

# 콘크리트 表面遮水壁型 石塊댐 支持層의 土質特性

Soil Properties of Bedding Zone for Concrete  
Faced Rockfill Dam

배    중    순\*1  
Bae, Jong-Soon  
성    영    두\*2  
Sung, Young-Du

---

## Abstract

The bedding zone which influence directly to the safety of dam is supporting the face slab under hydraulic load in concrete faced rockfill dam.

In case that leakage is developed due to various ruptured joint or cracks of face slab and etc., the bedding zone should limit the leakage by low permeability and keep the internal stability.

In this study for the proper coefficient of permeability various properties, such as gradation, dry density, performance of embankment work and etc. were analysed.

The results from the large scale test of permeability and density are summerized as follows :

1. Coefficient of permeability is decreased clearly by increase of dry density.
2. The particles smaller than the No.4 seive( $P_4$ ) greatly influences the permeability under dry density of  $2.24t/m^3$ .
3. In case of  $C_u \geq 40$  and  $P_4 \geq 40\%$ , even if dry density decreased to  $2.0t/m^3$ , the permeability coefficient is assumed to  $\alpha \times 10^{-3} cm/s$  and internal stability is obtained.
4. Generally in dam construction since dry density and uniformity coefficient of bedding zone were higher than  $2.2t/m^3$  and 50 respectively  $P_4$  of 30~40% is assumed to be suitable and permeability coefficient of below  $1 \times 10^{-3} cm/s$  is expectable.

## 요    지

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐의 지지층은 수하중을 직접받는 콘크리트 차수벽의 기초지반으로

---

\*1 정희원, 경상대학교 공과대학 토목공학과 교수, 생산기술연구소 연구원

\*2 정희원, 한국수자원공사 과장

로 차수벽 및 지수판의 손상에 의해 발생될 수 있는 누수를 감소시켜, 제체의 안정성 저하를 방지할 수 있는 저투수성과 소요 지지력을 갖는 구조로서 그 역할이 중요하다. 본연구에서는 이같은 지지층의 특성을 갖추기 위해 우리나라의 대표적 콘크리트 차수벽형 석괴댐인 남강댐 축조 시공결과를 통해 입도, 밀도 등에 대한 투수계수의 특성에 대하여 실험적 연구 고찰을 행하였다.

Keywords : Bedding Zone, Dry Density, Rockfill Dam, Permeability, Uniformity Coefficient

## 1. 서론

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(concrete face rockfill dam, CFRD)은 콘크리트차수벽과 이 차수벽을 지지하는 차수벽 지지층 및 석괴층으로 구성되는 형태로서 표면차수벽형 댐의 한 종류이며, 댐 분류상 필댐(fill dam)에 속한다.

표면차수벽형 석괴댐은 현재에는 표면차수벽형 석괴댐을 의미하고 있다. 차수벽에 작용하는 수하중은, 경험적으로 표준 구획에 따라 4가지, 즉 지지층(bedding zone), 주하중을 지지하는 2가지의 암석층, 이 암석층과 차수벽 지지층의 입자 이동방지등 내부안정성을 도모하기 위한 완화구간인 천이(transition)층으로 구분하여 축조되는 댐 제체에 전달된다. 1950, 60년대에 건설된 CFRD에서는 축조재료로 직경 50mm 이하 또는 25mm 이하의 잔입자 재료를 제거하여 사용하였으며, 70, 80년대 건설된 호주의 Cethana Dam, 콜롬비아 Alto-Anchicaya Dam, 브라질의 Foz Do Areia Dam 등에서는 누수현상이 심하게 나타났다. 이것은 차수벽 지지층이 제2의 차수벽 역할을 효과적으로 수행하지 못했음을 뜻한다. 그 이유는 큰 입자 사이의 공극을 작은 입자가 메울 수 있을 만큼 4.75mm(#4체) 통과량(P<sub>4</sub>)이 충분하지 못하였으며, 따라서 이로 인해 포설시 재료분리 발생을 억제할 수 없었기 때문이다. 이에 따라 차수벽 지지층의 투수성 및 시공성과 관련한 입도에 대해 많은 연구가 계속되어 왔는데, 일반적으로 토층내의 투수계수에 영향을 미치는 여러 인자는 토질구조의

기하학적 형상, 침투수의 물성, 침투수와 투수매질(흙) 사이의 표면장력 등으로 대별될 수 있다.(James L. Sherard, 1985, 1987, Wesley G. Holtz, 1985) 그 중에서 침투에 관한 개념으로 볼 때, 토질구조의 기하학적 형상 즉, 유공물질의 구조에 사실상 지배되며 그 유공은 불규칙한 간극이 있는 구조라고 할 수 있다.(崔上武雄, 1969)

토목공사에서 실무적으로는 유공물질내의 유체의 운동은 거시적으로 취급되고 있으며 실험으로 얻어진 법칙은 거시적 법칙으로서 그대로 쓰는 것이 일반적이다(Collins, 1961). 따라서 CFRD 지지층의 투수계수에 대한 연구도 대부분 이론적 고찰보다는 실험적 연구가 주류를 이루고 있는 실정이다.(Bayardo Materon, 1987, Cao Keming, 1987, Edmundo Moreno 1987, Guo Chengqian 1993, James L. Sherard, J Barry Cooke, F. ASCE 1987 a, b Ranji Casinader 1987) 이들 연구에 의해 이상적인 입도가 결정되어도 각 댐의 현장 여건별, 차수벽 지지층재료의 생산방법에 따른 경제성, 시공장비 및 재료원 특성에 따른 허용입도 범위의 설정이 필요하며, 특히 댐 설계시의 요구 다짐밀도 확보를 위한 다짐에너지 및 굽은골재의 제한적 요구 등을 감안한 차수벽 지지층의 토질특성 분석이 요구된다.

CFRD 형식은 국내 뿐 만 아니라 세계적인 추세이며 본 연구에서는 차수벽 지지층에 대한 실내투수시험 및 다짐시험을 실시하고 우리나라 대표적 CFRD인 남강댐 축조시공결과를 통해 입도, 밀도, 투수계수의 특성을 검토하였다.

연구대상 재료는 남강댐 지지층의 재료와 동

일한 것을 사용하였으며 입도별 다짐밀도와 투수성과를 분석하고, 차수벽 지지층의 내부안정성을 판별할 수 있는 새로운 기준을 제시하고 남강댐의 차수 지지층의 적정입도를 파악하고자 하였다.

## 2. 표면차수벽 지지층의 일반적 특성

### 2.1 차수벽 지지층 특성

콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD)의 콘크리트 지지층은 물하중을 직접받는 콘크리트 차수벽의 기초 지반으로서 차수벽 및 지수판의 손상에 의해 발생될 수 있는 누수를 감소시켜, 제체의 안정성 저하를 방지할 수 있는 저투수성(semi-pervious)과 소요지지력을 갖는 구조로서 다음과 같은 특성이 요구된다

- 1) 콘크리트 차수벽의 누수시 세립토의 이동에 의한 제체 변위를 억제할 수 있는 투수계수 유지
- 2) 댐 축조시 재료분리를 방지하고, 사면형상 유지 및 시공성 보장
- 3) 콘크리트 차수벽을 균등하게 지지할 수

있는 지지력 확보

4) 시공중 사면안정을 위한 소요 전단강도 확보

5) 슛콘크리트(shotcrete) 및 표면 슬래브(face slab) 등의 시공을 위한 안정성 시공기면 제공 등을 들 수 있다.

이와 같은 CFRD에 있어 지지층의 특성에 따른 적정성을 확보하기 위하여 소요입도와 밀도, 투수계수 등이 결정되어야 한다. 그런데 현재까지 CFRD를 설계 시공함에 있어 J. Barry Cooke(1987)가 "CFRD의 설계는 본질적으로 경험적이고, 경험과 선례에 기초를 둔다"고 주장한 바와 같이 기 시공된 사례를 분석, 이용하여 CFRD의 차수벽 지지층을 설계하여 왔다. 차수벽 지지층의 투수성, 내부안정성, 현장조건 및 시공성 등을 고려한 입도 등에 관한 표준시방서의 결정은 과거 댐 건설사례에서 경험적으로 접근되고 있다.

우리나라의 댐 설계기준(1) 및 세계적으로 CFRD의 설계기준이 되고 있는 James. L. Sherard(1987)가 제안한 표준단면 및 입도, 투수계수는 Fig.1. 및 Table 1.과 같다.

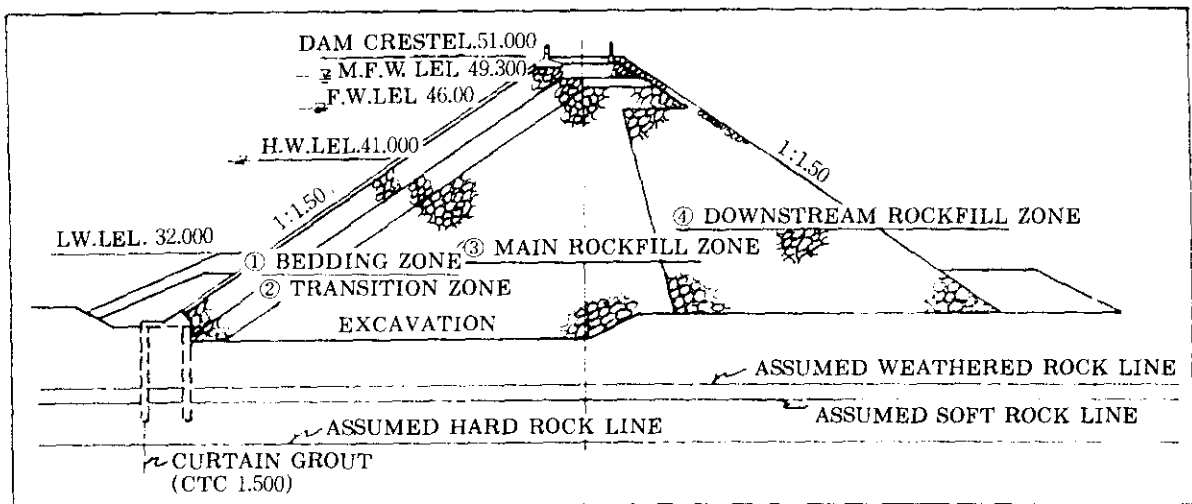


Fig. 1 Typical section of concrete face rockfill dam(Namgang dam)

Table 1. Recommended gradation and coefficient of permeability of bedding zone

unit : %(percent passing by weight)

DESCRIP. (mm)	101.6 (4")	76.2 (3")	38.1( $1\frac{1}{2}$ ")	19.1( $\frac{3}{4}$ ")	4.76 (#4)	0.59 (#30)	0.074 (#200)	k(cm/s)
한국댐 설계기준	100	-	70~100	55~80	35~55	9~30	3~15	$1 \times 10^{-4}$ below
J.L. Sherard 설계기준	-	90~100	70~95	55~80	35~55	8~30	2~12	$1 \times 10^{-3}$ below

## 2.2. 차수벽 지지층의 투수특성

지지층의 투수성에 대한 경험적 고찰 결과에 의하면 누수가 발생할 때 제체 내부의 토립자 이동에 따른 공극 및 유로 형성으로 체변형 및 누수량 확대에 이어지며, 궁극적으로 콘크리트 차수벽 변형으로 댐 파괴에 이르게 되므로 차수벽 지지층의 투수계수는 매우 중요하다.

Ranji Casinader(1987)의 연구한 결과에 의하면 차수벽 지지층의 투수성에 관한 특징은 다음과 같다.

1) 록필(rockfill)의 축조중 강우 또한 다짐 살수 등에 의한 과잉수는 배제되어야 한다.

2) 이 과잉수는 시공시 세립자가 각 포설층 표면부 일부 구간에 유실 퇴적되어 불투수 표면이 형성되므로 지지층 내부로 침투되기 어렵다.

3) 차수벽 지지층의 투수능력은 강한 폭우 등을 소화할 수 있는 정도는 아니므로 그 결과 차수벽 지지층이 불투수성이면 축조 내부에는 지하수위가 형성된다.

4) 이 지하수위에서 생기는 침투수가 층내부로 부터 잔입자를 유실시켜 밀도저하와 이에 따른 부등 침하로 콘크리트 차수벽의 균열을 발생시키는 결과를 초래한다.

5) 건설기간 중 높은 간극 수압은 사면 파괴의 원인이 될 수 있다.

최근 CFRD 설계경향을 보면 최대입경을 적게하고  $P_4$ 를 증가시켜 낮은 투수계수를 얻도록 시공하는 추세에 있으며, 80년대 이후는 투

수계수가  $k=10^{-3}$ cm/s에서  $10^{-4}$ cm/s로 낮아지는 경향을 나타내고 있다.

## 2.3. 차수벽 지지층의 입도특성

차수벽 지지층의 입도는 앞에서 설명한 바와 같이 소요 투수계수와 경제성 등을 위하여 가장 먼저 고려되어야 할 사항이다. 토립자 사이를 흐르는 물의 특성 즉, 투수성에 관한 이론적 고찰은 Kozeny, Drag, Hazen 등에 의한 여러 가지가 있으나(崔上武雄 1969) 여기서는 CFRD에 있어서의 지지층의 재료에 대한 투수계수에 대하여 고찰해 보기로 한다. 우선 최근 댐 건설에 사용된 쇄석암 또는 충전토(S/G)등, 지지층 재료의 입도특성을 보면

1)  $P_4$ (4.75mm체 통과량)가 평균 20% 이하인 Cethana, Alto Anchicaya, foz do Areia 댐

2)  $P_4$ 가 평균 30% 이상인 Cirata, Xingo, Yacambu, Salvajina 댐

등으로 대별된다. 그러나  $P_4=20\%$  이하인 경우에는 이수판이 손상되었을 때 누수억제 효과가 좋지 않았으며, 심한 경우 Alto Anchiyaca 및 Cethana 댐에서 누수가  $1m^3/s$  이상 발생된 경우가 있었다. Ge Zuli(1993)는 다음식과 같이 제안하여 지지층의 내부 안정성을 판단하였다.

$$D_{30} Cu^{1/2} \leq 40 \quad (2.1)$$

여기서

$D_{30}$  : 통과율 30%에 해당하는 유효입경

$Cu$  : 균등계수

이 계산방식은 사실상 내부 안정성이 주로 어느 특정입자에 의해서가 아니고 전체 토질특성에 의해 지배되며, Gu Ganchen과 Lubochkov에 의해 제안된 낮은 모래 함유율의 기준도 내부 안정성 판별에 적합하다고 주장하였다.

### 3. 차수벽 지지층의 토질시험

CFRD의 차수벽 지지층의 토질특성을 규명하기 위하여 남강댐의 설계 및 시공현황을 분

석하는 한편 적정 시방입도를 선정하여 남강댐 축조재료와 동일한 재료로서 시료를 조제하여 총 59회의 실내시험을 실시하고, 그 결과를 검토 분석하였다.

#### 3.1 남강댐 차수벽 지지층의 고찰

남강댐 차수벽 지지층의 입도 및 투수계수는 과거 CFRD의 시공실적 및 연구실적을 토대로 결정되었으며, 그 내용은 Table 2., Fig.2와 같다.

Table 2. Specific gradation of bedding zone on Namgang dam

SEIVE(mm)	100	40	19	6	4.76 (#4)	0.59 (#30)	0.149 (#100)	0.074 (#200)
PASSING(%)	100	70~95	49~82	35~60	30~57	12~30	2~17	0~12
DESCRP.	D <sub>60</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>15</sub>	D <sub>10</sub>	Cu	D <sub>30</sub> Cu <sup>1/2</sup>	P<5	k
UPP. GR.	6.0	0.59	0.11	0.074	81	5.3	57	10 <sup>-4</sup> cm/s
MID. GR.	14	1.32	0.28	0.149	94	12.8	44	
LOW. GR.	27	4.76	0.83	0.42	64	38.1	30	

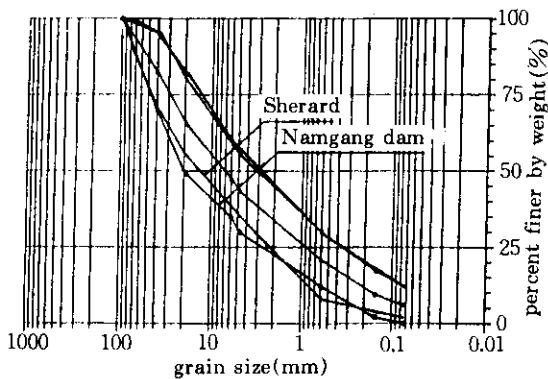


Fig. 2 Specific gradation curve of bedding zone on Namgang dam.

남강댐의 입도는 J.L. Sherard가 추천한 Table 1.과 비교할때 중앙값을 기준으로 보면  $Cu=94 < 100$ ,  $D_{10}=0.15 > 0.12$ ,  $P_1=44\% < 45\%$ 로서 유사하며,  $D_{30} Cu^{1/2}=12.8 > 12 \leq 40$ 로서

Ge Zuli가 제안한 식의 범위안에 있어 내부 안정성을 갖고 있는 것으로 나타난다.

남강댐에서는 투수계수의 경우  $k=1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 를 목표로 하도록 되어 있으며(전설부), 시방입도 범위안에서 각각 다른 입도에 대하여 당초 설계기준( $\gamma_d=2.21 \text{t/m}^3$ )보다 약간 상회하는 실제 시공시 다짐밀도의 품질관리 기준인  $\gamma_d=2.24 \text{t/m}^3$ 에 대응하는 투수계수 시험결과는 Table 3.과 같다. 이 시험결과에 의하면 시험 2에 의한 중앙입도 이하의 입도가 J.L. Sherard(1987) 및 Ranji Casinader(1993)가 추천한 소요 투수계수에는 부합하나 소요 건조 밀도  $\gamma_d=2.24 \text{t/m}^3$  이므로, 시험 2 및 3에서 상한입도의 경우는  $k=10^{-6} \text{cm/s}$  이하로서  $\gamma_d$ 가 증가하면 불투수성에 이르게 될 것으로 보여진다.

Table 3. Results of test for permeability of specific gradation on Namgang dam

DESCRP.	TEST 1		TEST 2		TEST 3		TEST 4	
	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	$k(\text{cm/s})$	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	$k(\text{cm/s})$	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	$k(\text{cm/s})$	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	$k(\text{cm/s})$
UPP. GR.	2.065	$8.5 \times 10^{-4}$	2.233	$5.0 \times 10^{-6}$	2.263	$6.6 \times 10^{-7}$	—	—
MID. GR.	2.065	$1.0 \times 10^{-2}$	2.233	$3.1 \times 10^{-4}$	2.263	$3.8 \times 10^{-5}$	2.283	$3.0 \times 10^{-5}$
LOW. GR.	2.024	$1.5 \times 10^{-2}$	2.233	$1.7 \times 10^{-3}$	—	—	2.291	$4.9 \times 10^{-4}$

### 3.2 시험입도의 선정

시험입도는 Fig.3과 같이 남강댐 시방입도의 입도곡선 기울기와 유사하게 묘사하여 균등계수  $C_u=50$ 을 기준으로 평행 이동시켜 5개의 모델을 구하였다. 또한 Fig.4와 같이 균등계수를 변화시켜 4개의 모델을 선정함으로써 가능

한 현장에서 얻을 수 있는 입도범위를 나타낼 수 있도록 하였다. 사용재료는 남강댐 축조재료와 같은 석산발파암 및 기초굴착 재료를 사용하였다.

시험입도에 대한 입도특성은 Table 4., Table5.와 같다.

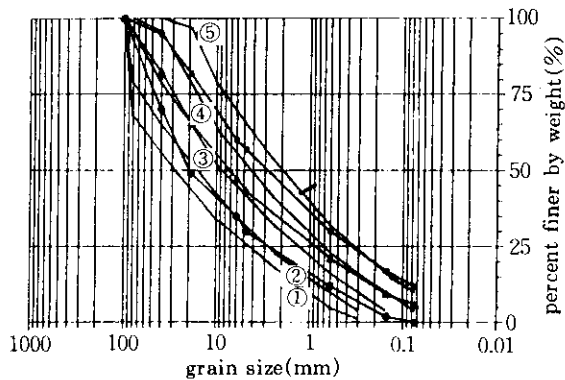


Fig. 3 Gradation for test of permeability ( $C_u=50$ )

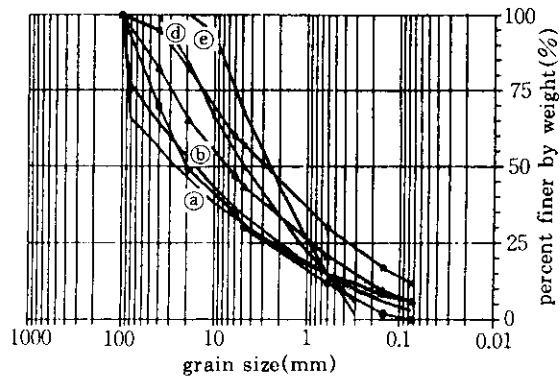


Fig. 4 Gradation curve of test for permeability ( $C_u=208, 100, 18, 8$ )

Table 4. Gradation for permeability test

MATERIAL SEIVE(mm)	PERCENT PASSING BY WEIGHT(%)									
	①	②	③	④	⑤	a	b	d	e	
100	100	100	100	—	—	100	100	—	—	
80	68	79	96	100	—	66	77	—	—	
40	56	65	79	96	100	56	64	100	—	
19	44	53	65	79	97	46	53	84	100	
10	34	42	52	64	79	38	43	66	94	
4.76 (#4)	26	32	42	52	65	31	34	50	68	
2.38 (#8)	18	23	32	41	53	25	27	37	48	
1.19 (#16)	11	16	24	32	42	19	20	25	30	
0.59 (#30)	5	10	16	23	32	15	15	15	15	

0.297(#50)	1	4	10	16	24	12	10	6	2
0.149(#100)	-	-	4	10	16	8	6	-	-
0.079(#200)	-	-	-	4	10	6	3	-	-
$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	2.126	2.165	2.210	2.260	2.225	2.290	2.263	2.165	2.135

Table 5. Properties of test materials

MATERI	$D_{max}$ (mm)	$D_{min}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{15}$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	Cu	Cg	$D_{30}Cu^{1/2}$	$P_4$ (%)	F.M	REMARK
①	100	0.149	50	6.8	1.78	1.0	50	0.92	48.1	26	7.39	
②	100	0.149	30	4.0	1.05	0.6	50	0.89	28.3	32	6.76	
③	100	0.079	15	2.1	0.52	0.3	50	0.98	14.8	42	5.80	
④	80	Pan	7.5	1.04	0.26	0.15	50	0.96	7.4	52	4.87	
⑤	40	Pan	3.75	0.54	0.13	0.074	50	1.04	3.8	65	3.92	
㉠	100	Pan	50	4.2	0.59	0.24	208	1.47	60.6	31	6.84	
㉡	100	Pan	30	3.2	0.59	0.3	100	1.14	32.0	34	6.50	
㉢	40	0.149	7.5	1.6	0.59	0.42	18	0.81	6.8	50	5.17	
㉣	19	0.149	3.75	1.19	0.59	0.46	8	0.82	3.4	68	4.43	
UPP.GR.	80	Pan	6.0	0.59	0.11	0.074	81	0.78	5.3	57	4.35	
MID.GR.	100	Pan	14	1.32	0.28	0.149	94	0.84	12.8	44	5.40	
LOW.GR.	100	0.074	27	4.76	0.83	0.42	64	2.0	38.1	30	6.52	

### 3.3 시험기구 및 시험방법

#### 3.3.1 시험기구

시험기구는 KSF 2322의 규정(한국공업규격)에 의하면 투수원통의 안지름은 시료의 최대입자 지름 크기의 20배 이상으로 규정하고 있으므로 본 시험에서는 최소 2m 직경을 사용하여야 한다. 그러나 이러한 원통을 사용하면 시료의 정밀한 다짐밀도 관리가 어렵고 또한 시료 조제시에 너무 많은 인력과 시간이 소요되므로 시험이 불가능할 것으로 판단되었다. 따라서 KSF 2312(흙의 다짐시험 방법)의 "E" 다짐방법(한국공업규격)에 적용되는 용기의 크기와 시료 크기의 비율을 참고하여, 남강댐 지지층 건설 재료의 최대입경과 동일한 시료 최대입자 크기의 약 4배 정도인 내경 40cm, 높이 60cm인 강재원통을 사용하여 정수위 투수

시험법으로 시험을 하였다. 투수계수가  $k=10^{-5}$  cm/s 이하의 일부 시료에 대해서는 변수위 투수시험법의 이론을 적용하여 시험하였다.

#### 3.3.2 시험방법

투수시험 시료는 모래를 입도 시험한 기본 시료에 각 입경별로 체가름한 시료를 혼합하여 최적함수비(OMC) 상태로 조제하였다. 시료의 밀도는 투수시험 원통안에 3개층으로 나누어 집어넣고 매 층별로 상부에 두께 10mm, 직경 40cm의 철판을 깔아 추가 낙하되어 다짐에너지를 균등하게 받을 수 있도록 하였으며, 80kg 추를 삼각 지지대 및 도르레를 이용하여 각 층별다짐을 하였다. 정수위 투수시험시에는 수두차(h)를 약 50cm를 유지시켜 투수시험을 실시하였다.

각 입도별, 밀도별 투수시험 결과는 Table

6., Table 7. 및 Table 8.과 같으며, Table속의  $k_i$ 는 시험초기의 투수계수,  $k_f$ 는 시험 4시간 경

과 후의 투수계수,  $k_s$ 는 시험 종료시의 투수계수이다.

Table 6. Results of test for various  $\gamma_d$ (Cu=50)

MATER- IAL NO.	건조밀도( $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ))와 투수계수(k(cm/s))								REM- ARK
	$\gamma_d$								
①	$\gamma_d$	2.003	2.125	2.167		2.279		2.327	불안정
	$k_i$	$5.3 \times 10^{-2}$	$4.9 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-2}$		$2.6 \times 10^{-3}$		$3.4 \times 10^{-3}$	
	$k_f$	—	—	—		—		$1.1 \times 10^{-2}$	
	$k_r$	$9.7 \times 10^{-2}$ (4)	$6.8 \times 10^{-2}$ (4)	$3.4 \times 10^{-2}$ (4)		$1.3 \times 10^{-2}$ (8)		$1.4 \times 10^{-2}$ (7)	
	k	$9.7 \times 10^{-2}$	$6.8 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-2}$		$1.3 \times 10^{-2}$		$1.4 \times 10^{-2}$	
②	$\gamma_d$	2.065	2.111		2.203		2.295		불안정
	$k_i$	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$		$1.8 \times 10^{-3}$		$2.9 \times 10^{-4}$		
	$k_f$	$5.4 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-2}$		$3.3 \times 10^{-3}$		$2.3 \times 10^{-4}$		
	$k_r$	$3.6 \times 10^{-3}$ (20)	$2.7 \times 10^{-2}$ (14)		$4.6 \times 10^{-3}$ (22)		$1.5 \times 10^{-4}$ (24)		
	k	$7.7 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-2}$		$4.6 \times 10^{-3}$		$2.6 \times 10^{-4}$		
③	$\gamma_d$	2.022	2.105	2.174	2.207	2.250	2.277	2.313	안정
	$k_i$	$5.9 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-5}$	—	$1.3 \times 10^{-5}$	
	$k_f$	$6.0 \times 10^{-3}$	$3.7 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$5.2 \times 10^{-5}$	—	—	
	$k_r$	$5.7 \times 10^{-3}$ (6)	$1.9 \times 10^{-3}$ (17)	$1.3 \times 10^{-3}$ (15)	$1.4 \times 10^{-4}$ (15)	$5.4 \times 10^{-5}$ (4)	$3.8 \times 10^{-5}$ (16)	$1.4 \times 10^{-5}$ (24)	
	k	$6.0 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$5.2 \times 10^{-5}$	$3.8 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-5}$	
④	$\gamma_d$		2.057		2.155		2.263		안정
	$k_i$		$9.1 \times 10^{-4}$		$7.0 \times 10^{-5}$		—		
	$k_f$		$6.8 \times 10^{-4}$		$5.8 \times 10^{-5}$		—		
	$k_r$		$3.9 \times 10^{-4}$ (18)		$5.4 \times 10^{-5}$ (18)		$2.5 \times 10^{-6}$ (48)		
	k		$8.0 \times 10^{-4}$		$6.6 \times 10^{-5}$		$2.5 \times 10^{-6}$		
⑤	$\gamma_d$	1.944	2.015		2.132			2.279	
	$k_i$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-4}$		$1.5 \times 10^{-5}$			—	
	$k_f$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-4}$		$1.5 \times 10^{-5}$			—	
	$k_r$	— (4)	$1.6 \times 10^{-4}$ (17)		$1.5 \times 10^{-5}$ (10)			$2.9 \times 10^{-7}$ (72)	
	k	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-4}$		$1.5 \times 10^{-5}$			$2.9 \times 10^{-7}$	

\* 불안정 시료의 투수계수  $10^{-4}$ cm/s에서는 안정  
 \*( )안의 수자는 시험 경과시간



Table 7. Results of test for various  $\gamma_d$ (Cu=Vari.)

MATERIAL NO.	건조밀도( $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ))와 투수계수(k(cm/s))								REMARK
	$\gamma_d$	1.877	2.065	2.203	2.303	2.377			
㉑	$k_i$	$2.4 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-3}$	$6.8 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-5}$			안정
	$k_t$	$1.2 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-5}$			
	$k_f$	$4.8 \times 10^{-4}$ (48)	$1.0 \times 10^{-3}$ (43)	$6.3 \times 10^{-4}$ (20)	$1.7 \times 10^{-4}$ (18)	$1.0 \times 10^{-5}$ (24)			
	$k$	$1.8 \times 10^{-3}$	$3.4 \times 10^{-3}$	$6.4 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-5}$			
	$\gamma_d$		2.147		2.271			2.390	
㉒	$k_i$		$6.9 \times 10^{-4}$		$4.3 \times 10^{-5}$			-	안정
	$k_t$		$5.0 \times 10^{-4}$		$4.2 \times 10^{-5}$			-	
	$k_f$		$4.1 \times 10^{-4}$ (20)		$4.2 \times 10^{-5}$ (24)			$1.1 \times 10^{-6}$ (43)	
	$k$		$6.0 \times 10^{-4}$		$4.2 \times 10^{-5}$			$1.1 \times 10^{-6}$	
	$\gamma_d$		1.983		2.065	2.118	2.164	2.193	
㉓	$k_i$		$1.3 \times 10^{-2}$		$3.5 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$4.9 \times 10^{-5}$	불안정
	$k_t$		$3.4 \times 10^{-2}$		$6.6 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$6.2 \times 10^{-5}$	
	$k_f$		$3.5 \times 10^{-2}$ (6)		$8.0 \times 10^{-3}$ (19)	$7.9 \times 10^{-3}$ (23)	$5.6 \times 10^{-4}$ (24)	$5.7 \times 10^{-5}$ (19)	
	$k$		$3.5 \times 10^{-2}$		$8.8 \times 10^{-3}$	$7.9 \times 10^{-3}$	$5.6 \times 10^{-4}$	$5.6 \times 10^{-5}$	
	$\gamma_d$	1.836		1.944		2.065	2.127	2.203	
㉔	$k_i$	$2.1 \times 10^{-2}$		$6.0 \times 10^{-3}$		$1.3 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-5}$	불안정
	$k_t$	$1.6 \times 10^{-2}$		$8.3 \times 10^{-3}$		$1.1 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$	
	$k_f$	$6.9 \times 10^{-3}$ (47)		$1.2 \times 10^{-2}$ (8)		$2.3 \times 10^{-3}$ (41)	$1.3 \times 10^{-4}$ (125)	$1.8 \times 10^{-5}$ (4)	
	$k$	$1.8 \times 10^{-2}$		$1.2 \times 10^{-2}$		$2.3 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-5}$	
	$\gamma_d$								

\* 불안정 시료의 투수계수  $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$  사이에서는 안정한 경우가 있음.  
 \* ( )안의 수자는 시험 경과시간

Table 8. Results of test for specific gradation on Nangang dam

MATERIAL NO.	건조밀도( $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ))와 투수계수(k(cm/s))							REMARK
	$\gamma_d$							
UPP.GR	$\gamma_d$	2.065	2.233	2.263				안정
	$k_i$	$9.6 \times 10^{-4}$	-	-				
	$k_t$	$8.5 \times 10^{-4}$	-	-				
	$k_f$	$8.5 \times 10^{-4}$ (4)	$5.0 \times 10^{-6}$ (23)	$5.8 \times 10^{-7}$ (85)				
	$k$	$8.5 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$6.6 \times 10^{-7}$				
MID.GR.	$\gamma_d$	2.065	2.233	2.263	2.284			안정
	$k_i$	$5.4 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-5}$	-			
	$k_t$	$9.8 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-5}$	-			
	$k_f$	$1.0 \times 10^{-2}$ (5)	$3.0 \times 10^{-4}$ (21)	$3.6 \times 10^{-5}$ (7)	$3.5 \times 10^{-5}$ (23)			
	$k$	$1.0 \times 10^{-2}$	$3.1 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$			
LOW.GR.	$\gamma_d$	2.024	2.233	2.291				불안정
	$k_i$	$9.0 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$2.6 \times 10^{-4}$				
	$k_t$	$1.3 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-4}$				
	$k_f$	$1.2 \times 10^{-2}$ (15)	$1.4 \times 10^{-3}$ (10)	$4.9 \times 10^{-4}$ (22)				
	$k$	$1.5 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$4.9 \times 10^{-4}$				
*안정한 시료의 투수계수 $10^{-3}$ cm/s 대에서는 불안정한 값을 나타낸 경우도 있음. * ( )안의 수자는 시험 경과시간								

### 3.4 시험성과 분석

#### 3.4.1 투수계수(k) - 건조밀도( $\gamma_d$ )와의 관계

Fig. 5에서와 같이 투수계수(k) - 건조밀도( $\gamma_d$ )와의 관계는 균등계수가 같을 때 입도 분포가 세립측(⑤ 입도)으로 갈수록 투수계수가 작아지며, 조립측(① 입도)으로 갈수록 굵은 골재 함유율 증가에 따른 다짐밀도가 증가하며 투수계수도 커졌다.

동일입도에서는 건조밀도가 증가하면 투수계수가 감소하여, 그 상관성이 매우 뚜렷하고, 균등계수가 같으면(Cu=50 ②~⑤) 그 상관성도 거의 같게 나타나고 있었다.

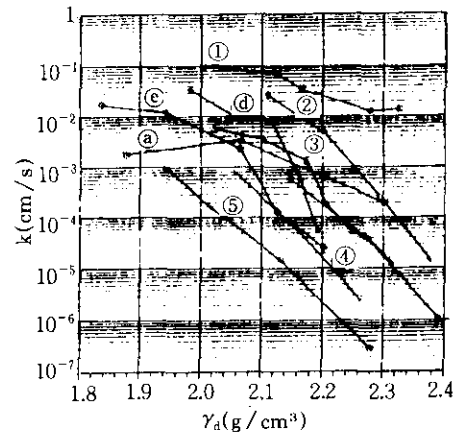


Fig. 5 Relation of  $\gamma_d$  to  $k$  for various materials.

단지 ①시료와 같이  $P_i=30\%$  이하일 경우 J. L. Sherard 및 U.S Soil Conservation Service의 재료분리를 고려한 시공성 평가에서 "재료분리 방지를 위해 많은 노력이 필요하다"고 평가한 것과 같이  $\gamma_d-k$ 의 상관성이 비교적 다르게 나타났으나,  $\gamma_d$ 증가에 따른  $k$ 의 감소현상은 명확하게 일어났다.

실험결과 Fig. 5에서

$C_u=50, P_i=52\%$  일때

$$\gamma_d = -0.040 \ln(k) + 1.750 \quad (3.1)$$

$C_u=100, P_i=34\%$  일때

$$\gamma_d = -0.040 \ln(k) + 1.845 \quad (3.2)$$

의 상관관계식으로 정리되었다.

### 3.4.2 투수계수(k)-NO.4체 통과량( $P_i$ )와의 관계

NO.4체 통과량( $P_i$ )에 따라 투수계수 및 내부안정성이 변화된다는 것은 J.L. Sherard 등 많은 학자들에 의해 증명되었다. 본 시험에서도 Fig.6과 같이  $\gamma_d$  및  $C_u$ 가 유사할 때  $P_i$ 의 영향이 큰 것으로 나타났으며  $\gamma_d=2.24t/m^3$ 에 대응하는 그 관계식은 (3.3)과 같았다.

$$k = \exp(-0.218P_i + 1.976) \quad (3.3)$$

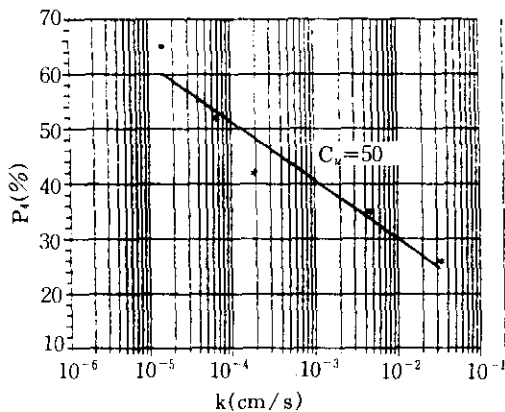


Fig. 6 Relation of  $P_i$  to  $k$  ( $C_u=50$ )

### 3.4.3 건조밀도( $\gamma_d$ )- $P_i$ 및 $D_{60}$ 관계

건조밀도는 KSF 2312의 "E" 다짐방법을 적용하여 9개의 시료에 대해서 최대 건조밀도를 구하였으며, 앞에서 설명한  $\gamma_d-k$ 에서도 일부 나타났듯이  $P_i$ 의 증가에 따른 건조밀도( $\gamma_d$ )는 Fig.7과 같이 감소되는 것으로 나타났다. 전체 입경 중  $D_{60}=40mm$  이하에서는 입경 확대에 따른 건조밀도가 비교적 증가하지만 그 이상은 별로 증가가 되지 않았다.

$P_i-\gamma_d$  관계는 실험결과, 식(3.4)와 같이 정리되었고

$$\gamma_d = -3.388 \times 10^{-5} \times (P_i)^2 + 0.001 \times (P_i) + 2.283 \quad (3.4)$$

$D_{60}-\gamma_d$  관계는 식(3.5)와 같았다.

$$\gamma_d = -4.559 \times 10^{-5} \times (D_{60})^2 + 0.004 \times (D_{60}) + 2.231 \quad (3.5)$$

지지층의 최대입경을 결정할 때  $D_{60}$ 의 영향도 고려하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

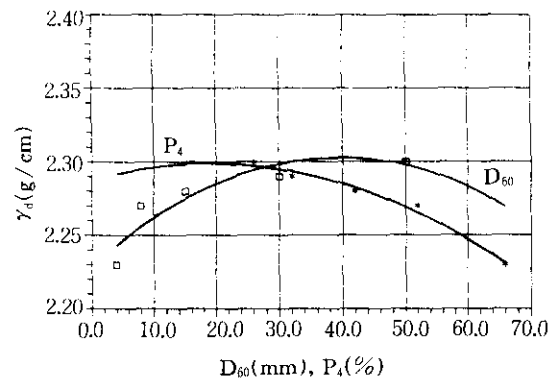


Fig. 7 Relation of  $\gamma_d$  to  $P_i$  and  $D_{60}$  ( $C_u=50$ )

### 3.4.4 $D_{60}, C_u^{1/2}$ 및 투수계수(k)에 따른 내부 안정성

차수벽 지지층 축조시 재료분리를 방지하고 좁은 입자사이의 공극을 잔입자가 효과적으로 채워줌으로 해서 표면차수벽의 균열발생, 지수판 파손 등의 손상에 의한 누수 발생시 입자이동을 억제하고 누수량을 효과적으로 제어할

수 있도록 하는 내부 안정성의 확보는 매우 중요하다.

3항에서 설명한 바와 같이 Ge Zuli(1993)가 제안한  $D_{30} Cu^{1/2} \leq 40$ 의 경우, 이 기준으로 볼 때 안정권에 포함된 사례중 17%가 불안정하였다고 보고하였으며, Fig.1과 같이 J.L.Sherard는  $k=10^{-3} \text{cm/s}$  이하에서 내부 안정성이 영구적으로 유지될 수 있을 것임을 예상하였다.

본 시험에서도 Fig.8에서 나타난 바와 같이 좌·하단부 권역이 시간에 따른 투수계수의 변화가 안정적이었으며, 불안정 권역의 투수계수가 큰 시료는 시간이 경과됨에 따라 Fig.9와 같이 투수계수가 증가되는 경향이 나타났다. 따라서 투수의 안정성은  $D_{30} Cu^{1/2} \leq 40$  식 만으로의 판별은 부족하고 투수계수의 제한조건이 추가되어야 할 것으로 본다. Fig.8에서 안정권역의 불안정 시료는 전체의 10%에 해당하는 2개의 경우가 있으나, 이 시료는  $Cu=8$ 로서 타 시료(현장입도 등)에 비해 상대적으로 훨씬 빈 입도이고, J. Sherard의 추천입도나 남강댐 시방입도의 하한치의  $P_i$ 를 벗어나고 있었다. 또한 이 시료들의 건조밀도가 낮다는 것이 주목되어졌다. 다른 한 경우는  $D_{30} Cu^{1/2}=38$ 로서 40기준의 거의 한계치에 달하는 점을 고려할

때 대체로 (3.6)식을 내부 안정조건 판별식으로 제안하고자 한다.

$$D_{30} Cu^{1/2} \leq 40 \text{ 및 } k \leq 5 \times 10^{-4} \text{cm/s} \quad (3.6)$$

### 3.4.5 시간별 투수계수 변화도 분석

#### (1) ①시료

No.4채 통과량이  $P_i=26\%$ 인 재료로서 잔골재가 부족하여, 건조밀도를  $2.279 \text{t/m}^3$ 까지 증가시켜도 투수계수가  $k=10^{-3} \text{cm/s}$  이상이 되어 세립자가 계속 이동되어 투수계수가 계속 증가추세를 보이는 등 불안정함을 나타냈다. (Fig.9)

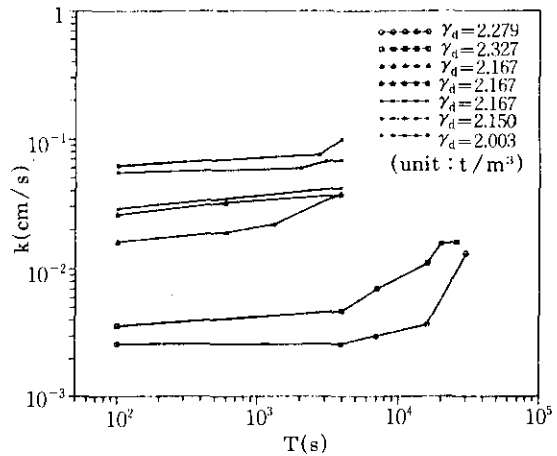


Fig. 9 Relation of  $k$  to  $T$  of material ①

#### (2) ②시료

No.4채 통과량이  $P_i=32\%$ 로서 Sherard가 추천한  $P_i=40\%$  보다는 적으며, 재료분리 방지를 위한 잔골재가 부족한 편이다. 건조밀도 ( $\gamma_d$ )를  $2.2 \text{t/m}^3$  까지 증가해도 투수계수가  $k=10^{-3} \text{cm/s}$  이상으로서 불안정함을 나타냈다.  $\gamma_d=2.111 \text{t/m}^3$  경우는 세립자가 일단 이동되어 일시적으로 시료 후면부의 공극을 줄인 것으로 보여지며,  $\gamma_d=2.295 \text{t/m}^3$ 로 건조밀도를 더욱 증가시켰을 때, 투수계수가  $k=2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 로 감소되자 안정되었다. 이에 따라 현장

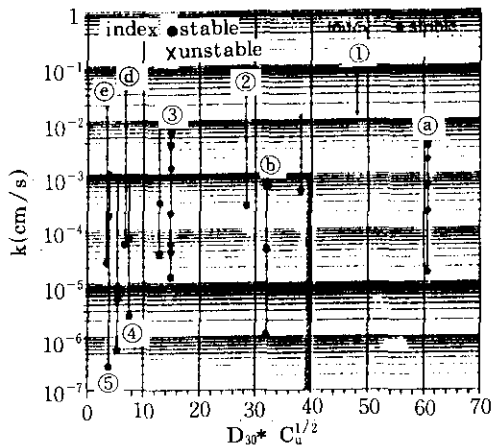


Fig. 8 Internal stability regarding with relation of  $D_{30}Cu^{1/2}$  to  $k$

기후조건상 동해를 입을 가능성이 많거나 폭우가 잦은 지역에서 사용할 수 있는 입도로 생각되어졌다.(Fig.10)

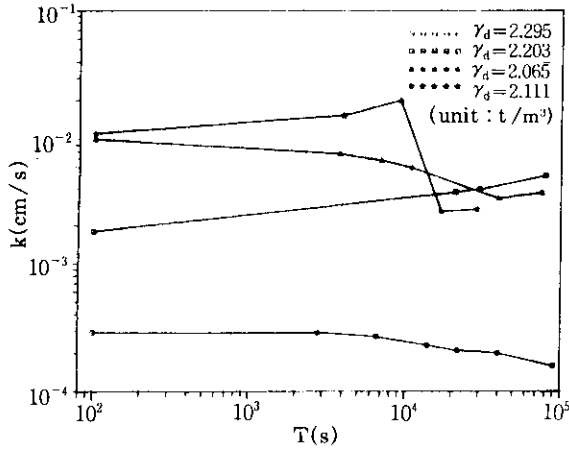


Fig. 10 Relation of  $k$  to  $T$  of material ②

(3) ③시료

No.4체 통과량이  $P_4=42\%$ 로서 Sherard의 제안입도  $P_4=40\%$  이상이며, 잔골재가 충분하여 재료 분리 방지가 용이하므로 건조밀도  $\gamma_d=2.0t/m^3$ 까지 낮아도 투수계수가  $k=5 \times 10^{-2} cm/s$ 까지 상승하나 안정함을 나타내고 있었다.(Fig.11)

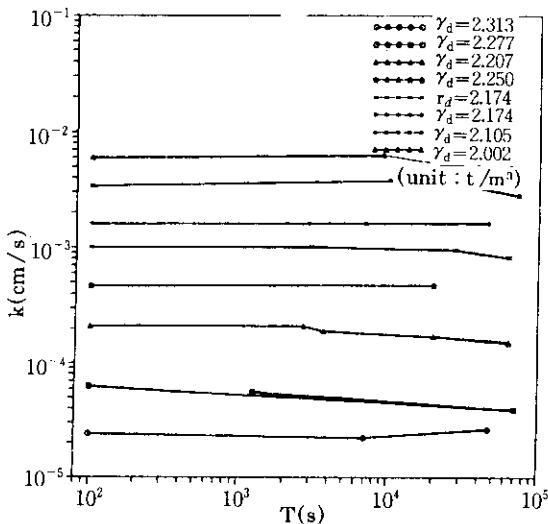


Fig. 11 Relation of  $k$  to  $T$  of material ③

(4) ④시료

시료 ③보다 No.4체 통과량이 더 많고  $Cu=50$ 으로서 동일하므로 건조밀도가 더 작아도 투수계수가 더 감소되며 안정되었다. 그러나 소요 건조밀도가 클 경우( $\gamma_d=2.2t/m^3$  이상)는 투수계수가  $k=10^{-5} cm/s$ 대 이하로 낮아지므로 지하수위의 상승 및 배수 등의 저하로 시공성이 떨어질 우려가 있음을 보여주었다.

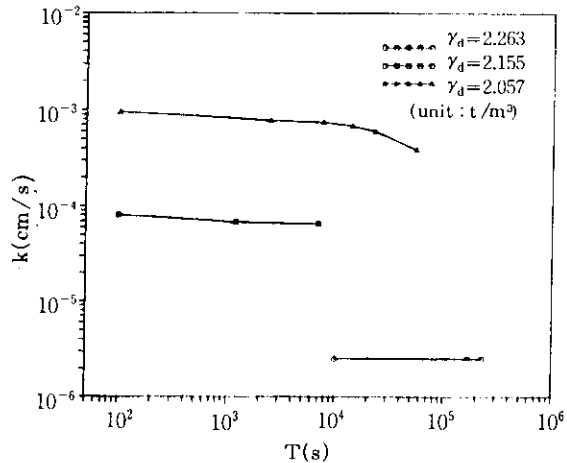


Fig. 12 Relation of  $k$  to  $T$  of material ④

(5) ⑤시료

시료 ④보다 다짐밀도 증가에 따른 투수계수의 감소가 더욱 현저하고 이에 따른 안정성도 대단히 높았으며, 배수능 저하에 따른 시공성 결여가 예상되었다.(Fig.13)

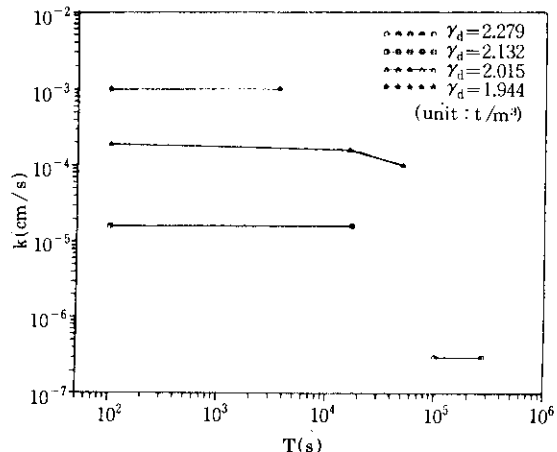


Fig. 13 Relation of  $k$  to  $T$  of material ⑤

(6) ㉔시료

균등계수가  $Cu=208$ 로서 입도분포가 아주 양호한 재료이며  $P_i=31\%$ ,  $\gamma_d=1.877t/m^3$ 에 불과해도 투수계수가  $k=1.5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  이하로 낮아서 매우 안정하였다. 그러나 건조밀도가 높아지면 투수계수가  $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 현저히 낮아져 불투수성에 접근하므로 지하수위의 상승 및 배수 등의 저하로 시공중 강우영향에 예민하고 실시공상 인공적인 배합이 어려웠다. (Fig.14)

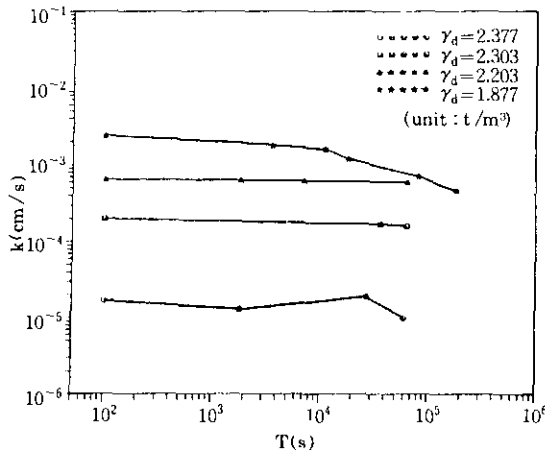


Fig. 14 Relation of  $k$  to  $T$  of material ㉔

(7) ㉕시료

균등계수  $Cu=18$ ,  $P_i=50\%$ 에 달하여 재료분리의 우려는 없으나 상대적으로 반입도로서 시료 ㉔와 대비되었다. 건조밀도를 증가시켜 투수계수가  $k=10^{-5} \text{cm/s}$ 로 저하될 때 안정되어짐을 나타내고 있었다. (Fig.15)

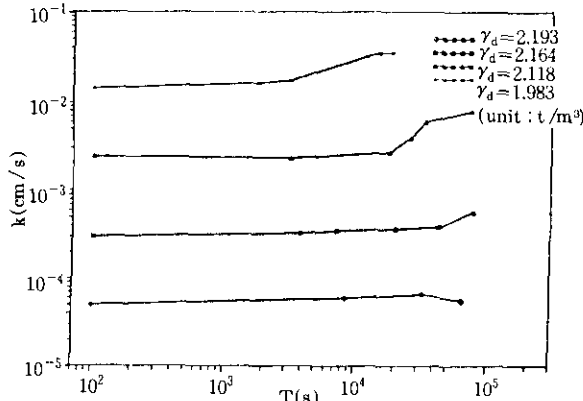


Fig. 15 Relation of  $k$  to  $T$  of material ㉕

(8) ㉖시료

균등계수  $Cu=8$ 로서 시료 ㉔보다 더욱 빈입도이며,  $P_i=68\%$ 가 재료분리가 없어도 안정성이 부족하였으며, 건조밀도를 충분히 증가시켜 투수계수가  $k=2 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 에 달했을 때 안정됨을 나타내고 있었다. (Fig.16)

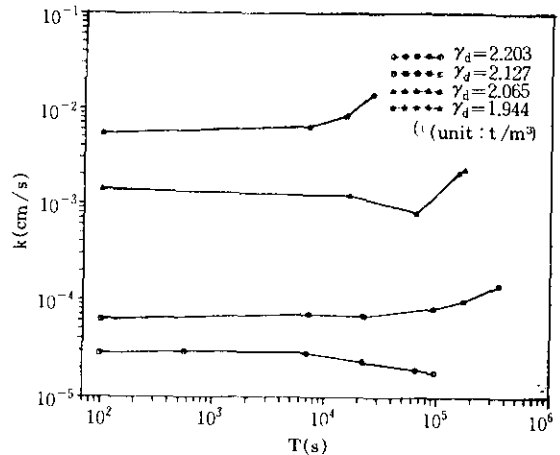


Fig. 16 Relation of  $k$  to  $T$  of material ㉖

3.4.6 세립분의 투수계수에 대한 역할

일반적으로 토층에서의 물의 흐름을 이론적으로 접근할 때 세립분의 역할은 커진다. 즉, Kozeny의 이론식, Drag의 이론식을 발전시킨 Emersleben의 제안식, 그리고 Briukman의 식 등에서 볼 때 단위체적당 공극의 면적  $S$ , 공극률  $n$  등 세립자의 역할에 따른 흡구조(공극) 변화에 기인하는 요소가 투수계수( $k$ )의 함수가 됨을 알 수 있으나, 본 시험에서와 같이 거시적 접근에 따른 결과론적으로는 0.149mm (NO.100)체 통과량(이하  $P_{100}$ ) 및 0.074mm (NO.200)체 통과량(이하  $P_{200}$ )과 투수계수와의 관계는 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 건조밀도 및 최대입경 등에 따르는 소요 전단강도 확보를 위한 시공성도 고려해야 하므로 세립분의 투수계수에 대한 역할을 크게 고려하지 않아도 좋을 것이다.

3.4.7 기타 요소들의 투수계수( $k$ )와 관계

앞에서 설명한 요소의 균등계수( $Cu$ ), 통과

을 10%에 대응하는 유효입경  $D_{10}$ 과 투수계수 ( $k$ )와 관계는 시험빈도수가 적어 경향 파악이 곤란하였으며, Cu의 경우 모든 자료가  $Cu > 10$  이상의 양입도임에도 같은 다짐밀도에서의 투수계수와는 상관성이 별로 없었으며, Hazen의 실험공식  $k=C \cdot D_{10}^2$ 에 이용하는  $D_{10}$ 과  $k$ 의 관계는 Hazen의 당초 가정대로 균질입자(빈입도)의 모래에서는  $k$ 값의 추론 및 그 상관성을 신뢰할 수 있었으나, 본 시험에서  $k$ 값 추론은 전혀 불가능하였다. 상관성도 일부 Cu가 동일할 때만  $k$ 와 비례관계가 있음이 확인되었으며 그러나 차수벽 지지층의 입도 결정에는 영향을 주지 못할 것으로 생각되었다.

#### 4. 결 론

CFRD에 있어서의 지지층에 대한 재료의 입도, 밀도, 투수계수 등의 각 시험성과 및 상관관계 등을 고찰하였다. 그 결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 건조밀도( $\gamma_d$ )와 투수계수( $k$ )와의 관계에서  $\gamma_d$ 가 증가하면  $k$ 가 감소하는 현상이 뚜렷하였으며 그 상관관계는 다음과 같았다.

(1)  $Cu=50, P_i=52\%$  일때

$$k = -0.040 \ln(k) + 1.750$$

(2)  $Cu=100, P_i=34\%$  일때

$$k = -0.040 \ln(k) + 1.845$$

2. 투수계수( $k$ )와 No.4체 통과량( $P_i$ )의 관계에서 투수계수에 미치는  $P_i$ 의 영향이 뚜렷하였으며, 그 상관관계는 다음과 같았다.

$$k = \exp(-0.218P_i + 1.976)$$

단,  $Cu=50, \gamma_d=2.24t/m^3$ 의 경우에 적용되었다.

3. 균등계수( $Cu$ )=40이상에서  $P_i$ 가 40% 이상이면 건조밀도가  $2.0t/m^3$ 까지 낮아져도 투수계수는  $k=10^{-3}cm/s$  대를 유지하고 내부안정성도 확보됨을 보였다.

4.  $P_i=50\%$  이상이면 투수계수에 따른 내부안정성에는 문제가 없음을 보여주었으나 시공 중 함수비 관리에 세심한 주의가 요구된다.

5. 일반적으로 CFRD의 실시공에서 지지층의 소요 건조밀도는  $\gamma_d=2.2t/m^3$ , 균등계수는  $Cu=50$ 을 상회하였으며,  $P_i=30\sim 40\%$ 가 적정하다고 생각되며 이 때  $k=1 \times 10^{-3}cm/s$  이하를 나타낼 것으로 예상되었다.

6. 재료분리 방지 및 적성투수계수를 얻기 위해서는 충분한 다짐이 필요하였으며  $P_i=30\sim 35\%$ 인 경우 동절기 및 우기 등 함수비 관리가 어려울 때 적용가능한 입도로서 판단되었다.

7. 표면차수벽 지지층의 내부안정성을 평가하는 상관식으로는 실험을 통하여  $D_{10}, Cu^{1/2} \leq 40$  및  $k \leq 1 \times 10^{-3}cm/s$ 의 식이 적정할 것으로 제시되었다.

#### 참 고 문 헌

1. 건설부(1993), 댐시설기준 C.F.R.D편, pp.597~629
2. 건설부, 남강다목적댐 건설공사 실시설계보고서.
3. 건설부, 남강다목적댐 건설공사 지방서.
4. 최계식(1993). 토목재료 시험법과 해설 및 응용
5. 한국공업규격, 흙의 투수시험방법 KSF 2322.
6. 한국공업규격, 흙의 다짐시험방법 KSF 2312.
7. 한국공업규격, 토질시험법, pp271~286.
8. 한국전력공사 기술연구원(1989). 구조물 뒷채움 및 채움토질의 역학적 특성과 다짐시공에 관한 연구, pp57~89.
9. 崔上武雄(1969). 土質力學, 지보당출판(주) Tokyo, Japan. pp873~891.
10. Bayardo Materon(1987). The upstream zone in concrete Face Rockfill Dams, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, pp1236~1238.
11. Cao Keming(1987). The upstream zone in concrete-Face Rockfill Dams, Journal of Geotechnical Engineering ASCE. pp1234~1236.
12. Chen Yu Nuan, Liu Fu Ming, Chen Yi Bin (1993). Study Test on the Characteristics of Bedding Material Containing Decomposed Granitic Coarse Sand, Proceedings International Symposium on High Earth-Rockfill Dams pp112~118.

13. Edmundo Moreno(1987). The Upstream Zone in Concrete-Face Rockfill Dams, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, pp1238~1241
14. Ge. Zuil(1993). Reliability Analysis on Seepage Stability of Bedding of C.F.R.D and Some Related Problems, Proceedings International Symposium on High Earth-Rockfill Dams, pp176~183.
15. Guan Zhicheng, Yang Hui, Wang Changyi, The Design of Concrete Face Rockfill Dam of SongJiang River Multi Stage Hydropower Station, Proceedings International Symposium on High Earth-Rockfill Dams, pp196~201.
16. Guo Chengqian(1993), On the Design of Concrete Face Rockfill Dams, Proceedings International Symposium on High Earth-Rockfill Dams, pp202~213.
17. Ignacio Garcia-Bengochea, Charles William Lovell, and Adolph G.Alschaeffl F.(1979). Pore Distribution and Pemeability of Silty Clay, Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, pp839~856.
18. Ivor L. Pinkerton, F.(1987), Soetomo Siswoidjono, Yutaka Matsui, Design of Cirata Concrete Face Rockfill Dam. Journal of Geotechnical Engineering ASCE. Vol. 113, pp 1213~1214.
19. James L. Sherard(1987). The Upstream Zone in Concrete Face Rockfill Dams, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, pp1241~1246.
20. James L. Sherard, J. Barry Cooke, F. ASCE (1987). Concrete-Face Rock fill Dam : I. Assessment, Journal of Geotechnical Engineering ASCE. Vol. 113, pp1096~1111.
21. James L. Sherard. F., Lorn P. Dunnigan, James R. Talbot(1985). Closure for Basic Properties of Sand and Gravel Filters, Journal of Geotechnical Engineering ASCE. Vol. 111, No7. pp1470~1472.
22. J. Barry Cooke, F.(1984). Progress in Rockfill Dams, Journal of Geotechnical Engineering ASCE. Vol. II, pp 1383~1414.
23. J. Barry Cooke, James L. Sherard, F.(1987). Concrete-Face Rockfill Dam : II. Design, Journal of Geotechnical Engineering ASCE. Vol. 113, pp1113~1132.
24. Leps. T. M.(1970). "Review of Shear Strength of Rockfill" Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE.
25. N. Barton and B. Kjaernsli(1981). "Shear Strength of Rockfill". Journal of the Geotechnical Engineering ASCE, pp873~891.
26. Ranji Casinader(1987). The Upstream Zone in Concrete-Face Rockfill Dams, Journal of Geotechnical Engineering ASCE. pp1231~1234.
27. Ranji Casinader(1993). Special Features of Some Concrete Faced Rockfill Dams, Proceedings International Symposium on High Earth-Rockfill Dams, pp96~104.
28. Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., and Talbot, J. R.,(1984) "Basic Properties of Sand Gravel Filters" Journal of Geotechnical Engineering, Vol.110, No.6, June, pp684~700.
29. Wesley G. Holtz(1985). Basic Properties of Sand and Gravel Filters, Journal of Geotechnical Engineering ASCE. Vol. 111, No 7. pp1467~1470.

(접수일자 1995. 10. 27)