발 간 등 록 번 호
11-B552016-000071-01

기존 시설물(터널) 내진성능

평가요령

2020. 6.

국토교통부
Ministry of Land, Infrastructure and Transport
한국시설안전공단

국토교통부와 한국시설안전공단은 지진으로부터 국민의 안전을 확보하기 위하여 기존 터널의 내진성능평가 및 내진보강을 체계적으로 수행할 수 있도록 “기존 시설물(터널) 내진성능 평가 및 향상요령”을 2004년에 제정하고 2011년에 개정하여 운영 중에 있습니다.

행정안전부에서는 「국가지진위험지도(2013)」와 「내진설계기준 공통 적용사항(2017)」을 제정·공표하였으며, 국토교통부에서는 이를 반영하여 ‘KDS 17 10 00 내진설계 일반’ 및 ‘KDS 27 17 00 터널 내진설계’를 제·개정하여 고시(2018)하였습니다.

이에 따라 터널의 내진성능평가가 최신의 기준 및 연구결과, 기존 평가요령의 미비점에 대한 개선사항 등이 반영될 수 있도록 「기존 시설물(터널) 내진성능 평가요령」을 개정하여 발간하였으니 실무에 많은 활용 바랍니다.

다만, 「기존 시설물(터널) 내진성능 평가요령」은 내진성능평가를 수행하는 실무자의 이해를 돕기 위한 참고도서로써 관계법상 구속력이 없으므로, 관련 기준이나 지침의 내용과 상이한 경우는 발주처와 협의하여 결정된 사항을 따르시길 바랍니다.

목 차

제1장 총 칙

1.1 일반사항 ····· 1

1.2 요령의 구성 ····· 2

1.3 용어 정의 ····· 3

1.4 기호 ····· 10

제2장 내진성능 평가기준지진과 평가절차

2.1 일반사항 ····· 13

2.2 지반운동 ····· 14

2.3 소요내진성능 ····· 19

2.4 내진성능 평가절차 ····· 21

제3장 내진성능 예비평가

3.1 일반사항 ····· 23

3.2 자료조사 및 정리 ····· 23

3.2.1 자료조사 ····· 23

3.2.2 자료정리 ····· 24

3.3 평가기준 ····· 24

3.4 평가방법 ····· 26

3.4.1 지진도 ····· 26

3.4.2 취약도 ····· 27

3.4.3 영향도 ····· 30

3.4.4 내진그룹화 ····· 33

제4장 내진성능 상세평가

4.1 일반사항 ····· 35
4.2 평가기준 및 성능수준별 하중조합 ····· 42
4.3 내진안정성 평가방법 ····· 43
4.3.1 응답변위법 ····· 43
4.3.2 응답이력해석법 ····· 60
4.3.3 액상화 ····· 66

제5장 내진성능 평가보고서 구성

5.1 문장 및 보고서의 작성 ····· 67
5.1.1 문장 ····· 67
5.1.2 보고서 ····· 67
5.1.3 편집 ····· 67
5.2 현황보고서 형식 ····· 68
5.3 예비평가 보고서 ····· 69
5.4 상세평가 보고서 ····· 69

참고문헌/참고기준

부록 A 내진성능 평가 예제

부록 B 내진점검표

<해설표 차례>

<해설표 2.2.1> 지진구역 구분 ····· 15
<해설표 2.2.2> 지진구역계수(재현주기 500년에 해당) ····· 15
<해설표 2.2.3> 지진 위험도계수 ····· 15
<해설표 2.2.4> 장단주기 지반증폭계수 F_a와 F_v ····· 15
<해설표 2.2.5> 지반의 분류 ····· 16
<해설표 2.2.6> 기반면의 수평가속도 (K_h') ····· 16
<해설표 2.2.7> 지표면의 수평가속도 (K_h) ····· 17
<해설표 2.2.8> 감쇠보정계수 C_D ····· 19
<해설표 2.3.1> 구조물별 내진등급 ····· 20
<해설표 2.3.2> 내진성능 목표 (붕괴방지수준) ····· 20
<해설표 2.3.3> 내진성능 목표 (기능수행수준) ····· 21
<해설표 3.4.1> 지진도 등급 기준 ····· 26
<해설표 3.4.2> 내진그룹화 예 ····· 34
<해설표 4.1.1> 경과년수 및 재료상태에 따른 구조상태계수 ····· 41
<해설표 4.1.2> 건설연도별 재료의 기본값 ····· 41
<해설표 4.3.1> 표층지반의 고유주기(T) 값에 따른 스펙트럼 속도값 계산식 ····· 53
<해설표 4.3.2> 응답이력해석의 입력물성 ····· 65

<그림 차례>

<그림 2.4.1> 내진성능 평가절차 ····· 22
<그림 4.3.1> 지진하중 산정 ····· 44
<그림 4.3.2> 구체에 작용하는 상시하중 ····· 47
<그림 4.3.3> 구체에 작용하는 지진시 주면전단력 ····· 48
<그림 4.3.4> 구체에 작용하는 지진시 관성력 ····· 48

<해설그림 차례>

<해설그림 2.2.1> 심도에 따른 수평가속도 ····· 17
<해설그림 2.2.2> 표준응답스펙트럼(감쇠비 5%) ····· 18
<해설그림 3.4.1> 내진그룹화 방법 ····· 33
<해설그림 4.3.1> 응답변위법의 개념도 ····· 49
<해설그림 4.3.2> 응답변위법의 해석절차 ····· 50
<해설그림 4.3.3> 단일코사인, 이중코사인 이론을 이용한 지중변위 산정법 ····· 52
<해설그림 4.3.4> 기반면에서의 속도응답스펙트럼 ····· 54
<해설그림 4.3.5> 지반반력계수 산정을 위한 유한요소모델 ····· 57
<해설그림 4.3.6> 구조해석에 사용하는 응답변위법의 해석모형 ····· 58
<해설그림 4.3.7> 지반변위하중 ····· 59
<해설그림 4.3.8> 유한요소해석(예) ····· 62
<해설그림 4.3.9> 양해법의 순환구조 ····· 64
<해설그림 4.3.10> 유한차분해석(예) ····· 64
<해설그림 4.3.11> 경계조건 적용(예) ····· 65
<해설그림 4.3.12> 유한차분해석결과(콘크리트라이닝 응력 (예)) ····· 66

제1장 총 칙

1.1 일반사항

1. 본 내진성능 평가요령은 개착 또는 굴착공법으로 건설된 터널 구조물에 대하여 적용한다.

2. 내진성능 평가방법은 개착터널의 경우는 응답변위법을 적용하고 굴착터널인 경우는 응답변위법 또는 응답이력해석법을 적용할 수 있다.

3. 본 요령의 내용은 기술수준이 향상되거나 필요에 따라 내용을 추가 또는 보완할 필요가 있을 때에는 개정하여 시행하는 것을 원칙으로 한다.

4. 본 요령과 관련된 규정은 다음과 같다.
   (1) 내진설계기준 공통적용사항(행정안전부, 2017)
   (2) 내진설계 일반(KDS 17 10 00 : 2018)
   (3) 터널 내진설계 (KDS 27 17 00 : 2018)
   (4) 공동구 설계기준(KDS 11 44 00 : 2018)
   (5) 도시철도 내진설계기준(국토교통부, 2018)
   (6) 기존 콘크리트구조물의 안전성 평가기준(KDS 14 20 90 : 2016)
   (7) 콘크리트 구조해석과 설계원칙(KDS 14 20 10 : 2016)

5. 내진성능 평가는 본 요령에서 제시하는 바와 다르더라도 역학적으로 타당한 절차와 방법에 의해서 실시될 수 있다.

6. 지반 액상화 내진성능 평가에 대해서는 내진설계 일반(KDS 17 10 00) 및 터널 내진설계(KDS 27 17 00)에 따라 최신의 평가법을 적용하도록 하며,

「기존 시설물(기초및지반)의 내진성능 평가요령」을 준용한다.

▌해설▐

1. 본 요령은 개착 또는 굴착공법으로 지중에 건설된 터널 구조물의 내진성능 평가에 적용하며, 개착식 터널의 본선 및 정거장 구조물, 굴착식 터널(도로 및 철도터널) 등에 적용한다. 본 요령 중 개착터널 내진성능 평가 부분은 「기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령」을 참조할 수 있으며, U-Type 및 옹벽구조물은 「기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령」편에서 다루기로 한다.

2. 본 요령에서는 내진성능 평가를 위하여 가능하면 보편적으로 이용하고 있는 응답변위법 또는 응답이력해석법 등을 이용하도록 하고 있다. 따라서, 개착식 터널의 경우 응답변위법을 적용하고 굴착식 터널의 경우 지반조건 및 터널단면 형태에 따라 응답변위법 또는 응답이력해석법을 적용할 수 있다.

3. 본 요령에서는 내진설계가 수행되지 않은 기존 구조물의 내진성능 평가와 관련한 최소한의 사항을 규정하고 있다. 따라서, 내진성능 평가와 관련하여 본 요령에서 규정하고 있지 않은 사항에 대해서는 관련 규정을 적용하여 평가하여야 한다.

1.2 요령의 구성

본 요령의 구성은 다음과 같다.

제1장 총칙

제2장 내진성능 평가기준과 평가절차

제3장 내진성능 예비평가

제4장 내진성능 상세평가

제5장 내진성능 평가보고서 구성

부록 A. 내진성능 평가 예제

부록 B. 내진점검표

1.3 용어 정의

본 요령에 사용되는 용어의 정의는 [내진설계 일반 (KDS 17 10 00)], [터널 내진설계 (KDS 27 17 00)], [도시철도 내진설계기준], [터널설계기준], [공동구 설계기준], [콘크리트 구조기준] 등의 관련 기준에 따르고 이에 정의되지 않은 용어는 아래의 정의를 따른다.

1. **가속도 시간이력 (Acceleration time history)** : 가속도의 시간에 따른 변동을 나타내는 함수
2. **감쇠비 (Damping ratio)** : 임계 감쇠계수에 대한 구조물 또는 지반의 감쇠계수의 비율
3. **강진지속시간** : 지진에 의한 가속도 시간이력에서 최대가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)에 해당하는 진동이 지속되는 시간
4. **개착공법** : 지표면에서 소정의 위치까지 굴착하고 구조물을 구축한 후 되메움하는 공법
5. **고유주기 (Natural period)** : 자유진동하는 구조물의 진동이 반복되는 시간간격(s)
6. **고유진동수 (Natural frequency)** : 진동시스템의 질량과 강성으로부터 결정되는 일정한 진동수로서 외력의 진동수가 고유진동수와 일치할 때 공진이 발생
7. **고정하중 (Dead load)** : 구조물의 시공 중 또는 건설이 완료된 후 변동없이 지속적으로 구조물에 작용되는 하중
8. **공동구** : 국토의 계획 및 이용에 관한 법 제2조제9호의 규정에 의한 공동구를 말하며, 지하매설물(전기·가스·수도 등의 공급설비, 통신시설, 하수도시설, 소방설비 등)을 공동 수용함으로써 도시 미관의 개선, 도로 구조의 보전 및 교통의 원활한 소통을 위하여 지하에 설치하는 시설물을 말함.

9. **관성력 (Inertia force)** : 구조물의 가속도에 의해 발생되는 힘으로서 그 크기는 질량과 절대가속도를 곱한 값이며 작용방향은 가속도와 반대방향임.
10. **기능수행수준:** 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 발생한 손상이 경미하여 그 구조물이나 시설물의 기능이 유지될 수 있는 성능수준
11. **내진그룹 (Seismic importance level)** : 터널 구조물의 내진성능 상세평가 수행여부를 결정하기 위하여 터널 구조물의 취약도, 영향도, 지진도를 고려하여 나눈 그룹
12. **내진성능 상세평가** : 터널 구조물의 구성부재가 내진성능 평가기준지진에 대하여 소요내진성능을 확보하고 있는지를 평가하는 2단계 평가
13. **내진성능 예비평가** : 터널 구조물의 내진그룹화를 위하여 개략적으로 수행되는 1단계 평가
14. **내진성능 평가기준지진** : 기존 터널 구조물의 내진성능을 평가하는 경우, 지진하중을 산정하는데 기준이 되는 지진
15. **노두 (Outcrop)** : 지표면에 노출된 암반의 상단
16. **도시철도** : 도시교통의 원활한 소통을 위하여 도시교통권역에서 건설·운영하는 철도·모노레일·노면전차·선형유도전동기·자기부상열차 등 궤도(軌道)에 의한 교통시설 및 교통수단을 말함.
17. **동적전단탄성계수 (Dynamic shear modulus)** : 동적변형이 작용될 때 재료의 전단탄성계수 값으로서 질량밀도와 전단파속도를 이용하여 구할 수 있음.
18. **붕괴방지수준** : 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 매우 큰 손상이 발생할 수는 있지만 구조물이나 시설물의 붕괴로 인한 대규모 피해를 방지하고, 인명 피해를 최소화하는 성능수준

19. 굴착공법(**비개착공법**) : 일반적으로 적용되는 개착공법 이외의 공법으로써 발파공법, 개방형TBM공법(Open TBM), 쉴드(Shield)공법과 하천, 철도, 교량 등을 통과하기 위한 특수공법 등을 말함.
20. **비선형거동 (Nonlinear behavior)** : 변형률과 응력의 관계가 선형탄성이 아닌 거동
21. **사용목표수명** : 내진성능 평가 대상구조물의 향후 목표로 하는 사용수명 년수로서 보수 및 보강이 되는 경우에는 이를 고려하여 평가된다. 시설물 관리주체의 시설물 사용계획에 따라 설정
22. **사용목표수명등급** : 내진성능 평가기준지진의 지진세기를 산출하는 경우, 사용목표수명을 용이하게 고려할 수 있도록 나눈 등급
23. **사용하중 (Service load)** : 고정하중 및 활하중과 같이 이 기준에서 규정하는 각종 하중으로서 하중계수를 곱하지 않은 하중 (작용하중이라고도 함.)
24. **상대변위 (Relative displacement)** : 기반지반 상단에서 변위에 대한 지층에서 변위의 상대적인 값
25. **상시하중** : 지진하중을 제외한 고정하중, 활하중, 토압, 수압 및 부력 등
26. **고유주기 (Design natural period)** : 전단파속도를 이용하여 구한 자유장지반의 고유주기로서 지반의 고유주기 중 가장 큰 값
27. **전단파속도 (Design shear wave velocity)** : 내진에 적용되는 지반의 전단파속도로서 지진에 의한 지반의 비선형성거동을 고려한 값
28. **소성 (Plasticity)** : 응력-변형률 관계가 탄성한계를 넘어 고체에 작용하고 있는 힘을 제거하여도 재료가 원래의 형상으로 복귀하지 않고 영구변형이 발생하는 현상
29. **속도응답스펙트럼 (Velocity response spectrum)** : 주어진 가속도에 대한 단자유도 구조물 상대속도의 최대값을 구조물 주기와 감쇠비에 따라 도표로 나타낸 스펙트럼

30. **수평층상지반 (Horizontally layered soil)** : 지층과 지층의 경계면이 수평인 지반
31. **스펙트럴 가속도 (Spectral acceleration)** : 진동주기에 해당하는 가속도응답스펙트럼의 값
32. **스펙트럴 속도 (Spectral velocity)** : 진동주기에 해당하는 속도응답스펙트럼의 값
33. **연직스프링 (Vertical spring)** : 응답변위법을 적용하여 구조해석을 수행할 때 구조물 단면에 연직방향으로 변위에 대한 지반의 강성을 나타내는 스프링 요소
34. **응답변위법 (Seismic deformation method)** : 지진에 의한 지중구조물의 거동을 해석하기 위한 해석방법으로서, 구조물과 지반의 구조해석모형(일반적으로 구조물은 프래임요소, 지반은 스프링요소로 모델링)에 구조물이 없는 자유장지반에서의 수평상대변위, 가속도, 응력을 입력으로 작용하여 구조해석을 수행하는 방법
35. **응답수정계수 (Response modification factor)** : 탄성해석으로 구한 각 요소의 내력으로부터 지진력을 산정하기 위한 수정계수
36. **자유장지반 (Free-field soil layer)** : 구조물 건설을 위하여 지반을 굴착하기 전의 지반상태
37. **전단력 (Shear force)** : 단면에 접하는 방향의 단면력 성분
38. **전단스프링 (Shear spring)** : 응답변위법을 적용하여 지반응답해석을 수행할 때 사용하는 구조물 모형에서, 구조물과 지반의 접촉면을 따라 설치하는 스프링요소
39. **전단탄성계수 (Elastic shear modulus)** : 재료의 전단응력-전단변형율 곡선에서 탄성영역의 기울기로서 재료의 전단변형에 대한 강성을 나타냄.
40. **전단탄성파속도 (Shear wave velocity)** : 매질에서 전단파(S파)의 전달속도

41. **전단파 (Shear wave)** : 파동 진행방향과 직각방향으로 진동하는 파로서 횡파, S파, 비틀림파라고도 함.
42. **정현하중 (Sine load)** : 불규칙한 지진하중을 일정한 주기와 진폭을 가지는 사인함수형태의 반복하중으로 치환한 값
43. **주면전단력 (Surface shear force)** : 응답변위법에 의해 구조해석을 수행할 때 구조물과 지반 사이에 발생하는 전단응력에 해당하는 하중으로서, 자유장지반에서 구한 자유장 전단응력을 구조물 면을 따라 적분한 값
44. **지반응답해석 (Ground response analysis)** : 토층의 저면에 입사되는 지진하중이 지표면으로 진행될 때 토층의 동적거동에 대한 해석
45. **지반진동 (Ground vibration)** : 지진에 의한 자유장지반의 진동
46. **지진지속시간 (Earthquake duration)** : 지진에 의해 유발된 기반지반의 가속도가 존재하는 총 시간
47. **지진하중 (Seismic load)** : 지진에 의해 추가적으로 구조물에 작용되는 하중으로써 지중구조물에서는 관성력, 지반변위, 주면전단력으로 구성됨.
48. **최대진폭 (Peak amplitude)** : 지진에 의해 구조물(또는 지반)에 발생된 응답(변위, 속도, 가속도, 응력)의 절대값 중에서 가장 큰 값
49. **축력 (Axial force)** : 부재의 축방향으로 작용되는 힘으로 방향에 따라 인장력 또는 압축력으로 구분함.
50. **탄성지반응답계수 (Elastic seismic response coefficient)** : 모든 스펙트럼 해석법에서 지진하중을 구하기 위한 무차원량
51. **탄성파 (Elastic wave)** : 탄성체를 매체로 전달되는 파동으로서 기본적으로 P-파와 S-파로 구분되며, 지층의 형태에 따라 다양한 표면파(Rayleigh파, Love파 등)가 존재함.
52. **터널 (Tunnel)** : 광의의 정의에 의하면 '지반 중에 어떤 목적이나 용도에 따라 만들어 높은 공간을 갖는 구조물' 또는 협의의 정의에 의하면 '입구와

출구를 갖는 지하통로 역할을 하는 연속적인 공간'이라고 말할 수 있는데, 일반적으로 도로 및 철도 터널 등을 그 예로 들 수 있음.

53. **통제주기 (Control period)** : 가속도 응답스펙트럼을 정의하는데 사용하는 주기로서 두 값이 정의됨. 두 주기 사이에서 최대증폭이 발생함.

54. **특수공법 :** 일반적으로 적용되는 개착공법, 발파공법, 개방형TBM(Open TBM)공법 또는 쉴드(Shield)공법 이외의 공법을 사용하여 하천, 철도, 교량 등을 통과하여 굴착터널 본체를 구축하는 공법

55. **파동전파이론 (Elastic wave propagation theory)** : 탄성파가 매질을 통해 전파되는 현상을 분석하기 위한 이론

56. **파장 (Wave length)** : 전단파속도를 이용하여 구한 자유장지반의 고유주기에 해당하는 지반 진동의 파장

57. **평균재현주기 (Mean return period)** : 어떤 크기나 특성을 가진 지진이 발생하는 평균 시간간격(s)

58. **평행층상 반무한지반 (Horizontally layered half-space soil)** : 반무한지반 위에 층경계가 모두 수평인 층상지반이 있는 지반. 내진에서는 대부분 지반응답해석을 수행할 때 지반을 평행층상 반무한 지반으로 가정함.

59. **표준관입시험 (Standard penetration test)** : 보링공을 이용하여 로드 끝에 중공의 표준샘플러(외경 5.2cm, 내경 3.5cm, 길이 81cm의 스플릿 스푼형)를 장착하여 무게 63.5kgf의 해머를 76cm의 높이에서 자유낙하로 타격시켜 30cm 관입하는데 요하는 타격회수(N 치)를 측정하여 토층의 경연을 조사하는 원위치시험임.

60. **표층지반 (Top soil layers)** : 기반지반 위에 있는 수평층상지반

61. **활하중 (Live load)** : 구조물의 사용 및 점용에 의해 발생하는 하중으로서 가구, 창고저장물, 차량, 군중에 의한 하중 등이 포함됨. 일반적으로 차량의 충격효과도 활하중에 포함되나, 풍하중, 지진하중과

같은 환경하중이나 고정하중은 포함되지 않음.

62. **휨모멘트 (Bending moment)** : 부재를 휘게 하도록 작용하는 부재력

1.4 기호

A : 구조물 단면적

B : 대상구조물의 최대 단면폭(m)

B_v : 구조물 저판 폭 (m)

C : 지반변형에 대한 보정계수

C_D : 암반지반에서 주기 T에 따른 감쇠보정계수

D : 고정하중

E : 지진하중

E_D : 지진하중 상태의 성능수준을 고려한 지반의 탄성계수

F_a : 토사지반의 단주기 지반증폭계수

f_{ck}, f_{ctk} : 콘크리트의 설계기준압축강도 및 인장강도(MPa)

F_v : 토사지반의 장주기 지반증폭계수

F_y : 강재의 항복강도(MPa)

f_y : 철근의 항복강도(MPa)

G_D : 지반의 동적전단탄성계수

g : 중력가속도(9.81m/s^2)

h : 토피고(m)

H : 대상구조물의 최대 단면높이(m)

H : 토압 및 수압(하중조합)

H_h : 흙, 지하수 등에 의한 수평방향 하중

H_v : 흙, 지하수 등에 의한 연직방향 하중

I : 위험도계수

II: 터널 구조물의 영향도 지수

K_H : 구체측벽의 수평 지반반력계수 (kN/m3)

K_h : 지표면에서의 수평가속도

K_h' : 기반면에서의 수평가속도

K_{SB} : 구체저판의 전단 지반반력계수 (kN/m^3)

K_{SS} : 구체측벽의 전단 지반반력계수 (kN/m^3)

K_V : 구체저판의 연직 지반반력계수 (kN/m^3)

L : 활하중

P : 일일 평균탑승인원(명)

Q_i : 사용하중에 의한 단면력

R : 개착터널 구조물의 응답수정계수

R_A : 구조물의 평가내하력

R_n : 공칭강도

S : 내진성능 평가기준지진의 유효수평지반가속도

s : 적설하중(하중조합)

S_a : 내진성능 평가기준지진의 스펙트럼가속도

S_i : 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 분류한 지반의 종류, i=1, 2, 3, 4, 5, 6

S_v : 표층지반의 고유주기에 해당되는 기반암 속도응답스펙트럼(m/s)

T : 일평균 교통량(대)

t : 터널의 공용년수(년)

T_G : 표층지반의 특성값$(s) = \sum(4H_i / V_{Si})$

T_L : 내진성능 평가기준지진의 응답스펙트럼에서 스펙트럼가속도가 주기 T의 제곱에 반비례하여 감소하기 시작하는 구간의 전이주기(sec)

T_S : 상한통제주기로 내진성능 평가기준지진의 응답스펙트럼에서 스펙트럼가속도가 상수인 구간의 최대주기(sec)

T_s : 표층지반의 고유주기$(s) = 1.25T_G$

T_0 : 하한통제주기로 내진성능 평가기준지진의 응답스펙트럼에서 스펙트럼가속도가 상수인 구간의 최소주기(sec)

U_A : 평가소요강도

V_s : 전단파속도(m/s)

V_{si} : i층 지반의 평균전단파속도(m/s)

VI : 터널의 취약도지수

Z : 지진구역계수

Z_B : 개착터널 하부까지 깊이

Z_U : 개착터널 상부까지 깊이

α : 제1층과 제2층의 임피던스비(개착터널)

α_H : 매설깊이(h)에 따른 분산보정계수

$\Delta_{\max}$: 소성변형과 탄성변형의 합

Δ_y : 부재의 항복변위(m)

γ_A : 구조물 평가에서 사용되는 하중평가계수

γ_i : 하중계수

γ_t : 지반의 단위중량 (kN/m^3)

μ_ψ : 곡률연성도

μ_Δ : 축방향철근의 겹침이음 상세에 따른 연성능력을 제한하는 변위연성도

ϕ : 강도감소계수

ϕ_A : 구조상태계수

$\psi_{\max}$: 최대소성변형에 대한 곡률

ψ_y : 항복상태의 곡률

ξ : 감쇠비(%)

제2장 내진성능 평가기준지진과 평가절차

2.1 일반사항

1. 내진성능 평가는 관련 기준을 따른다.

▌해설▐

1. 지중에 건설되는 터널 구조물은 관련 기준[내진설계 일반 (KDS 17 10 00), 도시철도 내진설계기준(2018), 터널 내진설계(KDS 27 17 00), 공동구 설계기준(KDS 11 44 00) 등]에서 요구하는 구조물의 성능과 동등한 성능을 발휘할 수 있어야 한다는 것을 의미한다. 이를 위해 현행 기준에 규정된 지진구역계수, 지반증폭계수, 응답스펙트럼 등이 사용되어야 하고, 당 기준에서 요구하는 강도 및 연성도를 달성할 수 있어야 한다. 따라서, 내진성능 평가는 기존 터널 구조물이 이러한 목표성능을 확보하고 있는지를 평가하여야 한다.

2.2 지반운동

1. 지진구역은 2개 구역으로 설정하고, 각 지진구역별로 지진구역계수를 설정한다.

2. 유효지반가속도(수평가속도)는 지진하중을 산정하기 위한 지반운동수준을 나타낸다.

3. 지진 응답스펙트럼

가. 표준응답스펙트럼은 <해설그림 2.2.2>와 같다.

나. 표준응답스펙트럼은 관련 기준에서 규정하고 있는 기반면에서의 수평가속도 스펙트럼을 적용한다.

다. 기반면에서의 가속도 스펙트럼은 감쇠율에 대한 보정계수를 곱하여 적용한다.

▌해설▐

1. 관련 기준에서는 지진구역을 <해설표 2.2.1>과 같이 2개 구역으로 설정하고 있고, 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년의 지진지반운동에 해당하는 지진구역계수는 <해설표 2.2.2>와 같이 규정하고 있다. 따라서, 본 요령에서도 이를 준용한다. 단, <해설표 2.2.1>의 지진구역에서 구분된 행정구역의 경계를 통과하는 평가대상 구조물에는 상위의 지진구역계수를 적용한다.
2. 본 요령에서는 기존 구조물에 대해서도 신설 구조물과 동일한 지진세기에 대하여 동일한 성능을 만족하도록 요구하고 있다. 따라서, 평균재현주기가 다른 지진의 유효지반가속도(수평가속도)는 <해설표 2.2.3>의 위험도계수(I)를 <해설표 2.2.2>의 지진구역계수(Z)에 곱하여 계산한다. 한편, 지중구조물의 가속도는 지진해석시 기반면에서의 수평가속도(K_h')와 지표면에서의 수평가속도(K_h)를 사용하여 대상 깊이의 수평가속도를 지표면과 기반면의 수평가속도를 직선 보간하여 구할 수 있다. 기반면은 전단파속도 760 m/s 이상인 지층의 상면으로 설정하며, 지반조사에 의하여 산정토록 한다. 유효지반가속도(수평가속도), S는 다음 식과 같이 구한다.

$$S = Z \times I \qquad \text{해설식(2.2.1)}$$

여기서, Z : 지진구역계수

I : 위험도계수

<해설표 2.2.1> 지진구역 구분

지진구역	행정구역	
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종
	도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부[1]
II	도	강원 북부[2], 제주

[1] 강원 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백
[2] 강원 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

<해설표 2.2.2> 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
지진구역계수, Z	0.11	0.07

<해설표 2.2.3> 지진 위험도계수

평균재현주기 (년)	50	100	200	500	1,000	2,400	4,800
위험도계수, I	0.40	0.57	0.73	1	1.4	2.0	2.6

<해설표 2.2.4> 장단주기 지반증폭계수 F_a와 F_v

지반분류	단주기 지반증폭계수, F_a			장주기 지반증폭계수, F_v		
	S ≤ 0.1	S = 0.2	S = 0.3	S ≤ 0.1	S = 0.2	S = 0.3
S_2	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
S_3	1.7	1.5	1.3	1.7	1.6	1.5
S_4	1.6	1.4	1.2	2.2	2.0	1.8
S_5	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

지진계수 결정을 위한 지반 분류는 <해설표 2.2.5>와 같이 분류한다. 지진구역에 따른 기반면 및 지표면의 수평가속도의 값은 <해설표 2.2.6> 및 <해설표 2.2.7>과 같으며 심도에 따른 수평가속도는 <해설그림 2.2.1>과 같다.

<해설그림 2.2.1>은 구조물 상판과 저판의 수평가속도 K_{h1}, K_{h2}가 기반면의 수평가속도 K_h'와 지표면에서의 수평가속도 K_h에 따라 결정됨을 나타낸 것이다.

<해설표 2.2.5> 지반의 분류

지반분류	지반분류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H (m)	토층 평균전단파속도, $V_{s,soil}$ (m/s)
S_1	암반 지반	1 미만	-
S_2	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
S_3	얕고 연약한 지반		260 미만
S_4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
S_5	깊고 연약한 지반		180 미만
S_6	부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 요구되는 지반		

주 : 1) 기반암(Bed rock)은 전단파속도가 760 m/s 이상인 지층으로 정의한다.

2) 토층의 평균전단파속도($V_{s,soil}$)는 탄성파시험 결과가 있을 경우 이를 우선적으로 적용한다.

3) 기반암 깊이와 무관하게 토층 평균전단파 속도가 120 m/s 이하인 지반은 S_6 지반으로 분류한다.

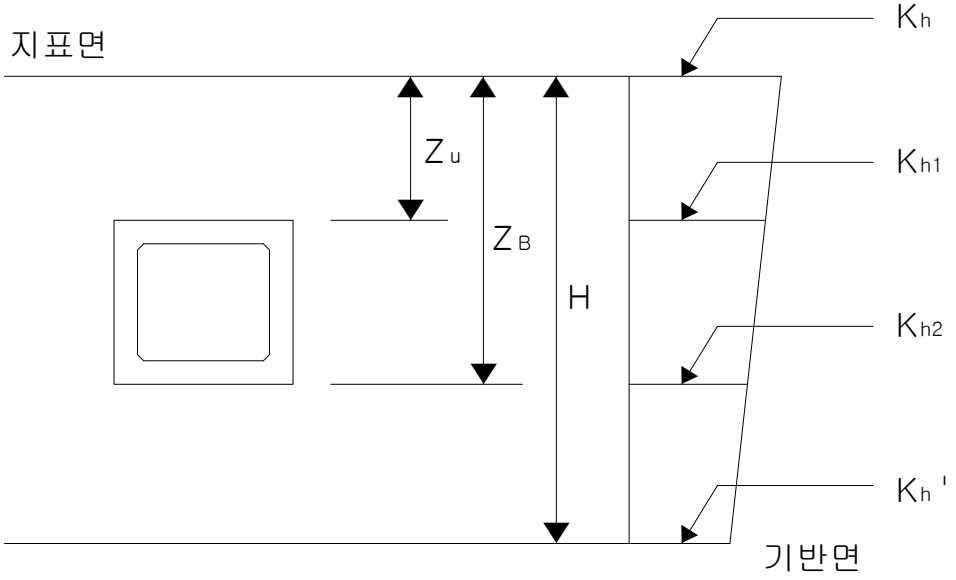
<해설표 2.2.6> 기반면의 수평가속도 (K_h')

구 분	I 등급(붕괴방지, 1000년)	
	I	II
수평가속도	0.154	0.098

<해설표 2.2.7> 지표면의 수평가속도 (K_h)

지반분류	지진구역 I		지진구역 II	
	내진I등급 S=0.154	내진특등급 S=0.22	내진 I 등급 S=0.098	내진특등급 S=0.14
S_1	0.154	0.220	0.0980	0.1400
S_2	0.216	0.308	0.137	0.196
S_3	0.262	0.374	0.167	0.238
S_4	0.246	0.352	0.157	0.224
S_5	0.277	0.396	0.176	0.252

주 : 예로써 S ≤ 0.1인 경우 단주기 지반증폭계수(F_a)를 적용하여 산정한 값임



<해설그림 2.2.1> 심도에 따른 수평가속도

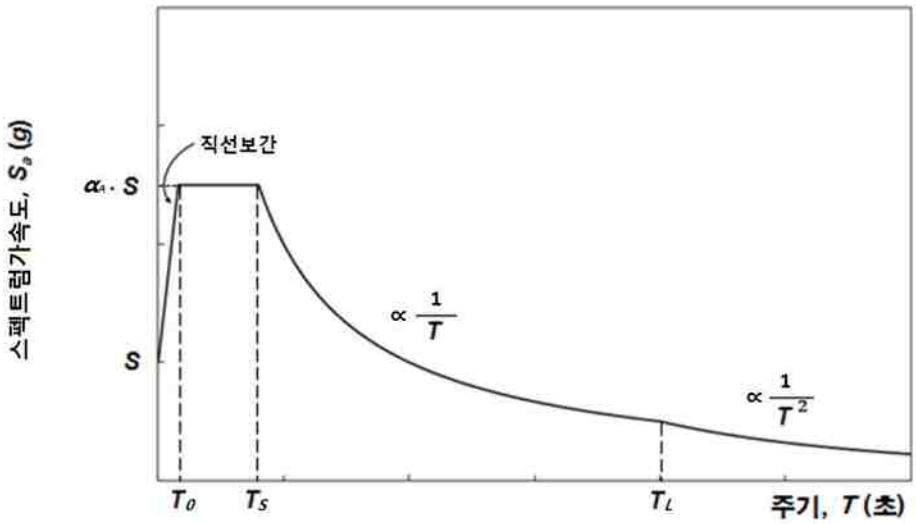
여기서, Z_U, Z_B : 구조물 상부, 하부까지 깊이

H : 기반면까지 깊이

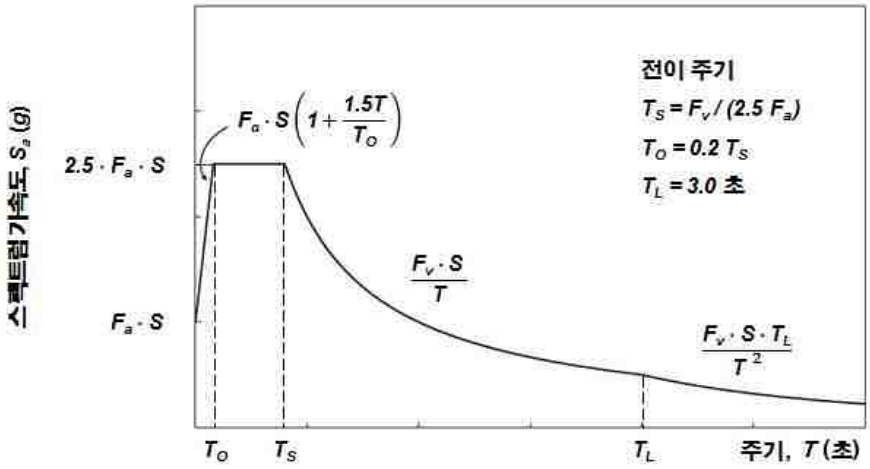
K_h, K_{h1}, K_{h2}, K_h' : 각 깊이에서 수평가속도

3.

가. 본 요령에서는 성능수준별 감쇠율에 대한 보정계수를 적용한 응답스펙트럼을 사용하도록 한다. 5% 감쇠비에 대한 표준응답스펙트럼은 <해설그림 2.2.2>와 같다.



<암반지반>



<토사지반>

<해설그림 2.2.2> 표준응답스펙트럼(감쇠비 5%)

나. <해설그림 2.2.2>에서 규정하고 있는 표준응답스펙트럼은 감쇠비가 5%인 경우이다. 이는 지표상 콘크리트 구조물의 탄성상태의 감쇠를 적용한 값이므로 지중구조물의 경우 이와 다른 값을 적용하여야 하며, 내진성능수준에 따른 감쇠비값을 적용하여 응답스펙트럼의 보정을 다음과 같이 수행한다.

<해설표 2.2.8> 감쇠보정계수 C_D

주기(T, sec)	$T=0$	$0 \le T \le T_o$	$T_0 \le T$
C_D	1.0	$T=0$일 때, 1.0 $T=T_o$일 때, $\left(\frac{6.42}{1.42+\xi}\right)^{0.48}$ 그 사이는 직선보간	$\left(\frac{6.42}{1.42+\xi}\right)^{0.48}$

2.3 소요내진성능

1. 내진등급

지중구조물의 내진등급은 시설물별 내진설계기준에서 정하는 바에 따라 설정한다.

2. 내진성능수준에 따른 지진세기

가. 기존 터널 구조물의 소요내진성능수준은 [기능수행수준]과 [붕괴방지수준]에 대해서 고려한다.

나. 내진성능평가에 이용하는 지진세기는 구조물의 내진등급과 내진성능수준에 따라 설정한다.

▌해설▐

1.시설물의 내진등급은 시설물의 중요도에 따라 내진 특등급, 내진Ⅰ등급, 내진Ⅱ등급으로 구분된다. 시설물의 내진등급은 시설물별 내진설계기준에서 정하는 바에 따라 설정하며, 터널 구조물은 대부분 내진Ⅰ등급 구조물에 속한다. 시설물별 내진설계기준에서 정하는 바가 명확하지 않은 경우, 해설표 2.3.1을 참조하여 정할 수 있다.

<해설표 2.3.1> 구조물별 내진등급

구조물 종류	내진Ⅰ등급	내진Ⅱ등급
주거・문화 시설	지하박물관, 지하음악당, 도서관, 지하상가, 위락시설	지하사무실, 스포츠센터
교통시설	도시철도, 철도・도로시설	지하주차장, 지하보도
라이프라인 시설	가스・석유 수송시설, 상수도, 전력・통신관로	하수도, 도수터널
산업시설	식수・정수처리장, 지하발전시설, 핵폐기물 처리시설	폐하수처리장, 산업폐기물 처리장
에너지 저장시설	전력시설, 전기공급시설, 열저장・지역냉난방공급시설, 지하원유・LNG・LPG 비축시설	곡물・식품저온 저장소, 수산물 냉장・냉동 저장소, 압축공기저장시설
방어시설	지하대피소, 지휘・통신시설, 군사기지, 해안방어기지	

2.

가. 터널의 내진 성능목표는 [내진설계 일반 (KDS 17 10 00)] (4.1.4)의 표 4.1-1 중 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 한다.

나. 현행 기준에서는 터널 구조물의 내진등급별 내진성능 목표에 따라 <해설표 2.3.2> ~ <해설표 2.3.3>와 같은 지진세기를 규정하고 있다.

<해설표 2.3.2> 내진성능 목표 (붕괴방지수준)

관련기준 / 재현주기	도시철도 내진설계기준(2018)	터널 내진설계 (2018)	공동구설계기준 (2018)
500년	내진Ⅱ등급	내진Ⅱ등급	-
1,000년	내진Ⅰ등급	내진Ⅰ등급	내진Ⅰ등급
2,400년	내진특등급	-	-

<해설표 2.3.3> 내진성능 목표 (기능수행수준)

관련기준 / 재현주기	도시철도 내진설계기준(2018)	터널 내진설계 (2018)	공동구 설계기준 (2018)
50년	내진Ⅱ등급	내진Ⅱ등급	-
100년	내진Ⅰ등급	내진Ⅰ등급	내진Ⅰ등급
200년	내진특등급	-	-

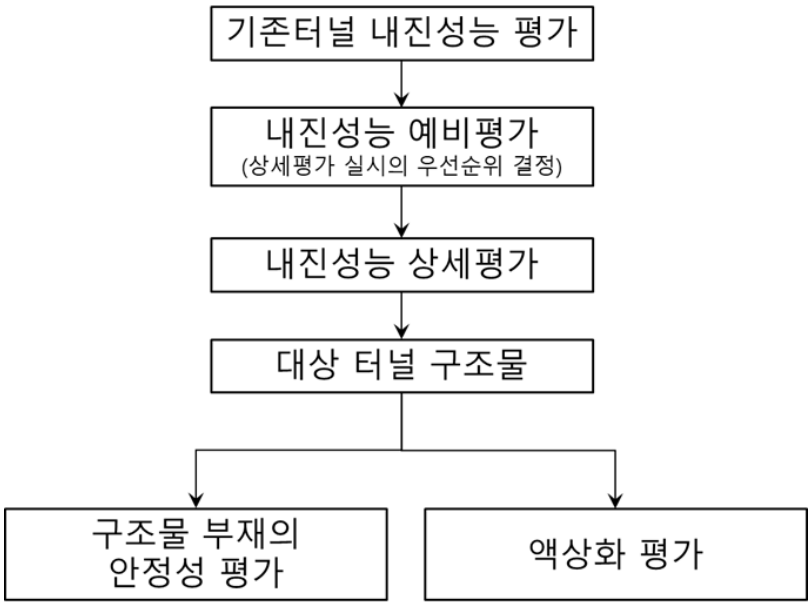
2.4 내진성능 평가절차

1. 기존 터널 구조물의 내진성능 평가는 내진성능 예비평가와 상세평가 2단계로 구분하여 단계적으로 수행한다.

2. 내진성능 예비평가는 문헌자료 및 현장조사에 근거하여 내진성능 상세평가의 우선순위 결정을 위해서 실시한다.

3. 내진성능 상세평가는 예비평가 결과와 내진성능 평가수준에 따라 기존 터널 구조물의 구성부재의 내진성능을 파악하기 위해서 실시한다.

4. 본 요령에서는 <그림 2.4.1>과 같은 내진성능 평가절차에 따라 터널 구조물의 내진성능 평가를 수행하도록 하고 있다. 지반의 액상화 발생가능성 평가는 예비평가 및 본평가의 순서로 실시되며, 보다 상세한 사항은 [기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령]을 준용한다.



<그림 2.4.1> 내진성능 평가절차

▌해설▐

3. 터널 구조물의 내진성능 평가를 위해서는 구조물의 비선형적 거동이 고려되어야 한다. 우리나라 지진세기 등을 고려하여 탄성법에 준하여 성능을 평가하는 방법을 채택할 수 있고, 응답이력해석법을 수행하여 지반에 대한 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 해석방법을 사용할 수 있다.

제3장 내진성능 예비평가

3.1 일반사항

내진성능 예비평가는 터널 구조물의 내진성능 상세평가의 우선순위를 결정하는 판단자료를 제공한다.

▌해설▐

내진설계가 수행되지 않은 기존 터널 구조물에 대하여 내진성능 평가를 보다 경제적이고 합리적으로 수행하기 위해서는 예비평가를 먼저 수행하여 내진성능 상세평가의 우선순위를 결정하는 것이 바람직하다.

3.2 자료조사 및 정리

3.2.1 자료조사

1. 내진성능 예비평가를 위한 자료조사에는 예비평가에 필요한 자료뿐만 아니라 내진성능 상세평가에 필요한 자료도 함께 조사하여 기록한다.
2. 자료조사에는 도서에 나타난 구조물의 직접 정보뿐만 아니라 현장조사를 통하여 구조물의 보수·보강이력 및 상태, 구조물의 현재 여건, 구조물 주위의 환경적 요인 등을 함께 조사하여 정리한다.

가. 일반사항 조사

(1) 터널명, 위치, 관리주체 등을 조사한다.

(2) 터널 구조물이 위치한 지진구역, 시설물의 내진등급, 지반조건 등을 조사한다.

(3) 준공년도, 준거 설계기준(시방서), 내진설계의 유무 등을 조사한다.

나. 도서 조사

(1) 구조물 구조형식 및 제원, 각 구성부재의 제원 및 재료 특성 등을 조사한다.

(2) 평면도, 종·횡단면도, 지반지질도, 상세도 등을 조사한다.

(3) 보수・보강 등에 따른 내진성능의 변화 요인을 조사한다.

다. 현장조사

(1) 구조물의 현재 상태 등을 파악하여 도서와의 차이점을 조사한다.

(2) 중요 연결시설물, 주변 현황 등을 조사한다.

라. 환경조사

(1) 재료 및 제원의 특성값에 영향을 주는 환경요인을 조사한다.

(2) 지진 외적인 보수·보강계획 등을 조사한다.

(3) 평균 이용객 현황 및 교통량 등과 같은 교통환경, 사회경제적 여건을 고려한 터널 구조물의 중요도 또는 특이사항 등을 조사한다.

3.2.2 자료정리

내진성능 평가를 위한 상세조사항목은 부록B와 같은 내진점검표를 작성하여 기록, 정리한다.

3.3 평가기준

1. 내진성능 예비평가는 기존 터널 구조물의 지진도, 취약도, 영향도를 고려하여 내진그룹화한다.

가. 지진도(Seismicity) : 지진의 규모 및 발생환경에 의해 결정한다.

나. 구조물의 취약도(Vulnerability) : 구조물의 취약성, 기하학적인 형상, 구조형식 등에 의해 결정한다.

다. 사회경제적인 영향도(Impact) : 교통량, 시설물의 중요성 등에 의해 결정한다.

2. 내진그룹은 내진보강 “핵심터널”, “중요터널”, “관찰터널”, “유보터널” 4개

그룹으로 분류하고 동 순서대로 상세평가 우선순위를 부여한다. 3. 정책적 판단으로 중요하다고 판단되는 시설에 대해서는 내진그룹을 조정할 수 있다.

▌해설▐

3. 기존 터널 구조물의 내진그룹화는 지진도, 취약도, 영향도를 종합적으로 고려하여 정량화함으로써 수행된다. 이러한 정량화는 수많은 사례연구를 통하여 중요인자를 도출하고 각 인자의 참여계수를 합리적으로 설정하여 그 결과가 공학적으로 충분히 타당하다는 것을 입증하는 것이 매우 중요하다. 본 요령에서 제안된 지진도, 취약도 및 영향도 지수는 향후 충분한 연구가 진행되면 수정·보완되어야 한다. 따라서, 정책적 판단으로 내진그룹의 변경이 가능하도록 한다.

3.4 평가방법

3.4.1 지진도

지진도는 지진구역과 도시권역, 지반분류 등을 고려하여 4그룹으로 분류한다.

▌해설▐

제2장에서 정의되는 지진구역과 지반분류를 기본으로 하여 권역별 특성(도시지역, 기타지역)을 고려하여 <해설표 3.4.1>과 같이 구분한다.

① 제 1 그룹 : 중점고려지역으로 한다.

② 제 2 그룹 : 우선고려지역으로 한다.

③ 제 3 그룹 : 관찰대상지역으로 한다.

④ 제 4 그룹 : 관찰제외지역으로 한다.

<해설표 3.4.1> 지진도 등급 기준

지진구역	구분	지반분류[1)]			
		S_6	S_3, S_5	S_2, S_4	S_1
I	도시	1그룹	1그룹	2그룹	3그룹
	기타지역	1그룹	2그룹	2그룹	3그룹
II	도시	1그룹	2그룹	3그룹	4그룹
	기타지역	1그룹	3그룹	4그룹	

주 1) 지반분류 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6는 터널주변 지반으로 한정한다.

3.4.2 취약도

지진에 대한 터널 구조물의 취약도는 터널 주변의 지반상태, 구조물의 형태, 기하학적 형상 등을 고려하여 취약도 지수로 나타낸다.

▌해설▐

터널 구조물의 취약도는 지진으로 인해 구조물이 붕괴되거나 손상을 입기 쉬운 형태를 구분하는 것으로 터널 주변의 지반상태, 갱구부 비탈면, 저토피 구간, 불균형 토압, 터널 형상, 라이닝 형식, 시공방법, 단면크기, 재난 이력, 지속적인 변형, 노후와, 손상상태 등 터널의 시공에서부터 유지관리에 이르기까지 다양한 인자를 고려하여 다음과 같이 **취약도 지수(Vulnerability Index, VI)**로 나타낸다.

$$VI = 10 \times (Soil + Slope + Depth + Unbal + Shape + Lining + Const + Size + Hist + Defor + Deter + Damage) \quad \text{해설식(3.4.1)}$$

여기서, $Soil$: 터널 주변의 지반(Soil) 분류에 따른 지수

$Slope$: 갱구부 비탈면(Slope)의 활동여부에 따른 지수

$Depth$: 터널 저토피(Shallow Depth) 구간에 따른 지수

$Unbal$: 단면의 비정형성 및 편토압 등의 불균형(Unbalance) 토압에 따른 지수

$Shape$: 터널 형상(Shape)에 따른 지수

$Lining$: 터널 라이닝(Lining) 형식에 따른 지수

$Const$: 터널 시공(Construction) 방법에 따른 지수

$Size$: 터널의 굴착단면 크기(Size)에 따른 지수

$Hist$: 터널 시공당시의 재난 이력(History)에 따른 지수

$Defor$: 터널의 지속적인 변형(Deformation) 여부에 따른 지수

$Deter$: 터널 구조물의 노후화(Deterioration)에 따른 지수

$Damage$: 터널 구조물의 손상(Damage) 상태에 따른 지수

1) $Soil$은 터널 주변의 지반 상태, 즉 강한 지반 또는 연약한 지반 등의 지반상태(Soil condition)를 나타내는 지수이다.

구분	내용	지반분류[2)]	점수
지반상태 (*Soil*)	연약지반[1)] 및 지층변화가 심한 지반	S_6	1.0
	연약한 지반	S_3, S_5	0.8
	단단한 지반	S_2, S_4	0.5
	강성지반	S_1	0.2

주 1) 단층파쇄대, 연약대 등의 지질학적으로 불량한 지반

주 2) 지반분류 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6는 터널주변 지반으로 한정한다.

2) *Slope* 는 갱구부 비탈면(Slope)의 활동 가능성을 나타내는 지수이다.

구분	내용	점수
갱구부 비탈면[1)] (*Slope*)	있음	1.0
	보통	0.5
	없음	0.2

주 1) 갱구부 비탈면에 대한 적절한 조치가 취해진 경우는 하향조정 가능

3) *Depth* 는 터널 저토피(Shallow depth) 구간에 따른 지수이다.

구분	토피고(h)	점수
저토피 구간 (*Depth*)	5m 미만	1.0
	5m ≤ h < 10m	0.5
	10m 이상	0.2

4) *Unbal* 는 단면의 비정형성 및 편토압 등의 불균형(Unbalance) 토압의 유무를 나타내는 지수이다.

구분	내용	점수
불균형 토압 (*Unbal*)	있음	0.5
	없음	0.2

5) *Shape* 는 터널 형상(Shape)을 나타내는 지수이다.

구분	내용	점수
터널형상 (*Shape*)	박스형	1.0
	아치형 (마제형, 난형, 반원형 등)	0.8
	원형	0.5

6) *Lining* 은 터널 라이닝(Lining) 형식을 나타내는 지수이다.

구분	내용		점수
라이닝 형식 (*Lining*)	조적조		1.0
	일부 조적조		0.8
	콘크리트	무근	0.5
		철근	0.2

7) *Const* 은 터널의 시공(Construction) 방법을 나타내는 지수이다.

구분	적용공법	점수
시공방법 (*Const*)	개착식	0.5
	굴착식	0.2

8) *Size* 는 터널의 단면 크기(Size)에 따른 지수를 나타낸다.

구분	단면크기		점수
단면크기[1] (*Size*)	대형	폭(B) 30m 이상 또는 높이(H) 20m 이상	1.0
	중대형	20m ≤ B < 30m 또는 15m ≤ H < 20m	0.8
	중형	10m ≤ B < 20m 또는 10m ≤ H < 15m	0.5
	소형	폭(B) 10m 미만이고 높이(H) 10m 미만	0.2

주 1) 대상구조물의 최대 단면폭(B)과 높이(H)로 산정

9) *Hist* 는 터널 시공당시의 재난 이력(History)의 유무를 나타내는 지수이다.

구분	내용	점수
재난이력 (변형, 붕괴 등) (*Hist*)	있음	0.5
	없음	0.2

10) *Defor* 는 터널의 지속적인 변형(Deformation) 여부를 나타내는 지수이다.

구분	내용	점수
지속적인 변형 (*Defor*)	있음	0.5
	없음	0.2

11) *Deter* 는 터널 구조물의 노후화(Deterioration)를 나타내는 지수이다.

구분	공용년수(t)	점수
구조물 노후화 (*Deter*)	50년 이상	1.0
	30년 ≤ t < 50년	0.8
	10년 ≤ t < 30년	0.5
	10년 미만	0.2

12) *Damage* 는 터널 구조물의 손상(Damage) 상태를 나타내는 지수이다.

구분	상태등급	점수
구조물 손상[1)] (*Damage*)	D, E등급	1.0
	C등급	0.8
	B등급	0.5
	A등급	0.2

주 1) 대상터널의 최근 상태평가등급으로 분류

3.4.3 영향도

터널 구조물의 영향도는 교통량 및 탑승인원, 주요 라이프라인, 시설물의 중요도 등을 고려하여 영향도 지수로 나타낸다.

▌해설▐

터널 구조물의 영향도는 지진으로 인해 피해가 발생할 경우에 이로 인한 사회 및 경제적인 영향을 고려하여 교통량 또는 탑승인원, 인접 주요시설물, 주요 라이프라인 등의 다양한 인자를 고려하여 터널 구조물의 취약도 지수 산정과 유사한 방법으로 다음과 같이 영향도 지수(Impact Index, II)로 나타낸다.

$$II = 20 \times (Traffic + Facilities + Lifeline + Importance + Recovery) \quad \text{해설식(3.4.2)}$$

여기서, $Traffic$: 터널을 이용하는 일평균 교통량(Traffic) 또는 일일 평균탑승인원

$Facilities$: 인접 주요 시설물(Facilities)의 존재여부

$Lifeline$: 터널 내·외부 주요 라이프라인(Lifeline)의 존재여부

Importance : 사회·경제적으로 영향을 주는 터널의 중요도(Importance)

Recovery : 터널 구조물의 성능회복(Recovery)을 위한 비용지수

1) *Traffic* 은 터널을 이용하는 일평균 교통량(Traffic density) 또는 탑승인원(Boarding persons)을 나타내는 지수이다.

구분	일평균 교통량(T)	일일 평균탑승인원(P)	점수
일평균 교통량 및 탑승인원[1)] (*Traffic*)	50,000대 ≤ T	10만명 ≤ P	1.0
	5,000대 ≤ T < 50,000대	1만명 ≤ T < 10만명	0.8
	2,500대 ≤ T < 5,000대	5천명 ≤ T < 1만명	0.6
	500대 ≤ T < 2,500대	1천명 ≤ T < 5천명	0.4
	T < 500대	P < 1천명	0.2

주 1) 시설물의 특성을 고려하여 일평균 교통량 또는 탑승인원으로 점수 산정

2) *Facilities* 는 터널 인접의 주요시설물(Facilities) 존재유무를 나타내는 지수이다.

구분	내용	점수
인접 주요시설물[1)] (*Facilities*)	존재	1.0
	없음	0.2

주 1) 군사시설, 관공서, 병원, 학교 등 지진시 터널 피해로 인하여 사회·경제적인 파급효과가 클 것으로 예상되는 시설물

3) *Lifeline* 은 터널 내·외부에 가스나 상수도 등 주요 라이프라인 시설물의 존재유무를 나타내는 지수이다.

구분	주요 라이프라인 시설물	점수
터널 내·외부 주요 라이프라인 (*Lifeline*)	가스 및 송유관	1.0
	상수도관 및 광통신케이블	0.8
	기타시설물	0.5
	시설물 없는 경우	0.2

4) *Importance* 는 사회·경제적으로 터널의 중요도(Importance)를 나타내는 지수이다.

구분	주요기능	내진등급	점수
터널 중요도[1)] (*Importance*)	인원수송	1등급	1.0
		2등급	0.8
	화물수송	1등급	0.5
		2등급	0.2

주 1) • 구조물 내진등급이 특등급에 준하는 경우는 해당점수의 1.5배 적용
• 폐쇄 또는 폐선 등 관리주체의 향후 유지관리계획에 따르는 경우는 점수 조정가능

5) *Recovery* 는 구조물의 성능 회복(Recovery)을 위한 비용지수를 나타낸다.

구분	터널 길이(L)	점수
구조물 성능회복[1)] (*Recovery*)	3,000m 이상	1.0
	2,000m 이상 ~ 3,000m 미만	0.8
	1,000m 이상 ~ 2,000m 미만	0.6
	500m 이상 ~ 1,000m 미만	0.4
	500m 미만	0.2

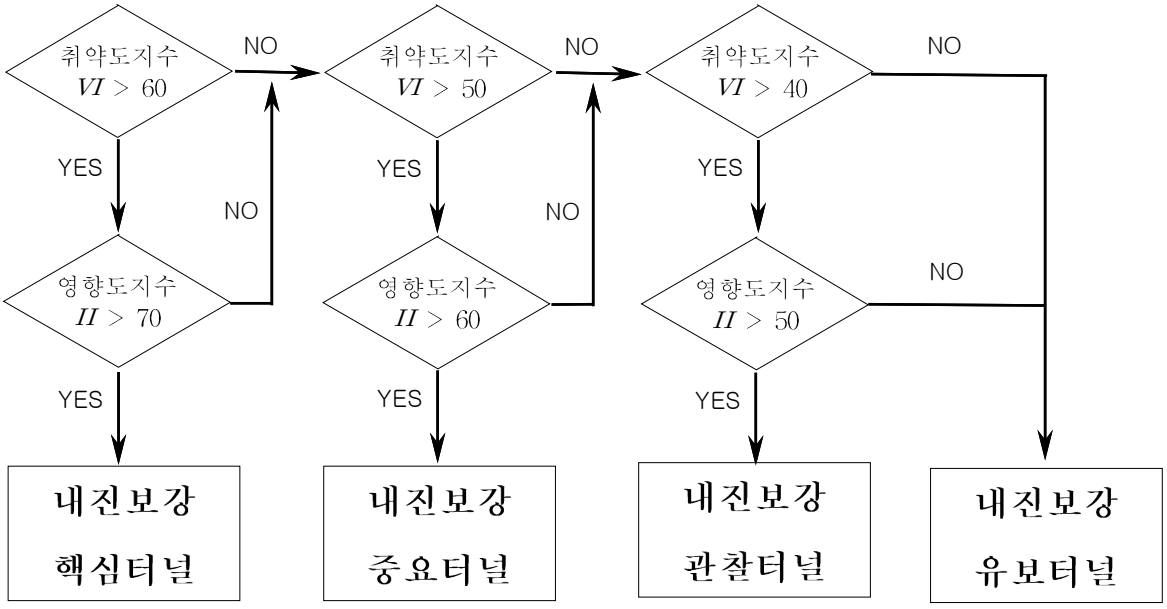
주 1) • 대상터널의 위치가 도심지역 이외의 경우는 한 단계 하향평가 가능
• 도시철도는 본선 길이를 터널 길이로 하며, 정거장 등의 중요구조물은 1.0 적용

3.4.4 내진그룹화

터널 구조물의 내진그룹은 지진도, 취약도, 영향도를 종합적으로 고려하여 내진보강 핵심터널, 중요터널, 관찰터널, 유보터널의 4개 등급으로 분류한다.

▌해설▐

터널 구조물의 내진그룹은 <해설그림 3.4.1>과 같이 취약도 지수와 영향도 지수를 고려하여 터널의 내진성능을 4개의 등급 즉, 내진보강 핵심터널, 중요터널, 관찰터널, 유보터널로 구분한다. 지진도 등급은 터널 내진성능에 미치는 취약도지수 산정시 적용한 세부지수에 일부 고려되어 있으므로 내진성능 예비평가에서는 지진도 등급을 직접 고려하고 있지 않지만, 이후 상세평가 우선순위 판단에 대해서 지진도 등급을 고려할 수 있다. 우선순위 1등급(핵심터널, 중요터널)의 경우 내진성능 상세평가를 우선적으로 수행한다.



<해설그림 3.4.1> 내진그룹화 방법

<해설표 3.4.2> 내진그룹화 예

터널명	내진그룹화	상세평가 우선순위
AA터널	핵심터널	우선순위 1등급
BB터널	중요터널	우선순위 1등급
CC터널	중요터널	우선순위 1등급
DD터널	관찰터널	우선순위 2등급
EE터널	유보터널	우선순위 3등급

제4장 내진성능 상세평가

4.1 일반사항

내진성능 상세평가는 예비평가 결과를 고려하여 필요한 터널 구조물에 대해서 수행한다. 내진성능 평가는 시설물의 특성에 따라 기능수행, 즉시복구, 장기복구/인명보호, 붕괴방지 수준 중에서 두 개 이상의 내진성능수준을 선택할 수 있으며, 일정 등급에서 기능수행을 포함하고, 즉시복구, 장기복구/인명보호, 붕괴방지 수준에서 하나 이상의 내진성능수준을 선택할 수 있다. 기존 시설물(터널) 내진성능 평가 시에는 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대해서 평가를 수행할 수 있다.

1. 평가대상은 부재의 안전성으로 한다.

2. 평가는 부재가 보유하고 있는 내하력(Capacity)과 지진에 대해 각 구성부재에 요구되는 부재력(Demand)을 비교하여 평가한다.

3. 구조물의 비탄성변형능력과 초과강도를 고려할 경우 구조물의 비탄성 거동 시 구조물의 부재력은 탄성거동으로 구한 부재력 보다 작게, 상한치 이내로 결정된다. 따라서 구조물의 비탄성 거동을 고려하여 부재의 탄성해석으로 구한 부재력(소요강도)을 응답(반응)수정계수(R)로 나누어 저감된 비탄성 상태 부재력을 추정할 수 있다.

4. 내진성능평가시 개착 터널인 경우 응답변위법, 굴착 터널인 경우는 지반-구조물의 동적 상호작용을 고려한 응답이력해석법 또는 응답변위법을 사용할 수 있다.

5. 개착터널에 작용할 수 있는 지진하중은 현재기준에 근거하여 적용하되, 구조물의 평가내하력은 직접 측정하거나 노후도를 고려한 내하력을 적용하여야 한다.

6. 비선형응답이력해석을 위한 입력지진기록은 내진설계일반(KDS 17 10 00)에 기반하여 선정한다. 응답변위법을 이용한 내진성능평가 시 기반면에서의 설계속도응답스펙트럼을 이용하여 깊이별 지반수평변위, 주면전단력을 구하여 지진하중을 산정하는 것을 원칙으로 한다.

▌해설▐

1. 개착식 구조물은 대부분 콘크리트 박스로 구성되며 이들 박스의 기둥부와 측벽 및 상·하부 슬래브에 대한 내진성능을 검토하고, 굴착식 구조물은 대부분 콘크리트 라이닝으로 구성되며 이에 대한 내진성능을 검토한다.

4. 내진성능 평가를 위해서는 필요에 따라 소성해석이 요구되는데 이를 위해서 엄밀한 비선형해석이 필요하다. 반면, 평가의 실용성과 효율성을 위해 응답(반응)수정계수(R)를 사용하여 지진시 소성상태 부재력을 추정할 수 있다. 응답수정계수는 구조물의 비탄성변형능력과 초과강도를 고려하여 설계지진하중을 저감시키는 역할을 한다. 단, 응답수정계수를 적용하기 위해서는 「콘크리트 내진설계기준(KDS 14 20 80)」의 구조상세를 만족하도록 배근되어야 한다. 본 방법을 적용시, 지진에 의한 탄성부재력을 응답수정계수로 나눈 값이 지진에 대한 성능평가를 위한 부재력이 되며, 이를 다른 하중에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안정성을 검토하여야 한다.

본 방법의 엄밀한 적용을 위해서 연성도는 두 가지 측면에서 고려할 수 있는데 하나는 구조물 부재의 최대 곡률과 항복 응력 상태의 곡률의 비이고, 또 다른 하나는 구조물 부재의 최대 변위와 항복 응력 상태의 변위의 비이다. 이를 각각 곡률연성도와 변위연성도로 정의할 수 있으며 다음과 같은 식으로 나타낸다.

- 곡률연성도

$$\mu_{\psi} = \frac{\psi_{max}}{\psi_{y}} \qquad \text{해설식(4.1.1)}$$

여기서, ψ_{max} : 최대소성변형에 대한 곡률

ψ_{y} : 항복상태의 곡률

- 변위연성도

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{y}} \qquad \text{해설식(4.1.2)}$$

여기서, Δ_{max} : 소성변형과 탄성변형의 합

Δ_{y} : 탄성변형

해석적인 방법으로 변위연성도를 구할 때 Δ_y는 콘크리트 부재의 경우 철근이 최초로 항복하는 시점에서의 변위이고, 강부재의 경우는 부재가 최초로 항복을 하는 시점에서의 변위이다. 곡률연성도와 변위연성도 중에는 후자가 구조적인 측면에서 접근이 용이하기 때문에 연성도로서는 변위연성도를 사용하는 것이 일반적이다.

상기 방법으로 각 구조물에 적합한 응답수정계수를 결정할 수 있으나 복잡한 절차를 필요로 함으로 「콘크리트구조 설계(강도설계법) (KDS 14 20 00)」의 일반규정을 만족하는 보통 콘크리트 구조시스템의 경우 초과강도를 고려하여 응답수정계수(R)를 3으로 성능평가에 적용할 수 있다.

응답수정계수(R)는 탄성해석으로 붕괴방지수준의 내진성능평가를 수행하는 경우에 한하여 적용하는 것을 원칙으로 하며, 터널 구조물의 구조부재가 탄성영역 하에서 거동하여야 하는 기능수행수준의 성능목표에 대한 평가를 실시하는 경우 응답수정계수(R)는 적용되어서는 안 된다.

응답수정계수는 지진에 의한 탄성부재력을 응답수정계수로 나눈 값이 지진에 대한 부재력이 되며 이 부재력을 다른 하중에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안전성을 검토하여야 한다. 응답수정계수는 휨모멘트에만 적용되며 설계 부재력 중 전단력과 압축력에 대해서는 적용하지 않는다.

4. 터널 구조물의 지진해석은 지반, 구조 조건 등을 고려하여 개착식 터널인 경우 “응답변위법”, 굴착식 터널인 경우 “응답변위법” 또는 “응답이력해석법”을 사용하여 수행할 수 있다. 일반적인 개착식 터널 구조물의 경우 “응답변위법”을 기본으로 하며,

응답변위법으로 성능평가가 어려운 경우로써 지반조건이 복잡(단층대 통과)한 경우 등에는 “응답이력해석법”을 적용할 하는 것이 바람직하다. 굴착식 터널의 경우 지반응답해석상 상대변위가 미미하게 발생된 경우 등은 지반과 구조물의 상호 작용 및 지반과 구조물의 비선형 거동을 고려할 수 있는 “응답이력해석법”을 적용하거나 지반조건 및 터널의 형상에 따라서 “응답변위법” 적용도 가능하다.

5. 평가용 지진하중은 「지진·화산재해대책법」 제14조에 따라 정의되는 최신 「내진설계 일반(KDS 17 10 00)」 기준에 근거하여 적용하여야 한다. 반면, 지진하중에 저항하는 개착터널 구조물의 평가 내하력은 현 상태의 강도를 측정하여 사용하는 것이 원칙이다. 그러나 현상태 강도확인이 어려운 경우, 환경요인 및 노후도를 고려하여 내진성능이 보수적으로 평가될 수 있도록 조정하여 사용하는 것이 바람직하다. 따라서, 철근콘크리트 구조물의 평가내하력은 「기존콘크리트구조물의 안전성평가기준(KDS 14 20 90 : 2016)」에 따라 다음의 절차에 기반하여 평가하도록 한다.

가. 구조물의 안정성 평가

다음 해설식 (4.1.3)과 같이 구조해석에 의하여 계산되는 구조물의 평가내하력 R_A가 평가소요강도 U_A 이상이면 안전한 것으로 평가할 수 있다.

$$R_A \geq U_A \qquad \text{해설식(4.1.3)}$$

나. 평가소요강도(U_A) 계산

평가소요강도 U_A는 다음 해설식 (4.1.4)에 따라 계산하여야 한다.

$$U_A = \Sigma \gamma_A (\gamma_i Q_i) \qquad \text{해설식(4.1.4)}$$

여기서, γ_A는 구조물 평가에서 사용되는 하중평가계수, γ_i는 이 구조기준에 따른 하중계수, 그리고 Q_i는 사용하중에 의한 단면력이다.

소요강도(U_A)는 사용성에 예상을 초과한 하중 및 구조해석의 단순화로 인하여 발생되는 초과 요인을 고려한 하중계수를 곱하여 산정한다. 하중입력값은 정밀현장조사에 의하여, 설계에서와 동일한 수준의 안전율을 확보할 수 있도록 적절한 확률·통계적인 방법으로 평가하는 경우, 고정하중과 활하중의 크기는 구조 도서에서 명기된 것과 다른 하중의 크기를 사용할 수 있다. 다만, 활하중의 감소는 입력값의 20% 내에서 허용되며, 고정하중과 활하중 이외의 하중에 대해서는 현 구조기준 값을 적용하여야 한다. 이렇게

평가된 하중크기에 대한 조정은 하중평가계수(γ_A)로 반영하여 적용토록 한다.(KDS 14 20 90)

다. 평가내하력(R_A) 계산

평가내하력 R_A은 다음 해설식 (4.1.5)에 따라 계산하여야 한다.

$$R_A = \phi_A(\phi R_n)$$ 해설식(4.1.5)

여기서, ϕ와 R_n은 각각 이 구조기준에 따른 강도감소계수와 공칭강도이며, ϕ_A는 구조상태계수이다.

(1) 개착터널의 평가내하력(R_A)은「기존 콘크리트구조물의 안전성 평가기준(KDS 14 20 90 」의 조사 및 시험 방법을 적용하여 재료 및 구조특성의 평가입력값을 산정하여 직접 결정할 수 있다.

(2) 개착터널의 평가내하력(R_A)을 추정하여야 하는 경우, 해설식 (4.1.5)에 따라 계산하여야 한다. 이때, 강도감소계수는 시공당시 상황을 반영하여 결정된 계수로 다음의 영향을 고려된 값이다.

(i) 재료의 기준강도와 실제강도와의 차이
(ii) 부재의 제작 또는 시공시 강도와의 차이
(iii) 부재강도의 추정과 해석에 관련된 불확실성을 고려한 안전계수

(3) 내진성능평가에 사용되는 강도감소계수는 개착터널의 시공당시 적용된 기준상의 강도감소계수를 기반으로 구조물의 노후도를 반영(구조상태계수, ϕ_A)하여 적용되어야 한다. 그러나, 극한하중인 지진하중의 특성을 고려시, 발주처와 협의 하에 최대 공칭강도가 발현된다고 가정하여 구조요소의 평가내하력을 정의할 수도 있다. 성능평가를 위하여 결정된 강도감소 계수는 다음을 초과할 수 없다. [기존 콘크리트구조물의 안정성 평가기준 (KDS 14 20 90: 2016)]

① KDS 14 20 20 (4.1.2(4))에서 정의된 인장지배단면 : 1.0
② KDS 14 20 20 (4.1.2(3))에서 정의된 압축지배단면
가. KDS 14 20 20 (4.3.2)에 따르는 나선철근으로 보강된 부재 : 0.85
나. 기타 부재 : 0.80

③ 전단력 및 비틀림모멘트 : 0.80
④ 콘크리트에 작용한 지압력 : 0.80

(4) 구조상태계수는 <해설표 4.1.1> 에서 제시된 경과년수에 따른 감소계수와 재료상태에 따른 감소계수를 곱하여 사용한다. 단, 도서에 명기된 기준강도에 경과년수에 따른 감소계수를 곱한 값이 <해설표 4.1.2>에 제시된 연도별 기본재료강도의 공칭강도보다 낮을 경우 연도별 기본재료강도를 사용할 수 있다. 이때, 현장조사를 실시하지 않을 경우 재료상태는 불량으로 간주한다. 재료의 상태는 구조요소에 발생한 균열발생, 변형, 화재이력, 마무리정도에 따라 엔지니어의 판단에 의해 결정하며 재료상태를 보통 혹은 양호로 판정할 경우 그 판단근거를 제시하여야 한다.

(5) 예비평가시 현장시험을 실시하지 않는 경우 또는 상세평가시 도서가 없고 현장시험이 어려운 재료(철근 등)의 경우 재료강도는 <해설표 4.1.2>의 연도별 기본값을 사용할 수 있다. 기본값에는 경과년수에 따른 재료강도의 감소가 이미 고려되어 있으므로 이에 대해 추가적으로 고려하지 않아도 되나, 재료상태에 따른 재료강도 감소계수는 현장조사에 근거하여 적용해야한다.

<해설표 4.1.1> 경과년수 및 재료상태에 따른 구조상태계수(ϕ_A)

구분		콘크리트 압축강도
경과 년수	30년 이상	0.8
	20년 이상	0.9
	20년 미만-10년 이상	1.0
	10년 미만	1.0
재료 상태	양호	1.0
	보통	0.9
	불량	0.8

<해설표 4.1.2> 건설연도별 재료의 기본값

구분	1970년 이전		1971-1987년		1988-2000년		2001년 이후	
	공칭 강도	기대 강도	공칭 강도	기대 강도	공칭 강도	기대 강도	공칭 강도	기대 강도
콘크리트 강도 (f_{ck}, MPa)	13	15	15	18	18	21	21	24
철근의 항복강도 (f_y, MPa)	240	300	240	300	240	300	300	375
강재의 항복강도 (F_y, MPa)	235	294	235	294	235	294	235	294

(6) 섬유복합체나 유기재료를 사용하는 보강공법을 적용할 경우, 환경노출 상태, 사용 재료 및 공법에 따라 보강한 부재의 신뢰성, 내구성, 강도 및 연성 능력의 저하가 예상되는 경우에는 해당 재료에 대하여 추가적으로 부분강도감소계수를 적용하여야 한다.

6. 비선형응답이력해석을 위한 입력지진기록은 3개의 실지진기록을 사용하여 내진성능을 평가한다. 사용되는 실지진 입력지진기록은 설계응답스펙트럼에 대해서 스펙트럼보정 후 사용되어야 한다.

4.2 평가기준 및 성능수준별 하중조합

1. 평가기준

내진성능 평가기준은 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\text{소요강도(U)} \leq \text{강도}(\phi \times \text{공칭강도}) \qquad \text{식(4.2.1)}$$

2. 내진성능수준별 하중조합

내진성능 평가시 내진성능수준별 하중조합은 관련 규정에 준한다.

▌해설▐

1. 소요강도(U)는 사용성에 예상을 초과한 하중 및 구조해석의 단순화로 인하여 발생되는 초과 요인을 고려한 하중계수를 곱하여 산정하며 구조부재의 강도는 공칭강도에 1.0보다 작은 값인 강도감소계수 ϕ를 곱하여 산정한다.

2. 내진성능 평가를 위한 목표 내진성능수준 및 하중조합은「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 제2조제8호에 근거하여, 시설물별로 정하는 내진설계기준의 규정에 따른다. 단, 관련 규정만을 적용하기 곤란한 경우에는 책임기술자의 판단에 따라 보다 향상된 규정을 적용할 수 있다. 시간이력 비선형 해석을 통한 상세평가를 실시하는 경우 해석모델링 단계에서 하중계수를 고려하지 않는다.

4.3 내진안정성 평가방법

4.3.1 응답변위법

지진발생 시에 발생하는 최대 지반변위를 등가의 지진하중으로 지중구조물에 작용하여 극한하중설계법을 따르는 방법을 응답변위법이라 한다. 「기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령」을 준용한다.

1. 지반의 지반응답변위 및 속도응답스펙트럼

가. 지진력에 의한 지반의 수평변위는 기반면에서의 속도응답스펙트럼을 이용하는 방법과 지반응답해석을 적용하여 산정한다.

나. [공동구 설계기준 (KDS 11 44 00)] '4.4.2 설계지반운동'에 제시된 기반면의 설정 방법에 따라 전단파속도 760 m/s 이상인 지층(기반암)의 상면을 기반면으로 설정한다. 기반암이 구조물 저면보다 높은 경우 구조물 저면을 기반면으로 설정한다.

다. 기반면의 속도응답스펙트럼을 산정하는 경우, [공동구 설계기준 (KDS 11 44 00)]을 따라 산정한다. 암반지반(S_1) 지반운동의 가속도 표준응답스펙트럼을 이용하여 직접 적분하여 구할 수 있다.

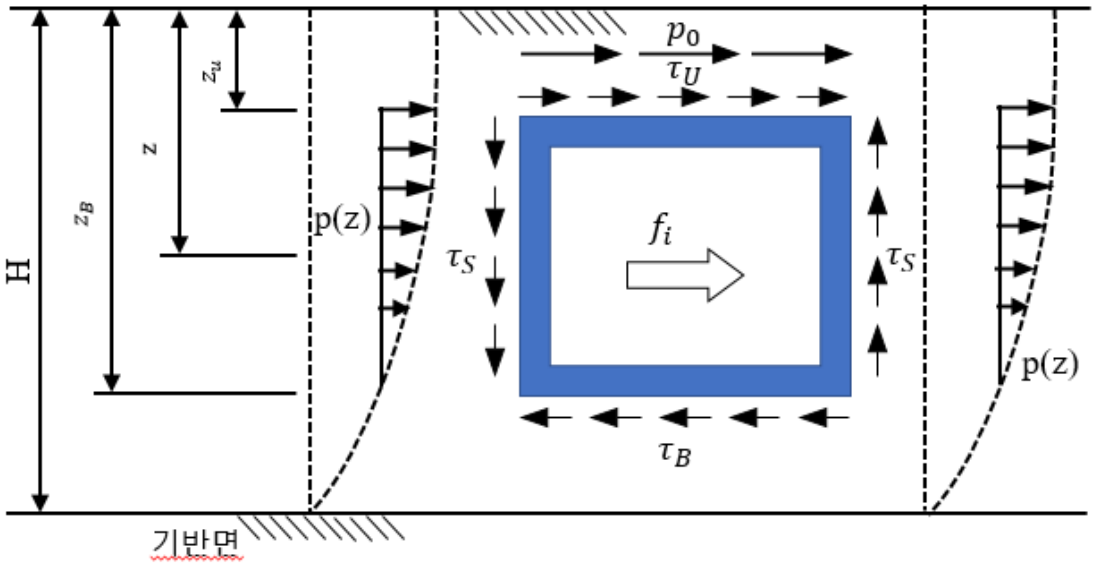
2. 내진해석을 위한 지반 탄성정수의 산정

가. 지반의 전단탄성계수는 성능수준에 따른 비선형성을 고려하여야 한다.

나. 지반반력계수는 [공동구 설계기준 (KDS 11 44 00)]에서 제시하는 방법에 따라 산출한다.

3. 구조물에 작용하는 지진하중

지진해석시 지진에 의한 하중은 <그림 4.3.1>과 같이 나타낼 수 있으며, 이러한 하중의 작용시 각 부재의 단면력을 계산하여 내진성능을 평가한다.



<그림 4.3.1> 지진하중 산정

가. 지반변위에 의한 지진하중

$$p(z) = K_H \cdot \{U_h(z) - U_h(z_B)\} \qquad \text{식(4.3.1)}$$

여기서, $p(z)$: 지표로부터 깊이 z 지점에 작용하는 수평방향 하중 (kN/m^2)

K_H : 단위면적당의 수평방향 지반반력계수 (kN/m^3)

$U_h(z)$: 지표면으로부터 깊이 z 지점의 수평방향 변위 (m)

$U_h(z_B)$: 지표면으로부터 깊이 z_B 지점의 수평방향 변위 (m)

z_B : 지표면으로부터 구체 저면까지의 깊이 (m)

또한, 지반반력계수를 4면지지모형으로 적용한 경우, 상판위 표층지반의 변위에 의한 상판변위하중 p_0을 추가로 재하한다. 4면지지모형에 대한 설명은 다음 절을 참고한다.

$$p_0 = K_{SB} \cdot \{U_h(z_U) - U_h(z_B)\} \qquad \text{식(4.3.2)}$$

여기서, p_0 : 상판의상면에 작용하는 지반변위하중 (kN/m^2)

z_U : 지표면으로부터 구조물 상판의 상면까지의 깊이 (m)

K_{SB} : 상판의 전단지반반력계수 (kN/m^3)

나. 주면전단력

① 지반변위를 단일코사인으로 산정 시

전단력은

$$\tau = G \cdot \gamma = G \cdot \frac{dU}{dz} \qquad \text{식(4.3.3)}$$

주면전단력은 지반변위식인 해설식(4.3.1)을 미분하여 구할 수 있고, 식(4.3.4)와 같다.

$$\tau(z) = \frac{G_D}{\pi H} \cdot S_v \cdot T_S \cdot \sin(\frac{\pi z}{2H}) \qquad \text{식(4.3.4a)}$$

$$\tau_U = (\frac{G_D}{\pi \cdot H}) \cdot S_v \cdot T_S \cdot \sin(\frac{\pi \cdot z_U}{2H}) \qquad \text{식(4.3.4b)}$$

$$\tau_B = (\frac{G_D}{\pi \cdot H}) \cdot S_v \cdot T_S \cdot \sin(\frac{\pi \cdot z_B}{2H}) \qquad \text{식(4.3.4c)}$$

$$\tau_S = \frac{(\tau_U + \tau_B)}{2} \qquad \text{식(4.3.4d)}$$

여기서, τ : 지표면으로부터의 깊이 z에 있어서 단위면적당의 지진시 주면 전단력 (τ_U : 상판, τ_B : 저판, τ_S : 측벽) (kN/m^2)

z_U : 지표면으로부터 구조물 상판까지의 깊이(m)

z_B : 지표면으로부터 구조물 저판까지의 깊이(m)

S_v : 기반면에서의 속도응답스펙트럼(m/s)

H_i : 제 i 번째 토층의 두께(m)

H : 기반암상면까지의 깊이(m)

② 지반변위를 이중코사인으로 산정 시

$$\tau_1(x) = \frac{2 \cdot G_D}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \frac{\omega_0}{V_{sod1}} \cdot \sin\left(\frac{\omega_0}{V_{sod1}} x_1\right) \qquad \text{식(4.3.5a)}$$

$$\tau_2(x) = \frac{2 \cdot G_D}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{V_{s0d1}}\right) \cdot \frac{\omega_0}{V_{s0d2}} \cdot \left(\sin\frac{\omega_0 x_2}{V_{s0d2}} + \frac{\cos\frac{\omega_0 x_2}{V_{s0d2}}}{\tan\frac{\omega_0 H_2}{V_{s0d2}}}\right)$$

식(4.3.5b)

구조물의 상판과 저면의 위치가 이중코사인의 제1층 또는 제2층의 어디인지에 따라서 아래와 같이 적용한다.

- 구조물 상판은 제1층에 구조물 저면은 제2층에 위치 시, $\tau_U = \tau_1(x), \tau_B = \tau_2(x)$
- 구조물 상판은 제1층에 구조물 저면은 제1층에 위치 시, $\tau_U = \tau_1(x), \tau_B = \tau_1(x)$
- 구조물 상판은 제2층에 구조물 저면은 제2층에 위치 시, $\tau_U = \tau_2(x), \tau_B = \tau_2(x)$

다. 관성력

$$f_i = m_i \cdot a_i = (w_i/g) \cdot a_i$$

식(4.3.6)

여기서, f_i : i번째 구조물의 관성력 하중 (kN/m)

w_i : i번째 구조물 중량 (kN/m)

m_i : i번째 구조물 질량 (t/m)

a_i : 해당깊이에 대해 보정한 수평지진가속도 ($m/\sec^2$) (이때, 기반면에서 유효수평지반가속도 S와 지표면에서 $F_a \cdot S$를 적용하여 깊이에 따라 수평가속도를 직선 보간하여 산정)

라. 지진시 동수압

$$p_f = a_i \cdot \gamma_w \cdot \frac{B}{2}$$

식(4.3.7)

여기서, p_f : 벽체 단위 면적 당 동수압 a_i : 수평가속도

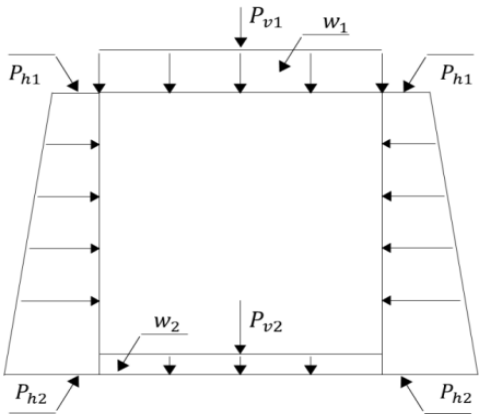
γ_w : 물의 단위체적중량 B : 벽체의 폭

4. 구조해석 모형

구조해석용 모형은 지반반력계수를 적용하는 방법에 따라 <해설그림

4.3.8>과 같이 4면지지모형과 3면지지모형의 2가지 형식으로 모델링이 가능하다. 구조해석을 위해 구성된 모형에 하중을 적용하는 방법은 아래의 절차와 같다.

가. 상시하중은 사하중과 활하중, 토압과 자중 등을 고려하며 하중조합을 이용하여 상부 슬래브와 하부 슬래브, 측벽에 대해 <그림 4.3.2>와 같이 작용시키도록 한다.



<그림 4.3.2> 구체에 작용하는 상시하중

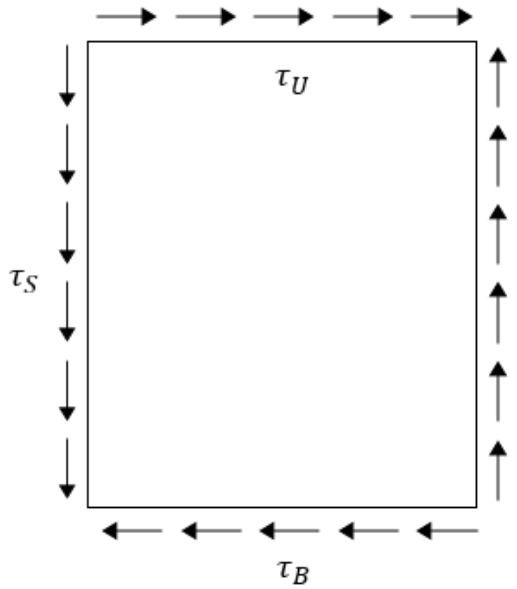
여기서, P_{h1}, P_{h2} : 상·하부 측벽토압

P_{v1} : 활하중 P_{v2} : 활하중 (내부설비 하중)

W_1 : 사하중 W_2 : 구조물의 자중

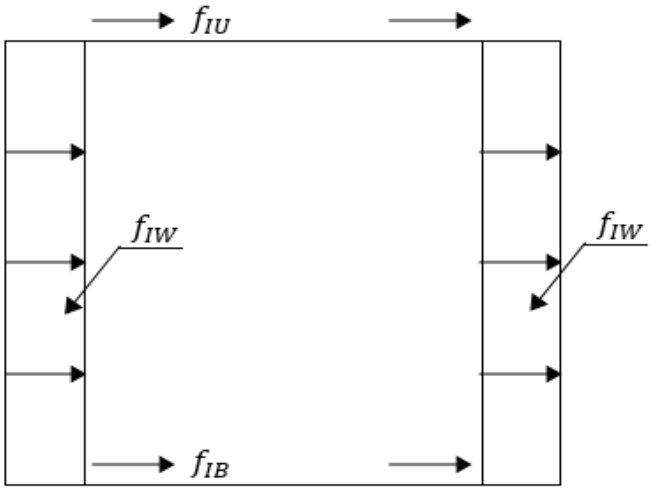
나. 지진시 수평하중 $p(z)$는 지반의 변위진폭을 이용하여 <해설그림 4.3.7>과 같이 수평력으로 작용한다.

다. 지진시 상·하부 슬래브와 측벽의 주면전단력(τ_U, τ_S, τ_B)은 <그림 4.3.3>과 같이 작용한다.



<그림 4.3.3> 구체에 작용하는 지진시 주면전단력

라. 지진시 자체중량에 의한 상·하부 슬래브와 측벽의 관성력 (f_{IU}, f_{IB}, f_{IW})은 <그림 4.3.4>와 같이 작용한다.

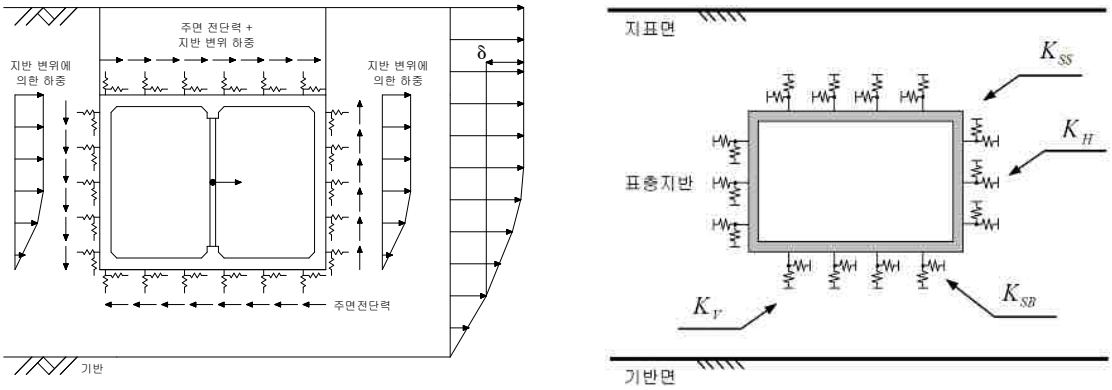


<그림 4.3.4> 구체에 작용하는 지진시 관성력

▌해설▐

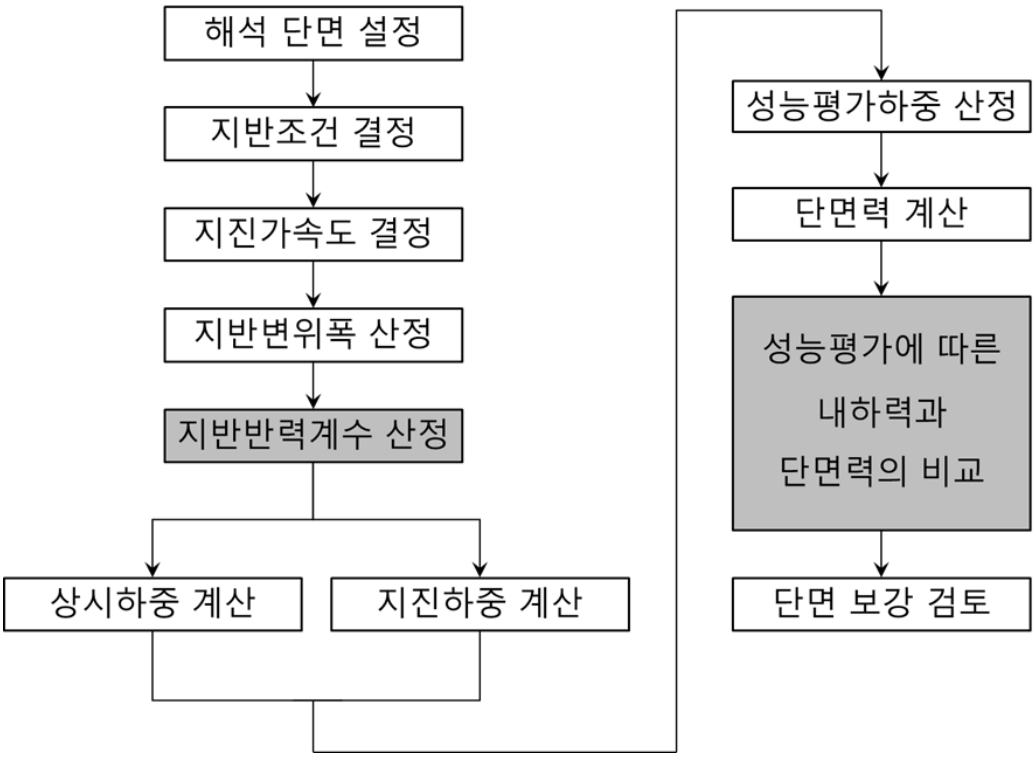
일반적으로 터널 구조물을 포함한 지중구조물의 겉보기 중량은 주변의 지반과 비교하여 가볍거나 또는 같은 정도이다. 또한 주위가 지반으로 둘러싸여 있으므로 발산감쇠가 커서

자기 진동이 곧 진정되는 특성을 가지고 있다. 그러므로 관성력에 의해 지중구조물 자체가 지반 속에서 자유롭게 진동하는 일은 없고, 지반의 진동에 따라 지반에 구속되어 움직인다. 따라서 지중구조물에 생기는 응력은 관성력에 의한 영향보다도 주변 지반의 상대 변위에 의한 강제력으로 생겨나게 된다. <해설그림 4.3.1>은 응답변위법의 개념을 설명하고 있다.



<해설그림 4.3.1> 응답변위법의 개념도

응답변위법을 적용하여 지진 해석을 수행하는 터널 구조물은 일반적으로 프레임(Frame) 요소로 모형화하고, 선형 또는 비선형성 구조요소로 모델링한다. 횡방향의 단면 검토에 있어서는 구조물을 슬래브, 측벽 및 중간 기둥(벽)으로 구성되는 라멘 구조로 모형화하는 것으로 한다. 각 부재는 프레임(Frame) 요소로 모형화하고, 축선 위치는 각 부재의 도심 위치로 해도 좋다. 일반적으로 중간 기둥 구조의 경우 기둥 간격을 고려한 2차원 모형으로 검토해도 좋지만 형상이 복잡한 경우나 2차원으로 해석하는 것이 부적절하다고 생각되는 구조인 경우는 3차원 해석을 수행하는 것이 좋다. 또 횡방향으로 내진벽이 존재하는 경우는 역학적 특성을 적절히 고려하여 모형화하는 것이 좋다. 응답변위법을 사용하여 터널 구조물의 내진성능평가를 위한 해석절차는 <해설그림 4.3.2>와 같다. 먼저 단면이 설정된 후 기반면에서의 설계속도응답스펙트럼 이용하여 깊이별 지반수평변위, 주면전단력을 구하여 지진하중을 산정하는 것을 원칙으로 한다.



<해설그림 4.3.2> 응답변위법의 해석절차

또한 지반조건에 따라 지반반력계수를 산정하고 설정된 단면의 상시하중과 지진하중에 의해 단면력을 계산한다. 기능수행 수준의 지진에 대해서는 응답변위법으로 예상되는 구조물의 최대변위가 구조 및 비구조요소의 정상적인 기능수행에 문제되지 않는 수준임을 확인하여야 한다. 붕괴방지 수준에 대해서는 계산된 단면력과 상시하중에 의한 단면력을 비교함으로써 내진보강 여부를 결정한다. 지반의 변위진폭 산정시 이용되는 기반면에서의 스펙트럼속도는 기반면에서의 속도응답스펙트럼에서 주기 T_s에 해당하는 값으로, 이 때 속도응답스펙트럼은 [공동구 설계기준 (KDS 11 44 00)]에 제시된 설계응답스펙트럼을 적용한다.

1.

가. 응답변위법에 사용되는 지반의 깊이별 수평변위는 지반응답해석을 이용하여 구하는 것이 좋다. 그러나 지층구성이 복잡하고 지반의 증폭 특성이 복잡한 지반이나 지진시에 지반의 특성이 크게 변화하는 지반 등의 상세한 검토를 필요로 하는 지반 이외는 기반면에서의 속도응답스펙트럼을 이용하여 토층의 고유주기에서 지표면의 최대 변위를 구하고, 지반의 변형 모드를 가정하여 깊이별 지반 수평변위를 구할 수 있다.

지반응답해석을 수행하는 경우, [기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령]의 지반응답해석절차를 준용한다. 1차원 지반응답해석결과는 일반적으로 깊이별로 최대변형률과 최대응력이 계산되며 이를 이용하여 기반암부터 변위를 누적하여 토사층의 깊이별 변위를 계산할 수 있다. 기반암의 변위를 0으로 설정한 후, 밑의 층부터 각 지층의 두께와 해당 지층의 최대(전단)변형률을 곱한 후 지층별로 누적하여 합산하여 토사층의 깊이별 변위를 계산할 수 있다. 최대(전단)변형률이 발생되는 시간이 각 지층 별로 다를 수 있으므로, 계산된 지반의 수평변위는 다소 보수적일 수 있다.

기반면에서의 속도응답스펙트럼을 이용하는 경우, <해설그림 4.3.3>과 같이 지반을 단일층으로 가정하여 지중변위를 산정하는 방법은 해설식(4.3.1)을 이용하고, 지반을 두 층으로 가정하여 지중변위를 산정하는 방법은 해설식(4.3.2a) ~ (4.3.2c)를 이용한다.

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_S \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2H_s}\right) \qquad \text{해설식(4.3.1)}$$

여기서, S_v : 표층지반의 고유주기에 해당되는 기반암 속도응답스펙트럼(m/s)

T_G : 표층지반의 특성값$(s) = \sum(4H_i / V_{Si})$

T_s : 표층지반의 고유주기$(s) = 1.25T_G$

V_{si} : i층 지반의 평균전단파속도(m/s)

H_i : i층지반의 두께(m)

H_s : 표층지반의 두께(m)

$$U_{h1}(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \cos\left(\frac{w_0 x_1}{V_{s_1}}\right) \qquad \text{해설식(4.3.2a)}$$

$$U_{h2}(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{V_{s1}}\right) \cdot \left(\cos\frac{\omega_0 x_2}{V_{s2}} - \frac{\sin\frac{\omega_0 x_2}{V_{s2}}}{\tan\frac{\omega_0 H_2}{V_{s2}}}\right) \qquad \text{해설식(4.3.2b)}$$

$$(1+\alpha)\cos\left\{\omega_0\left(\frac{H_1}{V_{s1}} + \frac{H_2}{V_{s2}}\right)\right\} + (1-\alpha)\cos\left\{\omega_0\left(\frac{H_1}{V_{s1}} - \frac{H_2}{V_{s2}}\right)\right\} = 0 \qquad \text{해설식(4.3.2c)}$$

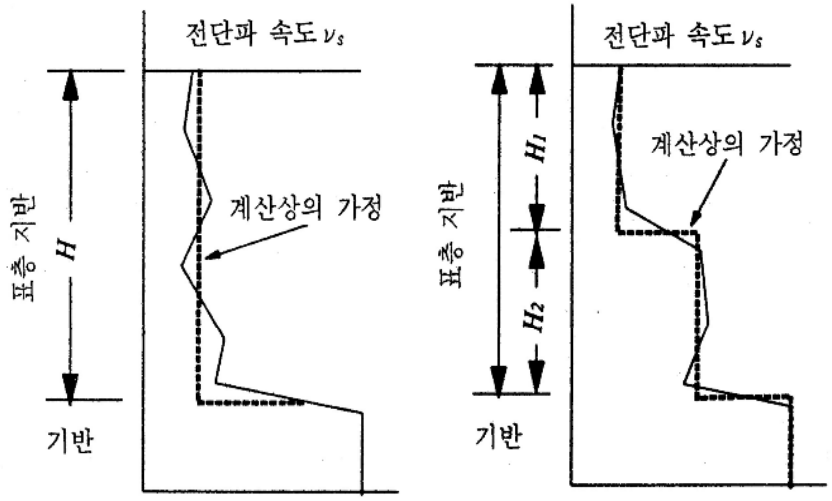
여기서, H_s : 전체 토층 지반의 두께(m)

H_1, H_2 : 제 1층, 제 2층 지반의 두께(m)

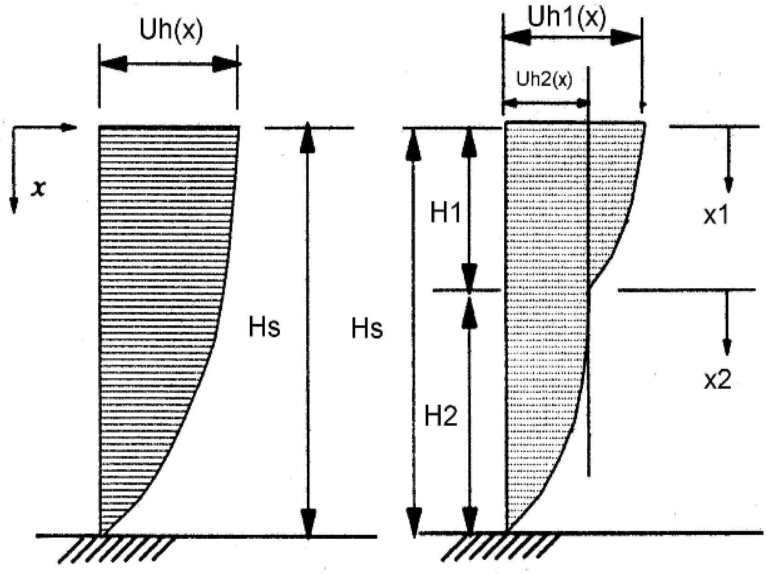
V_{s1}, V_{s2} : 제 1층, 제 2층의 평균 전단파속도(m/s)

ω_0 : 지반의 고유 진동수, 해설식(4.3.2c)에서 시행착오법으로 구함

α : 제1층과 제2층의 임피던스비, $\alpha = \dfrac{\gamma_1 V_{s1}}{\gamma_2 V_{s2}}$



(a) 전단파속도에 따른 지층 분할 및 평균 전단파속도 산정



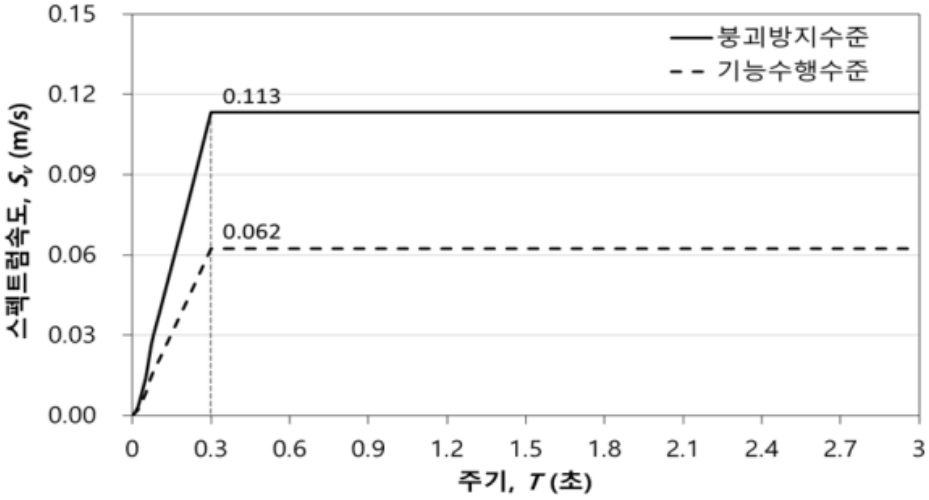
(b) 변형형상(모드)

<해설그림 4.3.3> 단일코사인, 이중코사인 이론을 이용한 지중변위 산정법

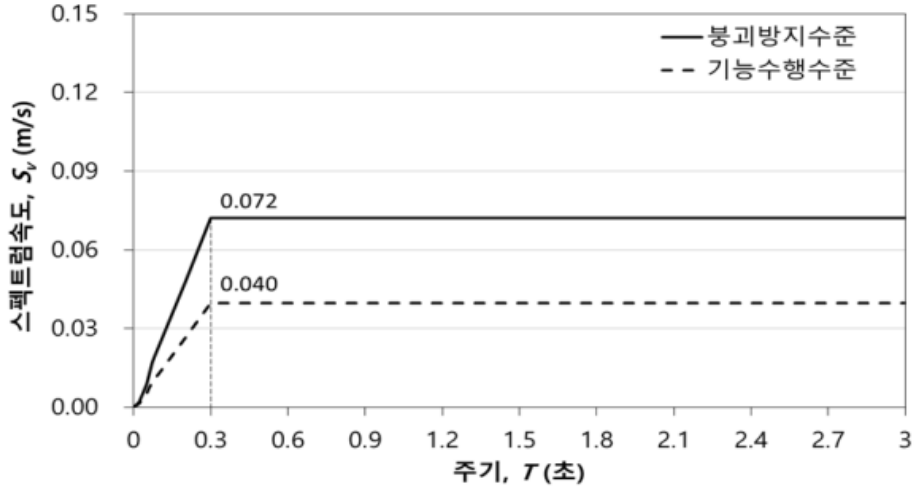
다. 기반면 속도응답스펙트럼은 행정구역에 따라 <해설표 4.3.1>의 계산식을 이용하여 구할 수 있고, 내진Ⅰ등급 시설물의 경우 기반면에서의 속도응답스펙트럼을 도시하면 <해설그림 4.3.4>와 같다.

<해설표 4.3.1> 표층지반의 고유주기(T) 값에 따른 스펙트럼 속도값 계산식

주기(T, sec)	지표면 가속도	기반면 속도	비고
	스펙트럼가속도 (S_a, g)	스펙트럼속도 (S_v, m/s)	
$0 \le T \le T_0$ ($0 \le T \le 0.06$)	$(1+30T)\times S$	$(1+30T)\times S\times 9.81\times C_D\times \frac{T}{2\pi}$	감쇠보정계수, C_D는 KDS 17 10 00 참조
$T_0 \le T \le T_S$ ($0.06 \le T \le 0.3$)	$2.8S$	$2.8\times S\times 9.81\times C_D\times \frac{T}{2\pi}$	감쇠보정계수 C_D = 0.758/0.561 (기능수행수준 /붕괴방지수준)
$T_S \le T \le T_L$ ($0.3 \le T \le 3$)	$\frac{0.84}{T}\times S$	$\frac{0.84}{T}\times S\times 9.81\times C_D\times \frac{T}{2\pi}$ $= 1.312\times S\times C_D$	



(a) 지진구역 Ⅰ



(b) 지진구역 Ⅱ

<해설그림 4.3.4> 기반면에서의 속도응답스펙트럼
[공동구 설계기준, (KDS 11 44 00 : 2018)]

2.

가.

지반의 응력-변형률 관계는 변형률의 크기에 따라 탄성계수가 변하는 비선형 거동을 보인다. 따라서 실내시험과 현장시험을 통하여 지반의 전단탄성계수 감소 현상을 평가하고 이를 해석에 이용해야 한다. 실내시험과 현장시험의 절차는 [기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령]을 준용한다. 지반의 비선형성을 최대한 반영하기

위해서는 적합한 구성모델을 선정하여 비선형 해석을 수행하는 방법이 가장 합리적이나, [기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령]의 지반의 비선형성에 대한 경험식을 준용한다. 선형해석 시에는 하중수준에 따른 비선형특성을 감안하기 위해 지반의 전단탄성계수를 다음과 같이 보정하여 사용한다.

$$G_D = (\gamma_t / g) \cdot V_{DS}^2 \qquad \text{해설식(4.3.3)}$$

여기서, G_D : 지반의 동적전단탄성계수 (kPa)

γ_t : 지반의 단위중량 (kN/m^3)

g : 중력가속도 ($m/\sec^2$)

V_{DS} : 해당구조물을 포함하는 지층의 전단탄성계수 계산에 사용되는 전단파속도 ($m/\sec$) (해당구조물이 여러 층에 걸칠 경우 각 지층의 높이를 고려한 평균치를 사용한다.)

$$V_{DSi} = C \cdot V_{si} \qquad \text{해설식(4.3.4)}$$

여기서, V_{Si} : i번째 지층의 현장에서 측정된 평균전단파속도(m/s)

V_{DSi} : i번째 지층의 V_{DS} (m/s)

C : 지반변형에 대한 보정계수 $C = \begin{cases} 0.8 & (< 360\,m/s) \\ 1.0 & (\geq 360\,m/s) \end{cases}$

특히, 360m/s 이상의 단단한 지반(풍화암, 연암, 경암 등)의 경우 지진하중으로 인한 전단변형이 상부지반에 비해 적기 때문에 전단탄성계수의 비선형성이 최소화되므로 이를 고려할 필요가 있다.

나. 지반반력계수의 산정

① 재하폭 산정 방법

지반반력계수는 각종 조사, 시험 결과에 의해 얻어진 탄성계수를 이용하여 기초 재하폭 등의 영향을 고려하여 정하는 것을 원칙으로 하며, 상시 상태에 대한 계수값은 [구조물기초설계기준] 혹은 [도로교 설계기준 해설 하부구조]의 지반반력계수의 산정부분을 따른다.

$$K_H = k_{h0}\,(\frac{B_h}{0.3})^{-3/4}$$ 해설식(4.3.5a)

$$K_V = k_{v0}\,(\frac{B_v}{0.3})^{-3/4}$$ 해설식(4.3.5b)

$$K_{SS} = \lambda K_H$$ 해설식(4.3.5c)

$$K_{SB} = \lambda K_V$$ 해설식(4.3.5d)

여기서, K_H : 구체측벽의 수평 지반반력계수 (kN/m^3)

K_V : 구체저판의 연직 지반반력계수 (kN/m^3)

K_{SS} : 구체측벽의 전단 지반반력계수 (kN/m^3)

K_{SB} : 구체저판 및 상판의 전단 지반반력계수 (kN/m^3)

k_{h0} : 지름 0.3 m 의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 수평 지반반력계수 (kN/m^3)

k_{v0} : 지름 0.3 m 의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 연직 지반반력계수 (kN/m^3)

B_h : 구조물 높이 (m)

B_v : 구조물 저판 폭 (m)

$$\lambda = 1/3 \sim 1/4$$ 해설식(4.3.6a)

$$k_{v0} = \frac{1}{0.3} \cdot E_D, \quad k_{h0} = \frac{1}{0.3} \cdot E_D$$ 해설식(4.3.6b)

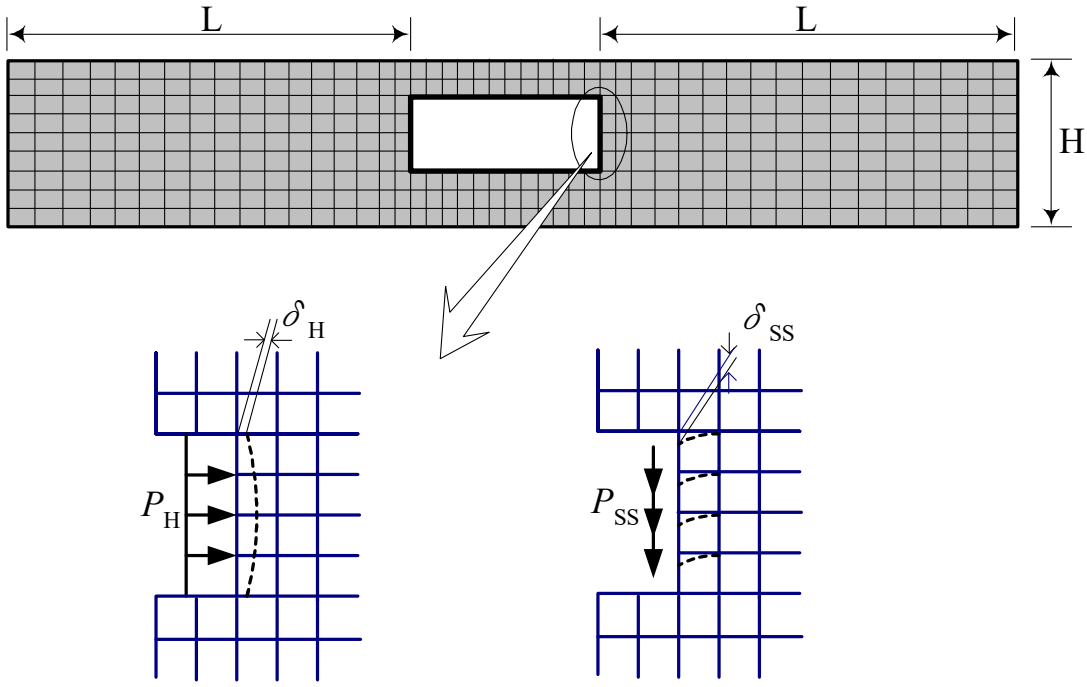
E_D : 지진하중 상태의 지반변형을 고려한 지반의 탄성계수

$$E_D = 2(1+\nu)\,G_D$$ 해설식(4.3.7)

② 유한요소법에 의한 방법

지진시 지반반력계수 K_H, K_V, K_{SS}, K_{SB}를 구하기 위하여 다음 <해설그림 4.3.5>와 같이 공동지반의 2차원 유한요소 모형을 작성하고, 지반탄성의 방향에 단위하중 “1”을 구조물에 작용시켜 그 방향의 하중과 변위의 관계에서 지반반력계수 값을 산출한다.

이때 지중 구조물은 상판 및 저판의 강성을 고려하거나, 혹은 강체로 간주한다.



<해설그림 4.3.5> 지반반력계수 산정을 위한 유한요소모델

여기서, K_H : 측벽에 대한 수평지반반력계수($K_H = P_H / \delta_H$)

K_V : 상판 및 저판에 대한 연직지반반력계수($K_V = P_V / \delta_V$)

K_{SS} : 측벽에 대한 전단지반반력계수($K_{SS} = P_{SS} / \delta_{SS}$)

K_{SB} : 상판 및 저판에 대한 전단지반반력계수($K_{SB} = P_{SB} / \delta_{SB}$)

P_H : 측벽에 가해지는 수평방향의 단위하중

P_V : 상판 및 저판에 가해지는 연직방향의 단위하중

P_{SS} : 측벽에 가해지는 전단방향의 단위하중

P_{SB} : 상판 및 저판에 가해지는 전단방향의 단위하중

δ_H : 측벽에 단위하중을 부여한 경우에 발생하는 수평방향의 변위

δ_V : 상판 및 저판에 부여한 단위하중에 의한 연직방향의 변위

δ_{SS} : 측벽에 단위하중을 부여한 경우에 발생하는 전단방향의 변위

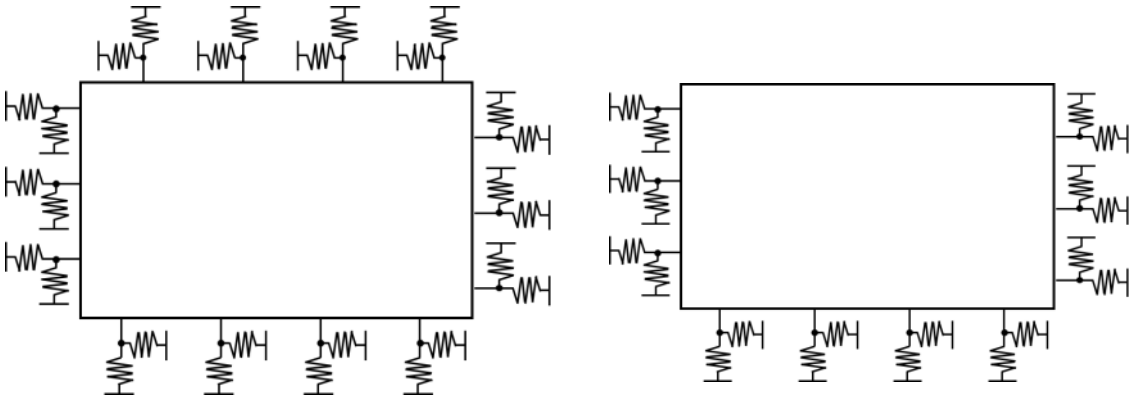
δ_{SB} : 상판 및 저판에 부여한 단위하중에 의한 전단방향의 변위

이때 주의할 점은 측방 경계와 구조물 측벽과의 거리를 충분히 고려하지 않으면 지진시 지반반력계수를 정확히 구할 수 없으므로, 유한요소 모형의 경계는 구조물 측벽에서 다음 식에서 나타난 거리 이상을 고려해야 한다.

$$L \geqq 3H \qquad \text{해설식(4.3.8)}$$

또한, 지반을 모형화할 때 적용하는 지반의 물성치, 즉 지반의 탄성계수(또는 전단탄성계수)와 포와송 비는, 지진시 지반에 동적하중이 가해지고 이에 따라 지반이 동적거동을 하므로, 지반의 동적탄성계수 E_D 또는 동적전단탄성계수 G_D와 동적포아송비 ν_D를 적용한다.

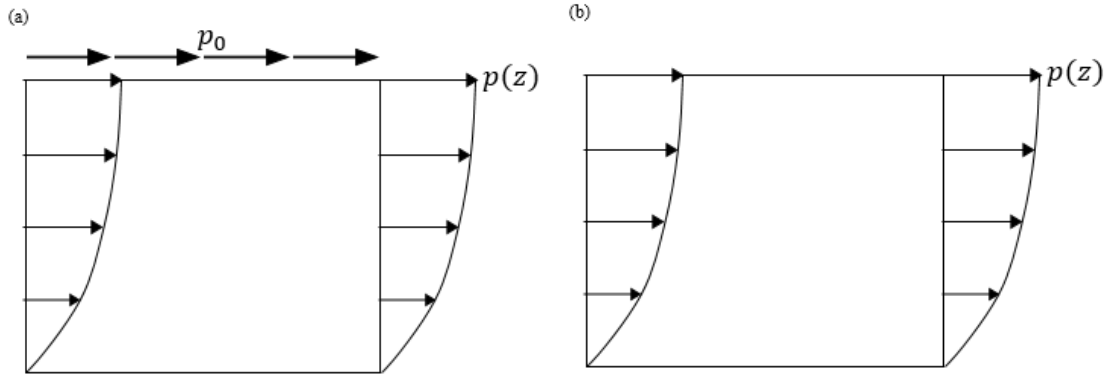
4. 상판과 표층지반이 일체 거동하는 경우 4면지지모형(그림 4.3.6a)이 합리적이지만, 상판 토피고가 구조물 폭에 비해 작고 상부토사가 주변지반과 일체가 되지 않고 추가 중량으로만 거동하는 경우 3면지지모형(그림4.3.6b)을 사용할 수 있다(일본토목학회, 1998). 또한, 두 모형에서는 상판위 표토의 역할을 달리 보기 때문에 상판지반변위하중을 달리 적용하게 된다('지반변위에 의한 지진하중'절 참조). 두 가지 모형기법에 의한 결과는 단면력을 비교하면 4면 모델이 구조물의 강체회전이 작아져 발생 단면력이 약간 커지는 경향이 있으나, 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있다(일본토목학회, 1998). 따라서, 두 모형기법 중에서 책임기술자의 판단에 따라 선정하여 해석하여도 좋다.



a) 4면지지모형　　b) 3면지지모형

<해설그림 4.3.6> 구조해석에 사용하는 응답변위법의 해석모형

나. 4면지지모형으로 구조해석하여 상판의 연직/전단지반반력계수를적용한 경우 상판변위하중 p_0을 지반변위하중을 추가 고려한다. 반면, 3면지지모형으로 구조해석하여 상판의 연직/전단지반반력계수를 적용하지 않은 경우, 상판변위하중 p_0는 생략한다.



a) 4면지지모형 b) 3면지지모형

<해설그림 4.3.7> 지반변위하중

4.3.2 응답이력해석법

1. 응답이력해석법을 사용하여 터널 구조물을 해석하기 위해서는 지진하중을 산정하는 것이 무엇보다 중요하다. 지진하중(가속도)의 시간이력은 내진등급에 해당하는 기능수행수준 및 붕괴방지수준을 만족할 수 있는 평균재현주기를 가진 지반운동이 되어야 한다. 응답이력해석시 적용하는 성능평가지진은 내진설계 일반(KDS 17 10 00)에 기반하여 산정한다. 응답이력해석은 시간영역에서 직접적분법에 의하여 해석을 수행하므로 성능평가지진이 응답스펙트럼을 만족하여도 가속도 시간이력 특성에 따라 그 결과가 상이하게 나타날 수 있으므로 실지진 기록을 적용하는 것을 권장하며 이 때, 3개의 서로 다른 실지진기록을 사용하는 것을 추천한다.
2. 응답이력해석을 위한 구조물의 해석모델은 지반운동에 대한 구조물의 동적응답 크기와 특성을 충분히 고려할 수 있도록 구조물의 질량과 강성의 공간적인 분포를 적절하게 대표할 수 있어야 한다.
3. 지반의 유연성이 매우 높아서 구조물의 동적응답에 미치는 영향이 무시될 수 없는 경우에는 지반-구조물 상호작용을 적절하게 고려할 수 있도록 지반을 역학적으로 모델링하여야 한다.
4. 구조물의 붕괴기구(Collapse Mechanism)의 확인을 위하여, 소성힌지(Plastic Hinge)발현이 가능한 구조요소를 적용할 수 있어야 한다.
5. 응답이력해석 시 구조물 혹은 지반의 감쇠특성이 적절히 모델링되어야 한다.
6. 응답이력해석법은 주로 수치해석법이 사용되는데 크게 유한요소해석법(Finite Element Method, FEM)과 유한차분해석법(Finite Difference Method)으로 구분할 수 있다.

가. 유한요소해석

나. 유한차분해석

▌해설▐

4. 구조물 일부영역의 파괴가 반드시 전체 구조물의 붕괴(Collapse)을 유발하지는 않는다. 따라서, 소성힌지 거동이 가능한 구조요소의 적용으로 소성힌지 발현에 따른 모멘트 재분배과정(Re-distribution of Bending Moment)과 붕괴기구를 확인할 수 있다. 이를 위하여, 터널 구조체를 압축력과 휨을 동시에 받는 부재로 모델링 할 수 있으며, 지진 후 구조물의 소성파괴 여부 및 붕괴여부 판단 만으로 내진성능의 평가가 가능하다. 이때, 구조물의 평가내하력은 성능곡선으로 정의되어야 한다.
반면, 터널 구조물을 선형탄성 구조요소로 모델링 하는 경우, 전체 구조요소의 시간 대별 부재력을 추적·기록하여, 해석종료 후 합성응력에 대한 내하력평가는 별도로 이루어져야 한다. 또한, 구조물의 소성변형을 고려하기 위한 응답수정계수의 적용 등 가정사항이 필요함에 따라, 본 요령에서는 응답이력해석을 수행함에 있어서 구조물의 선형탄성모델링은 추천하지 않는다.

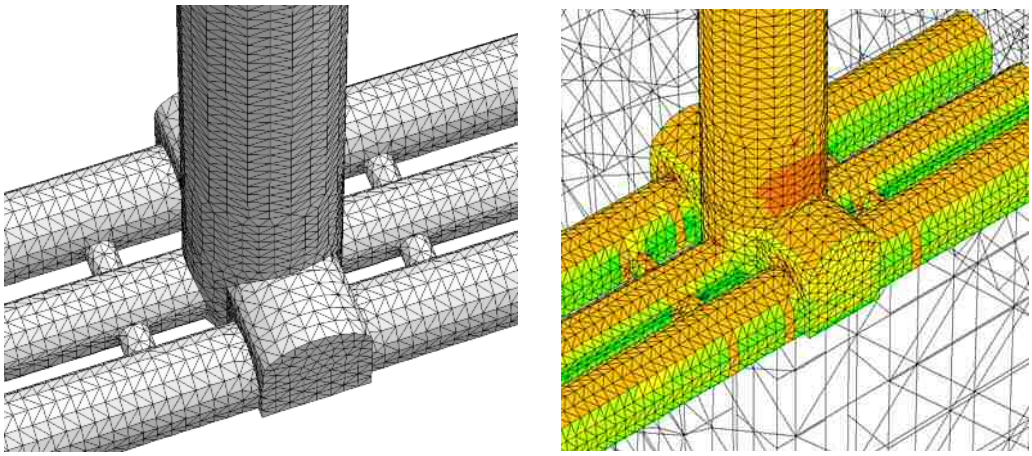
6. 지진하중에 대한 구조물의 동적거동을 나타내는데 사용되는 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=-[M]\{I\}\ddot{u}_g \qquad \text{해설식(4.3.10)}$$

응답이력해석은 궁극적으로 해설식(4.3.10)과 같은 운동방정식의 해를 구하는 것이다. 이 방정식의 해를 구하는 방법에는 첫째, 직접 수치해석을 행하는 방법(직접적분법, Direct integration method)과 둘째, 해설식(4.3.10)을 서로 무관한(Uncoupled) 모드별 미분방정식으로 변환(분리)시켜 풀고 각 모드별 해를 중첩하는 방법(모드중첩법, Mode superpositon method) 등이 있다. 이러한 응답이력해석법을 구현하여 구조물의 동적 응답을 구하기 위하여 주로 수치해석법이 사용되는데 크게 유한요소해석법(Finite Element Method, FEM)과 유한차분해석법(Finite Difference Method)으로 구분할 수 있다.

가. 해석하고자 하는 대상을 유한개의 요소(Element)로 분할하여 분할된 각 요소의 절점(Node)에서의 연속성 이용하여 절점해를 구하는 해석법이다. 대략적으로 절점 수와 절점에서의 자유도 수를 곱한 개수만큼의 미지수가 발생하고 이에 대한 연립방정식을 풀어 해를 구하게 된다(Implicit, 음해법). 해석 원리상 요소의 크기를 작게 구성할수록 이론해에 가까운 값을 얻을 수 있으나 요소의 크기와 형태를 결정하는 것은 사용자의 경험에 의존하는 편이다.

유한요소해석은 복잡하고 다양한 지반 및 구조물의 형태를 실제와 유사하게 모사할 수 있고 지반의 불균질성을 반영할 수 있다. 그러나 요소들 사이의 관계를 미분방정식으로 공식화한 후 이에 대응하는 연립방정식을 풀어 미지의 값을 구하므로 전체 구조물계에 대한 대규모 계산이 필요하게 된다. 따라서 유한요소해석을 위하여 대용량의 저장소와 고도화된 연산 알고리즘을 갖추는 것이 유리하다.



(a) 유한요소망(예) (b) 유한요소해석결과(예)

<해설그림 4.3.8> 유한요소해석(예)

일반적으로 유한요소해석은 다음과 같은 절차로 진행된다.

(1) 모델링

대상문제의 영역을 결정하고 요소화하는 과정을 말한다. 통상적으로 모델링의 범위는 해석하고자 하는 대상을 포함하여 외부영향이 미치는 범위 이상으로 충분한 크기의 영역을 설정하여야 한다. 요소화된 모델 조각을 메쉬(Mesh)라 하며 그 형태는 가능한 한 실제에 가깝게 모델링하여야 한다.

(2) 지반 및 구조모델의 선정

지반 및 구조물의 거동은 응력-변형률 관계를 정의하는 구성방정식을 적용하여 모사할 수 있다. 대부분의 유한요소해석 프로그램은 다양한 구성방정식을 라이브러리화 하여 제공하고 있으므로 해석 목적과 조건에 따라 적절한 구성방정식을 선정하여야 한다.

(3) 경계조건 및 해석조건 설정

해석 영역의 경계면에서의 구속조건, 모델 내 각종 하중조건, 배수조건 및 시공과정 등 모사하고자 하는 다양한 조건들을 유한요소모델에 적용한다.

(4) 해석 수행 및 후처리

해석 프로그램의 연산기(Solver)를 구동시켜 해석을 수행하고 그 결과를 다양한 후처리 프로세서를 적용하여 데이터, 등고선, 벡터도, 그래프 등으로 확인한다.

나. 해석하고자 하는 대상을 절점으로 연결된 유한개의 요소(Element)로 분할하여 모델링한다는 점은 유한요소해석법과 유사하나, 미지수를 구하는 방법이 양해법(Explicit method)이라는 점이 다르다. 이 방법은 연속체에서의 Newton 운동방정식(해설식 (4.3.11))을 이용하여 미지 절점의 가속도를 먼저 계산하고 매우 작은 시간간격(Time step)에 대해 적분하여 속도를 구하고, 다시 이를 적분하여 변위(Displacement)를 구하게 된다. 구한 속도와 변위를 재료의 구성방정식(해설식 (4.3.12, 4.3.13))을 이용하여 응력 및 힘을 계산한 후 이를 다시 미지 절점의 가속도 계산에 활용하는 순환구조를 가진다(<해설그림 4.3.10> 참조). 즉 기지의 값으로부터 미지의 값을 순차적으로 추정하므로 양해법이라 한다. 따라서 유한차분해석법에서는 전체 미지수에 대한 연립방정식의 해를 역행렬을 구성하여 한꺼번에 계산할 필요가 없으므로 컴퓨터의 메모리, CPU의 속도 등의 제약이 유한요소해석법에 비해 적은 편이나 수렴에 이르는 시간이 오래 걸리게 된다.

$$\rho \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \qquad \text{해설식(4.3.11)}$$

여기서, ρ : 재료의 밀도

t : 시간

x_i : 좌표계 벡터 요소

g_i : 중력가속도 요소

σ_{ij} : 응력텐서 요소

$$\sigma_{ij} := M(\sigma_{ij}, \dot{e}_{ij}, \kappa) \qquad \text{해설식(4.3.12)}$$

$$\sigma_{ij} := \sigma_{ij} + \left\{ \delta_{ij} \left(K - \frac{2}{3} G\right) \dot{e}_{kk} + 2\, G\, \dot{e}_{ij} \right\} \Delta t \qquad \text{해설식(4.3.13)}$$

여기서, $M(\ )$: 구성방정식

κ : 이력변수

$:=$: 대체

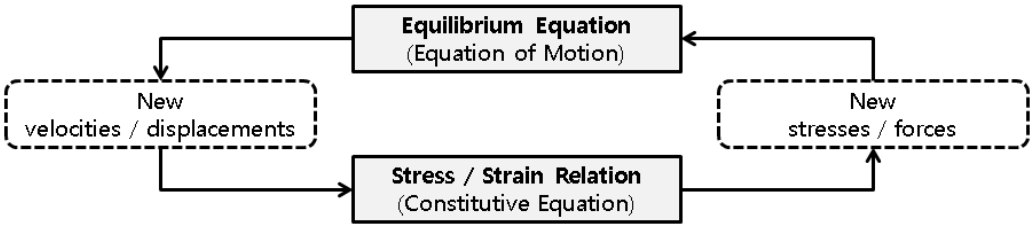
δ_{ij} : 크로네커델타

Δt : 시간증분

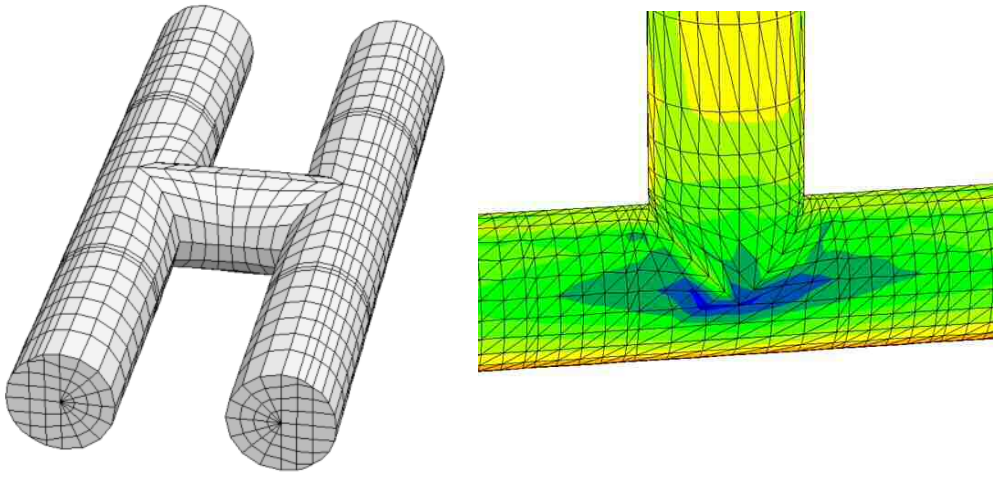
G : 전단탄성계수

K : 체적탄성계수

이며, 해설식(4.3.13)는 일반식인 해설식(4.3.12)에서 재료가 등방, 탄성일 경우를 텐서식의 형태로 표현한 것이다.



<해설그림 4.3.9> 양해법의 순환구조



(a) 유한차분해석망(예) (b) 유한차분해석결과(예)

<해설그림 4.3.10> 유한차분해석(예)

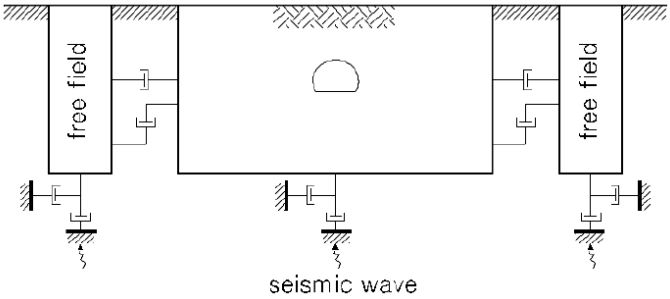
응답이력해석시 입력물성은 일반적으로 지반 및 터널 구조물의 동적응답거동을 고려하므로 [4.3.1 응답변위법] 2 항을 참조하여 동적물성을 적용한다. 일반적으로 지반은 탄소성 모델(Mohr-Coulomb model 등)을 적용하고 숏크리트, 록볼트 등 터널 구조물은 탄성 모델(Elastic model)을 적용하며 일반적인 예는 다음 표와 같다. 응답이력해석시 해석 과정 및 연산과정에 비해 입력물성은 매우 단순하므로 가능한 한 세분화하여

입력하고, 실내시험 또는 현장시험 등을 통하여 신뢰성 있는 값을 도출하여 적용하는 것이 바람직하다.

<해설표 4.3.2> 응답이력해석의 입력물성

구성모델	입력물성	비 고
탄소성 모델	변형계수	동적물성 적용
	포아송비	동적물성 적용
	점착력	
	내부마찰각	
	단위중량	
탄성 모델	탄성계수	동적물성 적용
	포아송비	동적물성 적용
	단위중량	

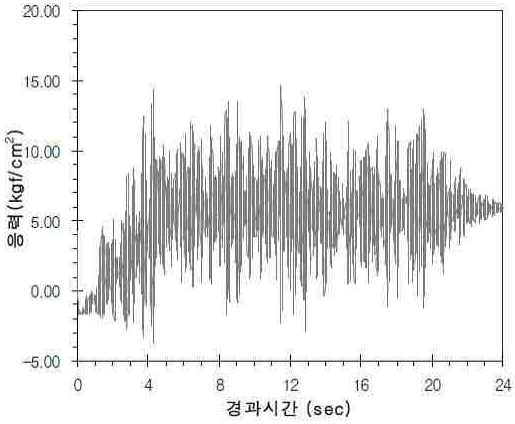
응답이력해석시 경계조건은 경계면에서의 중복반사파 영향을 최소화하기 위하여 좌우면 흡수경계(Quiet boundary) 또는 자유장경계(Free-field boundary)를 적용하게 된다. 흡수경계는 경계면과 접선방향 및 직각방향으로 완충요소(Dashpot)를 고려하는 경계이고 자유장경계는 완충요소를 고려함과 더불어 경계면의 불균형력을 추가로 고려하는 개념이다. 수평 및 수직방향의 모델링 범위는 터널 구조물의 굴착 및 시공에 따른 응력변화의 영향이 미치지 않는 범위까지 설정되어야 한다.



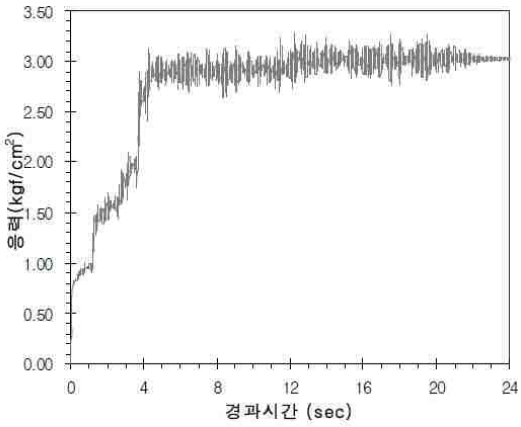
<해설그림 4.3.11> 경계조건 적용(예)

동적하중은 일반적으로 힘(응력) 또는 가속도 등의 값로 입력되는데 지진하중의 경우 요소망 하부 경계면에 시간이력의 형태로 가해지게 되므로 응답이력해석 결과 원하는 지점에서 시간에 따른 응답거동을 파악할 수 있다. 터널 내진해석에서는 주로 천단 및 내공변위, 콘크리트라이닝 최대휨압축응력, 전단응력, 록볼트 축력 등에 대한 시간이력을

계산하여 허용치와 비교하게 된다.



(a) 최대휨압축응력 시간이력



(a) 최대전단응력 시간이력

<해설그림 4.3.12> 유한차분해석결과(콘크리트라이닝 응력(예))

4.3.3 액상화

1. 액상화 발생 가능성에 대한 평가는 [KDS 17 10 00 (4.7)]과 [기존 시설물(기초및 지반) 내진성능 평가요령]을 준용한다.

2. 주변지반의 액상화 발생 가능성이 있는 경우, 개착터널의 부상(浮上)에 대한 안전성을 검토한다. [KDS 17 10 00 (4.7)]과 [기존 시설물(공동구)내진성능 평가요령 4.3.3 액상화]을 준용한다.

제5장 내진성능 평가보고서 구성

5.1 문장 및 보고서의 작성

5.1.1 문장

보고서의 문장은 간결하여야 하며 앞 뒤 연결관계가 명확하여야 한다.

5.1.2 보고서

객관적인 자료수집과 분석 그리고 결론으로 이루어져야 한다. 대상 터널 구조물에 대한 사항과 이론서 및 전문서, 연구보고서의 내용을 구별하여야 한다.

5.1.3 편집

편집순서는 다음을 따른다. 1. 표지 2. 속표지 3. 대상시설물 전경사진 4. 제출문 5. 참여기술진 6. 요약 7. 목차

8. 표목차
9. 그림목차
10. 본문
11. 참고문헌
12. 부록
13. 서지자료

5.2 현황보고서 형식

현황조사는 부록C의 <내진점검표>에 대한 조사 및 작업을 필요로 하며 보고서 구성은 다음과 같아야 한다.

1. 일반사항
2. 조사범위
3. 주요부재별 조사결과
4. 주요부재별 요약
5. 도면분석결과
6. 재료강도평가
7. 부록

5.3 예비평가 보고서

입력자료와 예비평가 분석표로 구성된다. 평가보고서의 구성은 다음을 따른다. 1. 일반사항 2. 현장평가분석 3. 지진도 평가 4. 취약도 평가 5. 영향도 평가 6. 내진그룹의 결정 7. 평가

5.4 상세평가 보고서

1. 일반사항 2. 평가기준 및 성능수준별 하중조합 3. 내진안정성 평가 4. 평가

참고 문헌

(1) 건설도서 편집부 (2002), 지하 구조물의 내진, 건설도서

(2) 오진우 (2000), (지중구조물) 내진 표준 및 동해설, 과학기술

(3) 日本道路協會 (1986), 共同構說計指針, 丸善株式會社

(4) 日本水道協會 (2009), 水道施設耐震工法指針.解說 設計,

(5) 日本道路協會 (1992), 駐車場設計.施工指針同解說,

(6) 農林水産省 (2015), 土地改良事業設計指針「耐震設計」,

(7) 鐵道總合技術硏究所 (1999), 鐵道構造物等設計標準.同解說 耐震設計, 丸善株式會社

(8) 日本土木學會 (1998), 開削トンネルの耐震設計, 丸善株式會社

(9) Dokainish, M.A. and Subbaraj, K.A. (1988), “Survey of Direct Time-integration Methods in Computational Structural Dynamics-I. Explicit Methods”, Computers and Structures, Vol.32, pp.1371-1386, DOI:10.1016/0045-7949(89)90314-3.

(10) Dokainish, M.A. and Subbaraj, K.A. (1988), “Survey of Direct Time-integration Methods in Computational Structural Dynamics-II. Implicit Methods”, Computers and Structures, Vol.32, pp.1387-1401, https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90315-5

(11) Lee, J.S. Appropriate input earthquake motion for the verification of seismic response analysis by geotechnical dynamic centrifuge test. EESK J. Earthquake Eng.

2013;17(5):209-217

(12) Lee, J.S., Liu, Q.H., Park, H.J. (2019), Effect of Earthquake Motion on The Permanent Displacement of Embankment Slopes, KSCE Journal of Civil Engineering, In-print.

(13) Mejia, L.H. and Dawson, E.M. (2006), "Earthquake Deconvolution for FLAC", Proceedings of 4th International FLAC Symposium on Numerical Modelling in Geomechanics, Paper 04-10, ISBN 0- 9767577-0-2.

(14) PEER, (2017), TBI, Tall Building Initiative, Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings, Pacific Earthquake Engineering Center, Report No. 2017/06, ISSN 1547-0587X

참고기준

내진설계 일반 (KDS 17 10 00)

터널 내진설계(KDS 27 17 00)

공동구 설계기준 (KDS 11 44 00)

도시철도 내진설계기준 (국토교통부, 2018)

콘크리트구조 설계(강도설계법)(KDS 14 20 00)

기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령 (국토교통부, 2019)

기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령 (국토교통부, 2020)

부 록

부록 A. 내진성능 평가 예제

부록 B. 내진점검표

부록 A

내진성능 평가 예제

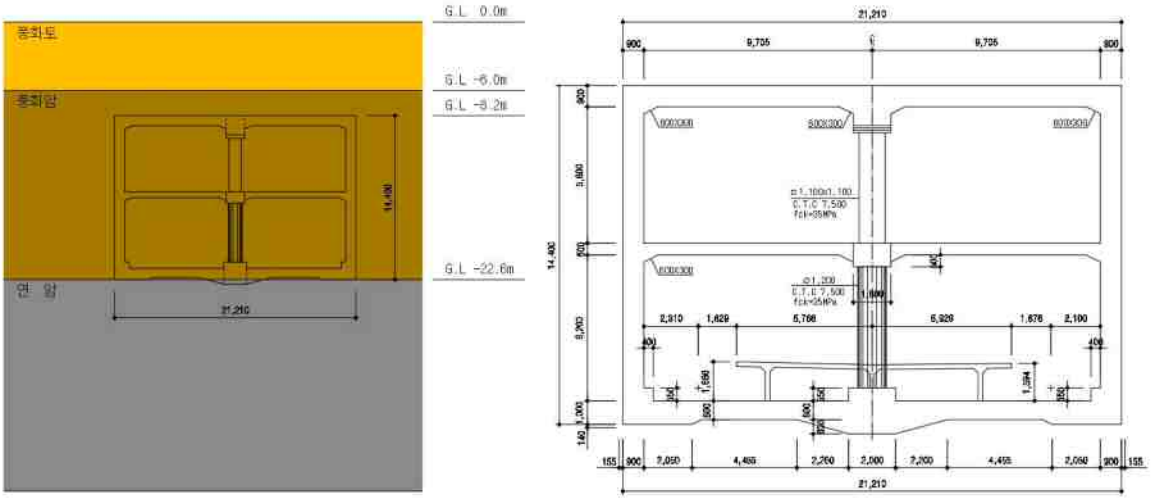
A.1 2층 정거장 (응답변위법)

A.2 개착식 터널 (응답변위법)

A.3 굴착식 터널 (응답이력해석법)

1. 2층 정거장

1.1 내진성능 예비평가



<그림 1-1> 지반조건 및 단면제원

가. 지진도 평가

대상 구조물은 구역 I, 도시지역, 지반분류 S_1 에 위치하므로 아래의 <표 1-1>의 '지진도 등급 기준'에 의해 지진도 3그룹에 해당한다.

<표 1-1> 지진도 등급 기준

지진구역	구분	지반분류			
		S_6	S_3, S_5	S_2, S_4	S_1
I	도시	1그룹	1그룹	2그룹	3그룹
	기타지역	1그룹	2그룹	2그룹	3그룹
II	도시	1그룹	2그룹	3그룹	4그룹
	기타지역	1그룹	3그룹	4그룹	

나. 취약도 평가

취약도 지수(Vulnerability Index, VI)

$$VI = 10 \times (Soil + Slope + Depth + Unbal + Shape + Lining + Const + Size + Hist + Defor + Deter + Damage)$$

여기서, *Soil* : 터널 주변의 지반(Soil) 상태에 따른 지수
Slope : 갱구부 비탈면(Slope)의 활동여부에 따른 지수
Depth : 터널 저토피(Shallow Depth) 구간에 따른 지수
Unbal : 단면의 비정형성 및 편토압 등의 불균형(Unbalance) 토압에 따른 지수
Shape : 터널 형상(Shape)에 따른 지수
Lining : 터널 라이닝(Lining) 형식에 따른 지수
Const : 터널 시공(Construction) 방법에 따른 지수
Size : 터널의 굴착단면 크기(Size)에 따른 지수
Hist : 터널 시공당시의 재난 이력(History)에 따른 지수
Defor : 터널의 지속적인 변형(Deformation) 여부에 따른 지수
Deter : 터널 구조물의 노후화(Deterioration)에 따른 지수
Damage : 터널 구조물의 손상(Damage) 상태에 따른 지수

<표 1-2> 취약도 지수 평가결과

No.	세부지수	설명	내용	점수
1	*Soil*	주변 지반	강성지반(S_1)	0.2
2	*Slope*	갱구부 비탈면활동	없음	0.2
3	*Depth*	저토피 구간	5m ≤ h < 10m	0.5
4	*Unbal*	불균형 토압	없음	0.2
5	*Shape*	터널 형상	박스형	1.0
6	*Lining*	라이닝 형식	철근콘크리트	0.2
7	*Const*	시공방법	개착식	0.5
8	*Size*	단면크기	B=21.21m, H=15.4m	0.8
9	*Hist*	재난이력	없음	0.2
10	*Defor*	지속적인 변형	없음	0.2
11	*Deter*	노후화	10년≤t≤30년	0.5
12	*Damage*	손상상태	B등급	0.5
합 계				5
⇒ **취약도 지수(VI) = 10 × 5.0 = 50점**				

다. 영향도 평가

영향도 지수(Impact Index, II)

$$II = 20 \times (Traffic + Facilities + Lifeline + Importance + Recovery)$$ 해설식(3.2)

여기서, $Traffic$: 터널을 이용하는 일평균 교통량(Traffic) 또는 일일 평균탑승인원

$Facilities$: 인접 주요 시설물(Facilities)의 존재여부

$Lifeline$: 터널 내·외부 주요 라이프라인(Lifeline)의 존재여부

$Importance$: 사회·경제적으로 영향을 주는 터널의 중요도(Importance)

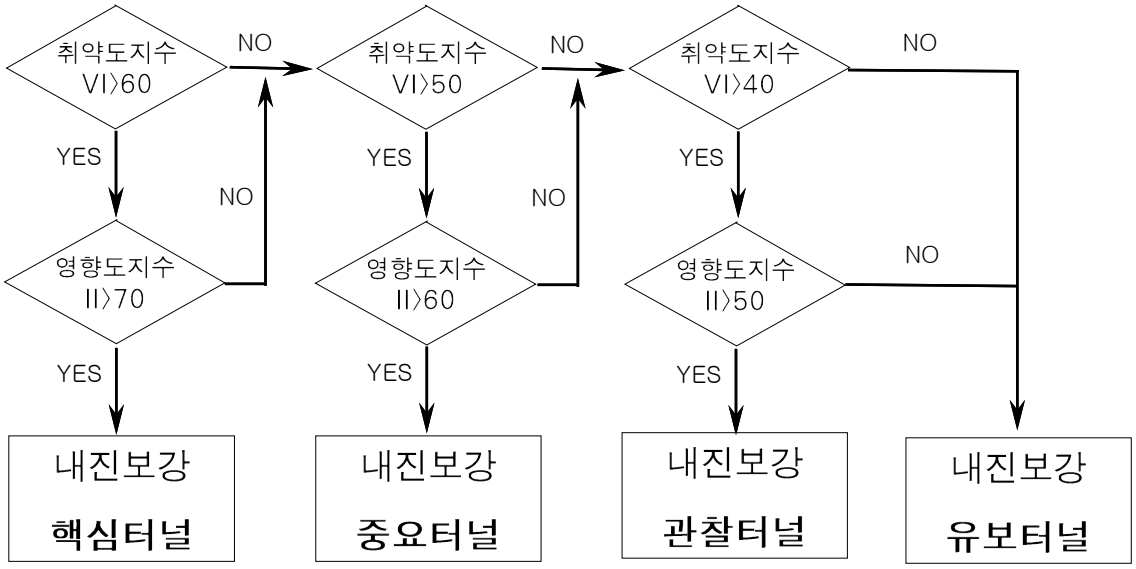
$Recovery$: 터널 구조물의 성능회복(Recovery)을 위한 비용지수

<표 1-3> 영향도 지수 평가결과

세부지수	설명	내용	점수
$Traffic$	교통량 또는 탑승인원	1만명 ≤ T < 10만명	0.8
$Facilities$	주요시설물	존재	1.0
$Lifeline$	주요 라이프라인	상수도관 및 광통신케이블	0.8
$Importance$	터널 중요도	인원수송, 1등급	1.0
$Recovery$	성능회복비용	터널길이=800m	0.4
합 계			4
⇒ **영향도 지수(VI) = 20 × 4 = 80점**			

라. 내진그룹화

지진도, 취약도, 영향도를 산정하여 <그림 1-2>와 같은 결정과정을 통하여 대상구조물의 내진등급을 그룹화한다.



<그림 1-2> 내진그룹화 방법

마. 내진성능 예비평가 결과

<표 1-4> 내진성능 예비평가 결과

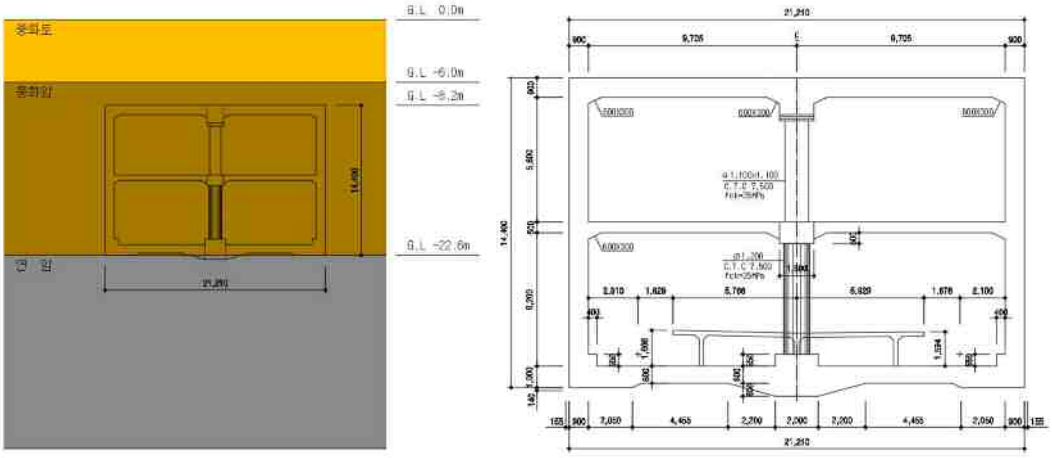
항 목	평 가 결 과
지진도 평가	3그룹
취약도 평가	50점
영향도 평가	80점
그룹 결정	**내진보강 관찰터널**

본 2층 정거장 구조물은 내진성능 예비평가에서 내진보강 '관찰터널'로 분류되었으나 이에 대한 내진성능 상세 평가를 수행하면 다음과 같다.

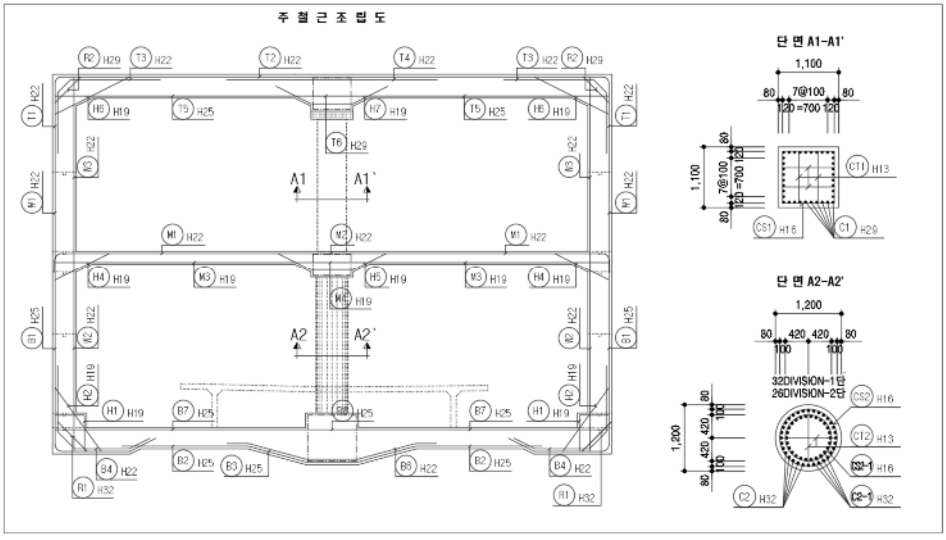
1.2 응답변위법(2층 정거장)

본 예제는 풍화암 지반에 위치한 2층 정거장 구조물을 다루도록 한다. 평가요령에 따르면 '기반면 위의 지층내부에 풍화암 또는 연암이 출현하여 표층지반에 전단파속도가 2개의 층으로 확연한 구분이 생기는 경우, 2개의 층으로 구분하고 이중코사인을 적용한다.' 라고 규정하고 있으며 이는 아래와 같이 기반면 위의 지층내부에 토사층과 전단파속도의 차이가 큰 풍화암 등이 출현하는 조건에 해당한다. 따라서 본 예제에서는 지반변위의 산정시 이중코사인 방식이 적용된다.

가. 지반조건 및 단면제원



<그림 1-3> 지반조건 및 단면제원



<그림 1-4> 철근배근도

지반의 물성치는 아래와 같다. 지반조사 및 동적시험을 통하여 별도로 동적 물성치를 산정한 경우는 산정된 동적물성치를 적용한다. 본 예제는 전단파속도와 기본적인 설계정수로 평가요령에서 제시하고 있는 수식에 따라 동적물성치를 추정하는 경우에 대한 예를 제시한다.

<표 1-5> 지반의 물성치

지반 구분	초기전단파속도 V_{si} (m/s)	설계전단파속도* $V_{DSi} = C \times V_{si}$	단위중량 (γ, kN/m^3)	포아송비 ν	전단탄성계수** G_D (kN/m^2)	탄성계수*** E_D (kN/m^2)
풍화토	275	220	19	0.32	93,741.1	247,476.5
풍화암	500	500	21	0.30	535,168.2	1,391,437
연암	1,200	1,200	24	0.28	3,522,935.8	9,018,715.6

$*\ C$: 지반변형에 대한 보정계수 $C = \begin{cases} 0.8 & (< 360m/s) \\ 1.0 & (\geq 360m/s) \end{cases}$

** 전단탄성계수 : $G_D = (\gamma_t/g)(V_{Ds})^2$, *** 탄성계수 : $E = 2(1+\nu)(\gamma_t/g)(V_{Ds})^2$

지반변형에 대한 보정계수 C는 표층지반의 고유주기 산정시는 적용되지 않으며 전단탄성계수와 탄성계수의 산정시 적용된다.

정거장 구조물의 철근콘크리트 물성과 부재별 단면특성은 아래와 같다.

<표 1-6> 철근콘크리트의 물성치

구조물	설계기준강도 $f_{ck}(MPa)$	설계탄성계수 $E_c(MPa)$	포아송비, ν
철근콘크리트 (본체)	27	26,701.7	0.17
철근콘크리트 (기둥)	35	28,825.3	0.17

- 콘크리트 설계기준강도 : $f_{ck} = 24$ MPa
- 설계탄성계수 : $E_c = 8{,}500\sqrt[3]{f_{cu}}$, 보통중량골재를 사용한 콘크리트($m_c = 2{,}300$kg/m^3) 의 경우,

  ($f_{cu} = f_{ck} + 4$), f_{ck} 가 40MPa이하일때

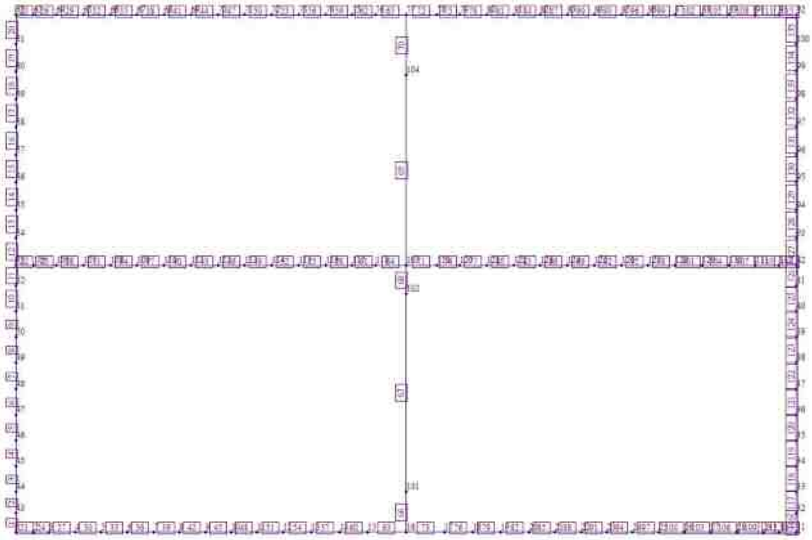
<표 1-7> 2층 정거장의 단면계수

부재구분	종방향 유효폭 B(m)	두께 H(m)	단면적 $A = BH(m^2)$	단면 2차 모멘트 $I = 1/12 \cdot bh^3(m^4)$
상부 슬래브	1	0.9	0.9	0.06075
중앙 슬래브	1	0.5	0.5	0.01042
하부 슬래브	1	1.0	1.0	0.08333
	1	0.8	0.8	0.04267
측벽	1	0.9	0.9	0.06075
거더	1	1.6	1.6	0.34133
	1	2.0	2.0	0.66667
사각기둥 (1.1m×1.1m, CTC = 7.5m)	0.146	1.1	0.161	0.01619
원기둥 (ϕ1.2m, CTC = 7.5m)	–	1.2	0.151*	0.01357**

* $A = \frac{1}{CTC}\frac{\pi d^2}{4}$, ** $I = \frac{1}{CTC}\frac{\pi d^4}{64}$

나. 응답변위법에 따른 내진평가

1) 유한요소해석모델



<그림 1-5> 유한요소해석모델

2) 지진하중 산정

- 지진구역 : I 구역
- 내진등급 : I 등급
- 위험도계수 : I=0.57 (기능수행수준), I=1.4 (붕괴방지수준)
- 지진구역계수 : Z = 0.11
- 기반암 지반분류 : S_1(암반 지반, 기반압 깊이 1.0m 미만)
- 유효수평지반가속도(S) : $S = Z \times I$, 0.0627g(기능수행수준), 0.154g(붕괴방지수준)

① 표층지반의 설계고유주기(T_S) 산정

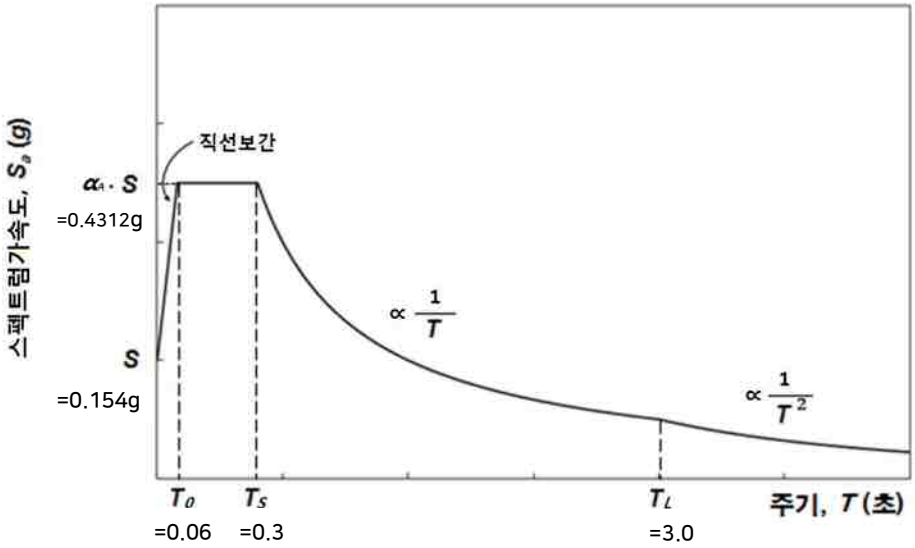
지반조건에 제시된 바와 같이 예제의 기반면 상부지층(표층지반)은 2개의 층으로 구성되며 표층지반의 설계고유주기를 산정하면 다음과 같다. 이때 적용되는 전단파속도는 지반변형에 대한 보정계수 C를 적용하지 않으며 초기 전단파속도를 적용함에 유의해야 한다.

<표 1-8> 표층지반의 특성치(T_G)와 설계고유주기(T_S)

구분	내용	
표층지반의 특성치	$T_G = \sum(4H_i/V_{Si})$,	
	1	0.087 sec
	2	0.133 sec
	Σ	0.220 sec
표층지반의 설계고유주기	$T_s = 1.25T_G$ = 0.275 sec	

② 기반면에서의 설계속도 응답스펙트럼(S_v) 산정

본 예제의 기반면은 연암층의 상부로 암반지반에 해당하며 이에 대한 가속도 표준설계응답스펙트럼은 아래와 같다.



<그림 1-6> 기반면에서의 설계응답스펙트럼

기반면에서의 설계가속도 스펙트럼은 감쇠율에 대한 보정계수를 곱하여 적용한다.
감쇠비는 기능수행수준은 $\xi = 10$, 붕괴방지수준의 경우 $\xi = 20$을 적용한다.

<표 1-9> 감쇠보정계수 C_D

주기(T, sec)	$T=0$	$0 \le T \le T_o$(=0.06)	$T_0 \le T$
C_D	모든 감쇠비에 대해서 1.0	$T=0$일 때, 1.0 $T=T_o$일 때, $\left(\frac{6.42}{1.42+\xi}\right)^{0.48}$ 그 사이는 직선보간	$\left(\frac{6.42}{1.42+\xi}\right)^{0.48}$
C_D(기능수행수준)	1.0	1 ~ 0.758	0.758
C_D(붕괴방지수준)	1.0	1 ~ 0.561	0.561

표층지반의 설계고유주기가 0.275sec 이므로 감쇠보정계수는 위와 같이 결정되며 기반면에서의 속도응답스펙트럼은 감쇠비를 적용하고 KDS 17 10 00 4.4.2(5)②에 따라 구한 암반지반 지반운동의 가속도 설계응답스펙트럼을 직접 적분하여 구할 수 있다. 이때, 환산식은 아래의 해석식을 이용한다.

$$S_v = \frac{T}{2\pi} S_a$$

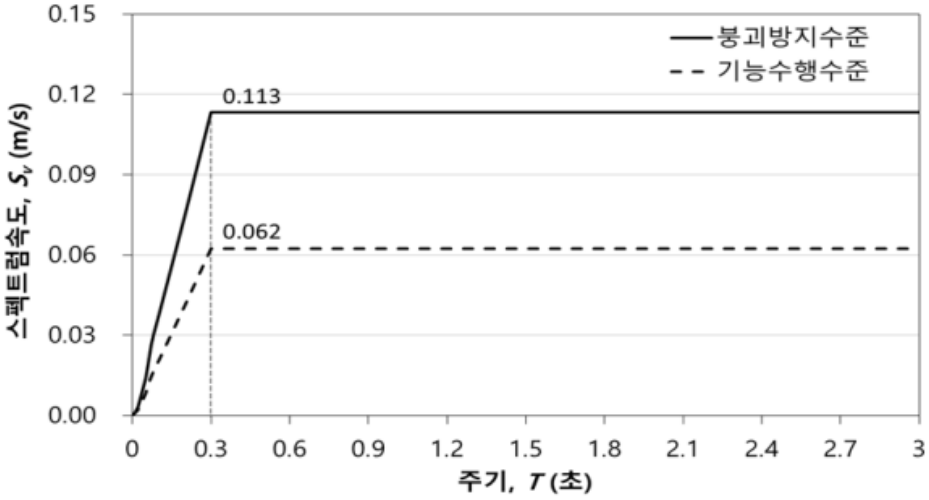
여기서, S_v : 스펙트럼속도 (m/s)

S_a : 스펙트럼가속도 (m/s^2)

T : 고유주기 (s)

<표 1-10> 기반면의 속도응답스펙트럼 S_v

주기(T, sec)	S_v(기능수행수준)	S_v(붕괴방지수준)
$T=0$	0	0
$0 \le T \le T_o$(=0.06)	$T=0.06$ $S_v = \frac{0.06}{2\pi}(1+30\times0.06)\times0.0627\times9.81$ $=0.0164$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.758 $S_v = 0.0164\times0.758 = 0.0124$	$T=0.06$ $S_v = \frac{0.06}{2\pi}(1+30\times0.06)\times0.154\times9.81$ $=0.0404$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.561 $S_v = 0.0404\times0.561 = 0.0227$
$T_0 \le T \le T_S$(=0.3)	$T=0.3$ $S_v = \frac{0.3}{2\pi}\times2.8\times0.0627\times9.81$ $=0.0822$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.758 $S_v = 0.0822\times0.758 = 0.062$	$T=0.3$ $S_v = \frac{0.3}{2\pi}\times2.8\times0.154\times9.81$ $=0.2019$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.561 $S_v = 0.2019\times0.561 = 0.113$
$T_S \le T \le T_L$(=3.0)	$T=3.0$ $S_v = \frac{3.0}{2\pi}\times\frac{0.84}{3}\times0.0627\times9.81$ $=0.0822$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.758 $S_v = 0.0822\times0.758 = 0.062$	$T=3.0$ $S_v = \frac{3.0}{2\pi}\times\frac{0.84}{3}\times0.154\times9.81$ $=0.2019$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.561 $S_v = 0.2019\times0.561 = 0.113$



<그림 1-7> 암반지반 기반면에서의 설계속도응답스펙트럼

표층지반의 속도응답스펙트럼 값은 표층지반의 설계고유주기가 0.275sec 이므로 위 수식에서 다음과 같이 산정한다.

<표 1-11> 성능수준별 기반면 속도응답스펙트럼 값

구분	기능수행수준	붕괴방지수준
표층지반의 설계고유주기	$T_s = 1.25T_G$ = 0.275sec	$T_s = 1.25T_G$ = 0.275sec
기반면 속도응답스펙트럼	T= 0.275 $S_v = \frac{0.275}{2\pi} \times 2.8 \times 0.0627 \times 9.81$ = 0.0754 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.758 $S_v = 0.0754 \times 0.758 = 0.0272$	T= 0.275 $S_v = \frac{0.275}{2\pi} \times 2.8 \times 0.154 \times 9.81$ = 0.1851 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.561 $S_v = 0.1851 \times 0.561 = 0.1039$

③ 지반반력계수(K_V, K_H, K_{SS}, K_{SB}) 산정

정거장의 경우 가시설을 적용한 수직 터파기로 구조물이 시공되는 경우가 많으므로 지진력에 의한 주변지반의 저항은 원지반 지층으로 고려할 수 있다. 따라서 본 예제에서는 구조물이 위치한 원지반의 지층에 대한 지반반력을 산정, 지반스프링계수 및 지진 토압의 산정에 적용하였다. 깎기 비탈면을 통한 터파기 공사로 구조물을 시공할 경우는 저면을 제외한 주변지반에 대해 되메움 토사의 물성으로 적용할 수 있다.

<표 1-12> 상판 및 저판의 지반반력계수

구 분		기능수행수준 / 붕괴방지수준
풍화암	E_D	1,391,437.3 (kN/m^2)
	k_{v0}, k_{h0}	$E_D/0.3$ = 4,638,124.4 (kN/m^3)
연 암	E_D	9,018,715.6 (kN/m^2)
	k_{v0}	$E_D/0.3$ = 30,062,385.3 (kN/m^3)

<표 1-13> 측벽의 지반반력계수

구 분		기능수행수준 / 붕괴방지수준	비 고
벽 체 (풍화암)	K_V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4}$ = 254,338,1 kN/m^3	B_v=14.4m
	K_{SB}	$= K_V/3.5$ = 72,668,0 kN/m^3	

④ 스프링계수(K_{Vi}, K_{SBi}, K_{Hi}, K_{SSi}) 산정

본 예제에서는 상판과 표층지반이 일체 거동하는 경우로 판단하여 4면 지지모형을 적용하며 지반스프링을 4면에 적용하는 방법으로 모델링하였다. 아래에 설명된 지반스프링은 지진하중의 적용시 사용되는 모델에서의 지반스프링이며 상시하중에 의한 해석의 경우는 기존의 방식에 따라 저면에 대한 지반스프링만을 적용하며 별도로 산정하여야 한다.

<표 1-14> 저판의 스프링계수

저판 절점		A_i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			연직 K_{Vi}^{*} (kN/m/m)	전단 K_{SBi}^{**} (kN/m/m)
1	31	0.675	832,267	237,791
2	30	0.425	524,020	149,720
3	29	0.540	665,814	190,232
4~11	21~28	0.680	838,432	239,552
12	20	0.705	869,257	248,359
13,14	18,19	0.730	900,081	257,166
15	17	0.865	1,066,535	304,724
16		1.0	1,232,988	352,282

* $K_{Vi} = A_i \times K_V$, ** $K_{SBi} = A_i \times K_{SB}$

<표 1-15> 상판의 스프링계수

상판 절점		A_i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			연직 K_{Vi}^{*} (kN/m/m)	전단 K_{SBi}^{**} (kN/m/m)
32	62	0.675	128,405	36,687
33	61	0.525	99,870	28,534
34	60	0.650	123,649	35,328
35~43	51~59	0.700	133,161	38,046
44	50	0.650	123,649	35,328
45	49	0.600	114,138	32,611
46	48	0.700	133,161	38,046
47		0.800	152,184	43,481

* $K_{Vi} = A_i \times K_V$, ** $K_{SBi} = A_i \times K_{SB}$

<표 1-16> 측벽의 스프링계수

측벽 절점		A_i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			수평 K_{Hi}^{*} (kN/m/m)	전단 K_{SSi}^{**} (kN/m/m)
32	62	0.83	209,829.0	59,951.1
63	82	0.73	186,785.9	53,367.4
64	83	0.72	182,805.5	52,230.2
65	84	0.72	182,805.5	52,230.2
66	85	0.72	182,805.5	52,230.2
67	86	0.72	182,805.5	52,230.2
68	87	0.72	182,805.5	52,230.2
69	88	0.72	182,805.5	52,230.2
70	89	0.72	182,805.5	52,230.2
71	90	0.63	161,339.4	46,097.0
72	91	0.61	154,980.9	44,280.3
73	92	0.67	170,089	48,596.7
74	93	0.67	170,089	48,596.7
75	94	0.67	170,089	48,596.7
76	95	0.67	170,089	48,596.7
77	96	0.67	170,089	48,596.7
78	97	0.67	170,089	48,596.7
79	98	0.67	170,089	48,596.7
80	99	0.61	154,994	44,283.9
81	100	0.53	133,528	38,150.7
1	31	0.75	190,754	36,334.0

* $K_{Hi} = A_i \times K_H$, ** $K_{SSi} = A_i \times K_{SS}$

⑤ **지반변위(U_h) 산정**

본 예제는 지중변위의 산정시 이중코사인 방식을 적용하는 경우로 아래의 수식에 따라 지반변위를 산정한다.

$$U_{h_1}(x) = \frac{2}{\pi^2} \times S_v \times T_S \times \cos\left(\frac{\omega_0 x_1}{V_{s1}}\right)$$

$$U_{h_2}(x) = \frac{2}{\pi^2} \times S_v \times T_S \times \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{V_{s1}}\right) \times \left[\cos\frac{\omega_0 x_2}{V_{s2}} - \frac{\sin\frac{\omega_0 x_2}{V_{s2}}}{\tan\frac{\omega_0 H_2}{V_{s2}}}\right]$$

$$(1+\alpha)\cos\left\{\omega_0\left(\frac{H_1}{V_{s1}} + \frac{H_2}{V_{s2}}\right)\right\} + (1-\alpha)\cos\left\{\omega_0\left(\frac{H_1}{V_{s1}} - \frac{H_2}{V_{s2}}\right)\right\} = 0$$

여기서, S_v : 표층지반의 고유주기에 해당되는 기반암 속도응답스펙트럼(m/s)

T_s : 표층지반의 고유주기, $1.25T_G$

$V_{s1,}V_{s2}$: 제 1층, 제 2층 지반의 평균전단파속도(m/s)

$H_{1,}H_2$: 제 1층, 제 2층 지반의 두께(m)

H_s : 전체 토층지반의 두께(m)

ω_0 : 지반의 고유진동수, 위식에서 시행착오법으로 산정

α : 제 1층과 제 2층의 임피던스 비, $\alpha = \frac{\gamma_1 V_{s1}}{\gamma_2 V_{s2}}$

<표 1-17> 지반변위(U_h)

심도(m)	지반변위($U_h(x)$, m)*		비고
	기능수행	붕괴방지	
8.65	0.0021035	0.0038202	상부슬래브
9.40	0.0020245	0.0036766	
10.12	0.0019437	0.0035299	
10.84	0.0018582	0.0033747	
11.56	0.0017682	0.0032112	
12.28	0.0016739	0.0030399	
12.99	0.0015755	0.0028613	
13.71	0.0014733	0.0026757	
14.43	0.0013676	0.0024836	
15.15	0.0012585	0.0022855	중간슬래브
15.70	0.0011729	0.0021301	
16.37	0.0010667	0.0019372	
17.04	0.0009581	0.0017401	
17.71	0.0008476	0.0015394	
18.38	0.0007353	0.0013354	
19.04	0.0006215	0.0011287	
19.71	0.0005063	0.0009195	
20.38	0.0003901	0.0007085	
21.05	0.0002731	0.0004959	
21.60	0.0001764	0.0003203	
22.10	0.0000882	0.0001602	하부슬래브

⑥ 지진토압($P_{(z)}$) 산정

본 예제는 4면 지지모형을 적용하므로 상판의 상면에 작용하는 지반변위하중을 별도로 산정하여 적용한다. 이때 상대변위 값은 구조물 저면에 대한 상부슬래브 상면의 값으로 산정하여 적용한다.

상판 상면의 지진토압 : $p_{(0)} = K_{SB} \times (U_h(z_U) - U(z_B))$

<표 1-18> 상판 상면의 지진토압($p_{(0)}$)

심도 (m)	상대변위(m)		측벽지진토압 ($p_{(0)}$, kN/m)	
	기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
3.5	0.0021483	0.0039015	116.76	212.050

측벽의 지진토압은 아래와 같이 산정된다. 이때 상대변위 값은 구조물 저면에 대한 모델링 절점 위치의 값으로 산정하여 적용한다.

측벽 지진토압 : $P_{(z)} = K_H \times (u(z) - u(z_B))$

<표 1-19> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

심도 (m)	측벽 절점	상대변위(m)*		측벽지진토압 ($P_{(z)}$, kN/m)	
		기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
8.65	32	0.0021035	0.0038202	535.00	971.61
9.40	63	0.0020245	0.0036766	514.90	935.10
10.12	64	0.0019437	0.0035299	494.35	897.79
10.84	65	0.0018582	0.0033747	472.61	858.31
11.56	66	0.0017682	0.0032112	449.72	816.73
12.28	67	0.0016739	0.0030399	425.73	773.17
12.99	68	0.0015755	0.0028613	400.71	727.74
13.71	69	0.0014733	0.0026757	374.72	680.54
14.43	70	0.0013676	0.0024836	347.82	631.68
15.15	71	0.0012585	0.0022855	320.08	581.29
15.70	72	0.0011729	0.0021301	298.32	541.78
16.37	73	0.0010667	0.0019372	271.29	492.70
17.04	74	0.0009581	0.0017401	243.69	442.57
17.71	75	0.0008476	0.0015394	215.59	391.53
18.38	76	0.0007353	0.0013354	187.02	339.65
19.04	77	0.0006215	0.0011287	158.07	287.07
19.71	78	0.0005063	0.0009195	128.78	233.87
20.38	79	0.0003901	0.0007085	99.22	180.19
21.05	80	0.0002731	0.0004959	69.45	126.13
21.60	81	0.0001764	0.0003203	44.86	81.46
22.10	1	0.0000882	0.0001602	22.44	40.76

⑦ 주면전단력(τ) 산정

이중코사인 방식 적용시의 주면전단력은 아래와 같이 산정된다. 주면전단력이 구조물의 외면에 작용하는 값이므로 구조물 상면과 구조물 저면의 위치에 대한 값으로 산정하여 적용한다.

$$\tau_1(x) = \frac{2G_D}{\pi^2} \times S_v \times T_S \times \frac{\omega_0}{V_{s1}} \times \sin\left(\frac{\omega_0}{V_{s1}} x_1\right)$$

$$\tau_2(x) = \frac{2G_D}{\pi^2} \times S_v \times T_S \times \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{V_{s1}}\right) \times \frac{\omega_0}{V_{s2}} \times \left(\sin\frac{\omega_0 x_2}{V_{s2}} + \frac{\cos\frac{\omega_0 x_2}{V_{s2}}}{\tan\frac{\omega_0 H_2}{V_{s2}}}\right)$$

구조물의 상판과 저면의 위치가 이중코사인의 제 1층 또는 제 2층중 어디에 위치하는 지에 따라 적용

<표 1-20> 주면전단력(τ)

구분	내 용	주면전단력(τ, kN/m)	
		기능수행	붕괴방지
상판	τ_U	52.031	94.493
저판	τ_B	94.457	171.544
측벽	$\tau_S = \frac{\tau_U + \tau_B}{2}$	73.244	133.019

⑧ 관성력(f) 산정

관성력은 아래와 같이 산정된다. 여기서 K_{hi}는 해당깊이의 수평방향 지진가속도 a_i를 g 값으로 나누어준 값을 의미한다.

관성력 : $f = m_i \times a_i = (w_i/g) \times a_i = w_i \times K_{hi} = (\gamma \times b \times h) \times K_h \times C_U(z)$

깊이에 대한 선형보정값 $C_U(z) = (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$

기반면에서의 지진가속도는 S = Z × I 로 구할 수 있으며 지표면에서의 지진가속도는 Fa × S 로 산정된다. 따라서 지표에서의 가속도 값을 구하기 위해서는 표층지반의 지반에 대해 분류하여야 하며 그에 따라 내진설계 일반에서 정의한 Fa 값을 산출하여 아래와 같이 적용한다.

<표 1-21> 지표에서의 설계수평가속도(K_h) 값

구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도	$V_{0avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	275×6/22.6 = 73.0 m/sec	
	2	500×16.6/22.6 = 367.3 m/sec	
	Σ	440.27 m/sec ⇒ S_2 지반	
지반증폭계수	$F_a = 1.4(S \le 0.1)$, $1.4(S = 0.2)$, 1.3 $(S = 0.3)$ 중간값은 직선보간		S_2 지반
기반면 설계수평가속도(S)	기능수행수준 : 0.0627 → Fa = 1.4 붕괴방지수준 : 0.154 → Fa = 1.4		
지표면 설계수평가속도(K_h)	$K_h = F_a \cdot S = 1.4 \times 0.0627 = 0.0878$ (기능수행수준) $K_h = F_a \cdot S = 1.4 \times 0.154 = 0.2156$ (붕괴방지수준)		

*주의 : 관성력에서 가속도로 표현하고 있는 값은 위에서 설명한 바와 같이 g값으로 나누어진 가속도의 값만을 의미함에 주의 바람.

따라서 구조물 깊이(z)에 따른 설계수평가속도는 다음과 같이 산정할 수 있다.

<표 1-22> 구조물 깊이에 따른 설계수평가속도(K_h) 값

구분	기능수행수준	붕괴방지수준
기반면에서의 설계수평가속도(S)	0.0627	0.154
지표면 설계수평가속도(K_h)	0.0878	0.2156
깊이(z)의 직선 보간식 Cu	$K_{hi} = K_h \cdot (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$ = 0.0878(1-0.012649z)	$K_{hi} = K_h \cdot (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$ = 0.2156(1-0.012642z)

<표 1-23> 심도에 따른 설계수평가속도(K_h)

구분	기능수행수준	붕괴방지수준	깊이 (z)
상부슬래브	K_{hi} = 0.0782	K_{hi} = 0.1920	8.65
지하1층 측벽	K_{hi} = 0.0745	K_{hi} = 0.1829	12.0
중간슬래브	K_{hi} = 0.0710	K_{hi} = 0.1743	15.15
지하2층 측벽	K_{hi} = 0.0672	K_{hi} = 0.1652	18.5
하부슬래브	K_{hi} = 0.0633	K_{hi} = 0.1554	22.1

<표 1-24> 관성력(f)

구분	단위중량 (kN/m^3)	단면적 $A = BH\,(m^2)$	설계수평가속도(K_h)		관성력(kN/m)	
			기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
상부슬래브 지하1층 측벽상단	23	0.9	0.0782	0.1920	1.6183	3.9749
중간슬래브	23	0.5	0.0710	0.1743	0.8161	2.0045
지하2층 측벽하단	23	0.9	0.0633	0.1554	1.3094	3.2160
하부슬래브	23	1.0	0.0633	0.1554	1.4549	3.5733
		0.8	0.0633	0.1554	1.1639	2.8587
지하 1층 기둥	23	0.161	0.0745	0.1829	0.2763	0.6787
지하 2층 기둥	23	0.151	0.0672	0.1652	0.2332	0.5729

3) 하중조합

본 해석에서 적용한 하중조합은 아래와 같으며, 내진성능평가를 위한 내진성능수준별 하중조합은 시설물별로 정하는 내진설계기준의 규정에 따른다. 여기서 주의 할 사항은 지진하중에 대한 해석과 지진하중을 제외한 상시하중에 대한 해석을 별도로 수행하여야 한다는 점이며 선형 탄성해석이므로 이 두 결과를 조합하여 단면력을 산출하여야 한다.

① 기능수행수준

$$U = 1.2\ D + 1.0\ E\ + 1.0\ L + 0.2\ S$$

$$U = 0.9\ D + 1.0\ E\ + 1.6(\alpha_H H_v + H_h)$$

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중 (상판지진토압+측벽지진토압+주면전단력+관성력)

S : 적설하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

H : 토압 및 수압

② 붕괴방지수준

$$U = 1.0\ (D + L + H + E)$$

여기서, D : 고정하중

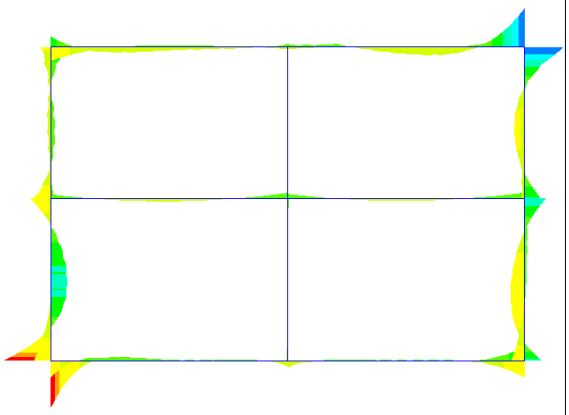
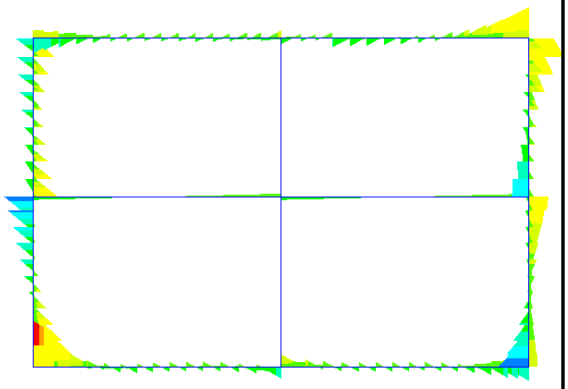
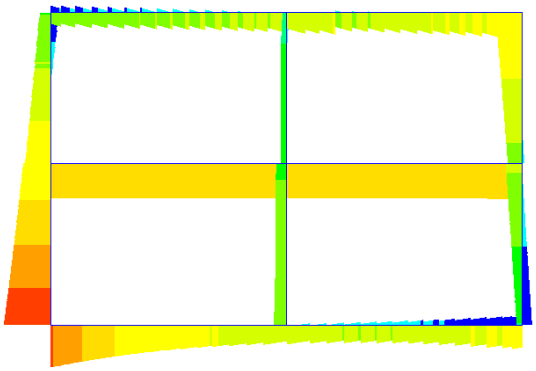
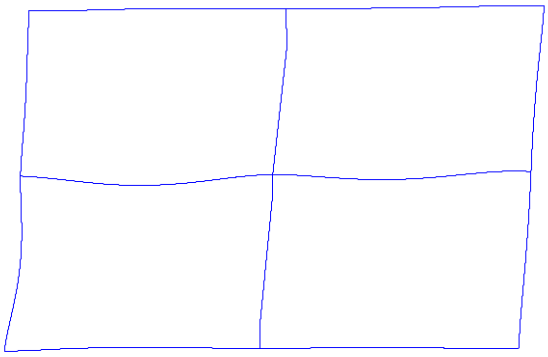
E : 지진하중(=상판지진토압+측벽지진토압+주면전단력+관성력)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

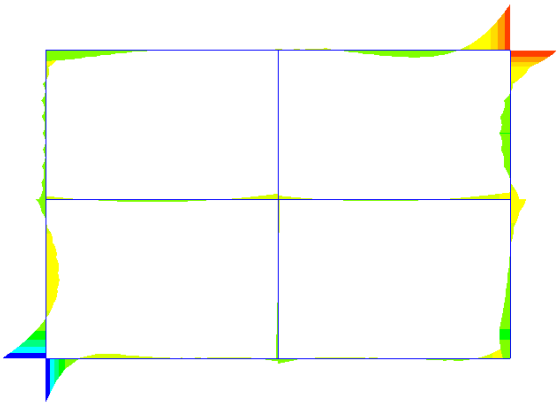
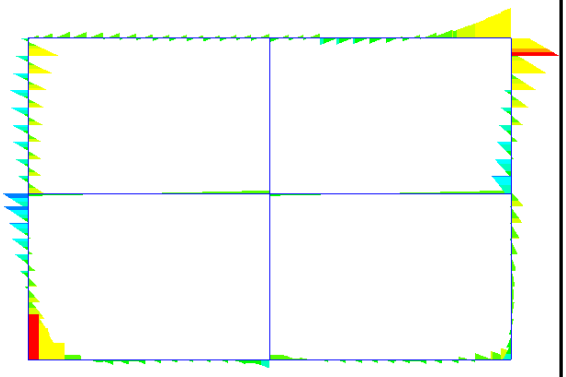
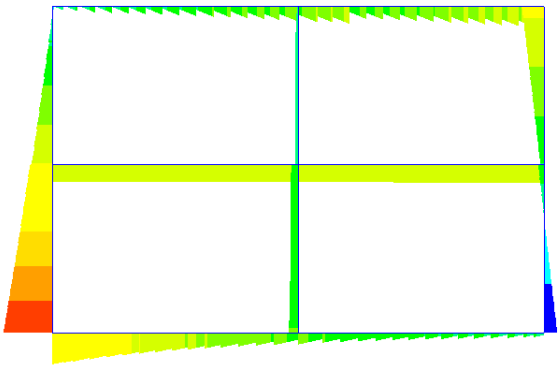
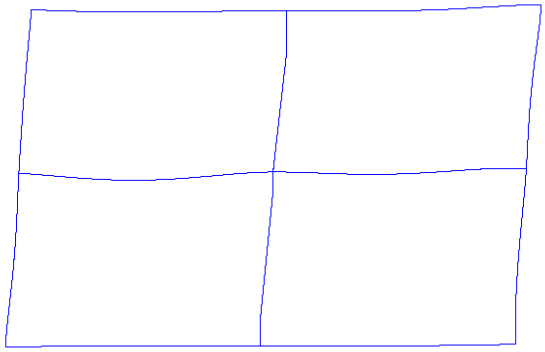
H : 토압 및 수압

4) 해석결과

① 기능수행수준

휨모멘트도	전단력도
	
축력도	변위도
	

② 붕괴방지수준

휨모멘트도	전단력도
	
축력도	변위도
	

5) 단면검토

해석결과의 분석은 강도설계법에 따라 수행한다. 기능수행수준의 내진성능을 검토하는 경우 설계시의 내하력에 대해 그 만족여부를 검토하는 방식을 적용하며 붕괴방지수준의 내진성능 검토시는 대상구조물의 변형이 탄성한도를 초과한 소성거동을 고려할 필요가 있다고 판단되는 경우 탄성부재력을 응답수정계수(R)로 나누어 설계부재력 평가를 수행할 수 있다.

① 기능수행수준

구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
상부 슬래브	지점부	1,465.7	891.5	O.K	1,678.7	706.4	O.K
	중앙부	835.0	186.9	O.K	532.6	110.2	O.K
벽 체	상부 지점부	2,116.9	891.5	O.K	2,134.4	789.4	O.K
	중앙부	1,002.3	326.6	O.K	844.0	121.2	O.K
	하부 지점부	2,946.4	1087.1	O.K	2,009.3	1121.5	O.K
하부 슬래브	지점부	1,931.2	1087.1	O.K	1,902.6	1035.4	O.K
	중앙부	943.6	80.6	O.K	467.7	144.6	O.K

구 분		철근량	Mu(kN-m) / Md(kN-m)	성능평가 (Mu/Md)	Pu(kN-m) / Pd(kN-m)	성능평가 (Pu/Pd)
상부 기둥	1,100×1,100 C.T.C 7.5m	36-H25	9.0	O.K	815.3	O.K
			2,893.1		26,736	
하부 기둥	Φ1,200 C.T.C 7.5m	32-H32 26-H32	132.0	O.K	2,262.0	O.K
			2,903.1		30,068.0	

기능수행수준의 내진성능 검토결과 지진시 발생단면력은 설계시의 내하력 이내로 충분한 안전율을 확보하고 있으므로 본 예제의 정거장은 기능수행수준의 내진성능을 만족하는 것으로 판단할 수 있다.

② 붕괴방지수행수준

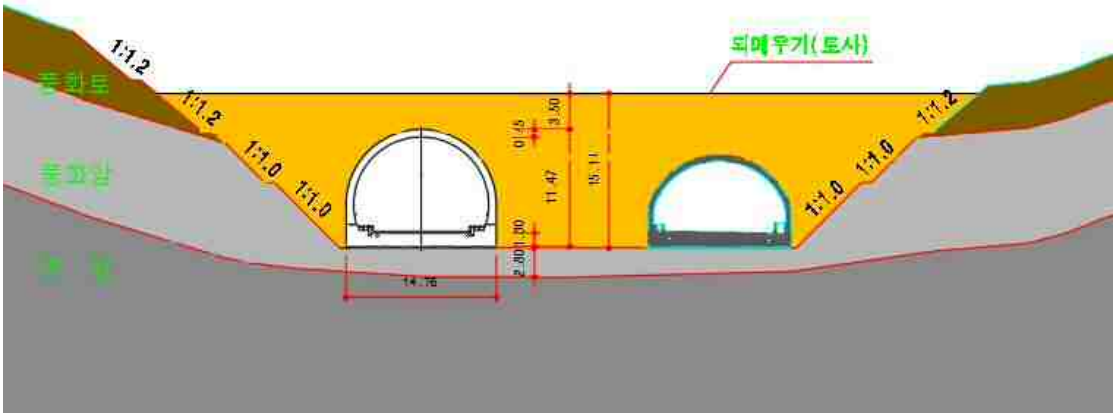
구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
상부 슬래브	지점부	1,465.7	963.4	O.K	1,678.7	681.1	O.K
	중앙부	835.0	159.9	O.K	532.6	94.1	O.K
벽 체	상부 지점부	2,743.7	963.4	O.K	2,152.9	1,064.0	O.K
	중앙부	1,943.3	282.1	O.K	882.4	89.4	O.K
	하부 지점부	3,473.7	1,102.9	O.K	2,035.2	964.2	O.K
하부 슬래브	지점부	1,931.2	1,102.9	O.K	1,902.6	1,131.3	O.K
	중앙부	943.6	97.8	O.K	467.7	80.9	O.K

구 분		철근량	Mu(kN-m) / Md(kN-m)	성능평가 (Mu/Md)	Pu(kN-m) / Pd(kN-m)	성능평가 (Pu/Pd)
상부 기둥	1,100×1,100 C.T.C 7.5m	36-H25	18.8 / 2,893.1	O.K	765.8 / 26,736.0	O.K
하부 기둥	Φ1,200 C.T.C 7.5m	32-H32 26-H32	242.3 / 3,481.4	O.K	1,967.3 / 28,266.1	O.K

붕괴방지수준의 내진성능 검토결과 지진시 발생단면력은 설계시의 내하력 이내로 충분한 안전율을 확보하고 있으므로 본 예제의 정거장은 붕괴방지수준의 내진성능을 만족하는 것으로 판단할 수 있다.

2. 개착식 터널

2.1 내진성능 예비평가



<그림 2-1> 지반조건 및 단면제원

가. 지진도 평가

대상 구조물은 구역 Ⅰ, 도시지역, 지반분류 S_1 에 위치하므로 아래의 표 B-1의 '지진도 등급 기준'에 의해 지진도 3그룹에 해당한다.

<표 2-1> 지진도 등급 기준

지진구역	구분	지반분류			
		S_6	S_3, S_5	S_2, S_4	S_1
Ⅰ	도시	1그룹	1그룹	2그룹	3그룹
	기타지역	1그룹	2그룹	2그룹	3그룹
Ⅱ	도시	1그룹	2그룹	3그룹	4그룹
	기타지역	1그룹	3그룹	4그룹	

나. 취약도 평가

취약도 지수(Vulnerability Index, VI)

$$VI = 10 \times (Soil + Slope + Depth + Unbal + Shape + Lining + Const + Size + Hist + Defor + Deter + Damage)$$

여기서, *Soil* : 터널 주변의 지반(Soil) 상태에 따른 지수
Slope : 갱구부 비탈면(Slope)의 활동여부에 따른 지수
Depth : 터널 저토피(Shallow Depth) 구간에 따른 지수
Unbal : 단면의 비정형성 및 편토압 등의 불균형(Unbalance) 토압에 따른 지수
Shape : 터널 형상(Shape)에 따른 지수
Lining : 터널 라이닝(Lining) 형식에 따른 지수
Const : 터널 시공(Construction) 방법에 따른 지수
Size : 터널의 굴착단면 크기(Size)에 따른 지수
Hist : 터널 시공당시의 재난 이력(History)에 따른 지수
Defor : 터널의 지속적인 변형(Deformation) 여부에 따른 지수
Deter : 터널 구조물의 노후화(Deterioration)에 따른 지수
Damage : 터널 구조물의 손상(Damage) 상태에 따른 지수

<표 2-2> 취약도 지수 평가결과

No.	세부지수	설명	내용	점수
1	*Soil*	주변 지반	강성지반(S_1)	0.2
2	*Slope*	갱구부 비탈면활동	없음	0.2
3	*Depth*	저토피 구간	10m≤h	0.2
4	*Unbal*	불균형 토압	없음	0.2
5	*Shape*	터널 형상	아치형	0.8
6	*Lining*	라이닝 형식	무근콘크리트	0.5
7	*Const*	시공방법	굴착식	0.2
8	*Size*	단면크기	B=10.12m, H=8.6m	0.5
9	*Hist*	재난이력	있음	0.5
10	*Defor*	지속적인 변형	없음	0.2
11	*Deter*	노후화	10년≤t≤30년	0.5
12	*Damage*	손상상태	B등급	0.5
합 계				4.5
⇒ **취약도 지수(VI) = 10 × 4.5 = 45점**				

다. 영향도 평가

영향도 지수(Impact Index, II)

$$II = 20 \times (Traffic + Facilities + Lifeline + Importance + Recovery)$$ 해설식(3.2)

여기서, $Traffic$: 터널을 이용하는 일평균 교통량(Traffic) 또는 일일 평균탑승인원

$Facilities$: 인접 주요 시설물(Facilities)의 존재여부

$Lifeline$: 터널 내·외부 주요 라이프라인(Lifeline)의 존재여부

$Importance$: 사회·경제적으로 영향을 주는 터널의 중요도(Importance)

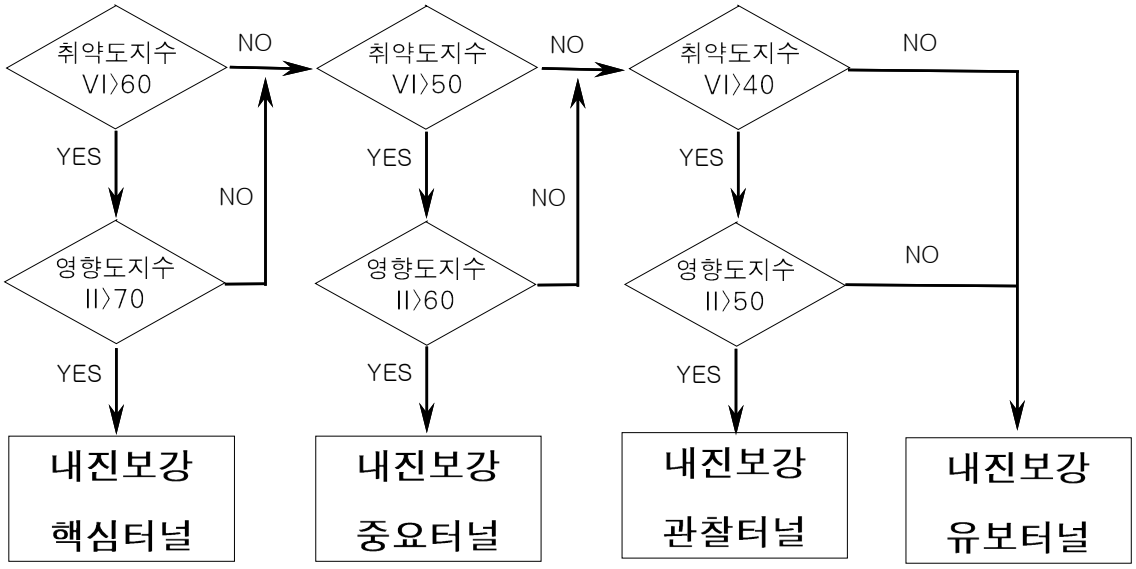
$Recovery$: 터널 구조물의 성능회복(Recovery)을 위한 비용지수

<표 2-3> 영향도 지수 평가결과

세부지수	설명	내용	점수
$Traffic$	교통량 또는 탑승인원	일교통량 약 3,000대	0.6
$Facilities$	주요시설물	없음	0.2
$Lifeline$	주요 라이프라인	기타시설물	0.5
$Importance$	터널 중요도	인원수송, 1등급	1.0
$Recovery$	성능회복비용	터널길이=800m	0.4
합 계			2.7
⇒ **영향도 지수(VI) = 20 × 2.7 = 54점**			

라. 내진그룹화

지진도, 취약도, 영향도를 산정하여 <그림 3-2>와 같은 결정과정을 통하여 대상구조물의 내진등급을 그룹화한다.



<그림 2-2> 내진그룹화 방법

마. 내진성능 예비평가 결과

<표 2-4> 내진성능 예비평가 결과

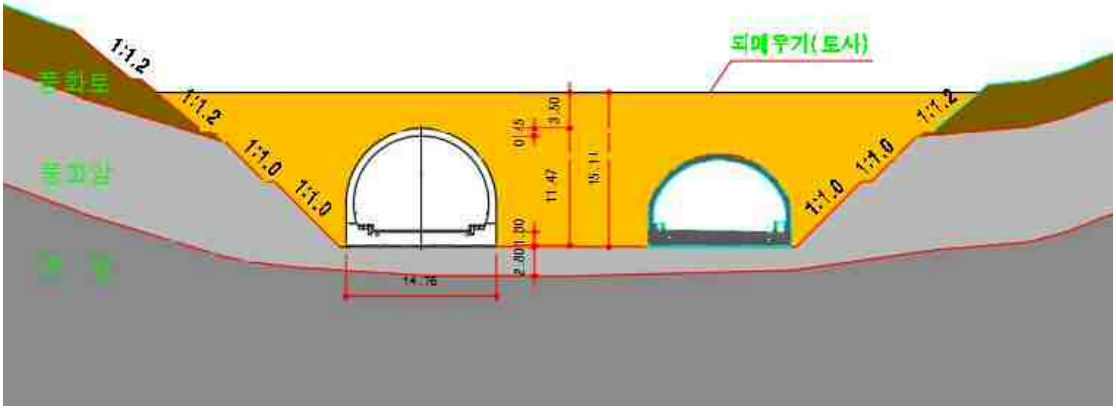
항 목	평 가 결 과
지진도 평가	3그룹
취약도 평가	45점
영향도 평가	54점
그룹 결정	**내진보강 관찰터널**

본 터널 구조물은 내진성능 예비평가에서 내진보강 '관찰터널'로 분류되었으나 이에 대한 내진성능 상세 평가를 수행하면 다음과 같다.

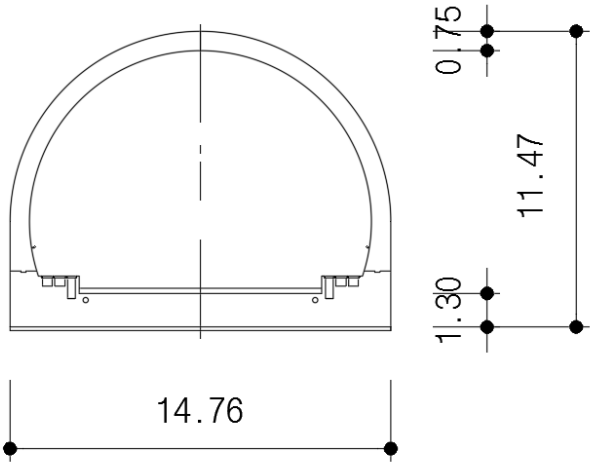
2.2 응답변위법(개착식 터널)

본 예제는 개착식으로 건설되는 개착터널의 지진해석에 대해 다루도록 한다. 대다수의 개착터널은 터파기를 통해 갱구부를 구성하고 굴착식 본선터널이 완료된 후 구조물을 시공하며 이후 구조물 상부에 되메움을 실시한다. 되메움 되는 토사의 높이는 경우에 따라 다르지만 일반적으로 토피고는 높지 않은 편이다. 본 예제에서는 아래와 같은 단면을 가정하여 적용하였다. 예제에 적용한 단면은 2차로 철도터널 단면이다.

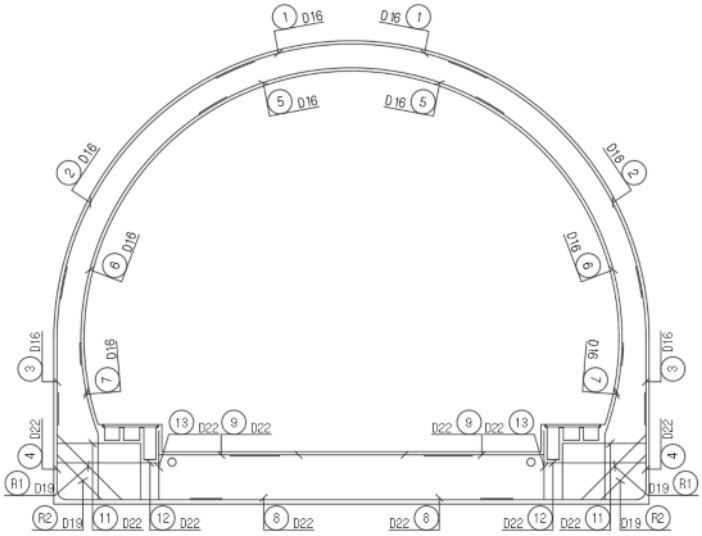
가. 지반조건 및 단면제원



<그림 2-3> 지반조건



<그림 2-4> 단면제원



<그림 2-5> 철근배근도

지반의 물성치는 아래와 같다. 지반조사 및 동적시험을 통하여 별도로 동적 물성치를 산정한 경우는 산정된 동적물성치를 적용한다. 본 예제는 전단파속도와 기본적인 설계정수로 평가요령에서 제시하고 있는 수식에 따라 동적물성치를 추정하는 경우에 대한 예를 제시한다.

개착터널의 경우 구조물 저면을 제외하고 주변부는 되메움 토사로 채워진다. 따라서 주변지반의 물성은 되메움 토사에 대한 물성 적용이 필요하다. 본 예제에서는 되메움 토사의 물성을 N치 20 기준으로 아래와 같이 가정하여 적용하였다.

N값을 통한 전단파속도 추정을 위한 경험식은 '기초 및 지반의 내진성능 평가요령'의 3.3 문헌자료 및 경험적 관계식을 참고하였다.

<표 2-5> 지반의 물성치

지반 구분	초기전단파속도 V_{si} (m/s)	설계전단파속도* $V_{DSi} = C \times V_{si}$	단위중량 (γ, kN/m^3)	포아송비 ν	전단탄성계수** G_D (kN/m^2)	탄성계수*** E_D (kN/m^2)
되메움토	221.36	177.09	20	0.34	63,934.4	171,344.3
풍화암	500	500	21	0.30	535,168.2	1,391,437.3
연암	1,200	1,200	24	0.28	3,522,935.8	9,018,715.6

* C : 지반변형에 대한 보정계수 $C = \begin{cases} 0.8 & (< 360m/s) \\ 1.0 & (\geq 360m/s) \end{cases}$

** 전단탄성계수 : $G_D = (\gamma_t/g)(V_{Ds})^2$, *** 탄성계수 : $E = 2(1+\nu)(\gamma_t/g)(V_{Ds})^2$

지반변형에 대한 보정계수 C는 표층지반의 고유주기 산정시는 적용되지 않으며 전단탄성계수와 탄성계수의 산정시 적용된다.

개착터널 구조물의 철근콘크리트 물성과 부재별 단면특성은 아래와 같다.

<표 2-6> 철근콘크리트의 물성치

구조물	설계기준강도 $f_{ck}(MPa)$	설계탄성계수 $E_c(MPa)$	포아송비, ν
철근콘크리트	24	25,811	0.17

- 콘크리트 설계기준강도 : $f_{ck} = 24$ MPa
- 설계탄성계수 : $E_c = 8{,}500\sqrt[3]{f_{cu}}$, 보통중량골재를 사용한 콘크리트($m_c = 2{,}300 kg/m^3$) 의 경우,

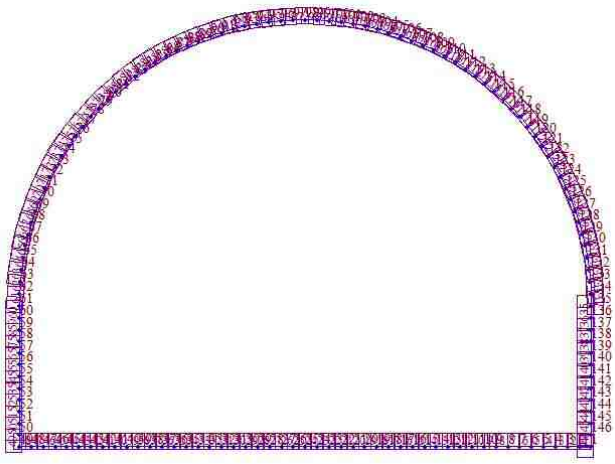
($f_{cu} = f_{ck} + 4$), f_{ck} 가 40MPa이하일때

<표 2-7> 터널 단면특성

부재구분	종방향 유효폭 B(m)	두께 H(m)	단면적 $A = BH(m^2)$	단면 2차 모멘트 $I = 1/12 \cdot bh^3(m^4)$
라이닝	1	0.75	0.75	0.035156
측벽	1	0.75	0.75	0.035156
하부 슬래브	1	1.30	1.30	0.183083

나. 응답변위법에 따른 내진평가

1) 유한요소해석모델



<그림 2-6> 유한요소해석모델

2) 지진하중 산정

- 지진구역 : I 구역
- 내진등급 : I 등급
- 위험도계수 : I=0.57 (기능수행수준), I=1.4 (붕괴방지수준)
- 지진구역계수 : Z = 0.11
- 기반암 지반분류 : S_1(암반 지반, 기반암 깊이 1.0m 미만)
- 유효수평지반가속도(S) : $S = Z \times I$, 0.0627g(기능수행수준), 0.154g(붕괴방지수준)

① 표층지반의 설계고유주기(T_S) 산정

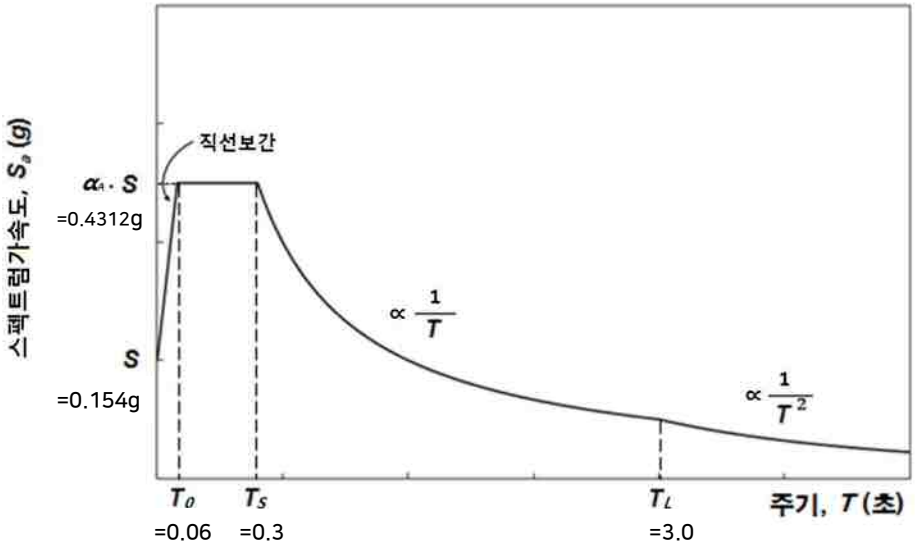
지반조건에 제시된 바와 같이 예제의 기반면 상부지층(표층지반)은 되메움토사 1개의 층으로 구성되며 표층지반의 설계고유주기를 산정하면 다음과 같다. 이때 적용되는 전단파속도는 지반변형에 대한 보정계수 C를 적용하지 않으며 초기 전단파속도를 적용함에 유의해야 한다.

<표 2-8> 표층지반의 특성치(T_G)와 설계고유주기(T_S)

구분	내용	
표층지반의 특성치	$T_G = \sum(4H_i/V_{Si})$,	
	1	0.273 sec
	2	0.022 sec
	Σ	0.295 sec
표층지반의 설계고유주기	$T_s = 1.25T_G =$ 0.369 sec	

② 기반면에서의 설계속도 응답스펙트럼(S_v) 산정

본 예제의 기반면은 연암층의 상부로 암반지반에 해당하며 이에 대한 가속도 표준설계응답스펙트럼은 아래와 같다.



<그림 2-7> 기반면에서의 설계응답스펙트럼

기반면에서의 설계가속도 스펙트럼은 감쇠율에 대한 보정계수를 곱하여 적용한다. 감쇠비는 기능수행수준은 $\xi = 10$, 붕괴방지수준의 경우 $\xi = 20$을 적용한다.

<표 2-9> 감쇠보정계수 C_D

주기(T, sec)	$T=0$	$0 \le T \le T_o$(=0.06)	$T_0 \le T$
C_D	모든 감쇠비에 대해서 1.0	$T=0$일 때, 1.0 $T=T_o$일 때, $\left(\frac{6.42}{1.42+\xi}\right)^{0.48}$ 그 사이는 직선보간	$\left(\frac{6.42}{1.42+\xi}\right)^{0.48}$
C_D(기능수행수준)	1.0	1 ~ 0.758	0.758
C_D(붕괴방지수준)	1.0	1 ~ 0.561	0.561

표층지반의 설계고유주기가 0.369sec 이므로 감쇠보정계수는 위와 같이 결정되며 기반면에서의 속도응답스펙트럼은 감쇠비를 적용하고 KDS 17 10 00 4.4.2(5)②에 따라 구한 암반지반 지반운동의 가속도 설계응답스펙트럼을 직접 적분하여 구할 수 있다. 이때, 환산식은 아래의 해석식을 이용한다.

$$S_v = \frac{T}{2\pi} S_a$$

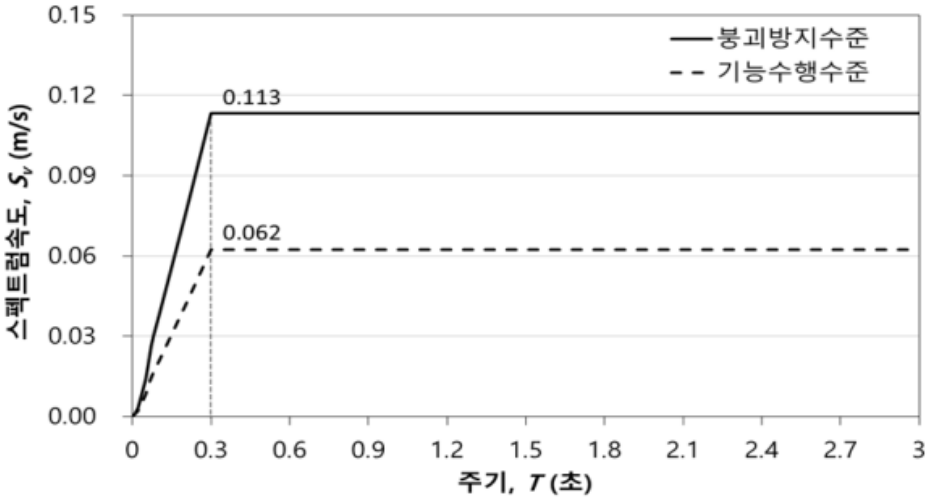
여기서, S_v : 스펙트럼속도 (m/s)

S_a : 스펙트럼가속도 (m/s^2)

T : 고유주기 (s)

<표 2-10> 기반면의 속도응답스펙트럼 S_v

주기(T, sec)	S_v(기능수행수준)	S_v(붕괴방지수준)
$T=0$	0	0
$0 \le T \le T_o$(=0.06)	$T=0.06$ $S_v=\frac{0.06}{2\pi}(1+30\times0.06)\times0.0627\times9.81$ $=0.0164$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.758 $S_v=0.0164\times0.758=0.0124$	$T=0.06$ $S_v=\frac{0.06}{2\pi}(1+30\times0.06)\times0.154\times9.81$ $=0.0404$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.561 $S_v=0.0404\times0.561=0.0227$
$T_0 \le T \le T_S$(=0.3)	$T=0.3$ $S_v=\frac{0.3}{2\pi}\times2.8\times0.0627\times9.81$ $=0.0822$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.758 $S_v=0.0822\times0.758=0.062$	$T=0.3$ $S_v=\frac{0.3}{2\pi}\times2.8\times0.154\times9.81$ $=0.2019$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.561 $S_v=0.2019\times0.561=0.113$
$T_S \le T \le T_L$(=3.0)	$T=3.0$ $S_v=\frac{3.0}{2\pi}\times\frac{0.84}{3}\times0.0627\times9.81$ $=0.0822$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.758 $S_v=0.0822\times0.758=0.062$	$T=3.0$ $S_v=\frac{3.0}{2\pi}\times\frac{0.84}{3}\times0.154\times9.81$ $=0.2019$ 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.561 $S_v=0.2019\times0.561=0.113$



<그림 2-8> 암반지반 기반면에서의 설계속도응답스펙트럼

표층지반의 속도응답스펙트럼 값은 표층지반의 설계고유주기가 0.30sec 이므로 위 수식에서 다음과 같이 산정한다.

<표 2-11> 성능수준별 기반면 속도응답스펙트럼 값

구분	기능수행수준	붕괴방지수준
표층지반의 설계고유주기	$T_s = 1.25T_G$ = 0.369sec	$T_s = 1.25T_G$ = 0.369sec
기반면 속도응답스펙트럼	T= 0.369 $S_v = \frac{0.84}{2\pi} \times 0.0627 \times 9.81$ = 0.082 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.758 $S_v = 0.0822 \times 0.758 = 0.062$	T= 0.369 $S_v = \frac{0.84}{2\pi} \times 0.154 \times 9.81$ = 0.202 감쇠보정계수 적용 C_D = 0.561 $S_v = 0.202 \times 0.561 = 0.113$

③ 지반반력계수(K_V, K_H, K_{SS}, K_{SB}) 산정

개착터널의 경우 토공을 통한 터파기 공사로 갱구부를 구성하고 개착터널을 시공한 후 되메움을 실시하는 하는 것이 일반적이다. 따라서 개착터널은 저면을 제외한 주변 지반을 되메움 토사로 둘러 쌓이는 조건이므로 본 예제에서는 구조물이 위치한 되메

움 토사에 대한 지반반력을 산정, 라이닝 부의 지반스프링계수 및 지진 토압의 산정에 적용하였다.

<표 2-12> 상판 및 저판의 지반반력계수

구 분		기능수행수준 / 붕괴방지수준
되메움토	E_D	171,344.3 (kN/m^2)
	k_{v0}, k_{h0}	$E_D/0.3$ =571,147.7 (kN/m^3)
풍화암	E_D	1,391,437.3 (kN/m^2)
	k_{v0}, k_{h0}	$E_D/0.3$ =4,638,124.4 (kN/m^3)

<표 2-13> 측벽의 지반반력계수

구 분		기능수행수준 / 붕괴방지수준	비 고
라이닝부 (되메움층)	K_H	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4}$ = 37,146,4 kN/m^3	B_h=11.47m
	K_{SH}	$= K_V/3.5$ = 10,613.3 kN/m^3	
저 판 (풍화암)	K_V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4}$ = 249,671.3 kN/m^3	B_v=14.76m
	K_{SB}	$= K_V/3.5$ = 71,334.6 kN/m^3	

④ 스프링계수(K_{Vi}, K_{SBi}, K_{Hi}, K_{SSi}) 산정

본 예제에서는 상판 토피고가 구조물 폭에 비해 작고 상부토사가 주변지반과 일체가 되지 않고 추가 중량으로만 거동하는 경우로 판단하여 3면 지지모형을 적용하여 모델링하였다. 따라서 라이닝면을 따라 모사된 지반스프링은 개착터널의 높이에 대한 측벽 지반스프링을 라이닝부에 적용한 것이다.

아래에 설명된 지반스프링은 지진하중의 적용시 사용되는 모델에서의 지반스프링이며 상시하중에 의한 해석의 경우는 기존의 방식에 따라 저면에 대한 지반스프링만을 적용하며 별도로 산정하여야 한다.

<표 2-14> 저판의 스프링계수

저판 절점		A_i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			연직 K_{Vi}^{*} (kN/m/m)	전단 K_{SBi}^{**} (kN/m/m)
1	45	0.52	130,079	37,165
2~44		0.292	73,903	21,115

* $K_{Vi} = A_i \times K_V$, ** $K_{SBi} = A_i \times K_{SB}$

본 예제에서는 아치형 터널의 원형단면을 최대한 가깝게 모사하기 위해 모델링 부재의 길이를 0.3m 이내로 조절하였다. 아래에 나타낸 측벽(라이닝부) 지반스프링은 모델링된 부재의 수직 높이에 대한 스프링계수로 산정되었다. 따라서 라이닝 천단부에 가까울수록 그 값이 매우 작게 모사된다. (단, 최상단부와 최하단부는 라이닝부재 두께의 1/2을 추가로 고려하였다)

<표 2-15> 측벽(라이닝부)의 스프링계수

측벽 절점		A_i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			수평 K_{Hi}^{*} (kN/m/m)	전단 K_{SSi}^{**} (kN/m/m)
50		0.38	14,059.9	4,017.1
49	51	0.01	464.3	132.7
48	52	0.02	928.7	265.3
47	53	0.04	1,411.6	403.3
46	54	0.05	1,857.3	530.7
45	55	0.06	2,321.7	663.3
44	56	0.07	2,786.0	796.0
43	57	0.09	3,231.7	923.4
42	58	0.10	3,677.5	1,050.7
41	59	0.11	4,123.3	1,178.1
40	60	0.12	4,364.7	1,247.1
39	61	0.13	4,773.3	1,363.8
38	62	0.15	5,386.2	1,538.9

측벽 절점		A_i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			수평 K_{Hi}^{*} (kN/m/m)	전단 K_{SSi}^{**} (kN/m/m)
37	63	0.16	5,794.8	1,655.7
36	64	0.17	6,184.9	1,767.1
35	65	0.18	6,574.9	1,878.5
34	66	0.19	6,927.8	1,979.4
33	67	0.20	7,280.7	2,080.2
32	68	0.21	7,652.2	2,186.3
31	69	0.22	7,986.5	2,281.9
30	70	0.22	8,283.6	2,366.8
29	71	0.23	8,580.8	2,451.7
28	72	0.24	8,878.0	2,536.6
27	73	0.24	8,970.9	2,563.1
26	74	0.25	9,398.0	2,685.2
25	75	0.26	9,825.2	2,807.2
24	76	0.27	9,862.4	2,817.8
23	77	0.27	10,066.7	2,876.2
22	78	0.28	10,252.4	2,929.3
21	79	0.28	10,419.6	2,977.0
20	80	0.28	10,568.2	3,019.5
19	81	0.29	10,679.6	3,051.3
18	82	0.29	10,791.0	3,083.2
17	83	0.29	10,883.9	3,109.7
16	84	0.30	10,958.2	3,130.9
15	85	0.30	10,995.3	3,141.5
14	86	0.30	11,199.6	3,199.9
13	87	0.29	11,032.5	3,152.1
5~12	88~95	0.29	10,661.0	3,046.0
3,4	96	0.29	10,642.4	3,040.7
2	97	0.29	10,661.0	3,046.0
1	98	0.79	29,475.7	8,421.6

* $K_{Hi} = A_i \times K_H$, ** $K_{SSi} = A_i \times K_{SS}$

⑤ **지반변위(U_h) 산정**

본 예제는 지중변위의 산정시 단일코사인 방식을 적용하는 경우로 아래의 수식에 따라 지반변위를 산정한다.

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \times S_v \times T_S \times \cos\left(\frac{\pi z}{2H_s}\right)$$

여기서, S_v : 표층지반의 고유주기에 해당되는 기반암 속도응답스펙트럼(m/s)

T_G : 표층지반의 특성값, $\sum(4H_i/V_{si})$

T_s : 표층지반의 고유주기, $1.25T_G$

V_{si} : i층 지반의 평균전단파속도(m/s)

H_i : i층지반의 두께(m)

H_s : 표층지반의 두께(m)

<표 2-16> 지반변위(U_h)

심도(m)	지반변위(U_h(x), m)*		비고
	기능수행	붕괴방지	
3.88	0.0044005	0.0079918	아치부 최상단
3.88	0.0043996	0.0079901	아치부
3.90	0.0043971	0.0079856	〃
3.93	0.0043927	0.0079776	〃
3.98	0.0043866	0.0079664	〃
4.03	0.0043787	0.0079521	〃
4.10	0.0043688	0.0079342	〃
4.18	0.0043570	0.0079128	〃
4.28	0.0043432	0.0078878	〃
4.38	0.0043273	0.0078588	〃
4.50	0.0043091	0.0078258	〃
4.62	0.0042903	0.0077917	〃
4.75	0.0042676	0.0077504	〃
4.91	0.0042422	0.0077043	〃
5.07	0.0042143	0.0076536	〃

심도(m)	지반변위($U_h(x)$, m)*		비고
	기능수행	붕괴방지	
5.24	0.0041836	0.0075978	〃
5.42	0.0041500	0.0075368	〃
5.61	0.0041136	0.0074708	〃
5.81	0.0040741	0.0073990	〃
6.02	0.0040313	0.0073212	〃
6.24	0.0039853	0.0072378	〃
6.47	0.0039362	0.0071485	〃
6.70	0.0038837	0.0070531	〃
6.95	0.0038276	0.0069513	〃
7.19	0.0037705	0.0068477	〃
7.45	0.0037053	0.0067293	〃
7.72	0.0036389	0.0066086	〃
7.98	0.0035692	0.0064820	〃
8.26	0.0034959	0.0063489	〃
8.54	0.0034194	0.0062101	〃
8.82	0.0033395	0.0060649	〃
9.11	0.0032567	0.0059145	〃
9.39	0.0031709	0.0057587	〃
9.69	0.0030822	0.0055976	〃
9.98	0.0029908	0.0054316	〃
10.28	0.0028968	0.0052608	〃
10.57	0.0028008	0.0050865	〃
10.88	0.0026993	0.0049021	측벽부
11.17	0.0026026	0.0047265	〃
11.45	0.0025042	0.0045479	〃
11.74	0.0024043	0.0043664	〃
12.03	0.0023028	0.0041822	〃
12.31	0.0021999	0.0039953	〃
12.60	0.0020956	0.0038059	〃
12.89	0.0019900	0.0036140	〃
13.18	0.0018831	0.0034199	〃
13.46	0.0017750	0.0032236	〃
13.75	0.0016662	0.0030260	〃
14.04	0.0015559	0.0028257	〃
14.32	0.0014447	0.0026237	하부슬래브 접합부

⑥ 지진토압($P_{(z)}$) 산정

본 예제는 3면 지지모형을 적용하는 개념으로 상판의 상면에 작용하는 지반변위하중은 별도로 적용하지 않으며 측벽의 지진토압은 아래와 같이 산정한다. 이때 상대변위 값은 구조물 저면에 대한 모델링 절점 위치의 값으로 산정하여 적용한다.

측벽 지진토압 : $P_{(z)} = K_H \times (u(z) - u(z_B))$

<표 2-17> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

심도 (m)	측벽 절점	상대변위(m)*		측벽지진토압 ($P_{(z)}$, kN/m)	
		기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
3.88	50	0.0032111	0.0058316	119.28	216.62
3.88	49	0.0032101	0.0058299	119.24	216.56
3.90	48	0.0032077	0.0058254	119.15	216.39
3.93	47	0.0032032	0.0058174	118.99	216.10
3.98	46	0.0031971	0.0058063	118.76	215.68
4.03	45	0.0031892	0.0057920	118.47	215.15
4.10	44	0.0031794	0.0057741	118.10	214.49
4.18	43	0.0031676	0.0057527	117.66	213.69
4.28	42	0.0031538	0.0057276	117.15	212.76
4.38	41	0.0031379	0.0056987	116.56	211.69
4.50	40	0.0031197	0.0056657	115.89	210.46
4.62	39	0.0031009	0.0056316	115.19	209.19
4.75	38	0.0030782	0.0055903	114.34	207.66
4.91	37	0.0030528	0.0055441	113.40	205.94
5.07	36	0.0030249	0.0054935	112.36	204.06
5.24	35	0.0029941	0.0054376	111.22	201.99
5.42	34	0.0029606	0.0053767	109.97	199.72
5.61	33	0.0029242	0.0053106	108.62	197.27
5.81	32	0.0028847	0.0052389	107.16	194.60
6.02	31	0.0028418	0.0051611	105.56	191.71
6.24	30	0.0027959	0.0050776	103.86	188.62
6.47	29	0.0027468	0.0049884	102.03	185.30

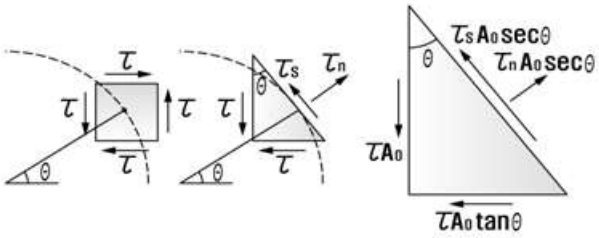
심도 (m)	측벽 절점	상대변위(m)*		측벽지진토압 ($P_{(z)}$, kN/m)	
		기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
6.70	28	0.0026942	0.0048930	100.08	181.76
6.95	27	0.0026382	0.0047912	98.00	177.97
7.19	26	0.0025811	0.0046875	95.88	174.12
7.45	25	0.0025159	0.0045691	93.46	169.73
7.72	24	0.0024494	0.0044484	90.99	165.24
7.98	23	0.0023797	0.0043218	88.40	160.54
8.26	22	0.0023064	0.0041887	85.68	155.60
8.54	21	0.0022300	0.0040499	82.84	150.44
8.82	20	0.0021501	0.0039048	79.87	145.05
9.11	19	0.0020673	0.0037544	76.79	139.46
9.39	18	0.0019815	0.0035986	73.61	133.67
9.69	17	0.0018927	0.0034374	70.31	127.69
9.98	16	0.0018013	0.0032714	66.91	121.52
10.28	15	0.0017073	0.0031007	63.42	115.18
10.57	14	0.0016113	0.0029264	59.86	108.70
10.88	13	0.0015098	0.0027420	56.08	101.85
11.17	12	0.0014131	0.0025664	52.49	95.33
11.45	11	0.0013148	0.0023878	48.84	88.70
11.74	10	0.0012148	0.0022063	45.13	81.96
12.03	9	0.0011134	0.0020220	41.36	75.11
12.31	8	0.0010105	0.0018351	37.54	68.17
12.60	7	0.0009062	0.0016457	33.66	61.13
12.89	6	0.0008005	0.0014539	29.74	54.01
13.18	5	0.0006937	0.0012597	25.77	46.79
13.46	4	0.0005856	0.0010634	21.75	39.50
13.75	3	0.0004767	0.0008658	17.71	32.16
14.04	2	0.0003665	0.0006656	13.61	24.72
14.32	1	0.0002552	0.0004635	9.48	17.22

⑦ 주면전단력(τ) 산정

주면전단력은 구조물의 외면에 작용하는 값이므로 구조물의 높이(z)에 대한 함수로 아래와 같이 정의된다.

$$\tau = \frac{G_D}{\pi H} \times S_v \times T_S \times \sin\left(\frac{\pi z}{2H}\right)$$

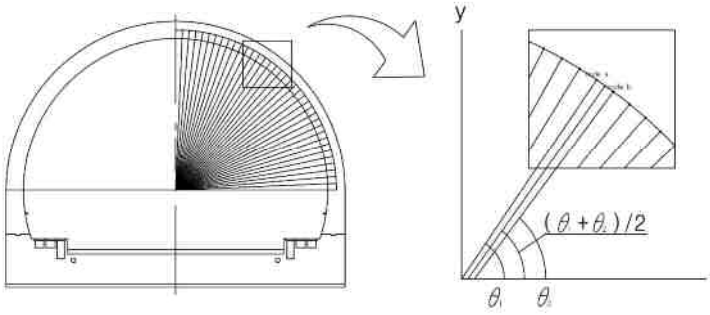
아치형 터널에서 주면전단력은 모델링한 구조물의 높이에 대해 주면전단력을 산정하여 라이닝면에 대해 아래의 그림과 같이 평면응력의 변환공식에 따라 변환하여 적용할 수 있다.



<그림 2-9> 경사면에 대한 주면전단력 산정

평면응력 변환공식에 따르면 위 그림에서 면의 접선방향 응력 $\tau_s = 2\ \tau\ \sin\theta \cdot \cos\theta$ 이며 법선방향 응력 $\tau_n = \tau\ (\cos^2\theta - \sin^2\theta)$ 이다. 곡면에 주면전단력을 작용시키는 경우는 이와 같이 접선방향과 법선방향으로 변환하여 적용된다.

위 수식에 따라 곡면을 모델링한 요소의 곡선중심으로 부터의 각도를 산정하면 다음과 같이 주면전단력을 산정할 수 있다.



<그림 2-10> 아치부 곡면의 부재중심에서의 각도 산정

<표 2-18> 주면전단력(τ) - 측벽(라이닝부)

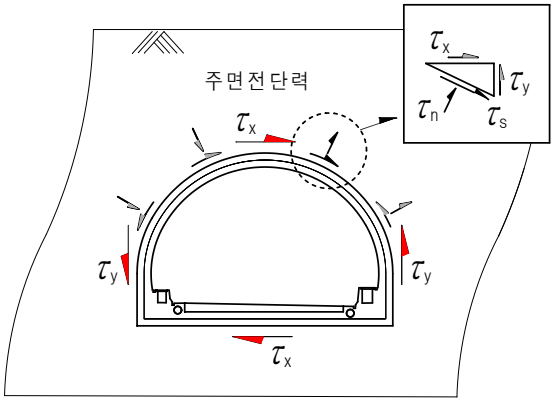
심도(z)	아치부 부재중심 각도(θ)	주면전단력-법선방향 (τ, kN/m)		주면전단력-접선방향 (τ, kN/m)	
		기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
3.879	88.78	0.371	0.673	-8.724	-15.844
3.891	86.35	1.113	2.021	-8.688	-15.779
3.916	83.92	1.857	3.372	-8.615	-15.647
3.954	81.49	2.605	4.731	-8.505	-15.447
4.004	79.05	3.357	6.096	-8.354	-15.172
4.067	76.62	4.114	7.471	-8.159	-14.818
4.142	74.19	4.875	8.854	-7.918	-14.380
4.229	71.76	5.640	10.243	-7.626	-13.850
4.328	69.32	6.406	11.635	-7.279	-13.220
4.439	66.89	7.171	13.024	-6.873	-12.482
4.556	64.46	7.922	14.387	-6.397	-11.617
4.685	62.03	8.660	15.728	-5.853	-10.630
4.830	59.59	9.391	17.056	-5.246	-9.528
4.986	57.16	10.099	18.341	-4.565	-8.290
5.152	54.73	10.775	19.568	-3.807	-6.914
5.329	52.30	11.411	20.724	-2.971	-5.396
5.516	49.86	11.997	21.789	-2.057	-3.736
5.712	47.43	12.524	22.744	-1.066	-1.936
5.918	45.00	12.982	23.576	0.000	0.000
6.133	42.57	13.360	24.262	1.137	2.065
6.356	40.14	13.646	24.782	2.340	4.249
6.587	37.70	13.831	25.118	3.601	6.540
6.826	35.27	13.906	25.255	4.913	8.923
7.067	32.84	13.853	25.159	6.262	11.373
7.320	30.41	13.682	24.848	7.643	13.881
7.585	27.97	13.384	24.306	9.046	16.428
7.850	25.54	12.938	23.497	10.447	18.972
8.121	23.11	12.349	22.427	11.835	21.494
8.397	20.68	11.614	21.092	13.196	23.966
8.678	18.24	10.734	19.493	14.513	26.357

심도(z)	아치부 부재중심 각도(θ)	주면전단력-법선방향 (τ, kN/m)		주면전단력-접선방향 (τ, kN/m)	
		기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
8.962	15.81	9.709	17.633	15.769	28.637
9.250	13.38	8.544	15.517	16.946	30.776
9.540	10.95	7.245	13.158	18.030	32.745
9.833	8.51	5.820	10.570	19.004	34.514
10.128	6.08	4.279	7.771	19.854	36.056
10.424	3.65	2.633	4.782	20.563	37.345
10.726	1.22	0.897	1.630	21.127	38.369
11.023	0.00	0.000	0.000	21.541	39.120
11.310	0.00	0.000	0.000	21.908	39.787
11.597	0.00	0.000	0.000	22.261	40.429
11.884	0.00	0.000	0.000	22.601	41.045
12.171	0.00	0.000	0.000	22.926	41.636
12.458	0.00	0.000	0.000	23.236	42.199
12.745	0.00	0.000	0.000	23.532	42.737
13.032	0.00	0.000	0.000	23.813	43.247
13.319	0.00	0.000	0.000	24.079	43.729
13.605	0.00	0.000	0.000	24.329	44.184
13.892	0.00	0.000	0.000	24.564	44.610
14.179	0.00	0.000	0.000	24.783	45.009
14.322	0.00	0.000	0.000	24.887	45.198

<표 2-19> 저판부 주면전단력(τ)

구분	심도(z)	주면전단력(τ, kN/m)	
		기능수행	붕괴방지
저판	14.972	211.845	384.731

측벽(라이닝부)의 주면전단력 산정결과에 따르면 부재 중심각도 45°를 전후하여 접선방향의 주면전단력의 부호가 바뀌는 것을 알 수 있는데 이는 아치형 단면에서는 아래의 그림과 같이 주변전단력이 작용함을 나타낸다.



<그림 2-11> 아치형 단면에서의 주면전단력

⑧ 관성력(f) 산정

관성력은 아래와 같이 산정된다. 여기서 K_{hi}는 해당깊이의 수평방향 지진가속도 a_i를 g 값으로 나누어준 값을 의미한다.

$$\text{관성력 : } f = m_i \times a_i = (w_i/g) \times a_i = w_i \times K_{hi} = (\gamma \times b \times h) \times K_h \times C_U(z)$$

$$\text{깊이에 대한 선형보정값 } C_U(z) = (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$$

기반면에서의 지진가속도는 S = Z × I 로 구할 수 있으며 지표면에서의 지진가속도는 Fa × S 로 산정된다. 따라서 지표에서의 가속도 값을 구하기 위해서는 표층지반의 지반에 대해 분류하여야 하며 그에 따라 내진설계 일반에서 정의한 Fa 값을 산출하여 아래와 같이 적용한다.

<표 2-20> 지표에서의 설계수평가속도(K_h) 값

구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도	$V_{0avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	221.36×15.11/17.91 = 186.8 m/sec	
	2	500×2.8/17.91 = 78.2 m/sec	
	Σ	264.92 m/sec ⇒ S_2 지반	
지반증폭계수	$F_a = 1.4(S \le 0.1)$, $1.4(S = 0.2)$, $1.3\ (S = 0.3)$ 중간값은 직선보간		S_2 **지반**
기반면 설계수평가속도(S)	기능수행수준 : 0.0627 → Fa = 1.4 붕괴방지수준 : 0.154 → Fa = 1.4 (직선보간)		
지표면 설계수평가속도(K_h)	$K_h = F_a \cdot S = 1.4 \times 0.0627 = 0.0878$ (기능수행수준) $K_h = F_a \cdot S = 1.4 \times 0.154 = 0.2156$ (붕괴방지수준)		

*주의 : 관성력에서 가속도로 표현하고 있는 값은 위에서 설명한 바와 같이 g값으로 나누어진 가속도의 값만을 의미함에 주의 바람.

따라서 구조물 깊이(z)에 따른 설계수평가속도는 다음과 같이 산정할 수 있다.

<표 2-21> 구조물 깊이에 따른 설계수평가속도(K_h) 값

구분	기능수행수준	붕괴방지수준
기반면에서의 설계수평가속도(S)	0.0627	0.154
지표면 설계수평가속도(K_h)	0.0878	0.2156
깊이(z)의 직선 보간식 Cu	$K_{hi} = K_h \cdot (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$ = 0.0878(1-0.015962z)	$K_{hi} = K_h \cdot (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$ = 0.2156(1-0.015953z)

<표 2-22> 심도에 따른 설계수평가속도(K_h)

구분	기능수행수준	붕괴방지수준	깊이 (z)
라이닝 천단부	K_{hi} = 0.0824	K_{hi} = 0.2023	3.88
벽체부 상단	K_{hi} = 0.0721	K_{hi} = 0.1772	11.166
하부슬래브	K_{hi} = 0.0677	K_{hi} = 0.1663	14.32

<표 2-23> 관성력(f)

구분	단위중량 (kN/m^3)	단면적 $A = BH\,(m^2)$	설계수평가속도(K_h)		관성력(kN/m)	
			기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
라이닝 천단부	23	0.75	0.0824	0.2023	1.4206	3.4892
벽체부 상단	23	0.75	0.0721	0.1772	1.2445	3.0566
하부슬래브	23	1.30	0.0677	0.1663	2.0250	4.9736

3) 하중조합

본 해석에서 적용한 하중조합은 아래와 같으며, 내진성능평가를 위한 내진성능수준별 하중조합은 시설물별로 정하는 내진설계기준의 규정에 따른다. 여기서 주의 할 사항은 지진하중에 대한 해석과 지진하중을 제외한 상시하중에 대한 해석을 별도로 수행하여야 한다는 점이며 선형 탄성해석이므로 이 두 결과를 조합하여 단면력을 산출하여야 한다.

① 기능수행수준

$$U = 1.2\ D + 1.0\ E\ + 1.0\ L + 0.2\ S$$

$$U = 0.9\ D + 1.0\ E\ + 1.6(\alpha_H H_v + H_h)$$

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중 (상판지진토압+측벽지진토압+주면전단력+관성력)

S : 적설하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

H : 토압 및 수압

② 붕괴방지수준

$$U = 1.0\ (D + L + H + E)$$

여기서, D : 고정하중

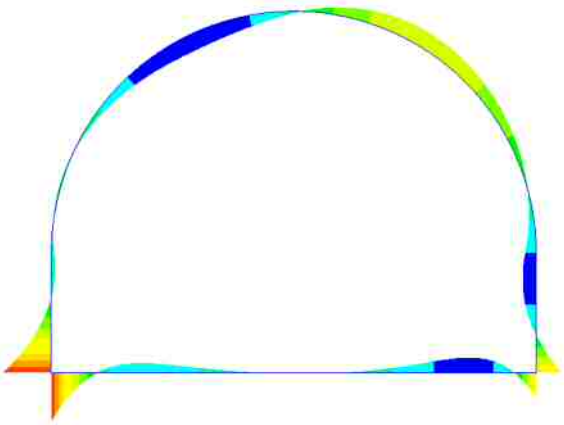
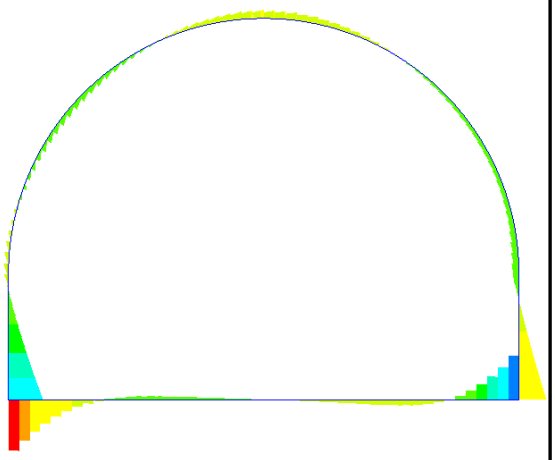
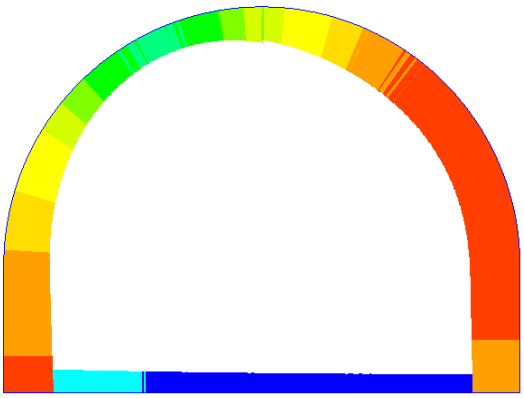
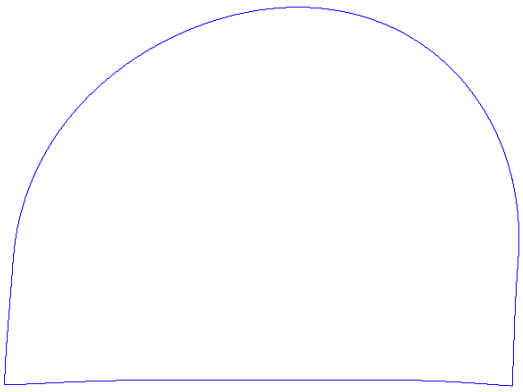
E : 지진하중(=상판지진토압+측벽지진토압+주면전단력+관성력)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

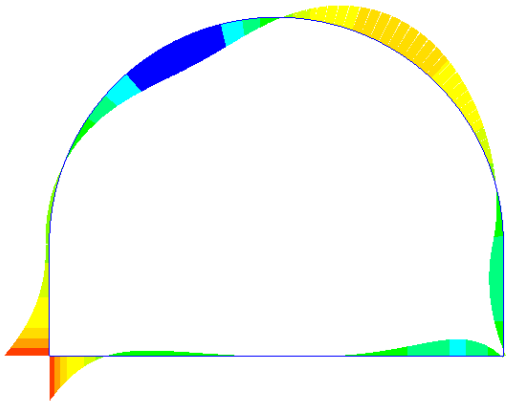
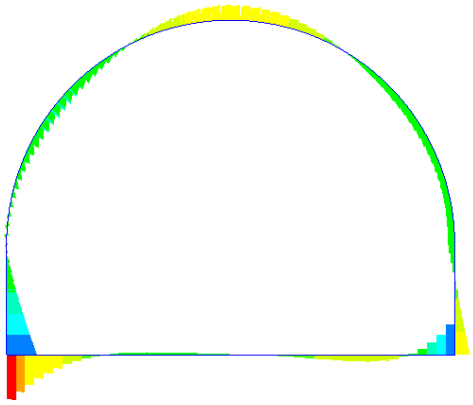
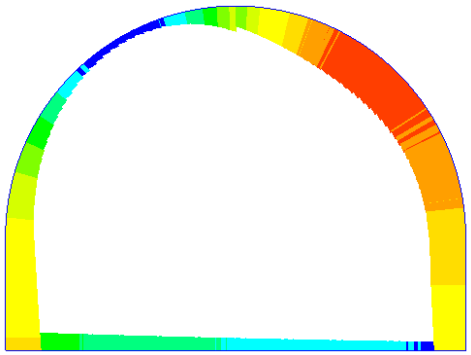
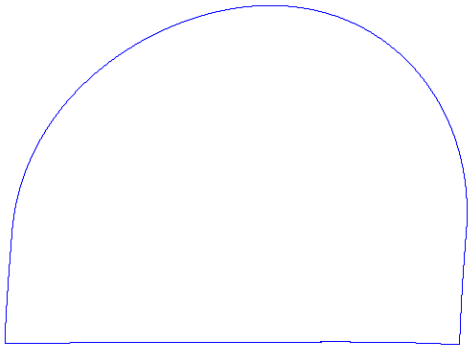
H : 토압 및 수압

4) 해석결과

① 기능수행수준

휨모멘트도	전단력도
	
축력도	변위도
	

② 붕괴방지수준

휨모멘트도	전단력도
	
축력도	변위도
	

5) 단면검토

해석결과의 분석은 강도설계법에 따라 수행한다. 기능수행수준의 내진성능을 검토하는 경우 설계시의 내하력에 대해 그 만족여부를 검토하는 방식을 적용하며 붕괴방지수준의 내진성능 검토시는 대상구조물의 변형이 탄성한도를 초과한 소성거동을 고려할 필요가 있다고 판단되는 경우 탄성부재력을 응답수정계수(R)로 나누어 설계부재력 평가를 수행할 수 있다.

① 기능수행수준

구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
라이닝부	천단부	634.6	34.1	O.K	553.5	150.2	O.K
	어깨부	1,096.0	275.3	O.K	568.0	113.8	O.K
	측벽부	1,046.8	225.4	O.K	568.4	128.9	O.K
	하부 지점부	928.9	796.3	O.K	692.4	608.3	O.K
하부 슬래브	지점부	929.6	796.3	O.K	1,191.0	894.5	O.K
	중앙부	929.6	246.4	O.K	734.8	64.8	O.K

기능수행수준의 내진성능 검토결과 지진시 발생단면력은 설계시의 내하력 이내로 충분한 안전율을 확보하고 있으므로 본 예제의 개착터널은 기능수행수준의 내진성능을 만족하는 것으로 판단할 수 있다.

② 붕괴방지수행수준

구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
라이닝부	천단부	634.6	37.1	O.K	545.8	240.6	O.K
	어깨부	324.4	488.5	N.G	528.5	168.2	O.K
	측벽부	1,152.2	235.0	O.K	555.2	108.1	O.K
	하부 지점부	790.2	740.3	O.K	679.0	457.3	O.K
하부 슬래브	지점부	929.6	740.3	O.K	1,191.0	675.3	O.K
	중앙부	929.6	271.4	O.K	734.8	106.7	O.K

붕괴방지수준의 내진성능 검토결과 지진시 발생단면력은 일부구간에서 설계시의 내하력을 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 경우 본 평가요령에 언급된 바와 같이 구조물의 소성변형에 따른 거동을 응답수정계수(R, 연성계수)를 적용하여 평가할 수 있다. 다만, 응답수정계수를 적용하기 위해서는 내진설계 구조상세(KDS 14 20 80)를 만족하도록 배근되어야 한다.

응답수정계수는 지진에 의한 탄성부재력을 응답수정계수로 나눈 값이 지진에 대한 부재력이 되며 이 부재력을 다른 하중에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안전성을 검

토하여야 한다. 응답수정계수는 휨모멘트에만 적용되며 설계 부재력 중 전단력과 압축력에 대해서는 적용하지 않는다.

응답수정계수 적용시의 하중조합은 다음과 같다.

$$U = 1.0\ (D + L + H + E/R)$$

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중(=상판지진토압+측벽지진토압+주면전단력+관성력)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

H : 토압 및 수압

R : 응답수정계수 (R=3.0)

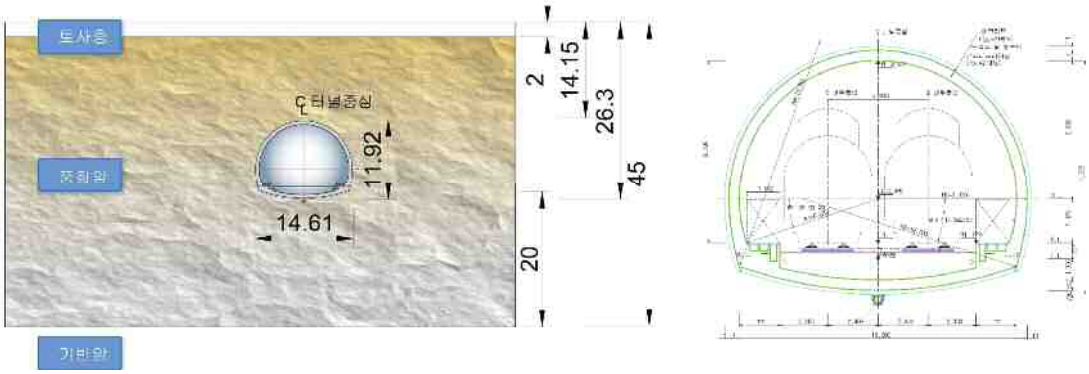
③ 붕괴방지수행수준 (응답수정계수 적용)

구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
라이닝부	천단부	634.6	14.9	O.K	544.1	93.0	O.K
	어깨부	1,066.2	172.9	O.K	539.4	74.7	O.K
	측벽부	980.0	128.0	O.K	553.4	85.1	O.K
	하부 지점부	983.2	506.9	O.K	677.5	382.5	O.K
하부 슬래브	지점부	929.6	506.9	O.K	1,191.0	604.2	O.K
	중앙부	929.6	172.4	O.K	734.8	69.7	O.K

부재의 소성 거동을 고려한 검토결과 본 예제의 개착터널은 붕괴방지수준의 내진성능을 만족하는 것으로 판단할 수 있다.

3. 굴착식 터널

3.1 내진성능 예비평가



(a) 지반조건 및 터널의 위치 (b) 터널 단면도

<그림 3-1> 지반조건 및 단면제원

가. 지진도 평가

대상 구조물은 구역 Ⅰ, 도시지역, 지반분류 S_1 에 위치하므로 아래의 표 B-1의 '지진도 등급 기준'에 의해 지진도 3그룹에 해당한다.

<표 3-1> 지진도 등급 기준

지진구역	구분	지반분류			
		S_6	S_3, S_5	S_2, S_4	S_1
Ⅰ	도시	1그룹	1그룹	2그룹	3그룹
	기타지역	1그룹	2그룹	2그룹	3그룹
Ⅱ	도시	1그룹	2그룹	3그룹	4그룹
	기타지역	1그룹	3그룹	4그룹	

나. 취약도 평가

취약도 지수(Vulnerability Index, VI)

$$VI = 10 \times (Soil + Slope + Depth + Unbal + Shape + Lining + Const + Size + Hist + Defor + Deter + Damage)$$

여기서, *Soil* : 터널 주변의 지반(Soil) 상태에 따른 지수
Slope : 갱구부 비탈면(Slope)의 활동여부에 따른 지수
Depth : 터널 저토피(Shallow Depth) 구간에 따른 지수
Unbal : 단면의 비정형성 및 편토압 등의 불균형(Unbalance) 토압에 따른 지수
Shape : 터널 형상(Shape)에 따른 지수
Lining : 터널 라이닝(Lining) 형식에 따른 지수
Const : 터널 시공(Construction) 방법에 따른 지수
Size : 터널의 굴착단면 크기(Size)에 따른 지수
Hist : 터널 시공당시의 재난 이력(History)에 따른 지수
Defor : 터널의 지속적인 변형(Deformation) 여부에 따른 지수
Deter : 터널 구조물의 노후화(Deterioration)에 따른 지수
Damage : 터널 구조물의 손상(Damage) 상태에 따른 지수

<표 3-2> 취약도 지수 평가결과

No.	세부지수	설명	내용	점수
1	*Soil*	주변 지반	강성지반(S_1)	0.2
2	*Slope*	갱구부 비탈면활동	없음	0.2
3	*Depth*	저토피 구간	10m≤h	0.2
4	*Unbal*	불균형 토압	없음	0.2
5	*Shape*	터널 형상	아치형	0.8
6	*Lining*	라이닝 형식	무근콘크리트	0.5
7	*Const*	시공방법	굴착식	0.2
8	*Size*	단면크기	B=10.12m, H=8.6m	0.5
9	*Hist*	재난이력	있음	0.5
10	*Defor*	지속적인 변형	없음	0.2
11	*Deter*	노후화	10년≤t≤30년	0.5
12	*Damage*	손상상태	B등급	0.5
합 계				4.5
⇒ **취약도 지수(VI) = 10 × 4.5 = 45점**				

다. 영향도 평가

영향도 지수(Impact Index, II)

$$II = 20 \times (Traffic + Facilities + Lifeline + Importance + Recovery)$$ 해설식(3.2)

여기서, $Traffic$: 터널을 이용하는 일평균 교통량(Traffic) 또는 일일 평균탑승인원

$Facilities$: 인접 주요 시설물(Facilities)의 존재여부

$Lifeline$: 터널 내·외부 주요 라이프라인(Lifeline)의 존재여부

$Importance$: 사회·경제적으로 영향을 주는 터널의 중요도(Importance)

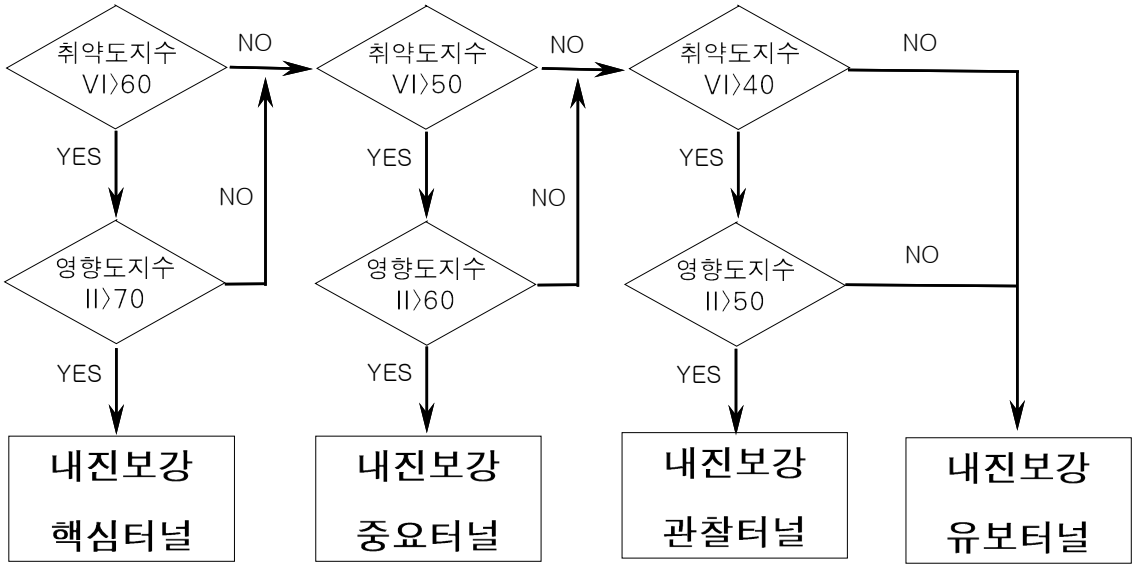
$Recovery$: 터널 구조물의 성능회복(Recovery)을 위한 비용지수

<표 3-3> 영향도 지수 평가결과

세부지수	설명	내용	점수
$Traffic$	교통량 또는 탑승인원	일교통량 약 3,000대	0.6
$Facilities$	주요시설물	없음	0.2
$Lifeline$	주요 라이프라인	기타시설물	0.5
$Importance$	터널 중요도	인원수송, 1등급	1.0
$Recovery$	성능회복비용	터널길이=800m	0.4
합 계			2.7
⇒ **영향도 지수(VI) = 20 × 2.7 = 54점**			

라. 내진그룹화

지진도, 취약도, 영향도를 산정하여 <그림 3-2>와 같은 결정과정을 통하여 대상구조물의 내진등급을 그룹화한다.



<그림 3-2> 내진그룹화 방법

마. 내진성능 예비평가 결과

<표 3-4> 내진성능 예비평가 결과

항 목	평 가 결 과
지진도 평가	3그룹
취약도 평가	45점
영향도 평가	54점
그룹 결정	**내진보강 관찰터널**

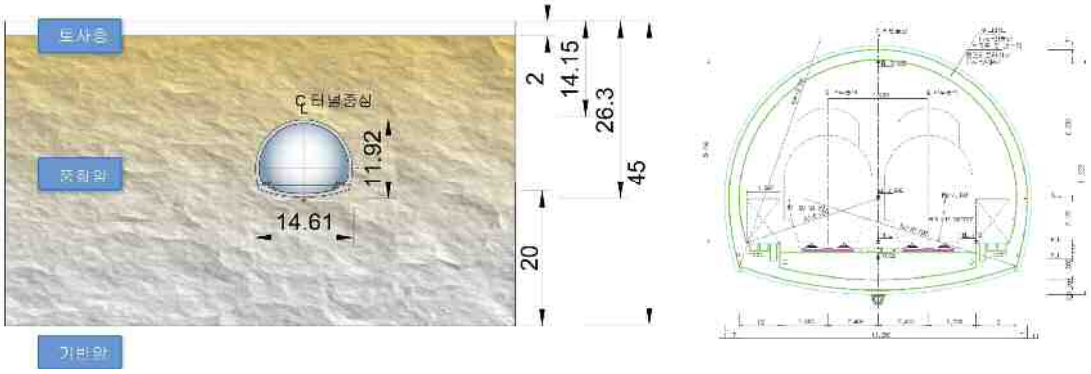
본 터널 구조물은 내진성능 예비평가에서 내진보강 '관찰터널'로 분류되었으나 이에 대한 내진성능 상세 평가를 수행하면 다음과 같다.

3.2 응답이력해석 (굴착식 터널)

응답이력해석(Response History Analysis, RHA)은 지반-구조물의 지진하중에 대한 응답을 시간영역 직접적분법을 이용하여 수치해석하는 방법으로, 지반의 동적 비선형 거동특성을 고려할 수 있어야 한다. 상기문제에 대한 시간영역 적분법은 양해법(Explicit Method)과 음해법(Implicit Method)이 사용될 수 있으며(Dokanish and Subbaraj, 1989), 연속체에 대한 수치모델링 방법은 유한요소법(Finite Element Method)과 유한차분법(Finite Difference Method)이 사용될 수 있다. 본 예제에서는 양해법과 유한차분법을 사용하는 수치해석기법을 이용한 예제를 제시하고자 한다.

3.2.1 예제터널의 설정

본 예제의 터널은 지진구역 I, 기반암은 연암으로 지표면 하 45m(GL -45m)에 위치한다. 풍화암층의 평균전단파 속도는 약 714m/이고, 전단파 속도가 760m/s 이상인 기반암의 깊이가 터널 하부 20m에 위치하는 조건으로 해당지역의 지반분류체계는 S1 지반에 해당된다.



(a) 지반조건 및 터널의 위치 (b) 터널 단면도

<그림 3-3> 예제터널의 지반조건 및 단면제원

예제터널이 위치한 지반의 단면도는 그림 3-3과 같다. 터널단면은 하부가 인버트 단면으로 복선터널 단면으로, 높이 11.92m, 폭 14.61m이다. 지하수위는 터널 측벽부 중간에 위치하는 것이 확인 되었으며, 풍화암층에 위치하여 지진시 지반의 변형에 의한 영향을 받을 수 있을 것으로 예상된다. 설계도서상의 지반조사 및 성능평가를 위한 지반조사결과로 결정된 내진성능평가를 위한 지반구분 및 지반정수는 표 3-5와 같다.

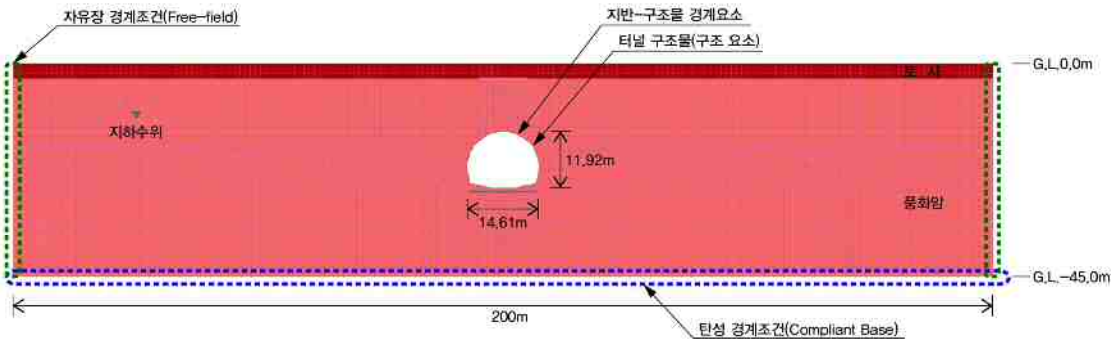
<표 3-5> 예제터널의 지층구분 및 지반정수

구 분	심도(m)	지반 종류	단위중량(kN/m^3)	전단파속도 (m/s)	동적 포아송비
1	2.0	매립층	19	233.92	0.45
2	45.0	풍화암	21	714.98	0.40
3	50.0	연암	24	1381.98	0.40

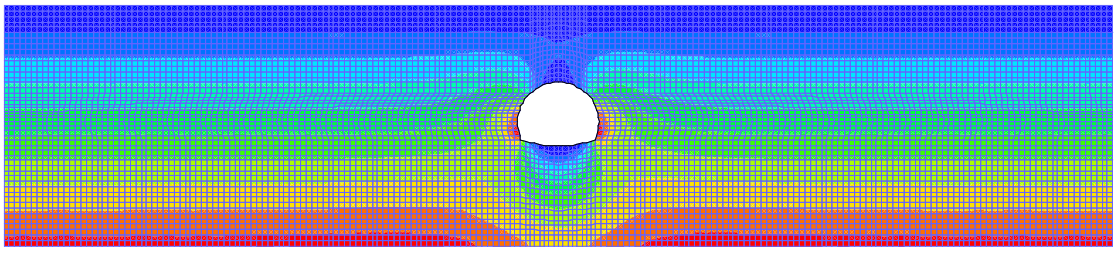
3.2.2 유한차분 모델링

가. 해석 영역의 설정

응답이력해석을 이용한 동적해석을 수행하기 위하여 그림과 같이 유한차분모델을 작성하였다. 수치모델의 범위는 터널의 시공으로 인하여 지중응력의 영향을 받게 되는 범위 이상으로 설정하였으며, 터널 시공으로 인한 최종 응력분포는 그림 3-5와 같다. 그림 3-5 로부터 수치모델링의 경계가 터널시공으로 인한 응력변화의 영향범위 바깥쪽에 위치함을 알 수 있다.



<그림 3-4> 터널 유한차분 모델링



<그림 3-5> 터널 시공에 의한 응력 영향범위의 분포

나. 요소크기의 결정

유한차분요소의 최소크기에 따라 전파되는 지진에너지의 주파수대역은 아래와 같이 계산 가능하다. 예제 터널 요소의 최대 대각길이(약 2m)와 최소전단파속도(233.92m/s)에 따라, 전파가능 주수 대역은 11.69Hz이하로, 해석 전 입력지진의 주파수대역이 11Hz 이하에 존재함을 확인하여야 한다.

$$\lambda = \frac{v}{f}, \qquad \Delta l \le \frac{\lambda}{10}, \qquad f \le \frac{v}{10 \times \Delta l} = \frac{233.92}{10 \times 2} = 11.69\,Hz \qquad \text{<식 3-1>}$$

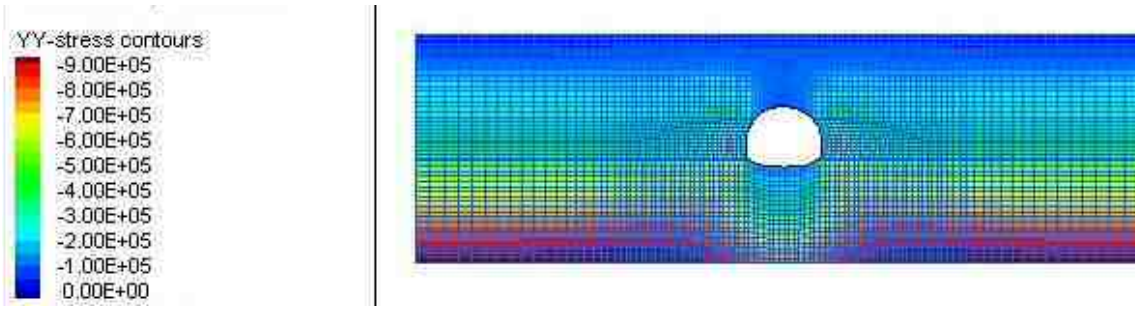
3.2.3 상시평형해석

지반재료는 지난 응력경로(Stress Path)에 따라 향후 응력경로가 달라질 수 있으므로, 시공과정을 포함하는 수치해석을 실시하여 현재의 응력상태를 재현하여야 한다. 다음은, 본 예제에서 시행한 시공단계별 해석과 단계별 해석 조건을 나타내고 있다.

가. 시공단계해석

1) 원지반 응력조건

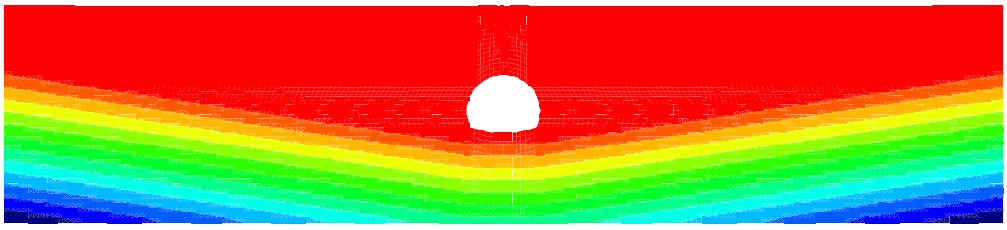
시공단계별 해석은 수평지반에 대한 원지반 응력상태 재현, 지하수위에 의한 유효응력계산을 고려하여 중력하중에 의한 평형상태 응력조건 (K0 평형조건)을 부여하였다. 또한 적용 경계조건으로는 최하단 및 좌우측면을 고정단 경계로 하였다.



<그림 3-6> 원지반 응력분포 및 경계조건

2) 터널 시공을 위한 시공단계별 굴착

시공단계별 굴착단계에서는 터널 굴착에서 따라서 지하수위 하강을 아래 그림과 같이 고려하였다.



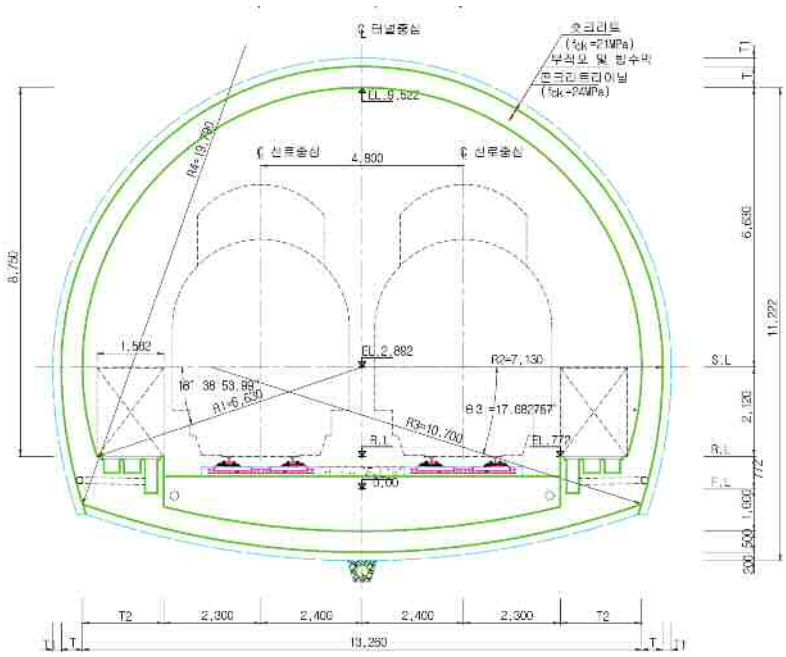
<그림 3-7> 터널 시공중 지하수위 하강을 위한 굴착해석

3) 터널 구조물 시공

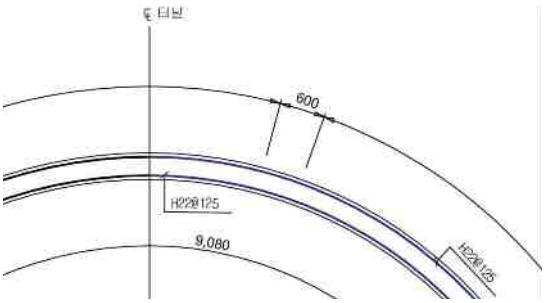
터널 단면도는 그림 3-8 과 같으며, 철근콘크리트 벽체로 두께 400~500mm이다. 배근은 D22~D25 이형 복철근 벽체로 가정한다.

본 요령의 응답이력해석에서는 터널 구조물의 소성거동을 묘사하기 위하여 평가내하력 이상의 부재력이 작용 시 소성거동(소성힌지, Plastic Hinge)이 가능한 구조요소를 적용하였다. 적용된 구조요소는 축력과 휨을 동시에 받을 수 있는 구조요소로 본 예제에서 사용된 해석프로그램에서 Liner Element로 사용가능하다.

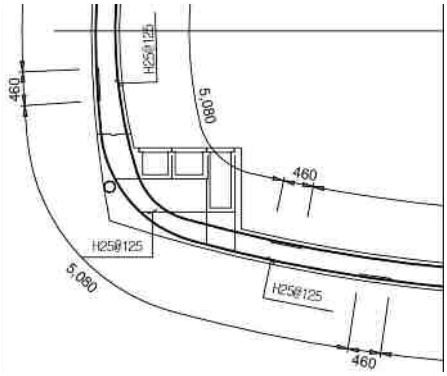
축력과 휨을 동시에 받는 구조요소의 평가내하력 곡선은 성능곡선(Moment-thrust Diagram)으로 정의되며, 철근콘크리트 기둥의 설계에 사용되는 P-M상관도의 작성절차를 따른다. 단, 강도감소계수의 적용에 따른 평가내하력의 계산은 설계기준이 아닌 본 요령의 방법을 따르도록 한다. 그림 3-9에 본 예제에 적용된 터널의 성능곡선을 도시하였다.



(a) 터널 단면도



(b) 터널 천장부 철근



(c) 인버트 및 코너부 철근

<그림 3-8> 터널 단면도 및 위치별 배근도 (단위 mm)

그림 3-9의 성능곡선 구성을 위한 재료상수, 강도감소계수, 노후도 계수 등은 표 3-6과 같다. 내진성능평가를 위해 평가대상 터널의 특성에 따라서 적용할 수 있는 항목으로 현장에서 직접 측정된 평가내하력이 존재하지 않음에 따라 예제 터널의 콘크리트와 철근의 공칭강도는 설계에 사용된 공칭강도를 사용하여 각각 24MPa, 400MPa가 적용되었으며 강도감소계수는 적용하지 않았다.

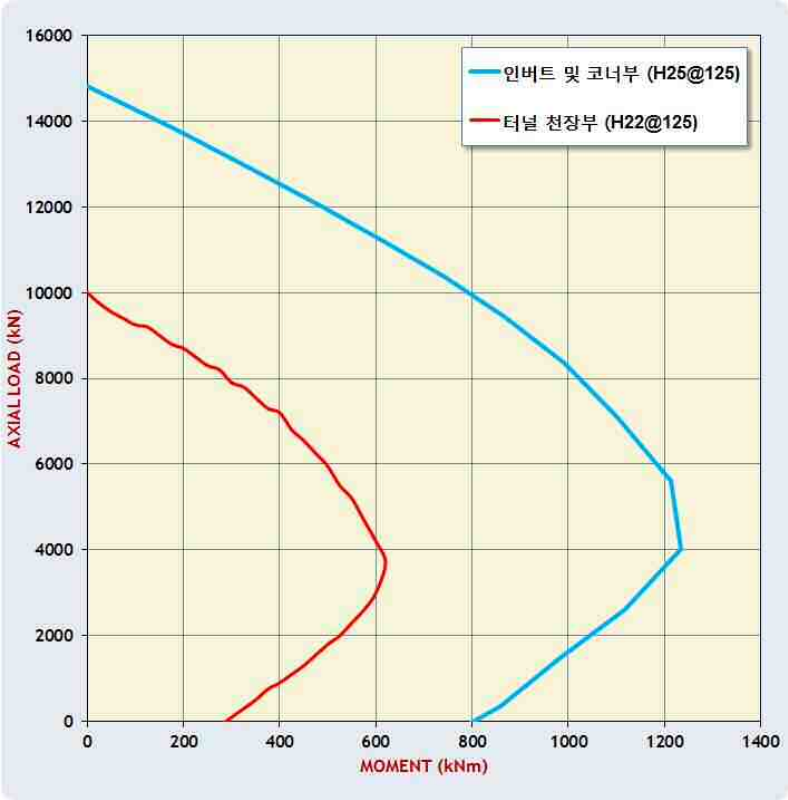


그림 <3-9> 예제 터널의 성능곡선

<표 3-6> 성능곡선 구성을 위한 강도감소계수 및 구조상태계수의 적용

강도감소계수 KDS 14 20 20		구조상태계수 (ϕ_A)		$\phi \times \phi_A$
		경과년수 20년 이상 (1996~2019)	재료상태 (B등급, 양호)	
ϕ_b (휨)	0.85	-	1.0	0.85
ϕ_c (압축)	0.65	0.9	1.0	0.585
ϕ_v (전단)	0.75	0.9	1.0	0.675

본 예제에서는 터널 구조물-지반간 분리거동을 묘사하기 위하여 경계요소를 적용하였다. 경계요소는 경계면 수직방향으로 인장에 대한 분리거동이 가능하여야 하며, 전단방향에 대해서는 미끌어짐을 표현할 수 있어야 한다. 각각의 거동은 경계요소의 인장강도와 마찰강도를 정의함으로써 표현가능하다. 그러나, 유한차분 또는 유한요소해석과정에서 절점간의 응력-변형율관계를 정의하기 위하여 수직, 전단방향에 대한 강성을 설정하여야 한다. 이때, 실제와 가장 유사한 거동을 나타내기 위해서 무한대의 강

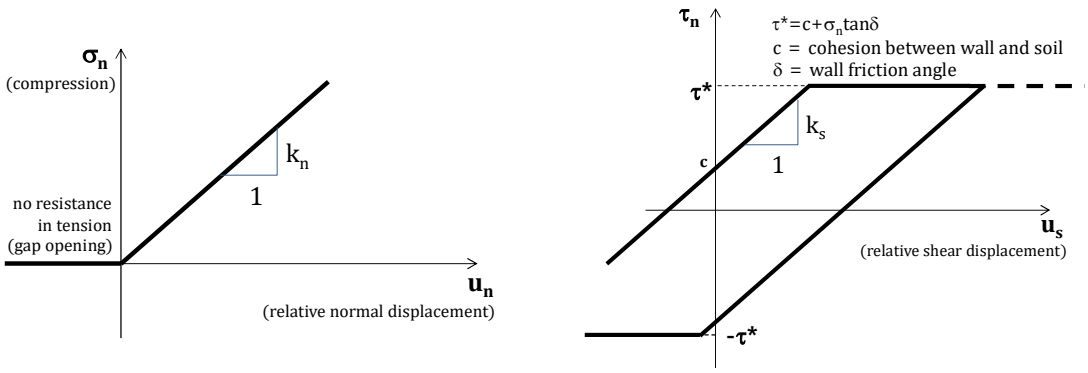
성을 적용하여야 하나, 이 경우 동해석의 시간적분간격이 '0'에 수렴하게 되어 해석이 불가능하다. 따라서, 경계요소에 접하는 두 재료의 강성의 함수로 자동산정되거나, 지반반력계수의 항으로 식 3-2와 같이 결정하는 방법이 일반적으로 통용된다.

$$k_n = k_s = 10 \times \max\left[\frac{\left(K + \frac{4}{3}G\right)}{\Delta z_{\min}}\right] \qquad \text{<식 3-2>}$$

여기서, k_n : 수직지반반력계수, k_s : 수평지반반력계수, $\Delta z_{\min}$경계면 인접요소의 수직방향 최소길이, K : 체적탄성계수, G : 전단탄성계수이다.

※ 실제, k_n, k_s는 수치적분시 수렴을 위한 가상의 요소강성으로, 경계요소 거동으로 인한 잔류변위의 크기는 점착력(c)과 경계면 마찰각(δ)에 의하여 결정됨(그림 3-10)

※ 실제 현상과 동일한 거동을 위해서는 k_n, k_s의 값이 크게 적용되어야 하나, 강성이 큰 k_n, k_s의 적용은 수치적분을 위한 한계시간간격이 감소하여 해석시간이 증가하므로, 식 <3-2>의 계산값을 적용함이 바람직함



(a) 경계면 수직방향 거동 (b) 경계면 전단방향 거동

<그림 3-10> 경계요소의 거동특성

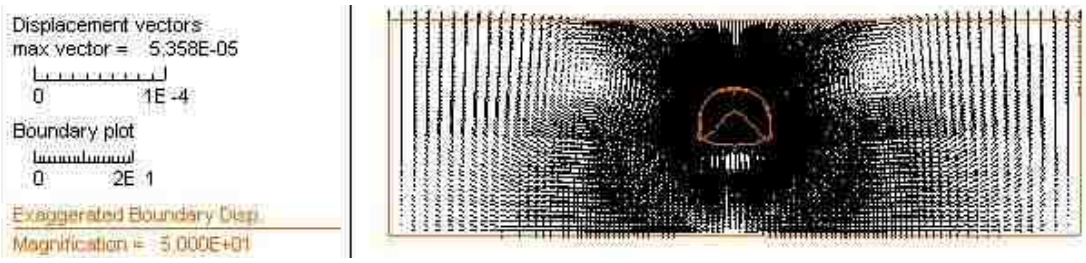
본 예제에서 적용된 경계요소의 입력변수는 아래와 같다.

<표 3-7> 경계요소의 입력변수

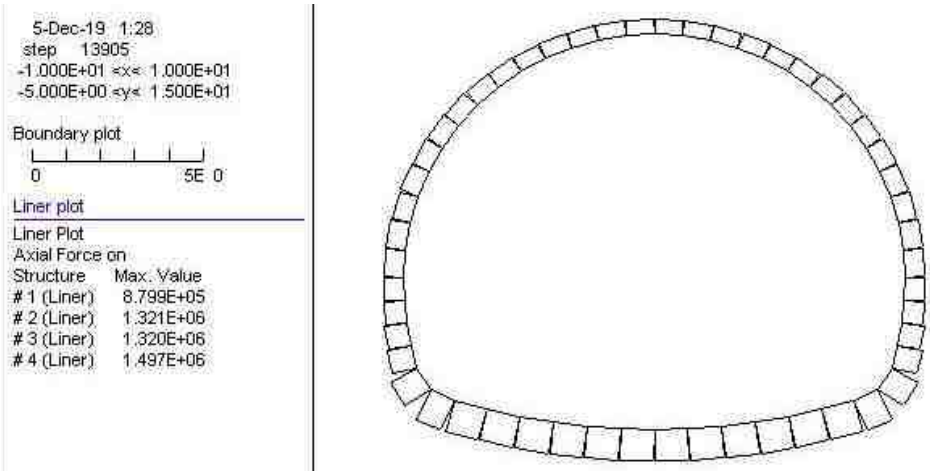
구 분	k_n (N/m^3)	k_s (N/m^3)	c (N/m^2)	δ (Deg)
입력값	3.28×10^{10}	3.28×10^{10}	0.0	40

나. 시공완료 단계 안정성 검토

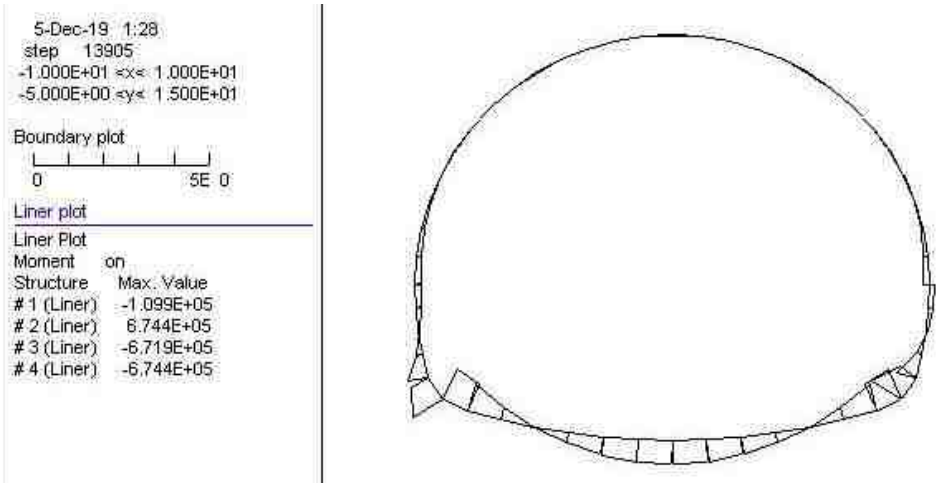
시공이 완료된 터널에 대해서 구조물의 최종변위 및 부재력 확인을 통해 수치해석모델링의 오류여부를 확인하여야 한다. 구조물의 변위는 통상적인 철근콘크리트 암거의 변위내에서 발생되어야 하며, 부재력은 탄성범위내 존재하여야 한다. 본 예제에서는 터널 구조물이 소성거동이 가능한 구조요소로 모델링 됨에 따라, 소성힌지 발생여부의 확인만으로 부재력에 대한 확인이 가능한 장점이 있다. 그림은 시공완료 후 최종변위 및 부재력의 분포를 나타내고 있다.



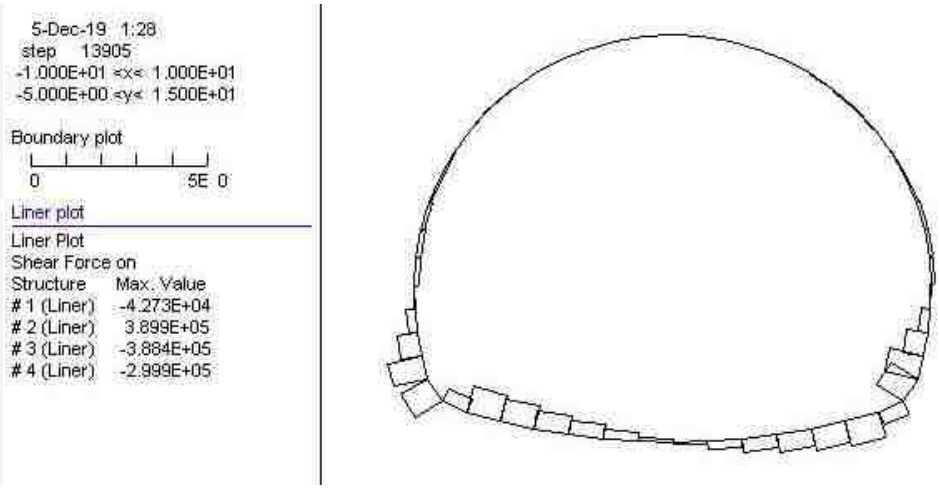
(a) 최대변위 : 5.35mm (터널 상단)



(b) 최대축력 : 1.497×10^{6} N



(c) 최대모멘트 : 6.744×10^5 N-m



(b) 최대전단력 : 3.899×10^5 N

<그림 3-11> 변위 및 부재력 확인결과 (상시 조건)

3.2.4 지진응답이력해석

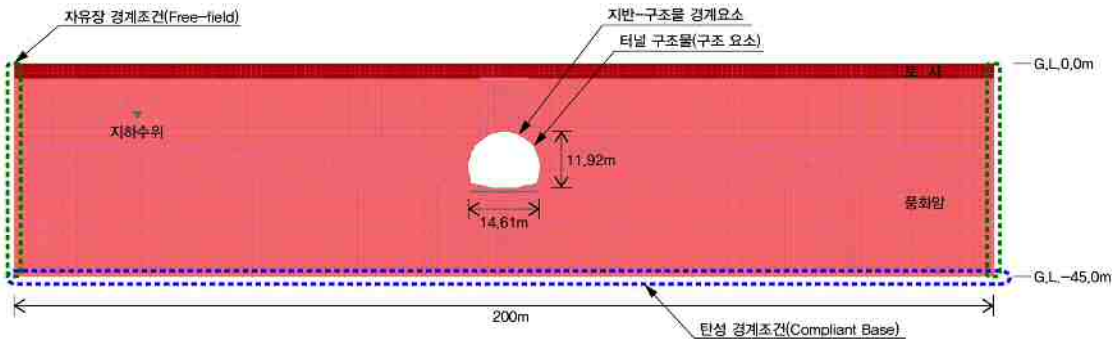
정적해석으로 현 상태 응력조건에 대한 평형해석 후, 지진하중에 의한 응답이력 해석을 시행한다. 응답이력해석에 사용되는 수치해석 프로그램이 갖추어야 할 필요조건은 다음과 같다.

가. 응답이력해석을 위한 필요조건

1) 동적 수치경계조건

· 수평경계조건

상향전파하는 지진파의 수평운동은 수평무한지반에서 구속되지 않아야 한다. 그러나, 수치해석모델링 과정에서 수평무한지반을 구성하는 것은 불가능함에 따라, 터널 구조물의 거동이 영향을 받지않는 거리까지 수치해석 모델을 구성하고 경계면에 수평운동을 흡수할 수 있는 경계요소를 적용하여야 한다. 본 예제에서 적용된 수치해석 프로그램에서는 자유장경계요소(Free Field Element)를 적용하였다. 사용된 자유장경계요소는 인접지반과 동일한 강성을 가지며 전달되는 수평응력을 100% 흡수할 수 있는 점성감쇠요소로 구성된다. (Lysmer and Kuhlemeyer, 1969)



<그림 3-12> 응답이력해석을 위한 경계조건

· 최하단 경계조건 (입력지진 경계조건)

지진응답해석은 연직상향전파되는 입사파(Incident Wave)에 의한 지반-구조물의 응답에 대한 해석이 이루어져야 한다. 그러나, 지표면 자유장에서 반사되어 하향전파되는 반사파(Reflected Wave)는 수치해석 모델의 최하단 경계에서 반사되어 입사파의 왜곡을 초래할 수 있으므로 수치해석과정에서 하향전파되는 반사파의 흡수·소멸이 반드시 이루어져야 한다. 이를 위한 방법은 아래와 표 3-8과 같이 두 가지 방법으로 구분되며, 각각의 경우 입력지진기록의 선정이 달리 이루어져야 한다. (그림 3-13)

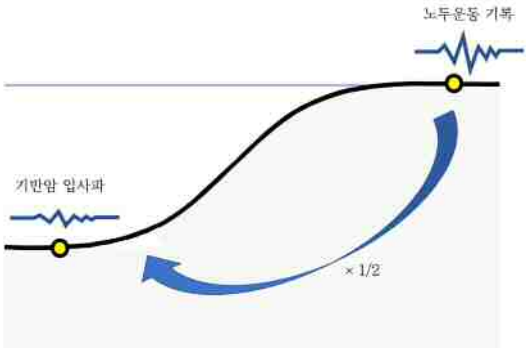
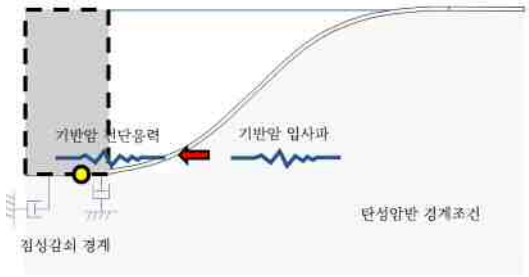
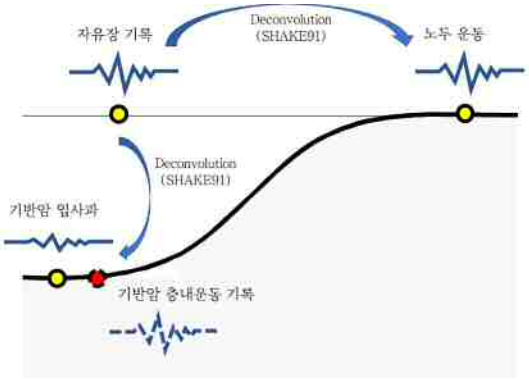
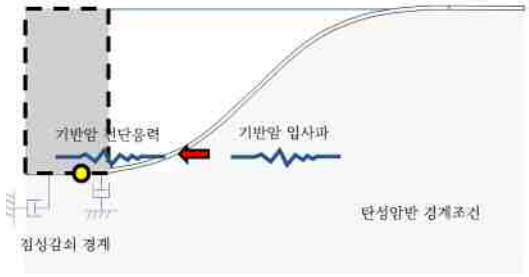
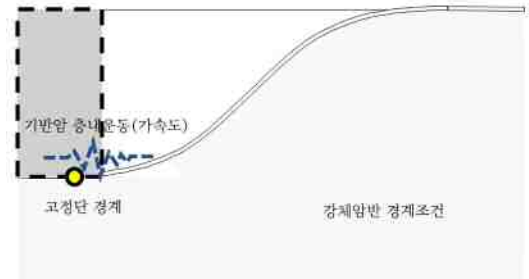
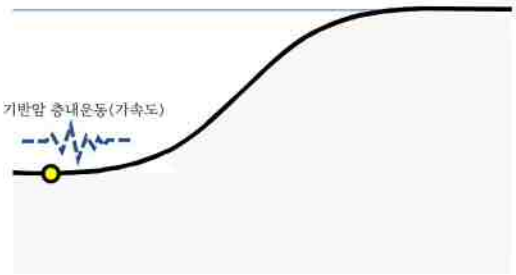
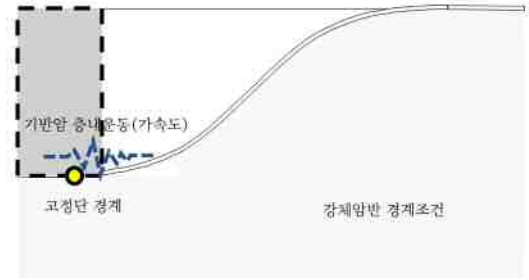
<표 3-8> 지진응답이력해석을 위한 최하단 경계조건

최하단 경계조건	반사파의 흡수	입력지진기록(형태)	입력지진기록(물리량)
점성감쇠(탄성)경계 (Compliant Base)	점성감쇠	입사파 (1/2 × 노두운동기록)	전단응력
강성경계 (Rigid Base)	입력지진기록에 의한 소멸 (수치해석 반사파 + 입력지진기록 반사파 = 0)	입사파 + 반사파 (층내운동 기록)	가속도

본 예제에서는 G.L. -45m 위치에 전단파속도 1381.98m/s 이상의 연암층이 확인되어, 입력지진기록은 S1지반의 설계응답스펙트럼에 상응하는 입력지진기록을 사용하였다. KDS 17 10 00에 따라 S_1지반의 설계응답스펙트럼은 보통암 자유장(노두) 지진기록에 대한 응답스펙트럼으로, 지진파의 자유장에서 입사파와 반사파의 크기는 동일하므로 입사파기록은 1/2을 취함으로 얻어질 수 있다. 따라서, 점성감쇠경계가 적용되어 가속도 지진기록은 아래의 식 3-3에 따라 전단응력기록으로 변환되어 수치해석에 적용하였다.

$$\tau(t) = 2(\rho v_s)\dot{u}(t) \qquad \text{<식 3-3>}$$

여기서, $\tau(t)$ 전단응력시간이력, ρ 매질의 밀도(가진위치), v_s 매질의 전단파속도(가진위치), $\dot{u}(t)$ 입력지진운동속도이력 이다.

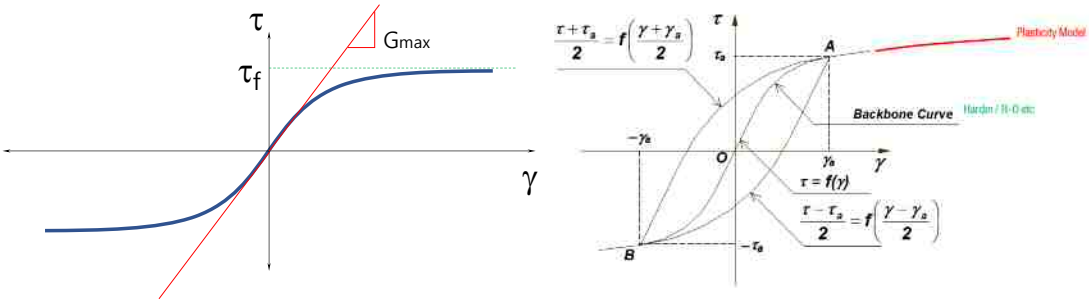
설계지진 기록	입력지진 경계조건
	
노두운동기록 → 기반암 입사파 도출	탄성암반 경계조건
	
	탄성암반 경계조건(기반암 입사파)
자유장 기록 → 노두운동 → 기반암 입사파 또는 자유장 기록 → 기반암 층내운동	
	강체암반 경계조건(기반암 층내운동)
	
기반암 층내운동	강체암반 경계조건(기반암 층내운동)

<그림 3-13> 설계지진기록 위치정의에 따른 입력지진 경계조건의 설정 방법

2) 지반의 구성모델

· 지반의 비선형 응력-변형율 거동모델

지진하중을 받는 지반의 전단변형율 영역에서 지반이 나타내는 비선형 응력-변형율 거동을 나타낼 수 있는 지반모델을 선정하여 응답이력해석에 적용하여야 한다. 수치해석 프로그램에 따라 지반의 비선형거동 및 이력감쇠(Hysteretic Damping)는 정규화전단탄성계수 감소곡선, 지반의 전단강도(τ_f)와 최대전단탄성계수(Gmax)를 이용한 쌍곡선 뼈대함수(Backbone curve, 그림 3-14 (a)) 또는 진보된 지반 구성모델을 적용하여 수치해석에 적용 할 수 있다. 대부분의 수치해석 프로그램에서 반복하중에 대한 이력감쇠는 뼈대함수로부터 Masing법칙(그림 3-14(b))이 적용되어 발생된다. 단, 진보된 지반 구성모델을 적용할 경우 모델변수 산정을 위한 별도의 노력(문헌, 지반조사)이 시행되어야 한다.



(a) 쌍곡선 뼈대함수의 구성 (b) Masing법칙

<그림 3-14> 동적하중에 대한 지반의 비선형 응력-변형율 거동

국내 설계에 적합한 지반의 G/Gmax곡선과 감쇠비 곡선은 시설안전기술공단의 “기존시설물(기초 및 지반)내진성능 평가요령”을 참조하는 것을 추천한다.

· 지반의 강성

지반의 비선형 응력-변형률 거동모델을 적용하기 위해서는 우선 풍화암 지반의 특성이 반영된 전단탄성계수 함수가 지반구성모델에 적용되어야 한다. 아울러, 지반의 비선형성 응력-변형율 거동에 미치는 영향을 무시할 수 없는 경우 이를 반영하여야 한다.

· **지반의 소성거동모델**

지반의 전단파괴 이후 소성거동에 대한 정의를 위하여 Mohr-Coulomb 모델 등의 소성거동모델을 적용하며, 이를 위한 지반의 전단강도정수를 결정하여 사용되어야 한다.

<표 3-9> 예제터널의 지층구분 및 지반정수

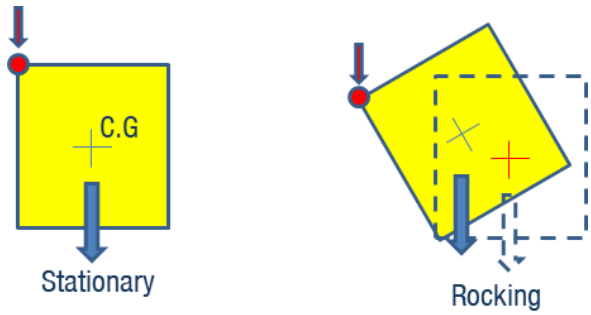
구 분	심도(m)	지반 종류	단위중량 (kN/m^3)	점착력 (kN/m^2)	내부마찰각 (Deg)
1	2.0	매립층	19	15	30
2	45.0	풍화암	21	50	45
3	50.0	연암	24	탄성	탄성

· 액상화 모델

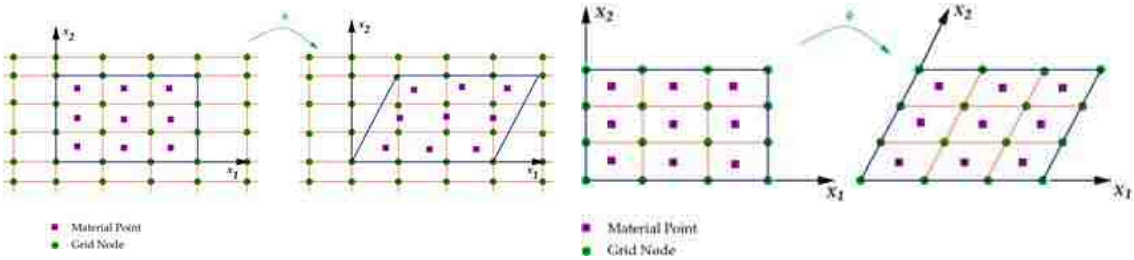
액상화 대상지반의 결정은 KDS 17 10 00또는 “기존시설물(기초 및 지반)내진성능 평가요령”을 참조하여 결정할 수 있다. 응답이력해석에서 액상화 대상지반을 고려하여야 하는 경우, 사용하는 수치해석 프로그램에서 제공하는 액상화모델을 적용하여 응답이력해석을 시행하여야 한다. 대표적인 액상화 모델은 Byrne모델(Byrne, 1991), PM4SAND(Boulanger and Ziotopoulou, 2017), UBC Sand(Byrne, 1995) 등의 액상화 거동모델이 있으며, 터널에서는 주로 지하수위가 높고 모래지반에 적용되는 하해저터널 등에서 국한적으로 적용될 수 있다.

· 기하학적 비선형 거동

지진응답이력해석 과정에서, 엄밀한 해석을 위해서는 수치해석 요소의 무게중심 변화에 따른 관성력변화가 고려되어야 한다. 이를 위해 해석시간에 따른 재료의 변형에 따른 무게중심의 변화가 고려되어야하며, 이는 수치해석에서 기하학적비선형(Geometric Nonlinearity) 또는 대변형해석(Large Strain Analysis)을 통해 구현될 수 있다. 이를 위해서 응답이력해석을 위한 수치해석 프로그램은 미소변형해석에 사용되는 Euler좌표계와는 달리, 응답이력해석과 같은 대변형 해석 시 Lagrangian좌표계를 적용하여야 한다. 본 예제에서는 「3.2.3 상시평형해석」 이후 지진응답이력해석 전 Lagrangian좌표계로 변환 후 지진응답이력해석을 시행하였다.



(a) 응답이력해석 시 무게중심 위치변화에 따른 관성력의 변화



(b) Euler 좌표계 (c) Lagrangian 좌표계

<그림 3-15> 기하학적 비선형(대변형)의 영향 및 좌표계의 영향

· 동적응답에 대한 감쇠모델

이력감쇠에 추가로 지반의 최소감쇠비와 구조물 감쇠비의 적용을 위한 인공감쇠비를 적용할 수 있다. 이때 사용가능한 대표적인 인공감쇠비는 Rayleigh감쇠이다. Rayleigh 감쇠를 정의하기 위한 중간주파수는 지반응답해석(SHAKE해석)을 이용하거나 수치해석 모델이 가지는 1차 공진주파수 식 3-4를 적용하여 추정할 수 있다.

$$f = \frac{\overline{V_s}}{4H}, \qquad \overline{V_s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{v_{si}}} \qquad \text{<식 3-4>}$$

여기서, n : 지반층의 개수, f : 1차 공진주파수, $\overline{V_s}$: 평균전단파 속도, H : 전체층의 두께, d_i : i번째 층의 두께, v_{si} : i번째 층의 전단파 속도

본 예제에서는 중간주파수 4Hz를 가지는 2% Rayleigh 감쇠를 적용하였다.

나. 입력지진기록의 결정

1) 지진하중 조합

내진성능 평가는 하중에 대한 불확실성이 존재하는 신설구조물이 아닌 기존구조물에 대해 시행됨에 따라, 수치해석 모델을 이용한 터널 구조물의 내진성능 평가는 두 가지 목표성능수준(기능수행, 붕괴방지)에 대해서 공히 실제하중에 대한 수치해석 모델 구성으로 시행한다. 단, 붕괴방지 수준의 지진에 대한 해석으로 기능수행수준의 목표달성 여부를 충분히 증명할 수 있는 경우, 기능수행 수준 지진에 대한 추가 검토는 생략할 수 있다.

2) 입력지진기록의 구성

입력지진기록은 실지진파를 설계응답스펙트럼에 대해서 스펙트럼 보정 후 Baseline Correction을 하여 적용토록 한다.

· 스펙트럼 보정

선정된 실지진파 기록이 설계응답스펙트럼을 만족시키기 위해 제안된 방법 중 푸리에 스펙트럼의 주파수대역 조정방법이 있다. (Rizzo et al., 1975; Silva and Lee, 1987) 그러나, 본 방법의 결과로 얻어진 속도, 변위기록에 과도한 에너지성분이 추가되는 단점이 보고되어(Naeim and Lew, 1995), 이를 해결하기 위하여 실지진기록 시간이력에 Wavelet을 추가하여 실지진기록을 보정하는 방법이 제안되었다. 본 방법은 원본지진기록이 가지는 비정상 지진특성을 훼손하지 않는 상태에서 에너지 변화를 최소화하는 장점을 가지고 있다. (Abrahamson, 1992). 본 방법을 적용한 최초의 스펙트럼 보정프로그램은 RspMatch2005이다. (Lilhanand and Tseng, 1987, 1988) Wavelet을 사용한 지진파의 보정을 위해서는 목표스펙트럼과 유사한 원본지진파를 사용하는 것이 가장 좋은결과를 도출할 수 있으며, 그렇지 않은 경우 보정과정의 수렴을 담보할 수 없는 단점이 있다. 본 예제에서는 이탈리아 Seismosoft사에서 개발된 Seismomatch Ver 2.1.2를 사용하여 Wavelet을 사용한 스펙트럼 보정을 실시하였다. (Seismosoft, 2019)

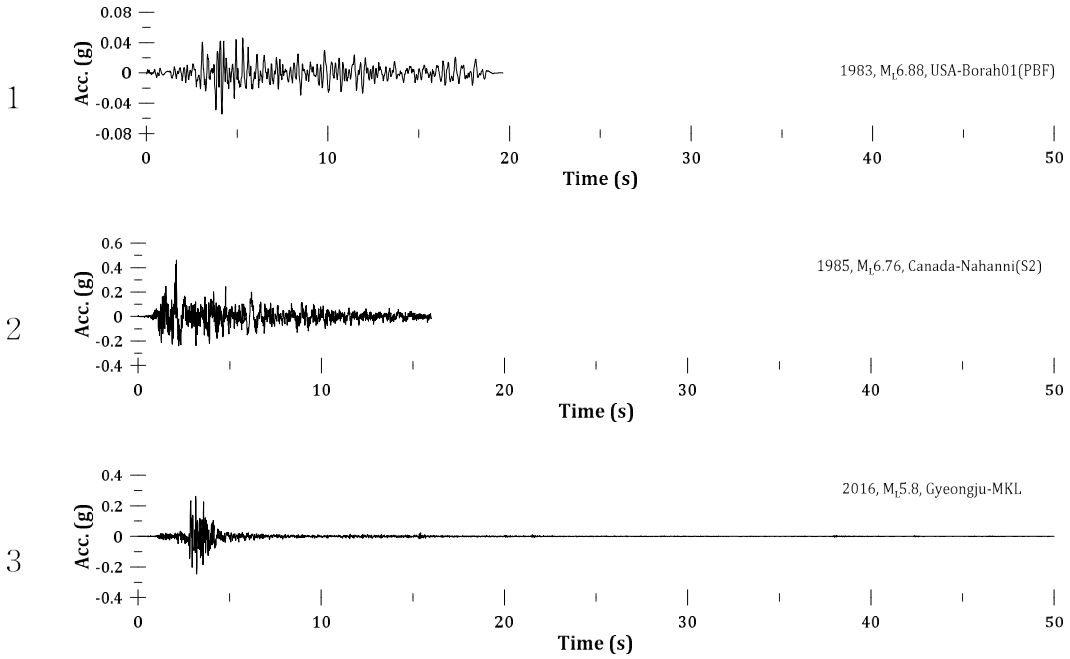
· 설계입력지진기록 군(群, BIN)의 구성

지진이 빈번한 대부분의 국가에서는 ASCE 기준(1개 기록 사용가능)을 제외하면 모두 설계스펙트럼을 만족시키는 3개 이상의 지진기록을 적용하여 그 결과의 최대값을 설계에 적용하며, 7개 이상의 지진기록을 사용 시 해석결과(구조물 응답)의 중간값을 적용할 수 있도록 규정하고 있다. 본 요령에서는 우리나라 및 국외 판 내부 지진계측 기록 중 3개의 지진기록을 선정하여 비선형응답이력 해석을 위한 군(群, BIN)을 구성하였다. 선정된 지진기록 군(群, BIN)은 서로 다른 지진이벤트로 구성되어 표 3-10과 같으며, 우리나라 경주과 외국의 판 내부 지진기록 2개로 구성된다. 선정된 지진기록은 모두 판 내부 지진기록으로의 유효성, 규모, 지진기록의 품질, 가속도, 지속시간 등을 종합적으로 고려하여 선정되었다. 본 보고서에서 선정된 지진기록 군이 향후 터널 구조물의 내진성능평가를 위한 절대적인 지진파의 조합을 의미하지는 않으며, 설계자는 경주 또는 포항지진기록 중 1개와 외국의 지진기록 중 규모 6.0 ~ 7.0의 실지진기록 2개를 선정하여 스펙트럼 보정 후 적용하는 것을 추천한다. 이때, 해석결과는 세 개의 지진파를 적용한 해석결과 중 최대값을 사용하여야 한다.

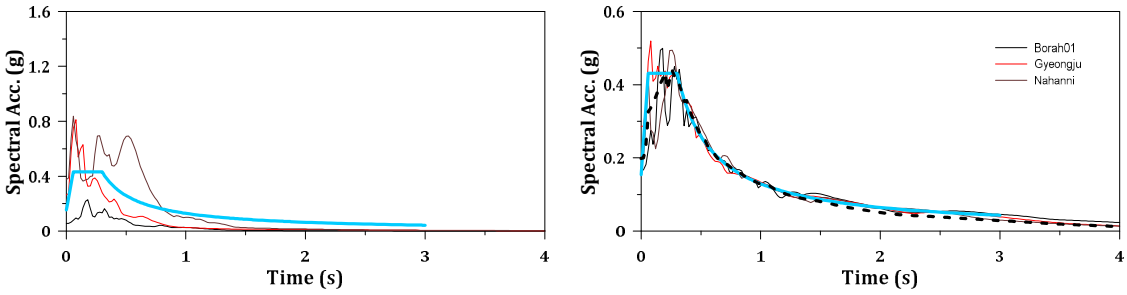
<표 3-10> 비선형응답이력 해석을 위한 실지진기록 군(群, BIN) (예)

No	Year	Magnitude (ML)	Epicentral Dist.(km)	PGA (g)	Event/Station/Country
1	1983	6.88	94.34	0.052	Borah01, PBF/America
2	1985	6.76	6.52	0.489	Nahanni, S2/Canada
3	2016	5.8	6	0.3497	Gyeongju/ MKL/Korea

본 예제의 1구역, S1지반 1등급 구조물에 대한 보정 전·후의 응답스펙트럼은 그림 3-17에 나타나 있다.



<그림 3-16> 비선형응답이력 해석을 위한 실지진 기록군(群, BIN)의 가속도 시간이력 (예)



(a) 스펙트럼 보정 전 (a) 스펙트럼 보정 후

<그림 3-17> 비선형응답이력 해석을 위한 실지진 기록군(群, BIN)의 스펙트럼 보정 전/후 응답스펙트럼

다. 해석결과

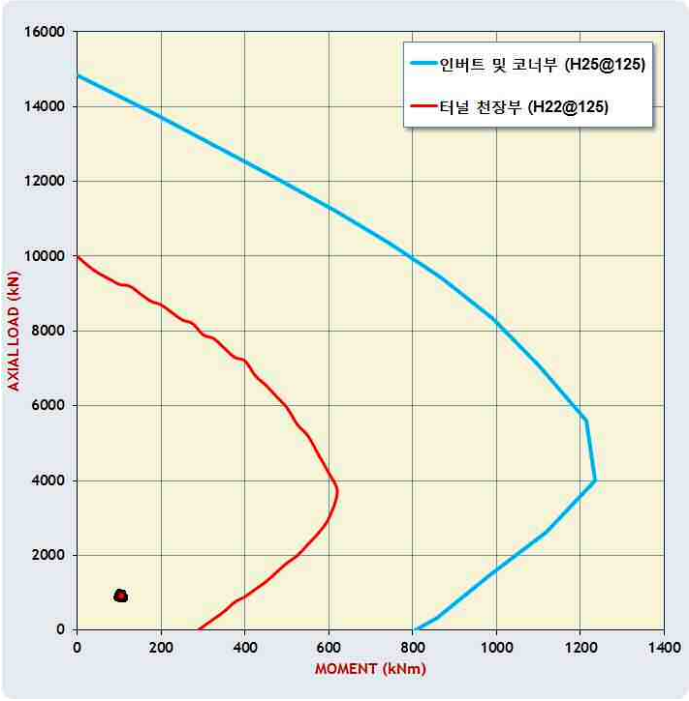
1) 붕괴방지 수준

앞에서 제시된 3개의 입력지진파에 대한 해석결과, 터널 구조물의 소성힌지 발생여부는 그림 3-18 ~ 20과 같이 확인 가능하다. 3개의 지진파에 대한 해석결과 공히 소요강도가 평가내하력을 이내로 소성힌지가 발생하지 않았다. 터널 하부 인버트구간에 대한 성능곡선 검토결과, 지진하중 재하시간 중 평가내하력을 만족하여 소성힌지가 발생하지 않음을 알 수 있다.

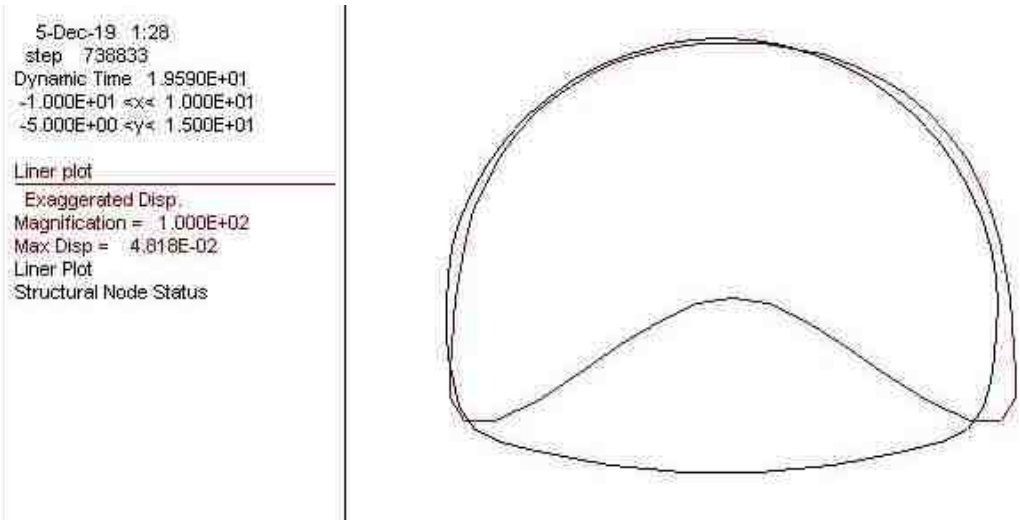
붕괴방지수준에서 힌지 발생여부를 확인한 결과, 발생하지 않으므로 안정성을 확보한 것으로 판단할 수 있다. 단 설계자의 판단에 따라서 지진으로부터 취약한 위치를 중심으로 보강을 고려하는 것이 바람직하다.

또한 본 예제해석 결과, 소성힌지의 발생이 최종적으로 구조물의 붕괴를 야기하지 않아 내진성능평가의 성능목표인 붕괴방지 수준을 만족시킴을 확인하였다. 여기서, 적용된 구조물의 평가내하력은 현장측정결과가 아닌 설계강도와 구조상태계수로 부터 도출된 것으로 엄밀한 판정을 위해서는 현장강도 측정과 우각부의 휨 변형에 대한 저항을 고려하여 최종평가 및 보강방안을 확정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

터널구조물의 전단력에 대한 평가내하력 및 평가결과는 표 3-11과 같으며, 응답이력해석으로 얻어진 터널 구조물의 최대전단력 분포는 그림 3-21과 같다. 그림 3-21의 최대전단력은 특정시점의 결과가 아닌, 전체해석시간 중 위치별 최대전단력의 절대값을 도시한 결과이다. 평가결과, 터널 구조물 전체단면에 대해서 전단철근 보강 없이 안전함을 알 수 있다.

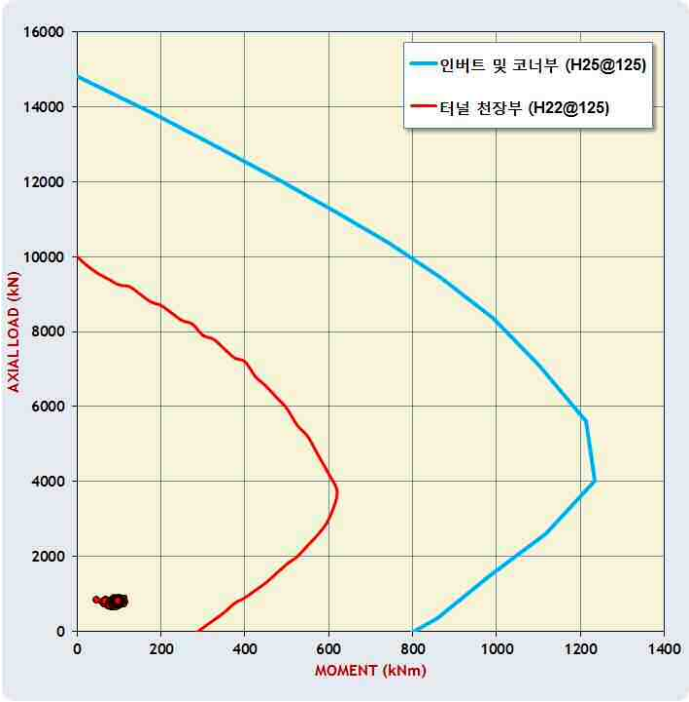


(a) 성능곡선 (터널 하부 인버트구간)

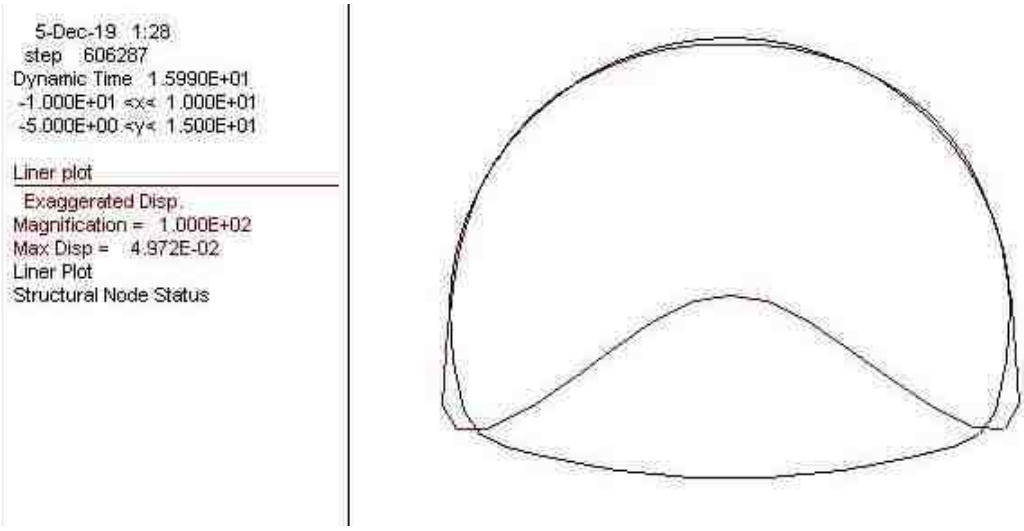


(b) 구조물 변형형상 및 소성힌지 위치 (미발생)

<그림 3-18> 붕괴방지 수준 해석결과 (Borah Peak 지진)

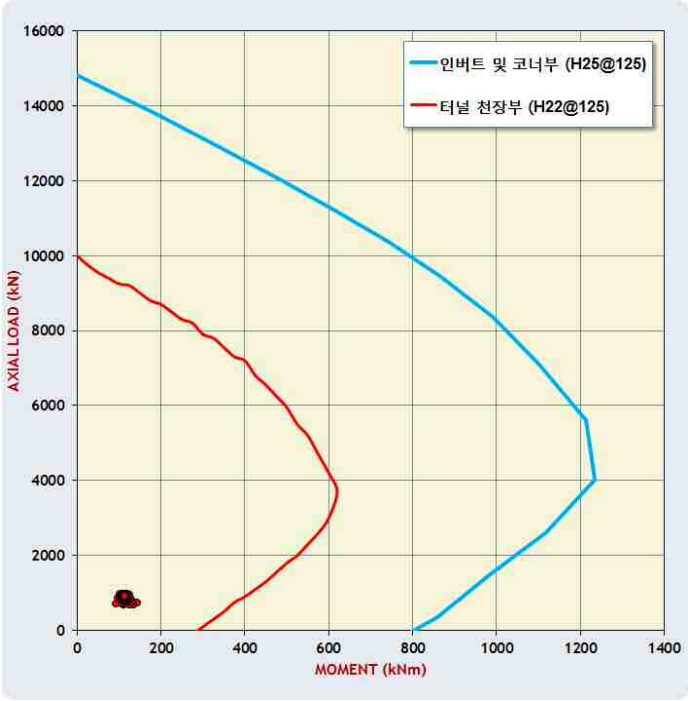


(a) 성능곡선 (터널 하부 인버트구간)

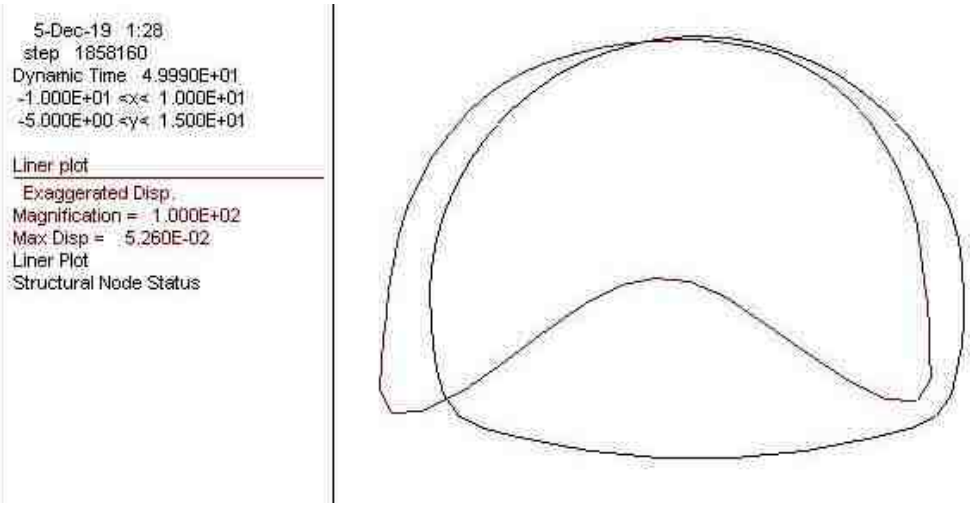


(b) 구조물 변형형상 및 소성힌지 위치 (미발생)

<그림 3-19> 붕괴방지 수준 해석결과 (Nahanni 지진)

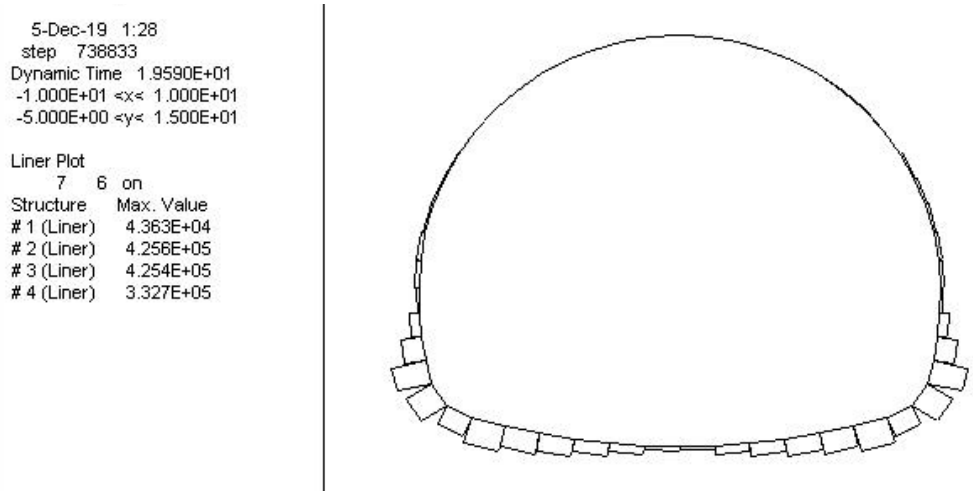


(a) 성능곡선 (터널 하부 인버트구간)

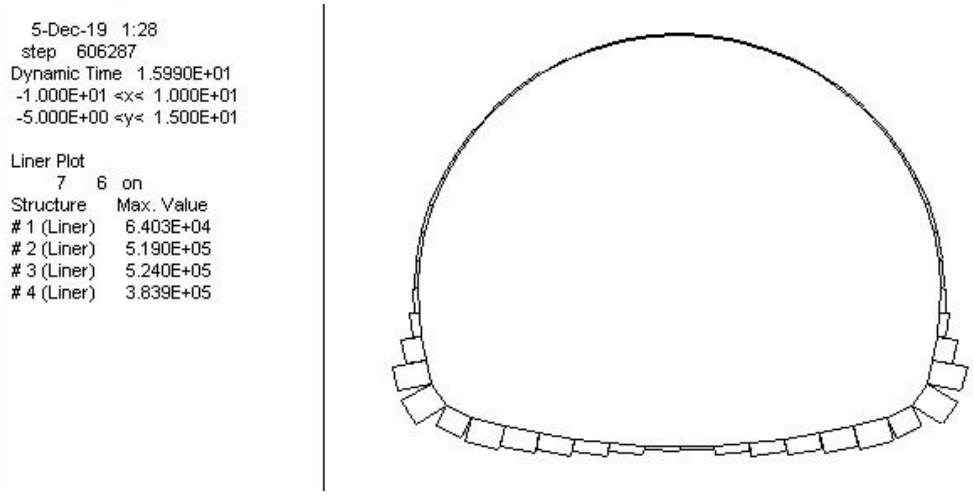


(b) 구조물 변형형상 및 소성힌지 위치 (미발생)

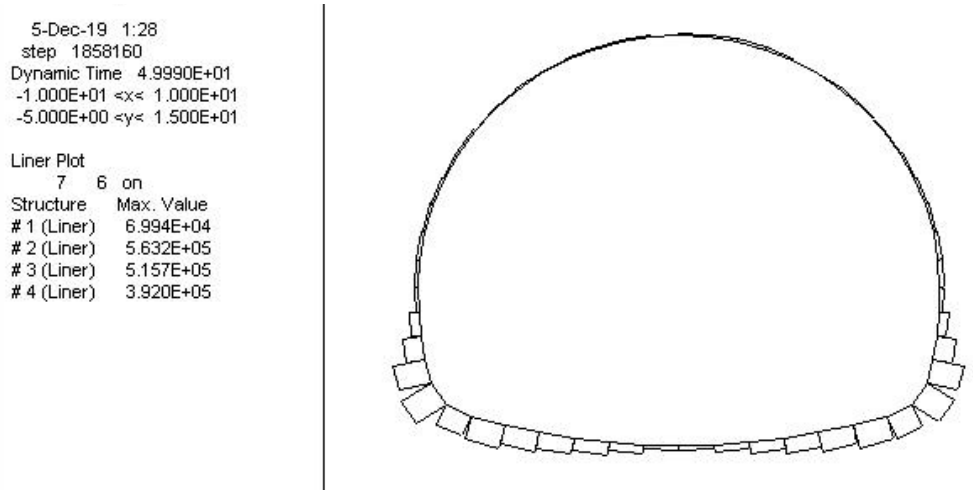
<그림 3-20> 붕괴방지 수준 해석결과 (경주지진)



(a) Borah Peak 지진



(b) Nahanni 지진



(c) 경주지진

<그림 3-21> 지진하중 재하 중 최대전단력 분포도 (절대값, N/m)

<표 3-11> 붕괴방지 수준 지진에 대한 전단력평가결과

	소요전단강도 (kN/m)			평가내하력, ϕV_c (kN/m)	판정
	Borah Peak	Nahanni	경주		
터널 천장부	43.6	64.0	69.9	330	OK
인버트 및 코너부	425	524	563	1,676	OK

2) 기능수행 수준

예제 터널 구조물의 기능수행수준 지진력에 대한 성능평가결과는 붕괴방지수준에 대한 평가절차와 동일하다. 우선, 붕괴방지수준에서의 발생되는 성능을 확인한 후에 불만족하는 경우에 기능수행수준에 대한 해석을 시행하도록 한다. 수행방법은 앞서 제시된 3개의 입력지진파에 대해서 기능수행수준(재현주기 100년)의 설계응답스펙트럼에 대한 스펙트럼보정 후 이를 입력지진으로한 해석을 수행하여야 한다. 또한 3개의 지진파에 대한 해석결과 모두 평가내하력이 소요강도를 상회하여 소성힌지가 발생하지 않음을 확인하여야 한다. 이는 모든 구조부재가 지진 중 탄성영역내 거동을 보임으로 기능수행 수준을 만족한다고 할 수 있다.

부록 B

내진점검표

□기본자료

1) 일반사항	(1)사업명			(2)구조물명		
	(3)위치			(4)관리주체		
	(5)길이(m)			(6)높이(m)		
	(7)폭(m)			(8)구조형식		
	(9)준공년도			(10)준거 설계기준 또는 시방서		
	(11)시공방법 및 형태			(12)노면 활하중		
	(13)설계도서 보관여부			(14)내진설계 유무		
	(15)중요부착시설물			(16) 상태등급		
	(17)보수・보강이력					
	(18)기타*					
2)지진 특성	(1)지진구역		(2)내진성능 목표		(3)지반분류	

* 지진외적인 보수・보강계획, 지진외적인 사용목표수명, 사회, 경제, 행정적인 고려사항 등 특이사항을 기입한다.

주) 첨부자료 : 설계도면(종단면도, 평면도, 횡단면도, 지반지질도, 상세도 등)

□구조일반자료

점검단면	-

(주요 단면별로 작성한다.)

3) 구조물

(1)구체강도(MPa)		(2)철근강도(MPa)	

(3)우각부	위치	
	피복(mm)	
	철근 직경, 간격, 개수	
	배근방법	
(4) 측벽 및 슬래브, 라이닝	위치	
	피복(mm)	
	철근 직경, 간격, 개수	
	배근방법	
(5)기둥	형태	
	높이(m)	
	지름(폭, m)	
	피복(mm)	
	철근비	
	철근 직경, 간격, 개수	
	배근방법	
	심부구속철근	
(6)지반	액상화 가능성	
	지반분류, 연암층까지의 깊이	
	지하수 위치	
(7)현장조사 상태평가		

내진점검표 작성지침서

□기본자료

1) 일반사항

(1)사업명		(2)구조물명	
(3)위치		(4)관리주체	
(5)길이(m)		(6)높이(m)	
(7)폭(m)		(8)구조형식	
(9)준공년도		(10)준거 설계기준 또는 시방서	
(11)시공방법 및 형태		(12)노면 활하중	
(13)설계도서 보관여부		(14)내진설계 유무	
(15)중요부착시설물		(16) 상태등급	
(17)보수・보강이력			
(18)기타*			

* 지진외적인 보수・보강계획, 지진외적인 사용목표수명, 사회, 경제, 행정적인 고려사항 등 특이사항을 기입한다.

1)-1. 사업명

사업명은 해당 사업에 부여하는 고유이름이며, 사업명은 명확히 구분되도록 작성한다.

기입예 : 사업명이 '서울지하철 1호선' 인 경우 (왼쪽부터 기입함)

(1) 사업명	서울 지하철 1호선

1)-2. 구조물명

구조물의 명칭을 적는다.

기입예 : 구조물이 '시청' 인 경우 (왼쪽부터 기입함)

(2) 구조물명	시청

1)-3. 위치

위치를 한글과 숫자로 기입한다.

기입예 :

▶ 부산광역시 기장군 기장읍 기장1리

(3) 위치	부산-기장-기장-기장1

주) 위치는 행정구역에 따라 시(도), 구(시, 군), 동(읍, 면), 리(동)으로 구분되며 각 2자리, 4자리, 4자리, 5자리로 기입한다. 기입시 행정지역 단위 즉, 시, 도, 군, 읍, 면, 구 등의 글자는 생략한다.

1)-4. 관리주체

해당 구조물을 관리하고 있는 주체를 기입한다.

기입예 : 관리기관이 서울특별시 도시철도공사 인 경우

(4) 관리주체	서울특별시 도시철도공사

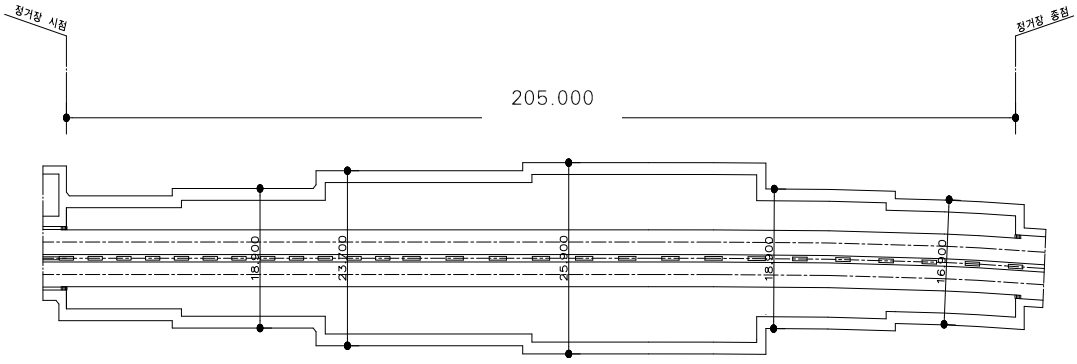
1)-5. 길이

지하 정거장인 경우 정거장 총길이, 본선 또는 기타의 경우 적용구간 길이를 기입한다.

기입예 : 정거장 길이가 165m인 경우

(5) 길이(m)	165.00

※주 : 1) 정거장의 경우 정거장 시점에서 정거장 종점까지의 거리를 길이로 산정한다.
2) 본선의 경우 본선 시점에서 본선 종점까지의 거리를 길이로 산정한다.



<정거장 종평면도>

1)-6. 높이

대상 구조물의 단면 Type중 가장 높은 높이와 가장 낮은 높이를 기입하고 본선 또는 기타의 경우 구조물 높이를 기입한다.

기입예 : 단면 중 가장 큰 높이가 23.6m이고 가장 작은 높이가 11.9m인 경우

(6) 높이(m)	23.60 / 11.90

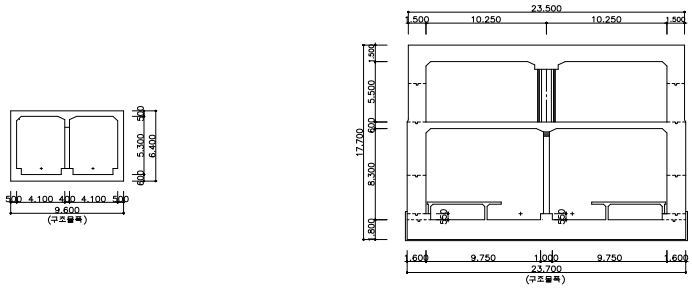
1)-7. 폭

대상 구조물의 단면 Type중 가장 큰 폭과 가장 작은 폭을 기입하고 본선 또는 기타의 경우 구조물 폭을 기입한다.

기입예 : 단면 중 가장 큰 폭이 10.5m이고 가장 작은 폭이 7.9m인 경우

(7) 폭(m)	10.5 / 7.9

주) 구조물 폭은 하면의 최대길이를 폭으로 산정한다.



<정거장 단면도>

1)-8. 구조형식

구조물의 형식을 본선, 정거장, 본선환기구, 터널 등으로 구분하여 기입한다.

기입예 : 정거장 인 경우

(8) 구조형식	정거장

1)-9. 준공년도

준공된 년도를 기입한다. 준공년도가 미상인 경우에는 8888을 기입한다.

기입예 : 1995년에 준공된 경우

(9) 준공년도	1995

1)-10. 준거 설계기준 또는 시방서

설계 및 시공시 적용한 설계기준 또는 시방서를 기입한다.

기입예 : 2007년 건설교통부제정 콘크리트 구조설계기준에 의거 설계된 경우

(10) 준거시방서	콘크리트 구조설계기준 - 07

※주 : 1) 한글 또는 영문 10자 이내로 시방서의 이름과 발간년도를 기입한다.
2) 설계와 시공 시에 시방서가 다를 경우 설계 시의 시방서를 기입한다.
3) 설계 및 시공 시에 사용한 시방서를 파악할 수 없을 경우에는 '미상'을 기입한다.

1)-11. 시공방법 및 형태

개착식과 비개착식을 구분하며, 정거장의 경우 섬식과 상대식으로 구분되며 그 내용을 기입한다.

기입예 : '개착식'이며, 상대식 정거장인 경우

(11) 형태	개착(상대식)

1)-12. 노면 활하중

설계 당시의 설계 노면 활하중을 기입한다.

기입예 : 노면 활하중이 DB24인 경우

(12) 노면 활하중	DB24

1)-13. 설계도서 보관여부

현재 보관된 설계도서의 여부를 표시한다.

내진성평가를 위하여 필요한 설계도서의 코드는 다음과 같다.

구분	코드	구분	코드
준공도면	1	보수·보강 도면 및 계산서	5
구조계산서	2	시공이력	6
토질조사보고서	3	기타	9
안전점검 및 정밀안전진단 보고서	4		

기입예 : 현재 준공도면 및 구조계산서만 보관되어 있는 경우

(13) 설계도서 보관유무	1, 2

1)-14. 내진설계 유무

해당 구조물의 설계 시 지진에 대비한 내진설계의 적용여부를 기입한다.

코드 자리수 : 1자리

구분	코드
적용하지 않음	0
적용함	1
미상	8

기입예 : 설계 시 내진설계를 적용하였다.

(14) 내진설계 유무	1

1)-15. 중요부착시설물

주요시설물이 부착되어 있는 경우 다음코드에 따라 기입한다.

코드	부착시설물	코드	부착시설물
0	없음	4	전력케이블
1	상수도	5	각종용수
2	하수도	6	송유관
3	통신케이블	9	기타

기입예 : 광통신케이블이 가설된 경우

(15)중요부착시설물	3

1)-16. 상태등급

점검 또는 진단에서의 구조물의 상태등급을 A등급~E등급으로 수행년도와 함께 기입한다.

기입예 : 2005년 정밀안전진단에서 상태등급이 B등급인 경우

(16) 상태등급	B등급 - 05 - 진단

1)-17. 보수・보강이력

보수・보강이력을 기록한다.

기입예 : 95년에 방수보강을 시공한 경우

(17) 보수・보강이력	방수보강 - 95

1)-18. 기타

지진외적인 보수・보강계획, 지진외적인 사용목표수명, 사회, 경제, 행정적인 고려사항등 특이사항을 기입한다.

기입예 : 2002년 환기실 확장계획, 사용목표수명: 20년 인 경우

(18) 기타*	2002년 환기실 확장계획 사용목표수명 : 20년

2) 지진특성

2)지진 특성	(1)지진 구역		(2)내진성능 목표		(3)지반 분류	

2)-1. 지진구역

1-2의 대상교량의 위치에 따른 지진구역 코드는 다음과 같다

코드	지진구역	행정구역	
1	I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종
		도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부[1]
2	II	도	강원 북부[2], 제주

※주:

[1] 강원 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백

[2] 강원 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

기입예 : 해당 구조물 위치가 서울특별시인 경우 다음과 같이 기입한다.

(1) 지진구역	1

2)-2. 내진성능목표

지중구조물은 지진시 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분하며 등급코드는 다음과 같다.

코드	성능수준	대상내용
1	기능수행수준	설계지진하중 발생 후 지중구조물이 원래의 기능을 유지하는 범위내에서 부분적 경미한 피해는 허용하나, 전체적인 붕괴는 허용하지 않는 수준이다.
2	붕괴방지수준	설계지진하중 발생 후 지중구조물에 붕괴가 발생하지 않는 정도의 제한적인 구조적 피해는 허용되나 구조물의 전체적인 붕괴는 허용하지 않고 긴급보수를 통해 구조물의 기능을 회복할 수 있는 수준이다.
3	기능 및 붕괴방지 수준	-
8	해당없음	

기입예 : '붕괴방지수준에 만족되도록 설계' 인 경우

(2) 내진성능목표	2

2)-3. 지반분류

대상구조물의 기초지반에 특성에 따라 지반분류는 다음과 같은 코드로 구분할 수 있다.

코드	지반 분류	지반분류의 호칭	분류기준	
			기반암 깊이, H (m)	토층 평균전단파속도, $V_{s,soil}$ (m/s)
1	S_1	암반 지반	1 미만	-
2	S_2	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
3	S_3	얕고 연약한 지반		260 미만
4	S_4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
5	S_5	깊고 연약한 지반		180 미만
6	S_6	부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 요구되는 지반		

주: 1) 기반암(Bed rock)은 전단파속도가 760 m/s 이상인 지층으로 정의한다.

2) 토층의 평균전단파속도($V_{s,soil}$)는 탄성파시험 결과가 있을 경우 이를 우선적으로 적용한다.

3) 기반암 깊이와 무관하게 토층 평균전단파 속도가 120 m/s 이하인 지반은 S_6 지반으로 분류한다.

기입예 : 해당 구조물의 지반이 암반지반에 위치하므로 다음과 같이 기입한다.

(3) 지반분류	1

□구조일반자료

3) 구조물

(1)구체강도(MPa)		(2)철근강도(MPa)	

(3)우각부	위치	
	피복(mm)	
	철근 직경, 간격, 개수	
	배근방법	
(4) 측벽 및 슬래브, 라이닝	위치	
	피복(mm)	
	철근 직경, 간격, 개수	
	배근방법	
(5)기둥	형태	
	높이(m)	
	지름(폭, m)	
	피복(cm)	
	철근비	
	철근 직경, 간격, 개수	
	배근방법	
	심부구속철근	
(6)지반	액상화 가능성	
	지반분류, 연암층까지의 깊이	
	지하수 위치	
(7)현장조사 상태평가		

3)-1. 구체강도

해당 구조물의 코어강도, 비파괴시험, 구조계산서, 도면 등을 이용하여 구조물 구체의 강도를 기입한다.

기입예 : 구조물의 콘크리트 설계기준강도가 27.0MPa인 경우

(1)구체강도(MPa)	27.0

3)-2. 철근강도

사용철근의 구조계산서, 도면등을 이용하여 철근의 항복강도를 기입한다.

기입예 : 철근의 설계기준강도가 400.0MPa인 경우

(2)철근강도(MPa)	400.0

3)-3. 우각부

① 위치

우각부의 위치를 기입한다. (상부, 하부)

② 피복두께

철근 최외단부터 노출면까지의 두께를 mm단위로 기입한다.

③ 철근직경, 간격, 개수

우각부에 보강된 철근직경 및 간격, 개수를 기입한다.

④ 배근방법

철근의 배근방법을 기입한다.

기입예 : 정거장 우측 상부의 우각부, D29 125mm간격 2단배근인 경우

(3) 우각부	위치	우측상부
	철근직경 및 간격, 개수	D29 - 125 - 8
	배근방법	2

3)-4. 측벽 및 슬래브, 라이닝

① 위치

우각부의 위치를 기입한다. (상부, 하부)

② 피복두께

철근 최외단부터 노출면까지의 두께를 mm단위로 기입한다.

③ 철근직경, 간격, 개수

우각부에 보강된 철근직경 및 간격, 개수를 기입한다.

④ 배근방법

철근의 배근방법을 기입한다.

기입예 : 슬래브 및 측벽이 D29 125mm간격 2단배근인 경우

(4) 슬래브 및 측벽	위치	슬래브, 측벽
	철근직경 및 간격, 개수	D29 - 125 - 8
	배근방법	2

3)-5. 기둥

① 형태 코드명 앞자리에 기둥의 형태를 기입한다.

코드	형식
1	원형
2	구형
3	다각형
4	타원형
8	기 타

② 높이

헌치부를 제외한 기둥의 높이를 기입한다.

③ 폭(지름)

기둥의 제원을 기입한다.

④ 피복두께

철근 최외단부터 노출면까지의 두께를 mm단위로 기입한다.

⑤ 철근비

⑥ 철근직경, 개수

기둥의 철근직경, 개수를 기입한다.

⑦ 배근방법

철근의 배근방법을 기입한다.

⑧ 심부구속철근

심부구속철근의 철근량과 간격을 기입한다.

기입예 : 구형이며 기둥의 높이 8m, 단면형상이 각각 0.4m, 2.5m, 피복두께 8.0cm , 철근비 1.0%, 1단으로 D32-40, 심부구속철근량 12.00㎠, 간격은 15cm인 경우

(5) 기둥	형태	2
	높이(m)	8
	지름(폭,m)	0.4 - 2.5
	피복두께(mm)	80.0
	철근비	1.0
	철근직경, 개수	D32 - 40
	배근방법	1
	심부구속철근	12.00 - 15.00

기존 시설물(터널) 내진성능 평가요령

승인 국토교통부 시설안전과
발행 한국시설안전공단

2004년 5월 제정
2011년 7월 개정
2020년 6월 개정

* 본 요령의 내용에 관한 질의 및 건의 사항은 국토교통부 시설안전과 및 한국시설안전공단으로 연락하여 주시기 바랍니다.

한국시설안전공단 (http://www.kistec.or.kr)
(우) 52856 경상남도 진주시 에나로 128번길 24 대표전화 1588-8788

본 요령의 내용은 공단 홈페이지에서 다운로드 받으실 수 있습니다.