

복합지반물질의 탄성계수 산정을 위한 균질화 해석

서용석^{1*} · 임성빈¹ · 백 용² · 김지수¹

¹충북대학교 지구환경과학과 · 기초과학연구소

²한국건설기술연구원 국토지반연구부

Homogenization Analysis for Calculating Elastic Modulus of Composite Geo-materials

Yong-Seok Seo^{1*}, Sung-Bin Yim¹, Yong Baek², and Ji-Soo Kim¹

¹Dept. of Earth & Environmental Sci. & Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University

²Korea Institute of Construction Technology, Dept. Geotechnical Engineering Research

암반은 일반적으로 생성환경 및 지질학적 조건에 따라 균질하지 못하며, 특히 기질과 역의 성분차이가 심한 역암 또는 각력암이나 핵석 등은 복합물질로 구성된 암반에 해당된다. 이들 복합 지반물질의 역학적 특성은 역과 기질의 역학 특성과 분포특성 등에 따라 달라진다. 사면과 터널 및 지하구조물의 설계를 위한 이들의 역학적 평가는 매우 중요하지만 일반적으로 행해지는 암반분류법에 의한 이들의 평가는 부적절하다. 따라서 본 연구에서는 복합지반물질의 역학적 평가를 위해 균질화법을 적용하였다. 역의 함유량, 크기, 기질의 고결도, 분급, 경사 등의 인자를 고려한 조합에 의해 총 49개의 해석모델을 작성하여 탄성해석을 실시하였다. 해석결과는 역암이나 핵석같은 복합지반물질의 역학적 계산에 적용될 수 있다.

주요어 : 균질화법, 복합지반물질, 탄성계수, 역 크기, 기질강도

Bedrock is inhomogeneous for its genetically diverse origins and geological conditions when it forms, and especially, conglomerates and core-stones are one of these typical composite geo-materials composed of weak matrices and strong pebbles. Mechanical properties of these composite bedrocks, like a conglomerate, generally vary depending on the mechanical properties and distributions of pebbles and the matrix. Therefore, regarding the consequence of understanding mechanical property of bedrocks in the designing slopes, tunnels, and other engineering facilities, empirical rock classification methods generally applied in the mechanical property modeling may not be suitable and rather, we may need some other classification methods, or tests more specific for these inhomogeneous composite bedrocks. This study includes a series of analyses to see elastic behaviors and modulus of composite geo-materials using homogenization theory. Forty nine case models were made for the elastic analysis with considering 5 factors such as gravel content, gravel size, strength of matrix, sorting and dip angle. The results analyzed are applicable to calculate elastic modulus of composite geo-materials as conglomerates and core-stones.

Key words : homogenization theory, composite geo-materials, elastic modulus, gravel size, strength of matrix

서 론

암석은 다양한 광물로 구성되어 불균질하며, 이들로 구성된 암반 또한 일반적으로 생성환경과 지질학적 조건 등에 따라 균질하지 못하다. 특히 기질과 역의 성분

차이가 심한 역암 또는 각력암, 동일한 암석에서의 풍화 차에 의해 생성되는 핵석 등은 복합물질로 구성된 불균질 암반에 해당된다. 그리고 이들 불균질 암반은 기질의 역학적 특성과 분포특성 등에 따라 역학 특성은 달라진다. 따라서 사면과 터널 및 지하구조물의 설계에 있어서

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

는 이들 복합지반물질의 역학적 및 거동 평가 시 지반의 불균질성을 고려한 접근이 필요하다.

RMR 분류법과 Q 분류법은 일반적으로 암반분류를 위해 국내에서 널리 사용되는 방법으로, 절리면의 발달 정도와 상태에 의존하는 경험적인 방법이다. 그러나 절리의 발달보다는 역과 기질의 특성에 의해 역학적 특성이 좌우되는 역암 및 각력암 등으로 구성된 지반에서는 이들 경험적인 방법을 사용하기에는 적합하지 않다. 또한 강도시험에 있어서도 연약한 기질 부분의 손상으로 인해 정확한 값을 추정하기 어려우며, RQD는 거력층의 존재로 인해 과대 혹은 과소평가 될 수 있는 등 불균질 지반의 역학적 특성을 예측하기는 매우 어렵다. 이들 지반은 특히 역과 기질 사이의 결합력이 약할 경우 쉽게 파괴되며, 지반굴착 시 낙반 및 지하수의 대량 유입 등 위험을 초래하는 원인이 된다. 따라서 김백근 등(2004)은 경주지역에 분포하는 제3기 미고결 역암퇴적층을 대상으로 지표지질조사, 물리탐사, 시추조사 등을 통해 지하수에 의한 변질과 강도에 의한 고결도에 따른 역암층의 암반분류를 제시한 바 있다. 그리고 양홍석 등(2002)과 이수곤 등(2004)은 시멘트를 이용하여 핵석 모형을 제작하였으며, 일축압축시험 및 삼축압축시험 통한 핵석을 포함하는 풍화층의 지반강도정수를 산정하였다.

일반적으로 균질화법을 이용하여 복합체의 유효한 탄성계수를 구할 때에는 그 복합체의 특성을 충분히 반영하고 있는 대표요소체적(Representative Elementary Volume, REV)을 산정하고, 이 대표요소에서의 응력-변형을 관계로부터 유효 탄성계수를 구하는 방법을 사용한다(Hashin, 1983). 균질화법(Homogenization method)은 편미분 방정식의 연구에서 발전하여 복합체의 유효물성치 추정에 적용되었으며(Sanchez *et al.*, 1980), Babuska, Lion 등은 미시구조의 크기가 전체 구조에 비하여 충분히 작을 때 균질화법에 의한 해는 수렴성을 보임을 밝혔다(Bensoussan *et al.*, 1978). Guedes and Kikuchi(1990)는 복잡한 형상의 미시구조를 갖는 탄성재료의 유효물성치를 균질화법에 의하여 추정하였으며, Fish *et al.*(1994)은 균질화법에 의한 해석결과의 국소오차(local error)를 분석하였다. Hollister and Kikuchi(1992)는 미시구조의 크기가 유한할 때, 균질화법(Homogenization method)이 미시역학적 방법(Standard Mechanics Approach)보다 탄성재료의 유효물성치를 잘 추정하는 것을 증명하였다. 점탄성 재료의 경우에는 Sanchez *et al.*(1980)이 Voigt 모델로 표현된 점탄성재료에 대하여, Suquet(1987)는 Maxwell 모델로 표현된

점탄성 재료에 대하여 균질화법에 의한 유효물성치를 해석적으로 표현하였다.

암반공학 분야에서는 Bear and Verruijt(1987)가 암반의 체적(U)에 대한 간극의 체적(U_v)비, 즉 간극율(U_v/U)의 체적에 따른 변화를 이용하여 대표체적요소(REV)를 결정하였으며, Seo *et al.*(2000)은 균질화법을 이용하여 화강암의 점탄성 거동에 대한 연구를 수행하였다. 국내에서는 정교철(1994)에 의해서 석영·장석 모델에서의 미세균열의 진전과 응력집중에 관한 연구가 이루어진 바 있으며, 서용석 등(2000)은 영주화강암의 조암광물 함유율을 이용하여 탄성계수 및 대표요소체적(REV)을 결정한 바 있다.

본 연구에서는 불균질성을 가지는 복합지반물질의 탄성계수를 산정하기 위하여 균질화법을 사용하였다. 해석에 있어서는 역의 함유량과 크기, 기질의 고결도, 분급 그리고 경사특성 등을 고려하여 이들의 변화에 따른 역학적 특성 변화를 분석하였다. 유효한 탄성계수의 산정을 위해 대표요소 체적(REV)은 기존의 연구(서용석 등, 2000)에 의한 것보다 충분히 크게 하여 대표성을 가지도록 모델을 설정하였다.

수치 해석

균질화법에서의 탄성해석

균질화법은 섭동법(Perturbation method)을 이용하여 변수를 전개함으로써 주기적인 내부구조를 가지는 이질재료(Heterogeneous material)에서 그 주기가 실제 구조의 크기에 비하여 매우 작은 경우 그 주기적 성질을 이용하여 유효 물성치를 계산하는 이론이다(Sanchez-Palencia, 1980; Seo *et al.*, 2002). Fig. 1에 나타난 것처럼 이질적인 구성요소가 규칙적으로 분포된 주기적 구조를 가진 재료는 그 물성치가 규칙적이면서도 미시적으로는 급격히 변화하는 특징이 있다.

본 논문에서 사용한 균질화 이론은 기존논문(서용석

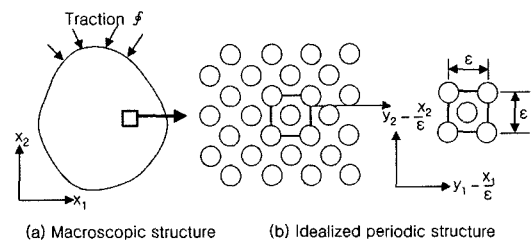


Fig. 1. Macroscopic and microscopic periodic structure.

등, 2000; Seo *et al.*, 2000; Seo *et al.*, 2002)에 많이 소개되었다.

해석모델

일반적으로 역암, 각력암 및 핵석 등 복합지반의 역학적 특성에 영향을 미치는 요인으로는 역의 함유량, 크기, 원마도, 분급, 기질의 고결도 및 풍화도 등 다양한 인자들이 있다. 본 연구에서는 이들 중 역의 함유량과 크기, 기질의 고결도, 분급 그리고 경사 등을 변화시키며 균질화법을 이용한 탄성해석을 수행하였다.

균질화법 해석모델 구성 시 지반을 역과 기질의 2종류로 구분하였으며, 이들의 재료정수는 Table 1과 같이 하였다. 역은 일반적으로 신축하기 때문에 견고한 암석으로 취급하였으며, 풍화도 및 고결도에 따라 3가지의 기질 상태를 가정하였다. 이 값들은 터널 설계 시 흔히 사용되는 토사, 풍화암, 연암 그리고 경암에 해당하는 지반재료정수이다. 역의 함유량은 20%부터 60%까지 10%씩 증가시키며 모델을 구성하였으며, 역의 크기는 상대적으로 큰 것과 보통 그리고 작은 것으로 구분하였다. 이들은 해석모델에서 각각 16, 4, 1개의 요소를 접한다. 분급상태를 고려하기 위해서는 역의 함유량이 40%일 때를 기준으로 하여 Fig. 2와 같이 상향세립의 양호한 분급상태(b)와 불량한 분급상태(c)의 모델을 작성하여 탄성해석을 수행하였다. 마지막으로 역암층의 경사에 따른

역학적 변화를 확인하기 위하여 Fig. 2(b)의 모델을 기준으로 0°, 20°, 40°로 경사를 변화시켜 해석모델을 작성하여 퇴적암의 경사특성을 고려하였다 이상의 인자들을 고려하여 총 49개의 모델을 작성하여 탄성해석을 수행하였다(Table 2).

해석에 사용된 모델은 1444(38×38)개의 요소와 1521개의 절점을 가지게 작성하였으며, 요소의 형태는 입자경계의 곡선을 잘 표현할 수 있도록 마름모로 정하였다. 모델의 크기는 기존의 REV에 대한 연구(서용석 등, 2000)와 비교적 균일한 모델 특성을 고려하여 충분히 크게 작성되었다. 작성된 계산 모델의 몇 가지 예를 Fig. 2에 나타내었다.

해석의 조건은 일축압축에 의한 이차원 평면변형을 가정하고, 한쪽 가압면에 강재변위 0.15%를 가하여 응력을 측정하였다(Fig. 3).

해석 결과

균질화법을 이용한 각 모델별 탄성해석 결과는 Table 2에 요약하였다.

역의 함유량과 탄성계수

균질화법을 이용한 해석결과로서 서로 다른 고결도 및 풍화도의 기질을 가진 모델에 대한 역의 함유량과 탄성계수의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 모든 경우에서 역의 크기가 작을수록 탄성계수는 크게 나타났으며, 역의 함유량이 높아질수록 탄성계수는 높아진다. 또한 역의 크기가 작을수록 역의 함유량 증가에 따른 탄성계수의 상승폭은 훨씬 커진다. 기질의 고결도가 낮은 경우 (soft matrix)에는 상대적으로 큰 역이 분포할 때 역의 함유량이 증가함에 따른 탄성계수의 증가가 미미하며,

Table 1. Mechanical properties of composite materials in homogenization analysis.

| Composite materials | Soft matrix | Medium matrix | Hard matrix | Gravel |
|--|-------------|---------------|-------------|--------|
| Elastic modulus E ($\times 10^3 \text{t/m}^2$) | 4 | 40 | 60 | 600 |
| Poisson's ratio | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 |

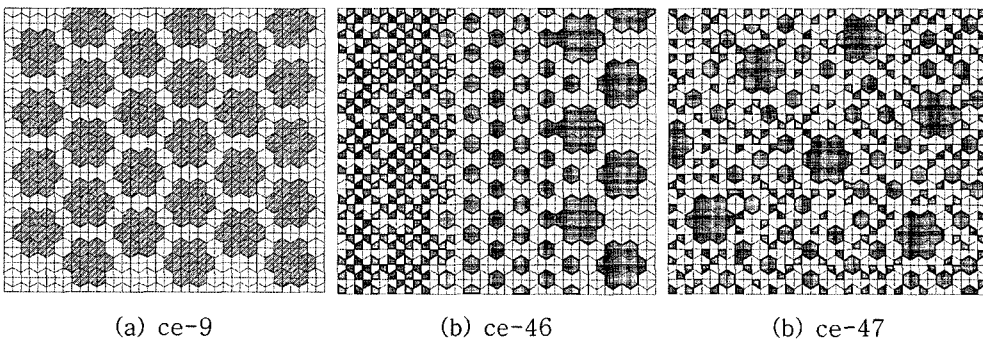


Fig. 2. Examples of calculation models for homogenization analysis.

Table 2. Calculated elastic moduli of composite geo-materials.

| Model No. | Matrix | Gravel size | Gravel content (%) | Sorting | Dip angle (°) | Elastic modulus $E(\times 10^3 \text{t/m}^2)$ |
|-----------|--------|-------------|--------------------|-------------|---------------|---|
| ce-1 | soft | big | 20 | well sorted | 0 | 8.7 |
| ce-2 | soft | big | 30 | well sorted | 0 | 11.7 |
| ce-3 | soft | big | 40 | well sorted | 0 | 14.4 |
| ce-4 | soft | big | 50 | well sorted | 0 | 17.7 |
| ce-5 | soft | big | 60 | well sorted | 0 | 22.9 |
| ce-6 | medium | big | 20 | well sorted | 0 | 71.4 |
| ce-7 | medium | big | 30 | well sorted | 0 | 89.9 |
| ce-8 | medium | big | 40 | well sorted | 0 | 107.3 |
| ce-9 | medium | big | 50 | well sorted | 0 | 128.7 |
| ce-10 | medium | big | 60 | well sorted | 0 | 157.4 |
| ce-11 | hard | big | 20 | well sorted | 0 | 95.5 |
| ce-12 | hard | big | 30 | well sorted | 0 | 118.4 |
| ce-13 | hard | big | 40 | well sorted | 0 | 140.1 |
| ce-14 | hard | big | 50 | well sorted | 0 | 165.9 |
| ce-15 | hard | big | 60 | well sorted | 0 | 199.7 |
| ce-16 | soft | medium | 20 | well sorted | 0 | 8.7 |
| ce-17 | soft | medium | 30 | well sorted | 0 | 10.4 |
| ce-18 | soft | medium | 40 | well sorted | 0 | 33.9 |
| ce-19 | soft | medium | 50 | well sorted | 0 | 117.9 |
| ce-20 | soft | medium | 60 | well sorted | 0 | 144.9 |
| ce-21 | medium | medium | 20 | well sorted | 0 | 71.4 |
| ce-22 | medium | medium | 30 | well sorted | 0 | 84.4 |
| ce-23 | medium | medium | 40 | well sorted | 0 | 127.6 |
| ce-24 | medium | medium | 50 | well sorted | 0 | 186.3 |
| ce-25 | medium | medium | 60 | well sorted | 0 | 236.6 |
| ce-26 | hard | medium | 20 | well sorted | 0 | 95.5 |
| ce-27 | hard | medium | 30 | well sorted | 0 | 112.6 |
| ce-28 | hard | medium | 40 | well sorted | 0 | 157.0 |
| ce-29 | hard | medium | 50 | well sorted | 0 | 212.3 |
| ce-30 | hard | medium | 60 | well sorted | 0 | 266.5 |
| ce-31 | soft | small | 20 | well sorted | 0 | 9.2 |
| ce-32 | soft | small | 30 | well sorted | 0 | 15.7 |
| ce-33 | soft | small | 40 | well sorted | 0 | 44.2 |
| ce-34 | soft | small | 50 | well sorted | 0 | 221.1 |
| ce-35 | soft | small | 60 | well sorted | 0 | 273.6 |
| ce-36 | medium | small | 20 | well sorted | 0 | 74.0 |
| ce-37 | medium | small | 30 | well sorted | 0 | 97.9 |
| ce-38 | medium | small | 40 | well sorted | 0 | 159.0 |
| ce-39 | medium | small | 50 | well sorted | 0 | 281.4 |
| ce-40 | medium | small | 60 | well sorted | 0 | 328.9 |
| ce-41 | hard | small | 20 | well sorted | 0 | 98.4 |
| ce-42 | hard | small | 30 | well sorted | 0 | 126.3 |
| ce-43 | hard | small | 40 | well sorted | 0 | 190.7 |
| ce-44 | hard | small | 50 | well sorted | 0 | 302.8 |
| ce-45 | hard | small | 60 | well sorted | 0 | 348.4 |
| ce-46 | medium | mixed | 40 | well sorted | 0 | 119.2 |
| ce-47 | medium | mixed | 40 | poor sorted | 0 | 114.7 |
| ce-48 | medium | mixed | 40 | well sorted | 20 | 121.2 |
| ce-49 | medium | mixed | 40 | well sorted | 40 | 125.3 |

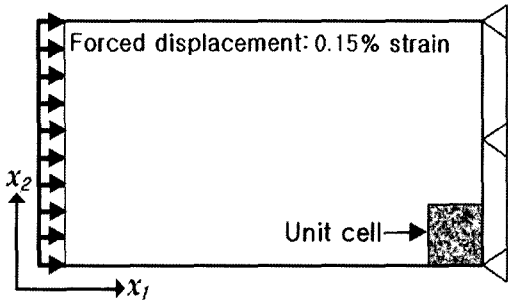


Fig. 3. Model for the global problem.

역의 크기가 상대적으로 작은 경우는 역의 함유량이 40%가 넘어서면서 탄성계수는 급격히 증가한다. 기질이 견고할 때(hard matrix) 큰 역의 경우 작은 역들을 포함할 때보다 역의 함유량 증가에 따른 탄성계수 증가의 폭이 커지며, 작은 역의 경우는 기질이 견고하지 않은 경우보다 역의 함유량 증가에 따라 일정하게 증가한다.

역의 크기와 탄성계수

역의 함유량에 따른 역의 크기와 탄성계수와의 관계는 Fig. 5와 같다. Fig. 4와 마찬가지로 역의 크기가 작

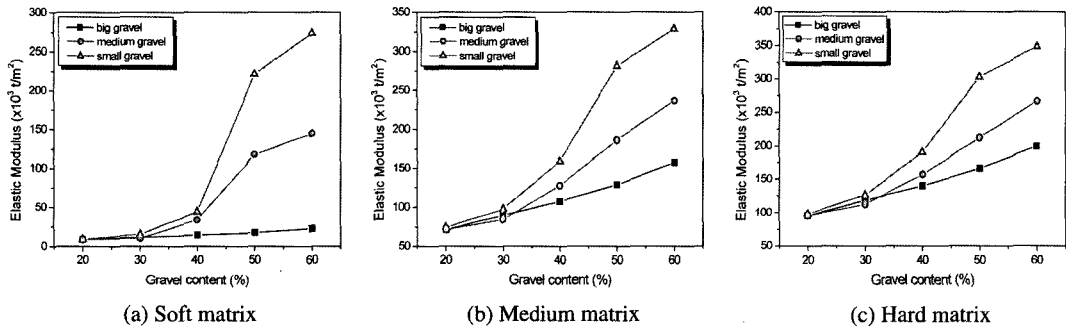


Fig. 4. Elastic modulus vs. gravel content with gravel size in various matrix condition.

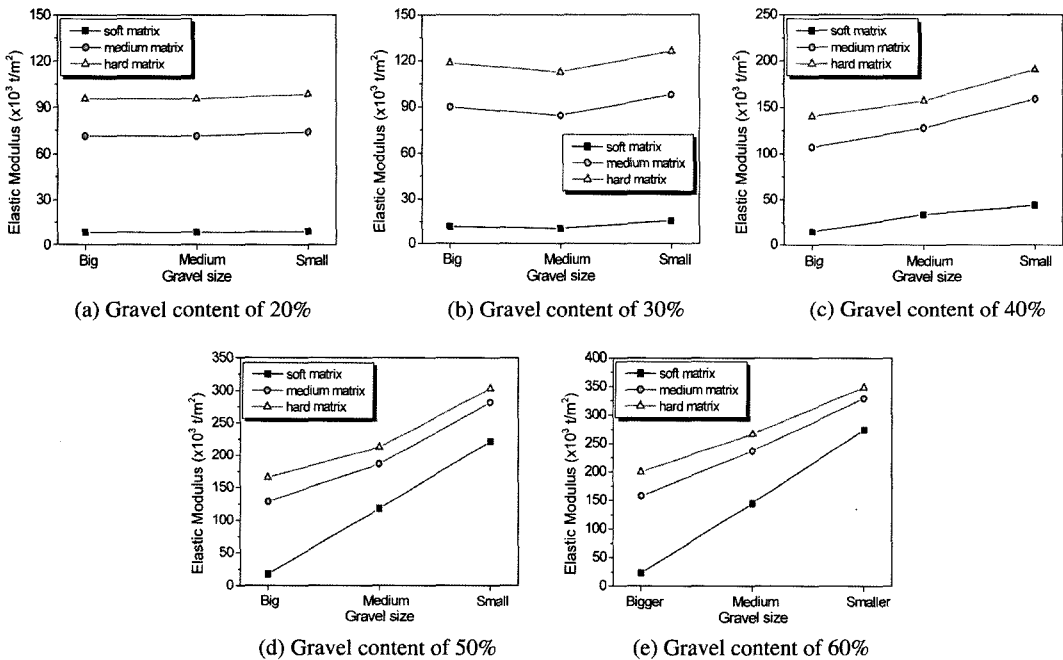


Fig. 5. Elastic modulus vs. gravel size with matrix condition in various gravel content.

아질수록 탄성계수는 대체로 증가하는 양상을 보이며, 역의 함유량이 많아질수록 그 증가폭은 커진다. 역의 함유량이 20%일 때 역의 크기가 상대적으로 큰 경우와 보통인 경우는 거의 같은 탄성계수를 보이며, 작은 경우도 증가폭은 매우 작다. 역의 함유량이 30%일 때는 역의 크기가 큰 경우에서 보통인 경우보다 오히려 더 큰 탄성계수를 보이며, 역의 함유량이 40%부터 역의 크기가 작아짐에 따른 탄성계수의 증가가 뚜렷해진다.

분급특성에 따른 탄성계수

균질화법을 이용한 탄성해석 결과, 40%의 역을 포함하는 역암층의 역의 크기와 분급상태에 따른 탄성계수는 Table 3과 같다. 동일한 크기의 역만 분포한다고 가정한 3개의 모델에서는 큰 역과 작은 역의 모델간 51,700 t/m³의 탄성계수 차이를 보이며, 역의 크기가 작아질수록 탄성계수는 커지는 경향을 보인다.

상향세립의 양호한 분급 상태의 모델(cc-46)은 각각 서로 다른 역학 특성을 가지는 3개의 층을 가지는 것으로 하였다(Fig. 2(b)). 상향세립의 양호한 분급 상태의 모델에 대한 탄성해석 결과, 119,200t/m³의 탄성계수를 기록하였다. 이 값은 중간크기의 역으로 구성된 모델보다 낮은 값으로 오히려 큰 크기의 역의 모델의 결과값과 근사하다. 즉 다양한 크기의 역들로 구성된 양호한 분급의 역암층은 큰 역들로 이루어진 층의 영향을 상대적으로 많이 받아서, 산술적인 계산에 의한 탄성계수보다는 다소 낮은 값을 보일 수 있다. Fig. 2(c)와 같은 분급이 불량한 역암층의 경우(cc-47)는 114,700 t/m³의 탄성계수로 양호한 분급상태보다는 4,500 t/m³ 정도 낮은 탄성계수를 보인다.

경사변화에 따른 탄성계수

Fig. 6은 상향세립의 양호한 분급의 조건에서 경사 0°, 20°, 40°로 변화시키면서 탄성해석을 수행한 결과이다. 역암층의 경사 증가에 따라 탄성계수는 완만하게 증가하는 양상을 보인다. 본 해석 모델에서는 퇴적암의 층리 특성, 즉 성층면을 따라 쪼개지는 특성은 무시하였다. 따라서 층리면을 따른 전단변형은 고려되지 않았으

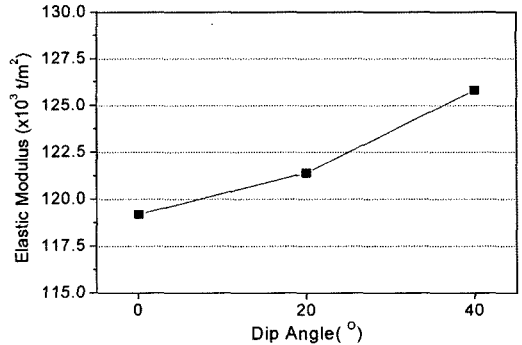


Fig. 6. The change of elastic modulus with dip angle of geo-materials containing 40% gravels.

며, 이 결과는 기질의 고결도가 높은 역암층의 경우에 해당한다. 만약 퇴적특성을 적용한 모델을 작성하여 탄성해석을 수행한다면 본 해석과는 다소 다른 결과를 예상할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 경험적인 암반분류법을 적용하기 어려운 역암이나 호박돌층과 같은 복합지반물질의 역학적 특성을 평가하기 위해 역의 함유량과 크기, 기질의 상태, 분급 그리고 경사특성 등의 다양한 조건을 가정하여 균질화법을 이용한 탄성해석을 실시하였다. 이상의 연구를 통해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 동일한 역의 함유량과 기질의 상태인 경우 역의 크기가 작을수록 대체로 탄성계수는 높아지는 경향을 보인다. 또한 역의 크기가 상대적으로 큰 경우는 기질이 견고할수록 역의 함유량에 따른 탄성계수의 증가량이 커지며, 기질의 고결도가 낮은 경우는 역의 크기가 작을 때 역의 함유량이 40%를 넘으면서 탄성계수가 급격히 증가한다.
2. 역의 크기가 작을수록 탄성계수가 커지는 경향은 역의 함유량이 많을수록 더욱 커지며, 특히 역의 함유량이 40%를 넘게 되면 그 양상은 뚜렷해진다.
3. 다양한 크기의 역으로 구성된 경우, 상향세립의 양

Table 3. Elastic moduli of well and poor sorted geo-materials containing 40% gravels.

| Compositematerials | Well sorted sediments | | | | Poor sorted sediments |
|---|-----------------------|---------------|--------------|----------------|-----------------------|
| | Big gravel | Medium gravel | Small gravel | Graded bedding | |
| Elastic modulus E (×10 ³ t/m ³) | 107.3 | 127.6 | 159.0 | 119.2 | 114.7 |

호한 분급상태와 불량한 분급상태를 가정하여 탄성해석을 수행한 결과 분급이 양호한 역암층이 다소 높은 탄성계수를 보인다.

4. 상향세립의 양호한 분급 조건에서 경사를 변화시키며 탄성해석을 실시한 결과, 경사가 증가함에 따라 탄성계수는 완만하게 증가하는 양상을 보인다.

사 사

이 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 김택곤, 최성순, 정의진, 2004, 경주지역 3기 역암퇴적층의 공학적 특성 및 암반분류사례, 대한지구물리학회지, 7(4), pp.293-305.
- 서용석, 도미란, 오대열, 홍성완, 배규진, 김교원, 2000, 균질화법을 이용한 화강암의 대표요소체적(REV) 산정에 관한 연구, 한국암반공학회지, 10(3), pp.309-315.
- 양홍석, 김동은, 이수곤, 2002, 핵석 지반에서의 합리적인 지반강도 정수 산정, 한국암반공학회 2002 춘계학술발표회 논문집, 한국암반공학회, pp.97-102.
- 이수곤, 김동은, 이천용, 김재현, 양홍석, 2004, 핵석 지반의 공학적 특성 연구, 한국환경복원녹화기술학회지, 7(1), pp.68-76.
- 정교철, 1994, Ananyis of Micro - to Macro - Mechanics in Granitic Rock: Experimental Observation of Theoretical Consideration, 자원환경지질학회지, 제27권, pp.499-505.
- Bear, J. and Verruijt, A., 1987, Modeling groundwater flows and pollution, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 20p.
- Bensoussan, A., Lions, J. L. and Papanicolsou, G., 1978, Asymptotic analysis for Periodic Structures, Studies in Mathematics and Its Applications 5, North Holland, Amsterdam.
- Fish, J., Nayak, P. and Holmes, M. H., 1994, Microscale reduction error indicators and estimators for a periodic heterogeneous medium, Comp. Mech. 14, pp.323-338.
- Guedes, J. and Kikuchi, N., 1990, Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 83(2), pp.143-198.
- Hashin, Z., 1983, Analysis of composite materials a survey, ASEM J. Appl. Mech., Vol. 50, pp.481-505.
- Hollister, S. J. and Kikuchi, N., 1992, A comparison of homogenization and standard mechanics analyses for periodic porous composites, Comp. Mech. 10, pp.73-95.
- Sanchez-Palencia, E., 1980, Non-Homogeneous Media and Vibration Theory, Lecture Notes in Physics 127, Springer-Verlag, Berlin.
- Seo, Y. S., Fujii, N., Seiki, T. and Ichikawa, T., 2000, Viscoelastic Behavior of Granite and the Homogenization Analysis, The Society of Materials Science, Japan, 6(3), pp.203-211.
- Seo, Y. S., Jeong, G. C., Kim, J. S. and Ichikawa, Y., 2002, Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression, Engineering Geology, Vol. 63, pp.259-275.
- Suquet, P. M., 1987, Elements of homogenization for inelastic solid mechanics, Lecture Notes in Physics 272, Springer-Verlag, Berlin.

2006년 7월 12일 원고접수, 2006년 9월 2일 게재승인

서용석

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-276-9645
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

임성빈

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-276-9645
E-mail: bins123@daum.net

백 용

한국건설기술연구원 국토지반연구부
411-712, 경기도 고양시 일산구 대화동 2311
Tel: 031-910-0228
Fax: 031-910-0561
E-mail: baek44@kict.re.kr

김지수

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-276-9645
E-mail: geop22@cbu.ac.kr