

발 간 등 록 번 호
00-0000000-0000000-00

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령(안)

2020. 4.



국토교통부

Ministry of Land, Infrastructure and Transport



한국시설안전공단



국토교통부와 한국시설안전공단은 지진으로부터 국민의 안전을 확보하기 위하여 기존 공동구의 내진성능평가 및 내진보강을 체계적으로 수행할 수 있도록 “기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령”을 제정하고자 합니다.

행정안전부에서는 「국가지진위험지도(2013)」와 「내진설계기준 공통적용사항(2017)」을 제정·공표하였으며, 국토교통부에서는 이를 반영하여 ‘KDS 17 10 00 내진설계 일반’과 ‘KDS 11 44 00 공동구 설계기준’을 제·개정하여 고시(2018)하였습니다.

이에 따라 공동구의 내진성능평가가 최신의 기준 및 연구결과 등이 반영될 수 있도록 「기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령」을 제정하여 발간하였으니 실무에 많은 활용 바랍니다.

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



목 차

제1장 총 칙

1.1 일반사항	1
1.2 요령의 구성	2
1.3 용어 정의	4
1.4 기호	11

제2장 내진성능 평가기준지진과 평가절차

2.1 일반사항	15
2.2 내진성능 평가방법 및 절차	20

제3장 내진성능 예비평가

3.1 일반사항	21
3.2 자료조사 및 정리	22
3.3 평가기준	23
3.4 평가방법	24

제4장 내진성능 상세평가

4.1 일반사항	28
4.2 평가기준 및 성능수준별 하중조합	33
4.3 내진안정성 평가방법	38

제5장 내진성능 평가보고서 구성

5.1 문장 및 보고서의 작성	70
5.2 현황보고서 형식	71
5.3 예비평가 보고서	72
5.4 상세평가 보고서	72

참고 문헌	73
-------------	----

부 록

A. 내진성능 평가 예제	A3
---------------------	----

<표 차례>

<표 3.4.1>	지반등급에 따른 점수(N)산정을 위한 분류표	25
<표 3.4.2>	정밀안전점검 안전등급 노후정도(<i>DE</i>)	27

＜해설표 차례＞

＜해설표 2.1.1＞	최소 내진성능목표(내진설계일반:KDS 17 10 00)	16
＜해설표 2.1.2＞	거동한계	17
＜해설표 4.1.1＞	평가내하력 산정을 위한 강도감소계수의 상한값	31
＜해설표 4.1.2＞	경과년수 및 재료상태에 따른 구조상태계수(ϕ_A)	31
＜해설표 4.1.3＞	건설연도별 재료의 기본값	32
＜해설표 4.2.1＞	성능목표 수준에 따른 응답 이력 해석결과의 판단기준	36
＜해설표 4.2.2＞	붕괴방지수준에서의 응답수정계수(R)	37
＜해설표 4.3.1＞	표층지반의 고유주기(T)값에 따른 스펙트럼 속도값 계산식	52
＜해설표 4.3.2＞	수치해석 요소크기에 따른 파동전파 예	63

<그림 차례>

<그림 4.3.1>	지진하중 산정	39
<그림 4.3.2>	단면의 모형화	43
<그림 4.3.3>	지진시 단면력	44
<그림 4.3.4>	이음에 의한 지진시 단면력의 저감계수	46

〈해설그림 차례〉

〈해설그림 4.3.1〉	응답변위법의 개념도	48
〈해설그림 4.3.2〉	응답변위법의 해석절차	49
〈해설그림 4.3.3〉	단일코사인, 이중코사인 이론을 이용한 지중변위 산정법 ·	51
〈해설그림 4.3.4〉	기반면에서의 속도응답스펙트럼	53
〈해설그림 4.3.5〉	지반반력계수 산정을 위한 유한요소모델	56
〈해설그림 4.3.6〉	구조해석에 사용하는 응답변위법의 해석모형	58
〈해설그림 4.3.7〉	상시하중	58
〈해설그림 4.3.8〉	지반변위하중	59
〈해설그림 4.3.9〉	주면전단력	59
〈해설그림 4.3.10〉	관성력	60
〈해설그림 4.3.11〉	비선형 지반 거동	62
〈해설그림 4.3.12〉	부상에 대한 검토	67
〈해설그림 4.3.13〉	공동구 저면이 점성토에 얹게 근입된 경우	68
〈해설그림 4.3.14〉	액상화 발생시 공동구의 부상 검토 지반조건	69





제1장 총 칙

1.1 일반사항

1. 본 요령은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제2조제9항에 정의된 개착공법으로 건설된 지중 공동구에 대하여 적용한다.
2. 공동구 예비평가는 관리대상 공동구 중 상세평가의 우선순위결정을 위해 시행하는 것을 원칙으로 하며, 공동구의 내진성능 상세평가는 응답변위법을 기본으로 하고 시간이력 동적해석법을 선택적으로 적용할 수 있다.
3. 본 요령의 대상 구조물은 신설구조물이 아닌 공용중인 기존구조물을 대상으로 함에 따라, 신설구조물에 적용되는 확률론적 설계기법의 적용이 아닌, 지진 시 예상되는 실제 구조물의 거동평가를 목표로 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) 내진설계기준 공통적용사항(행정안전부, 2017)
 - (2) 내진설계 일반(KDS 17 10 00 : 2018)
 - (3) 공동구 설계기준(KDS 11 44 00 : 2018)
 - (4) 공동구 설치 및 관리지침(국토교통부, 훈령 제569호)
 - (5) 공동구 표준시방서(KCS 11 44 00 국토교통부, 공고 제2010-77호)
 - (6) 기존 콘크리트구조물의 안전성 평가기준(KDS 14 20 90 : 2016)
 - (7) 콘크리트 구조해석과 설계원칙(KDS 14 20 10 : 2016)

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

6. 내진성능 평가는 본 요령에서 제시하는 바와 다르더라도 역학적으로 타당한 절차와 방법을 따르는 경우 사용될 수 있다.
7. 지반 액상화 내진성능 평가에 대해서는 [기존시설물의 기초 및 지반의 내진성능 평가 요령]에 준하여 구조물별 평가방법을 적용할 수 있다.

■ 해설 ■

1. “공동구”란 전기·가스·수도 등의 공급설비, 통신시설, 하수도시설 등 지하매설물을 공동 수용함으로써 미관의 개선, 도로구조의 보전 및 교통의 원활한 소통을 위하여 지하에 설치하는 시설물을 말한다.
3. 기존 공동구의 성능평가는 신설 공동구의 설계와 개념적으로 다르다. 강도설계법에 따른 신설 공동구의 설계는 아직 실재하지 않는 구조물을 대상으로 함에 있어서, 기본적으로 내재되어 있는 불확실성을 극복하고 구조적 안정성을 확보하기 위해 하중은 하중계수를 통해 증가시키고 구조부재의 저항능력은 주요부재에 대해서만 강도감소계수를 통해 감소시키는 보수적인 접근 방법을 사용하고 있다.
반면, 기존 공동구의 성능평가는 실재하고 있는 구조물을 대상으로 하기 때문에 공동구를 둘러싸고 있는 지반 및 하중저항에 관여하는 모든 부재를 포함한 해석 및 평가를 수행하여야 한다.

1.2 요령의 구성

본 요령의 구성은 다음과 같다.

제1장 총칙

제2장 내진성능 평가기준지진과 평가절차

제3장 내진성능 예비평가

제4장 내진성능 상세평가

제5장 내진성능 평가보고서 구성

부 록 A. 내진성능 평가 예제

1.3 용어 정의

본 요령에 사용되는 용어의 정의는 [KDS 17 10 00 내진설계일반], [도시철도 내진설계기준], [터널설계기준], [공동구설계기준], [콘크리트구조설계기준] 등의 관련 기준에 따르고 이에 정의되지 않은 용어는 아래의 정의를 따른다.

- (1) 가속도 시간이력 (Acceleration time history) : 가속도의 시간에 따른 변동을 나타내는 함수
- (2) 감쇠비 (Damping ratio) : 구조물 또는 지반의 감쇠값의 임계감쇠에 대한 비율
- (3) 강진지속시간 : 지진에 의한 가속도 시간이력에서 최대가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)에 해당하는 진동이 지속되는 시간
- (4) 개착공법 : 토류공을 설치하면서 지표면에서 소정의 위치까지 굴착하고 구조물을 구축한 후 되메움하는 공법
- (5) 고유주기 (Natural period) : 자유진동의 구조물이 한 번의 완전한 운동 사이클을 거치는데 걸리는 시간(초 또는 분수); 탄성물체가 외력 없이 한 번 진동하는 데 걸리는 시간; 고유진동수의 역수
- (6) 고유진동수 (Natural frequency) : 특정 탄성 물체나 시스템이 초기 변위나 초기 속도에 의해 움직이면서 다른 외부 힘이나 감쇠의 영향을 받지 않을 때 1초 동안 진동하는 사이클 횟수. 고유주기의 역수
- (7) 고정하중 (Dead load) : 구조물의 시공 중 또는 건설이 완료된 후 변동 없이 지속적으로 구조물에 작용되는 하중
- (8) 공동구 : 국토의 계획 및 이용에 관한 법 제2조 제9호의 규정에 의한 공동구를 말하며, 지하매설물(전기·가스·수도 등의 공급설비, 통신시설, 하수도시설, 소방 설비 등)을 공동 수용함으로써 도시 미관의 개선, 도로

구조의 보전 및 교통의 원활한 소통을 위하여 지하에 설치하는 시설물을 말한다.

- (9) 관성력 (Inertia force) : 구조물의 가속도에 의해 발생하는 힘으로서 그 크기는 질량과 절대가속도를 곱한 값이며 작용방향은 가속도와 반대방향임.
- (10) 기반암(Bed rock) : 부드러운 암석층, 퇴적층 또는 토양층의 아래에 위치하는 전단파속도가 760m/s 이상인 단단한 암석층
- (11) 내진등급(Seismic classification) : 시설물의 중요도에 따라 내진설계 수준을 분류한 범주로서 내진II등급, 내진I등급, 내진특등급으로 구분
- (12) 내진성능 상세평가 : 공동구 구조물의 구성부재가 내진성능 평가기준 지진에 대하여 소요내진성능을 확보하고 있는지를 평가하는 2단계 평가
- (13) 내진성능 예비평가 : 공동구 구조물의 상세평가의 우선순위를 결정을 위하여 개략적으로 수행되는 1단계 평가
- (14) 내진성능 평가기준지진 : 기존 공동구 구조물의 내진성능을 평가하는 경우, 지진하중을 산정하는데 기준이 되는 지진
- (15) 노두 (Outcrop): 지표면에 노출된 암반의 상단
- (16) 도시철도 : 도시교통의 원활한 소통을 위하여 도시교통권역에서 건설·운영하는 철도·모노레일·노면전차·선형유도전동기·자기부상열차 등 궤도(軌道)에 의한 교통시설 및 교통수단을 말한다.
- (17) 동적전단탄성계수 (Dynamic shear modulus) : 동적변형이 작용될 때 재료의 전단탄성계수 값으로서 질량밀도와 전단파속도를 이용하여 구할 수 있음.
- (18) 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

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

- (19) 비선형거동 (Nonlinear behavior) : 변형률과 응력의 관계가 선형탄성이 아닌 거동
- (20) 사용하중 (Service load) : 고정하중 및 활하중과 같이 이 기준에서 규정하는 각종 하중으로서 하중계수를 곱하지 않은 하중
(작용하중이라고도 함.)
- (21) 상대변위 (Relative displacement) : 기반지반 상단에서 변위에 대한 지층에서 변위의 상대적인 값
- (22) 상시하중 : 지진하중을 제외한 고정하중, 활하중, 토압, 수압 및 부력 등
- (23) 지반의 고유주기 (Natural period of Soil) : 지반의 전단파속도를 이용하여 구한 자유장지반의 고유주기로서 지반의 고유주기 중 가장 큰 값
- (24) 전단파속도 (Shear wave velocity) : 체적파 중 S파가 전파 매질을 통과하는 속도. 성능평가에 적용되는 지반의 주요특성으로 사용되는값.
- (25) 소성 (Plasticity) : 응력-변형률 관계가 탄성한계를 넘어 재료에 작용하고 있는 힘을 제거하여도 재료가 원래의 형상으로 복귀하지 않고 영구변형이 발생하는 현상
- (26) 속도응답스펙트럼 (Velocity response spectrum) : 주어진 가속도에 대한 단자유도 구조물 상대속도의 최대값을 구조물 주기와 감쇠비에 따라 도표로 나타낸 스펙트럼
- (27) 수평층상지반 (Horizontally layered soil) : 지층과 지층의 경계면이 수평인 지반
- (28) 스펙트럼 가속도 (Spectral acceleration) : 특정한 고유주기를 갖는 구조물이 특정 지진을 겪을 때 경험하는 최대 가속도
- (29) 스펙트럼 속도 (Spectral velocity) : 진동주기에 해당하는 속도응답 스펙트럼의 값
- (30) 액상화(Liquefaction) : 포화된 사질토 등에서 지진동, 발파하중 등과 같은 동하중에 의하여, 지반 내에 과잉간극수압이 발생하고, 지반의

전단강도가 상실되어 액체처럼 거동하는 현상

- (31) 연직스프링 (Vertical spring) : 응답변위법을 적용하여 구조해석을 수행할 때 구조물 단면에 연직방향으로 변위에 대한 지반의 강성을 나타내는 스프링 요소
- (32) 유효지반가속도(Effective ground acceleration) : 지진하중을 산정하기 위하여 국가지진위험지도나 행정구역을 기준으로 제시된 지반운동 수준
- (33) 위험도계수(Risk factor) : 평균재현주기가 500년인 지진을 기준으로 하여, 평균재현주기가 다른 지진의 유효지반가속도를 상대적 비율로 나타낸 계수
- (34) 응답변위법 (Seismic deformation method) : 지진에 의한 지중구조물의 거동을 해석하기 위한 해석방법으로서, 구조물과 지반의 구조해석모형(일반적으로 구조물은 프레임요소, 지반은 스프링요소로 모델링)에 구조물이 없는 자유장지반에서의 수평상대변위, 가속도, 응력을 입력으로 작용하여 구조해석을 수행하는 방법
- (35) 응답수정계수 (Response modification factor) : 탄성해석으로 구한 각 요소의 내력으로부터 설계지진력을 산정하기 위한 수정계수
- (36) 응답스펙트럼(Response spectrum) : 지반운동에 대한 단자유도 시스템의 최대응답을 고유주기 또는 고유진동수의 함수로 표현한 스펙트럼
- (37) 응답이력해석법 (Response history analysis method) : 지진의 지속시간 동안 각 시간단계에서의 구조물의 동적응답을 구하는 방법
- (38) 자유장지반 (Free-field soil layer) : 구조물 건설을 위하여 지반을 굴착하기 전의 지반상태
- (39) 재현주기 (Return period) : 지진과 같은 자연재해가 특정한 크기 이상으로 발생할 주기를 확률적으로 계산한 값으로, 일 년 동안에 특정한 크기 이상의 자연재해가 발생할 확률의 역수
- (40) 전단력 (Shear force) : 물체 내 임의면에 작용하여 그 양쪽을

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

역방향으로 어긋나도록 작용하는 힘

- (41) 전단스프링 (Shear spring) : 응답변위법을 적용하여 지반응답해석을 수행할 때 사용하는 구조물 모형에서, 구조물과 지반의 접촉면을 따라 설치하는 스프링요소
- (42) 전단탄성계수 (Elastic shear modulus) : 단순 전단 동안 재료의 전단 변형률에 대한 전단 응력의 비율
- (43) 전단탄성과속도 (Shear wave velocity) : 매질에서 전단파(S파)의 전달속도
- (44) 전단파 (Shear wave) : 파 진행방향과 직각방향으로 진동하는 파로서 횡파, S파, 비틀림파라고도 함.
- (45) 정현하중 (Sine load) : 불규칙한 지진하중을 일정한 주기와 진폭을 가지는 사인함수형태의 반복하중으로 치환한 값
- (46) 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
- (47) 지반응답해석 (Ground response analysis) : 토층의 저면에 입사되는 지진하중이 지표면으로 진행될 때 토층의 동적거동에 대한 해석
- (48) 지반종류 (Soil profile type) : 지반의 지진증폭특성을 나타내기 위해 분류하는 지반의 종류
- (49) 지반진동 (Ground vibration) : 지진에 의한 자유장지반의 진동
- (50) 지진구역계수 (Seismic zone factor) : 지진구역 I과 II의 암반지반(S1) 상에서 평균재현주기 500년 지진의 유효지반가속도를 중력가속도 단위로 표현한 값
- (51) 지진지속시간 (Earthquake duration): 지진에 의해 유발된 기반지반의 가속도가 존재하는 총 시간

- (52) 지진하중 (Seismic load) : 지진에 의한 지반운동으로 구조물에 작용하는 하중으로 구조물의 질량에 설계지진가속도를 곱한 값으로 구하고 지중 구조물에서는 관성력, 지반변위, 주면전단력으로 구성됨
- (53) 최대지반가속도 (Peak ground acceleration) : 지진에 의한 진동으로 특정위치에서의 지반이 수평 2방향 또는 수직방향으로 움직인 가속도의 절댓값의 최댓값(m/s^2)
- (54) 최대진폭 (Peak amplitude): 지진에 의해 구조물(또는 지반)에 발생된 응답(변위, 속도, 가속도, 응력)의 절대값 중에서 가장 큰 값
- (55) 축력 (Axial force) : 부재의 축방향으로 작용되는 힘으로 방향에 따라 인장력 또는 압축력으로 구분함.
- (56) 탄성지반응답계수 (Elastic seismic response coefficient) : 모든 스펙트럼 해석법에서 지진하중을 구하기 위한 무차원량
- (57) 탄성파 (Elastic wave) : 일종의 탄성변형(변형력이 제거되면 함께 사라지는 변형)에 의해 전파되는 파 기본적으로 P-파와 S-파로 구분되며, 지층의 형태에 따라 다양한 표면파(Rayleigh파, Love파 등)가 존재하고, 지진파는 탄성파의 한 유형
- (58) 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.
- (59) 통제주기 (Control period) : 가속도 설계응답스펙트럼을 정의하는데 사용하는 주기로서 두 값이 정의됨. 두 주기 사이에서 최대증폭이 발생함.
- (60) 파동전파이론 (Elastic wave propagation theory) : 탄성파가 매질을 통해 전파되는 현상을 분석하기 위한 이론
- (61) 파장 (Wave length) : 파동 운동의 동일한 위상(예 : 마루-마루 또는 골-골)의 인접한 점 사이의 공간 거리

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

- (62) 평균재현주기 (Mean return period) : 어떤 크기나 특성을 가진 지진이 발생하는 평균 시간간격(s)
- (63) 평행층상 반무한지반 (Horizontally layered half-space soil) : 반무한지반 위에 층경계가 모두 수평인 층상지반이 있는 지반. 내진설계에서는 대부분 지반응답해석을 수행할 때 지반을 평행층상 반무한지반으로 가정함.
- (64) 표층지반 (Top soil layers) : 기반면 위에 있는 수평층상지반
- (65) 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.
- (66) 휨모멘트 (Bending moment) : 부재를 휘게 하도록 작용하는 부재력

1.4 기호

A	: 구조물 단면적
B	: 대상구조물의 최대 단면폭(m)
B_v	: 구조물 저판 폭 (m)
C	: 지반변형에 대한 보정계수
C_D	: 암반지반에서 주기 T 에 따른 감쇠보정계수
C_i	: 지반의 강성계수
D	: 고정하중
DE	: 노후도 (예비평가)
E	: 지진하중
E_D	: 지진하중 상태의 성능수준을 고려한 지반의 탄성계수
F_a	: 토사지반의 단주기 지반증폭계수
f_{ck}, f_{ctk}	: 콘크리트의 설계기준압축강도 및 인장강도(MPa)
f_i	: i 번째 구조물의 관성력 하중 (kN/m)
F_v	: 토사지반의 장주기 지반증폭계수
F_y	: 강재의 항복강도(MPa)
f_y	: 철근의 항복강도(MPa)
G_D	: 지반의 동적전단탄성계수
g	: 중력가속도(9.81m/s^2)
H	: 기반암상면까지의 깊이(m)
H	: 토압 및 수압(하중조합)
H_h	: 흙, 지하수 등에 의한 수평방향 하중
H_v	: 흙, 지하수 등에 의한 연직방향 하중
I	: 위험도계수

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

K_H : 구체측벽의 수평 지반반력계수 (kN/m^3)

K_h : 지표면에서의 수평가속도

K'_h : 기반면에서의 수평가속도

K_{SB} : 구체저판의 전단 지반반력계수 (kN/m^3)

K_{SS} : 구체측벽의 전단 지반반력계수 (kN/m^3)

K_V : 구체저판의 연직 지반반력계수 (kN/m^3)

L : 공동구 총연장 (km)

L_i : 지반진동의 파장 (m)

L : 활하중(하중조합)

L_U : 과잉간극수압비 $\left[= \frac{\Delta u}{\sigma'_v}\right]$

M_h, M_v : 수평면내 및 수직면내의 지진진동에 의한 휨 모멘트

MN : 공동구 관리인원 (예비평가)

N : 지반등급 산정을 위한 지반분류에 따른 점수 (예비평가)

p_0 : 상판의 상면에 작용하는 수평방향 하중 (kN/m^2)

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

Q_i : 사용하중에 의한 단면력

Q_S : 상부토의 전단저항력 (포장과 노상의 전단저항은 미고려) (kN/m)

Q_B : 공동구 측벽의 마찰저항력 (kN/m)

R : 응답수정계수

R_A : 구조물의 평가내하력

R_n : 공칭강도

S : 내진성능 평가기준지진의 유효수평지반가속도

s : 적설하중(하중조합)

S_a : 내진성능 평가기준지진의 스펙트럼가속도

S_i : 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는

영향을 고려하기 위하여 분류한 지반의 종류, $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$

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

ST : 지반등급 (예비평가)

SZ : 지진구역 (예비평가)

T : 고유주기

t : 대상 층의 두께 (m)

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

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

T_s : 표층지반의 고유주기(s) = $1.25 T_G$

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

TL : 공동구 총연장 (예비평가)

U_A : 평가소요강도

U_D : 공동구 저면에 작용하는 과잉간극수압으로 인한 양압력 (kN/m)

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

U_S : 공동구 저면에 작용하는 정수압에 의한 양압력 (kN/m)

V_s : 전단파속도(m/s)

V_{si} : i 층 지반의 평균전단파속도(m/s)

V_{DS} : 표층지반의 전단파속도 [$= \frac{4H_s}{T_s} = \frac{4H_s}{1.25 T_G} = 0.8 \times \frac{4H_s}{T_G}$] (m/sec)

V_{BS} : 기반면의 전단파속도 (m/sec)

w_0 : 지반의 고유진동수

WT : 지하수위 (예비평가)

Z : 지진구역계수

z_B : 지표면으로부터 구조물 저면까지의 깊이 (m)

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

z_U : 지표면으로부터 구조물 상면까지의 깊이 (m)

α : 제1층과 제2층의 임피던스비

α_i : 지반에 발생하는 변위가 구조물에 전달되는 전달률

$\Delta_{\max}$: 소성변형과 탄성변형의 합

Δ_y : 부재의 항복변위(m)

Δu : 과잉간극수압 (kN/m^2)

γ_A : 구조물 평가에서 사용되는 하중평가계수

γ_i : 하중계수

γ_t : 지반의 단위중량 (kN/m^3)

γ_{teq} : 표층지반의 환산단위중량 $\left[= \frac{\sum \gamma_{ti} \cdot H_i}{H} \right]$ (kN/m^3)

μ_ψ : 곡률연성도

μ_Δ : 축방향철근의 겹침이음 상세에 따른 연성능력을 제한하는 변위연성도

ξ : 이음부의 단면력의 저감계수

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

ϕ : 강도감소계수

ϕ_A : 구조상태계수

$\psi_{\max}$: 최대소성변형에 대한 곡률

ψ_y : 항복상태의 곡률

ξ : 감쇠비(%)

2장 내진성능 평가기준지진과 평가절차

2.1 일반사항

1. 내진성능평가는 관련기준에서 제시하고 있는 지진크기 및 성능목표에 대해서 현상태의 구조물에 대한 성능평가를 실시한다.
2. 공동구의 내진성능평가는 성능평가지진력에 대해서 공용중인 공동구가 두 가지 내진성능목표(기능수행수준, 붕괴방지수준)를 만족하는지에 대한 검토를 실시한다.
3. 공동구의 내진등급은 설계 시 부여된 등급을 따르며, 내진설계가 적용되지 않은 공동구는 내진 I 등급의 성능이 확보되어야 한다.
4. 내진성능수준 평가를 위한 공동구구조물의 거동한계는 상세평가 실시 전 우선 정의되어야 한다.
5. 내진성능평가용 지진하중은 관련기준에서 제시하는 지진구역, 지진위험도, 지반분류에 따라 결정한다.

■ 해설 ■

1. 현재 운영중인 공동구의 내진성능 평가는 현 상태에서 지진발생 시 공동구의 성능을 검토하는 것을 원칙으로 한다. 이를 위하여 공동구의 성능목표는 내진설계일반(KDS 17 10 00)에 근거하여 기능수행수준을 포함한 최소 두 가지 이상의 성능목표에 대한 검증을 실시하여야 한다.

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

해설표 2.1.1 최소 내진성능목표(내진설계일반:KDS 17 10 00)

설 계 지 진	내진성능수준 평균재현주기	기능수행	즉시복구	장기복구/ 인명보호	붕괴방지
	50년	내진Ⅱ등급			
계 지 진	100년	내진Ⅰ등급	내진Ⅱ등급		
	200년	내진특등급	내진Ⅰ등급	내진Ⅱ등급	
	500년		내진특등급	내진Ⅰ등급	내진Ⅱ등급
	1,000년			내진특등급	내진Ⅰ등급
	2,400년				내진특등급
	4,800년				내진특등급

2. 내진성능평가 결과로 평가대상 구조물은 성능평가 지진력에 대하여 공동구 설계기준(KDS 11 44 00)에서 규정하는 기능수행수준과 붕괴방지수준의 성능이 확보됨을 증명할 수 있어야 한다. 각각의 성능수준에 대한 정의는 다음과 같다.

가. 기능수행수준은 성능평가용 지진하중 작용 시 전기·통신·가스·수도 등 공동구 수용시설물의 기능이 유지되며, 구조물의 부분적인 피해를 허용하는 성능수준이다. 공동구 구조물에서 허용할 수 있는 피해정도는 해설표 2.1.2에 정의되어 있다.

나. 내진설계일반(KDS 17 10 00)에서 정의하고 있는 붕괴방지수준은 ‘설계지진하중’ 작용 시 구조물이나 시설물에 매우 큰 손상이 발생할 수는 있지만 구조물이나 시설물의 붕괴로 인한 대규모 피해를 방지하고, 인명 피해를 최소화하는 성능수준이다.

다. 공동구의 붕괴로 인한 대규모 피해는 수용시설물의 기능상실로 인한 사회적 혼란으로 정의함이 바람직하다. 따라서, 본 요령에서는 공동구의 사용목적에 근거하여 붕괴에 대한 정의를 다음과 같이 구분하여 적용토록 한다.

- 구조요소의 붕괴 : 공동구 구조물이 지진종료 후 중력하중에 대한 저항이 불가능하여 공동구의 형상을 유지하기 어려운 상태로 정의한다. 붕괴방지수준의

제2장 내진성능 평가기준지진과 평가절차

성능목표를 만족하는 공동구 구조물은 일부 구조요소의 피해가 발생하여도, 지진 후 피해조사와 보수를 위한 현장접근이 가능하여야 한다.

- 비구조요소의 붕괴 : 붕괴방지수준의 지진에 대해서 비구조요소(공동구 내 수용시설)의 파괴가 발생하여 기능을 상실한 상태

3. 지중공동구 구조물의 내진등급은 공동구 설계기준(KDS 11 44 00)에 따라, 내진 I 등급의 내진성능을 갖도록 한다. 단, 수용하는 시설물의 중요도 등을 고려하여 내진등급을 상향할 수 있다.

4. 내진성능수준에 따른 지중공동구 구조물의 거동한계는 구조요소의 한계와 비구조요소의 한계를 종합적으로 고려하여 결정되어야 하며, 일반적으로 해설표 2.1.2와 같이 정의될 수 있다. 개별 공동구구조물의 성능평가는 상세평가 실시 전 발주처와 협의 하에 성능수준에 따른 거동한계를 정의 후 평가가 실시되어야 한다.

해설표 2.1.2 거동한계

피해구분	피해 세부사항	
	기능수행수준	붕괴방지수준
허용되는 피해	• 시설물의 미세한 균열 • 미세한 지반침하 • 구조물의 미세한 변형	• 시설물의 미세한 균열 • 미세한 지반침하 • 구조물의 미세한 변형 • 구조물의 붕괴가 일어나지 않는 수준의 부재 파괴
허용되지 않는 피해	• 수용 시설물의 정상 기능 수행을 위한 허용변위를 초과하는 변위	• 구조물의 붕괴 • 액상화로 인한 구조물의 부상 • 지반침하에 의한 주변 시설물의 붕괴나 과도한 침하

5.1 내진성능평가를 위한 지반운동의 정의와 고려사항은 다음과 같다.

가. 지중구조물인 공동구의 성능평가를 위한 지반운동은 기반면에서의 지반운동으로 정의한다.

나. 내진성능수준별 성능평가용 지진은 KDS 17 10 00 (4.1.3, 4.1.4)을 따른다.

다. 지반운동의 고려사항은 KDS 17 10 00 (4.2.1.3)을 따른다.

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

5.2 지진구역 및 지진위험도

가. 내진설계일반(KDS 17 10 00)을 따른다.

5.3 지반의 분류

가. 내진설계일반(KDS 17 10 00)을 따른다.

5.4 기반면의 설정

가. 4.4.2(3)의 기반암의 정의에 따라 전단파속도 760m/s 이상인 지층의 상면을 기반면으로 설정한다.

나. 기반암이 구조물 저면보다 높은 경우, 구조물 저면을 기반면으로 설정한다.

5.5 지반운동의 특성 표현

가. 지반운동의 세기 및 진동수성분은 기본적으로 응답스펙트럼으로 표현한다.

나. 암반지반(S_1 지반) 성능평가용 지반운동의 가속도 응답스펙트럼은 KDS 17 10 00 (4.2.1.4(2))을 따른다. 이때 유효수평지반가속도(S)는 KDS 17 10 00 (4.2.1.4(4), (5))에 따라 결정한다.

다. 지반운동 시간이력은 KDS 17 10 00 (4.2.1.4(8), (9), (10))에 따라 결정한다. 단, 설계지반운동 시간이력은 암반지반(S_1 지반)에 대해 작성된 시간이력을 사용한다.

라. 지반운동의 공간적 변화 특성 고려방법은 KDS 17 10 00 (4.2.1.4(11))을 따른다.

5.6 기반면에서의 속도응답스펙트럼

가. 지진해석 방법으로 응답변위법을 사용하는 경우, 지반변위 및 주면전단력의 산정은 기반면에서의 속도응답스펙트럼을 사용한다.

나. 기반면에서의 속도응답스펙트럼은 기반암 운동에 대한 표층지반 (지표면으로부터 기반면 사이의 지반)의 응답을 표층지반의 고유주기에 따라 기반면에서 설정한 속도응답스펙트럼이다.

다. 내진성능수준별 감쇠비(ξ , %단위)는 아래와 같이 설정한다. 단, 별도의 합리적인 해석에 의하여 감쇠비를 산정하는 경우 이를 적용할 수 있다.

- 기능수행수준 : $\xi = 10$

- 붕괴방지수준 : $\xi = 20$

제2장 내진성능 평가기준지진과 평가절차

라. 기반면에서의 속도응답스펙트럼은 위에 따라 결정된 감쇠비를 적용하고 KDS 17 10 00 4.4.2(5)②에 따라 구한 암반지반 지반운동의 가속도 설계응답스펙트럼을 직접 적분하여 구할 수 있다. 이때, 환산식은 해설식(2.1)을 이용한다.

$$S_v = \frac{T}{2\pi} S_a \quad \text{해설식(2.1)}$$

여기서, S_v : 스펙트럼속도 (m/s)

S_a : 스펙트럼가속도 (m/s²)

T : 고유주기 (s)

2.2 내진성능 평가절차

1. 기존 공동구의 내진성능 평가는 내진성능 예비평가와 상세평가의 2단계로 구분 하여 단계적으로 수행한다.
2. 내진성능 예비평가는 평가대상 공동구의 현황에 근거하여 내진성능 상세평가의 우선순위 결정을 위해서 실시한다.
3. 내진성능 상세평가는 기존 공동구의 현장조건에 따른 내진성능을 파악하기 위해서 실시한다.

제3장 내진성능 예비평가

3.1 일반사항

내진성능 예비평가는 관리중인 공동구의 내진성능 상세평가 우선순위결정을 위하여 시행되는 것을 목표로 한다.

■ 해설 ■

내진성능 예비평가는 제한된 예산과 기간 내 최선의 결과를 도출하기 위하여 실시하며, 그 결과는 순차적으로 실시되는 내진성능 상세평가의 우선순위를 결정하기 위한 판단자료를 제공하도록 한다. 내진성능 예비평가는 기존공동구의 영향도, 지진도, 취약도를 종합적으로 고려하여 결정하며, 예비평가 결과 후순위로 결정된 공동구에 대해서 상세평가가 생략 될 수 있음을 의미하지는 않는다. 공동구 관리주체에서는 본 요령에서 제공하는 예비평가 절차를 대신할 수 있는 별도의 판단기준을 제시할 경우 그에 준하여 상세평가 우선순위를 결정할 수 있다.

3.2 자료조사 및 정리

3.2.1 자료조사

1. 자료조사에는 예비평가에 필요한 자료뿐만 아니라, 향후 시행될 상세평가에 필요한 자료도 함께 조사하여 기록할 수 있도록 한다.
2. 자료조사에는 설계도서에서 나타난 구조물의 정보 외 예도, 구조물의 보수·보강이력 및 현 상태, 구조물의 여건, 주위 환경요인 등을 함께 조사하여 정리한다. 단, 예비평가단계에서는 현장조사를 실시하지는 않는 것을 원칙으로 한다.

가. 일반사항 조사

- (1) 관리대상 공동구의 현황을 조사한다.
- (2) 공동구가 위치한 지역의 지진구역, 지반조건, 내진등급 등을 조사한다.
- (3) 준공년도, 준거 지방서 및 설계서, 내진설계의 유무 등을 조사한다.

나. 설계도서 조사

- (1) 공동구 구조형식 및 제원, 각 구성부재의 제원 및 재료 특성 등을 조사한다.
- (2) 설계평면도, 종·횡단면도, 지반지질도, 상세도 등을 조사한다.
- (3) 보수·보강이력에 따른 내진성능 변화요인을 조사한다.

다. 현장조사

- (1) 예비평가 단계에서 현장조사는 실시하지 않는 것을 원칙으로 한다.
- (2) 다만, 현장조사가 필요하다고 판단될 경우 발주처와 협의 후 실시할 수 있다.

라. 환경조사

- (1) 재료 및 제원의 특성값에 영향을 주는 환경요인을 조사한다.
- (2) 기 수립된 보수·보강계획 등을 조사한다.

3.3 평가기준

1. 내진성능 예비평가는 기존 공동구의 영향도, 지진도, 취약도를 정량적으로 고려하여 상세평가 우선순위를 결정한다.

가. 영향도 : 해당 공동구의 영향을 받는 거주민 및 시설의 총량을 대표인자를 통하여 정량적으로 평가한다.

나. 지진도 : 해당공동구의 위치여건에 따른 지진 시 위험성을 정량적으로 평가한다.

다. 취약도 : 해당공동구의 정밀안전점검 결과를 바탕으로 노후도를 정량적으로 평가한다.

2. 정책적 판단으로 중요하다고 판단되는 경우 본 요령에 따라 실시된 예비평가의 상세평가 우선순위를 조정할 수 있다.

3.4 평가방법

예비평가는 영향도(40%), 지진도(30%), 취약도(30%)의 비율에 따라 정량평가를 실시하며, 개별 평가인자의 산식은 아래와 같다.

$$\text{예비평가 지수} = TL + MN + ST + SZ + WT + DE \leq 100 \quad \text{식(3.1)}$$

상세평가의 우선순위는 예비평가지수에 근거하여 결과값이 높을수록 상세평가를 우선 실시하도록 계획한다.

3.4.1 영향도(40%)

영향도는 해당 공동구의 영향을 받는 거주민 및 시설의 총량을 의미하며, 본 요령에서는 다음의 대표인자를 통하여 정량적으로 평가한다. 단, 본 요령에서 제시하고 있는 평가인자를 대체할 수 있는 경우 발주처와 협의 하에 적용할 수 있다.

가. 공동구 총연장 (20%), TL (Total Length)

공동구의 영향도는 총연장으로부터 아래의 산식을 이용하여 산정토록 하며, 최대값 20을 넘지 않는다.

$$TL = \min \left[20 \times \left(\frac{L}{30} \right), 20 \right] \quad \text{식(3.2)}$$

여기서, L 은 공동구 총연장 (km)

나. 공동구 관리인원 (20%), MN (Man Number)

공동구의 중요도는 관리인원의 수와 비례한다고 할 수 있다. 따라서, 현재

공동구 관리인원의 수로부터 아래의 산식을 이용하여 산정토록 하며, 최대값 20을 넘지 않는다.

$$MN = \min \left[20 \times \left(\frac{N}{20} \right), 20 \right] \quad \text{식(3.3)}$$

여기서, N 은 공동구 관리인원 수(명)

3.4.2 지진도(30%)

지진도는 해당공동구가 위치한 지역의 지진위험도, 지반종류를 고려하여 지진시 공동구가 겪을 수 있는 위험정도를 정량적으로 평가한다. 본 요령에서는 다음의 대표인자를 통하여 지진도를 정량적으로 평가할 것을 추천하며, 본 요령에서 제시하고 있는 평가인자를 대체할 수 있는 경우 발주처와 협의 하에 적용 가능하다.

가. 지반등급 (15%), ST (Soil Type)

기반암 지진크기가 동일하여도, 상부 지반의 강성과 두께에 따라 공동구가 위치한 깊이에서의 지진크기가 달라질 수 있으므로, 이를 정량적으로 평가하여 고려하도록 한다. 본 요령에서는 내진설계 일반(KDS 17 10 00)에 따른 지반분류에 근거하여 아래의 산식을 이용하여 산정하도록 한다.

표 3.4.1 지반등급에 따른 점수(N)산정을 위한 분류표

구분	내용	지반분류	점수(N)
지반상태 (Soil)	연약지반 ¹⁾ 및 지층변화가 심한 지반	S_6	6
	연약한 지반	S_3, S_5	4
	단단한 지반	S_2, S_4	2
	강성지반	S_1	1

주 1) 단층파쇄대, 연약대 등의 지질학적으로 불량한 지반

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

$$ST=15\times\left(\frac{N}{6}\right) \quad \text{식(3.4)}$$

여기서, N 은 표 3.4.1에서 정의하는 점수로 1 - 6의 값을 가진다.

나. 지진구역 (15%), SZ (Seismic Zone)

해당공동구가 위치한 지역의 지진구역 구분에 따라 공동구의 위험도를 평가한다. 지진구역의 구분은 내진설계일반(KDS 17 10 00)에 정의되어 있으며, 지진구역에 따른 공동구의 위험도는 아래의 구분을 이용하여 산정하도록 한다.

$SZ=15$, 지진구역 I 구역

$SZ=10$, 지진구역 II 구역

3.4.3 취약도(30%)

취약도는 현재 평가대상 공동구의 취약정도를 정량적으로 평가한다. 본 요령에서는 다음의 대표인자를 통하여 취약도를 정량적으로 평가할 것을 추천하며, 본 요령에서 제시하고 있는 평가인자를 대체할 수 있는 경우 발주처와 협의 하에 적용 가능하다.

가. 노후도(20%), DE (Deterioration)

공동구 구조체로 사용되는 철근콘크리트 구조물은 사용기간이 증가함에 따라 단면성능이 하락하는 현상을 나타낸다. 「시설물안전법」에 의하여 공동구는 주기적으로 정밀안전점검을 실시하도록 규정되어있다. 따라서, 본

요령에서는 내진성능 평가대상 공동구의 노후정도를 평가시점에서 가장 최근 시행된 정밀안전점검 결과를 반영하여 산정하도록 한다. 노후정도(*DE*)는 0점부터 20점 까지 산정되며, 정밀안전점검 안전등급 A~E등급에 따라 아래와 같이 부여할 수 있다.

표 3.4.2 정밀안전점검 안전등급 노후정도(*DE*)

정밀안전점검 안전등급 노후도	A	B	C	D	E
<i>DE</i>	0	5	10	15	20

나. 지하수위 (10%), *WT* (Water Table)

공동구 주변 지하수위의 위치에 따라 공동구에 작용하는 수압의 크기가 달라질 수 있으며, 액상화에 대한 취약도가 증가할 수 있다. 따라서, 공동구 주변 지하수위의 위치에 따른 지진시 취약정도를 다음의 구분에 따라 정량적으로 산정하여 반영하도록 한다.

WT=10, 연중 평균 지하수위 위치 : 공동구 상단

WT=5, 연중 평균 지하수위 위치 : 공동구 상 ~ 하단 사이

WT=0, 연중 평균 지하수위 위치 : 공동구 하단 아래

제4장 내진성능 상세평가

4.1 일반사항

내진성능 상세평가는 예비평가결과의 우선순위에 따라 수행한다. 내진성능평가는 기능수행과 붕괴방지수준 두 가지 성능목표에 대하여 수행하며, 성능평가를 위한 기본방향은 다음과 같다.

1. 본 요령을 적용하는 대상은 공동구 구조물로 한정한다.
2. 지진 시 지중 공동구 구조물의 해석은 지반의 변위에 근거하여 지진하중을 추정하는 응답변위법 사용을 기본으로 하며, 지반-구조물의 동적 상호작용을 고려한 응답이력해석법(Response History Analysis)을 사용할 수 도 있다.
3. 내진성능평가용 지진은 현 설계기준에 근거하여 적용하되, 구조물의 평가 내하력은 직접 측정하거나 노후도를 고려한 평가내하력을 적용하여야 한다.
4. 비선형응답이력해석을 위한 입력지진기록은 내진설계일반(KDS 17 10 00)에 기반하여 선정한다. 응답변위법을 이용한 성능평가 시 기반면에서의 설계속도응답스펙트럼 이용하여 깊이별 지반수평변위, 주면전단력, 가속도를 구하여 지진하중을 산정하는 것을 원칙으로 한다.

■ 해설 ■

1. 본 요령의 평가대상은 공동구 구조물 및 이를 둘러싼 지반으로 한정하며, 공동구 내부 수용시설인 비구조요소(통신, 라이프라인 등)에 대한 평가는 해당시설물의 관리기관과 협의 하에 별도의 기준에 따라 별도의 내진성능평가 용역을 실시하는 것을 원칙으로

한다.

2. 공동구 구조물의 내진성능평가는 ‘응답변위법’ 또는 ‘응답이력해석법’ 중 한 가지를 사용하여 수행될 수 있다. 일반적인 경우 ‘응답변위법’을 기본으로 하며, 상세 검토가 필요한 경우나 구조 또는 지반조건이 복잡한 경우에 지반과 구조물의 상호작용 및 지반과 구조물의 비선형 거동을 함께 고려할 수 있는 ‘응답이력해석(시간이력 비선형해석)’을 사용하는 것을 추천한다. 본 요령에서는 ‘응답변위법’을 공동구 구조물의 내진해석을 위한 표준해석법으로, ‘응답이력해석’은 부수적인 해석법으로 규정한다.
3. 내진성능평가용 지진은 지진·화산재해대책법 제12조에 따라 정의되는 최신기준(KDS 17 10 00)에 근거하여 적용하여야 한다. 반면, 지진하중에 저항하는 공동구 구조물의 평가내하력은 현 상태의 강도를 측정하여 사용하는 것이 원칙이다. 그러나 현상태 강도확인이 어려운 경우, 환경요인 및 노후도를 고려하여 내진성능이 보수적으로 평가될 수 있도록 조정하여 사용하는 것이 바람직하다. 따라서, 철근콘크리트 구조물의 평가내하력은 기존콘크리트구조물의 안전성평가기준(KDS 14 20 90 : 2016)에 따라 다음의 절차에 기반하여 평가하도록 한다.

가. 구조물의 안정성 평가

다음 해설식 (4.1)과 같이 구조해석에 의하여 계산되는 구조물의 평가내하력(R_A)이 평가소요강도(U_A) 이상이면 안전한 것으로 평가할 수 있다.

$$R_A \geq U_A \quad \text{해설식(4.1)}$$

나. 평가소요강도의 계산

평가소요강도(U_A)는 다음 해설식 (4.2)에 따라 계산하여야 한다.

$$U_A = \Sigma \gamma_A (\gamma_i Q_i) \quad \text{해설식(4.2)}$$

여기서, γ_A 는 구조물 평가에서 사용되는 하중평가계수, γ_i 는 이 구조기준에 따른 설계하중계수, 그리고 Q_i 는 사용하중에 의한 단면력이다.

평가소요강도(U_A)는 사용성에 예상을 초과한 하중 및 구조해석의 단순화로 인하여 발생하는 초과 요인을 고려한 하중계수(γ_i)를 곱하여 산정한다. 하중입력값은

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

정밀현장조사에 의하여, 설계에서와 동일한 수준의 안전율을 확보할 수 있도록 적절한 확률·통계적인 방법으로 평가하는 경우, 고정하중과 활하중의 크기는 구조설계 도서에서 명기된 것과 다른 하중의 크기를 사용할 수 있다. 다만, 활하중의 감소는 입력값의 20% 내에서 허용되며, 고정하중과 활하중 이외의 하중에 대해서는 현 구조기준 값을 적용하여야 한다. 이렇게 평가된 하중크기에 대한 조정은 하중평가계수(γ_A)로 반영하여 적용토록 한다. (KDS 14 20 90)

다. 평가내하력(R_A)의 계산

평가내하력(R_A)은 다음 해설식 (4.3)에 따라 계산하여야 한다.

$$R_A = \phi_A (\phi R_n) \quad \text{해설식(4.3)}$$

여기서, ϕ 와 R_n 은 각각 이 구조기준에 따른 강도감소계수와 공칭강도이며, ϕ_A 는 구조상태계수이다.

공동구 구조물의 평가내하력(R_A)은 기존 콘크리트구조물의 안전성평가기준(KDS 14 20 90)의 조사 및 시험 방법을 적용하여 재료 및 구조특성의 평가입력값을 산정하여 직접 결정할 수 있다.

- (1) 공동구 구조물의 평가내하력(R_A)을 추정하여야 하는 경우, 해설식 (4.3)에 따라 계산하여야 한다. 강도감소계수(ϕ)를 KDS 14 20 90에 따라 결정하는 경우, KDS 14 20 10(3.3)에서 규정한 강도감소계수를 증가시킬 수 있다. 단, 아래의 값을 초과할 수 없다.

해설표 4.1.1 평가내하력 산정을 위한 강도감소계수의 상한값

작용 단면력의 종류		강도감소 계수 (ϕ)
KDS 14 20 20 (4.1.2(4))에서 정의된 인장지배단면		1.0
KDS 14 20 20 (4.1.2(3)) 에서 정의된 압축지배단면	KDS 14 20 20 (4.3.2)에 따르는 나선철근으로 보강된 부재	0.85
	기타 부재	0.8
전단력 및 비틀림모멘트		0.8
콘크리트에 작용한 지압력		0.8

(2) 공동구 구조물의 평가내하력(R_A)을 추정하여야 하는 경우, 해설식 (4.3)에 따라 계산하여야 한다. 이때, 구조상태계수(ϕ_A)는 해설표 4.1.2에서 제시된 경과년수에 따른 구조상태계수와 재료상태에 따른 구조상태계수를 곱하여 결정한다.

해설표 4.1.2 경과년수 및 재료상태에 따른 구조상태계수(ϕ_A)

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

(3) 단, 설계도서에 명기된 설계기준강도에 경과년수에 따른 구조상태계수를 곱한 값이 해설표 4.1.3에 제시된 연도별 기본재료강도의 공칭강도보다 낮을 경우 연도별 기본재료강도를 사용할 수 있다. 이 때, 현장조사를 실시하지 않을 경우 재료상태는 불량으로 간주한다. 재료의 상태는 구조요소에 발생한

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

균열발생, 변형, 화재이력, 마무리정도에 따라 엔지니어의 판단에 의해 결정하며 재료상태를 보통 혹은 양호로 판정할 경우 그 판단근거를 제시하여야 한다.

해설표 4.1.3 건설연도별 재료의 기본값

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

(4) 상세평가지 설계도서가 없고 현장시험이 어려운 재료(철근 등)의 경우 재료강도는 해설표 4.1.3 의 연도별 기대강도를 사용할 수 있다. 기대강도에는 경과년수에 따른 재료강도의 감소가 이미 고려되어 있으므로 이에 대해 추가적으로 고려하지 않아도 되나, 이는 재료상태 ‘양호’에 대한 기대값으로 현장조사 시 재료상태가 상이할 경우 이에 대한 차이를 고려하여야 한다.

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

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

4.2 평가기준 및 성능수준별 하중조합

1. 내진성능평가는 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 제2조 8항에 근거하여, 내진설계기준에 규정된 절차에 따라 공동구가 지진에 견딜 수 있는 능력을 평가한다. 본 요령에서 공동구의 내진성능 평가를 위해 적용한 기준은 아래와 같다.

가. 내진설계기준 공통적용사항(행정안전부, 2017)

나. 내진설계 일반(KDS 17 10 00 : 2018)

다. 공동구 설계기준(KDS 11 44 00 : 2018)

라. 공동구 설치 및 관리지침(국토교통부, 훈령 제569호)

마. 공동구 표준시방서(KCS 11 44 00 국토교통부, 공고 제2010-77호)

바. 기존 콘크리트구조물의 안전성 평가기준(KDS 14 20 90 : 2016)

사. 콘크리트 구조해석과 설계원칙(KDS 14 20 10 : 2016)

2. 공동구의 내진성능 목표수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 정의하여 평가되어야 한다.

가. 기능수행수준의 지진력에 대하여 모든 공동구 구조물의 평가내하력이 평가소요강도 이상일 경우 기능수행수준을 만족한다고 평가할 수 있다.

나. 붕괴방지수준의 지진력에 대하여 모든 공동구 구조물의 평가내하력이 평가소요강도 이상을 확보함을 확인 하거나, 일부 부재에서 평가소요강도 확보가 되지 않아도 전체 구조물이 붕괴되지 않음이 증명될 경우 붕괴방지수준을 만족한다고 평가할 수 있다.

다. 붕괴방지수준의 지진력에 대해서 비구조요소의 기능수행여부는 별도로 검토되어야 한다.

라. 붕괴방지수준의 지진력에 대한 평가로 기능수행수준 목표달성 여부를 충분히 증명할 수 있는 경우, 기능수행 수준 지진력에 대한 추가 검토는 생략할 수

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

있다.

3. 내진성능 평가를 위한 하중조합은 공동구 설계기준(KDS 11 44 00)을 따른다.
4. 응답이력해석을 위한 성능평가지진은 내진설계일반(KDS 17 10 00)에 기반하여 선정한다.
5. 구조물이 비탄성 소성거동시 탄성거동 대비 부재력의 상한치 이내 결정됨에 따라 이를 고려하기 위하여 부재의 탄성해석으로 구한 부재력(소요강도)을 응답(반응)수정계수(R)를 사용하여 소성상태 부재력을 추정한다.

■ 해설 ■

- 2.가. 기능수행 수준의 지진에 대해서 구조요소의 성능목표 달성여부는 개별 구조부재의 파괴여부에 대한 평가로 인정될 수 있다.
- 2.나. 붕괴방지수준의 지진력에 대해서 구조요소의 성능목표 달성여부는 모든 구조요소의 평가내하력이 소요강도 이상을 확보하는 것이 확인될 경우 인정될 수 있다. 다만, 붕괴방지수준의 성능목표는 구조물의 부분적인 피해(소성거동)를 허용하고 있으므로, 지진 시 공동구 구조물이 확보하고 있는 안전여유량을 전부 소진하며 지진력에 저항하는 거동현상(소성힌지)을 고려할 수 있어야 한다.
따라서, 발주처와 협의 하에 일부 부재에서 소성파괴가 발생하여도 전체 구조물의 붕괴로 확대되지 않는다는 것이 증명될 경우 붕괴방지 성능목표를 달성하였다고 판정할 수 있다.
- 2.다. 지진시 공동구의 기능상실로 인한 대규모 피해는 비구조요소(공동구 내부 수용시설물)의 기능상실(단수, 정전, 화재, 통신두절)로 인하여 발생할 수 있으므로, 구조물의 붕괴여부와는 별도로 비구조요소의 기능수행여부에 대한 검토가 시행되어야 한다. 단, 본 요령에서 공동구의 내진성능평가는 구조요소에 대한 성능평가에 한정하며, 비구조요소에 대한 성능평가는 발주처와 협의 하에 별도의 과업으로 시행하는 것을 원칙으로 한다.

- 2.라. 내진설계일반(KDS 17 10 00)에서 붕괴방지수준의 지진은 기능수행수준 지진에 비하여 재현주기가 길게 정의되어, 지진의 세기 또한 증가하게 된다. 따라서, 붕괴방지수준지진에 대한 성능평가 결과, 기능수행수준의 성능목표를 만족함이 확인된다면, 기능수행수준에 대한 검토는 별도로 실시하지 않아도 된다.
3. 구조물의 성능목표에 따른 대한 하중계수 및 하중조합은 평가시점 현재 사용하는 기준(공동구 설계, KDS 11 44 00)에 따라, 지진 시 하중조합에 한정하여 적용하는 것을 원칙으로 한다.

$$\begin{aligned} U &= 1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S \\ U &= 0.9D + 1.0E + 1.6(\alpha_H H_v + H_h) \end{aligned} \quad \text{해설식(4.4)}$$

여기서, D = 고정하중, E = 지진하중, H_h = 흙, 지하수 등에 의한 수평방향 하중, H_v = 흙, 지하수 등에 의한 연직방향 하중

응답변위법을 사용한 내진성능평가 시, 하중조합은 성능수준에 대하여 지진하중의 크기를 달리하여 적용토록 한다.

하중조합은 중첩의 원리(Superposition Theory)에 기반한 설계기법으로, 선형탄성해석에 기반한 설계시 적용 가능한 방법이다. 따라서, 재료의 소성거동을 허용하는 내진성능평가에 적용하는 경우 지진 시 실제거동을 정확히 예측한다고 볼 수 없다(PEER, 2017). 따라서, 재료의 소성거동을 허용하는 비선형응답이력해석을 시행하는 경우, 설계기준(공동구 설계, KDS 11 44 00)의 붕괴방지 수준의 지진의 하중조합 (해설식 4.5)에 따라 수치해석 모델을 구성하여야 한다. 이때, 지표면 연직방향으로 작용하는 활하중(L)은 연직방향 지진력이 재하되는 경우, 질량을 가지는 사하중으로 모델링 하는 것을 권장한다.

$$U = 1.00 (D + L + H + E) \quad \text{해설식(4.5)}$$

4. 시간영역에서 직접적분법에 의한 해석을 시행하는 응답이력해석은 입력지진기록이 응답스펙트럼을 만족하여도, 가속도 시간이력 특성에 따라 그 결과가 상이하게 나타날 수 있다. 또한, 성능평가용 응답스펙트럼을 만족하는 인공합성 가속도 시간이력은 실지진 기록 대비 과도한 진동에너지(반복 회수)를 보유함에 따라 응답이력해석에 적합하지 않은 지진기록이라 할 수 있다(Lee et al., 2019). 따라서, 응답이력해석을 위한 지진기록은 실지진기록을 사용함이 바람직하다. 따라서, 본 요령에서는 내진설계일반(KDS 17 10 00)의 지침에 따라 실지진기록을 스펙트럼 보정하여 사용하는

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

것을 추천한다. 이때, 3개의 서로 다른 실지진기록을 사용하는 것을 추천하며, 해석결과에 대한 판단은 아래의 해설 표 4.2.1을 따르도록 한다.

해설표 4.2.1 성능목표 수준에 따른 응답이력 해석결과의 판단기준

	기능수행수준	붕괴방지수준
잔류변위	해석 최대값	해석 최대값
안정검토	(평가내하력) $R_A \geq U_A$ (평가소요 강도)	주요부재 소성파괴에 따른 구조물 붕괴확인

5. 내진성능 평가를 위해서는 필요에 따라 소성해석이 요구되는데 이를 위해서 엄밀한 비선형해석이 필요하다. 반면, 평가의 실용성과 효율성을 위해 응답수정계수를 사용하여 지진시 소성상태 부재력을 추정할 수 있다.

단, 응답수정계수를 적용하기 위해서는 내진설계 구조상세(KDS 14 20 80)를 만족하도록 배근되어야 한다.

본 방법을 적용시, 지진에 의한 탄성부재력을 응답수정계수로 나눈 값이 지진에 대한 성능평가를 위한 부재력이 되며, 이를 다른 하중에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안정성을 검토하여야 한다.

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

- 곡률연성도

$$\mu_{\psi} = \frac{\psi_{\max}}{\psi_y} \quad \text{해설식(4.6)}$$

여기서, $\psi_{\max}$: 최대소성변형에 대한 곡률

ψ_y : 항복상태의 곡률

- 변위연성도

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \quad \text{해설식(4.7)}$$

여기서, $\Delta_{\max}$: 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.

상기 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 4.2.2 붕괴방지수준에서의 응답수정계수(R)

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

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

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

4.3 내진안정성 평가방법

4.3.1 응답변위법

본 요령에서는 지진발생 시에 발생하는 최대 지반변위를 등가의 지진하중으로 지중구조물에 작용하여 극한하중설계법을 따르는 방법을 응답변위법이라 한다.

1. 지반의 수평변위 및 속도응답스펙트럼

- 가. 지진력에 의한 지반의 수평변위는 기반면에서의 속도응답스펙트럼을 이용하는 방법을 적용하여 산정한다.
- 나. [KDS 11 44 00 공동구 설계기준]의 기반암의 정의에 따라 전단파속도 760m/s이상인 지층의 상면을 기반면으로 설정한다. 기반암이 구조물 저면보다 높은 경우 구조물 저면을 기반면으로 설정한다.
- 다. 기반면의 속도응답스펙트럼을 산정하는 경우, [KDS 11 44 00 공동구 설계기준]을 따라 산정한다. 암반지반(S_1) 지반운동의 가속도 표준응답스펙트럼을 이용하여 직접 적분하여 구할 수 있다.

2. 내진해석을 위한 지반 탄성정수의 산정

- 가. 지반의 전단탄성계수는 성능수준에 따른 비선형성을 고려하여야 한다.
- 나. 지반반력계수는 [KDS 11 44 00 공동구 설계기준]에서 제시하는 방법에 따라 산출한다.

3. 구조물에 작용하는 지진하중

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

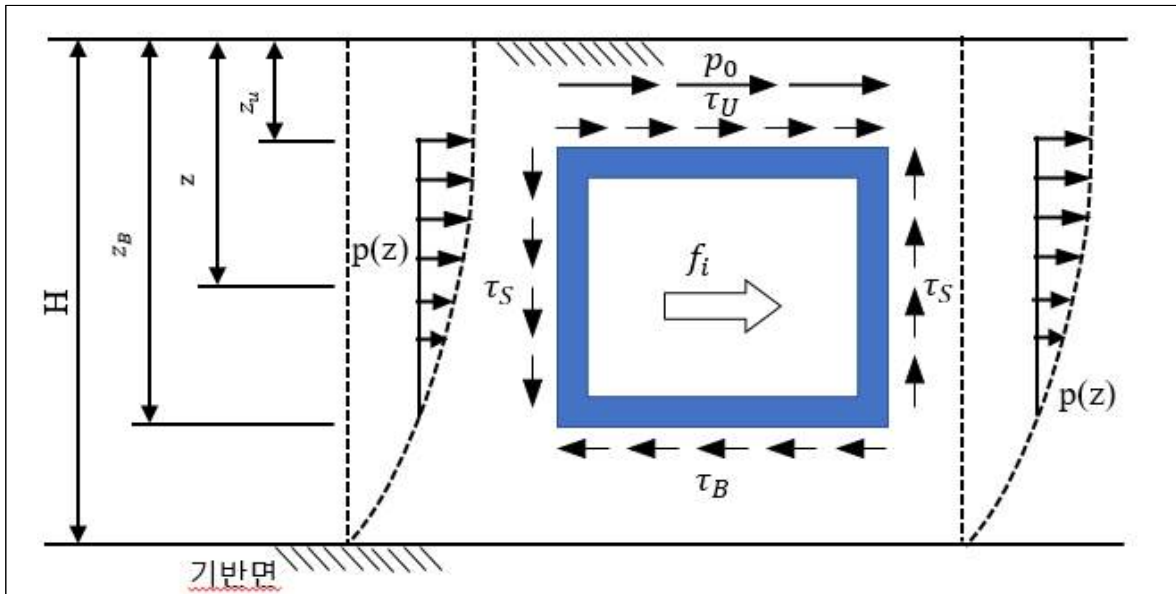


그림 4.3.1 지진하중 산정

가. 지반변위에 의한 지진하중

$$p(z) = K_H \cdot \{U_h(z) - U_h(z_B)\} \quad \text{식(4.1)}$$

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

K_H : 수평방향 지반반력계수 (kN/m^3)

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

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

z_B : 지표면으로부터 구조물 저면까지의 깊이 (m)

또한, 지반반력계수를 4면지지모형으로 적용한 경우, 상판위 표층지반의 변위에 의한 상판변위하중 p_0 을 추가로 재하한다. 4면지지모형에 대한 설명은 다음 절을 참고한다.

$$p_0 = K_{SB} \cdot \{U_h(z_U) - U_h(z_B)\} \quad \text{식(4.2)}$$

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

z_U : 지표면으로부터 구조물 상판의 상면까지의 깊이 (m)

K_{SB} : 상판의 전단지반반력계수 (kN/m³)

나. 주면전단력

1) 지반변위를 단일코사인으로 산정 시

전단력은 $\tau = G \cdot \gamma = G \cdot \frac{dU}{dx}$ 의 관계를 가지므로 주면전단력은 지반변위식 해설식(4.8)을 미분하여 구할 수 있고, 식(4.3)과 같다.

$$\tau(z) = \frac{G_D}{\pi H} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \sin\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad \text{식(4.3a)}$$

$$\tau_U = \left(\frac{G_D}{\pi \cdot H}\right) \cdot S_v \cdot T_s \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z_U}{2H}\right) \quad \text{식(4.3b)}$$

$$\tau_B = \left(\frac{G_D}{\pi \cdot H}\right) \cdot S_v \cdot T_s \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z_B}{2H}\right) \quad \text{식(4.3c)}$$

$$\tau_S = \frac{(\tau_U + \tau_B)}{2} \quad \text{식(4.3d)}$$

여기서, τ : 지표면으로부터의 깊이 z 에 있어서 단위면적당의 지진시 주면 전단력

(τ_U : 상판, τ_B : 저판, τ_S : 측벽) (kN/m²)

z_U : 지표면으로부터 구조물 상판까지의 깊이 (m)

z_B : 지표면으로부터 구조물 저판까지의 깊이 (m)

S_v : 기반면에서의 속도응답스펙트럼(m/s)

H_i : 제 i 번째 토층의 두께 (m)

H : 기반암상면까지의 깊이 (m)

2) 지반변위를 이중코사인으로 산정 시

$$\tau_1(x) = \frac{2 \cdot G_D}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \frac{\omega_0}{V_{sod1}} \cdot \sin\left(\frac{\omega_0}{V_{sod1}} x_1\right) \quad \text{식(4.4a)}$$

$$\tau_2(x) = \frac{2 \cdot G_D}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{V_{s0d1}}\right) \cdot \frac{\omega_0}{V_{s0d2}} \cdot \left(\sin \frac{\omega_0 x_2}{V_{s0d2}} + \frac{\cos \frac{\omega_0 x_2}{V_{s0d2}}}{\tan \frac{\omega_0 H_2}{V_{s0d2}}} \right) \quad (\text{식 4.4b})$$

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

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

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

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

다. 관성력

$$f_i = m_i \cdot a_i = (w_i/g) \cdot a_i \quad \text{식 (4.5)}$$

여기서, f_i : i번째 구조물의 관성력 하중 (kN/m)

w_i : i번째 구조물 중량 (tf/m)

m_i : i번째 구조물 질량(kN/m)

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

4. 구조해석 모형

구조해석용 모형은 지반반력계수를 적용하는 방법에 따라 해설그림 4.3.6과 같이 4면지지모형과 3면지지모형의 2가지 형식으로 모델링이 가능하다. 구조해석을 위해 구성된 모형에 하중을 적용하는 방법은 아래의 절차와 같다.

5. 종단방향에 대한 단면력 검토

지반의 상태가 종방향으로 급변하는 경우 지진에 의한 종단방향에 대한 단면력을 계산하고 이를 설계단면력과 비교하여 내진성능을 검토하여야 한다.

가. 표층지반의 특성을 반영한 지반의 고유주기 T_S 를 산정한다.

나. 지진으로 인한 지반진동의 파장은 다음 식으로부터 구한다.

$$L = \frac{2 \cdot L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad \text{식(4.6a)}$$

$$L_1 = T_S \cdot V_{DS} = 4H_s \quad \text{식(4.6b)}$$

$$L_2 = T_S \cdot V_{BS} \quad \text{식(4.6c)}$$

여기서, L : 지반진동의 파장 (m)

T_S : 표층지반의 고유주기 (sec)

$$V_{DS} : \text{표층지반의 전단파속도} [= \frac{4H_s}{T_S} = \frac{4H_s}{1.25 T_G} = 0.8 \times \frac{4H_s}{T_G}] \text{ (m/sec)}$$

V_{BS} : 기반면의 전단파속도 (m/sec)

다. 지반의 변위진폭은 표층지반의 고유주기를 이용하여 다음 식으로 구한다.

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_S \cdot \cos \frac{\pi z}{2H} \quad \text{식(4.7)}$$

이를 통해 지반변위에 의한 구조물 축 방향의 응력을 검토한다.

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

$$k_1 = C_1 \cdot G_D, \quad k_2 = C_2 \cdot G_D, \quad k_3 = C_3 \cdot G_D \quad \text{식(4.8)}$$

여기서, C_1, C_2, C_3 : 지반의 강성계수 k_1, k_2, k_3 에 대한 정수로 실험

등의 조사결과를 기초로 결정하며, 일반적으로 $C_1 = C_2 = 1.0$, $C_3 = 3.0$ 의 값을 사용한다.

G_D : 지반의 동적전단탄성계수

(중단방향의 검토 시 표층지반 전체의 평균치를 사용한다.)

γ_{teq} : 표층지반의 환산단위체적중량

$$\gamma_{teq} = \frac{\sum \gamma_{ti} \cdot H_i}{H} \quad \text{식(4.9)}$$

마. 중단방향의 검토 시에는 그림 4.3.2에 나타난 것처럼 단면적과 수평면 내의 단면 2차 모멘트 I_h 와 수직면내의 단면 2차 모멘트 I_v 를 구하며, 이는 지진으로 인한 축력과 휨 모멘트를 구하는데 이용된다.

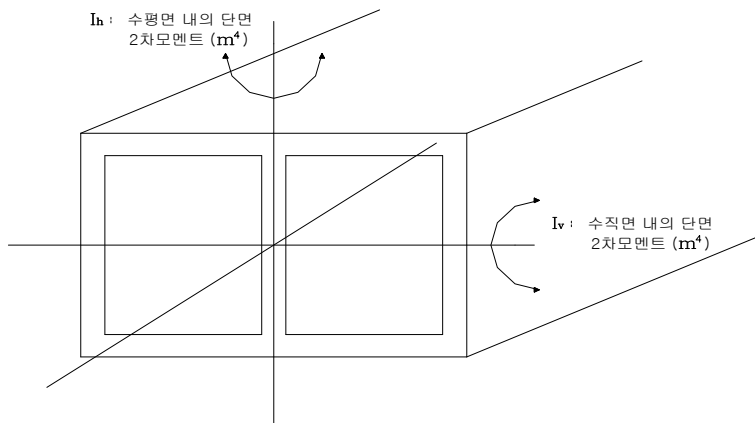
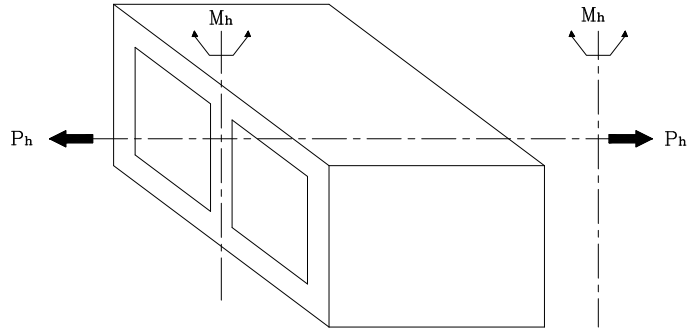
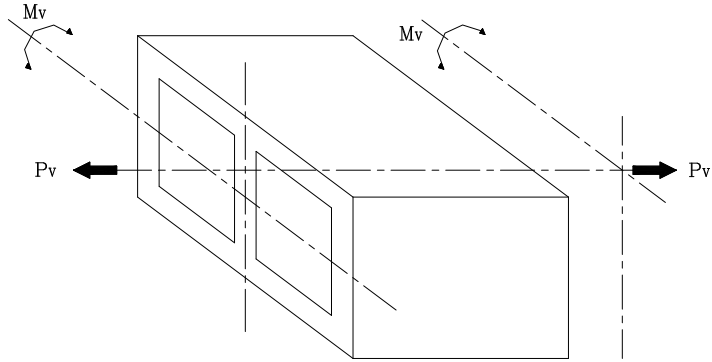


그림 4.3.2 단면의 모형화

이에 따라 수평면내 및 수직면내의 지반진동에 의한 축력과 휨 모멘트를 그림 4.3.3과 같이 나타낼 수 있으며, 구조물의 이음부를 제외한 단면력은 다음의 식으로 구할 수 있다.



(a) 수평면 내



(b) 수직면 내

그림 4.3.3 지진시 단면력

$$P_h = \alpha_1 \cdot \xi_1 \cdot \frac{\pi E \cdot A}{L} \cdot U_h \quad \text{식(4.10a)}$$

$$P_v = \alpha_1 \cdot \xi_1 \cdot \frac{\pi E \cdot A}{L} \cdot \frac{U_h + U_v}{2} \quad \text{식(4.10b)}$$

$$M_h = \alpha_2 \cdot \xi_2 \cdot \frac{4\pi^2 E \cdot I_h}{L^2} \cdot U_h \quad \text{식(4.10c)}$$

$$M_v = \alpha_3 \cdot \xi_3 \cdot \frac{4\pi^2 E \cdot I_v}{L^2} \cdot U_v \quad \text{식(4.10d)}$$

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 : 이음부의 단면력의 저감계수

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 구조물 종단방향과 종단방향에 직교하는 수평면내 및 수직면내의 지반에 발생하는 변위가 구조물에 전달되는 전달률

L : 지반진동의 파장

지반의 변위에 따른 전달률 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 각각 다음 식에 의해 구한다.

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 \cdot L'}\right)^2} \quad \text{식(4.11a)}$$

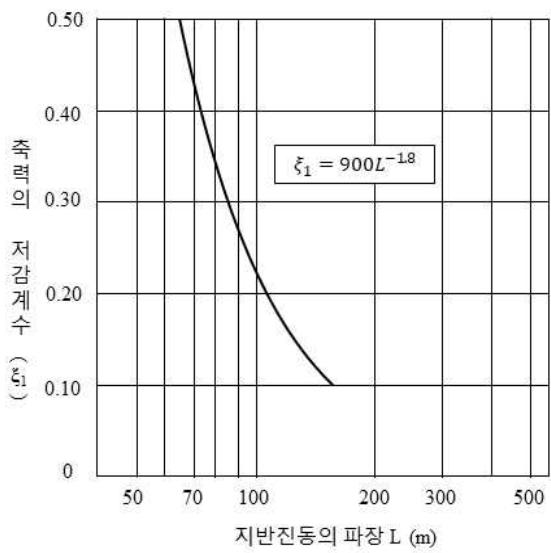
$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2 \cdot L}\right)^4} \quad \text{식(4.11b)}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_3 \cdot L}\right)^4} \quad \text{식(4.11c)}$$

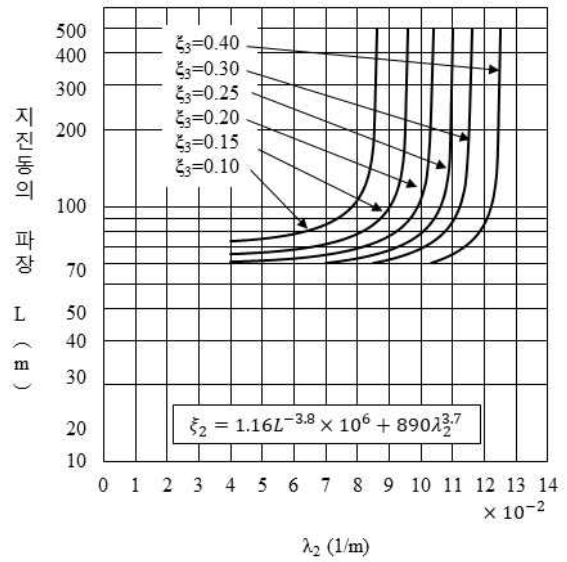
$$\text{여기서, } \lambda_1 = \sqrt{\frac{k_1}{EA}} \quad \lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{k_2}{EI_h}} \quad \lambda_3 = \sqrt{\frac{k_3}{EI_v}} \quad L' = \sqrt{2} \cdot L$$

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

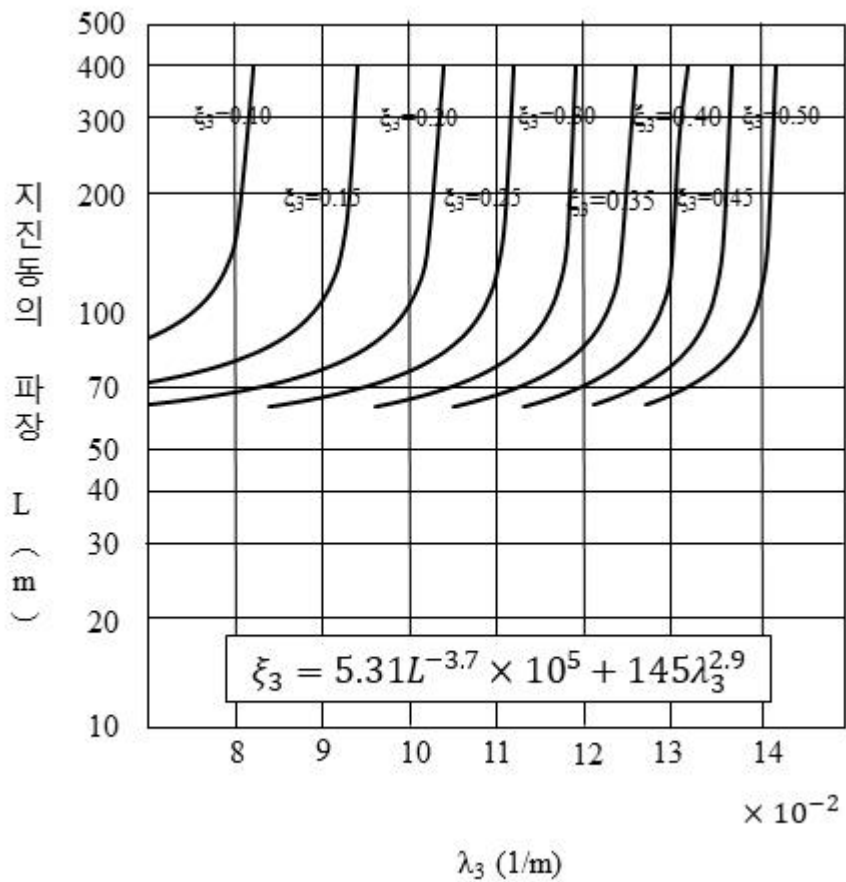
이음을 설치하면 지진시 단면력이 저감되며, 이음부의 경우 단면력의 저감계수 ξ_1, ξ_2, ξ_3 는 다음의 그림 4.3.4로부터 구한다. ξ_1, ξ_2, ξ_3 는 각각 종단방향, 횡단방향, 상하방향의 저감계수이다.



(a) 지진시 종단방향의 저감계수



(b) 지진시 횡단방향의 저감계수



(c) 지진시 상하방향의 저감계수

그림 4.3.4 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

$$P'_h = 1/\sqrt{2} \cdot P \quad \text{식(4.12a)}$$

$$M'_h = 1/\sqrt{2} \cdot M_h \quad \text{식(4.12b)}$$

· 수직면내

$$P'_v = 1/\sqrt{2} \cdot P \quad \text{식(4.12a)}$$

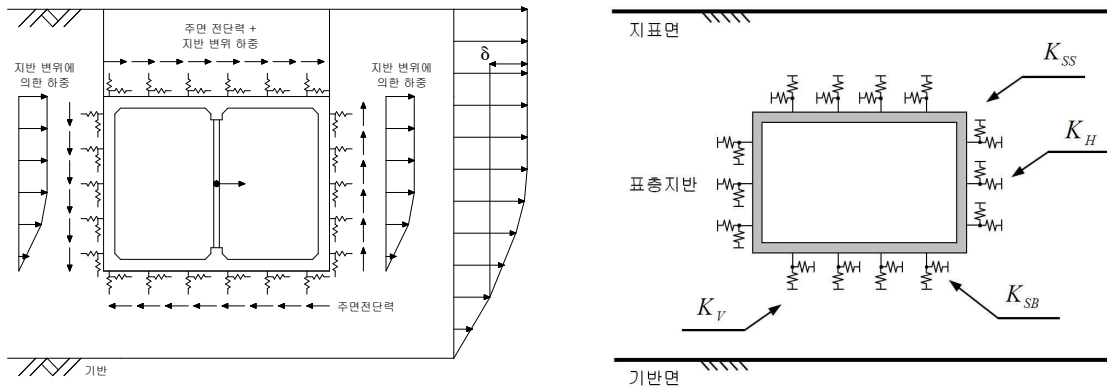
$$M'_v = 1/\sqrt{2} \cdot M_v \quad \text{식(4.12b)}$$

여기서, $P = \sqrt{2P_h^2 + 2P_v^2}$ 이다.

■ 해설 ■

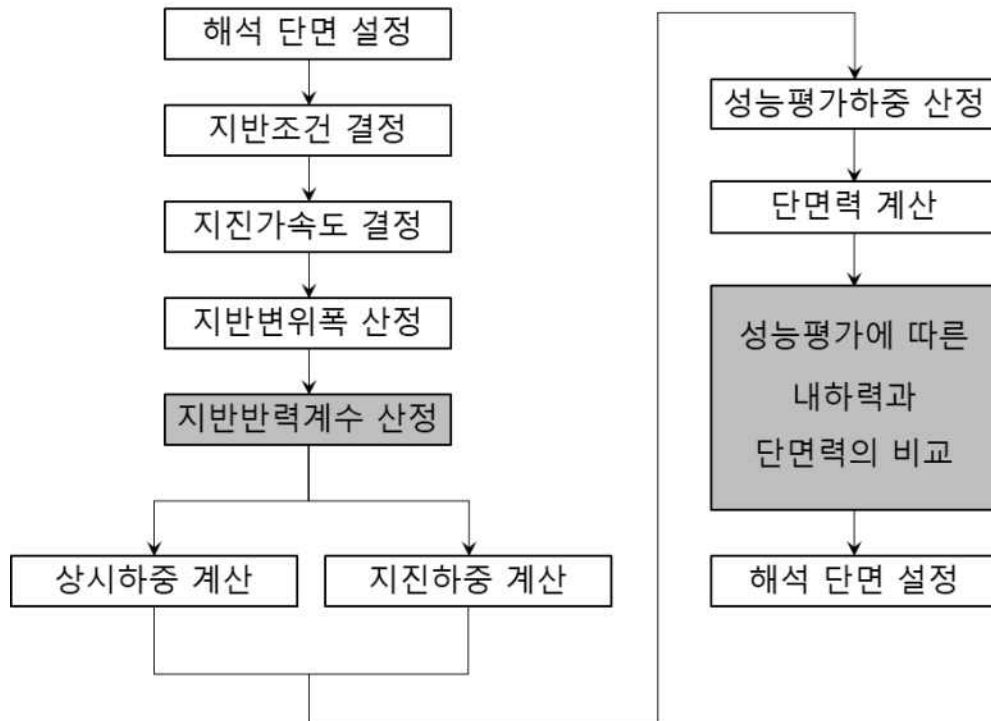
일반적으로 공동구 구조물을 포함한 지중구조물의 겉보기 중량은 주변의 지반과 비교하여 가볍거나 또는 같은 정도이다. 또한 주위가 지반으로 둘러싸여 있으므로 발산감쇠가 커서 자기 진동이 곧 진정되는 특성을 가지고 있다. 그러므로 관성력에 의해 지중구조물 자체가 지반 속에서 자유롭게 진동하는 일은 없고, 지반의 진동에 따라 지반에 구속되어 움직인다. 따라서 지중구조물에 생기는 변위 및 응력은 관성력에 의한 영향보다도 주변 지반의 상대 변위에 의한 강제력으로 생겨나게 된다. 해설그림 4.3.1은 응답변위법의 개념을 설명하고 있다.

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령



해설그림 4.3.1 응답변위법의 개념도

응답변위법을 적용하여 내진 해석을 수행하는 공동구 구조물은 일반적으로 프레임(Frame) 요소로 모형화하고, 그 선형 또는 비선형성 구조요소로 모델링 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 내진력이 존재하는 경우는 역학적 특성을 적절히 고려하여 모형화하는 것이 좋다. 응답변위법을 사용하여 공동구 구조물의 내진성능평가를 위한 해석절차는 해설그림 4.3.2와 같다. 먼저 단면이 설정된 후 기반면에서의 설계속도응답스펙트럼 이용하여 깊이별 지반수평변위, 주면전단력, 가속도를 구하여 지진하중을 산정하는 것을 원칙으로 한다.



해설그림 4.3.2 응답변위법의 해석절차

또한 지반조건에 따라 지반반력계수를 산정하고 설정된 단면의 상시하중과 지진하중에 의해 단면력을 계산한다.

기능수행 수준의 지진에 대해서는 응답변위법으로 예상되는 구조물의 최대변위가 구조 및 비구조요소의 정상적인 기능수행에 문제되지 않는 수준임을 확인하여야 한다. 붕괴방지 수준에 대해서는 계산된 단면력과 상시하중에 의한 설계 단면력을 비교함으로써 내진보강 여부를 결정한다. 지반의 변위진폭 산정시 이용되는 기반면에서의 스펙트럼속도는 기반면에서의 속도응답스펙트럼에서 주기 T_s 에 해당하는 값으로, 이 때 속도응답스펙트럼은 [KDS 11 44 00 공동구 설계기준]에 제시된 설계응답스펙트럼을 적용한다.

- 1.가. 응답변위법에 사용되는 지반의 깊이별 수평변위는 기반면에서의 속도응답스펙트럼을 이용하여 토층의 고유주기에서 지표면의 최대 변위를 구하고, 지반의 변형 모드를 가정하여 깊이별 지반 수평변위를 구한다. 기반면에서의 속도응답스펙트럼을 이용하는 경우, 해설그림 4.3.3과 같이 지반을 단일층으로 가정하여 지중변위를 산정하는 방법은 해설식(4.8)을 이용하고, 지반을 두 층으로 가정하여 지중변위를 산정하는 방법은 해설식(4.9a)~(4.9c)를 이용한다. 기반면 위의 지층의 깊이별 전단파속도가 유사한 경우

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

단일층으로 가정하고 단일코사인을 사용할 수 있다. 기반면 위의 지층내부에 풍화암 또는 연암이 출현하여 표층지반에 전단파속도가 2개의 층으로 확인한 구분이 생기는 경우, 해설그림4.3.3을 참고하여 2개의 층으로 구분하고 이중코사인을 적용한다.

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \cos\left(\frac{\pi x}{2H_s}\right) \quad \text{해설식(4.8)}$$

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

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

$$T_s : \text{표층지반의 고유주기}(s) = 1.25 T_G$$

$$V_{si} : i\text{층 지반의 평균전단파속도(m/s)}$$

$$H_i : i\text{층지반의 두께(m)}$$

$$H_s : \text{표층지반의 두께(m)}$$

$$U_{h1}(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \cos\left(\frac{\omega_0 x_1}{V_{s1}}\right) \quad \text{해설식(4.9a)}$$

$$U_{h2}(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{V_{s1}}\right) \cdot \left(\cos\frac{\omega_0 x_2}{V_{s2}} - \frac{\sin\frac{\omega_0 x_2}{V_{s2}}}{\tan\frac{\omega_0 H_2}{V_{s2}}} \right) \quad \text{해설식(4.9b)}$$

$$(1 + \alpha)\cos\left\{\omega_0\left(\frac{H_1}{V_{s1}} + \frac{H_2}{V_{s2}}\right)\right\} + (1 - \alpha)\cos\left\{\omega_0\left(\frac{H_1}{V_{s1}} - \frac{H_2}{V_{s2}}\right)\right\} = 0 \quad \text{해설식(4.9c)}$$

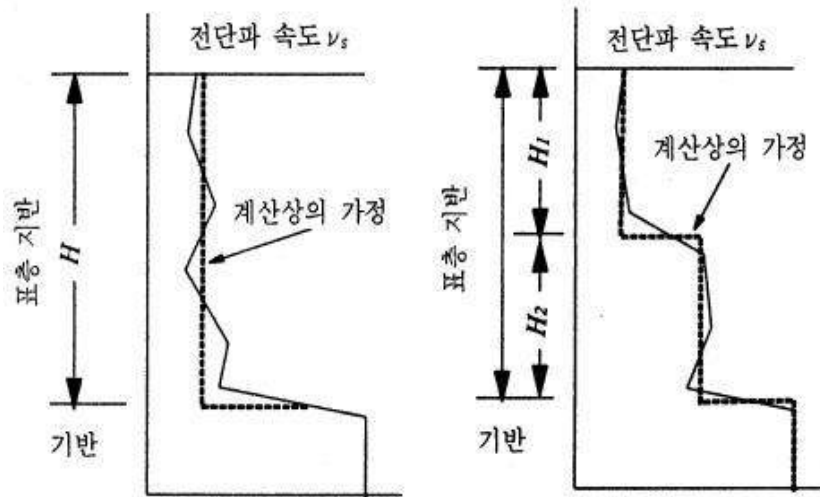
여기서, H_s : 전체 토층 지반의 두께(m)

$$H_1, H_2 : \text{제 1층, 제 2층 지반의 두께(m)}$$

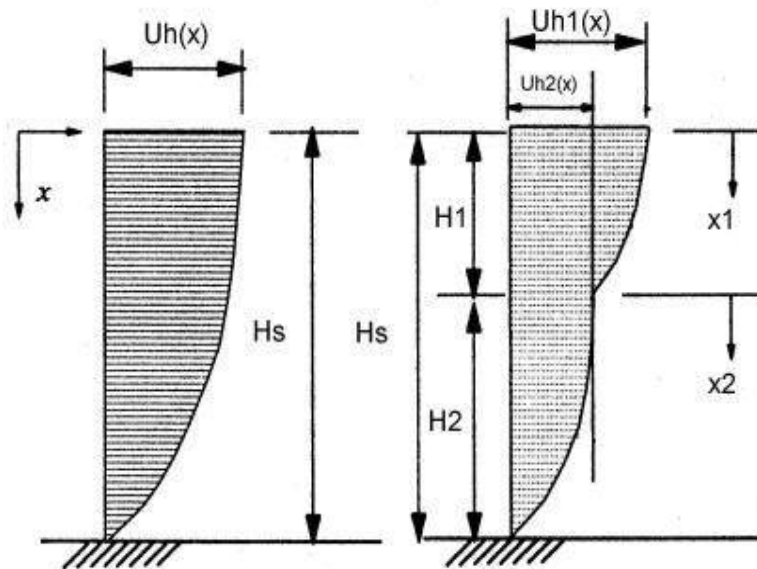
$$V_{s1}, V_{s2} : \text{제 1층, 제 2층의 평균 전단파속도(m/s)}$$

ω_0 : 지반의 고유진동수, 해설식(4.9c)에서 시행착오법으로 구함

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



(a) 전단파속도에 따른 지층 분할 및 평균 전단파속도 산정



(b) 변형형상(모드)

해설그림 4.3.3 단일코사인, 이중코사인 이론을 이용한 지중변위 산정법

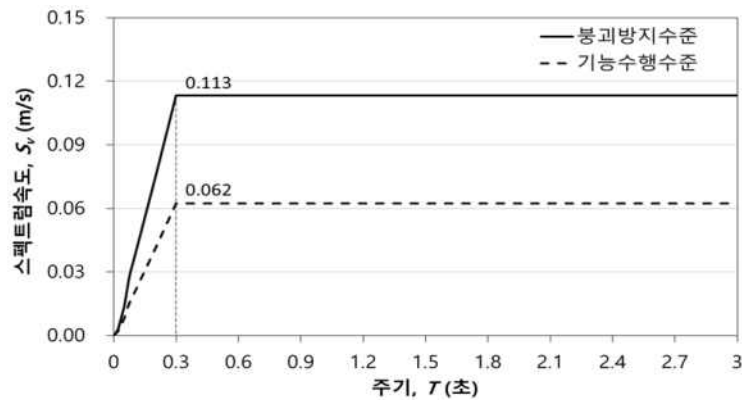
기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

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

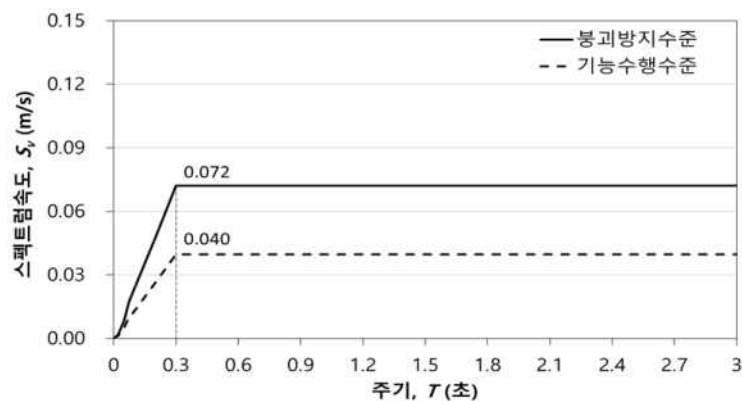
기반면 속도응답스펙트럼은 행정구역에 따라 해설표 4.3.1의 계산식을 이용 하여 구할 수 있고, 계산된 기반면에서의 속도응답스펙트럼을 도시하면 해설 그림 4.3.4와 같다.

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

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



(a) 지진구역 I



(b) 지진구역 II

해설그림 4.3.4 기반면에서의 속도응답스펙트럼
(공동구 설계기준, KDS 11 44 00:2018)

2.가. 지반의 응력-변형률 관계는 변형률의 크기에 따라 탄성계수가 변하는 비선형 거동을 보인다. 따라서, 실내시험과 현장시험을 통하여 지반의 전단탄성계수 감소 현상을 평가하고 이를 해석에 이용해야 한다. 실내시험과 현장시험의 절차는 [기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령]을 준용한다. 지반의 비선형성을 최대한 반영하기 위해서는 적합한 구성모델을 선정하여 비선형 해석을 수행하는 방법이 가장 합리적이거나, [기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령]의 지반의 비선형성에 대한 경험식을 준용한다. 선형해석 시에는 하중수준에 따른 비선형특성을 감안하기 위해 지반의 전단탄성계수를 다음과 같이 보정하여 사용한다.

$$G_D = (\gamma_t / g) \cdot V_{DS}^2 \quad \text{해설식(4.10)}$$

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

여기서, G_D : 지반의 동적전단탄성계수 (kPa)

γ_t : 지반의 단위중량 (kN/m³)

g : 중력가속도 (m/sec²)

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

$$V_{DSi} = C \cdot V_{si} \quad \text{해설식(4.11)}$$

여기서, V_{si} : i 번째 지층의 현장에서 측정된 평균전단파속도(m/s)

V_{DSi} : i 번째 지층의 V_{DS} (m/s)

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

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

2.나. 지반반력계수의 산정

① 재하폭 산정 방법

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

$$K_H = k_{h0} \left(\frac{B_h}{0.3} \right)^{-3/4} \quad \text{해설식(4.12a)}$$

$$K_V = k_{v0} \left(\frac{B_v}{0.3} \right)^{-3/4} \quad \text{해설식(4.12b)}$$

$$K_{SS} = \lambda K_H \quad \text{해설식(4.12c)}$$

$$K_{SB} = \lambda K_V \quad \text{해설식(4.12d)}$$

여기서, K_H : 구체측벽의 수평 지반반력계수(kN/m³)

K_V : 구체저판의 연직 지반반력계수(kN/m³)

K_{SS} : 구체측벽의 전단 지반반력계수(kN/m³)

K_{SB} : 구체저판 및 상판의 전단 지반반력계수(kN/m³)

k_{h0} : 지름 0.3m의 강채원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 수평 지반반력계수(kN/m³)

k_{v0} : 지름 0.3m의 강채원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 연직 지반반력계수(kN/m³)

B_h : 구조물 높이 (m)

B_v : 구조물 저판 폭 (m)

$$\lambda = 1/3 \sim 1/4 \quad \text{해설식(4.13a)}$$

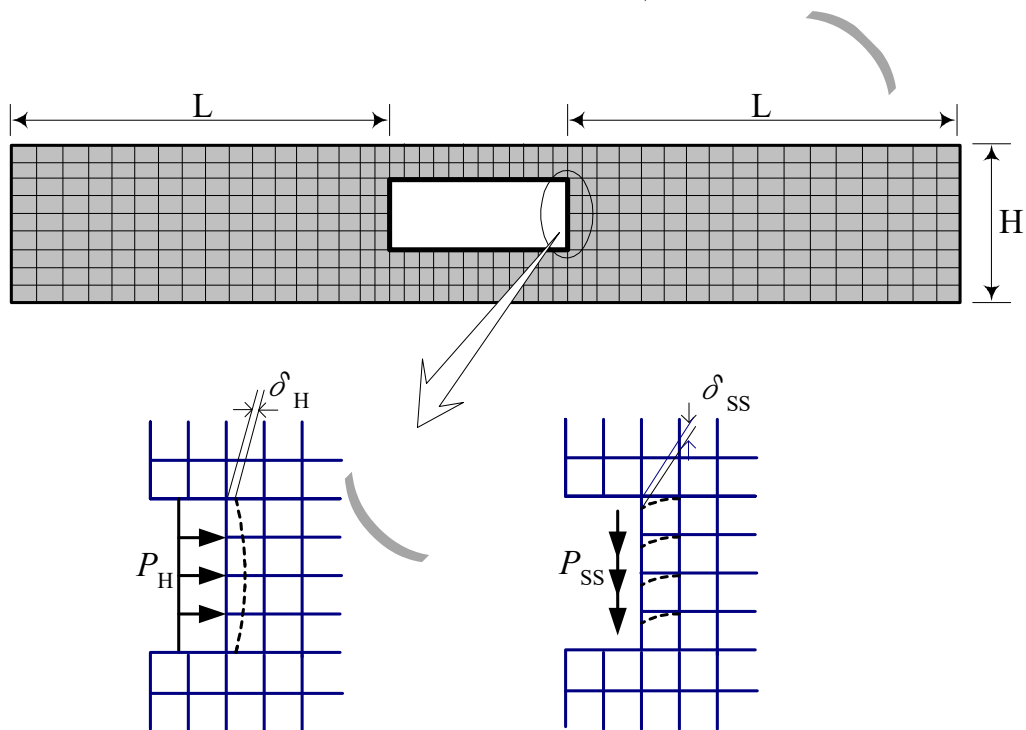
$$k_{v0} = \frac{1}{0.3} \cdot E_D, \quad k_{h0} = \frac{1}{0.3} \cdot E_D \quad \text{해설식(4.13b)}$$

E_D : 지진하중 상태의 지반변형을 고려한 지반의 탄성계수

$$E_D = 2(1 + \nu_D) G_D \quad \text{해설식(4.14)}$$

② 유한요소법에 의한 방법

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

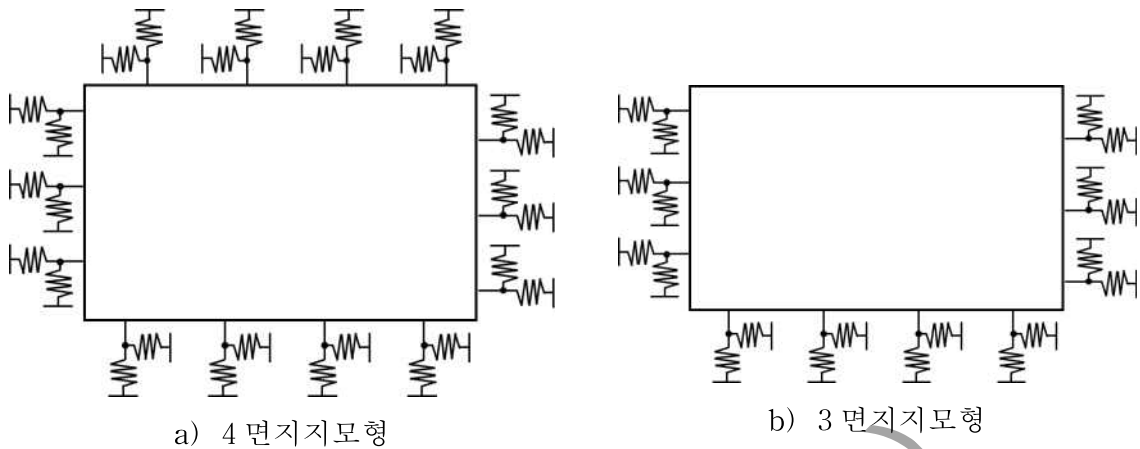
δ_{SB} : 상판 및 저판에 부여한 단위하중에 의한 전단방향의 변위

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.

$$L \geq 3H \quad \text{해설식(4.15)}$$

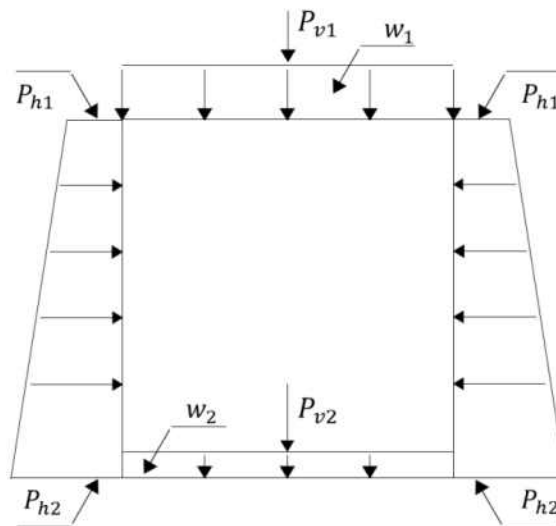
또한 지반을 모형화할 때 적용하는 지반의 물성치, 즉 지반의 탄성계수(또는 전단탄성계수)와 포와송 비는, 지진시 지반에 동적하중이 가해지고 이에 따라 지반이 동적거동을 하므로, 지반의 동적탄성계수 E_D 또는 동적전단탄성계수 G_D 와 동적포아송비 ν_D 를 적용한다.

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



해설그림 4.3.6 구조해석에 사용하는 응답변위법의 해석모형

4.가. 상시하중은 사하중과 활하중, 토압과 자중 등을 고려하며 하중조합을 이용하여 상부 슬래브와 하부 슬래브, 측벽에 대해 그림 4.3.7과 같이 작용시키도록 한다.



해설그림 4.3.7 상시하중

여기서, P_{h1} , P_{h2} : 상·하부 측벽토압

P_{v1} : 활하중

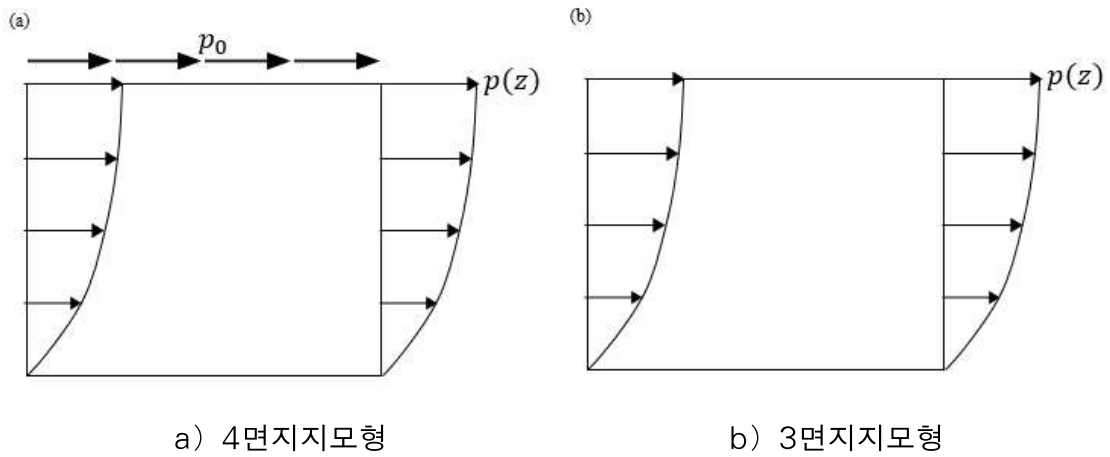
P_{v2} : 활하중 (내부설비 하중)

W_1 : 사하중

W_2 : 구조물의 자중

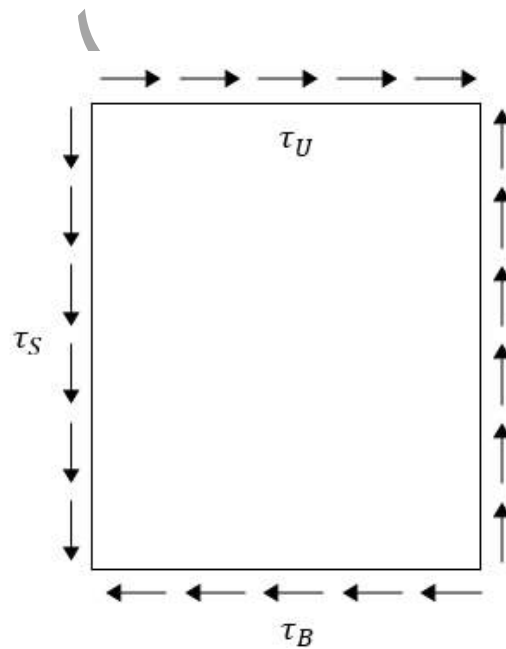
4.나. 지진하중 지반변위하중 $p(z)$ 는 지반의 변위진폭을 이용하여 해설그림 4.3.8와 같이 수평력으로 작용한다.

4 면지지모형으로 구조해석하여 상판의 연직/전단지반반력계수를 적용한 경우 상판변위 하중 p_0 을 지반변위하중을 추가 고려한다. 반면, 3 면지지모형으로 구조해석하여 상판의 연직/전단지반반력계수를 적용하지 않은 경우, 상판변위하중 p_0 는 생략한다.



해설그림 4.3.8 지반변위하중

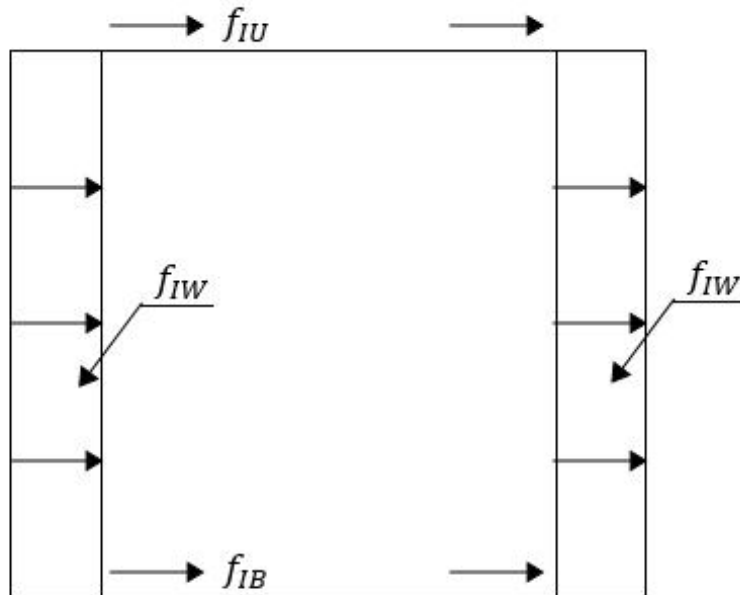
4.다. 지진하중 주면전단력(τ_U, τ_S, τ_B)은 상·하부 슬래브와 측벽에 해설그림 4.3.9와 같이 작용한다.



해설그림 4.3.9 주면전단력

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

4.라. 지진하중 관성력(f_{IU} , f_{IB} , f_{IW})은 상·하부 슬래브와 측벽에 그림 4.3.10과 같이 작용한다.



해설그림 4.3.10 관성력

4.3.2 응답이력해석 (Response History Analysis)

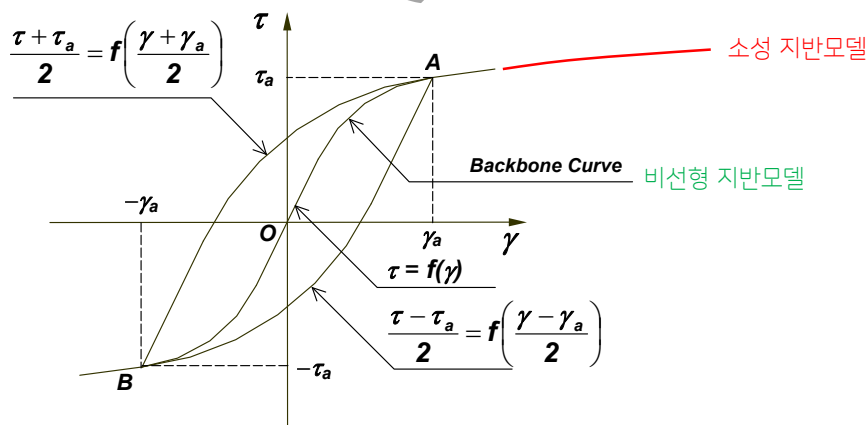
1. 공동구 구조물이 위치하는 지반은 지진하중 하에서 비선형 거동을 보임에 따라, 공동구의 내진성능평가는 이를 반영할 수 있는 비선형 응답이력해석(Response History Analysis)를 통해 엄밀히 평가할 수 있다.
2. 응답이력해석에 사용되는 지반모델은 소성과괴 이전 비선형 거동이 표현 가능한 모델을 적용하여야 한다.
3. 수평으로 무한한 지반이 효과적으로 모델링되어 경계에서 발산하는 지진파의 반사를 억제할 수 있어야 한다.
4. 응답이력 해석을 위한 유한요소(Element)의 최소 크기는 입력지진파의 에너지를 충분히 전달할 수 있는 크기로 작성되어야 한다.
5. 응답이력 해석은 공동구 구조물과 지반의 분리거동이 가능한 경계요소(Interface Element)를 적용할 수 있어야 한다.
6. 수치해석 모델의 최하단 부는 성능평가용 지진의 작용위치로, 전단파속도 760 m/s 이상인 s_1 지반까지 수치모델링 하는 것을 추천한다. 수치해석 모델이 최하단부가 상기 조건을 만족하지 않는 토사지반일 경우, 지표면 자유장부터 기반암까지의 지반응답해석을 실시하여 수치해석모델 최하단부의 지진가속도 시간이력을 획득, 성능평가용 입력지진 기록으로 적용하도록 한다. (Mejia and Dawson, 2006)
7. 입력지진파의 경계조건은 반무한 탄성경계(Compliant Base, Elastic Half Space) 또는 고정단 경계조건(Rigid Base) 중 입력지진운동의 특성에 맞게 적용하여야 한다.
8. 공동구 구조물의 붕괴기구(Collapse Mechanism)의 확인을 위하여, 소성힌지(Plastic Hinge)발현이 가능한 구조요소를 적용할 수 있어야 한다.
9. 시간이력 해석을 위한 하중조합은 공동구설계기준(KDS 11 44 00) 4.4.7절에 따른다.

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

10. 시간이력 해석을 위한 입력지진의 결정은 내진설계 일반(KDS 17 10 00)의 4.2.1.4 실지진기록 활용 지반운동 시간이력을 따른다.
11. 2차원 평면변형을 해석시 성능평가 지반운동은 공동구 구조물 횡단방향으로 작용하도록 한다. 연직방향 지진운동의 적용은 반드시 필수사항이 아니며, 평가자의 판단하에 적용 가능하다. 연직방향 지진의 성분의 특성은 수평방향의 성분특성과 동일 하지만 세기는 암반지반에서는 수평방향 성분의 77% 크기로 재하하도록 한다.

■ 해설 ■

1. 응답이력해석(Response History Analysis)는 공동구를 포함하는 지반의 지진 응답을 시간적분법을 이용하여 순차적으로 해석하는 방법으로, 시간적분방법에 따라 양해법(Explicit) 및 음해법(Implicit)으로 구분할 수 있다.(Dokainish and Subbaraj, 1988)
2. 지진하중에 대한 비선형 거동모델의 감쇠는 이력감쇠(Hysteretic Damping)의 형태로 발생한다. 반복하중에 대한 응력-변형을 관계는 Masing의 법칙 등을 따라 정의될 수 있다. 해설그림 4.3.11은 반복하중을 받는 지반의 응력-변형을 거동의 예이다.



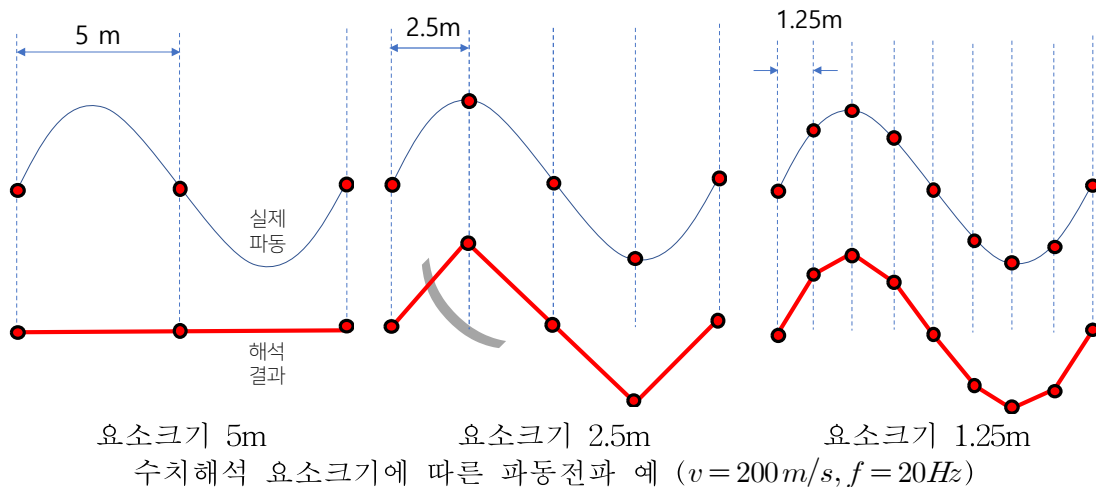
해설그림 4.3.11 비선형 지반 거동

3. 수평으로 충분히 넓은 영역의 지반이 모델링 되거나, 경계면 인접지반과 동일한 강성과 감쇠비를 가지는 자유장요소(Free Field Element)를 적용할 수 있다. 수평지반의 모델링 범위는 공동구 구조물의 굴착 및 시공에 따른 응력변화의 영향이 미치지 않는 범위까지 설정되어야 한다.

4. 수치해석에 사용되는 요소의 크기는 지반을 통하여 전파되는 지진파의 파장을 충분히 수용할 수 있을 정도로 결정되어야 한다. 지반의 탄성과 속도(v)로부터, 입력지진의 주파수(f)로 전파되는 지진파의 파장(λ)을 해설식 (4.16)을 이용하여 추정할 수 있다. 따라서, 수치해석의 요소의 크기(대각길이, Δl)는 지진파의 파장보다 작아야 하며, 해설식 (4.16)에서 분모의 10은 안전율로 설계자의 판단하에 조정 가능한 수치이다. 수치해석 요소크기에 따른 파동전파 해석의 예는 해설표 4.3.2과 같다.

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad \Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad \text{해설식 (4.16)}$$

해설표 4.3.2 수치해석 요소크기에 따른 파동전파 예



5. 공동구와 인접지반 간의 미끌어짐(Sliding), 분리(Seperation)현상은 경계요소의 적용으로 가능하다. 단, 공동구 구조물과 지반의 분리거동 영향이 무시할 수 있는 경우 경계요소를 적용하지 않을 수 있다.
6. 내진설계 일반(KDS 17 10 00)으로부터 결정되는 성능평가용 지진은 기반암 노두운동으로, 지중공동구 위치에서 지진운동과는 상이한 운동이라 할 수 있다. 따라서, 엄밀한 내진성능 평가를 위해서는 수치해석모델 하단부로부터 상향 전파하는 지진파의 지반응답을 평가에 반영하여야 한다. 수치해석모델 하단부가 전단파속도 760 m/s 이상인 기반암인 경우 S_1 지반의 응답스펙트럼을 만족하는 입력지진기록을 수정 없이 바로 적용할 수 있다. 그러나, 수치해석모델 하단부가 기반암이 아닌 경우 토사지반인 경우 지반응답해석으로 수치해석모델 하단부에 작용하는 입력지진기록을 도출하여

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

사용하여야 한다.

7. 응답이력해석은 기반암으로부터 상향전파하는 입사파(Incident Wave)만으로 시행되어야 한다. 그러나, 해석과정에서 지표면 자유장으로부터 하향전파되는 반사파(Reflected Wave)는 수치모델 최하단부에서 반사되어 지진에너지가 지층내 구속되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서, 수치해석모델의 입력지진 경계조건은 하향전파되는 반사파의 흡수가 가능하여야 한다. (Mejia and Dawson, 2006, Lee, 2013)

가. 탄성경계조건에서는 점성감쇠댐퍼를 이용하여 반사파를 흡수하며, 입력지진 기록은 입사파만을 사용하여야 한다.

나. 고정단 경계조건에서는 위상이 서로 다른 해석과 입력지진기록 하향반사의 합으로 하향반사파의 소멸을 구현할 수 있다. 이를 위하여 입력지진기록은 입사파와 반사파의 합인 층내운동(Within, In-layer Motion)기록이어야 한다.

8. 공동구 구조물 일부영역의 파괴가 반드시 전체 구조물의 붕괴(Collapse)를 유발하지는 않는다. 따라서, 소성한지 거동이 가능한 구조요소의 적용으로 소성한지 발현에 따른 모멘트 재분배과정(Re-distribution of Bending Moment)과 붕괴기구를 확인할 수 있다. 이를 위하여, 공동구 구조체를 압축력과 휨을 동시에 받는 기둥으로 모델링 할 수 있으며, 지진 후 공동구 구조물의 소성과괴 여부 및 붕괴여부 판단 만으로 내진성능의 평가가 가능하다. 이때, 구조물의 평가내하력은 성능곡선으로 정의되어야 한다.

반면, 공동구 구조물을 선형탄성 구조요소로 모델링 하는 경우, 전체 구조요소의 시간 대별 부재력을 추적·기록하여, 해석종료 후 합성응력에 대한 내하력평가는 별도로 이루어져야 한다. 또한, 구조물의 소성변형을 고려하기 위한 응답수정계수의 적용 등 가정사항이 필요함에 따라, 본 요령에서는 응답이력해석을 수행함에 있어서 구조물의 선형탄성모델링은 추천하지 않는다.

9. 수치해석 모델을 이용한 공동구 구조물의 내진성능 평가는 두 가지 목표성능 수준(기능수행, 붕괴방지)에 대해서 공히 실제하중에 대한 수치해석 모델 구성으로 시행된다. 일반적인 경우, 노면 활하중은 응답이력해석에서 고려하지 않도록 한다. 연직방향 지진력이 재하되는 경우, 지표면 연직방향으로 작용하는 활하중(L)은 질량을 가지는 사하중으로 모델링 하는 것을 권장한다. (PEER, 2017)

$$U = 1.00 (D + L + H + E)$$

해설식(4.17)

여기서, D : 고정하중

L : 활하중

H : 토압 및 수압

E : 지진하중

10. 동일 응답스펙트럼에 맞추어 보정된 입력지진이라 하여도, 시간이력 해석결과는 서로 다르게 나타날 수 있다.(Lee et al., 2019) 따라서, 총 3개 이상의 서로 다른 이벤트의 지진기록을 사용한 해석결과 중 최대값을 이용한 성능평가를 실시하여야 한다. 입력지진기록은 성능평가용 응답스펙트럼에 대해서 스펙트럼 보정을 실시 후 베이스라인 오차를 보정하여 해석에 적용하여야 한다.
11. 응답이력해석에서 연직방향 지진운동의 적용이 반드시 공동구구조물의 부재력 증가를 초래하지는 않는다. 따라서, 내진성능평가의 결과의 명확한 해석과 원인분석을 위하여 횡단방향 지진하중만을 적용한 해석을 실시할 수 있다. 사용하고자 하는 실지진 계측기록이 연직방향 지진운동기록을 포함하고 있을 경우, 이를 바로 사용할 수 있으며 그렇지 않은 경우 수평방향 지진운동기록의 세기를 조정하여 적용할 수 있다.

4.3.3 액상화

1. 액상화 발생 가능성에 대한 평가는 [KDS 17 10 00 (4.7)]과 [기존시설물(기초및지반)내진성능평가요령]을 준용한다.
2. 주변지반의 액상화 발생 가능성이 있는 경우, 공동구 구조물의 부상(浮上)에 대한 안전성을 검토한다.
3. 2항에 따라 검토한 결과, 공동구 구조물 종단방향의 일부 범위가 부상하는 경우에는 부상에 의한 종단방향의 구조 안전성을 검토한다.

■ 해설 ■

2. 액상화한 지반의 단위중량은 $18-20\text{kN/m}^3$ 으로, 공동구 구조물에는 부력이 작용한다. 공동구 부상의 유무를 검토하는 부상안전율 F_u 의 산정은 다음과 검토에 사용되는 작용력은 해설그림 4.3.12과 같다. 부상안전율 F_u 가 1.0보다 미만인 경우에는 지반개량, 지중구조물의 부상방지공법 등 필요한 대책을 시행하여야 한다.

$$F_u = \frac{W_S + W_B + Q_S + Q_B}{U_S + U_D} \quad \text{해설식(4.18)}$$

여기서, F_u : 부상안전율

W_S : 공동구 상부토의 단위 길이당 중량(물의 중량 포함) (kN/m)

W_B : 공동구의 단위 길이당 중량(내용물의 중량 포함) (kN/m)

Q_S : 상부토의 전단저항력 (포장과 노상의 전단저항은 미고려) (kN/m)

Q_B : 공동구 측벽의 마찰저항력 (kN/m)

U_S : 공동구 저면에 작용하는 정수압에 의한 양압력 (kN/m)

U_D : 공동구 저면에 작용하는 과잉간극수압으로 인한 양압력 (kN/m)

이때, 액상화안전율이 1.0이하인 지층에서는 Q_S 와 Q_B 는 고려하지 않는다. 공동구 저면에 작용하는 과잉간극수압으로 인한 양압력은 해설식(4.19)와 같다.

$$U_D = \Delta u \cdot B = L_u \cdot \sigma'_v \cdot B \quad \text{해설식(4.19)}$$

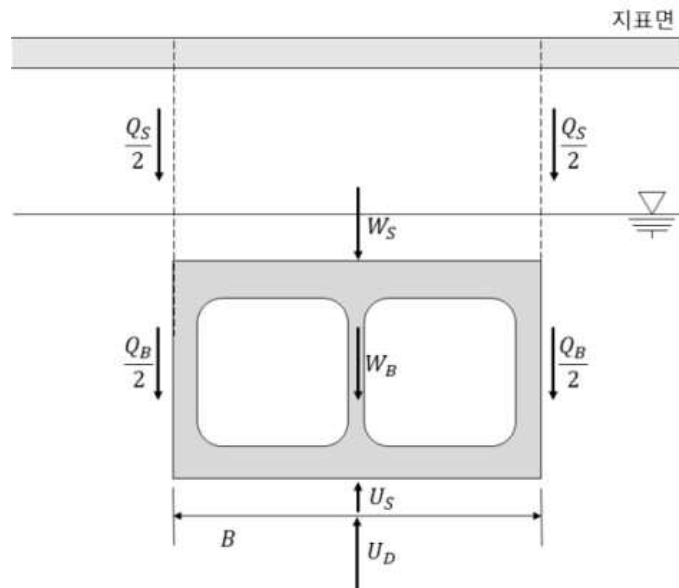
여기서, B : 공동구 구조물 폭(m)

σ'_v : 정수압상태에서의 구조물 저면과 동일한 심도에서의 원지반의 유효상재하중 (kN/m^2)

L_U : 과잉간극수압비 $[= \frac{\Delta u}{\sigma'_v}]$

Δu : 과잉간극수압 (kN/m^2)

부상의 검토는 액상화발생시 검토하므로 $L_U=1$ 으로 가정한다. 또한, 해설식 (4.19)는 지하수위면부터 심도 20m까지만 고려하며, 지층내에서 점성토가 있는 경우 해당부는 제외하고 구한다.



해설그림 4.3.12 부상에 대한 검토

점성토층에 공동구의 저면이 얇게 근입된 경우(해설그림 4.3.13) $Z_W + h_L \leq Z_B$ 으로, $Z_B - (h_L + Z_W) \leq 1.0\text{m}$ (점성토층 근입깊이가 1.0m이하)이다. 안전측으로 고려하기 위하여 과잉간극수압으로 인한 양압력 U_D 를 작용시켜 부상을 검토한다. U_D 의 σ'_v 는 $Z_W + h_L$ 에서 산정한다. 또한, 점토층에 근입이 1m를 초과하는 경우 부상 검토를 생략해도 된다.

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령



해설그림 4.3.13 공동구 저면이 점성토에 얹혀 근입된 경우

해설식(4.18)의 W_s , Q_s , Q_B 는 해설그림 4.3.14을 참고하여 다음 식과 같이 구할 수 있다. Q_s 산정시 포장과 노상의 전단저항력은 고려하지 않는다.

$$W_s = B \cdot [\gamma_1 \cdot t_1 + \gamma_2 \cdot t_2 + \gamma_{t1}(Z_W - (t_1 + t_2)) + \gamma_{t2}(Z_T - Z_W)] \quad \text{해설식 (4.20)}$$

$$Q_s = 2 \sum_i K_0 \sigma'_{vi} t_i \tan \phi_{si} \quad \text{해설식 (4.21)}$$

$$Q_B = 2 \sum_j K_0 \sigma'_{vj} t_j \tan \delta_j \quad \text{해설식 (4.22)}$$

$$U_s = \gamma_w (Z_B - Z_W) B \quad \text{해설식 (4.23)}$$

여기서, γ_1 : 포장단위중량(kN/m³)

γ_2 : 노상단위중량(kN/m³)

γ_{t1} : 지하수위위 단위중량(kN/m³)

γ_{t2} : 지하수위아래 단위중량(kN/m³)

t_1 : 포장두께(m)

t_2 : 노상두께(m)

t_i : 상재토 i번째 층 두께(m)

t_j : 공동구 측면지층 j번째 층 두께(m)

Z_T : 공동구 상면까지의 깊이(m)

Z_B : 공동구 저면까지의 깊이(m)

Z_W : 지하수위깊이(m)

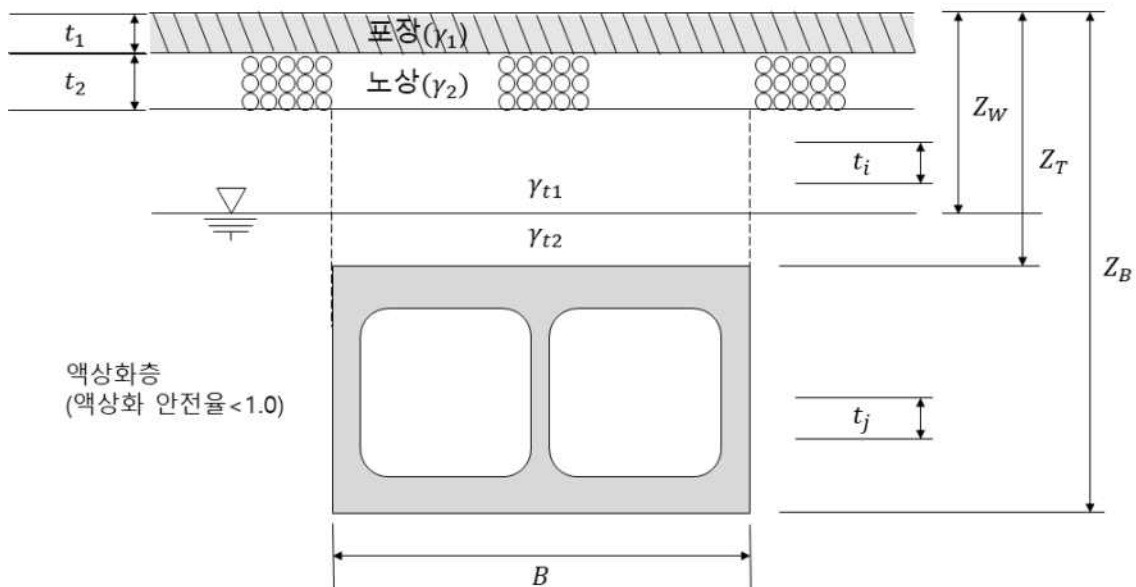
K_0 : 정지토압계수, 일반적으로 0.5로 가정

ϕ_{si} : 상재토 내부마찰각($^\circ$), 액상화안전율 ≤ 1.0 인 경우 $\phi_{si} = 0$

δ_{Bj} : 공동구 벽체의 흙-벽체 마찰각($^\circ$), 액상화안전율 ≤ 1.0 인 경우 $\delta_{si} = 0$,
액상화안전율 > 1.0 인 경우 $\delta_{si} = 2/3\phi_j$

σ'_{vi} : 상재토 i번째 층 중앙의 유효상재응력(kN/m 2)

σ'_{vj} : 공동구 측면 j번째 층 중앙의 유효상재응력(kN/m 2)



해설그림 4.3.14 액상화 발생시 공동구의 부상 검토 지반조건

제5장 내진성능 평가보고서 구성

5.1 문장 및 보고서의 작성

5.1.1 문장

보고서의 문장은 간결하여야 하며 앞 뒤 연결관계가 명확하여야 한다.

5.1.2 보고서

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

5.1.3 편집

편집순서는 다음을 따른다.

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

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

5.2 현황보고서 형식

현황조사는 현장조사 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. 평가

5.4 상세평가 보고서

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

참고문헌

- (1) 건설도서 편집부 (2002), 지하 구조물의 내진설계, 건설도서
- (2) 오진우 (2000), (지중구조물) 내진설계 표준 및 동해설, 과학기술
- (3) 日本道路協會 (1986), 共同構設計指針, 丸善株式會社
- (4) 日本水道協會 (2009), 水道施設耐震工法指針.解説 設計,
- (5) 日本道路協會 (1992), 駐車場設計.施工指針同解説,
- (6) 農林水産省 (2015), 土地改良事業設計指針「耐震設計」,
- (7) 鐵道總合技術研究所 (1999), 鐵道構造物等設計標準.同解説 耐震設計, 丸善株式會社
- (8) 日本土木學會 (1998), 開削トンネルの耐震設計, 丸善株式會社
- (9) Dokainish, M.A. and Subbaraj, K.A. (1988), “Survey of Direct Time-integration Methods in Computational Structural Dynamics-I. Explicit Methods”, Computers and Structures, Vol.32, pp.1371-1386, DOI:10.1016/0045-7949(89)90314-3.
- (10) Dokainish, M.A. and Subbaraj, K.A. (1988), “Survey of Direct Time-integration Methods in Computational Structural Dynamics-II. Implicit Methods”, Computers and Structures, Vol.32, pp.1387-1401, [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(89\)90315-5](https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90315-5)
- (11) Lee, J.S. Appropriate input earthquake motion for the verification of seismic response analysis by geotechnical dynamic centrifuge test. EESK J. Earthquake Eng. 2013;17(5):209-217
- (12) Lee, J.S., Liu, Q.H., Park, H.J. (2019), Effect of Earthquake Motion on The Permanent Displacement of Embankment Slopes, KSCE Journal of Civil Engineering,

In-print.

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

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



부록

부록 A. 내진성능 평가 예제





부록 A

내진성능 평가 예제

A.1 내진성능 예비평가

A.2 응답변위법 (단일 코사인 방식)

A.3 응답변위법 (이중 코사인 방식)

A.4 응답이력 해석

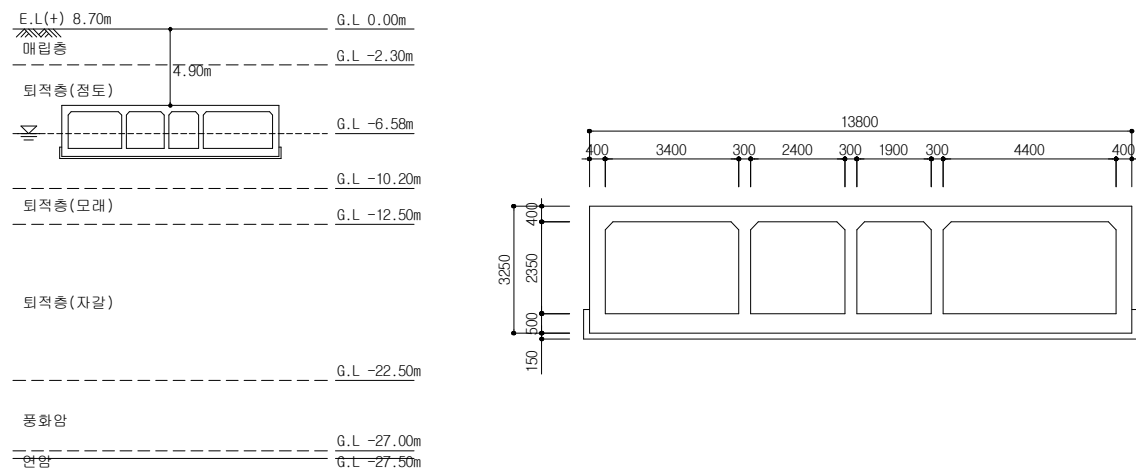
A.1 내진성능 예비평가 예제

A.1.1 일반사항

본 요령 3.2절 자료조사 및 정리'의 절차에 따라 사전자료조사를 실시하며, 그 결과에 따라 예비평가를 실시한다. 본 예제에서 사전자료조사로 얻어진 사항은 다음과 같다.

- (1) 공동구의 설계 : 1996년도
- (2) 공동구의 현 관리인원 : 8명
- (3) 공동구의 총 연장 : 15km
- (4) 최근 정밀안전점검 등급결과 : B등급

예비평가를 위한 예제의 공동구는 지진구역 I, 기반암은 연암으로 지표면 하 27.5m(G.L. - 27.5m)에 위치한다. 토층 평균전단파 속도는 약 313m/s로, 해당지역의 지반분류체계는 S_4 지반(깊고 단단한 지반)으로 분류된다. 본 예제의 공동구가 위치한 지반조건 및 표준단면은 그림 1-1과 같다.



(a) 지반조건 및 공동구의 위치

(b) 공동구 단면도

<그림 1-1> 지반조건 및 단면 제원

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

A.1.2 영향도

(1) 공동구 총연장 (20)

· 예비평가를 위한 공동구의 총 연장은 15km로, 영향도 계산을 위한 계산식에 의하여 아래와 같이 총연장에 의한 계산값을 산출 할 수 있다.

$$TL = \min \left[20 \times \left(\frac{L}{30} \right), 20 \right] = \min \left[20 \times \left(\frac{15}{30} \right), 20 \right] = 10$$

(2) 공동구 관리인원 (20)

· 예비평가를 위한 공동구의 관리인원은 8명으로, 영향도 계산을 위한 계산식에 의하여 아래와 같이 관리인원에 의한 계산값을 산출 할 수 있다.

$$MN = \min \left[20 \times \left(\frac{N}{20} \right), 20 \right] = \min \left[20 \times \left(\frac{8}{20} \right), 20 \right] = 8$$

A.1.3 지진도

(1) 지반등급 (15)

· 예비평가를 위한 공동구의 하부지층 주상도에 근거하여 판정된 지반등급은 S₄등급으로, 지진도 계산을 위한 계산식에 의하여 아래와 같이 지반조건을 고려한 계산값을 산출 할 수 있다.

$$ST = 15 \times \left(\frac{N}{6} \right) = 15 \times \left(\frac{2}{6} \right) = 5$$

(2) 지진구역 (15)

- 예비평가를 위한 공동구가 위치한 지역의 지진구역(I 구역)에 근거하여, 아래와 같이 지반구역을 고려한 지진도를 산출 할 수 있다.

$$SZ=15$$

A.1.4 취약도

(1) 노후정도 (20)

- 예비평가를 위한 공동구의 노후도는 가장 최근 실시된 정밀안전점검 안전등급에 의하여 평가할 수 있다. 예제공동구의 최근 정밀안전점검 안전등급은 'B'등급으로 확인되어 아래와 같이 노후정도에 따른 취약도 기여점수를 평가할 수 있다.

$$DE=5$$

(2) 지하수위 (10)

- 예비평가를 위한 공동구의 지반조사자료 참조결과, 연중 평균지하수위는 공동구 구조물 상, 하단 사이에 위치하여, 지하수위에 따른 취약도는 아래와 같이 평가할 수 있다.

$$WT=5$$

A.1.5 종합평가

예비평가를 위한 공동구의 기초 조사자료에 근거하여 산정된 영향도, 지진도, 취약도의 총합으로 결정된 예비평가지수의 값은 아래와 같으며, 이에 기반하여

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

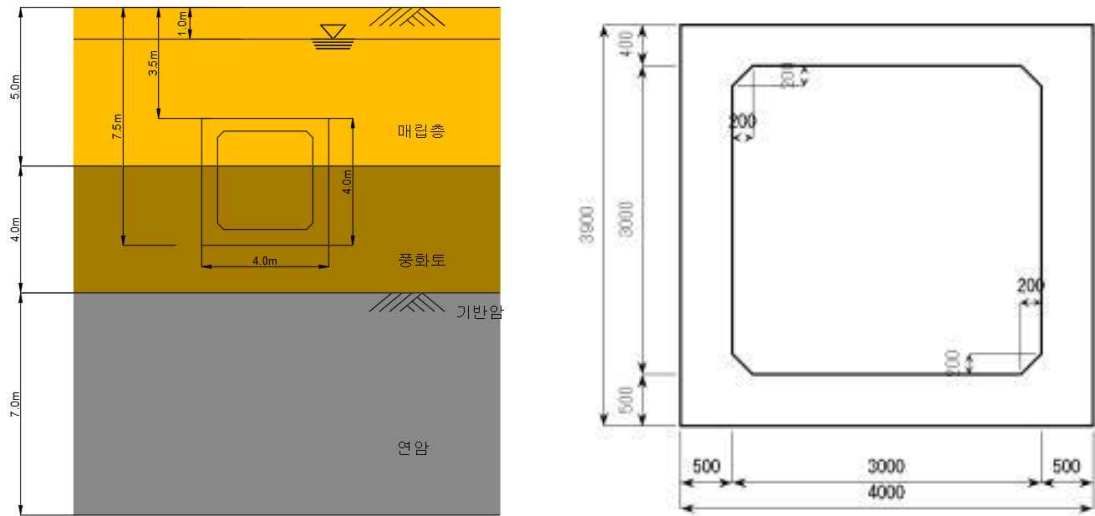
예제공동구의 상세평가 우선순위를 결정할 수 있다.

$$\text{예비평가 지수} = TL + MN + ST + SZ + WT + DE = 10 + 8 + 5 + 15 + 5 + 5 = 48 \leq 100$$

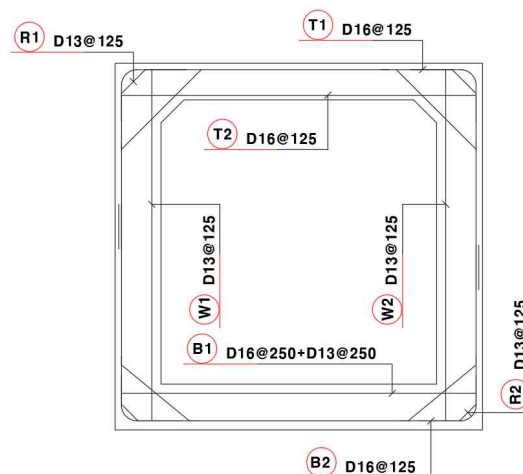
A.2. 응답변위법(단일코사인 방식)

본 예제는 지중변위의 산정시 단일코사인 방식을 적용하는 경우에 대해 다루도록 한다. 평가요령에 따르면 ‘기반면 위의 지층의 깊이별 전단파속도가 유사한 경우 단일층으로 가정하고 단일코사인을 사용할 수 있다.’ 라고 규정하고 있으며 이는 기반면 위의 지층내부에 토사층과 전단파속도의 차이가 큰 풍화암 등이 출현하지 않는 조건에 해당한다.

가. 지반조건 및 단면제원



<그림 2-1> 지반조건 및 단면제원



<그림 2-2> 철근배근도

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

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

<표 2-1> 지반의 물성치

지반 구분	초기전단파속도 V_{si} (m/s)	설계전단파속도* $V_{DSi} = C \times V_{si}$	단위중량 (γ , kN/m ³)	포아송비 ν	전단탄성계수** G_D (kN/m ²)	탄성계수*** E_D (kN/m ²)
매립층	136	108.8	17.7	0.35	21,358.1	57,666.8
풍화토	275	220	19	0.32	93,741.1	247,476.5
연암	1,200	1,200	24	0.28	3,522,935.8	9,018,715.6

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

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

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

공동구 구조물의 철근콘크리트 물성과 부재별 단면특성은 아래와 같다.

<표 2-2> 철근콘크리트의 물성치

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

- 콘크리트 설계기준강도 : $f_{ck} = 24$ MPa

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

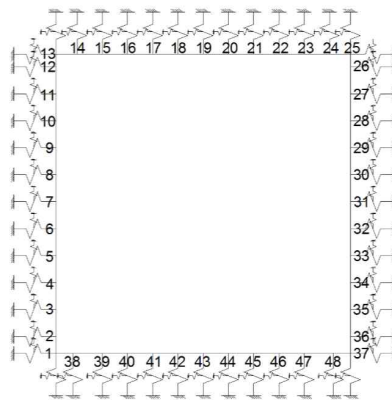
($f_{cu} = f_{ck} + 4$), f_{ck} 가 40MPa이하일때

<표 2-3> 공동구 단면특성

부재구분	종방향 유효폭 B(m)	두께 H (m)	단면적 $A = BH (m^2)$	단면 2차 모멘트 $I = 1/12 \cdot bh^3 (m^4)$
상부 슬래브	1	0.4	0.4	0.00533
측벽	1	0.5	0.5	0.01042
하부 슬래브	1	0.5	0.5	0.01042

나. 응답변위법에 따른 내진평가

1) 유한요소해석모델



<그림 2-3> 유한요소해석모델

2) 지진하중 산정

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

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

① 표층지반의 설계고유주기(T_s) 산정

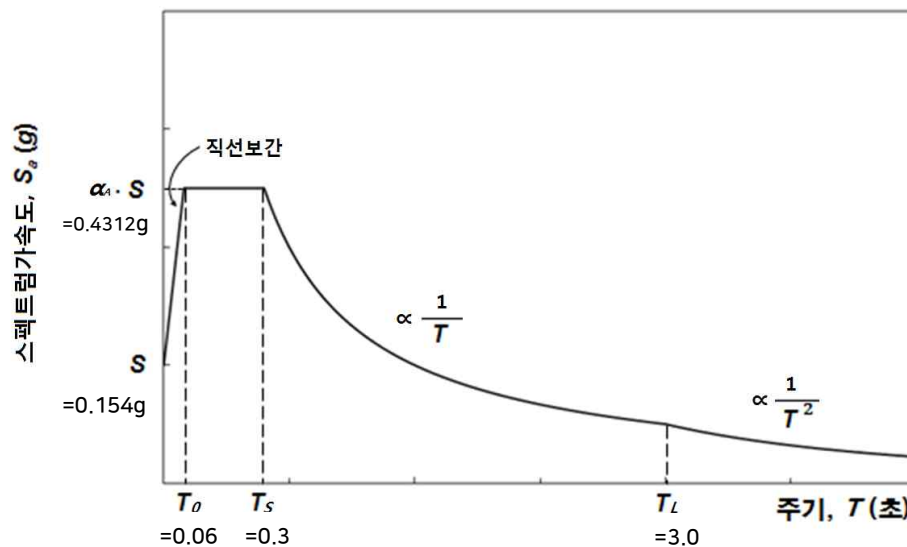
지반조건에 제시된 바와 같이 예제의 기반면 상부지층(표층지반)은 2개의 층으로 구성되며 표층지반의 설계고유주기를 산정하면 다음과 같다. 이때 적용되는 전단파속도는 지반변형에 대한 보정계수 C 를 적용하지 않으며 초기 전단파속도를 적용함에 유의해야 한다.

<표 2-4> 표층지반의 특성치(T_G)와 설계고유주기(T_s)

구분	내용	
표층지반의 특성치	$T_G = \sum(4H_i/V_{Si}),$	
	1	0.147 sec
	2	0.058 sec
	Σ	0.205 sec
표층지반의 설계고유주기	$T_s = 1.25T_G = 0.257 \text{ sec}$	

② 기반면에서의 설계속도 응답스펙트럼(S_v) 산정

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



<그림 2-4> 기반면에서의 설계응답스펙트럼

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

<표 2-5> 감쇠보정계수 C_D

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

표층지반의 설계고유주기가 0.257sec 이므로 감쇠보정계수는 위와 같이 결정되며 기반면에서의 속도응답스펙트럼은 감쇠비를 적용하고 KDS 17 10 00 4.4.2(5)②에 따라 구한 암반지반 지반운동의 가속도 설계응답스펙트럼을 직접 적분하여 구할 수 있다. 이때, 환산식은 아래의 해석식을 이용한다.

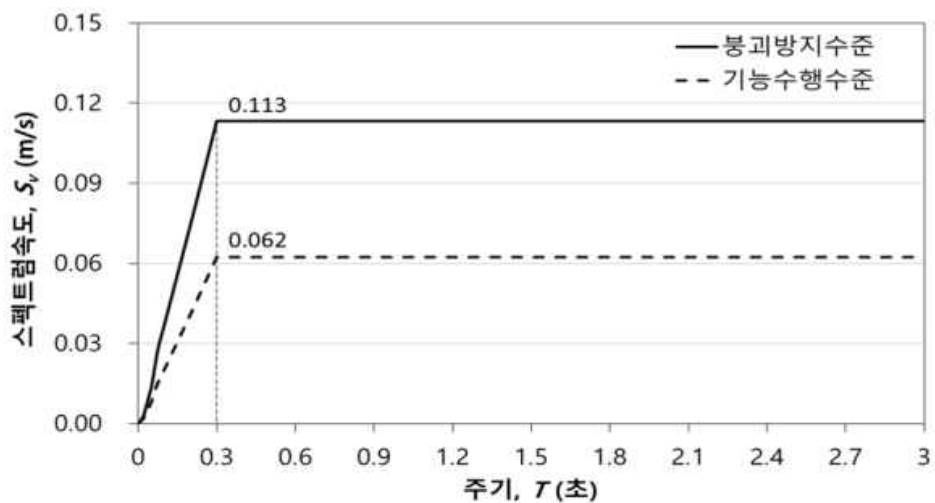
$$S_v = \frac{T}{2\pi} S_a$$

여기서, S_v : 스펙트럼속도 (m/s)
 S_a : 스펙트럼가속도 (m/s²)
 T : 고유주기 (s)

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

<표 2-6> 기반면의 속도응답스펙트럼 S_v

주기(T , sec)	S_v (기능수행수준)	S_v (붕괴방지수준)
$T = 0$	0	0
$0 \leq T \leq T_o(=0.06)$	$T = 0.06$ $S_v = \frac{0.06}{2\pi} (1 + 30 \times 0.06) \times 0.0627 \times 9.81$ $= 0.0164$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.758$ $S_v = 0.0164 \times 0.758 = 0.0124$	$T = 0.06$ $S_v = \frac{0.06}{2\pi} (1 + 30 \times 0.06) \times 0.154 \times 9.81$ $= 0.0404$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.561$ $S_v = 0.0404 \times 0.561 = 0.0227$
$T_o \leq T \leq T_s(=0.3)$	$T = 0.3$ $S_v = \frac{0.3}{2\pi} \times 2.8 \times 0.0627 \times 9.81$ $= 0.0822$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.758$ $S_v = 0.0822 \times 0.758 = 0.062$	$T = 0.3$ $S_v = \frac{0.3}{2\pi} \times 2.8 \times 0.154 \times 9.81$ $= 0.2019$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.561$ $S_v = 0.2019 \times 0.561 = 0.113$
$T_s \leq T \leq T_L(=3.0)$	$T = 3.0$ $S_v = \frac{3.0}{2\pi} \times \frac{0.84}{3} \times 0.0627 \times 9.81$ $= 0.0822$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.758$ $S_v = 0.0822 \times 0.758 = 0.062$	$T = 3.0$ $S_v = \frac{3.0}{2\pi} \times \frac{0.84}{3} \times 0.154 \times 9.81$ $= 0.2019$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.561$ $S_v = 0.2019 \times 0.561 = 0.113$



<그림 2-5> 암반지반 기반면에서의 설계속도응답스펙트럼

표층지반의 속도응답스펙트럼 값은 표층지반의 설계고유주기가 0.257sec 이므로 위 수식에서 다음과 같이 산정한다.

<표 2-7> 성능수준별 기반면 속도응답스펙트럼 값

구분	기능수행수준	붕괴방지수준
표층지반의 설계고유주기	$T_s = 1.25T_G = 0.257\text{sec}$	$T_s = 1.25T_G = 0.257\text{sec}$
기반면 속도응답스펙트럼	$T = 0.257$ $S_v = \frac{0.257}{2\pi} \times 2.8 \times 0.0627 \times 9.81$ $= 0.070$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.758$ $S_v = 0.070 \times 0.758 = 0.0533$	$T = 0.257$ $S_v = \frac{0.257}{2\pi} \times 2.8 \times 0.154 \times 9.81$ $= 0.173$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.561$ $S_v = 0.173 \times 0.561 = 0.0969$

③ 지반반력계수(K_V , K_H , K_{SS} , K_{SB}) 산정

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

<표 2-8> 상판 및 저판의 지반반력계수

구분		기능수행수준 / 붕괴방지수준
매립층	E_D	57,666.8 (kN/m ²)
	k_{v0} , k_{h0}	$E_D/0.3 = 192,222.6$ (kN/m ³)
풍화토	E_D	247,476.5 (kN/m ²)
	k_{v0} , k_{h0}	$E_D/0.3 = 824,921.5$ (kN/m ³)

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

<표 2-9> 측벽의 지반반력계수

구 분		기능수행수준 / 붕괴방지수준		비 고
상부 슬래브 (매 립층)	K _V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 27,548.7 \text{ kN/m}^3$		B _v =4.0m
	K _{SB}	$= K_v/3.5 = 7,871.0 \text{ kN/m}^3$		
벽 체 (매 립층)	K _H	$= k_{h0}(B_h/0.3)^{-3/4} = 27,548.7 \text{ kN/m}^3$		B _h =4.0m
	K _{SS}	$= K_H/3.5 = 7,871.0 \text{ kN/m}^3$		
벽 체 (풍 화토)	K _H	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 118,224.8 \text{ kN/m}^3$		
	K _{SS}	$= K_v/3.5 = 88,778.5 \text{ kN/m}^3$		
저 판 (풍 화토)	K _V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 118,224.8 \text{ kN/m}^3$		B _v =4.0m
	K _{SB}	$= K_v/3.5 = 88,778.5 \text{ kN/m}^3$		

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

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

<표 2-10> 저판의 스프링계수

저판 절점		A_i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			연직 K_{Vi}^* (kN/m/m)	전단 K_{SBi}^{**} (kN/m/m)
1	37	0.35	41,379	11,822
38	48	0.275	32,512	9,289
39	47	0.325	38,423	10,978
10~46		0.3	35,467	10,134

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

<표 2-11> 상판의 스프링계수

상판 절점		A _i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			연직 K _{V_i} [*] (kN/m/m)	전단 K _{SB_i} ^{**} (kN/m/m)
13	25	0.375	10,331	2,952
14	24	0.275	7,576	2,165
15~23		0.3	8,265	2,361

* K_{V_i} = A_i × K_V, ** K_{SB_i} = A_i × K_{SB}

<표 2-12> 측벽의 스프링계수

측벽 절점		A _i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			수평 K _{H_i} [*] (kN/m/m)	전단 K _{SS_i} ^{**} (kN/m/m)
13	25	0.28	7,575.9	2,164.5
12	26	0.24	6,473.9	1,849.7
11,10	27,28	0.32	8,815.6	2,518.7
9	29	0.26	7,024.9	2,007.1
8	30	0.32	23,323.8	6,663.9
7	31	0.39	45,516.5	13,004.73
6~3	32~35	0.32	37,831.9	10,809.12
2	36	0.26	30,738.4	8,782.41
1	37	0.35	26,600.6	7,600.17

* K_{H_i} = A_i × K_H, ** K_{SS_i} = A_i × K_{SS}

⑤ 지반변위(U_h) 산정

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

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

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

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

T_G : 표층지반의 특성값, $\sum(4H_i/V_{si})$

T_s : 표층지반의 고유주기, $1.25T_G$

V_{si} : i층 지반의 평균전단파속도(m/s)

H_i : i층지반의 두께(m)

H_s : 표층지반의 두께(m)

<표 2-13> 지반변위(U_h)

심도(m)	지반변위($U_h(x)$, m)*		비고
	기능수행	붕괴방지	
3.50	0.0022714	0.0041251	상부슬래브 상면
3.70	0.0022145	0.0040218	상부슬래브
3.85	0.0021701	0.0039411	
4.17	0.0020703	0.0037599	
4.49	0.0019641	0.0035671	
4.81	0.0018518	0.0033631	
5.00	0.0017824	0.0032369	
5.45	0.0016102	0.0029243	
5.77	0.0014817	0.0026909	
6.09	0.0013485	0.0024491	
6.41	0.0012112	0.0021996	
6.73	0.0010701	0.0019433	
7.05	0.0009256	0.0016810	
7.25	0.0008338	0.0015143	하부슬래브
7.5	0.0007177	0.0013034	하부슬래브 저면

⑥ 지진토압($P_{(z)}$) 산정

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

으로 산정하여 적용한다.

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

<표 2-14> 상판 상면의 지진토압($p_{(0)}$)

심도 (m)	상대변위(m)		측벽지진토압 ($p_{(0)}$, kN/m)	
	기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
3.5	0.0015537	0.0028217	12.229	22.210

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

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

<표 2-15> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

심도 (m)	층벽 절점	상대변위(m)*		층벽지진토폰 ($P_{(z)}$, kN/m)	
		기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
3.70	32	0.0014968	0.0027184	41.24	74.89
3.85	63	0.0014524	0.0026377	40.01	72.67
4.17	64	0.0013527	0.0024566	37.26	67.67
4.49	65	0.0012465	0.0022637	34.34	62.36
4.81	66	0.0011341	0.0020597	31.24	56.74
5.00	67	0.0010647	0.0019336	77.60	140.93
5.45	68	0.0008925	0.0016209	105.52	191.64
5.77	69	0.0007640	0.0013875	90.33	164.04
6.09	70	0.0006309	0.0011457	74.58	135.45
6.41	71	0.0004935	0.0008963	58.35	105.96
6.73	72	0.0003524	0.0006400	41.66	75.66
7.05	73	0.0002079	0.0003776	24.58	44.64
7.25	74	0.0001161	0.0002109	13.73	24.94

⑦ 주면전단력(τ) 산정

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

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

<표 2-16> 주면전단력(τ)

구분	내 용	주면전단력(τ , kN/m)	
		기능수행	붕괴방지
상판	τ_U	5.929	10.767
저판	τ_B	43.821	79.583
측벽	$\tau_S = \frac{\tau_U + \tau_B}{2}$	24.875	45.175

⑧ 관성력(f) 산정

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

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

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

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

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

<표 2-17> 지표에서의 설계수평가속도(K_h) 값

구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도	$V_{0avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	$135 \times 5/9 = 75.6 \text{ m/sec}$	
	2	$275 \times 4/9 = 122.2 \text{ m/sec}$	
	Σ	$197.78 \text{ m/sec} \Rightarrow S_3 \text{ 지반}$	
지반증폭계수	$F_a = 1.7(S \leq 0.1), 1.5(S = 0.2), 1.3(S = 0.3)$ 중간값은 직선보간		S_3 지반
기반면 설계수평가속도(S)	기능수행수준 : $0.0627 \rightarrow F_a = 1.7$ 붕괴방지수준 : $0.154 \rightarrow F_a = 1.592$ (직선보간)		
지표면 설계수평가속도(K_h)	$K_h = F_a \cdot S = 1.7 \times 0.0627 = 0.1066$ (기능수행수준) $K_h = F_a \cdot S = 1.592 \times 0.154 = 0.2452$ (붕괴방지수준)		

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

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

<표 2-18> 구조물 깊이에 따른 설계수평가속도(K_h) 값

구분	기능수행수준	붕괴방지수준
기반면에서의 설계수평가속도(S)	0.0627	0.154
지표면 설계수평가속도(K_h)	0.1066	0.2452
깊이(z)의 직선 보간식 C_u	$K_{hi} = K_h \cdot (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$ $= 0.1066(1 - 0.045758z)$	$K_{hi} = K_h \cdot (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$ $= 0.2452(1 - 0.041327z)$

<표 2-19> 심도에 따른 설계수평가속도(Kh)

구분	기능수행수준	붕괴방지수준	깊이 (z)
상부슬래브	$K_{hi} = 0.0885$	$K_{hi} = 0.2077$	3.7
측벽 중앙	$K_{hi} = 0.0788$	$K_{hi} = 0.1874$	5.7
하부슬래브	$K_{hi} = 0.0712$	$K_{hi} = 0.1717$	7.25

<표 2-20> 관성력(f)

구분	단위중량 (kN/m ³)	단면적 A = BH (m ²)	설계수평가속도(Kh)		관성력(kN/m)	
			기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
상부슬래브	23	0.4	0.0885	0.2077	0.8146	1.9107
측벽 상단부	23	0.5	0.0885	0.2077	1.0183	2.3884
측벽중앙부	23	0.5	0.0788	0.1874	0.9061	2.1554
측벽 하단부 하부슬래브	23	0.5	0.0712	0.1717	0.8192	1.9749

3) 하중조합

본 해석에서 하중조합은 아래와 같이 적용한다. 여기서 주의할 사항은 지진하중에 대한 해석과 지진하중을 제외한 상시하중에 대한 해석을 별도로 수행하여야 한다는 점이며 선형 탄성해석이므로 이 두 결과를 조합하여 단면력을 산출하여야 한다.

① 기능수행수준

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

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

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중 (상관지진토압+측벽지진토압+주면전단력+관성력)

S : 적설하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

H : 토압 및 수압

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

② 붕괴방지수준

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

여기서, D : 고정하중

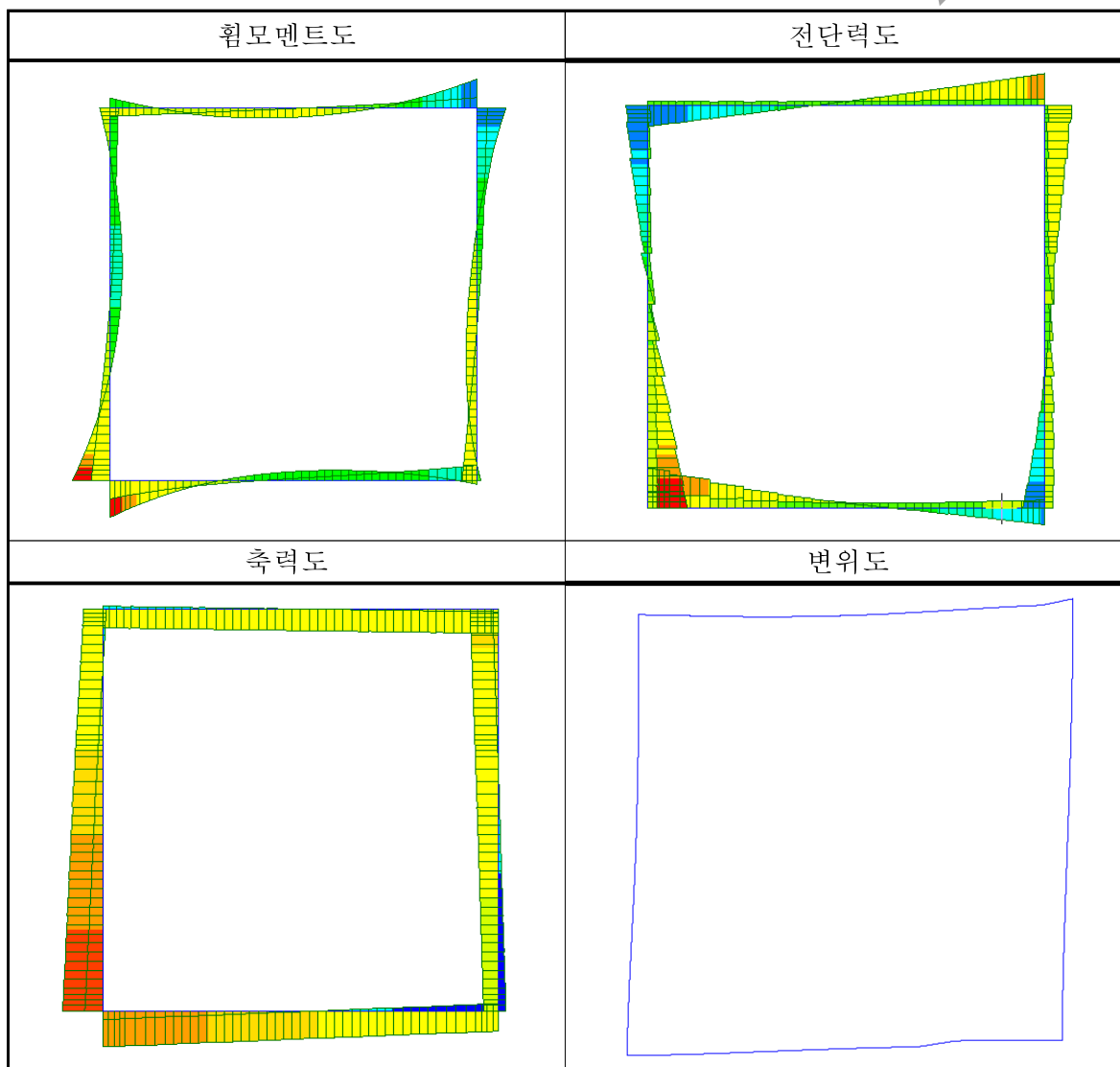
E : 지진하중 (=상판지진토압 + 측벽지진토압 + 주면전단력 + 관성력)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

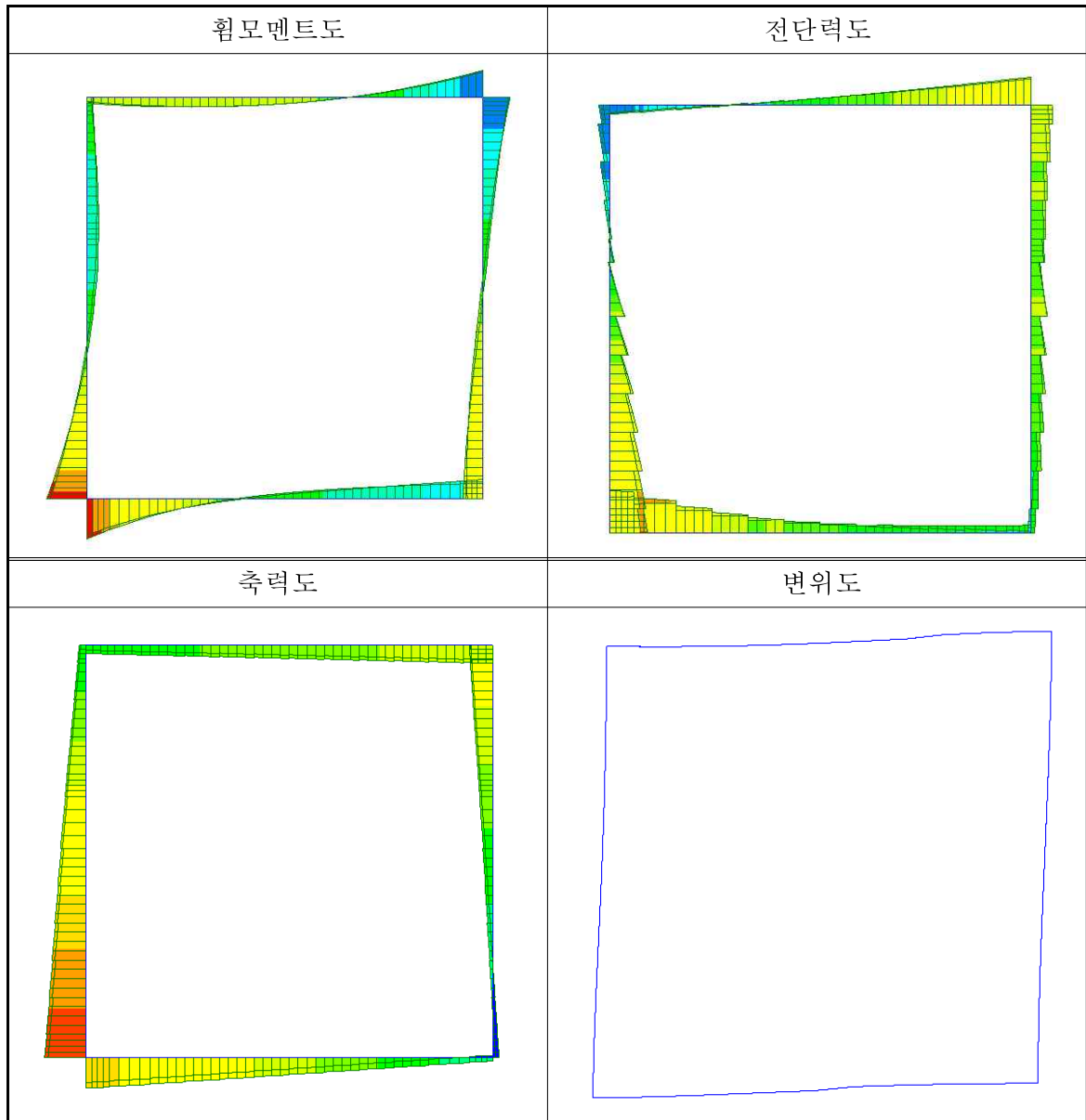
H : 토압 및 수압

4) 해석결과

① 기능수행수준



② 붕괴방지수준



5) 단면검토

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

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

① 기능수행수준

구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
상부 슬래브	지점부	116.8	102.3	O.K	297.7	182.3	O.K
	중양부	116.8	53.4	O.K	183.7	28.4	O.K
벽 체	상부 지점부	226.2	125.2	O.K	404.3	162.2	O.K
	중양부	306.0	67.3	O.K	328.0	66.5	O.K
	하부 지점부	213.6	144.8	O.K	401.4	243.2	O.K
하부 슬래브	지점부	157.3	144.1	O.K	397.0	223.5	O.K
	중양부	129.5	52.8	O.K	244.9	34.6	O.K

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

② 붕괴방지수행수준

구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
상부 슬래브	지점부	116.8	114.8	O.K	297.7	150.2	O.K
	중양부	116.8	53.5	O.K	183.7	0.4	O.K
벽 체	상부 지점부	203.1	136.6	O.K	403.1	123.4	O.K
	중양부	218.4	67.4	O.K	326.0	30.4	O.K
	하부 지점부	251.5	185.1	O.K	406.8	231.4	O.K
하부 슬래브	지점부	157.3	177.6	N.G	397.0	226.3	O.K
	중양부	129.5	49.5	O.K	244.9	61.4	O.K

붕괴방지수준의 내진성능 검토결과 지진시 발생단면력은 일부구간에서 설계시의 내하력을 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 경우 본 요령에 언급된 바와 같이 구조물의 소성변형에 따른 거동을 응답수정계수(R, 연성계수)를 적용하여 평가할 수 있다. 다만, 응답수정계수를 적용하기 위해서는 내진설계

구조상세(KDS 14 20 80)를 만족하도록 배근되어야 한다.

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

응답수정계수 적용시의 하중조합은 다음과 같다.

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

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중(=상판지진토압+측벽지진토압+주면전단력+관성력)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

H : 토압 및 수압

R : 응답수정계수

③ 붕괴방지수행수준 (응답수정계수 적용)

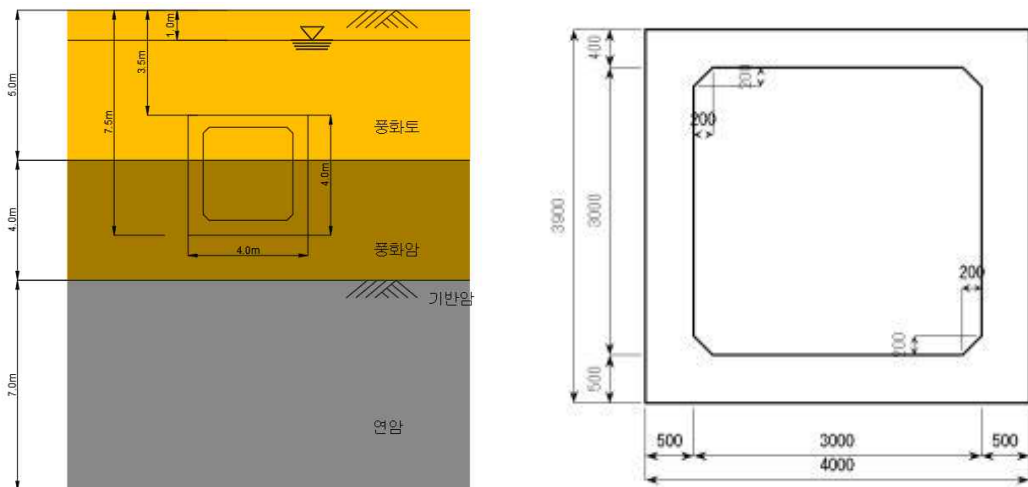
구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
상부 슬래브	지점부	116.8	64.1	O.K	297.7	136.9	O.K
	중양부	116.8	36.1	O.K	183.7	17.8	O.K
벽 체	상부 지점부	228.3	79.4	O.K	401.7	101.7	O.K
	중양부	362.8	37.2	O.K	325.8	38.9	O.K
	하부 지점부	271.2	92.7	O.K	402.9	152.5	O.K
하부 슬래브	지점부	157.3	90.3	O.K	397.0	146.4	O.K
	중양부	129.5	37.8	O.K	244.9	19.5	O.K

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

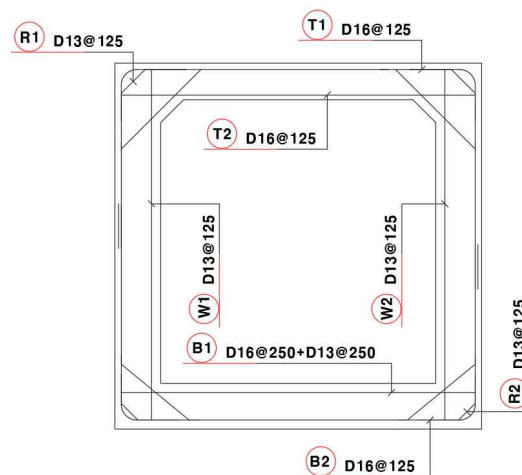
A.3. 응답변위법(이중코사인 방식)

본 예제는 지중변위의 산정시 이중코사인 방식을 적용하는 경우에 대해 다루도록 한다. 평가요령에 따르면 ‘기반면 위의 지층내부에 풍화암 또는 연암이 출현하여 표층지반에 전단파속도가 2개의 층으로 확연한 구분이 생기는 경우, 2개의 층으로 구분하고 이중코사인을 적용한다.’ 라고 규정하고 있으며 이는 기반면 위의 지층내부에 토사층과 전단파속도의 차이가 큰 풍화암 등이 출현하는 조건에 해당한다.

가. 지반조건 및 단면제원



<그림 3-1> 지반조건 및 단면제원



<그림 3-2> 철근배근도

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

<표 3-1> 지반의 물성치

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

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

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

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

공동구 구조물의 철근콘크리트 물성과 부재별 단면특성은 아래와 같다.

<표 3-2> 철근콘크리트의 물성치

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

- 콘크리트 설계기준강도 : $f_{ck} = 24$ MPa

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

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

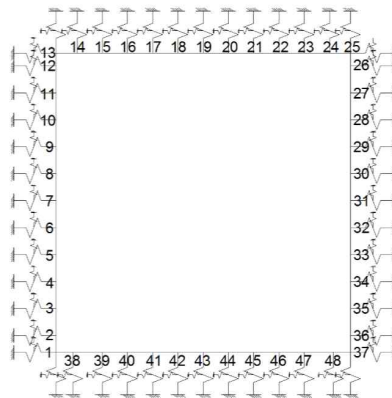
기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

<표 3-3> 공동구 단면특성

부재구분	종방향 유효폭 B(m)	두께 H(m)	단면적 $A = BH(m^2)$	단면 2차 모멘트 $I = 1/12 \cdot bh^3(m^4)$
상부 슬래브	1	0.4	0.4	0.00533
측벽	1	0.5	0.5	0.01042
하부 슬래브	1	0.5	0.5	0.01042

나. 응답변위법에 따른 내진평가

1) 유한요소해석모델



<그림 3-3> 유한요소해석모델

2) 지진하중 산정

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

① 표층지반의 설계고유주기(T_s) 산정

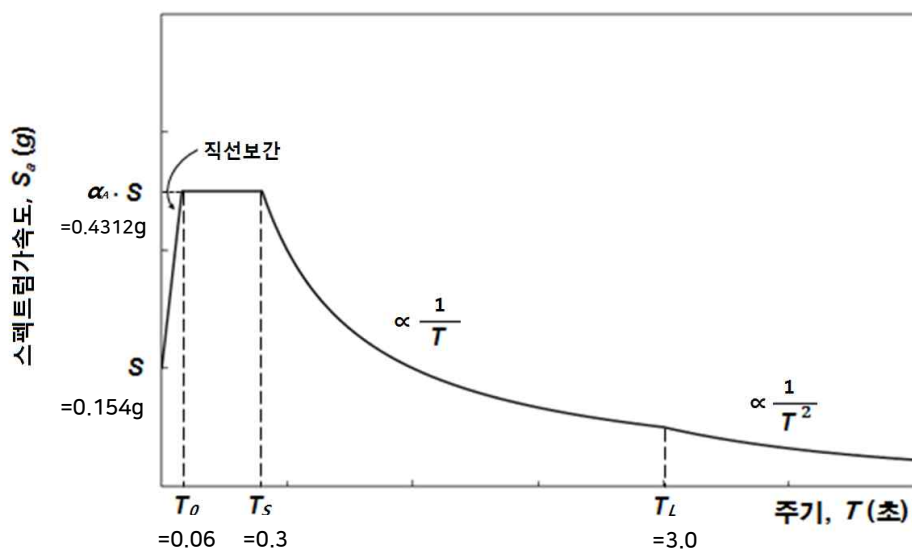
지반조건에 제시된 바와 같이 예제의 기반면 상부지층(표층지반)은 2개의 층으로 구성되며 표층지반의 설계고유주기를 산정하면 다음과 같다. 이때 적용되는 전단파속도는 지반변형에 대한 보정계수 C 를 적용하지 않으며 초기 전단파속도를 적용함에 유의해야 한다.

<표 3-4> 표층지반의 특성치(T_G)와 설계고유주기(T_s)

구분	내용	
표층지반의 특성치	$T_G = \sum(4H_i/V_{Si}),$	
	1	0.073 sec
	2	0.032 sec
	Σ	0.105 sec
표층지반의 설계고유주기	$T_s = 1.25T_G = 0.131 \text{ sec}$	

② 기반면에서의 설계속도 응답스펙트럼(S_v) 산정

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



<그림 3-4> 기반면에서의 설계응답스펙트럼

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

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

<표 3-5> 감쇠보정계수 C_D

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

표층지반의 설계고유주기가 0.131sec 이므로 감쇠보정계수는 위와 같이 결정되며 기반면에서의 속도응답스펙트럼은 감쇠비를 적용하고 KDS 17 10 00 4.4.2(5)②에 따라 구한 암반지반 지반운동의 가속도 설계응답스펙트럼을 직접 적분하여 구할 수 있다. 이때, 환산식은 아래의 해석식을 이용한다.

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

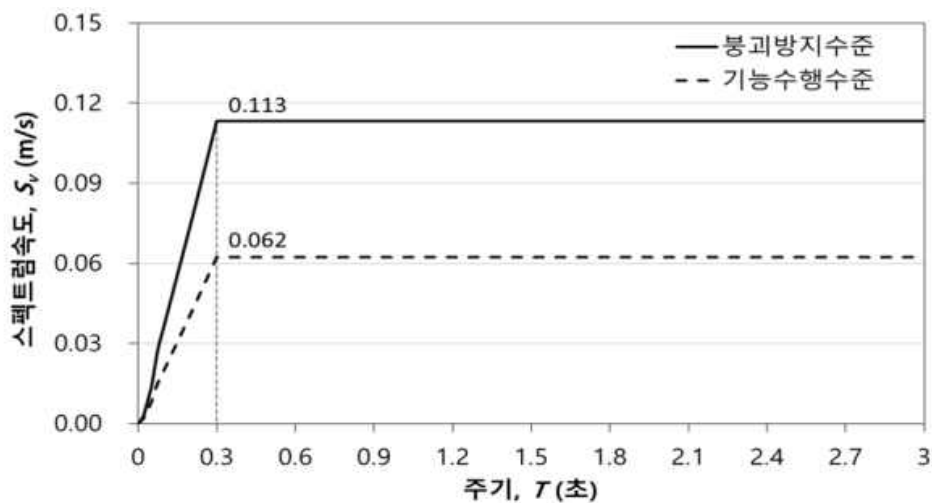
여기서, S_v : 스펙트럼속도 (m/s)

S_a : 스펙트럼가속도 (m/s^2)

T : 고유주기 (s)

<표 3-6> 기반면의 속도응답스펙트럼 S_v

주기 (T , sec)	S_v (기능수행수준)	S_v (붕괴방지수준)
$T = 0$	0	0
$0 \leq T \leq T_o(=0.06)$	$T = 0.06$ $S_v = \frac{0.06}{2\pi}(1 + 30 \times 0.06) \times 0.0627 \times 9.81$ $= 0.0164$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.758$ $S_v = 0.0164 \times 0.758 = 0.0124$	$T = 0.06$ $S_v = \frac{0.06}{2\pi}(1 + 30 \times 0.06) \times 0.154 \times 9.81$ $= 0.0404$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.561$ $S_v = 0.0404 \times 0.561 = 0.0227$
$T_o \leq T \leq T_s(=0.3)$	$T = 0.3$ $S_v = \frac{0.3}{2\pi} \times 2.8 \times 0.0627 \times 9.81$ $= 0.0822$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.758$ $S_v = 0.0822 \times 0.758 = 0.062$	$T = 0.3$ $S_v = \frac{0.3}{2\pi} \times 2.8 \times 0.154 \times 9.81$ $= 0.2019$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.561$ $S_v = 0.2019 \times 0.561 = 0.113$
$T_s \leq T \leq T_L(=3.0)$	$T = 3.0$ $S_v = \frac{3.0}{2\pi} \times \frac{0.84}{3} \times 0.0627 \times 9.81$ $= 0.0822$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.758$ $S_v = 0.0822 \times 0.758 = 0.062$	$T = 3.0$ $S_v = \frac{3.0}{2\pi} \times \frac{0.84}{3} \times 0.154 \times 9.81$ $= 0.2019$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.561$ $S_v = 0.2019 \times 0.561 = 0.113$



<그림 3-5> 암반지반 기반면에서의 설계속도응답스펙트럼

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

표층지반의 속도응답스펙트럼 값은 표층지반의 설계고유주기가 0.131sec 이므로 위 수식에서 다음과 같이 산정한다.

<표 3-7> 성능수준별 기반면 속도응답스펙트럼 값

구분	기능수행수준	붕괴방지수준
표층지반의 설계고유주기	$T_s = 1.25T_G = 0.131\text{sec}$	$T_s = 1.25T_G = 0.131\text{sec}$
기반면 속도응답스펙트럼	$T = 0.131$ $S_v = \frac{0.131}{2\pi} \times 2.8 \times 0.0627 \times 9.81$ $= 0.036$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.758$ $S_v = 0.036 \times 0.758 = 0.0272$	$T = 0.131$ $S_v = \frac{0.131}{2\pi} \times 2.8 \times 0.154 \times 9.81$ $= 0.088$ 감쇠보정계수 적용 $C_D = 0.561$ $S_v = 0.088 \times 0.561 = 0.0494$

③ 지반반력계수(K_v , K_H , K_{SS} , K_{SB}) 산정

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

<표 3-8> 상판 및 저판의 지반반력계수

구분		기능수행수준 / 붕괴방지수준
풍화토	E_D	247,476.5 (kN/m ²)
	k_{v0} , k_{h0}	$E_D/0.3 = 824,921.5$ (kN/m ³)
풍화암	E_D	1,391,437.3 (kN/m ²)
	k_{v0} , k_{h0}	$E_D/0.3 = 4,638,124.4$ (kN/m ³)

<표 3-9> 측벽의 지반반력계수

구 분		기능수행수준 / 붕괴방지수준	비 고
상부 슬래브 (풍화토)	K_V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 118,224.8 \text{ kN/m}^3$	$B_v=4.0\text{m}$
	K_{SB}	$= K_V/3.5 = 33,778.5 \text{ kN/m}^3$	
벽 체 (풍화토)	K_H	$= k_{h0}(B_h/0.3)^{-3/4} = 118,224.8 \text{ kN/m}^3$	$B_h=4.0\text{m}$
	K_{SS}	$= K_H/3.5 = 33,778.5 \text{ kN/m}^3$	
벽 체 (풍화암)	K_H	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 664,719.4 \text{ kN/m}^3$	$B_v=4.0\text{m}$
	K_{SS}	$= K_V/3.5 = 189,919.8 \text{ kN/m}^3$	
저 판 (풍화암)	K_V	$= k_{v0}(B_v/0.3)^{-3/4} = 664,719.4 \text{ kN/m}^3$	$B_v=4.0\text{m}$
	K_{SB}	$= K_V/3.5 = 189,919.8 \text{ kN/m}^3$	

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

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

<표 3-10> 저판의 스프링계수

저판 절점		A_i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			연직 K_{Vi}^* (kN/m/m)	전단 K_{SBi}^{**} (kN/m/m)
1	37	0.35	232,652	66,472
38	48	0.275	182,798	52,228
39	47	0.325	216,034	61,724
10~46		0.3	199,416	56,976

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

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

<표 3-11> 상판의 스프링계수

상판 절점		A _i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			연직 K _{Vi} [*] (kN/m/m)	전단 K _{SBi} ^{**} (kN/m/m)
13	25	0.375	44,334	12,667
14	24	0.275	32,512	9,289
15~23		0.3	35,467	10,134

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

<표 3-12> 측벽의 스프링계수

측벽 절점		A _i (m)	기능수행수준 / 붕괴방지수준	
			수평 K _{Hi} [*] (kN/m/m)	전단 K _{SSi} ^{**} (kN/m/m)
13	25	0.28	32,511.8	9,289.1
12	26	0.24	27,782.8	7,938.0
11,10	27,28	0.32	37,831.9	10,809.1
9	29	0.26	30,147.3	8,613.5
8	30	0.32	125,271.1	35,791.7
7	31	0.39	255,917.0	73,119.1
6~3	32~35	0.32	212,710.	60,774.3
2	36	0.26	172,827.0	49,379.15
1	37	0.35	149,561.9	42,731.96

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

⑤ 지반변위(U_h) 산정

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

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

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

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

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

T_s : 표층지반의 고유주기, $1.25T_G$

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

H_1, H_2 : 제 1층, 제 2층 지반의 두께(m)

H_s : 전체 토층지반의 두께(m)

ω_0 : 지반의 고유진동수, 위식에서 시행착오법으로 산정

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

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

<표 3-13> 지반변위(U_h)

심도(m)	지반변위($U_h(x)$, m)*		비고
	기능수행	붕괴방지	
3.50	0.0004552	0.0008268	상부슬래브 상면
3.70	0.0004262	0.0007741	상부슬래브
3.85	0.0004037	0.0007332	
4.17	0.0003538	0.0006426	
4.49	0.0003016	0.0005477	
4.81	0.0002474	0.0004492	
5.00	0.0002144	0.0003893	
5.45	0.0001924	0.0003494	
5.77	0.0001763	0.0003202	
6.09	0.0001599	0.0002904	
6.41	0.0001431	0.0002599	
6.73	0.0001261	0.0002290	
7.05	0.0001088	0.0001976	
7.25	0.0000979	0.0001777	하부슬래브
7.5	0.0000841	0.0001527	하부슬래브 저면

⑥ 지진토폰($P_{(z)}$) 산정

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

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

<표 3-14> 상판 상면의 지진토폰($p_{(0)}$)

심도 (m)	상대변위(m)		측벽지진토폰 ($p_{(0)}$, kN/m)	
	기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
3.5	0.0003711	0.0006740	12.536	22.767

부록 A. 내진성능 예비평가 예제

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

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

<표 3-15> 측벽지진토압($P_{(z)}$)

심도 (m)	측벽 절점	상대변위(m)*		측벽지진토압 ($P_{(z)}$, kN/m)	
		기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
3.70	32	0.0003421	0.0006213	40.45	73.45
3.85	63	0.0003196	0.0005805	37.79	68.62
4.17	64	0.0002697	0.0004898	31.89	57.91
4.49	65	0.0002175	0.0003950	25.71	46.69
4.81	66	0.0001633	0.0002965	19.30	35.05
5.00	67	0.0001303	0.0002366	50.99	92.61
5.45	68	0.0001083	0.0001967	71.99	130.74
5.77	69	0.0000922	0.0001675	61.30	111.32
6.09	70	0.0000758	0.0001376	50.37	91.48
6.41	71	0.0000590	0.0001072	39.23	71.25
6.73	72	0.0000420	0.0000762	27.90	50.67
7.05	73	0.0000247	0.0000448	16.41	29.79
7.25	74	0.0000138	0.0000250	9.15	16.61

⑦ 주면전단력(τ) 산정

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

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

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

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

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

<표 3-16> 주면전단력(τ)

구분	내 용	주면전단력(τ , kN/m)	
		기능수행	붕괴방지
상판	τ_U	13.355	24.218
저판	τ_B	29.568	53.698
측벽	$\tau_S = \frac{\tau_U + \tau_B}{2}$	21.451	38.958

⑧ 관성력(f) 산정

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

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

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

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

<표 3-17> 지표에서의 설계수평가속도(K_h) 값

구분	내 용		비 고
표층지반의 평균전단파속도	$V_{0avg} = \sum(V_{0i} \cdot H_i/H)$		
	1	$275 \times 5/9 = 152.8 \text{ m/sec}$	
	2	$500 \times 4/9 = 222.2 \text{ m/sec}$	
	Σ	$375.0 \text{ m/sec} \Rightarrow S_2 \text{ 지반}$	
지반증폭계수	$F_a = 1.4(S \leq 0.1), 1.4(S=0.2), 1.3(S=0.3)$ 중간값은 직선보간		S_2 지반
기반면 설계수평가속도(S)	기능수행수준 : $0.0627 \rightarrow F_a = 1.4$ 붕괴방지수준 : $0.154 \rightarrow F_a = 1.4$		
지표면 설계수평가속도(K_h)	$K_h = F_a \cdot S = 1.4 \times 0.0627 = 0.0878$ (기능수행수준) $K_h = F_a \cdot S = 1.4 \times 0.154 = 0.2156$ (붕괴방지수준)		

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

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

<표 3-18> 구조물 깊이에 따른 설계수평가속도(K_h) 값

구분	기능수행수준	붕괴방지수준
기반면에서의 설계수평가속도(S)	0.0627	0.154
지표면 설계수평가속도(K_h)	0.0878	0.2156
깊이(z)의 직선 보간식 C_u	$K_{hi} = K_h \cdot (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$ $= 0.0878(1 - 0.031764z)$	$K_{hi} = K_h \cdot (1 - \frac{K_h - S}{H \cdot K_h} z)$ $= 0.2156(1 - 0.031746z)$

<표 3-19> 심도에 따른 설계수평가속도(K_h)

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

구분	기능수행수준	붕괴방지수준	깊이 (z)
상부슬래브	$K_{hi} = 0.0775$	$K_{hi} = 0.1903$	3.7
측벽 중앙	$K_{hi} = 0.0719$	$K_{hi} = 0.1766$	5.7
하부슬래브	$K_{hi} = 0.0676$	$K_{hi} = 0.1660$	7.25

<표 3-20> 관성력(f)

구분	단위중량 (kN/m ³)	단면적 $A = BH$ (m ²)	설계수평가속도(Kh)		관성력(kN/m)	
			기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
상부슬래브	23	0.4	0.0775	0.1903	0.7127	1.7505
측벽 상단부	23	0.5	0.0775	0.1903	0.8909	2.1882
측벽 중앙부	23	0.5	0.0719	0.1766	0.8268	2.0307
측벽 하단부 하부슬래브	23	0.5	0.0676	0.1660	0.7771	1.9087

3) 하중조합

본 해석에서 하중조합은 아래와 같이 적용한다. 여기서 주의 할 사항은 지진하중에 대한 해석과 지진하중을 제외한 상시하중에 대한 해석을 별도로 수행하여야 한다는 점이며 선형 탄성해석이므로 이 두 결과를 조합하여 단면력을 산출하여야 한다.

① 기능수행수준

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

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

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중 (상관지진토압+측벽지진토압+주면전단력+관성력)

S : 적설하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

H : 토압 및 수압

② 붕괴방지수준

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

여기서, D : 고정하중

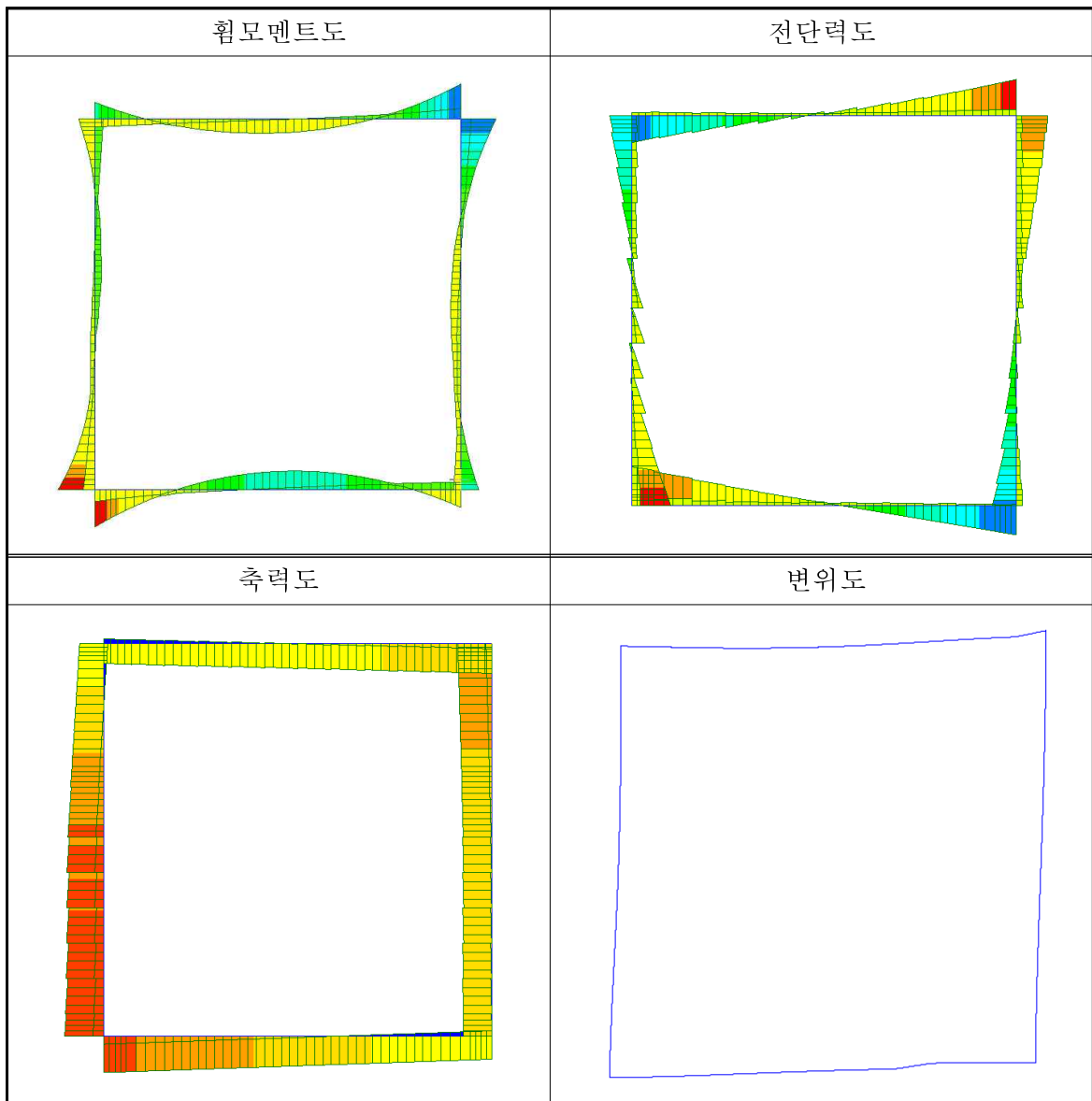
E : 지진하중(=상판지진토압+측벽지진토압+주면전단력+관성력)

L : 활하중 (본 예제에서는 해당사항 없음)

H : 토압 및 수압

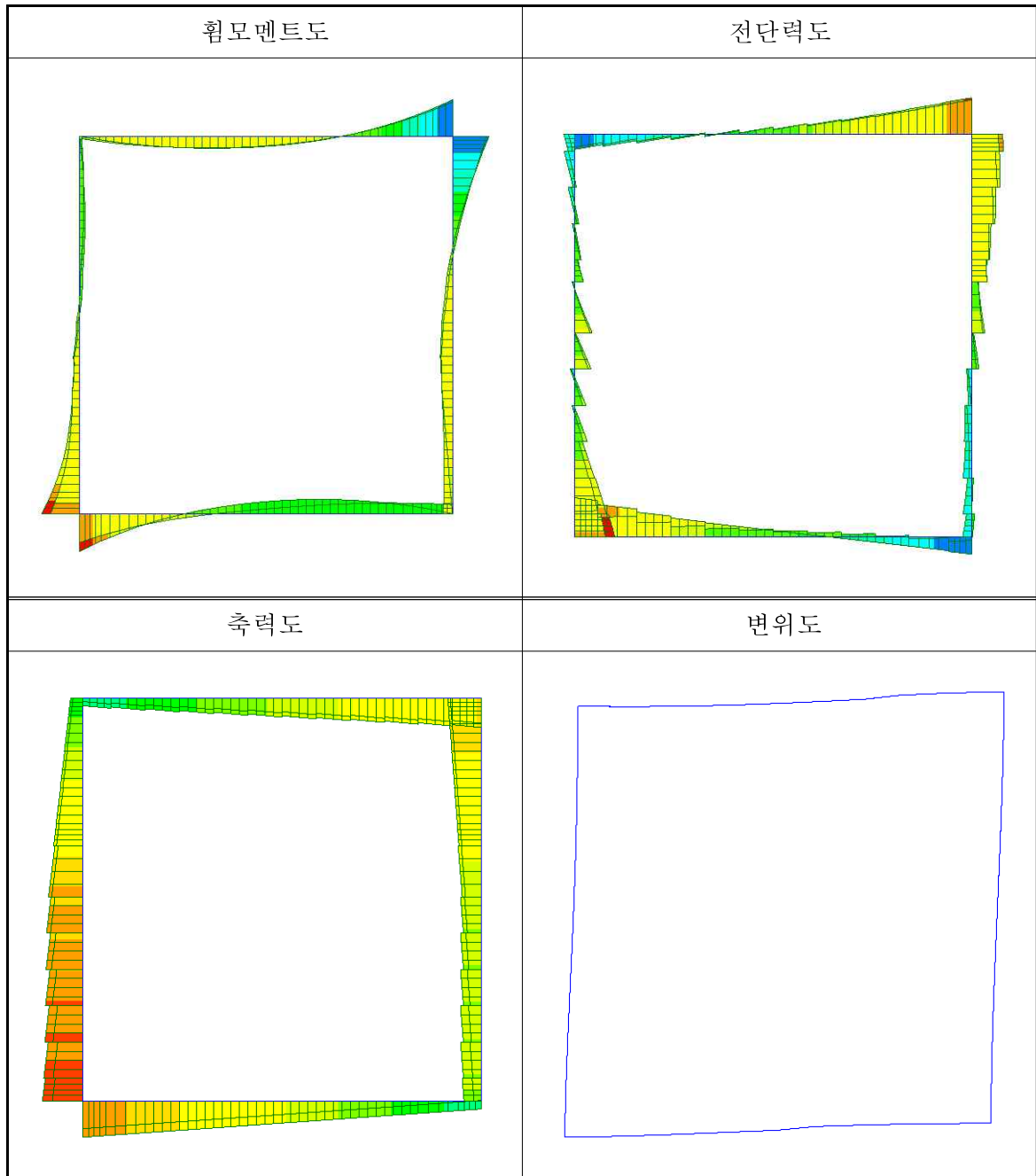
4) 해석결과

① 기능수행수준



기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

② 붕괴방지수준



5) 단면검토

해석결과에의 분석은 강도설계법에 따라 수행한다. 기능수행수준의 내진성능을 검토하는 경우 설계시의 내하력에 대해 그 만족여부를 검토하는 방식을 적용하며 붕괴방지수준의 내진성능 검토시는 대상구조물의 변형이 탄성한도를

부록 A. 내진성능 예비평가 예제

초과한 소성거동을 고려할 필요가 있다고 판단되는 경우 탄성부재력을 응답 수정계수(R)로 나누어 설계부재력 평가를 수행할 수 있다.

① 기능수행수준

구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
상부 슬래브	지점부	116.8	70.3	O.K	297.7	153.7	O.K
	중양부	116.8	46.6	O.K	76.3	20.1	O.K
벽 체	상부 지점부	249.5	89.2	O.K	403.3	143.2	O.K
	중양부	130.9	32.6	O.K	321.1	33.8	O.K
	하부 지점부	204.0	84.5	O.K	399.0	157.5	O.K
하부 슬래브	지점부	157.3	82.3	O.K	397.0	173.0	O.K
	중양부	129.5	61.1	O.K	244.9	41.4	O.K

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

② 붕괴방지수행수준

구 분		Md	Mu	성능 평가	Vd	Vu	성능 평가
상부 슬래브	지점부	116.8	74.0	O.K	297.7	126.2	O.K
	중양부	116.8	34.8	O.K	76.3	16.1	O.K
벽 체	상부 지점부	221.1	85.7	O.K	401.7	119.0	O.K
	중양부	195.2	36.5	O.K	323.2	30.1	O.K
	하부 지점부	260.6	82.0	O.K	401.8	130.7	O.K
하부 슬래브	지점부	157.3	81.5	O.K	397.0	133.3	O.K
	중양부	129.5	42.1	O.K	244.9	26.7	O.K

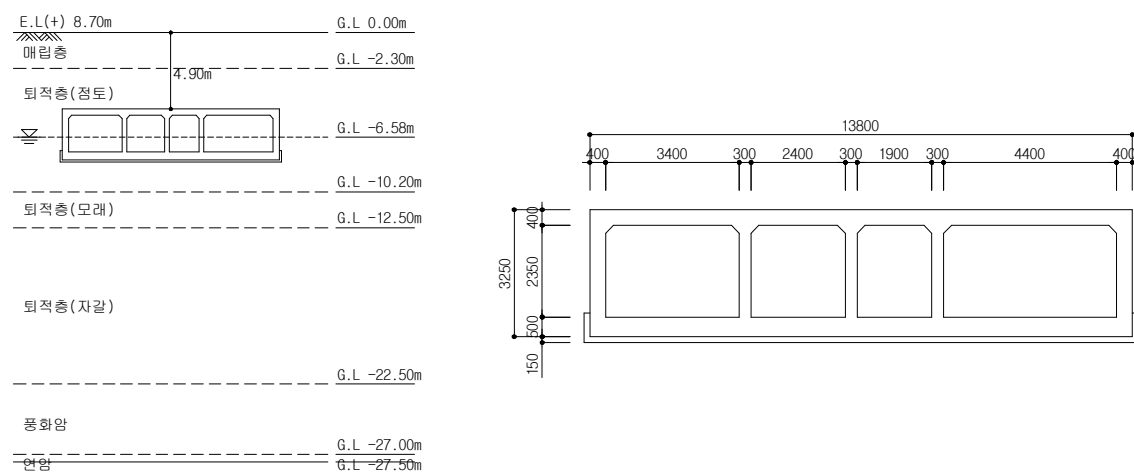
붕괴방지수준의 내진성능 검토결과 지진시 발생단면력은 설계시의 내하력 이내로 충분한 안전율을 확보하고 있으므로 본 예제의 공동구는 붕괴방지 수준의 내진성능을 만족하는 것으로 판단할 수 있다.

A.4. 응답이력해석

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

A.4.1 예제공동구의 설정

본 예제의 공동구는 지진구역 I, 기반암은 연암으로 지표면 하 27.5m(G.L. - 27.5m)에 위치한다. 토층 평균전단파 속도는 약 313m/s로, 해당지역의 지반분류 체계는 S_4 지반(깊고 단단한 지반)에 해당된다.



(a) 지반조건 및 공동구의 위치

(b) 공동구 단면도

<그림 4-1> 예제공동구의 지반조건 및 단면제원

예제공동구가 위치한 지반의 단면도는 그림 4-1과 같다. 공동구는 4면으로, 높이 3.25m, 폭 13.8m이다. 지하수위는 공동구 중간에 위치하는 것이 확인 되었으며, 퇴적토 점토층에 위치하여 지진시 지반의 변형에 의한 영향을 받을 수 있을 것으로 예상된다. 설계도서상의 지반조사 및 성능평가를 위한 지반조사결과로 결정된 내진성능평가를 위한 지반구분 및 지반정수는 표 4-1과 같다.

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

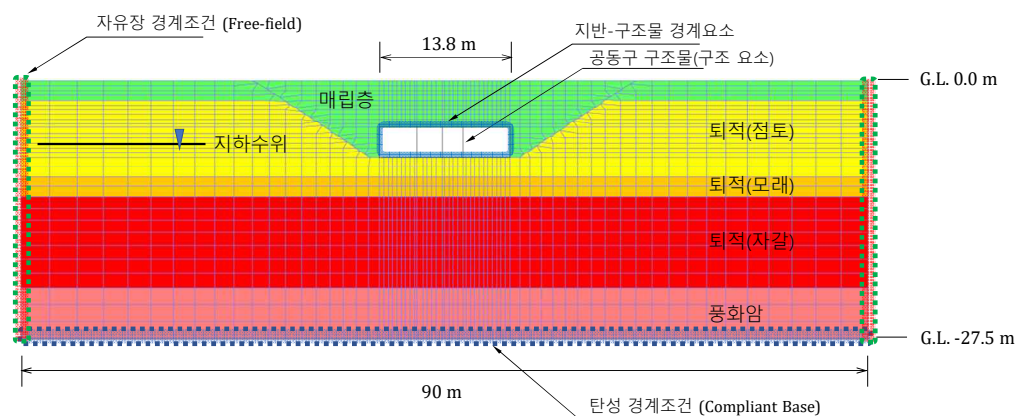
<표 4-1> 예제공동구의 지층구분 및 지반정수

구 분	심도(m)	지반 종류	단위중량(kN/m ³)	전단파속도 (m/s)	동적 포아송비
1	2.3	매립층	19	233.92	0.45
2	10.2	퇴적(점토)	18	235.13	0.45
3	12.5	퇴적(모래)	18	268.96	0.45
4	22.5	퇴적(자갈)	19	282.43	0.45
5	27.0	풍화암	21	714.98	0.40
6	30.0	연암	24	1381.98	0.40

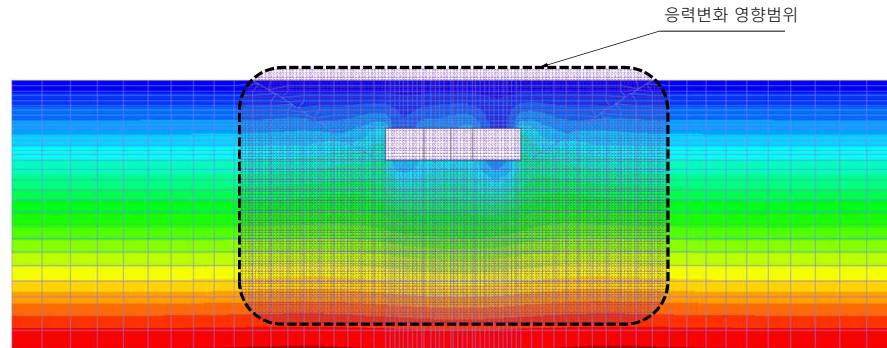
A.4.2 유한차분 모델링

A.4.2.1 해석 영역의 설정

비선형응답이력해석을 수행하기 위하여 그림 4-2와 같이 유한차분모델을 작성하였다. 수치모델의 범위는 공동구의 시공으로 인하여 지중응력의 영향을 받게 되는 영역 밖으로 설정하였으며, 공동구 시공으로 인한 응력분포는 그림 4-3과 같다. 그림 4-3으로부터 수치모델의 경계가 공동구시공으로 인한 응력변화 영향범위의 바깥쪽에 위치함을 알 수 있다.



<그림 4-2> 공동구 유한차분 모델링



〈그림 4-3〉 공동구의 시공에 의한 응력 영향범위의 분포

A.4.2.2 요소크기의 결정

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

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad \Delta l \leq \frac{\lambda}{10}, \quad f \leq \frac{v}{10 \times \Delta l} = \frac{233.92}{10 \times 2} = 11.69 \text{ Hz} \quad \text{〈식 4-1〉}$$

A.4.3 상시평형해석

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

A.4.3.1 시공단계 해석

가. 원지반 응력조건

- (1) 수평지반에 대한 원지반 응력상태 재현, 지하수위에 의한 유효응력계산
 - ① 중력하중에 의한 평형상태 응력조건 (K_0 평형조건), 그림 <4-4>
 - (2) 적용 경계조건 : 최하단, 좌우측면(고정단 경계)

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

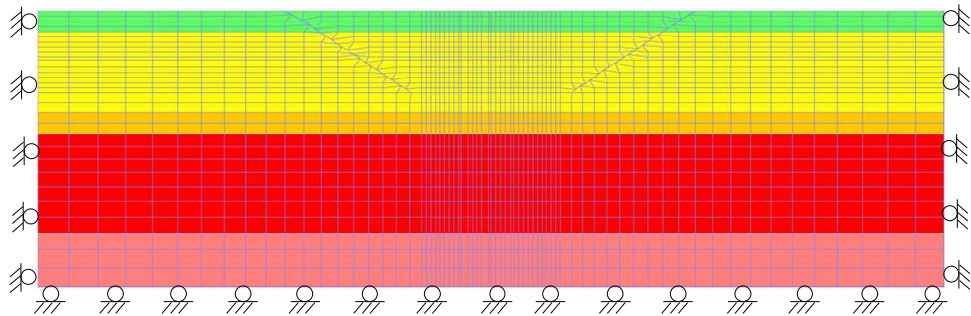


그림 <4-4> 원지반 응력분포 및 경계조건

나. 공동구 시공을 위한 자연사면 굴착

(1) 지하수위 저하를 고려한 굴착해석

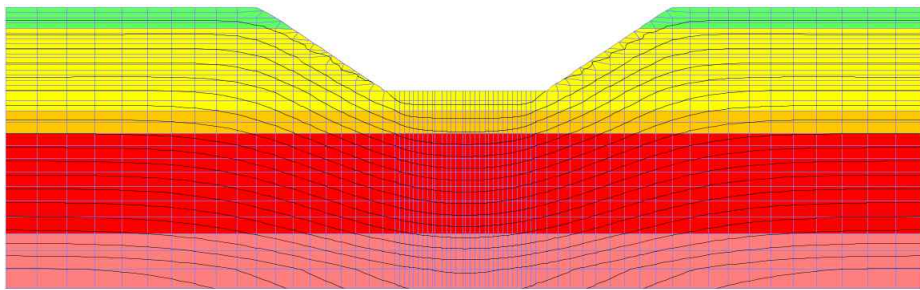


그림 <4-5> 공동구 시공을 위한 굴착해석

다. 공동구 구조물 시공

(1) 공동구 단면

공동구 단면도는 그림 4-6과 같으며, 철근콘크리트 벽체로 두께 300~500mm이다. 본 예제에서 철근의 배근은 D22 이형 복철근 벽체로 가정한다.

(2) 소성구조요소

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

축력과 휨을 동시에 받는 구조요소의 평가내하력 곡선은 성능곡선 (Moment-thrust Diagram)으로 정의되며, 철근콘크리트 기둥의 설계 시 사용되는 P-M상관도의 작성절차를 따른다. 이때, 평가내하력의 계산을 위한 강도감소

계수의 적용은 설계기준이 아닌 본 요령의 방법을 따르도록 한다. 그림 4-7에 본 예제에 적용된 공동구의 성능곡선을 도시하였다.

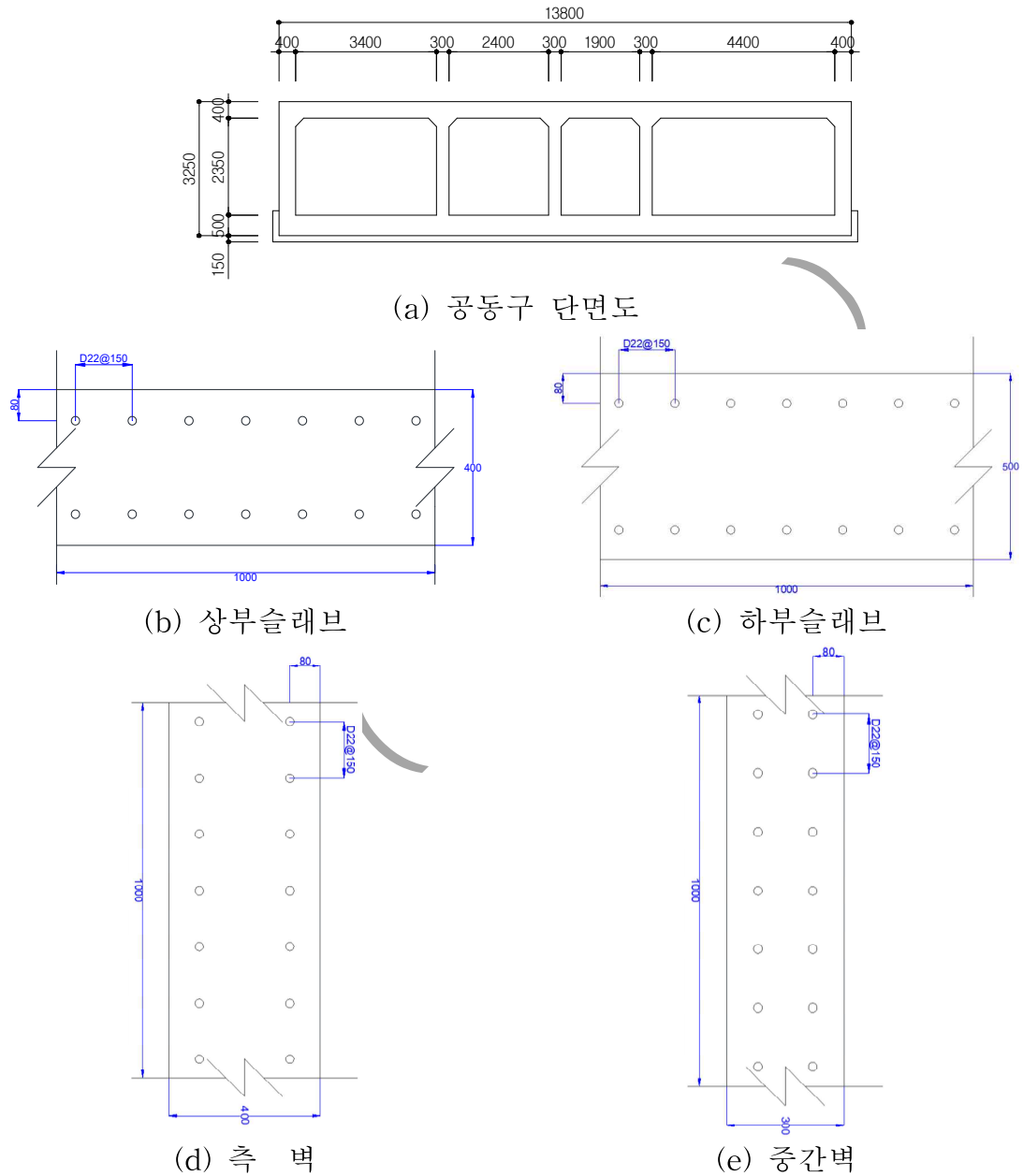
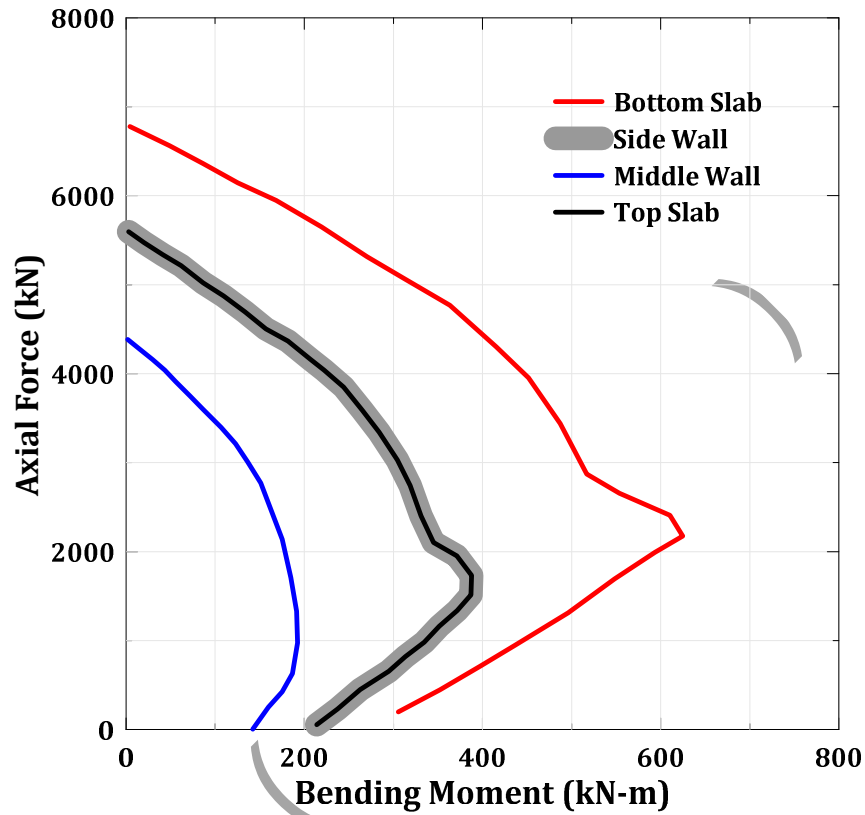


그림 <4-6> 공동구 단면도 및 위치별 배근도 (단위 mm)

그림 4-7의 성능곡선 구성을 위한 재료상수, 강도감소계수, 노후도계수 등은 표 4-2에 제시되어 있다. 소성해석을 실시하는 비선형응답이력 해석에서는 구조물의 강도감소계수는 적용하지 않는다. 본 예제에서는 현장에서 직접 측정된 평가내하력이 존재하지 않음에 따라 예제공동구의 콘크리트와 철근의

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

공칭강도는 설계 시 사용된 공칭강도를 사용하여 각각 24MPa, 300MPa로 적용하였다.



<그림 4-7> 예제공동구의 성능곡선

표 4-2 성능곡선 구성을 위한 강도감소계수 및 구조상태계수의 적용

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

(3) 구조물-지반 경계요소(Interface Element)적용

본 예제에서는 공동구 구조물-지반간 분리거동을 묘사하기 위하여 경계

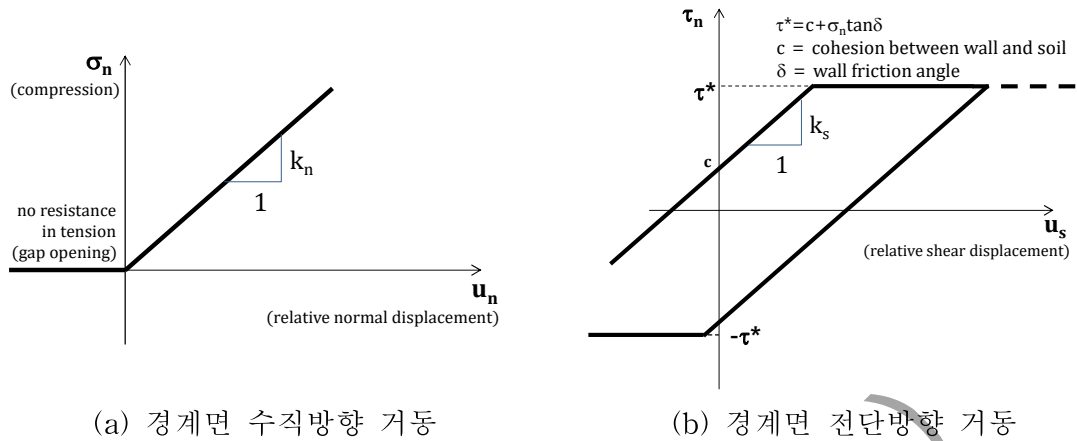
요소를 적용하였다. 경계요소는 경계면 수직방향으로 인장에 대한 분리거동이 가능하여야 하며, 전단방향에 대해서는 미끌어짐을 표현할 수 있어야 한다. 각각의 거동은 경계요소의 인장강도와 마찰강도를 정의함으로써 표현가능하다. 그러나, 유한차분 또는 유한요소해석 시 절점간의 응력-변형을 관계를 정의하기 위하여 수직, 전단방향에 대한 강성을 설정하여야 한다. 이때, 무한강성을 적용시 실제와 가장 유사한 거동을 나타낼 수 있으나, 동해석의 시간적분간격이 '0'에 수렴하게 되어 해석이 불가능한 단점이 있다. 따라서, 대부분의 상용해석 프로그램에서 경계요소의 강성은 접하는 두 재료의 강성의 함수로 자동산정되거나, 지반반력계수의 향으로 식 4-2와 같이 결정하는 방법이 통용된다.

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

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

※ 실제, k_n , k_s 는 수치적분시 수렴을 위한 가상의 요소강성으로, 경계요소 거동으로인한 잔류변위의 크기는 점착력(c)과 경계면 마찰각(δ)에 의하여 결정됨 (그림 4-8)

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령



<그림 4-8> 경계요소의 거동특성

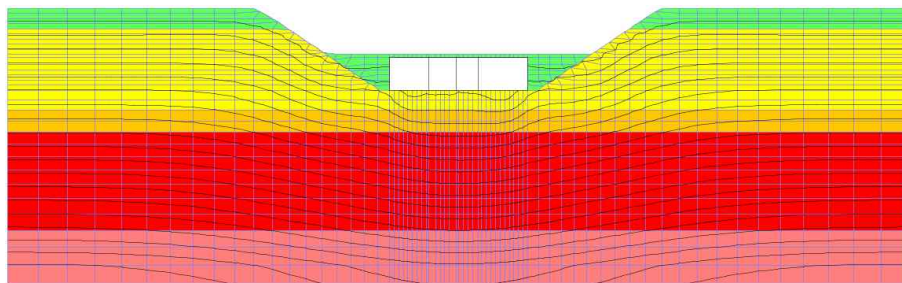
본 예제에서 적용된 경계요소의 입력변수는 표 4-3과 같다.

표 4-3 예제에 사용된 경계요소의 입력변수

구 분	k_n (N/m ³)	k_s (N/m ³)	c (N/m ²)	δ (Deg)
입력값	1×10^8	1×10^8	0.0	20

라. 매립지반재료를 이용한 되메우기

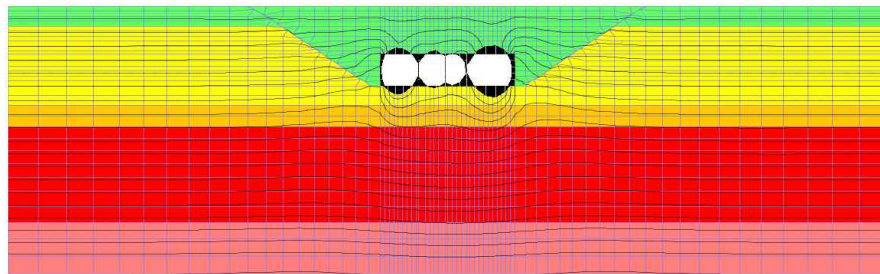
시공단계 해석과정에서는 원지반조건과 다르게 굴착 후 매립되는 지반조건을 반영하여야 한다. 예를들어 치환매립, 압밀, 심층혼합개량 등 다양한 공법의 적용 후 조성되는 지반의 최종상태에 대한 해석 후 지진하중에 대한 응답이력해석이 시행되어야 한다. 그림 4-9는 공동구 매립과정에서 원지반 퇴적점토층을 대신하여 매립되는 지반의 모델링 과정을 나타내고 있다.



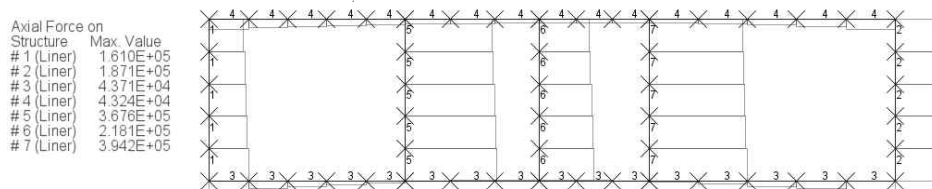
<그림 4-9> 공동구시공 및 되메우기

마. 시공완료 단계 안정성 검토

시공이 완료된 공동구 구조물의 최종변위 및 부재력 확인을 통해 수치해석 모델의 오류를 확인하여야 한다. 구조물의 변위는 통상적인 철근콘크리트 압거의 변위내에서 발생되어야 하며, 부재력은 탄성범위내 존재하여야 한다. 본 예제에서는 공동구 구조물이 소성거동이 가능한 구조요소로 모델링 됨에 따라, 소성한지의 발생확인만으로 부재력에 대한 확인이 가능한 장점이 있다. 그림 4-10은 시공완료 후 공동구의 최종변위 및 부재력의 분포를 나타내고 있다.

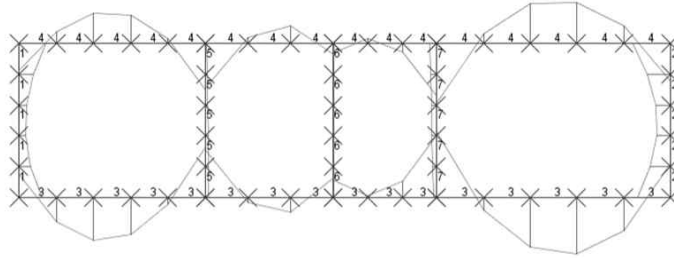


(a) 최대변위 : 4.6mm (공동구 상단)



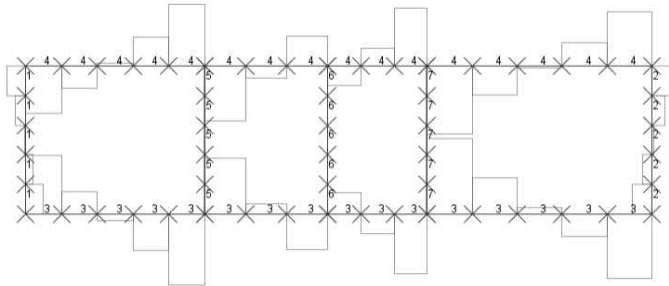
(b) 최대축력 : 3.942×10^5 N

Moment on Structure	Max. Value
# 1 (Liner)	5.742E+04
# 2 (Liner)	-8.044E+04
# 3 (Liner)	-1.384E+05
# 4 (Liner)	1.258E+05
# 5 (Liner)	7.092E+03
# 6 (Liner)	2.497E+03
# 7 (Liner)	-1.439E+04



(c) 최대모멘트 : 1.384×10^5 N-m

Shear Force on Structure	Max. Value
# 1 (Liner)	-4.098E+04
# 2 (Liner)	4.676E+04
# 3 (Liner)	-1.662E+05
# 4 (Liner)	1.487E+05
# 5 (Liner)	-1.274E+03
# 6 (Liner)	-1.442E+02
# 7 (Liner)	-2.214E+03



(b) 최대전단력 : 1.662×10^5 N

<그림 4-10> 변위 및 부재력 확인결과 (상시 조건)

A.4.4 지진응답이력해석(Seismic Response History Analysis)

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

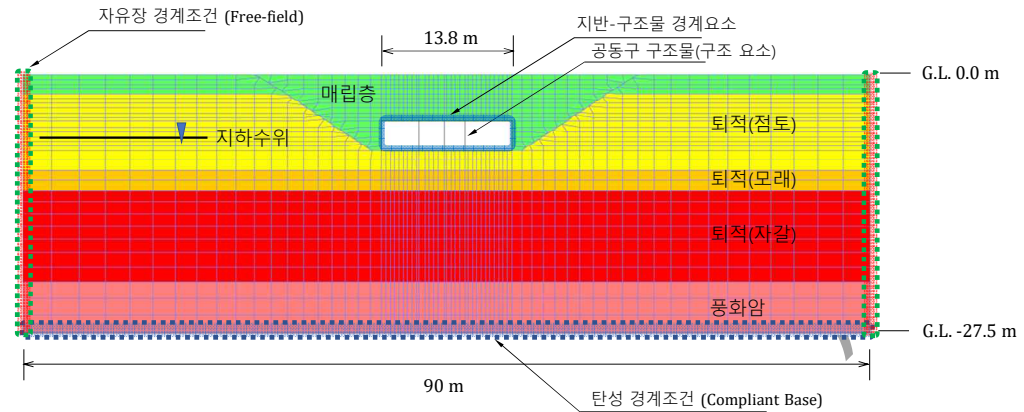
A.4.4.1 응답이력해석을 위한 필요조건

가. 동적 수치경계조건

(1) 수평경계조건

상향전파하는 지진파의 수평운동은 수평무한지반에서 구속되지 않아야 한다. 그러나, 수평무한한 수치모델을 구성하는 것은 불가능함에 따라, 공동구 구조물의 거동영향을 무시할 수 있는 영역까지 수치해석 모델을 구성하고 경계면에 수평운동을 흡수할 수 있는 경계요소를 적용하여야 한다. 이를 위하여, 본 예제의 수치해석 프로그램에서는 자유장경계요소(Free Field Element)를 적용하였다. 사용된 자유장경계요소는 인접지반과 동일한 강성을 가지며 전달되는

수평응력을 100% 흡수할 수 있는 점성감쇠요소로 구성된다. (Lysmer and Kuhlemeyer, 1969)



<그림 4-11> 응답이력해석을 위한 경계조건

(2) 최하단 경계조건 (입력지진 경계조건)

응답이력해석은 연직상향전파되는 입사파(Incident Wave)에 의한 지반-구조물의 응답 해석이 이루어져야 한다. 그러나, 지표면 자유장에서 반사되어 하향전파하는 반사파(Reflected Wave)는 수치해석 모델의 최하단경계에서 반사되어 입사파의 왜곡을 초래할 수 있으므로 수치해석과정에서 반사파의 흡수·소멸이 이루어져야 한다. 이를 위한 방법은 아래의 표 4-4와 같이 두 가지 방법으로 구분되며, 각각의 경우 입력지진기록의 선정이 달리 이루어져야 한다. (그림 4-12)

표 4-4 지진응답이력해석을 위한 최하단 경계조건

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

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

본 예제에서는 G.L. - 27.5m 위치에 전단파속도 1381.98m/s 이상의 연암층이 확인되어, 입력지진기록은 S_1 지반의 설계응답스펙트럼에 상응하는 입력지진기록을 사용하였다. KDS 17 10 00에 따라 S_1 지반의 설계응답스펙트럼은 보통암 자유장(노두) 지진기록에 대한 응답스펙트럼으로, 지진파의 자유장에서 입사파와 반사파의 크기는 동일하므로 입사파기록은 1/2을 취함으로 얻어질 수 있다. 따라서, 점성감쇠경계가 적용되어 가속도 지진기록은 아래의 식 4-3에 따라 전단응력기록으로 변환되어 수치해석에 적용하였다.

설계지진 기록	입력지진 경계조건
노두운동기록 → 기반암 입사파 도출	탄성압반 경계조건
자유장 기록 → 노두운동 → 기반암 입사파 또는 자유장 기록 → 기반암 증내운동	탄성압반 경계조건(기반암 입사파)
기반암 증내운동	탄성압반 경계조건(기반암 증내운동)
기반암 증내운동(가속도)	탄성압반 경계조건(기반암 증내운동(가속도))
기반암 증내운동(가속도)	탄성압반 경계조건(기반암 증내운동(가속도))
기반암 증내운동	강체압반 경계조건(기반암 증내운동)
<그림 4-12> 설계지진기록 위치정의에 따른 입력지진 경계조건의 설정 방법	

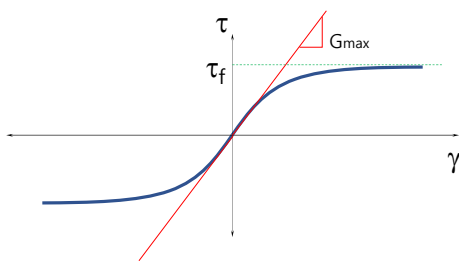
$$\tau(t) = 2(\rho v_s) \dot{u}(t) \quad \text{<식 4-3>}$$

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

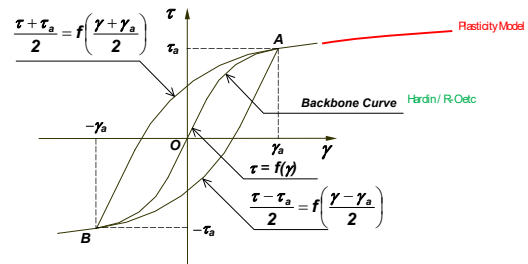
나. 지반의 구성모델

(1) 지반의 비선형 응력-변형률 거동모델

지진하중을 받는 지반이 겪게되는 전단변형률 영역에서 비선형 응력-변형률 거동을 나타낼 수 있는 지반모델을 선정하여 응답이력해석에 적용하여야 한다. 수치해석 프로그램에 따라 지반의 비선형거동 및 이력감쇠(Hysteretic Damping)는 정규화전단탄성계수 감소곡($G/G_{\max}$)선, 지반의 전단장도(τ_f)와 최대전단탄성계수($G_{\max}$)를 이용한 쌍곡선 뼈대함수(Backbone curve, 그림 4-13 (a)) 또는 진보된 지반구성모델을 적용하여 수치해석에 적용 할 수 있다. 대부분의 수치해석 프로그램에서 반복하중에 대한 이력감쇠는 비선형 거동을 위한 뼈대함수로부터 Masing법칙(그림 4-13(b))을 적용하여 발생가능하다.



(a) 쌍곡선 뼈대함수의 구성



(b) Masing법칙

<그림 4-13> 동적하중에 대한 지반의 비선형 응력-변형률 거동

국내 설계에 적합한 지반의 $G/G_{\max}$ 곡선과 감쇠비 곡선은 시설안전기술공단의 “기존시설물(기초 및 지반)내진성능 평가요령”을 참조하는 것을 추천한다. 단, 진보된 지반 구성모델을 적용할 경우 모델변수 산정을 위한 별도의 노력(문헌, 지반조사)이 시행되어야 한다.

(2) 지반의 강성

구속압에 의하여 강성이 달라지는 사질토지반의 특성을 해석에 반영하기 위하여, 최초 정적평형상태에서 지반의 평균유효구속압을 반영한 사질토지반의 강성(최대전단탄성계수)을 재설정 하여 정적평형해석을 실시한다. 이를 위하여, 지반내 유효응력분포를 반영하여 전단탄성계수 또는 전단파속도를 계산하여 수치해석 입력변수를 재설정하거나, 이를 반영할 수 있는 전단탄성계수의 함수가 적용되어야 한다. 아울러, 구속압의 영향이 지반의 비선형성 응력-변형률 거동에 미치는 영향을 무시할 수 없는 경우 이를 반영하여야 한다.

(3) 지반의 소성거동모델

지반의 전단파괴 이후 소성거동에 대한 정의를 위하여 Mohr-Coulomb 모델 등의 소성거동모델을 적용하며, 이를 위한 지반의 전단강도정수를 결정하여 사용하여야 한다. 표 4-5는 본 예제에 적용된 지층별 지반정수이다.

<표 4-5> 예제공동구의 지층구분 및 지반정수

구 분	심도(m)	지반 종류	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kN/m ²)	내부마찰각 (Deg)
1	2.3	매립층	19	15	30
2	10.2	퇴적(점토)	18	20	5
3	12.5	퇴적(모래)	18	0.1	38
4	22.5	퇴적(자갈)	19	0.1	45
5	27.0	풍화암	21	50	45
6	30.0	연암	24	탄성	탄성

(4) 액상화 모델

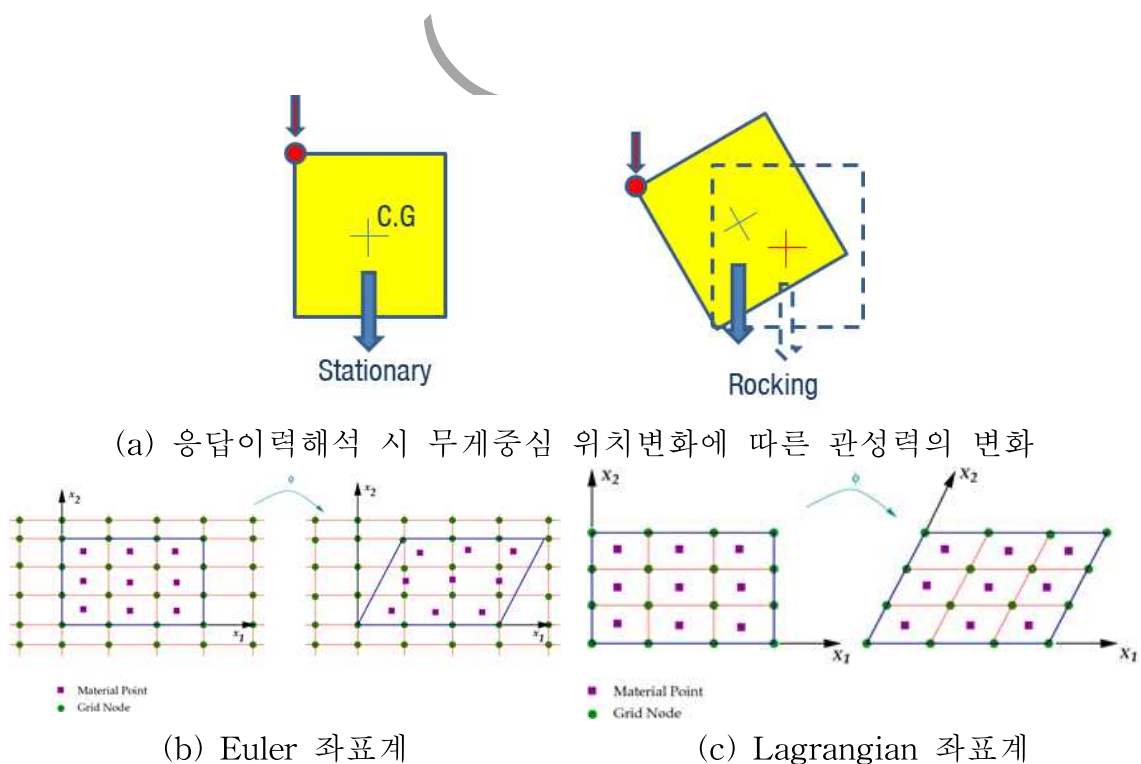
액상화 대상지반의 결정은 KDS 17 10 00 또는 “기존시설물(기초 및 지반)내진성능 평가요령”을 참조하여 결정할 수 있다. 응답이력해석에서 액상화 대상지반을 고려하여야 하는 경우, 수치해석 프로그램에서 제공하는 액상화모델을 적용하여 응답이력해석을 시행하여야 한다. 대표적인 액상화

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

모델은 Byrne모델(Byrne, 1991), PM4SAND(Boulanger and Ziotopoulou, 2017), UBC Sand(Byrne, 1995) 등의 액상화 거동모델이 있다.

(5) 기하학적 비선형 거동

지진응답이력해석 과정에서, 엄밀한 해석을 위해서는 수치해석 요소의 무게중심 변화에 따른 관성력변화가 고려되어야 한다. 이를 위해 변형으로 인한 무게중심의 변화가 고려되어야하며, 이는 수치해석에서 기하학적비선형(Geometric Non-linearity) 또는 대변형해석(Large Strain Analysis)을 통해 구현될 수 있다. 비선형응답이력해석을 위한 수치해석 프로그램은 미소변형해석 시 Euler좌표계를 적용하며, 대변형 해석 시 Lagrangian좌표계를 적용하여야 한다. 본 예제에서는 「4.3 상시평형해석」 이후 지진응답이력해석 전 Lagrangian좌표계로 변환 후 지진응답이력해석을 시행하였다. 그림 4-14는 대변형 발생시 무게중심의 변화와 좌표계의 적용방법에 따른 차이를 설명하고 있다.



<그림 4-14> 기하학적 비선형(대변형)의 영향 및 좌표계의 영향

(6) 동적응답에 대한 감쇠모델

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

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

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

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

A.4.4.2 입력지진기록의 결정

가. 지진하중 조합

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

나. 입력지진기록의 구성

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

(1) 스펙트럼 보정

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

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

(2) 설계입력지진기록 군(群, BIN)의 구성

지진이 빈번한 대부분의 국가에서는 ASCE 기준(1개 기록 사용가능)을 제외하면 모두 설계스펙트럼을 만족시키는 3개 이상의 지진기록을 적용하여 그 결과의 최대값을 설계에 적용하며, 7개 이상의 지진기록을 사용 시 해석결과(구조물 응답)의 중간값을 적용할 수 있도록 규정하고 있다. 본 요령에서는 우리나라 및 국외 판 내부 지진계측 기록 중 3개의 지진기록을 선정하여 비선형응답이력 해석을 위한 군(群, BIN)을 구성하였다. 선정된 지진기록 군(群, BIN)은 서로 다른 지진이벤트로 구성되어 표 4-6과 같으며, 우리나라 경주지진(2016)과 외국의 판 내부 지진기록 2개로 구성된다. 선정된 지진기록은 모두 판 내부 지진기록으로의 유효성, 규모, 지진기록의 품질, 가속도, 지속시간 등을 종합적으로 고려하여 선정되었다. 본 보고서에서 선정된 지진기록 군이 향후 공동구 구조물의 내진성능평가를 위한 절대적인 지진파의

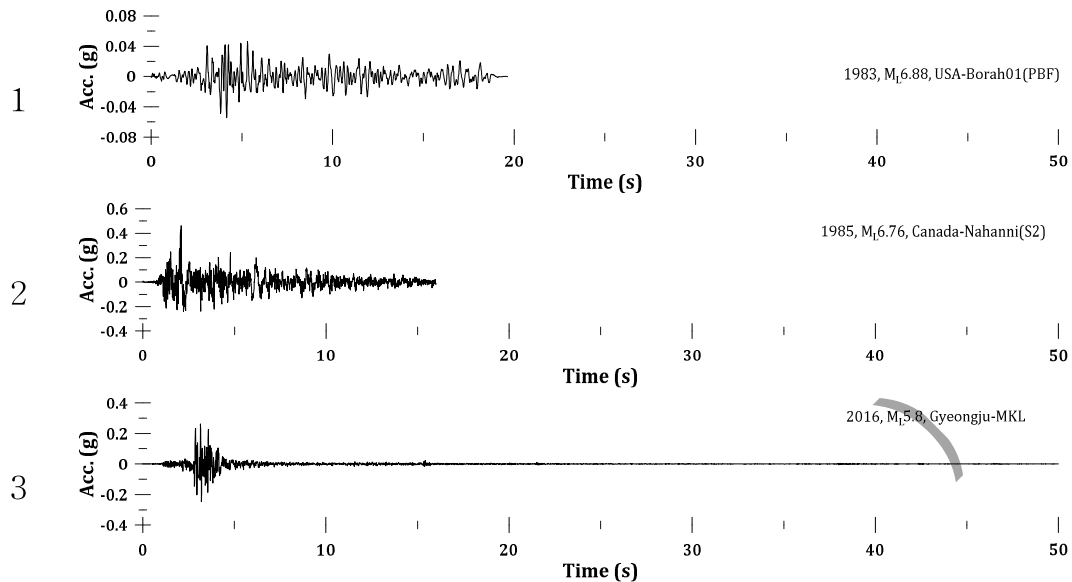
조합을 의미하지는 않으며, 설계자는 경주 또는 포항지진기록 중 1개와 외국의 지진기록 중 규모 6.0 ~ 7.0의 실지진기록 2개를 선정하여 스펙트럼 보정 후 적용하는 것을 추천한다. 이때, 해석결과는 세 개의 지진파를 적용한 해석결과 중 최대값을 사용하여야 한다.

표 4-6 비선형응답이력 해석을 위한 실지진기록 군(群, BIN) (예)

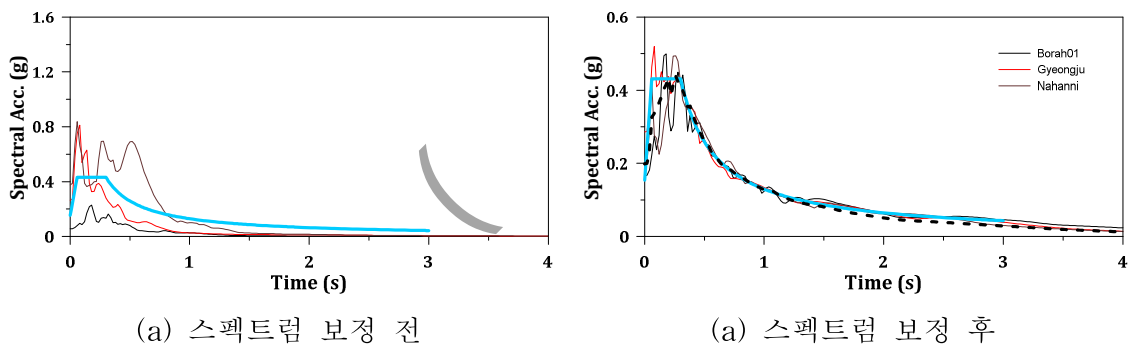
No	Year	Magnitude (ML)	Epicentral Dist.(km)	PGA (g)	Event/Station/Country
1	1983	6.88	94.34	0.052	Borah01, PBF/America
2	1985	6.76	6.52	0.489	Nahanni, S2/Canada
3	2016	5.8	6	0.3497	Gyeongju/ MKL/Korea

표 4-6에 제시된 지진기록의 시간이력은 그림 4-15에 제시되어 있으며, 본 예제의 1구역, S_1 지반, 1등급 구조물의 설계응답스펙트럼에 대한 보정 전·후 응답스펙트럼은 그림 4-16과 같다.

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령



<그림 4-15> 비선형응답이력 해석을 위한
실지진 기록군(群, BIN)의 가속도 시간이력 (예)



(a) 스펙트럼 보정 전

(a) 스펙트럼 보정 후

<그림 4-16> 비선형응답이력 해석을 위한
실지진 기록군(群, BIN)의 스펙트럼 보정 전/후 응답스펙트럼

A.4.5 해석 및 평가결과

A.4.5.1 붕괴방지 수준

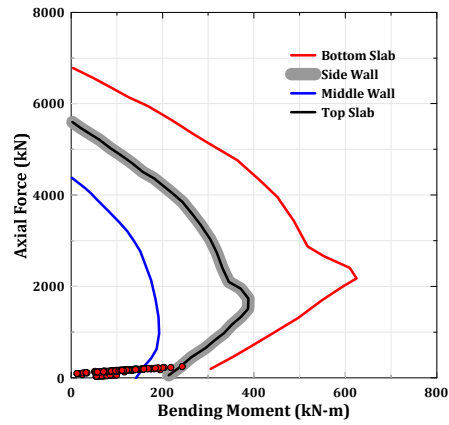
표 4-7에 제시된 3개의 입력지진파에 대한 해석결과, 공동구 구조물의 소성흔지 발생여부는 그림 4-17 ~ 4-19와 같이 확인 가능하다. 3개의 지진파에 대한 해석결과 공히 소요강도가 평가내하력을 초과하여 소성흔지가 발생하였다. A점에 대한 성능곡선 검토결과, 지진하중 재하시간 중 일시적으로 평가내하력이 부족하여 소성흔지가 발생함을 알 수 있다. 성능곡선으로부터

A점에서 소성힌지는 바닥슬래브와 측벽이 만나는 지점의 측벽에서 발생하였음을 알 수 있다.

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

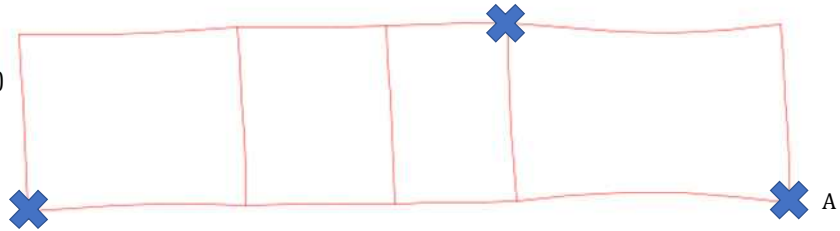
공동구구조물의 전단력에 대한 평가내하력 및 평가결과는 표 4-7과 같으며, 응답이력해석으로 얻어진 공동구 구조물의 최대전단력 분포는 그림 4-20과 같다. 그림 4-20의 최대전단력은 특정시점의 결과가 아닌, 전체해석시간 중 위치별 최대전단력의 절대값을 도시한 결과이다. 평가결과, 공동구 구조물 전체단면에 대해서 전단철근 보강없이 안전함을 알 수 있다.

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령



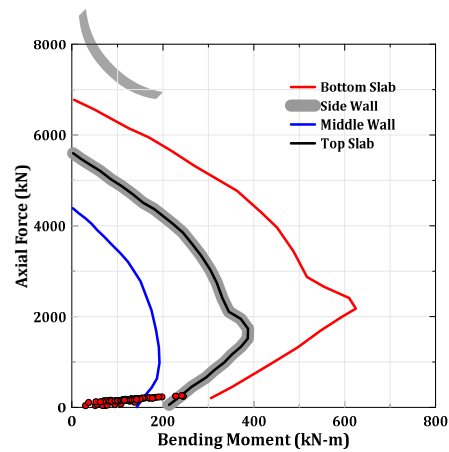
(a) 성능곡선 (A 지점)

✕ Plastic Hinge
(Fail in Compression)



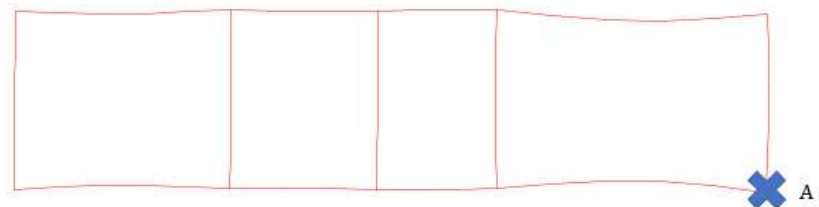
(b) 구조물 변형형상 및 소성힌지 위치

<그림 4-17> 붕괴방지 수준 해석결과 (Borah Peak 지진)



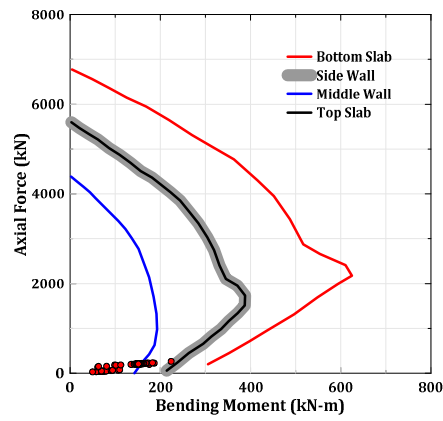
(a) 성능곡선 (A 지점)

✕ Plastic Hinge
(Fail in Compression)



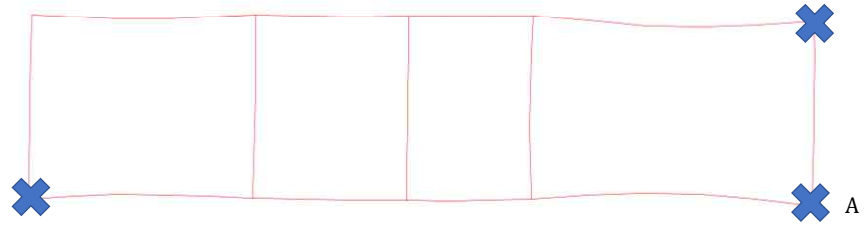
(b) 구조물 변형형상 및 소성힌지 위치

<그림 4-18> 붕괴방지 수준 해석결과 (Nahanni 지진)



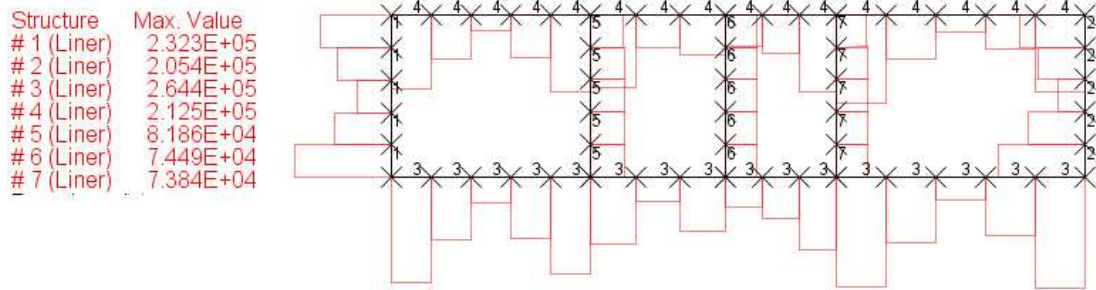
(a) 성능곡선 (A 지점)

✕ Plastic Hinge
(Fail in Compression)

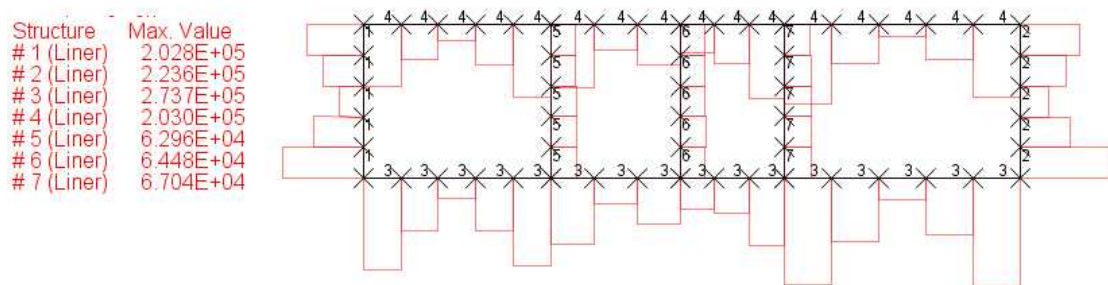


(b) 구조물 변형형상 및 소성힌지 위치
<그림 4-19> 붕괴방지 수준 해석결과 (경주지진)

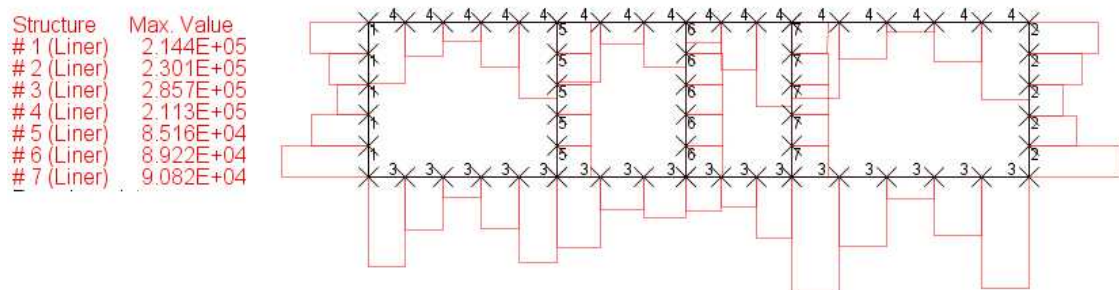
기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령



(a) Borah Peak 지진



(b) Nahanni 지진



(c) 경주지진

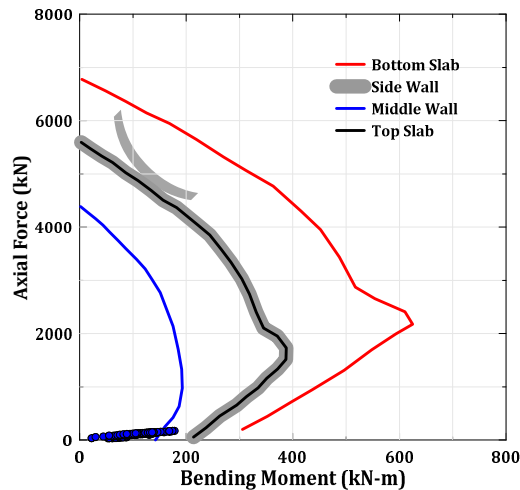
<그림 4-20> 지진하중 재하 중 최대전단력 분포도 (절대값, N/m)

표 4-7 붕괴방지 수준 지진에 대한 전단력평가결과

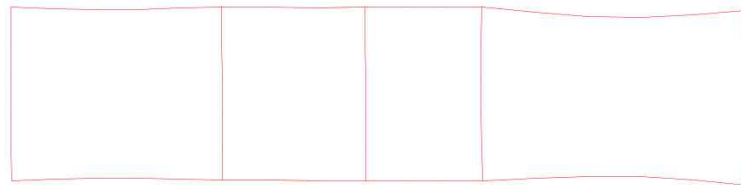
	소요전단강도 (kN/m)			평가내하력, ϕV_c (kN/m)	판정
	Borah Peak	Nahanni	경주		
상부슬래브	213	203	211	491	OK
하부슬래브	264	274	286	562	OK
측벽	232	224	230	491	OK
중간벽	82	67	91	410	OK

A.4.5.2 기능수행 수준

예제 공동구 구조물의 기능수행수준 지진력에 대한 성능평가결과는 붕괴방지 수준에 대한 평가절차와 동일하다. 우선, 표 4-7에 제시된 3개의 입력지진파에 대해서 기능수행수준(재현주기 100년)의 설계응답스펙트럼에 대한 스펙트럼 보정 후 이를 입력지진으로 한 해석을 시행하였다. 해석결과, 공동구 구조물의 소성힌지 발생여부는 그림 4-21 ~ 4-23과 같이 확인 가능하다. 3개의 지진파에 대한 해석결과 모두 평가내하력이 소요강도를 상회하여 소성힌지가 발생하지 않음을 알 수 있다. 이는 모든 구조부재가 지진 중 탄성영역내 거동을 보임으로 기능수행 수준을 만족한다고 할 수 있다. A점에 대한 성능곡선 검토결과, 지진하중 재하시간 중 모든 부재력 평가결과가 성능곡선을 초과하지 않음을 알 수 있다.



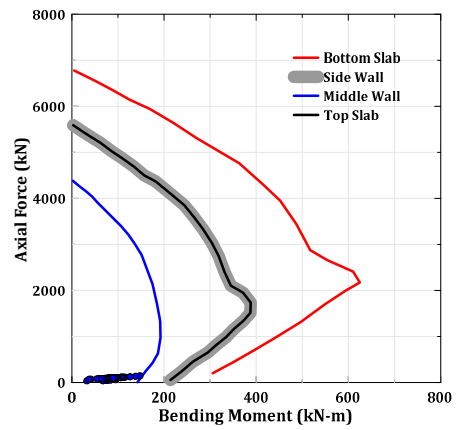
(a) 성능곡선 (A 지점)



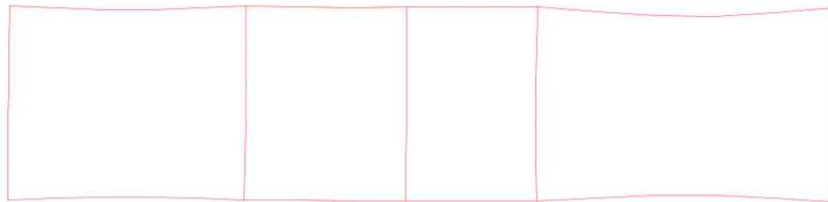
(b) 구조물 변형형상 및 소성힌지 위치

<그림 4-21> 붕괴방지 수준 해석결과 (Borah Peak 지진)

기존 시설물(공동구) 내진성능 평가요령

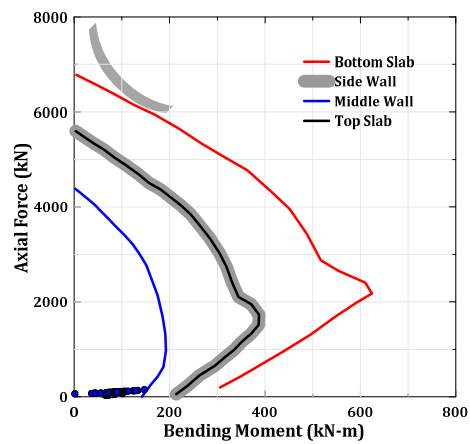


(a) 성능곡선 (A 지점)

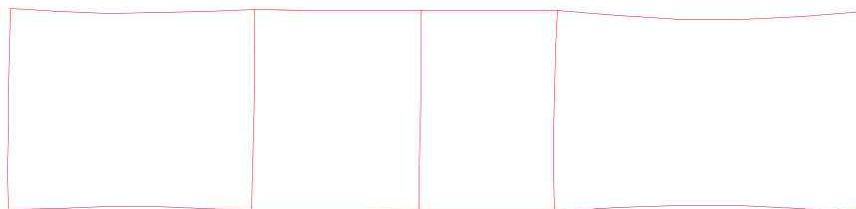


(b) 구조물 변형형상 및 소성힌지 위치

<그림 4-22> 붕괴방지 수준 해석결과 (Borah Peak 지진)



(a) 성능곡선 (A 지점)



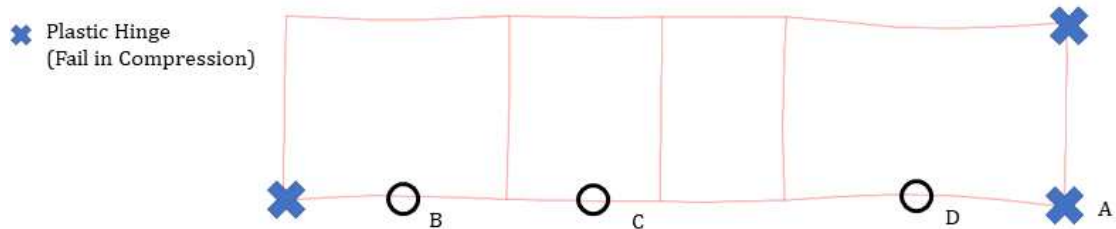
(b) 구조물 변형형상 및 소성힌지 위치

<그림 4-23> 붕괴방지 수준 해석결과 (Borah Peak 지진)

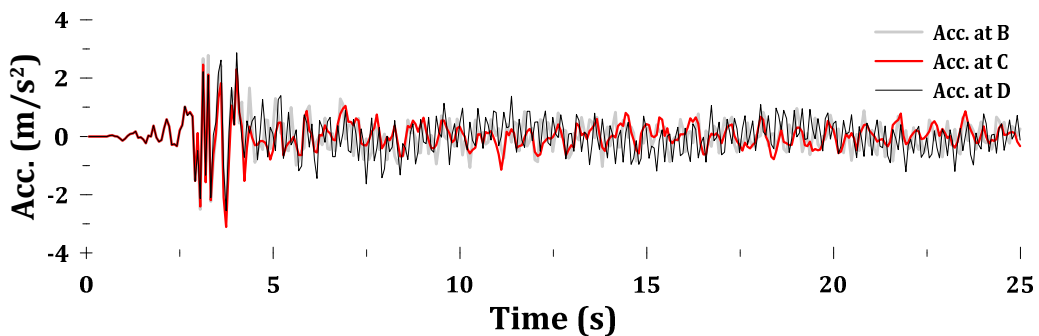
A.4.5.3 비구조요소의 성능목표 검증

지진시 공동구의 기능상실로 인한 대규모 피해는 비구조요소(공동구 내부 수용시설물)의 기능상실(단수, 정전, 화재, 통신두절)로 인하여 발생할 수 있으므로, 붕괴방지수준의 지진력에 대해서 구조물의 붕괴여부와는 별도로 비구조요소의 기능수행여부에 대한 검토가 시행되어야 한다. 단, 본 요령에서 공동구의 내진성능평가는 구조요소에 대한 성능평가에 한정하며, 비구조요소에 대한 성능 평가는 발주처와 협의 하에 별도의 과업으로 시행하는 것을 원칙으로 한다.

비선형응답이력 해석결과, 비구조요소의 성능평가를 위해 필요한 공동구 위치별 가속도 시간이력은 그림 4-24과 같다.



(a) 가속도 시간이력 기록위치 (B, C, D)



(b) 위치별 가속도 시간이력

<그림 4-24> 비구조요소 성능평가를 위한 위치별 가속도시간이력 (예)

비구조요소에 대한 성능평가자는 가속도 시간이력 등 본 요령에서 제시하는 공동구 구조물의 내진해석결과를 이용하여 공동구내 수용시설물의 내진성능평가를 실시하여야 한다. 이때, 시설물의 관리기관과 협의하에 비구조요소를 위한 별도의 기준 및 평가용역을 마련하여 시행하도록 한다.

참고문헌

- (1) Abrahamson, N. A. (1992). Non-stationary spectral matching. Seismological Research Letters 63(1), Rotterdam, Netherlands: Lausanne, K1.
- (2) Byrne, P.M. (1991), "A Cyclic Shear-volume Coupling and Pore-pressure Model for Sand", Proceedings of Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Paper No.1.24, pp. 47-55.
- (3) Boulanger, R.W. and Ziotopoulou, K. (2017), PM4SAND (Version 3.1) : A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications, Report No. UCD/CGM-17/01, Center for Geotechnical Modelling, Dept. of Civil and Environmental Engineering, UC. Davis.
- (4) Byrne, P. M., et al. (1995), "Predicting Liquefaction Response of Granular Soils from Self-Boring Pressuremeter Tests," ASCE National Convention, San Diego, California, October 23-27, ASCE, 56(GSP), pp. 122-135 (1995).
- (5) Lilhanand, K., & Tseng, W. S. (1988). Development and application of realistic earth-quake time histories compatible with multiple-damping design spectra. In Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 819 - 824). Tokyo, Japan
- (6) Lysmer J, Kuhlemeyer RL. Finite dynamic model for infinite media. J Eng Mech 1969;95(4):859 - 77.
- (7) Naeim, F., & Lew, M. (1995). On the Use of Design Spectrum Compatible Time Histories. Earthquake Spectra, 11(1), 111 - 127. <https://doi.org/10.1193/1.1585805>
- (8) Rizzo, P. C., Shaw, D. E., & Jarecki, S. J. (1975). Development of real/synthetic time histories to match smooth design spectra. Nuclear Engineering and Design, 32(1), 148 - 155. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(75\)90096-5](https://doi.org/10.1016/0029-5493(75)90096-5)
- (9) Seismosoft Earthquake Engineering Software Solutions - Seismosoft. (2019, November 5). Retrieved November 18, 2019, from <https://seismosoft.com/>
- (10) Silva, W. J., Lee, K., U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station., United States. Army. Corps of Engineers. (1987). WES RASCAL code for synthesizing earthquake ground motions. State-of-the-art for assessing earthquake hazards in the United States. [Vicksburg, Miss.: U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station].