

## 낙사법으로 조성된 대형 석고 고결시료의 균질성

### Uniformity of Large Gypsum-cemented Specimens Fabricated by Air Pluviation Method

이 문 주<sup>1</sup> Lee, Moon-Joo

최 성 근<sup>2</sup> Choi, Sung-Kun

추 현 옥<sup>3</sup> Choo, Hyun-Wook

조 용 순<sup>4</sup> Cho, Yong-Soon

이 우 진<sup>5</sup> Lee, Woo-Jin

#### Abstract

The method to prepare the large cemented sand specimen for calibration chamber test by air-pluviation is investigated in this study. The uniformity of cemented specimen is evaluated by performing the CPTs, DMTs, and bender element tests in the calibration chamber. The sand particles, pre-wetted with 0.5% water content, are mixed with gypsum to provide the homogeneous coating of gypsum particles on the grain surface. It was shown that the pre-wetting of particle surface is effective to minimize the potential for segregation between sands and gypsum during air-pluviation. It was observed that the extreme void ratios ( $e_{max}$  and  $e_{min}$ ) of the mixture of pre-wetted sand and gypsum powder increase at lower gypsum content while those of the mixture of dry sand and gypsum decrease with increasing gypsum content. It was also shown from the test results that large cemented specimens reconstituted in calibration chamber by rainer system are quite uniform in vertical and horizontal directions.

#### 요 지

본 연구에서는 대형 챔버에 낙사법에 의한 고결시료 조성시 모래와 고결유발제인 석고의 재료분리를 방지하기 위한 방법을 검토하고, 콘관입시험, 딜라토미터 시험, 벤더엘리먼트 시험을 수행하여 조성된 시료의 균질성을 평가하였다. 시료 낙사시 발생하는 재료분리를 최소화하기 위해 모래 중량비 0.5%의 물로 모래시료 표면을 습윤시키고, 석고를 모래표면에 골고루 흡착시킨 후 시료를 낙사하였다. 일반적인 세립분 포함 모래시료와 같이 건조상태 모래와 석고의 혼합시료는 석고함유율이 증가할수록 최대/최소 간극비가 감소하였지만, 습윤상태 모래와 석고의 혼합시료는 석고함유율이 적은 초기의 최대/최소 간극비가 증가하는 경향을 보였다. 조성된 시료의 연직방향 콘선단저항, 딜라토미터 수평응력지수, 딜라토미터 계수, 재료지수, 그리고 수평방향 전단파속도는 매우 균등하게 측정되었으며, 이로써 시료의 균질성이 매우 양호한 것으로 평가된다.

**Keywords :** Extreme void ratio, Large cemented specimen, Particle segregation, Uniformity

#### 1. 서 론

고결(cementation)은 지반의 변형계수 뿐만 아니라,

미소변형 강성을 증가시키기 때문에, 고결상태를 고려할 경우 경제적인 설계가 가능하다. 현재까지 고결에 대한 연구는 대부분 소형 고결시료를 이용한 실내시험

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Member, PhD student, Dept. of Civil, Environ., and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Member, PhD student, Dept. of Civil, Environ., and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environ., and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil, Environ., and Architectural Engrg., Korea Univ.)

5 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 (Member, Associate prof., Dept. of Civil, Environ., and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

위주로 수행되었으나, 현장시험 결과와 직접적으로 비교하기 어렵기 때문에 지반의 고결정도 평가를 위한 적절한 현장시험이 필수적이다. 그러나 현장의 고결지반은 연직/수평방향으로 결합정도가 매우 다양하게 분포할 뿐만 아니라, 일반적인 미고결 지반과 거동양상이 매우 상이하기 때문에 각종 관입시험을 통해 고결지반의 거동특성을 일반화 시키는 것은 매우 어렵다. 따라서 임의의 고결정도와 상대밀도, 그리고 응력조건 등을 고려하여 실내 챔버에 대해 고결시료를 조성한 후 각종 현장시험을 적용함으로써, 고결지반의 특성을 평가하는 연구가 필수적이다. 현재까지 미고결 사질토에 대한 각종 현장시험이 실내 챔버에서 수행되었으며, 그 결과를 바탕으로 지반의 응력상태와 상대밀도, 그리고 마찰각 등의 각종 지반정수를 추정할 수 있는 각종 관계식과 도표가 제시되고 있다. 그러나 고결시료의 경우, Puppala 등(1995)에 의해 포트랜드 시멘트로 약하게 고결된 시료에 대한 미니콘 관입시험이 수행되었지만, 현재까지의 연구성과는 매우 미흡하다.

본 연구에서는 다양한 현장시험법을 이용하여 고결 모래를 평가하기 위한 선행 연구로서, 대형 챔버에 고결시료를 조성하는 방법을 시험적으로 연구하였다. 시료 조성시 모래와 고결유발제인 석고의 재료분리를 방지하기 위한 방법을 검토하고, 낙사법으로 조성된 대형 고결시료에 각종 현장시험 장비를 적용하여 시료의 균질성을 간접 평가하였다.

## 2. 사질토 시료조성 방법의 검토

흙의 거동은 시료조성 방법에 따라 그 거동이 크게 달라지기 때문에, 자연상태의 퇴적과정에서 나타나는 흙의 조직과 유사한 시료를 조성하는 것이 중요하다(Mulilis 등 1977; Miura and Toki 1982). 또한 다양한 상대밀도의 시료를 균등하게 조성할 수 있어야 하고, 흙의 퇴적형상을 반복적으로 모사할 수 있어야 할 뿐만 아니라, 입자분포나 세립분 함유율에 따른 입자별 재료분리 없이 시료가 조성되어야 한다(Kuerbis and Vaid 1988). 이 같은 측면에서 건조낙사법(air pluviation method)은 바람에 의해 퇴적된 흙의 구조를 가장 잘 나타낼 수 있는 시료조성 방법으로써, 조성된 시료의 상대밀도는 입자 낙하고와 침전율(deposition rate)의 영향을 크게 받아 낙하고가 크고 침전율이 작을수록 높은 상대밀도의 시료가 조성된다(Kolbuszewski 1948; Jacobsen 1976;

Miura and Toki 1982; Gilbert 1984; Rad and Tumay 1986; Vaid and Nequssey 1984). 반면 수중낙사법은 수중에서 퇴적된 자연상태 흙의 구조를 가장 잘 나타낼 수 있는 시료조성 방법으로써, 탈기수를 통해 시료가 낙하하기 때문에 건조낙사법보다 낮은 상대밀도의 시료가 조성되고, 시료의 포화가 확실하게 되는 장점이 있다. 건조낙사법과 수중낙사법은 빈입도 시료에 적용할 경우 매우 균등한 시료의 조성이 가능하지만, 실트질 모래와 같이 세립분이 함유된 양입도 시료에 적용할 경우 입자의 낙하차에 의한 재료분리와 시료조성 후 포화과정에서 재료분리가 발생할 수 있는 것으로 알려지고 있다. Kuerbis and Vaid(1988)는 양입도 시료나 실트질 모래시료의 조성에 적용할 수 있는 슬러리침전법(slurry deposition method)을 제안하였다. 이 방법은 탈기수안에서 완벽한 포화상태에서 시료가 조성되고, 퇴적도중 입자의 낙하거리를 최소화할 수 있기 때문에 재료분리가 방지되어 흙의 입도분포나 세립분 함유율에 관계없이 균질한 시료가 조성되므로, 일반적으로 실트질 모래의 거동분석을 위한 시험에 주로 사용되고 있다. 또한 초기에 형성된 낮은 상대밀도의 시료에 기계적인 진동을 가하여 원하는 상대밀도로 시료를 조성하는 것이 가능하다.

## 3. 고결시료 조성

### 3.1 시료조성방법

고결시료의 조성을 위해 Clough 등(1981), Acar and El-Tahir(1986), Yun and Santamarina(2005), Haeri 등(2005a)은 포트랜드 시멘트를, Coop and Atkinson(1993), Huang and Airey(1998), Haeri 등(2005b)은 석고를 고결유발제로 사용하였다. 또한 최근에 Ismail 등(2002), Sharma and Fahey(2003)은 CIPS 용액을 이용하여 고결된 모래에 대한 연구를 수행하였다. 미고결 시료의 조성 후 CIPS 용액을 주입하여 고결시키는 방법과는 달리, 석고나 포트랜드 시멘트와 같은 분말상태의 고결유발제를 모래와 혼합하여 시료를 고결시키는 방법의 경우, 시료조성 시 모래와 고결유발제의 재료분리 현상이 발생할 가능성이 크다. Ismail 등(2002)은 석고와 모래가 혼합된 시료를 소형 삼축시험용 몰드에 낙하시킬 경우, 상대적으로 낙하고가 낮기 때문에 시료의 재료분리는 거의 무시할 수 있다고 하였다. 그러나 대형 챔버시료와

같이 시료의 낙하속도가 큰 경우에는 모래와 고결유발제의 낙하속도차에 의한 재료분리 현상이 발생 가능하며, 시료조성 시 이를 고려하여야 한다.

Puppala 등(1995)은 낙사법을 이용한 대형 고결시료 조성 시, 시료의 낙사도중 발생하는 모래와 포트랜드 시멘트의 재료분리를 방지하기 위해 함수비 0.4%의 모래 시료와 모래 중량비 1 ~ 2%의 포트랜드 시멘트를 혼합시킨 후 낙사하였다. 본 연구에서는 Puppala 등(1995)의 방법을 응용하여 모래의 함수비를 조절하여 고결유발제인 석고를 모래표면에 골고루 흡착시킨 후 낙사시켜 시료를 조성하였으며, 이를 위해 다음과 같은 사항을 검토하였다.

우선 모래와 석고의 재료분리를 최소화시킬 뿐만 아니라, 습윤상태의 모래로 인한 석고의 조기 양생을 방지할 수 있는 함수비를 결정하였다. 그림 1은 건조모래와 석고 혼합시료를 직경 70mm, 높이 150mm의 소형 몰드에 낙사시킨 후 하부에 증류수를 주입하여 고결된 시료와, 0.5% 함수비의 습윤모래와 석고를 혼합한 후 동일한 방법으로 고결된 시료에 대한 일축압축시험 결과로써, 습윤상태에서 낙사되어 조성된 시료의 일축압축강도는 건조상태에서 낙사되어 조성된 시료의 85 ~ 95% 정도의 강도를 나타내었다. 따라서 0.5% 함수비의 습윤상태 모래와 석고가 혼합된 경우에도 석고의 조기 양생으로 인한 강도 감소는 미비한 것으로 판단된다.

또한 습윤상태의 모래와 석고를 혼합할 경우, 함수비가 높아질수록 혼합시료의 자연마찰각이 증가하므로 혼합시료의 낙하가 원활이 진행될 수 있도록 레이저 시스템의 개폐 구멍 직경이 결정되어야 한다. 본 연구에서 사용된 레이저 시스템의 개폐구멍은 직경이 2.0cm로써, 함수비를 0.5% 상태로 혼합된 시료의 낙하가 원활이 진

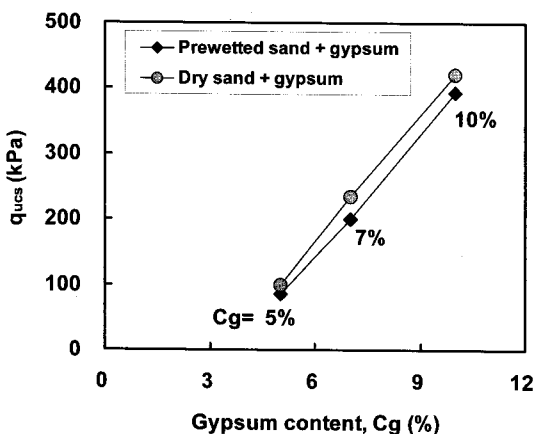


그림 1. 시료조성 방법에 따른 일축압축강도

행됨을 확인하였다.

### 3.2 모래-석고 혼합토의 간극비특성

#### 3.2.1 세립분이 함유된 모래의 간극비 특성

일반적으로 세립분이 함유된 시료의 최대/최소 간극비는 깨끗한 모래와는 다른 경향을 보인다. 그림 2에 보이는 바와 같이 깨끗한 모래에 실트를 첨가하여 간극비를 측정하면, 실트 함유율 20 ~ 30% 정도 까지 시료의 최대/최소 간극비가 감소하지만, 그 이상의 실트가 포함될 경우 최대/최소 간극비는 점차 증가하는 경향을 보인다(Kuerbis 등 1988; Lade 등 1998; Salgado 등 2000). 이 같은 현상은 적은 양의 세립분이 모래에 추가될 경우, 대부분의 세립분이 모래 입자 사이의 간극을 채우지만, 세립분 양이 전체 질량의 20 ~ 30% 이상일 경우, 입자와 입자 사이에 세립분이 채워져 간극의 증가를 유발시키기 때문이다(Lade and Yamamuro 1997; Salgado 등 2000).

#### 3.2.2 석고혼합 모래의 간극비 특성

입경이 다른 두 종류의 모래를 사용하여 석고가 혼합된 모래의 간극비 변화를 살펴보았다. 사용된 모래는 모암으로부터 인공적으로 파쇄된 석영질 모래로써, SiO<sub>2</sub> 함유량이 98% 이상이고, 입도분포 및 기본물성은 그림 3, 표 1과 같다. 두 모래의 조도는 모두 모난 ~ 중간모난 정도이며, 통일분류법에 의해 SP로 분류된다. 모래의 고결을 위해 사용된 석고는 도자기형재용 석고(GM-10)로써, 물-석고비(표준혼수량) 40%로 혼합되어 습윤양생될 경우 20MPa의 압축강도를 발현하고 양생시 팽창율은 0.03%이다.

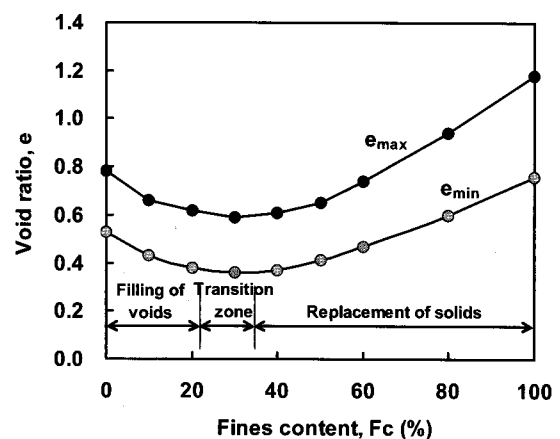


그림 2. 세립분 함유율에 따른 시료 간극비 변화 (Lade 등, 1998)

본 연구에서 시료의 최대간극비는 깔대기법(ASTM D4254)을, 최소간극비는 건조낙사법(Miura and Toki

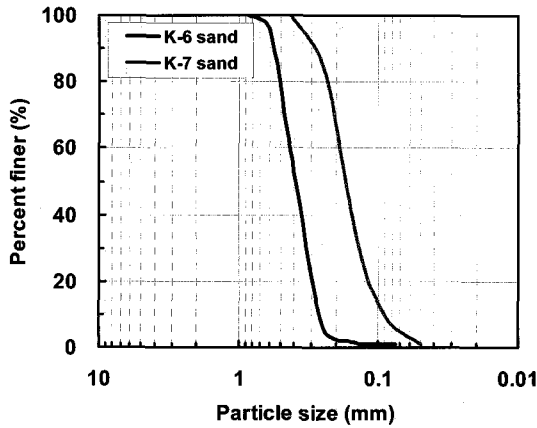


그림 3. 모래 입도분포

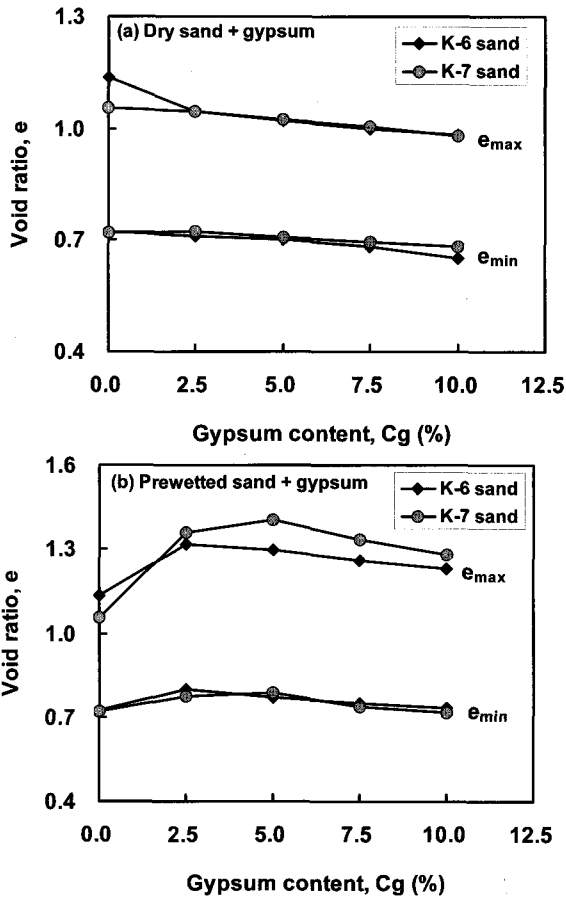


그림 4. 석고함유율에 따른 시료 간극비변화

1982)을 통해 결정하였다. 건조상태 모래에 석고를 혼합하여 간극비를 측정된 결과 그림 4(a)에 보이는 바와 같이 석고함유율이 증가할수록 혼합시료의 최대/최소 간극비가 점차 감소하였다. 즉, 석고와 건조모래의 재료 분리를 무시할 경우, 석고는 그림 5(a)와 같이 주로 모래의 간극에 퇴적되는 것으로 분석된다. 그러나 함수비 0.5% 모래와 모래중량비 2.5 ~ 10%의 석고 혼합시료를 이용하여 최대/최소 간극비 시험을 실시한 결과, 그림 4(b)와 같이 혼합시료의 석고함유율이 2.5 ~ 5.0%인 구간에서는 최대/최소 간극비가 증가하였다. 또한 석고함유율이 더 증가하면 최대/최소 간극비는 점차 감소하지만, 석고함유율 10%까지의 최대/최소 간극비는 순수 모래의 최대/최소 간극비보다 크게 나타났다. 이는 그림 5(b)와 같이 습윤상태에서 조성된 시료는 모래 입자 표면에 미리 석고입자가 흡착되기 때문에 입자 표면의 거칠기가 증가하여 건조시료에 비해 느슨한 상태로 조성되기 때문으로 판단된다. 동일 석고함유율에서 입자크기가 작은 K-7호사의 최대간극비 증가경향이 입자크기가 큰 K-6호사의 최대간극비 증가경향보다 더 뚜렷하게 나타났다. 특히 K-6호사의 최대간극비는 석고함유율 2.5% 이상에서 감소하기 시작하는 반면, K-7호사의 최대간극비는 5% 석고함유율까지도 증가하였다.

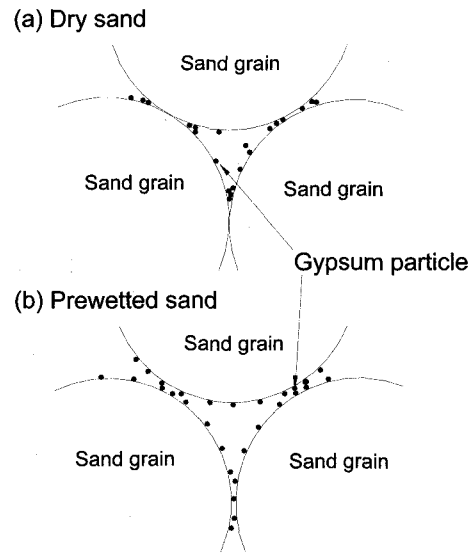


그림 5. 모래-석고 혼합토의 침전양상 모식도

표 1. 모래 기본물성

시료	Gs	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	Cu	Cc	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	조도	USCS
K-6	2.644	0.27	0.39	1.593	0.938	1.137	0.724	angular~subangular	SP
K-7	2.647	0.09	0.17	2.111	0.988	1.054	0.719		

## 4. 대형 고결시료 조성 및 시험

### 4.1 고결시료 조성 및 양생

#### 4.1.1 레이너 시스템

모래 시료를 조성하기 위한 레이너 시스템은 그림 6에 보이는 바와 같이 시료가 저장되는 직경 1.2m, 높이 1.0m의 상부 sand storage, 낙사되는 모래시료의 낙하량이 조절되는 개폐판(shutter plate), 그리고 적정 낙하고를 제공하기 위한 extension tube와 효율적인 시료 분산을 위한 분산시스템으로 구성되어 있다. 특히 분산시스템은 기존의 분산체에 porous plate를 추가하여 목표 상대밀도의 원활한 조성이 가능하도록 하였다(최성근 등 2007).

#### 4.1.2 대형 챔버시스템 (KUCCS)

본 연구에서 사용된 챔버시스템은 그림 7과 같이 높이 1.0m 직경 1.2m의 챔버셀과 하부 피스톤, 그리고 상부 플레이트로 구성되어 있다. 시료의 응력 상태를 조절할 수 있도록 측면의 챔버셀은 이중벽으로 구성되어 있고, 응력은 내측 셀, 외측 셀, 그리고 하부 피스톤과 연결된 control panel에서 조절한다. 본 챔버시스템은 상부 플레이트에 설치된 아답터를 통해 CPT, DMT, 벤더엘리먼트 시험 등의 각종 시험을 실시할 수 있다.

#### 4.1.3 시료조성 및 양생

본 연구에서는 시료의 상대밀도를 20 ~ 80%, 석고함유율을 5 ~ 10%, 그리고 고결시 연직구속압을 50 ~ 200kPa로 조절하여 약한 고결 ~ 중간 고결(일축압축강도 1000kPa 이하)의 시료를 조성한 후 각종 시험을 수행하고자 하며, 7% 석고함유율, 40% 상대밀도, 연직구속압 100kPa의 고결시료에 대한 균질성을 평가하여 전체 시료의 균질성을 간접적으로 판단하고자 한다.

레이너시스템의 extension tube와 분산체를 멤브레인이 고정된 대형 몰드의 상부에 거치, 고정하고, K-7호사와 석고의 혼합시료가 채워진 sand storage를 extension tube 상부에 조립하였다. 시료의 원활한 낙하를 위해 sand storage에 채워진 시료의 상부에 하중판을 얹은 후, 시료 낙사에 따라 동일한 낙하고가 유지되도록 분산체의 4방향 연결선을 하중판에 연결하였다. Sand storage의 하부 개폐판의 구멍을 열어 시료를 낙사시킨 후, sand storage와 extension tube를 해체하였다. 조성된 시료의 상부를 평평하게 고른 후, 상부 플레이트를 덮고

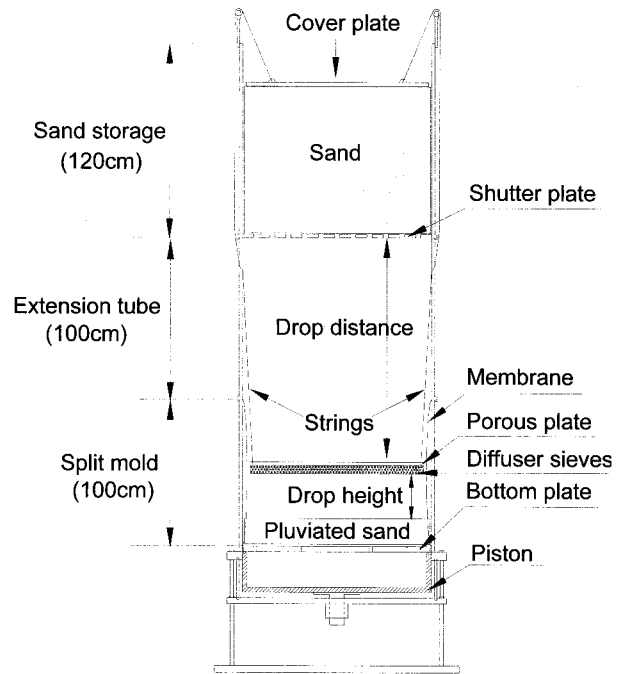


그림 6. 레이너 시스템 모식도

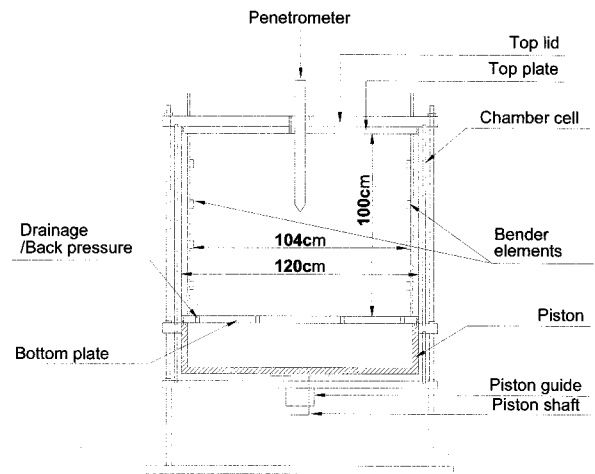


그림 7. 챔버시스템 모식도

대형 오링으로 멤브레인을 고정하여 밀폐시켰다. 시료 자립을 위해 시료하부의 배수라인과 상부 아답터를 통해 30kPa의 부압을 30분이상 가하였으며, 자립된 시료의 양방향 몰드를 해체하고 챔버셀과 top lid를 설치한 후, 12개의 룯드로 top lid를 고정하여 그림 7과 같이 시료조성을 완료하였다.

조성된 시료에 100kPa의 연직구속압을 가한 후 시료의 하부에 탈기수를 주입하여 석고의 수화를 통한 고결을 유도하였다. 이때, 주입압은 30kPa로 일정하게 유지되었으며, 주입속도는 10 ~ 12cm<sup>3</sup>/sec 정도를 유지하였다. 탈기수 주입 후 24시간 동안 시료를 양생시킨 후, 각종 시험을 수행하였다.

## 4.2 고결시료 균질성 평가

### 4.2.1 각종 시험의 적용

조성된 고결시료의 평가를 위해 각종 시험을 적용하였다. 챔버시스템의 상부 플레이트에 설치된 아답터의 위치는 그림 8과 같으며, 위치별로 실시된 시험은 표 2와 같다. 우선 벤더엘리먼트를 이용하여 조성된 시료의 깊이별 전단파 속도를 측정 후, 시료 중심에서부터 미니콘 관입시험을 실시하였다. 또한 동일한 조건으로 조성된 별도의 시료 중심에서 딜라토미터 시험을 실시하였다.

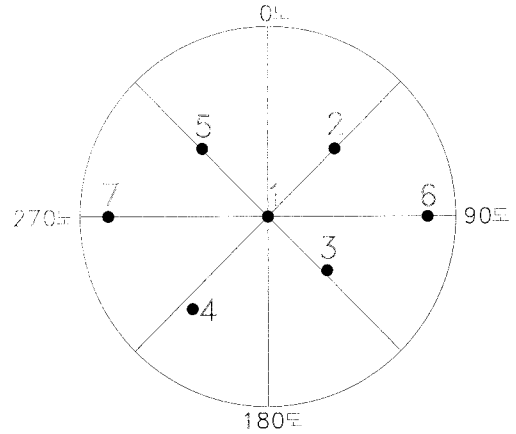


그림 8. 상부 플레이트 아답터 위치도

### 4.2.2 벤더엘리먼트 시험 및 깊이별 전단파속도 결과

시료의 수평 전단파 속도( $V_{hv}$ )를 측정하기 위해 그림 7과 같이 시료의 수평방향으로 벤더엘리먼트를 설치하였다. 설치된 각 벤더엘리먼트의 폭은 1cm, 길이는 2cm이며, cross-talk를 방지하기 위하여 electrical shield를 하였고, 방수를 위해 에폭시로 코팅하였다. 시료 내부에 설치된 두 벤더의 tip-to-tip 거리는 104cm로 측정되었다. Function generator와 linear amplifier를 이용하여 50~100V<sub>pp</sub>의 단일정현파의 입력신호를 제공하였으며, 출력신호의 노이즈 제거와 증폭을 위해 필터(low-pass filter  $f=100kHz$ , high-pass filter  $f=500Hz$ )와 digital oscilloscope를 사용하였다. 또한 고주파수의 잡음을 제거하기 위해 1024개의 stacking을 실시하였으며, Mathcad 프로그램을 이용하여 저장된 신호의 전단파 속도를 산출하였다.

목표 상대밀도 40%로 조성된 석고함유율 7% 시료에 연직구속압 100kPa을 가한 후, 침하량으로부터 보정된 시료의 상대밀도는 37.2%로 결정되었다. 시료 깊이별로 설치된 벤더엘리먼트를 이용하여 측정된 수평 전단파는 그림 9와 같다. 벤더의 tip-to-tip 거리와 전단파 도달 시간으로부터 시료깊이 15 ~ 55cm의 전단파 속도는 720 ~ 750m/s로 결정되었으며, 75cm 깊이의 전단파속도는 670m/s로 다소 작게 측정되었다. 이는 물주입으로 인한 시료하부에서의 석고와 모래입자의 재료분리 때문으로 판단되며, 시료 하부를 제외한 부분의 전단파 속도의 평균은 738m/s이고 표준편차는 13m/s이다.

### 4.2.3 미니콘 관입시험 및 위치별 콘선단저항

챔버에서 측정된 모래의 콘선단저항은 상대밀도, 응력 뿐만 아니라, 챔버와 콘 직경비, 그리고 경계조건에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 시료의 상대밀도가 높

표 2. 상부 플레이트 아답터 위치 및 적용시험

아답터	위치		적용시험
	중심에서 거리 (cm)	각도 (°)	
1	0	0	MCPT, DMT
2	30	45	MCPT
3	26	132	MCPT
4	38	220	MCPT
5	31	315	MCPT
6	51	270	BET
7	51	90	BET

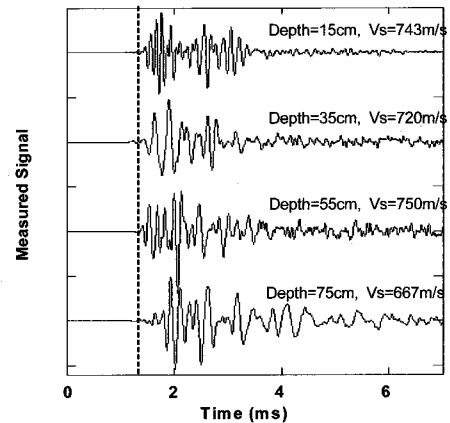


그림 9. 깊이별 수평전단파 속도

고 구속압이 낮을수록 시료의 팽창경향이 크기 때문에 더 큰 size effect가 발생한다(Salgado 등 1998). 동일 상대밀도에서는 챔버와 콘의 직경비가 클수록 챔버시험과 현장시험의 콘선단저항 값이 유사하지만, 낮은 상대밀도( $Dr < 30%$ )에서 직경비 20 이상인 경우 콘선단저항이 경계조건과 응력의 영향을 받지 않는 반면, 높은 상대밀도( $Dr > 90%$ )의 경우 직경비 50 이상이어야 챔버 크기에 의한 영향을 감소시킬 수 있다(Beau 등 1986).

챔버 크기와 경계조건의 영향을 최소화 하기 위해, 챔버를 이용한 콘관입시험 연구에서는 현장에서 사용되는 직경 3.57cm의 표준콘(단면적 10cm<sup>2</sup>)과 함께 미니콘(Miniature cone)도 사용되고 있다. 본 연구에서는 A.P. V.d. Berg사에서 제조한 직경 1.6cm(단면적 2cm<sup>2</sup>)의 미니콘을 사용하였다. 표 3은 본 챔버에서 표준콘과 미니콘을 사용할 경우 각 아답터 위치별 직경비를 나타낸다. 표준콘의 경우 모든 직경비가 50보다 작아 콘선단저항이 영향을 크게 받을 것으로 판단되는 반면, 미니콘의 경우 중심의 직경비가 75로써 상대밀도와 구속압에 관계 없이 크기 및 경계조건의 영향이 작을 것으로 판단된다.

표 3. 콘 종류에 따른 위치별 직경비

아답터	직경비 (Dc/dc)	
	미니콘	표준콘
1	75.0	33.6
2	37.5	16.8
3	32.5	14.6
4	27.5	12.3
5	36.3	16.3

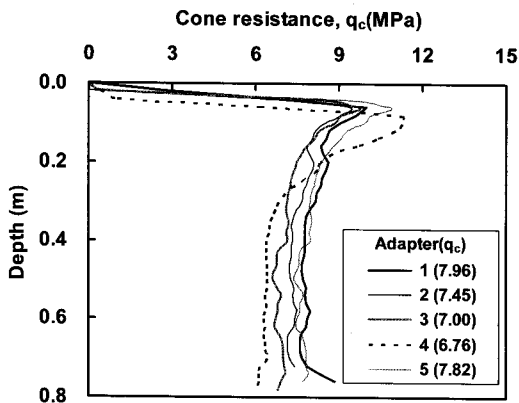


그림 10. 위치별 콘관입시험 결과

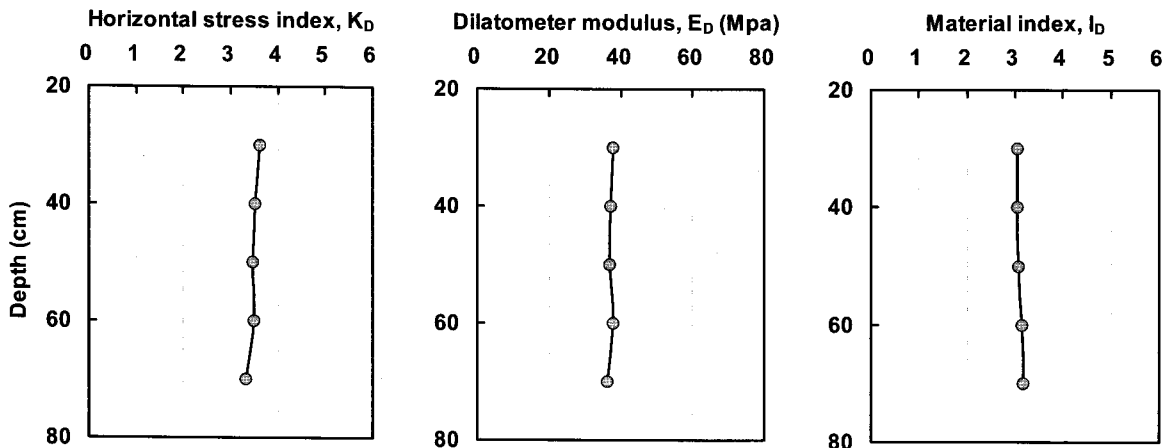


그림 11. 깊이별 DMT 결과

벤더엘리먼트를 이용한 고결시료의 전단파속도 측정 시험 완료 후, 동일한 시료에 대한 위치별 미니콘관입시험 결과는 그림 10과 같다. 시험결과, 상부 플레이트의 경계조건에 의해 상부 20cm에서 콘선단저항이 급격히 증가하였으며, 이후 20 ~ 60cm 깊이에서 비교적 일정한 콘선단저항이 측정되었다. 본 연구에서는 20 ~ 60cm 깊이의 콘선단저항을 평균하여 대표값으로 결정하였다. 챔버와 미니콘 직경비가 가장 작은 3, 4번 아답터 위치에서 측정된 콘선단저항이 비교적 작게 측정되었으며, 나머지 위치의 콘선단저항은 유사하게 나타났다. 1, 2, 5번 위치에서의 평균 콘선단저항은 7.74MPa이고, 표준편차는 0.26MPa이다. 시료 깊이 20 ~ 70cm에서의 콘선단저항이 상당히 일정하고, 평면상 다른 위치에서 실시한 콘관입시험의 결과가 매우 유사하므로, 조성된 시료는 비교적 균질한 것으로 판단된다. 전단파속도 결과와는 다소 상이하게 시료깊이 70cm 이상에서 하부 바닥판 경계조건의 영향을 받아 콘선단저항이 다소 증가하였다.

#### 4.2.4 달라토미터 시험

석고함유율 7%인 혼합시료를 낙사하고, 상부 플레이트의 1번 아답터에 달라토미터 블레이드를 설치한 후 챔버를 조립하였으며, 100kPa의 연직구속압 상태에서 시료 고결 후, 깊이에 따른 달라토미터 시험을 실시하였다. 조성된 시료의 침하량 보정 후 상대밀도는 38.4%로 결정되었다. 달라토미터 멤브레인은 초기 약 20cm 깊이에 위치하며, Bellotti 등(1997)의 실험과 같이 10cm 마다 단계적으로 관입시키면서 시료깊이 30 ~ 70cm에서 p<sub>0</sub>와 p<sub>1</sub>을 측정하여 시료 깊이에 따른 수평응력지수(K<sub>D</sub>), 달라토미터계수(E<sub>D</sub>), 재료지수(I<sub>D</sub>)를 비교하였다.

시험결과, 그림 11과 같이 시료 깊이에 따른 고결시료의 수평응력지수의 평균은 3.48, 표준편차는 0.10로 평가되었다. 또한 딜라토미터계수와 재료지수의 평균은 각각 37.28MPa, 3.09 이었으며, 각각의 표준편차는 0.67MPa, 0.05로 결정되었다. 각각의 딜라토미터 시험 결과로부터 조성된 시료의 연직방향 균질성이 상당히 양호한 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 검토

본 연구에서는 고결된 지반에 대한 실내 챔버시험을 위해 낙사법으로 대형 고결시료를 조성하였으며, 조성된 시료에 각종 현장시험을 적용하여 시료의 균질성을 평가하였다.

낙사중 모래와 석고의 낙하속도차에 의한 재료분리를 최소화하기 위해, 모래표면을 모래중량비 0.5%의 물로 습윤시키고 석고를 충분히 교반시켜 모래표면에 석고를 골고루 흡착시킨 후 시료를 낙사시켰으며, 조성된 시료에 탈기수를 주입하여 24시간의 양생을 통해 시료를 고결시켰다. 일반적인 세립분 포함 모래시료나, 건조상태 모래와 석고 혼합시료와는 달리, 습윤상태 모래와 석고의 혼합시료는 모래 표면에 흡착된 석고입자로 인해 표면의 거칠기가 증가하여 최대/최소 간극비가 증가하였으며, 석고함유율이 증가함에 따라 최대/최소 간극비가 점차 감소하는 경향이 나타났다.

고결된 시료에서 수행된 각종 현장시험 결과, 시료 깊이가 20 ~ 70cm의 콘선단저항이 매우 균등하였으며, 30 ~ 70cm 깊이에서 10cm 간격으로 측정된 딜라토미터의 수평응력지수, 딜라토미터 계수, 재료지수 또한 매우 유사하게 평가되었다. 또한 수평방향 각 위치에서 나타난 콘선단저항도 비교적 일정하였다. 시료깊이 15 ~ 75cm에서 20cm 간격으로 시료의 수평방향 전단파속도를 측정된 결과, 시료 하부에 주입되는 탈기수에 의한 교란으로 시료깊이 75cm 깊이에서의 전단파속도가 다소 작게 측정되었으나, 15 ~ 55cm 까지의 전단파속도는 유사하게 측정되었다. 이상의 콘관입시험, 딜라토미터 시험, 전단파속도 측정시험 결과로부터 조성된 대형 고결시료의 수평, 연직방향 균질성은 매우 양호한 것으로 평가된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술

평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호 : C104A1000009-06A0200-00800)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 이문주, 최성근, 추현욱, 조용순, 이우진 (2007), "응력조건에 따른 고결모래의 강도정수 평가", *한국지반공학회논문집*, 제 23권, 6호, pp.143-151.
2. 최성근, 이문주, 추현욱, 홍성진, 이우진 (2007), "Porous plate를 이용한 개선된 레이닝 시스템", *한국지반공학회논문집*, 제 23권, 6호, pp.67-76.
3. Acar, Y.B. and El-Tahir, E.A. (1986), "Low strain dynamic properties of artificially cemented sand" *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.112, No.2, pp.207-213.
4. Been, K., Crooks, J.H, Becker, D.E. and Jefferies, M.G. (1986), "The cone penetration test in sand : part I , state parameter interpretation" *Geotechnique*, Vol.36, No.2, pp.239-249.
5. Bellotti, R., Benoit, J. Fretti, C. and Jamiolkowski, M. (1997), "Stiffness of Toyoura sand from dilatometer tests" *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.123, No.9, pp.836-846.
6. Clough, W.G., Sitar N., and Bachus R. (1981), "Cemented sands under static loading" *Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.107, No.6, pp.799-817.
7. Coop, M.R. and Atkinson, J.H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53-67.
8. Gilbert, P.A. (1984), "Investigation of density variation in triaxial test specimens of cohesionless soil subjected to cyclic and monotonic loading", *Technical Report GL-84-10, U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station*, Vicksburg, MS.
9. Haeri, S.M., Hosseini, S.M., Toll, D.G. and Yasrebi, S.S. (2005a), "The behaviour of an artificially cemented sandy gravel", *Geotech. Geological Engrg.*, Vol.23, pp.537-560.
10. Haeri, S.M., Hamidi, A. and Tabatabaee, N. (2005b), "The effect of gypsum cementation on the mechanical behavior of gravelly sands", *Geotech. Testing J.*, ASTM, Vol.28, No.4, pp.1-11.
11. Huang, J.T. and Airey, D.W. (1998), "Properties of artificially cemented carbonate sand", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.124, No.6, pp.492-499.
12. Ismail, M.A., Joer, H.A., and Randolph, M.F. (2002), "Cementation of porous materials using calcite", *Geotechnique*, Vol.52, No.5, pp.313-324.
13. Jacobsen, M. (1976), "On pluvial compaction of sand", *Rapport 9, Aalborg Universitetscenter, Laboratoriet for Fundering*, pp.20.
14. Kolbuszewski, J.J. (1948), "An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of sands", *Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, London, pp.158-165.
15. Kuerbis, R. and Vaid, Y.P. (1988), "Sand sample preparation - the slurry deposition method", *Soils and Found.*, Vol.28 No.4, pp. 107-118.
16. Kuerbis, R., Nequssey, D. and Vaid, Y.P. (1988), "Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand", *Hydraulic fill structures, Geotech. Spec. Publ. No.21*, ASCE, New York, pp.330-345.



17. Lade, P.V. and Yamamuro, J.A. (1997), "Effects of non-plastic fines on static liquefaction of sands", *Can. Geotech. J.*, NRC, Vol. 34, pp.918-928.
18. Lade, P.V., Liggio, C.D. and Yamamuro, J.A. (1998), "Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand", *Geotech. Testing J.*, ASTM, Vol.21, No.4, pp.336-347.
19. Miura S. and Toki S. (1982), "Sample Preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand", *Soils and Found.*, Vol.22, No.1, pp.61-77.
20. Mulilis, J.P., Seed, H.B., Chan, C.K., Mitchell, J.K. and Arulanandan, K. (1977), "Effects of sample preparation on sand liquefaction", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.103, No.2, pp.91-108.
21. Puppala, A.J., Acar, Y.B. and Tumay, M.T. (1995), "Cone penetration in very weakly cemented sand", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.121, No.8, pp.589-600.
22. Rad, N. S., and Tumay, M. T. (1986), "Effect of cementation on penetration resistance of sand-a model study", *Geotech. Testing J.*, ASTM, Vol.9, No.3, pp.117-125.
23. Salgado, R., Mitchell, J.K. and Jamiolkowski, M. (1998), "Calibration chamber size effects on penetration resistance in sand", *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.124, No.9, pp.878-888.
24. Salgado, R., Bandini, P. and Karim, A. (2000), "Shear strength and stiffness of silty sand", *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.126, No.5, pp.451-462.
25. Sharma, S.S. and Fahey, M. (2003), "Degradation of stiffness of cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests", *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.129, No.7, pp.619-629.
26. Vaid, Y.P. and Nequssey, D. (1984), "Relative density of air and water pluviated sand", *Soils and Found.*, Vol.24, No.2, pp.101-105.
27. Yun, T.S. and Santamarina, J.C. (2005), "Decementation, softening, and collapse : changes in small-strain shear stiffness in k0 loading", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.131, No.3, pp.350-358.

(접수일자 2007. 10. 4, 심사완료일 2007. 12. 17)