

## 지하공간에 관련된 수치해석의 사례연구

이희근<sup>1)</sup>

Case study on numerical analyses related to large rock caverns

Hi Keun Lee<sup>1)</sup>

### ABSTRACT

The study of rock mass behaviour through a numerical analysis is important for the design, construction and maintenance of large rock caverns. The objectives of the numerical analysis are to design reasonably and construct safely the underground structures, to maintain them soundly after construction and to extend them securely for a desired period of time. Methods of numerical analyses included in this case study are the finite element method, the boundary element method, and the distinct element method. The numerical models are purely elastic, elasto-plastic, visco-elastic, visco-plastic, elasto-visco-plastic and jointed-discontinuous materials. The results of this case study indicate that the rock mass behaviour could be predicted exactly through continuous comparisons of the numerical results with the in-situ measurements.

### 1. 서 론

지하구조물의 설계, 건설 및 유지에 있어 암반의 변형, 파괴거동의 규명은 중요한 필수 요건이다. 그리고 이러한 규명의 과정은 현지측정과 그 측정자료를 바탕으로 한 해석으로 이루어진다. 이 해석은 가정이 없거나 최소한의 가정하에서 현실적 상황 즉 암반의 거동에 대

하여 이론적으로 수행될 수 있을 때 이상적인 것이다. 현실적으로는 해석대상인 암반의 불균질성, 이방성을 비롯한 물리적, 역학적 성질의 단순화를 위한 많은 가정하에서 이론해의 한 방편으로 수치해석이 널리 수행되고 있다.

수치해석의 목적은 첫째로, 지하구조물의 설계를 합리적으로 하고 건설을 안전하게 수행하

\* 1992년 5월 接受

1) 正會員, 서울대학교 工科大学 教授.

기 위한 것이며, 둘째로, 건설후에 점검과 안전 유지를 위한 것이고 셋째로, 지하도시 건설에서와 같은 복잡한 대규모 지하구조물 건설에 있어 증축 또는 시차적 건설을 합리적이고도 안전하게 수행하기 위한 것이라고 볼 수 있다.

수치해석의 방법으로는 일반적으로 유한요소법, 경계요소법, 개별요소법 등이 있다. 그리고 해석대상인 암반의 해석모델로는 탄성체, 탄소성체, 점탄성체, 점소성체, 탄점소성체, 절리-불연속체 등으로 분류할 수 있다.

Table 1은 위와 같은 연구내용(목적), 수치해석방법, 해석모델로 구분하여 최근의 국제학술회의에서 발표된 연구논문의 경향을 조사한 것이다. 여기서 인용한 국제학술 회의는 다음과 같다.

1) Large Rock Caverns, Proceedings of the International Symposium(Vol. 1 and Vol. 2), Helsinki, Finland, 25-28 August, 1986.

2) International Society for Rock Mechanics, 6(Vol. 1 and Vol. 2), Montreal, Canada, 1987.

3) Tunnel and Underground Works Today and Future, Proceedings of the International Congress(Vol. 1 and Vol. 2), Chengdu, China, September 3-7, 1990.

4) International Society for Rock Mechanics, 7(Vol. 1 and Vol. 2), Aachen, Deutschland, 1991.

Table 1. Research aims, methods and models of numerical analysis in papers presented recently in four international symposiums

International symposium	Large Rock Caverns	Tunnel and Underground Works Today and Future	6th ISRM	7th ISRM	Other*	Total
<b>Research aims ;</b>						
① Design, Construction	17	10	3	3		33
② Safety, Maintenance	2			2		4
③ Extension, Delayed construction					1	1
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>38</b>
<b>Methods of numerical analyses;</b>						
① Finite element method	15	9	3	3		30
② Boundary element method	3	1		1	1	6
③ Distinct element method	1			1		2
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>38</b>
<b>Models of numerical analyses;</b>						
① Elastic	5	2		2	1	10
② Elasto-plastic	6	4	1			11
③ Visco-elastic	1					1
④ Visco-plastic	1	1				2
⑤ Elasto-visco-plastic		1				1
⑥ Jointed-discontinuous	6	2	2	3		13
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>38</b>

\* Author's paper

## 2. 사 례

### 2.1 노르웨이의 올림픽 아이스하키 경기장을 위한 60m스판의 대형지하공동

본 사례는 노르웨이의 NGI 소속의 Barton, Tunbridge, Loset, Westerdahl, Kristiansen, Vik 및 Chrystanthakis에 의해서 수행된 연구 결과로서 연구대상은 Gjovik rock cavern으로 이는 1994년 동계올림픽게임에 사용될 하키경기장의 하나이다. 3개셋트의 수치모델에 사용할 목적으로 현지 측정한 자료들은 NGI의 터널특성계수  $Q$ 를 비롯하여 JRC, JCS, 잔류마찰각( $\phi_r$ ), 그리고 균열, 절리(joint)의 발달상태 등이다.

Fig. 1은 기존의 수영장과 전화교환소의 캐번(cavern)에 연결하여 건설중인 1994년 동계 올림픽게임용 하키장의 계획도를 나타낸 것이다. 이 Gjovik 하키장은 올림픽 주경기장이 있는 Lillehammer의 남쪽으로 약 25km 떨어져 있는 Mjosa 호반의 서안에 위치하고 있으며 그 크기는 폭 60m, 길이 90m, 높이 25m의 세계 제일의 캐번으로 그 천정의 심도는 25~50m이고 5,000명의 관객을 수용할 계획이다. 공사는 1991년 3월에 시작되었다. 암반은 프리 캄브리안 편마암(precambrian gneiss)로 되어 있으며 지각운동으로 미소절리들이 많이 발달되어 있는데 이들 조인트 속에는 보통 방해석(calcite)이나 녹립석(epidote)으로 충전되어 있다. 외부지형은 일반적으로 원활하지만 캐번으로부터 50~100m 떨어져서 접근로를 횡단하는 거의 수직한 방향의 fault가 발달되어 있다.

Fig. 2 및 3은 간단한 조인트 구조에서 수평-수직압비  $K_0$ 의 3경우( $K_0=0.5, 1, 3$ )에 대하여 경계요소법에 의한 응력해석 및 변위해석을 실시한 결과이다. 현위치 응력측정은 수압파쇄

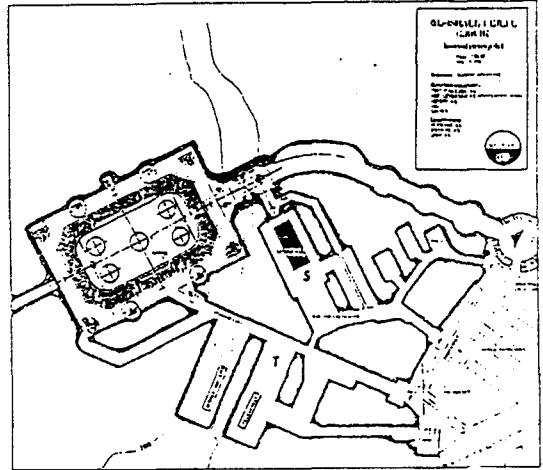


Fig. 1 Plan of cavern lay-out. S=existing swimming pool. T=Telephone Exchange. (Plan by courtesy of Fortifikasjon A/S)(After N. Barton et al.)

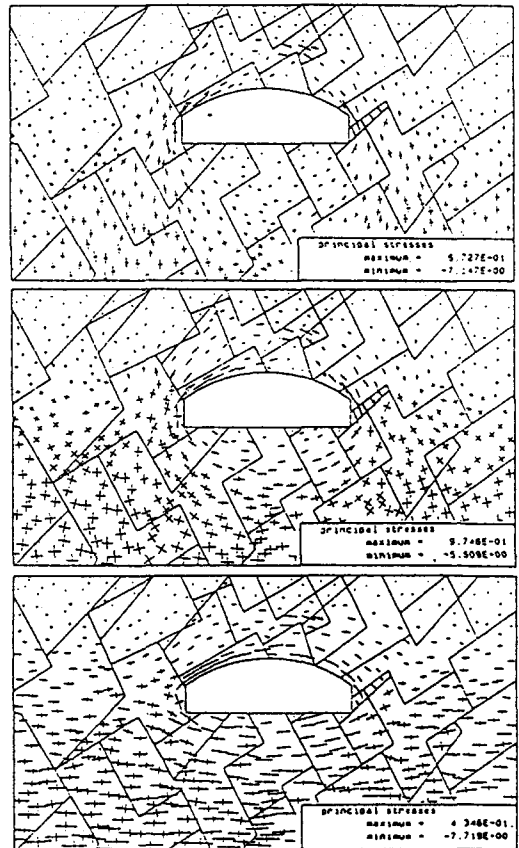


Fig. 2 Simplified phase I UDEC-BB runs. Principal stresses with  $K_0=0.5, 1, 3$ .(After N. Barton et al.)

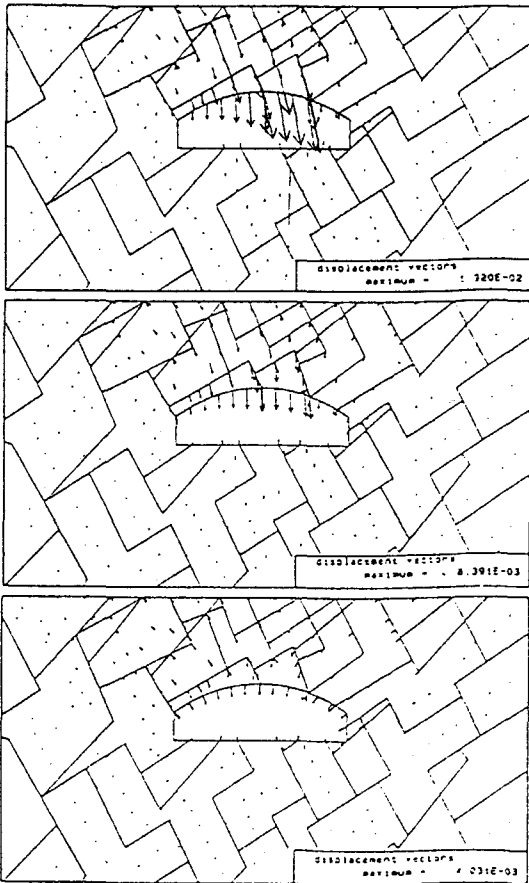


Fig. 3 Simplified phase I UDEC-BB runs. Deformations vectors(m), with  $K_0=0.5, 1, 3$ (Maximum = 19.2mm) (After N.Barton et al.)

법과 overcoring법에 의해서 수행되었는데 그 결과 수평압이 크게 나타났다. 따라서 Fig. 2 및 3에서 각각 마지막 해석결과를 응용하여 Fig. 4~7에는 수치해석모델, 주응력해석, 변위 해석, 조인트 전단변위량해석결과 등을 나타내었다. 특히 Fig. 5에서 보는 바와 같이 캐번의 크라운(crown) 부근에는 응력이 개방된 블록(stress-free block)들이 나타났는데 이런 경우에는 조직적인 록볼팅(rock bolting)을 실시하거나 일반적인 슛크리트(shotcrete) 혹은 화이버(fiber)를 넣어서 보강된 슛크리트를 실시하여 캐번의 안전성을 높일 수 있을 것이다.

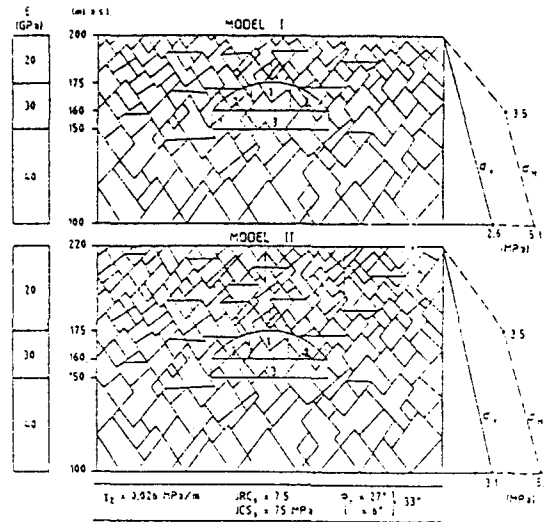


Fig. 4 Phase II assumptions concerning boundary stress conditions, deformation modulus (E) and joint properties. Model I = 25m overburden, Model II = 45m overburden(After N. Barton et al.)

2.2 지하차도 인터체인지의 공사중 현장계측 및 수치해석

본 사례는 Cravero, Grasso, Iabichino 및 Pelizza에 의해서 수행된 결과로서 연구 대상인 지하차도 인터체인지의 공사는 Italy의 Abbadia Lariana 근처의 Lecco-Colico 고속도로를 위한 것(Fig. 8, 9 참조)으로 공사장의 암석은 지질연대로 볼 때 middle-triassic age의 도로마이트질 석회암(dolomitic limestone)이며 터널은 서로 인접한 3개로 구성되어 있다. 지하 인터체인지의 일부인 Lecco쪽 교차점만의 건설을 위해서도 19m 이상의 넓은 스팬에 14m의 높이가 필요하다. 이러한 대공동 구조물의 안전평가를 위하여 2차원 유한요소해석을 실시하였고 공사가 진행중에 응력과 변위는 압력셀(pressure cell)과 보아홀 신장계(borehole extensometer)에 의해서 측정되었다.

Fig. 10은 수치해석을 위한 유한요소망이고

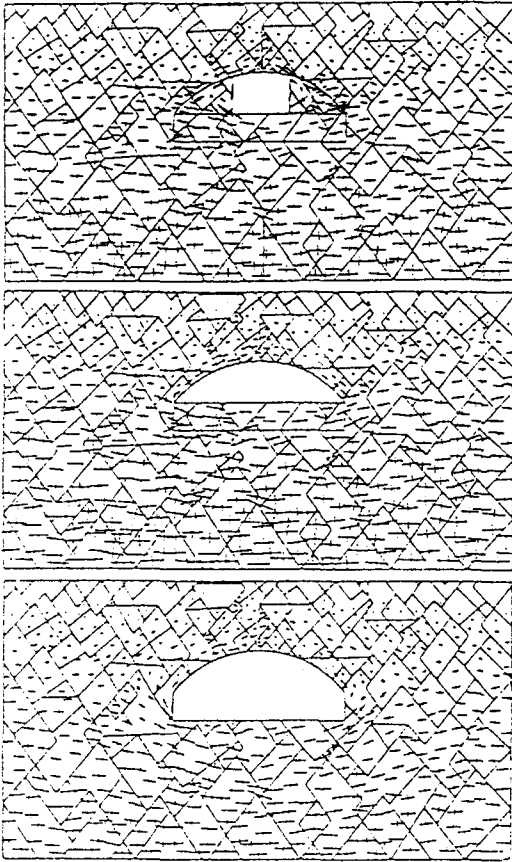


Fig. 5 Phase II UDEC-BB runs for Model I : principal stresses(After N.Barton et al.)

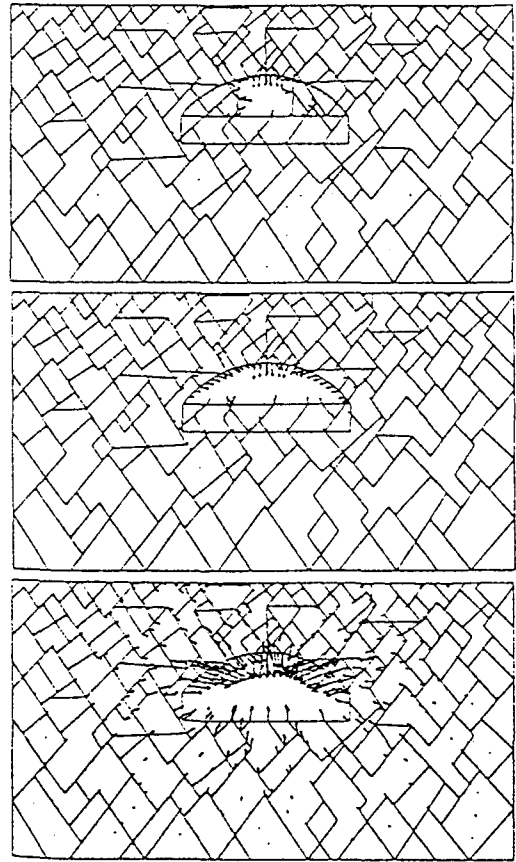


Fig. 6 Phase II UDEC-BB runs for Model I : deformations vectors(maximum 4.8mm) (After N.Barton et al.)

Fig. 11은 수치해석결과로서 주응력과 이완대를 나타낸 것이다. 인터체인즈 구축전과 굴착 과정에서 수치해석을 실시하고 한편으로는 압력셀에 의한 응력측정과 신장계에 의한 변위측정을 실시하여 해석결과와 비교검토함으로써 응력집중의 재분배현상과 이완대의 발전과정을 점검할 수가 있어서 공사진행중에 적절한 지보 시스템을 도입할 수가 있었다. 여기서 도입한 적절한 지보시스템의 예를 들면 스틸셋(steel sets), 철망(wire mesh), 슛크리트(shotcrete), 철재빔(metalwork beams), 밸브식 그라우팅

파이프(valved grouting pipes), 예응력 텐션로드(prestressed tension-rods)등이다.

### 2.3 Cavern 설계에 있어서 초기응력과 전단파라메타의 영향

본 사례는 Austria의 Pottler 및 John에 의해서 수행된 대형 지하 수력발전소 설계에 관한 연구결과이다. 수력발전소의 중심부 심도는 400m이다. 캐번의 규격과 유한요소해석 모델은 Fig. 12와 같으며 탄성해석과 점소성해석을 실시하였는데 후자의 경우에는 Drucker-Prager의 항복식(Drucker and Prager, 1952)

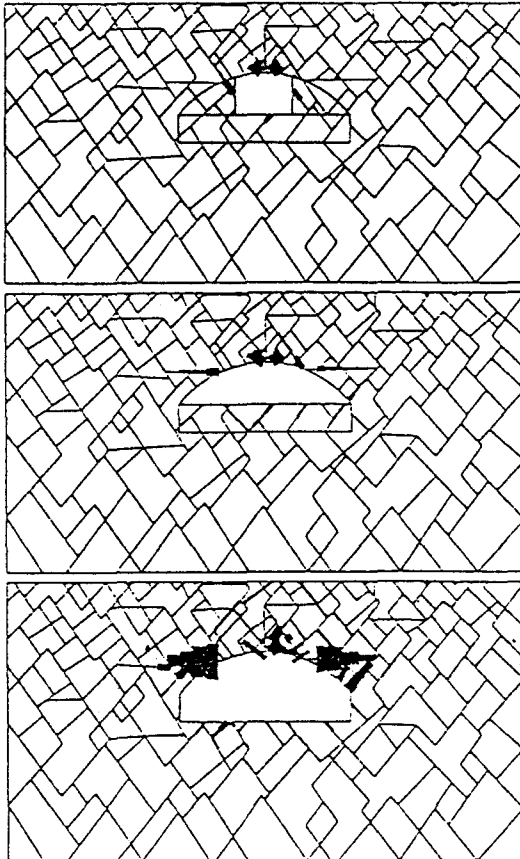


Fig. 7 Phase II UDEC-BB runs for Model I : joint shearing magnitudes(maximum 3.4 mm) (After N.Barton et al.)

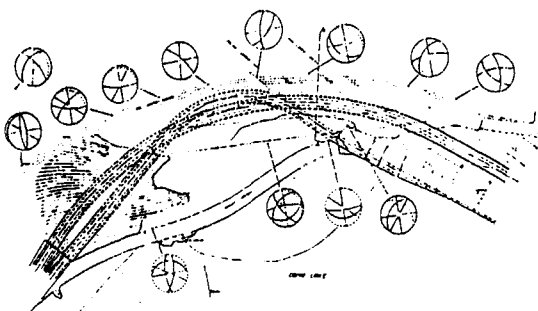


Fig. 8 Layout of multiple tunnels of the highway and interchanges at Abbadia L. ; stereogram of joint sets. (After M. Cravero et al.)

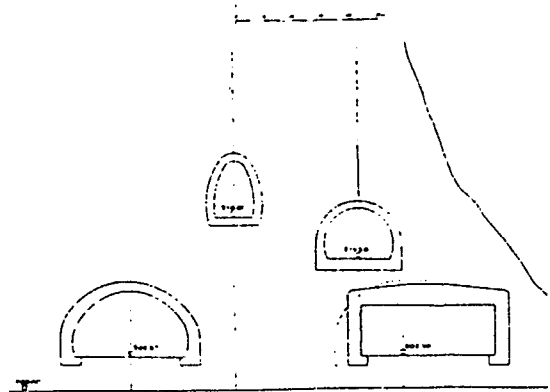


Fig. 9 A typical cross section(A-A) of multiple tunnels and junction widened area. (After M.Cravero et al.)

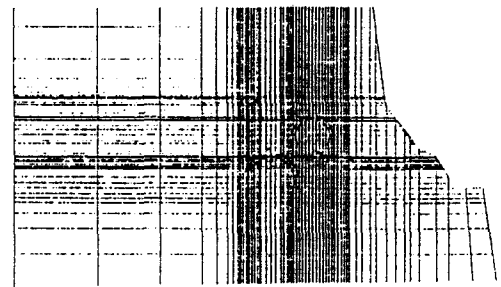


Fig. 10 2D FEM model used for analysis.(After M.Cravero et al.)

과 이에 관련된 flow rule을 적용하였다.

주요 입력자료는 영률  $E=400\text{MN}/\text{m}^2$ , 포아송비  $\nu=0.25$ , 수평-수직압비  $K=0.33\sim 2.0$ , 마찰각  $\phi=25^\circ\sim 45^\circ$ , 점착계수  $C=0\sim 1.0\text{MN}/\text{m}^2$ , 암석비중  $\gamma=0.025\text{MN}/\text{m}^3$  등이다.

Fig. 13은  $C=0.25\text{MN}/\text{m}^2$ ,  $\phi=35^\circ$ 일때의 점소성 해석결과를 나타낸 것이다. 이 해석결과에 의하면 double cavern solution(DCS)의 경우에 스팬의 대형화로 높은 인장응력이 발생하여 이에 대한 보강이 요구되었다. 그리고 DCS의 경우는 SCS(Single cavern solution)의 경우에 비하여 이완대의 확장으로 변위도 크게

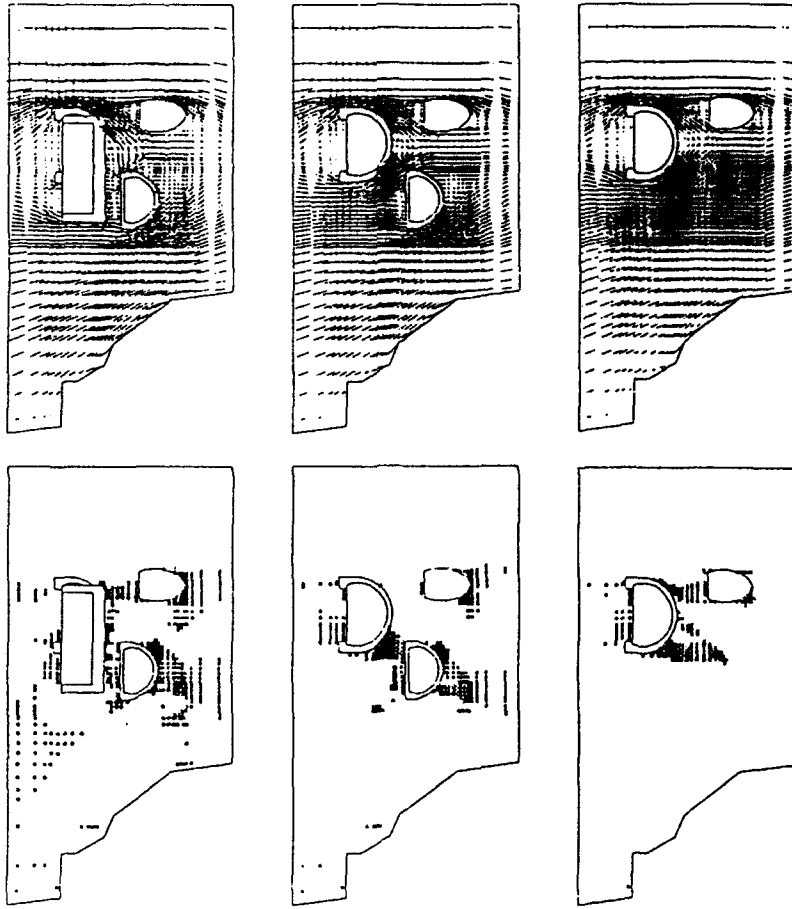


Fig. 11 Principal stresses and loosened areas(shear⊙, tension \*), before interchange excavation and in progress of work.(After M.Cravero et al.)

나타났다. 따라서 슛크리트, 록볼팅 등에 의한 1차적 보강책이 강구되어야 할 것이다.

2.4 대형지하공동주위의 응력상태에 대한 탄소성 해석

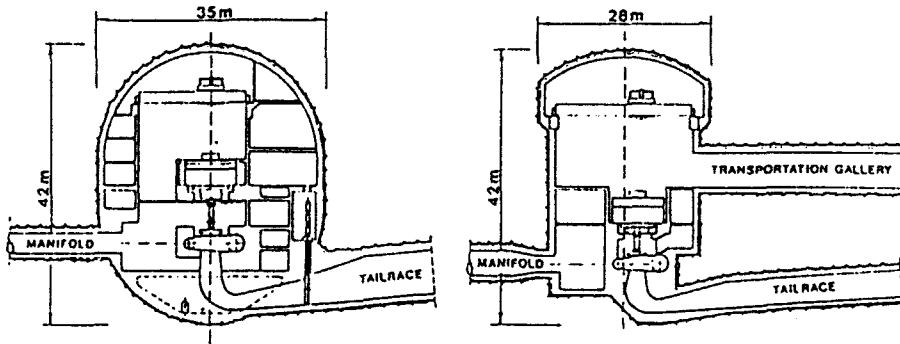
본 사례는 Romania의 Popovici, Tarhon 및 Suprovici에 의해서 수행된 연구결과로서 지하 수력발전소의 규모는 폭 16m, 길이 65m, 높이 41m이고(Fig. 14 참조), 발전소 심도는 약 240m이며, 이러한 규모의 cavern을 굴착하는 과정에서 지보시스템과 암반의 응력, 변형률을

해석 연구한 것이다.

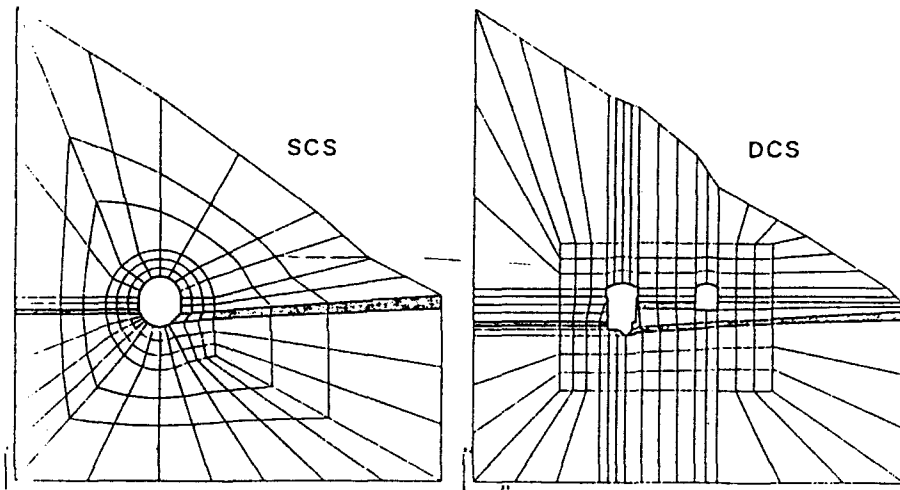
해석과정에서 암반과 콘크리트 라이닝의 지중은 Drucker-Prager 항복조건에 따르는 것으로 하고 보강용 철근과 록볼트는 von Mises 항복조건에 의하는 것으로 하였다.

암반이나 지보시스템의 탄소성체에 대하여 유한요소법에 의해서 역해석을 실시하므로써 지보시스템 및 주위 암반의 응력 및 변형률 이력을 규명할 수가 있었다.

캐번의 건설중 슛크리트 벽과 주위 암반에 균열이 발생했는데, 수치해석에 의해서 소성영



(a) Dimensions of the cavern : SCS and DCS.



(b) Finite element meshes for the SCS and DCS.

Fig. 12 Dimensions of the cavern and finite element meshes for the SCS and DCS(After R.Pöttler and M.John)

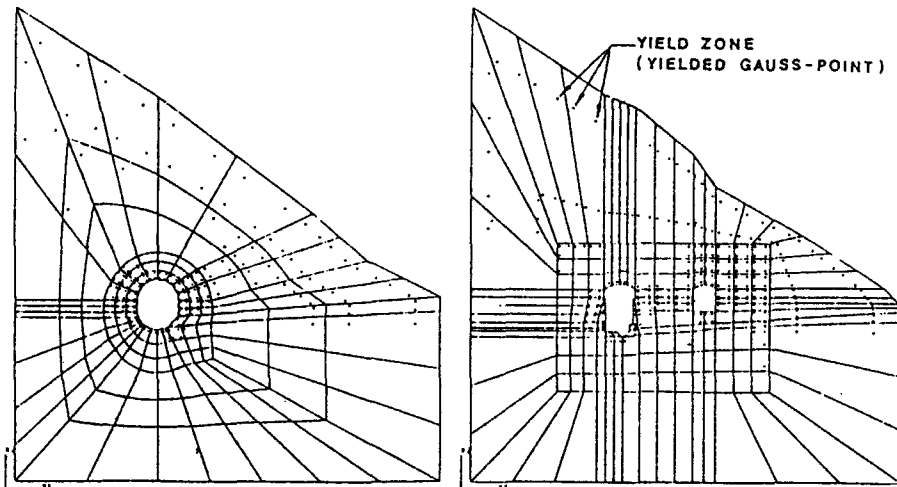


Fig. 13 Yield zone  $C=0.25MN/m^2$ ,  $\varphi=35^\circ$  (After R.Pöttler and M.John)



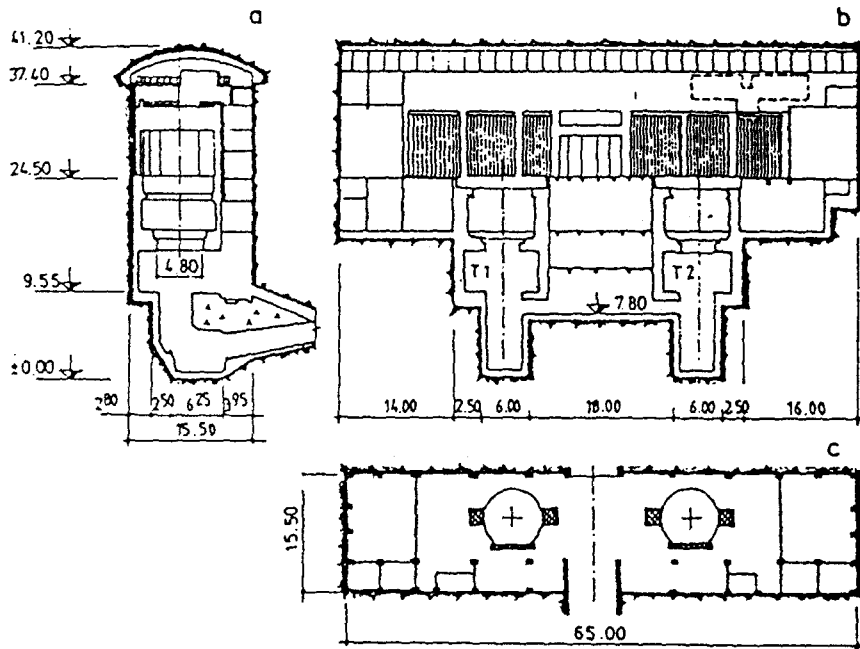


Fig. 14 Riuł-Mare Retezat hydropower house : a-cross section, b-longitudinal section, c-horizontal section at the generator hall level.(After A.Popovici et al.)

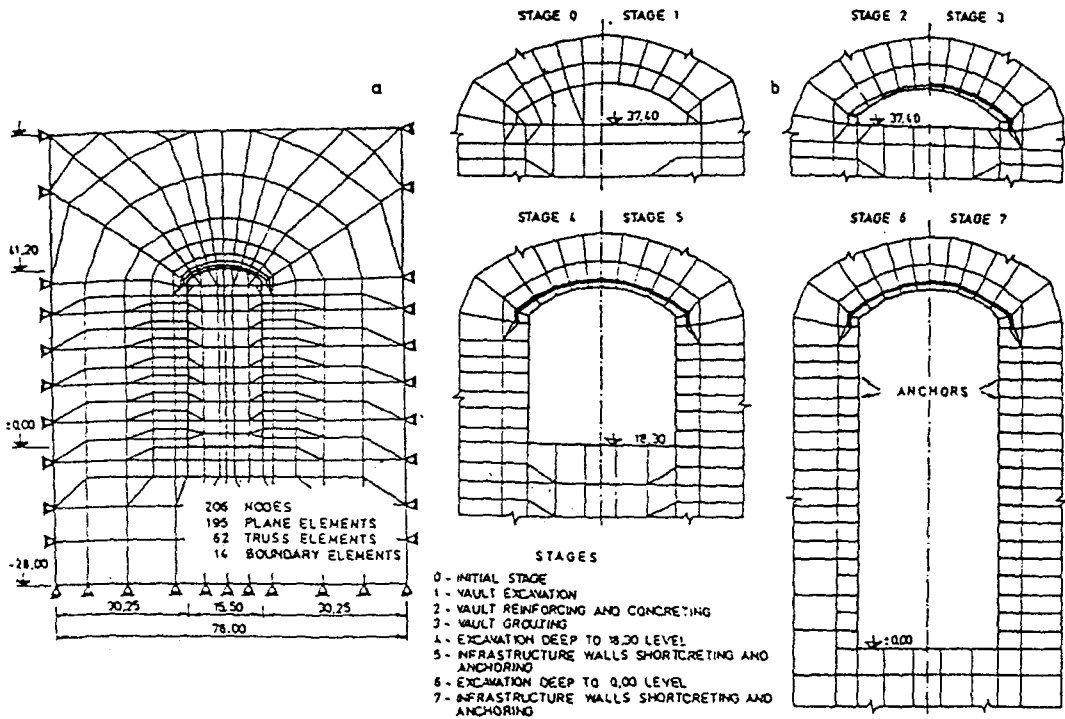


Fig. 15 Riuł-Mare Retezat hydropower house F.E.M. analysis : a-initial mesh, b-simulated construction sequences.(After A.Popovici et al.)

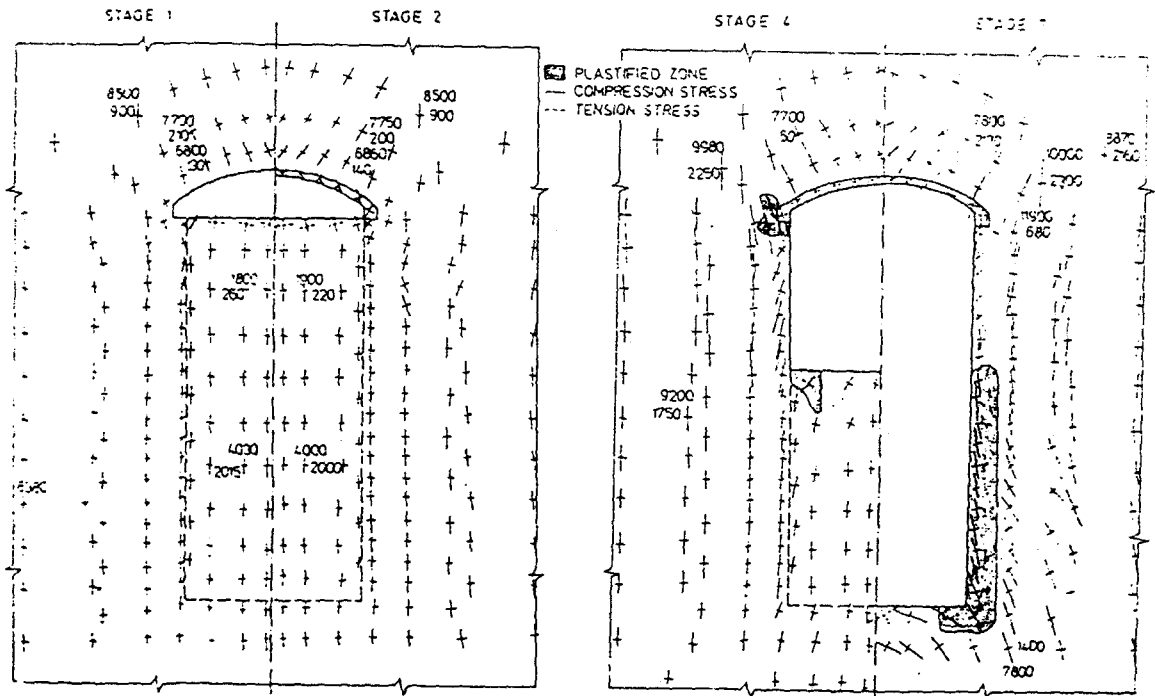


Fig. 16 Principal stresses history and plastic zones.(After A.Popovici et al.)

역을 규명할 수가 있었으며, 보강용 그라우팅 앵커의 설치간격, 길이, 제조응력 등을 계산할 수가 있었다.

Fig. 15는 수치해석을 위한 유한요소망과 굴착단계를 표시한 것이고, Fig. 16은 주응력 이력 및 건설중에 발생한 소성영역을 나타낸 것이다. 이와같이 수치해석에 의하여 점검된 소성영역은 현지측정에 의해서 확인되었으며, 그라우팅 앵커 등으로 보강되었다.

2.5 대형지하공동에 대한 핀란드식 설계방법

본 사례는 Finland의 Saanio에 의해서 수행된 연구결과이다. 대형지하공동에 대한 핀란드식 설계방법은 NATM(New Austrian Tunneling Method)에서와 같은 원리에 기초를 두고 있다. 암석자체와 암석 본래의 강도는 하중을 지지하는데 가장 중요한 '요소이며, 록블링과 슛크리트는 단지 필요한 보강에 불과한 것이

다. Finland 및 Scandinavia에서 이루어진 슛크리트 개발에 의해서 캐번의 목적이 극장이나

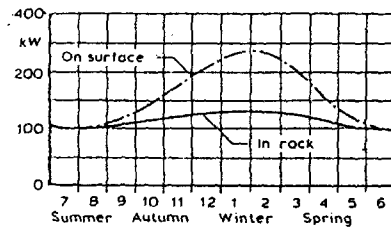


Fig. 17 The need for energy as a function of the season. Inside temperature is 28°C(After V. Saanio)

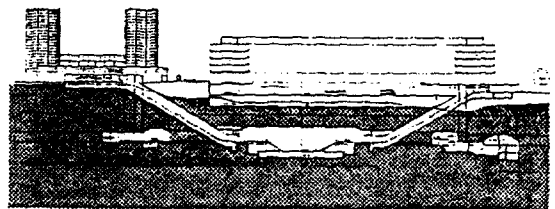


Fig. 18 Kamppi station, section(After V.Saanio)

수영장인 경우일지라도 슛크리트 이상의 다른 라이닝이 필요하지 않게 되었다. 캐번 내어로 누수현상이 일어날때는 그라우팅을 실시하게 된다.

지과학적 암석분류는 직접적으로 보강분류로서 적용되는 것이 아니고 지질학과 암석공학간의 연결 역할로서 활용되는 것이다.

Fig. 17은 에너지 절약면에서 볼 때 지하공간 활용의 이점을 설명해 주는 그림이다. 최근에 Finland 에서 구축된 Kamppi 지하철역의 예를 들면 다음과 같다.

Kamppi 지하철역은 Helsinki 시내의 지하철에서 가장 교통량이 많은 역으로, 플랫폼은 해수준면 이하 21m 지점에 있으며 지표면은 대략 해발 14m 고도로서 지표에서 7m깊이까지 층적층으로 덮혀있다(Fig. 18참조). 지하철 중앙부에서 15.5m의 스팬을 가진 2개의 터널이 14.5m의 스팬을 가진 3개의 터널과 직각 방향으로 달리고 있으며 터널간의 pillar는 높이 13m, 2개면의 폭 6.9×10.9m로 되어있다.

상기와 같은 지하구조물의 변위 및 응력해석은 유한요소법에 의하여 3차원적으로 실시되었다. 지하철역의 건설후에도 변위측정을 실시하여 수치해석결과와 비교 검토했을 때 양자는 거의 일치하였음을 확인하였다. 따라서 본 해석프로그램에 의하여 Kamppi 지하철역의 앞으로의 안전점검이 안전하게 수행될 것이다.

2.6 지하구조물의 時差的 구축에 따른 변형거동의 수치해석에 관한 연구

본 사례는 필자에 의하여 발표된 논문(터널과 지하공간, Vol. 1, No.1, p.39~48, 1991)으로서 평면적 규모가 약 200m×200m이고, 높이는 수십 m정도인 지하 블럭에 구조물을 시차적으로 구축할 경우에 대해서 경제요소법에 의

한 준3차원 해석을 실시하여 주위암반의 변형거동을 조사, 연구한 것이다.

Fig. 19, 20 및 21은 각각 해석대상의 지하블럭의 모양과 지하구조물의 시차적 구축에 따른 에너지 집적현상, 특정구역에 대한 응력집중현상 및 변위측정-해석 비교결과를 나타낸 것이다.

이들의 결과에 의하면 지하도시 건설과 같은 복잡한 구조물을 시차적으로 건설할 때 현지변형계수 등의 실측 자료를 이용하여 수치해석을 실시하므로써 위험개소를 점검할 수 있어서, 이에 대한 적절한 안전대책을 수립할 수 있을 것이다.

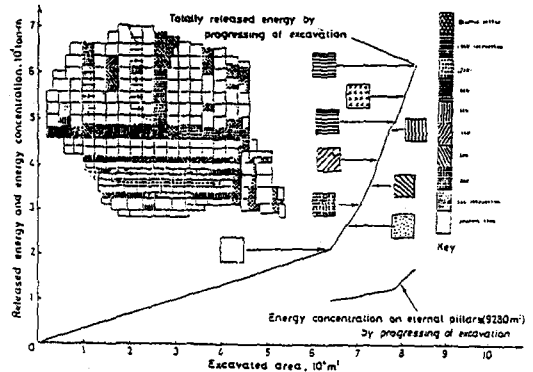


Fig. 19 Energy concentration on external pillars and around the large opening as a function of excavated area

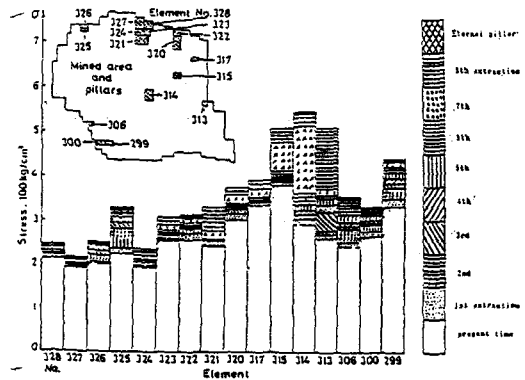


Fig. 20 Stresses on pillars owing to extraction progress

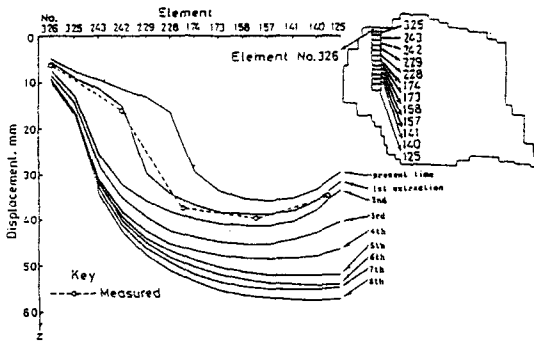


Fig. 21 Measured and calculated displacements

### 3. 결 론

1986년 이후, 최근에 주요한 국제학술회의에서 발표된 논문으로서 지하공간에 관련된 수치해석에 관한 38건의 논문들을 중심으로 하여 연구사례들을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 연구목적상으로 보면, 합리적인 설계와 안전한 건설을 위한 해석이 87%, 점점과 안전유지를 위한 해석이 10%, 증축 및 시차적 건설을 위한 해석이 3%이었다.

2) 수치해석방법상으로 보면 유한요소법에 의한 것이 79%, 경계요소법에 의한 것이 16%, 개별요소법에 의한 것이 5%이었다.

3) 해석모델의 성질상으로 보면 탄성체의 경우가 26%, 탄소성체의 경우가 29%, 점탄성체의 경우가 3%, 점소성체의 경우가 5%, 탄점소성체의 경우가 3%, 절리-불연속체의 경우가 34%이었다.

4) 수치해석을 위한 입력 data용으로 현지 측정 data가 많을수록 암반거동의 예측은 그 신뢰도가 높으며, 변위거동의 현지 측정결과와 수치해석결과를 계속적으로 비교 검토함으로써 정확한 암반거동을 예측할 수 있음이 연구사례에 의하여 예시되었다.

### 참 고 문 헌

- 1) 李喜根, 1991, 地下構造物の 時差的 構築에 따른 變形舉動의 數値解析에 關한 研究, 터널과 지하공간, 한국암반역학회지, Vol. 1, No.1, p. 39-48
- 2) N.Barton, L.Tunbridge, F.Loset, H. Westerdahl, J.Kristiansen, G.Vik and P.Chryssanthakis, 1991, Norwegian olympic ice hockey cavern of 60m span, 7th ISRM, Vol. 2, p.1073-1081
- 3) M.Craverio, P.Grasso, G.Iabichino and S. Pelizza, 1986, Methodology for calculation and field checking adopted for a complex configuration for and underground highway interchange(Coms, Italy), Large Rock Caverns, Proceedings of the international symposium, Helsinki, Finland, Vol.2, p.1235-1246
- 4) R.Pöttler and M.John, 1986, Influence of primary stresses and shear parameters on the design of caverns, Large Rock Caverns, Proceedings of the international symposium, Helsinki, Finland, Vol.2, p.1411-1418
- 5) A.Popovici, C.Tarhon and P.Suprovici, 1986, Elasto-plastic analysis of the stress-state around a large underground cavern, Large Rock Caverns, Proceedings of the international symposium, Helsinki, Finland, Vol.2, p.1399-1410
- 6) V.Saanio, 1986, Finnish design method for large rock caverns, Large Rock Caverns, Proceedings of the international symposium, Helsinki, Finland, Vol.2, p. 1419-1430