

대형전단시험을 통한 댐제체용 조립재료의 경험적 설계정수에 대한 평가 Evaluation of Empirical Design Factors of Coarse Grained Material through Large Scale Shear Test

오기대¹⁾, Gi-Dae Oh, 김경열²⁾, Kyoung-Yul Kim, 이대수³⁾, Dae-Soo Lee

¹⁾ 한전 전력연구원 일반연구원, .M.T.S, Korea Electric Power Research Institute(ogd@kepri.re.kr)

²⁾ 한전 전력연구원 선임연구원, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

³⁾ 한전 전력연구원 책임연구원, P.T.S, Korea Electric Power Research Institute

SYNOPSIS : The coarse grained materials are used in various construction field such as express way back fill, Dam etc. Especially, for dam construction, a huge amount of rock fill materials are needed, so around domestic stony mountains are generally developed to produce materials. Not an accurate theory, but design criteria is based on empirical factors that were constructed in advance for design of dam especially Concrete Face Rockfill Dam(CFRD). Considering the past facts, the modified design criteria are essential in the future with more theoretical and experimental ways.

In this study, large scale direct shear tests are performed with various relative density conditions on coarse grained material of Yecheon area to compare test results and general CFRD design factors.

Key words : Coarse grained materials, Large scale direct shear test, CFRD design criteria, Relative density

1. 서 론

일반적으로 댐시공시 엄청난 양의 성토재료가 필요함에 따라서 현장주위 석산을 개발하여 그 성토재료를 확보하는 것이 일반적이다. 따라서 지질구조상 암석자원이 풍부한 우리나라에서는 표면차수벽형 석괴댐(C.F.R.D)이 안정성과 경제성 측면에서 상당한 장점을 가지고 있으며, 최근 축조된 댐들의 모두가 CFRD형식으로 축조되었다. 이에 반해 CFRD의 설계기준들이 확고한 이론에 근거하기 보다는 실제 구조물의 거동상태에 따른 분석결과와 현장에서의 시공경험에 기초를 두고 발달해옴에 따라서 비합리적이고 비경제적인 측면을 상당부분 포함하고 있는바, 실험적 검증을 통한 수정보완이 향후 절실히 필요하다.

이에, 본 연구는 예천지역의 석산모암을 파쇄하여 생산된 조립재료를 사용하여 상대밀도 50, 70, 90 %에 따라서 대형전단시험을 수행하고 그 결과 값을 기초로 기존의 CFRD 설계값과 비교평가해 보고자 한다.

2. CFRD 설계기준

CFRD 설계시, 제체용 재료의 특성을 규명하여 시공에 필요한 소요 입도와 밀도 구하여야 하지만, Cooke(1987)가 "CFRD의 설계는 본질적으로 경험적이고, 경험과 선례에 기초를 둔다."라고 주장한 바와 같이 현재 CFRD의 설계는 선행사례에 기초를 두고 수행되는 있는 것이 사실이다.

국내 댐설계기준(수자원학회, 2005)은 CFRD 단면(그림 1)의 상하부 사면 경사, 각 존별 입도, 최대 입경 및 투수계수 등에 대해서 대략적인 기준을 제시하고는 있지만, 설계정수들의 상당부분을 선행 시공자료 및 설계자의 판단에 맡겨두고 있다. 지역별 조립재료의 특성이 상이함에도 불구하고 대부분 국내 CFRD의 제체사면의 경사, 강도 및 다짐기준들이 유사한 것을 볼 때 제체의 특성을 고려하기 보다는 경험과 선례에 기초를 두고 설계했다고 할 수 있다(표 1).

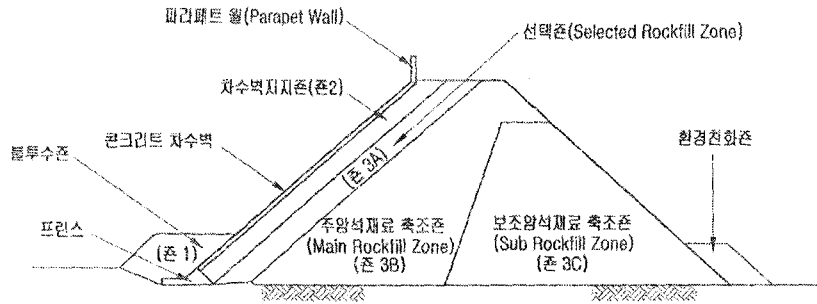


그림 1. 댐제체의 일반적인 구성

표 1. 국내 CFRD 축조재료의 설계현황(한국수자원학회, 2005)

댐명	설계연도	댐높이(m)	Zone	최대입경 (mm)	밀도 (tf/m ³)	내부마찰각 (도)	다짐횟수	다짐두께 (cm)	다짐장비 (V/R)	주행속도 (km/h)
평화의 댐	1987~1989	80~135	2	75	2.1	49	4	40	10 ton	4
			3A	150	2.1	49	4	40		
			3B	800	2.0	46	4	100		
			3C	1,500	1.9	43	4	160		
			3D	2,000	2.8	41	4	200		
남강댐	1989	34	2	100	2.21	43	6	30	10 ton	4
			3A	300	1.89	42	6	50		
			3B	600	2.04	50	6	60		
			3C	1,000	1.96	48	4	100		
부안댐	1990	50	2	75	2.10	45	6	30	10 ton	4
			3A	150	2.10	43	6	50		
			3B	800	2.00	43	4	100		
			3C	1,500	1.90	41	4	160		
말양댐	1991	89	2	75	2.10	45	6	40	10 ton	4
			3A	150	2.10	45	6	50		
			3B	800	2.00	43	4	100		
			3C	1,500	1.9	40	4	160		
용담댐	1991	70	2	75	2.20	45	6	-	10 ton	4
			3A	150	2.10	43	6	-		
			3B	800	1.95	43	6	100		
			3C	1,500	1.90	41	6	160		
산청댐	1995	97	2	75	2.00	38	6	40	10 ton	4
			3A	150	2.10	37	6	40		
			3B	800	2.60	41	6	100		
			3C	1,500	2.60	42	6	160		
영월댐	1997	98	2	75	2.30	43	6	40	10 ton	4
			3A	150	2.20	42	6	40		
			3B	800	2.10	41	6	100		
			3C	1,500	2.10	42	6	160		
대곡댐	1996	52	2	75	2.10	45	6	-	10 ton	4
			3A	150	1.95	43	6	-		
			3B	800	2.14	43	5	-		
			3C	1,500	1.96	40	4	-		

과거 시험기의 부족으로 인해서 대형시험에 대한 전반적인 제약이 많았던 시절에는 국내 지역별 조립 재료를 생산하는 석산의 특성이 서로 다르고 각 댐별로 시공여건 및 단면의 차이가 있음에도 불구하고 이를 보완할 실험적인 방법이 전무했었다. 즉, 대입경 조립재료들의 강도특성에 상당히 민감한 영향인자들인 석산모암의 강도, 입자의 형상 등과 같은 물리적, 역학적 재료특성 및 댐의 시공조건에 대한 고려가 부족했었다. 하지만, 근래 대형전단 및 삼축시험기가 국내 연구소와 학교를 중심으로 다수 보급되어 많은 실험들이 수행되고 있는 만큼 댐체재에 대한 이론적, 실험적 기준 마련을 위한 노력이 필요하겠다.

3. 시험방법

3.1 시료특성

본 시험에 사용한 조립재료는 예천지역 석산에서 생산된 것으로 모암의 암석학적 분류는 흑운모-석류석 편마암(Biotite-garnet gneiss)이고, 비중은 2.75, 흡수율은 0.14 %, 탄성파속도는 4.2 km/s, 암석의 일축압축강도는 약 1,100 MPa정도로 나타났다(표 2).

그리고 입도분포는 CFRD의 Zone 3C(Rockfill Zone)에 사용되는 입도인 1,500 mm, 800 mm 통과량이 85~100 %, 500 mm 통과량이 60~100 %, 100 mm 통과량이 10~60 %, 50 mm 통과량이 0~40 %, 4.8 mm(No. 4) 통과량이 5 % 이하인 입도를 전단시험이 가능한 최대입경인 150mm로 상사입도로 조정하였다(그림 2, 표 3).

표 2. 모암의 기본물성

구 분	비 중			흡수율 Q(%)	탄성파속도 (Vp, km/s)	일축압축강도 (MPa)
	절건 ¹⁾	표건 ²⁾	진 ³⁾			
평 균	2.75	2.75	2.76	0.14	4.2	107.8

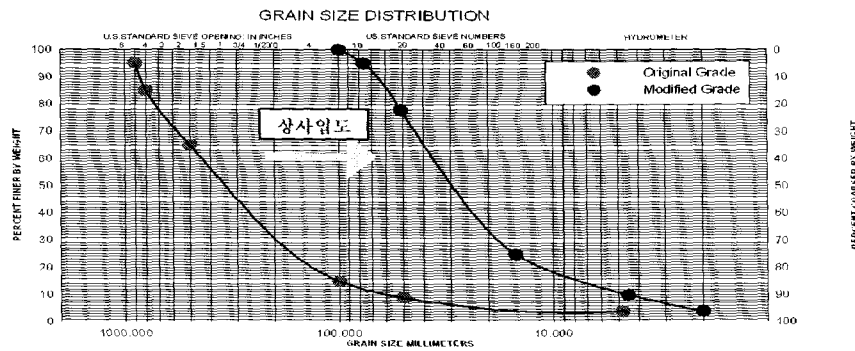


그림 2. 대형전단시험용 상사입도 그래프

표 3. 재료의 시험입도

체 입경 (mm)	150	76.3	50.8	15	4.5	2
통과율(%)	100	95	78	25	10	4

3.2 시험방법

본 연구에 사용한 대형전단시험기는 국내 자체기술로 제작된 장비로 시료제작을 위한 전단상자의 규모가 1500(가로)×1500(세로)×600(높이)mm로 국내 최대규모의 시험장치이며, 위의 표 3의 입도곡선에 따라 준비된 시료를 상대밀도 50, 70, 90 %가 되도록 핸드진동다짐기를 사용하여 3층으로 다짐하였다.

시료제작이 완료된 전단상자는 상부에 가압판을 사용하여 수직응력 98, 294, 490 kPa을 각 시험단계 별로 가하였고, 이때 너무 순간적으로 큰 하중을 상부에 가압하면 시료파쇄를 유발하여 강도에 영향을 줄 수 있으므로, 응력제어를 통하여 최초 98 kPa을 1분에 걸쳐 상재시키고 5분이 지난 후, 다음 하중 까지 증압시켰다. 증압이 완료되면 30분정도 압밀을 시켜 시료의 재배열을 시킨후, 전단변형률 1.0 %/min으로 변형률제어방식으로 전단시험을 수행하였으며 전단하중이 피크에 도달했을 때 또는 수평변형률이 15 %가 되었을 때를 파괴로 규정하였다.

견고한 모양을 인위적으로 파쇄하여 생산한 조립재료들은 육안으로 보이지 않는 미세한 균열 및 각진 입자 모양 등의 원인으로 압축이나 전단중 파쇄가 쉬워 높은 상대밀도 및 수직하중조건에서 입도, 모양의 강도 및 최대입경 등의 영향을 많이 받으므로 현장조건에 적합한 시험조건을 계획하여 시험을 수행하는 것이 무엇보다 중요하다.

표 4. 배수 직접전단시험 조건

Dr(%)	수직응력 kPa	시험밀도 (g/cm ³)	최대전조밀도 (γ_{dmax})	최소전조밀도 (γ_{dmin})
50	98, 294, 490	1.87	2.175	1.637
70	98, 294, 490	1.99		
90	98, 294, 490	2.10		

4. 대입경 석산개발 조립재료의 실내시험결과

아래 그림 3은 상대밀도 50, 70, 90 %에 대한 대입경 조립재료의 응력-변형률 및 수직-수평변형률 거동을 나타낸 그래프들이다. 시험결과, 상대밀도가 증가할수록, 수직하중이 증가할수록 큰 전단강도를 나타냈으며 부의 체적변화(Dilatancy)가 발생하였다.

아래 그림 4는 상대밀도별 수직응력-전단강도의 관계를 나타낸 것으로 상대밀도 50, 70, 90 %에 일 때 내부마찰각이 29.8, 41.5, 51.6°로 나타났다. 이 그래프에서 알 수 있듯이 상대밀도가 클수록 입자간의 마찰과 더불어 맞물림효과(interlocking)가 크게 작용하여 보다 큰 전단강도를 나타냈다.

표 5. 예천지역 조립재료에 대한 상대밀도별 설계정수값 비교

상대밀도 (%) [현장다짐도(%)]	내부 마찰각 (°)	겉보기점착력 (kPa)
50 [85.8]	29.8	186.2
70 [91.3]	41.5	182.3
90 [96.7]	51.6	123.5

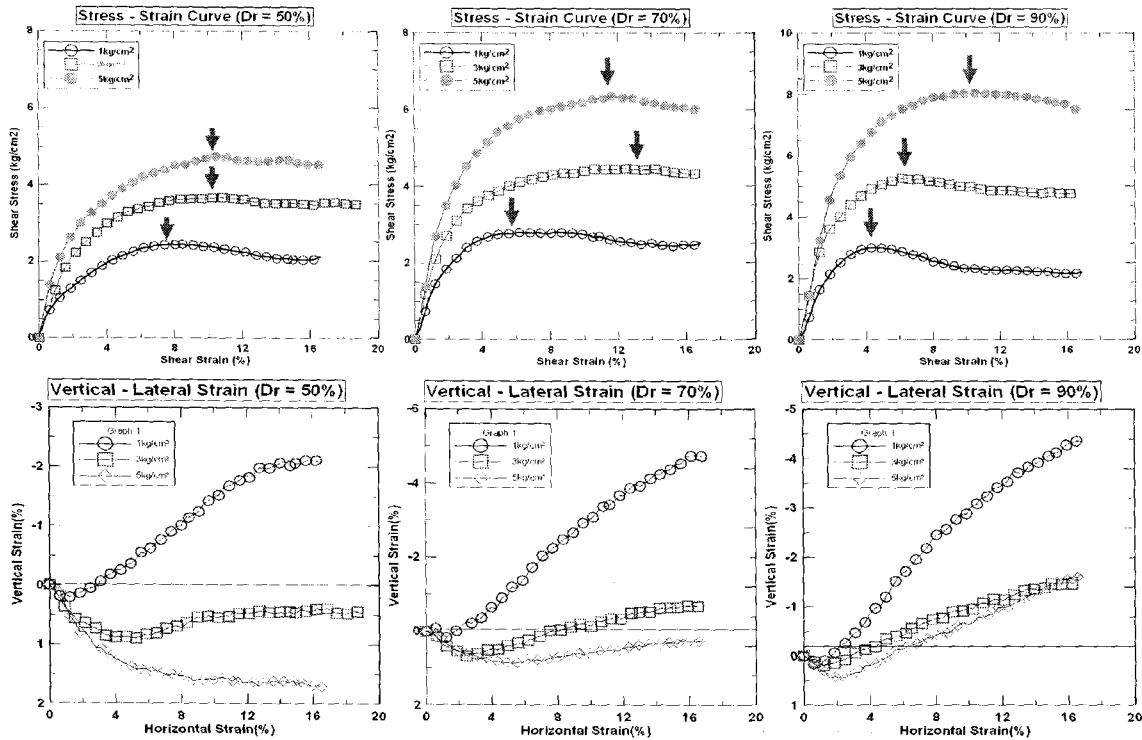


그림 3. 예천지역 조립재료의 응력-변형 및 수직-수평변형률

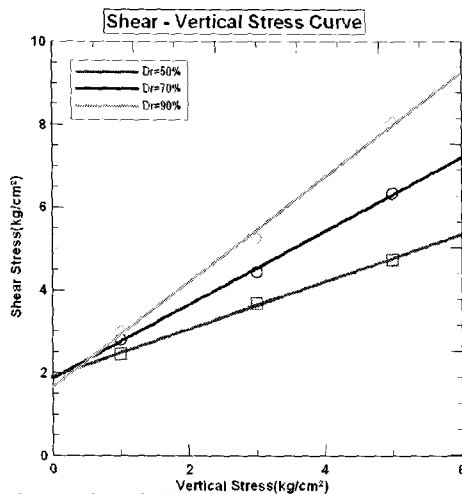


그림 4. 예천지역 조립재료의 전단-수직응력

5. CFRD 설계기준과 실내시험결과의 비교

아래 그림 5는 시험밀도-내부마찰각의 관계를 나타낸 그래프로써, CFRD 설계시 평균적으로 적용하는 내부마찰각 값인 43° 에 대응하는 다짐도가 91%로 나타났다. 이는 CFRD 시공시 사용하는 현장다짐도 95%보다 4%정도 작은 값으로 현장 다짐기기의 큰 다짐효과를 고려할 때 실제 체체의 강도 값은 설계 값보다 훨씬 클 것으로 추측된다.

그림 6은 국내 3개 CFRD들의 대형전단시험 결과(수자원공사, 1999)를 다짐도-내부마찰각의 관계로 나타낸 그래프로써, 다짐도 95%에 대응하는 내부마찰각이 44.5° , 45° , 52° 로 나타났으며, 이는 표 1에 소개된 실제 댐설계 값보다 약 $4 \sim 4.5^\circ$ 정도 큰 값들이다.

위의 시험결과들의 비교에서 실험치와 실제 설계치의 오차가 4 ~ 10 %가량 발생함을 확인 할 수 있었으며, 그 원인은 과거 대입경 조립재료 시험을 수행하지 못하여 일률적인 설계값을 사용한 측면도 일부 있겠지만, 상당한 부분은 대형시험의 발달로 신뢰성있는 시험결과들을 산정했음에도 불구하고 불명확한 설계기준으로 인하여 안전측인 선행 시공자료에 근거해서 설계와 시공이 이루어지기 때문으로 사료된다.

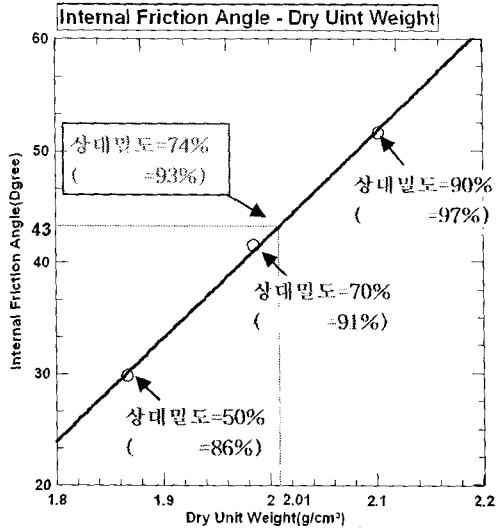


그림 5. 예천지역 조립재료의 내부마찰각-시험밀도

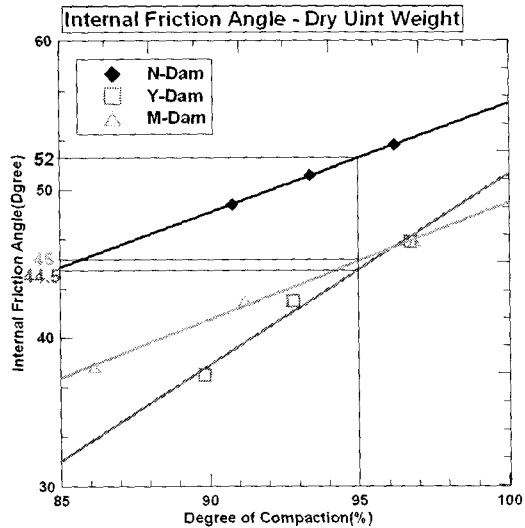


그림 6. 국내 CFRD 내부마찰각-다짐도

표 6. 국내 CFRD 대형전단시험결과

상대밀도(%)	내부마찰각 (Degree)		
	N댐(Zone3)	Y댐(Zone5)	M댐(Zone1)
50	49	37	35
70	51	42.7	42.5
90	53	49	46.5

6. 결론

본 연구에서는 CFRD의 국내 설계값들과 예천지역의 석산재료의 대형전단시험결과를 비교분석 하였으며 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 예천지역 석산재료의 내부마찰각-다짐도 관계로부터 CFRD Zone 3에 일반적으로 적용되는 내부마찰각 34°에 상응하는 다짐도 91%를 얻었으며, 이는 현장다짐기준 95 %을 고려할 때 4 %이상의 보수적인 값이다.
- 2) 국내 3개 CFRD들의 다짐도 95 %에 대한 대형전단시험결과는 내부마찰각 44.5(N 댐), 45(Y 댐), 52(M 댐)°로 실제 댐설계에 사용된 설계 값보다 약 4 ~ 4.5° 정도 큰 값을 나타냈다.
- 3) 예천지역과 국내 3개 CFRD의 조립재료에 대한 대형전단시험 값과 실제 댐에 적용된 설계값의 오차는 약 4 ~ 10%정도로 나타났다.

- 4) 위의 4 ~ 10 % 정도의 오차는 신뢰성있는 실험값을 가지고도 불명확한 설계기준으로 인해 실제 설계에 적용하지 못하는 관례 때문으로 사료되며, 이를 극복하기 위해서는 신뢰성 있는 시험 및 그 적용방법의 더 많은 연구와 더불어 이를 반영할 수 있는 명확한 설계기준의 마련일 것이다.

참 고 문 헌

1. 이대수, 김경열, 홍성연(2004), “조립질 토목재료 강도평가를 위한 대형 일면전단시험기 개발”, 한국지반공학회지, 11월호, pp8-16
2. 한국수자원공사(1999), “댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화방안 연구”, pp67-114
3. 한국수자원학회(2005), “댐설계기준”, pp217-277