



# 기반암의 파쇄대 특성을 고려한 지하차도 기초 보강사례

이근하<sup>1)</sup>, 양성돈<sup>2)</sup>, 윤지남<sup>3)</sup>, 정현철<sup>4)</sup>, 박사원<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> 포스코건설 상무(토질 및 기초 기술사)

<sup>2)</sup> 포스코건설 차장(토목구조기술사)

<sup>3)</sup> 포스코건설 과장

<sup>4)</sup> 에스코컨설턴트 전무(토질 및 기초 기술사, 공학박사)

<sup>5)</sup> 에스코컨설턴트 차장(공학박사)

## 1. 서론

국내에는 편마암과 화강암 지대가 넓게 분포하고 있으나 최근 들어 도로의 양호한 선형 및 종단 확보를 위해 불가피하게 파쇄대 및 연약대에 건설되는 대형구조물(지하차도, 터널, 교량 등)이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 지질학적 취약대의 특성상 구조물의 지지력 및 침하에 대한 안정성 검토와 보강대책의 필요성이 부각되고 있다.

본 고에서는 파쇄대가 존재하는 기반암 상부에 지하차도 구조물을 계획·설계하는 경우, 하부지반 지지력 증대 및 침하량 감소 목적으로 적용할 수 있는 “기초보강공법”에 대하여 보강효과 및 적정 설치간격을 수치해석적으로 예측하고 실제 시공시 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다. 이를 위해, ○○지역을 대상으로 수행된 시추조사, 물리탐사 및 실내실험결과 등을 분석하고, 파악된 파쇄대의 분포와 공학적 특성을 근거로 하여, 상부구조물인 지하차도의 지내력을 확보할 수 있는 효과적인 보강대책을 검토하였다. 또한, 보강사례에서 조사된 공법(이중관 고압분사 공법, 삼중관 고압분사 공법, 마이크로파일) 별로 적정 보강심도를 선정하고 수치해석(Plaxis 8.2 프로그램)을 통해 설치간격 등을 변화시켜가면서, 동일한 안정성을 기준으로 가장 효과적인 공법의 제원을 비교·검토하였다.

## 2. ○○지역 파쇄대 특성

본 논문에서는 파쇄대가 존재하는 기반암 지역에 지하차도 구조물을 시공하려는 경우, 안정성 및 시공성 확보를 위해 어떠한 제반 검토사항이 요구되는 지, 효과적인

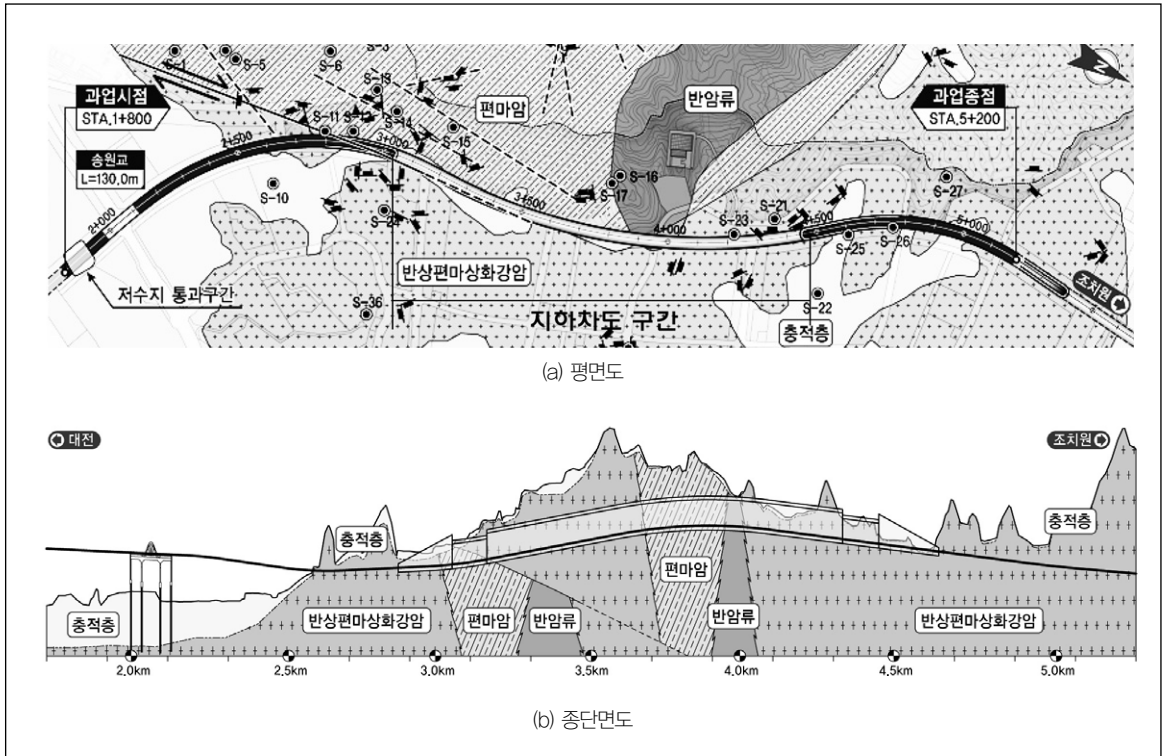


그림 1. OO지역 지질분포

대책공법은 무엇인지에 초점을 맞추고 이를 중점 검토하였다. 검토 대상지역에 대한 지질분포 현황, 파쇄대의 위치 및 구조물 현황 등에 대해서 상세히 언급하면 다음과 같다.

### 2.1 지질현황

OO지역 국도건설공사 구간은 대부분의 지역에서 선캄브리아기 편마상 화강암이 분포한다. 지하차도가 계획된 구간에는 편마암과 화강암의 암종경계부가 노선과 나란히 형성되어 있으며 층적층이 출현하는 일부 구간에서는 파쇄대의 발달이 예상된다(그림 1 참조). 또한, 금강 하천수계와 인접해 있어 지하수위가 높을 것으로 예상되는 지형이다.

### 2.2 파쇄대 분포현황

전기비저항 탐사결과에 의하면 화강암과 편마암의 암종경계부 내에 파쇄대로 판단되는 수평 및 수직적인 저비저항 분포대가 다수 존재하는 것으로 분석되었으며 지하차도 통과구간에는 풍화대 및 불규칙 암반구간이 산발적으로 분포함에 따라 확인 시추조사를 수행하였다.

확인 시추조사 결과, 지하차도 기초심도 이하의 구간에서 파쇄대가 확인되었으며(그림 2) 절리면 전단시험 및 JRC 레이저 분석 등을 토대로 불연속면의 특성을 파악하였다.

그림 3은 확인시추결과이며 특히, 지하차도 종점부 바닥면의 RQD는 0으로 암질이 매우 불량한 것으로 나타났다. 일축압축 강도시험을 위한 시료채취가 용이하지 않아

# 기술기사

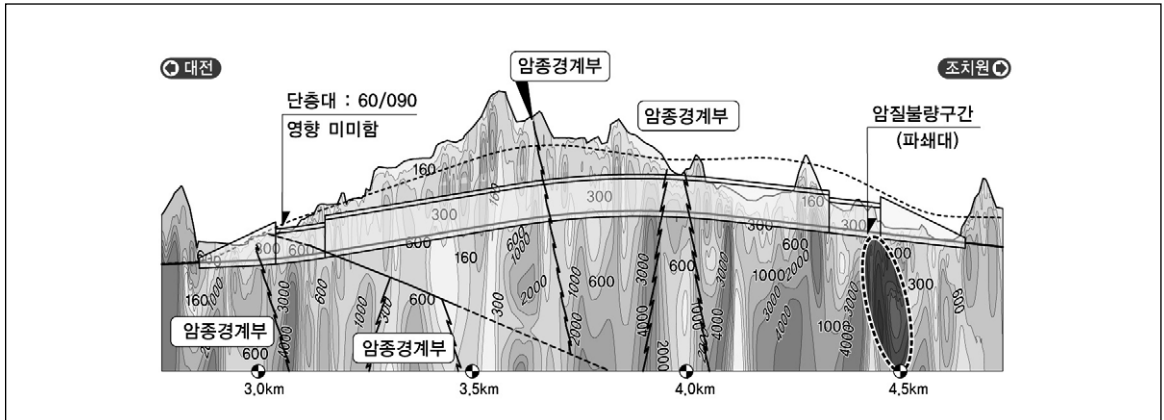


그림 2. 전기비저항 탐사결과



그림 3. 파쇄대 확인시추 결과

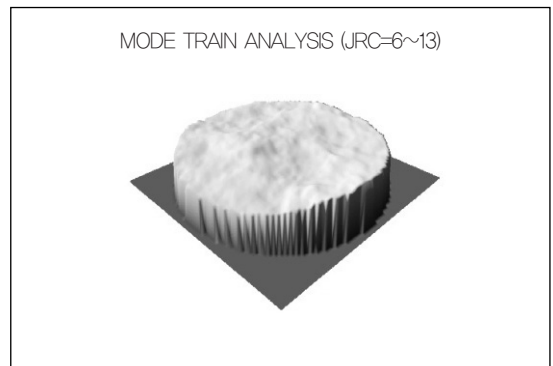


그림 4. 절리면 거칠기(JRC 레이저분석)

표 1. 파쇄대 암반의 물리적, 역학적 특성

구분	단위중량(kN/m³)	내부마찰각( $\phi$ )	점착력(MPa)	절리면거칠기(JRC)	변형계수(MPa)	일축압축강도 (MPa)	RMR
특성치	23.0	29.5~32.0°	0.04~0.27	6~13	1,526	5.0~8.0	12

점하중강도시험(Point Load Test)값으로부터 환산하거나 RMR 값에 의해 추정해보면 일축압축강도는 약 5~8 MPa 정도의 범위로 추정된다(표 1 참조). 강도 및 RQD 뿐만 아니라 지하수위도 G.L.(-)2.4m의 위치해 있어 지하차도 기초부 보강의 필요성이 부각되었다.

## 3. 구조물 기초보강

### 3.1 기초 보강의 필요조건

암반위에 기초를 설계할 때에는 토사지반과 마찬가지로 과도한 침하나 갑작스런 파괴가 일어날 위험성을 사전에 검토해야 한다.

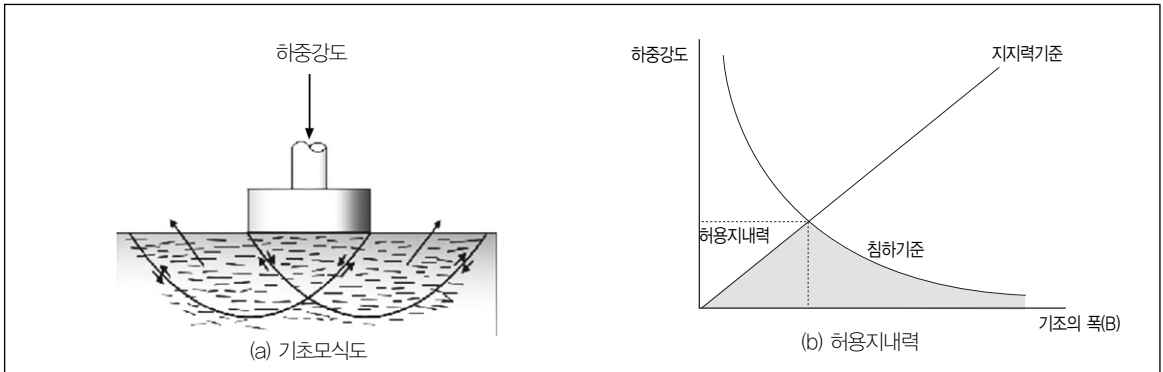


그림 5. 지지력과 침하 관계

암반의 상태를 정량적으로 등급화하고 그에 따라 등급별로 암반의 극한지지력을 정하여 기초를 설계할 수 있으나, 일축압축강도가 작고 불연속면의 간격이 매우 좁으며 풍화의 상태가 심하거나 세편상태(RQD<25)인 암반은 사질토로 간주하고 기초의 허용지내력을 검토한다(Hoek, 1983). 기초의 허용지내력이란 극한지지력에 대해 소정의 안전율(최소안전율 3.0)을 가지며 침하량이 허용치 이하가 되게 하는 하중강도 중의 최대값을 의미한다. 즉, 침하기준

을 만족하는 동시에 소요의 지지력을 확보할 수 있어야 한다(그림 5 참조). 이러한 지내력은 기초의 폭원 및 지반조건 등과 밀접한 관련이 있으므로 현장여건에 적합한 지내력 확보방안 및 기초계획을 수립하는 것이 바람직하다.

허용지내력에 의한 검토방법 외에 암반의 파괴규준을 이용하면 작용하중하의 암반의 상태를 간접적으로 평가할 수 있다. 즉, 파괴시의 최대주응력( $\sigma_{1f}$ )과 기초지반의 작용하중 강도에 대응하는 최대주응력( $\sigma_1$ )을 서로 비교하

표 2. 암반의 파괴규준 및 기초 검토조건

구분	파괴규준	기초 검토조건
Hoek & Brown 파괴규준(1997)	$\sigma_{1f} = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad \text{식(1)}$ <p>여기서, <math>\sigma_{1f}</math> : 파괴시 최대주응력  <math>\sigma_3</math> : 작용하중하의 최소주응력  <math>\sigma_c</math> : 암반의 일축압축강도  <math>m_b, s, a</math> : 불연속면 관련 계수</p>	$\frac{\sigma_{1f}}{\sigma_1} > 3.0$
Mohr-Coulomb 파괴규준	$\sigma_{1f} = \sigma_{cm} + k \sigma_3 \quad \text{식(2)}$ <p>여기서, <math>k</math> : <math>(1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)</math>  <math>\sigma_{cm}</math> : 암반의 일축압축강도  <math>c</math> : <math>\sigma_{cm} / (2 \sqrt{k})</math></p>	$\frac{\sigma_{1f}}{\sigma_1} > 3.0$

# 기술기사

표 3. 기초 보강사례

구분	이중관 고압분사	삼중관 고압분사	마이크로 파일
개요도			
보강 사례	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 동해 - 주문진간 ○○교 기초하부 보강</li> <li>• 청계천 복원사업 교대하부 기초 보강공</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 서울지하철 9호선 고가기초 하부보강</li> <li>• 중앙고속도로 단양-제천간 ○○교 교각기초 공동부 보강</li> <li>• 부산 여객터미널 부두 기초지반 보강공사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ○○원자력 발전소 기초보강</li> <li>• ○○대교 앵커리지 기초지반 보강설계</li> <li>• 영등포 민자역사 연약기초지반 보강</li> </ul>
경제성	단위체적당 공사비 비율(2.2)	단위체적당 공사비 비율(1.0)	단위체적당 공사비 비율(5.4)

여 파괴여부를 평가할 수 있으며, 일축압축강도가 작고 암의 파쇄정도가 심한 경우 AASHTO(1996)에서 제시한 최소안전율 3을 적용하여 전반적인 안정성을 사전에 평가할 수 있다.

### 3.2 기초 보강공법 적용사례

국내현장을 중심으로 구조물 기초보강 사례를 살펴보면, 하부지반의 풍화정도, 균열의 유무, 침하저감 및 지지력 증대의 필요성, 공동존재 등 현장의 필요 요구조건에 따라 시공성과 안정성이 확보될 수 있는 공법을 중심으로 기초보강이 이루어진 것으로 조사되었다(표 3 참조).

이중관 고압분사 및 삼중관 고압분사 공법의 경우는 기초하부의 강성을 증가시키는 역할을 하며 공동충전에도 매우 효과적인 것으로 보고되고 있으며(박영호 등, 2004), 마이크로 파일은 그물식의 보강형태 또는 하중을 직접 지지하는 보강방식을 이용하여 지지력을 증가시킬 수 있으며 도심지의 협소한 공간에서 효율성 및 적용성이 높아지고 있다(임종철 등, 2006).

### 3.3 기초 보강공법 비교

사례에서 살펴본 바와 같이, 파쇄대 지역의 기초 하부 지반을 보강하는 방법은 이중관 고압분사공법, 삼중관 고압분사공법 및 마이크로파일 공법 등을 들 수 있다. 먼저, 이중관 고압분사 공법은 절삭과 동시에 원지반토와 그라우트재를 혼합·교반하는 원리로 토사구간에서는 시공성이 좋으나 균열과 파쇄가 발달해 있는 암반지역에서는 수압파쇄(Hydraulic Fracture) 및 지표면 융기 등의 문제가 발생되기 쉽다.

삼중관 고압분사 공법은 40~80 MPa의 초고압수를 지중에 먼저 분사하여 지층을 절삭한 후 절삭토를 배토하는 과정에서 지중에 형성된 공동에 시멘트계 주입재를 충전하므로 균등한 개량체를 형성할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 삼중관 고압분사 공법은 풍화파쇄가 심하여 기초지반의 지지력 증대, 지반변형의 억제, 침하방지, 측압 및 투수성 감소 등을 달성할 목적으로 활용되는데, 자갈크기의 절삭토는 공내 존치되어 시멘트와 혼합되어 고결체를 형성한다.

표 4. 기초 보강공법 비교

구분	이중관 고압분사	삼중관 고압분사	마이크로파일
개요도			
적용지반	토사 및 풍화암	토사, 풍화암 및 파쇄성 연암	토사, 풍화암 및 연암
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>파쇄성 암반에도 시공가능하나 유효 구근의 크기 감소예상</li> <li>적정압: 20~40 MPa</li> <li>유효경: D600~800mm</li> <li>일축압축강도: 8~15MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>배도된 이토를 재처리한 후 시멘트를 혼합하여 모르타르의 주입재로 충전</li> <li>적정압: 40~80 MPa</li> <li>유효경: D1000~2500mm</li> <li>일축압축강도: 10~20MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>소형천공장비 이용으로 협소하고 접근성이 불량한 지역도 적용가능</li> <li>적정압: 0.5 MPa</li> <li>유효경: D200~300mm</li> </ul>
비고	JSP 공법	SRC, SIG, RJP 공법	Micropile 공법

마이크로파일 공법은 직경 150~300mm 정도의 보링 공에 강봉 또는 철근을 삽입한 후 그라우팅 재료를 주입 하여 소구경의 현장타설말뚝을 완성하는 것이며, 협소한 공간에서 활용성이 극대화되나 확실한 보강효과(지지력 증가, 침하억제)를 얻기 위해서는 타설심도 및 설치간격 측면에서 타공법에 비해 불리하다는 단점이 있다. 각 보강공법별 적용지반 및 특징 등을 비교하면 표 4와 같다.

한편, 기초 보강공법에 의해 개량된 지반에 대한 설계 지반정수는 각 공법별로 식(3)에 의해 환산변형계수( $E_{comp}$ )를 산정하여 이를 수치해석에 활용할 수 있으며, 이를 토대로 허용침하량 및 부동침하를 만족하는 적정 설치간격(C.T.C)을 예측해 볼 수 있다. 여기서,  $A_g$ ,  $A_c$ ,  $A_s$ 는 암반, 콘크리트 및 철근의 단면적이며,  $E_g$ ,  $E_c$ ,  $E_s$ 는 암반의 변형계수, 콘크리트 및 철근의 탄성계수(kPa)를 의미한다.

$$E_{comp} = \frac{E_g \cdot A_g + E_c \cdot A_c + (E_s \cdot A_s)}{A_g + A_c + (A_s)} \quad \text{식 (3)}$$

## 4. 분석 및 고찰

본 분석에서는 ○○지역의 하중조건과 지반조건을 토대로, 허용지지력의 만족 여부를 다각적으로 검토하고, 아울러 수치해석(Plaxis 8.2 프로그램)으로 평가한 발생 침하량을 고려함으로써 허용지내력을 갖추는데 필요한 제반조건들을 분석하였다. 또한, 허용침하량을 초과하는 경우에는 기초 보강사례에서 조사된 공법(이중관 고압분사 공법, 삼중관 고압분사 공법, 마이크로 파일 공법)을 중심으로 적정 보강심도를 선정하고 설치간격 등을 변화시켜가면서, 동일한 안정성을 충족시키기 위한 제원을 비교·분석하였다.

### 4.1 해석단면 및 해석조건

지하차도 중점부 Box Type 구간에는 연장 30m (STA.4+400~STA.4+430) 정도의 파쇄대가 분포하며 파쇄대의 중심부의 위치가 가장 취약할 것으로 판단되는

# 기술기사

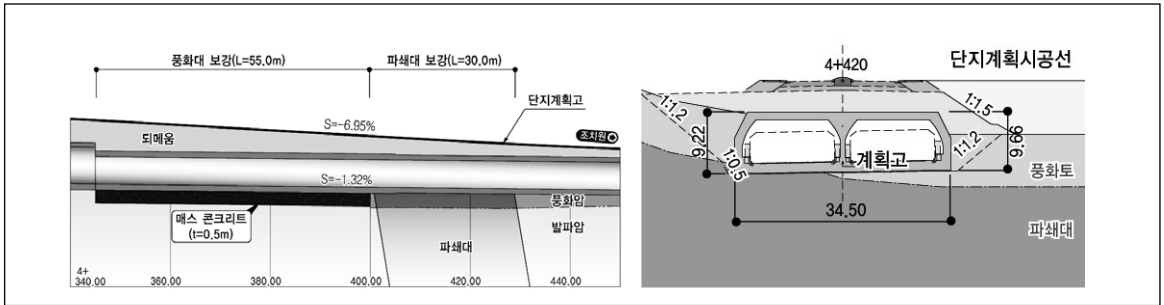


그림 6. 해석구간 및 대표단면

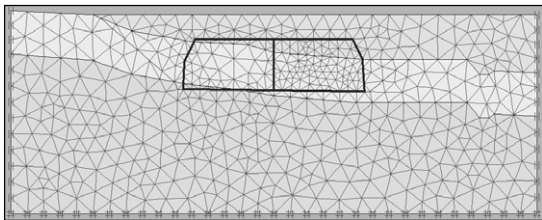


그림 7. 해석요소망(STA.4+420)

바, STA.4+420을 대표단면으로 선정하였다. 해석단면 상부의 토피고는 4.88m이며 지하차도 바닥부 편경사지역에는 풍화토가 최대심도 2.48m 정도로 분포하고 있다.

대표단면을 모델링하기 위하여 사용된 Plaxis 8.2는 탄·소성법에 기반을 두고 응력-변형 관계를 해석하는 유한요소해석 프로그램으로써 기하조건 모델링 후 요소망 자동생성, 구조물 자중 자동계산 및 시공단계별 해석 등을 수행할 수 있는 특징을 지니고 있다. 분석에 사용한 해석요소망은 (그림 7)과 같다.

## 4.2 허용지지력 검토

지하차도가 통과하는 하부지반의 암은 일축압축강도가 작고 풍화의 상태가 심하며 RQD가 0인 취약한 암질에 해당하므로 일반 토사로 간주하여 기초의 허용지지력을 검토하였다(Hoek, 1983). 각 단면별 허용지지력을 검토한 결과, 작용하중이 허용지지력을 초과하지 않는 안정한 수준으로 판단된다.

## 4.3 허용침하량에 따른 보강심도 선정

허용지지력 분석에서 나타난 바와 같이 전반적으로 기초의 지지력은 양호한 편이나, 기초하중과 흙의 자중으로 인해 발생하는 응력영향 범위내에서 침하량이 허용치를 초과하는 것으로 나타났다. 심도가 깊어질수록 침하량은 감소하는 경향을 보이나 허용치(25.4mm)를 초과하는 영역이 기초바닥면부터 5m 심도까지 분포하여 이를 보강영역(심도)으로 선정하였다.

표 5. 허용지지력 검토결과

구분	적용 토피고(m)	지지력			허용지지력 (kN/m <sup>2</sup> )	작용하중 (kN/m <sup>2</sup> )	판정
		구조물기초 설계기준(kN/m <sup>2</sup> )	수정 Meyerhof (kN/m <sup>2</sup> )	Bowles(1988) (kN/m <sup>2</sup> )			
STA4+400	5.76	1,050	454.30	407.47	407.47	369	안정
STA4+420	4.88	1,050	461.41	413.85	413.85	357	안정
STA4+430	4.00	1,050	447.65	401.50	401.50	317	안정

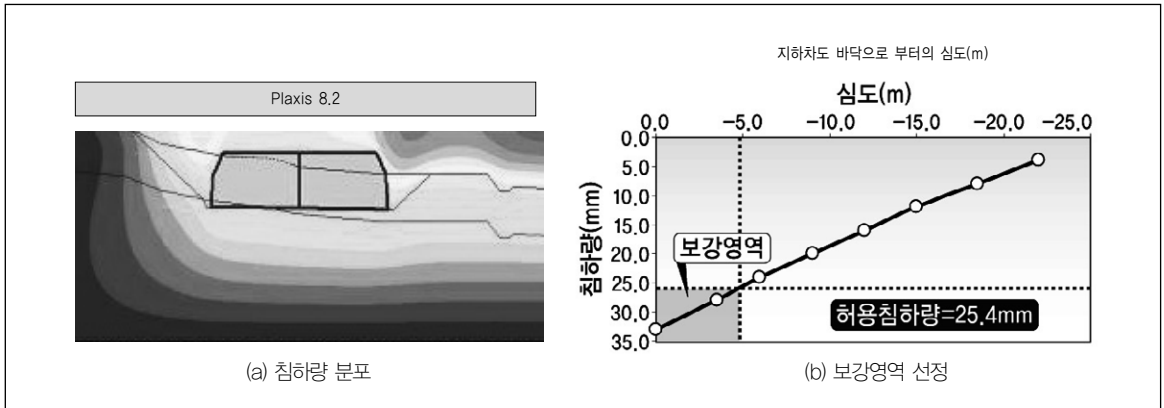


그림 8. 침하량 분포에 따른 보강영역 선정

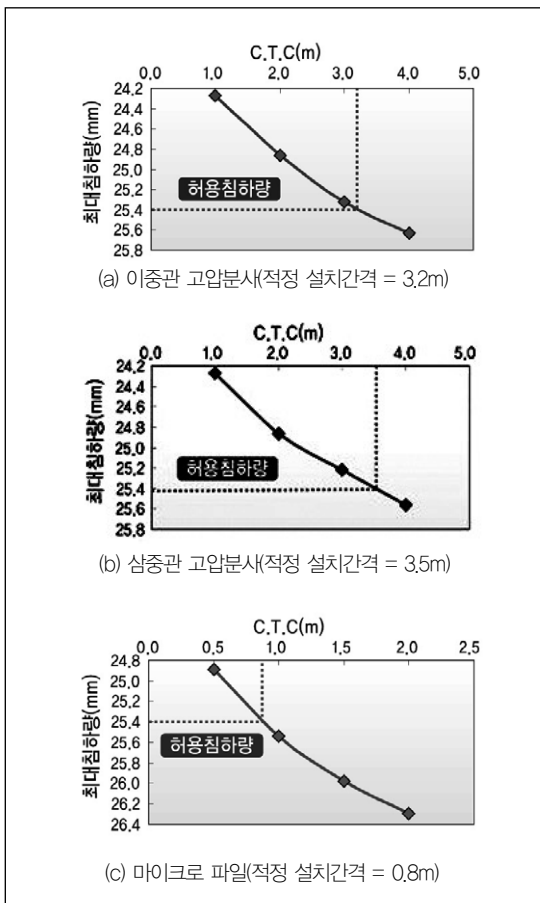


그림 9. 보강공법별 적정 설치간격

#### 4.4 기초 보강공법별 침하량 분석

각 단면별(STA. 4+400~430)로 극한지저력에 대한 소정의 안전율(FS=3)은 충족시키지지만(표 5) 침하량 기준을 초과하는 영역이 존재하므로(그림 8), 침하량 억제를 위한 기초 보강공법의 적용이 필요하다. (그림 9)는 각 공법별로 기초바닥부에서 발생하는 설치간격-최대침하량의 관계를 나타낸 그래프이다.

해석결과, 허용침하량을 만족시키는 적정 설치간격(C.T.C)은 삼중관 고압분사 공법이 3.5m로 가장 크게 나타났다. 유효경이 작은 마이크로파일 공법은 1.0m 이하의 설치간격이 필요한 것으로 분석되었다. 환산변형계수에 의한 제한적인 분석이긴 하나 동일한 침하억제 효과를 얻기 위해서는 삼중관 고압분사 공법이 가장 효과적임을 시사하는 분석결과이다.

#### 4.5 파괴규준(이론식)을 이용한 보강효과 분석

허용지내력에 의한 검토방법 외에 암반의 파괴규준을 이용하여 작용하중하의 지반상태를 평가한 결과, 파괴는 발생하지 않았으나 기초에 대한 최소안전율( $FS = \sigma_{\text{eff}} / \sigma_c$ ) 3.0에 미치지 못하는 것으로 나타났다.



기술기사의

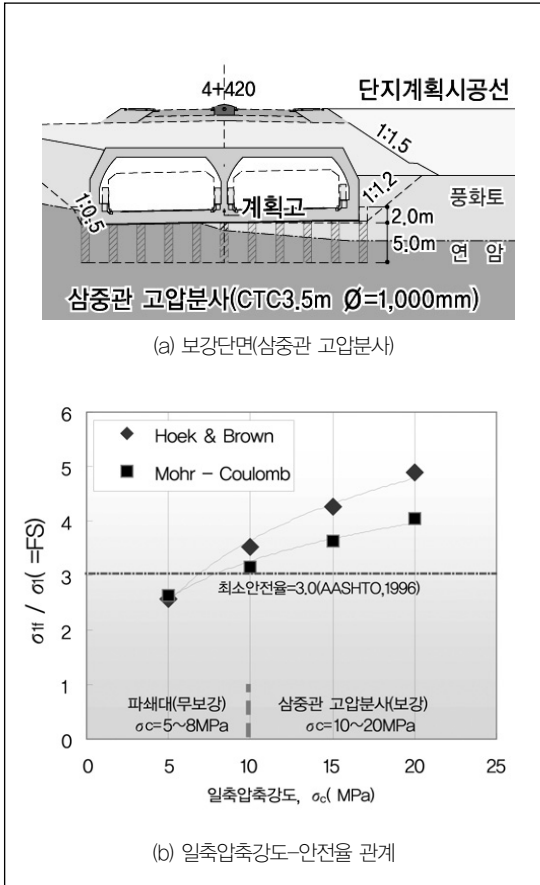


그림 10. 파괴규준을 이용한 보강효과 분석

(그림 10)에는 삼중관 고압분사 공법을 적용하는 경우의 보강단면과 일축압축강도-안전율의 관계그래프가 나타나 있다. 분석결과에 의하면, 암반의 일축압축강도가 5~8 MPa(무보강시) 범위에서는 AASHTO(1996)의 최소안전율 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났으나, 삼중관 고압분사 공법을 적용하여 10~20 MPa(보강시)의 일축압축강도를 확보할 경우에는 최소안전율을 상회하는 안정한 상태로 분석되었다.

5. 결론

- 1) 본 논문에서는 ○○지역의 하중조건과 지반조건을 토대로, 허용지지력의 만족 여부를 다각적으로 검토하고, 수치해석(Plaxis 8.2 프로그램)으로 평가한 발생침하량을 고려함으로써 허용지내력을 갖추는데 필요한 제반조건들을 분석하였다. 또한, 허용침하량을 초과하는 경우에는 기초 보강사례에서 조사된 공법(이중관 고압분사 공법, 삼중관 고압분사 공법, 마이크로 파일 공법)을 중심으로 적정 보강심도를 선정하고 설치간격 등을 변화시켜 가면서, 동일한 안정성을 충족시키기 위한 제원을 비교·분석하였다.
- 2) 각 대표 단면별로 극한지지력에 대한 소정의 안전율(FS=3)은 충족시키지만 침하량 기준을 초과하는 영역이 존재하여(그림 8), 침하량 억제를 위한 기초 보강공법의 적용이 필요하였다.
- 3) 기초 보강공법을 적용하여 해석을 수행한 결과, 균질한 개량체의 형성이 가능한 삼중관 고압분사 공법이 안정성 측면에서 가장 유리한 것으로 분석되었으며, 동일한 안정성(허용침하량)을 충족시키는 조건에서도 유사공법에 비해 시공성 및 경제성이 양호한 것으로 분석되었다.
- 4) 또한, 파괴규준(이론식)을 이용하여 기초지반의 최소안전율(FS=3.0)을 만족하는 지하차도 기초부 암반의 소요 일축압축강도를 예측해 본 결과, 10 MPa 이상으로 분석되었으며 이는 삼중관 고압분사 공법의 개량 일축압축강도 범위인 10~20MPa 내에 포함되므로 보강을 통한 안정성 확보가 가능할 것으로 사료된다.

**[참고문헌]**

1. 이태형, 임종철, 2006, 조밀한 모래지반의 기초인접에 설치된 마이크로파일 보강효과에 관한 실험적 연구, 한국지반공학회 논문집, 제22권, 5호, pp.69-81.
2. 박영호, 김낙영, 육정훈, 2004, 석회암 지대의 공동부 및 파쇄대 보강효과 분석, 한국지반환경공학회지 기술기사, 제5권, 제3호, pp.32-39.
3. 포스코건설, 2007, 행정중심복합도시 국도1호선 우회도로 건설공사 토질조사보고서, 한국토지공사.
4. AASHTO, 1996, Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Ed.
5. Bowles, J.E., 1988, Foundation Analysis and Design, 4th Ed. McGraw-Hill.
6. Hoek, E., 1983, Strength of Jointed Rock Masses, 23rd Rankine Lecture, Geotechnique Vol. 33(3), pp.187-223.
7. Hoek, E. and Brown, E.T., 1997, Practical Estimates of Rock Mass Strength, International Journal Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34, No.8, pp.1165-1186.

# Safety SQ! Quality SQ!

◆ 안전진단전문기관  
◆ 시설물유지관리업

◆ 엔지니어링활동주체  
◆ 기술연구소

**SQ** SQ엔지니어링(주)  
<http://www.sqeng.co.kr>

서울시 송파구 가락동 160-11 드림빌딩 / TEL : (02)400-5200(代), FAX : (02)400-9134