

## 얕은 기초의 지지력 산정결과를 이용한 비교 및 분석에 관한 연구 Comparison and Analysis of Bearing Capacity Calculation Results for Shallow Foundation

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 이정훈<sup>2)</sup>, Jong-Hun Lee, 김종환<sup>3)</sup>, Jong-Hwan Kim, 공진영<sup>4)</sup>, Jin-Young Kong

1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

2) 쌍용건설 사원, Employee, SsangYong E&C.

3) 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

4) 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

**개요(SYNOPSIS) :** The best way to gain optimal results on the bearing capacity is to perform the plate bearing test on field but it is not always possible. In the case of not performing the bearing test but estimating bearing capacity equations, it is not yet determined what equation is applicable.

In this paper the results of bearing capacity equation and the loading tests of 12 samples were compared and what the one is more reliable than others was verified. The comparison showed that the range of the values using Hansen's equation was 0.67 and 1.44 times of the measured, that of Vesic's was 0.71 and 1.27, that of Meyerhof is 0.69 and 1.1, and that of Terzaghi was 0.87 and 1.57.

**Keywords :** plate bearing test, Terzaghi theory, Meyerhof theory, Hansen theory, Vesic theory

### 1. 서론

얕은기초는 지표면 가까운 곳에 적당한 지지층이 존재하여 기초하부의 지반이 상부하중을 지지할 수 있고, 또한 침하량이 허용치를 초과할 가능성이 없을 경우 사용한다. 설계단계에서는 이론적인 지지력 공식을 적용하여 상부하중에 대한 기초지반의 지지여부를 판단하여 설계하며, 시공단계에서는 평판재하시험을 실시하여 지지력을 직접 확인한 후 기초를 시공하게 된다(지반공학회, 2003).

기초의 지지력 산정에 있어 가장 좋은 방법은 실제 기초와 똑같은 크기의 기초에 재하시험을 시행하는 것이지만 실제 기초 크기의 재하시험을 하는 것은 거의 불가능하다. 재하시험을 시행할 수 없는 경우 이론적인 방법으로 기초의 지지력을 산정하고 있으나 아직까지 그 적용성 파악에 있어 미흡한 면이 있다(지반공학회, 1997).

본 논문에서는 얕은 기초의 지지력 산정시 많이 이용되는 지지력 이론식(Terzaghi, Meyerhof, Hansen, Vesic)을 비교 분석하고 재하시험 결과와 비교하여 그 적용성을 파악하였다. 이를 위해 이론적인 지지력 공식에 포함되어 있는 다양한 계수들을 먼저 비교 분석하고, 지지력 공식을 무차원화하여 조합하중(수직하중, 수평하중, 모멘트)이 작용하는 기초의 파괴포락선을 산정해 지지력 특성을 파악하였다. 그리고 여러 문헌에 나와있는 재하시험결과와 이론식으로 산정한 지지력을 비교함으로써 이론식의 적용성을 검증하였다.

## 2. 얽은기초의 극한지지력

지반의 극한지지력이란 기초가 주는 하중에 대한 지반의 한계전단저항(limit shear resistance)으로 볼 수 있다. 즉, 기초에 하중이 가해지기 전 탄성평형상태에 있던 지반이 점차 하중이 증가하면 단부로부터 소성평형상태로 전이하며 이 과정에서 접지압과 주응력 위치가 변화하게 된다.

전반전단 파괴는 기초의 저면에서 지표면에 이르는 연속되고 명료한 활동선이 생기는 것이 특징인데, 기초 주위에 지반이 상승되며 최종적으로 기초는 어느 한 방향으로 전도된다. 이는 주로 압축성이 낮은 흙 즉, 조밀하거나 견고한 지반에서 발생한다(김상규,1993).

국부전단 파괴는 기초직하 부분에만 명료한 활동선이 생기고 지표면 부근에는 생기지 않는다. 이러한 형태는 지반의 파괴보다는 변위가 클 때 발생하는 것으로 실제로 파괴될 때 소성영역이 지표까지 도달하지 않고 지반내에서만 발생한다. 이는 주로 높은 압축성이 지반에서 발생하며 극한 지지력이 명확하게 정의되지 않는다.

관입전단파괴는 기초가 기울거나 용기되지 않고 상대적으로 큰 침하를 발생하는 파괴형태로서 극한지지력이 명확하지 않으며 주로 저압축성 지반에서 기초폭에 비해 근입길이가 큰 경우 발생한다.

## 3. 이론적 지지력 산정방법

Terzaghi(1943) 지지력 산정식에서는 지지력계수가 전반전단파괴와 국부전단파괴에 대해 각기 다르게 주어져 있으나, 실제의 파괴가 내부마찰각의 크기에 따라 어떤 형태로 일어나는지는 예측하기 어렵다. 즉, 내부마찰각이 몇 도에서는 전반전단파괴가 일어나고 몇 도에서는 국부전단파괴가 일어나는지 명확히 구분할 수 없다. 따라서 두 가지 파괴 형태를 모두 수용할 수 있도록 내부마찰각이 작을 때에는 국부전단파괴에 대한 식이 적용되고 내부마찰각이 어느 값에 이르면 전반전단파괴식이 적용되도록 복잡한 Terzaghi의 수정지지력 산정식이 제시되어있다.

Terzaghi(1943)는 Prandtl(1921)의 소성이론을 발전시켜, 균질한 흙에 의해 지지되는 기초저면이 거친 강성의 연속기초에 대한 극한지지력 이론을 제안하였다. 기초저면이 거칠 때에는 기초 바로 하부의 삼각형 모양의 흙층이 그 기초의 일부분처럼 작용하여 이 흙층에 하중이 작용하여 하향으로 내려가면서 움직일 때 생기는 수동토압으로 작용하중에 저항한다고 하였다. Terzaghi의 극한지지력 공식은 식 (1)과 같다.

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} BN_q \quad (1)$$

여기서,  $N_c, N_q, N_r$  : 지지력계수

$c$  : 흙의 점착력

$q$  : 기초 근입 심도에서의 상재하중

$B$  : 흙의 단위중량

$B$  : 기초의 폭

Meyerhof(1951)는 Terzaghi(1943)의 파괴메커니즘과 유사하지만, 기초바닥 바로 아래에는 썩기형 파괴체이고 각도가 다르고 파괴면이 대수나선과 직선이며 지표면까지 연장되는 파괴형상을 가정하여 극한 지지력 공식을 유도하였다. 탄성영역인 흙층에서 수평면과 이루는 각이  $= 45 + \frac{\phi}{2}$ 로 Terzaghi  $=$  와 다르며, 또한 Terzaghi가 기초저면 위쪽의 흙을 상재하중으로 간주해 전단저항을 무시하는데

반해, Meyerhof는 파괴면이 대수나선과 직선으로 지표면까지 연장된다고 가정하여 전단저항을 고려하였다. 또한 Meyerhof는 Terzaghi와 달리 기초의 형상 및 근입깊이와 하중경사를 고려하였다. Meyerhof의 극한 지지력 공식은 식(2)와 같다.

$$q_u = cN_{c_{cs}} N_{c_{cd}} N_{c_{ci}} + qN_{q_{qs}} N_{q_{qd}} N_{q_{qi}} + \frac{1}{2} BN_{r_{rs}} N_{r_{rd}} N_{r_{ri}} \quad (2)$$

여기서,  $c_{cs} \quad r_{rs} \quad q_{qs}$  : 형상계수  
 $c_{cd} \quad r_{rd} \quad q_{qd}$  : 심도계수  
 $c_{ci} \quad r_{ri} \quad q_{qi}$  : 하중경사계수

Hansen(1970), Vesic(1973)은 Meyerhof(1951)의 이론에 지반경사계수와 기초저판 경사계수를 적용시켜 지지력 공식을 제안함으로써 Meyerhof와  $N_r$ 의 값이 틀리며  $N_q$ ,  $N_c$ 의 값은 동일하다. Hansen, Vesic의 극한지지력 공식은 식 (3)과 같다.

$$q_u = cN_{c_{cs}} N_{c_{cd}} N_{c_{ci}} e^{c_{cg}} N_{c_{ct}} + qN_{q_{qs}} N_{q_{qd}} N_{q_{qi}} e^{q_{qg}} N_{q_{qt}} + \frac{1}{2} BN_{r_{rs}} N_{r_{rd}} N_{r_{ri}} e^{r_{rg}} N_{r_{rt}} \quad (3)$$

여기서,  $c_{cg} \quad q_{qg} \quad r_{rg}$  : 지반경사계수  
 $c_{ct} \quad r_{rt} \quad q_{qt}$  : 기초저판 경사계수

표 1. 지지력계수 비교

제안자	$N_q$	$N_c$	$N_r$
Terzaghi	$\frac{a^2}{a \cos^2(45 + \frac{\phi}{2})}$ $a = e^{(0.75 - \frac{\phi}{2})\tan\phi}$	$(N_q - 1)\cot\phi$	$\frac{\tan\phi}{2} \left( \frac{K_{pr}}{\cos^2\phi} - 1 \right)$
Meyerhof	$e^{\tan\phi} \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$	$(N_q - 1)\cot\phi$	$(N_q - 1)\tan(1.4\phi)$
Hansen	$e^{\tan\phi} \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$	$(N_q - 1)\cot\phi$	$1.5(N_q - 1)\tan\phi$
Vesic	$e^{\tan\phi} \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$	$(N_q - 1)\cot\phi$	$2(N_q + 1)\tan\phi$

#### 4. 지지력 이론식과 재하시험결과와의 비교

현장에서 계측된 재하시험 결과는 표 2와 같이 근입깊이, 기초폭, 기초길이, 단위중량, 내부마찰각, 점착력 등이 증가할수록 실측치의 값이 증가하는 경향을 보였다.

평판재하시험의 이론값과 실측값을 비교한 결과 그림 1과 같이, Hansen 이론식으로 구한 값은 실측치의 0.67~1.44 배, Vesic 이론식은 0.71~1.27 배, Meyerhof 이론식은 0.69~1.10 배, Terzaghi 이론식은 0.87~1.57 배로 나타났다.

Terzaghi의 이론식으로 구한 값이 가장 보수적이었는데, 이는 기초저면 위쪽의 흙을 상재하중으로 간주해 전단저항을 무시하는데 반해 Meyerhof, Hansen, Vesic의 이론은 전단저항을 고려하였기 때문으로 사료된다. 또한 고전적인 이론식 중 Meyerhof 이론식으로 산정된 값과 평판재하시험으로 측정된 값이 가장 비슷하게 나타났는데 그 이유는, Hansen, Vesic의 식이 Meyerhof의 식에 비해 기초 경

사계수와 기초저판 경사계수를 고려하였기 때문에 산정된 값이 더 크게 나타났다.

표 2. 현장 계측치에 의한 재하시험 결과

Test No	근입깊이 (m)	기초폭 (m)	기초길이 (m)	단위중량 ( $kN/m^3$ )	내부마찰각 ( $^{\circ}$ )	점착력 (kPa)	실측치 (kPa)
1	0	0.5	2	15.69	39	6.37	1059.48
2	0.5	0.5	2	16.38	36	3.92	1196.82
3	0.5	0.5	2	17.06	41	7.8	2374.02
4	0.5	1	1	17.06	39	7.8	3237.30
5	0.4	0.71	0.71	17.65	22	12.75	402.21
6	0.5	0.71	0.71	17.65	25	14.7	539.55
7	0	0.71	0.71	17.06	20	9.8	215.82
8	0.3	0.71	0.71	17.06	20	9.8	255.06
9	0	0.1015	0.127	17.16	40	0	316.00
10	0	0.05	0.2	16.6	44	0	67.60
11	0	0.0381	0.2	16.6	44	0	63.25
12	0.01	0.05	0.2	16.6	44	0	95.60

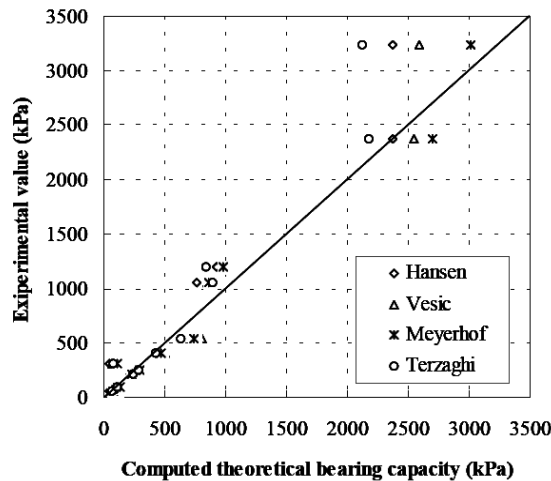
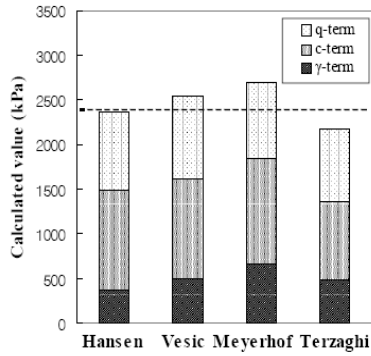


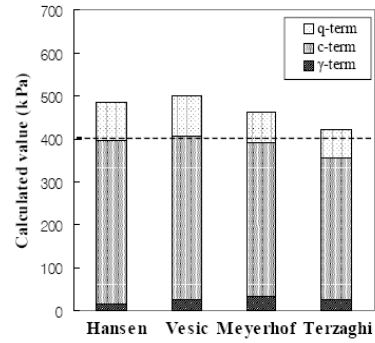
그림 1. 현장시험결과와 이론식으로 산정된 지지력 비교

극한지지력( $q_u$ )공식은 세가지 항인 점착력항, 기초폭항, 근입깊이항에 의해 계산된다. 현장시험조건에 따라 산정된 이론식(Terzaghi, Meyerhof, Hansen, Vesic)을 활용하여 산정된 값을 그래프로 나타내면 그림 2와 같다. 점착력항, 기초폭항, 근입깊이항이 극한지지력 산정에 미치는 영향을 분석해 보면 점착력항이 가장 크게 산정되었다. 기초의 근입깊이를 고려하지 않는 경우에는 점착력항이 더 크게 산정되었고, 점착력을 고려하지 않는 경우 기초폭항이 더 크게 산정되었다.

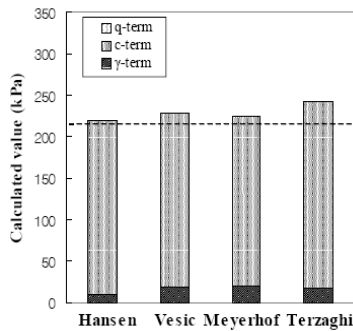
점착력, 기초폭, 근입깊이를 모두 고려할 때는 대체적으로 Vesic, Meyerhof식의 계산값이 Terzaghi 식보다 1.18~1.22배 크게 나타났다. 두가지 이하인 경우는 Terzaghi, Meyerhof식이 Hansen의 식보다 1.33~1.53배 크게 나타났다.



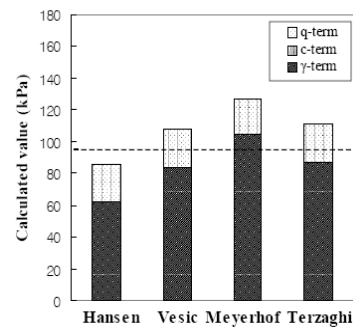
(a). Test No.1



(b). Test No.2



(c). Test No.3



(d). Test No.4

그림 2. 재하시험별 산정된 지지력

## 5. 결론

본 논문에서는 얇은 기초의 지지력 산정시 많이 이용되는 지지력 이론식의 차이점을 비교 분석하고 재하시험 결과와 비교를 통해 그 적용성을 파악한 것으로써 그 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1) 지지력 이론식으로 산정한 지지력과 재하시험결과를 비교한 결과, Hansen 이론식으로 구한 값은 실측치의 0.67~1.44 배, Vesic 이론식은 0.71~1.27 배, Meyerhof 이론식은 0.69~1.1 배, Terzaghi 이론식은 0.87~1.57 배로 나타났다.

2) Terzaghi의 이론식으로 구한 값이 가장 보수적이었는데, 이는 기초저면 위쪽의 흙을 상재하중으로 간주해 전단저항을 무시하는데 반해 Meyerhof, Hansen, Vesic의 이론은 전단저항을 고려하였기 때문으로 사료된다. 또한, 고전적인 이론식 중 Meyerhof 이론식으로 평판재하시험으로 측정된 값이 가장 비슷하게 나타났는데, 그 이유는, Hansen, Vesic의 식이 Meyerhof의 식에 비해 기초 경사계수와 기초저판 경사계수를 고려하였기 때문에 산정된 값이 더 크게 나타났다.

3) 현장시험조건에 따라 산정된 이론식(Terzaghi, Meyerhof, Hansen, Vesic)을 활용하여 산정된 값을 분석하면 점착력항이 제일 크게 산정되었다. 기초의 근입깊이를 고려하지 않는 경우에는 점착력항이 더 크게 산정되었고, 점착력을 고려하지 않는 경우 기초폭항이 더 크게 산정되었다.

점착력, 기초폭, 근입깊이를 모두 고려할 때는 대체적으로 Vesic, Meyerhof식의 계산값이 Terzaghi

식보다 1.18 ~ 1.22배 크게 산정되었다. 두가지 이하인 경우는 Terzaghi, Meyerhof식이 Hansen의 식보다 1.33 ~ 1.53배 크게 산정되었다.

### 참고문헌

1. 지반공학회(2003), **구조물 기초설계기준 해설**, 구미서관, pp.177 ~ 200.
2. 지반공학회(1997), **얕은기초**, 구미서관, pp.150 ~ 165.
3. 김상규(1993), **토질역학**, 청문각, pp.274 ~ 281.
3. Hansen, J. B.(1970), "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity", *Danish Geotechnical Institute Bulletin*, No.28, Copenhagen
4. Meyerhof, G. G.(1951), "The Ultimate Bearing Capacity of foundations", *Geotechnique* Vol. 2, No. 4, pp301-331
5. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
6. Vesic, A.S.(1973), "Analysis of Ultimate Load of Shallow Foundation", *J. of Soil Mech. Fdns. Div. ASCE*, Vol. 99, No. SMI, pp.45-73.
7. Prandtl, L.(1921), "Uber die Eindringungsfe-stigkeit Plastischer Baustoffe und die Seatigkei Analysis von Schneiden", *ZAMM*, Vol. 1, pp. 15-20.