

공동 변화에 따른 석회암 지반의 변형특성에 관한 연구

천병식 (한양대학교 공과대학 토목공학과 교수)

송승훈 (SK건설)

도종남, 공진영, 성화돈 (한양대학교 대학원 토목공학과 석박사과정)

임주현 (한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정)

1. 서 론

최근 국내에서는 동부와 중부내륙 산간지를 연결하는 고속도로 및 고속철도 건설로, 용해성 공동과 연약파쇄대가 협재한 석회암지대에 장대교의 건설공사가 빈번해지고 있다(임수빈 등, 1998). 그러나 국내에서는 석회암 공동에 대한 합리적이고 체계적인 기초지반의 안정성 검토와 보강공법의 연구가 미흡한 상태이다.

석회암 공동지역의 안정성 평가는 공동의 크기와 분포, 불연속면, 주변 암상 및 형상, 석회암층 상부면의 형태, 지하수위 변동 등 다양한 측면에서 이루어져야 하지만 본 연구에서는 직접기초의 침하 원인이 되는 용해성공동이 존재하는 석회암지역의 특성을 고찰하고, 구조물의 지반반력 및 공동의 크기와 분포에 따른 변형특성을 2차원 유한요소해석 프로그램(PLAXIS 2D)을 통해 분석하고자 한다.

첫째로, 석회암 지반에 설치된 교량기초로 인한 변형특성을 검토하기 위해 대상구간의 최대 지반 반력을 고려하여 수치해석에 적용될 하중조건을 선정한다.

둘째로, 2차원 유한요소해석 프로그램(PLAXIS 2D)을 통한 해석은 교량기초의 선단이 석회암에 직접 위치한다고 가정하고 공동의 심도와 크기 등을 변화시킨 지반을 모델링하여 각각의 경우에 따른 침하량을 산정하고 전반적인 응력 및 변형 양상을 분석한다.

셋째로, 본 연구에서는 공동이 없는 지반상태에서의 침하량을 기준으로 각 조건에 따른 침하량과의 비를 도출하여 석회암 공동 지역의 변형특성을 분석한다.

넷째로, 2차원 유한요소해석 프로그램(PLAXIS 2D)을 통해 얻은 침하량을 석회암종별로 비교·분석하고 공동의 영향에 따른 결과를 도출한다.

2. 유한요소해석 가정조건

2.1 지반 물성치의 선정

기초지반의 안정성을 수치해석에 의해 검토할 경우 필요한 지반 물성치의 선정은 매우 신중해야

한다. 본 연구대상의 지반 물성치는 중앙선 ○○~○○간 복선전철 교량건설공사에서 직접기초가 시공된 지반의 물성치로 선정하였다(대우건설, 2001 ; 삼성물산 건설부문, 2001). 표 1은 수치해석에 적용된 지반의 물성치를 나타낸 것이다. 참고 보고서에 의하면 정확한 물성치 산정을 위해 시추조사, 물리탐사, 실내시험 및 현장시험 등을 수행하였고, 지반조사 결과의 한계성에 대한 보완과 신뢰성 제고를 위해 문헌 및 자료에 제시된 경험적 추천치 및 상한치와의 비교, 검증을 시행하였다(윤운상 등, 1999).

표 1. 수치해석에 적용된 지반 물성치

| 구 분 | 기반암 | | | |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 석회암 | | 돌로마이트 | |
| | 연암 | 경암 | 연암 | 경암 |
| 단위중량(tonf/m ³) | 2.4 | 2.7 | 2.7 | 2.8 |
| 점착력(tonf/m ²) | 10.0 | 55.0 | 15.0 | 70.0 |
| 내부마찰각(°) | 30 | 34 | 32 | 35 |
| 변형계수(tonf/m ³) | 257,000 | 600,000 | 180,000 | 260,000 |
| 푸아송비 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.23 |
| 일축강도(kgf/cm ²) | 190 | 750 | 400 | 1200 |
| RMR | 32 | 53 | 33 | 56 |

2.2 적용하중의 선정

암반위의 기초는 직접적인 지반의 파괴보다는 절리나 파쇄면을 따라 발생하는 침하에 의해 불안정해진다. 따라서 석회공동 위에 구조물을 설치할 경우 구조물의 안정성은 지지력보다 침하에 의해 더 큰 영향을 받는다고 가정하여, 본 연구에서는 지지력에 의한 지반파괴를 무시하였다. 따라서 대상구간의 설계 하중에 대한 최대 지반반력을 근거로 하여 안정측 해석을 고려하기 위해서 표 2와 같은 대상구간의 최대 지반반력 중 최대치인 56.49tonf/m²을 적용하중으로 선정하였다. 하중이 가해질 직접기초는 일반 footing기초 형상을 적용할 경우 양단에서 약간의 응력집중이 발생하였다. 따라서 이런 문제점을 고려하여 등분포하중을 적용하기 위해서 직접기초는 Beam요소로 가정하였다(한국지반공학회, 2003).

표 2. 대상구간의 최대 지반반력

| 구 분 | 구간 1 | 구간 2 | 구간 3 | 구간 4 | 구간 5 | 구간 6 | 구간 7 | 구간 8 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 최대 지반반력 (tonf/m ²) | 52.22 | 46.76 | 43.50 | 45.43 | 39.43 | 43.19 | 40.62 | 56.49 |

2.3 지반 조건

본 연구에서는 Mohr-Coulomb 모델을 지반에 적용하여 경계조건을 설정하였고 지하수위에 의한 영향은 고려하지 않기 위해서 지반모델 하단에 지하수위를 설정하여 그림 1과 같이 지반모델을 형상화하였다(D.M.Potts, 2001). 여기서 B는 기초의 폭, D는 공동의 직경, d는 공동의 심도를 나타낸다.

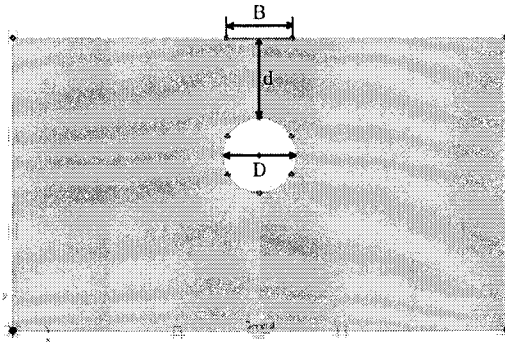


그림 1. 지반모델 모식도

공동의 심도는 Boussinesq(1985)에 의해 지반을 탄성체로 가정하여, 심도별 지중응력 분포를 기초 폭의 함수로 나타내었다. 이에 의하면 기초폭의 약 2배되는 심도에서 지중응력은 기초 접지압의 10% 내외인 것으로 나타내며, 기초폭의 약 3배되는 심도에서는 지중응력이 기초 접지압의 6%내외인 것으로 나타났다. 그러므로 본 연구에서는 기초저면에서 공동중심까지의 깊이를 각각 0.25B, 0.5B, 1.0B, 1.5B, 2.0B, 2.5B, 3.0B로 증가시켜 하중재하에 따른 침하량을 도출하였다.

또한 공동의 형상 및 크기는 석회공동의 형상을 단순한 원형으로 가정하고 직경을 0.5B, 0.75B, 1.0B, 1.25B, 1.5B로 확장시켜, 공동의 크기에 따른 변형특성을 분석하였다.

3. 공동심도 및 크기에 따른 변형특성 분석

최대 지반반력을 적용하중으로 작용하여, 공동의 심도를 각각 0.25B, 0.5B, 1.0B, 1.5B, 2.0B, 2.5B, 3.0B로 증가시키고, 또한 공동의 크기도 0.5B, 0.75B, 1.0B, 1.25B, 1.5B로 확장시킨 후 기초저면과 공동 천정부의 침하량을 구하였다.

각각의 경우에서 발생한 침하는 허용침하량인 10mm 이내에 들어왔으며, 이에 따라 공동이 존재하지 않는 석회암 지반과 석회공동이 존재하는 지반과의 비교를 위해 공동이 존재하지 않는 지반에서의 침하량에 대한 석회공동 지반의 기초저면과 공동 천정부 지점의 침하비를 산정하여 두 지점간의 석회암종별 변형특성을 비교하였다(정형식, 1998). 위에서 언급한 침하비는 본 연구에서 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\text{침하비} = \frac{\text{석회공동이 존재하는 경우의 침하량}}{\text{석회공동이 존재하지 않는 경우의 침하량}} \quad (1)$$

3.1 석회암(연암) 지반에서의 변형특성 분석

그림 2, 3에서 보는 바와 같이, 공동심도에 의한 변형특성은 공동의 크기에 상관없이 심도가 증가하면서 대략 2B 정도의 심도에 도달하면 일정한 값으로 수렴하여 안정화된 상태를 유지함을 보이며, 전반적으로 공동의 심도에 따른 침하비의 변화 범위보다는 공동의 크기 변화에 따른 침하비의 변화가 더 민감함을 알 수 있다. 그리고 공동 천정부에서의 공동의 심도 변화에 따른 변형특성은 공동크기에 상관없이 거의 유사한 양상을 보이지만, 기초저면에서는 공동의 크기가 커지면서 변형특성이 더 민감하게 증가함을 알 수 있다.

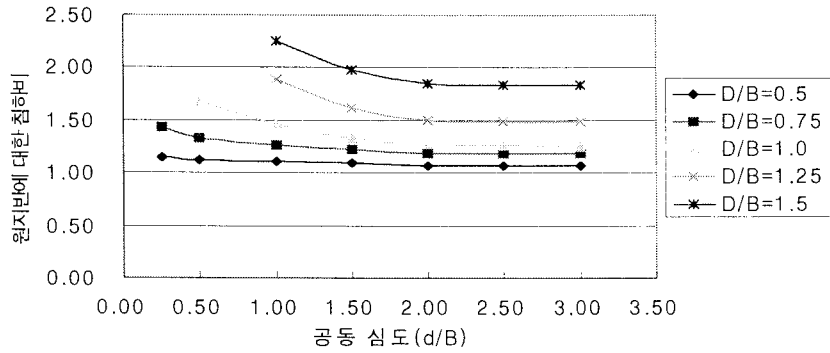


그림 2. 공동심도 및 크기별 침하비(기초저면)

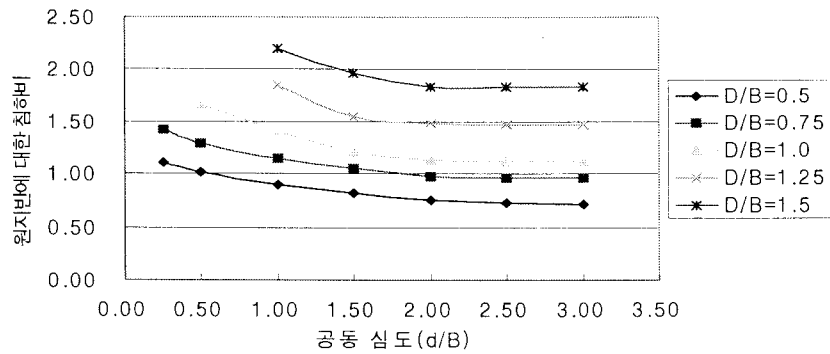


그림 3. 공동심도 및 크기별 침하비(공동 천정부)

3.2 석회암(경암) 지반에서의 변형특성 분석

그림 4, 5에서 보는 바와 같이 기초저면과 공동 천정부에 있어 전반적인 변형 양상은 석회암(연암)과 유사하게 전개되지만, 석회암(경암)의 강도정수와 변형계수 증가에 따라 그 침하비의 변화폭이 상당히 감소되었음을 확인할 수 있었다.

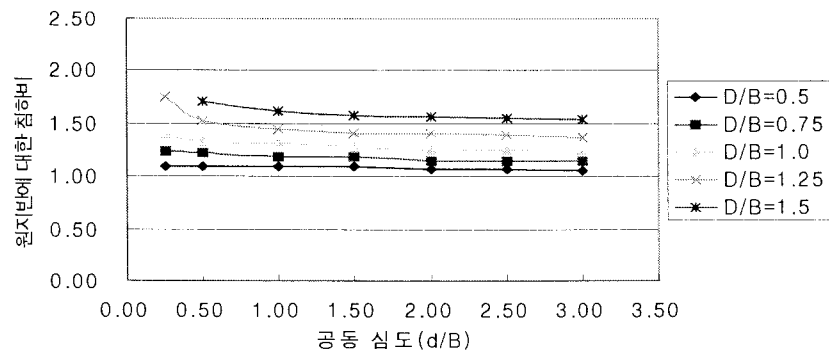


그림 4. 공동심도 및 크기별 침하비(기초저면)

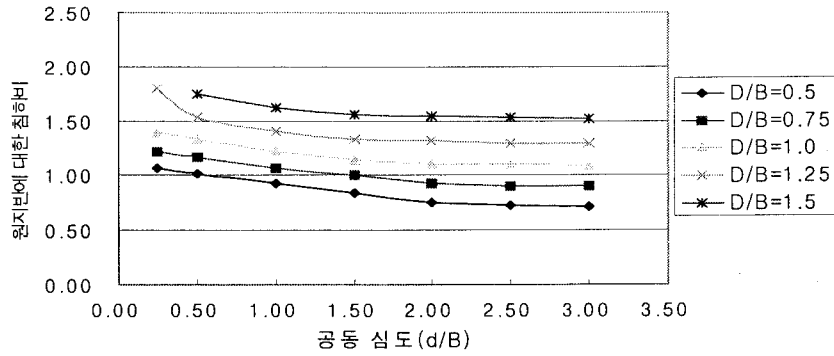


그림 5. 공동심도 및 크기별 침하비(공동 천정부)

3.3 돌로마이트(연암) 지반에서의 변형특성 분석

그림 6, 7에서 보는 바와 같이, 공동심도에 의한 기초저면과 공동 천정부에 있어 전반적인 변형 양상은 석회암과 유사하게 전개되었고 기초저면보다는 공동 천정부에서 공동크기에 따른 침하비의 변화폭이 더 크게 나타났다.

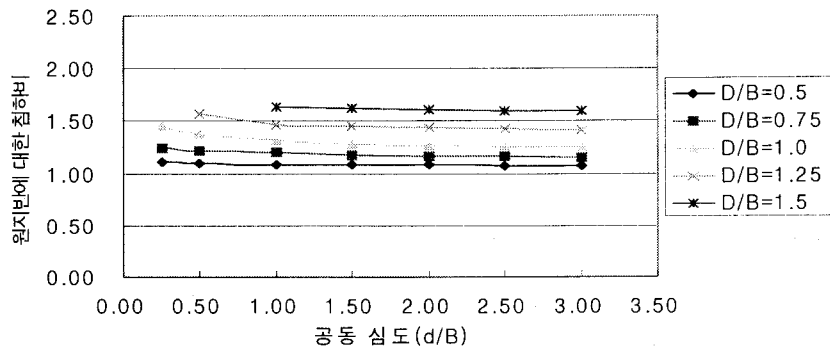


그림 6.. 공동심도 및 크기별 침하비(기초저면)

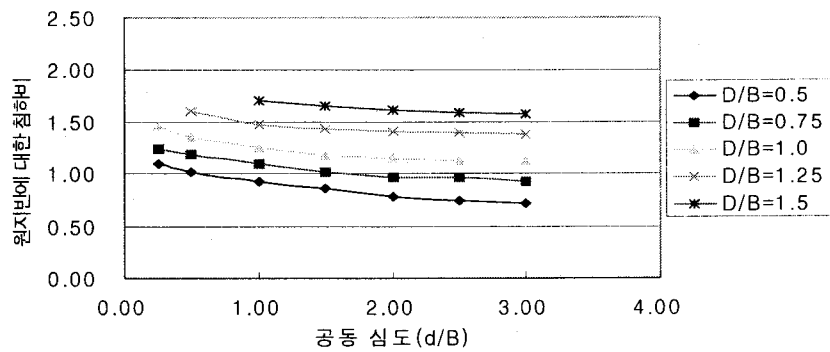


그림 7. 공동심도 및 크기별 침하비(공동 천정부)

3.4 돌로마이트(경암) 지반에서의 변형특성 분석

그림 8, 9에서 보는 바와 같이, 공동심도에 의한 기초저면과 공동 천정부에 있어 전반적인 변형 양상은 돌로마이트(연암)과 유사하게 전개되었다.

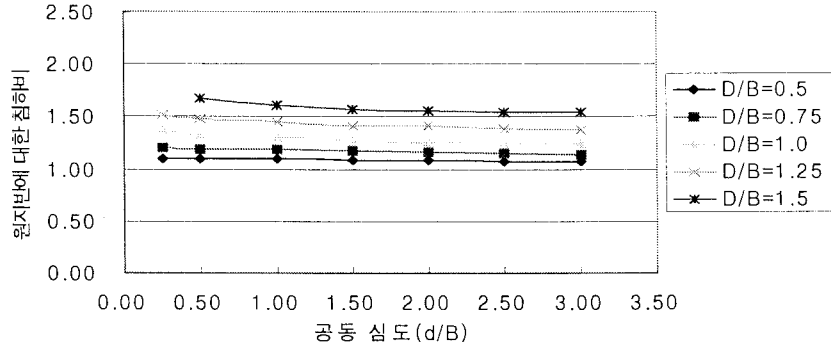


그림 8. 공동심도 및 크기별 침하비(기초저면)

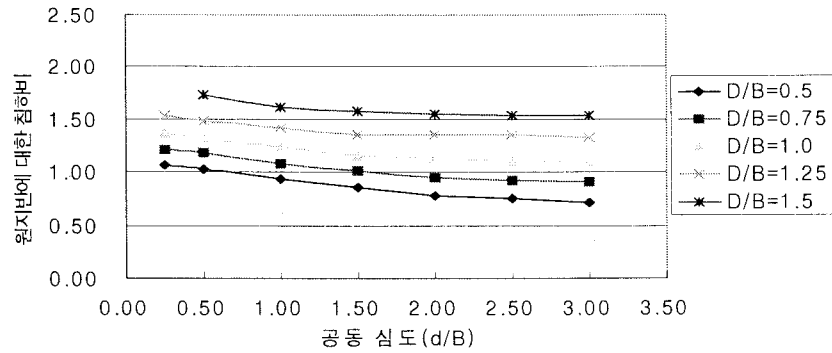


그림 9. 공동심도 및 크기별 침하비(공동 천정부)

4. 수치해석과 탄성론에 의한 침하량 분석

4.1 탄성론에 의한 침하량

암반위에 놓인 대부분의 기초에 있어서 지지체는 탄성체와 등방구조로 생각할 수 있으므로 하중이 작용했을 때 침하가 일어나면 시간의존적인 영향은 무시할 수 있다. 이러한 조건하에서 암반의 적절한 변형계수와 푸아송비를 결정하여 침하량을 구하였다. 이러한 조건과 기초 및 지반의 물성치를 이용하여 탄성론에 근거한 침하량 제안식(Vesic-Harr, Schleicher, Bell)으로 침하량을 산정하였다(천병식, 2004).

표 3. 탄성론에 의한 침하량

| 구 분 | 기반암 | | | |
|---------------------|------|------|-------|------|
| | 석회암 | | 돌로마이트 | |
| | 연암 | 경암 | 연암 | 경암 |
| Vesic-Harr의 침하량(mm) | 1.45 | 0.63 | 2.07 | 1.45 |
| Schleicher의 침하량(mm) | 1.63 | 0.71 | 2.33 | 1.63 |
| Bell의 침하량(mm) | 1.50 | 0.65 | 2.14 | 1.50 |

표 3과 같이 탄성론에 의해 산정된 암반의 침하량을 비교해 보면 Schleicher의 제안식에 의해 구해진 침하량이 가장 과대한 수치를 나타냈고, Vesic-Harr의 제안식에 의해 계산된 침하량이 가장 작았다. 그리고 Vesic-Harr과 Schleicher의 제안식은 서로 같지만, 기초의 강성도에 따른 영향계수가 상이하여 서로 약간의 차이를 보이고 있다. 그러나 그림 10에서 보는 바와 같이 탄성론에 의해 구해진 침하량들은 큰 오차 없이 일정한 경향을 보이고 있다.

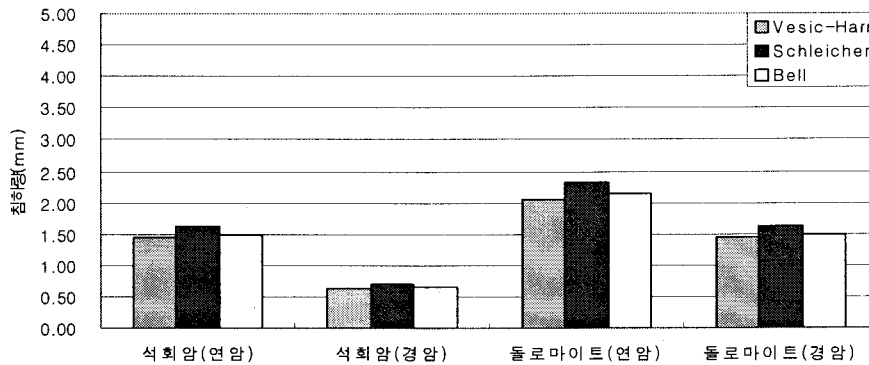


그림 10. 탄성론에 의한 침하량 비교

4.2 수치해석에 의한 침하량

PLAXIS 2D에 의한 수치해석 결과, 표 4와 같은 기초저면 침하량을 얻을 수 있었고 각 암종별 적용하중에 대한 지반의 변형 양상을 그림 11~14와 같이 나타내었다.

표 4. 수치해석에 의한 침하량

| 구 분 | 기반암 | | | |
|-------------------|------|------|-------|------|
| | 석회암 | | 돌로마이트 | |
| | 연암 | 경암 | 연암 | 경암 |
| PLAXIS 2D 침하량(mm) | 2.85 | 1.26 | 4.04 | 2.85 |

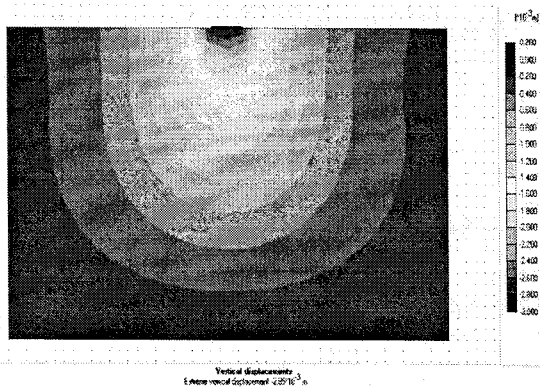


그림 11. 석회암(연암)에서의 지반 변형 양상

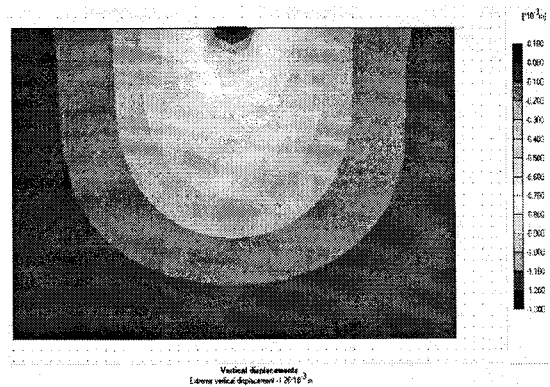


그림 12. 석회암(경암)에서의 지반 변형 양상

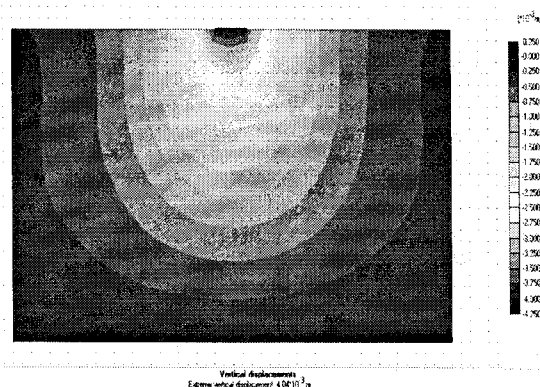


그림 13. 돌로마이트(연암)에서의 지반 변형 양상

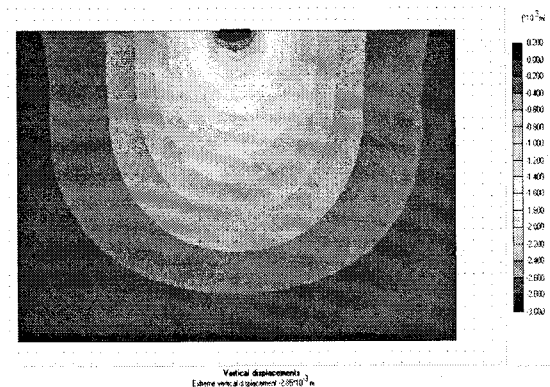


그림 14. 돌로마이트(경암)에서의 지반 변형 양상

4.3 탄성론과 수치해석에 의한 침하량 비교

앞장에서 언급했던 수치해석에 의한 침하량과 탄성론에 의한 침하량을 비교해 보았다. 탄성론에 의해 산정된 침하량은 지반에 공동이 존재하지 않는 상태의 침하량이기 때문에, 공동이 존재할 경우의 침하량과의 비교는 불가능하였다. 따라서 공동이 존재하지 않는 지반의 기초하부 침하량을 비교해 보면 표 5와 같다.

표 5. 탄성론과 수치해석에 의한 침하량 비교

| 구 분 | 기반암 | | | |
|---------------------|------|------|-------|------|
| | 석회암 | | 돌로마이트 | |
| | 연암 | 경암 | 연암 | 경암 |
| Vesic-Harr의 변위량(mm) | 1.45 | 0.63 | 2.07 | 1.45 |
| Schleicher의 변위량(mm) | 1.63 | 0.71 | 2.33 | 1.63 |
| Bell의 변위량(mm) | 1.50 | 0.65 | 2.14 | 1.50 |
| PLAXIS 2D 변위량(mm) | 2.85 | 1.26 | 4.04 | 2.85 |

유한차분해석 프로그램에 의해 얻어진 침하량은 석회암(연암), 석회암(경암), 돌로마이트(연암), 돌로마이트(경암)에서 각각 2.85mm, 1.26mm, 4.04mm, 2.85mm이었다. 표 5에 나타난 바와 같이, 돌로마이트(연암)에서 가장 큰 침하량의 차이를 보였고 단단함 암일수록 침하량의 차이는 작았다. 그리고 탄성론에 의한 침하량이 유한요소해석 프로그램에 의해 얻어진 침하량보다 과소평가되고 있음을 알 수 있다. 실제 지반에서는 심도가 깊어지면서 구속압에 따른 탄성계수가 증가하지만 탄성론에 의한 침하량은 지반을 균질하고 등방성인 탄성체로 가정하여 산정한 것이므로 실제 지반에 비해서 작게 산정될 수 있다. 그러나 수치해석에 의한 침하량은 탄성모델 대신 Mohr-Coulomb 탄소성이론을 적용시켰고 탄성이론식과는 달리 층두께를 고려한 침하량이기 때문에 탄성론에 의한 침하량보다는 큰 결과가 산정되었다고 판단된다. 따라서 탄성론에 의한 침하량이 과소평가되고 있음을 알 수 있다.

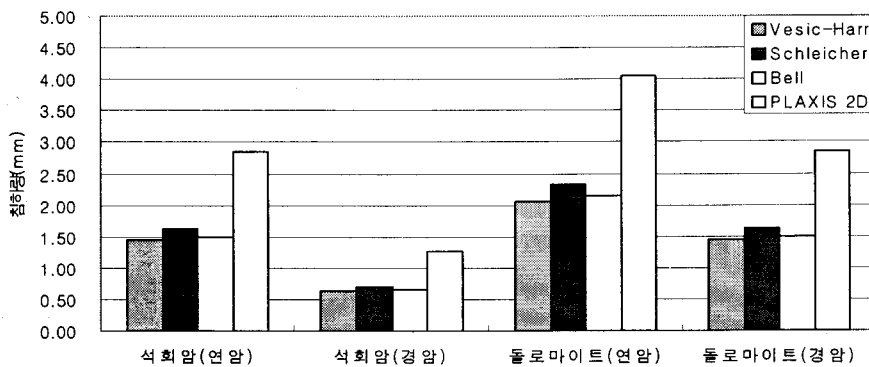


그림 15. 탄성론과 수치해석에 의한 침하량 비교

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 직접기초가 설치된 석회암 공동지역의 변형특성을 유한요소해석 프로그램(PLAXIS 2D)을 이용하여 해석하였다. 공동의 크기와 심도를 변화시켜 지반을 모델링하였고, 기초의 안정성은 지지력보다 침하에 의해 더 큰 영향을 받는다고 가정하여 대상구간의 최대 지반반력 중에서 최대치를 적용하중으로 재하시켜 이에 따른 침하량을 산정하였다. 각 석회암종에 따라 공동이 존재하지 않는 상태에서의 침하량을 기준으로 공동의 심도와 크기 변화에 따른 침하량의 비를 산정하여 석회공동 지반의 변형특성을 분석·고찰하였다. 또한 수치해석에 의한 침하량과 탄성론에 근거한 침하량을 비교·분석하였고 그 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 각 석회암종에 따라 산정된 침하비를 통한 석회공동 지반의 변형양상을 볼 때, 전반적으로 공동의 심도 변화보다는 공동의 크기 변화가 변형특성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 공동의 심도 변화에 따른 변형특성은 공동의 크기에 상관없이 심도가 증가하면서 대략 2B 정도의 심도에 도달하면 일정한 값으로 수렴하여 안정화된 상태를 유지하였다.
- (2) 각 석회암종에 따라 산정된 침하비를 통해 석회공동 지반의 기초저면과 공동 천정부의 변형양상을 볼 때, 공동의 크기가 작은 경우에는 공동의 심도가 깊어짐에 따라 어느 정도 일정한 차이가 발생했으나 공동의 크기가 커짐에 따라 기초저면과 공동천정부의 침하비가 유사해짐을

- 확인할 수 있었고 이는 공동이 커질수록 공동 천정부에 미치는 상재하중의 영향이 점차적으로 증가하여 결국은 기초저면에서의 상재하중에 의한 거동과 유사해지기 때문이라고 판단된다. 또한 기초저면보다는 공동 천정부에서 공동크기에 따른 침하비의 변화폭이 더 크게 나타났다.
- (3) 경암질 석회암의 경우 연암질 석회암에 비해 강도정수와 변형계수가 크게 증가하였는데, 이로 인해 공동의 심도와 크기에 따른 기초저면과 공동 천정부의 침하비 변화폭이 크게 감소되는 것을 알 수 있었다.
- (4) 경암질 돌로마이트의 경우 연암질 돌로마이트에 비해 강도정수는 크게 증가한 반면 변형계수는 소폭으로 증가하였는데, 이로 인해 공동의 심도와 크기에 따른 기초저면과 공동 천정부의 침하비 변화폭이 약간 감소되는 것을 알 수 있었다. 따라서 (3)의 결과와 함께 미루어 볼 때, 침하비의 변화 정도에 변형계수가 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 침하량이 비슷하게 산정된 연암질 석회암과 경암질 돌로마이트의 경우, 비슷한 변형계수를 가지고 있음에도 불구하고 상이한 변형양상을 보였다. 변형계수가 비슷함에도 불구하고 이런 상이한 거동을 보이는 것은 암반의 구성성분에 따라 변형계수라는 변수 외에 다양한 변수들에 의한 것으로 판단되며, 이에 따라 여러 영향요소들을 종합적으로 분석한 석회암 지반의 변형특성에 대한 연구가 이루어져야 된다고 판단된다.
- (6) 탄성론에 의한 침하량은 유한요소해석 프로그램에 의해 얻어진 침하량보다 과소평가되고 있다. 실제 지반에서는 심도가 깊어지면서 구속압에 따른 탄성계수가 증가하지만 탄성론에 의한 침하량은 지반을 균질하고 등방성인 탄성체로 가정하여 산정한 것이므로 실제 지반에 비해서 작게 산정될 수 있다. 그러나 수치해석에 의한 침하량은 탄성모델 대신 Mohr-Coulomb 탄소성 이론을 적용시켰고 탄성이론식과는 달리 층두께를 고려한 침하량이기 때문에 탄성론에 의한 침하량보다는 큰 결과가 산정되었다고 판단된다. 따라서 탄성론에 의한 침하량이 과소평가되고 있음을 알 수 있었다.

■ 참고문헌 ■

1. (주)대우건설(2001), "중앙선 ○○~○○간 복선전철 건설공사 지반조사 보고서", pp. 24~75.
2. (주)삼성물산 건설부문(2001), "중앙선 ○○~○○간 복선전철 건설공사 지반조사 보고서", pp. 33~68.
3. 윤운상, 김학수, 최원석(1999), "석회공동의 특성과 카르스트 지역내 교량기초를 위한 조사 설계", 한국지반공학회 1999년 봄학술발표회 논문집, pp. 399~406.
4. 임수빈, 김문국, 조병철, 임철훈(1998), "공동 및 점토협재 파쇄대가 산재된 석회암층의 교량 기초지반 보강공법", 한국지반공학회 1998년 가을학술발표회 논문집, pp. 121~128.
5. 정형식(1998), "토목기술자를 위한 암반역학", 새론, pp. 270~333.
6. 천병식(2004), "지반공학", 구미서관, pp. 621~650.
7. 한국지반공학회(2003), "구조물 기초설계기준 해설", pp. 177~275.
8. D. M. Potts and L. Zdravkovic(2001), "Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering (Application)", Thomas Telford, pp. 56~76.