

암반 위에 위치한 기초의 지지력 평가에 관한 연구

A study on ultimate bearing capacity of foundations on jointed rock mass

최고니¹⁾, Go-Ny Choi, 유충식²⁾, Chung-Sik Yoo

¹⁾ 성균관대학교 초고층장대교량학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Mega Buildings and Bridges, Sungkyunkwan University

²⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University

SYNOPSIS : This study concerns bearing capacity of shallow and deep foundations on jointed rock mass. The main focus of this research lies on getting insight into the applicability of bearing capacity estimation methods developed by other researchers. First, an extensive literature review was performed on previous studies concerning bearing capacity of foundation on jointed rock mass. Second, a parametric study on a number of jointed rock conditions using the finite-element analysis. The results of the analysis were then compared with those computed by the bearing capacity estimation method.

Keywords : jointed rock, bearing capacity, Finite-element method

1. 서론

암반에 대한 끊임없는 연구는 토목공학에서의 수많은 문제점들과 더불어 인류의 생활터전을 더욱 효율적으로 만드는데 근간을 이루고 있으며, 현재도 토목공학도 및 기술자들에게 있어 주요 관심대상이며 또한 미지의 개척분야라고 할 수 있다. 도로망 확충에 따른 대형도로의 건설이나 장대교량 등의 건설에 같이 상부구조물의 하중이 큰 경우에 구조물에 작용하는 연직하중이나 수평하중을 지지하기 위하여 깊은 기초가 사용되며 이러한 깊은 기초의 선단부는 암반층에 근입되어 지지되는 것이 일반적이다. 그리고 암반층에 얇은 기초가 건설되는 경우 또한 상부하중을 지지하여 암반층에 하중을 전달한다.

절리 암반의 경우 암반 내 존재하는 절리, 단층파쇄대 등과 같은 불연속면의 발달상태에 따라 암반에 건설된 기초의 극한지지력이 다르게 나타난다. 즉 암반의 불연속면의 발달 상태를 나타내는 방향과 간격, 연속성, 틈새, 거칠기, 충전물질, 풍화정도 등에 따라 기초의 극한지지력이 달라지므로 지지력 평가시에도 이러한 암반의 특성을 적절하게 반영하여야 현실적인 결과를 얻을 수 있다.

절리 암반에 대해 가장 근접한 구성모델로 알려진 Hoek-Brown Model을 이용한 절리암반에 건설된 기초의 극한지지력 산정에 대한 이론식에 대한 연구는 활발하게 진행되어 왔다. Hoek-Brown 파괴규준을 이용한 얇은 기초의 기초 종류에 따른 극한지지력의 산정(Wyllie, 1992), 깊은 기초에 관한 선단 극한지지력의 산정(Serrano와 Olalla, 2002), 깊은 기초에 관한 주면 극한지지력의 산정(사공명과 백규호, 2003) 등 절리암반에 건설된 기초의 극한지지력 산정에 대한 다각도의 연구가 이루어졌으며 이러한 연구에 대한 검증 연구 또한 요구된다.

위와 같은 맥락에서 본 논문에서는 절리암반에 건설된 여러 기초들의 극한지지력 산정에 있어서 기존의 연구에 인용된 암반 CASE에 대한 유한요소해석결과와 이론해석을 실시하였다. 유한요소해석에 있어서 각 해석 CASE에 대한 민감도 분석을 수행하였으며 이에 의한 최적화 유한요소망을 이용하여 수치해석을 실

시, 그 결과 유한요소해석에 의한 극한지지력 결과 값과 이론해석에 의한 극한지지력 결과 값들을 비교분석하여 각 이론식의 신뢰성분석을 수행, 합리적인 적용범위와 개선방향을 제안하였다.

2. 암반에 위치한 기초지지력

2.1 Hoek-Brown 파괴규준

Hoek 등(2002)은 암반의 파괴를 예측할 수 있는 가장 적당한 암반 강도모델로써 Hoek-Brown 파괴규준을 제안하였다. 이 파괴규준은 1980년에 처음 발표된 이후 계속 수정되어 왔으며 특히 낮은 응력범위에서 적합한 강도모델로 알려져있다. 일반화된 Hoek-Brown 파괴규준의 관계식을 다음과 같이 표현하였다. 무결암에 대한 Hoek-Brown 파괴규준식은 아래와 같다.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5} \quad (1)$$

여기서, σ'_1 과 σ'_3 는 파괴시 최대주응력과 최소주응력이며, σ_c 는 무결암의 일축압축강도이다.

일반적인 절리암반에 대한 Hoek-Brown 파괴규준식은 아래와 같다.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (2)$$

m_b 는 재료상수 m_i 가 감소된 값이며 s , a 는 암반특성에 의해 결정되는 상수이다.

맞물림 효과에 의해 암반의 강도가 영향을 받는 양질의 암반의 경우 일반적으로 $a=0.5$ 로 정의내리므로 Hoek-Brown 파괴규준식은 아래와 같다.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^{0.5} \quad (3)$$

그러나 풍화 등 에 의해 맞물림 효과가 저하된 불량한 암반에 대해서는 인장강도나 점착력이 작용하지 않기 때문에 $s=0$ 을 적용하고 Hoek-Brown 파괴규준식은 아래와 같다

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} \right)^a \quad (4)$$

위 (3), (4) 식에 적용하는 암반 재료상수들중 m_b , s , a 는 Hoek과 Brown(1988)이 제안한 이론에 의하여, RMR은 Bieniawski(1976)가 제안한 이론에 의하여 결정된다. 지하수위는 무시된 관계식이 아래와 같다.

(i) 교란된 암반

$$m_b = \exp\left(\frac{R-100}{14}\right) m_i \quad (5)$$

$$s = \exp\left(\frac{R-100}{6}\right) \quad (6)$$

$$a = 0.5 \quad (7)$$

(ii) 불교란 암반

$$m_b = \exp\left(\frac{R-100}{28}\right) m_i \quad (8)$$

$$s = \exp\left(\frac{R-100}{9}\right) \quad (9)$$

$$a = 0.5 \quad (10)$$

위의 (5)~(10) 의 식은 RMR이 25보다 큰 경우에 적용하는 식으로 이러한 한계를 극복하기 위하여 Hoek(1994)은 암반재료에 대한 새로운 지수인 Geological Strength Index(GSI)를 소개했다. GSI와 암반 재료상수들의 관계는 아래와 같다.

(i) GSI > 25, 양질의 암반

$$m_b = \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right) m_i \quad (11)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right) \quad (12)$$

$$a = 0.5 \quad (13)$$

(ii) GSI<25, 불량한 암반

$$m_b = \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right) m_i \quad (14)$$

$$s = 0 \quad (15)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (16)$$

초기에 Hoek-Brown 파괴규준을 적용하는데 있어서 어려운 점 중의 하나는 Hoek-Brown 파괴규준이 주응력의 관계로부터 유도되었으나 수치해석과 한계평형법의 연구에서는 주응력의 개념보다는 전단응력과 수직응력의 관계를 이용한 Mohr-Coulomb 파괴규준이 일반적으로 사용된다는 것이었다. 이러한 점을 고려하여 Hoek(1990)은 Hoek-Brown 파괴규준으로부터 등가 점착력과 마찰각을 유도하기 위한 연구를 수행하였다. Balmer(1952)의 방정식을 이용하여 수직응력과 전단응력은 다음과 같이 주응력과 연관시킬 수 있다.

$$\sigma_n' = \sigma_3' + \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'} + 1} \quad (17)$$

$$\tau = (\sigma_n' - \sigma_3') \sqrt{\frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'}} \quad (18)$$

GSI > 25, a=0.5 일때

$$\frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'} = 1 + \frac{m_b \sigma_c}{2(\sigma_n' - \sigma_3')} \quad (19)$$

GSI < 25, s=0 일때

$$\frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'} = 1 + am_b \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} \right)^{a-1} \quad (20)$$

위의 식으로 수직응력과 전단응력이 계산되어지면 평균적인 점착력과 내부마찰각 또한 선형회귀분석을 통하여 결정되어 진다. 다음 식은 암반의 일축압축강도와 최적화된 회귀분석을 통한 점착력과 내부마찰각의 관계이다.

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (21)$$

Hoek과 Brown(1983)이 제안한 파괴규준을 이용하여 얇은 기초의 극한지지력 산정시 암반조건과 기초형태에 의하여 다음과 같은 그룹으로 절리암반이 구분된다.

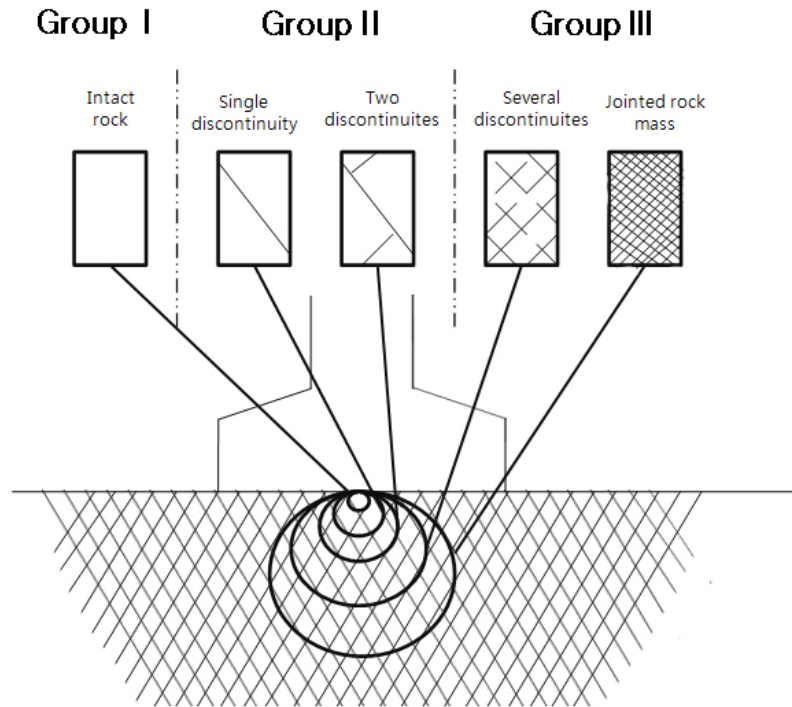


그림 1. 얇은 기초가 건설된 절리암반의 유형 (Hoek 등, 1995)

Group I : 무결암, 등방성 암반으로 간주되며 Hoek-Brown 파괴규준을 따른다.

Group II : 몇 개의 불연속면에 의해 영향을 받는 암반으로 비등방성거동을 하며 Hoek-Brown 파괴규준이 적용되지 않는다.

Group III : 많은 불연속면에 의해 영향을 받는 암반으로 불연속면 사이의 작은 공간들이 존재

한다. 이 그룹은 수많은 절리면을 포함하여 등방성 거동을 하며 Hoek-Brown 파괴 기준을 따른다.

작은 공간은 상대적인 개념으로 기초의 형태와 관련이 있다. Serrano와 Olalla(1996)가 제안한 "Spacing ratio of a foundation(SR)"은

$$SR = B \sum \frac{1}{s_{mi}} = B \sum \lambda_i \quad (22)$$

라 정의한다. B는 기초폭(m), s_{mi} 는 set I인 불연속면의 spacing, λ_i 는 불연속면 set I의 frequency (m^{-1})이다.

2.2 얇은 기초의 지지력 산정

Wyllie(1992)는 "Foundations on Rock" 5장에서 절리암반에 시공된 얇은 기초의 극한지지력의 결정을 제안하였다. 얇은 기초가 시공된 암반의 공학적 거동은 다음과 같다. 시공된 기초의 아래 부분에는 토질 역학적 거동과 유사한 주동, 수동 썩기가 발생하는데 이러한 썩기는 직선 형태로 가정되며 주동과 수동영역의 구분은 아래 그림과 같다.

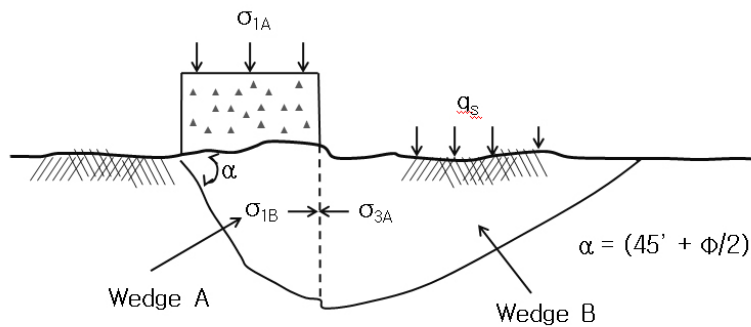


그림 2. 절리암반에 위치한 기초의 극한지지력 (Wyllie, 1992)

연속기초가 시공될 경우 주동 썩기 A와 수동 썩기 B가 형성되게 되며 기초아래의 암반은 삼축압축시험과 같은 거동을 하게 된다. 만일 기초 바로 아래의 암반의 무게가 무시된다면 A 영역의 주응력은 기초의 응력인 q와 같아지게 되고 B 영역은 수평방향으로 삼축압축시험의 최대주응력이 작용하게 된다. 또한 기초가 암반 표면에 시공되었다면 최소주응력은 0으로 결정되어진다. q_s 는 암반자중에 의하여 발생하는 수직응력의 평균값이다. 하중이 재하되어 양쪽 영역이 파괴에 도달할 때 A영역의 최소주응력 σ_{3A} 는 B영역의 최대주응력 σ_{1B} 와 같아지게 되며 A영역에서의 최소주응력은 B영역의 압축에 의해 형성되고 이는 암반의 압축지지력과 같다.

삼축압축에서의 절리암반의 최대주응력은 Hoek-Brown 파괴기준을 따라 식 (2)과 같이 정의되며 절리암반의 일축압축강도는 아래와 같다.

$$\sigma_{cm} = (s\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

또한 A 영역의 최대주응력은 극한지지력과 같으므로

$$\begin{aligned}\sigma_{1A} &= (m_i \sigma_c \sigma_{cm} + s \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} + \sigma_{cm} \\ &= s^{\frac{1}{2}} \sigma_c \left\{ 1 + (m_i s^{-\frac{1}{2}} + 1)^{\frac{1}{2}} \right\}\end{aligned}\quad (24)$$

시공한 기초의 형상을 고려한 절리암반에 건설된 기초의 극한지지력은 다음과 같다.

$$q_u = C_{f1} s^{\frac{1}{2}} \sigma_c \left\{ 1 + (m_i s^{-\frac{1}{2}} + 1)^{\frac{1}{2}} \right\}\quad (25)$$

C_{f1} 은 기초형태에 의한 형상계수로써 표 2에 의하여 결정된다.

식 (25)에서 제시된 바와 같이 Wyllie의 극한지지력 산정이론은 기초의 기하조건을 아래 표와 같이 다소 단순화 된 방법으로 적용하고 있다. 이는 토사지반에 적용하는 Terzaghi'의 지지력이론과 다소 차이나는 부분으로서 실제적으로 얇은 기초의 공학적 거동과 4장에서 언급될 유한요소해석의 결과 값을 보면 원형기초나 연속기초의 폭이 넓어지는 경우 암반의 극한지지력은 뚜렷히 증가하는 양상을 보인다. 그러나 Wyllie의 제안 식에는 기초의 폭에 대한 고려가 사각형 기초에 국한되어져 있으므로 기초형태에 의한 형상계수를 산정하는데 있어서 제한적인 적용이 이루어지고 있다. 공학적으로 정확하고 정밀한 극한지지력의 산정을 위하여 Wyllie의 제안식 적용시 기초의 기하조건 고려의 필요성에 대한 구체적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 1. 기초형태에 의한 형상계수. (L=길이, B=폭) (Wyllie, 1992)

Foundation shape		C_{f1}
strip (L/B > 6)		1.0
Rectangular	L/B = 2	1.12
	L/B = 5	1.05
Square		1.25
Circular		1.2

3. 유한 요소 해석

앞서 기술한 이론해석에 의한 암반의 지지력 결과의 신뢰성 평가의 일환으로 동일한 암반과 기초조건에 대하여 유한요소해석 모델을 구축하고 각 조건에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 수행한 구체적인 방법은 아래와 같이 요약된다. 축대칭모델을 이용하여 얇은 원형기초를 모델링하고 평면변형률모델을 이용하여 얇은 연속기초를 모델링한다. 이론식 극한지지력의 1.5배에서 3배에 해당하는 하중을 기초상부에 재하하여 침하를 유도하고 각 단계별 침하-하중곡선을 이용, 극한지지력을 산정한다.

3.1 대상조건

유한요소 해석시 고려한 검토 대상조건은 다음과 같다. 먼저 기초를 지지하는 암반은 기존의 Serrano와 Olalla (2002) 연구에서 Hoek-Brown 파괴규준을 따르는 암반조건을 인용하였으며 표 2에서 요약한 바와 같이 단위중량은 $23kN/m^3$, 포아송비 0.3, 발파교란계수 D는 0.5로 가정하였다.

표 2. 해석에 적용된 강도정수

case no.	γ (kN/m^3)	m_i	σ_c (Mpa)	GSI	D	m_b	s	a	ν	E (Mpa)
1	23	15	0.52	15	0.5	0.261959	0.000012	0.561101	0.3	72.121
2		5	1.091	65		0.944378	0.009404	0.501975		1857.69
3		5	1.42	65		0.944378	0.009404	0.501975		2119.36
4		19	27.5	75		5.777452	0.035674	0.500911		16585.4
5		14	0.85	75		4.25707	0.035674	0.500911		2915.88
6		4	18.2	50		0.36985	0.001273	0.505734		3199.6
7		4	0.38	60		0.595432	0.004828	0.502841		822.153
8		4	0.84	60		0.595432	0.004828	0.502841		1222.36
9		5	34	35		0.226321	0.000172	0.51595		1844.17
10		19	12.5	60		2.828304	0.004828	0.502841		4715.37

기초는 얇은기초 중 원형기초와 연속기초에 대하여 각각 폭 1m, 2m, 3m의 해석을 암반조건별로 수행하였다.

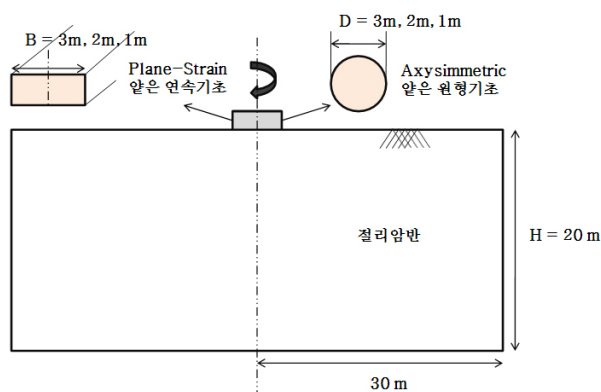


그림 3. 해석에서 고려된 기초 조건

3.2 해석 모델링

본 연구에서는 Rockscience사에서 개발한 Phase2 6.0 프로그램을 사용하여 절리암반 기초의 극한지력해석을 수행하였다. Phase2 6.0은 유한요소해석 프로그램으로서 Hoek-Brown 모델을 제공하고 있다. 모든 모델들이 중심축으로부터 좌우 대칭인 점을 고려하여 우측 반 단면에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 해석 모델링에서 모델의 영역제함에 의한 기초의 하중-변위 특성의 영향이 발생하지 않게 하기 위해 모델경계는 높이 20m, 폭은 대칭축으로부터 30m로 가정하였다. 암반거동의 공학적 모사를 위하여 모델의 양 수직경계는 연직롤러를 설치하여 수평방향의 변위를 구속하였고 모델 하부 수평경계는 힌지를 설치하여 수직, 수평거동을 구속하였다. 암반침하의 정밀한 모델링을 위하여 해석모델 이산화시 얇은 기초 원형기초에는 축대칭 8절점 가감 적분요소가 사용되었으며 얇은 기초 연속기초에는 평면변형률 8절점 가감 적분요소를 사용하였다. 하중재하방식은 20단계로 나누어 이론산정식의 1.5배에서 3배에 해당하는 하중을 단계별로 재하하였으며 각 단계별 기초하단의 침하량을 산정해낸다.

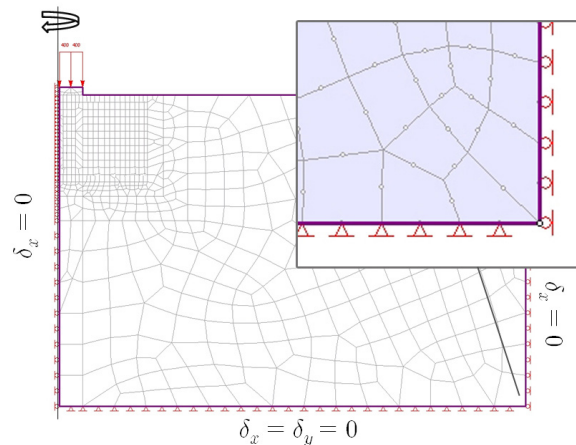


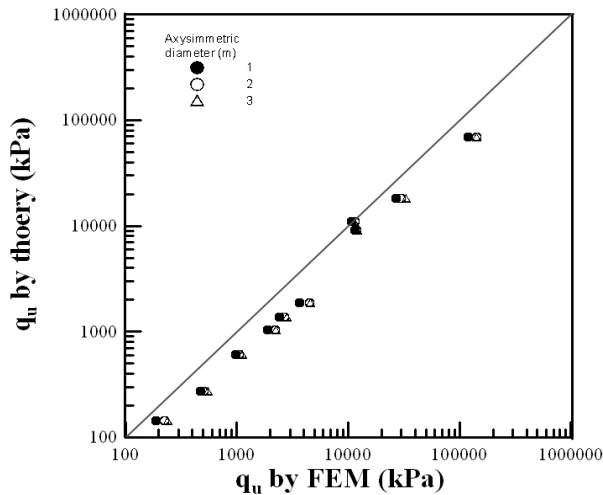
그림 4. 유한요소해석 모델링

3.3 이론식과 해석결과 비교

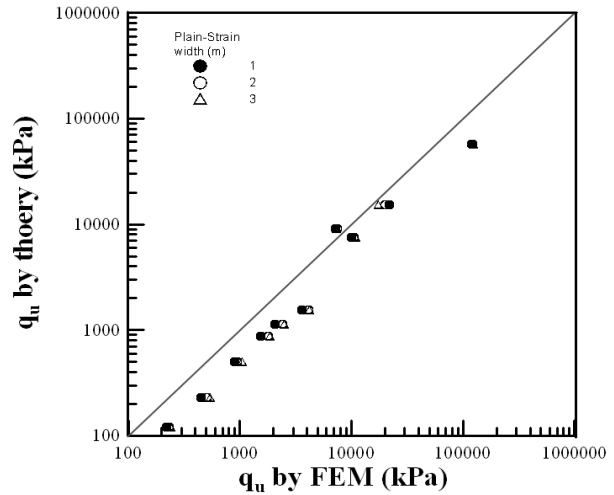
Hoek-Brown 파괴규준을 따르는 암반에 시공된 기초에 대하여 유한요소해석에서 결정된 극한지력과 이론식으로 결정된 극한지력이 그림 5와 같다.

기초조건을 변화시키면서 해석결과에 미치는 영향을 비교, 분석한 결과 앞서 살펴본 바와 같이 기초 폭이 넓을수록 동일한 지반에 대하여 극한지력이 크게 결정되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 동일한 지반 조건일 경우 얇은 원형기초, 얇은 연속기초 순으로 극한지력이 큰 값을 보임을 확인했다.

이러한 유한요소해석 값과 이론식을 비교해보면 얇은 기초에 대해서는, 이론식이 더 작게 산정되어 작게는 1.56배에서 크게는 1.9배까지 극한지력 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 유한요소 해석시 입력된 지반조건 중 특히 **CASE 5, 9**에 대하여 살펴보면, **CASE 5**는 무결암의 일축압축강도(σ_c)가 820 kPa로 매우 작고 GSI는 75로 큰 경우이고, **CASE 9**는 무결암의 일축압축강도(σ_c)가 34000 kPa로 매우 크고 GSI는 35로 작은 경우이다. 전체 CASE중 **CASE 5**는 최대오차가 발생하고 **CASE 9**는 최소오차가 발생한 것으로 보아 무결암의 일축압축강도(σ_c)가 큰 암반일수록 GSI가 작은 암반일수록 얇은 기초에 대한 이론식의 적용에 신뢰성이 있음을 확인할 수 있다. 또한 이러한 경향은 얇은기초의 전체 CASE에 대해서도 일반적으로 적용됨을 확인할 수 있다.



(a) 얇은 원형 기초



(b) 얇은 연속 기초

그림 5. 이론식과 유한요소해석의 암반 위에 위치한 기초의 지지력(q_u) 비교

4. 결론

본 논문에서는 암반 위에 위치한 기초의 지지력 평가 방법에 대한 신뢰성분석을 수행하기 위한 일환으로 암반에 위치한 기초의 지지력 평가방법에 대해 고찰하였으며 다양한 암반 조건과 기초설계조건을 구성하고 Hoek-Brown 모델을 이용한 수치해석을 수행하여 지지력을 평가한 후, 조사한 지지력 평가방법의 신뢰성을 검토하였다. 그 결과 현재 적용하는 암반기초 지지력 산정식은 기초 폭에 관한 고려가 세부적으로 이루어지지 않아 기초 폭의 영향을 반영할 수 없으나 해석 결과 기초 폭에 따른 영향을 받는 것으로 나타나 이에 대한 추가 검토가 필요할 것으로 된다. 또한 Hoek-Brown 모델을 이용한 유한요소 해석 결과를 이용하여 산정한 극한지지력은 이론식의 극한지지력 보다 큰 것으로 나타나고 있어 과대평가의 결과를 보이는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김선빈, 양기호, 유충식(2007), 암반절취사면의 안정해석시 Hoek-Brown모델 및 Mohr-Coulomb모델 적용에 관한 비교연구, 2007년도 한국지반공학회 가을 학술발표대회.
2. 사공명, 백규호(2003), Hoek-Brown모델을 이용한 현장타설말뚝의 주변마찰력 산정, 한국지반공학회 논문집, 제 19권 1호, pp. 209-220.
3. 설훈일, 정상섭, 김영호(2008), 유한요소해석을 통한 암반에 근입된 현장타설말뚝의 하중전이거동 분석, 한국지반공학회 논문집, 제 24권 12호, pp. 33-40.
4. 최병식, 이진무, 최현석, 서덕동(2003), Hoek-Brown 파괴기준의 비선형성을 고려한 암반사면 안정성 평가의 수치해석적 연구, 한국지반공학회 논문집, 제 4권 2호, pp. 77-91.
5. 홍원표, 채수근(2007), 지지지반의 종류별 SDA매입말뚝의 선단지지력 산정, 한국지반공학회 논문집, 제 23권 5호, pp. 111-129.
6. Balmer, G.(1951), "A General Analysis Solution for Mohr' Envelope", *Proceedings, American Society for Testing Materials*, Vol.52, pp. 287-332
7. Wyllie. Duncan C.(1992). *Foundation on Rock, E & FNSPON*, pp.114-122.
8. Hoek, E.(2002), A Brief History of the Hoek-Brown Failure Criterion, unpublished document.

9. Zhang, Lianyang.(2004), Drilled shafts in Rock -Analysis and Design, *A.A. Balkema Publishers*, pp.123-127, 147-148
10. Serrano, A. and Olalla, C.(2002). "Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock : part-1 :theory." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Siences*, Vol. 39. pp. 833-846.
11. Serrano, A. and Olalla, C.(2002). "Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock : part-2 :application." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Siences*, Vol. 39. pp. 847-866.
12. Serrano, A. and Olalla, C.(2004). "Shaft resistance of a pile embedded in rock" *International Journal of Rock Mechanics & Mining Siences*, Vol. 41. pp. 21-35