

# 실내모형실험을 통한 연약지반에서 부양형 팽이기초의 거동

## Behavior of Floating Top-Base Foundation on Soft Soils by Laboratory Model Tests

정진혁<sup>1</sup> Chung, Jin-Hyuck

정효권<sup>2</sup> Chung, Hye-Kwun

이송<sup>3</sup> Lee, Song

### Abstract

This research performed the laboratory model tests for Top-Base Foundation developed in Japan and Floating Top-Base Foundation developed in Korea on the typical clayey soft soils, namely, clay, clayey silt and clayey sand. The performances of the two types of top-base foundation were compared with each other and evaluated by measuring load-settlement, heaving of foundation side, ground stress distribution in this model tests. The change of settlement caused by the increase of top base width was also analyzed. As a result of the model tests, Floating Top-Base Foundation showed better performance in bearing capacity improvement, settlement decrease, stress dispersion effect and lateral confinement force. And settlement caused by the increase of top base width converged to a regular value from 5×5 layout of the width..

### 요 지

일본에서 개발된 원추형 팽이기초(Top-Base Foundation)와 국내에서 개발된 부양형 팽이기초(Floating Top-Base Foundation)를 대상으로 대표 점토질 연약지반인 저압축성점토, 점토질 실트, 점토질 모래에 타설하여 실내모형실험을 수행하였다. 본 실험을 통해 하중-침하량, 기초측면 히빙량, 지중응력분포 등을 측정하여 두 가지 팽이기초의 성능을 비교-평가하였다. 또한, 단변길이 증가에 따른 침하량 변화를 분석하였다. 실내모형실험 결과 부양형 팽이기초가 지지력 증진, 침하량 저감, 응력분산효과, 측방구속력에 대해서 좀 더 우수한 성능을 발휘하는 것으로 나타났으며, 기초폭 증가에 따른 침하량은 팽이기초 5×5배열을 기점으로 수렴하였다.

**Keywords** : Floating top-base foundation, Ground stress distribution, Heaving, Load-settlement, Top-base foundation

### 1. 서 론

팽이기초공법은 일본에서 개발될 당시 공장제작 콘크리트 팽이기초로 제작되어 1985년 일본에서 특허 출원한 제품으로서, 1980년대 말까지 일본의 6천여개소

현장에 시공되었으며, 이와 관련된 많은 연구가 진행되어 그 효과가 입증된 기초공법이다. 일본 및 국내에서 연구된 팽이기초공법의 특성은 콘크리트 부분과 쇠석이 일체 거동을 하여 강성매트 기능을 하며, 팽이기초의 원추부와 말뚝부가 쇠석과 상호작용하여 하중을 분

1 정희원, (주)동호 단지설계부 과장, 공학박사 (Member, Doc., Section Head, Complex Design Department, Dongho co.)

2 정희원, (주)뉴탑이엔씨 대표이사 (Member, President, New Top E&C)

3 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul, scugeo@uos.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

산시키고, 저면지반에 측방변형 및 부등침하를 방지하여 지지력 증대와 침하억제를 동시에 수행할 수 있다고 알려져 있다.

국내에는 1991년 도입되어 최근까지 다양한 현장에서 사용되고 있으나, 현재까지 대부분 건축구조물에 적용되고 있으며 토목구조물에서는 지지력 및 침하량 면에서 저평가 되어 있는 상태이다. 그러나 최근 경제성 시공과 맞물려 저심도 연약지반에 대한 말뚝기초의 대체 공법으로 팽이기초의 적용성이 검토되고 있다.

이에 본 연구에서는 연약지반의 적용성이 높은 팽이기초공법 중 국내에서 개발된 부양형 팽이기초(Floating Top-Base Foundation)와 일본에서 개발되어 국내에서 사용되고 있는 원추형 팽이기초(Top-Base Foundation)와의 성능을 비교·평가하여 국내 기술의 적용성을 타진하는데 연구의 목적이 있다.

## 2. 연구동향

팽이기초와 관련된 연구는 대부분 기초가 개발된 일본에서 수행되었으며, 본 공법에 관한 일본의 연구는 침하억제효과와 지지력증가효과의 두 가지로 대별되고 있다. 이 중 침하억제 효과와 관련된 연구는 현장에서의 장기침하실험과 실내에서의 모형실험 등으로 검증되었고 수치해석으로도 확인되었다.

이와 관련된 연구로 유기질 점성토 지반을 대상으로 5가지 종류의 기초에 대하여 2년간 장기압밀실험을 수행하여 탄성침하에서 압밀침하 단계까지의 전체침하량을 비교하였다(山田清臣 등, 1986; 安川郁夫 등, 1987). 같은 방법으로 5가지 종류의 기초모형을 제작하여 장기압밀침하실험을 실내에서도 수행하여 팽이기초의 경우 쇄석기초의 1/2로 침하가 억제되었다고 발표하였다(荒井克彦 등, 1986). 또한, 이 연구와 동시에 지반을 탄성체로 가정하여 압밀특성을 배제한 2차원 수치해석을 수행한 결과 팽이기초는 지표면에서 편칭침하를 억제하고, 응력전달 영향범위를 줄여 전체적인 침하를 감소시켜준다고 발표하였다(Ohmishi 등, 1988).

지지력증가효과에 관한 연구는  $N$ 값이 0인 유기질 점성토 지반에서 매트기초, 쇄석기초, 나무말뚝기초, 팽이기초 1단, 팽이기초 2단 등 총 5가지의 기초에 대하여 현장재하실험을 수행하였다(山田清臣 등, 1986; 安川郁夫 등, 1987). 또한, 폭 20cm, 길이 1.8cm, 깊이 72cm의

대형토층에서 실내장기침하실험과 같은 재하실험을 수행하였다(荒井克彦 등, 1986).

이렇게 일본에서 1980년도 후반에 연구된 결과를 통해 1991년 국내에 도입된 팽이기초는 2005년까지 한국에 도입한 회사에서 시공실적 위주로 원리와 시공 등에 관한 사례 중심의 공법 소개가 진행되었을 뿐, 팽이기초 자체의 역학적 연구는 미약한 상태였다. 그러나 이후 2006년이 되면서 경제성 시공과 맞물려 팽이기초에 대한 국내의 관심이 높아지면서 다각도의 연구가 진행되었으며, 최근에는 팽이기초의 형태 및 재질에 관한 연구가 진행되면서 기본형 팽이기초, 현장타설형 팽이기초, 부양형 팽이기초 등으로 대별되는 국내에서 유통되는 팽이기초에 대한 지반에서의 거동특성을 연구하는 사례가 늘어나고 있다(김찬국 등, 2006; 이강일 등, 2006).

본 연구에서 대상으로 하고 있는 부양형 팽이기초는 개발단계 모델인 볼록형 팽이기초에 대하여 형상의 변화를 준 다양한 팽이기초에 대한 수치해석을 실시하여 하중-침하 특성을 파악한 후 침하량 저감 효과가 가장 좋은 부양형 팽이기초에 대하여 평판재하실험 및 수치해석을 실시하였으며, 그 결과 부양형 팽이기초가 연약지반의 침하 저감 및 지지력 향상에 효과를 발휘하는 것으로 나타났다(이송 등, 2006). 이후 부양형 팽이기초에 대하여 수치해석 및 현장재하실험을 통해 그 거동특성을 검토하여 팽이기초에 관한 3차원수치해석 모델링 시 쇄석의 탄성 및 탄소성 모델에 대한 침하량, 축압계수에 따른 침하량 및 연결철근의 위치에 따른 침하량에 대한 민감도 분석을 수행하였다(이송 등, 2008).

본 연구에서는 상기 언급한 팽이기초의 성능평가 외에도 팽이기초 기초폭 변화에 따른 지중응력 영향범위 및 하중-침하 경향에 대한 실내모형실험 수행하여 설계시 문제가 되고 있는 기초폭 증가에 따라 침하량이 과다하게 계산되는 문제점의 원인을 분석하고, 분석된 결과를 토대로 기존 사용되고 있는 팽이기초의 영향범위를 연약지반별로 재산정하여 합리적인 침하 영향범위를 제안하려 한다.

## 3. 팽이기초 형태에 따른 하중-침하 모형실험

일본에서 개발된 원추형 팽이기초와 국내에서 개발된 부양형 팽이기초에 대하여  $N$ 치 1이하의 연약지반을 대상으로 대형 토조에 축소된 팽이기초 모형을 이용하

여 실내모형실험을 수행하였다. 여기서 팽이기초의 구별의 편의상 일본에서 개발된 팽이기초는 원추형 팽이기초로 호칭하도록 하였다.

### 3.1 실험대상 토질조성 및 기초배열

실험에 적용된 흙의 분류는 국내에 넓게 분포하고 있는 대표 연약지반인 점성토계열로 대상지반에 대하여 팽이기초의 형태별, 개수별, 지반특성에 따라 재하실험을 수행하였다. 표 1에 실험계획에 따른 절차 및 대상지반과 모형기초에 대하여 정리하였다.

다음 표 2는 실험에 적용된 대상 시료에 대한 물성시험결과이며, 그림 1은 입도분포곡선과 소성도표를 나타내는 것으로 적용대상 시료가 모두 각각의 영역인 CL, ML, SC에 들어와 있는 것으로 나타났다.

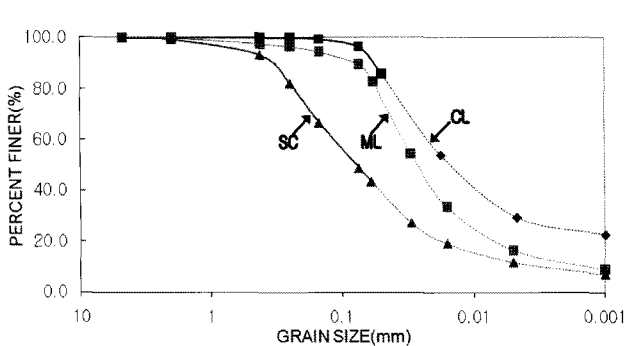
실험대상 모형기초는 매트기초, 원추형 팽이기초, 부양형 팽이기초로 팽이기초 3×3배열에 대해서 각각의 지반에 따른 하중-침하량을 측정하였고, 추가적으로 실험에 사용된 쇄석을 이용하여 3×3배열과 동일한 부피로 타설하여 재하실험을 수행하였다. 본 실험에 적용된 지반심도는 하중재하시 지반의 영향심도를 고려하여 최대 기초폭인 6×6 배열의 1.5B영역이상인 심도 70cm로 조성하였다. 이에 대한 보증으로 PENTAGON-3D를 이용하여 6×6 배열에 대해 모형실험과 동일한 스케일에 대하여 수치해석을 수행한 결과 심도 70cm로 했을 경우 측벽 및 저면에 영향이 없음을 확인하였다. 여기서 B는 배열된 팽이기초의 기초폭 전체를 의미하며, 그림 2는 실내재하실험을 실험조건 별로 요약하여 도시한 것이다.

표 1. 대상시료 및 모형기초

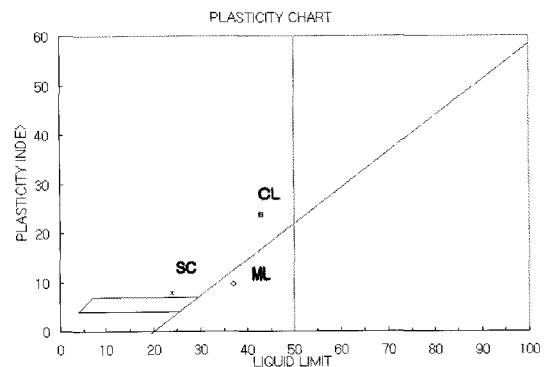
대상시료 타설 및 교반	· 대상시료 : 점토, 점토질 실트, 점토질 모래
모형지반 조성	· 초기함수비 63%의 점토를 상온 건조하여 몇 차례의 교반 후 물성시험과 실트, 모래 배합실험을 통해 세 가지 조성 모두 비배수전단강도를 0.98~1.96 $kPa$ 에 맞춤
팽이기초 타설작업 하중에 대한 예비압축	· 기준 비배수전단강도로 배합해 놓은 대상시료를 대형토조에 타설한 후 토조 내부에서 교반 수행 · 교반 수행을 위한 인력하중에 대한 지지대가 필요하여 접지면적이 큰 하중재하판을 제작하여 인력하중에 대한 교란을 최소화하여 교반을 수행 · 인력하중만큼 24시간 예비압밀을 수행하고 시료를 채취하여 비배수전단강도를 측정된 결과 비배수전단강도의 변화는 없는 것으로 나타남
실험대상 모형기초	· 3×3배열 : 쇄석기초, 매트기초, 원추형 팽이기초, 부양형 팽이기초 · 두 가지 팽이기초의 개수에 따라 지반별 하중-침하량 특성을 확인하기 위하여 정방형 배열로 3×3, 4×4, 5×5, 6×6 배열까지 재하실험을 수행

표 2. 시료의 물리적 특성

대상시료	Gs	Wn(%)	LL(%)	PI(%)	#200(%)	USCS
점토	2.70	56.70	42.90	23.60	96.40	CL
점토질 실트	2.68	45.50	37.20	9.60	89.50	ML
점토질 모래	2.67	31.10	24.00	7.90	48.90	SC



(a) 입도분포곡선



(b) 소성도표

그림 1. 시료의 입도분포 및 소성

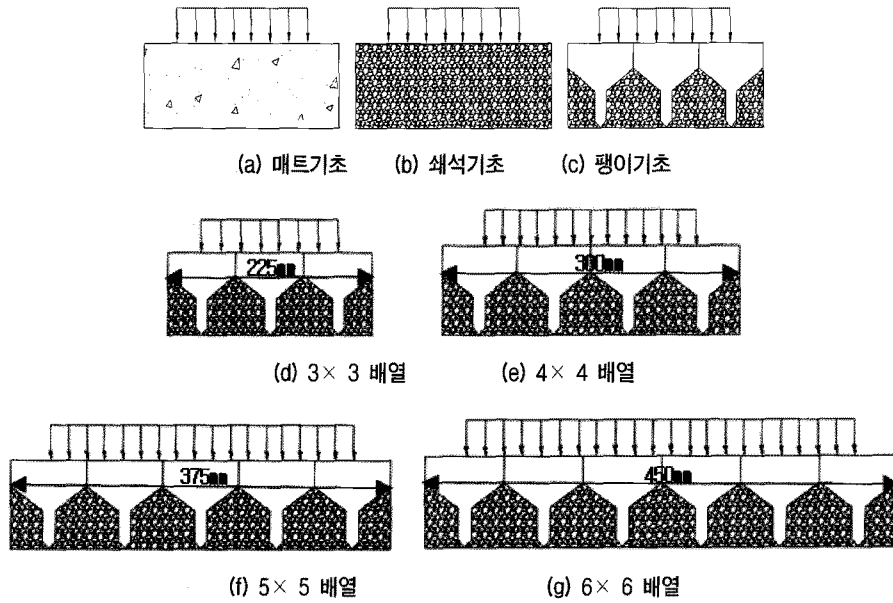


그림 2. 재하시험에 적용된 기초형태 및 배열

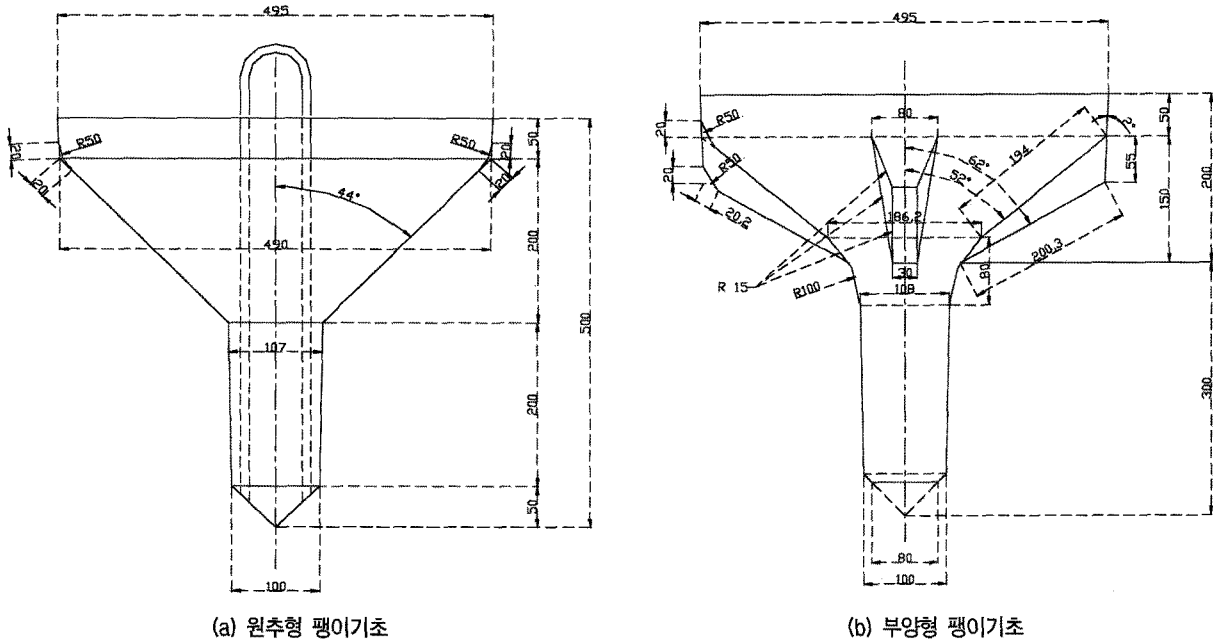


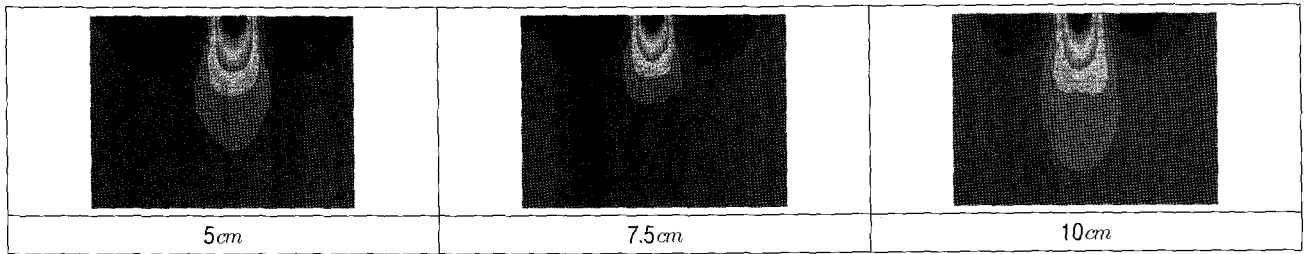
그림 3. 원추형과 부양형 팽이기초의 형태

### 3.2 실험대상 팽이기초의 형태 및 강도

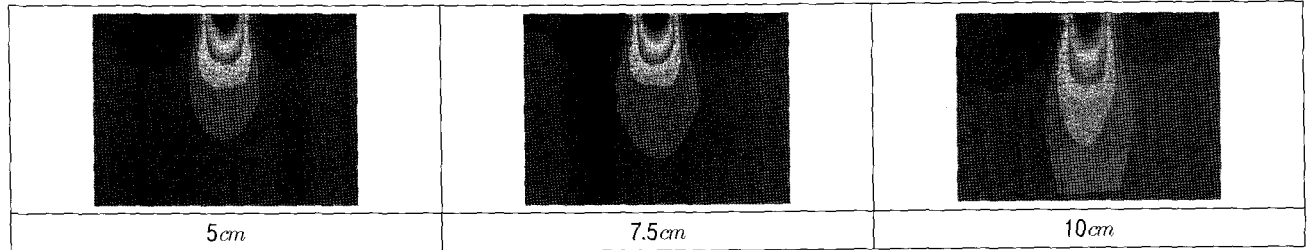
원추형 팽이기초와 부양형 팽이기초의 차이는 그림 3에서 알 수 있듯이 원추부가 44°로 일정한 단면을 갖는 원추형 팽이기초에 비해 원추부 경사각을 52°로 높여서 쇠석과의 접지면적을 넓혔으며, 경사각이 62°인 턱을 만들어 쇠석의 측방유동을 억제하였다. 또한, 늘어난 원추부의 경사각으로 인해 길어진 말뚝의 길이가 기존 25cm에서 30cm로 되어 주면마찰력을 향상시킨 형태이

다. 원추형팽이기초의 무게 60kg보다 그 무게가 약 17% 가벼운 50kg이 되도록 제작되어 기초체 자중에 의한 영향을 최소화하였다.

모형팽이기초의 크기는 1500×1500×1100mm인 토조에 서 3×3 팽이기초 폭을 대상으로 축소비율에 따라 수치해석을 수행하여 토조폭인 1500mm까지 최대한 영향이 적은 팽이기초 크기를 선정하였다. 그림 4는 PENTAGON-2D에서 제공하는 기하학적 축소 tool을 이용하여 3×3, 4×4 팽이기초를 대상으로 모형팽이기초 직경 5(10%),

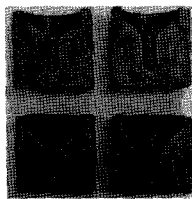


(a) 3×3 배열 부양형 팽이기초

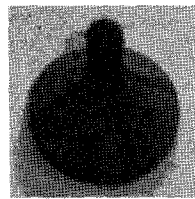


(b) 4×4 배열 부양형 팽이기초

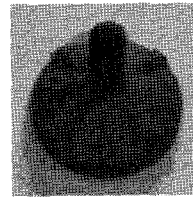
그림 4. 모형팽이기초의 모형토조에서의 수치해석 거동



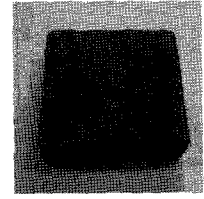
(a) 몰드



(b) 원추형



(c) 부양형



(d) 매트

그림 5. 모형기초의 제작

7.5(15%), 10(20%)cm에 대하여 1.96kPa의 하중을 0.49 kPa씩 증가시켜 최종단계에서의 연직변위 분포를 나타낸 것이다.

3×3의 결과에서는 7.5cm의 영향범위가 비교적 다른 크기에 비해서 작은 것을 알 수 있다. 그러나 4×4의 경우는 5cm, 7.5cm가 비슷한 결과가 도출되었다. 또한, 5cm의 경우 보통콘크리트의 굽은골재 최대입경인 20, 25mm를 적용할 경우 2~2.5mm로 굽은모래에 가까웠으며, 7.5cm는 3~3.75mm로 5cm의 모형팽이기초에 비해 좀 더 좋은 콘크리트 품질 및 워커빌리티를 얻을 수 있어 모형기초로 선택하였다.

본 해석은 모형실험 전에 팽이기초의 크기를 선정하기 위하여 수행되었기 때문에 해석에 적용된 지반정수는 일반적인 점성토 지반의 물성을 사용하였으며, 팽이기초의 입력치는 공장재 팽이기초의 콘크리트 물성치를 사용하였다.

그림 5에서와 같이 수치해석을 통해 결정된 모형크기인 실제크기의 15% 축소비율로 거푸집을 제작하였으며, 콘크리트는 자갈을 제외한 모든 구성요소가 콘크리

트 배합기준에 상응하는 재료를 사용하였으나, 자갈의 크기는 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 보통콘크리트 굽은골재의 최대치수 기준인 20, 25, 40mm에 맞출 경우 모형팽이기초 제작이 불가능하기 때문에 모형팽이기초 크기의 축소비율만큼 자갈의 크기를 조정하였다. 콘크리트 표준시방서를 기준으로 축소된 자갈 크기의 굽은골재 양을 변화시켜서 콘크리트 배합 및 압축강도 실험결과 양생일 1일간, 평균 압축강도  $2.25 \times 10^4 kPa$ 을 만족하는 실제 팽이기초와 같은 강도의 모형팽이기초를 제작하였다.

### 3.3 실험 장치 및 방법

모형실험은 크게 2가지 경우에 대하여 수행되었으며, 첫 번째는 팽이기초 3×3배열에 대하여 동일한 크기의 매트기초, 쇠석기초, 원추형 팽이기초, 부양형 팽이기초에 대하여 재하실험을 수행하였다. 두 번째는 팽이기초의 기초면적이 넓어짐에 따라 지지력과 침하량 특성을 평가하기 위하여 정방형 팽이기초의 폭을 늘려서 실험을 수행하였다.

### 3.3.1 3×3배열에 대한 실험의 절차 및 방법

모형실험은 그림 6에서와 같이 높이 1000mm에 가로×세로가 1500×1500mm인 대형토조를 사용하여 하중재하시 기초와 지반의 변형에 따른 벽면에서 발생하는 반력을 최소화 하였으며, 전면은 하중 50kN을 견딜 수 있는 특수아크릴로 제작하여 내부에서의 변형을 육안으로 확인할 수 있도록 제작하였다.

팽이기초의 타설은 국내 시공방법과 동일한 방법으로 수행되었다. 일본에서는 연약지반에 쇄석을 포설하지 않고 위치철근과 팽이기초를 거치한 후 쇄석을 포설하지만, 국내의 경우 말뚝의 효율을 높이기 위해 연약지반 저면에 말뚝의 길이만큼 쇄석을 포설한 후 위치철근과 팽이기초를 타설한다. 그림 7은 모형팽이기초 타설

전경이다.

완성된 기초체 위에 등분의 응력을 재하하기 위하여 3×3 모형기초의 경우 15×15cm의 재하판으로 하중을 가한다. 재하판은 하중전달 로드와 일체형으로 기초에 재하판의 자체 하중이 전달되지 않게 제작하였으며, LVDT는 재하판 위에 설치되어 침하량을 측정하고 히빙량 측정 기어지는 기초 끝단에서 10cm 간격을 두고 설치되었다.

하중재하는 하중제어 방식을 택할 경우 한 개의 하중 단계에 따른 침하량 수렴 소요시간이 실험 횟수에 비해 과도하게 요구되기 때문에 압밀실험방법 중 CRS를 이용한 변형제어 방식을 선택하였고, 하중재하시 지반의 전단변형을 최소화하기 위하여 분당 1mm의 변형속도로 재하하였다.

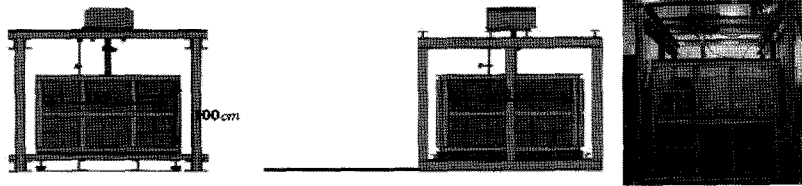
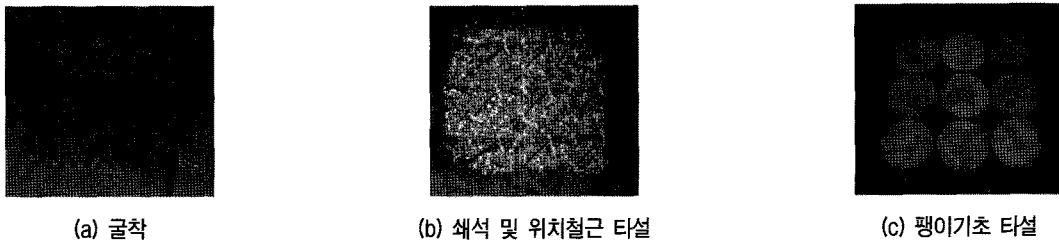


그림 6. 대형토조 및 시료타설 전경

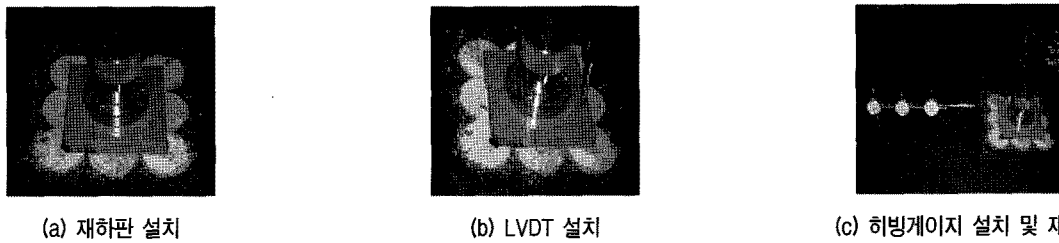


(a) 굴착

(b) 쇄석 및 위치철근 타설

(c) 팽이기초 타설

그림 7. 모형팽이기초 타설 전경

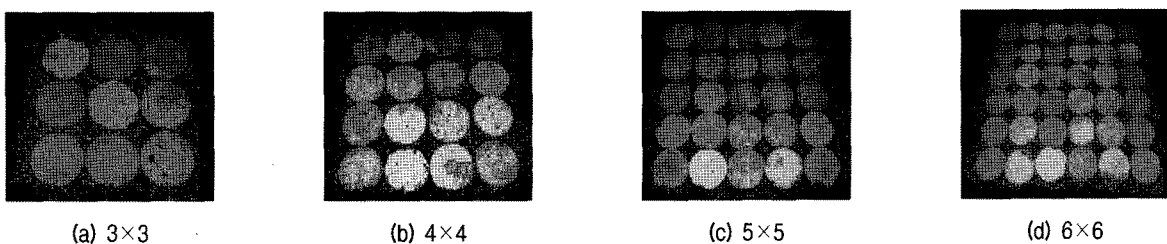


(a) 재하판 설치

(b) LVDT 설치

(c) 히빙게이지 설치 및 재하

그림 8. 게이지 설치 및 하중재하



(a) 3×3

(b) 4×4

(c) 5×5

(d) 6×6

그림 9. 팽이기초폭 증가에 따른 타설 전경

### 3.3.2 B값 증가에 따른 실험의 절차 및 방법

상기 3×3배열 기초실험과 모든 실험절차는 같으며, 단지 기초의 배열이 늘어나고 재하판의 면적이 커지는 특성이 있다. 그러나 본 실험의 경우 두 가지 형태의 팽이기초를 대상으로 수행하는 실험이기 때문에 쇄석기초와 매트기초는 적용하지 않았다. 그림 9는 팽이기초 폭의 증가에 따른 타설 전경이다.

## 4. 모형팽이기초의 재하실험 결과 및 분석

실험결과에 대한 정량적인 검토를 위하여 기초별 항복하중 및 그에 따른 침하량을 산정하였다. 항복하중의 산정은 실험결과를 바탕으로 독일의 DIN 규정에서 제시하는  $P-S$  곡선법,  $S-Log(P)$  곡선법,  $Log(P)-Log(S)$  곡선법,  $S-Log(t)$  곡선법,  $P-\Delta S/\Delta Log(t)$  곡선법 등의 5가지 방법으로 산정하여 그 평균값을 사용하여 비교하였다.

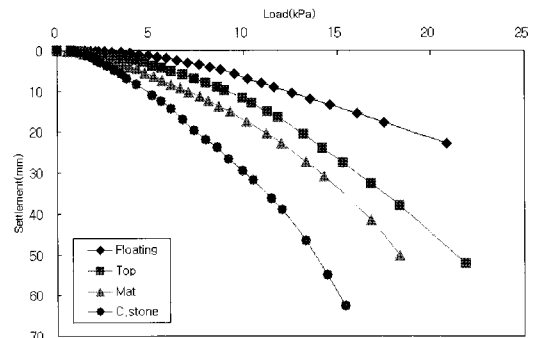
### 4.1 기초형태별 지반조성에 따른 하중-침하

그림 10의 결과에서 지반의 특성에 따라 기초별로 서로 다른 하중-침하 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 조성지반 및 기초별 하중-침하량은 상이하지만 공통적으로 나타나는 지지특성은 부양형 팽이기초, 원추형 팽이기초, Mat기초, 쇄석기초 순으로 지지력이 우수하게 나타났다.

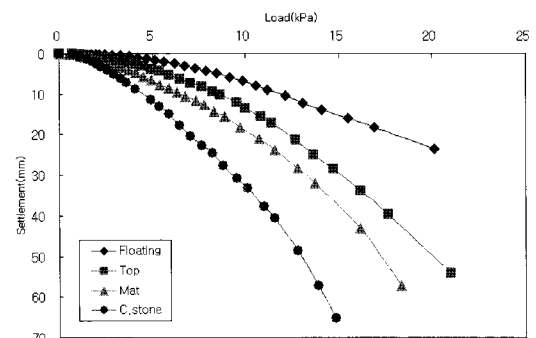
그림 10의 결과를 정량화된 산술값으로 비교해보기 위하여 독일의 DIN 규정에서 제시하는 5가지 방법으로 기초별 항복하중 및 그에 따른 침하량을 산정하였다. 그 결과 원추형 팽이기초와 부양형 팽이기초가 다른 두 기초에 비해 높은 항복하중을 발휘하였으며, 팽이기초에서는 유사한 항복하중에서 부양형 팽이기초의 침하량이 적게 발생하는 것으로 나타났다.

성능이 가장 우수하게 평가된 부양형 팽이기초의 항복하중 및 침하량을 기준으로 쇄석기초, 매트기초, 원추형 팽이기초의 항복하중 및 침하량을 지반별로 비교해본 결과 쇄석기초에 비해 지지력은 47.9~66.5% 증진되

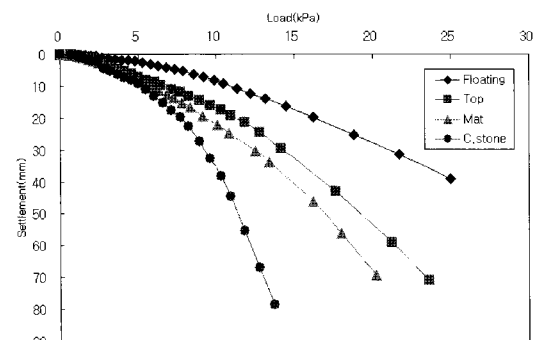
었으며 침하량은 33.5~60.9% 감소되었으며, 매트기초에 비해 지지력은 11.9~43.5% 증진되었으며 침하량은 27.9~56.9% 감소되는 것으로 나타났다. 또한, 유사 형태의 원추형 팽이기초에 비해서는 지지력이 0.5~16.4% 증가되었으며 침하량은 25.0~47.1 감소하였다.



(a) 점성토



(b) 점토질 실트



(c) 점토질 모래

그림 10. 기초형태에 따른 지반조성별 하중-침하

표 3. 기초형태별 3×3기초 기준 항복하중 및 침하량 산정

구분	독일의 DIN 규정에서 제시하는 5가지 방법의 평균							
	쇄석		Mat		원추형		부양형	
	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)
CL(3×3)	7.67	20.95	7.91	11.87	9.75	11.41	11.35	8.56
ML(3×3)	6.04	15.74	8.34	14.27	9.29	11.62	9.34	6.15
SC(3×3)	7.16	17.60	8.41	16.50	10.57	18.11	11.91	11.70

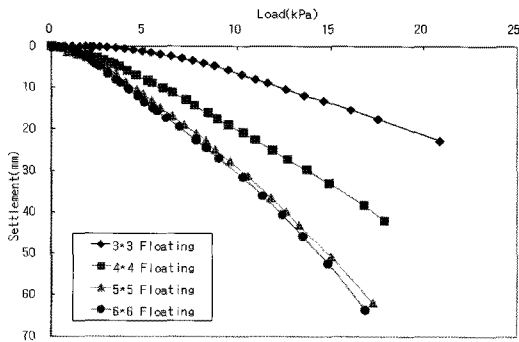
표 4. 부양형 팽이기초와의 성능비교

기초형태	쇄석기초		매트기초		원추형 팽이기초	
지지력 증진(%)	CL	47.9	CL	43.5	CL	16.4
	ML	54.5	ML	11.9	ML	0.5
	SC	66.5	SC	41.7	SC	12.7
침하량 저감(%)	CL	59.1	CL	27.9	CL	25.0
	ML	60.9	ML	56.9	ML	47.1
	SC	33.5	SC	29.1	SC	35.4

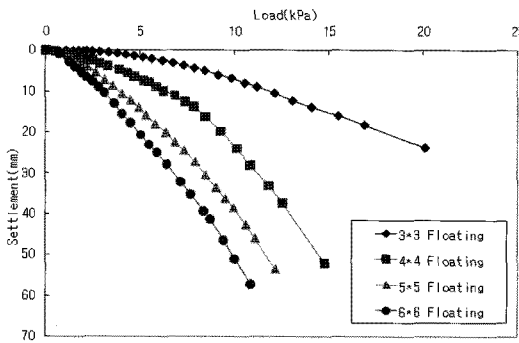
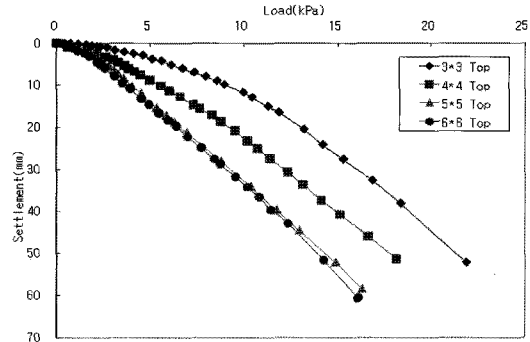
4.2 팽이기초폭 변화에 따른 하중-침하

현재까지 팽이기초의 모형실험들은 대부분 3×3배열의 정방형 기초에 대하여 수행되어왔다. 이것은 기초의

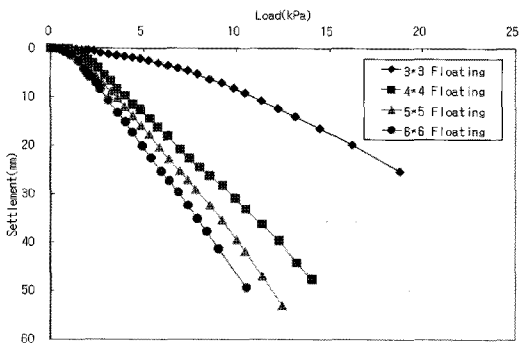
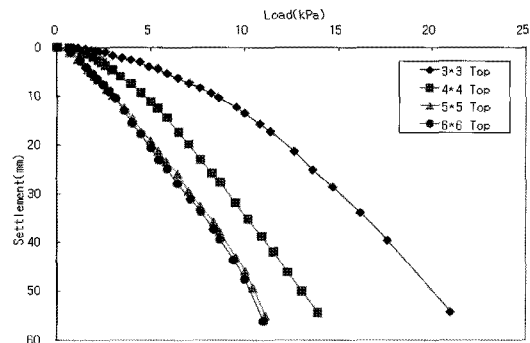
특성을 규명하기 위함으로 지지력 증대와 침하억제에 대한 효과를 확인하기 위함이다. 그러나 실제 시공에서는 3×3배열에 몇 배에 해당되는 지역에 타설하게 된다. 이 경우 팽이기초 침하량 선정시 적용되고 있는 全國ま



(a) 점성토



(b) 점토질 실트



(c) 점토질 모래

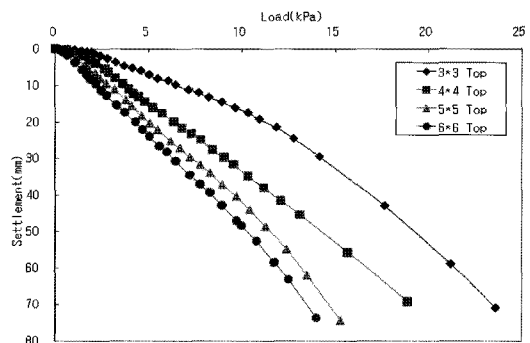


그림 11. 팽이기초폭 증가에 따른 지반조성별 하중-침하



い擲樂工業會(1995) 제안한 1B를 영향범위까지 산정할 경우 실제 계측 침하량에 비해 과대평가되는 경우가 많다. 이에 기초폭을 증가시켜 증가된 기초폭에 해당하는 등분포하중을 재하하여 침하정향을 측정해 보았다. 그림 11은 3×3배열에서 6×6배열까지 기초폭을 증가시켜 대상 지반별로 재하실험한 결과를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 흙의 종류와 무관하게 팽이기초폭이 증가할수록 하중-침하 곡선의 편차가 줄고 있다. 이는 동일한 하중에서 기초폭이 증가할수록 침하가 수렴하는 것으로 판단된다.

4×4배열 이상에 대해서도 항복하중 및 침하량을 산정하여 결과를 분석하였다. 표 5는 상기와 같은 방법으로 5가지의 항복하중 산정법을 동일하게 적용하여 평균값을 나타낸 것이다.

표 5의 결과를 팽이기초폭 증가에 따른 항복하중-침하량으로 정리하여 도시하면 그림 12와 같이 나타난다. 그림 12에서 팽이기초폭이 증가하면서 응력단위의 항복하중과 침하량이 5×5를 기점으로 일정 침하량으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

### 4.3 기초형태별 측각부에서의 히빙량

원추형 팽이기초와 부양형 팽이기초의 형태상의 가장 큰 차이점은 쇄석의 유동을 억제하기 위한 원추부의 날개가 그 특징 중에 하나이다. 이 날개부는 상재하중 재하시 발생하는 기초의 변형에서 쇄석의 유동을 억제하여 측방유동에 대한 구속력을 증진시키기는 효과가 있다고 판단된다. 이에 측방유동에 대한 억제효과가 입증된 원추형 팽이기초와 측방유동의 억제를 강화시킨 부양형 팽이기초에 대하여 상재하중 재하시 측각부에서의 히빙량을 측정해 보았다.

실험은 각각의 기초 끝단에 네 방향에서 10cm 간격으로 게이지를 설치하여 하중재하시 시간에 따라 팽창하는 값을 측정하였다. 시간 간격은 매 5분마다 측정하였으며, 기초별로 비교하는 기준은 기초별 항복하중을 산정하여 그때에 네 방향의 히빙량 중 편차가 큰 값을 배제한 평균값으로 산출하여 그림 13에 도시하여 나타내었다.

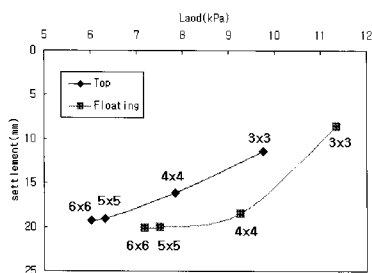
결과에서 보면 지반에 차이가 히빙량에 일정한 영향을 주는 규칙성은 없는 것으로 판단된다. 현상적인 결과

표 5. 기초폭에 따른 팽이기초의 항복하중 및 침하량

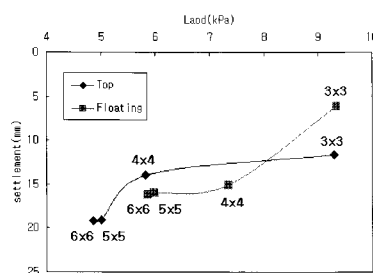
구분	3×3				4×4			
	원추형		부양형		원추형		부양형	
	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)
CL	9.75	11.41	11.35	8.56	7.85	16.14	9.27	18.46
ML	9.29	11.62	9.34	6.15	5.81	14.00	7.35	15.10
SC	10.57	18.11	11.91	11.70	6.89	21.77	7.68	20.10

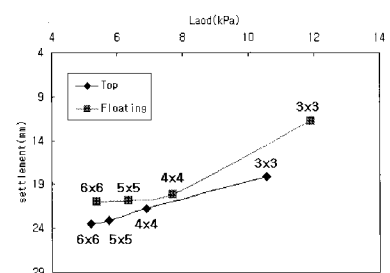
구분	5×5				6×6			
	원추형		부양형		원추형		부양형	
	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)	$Q_t$ (kPa)	$S$ (mm)
CL	6.31	19.02	7.50	20.06	6.02	19.27	7.18	20.10
ML	5.00	19.05	5.98	16.01	4.86	19.21	5.86	16.21
SC	5.74	23.14	6.35	20.75	5.19	23.52	5.36	21.01



(a) 점성토



(b) 점토질 실트



(c) 점토질 모래

그림 12. 팽이기초폭 증가에 따른 지반조성별 항복하중-침하

로 판단해 볼 때 기초폭이 증가함에 따라 히빙량의 최대 값이 증가했으며, 원추형 팽이기초에 비해 부양형 팽이기초의 히빙량이 감소되는 경향을 보이고 있다. 이는 부양형 팽이기초의 쇄석구속력과 측방유동 억제효과가 원추형 팽이기초에 비해 좋다고 해석할 수 있다.

표 6은 부양형 팽이기초가 원추형 팽이기초에 비해 히빙량을 감소시키는 비율을 실내모형실험 결과를 통해 평균적으로 나타낸 것이다.

#### 4.4 심도별 지중 지중응력 증가량 및 영향범위

지중응력계는 최대하중 500N에 감도 0.002%까지 측정이 가능하며, 기초 저면에서 각각 0.5B, 1.0B, 1.5B 위치에 매설하였다.

하중재하시 심도별 지중에서 측정된 지중응력은 지반의 초기토압을 배제하고 하중증가분만을 측정하기 위하여 매설 뒤 영점세팅(re-zero) 후 재하실험을 수행하였다. 표 7은 시간에 따라 측정된 심도별 전달하중 데이

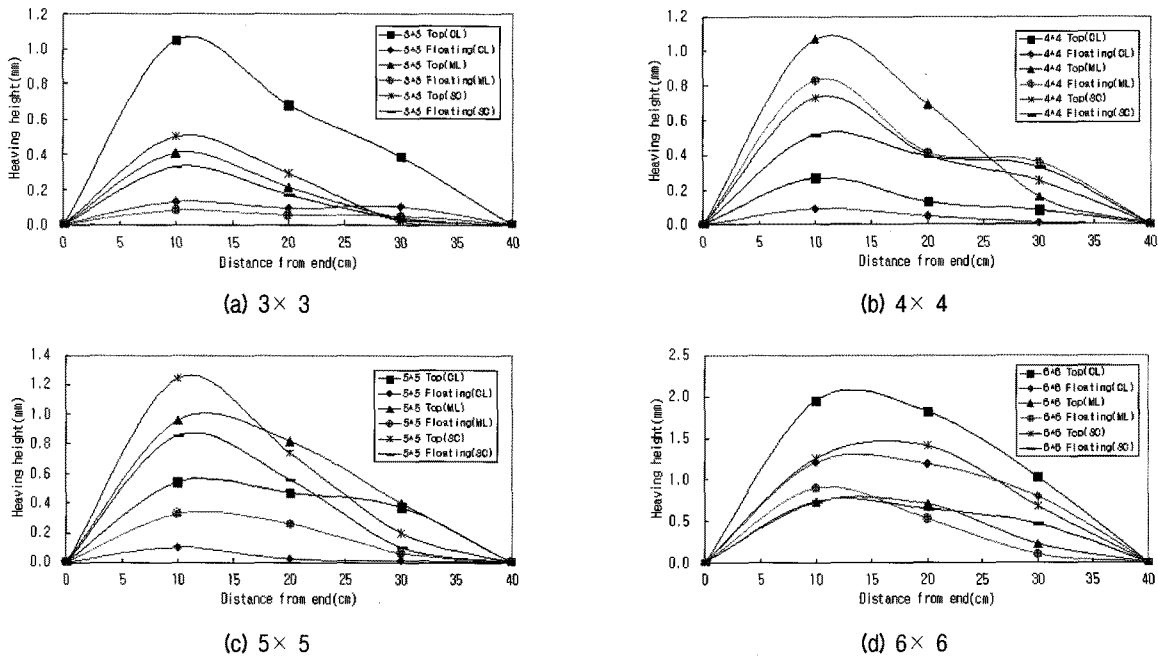


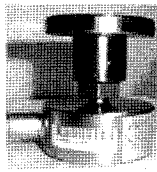
그림 13. 팽이기초폭 증가에 따른 형태별 히빙량

표 6. 부양형 팽이기초의 히빙량 감소효과

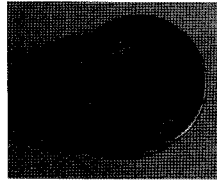
구분	3×3	4×4	5×5	6×6	CL	ML	SC
감소비율	36.4%	68.2%	36.2%	71.0%	30.5%	58.5%	69.9%

표 7. 항복응력에 대한 지중응력의 증가비율

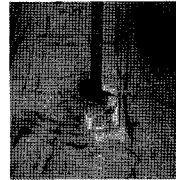
심도	3×3 원추형(%)			3×3 부양형(%)		
	CL	ML	SC	CL	ML	SC
0.5B	5.21	5.45	5.84	4.53	4.80	5.04
1B	1.72	1.86	2.10	1.50	1.66	1.81
1.5B	0.64	0.70	0.82	0.56	0.63	0.71
2B	0.28	0.31	0.36	0.24	0.28	0.31
심도	4×4 원추형(%)			4×4 부양형(%)		
	CL	ML	SC	CL	ML	SC
0.5B	7.44	7.80	8.41	6.52	6.94	7.31
1B	2.33	2.52	2.87	2.04	2.27	2.48
1.5B	0.84	0.93	1.09	0.74	0.84	0.94
2B	0.36	0.40	0.48	0.32	0.36	0.41



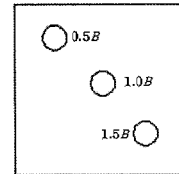
(a) 게이지 측면



(b) 게이지 접지면



(c) 게이지 매설



(d) 매설위치

그림 14. 지중에 매설된 지중응력측정 게이지

터에서 항복하중시에 발생한 하중증가분으로 정리하였으며, 항복하중에 대한 지중응력 증가량을 비율을 산출하여 영향범위에 대한 정량적인 분석을 수행하였다. 본 실험은 비배수 상태에서 진행되어 모형지반의 특성상 압밀상태를 배제한 탄소성 영역에서 발생하는 하중증가분을 측정하였다.

결과에서 0.5B에 전달되는 지중응력 증가비율이 최대 12%에서 최소 4.5%로 나타났다. 이는 팽이기초의 영향범위가 0.5B와 1B 사이에 있음을 증명하는 결과로 현재 설계에서 반영하는 1B나 1.5B는 팽이기초의 예상 침하량을 과다하게 평가할 수 있다고 판단된다. 또한, 지중응력 증가율이 대부분의 경우 부양형 팽이기초가 적게 전달하는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

- (1) 3×3 배열의 부양형 팽이기초는 쇄석기초에 비해 평균적으로 지지력이 56% 증진되었으며, 침하량은 51% 감소하였다. 또한, 매트기초에 비해서는 평균적으로 지지력은 32% 증진되었으며, 침하량은 38% 감소하는 결과가 나타났다. 마지막으로 형태상의 유사성이 가장 큰 원추형 팽이기초와 비교해서는 지지력이 9.8% 증가하였으며, 36% 감소하였다.
- (2) 4×4 배열 이상에서 원추형 팽이기초에 비해 부양형 팽이기초는 점토에서 지지력이 18.5% 증가했으며, 침하량은 25% 저감되었다. 점토질 실트와 점토질 모래에서는 각각 지지력이 22.2%, 8.5% 증가하였으며, 침하량은 47.1, 35.4% 저감되었다.
- (3) 측방유동에 대한 저항력의 지표인 재하시 기초주변의 히빙량을 측정한 결과, 원추형 팽이기초에 비해 부양형 팽이기초의 히빙량이 최대 71%에서 최소 30.5% 감소되는 경향으로 나타났다.
- (4) 팽이기초폭이 증가하면서 응력단위의 항복하중과 침하량이 5×5배열을 기점으로 일정 침하량으로 수렴하

는 것을 알 수 있다. 결과를 통해 판단해 볼 때 5×5 이상 팽이기초의 침하량을 산출할 경우 5×5 이상에서 현재 설계와 같이 지중의 하중전달 영향범위를 1B로 하여 산정할 경우 영향심도가 상대적으로 계속 증가되어 침하량이 과대평가될 수 있다고 판단된다.

(5) 재하실험 결과 0.5B에 전달되는 지중응력 증가비율이 최대 12%에서 최소 4.5%로 나타났으며, 1B에 전달되는 지중응력은 미약한 것으로 나타났다. 이는 팽이기초의 영향범위가 0.5B와 1B 사이에 있음을 증명하는 결과이며, 부양형 팽이기초가 좀 더 적은 지중응력 증가율을 나타냈다.

## 참고 문헌

1. 김찬국, 이봉열, 김학문 (2006), 팽이기초에 대한 하중재하실험 사례연구, *한국지반공학회 2006년도 학술발표회 논문집*, pp.669-674.
2. 이강일, 이정영, 홍기재, 황순중 (2006), 지내력 보강 기초인 현장 타설형 팽이말뚝 기초공법, *대한토목학회 2006년도 정기학술대회 논문집*, pp.1685-1688.
3. 이송, 정대열, 정효권, 이무철 (2006), 볼록형 부양팽이기초의 하중-침하특성에 관한 연구, *한국지반공학회 2006년도 학술발표회 논문집*, pp.740-751.
4. 이송, 정대열, 정효권, 이무철 (2008), 팽이기초의 형상에 따른 특성 분석, *한국지반공학회논문집*, 제 24권 2호, pp.15-25.
5. 山田清臣, 安川郁夫, 齊藤實 (1986), “軟弱地盤에 있어서 콘크리트팽이형블럭基礎의 現場荷重試驗”, *土質工學硏安發表會講演集*, 第 21回, pp.1281-1284.
6. 安川郁夫, 山田清臣, 齊藤實 (1987), “팽이型基礎의 沈下柳制效果에 對한 考察”, *土質工學硏安發表會講演集*, 第 22回, pp.1833-1836.
7. 荒井克彦, 町原水夫, 小久保晴康, 大西有三, 堀田政國, 安川訪夫 (1986) “軟弱地盤에 있어서 콘크리트팽이型블럭基礎의 沈下柳制效果”, *土質工學會 - 地盤의 側方流動에 關한 심포지움 發表論文集*, 第 21回, pp.111-114.
8. 全國まい掘業工業會 (1995), “뚝-베이스工活의 沈下柳制 實績調査報告書”.
9. Ohnishi, Y., Arai, K., Horita, M., Yasukawa, I., and Nakaya, S. (1988), “Interpretation of concrete Top Base foundation behaviour on soft ground by coupled stress flow finite element analysis”, *6th International conference on numerical method in geomechanics*, Vol.1, pp.625-630.

(접수일자 2009. 9. 16, 심사완료일 2010. 12. 14)