

방사성폐기물 처분동굴의 지진 취약도 해석

장승필
서울대학교
서정문
한국원자력연구소

요 약

방사성폐기물 영구처분장과 같은 대규모 지하 원자력시설의 운영중 안전성 평가를 위하여 지하 구조물의 지진 취약도 해석기법을 제안하였다. 지상구조물에 대해 적용되고 있는 Zion 방법을 모체로 하였으며 지하구조물의 특성 및 기술현황을 반영하였다. 지하구조물의 파괴양상은 구조물의 크기 및 형태, 수평 지압의 크기, 암반의 특성 등 많은 요인에 의해 달라진다. 처분동굴의 개념설계 결과에 대한 지진취약도 분석결과 수평지압계수의 영향이 매우 크며, 벽체부 또는 천정부에서의 슛크리트의 압축파괴가 가장 취약한 것으로 밝혀졌다.

1. 서론

지하 방사성폐기물 영구처분장과 같은 중요한 시설의 운영중 및 폐쇄후 지진에 대한 안전성이 확보되어야 하나 이를 평가하기 위한 지하구조물의 내진해석 및 설계기술은 국내외적으로 미정립된 상태이다. 더구나 암반의 특성 평가 및 적절한 구조해석 도구의 확보의 어려움, 설계기준의 미흡 등으로 정량적인 안전성 평가가 사실상 어려운 실정이었다. 그러나 국내외 여건상 지하공간의 이용 증가 및 구조물의 대형화 추세에 따라 지진시 지하구조물의 안전성 및 지진취약도 등을 정량적으로 평가할 수 있는 기술의 개발이 시급한 과제로 대두되고 있다.

본 연구에서는 현재까지 국내외적으로 연구된 바가 없는 지하구조물의 지진취약도 해석기법을 개발하였다. 구조물은 불연속면의 영향이 구조거동을 지배하지 않는 연속체역학에 의한 해석이 가능한 양호한 암반내에 NATM공법에 의해 건설된 것으로 가정하였다. 지상구조물에 대한 지진취약도 해석모델 및 지상과 지하 구조물의 차이점을 비교 분석하고, 지하구조물에 대한 지진취약도 해석모델을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 전형적인 지하구조물인 \cap 형 방사성폐기물 처분동굴에 대해 지보시스템의 파괴양상별 지진취약도를 비교하였다.

2. 지상 및 지하 구조물의 차이점

지진시 지하구조물과 지상구조물의 거동해석을 위한 차이점은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 지진시 구조물의 손상 및 파괴양상 : 지하구조물은 최대 지표지진 가속도 약 0.19 g (최대 지표 입자속도 약 20 cm/sec)까지는 손상이 극히 적었으며, 지진동에 의한 지하구조물의 일반적인 손상형태는 단면의 변형, 낙석, 지보시스템의 변형, 천정 또는 벽체부의 붕괴, 지상에 위치한 입구 부분의 붕괴 등이었다[1,2]. 그러나, 지상구조물의 경우 최대 지표지진 가속도가 0.2 g 이하에서도 붕괴된 사례는 무수히 많으며 파괴양상은 구조형태에 따라 매우 복잡하고 다양하다.

(2) 구조형태 및 지진시 거동 : 지하구조물은 단순한 형태의 선형 구조물인데 비해 지상구조물은 복잡한 형태의 박스형, 뼈대형 또는 이들의 복합체로 된 구조물이다. 지하구조물의 전체적인 거동은 암반매질의 변형 또는 변형도와 일반적으로 일치하며, 지상구조물에 비해 비교적 단순한 원환방향 변형, 축압축, 축인장 및 축휨 거동을 보인다. 지하구조물은 일반적으로 3축 응력상태를 유지한다. 암반상의 지상구조물은 지반과는 독립적인 거동을 하며, 뼈대구조, 전단벽구조 등 구조형태에 따라 그 거동이 다르다. 또한 지상구조물은 지진시 관성력에 의한 하중을 지지하도록 설계된다.

(3) 지진하중의 정의 : 일반적으로 지진하중은 지표부근에 위치하는 통제점에서의 지반가속도에 관한 응답스펙트럼, 파워 스펙트럼 또는 시간이력곡선 등으로 정의된다. 지하구조물에 대해서는 동적 해석방법에 따라 지상과 동일한 형태 또는 지진파형별 최대 입자속도 등으로 정의된다. 지하구조물의 경우에는 지하심도에 따른 지진동의 감소효과를 추가로 고려하여야 한다.

(4) 동적 해석 : 지상구조물에서는 일반적으로 암반지반이 아닌 경우 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하나, 지하구조물의 경우에는 구조물의 중요도, 지표 지진가속도의 크기, 단면의 크기에 따라 완전 동적해석 또는 유사 정적해석을 수행한다.

(5) 재료특성 : 암반의 역학적 특성은 다양한 균열, 암반의 응력 이력상태, 지하수, 풍화 작용, 시편의 크기 등에 의해 달라진다. 이에 비해 콘크리트 및 철근, 강재 등의 재료특성은 상대적으로 매우 균질하다.

3. Zion 방법에 의한 지하구조물의 지진취약도 해석모델

지상구조물의 지진취약도 해석방법은 안전계수 개념을 이용한 Zion 및 SSMRP 방법과 손상지수 개념을 이용한 BNL방법의 2가지로 대별할 수 있다. 실용성이 큰 안전계수 개념을 이용한 방법을 지하구조물에 적용하기 위해서는 몇 가지 요소를 추가로 고려하면 되나, 손상지수 개념을 이용한 방법을 적용하기 위해서는 암반 및 지보시스템에 대한 많은 동적시험 결과가 필요하나 실험결과가 축적되기까지는 많은 시간이 소요될 전망이다. 따라서 본 연구에서는 Zion방법을 모체로한 지진취약도 해석모델에 다음과 같은 지하구조물의 특수성을 고려하였다.

(1) NATM공법에서 변위종속적인 하중형태로 작용하는 하중에 대한 지보시스템 내의 불평형력 재분배현상. (2) 지진취약도는 내진해석 방법을 고려하여 입자속도 또는 지반가속도의 함수로 표현. (3) 심도에 따른 지반운동의 감소현상. (4) 암반, 슛크리트 및 록볼트의 강도계수의 정량적 표현. (5) 암반특성의 무작위성 및 불확실성.

(1)항과 관련된 해석 모델은 별도의 논문[3]에 제시하였으며, 나머지 항은 각각 다음과 같이

고려된다.

3.1 취약도 모델

특정 파괴양상에 대한 지하구조물의 지진취약도는 식 (1)과 같이 지진내력, A 로 표현되며, 내력의 중앙값과 두 가지 무작위성 변수로 표시할 수 있다.

$$A = \bar{A} \varepsilon_R \varepsilon_U \quad (1)$$

여기서, \bar{A} = 지반운동(가속도 또는 입자속도) 내력의 중앙값, ε_R = 중앙값이 1인 무작위성 변수, ε_U = 중앙값이 1인 불확실성 변수이다. $\varepsilon_R, \varepsilon_U$ 는 대수정규분포로 가정하며 각각의 대수 표준편차는 β_R, β_U 이다. 식 (1)에서 변수 A 는 중간 무작위변수인 안전계수, F 를 도입하여 나타내는 것이 편리하다. 안전계수 F 는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$A = F A_{DBE} \quad (2)$$

여기서, A_{DBE} 는 설계지반운동을 나타낸다.

Zion 방법에서 안전계수는 식 (3)과 같이 3개의 확률 변수들의 곱으로 나타낸다.

$$F = F_S F_\mu F_{RS} \quad (3)$$

여기서, F_S = 강도계수, F_μ = 비탄성 에너지 흡수계수 또는 연성계수, F_{RS} = 구조 응답계수이다. 비탄성 에너지 흡수계수 및 구조 응답계수는 지상구조물과 동일한 방법으로 고려된다.

3.2 지반운동 감소계수

속도 또는 가속도 성분의 지반운동은 지진성분계수 등과 같이 지진응답계수의 한 변수로서 고려된다. 지반가속도 및 입자속도는 지하 심도가 증가할수록 일반적으로 감소한다. 양호한 암반 내에 건설된 대규모 지하구조물에서 지진동의 크기는 지표에서 측정한 값의 1/2 정도로 감소되었다[4].

3.3 구조재의 강도계수

강도계수, F_S 는 부재의 극한강도를 설계지진에 대한 부재응답으로 나눈 것으로서 실제 계산시

에는 식 (4)에서와 같이 전체 하중에서 지진하중이외의 하중을 강도에서 제외한다.

$$F_S = \frac{S - P_N}{P_T - P_N} \quad (4)$$

여기서, S 는 특정한 파괴모드에 대한 구조요소의 강도, P_N 은 사하중이나 온도하중과 같은 정상하중을, P_T 는 구조물에 작용하는 전체하중을 나타낸다.

암반의 경우에는 Mohr-Coulomb의 파괴포락선으로부터 정의되는 안정성 지수 개념과 식 (4)를 도입하면 강도계수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_S = \frac{S}{P_{EQ}} - \frac{P_N}{P_{EQ}} = d_{EQ} - \frac{\sigma_{1N}}{\sigma_{1EQ}} \quad (5)$$

여기서, P_{EQ} 는 설계지진하중, S 는 암반의 강도를 나타낸다. d_{EQ} 는 설계지진에 대한 안정성지수, σ_{1N} 은 정상하중시 암반의 최대주응력, σ_{1EQ} 는 설계지진시 암반의 최대주응력을 나타낸다.

축력 또는 축력과 힘을 동시에 받는 슛크리트의 강도계수는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{P_N + F_S P_{EQ}}{SF_P P_{ult}} \right)^2 + \left(\frac{M_N + F_S M_{EQ}}{SF_M M_{ult}} \right)^2 = 1.0 \quad (6)$$

여기서, P_N, M_N 은 정상하중시 슛크리트에 작용하는 축력 및 모멘트이며, P_{EQ}, M_{EQ} 는 설계지진에 대한 부재의 축력 및 모멘트이다. P_{ult}, M_{ult} 는 부재의 극한 축력 및 모멘트 내력을 나타낸다. SF_P, SF_M 는 각각 축력 및 모멘트에 대한 내력 감소계수를 나타낸다. 슛크리트의 인장강도는 고려하지 않는다.

인장과 전단력을 동시에 받는 록볼트의 경우 강도계수는 식 (7)과 같이 주어지는 상관식으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\delta_{SN} + F_S \delta_{SEQ}}{SF_S \delta_{ult(S)}} \right)^2 + \left(\frac{\delta_{PN} + F_S \delta_{PEQ}}{SF_P \delta_{ult(P)}} \right)^2 = 1.0 \quad (7)$$

여기서, $\delta_{SN}, \delta_{SEQ}$ 는 각각 정상하중 및 지진하중시 볼트의 전단변위를 나타 내며, $\delta_{PN}, \delta_{PEQ}$ 는 정상하중 및 지진하중시 볼트의 축변위를 나타낸다. SF_S, SF_P 는 각각 전단 및 인장에 대한 내력 감소계수이며, $\delta_{ult(S)}, \delta_{ult(P)}$ 는 각각 볼트의 극한 전단 및 인장 변형이다.

3.4 암반의 역학적 특성

암반의 역학적 특성은 구조물의 단면 및 길이방향으로 랜덤분포를 하며, 현장암반의 특성은 실내시험 결과보다 일반적으로 적은 값을 보인다. 또한 암반의 특성은 매우 다양한 요소에 의해 영향을 받기 때문에 암반의 일반적 분류방법인 RMR 또는 Q 값과 암반특성의 상관관계를 이용하였다. 암반의 탄성계수와 RMR 값과의 대표적인 상관관계식은 식 (8)과 같다.

$$E_s = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)} \quad ; \quad RMR < 50$$

$$= 2RMR - 100 \quad ; \quad RMR > 50 \quad \text{in GPa} \quad (8)$$

4. 방사성폐기물 영구처분 동굴의 지진취약도 해석 예

그림 1과 같은 방사성폐기물 처분동굴[5]에 대한 지진취약도를 대표적으로 수행하였다. 암반의 단위중량은 25 KN/m^3 , 탄성계수는 5.6 GPa, 수평지압계수는 1.0, RMR의 평균값은 40, 슛크리트의 두께 및 압축 강도는 각각 10 cm 및 35 MPa, 탄성계수는 28 GPa, 록볼트의 항복강도 및 탄성계수는 각각 280 MPa, 200 GPa 로 가정하였다. 암반의 전단파 및 압축파의 전파속도를 각각 1040 m/sec, 1680 m/sec 로 가정하였다. 설계지진은 최대 수평 입자속도를 10 cm/sec, 수직 입자속도를 5 cm/sec, 지진파의 입사각을 30° 로 가정하였다. 지진력은 유사정적 해석방법을 사용하고 각 파형별 응답을 100-40-40 조합방법에 따라 조합하였다. 전체적인 구조물의 정적 및 내진해석은 ABAQUS 코드를 이용하였다.

파괴모드별 지진취약도 해석결과 수평지압계수의 영향이 매우 크며, 벽체부에서의 슛크리트의 강도파괴가 매우 취약한 것으로 밝혀졌다. 파괴모드별 취약도 곡선은 각각 그림 2,3,4와 같다.

5. 결론

지하구조물의 지진 취약도해석을 위한 방법을 제시하였다. 방사성폐기물 처분동굴의 개념 설계 결과에 대한 지진취약도 분석결과 수평지압계수의 영향이 매우 크며, 벽체부 또는 천정부에서 슛크리트의 압축파괴가 가장 취약한 것으로 밝혀졌다.

참고문헌

1. Dowding, C.H. and Rozen, A., " Damage to Rock Tunnels from Earthquake Shaking," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.104, No.GT2, pp.175-191, 1978.
2. Sharma, S. and Judd, W.R., " Underground Opening Damage From Earthquake,"

3. 장승필, 서정문, "암반 지하공동내 지보시스템의 구조적 안전성 평가 방법," 지질공학, 대한지질공학회 (인쇄중).
4. Komada, H. and Hayashi, M., "Earthquake Observation around the Site of Underground Power Station," Research Report E379003, Central Research Institute of Electric Power Industry, 1980.
5. 서정문 외, 중.저준위 방사성폐기물 영구처분시설건설, 한국원자력연구소, KAERI-NEMAC/PR-38/94, 1995.2

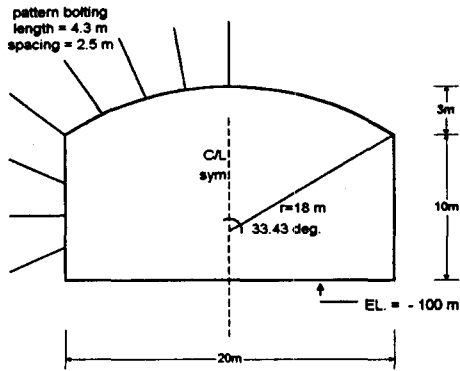


Fig. 1 Dimension of a Cavern for Parametric Study

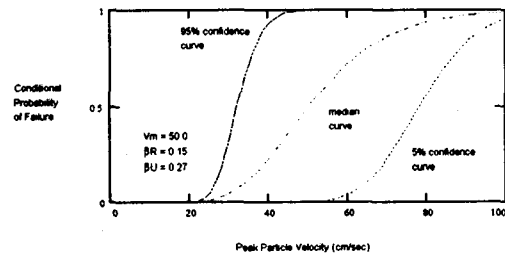


Fig. 3 Fragility Curves for Shotcrete Buckling Failure

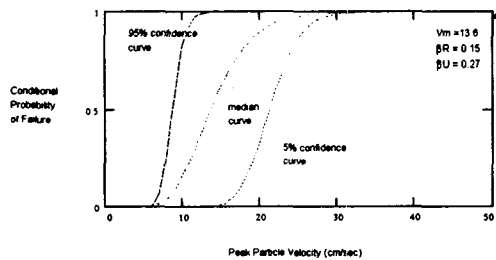


Fig. 2 Fragility Curves for Shotcrete Compression Failure

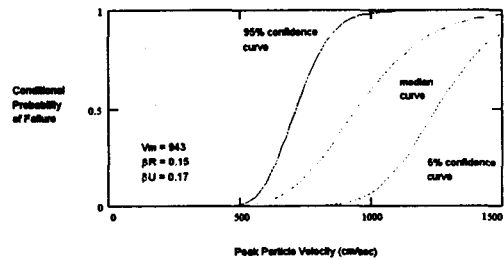


Fig. 4 Fragility Curves for Rock Bolt Tension-Shear Failure