

축소모형실험에 의한 불연속면 암반에서의 병설터널 적용성 평가 Evaluation on Tunnel in Uncontinuous Rock Mass by Small-Scale Model Tests

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 유찬호²⁾, Chan-Ho Yoo, 황정순³⁾, Jung-Soon Hwang, 윤현돈⁴⁾, Hyun-Don Yoon

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

²⁾ (주) KER 대표이사, President, K.E.R. Co., Ltd.

³⁾ 두산건설 토목설계팀 과장, Manager, Doosan Cons.&Eng., Co., Ltd.

⁴⁾ 두산건설 토목설계팀 팀장, Team Manager, Doosan Cons.&Eng., Co., Ltd.

SYNOPSIS : In this study, estimation of behavioral characteristics between twin tunnels was performed through the series of laboratory experiment on the small scale tunnel model. In the model test, the experimental parameters were geological conditions, center to center distance between twin tunnels, application of discontinuous inclination. To estimated behavior of pillar and load-displacement relationship by model tests and numerical analyses.

Key words : load-displacement relationship, model test, pillar, twin tunnel

1. 서 론

현재 시공되는 병설터널에서 터널간 이격거리는 보강공법의 발달로 인하여 2D 이하로 시공되는 경우가 많으며, 최근에는 병설터널 중앙 필라(pillar)부의 지지기능을 강화하여 2arch 터널이나 3arch 터널을 시공함으로써 이격거리를 보다 감소시키는 공법이 적용되고 있는 실정이다.

터널간 이격거리가 매우 좁은 근접 병설터널은 용지 매입면에서 유리한 장점이 있지만, 국내의 경우 시공이나 설계사례가 부족하며 이에 대한 연구도 매우 미흡한 형편이다. 따라서 본 연구에서는 불연속면이 포함된 지반에서 병설터널의 적용성을 알아보기 위하여 실내모형시험을 수행하였으며, 불연속면의 경사가 0° 및 15° 인 경우 터널간 이격거리에 터널의 안정성을 알아보았다.

2. 축소모형실험

2.1 개요

축소모형실험은 병설터널의 절리경사별 터널간의 이격거리를 변화시켜가며 전체 모형지반의 정량적 및 정성적인 터널의 거동특성을 확인하는 방법으로 수행하였다. 축소모형실험에 앞서 우선 적합한 모형지반재료를 선정하기 위하여 다양한 실내물성시험을 시행하였으며, 선정된 모형지반재료의 배합비를 결정하여 본 과업 제안기법의 축소모형실험을 수행하였다. 축소모형실험을 진행하는 동안에는 터널의 내공변위를 계측하여 굴착면의 변형을 확인하는 것이 가장 좋으나, 모형지반의 크기가 작아 계측기의 설치 불가능한 문제로 인해 본 모형실험에서는 모형지반의 파괴하중을 계측하는 방법으로 진행하였다.

아울러 축소모형실험 결과는 모형지반에 대한 역해석의 기초자료로 사용하여, 모형지반의 내공변위를 예측하는데 사용하였다.

2.2 축소모형지반의 결정

실제암반의 변형거동을 연구하기 위하여 축소모형실험을 실시할 때는 실제지반의 여건을 충분히 재현하여야 하며, 이를 위해서는 현장의 모든 제반요소들에 대한 차원해석을 실시하여 축소율을 산정하고 이에 따른 적합한 모형재료를 사용하여 축소모형을 제작하여야 한다.

전석원 등 (2003)은 세 가지 기본 차원을 길이[L], 시간[T], 질량[M]이라고 할 때, 축소율을 산정하는 순서는 우선 길이에 대한 축소율을 결정하고 나서 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 강도 등의 축소율을 차례로 산정한바 있다. 본 연구에서도 동일한 방법으로 축소모형지반을 결정하였으며, 최종적으로 결정된 축소모형지반의 조건은 표 1에 요약, 정리하여 나타내었다.

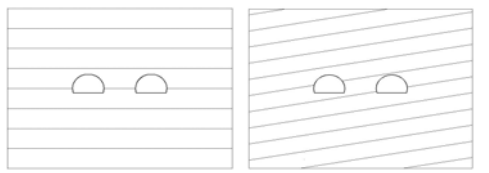
표 1 축소모형의 축소율 결정

Physical properties	Dimension	Scale factors
Length	[L]	1/127.8
Mass	[M]	1/2.79e6
Density	[ML ⁻³]	1/1.33
Strength	[ML ⁻¹ T ⁻²]	1/170.4

2.3 축소모형실험 조건

축소모형실험은 이방성 암반의 방향성 및 불연속면 조건이 터널 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수행하였으며, 절리경사 0°, 15° 두 가지 경우에 대해 필라(Pillar) 이격거리를(0.5D, 1.0D, 1.5D 2.0D) 조정하는 방안으로 총 8회 수행하였다. 축소모형실험이 수행된 조건은 표 2에 요약, 정리하였으며, 대표적인 축소모형지반은 그림 1에 나타내었다.

표 2 축소모형실험 조건

터널 이격거리		0.5 D	1.0 D	1.5 D	2.0D	총 횟수	모형실험 Case (예)	
절리 경사	0°	1회	1회	1회	1회	총 8회		
	15°	1회	1회	1회	1회			

2.4 축소모형실험 방법

축소모형실험의 재하방식은 기본적으로 변위제어방식으로 진행되었다. 축소모형실험은 미리 제작된 모형지반을 모형터널시험기 안에 자립시킨 이후에 좌, 우에 설치되어 있는 유압재하판을 이용하여 경계조건을 구속함과 동시에 측압을 작용하여 실제 응력상태를 구현하는 것으로 시작하였다. 초기응력상태를 구현한 뒤, 모형지반 연직에 설치된 전기식 하중재하장치를 1.25 mm/min의 속도로 재하하여 모형지반이 파괴되는 시점까지 축소모형실험을 진행하였다.

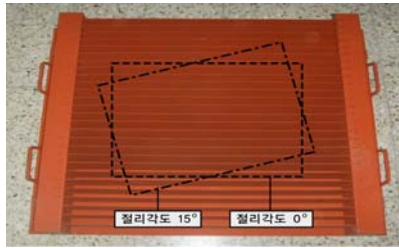
축소모형실험시에는 연직방향으로 다이알게이지를 설치하여 시간에 따른 변위량을 보다 정확하게 측정하였으며, 재하판 위로 설치되어 있는 로드셀을 통해 지반에 작용되는 하중값을 측정하여 모형지반의

응력-변형을 관계를 계측하였다.

본 과업에서 시행된 축소모형실험의 과정 전경은 그림 1에 나타내었다.



(a) 시료준비



(b) 불연속면



(c) 모형지반 조성



(d) 모형터널 굴착



(e) 모형지반 완성



(f) 모형실험 전경

그림 1 축소모형실험 전경

3. 수치해석

3.1 개요

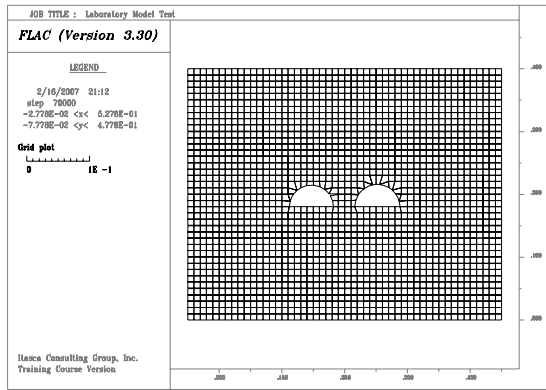
본 연구에서는 모형지반 내의 터널의 거동을 살펴보기 위하여 불연속면의 경사와 단선터널간의 이격 거리에 따른 모형지반의 하중-변위관계 및 파괴하중을 측정하는 방법으로 축소모형실험을 실시하였다. 그러나 모형지반의 재료가 취성재료인 석고인 관계로 터널내부에 부착되어 있던 스트레인게이지의 경우 하중증가에 따라 취성거동 결과가 계측되어 터널내부의 거동을 충분히 반영할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서 실험에 대한 신뢰성확보 및 터널거동예측을 위하여 수치해석을 통한 역해석이 필요할 것으로 판단되었다. 수치해석에서는 우선 불연속면을 포함한 모형지반을 그대로 격자 요소망으로 모델링하여 역해석을 수행함으로써 모형지반의 지반강도정수를 추정한 후, 이 결과를 이용하여 모형실험에 적용된 하중이 작용할 때 터널 주변의 변위를 측정하는 방법으로 진행하였다.

수치해석은 유한차분수치해석 프로그램인 FLAC 프로그램을 이용하였으며, 불연속면은 인터페이스 요소로 처리하여 실제 축소실험에 사용된 모형지반과 동일하게 진행하였다.

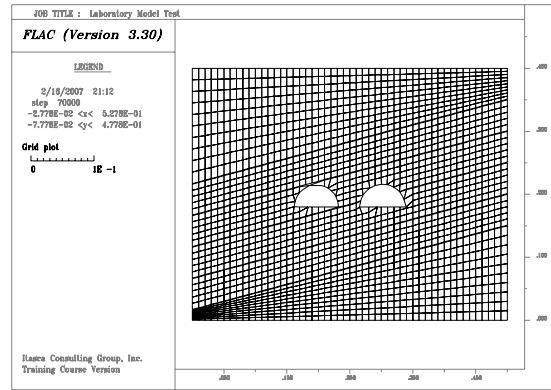
3.2 해석조건

유한차분 해석을 위한 격자 요소망은 축소모형실험이 수행된 모형지반의 크기로 결정하여 모델링하였다. 평면-변형률 조건으로 모델링하였으며, 모형실험과 동일하게 하부경계와 좌·우측 경계는 변형이 발생하지 않도록 롤러를 두어 구속하였다.

모형지반과 동일하게 불연속면을 두어 모델링하였으며, 불연속면은 경계면요소(Interface Element)를 이용하여 모델링하였다. 연속체의 격자요소는 Mohr-Coulomb failure criterion을 따르는 탄소성모델을 이용하였다. 수치해석에 이용된 격자요소망은 그림 2에 나타내었다.



(a) 불연속면의 경사 0°



(b) 불연속면의 경사 15°

그림 2 수치해석에 이용된 격자요소망

3.3 적용 지반강도정수

수치해석에 적용된 모형지반 물성치는 역해석을 통해 모형실험결과와 수치해석결과가 최대한 유사한 결과를 도출할 때까지 시행착오법에 의해 결정하였으며, 그 결과는 다음 표 3과 같다.

표 3 수치해석에 적용된 지반 물성치

구 분	단위중량	탄성계수	점착력	내부마찰각	포아송 비
모형지반 지반강도	14.0kN/m ³	1840MPa	0.14MPa	5	0.37

3.4 해석단계

수치해석에서는 모형지반 조성 후 굴착을 추가로 모델링하였으며, 굴착이후에 축소모형실험과 동일하게 상부지반에 하중을 재하하여 하중에 따른 변형의 관계를 알아보았다. 하중이 재하하는 동안 모형 터널의 천단과 측벽에서 변형정도를 확인하였으며, 모형에 재하되는 하중은 단계별로 증가하는 것으로 가정하였으며, 그 가정치는 다음과 같다.

표 4 수치해석에 적용 하중단계

구 분	1 단계	2 단계	3 단계	4 단계	5 단계	6 단계	7 단계	8 단계	9 단계	10 단계
작용 상재하중	10kPa	20kPa	30kPa	40kPa	50kPa	60kPa	90kPa	100kPa	200kPa	300kPa
누적 상재하중	10kPa	30kPa	60kPa	100kPa	150kPa	210kPa	300kPa	400kPa	600kPa	900kPa

3.5 해석 case

수치해석이 수행된 해석 case는 축소모형실험이 이루어진 조건과 동일하게 설정하였으며, 터널의 간격과 불연속면의 경사를 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다. 수치해석이 이루어진 종류 및 횟수는

표 5에 나타내었다.

표 5 축소모형실험의 종류 및 실험횟수

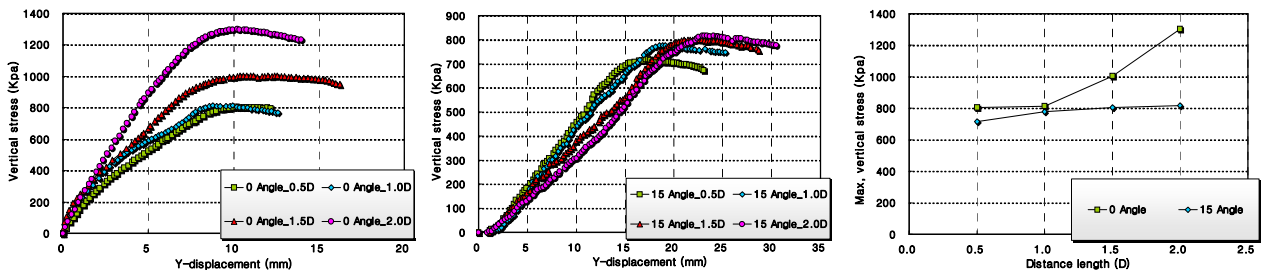
터널 이격거리		0.5 D	1.0 D	1.5 D	2.0 D	비고
절리경사	0°	1	1	1	1	총 8회
	15°	1	1	1	1	

4. 분석 및 고찰

4.1 실내시험 결과분석

4.1.1 터널 이격거리에 따른 하중-변형특성

본 연구에서 수행한 축소모형실험을 통해 평가된 모형지반의 하중-변형 특성은 다음 그림 3에 나타내었다.



(a) 불연속면 0° p-y 곡선

(b) 불연속면 15° p-y 곡선

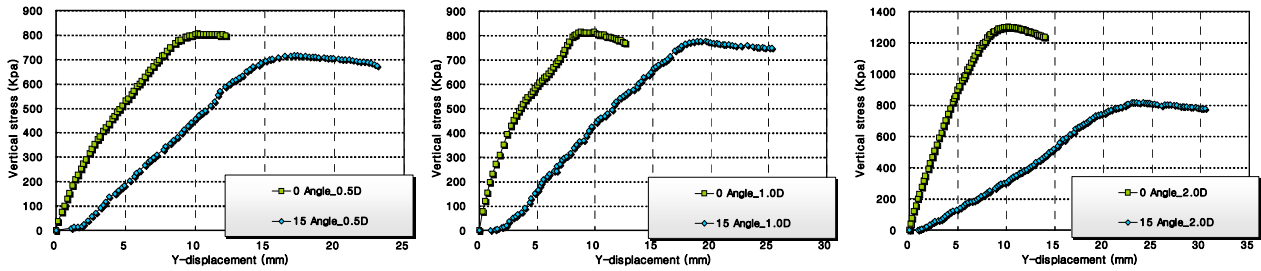
(c) Case별 최대하중

그림 3 모형지반의 하중-변형 특성

그림 3의 결과를 살펴보면, 불연속면의 경사가 0°인 경우에 터널간 이격거리가 1.0D까지는 최대 연직 응력이 약 800 kPa 정도로 평가되었으나, 이격거리가 1.5D 및 2.0D로 증가하는 경우 각각 최대 연직 응력이 약 1000 kPa 및 1300kPa 까지 증가하는 것으로 평가되었다. 반면에 불연속면의 경사가 15°인 경우에는 최소연직응력과 최대연직응력의 차이가 약 100kPa 정도 밖에 되지 않는 것으로 평가되었다. 이로 미루어보아, 불연속면에 의한 이방성 지반에서는 불연속면의 방향성이 터널의 안정성에 크게 영향을 줄 수 있는 것으로 생각된다.

4.1.2 불연속면에 따른 하중-변형 특성

본 연구에서 수행한 축소모형실험을 통해 평가된 모형지반의 하중-변형 특성은 다음 그림 4에 나타내었다.



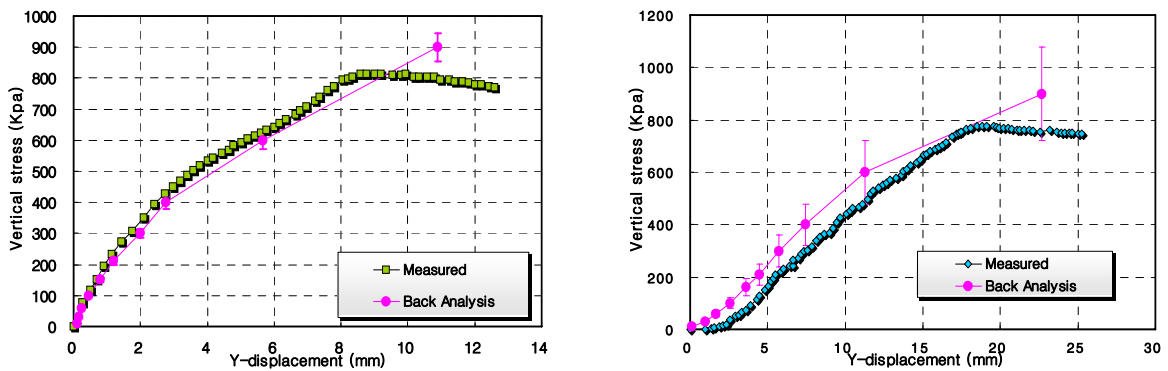
(a) 이격거리가 0.5D인 경우 (b) 이격거리가 1.0D인 경우 (c) 이격거리가 2.0D인 경우
 그림 4 불연속면에 따른 모형지반의 하중-변형 특성

그림 4의 결과를 살펴보면, 그림 3에서 평가된 바와 동일하게 불연속면의 경사가 15°인 경우가 연직 응력 작게 평가되었으며, 변형에도 더욱 취약한 것으로 평가되었다.

4.2 수치해석 결과분석

4.2.1 터널 이격거리에 따른 하중-변형특성

본 연구에서 수행한 축소모형실험을 통해 평가된 모형지반의 하중-변형 특성은 다음 그림 5에 나타내었다.

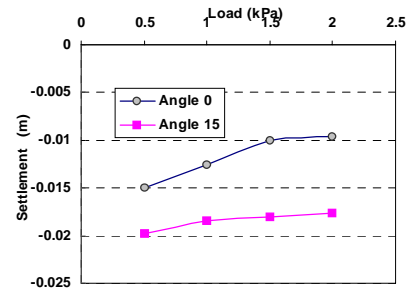
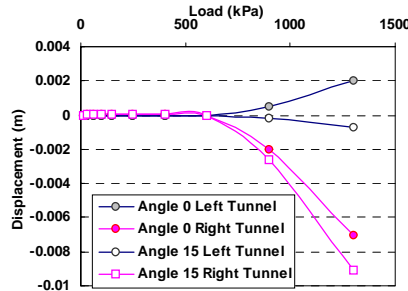
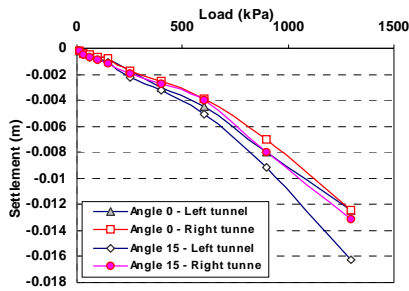


(a) 불연속면의 경사 0° (b) 불연속면의 경사 15°

그림 5 수치해석을 통해 평가된 모형지반의 하중-변형특성

그림 5의 수치해석결과를 살펴보면, 수치해석을 통해 평가된 모형지반의 하중-변형특성은 전반적으로 실내실험 결과와 유사한 양상의 하중-변형특성을 보이는 것으로 평가되었다. 불연속면의 경사가 0°인 경우에는 전반적으로 실험결과와 역해석결과가 오차율 ±5% 내에서 분산하는 것으로 평가되어 모형실험 결과의 신뢰성을 확인하였다. 불연속면의 경사가 15°인 경우에도, 모든 해석경우가 신뢰성 80% 정도에 해당되는 것으로 평가되어 이 역시, 최소한의 신뢰성을 확보하고 있음을 확인하였다.

수치해석을 통해 평가된 터널의 내공변위는 그림 6에 나타내었으며, 터널간의 이격거리 증가에 따른 천단침하 변화는 그림 7에 나타내었다.



(a) 이격거리 1.0D의 천단침하 (b) 이격거리 1.0D의 내공변위 그림 7 이격거리에 따른 모형지반의 천단침하
그림 6 불연속면에 따른 모형지반의 내공변위

그림 6의 수치해석결과를 살펴보면 불연속면의 방향이 0°인 경우의 천단침하량이 1.2cm 정도 내외의 침하량을 보이는 것으로 평가되었으며, 불연속면의 방향이 15°인 경우에는 최대 1.6cm 정도까지 천단침하량이 발생하는 것으로 평가되었다. 내공변위 역시 불연속면의 방향이 15°인 경우가 가장 큰 내공변위를 보이는 것으로 평가되었다.

그림 7의 해석결과를 살펴보면, 터널의 이격거리가 증가함에 따라서 터널 천단의 변위가 줄어드는 것으로 평가되었으며, 불연속면의 경사가 15°인 경우에는 전체적으로 안정성이 저하되어 있는 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 과업에서는 과업구간에 계획되고 있는 병설터널의 적용성을 알아보기 위하여 실내모형시험을 수행하였다. 모형실험은 이방성에 따른 안정성 및 터널간 이격거리에 터널의 안정성을 알아보는 방법으로 진행하였으며, 불연속면의 경사가 0° 및 15° 인 2가지 이방성 모형을 제작하여 모형실험을 실시함으로써 설계에 반영할 수 있는 신뢰성 높은 결과를 도출하고자 하였다.

본 과업을 통해 얻어지는 주요내용을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 축소모형실험결과, 불연속면의 경사가 0° 인 경우 이격거리가 증가함에 따라 지반의 전체 저항하중은 증가하는 것으로 평가되었으나, 불연속면의 경사가 15° 인 경우 이격거리가 증가함에 따라 지반의 전체 저항하중 증가는 크지 않은 것으로 평가되었다.
- (2) 역해석 결과, 불연속면의 경사가 15°인 경우에는 전반적으로 오차율이 5% 이상으로 그 신뢰성이 다소 떨어지는 것으로 평가되었다. 터널간격이 0.5D 인 경우에는 비교적 신뢰성을 확보하고 있지만 터널간격이 증가할수록 오차율이 증가하는 것으로 평가되었다. 그러나 모든 해석경우가 신뢰성 80% 정도로 평가되어 비교적 역해석의 신뢰성은 어느 정도 확보하고 있는 것으로 평가되었다.
- (3) 불연속면의 경사가 0°인 경우에는 터널간의 간격이 증가함에 따라서 발생하는 침하량은 감소하는 것으로 평가되었다. 즉, 불연속면의 경사가 0°인 경우에는 터널간격이 증가할수록 전반적인 안정성을 확보하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 불연속면의 경사가 15°인 경우에는 침하량의 차이가 크지 않은 것으로 평가되어 터널간격이 증가할수록 전반적인 안정성을 확보하는 경향이 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 평가되었다.
- (4) 불연속면의 경사가 0°인 경우에는 터널간의 이격거리는 터널의 안정성 확보에 큰 도움을 주지만,

불연속면의 경사가 15°인 경우에는 터널간의 이격거리는 터널의 안정성 확보에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 평가되었다. 이처럼 불연속면의 경사가 15°인 경우와 같이 경사진 경우에는 터널간의 이격거리 보다 불연속면의 방향성과 특성치가 전체 터널의 안정성에 영향을 미치는 요소임이 확인되었다. 따라서 단선터널의 간격은 이격거리를 확보할수록 안정성이 확보되기는 하지만, 안정성 증가는 연속체 지반 또는 수평지반에서보다 기대하기 힘들고, 경사진 지반에서는 불연속면의 방향성 및 불연속면의 특성치가 터널의 안정성에 가장 큰 영향을 주는 주요인임으로 불연속면의 특성을 정확하게 평가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 장부식 (2006), **근접 병설터널 필라의 거동특성에 관한 연구**, 홍익대학교 박사학위 학위논문
2. 장부식, 황정순, 류준원, 이응기, 김홍택(2006), “**병설터널 굴착시 필라부의 보강을 고려한 안정성 평가기법**“, *한국지반공학회 '06 봄학술발표회 논문집*, pp. 980~987
3. 황정순, 김승욱, 방윤경, 김홍택(2005), “**필라의 보강공법을 고려한 안정성 평가기법 및 분석**“, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp. 5571~5574
4. 황정순, 이응기, 김철준, 김승욱(2005), “**병설터널 시공에 따른 필라의 안정성 평가기법**“, *한국농공학회 지반분과위원회 학술세미나*, pp. 75~88
5. 황정순, 이흥규, 박석호, 이응기(2005), “**병설터널 시공에 따른 필라의 안정성 평가기법 제시**“, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp. 5575~5578
6. Hoek, E.(1968), “**Brittle failure of rock**“, In *Rock Mechanics in Engineering Practice*. (eds K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz), London : Wiley, pp. 99~124.
7. Hoek, E.(1968), “**Rock Mechanics in Engineering Practice**“, John & Wiley, London.
8. Hoek, E.(1983), “**Strength of jointed rock masses**“, 23rd. Rankine Lecture, *Geotechnique*, Vol. 23, No. 2, pp. 187~223.