

## 사질토 지반에서 Shell 기초 거동에 대한 연구

### A Study on Shell Foundation Behaviour in Cohesionless Soil

김 상 환<sup>1</sup> Kim, Sang-Hwan

정 용 수<sup>2</sup> Jung, Yong-Su

고 동 필<sup>3</sup> Ko, Dong-Pil

강 소 라<sup>4</sup> Kang, So-Ra

#### Abstract

In this paper, the behaviour of shell foundation was studied. In the theoretical program, the general shallow foundation theories and failure mechanism developed by Terzaghi, Meyerhof and others were reviewed and compared. In the numerical study, the 2 and 3 dimensional FEM simulations were carried out using an uncoupled-analysis approach. The results obtained from the model test show that the bearing capacity of shell foundation was about 25% to 30% larger than that of general foundation. Due to the cases of shell angle, the maximum bearing capacity of shell foundation shows when the shell angle of foundation was 60°. In addition, even if the shell foundation has various advantages compared with the general foundations as described above, the practical verifications in full scale size will be necessary to use in the field and will be helpful in the technical development of other special foundations.

#### 요 지

본 논문은 기초의 거동에 영향을 주는 여러 가지 인자 중 특히, 기초형상에 변화를 주었을 경우 기초의 거동에 초점을 두고 연구하였다. 기초형상으로는 시공성 및 경제성이 가장 우수하다고 판단되는 Shell기초 형태를 제시하였고 수치해석 및 실내모형시험을 실시하여 도출한 결과 값과 Terzaghi, Meyerhof등의 이론값을 비교·분석하였다. 그 결과, 일반기초에 비해 Shell 기초의 침하는 15%정도 크게 발생하는 것으로 나타났으나, 지지력은 20%~25% 정도 향상되는 결과를 얻었다. 특히 Shell 기초 60°인 경우 일반 기초에 비해 33%의 지지력이 향상되는 것을 알 수 있었으므로 연구된 기초형상이 실용화 되면 경제성과 안정성이 확보된 기초 설계기술에 공헌할 것으로 기대 된다.

**Keywords :** Cohesionless soil, Model test, Shell angle, Shell foundation, Upper boundary theorem

#### 1. 서 론

기초란 상부구조물의 하중을 지반에 전달하는 하부구조물을 말하며 기초공사는 하부구조와 지반사이의 상호작용에 대한 이해를 필요로 하는 중요한 공정이다. 이러한 기초공사를 시행하기 위해서는 기초지반의 지지력 및 침하량과 기초를 지지하는 지반의 거동 및 응력과 관련

된 변형조건, 흙의 공학적 특성(D.L. Karabalis, 2005)등을 면밀히 고려해야 하며 기초의 구비 조건에 부합하는 설계가 이루어져야 한다. 기초의 설계는 구조물의 안정성과 직결되는 만큼 과도한 안전율을 적용한 안정성 위주의 접근방식을 채택하여 발전해 온 것이 오늘날의 실정이다. 구조물들이 대형화됨에 따라 기초의 크기도 비대해져 경제적인 측면에서는 매우 불합리한 설계가 이

1 정희원, 호서대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hoseo Univ., kimsh@hoseo.edu, 교신저자)

2 호서대학교 토목공학과 석사과정 (Master Course, Dept. of Civil Engrg., Hoseo Univ.)

3 정희원, 호서대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Master Course, Dept. of Civil Engrg., Hoseo Univ.)

4 정희원, 건국대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Master Course, Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

루어지고 있으며 안정성이 입증된 획일화된 형태의 기초 형식이 주를 이루고 있다. 따라서 본 연구에서는 기초의 형상에 따른 지지효율에 대한 유사 이론들의 검토와 근입 깊이, 지반조건 등에 따른 지지력의 관계를 분석하여 특수한 형태의 기초에 부합되는 이론식을 제시하였다. 또한, 수치해석 및 실내 모형시험을 통한 최적의 효율을 갖는 기초의 형상을 도출하여 경제성과 안정성을 고루 갖춘 기초 형태의 방향을 제시 하는데 목적이 있다(정상배, 2003).

## 2. 기초의 이론적 고찰

### 2.1 Shell 기초의 현황

Shell 기초의 형식으로는 그림 1과 같이 원형과 사각형을 기본으로 형태를 변화시킨 Conical foundation과 Folded plate foundation이 있으며 그 외에 Inverted arch foundation, Elliptic paraboloid foundation, Hyperbolic paraboloid foundation 등이 있다. 그림 1의 (a)와 같은 Conical 형태의 기초는 좁은 바닥에서 높은 지지력이 필요한 고층 통신타워 등에 사용되며 (b)와 같은 형태는 연결기초나 전면기초 등으로 하중을 분산시키는 기초 형태로서 유용하게 쓰이고 있다.

이와 같은 Shell Foundation은 Conical 형태의 기초 종류에 속하는데 이미 국외에서는 Kurian에 의해서 많은 연구가 진행되었으며 그중에서 수직하중에 따른 침하거동에 의한 기초와 지반 파괴율을 연구한 결과 Spherical dome sector형상의 기초와 일반적인 원형, 사각형 형태의 기초들 보다 상대적으로 기초침하로 인한 지반파괴에 대한 안전율이 높다는 연구 결과가 보고되고 있다.

### 2.2 기초의 지지력 이론

#### 2.2.1 일반 기초의 지지력 이론

Terzaghi는 기초에 의한 파괴 형상을 직선과 대수나선의

결합으로 가정하고 극한지지력공식을 유도하였다. 이때에 기초저면보다 위쪽에 있는 지반의 전단저항은 무시하고 단순히 상재하중으로 처리하여 식 (1)과 같이 표현 하였다.

$$q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q \quad (1)$$

Meyerhof는 Terzaghi의 파괴메카니즘과 유사하지만, 기초 바로 아래의 썩기형 파괴체의 각도가 다르고 파괴면이 대수나선과 직선으로 지표면까지 연장되는 파괴 형상을 가정하여 극한지지력공식을 유도하였으며 기초저면보다 위쪽에 있는 지반의 전단저항을 고려하였다. Meyerhof의 극한지지력 계산식은 Terzaghi의 식과 같은 모양이며 다만 지지력계수  $N_c$ ,  $N_\gamma$ ,  $N_q$ 만 다를 뿐이며 지지력계수는 식 (2)와 같다.

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}), \quad N_c = (N_q - 1) \cot \phi, \\ N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi) \quad (2)$$

Hansen의 이론은 Meyerhof의 제안한 식을 확장한 것으로 두 이론 모두 형상계수, 깊이계수, 경사계수의 사용을 제안하였으며 Hansen의 이론은 사면에 설치된 footing에 대한 조건을 고려한 지표면경사계수, 기초저면경사계수를 추가적으로 제시하였다. 이러한 Hansen의 이론적 값은 Meyerhof의 이론적 값보다 약간 보수적(안전측)이며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_u = c N_c s_d i_b g_c + \bar{q} N_q s_q d_q i_q b_q g_q + \frac{1}{2} \bar{\gamma} B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma \quad (3)$$

#### 2.2.2 Shell 기초의 지지력 이론

##### 2.2.2.1 개요

지반공학에서의 안정문제를 취급할 때, 대부분의 경우 흙을 소성체로 본다. 지반 내에서 구속된 소성유동영역(contained plastic deformation region)에 대한 완전한 해석은 너무 복잡하고 비효율적이다. 이에 따라 기존의

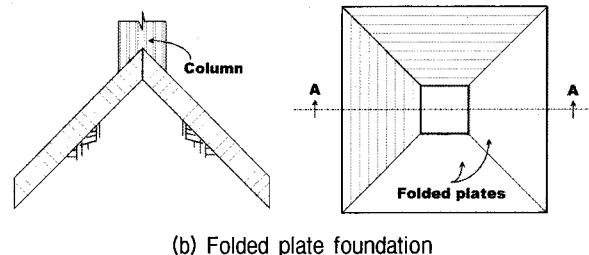
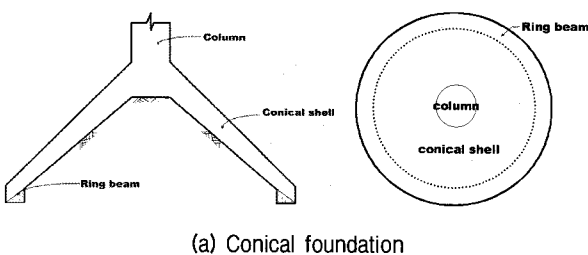


그림 1. Shell 기초 유형

소성 이론에 근거를 둔 Slip line법, 극한평형법에 비해 흙의 응력-변형률 관계를 이상적으로 고려하면서도 복잡한 하중 조건하에서 실질적인 파괴하중을 얻을 수 있고 파괴형태도 상대적으로 간단한 한계이론해석법(limit theorem)을 적용하고자 한다.

### 2.2.2.2 상한치이론(Upper bound theorem)

상한치이론이란 외부하중 및 체적력(body force)이 한 일이 지반 내부에서 소산된 에너지와 같게 되는 변형 메카니즘이 존재한다면, 이 외부하중과 체적력의 합은 파괴를 야기할 수 있는 하중의 상한 값을 나타낸다는 것이다. 이와 관련한 어떤 가정상의 오차도 정해( $F_s$ )보다 큰 파괴하중( $F_u$ )상태에 있게 된다.

이 방법에는 Chen의 속도장법과 Atkinson의 변위법이 있다. 두 방법의 기본 가정은 같으나 차이점이 있다. 속도장법은 외력이 한 일(지지력)이 기초 폭(B)에 작용하는 외력(F)에 대해 단위중량( $\gamma$ )을 갖는 파괴면의 토괴 블록이 중력방향으로 행한 일의 성분이고, 내부소산은 파괴면에서의 상대적인 속도 불연속량에 점착력(c)을 곱한 것으로 이들을 같다고 놓아 파괴하중을 구하게 되는데 이와 같은 방법으로 상한치 해가 구해진다. 이 방법은 내부소산을 구하는 경우에 반드시 점착력 항을 포함하게 되어 있어 점착력이 없는 사질토에서는 내부 에너지 소산이 0이 된다. 변위법에서는 직교 조건을 만족하는 완전소성재료에 대해서 내부응력에 의해 행해진 일의 증분( $\delta W$ )은 항상 0이고 이는 모든 경우의 배수하중조건에 해당한다고 정의한다.

### 2.2.2.3 Shell strip foundation의 파괴 메카니즘 가정

본 연구에서는 그림 2의 (a)와 같이 지표면에  $\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi + \beta$ 만큼 기울어져 기초 아래방향으로  $V_p$ 의 속도가 작용하는 삼각썰기 abc,  $\frac{1}{2}\pi$ 의 중심각을 가진 대수나선

전단 부분 acd, 지표면에  $\frac{1}{4}\pi - \frac{1}{2}\phi - \beta$ 만큼 기울어진 강체썰기 ade로 구성된 Prandtl mechanism을 적용하고자 한다. 이 메카니즘은 상계법에 근거하였다. 선 ac, bc와 cde, cfg는 불연속선이며, 지반아래 파괴선 cde는 정지상태로 존재하고 이 선을 따라  $\phi + 2\beta$ 의 경사로 속도가 작용한다. 폭 B를 가진 축 대칭 기초로 반단면의 소성흐름영역만 고려하기로 한다.

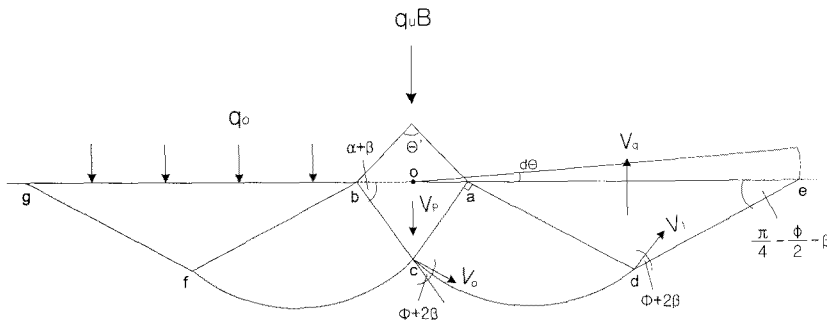
그림 2의 (a)에서 볼 수 있듯이 Shell 기초는  $\theta'$ 의 각을 이루고 있으며  $\theta'$ 가 변하면 기초아래 지반의 파괴형상과 함께 극한지지력도 변하게 된다. Terzaghi(1943)는  $\theta' = 180^\circ$ 인 일반 연속기초의 파괴형상에서 abc와 bac의 각을  $\alpha$ 로 가정하였다. 이 때  $\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}$ 이며 Shell 기초의  $\theta'$ 를 고려하기 위해 Hanna, A.M.(1990)은  $\beta$ 라는 Shell 형상에 따른  $\alpha$ 의 증가량을 가정하였다. 그는 가상 파괴 면을 설정하여 실험한 결과  $\beta = \frac{1}{120}(180 - \theta')$ 라는 식을 얻게 되었다.

그림 2의 (a), (b)와 같은 파괴메카니즘과 변위도를 통하여 다음과 같이 흙의 자중을 고려한 부착력이 있는 흙의 내부 소산율과 외부 일률은 같으므로 식 (7)과 같이  $q_u$  값을 나타낼 수 있는데 이를 식 (8)과 같이 정리하여 극한지지력 공식을 유추 할 수 있고 각각의 지지력 계수는 식 (4), (5), (6)과 같다.

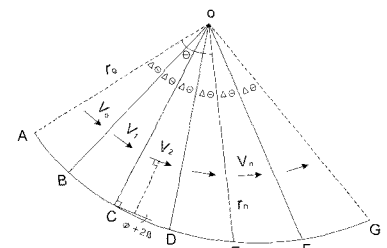
$$N_{\alpha} = \cot(\phi + 2\beta) \left\{ e^{\pi \tan(\phi + 2\beta)} \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \beta\right) - 1 \right\} \quad (4)$$

$$N_{qt} = e^{\pi \tan(\phi + 2\beta)} \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \beta\right) \quad (5)$$

$$N_{\beta} = \frac{1}{4} \tan\left(\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi + \beta\right) \left[ \tan\left(\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi + \beta\right) e^{\frac{3}{2}\pi \tan(\phi + 2\beta)} - 1 \right] + \frac{3 \sin(\phi + 2\beta)}{1 + 8 \sin^2(\phi + 2\beta)} \left[ \tan\left(\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi + \beta\right) - \frac{\cot(\phi + 2\beta)}{3} e^{\frac{3}{2}\pi \tan(\phi + 2\beta)} \right] + \tan\left(\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi + \beta\right) \frac{\cot(\phi + 2\beta)}{3} + 1 \quad (6)$$



(a) 파괴메카니즘



(b) 변위도

그림 2. Triangular shell strip foundation의 거동

$$q_u = \frac{1}{2}\gamma B \left\{ \frac{1}{4} \tan\left(\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi + \beta\right) \left[ \tan\left(\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi + \beta\right) e^{\frac{3}{2}\pi \tan(\phi + 2\beta)} - 1 \right] + \frac{3\sin(\phi + 2\beta)}{1 + 8\sin^2(\phi + 2\beta)} \left[ \tan\left(\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi + \beta\right) - \frac{\cot(\phi + 2\beta)}{3} e^{\frac{3}{2}\pi \tan(\phi + 2\beta)} \right] + \tan\left(\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi + \beta\right) \frac{\cot(\phi + 2\beta)}{3} + 1 \right\} \quad (7)$$

$$q_u = cN_{ct} + q_o N_{qt} + \frac{1}{2}\gamma B N_{\gamma t} \quad (8)$$

상기 식을 통한 평면기초와 대상 Shell기초의 이론적인 지지력계수를 비교하기 위하여 기초가 이루는 각( $\theta$ )을  $60^\circ \sim 180^\circ$ 까지 변화시켜가며 흙의 내부마찰각이  $0^\circ \sim 40^\circ$ 일 때의 각각의 지지력계수를 표 1에서 나타내었다. 기초가 이루는 각이  $180^\circ$ 인 경우는 일반기초라고 할 수 있으며 기초가 이루는 각이 클수록 지지력계수가 점차 감소하는 것으로 확인되었다.

### 2.3 일반기초와 Shell기초 극한지지력( $q_u$ )의 이론적 비교

일반기초와 Shell기초의 극한지지력을 비교하기 위해 기초 및 지반의 조건을 동일시하였으며( $D=10m$ ,  $P=10t$ ,  $C=5t/m^3$ ,  $\phi=30^\circ$ ,  $r=1.8t/m^3$ ) 일반기초는 Terzaghi의 식을 적용하고 셸기초는 식 (8)의 식으로 극한지지력을 산정하였다. 그 결과 표 2와 같은 결과 값을 얻을 수 있

었다.

극한지지력 비교결과 Shell 기초( $60^\circ$ )일 때 일반 원형기초보다 극한지지력이 약 16% 증가한 것으로 보아 Shell 기초의 여러 형태 중  $60^\circ$ 일 때 가장 이상적인 형상이라고 판단된다.

### 3. 수치해석의 조건 및 방법

일반적으로 사질토와 같이 투수성이 좋은 흙으로 구성된 지반에서 하중 변화에 의해 발생된 과잉간극 수압은 단기간에 소산된다. 따라서 포화된 사질토 지반의 간극수압은 0으로 볼 수 있으며 전응력은 유효응력과 같다고 할 수 있다. 반면 투수성이 낮은 점토질의 지반은 하중의 일부분을 간극수가 부담하며 간극수압이 증가되는 동안에도 흐름이 거의 발생하지 않는다. 즉, 간극수압의 소산이 일어나지 않으며 비압축성 탄성 거동을 보인다. 물론 이는 하중재하속도 개념을 고려하여 설명되어야 하지만 일반적인 지반 구조물의 건설 시간을 고려할 때 점토질 지반은 단기적으로는 비배수 거동을 보인다고 할 수 있다. 위의 두 경우를 정리하면 사질토 지반의 거동과 점토질 지반의 단기거동은 각각 완전 배수조건과 완전 비배수 조건으로 고려할 수 있다. 이러한 경우 지반의 거동은 시간 경과에 따른 간극수의 흐름

표 1. 지지력계수

$\theta$	$N_{ct}$					$N_{qt}$					$N_{\gamma t}$				
	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 10^\circ$	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 40^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 10^\circ$	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 40^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 10^\circ$	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 40^\circ$
$60^\circ$	5.632	9.285	16.883	35.490	93.706	1.197	2.974	7.821	23.177	85.374	0.146	1.670	6.831	27.796	145.260
$70^\circ$	5.588	9.201	16.698	34.999	91.965	1.179	2.928	7.690	22.728	83.322	0.132	1.627	6.679	27.115	140.827
$80^\circ$	5.546	9.119	16.517	34.516	90.265	1.161	2.883	7.562	22.290	81.329	0.119	1.585	6.530	26.453	136.549
$90^\circ$	5.504	9.037	16.337	34.042	88.605	1.144	2.839	7.435	21.861	79.391	0.106	1.544	6.384	25.809	132.420
$100^\circ$	5.462	8.956	16.161	33.577	86.985	1.127	2.795	7.312	21.442	77.508	0.093	1.504	6.241	25.182	128.434
$110^\circ$	5.420	8.877	15.987	33.120	85.403	1.110	2.752	7.190	21.032	75.677	0.081	1.464	6.102	24.572	124.585
$120^\circ$	5.379	8.798	15.815	32.671	83.858	1.094	2.710	7.071	20.631	73.897	0.069	1.426	5.966	23.978	120.868
$130^\circ$	5.339	8.720	15.646	32.230	82.350	1.078	2.669	6.954	20.239	72.166	0.057	1.388	5.833	23.400	117.278
$140^\circ$	5.298	8.644	15.479	31.797	80.876	1.062	2.628	6.839	19.855	70.483	0.045	1.351	5.702	22.837	113.810
$150^\circ$	5.259	8.568	15.314	31.372	79.437	1.046	2.588	6.726	19.479	68.845	0.033	1.314	5.575	22.289	110.460
$160^\circ$	5.219	8.492	15.152	30.954	78.030	1.030	2.548	6.615	19.112	67.252	0.022	1.279	5.450	21.756	107.222
$170^\circ$	5.180	8.418	14.992	30.543	76.656	1.015	2.510	6.506	18.753	65.703	0.011	1.244	5.328	21.237	104.092
$180^\circ$	-	8.345	14.835	30.140	75.313	1.000	2.471	6.399	18.401	64.195	0.000	1.209	5.209	20.731	101.067

표 2. 극한지지력 비교

기초형태	일반기초(사각형)	일반기초(원형)	Shell 기초( $120^\circ$ )	Shell 기초( $90^\circ$ )	Shell 기초( $60^\circ$ )
극한지지력 ( $t/m^2$ )	603.87	569.44	585.47	621	705.93

변화를 고려하지 않아도 되므로 이는 지반의 Uncoupled 거동에 해당한다고 할 수 있다.

이와 같은 사실을 바탕으로 본 해석은 기초의 파괴수준 검토가 아닌 일반적인 사질토 지반에서의 기초 형상별 하중-침하 곡선을 비교하기 위함이므로 Uncoupled-analysis 를 수행하였다.

### 3.1 수치해석을 통한 근입깊이 결정

본 해석은 특수기초의 실내모형시험에 대한 현상 분석과 함께 여러 가지 Case의 기초들에 대한 침하와 기초 저면의 응력상태를 파악하고 기초의 거동을 분석하여 기초의 근입깊이를 결정하기 위한 목적으로 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 적용 물성은 표 3과 같으며, 지반 및 기초의 모델링은 Ground support(지반 경계 조건 설정)기능을 사용하여 나타내었으며 그 결과는 그림

3와 같다.

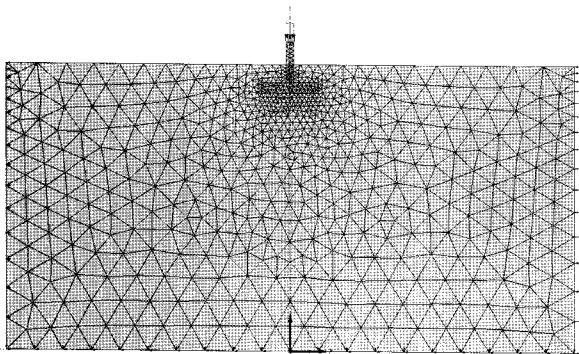
기초의 근입깊이에 따른 변위를 해석해 본 결과 그림 3과 같이 기초의 모든 저면에서  $D_f/B=75\%$ 에서 침하가 가장 적게 발생하는 것을 알 수 있었으며, 이와 더불어 근입 깊이 별 응력을 분석하여 본 결과 그림 4와 같이  $D_f/B=50\%$ 에서 가장 크게 발생하였고 변위의 결과와 같이  $D_f/B=75\%$ 에 가장 적은 응력 값을 나타내었다. 따라서 수치해석 결과  $D_f/B=75\%$  일 때 가장 적합한 근입 깊이로 판단하여 3D 수치해석과 모형시험에서 이를 적용하였다.

### 3.2 Shell 기초 변위 및 응력 검토를 위한 3차원 수치해석

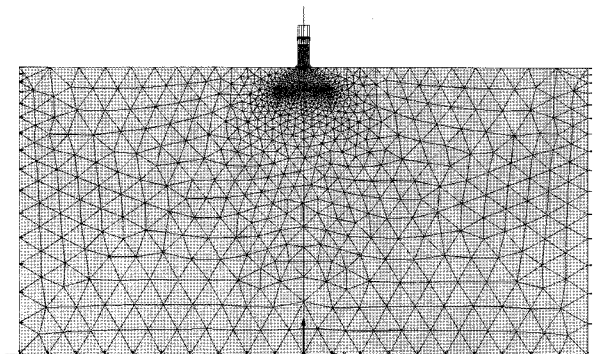
본 해석은 특수기초의 실내모형시험과 비교 분석 하기 위하여 바닥 면적이 동일하도록 실시하였다. 해석에 사용된 물성치는 상기 해석에서 사용되어진 것과 동일하며,

표 3. 적용 물성

구성매질	$E(t/m^2)$	$\nu$	$\gamma(t/m^3)$	$c(kg/cm^2)$	$\phi$	type
지반(마사토)	170	0.3	1.69	2.63	$28^\circ$	mohr coulomb
기초(철·콘)	200000	0.3	2.5	.	.	elastic

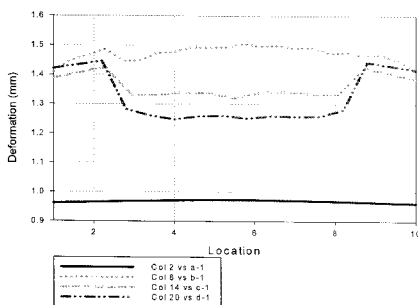


(a) Footing Foundation

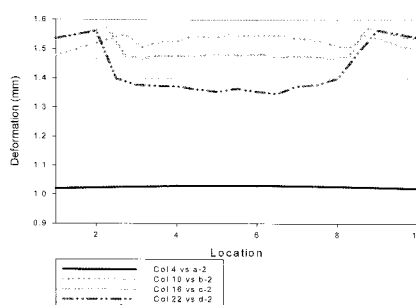


(b) Shell Foundation

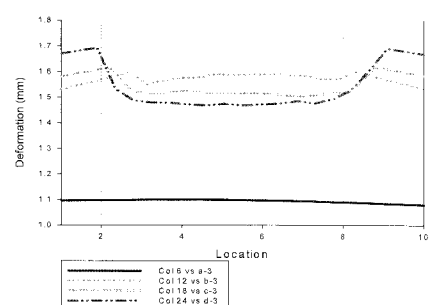
그림 3. 기초형상 모델링



(a)  $D_f/B=75\%$



(b)  $D_f/B=50\%$



(c)  $D_f/B=25\%$

그림 4. 기초의 근입 깊이 결정을 위한 변위

2D해석을 통하여 얻은 최적의 근입깊이  $D_f/B=75\%$ 를 적용하고 해석에 적용한 하중은 기초와 지반의 자중과 총 하중 1ton을 5단계로 나누어 각각 0.2ton 씩 증가하여 재하 하였으며, 경계조건은 Ground support(지반 경계 조건 설정)기능을 사용하였다. 이로 인해 좌우측 경계 부에는 UX방향, 모델 전·후방부분은 UY방향으로 변위를 제어하였으며, 모델 저면에는 각각 UX, UZ, UY방향으로 변위를 구속시켰다. 또한 기초의 영향반경을 고려

하여 충분한 크기의 지반을 조성하였고 하부, 좌·우측 및 전·후방 부 Boundary를 설정하였다. 여러 가지 형태의 기초들에 변위 및 응력상태를 해석 결과는 표 4~5와 같으며 분석한 결과 그림 6과 같다(Nainan P. Kurian 등, 2005).

해석 결과에서 보여 지듯이 각각 변위는 Shell 120° 및 90°에서는 다소 크게 나타났지만, 60°에서는 일반기초와 유사하게 나타났으며, 응력검토에서도 120°및 90°

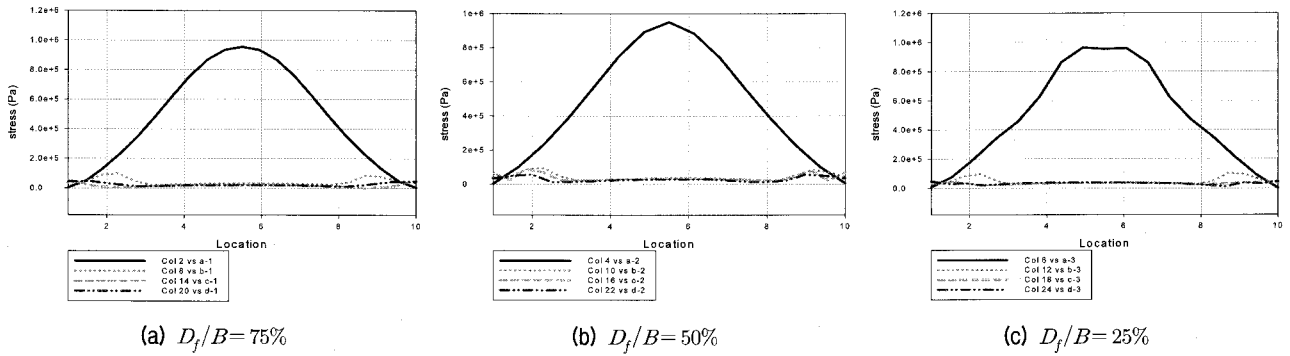


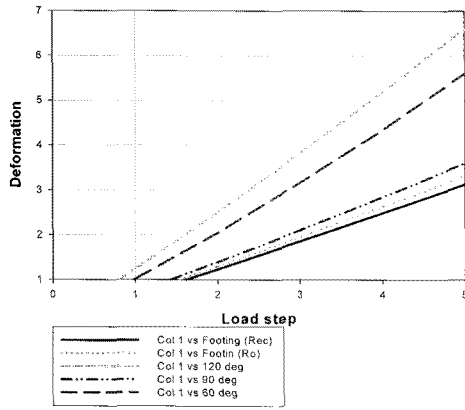
그림 5. 기초의 근입 깊이 결정을 위한 응력 검토

표 4. 대조군 기초(사각형, 원형)의 변위 응력 상태

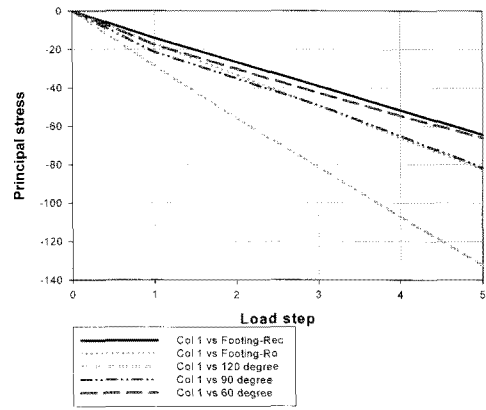
사각형기초		원형 기초	
변위	응력	변위	응력

표 5. 각 Shell 기초의 변위 응력 상태

구분	Shell 기초(120°)	Shell 기초(90°)	Shell 기초(60°)
변위			
응력			



(a) 변위(mm)



(b) 응력( $t/m^2$ )

그림 6. 변위와 응력의 양상

표 6. 기초 형태별 극한하중

기초형태	사각형기초	원형 기초	Shell 기초(120°)	Shell 기초(90°)	Shell 기초(60°)
극한 하중(ton)	0.58	0.52	0.58	0.61	0.63

에서는 크게 나타났고 사각 Footing기초와 Shell 60°에서 작은 응력을 가지는 것으로 나타났다.

위에서 제시한 대조군 기초(사각형, 원형)와 Shell 기초(120°, 90°, 60°)의 하중에 따른 침하량을 산정하기 위하여 3D 수치해석을 실시하였으며 제시된 기초의 변위를 도출하였다. 도출한 변위값에 Hansen의 정의를 인용하여 변위가 기초 폭의 10%일 때의 값을 극한하중 값으로 보고 표 6과 같이 기초 형태별 극한하중이 산정하였다. Shell 기초의 극한하중을 일반원형 기초에 비해 평균적으로 약 17%정도 높게 나타났다. 특히 Shell 60°에서는 약 21%정도의 극한하중이 증가 되는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 모형시험 내용 및 방법

기초의 형상을 달리한 특수한 형태의 기초형상(Conical shell foundation)과 기존 footing foundation을 동일한 조건하에서 시험함으로써 제하하중에 따른 기초의 지지력 및 침하량을 측정하고 결과를 비교 분석하여 Shell 기초의 우수성을 제시하고 이러한 우수성이 부피의 증

가가 아닌 구조적 우수성에 의한 향상임을 나타냄으로써 재료적 비용 절감에 따른 경제적 효율성을 역설하고 최적 형상을 제시하고자 한다.

#### 4.1 시험 장비 및 모형지반

본 시험의 지반조성은 표준사를 사용하며, 시험데이터 값의 신뢰성을 위하여 표준사의 기본 물성치를 재확인하고 강사 높이 조절이 가능한 강사기를 이용하여 느슨한 지반과, 중간 조밀한 지반을 조성하였다. 지반조성 후 일반 기초와 중심각을 달리한 Conical shell 기초 3가지로 시험 Case를 구성하였다. 또한 모형 기초 상부에 가해지는 하중을 로드셀을 통하여 측정함으로써 시험 오차를 줄였다(김병탁 등, 2001).

#### 4.2.1 지반조성재료 특성

본 시험의 시료는 동일한 토질정수를 확보할 수 있도록 주문진 표준사를 사용하였으며 재료의 특성은 표 7와 같다.

상대밀도(relative density)는 사질토의 조밀(dense)한

표 7. 모형시험 지반의 토질정수

최대건조밀도 ( $\gamma_{dmax}, t/m^3$ )	15.53	$D_{60}(mm)$	0.91	비중	2.59
최소건조밀도 ( $\gamma_{dmin}, t/m^3$ )	12.57	$D_{10}(mm)$	0.45	함수비(w, %)	0.32
최대 간극비	1.02	최소 간극비	0.61	균등계수(Cu)	2.02

표 8. 상대밀도시험 결과

지반조건	상대밀도(%)	간극비
모래지반	32	0.911

상태나 느슨한(loose)한 상태를 상대적으로 나타내는 요소로 0%부터 100% 사이의 값을 갖는다. 모형지반의 상대밀도를 측정하기 위하여 낙하 높이 및 낙하 속도에 따른 상대밀도시험을 실시하였으며 그 결과는 표 8과 같다.

#### 4.2.2 모형 원형 Shell기초의 제작

본 축소모형 시험에서는 원형 구조물과 모형 구조물 사이의 상사이론을 고려하여 축소 모형 시험을 실시하고 결과 값을 분석하여 시험적 결과의 신뢰성을 높이고 실제 적용을 위한 기준을 마련하고자한다. 원형과 모형의 상사관계 및 축척관계는 차원해석(Dimensional Analysis)이나 미분 방정식(Differential Equations)을 사용하여 구할 수 있으며 차원의 동차성원리(Principle of Dimensional Homogeneity)에 근거한다. 이러한 차원해석을 통한 시험적 연구는 시간, 비용 노력 등의 큰 절감으로 국외뿐만 아니라 국내에서도 시행되었으며, 좋은 결과를 얻은 바 있다. 차원해석을 고려하여 제작한 모형 기초는 사진 1과 같다.

#### 4.2.3 모형시험 방법

본 시험은 강사 높이를 조절하여 중간 조밀한 지반을 조성한 후 모형기초를 거치시켜 단계별 하중에 따른 각 기초 모형별 침하량과 극한지지력을 도출하기위한 실내시험으로 실내모형시험의 전경은 사진 2와 같다.

실내모형시험의 과정은 아래와 같다.

- 과정 1: 강사 높이를 조절하여 모래지반을 조성한다.
- 과정 2: Case별 기초 모형을 거치시킨다.

- 과정 3: 모형 shell 기초의 경우 기초안의 빈 공간에 모래를 넣어 채운다.
- 과정 4: 유압잭 설치 후 LVDT와 Load cell을 부착한다.
- 과정 5: 센서의 Initial 값을 체크 후 Zero 세팅한다.
- 과정 6: 하중은 7kg씩 단계별 하중을 제하하며 지반변위의 수렴시간은 20분으로 한다.
- 과정 7: 기초의 지지력이 극한에 다다를 때까지 실시 후 종료한다.

#### 4.2.4 모형시험 결과 분석

본 실험은 상대밀도가 상이한 모래지반에서 Shell 기초의 효과를 고찰할 목적으로 모형실험을 수행하였다. 모형 실내 시험의 각 기초별로 표 9와 같은 조건하에서 실시하고 오차를 줄이기 위해 각각 3회씩 실시하여 평균 침하량을 산정하였다(Dilip Kumar Maharaj, 2004).

일반 기초(사각형, 원형)와 Shell 기초(120°, 90°, 60°) 형태에 대한 각각의 최대 침하량을 측정한 결과 표 10와 같이 Shell 기초 모두 일반 기초에 비해 침하량이 크게 측정되었으나 그림 7과 같이 항복하중의 (3/2)배 값을 극한하중으로 측정하고 단위면적에 따라 지지력을 산정한 결과 Shell 기초의 지지력은 큼을 알 수 있었다. 그

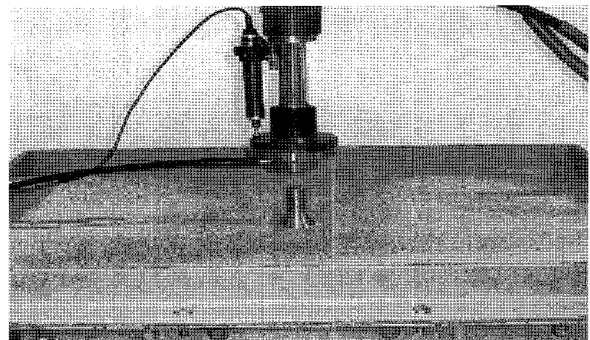
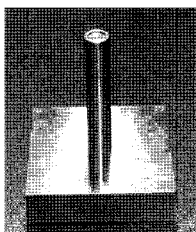
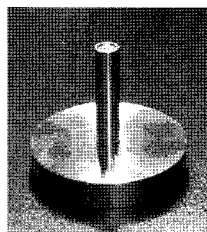


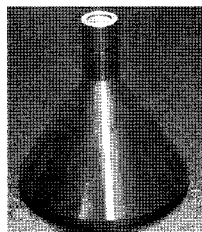
사진 2. 실내모형시험 전경



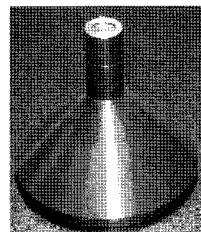
(a) 사각형 기초  
(바닥면적:77.44cm<sup>2</sup>)



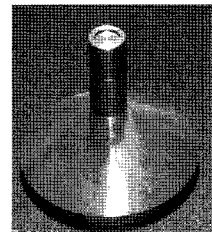
(b) 원형 기초  
(바닥면적:78.5cm<sup>2</sup>)



(c) Shell 기초 60°  
(바닥면적:78.5cm<sup>2</sup>)



(d) Shell 기초 90°  
(바닥면적:78.5cm<sup>2</sup>)



(e) Shell 기초 120°  
(바닥면적:78.5cm<sup>2</sup>)

사진 1. 모형 기초의 제작



표 9. 모형시험조건

지반조건	단위중량	상대밀도	기초종류
모래지반	13.65(t/m <sup>3</sup> )	32%	평면기초
			원형기초
			Shell 기초 60°
			Shell 기초 90°
			Shell 기초 120°

표 10. 기초형태 및 지반상태에 따른 최대 침하량

기초형태	사각형기초	원형 기초	Shell 기초 (120°)	Shell 기초(90°)	Shell 기초(60°)
최대 침하량	0.82mm	0.85mm	0.88mm	0.92mm	1.01mm

표 11. 기초 형태별 지지력

기초형태	사각형기초	원형 기초	Shell 기초(120°)	Shell 기초(90°)	Shell 기초(60°)
극한지지력(kg/cm <sup>2</sup> )	0.26	0.22	0.27	0.28	0.29

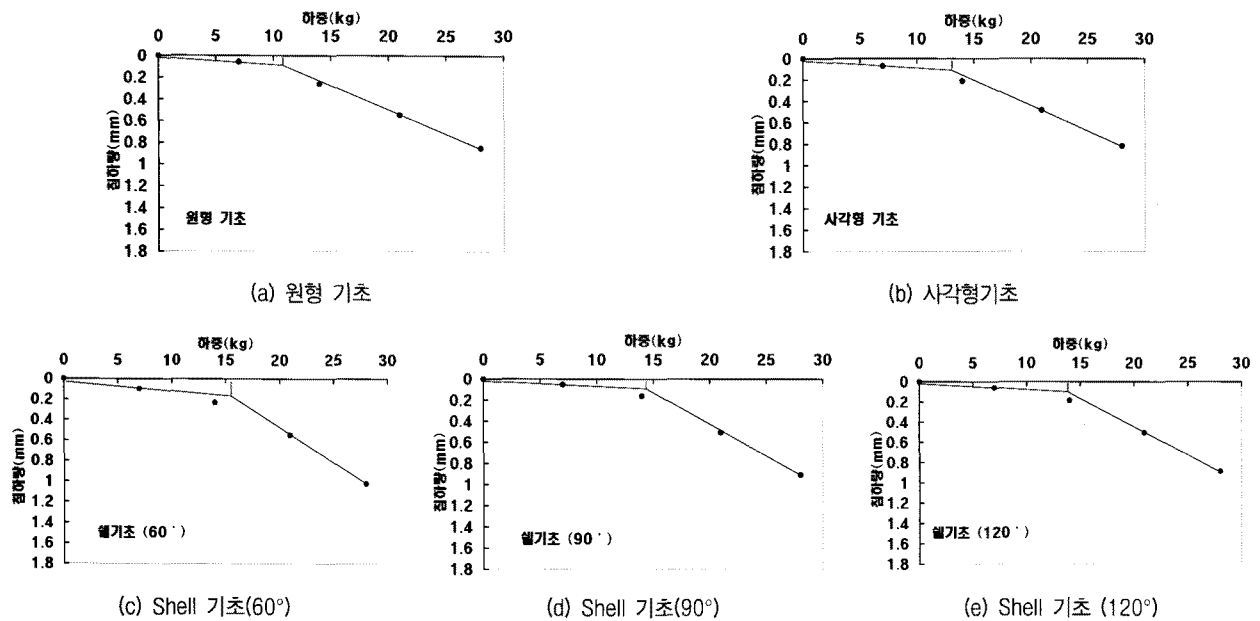


그림 7. 하중에 따른 침하량

결과 일반원형기초에 비해 Shell기초의 지지력이 약 27% 정도 높은 것으로 나타났으며 특히 중심각 60°의 Shell 기초에서는 약 31%정도의 지지력을 더 가지는 것을 알 수 있었다.

### 5. 결론

본 논문은 “모래지반에서 기초형상 변화에 따른 기초의 거동”에 대한 실험적 연구로서 기초의 거동에 영향을 주는 여러 가지 인자 중 기초형상에 초점을 두었다. 이에 따라 문헌연구를 통하여 일반기초 형태와 특수기초 형태의 이론적 배경 및 현황에 대해 고찰하여 비교

분석함으로써 경제성 및 구조적으로 가장 우수하다고 판단되는 Shell 기초 형태 중 Conical shell 형태를 제시 하였으며 Conical shell 기초의 우수성을 검증하기 위하여 중심각을 달리한 Conical shell 기초형상에 대한 수치 해석 및 실내모형시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) Terzaghi 및 Mayerhof 등의 얇은기초의 일반적인 파괴 메커니즘을 비교 분석하고 이를 바탕으로 하여 Shell 기초의 이론은 상한치 이론을 적용함으로써 Shell 기초의 이론적 지지력을 고찰하여 본 결과 Shell 기초의 지지력이 일반기초보다 15% 더 큼을

알 수 있었다.

- (2) Shell 기초의 최적의 근입 깊이를 도출하기 위하여 근입 깊이를  $D_f/B=75\%$ ,  $50\%$ ,  $25\%$ 로 각각 나누어 Uncoupled-analysis 방법을 이용한 2차, 3차원의 수치해석을 실시하였다. 수치해석 결과 근입 깊이가  $D_f/B=75\%$ 일 때가 최적 근입 깊이인 것으로 나타났다.
- (3) 이론 및 수치 해석적 결과의 검증에 위하여 실내 모형시험을 실시하였으며, 일반기초 형상 2 Case와 Conical shell 형상 3 Case에 대한 재하시험을 수행한 결과, Shell 기초의 지지력이 일반기초에 비해 27%~31% 증가되었음을 알 수 있었다.
- (4) 일반 기초 및 Shell 기초의 중심각( $120^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ )에 따른 지지력을 비교 분석하기 위해 수치해석을 실시한 결과 하중에 따른 침하량은 Shell 기초가 일반기초에 비해 크게 나타났지만, 하중과 침하량의 그래프로 지지력을 산정해 본 결과 Shell 기초가 일반기초에 비해 지지력이 평균적으로 높게 나타났고, 특히 Shell  $60^\circ$ 에서는 31%정도 높게 나타났다.

본 연구를 통하여 제시된 Shell 기초가 기존의 일반적인 기초의 형태보다 경제적으로 우수함을 검증하였다. 하지만 제시된 구조물이 대형 토목구조물인 만큼 현장에 적용하기 위해서는 실대형의 현장시험을 통한 실질

적인 검증이 이루어져야 할 것으로 판단되며, 이 연구를 통하여 다른 특수한 형태의 기초 연구 및 기술적 발전에 도움을 줄 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 호서대학교 교내 “기초형상에 따른 지지력 변화에 대한 연구(과제번호20050238)”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김병탁, 김영수, 이종현 (2001), “2개층 사질토지반에서 정방형 기초의 지지력 특성”, *한국지반공학회 논문집*, 제 17권, 4호, pp.289-299.
2. 정상배 (2003), 팽이말뚝기초공법, 지질공학 단기실무강좌 -지반 개량 및 보강공법, pp.1-22.
3. D.L. Karabalis (2005), “Vibrations of square and circular foundations with concentric openings on elastic half space”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25, pp.951-965.
4. Dilip Kumar Maharaj (2004), “Finite element analysis of strip type shell foundation and its interaction”, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 9, Bundle B.
5. Nainan P. Kurian and V.M. Jayakrishna Devaki (2005), “Analytical studies on the geotechnical performance of shell foundations”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, Issue. 2.

(접수일자 2008. 6. 5, 심사완료일 2008. 7. 25)