

단층대 터널굴착시 안정성 확보에 관한 연구

A Study of Stability Analysis for Tunnelling in Fault Zone

홍창수¹⁾, Chang-Soo Hong, 황대진²⁾, Dae-Jin Hwang, 이강호³⁾, Kang-Ho Lee,
이용훈⁴⁾, Yong-Hun, Lee, 이창원⁵⁾, Chang-Won, Lee

¹⁾ 삼성물산(주) 건설부문 기술연구팀 선임, Senior Researcher, R&D Team, Samsung Corporation

²⁾ 삼성물산(주) 건설부문 기술연구팀 수석, Principal Researcher, R&D Team, Samsung Corporation

³⁾ 삼성물산(주) 건설부문 TA팀 전문위원, Technical Advisor, TA Team, Samsung Corporation

⁴⁾ 삼성물산(주) 건설부문 양산-동면간 도로 현장소장, Senior Manager, Samsung Corporation

⁵⁾ 서영기술단 과장, Manager, Seo Yeong engineering co.,ltd

SYNOPSIS : This paper deals with the numerical study for excavation crossing the fault zone and the change of support pattern in field. The numerical analyses by FLAC program were performed to evaluate the suitable support pattern influenced by the width of Fault Zone, considering rock mass condition(RMR classification). Based on the results, it is found that partial reinforcement or degrading support pattern is suitable, when the width of Fault is under 3m. But when the width of Fault is more than 6m(0.5D), extra support pattern for fault zone is acceptable.

At field, this result is generally used as a guide in the construction of roadway tunnel, but it is also possible to vary this assessment along the condition of fault.

Key words : rock mas condition, width of fault zone, support pattern, Numerical analysis

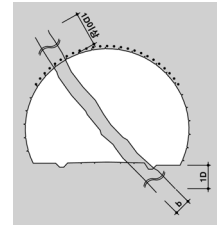
1. 서 론

터널설계시 다양한 지반조사를 통하여 단층과쇄대나 연약대 등 지질이상대를 사전예측하며, 암반분류를 통해 지보패턴을 선정하게 된다. 하지만 터널은 선형구조물로 조사범위가 넓으며, 원지반 깊은 위치에 설치되는 경우가 많기 때문에 많은 비용이 필요하게 되며, 더구나 암석과 암반은 서로 다르기 때문에 단편적 정보만을 얻게되는 경우가 많다. 따라서 터널시공시 막장관찰을 통하여 지반상태를 확인하고 때에 따라 지보패턴을 변경하거나 보조공법을 사용하기도 한다. 특히 단층(Fault)은 터널과 조우시 단층이 터널축과 만나는 각도, 단층의 두께나 상태에 따라 터널의 거동에 중요한 영향을 미치며 그 대처방안이 달라지게 된다.

Q-system에서는 연약대가 협제되어 있는 지반의 보강량 산정을 위하여 연약대의 Q_z 값과 주변지반의 Q_r 값이 고려되는데 Loset(1990)은 이를 고려한 터널설계를 위해 식 (1)과 같이 연약대와 주변암반의 평균 Q값을 구하는 식을 제시하였다.

$$\text{Log}Q_m = \frac{b \times \text{Log}Q_{so} + \text{Log}Q_{sb}}{b+1} \quad (1)$$

- Qm : 연약대/주변암반의 평균 Q값
- Qso : 연약대 Q값
- Qsb : 주변암반의 Q값
- b : 터널 축을 따라 측정된 연약대 너비(m)



본 연구에서는 중규모 단층대와 조우시 암반등급별로 단층의 규모가 미치는 영향을 분석하기 위해 단층대 폭을 각각 1m, 3m, 6m(0.5D)로 변화시켜 가면서 암반등급별, 파쇄대 조건을 변경하여 식(1) 및 수치해석을 통해 각 경우 적정 지보패턴을 제시하였으며, 이러한 결과들을 바탕으로 실제 도로터널시공시 현장에 적용하였으며, 단층의 암질에 따라 차등적용을 하였다.

2. 대상지역의 지반상태 및 단층대 통과방안

이 지역은 양산단층과 동래단층 사이에 백악기 경상누층군의 최상부 유천층군의 화산암류와 이를 관입한 백악기 불국사 화강암류가 분포하고 있다. 유천층군의 화산암류는 안산암질암과 이에 협재된 안산암질 응회암이 분포하며, 불국사 화강암류는 세립질 화강암, 반상화강암 및 흑운모 화강암으로 구분된다. 지형은 양산단층의 방향인 NNE로 발달하였으며, 선구조 분석결과 이와 동일한 방향으로 선구조가 발달되어 과업노선과 직교 혹은 사교하고 있다. 터널노선의 시점부는 세립질 화강암, 종점부는 반상화강암으로 구분하고 있다.

양산, 범기단층은 단일 불연속면 단층이 아니라, 서로 거의 평행한 무수한 소단층과 단층점토로 이루어진 복잡한 단층대이며, NS~N60E의 우세 주향방향을 갖고 있으며, 시공결과 대규모 단층대는 터널과 조우하지 않았다.

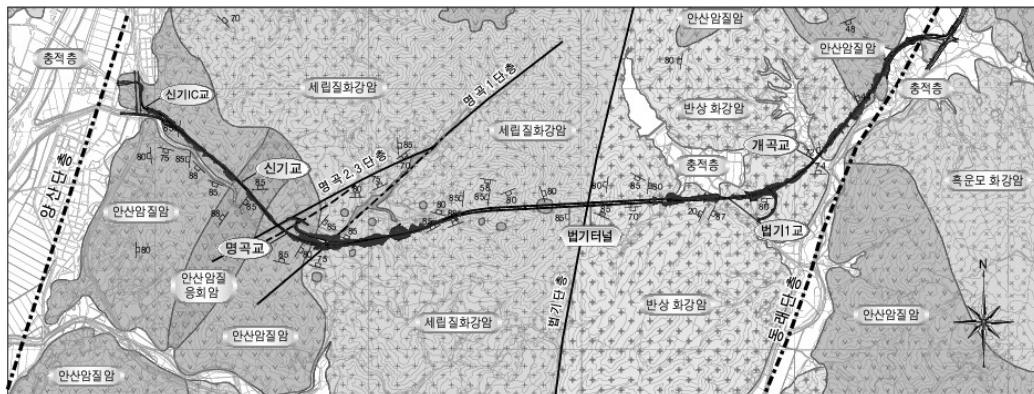


그림 1. 대상구간의 지질도

범기단층은 관입암(Dyke)을 수반한 단층대로 이로인해 주변부 변질대를 형성하고 있고 관입암과 파쇄대가 교호하여 분포하며, 단층점토와 단층각력을 함유한 전형적인 단층파쇄대이다. 지반조사시 코아회수율(TCR) 40%, 암질지수(RQD)는 0%로 심하게 파쇄되었으나, 실제시공시 현장에서는 위치별로 다르게 나타났다. 단층대 투수계수는 $k = 1.98 \times 10^{-5}$ cm/sec로 주변지반보다 높게 나타났다.

본 현장은 편도 2차선 도로 병렬터널로써 연장은 2.1km 이고, 터널폭은 12.7m, 터널높이는 약 8.8m 이다. 원설계시 표 1과 같이 단층대 규모별로 대책을 수립하였으나, 실제시공시 대규모 단층대는 없었으며, 중규모~소규모 단층대와 수시로 조우하였다. 이에 주변암반의 등급 고려없이 일괄적인 F-1 패턴적용은 무리가 있다고 판단하여 수치해석을 통한 매개변수 연구를 실시하여 및 공학적 판단을 통해 적정한 등급으로의 하향조정 및 보조공법 등을 사용하여 상황에 맞게 변경하였다.

표 1. 단층대 규모별 보강공법

구 분	대규모단층	중규모단층	소규모단층
단층폭, 연장	10m 이상, 10km 이상	1~10m, 10km 미만	1.0m 미만, 1km 미만
보강공법			
보강계획	·단층대 패턴(F-2) 사용	·단층대 패턴(F-1) 사용	·일반패턴적용 ·휘폴링 또는 록볼트 보강

3. 단층대 규모별 지보패턴 검토 및 수치해석 검증

3.1 Q-분류를 이용한 단층대 규모별 지보패턴 검토

연약대는 대부분 굽으면 부스러지는 상태이며, 질리간격을 산정할 수 없기 때문에 암반등급을 분류하기가 어렵다. 그러므로 연약대의 상태에 따라 파쇄대의 Q값을 좋은 경우 0.1, 나쁜 경우를 0.01로 가정하여 파쇄대 폭을 1m, 3m, 6m로 변화시켜 가면서 식(1)에 의거해 터널의 전체Q값을 계산하여 표 2에 나타내었다. RMR과 Q분류와의 관계는 원설계식을 참고로 결정하였으며, 괄호안의 값은 RMR로 환산하였을때의 암반등급을 나타낸다.

표 2. 연약대 규모에 따른 지반의 평균 Q값 산정결과

RMR등급	1등급(81~100)		2등급(61~80)		3등급(41~60)		4등급(21~40)		5등급(20이하)	
암반의 Q 값	40 이상		40~4		4~1		1~0.1		0.1 이하	
파쇄대 Q 값	0.01	0.1	0.01	0.1	0.01	0.1	0.01	0.1	0.01	0.1
파쇄대 폭 1m (재산정등급)	0.775 (4)	2.449 (3)	0.447 (4)	1.414 (3)	0.141 (4)	0.447 (4)	0.071 (5)	0.224 (4)	0.022 (5)	0.071 (5)
파쇄대 폭 3m (재산정등급)	0.088 (5)	0.495 (4)	0.067 (5)	0.376 (4)	0.038 (5)	0.211 (4)	0.027 (5)	0.150 (4)	0.015 (5)	0.084 (5)
파쇄대 폭 6m (재산정등급)	0.035 (5)	0.249 (4)	0.030 (5)	0.213 (4)	0.021 (5)	0.153 (4)	0.017 (5)	0.126 (4)	0.013 (5)	0.091 (5)

Loset식에 의하면 1등급에서 파쇄대가 1m 이내인 경우는 약 2등급 하향조정으로 나타났으며, 그 이상에서는 별도의 파쇄대패턴을 적용해야 되는 것으로 나타났다. 파쇄대에 의한 영향은 암반등급이 높을수록 높게 나타났으며, RMR 5등급에서는 그 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

파쇄대 상태에 따라서는 각 등급별로 동일하게 약 1등급정도의 차이가 발생하였다. 즉, 2등급 파쇄대 폭 3m인 경우 파쇄대 암질이 좋은 경우는 4등급으로, 나쁜 경우는 5등급으로 지보등급이 산정되었다.

3.2 터널 안정성 해석에 의한 매개변수 연구

3.2.1 해석 모델 및 입력자료

기존 연구결과에 의하면 그림 2와 같이 0.5D내는 집중보강범위내로, 1.0D내는 선택적 보강영역으로 알려져 있으므로 본 연구에서는 터널 횡단상 이격거리 0.5D내에 단층대가 존재할 경우 그 영향범위 및 보강대책을 검토하였다. 단층대의 경사각은 45°로 가정하였으며, 각 암반등급별로 단층대 규모를(1m, 3m, 6m) 변화시켜 가면서 범용 2차원 프로그램인 FLAC ver. 3.3을 이용하여 수치해석을 실시하였다. 해석에 사용된 지보패턴은 표 3과 같다.

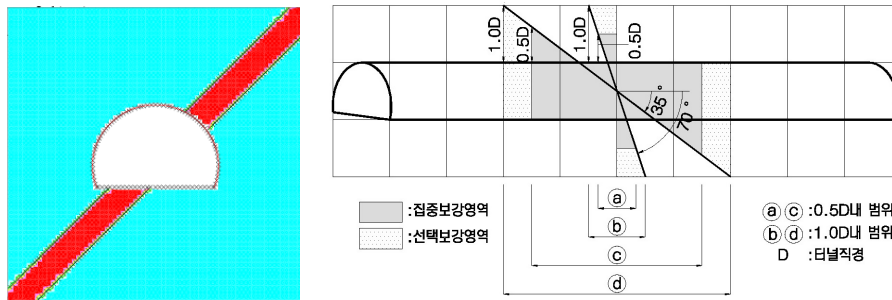


그림 2. 파쇄대를 고려한 지보패턴 적용

표 3. 본선 표준지보패턴

구분	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	Type-5	Type-F-2	
개요도							
RMR등급	81 이상	80~61	60~41	40~21	20 이하	단층대(예비)	
굴진장	3.5m	3.0m	2.0m/2.0m	1.5m/3.0m	1.2m/1.2m	1.2m/1.2m	
S/C 두께	50mm(일반)	50mm	80mm	120mm	160mm	160mm	
록볼트	종	랜덤	3.0	2.0	1.5	1.2	1.2
	횡	랜덤	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5
보조공법	-	-	-	필요시 휘폴링	필요시 휘폴링	FRP보강그라우팅	

기반암의 설계정수는 표 4와 같이 실내실험, 현장시험 등을 토대로 산정한 원설계정수를 사용하였으며, 단층대 물성치 역시 직접전단시험 등을 실시한 원설계정수를 사용하였다.

표 4. 설계지반 정수

구분	단위중량 γ (t/m ³)	변형계수 E (t/m ²)	내부마찰각 ϕ (°)	점착력 c (t/m ²)	포아송비 ν
1 등급	2.7	2.4×10^6	50	700	0.2
2 등급	2.6	1.0×10^6	47	300	0.22
3 등급	2.5	4.5×10^5	43	50	0.25
4 등급	2.3	1.0×10^5	35	30	0.30
5 등급	2.0	5.0×10^4	30	5	0.33

3.2.2 수치해석 결과

본 해석에서는 단층대 규모별(폭 1m, 3m, 6m) 수치해석을 수행한 결과를 토대로 슛크리트 응력이 허용응력을 초과하거나 변형율이 1% 이상인 경우는 지보패턴을 변경하여 재해석을 수행하였다.

스�크리트는 NATM터널의 주요지보재로써 축력과 모멘트가 동시에 작용할 경우의 최대휨응력을 파악하여 허용응력인 84kgf/cm^2 이내에 드는지 확인하여야 한다.

표 5는 파쇄대 규모별 발생한 최대 슛크리트 응력으로써 파쇄대폭 1m인 경우는 등급에 상관없이 허용범위 이내에 들어왔으나, 파쇄대폭 3m인 경우는 1~3등급은 허용응력을 초과하였으며, 4등급은 허용응력에 근접하였다. 파쇄대폭 6m인 경우는 모든 암반등급에서 허용응력을 초과하는 것으로 나타났다.

그러므로, 파쇄대폭이 3m(0.2D)인 경우 1등급 및 2등급은 2패턴 하향조정하여 3등급 및 4등급을 적용하였으며, 3등급인 경우 1패턴 하향조정하여 4등급을 적용하였다. 또한 파쇄대폭이 6m(0.5D)인 경우는 모든 등급에서 F-1패턴으로 하향조정하였으며 재해석결과 허용응력 범위내로 들어왔다.

부재위치별 슛크리트 응력은 파쇄대폭 1m인 경우 그림 3과 같고, 파쇄대폭 3m인 경우는 그림 4에, 파쇄대폭 6m 인 경우는 그림 5에 나타내었다.

표 5. 파쇄대 규모별 최대 슛크리트 응력

(단위 : kgf/cm^2)

구 분	1등급		2등급		3등급		4등급		비 고
	변경 전	변경 후	변경 전	변경 후	변경 전	변경 후	변경 전	변경 후	
파쇄대폭 1m	57(OK)	-	67(OK)	-	74(OK)	-	76(OK)	-	허용응력 84kgf/cm^2
파쇄대폭 3m	85(NG)	63(OK)	97(NG)	61(OK)	87(NG)	76(OK)	83(OK)	-	
파쇄대폭 6m	110(NG)	43(OK)	115(NG)	45(OK)	112(NG)	56(OK)	130(NG)	73(OK)	

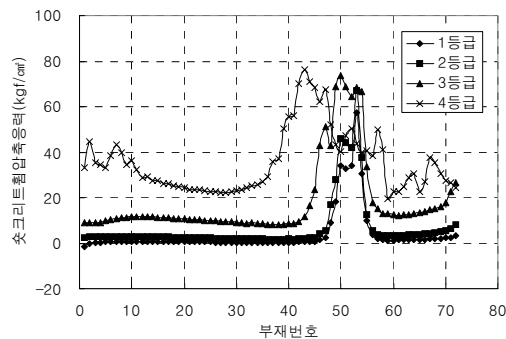
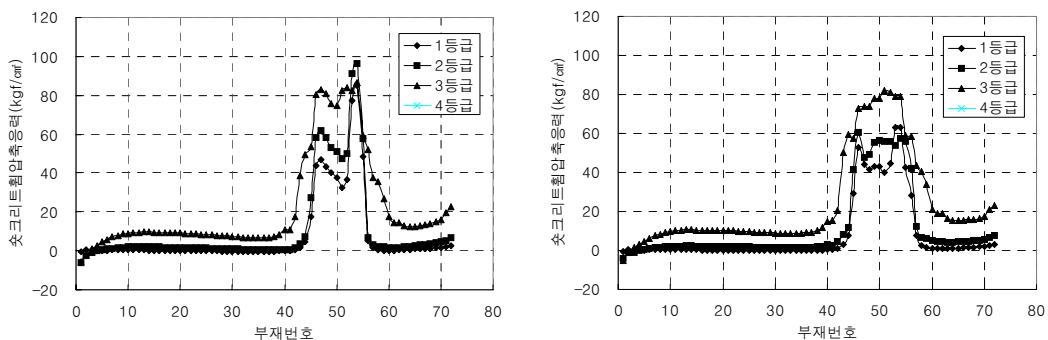


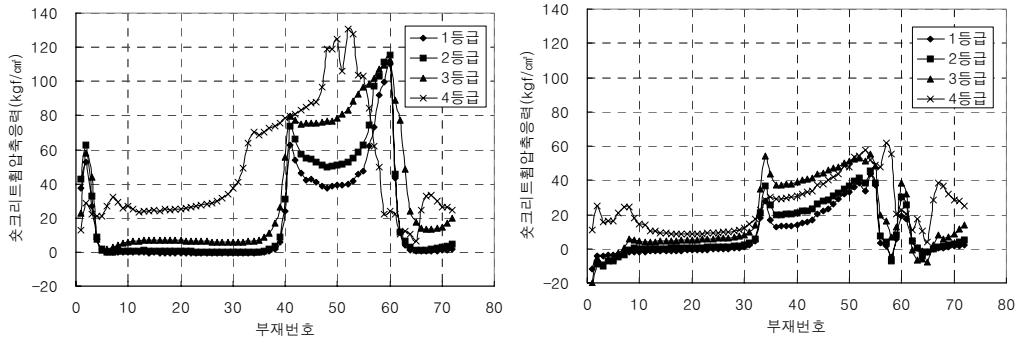
그림 3. 파쇄대폭 1m인 경우 부재위치별 슛크리트 응력



(a) 보강전

(b) 보강후

그림 4. 파쇄대폭 3m인 경우 부재위치별 슛크리트 응력



(a) 보강전 (b) 보강후

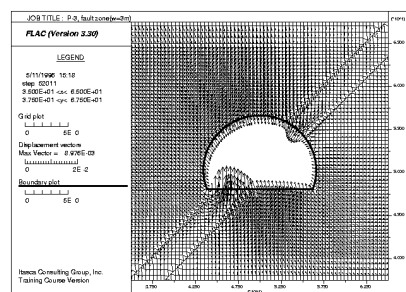
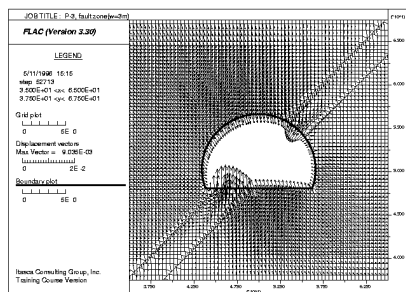
그림 5. 파쇄대폭 6m인 경우 부재위치별 슛크리트 응력

변위의 경우 국내에서는 관리기준이 제시되지 않고 있기 때문에 일본의 관리기준을 참조하여 10cm로 하였고, 발생한 내공변위는 표 6과 같으며, 암반 3등급의 경우 변위도 그림 6과 같으며, 전단변형율도는 그림 7과 같다.

표 6. 파쇄대 규모별 터널의 최대 내공변위

(단위 : cm)

구 분	1등급		2등급		3등급		4등급		비 고
	변경 전	변경 후	변경 전	변경 후	변경 전	변경 후	변경 전	변경 후	
파쇄대폭 1m	0.615	-	1.449	-	3.225	-	5.218	-	허용변위 10cm
파쇄대폭 3m	0.681	0.673	1.631	1.583	3.499	3.431	5.546	-	
파쇄대폭 6m	0.766	0.622	1.769	1.438	3.659	3.125	5.797	4.863	



(a) 변경전(3패턴) (b) 변경후(3패턴)

그림 6. 암반 3등급 파쇄대 3m의 경우 변위도

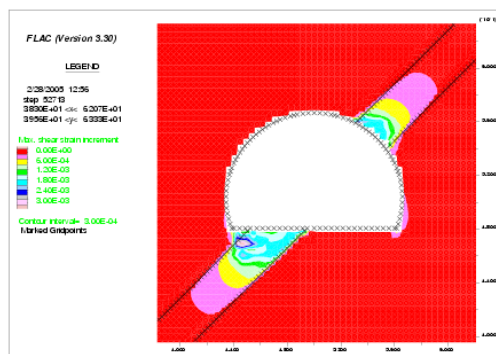


그림 7. 암반 3등급 파쇄대 3m의 경우 전단변형율도

4. 단층대 터널 시공시 지보적용 사례

4.1 파쇄대폭 2~3m, 단층대 암질이 좋은 경우

터널 굴진중 무지보 전단면굴착(Type-1)에서 그림 8(a)와 같이 막장 중앙부에 예상치 못한 단층 파쇄대가 폭 3m 규모로 수직분포하여 막장관찰을 실시하였다. 이 경우 파쇄대의 천공자국을 통해 파쇄대 암질이 강할 것으로 예상되어 패턴변경없이 슛크리트 조기타설 만으로 굴진하였다. 파쇄대는 2막장 굴진후 그림 8(b)와 같이 2개로 갈라졌으며 facemapping결과는 그림 9과 같다. 갈라진 파쇄대는 1~2회 굴진후 막장면에서 소멸되었다.



(a) 3m폭 파쇄대 출현 (b) 2막장 굴진후 2개로 갈라진 파쇄대

그림 8. 막장 현황

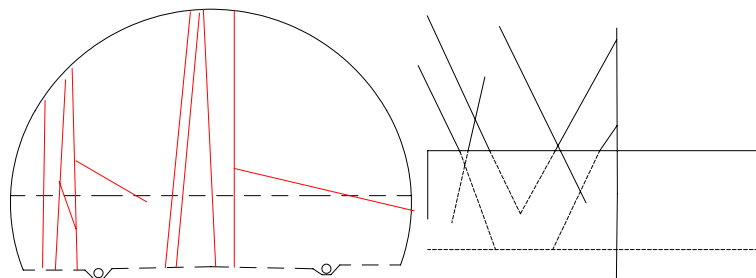


그림 9. 막장관찰 결과(단층대 암질이 좋은 경우)

4.2 파쇄대폭 3m, 단층대 암질이 나쁜 경우

터널 굴진중 무지보 전단면굴착(Type-2)에서 그림 10과 같이 막장 중앙부에 예상치 못한 단층 파쇄대가 폭 3.0m 규모로 출현하여 그대로 2패턴 적용시 막장 붕락이 예상되었다.

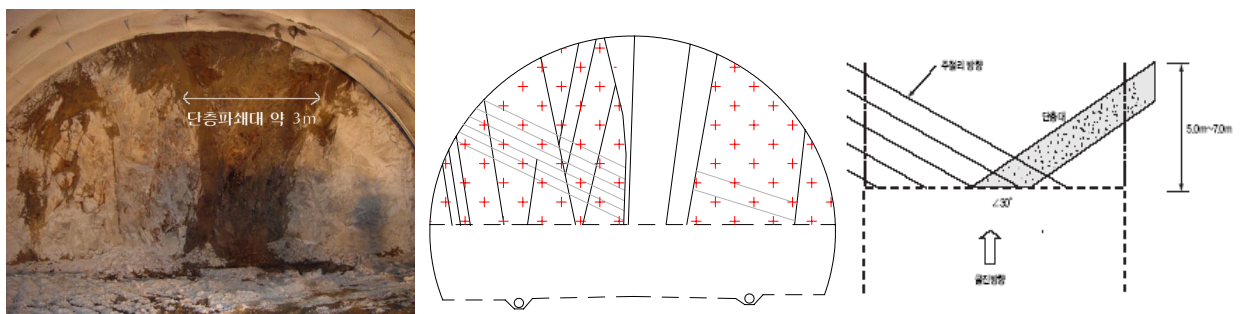


그림 10. 막장 매핑자료(단층대 암질이 나쁜 경우)

이 경우 파쇄대 자체도 상태가 좋지 않아 Type-4 패턴으로 변경하여 반단면 굴착을 실시하였다. 다행히 단층대가 진행방향에 우로 30°로 진행되어 7.0m 굴진후 사라져서 암판정을 재설시 한후 원래패턴으로 복귀하였다.

5. 결론

본 검토구간은 양산단층과 거의 평행한 무수한 소단층으로 이루어진 구간을 통과하는 편도2차선 병렬 도로터널로써 중규모(폭 1~10m, 연장 10km 미만) 단층대 통과에 대한 안정성 연구를 위하여 암반등급 별로 단층대 폭을 변화시켜가면서 Loset식 검토 및 수치해석을 실시하여 적절한 지보패턴을 선정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

Losset 식 검토 및 수치해석결과 파쇄대에 의한 영향은 암질이 좋을수록 높게 나타났으며, 파쇄대의 상태에 따라 파쇄가 심할수록 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

수치해석결과 파쇄대폭이 1m일 경우는 모든 암반등급에서 허용응력 이내로 나와 패턴변경이 없거나 필요시 부분보강을 실시하면 될 것으로 판단된다.

파쇄대폭 3m(0.2D~0.5D)인 경우는 1~3등급은 허용응력을 초과하였으므로 1,2등급은 2패턴 하향조정하여 3,4패턴 적용하였고, 3등급은 1패턴 하향조정하여 4패턴을 적용한 결과 허용응력 이내로 나타났다. 4등급인 경우는 그대로 4패턴을 적용하였으나 허용응력에 근접하였으므로 그라우팅 등의 보강이 필요한 것으로 판단되며, 이때의 보강범위는 그림 7 전단변형율도를 참고로 파쇄대폭 좌우로 2m 정도를 실시하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

파쇄대폭 6m(0.5D)이상인 경우는 모든 암반등급이 허용응력을 초과하여 F-1패턴 및 FRP보강 그라우팅 적용이 필요한 것으로 나타났다.

이를 근거로 실제시공시 파쇄폭 3m출현시 파쇄대 암질이 나쁜 경우 Type-2(전단면 굴착)에서 Type-4(반단면굴착)으로 2등급 하향조정하였으나, 파쇄대폭 2~3m 출현시 파쇄대 암질이 좋은 경우는 패턴변경없이 슛크리트 조기타설 만으로 그대로 굴착을 실시하였다.

설계시 단층대 암질을 판단하기는 어려우며, 제공하는 단층대패턴은 암반 및 파쇄대 암질과는 무관하게 폭만을 근거로 산정하는 경우가 많으므로, 실제 시공시는 이와같이 파쇄대 상태에 따라 달리 적용할 필요가 있다고 판단된다.

또한 지하수가 많은 경우는 상태가 더 나쁘므로 먼저 차수그라우팅을 실시한후 상황에 맞게 적용할 필요가 있다.

참고문헌

1. 이기화(1985), "양산단층의 활성문제에 대하여", **지질학회지**
2. 이정인, 조태진, 이연구 편저(1997), **암석역학을 이용한 터널설계**, 구미서관, pp. 121-204
3. 신희순, 신중호, 박찬, 한공창, 최영학, 최용기(2000), "연약파쇄 지반내 터널의 굴착·보강 설계 및 안정성 분석", **한국지반공학회 봄학술발표회**
4. 토목공법연구회, **연암의 평가**, 창우출판, pp.139~247
5. Barton, N., Lien, R., and Lunde, J.(1974), "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support", *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, Vienna, Austria
6. Hoek, E. and Brown, E.T.(1997), "Practical estimates of rock mass strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 34, No.8, pp.1165-1186