

단층이 토목구조물에 미치는 영향과 지반조사(사례 중심으로)

박남서(대덕공영(주))

Influence of fault on civil structure and geotechnical investigation (Case Histories)

Namseo Park(Daeduk Consulting & Construction Co.)

요약 : 토목 구조물의 합리적인 설계를 위한 지반조사의 역할은 대상 구조물의 최적 위치를 설정하는 일에서부터 시공 방법의 선정이나 안정성을 확보하는 일에 이르기까지 필요한 각종 정보를 제공하는 것이다. 인간 생활 환경의 확대에 따라 불리한 지반 조건에서 공사를 수행하여야 하는 경우가 점차 많아지고, 이에 따라 발생하는 문제에 있어서도 다양하고 복잡하여 이를 해결할 수 있기 위해서는 토목 시공뿐만 아니라 지반 자체에 대한 폭넓은 이해가 필요하게 되었다.

이에 본 고에서는 여러 가지 지질 구조 중 토목 구조물의 안정성에 가장 크게 영향을 미치는 단층과 관련된 여러 가지 사례를 소개하였으며 각 사례에 있어서 단층에 대한 대책을 분석, 요약하였다.

주요어 : 지반조사, 단층, 토목 구조물

Abstract : The role of site investigation for adequate design of civil structure begins from siting to comment on design and providing other available geotechnical data. As the scope of human's life is wider than before, civil works have become conducted at sites of worse geological condition. So, it is necessary to have more adequate comprehension on the geological condition than ever in order to solve complicated geotechnical problems.

In this paper, four fault related cases are introduced. Usually faults are the most influential geological structures on civil works. And the analyses with adequate countermeasures to each case are summarized.

Keywords : site investigation, fault, civil structure

1. 서 언

여러 가지 지질구조 가운데 토목구조물에 가장 큰 영향을 미치는 지질구조는 단층(斷層, fault)으로서 작게는 토목구조물의 보강 정도에서부터 크게는 구조물 자체의 건설 가능성을 좌우한다. 과거 우리 나라에서는 지질구조, 특히 단층에 대한 인식 부족으로부터 토목공사 시 많은 문제가 야기되어 왔으며 현재는 불리한 지반조건에서의 토목공사가 날로 증대되어가고 있어 단층은 토목 시공에서 처리하기 어려운 문제로 점차 대두되고 있다.

따라서 단층의 파악을 위한 지반조사의 중요성은 날로 증대되어 가고 있다고 볼 수 있겠으며 본 고에서는 지질조건, 특히 단층에 의한 토목구조물의 영향 사례를 통하여 적절한 지반조사의 중요성을 살펴보았다.

2. 단층과 토목구조물

단층이란 암반 내에 어떠한 쪼개진 면을 따라 변위가 발생하는 경우를 말하며 변위가 있다는 점에서 단순히 암반 내에서의 쪼개짐을 나타내는 절리(節理, joint)와는 구별된다. 단층의 변위는 작게는 0.5mm에서 크게는 수 km에 이르기도 한다. 지반의 변위가 여러 개의 소규모 단층, 파쇄대, 또는 단층점토 등의 형태로 나타나는 경우에는 단층대(fault zone)이란 용어를 사용하기도 하며 그 폭이 수 백m에 이르기도 한다(Gary, M., et. al., 1972).

단층의 생성은 지각 내의 응력 평형이 유지되는 현상이며 한 번 단층이 생성된 후 지각이 응력 평형을 잃게 되면 단층 주변의 교란되지 않은 지반 내에 새로운 단층이 생성되기 보다는 기존의 단층이 재활성되는 경우가 대부분이다. 단층은 단층면 양쪽 암괴의 상대적인 변위에 따라 Fig. 1.과 같이 구분되기도 하나 자연 상태에서는 복합적으로 발생한다.

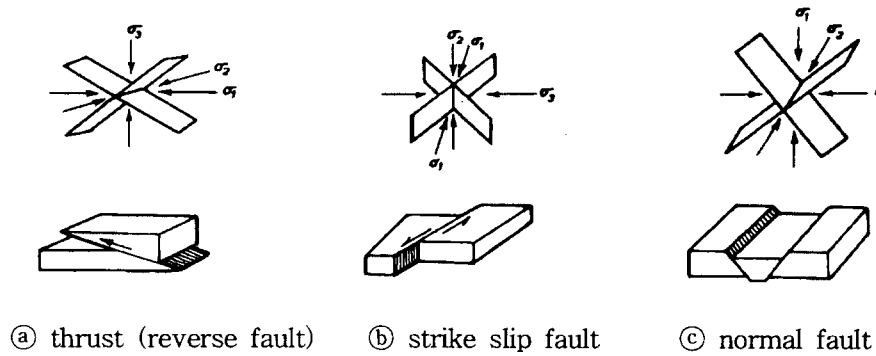


Fig. 1. Fault morphology in relation with stress field

지반조사에 있어서 가장 손쉽게 단층을 인지할 수 있는 방법은 인공위성 영상분석을 통한 선구조선의 분석이다. 분석된 선구조선은 지표지질조사를 통하여 단층 노두를 직접 확인하거나 지질도를 작성하여 단층을 추정하는 등의 방법으로 확인될 수 있다. 또한 여러 가지 물리 탐사를 수행하여 단층의 정확한 위치를 추정할 수도 있으나 노두 관찰이 불가할 경우에 있어서 가장 확실한 방법은 시추조사를 통하여 직접 확인하는 길이다.

지하구조물, 특히 터널 시공에 있어서 단층은 여러 가지 지질조건 중 가장 큰 위험 요소로서 작용하게 된다. 터널에 의해 단층이 관통될 경우, 단층을 따라 대량의 지하수가 유입되며 경우에 따라 가스가 분출되기도 한다. 터널이 단층의 주향 방향으로 진행되는 경우, 터널의 안정성에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 터널을 단층과 이격시켜야 하며 부득이한 경우에는 단층과 직교하도록 설계하여야 한다. Fig. 2.는 전자의 경우로 터널이 설계되는 경우, 지반이 터널의 안정성에 미치는 영향을 모식한 그림이다.

지상구조물의 경우 단층대는 주위의 교란받지 않은 지반에 비하여 전단 저항이 매우 약하기 때문에 단층대를 따른 sliding이 발생하기 쉽다. 단층면에 단층점토 등의 점토가 피복되어 있는 경우에는 특히 심하다.

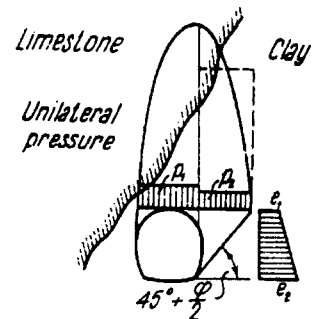


Fig. 2. Asymmetrical loads due to changes of ground materials (Széchy, K., 1973)

3. 지질 구조에 의한 토목 구조물의 변형 사례

3.1 단층에 의한 산골터널의 변형 및 보수·보강 (영동선 산골터널)

산골터널은 강원도 태백 지역에 위치한 영동선 통리-심포리 역 사이에 위치하며 1963년 5월에 준공되었다. 본 터널은 준공이후 지속적으로 터널 변형이 있어 계속적인 보수·보강공사가 있어왔으며 특히 1996년 9월 대대적인 긴급 보강공사가 실시된 바 있다(영주지방철도청, 1996, 1997).

3.1.1 지질

본 지역 주변은 캄브로-오르도비스기에 걸쳐 퇴적된 대석회암층군을 기저로 하여 페름기의 변성퇴적암이 그 상부를 평행부정합으로 피복하고 있다. 이들 변성퇴적암 상부에는 백악기에서 고제3기에 해당되는 퇴적암 및 화산암류가 부정합 또는 관입상으로 분포되어 있다. 이들 암석들은 수 회의 조산 운동에 의해 습곡을 이루고 있어 주향이 다양한 편이지만 대체로 EW 내지 N70W에 경사는 30~70NE의 방향성을 보이고 있다(Fig. 3. 참조).

지표지질 조사에 따르면 본 터널을 횡단하는 주향 EW~N70E, 경사 N~NE의 대규모 층상단층(thrust) 2매가 인지되고 있으며, 터널 내 수평시추 조사결과 터널측벽부에서 층상단층과 관련된 것으로 판단되는 단층각력, 단층점토 및 탄질세일 등이 수 매 인지된다. 이 층상단층은 철도터널 수 백m 하부에 detachment를 두고 있으며 본 보강공사구간 주변에서 thrust ramp를 이루며 터널과 교차하여 tip line이 지표에 노출되어 있다.

이는 지표에서 인지되는 2매의 층상단층 이외에도 지표 내에 숨어있는 수 매의 단층에 의해 엽편상 구조(Thrust imbricate fan)를 이루고 있으며, 특히 이들 엽편상 구조는 본 보강공사 구간 내에 집중되어 있어 지반의 교란을 심화시킨 것으로 판단된다(Fig. 4. 참조).

3.1.2 터널 변형에 대한 대책

터널 노선 중 터널 변형이 특별히 심각하여 건축한계 이내로 변형된 구간을 선정하여 보강 대상으로 삼았으며 이는 단층에 의해 형성된 넓은 파쇄대와 지하수에 의한 점토 유실로 지반 이완이 촉진되어 터널 측벽부에 높은 압력이 작용하여 변상이 진행되는 것으로 판단되었다.

특히 터널의 내공단면이 건축한계 이내로 축소되어 있으므로 강지보공이나 슛크리트의 시공이 불가능하므로 배면지반의 강도증가를 통한 안정화 공법을 보강설계의 기본 개념으로 하였다. 이에 따라 Fig. 5.와 같은 순서로 보강공사를 수행하였다.

3.1.3 계측 및 결과 분석

본 터널의 경우 3~4매의 엽편상 구조를 보이는 층상단층의 파쇄대 내에 철도터널이 건설되어 있어서 준공 후 30여 년 간 지속적으로 터널의 변형이 계속되어 왔다. 특히, 대규모 횡압에 의해 형성되는 층상단층의 특성상 터널이 위치하는 지반 내에 작용하는 측압이 매우 높아($K_v \approx 2.4$) 터널의 변형을 가속화시킨 것으로 판단된다.

이에 대한 보강공사는 Fig. 5.의 순서대로 이루어졌으며 보강 전후 350여일 간에 걸친 계측관리를 수행한 결과 터널의 안정성이 확인되었다.

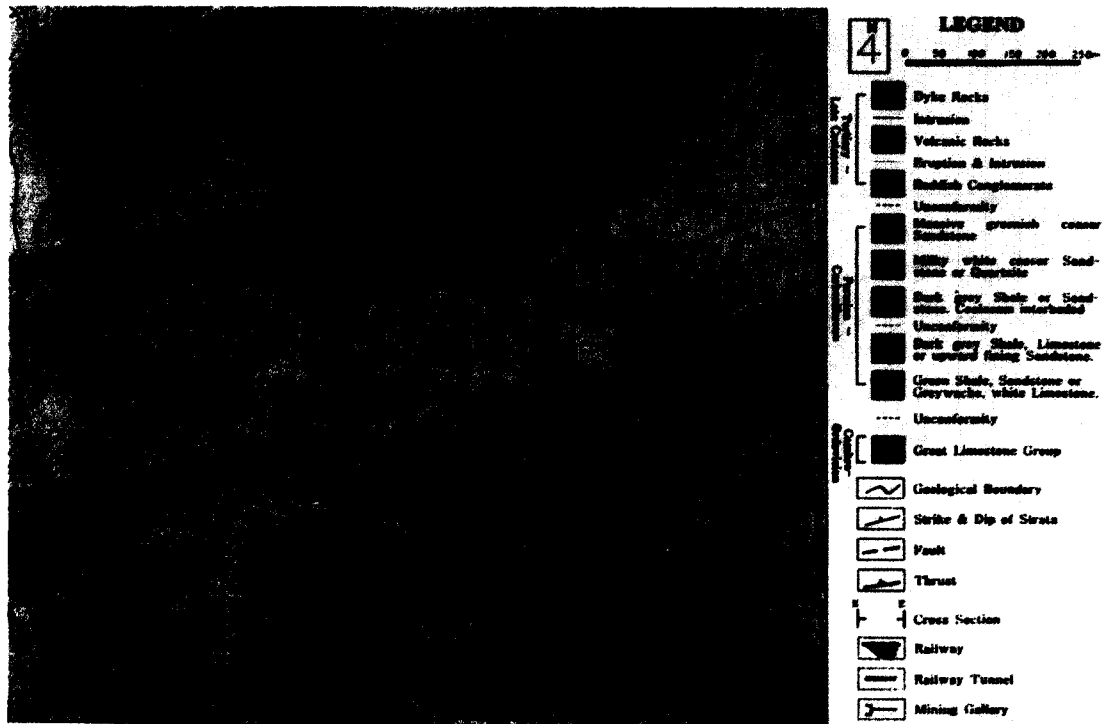


Fig. 3. Geological Map of study area

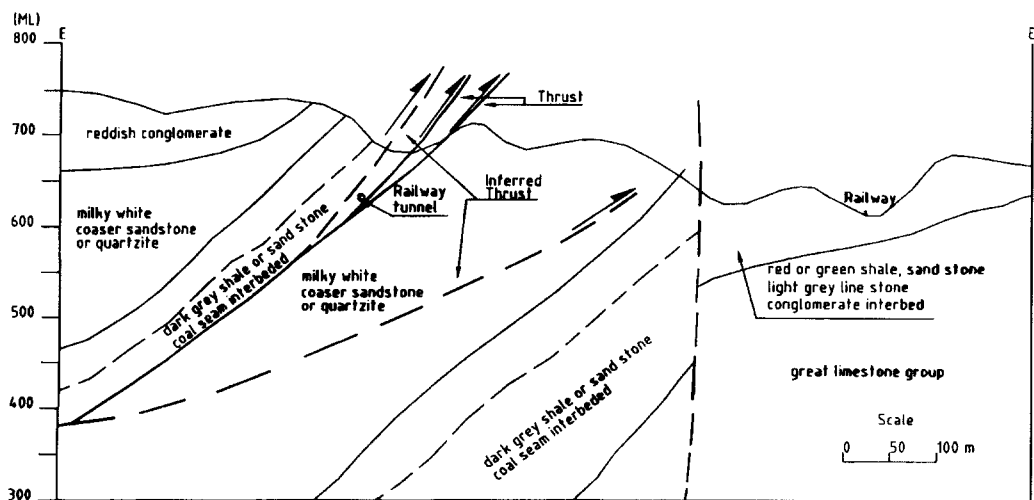


Fig. 4. Geological Cross section of study area (E-E' section at Fig. 3.)

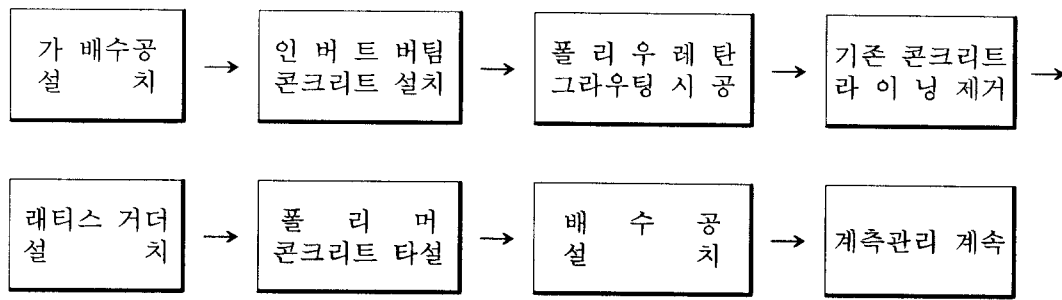


Fig. 5. Procedure of Reinforcement works

3.2 터널 노선선정에 있어서의 지질조건의 고려 (영동선 동백산-도계간 철도터널의 예)

앞에서 소개한 산골터널의 변형, 영동선 철도의 노후화, 선형 개량 등을 목적으로 영동선 동백산역에서 도계역 사이를 약 16km의 터널로 연결하려는 계획이 수립되어 1999년 10월에 설계안이 확정된 바 있다((주) 대우, 1999).

복잡한 지질 구조를 보이는 본 지역에서 터널 노선의 선정은 대규모 단층대와 석탄 채굴적을 효과적으로 피하는 문제가 가장 큰 관건이었으며 따라서 정확한 지질도 작성 및 석탄 채굴적의 분포상황 파악이 중요한 사안이었다.

과업 수행 당시 세 개의 터널노선이 고려되었으며 다음은 각 노선의 장단점을 상호 비교, 분석하여 최적의 노선을 선정한 예를 보인다.

3.2.1 지형 및 지질

본 과업지역은 동백산-통리 및 도계-고사리를 잇는 N10~20E로 발달된 두 개의 계곡을 따라 그 동서에 산악이 분포하며 터널 시점부와 종점부는 약 380m의 표고차를 보인다.

과업지역의 지질은 캄브로-오도비스기의 조선누층군, 석탄-페름기의 평안누층군, 백악기 경상누층군과 상기 지층들과 분출 및 관입 관계를 가지는 백악기 화산암류 및 제4기 층적층으로 구성된다.

과업지역 내 발달하는 층상단층에 의해 동일 지층이 수 차례 반복되며, 오십천 단층 등 주향이동 단층에 의해 단절되어 있다. 특히 위에서 언급한 산골터널 주변은 인편상 구조 등 층상단층에 의해 평안누층군의 금천 및 장성층 등 함탄층의 분포가 반복되어 주 가행탄층의 복잡한 분포를 보인다 (Fig. 6. 참조).

3.2.2 과업 구역 내 단층의 분포

본 지역은 삼척탄전 동부에 해당하는 지역으로 수 차례의 지구조적 작용으로 대·소규모의 단층들이 과업구역 전반에 걸쳐 분포한다. 과업 지역에 발달하는 단층은 주로 북북동 방향의 고각의 주향이동단층과 동서 방향 또는 서북서 방향의 층상단층, 동서 방향의 주향이동 단층 등으로 구분된다.

설계 노선의 선정에 있어서 단층과의 이격거리, 통과 횟수, 통과되는 단층의 규모 등이 주로 고려되었다. 다음 Table 1.은 Fig. 8에 표기된 주요 단층의 상태를 나타낸다. 그리고 Fig. 10.은 혈암단층대 내에 위치하는 산골터널 인근의 조사 결과를 보인다.



Fig. 6. Geological map of study area

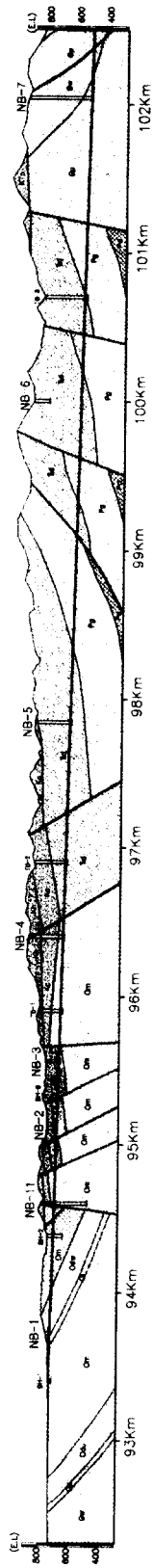


Fig. 7. Geological cross section of study area (roof area)

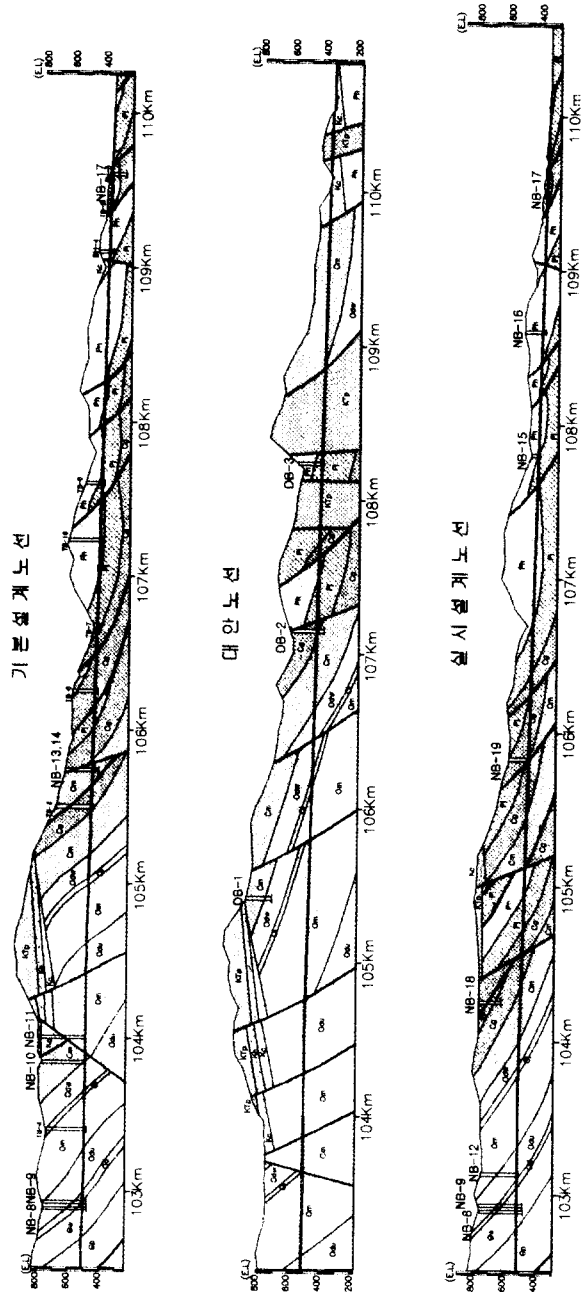
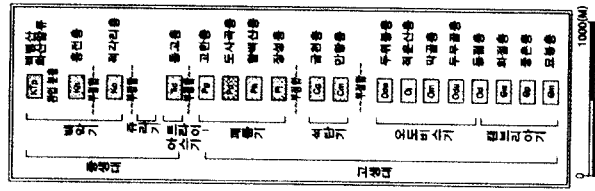


Fig. 8. Geological cross-section (linear area for each line)

Table 1. Major Faults in the Study Area

단층명	상 태
오십천 단층	<ul style="list-style-type: none"> • 과업구역 북단 도계읍 이북에서부터 조사지역 남쪽으로 연장됨 • 주향은 남북방향 또는 북북동방향이며 70° 이상의 고경사 • 1~3m의 단층점토 및 각력대와 10m 내외의 파쇄대를 형성하며 단층각력대는 방해석 또는 석영으로 충전되어 봉합되어 있는 형태를 보임 • 이 단층은 특히 기본설계노선의 일부 구간에서 노선과 교차 또는 거의 평행하게 인접하여 진행됨
통리 단층	<ul style="list-style-type: none"> • 통리 부근에서 철암천을 지나 과업구역 남단으로 연장됨 • 노두를 직접 확인하지는 못하였으나 철암천 주변의 각 지층의 변위로 확인됨
혈암 단층대	<ul style="list-style-type: none"> • 나한골과 홍전역 사이에서 3매의 층상단층대(혈암1 층상단층, 혈암2 층상단층, 혈암3 단층)가 발달하며, 이 단층대는 서측으로 함백산 대단층까지 연장되는 대규모의 층상단층임 • 혈암1 층상단층은 평안 누층군의 만항층, 금천층 및 장성층을 층상 반복시키며 일부 구간에서 백병산 화산암류에 의해 관입을 받고 있음 • 혈암2 층상단층은 기존 영동선 철도의 산골터널 구간을 통과하며 장성층을 함백산층 위로 층상시킴 • 혈암3 층상단층 역시 산골터널 구간을 통과하며 원래는 백병산 화산암체 위에 장성층을 층상시킨 대규모 층상단층이었으나 다시 정단층으로 재활성되어 현재는 전체적으로 정단층의 성격을 보임. • 혈암3 층상단층은 노두상태에서 20m 이상의 대규모 파쇄대를 형성시키고 있으며 혈암2 층상단층과 혈암3 단층 사이의 지반은 상당한 교란을 받아 파쇄가 심할 것으로 판단됨.
황지 층상단층	<ul style="list-style-type: none"> • 서측으로 함백산 대단층과 연결되는 대규모 층상단층 • 조선누층군의 석회암층이 경상 누층군의 적각리층 및 홍전층과 평안 누층군의 동고층을 층상함

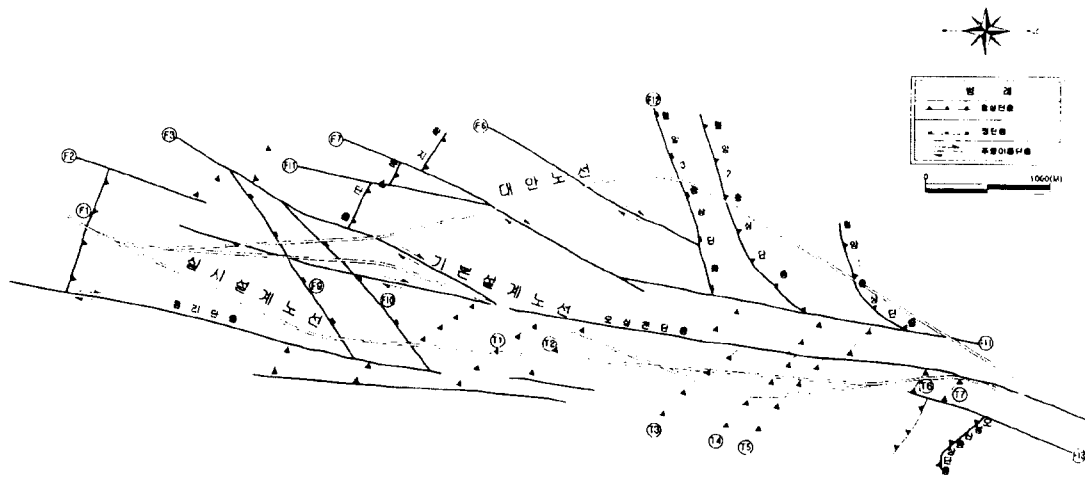


Fig. 9. Structural Slice Map at tunnel level

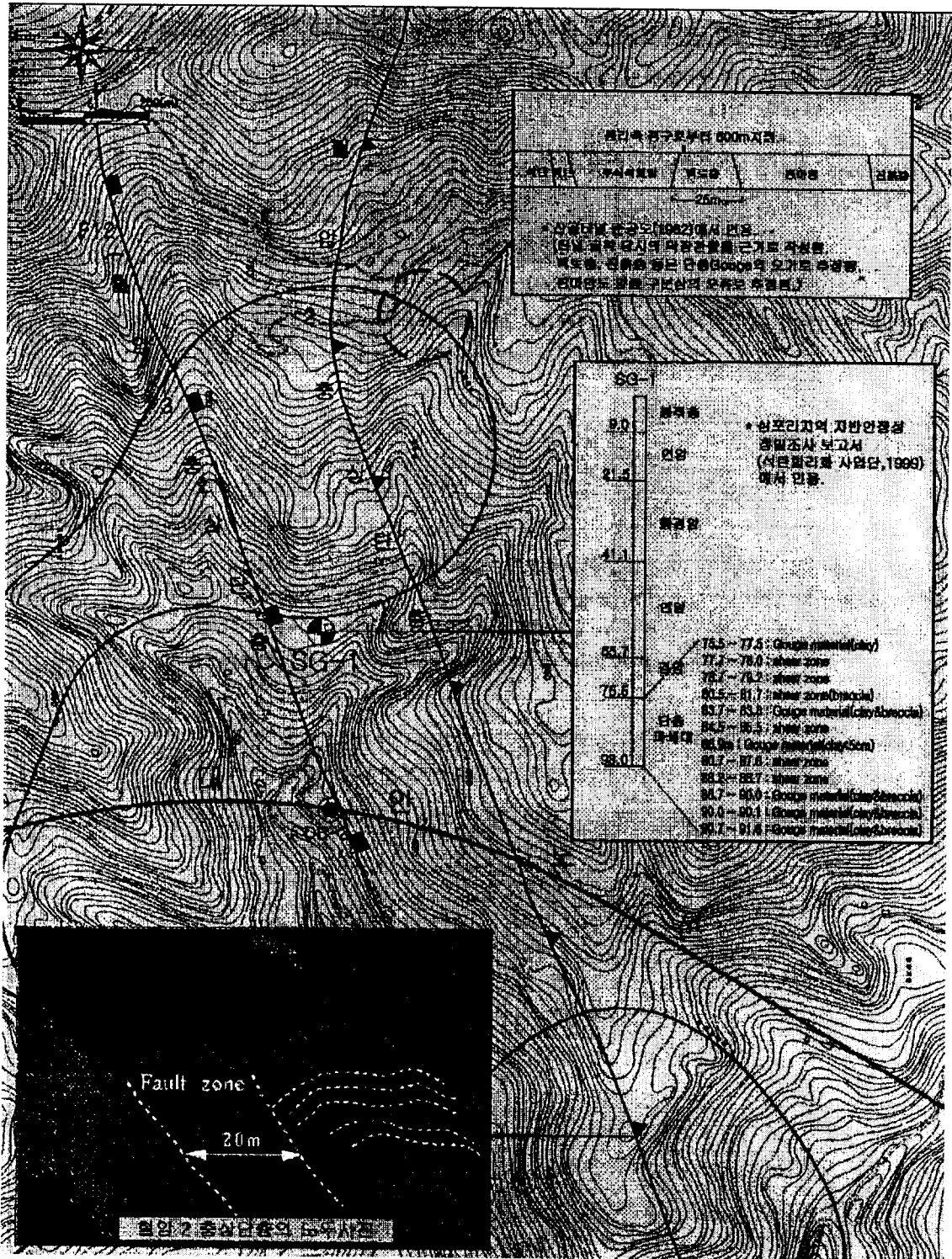


Fig. 10. Hyoulam thrust zone around the Sangol tunnel

과업구역 내에 발달해 있는 대규모의 주요 단층과 각 노선과의 관계를 비교 검토하면 다음과 같다. 각 단층의 위치는 Fig. 9.을 참고하기 바란다.

Table 2. Encounter of Each Tunnel Line with Faults

단층명	노선 통과 지점		
	실시설계노선	기본설계노선	대안노선
오십천 단층	109K500~110K200	103K900, 105K780 109K500~110K200	103K630
혈암1 층상단층	-	-	108K860
혈암2 층상단층	-	-	107K630
F3	-	-	104K750
F6	-	-	106K450
F9	104K560	-	103K870
F10	105K120	104K420	104K280
F11	-	-	105K770, 109K800
혈암3 층상단층	-	-	107K220
F13	109K040	109K040	

3.2.4 석탄 채굴적에 의한 영향 검토

지질도 분석으로부터 본 과업 구역 내에 발달하는 단층의 발달 상태를 추정하였으며 과거 탄광 개발 도면 등을 입수, 합성 작업을 실시하여 정확한 석탄 채굴적의 분포 상황을 파악하였다. Fig. 11.은 그 결과를 보인다.

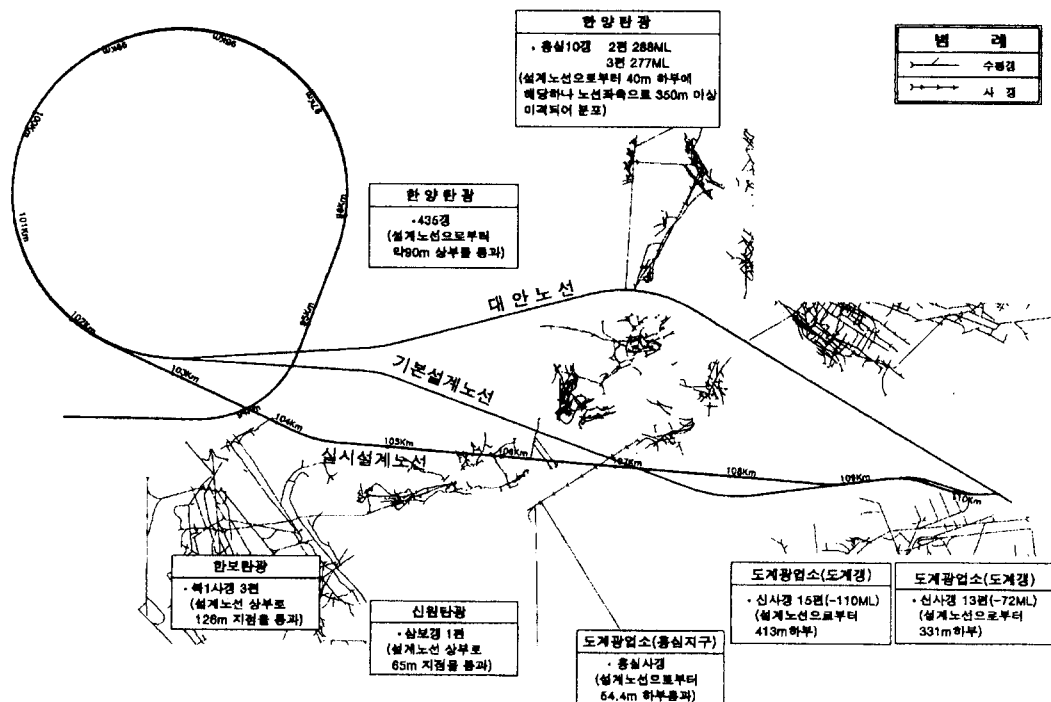


Fig. 11. Distribution of mining works in study area

분석된 채굴적도로부터 터널 노선을 채굴적과 최대한 이격시키도록 하였으며 Piggott and Eynon (1977)의 채적팽창이론을 적용하여 터널 노선에 인접한 채굴적의 영향 유무를 검토한 결과 터널 노선과 최고 근접한 홍심사갱이 봉락되어도 봉락은 홍심사갱 상부로 최대 28m 지점, 즉 설계노선의 26m 하부지점까지만 진행되므로 터널에 영향은 없을 것으로 판단되었다. 다음 Fig. 12.는 검토 결과를 보인다.

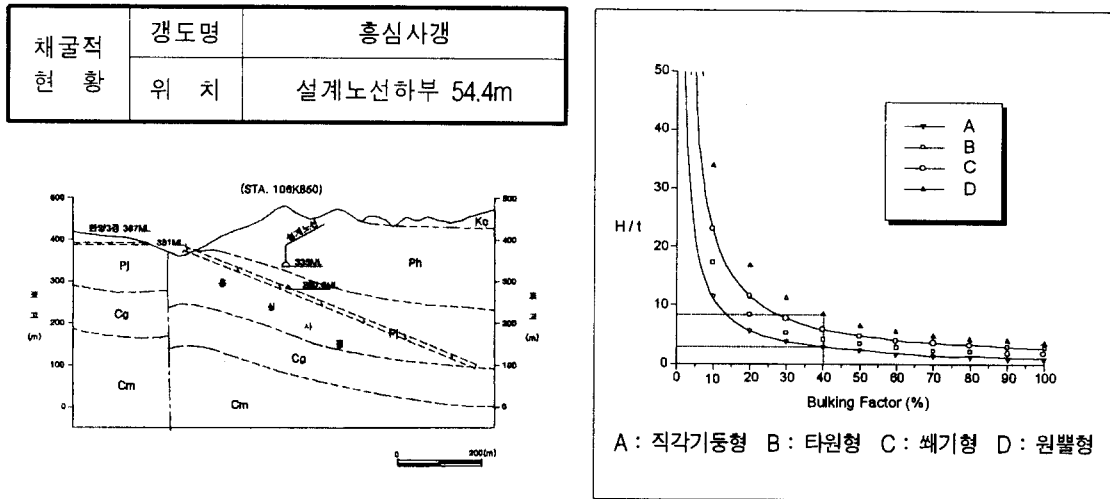


Fig. 12. Influence of mining works to Tunnel (cross section at STA. 106K 850)

3.2.5 노선의 선정

위의 지질조건을 종합분석한 결과는 다음과 같으며 분석결과로부터 실시설계 노선이 최적의 노선임이 확인되었다.

Table 3. Results of the Investigation on each Proposed Tunnel Line

구분	주요 단층 통과 빈도	불량 및 위험 잠재예상지층	채굴적 영향	터널연장	평가
실시설계노선	4회	3,370m	없음	7,720m	통과횟수가 가장 적으며 특히 대단층 통과횟수가 적음
기본설계노선	5회	3,760m	홍심사갱의 영향 예상	7,720m	터널 연장 약 2km에 걸쳐 오십 천 단층과 교행 또는 인접
대안노선	9회	3,410m	없음	8,400m	통과횟수가 가장 많으며 산골 터널 부근에서 인편상(고기 비늘형상) 구조를 갖는 3개의 혈암단층대 통과

3.3 단층 위에 건설된 교량의 변형 (안동 수곡교의 예)

3.3.1 서언

경북 안동 임하댐 저수지 주변에 위치한 수곡교는 임하댐 건설 이전인 1989년 12월에 완공되었으나 (Fig. 13.), 건설 직후부터 교량의 서쪽 부분의 하부 지반유동에 의하여 교량에 변형이 발생하였으며 이로 인하여 교량으로서의 기능을 상실하게 되었다(Fig. 14.). 이에 대한 원인 연구는 여러 차례 있어왔으며 1999년 11월 하부 지반보강 및 교량 재가설 공사가 완료되어 현재까지는 교량에 아무런 문제가 재발되고 있지 않다.

본 고에서는 교량 하부 지반에 존재하는 단층과 단층에 의한 수곡교의 변형에 관한 연구 사례를 소개한다. 더욱 관심있는 사람은 강상호(1999)를 참조하기 바란다.

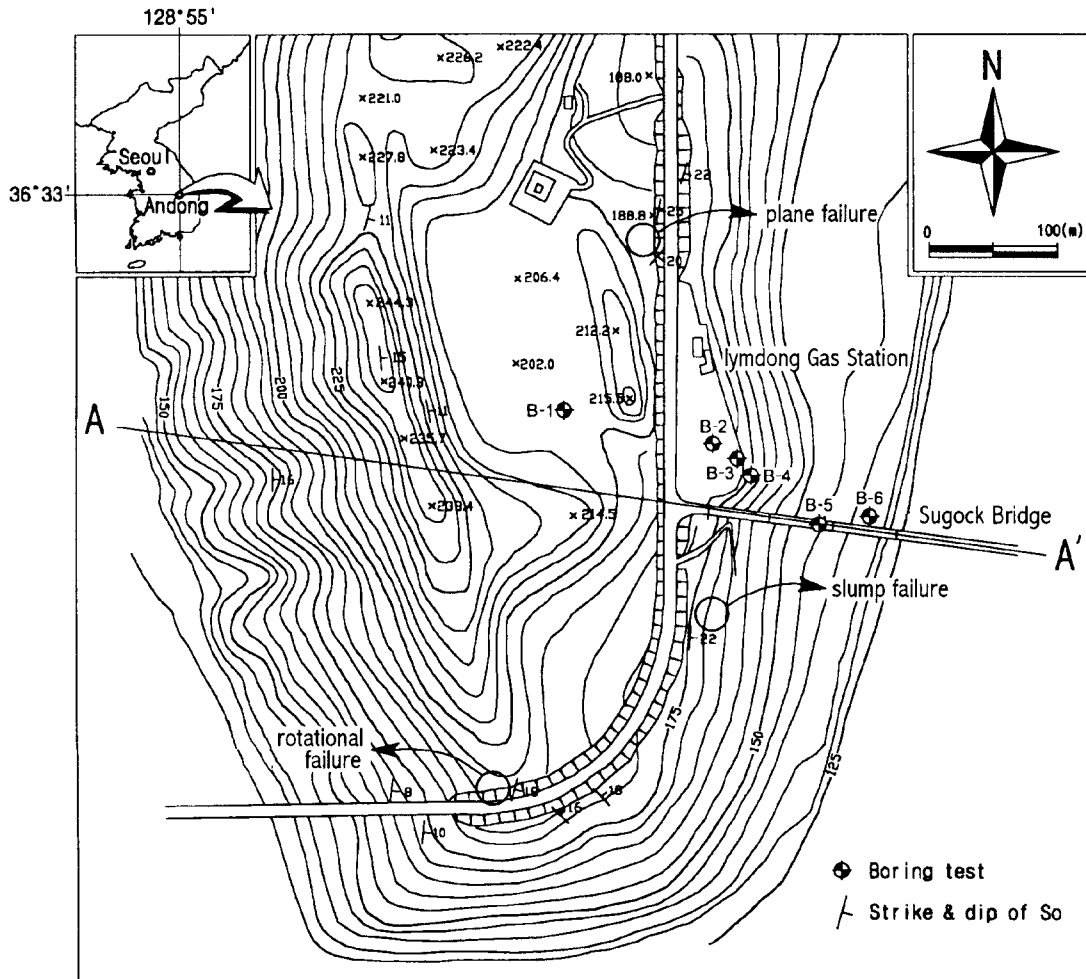
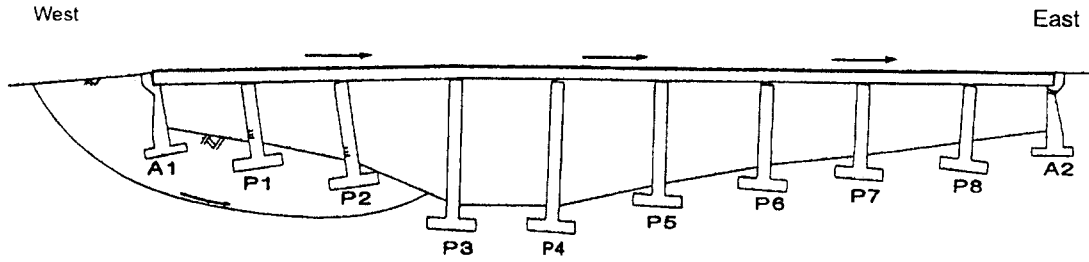


Fig. 13. Location of study area



- Abut 1 : settlement (55cm)
- Pier 1 : settlement (40cm)
- Pier 2 ~ Pier 8, Abut 2 : no settlement (within the surveying error range)
- Foundation ground of Pier 1, Pier 2 : lateral movement (70 ~ 90cm)
- Upper plate : lateral movement (A1 → A2 direction ; 20 ~ 25cm)

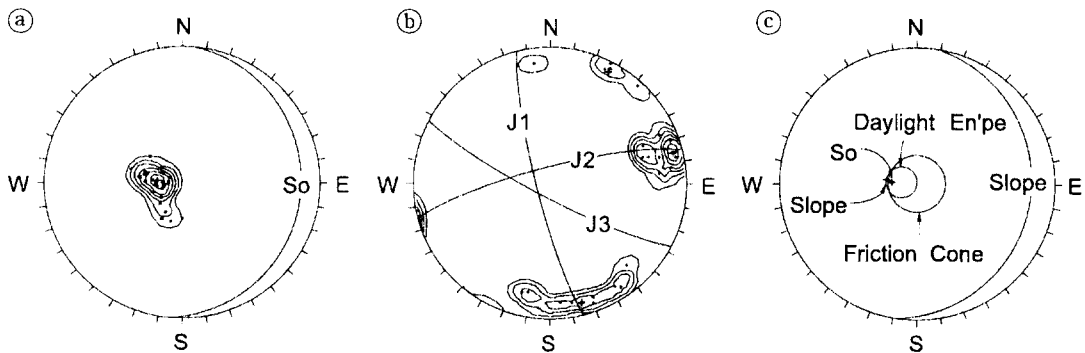
Fig. 14. Deformation of the Sugock bridge (Korean Geotechnical Society, 1995)

3.3.2 지반조사

연구 지역은 경상퇴적분지의 북쪽 연변부에 위치한다. 연구 지역 내지표에서의 주된 층리 방향도 NE / SE 경사 방향으로 모두 동쪽으로 저경사한다(Fig. 15. ㉑).

연구 지역 내에서 관찰되는 백악기 경상누층군의 동화치층은 주로 적색 셰일과 회백색 사암의 호층으로 구성되며 수 매의 역질 조립 사암 내지 역암층준이 협재된다. 일반적으로 셰일은, 고화가 덜 된 경우, 건설에 대한 내구성이 상당히 떨어지게 된다. 특히 셰일이 사암과 호층을 이루고 있는 경우에는 침투수가 층리면을 따라 흐르면서 윤택 작용을 할 수 있으며, 상대적으로 투수성이 낮은 셰일 층준 내에 간극수압이 유발될 수도 있다(Walkinshaw & Santi, 1996).

Fig. 15. ㉑에 의하면 연구지역에서는 세 방향의 절리군이 우세하게 발달하며 Fig. 15. ㉒는 이 지역에서 발달하는 층리면에 대한 사면의 기하학적 불안정성을 투영한 결과이다. 이에 의하면 마찰각의 크기에 따라 평면 파괴의 가능성이 존재하는 것으로 해석된다.



㉑ bedding plane, ㉒ joint set, ㉓ plane failure analysis (friction angle 17°)
So : bedding plane ; J1, J2, J3 : joint sets

Fig. 15. Stereographic projection of the discontinuity

시추조사 결과 코아에서 관찰되는 층리면의 경사는 일정한 심도까지 약 50°의 급한 경사를 보이다가 그 심도 이하에서는 다시 15° 내외로 지표면에서와 같은 경향을 보이는데 (Fig. 15.), 이는 하부 지반 내의 일종의 구조적인 불연속면의 존재를 지시하는 것으로 해석된다. 이 불연속면은 사암 블록이 풍화받은 셰일 층준을 따라 rotational sliding을 일으켜 형성된 것으로 판단된다. 이때 sliding면의 scarp는 시추공 B-1과 B-2 사이에, toe는 2번 교각과 3번 교각 사이에 위치하는데 이는 3번 교각이 수곡교가 건설된 골짜기의 최저 표고 부분이기 때문이다(Fig. 17).

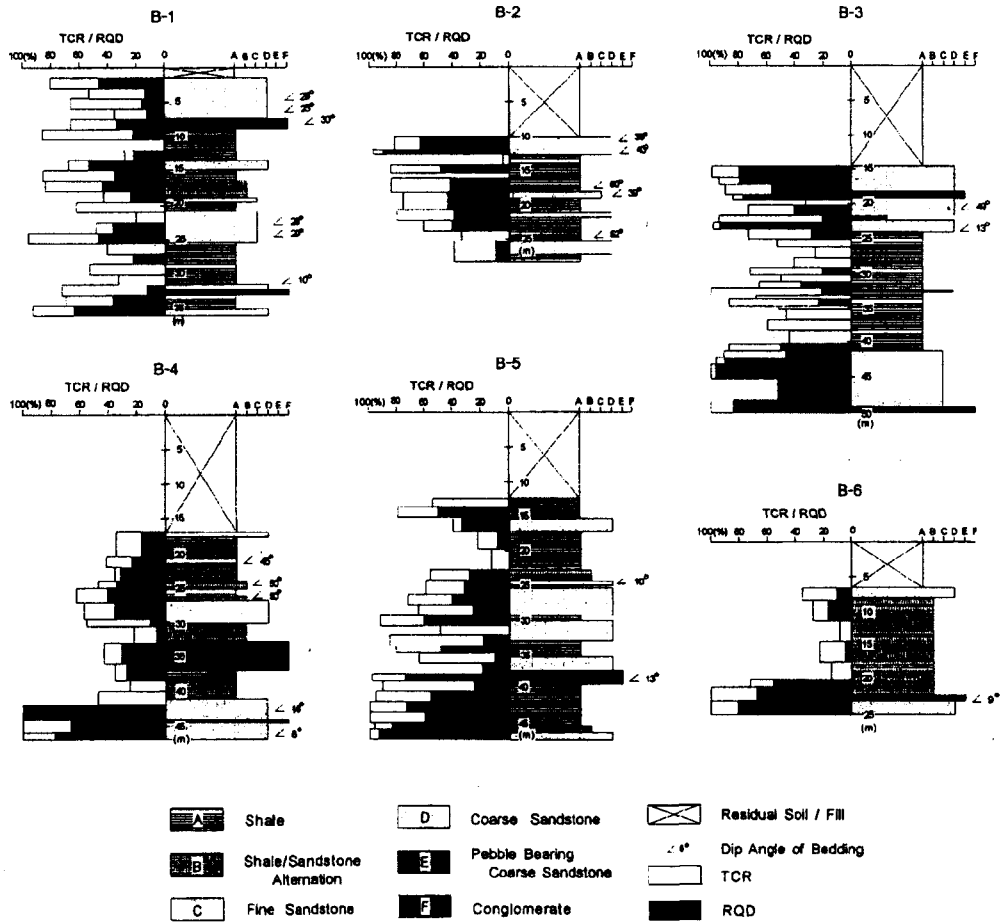


Figure 16. Results of core logging

3.3.3 전산 해석

해석 단계는 수곡교의 건설과 저수지의 저수를 고려하였다. Stage ④는 교량 완성 이전, stage ⑤는 교량 건설 직후, 저수지 생성 이전의 상태를 고려하였다. 그리고 stage ③는 입하댐 건설이후 저수지 최저수위(E.L. 149.81m)를, stage ④의 고수위는 과거 최고 수위(E.L. 162.81m), stage ③와 stage ①에서는 저수위 급강하에 의한 사면의 불안정화 상태를 가정하여 저수지의 수위는 각각 150m와 140m로 설정하였다.

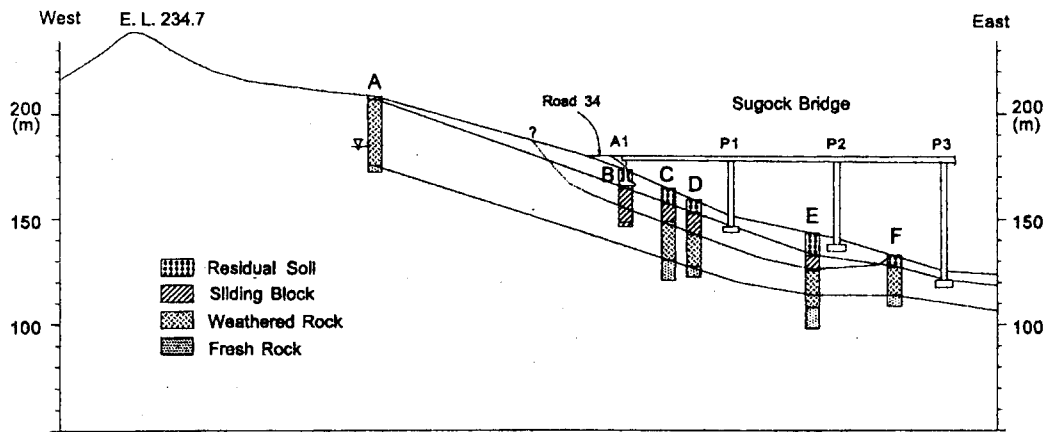


Fig. 17. Geological cross section (A-A' section at Fig. 13.)

STABL5M 프로그램을 이용하여 한계평형해석을 실시하였다. 해석 결과 연구 지역 내의 사면은 교량 가설 이전부터 일반적인 구조물 하부 지반으로서의 허용 안전율 이하로 나타나고 있으며, 교량 가설로 인하여 안전율이 상당히 낮아졌고 저수로 인하여 사면은 붕괴 직전에 이른 것으로 해석된다. 이때 발생하는 예상 파괴면은 모두가 1번 교대와 1번 교각은 포함하나 2번 교각은 포함하지 않는 원호 파괴면을 형성하며 이는 그림 2의 지반파괴 유형과도 어느 정도 일치하는 양상을 보인다. Stage ②, ③, ④에서 계산되어지는 안전율은 모두 1을 약간 상회하는 상태를 보임으로서 본 사면의 파괴 양상이 파괴가 진행중인 것과 일치하는 것으로 볼 수 있다. 저수지 주변 사면의 불안정 상태를 가정한 stage ⑤와 ⑥에서는 안전율이 1 이하로 해석된다. 각 해석단계에서의 예상 파괴면은 Fig 18.에 보인다.

Table 4. Minimum safety factor at each stage

	stage ①	stage ②	stage ③	stage ④	stage ⑤	stage ⑥
F.S.	1.384	1.195	1.048	1.109	0.943	0.943

FLAC 프로그램을 이용하여 지반 변위에 대한 해석을 실시하였다. Fig. 18.에서는 각 변위량 확인점에서 각각의 수평 및 수직 변위량을 보인다. 해석 결과에 의하면, stage ①의 초기 평형 상태에 교량이 건설되면서 1번 교대의 경우, 수평 변위 13.94cm, 침하량 47.17cm가 발생하여 교량의 최대 수평변위 허용량 10cm (한국지반공학회, 1995)를 이미 초과하기 시작하였음을 알 수 있다. 임하담 건설로 인한 저수지의 수위 상승은 위 변위량을 더욱 증가시켰으며 변위량은 저수위 급하강 시 최대가 된다.

변위는 1번 교대 부근에서 가장 큰 변위를 보임으로서 한계평형해석에서 최소 안전율을 보이는 예상 원호 파괴면이 1번 교대 및 1번 교각을 지나는 것과 유사한 결과를 보인다. 이러한 변위가 1번 교각과 2번 교각에 이어지며, 3번 교각의 경우에는 실제 관찰 결과(Fig. 9.)와 동일하게 변위가 거의 관찰되지 않았다.

한편, sliding block의 바로 하부의 풍화암반에 해당하는 T2 / T4 에서는 거의 변위가 발생하지 않았으며, T2 / T4 의 상부인 sliding block에 해당하는 T1 / T3 에서는 T2 / T4 에 비하여 변위량이 급격하게 증가하는 경향을 보이며, sliding block 및 그 상부에 집중되어 발생하는 양상을 보인다. 이는 지반의 거동이 과거의 sliding block 을 따른 변위, 즉 고기 sliding면의 재활성에 큰 영향을 받았음을 알 수 있다.

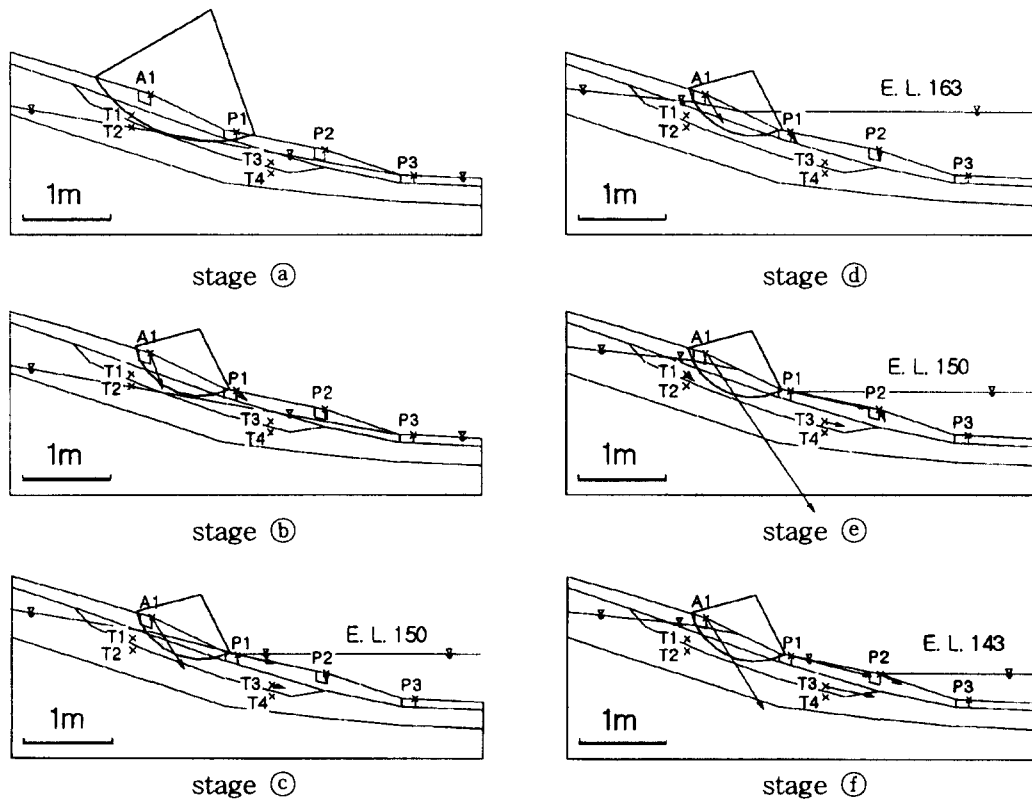


Fig. 18. Results of numerical analysis on each stage

* Failure plane shown is that of min. F.S. calculated at each stage.

* Displacement below 5cm is not plotted.

3.34 결과 분석

연구 지역은 백악기 경상누층군의 퇴적암 분포지역으로, 지표 지질조사 결과 단사 구조를 보이고, 그 경사 방향은 수곡교 하부 지반 사면에 대하여 전형적인 평면 파괴 형태를 보인다. 시추 결과에 의하면 지표에서 관찰되는 일반적인 층리의 경사와는 달리 일정 심도까지 층리 경사가 약 50° 정도로 관찰되는데 이는 지반 내에 지질구조적인 불연속면, 즉 단층이 존재함을 지시한다.

위 단층은 사암에 비하여 풍화에 약한 세일층준 위에 사암 암괴가 rotational sliding을 일으켜 형성된 지질 구조로 판단된다(Fig. 19.). 파괴면의 scarp는 시추공 B-1과 B-2 사이에 위치하는 것으로 추정되고, toe는 2번 교각과 3번 교각의 사이에 위치하는데 이 때문에 3번 교각은 변형되지 않았으며, toe가 2번 교각과 3번 교각 사이에 위치하는 이유는 3번 교각이

수곡교가 건설된 골짜기의 최저 표고 부근이기 때문이다.

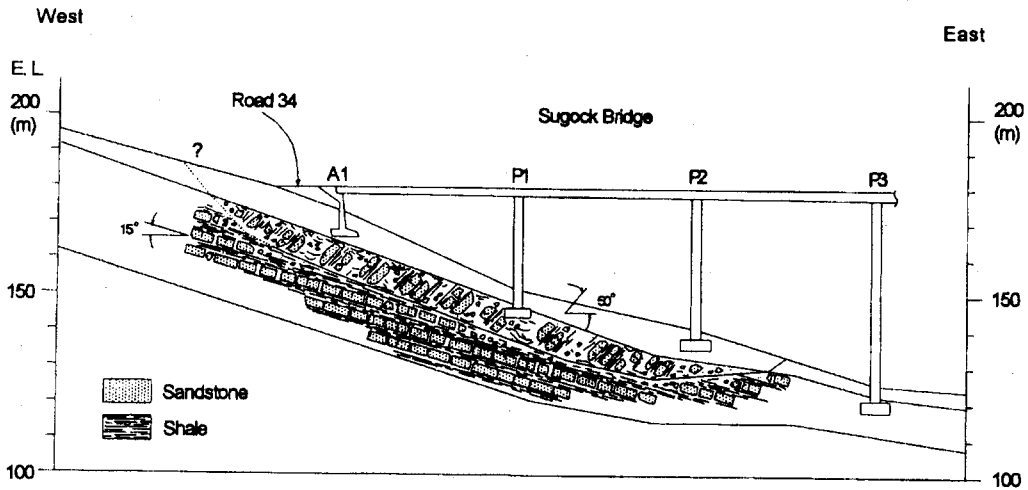


Fig. 19. Supposed Geological cross section

지반 내에 관찰되는 불연속면의 발달 과정은 다음 Fig. 20.과 같이 고려할 수 있다. 즉 사암층준 내에 발달하는 수직 절리들이 sliding plane의 역할을 한 세일층준을 통과하여 서로 활성화되는 과정에서 원호 형태로의 파괴가 전이되었던 것으로 추정되며, 이는 지표에서 관찰되는 여러 가지 형태의 사면 파괴(Fig. 13.)를 고려할 때 그 가능성이 높다.

수치해석 결과 수곡교 하부 지반은 교량 가설 이전부터 하부에 존재하는 단층면으로 인하여 이미 불안정한 상태이었으며 교량의 가설로 인하여 사면의 안전율의 저하를 초래하였고, 저수지의 생성으로 인한 지하수위의 상승은 사면의 안정성을 더욱 악화시켰다. 또한 수치해석 시 교량의 변형 상태는 과거 측량 자료와 흡사한 양상을 보였다(한국지반공학회, 1995)

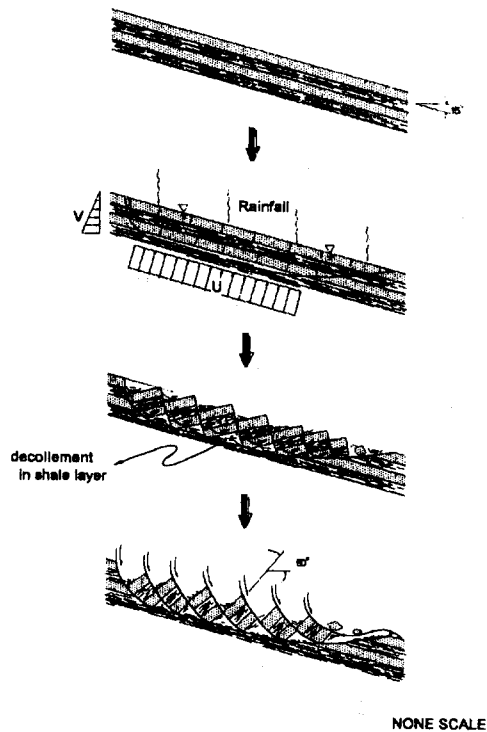


Fig. 20. Explanation on the failure mode

3.4 경상계 퇴적암 지역에서의 산사태 (부산 황령산 터널 사면 붕괴)

3.4.1 서언

부산광역시 황령산 터널 입구부의 산사면에 1999년 9월 집중 강우 직후 산사태가 발생한 바 있다. 부산광역시(1999)에 의하면 부산항 개발 사업의 일환으로 도로개설을 위하여 사면의 선단부를 절취, 도로를 개설하였으며 이로 인하여 산사태가 유발되었다(Fig. 21.). 이에 본 고에서는 이를 간략히 소개하였으며 관심있는 이는 부산광역시(1999)를 참고하기 바란다.

3.4.2 지질 조건 및 산사태의 원인

산사태 지역의 지질은 백악기 경상계 응회암질 퇴적암 지역으로서 견고한 사암과 풍화에 약한 녹회색 이암의 호층으로 이루어져 있다. 견고한 사암층에는 수직 절리가 발달되어 있어 우수의 유입이 용이한 상태이며 이암은 차별 풍화를 받는다(Fig. 22.). 앞의 수곡교의 예에서와 마찬가지로 견고한 사암층과 호층을 이루고 있는 녹회색 이암은 유입되는 우수에 의하여 풍화되어 점토화되었다.

층리면의 방향은 도로사면 쪽으로 15~20° 정도로 경사되어 있어 평면파괴의 조건을 만족시키고 있으며 산사태 이전에 이미 사면 상부에 인장균열이 발달하고 있었다. 게다가 산사태 발생 시에는 집중 호우가 있었으며 집중 호우에 의하여 암층 내에 간극수압이 급격히 증가, 사면을 파괴시킨 것으로 판단된다.

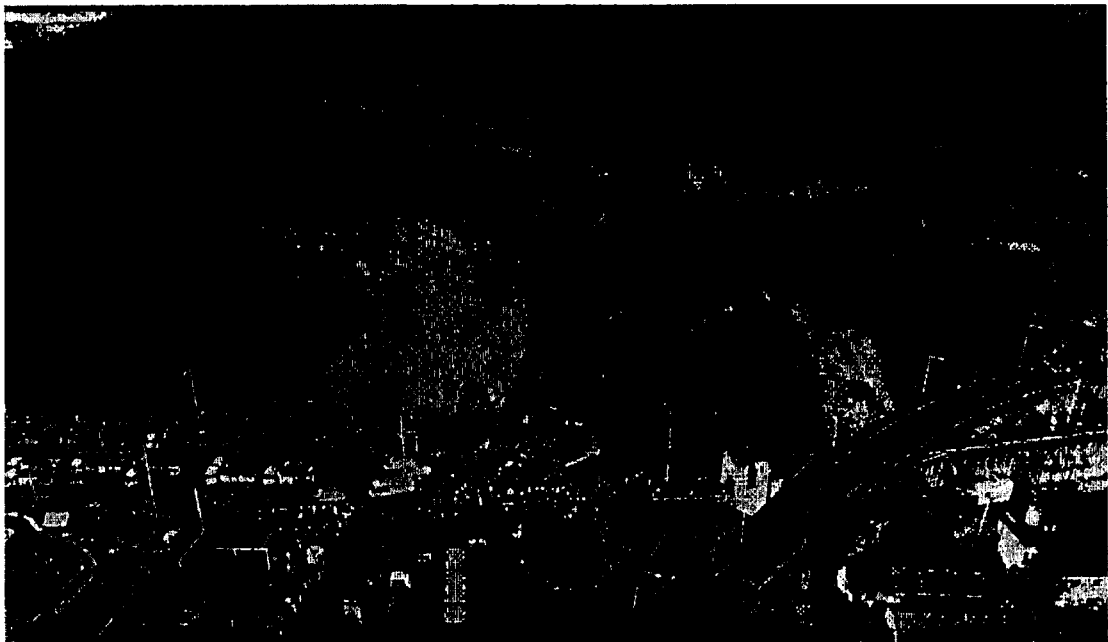


Fig. 21. General View of the Slope Failure

Fig. 22.에서는 견고한 사암 버력과 점토가 뒤섞여 있어서 순수한 점토층보다 더 두꺼워진 모습이다. Fig. 22.에서 보이는 면이 주요 활동면인데 점토층 축방향으로 굽힌 자국이 관찰되며 이는 사암 버력이 산사태 도중에 회전하고 부서지면서 생성된 것으로 수곡교의 예에

서 보인 Fig. 20.과 그 생성 과정이 같다. 또한 점토층 상부에 황갈색 물질이 피복되어 있는데 이는 지표면의 황갈색 붕적층 중 세립분이 침투수에 의하여 유실되는 증거로 보인다.

사면 내에 침출수가 나타나는 곳은 여러 위치에서 확인되며 Fig. 23.는 파괴 이후에 인장균열면에서 침출수가 흘러나오는 양상을 보이고 있다. 그림 중앙의 검게 나타난 부분이 침출수가 흘러나오는 부분이다.

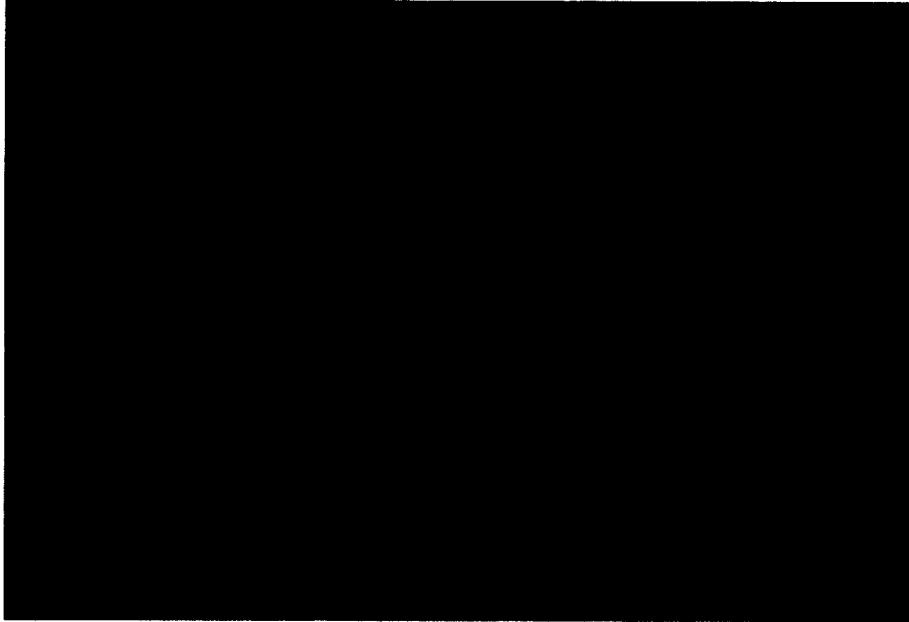


Fig. 22. Sandstone interbedded with Clay layer



Fig. 23. Water Seepage on the Tension Crack along the Clay Layer

4. 결 론

산골터널의 경우 터널 변상의 주원인은 터널과 사교하는 단층대를 따른 지반의 이완이 가장 큰 요인으로 작용하였다. 따라서 영동선 장대터널의 설계에 있어서는 석탄채굴적과 단층대의 분포 상태를 면밀히 분석하여 터널 노선을 결정, 단층의 영향을 최소화하고자 노력하였다.

수곡교의 경우, 교량 설계 시 교량 기조지반에 대한 이해가 부족하였던 사례로 꼽을 수 있겠으며 황령산 사면 붕괴의 경우 경상계 퇴적층의 지질 공학적 특성을 설계에 제대로 반영하지 못하여 기인된 사고로 이해된다.

앞에서 살펴본 바와 같이 지반조사를 통한 단층의 존재유무를 포함하여 지반 상태를 파악하는 일은 무엇보다도 중요하다고 하겠다.

특히 과거와는 달리 불리한 지반 조건에서의 토목 시공이 증가되어 가는 추세를 감안할 때 지반 조사의 중요성은 더욱 증대되어질 것으로 판단된다.

참고문헌

- 강상호, 1999, 기존사면 붕괴면의 재활성에 의한 교량의 변형에 관한 연구 ; 안동 임하댐 주변 수곡교의 예 : 서울대학교 자연과학대학 지질학과 석사학위논문.
- 부산광역시, 1999, 부산항 3단계 항만배후도로 산사태 원인규명 및 복구대책수립 보고서.
- 영주지방철도청, 1996, 통리-심포리간 산골터널 보강공사 실시설계보고서.
- 영주지방철도청, 1997, 영동선 통리-심포리간 산골터널 긴급보강공사 준공보고서.
- (주)대우, 1999, 영동선 동백산-도계간 철도이설 건설공사 지반조사보고서.
- 한국지반공학회, 1995, 안동 수곡교 서측단 교량 구조물 안전진단 및 보강 공법 검토 연구보고서.
- Gary, M., McAfee, R. Jr., and Wolf, C. L., 1972, Glossary of Geology : American Geology Institute, Washington D. C.
- Piggot, R. T. and Eynon, P., 1977, Ground Movements Arising from the Presence of Shallow Abandoned Mine Workings, in Large Ground Movements and Structures : Wiley, New York.
- Széchy, K., 1973, Art of Tunneling : 2nd ed., Akadémiai Kiadó, Budapest, p.293.
- Walkinshaw, J. L. & P. M. Santi, 1996, Shales & Other degradable materials. In special report 247 : Landslides - Investigation and Migration : (A. K. Turner and R. L. Schuster, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.555~576.