

## 불연속지반의 연속체 모델 적용범위에 대한 수치해석적 연구

### A Study on Application Range of Continuum Model to Discontinuous Rock mass with Numerical Analysis

이경우<sup>1)</sup>, Kyung-Woo Lee, 노상림<sup>2)</sup>, Sang-Lim No, 윤지선<sup>3)</sup>, Ji-Son Yoon,

- 1) 인하대학교 지구환경공학부 석사과정, Graduate Student, Div. of Environmental & Geosystem Engineering, Univ. of Inha
- 2) 인하대학교 지구환경공학부 박사과정, Graduate Student, Div. of Environmental & Geosystem Engineering, Univ. of Inha
- 3) 인하대학교 지구환경공학부 교수, Professor, Div. of Environmental & Geosystem Engineering, Univ. of Inha

**Synopsis :** In this study, multivariate analysis based on domestic data(958 EA) of road tunnel, and suggest the easy prediction equation of Q-system. We generate applicable Q-value to numerical analysis method with using the equation and investigate the behavior as variable Q-value of rock mass induced excavation with discontinuum numerical analysis method, UDEC. In the result of the experiment, we research the application range of Q-value to apply the continuum model to discontinuous rock mass is below 0.7 and we testify the applicability of continuum model as researched Q-value with continuum numerical analysis method, FLAC.

**Keywords :** Q-system, numerical analysis method, multivariate analysis, Pseudo-continuum

## 1. 서론

터널 공사의 수효가 늘어남에 따라 이제 터널은 보다 깊은 심도에서 굴착되는 것이 현재의 추세이다. 이러한 관점에서 우리나라의 지반은 얇은 토피 밑에 암반이 존재하며, 이제 터널은 암반에 대한 시공이 필수 불가결하다.

암반은 물리적으로 불연속면과 불연속면간의 intact rock인 2개의 구성요소로 되어 있다. 암반의 거동을 복잡하게 하는 요소로써 불연속면이나 단층 사이에 협재물의 존재가 추가된다. 이러한 이유로 불연속면을 포함하는 암반에 대해서는 개별요소법을 적용한 불연속체 해석이 타당하다고 판단된다. 그러나, 암반분류 결과가 낮은 등급의 지반은 암괴의 수가 방대하게 되고 현실적으로 개별요소법으로는 대응할 수 없기 때문에 암반을 의사연속체(Pseudo-continuum)로 가정하여 FEM이나 FLAC과 같은 연속체 해석을 필요로 하게 된다. 여기서, 동일 지반에 대하여 연속체 및 불연속체 모델을 동시에 적용하는 것은 문제가 있으므로 그 구분을 명확히 할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내 도로 터널의 Q분류결과 및 대상지역의 절리면 물성시험과 암석 시험결과에 기초하여 통계학적 분석 방법을 사용하여 Q값에 따른 불연속체 해석의 입력변수의 변화량을 추정하고 이를 근거로 임의의 해석단면을 설정하여 불연속체 해석을 실시하였다. 그 결과 Q값의 감소에 따라 암반이 연속체적 거동을 보이게 되는 Q값을 도출하고, 각각의 해석기법에 따른 지반 거동 예측결과를 비교함으로써 연속체 해석과 불연속체 해석의 적용 경계 영역에 대하여 고찰하였다.

## 2. Q값 및 입력변수 예측을 위한 다변량 분석

Q값을 구성하는 6개의 요소에 대하여 다변량 분석 중 다중회귀 분석을 실시하였다. 다중회귀 분석이란 종속변수의 변화를 설명하기 위하여 두 개 이상의 독립변수가 사용되는 다중 선형회귀모형을 말하

며, 여러 개의 원인과 결과를 연결하여 분석하는 방법이다.

다중 회귀분석을 위하여 Q분류식을 log 변환함으로써 각 요소의 비율에 대한 곱으로 되어있는 Q분류식을 선형식으로 변환시킨다. log 변환된 각 요소들과 실측 Q값은 다중회귀분석을 사용하여 원자료의 설명력을 가지는 상태로 Q의 평가항목을 줄여나갈 수 있다.

Q값을 예측하기 위한 모형을 설정하기 위하여 변수선택을 실시하였다. 예측 모형을 선택하는데 있어서 간단한 모형을 선호하는 모형 간편화 원칙(principle of parsimony)에 따라 모든 가능한 회귀 중에서 가장 좋은 회귀 방정식의 선택기준을 사용한다. 다중회귀 모형의 선택기준은 평균잔차제곱합(MSE) 기준, 수정결정계수(Adjusted R Square) 기준, Cp통계량 기준, 아카이카 정보량(AIC) 기준을 사용하였다.

표 1. 각 case에 대한 모든 가능한 변수선택 결과

case	num. of data	R-square	Adjusted R-square	MSE	Variables in Model
1	223	0.9505	0.9496	0.0571	RQD J <sub>n</sub> J <sub>r</sub> J <sub>a</sub>
2	202	0.9277	0.9262	0.0573	RQD J <sub>n</sub> J <sub>r</sub> J <sub>a</sub>
3	533	0.9787	0.9786	0.0170	RQD J <sub>n</sub> J <sub>r</sub> J <sub>a</sub>

각 case에 대한 변수 선택 결과 RQD, J<sub>n</sub>, J<sub>r</sub>, J<sub>a</sub>만으로 구성되는 예측 모형식은 각각의 case에 대하여 수정결정계수(Adjusted R-Square)가 0.95, 0.93, 0.98로 설명력을 충분히 가지는 것으로 판단되었다.

$$\log(Q) = 1.5526 \log(RQD) - 1.1222 \log(J_n) + 0.9105 \log(J_r) - 1.2915 \log(J_a) - 1.1446 \quad (1)$$

(case 1, Adjusted R-Square = 0.95)

$$\log(Q) = 1.0757 \log(RQD) - 1.0348 \log(J_n) + 0.8452 \log(J_r) - 1.5067 \log(J_a) - 0.1852 \quad (2)$$

(case 2, Adjusted R-Square = 0.93)

$$\log(Q) = 1.2812 \log(RQD) - 1.0894 \log(J_n) + 0.9380 \log(J_r) - 1.0099 \log(J_a) - 0.8492 \quad (3)$$

(case 3, Adjusted R-Square = 0.98)

또한, 선택된 각 case의 회귀모형의 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다.

표 2. 분산분석표

case	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob > F
1	Model	4	239.14	59.79	1047.09
	Error	218	12.45	0.06	
2	Model	4	144.73	36.18	631.47
	Error	197	11.29	0.06	
3	Model	4	413.45	103.36	6072.17
	Error	528	8.99	0.02	

도출된 예측모형은 case1, case2, case3에 대하여 모두 RQD, J<sub>n</sub>, J<sub>r</sub>, J<sub>a</sub>로 구성하였으며, 각 case의 변수 선택 결과에 있어서 회귀방정식은 모두 유의함을 알 수 있다. 또한, case3의 경우가 수정결정계수(Adjusted R-Square)와 평균잔차제곱(MSE)에서 다른 case에 비하여 설명력이 높게 나타난 것을 볼 수 있다.

다음으로, 회귀진단과 처방을 통하여 최적의 예측 모형식을 얻을 수 있도록 다중공선성과 잔차 분석에 대한 검토를 실시하였다. 우선, 예측된 모형에 대하여 각 변수간에 다중공선성의 존재 여부를 확인하고자 상태지수, 분산비율 등을 검토하였다. 검토 결과 선택된 4개의 변수가 포함된 모형에서 다중공선성의 문제가 없는 것으로 판단되었다.

## 2.1 최적 예측 모형식의 판단 및 적용성 평가

다면량 분석으로부터 얻은 다중회귀식의 적용성을 검토하기 위하여 다른 case에 대하여 실측된 Q값과 각 case로부터 얻은 예측된 Q값을 단순회귀분석으로부터 도출되는 결정계수(R-Square)를 기준으로 각 case의 예측 모형식을 비교한다. 그림 1은 각 case의 예측 모형식을 적용한 다른 case의 실측된 Q값과 예측된 Q값의 단순회귀 분석을 나타낸다.

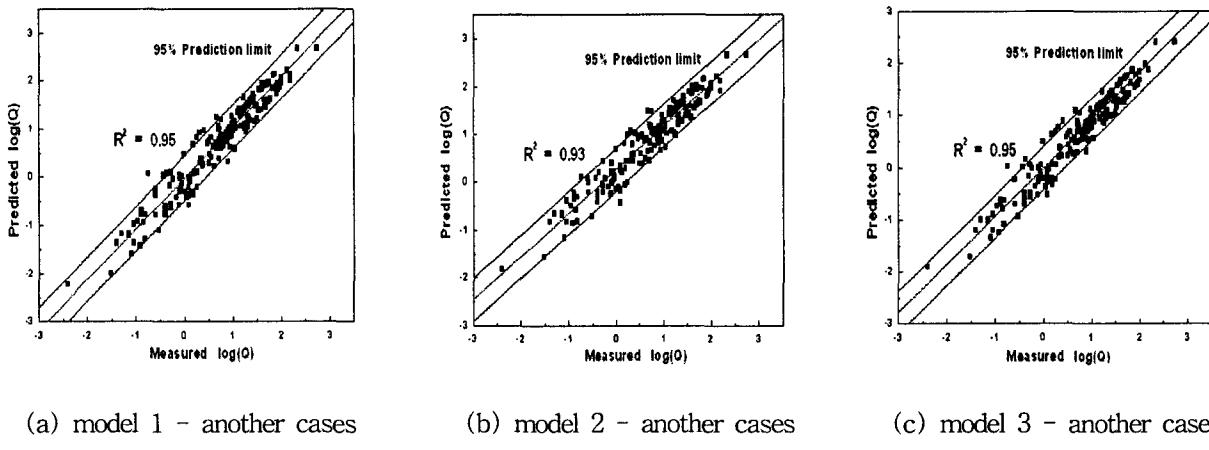


그림 1. 실측 Q값과 예측 Q값의 관계

Q의 예측 모형식에 대한 분석 결과를 종합할 때 case3의 예측 모형식은 다른 case에 대하여 수정결정계수 및 MSE 분석결과 설명력이 높게 판단되었으며, 적용성 평가 결과 또한 높은 상관관계를 나타내므로 이후의 불연속체 해석 입력변수에 대한 분석에 case 3으로부터 얻어진 예측 모형식을 적용하였다.

## 3. 불연속체 해석

본 연구에서는 불연속체 해석을 위하여 개별요소법을 채택한 UDEC 프로그램을 사용하였으며, 불연속면의 거칠기 및 팽창에 따르는 절리의 전단 및 수직 변형 거동을 고려하여 BB 모델을 적용하였다.

암반의 거동은 발생된 절리군의 비대칭적인 구조로 인하여 일정한 방향성을 가지게 된다. 그러나, Q값의 감소에 따라 암반상태가 불리하게됨과 동시에 지반의 거동은 이러한 방향성을 감소하게 된다. 결국 그 방향성의 감소가 수렴되는 상태의 지반을 나타내는 Q값의 범위를 관찰하였다.

터널 굴착의 대심도화 및 절리 발생 조건을 고려하여 지표 50m이하에 터널을 굴착하는 것으로 하고, 측압계수는 0.5로 설정하였다. 지반의 변형 거동 및 응력분포 형상을 쉽게 관측할 수 있도록 원형 단면을 채택하였으며, 그 직경은 10m로 설정하여 해석을 실시하였다. 또한, 터널 주변의 암반거동에 대하여 관찰하기 위하여 수평방향으로 3D, 터널 아래방향으로 2D의 거리를 두고 경계범위를 설정하였다.

### 3.1 불연속체 해석 입력 변수 설정

intact 암석블록의 물성치는 국내의 대표적 암석인 화강암의 일반적인 물성치를 사용하였다. 수치해석에 사용되는 intact 암석블록의 물성치는 다음과 같다.

표 3. 암석블록의 물성치(화강암)

단위중량 [kg/m <sup>3</sup> ]	공극률 [%]	일축압축강도 [MPa]	인장강도 [MPa]	탄성계수 [MPa]	포이슨비
2610	1.45	120	8	$3.14 \times 10^4$	0.23
±50	±1.34	±52	±4	$\pm 1.67 \times 10^4$	±0.08

표 3의 물성치는 신선한 화강암반 블록의 성질로 해석단계에서는 고정값으로 취하고, 불연속면은 지

반거동에 있어서 대칭적인 기하학적 형상이 되지 않도록 발생시켰다. 실제 지반에 대한 RQD를 수치해석에 대하여 기하학적으로 동일하게 구현하는 것은 어려우므로 수치해석 지반의 규모에 맞도록 조정하여 절리군의 평균 간격에 따라 RQD를 추정하여 적용하였다.

또한, 불연속면의 교차에 의하여 터널 굴착 후 key block의 형성으로 암반블록이 낙하하는 것을 방지하기 위하여 각 단면에 대하여 동일한 물성의 콘크리트 요소를 적용하였다.

Q-system에서 제시되는 평가항목의 평점기준 및 평가점수 중 일부를 다음과 같이 조합하고, 이를 추정된 예측식에 적용하여 발생 가능한 Q값을 예측하고 Q값을 단계적으로 감소시켜 불연속체 해석에 적용하였다. 단, 적용된 예측식은 RQD,  $J_n$ ,  $J_r$ ,  $J_a$  만으로 구성되므로  $J_w$ 와 SRF는 고려하지 않는다.

표 4. 수치해석에 적용된 예측 Q값의 분포

Range of Predicted Q	Number of cases	Substitute Q	Selected Value			
			RQD	$J_n$	$J_r$	$J_a$
> 50	1	52.57	95	4	4	0.75
		39.06	93	4	4	0.75
		28.01	90	4	3	1
		22.02	80	4	2	0.75
		16.15	93	9	3	0.75
		10.58	90	9	2	0.75
10 < Q < 50	45	9.25	93	15	3	0.75
		8.87	90	15	3	0.75
		8.24	85	15	3	0.75
		7.36	85	9	2	1
		6.09	65	4	3	3
		4.94	80	9	3	2
		3.90	80	15	2	1
		3.11	75	9	2	2
		2.02	20	4	3	2
		1.52	55	9	3	4
		0.99	65	15	2	3
		0.89	75	15	2	4
		0.80	55	15	2	3
0.1 < Q < 1	30	0.69	40	9	2	4
		0.60	55	15	2	4
		0.53	40	15	2	3

그 결과로 각 Q 범위에 해당하는 불연속면을 포함하는 암반에 대한 기하학적 형상은 대략적으로 다음과 같다. 또한, 암반등급이 낮은 상태에서의 의사연속체 모델 적용에 대하여 검토하기 위하여 Q = 50 이상의 암반은 수치해석에 있어서 고려하지 않는다.

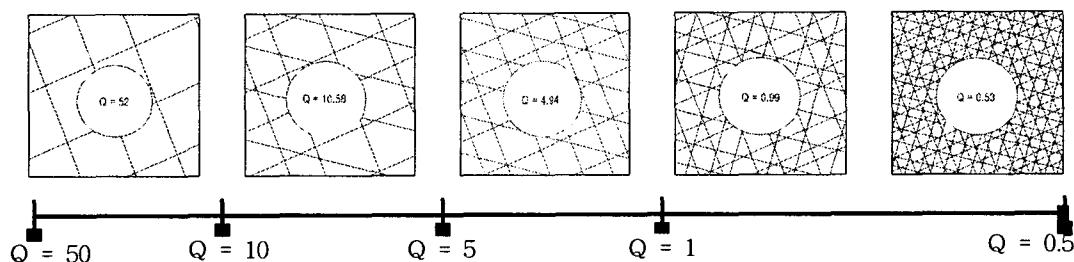


그림 2. Q값의 변화에 따른 암반의 절리분포 상태

### 3.2 해석결과의 분석

불연속면에 의해 일정한 역학적 방향성을 가지는 암반에 대하여  $Q$ 값을 감소시킴으로써 암반상태를 단계적으로 불리하게 적용하였다. 그 결과, 불연속면에 의한 방향성이 감소하여 결국 역학적 대칭성을 보이게 되는  $Q$ 값을 관찰하였다. 이러한 관찰을 위하여 터널 각 방향에 설정된 계측점에서의 변위량 및 솗크리트에 작용하는 축력 분포상황과 대칭적 위치에서의 변형량을 분석하였다.

$Q$ 값의 감소에 따른 터널 각 부분의 변위와 솗크리트 요소에 작용하는 축력 변화는 다음과 같이 관찰되었다.

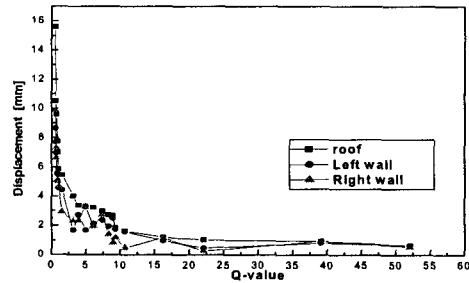


그림 3.  $Q$ 값의 변화에 따른 터널의 변위

그림 3은  $Q$ 값이 감소함에 따라 터널 변위가 증가하는 것을 보인다. 이것은  $Q$ 값의 감소에 따라 암반은 역학적으로 불리한 상태로 변화하고 있다는 것을 제시한다.

또한, 본 연구에서는  $Q = 0.5$  이하의 암반등급에 대해서는 암반블록의 수가 방대하게 됨에 따라 불연속체 해석의 수행이 어렵다고 판단되었다.

속크리트에 작용하는 축력의 분포상황을 관찰함으로써  $Q$ 값의 감소에 따라 암반 거동의 역학적 방향성이 감소하고 대칭적 거동을 보인다는 것을 알 수 있다.

그림 4에서 제시한 바와 같이  $Q$ 값이 감소하여 암반등급이 낮아질수록 비대칭적인 축력 분포상황은 속크리트 전체에 대하여 균등하게 분포된다. 이러한 관찰결과로부터 연속체 모델의 적용이 가능하다고 판단되는  $Q$ 값의 경계범위는  $0.69 \approx 0.7$ 이하로 판단되었다.

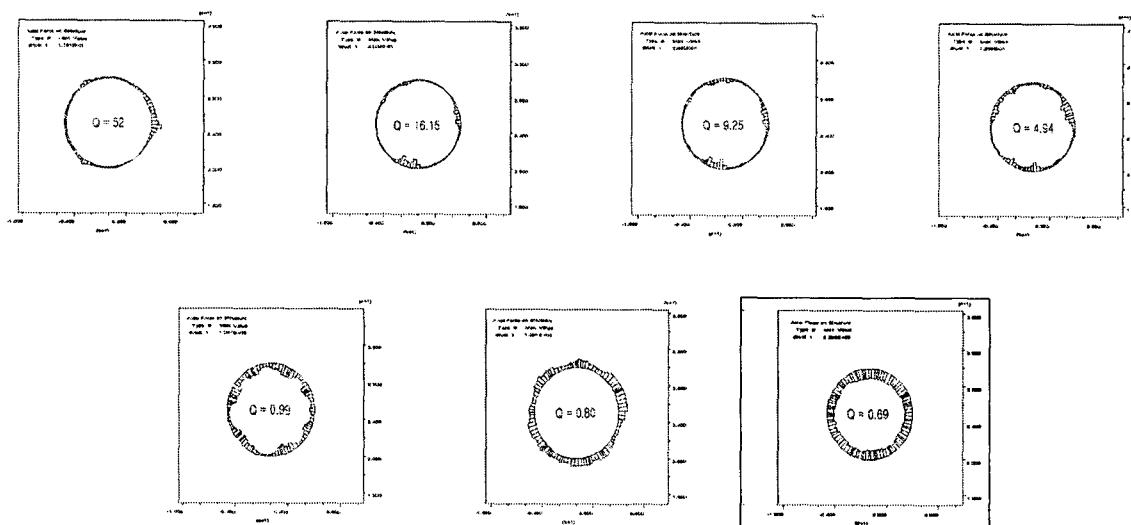


그림 4.  $Q$ 값의 변화에 따른 속크리트 축력 분포 상황

그림 5는  $Q$ 값의 감소에 따른 속크리트 요소의 변형량 분포를 제시한다. 축력의 분포상황과 마찬가지로 속크리트 요소의 변형량은 증가하며, 그 분포는 점차적으로 대칭성을 가지는 것을 관찰할 수 있었다.  $Q$ 값이 0.9 이하부터 속크리트 요소의 수직변형량은 대칭성을 가지지만 속크리트 상부와 하부의 변형량 분포를 모두 살펴볼 때 상, 하부 전반에 관하여 속크리트의 수직변형량이 대칭적인 분포를 이루는  $Q$ 의 경계값은  $0.69 \approx 0.7$ 이하인 것으로 판단된다.

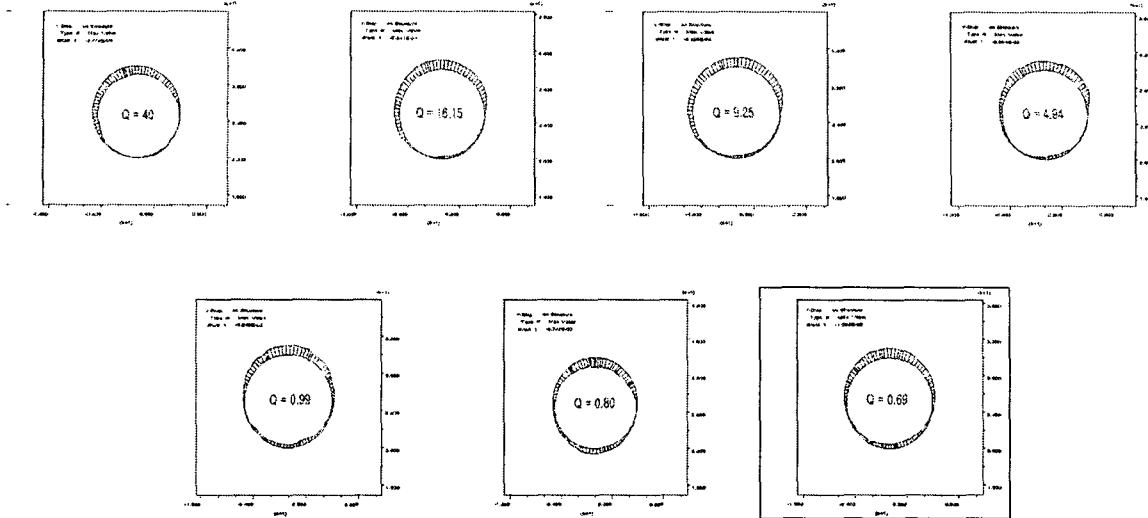


그림 5. Q값의 변화에 따른 콘크리트 수직 변형량 분포 상황

이와 같이 Q값의 감소에 따른 대칭점에서의 콘크리트 축력, 변형량 분포 상황의 관찰결과를 토대로 Q값이 0.7 이하의 낮은 암반등급을 가지는 불연속 암반을 연속체 모델로 가정하여 해석하는 것이 타당성을 가진다고 판단할 수 있다.

불연속체 해석 수행 과정에서  $Q = 0.5$  이하의 암반상태는 불연속체 해석 기법인 개별요소법으로는 대응이 불가능하여 연속체 해석 기법이 필요하다고 판단되었다.

결과적으로 불연속 암반의 연속체 모델 적용에 대한 Q 값의 경계 범위는 다음과 같이 제시할 수 있다.

표 5. 불연속 암반의 연속체 모델 적용에 대한 Q값의 경계범위

$Q < 0.5$	$0.5 < Q < 1.0$	$1.0 < Q < 100$	$100 < Q$
Pseudo-continuum approach	Pseudo-continuum and discontinuum approach	Discontinuum approach	Continuum approach

단, Q 분류의 개인적인 측정 오차 등을 고려하여 안전범위에서의 경계 값으로  $Q = 1.0$ 을 제시하였다.

#### 4. 연속체 해석

연속체 모델의 적용이 가능하다고 판단되는  $Q \approx 0.7$  이하의 범위에 대하여 실제 연속체 해석의 적용성을 검토하기 위하여 유한차분법을 이용한 연속체 해석 프로그램인 FLAC을 사용한다.

연속체 해석에서 사용되는 지반 및 터널에 대한 기하학적 형상은 불연속체 해석과 동일하다. 단, Q값을 선택하여 그림 6의 대략적인 관계로부터 지반변형계수를 산정하여 연속체 해석에 적용하였다.

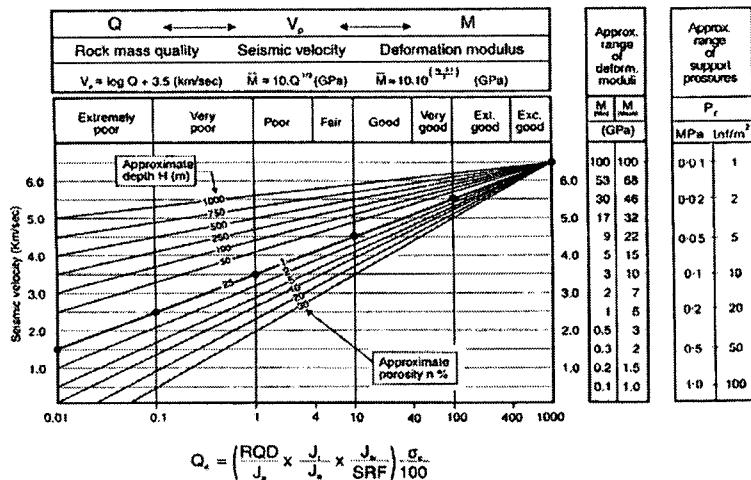


그림 6. 대략적인 Q값과  $V_p$ 와  $M$ 의 관계 (Barton, 1999)

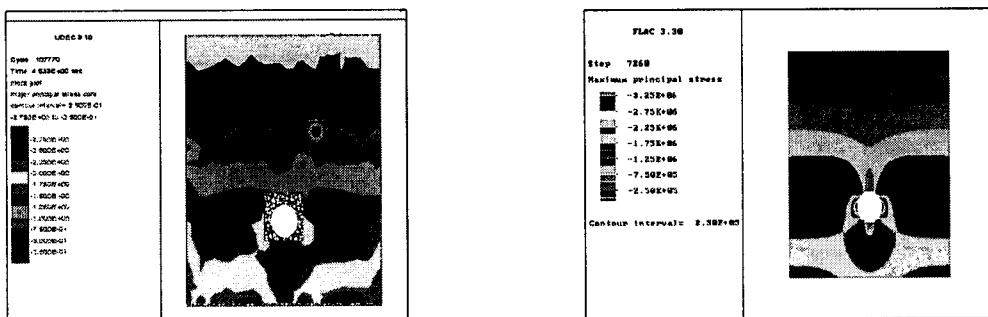
연속체 모델 적용이 타당한 것으로 판단되는 Q값의 범위와 이에 대응하는 암반의 변형계수는 다음과 같다.

표 6. 연속체 모델 적용 Q값의 범위와 암반변형계수

Q range for applying Continuous model	Selected Q-value	Approx. value of Deformable Modulus [GPa]	
		M <sub>mean</sub>	M <sub>min</sub>
Q ≤ 0.7	0.69	9	2.8
	0.60	7.5	2.5
	0.53	7	2.1

연속체 모델의 적용이 타당하다고 판단되는 Q값에 대한 변형계수를 적용한 연속체 해석결과와 불연속체 해석결과를 비교한다. 여기서, 암반조건이 가장 불리하다고 판단되는 Q = 0.53의 해석결과에 대하여 비교한다.

터널 주변의 응력분포는 다음과 같다. 여기서, 불연속체 모델 적용 해석결과의 경우 프로그램상의 표현 문제로써 원형 공동 주변에 대하여 구형으로 표현되는 문제가 있으나 터널 주변에 대한 응력분포 관찰에 대해서 큰 문제는 없다고 판단된다.



(Distinct Element Method, UDEC-BB)

(Finite Difference Method, FLAC)

그림 7. 터널 주변 암반의 주응력분포 상황

터널 주변의 응력분포 상황을 볼 때 연속체 모델의 경우는 응력 집중 상태 및 분포 상태가 규칙적이며 대칭적으로 나타나는 것에 비하여 불연속체 모델의 경우 터널 주변의 암반블록간 응력 분포 상황 및

블록의 거동 상태에 따라 응력분포 상태가 불규칙하게 나타나지만, 비교적 대칭적인 응력 분포 상황을 보이는 것을 볼 수 있다. 이는 암반 블록의 수가 많아짐에 따라 개별적인 암반 블록의 거동은 전체 지반으로 볼 때 연속체적 요소와 같이 거동하게 됨으로써 나타나는 결과이다.

또한, 불연속체 모델의 해석 결과와 다소 차이가 있지만, 암반변형계수의 최대값을 적용하는 것에 비하여 최소 암반변형계수를 적용한 연속체 모델로 해석하는 것이 보다 타당하다고 판단되며, 암반 내 터널 구조물을 안전측의 설계로 볼 때 최소 변형계수를 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

결과적으로, 불연속체 암반에 대한 연속체 모델의 적용에 있어서 암반변형계수의 정확한 판단과 더불어 불연속면을 포함하는 암반 전체를 대표할 수 있는 암반 강도정수의 정확한 판정이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

1. 동일 지역에 대한 3개 조사회사의 Q분류 결과자료에 대한 다변량 분석 중 하나인 다중회귀분석을 실시하여 Q값에 대한 간략 예측식을 제시하였다.

$$\log(Q) = 1.2812 \log(RQD) - 1.0894 \log(J_n) + 0.9380 \log(J_r) - 1.0099 \log(J_a) - 0.8492$$

(Adjusted R square = 0.98)

2. 선택된 최적 예측식을 이용한 불연속체 해석 실시하고 터널중심에 대하여 대칭인 각 계측점의 변위량 관찰, 쇠크리트에 작용하는 축력 및 수직변형량 분포 관찰결과, Q값이 0.7이하에서 연속체 모델의 적용이 타당하다고 판단되었다.

단, Q값에 의한 암반분류결과의 개인적 측정오차를 고려하여  $Q = 1.0$ 을 그 경계값으로 선택하였다.

3. 불연속체 모델 해석 수행과정에 있어서  $Q = 0.5$  이하의 암반상태에 대하여 개별요소법 대응이 불가능하여  $Q = 0.5$  이하의 암반에 대하여 연속체 모델의 적용이 필요한 것으로 판단되었다.

4. 연속체 모델 적용 모델과의 비교 분석 결과, Q값에 대응하는 암반변형계수의 적용에 있어서 평균 암반변형계수의 적용은 암반상태를 상대적으로 유리하게 판단하는 결과를 나타내며, 암반 내 구조물에 대한 안전 쪽의 설계에 있어서 최소 암반변형계수의 적용이 바람직하다고 판단되었다.

## 참고문헌

1. 박성현, 황선영(1994), “回歸分析”, 한국방송대학교출판부, pp. 89~282
2. 허명희, 이태주, 임성수(1994), “統計的 資料分析 · I -SAS-”, 한국방송대학교출판부, pp. 159~202
3. 윤지선(1996), “岩盤力學”, 구미서관, pp. 20~35, 266~306
4. 신희순, 선우 춘, 이두화(1999), “토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류”, 구미서관, pp. 238~262
5. S. D. PRIEST, J. A. HUDSON(1976), "Discontinuity Spacings in Rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. Vol. 13, pp. 135~148
6. RAJINDER BHASIN, KAARE HØEG(1998), "Parametric Study for a Large Carvern in Jointed Rock Using a Distinct Element Model (UDEC-BB)", Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. Vol. 35, pp. 17~29
7. B. SHEN, N. BARTON(1997), "The Disturbed Zone Around Tunnels in Jointed Rock Masses", Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. Vol. 34, pp. 117~125
8. Itasca Consulting Group, Inc.(1999), "FLAC, Version 3.4, manual." Minneapolis, Minnesota.
9. Itasca Consulting Group, Inc.(2000), "UDEC, Version 3.1, manual." Minneapolis, Minnesota.