The Journal of Engineering Geology, Vol.20, No.4, December, 2010, pp. 415-424

CFRD 시공시 축조재료의 다짐특성 평가

한상현[1] · 여규권[2*] · 박종화[2]

[1]서일대학 토목과, [2]삼부토건(주) 기술연구실

Evaluation of the Compaction Characteristics of CFRD Construction Materials

Sang-Hyun Han[1], Geu-guwen Yea[2*], and Jong-hwa Park[2]

[1]Department of Civil Engineering, Seoil University

[2]Dept. of Technology Research Office, Sambu Construction Co., Ltd.

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐에서 Zone별 거동특성을 평가하기 위하여 시험성토를 실시하였다. 본 연구에서는 기존의 시방기준에 제시된 각 Zone에 대한 축조재료 기준을 만족하는 시험재료를 선정하여 포설두께, 전압회수 및 함수비 등을 변경시키면서 다짐성토를 실시하였다. 이때의 시험다짐에 대한 성토체의 침하율, 다짐밀도, 함수비 및 투수계수의 변화를 측정하였다. 시험분석 결과 전압회수와 현장다짐밀도관계, 현장다짐밀도와 침하율의 관계, 다짐회수와 침하율의 관계. 침하율과 포설두께의 상관관계 등을 제시하였다. 특히, 투수계수와 다짐전압회수와의 관계를 제시하였고 이러한 연구를 통하여 효율적인 다짐관리기준을 마련하고자 하였다.

주요어 : 콘크리트표면 차수벽형 석괴댐, 다짐, 침하율, 투수계수

A prototype of a Concrete-Faced Rock-fill Dam (CFRD) was constructed to evaluate the behavior of the materials in each zone within the dam. The tested materials, selected based on their grain size distribution, were used in constructing the prototype dam with layers of variable thickness, settlement ratio, and water content. We investigated the suitability of various values of hydraulic conductivity, water content, dry unit weight, and settlement ratio for zones within the dam. The test results revealed the relationships between the number of passes and the dry unit weight, between the dry unit weight and the settlement ratio, and between the settlement ratio and the number of passes. This paper focuses on the relationship between hydraulic conductivity and the number of passes. The results of the present analysis could be used to establish reasonable compaction standards for materials used in dam construction.

Key words : CFRD, Compaction, Settlement ratio, Hydraulic Conductivity

서 론

최근 들어 건설기간 및 시공성이 유리하여 국내 댐 설계의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete Face Rockfill Dam: CFRD)에 대한 설계와 시공기술이 발전되면서 많은 관심을 갖게 되었다. 표면차수벽형 석괴댐은 주 축조재료인 암석자원이 풍부하고 구득이 쉬워 경제적이며 시공시 계절과 기후의 영향을 적게 받아 동절기에도 시공이 가능하고 누수에 대한 저항성이 높아 구조적으로 안정성이 높다. 또한 그라우팅 공종이 Plinth 아래에서 실시되므로 댐 축조와 별개의 공종으로 추진할 수 있어 공기단축이 가능하다. 그리고 입경이 큰 재료를 이용해서 축조하므로 파이핑에 대한 저항력이 우수하며 댐 제체 내부에 간극수압이 발생하지 않는 구조로서 대형 암괴의 엇물림 작용으로 지진에 대한 안정성이 비교적 높다. 따라서 이러한 장점으로 표면차수벽형 석괴댐이 현재 댐 건설의 주종을 이루고 있다.

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐은 1960년대 진동롤러를 사용하게 되면서 활발한 연구와 건설이 시작되었고 1985년 현대적인 기법을 적용한 CFRD를 도입하여 현재까지 비

*Corresponding author: moonju@sambu.ac.kr

약적인 기술발전이 이루어지고 있다. 우리나라에서는 동복댐에 최초로 이 형식을 도입하여 1985년에 완공하였고, 이후 평화의댐, 부안댐, 밀양댐, 남강댐, 산청양수 상·하부댐, 용담댐, 대곡댐, 장흥댐, 양양양수 상부댐, 청송양수 상·하부댐이 준공되었으며 군위댐, 부항댐이 건설 중에 있다.

본 연구사례 현장은 낙동강 수질관리개선 대책의 일환으로 울산지역의 깨끗하고 안정된 생활용수 공급을 위하여 추진되었다. 맑은 물 공급차원에서 당시 공업용수를 식수원으로 사용하고 있는 사연댐을 생활용수 수원으로 전환하고 신규취수원으로 이용하기 위하여 태화강 수계의 제1지류인 대곡천의 중류에 위치하며 댑지점의 좌안은 급경사인 사행하천의 U자형 계곡이 계획되었다. 본 지역의 지질특성은 경상계 신라통의 퇴적암류(대구층)와 이를 관입, 또는 분출한 화산암류와 상기 신라통의 제 암층을 관입한 불국사통의 화성암류로 주로 구성되어 있다.

댐형식은 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD)로 높이가 52 m이며 길이가 190 m인 중규모의 댐이다. 유역면적은 57.5 km^2이며 총 저수량은 28,500,000이다. 대곡댐 건설은 1994년 3월 실시설계를 시작으로 1999년 4월에 본 공사를 착공하여 2004년 10월에 담수를 시작하였고 2005년 6월 17일에 준공을 완료하였다.

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐 현장으로 본댐을 축조하기 전에 시험시공을 통하여 재료의 특성을 평가하고, 현장여건에 적합한 시공관리기준을 제시할 수 있도록 하였으며 시험시공의 위치는 본댐 하류측에 임의의 계획높이로 축조한 후 사면부 표층기초지반에 실시하였다.

이에 본 시험성토는 본댐의 축조에 앞서 시방기준에 적합한 입도를 갖는 각 Zone 별 성토재료를 대상으로 포설두께, 전압횟수, 함수비 등을 변경시켜가며 다짐 성토하여, 이때의 시험 다짐 성토체에 대한 침하율, 다짐밀도, 투수계수 등을 측정하여 비교·분석함으로써 실제 성토시 각 Zone 재료의 거동특성을 사전에 평가하여 효율적인 품질관리기준을 마련할 목적으로 본 연구를 수행하였다.

본 연구는 본댐 축조중 혼합재료 변경에 따른 Zone 1 및 Zone 1(마사토유용), Zone 2, Zone 3, Zone 4에 대한 시험축조결과에 대하여 기 실시하여 결정된 대형 삼축시험에 의한 암전단 시험결과를 이용하여 비교·분석하였다.

기존 연구

CFRD의 특성

CFRD는 크게 Zone 1(Bedding Zone), Zone 2 (Transition Zone), Zone 3(Graded Rockfill Zone), Zone 4 (Sub Rockfill Zone), Zone 5(Planting Zone)의 5가지로 구분되며, 이에 대한 개략적 기능은 다음 Fig. 1과 같다.

Zone 1(Bedding Zone)구간은 차수벽을 직접 지지하는 Bedding Zone으로서, 반투수성 벽을 만들어 차수벽의 균열이나 지수판의 결함시 야기되는 누수를 댐 제체의 손상없이 안전하게 통과시키는 기능을 한다. 그리고 Zone 2 (Transition Zone)는 차수벽과 암석부 제체의 강성차이로 응력이 차수벽과 Bedding Zone에 과도하게 집중되는 것을 방지하기 위하여 설치한다. 즉, 급격한 입도변화를 방지하기 위한 필터층의 기능을 한다. Zone 3(Graded Rockfill Zone)는 차수벽을 균등하게 지지하기 위한 층으로, 수압과 댐 자중에 의하여 댐 제체에 작용하는 외력의 대부분을 지지하는 기능을 한다. Zone 4(Sub Rockfill Zone)은 Graded Rockfill Zone의 기능을 보조하는 기능을 하며, 직접적인 외력을 받지 않으므로 재료의 선택에 다소 여유가 있으며, 비교적 조립의 석괴재로 구성되어 큰 투수성을 갖는다. Zone 5(Planting Zone)구간은 댐 제체 하부 비탈면에 조경식재를 통하여 환경친화적인 공간을 조성하는 기능을 한다.

거동 분석

CFRD의 거동분석에 대한 연구는 주로 침하에 대한 연구가 수행되었다. Liu et al. (1993)은 댐건설 완료시점에서 축조재료에 기초한 CFRD의 Rockfill 변형특성을 연직변형율 및 압축계수로 나타내어 담수후 CFRD의 침하분포 추정식을 제안하였다.

Giudici et al. (2000)은 호주에서 설계 시공된 13개의 CFRD의 변형계수 산정시 특별히 제체의 강성에 대한 계곡

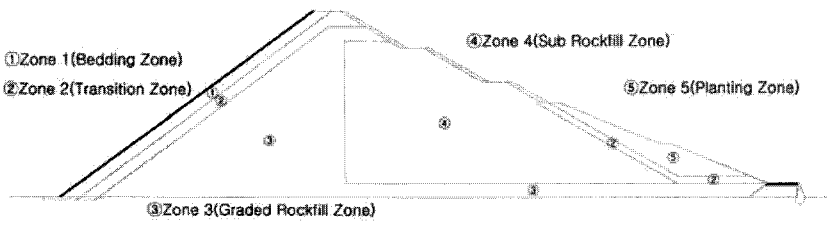

Fig. 1. Sectional view of the Concrete-Faced Rock-fill Dam (CFRD).

형상의 영향에 대하여 보고하였으며, Hunter and Fell (2003)은 CFRD의 실제 사례를 바탕으로 합리적인 Rockfill 거동특성을 설명하였다.

김용성 등(2005)은 국내, 외 38개 CFRD 계측자료에 의해 댐제체가 받는 하중의 변화에 따른 침하변형 특성을 고찰하여 계곡형상을 고려한 CFRD의 축조중 침하량 산정기법을 제안하였다.

시험 시공

개요

시험시공은 본 댐 전면부에 시험성토장을 축조한 다음, 시험성토재를 현장에서 생산하거나 일부 골재원으로부터 반입하여 시험축조를 한다. 이때, 성토재의 입도가 시방기준에 맞는지 확인하고, 기 계획된 성토재료별 및 성토조건별로 살수 및 다짐작업을 거쳐 시험성토체를 구성한다. 이후, 현장시험(다짐후 입도, 함수량, 밀도, 투수계수 등)을 통하여 성토재료 및 성토조건별 적용성을 비교·검토하고 축조단면을 절개하여 현장시공 상태를 육안으로 확인하도록 한다.

Fig. 2. Photograph of the compaction test.

시험성토

시험성토장 조성시 지표면을 고르고 깨끗하게 정리한 후 기초지반을 축조용으로 규정된 다짐장비로 10회 이상 다져서 시험성토 작업중이나 작업후에 기초지반의 침하가 없도록 하였다. 그리고 배수가 원활히 되도록 하였고 최소의 다짐으로 소요다짐효과를 얻기 위해 다양한 포설두께와 다짐회수를 시행하였다. 그리고 포설두께별, 층별, 전압횟수별로 다짐전, 후의 침하량을 레벨(Level) 측량기를 이용하였고 침하량 측정은 각층의 격자망의 교차점위에 침하판(20 cm × 20 cm)을 설치한 후 침하량을 측정하였다. 현장밀도시험과 현장투수시험은 각 시험이 지정된 위치에서 실시하였고 현장밀도 시험은 물치환 및 모래치환법에 의하여 현장밀도시험 실시하였다.

시험축조 조건

설계시 제시된 시방기준은 크게 5가지이다. 입도(75 mm, 40 mm, 19 mm, 4.75 mm, 0.60 mm, 0.075 mm), 포설두께 및 방법, 포설재료, 다짐장비 및 방법, 다짐도(품질관리)로 구성되어 있으며 Zone 1의 최대입경은 75 mm, Zone 2의 최대입경은 150 mm이며 Zone 3의 최대입경은 800 mm이고 포설두께는 Table 1에 제시하였고 포설 폭은 3.5 m를 적

Table 1. Mock-up test conditions.

Materials*1)	No.	Moisture content	Compaction equipment	Depth	Number of compaction	Layer	Velocity
Zone 1 (Weathered soil add.)	①	O.M.C ±2%	100 kN Vibratory Roller	30 cm	6 times	2	4 km/h
Zone 1	①	O.M.C ±2%	100 kN Vibratory Roller	30 cm	4,6,8 times	2	4 km/h
	②			40 cm		2	
	③			50 cm		2	
Zone 2 (Transition)	①		100 kN Vibratory Roller	50 cm	4,6,8 times	1	4 km/h
	②			60 cm		1	
	③			70 cm		1	
Zone 3 (Graded Rockfill)	①	20% water add. to volume percent	100 kN Vibratory Roller	100 cm	4,6,8 times	2	4 km/h
	②			-			
	③			-			
Zone 4 (Rockfill)	①	20% water add. to volume percent	100 kN Vibratory Roller	80 cm	4,6,8 times	1	4 km/h
	②			100 cm		1	
	③			-			

*1)Refer to Fig. 1.

용하였다. 포설재료는 신선하고 내구성이 있으며 화학작용을 받지 않은 암석, 사력재료(세골재 및 조골재), 마사토 등을 이용하여 생산하였다.

다짐방법은 댐 축방향으로 전 길이에 걸쳐 연속적으로 거의 수평으로 다짐을 실시하였다. 다짐도관리를 위한 상대밀도는 평균상대밀도가 최대상대밀도의 75%이상 되게 하였고 함수비는 최적함수비(OMC) ±2%로 관리하였다(한국수자원공사, 2001). 상기 시험시공조건에 의하여 현장에 적합한 시방기준을 새롭게 설정토록 하였다.

Zone 4를 제외하고는 최대 입경에 대한 규제기준이 있으며, Zone 1은 75 mm, Zone 2는 150 mm, Zone 3은 800 mm의 최대입경에 대한 상한치를 두었다. 시험축조는 Zone 1~4까지 함수비, 포설두께, 다짐횟수, 다짐층수 등을 변경하여 가면서 구성하였으며, 성토재료에 대한 혼합비는 다음의 Table 2와 같이 수행하였다.

설계시 댐 제체의 안정성을 확보하기 위하여 수치해석과 사면안정해석을 실시하였다. 검토조건은 시방서에 제시된 강도정수인 내부마찰각을 Zone 1의 경우 $\phi = 45^{\circ}$, Zone 2의 경우 $\phi = 43^{\circ}$, Zone 3의 경우 $\phi = 43^{\circ}$, Zone 4의 경우 $\phi = = 40^{\circ}$를 적용하였으므로 Zone별 축조재료에 대하여 이 값을 확보 할 수 있는지에 대하여 대형삼축압축시험을 실시하여 강도특성을 확인하였다. 그리고 시험성토시 상기 강도정수 확보 여부를 판단하기 위하여 건조단위중량에 의한 다짐도 관리를 실시하였다.

성토재료의 선정기준

시험성토를 실시하고자 하는 구간에서 지표면을 고르고 깨끗하게 정리한 후 기초지반을 축조용으로 규정된 다짐장비로 10회 이상 다져서 시험성토 작업중 또는 작업후에 기초지반의 침하가 없도록 하며, 배수가 원활히 되도록 하였다.

성토재료의 평가 기준은 설계당시 요구되는 재료의 시방기준에 부합하는 것이며, Zone 1의 경우, 마사토를 유용하는 경우에 대하여 검토하였으며, Zone 2~4의 경우, 설계치와 성토재료의 특성을 시방기준과 비교 · 검토하였다. 즉, 현장시험 결과를 토대로 다짐장비, 포설두께, 다짐회수 및 시공 함수비 등에 대하여 가장 효율적인 시공방법 결정하기 위하여 시험시공을 실시하였다. 각 Zone에 대한 성토재료의 적용기준 및 사용된 축조재료에 대한 입도분포는 Table 3과 같다.

① Zone 1(마사토 유용)

석산쇄석(50%)은 살수를 하면서 출구간격 40 mm을 조정한 콘 크러셔(Cone-crusher)로 파쇄하여 생산하였으며, 모래(40%)는 골재원에서 반입, 선별된 잔골재 사용하였고, 마사토(10%)는 석산에서 반입된 마사토를 사용하였다. 세가지 재료의 혼합은 혼합비율별 석산쇄석, 모래 및 마사토를 석산쇄석 파쇄시 살수 또는 자연건조를 하여 동시에 투입함으로서 혼합비율을 조정 · 생산하였다.

② Zone 1

중량비로 혼합비율은 석산암(50%), 모래(50%)이며, 동일무게를 체적으로 환산하여 Crush Plant (C/P)설비에 동시 투입하였고, 출구간격 40로 조정된 콘 크러셔에 1차 파쇄 · 혼합하여 생산하였다. 1차 파쇄로 혼합된 재료의 분리를 방지코자 백호(Backhoe)를 이용하여 2차 혼합하고, 로더(Loader)로 일정장소에 적치하였다.

Table 2. Mock-up test materials.

Zone	Material Constitution	Mixing ratio
Zone 1 (Weathered soil add.)	Crushed stone + Sand + Weathered soil	50 : 40 : 10
Zone 1	Crushed stone + Sand	50 : 50
Zone 2	Crushed stone + Sand	95 : 5
Zone 3	Crushed stone by blasting	100
Zone 4	Crushed stone by blasting in spillway & tunnel site	100

Table 3. Test results regarding grain size distribution.

Sieve sizes or No.	Zone-1, Weathered soil add. (percent finer by weight, %)	Zone-1 (percent finer by weight, %)	Zone-2 (percent finer by weight, %)	Zone-3 (percent finer by weight, %)	Zone-4 (percent finer by weight, %)
800 mm				100	
600 mm					100
500 mm				90-100	
300 mm					60-100
150 mm			100		59-100
75 mm	100	100	70-98		25-80
40 mm	70-95	70-95	45-85		20-70
19 mm	49-80	49-80	25-65	65-85	10-60
No. 4	30-55	30-55	0-35	45-70	0-30
No. 30	12-30	12-30	0-6	30-60	
No. 200	2-12	2-12		10-45	0-10

③ Zone 2

중량비로 혼합비율은 석산암(95%), 사력재(5%)이며, 동일무게를 체적으로 환산하여 C/P 설비에 동시 투입, 출구간격 95 mm로 조정된 죠 크러셔(jaw-crusher)에 1차 파쇄혼합 생산하였다. 1차 파쇄로 혼합된 재료의 재료분리를 방지코자 백호를 이용, 2차 혼합하고 로더로 일정장소에 적치하였다.

④ Zone 3

소요입경을 만족할 수 있는 발파방식으로 생산된 재료를 구분하여 채취하며 발파암중 큰 암괴의 것은 현장에서 작게 파쇄하여 반입하였다.

⑤ Zone 4

여수로에서 발파된 암석 중 큰 암괴가 포함되지 않은 부분에서 소요입경을 만족할 수 있는 발파방식으로 재료를 효과적으로 채취하였다.

함수비 조절

비율별 재료를 균일하게 적절한 함수비로 유지 하도록 Zone별 함수비를 조절하며 시험생산 후 결정하였다. Zone 1 (마사토유용) 및 Zone 1은 실내다짐 시험시 결정된 최적 함수비(O.M.C : 7.9% ±2%)를 유지하도록 조절하였으며, 조절된 재료는 함수비 변화를 최소화하기 위하여 천막 등을 이용하여 관리하였다.

Zone 2는 Transition Zone으로 자연상태로 축조를 시행하며, 생산시 함수비 조절을 별도로 하지 않으나 생산시 발생될 비산먼지를 방지하고자 저압의 살수로 생산하였다. Zone 3은 발파시 별도의 함수량 조절을 하지 않으며, 축조시 체적의 20% 이상으로 살수다짐을 실시하였고, Zone 4는 발파시 별도의 함수량 조절을 하지 않으며, 축조시 체적의 20% 이상으로 살수다짐을 실시하였다. 본 CFRD의 경우 Zone 3과 Zone 4의 경우 축조재료를 Table 1과 같이 발파암을 사용하였기 때문에 살수시 공극사이로 유출이 되므로 일정량의 함수상태를 유지하기 어려운 것으로 판단된다. 따라서 본 구역에서 다짐시 별도의 함수비 조절을 하지 않았다.

다짐장비

시험성토를 위해 먼저 성토를 위한 시험장을 조성하였다. 시험장 자체의 침하를 방지하고자 드럼중량 155 kN의 로울러로 10회 이상 다짐을 실시하였고, 레벨 측정으로 시험장 평탄성 확인하였다. 성토재료는 불도져로 펴고르기를 한 후, 한 층의 규정 두께별로 하여 다짐을 실시하였으며, 다짐은 규정된 다짐장비로 시험성토 조건에 따라 전압회수로 다짐하여 시방기준 이상으로 충족하였다.

Table 4. Comparison of various compaction devices used in the mock-up test.

Condition	Drum Weight (kN)	Drum Dia. (m)	Drum Length (m)	Vibration Centrifugal force (kN)	Frequency (rpm)
Specification	100	1.5	2.5	265	1,100-1,500
Mock-up test	155	1.56	2.13	175-258	1,620-1,920

분 석

다짐전압회수와 현장 다짐밀도 관계

시험 성토재료 기준에 부합하도록 Zone 1~Zone 4의 다짐재료에 대하여 규정된 다짐장비로 포설두께별 100 kN 로울러의 다짐회수에 따른 건조단위중량의 상관관계를 Fig. 3에 나타내었다. 현장에서 건조단위중량 측정은 물치환법 및 모래치환법을 사용하였다. 시험측점은 포설두께별로 인접한 3개소에서 시험을 실시하였다. Zone 1의 경우, 전반적으로 다짐회수가 증가할수록 현장의 건조단위중량이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 다짐회수 증가시 다짐효율 증대에 따른 것으로 일반적인 다짐 특성과 같은 양상이다. Zone 1구간에 대하여 Table 2에서와 같이 마사토 10%를 첨가할 경우 전압회수가 6회일 경우에 한하여 건조단위중량의 증가량은 거의 미소한 것으로 나타났다.

Zone 1구간의 다짐특성은 Fig. 3(a)에 의하면, 다짐회수가 4회에서 6회로 증가할 경우와 6회에서 8회로 증가할 때의 최대건조단위중량의 증가율은 4.9%~5.8%에서 1.9%~2.7%로 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 다짐회수가 4회일 경우 최대건조단위중량은 포설두께가 30 cm에서 40 cm로 증가할 때 1.8%에서 40 cm에서 50 cm로 증가할 경우 1.3%로 감소하였다. 다짐회수가 6회일 경우 최대건조단위중량은 포설두께가 30 cm에서 40 cm로 증가할 때 1.3%에서 40 cm에서 50 cm로 증가할 경우 0.9%로 감소하였다. 그리고 다짐회수가 8회일 경우 최대건조단위중량은 포설두께가 30 cm에서 40 cm로 증가 할 때 0.7%에서 40 cm에서 50 cm로 증가할 경우 0.6%로 감소하였다. 이는 다짐회수가 증가할 때 최대건조단위중량은 선형적으로 증가하지 않으며, 포설두께에 따른 최대건조단위중량은 층이 두꺼울수록 다짐효율이 낮음을 의미한다. 또한,

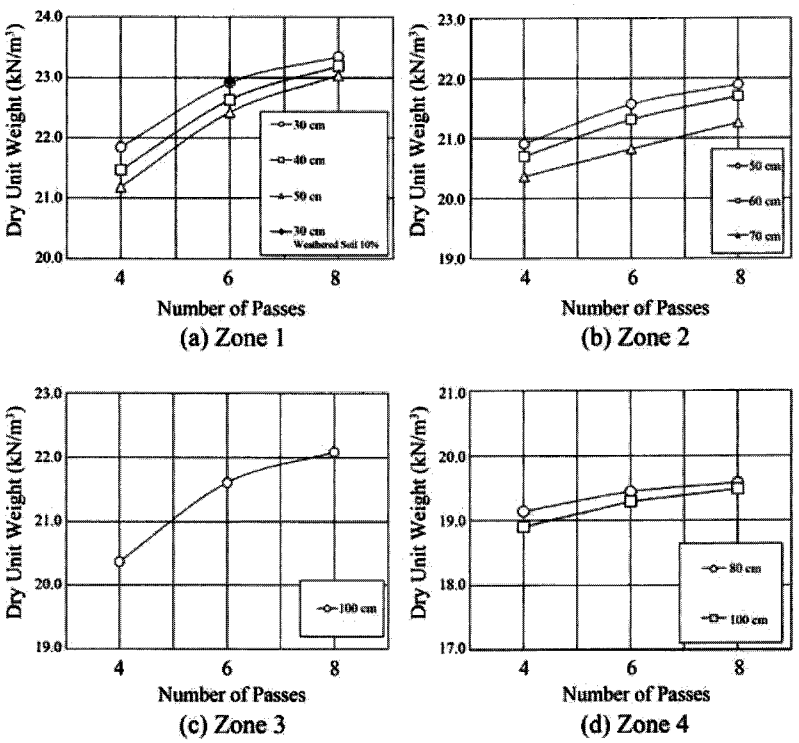

Fig. 3. Relationship between dry unit weight and the number of passes.

다짐회수가 증가할수록 포설두께에 대한 다짐효율의 변화는 미소한 것으로 나타났다.

Zone 2구간의 다짐특성은 Fig. 3(b)에 의하면, 다짐회수가 4회에서 6회로 증가할 경우와 6회에서 8회로 증가할 때의 최대건조단위중량의 증가율은 각각 2.3%~3.2%에서 1.5%~ 2.1%로 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 다짐회수가 4회일 경우 포설두께가 50 cm에서 60 cm로 증가할 경우 최대건조단위중량은 1.3% 감소하였고 60 cm에서 70 cm로 포설두께가 증가할 경우 최대건조단위중량은 1.6% 감소하였다. 다짐회수가 6회일 경우 포설두께가 50 cm에서 60 cm로 증가 할 때 최대건조단위중량은 1.2% 감소하였고 60 cm에서 70 cm로 포설두께가 증가할 경우 최대건조단위중량은 2.4% 감소하였다. 그리고 다짐회수가 8회일 경우 포설두께가 50 cm에서 60 cm로 증가 할 경우 최대건조단위중량은 0.9% 감소하였고 60 cm에서 70 cm로 포설두께가 증가할 경우 최대건조단위중량은 2.1% 감소하였다. 다짐회수가 증가할 때 최대건조단위중량은 선형적으로 증가하지 않으며, Zone 2구간의 경우, 다짐회수에 따른 포설두께가 50 cm에서 10 cm씩 70 cm로 증가 할 경우 층이 두꺼울수록 다짐효율이 증가 된 것으로 나타났다. 또한, 다짐회수가 동일한 경우 포설두께의 증가에 대한 다짐효율은 감소하는 것으로 나타났다.

Zone 3구간의 다짐특성은 Fig. 3(c)에 의하면, 포설두께가 100 cm인 층에 대하여 다짐회수가 4회에서 6회로 증가할 경우와 6회에서 8회로 증가할 때의 최대건조단위중량의 증가율은 6.0%에서 2.2%로 감소하는 것으로 나타났다. 본 Zone 3구간에서는 다짐회수가 4회에서 6회로 증가할 경우와 6회에서 8회로 증가할 때의 건조단위중량의 증가량은 급격히 저하되는 것을 알 수 있었다.

Zone 4구간의 다짐특성은 Fig. 3(d)에 의하면, 다짐회수가 4회에서 6회로 증가할 경우와 6회에서 8회로 증가할 때의 최대건조단위중량의 증가율은 각각 1.6%~2.0%에서 0.7%~1.0%로 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 다짐회수가 4회일 경우 최대건조단위중량은 포설두께가 80 cm에서 100 cm로 증가할 때 1.2%가 감소하였으며, 다짐회수가 6회일 경우 최대건조단위중량은 포설두께가 80 cm에서 100 cm로 증가 할 때 0.8%가 감소하였다. 그리고 다짐회수가 8회일 경우 최대건조단위중량은 포설두께가 80 cm에서 100 cm로 증가 할 때 0.5%가 감소하였다. Zone 4구간의 경우, 다짐회수에 따른 포설두께가 80 cm와 100 cm로

두꺼운 편이므로 다짐효율의 변화가 크지 않는 것으로 나타났다. 그리고 본 사례현장과 동일한 시방조건으로 시공된 남강대의 경우 건조단위중량은 21.35 kN/m^3~23.61 kN/m^{3}로 본 연구결과와 유사한 결과를 보이고 있다.

현장 다짐밀도와 침하율 관계

Zone 1, Zone 2, Zone 4의 다짐재료에 대한 현장 다짐밀도와 침하율의 관계는 Fig. 4에 나타내었다. 침하량 측정은 레벨(Level) 측량기를 이용하여 측정하였다. 여기서 침하율이란 다짐밀도에 따른 침하량을 포설두께로 나눈 백분율로 나타낸다. Fig. 4에서 건조단위중량의 증가량은 침하율의 증가와 비례하는 것으로 나타났고 Zone 축조재료의 직경이 증가 할수록 침하율이 감소하는 것으로 나타났다.

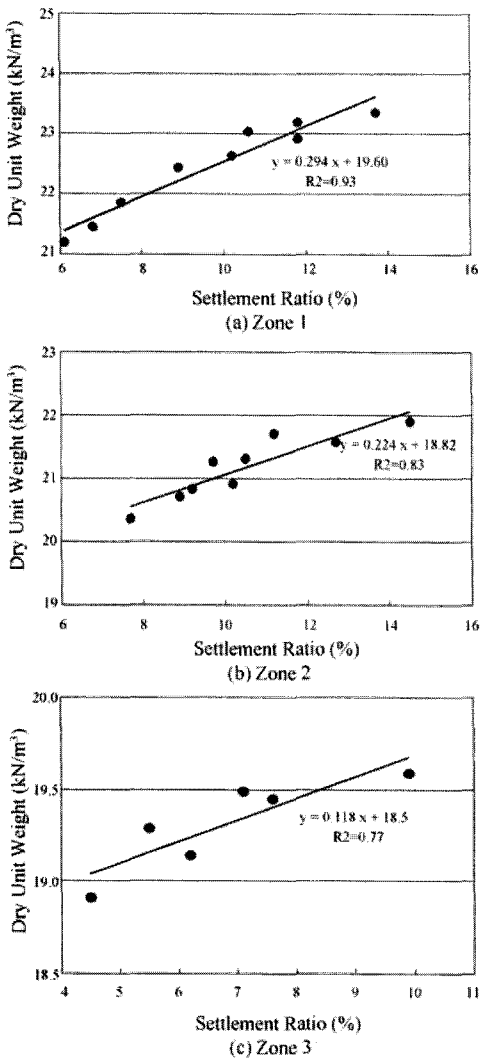

Fig. 4. Relationship between dry unit weight and the settlement ratio.

Zone 1 재료가 필요한 현장다짐밀도 γ_d= 22.4 kN/m^{3}를 만족키 위해서 침하율은 최소한 약 9.7%이상 발생되어야 하는 것으로 나타남을 알 수 있다. Zone 2 재료의 필요한 다짐밀도 γ_d= 21.0 kN/m^3(ϕ = 43°를 만족키 위한 최소건조단위중량) 이상의 값은 침하율이 약 10%이상 발생될 경우에 얻어지게 되는 것으로 나타나며, 이러한 침하율 값을 만족하기 위해서는 포설두께 50 cm 또는 60 cm의 경우, 다짐 전압회수는 6회 이상이 필요하다. Zone 4 재료의 필요한 다짐밀도 γ_d= 19.3 kN/m^3(ϕ = 40°를 만족키 위한 최소건조단위중량) 이상의 값은 침하율이 약 6.7%이상 발생될 경우에 얻어지게 되는 것으로 나타나며, 포설두께는 80 cm, 다짐 전압회수는 6회 이상이 필요한 것으로 나타난다. Fig. 4에서 현장다짐밀도와 침하율에 대한 선형회귀분석결과에 의하면 추세선과 Data와의 상관성을 나타내는 R^2 값이 Zone 1의 경우 R^2 = 0.93, Zone 2의 경우 R^2 = 0.83, Zone 4의 경우 R^2 = 0.77로 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 일반적인 CFRD의 축조재료는 거의 동일한 입도기준을 사용하므로 각 Zone에서 건조단위중량과 침하율의 경험식은 Fig. 4의 식을 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 다짐전압회수에 따른 건조단위중량과 침하율의 변화를 Zone 1, Zone 2 그리고 Zone 4에 대하여 포설두께별로 Table 5, 6, 7에 나타내었다.

Table 5. Relationship between dry unit weight and the settlement ratio for Zone 1.

Layer thickness Number of passes	30 cm		40 cm		50 cm	
	Dry unit weight (kN/m^3)	Settlement ratio(%)	Dry unit weight (kN/m^3)	Settlement ratio(%)	Dry unit weight (kN/m^3)	Settlement ratio(%)
4	21.8	7.5	21.5	6.8	21.2	6.1
6	22.9	11.8	22.6	10.2	22.4	8.9
8	23.3	13.7	23.2	11.8	23.0	10.6

Table 6. Relationship between the dry unit weight and the settlement ratio for Zone 2.

Layer thickness Number of passes	50 cm		60 cm		70 cm	
	Dry unit weight (kN/m^3)	Settlement ratio(%)	Dry unit weight (kN/m^3)	Settlement ratio(%)	Dry unit weight (kN/m^3)	Settlement ratio(%)
4	20.9	10.2	20.7	8.9	20.3	7.7
6	21.6	12.7	21.3	10.5	20.8	9.2
8	21.9	14.5	21.7	11.2	21.3	9.7

Table 7. Relationship between dry unit weight and the settlement ratio for Zone 4.

Layer thickness Number of passes	80 cm		100 cm	
	Dry unit weight (kN/m^3)	Settlement ratio(%)	Dry unit weight (kN/m^3)	Settlement ratio(%)
4	19.1	6.2	18.9	4.5
6	19.4	7.6	19.2	5.5
8	19.6	9.9	19.4	7.1

다짐 전압횟수와 침하율 관계

Zone 1~Zone 4의 다짐재료에 대한 각 포설두께별 전압회수에 따른 침하율 관계를 도시하면 Fig. 5와 같다. Zone 1의 경우, 다짐 전압회수가 증가함에 따라 침하율은 증가하는 양상을 보이고 있다. 특히 포설두께 30 cm일 경우가 40 cm, 50 cm에 비해 침하율이 큰 것으로 나타나고 있는 반면, 포설두께 40 cm, 50 cm의 경우 침하율은 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 또한, 포설두께가 30 cm~40 cm 사이에서 침하율의 변화가 크게 되는 것으로 나타나고 있으며 마사토 10% 혼합시 침하율이 약간 감소되는 것을 알 수 있다. Zone 2의 경우, 침하율은 다짐 전압회수가 증가할수록 커지며 포설두께가 작을수록 그 값이 커지는 것으로 나타나고 있는데, 이는 Rock Fill재 다짐시에 나타나는 일반적 경향으로 포설두께가 적을수록 다짐응력의 전압이 증대하기 때문이다. Zone 3의 경우, 다짐 전압 회수가 증가함에 따라 침하율은 증가하는 양상을 보이고 있으며, Zone 4 재료 역시 다짐 전압횟수가 증가함에 따라 침하율은 증가하였다.

침하율과 포설두께 관계

Zone 1, Zone 2, Zone 4의 다짐재료에 대하여 침하율에 따른 전압회수별 적정포설두께 관계는 Fig. 6과 같이 나타났다. Zone 1의 경우, 설계내부마찰각을 만족하는 침하율 9.7%일 때 다짐횟수 6회 이상을 기준으로 적정 포설두께는 33 cm 내외로 나타났다. Zone 2의 경우, 설계내부마찰각을 만족하는 침하율 10%일 때에 다짐횟수를 6회 이상을 기준으로 하면, 적정 포설두께는 56 cm 정도로 나타났다. Zone 4의 경우, 설계내부마찰각을 만족하는 침하율 6.7%에 대하여 다짐 전압회수 6회 이상을 기준으로 적정 포설두께는 90 cm이상으로 나타났다.

투수계수와 다짐전압회수 관계

Zone 1 재료의 각 포설두께(30 cm, 40 cm, 50 cm)별로 전압회수에 대한 투수계수 관계를 도시하면 Fig. 7과 같다. 현장투수시험은 현장밀도 시험용으로 굴착된 시험공을 사용하여 실시하였다. 이번 시험축조에서 Zone 1 재료의 기준값은 $K = 1 \times 10^{-4}$ cm/sec이하이며, 소요 투수계수를 확보하기 위한 포설두께 및 다짐회수는 포설두께 30 cm이하

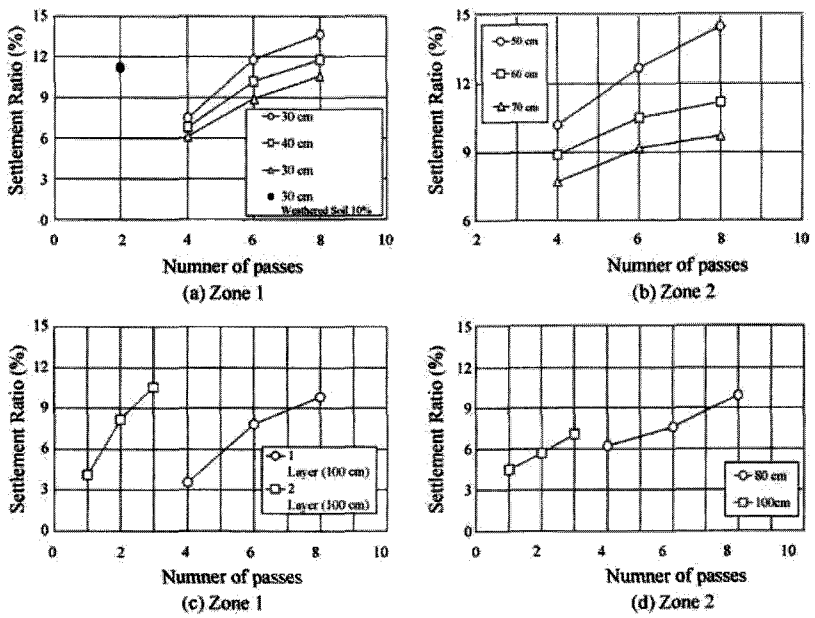

Fig. 5. Relationship between the settlement ratio and the number of passes.

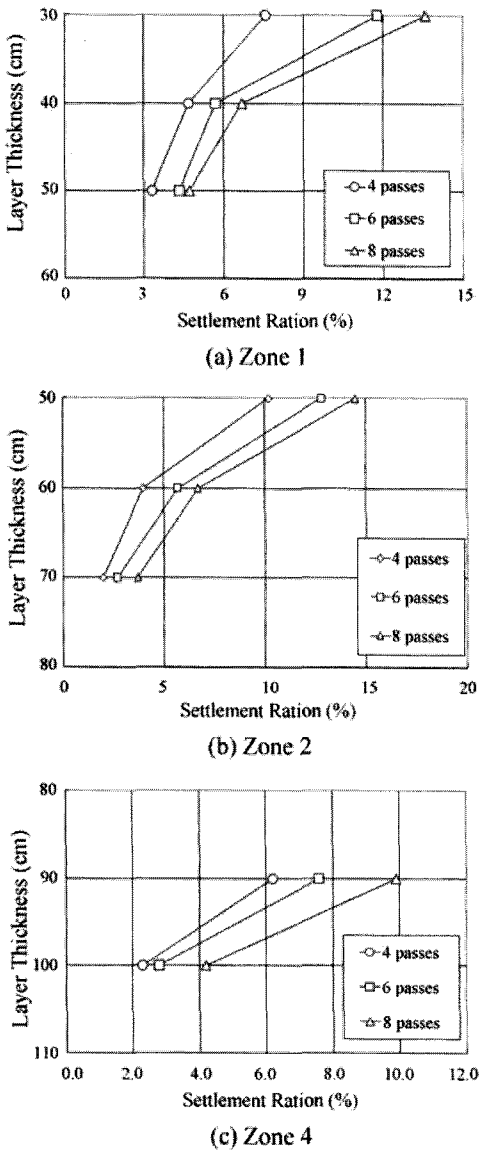

Fig. 6. Relationship between the settlement ratio and depth.

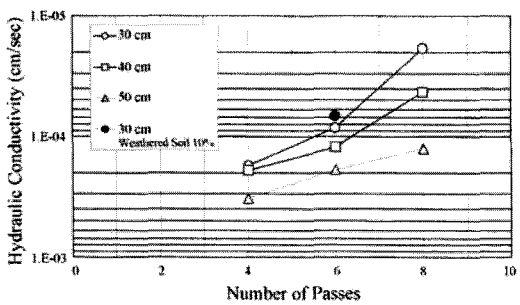

Fig. 7. Relationship between hydraulic conductivity and the number of passes.

다짐회수 6회 이상일 때 유효하다. 투수계수를 향상시키기 위하여 마사토 10%를 첨가하여 포설두께 30 cm, 다짐회수 6회로 시험축조한 결과, 투수계수가 당초 $K = 8.55 \times 10^{-5}$ cm/sec에서 $K = 6.75 \times 10^{-5}$ cm/sec로 약 21% 차수효과가 개선되었다.

결론 및 제언

CFRD 계획시 설정한 시방기준에 대하여 시험시공을 통하여 각 Zone별로 성토재료의 특성을 평가한 결과, 현장의 모암을 바탕으로 크러셔에서 생산된 쇄석을 바탕으로 재료원을 구성하여 시험시공한 바, 대부분 시방기준에 도달하기에는 어렵지 않았다. 또한, 점토성분이 거의 없지만 입도분포가 좋은 경우, 기존의 공학적인 예상과는 달리 석산분쇄암, 모재, 마사토 등의 유용은 충분한 소요강도를 유지하면서 원하는 투수계수를 충족시켰다. 이로써 기존 CFRD 시공시 시방기준에 맞는 품질확보의 경우, 엄격한 품질관리가 이루어진다면 CFRD의 조성은 기존 모암의 파쇄를 통하여 유용되는 것이 적합할 것으로 판단된다. 각 Zone별 시험성토 결과를 분석하면 다음과 같다.

Zone 1의 경우, $\gamma_d = 22.4$ kN/m^3(설계시 $\phi = 45°$를 얻을 수 있는 최소건조단위중량) 이상의 현장다짐밀도를 확보하기 위해서는 침하율이 약 9.7%이상 발생될 경우에 확보될 수 있는 것으로 나타났으며, 다짐전압회수는 최소한 6회 이상이 필요하였다. 또한, Zone 1의 적정 포설두께는 33cm로 판단할 수 있으나, 재료의 반투수성 특성을 감안할 때 투수계수의 확보 등을 위해서는 포설두께 30 cm, 다짐전압회수는 6회 이상이 적절한 것으로 나타났으며, 이때 다짐시 함수비는 최적함수비(O.M.C: 7.9%) 범위인 6~10% 정도가 적절하였다.

Zone 2에 대한 시험성토 결과를 종합하면 설계시 적용된 내부마찰각 $\phi = 43°$의 값을 얻기 위해서는 건조단위중량은 최소한 21.0 kN/m^{3}이상 확보되어야 한다는 점과 또한, 성토 다짐후의 침하량이 가급적 적은 것이 바람직할 것이므로 다소 여유가 있는 안전측으로 포설 두께는 50 cm, 다짐 전압회수는 6회 정도가 적합한 것으로 판단되어 품질관리 기준으로 설정하였다. Zone 2는 별도로 살수하지 않고 자연상태로 다짐을 하며 75 mm이하 세립분에 대한 건조밀도(γ_d)로 시공토록 계획하였다.

Zone 3에 대한 시험성토 결과를 종합하면 설계시 적용된 내부마찰각 $\phi = 43°$의 값을 얻기 위해서는 건조단위중량이 최소한 21.1 kN/m^{3}이상을 확보되어야 한다는 점과 포설두께 100 cm이하, 다짐 전압회수는 6회 정도가 적합할

것으로 판단되며, 동절기 시공시에는 기후 등을 고려하여, 자연상태에서 결정된 다짐전압 및 포설두께로 품질을 확인 후 시공하였다.

Zone 4에 대한 시험성토 결과를 종합하면 설계시 적용된 내부마찰각 $\phi = 40^{o}$의 값을 얻기 위해서는 건조단위중량이 최소한 19.3 kN/m^{3}이상을 확보되어야 한다는 점과 포설두께 80 cm이하, 다짐 전압회수는 6회 정도가 적합할 것으로 판단되었다.

사 사

이 연구는 2009년도 서일대학 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

김용성, 박한규, 임희대, 2005, 계곡형상을 고려한 CFRD의 축조중 침하량 예측, 한국지반공학회 가을학술발표회 학술논문집, 302-305.

한국수자원공사, 2001, 댐 좌안부 시공 실정보고서, 107-215.

Giudici, S., Herweynen, R. and Quinlan, P., 2000, HEC Experience in Concrete Face Rockfill Dams - Past, Present and Future, Proc. of International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams, 323-326.

Hunter, G. and Fell, R., 2003, Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Ro ckfill Dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(10), 220-230.

Liu, F., Chen, Y., Liu, J. and Ni, Y., 1993, Constriction Material Selection and Characteristics of Wannxi CFRD, Proceedings: International Symposium on High Earth-Rockfill Dams, 125-150.

2010년 11월 11일 원고접수, 2010년 12월 15일 게재승인

한상현
서일대학 토목과
131-702 서울시 중랑구 서일대학길 22(면목동 49-3)
Tel: 02-490-7444
Fax: 02-490-7438
E-mail: shhan@seoil.ac.kr

여규권
삼부토건(주) 기술연구실
100-804 서울시 중구 남창동 삼부빌딩 9-1
Tel: 02-3706-2537
Fax: 02-756-3905
E-mail: moonju@sambu.co.kr

박종화
삼부토건(주) 기술연구실
100-804 서울시 중구 남창동 삼부빌딩 9-1
Tel: 02-3706-2543
Fax: 02-756-3905
E-mail: civilpjh@sambu.co.kr