

## 모형실험을 통한 복합기초의 현장 적용성 평가

김학문<sup>1\*</sup>, 장경준<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>단국대학교 토목환경공학과

### Field Applicability Evaluation of Foundation Combine with Footing and Pile by Model Test

Hak-Moon Kim<sup>1\*</sup> and Kyung-Jun Jang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

**요 약** 토목구조물이 대형화되고 규모가 커짐에 따라 하부 기초 지반 조건도 위치마다 상이하게 나타나게 되어 일 부구간에서 기초지반의 불균일성으로 인해 국부적으로 지내력이 부족한 경우가 빈번하게 발생되고 있다. 일반적으로 상부 구조물의 안정성 확보 차원에서 기초지반이 균질하지 않은 경우에는 가능한 보수적인 기초공법을 적용함으로써 안정성 확보를 그 주안점으로 두고 있다. 직접기초와 파일기초가 혼용되는 복합기초의 경우에 대한 연구가 미비하여 그 적용성과 안정성이 검증되지 못하고 개략검토를 통한 복합기초의 시공이 적용되고 있는 점이 원인으로 사료된다.

본 연구에서는 직접기초와 파일기초가 혼용되는 복합기초에 대한 적용가능성을 평가하고, 석고와 주문진 표준사, 쇄 석 등을 이용하여 다양한 지반을 조성한 실내 모형실험을 수행하여 동일기초와 복합기초의 거동을 비교, 분석하였다.

이와 같은 모형실험을 통한 연구결과를 근거로 복합기초(직접기초+말뚝기초)와 보수적인 말뚝기초 및 전면기초의 거 동을 확인하고 지내력이 급격히 변화하는 지반의 경우 기존의 기초보다 효율적이고 경제적인 복합기초의 안정성 및 적용성을 평가하였다. 그 결과, 복합기초의 적용시 보수적인 말뚝기초보다 전체적인 침하량이 증가하였으나 그 차이 가 미미하였고, 구조물의 부등침하에 대한 안정성평가 결과, 적용 가능한 것으로 확인되었다.

**Abstract** As the size of structures become larger by civil and architectural structures becoming large, deeply underground, and high-rise, the conditions of underground foundation vary according to the location that the lack of bearing capacity locally because of ununiform of foundation in some parts is frequent. Generally, when the foundation is not homogeneous, the acquisition of safety through applying the most conservative foundation method possible becomes the focus to secure the stability of the superstructures. It is considered as because of inability to verify the application and stability and application of construction of different foundations through an outlined review because of lack of study in case of different foundation of mixed use of direct foundation and pile foundation. Therefore, through measurement interpretation of the different foundation in which the direct foundation and pile foundation are mixed in use, the grounds in which the hypothetical bearing capacity changes dramatically was modeled to evaluate the applicability of different foundations. Also, based on the results of measurement interpretation, various foundations are created by using plaster, Joomunjin standard soil, and rubble to conduct an indoor model test to compare and analyze the movement of pile foundation and different foundations. Based on such research results, the stability and applicability of the different foundations which is more efficient and economical than the existing foundations in case of grounds in which the bearing capacity changes dramatically by comparing and analyzing the different foundations (direct foundation + pile foundation) with the conservative pile foundation and mat foundation. As a result, when the different foundation is applied, the overall settlement amount increased than the conservative pile foundation. However, the difference was very minute and it has been confirmed to be no issue as a result of assessment of stability of the differential settlement of structures through critical angle displacement.

**Key Words** : Different foundation, Pile foundation, Model soil box test, Differential settlement

본 연구는 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

\*교신저자 : 김학문(khm1028@dankook.ac.kr)

접수일 11년 06월 17일

수정일 (1차 11년 07월 20일, 2차 11년 07월 29일)

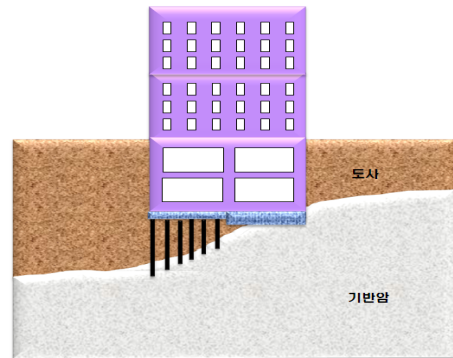
게재확정일 11년 08월 11일

## 1. 서론

최근 우리나라에서는 산업화와 경제발전에 따라 산업 단지, 택지 등의 수요가 증가하고 토목 및 건축 구조물의 규모가 커지고 있는 실정이다. 따라서 하부 기초적용 지반 조건도 동일 구조물 내에서 위치마다 상이하게 나타나게 되어 일부 구간에서 기초지반의 불균일성으로 인해 국부적으로 지내력이 부족한 경우가 빈번하게 발생되고 있다. 지내력이 급격히 변화하는 지반에서 그 지반 위에 설치될 구조물과의 상대적인 관계에 의해 결정되어진다. 따라서 이와 같은 지반에 기초설치 시 적합한 형식의 시공방법을 채택하는 것이 매우 중요하다(대한주택공사, 1996) 기존에는 기초지반이 복합적으로 이루어진 경우 구조물의 재설계에 의한 기초의 보강방안 모색보다는 복합기초 지반의 치환에 의해 기초지반의 안정성을 보완시켜주는 방안이 일반적으로 적용된 방법이었으나(임해식, 1999) 현재는 직접기초와 깊은기초를 혼용하여 복합적으로 지내력을 평가하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 따라서 지반이 불균질하여 지내력이 급격히 변화하는 구간에서 기초를 적용함에 있어 지지력 및 부등침하 등에 의한 안정성 평가를 통해보다 합리적인 구조물의 기초를 시공함으로써 시공성과 경제성을 확보하는 것이 중요하다. 본 연구는 경제적이고 효율적인 복합기초의 적용성 및 안정성을 규명하고 기존의 동일기초와 비교, 분석을 위해 모형실험을 수행하였다. 복합기초의 적용성을 평가하기 위하여 가상의 지반을 대상으로 가상의 기초형식에 대해 유한요소 해석을 통해 침하거동을 확인하였으며, 이 결과와 보수적인 말뚝기초와 비교·평가하여 복합기초의 적용가능성을 평가하였다. 모형실험은 복합기초의 타입에 따른 거동을 분석하고 기존의 말뚝기초와 비교하기 위해 각각의 실험마다 동일한 면적으로 제작하였고, 동일한 단계별 하중을 재하하여 실험을 수행하였다. 불균질한 지반을 모사하기 위해 석고를 이용하여 암반을 조성하고 주문진 표준사로 불규칙한 모형지반을 형성하여, 말뚝만으로 이루어진 기초와 전면기초만으로 이루어진 기초인 동일기초와, 복합기초는 전면기초와 말뚝기초로 이루어진 경우와 연속기초(줄기초)와 말뚝기초로 이루어진 경우를 대상으로 실험을 실시하여 기초의 침하량을 비교, 분석하였다. 또한 다양한 지반에서 복합기초의 적용성을 파악하기 위해 석고와 토사를 배합하여 암반지반을 조성하고 복합기초를 대상으로 실험을 실시하였다.

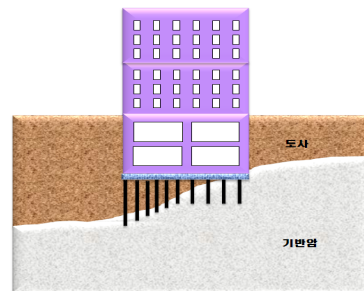
## 2. 복합기초의 정의

복합 기초란 지층의 굴곡이 심할 경우 지지층의 깊이가 구조물의 심도별로 차이가 많아 기초의 지내력이 급격히 변화하는 경우 그림 1의 (a)와 같이 동일 기초지반 내에서 직접기초와 말뚝기초가 혼합되는 기초형식이다. 복합기초 적용시 발생할 수 있는 부등침하 등에 대한 우려 때문에 기존에는 (b)와 같이 동일 구조물에서는 지내력이 약한 부분을 기준으로 말뚝형식의 보수적인 동일형식의 기초가 적용되고 있는 실정이다. 이러한 동일 기초형식으로 적용 시 지반여건상 얇은 기초로 지지할 수 있는 구간도 깊은 기초를 적용함으로써 비경제적이고 시공시 어려움이 많으므로 효율적이고 경제적인 복합기초 적용을 필요로 하게 된다.



(a) 복합기초

(a) different foundation



(b) 말뚝기초

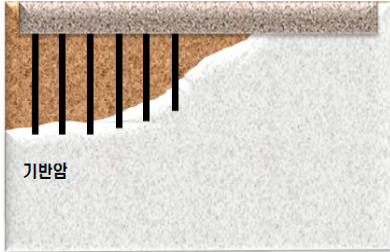
(b) pile foundation

【그림 1】 복합기초의 개요도

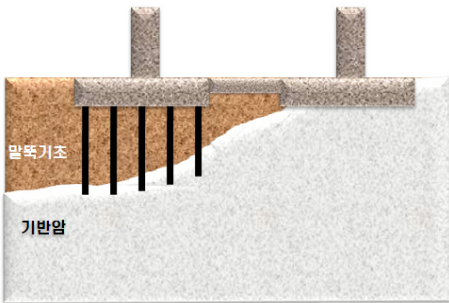
【Fig. 1】 An overview of different foundation

다음의 그림 2는 현장에서 적용될 수 있는 복합기초의 다양한 형태를 제시하였다. 단일구조물의 경우 그림 2와 같이 말뚝기초와 전면기초를 접목하여 기초를 시공할 수 있고, 또는 연속기초를 연결하고 말뚝기초를 혼용한 형태

로 기초를 시공할 수 있다. 그 이외에도 지반조건에 따라 다양한 형태의 기초양식이 적용되어 보다 경제적이고, 효율적인 기초의 적용이 가능하게 할 수 있다.



(a) 전면기초 + 말뚝기초  
(a) direct foundation + pile foundation



(b) 연속기초 + 말뚝기초  
(b) single foundation + pile foundation

[그림 2] 단일 구조물에서의 복합기초  
[Fig. 2] The different foundation of one

### 3. 실내 모형실험

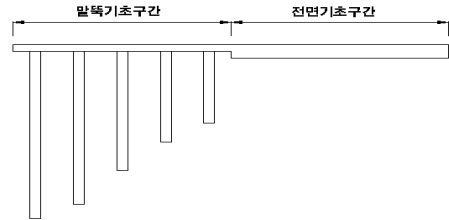
#### 3.1 모형실험의 개요

본 연구는 기초지반이 불균질하여 지내력의 급격한 변화가 발생할 때 효율적인 복합기초의 적용성과 안정성을 검증하기 위하여 모형기초를 이용하여 각각의 기초를 3차원 모형토조실험을 수행하여 비교, 분석 하였다.

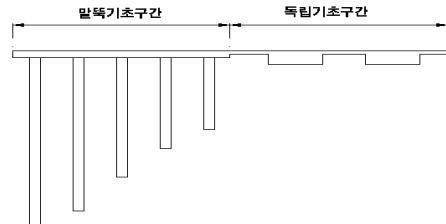
3차원 모형실험은 석고 및 석고와 토사의 배합을 통해 암반을 조성하고 그 위에 주문진 표준사 및 쇄석을 채워 모형 지반을 조성하였으며, 조성된 지반에 표 1과 같이 복합기초와 동일기초의 모형실험을 수행하였으며, 각각의 기초 타입에 대하여 하중의 변화로 인한 침하량 및 거동특성을 비교, 검토하기 위해 3가지 하중별로 총 7가지 조건에 대해 모형실험을 수행하였다. 그림 3과 같이 복합기초는 전면기초, 연속(줄)기초, 말뚝기초 등 복합기초의

종류를 달리하여 동일기초와 비교하였다.

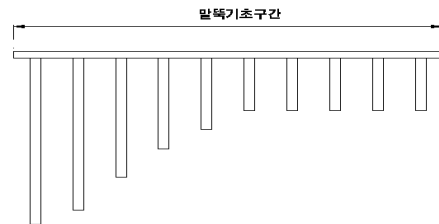
각각의 실험의 결과를 근거로 각변위로 구조물 및 기초의 안정성을 평가함과 동시에 모형실험에 대한 수치해석 결과와 비교하여 복합기초의 거동을 분석하였다.



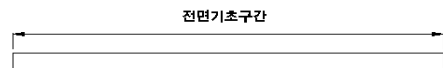
(a) 복합기초 (전면기초 + 말뚝기초)  
(a) different foundation  
(mat foundation + pile foundation)



(b) 복합기초 (연속기초 + 말뚝기초)  
(b) different foundation  
(continuous foundation + pile foundation)



(c) 동일기초 (말뚝기초)  
(c) pile foundation



(d) 동일기초 (전면기초)  
(d) direct foundation

[그림 3] 모형기초 종류  
[Fig. 3] Type of foundation

[표 1] 기초 종류에 따른 모형실험

[Table 1] model test for Type of foundation

| 기초종류 | 기초조건          | 지반조건                      | 하중조건 |
|------|---------------|---------------------------|------|
| 복합기초 | 전면기초<br>+말뚝기초 | 석고와 토사가 급격한 경사를 이루는 지반    | 초기   |
|      |               |                           | 중기   |
|      |               |                           | 최종   |
|      | 연속기초<br>+말뚝기초 | 석고+토사와 토사가 급격한 경사를 이루는 지반 | 초기   |
|      |               |                           | 중기   |
|      |               |                           | 최종   |
| 동일기초 | 말뚝기초          | 석고와 토사가 급격한 경사를 이루는 지반    | 초기   |
|      |               |                           | 중기   |
|      |               |                           | 최종   |
|      | 전면기초          | 석고와 토사가 급격한 경사를 이루는 지반    | 초기   |
|      |               |                           | 중기   |
|      |               |                           | 최종   |
|      |               | 석고와 쇄석이 급격한 경사를 이루는 지반    | 초기   |
|      |               |                           | 중기   |
|      |               |                           | 최종   |

### 3.2 모형실험 장비

본 실험에서 사용된 실험장비는 모형토조(토조, 재하 장치), 계측기기(침하계), 모형기초로 분류될 수 있다.

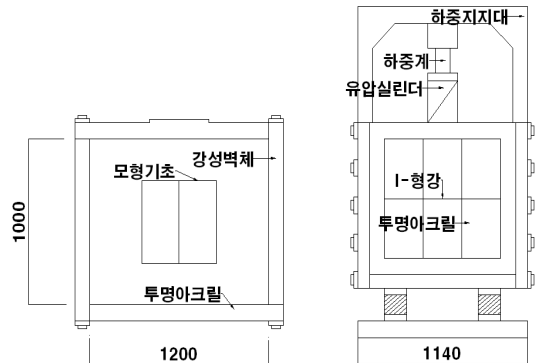
#### 3.2.1 모형토조

모형토조는 그림 4와 같이 120cm(가로) × 100cm(세로) × 100cm(높이) 의 크기로 하중재하에 따른 기초 및 지반 거동이 토조 벽면에 영향을 받지 않도록 고려하였다. 벽면은 토조 내 관찰이 용이하고 마찰이 적은 30mm 두께의 투명 아크릴판으로 제작되었고, 벽면의 변형이 발생하지 않도록 I-형강으로 보강하였다.



[그림 4] 토조장치 전경  
[Fig. 4] model soil box

그림 5와 같이 지반조성 및 기초설치 후 하중재하 실험을 위하여 기초가 놓이는 토조 중앙부에 반력대를 설치하였으며, 지반조성의 편리성 및 하중재하의 위치변경을 고려하여 반력대의 제거 및 위치 조정이 가능하도록 제작되었다.



[그림 5] 모형토조 장치 (단위: mm)  
[Fig. 5] model soil box (unit: mm)

#### 3.2.2 계측기기

계측기기는 재하실험에 따른 기초 침하를 측정하기 위해 기기의 용도 및 정밀도를 고려하여 선정하였다. 실험 시 사용된 계측기기의 정밀도 및 모형도는 표 2와 같다.

[표 2] 실험에 사용된 계측기기 종류 및 정밀도

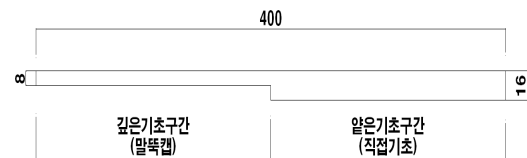
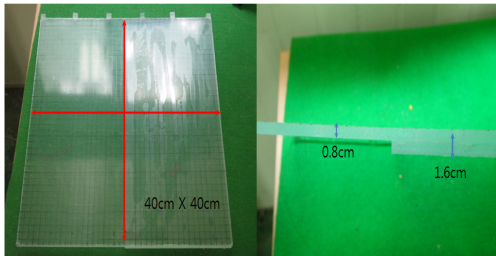
[Table 2] Kind of measurement used in this experiment

| 계측기기            | 모형도 | 측정개소 및 측정범위            |
|-----------------|-----|------------------------|
| 기초침하 측정장치       |     | 6개소<br>0.001mm ~ 50mm  |
| 하중계             |     | 1 개소                   |
| 하중계 Data Logger |     | 0 ~ 3 t/m <sup>2</sup> |

### 3.2.3 모형기초

모형 복합기초는 제한된 크기의 토조에서 하중재하에 의해 발생된 지반의 전단 거동이 토조 벽면에 영향을 미치지 않는 크기로 적용되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 문헌 조사 및 예비 실험을 통해 400mm × 400mm의 크기로 적용하였고, 말뚝의 영향거리를 고려하여 말뚝의 최대 길이 역시 150mm로 제한하였다.

말뚝 캡 및 얇은 기초의 모형기초는 강성이 지나치게 크거나 작을 경우 실험에 있어 상당히 영향이 크므로 영향요인에 따른 지반의 거동특성을 평가하기가 곤란하다. 그러므로 본 실험에서는 강성을 고려하여 아크릴 기초를 이용하였다. 그림 6과 같이 깊은 기초인 말뚝캡은 두께를 8mm로 하였고, 얇은 기초인 전면기초 및 연속기초는 두께 16mm를 적용하였다.



[그림 6] 아크릴 모형기초 (단위: mm)

[Fig. 6] Acrylic model (unit: mm)

실험에 사용한 모형기초는 표 3과 같이 나타내었다.

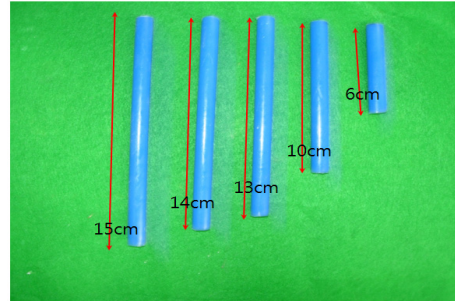
[표 3] 말뚝캡 및 직접기초의 제한

[Table 3] pile cap and foundation data

| 두께 (cm) | 폭 (cm) | 높이 (cm) | 탄성계수 (t/m <sup>2</sup> ) | 단면2차 모멘트 I(m <sup>4</sup> /m) | 휨강성 EI (t·m <sup>2</sup> /m) | 유연 계수 ρ (m <sup>3</sup> /t) |
|---------|--------|---------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 0.5     | 40     | 40      | 2.56×10 <sup>5</sup>     | 1.04×10 <sup>-8</sup>         | 2.67×10 <sup>-3</sup>        | 23                          |
| 0.7     | 40     | 40      | 2.56×10 <sup>5</sup>     | 2.86×10 <sup>-8</sup>         | 7.32×10 <sup>-3</sup>        | 33                          |
| 0.8     | 40     | 40      | 2.56×10 <sup>5</sup>     | 4.27×10 <sup>-8</sup>         | 10.9×10 <sup>-3</sup>        | 37                          |
| 0.9     | 40     | 40      | 2.56×10 <sup>5</sup>     | 6.08×10 <sup>-8</sup>         | 15.6×10 <sup>-3</sup>        | 42                          |

깊은 기초의 재료 선정은 말뚝이 하중을 기반암까지 전달되기 위해 그림 7과 같이 직경 10mm의 PVC 계통의

플라스틱(MC 나일론)을 사용하였으며 탄성계수(Ep)는 엔지니어링 플라스틱의 물성표에 제시된 3.2 × 10<sup>4</sup>kg/cm<sup>2</sup>을 사용하였다.



[그림 7] 모형말뚝 (MC 나일론)

[Fig. 7] Pile Model (MC Nylon)

### 3.2.4 기초지반 재료의 특성

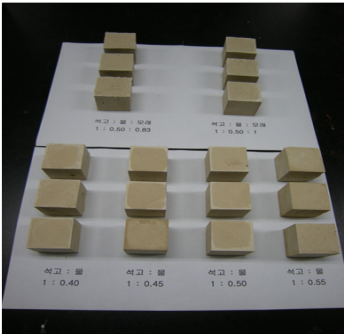
본 실험에서 기초지반을 조성하기 위해 연암과 풍화토를 각각 석고와 주문진 표준사를 사용하여 지반을 조성하였다. 석고의 적절한 기반암 조성을 위해 표 4와 같은 배합비로 기반암 조성 가능성을 알아보았다.

[표 4] 기반암 조성을 위한 석고의 배합비

[Table 4] Bedrock of gypsum formulation

| 석고 | 물    | 모래   |
|----|------|------|
| 1  | 0.30 | -    |
| 1  | 0.35 | -    |
| 1  | 0.40 | -    |
| 1  | 0.45 | -    |
| 1  | 0.50 | -    |
| 1  | 0.55 | -    |
| 1  | 0.60 | -    |
| 1  | 0.65 | -    |
| 1  | 0.50 | 0.83 |
| 1  | 0.50 | 1    |

각각의 혼합비를 달리하여 기반암 조성에 필요한 석고의 배합비를 알아본 결과 석고와 물의 비율이 1:0.55 이상과 1:0.35 이하는 물거나 되기 때문에 암반조성에 부적절함을 확인할 수 있었다. 따라서 석고와 물의 비율이 1:0.40 ~ 1:0.50 사이의 배합비를 상대로 그림 8과 같이 상온에서 7일 양생시켜 일축압축 실험을 실시하였으며, 결과는 표 5와 같다.

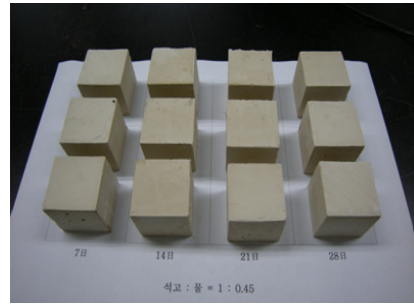


[그림 8] 일축압축 시험  
[Fig. 8] unconfined compression test

[표 5] 배합비에 따른 일축압축 시험 결과  
[Table 5] Result of unconfined compression test

| 구분          | 비율          | 탄성계수 (t/m <sup>2</sup> ) | 일축 압축강도 (t/m <sup>2</sup> ) |
|-------------|-------------|--------------------------|-----------------------------|
| 석고 : 물      | 1:0.40      | 3208.334                 | 44.667                      |
|             | 1:0.45      | 3139.352                 | 54.333                      |
|             | 1:0.50      | 3464.052                 | 36.5                        |
| 석고 : 물 : 모래 | 1:0.50:0.83 | 2794.662                 | 36                          |
|             | 1:0.50:1    | 2691.295                 | 36                          |

시험 결과를 통해 일축압축 강도가 가장 높게평가된 석고와 물 비율이 1:0.45 의 배합비가 물기나 강도면에서 연암 조성에 적절할 것으로 판단되어 이 배합비를 상대로 상온에서 그림 9와 같이 7일, 14일, 21일, 28일 양생시켜 일축압축 시험을 실시하였고, 양생일수에 따른 일축압축 강도가 크게 차이가 나지 않기 때문에 모형지반 조성 시 석고건조 등을 고려하여 7일 양생한 석고로 모형지반의 암반을 조성하였고, 그 결과는 표 6과 같다.



[그림 9] 기간별 일축압축 시험  
[Fig. 9] Period of unconfined compression test

[표 6] 석고의 일축압축강도 시험결과  
[Table 6] Results of the unconfined compression test of gypsum

| 구분            | 양생일수 | 탄성계수 (t/m <sup>2</sup> ) | 일축압축강도 (t/m <sup>2</sup> ) |
|---------------|------|--------------------------|----------------------------|
| 석고 : 물=1:0.45 | 7    | 3139.352                 | 54.333                     |
|               | 14   | 3203.228                 | 55.112                     |
|               | 21   | 3287.745                 | 55.225                     |
|               | 28   | 3302.556                 | 55.211                     |

또한 물리적 특성을 확인하기 위하여 기본물성 시험을 실시하였으며 석고로 조성한 연암의 모형지반의 특성은 표 7에 정리하였다.

[표 7] 석고의 기본 물성치  
[Table 7] Input properties of Gypsum

| 구분 | 단위중량 (t/m <sup>3</sup> ) | 점착력 (t/m <sup>2</sup> ) | 내부 마찰각(°) |
|----|--------------------------|-------------------------|-----------|
| 석고 | 2.1                      | 0.5                     | 32        |

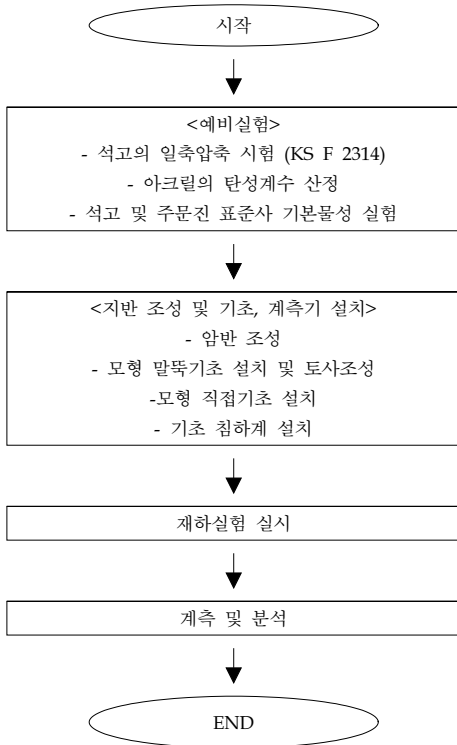
풍화토의 조성에 사용되는 자연 건조된 주문진 표준사의 물리적 특성을 확인하기 위하여 함수비, 비중, 체분석 시험 등의 기본 물성 시험을 실시하였으며, 물성치 결과는 표 8과 같다.

[표 8] 주문진 표준사의 물성치  
[Table 8] Input properties of Jumunjin soil

|                           |       |                        |      |
|---------------------------|-------|------------------------|------|
| 최대건조밀도(t/m <sup>3</sup> ) | 15.60 | D60                    | 0.61 |
| 최소건조밀도(t/m <sup>3</sup> ) | 12.58 | D10                    | 0.43 |
| 최대 간극비                    | 1.042 | 균등계수 (C <sub>u</sub> ) | 1.42 |
| 최소 간극비                    | 0.647 | 곡률계수 (C <sub>c</sub> ) | 0.95 |
| 비중 (G <sub>s</sub> )      | 2.573 | 함수비 (%)                | 0.31 |

### 3.3 모형실험 절차 및 방법

복합기초의 거동특성 및 동일기초와의 비교분석을 위한 모형실험은 크게 지반조성 및 모형기초 및 침하계 설치, 재하실험 단계로 이루어 졌으며 개략적인 실험 순서도는 그림 10과 같다.



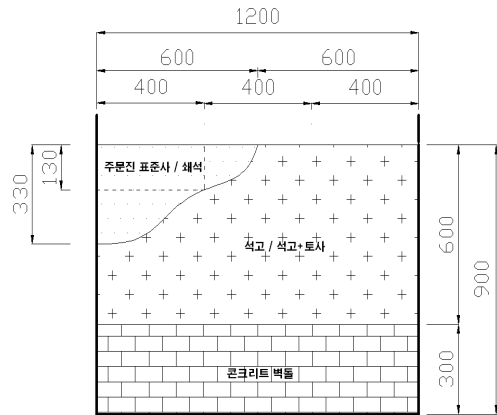
[그림 10] 모형실험 순서도  
[Fig. 10] Experimental flowchart

#### 3.3.1 모형지반 조성

모형지반 조성을 위해 그림 11과 같이 먼저 콘크리트 벽돌을 이용하여 30cm 높이로 기반암을 조성하고 그 위에 암반을 조성하기 위해 석고와 물, 토사를 이용한 여러 배합비의 (석고 : 물=1:0.45 / 석고 : 물 : 모래 = 1:0.5:1) 재료를 가지고 각각의 실험마다 동일한 경사의 지반을 조성 하였다. 말뚝의 최대 길이가 150mm 이므로 가장 긴 말뚝이 관입될 위치의 석고의 깊이를 130mm 로 조성하였고, 설치될 모형 말뚝의 길이를 고려하여 암반의 경사를 조성하였다. 400mm × 400mm 의 모형기초의 중앙부 200mm 에 모형 지반의 급격한 경사가 나타나도록 경계를 조성하였다.

모형기초의 특성상 지반을 모두 조성한 다음 기초를 설치하기에 어려움이 발생하기 때문에 암반을 모사한 석

고가 굳기 전에 지반의 경사를 고려한 모형기초의 말뚝 구간을 석고에 20mm의 일정한 깊이로 관입시킨 후 공기 중에 7일간 양생시켜 암반 및 기초를 조성하였다. 그 뒤 주문진 표준사 및 쇄석을 일정한 다짐으로 암반과 모형기초사이에 채워 넣어 다양한 조건으로 이루어진 지반을 모사하였다.



[그림 11] 모형지반 조성  
[Fig. 11] Soil composition model



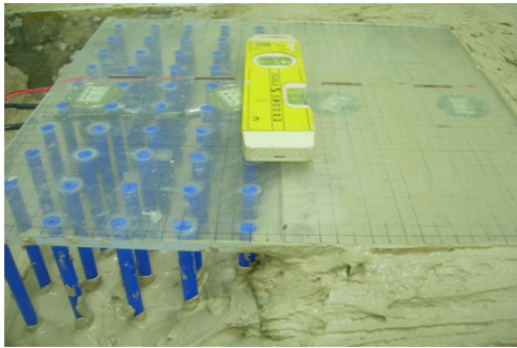
[그림 12] 모형지반 조성 전경  
[Fig. 12] Soil composition model photos



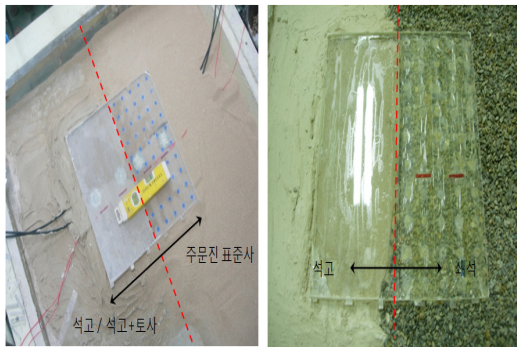
[그림 13] 모형지반 경사  
[Fig. 13] Slope of Soil composition

### 3.3.2 모형기초의 설치

모형실험은 아크릴로 제작한 두께 8mm와 16mm로 이루어진 400mm × 400mm 크기의 기초에 8mm두께부분에 10mm직경의 MC 나일론을 암반의 경사에 따라 말뚝을 배열 하였다. 지반의 상태가 급격히 변화하는 구간에서 전체기초의 중앙부분이 위치하게 설치하였다. 말뚝기초의 수직도 및 직접기초와의 호환성을 위해 그림 14와 같은 방법으로 모형기초의 수직도를 조정하였다. 모형기초의 설치후의 모습은 그림 15와 같다.

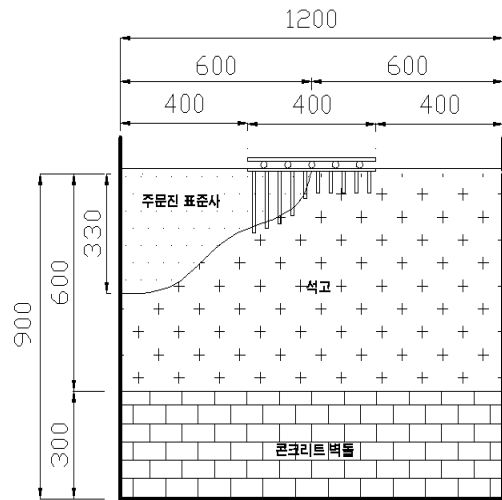
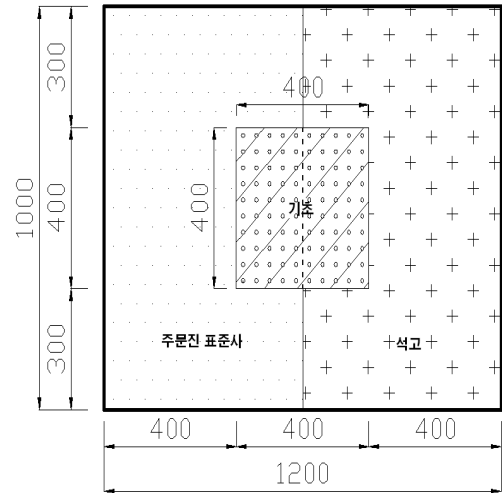


[그림 14] 수직도를 고려한 말뚝기초의 설치  
[Fig. 14] considering the vertical pile foundation



[그림 15] 모형기초 설치후  
[Fig. 15] After installing the foundation model

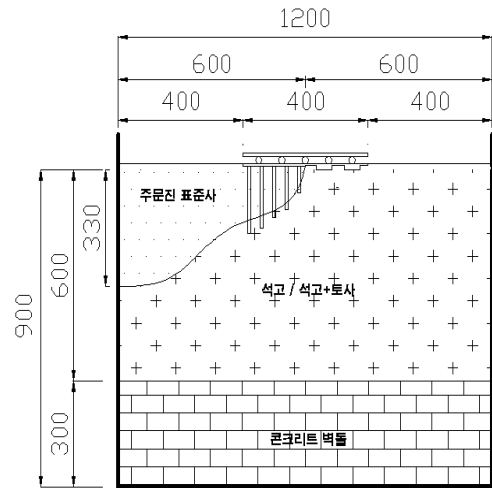
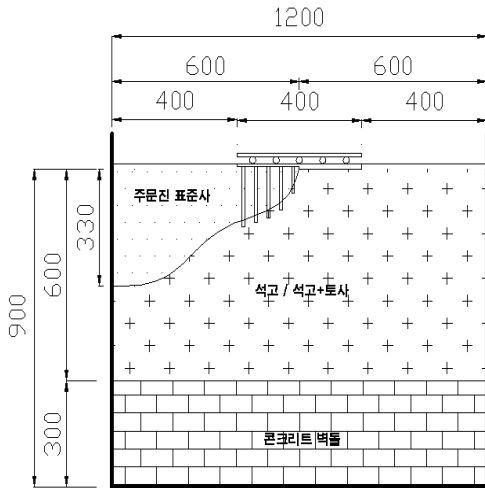
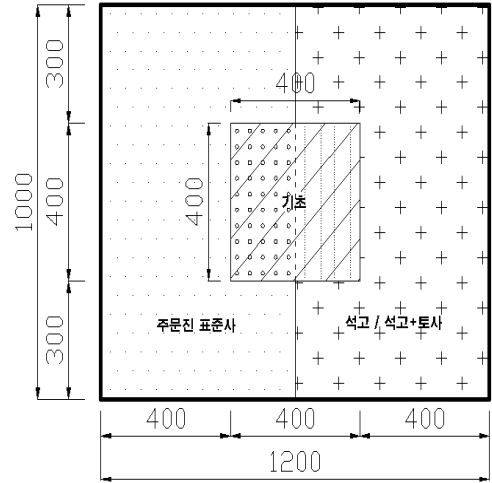
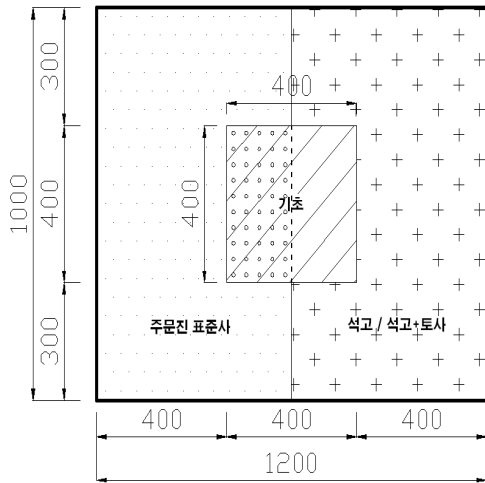
말뚝으로만 이루어진 동일기초는 그림 16과 같이 석고로 이루어진 암반과 주문진 표준사로 이루어진 모형기초 지반에 8mm의 두께에 크기 400mm × 400mm 로 이루어진 기초에 모두 말뚝기초로 배열하여 실험을 실시하였다.



[그림 16] 말뚝 동일기초  
[Fig. 16] pile foundation

전면기초와 말뚝기초가 혼용된 복합기초의 모형실험의 경우 400mm × 400mm 으로 말뚝기초의 크기와 동일하게 제작하고 전면기초의 두께를 16mm로 제작하여 설치하였다. 그림 17과 같이 석고와 물의 비율이 1:0.45 로 배합한 암반과 석고와 물, 토사의 비율이 1:0.5:1로 배합한 암반에 대하여 지반의 변화가 급격히 일어나는 전체기초의 중앙 200mm 지점을 기준으로 전면기초와 말뚝기초를 설치하였다.





[그림 17] 전면기초 + 말뚝기초

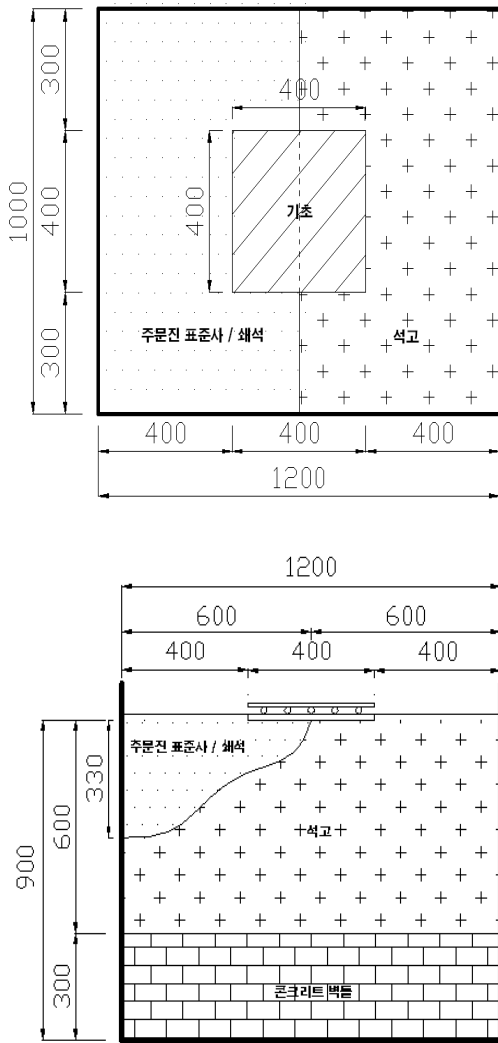
[Fig. 17] mat foundation + pile foundation

연속기초와 말뚝기초의 복합기초의 경우 그림 18과 같이 연속기초 50mm × 400mm를 배열하였고, 지반의 조건은 전면기초와 말뚝기초가 혼용된 복합기초와 동일하게 실험을 하였다.

[그림 18] 연속기초 + 말뚝기초

[Fig. 18] continuous foundation + pile foundation

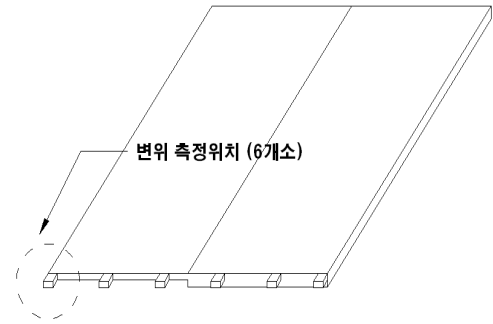
말뚝기초와 복합기초가 적용된 지반에서 전면기초만으로 이루어진 기초와의 비교, 분석을 위해 두께 16mm, 400mm × 400mm의 같은 크기로 제작한 모형 전면기초를 석고로 이루어진 암반과 주문진 표준사로 이루어진 모형 지반에서 실험을 실시하였으며, 주문진 표준사를 쇄석으로 치환하여 실험을 실시하였다.



[그림 19] 전면기초  
[Fig. 19] mat foundation

### 3.3.3 계측기 설치

하중 재하에 따른 기초 및 지반의 거동 변화를 측정하고자 침하계를 설치하였다. 하중재하에 따른 기초의 침하를 측정하기 위하여 그림 20과 같이 디지털 기초 침하계는 기초 상부에 측정할 수 있는 위치에 총 6개소 설치하였다.

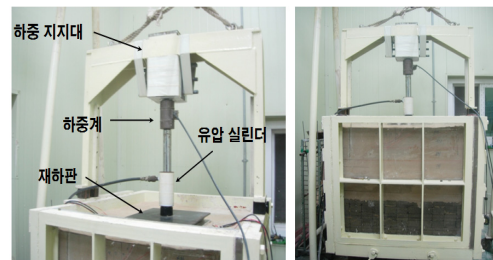


[그림 20] 기초 침하계 배치  
[Fig. 20] settlement extensometer

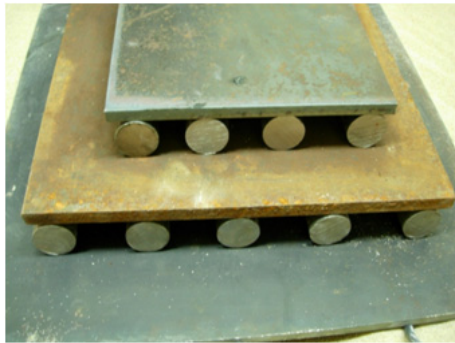
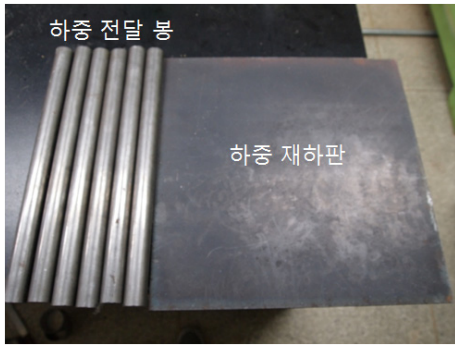
### 3.3.4 재하실험

하중 재하실험은 그림 21과 같이 모형토조위에 하중 지지대를 설치하고 기초 상부에 균등한 하중을 재하하기 위하여 그림 22와 같이 400mm(가로) × 400mm(세로) × 10mm(높이)의 정사각형 재하판을 사용하였다. 하중 재하 시 재하판과 모형기초 사이에 균등하게 하중을 전달시키기 위해 직경 30mm의 강철봉을 적용하여 실제 구조물의 하중이 기둥을 따라 기초에 전달되는 것을 모사하였다. 300mm(가로) × 300mm(세로) × 10mm(두께) 재하판 밑에 역시 직경 30mm의 강철봉을 설치하였고 역시 그 위에 200mm(가로) × 200mm(세로) × 10mm(두께)의 강철 재하판을 설치하여 유압실린더에서 발생한 하중이 모형기초에 전달되도록 하중재하를 실시하였다. 기초지반의 예상 극한 지지력을 고려하여 3t/m<sup>2</sup> 용량의 유압 실린더를 거치시켜 재하를 실시하였고, 재하 시 유압잭 위에 하중계를 설치하였다.

하중은 예비실험을 통해서 기초에 허용범위를 초과하지 않을 정도의 하중인 9.375 t/m<sup>2</sup> 을 정하고, 본 실험에서 각각의 기초에 동일하게 단계별로 증가시켜 재하 하였으며, 초기하중 3.125 t/m<sup>2</sup>, 중기하중 6.25 t/m<sup>2</sup> 그리고 최종적으로 9.375 t/m<sup>2</sup>의 하중에서 각각 하중에 대한 다양한 기초의 침하량을 측정하였다.



[그림 21] 하중재하  
[Fig. 21] Loading



[그림 22] 하중전달 봉 및 하중 재하판  
[Fig. 22] Loading pile and loading board

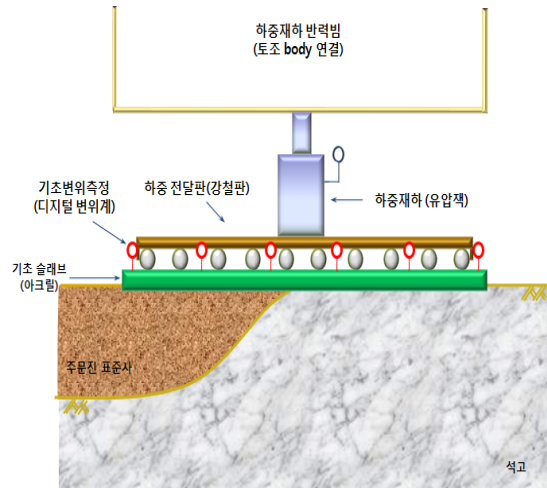
### 3.3.5 실험결과

모형실험을 통하여 전면기초와 말뚝기초가 혼용된 경우와 연속기초와 말뚝기초가 연결된 복합기초를 동일한 지반과 하중에서 말뚝으로 이루어진 기초와 전면기초의 실험결과는 다음과 같다.

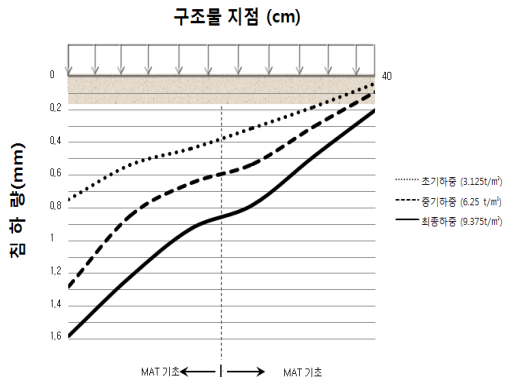
석고와 주문진 표준사로 지반을 조성한 모형 지반에서 그림 23과 같이 전면기초를 적용하여 최종하중 9.375 t/m<sup>2</sup>으로 재하실험을 실시하여 6지점에서 침하량을 측정 한 결과, 그림 24와 같이 주문진 표준사 구간에서 급격한 침하가 발생됨을 확인하였다. 최대 침하와 최소 침하의 차이는 1.38mm로 기초의 양단에서 발생하였으며, 이 결과를 구조물에 대한 각변위 한계(Bjerrum, 1963) 기준에서 구조물의 내벽에 첫 균열이 일어나는 각변위 한계인 1/300을 기준으로 부등침하에 대한 안정성 검토결과 1/289범위로 나타나 부등침하에 대한 구조물의 영향이 있는 것으로 판단된다. 따라서 이와 같은 동일한 지반에서 그림 25와 같이 말뚝으로 이루어진 기초를 적용하여 동일한 하중을 재하시켜 실험을 실시한 결과 그림 26과 같이 지반의 변화가 일어나는 기초의 중앙부근에서 0.74mm의 침하가 발생하였으며 석고로 조성한 암반구간에 걸친 기초의 침하가 주문진 표준사 구간의 기초 침하

보다 적게 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 말뚝기초로 모형말뚝을 제작하여 재하실험 결과를 가지고 각변위를 평가해 본 결과 1/382로 각변위 한계 1/300을 만족함으로 말뚝기초로 적용되었을 경우에는 부등침하에 대한 영향이 없는 것으로 판단된다.

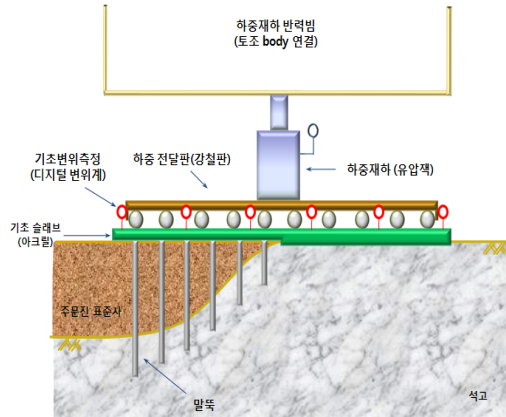
이와 같은 실험결과를 토대로 동일한 지반에서 그림 27과 같이 말뚝기초와 전면기초가 혼용된 복합기초를 동일한 하중에서 재하실험 결과, 그림 28과 같은 단계별 침하 경향을 확인할 수 있었다. 최대 침하가 일어나는 부분은 기초의 중앙 부근이며, 최종하중에서 0.81mm의 최대 침하량을 얻을 수 있었다. 최대 침하량의 차이는 보수적인 말뚝기초보다 10%정도 증가하였으며, 암반부분에는 16~30% 침하량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 부등침하의 영향이 우려되기 때문에 각변위를 평가해 본 결과 각변위는 1/359로 나타났으며, 말뚝으로 이루어진 기초보다 크게 평가되었지만 각변위 한계 1/300을 만족하는 것으로 확인되었다. 복합기초가 말뚝기초와 연속기초로 이루어진 경우에 대해서 그림 29와 같이 실험을 실시한 결과, 최대 침하가 동일한 지점에서 0.83mm의 침하량이 나타났다. 각변위는 1/374로 평가되었으며, 전면기초와 말뚝기초로 이루어진 복합기초보다 낮게 평가된 이유는 기초의 전체적인 침하가 크고, 암반에서 연속기초의 침하가 전면기초의 침하보다 크기 때문인 것으로 판단된다.



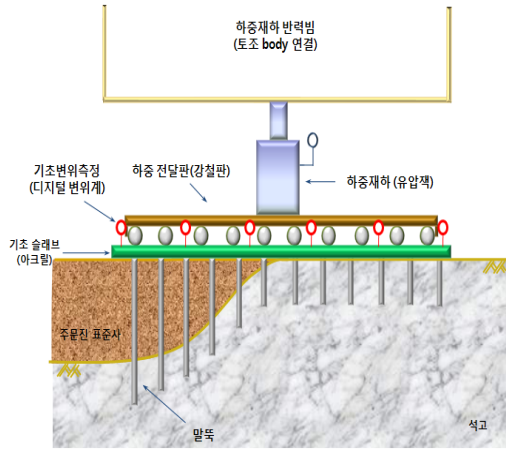
[그림 23] 전면기초 실험  
[Fig. 23] mat foundation test



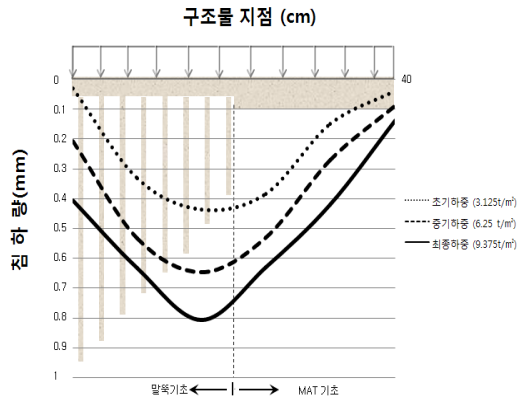
[그림 24] 전면기초 침하 그래프  
[Fig. 24] settlement graphs of mat foundation



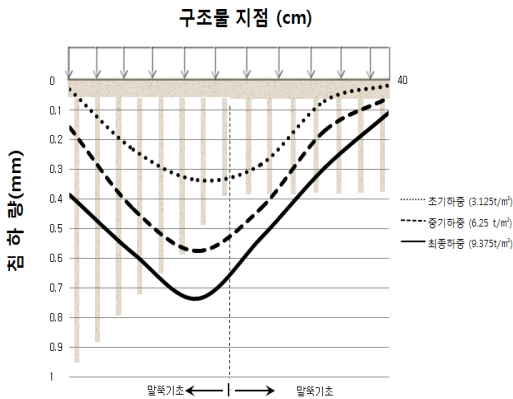
[그림 27] 복합기초(말뚝 + 전면) 실험  
[Fig. 27] different foundation(pile + mat) test



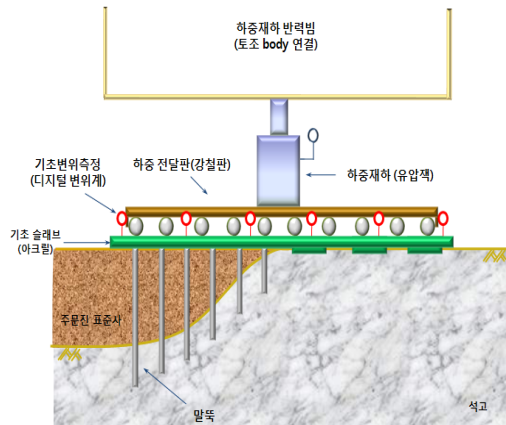
[그림 25] 말뚝기초 실험  
[Fig. 25] pile foundation test



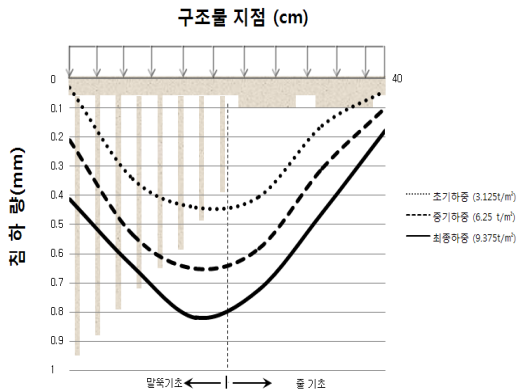
[그림 28] 복합기초(말뚝 + 전면) 침하 그래프  
[Fig. 28] settlement graphs of different foundation(pile + mat)



[그림 26] 말뚝기초 침하 그래프  
[Fig. 26] settlement graphs of pile foundation



[그림 29] 복합기초(말뚝 + 연속) 실험  
[Fig. 29] different foundation(pile + continuous) test

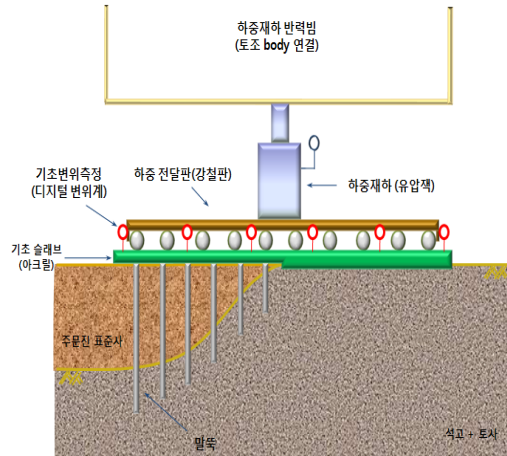


[그림 30] 복합기초(말뚝 + 연속) 침하 그래프  
 [Fig. 30] settlement graphs of different foundation(pile + continuous)

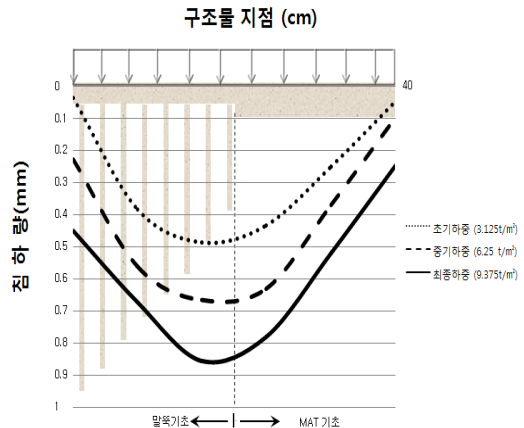
다양한 지반조건에서 복합기초의 적용 가능성을 확인하기 위해 석고와 토사를 일정한 비율로 배합한 모형 암반에 주문진 표준사로 지반을 조성하고 복합기초에 대하여 모형실험을 실시하였다. 그 결과, 석고로 암반을 조성한 모형실험 결과와 비교하였을 때 전체적으로 침하량은 증가하였지만, 지반이 급격히 변화하는 구간에서 최대 침하가 나타나고 직접기초가 적용된 암반구간의 기초 침하가 말뚝구간보다 작게 일어나는 등의 석고로 암반을 조성하였을 때의 침하 그래프와 유사한 경향의 침하 그래프를 확인할 수 있었다. 그림 31과 같이 전면기초와 말뚝기초가 혼용된 복합기초가 석고로 이루어진 모형암반보다 일축압축 강도가 33%정도 낮은 강도인 석고와 토사가 배합된 암반에서 적용될 경우 그림 32와 같이 최대 침하는 0.86mm로 나타났고, 그림 33과 같이 연속기초와 말뚝기초가 적용된 경우에는 그림 34와 같이 전면기초와 말뚝기초가 혼용된 복합기초보다 침하량이 크게 발생하며, 최대 침하량이 0.89mm로 나타났다. 최대 침하량은 그림 37과 같이 석고로 조성된 모형 암반에서의 실험보다 10% 미만으로 증가하였으나, 암반구간의 직접기초의 침하량이 최대 45% 증가하는 것으로 나타났다. 최대 침하량과 최소 침하량을 가지고 각각의 경우 각변위를 평가해 본 결과 전면기초와 말뚝기초가 혼용된 복합기초의 경우에는 1/394, 연속기초와 말뚝기초가 혼용된 경우에는 1/418 범위내로 평가되어 부등침하에 대한 구조물의 안정성에는 영향이 없는 것으로 판단된다. 석고로 조성된 모형암반의 실험결과보다 각변위가 작게 평가된 이유는 기초의 전체적인 침하량의 증가와 동시에 암반구간의 침하량이 더 크게 나타나는 것이 원인이라 사료된다.

또한 지반의 변화로 인해 지내력이 급격히 변화하는

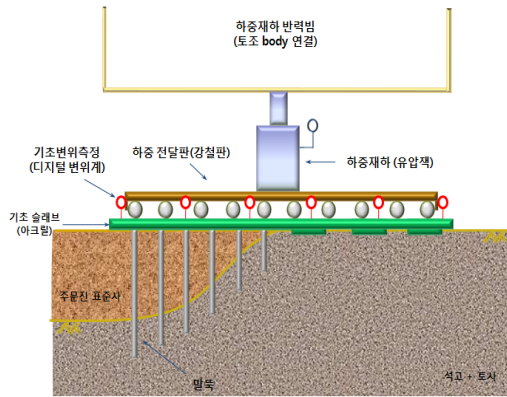
구간에서 지반치환에 대한 영향을 살펴보고자 그림 35와 같이 전면기초를 대상으로 석고로 이루어진 암반과, 쇠석을 이용하여 모형지반을 조성하여 실험을 실시한 결과, 그림 36과 같이 최대 침하량이 1.1mm로 나타났다. 최대 침하량과 최소 침하량의 차이가 크게 나타났으나, 그림 38과 같이 주문진 표준사로 지반을 조성하였을 때보다 최대 32% 침하가 감소하는 것으로 확인되었다.



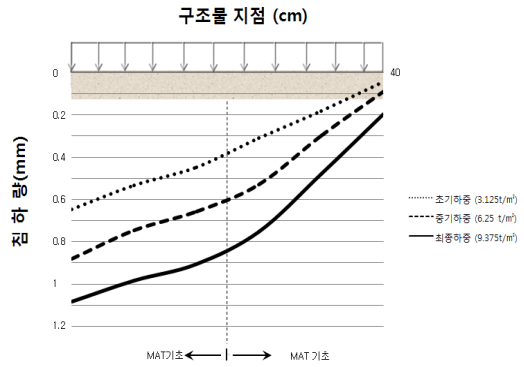
[그림 31] 복합기초(말뚝 + 전면) 실험(석고 + 토사)  
 [Fig. 31] different foundation(pile+mat) test(Gypsum + sand)



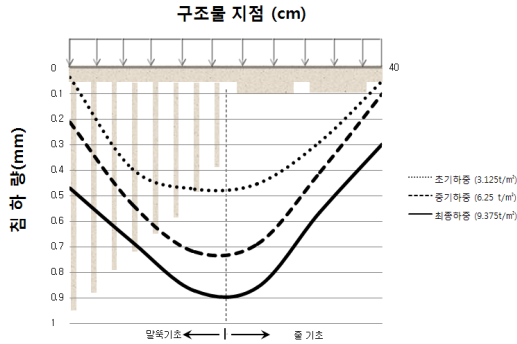
[그림 32] 복합기초(말뚝 + 전면) 침하 그래프(석고 + 토사)  
 [Fig. 32] settlement graphs of different foundation(pile + mat) (Gypsum + sand)



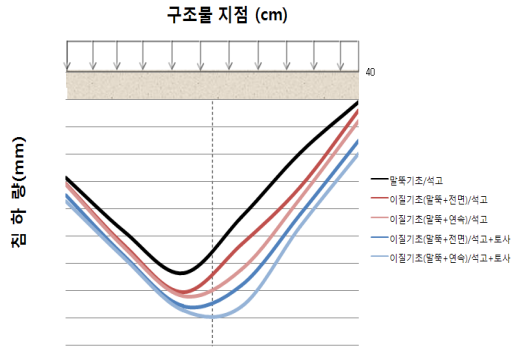
[그림 33] 복합기초(말뚝 + 연속) 실험 (석고 + 토사)  
 [Fig. 33] different foundation(pile+continuous)test (Gypsum + sand)



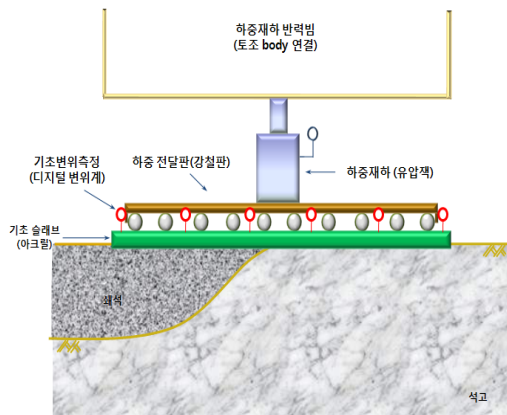
[그림 36] 전면기초 침하 그래프(쇄석)  
 [Fig. 36] settlement graphs of mat foundation (Broken stone)



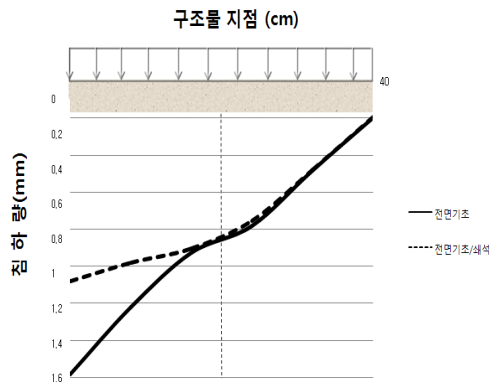
[그림 34] 복합기초(말뚝 + 연속) 침하 그래프(석고 + 토사)  
 [Fig. 34] settlement graphs of different foundation( pile + continuous) (Gypsum + sand)



[그림 37] 최종하중에 대한 침하량 비교  
 [Fig. 37] The final graph



[그림 35] 전면기초 실험(쇄석)  
 [Fig. 35] mat foundation test(Broken stone)



[그림 38] 전면기초 적용시 지반치환에 대한 침하량 비교  
 [Fig. 38] Comparison of the mat foundation

#### 4. 결론

복합기초(직접기초 + 말뚝기초)의 효율적이고 경제적인 안정성 및 적용성을 평가하기 위하여 모형실험을 수행하였으며, 그 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 지내력이 변화하는 구간에서 복합기초의 적용 가능성을 평가하고자 동일구조물에서 직접기초와 말뚝기초가 혼용된 복합기초에 대한 모형실험을 실시하여 침하량을 비교·평가한 결과, 지반의 변화가 급격히 변화하는 기초의 중앙부근에서 최대 침하가 일어나고, 주변부로 갈수록 침하가 감소하였으며, 단계별 하중에 따른 침하의 경향이 유사하였다.
- (2) 동일한 지반에서 복합기초와 보수적인 동일기초인 말뚝기초의 비교 결과 복합기초의 침하량이 더 컸으나, 그 침하량이 미비하여 복합기초의 적용에 무리가 없을 것으로 판단된다.
- (3) 모형실험을 실시한 결과, 동일기초인 전면기초와 말뚝기초가 적용된 경우에 대해 동일하중으로 재하실험을 실시한 결과 전면기초만으로 이루어진 경우에는 부등침하에 대한 구조물의 안정성에는 문제가 나타났지만 보수적인 말뚝기초의 경우에는 기초의 중앙부근에서 최대 침하가 일어났으며, 부등침하에 의한 구조물의 안정성 평가는 문제가 없는 것으로 판단된다.
- (4) 보수적인 말뚝기초와 복합기초를 비교하기 위하여 말뚝기초와 동일한 지반과, 하중조건 하에서 복합기초인 전면기초와 말뚝기초가 혼용된 경우와 연속기초와 말뚝기초가 혼용된 경우를 적용하여 하중을 재하한 결과, 보수적인 말뚝기초와 유사한 침하경향을 나타냈고, 전체적인 침하량이 증가하였으나, 한계 각변위를 이용한 부등침하에 대한 구조물의 거동은 안정한 것으로 나타났다.
- (5) 다양한 지반조건에서 복합기초의 적용성을 평가하고자 암반의 강도를 감소시켜 복합기초의 모형실험을 수행한 결과 기초의 전체적인 침하량은 증가하였으나, 부등침하에 대한 영향은 미비한 것으로 나타났으며, 지반치환에 의한 전면기초의 실험결과, 치환에 의해 침하량이 감소하는 것을 확인하였다.
- (6) 동일 구조물의 하부기초 지반에서 지내력이 급격히 변화하는 경우에 기존의 보수적인 말뚝기초보다 복합기초로 적용 시 구조물의 전체적인 침하량은 증가하였으나 그 차이가 매우 작으며, 구조물의 한계 각변위를 통해 부등침하에 대한 안정성을 평가해 본 결과, 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치지

않으며 경제적인 효과와 동시에 효율적인 시공이 가능할 것으로 판단된다.

#### References

- [1] KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, "Geo-technical Engineering Series NO.4 deep foundation", goomibook (2002)
- [2] KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, "Geo-technical Engineering Series NO.2 shallow foundation", goomibook (2002)
- [3] KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, Commentary foundation design criteria for structures(2009)
- [4] Hea-sik im, "Review based on the stability of supportive", KOREA land & housing corporation (1999)
- [5] KOREA land & housing corporation, "Type of soil and foundation subsidence observations and analysis of an apartment building" (1996)
- [6] Yun-gyu Han, Study on the application of heterogeneous foundations in the execution of foundations for apartments, Yonsei University Industrial Graduate (2001)
- [7] Ministry of Construction and Transportation, "standard specification", pp. 697-699(1998)
- [8] Du-young Jeong et al, The probabilistic interpretation of a shallow foundation settlement, KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, 9th No.3(1993)
- [9] Jong-jin Park, Centrifuge Model Experiments and Numerical Analysis for the Bearin Capacity of Sloped Rubble Mound, KangWon National University(2004)

김 학 문(Hak-Moon Kim)

[정회원]



- 1981년 9월 : (영국) Sheffield대학교 (공학석사)
- 1985년 6월 : (영국) London 대학교 (공학박사)
- 1976년 12월 ~ 1980년 12월 : 대림 Engineering Co. 과장
- 1985년 4월 ~ 1988년 2월 : ICOS - INC.(KOREA) 기술고문
- 1988년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

도심지굴착과 정보화시공, 기초공학, 사면안정, 터널공학

장 경 준(Kyung-Jun Jang)

[정회원]



- 2003년 2월 : 단국대학교 일반대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 ~ 2007년 3월 : 청석 Engineering Co. 대리
- 2011년 2월 : 단국대학교 일반대학원 토목환경공학과 (공학박사)

<관심분야>

흙막이구조물, 사면안정, 기초공학, 연약지반