

터널 간섭에 따른 지반의 공간 구역화 및 지반공학적 특성 분석

Spatial Ground Zoning and Analysis of Geotechnical Characteristics Considering Tunnel Interface

전 제 성* 김 용 성** 김 기 영**
Jeon, Je-Sung Kim, Yong-Seong Kim, Ki-Young

Abstract

In this research, case studies considering tunnel interface were conducted for zoning the ground into spatial area having similar geotechnical characteristics and estimating geotechnical properties for each area. The site for analysis consists of banded biotite gneiss, biotite schist and granite gneiss with spatial non-homogeneity, and for that reason weathering and fault zone were distributed with large scale. It's important thing to consider spatial ground zone and their geotechnical properties properly into stability analysis at design and construction stage. Also, in this studies, these analysis works are very useful for further decision making process by stability analysis.

요 지

본 연구에서는 OO지역에서의 터널 간섭사례에 따른 적정 지반 구역화 및 각 구역별 특성치 분석을 수행하였다. 본 대상 지역은 호상흑운모 편마암 및 흑운모 편암, 화강 편마암이 심도와 평면상에서 불규칙하게 분포하고 있는데, 전반적으로 풍화대가 깊게 분포하고 있으며, 단층대 및 파쇄대가 깊은 심도에서도 대규모로 분포하고 있었다. 본 사례에서와 같이 특정 간섭부분의 공간적 지층특성 구분이 향후 안정성 분석 및 설계반영에 매우 중요하게 작용하는 경우, 기존 터널설계시의 지층구분 및 대표 특성치 산정 방식은 적정 지층특성 분석에 많은 한계점을 지니고 있었다. 본 연구결과, 각종 지반조사 결과의 종합 및 분석을 통해 공간적 지층구분 및 적정 특성치 산정이 향후 안정성 검토 등에 있어 매우 유효하게 적용됨을 알 수 있었다.

Keywords : Site Investigation, Tunnel Interface, Spatial Zoning, Geotechnical Property

핵심 용어 : 지반조사, 터널간섭, 공간구분, 지반공학적 물성치

* 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원, 책임연구원

** 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원, 선임연구원

E-mail: jsjeon@kowaco.or.kr, 017-234-6697

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2006년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

서울 OO지역 일대에 위치하는 수도권광역상수도 수로터널은 인근 5개 도시에 용수를 공급하는 국가 중요시설물로서, 시설물 안전관리에 관한 특별법상 1종 시설물로 분류되어 있다.

본 수로터널은 1989년에 준공된 터널로서, 터널통과유량 1,543(천톤/일)의 압력터널이며 평상시 내압은 2.5~3.5kg/cm², 수격압 작용시 최대 6.0kg/cm² 규모이다. 시공은 NATM 방식이며, 단면은 D=3.2m의 마제형 터널이다.

한편, 서울지역의 원활한 교통소통 및 기존 도로와의 연계를 도모하기 위한 신규도로 건설 계획 중, 신규 도로터널이 기존 수로터널의 하단부 교차 통과 및 출구부에 근접 굴착토목 계획되어 있었다.

본 연구에서는 이러한 간섭지역을 터널 간섭부와 사면 간섭부로 구분하였는데, 터널 간섭부는 신설 도로터널과 기존 수로터널의 교차통과지역 나타내며, 이에 대한 간섭현황은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

일반적인 터널 설계과정에서는, 초기 지반조사 과정에서의 광역 지질조사 및 한정된 시추조사, 물리탐사, 노두조사 등을 통해 전체 터널노선을 임의 구간으로 구분한 후, 각 구간별 지반등급을 부여하고 이에 대한 각 지반등급별 대표 물성치를 산정하여 세부 터널 설계 및 안정성 검토를 수행하고 있다.

그러나 본 연구사례와 같이 특정 간섭지역에 대한 안정성 검토를 수행하는데 있어, 기존의 대표 지반등급 및 이에 대한 대표 물성치를 적용하는 것은 실제

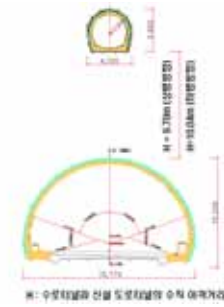


Fig. 2. 수직 이격거리 현황

지반조건하에서 발생할 수 있는 많은 불안정성을 고려할 수 없다는 단점을 내포하고 있다.

특히, 본 연구대상 지역은 지반의 불균질성이 매우 심하고, 간섭대상 터널의 심도가 100m에 달하는 점을 고려할 때, 심도별 공간적인 구역화 및 각 구역에 대한 적정 물성치 산정이 매우 중요하다.

이를 위하여, 본 연구에서는 대심도 시추조사 및 물리탐사, 다양한 현장시험 및 실내시험등을 수행하였으며, 이들의 종합적인 분석을 통해 최종적인 대심도 공간 구역화 및 물성치 산정을 수행하였다.

2. 조사계획

신설 도로터널 구간중 수로터널과 간섭되는 구간에 대하여 시추조사, 현장시험 및 물리탐사등에 대한 각 조사지점을 계획한 후, 현장답사를 통해 지형조건과 제반 요건에 따른 적정 조사위치를 선정하였는데, 전체적인 내용과 위치는 Table 1 및 Fig. 3과 같다.

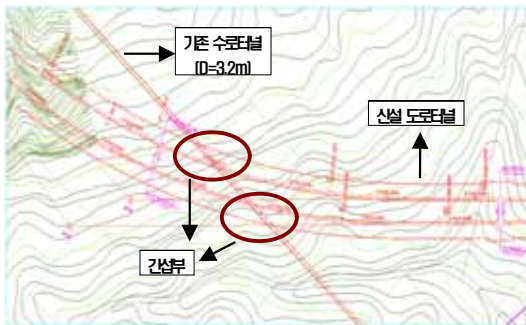


Fig. 1. 터널 간섭에 대한 종평면도

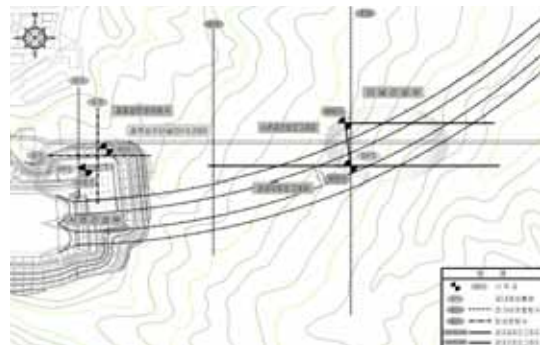


Fig. 3. 지반조사 현황 평면도

Table 1 지반조사 내용

	구 분	구 간	수 량
현장 조사	지표지질조사	사면간섭부	1식
	시추조사	모든간섭부	4공
현장 탐사	탄성파탐사	사면간섭부	1.5km
	전기비저항탐사	모든간섭부	1.6km
현장 시험	표준관입시험	시추조사	20회
	공내영상촬영(BIPS)	모든간섭부	2공
	공내제하시험(PMT)	터널간섭부	5회
	공내전단시험(BST)	사면간섭부	2회
	탄성파토모그래피 (공대공, 공대지)	터널간섭부	2단면
측량	기준점 및 수준점	전체	1식
실내시험	암 석 시험	전체	1식

3. 지반조사 및 물리탐사

3.1 지형 및 지질

본 연구 대상지역의 지질은 주로 선캠브리아기의 호상흑운모 편마암, 흑운모 편암, 화강암질 편마암과 이를 관입한 쥬라기의 화성암류로 대별할 수 있으며, 이들은 하천변에서 제4기 충적퇴적층에 의해 부정합으로 피복되어 있다. 모든 지질 상황을 공학적 안정성 측면에서 요약하면, 본 대상지역은 기반암인 편마암을 화강암이 쥬라기에 관입한 형태로 볼 수 있는데, 본 지역의 편마암이 선캠브리아기 시대부터 여러 번의 광역 변성작용의 영향을 받아 형성된 점과 수로터널 시점쪽에 대규모로 관입한 화강암이 분포하고 있는 점 등으로 보아, 본 지역은 단층 등의 구조작용으로 인해 부분적인 파쇄대가 발달 할 것으로 예상되었으며, 이는 금번 시행된 시추조사 및 물리탐사 결과에서도 확인되었다.

3.2 시추조사

기존 수로터널 하부의 지층상태(파쇄대, 단층대 등)를 파악하여 신규 도로터널의 시공 및 운영이 기존 수로터널의 안정성에 미치게 될 영향검토를 위하여 2개소에 대한 시추조사(WTB-1, WTB-2)를 실시하였는데, 각 시추공별 파쇄대와 단층대 상태는 Fig. 4와 같다.

시추조사 결과, 기반암은 녹색계통의 색을 띄고 있으며 흑운모호상편마암으로 구성되어 있었다. 연암층의 TCR은 WTB-1 조사공에서 45~100%, WTB-2 조사공은 90~100%, RQD는 WTB-1 조사공은 0~85%, WTB-2 조사공은 9~80%를 보이며, 경암층의 TCR은 WTB-1, 2 조사공 모두 100%, RQD는 WTB-1 조사공은 0~98%, WTB-2 조사공은 6~97%를 보였다. 결과에서 알 수 있듯이, 심도에 관계없이 부분적으로는 파쇄가 심하여 코어 회수가 불가능한 구역이 존재하고 있었다.



(a) WTB-1



(b) WTB-2

Fig. 4. 터널 간섭부 시추조사 결과

즉, 연암층은 대체적으로 풍화가 심하고 절리가 발달되어 있는 양상을 보이고 있었는데, 특히 WTB-1 조사공은 부분적으로 박층의 점토가 협재되어 있었으며, 지표하 39.3~41.8m 구간에서는 단층파쇄대가 분포하고 있었고, 절리면에는 흑연이 5cm 내외로 충전되어 있었다.

WTB-1 조사공의 경암은 절리면에 방해석과 점토가 박층으로 충전되어 있었는데, 지표하 78.9m~79.2m 구간과 82.2m~82.4m구간에서는 파쇄가 심하고 절리면에 흑연과 점토가 충전되어 있는 양상을 보이고 있었다.

WTB-2 조사공의 경암은 수로터널 상부인 70.5m~79.4m구간에서 파쇄가 발달된 단층대가 분포하고 있었으며, 단층점토가 충전되어 있었다.

특히, 신규 도로터널 통과 예정구간은 전반적으로 RQD가 8~65%내외로 매우 불량~양호 상태를 보이고 있었으며, 파쇄대가 발달하고 절리면에 점토와 흑연이 충전되어 있었다.

한편, WTB-2 시추공 굴진 중 지표하 68.0m~70.0m구간에서 작업수가 전량 누수되어 Grouting 후 재 굴진작업을 진행하였는데, 이는 본 구간의 파쇄정도가 매우 심각하다는 근거이기도 하다.

3.3 공내영상촬영

시추조사만으로는 절리면과 단층의 방향성 및 정확한 균열 크기를 알 수 없고, 지층구조나 구성지질의 실제적인 존재상태를 파악하기가 어렵다. 본 연구에서는 수로터널과 신규 도로터널 간섭부 불연속면의 주향, 경사, 크기, 충전물 등의 불연속면 특성 규명을 위하여 WTB-2 시추공에서 시추공 영상촬영을 실시하였다.

호상흑운모편마암이 주를 이루고 있는 WTB-2공은 지표하 126.0m까지 굴진되었고, 시추작업 종료 후 지표하 1.0m하부에서부터 촬영을 시작하여 지표하 125.0m 까지 촬영을 실시하였다.

Crack들이 밀집되어 있어 일정한 방향성을 측정할 수 없었던 파쇄구간의 주방향성은 319/45으로 나타났으며, 지표하 78.7m에서 약 743mm 폭으로 발달되

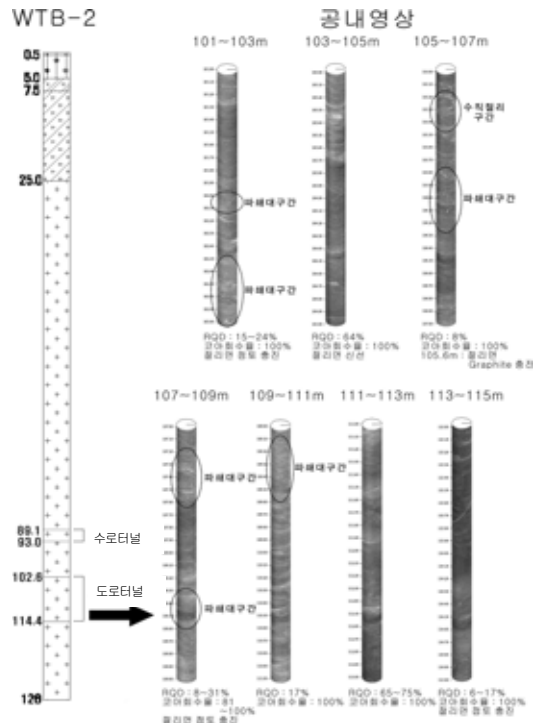


Fig. 5 공내영상촬영 결과

어 있었다.

WTB-2호공에서의 불연속면 발달 양상을 살펴보면, 심도에 따라서 3개의 군으로 구분할 수 있었는데, 지표하 15.0~20.0m의 상부구간, 지표하 60.0~70.0m의 중부구간, 그리고 지표하 105.0~110.0m의 하부구간으로 구분되었다. 전체적인 양상은 상부구간에서 중부구간으로 갈수록 증가하다 중부구간 이후 신선한 암반에 의해 점차 감소하는 경향을 보였다. 파쇄대 및 개구성 균열등의 투수성 균열은 지표하 60.0m~70.0m 구간에 집중하는 경향을 보였다.

3.4 물리탐사

시추조사에 이어, 공간적 지층분포 형태 및 특성 파악을 목적으로 전기비저항 탐사 및 공대공과 공대지 탄성파도모그래피탐사 등을 실시하였다.

전기비저항 탐사는 수로터널 주변의 지질이상대 파악 및 수로터널 진행방향을 유추하기 위하여 3개 축선

을 수로터널 횡단방향으로 설정하였다. 탄성과 토모그래피 탐사는 수로터널과 도로터널 교차부의 지반상태 파악을 위하여 WTB-1 및 WTB-2 시추공을 활용하여 실시하였는데, 공대지 탄성과 토모그래피 측선은 수로터널과 평행하게 설정, 시추 공간 토모그래피 결과와의 복합 해석을 통해 지층변화 상태를 입체적으로 파악하고자 하였다. 이러한 물리탐사 결과는 향후 시추조사 및 각종 시험결과와 함께 공간 구역구분에 활용하였는데, 시추조사 결과만에 의한 구역구분 한계를 극복하는데 매우 유용하게 이용되었다.

본 연구에서 고려할 수 있는 탄성과 토모그래피는 탄성과의 주시를 이용하는 주시토모그래피와 탄성과의 진폭을 이용하는 진폭토모그래피로 구분된다. 진폭 토모그래피는 이론적으로 많이 연구되고 있으나 현장에 적용된 예는 미비하다. 현실적으로 널리 활용되는 탄성과 토모그래피 기법은 P파의 초동 주시를 이용하는 주시토모그래피이다. 따라서 본 연구에서는 스칼라 파동방정식을 주파수 영역에서 유한차분법으로 풀어 P파의 거동만을 모델링하는 알고리즘을 사용하였다. 전기비저항 탐사 결과들을 종합하여 볼 때, E-2 측선에서는 터널 예상위치에 저비저항대가 나타나고 있는데 터널 및 지질구조대의 영향이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 보인다. E-3측선의 경우 터널 크기에 비해 심도가 깊어 전기비저항 탐사의 해상도로 기존 수로터널을 구분하는 것은 불가능하였다.

전기비저항탐사 결과의 위치 정확성 및 탐사 단면에 나타난 이상대들을 수로터널 누수에 의한 이상대로 가정할 때, 수로터널의 위치는 당초 예상되는 위치로 통과하는 것으로 판단된다. 그리고, 탐사 결과에서 나타난 전반적인 전기비저항 범위를 볼 때 이 지역의 암반은 대체적으로 절리가 많이 발달하고 있을 것으로 예상된다. 또한 E-2 측선의 거리 130m 부근의 저비저항 대 및 E-3 측선의 거리 160m 부근의 저비저항 대 형상 및 연결성으로 판단할 때, 수로터널과 평행한 방향성을 가지면서 수로터널 하부로 경사진 지질구조대가 수로터널의 좌측에 발달하고 있을 것으로 판단된다.

이에 대한 결과를 종합하면, Fig. 6과 같이 전기비저항 탐사 측선(E-2)을 기준으로 거리 120~160m,

195~245m 구간과 전기비저항 탐사 측선(E-3)을 기준으로 거리 135~190m, 240~280m 구간에서 이상대로 판단되는 구간이 나타났다. 이 이상대를 연장하였을 때, 예측 수로터널구간과 교차하는 이상대와 도로터널 상행 방향에 유사한 이상대가 있을 것으로 판단된다.

공대공 탄성과토모그래피 탐사결과를 살펴보면, Fig. 7에서 알 수 있듯이 5000m/sec 이하의 탄성과 속도를 보이는 저속도 이상대가 총 2개소에서 관찰되었다. 이상대 A의 경우는 WTB-1 시추공의 (EL) 90m 지점에서 WTB-2 시추공 방향으로 아래쪽으로 경사져서 발달하는 형태를 보인다. 이상대 B는 WTB-1 시추공의 (EL) 30m 하부에 발달하고 있으며 이상대의 경계면은 WTB-2 시추공 방향으로 약 45도의 경사를 보여준다.

공대지 및 공대공 탄성과 토모그래피 탐사결과를 종합해 볼 때, Fig. 8과 같이 신규 도로터널 예상지역에서 이상대 구간이 존재하는 것으로 판단되었다.

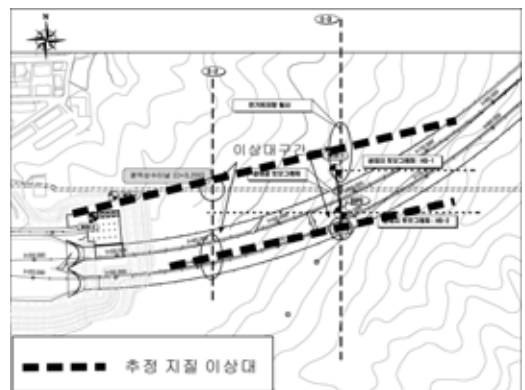
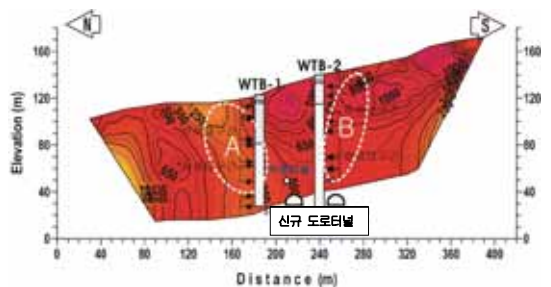


Fig. 6. 터널 간섭부 전기비저항탐사 결과

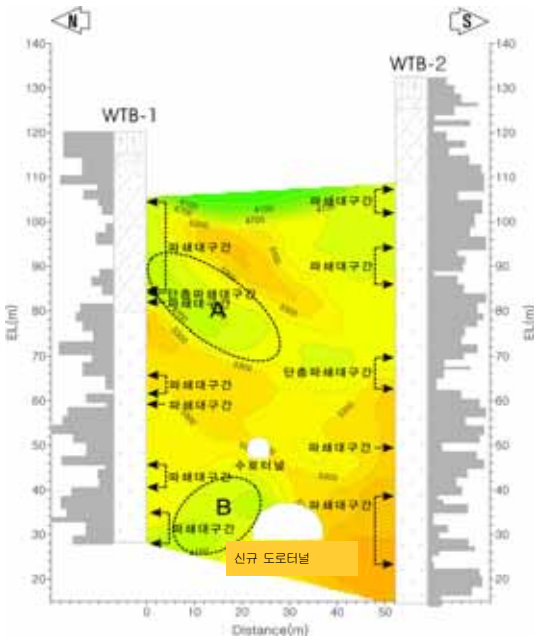


Fig. 7. 탄성파토모그래피 결과

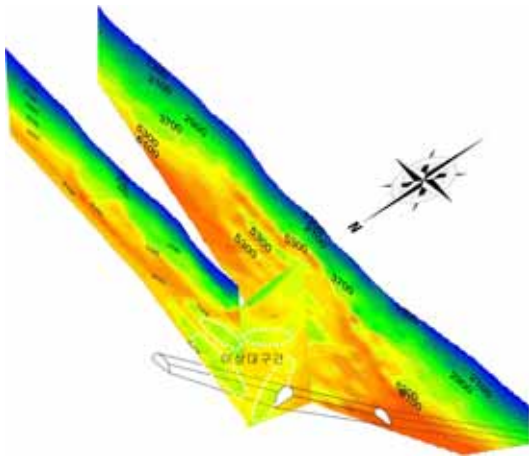


Fig. 8. 탄성파토모그래피 결과 종합(공대공, 공대지)

4. 공간 구역 구분

앞서 언급했듯이, 본 연구대상 지역과 같이 심도별 혹은 공간별 지층의 변화가 심하고, 그 각각의 지반특성이 기존 수로터널 및 신설 도로터널의 안정성에 미치는 영향이 큰 경우, 전체 심도를 하나의 대표 토층

으로 간주하여 설계 및 안정성 검토에 적용하는 것은 큰 오류를 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 육안분류, 시추조사 등에 의한 RQD, RMR 분류 및 탄성과 토모그래피탐사 결과 등을 종합적으로 분석하여 터널 간섭부에 대한 구역구분을 실시하였다. 구역구분시 RQD, RMR 값은 1차적으로 회수된 시추코아에 대하여 2.0~3.0m 구간별로 값을 구한 후 각 구간에서의 극한치를 제외한 체, 심도별 가중치를 감안하여 적용하였다.

Fig. 9는 일반적인 암질기준 및 RQD, RMR, 탄성과 토모그래피탐사 각각에 의한 구역구분 결과를 나타내고 있다. 암질에 의한 구역구분은 전체 토층을 풍화토, 풍화암, 연암, 경암으로 분류하는 방식으로 수행하였는데, 각 암질마다의 대표 지반특성치를 산정하고 이를 세부 터널설계 및 안정성 분석에 적용하는 방식이 가장 단순한 개념의 접근방식이라 할 수 있다.

Fig. 9(a)에서 알 수 있듯이, 기존 수로터널 주변 지반은 경암지반으로 표현되며, 이러한 지층구분 방식은 각종 지반조사에 의해 확인된 심도별 불균질성 및 안정성에 영향을 미치는 단층대와 파쇄대를 적절히 표현하지 못하고 있다.

RQD, RMR에 의한 구역구분 결과를 살펴보면, 두 방법 각각의 결과가 비교적 잘 일치되고 있는 것을 알 수 있었는데, 수평 이격거리가 50m 정도인 두 시추공 사이에서의 지층변화를 정확히 파악하는데 어려움이 있었다. 이러한 시추공 사이의 지층변화 파악 및 기존 구역구분내용에 대한 보정수단으로서 탄성과 토모그래피 탐사결과를 이용하였는데, 그 결과 WTB-1 방향에서의 단층파쇄대 심도가 상부로 조정되었고, 시추공 사이 하부지역에 경암 파쇄대가 존재하는 것으로 분석되었다.

결론적으로, 상부 토사층(붕적, 풍화토층) 및 풍화암층을 Zone I, Zone II로 구분하였으며, RQD=(평균 35), RMR=(평균 35) 정도의 기반암을 Zone III, RQD=(평균 67), RMR=(평균 57) 정도의 기반암을 Zone IV로 구분하고 단층파쇄대(RQD=13, RMR=23)를 Zone IV-1, 일반적인 경암파쇄대를 Zone IV-2으로 구분하였다. 이에 대한 최종 결과는 Fig. 10과 같다.

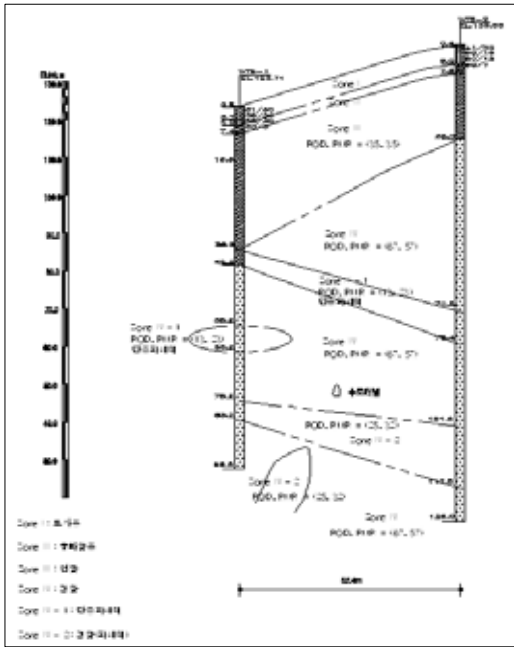


Fig. 10. 최종적인 구역화 결과

5. 구역별 지반 특성치 산정

5.1 현장 및 실내 시험

최종적인 구역화 결과에 대하여, 각 구역별 역학적 특성규명을 위한 현장 원위치 시험과 실내암석시험, 파쇄대 구간을 대상으로 한 현장수압시험 등을 실시하였으며, 암석의 물리적 특성과 역학적 특성파악을 위한 실내시험을 병행하였다. 그 중, 공내재하시험 결과를 살펴보면, 같은 경암 내에서도 구역별로 시험 결과에 큰 차이를 보이고 있었다. 즉, Zone IV의 변형계

Table 2. 공내재하시험 결과

공 변	심 도 (GL.-m)	변형계수 (MPa)	TCR/RQD (%)	Zone	비 고
WTB-1	79.5	1,234	100/25	IV-2	파쇄대
	85.5	10,663	100/84	IV	경 암
WTB-2	76.0	639	100/8	IV-1	단층대
	91.0	2,611	100/15	IV	경 암
	94.0	10,895	100/90	IV	경 암

수는 2,611~10,895MPa, Zone IV-2는 1,234MPa로 나타났으며 단층파쇄대로 구분된 Zone IV-1에서는 639MPa의 값을 나타내고 있다. 각 공별 공내재하시험 결과는 Table 2와 같다. 기존 수로터널과 신설 도로터널 간섭부 교차지점의 하부 기반암에 대한 투수성을 파악(특히, 파쇄대를 중심)하기 위하여 현장 수압시험을 실시하였다. 그 결과 파쇄대에서의 투수계수는 일반적인 값에 비해 낮은 경향을 보였는데, 이는 시추조사 결과에서 보듯이 파쇄대 부분에 존재하는 점토 등의 협재물로 인한 것으로 판단된다.

5.2 지반 특성치 산정

현장 원위치 시험 및 실내시험을 통하여 공간 구역 구분 결과에 따른 각 구역별 지반공학적 특성치를 산정하였다. 물리적 특성치는 실내 암석시험에 대한 물리시험 결과를 통해 산정하였으며, 역학적 특성치는 실내 시험 결과 및 현장시험 결과를 종합하여 산정하였다.

단, 각 구역별 암반의 전단강도는 GSI를 도입한 Hoek-Brown 파괴규준을 이용하여 Rock mass에 대한 값을 산정하였다. 각 구역별 최종 산정결과를 Table 3과 같으며, 결과에서 알 수 있듯이, 터널의

Table 3 터널 간섭부 지반특성치 산정결과

지반특성치 \ Zone	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV	Zone IV-1	Zone IV-2
변형계수, E_m (MPa)	29	250	1,300	5,100	400	800
점착력, c (MPa)	0.016	0.021	1.0	3.0	0.3	0.9
내부마찰각, ϕ ($^\circ$)	30	31	33	38	29	33
단위중량, γ_t (tf/m ³)	1.9	2.1	2.5	2.6	2.3	2.4
포아송비, ν	0.35	0.32	0.26	0.23	0.30	0.28

종방향 구간상에서 동일 지역일지라도 심도별로 매우 상이한 결과를 보이고 있으며, 이러한 값은 향후 안정성 검토 및 터널설계에도 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존 수로터널과 신규 도로터널과의 간섭사례를 대상으로, 세부 안정성 검토를 위한 지반조사 및 세부 구역화, 각 구역별 특성치 분석을 수행하였다.

일반적인 터널 설계과정에서는, 초기 지반조사 과정에서의 광역 지질조사 및 한정된 시추조사, 물리탐사, 노두조사 등을 통해 전체 터널노선을 임의 구간으로 구분한 후, 각 구간별 지반등급을 부여하고, 각각의 지반등급별 대표 물성치를 산정하여 세부 터널설계 및 안정성 검토를 수행하고 있다. 그러나 이러한 방법은 본 연구 대상지역과 같이 대심도 구간에 걸쳐 지층변화 및 공학적 특성변화가 심한 경우에 있어, 세부 안정성 검토 및 설계와 시공을 위한 적정 지반정보를 제공하지 못하는 것이 사실이다.

본 연구결과에서 알 수 있듯이, 현장시추 결과만에 의한 암종별 지층구분은 대상 지반을 풍화토, 풍화암, 연암, 경암만으로 표현할 뿐, 지층내 임의 심도에 분포하는 다양한 규모의 암종별 파쇄대 및 단층대 등을 반영하지 못하는 한계점을 지니고 있었다.

더욱이 구조물 간섭에 따른 상호영향 및 안정성 검토를 수행하는데 있어, 구조물 인근 지반의 지층구성 파악과 적정 지반공학적 특성치 산정은 가장 기본적인 동시에 중요한 과정임을 알 수 있었다. 결론적으로 본 연구에서와 같이, 현장시추 결과 및 물리탐사, 각종

시험결과 등의 종합적 분석과정을 통해 공간적 구역구분과 각 구역별 특성치를 산정하는 일련의 과정은 기존 암종별 지층구분 및 획일적 대표치 적용의 모순점을 극복할 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. “수로터널 설계 및 시공지침”, 한국수자원공사, 1997, pp.3-265.
2. “터널설계기준”, 건설교통부, 1999.
3. Bieniawski, Z. T., “Engineering Rock Mass Classifications”, John Wiley & Sons, New York, 1989, pp.1-135.
4. E. Hoek, and Brown, E.T., “Underground Excavations in Rock”, Institution of Mining and Metallurgy, 1980, pp.183-243.
5. E. Hoek and E. T. Brown, “Practical estimates of rock mass strength”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.34(8), 1997, pp.1165-1186.
6. E. Hoek, “Rock engineering course notes”, Rocscience, Toronto, 2000.
7. Kulhawy, F. H., “Stress Deformation Properties of Rock and Rock Discontinuities”, Engineering Geology, Vol.9, 1975, pp. 327-350.
8. P. Marinos and E. Hoek, “GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation”, GeoEng2000 conference, Melbourne, Austria, 2000.
9. S. Kielbassa and H. Duddeck, “Stress-strain fields at the tunnelling face - Three-dimensional analysis of two-dimensional technical approach”, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.23(3), 1991, pp.115-132.

(접수일자 : 2005년 7월 26일)