은 실정으로 호안공은 유속이 3m/s이상에서 설치하도록 제시하고 있어 호안공별 시공기준이 경험에 의존하게 된다. 따라서, 호안공이 과대 설계되거나 과소 설계되어 침식에 취약한 문제들이 발생할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

일본의 하천제방설계지침에서는 안전성 검토를 침식에 대한 보호공이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 평가하도록 되어 있다. 침식에 대한 제방의 안전성은 홍수시의 제방 부근의 대표유속에 의해 결정된다. 대표 유속 결정을 위하여 단면 평균유속을 만곡, 세굴, 흐름간섭 등에 의해 보정하고 이 유속은 하도의 형상과 하상 재료 등에 관계가 되므로 하도 특성을 평가하는 하나의 지표인 하도의 세그먼트 분류를 통해 침식에 대한 안전성 평가와 호안 설계 기준을 제시하고 있다.

본 연구에서는 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미'에 의해 침식피해가 발생한 지점에 대해서 현장조사를 수행하고, 이를 정량적으로 해석함으로써 침식에 대한 설계기법에 대한 검토를 수행하였다. 본 연구에서는 제방 비탈면이 식생으로 보호된 경우와 호안공(호안블럭, 돌망태 등)이 설치된 경우에 대해서 안정성을 해석하였으며, 그 결과로 국내 실정에 맞는 설계기법에 대해서 검토하였다.

2. 제방 침식에 대한 설계기법

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : ksyoon@kict.re.kr

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : sjlee@kict.re.kr

국내 하천제방설계에 있어서 침식에 대해 호안을 설치하고 있으나 확실한 설계기준은 없는 실정이다. 그러나 실제 설계에 있어서 식생호안 그리고 과도한 유속이 발생할 것으로 예상된 지역은 돌망태가 많이 사용되고 세굴 우려 구간에 대해서는 밀다짐공으로 콘크리트 블럭공, 사석공, 돌망태공 등이 이용되고 있다. 하천 설계기준에서는 기초깊이에 대해 유속과 입경에 따른 홍수시 일시적 세굴깊이가 주어져 있으며 밀다짐공은 홍수시 단면평균유속에 따라 제시되어 있으나 본문에 급류 및 준급류 하천의 경우 4m이상, 완류 및 준완류부 하천의 경우 4~12m로 되어 있어 기준이 모호하다. 실제로 설계시 4m가 많이 이용된다. 밀다짐공이 결정되면 밀다짐공의 규모가 결정된다. 예를 들어 사석의 경우 사석규모가 결정된다. 일련의 설계과정을 거쳐 결정된 호안은 안전성 검사가 수행되지 않고 있다.

일본의 침식에 대한 제방의 안전성은 홍수시의 제방 부근의 대표유속에 의해 결정된다. 이 유속은 하도의 형상과 하상 재료 등에 관계가 된다. 일본에서는 이러한 하도 특성을 평가하는 하나의 지표인 하도의 세그먼트 분류를 통해 침식에 대한 안전성 평가와 호안 설계 기준을 제시하고 있다. 즉, 하상구배 및 하상재료의 대표입경 등을 고려해 설계 대상 구간의 하도를 세그먼트로 분류하여 이에 따라 호안공의 설치 유무 및 공법을 결정한다. 그림 1은 침식에 대한 안전성 조사 순서도를 나타낸다.

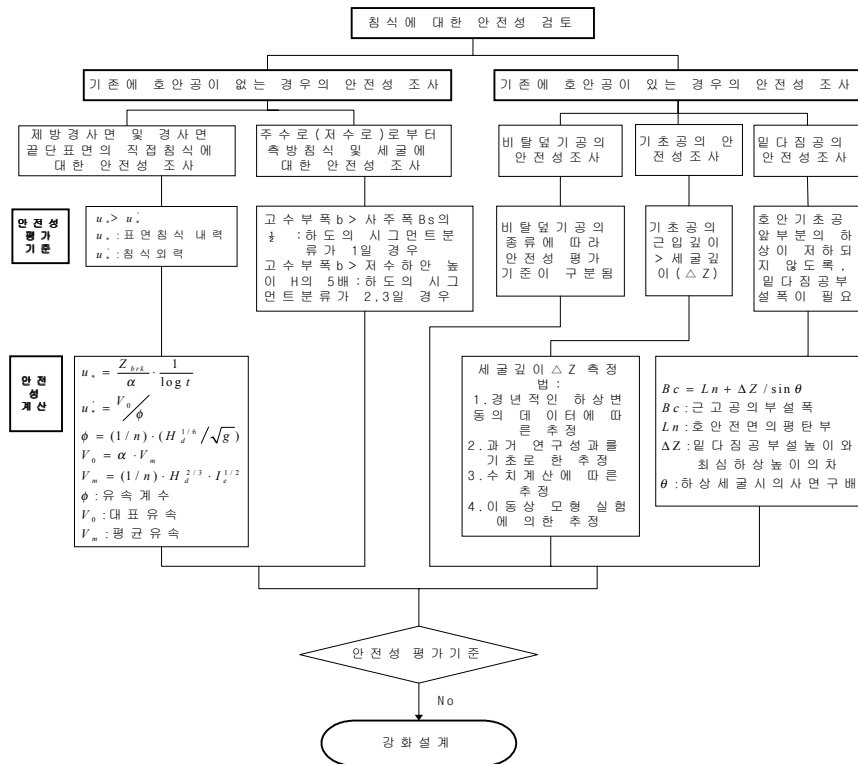


그림 1. 침식에 대한 안정성 평가 절차(일본 건설성)

일본의 하천제방설계시침의 경우 안전성 검사를 침식에 대해서 보호공이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 산정하도록 되어 있다. 대표유속을 결정하는 방법에 있어서 국내의 경우 수리영향검토의 단면평균유속을 이용하는 반면 만곡, 세굴, 흐름간섭 그리고 밀다짐공 등의 유무에 의해 보정하여 유속을 결정한다. 일본의 경우 비탈댐기 보호공의 경우 파괴요인, 설치상태에 따라 세분하고 비탈댐기의 수중중량, 양력, 항력 등을 이용하여 안전성 조사를 행하도록 하고 있으나 기초공의 경우 역학적 안전성 및 부설폭을 조사하도록 하고 있다. 필요부설폭 다음 식에 의해서 산정된다.

$$B_c = Ln + \Delta Z / \sin \theta$$

윗 식에서 B_c 는 필요부설폭, Ln 은 호안 전면의 평탄부, ΔZ 는 세굴깊이, θ 는 하상세굴 경사이다. 하

천설계기준에 대해 적용해보면 홍수시 일시적 세굴깊이 ΔZ 는 0.5~1.5m이고 θ 는 하상재료의 수중안식각이지만 안전을 생각하면 일반적으로 30°정도로 알려져 있다. Ln은 호안전면의 평탄부로 블록 1장 또는 2m 정도 이상이므로 최소인 2m를 적용하면 필요부설폭은 최소 B_c 는 3~5m정도임을 알 수 있다.

2.1 식생 호안공에 대한 안정성 평가

일본에서 수행하고 있는 안전성 평가방법은 내력소류력이 외력소류력보다 클 경우 안정한 것으로 평가한다. 대표유속과 유속계수로 표현되는 외력 소류력은 다음과 같다.

$$u_*' = V_0/\phi, \quad \phi = (1/n) \cdot (H_d^{1/6}/\sqrt{g})$$

위의 식에서 V_0 는 대표유속, ϕ 는 유속계수를 나타낸다.

평균근모량(σ_0)으로 나타내어지는 침식의 용이성을 나타내는 파라미터 $\alpha (= 50 \sigma_0 + 9)$, 전단응력 지속시간(t)min, 허용침식깊이($Zbrk$)로 표현되는 내력 소류력(u_*)은 아래와 같다.

$$u_* = \frac{Zbrk}{\alpha} \cdot \frac{1}{\log t}$$

2.2 돌망태공의 안전성 조사

돌망태의 비탈덧기공은 대표 유속에 의해 망태속 재료의 이동을 허용하지 않는 조건으로 평가한다. 즉 망태속 재료는 무차원 외력 소류력에 견딜 수 있도록 설계한다. 안정조건은 아래와 같다.

$$\tau_{sd} = \tau_{*d} \times \cos \theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi}} \geq \tau_{*sd} = u_*^2 / (s \cdot g \cdot D_m)$$

τ_{sd} 는 내력 소류력을 나타내고 τ_{*sd} 는 외력 소류력, s 는 하상재료의 수중비중(≈ 1.65), D_m 는 돌망태 안의 돌의 평균입경을 나타낸다.

2.3 콘크리트 블록공의 안전성 평가

비탈면에 설치된 콘크리트 블록은 유체력에 의한 활동이 생기는 조건으로 안전성 평가를 조사한다. 즉, 수중에서의 콘크리트 블록의 항력과 양력에 대한 활동에 대한 안정성을 조사한다. 안정조건은 아래와 같다.

$$\mu(W_w \cdot \cos \theta - L) \geq ((W_w \cdot \sin \theta)^2 + D^2)^{1/2}$$

양력(L)은 $L = \rho_w/2 \cdot C_L \cdot A_b \cdot V_d^2$, 항력(D)은 $D = \rho_w/2 \cdot C_D \cdot A_D \cdot V_d^2$ (kgf)와 같으며, W_w 는 비탈덧기공의 부재 수중중량을 나타내는데 $W_w = (\rho_b - \rho_w) \cdot g \cdot K_v \cdot A_b \cdot t_b$ 와 같다.

3. 국내 제방 침식 사례 적용

제방 침식의 정량적인 안정성 평가를 위하여 지난 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미에 의한 홍수시 제방 피해를 입은 강원도 지역의 하천에 대해 현장조사를 수행하고 그 결과를 가지고 안정성 평가 방법의 적용성을 검토하였다. 대상 지점은 표 1에 나타낸 바와 같다.

표 1. 제방의 침식안정성 평가 적용 지점

하천	조사 지점	호안재료	파괴여부	파괴시기	비고	
양양남대천	No.22 우안	돌망태	안정	태풍 루사 (2002년)	하천정비기본계획, 1992.5	
	No.22 좌안	식생	안정			
강릉남대천	No.38 우안	콘크리트 블록	불안정		태풍 매미 (2003년)	하천정비기본계획, 1992.5
	No.38 좌안	식생	불안정			
주수천	No.4 좌안	콘크리트 블록	불안정			하천정비기본계획, 1992.12
낙풍천	No.16 좌안	돌망태	안정			
골지천	No.14 좌안 저수호안	돌망태	불안정	하천정비기본계획, 1996.12		
	No.14 좌안 고수호안	돌망태	불안정			
	No.42+50 좌안 저수호안	돌망태	불안정			

3.1 피해 지점 조사

침식에 대한 안전성 평가를 위하여 침식에 의한 호안공의 붕락이나 제방 붕괴가 발생한 지점을 조사 대상 지점으로 선정하였는데, 수류력에 의한 침식이 지배적이라고 판단되는 지점이다. 조사 대상 지점이 선정된 후 제방 및 호안의 제원을 조사하는데, 제방의 기하적 형상 뿐만 아니라, 호안공의 종류, 입경, 형태 등이 조사되었다. 호안공이 돌망태의 경우 그림 4와 같이 재료의 입경 및 돌망태 규격을 조사하고, 식생 호안인 경우 그림 5와 같이 근모량을 측정하였다. 그림 6은 호안블록이 제방 비탈면에서 이탈된 지점을 나타내는 것으로서 이 지점에 대해서는 그림 7과 같이 호안블록의 제원을 조사하였다.



그림 2. 조사 지점 피해상황 조사(골지천)

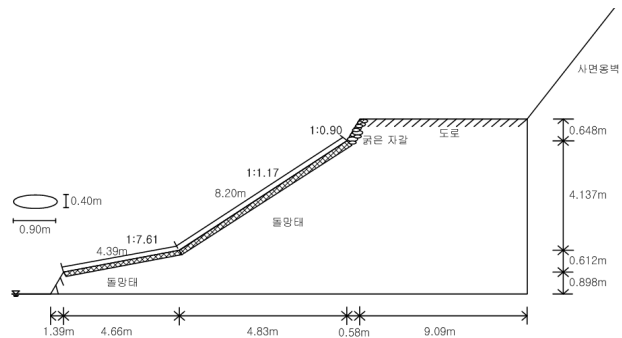


그림 3. 제방단면 측량 및 호안 제원 조사



그림 4. 돌망태공의 입경 조사



그림 5. 식생 호안의 근모량 측정



그림 6. 호안 블록의 이탈(강릉남대천)

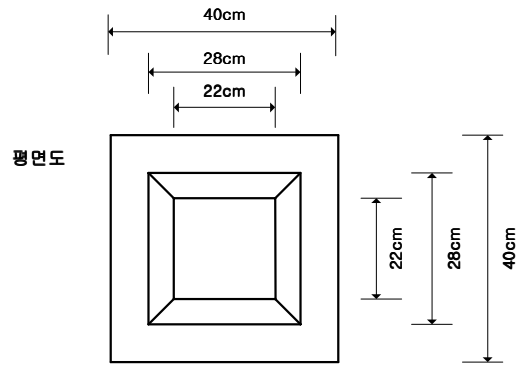


그림 7. 호안블록의 제원 조사

3.2 안정성 평가결과

3.2.1 식생호안에 대한 안정성 평가

2002년 홍수 당시 파괴되지 않았던 양양남대천의 양양교 직하류지점 좌안의 식생공 지점과 강릉남대천의 회산교 하류 700m지점 좌안의 식생공 지점에 대해 안전성 조사법의 적용해 보았다. 적용결과는 표 2와 같다. 표에서 내력소류력은 식생호안의 저항하는 힘이고 외력소류력은 흐름이 호안에 미치는 힘이라 정의할 수 있으며, 내력소류력이 외력소류력보다 큰 경우에 흐름에 대해서 안정이라고 정의된다. 표와 같이 외력소류력과 내력소류력을 산정하여 식생호안의 안정성을 검토한 결과, 안전성 평가 결과와 현장조사결과가 일치함을 알 수 있다.

표 2. 식생호안 안전도 평가 결과

항목 지점	허용침식깊이 (뿌리깊이)(m)	전단응력 지속시간 (min)	외력소류력 (m/s)	내력소류력 (m/s)	평가결과	현장조사 결과
양양남대천 No.22 좌안지점	277.73	40	0.226	0.393	안정	안정
강릉남대천 No.38 좌안지점	231.63	60	0.307	0.300	불안정	불안정

3.2.2 콘크리트 블록 호안에 대한 안정성 평가

2002년 태풍 루사에 의한 홍수 당시 제방 비탈면으로부터 이탈되었던 강릉남대천과 주수천의 콘크리트 블록공에 대한 안전성 평가기법 적용 결과는 표 3과 같다. 안전성 평가결과 두 지점 모두 콘크리트 블록공이 불안정한 것으로 평가되어 현장조사 결과와 일치하는 것으로 분석되었다.

표 3. 콘크리트 블록 호안의 안전성 평가 결과

항목 지점	호안공의 수중중량(kgf)	양력 L (kgf)	항력 D (kgf)	외력(kgf) $((W_w \cdot \sin \theta)^2 + D^2)^{1/2}$	내력(kgf) $\mu(W_w \cdot \cos \theta - L)$	평가결과	현장조사 결과
강릉남대천 No.38우안지점	277.73	117.79	94.07	168.56	79.40	불안정	불안정
주수천 No.4좌안지점	231.63	27.93	53.90	139.67	106.96	불안정	불안정

3.2.3 돌망태 호안에 대한 안정성 평가

돌망태 호안에 대한 안정성 평가 결과는 표 4에 나타난 바와 같다. 조사 지점에 대한 홍수량을 강우-유출 모형을 이용하여 산정하였고, 호안공의 붕락 당시의 유속 조건을 정확히 알 수 없다는 불확실성을 가지고

있긴 하나 안정성 평가 방법의 적용성은 어느 정도 확보된 것으로 판단할 수 있다.

표 4. 돌망태 호안의 안정성 평가 결과

하천	지점	대표 유속 (m/s)	내력 (무차원소류력) τ_{sd}	외력 (무차원소류력) τ_{*sd}	평가결과	현장조사 결과
양양남대천	No.22우안	2.98	0.097	0.022	안정	안정
낙풍천	No.16좌안	2.37	0.0858	0.014	안정	안정
골지천	No.14좌안 저수호안	12.78	0.117	0.435	불안정	불안정
	No.14좌안 고수호안	12.78	0.040	0.433	불안정	불안정
	No.14 상류 100m 좌안 저수호안	12.78	0.117	0.147	불안정	불안정
	No.42+50 하류 50m좌안 저수호안	6.28	0.114	0.116	불안정	불안정
	No.42+50 하류 50m좌안 고수호안	6.28	0.090	0.116	불안정	불안정

4. 결론

일본 하천제방설계지침(2000)에서 제시하고 있는 제방 침식에 대한 안전성 평가기법의 적용성을 검토해 보았다. 이를 위하여 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미에 의한 홍수시 붕락이 발생했던 지점에 대한 현장조사를 수행하고 안전성을 평가하였다. 평가결과, 호안공 설계시 정량적인 해석에 의한 적절한 공법의 선정이 가능함을 알 수 있었다.

국내 기준에서 침식 방지를 위해서 유속이 3m/s 이상에서 호안공을 설치하도록 규정하고 있으며 실제 제방 설계에서는 뚜렷한 규정이 없이 거의 전 구간에 걸쳐 일률적으로 호안을 설치하고 있는 실정이다. 따라서 지금까지 살펴본 바와 같이 식생공의 안전성 평가를 통하여 호안공 필요 유무를 판단한 후 호안공 필요시 각 호안공법에 대한 안전성 평가에 의해 적합한 호안공을 선택하여 제방 강화가 이루어져야 할 것이다. 또한 침식에 대한 제방의 안전성은 홍수시의 제방 부근의 대표유속에 의해 결정되는데 이 유속은 하도의 형상과 하상 재료 등에 관계가 되므로 하도 특성을 평가하는 하나의 지표인 하도의 세그먼트 분류를 통해 침식에 대한 안전성 평가와 호안공법의 분류가 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원(2002.12). 2002년 태풍 루사에 의한 강원도지역 대홍수
2. 한국건설기술연구원(2003.8). 하천제방 관련 선진기술 개발 연구보고서, 건설교통부/한국건설교통기술평가원
3. 한국건설기술연구원(2003.10). 2003년 9월 태풍 매미에 의한 대홍수
4. 한국수자원공사(2002.10). 태풍 루사에 의한 2002 전국 홍수조사 보고서
5. 한국수자원학회(2002.10). 2002년 홍수피해 종합 조사보고서
6. 한국수자원학회(2002). 하천설계기준
7. 행정자치부(2002). 2002 태풍 루사 피해 현장조사 보고서
8. 建設省, (2000.6). 河川堤防設計指針
9. U. S. Army Corps of Engineers(2002). Design and Construction of Levees