

터널의 내진설계 이해(1)

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

일반적으로 지진은 지각변동운동(Tectonic Motion)에 의하여 지반이 흔들리는 현상을 뜻하는 것으로 지반자체 또는 지상이나 지하에 설치되어 있는 구조물이 지진의 영향을 받게 되면 손상이 발생하거나 붕괴될 수 있다.

국내의 경우, 지진대 내에 위치하거나 과거에 큰 규모의 지진을 경험한 사례가 많은 국가들에 비해 지진에 대한 인식이 낮았기 때문에 내진설계 등에 대한 체계적인 대책수립에 있어서 상대적으로 미약한 상황이다.

현재 교량 등 지상 구조물에 대한 내진설계는 체계가 갖추어져 시행되고 있으나 지하 구조물은 주변지반과 구조물의 기하학적 특성 그리고 과거의 지진 피해 사례를 검토한 결과, 지상 구조물에 비해 상대적으로 지진의 영향이 적기 때문에 별도의 내진설계를 실시한 사례는 많지 않다.

1

서론

일반적으로 지진은 지각변동운동(Tectonic Motion)에 의하여 지반이 흔들리는 현상을 뜻하는 것으로 지반자체 또는 지상이나 지하에 설치되어 있는

구조물이 지진의 영향을 받게 되면 손상이 발생하거나 붕괴될 수 있다.

국내의 경우, 지진대 내에 위치하거나 과거에 큰 규모의 지진을 경험한 사례가 많은 국가들에 비해 지진에 대한 인식이 낮았기 때문에 내진설계 등에 대한 체계적인 대책 수립에 있어서 상대적으로 미약한 상황이다. 현재 교량 등 지상 구조물에 대한 내진설계는 체계가 갖추어져 시행되고 있으나 지하 구조물은 주변지반과 구조물의 기하학적 특성 그리고 과거의 지진 피해 사례를 검토한 결과, 지상 구조물에 비해 상대적으로 지진의 영향이 적기 때문에 별도의 내진설계를 실시한 사례는 많지 않다. 그러나 지하 구조물의 중요성이 증대되고 있으며 더욱이 터널은 국가 및 사회기반시설로서, 사고발생시 가공할 만한 인적, 물적 피해가 예상되는 철도시설 중 핵심이 되는 시설물로서, 그 손상 또는 붕괴 시 대형 철도사고를 유발할 수 있다.

본고에서는 터널구조물을 대상으로 내진 안전성을 확보하기 위하여 특별히 고려해야 할 기술적 항목과 지반의 액상화에 대해서 알아보고자 한다.

2

지하 구조물의 진동특성

지하 구조물의 진동특성은 지반 속에서의 지반운동에 순응하여 구조물이 진동하기 때문에, 상대적으로 큰 지진 피해를 받는 교량, 건물 등의 지상 구조물과

다르다. 즉, 지하 구조물에서는 작용하는 지반운동이 지표면에서 정의된 지반운동보다 작으며 증폭현상도 나타나지 않는다.

이에 대한 원인으로는 첫째, 대부분의 지반에 있어서 깊이에 따른 지반운동의 크기가 지표면에서 최대가 되며 지중에서는 상대적으로 작은 지반운동의 진폭을 갖는다. 따라서 기반면 상부지반을 단일자유도시스템으로 한 설계응답스펙트럼이 작성되지 않은 상태이므로 SHAKE 해석 등을 통하여 지반을 따라 전파되는 지진파에 의한 지반운동의 크기를 적절히 파악할 필요가 있다.

둘째는 지하 구조물의 겉보기 단위체적중량은 일반적으로 주변 지반의 단위체적중량보다 작든지 같은 정도인 경우가 많다는 점이다. 지하 구조물의 겉보기 단위체적중량이 주변 지반과 비교하여 작다는 것은 지하 구조물에 작용하는 관성력이 작다는 것이다. 즉, 지반 속에서 지하 구조물을 진동시키려는 힘이 작다는 것을 의미한다.

셋째는 지하 구조물은 주변이 지반에 의해 둘러싸여 있기 때문에 구조물에서 주변 지반으로 빠져나가는 에너지, 즉 일산 감쇄가 상당히 크다는 점이다. 이는 지하 구조물이 주변 지반에 대해 상대적

인 진동을 일으켰다 하더라도 곧 작게 된다는 것을 나타내고 있다. 이와 같이 일반 지하 구조물에서는 원래 지반에 대해 상대적인 진동을 일으키기 어렵고 일단 일어난 진동도 곧 소멸된다. 그러므로 지하 구조물은 지진시 지반에 변위나 변형이 생기면 그것에 따라 주위에 끌려 운동한다. 지상 구조물에서는 관성력이 중요하지만 지하 구조물에 대해서는 지진시 지반에 생기는 변위 및 변형이 중요하다.

3

설계방법의 종류 및 유의사항

3-1. 설계방법

내진설계를 위한 지진해석법으로 등가 정적해석법, 응답변위법, 동적해석법을 제시하고 있다. 내진설계시에는 터널 혹은 구조물과 주변 지반과의 상대질량 및 강성 등을 고려하여 최적의 방법을 선택하도록 하고 있다.

3-2. 내진설계시 주의 사항

- (1) 지진력에 저항하도록 라이닝의 두께를 증가시키는 것은 지진력을 증대시키는 역효과를 가져올 수 있다. 따라서 라이닝의 두께를 증가시키는 대신에 라이닝에 철근을 보강하여 라이닝의 인성을 증가시키도록 한다.
- (2) 구조물이 연성을 가지도록 하여 급작스러운 파괴가 일어나지 않도록 하는 방법을 취한다. 특히 단면의 교차점과 현치부 설계에 주의를 요한다.
- (3) 지진에 의한 수평력에 의하여 기둥단면의 압축파괴나 전단파괴, 휨인장파괴에 저항할 수 있도록 보강하는 것으로, 압축파괴나 전단파괴보다 휨인장파괴가 먼저 발생하도록 설계한다.
- (4) 터널 입구부 표토의 활동붕괴를 방지하기 위해서 입구부의 절취면에 적절한 기울기를 확보하고 토류공을 설치한다.
- (5) 터널의 이음부에 강성이 작은 이음장치를 설치하여 구조물에 작용하는 지진력을 감소시킨다. 그러나 강성이 작은 이음장치의 설치에 따른 구조적인 약점을 검토하여야 한다.
- (6) 지반개량을 통하여 지반 액상화를 방지 또는 억제시킨다.

3-3. 내진설계시의 기본방향

- (1) 내진설계는 일반 하중에 대하여 기 설계된 시설물에 대한 내진 안전성 분석을 수행하고, 필요한 경우 단면 및 세부 설계 내용을 수정, 보완하는 방법으로 수행한다.
- (2) 적용 기준은 현재 건교부에서 제시된 상위개념 내진설계기준의 요건에 따르는 것을 원칙으로 하고, 필요한 경우 기술현황상의 최신 기술 및 기준을 추가 적용한다.

(3) 대상 시설물을 '개착터널', 'NATM터널'의 2가지 공종으로 크게 구분하여, 각 공종에 부합되는 별도의 내진 설계 및 안전성 평가 절차를 작성한다.

(4) 작성된 절차를 각 공종별로 그 형태 및 지반의 특성에 따라 지진의 영향이 클 것으로 예상되는 대표 구조물 혹은 대표 단면에 적용함으로써, 전 구간에 대한 내진 안전성을 평가한다.

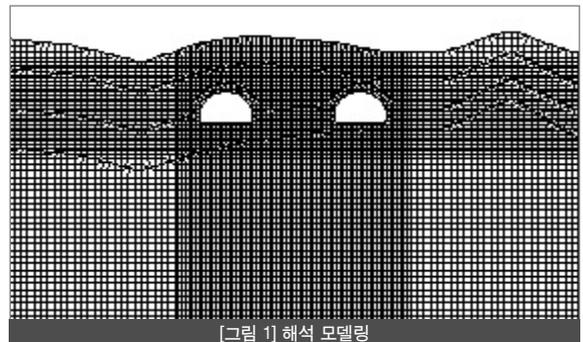
(5) 터널의 내진설계시 다음과 같은 내용을 특별히 고려한다.

- 지반과 구조물의 상대강도를 고려하는 최적의 지진해석법 사용
 - 지진의 크기에 따른 비선형 지반 물성치에 따른 영향 고려
 - 지진파의 전파에 따른 지진파의 증폭현상 고려
 - 지반의 단층 및 절리(Joint), 불안정지반, 간극수압 등에 의한 영향 고려
 - 긴 터널의 경우 종 방향 거동에 따른 축 방향과 축직각 방향의 영향 고려
 - 접합부(신축 이음부 및 단면 변화부)의 내진성 확보
 - 액상화 가능성 및 액상화에 따른 영향 검토
- (6) 상위개념의 적용시, 대상 철도시설물(터널 및 사면)은 내진등급으로 가정한다.
- (7) 내진성 검토는 우선 붕괴방지수준지진(1000년 재현주기)만을 대상으로 하여 기능수행여부를 판단하고, 검토 결과에 따라 필요하면 기능수행수준지진(100년 재현주기)과 붕괴방지수준지진을 구분해서 고려한다.

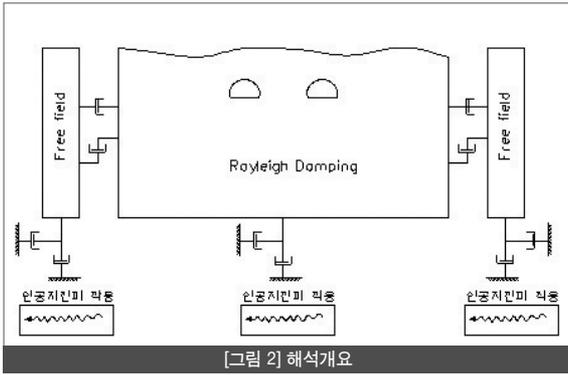
4

터널의 내진설계 (적용사례)

예시된 터널 시점부의 토피는 토사층으로 되어있어 0.154g의 지진 가속도에도 갱구부의 상대변위에 의해 터널 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있으므로 내진해석을 수행한 경우로 울산광역시 및 경상남도 지역으로 지진 구역 1에 해당되는 구역이며, 도로터널은 내진 1등급에 해당된다. 따라서 본 구간의 터널 내진설계시 적용할 가속도 계수는 0.154g(지진구역계수 위험도계수)이다.



[그림 1] 해석 모델링



4-1. 내진해석 프로그램(FLAC)

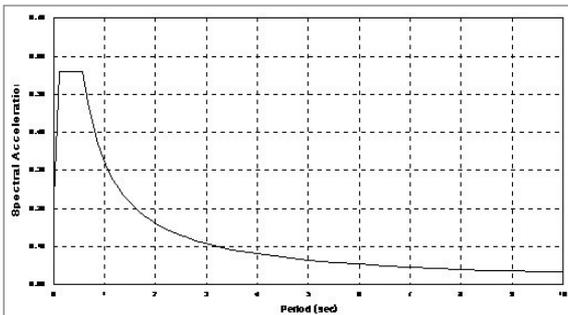
FLAC은 동적 해석기능을 가지고 있으므로 평면 변형률 또는 축대칭 문제에서 동적 해석을 수행할 수 있으며 FLAC을 사용하여 동적 해석을 수행하기 위해서는 1)외부하중과 경계조건 2)감쇠 3)해석 모형에서의 파의 전파에 대한 고려가 있어야 한다.

동적 하중으로 입력이 가능한 형태는 가속도 시간이력, 속도 시간이력, 응력 시간이력 또는 하중 시간이력이며 네 가지 중의 하나로서 동적 하중을 가할 수 있고 하중의 입력방향은 3가지 방향으로 해석이 가능하다.

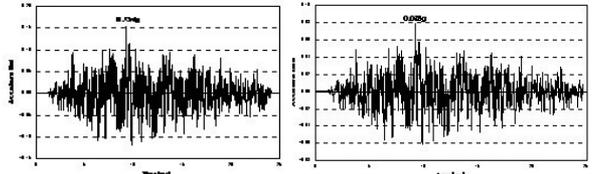
FLAC은 개발된 목적이 지반 또는 암반위의 구조물을 해석하므로 항만 구조물의 경우 적절한 해석방법이 될 수 있는 반면 대상이 되는 구조물을 자유롭게 모형화하기 어려운 점과, 정확한 해석을 위해서는 입력하중과 해석의 결과를 짧은 시간간격으로 나누어서 수행하여야 하므로 해석시간이 길어지는 단점이 있다.

4-2. 응답스펙트럼, 건교부 내진설계기준

터널시점부는 내진성능수준 1등급에 재현주기 1000년(붕괴방지 수준), 상부 지반조건은 지반조사 결과를 바탕으로 단단한 토사지반(SD)로 설정한다. $C_a=0.16$, $C_v=0.23$, $T_s=C_v/2.5C_a$, $T_o=0.2T_s$ 재현주기 1000년에 대한 보정계수 1.4를 곱하여 시점부의 설계응답스펙트럼 산정한다.

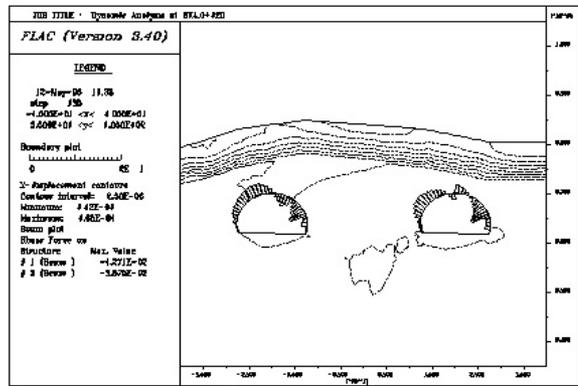
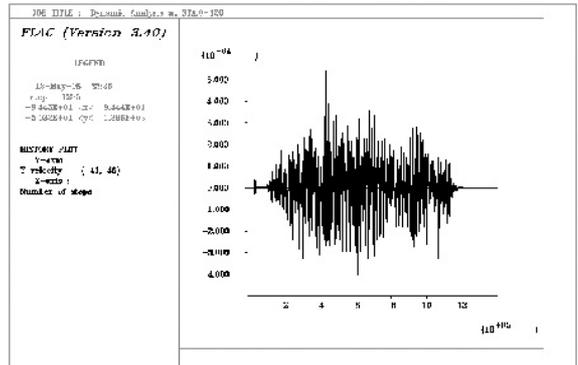


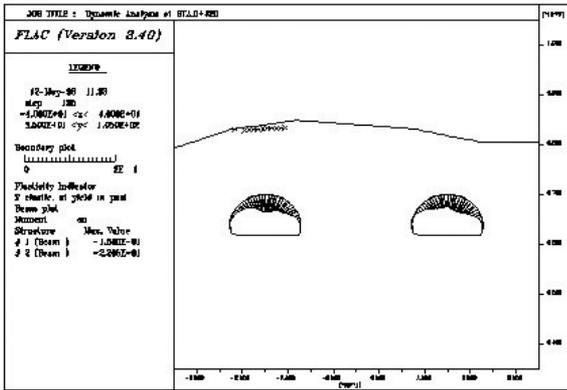
4-3. 인공지진의 작성



4-4. 해석 결과

25초간 지진파 전파시 순간 최대천단변위는 시점부 0.018mm, 중점부 0.148mm이며 실제로 라이닝에 추가 하중으로 발생하는 영구잔류천단변위는 시점부 0.001mm, 중점부 0.002mm로 지진하중으로 인한 추가 천단변위의 영향은 없는 것으로 나타났으며, 내공변위의 경우 지진파 전파시 순간 최대내공변위는 시점부 12.58mm, 중점부 7.159mm이고 영구잔류내공변위는 시점부 3.0mm, 중점부 2.0mm로, 실제로 지진하중에 의해서는 터널측면에 영향을 더 주는 것으로 검토되었다.





[그림 7] 콘크리트 라이닝 모멘트, 소성도

5

지진 / 액상화

일반적으로 액상화는 '지반 내에 작용하고 전단응력에 의해 지반 중에 생기는 과잉간극수압이 토립자를 구속하고 있었던 초기 유효응력과 같아져, 유효응력이 0이 되는 현상' 이라고 정의되어 있다. 또는, '지반이 진동 하중 또는 지진 등의 급속하중에 의해 포화사질토가 전단 저항력을 상실하고 마치 유체와 같이 거동하는 현상' 을 의미한다.

액상화 현상을 재료의 역학적 거동특성에 기초하여 설명해 볼 때 '지반이 유체와 같이 거동하는 현상' 을 의미한다. 느슨한 사질토가 과잉간극수압이 소산되는 시간보다 빠른 재하속도를 갖는 동하중을 받게 되면 토체는 비배수 상태 하에 있게 된다. 비배수 상태에 있는 사질토는 일정한 체적을 유지하려는 상태에서 변형을 겪게 된다. 즉, 진동하중 하에서 토립자는 변형 및 재배열을 하지만 포화 토체의 일정한 체적 유지성 때문에 토립자의 변형을 및 재배열량 만큼 과잉간극수압이 발생하게 된다.

이렇게 간극수압이 상승하여 유효응력이 감소한 결과 포화사질토가 전단강도를 잃는 것을 액상화라 한다. 완전한 액상화는 유효응력 0의 상태와 대응하고, 그 때 간극수압은 전응력과 같아질 때까지 상승한다. 한계동수경사(Critical hydraulic gradient)를 가진 상향 침투수에 의하여 모래는 완전히 액상화한 상태를 지속시킬 수 있다.

동수경사가 임계치에 달한 후 거기에 상향 침투수의 유량이 크게 되면 모래입자가 활발히 유동하는데, 그러한 상태를 보일링(Boiling)이라 한다. 매우 느슨한 포화사질토는 아주 경미한 자극에 의해서도 액상화되는 경우가 있는데 이것을 돌발적 액상화(Spontaneous liquefaction)라 한다.

지진에 의한 사질토지반의 액상화는 비배수 조건에 가까운 상태에서 전단응력이 반복 작용함에 따라 과잉간극수압이 점차 축적되는

과정을 따르는 경우가 많다고 추정된다. 따라서 포화토 공시체에 대한 비배수 조건 하에서 반복전단응력(Cyclic shearstress)을 작용시켜 액상화 저항(Liquefaction resistance) 또는 반복전단저항(Cyclicshear resistance)을 정량적으로 구하려는 시도가 행해지고 있다.

액상화 저항이란 어느 횡수의 반복전단에 의해 유효응력이 0으로, 또는 전단변형률 진폭이 어느 값(예를 들면 양진폭에서 각각 5%)에 달하게 되는 상태로서, 실내시험에 의하면 모래의 액상화 저항은 초기 유효응력에 따라 비례하고 모래의 밀도, 응력변형률 이력, 입도분포 등의 영향을 받는다.

5-1. 액상화의 원인

액상화를 발생시키는 원인으로서의 다음의 것이 생각된다.

- (1) 침투류 : 사질지반 속을 흐르는 상향의 침투류의 동수구백 그 한 계치를 넘으면 이른바 보일링을 일으켜 지중의 가는 모래가 지상으로 분출한다.
- (2) 정적전단 : 골격 구조가 불안정한 혹은 초예민성이므로 정적인 약간의 자극으로 액상화 상태가 되기 쉽다. 이른바 퀵·샌드가 그 전형이다.
- (3) 반복전단 : 매립지반과 같이 퇴적연대가 얼마 되지 않아 다져지지 않은 모래 지반이 진동을 받으면 모래의 부의 다일레이턴시에 의해 액상화가 생긴다. 일반적으로 조밀한 상태에서는 체적이 증가하고, 느슨한 상태에서는 체적이 수축이 일어난다. 이 중에 액상화에 관계되는 것은 후자의 다일레이턴시이다.

5-2. 액상화에 영향을 미치는 요소

(1) 밀도

액상화의 발생 메커니즘을 생각하면 입자가 조밀하게 가득 차 있을수록 액상화하기 어려운 것은 명백하다. 왜냐하면 액상화는 토립자의 골격구조가 파괴하는 것에 따라 일어나기 때문이다. 또 조밀한 모래로는 액상화가 발생하여도 유동적이지 않고, 다소 변형하는 것에 그치기도 한다. 이와 같이 밀도는 액상화에 대하여 크게 영향을 미치게 된다.

(2) 입도 분포 및 입자크기

일반적으로 세립이면서 입도 분포가 양호한 사질토가 굵은 모래보다 액상화하기 쉽다. 이것은, 입도분포가 불량한 세립분을 함유하고 있는 모래의 경우에는 세립분에 의한 점착력 때문에, 토립자의 골격구조가 파괴되기 어려우며, 또한 입자가 큰 경우에는 간극비가 크기 때문에 투수성이 커져 비배수 상태를 유지하기 어렵고, 간극수압의 소산이 쉽게 이루어져 액상화의 발생 가능성도 그만큼 줄어들게 된다.

(3) 포화도

액상화는 입자의 맞물림이 어긋나 간극수 중에 입자가 뜬 상태가 되어 발생한다. 따라서 포화도가 낮아 간극수에 공기가 포함되어 있는 경우 액상화되기가 어려워진다. 이 때문에 흙의 포화도는 액상화 강도에 크게 영향을 준다. 일반적으로 지하수위 이하는 완전히 포화되어 있는 경우가 많고, 반대로 지하수위 보다 위에서는 불포화 상태를 유지하기 때문에 액상화가 발생하기가 어렵다.

(4) 유효 상재압 또는 유효 구속압

모래는 유효 연직응력에 의해 전단강도가 크게 변한다. 이것은 모래가 내부 마찰각을 가지기 때문으로 주위에서 구속하는 압력이 늘면 액상화에 저항하는 강도도 증가한다. 즉 유효 상재압 또는 유효 구속압은 액상화하든지, 하지 않는지가 하나의 판정 재료가 된다. 지금까지 액상화 강도가 유효 구속압에 비례해 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

(5) 진동 특성(Vibration characteristics)

일정한 진동 아래에서는 액상화는 지표의 윗부분에서 시작해 아래 부분으로 발생하게 되어 최대 간극수압의 발생에는 시간이 걸리게 된다. 반면에 순간적인 재하에 의해서는 지층 전체에 걸쳐 동시에 액상화가 일어나게 된다. 그리고 수평방향의 진동은 수직의 것보다 더 큰 침하를 일으키게 되고 동시에 한 방향 이상으로 진동이 오게 되면 과잉 간극수압도 더 빨리 발생하게 된다.

(6) 배수와 퇴적 조건 (Drainage and deposits)

만약 이전 퇴적 지층이 넓고 두껍게 분포한다면 이로 인해 길어진 배수 길이는 지진에 의한 급속 재하가 이루어 졌을 때에는 마치 비배수의 흙처럼 거동을 보이게 한다. 배수 조건이 좋을 경우에는 배수 길이가 짧아져 간극수압의 소산에 유리하게 작용하기 때문에 잠재적으로 액상화 가능성이 있는 모래를 안정화 시키는 데에 많은 역할을 하게 된다.

(7) 진도와 하중 상태 (Magnitude and nature of loads)

액상화는 큰 유효 응력이 지반에 가해졌을 때 진동의 강도나 또는 특별한 응력 주기의 횟수가 간극수압에 전달되어지는 응력보다 커졌을 때 발생하게 된다. 따라서 높은 초기 유효응력은 액상화 발생의 가능성을 줄여주게 된다.

(8) 재하 기간 (Period of loading)

오랜 기간 동안 교란되지 않은 상태를 유지한 모래 퇴적층은 교결 작용에 의해 액상화에 대해 추가의 저항력을 발휘한다.

(9) 갇힌 공기 (Trapped air)

만약 공기가 간극 내에 존재한다면 이 공기들은 과잉 간극수압의 소산을 도와 그만큼 액상화의 가능성을 줄여준다.

5-3. 액상화에 의한 지반 파괴의 유형

액상화가 발생하면 구조물에 해를 끼치는 지반파괴나 지반변형을 동반하게 되는데 액상화로 인해 유동파괴, lateral spreads, 지반진동, 지지력의 상실, 침하 등이 나타난다.

(1) 유동파괴 : 유동파괴는 대부분 액상화에 의한 대규모 지반파괴 때문이다. 이러한 파괴는 일반적으로 종축으로 수십 미터의 변위를 유발시켜 수십 킬로미터의 속력으로 수십 킬로미터를 이동한다. 이러한 현상은 완전히 액상화가 된 지반이나 원지반이 액상화 된 지반 위에 올라타 있을 때 발생한다.

(2) Lateral spreads : Lateral spreads는 흙의 표면 토괴 지표면 아래층의 액상화의 결과에 의존하여 큰 측방변위를 수반한다. 지진에 의해서 중력과 지층 내부에서 작용하는 힘의 조합에 의하여 변위가 나타난다. Lateral spreads는 일반적으로 완만한 경사(보통 3도 이하)에서 발생해서 강바닥과 같은 자유표면 쪽으로 움직인다. 수평 변위는 보통 수 미터 범위에 있다. 일반적으로 지반변위는 내부의 파괴, 갈라짐, 가파른 비탈, 지루(horst) 그리고 지반의 표면파괴의 원인이 된다.

일반적으로 Lateral spreads는 건물의 기초 또는 토체 속의 하수관 그리고 교량 등을 붕괴시킨다. Lateral spreads에 의한 손상은 심한 붕괴를 일으킨다. 한 예로서 1964년 발생한 Alaska지진(규모 8.3)은 200개 이상의 교량에 손상을 주었다. Lateral spreads는 특히 관로를 파괴한다. 일례로서 1906년에 발생한 샌프란시스코의 지진은 모든 주요 관로를 파괴하였다.

(3) 지반 진동 : 지반은 평평하거나 경사져있으며 모든 측방변형은 완만하여 액상화가 발생하기 위해서 토층은 깊은 곳에서 발생한 진동에 의한 지진파에 의해 상하 좌우로 심한 충격을 받는다. 진동은 반복 작용으로 관로나 도로포장과 같은 강성 구조물을 부서지거나 갈라지게 한다. 지반 진동의 징후는 1989년 Loma Prieta 지진과 더불어 샌프란시스코 Marina District 에서 나타났었다. 보도와 차도가 비틀리고 광대하게 넓은 지역의 관로가 파괴되었다.

(4) 지지강도의 상실 : 액상화가 발생할 때 기초나 다른 구조물은 강도를 상실하게 되어 구조물의 기초나 침단 모두에서 큰 변형이 발생한다. 역으로, 지하매설 탱크나 파이프는 흙의 액상화 발생으로 인하여 부양력이 발생하게 된다. 1964년 일본 니가타 지진을 예로서 들 수 있다. 대규모 지진이 발생하는 동안 Kawangishicho의 복합아파트 단지는 60°정도 기울어지는 대사건이 일어났다. **S**

참고문헌

1. 건설교통부, 내진설계기준연구(II), 1997.
2. 한국지진공학회, 지중구조물의 내진설계, 1999.
3. Wang, J.-J., Seismic Design of Tunnels, Parsons Brinckerhoff, 1993.
4. 한국터널공학회, 터널의 이론과 실무, 2002.
5. 해양수산부, 항만 및 어항 설계기준, 1999.