

## 시험시공 및 현장시험을 통한 C.S.G 공법의 적용성 검토

### Application study of C.S.G method by the test construction and field test

김기영<sup>1)</sup>, Kim Ki-Young, 박한규<sup>2)</sup>, Park Han-Gyu, 조성은<sup>3)</sup>, Cho Sung-Eun, 전제성<sup>4)</sup>, Jeon Je-Sung

<sup>1)</sup> 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

<sup>2)</sup> 수자원연구원 댐안전연구소 소장, Director in Dam Safety Research Center KIWE

<sup>3)</sup> 자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

<sup>4)</sup> 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

**SYNOPSIS** : Cemented Sand and Gravel(CSG) is a material made by simple mixing of rock-based raw materials such as excavated soil and riverbed gravel together with cement and water. The use of CSG method for cofferdam and large dam is gradually increasing in Japan because a quarry and aggregate plants can be diminished. Also, the CSG method can reduce dam construction cost, construction duration and destruction of environment. In this paper, field test and test construction of CSG method was conducted on Hwabuk Dam. The mechanical properties of CSG, such as compressive strength, extension strength and field permeability test were investigated. From the results of the experimental study, application study of CSG method was discussed

**Key words** : C.S.G method, Mix Design, Test construction, Field test

## 1. 서론

C.S.G 공법은 댐 건설 현장에서 쉽게 찾을 수 있는 하상자갈 및 원지반 토사 그리고 터널 발파로부터 발생한 암비력등을 댐 축조재료로 활용함으로써 축조재료의 다각화와 재활용이란 측면에서 주목받고 있으며, 필댐 시공에 따른 석산개발 및 플랜트설치를 최소화함으로써 경제성과 친환경성면에서도 기존의 댐 공법에 비하여 유리하다. 최근 국내에서는 화북댐 건설시공에 하상자갈을 활용한 CFGD 형식의 댐 축조공법이 처음 도입되어 시공 중에 있을 뿐 C.S.G 공법에 대한 연구는 전무한 실정이다. C.S.G댐은 1992년 일본의 나가시마댐 가물막이 공사에 처음 도입된 후 본댐, 저사댐, 호안공 그리고 저수지내 사면보호공법 등 그 활용 실적이 매우 다양하다. 본 연구에서는 다짐시험 및 강도시험을 통한 실내배합 설계를 실시하고 이 결과를 토대로 화북댐 수몰지내에 현장시험시공을 실시하였다. 또한 C.S.G 성토체의 품질을 검증하기 위하여 3D 스캐너를 활용한 현장밀도검층, 보링홀을 이용한 현장투수시험 그리고 현장코어를 이용한 일축압축강도, 인장강도시험등의 현장시험을 실시하고 그 결과를 고찰함으로써 본 공법의 적용 가능성을 검토하였다.

## 2. 실내시험 및 배합설계

### 2.1 기본물성시험

실내시험 및 배합설계에 사용된 재료는 경상북도 군위군 고로면에 위치한 화북댐 건설현장지내의 하상재료이며 시험 제약상 최대입경은 37.5mm 이하로 제한하였다. 이 지역의 하상재료는 부존량이 상당히 풍부하고 골재의

입도분포가 매우 양호하며 비교적 건전 상태로 유지되고 있을 뿐 아니라 댐 건설현장지내에 산재하고 있어 재료 운반에도 매우 유리한 조건을 갖추고 있다. 아래 표는 150mm 이하 현장시료 및 40mm 이하 실내시험에 사용된 하상재료의 기본물성시험 결과를 나타낸 것이다.

표 1. 현장입도 및 시험입도

항목 입도	Gs	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>g</sub>	USCS
150mm이하 현장입도	2.67-2.69	0.31-0.35	2.4-7.2	16-22	51-65	1.16-6.7	GW, GP
40mm이하 시험입도	2.680	0.6	6.5	22	36	3.2	GW

## 2.2 다짐시험

시멘트량을 60, 80, 100kg/m<sup>3</sup>으로 달리하여 수정 E다짐[KSF 2319]방법으로 실시한 다짐시험결과는 아래 표 및 그림과 같다. 시멘트를 첨가하지 않은 화북댐 하상재료의 경우 최적함수비는 대략 7%, 최대건조단위중량은 2.11g/cm<sup>3</sup>로 나타났다. 단위시멘트량이 증가함에 따라 최대건조단위중량은 2.13-2.18g/cm<sup>3</sup>으로 조금씩 증가하지만 최적함수비는 6.5% - 7%로 시멘트를 첨가하지 않았을 때와 거의 비슷한 범위로 나타났다. Watanabe & Tateyama(2003)는 지바 및 큐슈지역의 CSG 재료를 대상으로 실시한 다짐 및 강도특성 연구에서 지바지역 CSG 재료의 최적함수비는 대략 5% - 8.7%, 최대건조단위중량은 2.15 - 2.2g/cm<sup>3</sup>, 큐슈지역 CSG 재료의 최적함수비는 약 5.5%, 최대건조단위중량은 약 2.65g/cm<sup>3</sup>로 발표한 바 있다.

표 2. 다짐시험결과

단위시멘트량 (kg/m <sup>3</sup> )	최적함수비 (%)	최대건조단위중량 (g/cm <sup>3</sup> )
0	7.0	2.11
60	7.0	2.13
80	6.5	2.15
100	7.0	2.18

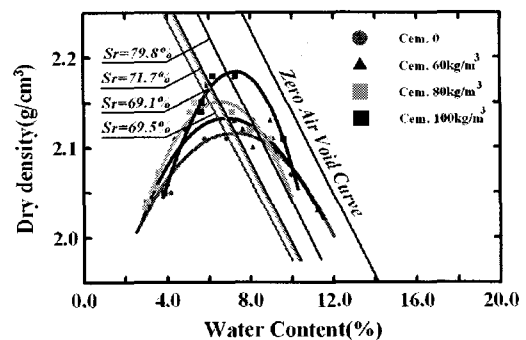


그림 1. 다짐곡선

## 2.3 일축압축시험

강도시험용 표준공시체 제작은 [ASTM C 1435]에서 제안하는 Hilti vibrating 방법을 채택하였으며, 공시체 직경은 15cm, 높이 30cm로 일반적인 콘크리트 공시체 크기와 동일하다. 재하장치는 대형 삼축압축시험기를 이용하였으며 최대재하용량은 75ton이다. 전단시 하중재하속도는 1ton/min로 결정하였다. 아래 표 3 및 그림 3은 단위시멘트량과 재령별 일축압축 강도시험결과를 요약한 것으로 동일한 재령인 경우 단위시멘트량이 증가함에 따라 일축압축강도는 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 모든 재령에서 상관도는 0.96 이상으로 높게 나타났다. 그림 3은 단위시멘트량에 대한 재령별 강도증가율을 도시한 그림으로 단위시멘트량이 60kg/m<sup>3</sup>인 경우 재령 28일에 대한 재령 7일의 강도 발현율은 약 63% 정도이며, 이러한 강도증가율은 단위시멘트량이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였다. 김기영, 박한규(2005)는 탐진댐 하상재료를 이용한 강도특성 연구에서 단위시멘트량 80kg/m<sup>3</sup>에서 재령 28일 대비 재령 3일 강도비는 0.41, 7일 강도비는 약 0.61로 보고한바 있어 본 연구보다 약간 낮은 강도증가율을 나타내었다. 이러한 원인은 탐진댐 하상재료의 경우 화북댐 시료에 비하여 상대적으로 세립분이 많이 함유되어 있어 동일 시멘트량을 기준으로 강도발현 정도가 작은 것으로 판단된다. 본 연구의 경우 모든 단위 시멘트량에서 재령 7일을 기점으로 강도증가율이 급격히 감소되는 것으로 나타났으며, 이 결과를 바탕으로 재령과 강도증가율에 대한 상관식을 제안하였다. 이때 각 인자별 상관계수는 최소 0.84이상으로 나타났다.

표 3. 일축압축시험결과

시멘트량 재령	일축압축강도								
	60(kg/m <sup>3</sup> )			80(kg/m <sup>3</sup> )			100(kg/m <sup>3</sup> )		
3일	No.59	13	12.6	No.66	30	34	No.69	50	53.7
	60	11		67	35		70	55	
	61	14		68	36		71	56	
7일	No.59	32	30.6	No.66	-	45.7	No.69	80.9	80.1
	60	30.5		67	44.2		70	72.1	
	61	29.5		68	47.3		71	87.5	
28일	No.105	45.1	44.4	No.108	64.4	62.7	No.111	92.0	92.5
	106	45.3		109	61.0		112	95.0	
	107	43.0		110	63.0		113	90.6	

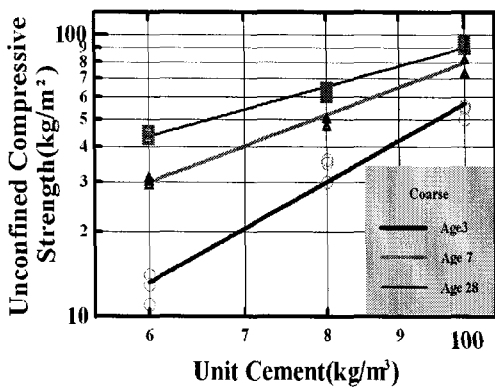


그림 2. 단위시멘트량과 일축압축강도

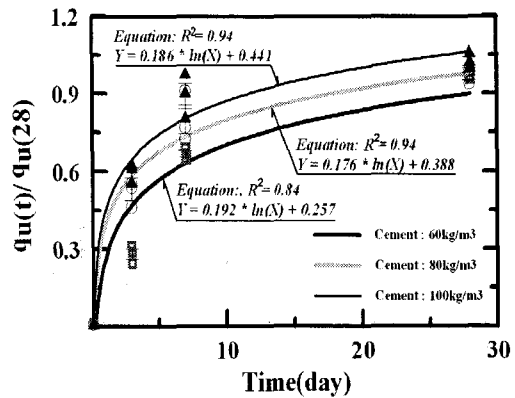


그림 3. 재령과 일축압축강도비

## 2.4 실내 배합설계

C.S.G 공법은 현장입도를 최소한으로 조정하면서 소정의 강도를 지닐 수 있도록 단위시멘트량을 산정함으로써 하상재료의 특성에 따라 배합설계의 폭이 넓다고 할 수 있다. CSG 공법과 비슷한 RCC(Roller Compacted Concrete)공법의 경우 최대골재의 크기는 일반적으로 50mm 이하로 규정하고 있으며, 골재의 상·하한입도를 시방기준에 의하여 제한하고 있다. 배합설계는 다짐시험 및 강도시험 결과를 토대로 포화도와 간극비, 간극률을 계산하고 공기량과 물량 그리고 전체 골재량을 산정하게 되며, 각 체별 재료량은 입도 분포결과를 토대로 전체 골재량에 대한 체별 중량비율을 곱해 결정하게 된다. 화북댐 시료의 각 단위시멘트량에 대한 배합설계 결과 및 RCC 공법의 배합설계 예는 아래 표 4와 같다. 화북댐 시료의 골재 총량은 단위 m<sup>3</sup> 당 약 2079~2092kg 정도로 나타났으며, 단위수량은 142.4~155.4kg로 나타났다. 원칙적으로 배합설계는 설계기준강도를 만족하는 단위시멘트량을 기준으로 산정하게 되지만 연구차원인 만큼 각 단위시멘트량에 대한 배합설계를 모두 실시하였다.

표 4. 화북댐 CSG재료의 실내배합결과 및 RCC 배합설계 예

[단위 : kg]

시료 재료	화북댐 CSG재료			탐진댐 CSG재료	Whipps Mill Road, KY	Prairie Creek TX(1)	North Bosque River, TX(1)
시멘트량	60	80	100	80	65	173	227
물량	152	142	155	167.9	136	151	148
골재량	2079	2079	2092	2074	2136	2159	2063
플라이애쉬	-	-	-	-	65	-	-
총배합량	2291	2301	2347	2321	2402	2483	2438

### 3. 현장시험시공

현장시험시공은 본 시공에 앞서 실내 배합시험결과를 토대로 현장배합을 실시하고 최적의 시공 리프트와 장비조합을 결정하며 품질관리를 통한 시공가이드라인을 제공하기 위함이 그 목적이다. 현장시험시공은 화북댐 건설현장지내에서 실시되었으며 개략적인 시험시공 개요 및 절차는 아래와 같다.

#### 3.1 시험시공개요

그림 4에서처럼 성토규모는 하부폭이 15m, 높이 1.5m, 길이 45m이며, 1회 포설 높이와 다짐횟수를 결정하기 위하여 동일한 단위시멘트량을 기준으로 9개 구역으로 구분하여 시공하였다. 시험시공 순서는 그림 5 및 사진 1과 같다. 시험시공은 크게 1)재료선별 2)혼화조 시공 3)원지반 정지작업 4)재료혼합 5)포설 및 다짐 6)현장밀도검층으로 나누어진다. 시험시공에 사용된 최대골재치수는 150mm이며, 시멘트 종류는 보통 포틀랜드시멘트, 단위시멘트량은 60kg/m<sup>3</sup>, 80kg/m<sup>3</sup> 구간으로 나누어 실시하였다.

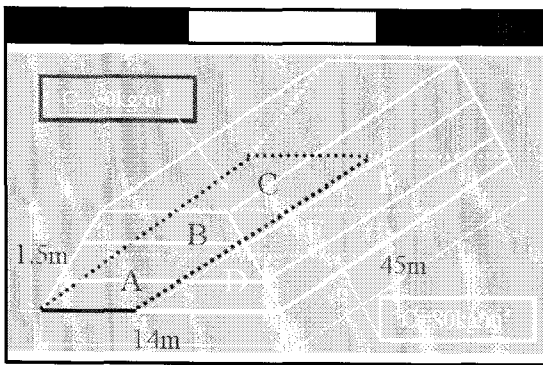


그림 4. 시험성토 개요

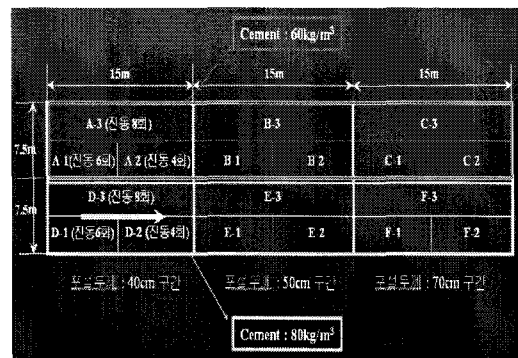


그림 5. 시험시공 순서도

#### 3.2 시험시공절차

먼저 백호우를 이용하여 최대골재치수를 150mm 이하로 선별하였다. 육안 확인시 150mm 이상 골재는 전체 골재량의 약 10% 미만을 차지하고 있었으며, 재료혼합을 위한 선행 작업으로 함수비 유지가 가능하도록 버림 콘크리트를 타설한 혼화조를 제작하였다. 혼화조의 용량은 1회 배합량이 대략 60m<sup>3</sup> 정도가 될 수 있도록 제작하였으며, 혼합은 백호를 사용하였다. 원지반에 대한 정지 및 다짐작업이 완료되면 CSG 재료를 투입하여 일차적인 혼합을 실시하고 가수 후 2차 혼합을 실시한다. 가수 전 현장함수비를 확인하여 이를 배제한 만큼의 단위수량만을 투입한다. 혼합 후 덤프트럭으로 포설작업을 실시하고 습지도우지를 이용하여 시공리프트 별 정지작업을 실시한다. 이후 진동로울러를 이용하여 다짐작업을 실시한 후 현장밀도검층을 수행하였다.



사진 1. 현장시험시공 전경

### 3.3 현장시험

#### 3.3.1 현장밀도검층

현장 다짐시 효율적인 포설두께를 결정하기 위하여 1회 포설 높이를 각각 40, 50, 70cm의 3가지 경우로 나누어 현장다짐을 실시하였으며, 각 구간별로 진동 로울러를 이용하여 무진동 2회 진동 4, 6, 8 회씩의 다짐을 실시하였다. 다짐이 완료되면 각 구간별 현장 다짐도를 측정하였다. 아래 표 5는 모래치환법을 이용한 현장다짐도와 이를 검증하기 위하여 3차원 레이저 스캐너를 활용한 밀도검층 결과를 함께 도시한 결과이다. 모래치환법은 일반적인 토사에서 사용하는 지름 15cm 보다 큰 지름 30cm의 측정 장치를 사용하였다. 3차원 레이저 스캐닝 장비는 대상체의 표면으로부터 상대적인 3차원(x,y,z) 공간좌표를 각각 점좌표로 기록하며, 측정 방법에 따라 일정량의 굴절장 증분을 주기위해 하나 또는 두개의 mirror를 사용하거나, 장비 전체가 회전하여 3차원 공간좌표를 얻을 수 있다. 단위시멘트 60kg/m<sup>3</sup> 인 경우 진동횟수가 증가함에 따라 현장 다짐도도 증가하는 것으로 나타났으나 진동횟수 6회와 8회에서의 다짐도는 큰 차이가 나지 않았다. 측정된 현장 함수비는 최적함수비의 ±1% 정도의 편차를 가지는 것으로 나타났으며, 전반적으로 시멘트량과 다짐횟수가 증가함에 따라 건조단위중량은 증가하는 것으로 나타났다. 포설두께에 따른 현장 다짐도를 검토한 결과 포설 높이가 40, 50cm 인 경우 현장 다짐도는 모든 다짐횟수에서 실내 다짐도의 97% 이상을 상회하는 것으로 나타났으며, 포설두께 70cm 의 경우에도 진동횟수 4회를 제외하고는 실내 다짐도의 95% 이상의 값을 나타내었다. 이러한 경향은 단위시멘트 80 kg/m<sup>3</sup> 인 경우의 결과에서도 나타나고 있다. 3차원 레이저를 이용한 현장밀도 측정결과 모래치환법으로 구해진 건조단위중량보다 평균 3%가량 크게 나타나는 경향을 보였으며, 시멘트량과 다짐횟수의 증가에 따라 건조단위중량은 증가하는 것으로 나타났다. 3차원 스캐너의 경우 정확도에서는 앞서지만 밀도계산을 위한 내업 시간이 길어지는 단점이 있다. 또한 앞서 언급한 2가지 방법은 포설두께가 증가할 경우 깊이에 따른 다짐도의 변화를 확인하기 어렵다. 선진외국의 경우 이를 고려하여 C.S.G 재료의 밀도검층은 방사선을 이용한 RI 미터를 활용하고 있다. 연구결과 적절한 1회 포설두께는 수치상으론 70cm, 진동횟수는 6회로 이 조건일 경우 실내다짐도의 95%이상을 만족하지만 포설두께 70cm의 경우 밀도검층 장비의 제약으로 깊이 30cm 이상의 밀도검층 확인이 어렵고 C.S.G 재료의 분급이 넓은 만큼 품질관리의 안정성을 감안한다면 포설두께 50cm 다짐횟수 6회가 적당한 것으로 판단된다. 이러한 포설두께 및 다짐횟수는 하상재료의 특성과 현장 시공여건 등에 따라 달라질 수 있으므로 시공전 반드시 시험시공을 통한 확인검증이 필요할 것으로 판단된다.

표 5. 포설두께 및 진동횟수에 따른 현장다짐도

단위: [g/cm<sup>3</sup>]

밀도검층법 시멘트량 포설두께 진동횟수	모래치환법						3차원 레이저 스캐너					
	시멘트 60kg/m <sup>3</sup>			시멘트 80kg/m <sup>3</sup>			시멘트 60kg/m <sup>3</sup>			시멘트 80kg/m <sup>3</sup>		
	40cm	50cm	70cm	40cm	50cm	70cm	40cm	50cm	70cm	40cm	50cm	70cm
4	2.08 (97.6%)	2.07 (97.1%)	2.0 (93.8%)	2.15 (100%)	2.13 (99%)	1.99 (92.5%)	2.14	2.11	2.04	2.19	2.19	2.05
6	2.18 (102%)	2.15 (101%)	2.05 (96%)	2.20 (102%)	2.18 (101%)	2.06 (95.8%)	2.22	2.20	2.09	2.25	2.22	2.10
8	2.20 (103%)	2.16 (101%)	2.12 (99.5%)	2.22 (102%)	2.19 (102%)	2.15 (100%)	2.24	2.21	2.16	2.28	2.24	2.16

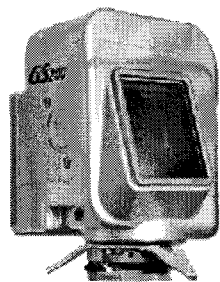


사진 2. 3D 레이저스캐너

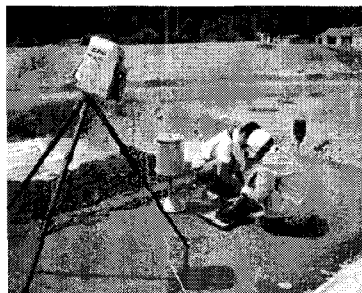


사진 3. 현장밀도검층

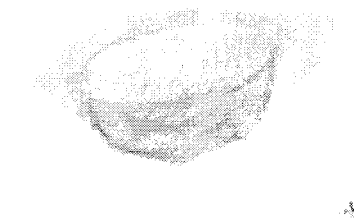


그림 5. 밀도검층 스캐닝결과

### 3.3.2 일축압축강도시험

실내 배합설계에서 결정된 단위재료량에 대한 품질확인을 위하여 성토제체의 코아채취를 통한 일축압축강도 및 인장시험을 실시하였다. 아래 사진 4는 현장에서 채취한 코아샘플 및 일축압축시험 전경을 도시한 것이며, 아래 표에 요약된 일축압축강도는 포설두께 50cm, 다짐횟수 6회의 최적 다짐구간의 시험결과만을 요약한 것이다. 일축압축시험결과 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup>에서의 재령 7일 강도는 37.7kg/cm<sup>2</sup>으로 나타났으며, 재령 28일에서의 평균 강도는 76.7kg/cm<sup>2</sup>으로 동일 재령에서의 실내 시험치를 초과하였다. 단위시멘트량 80kg/m<sup>3</sup>인 경우 역시 모든 재령에서 실내 시험치 보다 큰 압축강도를 나타내었다. 이러한 현상은 실내배합시험의 경우 최대 골재치수가 37.5mm 이하이지만 현장입도는 150mm 이하로 차이가 있으며, 다짐에너지가 실내시험보다 크기 때문으로 분석된다. 이에 대한 연구는 현재 진행중인 만큼 차후 지면을 통해 언급하고자 한다.

표 6. 현장코아 일축압축강도

No.	현장일축압축강도					
	60(kg/m <sup>3</sup> )			80(kg/m <sup>3</sup> )		
7일	No.1	38.0	37.7	No.10	54.0	53.1
	2	39.0		11	56.5	
	3	36.2		12	49.0	
12일	No.4	-	53.1	No.13	69.3	62.0
	5	54.2		14	54.2	
	6	52.0		15	62.5	
28일	No.7	83.5	76.7	No.16	96.0	101.1
	8	76.7		17	114.2	
	9	70.1		18	93.3	

표 7. 현장코아 인장강도시험

재령	시료	단위시멘트량	
		60kg/m <sup>3</sup>	80kg/m <sup>3</sup>
28일	No.1	8.83	6.84
	No.2	8.87	12.46
	No.3	7.93	11.20
	No.4	5.69	10.9
	No.5	4.44	8.78
	No.6	8.66	11.1

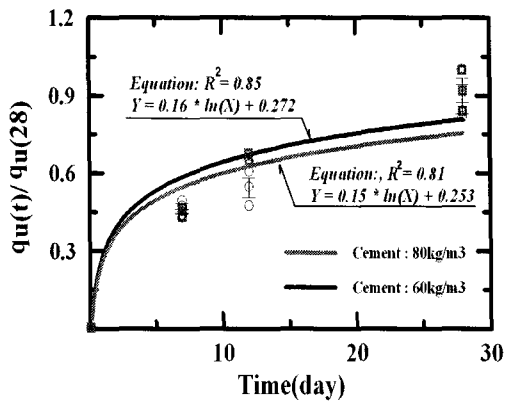


그림 6. 현장일축압축강도

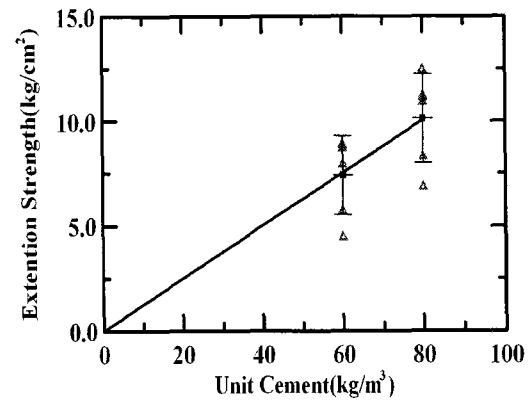


그림 7. 현장인장강도

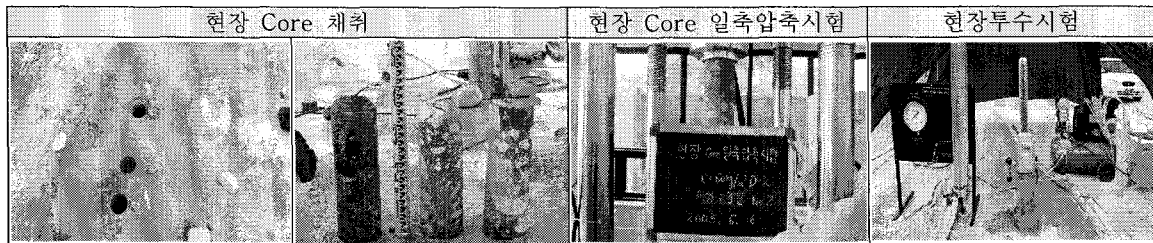
### 3.3.3 인장강도시험

CSG 재료는 시멘트로 모재를 고결하기 때문에 점착력이 존재하며 따라서 어느 정도의 인장강도를 가진다고 판단된다. 여기서는 콘크리트의 인장시험과 동일한 할열시험을 통하여 현장에서 채취한 CSG 코아의 인장강도를 살펴보았다. 콘크리트의 경우 일반적인 할열 인장강도는 일축압축강도의 1/5-1/10 정도인 것으로 알려져 있다. 표 7은 최적다짐 조건하에서의 인장시험결과를 요약한 것으로 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup>인 경우 인장강도는 약 4.44-8.87kg/cm<sup>2</sup>으로 일축압축강도의 대략 1/20-1/10정도 수준으로 나타났으며, 단위시멘트량 80kg/m<sup>3</sup>에서는 일축압축강도의 대략 1/16-1/9정도로 나타났다.

### 3.3.4 현장투수시험

현장투수시험은 아래 그림과 같이 코아 채취된 보링홀을 이용한 Open end 방식을 채택하였으며, 여기서는 시험시공시 최적 장비조합으로 다져진 재령 28일에서의 투수계수만을 측정하였다. 실험결과 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup> 구간의 현장투수계수는 3\*10<sup>-6</sup>cm/sec 로 나타났으며, 단위시멘트량 80kg/m<sup>3</sup> 구간의 투수계수는 평균 2.73\*10<sup>-7</sup>cm로 시멘트량이 증가함에 따라 투수계수는 감소하는 경향을 보였다. 따라서 C.S.G재료를 제체로 사용할 경우 소량의 단위시멘트량으로 우수한 차수효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 참고적으로 일본의 Tokuyama 댐 건설시 C.S.G공법을 이용한 호안공의 시험시공이 실시되었으며 80일 경과후 제체에 대한 현장투수시험을 실시한 결과 투수계수는 대략 10-5cm/sec의 범위로 본 연구결과보다 약간 높은 투수성을 나타내었다. 그러나 이 공사의 층당 리프트는 대략 60cm로 본 시험시공시 1회 포설두께보다 높았다. 또한 시공이음부에 대한 투수시험에서도 큰 차이를 보이지 않으므로써 소량의 시멘트로 상당한 차수효과를 나타낼 수 있음을 입증한바 있다.

사진 4. 현장코아채취 및 현장투수시험진경



## 4. 결론

1. CSG 공법에 대한 배합설계는 현장입도를 최대한 활용하는데 있으며 대상지역의 하상재료 및 입도분포특성에 따라 배합설계의 변화폭이 기존의 RCC, RCD 공법에 비하여 상대적으로 클 수 있지만, 소량의 시멘트로 강도증가 효과가 큰 만큼 댐 제체 규모의 축소와 연속 시공에 의한 경제성과 시공성 그리고 환경성에서 기존의 댐 축조공법에 비하여 유리할 것으로 판단된다.
2. 실내 다짐시험결과 시멘트량이 증가할수록 최대건조단위중량은 증가하였으나 최적함수비는 큰 변동이 없는 것으로 나타났다. 일축압축 시험결과 전반적인 거동양상은 콘크리트와 토사의 중간 형태로 나타났으며, 강도는 시멘트량과 재령에 비례하여 증가하였다. 양생초기에서 재령 7일 이내에 28일 강도의 60% 이상이 발현되었으며 이후 완만한 강도증가율을 나타내었다.
3. 단위시멘트량에 대한 실내 배합시험결과 골재 총량은 단위 m<sup>3</sup> 당 약 2079~2092kg, 단위수량은 142.4~155.4kg로 결정되었다. 현장시험시공을 통해 결정된 최적의 1회 포설두께는 대략 50cm, 다짐횟수는 6회로 판단되며 이때의 현장 다짐도는 모래치환법을 사용할 경우 실내다짐시험의 100%를 초과하는 것으로 나타났다. 3D 스캐너로 측정된 현장 다짐도는 모래치환법보다 약 3% 정도 크게 측정되었다. 그러나 깊이별 다짐도를 보다 정확히 측정하기 위해서는 RI 미터를 활용한 측정법의 도입이 필요한 것으로 판단된다.
4. 현장 코아를 대상으로 실시한 일축압축시험 결과 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup>에서의 일축압축강도는 실내시험에 나타난 일축압축강도보다 크게 나타났으며, 이러한 경향은 단위시멘트량 80kg/m<sup>3</sup> 에서도 동일하게 나타났다. 이러한 원인은 다짐에너지와 최대입경이 실내다짐보다 크기 때문으로 판단되며, 최대입경에 따른 강도특성 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 또한 할열시험을 통한 인장강도는 단위시멘트량이 증가함에 비례하여 증가하였으며 일축압축강도의 대략 1/9-1/20정도 수준으로 나타났다.
5. C.S.G 성토체에 대한 현장투수시험 결과 투수계수는 단위시멘트량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며 대략 10<sup>-6</sup>-10<sup>-7</sup>cm/sec의 범위로 성토체로 사용할 경우 만족할만한 차수성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 김기영, 박한규 외 2인(2005), “CSG 재료의 강도특성에 관한연구” 한국지반공학회 학술발표회 논문집 pp.619-626
2. 김기영, 박한규 외 1인(2005), “Cemented Sand and Gravel 재료의 강도특성” 한국지반공학회 논문집 pp.
3. Watanabe, K., Tateyama, M., Jiang, G., Tatsuoka, F. and Lohani, T.N.(2003), "Strength Characteristics of cement mixed gravel evaluated by large triaxial compression test, Proc. 3rd Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials. pp.637-643.