발간등록번호
11-B552016-000009-01

기존 시설물(터널) 내진성능 평가 및 향상요령

2011. 7.

국 토 해 양 부
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs

한국시설안전공단

기존 시설물(터널) 내진성능

평가요령

2011. 7.

국 토 해 양 부
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs

한국시설안전공단

차 례

제 1 장 총 칙 ····· 1
1.1 일반사항 ····· 1
1.2 요령의 구성 ····· 3
1.3 용어의 정의 ····· 4

제 2 장 내진성능 평가기준지진과 평가절차 ····· 11
2.1 일반사항 ····· 11
2.2 설계지반운동 ····· 12
2.3 소요내진성능 ····· 17
2.4 내진성능 평가절차 ····· 21

제 3 장 내진성능 예비평가 ····· 23
3.1 일반사항 ····· 23
3.2 자료조사 및 정리 ····· 23
3.3 평가기준 ····· 24
3.4 평가방법 ····· 25

제 4 장 내진성능 상세평가 ····· 33
4.1 일반사항 ····· 33
4.2 평가기준 및 성능수준별 하중조합 ····· 36
4.3 내진안정성 평가방법 ····· 37

제 5 장 내진성능 평가보고서 구성 ····· 61
5.1 문장 및 보고서의 작성 ····· 61
5.2 현황보고서 구성 ····· 62
5.3 예비평가 보고서 ····· 62
5.4 상세평가 보고서 ····· 62

□ 부 록
A. 내진성능 평가 예제(본선박스, 2층 정거장)
B. 내진안정성 평가방법에 따른 결과 비교(개착식 터널, 굴착식 터널)
C. 내진점검표

<표차례>

해설표 2.2.1 지진구역 구분 ····· 13
해설표 2.2.2 지진구역계수(재현주기 500년에 해당) ····· 13
해설표 2.2.3 지진 위험도계수 ····· 13
해설표 2.2.4 지진계수 C_a와 C_v ····· 13
해설표 2.2.5 지반의 분류 ····· 14
해설표 2.2.6 기반면의 설계수평가속도 ····· 15
해설표 2.2.7 지표면의 설계수평가속도 ····· 15
해설표 2.2.8 구조물별 내진등급 ····· 17
해설표 2.2.9 내진성능 목표 (붕괴방지수준) ····· 18
해설표 2.2.10 수명비에 따른 내진등급 평가기준지진의 평균재현주기 ····· 19
해설표 2.2.11 선형보간에 의한 지진 위험도계수(I) ····· 19
해설표 2.2.12 수명비에 따른 지진위험도 계수(I) ····· 19
해설표 2.2.13 지진구역 I 에서의 내진성능 평가기준지진 가속도계수(A) ····· 20
해설표 2.2.14 지진구역 I, II에서의 내진성능 평가기준지진 가속도계수(A) ····· 20
해설표 3.4.1 지진도 등급 기준 ····· 25
해설표 4.1.1 붕괴방지수준에서의 응답수정계수(R) ····· 34

<그림차례>

해설그림 2.2.1 심도에 따른 설계수평가속도 ····· 15
해설그림 2.2.2 표준설계응답스펙트럼(감쇠비 5%) ····· 16
해설그림 2.4.1 내진성능 평가절차 ····· 21
해설그림 3.4.1 내진그룹화 방법 ····· 31
해설그림 4.3.1 응답변위법의 개념도 ····· 37
해설그림 4.3.2 응답변위법의 해석절차 ····· 38
해설그림 4.3.3 단일코사인, 이중코사인 이론을 이용한 지중변위 산정법 ····· 40
해설그림 4.3.4 기반암 설계속도응답스펙트럼 ····· 41
해설그림 4.3.5 지반반력 탄성계수 산정을 위한 유한요소모델 ····· 43
해설그림 4.3.6 구체에 작용하는 지진시 하중 ····· 47
그림 4.3.1 구체에 작용하는 상시하중 ····· 48
그림 4.3.2 구체에 작용하는 지진시 토압하중 ····· 48
그림 4.3.3 구체에 작용하는 지진시 주면전단력 ····· 49
그림 4.3.4 구체에 작용하는 지진시 관성력 ····· 49
그림 4.3.5 단면의 모형화 ····· 51
그림 4.3.6 지진시 단면력 ····· 52
그림 4.3.7 이음에 의한 지진시 단면력의 저감계수 ····· 54
해설그림 4.3.7 응답진도법의 개념도 ····· 56
해설그림 4.3.8 2차원 정적 유한요소모델 및 자유장 모델 ····· 57
해설그림 4.3.9 주동쐐기에 작용하는 힘의 도식도 ····· 60

제 1 장 총 칙

1.1 일반사항

1. 본 내진성능 평가요령은 개착 또는 비개착 공법으로 건설된 지중구조물, 지중과 지상의 경계부인 U-Type 구조물 및 옹벽구조물에 대하여 적용한다.

[해설] 본 요령은 개착 또는 비개착 공법으로 지중에 건설된 터널 구조물의 내진성능 평가에 적용한다. 개착식 터널의 본선 및 정거장 구조물, 굴착식 터널(도로 및 철도터널) 등에 적용하며, 기타 공동구 및 지하차도, 복개구조물 등의 내진성능 평가에도 본 요령을 준용하여 적용할 수 있다. 또한 지중과 지상의 경계부인 U-Type 구조물 및 옹벽구조물도 적용 가능하다.

2. 내진성능 평가방법은 응답변위법을 기본으로 하고 응답진도법 또는 동적해석법은 제한된 경우에 한해서 적용하는 것을 원칙으로 한다.

[해설] 본 요령에서는 내진성능 평가를 위하여 가능하면 간단한 평가식 또는 실험식 등을 이용하도록 하고 있다. 따라서, 지진시 터널 구조물과 지중에 건설된 구조체의 경우 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석이 필요하지만 이 해석방법이 난해하기 때문에 간단하면서도 동적해석과 거의 유사한 해를 주는 응답변위법을 우선으로 적용하고 지반조건과 구조물의 형상이 매우 복잡하거나 필요한 경우에 한해서 응답진도법 또는 동적해석법을 적용할 수 있다.

3. 내진성능 평가기준지진은 사용목표수명을 고려하지 않은 지진과 사용목표수명을 고려한 지진을 선택적으로 사용할 수 있다.

[해설] 내진성능 평가를 위한 기준지진은 사용목표수명을 고려하지 않는 경우 관련 기준에서 규정하는 설계지진으로 할 수 있다. 한편, 기존구조물의 경우 사용목표수명은 일반적으로 신설구조물의 평가설계수명에 비하여 짧아 사용목표수명 중에 경험하게 될 지진세기는 신설구조물이 평가설계수명내에 경험하게 되는 지진세기보다 작을 확률이 높다. 따라서, 내진성능 평가기준지진은 대상구조물의 사용목표수명을 고려하여 결정할 수도 있다. 그러나, 대상구조물의 사용목표수명이 신설구조물의 평가설계수명에 비하여 현저하게 작더라도 보수 또는 보강을 실시하여 신설구조물의 평가설계수명과 동등한 정도의 사용수명을 기대하는 경우에는 내진성능 평가기준지

진은 관련 기준의 설계지진으로 하여야 한다. 사용목표수명의 정량적인 판단근거는 아직 확립되어 있지 않은 상태이다. 따라서, 향후 연구를 통하여 객관적인 판단기준이 마련되기까지 이의 판단은 관리주체의 시설물 사용계획(폐선, 개축, 보강 등)에 따라 결정하도록 한다.

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

5. 본 요령과 관련된 규정은 다음과 같다.

(1) 내진설계기준연구 II (건설교통부, 1997)

(2) 도시철도내진설계기준 (국토해양부, 2009)

(3) 터널설계기준 (건설교통부, 2007)

(4) 공동구설계기준 (국토해양부, 2010)

(5) 콘크리트구조설계기준 (건설교통부, 2007)

(6) 기존시설물의 기초 및 지반의 내진성능 평가요령 (건설교통부, 2004)

[해설] 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.

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

7. 지반액상화 내진성능 평가에 대해서는 [기존시설물의 기초 및 지반의 내진성능 평가요령]에 준하여 구조물별 평가방법을 적용할 수 있다.

1.2 요령의 구성

본 요령의 구성은 다음과 같다.

1. 총칙
2. 내진성능 평가기준지진과 평가절차
3. 내진성능 예비평가
4. 내진성능 상세평가
5. 내진성능 평가보고서 구성
6. 부록 A. 내진성능 평가 예제
7. 부록 B. 내진안정성 평가방법에 따른 결과 비교
8. 부록 C. 내진점검표

1.3 용어의 정의

본 요령에 사용되는 용어의 정의는 [내진설계기준연구Ⅱ], [도시철도내진설계기준], [터널설계기준], [공동구설계기준], [콘크리트구조설계기준] 등의 관련 기준에 따르고 이에 정의되지 않은 용어는 아래의 정의를 따른다.

(1) 가속도 계수 (Acceleration coefficient, A) : 구역계수(Z)에 지진 위험도계수(I)를 곱한 값(무차원량)

(2) 가속도 시간이력 (Acceleration time history) : 가속도의 시간에 따른 변동을 나타내는 함수

(3) 가속도 응답스펙트럼 (Acceleration response spectrum) : 주어진 가속도를 단자유도 구조물의 지지점에 작용하여 구한 절대가속도 응답의 최대값을 단자유도 구조물 고유주기와 감쇠비에 따라 도표로 나타낸 스펙트럼

(4) 감쇠비 (Damping ratio) : 임계 감쇠계수에 대한 구조물 또는 지반의 감쇠계수의 비율

(5) 강진지속시간 : 지진에 의한 가속도 시간이력에서 최대가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)에 해당하는 진동이 지속되는 시간

(6) 개착공법 : 토류공을 설치하면서 지표면에서 소정의 위치까지 굴착하고 구조물을 구축한 후 되메움하는 공법

(7) 고유주기 (Natural period) : 자유진동하는 구조물의 진동이 반복되는 시간간격(s)

(8) 고유진동수 (Natural frequency) : 진동시스템의 질량과 강성으로부터 결정되는 일정한 진동수로서 외력의 진동수가 고유진동수와 일치할 때 공진이 발생

(9) 고정하중 (Dead load) : 구조물의 시공 중 또는 건설이 완료된 후 변동없이 지속적으로 구조물에 작용되는 하중

(10) 공동구 : 국토의 계획 및 이용에 관한 법 제2조 제9호의 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 말한다.

(11) 관성력 (Inertia force) : 구조물의 가속도에 의해 발생되는 힘으로서 그 크기는 질량과 절대가속도를 곱한 값이며 작용방향은 가속도와 반대방향임.

(12) 기반면 (Seismic base) : 지반분류 S_B에 해당되는 전단파속도(V_S) 760m/s 이상

인 지반, 물성변화가 적고 해석대상 구조물의 아래면에 걸쳐 넓게 존재하는 지반으로 충분히 강성이 큰 암반과의 경계면을 갖는 지반

(13) 내진그룹 (Seismic importance level) : 터널 구조물의 내진성능 상세평가 수행여부를 결정하기 위하여 터널 구조물의 취약도, 영향도, 지진도를 고려하여 나눈 그룹

(14) 내진등급 (Seismic importance level) : 구조물의 중요도에 따라서 정해지는 내진설계상의 등급

(15) 내진성능 상세평가 : 터널 구조물의 구성부재가 내진성능 평가기준지진에 대하여 소요내진성능을 확보하고 있는지를 평가하는 2단계 평가

(16) 내진성능 예비평가 : 터널 구조물의 내진그룹화를 위하여 개략적으로 수행되는 1단계 평가

(17) 내진성능 평가기준지진 : 기존 터널 구조물의 내진성능을 평가하는 경우, 지진하중을 산정하는데 기준이 되는 지진

(18) 노두 (Outcrop): 지표면에 노출된 암반의 상단

(19) 도시철도 : 도시교통의 원활한 소통을 위하여 도시교통권역에서 건설·운영하는 철도·모노레일·노면전차·선형유도전동기·자기부상열차 등 궤도(軌道)에 의한 교통시설 및 교통수단을 말한다.

(20) 동적전단탄성계수 (Dynamic shear modulus) : 동적변형이 작용될 때 재료의 전단탄성계수 값으로서 질량밀도와 전단파속도를 이용하여 구할 수 있음.

(21) 동적해석법 (Dynamic analysis method) : 시간에 따른 구조물(또는 지반)의 응답을 구하는 구조해석방법으로서, 해석방법으로는 시간영역해석법과 주파수영역해석법이 있음.

(22) 붕괴방지수준 : 설계지진 작용 시 구조물이나 시설물에 상당한 변형이나 손상이 발생할 수는 있지만 그 수준과 범위는 구조물이나 시설물이 붕괴되거나 또는 그 손상으로 인하여 대규모 피해가 초래되는 것을 방지할 수 있는 성능수준

(23) 비개착공법 : 일반적으로 적용되는 개착공법 이외의 공법으로서 발파공법, TBM공법, 쉴드(Shield)공법, 쉴드(Shield) TBM공법과 하천, 철도, 교량 등을 통과하기 위한 특수공법 등을 말함.

(24) 비선형거동 (Nonlinear behavior) : 변형률과 응력의 관계가 선형탄성이 아닌 거동

(25) 사용목표수명 : 내진성능 평가 대상구조물의 향후 목표로 하는 사용수명 년수로서 보수 및 보강이 되는 경우에는 이를 고려하여 평가된다. 시설물 관리주체의 시설물 사용계획에 따라 설정

(26) 사용목표수명등급 : 내진성능 평가기준지진의 지진세기를 산출하는 경우, 사용목표수명을 용이하게 고려할 수 있도록 나눈 등급

(27) 사용하중 (Service load) : 고정하중 및 활하중과 같이 이 기준에서 규정하는 각종 하중으로서 하중계수를 곱하지 않은 하중 (작용하중이라고도 함.)

(28) 상대변위 (Relative displacement) : 기반지반 상단에서 변위에 대한 지층에서 변위의 상대적인 값

(29) 상시하중 : 지진하중을 제외한 고정하중, 활하중, 토압, 수압 및 부력 등

(30) 설계가속도 응답스펙트럼 (Design acceleration response spectrum) : 구조물의 내진설계를 위한 지반의 가속도를 가속도응답스펙트럼 형태로 정의한 것임.

(31) 설계고유주기 (Design natural period) : 설계전단파속도를 이용하여 구한 자유장지반의 고유주기로서 지반의 고유주기 중 가장 큰 값

(32) 설계전단파속도 (Design shear wave velocity) : 내진설계에 적용되는 지반의 전단파속도로서 지진에 의한 지반의 비선형성거동을 고려한 값

(33) 파장 (Wave length) : 설계전단파속도를 이용하여 구한 자유장지반의 고유주기에 해당하는 지반 진동의 파장

(34) 소성 (Plasticity) : 응력-변형률 관계가 탄성한계를 넘어 고체에 작용하고 있는 힘을 제거하여도 재료가 원래의 형상으로 복귀하지 않고 영구변형이 발생하는 현상

(35) 속도응답스펙트럼 (Velocity response spectrum) : 주어진 가속도에 대한 단자유도 구조물 상대속도의 최대값을 구조물 주기와 감쇠비에 따라 도표로 나타낸 스펙트럼

(36) 수평층상지반 (Horizontally layered soil) : 지층과 지층의 경계면이 수평인 지반

(37) 스펙트럴 가속도 (Spectral acceleration) : 진동주기에 해당하는 가속도응답스펙트럼의 값

(38) 스펙트럴 속도 (Spectral velocity) : 진동주기에 해당하는 속도응답스펙트럼의 값

(39) 신축이음 (Expansion joint) : 콘크리트로 성형된 교량 등의 각종 구조물은 온도변화에 따라 미량의 신축을 하게 되며 하중이 재하됨에 따라 각 단면은 변형을 받게 됨. 이러한 온도변화에 의한 신축작용과 하중재하에 의한 균열을 방지하기 위하여 일정 길이마다 이 힘들을 흡수할 수 있도록 단면을 횡단하여 설치하는 이음을 말함.

(40) 액상화 (Liquefaction) : 지진과 같은 진동하중 발생시, 느슨한 사질토 등이 비배수 상태에서 순간적인 과잉간극수압의 발생으로 지반의 전단저항력이 저하되거나 전단저항력을 잃게 되는 현상

(41) 연직스프링 (Vertical spring) : 응답변위법을 적용하여 구조해석을 수행할 때 구조물 단면에 연직방향으로 변위에 대한 지반의 강성을 나타내는 스프링 요소

(42) 위험도계수 (I) : 500년 재현주기를 기준으로 지진의 위험도를 나타내는 계수

(43) 응답변위법 (Seismic deformation method) : 지진에 의한 지하구조물의 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

(44) 응답수정계수 (Response modification factor) : 탄성해석으로 구한 각 요소의 내력으로부터 설계지진력을 산정하기 위한 수정계수

(45) 응답스펙트럼 (Response spectrum) : 어떤 일정한 감쇠비를 가진 구조물의 고유주기나 진동수에 따른 지진의 최대응답을 나타낸 그래프

(46) 응답진도법 (Response acceleration method) : 지진에 의해 발생되는 구조물(또는 지반)의 각 위치에서 최대가속도가 주어질 때, 각 질점의 질량에 주어진 가속도를 곱한 값을 지진방향의 정적하중으로 작용하여 지진응답해석을 수행하는 방법. 지하구조물인 경우에는 구조물과 구조물 주변의 지반을 모두 모형화한 다음 깊이에 따라 부지응답해석을 통해 구한 최대지반가속도(절대가속도)를 지진방향으로 작용하여 적용함.

(47) 자유장지반 (Free-field soil layer) : 구조물 건설을 위하여 지반을 굴착하기 전의 지반상태

(48) 부지응답해석 (Site response analysis) : 구조물 건설을 위하여 지반을 굴착하기 전의 지반상태에 대한 지진응답해석

(49) 재현주기 (Return period) : 강우, 홍수, 지진 등과 같이 구조물에 영향을 미치는 환경조건의 강도와 발생의 변동을 통계적으로 표시하는 지표의 하나로서 어떤 크기의 연최대치가 몇 년에 한번 발생할 확률이 있는지를 정한 연수

(50) 전단력 (Shear force) : 단면에 접하는 방향의 단면력 성분

(51) 전단스프링 (Shear spring) : 응답변위법을 적용하여 지진응답해석을 수행할 때 사용하는 구조물 모형에서, 구조물과 지반의 접촉면을 따라 설치하는 스프링요소

(52) 전단탄성계수 (Elastic shear modulus) : 재료의 전단응력-전단변형율 곡선에서 탄성영역의 기울기로서 재료의 전단변형에 대한 강성을 나타냄.

(53) 전단탄성파속도 (Shear wave velocity) : 매질에서 전단파(S파)의 전달속도

(54) 전단파 (Shear wave) : 파동 진행방향과 직각방향으로 진동하는 파로서 횡파, S파, 비틀림파라고도 함.

(55) 정현하중 (Sine load) : 불규칙한 지진하중을 일정한 주기와 진폭을 가지는 사인 함수형태의 반복하중으로 치환한 값

(56) 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

(57) 지반응답해석 (Ground response analysis) : 토층의 저면에 입사되는 지진하중이 지표면으로 진행될 때 토층의 동적거동에 대한 해석

(58) 지반진동 (Ground vibration) : 지진에 의한 자유장지반의 진동

(59) 지반종류 (Soil profile type) : 지진시에 지반의 진동특성에 따라 공학적으로 분류하는 지반의 종류

(60) 지진지속시간 (Earthquake duration): 지진에 의해 유발된 기반지반의 가속도가 존재하는 총 시간

(61) 지진구역계수 (Zone factor, Z) : 각 지진구역에서의 평균 재현주기 500년에 해당하는 지진지반운동의 최대지반가속도값을 중력가속도(g)로 나눈 값

(62) 지진하중 (Seismic load) : 지진에 의해 추가적으로 구조물에 작용되는 설계하중으로서 지하구조물에서는 관성력, 지반변위, 주면전단력으로 구성됨.

(63) 최대지반가속도 (Peak ground acceleration) : 지진에 의해 발생되는 최대의 지반가속도로 가속도계수에 중력가속도를 곱한 값으로 정의(m/s^2)

(64) 최대진폭 (Peak amplitude): 지진에 의해 구조물(또는 지반)에 발생된 응답(변위, 속도, 가속도, 응력)의 절대값 중에서 가장 큰 값

(65) 축력 (Axial force) : 부재의 축방향으로 작용되는 힘으로 방향에 따라 인장력 또는 압축력으로 구분함.

(66) 탄성지진응답계수 (Elastic seismic response coefficient) : 모든 스펙트럼 해석법에서 지진하중을 구하기 위한 무차원량

(67) 탄성파 (Elastic wave) : 탄성체를 매체로 전달되는 파동으로서 기본적으로 P-파와 S-파로 구분되며, 지층의 형태에 따라 다양한 표면파(Rayleigh파, Love파 등)가 존재함.

(68) 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.

(69) 통제주기 (Control period) : 가속도 설계응답스펙트럼을 정의하는데 사용하는 주기로서 두 값이 정의됨. 두 주기 사이에서 최대증폭이 발생함.

(70) 특수공법 : 일반적으로 적용되는 개착공법, 발파공법, TBM공법 또는 쉴드(Shield)공법 이외의 공법을 사용하여 하천, 철도, 교량 등을 통과하여 공동구 본체를 구축하는 공법

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

(72) 평가설계수명 : 사용목표수명등급을 평가하기 위한 기준이 되는 수명으로서 잠정적으로 100년을 내구년한으로 정의

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

(74) 평행층상 반무한지반 (Horizontally layered half-space soil) : 반무한지반 위에 층경계가 모두 수평인 층상지반이 있는 지반. 내진설계에서는 대부분 부지응답해석을 수행할 때 지반을 평행층상 반무한 지반으로 가정함.

(75) 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.

(76) 표층지반 (Top soil layers) : 기반지반 위에 있는 수평층상지반

(77) 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.

(78) 휨모멘트 (Bending moment) : 부재를 휘게 하도록 작용하는 부재력

제 2 장 내진성능 평가기준지진과 평가절차

2.1 일반사항

1. 내진성능 평가는 관련 기준에 따른다.

[해설] 지중에 건설되는 터널 구조물은 관련 기준(도시철도 내진설계기준, 터널설계기준, 공동구 설계기준 등)에서 요구하는 구조물의 성능과 동등한 성능을 발휘할 수 있어야 한다는 것을 의미한다. 이를 위해 현행 기준에 규정된 지진구역계수, 지반계수, 설계응답스펙트럼 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. 내진성능 평가를 위한 “내진성능 평가기준지진”은 터널 구조물의 사용목표수명을 고려하여 결정할 수 있다.

[해설] “내진성능 평가기준지진”은 관련 기준에서 규정하는 설계지진으로 하는 것이 원칙이나 기존구조물의 경우 사용목표수명은 일반적으로 신설구조물의 평가설계수명에 비하여 짧아 사용목표수명 중에 경험하게 될 지진세기는 신설구조물이 평가설계수명 내에 경험하게 되는 지진세기보다 작을 확률이 높기 때문에 이를 반영하기 위함이다. 그러나, 대상구조물의 사용목표수명이 신설구조물의 평가설계수명에 비하여 현저하게 작더라도 보수 또는 보강을 하여 신설구조물의 평가설계수명과 동등한 정도의 사용목표수명을 기대하는 경우에는 내진성능 평가기준지진은 관련 기준의 설계지진으로 하여야 한다. 사용목표수명의 정량적인 판단근거는 아직 확립되어 있지 않은 상태이다. 따라서, 향후 연구를 통하여 객관적인 판단기준이 마련되기까지 이의 판단은 관리주체의 시설물 사용계획에 따라 결정하도록 한다.

2.2 설계지반운동

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

[해설] 관련 기준에서는 지진구역을 해설표 2.2.1과 같이 2개 구역으로 설정하고 있고, 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년의 지진지반운동에 해당하는 구역계수는 해설표 2.2.2와 같이 규정하고 있다. 따라서, 본 요령에서도 이를 준용한다. 단, 해설표 2.2.1의 지진구역에서 구분된 행정구역의 경계를 통과하는 평가대상 구조물에는 상위의 지진구역계수를 적용한다.

2. 설계가속도는 지진에 의한 지반진동의 강도를 나타낸다.

[해설] 본 요령에서는 기존구조물에 대해서도 신설구조물과 동일한 지진세기에 대하여 동일한 성능을 만족하도록 요구하고 있다. 따라서, 평균재현주기가 다른 지진의 설계가속도는 해설표 2.2.3의 위험도계수(I)를 해설표 2.2.2의 지진구역계수(Z)에 곱하여 계산한다. 한편, 지중구조물의 설계가속도는 지진해석시 기반면에서의 수평가속도(K_h')와 지표면에서의 수평가속도(K_h)를 사용하며 대상깊이의 수평가속도는 지표면과 기반면의 수평가속도를 직선 보간하여 구할 수 있다. 기반면이라 함은 전단파속도 V_s=760m/s 이상의 보통암 수준을 의미하며 개략적으로 20~30m의 심도에 해당되나, 지반조사에 의하여 산정토록 한다. 수평가속도는 지반의 종류에 따라 지진계수 C_a 와 C_v(해설표 2.2.4 참고)로 세분화되는데, 수평가속도는 다음 식과 같이 구한다.

$$K_h = C_a \cdot I \qquad \text{해설식(2.1)}$$

여기서, C_a : 지진계수

I : 지진 위험도계수

해설표 2.2.1 지진구역 구분

지진구역	행정구역	
Ⅰ	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부
Ⅱ	도	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도

해설표 2.2.2 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진구역	Ⅰ	Ⅱ
구역계수, Z	0.11	0.07

해설표 2.2.3 지진 위험도계수

재현주기(년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도계수, I	0.40	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0

해설표 2.2.4 지진계수 C_a와 C_v

지반 종류	C_a		C_v	
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
S_A	0.09	0.05	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07	0.11	0.07
S_C	0.13	0.08	0.18	0.11
S_D	0.16	0.11	0.23	0.16
S_E	0.22	0.17	0.37	0.23

지진계수 결정을 위한 지반 종류는 해설표 2.2.5와 같이 분류한다. 지진구역에 따른 기반면 및 지표면의 설계수평가속도의 값은 해설표 2.2.6과 해설표 2.2.7과 같으

며 심도에 따른 설계수평가속도는 해설그림 2.2.1과 같다.

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

해설표 2.2.5 지반의 분류

지반 종류	지반상태	상부 30.0m 에 대한 평균 지반 특성[1]		
		평균전단파속도 $\overline{V_s}$ (m/sec)	평균표준관입시험 $\overline{N}$ (타격수)	평균비배수전단강도 $\overline{S_u}$ (kPa)
S_A	경암 지반	1500 초과	–	–
S_B	보통암 지반	760초과 1500이하		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360초과 760이하	50초과	100초과
S_D	단단한 토사지반	180이상 360이하	15이상 50 이하	50이상 100이하
S_E	연약한 토사지반	180미만	15미만	50미만
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

주 : 1) 상부 30.0m 이내에 기반암층이 있는 경우는 지표층(기반암 상부 토층)의 평균 지반특성을 고려한다. 상부 30.0m의 평균 전단파속도는 아래 식을 이용한다. 전단파속도 또는 표준관입시험치는 현장시험 결과치를 이용하는 것을 원칙으로 한다. 또한, 전단파속도와 표준관입시험치를 모두 측정한 경우는 전단파속도에 의해 분류한다.

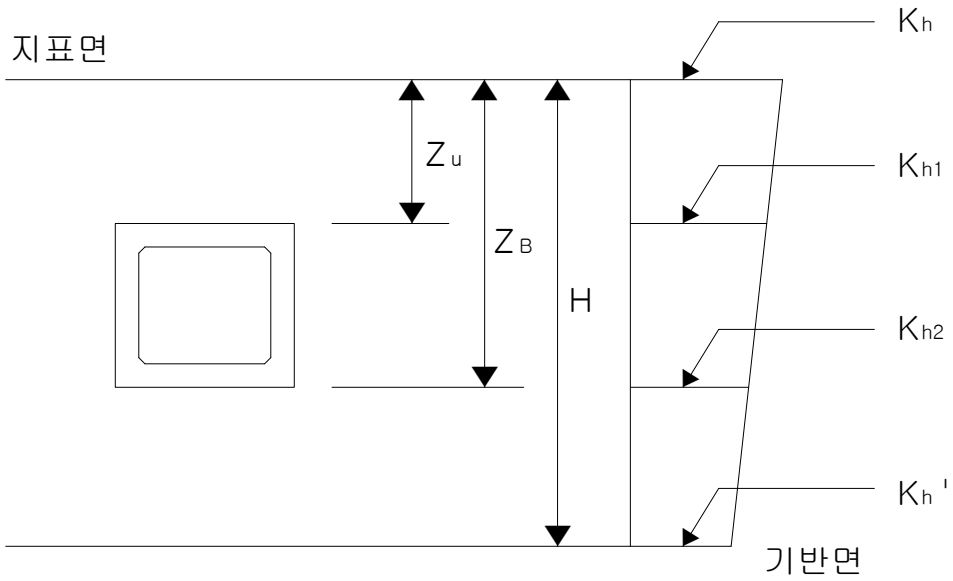
상부 30m 평균 전단파속도	상부 30m의 평균 SPT-N값	상부 30m의 평균 비배수강도(S_u)
$V_{S30}=\frac{30}{\sum_{i=1}^{n} d_i/V_{Si}}$ 여기서, V_{s30} : 상부30m 평균전단파속도 V_{si} : 각 층의 전단파속도	$\overline{N}=\frac{30}{\sum_{i=30}^{n} d_i/N}$ 여기서, $\overline{N}$: 상부 30m 평균 SPT-N값 N : 각 층의 SPT-N값	$\overline{S_u}=\frac{30}{\sum_{i=1}^{n} d_i/S_u}$ 여기서, $\overline{S_u}$: 상부 30m 평균비배수강도 S_u : 각 층의 비배수강도 d_i : 각 층의 두께

해설표 2.2.6 기반면의 설계수평가속도 (K_h')

구 분	1등급(붕괴방지, 1000년)	
	I	II
설계수평가속도	0.154	0.098

해설표 2.2.7 지표면의 설계수평가속도 (K_h)

지반 종류	1 등급(붕괴방지, 1000년)	
	I	II
S_A	0.126	0.070
S_B	0.154	0.098
S_C	0.182	0.112
S_D	0.224	0.154
S_E	0.308	0.238



Z_U, Z_B : 구조물 상부, 하부까지 깊이

H : 기반면까지 깊이

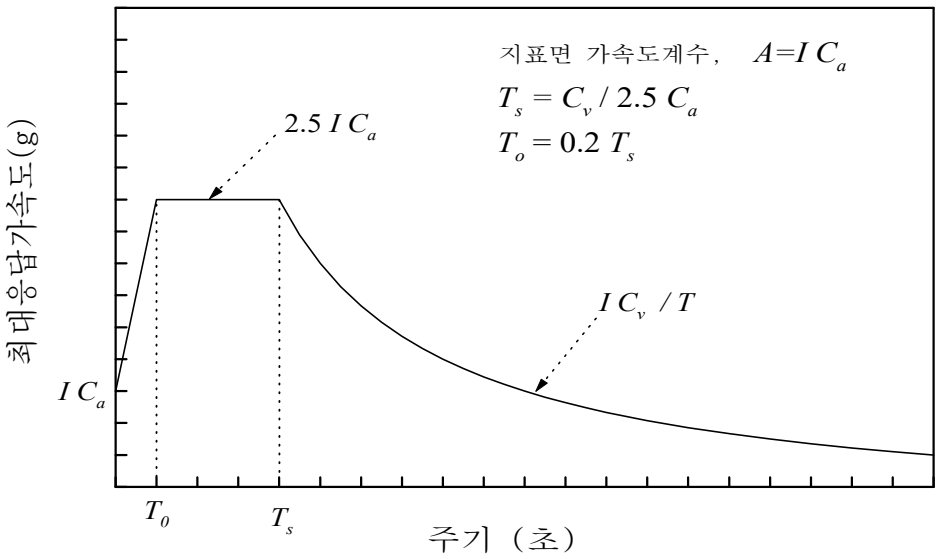
K_h, K_{h1}, K_{h2}, K_h' : 각 깊이에서 설계수평가속도

해설그림 2.2.1 심도에 따른 설계수평가속도

3. 설계지진 응답스펙트럼

가. 표준설계응답스펙트럼은 해설그림 2.2.2와 같다.

[해설] 본 요령에서는 성능수준별 감쇠율에 대한 보정계수를 적용한 설계응답스펙트럼을 사용하도록 한다. 5% 감쇠비에 대한 표준설계응답스펙트럼은 해설그림 2.2.2와 같다.



해설그림 2.2.2 표준설계응답스펙트럼(감쇠비 5%)

나. 응답스펙트럼은 관련 기준에서 규정하고 있는 기반면에서의 설계가속도 스펙트럼을 적용한다.

다. 기반면에서의 설계가속도 스펙트럼은 감쇠율에 대한 보정계수를 곱하여 적용한다.

[해설] 해설그림 2.2.2에서 규정하고 있는 표준설계응답스펙트럼은 감쇠비가 5%인 경우이다. 이는 지표상 콘크리트 구조물의 탄성상태의 감쇠를 적용한 값이므로 지중구조물의 경우 감쇠비는 이와 다른 특성을 보이며, 성능수준에 따른 응답스펙트럼의 보정을 다음과 같이 수행한다.

○ 감쇠율에 대한 보정계수(C_D) : $C_D = \dfrac{1.5}{(40h+1)} + 0.5$ 해설식(2.2)

여기서, 성능수준별 감쇠율(h)은 붕괴방지수준 0.2를 적용

(단, 별도의 합리적인 해석에 의하여 구한 값을 적용할 수도 있다.)

2.3 소요내진성능

1. 내진성능

지중구조물의 내진등급은 지중구조물의 중요도에 따라 설정한다.

[해설] 구조물의 등급은 내진 특등급, 내진 1등급, 내진 2등급으로 구분된다. 터널 구조물은 대부분 내진 1등급 구조물에 속하며 일반적인 지중구조물의 내진 등급은 해설표 2.2.8에 의거한다.

해설표 2.2.8 구조물별 내진등급

구조물 종류	내진 1등급	내진 2등급
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. 성능수준에 따른 지진세기

가. 기존 터널 구조물의 소요성능수준은 [붕괴방지수준]에 대해서 고려한다.

[해설] 성능수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분되지만, 최근 제·개정된 터널설계기준(2007), 공동구설계기준(2010), 도로교설계기준(2010), 철도설계기준(2011) 등 관련 기준의 개정된 내용을 반영하여 본 요령에서는 내진성능 평가시 붕괴방지수준에 대해서만 고려하는 것으로 한다.

나. 성능평가에 이용하는 지진세기는 구조물의 내진등급과 성능수준에 따라 설정한다.

[해설] 현행 기준에서는 터널 구조물의 내진등급별 내진성능 목표에 따라 해설표 2.2.9와 같은 설계지진세기를 규정하고 있다.

해설표 2.2.9 내진성능 목표 (붕괴방지수준)

관련기준 / 재현주기	도시철도 내진설계기준	터널설계기준	공동구설계기준
500년	2 등급	2 등급	-
1000년	1 등급	1 등급	1 등급

3. 사용목표수명을 고려한 평균재현주기

가. 사용목표수명을 고려한 내진성능 평가기준지진은 사용목표수명동안 내진성능 평가기준지진의 발생확률이 동일 등급의 신설구조물이 평가설계수명 동안 경험할 수 있는 설계지진의 발생확률과 동일하도록 결정한다.

[해설] 설계지진의 평균재현주기는 구조물의 등급별로 주어지며, 연평균발생확률은 평균재현주기의 역수로 정의된다. 현행 설계개념은 설계지진하에서 구조물이 붕괴하지 아니하여 인명피해를 방지할 수 있고, 이렇게 설계된 구조물에 최대가능지진이 발생하더라도 붕괴될 확률은 매우 낮을 것이라는 가정에 근거하고 있다. 여기서는 구조물의 수명기간동안 손상 또는 붕괴할 확률은 명시적으로 도입되어 있지 아니하다. 그러나, 본 요령에서는 아직 그 타당성이 완전하게 입증되지는 아니하였으나 잠정적으로 사용목표수명동안 지진을 경험할 확률을 고려하는 개념을 다음의 해설식(2.3)과 같이 채택하고자 한다.

(내진성능 평가기준지진의 연평균발생확률×사용목표수명)
= (설계기준지진의 연평균발생확률×평가설계수명) 해설식(2.3)

나. 사용목표수명은 평가설계수명에 대한 수명비(사용목표수명/평가설계수명)에 따라 다음과 같이 3개 등급(1/2 이상, 1/2-1/4, 1/4 이하)으로 구분한다.

[해설] 내진성능 평가에 있어서 사용목표수명을 효율적으로 고려하기 위하여 평가설계수명의 비에 따라 3개 등급으로 구분하여 사용하도록 한다.

다. 내진성능 평가기준지진의 지진세기는 사용목표수명 등급에 따라 평균재현주기를 고려하여 결정한다. 이는 해설표 2.2.10과 같다.

해설표 2.2.10 수명비에 따른 내진등급 평가기준지진의 평균재현주기

내진등급	수명비(사용목표수명/평가설계수명)		
	1/2 이상	1/2-1/4	1/4 이하
1등급	1000년	500년	250년
2등급	500년	250년	125년

4. 사용목표수명을 고려한 가속도계수

가. 사용목표수명을 고려한 내진성능 평가기준지진의 가속도계수(A)는 지진구역계수(Z)와 지진 위험도계수(I)의 곱으로 정의한다.

나. 지진구역계수(Z)는 2.2절의 해설표 2.2.2와 같다.

다. 사용목표수명을 고려한 지진 위험도계수(I)는 [내진설계기준연구II(건교부,1997)]에 제시된 값을 기본으로 하고 필요시에는 이를 선형보간하여 사용할 수 있다.

[해설] 지진 위험도계수(I)는 재현주기 500년 설계지진의 가속도계수에 대한 특정재현주기의 설계지진의 가속도계수의 비로서 해설표 2.2.11과 같이 정의된다. 또한, 수명비(사용목표수명/평가설계수명)에 따른 지진 위험도계수(I)는 해설표 2.2.12와 같다.

해설표 2.2.11 재현주기에 따른 지진 위험도계수(I)

재현주기 (년)	50	100	200	500	1000
위험도계수, I	0.4	0.57	0.73	1.0	1.4

해설표 2.2.12 수명비에 따른 지진 위험도계수(I)

내진등급	수명비(사용목표수명/평가설계수명)		
	1/2이상	1/2-1/4	1/4이하
1등급	1.4	1.0	0.78
2등급	1.0	0.78	0.6

라. 수명비에 따른 가속도계수(A)는 해설표 2.2.13 및 해설표 2.2.14와 같다.

[해설] 지진구역계수(Z)와 수명비(사용목표수명/평가설계수명)에 따른 지진 위험도계수(I)를 곱하여 수명비에 따른 가속도계수(A)를 산정하면 해설표 2.2.13 및 해설표 2.2.14와 같다.

해설표 2.2.13 지진구역 I 에서의 내진성능 평가기준지진 가속도계수(A)

내진등급	수명비(사용목표수명/평가설계수명)		
	1/2 이상	1/2-1/4	1/4 이하
1등급	0.154 g	0.11 g	0.086 g
2등급	0.11 g	0.086 g	0.066 g

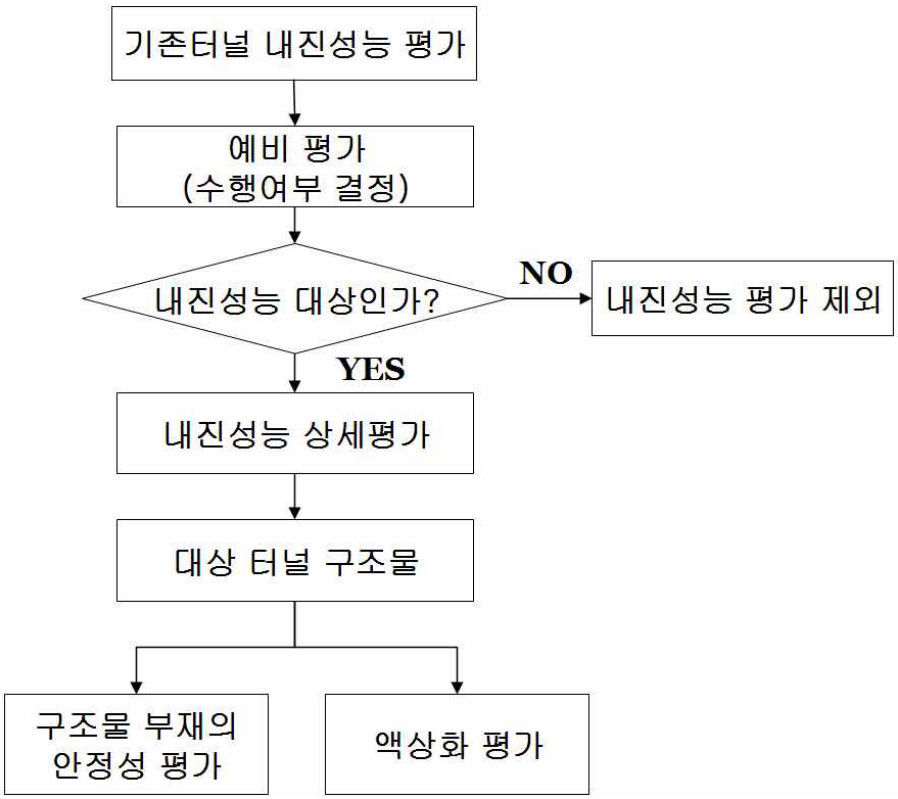
해설표 2.2.14 지진구역 I, II에서의 내진성능 평가기준지진 가속도계수(A)

지진구역 (1등급)	수명비(사용목표수명/평가설계수명)		
	1/2 이상	1/2-1/4	1/4 이하
I구역	0.154 g	0.11 g	0.086 g
II구역	0.098 g	0.07 g	0.055 g

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

   [해설] 터널 구조물의 내진성능 평가를 위해서는 구조물의 비선형적 거동이 고려되어야 한다. 그러나, 본 요령에서는 우리나라 지진세기 등을 고려하여 탄성설계법에 준하여 성능을 평가하는 방법을 채택하였다.
4. 본 요령에서는 해설그림 2.4.1과 같은 내진성능 평가절차에 따라 터널 구조물의 내진성능 평가를 수행하도록 하고 있다. 지반액상화는 예비평가, 간이평가 및 상세평가의 순서로 실시되며, 보다 상세한 사항은 [기존시설물의 기초 및 지반의 내진성능 평가 요령]을 참고하길 바란다.



해설그림 2.4.1 내진성능 평가절차

제 3 장 내진성능 예비평가

3.1 일반사항

내진성능 예비평가는 터널 구조물의 내진성능 상세평가의 수행여부를 결정하는 판단자료를 제공한다.

[해설] 내진설계가 수행되지 않은 기존 터널 구조물에 대하여 내진성능 평가를 보다 경제적이고 합리적으로 수행하기 위해서는 예비평가를 먼저 수행하여 내진성능 상세평가의 수행여부를 우선적으로 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 설계도서에 나타난 구조물의 직접정보뿐만 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 시방서, 내진설계의 유무 등을 조사한다.

나. 설계도서 조사

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

(2) 설계 평면도, 종·횡단면도, 지반지질도, 상세도 등을 조사한다.

(3) 보수·보강 등에 따른 내진성능의 변화 요인을 조사한다.

다. 현장조사

(1) 구조물의 현재 상태 등을 조사하여 설계도서와의 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 부록C와 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 “핵심시설”, “중요시설”, “관찰시설”, “유보시설” 4개 그룹으로 분류하고 동 순서대로 우선순위를 부여한다.

3. 내진보강 “핵심시설”, “중요시설”에 대해서는 우선적으로 내진성능 상세평가를 실시하고, 내진보강 “관찰시설”, “유보시설”에 대해서는 관리주체의 정책적 판단에 의거하여 내진성능 상세평가 실시여부를 결정할 수 있다.

4. 정책적 판단으로 중요하다고 판단되는 시설에 대해서는 내진그룹을 조정할 수 있다.

   [해설] 기존 터널 구조물의 내진그룹화는 지진도, 취약도, 영향도를 종합적으로 고려하여 정량화함으로써 수행된다. 이러한 정량화는 수많은 사례연구를 통하여 중요 인자를 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, 지반종류 등을 고려하여 4그룹으로 분류한다.

[해설] 제 2장에서 정의되는 지진구역과 지반종류를 기본으로 하여 권역별 특성(도시지역, 기타지역)을 고려하여 해설표 3.4.1과 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

<table>
<tr><th rowspan="2">지진구역</th><th rowspan="2">구분</th><th colspan="4">지반종류</th></tr>
<tr><th>S_E</th><th>S_D</th><th>S_C</th><th>S_B, S_A</th></tr>
<tr><td rowspan="2">I</td><td>도시</td><td colspan="2">1그룹</td><td colspan="2">2그룹</td></tr>
<tr><td>기타지역</td><td rowspan="2">1그룹</td><td rowspan="2">2그룹</td><td rowspan="2">3그룹</td><td>3그룹</td></tr>
<tr><td rowspan="2">II</td><td>도시</td><td>4그룹</td></tr>
<tr><td>기타지역</td><td>2그룹</td><td>3그룹</td><td colspan="2">4그룹</td></tr>
</table>

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 사면, 저토피 구간, 불균형 토압, 터널 형상, 라이닝 형식, 시공방법, 단면크기, 재난 이력, 지속적인 변형, 노후화, 손상상태 등 터널의 설계·시공에서부터 유지관리에 이르기까지 다양한 인자를 고려하여 다음과 같이 취약도 지수(Vulnerability Index)로 나타낸다.

$$VI = 10 \times (Soil + Slope + Depth + Unbal + Shape + Lining + Const + Size + Hist + Defor + Deter + Damage) \quad \text{해설식(3.1)}$$

여기서, *Soil* : 터널 주변의 지반(Soil) 상태에 따른 지수

Slope : 갱구부 사면(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	점수
지반상태 (*Soil*)	연약지반[1] 및 지층변화가 심한 지반	S_E, S_F	1.0
	단단한 토사지반	S_D	0.8
	보통지반	S_C	0.5
	강성지반	S_A, S_B	0.2

주 1) 단층파쇄대, 연약대 등의 지질학적으로 불량한 지반

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

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

주 1) 갱구부 사면에 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)로 나타낸다.

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

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

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.

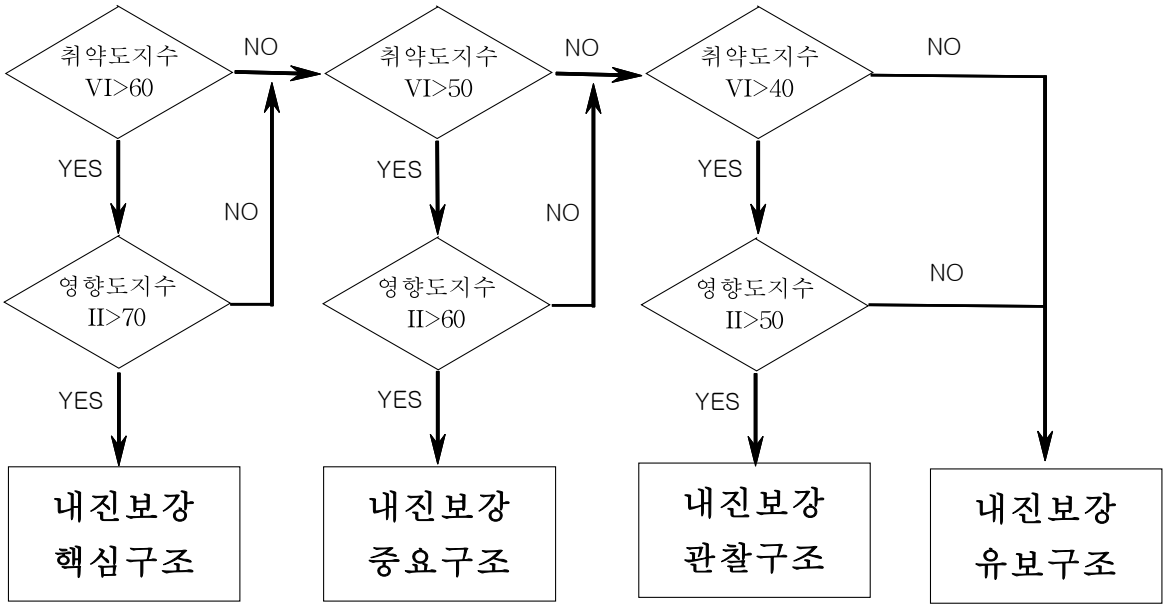
구분	터널 길이(L)	점수
구조물 성능회복[1] (*Recovery*)	3,000m 이상	1.0
	2,000m 이상 ~ 3,000m 미만	0.8
	1,000m 이상 ~ 2,000m 미만	0.6
	500m 이상 ~ 1,000m 미만	0.4
	500m 미만	0.2

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 내진성능 핵심구조, 중요구조, 관찰구조, 유보구조의 4개 등급으로 분류한다.

[해설] 터널 구조물의 내진그룹은 해설그림 3.4.1과 같이 취약도 지수와 영향도 지수를 고려하여 터널의 내진성능을 4개의 등급 즉, 내진보강 핵심구조, 중요구조, 관찰구조, 유보구조로 구분한다. 지진도 등급은 터널 내진성능에 미치는 취약도와 영향도 지수 산정시 적용한 세부지수에 일부 고려되어 있으므로 내진성능 예비평가에서는 지진도 등급을 직접 고려하고 있지 않지만, 이후 상세평가 실시판단에 대해서 지진도 등급을 고려할 수 있다.



해설그림 3.4.1 내진그룹화 방법

제 4 장 내진성능 상세평가

4.1 일반사항

내진성능 상세평가는 예비평가 결과를 고려하여 필요한 터널 구조물에 대해서 수행한다. 내진성능 평가는 붕괴방지수준에 대하여 수행하며 성능평가를 위한 기본방향은 다음과 같다.

1. 평가대상은 부재의 안전성으로 한다.

[해설] 개착식 구조물은 대부분 콘크리트 박스로 구성되며 이들 박스의 기둥부와 측벽 및 상·하부 슬래브에 대한 내진성능을 검토하고 비개착식 구조물은 대부분 콘크리트 라이닝으로 구성되며 이에 대한 내진성능을 검토한다.

2. 평가는 부재가 보유하고 있는 설계내하력(Capacity)과 설계지진에 대해 각 구성부재에 요구되는 설계부재력(Demand)을 비교하여 평가한다.

3. 붕괴방지수준의 내진성능 평가시 구조물의 비탄성 거동을 고려하기 위해 응답수정계수를 사용한다.

[해설] 붕괴방지수준의 내진성능 평가를 위해서는 필요에 따라 비탄성 소성해석이 요구되는데 이는 지진하중을 고려한 엄밀한 동적 비선형해석이 필요하게 된다. 따라서 평가의 실용성과 효율성을 위해 각 구성부재의 종류에 따라 안정해석에서 얻은 결과로부터 도출된 응답수정계수를 사용한다. 한편, 보다 정밀한 평가를 위해서 비선형 동적해석을 수행할 수 있다.

4. 응답수정계수

구조물이 비탄성 거동을 하게 되면 탄성거동을 하는 경우보다 부재력이 작아지므로 일반 구조물의 경우 이를 고려하기 위하여 부재의 성능평가시 탄성해석으로 구한 탄성부재력을 응답수정계수(R)를 사용하여 수정한다.

[해설] 지진에 의한 탄성부재력을 응답수정계수로 나눈 값이 지진에 대한 설계부재력이 되며, 이를 다른 하중에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안정성을 검토하면

된다. 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

$$\mu_{\Psi} = \frac{\Psi_{max}}{\Psi_{y}} \qquad \text{해설식(4.1)}$$

여기서, ψ_{max} : 최대소성변형에 대한 곡률

ψ_{y} : 항복상태의 곡률

- 변위연성도

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{y}} \qquad \text{해설식(4.2)}$$

여기서, Δ_{max} : 소성변형과 탄성변형의 합

Δ_{y} : 탄성변형

해석적인 방법으로 변위연성도를 구할 때 Δ_{y}는 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.

이 방법으로 각 구조물에 적합한 응답수정계수를 결정할 수 있으나 복잡한 절차를 필요로 하므로 다음의 해설표 4.1.1에서 제시한 응답수정계수를 사용하여 성능평가에 적용할 수 있다.

해설표 4.1.1 붕괴방지수준에서의 응답수정계수(R)

구 분	기둥	보	비 고
철근콘크리트 부재	3	3	
강 부재 또는 합성부재	5	5	

붕괴방지수준의 내진성능평가를 수행하는 경우 탄성해석과 탄소성해석을 필요에 따라 선택할 수 있다.

① 탄성해석을 수행하는 경우에는 계산 결과를 응답수정계수로 나눠줌으로써 탄성해석만으로 소성변형까지도 고려할 수 있다.

② 탄소성해석을 수행하는 경우에는 계산 결과를 그대로 사용하고 응답수정계수는 고려하지 않아야 한다.

5. 지진하중을 고려한 터널 구조물의 응답산정시 지반변위를 고려한 응답변위법을 사용하는 것을 기본으로 하며 구조 또는 지반이 복잡한 경우 응답진도법 또는 지반-구조물의 동적 상호작용을 고려한 동적해석법을 사용할 수 있다.

[해설] 터널 구조물의 내진 해석은 지반, 구조 조건 등을 고려하여 “응답 변위법”, “응답진도법” 혹은 “동적해석법” 중 한 가지를 사용하여 수행할 수 있다. 일반적인 터널 구조물의 경우 “응답 변위법”을 기본으로 하며, 상세 검토가 필요한 경우나 구조 또는 지반조건이 복잡한 경우는 “응답진도법” 또는 지반과 구조물의 상호 작용 및 지반과 구조물의 비선형 거동을 고려할 수 있는 “동적해석법(선형 또는 비선형해석)”을 사용하는 것이 좋다. 즉, “응답변위법”을 터널 구조물의 내진해석을 위한 표준해석법으로, “응답진도법” 및 “동적해석법”은 부수적인 해석법으로 규정하였다.

6. 단면특성, 재료강도 등과 같이 내진성능에 관련하는 모든 특성값은 실제 특성값을 기준으로 한다.

[해설] 터널 구조물의 내진성능 평가에 필요한 단면특성, 재료강도 등과 같은 특성값은 현 상태의 특성값을 사용하는 것이 원칙이다. 그러나 이것이 없는 경우에는 설계값을 이용하여야 되지만 환경요인 및 기타요인 등을 고려하여 내진성능이 보수적으로 평가되도록 조정하여 사용하는 것이 좋다.

4.2 평가기준 및 성능수준별 하중조합

1. 평가기준

내진성능 평가기준은 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\text{소요강도(U)} \leq \text{설계강도}(\phi \times \text{공칭강도}) \qquad \text{식(4.1)}$$

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

2. 성능수준별 하중조합

내진성능 평가시 성능수준별 하중조합은 관련 규정에 준한다.

[해설] 대상시설물에 대한 내진성능 평가시 성능수준별 하중조합은 관련 규정에 준한다. 단, 관련 규정만을 적용하기 곤란한 경우에는 책임기술자의 판단에 따라 보다 향상된 규정을 적용할 수 있다.

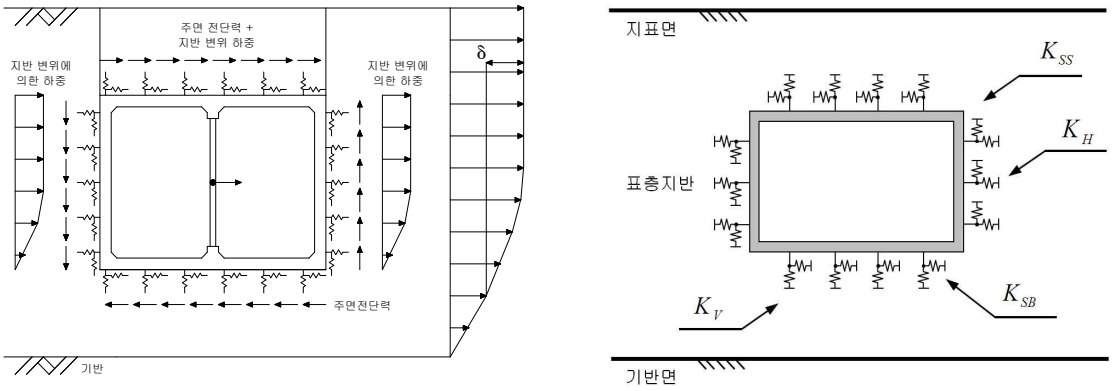
4.3 내진안정성 평가방법

4.3.1 응답변위법

지진발생 시에 발생하는 지반변위에 의한 지진 토압과 구조물과 주변지반 관계에서의 경계조건을 적절히 모델링하여 정적으로 계산하는 방법을 응답변위법이라 한다.

[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.

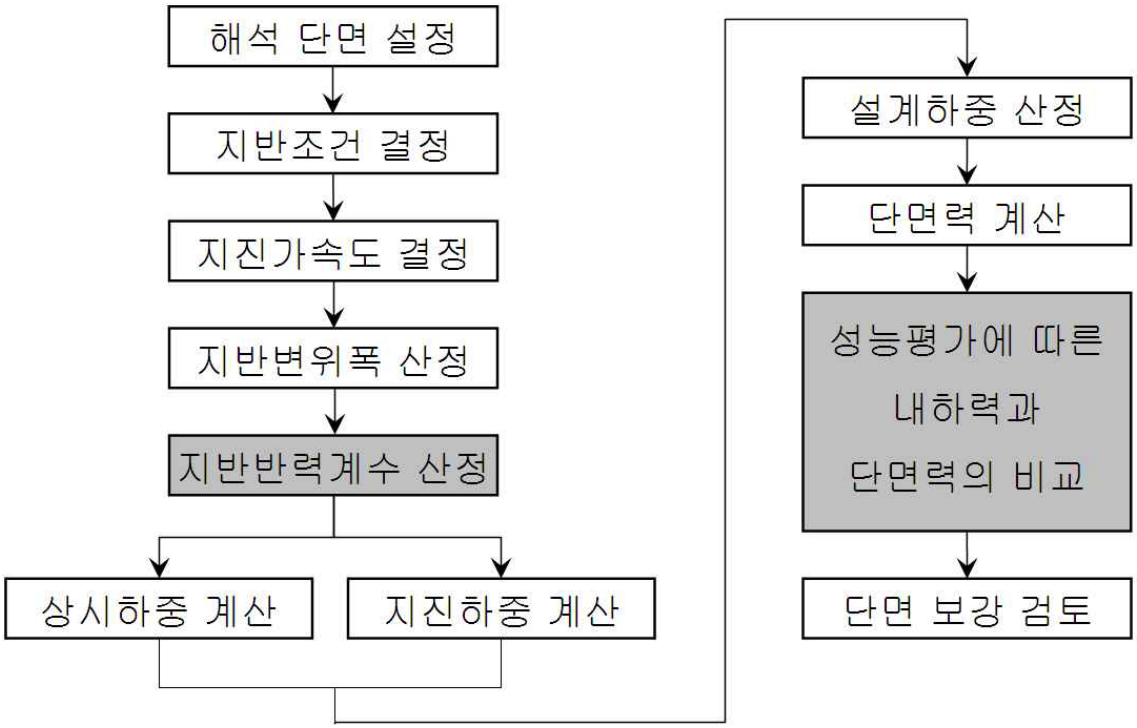
해설그림 4.3.1은 응답변위법의 개념을 설명하고 있다.



해설그림 4.3.1 응답변위법의 개념도

응답변위법을 적용하여 내진 해석을 수행하는 터널 구조물은 일반적으로 프레임(Frame) 요소로 모형화하고, 그 비선형성을 고려하는 것으로 한다. 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 4.3.2와 같다. 먼저 단면이 설정된 후 지반조건에 따른 지진계수를 산정하고 이에 따라 지반의 최대 변위진폭을 결정한다.



해설그림 4.3.2 응답변위법의 해석절차

또한 지반조건에 따라 지반반력계수를 산정하고 설정된 단면의 상시하중과 지진하중에 의해 단면력을 계산한다. 계산된 단면력과 상시하중에 의한 설계 단면력을 비교함으로써 내진보강 여부를 결정한다. 지반의 변위진폭 산정시 이용되는 기반면에서의 설계응답속도는 기존의 가속도응답스펙트럼을 속도응답스펙트럼으로 변환시켜 사용하며, 이 때 속도응답스펙트럼은 [도시철도 내진설계기준]에 제시된 방법을 적용한다.

1. 지반의 지진응답변위 및 설계속도응답스펙트럼

가. 지진력에 의한 지반의 응답변위는 일반적으로 지진응답해석을 통해 기반면에서의 속도응답스펙트럼으로부터 산정한다.

[해설] 응답변위법에 사용되는 지반의 수평 변위량의 연직방향분포는 지진응답해석을 이용하여 구하는 것이 좋다. 그러나 지층구성이 복잡하고 지반의 증폭특성이 복잡한 지반이나 지진시에 지반의 특성이 크게 변화하는 지반 등의 상세한 검토를 필요로 하는 지반 이외는 토층의 고유주기에서 지표면의 최대 변위를 구하고, 지반의 변형 모드를 가정하여 지반 변위의 연직방향분포를 구해도 된다.

해설그림 4.3.3과 같이 지반을 단일층으로 가정하여 지중변위를 산정하는 방법은 해설식(4.3)을 이용하고, 지반을 두 층으로 가정하여 지중변위를 산정하는 방법은 해설식(4.4a)~(4.4c)를 이용한다.

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_S \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2H_s}x\right) \qquad \text{해설식(4.3)}$$

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

T_S : 표층지반의 고유주기(s)　　H_s : 표층지반의 두께(m)

$$U_{h1}(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_S \cdot \cos\left(\frac{w_0}{V_{s0d_1}}x_1\right) \qquad \text{해설식(4.4a)}$$

$$U_{h2}(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_S \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{V_{s0d1}}\right) \cdot \left(\cos\frac{\omega_0 x_2}{V_{s0d_2}} - \frac{\sin\frac{\omega_0 x_2}{V_{s0d2}}}{\tan\frac{\omega_0 H_2}{V_{s0d2}}}\right) \qquad \text{해설식(4.4b)}$$

$$(1+\alpha)\cos\left\{\omega_0\left(\frac{H_1}{V_{s0d1}} + \frac{H_2}{V_{s0d2}}\right)\right\} + (1-\alpha)\cos\left\{\omega_0\left(\frac{H_1}{V_{s0d1}} - \frac{H_2}{V_{s0d2}}\right)\right\} = 0 \qquad \text{해설식(4.4c)}$$

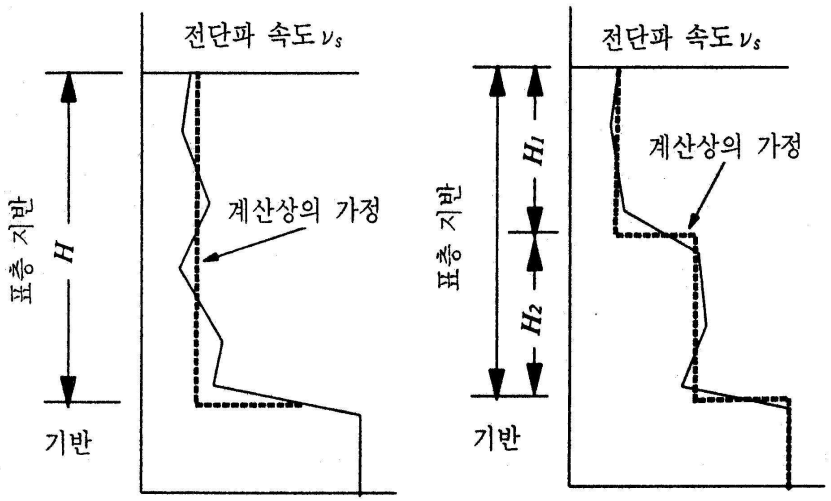
여기서, H_s : 전체 토층 지반의 두께(m)

H_1, H_2 : 제 1층, 제 2층 지반의 두께(m)

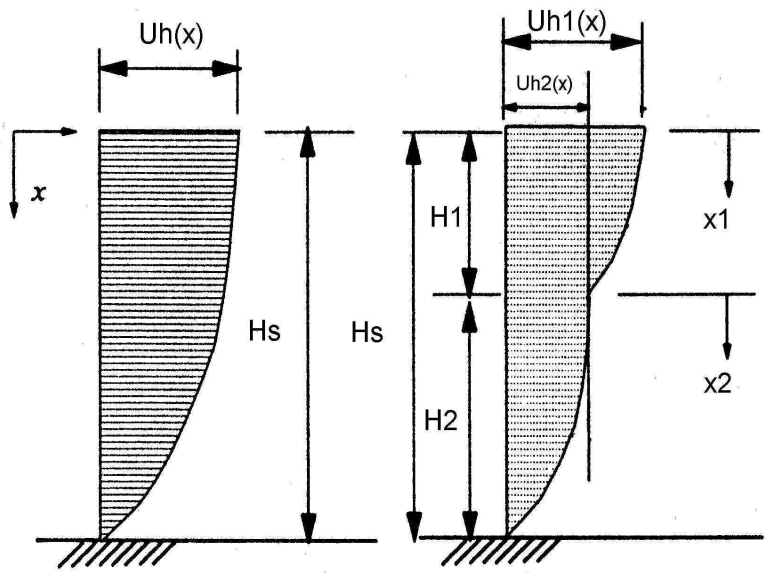
V_{s0d_1}, V_{s0d_2} : 제 1층, 제 2층의 평균 설계전단파속도(m/s)

ω_0 : 지반의 설계 고유 진동수, 해설식(4.4c)에서 시행착오법으로 구함

α : 제1층과 제2층의 임피던스비, $\alpha = \frac{\gamma_1 V_{s0d1}}{\gamma_2 V_{s0d2}}$



(a) 전단파속도에 따른 지층 분할 및 평균 전단파속도 산정



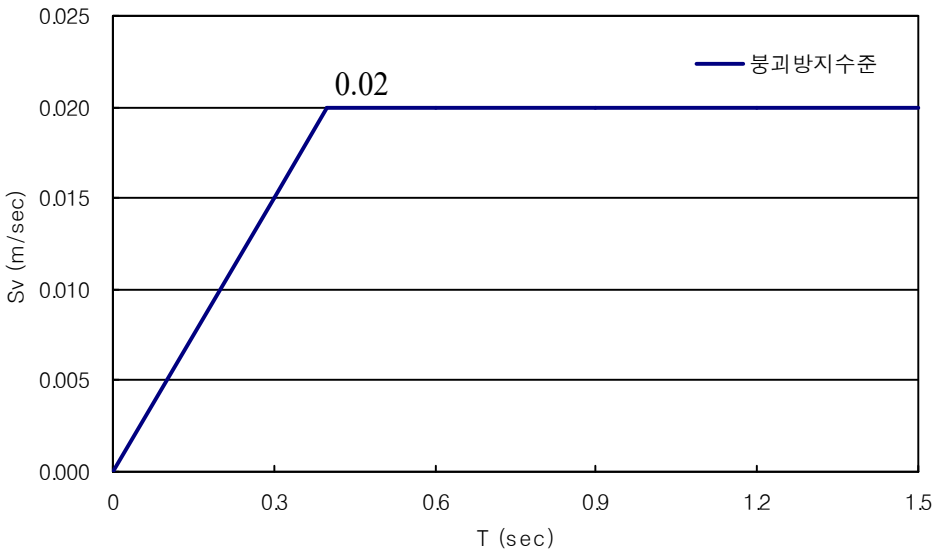
(b) 변형형상(모드)

해설그림 4.3.3 단일코사인, 이중코사인 이론을 이용한 지중변위 산정법

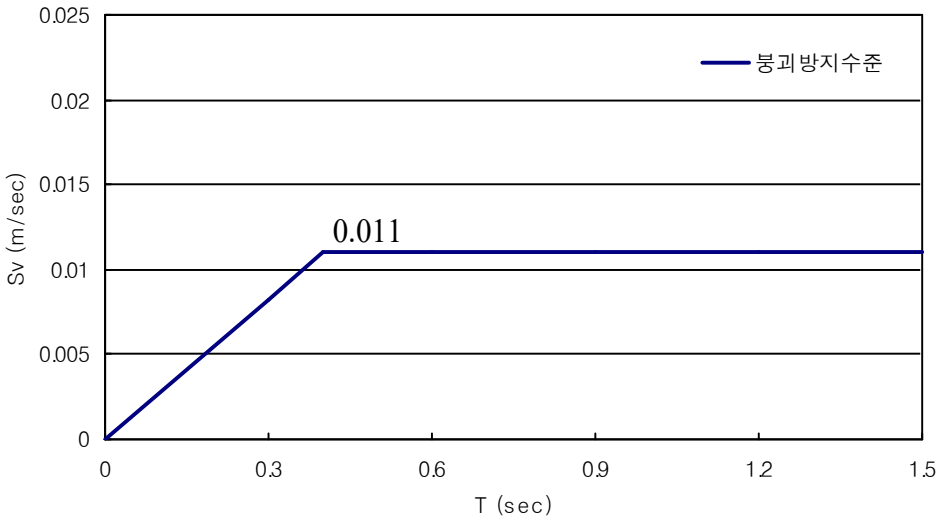
기반면의 속도응답스펙트럼을 산정할 경우, 해석대상 지반의 공진주기가 0.4초 보다 작은 대부분의 국내지반에서는 S_A지반의 지표면 가속도응답스펙트럼을 적분하여 기반면 속도응답스펙트럼으로 사용하는 방법이 적절하다. 그러나, 공진주기가 0.4초 이상인 장주기 지반에서는 지진응답해석을 수행하여 결정하는 것이 바람직하다.

나. 기반면에서 속도 응답스펙트럼은 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 직접 적분하여 구할 수 있다. 그러나 해석부지가 연약층이 깊게 발달되어 공진주기가 0.4초 이상일 경우는 지진응답해석을 수행하여 기반면의 속도응답스펙트럼을 구하는 방법을 추천한다.

[해설] 기반면에서의 설계속도응답스펙트럼은 다음 값에 감쇠율에 대한 보정계수를 곱하여 적용한다.



(a) 지진구역 Ⅰ



(b) 지진구역 Ⅱ

해설그림 4.3.4 기반암 설계속도응답스펙트럼

2. 내진해석을 위한 지반 탄성정수의 산정

가. 지반의 전단탄성계수는 성능수준에 따른 비선형성을 고려하여야 한다.

[해설] 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. 지반의 비선형성을 최대한 반영하기 위해서는 적합한 구성모델을 선정하여 비선형 해석을 수행하는 방법이 가장 합리적이나, 현장에서는 매우 중요한 구조물 이외에는 선형해석을 수행하는 것이 일반적이다. 선형해석 시에는 하중수준에 따른 비선형특성을 감안하기 위해 지반의 전단탄성계수를 다음과 같이 보정하여 사용한다.

$$G_D = (\gamma_t / g) \cdot V_S^2 \qquad \text{해설식(4.5)}$$

여기서, G_D : 지반의 동적전단탄성계수

γ_t : 지반의 단위중량

g : 중력가속도 ($m/\sec^2$)

V_S : 해당구조물을 포함하는 지층의 설계전단파속도 ($m/\sec$)

(해당구조물이 여러 층에 걸칠 경우 각 지층의 높이를 고려한 평균치를 사용한다.)

$$V_{Si} = C \cdot V_{0i} \qquad \text{해설식(4.6)}$$

여기서, V_{Si} : 지반의 동적전단탄성계수 산출에 이용되는 i번째 지층의 설계전단파속도

V_{0i} : 해당구조물을 포함하는 i번째 지층의 초기전단파속도

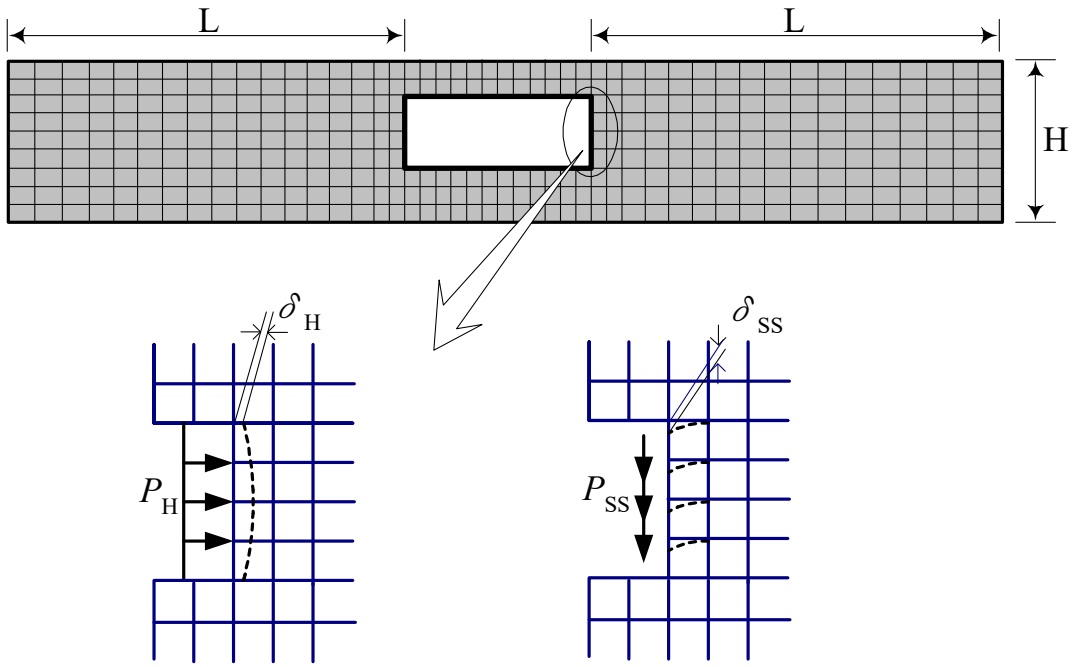
C : 성능수준별 지반변형에 대한 보정계수 $C = 0.5$ (붕괴방지수준)

나. 지반반력계수는 [도시철도 내진설계기준]에서 제시하는 방법에 따라 산출한다.

[해설] 지반반력계수의 산정

① 유한요소 모형법

지진시 지반반력계수 K_H, K_V, K_{SS}, K_{SB}를 구하기 위하여 다음과 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.

$$L \geq 3H \qquad \text{해설식(4.7)}$$

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. 이들 계수간의 상호관계는 다음과 같다. 지반의 동적탄성계수 E_D는 성능수준을 고려한 지반의 설계전단파속도(V_S)로부터 산정된다.

$$E_D = 2(1+\nu_D) \cdot G_D \qquad \text{해설식(4.8)}$$

② 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]의 지반반력계수의 산정부분을 따른다.

$$K_H = k_{h0}\left(\frac{B_h}{30}\right)^{-3/4} \qquad \text{해설식(4.9a)}$$

$$K_V = k_{v0}\left(\frac{B_v}{30}\right)^{-3/4} \qquad \text{해설식(4.9b)}$$

$$K_{SS} = \lambda K_H \qquad \text{해설식(4.9c)}$$

$$K_{SB} = \lambda K_V \qquad \text{해설식(4.9d)}$$

여기서, K_H : 구체측벽의 수평 지반반력계수

K_V : 구체저판의 연직 지반반력계수

K_{SS} : 구체측벽의 전단 지반반력계수

K_{SB} : 구체저판의 전단 지반반력계수

k_{h0} : 지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 수평 지반반력계수

k_{v0} : 지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 연직 지반반력계수

B_h : 구조물 높이 (cm)

B_v : 구조물 저판 폭 (cm)

$$\lambda = 1/3 \sim 1/4 \qquad \text{해설식(4.10a)}$$

$$k_{v0} = \frac{1}{30} \cdot E_D, \qquad k_{h0} = \frac{1}{30} \cdot E_D \qquad \text{해설식(4.10b)}$$

E_D : 지진하중 상태의 성능수준을 고려한 지반의 탄성계수

$$E_D = 2(1+\nu)G_D \qquad \text{해설식(4.11a)}$$

$$G_D = \gamma_t / g \times V_S^2 \qquad \text{해설식(4.11b)}$$

$$V_S = 0.5\, V_0 \text{ (붕괴방지수준)} \qquad \text{해설식(4.11c)}$$

3. 구조물에 작용하는 지진하중

가. 지진력에 의한 수평하중은 다음 식에 의해 계산된다.

$$p(z) = K_H \cdot \{U_h(z) - U_h(z_B)\} \quad \text{식(4.5)}$$

여기서, $p(z)$: 지표로부터 깊이 z 지점에 작용하는 수평방향 하중

K_H : 단위면적당의 수평방향 지반반력계수

$U_h(z)$: 지표면으로부터 깊이 z 지점의 수평방향 변위

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

z_B : 지표면으로부터 구체 저면까지의 깊이

나. 지진력에 의한 구조물에 적용하는 주면전단력은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\tau_U = (\frac{G_D}{\pi \cdot H}) \cdot S_v \cdot T_S \cdot \sin(\frac{\pi \cdot z_U}{2H}) \quad \text{식(4.6a)}$$

$$\tau_B = (\frac{G_D}{\pi \cdot H}) \cdot S_v \cdot T_S \cdot \sin(\frac{\pi \cdot z_B}{2H}) \quad \text{식(4.6b)}$$

$$\tau_S = \frac{(\tau_U + \tau_B)}{2} \quad \text{식(4.6c)}$$

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

z_U : 지표면으로부터 구조물 상판까지의 깊이

z_B : 지표면으로부터 구조물 저판까지의 깊이

S_v : 기반면에서의 속도응답스펙트럼 (설계기준에는 가속도응답스펙트럼 S_a 만이 주어져 있으므로, 이를 변환하여 사용한다.)
$= (T_S/2\pi) \cdot S_a$

T_S : 표층지반의 고유주기$(s) = 1.25 \cdot T_G$
(지진발생시 지반에 발생하는 전단변형 수준을 고려함)

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

H_i : 제 i 번째 토층의 두께

V_{Si} : 제 i번째 토층의 설계전단파속도

H : 기반면의 깊이(경암면 또는 구조물 저면 이하 10~15m정도; m)

다. 지진력에 의한 구조물에 적용하는 자체 중량에 의한 관성력은 다음과 같다.

$$f_i = w_i \cdot K_{hi} \qquad \text{식(4.7)}$$

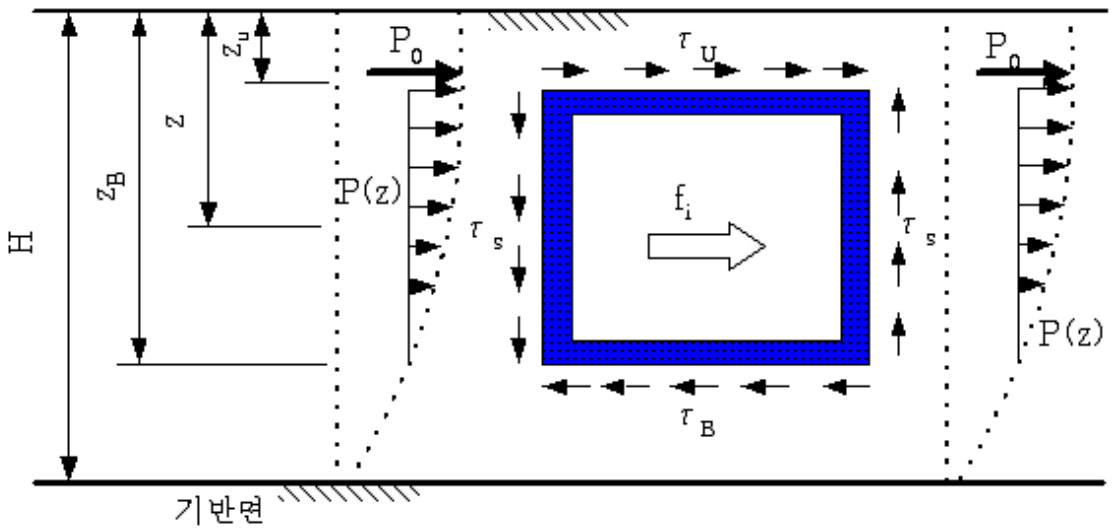
여기서, f_i : i번째 구체의 관성력 하중

w_i : i번째 구체중량

K_{hi} : 해당깊이에 대해 보정한 수평가속도 $[= K_h \cdot C_U(z)]$

$C_{U(Z)}$: 깊이에 대한 보정계수 = $1 - 0.015z$

[해설] 지진해석시 지진에 의한 하중이 작용하는 구체는 해설그림 4.3.6과 같이 나타낼 수 있으며, 이러한 하중의 작용시 각 부재의 단면력을 계산하여 내진성능 평가에 적용하도록 한다.



해설그림 4.3.6 구체에 작용하는 지진시 하중

라. 평가 대상구조물이 지하수위 아래에 있을 경우 지진시 벽체에 단위 면적당 작용하는 동수압을 고려해야 한다. 지진시 동수압은 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$p_f = K_h \cdot \gamma_w \cdot \frac{B}{2} \qquad \text{식(4.8)}$$

여기서, p_f : 벽체 단위 면적 당 동수압 K_h : 설계수평가속도

γ_w : 물의 단위체적중량 B : 벽체의 폭

4. 하중의 구조해석 모형

가. 상시하중은 사하중과 활하중, 토압과 자중 등을 고려하며 하중조합을 이용하여 상부 슬래브와 하부 슬래브, 측벽에 대해 그림 4.3.1과 같이 작용시키도록 한다.

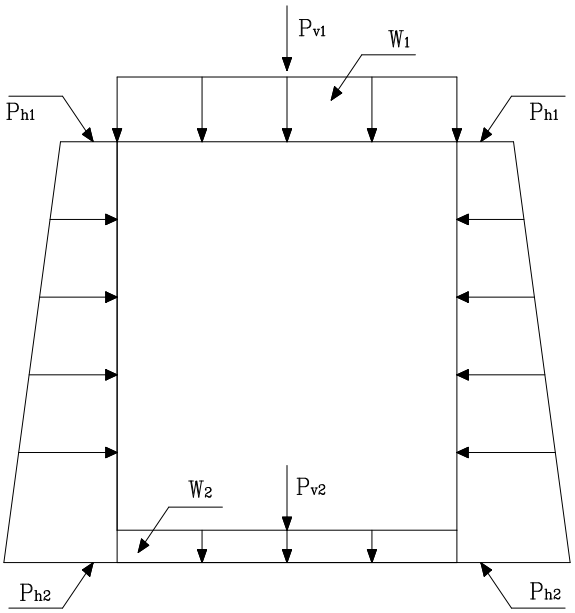


그림 4.3.1 구체에 작용하는 상시하중

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 그림 4.3.2와 같이 수평력으로 작용한다.

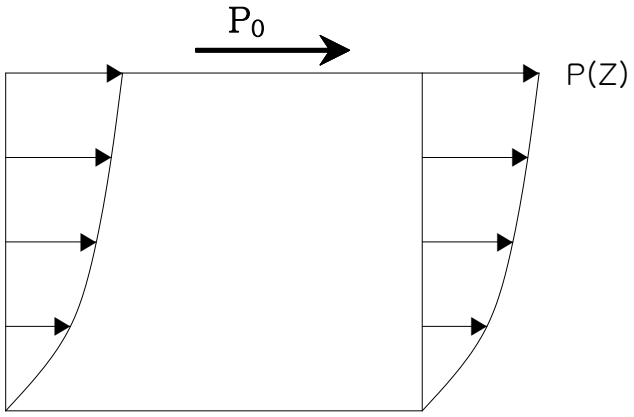


그림 4.3.2 구체에 작용하는 지진시 토압하중

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

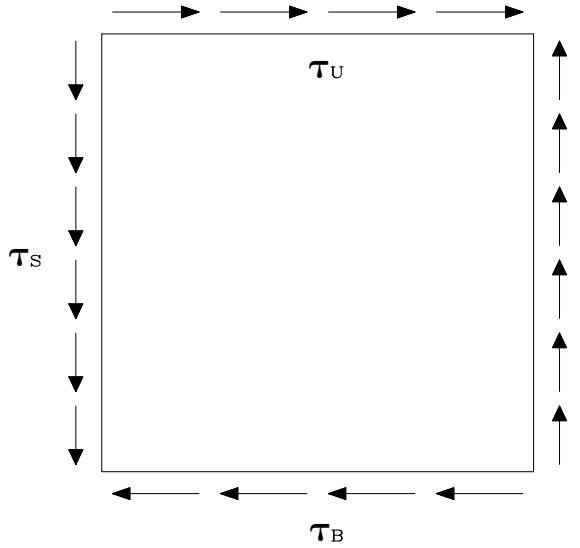


그림 4.3.3 구체에 작용하는 지진시 주면전단력

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

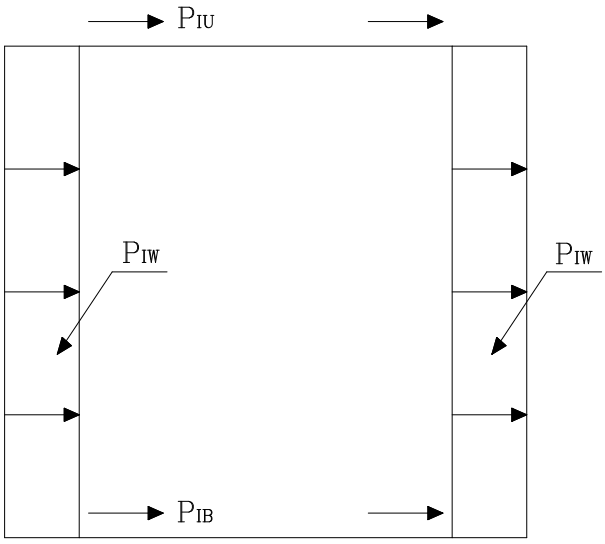


그림 4.3.4 구체에 작용하는 지진시 관성력

5. 종단방향에 대한 단면력 검토

지반의 상태가 종방향으로 급변하는 경우 책임기술자의 판단에 의하여 필요 시 지진에 의한 종단방향에 대한 단면력을 계산하고 이를 설계단면력과 비교하여 내진성능을 검토할 수 있다.

가. 표층지반의 특성을 반영한 지반의 고유주기는 다음 식에 의해 산정한다.

$$T_G = 4\sum_{i=0}^{n}\frac{H_i}{V_{Si}} \qquad \text{식(4.9)}$$

여기서, H_i : 제 i층의 두께

V_{Si} : 제 i층의 설계전단파속도

나. 지진으로 인한 지반진동의 파장은 다음 식으로부터 구한다.

$$L = \frac{2 \cdot L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \qquad \text{식(4.10a)}$$

$$L_1 = T_S \cdot V_{SD} \qquad \text{식(4.10b)}$$

$$L_2 = T_S \cdot V_{BS} \qquad \text{식(4.10c)}$$

여기서, L : 지반진동의 파장

T_S : 표층지반의 고유주기, $T_S = 1.25\,T_G$

V_{SD} : 표층지반의 설계전단파속도

(다음 식에 의해 표층지반 전체의 평균치를 산정한다.)

$$V_{SD} = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{V_{Si}}} \qquad \text{식(4.11)}$$

V_{BS} : 기반면의 설계전단파속도

다. 지반의 변위진폭은 표층지반의 고유주기를 이용하여 다음 식으로 구한다.

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_S \cdot \cos\frac{\pi z}{2H} \qquad \text{식(4.12)}$$

이를 통해 지반변위에 의한 구조물 축 방향의 응력을 검토한다.

라. 구조물의 종단방향과 이와 직교하는 수평면내 및 수직면내의 지반의 강성계수는 다음 식에 의해 산정된다.

$$k_1 = C_1 \cdot G_D,\ k_2 = C_2 \cdot G_D,\ k_3 = C_3 \cdot G_D \qquad \text{식(4.13)}$$

여기서, C_1, C_2, C_3 : 지반의 강성계수 k_1, k_2, k_3에 대한 정수로 실험 등의 조사 결과를 기초로 결정하며, 일반적으로 C_1= C_2=1.0, C_3=3.0 의 값을 사용한다.

G_D : 지반의 동적전단탄성계수

(종단방향의 검토 시 표층지반 전체의 평균치를 사용한다.)

$$G_D = \frac{\gamma_{teq}}{g} \cdot V_{SD}^2 \qquad \text{식(4.14)}$$

γ_{teq} : 표층지반의 환산단위체적중량

$$\gamma_{teq} = \frac{\sum \gamma_t \cdot H_i}{H} \qquad \text{식(4.15)}$$

V_{SD} : 표층지반의 설계전단파속도

마. 종단방향의 검토 시에는 그림 4.3.5에 나타낸 것처럼 단면적과 수평면 내의 단면 2차 모멘트 I_h와 수직면내의 단면 2차 모멘트 I_v를 구하며, 이는 지진으로 인한 축력과 휨 모멘트를 구하는데 이용된다.

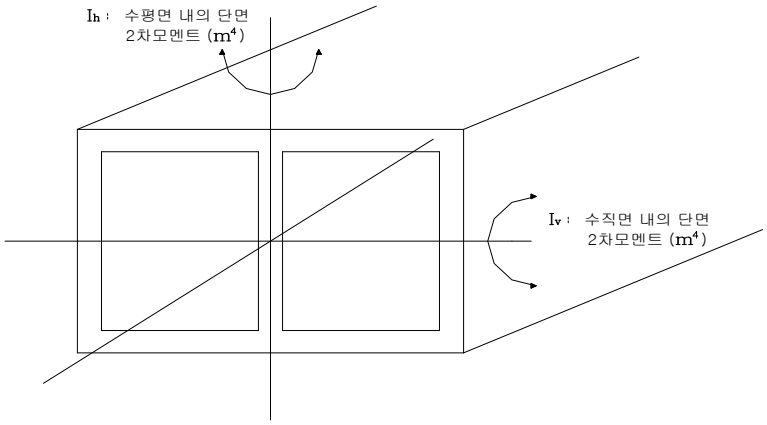
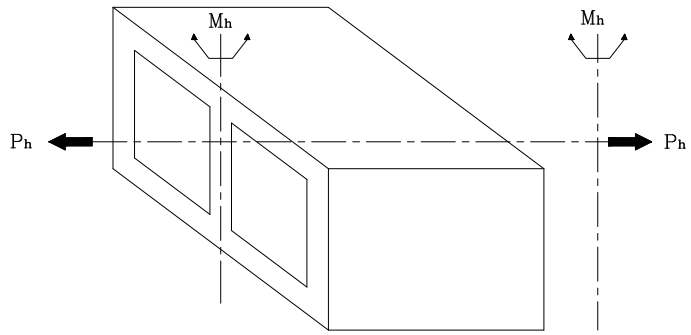
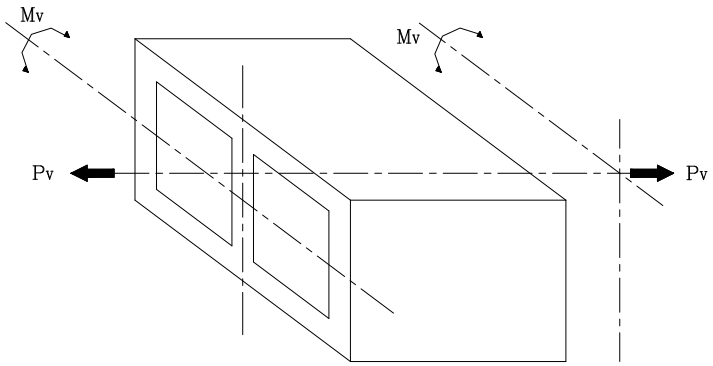


그림 4.3.5 단면의 모형화

이에 따라 수평면내 및 수직면내의 지반진동에 의한 축력과 휨 모멘트를 그림 4.3.6과 같이 나타낼 수 있으며, 구조물의 이음부를 제외한 단면력은 다음의 식으로 구할 수 있다.



(a) 수평면 내



(b) 수직면 내

그림 4.3.6 지진시 단면력

$$P_h = \alpha_1 \cdot \xi_1 \cdot \frac{\pi E \cdot A}{L} \cdot U_h \qquad \text{식(4.16a)}$$

$$P_v = \alpha_1 \cdot \xi_1 \cdot \frac{\pi E \cdot A}{L} \cdot \frac{U_h + U_v}{2} \qquad \text{식(4.16b)}$$

$$M_h = \alpha_2 \cdot \xi_2 \cdot \frac{4\pi^2 E \cdot I_h}{L^2} \cdot U_h \qquad \text{식(4.16c)}$$

$$M_v = \alpha_3 \cdot \xi_3 \cdot \frac{4\pi^2 E \cdot I_v}{L^2} \cdot U_v \qquad \text{식(4.16d)}$$

여기서, P_h, P_v : 수평면내 및 수직면내의 지진진동에 의한 축력

M_h, M_v : 수평면내 및 수직면내의 지진진동에 의한 휨 모멘트

E : 콘크리트 탄성계수

A : 구조물 단면적

I_h, I_v : 구조물 수평면내 및 수직면 내 단면 2차 모멘트

U_h, U_v : 구조물 중심위치의 깊이에서 지진진동의 수평방향 및 수직방향의 변위진폭

ξ_1, ξ_2, ξ_3 : 이음부를 설계하는 경우 단면력의 저감계수

α_1, α_2, α_3 : 구조물 종단방향과 종단방향에 직교하는 수평면내 및 수직면내의 지반에 발생하는 변위가 구조물에 전달되는 전달률

L : 지반진동의 파장

지반의 변위에 따른 전달률 α_1, α_2, α_3는 각각 다음 식에 의해 구한다.

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + (\frac{2\pi}{\lambda_1 \cdot L'})^2} \qquad \text{식(4.17a)}$$

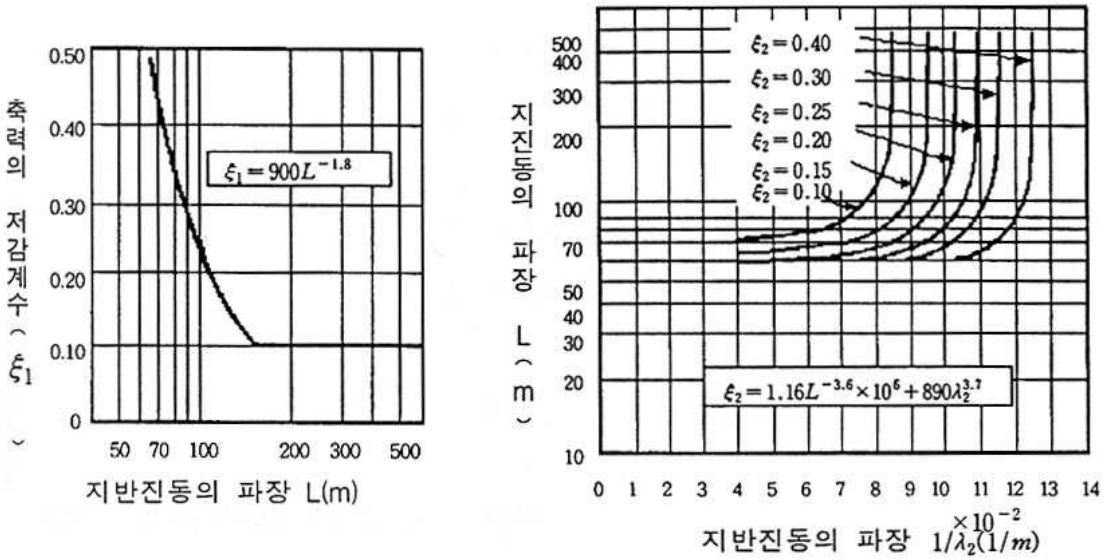
$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + (\frac{2\pi}{\lambda_2 \cdot L})^4} \qquad \text{식(4.17b)}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{1 + (\frac{2\pi}{\lambda_3 \cdot L})^4} \qquad \text{식(4.17c)}$$

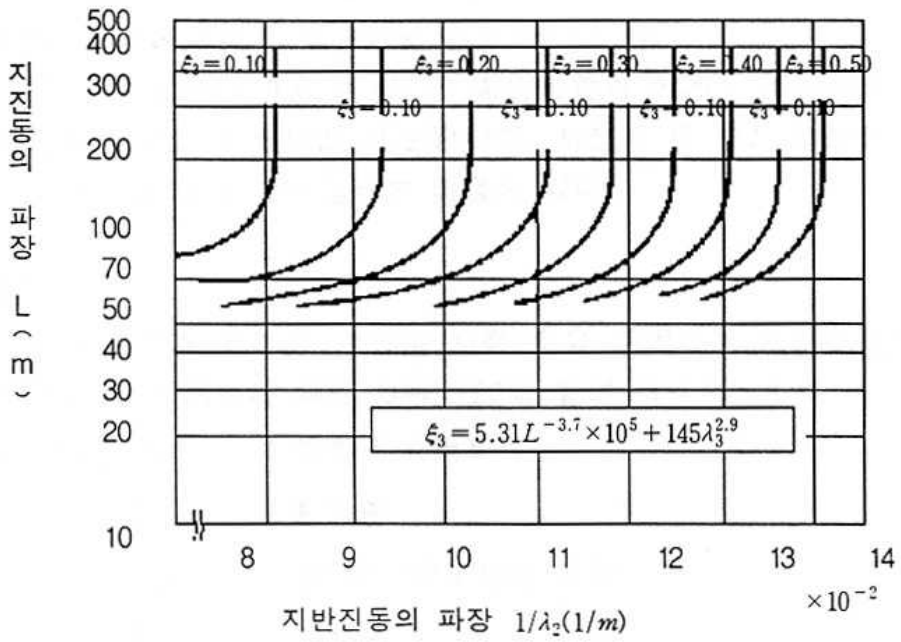
여기서, $\lambda_1 = \sqrt{\frac{k_1}{EA}}$ $\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{k_2}{EI_h}}$ $\lambda_3 = \sqrt{\frac{k_3}{EI_v}}$ $L' = \sqrt{2} \cdot L$

k_1, k_2, k_3 : 구조물의 종단방향, 그와 직교하는 수평면내 및 수직면내 지반의 강성계수

이음을 설치하면 지진시 단면력이 저감되며, 이음부를 설계하는 경우 단면력의 저감계수 ξ_1, ξ_2, ξ_3는 다음의 그림 4.3.7로부터 구한다. ξ_1, ξ_2, ξ_3는 각각 종단방향, 횡단방향, 상하방향의 저감계수이다.



(a) 지진시 종단방향의 저감계수 (b) 지진시 횡단방향의 저감계수



(c) 지진시 상하방향의 저감계수

그림 4.3.7 이음에 의한 지진시 단면력의 저감계수

축력과 휨 모멘트를 동시에 받는 구조물 단면의 응력을 구하기 위해 지진 진동방향, 위상관계 등을 고려하여 앞서 계산된 단면력을 다음과 같이 산정한다.

· 수평면내

$$P_h^{'} = 1/\sqrt{2} \cdot P \qquad \text{식(4.18a)}$$

$$M_h^{'} = 1/\sqrt{2} \cdot M_h \qquad \text{식(4.18b)}$$

· 수직면내

$$P_v^{'} = 1/\sqrt{2} \cdot P \qquad \text{식(4.19a)}$$

$$M_v^{'} = 1/\sqrt{2} \cdot M_v \qquad \text{식(4.19b)}$$

여기서, $P = \sqrt{2P_h^2 + 2P_v^2}$ 이다.

4.3.2 응답진도법

자유장 지반응답을 통하여 구조물 상단과 하단의 상대변위가 최대인 시점의 지층별 응답가속도를 각 절점의 질량에 주어진 값을 곱하여 수평방향의 정적하중으로 작용시키는 지진응답해석법을 응답진도법이라 한다. 응단진도법에 의한 내진안정성 평가는 지진응답 해석결과에 1.5배를 취하여 내진성능 평가에 활용할 것을 추천한다.

[해설] 응답진도법(Ground Response Seismic Coefficient Method, GRSCM)은 자유장 지반응답을 통하여 지진에 의해 구조물 상·하단의 상대변위가 최대인 시점에 발생되는 지반 또는 구조물의 각 위치에서 최대응답가속도를 산정하고 각 절점의 질량에 산정된 응답가속도를 곱한 값을 지진방향의 정적하중으로 작용하여 지진해석을 수행하는 방법으로 형상과 물성의 변화가 큰 지반과 지중구조물에 대해서 신뢰성이 높은 결과를 나타낸다. 또한 이 방법은 지반조건이 급격하게 변하는 구간을 지나는 터널의 내진성능을 향상시키기 위한 지진격리설계에도 효과적으로 적용될 수 있다. 그리고 응답진도법에 의한 지중구조물의 내진안정성 평가에서는 보수적인 평가 및 보수·보강을 위하여 지진시 해석결과에 1.5배 하여 내진성능 평가에 활용할 것을 추천한다.

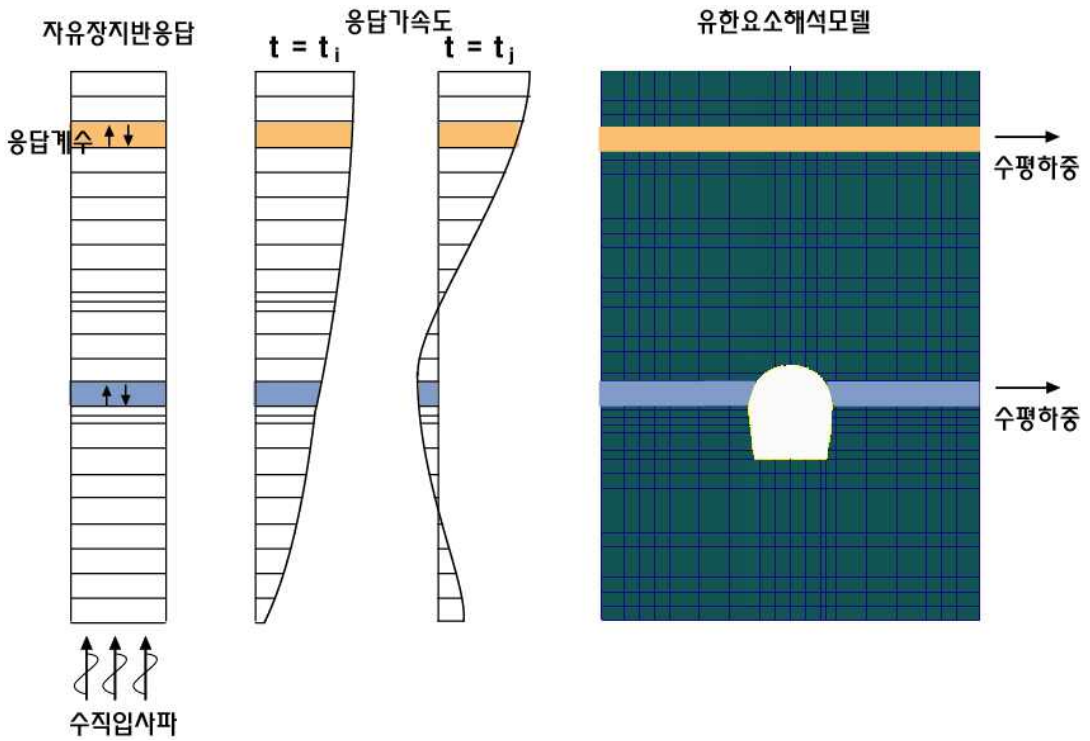


그림 4.3.7 응답진도법의 개념도

응답진도법은 자유장 해석에서 구한 가속도 응답을 유한요소 해석모델에 깊이별로 직접 재하하는 방법으로 다음과 같은 동적 평형방정식으로부터 유도할 수 있다.

▪ 동적 평형방정식

$$[M]\{\ddot{x}(t)\}+[C]\{\dot{x}(t)\}+[K]\{x(t)\}=\{0\}$$

$$\Downarrow$$

$$[M]\{\ddot{\Delta}(t)\}+[C]\{\dot{\Delta}(t)\}+[K]\{\Delta(t)\}=-[M]\{1_z\}\ddot{z}(t)$$

$$\Downarrow$$

$$[K]\{\Delta(t_i)\}=-[M]\underbrace{(\{\ddot{\Delta}(t_i)\}+\{1_z\}\ddot{z}(t_i))}_{=\{\ddot{x}^t_{ff}(t_i)\}}$$

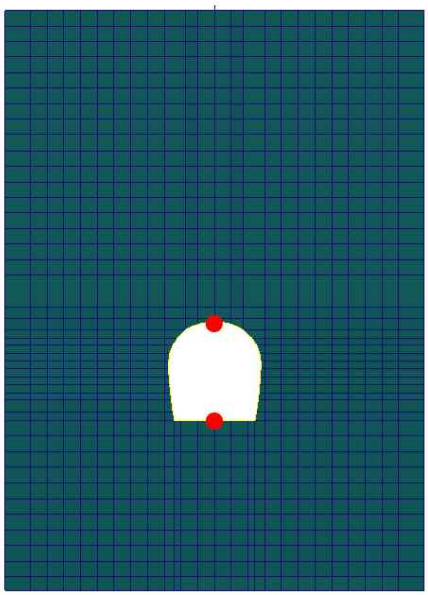
식(4.20a)

$[M]$: 질량행렬 $[C]$: 감쇠행렬
$[K]$: 강성행렬
$\{\ddot{\Delta}\}$: 상대가속도벡터 $\{\dot{\Delta}\}$: 상대속도벡터
$\{\Delta\}$: 상대변위벡터 $\ddot{z}(t)$: 바닥의 수평운동
t_i : 최대 부재력이 발생하는 시간

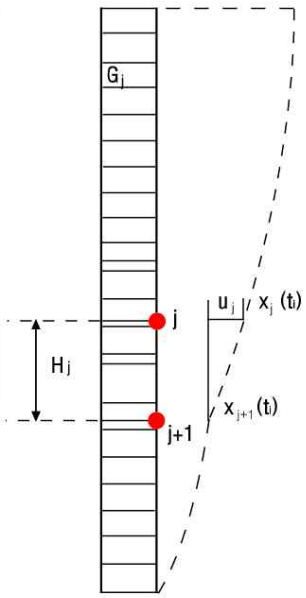
▪ 등가정적 평형방정식

$$[K]\{\Delta(t_i)\}=-[M]\{\ddot{x}^t_{ff}(t_i)\}$$

식(4.20b)



2차원 정적 유한요소모델



1차원 파동전파 자유장모델

$\bar{\tau}_i = G_j \bar{\gamma}_j$

$\bar{\gamma}_j = \dfrac{u_j}{H_j}$

$\bar{\tau}_j$: 전단응력
G_j : 전단탄성계수
$\bar{\gamma}_j$: 전단변형률
u_j : 전단길이
H_j : 구조물의 높이

그림 4.3.8 2차원 정적 유한요소모델 및 자유장 모델

4.3.3 동적해석법(시간이력해석법)

1. 시간이력해석법과 같은 동적해석법을 사용하여 터널 구조물을 해석하고 설계하기 위해서는 설계지진하중을 산정하는 것이 무엇보다 중요하다. 설계지진하중(가속도)의 시간이력은 내진등급에 해당하는 붕괴방지수준을 만족할 수 있는 평균재현주기를 가진 지반운동이 되어야 한다.
2. 시간이력해석을 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. 질량중심과 강성중심의 편차로 인하여 발생하는 비틀림의 효과를 적절히 모델링하여야 한다.
5. 시간이력해석시 구조물 혹은 지반의 감쇠특성이 적절히 모델링되어야 한다.
6. 해석방법

지진하중에 대한 구조물의 동적거동을 나타내는데 사용되는 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=-[M]\{I\}\ddot{u}_g \qquad \text{식(4.21)}$$

동적해석은 궁극적으로 식(4.21)과 같은 운동방정식의 해를 구하는 것이다. 이 방정식의 해를 구하는 방법에는 첫째, 직접 수치해석을 행하는 방법(직접적분법, Direct integration method)과 둘째, 식(4.21)을 서로 무관한(Uncoupled) 모드별 미분방정식으로 변환(분리)시켜 풀고 각 모드별 해를 중첩하는 방법(모드중첩법, Mode superpositon method) 등이 있다.

4.3.4 U-Type 구조물 및 옹벽의 해석법

1. 지진에 의한 토압

U-Type 구조물 및 옹벽에 작용하는 지진에 의한 토압계산은 Mononobe-Okabe에 의해 개발된 의사 정석해석방법을 이용한다.

가. 주동토압

$$P_{AE} = \frac{1}{2}\gamma H^2(1-K_v)K_{AE} \qquad \text{식(4.22)}$$

여기서, K_{AE} : 지진시 주동토압계수로서

$$K_{AE} = \frac{cos^2(\phi-\theta-\beta)}{cos\theta cos^2\beta cos(\delta+\beta+\theta)[1+\sqrt{\frac{sin(\phi+\delta)sin(\phi-\theta-i)}{cos(\delta+\beta+\theta)cos(i-\beta)}}]^2} \qquad \text{식(4.23)}$$

나. 수동토압

$$P_{PE} = \frac{1}{2}\gamma H^2(1-K_v)K_{PE} \qquad \text{식(4.24)}$$

여기서, K_{PE} : 지진시 수동토압계수로서

$$K_{PE} = \frac{cos^2(\phi-\theta-\beta)}{cos\theta cos^2\beta cos(\delta+\beta+\theta)[1-\sqrt{\frac{sin(\phi-\delta)sin(\phi-\theta+i)}{cos(\delta-\beta+\theta)cos(i-\beta)}}]^2} \qquad \text{식(4.25)}$$

γ : 흙의 단위체적중량　　K_h : 수평가속도

H : 옹벽높이　　K_v : 연직가속도

ϕ : 흙의 내부마찰각　　i : 뒤채움흙의 경사각

θ : $tan^{-1}(\frac{K_h}{1-K_v})$　　β : 옹벽배면의 연직에 대한 각

δ : 흙과 옹벽사이의 마찰각

다. U-Type 구조물 및 옹벽에 토압의 합력이 작용하는 높이 h_a는 토압의 정적분력이 하면으로부터 H/3에 작용하고 지진에 의한 추가적인 동적영향이 0.6H의 높이에 작용한다고 가정하여 구할 수 있다. 그러나 대부분의 경우에는 토압이 균등하게 분포되어 있고 h_a를 H/2로 가정하는 것으로 충분하다.

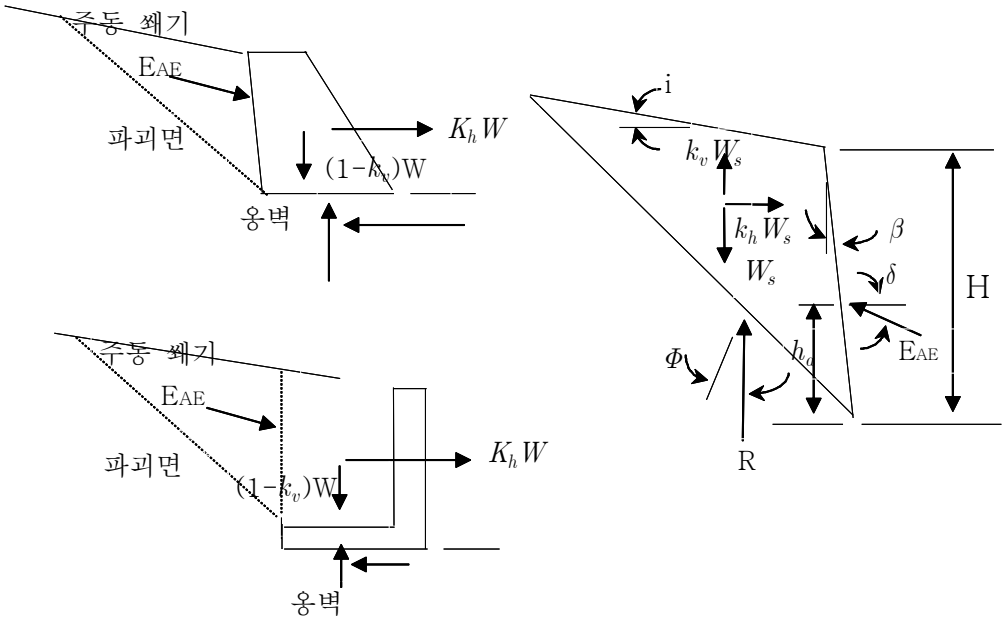


그림 4.3.9 주동쐐기에 작용하는 힘의 도식도

2. 수평가속도(K_h)의 결정

가. 영구변위를 허용하는 경우

경제적인 구조물이 되기 위해서는 변위가 전혀 발생하지 않도록 설계하기보다는 작은 허용변위에 대해 설계하는 것이 좋다. 일반적으로 U-Type 구조물 및 옹벽의 설계허용수평변위를 $254C_a \cdot I$ (mm) 이내로 하는 경우에는 수평가속도(K_h)를 $0.5C_a \cdot I$ 로 적용하여 Mononobe-Okabe 해석방법으로 토압을 계산한다.

나. 영구변위를 허용하지 않는 경우

영구변위를 허용하지 않는 경우의 U-Type 구조물 및 옹벽(기초가 경사말뚝이나 타이백으로 지지되어 있어 구속된 경우)에는 수평가속도(K_h)를 $1.5C_a \cdot I$ 로 적용하여 Mononobe-Okabe 해석방법으로 토압을 계산한다.

3. 수직가속도(K_v)의 결정

특별한 요구가 없는 한 수직가속도(K_v)는 0으로 본다.

제 5 장 내진성능 평가보고서 구성

5.1 문장 및 보고서의 작성

5.1.1 문장

보고서의 문장은 간결하여야 하며 전후의 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 구성

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

부 록

A. 내진성능 평가 예제

(본선 박스, 2층 정거장, 굴착식 터널)

B. 내진안정성 평가방법에 따른 결과 비교

(개착식 터널, 굴착식 터널)

C. 내진점검표

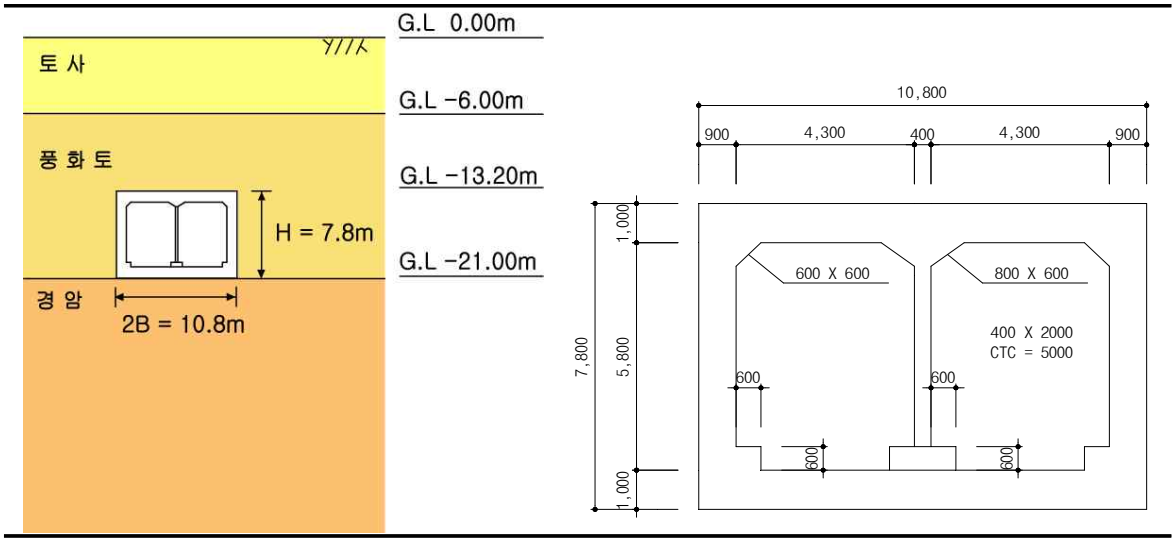
A. 내진성능 평가 예제

1. 본선 박스

2. 2층 정거장

3. 굴착식 터널

1. 본선 박스



<그림 1-1> 지반조건 및 단면제원

■ 내진성능 예비평가

가. 지진도 평가

대상 구조물은 구역 Ⅰ, 도시지역, 지반종류 S_A에 위치하므로 아래의 <표 1-1>의 '지진도 등급 기준'에 의해 지진도 2그룹에 해당한다.

<표 1-1> 지진도 등급 기준

지진구역	구분	지반종류			
		S_E	S_D	S_C	S_B, S_A
Ⅰ	도시	1그룹		2그룹	
	기타지역	1그룹	2그룹	3그룹	3그룹
Ⅱ	도시				4그룹
	기타지역	2그룹	3그룹	4그룹	

나. 취약도 평가

터널 구조물의 취약도는 지진으로 인해 구조물이 붕괴되거나 손상을 입기 쉬운 형태를 구분하는 것으로 지반상태, 사면활동, 저토피 구간, 불균형 토압, 터널 형상 등의 터널의 설계·시공에서부터 유지관리에 이르기까지 다양한 인자를 고려하여 다음과 같이 취약도 지수(Vulnerability Index)로 나타낸다.

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

여기서, *Soil* : 터널 주변의 지반(Soil) 상태에 따른 지수

Slope : 갱구부 사면(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 노후(Deterioration)화에 따른 지수

Damage : 터널 구조물의 손상(Damage)에 따른 지수

<표 1-2> 취약도 지수 평가결과

No.	세부지수	설명	내용	점수
1	*Soil*	주변 지반	경암지반(S_A)	0.2
2	*Slope*	갱구부 사면활동	없음	0.2
3	*Depth*	저토피 구간	10m≤h	0.2
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=10.8m, H=7.8m	0.5
9	*Hist*	재난이력	없음	0.2
10	*Defor*	지속적인 변형	없음	0.2
11	*Deter*	노후화	30년≤t<50년	0.8
12	*Damage*	손상상태	B등급	0.5
합 계				4.7
⇒ 취약도 지수(VI) = 10 × 4.7 = 47점				

다. 영향도 평가

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 터널 구조물의 영향도 지수(Impact Index)로 나타낸다.

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

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

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

$Lifeline$: 터널 내부 주요부착물의 존재여부

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

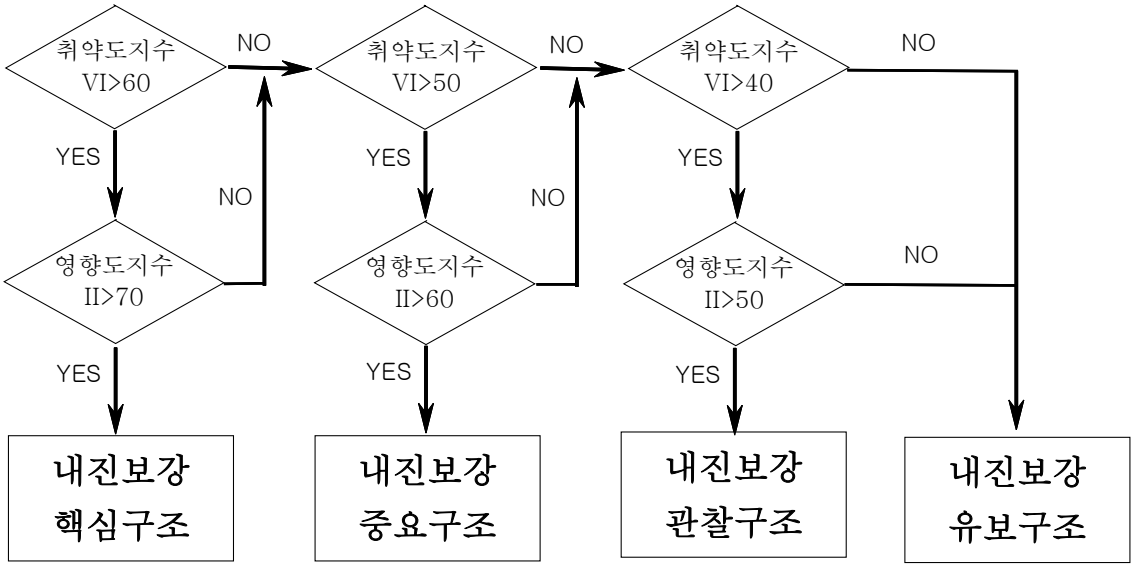
$Recovery$: 터널 구조물의 성능회복을 위한 비용지수

<표 1-3> 영향도 지수 평가결과

세부지수	설명	내용	점수
$Traffic$	교통량 또는 탑승인원	10만명 ≤ P	1.0
$Facilities$	주요시설물	존재	1.0
$Lifeline$	주요 라이프라인	상수도관 및 광통신케이블	0.8
$Importance$	터널 중요도	인원수송, 1등급	1.0
$Recovery$	성능회복비용	2,000m 이상 ~ 3,000m 미만	0.8
합 계			4.6
⇒ 영향도 지수(VI) = 20 × 4.6 = 92점			

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

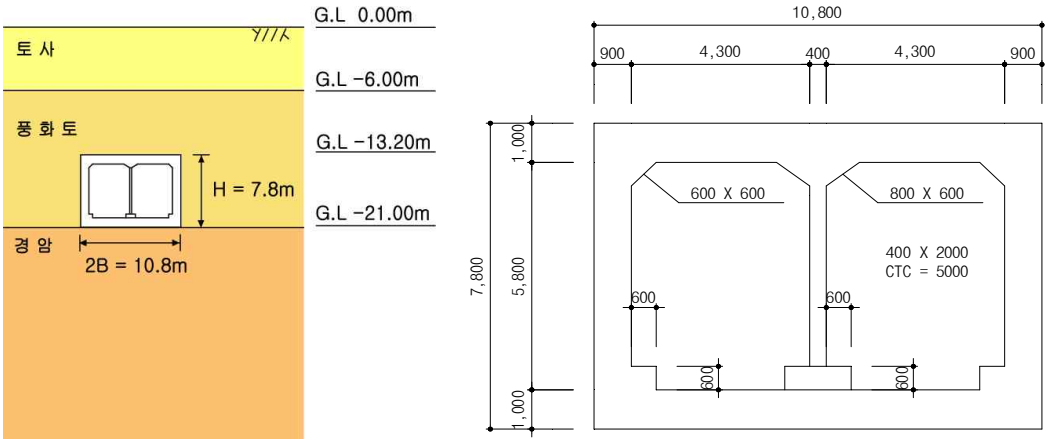
<표 1-4> 내진성능 예비평가 결과

항 목	평 가 결 과
지진도 평가	2그룹
취약도 평가	47점
영향도 평가	92점
그룹 결정	**내진보강 관찰시설**

본 터널 구조물은 내진성능 예비평가에서 내진보강 '관찰시설'로 분류되었으나, 이에 대한 내진성능 상세평가를 수행하면 다음과 같다.

■ 내진성능 상세평가

가. 지반조건 및 단면제원



<그림 1-3> 지반조건 및 단면제원

<표 1-5> 지반의 물성

지반 구분	초기전단파속도 V_0 (m/s)	설계전단파속도 $V_s = 0.5V_0$	단위중량 (γ, kN/m^3)	설계탄성계수** E (kN/m^2)	포아송비 ν
토사	275	137.5	17.65	91,884.5	0.35
풍화토	500	250	19.61	337,500	0.35
경암	1,500	1,500*	22.55	12,937,500	0.25

* 경암(기반암)의 전단파속도는 성능수준별 지반변형에 대한 보정계수(C)를 적용하지 않음.

** 탄성계수 : $E = 2(1+\nu)(\rho)(V_s)^2$

<표 1-6> 철근콘크리트의 물성

구조물	단위중량 γ_{con} (kN/m^3)	설계탄성계수 E_c (kN/m^2)	포아송비 ν
철근콘크리트	24.02	3.123×10^7	0.17

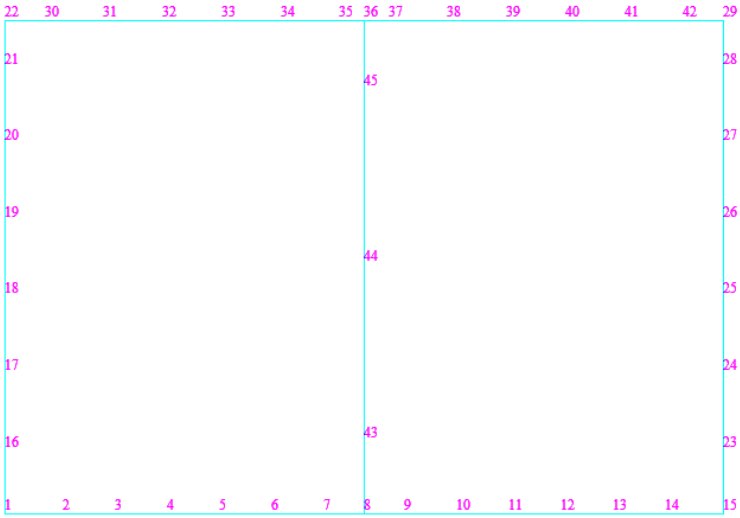
- 콘크리트 설계기준강도 : $f_{ck} = 29.42$ MPa $(= 300$ kgf/cm$^2)$
- 설계탄성계수 : $E_c = 0.077 m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}$ $(f_{cu} = f_{ck} + 8)$

<표 1-7> 본선박스의 단면계수

부재구분	종방향 유효폭(B, m)	두께 H(m)	단면적 $A = BH(m^2)$	단면 2차 모멘트 $I = 1/12 \cdot bh^3(m^4)$
상/하부 슬래브	1	1	1	0.08333
측벽	1	0.9	0.9	0.06075
사각기둥 (0.4m × 2m, CTC = 5m)	0.4	0.4	0.160	0.00213

나. 응답변위법

1) 유한요소해석모델



<그림 1-4> 유한요소해석모델

2) 지진하중 산정

·지진구역 : I 구역

·내진등급 : I 등급

·위험도계수 : I=1.4 (붕괴방지수준)

·지진계수 : $C_a = 0.09$, $C_v = 0.09$ **(기반암=경암 :** S_A**지반)**

① 표층지반의 설계고유주기(T_S) 산정

<표 1-8> 표층지반의 특성치(T_G)와 설계고유주기(T_S)

구분	내 용		비 고
표층지반의 특성치	$T_G = \sum(4H_i/V_{Si})$		$V_{Si} = 0.5 \times V_{0i}$
	1	0.175 sec	V_{0i} : 초기전단파속도 V_{Si} : 설계전단파속도
	2	0.240 sec	
	Σ	0.415 sec	
표층지반의 설계고유주기	$T_S = 1.25T_G = 0.518$ sec		

② 설계속도 응답스펙트럼(S_v) 산정

·통제주기(T_s, T_0) : $T_s = C_v/2.5C_a = 0.4$ sec, $T_0 = 0.2T_s = 0.08$ sec

<표 1-9> 설계속도 응답스펙트럼(S_v)

설계속도 응답스펙트럼, $S_v = T_S/2\pi \times S_a$		S_v(m/sec)
$0 \leq T_S < T_0$	$S_a = C_D \times (C_a + (2.5C_a - C_a)/T_0 \times T_s) \times g \times I$	-
$T_0 \leq T_S < T_s$	$S_a = C_D \times 2.5 \times C_a \times g \times I$	-
$T_s \leq T_S$	$S_a = C_D \times C_v \times g \times I/T_s$	0.131

- 성능수준에 대한 보정 : $I = 1.4$ (붕괴방지수준)

- 지반적용위치에 대한 보정 : $C_a = C_v = 0.09$ (S_A지반)

- 감쇠율에 대한 보정 : $h = 0.2$ (붕괴방지수준), $C_D = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 = 0.667$

③ 지반반력계수(K_V, K_H, K_{SS}, K_{SB}) 산정

<표 1-10> 지반반력계수

구 분		내 용	비 고
풍화토	V_s	$= C \times V_0 = 250$ m/sec	$C = 0.5$, $V_0 = 500$ m/sec
	G_D	$= \gamma_t/g \times V_s^2 = 125{,}000$ kN/m^2	$\gamma_t = 19.61$ kN/m^3
	E_D	$= 2(1+\nu)G_D = 337{,}500$ kN/m^2	$\nu = 0.35$
	k_{v0}, k_{h0}	$= E_D/0.3 = 1{,}125{,}000$ kN/m^3	
경 암	V_s	$= V_0 = 1{,}500$ m/sec	성능수준별 지반변형에 대한 보정계수(C)를 적용하지 않음.
	G_D	$= \gamma_t/g \times V_s^2 = 5{,}175{,}000$ kN/m^2	$\gamma_t = 22.55$ kN/m^3
	E_D	$= 2(1+\nu)G_D = 12{,}937{,}500$ kN/m^2	$\nu = 0.25$
	k_{v0}	$= E_D/0.3 = 43{,}125{,}000$ kN/m^3	

구 분		내 용	비 고
상부 슬래브 (풍화토)	K_V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 76,547\ kN/m^3$	$B_v = 10.8\ m$
	K_{SB}	$= K_V/3.5 = 21,870\ kN/m^3$	
벽 체 (풍화토)	K_H	$= k_{h0}(B_h/0.3)^{-3/4} = 97,706\ kN/m^3$	$B_h = 7.8\ m$
	K_{SS}	$= K_H/3.5 = 27,916\ kN/m^3$	
하부 슬래브 (경 암)	K_V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 2,934,285\ kN/m^3$	$B_v = 10.8\ m$
	K_{SB}	$= K_V/3.5 = 838,367\ kN/m^3$	

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

<표 1-11> 저판 및 상판의 스프링계수

저판 절점	A_i (m)	K^{*}_{Vi} (kN/m/m)	K^{**}_{SBi} (kN/m/m)	상판 절점	A_i (m)	K^{*}_{Vi} (kN/m/m)	K^{**}_{SBi} (kN/m/m)
1	0.850	2,494,100	712,600	22	0.7250	55,500	15,900
2	0.760	2,230,100	637,200	30	0.6815	52,200	14,900
3	0.720	2,112,700	603,600	31	0.8130	62,200	17,800
4	0.720	2,112,700	603,600	32	0.8130	62,200	17,800
5	0.720	2,112,700	603,600	33	0.8130	62,200	17,800
6	0.720	2,112,700	603,600	34	0.8130	62,200	17,800
7	0.635	1,863,300	532,400	35	0.5740	43,900	12,600
8	0.550	1,613,900	461,100	36	0.3350	25,600	7,300
9	0.635	1,863,300	532,400	37	0.5740	43,900	12,600
10	0.720	2,112,700	603,600	38	0.8130	62,200	17,800
11	0.720	2,112,700	603,600	39	0.8130	62,200	17,800
12	0.720	2,112,700	603,600	40	0.8130	62,200	17,800
13	0.720	2,112,700	603,600	41	0.8130	62,200	17,800
14	0.760	2,230,100	637,200	42	0.6815	52,200	14,900
15	0.850	2,494,100	712,600	29	0.7250	55,500	15,900

* $K_{Vi} = A_i \times K_V$

** $K_{SBi} = A_i \times K_{SB}$

<표 1-12> 측벽의 스프링계수

측벽 절점	A_i (m)	K^{*}_{Hi} (kN/m/m)	K^{**}_{SSi} (kN/m/m)	측벽 절점	A_i (m)	K^{*}_{Hi} (kN/m/m)	K^{**}_{SSi} (kN/m/m)
22	0.82500	80,600	23,000	29	0.82500	80,600	23,000
21	0.85250	83,300	23,800	28	0.85250	83,300	23,800
20	1.05500	103,100	29,500	27	1.05500	103,100	29,500
19	1.05500	103,100	29,500	26	1.05500	103,100	29,500
18	1.05500	103,100	29,500	25	1.05500	103,100	29,500
17	1.05500	103,100	29,500	24	1.05500	103,100	29,500
16	0.96500	94,300	26,900	23	0.96500	94,300	26,900
1	0.93750	91,600	26,200	15	0.93750	91,600	26,200

* $K_{Hi} = A_i \times K_H$

** $K_{SSi} = A_i \times K_{SS}$

⑤ 지반변위(U_h) 산정

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

<표 1-13> 지반변위(U_h)

간격(m)	누적심도(m)	지반변위($U_h(x)$, m)*	비고
0.000	0.000	0.0137728	
2.000	2.000	0.0136189	
2.000	4.000	0.0131609	
2.000	6.000	0.0124088	
2.000	8.000	0.0113796	
2.000	10.000	0.0100961	
2.000	12.000	0.0085872	
1.700	13.700	0.0071523	상부슬래브
0.650	14.350	0.0065718	
1.055	15.405	0.0055972	
1.055	16.460	0.0045877	
1.055	17.515	0.0035497	
1.055	18.570	0.0024896	
1.055	19.625	0.0014140	
0.875	20.500	0.0005150	하부슬래브
0.500	21.000	0.0000000	기반암

* 단일코사인 적용

⑥ 지진토압 산정

상판지진토압 $P_{(0)} = K_{SB} \times (u(z_U) - u(z_B)) = 145.16\ kN/m$

측벽지진토압 $P_{(z)} = K_H \times (u(z) - u(z_B))$

<표 1-14> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

측벽 절점		심도(m)	변위(m)	상대변위(m)	K_H(kN/m/m)	측벽지진토압 ($P_{(z)}$, kN/m)
22	29	13.700	0.00715	0.00664	97,706	648.51
21	28	14.350	0.00657	0.00606	97,706	591.79
20	27	15.405	0.00560	0.00508	97,706	496.56
19	26	16.460	0.00459	0.00407	97,706	397.93
18	25	17.515	0.00355	0.00303	97,706	296.51
17	24	18.570	0.00249	0.00197	97,706	192.94
16	23	19.625	0.00141	0.00090	97,706	87.84
1	15	20.500	0.00051	0.00000	97,706	0.00

⑦ 주면전단력(τ) 산정

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

<표 1-15> 주면전단력(τ)

구분	내 용	주면전단력(τ, kN/m)
상판	$\tau_U = \frac{125{,}000}{\pi \times 21} \times 0.197 \times 0.518 \times \sin\left(\frac{\pi \times 13.7}{2 \times 21}\right)$	110.050
저판	$\tau_B = \frac{125{,}000}{\pi \times 21} \times 0.197 \times 0.518 \times \sin\left(\frac{\pi \times 20.5}{2 \times 21}\right)$	128.685
측벽	$\tau_S = \frac{110.050 + 128.685}{2}$	119.367

⑧ 관성력(f) 산정

$$f = m_i \times a_i = w_i \times K_{hi} = (\gamma \times b \times h) \times K_h \times C_U(z)$$
$$= (\gamma \times b \times h) \times (I \times C_a) \times (1 - 0.015z)$$

<표 1-16> 지표에서의 설계수평가속도(K_h)

구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도	$V_{0avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	78.57 m/sec	
	2	357.14 m/sec	
	Σ	435.71 m/sec	⇒ S_C 지반
지진계수	$C_a = 0.13$		
수평가속도	$K_h = I \cdot C_a = 1.4 \times 0.13 = 0.182$		

<표 1-17> 관성력(f)

구분	내 용	관성력(f, kN/m)
상판	$f_{U} = (24.02 \times 1 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 13.7)$	3.473
저판	$f_{B} = (24.02 \times 1 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 20.5)$	3.027
측벽	$f_{W} = (24.02 \times 0.9 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 17.1)$	2.925
기둥	$f_{P} = \left(24.02 \times 0.4 \times 2 \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 17.1)$	0.520

3) 하중조합

본 해석에서 하중조합은 아래와 같이 콘크리트 구조설계기준(2007)을 적용하였으며, 상시와 지진시(붕괴방지수준)에 대한 하중을 조합하여 구조물 단면력을 검토하였다.

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

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

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중(=상판지진토압+ 측벽지진토압+ 주면전단력+ 관성력)

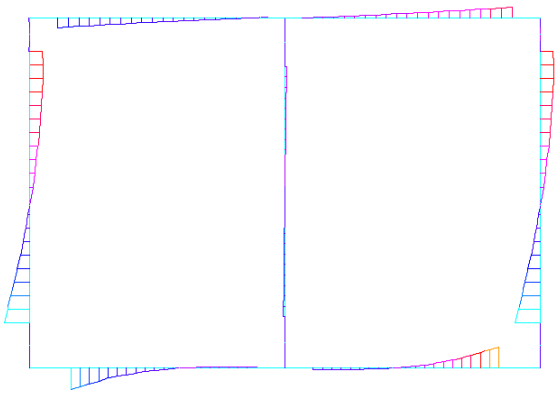
L : 활하중

S : 적설하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

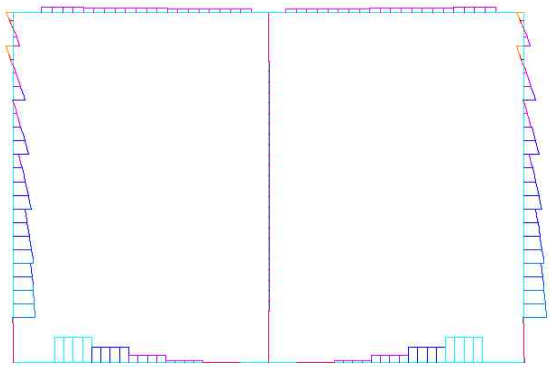
α_H : 토피두께에 따른 보정계수

H_v : 연직토압 및 수압

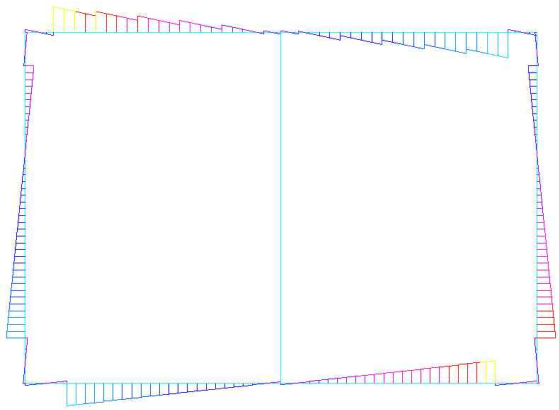
H_h : 수평토압 및 수압



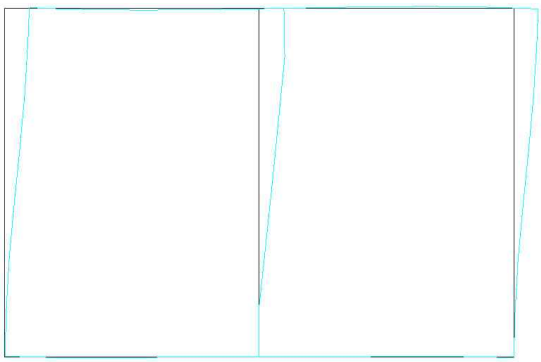
(a) 모멘트도



(b) 전단력도



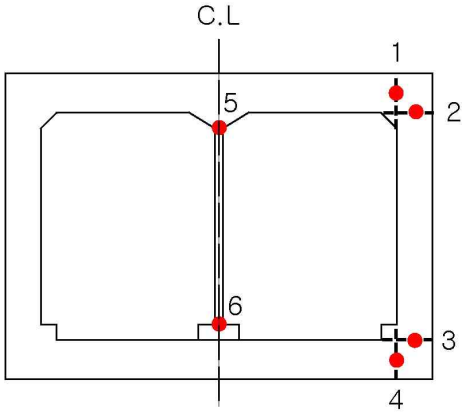
(c) 축력도



(d) 변위도

<그림 1-5> 지진하중에 의한 해석결과

4) 단면검토



<그림 1-6> 본선 박스의 부재력 산정위치

<표 1-18> 슬래브 및 측벽의 성능평가

부재위치		1	2	3	4
B (m)		1.00	1.00	1.00	1.00
H (m)		1.00	0.90	0.90	1.00
Mu (kN-m)		1,690.28	1,723.71	1,976.54	1,720.27
Md ((kN-m)		1,820.72	2,094.07	2,190.23	1,820.72
Vu (kN)		1,192.70	1,293.59	1,341.57	1,493.59
Vd (kN)		1,435.38	1,372.50	1,387.72	1,599.29
인장철근		D29@100	D25@100	D25@100	D29@100
압축철근		-	-	-	-
전단보강근		4-D13@200	4-D13@200	4-D13@200	5-D13@200
성 능 평 가	Mu/Md	0.93	0.82	0.90	0.94
		O.K	**O.K**	**O.K**	**O.K**
	Vu/Vd	0.83	0.94	0.97	0.93
		O.K	**O.K**	**O.K**	**O.K**

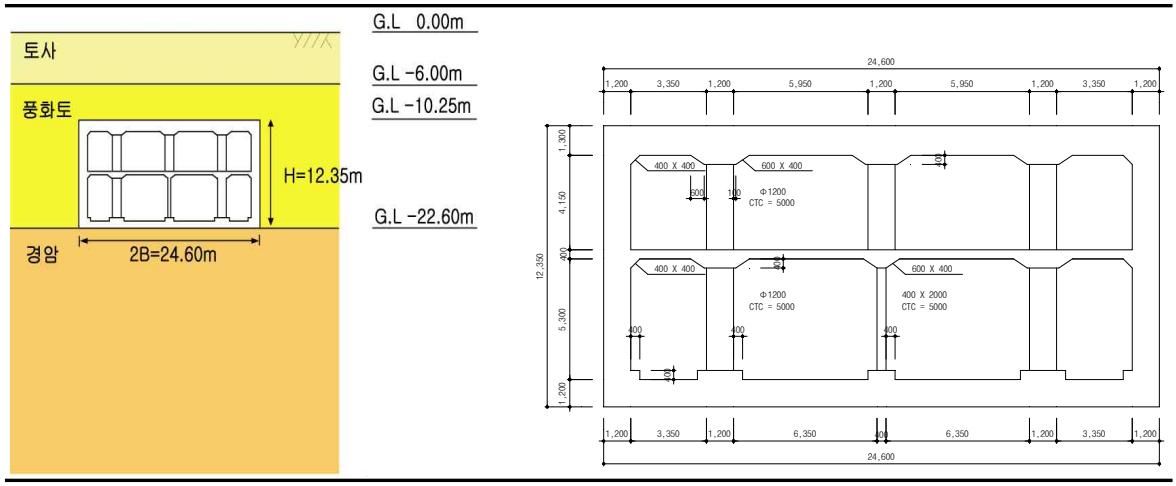
※ Mu/Md, Vu/Vd, Pu/Pd 가 1.0보다 작거나 같으면 OK, 그 외는 NG

<표 1-19> 기둥의 성능평가

부재 위치	폭(m)	e (cm)	철근량	Mu(kN-m) / Md(kN-m)	성능평가 (Mu/Md)	Pu(kN-m) / Pd(kN-m)	성능평가 (Pu/Pd)
5	0.4×2.0CTC 5.0	-	10-D25	112.70 / 718.12	0.16 ∴ **O.K**	1,429.93 / 9,111.49	0.16 ∴ **O.K**
6	0.4×2.0CTC 5.0	-		109.70 / 705.39	0.16 ∴ **O.K**	1,446.70 / 9,302.53	0.16 ∴ **O.K**

※ Mu/Md, Vu/Vd, Pu/Pd 가 1.0보다 작거나 같으면 OK, 그 외는 NG

2. 2층 정거장



<그림 2-1> 2층 지반조건 및 단면제원

■ 내진성능 예비평가

가. 지진도 평가

대상 구조물은 구역 Ⅰ, 도시지역, 지반종류 S_A에 위치하므로 아래의 <표 2-1>의 '지진도 등급 기준'에 의해 지진도 2그룹에 해당한다.

<표 2-1> 지진도 등급 기준

지진구역	구분	지반종류			
		S_E	S_D	S_C	S_B, S_A
Ⅰ	도시	1그룹		2그룹	
	기타지역	1그룹	2그룹	3그룹	3그룹
Ⅱ	도시				4그룹
	기타지역	2그룹	3그룹	4그룹	

나. 취약도 평가

터널 구조물의 취약도는 지진으로 인해 구조물이 붕괴되거나 손상을 입기 쉬운 형태를 구분하는 것으로 지반상태, 사면활동, 저토피 구간, 불균형 토압, 터널 형상

등의 터널의 설계·시공에서부터 유지관리에 이르기까지 다양한 인자를 고려하여 다음과 같이 취약도 지수(Vulnerability Index)로 나타낸다.

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

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

$Slope$: 갱구부 사면(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 노후(Deterioration)화에 따른 지수

$Damage$: 터널 구조물의 손상(Damage)에 따른 지수

<표 2-2> 취약도 지수 평가결과

No.	세부지수	설명	내용	점수
1	*Soil*	주변 지반	보통지반(S_A)	0.2
2	*Slope*	갱구부 사면활동	없음	0.2
3	*Depth*	저토피 구간	10m≤h	0.2
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=24.6m, H=12.35m	0.8
9	*Hist*	재난이력	없음	0.2
10	*Defor*	지속적인 변형	없음	0.2
11	*Deter*	노후화	30년≤t<50년	0.8
12	*Damage*	손상상태	C등급	0.8
합 계				5.3
⇒ 취약도 지수(VI) = 10 × 5.3 = 53점				

다. 영향도 평가

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 터널 구조물의 영향도 지수(Impact Index)로 나타낸다.

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

여기서, $Traffic$: 터널을 이용하는 일평균 교통(Traffic)량 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)

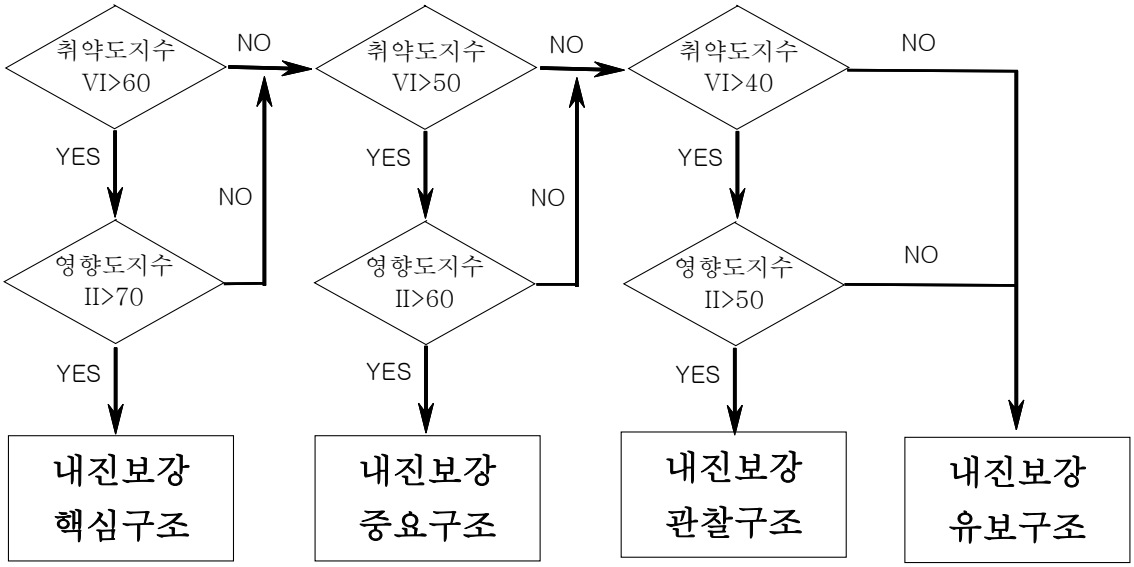
$Recovery$: 터널 구조물의 성능회복(Recovery)을 위한 비용지수

<표 2-3> 영향도 지수 평가결과

세부지수	설명	내용	점수
$Traffic$	교통량 또는 탑승인원	10만명 ≤ P	1.0
$Facilities$	주요시설물	존재	1.0
$Lifeline$	주요 라이프라인	가스 및 송유관	1.0
$Importance$	터널 중요도	인원수송, 1등급	1.0
$Recovery$	성능회복비용	정거장	1.0
합 계			5.0
⇒ 영향도 지수(VI) = 20 × 5.0 = 100점			

라. 내진그룹화

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



<그림 2-2> 내진그룹화 방법

마. 내진성능 예비평가 결과

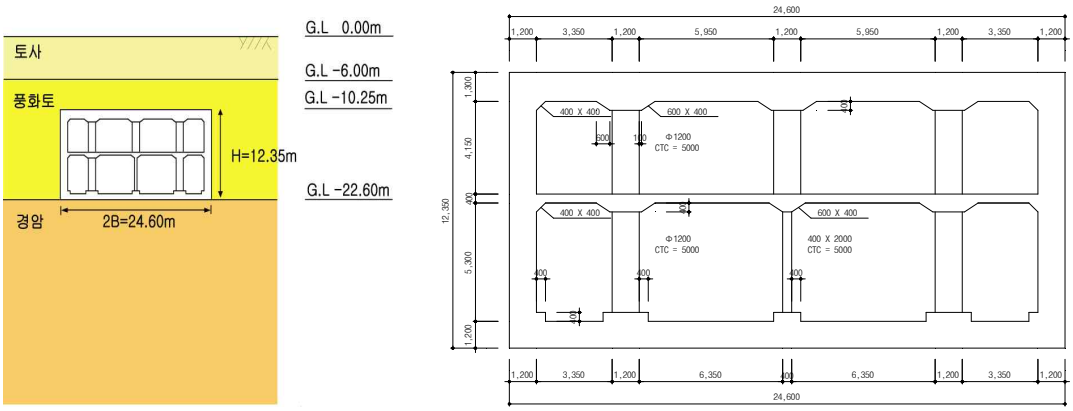
<표 2-4> 내진성능 예비평가 결과

항 목	평 가 결 과
지진도 평가	2그룹
취약도 평가	53점
영향도 평가	100점
그룹 결정	**내진보강 중요시설**

본 터널 구조물은 내진성능 예비평가에서 내진보강 '중요시설'로 분류되었으며, 이에 대한 내진성능 상세평가를 수행하면 다음과 같다.

■ 내진성능 상세평가

가. 지반조건 및 단면제원



<그림 2-3> 지반조건 및 단면제원

<표 2-5> 지반의 물성치

지반 구분	초기전단파속도 V_0 (m/s)	설계전단파속도 $V_s = 0.5V_0$	단위중량 (γ, kN/m^3)	설계탄성계수** E (kN/m^2)	포아송비 ν
토사	275	137.5	17.65	91,884.5	0.35
풍화토	500	250	19.61	337,500	0.35
경암	1,500	1,500*	22.55	12,937,500	0.25

* 경암(기반암)의 전단파속도는 성능수준별 지반변형에 대한 보정계수(C)를 적용하지 않음.

** 탄성계수 : $E = 2(1+\nu)(\rho)(V_s)^2$

<표 2-6> 철근콘크리트의 물성치

구조물	단위중량, γ_{con} (kN/m^3)	설계탄성계수, E_c (kN/m^2)	포아송비, ν
철근콘크리트	24.02	3.123×10^7	0.17

- 콘크리트 설계기준강도 : $f_{ck} = 29.42$ MPa $(= 300$ kgf/cm$^2)$
- 설계탄성계수 : $E_c = 0.077 m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}$ $(f_{cu} = f_{ck} + 8)$

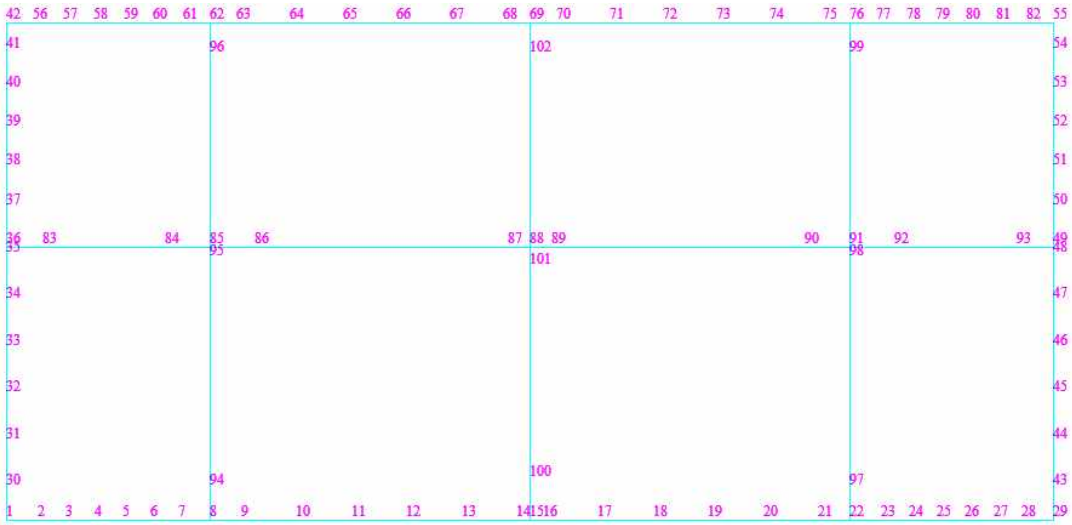
<표 2-7> 2층 정거장의 단면계수

부재구분	종방향 유효폭 B (m)	두께 H (m)	단면적 A = BH (m^2)	단면 2차 모멘트 I = 1/12 · bh^3 (m^4)
상부 슬래브	1	1.3	1.3	0.183083
중앙 슬래브	1	0.4	0.4	0.005333
하부 슬래브	1	1.2	1.2	0.14400
측벽	1	1.2	1.2	0.14400
사각기둥 (0.4m × 2m, CTC = 5m)	0.4	0.4	0.160	0.002133
원기둥 (ϕ1.2m, CTC = 5m)	-	1.2	0.2262*	0.020358**

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

나. 응답변위법

1) 유한요소해석모델



<그림 2-4> 유한요소해석모델

2) 지진하중 산정

·지진구역 : I 구역

·내진등급 : I 등급

·위험도계수 : I=1.4 (붕괴방지수준)

·지진계수 : $C_a = 0.09, C_v = 0.09$ **(기반암=경암 :** S_A**지반)**

① 표층지반의 설계고유주기(T_S) 산정

<표 2-8> 표층지반의 특성치(T_G)와 설계고유주기(T_S)

구분	내 용		비 고
표층지반의 특성치	$T_G = \sum(4H_i/V_{Si})$		$V_{Si} = 0.5 \times V_{0i}$
	1	0.175 sec	V_{0i} : 초기전단파속도 V_{Si} : 설계전단파속도
	2	0.265 sec	
	Σ	0.440 sec	
표층지반의 설계고유주기	$T_s = 1.25T_G = 0.550$ sec		

② 설계속도 응답스펙트럼(S_v) 산정

·통제주기(T_s, T_0) : $T_s = C_v/2.5C_a = 0.4$ sec, $T_0 = 0.2T_s = 0.08$ sec

<표 2-9> 설계속도 응답스펙트럼(S_v)

설계속도 응답스펙트럼, $S_v = T_S/2\pi \times S_a$		S_v(m/sec)
$0 \leq T_S < T_0$	$S_a = C_D \times (C_a + (2.5C_a - C_a)/T_0 \times T_s) \times g \times I$	-
$T_0 \leq T_S < T_s$	$S_a = C_D \times 2.5 \times C_a \times g \times I$	-
$T_s \leq T_S$	$S_a = C_D \times C_v \times g \times I/T_s$	0.131

- 성능수준에 대한 보정 : $I = 1.4$ (붕괴방지수준)

- 지반적용위치에 대한 보정 : $C_a = C_v = 0.09$ (S_A지반)

- 감쇠율에 대한 보정 : $h = 0.2$ (붕괴방지수준), $C_D = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 = 0.667$

③ 지반반력계수(K_V, K_H, K_{SS}, K_{SB}) 산정

<표 2-10> 지반반력계수

구 분		내 용	비 고
풍화토	V_s	$= C \times V_0 = 250$ m/sec	$C = 0.5$, $V_0 = 500$ m/sec
	G_D	$= \gamma_t/g \times V_s^2 = 125{,}000$ kN/m^2	$\gamma_t = 19.61$ kN/m^3
	E_D	$= 2(1+\nu)G_D = 337{,}500$ kN/m^2	$\nu = 0.35$
	k_{v0}, k_{h0}	$= E_D/0.3 = 1{,}125{,}000$ kN/m^3	
경 암	V_s	$= V_0 = 1{,}500$ m/sec	성능수준별 지반변형에 대한 보정계수(C)를 적용하지 않음.
	G_D	$= \gamma_t/g \times V_s^2 = 5{,}175{,}000$ kN/m^2	$\gamma_t = 22.55$ kN/m^3
	E_D	$= 2(1+\nu)G_D = 12{,}937{,}500$ kN/m^2	$\nu = 0.25$
	K_{v0}	$= E_D/0.3 = 43{,}125{,}000$ kN/m^3	

구 분		내 용	비 고
상부 슬래브 (풍화토)	K_V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 41{,}285\ kN/m^3$	$B_v = 24.6\ m$
	K_{SB}	$= K_V/3.5 = 11{,}796\ kN/m^3$	
벽 체 (풍화토)	K_H	$= k_{h0}(B_h/0.3)^{-3/4} = 69{,}222\ kN/m^3$	$B_h = 12.35\ m$
	K_{SS}	$= K_H/3.5 = 19{,}778\ kN/m^3$	
저 판 (경 암)	K_V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 1{,}582{,}591\ kN/m^3$	$B_v = 24.6\ m$
	K_{SB}	$= K_V/3.5 = 452{,}169\ kN/m^3$	

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

<표 2-11> 저판 및 상판의 스프링계수

저판 절점	A_i (m)	K^{*}_{Vi} (kN/m/m)	K^{**}_{SBi} (kN/m/m)	상판 절점	A_i (m)	K^{*}_{Vi} (kN/m/m)	K^{**}_{SBi} (kN/m/m)
1	0.950	1,503,500	429,600	42	0.9000	37,200	10,600
2	0.665	1,052,400	300,700	56	0.6350	26,200	7,500
3	0.630	997,000	284,900	57	0.6700	27,700	7,900
4	0.630	997,000	284,900	58	0.6700	27,700	7,900
5	0.630	997,000	284,900	59	0.6700	27,700	7,900
6	0.630	997,000	284,900	60	0.6700	27,700	7,900
7	0.665	1,052,400	300,700	61	0.6350	26,200	7,500
8	0.700	1,107,800	316,500	62	0.6000	24,800	7,100
9	0.965	1,527,200	436,300	63	0.8950	37,000	10,600
10	1.230	1,946,600	556,200	64	1.1900	49,100	14,000
11	1.230	1,946,600	556,200	65	1.1900	49,100	14,000
12	1.230	1,946,600	556,200	66	1.1900	49,100	14,000
13	1.230	1,946,600	556,200	67	1.1900	49,100	14,000
14	0.765	1,210,700	345,900	68	0.8950	37,000	10,600
15	0.300	474,800	135,700	69	0.6000	24,800	7,100
16	0.765	1,210,700	345,900	70	0.8950	37,000	10,600
17	1.230	1,946,600	556,200	71	1.1900	49,100	14,000
18	1.230	1,946,600	556,200	72	1.1900	49,100	14,000
19	1.230	1,946,600	556,200	73	1.1900	49,100	14,000
20	1.230	1,946,600	556,200	74	1.1900	49,100	14,000
21	0.965	1,527,200	436,300	75	0.8950	37,000	10,600
22	0.700	1,107,800	316,500	76	0.6000	24,800	7,100
23	0.665	1,052,400	300,700	77	0.6350	26,200	7,500
24	0.630	997,000	284,900	78	0.6700	27,700	7,900
25	0.630	997,000	284,900	79	0.6700	27,700	7,900
26	0.630	997,000	284,900	80	0.6700	27,700	7,900
27	0.630	997,000	284,900	81	0.6700	27,700	7,900
28	0.665	1,052,400	300,700	82	0.6350	26,200	7,500
29	0.950	1,503,500	429,600	55	0.9000	37,200	10,600

* $K_{Vi} = A_i \times K_V$

** $K_{SBi} = A_i \times K_{SB}$

<표 2-12> 측벽의 스프링계수

측벽 절점	A_i (m)	K^{*}_{Hi} (kN/m/m)	K^{**}_{SSi} (kN/m/m)	측벽 절점	A_i (m)	K^{*}_{Hi} (kN/m/m)	K^{**}_{SSi} (kN/m/m)
42	0.975	67,500	19,300	55	0.975	67,500	19,300
41	0.760	52,600	15,000	54	0.760	52,600	15,000
40	0.870	60,200	17,200	53	0.870	60,200	17,200
39	0.870	60,200	17,200	52	0.870	60,200	17,200
38	0.870	60,200	17,200	51	0.870	60,200	17,200
37	0.870	60,200	17,200	50	0.870	60,200	17,200
36	0.535	37,000	10,600	49	0.535	37,000	10,600
35	0.620	42,900	12,300	48	0.620	42,900	12,300
34	1.040	72,000	20,600	47	1.040	72,000	20,600
33	1.040	72,000	20,600	46	1.040	72,000	20,600
32	1.040	72,000	20,600	45	1.040	72,000	20,600
31	1.040	72,000	20,600	44	1.040	72,000	20,600
30	0.870	60,200	17,200	43	0.870	60,200	17,200
1	0.950	65,800	18,800	29	0.950	65,800	18,800

* $K_{Hi} = A_i \times K_H$

** $K_{SSi} = A_i \times K_{SS}$

⑤ 지반변위(U_h) 산정

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

<표 2-13> 지반변위(U_h)

간격(m)	누적심도(m)	지반변위($U_h(x)$, m)*	비고
0.000	0.000	0.0146233	
2.000	2.000	0.0144822	
2.000	4.000	0.0140618	
2.000	6.000	0.0133700	
2.000	8.000	0.0124204	
2.900	10.900	0.0106237	상부슬래브
0.650	11.550	0.0101590	
0.870	12.420	0.0095048	

0.870	13.290	0.0088158	
0.870	14.160	0.0080947	
0.870	15.030	0.0073439	
0.870	15.900	0.0065663	중간슬래브
0.200	16.100	0.0063840	
1.040	17.140	0.0054172	
1.040	18.180	0.0044221	
1.040	19.220	0.0034039	
1.040	20.260	0.0023679	
1.040	21.300	0.0013195	
0.700	22.000	0.0006097	하부슬래브
0.600	22.600	0.0000000	기반암

* 단일코사인 적용

⑥ 지진토압($P_{(z)}$) 산정

상판지진토압 $P_{(0)} = K_{SB} \times (u(z_U) - u(z_B)) = 198.05\ kN/m$

측벽지진토압 $P_{(z)} = K_H \times (u(z) - u(z_B))$

<표 2-14> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

측벽절점		심도(m)	변위(m)	상대변위(m)	K_H(kN/m/m)	측벽지진토압 ($P_{(z)}$, kN/m)
42	55	10.900	0.01062	0.01001	69,222	693.19
41	54	11.550	0.01016	0.00955	69,222	661.02
40	53	12.420	0.00950	0.00890	69,222	615.74
39	52	13.290	0.00882	0.00821	69,222	568.05
38	51	14.160	0.00809	0.00749	69,222	518.13
37	50	15.030	0.00734	0.00673	69,222	466.16
36	49	15.900	0.00657	0.00596	69,222	412.33
35	48	16.100	0.00638	0.00577	69,222	399.71
34	47	17.140	0.00542	0.00481	69,222	332.79
33	46	18.180	0.00442	0.00381	69,222	263.90
32	45	19.220	0.00340	0.00279	69,222	193.42
31	44	20.260	0.00237	0.00176	69,222	121.71
30	43	21.300	0.00132	0.00071	69,222	49.14
1	29	22.000	0.00061	0.00000	69,222	0.00

⑦ 주면전단력(τ) 산정

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

<표 2-15> 주면전단력(τ)

구분	내 용	주면전단력(τ, kN/m)
상판	$\tau_U = \frac{125,000}{\pi \times 22.6} \times 0.197 \times 0.550 \times \sin\left(\frac{\pi \times 10.9}{2 \times 22.6}\right)$	87.304
저판	$\tau_B = \frac{125,000}{\pi \times 22.6} \times 0.197 \times 0.550 \times \sin\left(\frac{\pi \times 22}{2 \times 22.6}\right)$	126.937
측벽	$\tau_S = \frac{87.304 + 126.937}{2}$	107.121

⑧ 관성력(f) 산정

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

$$= (\gamma \times b \times h) \times (I \times C_a) \times (1 - 0.015z)$$

<표 2-16> 지표에서의 설계수평가속도(K_h)

구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도	$V_{0avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	73.01 m/sec	
	2	367.26 m/sec	
	Σ	440.27 m/sec	$\Rightarrow S_C$ 지반
지진계수	$C_a = 0.13$		
수평가속도	$K_h = I \cdot C_a = 1.4 \times 0.13 = 0.182$		

<표 2-17> 관성력(f)

구분	내 용	관성력(kN/m)
상판	$f_U = (24.02 \times 1.3 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 10.9)$	4.754
중판	$f_U = (24.02 \times 0.4 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 15.9)$	1.332
저판	$f_B = (24.02 \times 1.2 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 22.0)$	3.515
측벽	$f_W = (24.02 \times 1.2 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 16.45)$	3.952
지하 1층 기둥	$f_{P1} = \left(24.02 \times \frac{\pi \times 1.2^2}{4} \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 13.4)$	0.790
지하 2층 기둥	$f_{P2} = \left(24.02 \times \frac{\pi \times 1.2^2}{4} \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 18.95)$	0.708
지하 2층 측벽	$f_{W1} = \left(24.02 \times 0.4 \times 2 \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 18.95)$	0.501

3) 하중조합

본 해석에서 하중조합은 아래와 같이 콘크리트 구조설계기준(2007)을 적용하였으며, 상시와 지진시(붕괴방지수준)에 대한 하중을 조합하여 구조물 단면력을 검토하였다.

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

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

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중(=상판지진토압+ 측벽지진토압+ 주면전단력+ 관성력)

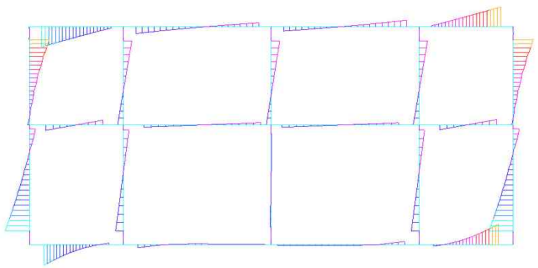
L : 활하중

S : 적설하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

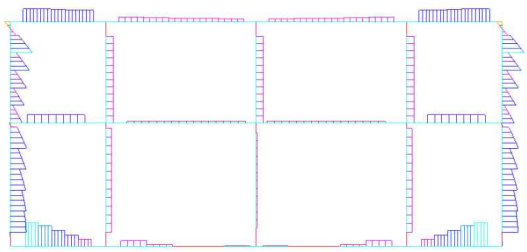
α_H : 토피두께에 따른 보정계수

H_v : 연직토압 및 수압

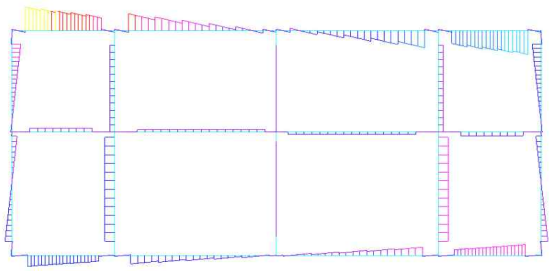
H_h : 수평토압 및 수압



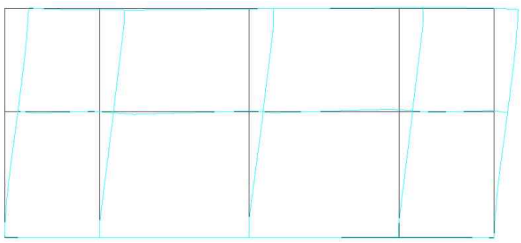
(a) 모멘트도



(b) 전단력도



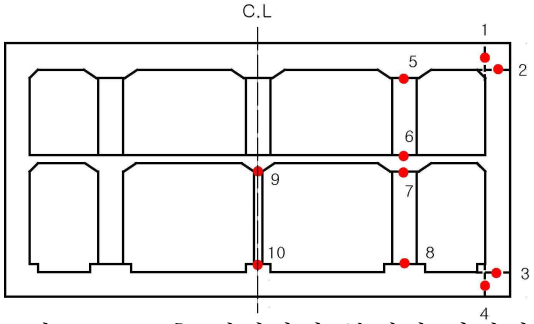
(c) 축력도



(d) 변위도

<그림 2-5> 지진하중에 의한 해석결과

4) 단면검토



<그림 2-6> 2층 정거장의 부재력 산정위치

<표 2-18> 슬래브/측벽의 성능평가

부재위치		1	2	3	4
B (m)		1.00	1.00	1.00	1.00
H (m)		1.30	1.20	1.20	1.20
Mu (kN-m)		2,758.19	2,649.29	3,025.13	2,958.18
Md ((kN-m)		1,404.43	2,381.05	2,719.40	1,640.97
Vu (kN)		1,195.70	1,480.39	1,567.03	1,598.41
Vd (kN)		1,134.81	1,095.99	1,143.56	1,601.38
인장철근		D25@125	D25@125	D25@125	D29@125
압축철근		-	-	-	-
전단보강근		2-D13@400	2-D13@400	2-D13@400	4-D13@200
성 능 평 가	Mu/Md	1.96	1.11	1.11	1.80
		N.G	**N.G**	**N.G**	**N.G**
	Vu/Vd	1.05	1.35	1.37	1.00
		N.G	**N.G**	**N.G**	**O.K**

※ Mu/Md, Vu/Vd, Pu/Pd 가 1.0보다 작거나 같으면 OK, 그 외는 NG

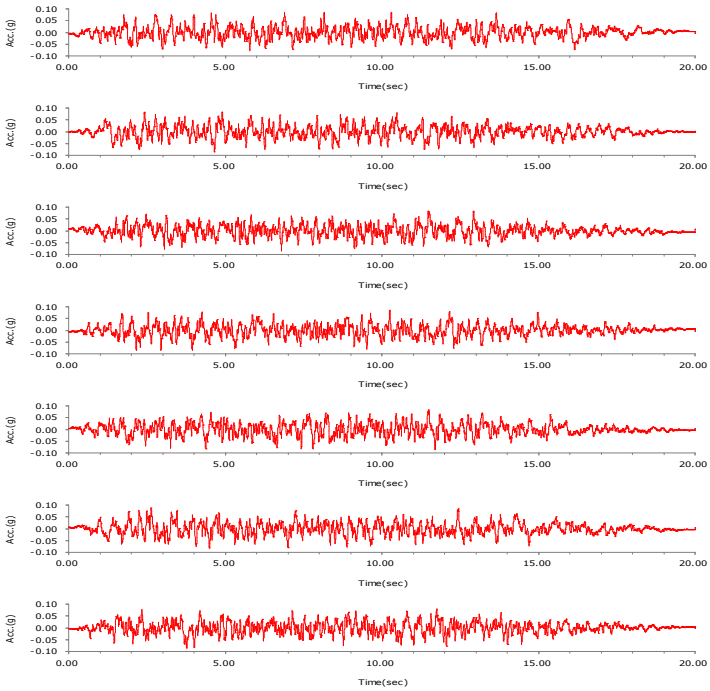
<표 2-19> 기둥의 성능평가

부재 위치	폭 또는 직경 (m)	e (cm)	철근	Mu (kN-m) / Md (kN-m)	성능평가 (Mu/Md)	Pu (kN) / Pd (kN)	성능평가 (Pu/Pd)
5	Φ1.2CTC 5.0	-	11-D32	991.23 / 2,887.39	0.34 ∴ O.K	1,720.78 / 5,012.52	0.34 ∴ O.K
6	Φ1.2CTC 5.0	-		698.71 / 3,069.40	0.23 ∴ O.K	1,741.71 / 7,651.24	0.23 ∴ O.K
7	Φ1.2CTC 5.0	-	14-D32 7-D32	560.97 / 3,062.82	0.18 ∴ O.K	2,037.91 / 11,126.70	0.18 ∴ O.K
8	Φ1.2CTC 5.0	-		851.98 / 3,467.97	0.25 ∴ O.K	2,063.00 / 8,397.41	0.25 ∴ O.K
9	0.4×2.0CTC 5.0	-	16-D32 11-D32	53.90 / 574.37	0.09 ∴ O.K	2,284.60 / 16,535.60	0.14 ∴ O.K
10	0.4×2.0CTC 5.0	-		83.20 / 592.49	0.14 ∴ O.K	2,300.96 / 16,385.80	0.14 ∴ O.K

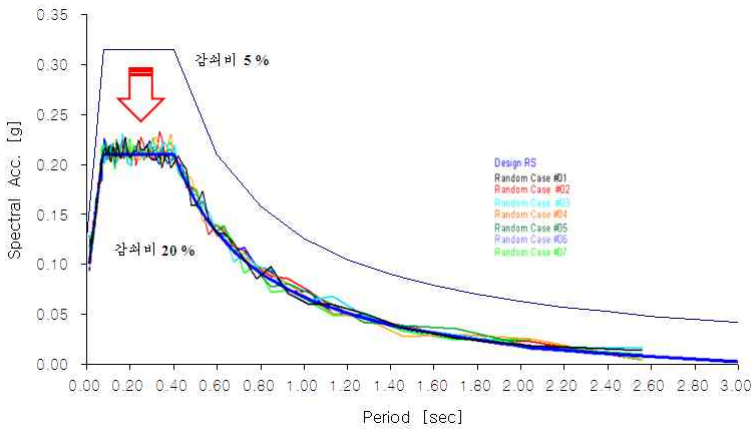
※ Mu/Md, Vu/Vd, Pu/Pd 가 1.0보다 작거나 같으면 OK, 그 외는 NG

다. 응답진도법(GRSCM)

구조물의 등가정적해석을 위해 기반면 노두의 가속도 설계응답스펙트럼으로 부터 7개의 인공지진파를 <그림 2-7>과 같이 작성하였다. 인공지진파의 총 지속시간은 20초로 가정하였으며 강진지속시간은 10초로 하였다. 인공지진파는 지진파를 생성하는 기법에 따라 목표 응답스펙트럼을 만족하는 정도가 다를 수 있으며, 지중시설물 별로 세부기준이 제시되어 있다. 일반적으로 목표 응답스펙트럼을 만족하는 인공지진파를 여러 개 생성하고 각 지진파 입력에 의한 구조응답을 평균하여 설계에 사용한다.



(a) 인공지진파의 시간이력곡선 (강진지속시간 10초, 총 지속시간 20초)



(b) 응답스펙트럼 (감쇠비 20%)

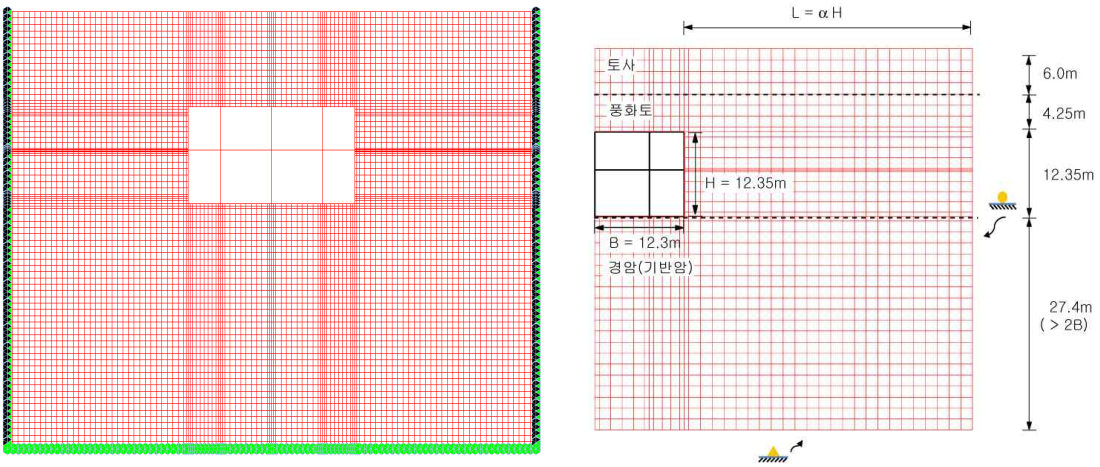
<그림 2-7> 기반암 노두에서 정의되는 설계지진의 인공지진파 (붕괴방지수준, PGA=0.126g)

1) 유한요소 모델링

좌·우 대칭 구조물인 경우에는 전체 구조물 중에서 절반만을 모델링하여 해석을 수행할 수 있으나 본 해석에서는 구조물 전체를 모델링하였다. <그림 2-8>에 해석 모델링을 나타내었고, 응답진도법(GRSCM)에 의한 지진응답해석은 상용프로그램을 이용하였다.

① 지반의 2차원 모델링을 위해 평면(plate) 요소를 사용하였으며, 구조물은 2절점 보(frame) 요소를 사용하였다.

② 구조물 측벽으로부터 <그림 2-8>과 같이 지반의 수평 모델링 범위(αH)를 구조물의 높이(H)의 2배($\alpha = 2$)로 설정하고, 구조물 하부의 지반 모델링 범위는 구조물 반폭(B)의 2배 이상($D \geq 2B$)이 되도록 설정하였다. 그리고 해석모델의 좌·우측 지반경계는 롤러 조건을 적용하였으며, 바닥경계는 모두 구속하였다.



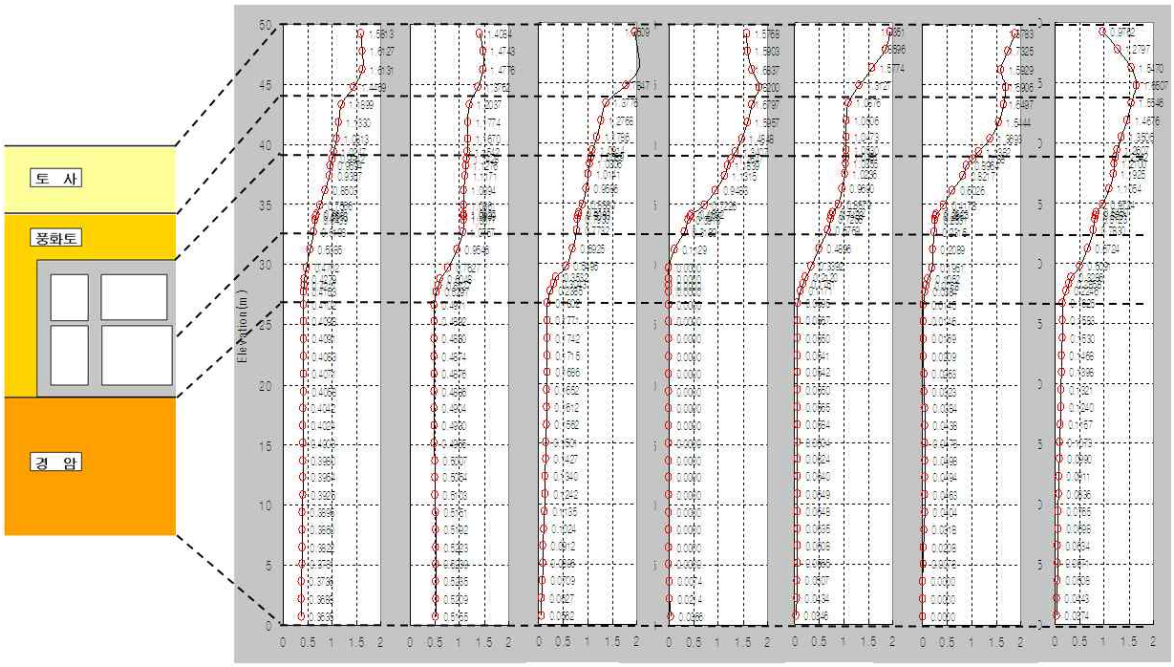
<그림 2-8> 해석 모델링

2) 응답가속도 산정

응답진도법에 의한 구조물의 부재력을 산정하기 위해서, 먼저 자유장 지반의 응답진도를 결정하고 그에 따른 깊이별 응답가속도를 산정한다.

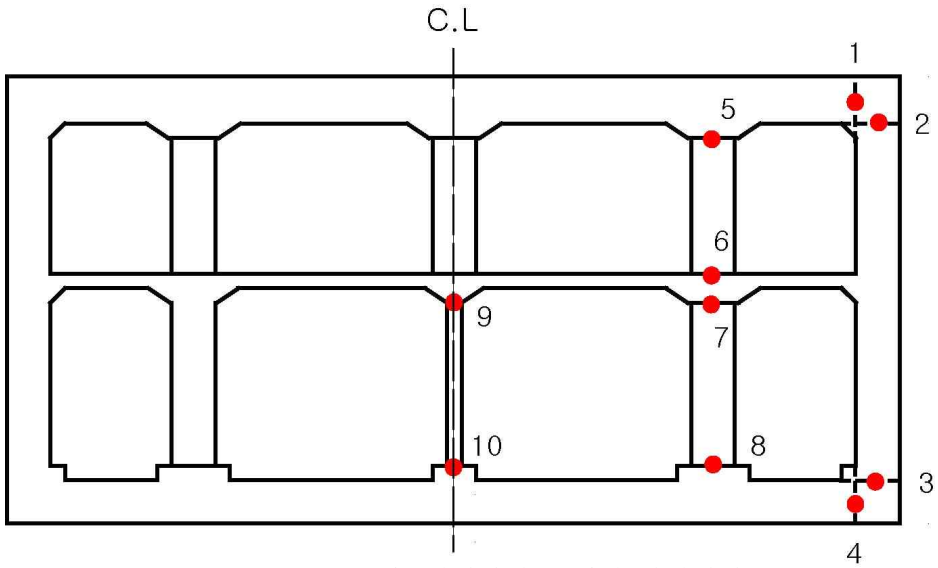
① 앞서 만들어진 각 유한요소 해석모델의 지반 층별 높이를 입력하여, <그림 2-7>의 설계 인공지진파 7개를 입력한 자유장 해석을 수행하였다. 그에 따라 각 인공지진파에 대한 자유장 지반의 깊이별 응답가속도를 구하였다.

② 지반의 깊이별 응답가속도는 자유장 해석을 통해서 구조물의 상단과 하단의 상대변위가 최대가 되는 시점의 깊이별 응답가속도를 <그림 2-9>와 같이 구하고 유한요소 해석모델에 깊이별 수평방향 지진력으로 재하하였다.



<그림 2-9> 깊이에 따른 최대응답가속도

3) 단면검토



<그림 2-10> 2층 정거장의 부재력 산정위치

<표 2-20> 슬래브/측벽의 성능평가(단위 : kN-m, kN)

부재위치			1	2	3	4
B (m)			1.00	1.00	1.00	1.00
H (m)			1.30	1.20	1.20	1.20
상 시 (①)		Mu	913.99	929.29	911.43	1,058.38
		Vu	652.50	605.19	927.73	619.61
지진시	단면력 (②)	Mu	421.60	407.79	530.71	502.90
		Vu	122.87	123.91	176.79	223.86
	보정 단면력 (③=②×1.5배)	Mu′	632.40	611.69	796.07	754.36
		Vu′	184.30	185.87	265.19	335.79
검토 단면력 (=① + ③)		Mu′′	1,546.39	1,540.98	1,707.50	1,812.74
		Vu′′	836.80	791.06	1,192.92	955.40
설계강도		Md	1,404.43	2,381.05	2,719.40	1,640.97
		Vd	1,134.81	1,095.99	1,143.56	1,601.38
인장철근			D25@125	D25@125	D25@125	D29@125
압축철근			-	-	-	-
전단보강근			2-D13@400	2-D13@400	2-D13@400	4-D13@200
성 능 평 가	Mu′′/Md		1.10	0.65	0.63	1.10
			N.G	**O.K**	**O.K**	**N.G**
	Vu′′/Vd		0.74	0.72	1.04	0.60
			O.K	**O.K**	**N.G**	**O.K**

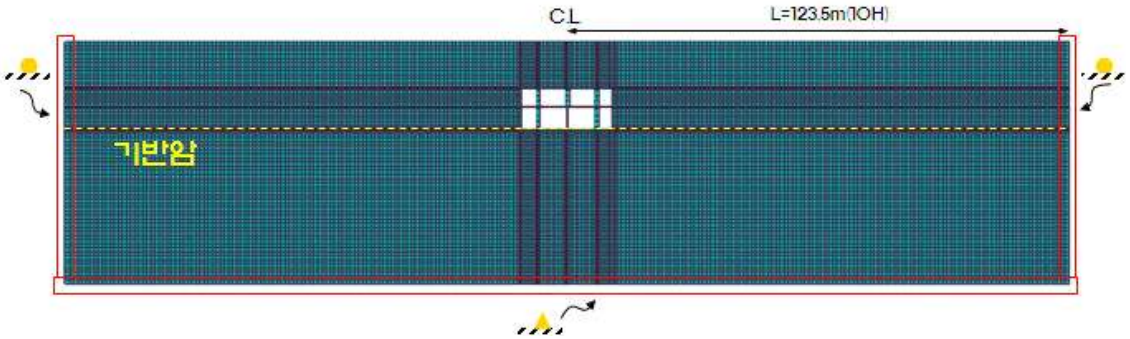
※ Mu′/Md, Vu′/Vd 가 1.0보다 작거나 같으면 OK, 그 외는 NG

라. 시간이력해석법

1) 유한요소 모델링

① 시간이력해석법에 의한 동적해석을 수행하기 위하여 <그림 2.11>과 같은 유한요소 해석모델을 작성하였다. 이때 지반과 구조물을 모델링하기 위하여 각각 평면요소와 프레임(frame) 요소를 사용하였다. 해석모델의 양측 경계는 롤러조건을 적용하였으며 해석모델의 바닥경계는 모두 구속하였다.

② 유한요소해석모델을 작성할 때 지반영역의 수평방향 모델링 범위는 구조물 중심으로 부터 롤러조건을 적용한 모델 좌·우 수직경계까지 거리를 구조물 높이(H)의 10배 이상이 되도록 하였다. 그리고 구조물 아래 기반암의 수직방향 모델링 범위는 구조물 바닥으로 부터 구조물 반폭(B, 터널 폭=2B)의 2배 이상이 되도록 하였다.



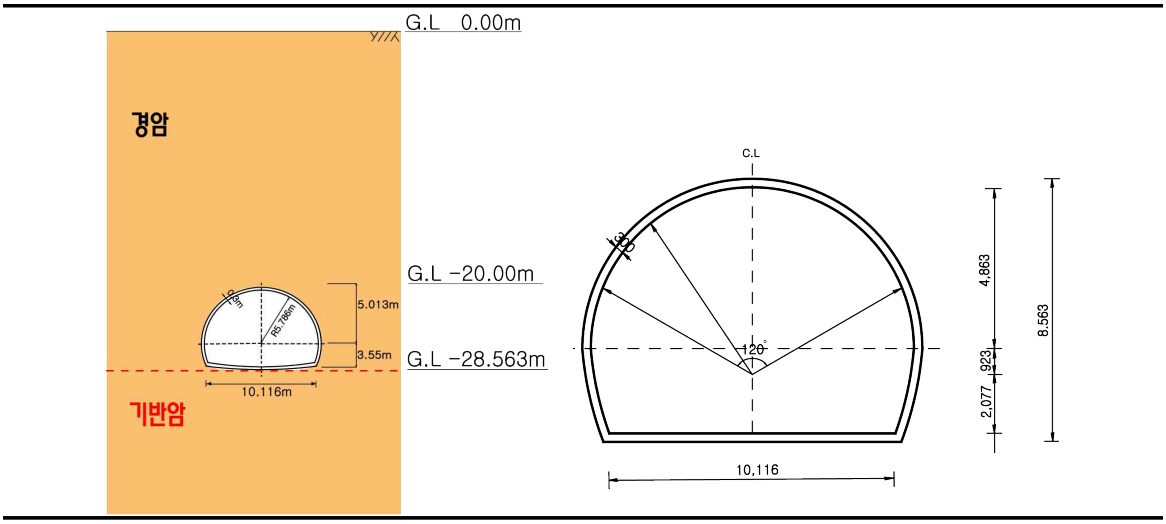
<그림 2-11> 2층 정거장의 유한요소 모델링

<표 2-21> 슬래브/측벽의 성능평가(단위 : kN-m, kN)

부재위치		1	2	3	4
B (m)		1.00	1.00	1.00	1.00
H (m)		1.30	1.20	1.20	1.20
검토 단면력	Mu	1,088.87	1,221.03	2,174.99	1,619.21
	Vu	617.76	540.54	974.04	1,471.14
설계강도	Md	1,404.43	2,381.05	2,719.40	1,640.97
	Vd	1,134.81	1,095.99	1,143.56	1,601.38
인장철근		D25@125	D25@125	D25@125	D29@125
압축철근		-	-	-	-
전단보강근		2-D13@400	2-D13@400	2-D13@400	4-D13@200
성 능 평 가	Mu/Md	0.78	0.51	0.80	0.99
		O.K	**O.K**	**O.K**	**O.K**
	Vu/Vd	0.54	0.49	0.85	0.92
		O.K	**O.K**	**O.K**	**O.K**

※ Mu/Md, Vu/Vd 가 1.0보다 작거나 같으면 OK, 그 외는 NG

3. 굴착식 터널



<그림 3-1> 지반조건 및 단면제원

■ 내진성능 예비평가

가. 지진도 평가

대상 구조물은 구역 Ⅰ, 도시지역, 지반종류 S_A 에 위치하므로 아래의 표 B-1의 '지진도 등급 기준'에 의해 지진도 2그룹에 해당한다.

<표 3-1> 지진도 등급 기준

지진구역	구분	지반종류			
		S_E	S_D	S_C	S_B, S_A
Ⅰ	도시	1그룹		2그룹	
	기타지역	1그룹	2그룹	3그룹	3그룹
Ⅱ	도시				4그룹
	기타지역	2그룹	3그룹	4그룹	

나. 취약도 평가

터널 구조물의 취약도는 지진으로 인해 구조물이 붕괴되거나 손상을 입기 쉬운 형태를 구분하는 것으로 지반상태, 사면활동, 저토피 구간, 불균형 토압, 터널 형상 등의 터널의 설계·시공에서부터 유지관리에 이르기까지 다양한 인자를 고려하여 다

음과 같이 취약도 지수(Vulnerability Index)로 나타낸다.

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

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

$Slope$: 갱구부 사면(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 노후(Deterioration)화에 따른 지수

$Damage$: 터널 구조물의 손상(Damage)에 따른 지수

<표 3-2> 취약도 지수 평가결과

No.	세부지수	설명	내용	점수
1	*Soil*	주변 지반	강성지반(S_A)	0.2
2	*Slope*	갱구부 사면활동	없음	0.5
3	*Depth*	저토피 구간	10m≤h	1.0
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				5.6
⇒ 취약도 지수(VI) = 10 × 5.6 = 56점				

다. 영향도 평가

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 터널 구조물의 영향도 지수(Impact Index)로 나타낸다.

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

여기서, $Traffic$: 터널을 이용하는 일평균 교통(Traffic)량 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)

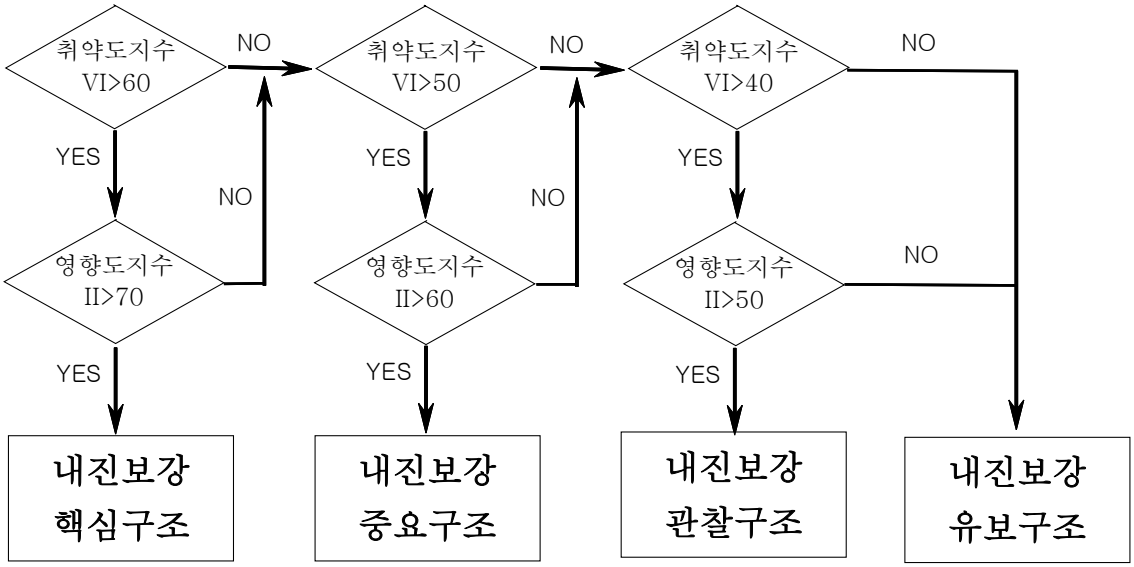
$Recovery$: 터널 구조물의 성능회복(Recovery)을 위한 비용지수

<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	없음	0.2
$Importance$	터널 중요도	인원수송, 1등급	1.0
$Recovery$	성능회복비용	터널길이=800m	0.4
합 계			2.4
⇒ 영향도 지수(VI) = 20 × 2.4 = 48점			

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

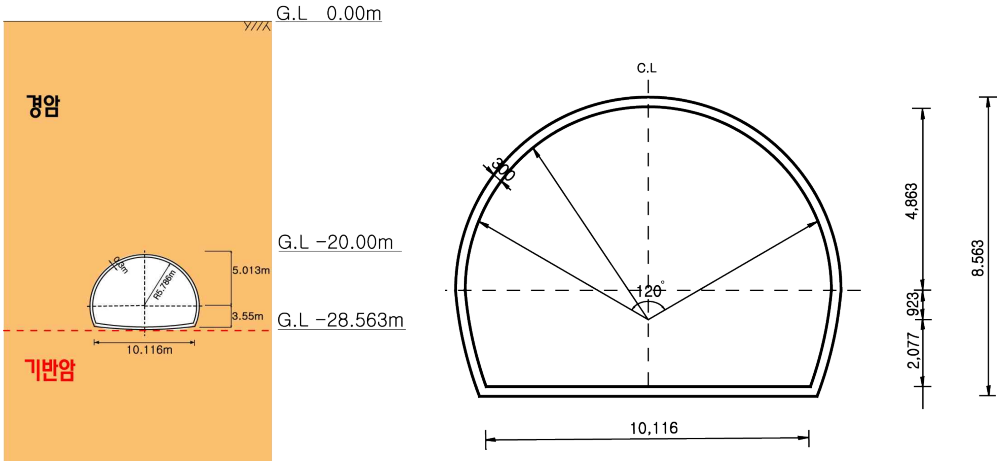
<표 3-4> 내진성능 예비평가 결과

항 목	평 가 결 과
지진도 평가	2그룹
취약도 평가	56점
영향도 평가	48점
그룹 결정	**내진보강 유보시설**

본 터널 구조물은 내진성능 예비평가에서 내진보강 '유보시설'로 분류되었으나, 이에 대한 내진성능 상세평가를 수행하면 다음과 같다.

■ 내진성능 상세평가

가. 지반조건 및 단면제원



<그림 3-3> 터널의 지반조건 및 단면제원

<표 3-5> 지반의 물성치

지반층	초기전단파속도 V_0 (m/s)	설계전단파속도 $V_s = 0.5V_0$	단위중량 γ(kN/m^3)	설계탄성계수* E (kN/m^2)	포아송비 ν	재료감쇠비 h**
경암(표층)	1,600	800	22.55	3,680,000	0.25	0.2

* 탄성계수 : $E = 2(1+\nu)(\rho)(V_s)^2$

** 감쇠율에 대한 보정 : h = 0.2 (붕괴방지수준)

<표 3-6> 철근콘크리트의 물성치

구조물	단위중량 γ_{con} (kN/m^3)	설계탄성계수 E_c (kN/m^2)	포아송비 ν
철근콘크리트	24.02	3.123×10^7	0.17

- 콘크리트 설계기준강도 : $f_{ck} = 29.42$ MPa (= 300 kgf/cm^2)
- 설계탄성계수 : $E_c = 0.077 m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}$ ($f_{cu} = f_{ck} + 8$)

<표 3-7> 굴착식 터널의 단면계수

부재구분	종방향 유효폭 B (m)	두께 H (m)	단면적 A = BH (m^2)	단면 2차 모멘트 I = 1/12 · bh^3 (m^4)
라이닝	1	0.3	0.3	0.00225

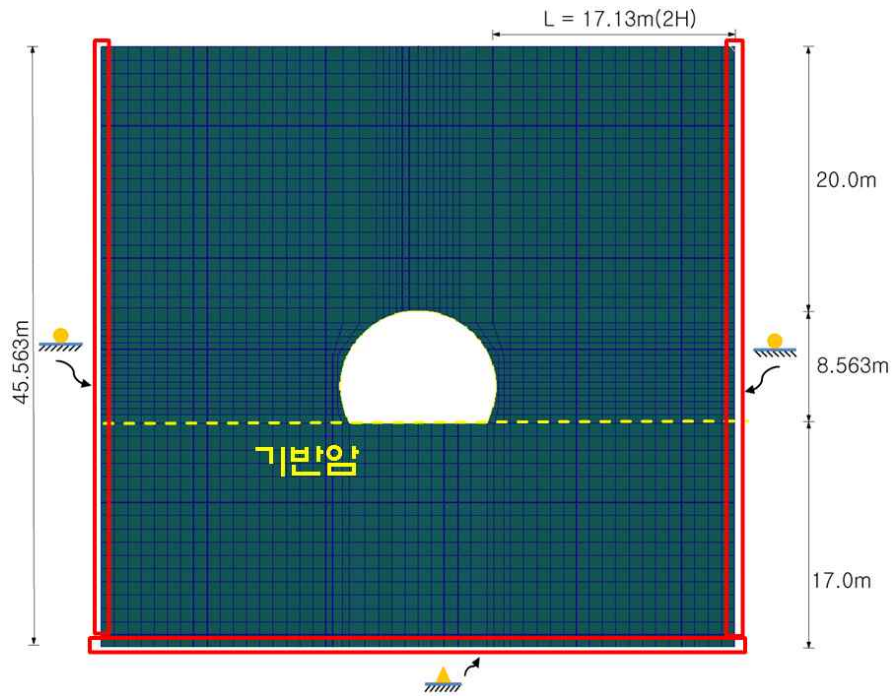
나. 응답진도법

1) 유한요소 모델링

본 해석에서 구조물 전체에 대한 해석 모델링은 <그림 3-4>와 같고 응답진도법에 의한 지진응답해석을 위하여 상용 프로그램을 이용하였다.

① 지반의 2차원 모델링을 위해 평면(plate) 요소를 사용하였으며, 구조물은 2절점 보(frame) 요소를 사용하였다.

② 구조물 측벽으로부터 <그림 3-4>와 같이 지반의 수평 모델링 범위(αH)를 구조물의 높이(H)의 2배($\alpha = 2$)로 설정하고, 구조물 하부의 지반 모델링 범위는 구조물 반폭(B)의 2배 이상(D $\geq$ 2B)이 되도록 설정하였다. 그리고 해석모델의 좌·우측 지반경계는 롤러 조건을 적용하였으며, 바닥경계는 모두 구속하였다.



<그림 3-4> 굴착식 터널의 유한요소해석모델

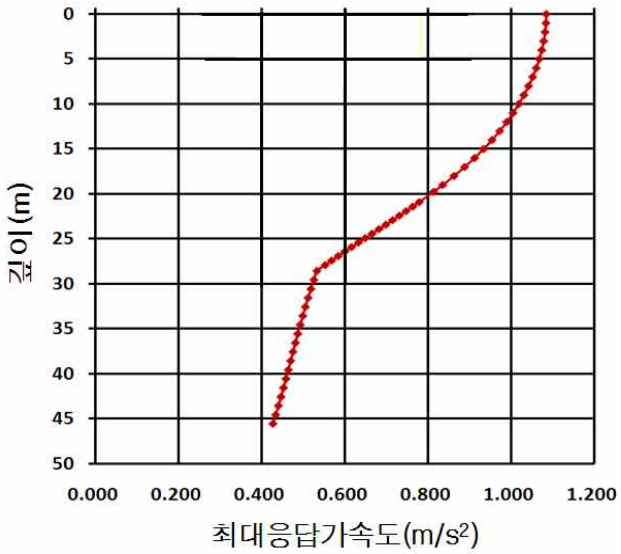
2) 응답가속도 산정

응답진도법에 의한 구조물의 부재력을 산정하기 위해서, 먼저 자유장 지반의 응답진

도를 결정하고 그에 따른 깊이별 응답가속도를 산정한다.

① 앞서 만들어진 각 유한요소 해석모델의 지반 층별 높이를 입력하여, <그림 2-6>의 설계 인공지진파 7개를 입력한 자유장 해석을 수행하였다. 그에 따라 각 인공지진파에 대한 자유장 지반의 깊이별 응답가속도를 구하였다.

② 지반의 깊이별 응답가속도는 자유장 해석을 통해서 구조물의 상단과 하단의 상대변위가 최대가 되는 시점의 깊이별 응답가속도를 <그림 3-5>와 같이 구하고 유한요소 해석모델에 깊이별 수평방향 지진력으로 재하하였다.



<그림 3-5> 깊이에 따른 최대 응답가속도

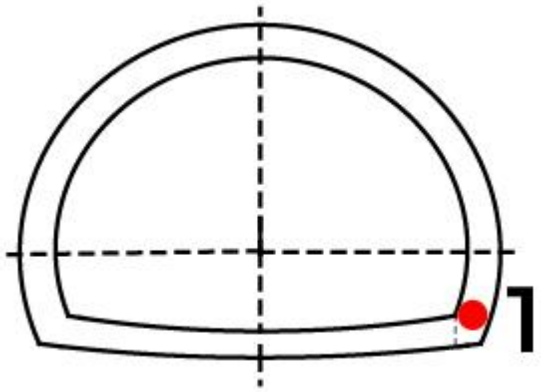
3) 하중조합

본 해석에서 하중조합은 <표 3-8>과 같이 콘크리트 구조설계기준(2007), 도로설계편람(2010) 제6편(터널)을 참고하였으며, 상시와 지진시(붕괴방지수준)에 대한 하중을 조합하여 구조물 단면력을 검토하였다.

<표 3-8> 하중조합

하중조합	고정하중(자중)	이완하중	잔류수압	지진하중(E)
LC1	1.4	1.4	-	1.0
LC2	1.2	1.6	-	1.0
LC3	1.4	1.4	1.4	1.0
LC4	1.2	1.6	1.6	1.0
LC5	1.0	1.0	1.0	1.0

다. 단면검토



<그림 3-6> 터널의 부재력 산정위치

<표 3-9> 슬래브/측벽의 성능평가(단위 : kN-m, kN)

부재위치		1	인장철근	D22@150
B (m)		1.00	압축철근	D22@150
H (m)		0.3	전단보강근	2-D16@450
상 시 (①)		Mu	Vu	Pu
		128.30	114.10	981.20
지진시	단면력 (②)	Mu	Vu	Pu
		13.30	31.35	190.57
	보정 단면력 (③=②×1.5배)	Mu′	Vu′	Pu′
		19.95	47.03	285.86
검토 단면력 (=① + ③)		Mu′′	Vu′′	Pu′′
		148.25	161.13	1,267.06
설계강도		Md	Vd	Pd
		232.61	226.84	3,332.94
성능평가	Mu′′/Md	0.64 ∴ **OK**		
	Vu′′/Vd	0.71 ∴ **OK**		
	Pu′′/Pd	0.38 ∴ **OK**		

※ Mu′/Md, Vu′/Vd, Pu′/Pd 가 1.0보다 작거나 같으면 OK, 그 외는 NG

B. 내진안정성 평가방법에 따른 결과 비교

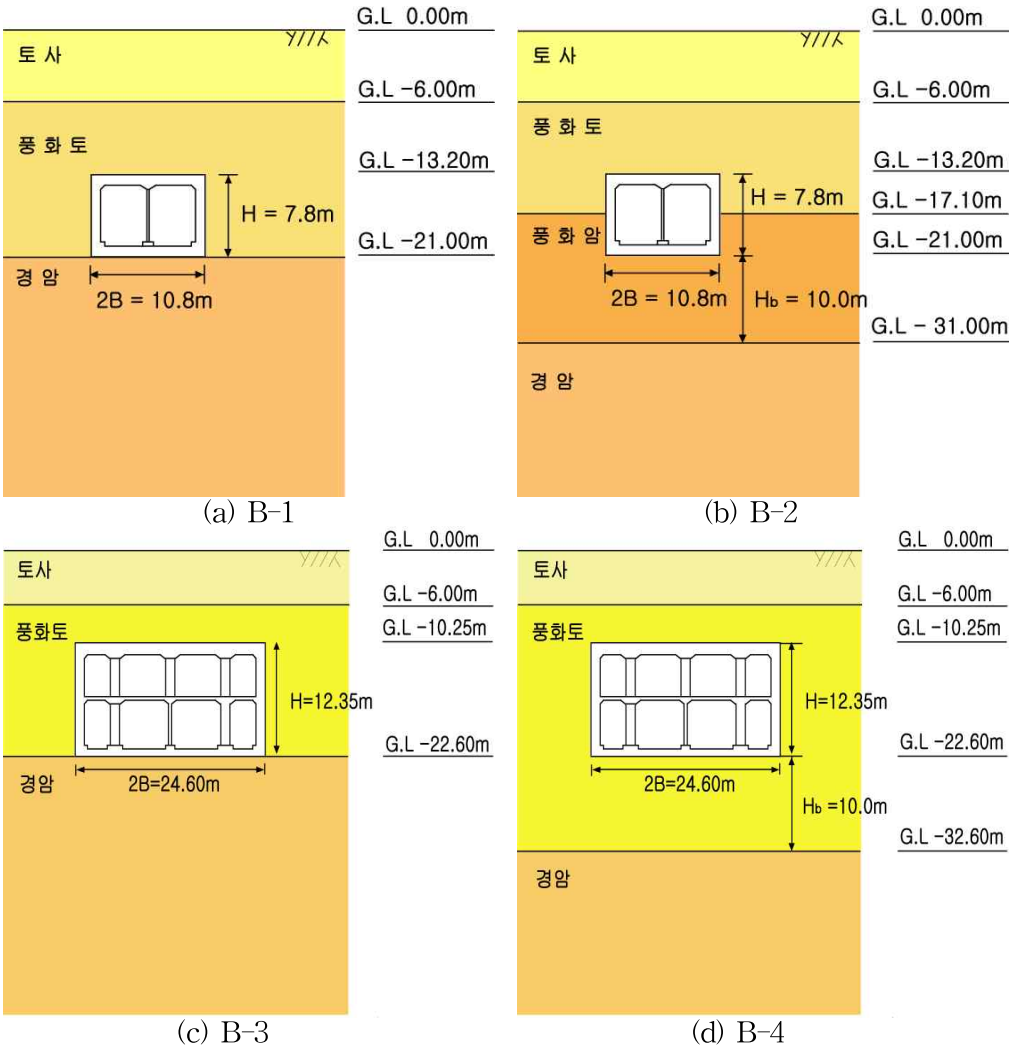
1. 개착식 터널

2. 굴착식 터널

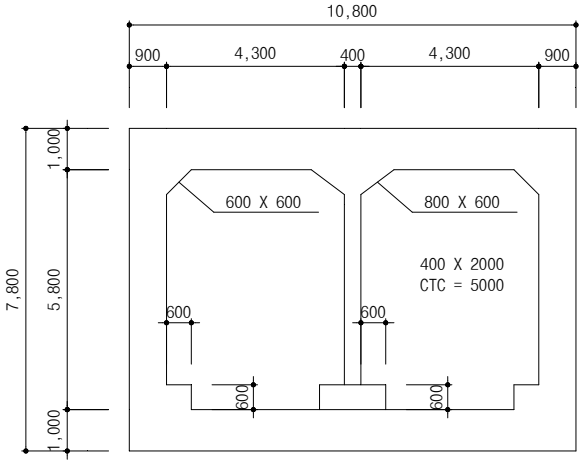
여기서는 터널의 기본해석법인 응답변위법(SDM)에 더해서 응답진도법(GRSCM), 시간이력해석법(MSM), 지반-구조물 상호작용(SSI) 해석법 등을 활용하여 일정한 조건(감쇠율 5% 적용)에서 지진하중에 의한 구조물 단면력을 서로 비교하여 내진성능 평가방법에 따른 기본적인 자료를 제공하고자 한다(감쇠비 5% 적용).

1. 개착식 터널

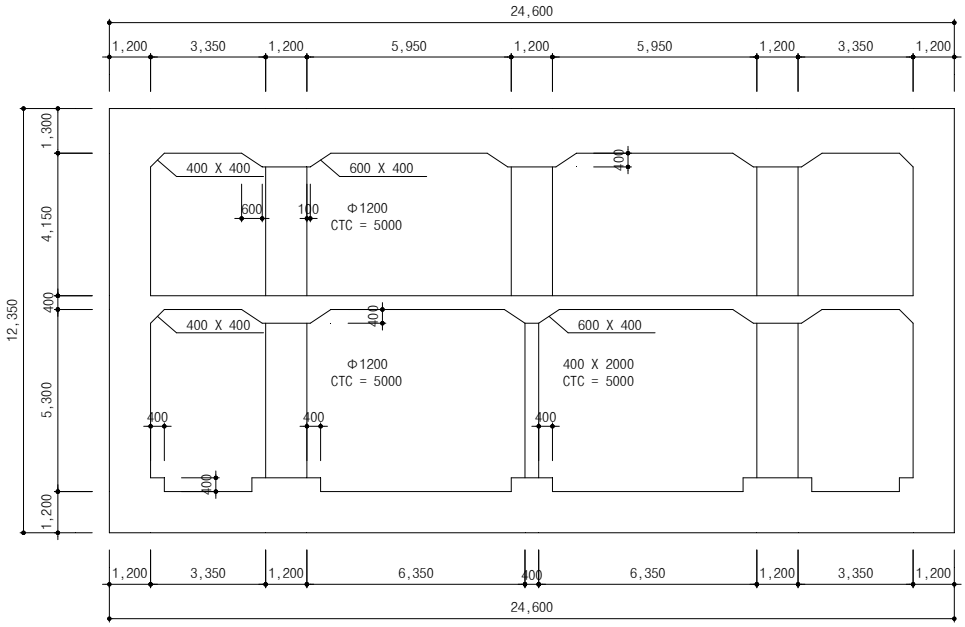
지반조건 및 터널단면은 <그림 1-1~2>에 나타낸 바와 같으며, 지반조건에 따라 예제 B-1~예제 B-4의 4가지 경우로 분류하였다. 예제 B-1,2는 도시철도의 대표적인 단층 본선, 예제 B-3,4는 2층 정거장을 나타낸다. 지반 물성은 <표 1-1>, 철근콘크리트 물성은 <표 1-2>와 같다. <표 1-3>은 각 터널의 단면물성을, <표 1-4>는 설계지반운동의 해석조건을 나타낸다.



<그림 1-1> 지반조건 및 터널위치



(a) 본선박스



(b) 2층 정거장

<그림 1-2> 터널 단면 및 제원

<표 1-1> 지반 물성

지반 구분	초기전단파속도 V_0 (m/s)	설계전단파속도 $V_s = 0.5V_0$	단위중량 (γ, kN/m^3)	설계탄성계수[2] E (kN/m^2)	포아송비 ν
토사	275	137.5	17.65	91,884.5	0.35
풍화토	500	250	19.61	337,500	0.35
풍화암	750	375	20.59	797,344	0.35
경암[1]	1,500	1,500	22.55	12,937,500	0.25

주 : 1) 경암(기반암)의 전단파속도는 성능수준별 지반변형에 대한 보정계수(C)를 적용하지 않음.

2) 탄성계수(E) = $2(1+\nu)(\rho)(V_s)^2$

<표 1-2> 철근콘크리트 물성

구조물	단위중량 γ_{con} (kN/m^3)	설계탄성계수 E_c (kN/m^2)	포아송비 ν
철근콘크리트	24.02	3.123×10^7	0.17

주) 탄성계수 : $E_c = 0.077 m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}$ ($f_{cu} = f_{ck}+8$), 설계기준강도 : $f_{ck} = 29.42$ MPa ($=300$ kgf/cm^2)

<표 1-3> 터널의 단면물성

구분	부재구분	종방향 유효폭 B (m)	두께 H (m)	단면적 A = BH (m^2)	단면 2차 모멘트 $I = \frac{1}{12}bh^3$ (m^4)
본선 박스	상/하부 슬래브	1	1	1	0.08333
	측벽	1	0.9	0.9	0.06075
	사각기둥 (0.4m × 2m, CTC = 5m)	0.4	0.4	0.160	0.00213
2층 정거장	상부 슬래브	1	1.3	1.3	0.183083
	중앙 슬래브	1	0.4	0.4	0.005333
	하부 슬래브	1	1.2	1.2	0.14400
	측벽	1	1.2	1.2	0.14400
	사각기둥 (0.4m × 2m, CTC = 5m)	0.4	0.4	0.160	0.002133
	원기둥[1] (ϕ1.2m, CTC = 5m)	-	1.2	0.2262	0.020358

주 : 1) $A = \frac{1}{CTC}\frac{\pi d^2}{4}$, $I = \frac{1}{CTC}\frac{\pi d^2}{4}$

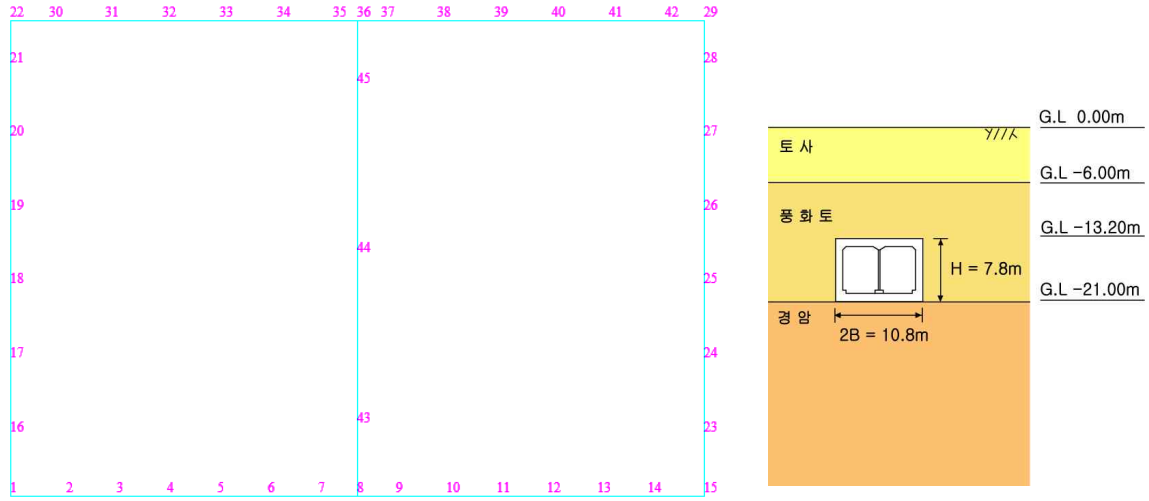
<표 1-4> 설계지반운동의 해석조건

구 분	해석조건
지진구역	I 구역
내진등급	I 등급
위험도계수	I=1.4 (붕괴방지수준)
지진계수	$C_a = 0.09$, $C_v = 0.09$(기반암=경암 : S_A 지반)

1.1 응답변위법

가. 예제 B-1

1) 유한요소 모델링



(a) 유한요소 모델링 (b) 지반조건

<그림 1.1-1> 예제 B-1의 유한요소 모델링과 지반조건

2) 지진하중 산정

① 지진토압($P_{(z)}$) 산정

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

상판지진토압 $P_{(0)} = K_{SB} \times (u(z_U) - u(z_B)) = 217.63\ \mathrm{kN/m}$

측벽지진토압 $P_{(z)} = K_H \times (u(z) - u(z_B))$

<표 1.1-1> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

측벽절점		심도(m)	변위(m)	상대변위(m)	K_H(kN/m/m)	측벽지진토압($P_{(z)}$, kN/m)
22	29	13.700	0.01072	0.00995	97,706	972.27
21	28	14.350	0.00985	0.00908	97,706	887.24
20	27	15.405	0.00839	0.00762	97,706	744.47
19	26	16.460	0.00688	0.00611	97,706	596.60
18	25	17.515	0.00532	0.00455	97,706	444.55
17	24	18.570	0.00373	0.00296	97,706	289.26
16	23	19.625	0.00212	0.00135	97,706	131.70
1	15	20.500	0.00077	0.00000	97,706	0.00

* 단일코사인 적용

② 주면전단력(τ) 산정

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

<표 1.1-2> 주면전단력(τ)

구분	내 용	주면전단력(τ, kN/m)
상판	$\tau_U = \frac{125,000}{\pi \times 21} \times 0.197 \times 0.518 \times \sin\left(\frac{\pi \times 13.7}{2 \times 21}\right)$	164.992
저판	$\tau_B = \frac{125,000}{\pi \times 21} \times 0.197 \times 0.518 \times \sin\left(\frac{\pi \times 20.5}{2 \times 21}\right)$	192.931
측벽	$\tau_S = \frac{164.992 + 192.931}{2}$	178.961

③ 관성력(f) 산정

$$f = m_i \times a_i = w_i \times K_{hi} = (\gamma \times b \times h) \times K_h \times C_U(z)$$
$$= (\gamma \times b \times h) \times (I \times C_a) \times (1 - 0.015z)$$

<표 1.1-3> 지표에서의 설계수평가속도(K_h)

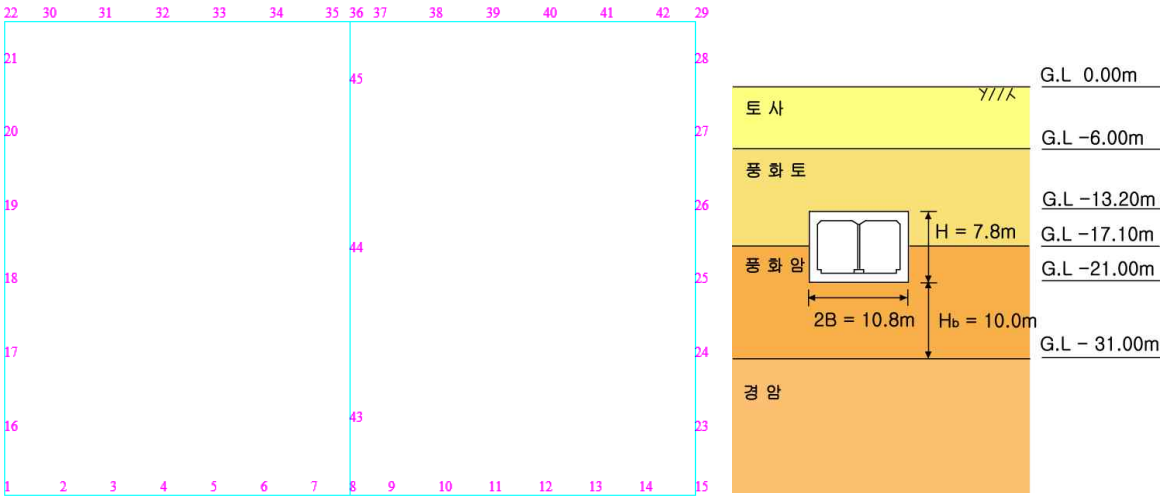
구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도 (m/s)	$(V_0)_{avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	78.57	
	2	357.14	
	Σ	435.71	⇒ S_C 지반
지진계수	$C_a = 0.13$		
수평가속도	$K_h = I \cdot C_a = 1.4 \times 0.13 = 0.182$		

<표 1.1-4> 관성력(f)

구분	내 용	관성력(f, kN/m)
상판	$f_U = (24.02 \times 1 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 13.7)$	3.473
저판	$f_B = (24.02 \times 1 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 20.5)$	3.027
측벽	$f_W = (24.02 \times 0.9 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 17.1)$	2.925
기둥	$f_P = \left(24.02 \times 0.4 \times 2 \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 17.1)$	0.520

나. 예제 B-2

1) 유한요소 모델링



(a) 유한요소 모델링 (b) 지반조건

<그림 1.1-2> 예제 B-2의 유한요소 모델링과 지반조건

2) 지진하중 산정

① 지진토압($P_{(z)}$) 산정

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

상판지진토압 $P_{(0)} = K_{SB} \times (u(z_U) - u(z_B)) = 160.93\ \mathrm{kN/m}$

측벽지진토압 $P_{(z)} = K_H \times (u(z) - u(z_B))$

<표 1.1-5> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

측벽절점		심도(m)	변위(m)	상대변위(m)	K_H(kN/m/m)	측벽지진토압($P_{(z)}$, kN/m)
22	29	13.700	0.01342	0.00736	164,322	1,209.16
21	28	14.350	0.01241	0.00634	164,322	1,042.62
20	27	15.405	0.01070	0.00464	164,322	762.65
19	26	16.460	0.00894	0.00287	164,322	472.22
18	25	17.515	0.00763	0.00157	388,210	607.86
17	24	18.570	0.00709	0.00102	388,210	397.64
16	23	19.625	0.00653	0.00047	388,210	182.26
1	15	20.500	0.00606	0.00000	388,210	0.00

* 이중코사인 적용 (터널 구조물이 두층의 지반에 걸쳐져 있음)

② 주면전단력(τ) 산정

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

<표 1.1-6> 주면전단력(τ)

구분	내 용	주면전단력(kN/m)
상판	$\tau_U = \frac{125{,}000}{\pi \times 21} \times 0.197 \times 0.626 \times \sin\left(\frac{\pi \times 13.7}{2 \times 31}\right)$	101.004
저판	$\tau_B = \frac{295{,}313}{\pi \times 21} \times 0.197 \times 0.626 \times \sin\left(\frac{\pi \times 20.5}{2 \times 31}\right)$	321.428
측벽	$\tau_S = \frac{101.004 + 321.428}{2}$	211.216

③ 관성력(f) 산정

$$f = m_i \times a_i = w_i \times K_{hi} = (\gamma \times b \times h) \times K_h \times C_U(z)$$
$$= (\gamma \times b \times h) \times (I \times C_a) \times (1 - 0.015z)$$

<표 1.1-7> 지표에서의 설계수평가속도(K_h)

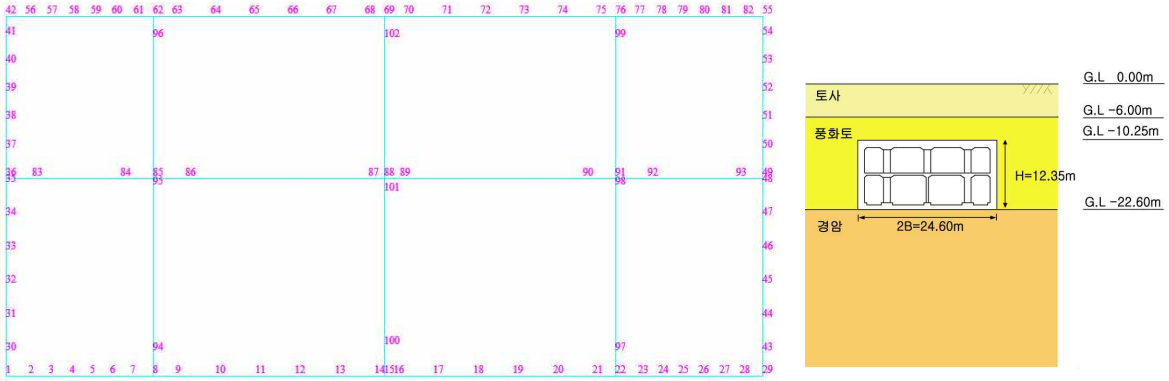
구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도 (m/s)	$(V_0)_{avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	55.0	
	2	185.0	
	3	347.5	
	Σ	587.5	⇒ S_C 지반
지진계수	$C_a = 0.13$		
수평가속도	$K_h = I \cdot C_a = 1.4 \times 0.13 = 0.182$		

<표 1.1-8> 관성력(f)

구분	내 용	관성력(f, kN/m)
상판	$f_U = (24.02 \times 1 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 13.7)$	3.473
저판	$f_B = (24.02 \times 1 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 20.5)$	3.027
측벽	$f_W = (24.02 \times 0.9 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 17.1)$	2.925
기둥	$f_P = \left(24.02 \times 0.4 \times 2 \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 17.1)$	0.520

다. 예제 B-3

1) 유한요소 모델링



<그림 1.1-3> 예제 B-3의 유한요소 모델링과 지반조건

2) 지진하중 산정

① 지진토압($P_{(z)}$) 산정

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

상판지진토압 $P_{(0)} = K_{SB} \times (u(z_U) - u(z_B)) = 177.09\ \mathrm{kN/m}$

측벽지진토압 $P_{(z)} = K_H \times (u(z) - u(z_B))$

<표 1.1-9> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

측벽절점		심도(m)	변위(m)	상대변위(m)	K_H(kN/m/m)	측벽지진토압($P_{(z)}$, kN/m)
42	55	10.900	0.01593	0.01501	69,222	1,039.26
41	54	11.550	0.01523	0.01432	69,222	991.04
40	53	12.420	0.01425	0.01334	69,222	923.15
39	52	13.290	0.01322	0.01230	69,222	851.65
38	51	14.160	0.01214	0.01122	69,222	776.80
37	50	15.030	0.01101	0.01010	69,222	698.89
36	49	15.900	0.00984	0.00893	69,222	618.18
35	48	16.100	0.00957	0.00866	69,222	599.27
34	47	17.140	0.00812	0.00721	69,222	498.93
33	46	18.180	0.00663	0.00572	69,222	395.66
32	45	19.220	0.00510	0.00419	69,222	289.98
31	44	20.260	0.00355	0.00264	69,222	182.47
30	43	21.300	0.00198	0.00106	69,222	73.67
1	29	22.000	0.00091	0.00000	69,222	0.00

* 단일코사인 적용

② 주면전단력(τ) 산정

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

<표 1.1-10> 주면전단력(τ)

구분	내 용	주면전단력(τ, kN/m)
상판	$\tau_U = \frac{125,000}{\pi \times 22.6} \times 0.197 \times 0.550 \times \sin\left(\frac{\pi \times 10.9}{2 \times 22.6}\right)$	130.891
저판	$\tau_B = \frac{125,000}{\pi \times 22.6} \times 0.197 \times 0.550 \times \sin\left(\frac{\pi \times 22}{2 \times 22.6}\right)$	190.310
측벽	$\tau_S = \frac{130.891 + 190.310}{2}$	160.601

③ 관성력(f) 산정

$$f = m_i \times a_i = w_i \times K_{hi} = (\gamma \times b \times h) \times K_h \times C_U(z)$$
$$= (\gamma \times b \times h) \times (I \times C_a) \times (1 - 0.015z)$$

<표 1.1-11> 지표에서의 설계수평가속도(K_h)

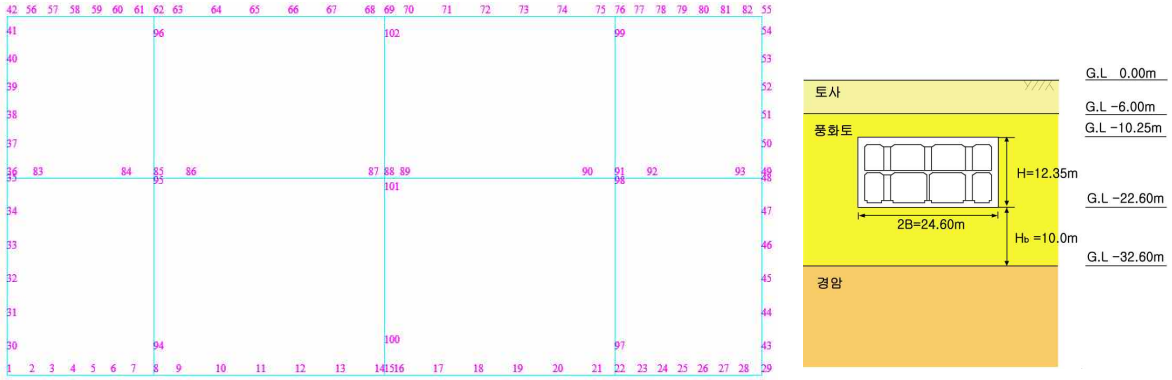
구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도 (m/s)	$(V_0)_{avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	78.57 m/sec	
	2	367.26 m/sec	
	Σ	440.27 m/sec	$\Rightarrow$ S_C 지반
지진계수	$C_a = 0.13$		
수평가속도	$K_h = I \cdot C_a = 1.4 \times 0.13 = 0.182$		

<표 1.1-12> 관성력(f)

구분	내 용	관성력(kN/m)
상판	$f_U = (24.02 \times 1.3 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 10.9)$	4.754
중판	$f_U = (24.02 \times 0.4 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 15.9)$	1.332
저판	$f_B = (24.02 \times 1.2 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 22.0)$	3.515
측벽	$f_W = (24.02 \times 1.2 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 16.45)$	3.952
지하 1층 기둥	$f_{P1} = \left(24.02 \times \frac{\pi \times 1.2^2}{4} \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 13.4)$	0.790
지하 2층 기둥	$f_{P2} = \left(24.02 \times \frac{\pi \times 1.2^2}{4} \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 18.95)$	0.708
지하 2층 측벽	$f_{W1} = \left(24.02 \times 0.4 \times 2 \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 18.95)$	0.501

라. 예제 B-4

1) 유한요소 모델링



(a) 유한요소 모델링 (b) 지반조건

<그림 1.1-4> 예제 B-4의 유한요소 모델링과 지반 조건

2) 지진하중 산정

① 지진토압($P_{(z)}$) 산정

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

상판지진토압 $P_{(0)} = K_{SB} \times (u(z_U) - u(z_B)) = 132.72\ \mathrm{kN/m}$

측벽지진토압 $P_{(z)} = K_H \times (u(z) - u(z_B))$

<표 1.1-13> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

측벽절점		심도(m)	변위(m)	상대변위(m)	K_H(kN/m/m)	측벽지진토압($P_{(z)}$, kN/m)
42	55	10.900	0.02586	0.01125	69,222	778.86
41	54	11.550	0.02538	0.01077	69,222	745.49
40	53	12.420	0.02470	0.01009	69,222	698.14
39	52	13.290	0.02397	0.00936	69,222	647.79
38	51	14.160	0.02320	0.00859	69,222	594.51
37	50	15.030	0.02239	0.00778	69,222	538.42
36	49	15.900	0.02154	0.00693	69,222	479.60
35	48	16.100	0.02134	0.00673	69,222	465.71
34	47	17.140	0.02027	0.00565	69,222	391.27
33	46	18.180	0.01914	0.00453	69,222	313.31
32	45	19.220	0.01796	0.00335	69,222	232.03
31	44	20.260	0.01675	0.00213	69,222	147.62
30	43	21.300	0.01548	0.00087	69,222	60.30
1	29	22.000	0.01461	0.00000	69,222	0.00

* 단일코사인 적용

② 주면전단력(τ) 산정

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

<표 1.1-14> 주면전단력(τ)

구분	내 용	주면전단력(τ, kN/m)
상판	$\tau_U = \frac{125,000}{\pi \times 32.6} \times 0.197 \times 0.750 \times \sin\left(\frac{\pi \times 10.9}{2 \times 32.6}\right)$	90.275
저판	$\tau_B = \frac{125,000}{\pi \times 32.6} \times 0.197 \times 0.750 \times \sin\left(\frac{\pi \times 22}{2 \times 32.6}\right)$	157.071
측벽	$\tau_S = \frac{90.275 + 157.071}{2}$	123.673

③ 관성력(f) 산정

$$f = m_i \times a_i = w_i \times K_{hi} = (\gamma \times b \times h) \times K_h \times C_U(z)$$
$$= (\gamma \times b \times h) \times (I \times C_a) \times (1 - 0.015z)$$

<표 1.1-15> 지표에서의 설계수평가속도(K_h)

구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도 (m/s)	$(V_0)_{avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	50.61 m/sec	
	2	407.98 m/sec	
	Σ	458.59 m/sec	$\Rightarrow$ S_C 지반
지진계수	$C_a = 0.13$		
수평가속도	$K_h = I \cdot C_a = 1.4 \times 0.13 = 0.182$		

<표 1.1-16> 관성력(f)

구분	내 용	관성력(f, kN/m)
상판	$f_U = (24.02 \times 1.3 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 10.9)$	4.754
중판	$f_U = (24.02 \times 0.4 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 15.9)$	1.332
저판	$f_B = (24.02 \times 1.2 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 22.0)$	3.515
측벽	$f_W = (24.02 \times 1.2 \times 1) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 16.45)$	3.952
지하 1층 기둥	$f_{P1} = \left(24.02 \times \frac{\pi \times 1.2^2}{4} \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 13.4)$	0.790
지하 2층 기둥	$f_{P2} = \left(24.02 \times \frac{\pi \times 1.2^2}{4} \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 18.95)$	0.708
지하 2층 측벽	$f_{W1} = \left(24.02 \times 0.4 \times 2 \times \frac{1}{5}\right) \times 0.182 \times (1 - 0.015 \times 18.95)$	0.501

1.2 응답진도법(GRSCM)

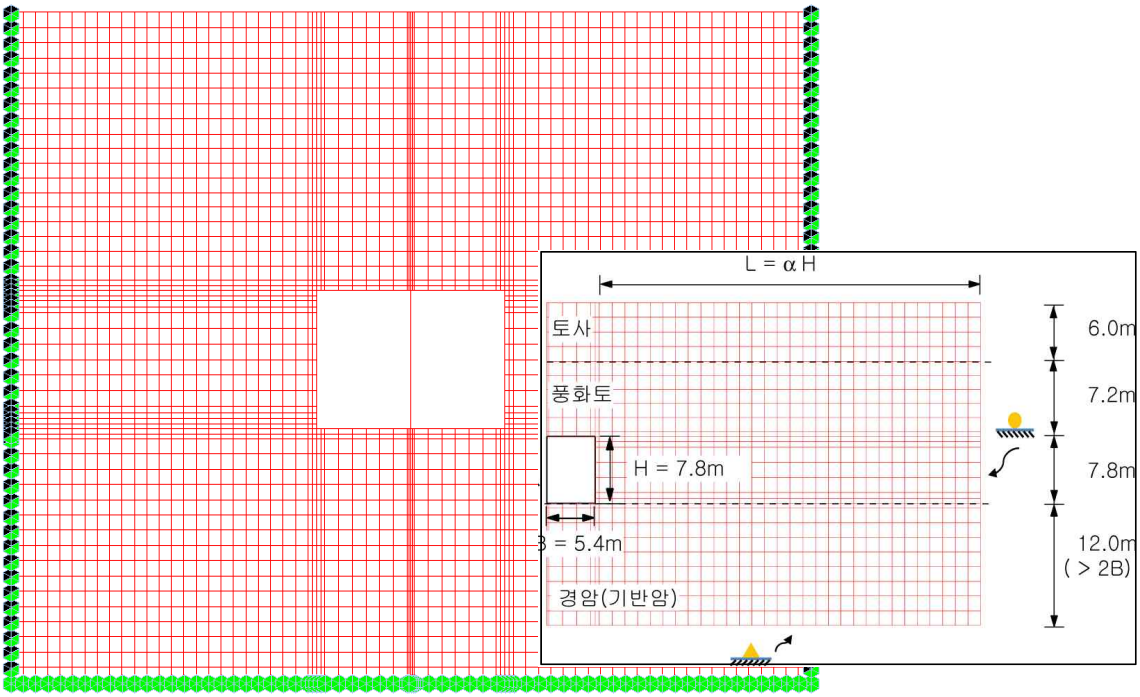
응답진도법(GRSCM, Ground Response Seismic Coefficient Method)은 자유장 지반응답을 통하여 지진에 의해 발생되는 구조물(또는 지반)의 각 위치에서 최대응답가속도를 산정하고 각 절점의 질량에 산정된 응답가속도를 곱한 값을 지진방향의 정적하중으로 작용하여 지진해석을 수행하는 방법으로 유한요소 프로그램을 활용한 해석과정을 보다 상세히 정리하면 다음과 같다.

1) 지반을 포함한 터널 구조물의 2차원 유한요소해석을 위하여 <그림 1.2-1>과 같이 지반은 평면 요소를, 터널 구조물은 보(beam) 요소를 사용하여 터널을 포함한 지반 전체를 모델링하였다.

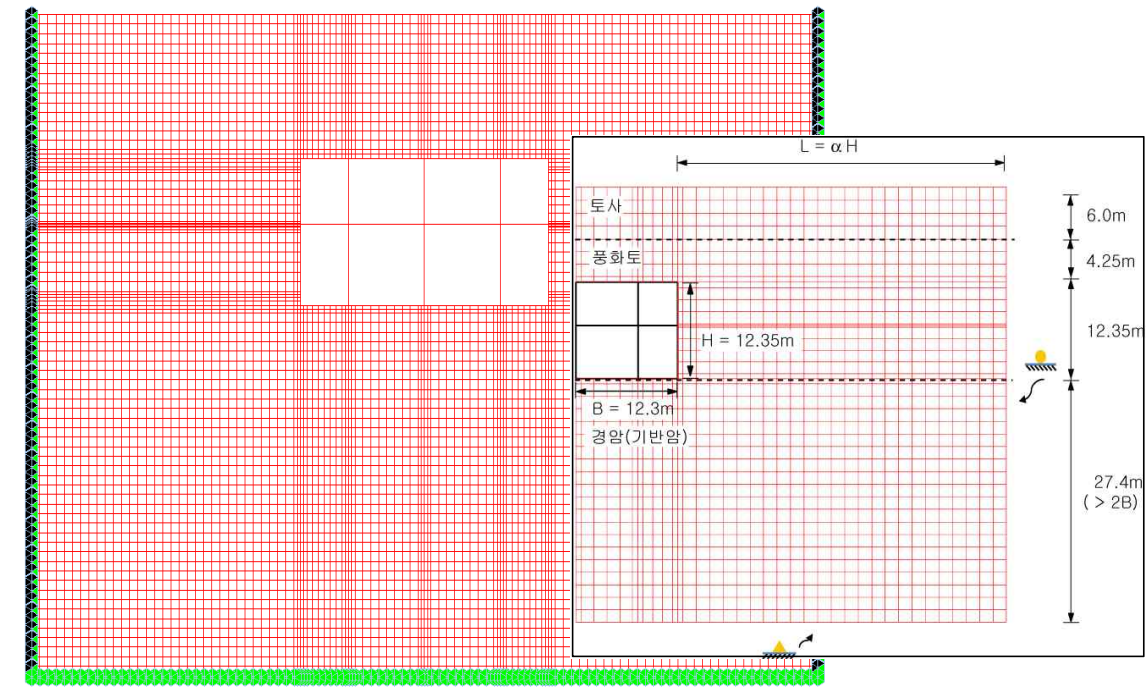
2) <그림 1.2-1>의 구조물 측벽으로부터 지반의 수평 모델링 범위(αH)는 구조물 높이(H)의 2배($\alpha=2$)로 설정하고, 구조물 하부의 지반 모델링 범위는 구조물 반폭(B)의 2배 이상(D $\geq$ 2B)이 되도록 설정하였다. 그리고 해석모델의 좌·우측 지반 경계는 롤러조건을 적용하였으며, 구조물 하부 바닥경계는 모두 구속하였다.

3) 응답진도법에 의한 구조물의 부재력을 산정하기 위해서 <그림 1.2-2>의 설계 인공지진파 7개를 입력한 자유장 해석을 수행하였다. 그에 따라 각 인공지진파에 대한 예제 B1~B4 구조물의 자유장 지반의 깊이별 응답가속도를 구하였다.

4) 지반의 깊이별 응답가속도는 단선 박스의 경우 구조물의 상단과 하단, 2층 정거장의 경우 상단과 중단, 중단과 하단의 상대변위가 최대가 되는 시점의 지층별 가속도를 결정하기 위하여 자유장 해석을 수행하였다. <그림 1.2-3>은 자유장 해석을 통해서 구조물의 상대변위가 최대가 되는 시점의 깊이별 응답가속도를 나타낸 것이며, 이를 유한요소해석을 통하여 지층별 질량을 고려하여 깊이별 수평방향 관성력(지진력)으로 재하하였다.

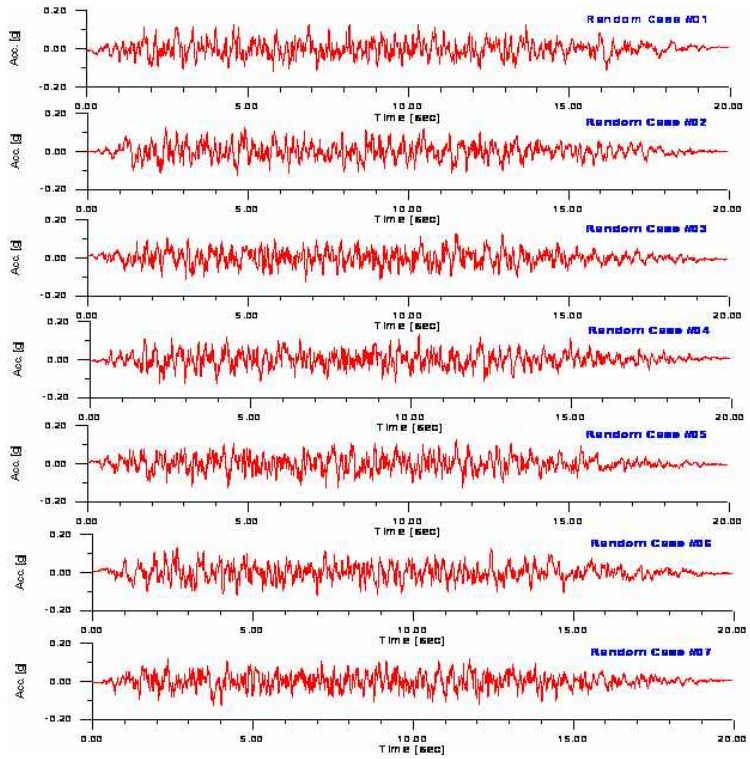


(a) 단선 박스(B-1)

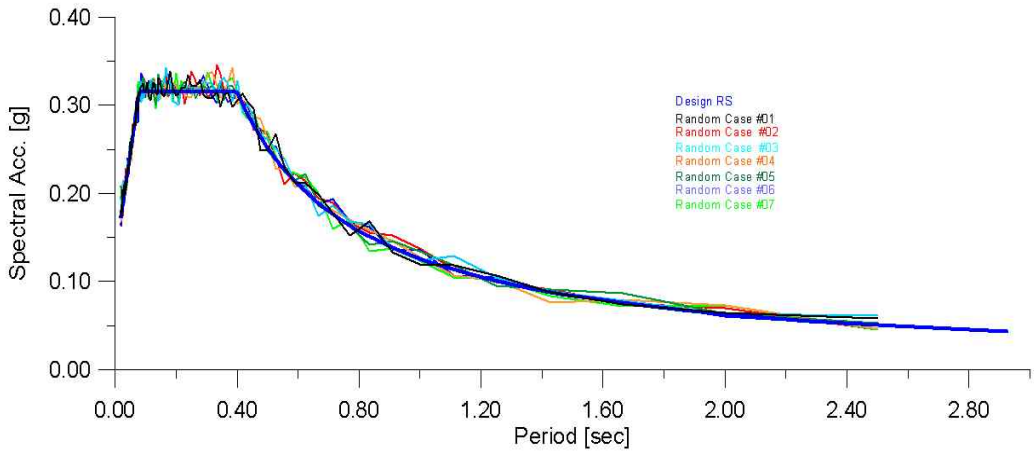


(b) 2층 정거장(B-3)

<그림 1.2-1> 유한요소해석 모델링

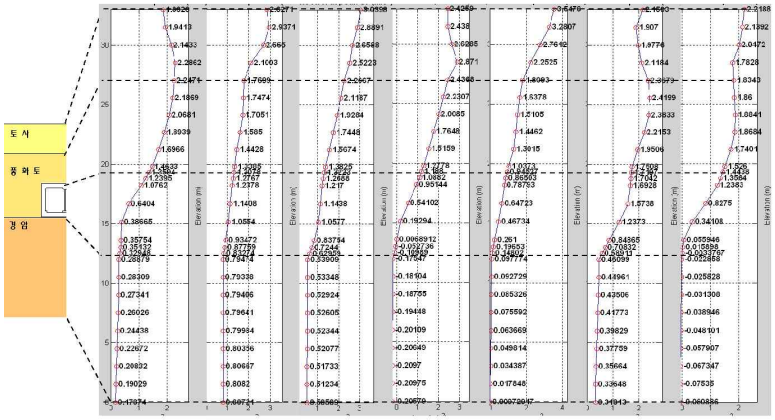


(a) 인공지진파의 시간이력곡선(강진지속시간 10초, 총 지속시간 20초)

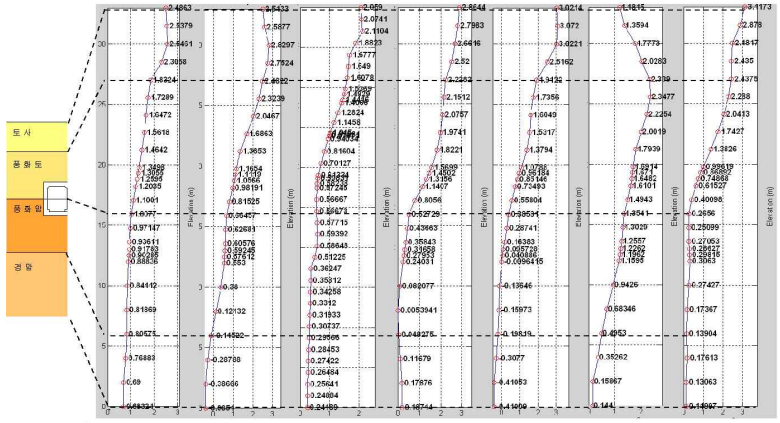


(b) 응답스펙트럼 (감쇠비 5%)

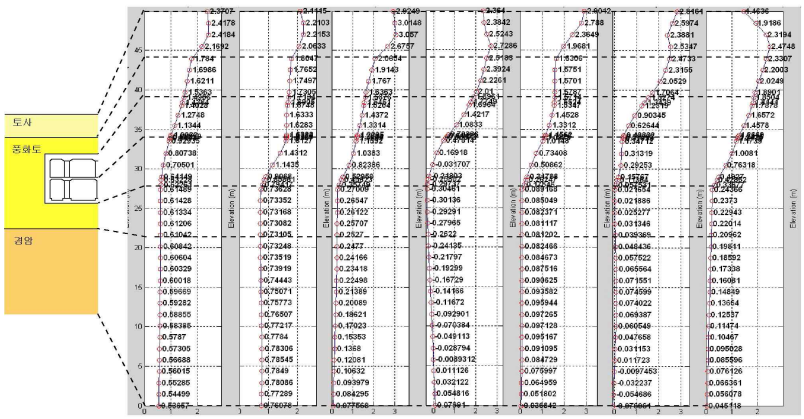
<그림 1.2-2> 기반암 노두에서 정의되는 설계지진의 인공지진파
(붕괴방지수준, PGA=0.126g)



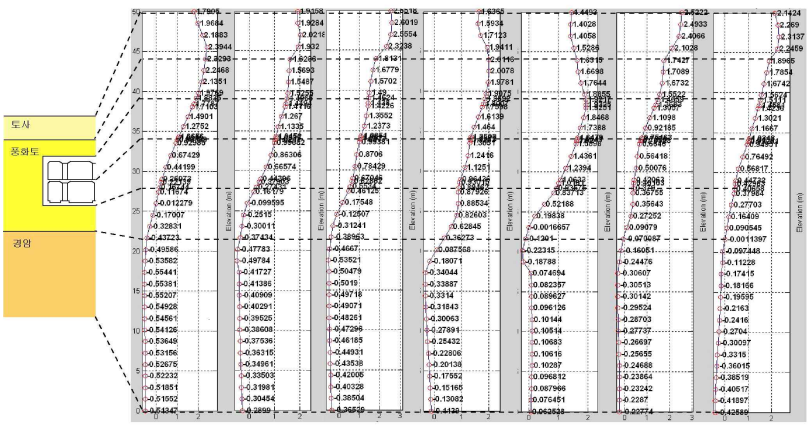
(a) B-1



(b) B-2



(c) B-3

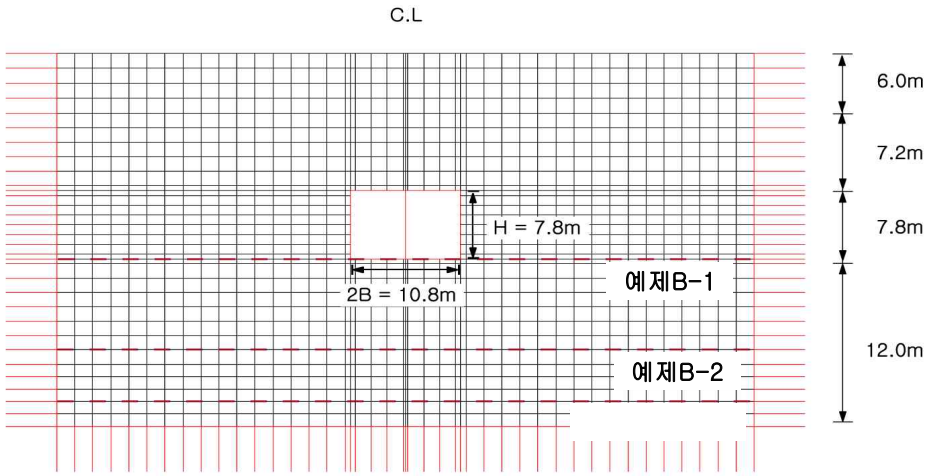


(d) B-4

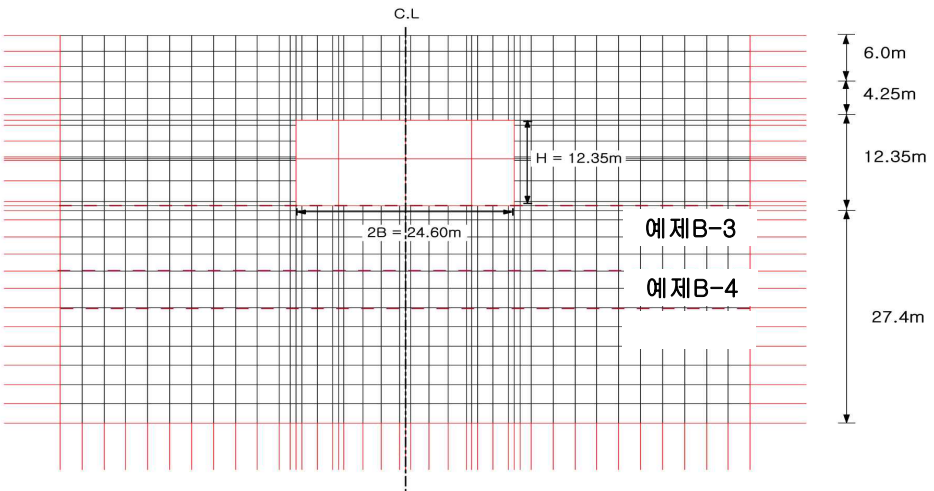
<그림 1.2-3> 깊이에 따른 최대응답가속도

1.3 SSI(Soil-Structure Interaction) 해석법

1) 지반과 구조물을 모델링하기 위해 각각 9절점 평면(plate)요소와 2절점 프레임(frame) 요소를 사용하였다. 그리고 <그림 1.3-1>에서 해석모델의 양측 수평지반층은 3절점 수평무한요소를 이용하고 반무한 기반암은 3절점 수직무한요소와 1절점 모서리 무한요소를 이용하여 모델링하였다.
2) 근역지반의 유한요소해석모델을 작성할 때 지반영역의 수평방향 모델링 범위는 구조물 중심으로부터 동적 무한요소를 적용한 모델 좌·우 측면경계까지 거리를 각각 구조물 높이(H)의 3배 이상이 되도록 하였다. 그리고 구조물 수직방향 모델링 범위는 구조물 바닥으로부터 구조물 반폭(B)의 2배 이상이 되도록 하였다.
3) 지진입력은 붕괴방지수준(PGA = 0.126g)을 고려한 <그림 1.2-2>의 7개의 인공지진파를 기반암 노두에 x축으로 가진하여 지진응답해석을 실시하였다. 인공지진파는 G.L -33.0m에서 가진하여 구조물의 부재력을 산정하였다.



(a) 본선 박스



(a) 2층 정거장

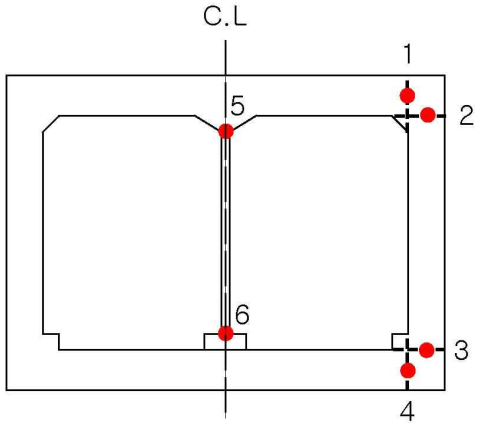
<그림 1.3-1> SSI 해석을 위한 유한요소해석모델

1.4 결과정리

터널의 내진안정성을 평가방법으로는 응답변위법(SDM), 응답진도법(GRSCM), 지반-구조물 상호작용(SSI) 해석법 등 다양한 평가방법이 있다. 본 예제에서는 이들 평가방법에 따라서 개착식 박스터널(본선 박스, 2층 정거장)에 대한 내진안정성 평가결과를 비교해보고자 한다.

가. 본선 박스

본선 박스(예제 B-1, B-2)에 대한 해석결과를 비교하면 <표 1.4-1>과 같다.



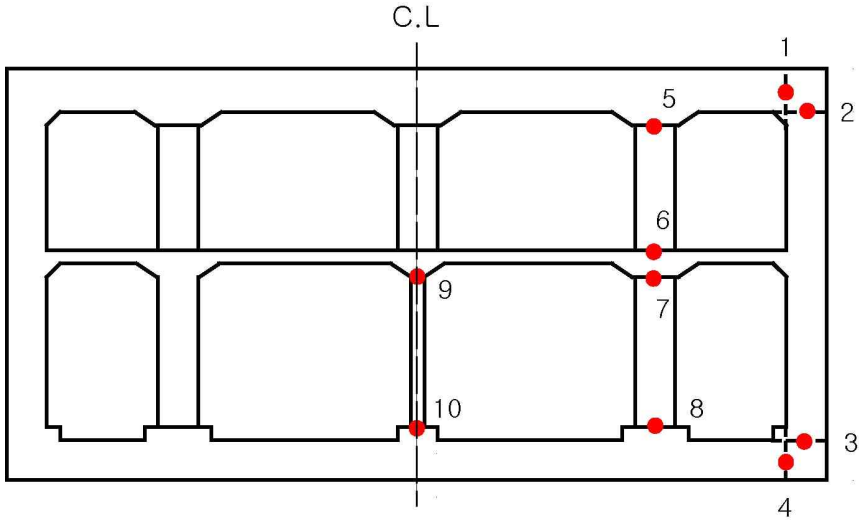
<그림 1.4-1> 본선 박스의 부재력 측정위치

<표 1.4-1> 본선 박스의 해석결과 비교 (단위 : kN－m, kN)

구분	위치	응답변위법(SDM)		응답진도법(GRSCM)		SSI 해석법	
		모멘트	전단력	모멘트	전단력	모멘트	전단력
예제 B-1	1	1,448.20	431.40	626.81	203.21	650.30	259.75
	2	1,404.00	912.20	590.51	254.59	630.40	299.44
	3	2,108.90	999.20	775.83	333.99	905.70	448.47
	4	1,765.10	1,271.30	588.09	499.53	471.40	596.38
	5	168.90	67.20	48.71	15.67	86.70	34.07
	6	163.40	69.80	47.87	17.64	73.90	35.94
예제 B-2	1	1,175.70	392.50	601.51	197.21	648.74	290.72
	2	1,167.90	674.60	555.73	269.13	598.14	350.30
	3	1,393.60	733.80	502.93	228.53	542.98	303.59
	4	1,589.20	665.00	514.11	230.50	544.39	353.06
	5	151.40	61.90	46.41	15.26	71.80	30.31
	6	154.80	64.40	46.93	16.97	71.28	31.77

나. 2층 정거장

2층 정거장(예제 B-3, B-4)에 대한 해석결과를 비교하면 <표 1.4-2>와 같다.



<그림 1.4-2> 2층 정거장의 부재력 산정위치

<표 1.4-2> 2층 정거장의 해석결과 비교 (단위 : kN－m, kN)

구분	위치	응답변위법(SDM)		응답진도법(GRSCM)		SSI 해석법	
		모멘트	전단력	모멘트	전단력	모멘트	전단력
예제 B-3	1	1,837.80	545.70	948.29	276.34	985.98	438.43
	2	1,891.80	841.30	917.26	278.66	1,012.10	339.02
	3	3,030.50	997.70	1,194.01	397.77	1,690.63	600.79
	4	2,684.80	1,458.30	1,131.43	503.66	888.20	903.79
	5	820.20	319.00	357.84	127.76	421.05	163.71
	6	552.20	322.30	178.00	130.67	199.68	168.56
	7	683.80	311.80	218.29	109.80	201.89	131.27
	8	925.00	315.40	369.17	111.84	389.30	134.19
	9	82.60	40.80	28.76	12.97	27.89	16.09
	10	115.90	43.20	43.94	14.43	47.91	20.51
예제 B-4	1	1,301.90	385.70	882.09	211.30	802.99	291.83
	2	1,359.70	590.90	838.91	242.46	852.05	336.46
	3	2,341.90	799.80	1,104.19	411.99	1,134.00	479.44
	4	2,081.80	1,138.40	1,127.24	378.63	1,076.08	428.49
	5	592.20	228.60	359.79	125.64	390.10	147.06
	6	393.50	232.00	167.30	128.59	158.87	163.47
	7	525.00	238.10	243.26	120.67	253.78	191.45
	8	705.70	241.70	401.67	122.69	449.73	156.95
	9	64.50	31.30	37.87	17.19	41.75	26.18
	10	89.20	33.70	56.91	18.60	64.70	24.30

다. 결과분석

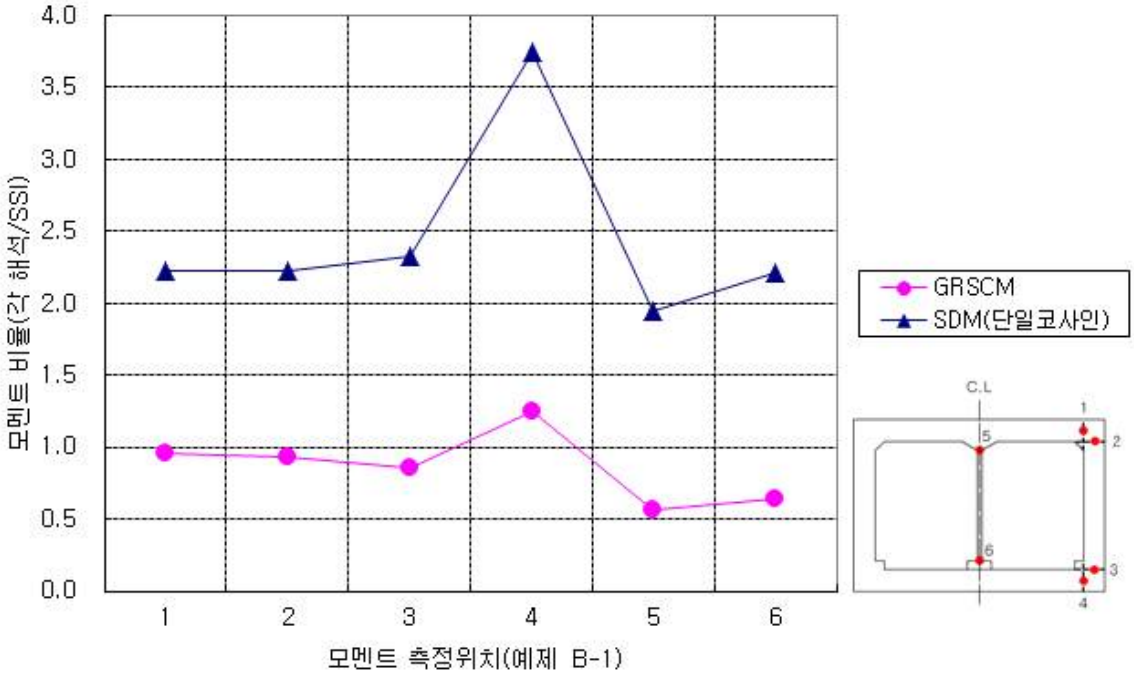
본선 박스(예제 B-1, B-2)와 2층 정거장(예제 B-3, B-4)의 내진안정성 평가결과에 대해서 지반-구조물 상호작용(SSI) 해석결과를 기준(1.0)으로 응답변위법(SDM)과 응답진도법(GRSCM)의 해석결과를 비교하여 나타내면 <표 1.4-3>, <그림 1.4-3~6>과 같으며, 이들 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 도시철도 내진설계기준(2009)에서 제시하고 있는 응답변위법(SDM)에 의한 해석결과를 지반-구조물 상호작용(SSI) 해석결과와 비교하면, SSI 해석법에 비하여 본선 박스는 최대 3.4배, 2층 정거장은 최대 3.13배까지 보수적인 결과를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다.

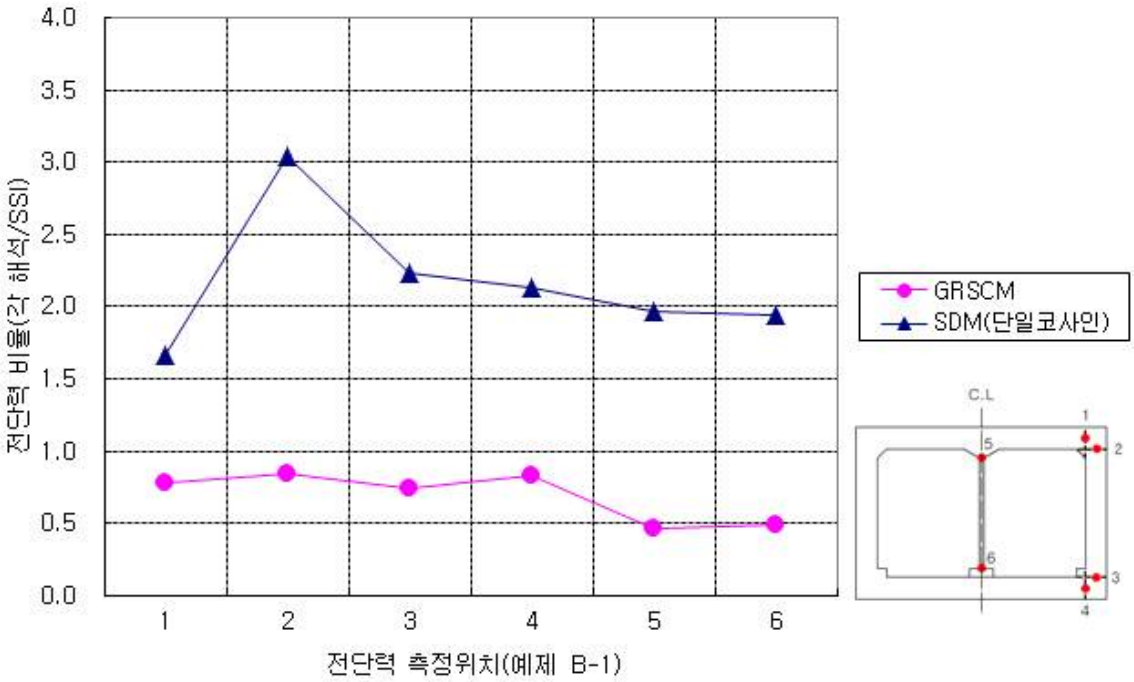
2) 응답진도법(GRSCM)에 의한 해석결과를 엄밀해석법인 SSI 해석결과와 비교하면, 전반적으로 각 부재력(모멘트 및 전단력)에서 유사성을 확인할 수 있으며, 이들 해석결과를 통해서 응답진도법의 적용성을 파악할 수 있다.

<표 1.4-3> SSI 해석법에 대한 각 해석방법의 결과 비교

구분	위치	응답변위법 (SDM)		응답진도법 (GRSCM)		구분	위치	응답변위법 (SDM)		응답진도법 (GRSCM)	
		모멘트	전단력	모멘트	전단력			모멘트	전단력	모멘트	전단력
예제 B-1	1	2.23	1.66	0.96	0.78	예제 B-2	1	1.81	1.35	0.93	0.68
	2	2.23	3.05	0.94	0.85		2	1.95	1.93	0.93	0.77
	3	2.33	2.23	0.86	0.74		3	2.57	2.42	0.93	0.75
	4	3.74	2.13	1.25	0.84		4	2.92	1.88	0.94	0.65
	5	1.95	1.97	0.56	0.46		5	2.11	2.04	0.65	0.50
	6	2.21	1.94	0.65	0.49		6	2.17	2.03	0.66	0.53
예제 B-3	1	1.86	1.24	0.96	0.63	예제 B-4	1	1.62	1.32	1.10	0.72
	2	1.87	2.48	0.91	0.82		2	1.60	1.76	0.98	0.72
	3	1.79	1.66	0.71	0.66		3	2.07	1.67	0.97	0.86
	4	3.02	1.61	1.27	0.56		4	1.93	2.66	1.05	0.88
	5	1.95	1.95	0.85	0.78		5	1.52	1.55	0.92	0.85
	6	2.77	1.91	0.89	0.78		6	2.48	1.42	1.05	0.79
	7	3.39	2.38	1.08	0.84		7	2.07	1.24	0.96	0.63
	8	2.38	2.35	0.95	0.83		8	1.57	1.54	0.89	0.78
	9	2.96	2.54	1.03	0.81		9	1.54	1.20	0.91	0.66
	10	2.42	2.11	0.92	0.70		10	1.38	1.39	0.88	0.77

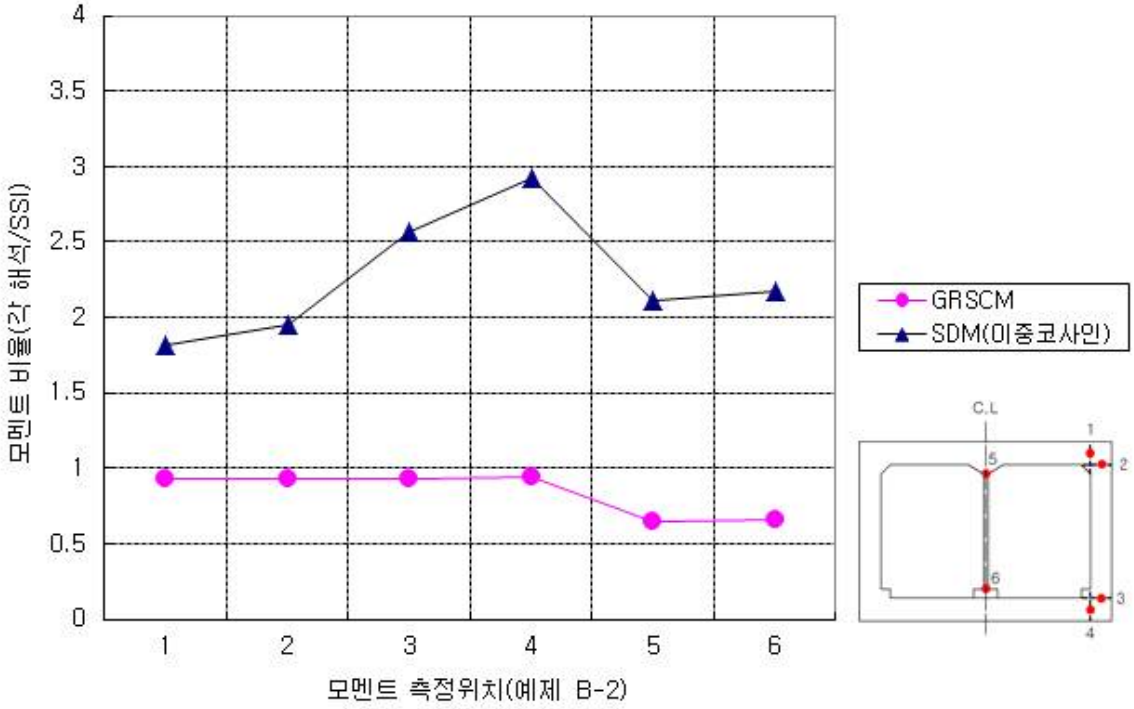


(a) 모멘트

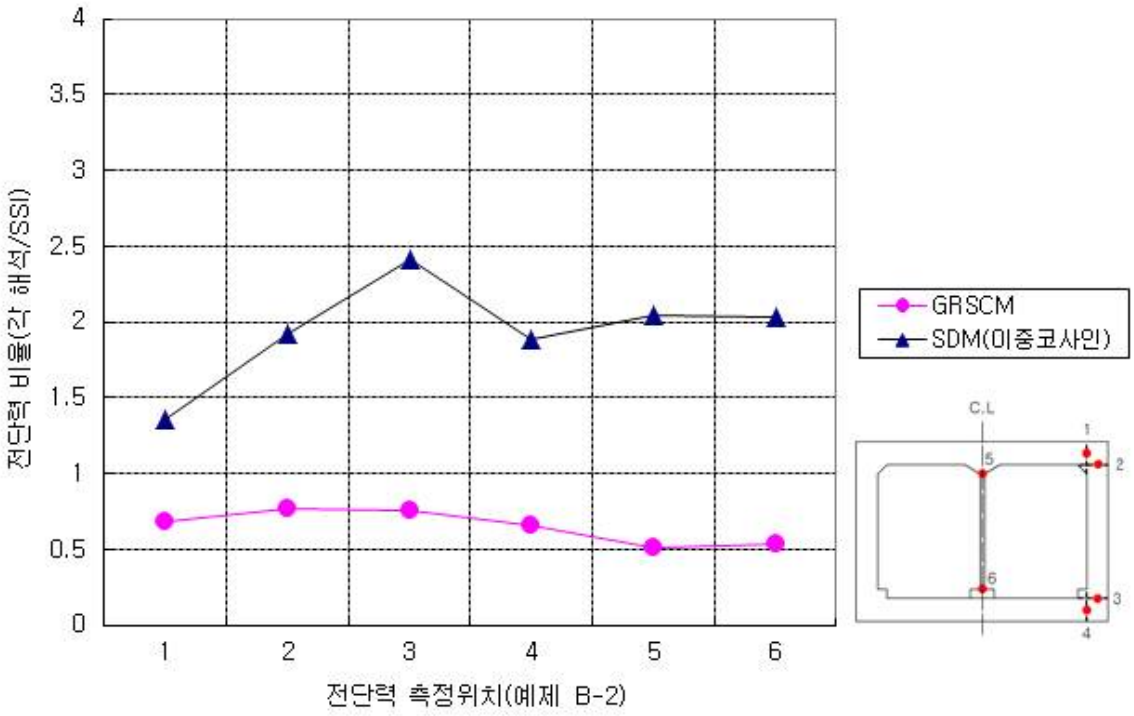


(b) 전단력

<그림 1.4-3> 평가방법에 따른 예제 B-1의 해석결과 비교

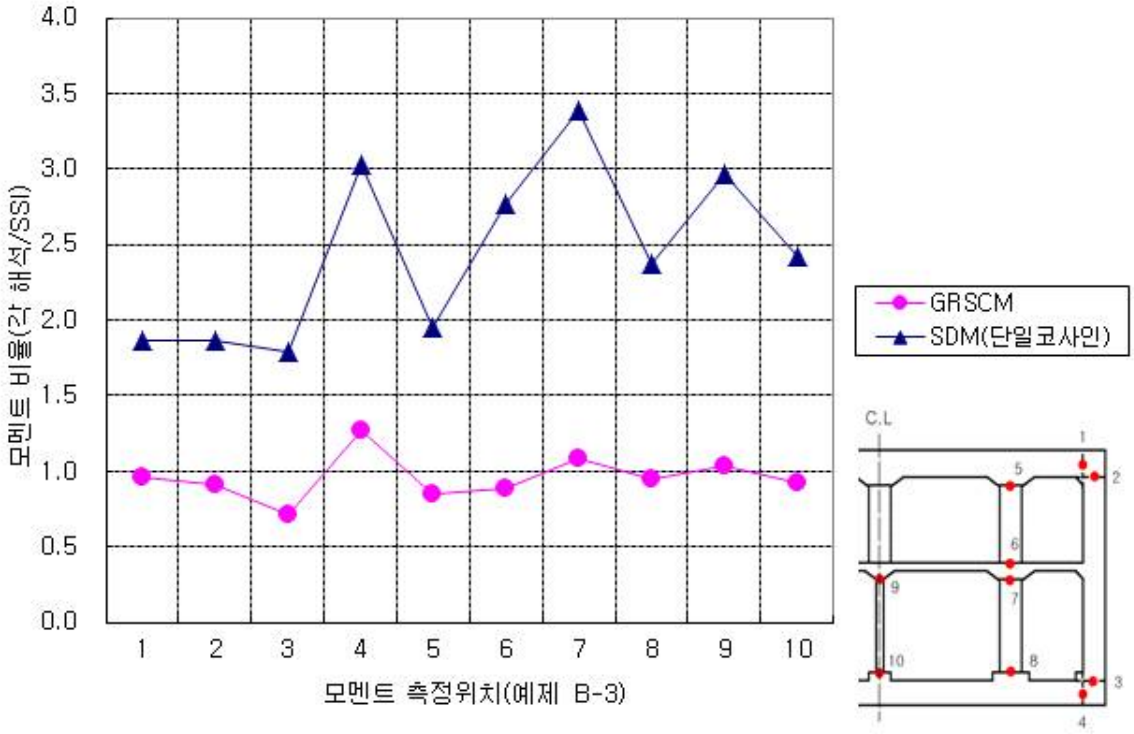


(a) 모멘트

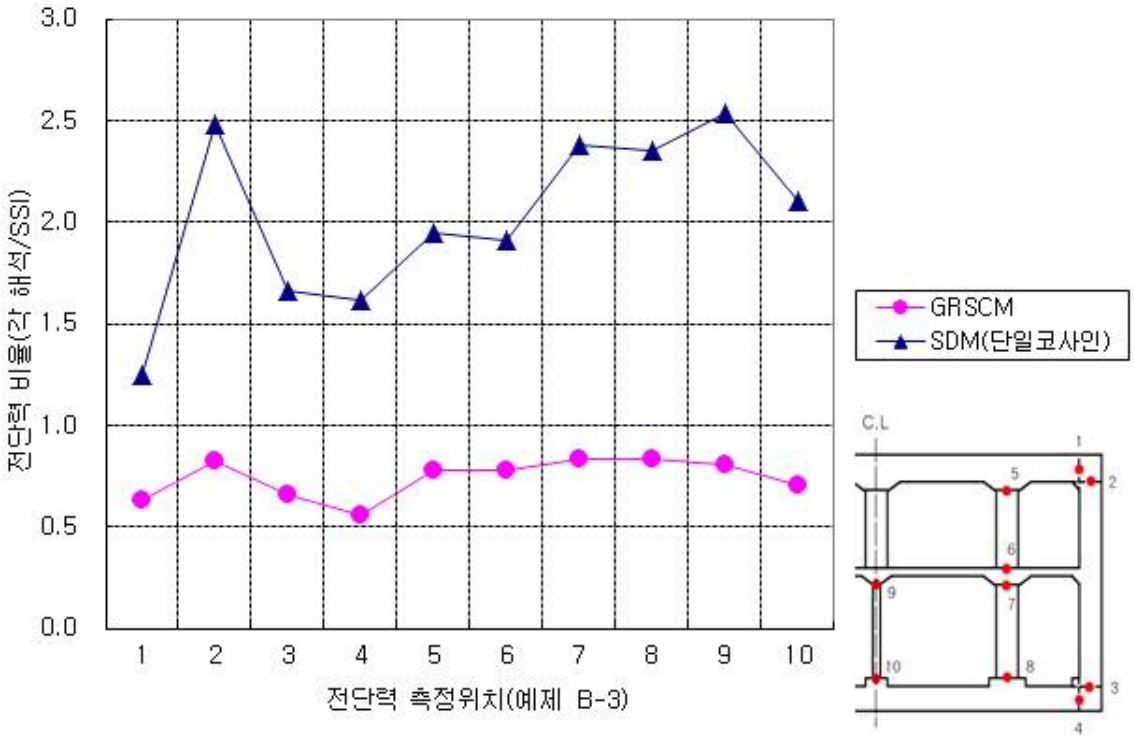


(b) 전단력

<그림 1.4-4> 평가방법에 따른 예제 B-2의 해석결과 비교

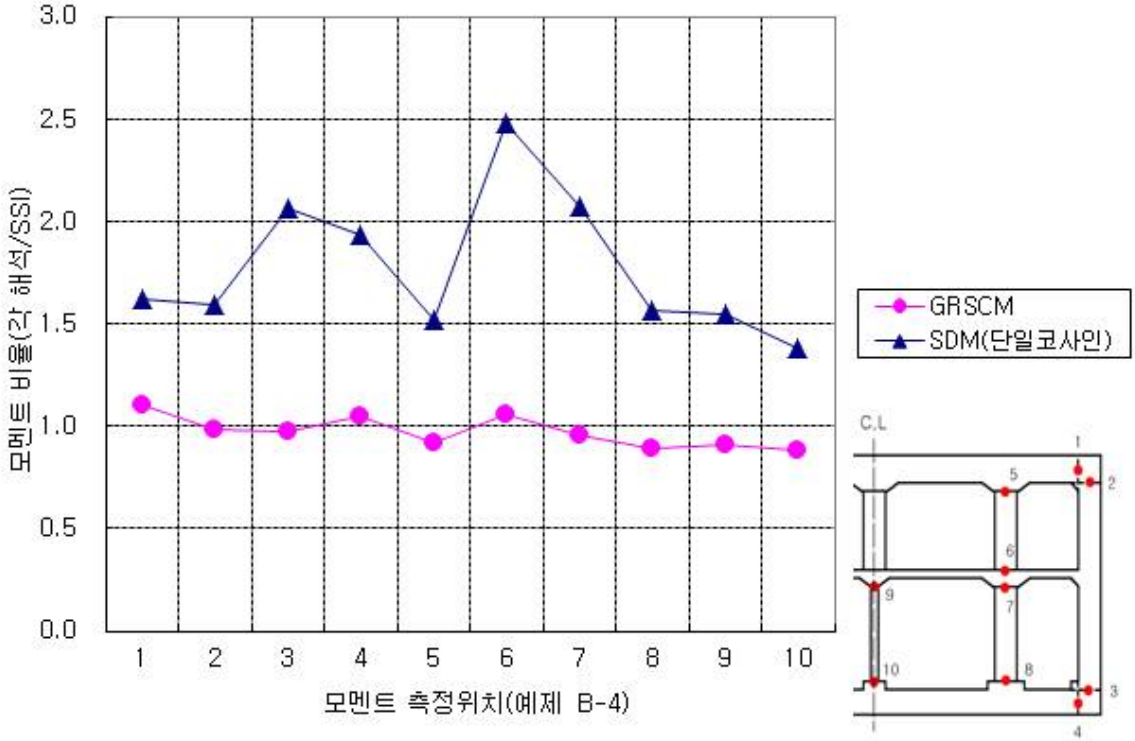


(a) 모멘트

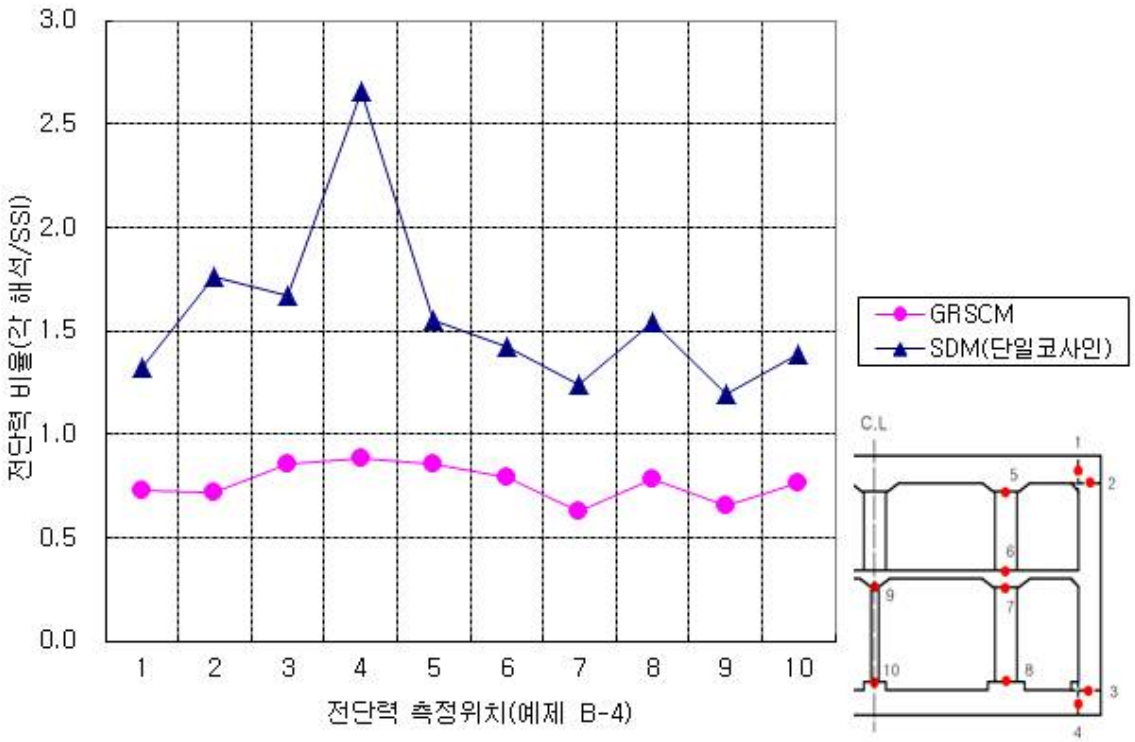


(b) 전단력

<그림 1.4-5> 평가방법에 따른 예제 B-3의 해석결과 비교



(a) 모멘트

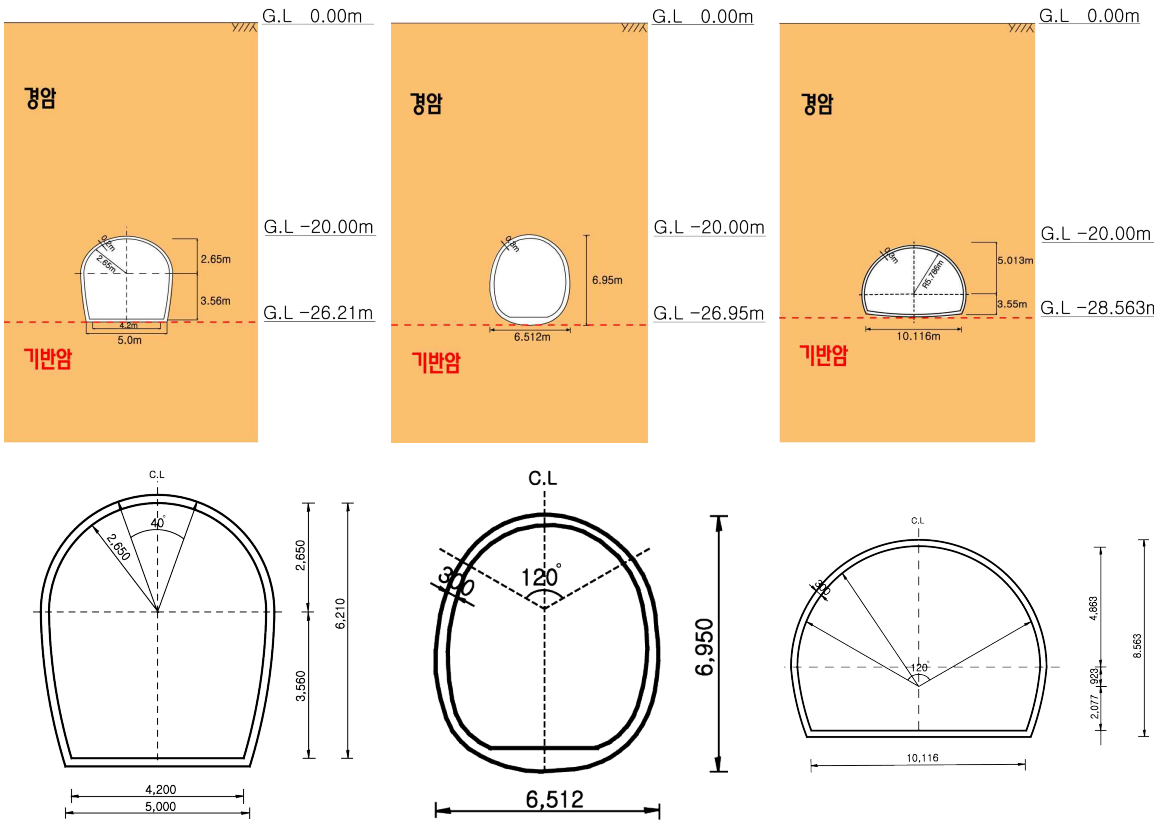


(b) 전단력

<그림 1.4-6> 평가방법에 따른 예제 B-4의 해석결과 비교

2. 굴착식 터널

대상터널은 <그림 2-1>과 같으며, 단면형상 및 크기에 따라 예제 T-1, T-2, T-3으로 구분하였다. 그리고 <표 2-1>은 지반 물성을 나타내고, <표 2-2>는 터널의 단면 물성을 나타낸다.



(a) T-1 (b) T-2 (c) T-3

<그림 2-1> 굴착식 터널의 지반조건과 위치 및 단면치수

<표 2-1> 지반 물성

구 분	지층	초기전단파속도 V_{s0} (m/s)	설계전단파속도 $V_s = 0.5V_{s0}$	단위중량 γ(kN/m^3)	설계탄성계수[2] E (kN/m^2)	감쇠비 (h)
Case1	경 암	1,600	**800**	22.55	3,680,000	**0.20**
Case2	경 암	1,600	**800**	22.55	3,680,000	**0.05**
Case3	경암	1,600	**1,600**[1]	22.55	14,720,000	**0.05**

주 : 1) 경암(기반암)의 전단파속도는 성능수준별 지반변형에 대한 보정계수(C)를 적용하지 않음.
2) 탄성계수(E) = $2(1+\nu)(\rho)(V_s)^2$

<표 2-2> 터널의 단면물성

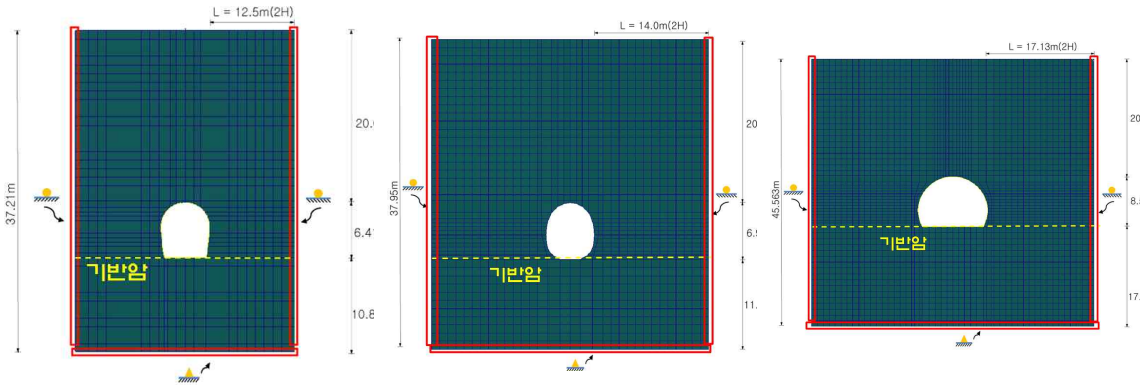
구분	부재구분	종방향 유효폭 B(m)	두께 H(m)	단면적 $A=BH(m^2)$	단면 2차 모멘트 $I=\frac{1}{12}bh^3(m^4)$
T-1	라이닝	1	0.2	0.2	0.000667
T-2	라이닝	1	0.3	0.3	0.00225
	하부 라이닝	1	0.7	0.7	0.02858
T-3	라이닝	1	0.3	0.3	0.00225

2.1 응답진도법

가. 유한요소 모델링

응답진도법에 의한 굴착식 터널의 지진응답해석을 위하여 상용 프로그램을 이용하여 해석모델을 작성하였다. 굴착식 터널의 유한요소 모델링은 개착식 박스와 같이 지반은 평면(plate) 요소, 구조물은 프레임(frame) 요소를 사용하였다. 지반의 수평 모델링 범위(αH)는 구조물 높이(H)의 2배($\alpha=2$)로 설정하고, 해석모델의 좌·우측 지반 경계는 롤러조건을 적용하였으며, 구조물 하부의 바닥경계는 모두 구속하였다.

구조물 아래 기반암의 수직방향 모델링 범위는 구조물 반폭(B, 터널 폭=2B)의 2배 이상이 되도록 하여 <그림 2.1-1>과 같이 모델링하였다.

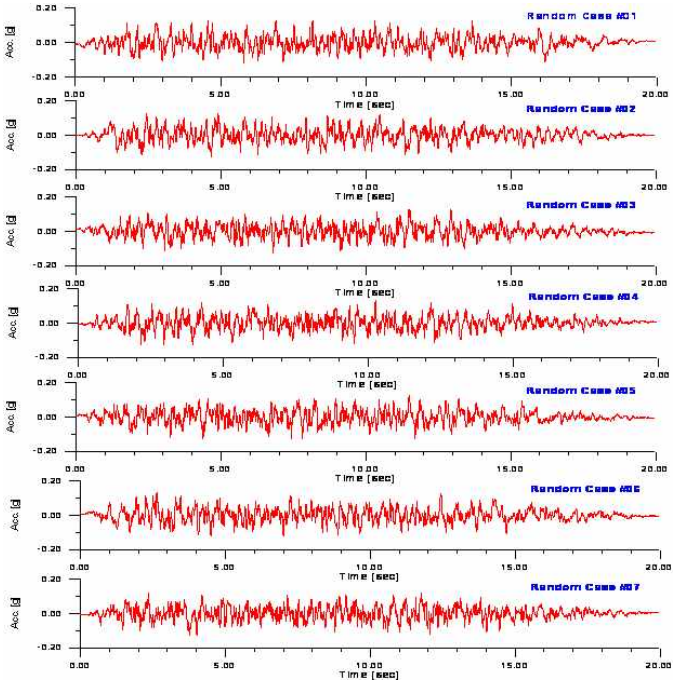


(a) T-1 (b) T-2 (c) T-3

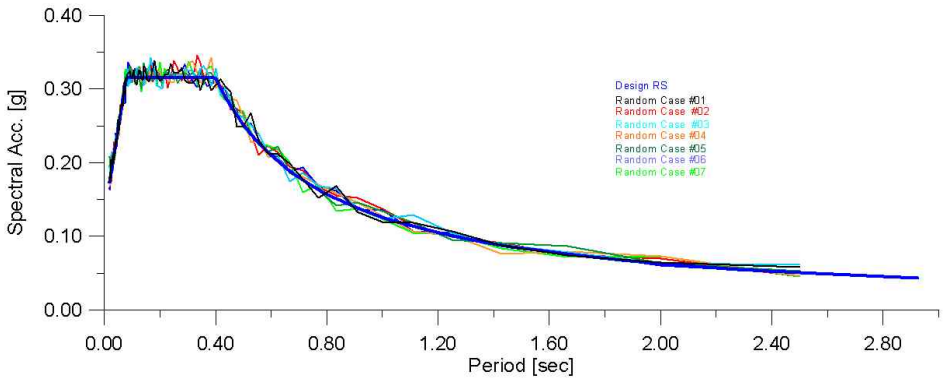
<그림 2.1-1> 굴착식 터널의 유한요소해석모델

나. 깊이별 최대응답가속도 산정

응답진도법에 의한 구조물의 부재력 산정을 위해서 자유장 지반의 응답진도를 결정하고 그에 따른 깊이별 응답가속도를 산정하는데, 이때 응답가속도는 구조물의 상·하단의 상대변위가 최대가 되는 시점을 기준으로 한다. <그림 2.1-2>의 설계 인공지진파 7개는 자유장 해석을 위한 것이며, 각 인공지진파에 대한 Case별 자유장 지반의 깊이별 응답가속도를 <그림 2.1-3>과 같이 구하였다. 이러한 응답가속도는 유한요소 해석모델에서 깊이별 수평방향 지진력으로 재하하였다.

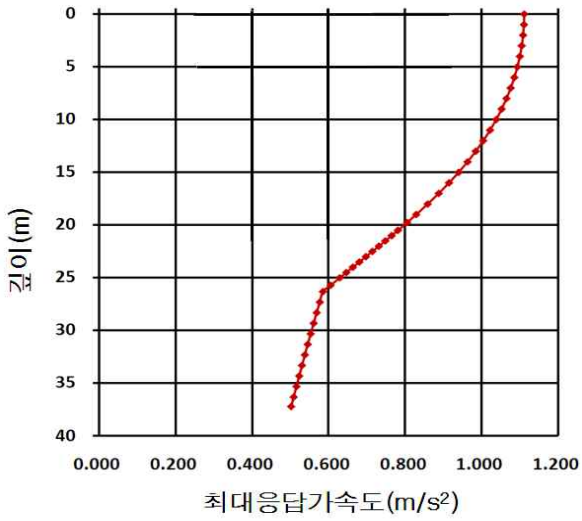


(a) 인공지진파의 시간이력곡선(강진지속시간 10초, 총 지속시간 20초)

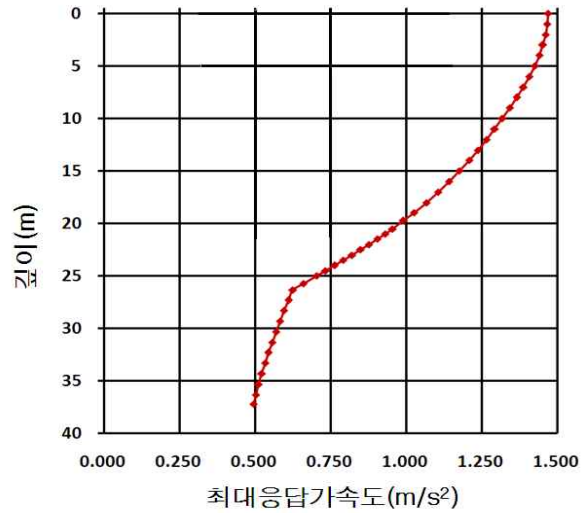


(b) 응답스펙트럼 (감쇠비 5%)

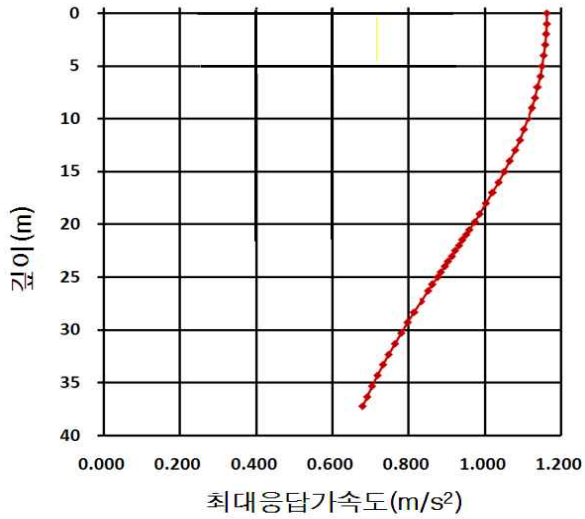
<그림 2.1-2> 기반암 노두에서 정의되는 설계 인공지진파 (붕괴방지수준, PGA=0.126g)



(a) Case#1



(b) Case#2



(c) Case#3

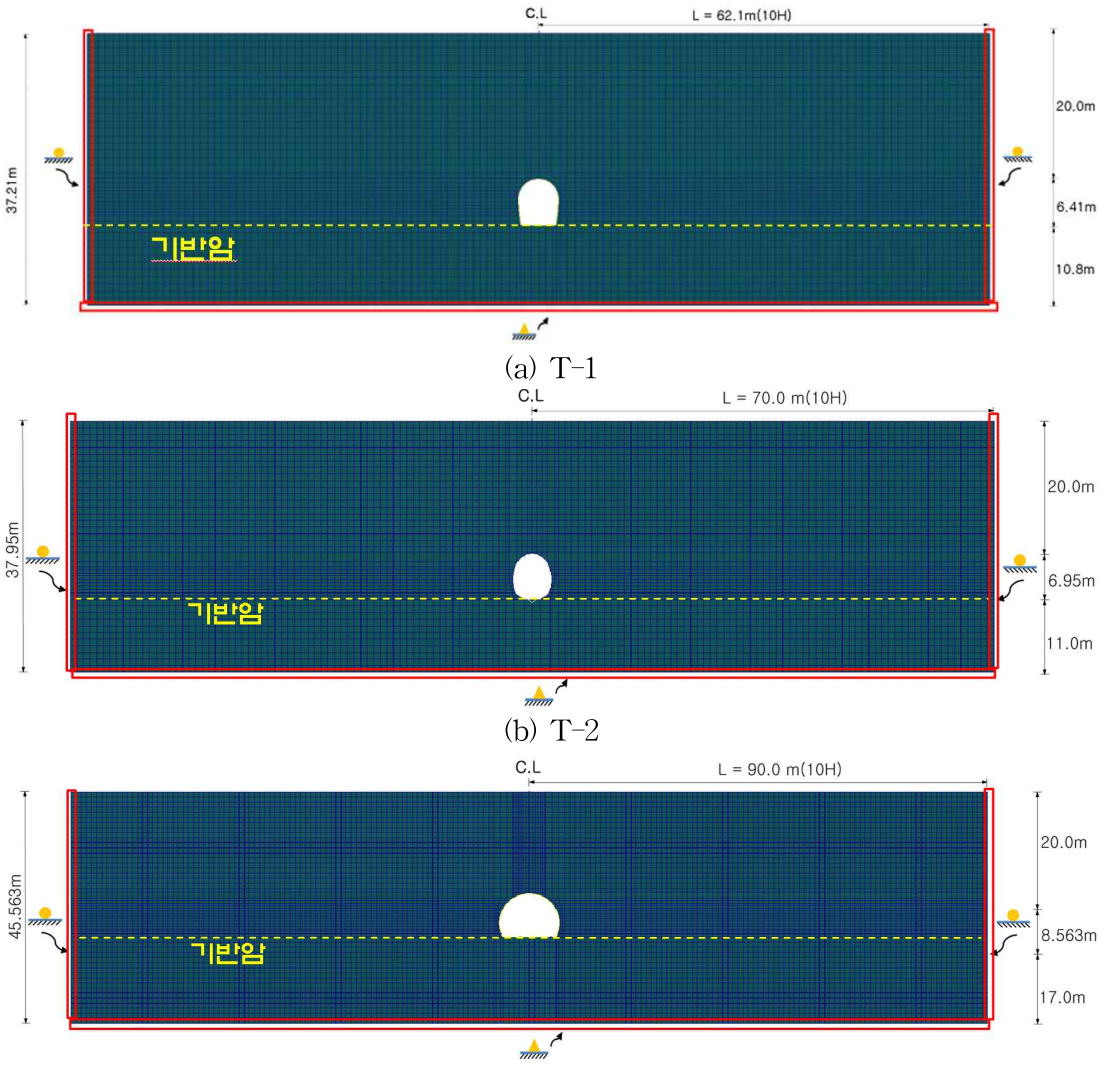
<그림 2.1-3> 예제 T-1의 깊이별 최대 평균응답가속도

2.2 시간이력해석법

가. 유한요소 모델링

1) 시간이력해석법에 의한 동적해석을 수행하기 위하여 <그림 2.2-1>과 같은 유한요소 해석모델을 작성하였다. 이때 지반과 구조물을 모델링하기 위하여 각각 평면요소와 프레임(frame) 요소를 사용하였다. 해석모델의 양측 경계는 롤러조건을 적용하였으며 해석모델의 바닥경계는 모두 구속하였다.

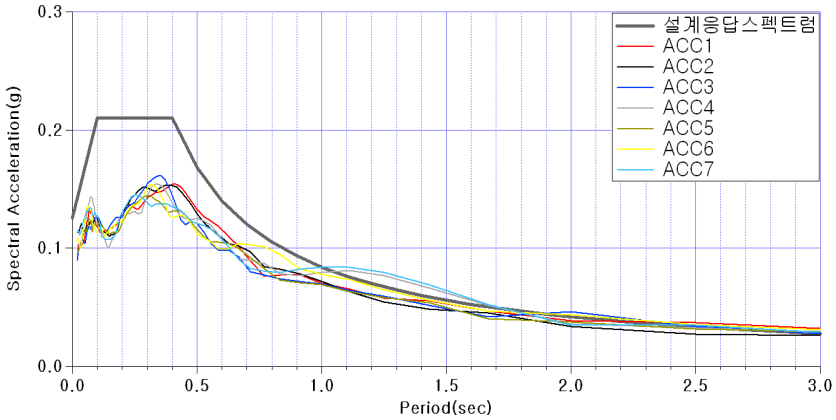
2) 유한요소해석모델을 작성할 때 지반영역의 수평방향 모델링 범위는 구조물 중심으로 부터 롤러조건을 적용한 모델 좌·우 수직경계까지 거리를 구조물 높이(H)의 10배 이상이 되도록 하였다. 그리고 구조물 아래 기반암의 수직방향 모델링 범위는 구조물 바닥으로 부터 구조물 반폭(B, 터널 폭=2B)의 2배 이상이 되도록 하였다.



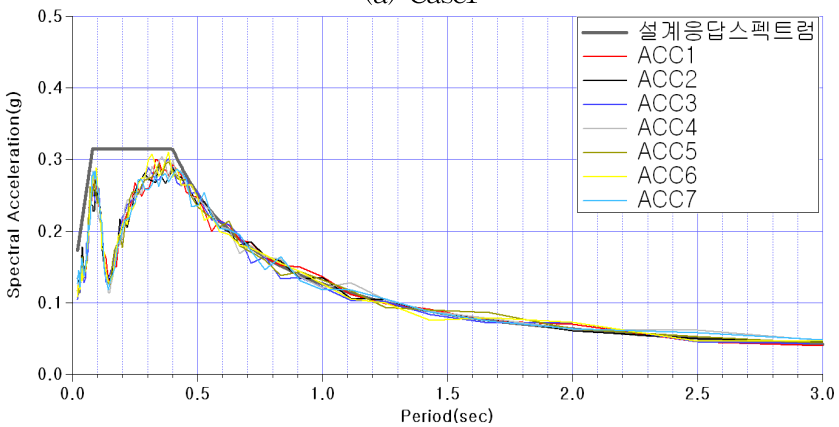
<그림 2.2-1> 굴착식 터널의 유한요소 모델링

나. 자유장 해석에 의한 기반암응답 산정

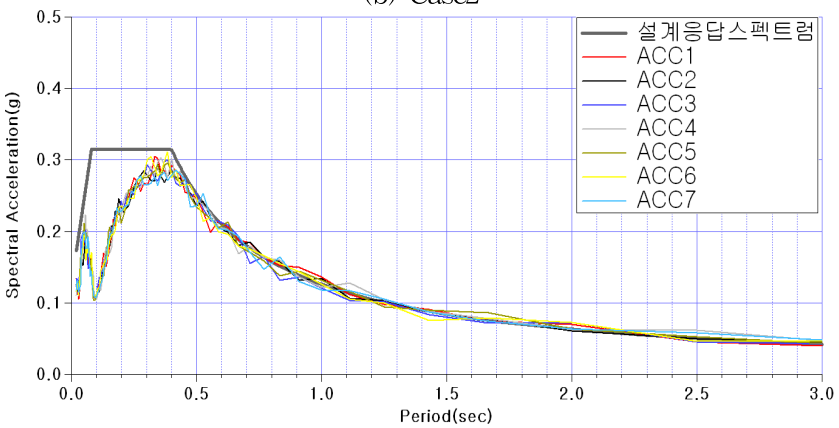
유한요소 해석모델의 바닥면에 입력할 지진운동을 결정하기 위하여 지진응답해석을 수행하였다. <그림 2.2-2>는 대표적으로 예제 T-1의 Case별 기반암 응답의 가속도 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. T-1, T-2, T-3의 자유장 지반에 대한 지진응답해석 결과 자유장 지반의 고유진동수 부근 진동수영역에서 기반암 응답이 노두입력에 비해 현저하게 작게 된다는 것을 알 수 있다.



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

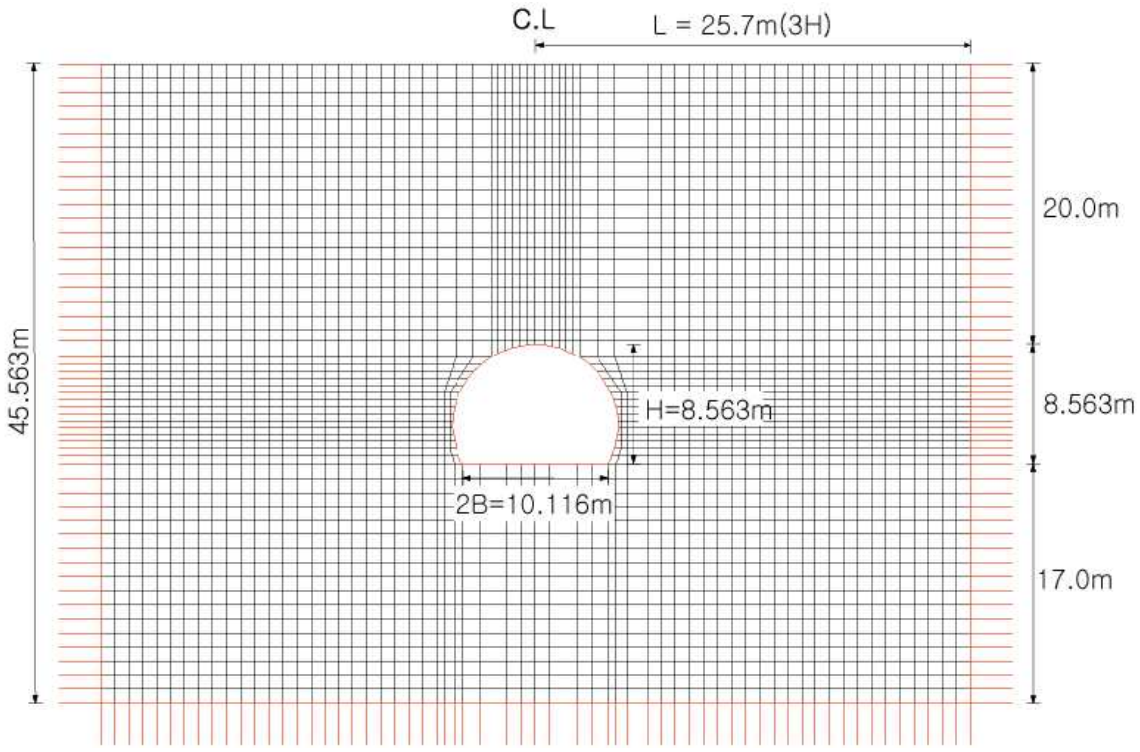
<그림 2.2-2> 기반암 응답의 가속도응답스펙트럼(예제 T-1)

2.3 SSI(Soil-Structure Interaction) 해석법

1) 지반과 구조물을 모델링하기 위해 각각 평면요소와 프레임(frame) 요소를 사용하였다. 그리고 <그림 1.3-1>에서 해석모델의 양측 수평지반은 3절점 수평무한요소를 이용하고 반무한 기반암은 3절점 수직무한요소와 1절점 모서리 무한요소를 이용하여 모델링하였다.

2) 근역지반의 유한요소 해석모델을 작성할 때 지반영역의 수평방향 모델링 범위는 구조물 중심으로부터 동적 무한요소를 적용한 모델 좌·우 측면경계까지 거리를 각각 구조물 높이의 3배 이상이 되도록 하였다. 그리고 구조물 수직방향 모델링 범위는 구조물 바닥으로부터 구조물 반폭(B)의 2배 이상이 되도록 하였다.

3) 지진입력은 붕괴방지수준(PGA = 0.126g)을 고려한 <그림 1.2-2>의 7개의 인공지진파를 기반암 노두에 X축으로 가진하여 지진응답해석을 실시하였으며, 인공지진파는 G.L -33.0m에서 가진하여 구조물의 부재력을 산정하였다.

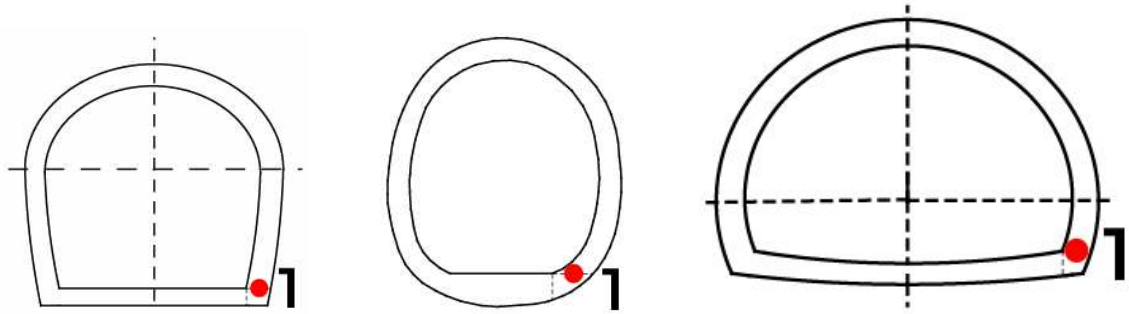


<그림 2.3-1> 굴착식 터널의 유한요소해석모델 (예제 T-3)

2.4 결과정리

가. 부재력 산정

터널의 부재력 산정위치는 <그림 2.4-1>과 같고, 내진안정성 평가방법에 따른 해석결과를 비교하면 <표 2.4-1>과 같다.



(a) 예제 T-1 (b) 예제 T-2 (c) 예제 T-3

<그림 2.4-1> 터널의 부재력 산정위치

<표 2.4-1> 터널의 해석결과 비교 (단위 : kN－m, kN)

구 분		응답진도법 (GRSCM)			시간이력해석법 (MSM)			SSI 해석법		
		모멘트	전단력	축력	모멘트	전단력	축력	모멘트	전단력	축력
예제 T-1	Case1	8.12	24.68	128.2	7.78	23.65	124.14	8.81	28.95	131.97
	Case2	10.27	31.28	162.31	9.19	27.40	143.86	10.28	33.71	154.46
	Case3	6.19	24.39	68.52	5.93	22.98	64.40	6.36	26.19	67.61
예제 T-2	Case1	2.34	9.11	111.84	2.29	9.15	112.04	2.76	10.27	117.54
	Case2	2.97	11.57	141.99	2.77	10.69	130.01	3.03	12.02	137.57
	Case3	2.95	7.44	75.29	2.96	7.28	74.10	3.15	7.94	75.68
예제 T-3	Case1	13.30	31.35	190.57	13.50	31.41	196.19	14.31	39.41	204.48
	Case2	17.08	39.70	245.11	16.55	37.73	235.97	17.34	40.24	257.00
	Case3	11.75	37.95	123.01	11.73	37.26	120.61	12.92	44.94	126.89

나. 결과분석

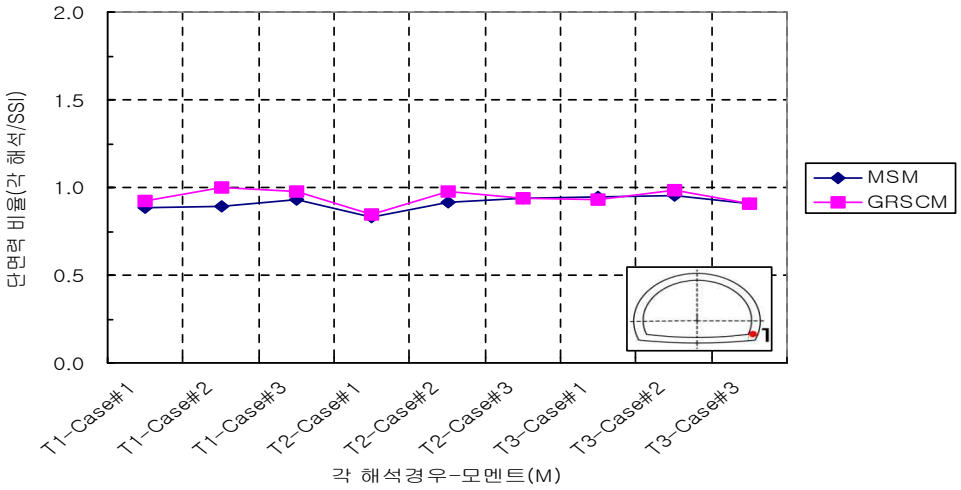
굴착식 터널의 내진안정성 평가결과에 대해서 지반-구조물 상호작용(SSI) 해석결과를 기준(1.0)으로 응답진도법(GRSCM)과 시간이력해석법(MSM)의 해석결과를 비교하여 나타내면 <표 2.4-2>, <그림 2.4-2>와 같으며, 이들 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 응답진도법(GRSCM), 시간이력해석법(MSM)의 해석결과를 지반-구조물 상호작용(SSI) 해석결과와 비교하면, 모든 경우의 부재력에서 유사성을 확인할 수 있다. 그리고 전반적으로 최대 20%이내의 오차를 보이는 응답진도법의 적용성을 확인할 수 있다.

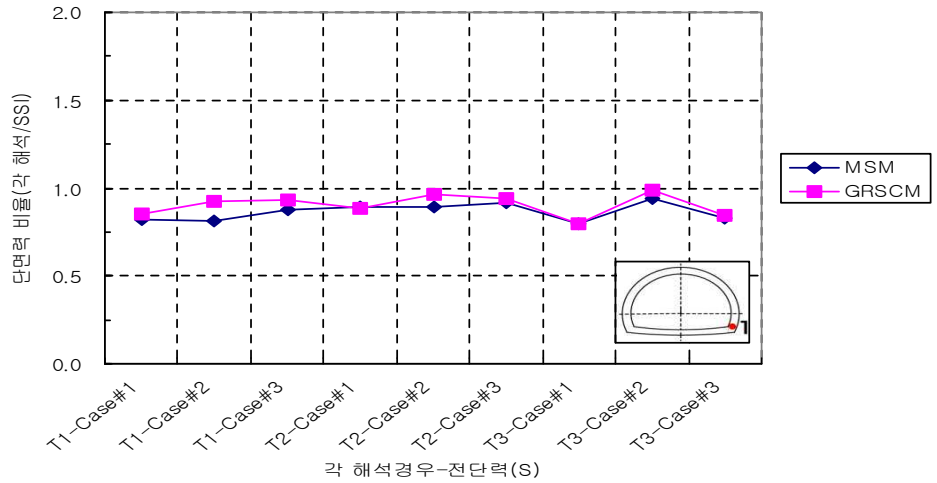
2) 시간이력해석법은 SSI 해석결과와 비교하면, 자유장 지반의 고유 진동수 부근에서 기반암 응답이 노두입력에 비해 작아져서 다소 과소평가됨을 확인할 수 있다.

<표 2.4-2> SSI 해석법에 대한 각 해석방법의 결과 비교 (단위 : kN－m)

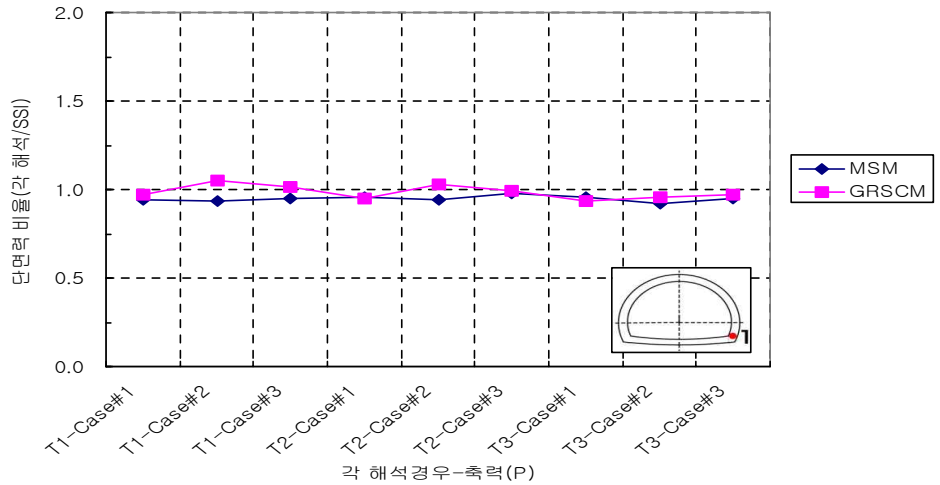
구분		응답진도법(GRSCM)			시간이력해석법(MSM)		
		모멘트	전단력	축력	모멘트	전단력	축력
예제 T-1	Case1	0.92	0.85	0.97	0.88	0.82	0.94
	Case2	1.00	0.93	1.05	0.89	0.81	0.93
	Case3	0.97	0.93	1.01	0.93	0.88	0.95
예제 T-2	Case1	0.85	0.89	0.95	0.83	0.89	0.95
	Case2	0.98	0.96	1.03	0.91	0.89	0.95
	Case3	0.94	0.94	0.99	0.94	0.92	0.98
예제 T-3	Case1	0.93	0.80	0.93	0.94	0.80	0.96
	Case2	0.99	0.99	0.95	0.95	0.94	0.92
	Case3	0.91	0.84	0.97	0.91	0.83	0.95



(a) 모멘트



(b) 전단력



(c) 축력

<그림 2.4-2> 평가방법에 따른 예제 T1~T3의 해석결과 비교

C. 내진점검표

□기본자료

<table>
<tr><td rowspan="11">1) 일반사항</td><td colspan="2">(1)사업명</td><td></td><td colspan="2">(2)구조물명</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">(3)위치</td><td></td><td colspan="2">(4)관리주체</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">(5)길이(m)</td><td></td><td colspan="2">(6)높이(m)</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">(7)폭(m)</td><td></td><td colspan="2">(8)구조형식</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">(9)준공년도</td><td></td><td colspan="2">(10)준거 설계기준 또는 시방서</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">(11)시공방법 및 형태</td><td></td><td colspan="2">(12)노면 활하중</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">(13)설계도서 보관여부</td><td></td><td colspan="2">(14)내진설계 유무</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">(15)중요부착시설물</td><td></td><td colspan="2">(16) 상태등급</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">(17)보수・보강이력</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="2">(18)기타*</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>2)지진특성</td><td>(1)지진구역</td><td></td><td>(2)내진성능목표</td><td></td><td>(3)지반종류</td><td></td></tr>
</table>

* 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	
	지반종류, 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

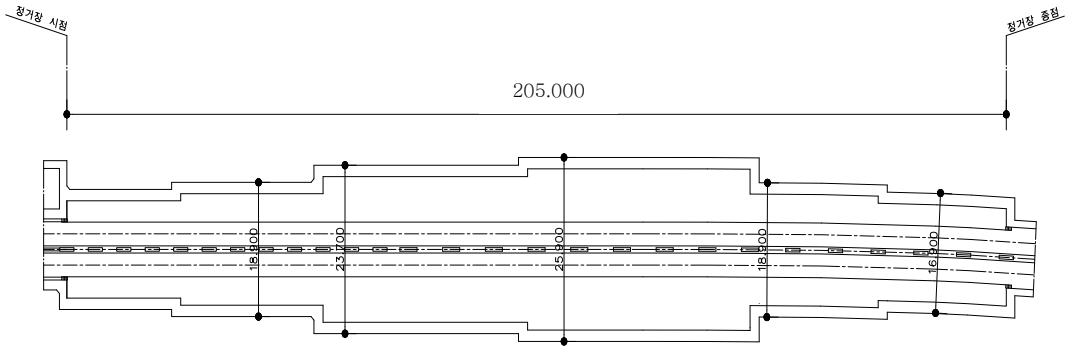
1)-5. 길이

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

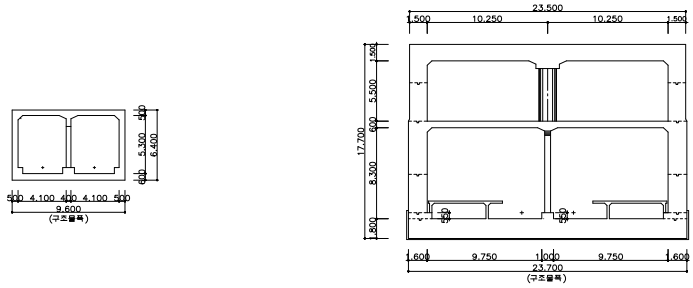
1)-7. 폭

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)지진특성	(1)지진구역		(2)내진성능목표		(3)지반종류	

2)-1. 지진구역

1-2의 대상교량의 위치에 따른 지진구역 코드는 다음과 같다

코드	지진구역	행정구역	
1	Ⅰ	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
		도	경기도, 강원도 남부(1), 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부(2)
2	Ⅱ	도	강원도 북부(3), 전라남도 남서부(4), 제주도

※주: 1) 강원도 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시

2) 전라남도 북동부(군, 시) : 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 여천, 화순, 광양시, 나주시, 여천시, 여수시, 순천시

3) 강원도 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시

4) 전라남도 남서부(군, 시) : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

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. 지반종류

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

코드	지반종류	지반상태	상부 30.0m에 대한 평균 지반 특성[1]		
			평균전단파속도 $\overline{v_s}$ (m/s)	평균표준관입시험[2] $\overline{N}$ (타격수)	평균비배수전단강도 $\overline{s_u}$ (kPa)
1	S_A	경암지반	1500 초과	-	-
2	S_B	보통암 지반	760초과 1500이하		
3	S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360초과 760이하	50 초과	100 초과
4	S_D	단단한 토사지반	180이상 360이하	15에서 50	50이상 100이하
5	S_E	연약한 토사지반	180미만	15 미만	50 미만
6	S_F	부지고유의 특성평가가 요구되는 지반			
8	미상				

※주: 1) 상부 30.0m이내에 기반암층이 있는 경우는 지표층 (기반암 상부 토층)의 평균지반특성을 고려한다.

2) 전단파속도 또는 표준관입시험치는 현장시험 결과치를 이용하는 것을 원칙으로 한다. 또한, 전단파속도와 표준관입시험치를 모두 측정한 경우는 전단파속도에 의해 분류한다.

기입예 : 해당 구조물의 지반이 보통암지반에 위치하므로 다음과 같이 기입한다.

(3) 지반종류	2

□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	
	지반종류, 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

3)-6. 지반

① 액상화가능성

코드	액상화 가능성
0	액상화 가능성 없음
1	액상화 가능성 있음

② 지반종류, 연암층까지 깊이

구조물저면에서 연암층까지의 깊이를 기입한다.

③ 지하수 위치

평균지하수위를 기입한다

기입예 : 해당구조물은 액상화가능성이 없으며, 구조물 저면이 연암층으로 구성되며 평균지하수위는 G.L - 1.5m이다.

(6)지반	액상화가능성	0
	지반종류, 연암층까지 깊이	구조물 저면 : 연암층 연암층까지 깊이 : 0.0m
	지하수 위치	G.L - 1.5m