

탄질 셰일 파쇄대 비탈면 구간 조사, 설계 및 시공 유치~이양간 지방도 4차로 확·포장 공사

황인철*, 이선복*, 제해찬*, 민동호*

1. 서론

석탄층과 유사한 특징을 가지는 탄질 셰일층은 지층 내부에서 지하수위 상승 또는 지하수위 침투가 발생할 경우, 강도저하가 발생하는데 특히, 비탈면 중에 탄질 셰일층이 포함되어 있는 경우에는 우기시 급속한 강도저하가 발생하게 되어 비탈면 안정에 심각한 문제가 발생할 수 있다.

국내에서 발견되는 탄질 셰일층의 특징은 주향과 경사의 변화가 심하고, 심한 팽창 및 수축으로 그 폭이 완전히 소멸되거나 국부적으로 수십 m의 폭을 가진 포켓형을 형성하는 경우가 많다.

국내 탄질 셰일 및 탄층이 협재된 비탈면 설계 및 시공사례를 조사해 보면, 비탈면 굴착시 공기 노출 및 지표수 유입으로 탄질 셰일층이 급속하게 풍화되는 것을 고려하여 설계지반정수를 토사에 가까운 값

을 이용해 비탈면 설계를 수행하고 있음을 알 수 있다.

또한, 비탈면 보강공법 및 보호대책으로는 탄질 셰일의 풍화특성을 고려하여 섬유거푸집을 이용한 몰탈 격자블록, 세굴방지 식생토 등이 많이 적용되고 있음을 알 수 있다.

본 고에서는 유치~이양간 도로 확·포장공사 터널시설계중 탄질 셰일 파쇄대가 확인됨에 따라 상세지반조사를 통해 탄질 셰일 파쇄대의 분포 및 특성을 확인하고 이를 고려한 비탈면 설계 및 시공중 대책을 수립한 사례가 있어 이를 소개하고자 한다.

2. 탄질 파쇄대 비탈면 구간 상세조사

2.1 과업구간 개요

전라남도에서 설계·시공 일괄입찰로 발주한 유치~이양간 도로 확·포장공사는 시점부에 위치한 탐진담 건설에 따른 피해지역 주변 도로 개선사업의 일환으로써 정남진 관광개발을 역점사업으로 하고

*1 동부건설(주) 토목설계팀 과장(hic1258@dongbu.co.kr)

*2 동부건설(주) 토목설계팀 차장

*3 동부건설(주) 상무

*4 동부건설(주) 상무

있는 장흥군과 고부가가치 사업인 청정농업의 육성을 목표로 하는 화순군을 연결하는 관광도로 개발로 낙후된 지역경제 활성화를 도모하는 것에 그 목적이 있는 사업이다.

특히, 본 과업에서는 환경훼손 최소화 및 복원을 위해 환경구조물 3개소를 계획하였는데 그 중 해동환경터널은 대절토 구간에 환경 구조물을 설치함으로써 환경훼손을 최소화하고 지역주민의 민원해소 및 생태 이동로 복원을 위해 계획된 구조물이다.

이러한 해동환경터널 설계를 위해 지표지질조사 및 예비시추조사를 수행하던중 해동환경터널 인접 비탈면부에서 탄질 셰일 파쇄대가 분포하는 것으로 파악되었으며 이에 당시에서는 환경지구화학적 분

석을 포함한 다양한 조사를 통해 그 분포형태 및 특성을 확인하고 대책을 수립하였다.

2.2 주요 조사내용

탄질 셰일 파쇄대가 분포하는 해동환경터널 구간의 예상 문제점 및 중점분석내용을 정리하면 표 1과 같다.

탄질 셰일 파쇄대층의 분포양상 및 특성을 파악하고자 수행한 해동환경터널구간의 주요조사 내용은 다음과 같으며 특히, 탄질 셰일 파쇄대층의 분포양상을 파악하고자 노선 종 · 횡단 방향으로 전기비저항탐사를 수행하고, 이를 시추조사 및 시추공주사검층

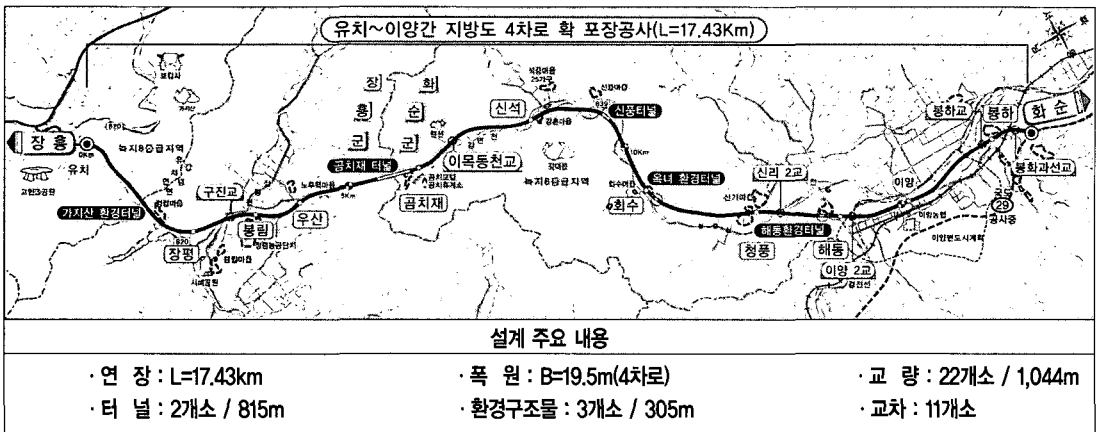


그림 1. 유치~이양간 지방도 4차로 확 · 포장공사 노선 현황

표 1. 해동환경터널구간 예상 문제점 및 중점분석내용

예상 문제점	중점분석내용
<ul style="list-style-type: none"> · 비탈면 공사에 매우 불리한 단층 점토, 탄질 셰일 분포 · 화학, 물리적 풍화에 취약한 상태 · 풍화대가 두껍고 암중변화가 심함 · 노선주변부 폐갱분포 · 순창전단대 연장선상에 위치 	<ul style="list-style-type: none"> · 지반공학적으로 불안정한 토질 실내시험 결과분석 · 풍화민감도 분석 · 환경지구화학적 분석 · 종 · 횡단방향 시추조사 확인 → 지하지질 상태규명 · 탐문조사 및 현장확인조사결과 분석 · 문헌조사 및 정밀지표지질조사 분석

탄질 세일 파쇄대 비탈면 구간 조사, 설계 및 시공

표 2. 해동환경터널구간 주요조사내용

조사 항목	단 위	수 량	적 용 대 상	비 고
정밀지표지질조사	식	1	전구간	-
수직시추조사	공	4	CB - 18, 19, 20, 21	-
전기비저항탐사	km	1.5	전구간	중· 횡단방향
탄성파탐사	km	1,085	전구간	종단방향
MASW탐사	단면	1	전구간	종단방향
시추공주사검층(BHTV)	회	1	CB - 20	-
시추공영상촬영	회	1	CB - 18	-
풍화민감도시험	식	1	암종별	-
공내밀도검층	회	1	CB - 20	-
현장시험 및 실내시험	식	1	-	-

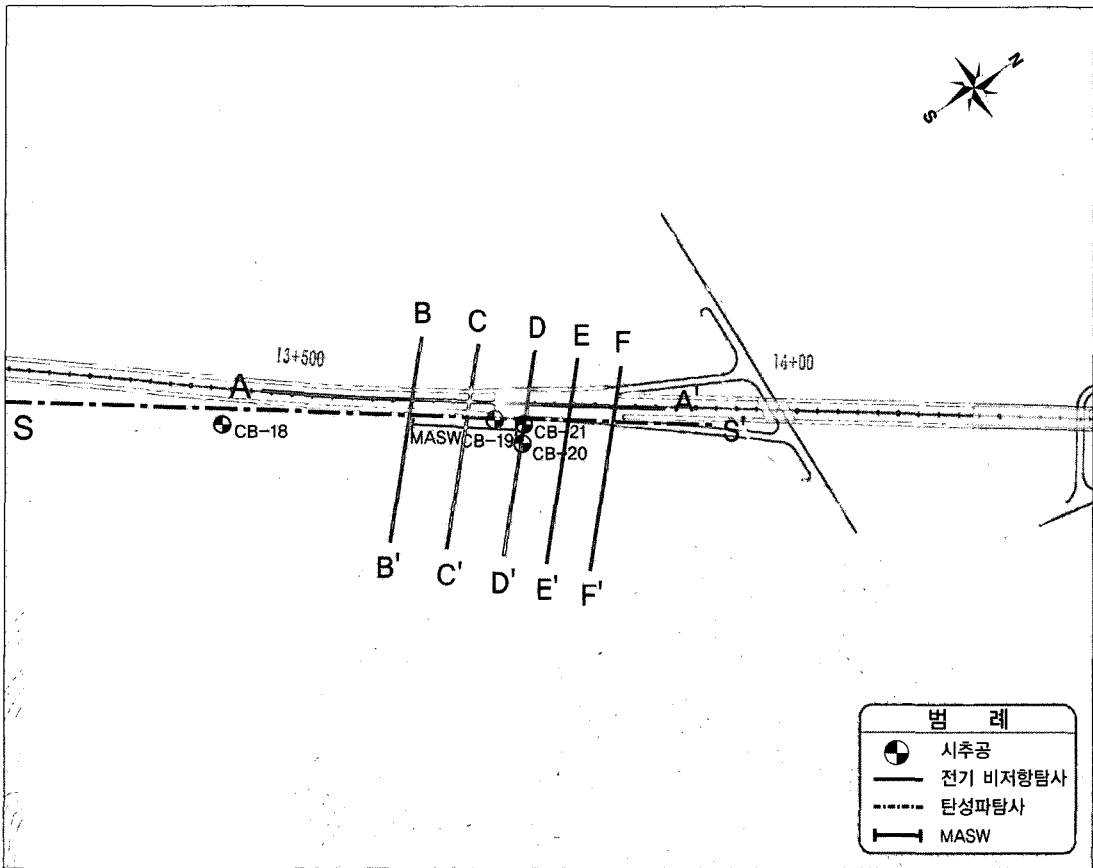


그림 2. 해동환경터널구간 조사위치도



그림 3. 지표에 노출된 탄질 세일 파쇄대

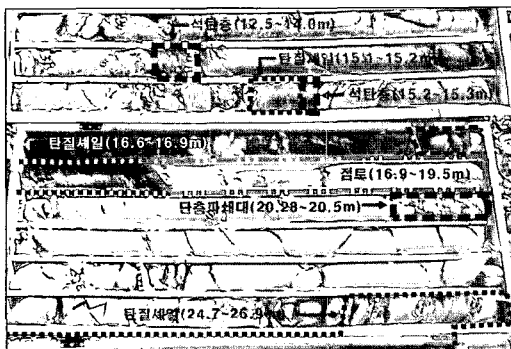


그림 4. 시추코아사진 (CB-19)

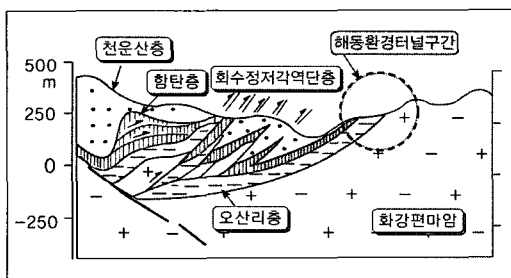


그림 5. 해동환경 터널구간 지질구조 모식도

결과와 비교함으로써 조사성과의 신뢰도를 높였다.

그림 3은 정밀 지표지질조사 과정에서 나타난 탄질 세일층 상태이며, 그림 4는 시추공 CB-19의 시추코아사진으로서 탄질 세일의 분포형태를 뚜렷하게 확인할 수 있다.

지반조사결과를 종합하여 구성한 해동환경 터널 구간 지질구조 단면도는 그림 5와 같으며 그림에서 오산리층이 바로 편암, 흑색편암, 탄질편암, 탄층으로 구성된 탄질파쇄대를 포함하고 있는 변성 퇴적암층이다.

2.3 탄질 세일층 설계정수 산정

탄질 세일 파쇄대층의 분포상태를 고려한 설계를 위해서는 탄질 세일층의 역학적 특성을 파악하는 것이 중요하다.

이를 위해 본 과업에서는 시추조사를 통해 채취한 탄질 세일시료를 가지고 직접전단시험 등 실내시험을 수행하고 탄질 세일층에 직접 현장시험을 실시한 결과를 종합하여 역학적 특성을 파악하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

먼저, 탄질 세일층 채취시료를 가지고 직접전단시험을 수행한 결과, 점착력은 0.31~2.14 kgf/cm², 내부마찰각은 25.3~33.3° 범위로 나타났다.

표 3. 충전물을 포함하는 불연속면의 전단강도(Barton, 1974)

구 분	점착력(kgf/m ²)		내부마찰각(°)		비 고
	최대	잔류	최대	잔류	
탄층을 포함하는 암석	1.1~1.3	0.0	16.0	11.0~11.5	점토 분쇄암층, 두께 1.0~2.5cm

표 4. 탄질 세일 파쇄대 설계지반정수 산정결과

구 분	단위중량(tf/m ³)	점착력(tf/m ²)	내부마찰각(°)	변형계수(tf/m ²)	포아송비(ν)
탄질세일파쇄대	1.9	4.5	28	43,000	0.30

탄질 세일 파쇄대 비탈면 구간 조사, 설계 및 시공

Barton(1974)은 표 3 과 같이 탄층을 포함하는 암석의 불연속면 전단강도를 제시하고 있으며 이로부터 본 과업에서 수행한 탄질 세일층 직접전단시험결과는 원위치상태보다 다소 크게 평가된 것을 알 수 있다.

따라서, 본 과업에서는 현장시험 및 실내시험결과를 종합분석하여 전단강도정수의 경우 시추공 전단 시험결과를, 변형계수의 경우 공내재하시험 결과를 우선적으로 적용해 표 4와 같이 탄질파쇄대의 설계 지반정수를 산정하였다.

3. 환경지구화학적 조사 및 분석

최근 석탄폐광의 산성배수, 폐석 등에 의한 환경 지구화학적 오염사례가 많이 보고 되고 있으며 이에 대한 대책마련이 적절히 이루어지지 않아 이 문제가 사회문제로 대두되고 있다.

해동환경터널 주변부는 과거 탄광개발지역이었음이 노선주변부 폐광도 상태 조사결과 확인되었으며 석탄폐광의 환경지구화학적 오염사례를 감안할 때 현 상태의 오염정도 파악, 시공시 환경오염 피해

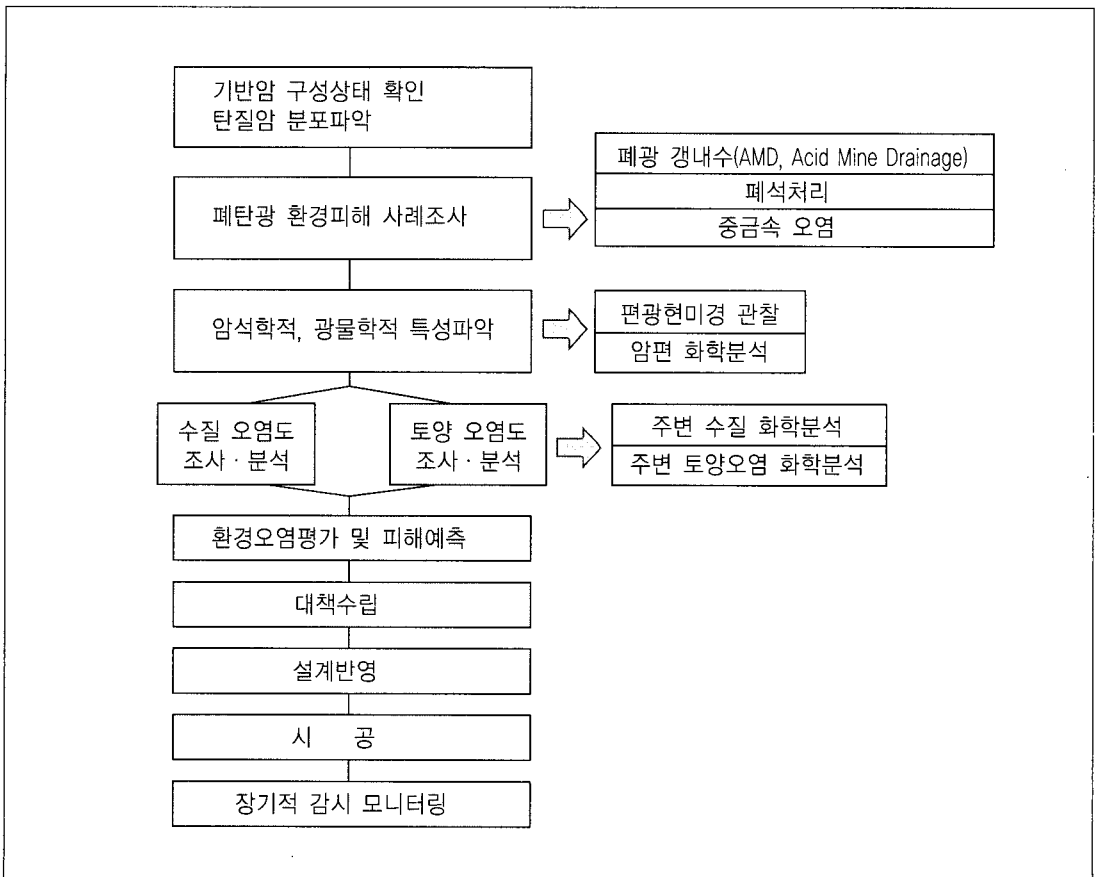


그림 6. 환경지구화학적 조사 및 분석 흐름도

표 5. 환경지구화학적 조사항목

구분	항목	수량	항목	비고
암석학적조사	편광현미경관찰	7 회	-	시추코아
광물학적조사	X-ray 분석	2 회	-	
환경수질조사	수질시료채취	4 회	17 항목	해동환경터널 주변부
환경토질조사	토양시료채취	5 회	18 항목	

표 6. 환경지구화학적 조사내용

암석기재학적 조사	<ul style="list-style-type: none"> • 탄질세일, 탄질면암, 탄질파쇄암은 탄화작용을 받아 흑색을 나타냄 • 탄질암의 Mode 분석결과 점토광물, 흑연, 중금속 함량이 높음
광물학적 조사	<ul style="list-style-type: none"> • X-ray 회절분석결과 석영, 운모류와 무색광물인 흑연으로 구성됨
환경수질조사	<ul style="list-style-type: none"> • 폐광도 및 폐광 인접 수계에서의 pH는 6.21~7.16 범위로 생활, 농업용수에 적합함 • 폐광인근 시료에서 COD, Mg, 대장균, 황산이온이 주변보다 상대적으로 높음
환경토양조사	<ul style="list-style-type: none"> • 폐광주변 토양은 Cu, As, Pb 같은 특정유해물질이 토양오염 대책 기준 이상임 • pH는 5.06~6.31 범위의 약산성~중성으로 콘크리트 구조물에 약간의 부식 영향을 줌 • S-1, 2, 3 위치에서 Mg성분이 상대적으로 매우 높게 나타남

표 7. 해동환경터널구간 환경오염 피해예측결과

	피해예측
공사구분 꺾기로 계획한 경우	1. 탄질암 지표노출 → 지표산화 → 흑갈색, 적갈색 고산(Gossan)대 형성 → 수계오염
	2. 산성수 유출 → 배수로 침전물 파복, 콘크리트구조물 박락, 손상
	3. 산성수내 중금속에 의한 수질, 토양오염 확산
	4. 산성수와 지각구성물질반응에 의한 유해원소 발생
	5. 탄질암 분진에 의한 공해 유발
터널로 계획한 경우	1. 폐석처리 문제 발생
	2. 산성수 유출 → 주변 지하수계 오염

주)고산(Gossan) : 황철광, 자류철광이 풍부한 광상의 노두를 말함

탄질 파쇄대 비탈면 구간의 환경오염방지를 위해서는 다음과 같은 대책을 고려할 수 있으며, 본 기업에서는 지하수계를 손상시키지 않도록 노선검토시 선형 및 종단 계획을 수립하였다.

표 8. 환경오염 방지대책

구분	환경오염 방지대책
산화작용문제	• 탄질암 지표(산소)노출 방지
산성수 유출문제	• 지하수 및 지표수유출 강제적 차단
탄질암 분진문제	• 공사기간 중 분진방지 살수작업, 완료 후 노출방지대책 수립
폐석 처리문제	• 환경오염의 위험성 없는 공사용 재료로 활용
폐광 갱내수(AMD) 문제	• 알칼리 용화제로 중화
	• 인공 소택지 형성
	• 석회석 침전조 설치
	• 박테리아 배양에 의한 중화, 희석

탄질 세일 파쇄대 비탈면 구간 조사, 설계 및 시공

예측 및 대비책 등의 조치가 필요하다.

따라서, 본 과업에서는 다음과 같은 흐름에 의해 환경지구화학적 조사를 수행하고 대책을 수립하였으며 수행한 조사 항목 및 내용은 표 5, 6과 같다.

상기의 조사내용을 바탕으로 환경오염 피해를 예측한 결과는 다음의 표 7과 같다.

4. 탄질 파쇄대 비탈면구간 설계 및 대책수립

4.1 비탈면 안정검토

전술한 바와 같이 탄질 파쇄대가 포함된 비탈면은 우기시 안정성 측면에서 취약할 수 있으므로 비탈면 설계시 주의를 요한다.

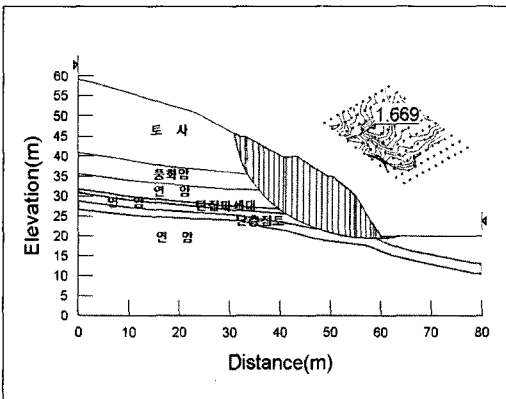
본 과업에서는 해동환경터널 구간 비탈면중 탄질 파쇄대를 포함한 검토단면(STA.13+680 이양방향)을 선정하고 표 4 에서 제시된 탄질 세일 파쇄대 설계지반정수를 이용하여 안정검토를 수행하였다.

우기시에 대한 한계평형해석에 의한 검토결과 기준안전율(우기시 F.S = 1.2)이하로 나타났으며 탄질 세일 파쇄대층을 3차원으로 고려하여 보다 실제적인 지반거동을 파악하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행한 결과 최대 지반변위는 탄질 세일 파쇄대층에서 9.36mm가 발생되는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 종합해볼 때 검토대상 비탈면은 우기시 불안정할 것으로 판단된다.

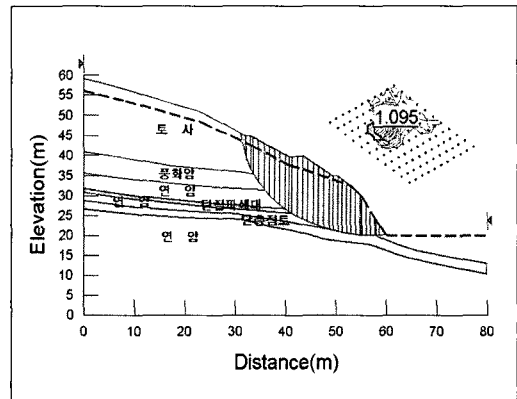
4.2 비탈면 안정 대책공법 선정

본 과업에서는 우기시 불안정한 것으로 판단되는 해동환경터널구간 비탈면에 대하여 다음과 같은 보강공법 비교검토를 통해 「섬유거푸집 몰탈격자블록과 FRP 보강그라우팅」을 대책공법으로 선정 하고 한계평형해석을 통해 대책공법 적용후 보강효과를 확인하였다.

4.3 비탈면 시공시 예비보강계획



건기시(F.S=1.669/1.5) → 안정



우기시(F.S=1.095/1.2) → 불안정

그림 7. 대표단면 STA.13+680 (이양방향) 한계평형해석

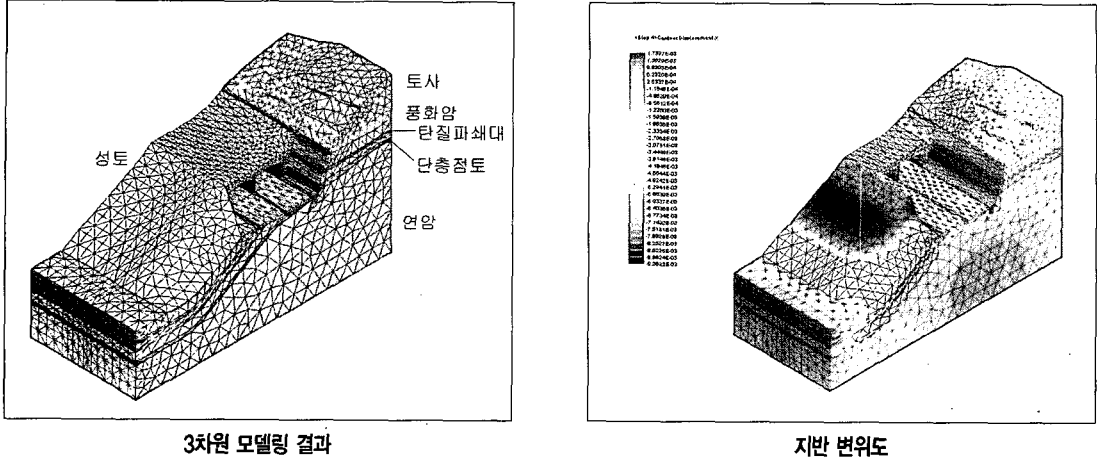
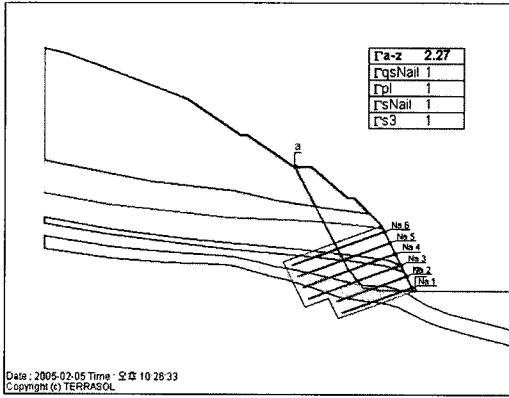


그림 8. 3차원 유한요소해석 STA.13+680 ~ 13+735

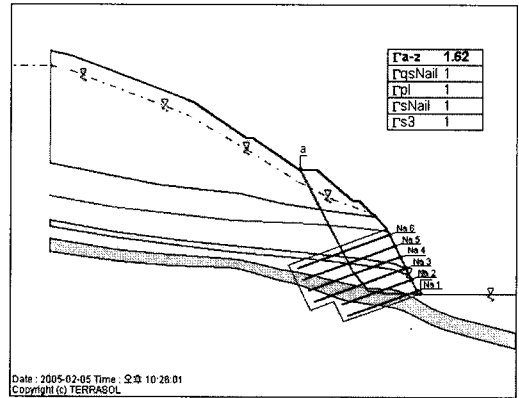
표 7. 해동환경터널구간 환경오염 피해예측결과

구분	1안 Soil Nail	2안 섬유거푸집 몰탈격자블록+ FRP 그라우팅	3안 Rock Bolt
개요			
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 비탈면에 보강재를 Pre-stressing 없이 촘촘한 간격으로 원지반에 삽입하여 원지반 자체의 전단 강도를 증대시킴 	<ul style="list-style-type: none"> • 토사침식을 최소화하며, 활동저항성을 높임 • 콘크리트 기둥으로 침식 방지 • 지형특성에 대한 적용성 우수 • 장기적 안정성 확보에 유리 	<ul style="list-style-type: none"> • 균열 및 심한 절리, 낙석위험이 있는 대상 구간에 Rock Bolt를 삽입 부분적으로 보강 • 소규모 공사에 경제적이며 매우 효과적
단점	<ul style="list-style-type: none"> • Nail 부식방지 대책 필요 • 추가 표면 처리공 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 식생이 제대로 이루어지지 않았을 경우 미관을 해칠 가능성이 있음 	<ul style="list-style-type: none"> • 정척부에 견고한 암반이분포할 경우에만 적용 가능
경제성	보통	보통	불리
선정		◎	-
선정 사유	단질 파쇄대, 탄층 및 단층점토가 혼재하며, 풍화민감도 분석결과 시공과 동시에 표면보호가 필요한 풍화 1~2 등급으로 판정되어 보강과 동시에 표면 보호가 가능한 섬유거푸집 몰탈격자블록을 적용		

탄질 셰일 파쇄대 비탈면 구간 조사, 설계 및 시공



건기시(F.S.=2.27)1.5) → 안 정



우기시(F.S.=1.62)1.2) → 안 정

그림 9. 보강공법(섬유거푸집 몰탈격자블록 + FRP 그라우팅) 적용 후 비탈면 안정검토

그림 10. 오산리층 변성퇴적암 구간 비탈면 시공시 예비보강계획

비탈면 저부에 저각으로 지질이상대 위치	비탈면 내부에 고각으로 지질이상대 위치	비탈면 내부에 불규칙하게 지질이상대 혼재
<ul style="list-style-type: none"> • 도로의 침하 및 비탈면 원호파괴 예상 → 콘크리트 채움 보강 	<ul style="list-style-type: none"> • 전도 파괴 및 낙석 예상 → Rock Bolting 보강 	<ul style="list-style-type: none"> • 장기적 안정성 확보가 요구됨 • 파쇄대 규모가 작을 경우 : FRP 그라우팅으로 부분 보강 • 파쇄대 규모가 클 경우 : 섬유거푸집 몰탈 격자블록+FRP 그라우팅 전면 보강

검토대상 구간내 탄질 셰일을 포함하고 있는 오산리층 변성퇴적암 구간은 탄질 셰일 외에도 탄층, 단층점토 등의 지질이상대 발달이 예상되므로 비탈면 시공시 붕괴위험이 존재한다.

따라서, 본 과업에서는 깎기 비탈면 계획구간을 중심으로 다음과 같이 예비 보강공법을 계획하여 시공시 안정성을 확보토록 조치하였다.

5. 맺음말

유치~이양 도로 확·포장공사 설계중 해동환경 터널 구간은 지표지질조사결과 탄질 세일 파쇄대발달이 예상되어 상세한 지반조사를 통해 지질이상대의 분포형태 및 특성을 파악하고 합리적인 설계지반정수를 산정해 안전한 비탈면 설계가 이루어 질 수 있도록 하였다.

석탄층이 존재하는 지역에서 최근 산성배수, 폐석 등에 의한 환경 지구화학적 오염사례가 많이 보고되고 있는 점에 착안해 본 설계에서는 해동환경 터널 구간의 탄질 세일층에 대하여 환경지구화학적 조사 및 분석을 수행함으로써 환경오염 방지대책을 수립하였다.

탄질파쇄대를 포함하고 있는 비탈면의 안정확보를 위해서 섬유거푸집 몰탈 격자블록과 FRP 보강그라우팅을 안정대책공법으로 적용함으로써 탄질파

쇄대 비탈면구간에 대한 조사, 설계, 시공에 대한 종합적인 대책을 수립하였다.

향후 유사한 지반조건하의 비탈면 설계 및 시공시 본 유치~이양 터널설계중 해동환경 터널 구간 비탈면 설계사례는 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. 김정환(2005) 한국의 지층, p.194
2. 동부건설(2005) 유치~이양간 지방도 4차로 확·포장공사 토질조사보고서, pp.347~372, pp.435~438, pp.502~517, pp.525
3. 전효택 외(1998) 환경지질학, pp.315~319, pp.355~397
4. 한국도로공사(2001) 도로설계요령(토공 및 배수), pp.129~130, pp.152~175

