

수치해석적 방법에 의한 층상 점토지반의 극한지지력 해석

The Analysis of the Bearing Capacity of Layered Clay by Numerical Methods

김 영 민* Kim, Young-Min

Abstract

Numerical studies on bearing capacity problems of layered clay are performed for smooth and rough strip footings. The finite element method and finite difference method (FLAC) are used for computations of the bearing capacity, entire load-displacement curve and the failure mechanism. The presented results show that it is possible to analyze the bearing capacity of layered clay and to give a progressive failure mechanism clearly. To obtain high quality solutions, it is necessary to review the results on control parameters(e.g., yield function, number of calculation) and compare the results by two numerical methods.

요 지

층상점토지반의 극한지지력에 대하여 수치해석적 방법을 이용하여 거친 띠기초, 미끈한 띠기초에 대하여 해석을 수행하였다. 유한요소법과 유한차분법(FLAC)을 사용하여 층상점토 기초지반의 파괴거동 및 전반적인 하중-변위관계, 극한지지력에 대하여 수치해석적 방법으로 검토하였다. 해석된 결과를 분석하여보면, 이러한 수치해석적 방법을 통해서 층상점토 지반의 극한지지력, 진행성 파괴거동을 충분히 검토할 수 있음을 보여주었다. 그러나 정도가 높은 해석결과를 얻기 위해서는 수치해석에 큰 영향을 미치는 조절요인(항복함수선택, 해석증분수)과 두 가지 이상의 수치해석적 방법에 의하여 해석결과를 비교 분석하는 것이 필요하다.

Keywords : Bearing capacity, Finite difference method, Finite element method, Layered clay, Progressive failure

1. 서 론

기초는 상부구조물의 하중을 하부지반에 전달 시키는 하부 구조물이다. 이러한 기초는 지반의 전단파괴나 과잉 침하가 발생됨이 없이 안전하게 상부하중을 전달할 수 있도록 설계되어야 한다. 그러기 위해서는 지반의 강도특성과 변형특성을 올바르게 평가할 수 있어야 한다. 원래 이 두 사항은 함께 발생하는 현상이므로 분리시키지 않음이 바람직하나 현재의 기술수준에서는 편리상 구분하여 최종 판단 시 양쪽을 모두 만족시키도록 설계하중 또는 기초형식을 결정하고 있다.

기초지반의 지지력에 대한 해석법으로는 한계평형이

론(Limit equilibrium method)을 이용한 Terzaghi공식과 상, 하계정리(Upper bound, Lower bound)로 구분되는 극한해석(Limit analysis)을 이용한 Prandtl공식, 미끄러짐선 이론(Slip line method)을 이용한 Sokolovskii 등의 공식으로 설명하고 있다. 위와 같은 해석방법은 하중 조건이나 토층의 구성이 복잡하게 되면 적용이 곤란하게 되고, 파괴거동 시 지반의 응력상태나 변형을 정확히 파악하기 힘들다(Chen, 1975; 윤지선역, 1992).

위와 같은 극한 지지력문제 중, 현장에서 종종 발생하는 하나가 층상상태의 점토지반에서 극한지지력을 계산하는 경우이다. 현재까지 층상지반의 극한지지력 평가에 대한 연구는 Brown & Meyerhoff(1965), Chen

* 정희원, 전주대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Environmental Engrg., Jeonju Univ., youngmk@jeonju.ac.kr)

(1975), Meyerhoff & Hanna(1978), Merifield 등(1999)의 연구가 발표되어 있으나 주로 실험 등 반 경험적 방법이나 극한이론에 의한 해석 등으로 정확한 값을 추정하는데 어려움이 있다. 이러한 종래의 극한지지력 해석방법은 강소성 이론에 근거하고 있으며, 유한요소법, 유한차분법으로 대표되는 수치해석적 방법은 보다 정확한 탄소성이론을 이용하여 계산을 수행한다. 그러나 극한지지력에 대한 수치해석은 지반의 파괴상태에 근접하는 조건에서 계산을 수행하기 때문에 계산이 수렴하지 않고 발산하거나 극한하중을 과대하게 평가하는 등의 수치해석적 어려움이 많이 발생한다(Sloan 등, 1982; Abbo 등, 1993). 최근에는 수치해석적 방법이 개량되거나 개발되어 이러한 문제에도 적용되어지고 있다(小林正樹, 1990; 김영민, 1999).

본 논문에서는 기초지반의 파괴거동을 좀 더 정밀하고 자세히 분석할 수 있는 수치해석적 방법들(FDM, FEM)을 이용하여 층상 점토지반의 극한지지력과 파괴거동에 미치는 영향에 대하여 자세히 검토 분석하였다.

2. 층상 점토지반의 극한지지력

그림 1과 같이 층상의 점토지반의 얇은 기초의 조건을 나타내었다. 이러한 경우에 다음과 같이 층상지층조건을 다음과 같이 두 경우로 나누어 생각할 수 있다(Barja, 1995).

1. $c_{u1}/c_{u2} > 1$ 인 경우, 연약한 점토층이 아래에 있고 단단한 점토층이 상부에 위치한 경우
 2. $c_{u1}/c_{u2} < 1$ 인 경우, 단단한 점토층이 아래에 있고 연약한 점토층이 상부에 위치한 경우
- 일련의 모형실험을 바탕으로 한 반경험적 방법에 의

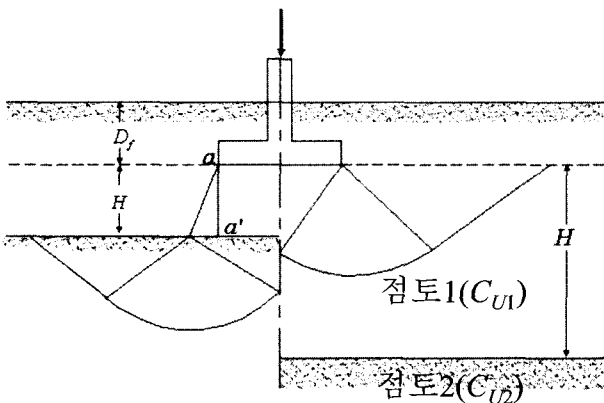


그림 1. 층상점토지반의 기초

한 해석으로 Meyerhoff와 Hanna(1978)가 제안한 각 경우의 지지력 이론은 다음과 같다.

경우 1: $c_{u1}/c_{u2} > 1$

$$q_u = [1 + 0.2(B/L)]c_{u2}N_c + (1 + B/L)(2c_a H/B) + \gamma D_f \leq [1 + 0.2(B/L)]c_{u1}N_c + \gamma D_f \quad (1)$$

여기서, B=기초의 폭, L=기초의 길이

c_{u1}, c_{u2} : 지층 1, 2의 점착력

γ : 단위중량, D_f : 기초의 깊이

$N_c = 5.14$ ($\phi=0$ 에 대한 지지력 계수)

$c_a = \alpha a'$ 에 발생하는 점착력

c_a 값은 동일 지층의 경우 $c_{u1}/c_{u2} = 1$ 에는 1로 평가되며, $c_{u1}/c_{u2} = 10$ 인 지층의 경우에는 개략적으로 0.7값을 갖는 실험결과에 의하여 추정된 값이다.

경우 2: $c_{u1}/c_{u2} < 1$

$$q_u = q_t + (q_b - q_t)(1 - H/B)^2 \geq q_t \quad (2)$$

여기서, $q_t = [1 + 0.2(B/L)]c_{u1}N_c + \gamma D_f$

$q_b = [1 + 0.2(B/L)]c_{u2}N_c + \gamma D_f$

또한, Chen(1975)에 의한 그림 2와 같이 원호파괴를 가정한 극한이론의 상계법에 의한 극한지지력 이론이 제안되어있다. 상계법에서는 외부의 일과 내부의 일이 동일하다는 가정 하에 원형파괴형태로 가정으로 다음과 같이 극한지지력 계수를 추정할 수 있다.

$$N_c(r, \theta) = 2(r/B)^2 \left\{ \frac{\theta + n\theta_i}{(r/B) \sin \theta - 1/2} \right\} \quad (3)$$

여기서, $\theta = \cos^{-1}(\cos \theta + \frac{H}{r})$, $n = \frac{c_{u2}}{c_{u1}} - 1$

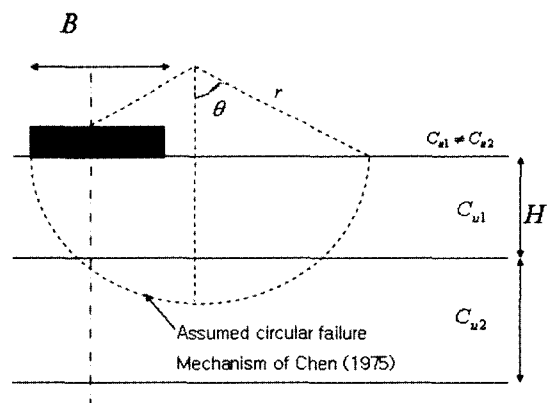


그림 2. 극한이론에 의한 파괴형태

앞의 식에서 최적의 지지력 값은 아래와 같은 조건을 만족하는 조건을 수치 해석적 방법을 통하여 해를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial N_c}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial N_c}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

위와 같은 방법으로 균일 점토지층 위의 띠 기초에 대한 극한 지지력 값을 계산하여 보면, $N_c=5.53$ 값을 준다. 이것은 정밀해 Prandt 1해 $N_c=5.14$ 값 보다 약 8% 오차를 보인다.

또한, 최근에 발표된 Merifield(1999) 연구에서는 상, 하계 극한이론(Limit theorem)을 유한요소법과 결합하여 층상점토지반에 대한 여러 경우에 대하여 극한 지지력을 평가한 결과가 있다.

3. 수치해석을 위한 예비검토

본 논문에서 이용한 수치해석적 방법으로 지반분야에서 가장 많이 사용되고 있는 유한차분법과 유한요소법을 이용하였다. 유한차분법은 공간상의 절점에서 미지함(변위 또는 응력)으로 표시된 지배방정식을 풀기 위해서 차분형태로 표시하여 계산을 수행한다. 유한차분법의 특징으로는 형상함수를 사용하지 않으며, 양적해법을 사용할 경우, 전체강성행렬을 구성하지 않으므로 각 시간 단계에서의 계산량이 적고 구성방정식이 비선형일 경우에도 적용하기가 매우 쉬운 해석 방법이다. 국내에서 많이 활용되고 있는 FLAC을 이용하여 유한차분법 해석을 수행하였다.

유한요소법은 원래 구조해석을 위한 수치해석법으로 개발되어진 것이며, 그 방법의 범용성으로 인하여, 각종의 분야에 대하여 광범위하게 이용되어져 왔다. 지반공학분야에서도 유한요소법은 오래 전부터 이용되어 주로 기초, 성토구조물, 터널, 사면등과 같은 지반공학에 대한 전형적인 문제에 대하여 변위거동을 해석하는 경우에 적용되어져 왔다. 최근에는 지반구조물의 파괴거동에 대한 계산수법의 발달로 지반의 실제적인 파괴거동을 표현하는 것이 가능하게 되었다. 본 논문에서는 파괴거동 해석 방법으로 안정성이 매우 높은 것으로 알려진 가상적 점탄소성 이론을 이용하여 지반의 극한지지력 해석을 수행하였다(Zienkiwiz 등, 1974). 가상적 점탄소성법은 항복 곡면 위의 응력상태를 일정기간 허용하는 관계로 극한해석 시 안정된 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 본 해석에 이용한 유한요소프로그램은 저자에 의해 개발된 프로그

램으로 지반의 파괴거동해석에 기 적용하여 타당한 결과를 나타내었다(김영민, 1999). 해석 시 이용한 요소는 파괴해석 시 적합한 8절점의 저감적분한 요소를 사용하였으며, 해석방법으로는 Initial stiffness method를 이용하였다. 유한요소해석에서 수렴의 기준은 하중잔차(residual forces)가 0.1% 조건에서 반복횟수 500회까지 허용하였으며, 유한차분법(FLAC)에서는 하중잔차가 기본값인 100N으로 설정하여 해석하였다. 또한 기초하중에 대한 모사방법으로 기초저면에 대응하는 절점에 연직변위를 서서히 증가시키는 변위제어에 의하여 모사하였다. 지지력해석과 같은 파괴조건이 발생하는 경우에는 변위제어에 의한 조절이 비구속 소성흐름이 발생하지 않기 때문에 빠르고 안정적으로 계산된다.

3.1 예비 분석

본 절에서는 기초지반의 극한지지력에 대한 수치해석적 방법을 검토하기 위하여, 극한상태 수치해석 시 중요한 영향을 미치는 것으로 알려진 하중증분수인 변위 증분속도와 항복조건식에 대하여 검토하였다. 점토 지반의 항복 조건식으로는 Von-Mises조건과 Tresca조건을 이용하였다. 수치해석방법은 균일한 점토지반 위의 강성기초를 대상으로 FEM, FLAC을 사용하여 분석하였다. 해석범위는 대칭조건을 이용하여 반 단면만 고려하였으며, 하중은 기초에 강제변위를 가하는 변위제어를 이용하였다. 해석조건은 탄성계수 $E=1e5Kpa$, 포아슨비 $\nu=0.3$, 점착력 $c=c_{ul}=c_{ul}=1kpa$ 경계조건은 양쪽 측면은 롤러조건이며 바닥은 힌지조건으로 하였다. 또한 메쉬의 크기는 계산시간 단축을 고려하여 극한지지력 계산에서 적합한 결과를 주는 크기로 기초폭 $B/2=5m$,

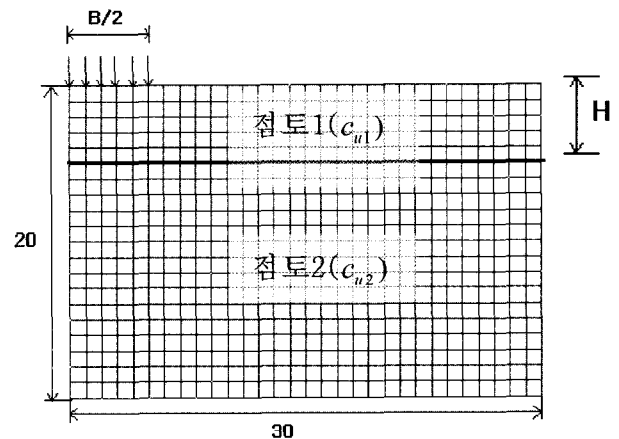
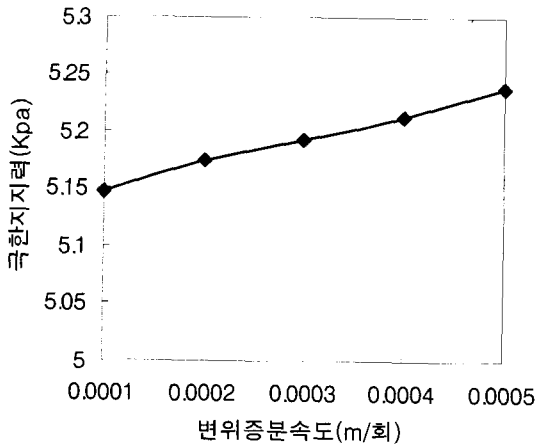
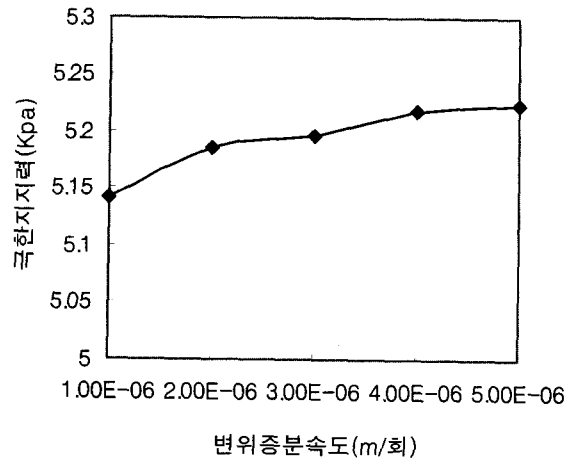


그림 3. 해석모델



(a) FEM 해석



(b) FLAC 해석

그림 4. 변위증분속도에 의한 영향

해석범위는 깊이 20m, 폭 30m로 그림 3과 같은 메쉬형태로 설정하여 해석을 수행하였다(Griffiths, 1989; 小林正樹, 1990). 기초의 조건은 완전히 미끈한 조건으로 하여 기초저면에 대응하는 절점의 수평방향변위를 자유로 설정하였다. 또한, 기초의 하중은 기초저면에 대응하는 절점력의 합력을 기초에 작용하는 하중으로 계산하였으며, 극한지지력은 계산된 하중-침하량 곡선에서 수렴되는 극한값을 기초지반의 극한지지력으로 간주하였다.

우선 Tresca항복조건을 이용하여 FEM과 FLAC해석에서 주어진 변위증분속도에 대한 극한지지력 값을 검토하였다. FEM해석결과를 보면 변위증분속도가 감소함에 따라 극한지지력 값은 따라서 감소하며 변위증분속도 1×10^{-6} 에서 Prandtl의 이론값 5.146Kpa에 접근하는 결과를 나타내었다. FLAC해석에서도 변위증분속도가 감소함에 따라 극한지지력은 감소하며 1×10^{-6} 부근에서 이론값에 수렴하는 결과를 나타내었다(그림 4 참조). 이후의 계산에서는 본 결과를 바탕으로 FEM 경우에는 변위증분속도를 1×10^{-4} 으로, FLAC의 경우에는 1×10^{-6} 으로 고정하여 계산을 수행하였다.

또한, 항복조건식에 의한 극한지지력값에 미치는 영향을 분석하여 보면, FLAC의 경우에는 Von-Mises 항복조건을 직접 이용할 수가 없고, Drucker-Prager 모델을 이용하여 $\phi=0$ 인 조건을 이용하여 Von-Mises 항복조건을 모사할 수 있다. Drucker-Prager모델 이용한 경우에 주의 해야 할 점은 매개정수 α , κ 추정에 있어, 아래와 같이 띠 기초조건에 맞는 평면 변형률 조건에서의 계수값으로 추정해야 한다.

$$f = \alpha I_1 + \bar{\sigma} = k \quad (5)$$

여기서,

$$I_1 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = 3\sigma_m$$

$$\bar{\sigma} = f_2^{1/2} = \{1/2(s_x^2 + s_y^2 + s_z^2) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2\}^{1/2},$$

$$s_x = \sigma_x - \sigma_m$$

$$\alpha = \frac{\tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}}, \quad \kappa = \frac{3c}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}} \text{ for 평면 변형률 조건}$$

일반적으로 추정하는 삼축조건외의 매개정수값을 이용하면 실제 지지력값과 상당한 차이가 발생하는 것으로 알려져 있다(Gudehus, 1977)

본 해석의 경우, Drucker-Prager모델을 이용한 Von-Mises항복조건에서의 극한지지력 계산값은 5.175Kpa로 평가되었으며, Tresca 항복조건을 이용하는 경우에는 5.141Kpa값을 나타내어 Tresca 조건을 이용하는 경우가 Prandtl의 이론해석값 5.14Kpa에 근접하는 결과를 보여주었다. 또한, FEM 해석의 경우의 극한지지력 계산값은 Von-Mises조건인 경우 5.162Kpa, Tresca 조건인 경우 5.146Kpa으로 평가가 되어, FEM, FLAC해석 모두 Tresca 항복조건을 이용한 경우가 Von-Mises 항복조건을 이용한 경우보다 이론해 5.14에 근접한 값을 나타내어 보다 합리적인 결과를 표시하였다(표 1 참조).

표 1. 수치해석에 의한 극한지지력값

	미끈한 기초조건	
	Von-Mises	Tresca
FEM	5.162	5.146
FLAC	5.175	5.141

4. 층상 기초지반의 파괴거동해석

4.1 FEM, FDM에 의한 비교검토

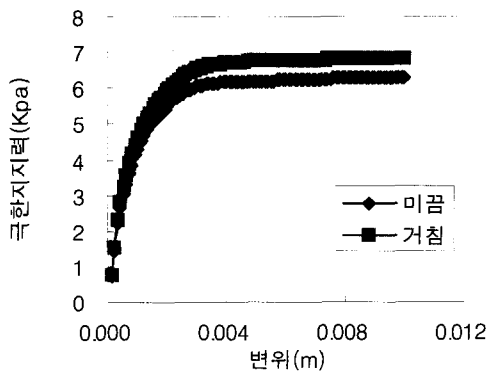
여기서는 층상점토지반 지표면 위에 존재하는 강성 띠기초를 대상으로 위에서 설명한 수치해석적 방법(FDM, FEM)을 이용하여 기초의 파괴거동을 조사하였다. FEM, FLAC에 의한 해석결과를 비교분석하기 위하여 그림 3에 표시된 모델(메쉬형태:20x30)을 이용하여 동일한 조건에서 해석을 수행하였다. 해석조건으로는 탄성계수 100,000 Kpa, 포아슨비 0.3, 점착력은 층상지반 조건 경우 1의 경우 $c_{u1}=2Kpa$, $c_{u2}=1Kpa$, 경우 2의 경우 $c_{u1}=1Kpa$, $c_{u2}=2Kpa$ 이다. 항복조건식은 Tresca 조건으로 가정하였다. 또한 기초조건이 거친 조건(기초부분의 x방향 변위구속)과 미끈한 조건(기초부분의 x방향 변위자유) 모두를 고려하여 층상지반조건 경우 1, 2에 대하여 각각 검토하였다.

경우 1 ($c_{u1}/c_{u2} > 1$)에 대한 수치해석결과 극한지지력

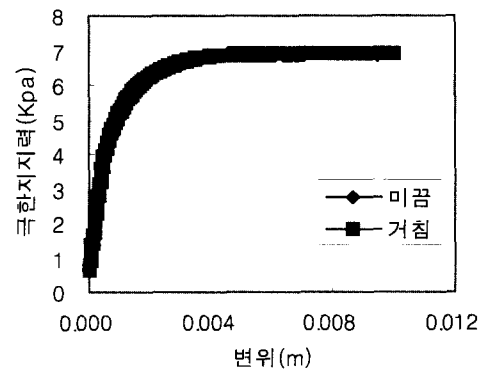
을 살펴보면, 유한요소해석에서는 기초조건에 따라 결과가 미끈한 경우에는 $q_u=6.43Kpa$, 거친 경우에는 $q_u=6.83Kpa$ 으로 평가 되어, 거친 경우가 다소 크게 평가 되었으며, FLAC해석에서는 기초조건이 미끈한 경우와 거친 경우가 거의 동일하게 $q_u=6.90Kpa$ 으로 나타내었다. Davis & Booker(1973)의 이론에 의하면 점토지반의 전단강도가 깊이에 따라 변화하는 경우 극한 지지력 값은 거친 기초조건이 미끈한 기초보다 더 큰 지지력값을 갖는 것으로 알려져 있어, FLAC 해석의 동일한 값은 다소 틀린 결과를 보이는 것으로 생각된다.

경우 2 ($c_{u1}/c_{u2} < 1$)에 대한 수치해석결과를 살펴보면, 유한요소해석에서는 기초조건에 따라 미끈한 경우에는 극한지지력 $q_u=5.16Kpa$, 거친 경우에는 $q_u=5.52Kpa$ 으로 평가 되었으며, FLAC해석에서는 기초조건이 미끈한 경우에는 $q_u=5.07Kpa$ 와 거친 경우에는 $q_u=5.46Kpa$ 으로 나타내어 유한요소해석 값이 다소 크게 평가되었다.

또한, 층상점토지반(B/H=0.5)의 극한지지력값을 수치해석 결과값(메쉬형태 20x30)과 극한이론을 이용한

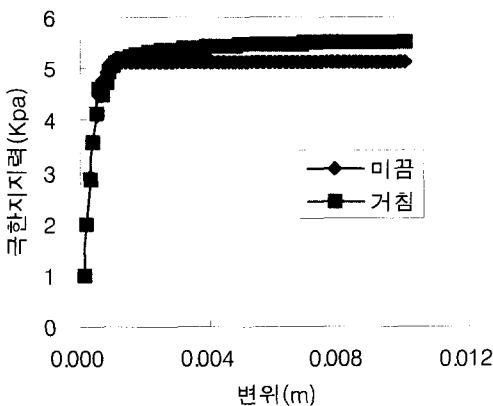


(a) FEM 해석

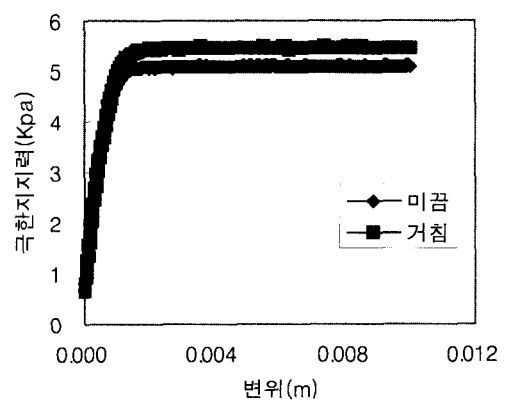


(b) FLAC 해석

그림 5. 하중-변위곡선(경우 1)



(a) FEM 해석



(b) FLAC 해석

그림 6. 하중변위곡선(경우 2)

표 2. 각종 이론에 의한 극한지지력값

(단위: Kpa)

지층조건	기초조건	F.E.M	F.D.M	극한이론(Merifield등)		Meyerhof & Hanna(1978)	강도 평균값
				하계치	상계치		
경우 1	미꿈	6.43	6.90	7.04	7.78	7.04	10.28
	거침	6.83	6.90	7.04	7.78	7.04	10.28
경우 2	미꿈	5.16	5.07	4.86	5.31	6.425	5.14
	거침	5.52	5.46	4.98	5.49	6.425	5.14

Merifield등의 해석값, Meyerhof와 Hanna(1978)의 이론값, 일반적으로 이용되는 강도 평균값에 의한 극한지지력 값을 비교하여 표 2로 정리하면 다음과 같다.

위의 강도 평균값에 의한 극한 지지력은 층상지반의 영향깊이를 $0.5B \tan(45 + \phi/2)$ 로 가정하여 각 지층의 강도정수를 지층 두께로 고려한 평균강도를 이용하여 Terzaghi 극한 지지력이론에 따른 계산 값이다. 위의 도표의 결과를 분석하여 보면 층상점토지반의 극한지지력은 경우 1인 조건에서는 강도 평균값으로 평가한 지지력 값이 가장 크게 평가되어 불안전 측으로 계산되며, 유한요소법으로 평가한 값이 가장 작게 나타나 안전측

으로 계산됨을 알 수 있다. 경우 2의 조건에서는 예상외로 강도 평균값으로 평가한 극한 지지력값이 가장 작게 되며, 유한요소법으로 계산한 값이 비교적 크게 평가되는 결과를 나타내었다. 특히 경우 1에 대한 강도평균값에 의한 층상지반의 극한 지지력 값이 과대하게 평가되는 것은 강도평균값에 큰 영향을 미치는 영향깊이 값을 층상지반의 파괴형태를 고려하지 못한 적용결과로 큰 차이가 발생한 것으로 판단된다.

또한 기초지반의 변형거동에 대하여 수치해석결과를 비교 분석하여 보면, 그림 7, 8, 9, 10에 표시하였듯이 FLAC결과가 FEM해석 결과보다 상대적으로 넓은 영역

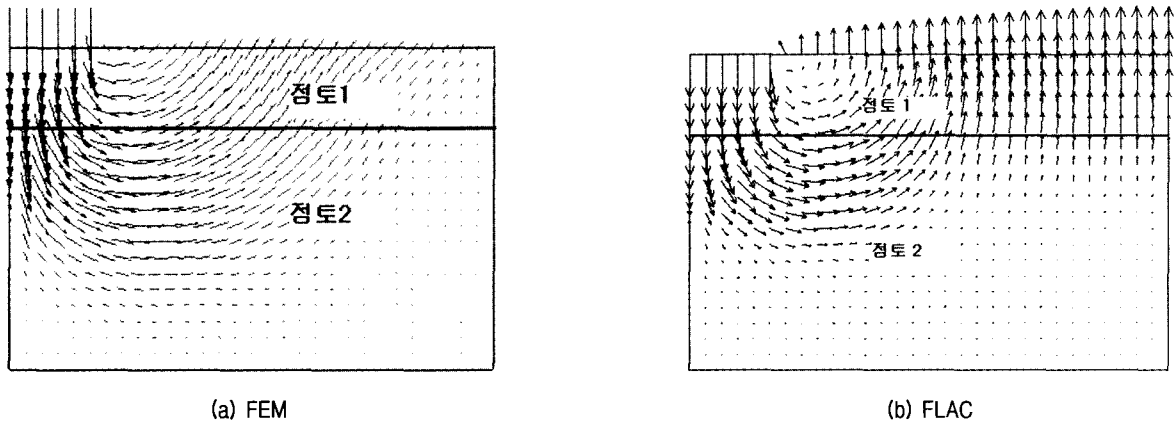


그림 7. 수치해석결과(경우 1 : 거침 기초조건)

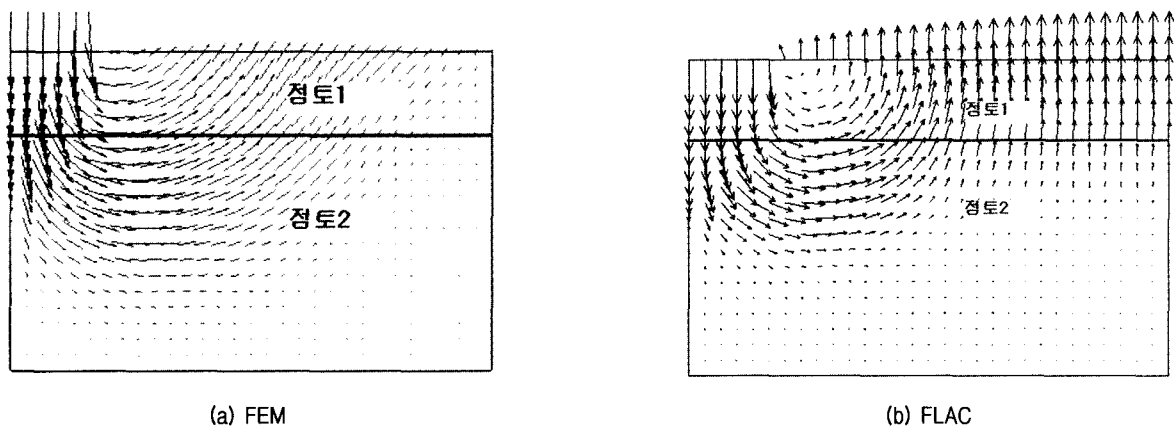
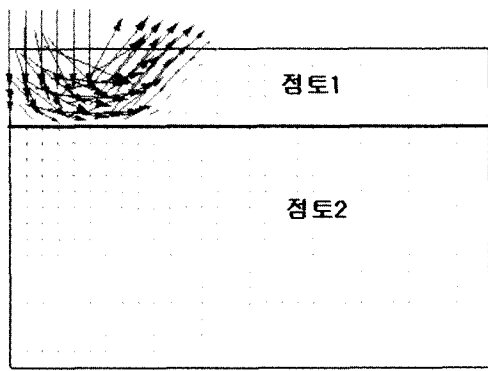
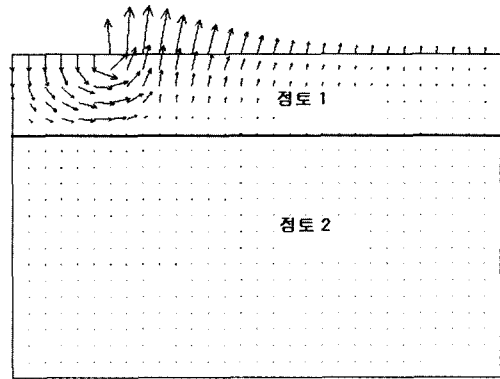


그림 8. 수치해석결과(경우 1 : 미끈한 기초조건)

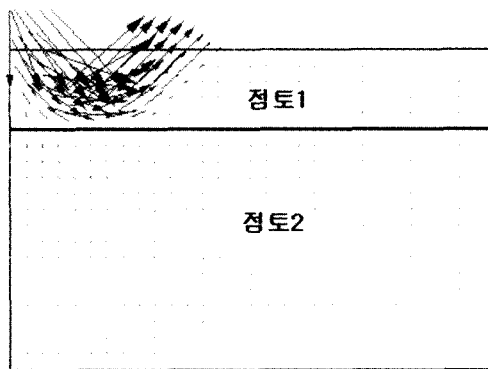


(a) FEM

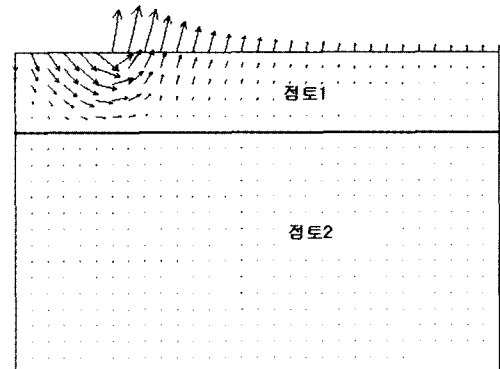


(b) FLAC

그림 9. 수치해석결과(경우 2 : 거친 기초조건)



(a) FEM



(b) FLAC

그림 10. 수치해석결과(경우 2 : 미끈한 기초조건)

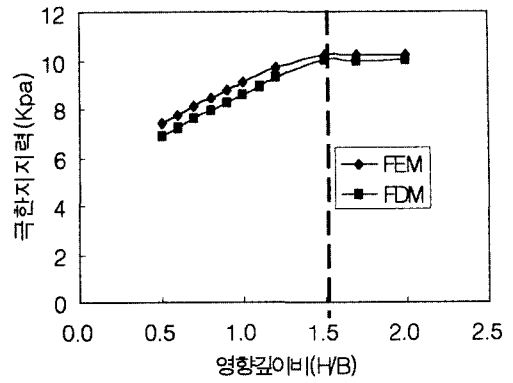
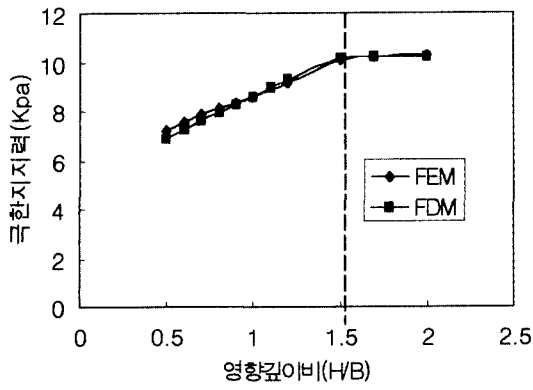
에 걸쳐 지표면이 과대하게 융기하는 것으로 나타나, FEM 해석결과가 기초지반 변위거동에 대해서는 좀 더 합리적인 결과를 주는 것으로 생각된다.

4.2 영향깊이 결정

층상점토지반 기초의 지지력 결정에서 주된 관심사 중 하나는 층상지반의 극한지지력값이 아래 지층의 영향을 받지 않는 영향깊이를 결정하는 것이다. Prandtl 이론에 의하면 영향을 미치는 두께깊이는 기초지반의 썩기파괴각도는 45°로 보고 원형 형태의 파괴면을 가정하면 영향깊이는 0.707B로 결정된다.

층상지반에서 영향깊이를 알아 보기 위하여 그림 3의 해석모델을 이용하여 층상지반 조건이 경우 1, 2에 대하여 층상깊이범위 $H/B=0.5\sim 2$ 에서 FEM과 FLAC을 사용하여 분석하였다. 수치해석에서는 H값(기초저면에서 아랫지층까지의 깊이)의 증가에 따라 첫번째 지층의 강도정수 값을 부여하여 계산토록 하였다. 해석결과를 분석

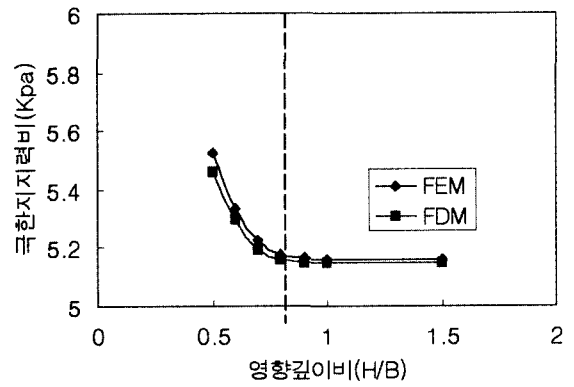
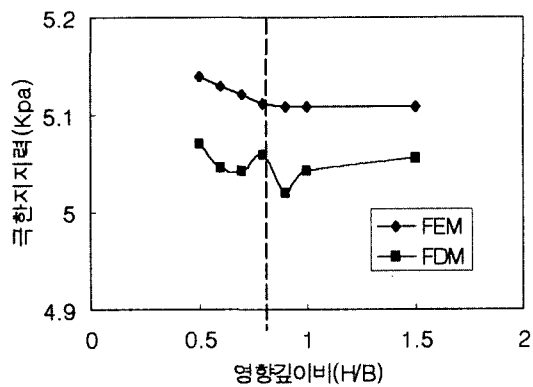
하여 보면 층상지반 경우 1에서는 영향깊이가 그림 11에서 보듯이 FEM과 FLAC결과 모두 기초의 저면의 상태에 관계없이 위 지층 두께가 $H/B=1.5$ 부근에서 수렴되는 결과를 보이고 있다. 또한, 극한 지지력값(q_u)은 기초조건이 미끈한 경우와 거친 경우 모두 수치해석결과값이 영향깊이비가 증가함에 따라 10.2Kpa에 수렴하는 값을 나타내었다. 경우 2에 대한 결과를 분석하여 보면, 영향깊이는 FEM과 FLAC결과 모두 지층 두께 비(H/B)=0.8 부근에서 수렴하는 결과를 나타내어 Prandtl의 영향깊이비 0.707보다 크게 평가되었다. 또한, 극한 지지력값(q_u)은 영향깊이비가 증가함에 따라 미끈한 기초의 경우 FEM해석 값은 5.11Kpa, FLAC 해석값은 5.05Kpa로 나타나 FEM 해석 값이 다소 큰 결과를 주었다. 거친 기초조건에서는 FEM과 FLAC해석 값은 거의 동일하게 5.15Kpa값을 나타내었다. 그러나 층상조건이 경우 2의 미끈한 기초 해석의 경우 FLAC해석 값이 영향깊이 비에 따라 다소 진동하는 불안정한 결과를 나타내었다(그림 12(a)참조).



(a) 미끈한 기초조건

(b) 거친 기초조건

그림 11. 영향깊이에 대한 결과(경우 1)



(a) 미끈한 기초조건

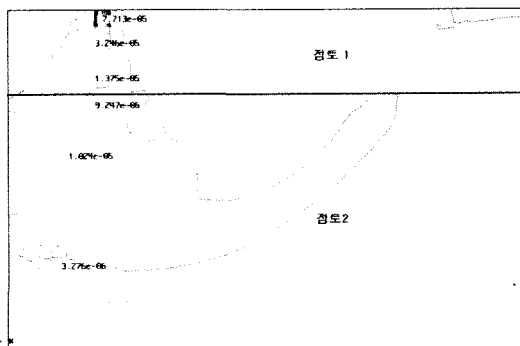
(b) 거친 기초조건

그림 12. 영향깊이에 대한 결과(경우 2)

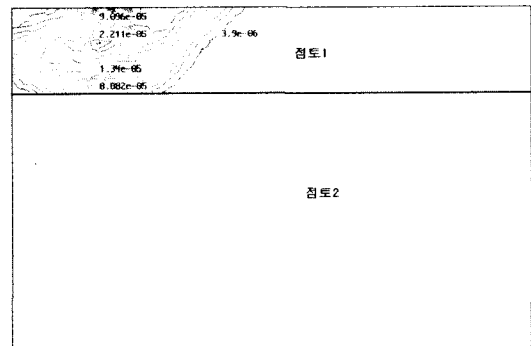
4.3 진행성 파괴 거동

층상기초지반의 진행성 파괴거동을 분석하기 위하여 거친 기초조건에서 층상 지반조건이 경우 1, 2에 대하여 극한상태의 기초지반에 발생하는 최대 전단변형율을 계산하여 그림 13, 14에 표시하였다. 해석결과를 살펴보면 FEM과 FLAC 프로그램에 의한 각 경우에 대

한 파괴전단 형태는 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다. 경우 1에 대한 파괴양상을 자세히 분석하여 보면 그림 13에서 보듯이 견고한 지층 1에서는 관입전단 파괴면이 발달되고, 연약한 지층 2에서 전반전단파괴형태를 보이고 있다. 경우 2에 대한 기초지반의 파괴형태를 분석하면, 연약한 지층 1에서는 전반전단파괴형태를 보이나 견고한 지층 2에 영향을 받아 지층경계면에 파괴면

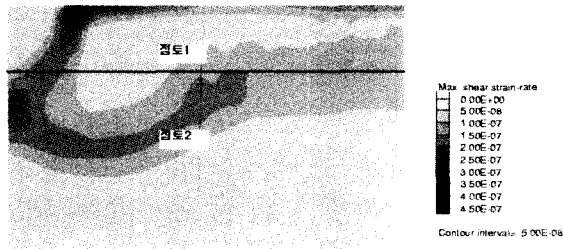


(a) 경우 1

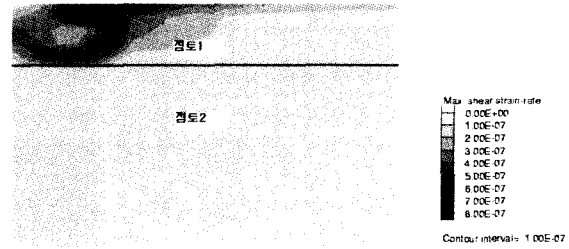


(b) 경우 2

그림 13. FEM에 의한 파괴거동(최대전단변형율도)



(a) 경우 1



(b) 경우 2

그림 14. FLAC에 의한 파괴거동(최대전단변형률도)

이 구속되는 형태를 보이고 있다.

5. 결론

유한요소법(FEM)과 유한차분법(FLAC)을 이용하여 층상점토지반의 극한지지력 문제를 수치 해석적으로 비교 분석하였다. 두 해석방법을 사용하여 층상점토지반의 극한지지력을 명확히 추정할 수 있는 수치적 해석 가능성을 보여주었다. 그 중에서 유한요소법이 파괴거동시 FLAC에 비하여 지표면 변위가 보다 실제적인 거동을 나타내었고, 지지력 계산에서도 일부 구간(경우 2, 미끈한 기초)의 수치 불안정성 없이 안정적으로 계산됨을 알 수 있었다. 층상점토지반의 극한 지지력에 대한 수치해석으로 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 층상점토지반에서 극한 지지력은 지층의 상태(두께, 강도)에 의존할 뿐 아니라 기초의 저면의 조건(거침, 미끄럼)에 의하여 지지력의 차이가 발생된다.
- (2) 층상점토지반(경우 1)에서 일반적으로 사용하는 평균강도에 의한 지지력의 추정은 상당히 과대평가가 되어 위험한 결과를 초래할 수 있다.
- (3) 층상 기초의 극한 지지력 값에 영향을 미치는 깊이는 $H/B=0.5$ 인 층상지층조건 1의 경우는 영향깊이비 (H/B)가 1.5값을 가지며, 층상지층조건 2의 경우는 영향깊이비가 0.8값으로 나타나 Prandtl의 영향깊이비 0.707보다 큰 것으로 조사되었다.
- (4) $H/B=0.5$ 인 층상 기초의 파괴형태는 견고한 지층이 위에 존재하는 경우 관입전단 파괴와 전반전단파괴가 혼합하여 발생되며, 연약한 지층이 위에 존재하는 경우는 전반전단파괴형상이 견고한 아래지반의 영향으로 지층 경계면에 구속되는 형태의 파괴 양상을 나타내었다.

- (5) 층상점토지반의 극한지지력을 수치해석적으로 충분히 검토할 수 있으며, 정도가 높은 해석결과를 얻기 위해서는 수치해석에 영향을 미치는 조절요인(항복 함수선택, 해석증분수)과 두 가지 이상의 수치해석적 방법에 의하여 비교,분석하는 것이 필요하다.

참고 문헌

1. 김영민(1999), 유한요소법에 의한 사면붕괴 거동해석에 미치는 영향분석, *한국지반공학회논문집*, 제15권 5호, pp.19-28.
2. 윤지선역(1992), 흙강도와 지반파괴입문, 구미서관.
3. 小林正樹(1990), 지반의 안정, 침하해석에 관한 유한요소법 적용에 관한 연구, 동경공업대 박사학위논문.
4. Abbo, A.J. and Sloan, S.W.(1993), Backward Euler and subincrementation schemes in computational plasticity, *Computational Mechanics*, Bailema.
5. Braja M. D.(1995), *Principles of foundation engineering*, 3th, PWS.
6. Brown, J.D and Meyerhof, G.G.(1969), Experimental study of bearing capacity in layered clays, *Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, Mexico, Vol.2, pp.45-51.
7. Chen, W.F.(1975), *Limit analysis and soil plasticity*, Elsevier.
8. Davis, E.H. and Booker J.R.(1973), The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays, *Geotechnique*, Vol.23, No.4, pp.551-563.
9. Griffiths, D.V(1989), Computation of collapse loads in geomechanics by finite elements, *Ingenieur Archiv* 59, pp.237-244.
10. Merifield, R.S and Sloan, S.W., Yu, H.S.(1999), Rigorous plasticity solutions for the bearing capacity of two-layerd clays, *Geotechnique* 49, No4, pp.471-490.
11. Meyerhof, G.G. and Hanna, A.M.(1978), Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load, *Can Geotech. J.* Vol.15, pp.565-572.
12. Sloan, S.W. and Vermeer, P.A.(1982), Numerical prediction of collapse loads using finite element methods, *Int. J. Num. Aanal. Meth. Geomech.* Vol.6, pp.47-76.
13. Vermeer, P.A. and Langen(1989), H.V., *Soil collapse computations with finite elements*, *Ingenieur Archiv* 59, pp.221-236.
14. Zienkiewica, O.C and Corneau, I.C.(1974), Viscoplasticity and creep in elastic solids unified numerical solution approach, *Int. J. Num. Meth. Eng.* Vol.8, pp.821-845.

(접수일자 2002. 10. 7, 심사완료일 2003. 1. 23)