록필댐 축조재료의 입자파쇄에 대한 연구
A Study on particle crushing of rock-fill material

임은상[1], Eun-Sang Im, 신동훈[2], Dong-Hoon Snin, 김재홍[1], Jea-Hong Kim, 김광일[3], Kwang-Il Kim

[1] 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원, P. Researcher, K-water Research Center, K-water
[2] 한국수자원공사 K-water연구원 팀장, Head. Researcher, K-water Research Center, K-water
[3] 한국수자원공사 K-water연구원 연구원, Researcher, K-water Research Center, K-water

SYNOPSIS : Earth and rock fill dam is our typical dam because of their inherent flexibility and adaptability to various fundation conditions. In order to secure structural safety, rockfill materials are used angular particles obtained by blasting parent rock or rounded particles collected from river beds. Concrete-faces rockfill dams(CFRD) and Concrete-faces gravelfill dams(CFGD) have become popular in the last 20 years as s result of their good performance and low cost compared with the rockfill dam. These Dams are also constructed by the materials. A key factor in the design of the dams is the deformations induced during construction and upon reservoir filling. These can be predicted using the stress-strain and strength properties can be adequately define. However the stress-strain properties of rockfill are difficult to determine because the properties are affected by such factors as particle grading, size and shape of particles, stress conditions, and particle crushing. In our study, testing of the behavior of the rockfill materials are essential prerequisites to the realistic analysis and design of the CFGD. This paper deals with laboratory testing of particle crushing among the study.

Keywords : rock-fill material, particle breakage, crushing, large triaxial compression tests

1. 서 론

우리나라 대표적인 형식의 댐은 흙이나 암석을 쌓아서 만드는 필댐이며 이 필댐의 구조적일 안전성을 확보하기 위하여 사용되는 축조재료로서는 암석이나 쇄석과 같은 록필 재료가 주고 사용되고 있다. 특히 최근 대댐을 축조에 있어서 자주 사용되어지고 있는 콘크리트 표면차수벽 록필댐(CFRD)의 경우에는 쇄석 등이 주요 축조재료이며 이 주 축조재료로서 하천의 자갈·모래를 사용하는 CFGD의 경우에도 최근 축조되어지는 댐 형식이라고 할 수 있다.

이와 같이 댐의 구조적 안전성을 담당하는 주 축조재료인 록필 재료의 강도 및 변형특성을 파악하는 것은 댐의 안전성을 확보하는데 있어서 매우 중요한 일이라고 하겠다. 그렇지만 이 특성은 입자의 분포 및 크기와 형상 그리고 응력조건, 입자 파쇄와 같은 인자에 영향을 받기 때문에 정확한 특성을 파악하기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 록필 대표적 재료인 쇄석과 하천 사력에 대한의 강도-변형특성 중에 하나인 입자의 파쇄특성을 파악하기 위하여 수행되어진 연구의 일부 결과를 수록하였다.

2. 입자 파쇄

2.1 입자 파쇄의 측정

입자 파쇄에 대한 연구는 크게 입자파쇄의 정량적 측정방법이나 지수에 대한 연구와 입자의 파쇄가 역학적 거동에 미치는 영향에 대한 연구로 나눌 수 있다. 그중에 입자파쇄에 대한 정량적 측정방법은 Marsal(1967), Lee & Fahoonmand(1967) 등의 다수의 연구자에 의하여 수행되었으며, 이 들 측정방법의 대부분은 하중 전·후의 입경 변화를 바탕으로 특정 입경크기의 입도분포 변화를 측정하여 산정하거나 입도분포 전체의 변화를 측정하여 산정하였다.

Marsal(1967)은 록필댐의 대형삼축압축시험 중에 상당량의 입자파쇄가 발생한다는 것이 주목하여 입자파쇄지수(Index of particle breakage, B_g)라는 측정기준을 제시하였다. 이 방법은 하중 작용에 의한 전체 입경분포의 변화를 포함하는 것으로서 하중재하 전·후의 입도분포를 측정하여 각 입경별로 차이를 보이는 중량비($\triangle W_k = W_{ki} - W_{kf}$)를 계산하고 이로부터 양의 중량비를 합산하여 입자파쇄지수(B_g)를 산정하는 방법이다. 여기서 W_{ki}는 삼축압축시험 전의 k입경체에 남은 중량비이며, W_{kf}는 삼축압축시험 후 k입경의 체에 남은 중량비이다. 또한 $\triangle W_k$는 시험 전·후에 k 입경체에 남은 중량비의 차이이고 단위는 %로 표시된다. Lee & Fahoonmand(1967)는 흙댐의 필터재료에 대한 시험을 통하는 입자파쇄의 량을 측정하였다. 이들은 댐 필터의 역할에 대한 입자 파쇄의 영향을 조사하였고, 필터의 주요 설계상수인 D_{15}에 대한 입경크기의 변화를 이용하여 재하 전·후에 대한 D_{15}의 비인 파쇄 지수(Breakage indicator, $D_{15(innitial)}/D_{15(final)}$)를 산정하였다. 그 후 Hardin(1985)은 전체 입도분포의 차이를 바탕으로 파쇄잠재력(Breakage potential, B_p)와 전체파쇄(Total breakage, B_p)을 정의하고 이들의 비인 상대파쇄지수(Relative breakage index, $B_r = B_t/B_p$)을 제안하였다. Miura and O-hara(1979)는 입자파쇄의 지표로서 입자 표면적의 변화($\triangle S$)를 이용하였다. 이 개념은 입자가 파괴되면 새로운 표면이 발생하기 때문에 입자 표면적의 변화는 입자의 파쇄를 측정하는데 이용할 수 있으며, 각 입경에서의 비표면적은 모든 입자가 구하고 가정하여 산정하게 된다.

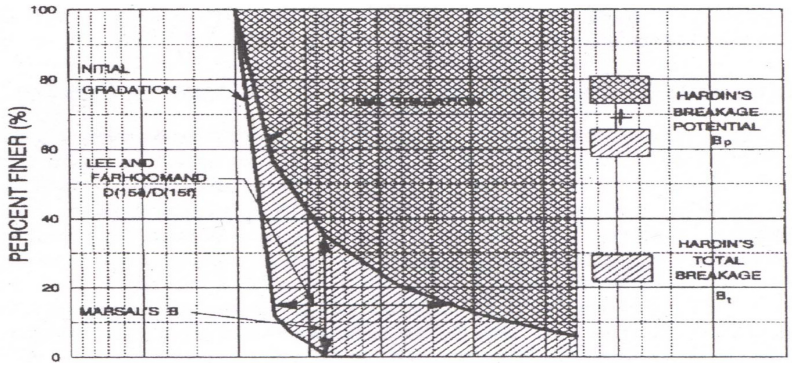

그림 1. 제안되어진 입자 파쇄 지수들의 개념도(after Lade, 1996)

2.2 입자 파쇄에 영향를 미치는 인자

입자의 파쇄에 영향을 미치는 인자는 재하하중의 크기, 진도, 밀도, 입자의 형상, 구속압, 포화도 등 다양하다고 할 수 있지만 그 중에서도 가장 주요한 인자는 각 입자의 강도이라 Indraratna and Salim(2003) 등이 주장하고 있다. 또한, Lee & Fahoonmand(1967)는 입자의 크기, 형상, 입도분포 그리고 구속압의 크기가 입자 파쇄에 영향을 미친다고 제시하였고, Maesal(1967) 역시 같은 의견을 제시하였으며 상기의 영향인자와 더불어 접촉하중의 평균값 역시 영향인자라고 제시하였다. Maesal(1967)은 또한 폭발이나 암석 파쇄시에 발생한 미세균열도 주요한 영향인자라고 지적하였다. Bishop(1966)은 높은

압력하에서는 압밀과정 중에 발생하는 입자 파쇄보다 전단과정에서 발생하는 입자의 파쇄가 매우 크다고 지적하였으며, Lade(1996)등은 큰 입자가 보다 많은 미세균열과 불연속면을 갖고 있을 가능성이 크기 때문에 작은 입자보다 파쇄에 취약하다고 언급하였다. 또한, McDowell and Bolton(1998)은 입경이 커질수록 입가의 인장강도가 적다고 보고하였고, Lade(1996) 등은 광물의 강성이 클수록 입자 파쇄가 작아진다. 또한, 입자의 모난 정도가 증가하면 입자의 파쇄가 증가하게 되는데 이는 짧은 측을 따라서 응력이 집중될 수 있기 때문이고 입도분포가 양호하거나 상대밀도가 커지게 되면 각 입자의 주변에서 입자와 접촉하는 입자가 증가하기 때문에 평균 접촉응력이 저하하여 입자 파쇄가 적게 발생하게 된다.

2.3 입자 파쇄의 의한 영향

입자 파쇄는 조립재료의 거동에 영향을 미친다는 사실이 많은 연구자에 의하여 밝혀졌으며, 응력의 변화에 따른 입도분포의 변화를 나타내는 지수나 상수를 산정하는 연구뿐만 아니라 이 입자파쇄 지수나 상수가 강도나 다이레이턴시, 내부마찰각 등에 미치는 영향을 밝히기 위한 연구도 다수 수행되었다.

그 대표적인 예로서 Marsal(1967)은 비록 파괴시의 주응력비(σ_1/σ_3)와 입자파쇄가 15%이하인 조건에서는 명확한 상관관계을 얻을 수는 없었지만 파쇄지수B_g에 대한 피크 주응력비(σ_1/σ_3)의 관계로부터 입자파쇄가 증가하면 전단강도가 저하한다는 결론을 얻었고, Miura and Ohara(1979)는 소성거동이 증가하면 표면적비가 증가하고 파괴 시에 입자 파쇄비가 증가하면 주응력비가 감소한다고 보고하였다. Indraratna(1998) 등은 입자파쇄지수와 주응력비 그리고 피크내부마찰각의 상관관계을 구했으며 이로부터 큰 구속압 조건에서 파쇄지수가 증가하면 피크 주응력비와 피크 내부마찰각이 감소한다고 제안하였다.

3. 대형삼축압축시험에 의한 입자파쇄

본 연구에서 사용한 대형삼축압축시험기는 댐 공사는 물론 방파제 등의 항만공사, 철로공사, 도로공사 및 기타 흙막이 공사 등 조립재료를 사용하는 지반구조물의 설계·시공 및 안정성 평가 등에 활용하기 위하여여 신동훈(2001)이 개발한 시험기로서 공시체의 직경 300mm, 높이 600로 최대입경 50mm까지 실험이 가능한 있는 시험기이다.

3.1 시험 개요

쇄석 및 사력(강자갈)의 입자 파쇄 특성을 파악하기 위하여 상대밀도를 일치하도록 다짐시험을 수행하고 다짐시험 전·후의 입자 파쇄에 의한 입도변화량을 측정하였고 다짐이 완료된 공시체는 3단계의 구속압(1, 2, 4 kg/cm^2) 조건으로 삼축압축시험을 수행하여 아래 표 1과 같은 결과를 얻었다. 또한 이 표 1에는 각 시료의 비중, 마모율 등의 기본 물성도 나타내었다. 삼축압축시험에 의한 입자 파쇄의 측정은 구속압이 가장 큰 4 kg/cm^2)의 시험이 종료한 후에 입도분석을 수행하여 다짐완료후의 입도분포와 비교하는 것으로 하였다.

표 1. 강도정수 산정결과

	비중	다짐시험결과 (t/m^3)		시험밀도, t/m^3 (상대밀도, %)	강도정수		마모율 (%)	흡수율 (%)	비고
		최소 밀도	최대 밀도	초기 / 압밀 후	c (t/m^2)	ϕ (°)			
Gravel	2.60	1.514	2.108	1.917 (67) / 1.971 (76)	1.97	39.7	32.1	0.65	
Ballast	2.69	1.390	2.125	1.886 (67) / 1.956 (77)	1.34	35.5	29.6	0.73	

3.2 시험 결과 및 분석

본 연구에서 이용한 재료는 실제 축조되고 있는 댐의 축조재료로서 최대 입경이 각각 500mm, 150mm 이기 때문에 실내실험을 수행하는데 한계가 있어 그림 2와 4에서와 같이 모형시험이 가능하도록 최대입경이 20mm가 되도록 상사입도를 산정하여 다짐 및 삼축압축시험을 수행하였다. 두 재료 모두 다짐 시에 더 많은 파쇄가 발생하였으며 사력의 경우에는 중간의 입경에서 파쇄가 가장 많이 발행한 반면에 쇄석에서는 큰 입경에서 전체적으로 파쇄가 발생한 경향을 보이고 있으며, 다짐 시에는 마모율이 적은 즉 입자의 강성이 적은 사력에서 파쇄가 만히 발생하였고, 전단 시에는 입자의 형상 즉 모가 많은 쇄석에서 파쇄가 많이 발생하였다. 이는 다짐 및 전단 시에 파쇄에 미치는 주요요인이 달라지기 때문으로 사료된다.

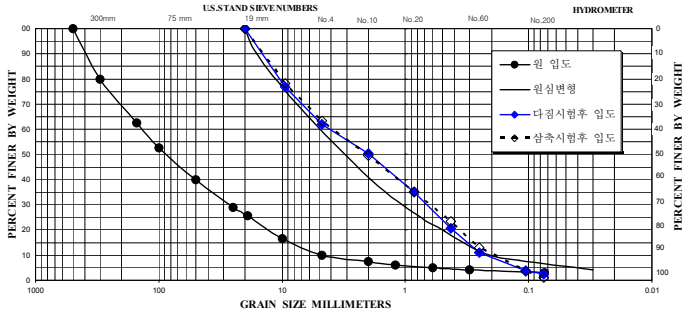

그림 2. 사력재료의 입도분포곡선

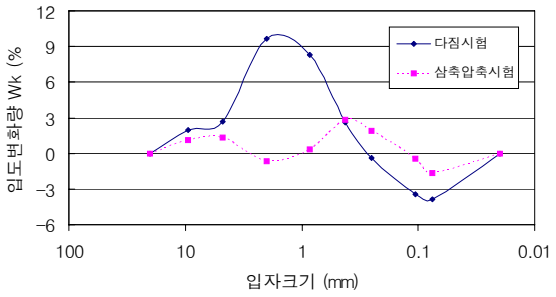

그림 3. 입도변화량 (Gravel)

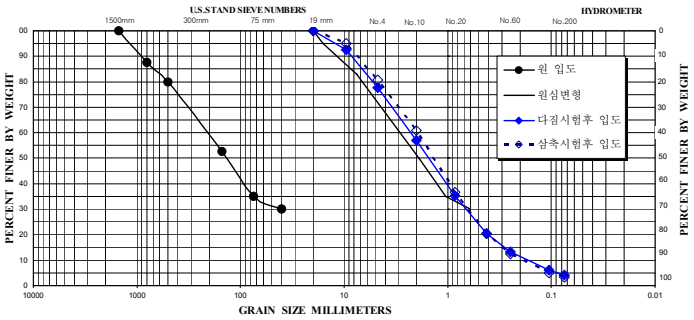

그림 4. 쇄석재료의 입도분포곡선

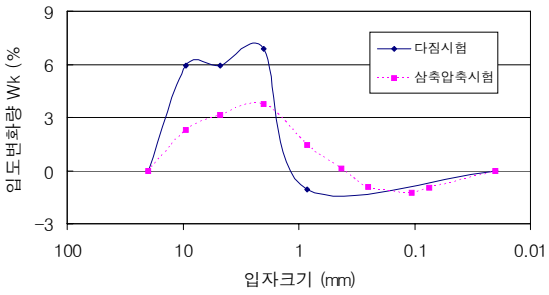

그림 5. 입도변화량 (Ballast)

표 2. Marsal의 입자 파쇄 지수

	입자 파쇄 지수 (%)		마모율 (%)	흡수율 (%)	비고
	다짐	삼축압축			
Gravel	25.3	7.5	32.1	0.65	
Ballast	18.8	10.6	29.6	0.73	

4. 결 론

본 연구에서는 사력재료와 쇄석재료의 파쇄 특성에 차이가 있는 것을 확인하였으며, 이러한 차이가 일반적으로 나타나는 현상인지에 대한 연구를 추가할 계획이다. 또한, 입자 파쇄가 추조재료의 역학특성이 미치는 영향에 대한 연구도 추진 중에 있으며 연구 성과가 정리되는 대로 보고할 계획이다.