

Slit공법을 이용한 지하공동 굴착에 관한 기초적 연구(I)

A Fundamental Study on the Underground Excavation using by Slit Method(I)

이희성¹⁾, Hee-Seong Lee, 윤지선²⁾, Ji-Son Yoon,

¹⁾ 인하대학교 공과대학 지구환경공학부 박사과정, Graduate Student, Division of Environmental Geosystem Engineering, Univ. of Inha

²⁾ 인하대학교 공과대학 지구환경공학부 교수, Professor, Division of Environmental Geosystem Engineering, Univ. of Inha

SYNOPSIS : In this study, we used photoelastic coating method which is a kind of model test for examining the stress condition of rock masses around underground structures. Using this method, we could know adaptability and usefulness of photoelastic coating method for various shape of tunnel models. And, in spite of higher cross section efficiency, square shape model showed unstable status because of high stress concentration. So, we cut the slits at the each corner of tunnel, and we could make more stable stress condition by means of moving high stress concentration to rock mass.

Keywords : model test, photoelastic coating method, stress analysis, slit

1. 서 론

인구 증가, 산업사회 발전, 도시화 촉진 등에 따라 지하공동 이용에 대한 요구가 증가하고 있고, 이러한 구조물들은 대부분 장기간에 걸친 안정성을 필요로 하기 때문에 이것이 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 구조물의 설계와 시공을 합리적으로 실시하기 위해서는 가장 먼저 지하구조물의 응력상태를 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 응력해석의 한 방법으로, 응력상태 전체를 시각적으로 파악할 수 있는 광탄성피막법을 적용하여 여러 가지 공동의 형상에 대한 주변 암반의 응력상태를 먼저 관찰한 결과, 응력상태가 양호한 경우에는 유효단면 효율이 낮게 되고, 유효단면효율이 높은 구형과 같은 경우에는 응력상태가 불안정하게 되는 점에 착안하여, 유효단면 효율을 높이면서도 안정적인 응력상태를 구현할 수 있는 방법을 찾고자 하였다. 그 방법의 하나로서 응력상태가 불안정하게 관찰된 구형단면에 대해서, 응력상태를 개선시키는 굴착방법, 즉, 응력집중이 일어나는 부분에 지금까지 적용해온 개념과는 상이한 개념으로, 응력집중 부분에 slit를 설치하여 응력집중 지점을 이동시킴으로서 구조물의 안정성을 확보할 수 있다는 결과를 도출할 수 있었다.

2. 응력 해석방법

응력해석방법으로는 이론적인 해석방법, 수치해석 방법, 모형실험방법 이 세 가지를 들 수 있다. 먼저, 탄성론이나 소성론, 점성론, 탄·소성론, 점·탄성론 등에 기초한 이론적인 해석 방법을 살펴보면 변형 형상이나 응력분포 등을 지극히 간단히 해석할 수 있는 장점은 있으나 실제로 풀 수 있는 문제는 해석 영역 형상이나 하중 상태가 매우 단순하고 또 등방·등질성이 가정될 수 있는 것과 같은 특별한 경우에 제한되는 단점이 있다.

수치해석 방법에 있어서는 전자계산기의 발달 및 계산 기술의 진보에 의하여 재료적, 기하학적으로 복잡한 지반 역학 문제를 상당히 현실적으로 취급하는 것이 가능하게 되었으며, 최근에는 무한 영역을 포함하는 문제에 적합한 경계요소법과 유한요소법을 조합한 응력 해석이 한창 연구되고 있는 실정이다. 그러나 어떤 수치 해석 방법이든지 나타나는 결과들은 실제 현장에서 나타나는 현상과는 많은 차이가 생기고 있으며, 해석 결과로부터 실제 현상을 추정하는 것에는 상당한 어려움이 있다.

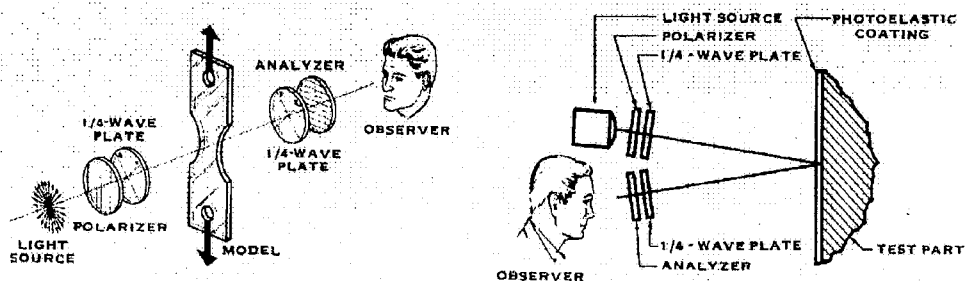
모형실험 방법으로는 파괴패턴을 정성적으로 파악하기에 유효한 원심력 재하실험, 파쇄된 암반의 파괴 메카니즘을 규명하는데는 상당히 양호하나 그렇지 않은 암반에 대해서는 효과적이지 못한 단점이 있는 저면마찰모델실험, 광탄성 효과를 나타내는 투명한 재료와 편광을 사용해서 탄성체의 응력 분포 상태를 광학적으로 조사하는 방법인 광탄성실험 등이 있으며, 이와 같은 모형 실험을 실시하는 목적으로는 현장 현상을 재현하고 대책, 설계를 위한 정보 수집의 목적과 합리적 수치해석 모델 작성을 위한 feed back system을 구성하고자 하는 목적들이 있다.

3. 광탄성 응력측정법

3. 1 광탄성 실험법의 개요

광탄성 실험 방법은 광탄성 효과를 나타내는 투명한 재료와 편광을 사용해서 응력 분포 상태를 광학적으로 조사하는 방법이다. Fig-1. (a)에서와 같이 광탄성 재료인 투명한 2차원 모형에 하중을 적용시켜 어느 응력 상태에 놓으면 그 재료는 응력 상태에 따라 복굴절성이 나타나게 된다. 따라서 모형에 편광을 통하면 복굴절에 의하여 발생한 2종의 편광의 간섭에 의하여 광탄성 줄무늬를 발생하고 이것은 모형내 주응력 차에 비례하여 생기게 됨으로서 응력 해석을 할 수 있는 것이다.

이와 같은 광탄성 실험방법은 많은 발전을 가져와서 Fig-1.(b)에서 나타낸 것과 같이 측정하고자 하는 물체의 표면에 반사적인 재료를 사용하여 피막과 시편의 접촉면에서 변위의 확대나 감소없이 변형이 동일하게 전달되게끔 피막을 부착하고 이 전달된 변위를 피막에서 반사편광기를 이용하여 측정하는 방법인 광탄성피막법이 개발되었다.



a) Transmission polariscope

(b) Reflection polariscope

Fig-1. Schematic representation of polariscope principles

이러한 피막법의 중요한 두 가지 장점은 첫째, 측정하고자 하는 재료에 직접 피막을 부착하여 이용할 수 있다는 것이며 둘째, strain gage와 같이 어떤 한 점에서의 data라기 보다는 피막의 전체에 걸쳐 반응이 나타나는 field data로서 주어진다. 일반적으로 피막법에는 birefringent coating method와 brittle coating method 가 있다. 본 연구에서 사용한 방법은 전술한 birefringent coating 방법으로 불투명한 2차원 혹은 3차원 물체의 표면 변형율을 결정할 수 있는 방법으로 다른 경험적인 응력분석법들 보다 많은 장점을 가지고 있다. 먼저 측정 대상물체의 표면변형율을 전 영역에 걸쳐 시각적으로 보여주며, 피막에 있어서의 간단한 선형 탄성문제 보다는 대상 물체에 있어서의 복잡한 비선형 응력분석 문제들에 있어서 매우 유용하게 사용할 수 있는 장점들을 지니고 있다.

이러한 복굴절 피막법의 개념은 1930년에 프랑스의 Mesnager에 의해 처음 도입되었으며, 1950년대 초기 epoxy를 이용하게 됨에 따라 접착과 민감도의 문제들을 해결하게 되었으며 후에 프랑스, 일본, 미국 등지의 여러 학자들에 의해 재료와 기술적인 문제들에 대해서 빠른 발전을 가져오게 되었다.

국내의 암석역학 분야에서 광탄성실험은 그렇게 많이 실시되지 않고 있지만 외국의 경우에는 암석역학 분야에서도 많은 광탄성 실험을 실시하고 있다. 대표적인 사례로 Hoek박사(1965년)는 광탄성피막법을 이용하여 지하공동의 가장 일반적인 형상의 하나인 원형 수평터널에 대해서 터널 주변부의 파괴전파에 관한 소축적의 모형실험을 실시한 사례가 있다. Hoek박사의 실험에서는 원형 수평터널에 대한 파괴메카니즘 연구에 국한되었지만 본 연구에서는 공동의 형상을 달리하여 응력상태를 파악하고자 하였다.

3. 2 광탄성 피막법의 원리

광탄성 피막이 입혀진 물체가 하중을 받고 있을 때 응력들은 그것의 표면과 시험체 전체에 존재하는 변형을 일으키게 된다. 표면 응력과 변형률들은 대개 제일 크고 그리고 가장 중요하다. 광탄성 피막은 반사접착제로 시험체 표면에 밀착되어 균등하게 결합되어 있기 때문에 그 부분에서의 변형률들은 피막에 충분히 전달된다. 피막에 있어서의 변형률들은 광학 효과에 비례해서 나타나게 되며 반사 편광기로 볼 때 그들은 isochromatic fringe로서 나타난다. 하중을 받고 있지 않는 시편으로 시험할 때 하중 혹은 증분하중을 가할 때 줄무늬는 가장 높은 응력을 받는 점에서 맨 처음 나타나게 되며 하중을 증가함으로써 새로운 fringe들이 나타날 것이고 기존의 무늬들은 낮은 응력이 분포하는 쪽으로 밀려나게 된다. 더욱 하중을 가함으로써 추가된 줄무늬들은 높은 응력을 받는 부분에서 발생되며 최대 하중에 도달될 때까지 낮은 응력 혹은 응력이 0이 되는 부분으로 이동된다. 줄무늬들은 숫자로서 지정할 수 있으며 연속 하중을 통하여 각각 고유의 수를 가진다.

광탄성 피막에서 관찰된 fringe order들은 피막의 주변형률들 사이의 차이에 비례한다. 이것은 다음과 같이 간단한 선형 관계를 나타낸다.

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = fN \quad (1)$$

여기서 ε_x , ε_y : 피막과 시험체 표면의 주변형률

f : 피막의 fringe value (PS-1 피막의 경우: $870 \mu \varepsilon / \text{fringe}$)

N : fringe order - 관찰된 birefringence, fringe단위로 표현됨.

(1)식은 전단변형율 γ_{xy} 로 쓸 수 있다.

$$\gamma_{xy} = f \cdot N \quad (2)$$

γ_{xy} : 어떤 한 점에서의 최대전단변형율 (시편 표면의 평면에서)

상기 내용의 중요한 점은 시험체 표면에서의 최대전단변형율 혹은 주변형률들의 차이이며 이것은 피막 재료의 fringe value와 피막의 fringe order를 곱함으로써 간단하게 얻을 수 있다. 이것을 응력으로써 표현하기 위해서는 (1)식과 (2)식을 Hooke's law를 도입함으로써 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (4)$$

$$\sigma_x - \sigma_y = \frac{E}{1+\nu} (\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (5)$$

(1)식을 (5)식에 대입하면,

$$\sigma_x - \sigma_y = \frac{E}{1+\nu} fN \quad (6)$$

여기서 σ_x, σ_y : 시험 표면에서의 주응력, E : 시험체의 탄성계수, ν : 시험체의 poisson's ratio

그리고 표면의 어떤 점에서의 최대전단응력 $\tau_{\max} = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2}$ 이므로 다음 식과 같이 나타난다.

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{1+\nu} \right) fN \quad (7)$$

광탄성 피막의 응력 분석법에서는 (1), (6)식이 많이 사용되며 오직 주변형울과 주응력들의 차이를 나타내 주며 개개의 값은 아니다.

관찰된 fringe pattern에서 나타나는 각각의 fringe color에 대응하는 fringe order는 Table-1과 같다.

Table-1. Dominant Isochromatic Fringe colors for Full-Field Interpretation

Color	Approximate Fringe Order
BLACK	0
YELLOW	0.6
RED	0.9
PURPLE(TINT OF PASSAGE)	1.0
BLUE-GREEN	1.2
YELLOW	1.5
RED	1.75
RED/GREEN TRANSITION	2.0
GREEN	2.2
YELLOW	2.5
RED	2.8
RED/GREEN TRANSITION	3.0
GREEN	3.2

4. 시편제작 및 실험방법

4. 1 시편의 제작

본 연구에서는 첫 번째 단계로 조건이 균일한 공시체를 제작하기 위하여 평판 위에 유리판(30cm×30cm)을 얹어놓고 가로×세로가 약 20cm×20cm의 면적이 되도록 황동제 frame을 설치한 다음 epoxy로 제작된 공동형상의 축소 모형을 중심에 위치시키고 CAS시멘트 그라우트 모르타르를 물비 15%로 충분히 혼합하여 몰드에 넣고 7일이 경과한 후에 시험을 실시하였다. 제작된 몰탈 시편은 Table-2와 같다.

Table - 2. Specifications of Specimen

Sample No.	Width(cm)	Height(cm)	Thickness(cm)	Opening Shape	Opening Area(cm ²)
C - 1	19.8	19.8	1.25	Circular type	12.6
R - 1	19.9	19.9	1.31	Retangular type	13.7
R - 2	19.8	19.8	1.28	Retangular type(slit)	13.7
H - 1	20.0	20.0	1.25	saddle type	14.6
T - 1	19.9	19.9	1.24	Road tunnel type	13.4

2단계로 제작된 시편 위에 미국 Measurement사 제품인 PS-1B 피막(15cm×15cm, 두께 0.22cm)을 Model 1571 15" scroll saw를 사용하여 모델크기에 맞게 잘라준 다음 공동모형을 만들어준다.

3단계로 모르타르 시편의 표면을 깨끗하게 하게 하기 위하여 disk sander나 grinder를 이용하여 표면 처리를 하고 isopropyl alcohol, acetone 등으로 표면에 남아있는 먼지를 수회 반복해서 닦아낸다. 접착제(PC-1)를 이용하여 부착표면의 공극을 메우고 1시간 - 1시간30분 정도 경과한 후 Neutra-sol으로 닦아낸다.

4단계에서 PC-1접착제를 부착면적 10cm²당 1gram 정도를 사용하여 부착시킨다.

이상과 같은 처리를 한 모델은 피막 부착 후 24시간이 경과한 후에 실험을 실시하였다.

Fig-2는 만들어진 모델을 시험하기 위해 압축시험기 위에 설치한 모습이다.

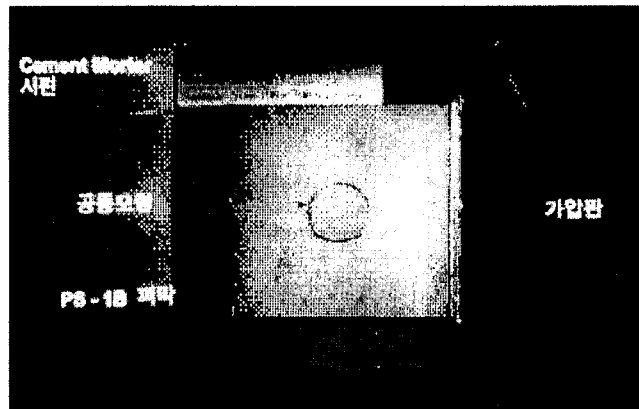


Fig-2. The view of manufactured test specimens

4. 2 재료의 역학적 성질

본 연구에서 사용된 모르타르의 역학적 특성을 알아보기 위하여 물 비 15%의 같은 조건으로 직경 5cm, 길이 10cm의 원주형 공시체를 제작한 다음 150톤 용량의 압축시험기로 실내 역학시험을 실시하였다. 몰탈 공시체에 대한 일반적인 물리적 역학적 성질은 Table-3과 같다.

Table - 3. Physical and Mechanical properties of tested sample

	Uniaxial compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Young's Modulus (×10 ⁴ kgf/cm ²)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Dynamic Poisson's ratio
Range	291-318	19-23	3.7-4.43	3.44-3.65	1.95-1.98	0.26-0.28
Average	301	21	4.0	3.51	1.96	0.27

4. 3 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 미국 Measurement사에서 제작된 030-Series Reflection Polariscope를 사용하였다. 이 장치는 물체의 측정하고자 하는 부분에 반사접착제를 이용하여 광탄성 피막을 붙여서 측정하는 반사법을 이용한 장치로 실험장치는 작동법이 간단하고 가벼워서 삼각대에 얹어서 사용하거나 손으로 들고 측정할 수가 있게 되어있다. 이 장치는 Fig-3에서 보는바와 같이 Polariscope(polarizer, 두 개의 quarter-wave filter, analyzer), Polariscope를 장착할 수 있는 Tripode, Light source, 관찰되는 fringe pattern을 촬영할 수 있는 camera, 그 외 여러 가지 부속품들로 구성되어 있다. 사용되는 광원은 12 volt 100watt의 tungsten-halogen lamp와 특수 filter로 되어 있다. 본 장치로는 아주 미세한 변형율(응력)의 크기와 변형율 증감, 그리고 전체적인 변형율 분포를 즉시 알아낼 수 있는 장점을 가지고 있다.

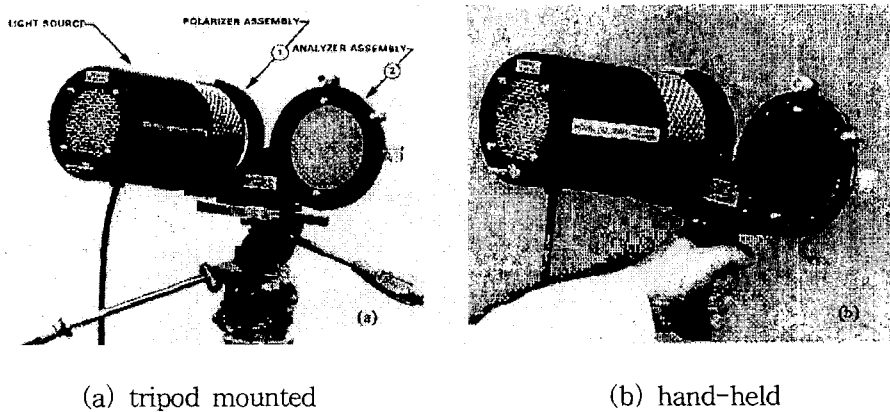


Fig-3. 030-Series Reflection Polariscope

4. 4 실험방법

본 실험에서는 제작된 5개의 모델에 대해 1축 압축상태로 응력을 증가시켜 가면서 10kgf/cm²단위마다 Nikon N6006 Camera로 fringe pattern의 변화 양상을 촬영하여 응력의 분포상황을 관찰하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5. 1 각 단면형상에 대한 실험결과

Fig-4.(a)는 공동의 형상이 원형일 경우 $\sigma=250kgf/cm^2$ 의 응력수준에서 나타난 fringe pattern으로 공동 중앙 측벽부에서 fringe의 밀도가 높은 것으로 보아 응력집중도가 크다는 것을 알 수 있으며 공동 상부와 하부지점에서는 측벽의 1/2정도의 인장응력이 작용함을 알 수 있다.

Fig-4.(b)는 공동의 형상이 마제형일때 $\sigma=150kgf/cm^2$ 의 응력수준에서 촬영한 fringe pattern으로 측벽 상단부의 곡선부분과 측벽과 하반이 만나는 coner부분에서 응력집중도가 크게 나타났다.

Fig-4.(c)는 공동의 형상이 표준 도로터널 단면의 경우 $\sigma=150kgf/cm^2$ 의 응력수준에서 촬영한 fringe pattern으로 측벽 중앙부분과 하반과 측벽이 만나는 coner부분에서 응력집중이 높게 나타났다.

Fig-4.(d)는 공동의 형상이 정방형단면인 경우 $\sigma=200kgf/cm^2$ 의 응력수준에서 촬영한 fringe pattern으로 상,하반이 만나는 coner부분, 측벽, 상반과 하반의 중앙부분 순서로 응력집중이 높게 나타났다.

정방형단면의 경우 공간활용의 효율성이 가장 높은 단면형상인데도 불구하고 (4)의 결과에서도 나타난바와 같이 응력집중도가 높게 존재하는 부분이 많아서 공동의 굴착 및 유지가 어려운 것이 사실이다.

본 실험에서는 이러한 정방형형 단면에 대한 응력집중도를 낮추어주기 위한 방법으로 측벽과 상,하반이 만나는 coner 부분에 대해서 폭 0.2cm, 길이 1.5cm의 slit을 45° 방향으로 만들어 준 다음 실험을 실시 하였다. 그 결과 (4)의 경우와 동일한 응력수준인 $\sigma=200\text{kgf/cm}^2$ 에서 촬영한 fringe pattern (Fig-4.(e))을 살펴보면 (4)의 결과에서 나타났던 coner부분과 측벽의 응력집중은 감소된 반면에 4개 slit 의 끝 부분으로 응력이 집중됨을 알 수 있었다.

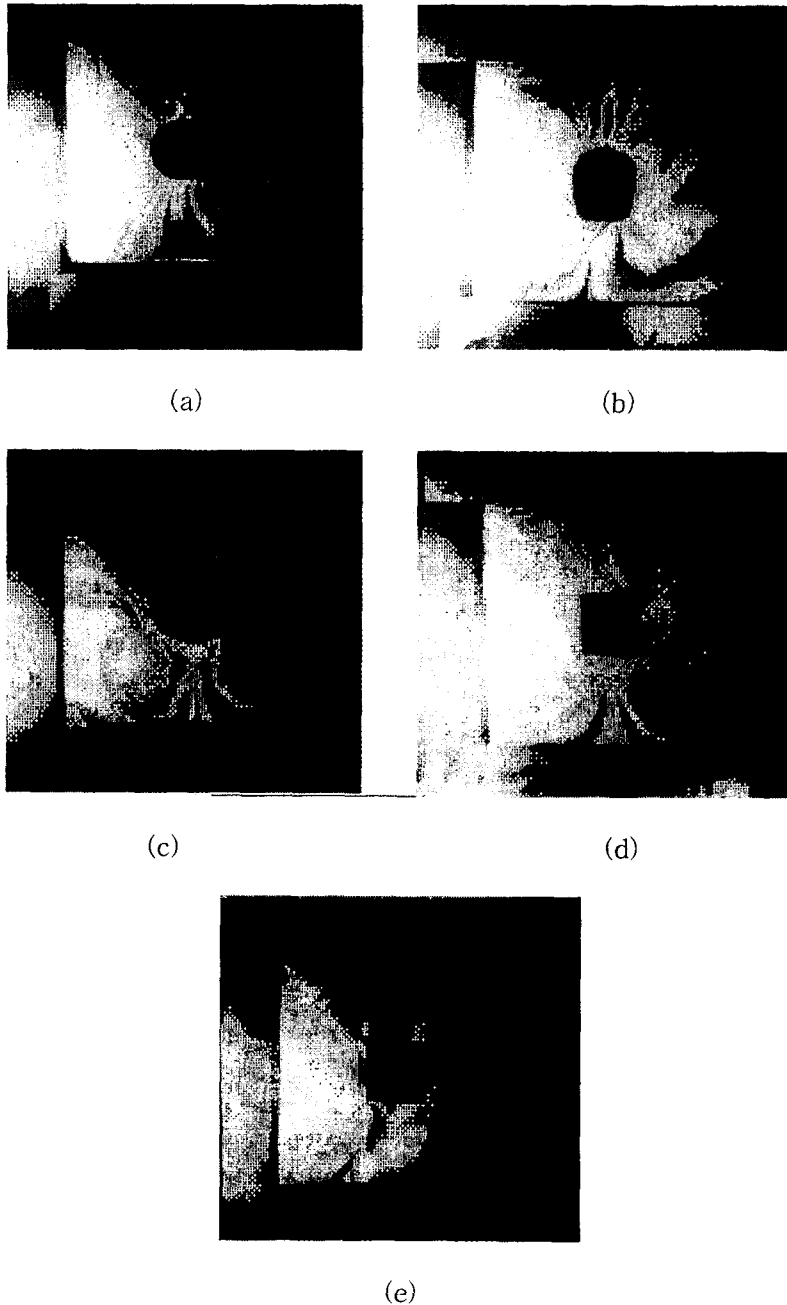


Fig - 4. Test results of Photoelastic coating method

5. 2 고 찰

이상과 같이 지하구조물의 응력해석에 광탄성 피막법의 적용성과 효율성을 알 수 있었다. 또한 그동안 공간 효율성이 높으면서도 불안정한 응력상태를 나타내어 사용되지 못하던 정방형 단면에 대해서 지

금까지 사고방식이었던 응력집중부분에 대해 유효단면 효율이 떨어지더라도 안정된 응력상태를 구현하기 위해 공동형상을 바꾸어서 굴착하는 것이 아니라 유효단면 효율을 그대로 유지하면서 불안정한 응력상태를 안정상태로 변화시키기 위해 응력집중부분에 slit을 만들어 주었을 때 응력집중지점이 slit의 끝부분으로 이동하여 정방향 단면이 안정상태로 변화하는 결과를 이번 실험을 통하여 얻었다. 앞으로의 연구에서는 이 slit의 크기 및 각도, 그리고 시공성의 문제에 대해서 더 많은 연구가 있어야 할 것으로 생각된다.

6. 참고문헌

1. 尹志善, 1990, 岩盤力學, 歐美書館, 서울, pp 176~318.
2. 尹志善, 1994, 터널工學, 歐美書館, 서울, pp 196~231.
3. 松井源吾, 1995, 見える力學. 4th ed., 麻島出版社, 日本.
4. 應力測定技術研究會編, 昭和 30年 8月, 應力測定法, 朝倉書店, 日本, pp472~692.
5. B. H. G. Brady and E. T. Brown, 1985, Rock Mechanics For Underground Mining, George Allen & Unwin, London, pp 153~208.
6. E. Hoek and E.T. Brown, 1980, Underground Excavations in Rock : The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp 183~243.
7. James W. Dally and William F. Riley, 1991, Experimental Stress Analysis, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
8. Leonard Obert and Wilbur I. Duvall, 1967, Rock Mechanics and The Design of Structures in Rock, John Wiley & Sons, New York, pp 355~408.