

단열체계 및 수리특성 평가방법 연구

조성일	한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
김천수	한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
배대석	한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
김경수	한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
송무영	충남대학교 지질환경과학과

1. 서 론

단열체계 및 수리인자의 해석신뢰도를 향상시키기 위한 노력은 최근 국내·외적으로 많은 연구가 진행 중에 있으며, 국외의 경우 방사성폐기물처분과 관련하여 지하시험시설을 이용한 연구를 통해 지질 및 구조분야, 수리지질학, 암반역학, 지구화학, 지열, 용질이동, 생태학분야로 세분화하여 각 분야별 해석신뢰도와 이해도를 한 단계 높이는 계기를 마련하였다(Andersson et al. 2002). 또한 지하시험시설 건설 전 지표조사 시 예측된 자료와 건설 후 확인된 자료와의 대비를 통해 조사의 문제점을 도출하고 이를 보완하여 조사 및 해석방법에도 많은 발전을 기여하였다.

국내의 경우 지하시험시설을 이용한 연구는 현재 초기단계에 있으며, 지하저장시설 건설과정 중 지표조사단계에서 예측한 자료에 대한 확인이나 문제점을 보완하는 연구는 현장여건 상 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 지하시험시설을 이용한 지하지질환경연구의 대안으로 지하유류저장시설 건설과정 중 도출된 자료를 통해 지표조사단계에서 예측된 자료(엘지엔지니어링(주), 1999; 김경수, 2000)와 저장공동 굴착 시 확인된 자료(대우엔지니어링, 2003a, 2003b)와 대비해 봄으로써 불확실성이 높은 단열 및 수리인자의 지하분포특성을 해석하고, 조사방법의 문제점을 도출하여 보완방안을 모색해 보고자 하였다.

2. 단열체계

2.1. 단열대

지표조사단계에서 위성영상분석, 지구물리탐사, 시추조사에 의해 예측된 6개의 국지규모 단열대 중 지하공동조사에서 그 위치 및 방향이 비교적 일치하는 것으로 확인된 것은 NE-1에 해당하는 F-1 구조대 하나로, 예측신뢰도는 매우 낮은 것으로 확인되었다(Figure 1). 이처럼 지표노두와 시추공에서 조사된 단열대의 낮은 예측신뢰도는 1차적으로 연구지역의 고유특성에 의해 심도가 깊어짐에 따라 단열대 자체의 위치 및 폭, 방향의 다양한 특성 등에 의한 원인으로 판단할 수 있으며, 2차적으로 조사방법 및 해석의 오차에 의한 결과로 유추할 수 있다.

국외의 경우에는 정량적인 분류기준을 통해 예측신뢰도를 향상시키는 계기를 마련하였다. Munier et al.(2003)은 취성변형(brITTLE deformation)에 의해 형성된 단열빈도에 의하여 단열체계의 분류기준을 제시하였으며, 단층비지(fault gouge)를 포함하는 단층핵(fault core)은 9개/m 이

상, 교란대(transition zone)의 경우 4~5 개/m, 암반 내 단위 m당 단열의 수는 4개 미만을 포함하는 것으로 정의하였고, Palmqvist(1990)는 단열대는 단열밀도가 주변 암반보다 상대적으로 높은 구간으로 정의하고, 단열대의 정량적 범위는 폭 1m 이상, 단열빈도 5 개/m 이상 구간으로 기준을 정하였다.

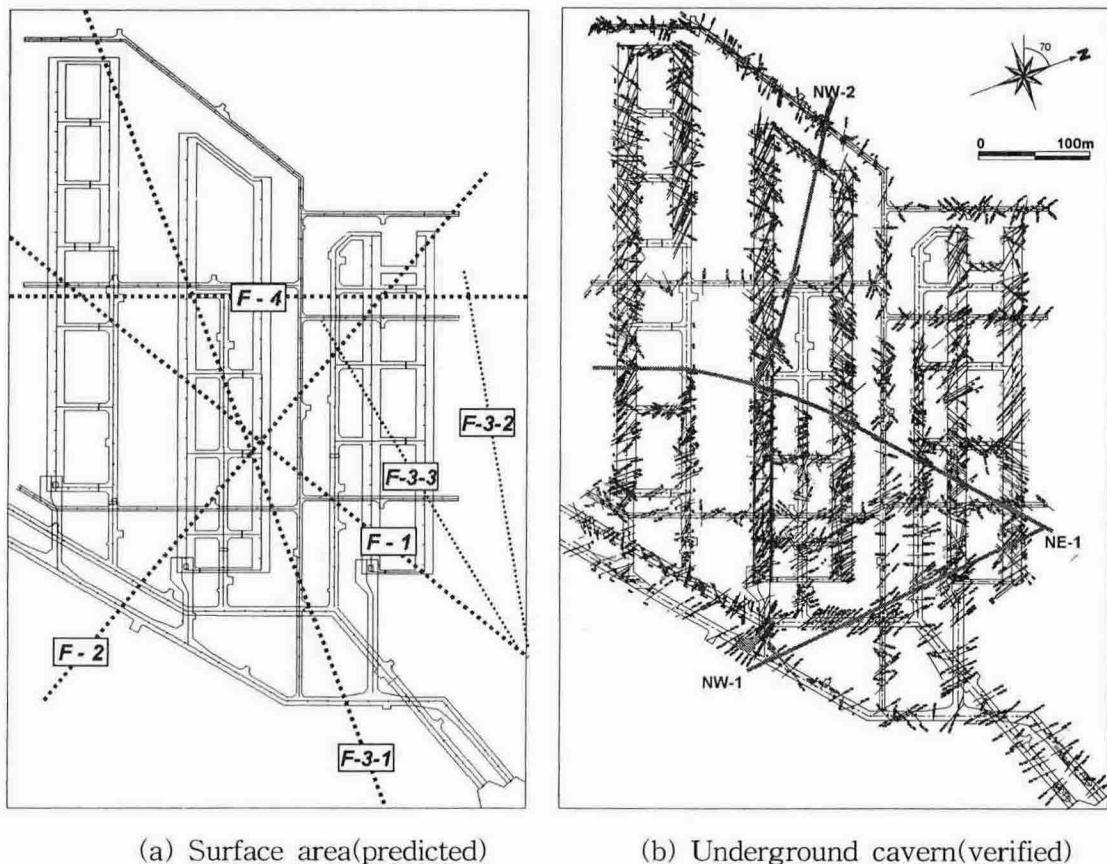


Figure 1. The predicted and verified fracture zones around underground cavern.

본 연구에서는 단열빈도, 틈의 크기, 상대강도지수, 개구성 여부 등에 대한 정량적 해석이 비교적 가능한 BHTV(Bore Hole TeleViewer)의 검출결과를 이용하여 좀 더 정량적인 분류를 할 수 있는 기준을 제시해 보고자 하였다. 분류기준은 국외 분류기준을 참고로, NE-1 단열대의 공동내 분포양상과 지표조사공에서 조사된 BHTV에 나타나는 이미지를 대비하여 설정하였다. BHTV에 인지된 단층핵의 폭은 약 1 m로 공동에서는 1 ~ 1.5 m로 비교적 크기가 비슷하며, 교란대의 폭 역시 BHTV의 경우 3.5 m, 공동 내에서 약 4 ~ 4.5 m로 유사한 크기를 갖는 것으로 나타났다. 교란대의 단위 m당 단열의 수는 BHTV의 경우 8개, 공동 내에서는 9개로, 교란대로 분류될 수 있는 단열의 수는 단위 m 당 최소한 8개 이상을 포함함을 알 수 있다. 따라서 본 연구지역에서 단열대로 간주할 수 있는 단열 폭의 규모는 국지단열대(local fracture zone)로 분류할 수 있는 최소크기는 1 m로 하였으며, 분류기준은 다음과 같다.

- 단열대(fracture zone) : Crushed zone(파쇄대)을 포함하며 Crushed zone 주변에 Damaged zone(교란대)이 분포하고 폭의 크기는 1m 이상이다.
- Crushed zone은 단열의 빈도가 단위 m당 10개 이상이거나, 단열을 셀 수 없을 만큼 매우 불

규칙적으로 파쇄된 구간으로 단층비지(fault gouge)나 단열충전물(infilling material)을 다량 포함하며 폭 0.3 m 이상의 규모에 해당한다. BHTV 이미지에서 진폭값과 상대강도지수가 상대적으로 매우 낮고(<50%), 주시(travel time)가 길며 Crushed zone 주변은 moderately fractured rock mass가 분포한다.

- Damaged zone : Crushed zone 주변에 분포하는 폭 1m 이상의 구간으로, 교란대 내의 단열의 분포특성은 Fracture cluster와 동일하다.
- Fracture cluster는 단열의 빈도가 단위 m 당 6 ~ 9개로, 반 개구성 및 개구성 단 열을 다량 포함하여 상대강도지수가 상대적으로 낮은 영역에 해당한다.
- Wide open fractures는 개구성 단열로, 틈의 크기는 0.02 ~ 0.3 m이며 경사각이 45° 이하이고, 진폭 및 주시이미지에 뚜렷한 연장성을 보이는 개구성 단열이다.
- Open fractures : 틈의 크기가 0.02 m 이하로 진폭 및 주시이미지에서 연장성이 뚜렷하게 나타나며 상대강도지수가 50% 미만이다.
- Partly open fractures는 진폭 및 상대강도지수가 모암에 비해 비교적 낮고, 부분적으로 주시 이미지에 나타나는 반 개구성 단열에 해당한다.
- Tight fractures는 진폭이미지에만 나타나며 진폭 및 상대강도지수가 모암과 비교적 유사한 단열이다.

본 분류기준은 본 연구지역의 암종에 해당하는 화산암과 비교적 취성변형이 발생되는 영역에서의 NE-1 단열대만을 고려하여 분류기준을 제시하였으므로, 추후 다양한 암종과 암반특성에 적용하여 수정·보완되어져야 할 것이다.

2.2. 암반단열

2.2.1. 방향성

지표노두 30개 지점에서 측선법에 의해 조사된 총 935개 단열의 주 방향은 N70°E/75°(NW/SE)이고, 지표조사공의 BHTV 자료에 의해 조사된 총 4062개 단열의 주 방향 역시 N65°E/88°(NW/SE)로 비교적 유사한 경향을 보여주었다(김경수, 2000). 그러나 지하공동 내 벽면에서 측선법에 의한 단열의 주 방향은 N10 ~ 20°W/80°(NE/SW)로 지표노두 및 시추공에서 Set 2로 분류된 단열조와 유사한 방향성을 나타내었다. 지표와 지하의 주 방향성이 다른 이유는 1차적으로 연구지역 내 암반의 고유특성으로 해석할 수 있으며, 2차적으로 조사의 제한성으로 인해 조사대상에 따라 인지될 수 있는 단열이 어느 한 방향으로 편중된 결과로 유추할 수 있다. 즉, 지표노두면의 경사각 및 경사방향, 시추방향에 따라 어느 한 단열조의 단열이 배제되거나 과도하게 조사될 수 있기 때문에 조사편의에 의한 오차를 최소화할 수 있도록 조사대상과 조사방향이 선정되어야 할 것이다.

2.2.2. 크기

단열크기의 경우 산술평균값과 확률밀도분포에 따른 순산모델링기법을 이용한 결과를 보면 고경사를 갖는 Set 1과 Set 2 단열조의 경우 지표보다 지하에서 약 0.6 ~ 0.7배 작게 계산되었다. 이는 지하공동 내 조사대상이 최대 20 m(가로) × 5 m(세로)인 수직인 면으로 고경사 단열의 최

대길이가 5 m로 제한되었기 때문인 것으로 사료된다. 반면, 조사 대상의 규모가 유사한 저경사 단열의 경우에는 매우 유사한 값을 보인다.

단열의 크기 역시 조사대상의 규모에 따라 크기의 편차가 매우 크기 때문에, 조사대상은 가능한 한 최대한 크고 가로와 세로의 차이는 크지 않도록 선정되어야 할 것으로 판단된다.

2.2.3. 빈도

Stanfors et al.(1997)의 연구결과에 의하면 화강암지역에서 단열의 빈도는 지표보다 지하에서 약 1.7배정도 적게 분포하며, 섬록암 지역에서도 2배정도 작은 것으로 보고하였다. 본 연구지역에서는 고경사 단열조의 경우 지표노두나 시추공 조사자료보다 지하공동에서 조사된 단열의 빈도가 약 1.4 ~ 3.8배 작게 분포하며, 저경사 단열조의 경우에는 유사하거나 오히려 1.2배정도 큰 것으로 조사되었다. 저경사 단열조의 빈도가 지하공동에서 증가한 원인 역시 조사대상의 가로와 세로의 조사면적 크기비율에 의한 것으로 판단된다.

3. 수리특성

3.1. 수리적 연결성

본 연구지역 내 FZ-1과 FZ-2 구조대 주변은 상·하부의 수리적 연결성에 따라 서로 다른 지하수체계를 형성하고 있는 것으로 해석되었다(조성일, 2005). 특히 FZ-1 구조대 주변은 공동굴착 전 이중수위측정시설에 의해 계측된 상·하부의 수위차는 최대 약 120 m에 이르는 것으로 나타났으며, 공동굴착 중 FZ-1과 인접한 K-1공에 설치된 다중패커시스템에 의해 계측된 수위변화를 보면 상부 2구간(Zone 1, 2)은 공동굴착에 따른 수위변화가 크지 않고 지하저장공동의 상부(Gallery)와 하부(Bench-1)구간을 굴착하는 시기에 따라 수위강하시기도 다르게 나타났다(Figure 2). 따라서 지표조사단계에서 이러한 특성을 예측하기 위해서는 수리지질학적 특성이 다른 구간과의 격리를 통한 계측이 반드시 요구되며, 주입이나 양수에 의한 지하수체의 교란에 따른 구간별 모니터링이 필수적인 것으로 판단된다.

3.2. 수리전도도

수직 및 수평수벽공에 의해 계산된 공동주변의 기하평균은 2×10^{-9} m/sec로 지표조사 시 지표관측공에서 계측된 풍화대 영역(GL. 0 ~ -40 m)을 제외한 영역의 수리전도도 기하평균인 5×10^{-9} m/sec(김경수, 2000)보다 약 2.3배 작은 값을 나타내었다. 또한 수평수벽공에서 계산된 수리전도도의 기하평균 1×10^{-9} m/sec은 수직수벽공의 기하평균 8×10^{-9} m/sec보다 약 6배정도 작게 계산되었다. 이러한 차이의 원인은 크게 두 가지로 설명될 수 있다.

첫째, 심도의 증가에 따라 단열빈도는 감소하고 틈의 크기 및 길이는 작아지기 때문에 수리적 연결성이 양호하지 못한 결과로 유추할 수 있다. 실제로 스웨덴의 Finnsjön site의 연구결과에 의하면 지표면으로부터 약 500 m 하부는 최상부보다 약 10배정도 작은 특성을 나타냈으며 (Andersson, 1991), Tammemagei and Cheislard(1996)는 다음과 같은 경험식에 의하여 심도가 증가함에 따라 수리전도도가 감소한다고 보고 하였다.

$$\log(K) = -1.65 \log(z) - 4.5 \quad (1)$$

$$K = 10^{-(7 + z/250)} \quad (2)$$

여기서, K = 수리전도도

z = 심도

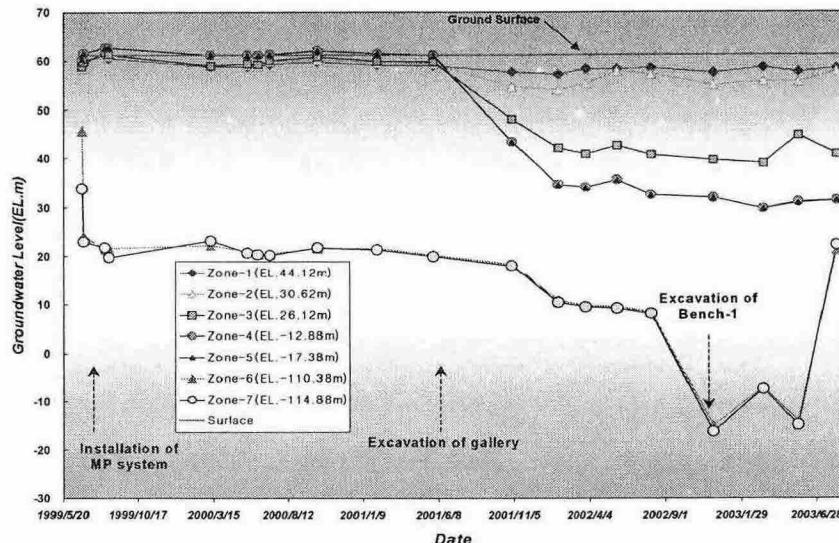


Figure 2. Evolution of the groundwater levels in the multi-packer system.

둘째, 수리시험 방법 및 해석모델의 적용에 따른 차이로 해석가능하다. 수리시험은 지하매질과 지하수체계 특성에 따라 그 시험방법과 해석모델을 달리 적용할 수 있으므로 계산된 수리전도도 역시 다소 차이를 나타내게 된다. Andersson and Persson(1985)은 straddle 패커시험에서 일반적으로 정상류 분석방법에 의한 수리전도도 값이 부정류 해석에 의한 경우보다 적개는 2 ~ 3배, 경우에 따라서는 10 ~ 20배 가량 더 큰 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 수평수벽공 자료를 이용해 계산된 정상류 분석이 부정류에 의해 해석된 값보다 산술평균의 경우 약 1.75, 기하평균은 1.18 배정도 높게 나타났다.

김경수 외(2002)는 단일공 내에서 다양한 수리시험을 통해 천부의 지표풍화대에 대한 수리특성은 전공순간충격시험이나 양수시험의 효과적이며, 심부의 수리특성은 정압주입/수위강하 시험이나 펠스시험이 타당한 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 K-1공을 대상으로 다중패커시스템을 설치하기 전 이중패커를 이용한 정압주입/수위강하 시험과 전공 순간충격시험을 수행하였고, 다중패커시스템을 설치한 후 구간별 펠스시험을 실시하여 시험방법 및 해석식의 차이에 의해 도출된 수리전도도를 비교해 보고자 하였다.

정압주입/수위강하시험에 의한 K-1공의 기하평균(정상류)은 8×10^{-9} m/sec로 전공 순간충격시험에 의한 3×10^{-9} m/sec(Bouwer & Rice, 1976)보다 약 4배 정도 낮게 계산되었다. 전공 순간충격시험은 시추공 전구간 중 투수성이 가장 높은 구간의 수리특성을 대변하는 것으로 보고(함세영외, 2001)된 바와 같이, 본 연구결과에서도 천부 풍화·파쇄대의 영향으로 비교적 높게 계산된 것으로 판단된다. 수벽공에서 단일패커에 의한 전공 주입/수위강하시험 결과도 전공 순간충

격시험과 같이 투수성이 높은 단열의 수리특성이 반영된 점을 고려하면, 수리전도도가 과대평가되었을 것으로 예상되나, 수평수벽공의 기하평균 값이 낮게 평가된 것을 보면 수평수벽공에 교차빈도가 높은 고경사 단열은 비교적 낮은 투수성을 갖는 것으로 유추할 수 있다.

다중패커시스템의 2, 4, 6구간에 펠스시험 결과와 동일한 구간에 해당한 주입/수위강하 시험결과를 비교하여 보면, 낮은 수리전도도를 나타내는 6구간에서는 펠스시험이 좀 더 낮게 계산되었고, 비교적 높은 값을 갖는 2, 4구간에서는 펠스시험이 좀 더 높게 계산되었다. 이러한 결과는 정압주입시험의 호스와 주입수 자체의 압축성, 그리고 공내저류효과에 의한 영향으로 펠스시험에 비하여 민감하지 못하기 때문으로 판단되며, 김경수 외(2002)에 의해서도 유사한 연구결과가 도출되었다.

이러한 관점에서 단열암반의 투수성을 평가하기 위한 수리시험을 계획할 경우, 전공 순간충격시험 혹은 단일패커에 의한 주입/수위강하 시험은 천부의 풍화대를 포함하는 파쇄구간이나 주 투수성 구조에 대한 수리특성을 해석할 때 적합하며, 심도에 따른 보다 구간별 수리특성을 해석하는 경우에는 이중패커를 이용한 일정구간 정압주입/수위강하시험 또는 다중패커시스템 내에서의 펠스시험에 고려될 수 있으나, 펠스시험이 좀 더 높은 신뢰도를 기대할 수 있을 것이다.

4. 결 론

1. 지표조사단계에서 위성영상 및 DEM, 지구물리탐사, 시추조사, BHTV 등에 의해 예측된 6개 단열대 중 지하공동에서 확인된 단열대와 비교적 방향성과 위치가 유사한 단열대는 NE-1 단열대 하나로 매우 낮은 예측신뢰도를 나타내었다.
2. 지표조사 시 최소한의 조사를 통해 단열대의 예측신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안으로 BHTV 조사결과를 이용한 정량적 분류기준을 제시하였으나, 향후 다양한 암종과 암반특성을 갖는 지역에서 적용하여 수정·보완되어져야 할 것이다.
3. 본 연구지역 내 암반단열은 심도가 깊어짐에 따라 주 방향성이 변하며, 크기와 빈도는 고경사 단열조는 각각 0.6 ~ 0.7배, 1.4 ~ 3.8배정도 작게 분포하고, 저경사 단열조는 유사하거나 오히려 약 1.2배정도 큰 것으로 조사되었다. 이는 조사대상의 방향 및 조사방향, 조사규모 등에 따른 조사편의(investigation bias)에 의한 것으로 사료되며, 조사 시 조사편의를 최소화해야 할 것이다.
4. 지표조사단계에서 심도 및 수평방향으로의 수리적 연결성을 예측하기 위해서는 이중수위측정시설이나 다중패커시스템에 의해 수리지질학적 특성이 다른 영역을 격리시킨 후 양수나 주입에 의한 지하수의 교란에 따른 구간별 수위계측이 요구된다.
5. 수리전도도는 시험공의 방향, 조사범위, 시험방법에 따라 해석하고자 하는 영역의 투수성이 과소 혹은 과대평가될 수 있으므로 조사편의를 최소화하고 연구목적에 맞는 시험방법이 선택되어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국석유공사와 한국원자력연구소에서 공동으로 시행하는 연구개발사업에 의하여 수행되었다. 현장조사에 협조를 아끼지 않으신 한국석유공사 및 대우엔지니어링 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 김경수, 2000, 수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 212 p.
- 김경수, 2002, 등연속체매질로서의 화강암지역의 유효수리전도도 산출, 대한지질공학회지, Vol. 12, No. 3, 319-332.
- 대우엔지니어링(주) 시공감리단, OO 추가비축기지공사 공사평가보고서 제 3권, 2003a.
- 대우엔지니어링(주) 시공감리단, 수벽공 장기수리시험 종합보고서, 2003b.
- 엘지엔지니어링(주), SK 건설(주), 1999, U-1 추가비축기지 조사설계 용역 지질조사보고서.
- 함세영, 김문수, 성의환, 이병대, 김광성, 2001, 순간충격시험에 의한 화강암지역의 수리적 매개변수 산출, 대한지질공학회지, Vol. 11, No. 1, 63-79.
- Andersson, J. E. and Persson, O., 1985, Evaluation of single-hole hydraulic tests in fractured crystalline rock by steady-state and transient methods, SKB Technical Report 85-19, Stockholm.
- Andersson, Jan-Eri; Nordqvist, Rune; Nyberg, Goran, 1991, Hydrogeological conditions in the Finnsjön area, SKB Technical Report 91-24, Stockholm.
- Andersson, J., Berglund, J., 2002, Testing the methodolgy for site descriptive modelling. Application for the Laxemar area. SKB TR-02-19, SKB, Stockholm.
- Bouwer, H. and Rice, R. C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductiviy of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, Water Resour. Res., 12(2), 423-428.
- Munier, R., Stanfors, R., 2003, Geological site descriptive model, A strategy for the model development during site investigation, R-03-07, SKB, Stockholm.
- Palmqvist, K., 1990, Groundwater in crystalline bedrock, SKB TR 90-41. SKB, Stockholm.
- Stanfors, R., Olsson, P., Stille, H., 1997, ÄSPÖ HRL - Geoscientific evaluation 1997/3. Results from pre-investigations and detailed site charateriazation. Comparison of predictions and observations. Geology and Mechanical stability. SKB TR 97-04.
- Tammemagi, H. Y. and Cheislar, J. D., 1996, Interim rock mass properties and conditions for analysis of a repository in crystalline rock, United States Department of Energy, BMI/ORCD-18.