

대형평판재하시험 및 수치해석에 의한 풍화암 허용지지력 평가

An Evaluation of Allowable Bearing Capacity of Weathered Rock by Large-Scale Plate-Bearing Test and Numerical Analysis

홍 승 현¹ Hong, Seung-Hyeun

Abstract

Considering that the number of cases in which a structure foundation is located on weathered rock has been increasing recently, for adequate design bearing capacity of a foundation on weathered rock, allowable bearing capacities of such foundations in geotechnical investigation reports were studied. With reference to the study results, the allowable bearing capacity of a foundation on weathered rock was approximately $400\text{--}700\text{ kN/m}^2$, with a large variation, and was considered a conservative value. Because the allowable bearing capacity of the foundation ground is an important index in determining the foundation type in the early design stage, it can have a significant influence on the construction cost and period according to the initial decision. Thus, in this study, six large-scale plate-bearing tests were conducted on weathered rock, and the bearing capacity and settlement characteristics were analyzed. According to the test results, the bearing capacities from the six tests exceeded $1,500\text{ kN/m}^2$, and it shows that the results are similar with the one of bearing capacity formula by Pressuremeter tests when compared with the various bearing capacity formula. In addition, the elastic modulus determined by the inverse calculation of the load-settlement behavior from the large-scale plate-bearing tests was appropriate for applying the elastic modulus of the Pressuremeter tests. With consideration of the large-scale plate-bearing tests in this study and other results of plate-bearing tests on weathered rock in Korea, the allowable bearing capacity of weathered rock is evaluated to be over $1,000\text{ kN/m}^2$. However, because the settlement of the foundation increases as the foundation size increases, the allowable bearing capacity should be restrained by the allowable settlement criteria of an upper structure. Therefore, in this study, the anticipated foundation settlements along the foundation size and the thickness of weathered rocks have been evaluated by numerical analysis, and the foundation size and ground conditions, with an allowable bearing capacity of over $1,000\text{ kN/m}^2$, have been proposed as a table. These findings are considered useful in determining the foundation type in the early foundation design.

요 지

최근 구조물 기초가 풍화암상에 위치하는 경우가 증가하는 추세로 풍화암상 기초의 적정 설계 지지력을 평가하고자 국내 지반조사서상 제안된 풍화암 기초 허용 지지력을 조사하였다. 조사 결과 몇몇 현장에 제안된 풍화암 허용 지지력은 약 $400\text{--}700\text{ kN/m}^2$ 수준으로 그 편차가 큰 편이며 보수적인 값으로 판단되었다. 지반의 기초 허용 지지력은 설계 초기 기초 형식 결정에 중요한 지표로, 그 결정에 따라 공사비 및 공기에 큰 영향을 줄 수 있다. 이에 본 연구에서는 적절한 풍화암 지반의 허용지지력을 평가하고자 풍화암 지반에 대하여 총 6회의 대형 평판재하시험을 실시하고 지지

¹ 정회원, 경기대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ., Tel: +82-2-2057-3100, 2ndlife@hanmail.net)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

력 및 침하 특성을 분석하였다. 시험 결과 지지력은 모두 $1,500kN/m^2$ 이상으로 평가되었으며 기존 지지력 공식과 비교하였을 때 공내재하시험에 의한 지지력 평가식이 본 시험결과와 유사함을 확인하였다. 또한 대형 평판재하시험의 하중-침하 거동 역산에 의한 지반의 탄성계수는 공내재하시험의 탄성계수(E) 값 적용이 적절하다고 평가되었다. 본 연구에서의 대형 평판재하시험 결과 및 국내 타 현장에서의 평판재하시험 사례 등을 종합하여 볼 때 풍화암 허용 지지력은 $1,000kN/m^2$ 이상으로 평가된다. 그러나 기초 침하량은 기초 크기 증가에 따라 비례하므로 구조물 허용 침하량 기준에 따라 허용 지지력은 제한되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 수치해석적 방법으로 기초 크기 및 풍화암 두께에 따른 기초 예상 침하량을 평가하였으며, 풍화암 지반상 기초 허용지지력이 $1,000kN/m^2$ 이상일 수 있는 기초 크기 및 지반 조건을 표로 제안하였다. 이는 기초 설계 초기 기초 형식 결정에 유용하다고 사료된다.

Keywords : 3D FEM (Finite element method), Bearing capacity, Large-scale plate-bearing test (LPBT), Shallow foundation, Weathered rock

1. 서론

국내 건축 구조물은 초고층화가 진행되면서 지하 주차장 확보를 위하여 지하 층수가 증가하고 있으며, 이에 대심도 굴착이 진행되어 구조물 기초가 풍화대에 위치하는 경우가 증가하고 있다. 국내 지반은 심도에 차이가 있을 뿐 대부분 지역에서 풍화대가 존재한다. 본 풍화대 층은 풍화토층과 풍화암층으로 구분되며, 이들에 대한 국내 분류기준은 표준관입저항치(N)가 50회/10cm를 기준으로 풍화토와 풍화암으로 구분하고 있다(지반조사편람(2006) 및 도로설계 편람(2000)).

이와 같이 구조물 기초가 풍화암상에 위치하는 경우가 증가하면서 기초 설계 실무시 풍화암 지반상 얇은 기초의 지반 허용 지지력 평가는 기초 형식 결정에 중요한 요소라 할 수 있다. 기초 설계 실무시 지반조사서에 제시한 지반 허용 지지력을 설계에 그대로 반영하는 경우가 적지 않다. 특히 건축 구조물 설계시 건축구조기술자가 직접 기초설계를 수행하는 경우가 있으며, 이 경우 지반에 대한 상세 평가 없이 지반조사서에 제시한 지반 허용지지력을 그대로 차용하여 기초형식을 결정하는 사례가 있다.

Table 1은 국내 지반조사보고서상 풍화암 지반 허용 지지력이 제시된 몇몇 사례로서, 조사된 사례의 지지력 범위는 약 $400\sim700kN/m^2$ 수준으로 Table 6의 국내 다수의 현장에서 실시한 평판재하시험 결과에 근거할 때 보수적인 값으로 판단된다. 지반조사서상 제시된 얇은 기초 허용 지지력이 상부 재하하중에 미달될 경우 깊은 기초 형식으로 결정되어 공기 및 공사비가 증대될 수 있으므로 기초 허용 지지력 산정은 매우 신중하여야 한다. 이에 본 연구의 목적은 풍화암 지반의 허용지지력을 실제 현장 시험 결과와 수치해석적 방법으로 평가하여 기초 설계시 참고 자료를 제공하기 위함이다.

풍화암반 상 얇은 기초 허용 지지력에 대한 연구는 다소 미흡한 실정이다. Jung(2013)은 실험용 토조에 소일시멘트를 이용하여 인공 풍화암 지반을 조성하고 실내실험을 통한 인공 풍화암 지반 상 얇은 기초의 거동특성을 분석하였다. 또한 실무에서 풍화암 지반의 지지력은 Terzaghi의 지지력 공식을 준용하여 사용하고 있는 점을 개선하고자 실험 결과 분석을 통하여 별도의 풍화암 지반의 극한 지지력 공식을 제안하였다.

Kim et al.(2012)은 조밀한 화강 풍화토 지반에 크기

Table 1. Cases of recommended allowable bearing capacity on weathered rock

| References | Recommended allowable bearing capacity (kN/m^2) | Remarks |
|---|---|----------------|
| Geotechnical report of Gyeonggi-do Goyang-si ○○○ project | 500 | Weathered rock |
| Geotechnical report of Gangwon-do Chuncheon-si ○○○ project | 470 | " |
| Geotechnical report of Chungcheongnam-do Sejong-si ○○○ project | 630~687 | " |
| Geotechnical report of Chungcheongnam-do Asan-si ○○○ project | 500~600 | " |
| Geotechnical report of Gyeongsangbuk-do Pohang-si ○○○ project | 500 | " |
| Geotechnical report of Chungcheongnam-do Asan-si bebang ○○○ project | 400 | " |

Table 2. Pressuremeter and borehole shear test results of weathered rock

| | Pressuremeter test | | | | Borehole shear test | | Remarks |
|---------|---|---|---|---|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| | In-situ pressure (Po, MN/m ²) | Yield pressure (Py, MN/m ²) | Deformation modulus (D, MN/m ²) | Elastic modulus (E, MN/m ²) | Cohesion (kN/m ²) | Internal friction angle (°) | |
| Range | 0.5~5.0 | 5.5~11.5 | 123~764 | 189~1,672 | 26.5~34.4 | 32.7~33.9 | Weathered rock |
| Average | 1.53 | 7.13 | 241 | 470 | 30.0 | 33.1 | |

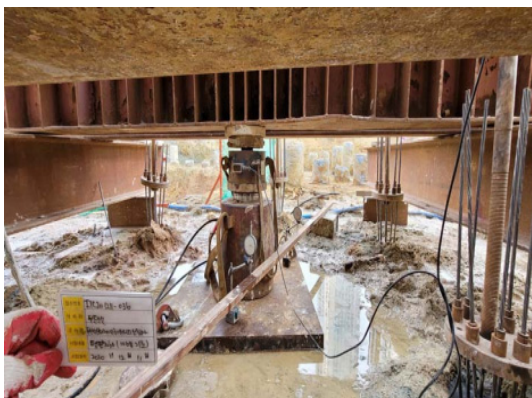
Table 3. Design properties from laboratory and field tests

| Division | Unit weight (kN/m ³) | Elastic modulus (MN/m ²) | Poisson's ratio | Cohesion (kN/m ²) | Internal friction angle (°) |
|----------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Weathered rock | 20 | 300 | 0.3 | 30 | 33 |
| Soft rock | 22 | 1,500 | 0.25 | 50 | 35 |

2.2 시험 방법

평판재하시험은 상대적으로 크기가 큰 1.0m×1.0m의 정방형 강재 재하판을 이용하였다. 강재판은 재하시 접촉압을 일정하게 유지하고 시험과정에서 변형되지 않도록 두께 5cm의 강판을 사용하였다.

Table 4는 대형평판재하시험의 재하 장치 및 측정 장치 제원이며 Fig. 2는 시험 전경사진이다. 본 시험은 동일 현장의 풍화암 지반을 대상으로 위치를 달리하여 총 6개소에서 실시하였다. 본 시험의 최대하중은 4,500kN/m² 수준으로 총 8단계로 나누어 하중을 재하하고 하중과 침하량을 계측하였다.



2.3 시험 결과

Fig. 3은 본 연구에서 수행한 대형평판재하시험 결과 하중-침하곡선이다. 총 6개소 시험 결과 전반적으로 하중이 증가함에 따라 침하가 지속적으로 증가하나, 최대 하중(약 4,500kN/m²)까지 뚜렷한 항복점이 없으며 침하량이 상대적으로 미미하여 항복 또는 극한상태에 도달하지 않은 것으로 평가되었다.

3. 시험 결과 분석

본 절에서는 본 연구의 대상인 풍화암 지반상 얇은

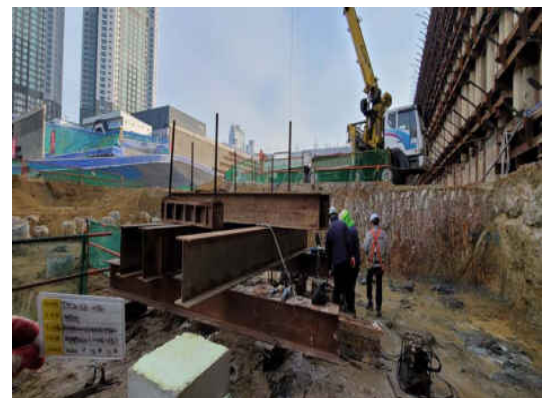
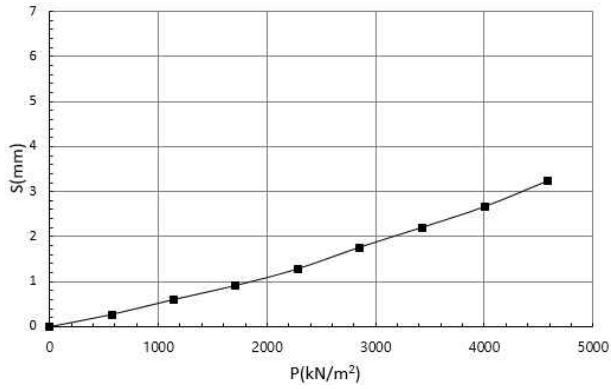


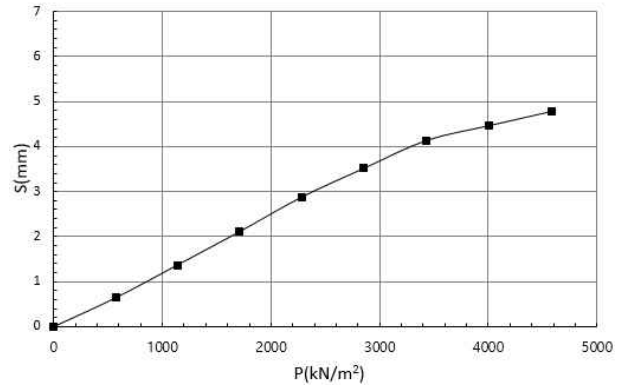
Fig. 2. Photos of large-scale bearing plate test

Table 4. Large-scale bearing plate test set

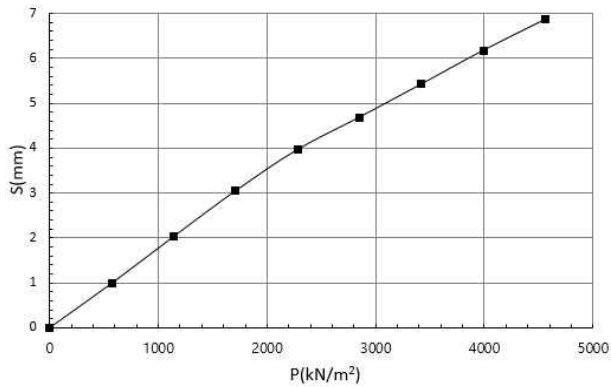
| | Device | Capacity/Size | Quantity | Remark |
|-------------------|-------------------|---------------|----------|-------------------|
| Loading devices | Cylinder and pump | 500 ton | 1 Set | Hydraulic |
| | Bearing plate | 1.0m×1.0m | 1 E/A | Rectangular shape |
| | Reaction anchor | - | 6 E/A | - |
| Measuring devices | Dial gauge | 50mm | 2 E/A | - |
| | Load cell | 500 ton | 1 E/A | - |



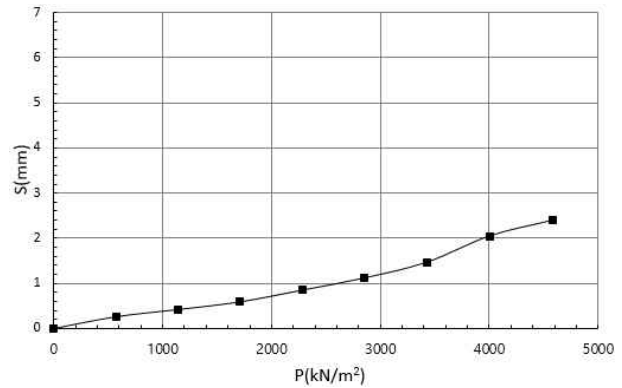
(a) P-S curve of LPBT-1



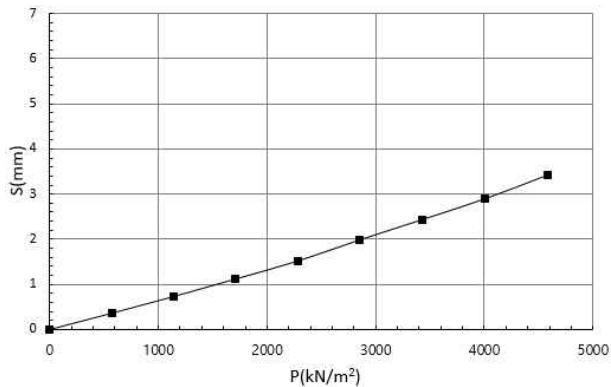
(b) P-S curve of LPBT-2



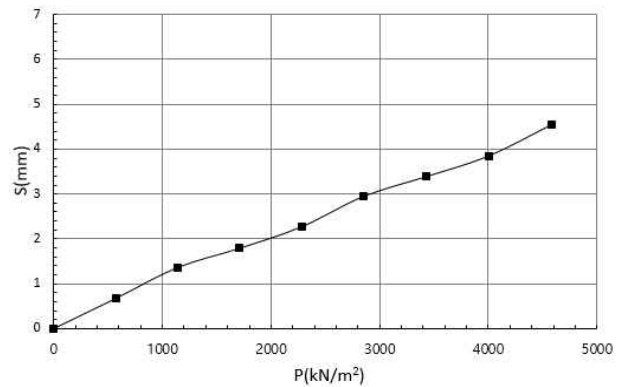
(c) P-S curve of LPBT-3



(d) P-S curve of LPBT-4



(e) P-S curve of LPBT-5



(f) P-S curve of LPBT-6

Fig. 3. P-S curve of large-scale plate bearing tests

기초의 적정 허용지지력을 평가하기 위하여 재하시험 결과를 분석하였으며, 그 결과와 기존 이론식 및 경험식과 비교 평가하였다. 또한 침하 거동 분석을 실시하여 이론식 적용의 적정성을 평가하고 이를 기술하였다.

3.1 허용 지지력 평가

평판재하시험 결과 허용 지지력은 하중(P)-침하량(S) 분석법, S-Logt 분석법, ds/d(log t)-P분석법 및 LogP-LogS

분석법으로 항복하중을 구하여 안전율을 적용하는 방법, 항복하중의 1.5배를 취하거나 침하량이 재하판 직경의 10%인 때를 극한하중으로 평가하는 극한하중 분석법이 있다(구조물기초설계기준 해설, 2018).

최대 시험하중을 $1,500\text{ kN/m}^2$ 이상 재하하였으나, 특별한 항복점이 발견되지 않고 침하량은 상대적으로 미소(2.40~6.87mm)하여 극한하중에 대한 일반적인 안전율($F.S=3$)을 적용할 경우 평판의 허용지지력은 약 $1,500\text{ kN/m}^2$ 이상이라 평가된다. 각 시험별 평판 허용 지지력

은 Table 5와 같다.

별도로 국내 다수의 풍화암 지반 대상 평판재하시험 결과를 조사하여 Table 6에 요약하였다. 풍화암 지반의 평판 허용지지력은 약 $1,000\sim 1,600\text{ kN/m}^2$ 이며, 대부분 굴삭기(백호) 자중에 의한 재하방식으로 평판에 대한 반력 하중의 한계로 반력 하중 증대시 허용지지력은 더

욱 증가할 것으로 예상된다.

본 연구의 대형평판재하시험 결과 및 국내 타현장 다수의 평판재하시험 사례와 실제 기초의 크기 효과를 고려할 때 파괴에 대한 풍화암 지반상 얇은 기초 허용 지지력은 $1,000\text{ kN/m}^2$ 이상으로 평가된다. 다만 기초 크기 증가에 비례하여 기초 침하량은 증가하므로 허용 침하

Table 5. Summary of large-scale plate bearing test results

| Test No. | Max. test load (kN/m^2) | Total settlement (mm) | Factor of safety (F.S) | Allowable bearing capacity (kN/m^2) | Remarks |
|----------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|--|----------------|
| LPBT-1 | 4,581.89 | 3.23 | 3 | over 1,527.3 | Weathered rock |
| LPBT-2 | 4,581.89 | 4.79 | 3 | over 1,527.3 | " |
| LPBT-3 | 4,563.19 | 6.87 | 3 | over 1,521.1 | " |
| LPBT-4 | 4,581.89 | 2.40 | 3 | over 1,527.3 | " |
| LPBT-5 | 4,581.89 | 3.43 | 3 | over 1,527.3 | " |
| LPBT-6 | 4,581.89 | 4.55 | 3 | over 1,527.3 | " |

Table 6. Cases of allowable bearing capacity by plate bearing test on weathered rock

| Site | Test No. | Allowable bearing capacity (kN/m^2) | Remark |
|-----------------------------|----------|--|--------------------|
| Busan-si 000-A | PBT-1 | 1,130 | Plate size(B)=30cm |
| | PBT-2 | 1,600 | Plate size(B)=1.0m |
| Gyeonggi-do Goyang-si 000-A | PBT-1 | 1,167 | Plate Size(B)=30cm |
| | PBT-2 | 1,283 | " |
| | PBT-3 | 1,167 | " |
| | PBT-4 | 1,283 | " |
| | PBT-5 | 1,283 | " |
| | PBT-6 | 1,283 | " |
| Gyeonggi-do Goyang-si 000-B | PBT-1 | 1,369 | Plate size(B)=30cm |
| | PBT-2 | 1,022 | " |
| | PBT-3 | 1,329 | " |
| | PBT-4 | 1,255 | " |
| | PBT-5 | 1,129 | " |
| | PBT-6 | 1,158 | " |
| Gyeonggi-do Goyang-si 000-C | PBT-1 | 1,132 | " |
| | PBT-2 | 1,132 | " |
| | PBT-3 | 1,132 | " |
| Gyeonggi-do Hanam-si 000 | PBT-1 | 1,132 | " |
| | PBT-2 | 1,132 | " |
| | PBT-3 | 1,101 | " |
| | PBT-4 | 1,132 | " |
| Jeollabuk-do 000 | PBT-1 | 1,321 | " |
| Seoul-si 000 | PBT-1 | 1,018 | " |
| | PBT-2 | 1,018 | " |
| Busan-si 000-B | PBT-1 | 1,125 | Plate size(B)=1.0m |
| | PBT-2 | 1,018 | Plate size(B)=30cm |
| | PBT-3 | 1,018 | " |
| | PBT-4 | 1,018 | " |
| | PBT-5 | 1,018 | " |

량 기준에 따라 기초 허용 지지력은 가감될 수 있다. 본 연구에서는 추가로 기초 크기 및 풍화암 지층 두께에 따른 침하량을 수치해석적으로 평가하여 이를 표로 제시하였다.

3.2 이론식 및 경험식에 의한 허용지지력 비교 평가

본 재하시험 결과 평판의 허용 지지력과 실무에서 주로 사용되는 얇은 기초의 이론적, 경험적 허용 지지력 공식을 비교 분석하였다. 본 평가에서 적용한 이론식과 경험식은 국내 구조물기초설계 해설(2018)에 제시된 식 (1)의 Terzaghi 지지력 공식, 식 (2)의 공내재하시험 결과로부터 기초의 허용지지력 추정식(Menard, 1965; Baguelin et al., 1978)과 식 (3)의 표준관입시험 N값으로부터 허용지지력 추정식(Meyerhof, 1965)이다. 본 이론식 및 경험식에 의한 허용 지지력 산정시 적용된 물성치는 Table 3의 풍화암 물성치를 적용하였다. 또한 기초 폭(B)은 평판의 크기인 1m와 기초 근입깊이(D_f)는 지표면상 재하를 고려하여 $D_f=0m$ 을 적용하여 관련된 계수를 산정하였다. 공내재하시험에 의한 허용지지력 추정식에 적용된 지반 물성치는 Table 2와 같다.

$$q_{ult} = \alpha c N_C + qN_q + \beta\gamma_2 BN_r \quad (1)$$

여기서, q_{ult} 는 극한지지력, γ_1 은 기초저면 상부 지반의 단위중량($20kN/m^3$ 적용), γ_2 는 기초저면 하부 지반의 단위중량(수중 고려 $11kN/m^3$ 적용), $q=\gamma_1 \times D_f$, c 는 기초지반의 점착력($30kN/m^2$), D_f 는 기초의 근입깊이($0m$ 적용), B 는 기초 폭($1m$ 적용), α, β 는 형상계수($\alpha=1.3, \beta=0.5$ 적용), N_c, N_r, N_q 는 지지력 계수($N_c=48.3, N_r=32.5, N_q=32.2$ 적용)이다.

$$q_b = p_{0h} + k_g(p_t - p_0) \quad (2)$$

여기서, q_b 는 극한 지지력, p_0 는 초기압력($1.53MN/m^2$ 적용), k_g 는 지지력 계수(0.8 적용), p_t 는 한계압력($7.13MN/m^2$ 적용), p_{0h} 는 기초 위치의 전체 상재하중(0 적용)이다.

$$q_{all} = 19NK_d(B < 1.2m \text{인 경우}) \quad (3-1)$$

$$q_{all} = 12NK_d\left(\frac{B+0.3}{B}\right)^2 (B > 1.2m \text{인 경우}) \quad (3-2)$$

여기서, q_{all} 는 허용지지력(kN/m^2), B 는 기초 폭($1m$ 적용), D 는 근입깊이($0m$ 적용), N 는 SPT 관입치($N=150$ 적용), K_d 는 깊이계수이고 D 와 B 관계로부터 아래 식과 같다.

$$K_d = 1 + \frac{D}{3B} (D < B \text{인 경우}) \quad (3-3)$$

$$K_d = 1.3 (D \geq B \text{인 경우}) \quad (3-4)$$

Table 7은 대형평판재하시험 결과 허용지지력과 위 3가지 이론식 및 경험식으로부터 산출한 허용지지력 비교표이다. 비교 결과 Terzaghi 지지력 공식과 표준관입시험 N값으로부터 허용지지력 추정식에 의한 지지력은 재하시험 결과와 지지력에 비해 과소 또는 과대평가됨을 알 수 있었다. 반면, 공내재하시험 결과로부터 기초의 허용지지력 추정식은 평판재하시험 결과와 유사함을 확인하였다. 그러나 공내재하시험은 시추공 내 수평재하방식으로 평판재하시험의 수직재하방식과 하중재하방향이 직교하므로 퇴적암 등 이방성이 큰 지반에서는 공식 적용에 신중을 기해야 할 것이다.

여기서 Terzaghi 지지력 공식에 의한 허용지지력($675.6kN/m^2$)은 평판재하시험의 값($1,521.1kN/m^2$)의 절반 이하로 큰 차이를 보이고 있다. 이는 풍화암의 지반 정수($c=30kN/m^2, \phi=33^\circ$)가 과소평가된 데 기인한다고 판단된다. 이에 대한 근거로 Kim et al.(2012)이 현장에서 채취한 불교란 화강 풍화토에 대한 삼축 압축 시험 결과

Table 7. Allowable bearing capacities by LPBT and various bearing capacity formula

| | Large plate bearing test (LPBT) | Terzaghi bearing capacity formula | Empirical formula using presuremeter test | Empirical formula using SPT (N) |
|---|---------------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| Allowable bearing capacity (kN/m^2) | over 1,521.1 | 675.6 | 1,493.3 | 2,850 |
| Remark | 1m×1m Plate | Applied $c=30kN/m^2, \phi=33^\circ$ | Applied $Po=1.53MN/m^2, Pl=7.13MN/m^2$ | Applied $N=150 (N=50/10)$ |

Table 8. Soil properties from laboratory and field tests for weathered soil (Kim, 2012)

| | Site-A | Site-B | Remark |
|--|-------------------------------|-------------------------------|--|
| | Weathered granite soil, SW-SM | Weathered granite soil, SW-SM | |
| Cohesion ($c, kN/m^2$) | 100 ~ 105 | 45 ~ 95 | Triaxial test results for block sample |
| Internal friction angle ($\phi, ^\circ$) | 27 ~ 54.5 | 31.5 ~ 47.0 | |
| Elastic modulus ($E, MN/m^2$) | 110 ~ 189 | 324 ~ 551 | PMT |

Table 8과 같이 점착력(c)은 45~105kN/m², 내부마찰각(ϕ)은 강도가 약한 풍화토임에도 불구하고 당 현장 풍화암에서 실시한 공내전단시험치($c=30kN/m^2, \phi=33^\circ$)에 비하여 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 본 풍화암에 대한 지반 정수는 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

또한 표준관입시험 N값으로부터 허용지지력 추정식에 의한 지지력은 재하시험에 의한 지지력의 약 2배로 역시 재하시험치와 차이를 보이고 있다. 본 추정식에 적용된 N치는 풍화암의 N치가 50회/10cm이상임을 감안하여 30cm 관입으로 환산한 N=150회로, 풍화암과 같이 환산 N치가 일정 수준 이상일 경우 지지력이 과다하게 산정되는 추정식으로 평가된다.

3.3 침하 거동 평가

실무에서 널리 사용하고 있는 침하량 공식 적용의 적정성을 평가하기 위하여 식 (4)의 Harr 이론적 공식(구조물기초설계기준 해설, 2018)과 대형재하시험 결과 침하량을 비교 분석하였다.

$$S_c = \frac{qB}{E_s}(1 - v^2)I_s \quad (4)$$

여기서, S_c 는 기초의 탄성침하량(각 재하시험의 최종 침하량 적용), q 는 기초 작용 하중(각 재하시험의 최대

시험하중 적용), B 는 기초 폭(1m 적용), E_s 는 지반의 탄성계수(역산 평균치 973MN/m²적용), v 는 지반의 포아송 비(Poisson's ratio=0.3적용), I_s 는 탄성침하의 영향 계수(0.88 적용)이다.

본 이론적 지지력 공식에 산정된 평판의 침하량 약 12mm은 본 시험 결과 실제 침하(평균 4.2mm)의 약 3배로 과대하게 평가되었다. 이는 침하량 산정시 적용된 탄성계수가 상대적으로 적게 적용된 것으로 평가된다. 시험 결과 역산한 탄성계수(Table 9 참고)의 범위는 532~1,529MN/m²으로 설계에 적용한 탄성계수(300MN/m²)의 약 2~3배로 평가되었다. 본 역산된 탄성계수는 Lee et al.(2017)이 화강암에 대한 지반 특성 연구에서 산정된 범위(239.5~2,301.9MN/m²)에 포함되는 값으로 평가된다.

Fig. 4는 본 재하시험에서 역산한 탄성계수와 공내재하시험(Pressuremeter test)의 변형계수(D, Deformation Modulus) 및 탄성계수(E, Elastic Modulus)를 함께 도시한 그래프이다. 본 그림에서 알 수 있듯이 대형 평판 재하시험에서 역산한 탄성계수는 전반적으로 공내재하시험의 변형계수(D) 및 탄성계수(E) 값보다 큰 것을 알 수 있다. 이에 근거할 때 풍화암 지반상 얇은 기초 설계시 공내재하시험의 탄성계수(E) 적용은 무리가 없다고 판단된다.

Table 9. Re-evaluation of elastic modulus (E) from large-scale plate bearing tests

| Test No. | Max. test load (kN/m ²) | Total settlement (mm) | $E_s = \frac{qB}{S_c}(1 - v^2)I_s$ (MN/m ²) | Remarks |
|----------|-------------------------------------|-----------------------|---|---|
| LPBT-1 | 4,581.89 | 3.23 | 1,136 | Applied $I_s=0.88$ for square rigid footing |
| LPBT-2 | 4,581.89 | 4.79 | 766 | |
| LPBT-3 | 4,563.19 | 6.87 | 532 | |
| LPBT-4 | 4,581.89 | 2.40 | 1,529 | |
| LPBT-5 | 4,581.89 | 3.43 | 1,070 | |
| LPBT-6 | 4,581.89 | 4.55 | 806 | |
| | | Average=4.2 | Average=973 | |

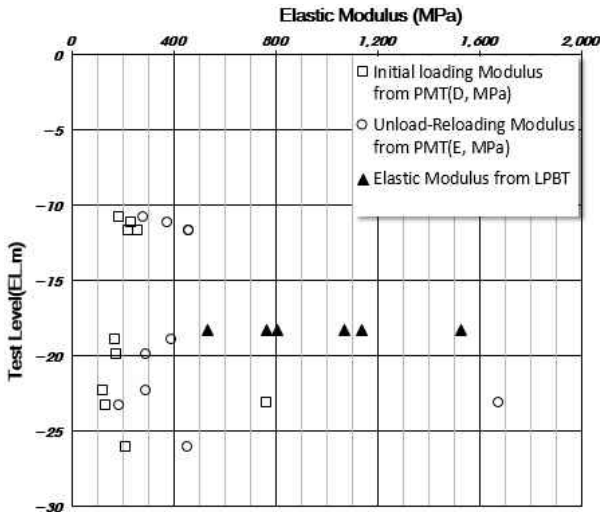


Fig. 4. Comparison of elastic modulus from large-scale plate bearing test (LPBT) and Pressuremeter test (PMT)

4. 기초 크기 및 풍화암 두께에 따른 허용 지지력 평가

기초 지지력과 침하량은 기초 크기에 비례하여 증가하므로 기초는 허용 침하량 조건을 만족시키는 범위 내에서 허용지지력을 제한하여야 한다. 국내 구조물기초 설계기준 해설(2018)에서는 허용 침하량은 구조물의 종류, 형태, 기능에 따라 별도로 정하며, 별도의 기준이 없는 경우에는 국제적으로 통용되는 기준을 준용할 수 있

다고 규정되어 있다. Table 10은 국내 얇은 기초(한국지반공학회, 1994)에 소개된 구조물 종류별 허용 침하량이며, Table 11는 해외 다양한 기관 또는 문헌에서 지반 종류 및 기초 형식에 따라 제안한 허용 침하 기준이다. 기초 설계시 구조물에 따라 발주자가 요구하는 허용 침하 기준을 우선 적용해야 하나, 국내 기초설계 실무시 Table 10에 제시된 최소 기초 허용 침하량(25mm)을 적용하는 사례가 적지 않은데 이는 매우 보수적인 설계라 사료된다. 특히 Table 10 및 Table 11에서 알 수 있듯이 전면기초(MAT)의 허용 침하량은 50mm 이상으로써 25mm 적용은 과다설계를 유발할 수 있다고 사료된다.

기초 침하량은 하중 재하시 발생하는 응력 영향 범위 내의 지반의 변형특성에 크게 영향을 받는다. 만약 Fig. 5와 같이 기반암(Bed rock)상에 풍화암이 위치하여 기초 하중이 재하될 경우, 기반암이 변형이 없는 지층으로 가정할 경우 압축 대상층(풍화암층)두께가 두꺼울수록 재하하중(응력)의 영향을 크게 받아 침하가 증가할 수 있다. 따라서 Fig. 5의 우측 그래프와 같이 풍화암층 두께(H) 증가에 따라 비례하여 침하량이 증가되며 풍화암층 두께(H)가 기초 응력 영향 범위 이상으로 증가될 경우 침하는 수렴될 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 실제 기초 설계 실무에 참고할 수 있도록 기초 크기(B) 및 풍화암층 두께(H)에 따른 기초 침하량을 수치 해석적으로 평가하였다.

Table 10. Allowable total settlement (Sowers, 1962)

| Limiting factor | Allowable total settlement (mm) | Remark |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Drainage | 150 ~ 300 | |
| Access | 300 ~ 600 | |
| Masonry walled structure | 25 ~ 50 | Probability of nonuniform settlement |
| Framed structures | 50 ~ 100 | " |
| Smokestacks, silos, mats | 75 ~ 300 | " |

Table 11. Allowable total settlement of foundation recommended various agency

| References | Allowable total settlement (mm) | Remark |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|
| Canadian Foundation Engineering Manual (4th Edition(2006, Canadian Geotechnical Society) | 50 ~ 135 | Cohesive soil |
| | 50 ~ 75 | Cohesionless soil |
| ICE Manual of Geotechnical Engineering (Vol.2 (2012), British Geotechnical Association) | 65 | Cohesive soil, Footing |
| | 40 | Cohesionless soil, Footing |
| | 100 | Mat foundation |
| Foundation Analysis and Design (5th Edition (1997), Joseph E. Bowles) | 75 | Cohesive soil, Footing |
| | 50 | Cohesionless soil, Footing |
| | 75 ~ 125 | Cohesive soil, Mat foundation |
| | 50 ~ 75 | Cohesionless soil, Mat foundation |

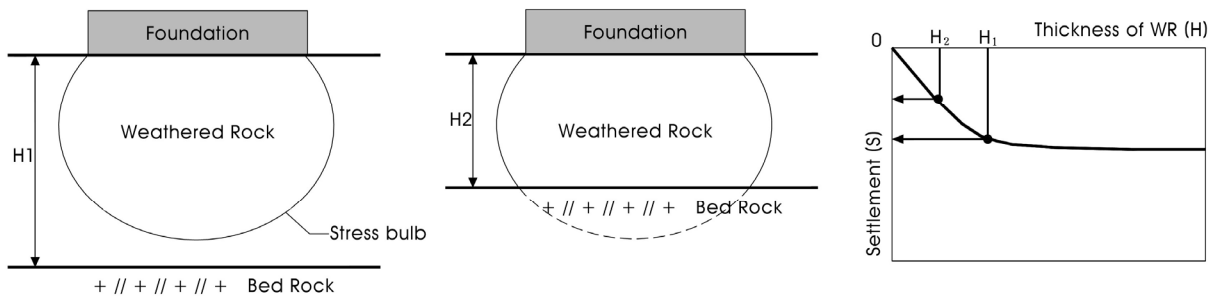


Fig. 5. Foundation settlement along thickness of weathered rock

Footing의 경우 상대적으로 기초 폭이 작으므로 기초 침하량이 적은 편이며, 기초 하중 영향범위가 상대적으로 적어 풍화암 두께에 크게 영향을 받지 않으므로 본 해석에서는 기초 폭이 상대적으로 큰 전면기초(MAT기초)를 대상으로 해석하였다.

4.1 수치 해석

본 기초 침하 해석은 3차원 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 3D v.22를 사용하였다. 본 해석시 적용된 가정 조건은 다음과 같다.

- 1) 기초 하부 지층조건은 앞 절에서 제시한 풍화암 지층과 하부 연암층으로 가정하였다.
- 2) 기초는 전면기초(두께 1m의 MAT)를 가정하였으며, 기초 크기(B)는 실제 전면기초 크기를 감안하여 최소 10m, 최대 50m로 설정하였다. 또한 풍화암 두께는 최소 5m에서 200m(반무한)로 설정하였다.
- 3) 해석에 적용된 지반 모델 크기는 경계조건이 해석 결과에 영향을 미치지 않도록 최대 기초 폭(50m)의 4배인 200m×200m×200m(가로×세로×높이)로 설정하였다.
- 4) 지반은 10절점 고체요소, 기초는 6절점 쉘요소로 모델링하였으며, 요소 개수는 기초 크기(B)에 따라 8,763~10,160개로 모델링하였다.
- 5) 구조물기초(MAT기초)와 가까울수록 조밀한 요소망을 적용하여 기초에 근접한 요소의 기초 크기(B)에 따라 최소 요소 크기는 3.5~4m와 최대

요소 크기는 37~38m로 모델링 하였다.

- 6) 기초 침하에 가장 큰 영향계수인 탄성계수는 공내재하시험의 제하-재제하(Unload-Reloading) 기율기로 산출된 탄성계수(E, Elastic Modulus)의 평균치로 변경하여 적용하였으며, 본 해석에 적용한 지반 물성치는 Table 12와 같다.
- 7) 지하수위는 기초면에 위치하는 것으로 가정하였다.
- 8) 본 해석에 적용한 하중은 앞 절에서 제안한 풍화암 허용 지지력 $1,000kN/m^2$ 을 적용하였다.
- 9) 지반은 Mohr-Coulomb 모델을, 기초(MAT)는 탄성모델을 적용하였다.
- 10) 유한요소 해석 단계(Step) 4단계로 나누어 각각 원지반조건 모사단계, 변위 초기화 단계, 기초 시공 단계 및 하중 재하 단계로 모델링하였다.

본 해석시 적용된 기초 및 지반 모델과 3차원 유한요소해석 모델을 Fig. 6과 같다.

4.2 대형평판재하시험 결과와 수치해석 결과 비교

기초 크기(B) 및 풍화암층 두께(H)에 따른 기초 침하량 평가 전 3차원 유한요소해석이 실제 기초 거동과 유사성을 평가하기 위하여 대형평판재하시험 과정을 3차원 유한요소로 모사하여 하중-침하량 관계를 비교 분석하였다.

Fig. 7(b)에서 알 수 있듯이 당초 풍화암 설계 지반정수($c=30kN/m^2$, $\phi=33kN/m^2$)를 적용한 유한요소해석 결과는 재하하중(P)가 $1,000kN/m^2$ 수준까지는 재하시험 결과와 유사한 거동을 보였다.

Table 12. Properties of weathered rock for finite element analysis

| Division | Unit weight (kN/m^3) | Elastic modulus (MN/m^2) | Poisson's ratio | Cohesion (kN/m^2) | Internal friction angle ($^\circ$) |
|----------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Weathered rock | 20 | 450 | 0.3 | 30 | 33 |
| Soft rock | 22 | 2,000 | 0.25 | 50 | 35 |
| Foundation | 25 | 20,000 | 0.15 | - | - |

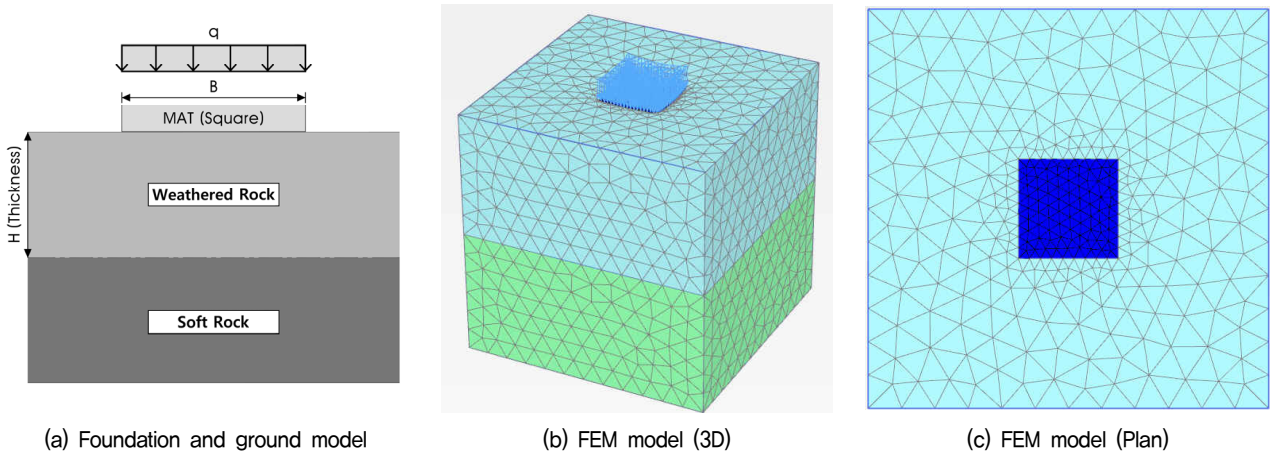


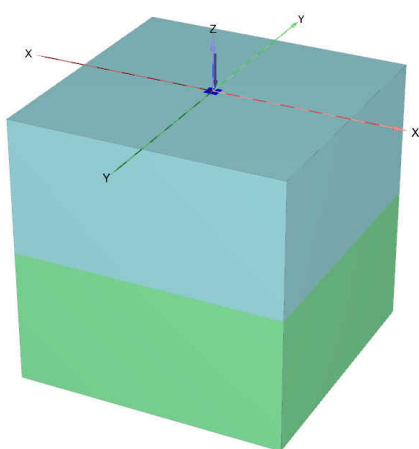
Fig. 6. Foundation and ground model for 3D finite element analysis

그러나 Fig. 7(b)에서 재하하중(P)이 $1,000\text{ kN/m}^2$ 이상으로 하중이 증가함에 따라 침하가 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이는 상대적으로 큰 하중으로 인하여 지반 전단강도를 초과하여 지반이 항복 또는 파괴로 인한 결과로 판단된다. 이는 3.2절에서 언급한 바와 같이 풍화암의 지반 정수가 과소평가된 결과로 판단된다. 앞서 기술한 Kim et al.(2012)이 현장에서 채취한 불교란 화강 풍화토에 대한 삼축 압축 시험 결과 Table 8과 같이 풍화토 점착력(c)이 최대 $45\sim 105\text{ kN/m}^2$, 내부마찰각(ϕ)이 최대 $47\sim 55^\circ$ 수준까지 평가된 점, 그리고 당현장 재하시험시 극한 또는 파괴가 발생되지 않은 점을 고려할 때 풍화토에 비해 상대적으로 강한 풍화암의 지반 정수는 풍화토 삼축 압축 시험 결과치 수준이상으로 증가시킬 수 있다고 사료된다. 이에 기초 침하에 대한 직접적인 영향계수인 탄성계수가 동일한 조건에서 지반정수를 증가($c=50\text{ kN/m}^2$, $\phi=50^\circ$)시켜 해석한 결과 시험 결

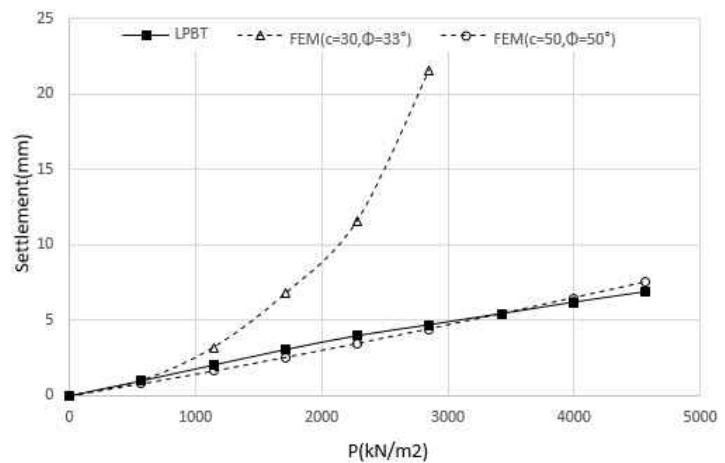
과에 상당히 일치함을 알 수 있었다.

이와 같이 평판재하시험과 유한요소 해석 결과와의 하중-침하량 거동이 유사함을 확인한 바, 본 3차원 유한요소 해석법(Plaxis 3D)은 실제 기초 거동 해석에 적절한 해석법으로 판단된다.

그러나 풍화암에 대한 삼축 압축 시험 등이 시행되지 않아 증가된 지반정수 적용($c=50\text{ kN/m}^2$, $\phi=50^\circ$)은 어렵다고 판단된 점 및 유한요소해석 결과 재하하중(P)이 $1,000\text{ kN/m}^2$ 수준까지는 재하시험 결과와 유사한 거동을 보이는 점을 감안하여 본 절의 기초 크기(B) 및 풍화암층 두께(H)에 따른 기초 침하량 수치 해석시 적용한 풍화암 설계 지반정수는 Table 12와 같이 당현장 시험결과에 근거한 $c=30\text{ kN/m}^2$, $\phi=33^\circ$ 를 적용하였으며, 재하하중 역시 재하시험 결과와 당현장 물성치 적용시 수치해석 거동이 유사한 한계인 $1,000\text{ kN/m}^2$ 을 적용하였다.

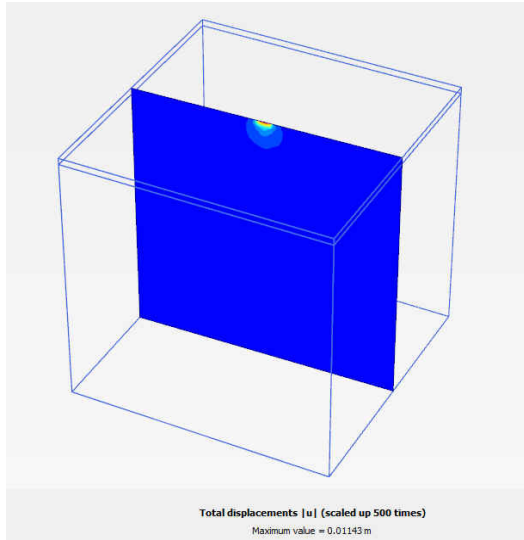


(a) FEM Model of LPBT

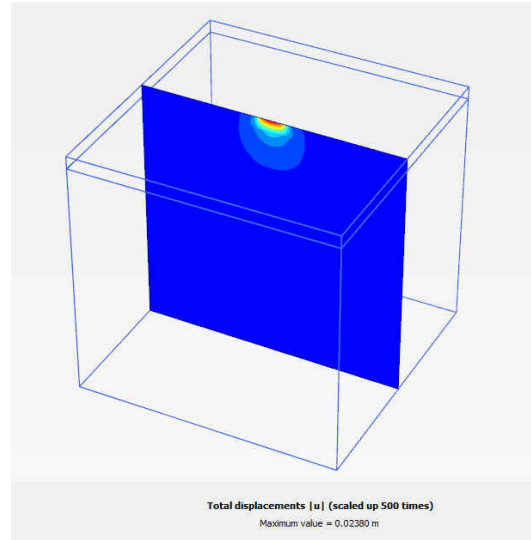


(b) Comparison of LPBT and FEM analysis

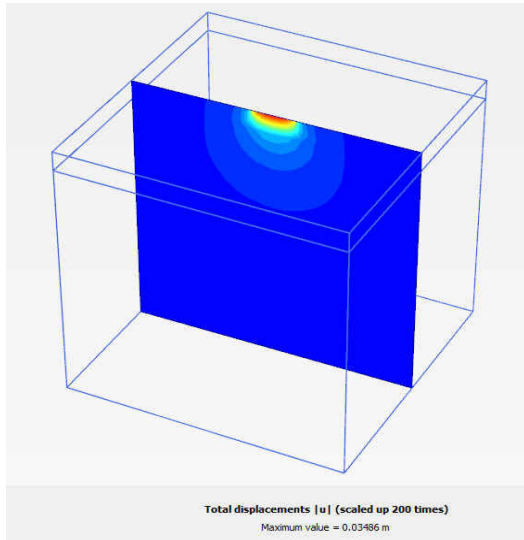
Fig. 7. FEM model and comparison of LPBT and FEM analysis



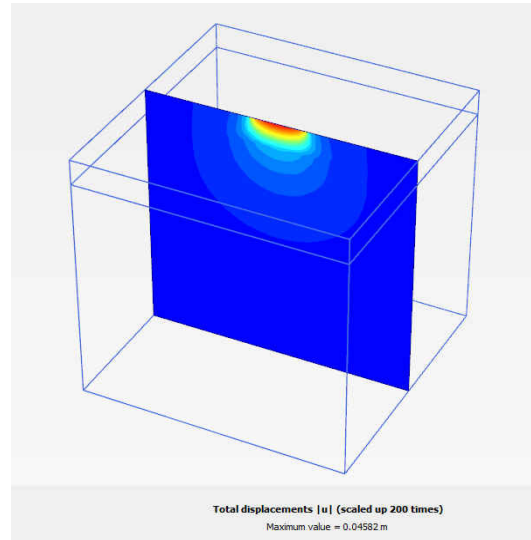
(a) B=10m, H=5m (settlement=11.43mm)



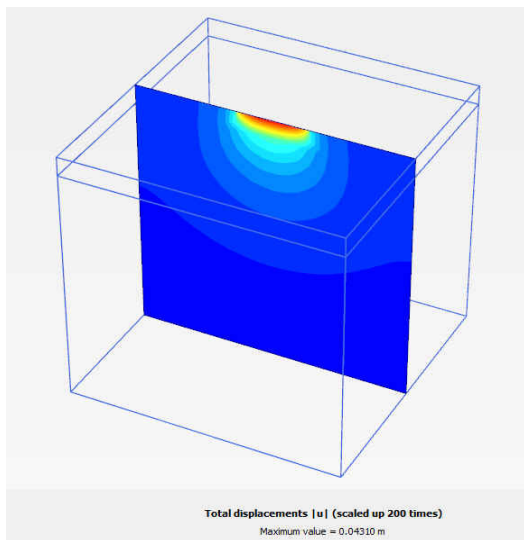
(b) B=20m, H=10m (settlement=23.80mm)



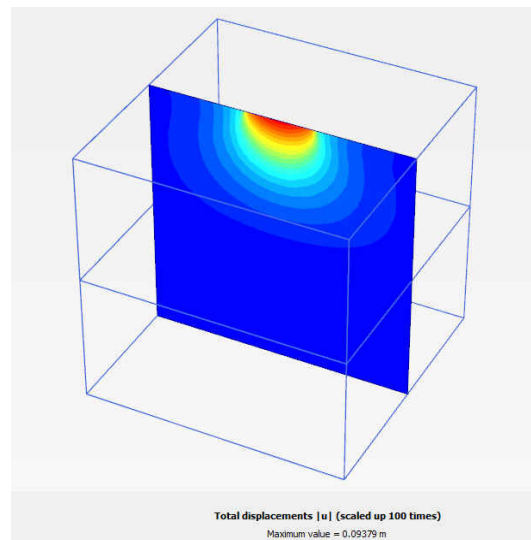
(c) B=30m, H=15m (settlement=34.86mm)



(d) B=40m, H=20m (settlement=45.82mm)



(e) B=50m, H=15m (settlement=43.10mm)



(f) B=50m, H=100m (settlement=93.79mm)

Fig. 8. Typical 3D finite element analysis results

4.3 수치 해석 결과 및 분석

기초 크기(B)와 풍화암 두께(H)를 변화시켜 총 45회의 수치해석을 실시하였다. 대표적인 기초크기(B)와 풍화암층 두께(H) 변화에 따른 기초 허용 침하량 해석결과는 Fig. 8과 같다.

총 45가지 경우에 대한 침하량을 Table 13에 요약하였다. 기초가 풍화암상에 위치하고 그 하부에 연암이 위치할 경우 설계초기 본 표를 이용하여 침하량을 예측할 수 있다. 본 표에서 알 수 있듯이 동일한 기초 크기(B)에서도 풍화암 두께(H) 변화에 따라 침하량이 약 2~3배 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 13의 회색 부분은 25mm이하 침하량 구간이며, Table 13의 회색을 포함한 파란색 부분은 50mm이하 침하량 구간을 표기하였다. 본 해석에 적용된 재하하중은 $1,000kN/m^2$ 으로써 본 표의 예상 발생 침하량을 참고하여 풍화암상 기초 허용지지력이 $1,000kN/m^2$ 이상인 지반 조건을 확인할 수 있다. 특히 허용 침하량을 50mm로 가정할 경우 Table 13의 회색을 포함한 파란색 부분 지층 조건을 참고할 때 실무 현장에서 접할 수 있는 대부분의 지반조건에서 허용지지력 $1,000kN/m^2$ 적용이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 풍화암 지반에 지지되는 얇은 기초의 허용 지지력을 평가하기 위하여 대형평판재하시험과 3차원 유한요소해석을 실시하였으며, 시험 결과 고찰 및 수치해석적 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 대형평판 재하시험 결과 풍화암 허용 지지력은 $1500kN/m^2$ 이상이며, 국내 다수의 풍화암 지반에서 실시한 평판재하시험 결과를 수집, 분석한 결과 풍화

암 허용 지지력은 $1,000kN/m^2$ 이상 적용이 가능하다고 평가된다.

- (2) 풍화암 지반에 대하여 기존에 제안된 지지력 공식과 본 연구에서 시행한 대형평판재하시험 결과를 비교한 바, Terzaghi공식과 표준관입저항치(N)를 이용한 경험식은 지지력을 과소 또는 과대평가되며, 공내재하시험에 의한 지지력이 시험치와 유사함을 확인하였다.
- (3) 얇은 기초 침하량 평가시 탄성계수는 공내재하시험의 변형계수(D)와 탄성계수(E) 중 탄성계수(E) 적용이 적절하다고 평가된다.
- (4) 3차원 유한요소해석을 통하여 기초 크기 및 풍화암 두께에 따른 얇은 기초의 예상 기초 침하량을 산출하고 이를 표로 제시하였다. 이는 설계 초기 풍화암상 얇은 기초 허용 지지력 평가 및 기초 형식 결정에 유용하게 참고할 수 있다고 사료된다.

참고문헌 (References)

1. Bowles, J. E. (1997), "Foundation Analysis and Design", 5th edition, The McGraw-Hill, pp.339.
2. Canadian Geotechnical Society, (2006), "Canadian Foundation Engineering Manual", 4th edition, pp.180.
3. Choi, Y. K., Kim, S. H., and Lee, M. H. (2009), "The Case Studies on Application of Mat Foundation System to Building Structure Founded on Weathered Ground", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.10, No.6, pp.5-18.
4. Jung, H.Y. (2013), "A Study on the Bearing Capacity of Spread Foundation on Weathered Rock", *Busan National Univ.*, pp.61-101.
5. Kim, D. E. and Huh, K. H. (2005), "Bearing Capacity and Settlement Characteristics of Weathered Granite Masses in Gyeonggi Area", *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.5, No.4, pp.37-47.
6. Kim, K.S., Lee, S.R., Park, Y.H., and Kim, S.H. (2012), "Evaluation of Size Effects of Shallow Foundation Settlement Using Large Scale Plate Load Test", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.7, pp.67-75.
7. Korean Geotechnical Society (1994), "Shallow Foundation", pp.122.

Table 13. Anticipated foundation settlements for load of $1,000kN/m^2$ according to the foundation size (B) and the weathered rock thickness (H) by 3D finite element analysis (Gray zone: settlement < 25mm, Gray & Blue zone: settlement < 50mm)

| B (m) \ H (m) | H (m) | | | | | | | | |
|---------------|-------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 100 | 200 |
| 10 | 11 | 16 | 19 | 20 | 21 | 21 | 21 | 22 | 22 |
| 20 | 17 | 24 | 30 | 35 | 40 | 42 | 43 | 45 | 46 |
| 30 | 21 | 28 | 35 | 41 | 51 | 56 | 59 | 63 | 66 |
| 40 | 25 | 32 | 39 | 46 | 57 | 66 | 71 | 79 | 85 |
| 50 | 29 | 36 | 43 | 50 | 63 | 73 | 80 | 94 | 102 |

8. Korean Geotechnical Society (2018), "Structure Foundation Design Standard", pp.171-274.
9. Lee, S. H., Yoo, B. S., and Chung, C. K. (2017), A Case Study on Geotechnical Properties and Weathering Degree of Weathered Granite Rock, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.12, pp.127-139.
10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2000), "Road Design Manual", pp.402.
11. Park, C. S. and Kim, J. H. (2012), "Bearing Capacity Characteristics of Shallow Foundation by Three Dimension FEM", *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.35, No.3, pp.17-24.
12. Saegil ENC. (2010), "Geotechnical Report of Gyeonggi-do Goyang-si ○○○ Project", pp.51-54.
13. Saegil ENC. (2020), "Geotechnical Report of Gyeongsangbuk-do Pohang-si ○○○ Project", pp.46-60.
14. Sanha ENC. (2009), "Geotechnical Report of Chungcheongnam-do Sejong-si ○○○ Project", pp.192-194.
15. Seoul Metropolitan Government (2006), "Geotechnical Investigation Manual", pp.17.
16. Sower, G. F. (1962), "Shallow Foundation", Foundation Engineering, G. A. Leonards(ed), McGraw-Hill, pp.525.
17. S-tech consulting group (2011), "Geotechnical Report of Gangwon-do Chuncheon-si ○○○ Project", pp.47-63.
18. Sunwoo ENC. (2021), "Geotechnical Report of Chungcheongnam-do Asan-si Bebang ○○○ Project", pp.96-105.
19. Taechang ENC. (2020), "Geotechnical Report of Chungcheongnam-do Asan-si ○○○ Project", pp.31-40.
20. The British Geotechnical Association, (2012), "ICE Manual of Geotechnical Engineering", Vol.2, pp.749.

Received : September 29th, 2022

Revised : October 7th, 2022

Accepted : October 11th, 2022