

부양형 팽이기초의 하중전달 메커니즘에 따른 거동

Behavior of Floating Base Plate by Stress Delivery Mechanism

정진혁¹⁾

Chung, Jin Hyuck

정효권²⁾

Jung, Hye Kwun

이송^{3)*}

Lee, Song

Abstract

Up to now, common studies of top base have concentrated upon bearing capacity and settlement by in-situ loading test in Japan and Korea. But most of all preceding study for top base must analyze how to deliver overburden loading on bottom of foundation.

Therefore, in this study, the stress delivery mechanism of Top-Base Foundation developed in Japan and Floating Top Base developed in Korea is investigated through numerical analysis and laboratory model test. Analyzing the load delivery mechanism of top base, it was found that the division rate of load reduction of top base for overburden load was largest in peripheral skin friction between the top base and the crushed stone. Further, total stress dispersion angle of Top-Base Foundation including internal stress dispersion effect of top base was 41.8° and total stress dispersion angle of Floating Top Base was 44.5°.

Keywords : Floating base plate, Top-base foundation, Bearing capacity, Settlement, Stress dispersion angle

1. 서론

팽이기초 공법은 일본에서 개발될 당시 공장제작 콘크리트 팽이기초로 제작되어 1985년 일본에서 특허 출원한 발매품으로서, 1980년대 말까지 6천여개소의 현장에 시공되었으며, 이와 관련하여 일본에서는 많은 연구가 진행되어 그 효과가 입증되었다.

국내에는 1991년 도입되어 최근까지 다양한 현장에서 적용되고 있으나 현재까지 국내 지반특성에 따른 팽이기초의 공학적 원리에 관한 연구가 부족한 상태로 시공되어, 향후 팽이기초가 적용된 구조물의 진단 및 유지관리에서 발생될 문제의 기초지반력에 관련된 원인을 분석하는 지표연구가 필요한 실정이다.

팽이기초와 관련된 연구는 대부분 기초가 개발된 일본에서 수행되었으며, 본 공법에 관한 일본의 연구는 침하 억제효과와 지지력증가효과의 두 가지로 대별되고 있다.

이 중 침하억제 효과와 관련된 연구는 현장에서의 장기 침하실험과 실내에서의 모형실험 등으로 검증되었고 수치해석으로도 확인되었다. 이와 관련된 연구로 유기질 점성토 지반을 대상으로 5종류의 기초에 대하여 2년간 장기압밀실험을 수행하여 탄성침하에서 압밀침하 단계까지

의 전체침하량을 비교하였다(山田清臣 등, 1986; 1987).

같은 방법으로 장기압밀침하실험을 실내에서도 수행하여 팽이기초의 경우 쇄석기초의 1/2로 침하가 억제되었다고 발표하였다(荒井克彦 등, 1986; 1987).

또한, 이 연구와 동시에 지반을 탄성체로 가정하여 압밀특성을 배제한 2차원 수치해석을 수행한 결과 팽이기초는 지표면에서 편칭침하를 억제하고, 응력전달 영향범위를 줄여 전체적인 침하를 감소시켜준다고 발표하였다(Ohnishi 등, 1988).

상기 1986, 1987년 山田清臣 등의 연구에서 침하량 저감효과와 함께 지지력증가효과에 관한 연구도 수행되었으며, N 값이 0인 유기질 점성토 지반에서 매트기초, 쇄석기초, 나무말뚝기초, 팽이기초 1단, 팽이기초 2단 등 총 5가지의 기초에 대하여 현장재하실험을 수행하였다. 또한, 荒井克彦 등도 폭 20cm, 길이 1.8cm, 깊이 72cm의 대형토조에서 실내장기침하실험과 함께 재하실험을 수행하였다.

이렇게 일본에서 연구된 결과를 통해 1991년 국내에 도입된 팽이기초는 1990년 한국지반공학회지에 기술기사로 소개된 이후 1995년 서울대학교에서 실내모형실험 및 현장평판재하실험을 통해 국부변형을 줄여 부등침하

1) 정희원, (주)동호 단지설계부 대리, 공학박사

2) 정희원, (주)뉴탑이엔씨 대표이사

3) 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : scugeo@uos.ac.kr 02-2210-2272

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2010년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

를 억제하고 측방유동을 방지하는 효과가 있으며, 강성지반을 형성하면서 하중을 넓게 분포시켜 연약지반 상에 전달되는 응력을 감소시킴으로써 침하량을 줄이고 상재하중에 대한 저항능력을 증대시키는 효과가 있다고 발표하였다(서울대학교, 1995).

그러나 2005년까지 팽이기초에 관한 국내연구는 1995년 서울대학교의 연구 외에는 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 연구의 실험대상인 부양형 팽이기초는 형상의 변화를 준 다양한 팽이기초에 대한 수치해석을 실시하여 가장 우수하게 평가된 볼록한 형태의 팽이기초를 모델로 개발되었다. 이후 수치해석 및 현장재하실험을 통해 그 거동특성을 검토하였다(이송 등, 2008).

상기 연구동향에서 알 수 있듯이 일본과 국내에서 현재까지 공통적으로 연구되고 있는 것은 팽이기초의 현장에 대한 지지력과 침하량에 주목되어 있다.

이에 본 연구에서는 일본에서 개발된 Top-Base Foundation과 기존 팽이기초의 응력분산효과를 증대시키고 채움쇄석의 변형을 구속하여 지반의 측방변형을 억제할 목적으로 국내에서 개발된 부양형 팽이기초의 응력전달 메커니즘을 수치해석 및 실내모형실험을 통하여 분석하고, 국내와 일본의 시공법 차이로 인한 팽이기초 내부에서의 응력분산효과 차이를 규명하였다.

2. 이론적 배경 및 팽이기초모형 선정

일본에서 개발된 원추형 팽이기초와 국내에서 개발된 부양형 팽이기초의 모형을 제작하여 팽이기초 자체의 하중전달 메커니즘을 모형실험을 통하여 구현하고, 그 결과를 분석하였다.

2.1 팽이기초의 응력분산각

팽이기초의 하중분산효과를 대표하는 인자는 응력분산각(ω)으로 허용지지력 산정과 관련해서는 Fig. 1의 개념도가 제시되고 있다.

상기 개념도에서 상부하중 P 를 등분포하중 q 로 환산하고 팽이기초의 응력분산효과에 의하여 기초저면에 감

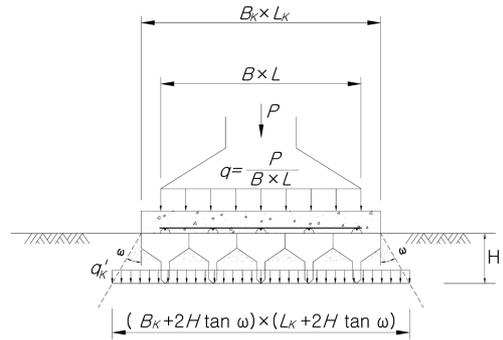


Fig. 1 Bearing capacity improvement by stress dispersion

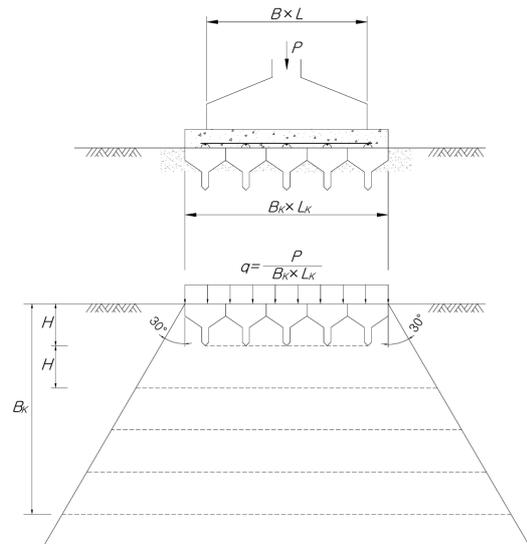


Fig. 2 Settlement reduction by stress dispersion

소된 등분포하중이 q'_K 라고 가정하면 식 (1)이 성립한다.

$$qBL = q'_K(B_K + 2H \tan \omega)(L_K + 2H \tan \omega) \quad (1)$$

q 에 관해서 정리하면 식 (2)와 같이 된다.

$$q = \frac{(B_K + 2H \tan \omega)(L_K + 2H \tan \omega)}{BL} q'_K = K_1 q'_K \quad (2)$$

따라서 팽이기초 자체의 응력분산효과와 관련된 K_1 은 다음과 같다.

$$K_1 = \frac{(B_K + 2H \tan \omega)(L_K + 2H \tan \omega)}{BL} \quad (3)$$

식 (3)에 의해 구한 K_1 은 팽이기초의 하중분산효과를 나타내는 계수로 응력분산각(ω)이 분산효과를 나타내는 인자로 적용된 것을 알 수 있다. 여기서, \tan 함수의 특성상 응력분산각(ω)이 증가함에 따라 K_1 값은 증가한다.

팽이기초의 침하량 산정은 상재하중이 팽이기초 부설

쪽으로 분산되기 때문에 상기 지지력 산정시의 하중강도 q 를 적용하고 지반내의 응력분산 효과를 나타내는 응력 분산각은 30° 로 분포하는 것으로 가정하였다(荒井克彦 등, 1990). Fig. 2는 상기 침하량 산정을 위한 개념도이다.

개념도에서와 같이 유효폭 만큼의 심도까지 영향깊이를 결정하고 층을 분할하여 각각의 분할된 토층마다 침하량을 구해서 합계한 것을 팽이기초의 최종침하량으로 한다.

이러한 개념에 따라 팽이기초의 침하량을 산출하기 위해서 우선 분할된 각층의 경계에서 상재하중에 의해 증가된 지반연직응력 $\Delta\sigma_{zi}$ 를 Boston Building Code법에 따라 응력분산을 적용한 식 (4)로 구한다(John R. Nichols, 1934).

$$\Delta\sigma_{zi} = \frac{qBL}{(B_K) \times (L_K)} \quad (4)$$

식 (4)에서 구한 $\Delta\sigma_{zi}$ 로부터 각 층의 연직변형도 ε_{zi} 를 식 (5)와 같이 구한다.

$$\varepsilon_{zi} = \frac{1}{E}(1 - 2\nu K_0)\Delta\sigma_{zi} \quad (5)$$

따라서 상기 팽이기초의 허용지지력과 침하량 산정에서 알 수 있듯이 응력분산각(ω)은 팽이기초의 하중전단 메커니즘에서 주요인자로 판단되었다.

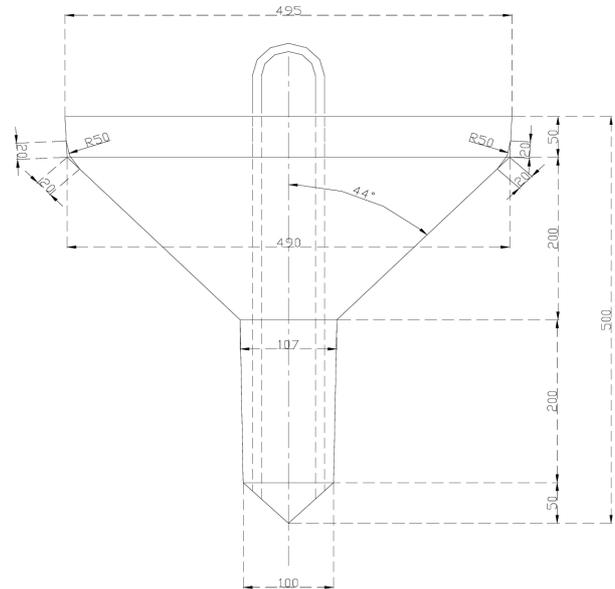
2.2 모형팽이기초의 강도 및 형태

모형실험을 위해서 우선적으로 모형팽이기초의 강도와 크기를 결정해야 한다. 이 중 강도를 결정하기 위해서 현재 국내에서 제작되고 있는 공장제 팽이기초의 콘크리트 강도인 $2.06 \times 10^4 kPa$ 을 기준으로, 일반적으로 콘크리트 시방에서 구조물의 안전을 위해서 제시하고 있는 $2.06 \times 10^4 kPa$ 이상의 강도를 발현하기 위하여 여러가지 배합비에 따라 콘크리트 강도실험을 수행하여 최적 배합비와 양생일을 결정하였다.

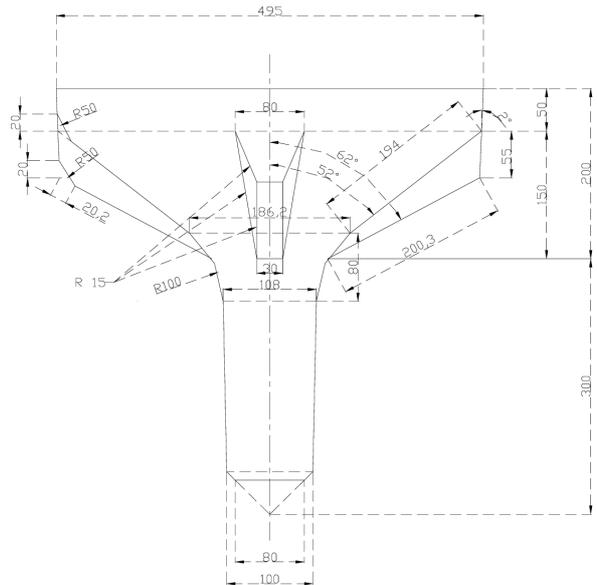
본 연구에 사용된 콘크리트는 상기 구성요소 중 자갈을 제외한 모든 구성요소가 콘크리트 배합기준에 상응하는 재료를 사용하였으나, 자갈의 크기는 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 보통콘크리트 굵은골재의 최대치수 기준인 20, 25, 40mm에 맞출 경우 모형팽이기초 제작이 불가능하기 때문에 모형팽이기초 크기의 축소비율만큼 자갈의 크기를 조정하였다. 기존의 연구에서는 10% 축소 모형을 많이 사용하였으나, 이 경우 굵은골재의 크기가 통일분류상의 자갈의 최대입경보다 작아지기 때문에 축소비율은 15%로 정하였다.

모형팽이기초의 축소비율을 15%로 하였기 때문에 최대치수 기준인 20, 25mm 대하여 축소비율을 적용한 결과 3~3.75mm가 되어 #4번체와 #10번체 사이에 남은 자갈을 사용하였으며, 콘크리트 표준시방서를 기준으로 축소된 자갈 크기의 굵은골재 양을 변화시켜서 콘크리트 배합 및 압축강도 실험결과 양생일 1일간, 평균 압축강도 $2.25 \times 10^4 kPa$ 을 만족시킨 배합비를 이용하여 모형팽이기초를 제작하였다.

원추형 팽이기초와 부양형 팽이기초의 차이는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 원추부가 44° 로 일정한 단면을 갖는 원추형 팽이기초에 비해 원추부 경사각을 52° 로 넓혀서 쇠



(a) Top-base Foundation



(b) Floating base Foundation

Fig. 3 Shape of base

석과의 접지면적을 넓혀 응력분산효과를 높였으며, 62°의 틱을 만들어 쇄석의 측방유동을 억제하며, 늘어난 원추부의 경사각으로 인해 길어진 말뚝의 길이가 기존 25cm에서 30cm로 되어 주면마찰력을 향상시킨 형태이다. 원추형팽이기초의 무게 60kg보다 그 무게가 약 17% 가벼운 50kg이 되도록 제작되어 팽이기초의 자중에 의한 영향을 최소화하였다.

3. 팽이기초의 하중전달 모형실험

팽이기초 자체의 하중전달 메커니즘을 구현하기 위하여 팽이기초 내부에서 기초와 쇄석 사이에 발생하는 분력에 대한 분석을 통하여 기초에 작용하는 상재하중이 팽이기초 내부에서 얼마나 상쇄되는 지를 검토하고, 두 가지 팽이기초에 작용하는 상부하중이 기초저면에 얼마나 전달되는지를 실내실험으로 산출하여 팽이기초 자체에서의 응력분산효과와 관련된 내부응력분산각인 ω' 을 산정하였다.

일본에서 개발당시 팽이기초의 시공개념은 Fig. 4(a)와 같이 팽이기초의 말뚝부는 원지반에 매설되고, 원추부와 쇄석은 원지반상부에 위치하였다. 그러나 이러한 시공 방법은 사질지반에 타설될 경우에는 말뚝부의 주면마찰력 효과를 얻을 수 있으나, 연약한 점토질 지반에 시공될 경우 말뚝의 역할을 충분히 수행하지 못하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 국내에 도입된 팽이기초는 Fig. 4(b)와 같이 원지반 위에 쇄석과 팽이기초가 일체의 형태로 시공되고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 적용되고 있는 연약지반 점토에 적용성이 높은 Fig. 4(b) 모델에 대해서 하중 메커니즘을 분석하였다.

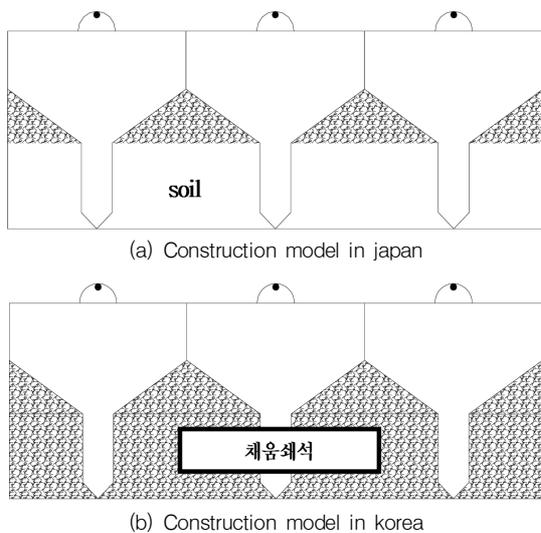


Fig. 4 Construction model of Top-base

3.1 팽이기초와 쇄석사이의 반력

Fig. 5는 팽이기초와 쇄석 사이에서 발생 가능한 분력과 상재하중에 대한 반력을 도시한 것으로, 상재하중을 q 라고 가정할 경우 팽이기초에 작용하는 반력은 크게 주면마찰력, 위치철근의 탄성영역에서 휨강성과 쇄석의 탄성 변형으로 나눌 수 있다.

여기서 팽이기초의 분력은 팽이기초 자체의 탄성계수, 쇄석의 탄성계수 등과 상호작용하여 상부하중에 대한 팽이기초 자체의 반력으로 작용한다는 가정 하에 연구를 진행하였기 때문에, 수치해석 및 실내실험의 경우 지반의 영향을 최소화하기 위하여 경계면을 모두 고정된 상태로 수행되었다.

3.2 하중전달 모델링에 따른 실험개요

본 연구에서의 대상 모형팽이기초는 일본에서 개발된 Top-Base Foundation과 국내에서 개발된 부양형 팽이기초, 팽이기초에 상응하는 부피의 매트기초가 사용되었으며, 구분의 편의상 본 논문에서 Top-Base Foundation은 원추형 팽이기초로 호칭하도록 하겠다.

실험방법은 우선 2.2절에서 선정된 강도와 크기의 모형 팽이기초와 모형팽이기초 3×3배열의 부피에 상응하는 모형 매트기초를 제작하였다. Fig. 6은 모형팽이기초와 매트기초이다.

제작된 기초를 대상으로 Fig. 5의 개념도에서 마찰력을 구하기 위해서는 각각의 접지면의 콘크리트와 쇄석사이의 마찰계수를 알아야 그 값을 계산할 수 있다. 따라서 Fig. 7에서와 같이 모형팽이기초를 구성하고 있는 소요강도 $2.25 \times 10^4 kPa$ 의 콘크리트와 축소된 쇄석과의 마찰

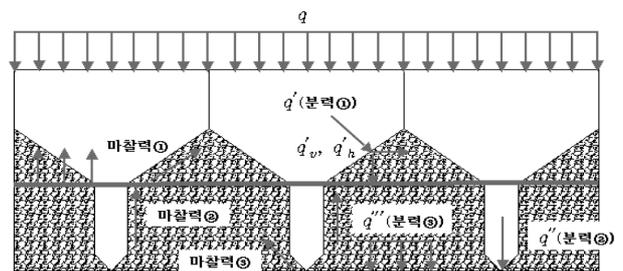


Fig. 5 Component of force acting to Top-base



Fig. 6 Maquette of Top-base model

계수를 직접전단실험으로 산출하였다.

하중전달 메커니즘에 관한 실험으로 측방구속이 가능한 대형전단 상자에 팽이기초와 매트기초를 3×3 배열로 타설하여 상재하중을 가한 후 저면에 토압계를 설치하여 기초저면에 전달되는 접지압을 측정하였다. Fig. 8은 하중전달 모형실험의 절차와 방법을 나타낸 것이다.

또한, 말뚝부의 주면마찰력을 산정하기 위해서는 말뚝부에 작용하는 수평방향 하중을 측정해야 한다.

Fig. 9는 팽이기초 측면에 토압관을 대고 토압관 측면에 토압계를 설치하여 상재하중에 따른 수평방향 하중을 측정하는 전경이다.

하중전달 모형실험에서 측정된 접지압이 관입심도 D_f 만큼까지의 지반에서 얼마만큼 전달되는 가를 측정하기

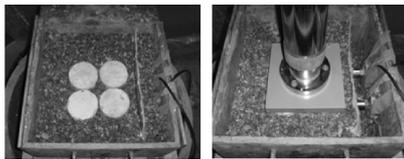


Fig. 7 Direct shear test of concrete and crushed stone



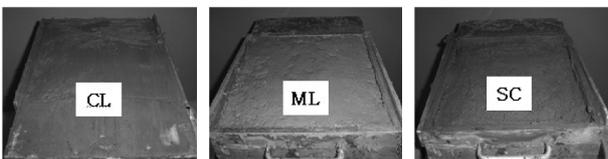
(a) Setting up gauge (b) Carrying out base (c) Loading

Fig. 8 Loading transmission test for overburden pressure



(a) Setting up plate and gauge (b) Loading

Fig. 9 Lateral stress acting on pile part of Top-base



(a) Species of clayey soil



(b) Assembling and loading

Fig. 10 Stress measurement test passed in ground

위해서 기초저면에 실험대상 지반인 CL, ML, SC 시료를 대형전단 상자의 반쪽부분에 D_f 까지 채우고 그 하부에는 상기 실험과 동일하게 토압계를 설치하였다. 여기에 하중전달 모형실험과 동일한 하중을 재하한 후 접지압을 측정하였다.

Fig. 10은 기초저부에 적용된 CL, ML, SC 시료가 채워지고, 기초부분과 지반부분을 일체시킨 후 하중을 재하하는 전경이다.

3.3 하중전달 모형실험결과 및 분석

팽이기초와 쇄석과의 마찰력을 쇄석의 탄성변형에 의한 에너지 소산 및 위치철근의 휨강성을 포함한 힘의 합력으로 도식화하면 식 (6)과 같다.

본 실험에서 팽이기초 자체의 자중을 배제하는 것은 상재하중 q 가 기초 내부의 하중전달 메커니즘에 의해서 어느 정도 상쇄되는 지를 확인하기 위함이며, 이를 위해 접지압 측정시 토압계 위에 기초를 타설하고 토압계의 영점을 조절한 후 실험을 수행하였다.

$$q = \text{평균접지응력} \left(\frac{q'' + q'''}{2} \right) + \text{주면마찰력} + \text{쇄석의 탄성변형} + \text{위치철근의 휨강성} \quad (6)$$

여기서, q'' : 팽이기초 끝단에 전달된 접지응력

q''' : 기초저면 쇄석부에 전달된 접지응력

3.3.1 팽이기초와 쇄석에 작용하는 마찰력

직접전단실험을 통하여 모형팽이기초를 구성하는 콘크리트와 본 연구에서 사용된 축소된 쇄석사이의 마찰계수를 측정하였다.

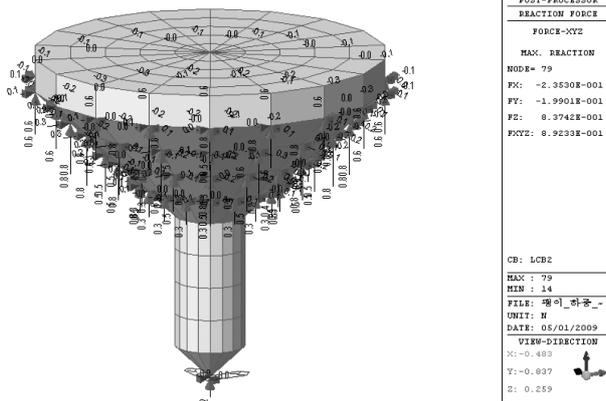
연직하중 127.4, 221.48, 379.3 kPa에 대한 전단강도의 peak 값을 연결한 선으로 콘크리트와 쇄석이 움직임 없이 마찰력에 의해서 정지할 수 있는 최대정지마찰력을 의미하고 이때의 기울기인 $\tan \phi_s$ 는 최대주면마찰계수가 된다.

다음 Table 1은 직접전단실험 결과를 통해 산정한 마찰계수를 나타낸다.

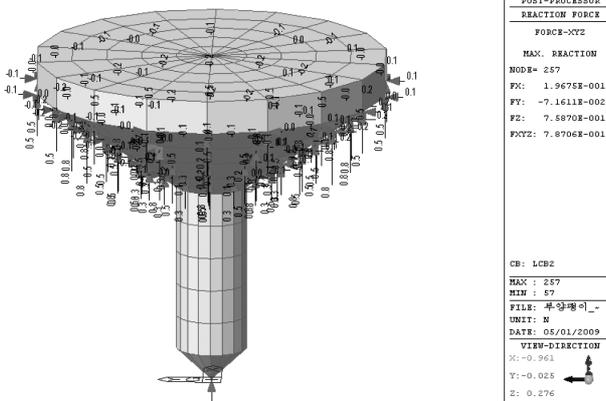
상기 측정된 마찰계수를 통해 쇄석과 팽이기초 사이의 주면마찰력을 계산하기 위해서는 상부하중에 대한 원추부의 경사면과 말뚝끝단 경사면에 작용하는 연직분력을 산정해야한다. 이에 구조해석 범용 program인 MIDAS/

Table 1 Friction coefficient of concrete and crushed stone

구분	ϕ_s (°)	마찰계수
		$\tan \phi_s$
Test 1	9.4	0.17
Test 2	8.0	0.14



(a) Top-base



(b) Floating base

Fig. 11 Vertical reaction of cone department

CIVIL 2006을 사용하여 3차원해석을 수행하였다. Fig. 11은 수치해석 결과를 3차원으로 나타낸 것이다. 해석에 구현된 팽이기초의 크기는 실내실험모형 크기로 하였으며, 팽이기초의 경계면은 고정하여 절점에서의 반력분포를 확인하였다.

실내실험과 수치해석을 병행하여 팽이기초의 하중 메커니즘을 분석해 본 결과 상재하중 459N, 상재응력 20.38 kPa에 대하여 다음과 같은 결과를 도출하였다. 상재하중 q 는 팽이기초 내부의 반력으로 가정한 요소 중 주변마찰력과 쇄석의 탄성변형에 의하여 상재하중을 저감시키는 결과가 나타났다. 상기 결과에서 산출된 수치에 대하여 식 (6)으로 정리하여 하중저감에 관한 각 반력별 부담률로 정리하였다.

여기서, 마찰력은 응력으로 환산할 수 없기 때문에 각각의 반력에 대한 분석은 하중단위로 통일하였다.

Table 2의 결과에서 보면 팽이기초에 적용된 위치철근은 하중을 부담하는 역할은 없으며, 대부분 팽이기초와 쇄석과의 마찰력이 상재하중에 대한 반력으로 작용하며 쇄석의 탄성변형에 의해 약간부분 저감된다는 결과가 나타났다.

Table 2 Allotment ratio of load reduction (unit : N)

원추형 팽이기초				
상재하중	평균접지하중	주변마찰력	위치철근의 휨강성	쇄석의 탄성변형
459	346.1	109	0	3.9
부담률(%)		23.7	0	0.85
부양형 팽이기초				
상재하중	평균접지하중	주변마찰력	위치철근의 휨강성	쇄석의 탄성변형
459	322.77	121.6	0	14.63
부담률(%)		26.5	0	3.19

Table 3 Contact stress of foundation bottom

매트기초		원추형 팽이기초		부양형 팽이기초	
하중 (N)	응력 (kPa)	하중 (N)	응력 (kPa)	하중 (N)	응력 (kPa)
449.8	19.99	346.1	15.38	322.77	14.35

또한, 원추형 팽이기초의 경우 팽이기초와 쇄석사이에서 발생하는 마찰력이 대부분의 반력으로 작용하지만, 부양형 팽이기초의 경우 원추부 경사각의 증가로 하중을 분산시켜 쇄석 자체에도 하중을 분산하는 효과가 있으며 말뚝의 길이 증가로 인해 원추형 팽이기초에 비해 높은 주변마찰력을 얻을 수 있다.

3.3.2 팽이기초의 내부응력분산각(w')

팽이기초 내부의 하중전달 메커니즘에 관한 실험결과로 상재하중 459N(20.38kPa)의 등분포하중을 가하고, 접지면에 전달되는 응력을 측정하였다. 모형실험은 매트기초, 원추형 팽이기초, 부양형 팽이기초에 대하여 진행되었으며, 말뚝부와 쇄석부 저면에 토압계를 설치하여 접지압을 측정하였다. Table 3은 실험대상 기초저면에서 측정된 하중과 이를 응력으로 환산하여 나타낸 것이다.

Table 3을 통해 알 수 있는 사실은 매트기초의 경우 상재하중이 98% 기초저면에 전달되었으며, 원추형 팽이기초와 부양팽이기초는 각각 75, 70% 기초저면에 전달되었다는 것이다. 이는 팽이기초가 내부의 하중 메커니즘을 통해 상재하중을 저감시키는 결과라고 판단되며, 본 결과에서도 알 수 있듯이 부양형 팽이기초가 원추형 팽이기초에 비해 하중을 저감시키는 효과가 더 좋은 것으로 나타났다.

상기 결과를 토대로 국내에서 시공방법의 차이에 의해 일본에서는 고려되지 않았던 팽이기초 내부의 하중저감 효과에 의한 정방형 팽이기초의 내부응력분산각을 식 (2)를 이용하여 산정하면 원추형 팽이기초가 $w' = 12.8^\circ$, 부양형 팽이기초는 $w' = 16.0^\circ$ 로 나타났다.

여기서, 산정된 내부응력분산각은 지반의 반력과 팽이기초와의 상호작용으로 발생하는 일본에서 제안하는 응

Table 4 Angle of internal stress distribution

원추형 팽이기초	부양형 팽이기초
- 상재하중 P 에 대하여 내부응력분산각을 적용한 접지응력 $\frac{0.459kN}{(0.225 + 0.15\tan 42.8^\circ)^2 m^2} = 3.47kPa$	- 상재하중 P 에 대하여 내부응력분산각을 적용한 접지응력 $\frac{0.459kN}{(0.225 + 0.15\tan 46^\circ)^2 m^2} = 3.17kPa$
- 실내실험으로 측정된 접지하중 P 를 상재하중으로 하여 일본에서 제안하는 응력분산각 30° 를 넣어 적용한 응력 $\frac{0.346kN}{(0.225 + 0.15\tan 30^\circ)^2 m^2} = 3.56kPa$	- 실내실험으로 측정된 접지하중 P 를 상재하중으로 하여 일본에서 제안하는 응력분산각 30° 를 넣어 적용한 응력 $\frac{0.322kN}{(0.225 + 0.15\tan 30^\circ)^2 m^2} = 3.31kPa$

력분산각인 30° 에 고려되지 않은 팽이기초 내부의 하중저감효과를 나타내는 값으로 일본에서는 제안하고 있는 응력분산각에 합산되어야 한다.

기존 응력분산각인 30° 에 내부응력분산각을 산술적으로 합산하여 구한 접지응력과 기초저면에서 측정된 접지응력을 상재하중으로 일본에서 제시하고 있는 방법으로 응력분산각을 30° 로 하여 계산된 값을 Table 4에 비교해 보았다.

Table 4의 결과에서 두 값의 약간의 차이가 나는 것은 \tan 의 함수가 선형이 아니기 때문에 산술계산으로 적용된 $\omega + \omega'$ 의 값이 선형으로 증가하지 않기 때문이다. 이에 \tan 값에 대한 보정을 수행한 결과 원추형팽이기초의 총 응력분산각 $\omega_t = 41.8^\circ$ 이며, 부양형 팽이기초의 총 응력분산각 $\omega_t = 44.5^\circ$ 로 나타났다.

3.3.3 연약지반 D_f 에서의 하중분산효과

상기에 도출된 하중 메커니즘은 저면을 고정 상태로 구현하여 이상적인 하중분산효과를 구현한 것이다. 이에 연약지반과의 상호작용에 따른 하중분산효과를 확인하기 위하여 기초저면에서 D_f 까지 유사한 비배수전단강도를 갖게 배합한 실험대상 시료 CL, ML, SC에 대하여 Fig. 10과 같은 실험을 수행하였다.

본 모형실험은 응력분산각에 대한 고증으로 원추형 팽이기초와 부양형 팽이기초에 대하여 진행하였다.

상기 결과에서 알 수 있듯이 흙 종류에 따른 접지하중 분포는 $SC > ML > CL$ 순으로 나타났으며, 지반과의 상호작용에서도 원추형팽이기초에 비해 부양형 팽이기초가 지반에 전달되는 하중이 평균적으로 8.76% 저감되는 것으로 나타났다. 팽이기초와 지반사이에서 측정된 접지하중의 결과를 토대로 앞에서 측정된 팽이기초 저면의 접지하중에 대하여 흙 종류에 따른 지반에서의 응력분산각인 ω'' 을 산정해 보았다.

Table 5 Contact stress of ground bottom

점토					
상재하중		원추형 팽이기초		부양형 팽이기초	
하중(N)	응력(kPa)	하중(N)	응력(kPa)	하중(N)	응력(kPa)
459	20.38	130.75	5.81	118.9	5.28
점토질 실트					
상재하중		원추형 팽이기초		부양형 팽이기초	
하중(N)	응력(kPa)	하중(N)	응력(kPa)	하중(N)	응력(kPa)
459	20.38	136.93	6.09	126.42	5.62
점토질 모래					
상재하중		원추형 팽이기초		부양형 팽이기초	
하중(N)	응력(kPa)	하중(N)	응력(kPa)	하중(N)	응력(kPa)
459	20.38	147.33	6.55	133.27	5.92

Table 6 Angle of stress distribution on soft ground (unit : °)

원추형 팽이기초			부양형 팽이기초		
CL	ML	SC	CL	ML	SC
43.23	41.49	38.61	44.08	41.79	39.75

상기결과에서 알 수 있듯이 일본에서 제시하고 있는 지반에 일률적으로 적용하는 응력분산각 30° 는 팽이기초의 성능을 과소평가하는 결과라고 판단된다. 상재하중은 기초저면에서 내부응력분산각 만큼 분산되며, 분산된 기초저면의 하중은 다시 지반에서 지반의 종류에 따라 Table 6의 응력분산각으로 분산된다.

4. 결론

1. 부양형 팽이기초는 말뚝부의 길이 확장을 통한 주변 마찰력의 증진과 원추부 경사각의 완화로 인한 채움쇄석과의 하중분담을 동시에 얻을 수 있는 팽이기초라고 판단된다.

2. 내부분산효과를 포함한 원추형팽이기초의 총 응력분산각 ω_t 는 41.8° 이며, 부양형 팽이기초의 총 응력분산각 ω_t 는 44.5° 로 산정되었다.

3. 실험에 적용된 연약지반에서는 팽이기초 저면에 전달된 응력을 기준으로 기초저면의 응력은 지반의 종류에 따라 약간의 차이는 있으나 기초내부의 응력분산효과와 유사하게 응력이 분산되는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 김찬국, 이봉열, 김학문, “팽이기초에 대한 하중재하실험 사례 연구”, 한국지반공학회 2006년도 학술발표회 논문집, 2006, pp.669-674.
- 서울대학교, 팽이형 파일 공법, 연구보고서, 1995.

3. 이강일, 이정영, 홍기채, 황순중, “지내력 보강 기초인 현장타설형 팽이말뚝 기초공법”, 대한토목학회 2006년도 정기학술대회 논문집, 2006, pp.1685-1688.

4. 이종규, 김대훈 “탑-베이스(TOP-BASE) 공법: 연약지반과 호안방파블럭의 안정화를 위한 콘크리트 팽이형 파일공법”, 한국지반공학회, Vol. 6, No. 4, 1990, pp.75-77.

5. 이승, 정대열, 정효권, 이무철, “팽이기초의 형상에 따른 특성 분석”, 한국지반공학회논문집, 제24권, 2호, 2008, pp.15-25.

6. 山田清臣, 安川郁夫, 齊藤實, “軟弱地盤에 있어서 콘크리트팽이형블럭基礎의 現場載荷試驗”, 第21回, 土質工學硏安發表會講演集, 1986, pp.1281-1284.

7. 山田清臣, 齊藤實, 安川郁夫, “팽이型基礎의 沈下抑制效果에 對한 考察”, 第22回, 土質工學硏安發表會講演集, 1987, pp.1833-1836.

8. 荒井克彦, 町原秀夫, 大西有三, 小久保晴康, “軟弱地盤에 있어서 콘크리트팽이형블럭基礎의 室内模型實驗”, 第21回, 土質工學硏安發表會講演集, 1986, pp.1285-1286.

9. 荒井克彦, 町原水夫, 清水活美, 大西有三, “軟弱地盤에 있어서 콘크리트팽이형 블럭基礎의 支持力向上效果”, 第22回, 土質工學硏安發表會講演集, 1987, pp.1131-1132.

10. 荒井克彦, 大西有三, 安川郁夫, “軟弱地盤에 있어서 팽이型基礎의 變形과 支持特性 및 地盤災害防上에 있어서 新材料新工法の 適用”에 關한 심포지움 論文集, 西日本工業大學 地盤工學硏究所, 1990, pp.95-104.

11. Nichols, John R., “Two-way Slabs in the Proposed Building Code for BOSTON AND NEW ENGLAND”, ACI, Journal Proceedings, Vol. 30, 1934.

12. Arai, K., Ohnishi, Y., Horita, M., Yasukawa, I., and Nakaya, S., “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, 1988, pp. 625-630.

(접수일자 : 2009년 9월 14일)
 (1차수정일자 : 2010년 2월 2일)
 (심사완료일자 : 2010년 2월 11일)

요 지

팽이기초에 대한 일본과 국내에서 현재까지 공통적으로 연구되고 있는 것은 팽이기초의 현장재하실험에 대한 지지력과 침하량에 주목되어 있다. 그러나 팽이기초에서 선행되어야 할 연구는 공법 자체가 상재하중을 하부에 어떠한 원리로 전달되는 지에 대한 분석이 수행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 일본에서 개발된 Top-Base Foundation과 국내에서 개발된 부양형 팽이기초의 응력전달 메커니즘을 수치해석 및 실내모형실험을 통하여 분석하였다. 팽이기초의 하중전달 메커니즘을 분석한 결과 상재하중에 대한 팽이기초 자체의 하중저감 부담률은 주로 팽이기초와 쇄석사이에서 발생하는 주변마찰력이 가장 크게 나타났다. 또한, 팽이기초의 내부응력분산효과를 포함한 Top-Base Foundation의 총 응력분산각은 41.8°이며, 부양형 팽이기초의 총 응력분산각은 44.5°로 산정되었다.

핵심 용어 : 부양형 팽이기초, 탑-베이스 팽이기초, 지지력, 침하량, 응력분산각