

# 수치해석을 통한 기초지반의 파괴거동 고찰

이승현<sup>1</sup>, 장인성<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>선문대학교 토목공학과, <sup>2</sup>한국해양과학기술원 연안개발에너지 연구부

## Study on Behavior of Failure of Footing through Numerical Analysis

Seung-Hyun Lee<sup>1</sup>, In-Sung Jang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Sunmoon University

<sup>2</sup>Coastal Development & Ocean Energy Research Division,  
Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST)

**요약** 세 종류의 얇은기초를 지지하는 기초지반의 하중지지거동을 살펴보고자 모래지반과 점토지반을 가정하여 유한요소 해석을 수행하였다. 띠기초를 지지하는 모래지반의 파괴영역의 형상 및 크기는 상대밀도에 따라 달랐으나 점토지반의 경우 강도에 따라 파괴영역에 차이가 거의 없으며 이론에서 고려되는 파괴영역과 유사한 결과를 보였다. 모래지반에 대한 수치해석을 통해 얻은 하중-침하곡선의 형상을 고려해 볼 때 느슨한 모래에 놓인 기초의 경우 거의 관입전단파괴양상을 보였으며 조밀한 모래에 놓인 기초의 경우 극한하중이 뚜렷하지는 않았다. 점토지반에 놓인 기초에 대하여 수치해석을 통해 얻은 하중-침하량곡선의 경우 침하가 급격하게 증가하는 항복점이 존재함을 알 수 있었다. 모래지반에 의해 지지되는 기초에 대해 이론식에 의해 예측된 극한하중은 수치해석에 의한 극한하중보다 큰 값을 보였으며 점토지반에 대해 이론식에 의해 예측된 극한하중은 수치해석에 의한 극한하중과 유사한 값을 보였다. 1 인치 침하기준법에 의해 결정된 극한하중은 수치해석을 통해 얻은 극한하중보다 약간 작은 값을 보여 안전측의 결과를 보였다.

**Abstract** In order to find out the load bearing behavior of sand and clay which sustain three types of shallow footing, finite element analyses were performed. Failure zone of sand which sustain strip footing was affected by relative density of sand whereas, failure zone of clay was not affected by soil strength and it was similar to the failure zone which is considered in theory. Considering the shape of load-settlement curves obtained by numerical analyses, punching shear failure can be seen in loose sand and ultimate bearing load can not be seen in dense sand whereas, yielding point can be seen in clay. Ultimate bearing loads for sand predicted by theory were greater than those obtained by numerical analyses and ultimate bearing loads for clay predicted by theory were similar to those of numerical analyses. Ultimate bearing loads determined by 1 inch settlement criteria were slightly less than those of numerical analyses.

**Key Words** : Shallow footing, Finite element analysis, Failure zone, Ultimate bearing load

### 1. 서론

기초를 지지하는 흙은 전단파괴나 허용값을 초과한 침하가 발생하지 않도록 설계할 필요가 있다. 기초지반에 전단파괴가 발생하는 경우에는 상부구조물에 과도한 변형이 발생하며 경우에 따라서는 붕괴가 발생하기도 한

다. 따라서 기초지반의 지지력산정에 관하여 많은 연구 [1-5]가 진행되어 왔다. 현대의 이론적인 지지력 예측법은 Prandtl의 연구[6]에 근거하고 있는데 Prandtl은 집중하중에 저항하는 상당히 두꺼운 금속체의 능력을 연구 하였다. 사질토로 이루어진 기초지반의 파괴양상은 흙의 상대밀도와 근입깊이에 따라 전반전단파괴(general shear

\*Corresponding Author : In-Sung Jang(Korea Institute of Ocean Science and Technology)

Tel: +82-31-400-7810 email: isjang@kiost.ac

Received October 15, 2014

Revised February 04, 2015

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

failure), 국부전단파괴(local shear failure) 그리고 관입전단파괴(punching shear failure)로 나눌 수 있다[7]. 한편, 기초의 지지력을 결정하는 가장 신뢰성 있는 방법은 재하시험에 의한 방법이라 할 수 있는데 재하시험을 통해 얻은 하중-침하곡선으로부터 기초의 극한지지력을 결정하는 방법도 여러 가지가 있다. 기초지반의 강도정수에 근거한 상당수의 이론적 지지력공식이 설계에 있어 적용되고 있으나 제안자에 따라 예측된 값들의 편차도 심한 편이다. 본 연구에서는 다양한 형식의 기초를 지지하는 기초지반의 하중지지거동을 수치해석법을 이용하여 살펴보고자 하였는데 파괴시 기초지반의 거동과 수치해석을 통해 얻은 하중-침하곡선의 특성을 살펴보고자 하였다. 그리고 수치해석을 통해 구한 극한하중과 이론식에 의한 극한하중 그리고 수치해석을 통해 구한 하중-침하곡선으로부터 극한하중 결정법을 적용하여 구한 극한하중을 상호 비교해보고자 하였다.

## 2. 극한하중의 결정

얕은기초의 지지력을 신뢰성있게 결정하기 위한 현장 시험법으로는 평판재하시험(plate load test)을 들 수 있다. 평판재하시험을 통해 얻은 하중-침하자료로부터 극한하중을 결정하는 방법은 시험자료로부터 수평축적인 시간을 대수값으로 놓고 연직축을 침하값으로 하여 플로팅한 자료에서 시간에 따른 침하의 기울기가 0이 될 때의 침하량에 대응하는 하중값을 극한하중으로 보는 것이다. 또는 특정한 침하량(통상 1 inch)에 대응하는 하중을 극한하중으로 보는 방법도 있다. 깊은기초에 대한 하중-침하곡선으로부터 극한하중을 결정하는 방법은 다수 제안되어 있다[8-15]. 평판재하시험으로부터 얻은 하중-침하곡선에 대하여 깊은기초의 자료해석에 적용되는 다양한 방법들이 사용되지 않는 이유는 평판과 같은 얕은기초의 경우 설계를 지배하는 요소는 지지력보다는 침하이기 때문으로 생각해 볼 수 있다. 그러나 침하보다는 지지력이 중요시 되는 특별한 얕은기초의 경우에는 지지력을 결정하는 적당한 방법이 필요할 것이다. 깊은기초에 대하여 시험자료로부터 극한하중을 결정하는 방법 중 Davisson 방법[16]은 말뚝의 물성값을 이용하는 방법으로 얕은기초에 적용하기 곤란하지만 그 외의 여러 방법에 있어서는 시험을 통해 얻은 하중-침하곡선의 기하학적 형상과 경험을 복합적으로 고려한 방법이기 때문에 얕은기초의 결과

해석에도 시도해 볼 수는 있을 것으로 생각된다. 하중-침하곡선의 기하학적 형상을 고려하여 극한하중을 결정하는 대표적인 방법으로는 Chin 방법과 De Beer and Wallays 방법을 들 수 있다. Chin 방법에서는 수평축을 침하량( $s$ )으로 하고 연직축을 침하량에 대응하는 하중( $Q$ )으로 나눈 값( $s/Q$ )으로 하여 자료를 플로팅함으로써 플로팅된 자료를 직선으로 근사화시키는 기울기를 구하고 그 기울기의 역수를 극한하중으로 하는 방법이다. De Beer and Wallays 방법은 하중-침하곡선의 하중과 침하값을 대수축으로 하여 플로팅했을 때 직선이 꺾이는 점에서의 하중을 극한하중으로 하는 방법이다.

## 3. 수치해석

기초의 하중지지거동 해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ZSOIL을 사용하였다[17]. 해석대상지반으로는 느슨한 모래지반(loose sand)과 조밀한 모래지반(dense sand) 그리고 연약 점토지반(soft clay)과 단단한 점토지반(stiff clay)을 가정하였고 Mohr-Coulomb모형을 적용하였다. Table 1에는 해석에 적용한 기초지반의 물성값이 나타나 있는데 탄성계수( $E_s$ )와 포아송비( $\nu_s$ ), 점착력( $c$ ), 내부마찰각( $\phi'$ ), 팽창각( $\alpha$ ) 그리고 단위중량( $\gamma$ )은 기존 문헌에 나타나 있는 값을 참조한 것이다[18-20].

[Table 1] Properties of foundation soils

Soil type	$E_s$ (kPa)	$\nu_s$	$c$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\alpha$ (°)	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )
Loose sand	20,000	0.2	0	27	0	17
Dense sand	75,000	0.35	0	36	12	19
Soft clay	5,000	0.49	20	0	0	16
Stiff clay	45,000	0.49	75	0	0	18

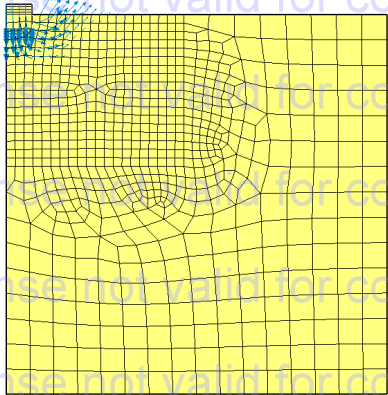
Table 1에서 모래지반은 균등한 입도분포를 갖는 지반으로 보았고 점토지반의 경우 비배수상태를 가정하였다. 사질토의 전단거동특성은 팽창각( $\alpha$ )에 영향을 받게 되는데 매우 조밀한 모래의 경우 실험실 시험결과에 따르면 팽창각은 흙의 침투전단저항각( $\phi'$ )의 1/3 정도의 값을 보이며 느슨한 모래의 경우 팽창각은 5° 이하의 값을 보이는 것으로 보고되고 있다. 점성토의 팽창각은

압밀정도에 영향을 받게 되는데 정규압밀점토와 약간 과압밀된 점토인 경우 팽창각은  $0^\circ$  이며 과압밀된 점토인 경우와 과압밀 정도가 심한 점토인 경우의 팽창각은 각각  $\phi'/6$ 과  $\phi'/3$ 으로 보고되고 있다. 해석에서 가정한 얇은기초는 탄성체로 가정하였는데 탄성계수와 포아송 비는 각각 30,000,000kPa 과 0.2이다. 해석에서 고려한 얇은기초 형식은 띠기초(strip footing)와 원형기초(circular footing) 그리고 정사각형기초(square footing)인데 띠기초의 경우 평면변형률해석(plane strain analysis)을 수행하게 되고 원형기초의 경우 대칭해석(symmetrical analysis)을 수행하게 되며 정사각형기초의 경우 3차원해석(3D analysis)을 수행하게 된다. 기초는 표면기초(surface footing)로 가정하였는데 기초 바닥면은 흙과 기초바닥 사이에 상대변위가 없는 거친 바닥(rough base)으로 가정하였고 기초의 폭은 2m로 하였다.

#### 4. 해석결과의 비교분석

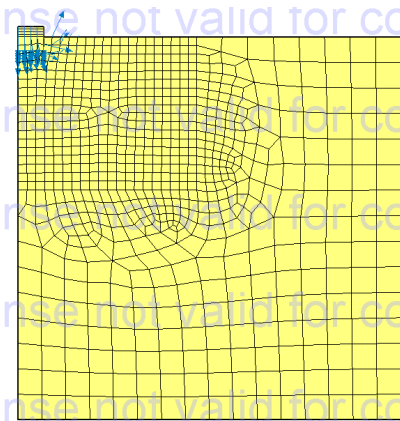
##### 4.1 파괴시 기초지반의 거동

띠기초에 대한 해석에 있어 고려한 유한요소망과 파괴시 기초지반에 발생하는 변위벡터를 단단한 점토에 대해 나타내면 Fig. 1과 같다. 띠기초의 폭은 2m로 가정하였으므로 해석시에는 대칭성을 고려하여 1m의 폭을 고려하였다. 변위에 대한 경계조건으로는 전체 해석영역의 좌우측은 수평방향으로 변위를 구속시켰으며 아래측은 수평 및 연직방향으로 변위를 구속시켰다.



[Fig. 1] Displacement vectors at failure (stiff clay-strip footing)

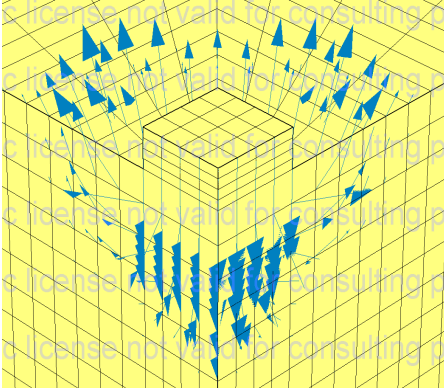
Fig. 1에는 나타나 있지 않지만 느슨한 모래의 경우 파괴시 기초 아래 제한된 영역에 국부적인 파괴가 발생하였다. 조밀한 모래의 경우 파괴시 느슨한 모래에 비해 넓은 영역에 걸쳐 변위가 발생하였다. 기초지반이 점토인 경우는 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 파괴시 제한된 영역에 걸쳐 파괴가 발생하였는데 기초아래 지반에서는 연직하향의 변위가 발생하고 기초 바로 아래를 벗어난 기초 주위로 점차 변위방향이 상향으로 바뀔 수 있다. 이러한 기초하부 점토지반에서의 변위양상은 얇은기초의 지지력을 유도하는데 있어 이론적으로 고려되는 썩기영역과 전이영역 그리고 수동영역을 뒷받침하는 결과로 볼 수 있다. 해석에서 고려한 띠기초 아래에서의 지반 거동을 요약하면 사질토지반의 경우 기초하부지반의 파괴영역의 형상 및 크기는 상대밀도에 따라 달라지는데 반하여 점토지반의 경우 기초하부지반의 파괴영역에 차이가 거의 없으며 이론에서 고려하는 파괴영역을 보임을 알 수 있다. 원형기초에 대한 파괴시 단단한 점토 기초지반에서의 변위벡터와 유한요소망을 Fig. 2에서와 같다. 원형기초의 반지름은 1m 이다.



[Fig. 2] Displacement vectors at failure (stiff clay-circular footing)

Fig. 2를 통해 알 수 있듯이 원형기초의 경우 기초 아래 제한된 범위에 걸쳐 파괴영역이 형성되었다. 느슨한 모래의 경우보다 조밀한 모래에서 좀 더 이론적인 파괴영역에 부합되는 결과를 보였다. 점토지반에 원형기초가 놓이는 경우 파괴시 파괴영역은 띠기초와 유사하지만 파괴영역이 띠기초의 경우에 비해 좀 더 제한되었다. 정사각형기초가 놓이는 단단한 점토지반에 대하여 기초지반 파괴시의 변위벡터와 유한요소망을 나타내면 Fig. 3과

같다. 정사각형기초의 한 변의 길이는 2m로 가정하였다. 따라서 해석에 적용한 기초의 폭은 대칭을 고려하여 1m가 된다.

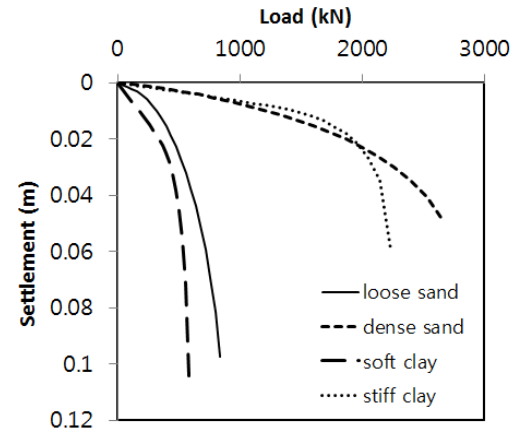
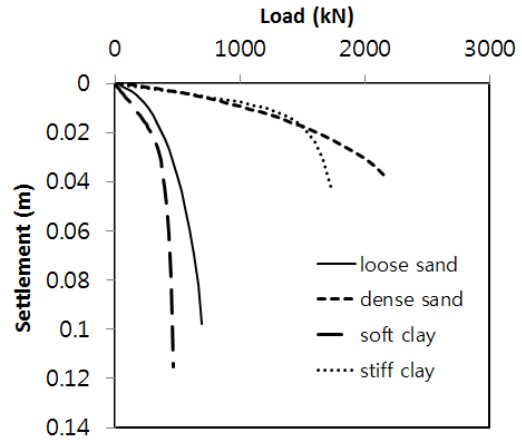
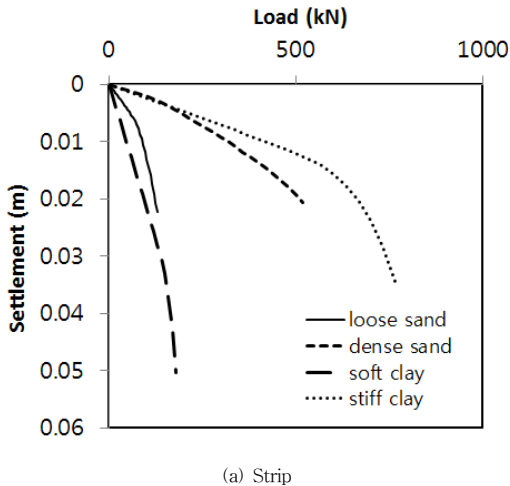


[Fig. 3] Displacement vectors at failure (stiff clay-square footing)

Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 전체적으로 정사각형기초가 놓이는 지반에 있어서 파괴시 파괴영역은 제한된 범위에 국한되었다. 조밀한 모래의 경우 파괴영역이 느슨한 모래의 경우에 비해 더 컸으며 점토지반에 놓인 정사각형기초의 파괴영역은 점토의 강도 크기에 관계없이 유사하였다.

### 4.2 하중-침하거동

수치해석을 통하여 얻은 하중-침하곡선을 기초형식별로 나타내면 Fig. 4와 같다.



[Fig. 4] Load-settlement curves

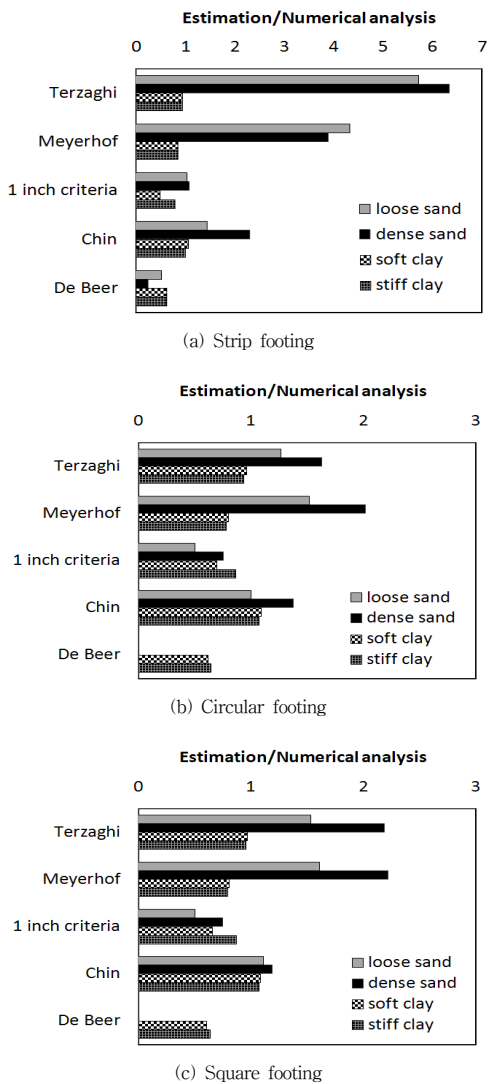
Fig. 4에 나타나 있는 모래지반에 대한 하중-침하곡선의 형상을 고려해 볼 때 느슨한 모래에 놓인 기초의 경우 거의 관입전단파괴양상을 보인다고 할 수 있다. 조밀한 모래에 놓인 기초의 경우 극한하중이 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 점토지반에 놓인 기초의 하중-침하곡선으로부터 침하가 급격하게 증가하는 항복점이 존재함을 알 수 있다.

### 4.3 극한하중의 비교

수치해석을 통해 구한 극한하중을 다양한 방법을 통해 예측한 극한하중과 비교해 보았다. 여기서 다양한 방법이란 흙의 강도정수를 적용하여 극한하중을 예측하는 이론적 방법(Terzaghi 방법, Meyerhof 방법), 1 inch 침하량에 대응하는 하중을 극한하중으로 정의하는 1 inch

침하기준법(1 inch criteria) 그리고 하중-침하곡선으로부터 극한하중을 결정하는 방법(Chin 방법, De Beer & Wallays 방법)을 의미한다. Chin 방법과 De Beer & Wallays 방법을 통한 극한하중 결정은 Fig. 4에 나타낸, 수치해석을 통해 얻은 하중-침하량곡선에 근거하고 있다. 모래지반에 설치된 원형기초와 정사각형기초의 하중-침하량곡선에 대하여 De Beer & Wallays 방법을 적용할 경우 극한하중이 뚜렷하지 않아 결정하지 못했다. 다양한 방법들에 의해 예측된 극한하중을 수치해석에 의한 극한하중으로 나눈 결과(Estimation/Numerical 로 표시)를 기초의 형식에 따라 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5(a)를 통해 알 수 있듯이 모래지반에 설치된 띠기초에 대하여 이론식(Terzaghi 방법, Meyerhof 방법)을 이용하여 구한 극한하중은 수치해석에 의한 극한하중보다 상당히 과대평가되는데 비해 기초지반이 점토인 경우 이론식에 의한 극한하중과 수치해석에 의한 극한하중이 거의 같다. 1 인치 침하기준법을 적용할 경우 모래지반에 대하여 얻은 극한하중은 수치해석에 의한 값과 유사하고 점토지반에 대하여 얻은 극한하중은 수치해석에 의한 값보다 약간 작음을 알 수 있다. Chin 방법에 의한 경우 모래지반에 대하여 예측된 극한하중이 수치해석에 의한 값보다 크음을 알 수 있으며 점토지반에 대하여 예측된 극한하중은 수치해석에 의한 값과 유사함을 알 수 있다. 그리고 De Beer & Wallays 방법에 의해 예측된 극한하중은 수치해석에 의한 극한하중보다 작음을 알 수 있다. Fig. 5(b),(c)는 대체로 비슷한 계산결과를 보여주는데 모래지반에 설치된 원형기초와 정사각형 기초에 대해서는 이론식에 의해 예측된 극한하중이 수치해석에 의한 극한하중보다 크음을 알 수 있으며 점토지반에 설치된 원형기초와 정사각형기초에 대하여 이론식에 의해 예측된 극한하중은 수치해석에 의한 극한하중보다 약간 작음을 알 수 있다. 1 인치 침하기준법에 의해 예측된 극한하중은 수치해석에서 고려한 지반조건에 관계없이 수치해석을 통해 구한 극한하중보다 약간 작은 결과를 보임을 알 수 있다. Chin 방법에 의한 경우 모래지반과 점토지반에 대하여 얻은 극한하중은 수치해석을 통해 구한 극한하중보다 약간 크음을 알 수 있고 De Beer & Wallays 방법에 의한 극한하중은 수치해석을 통해 구한 극한하중보다 작음을 알 수 있다. 하중-침하곡선을 해석함에 있어 Chin 방법은 극한하중 결정법으로 인식되고 De Beer & Wallays 방법은 항복하중 결정법으로 인식되는 경향이 큰데 Fig. 7에 나타나 있는 결과 또한 이러한 인식을 뒷받침한다고 볼 수 있다.



[Fig. 5] Comparison of ultimate bearing loads

#### 4. 결론

기초형식별 하중지지거동을 살펴보고자 모래지반과 점토지반을 가정하여 유효요소해석을 수행하고 기초지반의 파괴시 거동과 하중-침하곡선의 특징 그리고 다양한 방법을 이용하여 얻은 극한하중을 비교해 보았다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 띠기초를 지지하는 모래지반의 파괴시 기초지반 파괴영역의 형상 및 크기는 상대밀도에 따라 달라지는데 반하여 점토지반의 경우 기초하부지반의 파괴영역은 지반강도에 따라 차이가 거의 없으며 이론에서 고려되는 파괴영역과 유사한 결과를 보였다.
- 2) 모래지반에 설치된 원형기초와 정사각형기초의 경우 띠기초 에서는 달리 기초 아래 제한된 범위에 걸쳐 파괴영역이 형성됨을 알 수 있었는데 느슨한 모래의 경우보다 조밀한 모래에서 좀 더 이론적인 파괴영역에 부합되는 결과를 보였다. 점토지반에 원형기초가 놓이는 경우 파괴시 파괴영역은 띠기초 아래의 점토지반에서와 유사하였다.
- 3) 모래지반에 대한 수치해석을 통해 얻은 하중-침하곡선의 형상을 고려해 볼 때 느슨한 모래에 놓인 기초의 경우 거의 관입전단파괴양상을 보였으며 조밀한 모래에 놓인 기초의 경우 극한하중이 뚜렷하지는 않았다. 점토지반에 놓인 기초에 대하여 수치해석을 통해 얻은 하중-침하량곡선의 경우 침하가 급격하게 증가하는 항복점이 존재함을 알 수 있었다.
- 4) 띠기초에 대하여 이론식에 의한 방법(Terzaghi 방법과 Meyerhof 방법)을 이용하여 구한 극한하중을 수치해석에 의한 극한하중과 비교해 볼 때 기초지반이 모래인 경우 이론식에 의한 경우 수치해석에 의한 극한하중보다 상당히 과대평가된 극한하중을 보였으며 기초지반이 점토인 경우 이론식에 의한 극한하중과 수치해석에 의한 극한하중이 거의 같았다. 1 인치 침하기준법에 의한 극한하중은 수치해석에 의한 값과 큰 차이가 없었다.
- 5) 모래지반에 설치된 원형기초와 정사각형 기초에 대해서는 이론식에 의해 예측된 극한하중은 수치해석에 의한 극한하중보다 컸는데 띠기초의 경우보다는 작은 편차를 보였다. 점토지반에 설치된 원형기초와 정사각형기초에 대하여 이론식에 의해 예측된 극한하중은 수치해석에 의한 극한하중보다 약간 작았다. 1 인치 침하기준법에 의해 예측된 극한하중은 수치해석에서 고려한 지반조건에 관계없이 수치해석을 통해 구한 극한하중보다 약간 작았다.
- 6) 하중-침하곡선을 해석함에 있어 Chin 방법은 극한하중 결정법으로 인식되고 De Beer & Wallays 방법은 항복하중 결정법으로 인식되는 경향이 큰데

수치해석을 통해 얻은 하중-침하곡선에 대한 해석 결과 또한 이러한 인식을 뒷받침한다고 볼 수 있다.

## References

- [1] Terzaghi, K. Theoretical soil mechanics, John Wiley, New York, 1943.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470172766>
- [2] Skempton, A. W. "The Bearing Capacity of Calys", Proceedings, Building Research Congress, Vol. 1, 180-189, London, 1951.
- [3] Meyerhof, G. G. "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, No. 1, 16-26, 1963. (Reprinted in Meyerhof, 1982)  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/t63-003>
- [4] Brinch Hansen. "A General Formula for Bearing Capacity", Bulletin No. 11, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, 1961.
- [5] DeBeer, E. E. and Ladanyi, B. "Experimental study of the bearing capacity of sand under circular foundations resting on the surface", Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 577-585. Paris, 1961.
- [6] Prandtl, L. Über die Härte plastischer Körper (On the Hardness of Plastic Bodies), Nachr. Kgl. Ges Wiss Göttingen, Math-Phys. Kl., 74. (in German), 1920.
- [7] Vesic, A. S. "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. SMI, 45-73, 1973.
- [8] Bowles, J. E. Foundation analysis and design, McGraw-Hill Book Co., 224-226, 1988.
- [9] Chin, F. K. "Estimation of the ultimate load of piles not carried to failure", Proceedings 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, 1970, pp. 81-90, 1970.
- [10] De Beer, E. E. and Wallays, M. Franki piles with overexpanded bases., La Technique des Travaux, No. 333, pp.48, 1972.
- [11] Brinch Hansen, J. Discussion, "Hyperbolic stress-strain response. Cohesive soils", J. Soil Mech. Found Div. ASCE, Vol. 89, No. SM4, 241-242, 1963.
- [12] Mazurkiewicz, B. K. Test Loading of Piles According to Polish Regulations., Royal Swedish Academy of Engineering Sciences Commission on Pile Research. Report No. 35, Stockholm, pp.20, 1972.

- [13] Fuller, F. M. and Hoy, H. E. Pile load tests including quick-load test method Conventional methods and interpretations., HRB 333, 78-86, 1970.
- [14] Butler, H. D. and Hoy, H. E. Users manual for the Texas Quick-Load Method for Foundation Load Testing., Federal Highway Administration, Office of Development, Washington, DC, pp.59, 1977.
- [15] Vander Veen, C. "The Bearing Capacity of a Pile", Proceedings, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, Zurich, 84-90, 1953.
- [16] Davisson, M. T. "Static measurement of pile behavior", Proc. Conf. on Design and Installation of Pile Foundations and Cellular Structures, Ed. H. Y. Fang and T. D. Dismuke, Bethlehem, 159-164, 1970.
- [17] Zimmermann, T. ZSOIL.PC Getting started, Elmepress international, Lausanne, Switzerland, 2013.
- [18] Coduto, D. P. Foundation design, Prentice-Hall, Inc., 63-93, 1994.
- [19] Craig, R. F. Soil mechanics, Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., 122, 1983.
- [20] Bolton, M. D. "The Strength and dilatancy of sands", Geotechnique 1/36, 65-78, 1986.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1986.36.1.65>

---

**장 인 성(In-Sung Jang)**

[정회원]



- 1995년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 2002년 12월 : 한국해양연구원 연수연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 한국해양연구원 제직

<관심분야>

지반공학, 지반조사, 해양구조물, 수중시공장비

---

**이 승 현(Seung-Hyun Lee)**

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학