

터널의 내진설계 이해(2)

글 | 김창수 | 토목기술부 과장 | 전화 : 02-3433-7767 E-mail : conshot@ssyenc.com

1. 서론

지진(Earthquake)이란 지구를 구성하고 있는 암석의 일부분에 급격한 파괴가 발생하여 지진파가 발생하는 현상이다. 지진파에 의한 지표 및 지구 내부의 진동이 바로 지진동이다.

지진 발생의 직접적인 원인이 된 파괴영역을 진원역이라 부르며, 큰 지진의 진원역은 수십~수백 km에 달하므로 이것을 한 점으로 간주하는 것은 무리라고 볼 수 있다. 그러나 지진파의 관측으로부터 지진이 발생한 장소를 한 점으로 가정하여 위치를 구하면, 1개의 점이 결정된다. 이 점을 진원이라 한다.

결정된 진원은 통상 파괴가 최초로 발생한 지점이며, 진원역의 중심이 아닌 한쪽 편에 치우쳐 나타난다. 진원과 지구 중심을 연결하는 선이 지표와 만나는 점을 진앙이라 하며, 진원의 위치는 진앙의 경도, 위도와 발생 깊이로 나타낸다.

본고에서는 지난 호에 이어 국내외 내진설계에 대한 기술동향을 분석하고, 한반도의 지진활동 및 지진 발생원인, 지진파의 원리 등에 대해서 알아보려고 한다.

2. 한반도의 지진활동

2-1. 역사지진자료로 본 과거의 지진활동

지진활동의 변화 양상을 알기 위해서는 장기간의 지진기록이 필요하다는 것은 주지의 사실이다. 한반도의 지진자료는 약 2,000여 년에 걸친 역사지진자료와 1905년 이래의 계기지진자료로 나눌 수 있다. 역사지진자료는 삼국시대의 초기부터 조선시대에 걸쳐 여러 역사문헌에 서술되어 있다. 역사지진에 관한 연구는 여러 연구자에 의하여 수행되어 왔다.

역사지진에 관한 여러 연구들은 한반도의 지진활동연구에 기여한

바가 크며, 특히 원자력발전소의 지진에 관한 안전성 평가에 크게 활용되어 왔다. 그러나 역사지진자료는 역사문헌 중에 서술적인 문장으로 기술되어 있어 그 당시의 정치, 문화, 경제의 중심지 및 인구밀집지역의 분포와 건축물양식의 차이에 따라 기록 자체의 균질성과 완전성이 보장되기 어렵다. 또한 시대적으로 인구분포와 세력범위가 다른 여러 왕조의 관점이 다른 사가들에 의하여 기록된 것이므로 누락과 과장, 오기의 가능성을 인정하지 않을 수 없다. 그 예로서 삼국-고려시대의 지진기록은 대부분 감진지역이 누락되어 있으며, 기간에 비하여 수록된 지진의 수가 조선시대에 비하여 상대적으로 적다.

물론 이러한 사실은 지진활동의 차로서도 해석될 수 있으나, 고대로 갈수록 작은 규모지진의 누락 가능성을 배제하기 어렵다. 이러한 이유로 진앙지나 지진의 규모를 평가하는 데 있어서 연구자의 주관이 개입되기 쉬우며, 그 결과 지진활동의 해석에 서로 상이한 결과를 얻기 쉽다. 예를 들면, 연구자에 따라 일부 지진에 대한 자료의 누락이 나타나며, 특히 진앙지 결정과 진도평가에 큰 차를 보여주고 있다.

피해지진은 총 36개로서, MM진도 VII, VIII, IX의 발생횟수는 7, 10, 19회이다. 조선시대 이전의 진앙지는 대부분 역사문헌에 명시되지 않거나 당시의 수도에만 감진기록이 있는 관계로 그 시대의 수도에 지진이 집중되어 발생한 것처럼 나타난다.

이러한 결과는 실제의 지진활동을 그대로 반영하기 보다는 고대의 인구분포, 지진발생에 대한 보고체제상의 결과로 해석할 수 있을 것이다. 이에 반하여 조선시대는 진앙지가 한반도전체에 걸쳐 분산되어 나타난다.

동아시아의 지진활동을 분석한 여러 연구들은 북동중국, 한반도, 서남일본의 지진활동이 서로 상관이 있음을 지적하였다. 이 지역들의 지진활동이 1700년경을 정점으로 가장 활발하였으며, 그 후

활동이 급격히 저하한 것으로 알려져 있다. 이들 세 지역의 지진활동은 상당히 긴 주기를 가지고 있으며, 서로 어떤 상관을 가지고 있음을 알 수 있다. 단지 한반도는 일본이나 중국에 비하여 활동의 주기가 비교적 긴 것으로 해석할 수 있다.

2-2. 지진 발생원인

1) 탄성반발설

지진은 그 원인에 따라 지체구조성지진, 화산성지진, 함몰형지진, 인공지진, 유발지진으로 나눌 수 있다. 지체구조성지진은 지구 내부에 작용하는 지질학적인 응력에 의하여 발생하는 지진으로서 대부분의 지진이 여기에 속하며, 단층운동을 수반한다. 화산성지진은 화산활동과 관련된 마그마의 운동에 의하여 발생하는 지진이며, 함몰형지진은 지하 동굴의 함몰 또는 산사태에 수반되어 나타나는 지진을 말하며, 이러한 지진들은 규모가 작다. 다이내마이트의 폭발 또는 지하핵실험은 암석의 파괴에 따른 지진파를 발생시키므로 이를 자연지진과 구별하여 인공지진이라 부른다. 인공지진은 자연지진에 비하여 진앙지가 확실하므로 이러한 지진을 관측함으로써 좀 더 실제에 가까운 지하의 지진파속도 구조를 결정할 수 있다.

또한 인간 활동에 의하여 발생하는 지진을 유발지진이라 하며, 과거에 지진이 거의 없었던 지역에서 대형 댐에의 저수, 시추공속으로의 폐액주입 등이 지하의 암석에 응력을 증가시킨 결과로 지진이 유발되었다는 여러 사례가 알려져 있다.

1906년의 San Francisco 근처에서 규모 8.3의 대지진이 발생하였다. 이 지진으로 약 400km에 달하는 대단층이 출현하였다. 이 단층은 기존의 San Andreas 단층이 재활동한 것으로 단층의 양측에서 약 6m에 달하는 수평변위가 관측되었다. 이를 설명하기 위하여 Reid는 탄성반발설(Elastic Rebound Theory)을 제안하였다. 이 가설은 지체구조성지진의 원인설로서 폭 넓게 받아들여지고 있다.

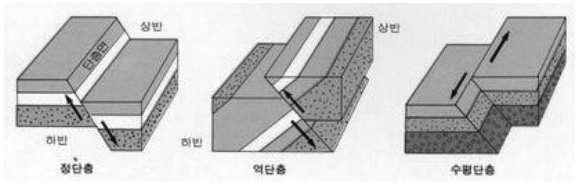
2) 지진과 단층

전 항에서 설명한 탄성반발설이 등장한 이후, "지진은 단층운동의 결과이다"라는 지진학적 관점이 의심할 여지없이 정착된 것은 20세기 중반부터이다. 이 명제는 근대 지진학의 기초가 되었으며, 지진학과 지질학을 연계시키는 역할을 하게 되었다.

단층운동은 지구 내부에서의 응력(Stress)의 불균형에 의하여 발생한다. 연직방향을 z축, 두 수평방향을 x, y축으로 하는 직교좌표계

를 설정할 때, 안정상태의 지구 내부는 정수역학적 평형상태에 있다고 할 수 있다. 이와 같이 평형상태에 있는 응력사이에 불균형이 생길 때, 단층운동이 일어나게 된다. 이때 작용한 응력을 크기순서에 따라 최대주응력, 중간응력, 최소응력이라 부른다. 3가지 응력의 대소 관계에 따라 각각 정단층, 주향이동단층, 역단층이 발생하고 최대주응력축의 방향으로서는 압축력이 작용하고 최소응력의 방향으로서는 장력이 작용한 것과 같은 결과이다.

지진과 단층의 관련성이 최초로 인정된 것은 1891년 일본 중부지역에서 발생한 Nobi지진(M=8.4)에 의한 지표단층 출현의 결과이다. 또한 1906년의 California지진(M=8.3)의 발생에 따라, 지형 및 지질학적으로 잘 알려져 있던 San Andreas 단층이 수평방향으로 6m 정도의 변위를 일으킨 것이 밝혀졌으며, 이 단층에 대하여 활성단층이라는 용어가 최초로 사용되었다.



[그림 1] 단층의 종류

활성단층은 제4기 후반에 활동한 단층으로서, 미래에도 활동할 가능성이 있는 단층으로 정의할 수 있다. 일반적으로 파쇄대의 폭이 넓고 길이가 긴 활성단층일수록 큰 규모의 지진을 일으킬 가능성이 크며, 이들 사이에 여러 경합식이 발표되어 있다. 활성단층의 발견, 발생가능한 지진의 규모나 재래주는 주요 구조물과 산업시설의 입지문제와 관련하여 중요한 연구과제가 되고 있다.

3. 지진파의 전파

3-1. 지진파

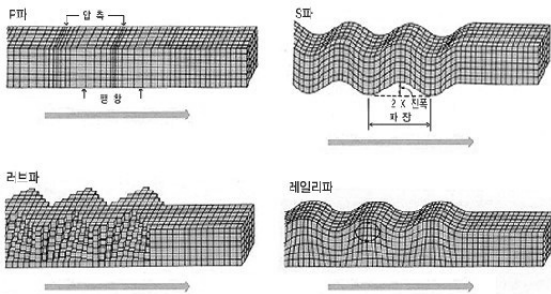
소리굽쇠나 북을 치면 물체의 진동이 주위의 공기에 전달되어 공기의 압축된 부분과 팽창된 부분이 바뀌며 주위로 전파되어 간다. 이 파동을 음파라 부른다. 일반적으로 탄성체에 충격을 주면 파동이 일어나며, 이를 탄성파라 한다. 지구 내부에서 암석의 급격한 파괴로 발생하는 지진에 의해서도 탄성파가 발생하며, 지진에 의하여 발생하는 탄성파를 특히 지진파라 부른다.

지진파는 진행방향과 입자의 진동양식과의 관계에 따라 여러 종류

의 파로 나눌 수 있다. 지진파의 종류가 다르면 그 전파속도에 차이가 있으므로 관측점에 도달하는 시각에 차이가 생긴다. P파는 진행방향과 입자의 진동방향이 같은 파이며, S파는 진행방향과 진동방향이 서로 직각인 파이다. P파는 먼저 도착한다는 Primary Wave의 두문자에 의하여 명명되었으며, 음파와 같은 일종의 종파로서 부피변형을 일으키기 때문에 압축파라고 부른다.

S파의 명칭은 2번째로 도착한다는 Secondary Wave에서 유래하며, 빛과 같은 일종의 횡파로서 전단변형을 일으키므로 전단파라고도 부른다. S파는 입자의 진동방향이 수직인가 수평인가에 따라 SV파와 SH파로 나눌 수 있다.

P파와 S파의 뒤에 도착하는 러브파와 레일리파는 매질의 물성이 다른 경계가 있을 때 표층에서만 전파되므로 표면파라 부르며, 이에 대하여 P파와 S파는 매질 내에서 모든 방향으로 전파되므로 실체파라 부른다. 러브파는 표층전체가 전후방향으로 진동하며, 레일리파는 상하방향으로 진동한다. 당연하지만 레일리파는 상하동지진기록에, 러브파는 수평동기록에 강조되어 나타난다.



[그림 2] 지진파의 종류

3-2. 지진파의 굴절과 반사, 감쇠

지진파의 파장이 충분히 작은 경우에는 기하광학에 있어서의 광선에 대응하는 지진파선을 생각할 수 있으며, Snell의 법칙과 같은 기하광학에서의 원리가 적용된다. 지진파를 전파하는 매질의 밀도, 탄성계수와 같은 물성이 모든 방향에 대하여 일정한 경우 지진파는 빛과 같이 직진하나, 물성이 달라지는 경계에서는 지진파가 굴절, 반사 또는 다른 종류의 지진파로 전환이 일어난다.

어떤 지역의 지진재해는 지진원의 특성, 지진파를 전달하는 매질의 성질 및 지반의 조건에 따라 크게 달라진다. 매질의 성질 중 중요한 것은 지진파의 속도와 에너지 전달에 관련된 감쇠특성이다.

4. 국내 내진설계 기술동향 분석

감쇠는 물질의 종류와 상태, 지진파의 주파수에 따라 달라진다. 즉 지역과 지진파의 전파경로에 따라 달라짐을 의미한다. 이러한 지진파의 감쇠특성에 대한 연구는 지구내부의 구성 물질에 대한 귀중한 정보를 제공하게 되며, 강진동의 전달에 따라 진폭이 어떻게 변화할 것인가를 예측하는 공학적인 연구에 필수적이다. 지진파의 전파에 따른 진폭의 감쇠는 지진파선의 기하학적인 확장효과와 매질이 파동에너지를 흡수하여 일어나는 비탄성적인 감쇠효과로 나누어 생각할 수 있다.

4-1. 국내 기술동향 분석

우리나라 내진설계의 기본개념은 성능기초 내진설계라고 할 수 있다. 이는 각기 다른 규모의 설계지진 수준에 대하여 구조물이 만족하도록 요구되어지는 소요성능을 확보하도록 설계하는 것이다.

우리나라의 경우, 구조물의 중요도에 따라 설계지진의 평균재현주기를 달리하여 구조물의 목표성능을 규정하고 있다. 이를 자세히 설명하며, 구조물의 사용기간 내에 발생확률이 큰 중소지진에 대해서는 기능수행수준으로 설계하여 구조물의 지진응답이 탄성한계 내에 머물도록 하면서, 발생확률이 작은 대규모의 지진에 대하여는 구조물에 충분한 변형성능을 제공하여 지진에너지를 흡수하도록 하는 소성설계를 하는 것이다.

1) 도로교 내진설계기준

우리나라 도로교의 내진설계는 1992년, AASHTO의 내진규정을 기본으로 하는 내진설계개념이 도로교 시방서에 도입되면서 실시되었고 1996년 한 차례의 개정을 거쳐 2000년에는 상위기준의 단계의 목표성능과 달리 도로교의 내진설계기준에서는 붕괴방지 수준에서의 설계가 수행되고 있고 기능수행수준의 성능은 묵시적으로 만족할 것으로 기대하고 있다.

2) 항만 및 여항시설의 내진설계 표준서

동 표준서는 ‘내진설계 기준연구(II)’의 성능기준목표에 따라 항만시설에 대한 기술기준으로 작성된 것으로 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대한 설계기준을 제시하고 있다. 항만시설이 연약지반 위에 건설되는 경우가 많으므로, 기초지반이 지반진동으로 증폭이

크게 발생할 가능성이 높은 연약지반으로 분류된 경우에는 부지 특성평가의 수행을 제하고 있다. 또한 내진 I 등급 구조물이나 액상화 평가시 간략법으로 산정한 안전율이 허용안전율보다 낮은 경우에는 구체적인 내진 설계절차를 수행하도록 하였다.

해석방법으로는 등가정적법과 응답스펙트럼법 및 시간이력해석법 등의 동적해석법을 채택하고 있다. 흙구조물의 경우 II등급 붕괴 방지수준의 내진기준을 만족하도록 설계해야 하며, 등가정적해석에 기초하여 내진설계를 수행한다. 독립기초와 말뚝기초와 같은 기초구조물의 경우에는 구조물의 중요도에 따라 등가정적해석법과 동적해석법을, 벽체 구조물의 경우 등가정적해석법, 변위를 고려한 해석법 및 동적해석법을 내진설계방법으로 사용하도록 하고 있다. 말뚝지구조물의 경우 단일모드 및 다중모드 스펙트럼법, 시간이력해석법, 등가정적해석법을 구조물 형태와 내진등급에 따라 나누어서 사용하도록 하고 있다.

3) 상수도 시설의 내진설계기준

상수도 시설중 상류에 위치하는 시설, 수도관로, 대체시설이 없는 송배수 간선시설 등 중요도가 높은 시설은 내진 I 등급으로 분류되고, 그 외는 내진 II등급으로 분류하였다. 내진성능기준 및 설계지반진동은 기본적으로 상위기준에 따르고 있다. 해석방법으로는 상수도 시설물의 종류에 따라 수평2축 방향과 수직방향의 조합을 다르게 적용하고, 지진응답은 선형해석법으로 해석하고 구조물 응답 해석은 지반조건에 따라 등가정적하중법, 응답변위법, 응답스펙트럼법, 동적해석법중 적절한 방법을 사용할 수 있다고 정하고 있다.

4) 대한주택공사 토목구조물 내진설계지침

동 지침서는 대한주택공사가 설계, 시공하는 토목구조물을 대상으로 하며, 내진설계 상위기준인 '내진설계 기준연구(II)'에 기초를 두고 작성되었다. 대한주택공사가 설계, 시공하는 토목구조물은 지중구조물의 경우 건축구조물과 연계된 경우가 많으므로 성능기준 중에서도 지중구조물과 건축물의 내진설계 기준을 참조하고 있다. 대한주택공사 토목구조물은 크게 선상지중구조물, 수평공간구조물 및 옹벽 및 사면류로 분류된다.

지중구조물과 건축물의 등급은 구조물의 중요도, 인명피해 여부 및 피해규모에 따라 내진특등급, 내진 I 등급, 내진 II등급으로 구분하고 토목구조물이 건축물에 접합되어 그 건축물의 기능에 직접적인 영향을 주는 경우에는 건축물과 같은 내진등급에 따른다. 내

진성능목표는 현 성능기준에 따라 기능수행 수준과 붕괴방지 수준의 성능목표를 모두 만족하는 내진설계지침을 제시하였다. 그러나 성능목표에 따른 내진설계는 아직 지속적인 조사연구가 필요하므로 그 중간단계로 붕괴방지 수준만을 고려한 설계를 잠정적으로 인정하고 있다.

지중구조물의 지진해석기법으로는 성능기준의 기준에 규정한 바와 같이 응답변위법에 의한 내진해석을 행하는 것을 원칙으로 한다. 그러나 본 지침에서는 지중구조물에 대한 등가정적해석법에 의한 내진해석법도 제시하고 있는데, 이 방법은 대부분 지상구조물에 적용하는 해석법이므로 지중구조물의 경우 주변지반에 비해 단위체적중량이 상당히 크다고 판단되는 구조물에 한해서 적용한다. 그리고 내진특등급으로 규정된 구조물에 대해서는 동적해석을 실시하도록 하며, 지반급변부 등 지진시에 국소적으로 큰 응력이나 상대변위가 발생할 것으로 예상되는 지역에 대해서도 응답변위법 외에 필요에 따라 동적해석을 사용한다.

5. 외국 기술동향 분석

5-1. 국제표준기구(ISO)

모든 지진에 대하여 다음의 설계철학 및 설계원칙에 의하여 구조물이 저항하도록 설계한다. 지중구조물에 대한 별도의 관련규정은 정립되어있지 않은 실정이다.

5-2. 일본

지진에 대한 피해가 빈번한 일본은 일찍부터 내진설계에 대한 연구를 실시하였다. 지중구조물에 대한 내진 연구는 1923년 관동대지진 때 발생한 수도관의 피해를 조사하는 것으로부터 시작되었다. 그러나 지진 관측이나 지반의 동적특성에 관한 연구를 이용한 구체적인 내진검토가 시작된 것은 1960년대부터이다. 그 후 관계기관별로 각각 독자적으로 내진설계지침을 마련하고 있다.

1) 일본토목학회 콘크리트 표준시방서

1986년에 한계상태설계법을 도입하여 내진설계에 관한 항목을 새롭게 두었다. 내진설계는 구조물의 사용기간 중에 1회 정도 발생하는 규모의 지진에 대해 한계상태를 설정하여 수행한다. 설계수평진도는 지역, 지반조건, 구조물의 고유주기, 한계상태를 고려하여 정한다. 1996년 개정시방서 내진설계 편에는 다음과 같이 성능기

준 내진설계 개념을 도입하였다.

가. 설계지진동을 레벨1과 레벨2로 정함.

- 레벨1 : 구조물의 사용기간 중에 몇 번 발생할 정도의 지진동
- 레벨2 : 구조물의 사용기간 중 발생할 확률이 매우 낮은 세기가 큰 지진동

나. 성능기준

구조물의 손상정도 및 인명피해, 2차 재난방지 등을 고려하여 3단계의 내진성능 설계기준

- 내진성능1 : 지진 후에도 보수를 하지 않고도 기능을 유지할 수 있으며, 과다한 변위가 생기지 않은 성능
- 내진성능2 : 지진 후에 보수를 필요로 하나, 조기에 기능이 회복 가능한 성능
- 내진성능3 : 지진에 의해 구조물 전체가 붕괴하지 않은 성능

2) 일본토목학회 터널표준시방서

일본토목학회 터널표준시방서 산악터널 편에서는 별도의 내진설계기준을 규정하고 있지 않으며 개착터널 편에서는 일반적인 경우에는 지진의 영향은 고려하지 않되 지진에 대하여 취약한 다음과 같은 특수한 경우에만 검토 반영하도록 규정하고 있다.

- 가. 구조물의 일부가 지상에 노출된 경우
- 나. 구조물 상부에 지상구조물의 기초가 놓인 경우
- 다. 구조물이 현저하게 다른 지반상태에 놓인 경우
- 라. 구조물의 심도가 현저하게 변화하는 경우
- 마. 액상화 가능성이 큰 사질토 지반 혹은 대변위가 발생하기 쉬운 지형 및 연약지반 중에 구조물이 놓인 경우
- 바. 구조물의 단면변화가 큰 접속부

3) 도로교 시방서

도로교 시방서에서는 1971년부터 지역, 지반 및 구조물의 중요도에 따라 수평진도를 보정하여 사용하기 시작하였다. 구조물의 동적응답 특성을 고려하는 고유주기에 따른 보정계수를 도입한 것은 1990년부터이다. 지진시 취성적인 파괴를 방지하기 위하여 지진시 보수수평내하력을 기본으로 하는 조사법이 개정되었고 구조물의 종곡시의 거동에 대한 검토를 수행하는 규정이 포함되었다.

5-3. 미국

1) ASSHTO

활동 단층대 통과부를 제외하고는 Box Culvert와 지중에 매설된 구조물에 대한 지진효과는 고려하지 않는 것으로 규정하고 있다.

2) CALTRANS

미국 캘리포니아 교통국(CALTRANS)에서는 성능에 기초한 설계법을 채택하고 있으며 설계지반운동으로 2가지 설계지반운동을 적용하고 있다.

가. 기능평가지진

나. 안전평가지진(최대가능지진, 최대 신뢰지진)

5-4. 유럽 및 대만

Commission of the European Communities는 유럽공동체에 공통으로 적용할 수 있는 설계기준인 Structural Eurocode를 유럽표준화위원회로 하여금 1990년부터 개발하도록 하였고, 최근 큰 피해를 입은 대만의 경우 1998년 건축물 내진 설계규범을 개정하였으며 대만 전체를 4개의 Zone으로 설정하여 지진계수 0.18, 0.22, 0.28, 0.33을 각각 적용하고 있다. S

참고문헌

1. 건설교통부, 「도로교표준시방서」, 1996.
2. 건설교통부, 「콘크리트표준시방서」, 1996.
3. 건설교통부, 「내진설계 기준연구」, 1997.
4. 한국터널공학회, 「터널의 이론과 실무」, 2002.
5. 지반공학회, 「진동 및 내진설계」, 1997
6. 한국지진공학회, 「도시철도의 내진설계」, 2002

