

# C.S.G 공법의 실내 배합설계

## Laboratory Mix Design of C.S.G Method

김 기 영<sup>1</sup> Kim, Ki-Young  
전 제 성<sup>2</sup> Jeon, Je-Sung  
김 용 성<sup>3</sup> Kim, Yong-Seong

### Abstract

Cemented Sand and Gravel (C.S.G) method has become increasingly popular in Japan and throughout the world as a construction method and material. This method is favorably used for cofferdam and large dam because a quarry and aggregate plant facility can be diminished. Also, this method can reduce construction cost, work duration and destruction of environment. In this paper, a methodology for C.S.G mix design based on so-called soil mechanics approach is proposed for trapezoid-shaped dam. The methodology consists of selection of a suitable aggregate, introduction of compaction method, processing to prepare standard specimens, and determination of mix portions. Also, unconfined compressive strength tests and large triaxial compression tests are performed. From the results of the test, correlation equation among strength, elastic modulus and unit cement is proposed.

### 요 지

최근 일본 및 선진외국에서는 C.S.G(Cemented Sand and Gravel)재료를 활용한 시공공법이 점차 증가하고 있다. 특히 본 댐과 가물막이 댐의 축조공법으로 그 적용성을 인정받고 있는 C.S.G 공법은 댐 축조에 필요한 채석장 개발과 플랜트 건설에 투입되는 제반경비를 줄일 수 있을 뿐 아니라, 석산개발에 따른 환경훼손을 방지할 수 있게 됨으로써 경제성과 환경적 측면에서 기존의 댐 축조공법에 비하여 유리한 측면이 있다. 본 연구에서는 토질 역학적 개념에 기초한 C.S.G 공법의 배합설계 절차를 시료 선별과정, 다짐시험 방법, 표준 공시체의 제작방법 그리고 배합비의 결정 순으로 살펴보고 일축압축시험 및 대형 삼축압축시험을 통해 얻어진 응력-변형특성 및 단위시멘트량에 따른 강도 및 탄성계수의 변화를 고찰하고 그 상관식을 제안하였다.

**Keywords :** C.S.G (Cemented Sand and Gravel), Elastic modulus, Large triaxial test, Mix design, Unconfined compression test

### 1. 서 론

최근 토목구조물은 비용감축과 환경의 보전이라는 두 가지 주제에 맞추어 새로운 기술을 펼쳐나가고 있다.

댐 건설에 있어서도 이 두 가지 점은 분명히 중요한 명제임에 틀림이 없을 것이다. 근대적인 댐 건설은 확실성과 신뢰성으로 인정받은 중력식 콘크리트댐을 필두로 댐 체적의 축소를 통해 경비절감을 지향한 중공중력

1 정희원, 한국수자원공사 댐기술연구소 선임연구원 (Member, Senior Research, DSRC/KIWE, kky0606@kowaco.or.kr, 교신저자)

2 정희원, 한국수자원공사 댐기술연구소 책임연구원 (Member, Senior Research, DSRC/KIWE)

3 정희원, 소방방재청 재해경감 대책팀 토목사무관 (Member, National Emergency Management Agency Disaster Mitigation Measures Team Deputy Director)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

식 콘크리트댐과 아치식 콘크리트댐의 건설로 전개되어왔으며, 이 후 기계화 시공에 의한 필댐의 건설이 가속화 되었다. 이 후 필댐과 같은 기계화 시공을 지향한 콘크리트댐의 시공방법이 검토되면서 선진외국에서는 RCC, RCD 공법을 이용한 댐 축조 기술이 널리 활용되고 있는 실정이다. 그러나 최근 자연환경 보호에 대한 국민 의식의 향상과 댐 건설에 따른 지역주민과 환경단체와의 마찰은 신규 댐의 건설을 더욱 어렵게 만들고 있는 것이 현실이며, 따라서 시공성 뿐만이 아니라 환경을 배려한 댐 축조공법의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 시작된 축조공법이 C.S.G(Cemented Sand and Gravel)공법이다. C.S.G 재료란 댐 수몰지로부터 쉽게 얻을 수 있는 하상자갈과 원지반으로부터 채취된 굴착토를 물, 시멘트와 함께 혼합한 재료를 총칭하며 C.S.G 공법은 C.S.G 재료를 현장에서 혼합한 뒤 포설작업, 정지작업 그리고 진동로울러를 이용한 다짐작을 통해 성토체를 연속적으로 축조해 나가는 공법으로 1993년 일본의 나가시마댐 상류 가물막이 공사에 처음 적용된 후 크부스가와댐, 초우베즈댐, 스키카미가와댐, 토코야마댐의 가물막이 댐과 타키자와 댐의 가설수로, 나가시마댐의 저사댐 등에 적용되는 등 많은 시공실적을 이룬바 있다. 최근 화북댐 축조시 하상자갈을 댐 축조재료로 이용한 CFGD 타입의 시공공법이 채택되어 공사 중에 있으나 C.S.G 재료를 이용한 댐체 시공은 국내의 경우 전무한 실정이다. C.S.G 재료를 이용한 댐 축조술의 가장 큰 장점은 하상재료 및 굴착된 토사를 인위적인 입도조절을 거치지 않고 그대로 이용하는데 있으며, 불가피할 경우 최소한의 선별작업을 통해 성토함으로써 기존의 댐 축조시 필요한 채석장 개발과 플랜트 건설에 투입되는 제반 경비를 줄이 수 있다는 점 그리고 연속적인 타설을 통한 시공기간의 단축 등을 들 수 있다. 이 연구의 주된 목적은 C.S.G 재료를 이용한 댐 축조 설계 시 필수적인 배합설계 방법과 절차 그리고 관련 실내시험을 소개하고 화북댐 건설지내의 하상재료를 대상으로 실내시험을 통한 배합설계와 역학적 특성을 고찰함으로써 C.S.G 공법설계에 필요한 기초적인 자료를 제공하는데 있다.

## 2. C.S.G 재료의 배합설계

### 2.1 배합설계 개요

그림 1은 사다리형 C.S.G 댐의 단면을 도시한 것이다.

사다리형 C.S.G 댐에서는 댐체 재료로서 C.S.G를 이용하여 상류면에는 저수 등에 대한 수밀성 및 내구성을 확보하는 목적으로 차수콘크리트를 설치하고, 천단 및 하류면에는 내구성의 확보를 목적으로 보호콘크리트를 시공한다. 댐 상류쪽에는 침수를 방지할 목적으로 지수 콘크리트를 시공하고 댐체와 기초지반의 접합부에는 내구성을 확보하기 위하여 단위시멘트량이 많은 부배합 C.S.G를 시공한다. 지수 콘크리트의 밑에는 커튼 그라우팅과 보조 그라우팅을 시공하게 된다. 일반적인 사다리꼴 C.S.G 댐의 설계순서는 다음과 같다. (1) 먼저 댐체의 높이를 설정하고 (2) C.S.G 재료의 설계기준 강도를 설정한다. 그리고 (3) 성토체 상하류면 구배의 초기값을 설정하고 (4) 댐체의 응력해석을 실시한다. 여기서 응력조건과 활동 및 전도에 대한 안전성을 검토하고 이를 만족하면 (5) 가장 합리적인 단면 형상을 결정하게 된다. 배합설계의 목적은 댐체 및 기초저부의 C.S.G 재료가 허용설계 기준강도를 만족하는 가장 합리적인 단위 재료량이 얼마인지를 결정하는데 있다.

다시말해 다짐시험 및 강도시험과 같은 실내시험을 통하여 설계기준 강도를 확보할 수 있는 단위시멘트량, 물량, 골재량을 결정하고 시험배합 및 재시험을 통해 이를 확인함으로써 경제적이면서 시공 효율성을 고려할 수 있는 단위재료량을 산정하는 것이다. 일반적으로 시멘트가 첨가되는 경우의 배합설계방법에는 콘크리트 배합설계에 이용되는 물-시멘트비 이론이 있으나 C.S.G 재료의 경우 단위 시멘트량이 상당히 적고 토사와 골재의 비중이 큰 만큼 토질역학적 이론에 기초한 배합설계를 실시하였다. 그림 2는 본 연구에서 실시한 배합설계 개념 및 순서를 도시한 것이다.

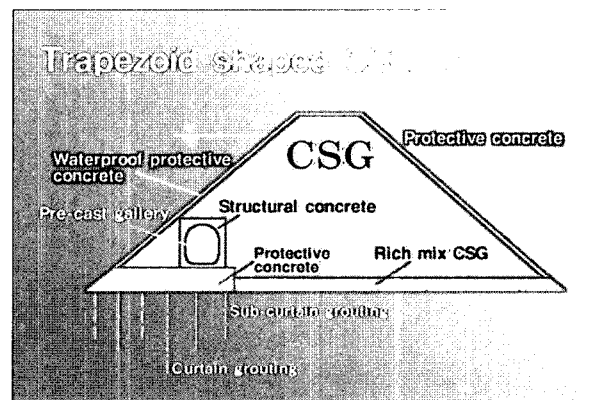


그림 1. C.S.G 댐의 일반적인 설계단면

## 2.2 배합설계를 위한 실내시험

### 2.2.1 최대골재치수

일본의 경우 C.S.G 공법의 실 시공에 사용되는 최대골재의 치수는 150mm 또는 80mm 이하이며, 입도조정 없이 현장입도를 그대로 사용하는 것을 원칙으로 한다. 다만 실내 배합설계의 경우 시험장비의 제약상 이러한 대형입도를 사용할 수 없으므로 다짐시험 및 강도시험용 시료의 최대 골재치수는 통상적으로 40mm 이하를 사용한다.

### 2.2.2 다짐시험

C.S.G 재료의 다짐시험 방법에 대한 명확한 기준은 제시되어 있지 않다. 비교적 본 공법에 대한 연구가 활발한 일본에서도 다짐방법에 대한 별도의 기준을 제시하지 않고 있으며, 기존의 토질역학적 다짐시험 방법을

|   |
|---|
| Step 1 : CSG재의 기본적인 물성시험실시                |
| Step 2 : 입도시험을 통한 골재의 중량 백분율 계산           |
| Step 3 : 단위시멘트량( $m^3$ )가정                |
| Step 4 : 가정된 단위시멘트량에서 골재(잔골재, 굵은골재)의 용적계산 |
| Step 5 : 다짐시험에 필요한 단위재료량 산정               |
| Step 6 : 단위시멘트량을 달리한 다짐시험실시               |
| Step 7 : 각 단위시멘트별 최적함수비와 최대건조단위중량 산정      |
| Step 8 : 삼상관계로부터 간극비,간극률,공기량,수량 및 골재량을 산정 |
| Step 9 : 강도시험용 표준공시체 제작에 필요한 단위재료량 확정     |
| Step10 : 표준공시체의 제작 및 역학시험실시(일축,삼축,인장시험등)  |
| Step11 : 허용기준강도를 만족하는 단위시멘트량 결정           |
| Step12 : 결정된 단위시멘트량으로 시험배합 및 강도 재확인       |

그림 2. C.S.G 재료의 배합설계 순서

그대로 채택하고 있다. 일본의 다짐시험 기준은 [JSF T 711-1990]이며, 이 기준은 국내 다짐시험기준[KSF 2319]과 동일하다. 미국 역시 C.S.G 재료에 대한 다짐기준이 제시되어 있지 않지만 본 공법과 유사한 RCC(Roller Compacted Concrete)공법의 경우 배합설계에 사용되는 다짐기준을 표준다짐(ASTM D 698)과 수정다짐(ASTM D 1557)으로 규정하고 있다.

### 2.2.3 강도시험

강도시험은 C.S.G 댐의 설계시 설정한 설계기준강도를 만족하는 단위시멘트량을 결정하기 위한 실험으로 시험에 필요한 재료량은 다짐시험 결과로부터 얻어진 최적함수비와 최대건조단위중량을 바탕으로 삼상관계를 적용하여 얻어진다. 공시체의 성형은 일반적인 콘크리트 몰드(직경 15cm, 높이 30cm)를 사용한다. 일본의 C.S.G 연구회에서 제안한 표준공시체 제작방법을 요약하면 표 1과 같으며, 이 방법은 후자에서 언급할 Hilti 또는 Kango vibrating 방법(ASTM C 1435)과 유사하다.

미국의 경우 C.S.G 공법과 유사한 RCC 공법에서 채택하고 있는 강도시험용 표준공시체의 제작방법은 사진 1과 같은 Proctor Test(ASTM D 1557), Hilti 또는 Kango vibrating 방법(ASTM C 1435), Pneumatic tamper 방법 그리고 Vebe Table 방법(ASTM C 1176)등이 사용되고 있으며, 각 방법에 대한 요약은 김기영, 박한규(2005)를 참조하기 바란다.

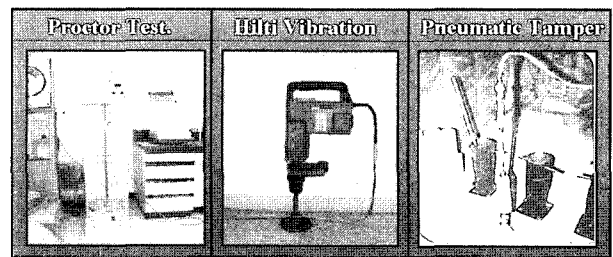


사진 1. C.S.G 재료의 강도시험용 표준공시체 제작방법

표 1. 일본 C.S.G 연구회의 강도시험용 표준공시체 제작방법

| 일 본    |  |
|--------|--|
| □ 재료준비 | · 스크린 작업을 통해 골재의 최대입경을 40mm 이하로 선별.  |
| □ 혼 합  | · 혼합은 콘크리트용 간이식 포트 믹서기(용량 90-165l)를 사용하며, 혼합온도는 대략 20℃를 유지.<br>· 1회 재료 혼합량은 시험에 필요한 양보다 5L 이상, 믹서 공칭용량의 1/2이상을 넘지 않도록 혼합.<br>· 하상재료와 시멘트를 첨가 후 1분간 혼합하고 가수한 후 3 분간의 재 혼합 실시. |
| □ 다짐기계 | · 총격식 진동 탬퍼 제원 : 무게 11kg, · 가진력 : 140-150kg(50-60Hz), · 회전수 : 3000-3600회/분   |
| □ 제 작  | · 공시체 치수는 지름 150mm, 높이 300mm이며, 재료분리가 생기지 않게 3층으로 나누어 다짐<br>· 각층을 다짐봉으로 15회 다진 후 진동 탬퍼로 약 1분간 다짐   |
| □ 양 생  | · 다짐후 20℃ 항온실에서 양생하며 3일, 7일 28일, 91일 후 강도시험(일축,인장,삼축시험 등)을 실시  |

### 3. 실내 배합설계

본 절에서는 2.1절에서 언급한 실내시험 방법에 기초하여 경상북도에 균위균 고로면에 위치한 화북댐 건설 현장의 하상재료를 대상으로 C.S.G 재료에 대한 실내 배합설계를 실시하였다. 배합설계시의 목표 설계기준강도는 성토체의 규모와 크기에 따라 달라 질 수 있지만 일본의 경우 재령 28일 강도를 기준으로  $30\text{kg/cm}^2$ 을 많이 채택하고 있다. 본 연구의 설계기준강도는 재령 7일 강도를 기준으로  $30\text{kg/cm}^2$ 으로 선정하였다.

#### 3.1 시료채취 및 선별

먼저 실내시험에 사용할 하상재료의 채취를 위하여

화북댐 수몰지내 가물막이댐 시공지역의 하상재료를 대상으로 입도 및 부존량에 대한 육안 관찰조사를 실시하였다. 이 중 하상자갈의 분포가 비교적 양호하고 실험 및 현장시공시 최소한의 혼합 및 선별을 통한 모재료의 확보가 가능한 지역을 선정하였다. 먼저 아래 사진과 같이 체 버킷을 장착한 백호우를 이용하여 골재의 최대 직경이 150mm 정도 되도록 1차 선별하였다. 이후 2, 3차 재료선별 작업을 통하여 40mm~20mm, 20~10mm, 10mm 미만의 시료로 분리 선별하였다.

#### 3.2 기본물성시험

현장에서 채취한 하상재료를 최대골재치수 40mm이하로 선별하여 기본적인 물리특성 및 입도분포시험을

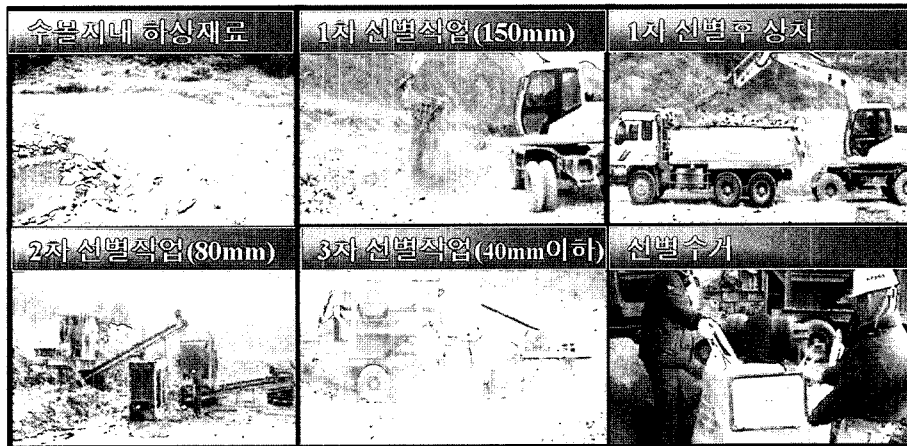


사진 2. 시료채취 전경

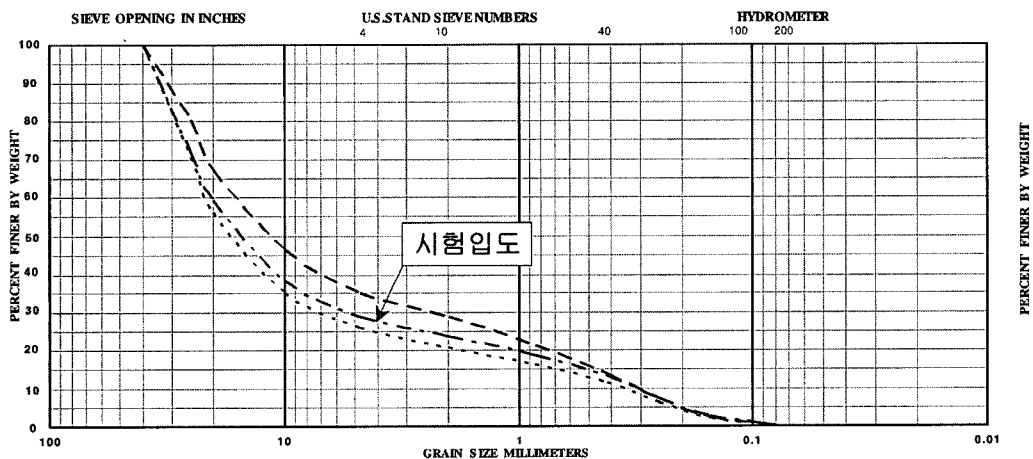


그림 3. 입도분포(40mm 이하)

표 2. 화북댐 시료의 물리적 특성

| 비중(Gs)    | D <sub>10</sub> (mm) | D <sub>30</sub> (mm) | D <sub>60</sub> (mm) | C <sub>u</sub> | C <sub>w</sub> | USCS |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------|------|
| 2.67~2.69 | 0.31~0.35            | 2.4~7.2              | 16~22                | 51~65          | 1.16~6.7       | GW   |

실시한 결과는 아래 표 2 및 그림 3과 같다. 현장 자연시료의 입도시험결과 균등계수( $C_u$ )는 51~65, 곡률계수( $C_g$ )는 1.16~6.7의 범위로 나타났으며, 통일 분류법상 GW에 해당하는 것으로 나타났다. 동일한 장소에서 채취된 시료라 하더라도 그 분포양상이 조금씩 차이가 있으나 본 공법의 주된 취지가 현장입도를 최대한 활용한다는 측면에서 시료 균일성의 오차는 어느 정도 감안하지 않을 수 없다. 다짐 및 강도시험에 사용된 시험입도는 그림 3과 같다.

### 3.3 다짐시험

2장에서 언급한대로 배합설계를 위한 첫 단계로 시멘트량을 60, 80, 100kg/m<sup>3</sup>으로 달리하여 수정 E 다짐 [KSF 2319]에 의한 다짐시험을 실시하고 각 단위시멘트량에 대한 최대건조단위중량 및 최적함수비를 도출하였다. 아래 그림 4는 단위시멘트량을 변화시켜 실시한 다짐시험결과를 도시한 것으로 단위시멘트량은 전체중량 대비 약 2.5%~4.2% 내외이며, 시험결과 시멘트량이 증가함에 따라 최대건조단위중량은 2.13~2.18g/cm<sup>3</sup>로 증가하는 것으로 나타났으나 최적함수비는 대략 6.5~7.0% 정도로 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

Watanabe & Tateyama(2003)은 2.5%의 시멘트를 혼합한 지바 및 큐슈지역의 C.S.G 재료를 대상으로 실시한 연구에서 지바지역 C.S.G 재료의 최적함수비는 A, B 다짐

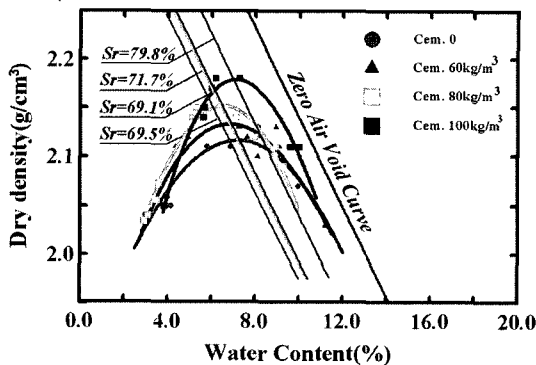


그림 4. 단위시멘트별 다짐시험결과

표 3. 다짐시험결과

| 단위 시멘트량 (kg/m <sup>3</sup> ) | 최적 함수비 (%) | 최대건조 단위중량 (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                           |

방법에 따라 차이가 있으나 대략 5%~8.7%, 최대건조단위중량은 2.15~2.2g/cm<sup>3</sup> 정도인 것으로 발표한 바 있으며, 큐슈지역 C.S.G 재료의 경우 B 다짐으로 실시한 다짐 시험결과 최적함수비는 약 5.5%, 최대건조단위중량은 약 2.65g/cm<sup>3</sup> 정도로 전자에 비하여 최적함수비는 작고 최대건조단위중량은 상당히 크게 나타났다. 2가지 시료 모두 본 연구에 비하여 다짐에너지가 작으면서도 최대건조단위중량이 비슷하거나 크게 나타나는 것은 이 지역 모재료의 비중이 각각 2.71, 3.03으로 본 연구에 사용된 모재료의 비중 2.67~2.69 보다 크기 때문으로 판단된다.

참고적으로 일본의 수자원개발공단, 국토 교통성의 유수전환 및 사방댐 13개소의 건설시 C.S.G 공법 적용 현장을 대상으로 실시한 현장 다짐도를 통계 분석한 결과 현장다짐시의 평균 건조단위중량은 대략 2.15~2.25t/m<sup>3</sup>, 최적함수비는 약 5.93~8.47% 정도로 파악되었다. 이 중 최대골재치수는 150mm인 경우가 10개소 그리고 80mm 이하의 골재를 사용한 경우가 3 개소였으며, 사용된 단위시멘트량은 60kg/m<sup>3</sup>인 경우가 12개소 그리고 80kg/m<sup>3</sup>인 경우가 1개소로 나타났다. 일반적으로 현장 다짐에너지가 실내 다짐에너지보다 큰 점을 감안한다면 일본과 본 연구의 실내 다짐도는 유사할 것으로 판단되며, 최적함수비는 거의 비슷한 범주에 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.4 배합비

다짐시험결과를 토대로 각 단위시멘트별 재료량을 계산한 결과는 표 4와 같다. 각 단위시멘트별 재료량을 검토한 결과 골재량은 단위 m<sup>3</sup> 당 약 2079~2092kg 정도로 나타났으며, 단위수량은 142~155kg로 나타났다. 총 배합량은 2291~2347kg으로 단위시멘트량이 증가함에 따라 총 배합량도 비례하여 증가하였다. C.S.G 공법과 RCC 공법의 배합설계시 가장 큰 차이점은 재료선택 및 선별의 유무라 할 수 있다.

RCC 공법의 경우 최대골재 치수는 대략 37.5mm 이하로 규정하고 있으며, 골재의 상·하한입도 범위를 시방기준에 의하여 제한하고 있다. 따라서 배합설계시 단위재료량의 변동 폭이 C.S.G 공법에 비하여 상대적으로 작고 최적함수비는 대략 6~6.5% 정도로 보고되고 있다. 그러나 C.S.G 공법의 경우 최대골재치수는 대략 150mm 이하이며 현장입도를 최대한 그대로 활용하면서 소정의 강도를 지닐 수 있도록 단위 재료량을 산정하게 됨으로 현지 하상재료의 입도분포에 따라 배합설계의 변동

폭이 상대적으로 넓게 된다. 표 5에서 보듯이 화북댐에서 채취한 40mm 이하의 현장 입도분포와 김기영, 박한규(2005)의 탐진댐 하상재료의 현장 입도분포는 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있다. 화북댐 시료의 경우 잔골재와 조골재의 기준이 되는 4.75mm 통과율이 45~35%로 표준 RCC 입도와 다른 3 지역의 실제 입도보다 작게 나타났다. 즉 조골재 비율이 비교적 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 반면 탐진댐 유역 하상재료의 경우 화북댐이나 기타 RCC 공법에 사용된 재료에 비하여 세립분이 상당히 많이 차지하고 있음을 알 수 있으며, 200번체 통과율이 화북댐 하상재료에 비하여 다소 크게 나타났다. 그러나 표준 RCC 공법에서 사용하고 있는 전형적인 입도분포와 미국의 소규모 RCC 댐에서 실제 사용된 입도분포의 범위는 거의 일정한 양상을 보이는 것을 알 수 있으며, 단위시멘트량이 65~227kg/m<sup>3</sup> 정도로 CSG 공법에 비하여 상당히 많이 투입되고 단위시멘트량이 작을 경우 플라이애쉬가 혼합된 것을 알 수 있다. 그러나 단위수량은 131~151kg으로 본 연구결과의 단위수

량과 거의 비슷하게 나타났다.

### 3.5 강도시험

#### 3.5.1 재하장치 및 실험방법

사진 3은 본 연구에 사용된 재하장치로서 정적 및 동적재하시험이 가능하며 응력 및 변형제어를 자동적으로 조절할 수 있는 다기능 재하시험 장치이다. 현재 수

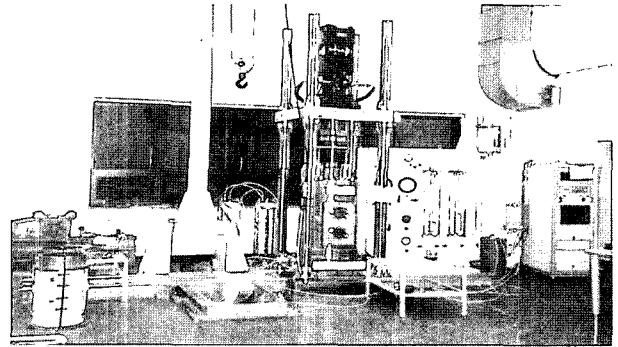


사진 3. 재하장치

표 4. CSG 재료의 배합설계 및 RCC 배합설계 사례 [단위 : kg]

| 배합비   | 장소   | 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  | 1676.9 | 136       | 151                  | 148                 |                           |
| 골재량   | 2079 | 2079      | 2092 | 2074   | 2136      | 2159                 | 2063                |                           |
| 플라이애쉬 | -    | -         | -    | -      | 65        | -                    | -                   |                           |
| 총배합량  | 2291 | 2301      | 2347 | 2321   | 2402      | 2483                 | 2438                |                           |

표 5. CSG 골재배합 입도와 RCC 배합입도의 비교

| 입도      | 장소    | 화북댐 CSG    | 탐진댐 CSG    | 표준 RCC      | Whipps Mill Road, KY | Prairie Creek TX(1) | North Bosque River, TX(1) |
|---------|-------|------------|------------|-------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
|         |       | 실입도 통과율(%) | 실입도 통과율(%) | 규정입도 통과율(%) | 실입도 통과율(%)           | 규정입도 통과율(%)         | 실입도 통과율(%)                |
| 50mm    | -     | -          | -          | -           | 100                  | -                   | -                         |
| 37.5mm  | 100   | 100        | 100        | 100         | -                    | 100                 | 100                       |
| 25mm    | 80-70 | -          | 100-85     | 100         | 100                  | 100-75              | 96.8                      |
| 19mm    | 67-55 | -          | 89.3       | -           | 97                   | 85-65               | 84.4                      |
| 12.5mm  | -     | -          | 80-60      | 77          | -                    | -                   | -                         |
| 9.5mm   | 45-35 | -          | 75         | -           | 65                   | 60-45               | 46.7                      |
| 4.75mm  | 35-25 | -          | 69         | 55-40       | 43                   | 45-30               | 40.5                      |
| 2.36mm  | -     | -          | 41-28      | 30          | -                    | -                   | -                         |
| 2.0mm   | 28-20 | -          | -          | -           | -                    | 35-20               | 34.0                      |
| 1.18mm  | -     | -          | 23-33      | 23          | -                    | -                   | -                         |
| 0.425mm | -     | -          | 35         | -           | -                    | 20-8                | 17.0                      |
| 0.3mm   | 15-12 | -          | 20-10      | 16          | -                    | -                   | -                         |
| 0.15mm  | -     | -          | 13-5       | 14          | -                    | -                   | -                         |
| 0.075mm | 0.2   | -          | 2-7        | 1           | -                    | 8-2                 | 0.3                       |

자원 연구원에서 보유하고 있으며, 최대 재하 축 하중은 75ton으로 일축압축 및 정,동적 삼축압축시험이 가능하다. 일축압축시험시 단위 시멘트량에 대한 강도특성을 파악하기 위하여 시멘트량을 각각 60, 80, 100kg/m<sup>3</sup>으로 나누어 시험을 수행하였으며, 각 단위시멘트량에 대한 재령은 7일 강도만을 살펴보았다. 삼축압축시험의 경우 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup>을 대상으로 재령 7일에서의 강도정수와 응력-변형특성만을 검토하였다.

### 3.5.2 시료성형

일축시험시 표준공시체의 제작방법은 전절에서 언급한 방법 중 Hilti Vibrationg 방법에 기초하여 성형하였다. 일축압축강도시험에 사용된 몰드는 직경 15cm, 높이 30cm의 일반적인 콘크리트 몰드이며, 시료의 최대골재 치수는 40mm 이하로 제한하였다. 다짐시험에서 계산된 재료량을 토대로 공시체를 제작하고 항온 항습실에서 7일간 양생 후 탈형 하였으며 유황을 사용한 캠핑 작업을 실시한 후 강도시험을 수행하였다. 대형삼축시험의 경우 포터식 콘크리트 믹서기를 이용하여 C.S.G 재료를 투입하고 1분간 혼합한 후 물과 함께 3분간의

추가 믹싱을 실시하였다. 이 시료를 직경 30cm, 높이 60cm의 몰드에 투입하고 대형자동화 다짐기를 이용하여 공시체를 성형하였다. 시료배합후의 건조밀도는 대략 최대건조단위중량의 약 95±1%정도 수준이다.

### 3.5.3 일축압축시험

일축압축시험은 목표한 설계기준강도를 만족할 수 있는 최소한의 단위시멘트량이 얼마인가를 산정하기 위한 실험으로 일축압축시험에 필요한 단위재료량은 반드시 다짐시험을 통해 얻어진 결과를 토대로 산출되어진다. 특히 C.S.G 공법의 설계가 탄성해석을 기본으로 설계되는 만큼 일축압축시험에서 얻어진 강도와 탄성계수는 단위시멘트량의 결정과 기본설계를 위한 필수적인 시험으로 상당히 중요하다. 일축압축시험시 적용된 하중재하속도는 분당 1ton이며, 본 연구에서의 탄성계수는 응력-변형곡선에서 나타나는 선형구간의 기울기를 의미한다.

각 단위시멘트별 응력-변형곡선은 그림 5, 6과 같다. 전반적인 거동양상은 변형초기 일시적인 곡선부분이 나타나며, 이 후 급격한 응력증가와 함께 최대강도를 받

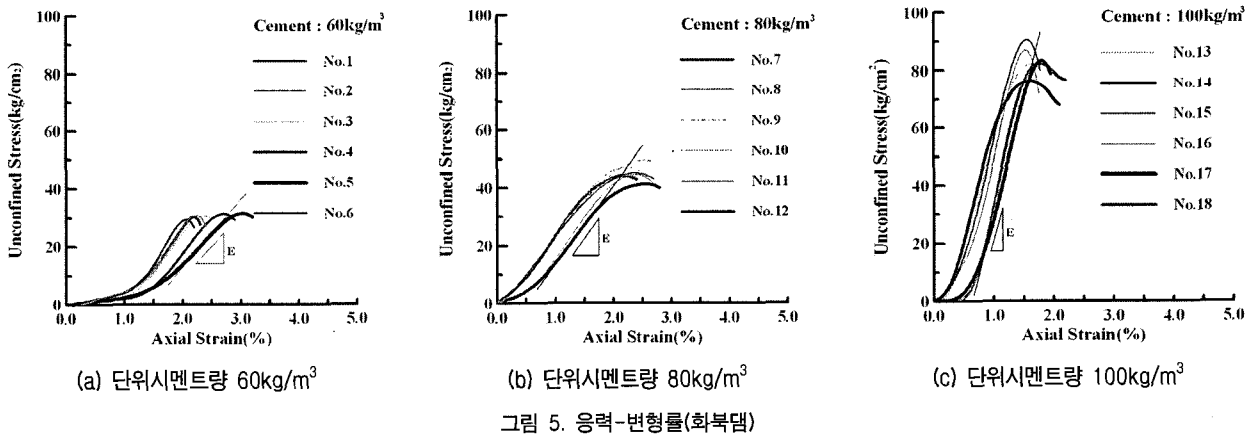


그림 5. 응력-변형률(회복값)

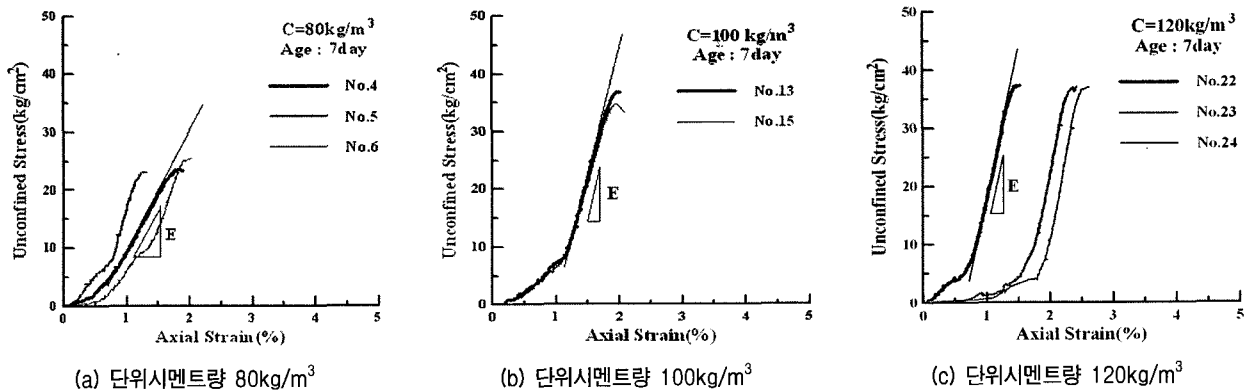


그림 6. 응력-변형률관계(탐진값)

현한 후 취성파괴에 이르는 양상을 나타내었다. 특이한 점은 동일한 단위시멘트량과 재령일 경우 화북댐 C.S.G 재료의 일축압축강도가 탐진댐 시료의 압축강도보다 크게 나타나고 있다는 점이다. 즉 동일한 단위시멘트량과 재령일 경우 입도분포가 강도특성에 미치는 영향이 매우 크고, 특히 세립분이 많을 경우 일축강도의 발현이 작고 시멘트량의 증가에 따른 강도 변화율도 작게 나타난다는 점이다. 이러한 원인은 세립분이 많을 경우 골재 입자의 비표면적이 상대적으로 커지게 됨으로 동일한 강도를 발현하기 위해서는 조립분이 많은 시료에 비하여 좀 더 많은 양의 단위시멘트량이 필요하기 때문으로 분석된다.

표 6은 일축압축강도 시험결과를 요약한 것이며, 그림 7은 단위시멘트량과 일축압축강도의 상관성을 그림 8은 단위시멘트량과 탄성계수와의 상관성을 도시한 것이다. 단위시멘트량이 증가함에 따라 C.S.G 재료의 강도와 탄성계수는 비례하여 증가하였다.

즉 소량의 시멘트양이라 하더라도 시멘트가 강도특성에 미치는 주요 인자임을 알 수 있다. 이러한 연구결

과는 김기영, 박한규(2005)의 탐진댐 하상재료를 대상으로 실시한 시험결과와 유사한 결과로 그림 9, 10에서 처럼 일축압축강도와 탄성계수는 시멘트량에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있으며, 조립분이 많은 화북댐 시료에 비하여 강도와 탄성계수의 발현이 작음을 알 수 있다.

일본 토목기술 자료에 의하면 단위시멘트량을 20~100kg/cm<sup>3</sup>으로 변화시켜 고찰한 일축압축강도의 경우 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup>의 재령 7일 강도는 대략 1~4 MN/m<sup>2</sup>으로 나타났으며, 시멘트량이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하고 단위시멘트량이 커질수록 강도의 오차범위가 크게 나타났다. 또한 일본의 수자원개발공단 및 국토교통성에서 시공한 호안공의 경우 단위시멘트량이 61.2kg/m<sup>3</sup>일 경우 재령 7일후의 강도는 23kg/cm<sup>2</sup>으로 보고된바 있으며, 단위시멘트량 65.1kg/m<sup>3</sup>로 시공한 하류가물막이 댐의 재령 7일 후의 일축강도는 27kg/cm<sup>2</sup>로 보고된바 있다. 본 연구결과에서도 단위시멘트량이 증가함에 따라 일축압축 강도는 비례하여 증가하지만 강도편차의 범위가 상기 연구결과와 달리 작게 나타났으

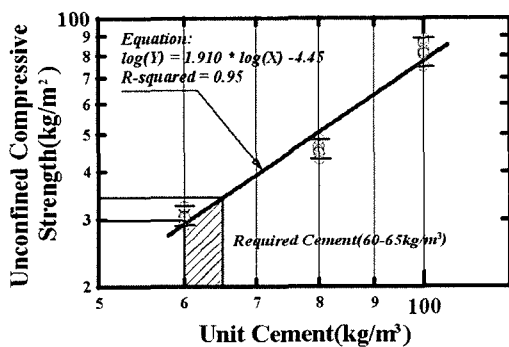


그림 7. 단위시멘트량 - 일축압축강도(화북댐)

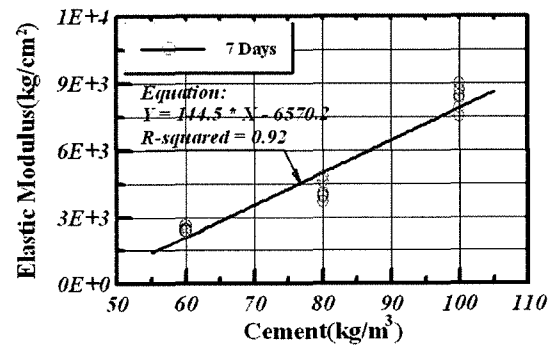


그림 8. 시멘트량-탄성계수(화북댐)

표 6. 일축압축강도 시험결과(화북댐)

| 시료    | 화북댐 유역 하상재료         |       |  |                      |       |  |                      |       |  |
|-------|---------------------|-------|--|----------------------|-------|--|----------------------|-------|--|
|       | 60kg/m <sup>3</sup> |       |  | 80kg/m <sup>3</sup>  |       |  | 100kg/m <sup>3</sup> |       |  |
| 재령 7일 | No.1                | 32.0  | 평균강도<br>30.6<br>(kg/cm <sup>2</sup> )  | No.7                 | 44.6  | 평균강도<br>45.5<br>(kg/cm <sup>2</sup> )  | No.13                | 80.9  | 평균강도<br>82.3<br>(kg/cm <sup>2</sup> )  |
|       | No.2                | 30.5  |  | No.8                 | 45.3  |  | No.14                | 73.1  |  |
|       | No.3                | 30.1  |  | No.9                 | 48.4  |  | No.15                | 88.6  |  |
|       | No.4                | 29.5  |  | No.10                | 46.5  |  | No.16                | 87.5  |  |
|       | No.5                | 32.3  |  | No.11                | 44.9  |  | No.17                | 82.4  |  |
|       | No.6                | 29.1  |  | No.12                | 43.2  |  | No.18                | 81.2  |  |
| 시멘트   | 탐진댐 유역 하상재료         |       |  |                      |       |  |                      |       |  |
|       | 80kg/m <sup>3</sup> |       |  | 100kg/m <sup>3</sup> |       |  | 120kg/m <sup>3</sup> |       |  |
| 재령 7일 | No.4                | 23.49 | 평균강도<br>23.88<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | No.13                | 36.72 | 평균강도<br>35.72<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | No.22                | 37.19 | 평균강도<br>36.99<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|       | No.5                | 23.12 |  | No.14                | -     |  | No.23                | 36.88 |  |
|       | No.6                | 25.03 |  | No.15                | 34.72 |  | No.24                | 36.92 |  |



며 비슷한 양의 단위시멘트량일 경우 일축압축강도는 일본에서의 연구결과보다 오히려 크게 나타났다.

그림 7로부터 목표 설계기준강도인 30kg/cm<sup>2</sup>을 만족하는 단위시멘트량은 대략 60kg/m<sup>3</sup>인 것으로 판단된다. 그러나 C.S.G 재료의 일축강도 변동 폭을 고려하여 콘크리트 배합설계에서 사용되는 할증계수 1.1을 고려할 경우 목표 설계기준강도는 33kg/cm<sup>2</sup>으로 상향되며 이를 만족하는 단위시멘트량은 대략 65kg/m<sup>3</sup>으로 판단된다. 그러나 이러한 단위시멘트량의 산정은 대상지역의 하상재료 특성 및 입도분포에 따라 달라질 수 있으므로 반드시 배합설계를 통한 최적의 단위시멘트량 산정 이 무엇보다 중요하다.

표 7은 화북댐과 탐진댐 시료에 대한 일축압축 시험 결과를 바탕으로 도출된 단위시멘트별 일축압축강도와 탄성계수와의 상관성을 관련식으로 나타낸 것으로 각

인자별 상관계수는 최소 0.85 이상으로 나타나 매우 높은 수준의 상관성을 확인할 수 있다.

### 3.5.4 삼축압축시험

#### 1) 응력-축변형률-체적변형률

아래 그림 11, 12는 축차응력-축변형률-체적변형률의 관계를 도시한 것이다. 먼저 축차응력과 축변형률의 관계를 살펴보면 전반적인 거동양상이 변형초기 거의 선형적인 증가를 보인 직후 축변형률 1~1.5% 범위에서 최대강도가 발현되고 이후 급격한 연화현상을 나타내었다. 구속압이 커짐에 따라 최대강도의 발현은 점차 작은 변형률에서 나타나고 있으며, 잔류강도는 구속압이 상대적으로 작은 1kg/cm<sup>2</sup>에서 최대강도의 약 75%, 구속압 2, 3kg/cm<sup>2</sup>에서는 55~58% 정도로 단위 시멘트량이 증가함에 따라 최대강도에 대한 잔류강도의 비가 점차

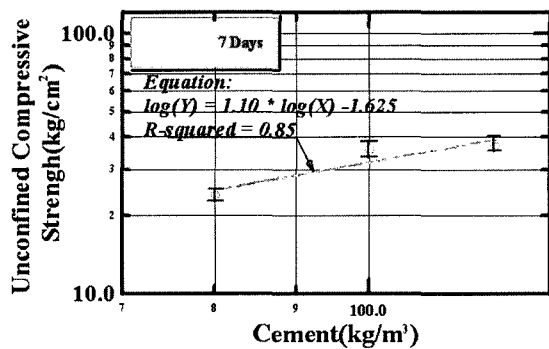


그림 9. 단위시멘트량-일축압축강도(탐진댐)

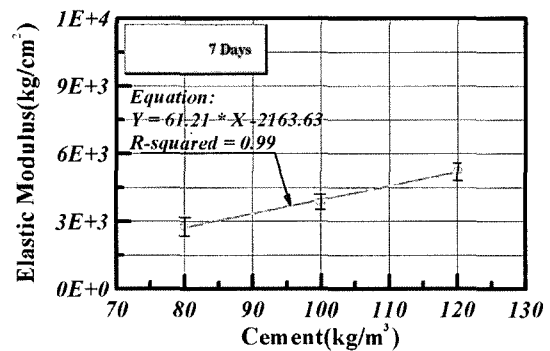


그림 10. 단위시멘트량-탄성계수(탐진댐)

표 7. 일축압축강도-시멘트량-탄성계수의 상관식

| 시료  | 상관식   | R <sup>2</sup> | 탄성계수 - 시멘트량과의 상관식  | R <sup>2</sup> |
|-----|---|----------------|--|----------------|
| 화북댐 | 재령 7일 : $\ln(Y) = 1.91 * \ln(X) - 4.45$<br>[* (X) Range : 60~100 kg/m <sup>3</sup> ]  | 0.95           | $Y = 144.5 * (X) - 6570.2$<br>[(X) Range : 60~100kg/m <sup>3</sup> ] | 0.92           |
| 탐진댐 | 재령 7일 : $\ln(Y) = 1.105 * \ln(X) - 1.62$<br>[* (X) Range : 80~120 kg/m <sup>3</sup> ] | 0.85           | $Y = 61.21 * (X) - 2163.6$<br>[(X) Range : 80~120kg/m <sup>3</sup> ] | 0.99           |

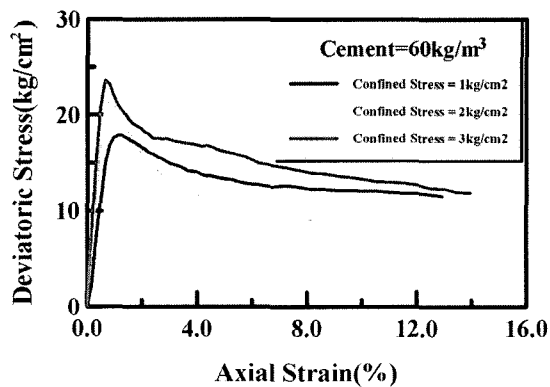


그림 11. 축변형률 - 축차응력

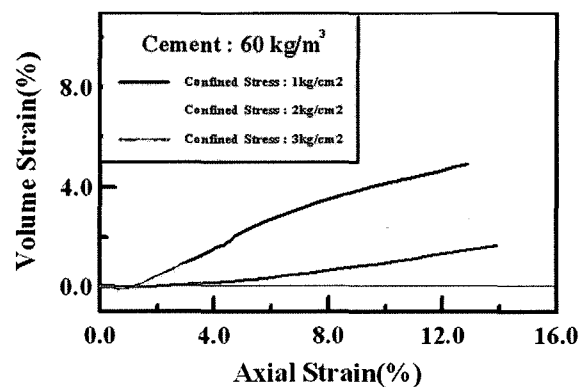


그림 12. 축변형률 - 체적변형률

작아지는 경향을 나타내었다.

Coop & Atkinson(1993)은 시멘트가 첨가된 모래의 저동양상을 크게 3 가지로 구분하고 있는데 그 중 하나의 양상으로 시멘트의 점착강도에 비하여 낮은 구속압에서 전단될 경우 응력-변형곡선의 최대축차응력은 매우 작은 변형률에서 발생한다고 발표한 바 있다. 그림 12는 축변형률과 체적변형률과의 관계를 도시한 것으로 구속압에 상관없이 초기 변형률에서 일시적인 체적감소를 나타낸 후 변형률이 증가함에 따라 체적팽창 현상이 두드러지게 나타나고 있으며, 특히 축차응력이 최대가 되는 변형률에서 체적변형의 변곡점이 나타나는 현상을 보였다. 그러나 이러한 체적팽창 현상은 구속압이 증가함에 따라 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

## 2) 강도정수

전절의 삼축시험 결과를 바탕으로 도시한 강도정수 및 Mohr원은 표 8, 그림 13과 같다. 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup>일 때의 유효 내부마찰각은 약 48°, 점착력은 대략 2kg/cm<sup>2</sup> 정도로 나타났다. 그러나 탐진댐 시료의 경우 화북댐보다 많은 단위시멘트량에도 불구하고 유효 마찰과 점착력은 각각 45°와 1.8kg/cm<sup>2</sup>로 작게 나타났으며, 이러한 현상은 화북댐 시료의 경우 조립질이 상당히 많은 반면 탐진댐 시료의 경우 세립분과 특히 200번 체 통과량이 상대적으로 많이 분포하기 때문으로 판단된다. 즉 세립분 함유량이 증가함에 따른 골재의 비표면

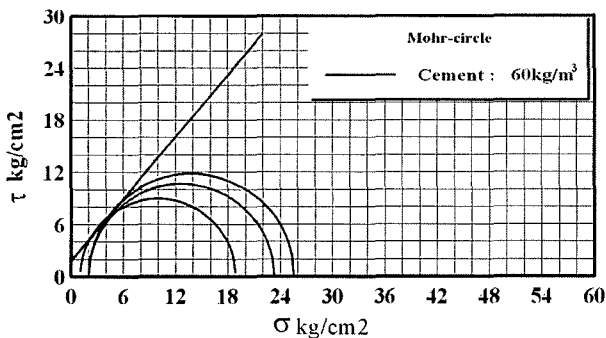


그림 13. Mohr 원

표 8. 강도정수

| 시료  | Mohr-Coulomb           |      |
|---|------------------------|------|
|   | C(kg/cm <sup>2</sup> ) | Φ(°) |
| 화북댐(60kg/m <sup>3</sup> )                   | 2.0                    | 48   |
| 탐진댐(80kg/m <sup>3</sup> )                   | 1.8                    | 45   |
| Omae et al.(2003)<br>(60kg/m <sup>3</sup> ) | 5.6                    | 52.7 |

적이 증가하게 됨으로써 동일한 강도의 발현을 위해서는 입자 점착에 필요한 단위시멘트량이 증가할 수 밖에 없을 것으로 분석된다.

Omae et al.(2003)은 C.S.G 재료의 대형 삼축압축시험 연구에서 단위 시멘트량 60kg/m<sup>3</sup>인 경우의 재령 7일에서의 유효 마찰각은 대략 52.7°, 점착력은 5.6kg/cm<sup>2</sup> 정도의 값을 가진다고 발표함으로써 본 연구 결과보다 유효마찰각과 점착력이 다소 크게 나타났다. 참고적으로 Fernando Schnaid et al.(2001)은 시멘트를 혼합한 모래재료의 강도특성 연구에서 시멘트량과 점착력은 서로 비례하지만 유효마찰각과 시멘트량과의 상관관계는 일정하게 명확치 않다고 발표한바 있으며, 이러한 경향은 Acar & EL-Tahir(1986), Rad & Tumay(1986), Clough et al.(1979, 1981, 1989), Dupas & Pecker(1979) 의 연구 결과에서도 찾아 볼 수 있다. 그러나 위 실험의 대부분이 세립분의 모래를 대상으로 이루어진 만큼 굵은 골재가 다량 혼합된 C.S.G 재료의 경우에서도 적용될 수 있을지에 대하여는 보다 많은 연구가 실시되어야 할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

- (1) 본 연구에서는 C.S.G 공법 설계에 필요한 배합설계를 토질역학적 이론에 기초하여 수행하였으며 공법 특성상 현장입도를 최대한 그대로 활용하는 것인 만큼 대상지역의 하상재료에 따라 배합설계의 변동 폭이 다소 클 수 있음을 알 수 있다. 그러나 C.S.G 공법은 소량의 시멘트로 강도 증가효과가 크고 경제적, 환경적 측면에서 유리하며 연속적인 시공을 통한 공기 단축 효과를 기대할 수 있어 시공적인 측면에서도 우수한 공법이다.
- (2) 화북댐 시료의 경우 골재의 입도분포가 양호하고 RCC 공법에서 추천하고 있는 시방입도에 비하여 조립질이 상대적으로 많이 분포하는 것으로 나타났다. 그러나 현장입도를 그대로 적용해서 얻어진 실내 다짐도는 다른 C.S.G 연구결과에 비하여 비슷하거나 크게 나타나고 있어 댐 축조재료로서의 사용이 충분할 것으로 판단된다.
- (3) C.S.G 공법은 하상재료의 모재 특성에 따라 그 다짐 특성이 달라질 수 있으므로 그 특성을 단적으로 결정지을 수는 없으나 화북댐 시료의 경우 시멘트량이 증가함에 따라 최대 건조단위중량은 비례하여

증가하며, 최적함수비는 단위시멘트량에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

- (4) 배합설계 결과 설계기준 강도를 만족하는 단위시멘트량은 할증계수를 고려할 경우 단위  $m^3$  당 약 65kg 정도인 것으로 판단되며, 소량의 단위시멘트로 상당히 우수한 강도발현을 나타내었다. 그러나 동일한 시멘트량이라 하더라도 모 재료의 특성 및 입도분포에 따라 강도발현의 차이가 나타날 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.
- (5) 일축압축시험결과 C.S.G 재료의 거동특성은 작은 변형률에서는 탄성체적 거동이 그리고 최대강도를 발현한 후에는 취성적 거동이 지배적인 것으로 나타났다. 단위시멘트량과 일축압축강도 그리고 탄성계수는 상호 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 특히 동일한 양의 시멘트라 할지라도 입도분포에 따른 강도발현과 증가율이 다르고 공시체 제작시 재료적 편차에 따른 강도 변동의 폭이 발생할 수 있으므로 배합설계시 이를 고려한 최적의 단위시멘트량 산정이 필요하다.
- (6) 삼축압축시험 결과 C.S.G 재료의 최대강도는 축변형률 1.5% 이내에서 발생하였으며 최대강도가 발현된 직후 급격한 연화현상을 나타내었다. 그리고 동일한 단위시멘트량이라 하더라도 입도분포 특히 세립분의 함유량이 증가함에 따라 유효마찰각과 점착력은 작아지는 경향을 보였다.

## 참 고 문 헌

1. 김기영, 박한규, 전제성 (2005), "Cemented Sand and Gravel 재료의 강도특성", *한국지반공학회논문집*, 제 21권, 10호, pp.61-71.
2. Acar, Y. B. and El-Tahir, A. E. (1986), "Low strain dynamic properties of artificially Cemented Sand", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE* Vol.112, No.11, pp.1001-1015.
3. Clough, G. W., Kuck, W. M., and Kasali, G. (1979), "Silicate-stabilized sand", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol.107, No.6, pp.799-817.
4. Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C., and Rad, N. S. (1981), "Cemented sands under static loading", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 107(6), 799-817.
5. Clough, G. W., Iwabuchi, J., Rad, N. S., and Kuppasamy, T. (1989), "influence of cementation on liquefaction of sands", *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 115(8), 1102-1117.
6. Coop, M. R., and Atkinson, J. H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53-67.
7. Dupas, J. and Pecker, A. (1979), "Static and dynamic properties of sand cemented", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 105(3), 419-436.
8. Fernando Schnaid., Pedro D. M. Prietto. and Nilo C. Consoli (2001), "Characterization of cemented sand in triaxial compression", *J. Geotech. & Geoenvironmental Engrg., ASCE*, Vol.127, No.10, pp.857-868.
9. Omae, S., Sato, N., and Oomoto, I. (2003), "Dynamic properties of CSG", *Proc of 4th Inter. Conf. on Roller compacted concrete dam*, Spain pp.511-518.
10. Rad, N. S. and Tumay, M. T. (1986), "Effect of cementation on the cone penetration resistance of sand : A model study", *Geotec. Testing J.*, Vol.9, No.3, pp.117-125.
11. 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*. IS Lyon 03, Balkema, Sept. 2003.

(접수일자 2005. 8. 16, 심사완료일 2006. 5. 12)