

사력재와 석산재의 특성이 축조와 담수시 댐체 거동에 미치는 영향

Effect of Characteristics of Sand/Gravel and Rock Materials on Behavior of Dam during Construction and Impounding

서 민 우¹ Seo, Min-Woo

조 성 은² Cho, Sung-Eun

신 동 훈³ Shin, Dong-Hoon

Abstract

CFRD (Concrete Faced Rockfill Dam) has been world-widely constructed due to a lot of advantages which it has compared with rockfill dam and recently, sand/gravel materials, instead of crushed rock materials, are also utilized as a main rockfill material to overcome geological and environmental problems. In Korea, two dams using sand/gravel materials as a main fill material were designed and are being constructed. In this research, the strength and deformation characteristics of the rockfill and sand/gravel materials taken from 2 dam sites were tested by using a laboratory large triaxial testing equipment for a total of 7 cases. From the results of large triaxial and compaction tests, it was observed that two kinds of materials show a little different compaction, shear strength and deformation characteristics. It could be expected that the shear strength of sand/gravel material was not disadvantageous compared with that of rockfill materials, however, there was some difference between two materials with respect to behavior characteristics. On the other hand, smaller displacements were observed from numerical analysis based on the data from a large triaxial test when the sand/gravel is used as a main fill material compared with the case when the crushed rock material is used as a main fill material. Finally, in spite of a little different shear strength and behavior characteristic between two materials, it was concluded that it will not lead to a significant problem when the sand/gravel material is used as a main rockfill material.

요 지

최근 전 세계적으로 대부분의 댐이 CFRD 형식으로 축조되지만, 일부 지역에서는 지형적 및 환경적 특성으로 인해 석산재를 대신하여 사력재가 댐의 주 축조재료로 이용되고 있다. 최근 국내에서도 사력재를 댐의 주축조재료로 이용하도록 댐이 설계된 바 있다. 본 연구에서는 국내 현장에서 채취된 사력재 및 석산재를 대상으로 총 7 case의 대형 다짐 및 삼축시험을 수행하였다. 다짐 시험 및 삼축시험을 통해 두 재료의 다짐, 전단 강도, 변형 특성을 산정하였으며, 이로부터 두 재료 사이에 존재하는 특성 차이를 확인하였다. 실험 결과 전단강도에 있어서 사력재가 석산재에 비해 결코 불리하지 않음을 알 수 있었으나, 변형 특성은 다소 차이를 보이고 있었다. 한편 실험 결과를 이용한 댐체 거동해석에서는 주축조 영역에 강성이 큰 사력재를 사용한 경우가 석산재를 사용한 경우에 비해 변형이 작게 발생하였다. 결론적으로 사력재의 강도 및 변형특성이 석산재와는 다소 차이를 보이지만, 석산재를 대신하여 댐의 주축조재료로 사용하여도 안정성에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

Keywords : Large triaxial test, Numerical analysis, Rockfill material, Sand/gravel material, Shear strength

1 정회원, 전) 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, 현) UIUC 박사후 연수 연구원 (Member, Post-doctoral research associate at Univ. of Illinois at Urbana-Champaign)

2 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environ., Korea Water Resources Corporation, drsecho@hanmail.net, 교신저자)

3 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Institute of Water and Environ., Korea Water Resources Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근에 시공성, 경제성 및 누수에 대한 저항성 등이 뛰어난 표면차수벽형석괴댐(Concrete Faced Rockfill Dam, 이하 CFRD)이 댐 형식의 주를 이루면서, 이에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다(박동순 등, 2004a; 박동순 등, 2004b; 박한규 등, 2005; 김용성 등, 2006). 이러한 CFRD의 이점으로 인해 현재 전 세계적으로 건설이 진행 중인 많은 댐이 CFRD 형식으로 축조되지만, 일부 지역에서는 지형적 및 환경적 특성으로 인해 석산재(rockfill material)를 대신하여 사력재(sand and gravel material)가 댐의 주 축조재료로 이용되기도 한다. 최근 들어 국내에 건설되는 H댐과 B댐의 경우에도 사력재를 댐의 주축조 재료 이용하도록 댐이 설계된 바 있으며 이에 따라 국내에서도 표면차수벽형석괴댐의 사력재 적용성에 관한 연구가 수행된 바 있다(이상중, 2007).

댐 건설지역 부근의 천연재료(하상골재 등)를 그대로 축조재료로 사용하면 석산 개발로 인한 환경 훼손을 최소화시키고, 댐 부지 내 골재를 이용하므로 경제성도 도모할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 방식으로 건설되는 댐을 콘크리트차수벽형사력댐(Concrete Faced Gravelfill Dam, 이하 CFGD)이라 한다(그림 1). CFGD의 기본적인 단면 구성은 CFRD와 동일하지만(수자원학회, 2003), 주축조층(그림 1의 F층)이 기존 석산재(rockfill) 대신 사력

재(sand and gravel)로 이루어진다는 점에서 차이가 있다.

일반적으로 다짐된 사력(sand/gravel) 재료의 변형계수는 석산(rockfill)재료보다 크며, 석산재(rockfill)와 유사하게 높은 전단강도를 나타낸다. 중국에서는 2000년 기준으로 완공되었거나 시공 중인 70개의 CFRD 중 사력(sand-gravel) 재료로 축조된 댐이 13개에 달하며, 100m가 넘는 시공 중인 댐도 4개소가 있다(김범주 등, 2006). 잘 다져진 사력재료는 암재료보다 변형계수가 크면서 전단강도는 암재료와 거의 유사하기 때문에 우수한 댐 축조재료 중 하나로 인식되고 있다. 국내에서도 70, 80년대 건설된 일부 다목적댐에 사력재가 사용된 예가 있으며 현재까지 안정적인 거동을 보이고 있다. 표 1은 자갈 혹은 모래/자갈을 주축조재료로 활용한 국외 댐 건설 사례를 보여주고 있다.

표 1의 Aguamilpa 댐 재료의 경우, 구속압이 커질수록 사력재의 내부마찰각이 석산재에 비해 약 20% 크게 나타났으며, 이는 입도분포, 다짐특성 등에 의한 영향이라고 보고된 바 있다. 하지만 국내의 경우, 이전에 일부 시공되었던 CFGD 축조재료의 특성은 제대로 보고되지 않아 실무에 활용할 수 없으며, 국외 사례 역시 국내와 지질 및 지반조건이 다르기 때문에 그대로 차용하기에는 많은 제약이 따른다. 이렇듯 현재 국내에서는 국내 하상 사력재의 역학적 특성에 대한 연구가 충분히 진행되지 못한 상태에서 CFGD 축조가 진행되고 있다.

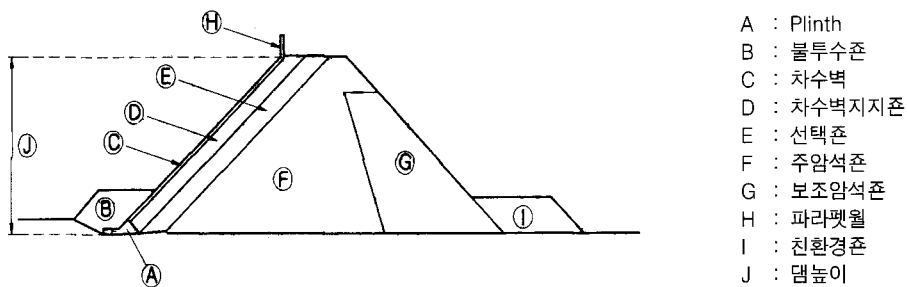


그림 1. CFRD 또는 CFGD의 대표적 단면 구성(한국수자원학회, 2003)

표 1. 국외 CFGD 사례

구분	국가	댐높이	주축조재	차수벽 두께	프린스 폭	사면 경사
Salvajina 댐	콜롬비아	148m	Gravel	0.3-0.8m	4.0-8.0m	1.4-1.5
Golillas 댐	콜롬비아	130m	Gravel	0.3-0.8m	3.0m	1.6
Aguamilpa 댐	멕시코	187m	Gravel/Ignimbrite	0.3-0.8m	-	1.4-1.5
Crotty 댐	호주	82m	Gravel/Quartzite	0.3m	3.0-4.2m	1.3-1.5
Gudongkou 댐	중국	120m	Sandy Gravel /Limestone	0.3-0.6m	4.5-10m	1.4-1.5
Gou Hou 댐	중국	70m	SandyGravel	0.3-0.6m	4.0-5.0m	1.55-1.6
M'DEZ 댐	모로코	97m	Gravel	0.3-0.6m	3.0-5.0m	1.6-1.8

본 연구에서는 사력재와 석산재 각 재료의 역학적 특성을 파악하고자 댐 현장에서 채취한 “사력재(sand and gravel material)”와 “석산재(rockfill material)”를 대상으로 대형 삼축시험을 실시하고, 그 결과를 비교 분석하였다. 그리고 삼축시험 결과를 이용하여 CFRD와 CFGD의 거동을 모사하는 수치해석을 실시하였다. 두 종류의 재료에 대한 대형 삼축시험과 수치해석 결과는 CFGD의 거동 특성을 보다 심도 있게 파악하는데 기여할 수 있을 것이다.

2. 대형 삼축시험 및 시험 재료

2.1 대형 삼축 시험 개요

최근 국내에 건설되고 있거나 건설 계획 중인 2개의 CFGD 현장에서 채취된 시료를 대상으로 대형 삼축시험이 수행되었다. 대형 삼축시험을 통해서 강도 정수와 변형 특성을 산정하였으며, 본 연구에서 수행된 삼축시험의 구체적인 내용은 표 2와 같다. 본 연구에서는 수행된 시험 결과 중 주축조준 재료의 결과를 주 분석 대상으로 하였으나, 일부 다른 존의 시험 결과(SG-4, RF-2)

도 포함하였다.

본 연구에 이용된 대형 삼축시험기는 정적 및 동적 하중 조건 모두 구현 가능하며, 공시체의 크기는 직경 300mm × 높이 620mm이다. 본 시험기에 대한 보다 자세한 설명은 서민우 등(2005)과 하익수 등(2005)에 기술되어 있다.

2.2 시험 재료 특성

일반적으로 댐 축조에 사용되는 재료의 최대 입자 크기는 500mm 이상이지만, 본 시험에서는 최대 입자 크기를 시험기 규모에 맞추어 50mm로 축소시킨 후, 원입도의 상사입도(parallel gradation technique)를 적용시켜 시료를 성형하였다. 원입도를 축소된 시험입도로 조정하는 방법에는 상사입도법, 전두입도법, 입자모형법 등이 있으며(한국수자원공사, 1999), 이 중에서 가장 널리 적용되는 방법은 상사입도법이다. 이 방법은 시험기의 크기에 맞추어 최대입경을 결정한 후, 원재료의 입도곡선을 평행 이동하여 시험입도의 균등계수가 원입도와 같도록 입도를 축소 조정하는 방법이다. 본 시험이 수행된 사력재와 석산재의 기본 물성은 표 3과 같다. 시험에

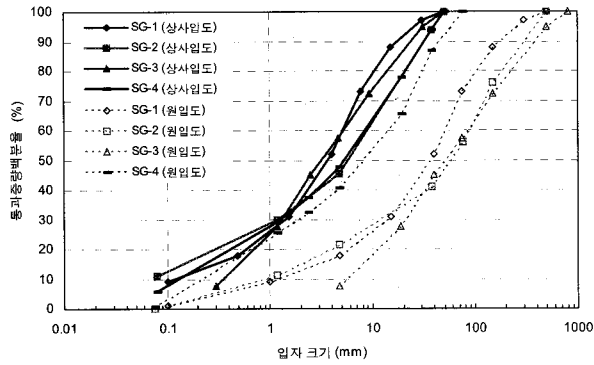
표 2. 대형 삼축시험 재료 구성

재료	구분	대상 댐	Zone	구속압(kPa)	단위중량(KN/m ³)	비고
사력재	SG-1	H댐	Zone 4	196, 392, 588	19.13	Zone 2 : 차수벽지존 Zone 3B : 주축조준 Zone 4 : 주축조준(H댐) Zone 3C : 부축조준
	SG-2	H댐	Zone 4	98, 196, 392	20.31	
	SG-3	B댐	Zone 3B	98, 196, 392	20.11	
	SG-4	H댐	Zone 2	98, 196, 392	20.31	
석산재	RF-1	H댐	Zone 3B	196, 392, 588	18.93	
	RF-2	H댐	Zone 3C	98, 196, 392	19.33	
	RF-3	B댐	Zone 3B	98, 196, 392	20.11	

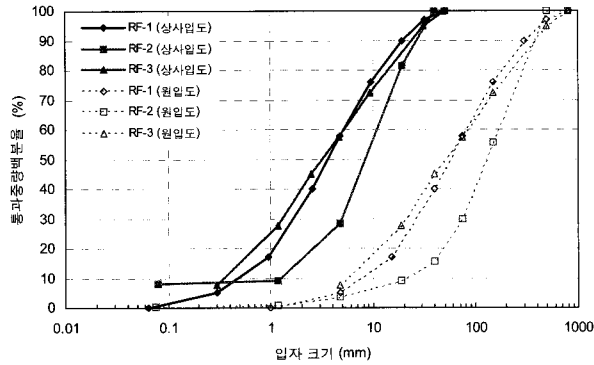
* SG : sand and gravel, RF : rockfill

표 3. 시험 재료의 기본 물성

재료	구분	비중	마모율(%)	흡수율(%)	균등계수	곡률계수
사력재	SG-1	2.48	24.3	2.9	52.9	3.0
	SG-2	2.51	24.5	2.12	112.5	2.3
	SG-3	2.61	34.0	1.06	15.0	0.8
	SG-4	2.51	26.9	2.16	69.2	1.5
석산재	RF-1	2.50	21.6	2.82	12.1	1.2
	RF-2	2.51	25.3	1.90	9.2	1.6
	RF-3	2.63	32.1	1.09	15.8	1.0

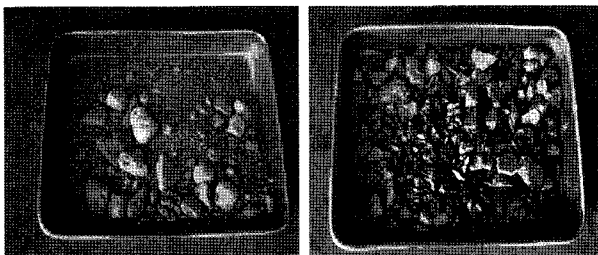


(a) 사력재



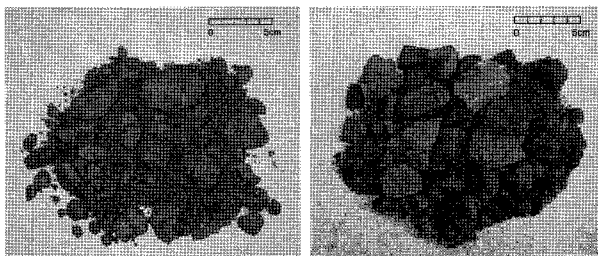
(b) 석산재

그림 2. 시험 재료의 원입도 및 상사입도 분포



(a) 사력재 (B덤)

(b) 석산재 (B덤)



(c) 사력재 (H덤)

(d) 석산재 (H덤)

그림 3. 사력재 및 석산재 모습(B덤 및 H덤)

적용된 원입도와 상사 입도 분포는 그림 2에 도시하였으며, 사력재 및 석산재의 모습은 그림 3과 같다.

2.3 다짐 특성

삼축시험을 시작하기 전에 각 재료의 다짐 특성을 평가하기 위해서 대형 다짐시험을 실시하였다. 다짐시험

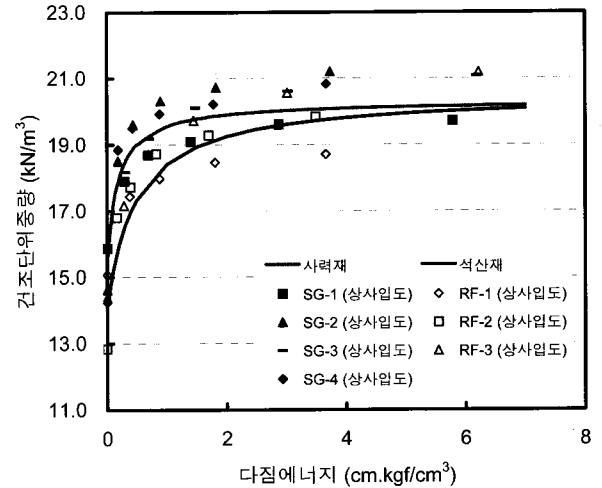


그림 4. 다짐 시험 결과

은 대형 자동 다짐장치를 사용하여 이루어졌으며, 동일한 다짐 시험기는 공시체 제작에도 이용된다. 대형 다짐 장치의 램머 중량은 16kgf, 낙하고는 50cm였으며, 다짐 회수와 다짐 층수는 재료에 따라 적절히 조절하였다.

다짐 순서는 먼저 다짐 몰드에 재료를 투입한 후 소정의 다짐층수와 다짐횟수를 변화시키면서, 즉 다짐 에너지를 변화시켜 다짐을 수행한 후 밀도를 측정한다. 본 연구에서는 다짐에너지를 0~7.0 cm·kgf/cm³로 변화시켜가며 다짐시험을 실시하고, 이로부터 다짐에너지와 밀도의 관계를 구하였다. 그리고 사력재와 석산재 각각의 다짐 결과를 평균하여 재료별 평균 다짐에너지와 단위중량의 평균 추세식을 구하였다(그림 4).

$$\begin{aligned} \cdot \text{사력재} : \text{건조단위중량 (kN/m}^3\text{)} \\ = 15.50 + \frac{E}{0.0385 + 0.2081 \times E} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{석산재} : \text{건조단위중량 (kN/m}^3\text{)} \\ = 14.13 + \frac{E}{0.0758 + 0.1561 \times E} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $E(\text{cm} \cdot \text{kgf}/\text{cm}^3)$ 는 다짐에너지

그림 4는 다짐에너지 변화에 따른 건조단위 중량을 보여주고 있다. 그림 4로부터 평균 극한 최대 건조단위 중량은 사력재와 석산재 모두 약 20.60kN/m³로 유사하게 나타났다. 하지만 약 3.0cm·kgf/cm³ 이하의 낮은 다짐 에너지에서는 사력재가 석산재보다 훨씬 큰 건조 단위 중량을 보이고 있다. 이는 사력재가 석산재에 비해 세립분을 많이 포함하고 있기 때문에 초기의 낮은 다짐 에너지에도 비교적 밀한 상태가 조성되어 나타난 결과로 보인다. 하지만 석산재의 경우, 초기 다짐 에너지로

는 넓은 간극을 채울 만큼 재료가 충분히 파쇄되지 않아 상대적으로 낮은 단위중량을 보였지만, 다짐에너지가 일정 수준 이상으로 증가하면 파쇄로 인해 세립분이 증가하여 간극이 밀해져 결국 사력재와 유사한 최대 단위중량이 조성되었다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 응력 변형을 관계

재료에 따른 전단 거동 특성을 파악하기 위해 대형 삼축시험을 통해 응력-변형률 곡선을 구하였다. 그림 5

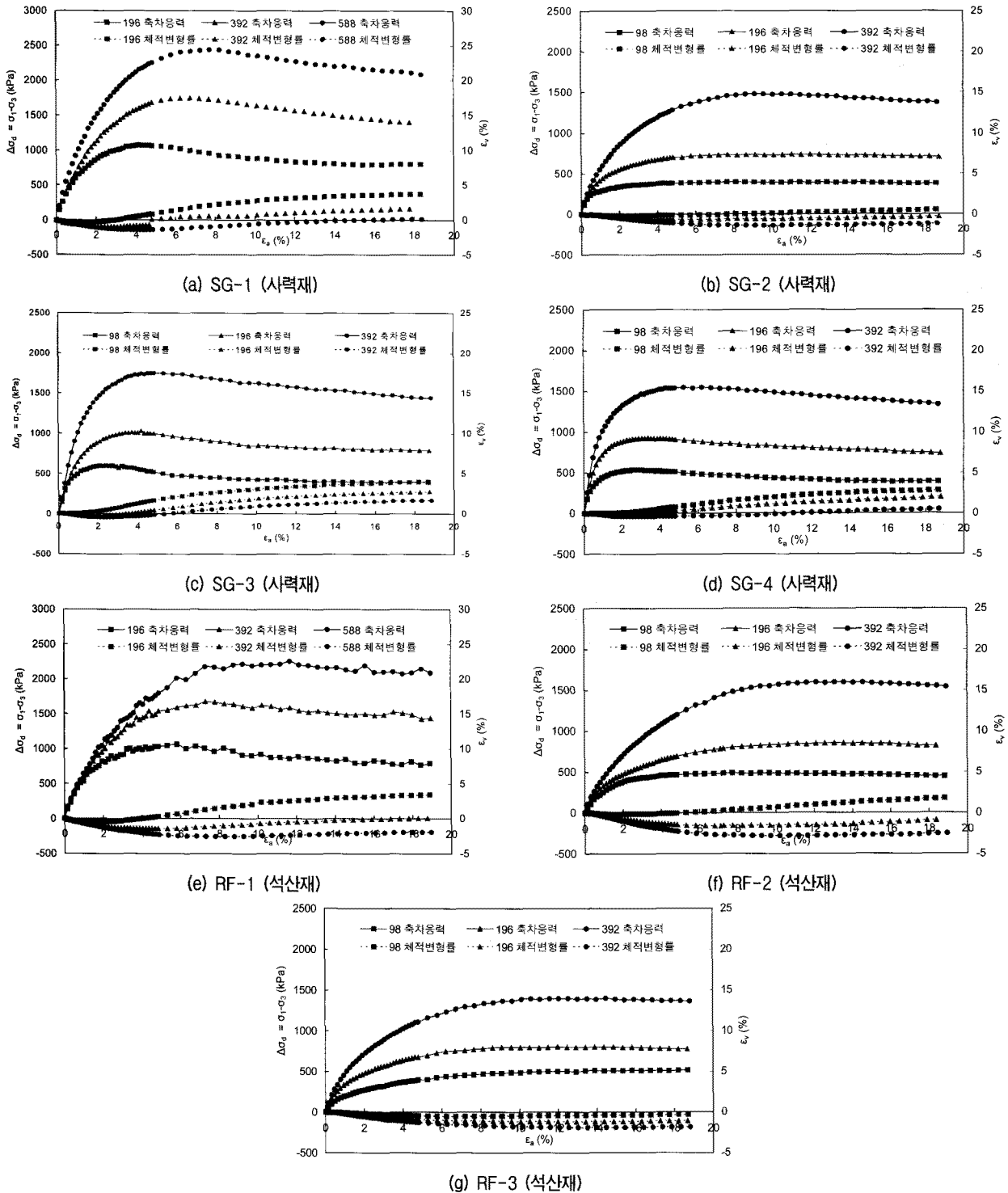


그림 5. 사력재와 석산재의 응력-변형률 곡선(구속압 단위: kPa)

는 각 재료별로 3개의 축차응력과 변형률의 관계를 보여주고 있다.

그림 5를 살펴보면 두 재료의 응력 변형률 관계가 다소 차이를 보임을 확인할 수 있다. 사력재의 경우(그림 5(a)~(d)), 초기 변형률에서 전단 강도가 빠르게 증가하는, 즉 상대적으로 큰 강성(stiffness)을 나타내고 있으며, 부피 변형 역시 석산재에 비해 큰 양(+)의 다일러턴시(dilatancy, 부피 팽창)를 보임을 알 수 있다. 또한 사력재에서는 어느 정도 뚜렷한 최대값(peak)을 확인할 수 있지만, 석산재는 대부분 변형이 진행될수록 강도는 일정한 값에 수렴해가는 모습을 나타내고 있다.

사력재의 이러한 거동 특성은 사력재의 재료적 특성에서 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 사력재는 장기간에 걸쳐 하상에 존재하면서 약한 부분이 침식과정을 거쳐 자연스럽게 모양이 둥글게(round)되며, 강도면에서도 비교적 큰 값을 지니게 된다. 이러한 재료적 특성으로 인해 전단 시 낮은 파쇄율과 높은 입자간 재배열(re-arrangement) 경향을 유발시키며, 종합적으로 큰 전단강도와 체적변형을 나타낸다.

한편 SG-2 사력재는 다른 사력재와는 조금 다른 곡선 형태를 보이고 있는데, 즉 다른 사력재에 비해 상대적으로 다소 작은 강성(stiffness)을 보이고, 또한 최대값 이후의 강도 감소 현상도 두드러지게 나타나지 않고 있다. 이는 입도분포 상의 상대적으로 큰 균등계수(>100)와 다소 높은 세립분 함유량(그림 2(a) 참조)이 영향을 미친 것으로 판단된다. SG-2의 경우는 세립분 함유량이 사력재의 강성에 영향을 미침을 보여주는 결과라고 할 수 있으며, 따라서 사력재의 현장 시공 시 세립분 함유량의 관리에 특별히 주의를 기울여야 할 것이다.

3.2 전단 강도 특성 비교

댐 축조재료로 사력재를 이용할 경우, 통상적으로 사력재가 석산재에 비해 낮은 전단강도를 보일 것으로 예상하여 안정성 문제가 제기된다. 이러한 문제를 불식시키기 위해서는 많은 축적된 자료의 제시를 통해 사력재의 역학적 특성과 축조재료로서 사력재의 구조적 안정성을 확보할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 활용 가능한 국내 자료의 분석을 통해 이러한 문제에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다. 표 4는 대형 삼축시험을 통해 측정된 전단강도 정수를 제시하고 있으며, 대형 삼축시험에서 가해진 구속압은 98~588kPa이었다.

표 4에서와 같이 사력재와 석산재의 강도 특성을 비교해보았다. 본 연구의 대상이 된 총 7개 재료는 평균 강도를 기준으로 사력재가 석산재에 비해 약 2° 정도 큰 마찰각을 보여, 강도면에서도 사력재가 석산재에 비해 결코 불리하지 않음을 확인하였다. 기존 실험 및 설계 자료에 의하면(김범주 등, 2006) 석산재와 사력재가 거의 유사한 크기의 강도를 보인다고 발표된 바 있는데, 표 4의 결과는 이러한 연구사례와도 잘 일치한다고 할 수 있다.

한편 앞서 다른 사력재와 약간 다른 거동 특성을 보였던 SG-2 역시 평균값과 거의 유사한 마찰각을 보이고 있어, 입도분포 상의 차이가 재료의 전단강도에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 한편 석산재 중 RF-2는 다른 석산재에 비해 다소 큰 마찰각을 보이고 있는데, 이는 SG-2와는 반대로 상대적으로 입자 크기가 큰 조립재료가 많이 포함되어(그림 2(b)) 나타난 결과로 판단된다.

표 4. 사력재와 석산재의 전단 강도

재료	구분	대상 댐	강도정수		구속압(kPa)	단위중량(kN/m ³)
			내부마찰각(°)	점착력(kPa)		
사력재	SG-1	H댐	39.4	91.20	196, 392, 588	19.13
	SG-2	H댐	40.4	4.90	98, 196, 392	20.31
	SG-3	B댐	41.3	52.96	98, 196, 392	20.11
	SG-4	H댐	39.0	53.54	98, 196, 392	20.31
	평균		40.37	49.69	-	19.85
석산재	RF-1	H댐	37.0	119.64	196, 392, 588	18.93
	RF-2	H댐	40.8	26.48	98, 196, 392	19.33
	RF-3	B댐	37.0	52.96	98, 196, 392	20.11
	평균		39.39	65.27	-	19.37

3.3 변형 특성

대형 삼축압축 시험 결과로부터 조립재료의 거동 특성을 비교적 잘 표현하는 것으로 알려진 Hyperbolic model의 parameter를 산정하였으며, 이를 통해 사력재와 석산재의 변형특성을 비교하였다. 접선변형계수는 주응력차 ($\sigma_1 - \sigma_3$)와 축변형률 ϵ_a 의 관계를 나타내는 곡선으로부터 구할 수 있으며 체적변형계수는 주응력차 ($\sigma_1 - \sigma_3$)와 체적변형률 ϵ_v 의 관계를 나타내는 곡선으로부터 응력-변형률 곡선이 쌍곡선과 비슷하다고 가정하여 구할 수 있다. 변형계수의 산정 절차는 서민우 등(2006)과 Duncan과 Chang(1970)에 자세히 기술되어 있다.

재료의 강성(stiffness)을 나타내는 초기 탄성계수의 경우, 사력재 중 일부(SG-2)에서는 낮은 값을 보이기는 하지만 대체적으로 사력재가 석산재에 비해 큰 값이 측정되었다. 평균값을 기준했을 때 역시 사력재가 석산재보다 2배 큰 초기 탄성계수를 보이고 있다. 또한 응력 수준에 따른 전단강도 변화, 즉 구속압 증가에 따른 강도 감소 효과를 보여주는 $\Delta\phi$ 값은 석산재에서 상대적

으로 큰 값이 산정되었으며, 이는 석산재가 사력재보다 응력 증가에 따른 강도 감소 현상이 두드러지게 발생하는 것을 의미한다.

한편 부피변형계수, B 값을 통해 두 재료 사이의 전단 시 부피 변형 특성을 비교하였다. 표 5에서 볼 수 있듯이 사력재의 부피변형 계수(평균 138MPa)는 석산재(평균 35MPa)에 비해 약 4배 이상 큰 값이 산정되었다. 이는 사력재가 최대값 이전 범위에서 동일한 축차응력이 발휘되는데 석산재에 비해 부피 변형이 작게 발생함을 의미한다고 할 수 있다. 하지만, 대변형률 범위로 갈수록 사력재가 석산재에 비해 상당히 큰 체적팽창(+의 다일러턴시) 현상을 보이고 있다(그림 5 참조).

사력재에서 보이는 상대적으로 큰 초기 탄성계수와 대변형률에서의 높은 부피 팽창성(dilatancy)은 댐체 내부 변형이 크게 발생하면 전체 안정성에 불리하게 작용할 수 있다. Kim 등(2008)에 의하면 축조에 의한 CFRD의 침하량은 기존의 계측자료로부터 댐 높이가 100m이하일 경우 보통 댐 높이의 1%이하이나 100m이상일 경우에는 2.29%정도의 침하량을 보이는 경우도 있으며 댐

표 5. 사력재 및 석산재의 변형 특성(Hyperbolic parameter)

시험 재료 (대상 댐)		구속응력 (kPa)	E_s (kPa)	ϕ_0 (°)	$\Delta\phi$ (°)	K	n	R_f	B (kPa)	K_b	m	
사력재	SG-1	H댐	196	104343	50.2	10.0	722	0.43	0.72	67665	855	-0.37
			392	101107					0.68	44718		
			588	178285					0.80	46483		
	SG-2	H댐	98	83111	41.7	1.8	834	-0.07	0.93	79728	784	-0.38
			196	75432					0.82	55211		
			392	75432					0.75	47366		
	SG-3	B댐	98	163477	48.9	8.5	1,617	0.13	0.80	-	3,516	-0.62
			196	163477					0.82	224180		
			392	196133					0.71	145726		
	SG-4	H댐	98	138176	47.2	8.8	1,439	0.41	0.83	481310	4,485	-0.91
			196	196133					0.85	194858		
			392	245166					0.79	135429		
평균			142916	47.0	7.3	-	-	0.79	138469	-	-	
석산재	RF-1	H댐	196	91692	51.1	12.7	1028	-0.09	0.74	39128	729	-0.58
			392	97086					0.73	30400		
			588	81003					0.67	25791		
	RF-2	H댐	98	55093	45.3	5.4	519	-0.08	0.80	52661	445	-0.77
			196	40864					0.87	17553		
			392	49033					0.65	18044		
	RF-3	B댐	98	21084	46.0	10.1	238	0.77	0.79	43639	451	0.01
			196	49033					0.82	45797		
			392	61292					0.71	44228		
	평균			60223	47.35	8.88	-	-	0.76	35205	-	-

수에 의한 침하량은 댐 높이의 0.02~0.596% 정도인 것으로 알려져 있다. 즉, 통상적으로 댐체 변형은 그리 크지 않기 때문에 이러한 사력재의 변형 특성이 댐 구조물의 안정성에는 큰 영향은 미치지 않을 것으로 판단된다.

4. CFRD/CFGD 거동 특성 비교

4.1 해석 개요

주축조 재료의 특성에 따른 축조 및 담수시의 댐체의 거동 특성을 알아보기 위하여 H댐에 대한 거동해석을 수행하였다. H댐의 형식은 사력재를 이용한 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐으로 댐 유역에 넓게 분포한 하상 사력재를 주축조재료로 하는 국내에서 최초로 도입하는 형식이다. 높이는 45m이며, 댐체의 단면 구성은 그림 6과 같이 Concrete Face Slab, Filter Zone, Gravel Fill Zone, Rock Fill Zone으로 구성되었고, 댐 하류사면에는 댐체와 주변 자연과의 조화를 고려하여 환경친화 Zone을 설치하였다. 상·하류면의 경사는 1:1.4(댐 마루폭 8.5m)이며, 댐축조 후 하류사면에 설치되는 친환경층의 경사는 1:2.0이다.

수치해석을 위해서는 무엇보다도 축조재료의 응력-

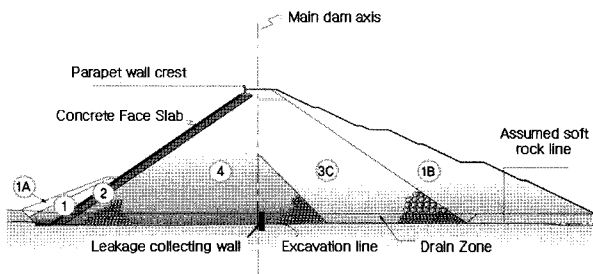


그림 6. 해석단면

표 6. Hyperbolic 모델 변수

ZONE	γ_d (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	hyperbolic model parameters							
				E (kPa)	K	n	R_f	K_b	m	ν	
1A	Random Fill	17.66	9.81	40.0	49050	540	0.43	0.64	150	0.34	0.25
1	Impervious Fill	18.15	14.72	35.0	29430	500	0.39	0.67	300	0.05	0.26
2	Bedding*	20.31	53.54	39.0	193208	1,439	0.41	0.82	4,485	-0.91	0.40
4	Main Gravel Fill* (사력재)	20.31	5.30	40.4	78019	834	-0.07	0.83	784	-0.38	0.39
3C	Rock Fill* (석산재)	19.33	26.19	40.8	48344	519	-0.08	0.76	445	-0.77	0.30
1B	Random fill	18.64	9.81	36.0	44145	400	0.35	0.70	400	0.20	0.30

* Note : Values are obtained from large triaxial tests.

변형률을 구성방정식으로 모델링하는 것이 가장 중요한 과제이다. 조립재료로 축조되는 댐 구조물의 경우 가장 많이 적용되고 있는 구성방정식은 쌍곡선 형태로 표현된 Hyperbolic 모델이다(Kondner, 1963; Duncan과 Chang, 1970). 쌍곡선 모델은 그 동안의 많은 적용을 통하여 자료 및 경험에 축적되어 있다는 장점이 있고 비교적 간단한 실험을 통하여 모델 내에 포함된 매개 설계변수들을 구하거나 추정할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 대형 삼축압축시험 및 과거 타댐에서 수행한 시험결과, 문헌자료 등을 토대로 거동해석에 필요한 모델변수를 아래의 표 6과 같이 얻었다.

댐체의 침하나 수평변형 거동은 탄성계수나 포아송비와 같은 재료의 변형에 관한 변수에 의해 크게 좌우되며, 상대적으로 강도정수(내부마찰각 및 점착력)의 영향은 작은 것으로 알려져 있다.

대형 삼축압축시험의 결과로부터 초기접선탄성계수 E_t 는 Sand/Gravel(사력재)가 Rockfill(석산재)보다 크게 나타났다. 이는 문헌상에 보고된 것과 유사한 경향으로 동일한 응력조건이라면 사력재료로 축조된 댐의 변형량이 석산재료로 축조된 댐 보다 작을 것이라 것을 예상할 수 있다.

본 연구에서는 Zone 4의 주축조재료로 사력재료가 사용되는 CFGD(Case I)의 거동을 해석하였고 비교를 위하여 Zone 4의 재료로 Zone 3C와 같은 석산재료가 사용되는 CFRD(Case II)에 대하여 거동해석을 수행하였다. 이때 연구목적 상 축조재료의 변동에 따른 단면의 재구성은 고려하지 않았으며 단지 물성의 변동만을 고려하였다.

거동해석은 유한요소 해석 프로그램인 SIGMA/W를 사용하여 수행하였으며, 댐의 축조과정을 재현하기 위하여 증분방법(Incremental method)을 사용하였다.

4.2 축조직후의 거동

해석에 사용된 유한요소망은 1795개의 절점과 1735개의 4절점요소로 구성되었으며 축조는 46단계에 걸쳐 모사되었다. 거동해석을 통하여 축조 직후에 댐축에서의 변위 및 응력 분포 등을 검토하였다.

댐 완공 직후 댐체는 자중에 의하여 침하가 발생하고 상·하류 사면을 따라 변위가 발생하는 것으로 해석되었다. 그림 7은 축조 직후의 침하량 분포를 나타낸 것이다. Case I의 경우에 강성이 작은 Rockfill zone(Zone 3C)에서 Sand/Gravel Zone(Zone 4)보다 상대적으로 더 큰 변형이 유발되어 최대변위가 발생(약 13cm)하였고, 발생 위치는 댐체 중간 높이 보다 약간 위쪽에 발생하는 것으로 나타났다. Case II의 경우에는 댐체 높이의 중앙부에서 약 18cm의 침하가 발생하였다.

그림 8은 수평변위 분포를 나타낸 것으로서 최대변위는 대략 댐체의 중간 높이보다 약간 아래에서 발생하였다. 수평변위의 형상은 댐축을 중심으로 상류측과 하류측으로 대략 대칭적인 수평변위가 발생하였으며 Case I의 경우에는 강성이 큰 Zone 4의 영향으로 상류측의 변형이 Case II보다 작은 반면, 하류측의 변형은 Case II보다 크게 발생하였다.

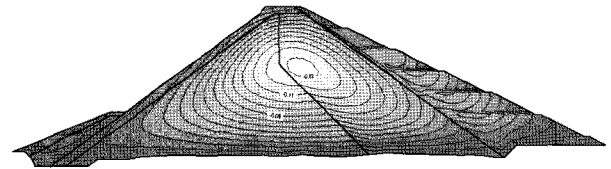
그림 9는 Case I과 Case II에 대한 댐축에서의 연직변위 및 수평변위를 비교한 것으로 Case II의 경우가 더 큰 변위가 발생하였고 최대변위 발생위치도 서로 약간 다를 수 있다.

그림 10은 댐의 전단응력분포를 나타내며 Case I의 경우에 더 큰 전단응력이 발생하였고 강성이 작은 Rockfill 영역에서 강성이 큰 Sand/Gravel 영역으로 응력이 전이되는 현상이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 그림 11은 최대주응력과 최소주응력의 차이로 계산되는 최대전단응력($\sigma_1 - \sigma_3$)을 나타내는 것으로 Case II의 경우에 최대값이 크게 나타났음을 알 수 있다.

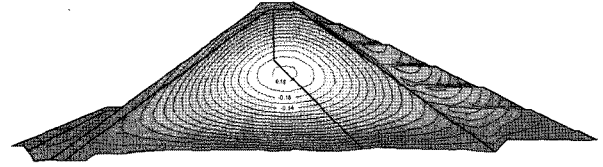
해석결과 Case I, Case II 모두 항복영역은 상·하류의 표면에 미미하게 발생하여 전체적인 댐체의 안정에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

4.3 담수시 거동

담수의 영향은 표면차수벽에 작용하는 수압과 댐 기초에 작용하는 수압으로 고려할 수 있다. 표면차수벽은 완전 불투수성으로 가정되므로 담수에 의해 정수압을

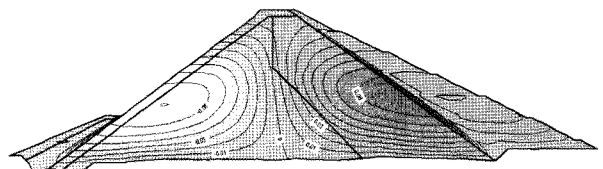


(a) Case I

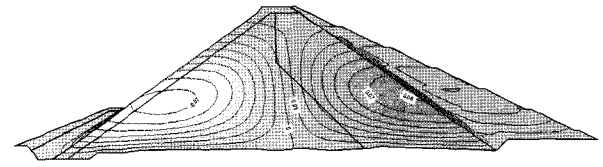


(b) Case II

그림 7. 축조시 연직변위(m)

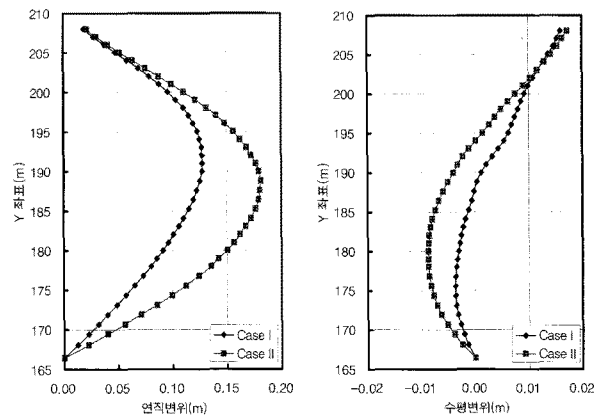


(a) Case I



(b) Case II

그림 8. 축조시 수평변위(m)



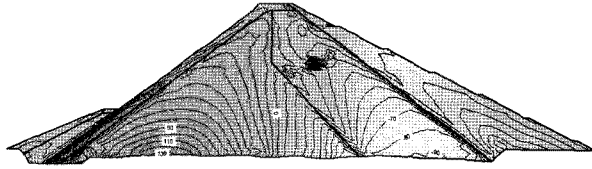
(a) 연직변위

(b) 수평변위

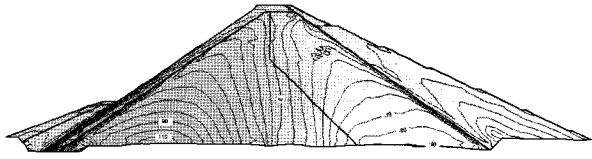
그림 9. 축조시 댐축에서의 변위(m)

받는 것으로 모델링하였으며 댐 기초의 강성이 댐체보다 월등히 커서 변위가 작으므로 기초에 작용하는 수압은 무시하였다.

담수 시 수압에 의하여 댐체에 발생하는 변위의 방향은 상류측에서 하류측으로 향하는 것으로 나타났다. 이때 변위가 주로 댐체의 상류측에서 크게 발생하는 것은

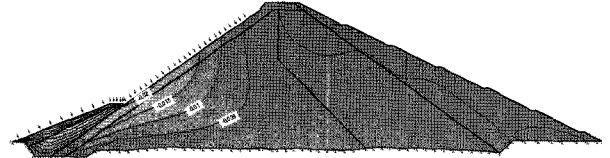


(a) Case I

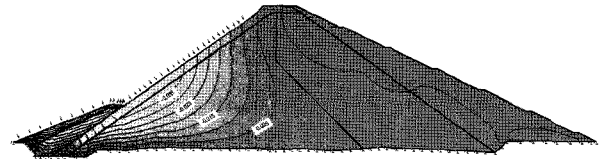


(b) Case II

그림 10. 축조시 전단응력(kPa)

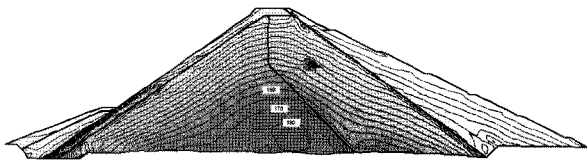


(a) Case I

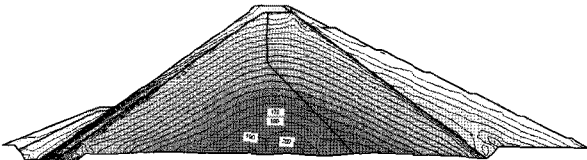


(b) Case II

그림 12. 담수시 연직변위 증분(m)

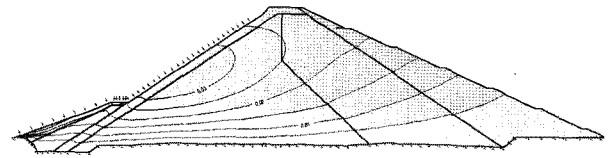


(a) Case I

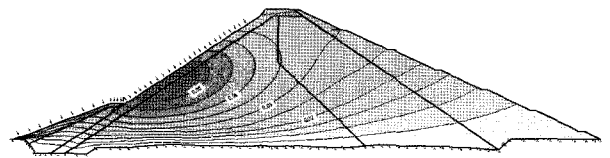


(b) Case II

그림 11. 축조시 최대전단응력(kPa)



(a) Case I



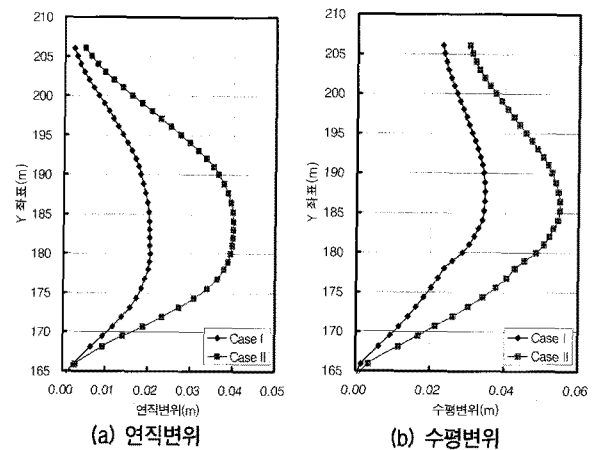
(b) Case II

그림 13. 담수시 수평변위 증분(m)

댐체의 상류측이 정수압에 직접적으로 영향을 받기 때문이며 변위가 댐체의 하단부에서 거의 발생하지 않는 것은 댐체가 기초암반에 의해 구속되어 있기 때문이다.

그림 12는 담수에 의하여 증가하는 침하량의 증분분포로서 수압에 의하여 댐체의 상류측이 집중적으로 영향을 받음을 보여주고 있다. 한편 담수에 의한 수평변위는 그림 13과 같이 댐 본체 하류측까지 발생하는 것으로 나타났다. 해석결과(그림 12, 그림 13)에서 알 수 있듯이, 댐체에 작용하는 물에 의한 하중을 담당하는 주축조 영역의 강성이 큰 Case I의 경우가 Case II의 경우보다 담수에 의한 추가 변형이 작게 나타났다.

그림 14는 Case I과 Case II에 대하여 차수벽이 설치된 상류사면에서의 연직변위 및 수평변위를 비교한 것으로 Case II의 경우가 수압에 의하여 훨씬 큰 변위가 발생하였다. 담수에 의해 상류측의 변위가 크게 발생하면 차수벽의 균열, 이음부의 벌어짐 및 차수벽과 댐체의 변형거동 차이로 인한 차수벽과 차수벽 지지층의 분리 등의 결합이 발생할 가능성이 있으므로 댐체의 안정성 면에서 불리하게 작용하게 된다.



(a) 연직변위

(b) 수평변위

그림 14. 담수에 의한 상류사면에서의 변위(m)

5. 결론

본 연구에서는 댐의 축조재료로 이용되는 사력재 및 석산재의 역학적 특성을 비교하기 위하여, 국내에 축조되는 2개 댐 현장에서 채취한 재료를 대상으로 대형 삼축시험을 수행하였다. 사력재 4종류, 석산재 3종류, 총

7가지 재료에 대한 대형 삼축시험이 수행되었으며, 실험 결과를 바탕으로 댐체 변형을 모사하는 수치해석을 수행하여 사력재와 석산재의 재료적 특성이 댐체 거동에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

본 연구를 통해 얻은 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 다짐 시험 결과 최대 건조단위중량은 사력재와 석산재 모두 약 20.6kN/m²로 유사하게 나타났다. 하지만 각 시험 재료의 파쇄 특성 및 세립분 함량의 차이로 인해 약 3.0cm·kgf/cm³ 이하의 낮은 다짐 에너지에서는 사력재가 석산재보다 훨씬 큰 건조 단위 중량을 보였다. 그러나, 석산재 역시 다짐에너지가 일정 수준 이상으로 증가하면 파쇄로 인해 세립분이 증가하여 결국 사력재와 유사한 최대 단위중량이 조성되었다.
- (2) 두 재료의 전단 강도는 평균 강도를 기준으로 사력재가 석산재에 비해 약 2° 정도 큰 마찰각을 보였으며, 이로부터 강도면에서도 사력재가 석산재에 비해 결코 불리하지 않음을 확인하였다.
- (3) Hyperbolic 모델의 parameter를 산정하여 각 재료의 변형특성을 비교하였으며, 재료의 강성(stiffness)을 나타내는 초기 탄성계수의 경우, 사력재 중 일부(SG-2)에서 낮은 값을 보이는 하지만 대체적으로 사력재가 석산재에 비해 큰 값이 측정되었다. 평균값을 기준했을 때 역시 사력재가 석산재보다 큰 초기 탄성계수를 보였다.
- (4) 부피변형계수, 즉 B값을 통해 부피 변형 특성을 비교하였다. 그 결과 사력재의 부피변형 계수 평균값이 사력재에 비해 약 4배 이상 크게 나타났으며, 대변형을 범위로 갈수록 사력재가 석산재에 비해 상당히 큰 체적팽창(+의 다일러턴스) 현상을 보였다.
- (5) 거동해석에 의하면 주축조 재료로 변형계수가 큰 사력재를 사용하는 경우가 석산재를 사용하는 경우보다 축조 및 담수 시에 변형에 대한 저항성이 컸다. 그러나, 댐의 축조고가 높아지고 작용하는 축차응력 수준이 증가하여 최대값 부근에 이르면 이후의 응력-변형률 곡선의 경향이 다르게 나타나므로 재료에 따른 댐체의 거동 또한 다르게 나타날 것으로 판단된다. 따라서, 이에 따른 댐체의 거동에 대한 추후 연구가 필요하다.
- (6) 사력재에서 보이는 상대적으로 큰 초기 탄성계수와 대변형률에서의 높은 부피 팽창성(dilatancy)은 댐체 내부 변형이 크게 발생하면 전체 안정성에 불리하게

작용할 수 있지만, 기존 계측 및 수치해석 결과 통상적으로 댐체 변형은 그리 크지 않기 때문에 이러한 사력재의 변형 특성이 댐 구조물의 안정성에는 큰 영향은 미치지 않을 것으로 판단된다.

- (7) 사력재와 석산재의 특성이 축조직후의 거동과 담수시 거동 외에도 지진시의 동적거동과 축조 후 장기 거동특성에도 영향을 미칠 것으로 판단되나, 아직까지는 사력재와 석산재의 동적특성과 장기 변형특성에 대한 실험적 연구결과가 미미한 상태이므로 향후 이에 대한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 김범주, 임은상, 임정열, 박한규, 임희대 (2006), “콘크리트표면차수벽형 사력댐(CFGD)의 적용성 고찰”, *한국지반공학회 봄학술 발표회*, pp.818-823.
2. 김용성, 김범주, 신동훈, 박한규 (2006), “CFRD의 담수 후 침하 거동 예측”, *대한 토목학회 논문집*, Vol.26, No.3C, pp.209-218.
3. 박동순, 신동훈, 김형수, 임정열, 박한규 (2004a), “CFRD의 현재와 미래”, *지반 한국지반공학회지*, Vol.20, No.7, pp.16-27.
4. 박동순, 신동훈, 김형수, 임정열, 박한규 (2004b), “CFRD의 거동 특성 이해”, *지반 한국지반공학회지*, Vol.20, No.8, pp.6-16.
5. 박한규, 김용성, 서민우, 임희대 (2005), “콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐의 축조 중 침하거동 특성-대국댐을 중심으로-”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.21, No.7, pp.91-105.
6. 서민우, 신동훈, 하익수, 박한규 (2006), “대형 삼축압축시험을 통한 석산재와 사력재의 거동 특성 평가”, *한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집*, pp.844-853.
7. 서민우, 하익수, 정우성, 김범주 (2005), “대형 지반 시험장비를 이용한 댐축조재의 전단 강도 평가”, *대한토목학회 정기학술대회 논문집*, pp.5352-5355.
8. 이상중 (2007), *표면차수벽형 Rockfill 댐의 사력재 적용성에 관한 연구*, 석사학위논문, 충남대학교.
9. 하익수, 신동훈, 정우성, 김우구 (2005), “입경이 큰 조립재료의 강도정수 산정을 위한 국내 대형 삼축압축시험 수행 사례”, *지반 한국지반공학회지*, 한국지반공학회, Vol.21, No.9, pp.21-32.
10. 한국수자원공사(1999), *댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화 방안 연구*, 한국수자원공사 연구보고서, WRR1-GT-99-3, pp.16-18.
11. 한국수자원학회 (2003), *댐설계기준*, 219p.
12. Duncan, J. M., and Chang, C. Y. (1970), “Nonlinear analysis of stress and strain in soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol.96, No.SM5, pp.1629-1654.
13. Konder, R. L. (1963), “Hyperbolic Stress-Strain Responses: Cohesive Soils” *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.89, No.SM1, pp.115-143.
14. Kim, Y. S., and Kim, B. T. (2008), “Prediction of relative crest settlement of concrete-faced rockfill dams analyzed using an artificial neural network model”, *Computers and Geotechnics*, Vol.35, pp.313-322.

(접수일자 2007. 12. 11, 심사완료일 2008. 6. 17)