

우리나라 주요 특철 댐의 지반공학적 특성

Geotechnical Characteristics of Major Earth and Rockfill Dams in Korea

유태성¹⁾, Tai-Sung Yoo

¹⁾ 주식회사 유니백 대표이사, CEO, Univec Corporation

SYNOPSIS : This paper presents the status of dam construction in Korea, along with a brief assessment of the dam design and construction practice. The assessment is based on publically available design and construction records of the major existing rockfill dams which have been constructed since early 1970's, and focussed in identifying geotechnical characteristics of design and construction parameters of the dams. Though the assessment, two representative dams, having unique geotechnical characteristics, are selected for comprehensive comparison of their geotechnical engineering behavior during construction and operation. The comparison yields very interesting findings on the effects of various design and construction parameters on dam behavior.

Key words : rockfill dam, core materials and compaction, dam monitoring and behavior analysis, dam deformation and settlement, pore pressure, hydraulic fracturing, piping, clay activity

1. 서 론

우리나라 댐 건설의 역사는 매우 깊다. 지금으로부터 약 1670여 년 전인 백제 시대에 이미 높이가 5.7m, 댐 마루폭이 10m, 길이가 3,240m로 추정되는 대규모의 저수지 댐이 건설되었다는 역사 기록으로 볼 때 당시의 댐 축조 기술이 매우 발달되었던 것으로 추정된다.

2000년 현재 국내에는 국제대댐학회 기준에 의한 대댐(Large Dam)에 해당되는 댐이 1,214개에 달한다고 한다. 이들 대부분의 댐은 횡댐(Fill Type Dam)으로서 댐의 설계와 시공은 물론, 댐의 운영 및 관리 측면에서 지반공학자들의 역할이 매우 중요하다. 그러나 지난 수년간은 NIMBY 현상, 매우 어려운 이주 및 보상 대책, 환경보존의 필요성 등의 사회적 어려움 등으로 새로운 댐의 건설이 매우 위축되어 왔고, 지반공학자들을 포함한 많은 기술자들의 댐 기술에 대한 관심 또한 줄어들고 있다.

반면에 최근 기상이변에 따른 집중호우로 인한 홍수는 기존 댐에 대한 안전성에 관한 사회적 관심도가 높아졌으며, 또한 5년 후인 2006년도부터 물 부족이 예상되고 있어 새로운 댐 건설의 필요성이 심각하게 대두되고 있다.

본 논문에서는 새로운 댐 건설에 대비하기 위하여 댐 기술에 대한 여러 지반공학자들의 관심과 연구를 촉구하는 뜻에서 국내 기존 댐의 특성과 그 설계 및 시공과정을 지반공학적인 측면에서 검토 분석하여 문제점과 개선 방향을 제시하고자 하였다. 또한 국내 대표적인 기존 댐인 소양강댐과 안동댐의 거동을 비교 검토하여 기술하였다.

2. 우리나라 댐 건설 현황

2.1 우리나라 댐 건설 역사

우리나라는 예로부터 농경문화권에 속하여 주로 벼농사를 위한 관개시설이 발달되어 왔다. 특히 연간 강수량의 2/3가 하절기에 집중되어 있고 국토 지형이 비교적 경사가 급하고 보수 기능이 낮은 유역 특성에 따라, 역사적으로도 치수 및 이수(水事)는 국가 통치 차원으로도 지속되어 왔다고 해도 과언이 아니다.

역사기록에 따르면 우리나라 최초의 댐(저수지)은 이미 약 1,670여 년 전 서기 330년 백제 중기에 축조된 김제 벽골제로 알려져 있고, 그 후 통일신라시대에도 시제, 의림지, 대제지, 수산제, 공검지 등의 문헌에 나타나고 있다고 하는데 제천의 의림지, 영천의 정제, 밀양의 수산제 등은 지금까지도 현존하고 있다고 한다. 고려조와 조선조에서도 농경 정책의 근본으로 관개사업에 치중하였다고 전해지고 있고, 특히 조선의 태조는 1895년 권농관 제도를 두어 제언의 축조를 독려했고, 1919년 세종은 이미 제언 대장을 만들었다고 한다. 그 후 1662년(현종3년) 우리나라 최초의 댐 건설 및 관리 기준에 해당되는 제언사목(堤堰事目), 1978년(정조 2년)에는 제언절목(堤堰節目)을 공포하여 저수지의 건설과 관리 등에 관한 규정을 정하였고, 1903년(고종 40년)에는 당시 전국의 제언(댐)에 대한 조사를 착수하여 1908년(순종 2년)에 동국문헌비고를 발간하였다. 이에 의하면 전국 제언(댐) 총수는 3,378개소(1780년 현재)에 달한 것으로 기록되고 있다.

이들 역사기록을 미루어 볼 때, 우리나라 댐(저수지) 건설의 역사는 매우 깊고, 댐 건설 기술도 상당한 수준에 달한 것으로 추정되며, 이미 조선시대부터는 댐 건설과 관리가 체계적으로 이루어졌다고 할 수 있다. 일제 강점기인 1920년대 이후에는 일제의 침략정책에 따라, 한반도를 그들의 식량공급 및 군수기지로 확보하기 위하여, 남한에는 주로 소규모 관개용 댐을, 북한에는 발전용 댐 등 국토 개발 보다는 식민정책에 의한 주로 단일 목적을 위한 약 130여개 정도의 소규모 댐이 건설되었다. 1945년 해방 이후 정치적 혼란기와 국토가 초토화된 6.25 동란에는 댐 건설이 거의 중단되었고, 1953년 휴전 이후 심각한 식량난과 전력의 부족으로 댐 건설의 절박한 필요성이 제기되었다.

이에 따라 1962년 제1차 경제개발5개년계획을 효시로, 우리나라 댐 건설은 본격적으로 시작되었으며, 1972년 제1차 종합개발계획에 의해 농업용수의 개발, 공업용수의 확보, 장기 전원 개발 등 국토종합개발 차원에서 수많은 저수지와 수력발전용 댐이 건설, 착수되었다. 특히, 1960년 착공된 남강댐을 시작으로 1964년에는 특정 다목적댐법이 제정되었고, 1960년대 말부터는 댐 높이가 비교적 높은 다목적댐이 건설되기 시작하였고, 1967년 남강댐, 1973년 소양강 다목적댐 준공을 기점으로 안동댐, 대청댐 등이 건설되어, 우리나라 댐 건설기술 발전의 효시가 되었다.

2.2 댐 건설 현황

2000년 현재 우리나라 댐 및 저수지의 총수는 약 18,000개소이고, 그 중 국제대댐회(ICOLD) 기준으로 대댐(높이 15.0m 이상, 길이 2,000m 이상, 저수용량 3,000,000m³ 이상)에 해당되는 댐이 1,214 개소에 달해 세계적으로도 중국, 미국, 일본, 인도, 스페인에 이어 순위 6위의 댐 보유 국가이다.

그림1은 현재 관리중이거나, 건설 혹은 계획되고 있는 우리나라 댐을 준공 연도별로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 우리나라 댐 건설은 주로 1950년 후반 이후에 건설된 것으로 1976~1985년에 가장 많이 건설되었으며 1990년 중반 이후 건설된 댐 수가 서서히 감소하다가 1990년 말부터는 급격히 감소하고 있다. 이는 경제적으로 적정 규모의 댐을 건설할 수 있는 지점이 감소하고 있기도 하지만, 최근의 NIMBY 현상과 함께 급격한 보상비의 상승, 수몰대책, 그리고 환경보존 등에 대한 논쟁이 거세게 일어나고 있어 현재에는 고작 10여개의 댐만이 건설 중에 있다.

<표1>은 해방 후 건설된 형식별 댐 건설 현황으로서 균질형 흙댐이 24.7%, 심벽이 있는 사력댐이 66.9% Rockfill 댐이 4.8%(콘크리트 표면 차수형 댐 포함)로서 Fill Type 댐이 전체 댐의 96.4%로 우리나라 댐 건설의 주류를 이루고 있으며, Rock Fill 댐과 콘크리트 중력식 댐의 복합댐도 1개소(대청댐) 존재하고 있다. 특히 최근에는 동북댐을 시작으로 콘크리트 표면차수벽 Rockfill 댐이 11개소나 달하고 있다.

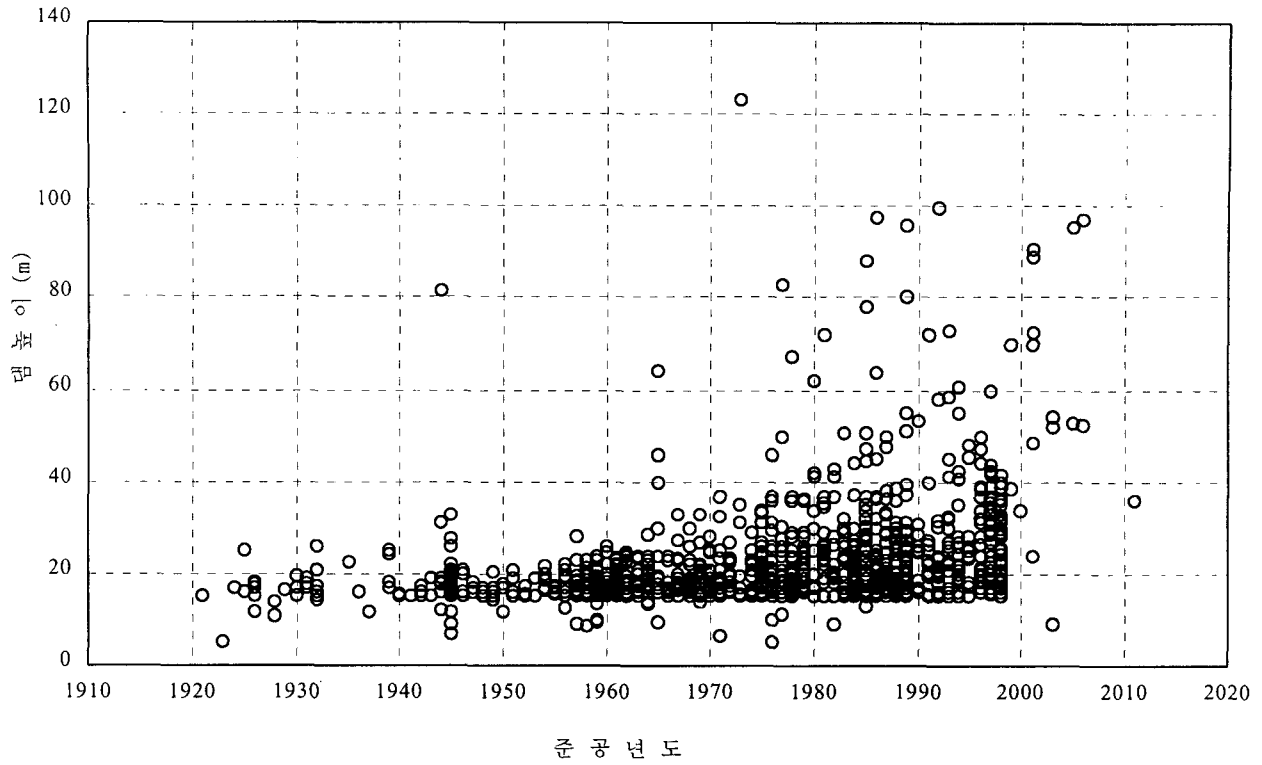


그림 1. 국내 댐 건설 현황

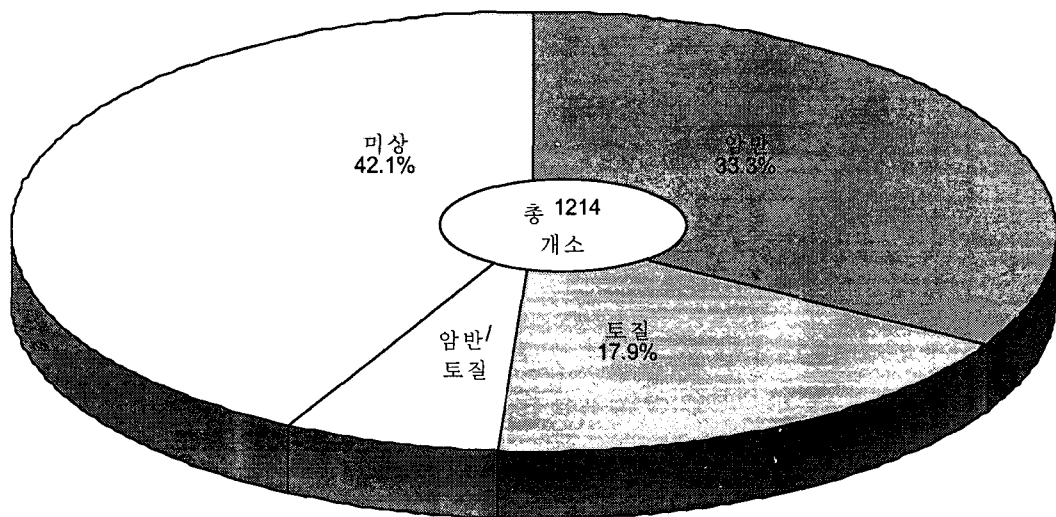


그림 2. 우리나라 대댐의 기초지반 상태에 따른 분포

<표1> 형식별 댐 건설 현황

(단위 : 개소)

년차별	소 계	균질형 Earth 댐	코아가 있는 사력댐	Rockfill Dam	표면차수벽 Rockfill Dam	콘크리트 중력식 댐	복합형	기타
1946~1955	52	20	32	-	-	-	-	-
1956~1965	230	83	141	1	-	5	-	-
1966~1975	197	59	129	3	-	3	-	3
1976~1985	266	51	192	11	1	3	1	7
1986~1995	217	37	149	19	1	5	-	6
1996 이후	117	16	79	7	9	3	-	3
계	1,079	266 (24.7%)	722 (66.9%)	41 (3.8%)	11 (1.0%)	19 (1.8%)	1 (0.0)	19 (1.8%)

그림2는 우리나라 대댐의 분포를 기초지반의 상태에 따라 분류한 것인데, 33.3%가 암반 기초에, 17.9%가 암반과 토질의 혼합된 기초에 건설되었고, 토질기초에도 6.7%가 건설된 것으로 나타났다. 그림 3은 다목적댐의 건설 현황이다. 우리나라의 다목적댐은 1961년 착공되어 1965년 준공된 섬진강 다목적 댐을 시작으로 모두 15개 다목적댐이 건설되었고, 현재 진행되거나 계획되고 있는 댐도 15개에 달하고 있다.

3. 주요 Rockfill 댐의 설계 시공 현황 및 분석

본 장에서는 우리나라 대표적인 Rockfill 댐에서 설계 및 시공 현황을 일반적으로 적용되고 있는 댐 건설 기준과 지침 등을 지반공학적인 측면에서 비교 검토하여, 향후 댐 설계 및 시공에서 개선하여야 할 사항을 제시하고자 한다.

여기에서 검토 대상이 되고 있는 댐은 Core가 있는 Rockfill 댐으로 국한하였으며, 설계 및 시공에 대한 기술사항이 준공지 형태로 보존되어 있거나, 학술지 등에 발표된 댐을 중심으로 하였다. 그러나 대부분의 경우, 공사지나 발표된 논문에 기술된 현존 자료 등의 내용이 불충분하여 댐 설계나 시공 당시의 세부적인 기술 사항이 명확하지 않아 정밀한 지반공학적인 검토가 어려워, 제한된 자료 안에서 평가가 가능한 주요 사항만 다루었다.

<표2>는 검토 대상인 Rockfill 댐의 단면 설계 형상을 준공 연도순으로 정리한 것이며, <표3>은 주요 축조재인 Core와 Filter의 재질과 다짐에 관하여 적용된 설계 기준이다. 또한 <표4>는 이들 댐들의 건설 당시 시공 과정에서 시행된 품질 관리 시험 결과를 토대로 Core층의 축조현황을 정리 요약한 것이다. 이들 자료를 통하여 각 댐의 설계 및 시공 현황을 지반공학적인 측면에서 검토한 특징은 아래와 같다.

<표2> 주요 Rockfill 댐의 단면설계 형상

댐 명	준공 연도	댐높이 H(m)	댐길이 (m)	댐마루 (m)	차수 Zone		B/H	Filter 최소폭 (m)	사면경사		수평 지진계수		비 고
					최소 (m)	최대 B(m)			상류	하류	건설직후 (수위급강하)	저수지 운영시	
소 양 강	1973	123.0	530	10.0	5.0	65.0	0.53	1.5	2.3	2.0	-	0.05	중심코아형
안 동	1977	83.0	612	8.0	4.0	32.7	0.39	1.0	2.0	1.7	0.025	0.05	중심코아형
대 청	1981	46(72)	132(495)	10.0	5.0	27.75	0.60	2.0	2.0	1.8	-	0.05	복 합 형
삼랑진(생뱀)	1985	88	269	10	5.0	30.8	0.35	3.0	2.1	1.8	0.03 0.06	0.06	중심코아형
주암(본댐)	1991	58.0	330	10.0	5.0	27.6	0.48	1.0	2.2	1.8	0.05	0.10	중심코아형
주암(조력댐)	1991	99.9	562.6	10.0	5.0	47.2	0.45	1.0	2.2	1.8			중심코아형
강 룡	1991	72.0	300	8.0	4.0	25.0	0.29	2.0	1.5	1.4			경사코아형
임 하	1993	73.0	515	10.0	4.0	40.0	0.55	2.0	2.2	1.8	0.05	0.10	중심코아형
무 주(생뱀)	1994	60.7	287	10.0	4.0	28.3	0.46	2.0	2.25	1.8	0.05 0.10	0.10	중심코아형
보 령 댐	1996	50.0	291	10.0	4.0	25.0	0.54	1.0	2.2	1.7	0.05	0.10	중심코아형
횡 성 댐	2000	48.5	205	8.0	4.0	23.4	0.48	1.0	2.2	1.8	0.05	0.10	중심코아형

<표3> 주요 Rockfill 맴의 축조재료 설계기준

맴 명	준공 연도	CORE						FILTER					
		흙의 분류	K (cm/sec)	PI	<#200 (0.075)	다짐조건 (착암부)	흙의 분류	D _{f15/d15}	D _{f15/d85}	<#200 (0.075)	다짐 조건	K (cm/sec)	
소양강맴	1973	SC-SM, SM	$1 \times 10^{-5} \sim 10^{-7}$	15-30 (>15)	8-50%	$\gamma_d > 95\%$ $W_f = OMC \pm 2.5$		> 5			$\gamma_d > 60\%$	$1 \times 10^{-2} \sim 10^{-3}$	
안동맴	1977	CL-SC	1×10^{-6}	> 15	> 12%	$\gamma_d > 98\%$ $W_f = OMC - 1.0 \sim +2.0$	SW-SM			< 8%	$\gamma_d > 75\%$	1×10^{-4}	
대청맴	1981	CL, ML	5.0×10^{-6}	> 15	> 20%	> 95 % $W_f = OMC \pm 2.0$ (OMC+2~5)					$\gamma_d > 80\%$	1×10^{-5}	
삼랑진 (상부맴)	1985	점토, 실트, 자갈 혼합	1×10^{-5}	> 8	> 10% (10-49)	$\gamma_d > 95\%$ $W_f = OMC - 1 \sim +3$	SP/SP-SM GP/GW	> 5	< 5	< 5%	$\gamma_d > 70\%$	1×10^{-3}	
주암맴	1991	SC-SM	1×10^{-6}		> 25%	OMC = 15.9 $W_f = OMC \pm 2$						1×10^{-3}	
임하맴	1993	SC, CL, SM, ML	1×10^{-5}	> 8 (> 15)	> 15% (15-60)	$W_f = OMC \pm 2.0$				< 5%	$\gamma_d > 85\%$		
무주맴	1994		1×10^{-5}	> 12	> 20%	OMC = 25.0		> 5	< 5	< 5%		1×10^{-3}	
보령맴	1996		5.0×10^{-7}	NP	> 25% (25-80)	OMC = 18.9 $\gamma_d > 98\%$ $W_f = OMC \pm 2$		> 5	< 5	< 5%	$\gamma_d > 75\%$	1×10^{-3}	
황성맴	2000	SC, SM	1×10^{-5}		> 20% (20-65)	OMC = 19.7 $\gamma_d = 98\%$ $W_f = OMC \pm 2$	SC, SM	> 5		< 5%	$\gamma_d > 85\%$	1×10^{-3}	

<표4> 주요댐 Core 층의 축조현황 (관리시험결과기준)

댐 명	CORE 축조기간	CORE 체적(m ³)	평균축조율 (m ³ /mon)	USCS 분류	K (cm/sec)	평균 PI (범 위)	평균 <#200 (범 위),%	다짐현황				착암부 여 부
								다짐도 (%)	OMC	W _r	현장 다짐	
소양강댐	32개월 (70.4-72.12)	1,242,200	38,818	SW, CH, CL	4.5-4.7 x 10 ⁻⁷	17.2%	21.5	99.0	18.22	OMC -1.22	Opt. Dry	미고려
안동댐	30개월 (74.2-76.8)	463,013	15,433	SW-SM	8.07 x 10 ⁻⁶	5-14%	> 17.0	99.7	10.7	OMC -2.0~+1.0	Opt. Dry	고려
대청댐	10개월 (79.8-80.6)	84,770	8,477	CL, ML	3.4 x 10 ⁻⁶	19.5% (21.38%)	21.0	98.6	22.27 (24.68)	OMC +1.28	Opt. Wet	고려
삼랑진 (상부댐)	18개월 (83.4-84.10)	176,440	9,802	CL, SC	0.168 x 10 ⁻⁵	12.62% {9.5-12.4} (19.63)	29.13 (53.1)	98.3	18.40 (34.73)	OMC +1.97 (3.05)	Opt. Wet	고려
주암댐	17개월 (87.5-88.10)	198,972	1,704	SC, SM	4.33 x 10 ⁻⁶	14.1% {8.9-19.6}	36.1 {24.2-43.2}	97.2 {92.1- 109.0}	15.9	OMC ±0.54	Opt.	고려
강능댐	8개월 (87.9-89.11)	166,732	703m ³ /day	GM, SM, SC, CL (150mm자갈)	3.2 x 10 ⁻⁶	8.03 (5.16-12.87)		98%	13.0	OMC ±3.50	Opt.	고려
임하댐	24개월 (88.8-90.7)		0.21m/day	SC, SM, Cl, ML	1.36 x 10 ⁻⁶	13.3%	46.5	98.8	14.94	OMC +1.09	Opt. Wet	
무주 (상부댐)	23개월 (92.8-94.6)	133,635	5,810	CL	1 x 10 ⁻⁵	11.7% (14.9)	49.0		26.7	OMC +3.40	Opt. Wet	고려
보령댐	13개월 (95.9-96.10)	146,202	11,246	CL-ML		9.2% {2.1-19.7}	56.2 {22.6-79.9}	98	19.7	OMC ± 2.0	Opt.	고려
황성댐	21개월 (97.1-98.10)	107,858	5,136	SC, SM	1 x 10 ⁻⁵	5-22%	27.5 {15-40}	98.9	18.9	OMC ± 2.0	Opt.	

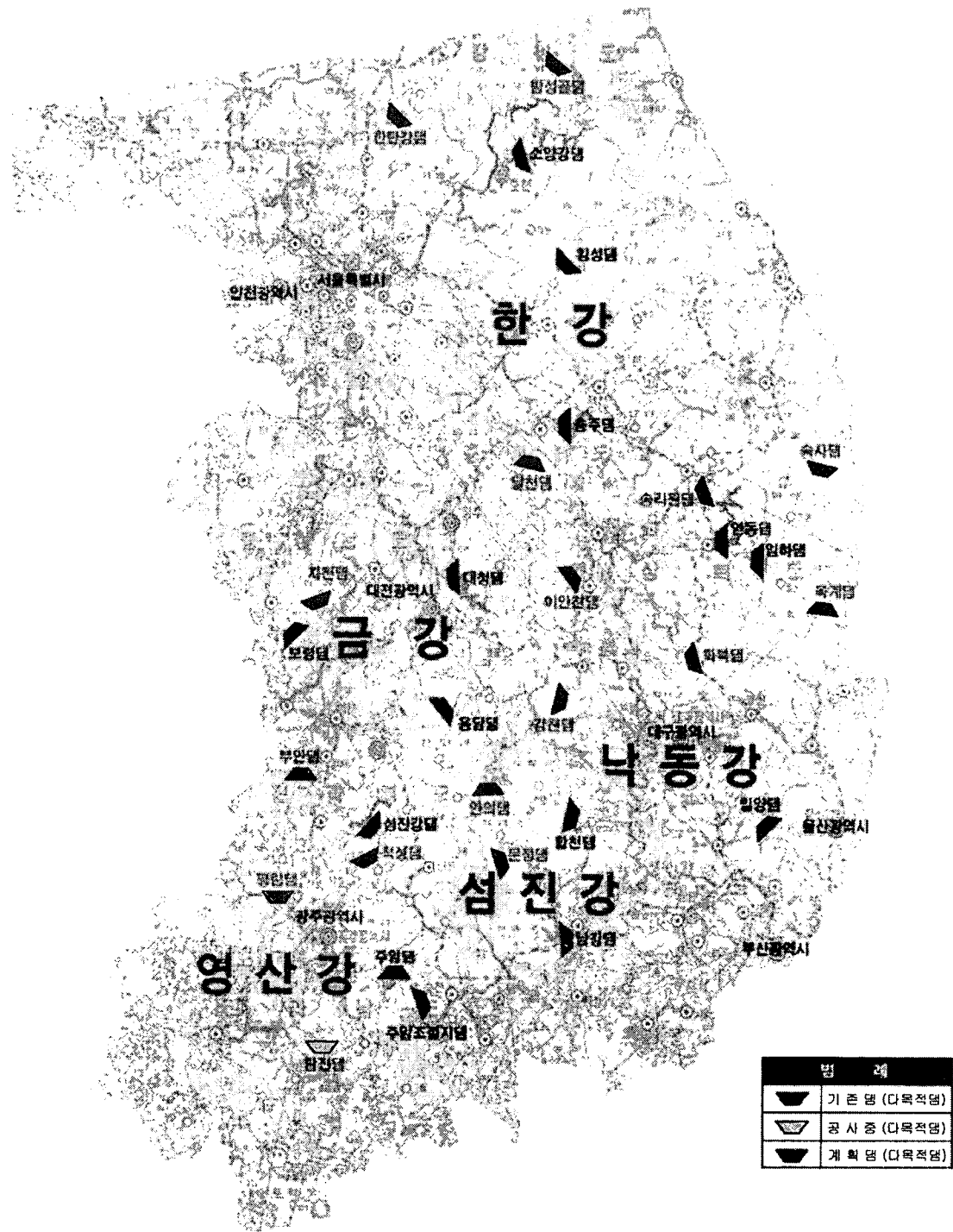


그림3. 다목적댐의 건설 현황

3.1 표준 단면 및 Zoning

그림4는 국내 댐 중에서 특징이 있는 대표적인 댐인 소양강댐, 안동댐, 강릉댐의 표준 설계 단면이다. 소양강댐은 1968년 착공하여 1973년에 준공된 댐으로서, 우리나라에서 최초로 시도된 대규모 Rockfill 댐으로서, 그 규모가 준공 당시에는 동양에서 제일 높은 댐으로 기록되었으며, 지금도 국내에서는 제일 높고 큰 댐이다.

국내 최초의 댐인 소양강의 Zoning 형상은 전형적인 중심 Core형 Rockfill 댐의 형상을 가지고 있으며, 상하류 사면은 각각 1 : 2.3 과 1 : 2.0으로서 비교적 완만한 편이나, 당시의 사면 안정성 계산 방법, 설계기술 수준, 건설장비 등을 감안할 때 과감한 설계로 판단된다. 소양강댐의 설계는 그 후 여러 댐에 많은 영향을 주어, 최근에 준공된 다수의 댐들도 Zoning 형상과 매우 유사하다고 할 수 있다.

소양강댐에 이어 건설된 안동댐에서는 소양강댐에서의 축적된 기술을 바탕으로 댐 사면의 경사가 상류 1 : 2.0, 하류 1 : 1.7로서 소양강에 비해 댐 단면을 상당히 축소하여 경제성을 확보하고자 한 것으로 나타났다. 특히 소양강에 비해 댐 마루폭을 10m에서 8m로 축소하였고, Core의 최소폭도 5m에서 4m로, Filter층의 최소폭도 1.5m에서 1.0m로 축소하였다. 또한 Core층의 경사도 소양강에서는 상하류 1 : 0.25이었는데, 안동댐에서 상류는 1 : 0.2, 하류는 1 : 0.15로 축소하였다.

또한 안동댐의 Zoning은 아주 특이한 형상을 하고 있다. 즉 Core 상류측 Filter층은 제거하고, 하류측에만 두었으며, 상하류 안정부를 모두 화강토로 하였다. 이는 원래 차수 심벽재로서 점토를 사용토록 되어 있었으나, 양질의 불투수성 점토가 댐 지점 상류 약 12km 지점에 채취 사용토록 되어 있어, 경비절감을 위하여 댐 지점 부근에 분포되어 있는 화강토를 대체 사용함에 따른 것으로 추정된다. 이러한 Core층의 단면 축소와 Core재의 화강토 대체에 따른 문제점 등은 3.3절에서 자세히 기술하기로 한다.

1985년에 착공되어 1991년에 준공된 강릉 수력댐은 국내 유일의 경사 심벽형 Rockfill 댐이다. 이는 강릉댐 지점의 지형여건과 축조재료의 가용성, 댐 축조방법 및 순서, 공사기간 등을 감안하여 결정된 것으로 추측된다. 일반적으로 경사형 Core의 가장 큰 장점은 우선 사력 Zone을 먼저 시공하고 Core를 나중에 축조할 수 있으며, 기초처리를 위한 Grouting도 하류측 댐 축조의 진행과 동시에 수행할 수 있으며, Filter를 쉽게 축조할 수 있다는 점이다. 그러나 Core가 위치한 기초 암반의 상태가 불량하거나 부분적으로 취약하여 기초 암반의 굴착 깊이를 사전에 추정하기 어려울 때는 여러가지 어려움을 겪게 된다.

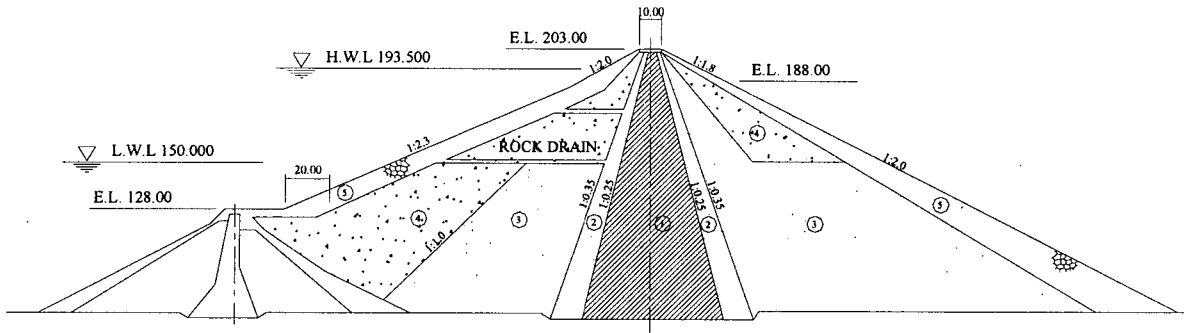
경사형 Core형 Rockfill 댐의 거동과 안정성에 대해서는 상당한 논란이 제기되어 왔으나, 일반적으로 하류측 사면에 안정된 석괴층이 안식각 이상으로 축조되어 Core층을 지지하고 있는 경우에는 매우 안전한 것으로 알려져 있다. 강릉댐은 <표2>와 그림4에서 보인 바와 같이 댐 사면의 경사가 상류측 사면이 1 : 1.5, 하류측 사면이 1 : 1.4로서 매우 급하고, Core 바닥의 최대폭도 비교적 짧아 강릉댐의 거동은 앞으로 심도 있게 관찰하는 것이 바람직하다.

3.2 Core층의 폭

통상적으로 댐 지점에서는 불투수성 Core 재료를 구하기는 쉽지 않다. 따라서 Core층의 폭은 전통적으로 댐의 안정성을 확보할 수 있는 최소한의 폭으로 설계되어 왔으며, 일반적으로 허용 투수량, 재질, 시공성, Filter층의 형상, 경제성 및 공기 등을 감안하여 경험적으로 판단하여 정하고 있다. Core층의 폭에 관하여 규정하고 있는 댐 설계 기준은 어느 나라에서도 찾아 볼 수 없다. 단지 유사한 사례를 참고하여 경험적으로 정하는 것으로 되어 있다. 즉 기존의 유사한 댐에서의 사례를 참고하는데, 국내댐에서는 소양강의 사례를 참고한 것으로 보인다.

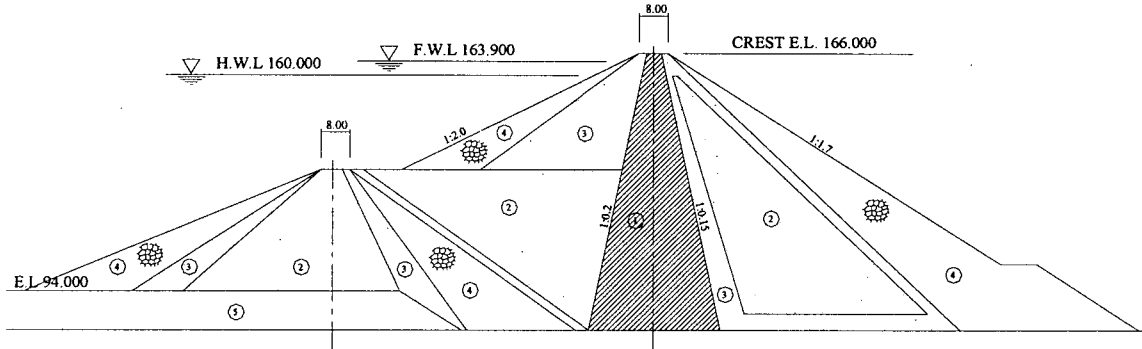
<표2>에서 나타난 바와 같이 국내댐 Core의 최소폭은 대체적으로 4~5m로 정하고 있으나, Core층의 바닥면에서의 최대 폭은 매우 다양하다. 설계 기록에 의하면, 일반적으로 다목적댐인 경우 Core의 최대 폭은 저수지 총수두의 50% 이상이 되도록 설계한 것으로 나타나고 있다. 즉, 소양강댐, 대청댐, 주암댐, 임하댐, 보령댐, 횡성댐 등에서는 표에 보인 바와 같이 Core 바닥 폭과 댐 높이의 비율(B/H)이 개략적으로 0.5 내외로 나타나고 있는데, 이는 댐 높이의 여유고를 감안하면 총수두의 50%를 충분히 만족시키

a) 소양댐 (중심코아형)



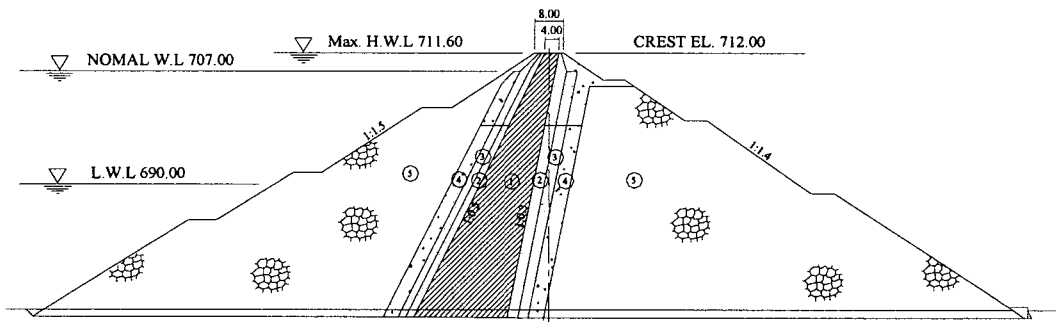
①	EARTH IN CORE (GC)	④	FINER ROCK IN SHELL
②	SAND A GRAVEL IN FILTER	⑤	COARSE ROCK IN SHELL
③	SAND A GRAVEL IN SHELL		

b) 안동댐 (중심코아형)



①	IMPERVIOUS CORE (DECOMPOSED GRANITE)	④	ROCKFILL
②	STABILIZING (DECOMPOSED GRANITE)	⑤	ALLUVIUM SAND
③	FILTER		

c) 강릉 수력댐 (경사코아형)



①	IMPERVIOUS CORE	④	TRANSITION ROCK
②	FILTER (PROCESSED ALLUVIUM)	⑤	ROCKFILL
③	DRAINAGE (PROCESSED ALLUVIUM)		

그림 4. 국내 대표적인 댐의 표준설계 단면

는 것이다. 그러나 안동댐의 경우는 0.39로서 비교적 낮은 숫자를 보이고 있다. 이는 전술한 바와 같이 Core 상류측의 안정부도 비교적 불투수성인 화강토로써 구성되었음을 감안할 때 총수두의 50%는 충분히 만족시키고 있다고 할 수 있다. 그러나 삼랑진댐에서는 0.35, 특히 강릉댐인 경우에는 0.293으로 매우 낮은 비율을 보이고 있는데 이는 수력댐의 특성에 따른 것으로 판단된다.

실질적으로 Core층을 통한 투수량을 감소시키는 데에는 Core층의 폭이 큰 영향을 미치지 않는 것이 통례이다. 또한 댐 사면의 안정성 측면에서도 Core층의 전단 강도가 사력층이나 석괴층 등의 다른 Zone에 비하여 낮으므로 그렇게 Core층의 폭이 커야 할 필요는 없다. 그러나 Core의 폭과 형상은 댐 거동 측면에서 댐의 안정성에 미치는 영향이 아주 중요하다.

즉 Core의 폭은 Core의 재질과 다짐 상태에 따라 Piping에 대한 저항과 Arching에 의한 응력전이 및 수리할렬 등의 가능성에 큰 영향을 끼치므로 신중히 결정되어야 한다. 과거에는 주로 투수와 Piping에 대한 저항에 주안점을 두었으나 최근에는 Core층에서의 응력전이, 과대한 간주수압, 건조수축 균열, 부동침하 등에 의한 수리할렬의 가능성에 더욱 중점을 두고 있다. 향후 국내 댐의 설계에서는 적절한 토질 T-E, 강도 시행과 FEM 해석 방법을 이용하여 이러한 현상을 사전에 규명하여 설계에 임하여야 할 것이다.

3.3 Core의 재질

전 세계적으로 Core는 매우 다양한 재질이 사용되고 있으며, Core의 재질에 대한 절대적인 규정을 정할 수는 없다. 우리나라 댐 건설 기준에서는 “Core 재료로서 이상적인 재료는 0.05m 이하의 입자를 15~20% 함유하는 입도 배분이 좋은 점토, 실트, 모래, 자갈의 혼합물”로 제시하고 있고, “GC, SC, CL, SM, CH 정도가 적당하고 ML이 그 다음이며, OL, MH, OH는 부적당하다.”고 언급하고 있으며 착암부 재료는 양호하고 균열 발생을 방지토록 PI가 15% 이상의 세립재료를 사용해야 한다고 매우 개념적으로 규정하고 있다.

그러나 국내 각 댐 설계에서는 좀 더 구체적인 기준이 제시되고 있으며, 1)USCS에 의한 흙의 분류, 2)입자 분포 범위, 3)소성지수, 4) #200체를 통과하는 세립분의 량, 5)투수계수, 6)다짐조건 등이 포함되고 있다. 그러나 현재 채택되고 있는 토질 특성 기준만으로는 Core층의 충분한 기능을 확보할 수 있는 Core 재질 기준으로는 보완되어야 할 부분이 몇 가지 있다.

<표3>에 의하면 국내 기존 댐들은 개략적으로 소성지수가 8~15% 이상이고 200번 체를 통과하는 세립분이 10~25% 정도 이상으로 하는 소성 점토질로 그 입도 분포 범위도 매우 광범위하게 규정하고 있다. 그러나 <표4>에 의하면, 실제로 축조된 Core의 재질은 소성지수가 비교적 낮으면서 200번 체를 통과하는 세립분의 함량이 높은 경우가 있는데, 이러한 경우에는 입도가 매우 작은 점토의 활성화(Activity)에 따라 Erosion이나 Piping의 가능성에 큰 영향을 줄 수 있다.

점토의 활성화는 소성지수와 2 μ m 보다 작은 세립분의 중량 백분율의 비로 정의하는데, 통상적으로 활성화(A)가 0.3 이상 1.0 이하인 경우에는 Piping이 가능한 토질로 분류된다. 물론 댐에서의 Erosion과 Piping은 물의 흐름에 대한 전단응력, 수두경사, 간극현상과 그 구조 등에 따라 결정되는 한계 유속과 댐체의 부동침하, Arching 현상 및 수리할렬 등에 의한 댐체 내부 균열의 부존 여부 등에 여러 인자들이 복합적으로 작용하여 발생하는 것이다. 따라서 Core재의 활성화만으로는 Erosion과 Piping의 가능성을 판단하기는 어렵지만 활성화가 낮은 경우에는 그에 유의하여야 한다. 이러한 관점에서 Core재의 시방은 좀 더 강화되어야 할 것이다.

특히 기존 국내 댐의 설계 및 시공 자료를 검토한 바에 의하면 Clay Fracturing을 결정하는데 필요한 Hydrometer Test를 수행한 기록은 매우 드물고, 그림5에서 표시한 바와 같이 일반적으로 #200번체를 통과하는 입도분포를 결정하는 하한선으로 하는 경우가 대부분으로 나타났다.

그림6은 소성지수가 낮으며 200번체를 통과한 세립자가 많은 댐 중에서 Hydrometer Test 기록이 있는 댐들의 활성도를 분석한 결과로서, 이들 댐에서는 Core재의 활성화가 낮아 Erosion이나 Piping에 취약할 가능성을 보여주고 있다. 특히 J 댐의 경우에는 실제로 담수 후 댐 하류 누수 추정용 집수정에선 상당 기간 탁도가 매우 높고 Clay 부유 함량이 매우 높은 침투수가 집수된 것으로 알려져 있다.

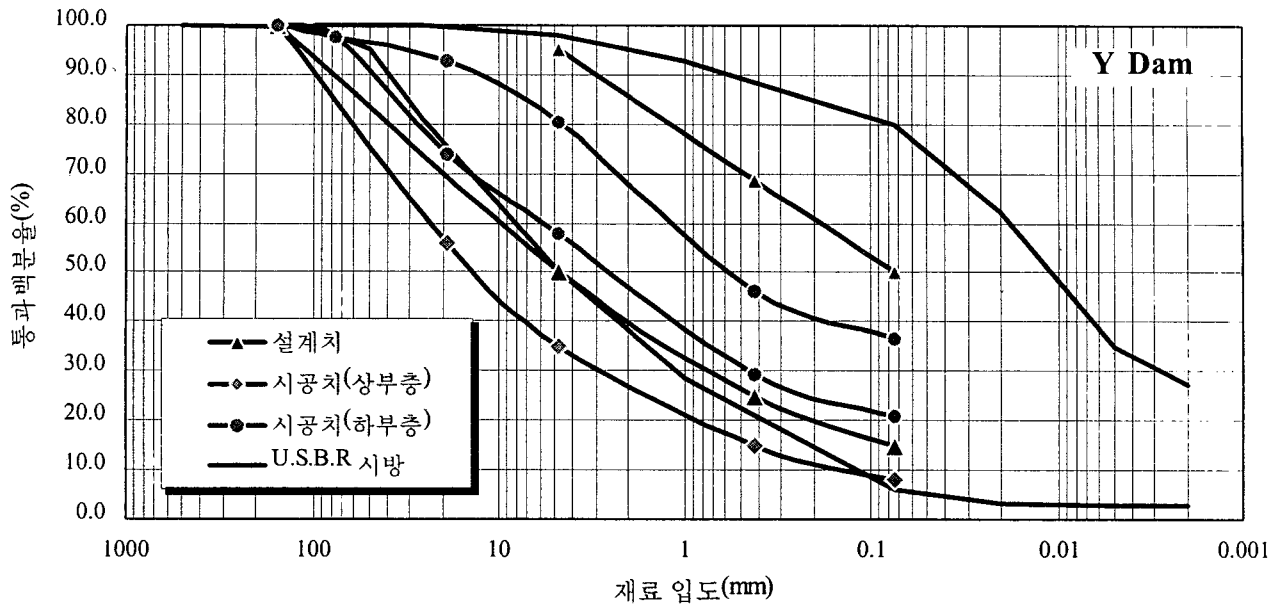


그림 5. Hydrometer Test 결과가 없는 댐에서의 코아재 입도분포사례

따라서 향후에는 댐 Core재의 선정에서 필히 Hydrometer Test가 수행되어야 할 것이며, 소성지수가 낮고 점토질 세립분이 많은 경우에는 입도분포 범위의 결정에 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다. 기존의 댐에서 사용된 Core재에서 특기할만한 사항은 안동댐에서 Core재로 사용된 화강토이다. 전술한 바와 같이 안동댐에서는 원래 차수 심벽재로서 실토질 점토(CL-SC)를 사용토록 계획하였으나, 양질의 불투수성 점토가 댐 지점에서 원거리에 위치하고 있어, 공사비 절감 차원에서 댐 지점 부근에 분포되어 있는 화강토(SW-SM)를 대체적으로 사용하였다.

화강토는 모암을 구성하고 있는 주된 광물의 종류와 풍화 정도에 따라 서로 다른 특성을 나타내는데 일반적으로 화강토의 주된 일차광물은 석영, 장석, 흑운모 등인데 이중 석영은 풍화가 진행되어 비교적 안정한 세립사질의 토사를 형성하나, 장석과 운모는 물리적으로나 화학적으로 불안정하여 풍화와 함께 세립화 함과 동시에 화학적으로 변질하여 점토 광물 형태의 Kaolinite, Illite, Halloysite, Vermiculite 등의 점토 광물로 변화한다. 따라서, 화강토의 일반적인 공학적 특성은 이러한 점토 광물을 성분으로 하는 흙과 유사한 특성을 보인다.

그러나 화강토에서는 교란 여부에 따라 강도, 압축성, 투수성 등의 공학적 성질이 매우 다르다. 특히, 다짐 중 혹은 구조물의 사용 중 토립자의 파쇄성은 화강토의 성질을 근본적으로 변화시키며, 특히, 강도, 변형특성, 투수성 등에 심각한 영향을 주게 되며, 댐과 같은 장기적 안정성의 확보가 요구되는 경우에는 그 영향을 심각하게 고려해야 한다.

또한, 화강토에 있어서 간과해서는 안 될 사항은 물에 의한 그 특성의 변화이다. 화강토는 특히, 잔적토인 경우에는 약간의 교란과 함께 하중이 증가하거나 또는 하중의 증가 없이 흡수와 더불어 세립자가 급격히 재배열되고, 체적이 감소하는 특성을 가지고 있어 이른바 붕적토(Collapsing Soil)로 분류되기도 한다.

화강토의 파쇄성은 잔적 화강토의 입경, 비표면적, 입도, 입자구조, 비중, 흡수성 등에 영향을 미치며, 퇴적 화강토인 경우에는 그 퇴적 구조에도 영향을 주어 다짐 특성, 강도, 압축성, 투수성 등의 역학적 성질을 변화시킨다. 특히, 다짐이 요구되는 경우에는 파쇄성은 토취장에서 조사 당시 발견된 공학적 성질과 전혀 다른 토질 특성을 공사 현장에서 보이게 하는 것이 통례이며, 더욱 중요한 것은 구조물의 시공과정 뿐만 아니라, 완공 후의 하중의 변화 및 침수 등 환경 조건에 따라 그 특성이 변화하기 때문에 구조물의 장기적인 안정성에 주는 영향을 신중히 다루어야 한다.

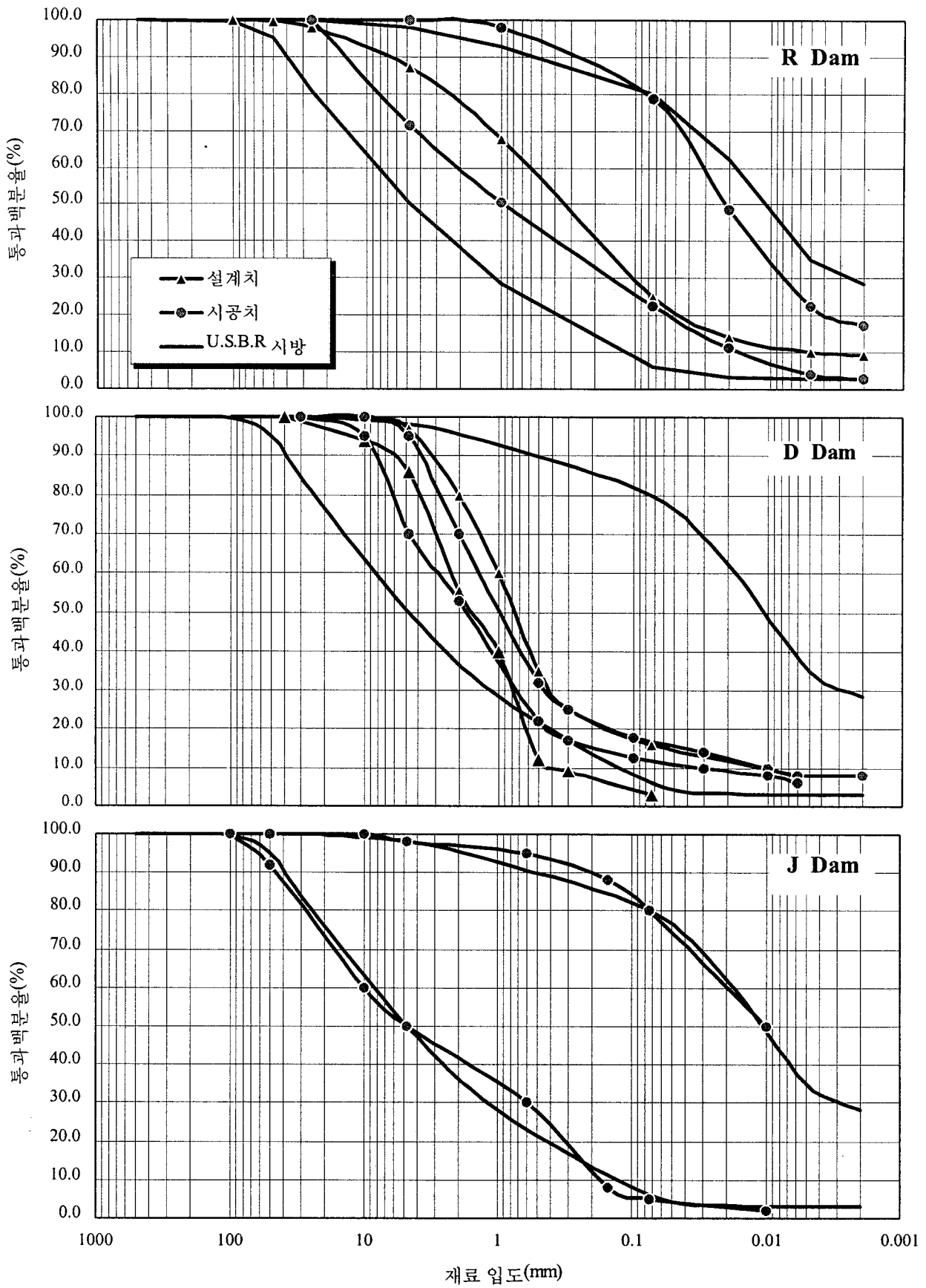


그림 6. Hydrometer Test 결과가 있는 댐에서의 코아재 입도분포사례

특히, 댐에서와 같이 화강토를 잘 다져야 하는 경우에는 다져진 화강토가 침수에 의해 시간의 경과와 함께 그 투수성이 변한다는 사실이다. 많은 실험에 의하면 다짐 화강토의 투수계수는 동수경사가 일정해도 시간의 경과와 함께 변화한다. 이러한, 시간적 변화는 토립자의 이동(Migration) 때문이다. 이와 같은 현상은 밀도가 작은 화강토 일수록 더욱 뚜렷해진다. 이와 같이 화강토는 다짐 조건에 따라 그 구조적 요인으로 인해 수밀성이 달라질 뿐만 아니라 침투시에는 세립자의 이동에 의해 그 투수성이 시간이 증가함에 따라 증가하기 때문에 차수 목적의 댐의 심벽 재료로 사용하는 데는 화강토의 장기적인 투수계수의 변화에 따른 댐의 거동과 안정성에 영향을 줄 수 있다는 점을 간과해서는 아니 된다. 실제로 안동댐에서는 심벽재로서 화강토를 사용함에 따라 그 거동이 매우 특이한 것으로 규명되고 있으며, 그 특성은 제4장에서 언급되고 있다.

3.4 Core의 다짐

<표4>에 요약된 바와 같이 국내 Rockfill 댐에서 Core층의 다짐은 소양강댐과 안동댐 등과 같이 비교적 초기에 건설된 댐에서는 최적 함수비 보다 건조측으로 다져진 것으로 나타났고, 그 이후 대청댐부터는 습윤측으로 다져진 경향을 보이고 있다. 물론 각 특성과 댐 위치에서 활용 가능한 Core재의 지반공학 특성 등에 따라 다짐 함수비가 결정되는 것이지만, 댐에서의 현장 다짐 함수비에 대하여는 오래 동안 논란이 되어 왔다.

일반적으로 연중 강우가 고루 분포되어 있고 기후가 건조한 지역에서는 건조측 다짐을, 강우가 계절적으로 집중되고 날씨가 더운 하절기를 가진 지역에서는 습윤측으로 다지는 것이 바람직하다. 따라서 우리나라에서는 습윤측으로 다지는 것이 타당하다.

건조측으로 다지는 경우에는 같은 다짐도를 가지는 경우 습윤측으로 다질 때보다 높은 강도를 보이지만, 담수 후 침투수에 의하여 포화도가 증가하는 경우에는 그 초기 강도가 비교적 큰 폭으로 감소할 수 있고, 건조측으로 다져진 Core층은 그 강성과 Brittleness가 커서 낮은 변형에서도 쉽게 균열이 일어날 수 있다. 또한, 공사가 장기간 중단되는 다짐 표층이 온도가 높고 건조한 대기에 노출되는 경우에는 건조측으로 다져진 Core층의 표면에서는 대기의 온도에 따라 건조 수축에 의한 균열이 발생할 수 있어, Core층의 부동침하 등과 함께 담수시 초기 누수와 수리할렬 등의 가능성을 높여줄 수 있다. 그러나 너무 습윤측으로 다질 때에는, 압축성이 증가하고 Descication의 가능성이 있어 유의하여야 한다.

따라서, Core의 현장 다짐 함수비는 Core재의 특성과 댐 설계 개념에 맞게 조절하여야 한다. 예로서 댐 하부층에서는 댐체의 침하를 감소시키기 위하여 건조측으로 다짐에너지가 비교적 낮은 댐 상부층에서는 습윤측으로 다지는 것도 좋은 방법이다. 또한 착암부나 댐 좌우안의 코아 바닥 경사가 큰 경우에는 습윤측으로 다지는 것이 바람직하다.

<표4>에 보인 바와 같이 최근에 건설되는 국내 댐에서 착암부에는 좀 더 소성이 큰 점토질 Core재가 선택되고 다짐도 강화되는 경향을 보이고 있다. 실제로 착암부에 대한 고려가 되지 않은 국내 댐에서는 Core나 기초바닥이나 좌우안 사면 경사에서 투수가 비교적 높고 취약한 거동을 보이는 현상이 나타나 는 경우도 있다.

4. 소양강댐과 안동댐의 거동 특성

소양강댐과 안동댐은 거의 같은 시대에 건설되었으나, 댐체의 단면 구성, 축조 재료의 재질, 댐 축조 과정 등이 서로 매우 다른 특징을 가지고 있다. 특히 Core층에서 사용된 흙은 소양강댐의 경우 Core층에는 소성지수가 비교적 높은 점토를, 안정부에는 모래 자갈을 사용하였고, 안동댐의 경우는 Core층이나 안정부 모두 소성지수가 비교적 낮은 화강토를 사용하였다.

본 장에서는 이 두 댐의 거동 특성을 주요 항목에 대한 계측자료를 개략적으로 비교하여, 이들 성토 재들이 댐 거동에 어떠한 영향을 주었는지 고찰해 보고자 한다.

4.1 댐 정상침하

그림7과 그림8은 각각 소양강댐과 안동댐의 댐마루의 침하량과 침하율을 나타내고 있다. 이 두 그림으로부터 양 댐을 비교해 보면 정상침하는 다음과 같은 특징을 보임을 알 수 있다.

정상침하의 최종 침하량의 형상은 댐의 기초 저면의 형상과 유사하다. 이는 정상침하량에 영향을 미치는 제체의 두께가 기초저면의 형상에 따라 달라지기 때문이다.

정상침하의 침하율은 기초저면의 형상이 편평한 곳에서 발생한 값이 경사진 곳 보다 더 작은 값을 보인다. 이는 경사진 곳에서의 정상침하는 경사를 따라 변위가 발생하기 때문에 정상침하에 변위의 수평성분이 영향을 미치기 때문인 것을 추측된다.

소양강댐의 정상침하는 심벽부가 점토이기 때문에, 일반적인 점토 심벽형 Rockfill 댐처럼, 침하량의 증가율이 담수 후 약 2년 후 감소 추세를 보이거나 그 후 2년 동안에는 좌안부를 제외하고는 갑작스런 침하를 겪게 된다. 이는 댐 중앙부가 제체의 압축층이 두꺼움에도 불구하고 담수 후 침하가 작게 일어남으로써 점차 침하발생의 잠재성을 보여 오다 1978년 여름에 약 35m에 이르는 저수위 급상승으로 인해서 큰 침하가 발생한 것이고 이의 영향으로 우안부까지도 큰 침하를 겪은 것으로 추정된다.

안동댐의 정상침하는 담수 후 약 5년간은 침하량의 증가율이 감소하기 보다는 오히려 증가하는 양상을 보이며 그 후 주기적으로 비교적 큰 침하가 발생했다. 이처럼 정상침하가 시간이 경과함에 따라 수렴해가지 않은 것은 저수위 급강하로 인한 세립분의 이동에 따른 토립자 구조의 변화가 그 주요인인 것으로 추정된다.

4.2 Core 내 층별 침하

그림9는 각각 소양강댐과 안동댐의 층별 침하 경향을 나타낸 것이다. 두 댐의 심벽부 내 층별 침하 특징을 비교하면 다음과 같다.

소양강댐에서는 상부층 EL. 159m 위치와 EL. 169m 사이의 Core층이 성토가 진행되면서 상대적으로 벌어졌으며 이는 비교적 폭이 좁은 Core부에서의 Load Transfer 형상에 의한 것으로 추정된다. 반면에 안동댐의 경우는 측정점 EL. 145m와 EL. 150m 사이의 Core층이 상대적으로 벌어졌는데 이는 동계 공사중지의 경향 때문으로 추정된다.

댐 건설중 최대 침하는 소양강댐의 경우는 230cm, 안동댐의 경우는 40cm를 이룰 댐 높이에 대한 비로 나타나면 각각 1.9%와 0.5%로 안동댐의 심벽재료인 화강토가 소양강댐의 점성토에 비해 압축성이 훨씬 작은 것을 알 수 있다.

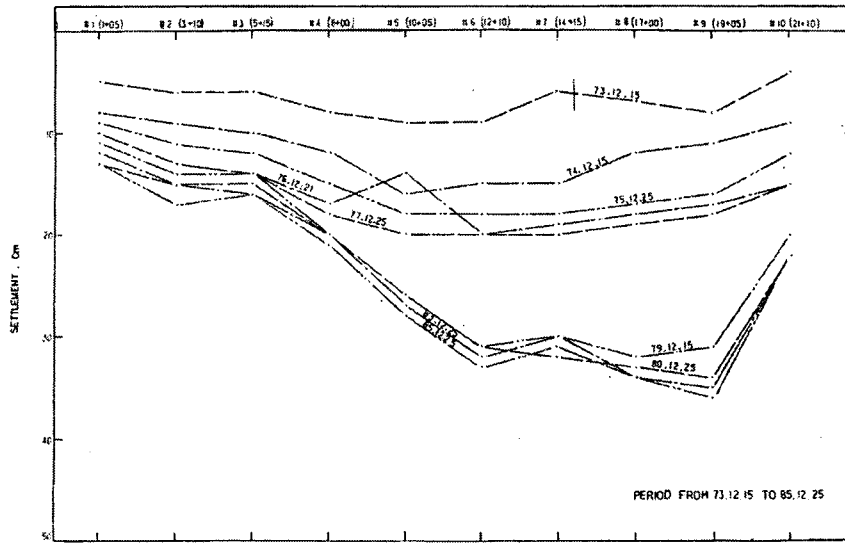
이 두 댐의 층별 침하 경시 변화에 의하며, 소양강댐은 댐 완공 후에도 층별 침하계의 측정점위치에 상관없이 침하가 계속되나 저수위 변화에는 큰 영향을 받지 않는 반면, 안동댐의 경우는 댐의 완공과 더불어 침하가 거의 중단되었다가 저수위 변화에 민감한 반응을 나타내고 있다. 즉, 소양강댐의 경우는 2차 압밀성 침하가 그리고 안동댐의 경우는 저수위 변화에 따른 세립분의 이동이 댐 완공 후 침하의 주요인인 것으로 판단되었다.

4.3 간극수압

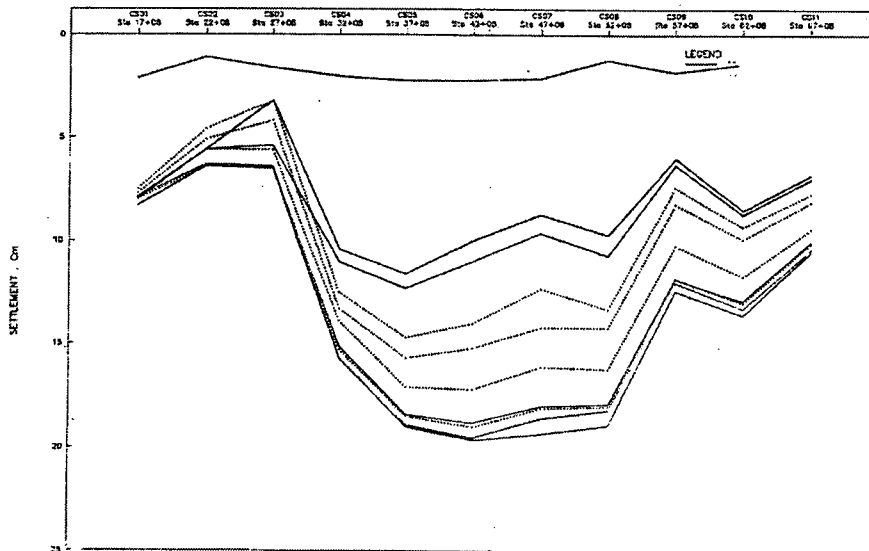
그림10은 소양강댐과 안동댐의 건설중 간극수압 분포를 보인 것이다. 건설중 소양강댐에서는 과대한 과승간극수압이 발생하여 최대 간극수압비가 1.0을 넘은 경우가 있었으나 안동댐의 경우에는 Core 저면의 점토층에서 약간의 과승간극압이 발생하여 간극수압비가 0.3~0.4 정도에 이른 적이 있었으면 화강토에서는 과승간극압이 거의 발생하지 않았다.

이와 같이 소양강댐에서 과승수압이 발생한 것은 Core 재료를 시공 함수비와 포화도 및 압축성이 높고 투수계수가 낮은 연약한 점토를 사용하였기 때문으로 추정된다.

그러나, 안동댐의 경우에는 시공함수비, 포화도 및 압축성이 낮고 투수계수가 비교적 큰 화강토를

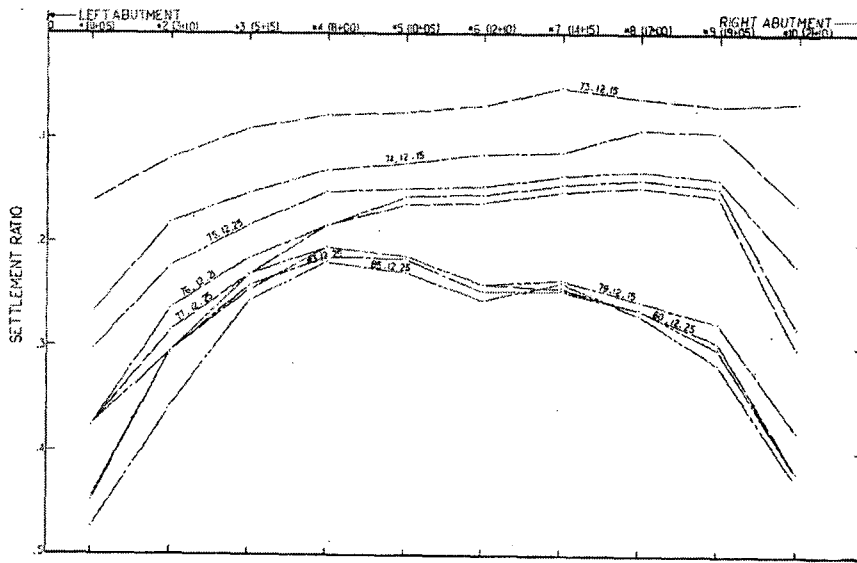


(a) 소양강 댐

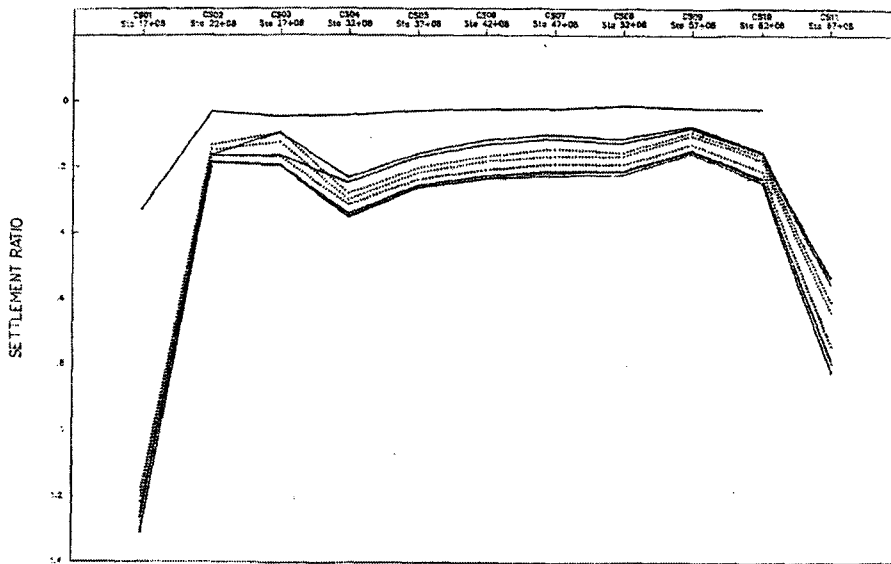


(b) 안동댐

그림 7. 댐마루 침하량

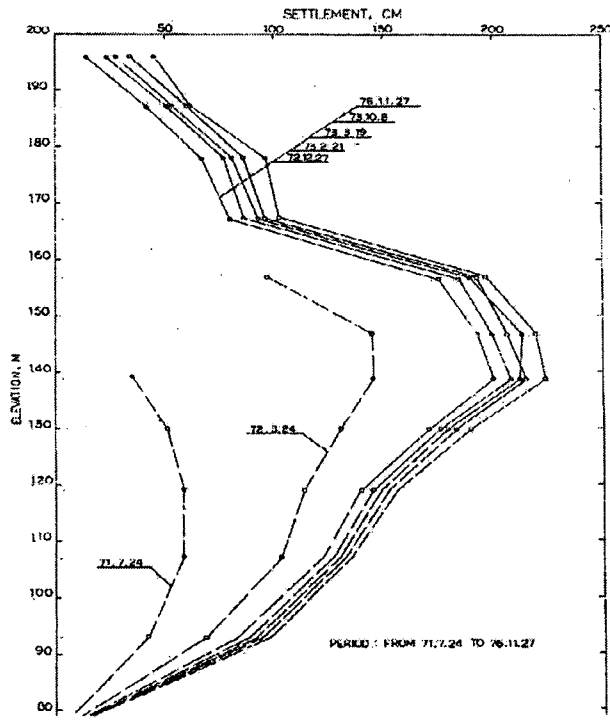


(a) 소양강 댐

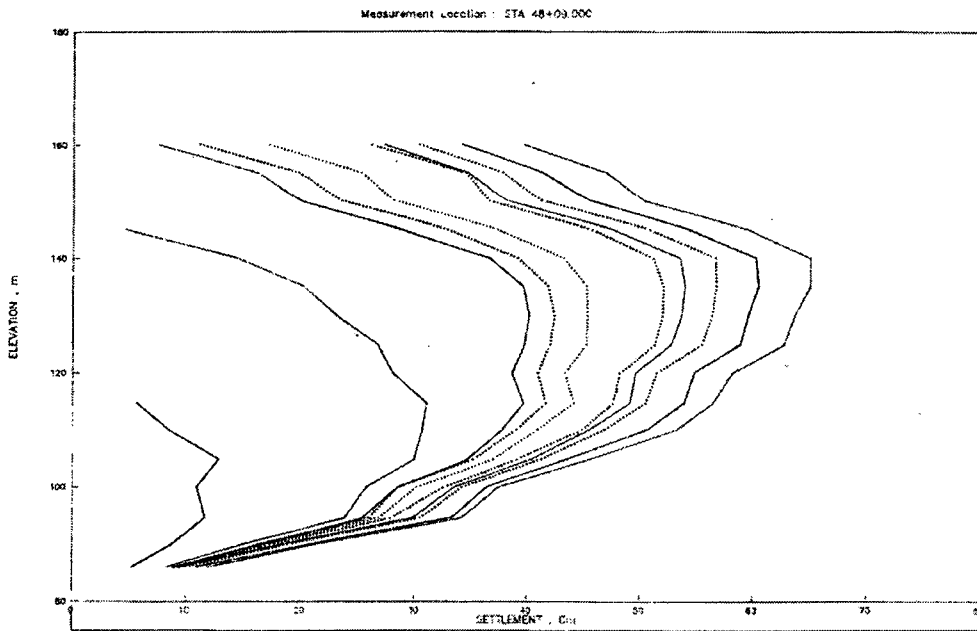


(b) 안동댐

그림 8. 댐마루 침하율

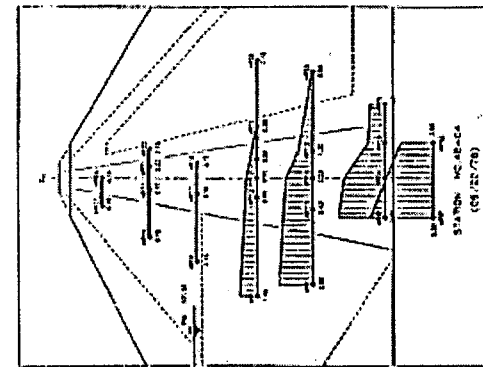
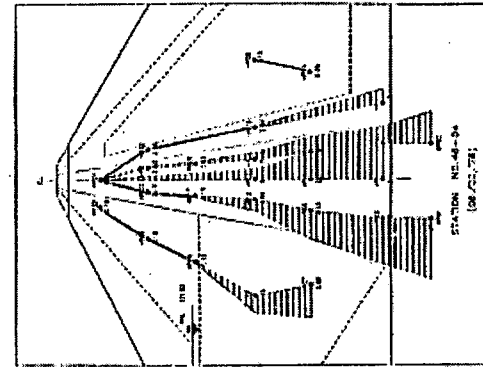
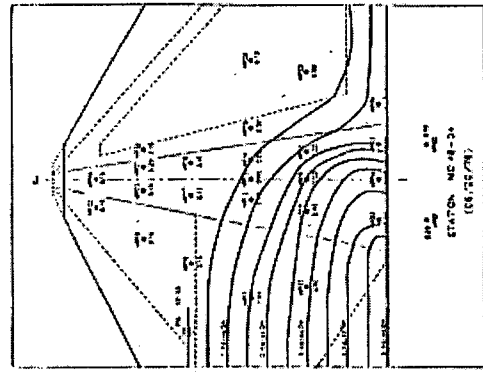
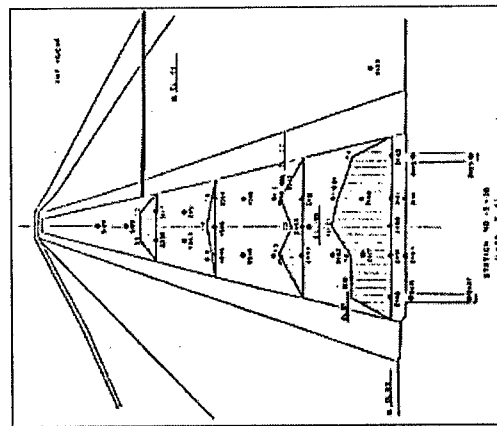
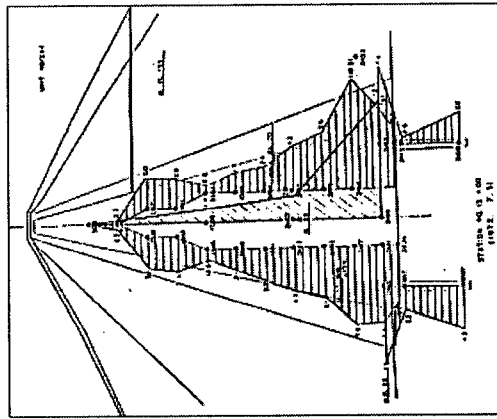
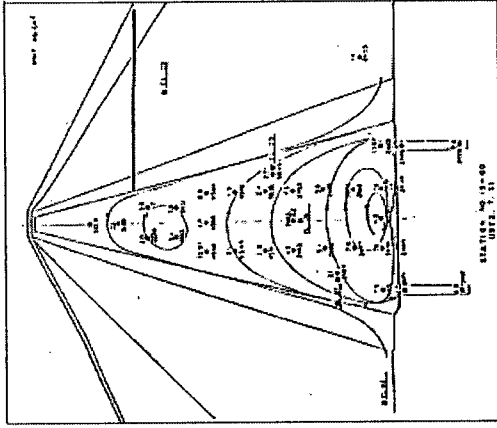


(a) 소양강 댐



(b) 안동 댐

그림 9. 코아층 층별침하



(A) 소양강 댐

(b) 안동 댐
그림 10. 건설중 간극수압 분포

Core 재료로 사용하였기 때문에 과승간극수압은 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다. 또한 안동댐에서는 화강토의 투수성을 저하시킬 목적으로 과다짐을 실시한 결과, 선행유효응력이 매우 컸기 때문에 작은 하중 증가에 의해서는 간극수압이 발생하지 않았던 것으로 추측된다.

소양강댐에서의 건설중 최대 간극수압은 Core 저면이 아니라 이보다 10여m 상부층에서 발생하였는데, 이는 Core 저면과 기초와의 밀착이 만족스럽지 못하였음을 시사하는 것이었다. 그러나 안동댐의 경우에는 Core 저면과 기초와의 밀착성을 높이기 위해 경계부에 양질의 점토를 포설한 결과 Core 저면에서 최대 간극수압이 발생하였다.

그림11은 소양강댐과 안동댐의 담수 중 간극수압의 분포를 보인 것이다. 소양강댐의 경우에는 댐 건설중에는 물론 초기 담수 중에도 약간의 과승간극수압이 발생하였으며 이 이후의 저수위 변화기간에는 지속적으로 소산되다가 댐 완공 후 5년이 지나서야 비로소 정수압과 거의 일치하게 된 것으로 나타났다.

그러나 안동댐의 경우에는 댐 건설중과 담수중에 거의 과승간극수압이 발생하지 않고 담수가 시작되자 담수위고에 의한 정수압이 Core층의 간극수압으로 나타나 Core재로 사용된 화강토의 투수계수는 비교적 컸음을 시사하고 있다.

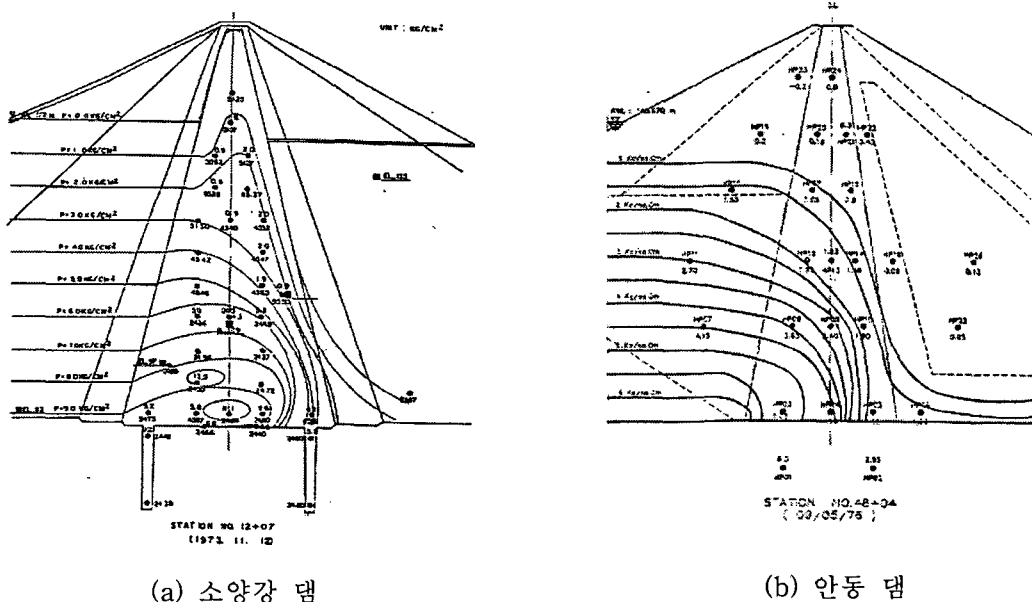


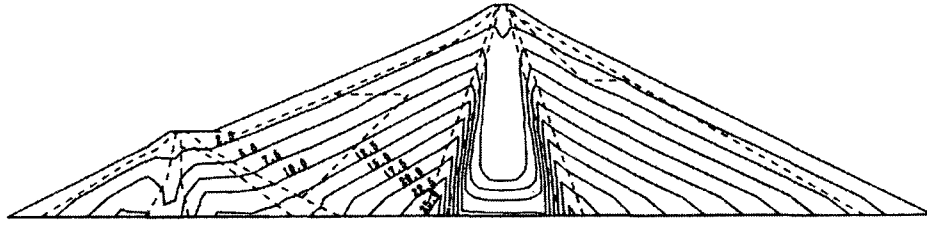
그림 11. 담수중 간극수압 분포

4.4 댐 거동 종합 분석

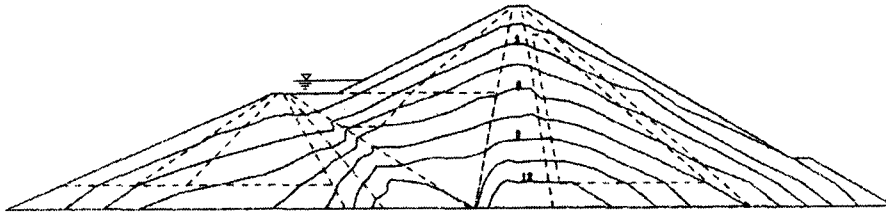
축조재료

그림12와 13은 소양강댐과 안동댐에 대하여 댐 축조과정을 댐 거동 해석을 위한 유한요소 프로그램인 CON2D를 활용하여 해석될 각 댐에서 댐 성토 완료 후 예상되는 수직유효응력 분포와 댐 축조 직후 Core층과 상류층 Filter층간의 응력전이도이다.

그림에서 보인 것과 같이 각 댐의 Core 재료와 Filter 재료의 특성에 따라 서로 다른 응력전이(Load Transfer) 형상을 나타내고 있다. 즉 소양강댐의 경우에는 Core 재료의 강성이 Filter 재료의 강성 보다 훨씬 낮은 관계로 Core Zone에서의 응력이 Filter Zone으로 전이됨으로써 Core Zone에는 토주중량보다 낮은 응력이 발생하고 Filter Zone에는 상대적으로 큰 응력이 발생하였고, Filter Zone에서는 응력 집중



(a) 소양강 댐



(b) 안동 댐

그림 12. 준공후 예상 댐체 수직응력 Contour

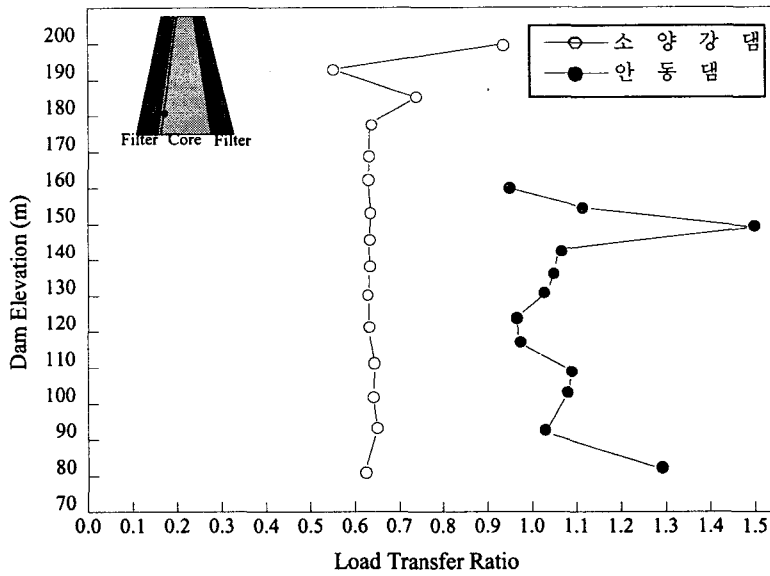


그림 13. 응력 전이도(댐축조 직후)

에 의한 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

안동댐의 경우에는 이와는 반대로 Core 재료와 상류 안정부 재료, 그리고 Core 재료와 하류 Filter 재료 사이의 강성이 거의 비슷하게 설계됨으로써 성토 높이가 가장 높은 Core Zone에서 가장 높은 응력이 발생하고 안정부와 Filter Zone에서 상대적으로 낮은 응력이 발생하였다. 그리고 재료의 투수계수, 포화도, 간극비의 크기에 따라 시공중 Core Zone 내의 간극수압의 발생과 소산특성이 달라지는데 소양강댐의 경우에는 투수성이 낮고, 포화도가 높으며, 간극비가 큰 점토를 Core 재료로 사용함으로써 시공중 높은 간극수압이 발생하였고 결과적으로 낮은 유효응력이 발생하였다. 그리고 압축성도 컸기 때문에 시공중에 과도한 침하가 발생하였다. 한편, 안동댐의 경우에는 투수성이 비교적 크고 포화도와 간극비가

낮으며 압축성이 작은 화강토를 Core 재료로 사용하였기 때문에 건설중에 매우 낮은 간극수압이 발생하였고, 최대 침하량도 매우 적게 발생하였다.

Core의 폭과 기울기

Core의 폭과 기울기의 관점에서 보면, 소양강댐의 경우에는 댐 상부에서 Core 폭이 재료의 압축성이 컸기 때문에 Arching Effect가 현저하게 발생하여 Core 재료가 Filter 등에 걸치게 되는 형상의 가능성을 보여주었다. 이와 같은 Core 상부에서 Arching 형상은 댐 상부의 하중이 댐 하부로 전달되지 않아 댐에 좋지 않은 영향을 준다. 그러므로 Core의 기울기와 폭을 너무 좁게 하지 않는 것이 바람직하며 Core의 기울기와 폭은 Core 재료의 특성에 의하여 결정되어야 할 것이다. 안동댐의 경우에는 Core 재료의 압축성이 작았기 때문에 Core 상부에서의 Arching Effect는 발생하지 않았다.

Abutment의 기울기

Abutment의 기울기가 댐의 안전에 미치는 영향을 고려하기 위해서 종단면 해석을 실시해 본 결과 그림14에서 보인 바와 같이 소양강과 안동댐 모두 댐 우안에서 좌안이나 댐 중앙부 보다 상대적으로 높은 응력이 발생한 것으로 나타났는데 이는 Abutment의 기울기에 의한 영향으로 판단된다. 우리나라 댐 건설기준에서는 Abutment의 최대 기울기를 1 : 0.7 이내로 추천하고 있는데 Abutment의 기울기가 급할수록 Fill Type 댐의 안정성에는 좋지 않은 영향을 미친다. Abutment부에서의 바닥 굴착면의 기울기도 Core의 기울기와 마찬가지로 Core 재료의 특성에 맞추어 결정되어야 할 것으로 판단된다.

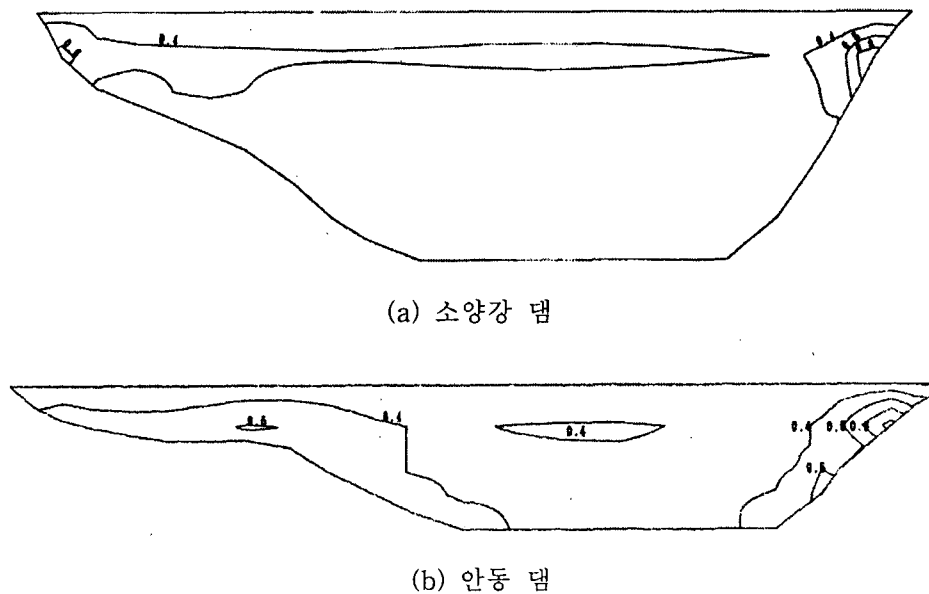


그림 14. 댐 종단면에서의 응력분포

Zoning

축조재료를 달리하는 댐 제체의 Zoning 계획은 댐의 안정성과 시공성에 큰 영향을 미친다. 심벽부와 여과부 그리고 안정부와의 강성 차이는 Zone 간의 응력전이를 일으켜 임의의 특정 위치에 응력집중 현상을 초래하여 댐 제체의 안정에 도움을 주지 못한다. 따라서 각 Zone의 강성과 강도 특성의 상호관계는 댐 거동과 안정에 기여할 수 있도록 적절한 조합이 이루어져야 한다. 소양강댐의 경우에는 강성 차

이가 큰 Core 재료와 Filter 재료를 인접하여 Zone이 형성된 까닭으로 Filter Zone에서 국부적인 응력집중의 가능성을 보여주고 있고, 안동댐의 경우에는 Cofferdam과 Main Dam 사이의 경계부 상단에 강성이 큰 불용암을 국부적으로 사용함으로써 높은 응력집중이 발생한 것으로 해석되었다.

단계별 성토고 및 시공속도

댐의 단계별 성토고와 시공속도는 응력과 변형 특성에 영향을 미치기 때문에 건설중 댐의 안전을 지배하게 된다. 소양강댐은 강성이 작은 점토재료를 짧은 기간에 축조한 때문에 높은 간극수압이 발생하였고, 이에 따라 유효응력이 감소되고 횡방향 수평변위가 증대된 것으로 추정된다. 한편 시공의 어려움과 Core 재료의 동결영향을 배제하기 위하여 실시한 동계 공사중지는 댐의 안전적인 측면에서 볼 때 긍정적인 것으로 평가된다. 왜냐하면 동계 공사중지를 인위적으로 실시함으로써 공사중 높게 발생하였던 간극수압이 소산될 수 있는 기회를 제공함으로써 추가의 성토 공사시 댐의 안전을 확보할 수 있었기 때문이다. 안동댐의 경우에는 Core 재료의 강성이 크고 투수성도 비교적 컸기 때문에 시공속도가 댐의 안정에 크게 영향을 주지 않았을 것으로 판단된다. 그러므로, 댐의 단계별 성토고와 시공속도는 Core 재료의 특성에 맞추어 조정하여야 할 필요가 있다.

다짐 특성

동일한 축조재료를 사용하더라도 다짐에너지의 정도에 따라 투수, 강도, 변형, 간극수압의 크기가 달라진다. 다짐의 품질관리가 댐의 안정성을 좌우할 만큼 중요하기 때문에 각 축조재료의 다짐 특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히 Core 재료의 경우에는 다짐시의 시공함수비가 최적 함수비보다 건조측이었느냐 또는 습윤측이었느냐에 따라 그리고 세립분의 함유량에 따라 간극수압의 크기에 절대적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 결정을 신중히 하여야 할 것이다.

소양강댐의 경우 시공 함수비를 최적함수비보다 건조측으로 다진 것으로 보고 되고 있으나 실제 댐 거동을 파악해 보면 습윤측으로 다져진 것으로 추정되며, 이에 따라 과대한 간극수압이 발생한 것으로 추정되며, 응력전이 효과도 증대되었다. 그러나 안동댐의 경우에는 Core 재료를 최적함수비 보다 건조측으로 다진 것으로 나타나 간극수압의 발생을 최소화하는데 큰 역할을 하였고, 침하량도 매우 적게 나타났다.

Core 바닥의 차수효과

모든 댐에서는 누수를 최소화하기 위해서 Core Zone을 설치하고 Core Zone과 기초와의 접촉부를 밀착시키기 위하여 많은 노력을 기울인다. 소양강댐에서는 Core 저면과 기초와의 경계부에서 낮은 간극수압이 측정되었다. 안동댐의 경우에는 Core 저면과 기초와의 밀착을 증진시키기 위하여 Core 재료인 화강토 대신 투수성이 낮은 점토를 사용하여 습윤측으로 다진 것으로 알려져 있다.

담수시기 및 담수속도

과거 댐의 파괴가 대부분 초기 담수시에 일어나고 있었다는 사실은 초기 담수시기와 담수속도가 댐의 안전에 얼마나 지대한 영향을 미치는가를 단적으로 말해주고 있다. 초기 담수시기의 결정은 댐 내부의 응력과 변위가 어느 정도 안정한 상태에 이르렀을 때 실시하는 것이 바람직하며 담수속도는 적절히 조정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 소양강댐의 경우에는 담수가 비교적 빠른 속도로 진행되어 시공중 발생한 Core 내부의 과승간극수압이 소산되는데 많은 시간이 소요되었다. 안동댐의 경우에도 마찬가지였으나 건설중에 과승간극수압이 발생하지 않았기 때문에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다.

종합적으로, 위에서 기술된 바와 같이 아주 특징적인 댐 설계 및 시공인자를 가지고 있는 소양강댐과 안동댐에서 얻어진 계측자료와 해석 결과는 여러 가지 측면에서 향후 국내 댐 건설에 활용할 수 있는 여러 가지 기술적 자료를 제공하고 있다.

5. 결 론

댐은 댐 지점의 지반조건을 포함한 수많은 설계, 시공 및 운영관리, 영향인자들에 의하여 그 거동이 매우 다양하고 복잡하게 나타난다. 그러나 댐 거동에 대한 전문적인 지식과 경험을 바탕으로 그 설계, 시공 및 댐 운영중의 계측자료를 체계적으로 심도 있게 접근할 때에는 댐 거동에 대한 신빙성 있는 분석과 예측이 가능하다.

이러한 측면에서 본 논문에서는 국내 주요 댐들에 대한 설계 및 시공인자들의 지반공학적인 특성을 규명하려고 시도하였고, 이를 대표적인 댐에서의 계측자료와 수치해석 결과를 비교 분석하여 보았다. 이러한 과정을 통하여 매우 의미 있고 유익한 기술적 자료를 도출할 수 있었으며, 국내 댐 건설기준과 설계 및 시공에서 개선 혹은 유의해야 할 사항들을 제시하고자 노력하였다.

그러나 이러한 노력은 우리 학회의 모든 회원들의 댐 기술 분야에 대한 적극적인 관심과 참여, 그리고 지속적인 연구개발 노력이 이루어져야 의미 있는 결실을 맺을 수 있을 것이다.

* 참고문헌

1. 건설부(1974), 산업기지개발공사, “소양강 다목적댐 공사지”
2. 건설부(1977), “안동다목적댐 공사지”
3. 건설부(1981), 산업기지개발공사, “대청다목적댐 공사지”
4. 건설부(1985), “주암다목적댐 건설사업 지질조사보고서”
5. 건설부, 한국수자원공사(1990), “주암다목적댐 건설사업 댐 거동 분석 보고서”
7. 유태성(1987), “댐의 거동과 안전”, 한국대댐학회, 제8회 한국대댐학회 학술발표지
8. 유태성(1988), “심벽재로써의 화강토”, 한국대댐학회, 제9회 한국대댐학회 학술발표지
9. 유태성, 신종호(1990), “저수위 변화에 의한 Fill Type 댐의 거동”, 한국대댐학회, 제10회 한국대댐학회 학술발표지
10. 한국수자원공사(1987), “87 소양강 다목적댐 거동분석 및 안정해석 보고서”
11. 한국수자원공사(1987), “87 안동다목적댐 거동분석 및 안정해석 보고서”
12. 한국전력공사(1991), “강릉수력발전소 건설지”, 제1권.
13. 한국전력공사(1995), “무주양수발전소 건설지”, 제1권.
14. 한국전력공사 기술연구원(1993), “댐 안전도 평가 및 유지관리 방안 연구(삼랑진 양수발전소 상하부 댐)”, 한국전력공사 기술연구원
15. Chang, C. S. and Duncan, J. M.(1977), “Analysis of Consolidation of Earth and Rockfill Dams”, College of Engineering Office of Research Services, University of California Berkeley, California, Vol. I, Vol. II, Report No. TE-77-3.
16. Dascar O.(1987), “Postconstruction Deformations of Rockfill Dams”, Journal of the Geotechnical Division, ASCE, pp. 46-590.
17. Dibiagio, E. and Myrvoll, F.(1985), “Instrumentation Techniques and Equipment used to Monitor the Performance of Norwegian Embankment Dams”, Proceedings 15th ICOLD Congress, Lausanne, pp. 1169-1197.
18. Hirschfeld, R. C, Poulos, S. J.(1972), “Embankment-Dam Engineering”, A Wiley-Interscience, Casagrande Volume
19. Jin B. I. and Lee S. Y.(1979), “Design of Interface in Composite Type Dam”, 13th Congress on Large Dams, New Delhi, pp. 823-840
20. Kulhawy, F. H. and Gurtowski, J. M.(1976), “Load Transfer and Hydraulic Fracturing in Zoned Dams”, Journal of the Geotechnical Division, ASCE, pp. 963-974.
21. Löwe, III. J.(1972), “Earth and Earth-Supported Structures”, ASCE, pp. 55-70.

22. Penman A. D. M. and Charles J. A.(1979), "The Influence of Their Interface on the Behaviour of Clay Cores in Embankment Dams", 13th Congress on Large Dams, New Delhi, pp. 695-714.
23. Seco E Pinto, P. S. and Maranha Das Neves, E.(1985), "Hydraulic Fracturing in Zoned Earth and Rockfill Dam", 11th ICSMFE, SanFrancisco, U.S.A., Vol. 4.
24. Sherard, J. L, Woodward R. J, Gizienski, S. F and Clevenger, W. A.(1963), "Earth and Earth-Rock Dams-Engineering Problems of Design and Construction", John Wiley and Sons, Inc.
25. Sherard, J. L.(1985), "Hydraulic Fracturing in Embankment Dams", Journal of the Geotechnical Division, ASCE, pp. 905-927.
26. Squier, L. R.(1970), "Load Transfer in Earth and Rockfill Dams", Journal of the Geotechnical Division, ASCE, pp. 213-232.
27. Sukhmander Singh(Edited-1992), "Embankment Dams", ASCE, Geotechnical Special Publication No. 32, Sherard Memorial Volume