

대한주택공사 토목구조물
내진설계지침

1999. 2.

대한주택공사
대한토목학회

일반적인 내진설계를 위해서는 구조물이 위치한 지점의 지진특성과 구조물의 동적특성을 파악하는 것이 중요하다 그러나 우리나라에서는 현재까지 지진기록이 부족하고, 지진으로 인한 구조물의 피해사례가 많지 않기 때문에 외국의 기준과 사례를 참고하여 내진설계를 수행하고 있다 외국에서도 보다 합리적인 내진설계를 수행하기 위해 지속적인 연구를 하고 있으며, 이러한 연구된 내진설계기준을 국내에 적용하여 국내실정에 맞는 내진설계를 수행하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다

본 “대한주택공사 토목구조물의 내진설계지침”은 1997년 건설교통부에서 제정된 “내진설계 기준연구”의 상위개념에 준하여 작성되었으며, 앞으로 국내외에서 수행되는 연구결과 및 관련 기준의 변경에 따라 지속적인 보완 및 수정이 이루어져야 할 것이다

또한 본 지침서에서 다루는 토목구조물은 지반과 연관된 형태로 존재하기 때문에 교량과 건축물과 같은 지상구조물보다 더 많은 불확실성을 내포하고 있음에 유의해야 한다 따라서 내진이 중요시 되는 구조물의 설계는 본 지침서를 바탕으로 관련 기술자들이 상호의견을 교환하고 그로부터 도출된 결론에 의거하여 합리적인 설계를 수행하여야 할 것이다

끝으로 본 “내진설계지침”의 내실을 기하기 위하여 연구자 여러분의 많은 조언을 부탁드립니다

대한주택공사 토목구조물
내진설계지침

1999. 2.

대한주택공사
대한토목학회

제 출 문

대한주택공사 사장 귀하

귀 공사와 계약체결(1998 6 29)한 “토목구조물 내진설계기준 수립용역”을
완료하고 그 결과를 본 보고서로 제출합니다

1999년 2월

사단법인 대한토목학회
회장 권 오 석

참 여 연 구 원

책임연구원 이종규 / 단국대학교 토목환경공학과 교수

연구원 김명모 / 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
김문겸 / 연세대학교 토목공학과 교수
이병수 / (주) 남원 엔지니어링 부사장
임윤묵 / 연세대학교 토목공학과 조교수

심 의 위 원 이형수 / 대한토목학회 토목연구소장
황정규 / 홍익대학교 토목공학과 교수
이종세 / 한양대학교 토목환경공학과 교수

차 례

1	서론	1
11	내진설계지침 수립의 목적	1
12	대한주택공사 토목구조물의 분류	1
13	토목구조물의 내진등급	3
131	등급설정의 상위개념	3
1311	지중구조물의 내진설계기준	3
1312	건축물의 내진설계기준	4
132	대한주택공사 토목구조물의 내진등급	5
14	내진성능목표	7
141	내진성능목표의 상위개념	7
1411	지중구조물의 내진성능수준	8
1412	지중구조물의 설계거동 한계	9
1413	옹벽 및 사면 구조물의 내진성능수준	10
1414	옹벽 및 사면 구조물의 설계거동한계	10
142	대한주택공사 토목구조물의 내진성능목표	10
2	설계일반	12
21	내진설계의 기본방침	12
22	지반조사 및 지반분류	16
221	지반조사	16
222	지반분류	16
23	설계지진동	17
231	설계지반운동 수준	17
232	설계응답스펙트럼	20
233	가속도 시간이력	22
24	하중조합과 내진해석방법	23
241	설계하중과 하중조합	23
242	내진해석방법	25
2421	지중구조물의 내진해석방법	25
2422	옹벽 및 사면의 내진해석방법	27

3 구조물별 내진해석 및 내진설계 요구사항	30
31 선상지중구조물	30
311 내진해석 방법	30
3111 압거와 공동구의 내진해석	30
3112 매설관의 내진해석	48
3113 지중구조물의 동적해석법	53
312 내진설계 요구사항	54
32 수평공간구조물	57
321 내진해석 방법	57
322 내진설계 요구사항	62
33 옹벽 및 사면류	63
331 내진해석 방법	63
3311 옹벽의 내진해석 방법	63
3312 사면의 내진해석 방법	74
332 내진설계 요구사항	80
 참고문헌	 83
 부 록	 84
A1 지반의 분류 절차	85
A2 지진재해도	89
A3 인공지진의 형성방법	96
A4 응답 변위법	100
A5 기반면의 설계응답속도	106
A6 기반암의 위치에 따른 지진하중의 변화	110
A7 액상화 평가방법	112
A8 말뚝기초의 내진설계	118
A9 사면 안정화 방법	122
A10 용어정리	125

1. 서 론

1.1 내진설계지침 수립의 목적

최근들어 외국에서 지진으로 인한 대규모의 인명피해와 도시의 기능을 수행하는 많은 종류의 구조물의 피해가 발생하였다 특히 일본에서 발생한 효고현 남부지진을 계기로 우리나라에서도 지진에 대한 준비를 국가적으로 시작하게 되어 1997년에는 건설교통부에서 “내진설계 기준연구⁽¹⁾”를 상위개념으로 제정하게 되었다 이 상위개념에서는 구조물의 내진등급, 성능목표, 각 구역별 설계가속도 등 기본적인 설계에 대해서 언급하고 있으며, 각 구조물별 세부사항은 상위개념의 기준에 따라 내진설계기준서 또는 지침서를 작성하여 사용하도록 하고 있다 이에 따라 각 기관별로 상위개념에 준하는 내진설계기준서 또는 지침서 작성을 진행 중에 있으며 대한주택공사에서도 토목구조물의 내진 안전성을 확보하기 위하여 내진설계 지침을 작성하게 되었다

특히 본 지침에서 다루는 대한주택공사 토목구조물은 주거단지의 기능을 수행하는 구조물로서 공동구, 지하저수조, 상수관, 하수관 등과 같이 지중에 매설되거나 옹벽 및 사면과 같이 지반과 연관된 형태로 존재한다 이러한 구조물의 피해는 구조물 자체의 피해보다는 구조물이 담당하고 있는 기능을 수행하지 못함으로 발생하는 간접적인 피해가 더 심각한 것으로 인식되고 있으며, 피해를 최소화하기 위해서는 이들 구조물에 대한 내진설계가 필요하다 본 지침은 택지개발 및 주택건설 사업을 수행함에 있어 토목구조물에 대한 내진안전성을 확보하기 위한 설계지침을 수립하여 내진설계의 합리화와 능률화를 도모함을 그 목적으로 한다

1.2 대한주택공사 토목구조물의 분류

본 지침은 대한주택공사가 설계 시공하는 토목구조물을 대상으로 한다 이러한 토목구조물은 구조물의 구조형식 특성을 고려하여 수도시설, 전력 통신시설, 가스 수송시설 등의 라이프라인 구조물을 포함하는 선상지중구조물과 지하공간내 존재하는 지하저수조, 오수정화시설 등의 지중시설물을 포함하는 수평공간구조물 그리고 옹벽 및 사면류로 분류할 수 있다 이러한 분류에 따른 대한주택공사 토목구조물의 종류와 규격 및 재질은 <표 11> 과 같다

〈표 11〉 토목구조물의 종류와 규격(대한주택공사 토목설계지침 참조)

구 분	종 류	규 격 및 재 질
선상지중구조물	오 수 관	<ul style="list-style-type: none"> • D200-D1,800m/m(원심력철근콘크리트관) • D300-D1,200m/m(진동 및 롤전압철근콘크리트관)
	우 수 관	<ul style="list-style-type: none"> • D450m/m 이하(나선형금속관, 원심력철근콘크리트관, 진동 및 롤전압철근콘크리트관) • D500m/m 이상(원심력 철근콘크리트관, 진동 및 롤전압철근콘크리트관)
	급 수 관	<ul style="list-style-type: none"> • D60mm이하(일반배관용 스테인리스 강관, 내충격성 경질 염화비닐관(HIVP)) • D80mm-D200mm(수도용 원심력 덕타일 주철관(2종관), 내충격성 경질 염화비닐관(HIVP)) • D200mm초과(수도용 원심력 덕타일 주철관(2종관), 상수도용 도복장 강관)
	하수암거	<ul style="list-style-type: none"> • 시설규모에 따라 변함 (철근 콘크리트공)
	공 동 구	<ul style="list-style-type: none"> • 내부높이 18-20m • 폭 시설규모에 따라 변화되며 일반적으로 통로 07m 포함하여 14-24m
수평공간구조물	이중구조 지하저수조	<ul style="list-style-type: none"> • 700톤 이하(A-TYPE, 50m×50m) • 700-1,500톤(B-TYPE, 60m×55m) • 1,500-3,000톤(C-TYPE, 70m×60m)
	단일구조 지하저수조	<ul style="list-style-type: none"> • 500톤형 (30m×31m) • 1,000톤형 (40m×40m, 30m×40m) • 3,000톤형 (40m×45m, 50m×50m, 30m×50m) • 5,000톤형 (45m×45m, 60m×60m, 30m×60m)
	오수정화시설	<ul style="list-style-type: none"> • 100-2,000톤
옹벽 및 사면류	사 면	<ul style="list-style-type: none"> • 흙깎기 (5m 미만, 5m 이상)-발파암, 풍화암, 토사 • 흙쌓기 (5m 미만, 5m 이상)-사질토, 점성토
	옹 벽	<ul style="list-style-type: none"> • 높이20m 이하 반중력식, 중력식, 블록식보강토, 연속 장섬유보강토 • 높이20-80m 역T형, 역L형, L형, 블록식 보강토, 연속 장섬유보강토 • 높이8m이상 부벽식, 블록식보강토, 연속 장섬유보강토
기 타		<ul style="list-style-type: none"> • 측구 (콘크리트타설, RC플룸관, RC벤취플룸관) • 맨홀 (원형맨홀 D900-D1800mm, 각형맨홀(12m×12m~18m×12m))

1.3 토목구조물의 내진등급

본 지침은 상위개념인 건설교통부의 내진설계기준에 준하여 대상구조물의 내진등급을 설정한다. 건설교통부의 내진등급에 대한 규정은 다음과 같다.

- (1) 시설물의 내진등급은 시설물의 중요도에 따라서 내진 2등급, 내진 1등급과 내진 특등급의 3가지 등급으로 분류한다.
- (2) 시설물별 구체적인 분류기준은 해당하는 내진설계성능기준에서 규정한다.

1.3.1 등급설정의 상위개념

본 지침에서 대상으로 하는 대한주택공사가 설계·시공하는 토목구조물은 지중구조물의 경우 건축구조물과 연계된 경우가 많다. 그러므로 대한주택공사 토목구조물의 등급을 설정하기 위해서는 상위개념에서 규정한 지중구조물의 내진설계기준과 건축물의 내진설계기준을 살펴볼 필요가 있다.

1.3.1.1 지중 구조물의 내진설계기준

(1) 지중 구조물의 등급설정기준⁽¹⁾

지중 구조물의 내진등급 분류는 구조물의 중요도, 인명피해 여부 및 피해규모의 정도를 기준으로 한다.

① 구조물의 중요도

사회간접구조물로서 구조물이 그 기능을 상실하였을 경우, 관련 사회의 기능을 지속하는데 영향을 미치는 정도에 따라 구분한다.

② 인명피해 여부

시민이 주로 사용하는 구조물로서 지진에 의해 발생하는 구조물의 취약화 과정에서 인명피해가 발생할 가능성이 높은 정도에 따라 구분한다.

③ 피해규모의 산정

지진에 의해 구조물이 기능을 상실하였을 때, 그 피해규모의 산정은 파괴구조물이 원래의 기능을 회복할 때까지 걸리는 시간과 비용, 그리고 주변 환경의 피해 정도에 따라 구분한다.

(2) 지중 구조물의 등급

구조물의 등급은 내진 특등급, 내진 1등급, 내진 2등급으로 구분한다. 내진 특등급 구조물은 지중 구조물 중에서 특별한 안전이 요구되는 시설로서 특별히 지정되는 구조물로 긴급구조와 구호, 국방 및 치안유지에 필요한 구조물이다. 내진 1등급 구조물은 구조물이 피해를 입으면 사회적 혼란이 야기되고 많은 인명과 재산상의 손실을 줄 수 있는 구조물이고 내진 2등급 구조물은 그 외의 일반적인 지중 구조물이다. 일반적으로 지중 구조물의 내진등급은 <표 12>에 의거한다.

다음의 <표 12>는 상위개념의 내용 중 본 기준에서 다루고 있는 대한주택공사 구조물과 관련되는 부분만을 발췌하여 수록하였다.

<표 12> 지중구조물의 등급⁽¹⁾

구조물 종류	내진 1등급	내진 2등급
주거 문화 시설	지하박물관, 지하음악당, 도서관, 지하상가, 위락시설	지하사무실, 스포츠센터
교통시설	지하철, 철도 도로시설	지하주차장, 지하보도
라이프라인 시설	가스 석유 수송시설, 상수도, 전력 통신관로	하수도, 도수시설

13.12 건축물의 내진설계기준

건축물의 등급은 건축물의 중요도에 따라 내진 특등급, 내진 1등급, 내진 2등급으로 분류한다. 내진 특등급 건축물은 폭발성 물질을 보관하는 건축물이나 시설물과 방송국을 포함하고, 내진 1등급 건축물은 지진 후 피해복구를 위해 필요한 중요 건축물과 지진 발생시 거주자나 사용자에게 큰 피해를 줄 수 있는 건축물을 포함한다. 그리고 내진 2등급 건축물은 내진 특등급과 1등급에 포함되지 않는 건축물이다. 여러 용도로 사용되는 건축물이 2개 이상의 등급에 해당할 경우 가장 높은 등급을 적용하여야 한다. 각각의 내진 등급별로 포함되는 대표적인 건축물이나 시설물은 <표 13>과 같다.

〈표 13〉 건축물의 등급⁽¹⁾

구조물의 내진등급	건축물
내진 특등급	방송국 방출되었을 때, 시민에게 위협이 된다고 판단되는 충분한 양의 유독성, 폭발성 물질을 보관하는 건축물 (가스나 유류탱크 등)
내진 1등급	소방서, 경찰서 종합병원과 수술, 응급조치가 가능한 의료시설 발전소등 내진 특등급 시설물을 지원하기 위한 시설물 긴급차량 차고 통신시설 바닥면적의 합계가 5천 제곱미터 이상인 관람집회 시설 (극장, 실내체육관 등) 제반 교육용 건축물 교도소나 구금시설 바닥면적의 합계가 1만 제곱미터 이상인 판매시설 (백화점, 상가 등) 6층 이상의 아파트나 숙박시설 공공시설 중 지진발생 전후로 계속 가동되어야 하는 건축물
내진 2등급	그 외의 건축물

132 대한주택공사 토목구조물의 내진등급

본 지침에서 대상으로 하는 대한주택공사가 설계 시공하는 토목구조물인 선상지중구조물과 수평공간구조물은 건축물에 속해있거나 접합되어 있는 형태가 많다. 이런 경우 토목구조물의 피해정도에 따라 접합된 건축물의 기능이 영향을 받을 수 있다. 그러므로 토목구조물이 건축물에 속해 있거나 접합되어 그 건축물의 기능에 직접적인 영향을 주는 경우에 대해서는 건축물과 같은 내진등급을 따른다. 한편 토목구조물이 독립적으로 그 기능을 수행하는 경우에 대해서는 그 중요도와 인명피해여부, 피해규모의 정도에 따라 상위개념에서 다루고 있는 지중구조물의 등급을 따르도록 규정한다. 이와 같은 기준으로 대한주택공사 토목구조물의 등급설정기준과 해당구조물을 정리하면 〈표 14〉와 같다.

〈표 14〉 대한주택공사 토목구조물의 등급설정기준

등급	등급설정기준	해당구조물
내진 특등급	폭발성 물질을 보관하는 건축물이나 시설물, 방송국과 관련된 토목구조물	방송국 유독성, 폭발성 물질을 보관하는 건축물 (가스나 유류탱크) 등과 관련된 토목구조물
내진 1등급	피해로 인해 사회적 혼란이 야기되고 인간에 해로운 물질을 포함하고 있어, 많은 인명과 재산상의 손실을 가져올 수 있는 구조물과 지진 후 피해복구를 위해 필요한 중요 건축물과 관련된 토목구조물	소방서, 경찰서, 병원, 의료시설, 발전소, 통신시설 6층이상의 아파트나 숙박시설 가스, 석유수송시설 상수도, 전력, 통신관로 식수 정수처리장 핵폐기물 처리시설 지하원유 LNG LPG 저장시설 지하대피소, 군사기지 등과 관련된 토목구조물
내진 2등급	그 외의 일반적인 구조물	하수도, 도수시설 지하주차장, 지하보도 폐수처리장, 곡물 식품 저장소 등과 관련된 토목구조물

위의 기준에 따라 12 절에서 분류한 대한주택공사의 토목구조물별 등급을 설정하면 다음과 같다

- (1) 방송국과 같이 내진 특등급에 해당하는 건축물의 기능에 직접적인 영향을 줄 것으로 예상되는 공동구의 경우는 내진 특등급으로 규정하며 일반적인 전력 통신관로에 해당하는 공동구와 지하저수조 등은 상위개념에서 다루었듯이 내진 1등급으로 규정한다
- (2) 대한주택공사에서 설계 시공하는 오 배수 및 급수관 등의 매설관로는 주로 단지내에 매설되는 소형 관로시설로서 그 중요도와 경제성을 고려하여 내진 2등급 구조물로 규정하며 지진피해정도가 그리 크지 않은 관로시설의 경우 원칙적으로 상세한 내진설계를 생략할 수 있다
- (3) 하수암거나 오수정화시설 등은 그 중요도와 피해규모에 따라 내진 2등급으로 규정한다
- (4) 옹벽 및 사면류의 내진설계 필요 유무는 설계자의 판단에 의해 결정한다 옹벽 및 사면의 내진설계시에는 내진 2등급으로 설계하는 것을 원칙으로 하고 자세

한 내용은 331항을 따른다

- (5) 맨홀 측구 등은 그 중요도와 피해규모의 정도가 미미한 것으로 판단되는 경우에는 내진설계를 고려하지 않는다

1.4 내진성능목표

본 지침의 대상인 대한주택공사 토목구조물의 내진성능목표를 설정하기 위하여 상위개념인 건설교통부의 내진설계기준연구에 따르면 시설물은 내진등급별로 차등을 둔 재현주기를 갖는 설계지진에 대하여 기능수행과 붕괴방지라는 두 가지 성능수준을 만족하도록 요구되고 있다. 이러한 두 가지 성능수준에 대한 정의는 다음과 같다. 기능수행수준은 구조물에 심각한 구조적 손상이 발생하지 않고 지진시나 지진경과 후에도 시설과 구조물의 기능은 정상적으로 유지할 수 있는 성능수준을 의미하며, 붕괴방지수준은 구조물에 상당한 정도의 손상이 발생하는 것은 허용하나 구조물이 붕괴되어 대규모 인명손실이나 재산피해를 방지할 수 있는 성능수준을 의미한다.

본 지침에서는 현 상위개념에 따라, 기능수행수준과 붕괴방지수준의 성능목표 모두를 만족하는 내진설계를 제시하였다. 그러나, 성능목표에 따른 내진설계는 아직 계속적인 조사연구가 필요하다. 따라서, 그 중간단계로 붕괴방지수준만을 고려한 설계를 잠정적으로 인정한다.

1.4.1 내진성능목표의 상위개념

상위개념인 내진설계기준연구에 따르면 각 등급에 대한 내진성능목표는 다음과 같다. 내진 2등급의 경우에는 평균재현주기 50년 지진에 의해서 발생할 수 있는 지반운동에 대해서는 구조물이 기능수행수준을 유지할 수 있도록 설계하고 평균재현주기가 500년인 지반운동에 대해서는 구조물이 붕괴방지수준의 성능을 유지할 수 있어야 한다. 내진 1등급의 경우에는 평균재현주기 100년 지진에 의해서 발생할 수 있는 지반운동에 대해서 구조물이 기능수행수준을 유지할 수 있고 평균재현주기 1000년의 높은 크기의 지반운동에 대해서는 구조물이 붕괴방지수준의 성능을 유지할 수 있도록 설계하게 된다. 내진 1등급 시설보다 높은 내진 특등급 시설의 경우에는 평균재현주기 200년 지진에 대하여 구조물이 기능수행수준을 유지할 것을 요구하고 평균재현주기 2400년의 높은 크기의 지반운동에 대해서 구조물이 붕괴방지수준을 유지할 수 있도록 설계한다. 설계지진에 대한 내진성능목표는 <표 15>와 같다.

〈표 15〉 내진성능목표⁽¹⁾

설 계 지 진	성능수준 재현주기	기능수행수준	붕괴방지수준
	50년	내진 2등급	
	100년	내진 1등급	
	200년	내진 특등급	
	500년		내진 2등급
	1000년		내진 1등급
	2400년		내진 특등급

본 지침에서 다루는 선상지중구조물과 수평공간구조물은 13 절에서 다른 바와 같이 상위개념에서 규정한 지중구조물에 해당하므로 상위개념 중 지중구조물에 대한 내진성능수준을 인용할 필요가 있다 지중구조물과 옹벽 및 사면의 내진성능수준은 다음과 같이 정의한다

1411 지중구조물의 내진성능수준

- (1) 지중구조물은 지진시 기능수행수준과 붕괴방지수준의 두 가지 성능수준을 만족하도록 설계되어야 한다
- (2) 기능수행수준
설계지진하중 발생 후 지중구조물이 원래의 기능을 유지하는 범위내에서 부분적 경미한 피해는 허용하나, 전체적인 붕괴는 허용하지 않는 수준이다
- (3) 붕괴방지수준
설계지진하중 발생 후 지중구조물에 붕괴가 발생하지 않는 정도의 제한적인 구조적 피해는 허용되나 구조물의 전체적인 붕괴는 허용되지 않고 긴급보수를 통해 구조물의 기능을 회복할 수 있는 수준이다
- (4) 구조물별 성능수준의 상세 내용은 다음의 〈표 16〉과 같다

〈표 16〉 지중구조물의 성능수준의 정의⁽¹⁾ (해당부분만 발췌)

구조물 종류	기능수행수준	붕괴방지수준
주거 문화 시설	문화재, 유물, 예술품의 파손이 발생되지 않는 한도내에서 부분적인 피해는 허용한다	인명피해가 발생되지 않는 정도의 피해는 허용한다
교통시설	교통 수송기능을 유지하는 한도에서의 부분적인 피해는 허용한다	전체적인 붕괴가 발생하지 않는 한도에서 쉽게 보수할 수 있도록 한다
라이프라인 시설	중요 간선의 경우 가스 석유, 상수도, 전력 통신 등의 수송기능을 유지하는 한도에서의 부분적인 피해는 허용한다	기능을 상실하더라도 신속하고, 경제적인 보수가 가능하도록 한다

14.1.2 지중구조물의 설계거동 한계

상위개념에 의하면 지중 구조물이 보유해야하는 내진성능은 피해를 입은 지역의 사회적 경제적 영향 등을 종합적으로 감안해서 결정하도록 규정하고 있으며 성능수준에 따른 설계거동의 한계는 다음과 같다

- (1) 기능수행수준은 설계지진하중 발생 후 지중 구조물이 원래의 기능을 유지하는 범위 내에서 부분적 경미한 피해는 허용하나, 전체적인 붕괴는 허용하지 않는 수준으로 구조물이 탄성한계 내에서 거동하여야 한다 지진 피해 발생부분에 대하여 특별한 작업 없이도 쉽게 육안조사가 가능하고 간단한 보수를 통해 기능수행에 문제가 발생되지 않아야 한다
- (2) 붕괴방지수준은 설계지진하중 발생 후 지중 구조물에 붕괴가 발생하지 않는 정도의 제한적인 구조적 피해는 허용되나 구조물의 전체적인 붕괴는 허용되지 않는 수준이다 긴급보수를 통해 구조물의 기능을 회복할 수 있어야하고, 탄성한계를 초과하는 소성거동은 허용할 수 있으나 주요 구조부재의 과도한 소성변형, 지반의 액상화, 기초의 지지력 손실로 인하여 시설의 붕괴나 과도한 침하가 발생되지 않아야 한다

1413 옹벽 및 사면 구조물의 내진성능수준

(1) 옹벽 및 사면 구조물은 지진시 붕괴방지수준을 만족하여야 한다 다만 설계자의 판단으로 옹벽 및 사면의 변위해석이 필요할 때에는 변위해석을 수행한다

(2) 붕괴방지수준

붕괴방지수준은 설계지진하중 발생 후 옹벽 및 사면 구조물에 붕괴가 발생하지 않는 정도의 제한적인 구조적 피해는 허용되나 구조물의 전체적인 붕괴는 허용하지 않고 긴급보수를 통해 구조물의 기능을 회복할 수 있는 수준이다

1414 옹벽 및 사면 구조물의 설계거동한계

붕괴방지수준에서 옹벽 및 사면 구조물의 구조적 손상은 경미한 수준으로 제한되어야 하며 구조물의 영구변형으로 인해 주변 구조물 및 부속시설들이 탄성한계를 초과하는 소성거동은 허용할 수 있으나 구조물의 전체적인 붕괴는 허용하지 않는다

142 대한주택공사 토목구조물의 내진성능목표

본 지침에서 대상으로 하는 대한주택공사 토목구조물의 등급은 132 절에서 다룬 바와 같이 방송국 등 내진 특등급에 해당하는 구조물의 기능에 직접적인 영향을 주는 공동구의 경우 내진 특등급으로 규정하며 일반적인 공동구와 지하저수조 구조물은 1등급으로, 그 외의 경우와 옹벽 및 사면은 내진 2등급으로 규정하였다

각 등급의 구조물에 대한 내진성능목표는 상위개념 기준인 141 절의 〈표 15〉에 따르며 이에 따라 구조물은 기능수행수준과 붕괴방지수준의 두 가지 성능수준을 만족하도록 설계되어야 한다 각 구조물별 내진성능은 상위개념 기준의 규정과 같이 피해를 입은 지역의 사회적 경제적 영향 등을 종합적으로 감안하여 규정하며 이에 따라 기능수행수준과 붕괴방지수준의 거동한계를 규정할 수 있다 대한주택공사 토목구조물의 세부적인 설계거동한계는 〈표 17〉과 같으며 내진설계시에는 이러한 거동한계를 넘어서지 않도록 평가 및 검토가 이루어져야 한다

〈표 17〉 대한주택공사 구조물의 설계거동한계

구조형식	종류	설계거동한계	
		기능수행수준	붕괴방지수준
선상지중 구조물	오수관 우수관	관로 자체나 이음부에 허용 변위를 초과하는 변위가 발 생되지 않으며, 오수 및 우 수의 배수기능을 유지하여 야 한다	관로 자체나 이음부 일부의 파괴는 허용하나, 전체적인 붕괴나 파괴로 인한 주변 시 설이나 인명의 피해가 일어나 는 것은 방지한다
	급수관	관로 자체나 이음부에 허용 변위를 초과하는 변위가 발 생되지 않으며, 급수기능을 유지해야 한다	관로 자체나 이음부 일부의 파괴는 허용하나, 전체적인 붕괴나 파괴로 인한 주변 시 설이나 인명의 피해가 일어나 는 것은 방지한다
	하수 압거	구조물의 미세한 균열이나 변형은 허용하나, 허용변위 를 초과하는 변위가 발생하 지 않도록 한다	전체 구조물의 안전에 관계없 는 2차 부재의 파괴는 허용하 나, 구조물의 붕괴로 인한 주 변시설이나 인명의 피해는 발 생하지는 않도록 한다
	공동구	구조물의 미세한 균열이나 변형은 허용하나, 허용변위 를 초과하는 변위가 발생하 지는 않도록 하며 수용시설 의 기능유지를 저해하지 않 도록 한다	전체 구조물의 안전에 관계없 는 2차 부재의 파괴는 허용하 나, 붕괴로 인한 구조물 내부 의 수용시설에 피해가 발생하 지 않도록 한다
수평공간 구조물	지하 저수조	구조물의 미세한 균열이나 변형은 허용하나, 허용변위 를 초과하는 변위가 발생하 지는 않아야 하며, 저수한 물의 오염을 방지하고 상수 도공급 기능을 유지해야 한 다	전체 구조물의 안전에 관계없 는 2차 부재의 파괴는 허용하 나, 구조물의 붕괴로 인한 주 변시설이나 인명의 피해는 발 생하지는 않도록 한다
	오수 정화 시설	구조물의 미세한 균열이나 변형은 허용하나, 허용변위 를 초과하는 변위가 발생하 지는 않아야 하며, 오수의 유출로 인한 피해를 방지해 야 한다	전체 구조물의 안전에 관계없 는 2차 부재의 파괴는 허용하 나, 구조물의 붕괴로 인한 주 변시설이나 인명의 피해는 발 생하지는 않도록 한다
사면 및 옹벽	사면	-	활동파괴에 대하여 안전해야 한다
	옹벽	-	활동, 전도 및 지지력 파괴에 대하여 안전하여야 한다

2. 설계일반

2.1 내진설계의 기본방침

본 절에서는 대한주택공사 토목구조물을 설계함에 있어서 고려하여야 할 기본적인 내용을 다룬다. 각 구조물에 대한 내진설계의 절차는 다음과 같다.

(1) 건설구조물의 선정

본 지침에서 대상으로 하는 대한주택공사 토목구조물은 구조물의 구조형식 특성을 고려하여 수도시설, 전력 통신시설 등의 라이프라인 구조물을 포함하는 선상지중구조물과 지하공간내 존재하는 지하저수조, 오수정화시설 등의 지중시설물을 포함하는 수평공간구조물 그리고 옹벽 및 사면류로 분류하도록 한다. 설계자는 선정된 구조물의 형식에 대해 이하 제시되는 절차에 따라 적절한 내진설계를 행한다.

(2) 건설지점의 선정

본 지침에서 다루는 대한주택공사 토목구조물은 활성단층이 인접한 지역이나 지나가는 지역에는 건설하지 않도록 하며, 지진시 사면파괴, 액상화, 지반 침하 등의 가능성이 현저한 곳은 가급적 피하고 부득이한 경우에는 지반을 개량하여 발생가능성을 저하시키도록 한다.

(3) 구조물의 중요도에 따른 등급결정

구조물의 등급은 중요도에 따라 13 절에서 다룬바와 같이 등급을 결정하며 구조물은 각 등급에 따라 규정된 성능목표를 만족하도록 설계되어야 한다.

(4) 건설지점의 지반조사

설계자는 지진시 구조물의 내진해석을 위한 지반의 물성파악과 이를 통한 지반의 분류를 위해 지반조사를 수행한다. 이러한 지반의 분류는 지진구역계수와 지진계수의 산정에 관련되며 이는 지진하중을 산정하는데 이용된다. 지반의 분류는 2.2.1 절에서, 분류절차는 부록 A1에서 상세히 다룬다.

(5) 구조형식 및 단면가정

구조의 형식과 제원은 선정된 구조물의 사용목적에 합당하도록 대한주택공사의 규정에 따라 결정한다

(6) 내진해석방법의 결정

대한주택공사 토목구조물 중 지중에 매설된 관로나 지하에 건설된 구조물은 일반적으로 단위체적중량이 주변지반과 비교해서 상대적으로 가볍기 때문에 지진시에 독자적인 진동을 하지 않으며 주변지반의 움직임에 따라 거동한다고 생각할 수 있다 따라서 이와 같은 지중구조물의 지진해석기법으로는 상위개념의 기준에 규정한 바와 같이 응답변위법에 의해 내진해석을 행하는 것을 원칙으로 한다 그러나 본 지침에서는 지중 구조물에 대한 등가정적해석법에 의한 내진해석 방법도 제시하고 있는데, 이 방법은 대부분 지상구조물에 적용하는 해석법이므로 지중 구조물의 경우 주변지반에 비해 단위체적중량이 상당히 크다고 판단되는 구조물에 한해서 적용한다 또한 설계자의 판단에 의해 지진에 대한 종단방향의 구조물 안정검토가 필요한 경우에도 응답변위법을 사용하도록 한다 대한주택공사 토목구조물의 경우 대부분 동적해석에 대한 필요성은 없으나, 위에서 언급한 내진 특등급으로 규정된 구조물에 대해서는 동적해석을 실시하도록 하며, 지반급변부 등 지진시에 국소적으로 큰 응력이나 상대변위가 발생할 것으로 예상되는 지역에 대해서도 응답변위법 외에 필요에 따라 동적해석을 사용한다

옹벽 및 사면류는 붕괴방지 수준에 대해서만 설계한다 이때, 등가정적해석법으로 설계수준의 만족여부를 판단한다

내진계산은 위와 같이 구조물의 형식과 특성에 따라 적절한 해석방법을 선택하여 계산하며 대한주택공사 토목구조물의 경우 구조물별 해석방법은 <표 21>에 기술하였다

<표 21> 구조물별 해석방법

해당구조물	해석방법
오수관, 우수관, 급수관 하수암거	응답변위법
지하저수조 오수정화시설	응답변위법
	등가정적해석법
공동구	응답변위법
옹벽 및 사면	등가정적해석법

(7) 설계하중의 산정

설계하중은 상시하중과 지진시 하중으로 대별할 수 있으며 상시하중은 사하중, 활하중, 토압, 수압 등을 고려하며 지진시 하중으로는 23절에서 다루는 지진구역계수와 지진계수를 이용한 설계지진계수를 사용하여 산정한다. 내진설계시에는 이 두 하중의 조합을 사용하도록 하며 설계하중에 대한 상세한 내용은 24절에서 다루기로 한다.

(8) 내진해석

주어진 내진해석 방법과 설계하중에 의한 내진해석을 수행하며 이에대한 상세한 내용은 3장에서 다루도록 한다.

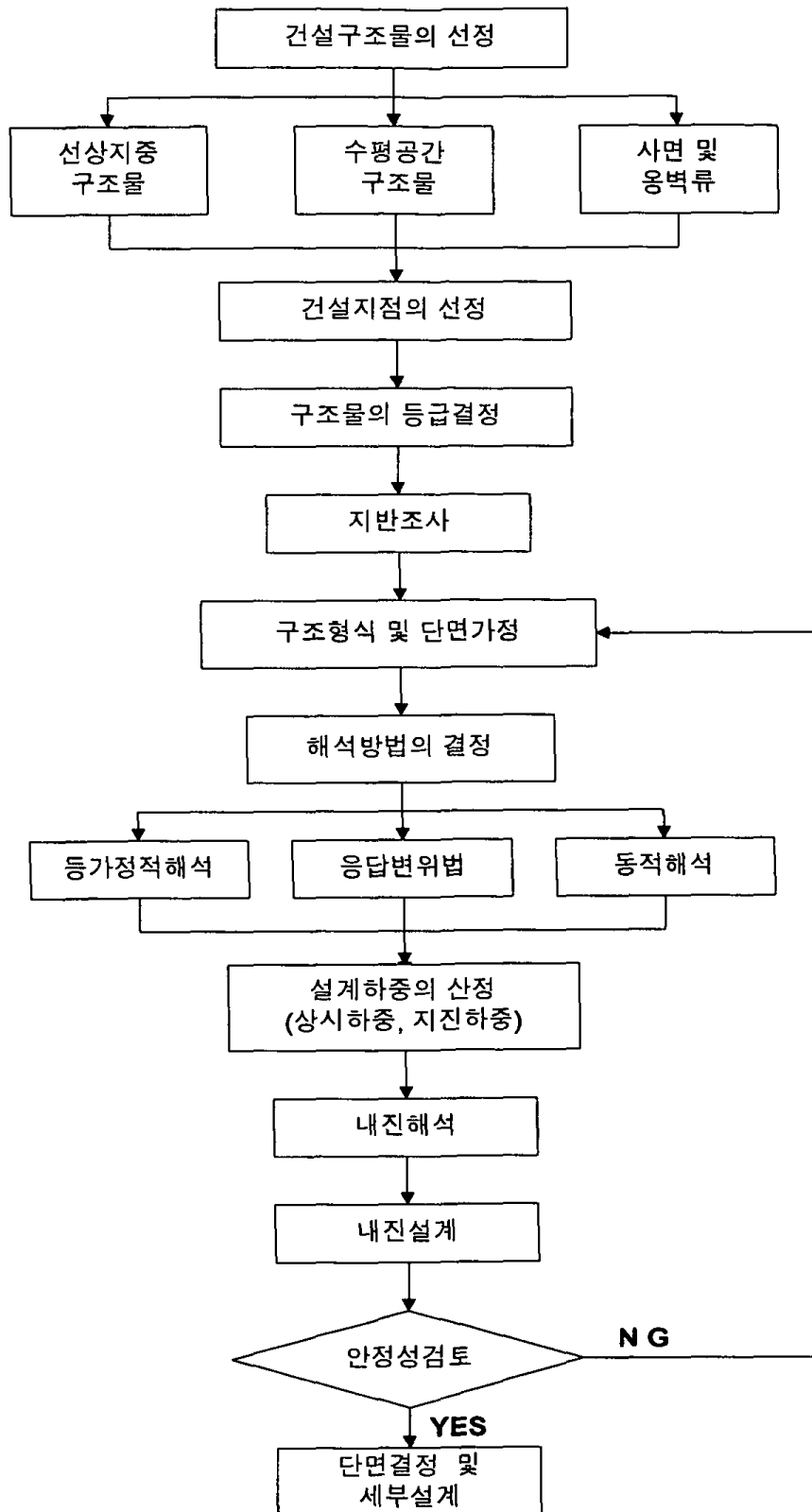
(9) 안정성 검토

내진설계시에는 내진해석에 의해 구한 구조물의 단면력과 응력을 가정한 단면의 허용치와 비교하여 그 안정성을 검토하여야 한다.

(10) 단면결정 및 세부설계

안전성 검토를 통하여 단면을 결정하고 이 때 설계강도 및 세부사항은 관련 시방서의 '내진설계시 특별고려사항'을 만족하도록 한다.

이상의 내진설계절차는 간략히 표현하면 다음의 〈그림 21〉과 같은 순서에 따라 진행된다.



〈그림 21〉 내진 설계 절차

2.2 지반조사 및 지반분류

2.2.1 지반조사

내진설계시 설계자는 구조물의 내진해석에 필요한 지반물성을 파악하기 위하여 지반조사를 실시하여야 한다. 지반조사는 지층의 구성, 각 지층의 역학적 특성파악 및 실내시험용 시료채취 등을 수행하는 현장시험과 채취된 시료를 이용한 실내시험을 포함한다.

내진설계시 필요한 지반 자료는 시추를 통한 지반의 층상구조 및 지하수위 확인, 탄성과 시험을 이용한 전단파속도 주상도 결정, 실내시험을 수행하여 결정된 변형률 크기에 따른 전단 탄성계수 및 감쇠비의 변화, 액상화 관련계수 등이다.

지반조사를 통한 이러한 지반자료를 바탕으로 건설지점의 지반을 분류하도록 하며 분류된 지반종류에 따른 지진계수를 이용하여 내진설계시 사용하는 지진하중의 산정과 설계응답스펙트럼을 구한다.

2.2.2 지반분류

건설지점의 지반은 지반조사를 통하여 얻은 결과를 이용하여 다음과 같이 분류하도록 한다. 상위개념 기준에서 규정한 지반의 분류는 아래와 같다.

- (1) 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 원칙적으로 지반을 <표 2.2>에서와 같이 $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F$ 의 6종으로 분류한다.
- (2) 지반종류 S_F 는 부지의 특성 조사가 요구되는 다음 경우에 속하는 지반이다.
 - ① 액상화가 일어날 수 있는 흙, Quick Clay와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
 - ② 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반
 - ③ 매우 높은 소성을 갖은 점토지반
 - ④ 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토
- (3) 지반의 자세한 분류기준과 절차는 부록 A1에 제시한다.

〈표 22〉 지반의 분류⁽¹⁾

지반 종류	지반종류의 호칭	상부 30~48m에 대한 평균 지반특성 ¹⁾		
		전단파속도(m/s)	표준관입시험 $\overline{N(N_{CH})}$ (blow/foot)	비배수전단강도(kPa) $\overline{S_u}$
S _A	경암지반	1500초과	-	-
S _B	보통암지반	760~1500		
S _C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360~760	> 50	> 100
S _D	단단한 토사지반	180~360	15~50	50~100
S _E	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50
S _F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

위와 같이 분류된 지반은 그 종류에 따라 서로 다른 지진계수를 가지며 이는 23절에서 다루는 지진구역계수와 함께 설계지진동의 산정에 이용된다. 지진계수는 지진구역계수와 관련이 있으므로 23절에서 다루도록 한다.

2.3 설계지진동

본 절에서는 대한주택공사 토목구조물에 대한 내진설계시 사용할 수 있는 지진하중의 산정에 대해 다루기로 한다. 지진하중의 산정을 위해서는 먼저 설계지반운동의 수준을 결정하고 22절에서 분류된 지반에 따른 지진구역계수와 지진계수를 구하여 설계응답스펙트럼을 결정하고 동적해석시에는 설계응답스펙트럼에 준하는 가속도 시간이력을 사용하도록 한다.

2.3.1 설계지반운동 수준

지진발생시 구조물의 거동에 영향을 미치는 지반거동의 주요 요소는 지진의 강도, 주파수 특성, 그리고 지속시간 등이다. 지진의 강도는 일반적으로 최대 가속도를 이용하여 나타내나 이러한 하나의 요소만으로는 구조물에 영향을 미치는 지반진동의 전체적인 에너지를 표현하기에 불충분하다. 강진시에 비탄성거동을 보이는

구조물의 경우 지반진동의 지속시간은 특히 중요한 요소로 작용하게 되며 이러한 구조물에서 비탄성거동과 손상이 발생할 가능성은 지진시의 강한 진동의 진동수에 크게 의존하기 때문에 응답스펙트럼을 이용하여 지반진동의 에너지를 특정지을 수 있다

위와 같은 지반운동의 특성을 반영하기 위하여 설계지반운동으로 고려하여야 할 사항으로서 상위개념 기준의 규정은 다음과 같다

- ① 설계지반운동은 부지 정지작업이 완료된 지표면에서의 자유장 운동으로 정의한다
- ② 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향이 고려되어야 한다
- ③ 기본적인 지진재해도는 보통암 지반을 기준으로 평가한다
- ④ 설계지반운동은 흔들림의 세기, 주파수 내용 및 지속시간의 세 가지 측면에서 그 특성이 잘 정의되어야 한다
- ⑤ 설계지반운동은 수평 2축 방향과, 수직방향 성분으로 정의된다
- ⑥ 설계지반운동의 수평 2축 방향 성분은 세기와 특성이 동일하다고 가정할 수 있다
- ⑦ 설계지반운동의 수직 방향 성분의 세기는 수평 방향 성분의 3분의 2로 가정할 수 있고, 주파수 내용과 지속시간은 수평방향 성분과 동일하다고 가정할 수 있다

(1) 설계지반운동수준

상위개념 내진설계기준연구에 의하면 설계지반운동 수준은 다음과 같이 분류하도록 규정한다

- ① 평균재현주기 50년 지진지반운동 (5년내 초과확률 10 %)
- ② 평균재현주기 100년 지진지반운동 (10년내 초과확률 10 %)
- ③ 평균재현주기 200년 지진지반운동 (20년내 초과확률 10 %)
- ④ 평균재현주기 500년 지진지반운동 (50년내 초과확률 10 %)
- ⑤ 평균재현주기 1000년 지진지반운동 (100년내 초과확률 10 %)
- ⑥ 평균재현주기 2400년 지진지반운동 (250년내 초과확률 10 %)

(2) 설계지반운동수준의 결정

상위개념에서는 기존의 지진재해지도와 지진구역을 재검토하여 설계지반운동수준의 결정을 위한 다음과 같은 기준을 제시하고 있다

- ① 지진재해도 해석 결과에 근거하여 <표 23>에 기술된 바와 같이 우리 나라의 경기도와 강원도 남쪽을 두 개의 지진구역으로 설정한다 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년 지진지반운동에 해당하는 지진구역계수 Z 는 <표 24>에

수록된바와 같이 구역 I에서는 0.11, 구역 II에서는 0.07 이다

〈표 23〉 지진구역 구분⁽¹⁾

지진구역	행정구역	
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주
	도	경기, 강원 남부, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남 북동부
II	도	강원 북부, 전남 남서부, 제주

× 강원도 북부(군, 시) 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
 강원도 남부(군, 시) 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시
 전라남도 북부(군, 시) 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 여천, 화순, 광양시, 나주시, 여천시, 여수시, 순천시
 전라남도 남부(군, 시) 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

〈표 24〉 지진구역계수⁽¹⁾ (재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수, Z(g값)	0.11	0.07

- ② 평균재현주기별 최대유효지반가속도의 비를 의미하는 위험도계수는 〈표 25〉에 주어져있다 이 표에서 기준은 평균재현주기 500년 지진이 사용되었다

〈표 25〉 위험도 계수⁽¹⁾

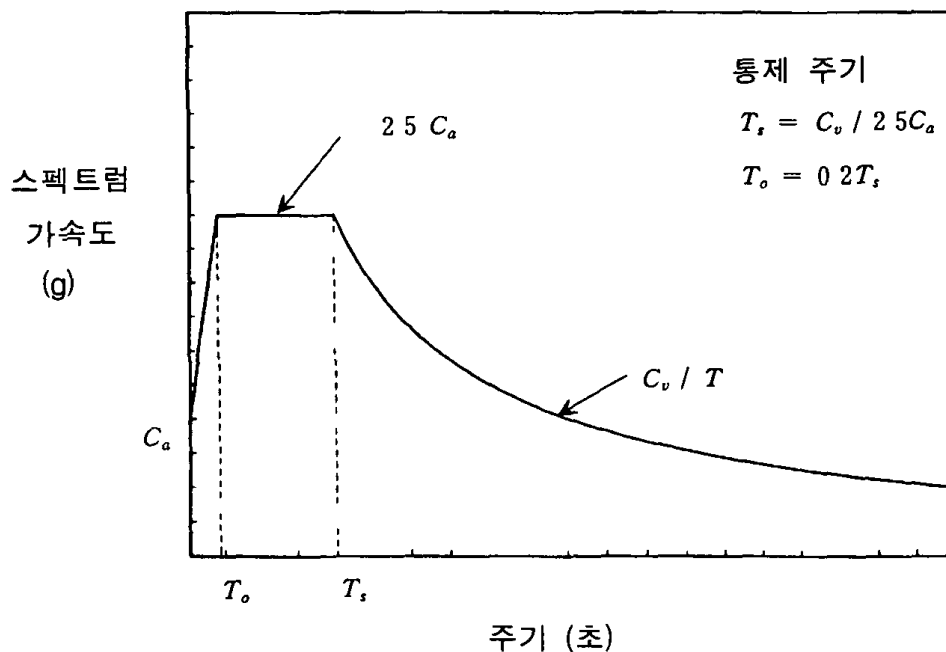
재현주기(년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도 계수, I	0.40	0.57	0.73	1	1.4	2.0

- ③ 시설이 위치할 부지에 대한 지진재해도를 정밀하게 평가하고자 할 경우에는 이 기준 작성의 근거가 되는 지진재해도 해석으로부터 얻어진 등고선 형태의 지진재해도가 사용될 수 있다

위와 같은 기준에 따라 설계지반운동수준은 각 지역의 지진구역계수와 재현주기에 따른 위험도계수를 고려하여 결정한다 다만 좀더 정확한 설계지반 운동수준을 원할 경우에는 부록 A2의 지진재해도를 이용할 수 있다

232 설계응답스펙트럼

- (1) 설계지반운동의 특성은 기본적으로 응답스펙트럼으로 표현한다
- (2) 위험도계수가 10 일 때, 5 % 감쇠비에 대한 표준설계응답스펙트럼은 〈그림 22〉에 정의되어 있다
- (3) 〈그림 22〉에서 표준설계응답스펙트럼의 완전한 결정을 위해 요구되는 C_a 와 C_v 의 값은 〈표 26〉과 〈표 27〉에 지반종류별과 지진구역별로 각각 주어져 있다
- (4) 필요시 시설물의 구조특성과 설계법을 고려하여 〈그림 22〉에 주어진 표준설계응답스펙트럼을 대신할 수 있는 설계응답스펙트럼을 구성할 수 있다 이때 설계응답스펙트럼은 〈그림 22〉에 주어진 표준설계응답스펙트럼보다 안전측이어야한다 단, 대안으로 제시된 설계응답스펙트럼이 〈그림 22〉에 주어진 표준설계응답스펙트럼보다 비안전측일 경우 그 합리성을 입증한다면, 비안전측인 설계응답스펙트럼이 사용될 수 있다



〈그림 22〉 표준설계응답스펙트럼⁽¹⁾

〈표 26〉 지진계수 $C_a^{(1)}$

지반종류	지진구역	
	I	II
S _A	0.09	0.05
S _B	0.11	0.07
S _C	0.13	0.08
S _D	0.16	0.11
S _E	0.22	0.17

〈표 27〉 지진계수 $C_v^{(1)}$

지반종류	지진구역	
	I	II
S _A	0.09	0.05
S _B	0.11	0.07
S _C	0.18	0.11
S _D	0.23	0.16
S _E	0.37	0.23

2 3.3 가속도 시간이력

대한주택공사 토목구조물의 동적해석을 위한 가속도 시간이력의 산정은 다음 사항에 준하여 결정한다 우선 상위개념 기준인 내진설계 기준연구에서 정의하고 있는 가속도 시간이력의 기본요건은 다음과 같다

- (1) 지반가속도 또는 속도나 변위의 시간이력으로 지반운동이 표현될 수 있다
- (2) 공간적인 모델이 필요할 때 지반운동은 동시에 작용하는 3개의 가속도 성분으로 구성되어야 한다
- (3) 부지에서 계측된 시간이력이 사용되는 것이 원칙이나, 필요시에는 대상부지에서 기대되는 시간이력과 유사하다고 판단되는 다른 지역에서 계측된 가속도 시간이력 또는 다음에 기술하는 인공 가속도 시간이력이 사용될 수 있다

여기서 인공 가속도 시간이력의 요건은 다음과 같다

- (1) 인공가속도 시간이력은 응답스펙트럼과 잘 부합되도록 생성되어야 한다
- (2) 지반운동의 장주기 성분이 구조물의 거동에 미치는 영향이 중요하다고 판단될 경우에는 지진원의 발진기구 특성과 국지적인 영향을 고려하여 시간이력을 생성하여야 한다
- (3) 인공가속도의 지속시간은 지진의 규모와 발진기구특성 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여 합리적으로 결정되어야 한다

이에 대한 세부사항과 인공 가속도 시간이력 작성 예는 부록 A3에서 다루기로 한다

2.4 하중조합과 내진해석방법

본 절에서는 내진설계에 사용되는 설계하중의 조합과 이를 이용한 내진해석방법에 대한 일반적인 사항을 다루고자 한다

2 4 1 설계하중과 하중조합

(1) 지중구조물의 설계시 고려하는 하중

지중구조물의 내진설계상 고려해야 하는 하중은 사하중, 활하중, 토압, 수압, 부력, 지반변동에 해당하는 지진의 영향 등이다 구조물의 설계에는 시공 중 및 설계수명기간 중에 작용하는 하중에 대해 적절한 조합을 고려하여야 한다 관로시설을 제외한 구조계산에 적용되는 설계하중과 하중계수는 “콘크리트구조설계기준”을 따르도록 하며 구조물의 특성에 따라 도로교 표준시방서 등의 관련기준을 적용할 수 있다 관로시설의 경우는 상수도 시설기준 등의 관련기준에 따라 설계하중을 산정하도록 한다

이하에 제시된 하중조합은 콘크리트 구조설계기준(1999)에 근거하며 기능수행수준에서는 하중조합 ①에서 ③을 사용하여 설계하도록 한다 그리고 붕괴방지수준에서는 상위개념 기준에 근거하여 각 하중에 대한 하중계수로서 1.0을 사용하는 하중조합 ④를 사용하여 설계하도록 한다

다음에 나열된 하중조합에서 지중구조물과 같이 사하중이 지배적인 구조물에 대해서는 식 중의 1.4D 항에 1.1을 곱하도록 한다 또한 구조물에 충격의 영향이 작용하는 경우에는 활하중(L)을 충격효과(I)가 포함된 ($L+I$)로 대체하여 상기식들을 적용하여야 한다

① 사하중(D)과 활하중(L) 및 지진하중(E)이 작용하는 경우의 하중조합

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.8E \quad (2.1)$$

② 사하중(D)과 활하중(L) 그리고 횡토압과 횡방향 지하수압(H)이 작용하는 경우의 하중조합

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.8H \quad (2.2)$$

③ 사하중(D)과 활하중(L) 및 유체압(F)이 작용하는 경우의 하중조합

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.5F \quad (23)$$

④ 붕괴방지수준의 설계시 상위개념인 건설교통부의 내진설계기준에 근거하여 다음과 같은 하중조합을 사용한다

$$U = 1.0(D + L + H + F + E) \quad (24)$$

각 하중에 대한 자세한 계산식과 적용에는 3장의 내진해석에서 다루기로 한다

(2) 매설관로의 내진설계시 고려하는 하중

매설관로의 내진설계에는 다음과 같이 상시하중인 내압 및 외압 그리고 지진시 지반변위에 의한 하중 등을 고려하여 설계하도록 한다

- ① 내압에 의한 하중
- ② 차륜에 의한 축방향 하중
- ③ 지진시 지반변위에 의한 축방향 하중

각 하중에 대한 설명은 3.1 절의 매설관의 내진해석에서 다루기로 한다

(3) 옹벽 및 사면류

옹벽 및 사면의 등가정적 내진설계시 고려해야 하는 하중은 다음과 같다

- ① 정적인 상태에서 파괴췌기에 작용하는 하중
- ② 지진시 파괴췌기에 추가되는 등가횡방향력

242 내진해석방법

본 지침에서 대상으로 하는 대한주택공사 토목구조물은 선상지중구조물과 수평 공간구조물 등의 지중구조물과 옹벽 및 사면 구조물이다 지중구조물의 경우 지상 구조물과 다른 진동특성을 가지고 있으므로 본 절에서는 지중구조물과 옹벽 및 사면 구조물로 나누어 내진해석방법에 대해 기술한다

242.1 지중구조물의 내진해석방법

(1) 지중구조물의 진동특성

지중구조물의 진동 특성은 관성력이 크게 작용하는 교량, 건축물과 같은 지상구조물과 다르게 생각하여야 한다 지중구조물의 거동특성이 지상구조물의 특성과 다른 점은 크게 두가지이다 첫째는 지중구조물의 진동이 지반의 진동보다 크지 않는다는 점이다 이는 지중구조물의 단위체적중량은 일반적으로 주변 지반의 단위체적중량보다 작거나 같으므로 관성력의 영향이 줄어들고 주변 지반에 둘러 싸여 있으므로 구조물에서 주변 지반으로 소산되는 에너지, 즉 감쇠효과가 매우 크기 때문이다 둘째는 지중구조물의 진동특성은 지중구조물이 주변 지반으로 둘러 싸여 있기 때문에 지반의 운동과 밀접한 관계가 있다는 것이다 이러한 지반운동으로는 지진파의 전달과 액상화, 단층 등의 영구지반변형이 있다

내진 해석시에는 이러한 지중구조물의 거동 특성을 충분히 고려하여야 하며 지중구조물의 내진해석에는 등가정적해석법, 응답변위법 및 동적해석법이 사용된다

(2) 내진해석법

내진해석법 중 등가정적해석법과 응답변위법은 본래의 동적인 문제를 정적인 문제로 바꾸어 놓고 계산하는 방법들이다 등가정적해석법은 구조물의 중량에 설계 지진계수를 곱한 힘을 관성력으로써 구조물에 작용시켜서 지진에 의해 구조물에 발생하는 응력을 구하는 방법으로 주로 지상구조물의 내진 계산법으로 사용된다

응답변위법은 지중구조물의 내진계산을 위해 개발된 방법으로서 앞에서 언급한 지중구조물의 진동특성을 반영하여 지진시에 발생하는 지반변위를 강제적으로 구조물에 작용시켜 지중구조물의 응력을 정적으로 계산하려는 방식에 근거한 내진계산법이다

동적해석법은 시간이력응답 해석법과 응답스펙트럼법이 있으며 주로 구조물의 형상이나 지반조건이 복잡한 경우에 대해서 등가정적해석법이나 응답변위법에 의한 계산 결과의 확인을 위해 쓰여지는 일이 많다 이 방법은 구조물 및 주변 지반을 동역학 수치해석모델로 바꿔 놓고 이것에 지진동을 입력하여 구조물의 응력 등을

수치해석적으로 구하는 것이다

① 등가정적해석법

구조물에 작용하는 지진력을 자중에 비례하는 수평력으로 가하여 정적해석을 수행하는 방법을 등가정적해석법이라고 한다. 이 방법은 지상구조물에 적용하기에 적합한 방법이며 지중구조물과 같이 동적특성이 지상구조물과 다른 구조물에 대해서는 정확도가 떨어진다. 수평력을 구하는데 필요한 비례계수는 설계지진계수로 반영하며 설계지진계수를 산정함에 있어서 다음과 같은 가정사항을 필요로 한다.

- 1) 지진력은 정적외력으로서 구조물의 각 부분의 질량에 작용한다
- 2) 지진력의 방향은 수평방향이며 그 크기는 질량에 비례한다. 이 비례상수를 중력의 가속도로 나눈 값이 지진계수이다
- 3) 지진계수의 값은 각 질량에 대하여 같은 크기이다
- 4) 지진시에 심한 연직진동을 받을 것으로 예상되는 구조물에 대해서는 연직 방향의 지진력을 고려해야 한다. 그 크기를 정하는 방법은 수평진동의 경우와 동일하다

② 응답변위법

응답변위법은 기반면으로부터 발생된 지반운동으로 인하여 지중구조물에 발생된 가상의 변위와 주면전단력을 이용하여 내진해석을 수행하는 방법이다. 응답변위법은 당초 선상 지중구조물이 지진에 의해 축·직각 방향으로 휘거나 혹은 축방향으로 늘어나거나 줄어드는 종단방향의 움직임에 대한 내진 계산법으로 이용되었으며 그 후 비교적 규모가 큰 지중구조물이나 선상지중구조물의 횡단방향의 내진 계산법으로 등가정적해석법을 대신해 이용되는 경우가 많아지고 있다. 응답변위법은 구조물과 지반의 접촉면에서는 상호작용이 일어나며 구조물과 지반의 접촉면이 완전부착상태라는 가정에 기초한다. 응답변위법의 자세한 사항은 부록 A4에 수록하였다.

③ 동적해석법

동적해석법으로는 응답스펙트럼법, 시간이력응답 해석법이 있다. 응답스펙트럼법은 설계응답스펙트럼을 이용하여 특정 하중 및 구조물의 주기특성을 이용하여 최대응답을 구하는 방법이다. 시간이력응답 해석법은 모드중첩법과 직접적분법으로 분

류할 수 있으며 구조물이 탄성거동을 하는 경우에는 모드중첩법이 편리하게 적용되며 구조물이 비선형거동을 하는 경우에는 직접적분법을 적용한다

2.4.2.2 옹벽 및 사면의 내진해석방법

(1) 옹벽 및 사면 구조물의 진동 특성

옹벽 및 사면구조물의 내진해석은 지진파에 대한 지반의 응답특성을 고려해야 한다 일반적으로 설계수평가속도는 기반암에서의 값으로 주어지는 데, 기반암에서의 지진파는 표층을 지나면서 증폭현상이 발생한다 지진시 사면에 작용하는 하중은 지진파의 지표면 최대수평가속도에 따라 결정되므로 지진파가 표층을 지나면서 발생하는 증폭현상을 고려하는 것은 매우 중요하다 등가정적하중을 결정하는 기준이 되는 지표면 최대수평가속도는 지반의 지진응답해석을 통하여 얻는다 지표면 최대수평가속도로는 지진파의 증폭을 지층의 종류에 따라 고려한 설계수평지진계수 <표 3.2>를 사용할 수 있다 그러나 표층이 30m 이상 존재하거나 느슨한 사질토 지반인 경우 지진파가 크게 증폭될 수 있으므로 지반응답특성을 검토해야 한다 특히 액상화가 발생할 수 있는 포화된 느슨한 사질토 층이 있는 경우에는 지진파로 인한 액상화 발생여부를 검토해야 한다 지반응답해석은 보통 Shake 등의 프로그램으로 수행되며, 해석결과는 지진파 전달에 대한 지식이 있는 전문가에 의해 검증되어야 한다 지진으로 인한 수직가속도 성분은 안전성에 미치는 영향이 작으므로 일반적으로 설계에서는 무시한다

(2) 옹벽의 내진해석법

옹벽의 내진해석에는 ① 등가정적해석법(Pseudo-Static Analysis), ② 강성블록해석(Rigid Block Analysis), ③ 동적해석법 등이 있으며 2.1절을 기준으로 하여 구조물의 중요성에 따라 설계자의 판단에 의하여 해석방법을 선택한다

① 등가정적해석법

등가정적해석법은 파괴흙쇄기의 중심에 등가수평가속도와 파괴흙쇄기의 무게의 곱인 등가횡방향지진력을 작용시켜 해석하는 방법이다 이 때 일반적으로 지진에 의한 수직가속도는 옹벽의 안정성에 미치는 영향이 작으므로 무시하고 등가수평가속도는 지진파의 지표면 최대수평가속도의 50%를 사용한다⁽²⁾⁽³⁰⁾

② 강성블록해석법

강성블록해석을 통하여 옹벽의 허용수평변위를 유발시킬 수 있는 수평가속도를 산정한 후 등가정적해석법을 통하여 옹벽의 안정성을 평가하는 방법이다 변위를 허용하는 방법이므로 보다 경제적인 설계가 가능하다

③ 동적해석법

지진하중을 받는 옹벽의 거동을 알아보기 위해서 유한요소법, 유한차분법 등을 이용한 수치해석이 가능하다 일반적으로 동적인 해석 프로그램을 작성하는 것보다 상용 프로그램을 이용한 해석을 수행한다 이 때 벽체와 지반과의 접촉면은 적절한 상호면 요소(Interface Element)를 이용하여 모사한다 수치모델의 좌 우측 경계조건을 고정단이나 롤러, 또는 힌지로 하였을 경우 진동이 반사되므로 반드시 Free Field Boundary로 설정하여야 한다

(3) 사면의 내진해석법

사면의 내진해석방법으로는 ① 등가정적해석법(Pseudo-Static Analysis), ② 강성블록해석(Rigid Block Analysis), ③ 동적해석법 그리고 ④ 액상화에 따른 유동파괴해석 방법 등이 있으며 21절을 기준으로 하여 구조물의 중요성에 따라 설계자의 판단에 의하여 해석방법을 선택한다

① 등가정적해석법

등가정적해석법은 파괴토체의 중심에 등가수평가속도와 파괴토체의 무게의 곱인 등가횡방향지진력을 작용시켜 안정성을 평가한다 이때 지진으로 인한 수직가속도는 사면의 안전성에 미치는 영향이 작으므로 일반적으로 설계에서는 무시한다 이 때 등가수평가속도는 지진파의 지표면 최대수평가속도의 50%를 사용한다^{(2) (30)}

② 강성블록해석

강성블록해석은 사면이 항복할 때의 지진가속도를 항복가속도라 하고 항복가속도가 넘는 지진가속도를 적분함으로써 사면의 변형을 구하는 방법이다 이러한 변위 해석법은 토체의 물성이 균일한 성토체의 변형해석에 주로 쓰인다 즉, 지진하중에 의해 사면에 작용하는 가속도는 시간에 따라 변하는데, 작용 가속도가 항복가속도보다 작아 안전률이 1이상일 때는 사면은 평형상태를 유지한다 가속도가 항복가속도보다 커져 사면이 안전률이 1미만이 되면 사면내의 힘의 평형은 깨지고 파괴토체는 외부하중에 의해 가속도를 가지게 되어 움직인다 Newmark(1965)는 위의 원리를 이용하여 사면의 파괴토체를 경사진 평면위에 있는 강성블록으로 단순화하여 파괴

토체의 변형을 해석하는 방법을 제안하였다

③ 동적해석법

지진하중을 받는 사면의 변형량을 구하기 위해서 유한요소법, 유한자분법 등을 이용한 수치해석이 가능하다 일반적으로 동적인 해석 프로그램을 작성하는 것보다 상용 프로그램을 이용한 해석을 수행한다 동적해석에 대한 일반적인 방법은 33절에서 설명한다

④ 액상화에 따른 유동파괴해석방법

사면에 액상화가 발생할 가능성이 있는 경우 액상화에 따른 유동파괴해석을 수행해야 한다 액상화에 대한 해석은 경험적 방법과 수치적 방법이 있는데 경험적 방법은 액상화 발생 여부만을 결정하는 방법이다 수치적 방법은 사면의 변위를 구할 수 있지만 해석이 매우 어려우므로 경험있는 전문가의 참여가 필요하다 일반적으로 액상화 발생 가능성이 있는 경우는 액상화 방지대책으로 액상화가 일어나지 않도록 조치를 한 후 설계를 하는 것이 보통이다

3. 구조물별 내진해석 및 내진설계 요구사항

3.1 선상지중구조물

본 절에서는 대한주택공사 토목구조물 중 선상지중구조물의 내진해석과 설계에 대해 다루기로 한다

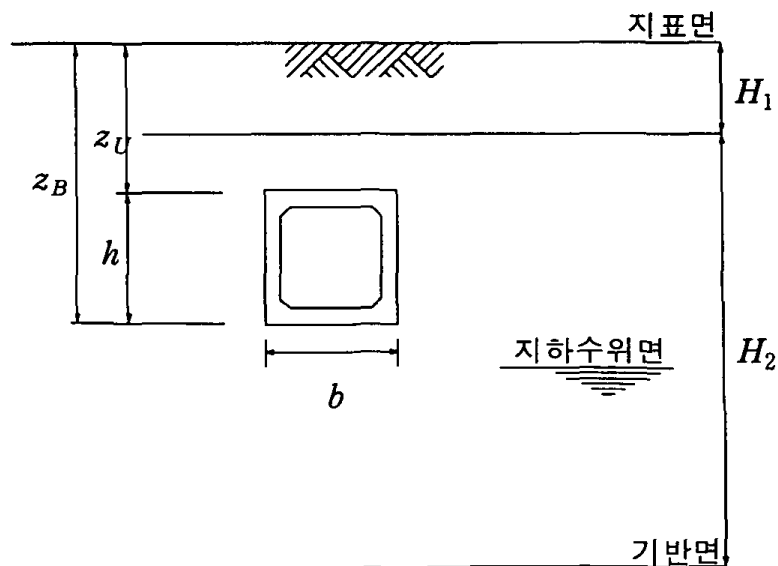
3.1.1 내진해석 방법

선상지중구조물 중 지중에 매설된 관로나 지하에 건설된 구조물은 2.4절에서 다룬 바와 같이 일반적으로 단위체적중량이 주변지반과 비교해서 상대적으로 가볍기 때문에 지진시에 독자적인 진동을 하지는 않으며 주변지반의 움직임에 기인한다 따라서 구조물의 지진해석기법으로는 2장에서 규정한 바에 따라 응답변위법에 의해 내진해석을 행한다

3.1.1.1 암거와 공동구의 내진해석

(1) 단면설정

대한주택공사에서 설계 시공하는 암거와 공동구는 주로 구형의 구조단면을 사용한다 그러므로 여기서는 보다 중요한 구조물로 판단되는 공동구의 성능수준에 맞추어 내진해석을 수행하기로 한다 공동구의 단면은 <그림 31> 과 같이 지표면으로부터 z_U 의 위치에 매설된 높이 h , 폭 b 의 구형단면으로 가정한다



<그림 31> 암거 및 공동구의 단면

압거 및 공동구는 단위체적중량이 주변지반에 비해 비교적 가벼우므로 응답변위법에 의해 횡단방향의 내진해석을 행하며 필요시 종단방향의 내진해석을 할 수 있다. 내진해석은 다음에 제시된 순서에 따라 계산한다

(2) 횡단방향의 내진해석

① 지반조건의 결정

지표면에서 기반면 사이 지반인 표층지반의 특성을 반영한 지반의 고유주기는 다음의 식에 의해 산정한다

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (3.1)$$

여기서 T_G 표층지반의 고유주기 (sec)
 H_i 제 i 층의 두께 (m)
 V_{si} 제 i 층의 전단탄성파 속도(m/sec)

전단탄성파속도는 지반의 조사를 통해 구할 수 있으며 구체적인 실험치가 없을 경우 표준관입시험의 결과를 이용한 다음의 식을 사용한다

$$\begin{aligned} \text{점성토층의 경우} \quad V_{si} &= 100 N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 25) \\ \text{사질토층의 경우} \quad V_{si} &= 80 N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 50) \end{aligned} \quad (3.2)$$

② 지진계수의 결정

지중구조물의 설계지진계수는 내진해석시 기반면에서의 설계수평지진계수(K_h')와 지표면에서의 설계수평지진계수 (K_h)를 사용하며 대상깊이의 설계수평지진계수는 지표면과 기반면의 설계수평지진계수를 직선보간하여 구하도록 한다

기반면의 설계수평지진계수 (K_h')는 2장에 제시된 지진계수와 성능기준에 따른 위험도 계수에 의하여 결정한다

$$\text{기반면의 설계수평지진계수} \quad K_h' = 0.11 \quad I \quad (\text{지진구역 I}) \quad (3.3)$$

$$K_h' = 0.07 \quad I \quad (\text{지진구역 II}) \quad (3.4)$$

여기서 I 위험도계수 (〈표 25〉 참조)

각 등급과 성능수준에 따른 기반면의 설계수평지진계수는 다음의 〈표 31〉과 같다

〈표 31〉 기반면의 설계수평지진계수 (K_h')

지진구역	수평 지진계수					
	2등급		1등급		특등급	
	기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
I	0.044	0.110	0.063	0.154	0.080	0.220
II	0.028	0.070	0.040	0.098	0.051	0.140

예를 들면 일반적인 공동구의 경우 내진 1등급의 구조물로 규정하므로 지진구역 I에서 기능수행수준으로는 0.063 붕괴방지구준으로는 0.154의 값을 사용한다
지표면의 설계수평지진계수는 다음 식 (35)와 같다

$$K_h = C_a \cdot I \quad (35)$$

여기서 C_a 지진계수 (〈표 26〉 참조)

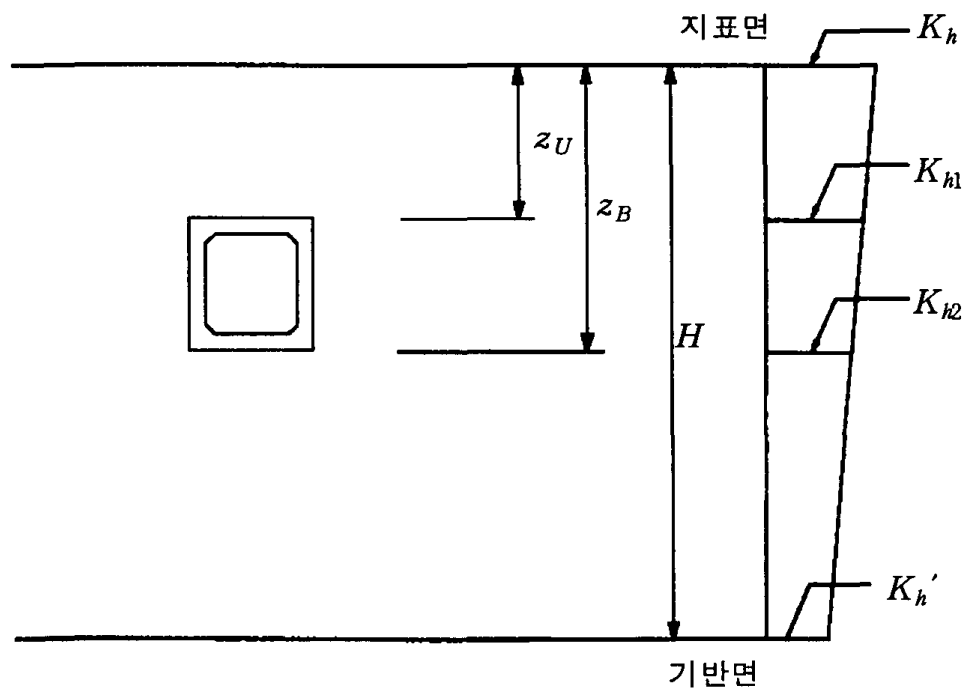
I 위험도계수 (〈표 25〉 참조)

각 등급에 따른 지표면의 설계수평지진계수의 값은 다음의 〈표 32〉와 같으며 심도에 따른 설계수평지진계수는 〈그림 32〉와 같다

〈그림 32〉는 구조물 저판과 상판의 설계수평지진계수 K_{h1} , K_{h2} 가 기반면의 설계수평지진계수 K_h 와 지표면에서의 설계수평지진계수 K_h' 에 따라 결정됨을 나타낸 것이다

〈표 32〉 지표면의 설계수평지진계수 (K_h)

지반종류	지진구역	수평 지진계수					
		2등급		1등급		특등급	
		기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
S_A	I	0.036	0.090	0.051	0.126	0.066	0.180
	II	0.020	0.050	0.029	0.070	0.037	0.100
S_B	I	0.044	0.110	0.063	0.154	0.080	0.220
	II	0.028	0.070	0.040	0.098	0.051	0.140
S_C	I	0.052	0.130	0.074	0.182	0.095	0.260
	II	0.032	0.080	0.046	0.112	0.058	0.160
S_D	I	0.064	0.160	0.091	0.224	0.117	0.320
	II	0.044	0.110	0.063	0.154	0.080	0.220
S_E	I	0.088	0.220	0.125	0.308	0.161	0.440
	II	0.068	0.170	0.097	0.238	0.124	0.340



〈그림 32〉 심도에 따른 수평지진계수

③ 지반의 변위진폭 산정

지진력에 의한 지반의 변위진폭은 다음과 같이 산정한다

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_G \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (36)$$

여기서 U_h 지표면으로부터 깊이 z 에서의 수평방향 변위진폭 (m)

z 지표면으로부터의 깊이 (m)

H 표층지반의 깊이 (m)

T_G 표층지반의 고유주기 (sec)

S_v 기반면에서의 지진계수당 설계응답속도 (m/sec)

기반면에서의 설계응답속도 S_v 는 23절의 응답스펙트럼을 다음의 식을 이용, 속도응답스펙트럼으로 변환하여 사용하도록 한다 23절의 응답스펙트럼에 의하면 각 구간의 경계가 되는 주기는 다음 식과 같다

$$T_o = 0.2 T_s \quad (37)$$

$$T_s = \frac{C_v}{2.5 C_a} \quad (38)$$

위의 주기를 경계로 스펙트럼 가속도는 다음과 같은 식으로 나타낸다

$$S_a = \left[C_a + \left(\frac{2.5 C_a - C_a}{T_o} T_G \right) \right] g I \quad (0 \leq T_G < T_o) \quad (39)$$

$$S_a = 2.5 C_a g I \quad (T_o \leq T_G < T_s) \quad (310)$$

$$S_a = C_v / T_G g I \quad (T_G \geq T_s) \quad (311)$$

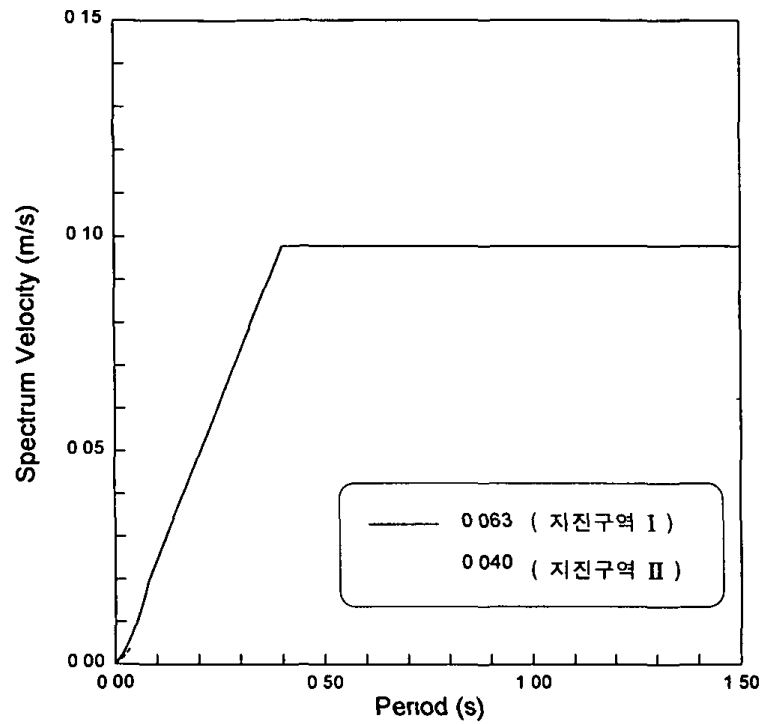
여기서 g 중력가속도 (m/s^2)

또한 응답변위법을 이용한 내진해석에서는 스펙트럼 속도를 사용하므로 위의 식은 아래와 같이 가속도-속도의 관계식을 이용하여 스펙트럼속도를 구한다

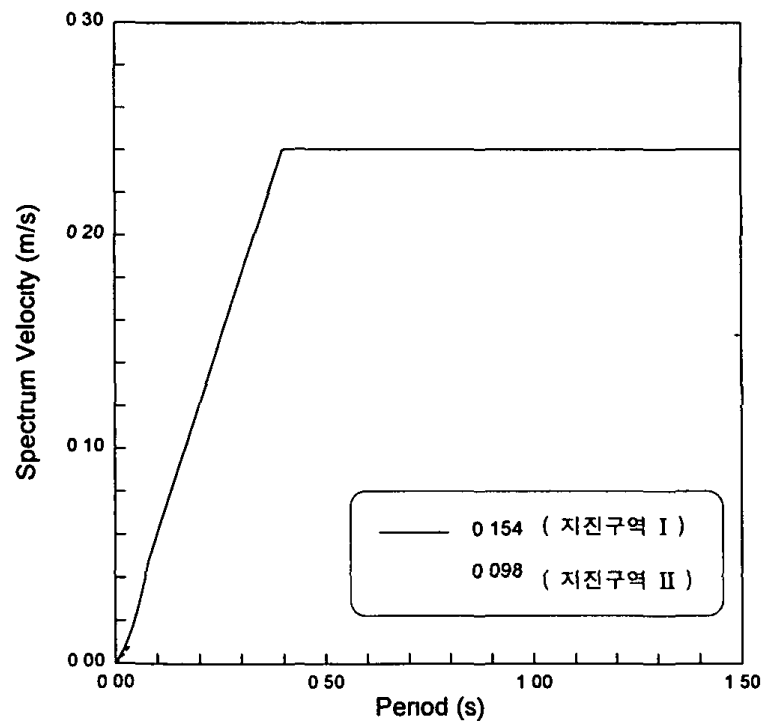
$$S_v = \frac{T_G}{2\pi} S_a \quad (312)$$

여기서 T_G 표층지반의 고유주기 (sec)

위의 식을 이용하여 내진 1등급 기능수행수준과 붕괴방지수준의 지진계수 0.063과 0.154에 대한 설계 속도응답스펙트럼을 구하면 <그림 33>, <그림 34> 와 같다 내진 2등급과 내진 특등급에서의 설계 속도응답스펙트럼은 부록 A5에 제시하였다



〈그림 33〉 내진 1등급에 대한 기능수행수준의 속도응답스펙트럼



〈그림 34〉 내진 1등급에 대한 붕괴방지수준의 속도응답스펙트럼

④ 지반반력계수 산정

지반반력계수는 각종의 조사, 시험 결과에 의해 얻어진 변형계수를 써서, 기초의 재하폭 등의 영향을 고려해 정하는 것을 원칙으로 하며 이하에 제시된 내용은 도로 교 표준시방서를 따른다

$$k_h = k_{h0} \left(\frac{B_h}{30} \right)^{-3/4} \quad (3.13)$$

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-3/4} \quad (3.14)$$

$$k_{hs} = \lambda k_h \quad (3.15)$$

$$k_{vs} = \lambda k_v \quad (3.16)$$

여기서

- k_h 구체측벽의 수평방향 지반반력계수 (t/m³)
- k_v 구체저판의 연직방향 지반반력계수 (t/m³)
- k_{hs} 구체측벽의 전단 지반반력계수 (t/m³)
- k_{vs} 구체저판의 전단 지반반력계수 (t/m³)
- k_{h0} 지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 수평방향 지반반력계수로서 각종 토질시험 조사에 의해 구한 변형계수로부터 추정하는 경우는 다음의 식 (3.18)로 구한다 (수평방향 지반반력계수 산정을 위한 평판재하시험이 어려운 경우는 적절한 시험방법으로 관계 시방규정에 의거하여 실행하도록 한다)
- k_{v0} 지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 연직방향 지반반력계수로서 각종 토질시험 조사에 의해 구한 변형계수로부터 추정하는 경우는 다음의 식 (3.18)로 구한다
- B_h 하중작용방향과 직교하는 기초의 환산재하폭 <표 3.3>에 표시하는 방법으로 구한다
- B_v 하중작용방향 기초의 환산재하폭 $B_v = \sqrt{A_v}$

$$\lambda = 1/3 \sim 1/4 \quad (3.17)$$

$$k_{v0} = \frac{1}{30} \alpha E_0, \quad k_{h0} = \frac{1}{30} \alpha E_0 \quad (3.18)$$

여기서 α 지반반력계수의 추정에 쓰이는 계수 (<표 3.4> 참조)

E_0 <표 34>에 제시한 방법으로 측정 또는 추정한 설계의 대상이 되는 위치에서의 지반의 변형계수

<표 33> 기초의 환산재하폭⁽²⁾

기초형식	B_h
직접기초	$\sqrt{A_h}$
케이슨기초 ($\beta l < 2$)	$\sqrt{A_h}$
케이슨기초 ($1 < \beta l < 2$)	$\sqrt{D/\beta}$
말뚝기초	$\sqrt{D/\beta}$
강관널말뚝기초	$\sqrt{D/\beta}$

여기서 A_h 하중작용방향에 직교하는 기초의 재하면적 (m^2)

A_v 연직방향의 재하면적 (m^2)

D 하중작용방향에 직교하는 기초의 재하폭 (m)

$1/\beta$ 수평저항에 관여하는 지반의 깊이 (m)로서 기초 길이 이하

β 기초의 특성치 $\sqrt[4]{\frac{k_{10} D}{4EI}}$ (m^{-1})

EI 기초의 휨강성 (tf m^2)

<표 34> E_0 와 α 값⁽²⁾

변형계수 E_0 (tf/ m^2)	α	
	평상시	지진시
지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험을 반복시킨 곡선에서 구한 변형계수의 1/2	1	2
보링 공내에서 측정한 변형계수	4	8
공시체의 1축 또는 3축 압축시험에서 구한 변형계수	4	8
표준관입시험의 N값에서 $E_0 = 28 N$ 으로 추정한 변형계수	1	2

⑤ 지진시 하중

1) 지진시 수평하중의 산정

지진력에 의한 수평하중은 다음 식에 의해 계산된다

$$p(z) = k_h \{ U(z) - U(z_B) \} \quad (3.19)$$

여기서 $p(z)$ 지표면으로부터 깊이 z 에서 구조물에 작용하는 수평방향 하중 (tf/m²)

k_h 단위면적당의 수평방향 지반반력계수 (tf/m³)

$U(z)$ 지표면으로부터 깊이 z 인 지점의 수평방향 변위진폭 (m)

$U(z_B)$ 지표면으로부터 깊이 z_B 인 지점의 수평방향 변위진폭 (m)

z_B 지표면으로부터 구체 저면까지의 깊이 (m)

2) 지진시 주면전단력

$$\tau_U = \left(\frac{G_D}{\pi H} \right) S_v T_G \sin \left(\frac{\pi z_U}{2H} \right) \quad (3.20)$$

$$\tau_B = \left(\frac{G_D}{\pi H} \right) S_v T_G \sin \left(\frac{\pi z_B}{2H} \right) \quad (3.21)$$

$$\tau_S = \frac{(\tau_U + \tau_B)}{2} \quad (3.22)$$

여기서 τ_U 지진시 상판에 작용하는 주면 전단력 (tf/m²)

τ_B 지진시 저판에 작용하는 주면 전단력 (tf/m²)

τ_S 지진시 측벽에 작용하는 주면 전단력 (tf/m²)

S_v 기반면에서의 지진계수당 응답속도(m/sec)

T_G 표층지반의 고유주기 (sec)

z_U 지표면에서 상판까지의 깊이 (m)

z_B 지표면에서 저판까지의 깊이 (m)

H 표층지반의 깊이 (m)

G_D 지반의 동적전단변형계수

$$G_D = (\gamma_t/g) V_{SD}^2 \quad (3.23)$$

여기서 γ_t 지반의 단위중량 (tf/m³)
 g 중력가속도 (m/s²)
 V_{SD} 해당구조물을 포함하는 지층의 전단탄성파 속도 (m/sec)
 (해당구조물이 여러 층에 걸쳐있을 경우 그 평균치를 사용한다)

$$V_{SDi} = C V_{si} \quad (3.24)$$

여기서 V_{SDi} 지반의 동적전단변형계수 산출에 이용되는 i 번째지층의 설계전단탄성파 속도
 V_{si} 해당구조물을 포함하는 i 번째 지층의 전단탄성파속도
 C 지반변형에 대한 보정계수

$$\begin{aligned} C &= 0.8 \quad (V_{si} < 300 \text{ m/sec}) \\ C &= 1.0 \quad (V_{si} \geq 300 \text{ m/sec}) \end{aligned} \quad (3.25)$$

3) 지진시 동수압 (암거의 경우)

암거 내에 만수상태시 고려해야하는 벽체단위면적당 작용하는 동수압은 다음과 같다

$$p_f = K_h \gamma_w \frac{B}{2} \quad (3.26)$$

여기서 p_f 벽체 단위면적당의 동수압(tf/m²)
 K_h 지표면의 설계수평지진계수
 γ_w 물의 단위체적중량(tf/m³)
 B 수로폭(m)

암거 내의 수위면이 낮아 지진시 동수압의 영향이 극히 작다고 판단될 경우는 동수압을 무시할 수 있다

4) 지진시 관성력

지진시 자체 중량에 의한 관성력은 다음과 같다

$$P_I = W K_{hav} \quad (3.27)$$

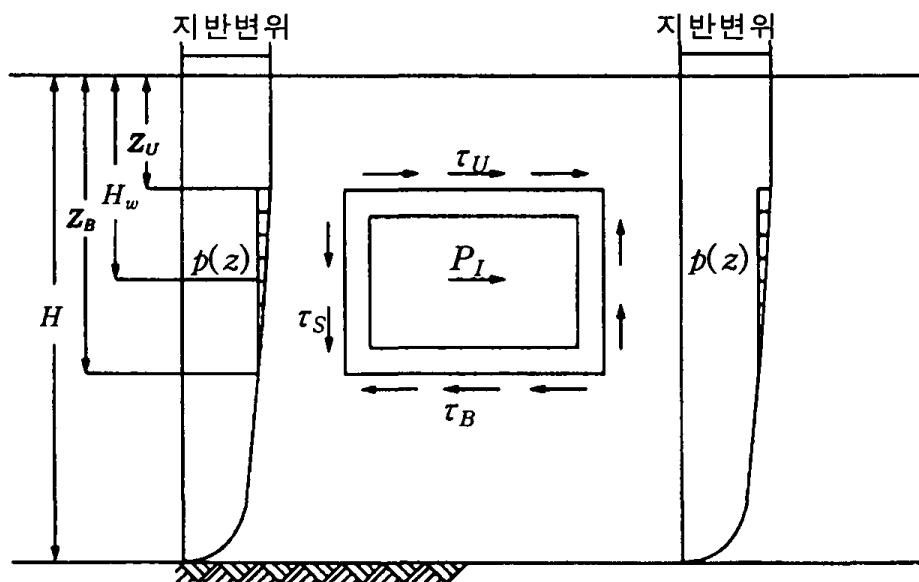
여기서 W 구체중량(tf)
 K_{hav} 설계수평지진계수

K_{hav} 는 기반면과 지표면의 수평지진계수를 다음의 식 3.28 과 같이 직선보간하여
 측벽의 경우 구조물 중심에서의 지진계수를 사용한다

$$K_{hav} = K_h' + (K_h - K_h') \frac{H_w}{H} \quad (3.28)$$

여기서 H_w 기반면으로부터 구조물 중심까지의 거리 (m)
 H 표층지반의 깊이 (m)

내진해석시 지진에 의한 하중이 작용하는 구체는 〈그림 35〉와 같이 나타낼 수
 있으며 이러한 하중의 작용시 각 부재의 단면력을 계산하여 설계에 적용하도록 한
 다



〈그림 35〉 구체에 작용하는 지진시 하중

(3) 종단방향의 내진해석

① 지반조건의 결정

표층지반의 특성을 반영한 지반의 고유주기는 앞에서 다룬 식 (3 1)에 의해 산정할 수 있다

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (3 1)$$

여기서 H_i 제 i 층의 두께 (m)
 V_{si} 제 i 층의 전단탄성파 속도(m/sec)

② 지반진동의 파장

지진으로 인한 지반진동의 파장은 다음 식으로부터 구한다

$$L = \frac{2 L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (3 29)$$

$$L_1 = T_{GS} V_{SD} \quad (3 30)$$

$$L_2 = T_{GS} V_{BS} \quad (3 31)$$

여기서 L 지반진동의 파장

T_{GS} 표층지반의 수정고유주기 $T_{GS} = 1.25 T_G$

V_{SD} 표층지반의 전단탄성파속도 (m/sec) (다음 식에 의해 표층지반 전체의 평균치를 사용한다)

$$V_{SD} = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{V_{si}}} \quad (3 32)$$

여기서 V_{BS} 기반면의 전단탄성파속도 (m/sec)

③ 지진시 지반변위진폭 산정

지반의 변위진폭은 표층지반의 고유주기를 이용하여 다음 식에 의해 계산된다 이를 통해 지반변위에 의한 구조물 축방향의 응력을 검토한다

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_{GS} \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (3.6)$$

$$U_v(z) = \frac{1}{2} U_h(z) \quad (3.33)$$

④ 지반의 강성계수 산정

공동구의 종단방향, 그와 직교하는 수평면내 및 연직면내의 지반의 강성계수는 다음 식에 의해 산정된다

$$k_1 = C_1 G_D \quad (3.34)$$

$$k_2 = C_2 G_D \quad (3.35)$$

$$k_3 = C_3 G_D \quad (3.36)$$

여기서 C_1, C_2, C_3 지반의 강성계수 k_1, k_2, k_3 에 대한 정수로 실험 등의 조사결과를 기초로 정함 일반적으로 $C_1, C_2 = 1.0$,
 $C_3 = 3.0$ 의 값을 사용한다

G_D 지반의 동적전단변형계수 (종단방향의 검토시 표층지반 전체의 평균치를 사용한다)

$$G_D = \frac{\gamma_{teq}}{g} V_{SD}^2 \quad (3.37)$$

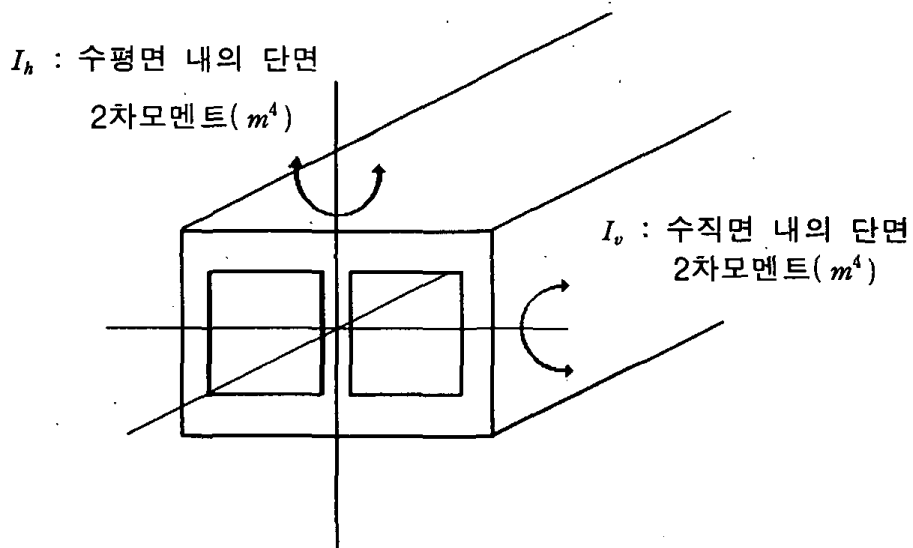
γ_{teq} 표층지반의 환산단위체적중량

$$\gamma_{teq} = \frac{\sum \gamma_i H_i}{H} \quad (3.38)$$

V_{SD} 표층지반의 전단탄성파속도 (식 3.32 이용)

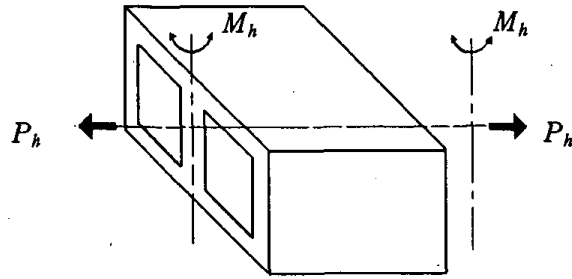
⑤ 단면력의 산정

종단방향의 검토시에는 <그림 3.6>에 나타낸 것처럼 단면적과 수평면 내의 단면 2차모멘트 I_h 와 수직면내의 단면 2차모멘트 I_v 를 구하며, 이는 지진으로 인한 축력과 휨모멘트를 구하는데 이용된다.

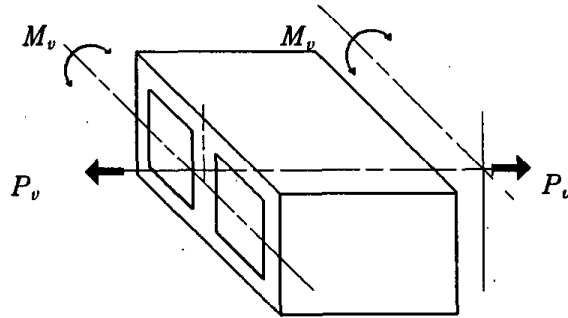


<그림 3.6> 단면의 모형화

이에 따라 수평면 내 및 수직면 내의 지반진동에 의한 축력과 휨모멘트를 <그림 3.7>과 같이 나타낼 수 있으며, 공동구의 이음부를 제외한 단면력은 다음의 식 (3.39) ~ 식 (3.42)와 같이 구할 수 있다.



(a) 수평면 내



(b) 수직면 내

〈그림 3.7〉 지진시 단면력

$$P_h = \alpha_1 \cdot \xi_1 \cdot \frac{\pi E \cdot A}{L} \cdot U_h \quad (3.39)$$

$$P_v = \alpha_1 \cdot \xi_1 \cdot \frac{\pi E \cdot A}{L} \cdot \frac{U_h + U_v}{2} \quad (3.40)$$

$$M_h = \alpha_2 \cdot \xi_2 \cdot \frac{4\pi^2 E \cdot I_h}{L^2} \cdot U_h \quad (3.41)$$

$$M_v = \alpha_3 \cdot \xi_3 \cdot \frac{4\pi^2 E \cdot I_v}{L^2} \cdot U_v \quad (3.42)$$

여기서 P_h, P_v : 수평면내 및 연직면내의 지진진동에 의한 축력 (tf)

M_h, M_v : 수평면내 및 연직면내의 지진진동에 의한 휨모멘트 (tf · m)

E : 콘크리트 탄성계수 (tf/m²)

A : 공동구 단면적 (m²)

I_h, I_v : 공동구 수평면내 및 연직면내 단면 2차 모멘트 (m⁴)

U_h, U_v 공동구 중심위치의 깊이에서 지진진동의 수평방향 및 연직방향의
변위진폭 (m)

ξ_1, ξ_2, ξ_3 이음부를 설계하는 경우 단면력의 저감계수

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 공동구 종단방향과 종단방향에 직교하는 수평면내 및 연직면
내의 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

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \frac{L'}{L}\right)^2} \quad (3.43)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \frac{L'}{L}\right)^4} \quad (3.44)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_3} \frac{L'}{L}\right)^4} \quad (3.45)$$

여기서

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{k_1}{E A}}$$

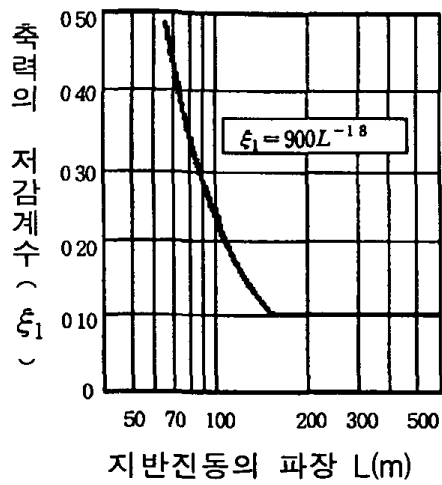
$$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{k_2}{E I_h}}$$

$$\lambda_3 = \sqrt[4]{\frac{k_3}{E I_v}}$$

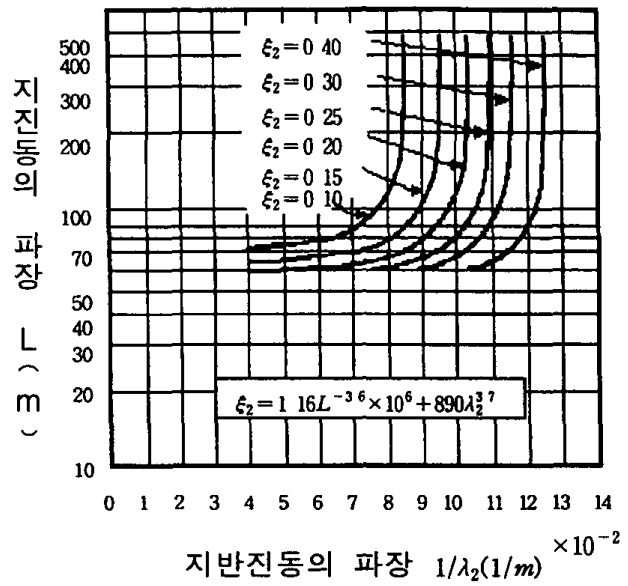
$$L' = \sqrt{2} L$$

k_1, k_2, k_3 공동구의 종단방향, 그와 직교하는 수평면내 및 연직면내의 지반의
강성계수

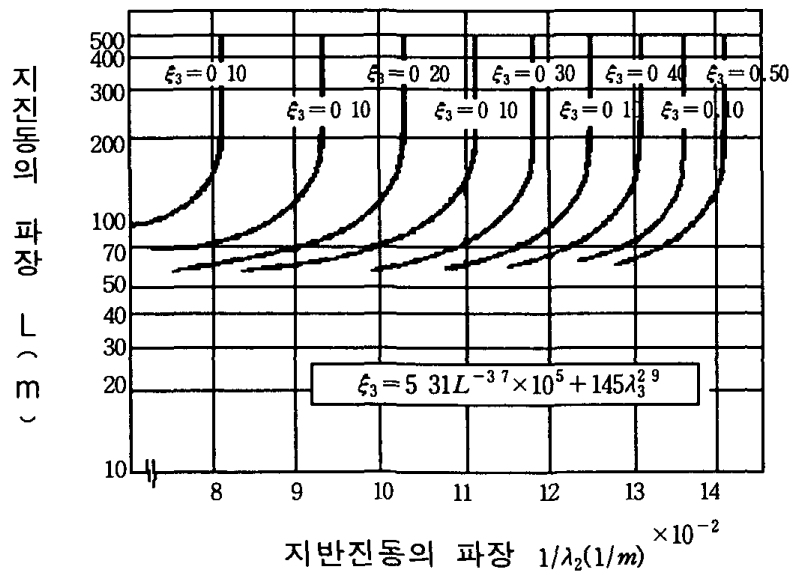
일반적으로 건조수축에 의한 균열방지 등의 이유로 공동구에는 30m 정도의 간격
으로 이음이 설치되는 경우가 많다 이음을 설치하면 여기서 지진시 단면력이 저
감되며, 이음부를 설계하는 경우 단면력의 저감계수 ξ_1, ξ_2, ξ_3 는 다음의 <그림
38>로부터 구한다 ξ_1, ξ_2, ξ_3 는 각각 종단방향, 횡단방향, 상하방향의 저감계
수이다



(a) 지진시 종단방향의 저감계수



(b) 지진시 횡단방향의 저감계수



(c) 지진시 상하방향의 저감계수⁽¹¹⁾

〈그림 38〉 이음에 의한 지진시 단면력의 저감계수

축력과 휨모멘트를 동시에 받는 공동구 단면의 응력도를 구하기 위해 지진진동방향, 위상관계 등을 고려하여 위에서 계산된 단면력을 다음과 같이 합한다

1) 수평면내

$$P_h' = 1/\sqrt{2} \quad P \quad (346)$$

$$M_h' = 1/\sqrt{2} \quad M_h \quad (347)$$

2) 연직면내

$$P_v' = 1/\sqrt{2} \quad P \quad (348)$$

$$M_v' = 1/\sqrt{2} \quad M_v \quad (349)$$

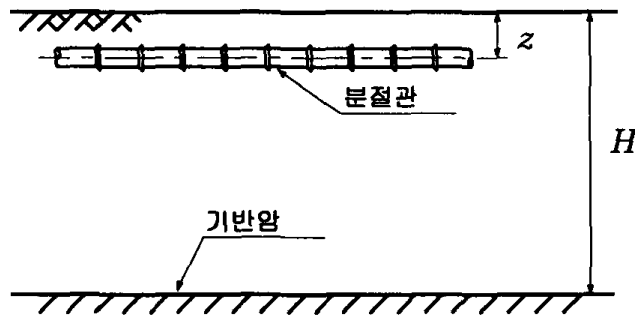
여기서 $P = \sqrt{2 P_h'^2 + 2 P_v'^2}$ 이다

3 1.1.2 매설관의 내진해석

일반적으로 매설관은 단위체적중량이 주변지반의 중량에 비해 작기 때문에 응답변위법에 의하여 내진해석을 수행한다. 매설관은 크게 분절관과 연속관으로 구분할 수 있으며, 덕타일 주철관은 분절관에 속하고 용접강관은 연속관에 속한다. 분절관의 경우 지진으로 인한 관자체의 변형이 허용변형률을 넘어서거나 응력 증가로 인한 파손이 발생하기도 하지만 관의 이음부가 탈락하거나 파손되는 경우가 대부분이다. 연속관의 경우 이음부가 용접되어 관과 일체로 작용한다고 가정할 수 있기 때문에 관 자체의 변형률 또는 응력의 증가로 인하여 파손이 발생된다. 따라서 내진해석을 위해서는 분절관의 경우 이음부의 변형률, 그리고 이음부의 굴곡각에 대하여 검토가 필요하고, 연속관의 경우 관의 변형률에 대한 검토가 필요하다.

(1) 분절관의 지진해석

응답변위법에 의한 분절관의 내진해석은 공동구의 계산 순서와 유사하며 다음과 같은 순서에 따라 계산할 수 있다. 분절관의 지반모형은 〈그림 39〉와 같다.



〈그림 39〉 분절관의 지반모형

① 지반조건 결정

표층지반의 고유주기는 다음의 식에 의해 산정한다.

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (3.1)$$

② 지진계수의 결정

기반암의 설계 지진계수 K_h' 는 3장에 제시된 설계지진계수와 성능기준에 따른 위험도 계수에 의하여 결정되며 앞에서 제시한 식 (3.3)과 식 (3.4)를 사용한다

$$\text{기반면의 설계수평지진계수 } K_h' = 0.11 \quad I \quad (\text{지진구역 I}) \quad (3.3)$$

$$K_h' = 0.07 \quad I \quad (\text{지진구역 II}) \quad (3.4)$$

여기서 I 위험도계수 (〈표 2.5〉 참조)

③ 지진시 지반변위진폭 산정

지반의 변위진폭은 표층지반의 고유주기를 이용하여 앞에서 다룬 식 (3.6)에 의해 계산된다 이를 통해 지반의 강성계수를 구하고 지반변위에 의한 관측방향의 응력을 검토한다

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_G \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (3.6)$$

④ 파장의 결정

지진으로 인한 파장은 앞에서 다룬 식 (3.29)~(3.31)에 의해 구한다

$$L = \frac{2 L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (3.29)$$

$$L_1 = T_G V_{SD} \quad (3.30)$$

$$L_2 = T_G V_{BS} \quad (3.31)$$

⑤ 지반의 강성계수

$$k_{g1} = 1.5 \frac{\gamma_t}{g} V_{SD}^2 \quad (3.50)$$

$$k_{g2} = 3 \frac{\gamma_t}{g} V_{SD}^2 \quad (3.51)$$

여기서 k_{g1} 축방향 변위에 관한 지반강성계수

k_{g2} 축방향과 직교하는 변위에 관한 지반강성계수

γ_t 흙의 단위체적중량 (tf/m³)
 V_{SD} 관로위치의 표층지반의 전단탄성파속도 (m/sec)

⑥ 관의 이음부의 변형량

지진시 지반변위진폭 U_h 로부터 다음 식에 따라 관축방향의 변형량을 구한다

$$|u_J| = u_0 \overline{u_J} \quad (3.52)$$

여기서

$$u_0 = \alpha_1 U_a$$

$$U_a = \frac{1}{\sqrt{2}} U_h$$

$$u_J = \frac{2\gamma_1 |\cosh \beta_1 - \cos \gamma_1|}{\beta_1 \sinh \beta_1}$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + (\gamma_1/\beta_1)^2}$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{k_{gl}}{E A_p}} l$$

$$\gamma_1 = \frac{2\pi l}{L'}$$

$$L' = \sqrt{2} L$$

이고, 각각의 계수는 다음과 같다

L 지진진동의 파장 (m)
 U_h 지반변위진폭 (m)
 k_{gl} 축방향에 변위에 대한 지반 강성계수
 E 탄성계수 (tf/m²)
 A_p 관의 단면적 (m²)
 l 이음부와 이음부사이의 거리 (m)

⑦ 이음부의 굴곡각

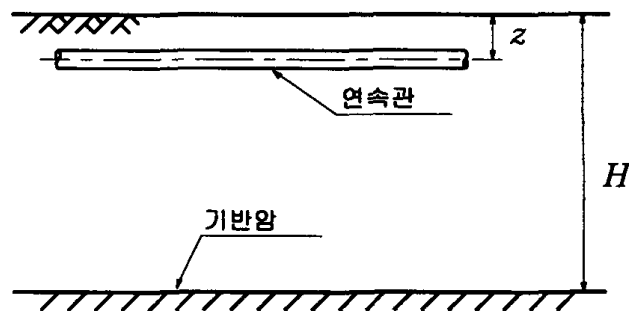
지진으로 인한 이음부의 굴곡각은 다음 식으로부터 구한다

$$\theta = \frac{4 \pi^2 l U_h}{L^2} \quad (353)$$

여기서 θ 이음부의 굴곡각 ()
 l 이음부와 이음부사이의 거리 (m)
 U_h 지반변위진폭 (m)
 L 지진진동의 파장 (m)

(2) 연속관의 지진해석

연속관의 지반모형은 〈그림 3 10〉에 나타내었다



〈그림 3 10〉 연속관의 지반모형

연속관의 지진해석은 지반조건, 지진계수, 지반변위진폭, 지반강성계수 등에 따라 이루어진다. 분절관은 내진해석을 응력에 대하여 검토한 반면에 연속관의 경우 변형률에 대하여 해석을 수행한다. 지진으로 발생한 변형률은 다음 식을 이용하여 산정한다

$$\epsilon_x = \sqrt{\epsilon_L^2 + \epsilon_B^2} \quad (354)$$

$$\begin{aligned}
\text{여기서} \quad \epsilon_L &= \alpha_1 \frac{\pi U_h}{L} \\
\epsilon_B &= \alpha_2 \frac{2\pi^2 D U_h}{L} E \\
\alpha_1 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L'} \right)^2} \\
\alpha_2 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2 L} \right)^4} \\
\lambda_1 &= \sqrt{\frac{k_{g1}}{E A_p}} \\
\lambda_2 &= \sqrt[4]{\frac{k_{g2}}{E I_p}} \\
L' &= \sqrt{2} L
\end{aligned}$$

k_{g1} , k_{g2} 와 L 등은 앞의 식 (3 29), 식(3 50) 식(3 51)에 따라 구한다

3.1 1.3 지중구조물의 동적해석법

지중구조물에 대하여 내진설계를 하고자 할 경우 가장 정확한 방법으로 알려져 있는 방법은 지진의 가속도 시간이력을 사용하여 지중구조물과 주변지반 전체를 모형화 하여 동적해석을 수행하는 방법이다 지진의 가속도 시간이력을 사용한 동적 해석법은 현재로서는 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법이지만 단점으로는 많은 노력과 시간을 필요로 한다

유한요소법이나 유한차분법과 같은 수치해석방법을 이용하여 지중구조물의 동적 해석을 수행할 때에는 지반조사자료를 이용하여 기반암까지를 모형화하여야 한다

그리고 기반암의 위치에 기반암에서 측정된 지진기록을 가해주어서 지반과 지중구조물 계의 거동을 해석하여야 한다 또한 수치모형의 좌 우측 경계의 경계조건은 고정단이나 롤러 또는 힌지 지점을 설정하였을 경우 진동이 반사되므로 신뢰성 있는 해석결과를 얻을 수 없다 따라서 Free Field Boundary를 설정하여야 한다 요소망을 작성할 때는 가장 작은 크기의 요소가 전체 시간간격을 결정하므로 균등하게 분할하여야 하며 구조물이 위치하지 않은 주변부는 요소의 크기가 큰 요소망을 형성하는 것이 전체 시간을 절약할 수 있는 방법이다 또한 입력지반자료의 정확성이 해석결과의 신뢰도를 결정하는 가장 중요한 요소이므로 입력물성치를 선정할 때는 신중하게 결정하여야 한다 특별히 동적해석법에서 해석결과의 신뢰도에 큰 영향을 미치는 동적전단탄성계수와 지반의 감쇠비는 중요한 구조물일 경우 실내시험을 통하여 적절한 변형률 수준에서의 값을 사용할 수 있도록 하여야 한다

3.12 내진설계 요구사항

본 절에서는 선상지중구조물의 내진설계 요구사항에 대해 서술한다 선상지중구조물의 내진설계는 311절의 내진해석 방법의 결과로서 구한 하중을 구조물에 작용시켜 단면력을 구하며 이를 통해 구조물의 안정성을 검토하는 과정이 포함된다

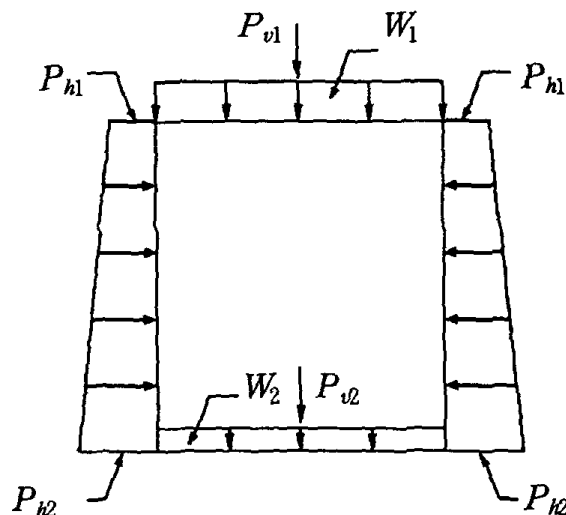
(1) 암거 및 공동구의 내진설계

- ① 암거 및 공동구를 포함하는 선상지중구조물은 대부분의 경우 횡단방향에 대해 설계한다
- ② 선상지중구조물에서 종방향 해석이 필요할 경우 311절의 종단방향의 내진해석 방법을 참고할 수 있다
- ③ 내진해석 방법에 따른 단면력은 상시하중에 의한 일반설계 단면력과 비교하여 단면의 안정성과 단면보강의 필요성을 검토하여야 한다
- ④ 횡단방향의 내진설계시 하중의 재하

횡단방향의 설계시 작용하는 하중은 상시하중과 지진시 하중인 지진토압, 주변전단력, 지진시 동수압, 관성력 등이며 구조물에 이러한 하중이 작용하는 형태는 다음과 같다

1) 상시하중

상시하중은 사하중과 활하중, 토압과 자중 등을 고려하며 24절의 하중조합을 이용하여 상부 Slab과 하부 Slab, 측벽에 대해 〈그림 311〉과 같이 작용시키도록 한다

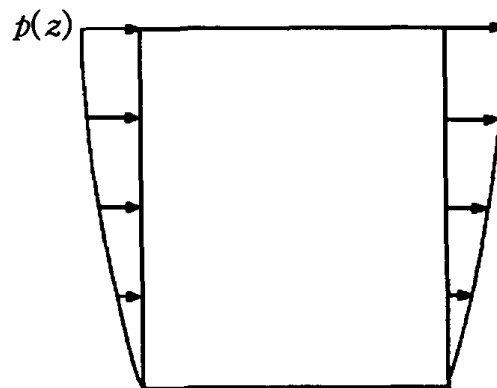


〈그림 311〉 구체에 작용하는 상시하중

여기서 P_{h1}, P_{h2} 상하부 측벽토압
 P_{v1} 활하중
 P_{v2} 활하중 (내부설비 하중)
 W_1 사하중
 W_2 구조물의 자중

2) 지진시 토압하중

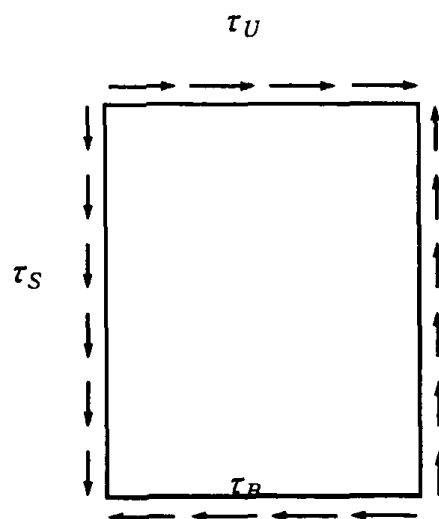
지진시 토압하중 $p(z)$ 는 지반의 변위진폭을 이용하여 〈그림 3 12〉와 같이 수평력으로 작용한다



〈그림 3 12〉 구체에 작용하는 지진시 토압하중

3) 지진시 주면전단력

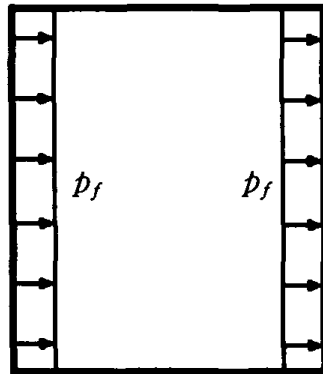
지진시 상 하부 Slab 과 측벽의 주면전단력(τ_U, τ_S, τ_B)은 다음의 〈그림 3 13〉과 같이 작용한다



〈그림 3 13〉 구체에 작용하는 지진시 주면전단력

4) 지진시 동수압 (만수시)

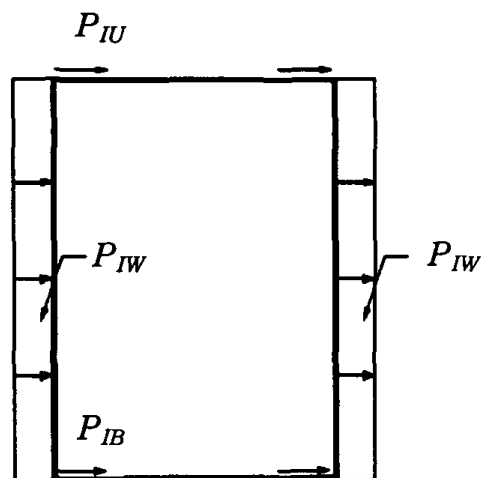
암거의 경우 만수상태시 고려해야하는 지진시 동수압 p_f 는 〈그림 3 14〉와 같이 벽체에 작용한다



〈그림 3 14〉 구체에 작용하는 지진시 동수압

5) 지진시 관성력

지진시 자체중량에 의한 상 하부 Slab 과 측벽의 관성력 (P_{IU} , P_{IB} , P_{IW})은 〈그림 3 15〉와 같이 작용한다



〈그림 3 15〉 구체에 작용하는 지진시 관성력

(2) 매설관의 내진설계

매설관의 내진설계는 3 1 1절에서 다룬 내진해석 방법으로 수행하며 내진해석에 의한 변형량이 허용변형량을 만족하는지 판단하여 설계한다

3.2 수평공간구조물

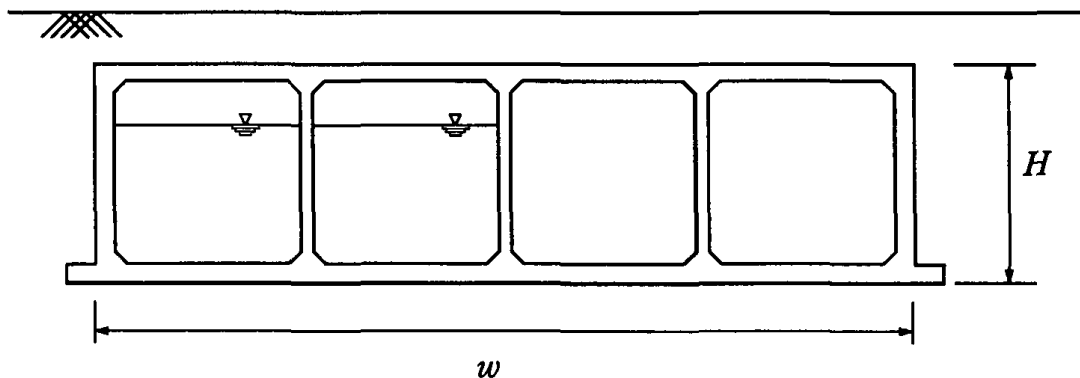
본 절에서는 대한주택공사 토목구조물 중 수평공간구조물의 내진해석과 설계에 대해 다루기로 한다

3 2 1 내진해석 방법

수평공간구조물 중 일반적으로 단위체적중량이 주변지반과 비교해서 상대적으로 가벼운 구조물은 2장에서 규정한 바에 따라 응답변위법에 의해 내진해석을 행하도록 하며 단위체적중량이 주변지반의 중량에 비해 비교적 크다고 판단되는 지하저수조와 오수정화시설 등의 구조물에 대해서는 등가정적해석법을 이용하여 내진해석을 행할 수도 있다

(1) 단면설정

지하저수조의 단면은 〈그림 3 16〉과 같이 가정한다



〈그림 3 16〉 지하저수조의 단면도

(2) 등가정적해석법에 의한 내진해석

등가정적해석법은 2장에서 다루었듯이 지중구조물의 지진에 따른 지반의 진동하중을 정역학적인 횡토압으로 환산하여 정적해석을 수행하는 방법으로 다음의 절차에 따라 내진해석을 수행한다

① 지진계수의 결정

등가정적해석법에서는 지진토압의 산정에 이용되는 지진계수는 지표면의 설계 지진계수 K_h 를 사용하며 이는 3장에 제시된 식 (35)를 사용한다

$$\text{지표면의 설계수평지진계수 } K_h = C_a \quad I \quad (\text{지진구역 I}) \quad (35)$$

$$\text{지표면의 설계수직지진계수 } K_v = \frac{2}{3} K_h \quad (355)$$

여기서 C_a 지진계수 (〈표 26〉 참조)

I 위험도계수 (〈표 25〉 참조)

② 지진 토압의 산정

지진시 구조물의 측벽에 작용하는 지진토압은 Mononobe-Okabe에 의해 개발된 다음의 등가정적해석법에 의해 계산한다 이 방법은 Coulomb의 토압이론을 지진에 의해 발생된 수직 및 수평지진계수를 고려할 수 있도록 수정한 방법이다 이에 대한 자세한 내용은 33절 옹벽 및 사면류의 Mononobe-Okabe 방법에 자세히 설명한다

1) 비포화토의 경우

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - K_v) K_{AE} \quad (356)$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \psi)}{\cos \psi \cos^2 \theta \cos(\delta + \theta + \psi) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta - \psi)}{\cos(\delta + \theta + \psi) \cos(\beta - \theta)}} \right]^2} \quad (357)$$

$$\tan \psi = \frac{K_h}{1 - K_v} \quad (358)$$

여기서 γ 지반의 단위체적중량 (tf/m³)

H	구조물의 수직높이 (측벽높이, m)
ϕ	지반의 내부마찰각 (°)
δ	지반과 구조물간의 마찰각 (일반적으로 $\delta = \phi/2$)
β	구조물 배면의 지표면의 경사각(°)
θ	측벽의 수직에 대한 각(°)
K_h, K_v	지진의 수평 및 수직지진계수 (m/sec ²)

2) 구조물이 지하수위 아래에 있을 경우

구조물이 지하수위 아래에 있는 경우에 대해서는 식(356)에 γ_b, K_{AE}' 를 대입하여 토압을 산정하고 이에 동수압과 정수압을 더해주는 방식을 취한다

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma_b K_{AE}' (1 - K_v) H^2 + E_{wd} + E_{us} \quad (359)$$

여기서 γ_b 지반의 수중단위중량

K_{AE}' 보정된 동적주동 토압계수

E_{wd}, E_{us} 각각 동수압과 정수압

K_{AE}' 와 E_{wd} 는 지반의 투수계수에 따라 다음의 두 가지 경우로 나뉘어 산정된다

(a) 지하수위 아래 지반이 동적 투수율이 높은 지반일 경우 (투수계수 $\geq 5 \times 10^{-4}$ m/sec)

동적 투수율이 높은 지반의 간극수는 흙입자에 제약을 받지 않고 자유롭게 움직일 수 있다고 가정하여 흙입자에 해당하는 부분에만 관성력이 작용하는 것으로 보아 보정된 ψ' 를 식(360)과 같이 산정한다

$$\tan \psi' = \frac{\gamma_d}{\gamma_b} \frac{K_h}{1-K_v} = \frac{G_s}{G_s-1} \frac{K_h}{1-K_v} = \frac{G_s}{G_s-1} \tan \psi \quad (360)$$

여기서 γ_d 지반의 건조단위중량

G_s 흙의 비중

간극수에 의한 동수압은 수리 동역학적인 방법에 의하여 유도된 Westergaard의 해로부터 다음과 같이 산정한다

$$E_{wd} = \frac{7}{12} K_h \gamma_w (H - h_w)^2 \quad (361)$$

여기서 γ_w 물의 단위중량

h_w 지표면에서 지하수위까지의 깊이

(b) 지하수위 아래 지반이 동적 투수율이 낮은 지반일 경우 (투수계수 $\leq 5 \times 10^{-4}$ m/sec)

동적 불투수 지반일 경우, 흙입자와 간극수가 같이 움직인다고 가정한다 따라서, 흙입자와 간극수 모두에 관성력이 작용하므로 보정된 ϕ'' 는 다음의 식 (362)와 같이 산정한다

$$\tan \phi'' = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \frac{K_h}{1 - K_v} = \frac{G_s + e}{G_s - 1} \frac{K_h}{1 - K_v} = \frac{G_s + e}{G_s - 1} \tan \phi \quad (362)$$

여기서 γ_{sat} 지반의 포화단위중량

e 지반의 간극비

③ 지진시 동수압의 산정

지진시 지하저수조에 저장된 물에 의한 동수압은 다음에 제시되는 응답변위법의 지진시 동수압 고려방법에 따르도록 한다

(3) 응답변위법에 의한 내진해석

응답변위법에 의한 지하저수조의 내진해석은 다음의 순서에 따라 계산할 수 있다. 해석법은 앞에서 다룬 선상지중구조물의 횡단방향에 대한 해석과 동일하므로 여기서는 지하저수조 및 오수정화시설내의 동수압 고려방법에 대해서만 추가하여 설명한다.

지하저수조 및 오수정화시설은 평상시 수조내부에 물을 저장하므로 지진시 수면의 동요 등을 고려하여 다음과 같은 Housner 식을 기본으로 하여 계산한다.

$$p(y) = \sqrt{3} K_{hw} \gamma_w H_f \left[\frac{y}{H_f} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{H_f} \right)^2 \right] \tanh \left(\sqrt{3} \frac{l}{H_f} \right) \quad (3.63)$$

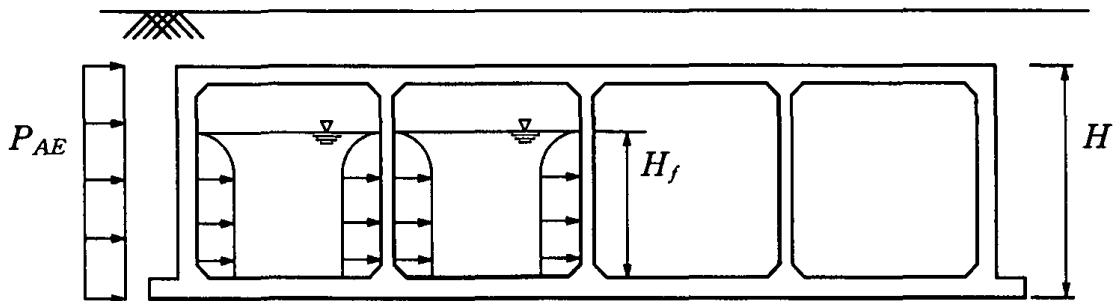
여기서	$p(y)$	지진시 동수압 (tf/m ²)
	K_{hw}	구체중심깊이에 따른 설계 수평지진계수
	H_f	수심 (m)
	γ_w	물의 단위체적중량 (10 tf/m ³)
	y	수면까지의 깊이 (m)
	l	장방형수조 길이의 1/2 (m)

3 2.2 내진설계 요구사항

본 절에서는 수평공간구조물의 내진설계 요구사항에 대해 서술한다 수평공간구조물의 내진설계는 3 2 1절의 내진해석 방법의 결과로서 구한 하중을 구조물에 작용시켜 단면력을 구하며 이를 통해 구조물의 안정성을 검토하는 과정이 포함된다

(1) 등가정적해석법에 의한 설계

- ① 등가정적해석법에서 설계수평지진계수는 지표면 값의 50%를 사용하며 설계수직지진계수는 토압에 주는 영향이 크지 않으므로 무시할 수 있다
- ② 등가정적해석법에 의한 설계에서는 상시하중에 지진시 하중을 추가하여 단면력을 산정하며 상시하중의 작용은 3 1절의 상시하중과 같으며 이에 추가적으로 가해지는 지진시 하중은 다음의 〈그림 3 17〉과 같이 작용시키도록 한다
- ③ 지하저수조나 오수정화시설에 저수된 물의 지진시 동수압에 대해서는 3 2 1절의 식 (3 63)을 사용하여 〈그림 3 17〉과 같이 고려한다
- ④ 내진해석 방법에 따른 단면력은 상시하중에 의한 일반설계 단면력과 비교하여 단면의 안정성과 단면보강의 필요성을 검토하여야 한다



〈그림 3 17〉 지하저수조에 작용하는 지진하중

(2) 응답변위법에 의한 설계

응답변위법에 의한 수평공간구조물의 내진설계는 앞에서 다룬 선상지중구조물의 횡단방향에 대한 설계와 동일하며 지하저수조 및 오수정화시설내 동수압의 고려에 대해서만 추가하여 설계한다

3.3 옹벽 및 사면류

본 절에서는 2절을 원칙으로 하여 대한주택공사 토목구조물 중 옹벽 및 사면류의 내진해석과 설계에 대하여 다루기로 한다

3.3.1 내진해석 방법

3.3.1.1 옹벽의 내진해석 방법

(1) 일반

- ① 옹벽의 내진해석 시에는 우선 옹벽이 정적하중하에서 설계기준을 만족하여야 한다
- ② 지진에 대한 옹벽의 안정해석은 정적설계기준을 만족하는 옹벽에 대하여 실시한다 동적옹벽해석은 옹벽파괴로 인하여 인명 및 재산에 큰 피해 발생이 예상되는 옹벽에 대하여 실시한다 지진이 일어나는 동안 옹벽에 작용하는 배면 토압의 증가, 동수압의 발생, 뒷채움재의 액상화 현상 등에 의해 옹벽의 손상 또는 파괴가 빈번히 발생하므로, 지진지역에서는 옹벽설계 및 세부사항에 대한 세심한 주의가 요구된다

(2) 동적안정기준

- ① 벽체의 기초 및 기초지반은 동적옹벽해석 결과 미끄러짐 파괴, 지지력 파괴, 전도파괴, 전체활동파괴 등에 안정해야 한다
- ② 앵커시스템은 지진시 유발되는 토압 및 지반변형에 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다
- ③ 벽체의 구조적 요소(Structure Elements)들의 파괴가 일어나지 않아야 한다

(3) 동적옹벽해석법

- ① 지진발생시 벽체의 이동가능성에 따라 항복벽체와 비항복벽체로 나눈다
- ② 동적옹벽해석에는 ㉠ 등가정적해석법(Pseudo-Static Analysis), ㉡ 강성블록해석(Rigid Block Analysis), ㉢ 동적해석법 등이 있으며 구조물의 내진등급과 내진성능목표에 따라 해석방법을 선택한다
- ③ 등가정적해석법
 - 1) 일반적으로 항복벽체에 작용하는 토압은 등가정적해석법인 Mononobe-Okabe방법을 통하여 산정한다

용력 P_{AE} 는 다음식에 의하여 산정할 수 있다

$$P_{AE} = \frac{1}{2} K_{AE} \gamma H^2 (1 - K_v) \quad (3.64)$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \psi)}{\cos \phi \cos^2 \theta \cos(\delta + \theta + \psi) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta - \psi)}{\cos(\delta + \theta + \psi) \cos(\beta - \theta)}} \right]^2} \quad (3.65)$$

$$\tan \psi = \frac{K_h}{1 - K_v} \quad (3.66)$$

여기서 γ 뒷채움 지반의 단위중량 (tf/m)

ϕ 뒷채움 지반의 내부마찰각 (°)

β 뒷채움 지반 배면경사각 (°)

θ 옹벽의 수직에 대한 경사각 (°)

δ 벽면마찰각 (°)

$$\psi = \tan^{-1} \frac{K_h}{1 - K_v}$$

H 기초지반고에서 옹벽수직높이

(안정해석시 배면이 경사진 경우는 가상배면 높이)

K_h, K_v 지진의 수평 및 수직지진계수 (3.1.1절 <표3.2> 참조)

식(3.65)에서 제곱근안에 있는 항이 0보다 작아지면 허근이 되어 토압계수를 구할 수 없다 따라서, Mononobe-Okabe 방법을 이용할 때 뒷채움 지반의 배면경사는 식 (3.67)을 만족하여야 한다

$$\beta \leq \phi - \psi \quad (3.67)$$

$\beta > \phi - \psi$ 인 경우에는 식(3.65)에서 제곱근안에 있는 항을 0 으로하여 아래식 (3.68)와 같이 토압계수를 산정한다 (Eurocode, 1996⁽²¹⁾)

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \psi)}{\cos \phi \cos^2 \theta \cos(\delta + \theta + \psi)} \quad (3.68)$$

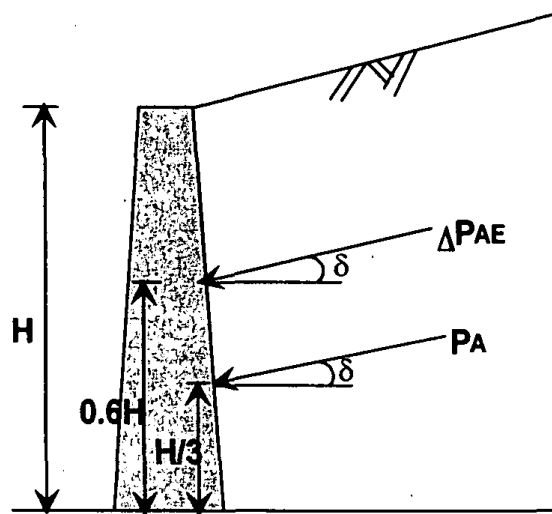
주동상태의 총 작용토압 P_{AE} 는 식(3.69)와 같이 정적인 토압, P_A 와 동적인 토압, ΔP_{AE} 로 나눌 수 있다 이 때 정적인 토압, P_A 는 Rankine의 방법이나 Coulomb

의 방법을 통하여 구한다.

$$P_{AE} = P_A + \Delta P_{AE} \quad (3.69)$$

정적인 토압은 옹벽저판에서 높이 $H/3$ 위치에 작용한다. Seed와 Whitman(1970)⁽²⁸⁾은 동적인 토압은 대략 $0.6H$ 위치에 작용한다고 하였다. 따라서, 〈그림 3.19〉와 같이 옹벽저판에서 총 작용력의 작용위치 \bar{z} 는 식(3.70)과 같다.

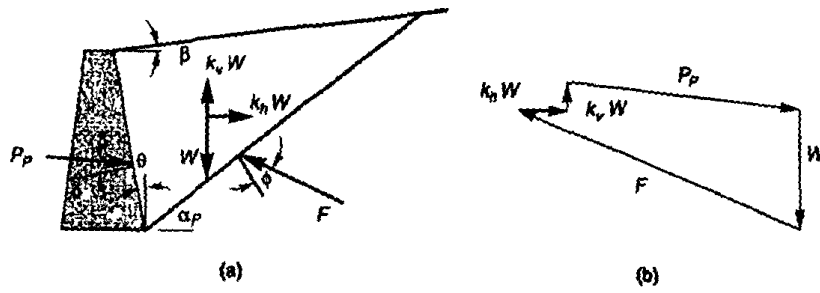
$$\bar{z} = \frac{P_A (H/3) + \Delta P_{AE} (0.6H)}{P_{AE}} \quad (3.70)$$



〈그림 3.19〉 동적토압의 작용점

② 동적수동토압

〈그림 3.20〉은 수동상태에서 건조된, 비점착성 뒷채움 지반에 작용하는 힘이 나타나 있다. 이 때 옹벽에 작용하는 동적수동토압, P_{PE} 는 다음과 같다.



〈그림 3 20〉 Mononobe-Okabe방법에서 수동쇄기에 작용하는 힘

$$P_{PE} = \frac{1}{2} K_{PE} \gamma H^2 (1 - K_v) \quad (371)$$

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\phi + \theta - \psi)}{\cos \phi \cos^2 \theta \cos(\delta - \theta + \psi) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi + \beta - \psi)}{\cos(\delta - \theta + \psi) \cos(\beta - \theta)}} \right]^2} \quad (372)$$

수동상태의 총작용토압, P_{PE} 는 동적주동토압에서와 마찬가지로 정적인 토압과 동적인 토압으로 분리할 수 있다 동적인 토압, ΔP_{PE} 는 정적요소와 반대방향으로 작용하여 수동저항력을 감소시킨다 따라서, P_{PE} 는 P_p 보다 작게된다

$$P_{PE} = P_p - \Delta P_{PE} \quad (373)$$

(5) Wood의 방법

Wood(1973)⁽²⁵⁾는 〈그림 321〉과 같이 강성기초로 결합된 2개의 강성벽 사이에 선형-탄성 거동을 하는 균질한 흙이 있는 경우, 동적인 토압을 산정하는 방법을 제안하였다 〈그림 321〉에서 H는 벽체의 높이, L은 두 강성벽체 사이의 거리를 나타내는데 L은 현장조건에 따라 결정한다 Wood(1973)는 일정한 수평가속도가 토체에 작용했을 때 매끈한 강성벽체에 작용하는 동적인 토압, ΔP_{eq} 와 벽체의 바닥에 대한 동적 회전 모멘트, ΔM_{eq} 를 식(374)와 식(375)와 같이 제안하였다

$$\Delta P_{eq} = \gamma H^2 \frac{a_h}{g} F_p \quad (374)$$

$$\Delta M_{eq} = \gamma H^3 \frac{a_h}{g} F_m \quad (3.75)$$

여기서 a_h 설계수평가속도

g 중력가속도

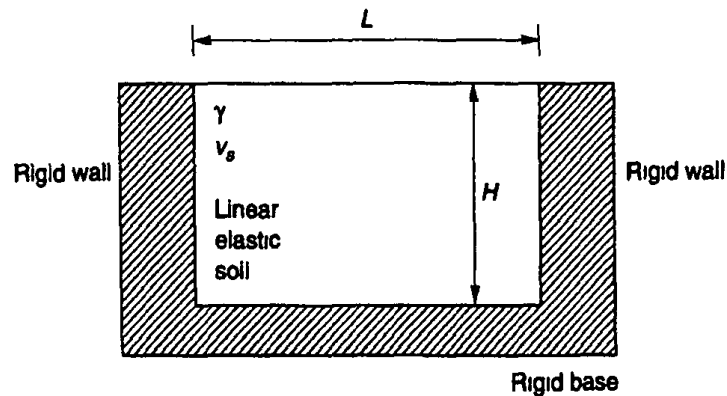
H 기초지반고에서 옹벽수직높이

(안정해석시 배면이 경사진 경우는 가상배면 높이)

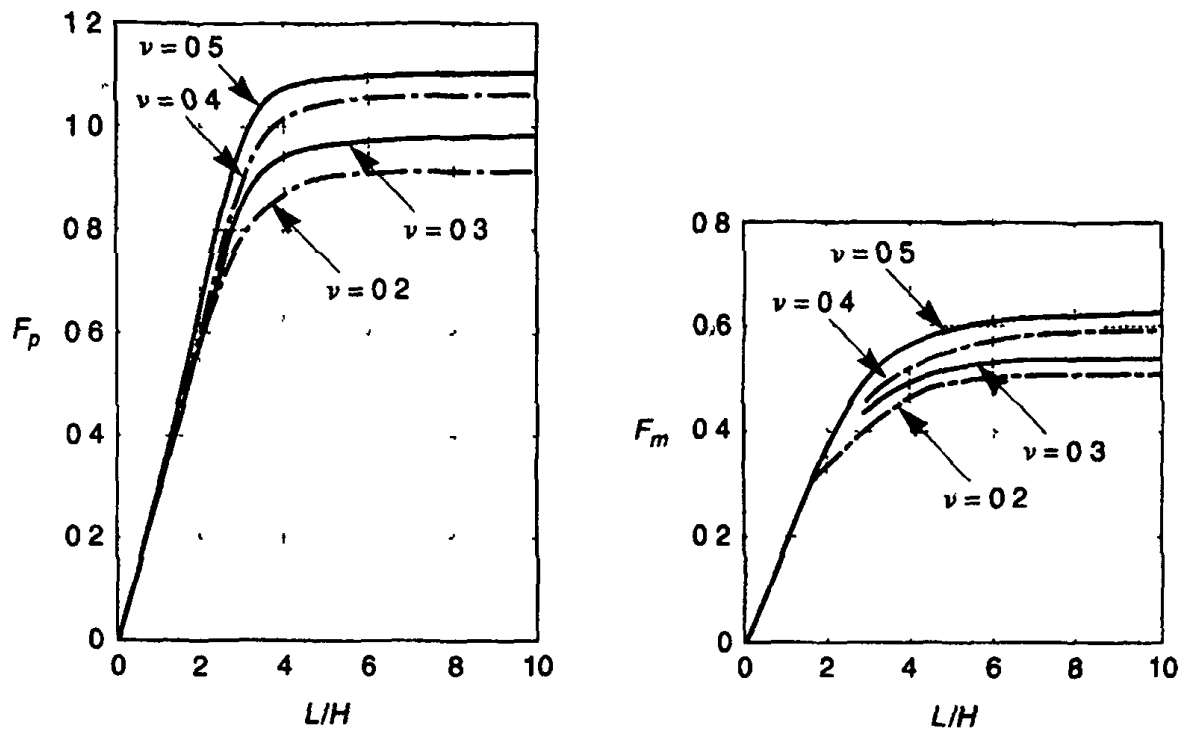
F_p 와 F_m 무차원의 동적 작용력과 모멘트 요소 (〈그림 3.22〉 참조)

따라서 지진시 벽체에 작용하는 힘은 정지토압과 식(3.74)에 의한 동적인 토압의 합이 된다 동적인 토압은 벽체 하단으로부터 높이 h_{eq} 에 작용하며 식(3.76)과 같이 산정한다

$$h_{eq} = \frac{\Delta M_{eq}}{\Delta P_{eq}} \quad (3.76)$$



〈그림 3.21〉 비항복 벽체에 대해 토압을 산정하는
Wood방법의 벽체형상



〈그림 322〉 Wood 식에서 사용되는 F_p 와 F_m 값
(ν 지반의 포와송 비)

〈표 35〉 흙의 종류에 따른 포와송비

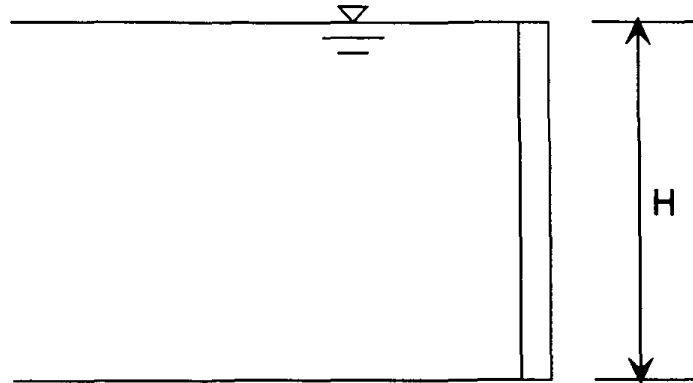
흙의 종류	포와송비
점성토 (포화상태)	0.4-0.5
점성토 (불포화 상태)	0.1-0.3
모래질 점성토	0.2-0.3
실트	0.3-0.35
사질토	0.3-0.4

(6) 동수압의 고려

〈그림 323〉 과 같이 옹벽의 배수시설이 제기능을 발휘하지 못하여 옹벽의 뒷채움 지반이 완전포화되어 있는 경우 벽체에 작용하는 총 합력을 산정하기 위해서는 동적인 수압과 정적인 수압을 고려해야 한다 따라서, 지진시 벽체에 작용하는 총작용토압은 식(377)과 같이 산정된다 만약 뒷채움 지반내에 지하수위가 있으면 지하수위 아래에 있는 지반에 대하여 식(364)에 γ_b , K_{AE}' 를 대입하여 토압을 산정하고 이에 동수압과 정수압을 더해주면 된다

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma_b K_{AE}' (1 - K_v) H^2 + E_{wd} + E_{ws} \quad (377)$$

여기서 γ_b 뒷채움 지반의 수중단위중량
 K_{AE}' 보정된 동적주동 토압계수
 E_{wd}, E_{ws} 각각 동수압과 정수압



〈그림 3 23〉 옹벽 뒷채움부가 완전포화되어 있는 경우

식(377)에서 동수압 E_{wd} 의 작용점은 지하수위 위치에서부터 포화층의 높이의 60% 아래 깊이에 있다 K_{AE}' 와 E_{wd} 는 뒷채움 지반의 투수계수에 따라 다음의 두 가지 경우로 나뉘어 산정된다 (Matsuzawa 등, 1985⁽²³⁾)

- ① 지하수위 아래 지반이 동적 투수율이 높은 지반일 경우
 (투수계수 $\geq 5 \times 10^{-4}$ m/sec)

동적 투수율이 높으므로 간극수는 흙입자에 제약을 받지 않고 자유롭게 움직일 수 있다고 가정한다 따라서, 〈그림 3 24〉 에서 흙입자에 해당하는 부분에만 관성력이 작용한다고 하여 보정된 ϕ' 를 식(378)과 같이 산정한다 보통 흙의 G_s 는 약 2.65이므로 대략 $\tan \phi' = 1.6 \tan \phi$ 이 된다

$$\tan \phi' = \frac{\gamma_d}{\gamma_b} \frac{K_h}{1 \pm K_v} = \frac{G_s}{G_s - 1} \frac{K_h}{1 \pm K_v} = \frac{G_s}{G_s - 1} \tan \phi \quad (378)$$

여기서 γ_d 뒷채움 지반의 건조단위중량

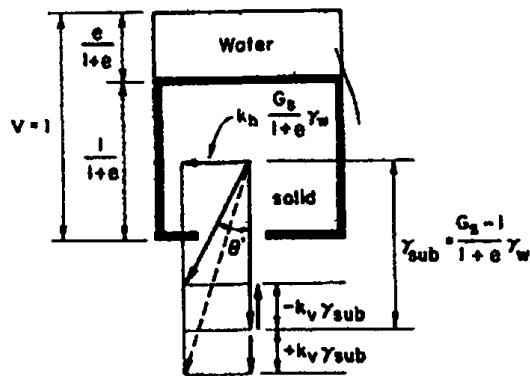
G_s 흙의 비중

K_{AE}' 는 식(3 65)에서 식(3 66)으로 정의되는 ϕ 대신 식(3 78)로 정의되는 ϕ' 를 대입하여 산정한다 그리고 간극수에 의한 동수압은 수리 동역학적인 방법에 의하여 유도된 Westergaard의 해로부터 다음과 같이 산정할 수 있다

$$E_{wd} = \frac{7}{12} K_h \gamma_w (H - h_w)^2 \quad (379)$$

여기서 γ_w 물의 단위중량

h_w 지표면에서 지하수위까지의 깊이



〈그림 3 24〉 투수계수가 큰 경우 흙입자에 작용하는 관성력

- ② 지하수위 아래 지반이 동적 투수율이 낮은 지반일 경우
(투수계수 $\leq 5 \times 10^{-4}$ m/sec)

동적 불투수 지반일 경우, 흙입자와 간극수가 같이 움직인다고 가정한다 따라서, 흙입자와 간극수 모두에 관성력이 작용하므로 보정된 ϕ'' 는 〈그림 3 25〉를 통하여 식(3 80)과 같이 산정한다 γ_{sat} 는 γ_w 의 약 두 배 정도이므로 대략

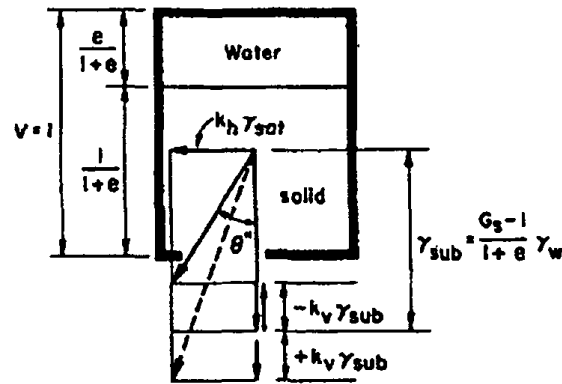
$\tan \phi'' = 2.0 \tan \phi$ 이 된다

$$\tan \phi'' = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \frac{K_h}{1 \pm K_v} = \frac{G_s + e}{G_s - 1} \frac{K_h}{1 \pm K_v} = \frac{G_s + e}{G_s - 1} \tan \phi \quad (380)$$

여기서 γ_{sat} 뒷채움 지반의 포화단위중량

e 뒷채움 지반의 간극비

역시 K_{AE}' 는 식(3 65)에서 식(3 66)으로 정의되는 ψ 대신 식(3 80)로 정의되는 ψ'' 를 대입하여 산정하지만 간극수는 흙과 함께 거동하므로 간극수에 의한 동수압은 없는 것으로 한다



〈그림 3 25〉 투수계수가 작은 경우 흙입자에 작용하는 관성력

(7) Richards-Elms 방법

Richards와 Elms(1979)⁽²⁴⁾는 허용변위에 따른 벽체구조물의 내진설계 방법을 제안하였다 이 방법은 지진시의 사면안정해석 방법으로 Newmark(1965)가 제안한 슬라이딩 블록방법과 유사한 방법으로 벽체의 영구변위를 평가하는 방법이다 Richards와 Elms(1979)는 영구변위 및 설계수평가속도를 구하는 방법을 다음과 같이 제안하였다

$$d_{perm} = 0.087 \frac{V_{max}^2}{A g (N/A)^4} \quad (3.81)$$

$$N = A \left(\frac{0.087 V_{max}^2}{d_{perm} A g} \right)^{1/4} \quad (3.82)$$

여기서 d_{perm} 허용변위 (m)

V_{max} 지표면 최대수평속도(m/sec)

A 지표면 최대수평가속도 (m/sec^2)

N 설계수평가속도 (m/sec^2)

g 중력가속도 (m/sec^2)

일반적으로 허용변위는 구조물의 등급 및 종류에 따라 설계 시방서에 주어진다
 허용변위가 결정되면 다음의 절차를 통하여 허용변위를 만족하기 위하여 필요한 벽
 체의 중량을 구할 수 있다

- ① 식(3.82)를 통하여 설계수평가속도를 결정한다
- ② 수평지진계수 K_h 를 산정하여 Mononobe-Okabe 방법으로 벽체에 작용하는 토
 압 P_{AE} 를 산정한다 이 때 ①에서 구한 설계수평가속도 N 을 K_h 로 사용한다
- ③ ②항에서 산정된 토압, P_{AE} 대하여 안정한 벽체구조물을 설계한다 이 때 벽체
 의 중량은 다음과 같이 산정된 W_w 이상이어야 한다

$$W_w = FS \frac{P_{AE} [\cos(\delta + \theta) - \sin(\delta + \theta) \tan \phi_b]}{(1 - K_v) \tan \phi_b - K_h} \quad (3.83)$$

여기서 δ 벽면마찰각 (°)

θ 옹벽의 수직에 대한 경사각(°)

FS 옹벽중량에 대한 안전율 (보통 1.5 사용)

ϕ_b 기초지반의 내부마찰각 (°)

K_h, K_v 지진의 수평 및 수직지진계수

- ④ 이 방법에서는 활동이 유발되는 것으로 가정하기 때문에 활동이외의 사항에 대
 한 안정성 검토를 수행한다

33 1.2 사면의 내진해석 방법

(1) 일반

- ① 사면은 성토사면, 절토사면 및 자연사면으로 나눌 수 있으며 모든 사면은 우선 정적하중하에서 설계기준을 만족하여야 한다
- ② 지진에 대한 사면안정해석은 정적설계기준을 만족하는 사면에 대하여 실시한다 동적사면해석은 중요한 도로, 매립지반 그리고 구조물 및 시설물과 인접된 사면으로, 사면파괴로 인하여 인명 및 재산에 큰 피해 발생이 예상되는 사면에 대하여 실시한다

(2) 동적사면안정기준

- ① 사면은 우선 정적설계기준을 만족해야 한다
- ② 사면은 액상화에 대해 안전해야 한다
- ③ 등가정적해석시 사면은 안전율 1.1 이상이어야 한다

(3) 동적사면안정해석

- ① 동적사면안정해석에는 ㉞ 등가정적해석법(pseudo-static analysis), ㉟ Newmark의 강성블록해석법, ㊱ 동적해석법 그리고 ㊲ 액상화에 따른 유동파괴해석법 등이 있으며 사면 구조물의 특성, 내진등급과 내진성능목표에 따라 해석방법을 선택한다 일반적으로 성토사면의 경우에는 안정성해석과 변형해석이 가능하지만 절취사면, 자연사면의 경우에는 변형해석이 어려우므로 등가정적해석법을 이용한 안정성 해석을 수행한다
- ② 등가정적 사면안정 해석은 지표면에서 지진파의 지표면 최대수평가속도의 50%를 파괴토체의 무게에 곱한 하중을 등가정하중으로 치환하여 안정성을 검토하는 방법이다 지진하중으로 인한 지표면 최대수평가속도를 $a_{h \max}$ 라 하면 지진으로 인하여 파괴토체에 추가로 작용하는 횡방향 힘은 다음과 같다

$$F_h = \frac{a_{h \max}}{2g} W \quad (3.84)$$

여기서 $a_{h \max}$ 지표면 최대수평가속도

W 파괴토체의 무게

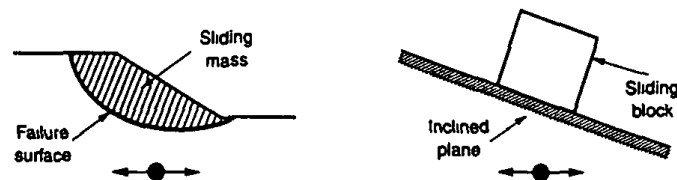
g 중력 가속도

형방향 하중(F_h)를 파괴토체의 중심에 작용시켜 활동파괴에 대한 안정성을 검토한다

- ③ 지진에 의한 성토사면의 변형량을 알기 위해서는 Newmark의 강성블록해석을 이용하여 수행한다

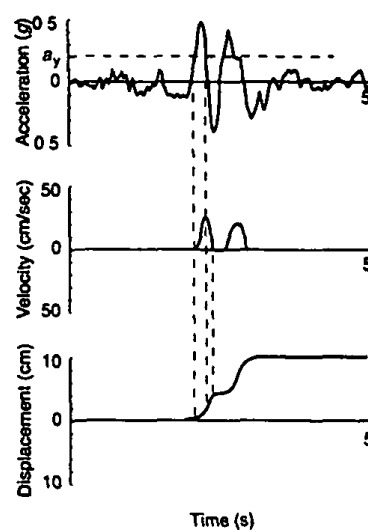
지진하중에 의해 사면에 작용하는 가속도는 시간에 따라 변한다. 가속도가 작아 안전률이 1이상일 때는 사면은 평형상태를 유지한다. 가속도가 어느 정도 증가하여 사면의 안전률이 1미만이 되면 사면내의 힘의 평형은 깨지고 파괴토체는 외부하중에 의해 가속도를 가지게 되어 움직인다.

Newmark(1965)는 위의 원리를 이용하여 <그림326>에서 보듯이 사면의 파괴토체를 경사진 평면위에 있는 강성블록으로 단순화하여 파괴토체의 변형을 해석하는 방법을 제안하였다.



<그림 326> 미끄러짐 블록해석의 개념도

아래 그림 모양의 지진가속도가 가해졌다고 하면, 토체의 가속도, 속도 변위는 다음과 같다



<그림 327> 실제 지진파에 의해 발생하는 영구변형량

강성블록해석을 하기 위해서는 파괴토체가 항복하여 변형이 일어나기 시작하는 가속도를 결정해야 한다 이 가속도를 항복가속도(a_y)라 하고 파괴토체의 안전율이 1이 될 때 작용하는 가속도이다 토체의 가속도($a_r(t)$)는 실제 작용가속도($a_b(t)$)에서 항복가속도를 뺀 값이 된다 토체의 속도와 변위는 토체의 가속도($a_r(t)$)를 가속도가 작용하는 시간에 대하여 적분함으로써 구할 수 있다

$$a_r(t) = a_b(t) - a_y = A - a_y \quad t_o \leq t \leq t + \Delta t \quad (385)$$

$$v_r(t) = \int_{t_o}^t a_r(t) dt = [A - a_y](t - t_o) \quad t_o \leq t \leq t + \Delta t \quad (386)$$

$$d_r(t) = \int_{t_o}^t v_r(t) dt = \frac{1}{2} [A - a_y](t - t_o)^2 \quad t_o \leq t \leq t + \Delta t \quad (387)$$

성토사면내에 강도감소가 크지 않은 경우, 즉 전단강도가 15% 이내로 감소하는 경우에는 간단히 다음의 식으로 변형량을 예측할 수 있다 (NAVFAC, 1982⁽²⁹⁾) 전단강도의 감소는 반복삼축압축실험이나 반복순수전단실험 등을 통하여 확인할 수 있다

$$d_{\max} = \frac{V_{h, \max}^2}{2 a_y} \frac{a_{h, \max}}{a_y} \quad \left(\frac{a_y}{a_{h, \max}} > 0.17 \right) \quad (388)$$

여기서 d_{\max} 수평변위

$V_{h, \max}$ 지표면 최대수평속도

$a_{h, \max}$ 지표면 최대수평가속도

a_y 항복가속도

지표면 최대수평속도($V_{h, \max}$) 및 최대수평가속도($a_{h, \max}$)는 Shake 등 지진파 전달 프로그램으로부터 구할 수 있다 지표면 최대속도 및 가속도를 구할 때에는 장, 단 주기의 지진파를 포함하여 3개 이상의 지진파에 대하여 지반응답특성을 고려한다 지진파 전달 프로그램인 Shake에서는 지층의 분할을 1m 이하로 하는 것이 좋다 이는 균질한 지반이 두껍게 존재할 때에도 1m 이하로 분할하여 해석해야 한다

- ④ 지진에 의한 성토사면의 변형량을 알기 위해서는 수치해석을 이용하여 수행한다
 수치해석방법에는 유한요소해석, 유한차분해석 등이 있다 내진해석을 수행할 수 있는 프로그램을 작성하는 것은 매우 어려우므로, 현실적으로 상용프로그램을 이용하여 해석한다 지진설계가 가능한 프로그램으로는 FLAC 등이 있다
 수치해석을 이용한 내진해석의 방법에 대한 일반적인 내용은 다음과 같다

- 1) 초기응력 결정
- 2) 가속도의 시간이력 선택
- 3) 암반진동에 대한 성토체의 응답 산정
 - 발생하는 전단응력의 시간이력 산정
 - 흙의 동적 물성치 결정이 필요
- 4) 대표적 시료의 동적 시험
 - 흙의 지진강도와 변형특성 결정
- 5) 일정한 변형율 수준을 일으키는데 필요한 실내 반복 전단응력과 지진에 의해 발생하는 전단응력의 비교
- 6) 성토체 단면의 전체적인 변형율 포텐셜, 변형, 안전성 산정

(a) 초기응력 결정

초기응력을 결정하는 방법은 다음 사항을 고려하여 구한다

- ㉔ 유한 요소법 - 성토체의 응력과 변형을 결정
- ㉕ 과도한 수직 수평 변형, 부등침하 등 정적 변형은 성토체의 안전성에 악영향
- ㉖ 실제 시공 순서와 하중을 모사하고, 흙의 비선형, 응력 의존 거동을 모사 하기 위해서 점진적 절차(incremental procedure)를 사용
- ㉗ 고려하중 코어에 작용하는 수압, 상류 암반에 작용하는 수압, 상류의 부력, 침투력
- ㉘ 해석모델
 - Mohr-Coulomb 모델
 - Drucker-Prager 모델
 - Cam-Clay 모델
 - Strain-Hardening 모델
 - Strain-Softening 모델 등

(b) 설계 가속도의 선택

가속도 시간이력을 산정하여 해석해야 한다 자세한 내용은 23과 부록 A3에서 다룬다

(c) 동적해석을 위한 흙의 물성치 선택

동적해석을 위한 흙의 물성치는 다음과 같다

- ㉠ 전체단위 중량, γ_t
- ㉡ 최대 전단탄성계수, G_{\max}
- ㉢ 평균유효주응력, $\overline{\sigma_m}$ 에 대한 G_{\max} 의 변화
- ㉣ 전단 변형률에 대한 전단탄성계수, G 의 변화
- ㉤ 전단 변형률에 대한 감쇄비, λ 의 변화
- ㉥ 포아송 비, ν

(d) 응답해석

응답해석은 다음의 항목을 고려하여 구한다

- ㉠ 시스템 방정식

$$[M]\{U\} + [C]\{U\} + [K]\{U\} = \{F(t)\} \quad (3.89)$$

여기서 $[M]$ 구조물의 특성 행렬

$[C]$ 감쇠 행렬

$[K]$ 강성 행렬

$[U]$ 변위벡터

- ㉡ 지진시 각 요소에 발생하는 전단응력과 가속도 시간 이력 산정
- ㉢ 불규칙한 전단응력의 시간이력을 평균전단응력(τ_{ave}) 크기의 균일한 시간 이력을 가지는 등가의 응력 반복수(Equivalent Number of Uniform Shear Stress Cycles)변환

④ 변형 포텐셜 산정

τ_d 지진시 30 cycles에 발생하는 등가 일정 전단응력

τ_f 30 cycles에 성토흙의 5% 변형율을 일으키는데 필요한 응력

τ_f/τ_d 부분 안전율

$\tau_f/\tau_d < 1 \rightarrow$ 지진시 5% 변형율을 초과하는 변형이 예상

- ⑤ 액상화로 인한 사면의 유동파괴 여부는 액상화 판정법으로 평가하고 사면의 변형량을 구하기 위해서는 지반의 비배수 한계상태전단강도 또는 잔류전단강도를 구하여 ④에서 설명한 수치해석법을 이용하여 해석한다

332 내진설계 요구사항

(1) 옹벽

옹벽 구조물의 내진설계방법은 2절 및 본문 331에서 밝힌 내진해석방법으로 수행하여 안정성을 검토한다

① 등가정적 옹벽해석에 의한 설계

- 1) 정적설계 기준을 만족해야 한다
- 2) 옹벽의 내진설계 기준은 2등급 붕괴방지수준으로 한다
- 3) 설계 수직가속도는 토압에 주는 영향이 크지 않으므로 무시한다
- 4) 설계 수평가속도는 지표면 최대수평가속도의 50%를 사용한다
- 5) 지표면 최대수평가속도(a_{hmax})는 <표 32>의 지표면의 설계수평지진계수를 사용하거나 지진응답해석을 수행하여 구한다 단, 다음의 경우에는 반드시 지진응답해석을 수행한다

- (a) 표층의 두께가 30m 이상
- (b) 느슨한 사질토 지반
- (c) 포화된 느슨한 또는 중간정도의 사질토 지반

지진응답해석시에는 장주기, 단주기의 대표적인 지진파를 포함하여 3개 이상의 가속도 시간이력을 입력하여 지표면 최대가속도를 구한다

- 6) 벽체의 안정성을 검토할 때 최소 안전율은 정적인 토압만 작용하는 경우보다 작은 1.1~1.2를 사용한다 이 기준서에서는 미 공병단(1994)⁽²⁷⁾에서 사용하는 안정기준을 참고하여 <표 36>과 같은 안정기준을 사용한다

<표 36> 동적토압을 고려할 때의 안정기준

	활동	전도	기초지반 지지력
안정기준	1.1	1.2	1.0

* 편심 < 저판길이/2

② 강성블록해석에 의한 설계

- 1) 정적설계 기준을 만족해야 한다

- 2) 벽체의 허용변위는 구조물의 중요도 및 현장여건에 따라 결정한다
- 3) 활동이 유발되는 것으로 가정하기 때문에 활동이외의 사항에 대한 안정성 검토를 수행하여야 한다

(2) 사면

사면 구조물의 내진설계방법은 2절 및 본문 3.3.1에서 밝힌 내진해석방법으로 수행하여 안정성을 검토한다

① 등가정적 사면해석에 의한 설계

- 1) 정적설계기준을 만족해야 한다
- 2) 사면의 내진설계 기준은 2등급 붕괴방지수준으로 한다
- 3) 기반암 설계가속도는 본문 2.3에 의하여 결정한다
- 4) 지표면 최대수평가속도($a_{h\max}$)는 〈표 3.2〉의 지표면의 설계수평지진계수를 사용하거나 지진응답해석을 수행하여 구한다 단, 다음의 경우에는 반드시 지진응답해석을 수행한다
 - (a) 표층의 두께가 30m 이상
 - (b) 느슨한 사질토 지반
 - (c) 포화된 느슨한 또는 중간정도의 사질토 지반 지진응답해석시에는 장주기, 단주기의 대표적인 지진파를 포함하여 3개 이상의 가속도 시간이력을 입력하여 지표면 최대수평가속도를 구한다
- 5) 액상화에 대해 안정해야 한다(부록 참조)
- 6) 등가정적 사면해석

- (a) 파괴토체의 중심에 지표면 최대수평가속도의 50%에 해당하는 횡방향하중(F_h)을 작용시킨다
- (b) 등가횡방향 하중을 고려한 사면안정해석을 수행한다
- (c) 최소안전률은 1.1로 한다

② Newmark의 강성블록해석에 의한 설계

Newmark의 강성블록해석을 수행하여 허용변위를 만족하는 지를 판단하여 설계한다

③ 동적해석법에 의한 설계

수치해석의 결과가 허용변위를 만족하는 지를 판단하여 설계한다

④ 액상화로 인한 사면의 유동파괴해석에 의한 설계

액상화로 인한 사면의 유동파괴 해석여부는 액상화 판정법(부록 참고)으로 평가하고 사면의 변형량을 구하기 위해서는 지반의 비배수 한계상태전단강도 또는 잔류전단강도를 이용하여 수치해석법을 이용하여 해석한다 이때의 변위가 허용 변위를 만족하는 지를 판단하여 설계한다

참 고 문 헌

- 1 건설교통부(1997), 내진설계기준연구
- 2 건설교통부(1996), 도로교표준시방서
- 3 건설도서(1996), 지하구조물의 내진설계
- 4 대한주택공사(1998), 토목설계지침
- 5 대한주택공사(1998), 토목공사 표준시방서
- 6 대한주택공사(1993), 토목구조물 표준도집
- 7 대한토목학회(1996), 도로교표준시방서
- 8 한국수도협회(1997), 상수도시설기준
- 9 한국지반공학회(1997), 진동 및 내진설계
- 10 鹿島出版社(1996), 地下構造物の耐震設計
- 11 日本道路協會(1986), 共同溝設計指針
- 12 日本道路協會(1992), 駐車場設計・施工指針 同解説
- 13 日本水道協會(1997), 水道施設耐震工法指針・解説
- 14 AASHTO(1996), Standard Specification for Highway Bridges
- 15 ASCE(1991), Lifeline Earthquake Engineering
- 16 ASCE(1996), Pipeline Research Needs
- 17 ASCE(1977), The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering
- 18 ASCE(1995), Lifeline Earthquake Engineering in the Central and Eastern U S
- 19 ASCE(1990), Recent Lifeline Seismic Risk Studies
- 20 ASCE(1983), Advisory Notes on Lifeline Earthquake Engineering
- 21 NIST(1996), Developing and Adopting Seismic Design and Construction Standard for Lifeline
- 22 BSI(1996), Eurocode 8 Design Provision for Earthquake Resistance of Structures
- 23 Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 111, No 10, pp 1161-1176 (1985), Dynamic Soil and Water Pressures of Submerged Soils
- 24 Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 105, No GT4, pp 449-464 (1979), Seismic Behavior of Gravity Retaining Wall
- 25 REPORT EERL 73-05, California Institute of Technology, Pasadena, California, pp 311(1973), Earthquake-Induced Soil Pressures on Structures
- 26 Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, pp 423-463, pp 466-493 (1996), Geotechnical Earthquake Engineering
- 27 U S Army Corps of Engineers, pp 66-76 (1994), Retaining and Flood Walls
- 28 ASCE Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures, pp 103-147 (1970), Design of Earth Retaining Structures for Dynamic Loads, Proceedings
- 29 NAVFAC(1982), Design Manual 71 & 72, pp 71-309~71-338, pp 72-59~72-116
- 30 Kramer, S T (1996), Geotechnical Earthquake Engineering

부

부

A1. 지반의 분류 절차⁽¹⁾

■ 범위

여기서는 <표 22>에 의거하여 상위개념 기준에서 규정한 내용으로 지반을 종류 S_A 부터 S_F 까지 6종으로 분류하는 절차를 기술한다

■ 정의

지반의 종류는 다음과 같이 정의된다

S_A $\overline{v_s} > 1,500 \text{ m/s}$ 인 경암지반

S_B $760 \text{ m/s} < \overline{v_s} \leq 1,500 \text{ m/s}$ 인 경암지반

S_C $360 \text{ m/s} < \overline{v_s} \leq 760 \text{ m/s}$ 이거나, $\overline{N} > 50$ 또는 $\overline{s_u} \geq 100 \text{ kPa}$ 인 매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반

S_D $180 \text{ m/s} < \overline{v_s} \leq 360 \text{ m/s}$ 이거나, $15 \leq \overline{N} \leq 50$
또는 $50 \text{ kPa} \leq \overline{s_u} \leq 100 \text{ kPa}$ 인 단단한 토사지반

S_E $\overline{v_s} \leq 180 \text{ m/s}$ 인 지반이거나, $PI > 20$, $w_{mc} \geq 40 \%$ 이고
 $\overline{s_u} \leq 25 \text{ kPa}$ 인 연약 점토의 두께가 3 048 m 이상되는 토사지반

S_F 부지 고유의 특성 평가가 요구되는 다음 경우에 속하는 지반

- 1) 액상화가 일어날 수 있는 흙, Quick Clay와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
- 2) 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반 [지층의 두께, $H > 3\,048 \text{ m}$]
- 3) 매우 높은 소성을 갖은 점토지반 [$H > 7\,620 \text{ m}$ 이고 $PI > 75$]
- 4) 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토 [$H > 36\,580 \text{ m}$]

※예외 지반의 종류를 결정하기에 충분할 정도로 지반의 특성이 자세하게 알려져 있지 않은 경우에는 지반종류 S_D 를 사용한다. 관계 공무원이 해당 부지에 지반 종류 S_E 가 있다고 결정하거나 지반공학적 자료에 의하여 지반 종류 S_E 라고 입증되는 경우를 제외하고는 부지를 지반 종류 S_E 라고 가정할 필요가 없다. 부지 고유의 지반특성 평가가 요구되는 지반, 즉, S_F 로 분류할 때는 상기 S_F 에 대한 정의에서 제시한 기준이 고려되어야 한다

다 만약 해당 부지가 이 기준과 일치하면, 그 부지는 지반 종류 S_F 로 분류되어야 하며, 부지 고유의 지반특성평가가 이루어져야 한다

■ $\overline{v_s}$, 평균전단파속도

$\overline{v_s}$ 는 다음 공식에 따라 결정되어진다

$$\overline{v_s} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad (A1)$$

여기서

d_i = 토층 i 의 두께, m

v_{si} = 토층 i 의 전단파속도, m/sec

■ 평균현장표준관입저항 (\overline{N})과 점착력이 없는 토층에 대한 평균표준관입저항 ($\overline{N_{CH}}$)

\overline{N} 과 $\overline{N_{CH}}$ 는 다음 공식에 따라 결정되어야 한다

$$\overline{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (A2)$$

$$\overline{N_{CH}} = \frac{d_s}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (A3)$$

여기서

d_i = 토층 i 의 두께, m

d_s = 상부 30 480 m 에 있는 비점착성 토층의 총두께, m

N_i = 공인된 표준에 따른 토층의 표준관입저항

■ 평균비배수 전단강도 (s_u)

$\overline{s_u}$ 는 다음공식에 따라 결정되어야 한다

$$\overline{s_u} = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{s_{ui}}} \quad (A4)$$

여기서

d_c = 상부 30 480 m 에 있는 점착성 토층의 총두께 ($100 - d_s$), m

s_{ui} = 250 kPa 를 초과하지 않는 공인된 표준에 따른 비배수전단강도

■ 연약한 점토지반, S_E

연약한 점토층이 $s_u < 25 \text{ kPa}$, $w_{mc} \geq 40 \%$ 이고 $PI > 20$ 으로 정의된 곳에서는 3 048 m 이상의 연약한 점토층이 존재하는지를 조사해야 한다 만약 기준들이 충족되면, 그 부지는 지반종류 S_E 로 분류되어야 한다

■ 지반종류 S_C, S_D, S_E

위에서 지정된 모든경우에 있어서 계산된 $\overline{v_s}$, \overline{N} , $\overline{s_u}$ 를 가지고 다음 세가지 방법들 중의 하나를 사용해서 지반종류 S_C, S_D, S_E 의 부지를 분류한다

- 1) 상부 30 480 m 에 대한 $\overline{v_s}$ ($\overline{v_s}$ 방법)
- 2) 상부 30 480 m 에 대한 \overline{N} (\overline{N} 방법)
- 3) 상부 30 480 m 에 있는 비점착성 토층($PI < 20$)에 대한 $\overline{N_{CH}}$ 와 상부 30 480 m 에 있는 점착성 토층($PI > 20$)에 대한 평균 $\overline{s_u}$ ($\overline{s_u}$ 방법)

■ 지반종류 S_A, S_B

지반종류 S_B 로 분류될 수 있을 정도로 파쇄와 풍화의 정도가 심하지 않은 단단한 암반으로 이루어진 부지에 있어서의 전단파속도는 해당 부지에서 직접 측정하거나 아니면 지반공학자, 공학지질학자 또는 지진학자 등에 의해 평가되어야 한다 S_B 에 비하여 더욱 연약하며 심하게 파쇄되고 풍화된 암반은 해당 부지에서 직접 전단파속도를 측정하거나 지반종류 S_C 로 분류되어야 한다

경암지반 S_A 로 분류될 수 있기 위해서는 전단파속도를 해당 부지에서 직접 측정하거나 아니면 해당 부지와 동등하거나 더욱 심하게 풍화되고 파쇄된 같은 해당 부지의 지층구조가 유사한 부지에서 측정된 값이 사용되어야 한다. 경암 조건이 깊이 30.048 m 까지 연속적인 것으로 알려져 있는 곳에서는 표면전단파속도 측정값으로부터 외삽하여 $\overline{v_s}$ 를 추정할 수 있다. 만약 암반표면과 확대기초 또는 매트기초 사이에 3.083 m 이상의 토층이 존재한다면, 그 부지는 암반 등급인, 지반종류 S_A 와 S_B 로 분류될 수 없다.

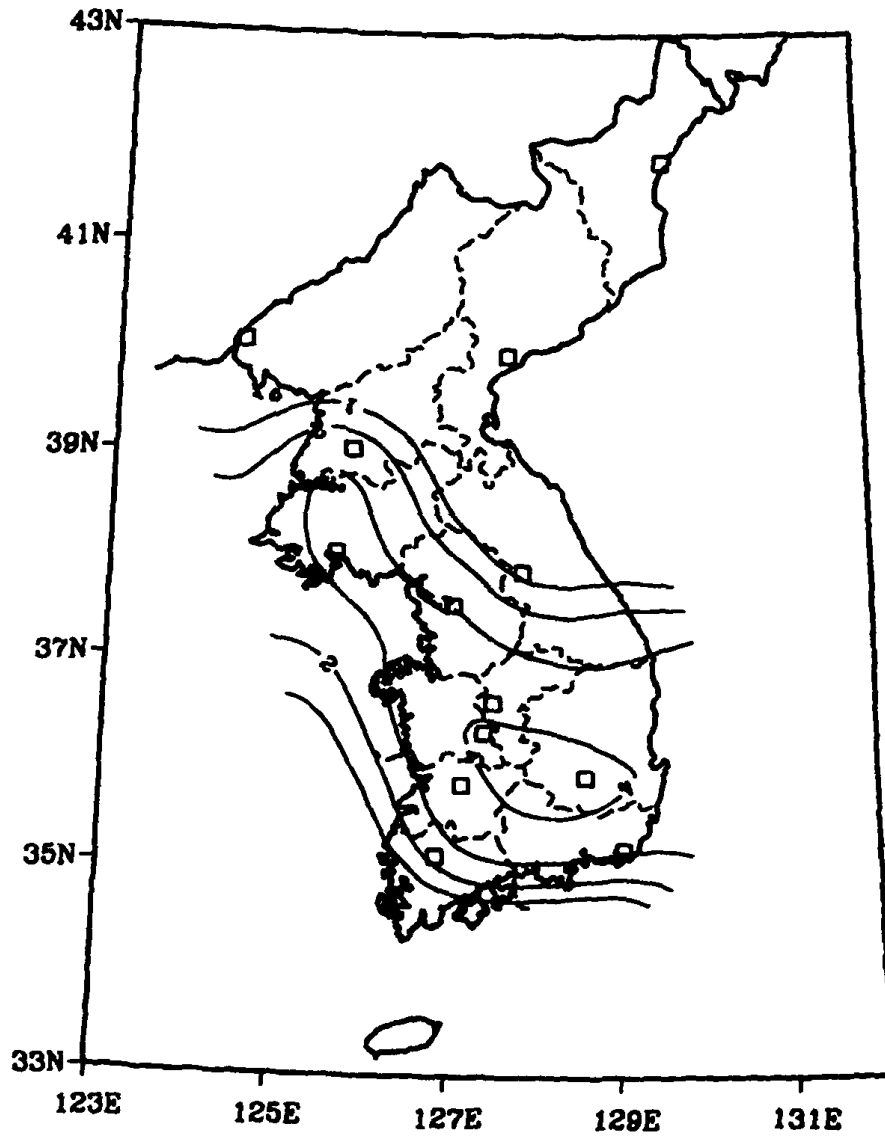
여기에 주어진 정의들은 부지 단면의 상부 30.480 m 에 적용된다. 뚜렷이 다른 지층으로 구성된 지반은 그러한 층으로 세분화 되어야하며 각층은 제1층에서 바닥의 제 n 층까지 번호를 부여한다. 기호 l 는 제 l 번째 층을 나타낸다.

A2. 지진재해도⁽¹⁾

건설교통부의 설계기준에서 기존의 지진재해지도와 지진구역을 재검토하여 보다 정밀하며 통일된 지진재해지도로서, 제시한 결과는 다음의 〈그림 A1〉 ~ 〈그림 A6〉과 같다

여기서 제시된 지진재해도는 한반도에서 각각 5, 10, 20, 50, 100, 250년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 가속도를 등치선의 형태로 나타낸 것이며, 이러한 기간과 확률에 해당하는 평균재현주기의 정확한 값은 각각 48, 95, 190, 475, 950, 2373년에 해당한다 그러나 실용에서는 이들 숫자를 단순화하여 각각 50, 100, 200, 500, 1000, 2400년으로 한다 따라서 시설물별 내진설계기준의 작성에서는 시설물의 계획수명과 중요도에 따라 적절한 재해지도를 선택하여 사용하게 된다

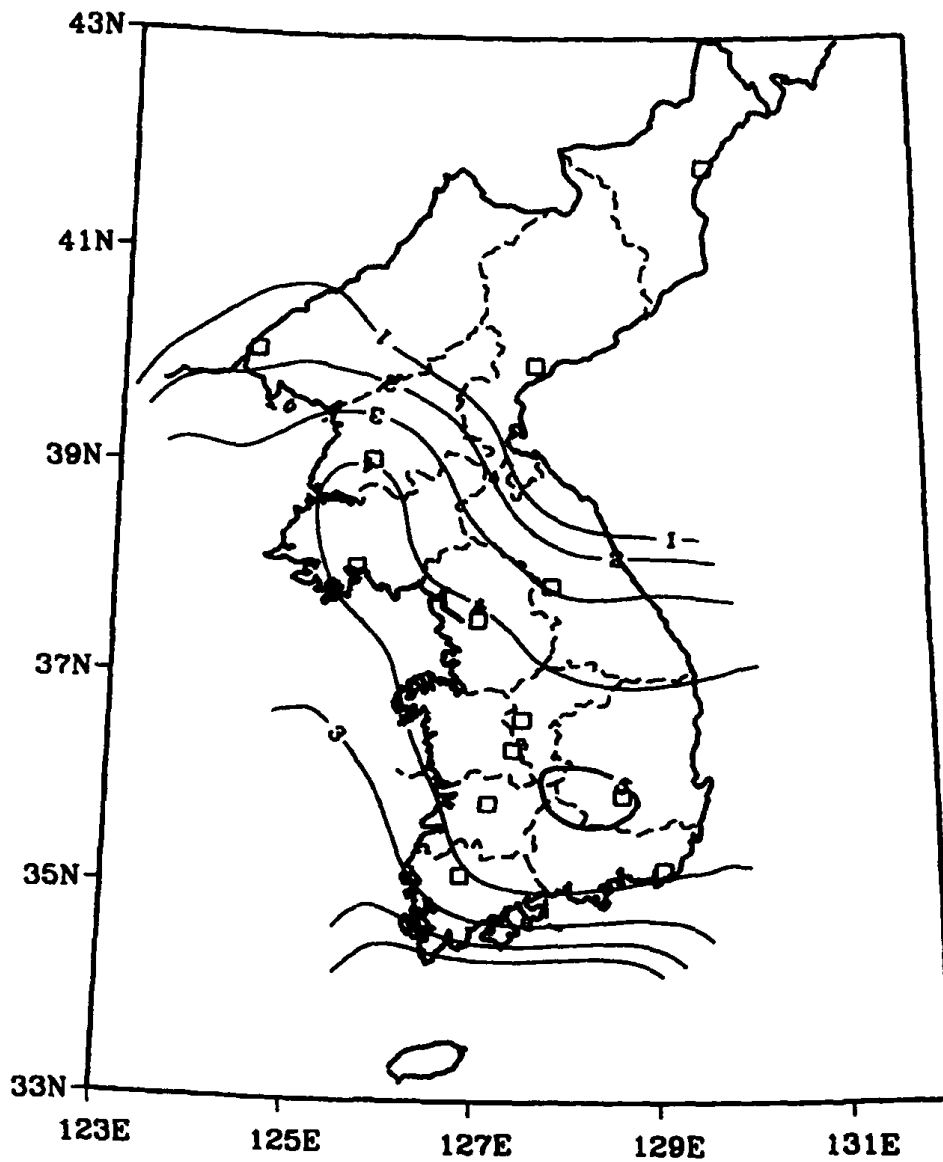
Peak Acceleration (%g) with 10 % Probability
of Exceedance in 5 Years



※ 점 선 도경계
□ 표 시 대도시(청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천,
 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)
도 법 UTM

〈그림 A1〉 평균재현주기 50년 지진지반운동⁽¹⁾

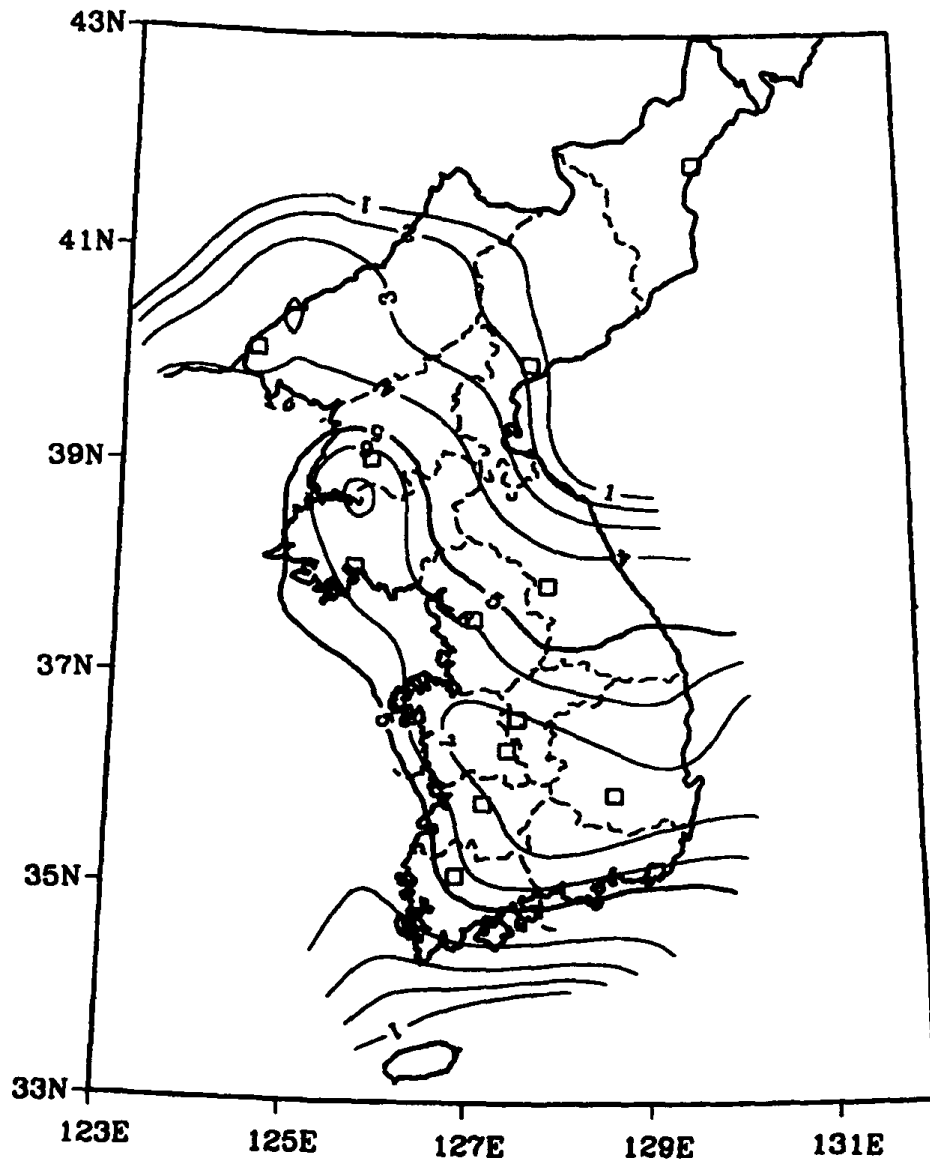
Peak Acceleration (%g) with 10 % Probability
of Exceedance in 10 Years



- × 점 선 도경계
□ 표 시 대도시(청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천,
 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)
도 법 UTM

〈그림 A2〉 평균재현주기 100년 지진지반운동⁽¹⁾

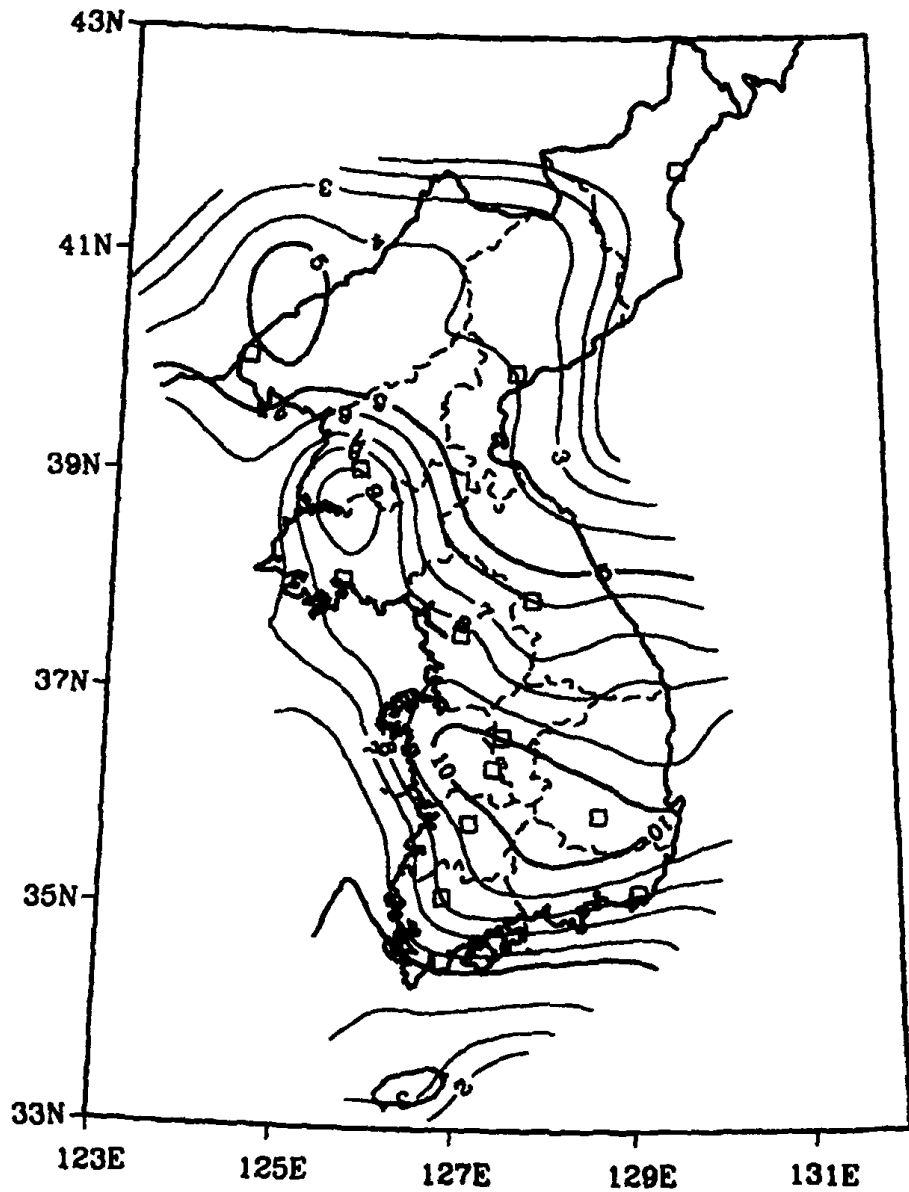
Peak Acceleration (%g) with 10 % Probability
of Exceedance in 20 Years



※ 점 선 도경계
□ 표 시 대도시(청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천,
 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)
도 법 UTM

〈그림 A3〉 평균재현주기 200년 지진지반운동⁽¹⁾

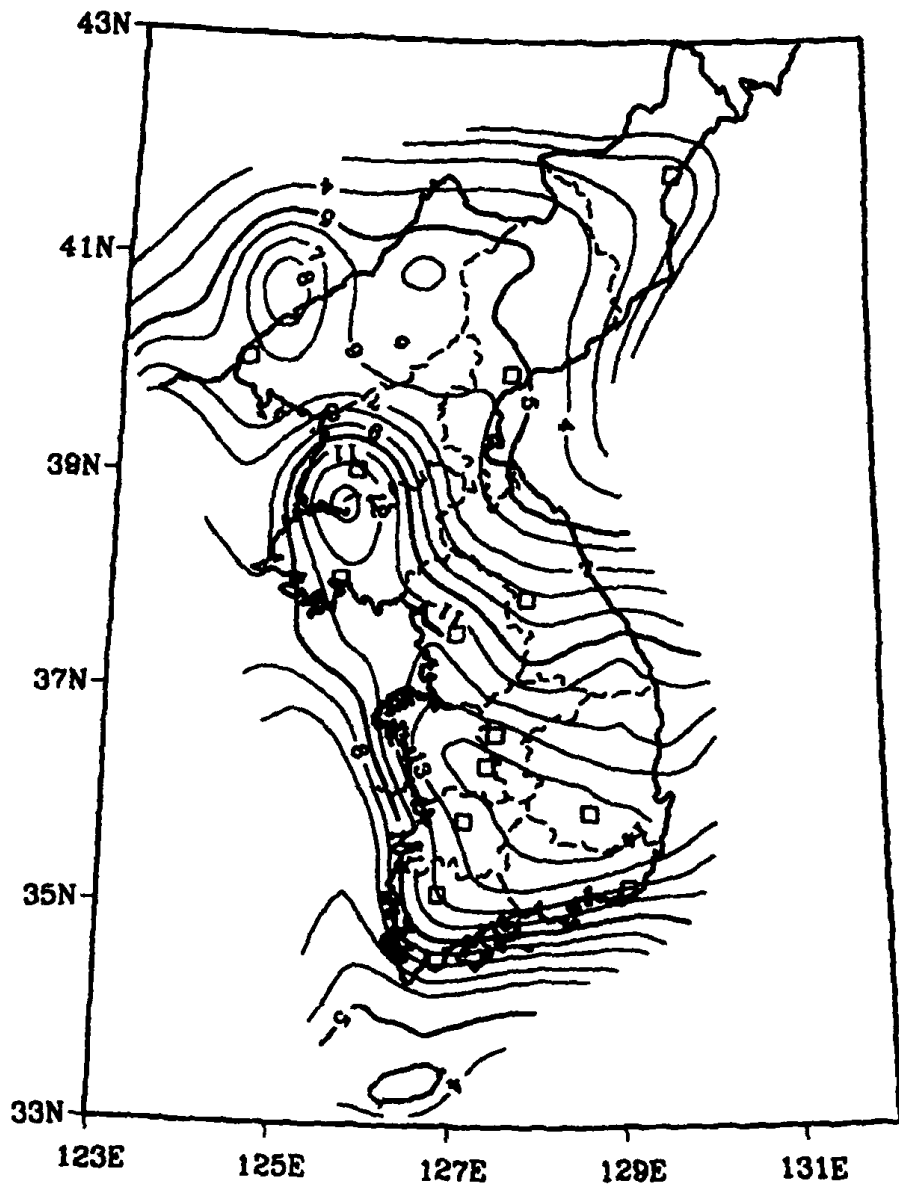
Peak Acceleration (%g) with 10 % Probability
of Exceedance in 50 Years



- × 점 선 도경계
□ 표 시 대도시(청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천,
 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)
도 법 UTM

〈그림 A4〉 평균재현주기 500년 지진지반운동⁽¹⁾

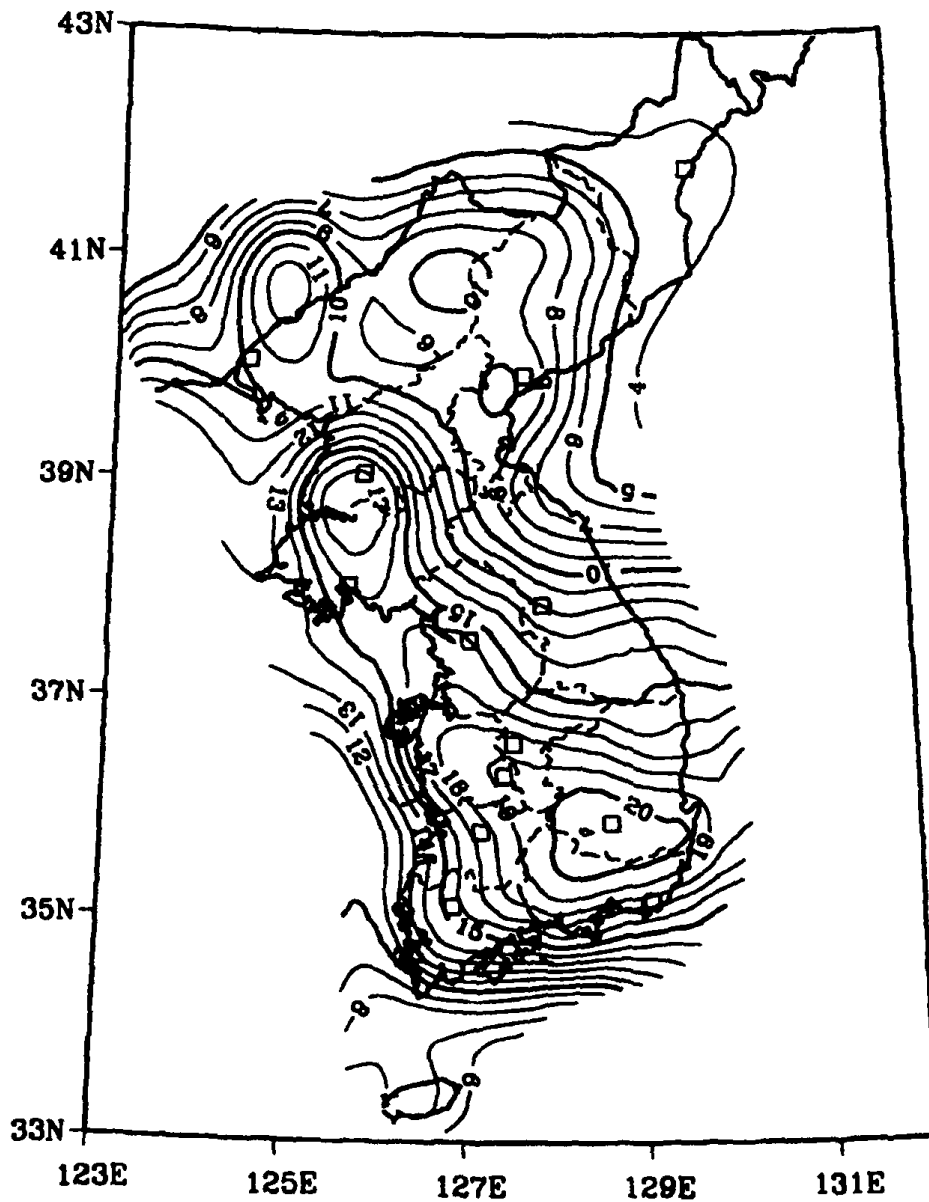
Peak Acceleration (%g) with 10 % Probability
of Exceedance in 100 Years



※ 점 선 도경계
□ 표 시 대도시(청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천,
서울, 정주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)
도 법 UTM

〈그림 A5〉 평균재현주기 1000년 지진지반운동⁽¹⁾

Peak Acceleration (%g) with 10 % Probability
of Exceedance in 250 Years



※ 점 선 도경계
□ 표 시 대도시(청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천,
 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)
도 법 UTM

〈그림 A6〉 평균재현주기 2400년 지진지반운동⁽¹⁾

A3. 인공지진의 형성방법 ^{(8) (30)}

본 절에서는 동적해석을 위한 인공지진의 형성방법에 대해 다루고자 한다. 인공적으로 지진기록을 생성시키는 방법에는 여러 가지가 있으나 널리 쓰이는 방법은 기존의 지진기록을 수정하는 방법과 시간영역에서 인공적으로 생성시키는 방법이다. 이에 대한 세부사항은 다음과 같다.

■ 실 지진기록의 수정

인공지진을 형성하는 방법 중에서 실제의 지진기록을 수정하는 방법이 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이다. 이는 가속도시간이력이나 속도시간이력에서, 목표로 하는 진동의 최대값으로 임의의 비례계수를 적용하여 지진동의 크기를 조정하는 방법이다. 여기서 사용하는 비례계수의 값은 가능하면 1에 가까운 값을 사용할 것으로 제안하며 경우에 따라 여러 가지 기록을 사용하여 0.25에서 4.0 사이의 값을 사용하는 것을 허용하도록 한다. 선형탄성구조물인 경우에는 0.25에서 4.0 사이의 값을 사용하는 것이 무난하며 액상화의 경우는 0.5에서 2.0의 값을 사용하는 것이 바람직하다.

이러한 방법으로 지진동의 크기를 조절하여 가속도시간이력을 결정하는 데에는 세심한 주의를 기울여야 한다. 대상으로 하는 지진기록은 최대 가속도 또는 최대 속도 뿐 만이 아니라 진도, 진앙거리 그리고 지역적인 특성도 목표로 하는 지역과 맞아야 한다. 또한 지진기록은 주파수 특성과 지속시간도 지역적인 특성을 반영할 수 있어야 한다.

주파수 특성을 크게 변화시키지 않으면서 긴 지속시간을 가지는 인공지진을 형성하기 위해서는 여러 개의 지진기록을 부분별로 결합하는 방법을 사용할 수도 있다. 따라서 설계자의 판단에 따라 여러 개의 지진기록을 부분적으로 합성하는 방법을 사용할 수도 있으나 이러한 방법도 시간영역과 주파수 영역 모두에서 적절하게 결합되었는지를 검토하여야 한다.

■ 인공지진의 합성

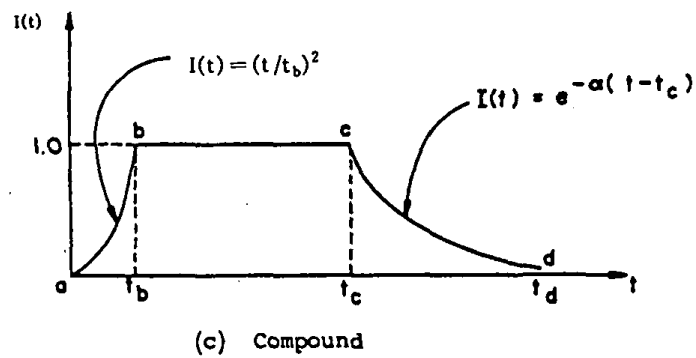
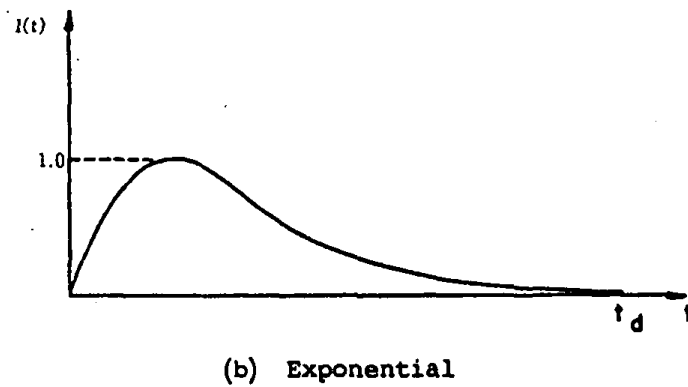
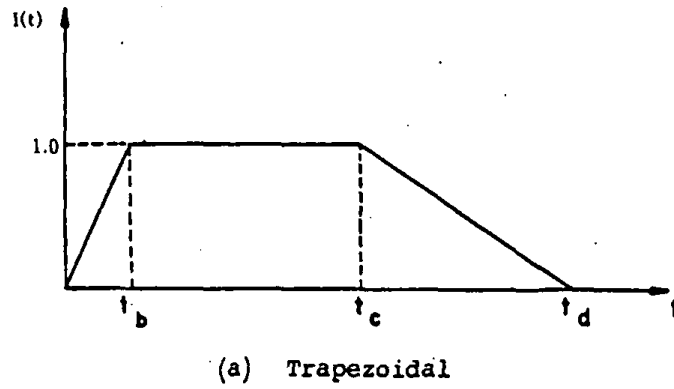
실제로 발생한 지진은 진앙이 서로 다르고 지진의 전파 경로에 따라 그 특성이 바뀌기도 하기 때문에 이러한 지진만을 이용하여 해석한 결과를 설계에 반영하는데는 무리가 따른다. 또한 실제 지진기록은 전술한 실 지진기록의 수정 방법으로 크기를 조정하여 목표로 하는 최대값을 만족시킨다 하더라도 설계응답스펙트럼을 만족시키지 못한다. 그러므로 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진을 산정하고 이를 이용하여 해석을 수행하며 그 결과를 설계에 반영하는 것이 필요하다.

인공지진이력은 주기와 위상각, 진폭이 다양한 정현함수와 포락함수를 중첩하여 다음과 같은 시간의 함수로 나타낼 수 있다

$$v_g(t) = E(t) \sum_{n=1}^N C_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (A5)$$

여기서 $E(t)$ 가속도-시간이력곡선의 진도포락함수
 C_n 진폭
 ω_n 진동수
 ϕ_n 위상각

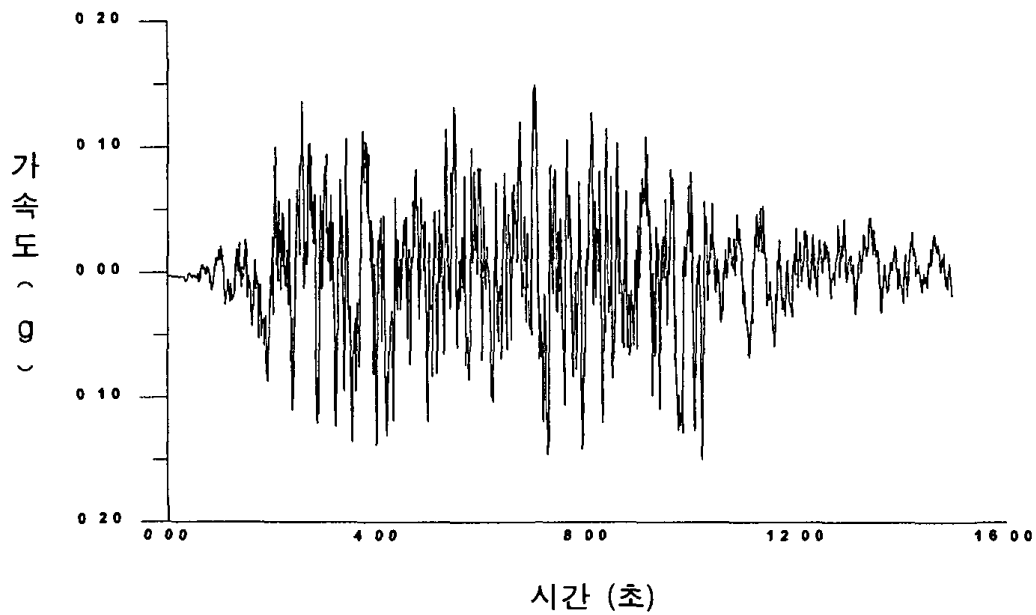
여기서 위상각은 독립무작위 변수로 0과 2π 사이에서 일정한 분포를 갖는다 진도 포락함수는 특정지역에서 발생한 가속도 시간이력의 기록을 참조하여 결정하여야 그 지역의 지반특성에 맞게 사용할 수 있으며 일반적으로 〈그림 A7〉과 같이 서로 다른 3가지 형태를 이용하게 된다 우리나라의 경우 가속도 시간이력의 기록이 미비하고 지진기록에 대한 동적특성을 심층적으로 연구한 자료가 불충분하므로 국내의 경우는 진앙지와 관측지가 먼 경우에 많이 사용하는 복합형을 사용하는 것이 타당하다



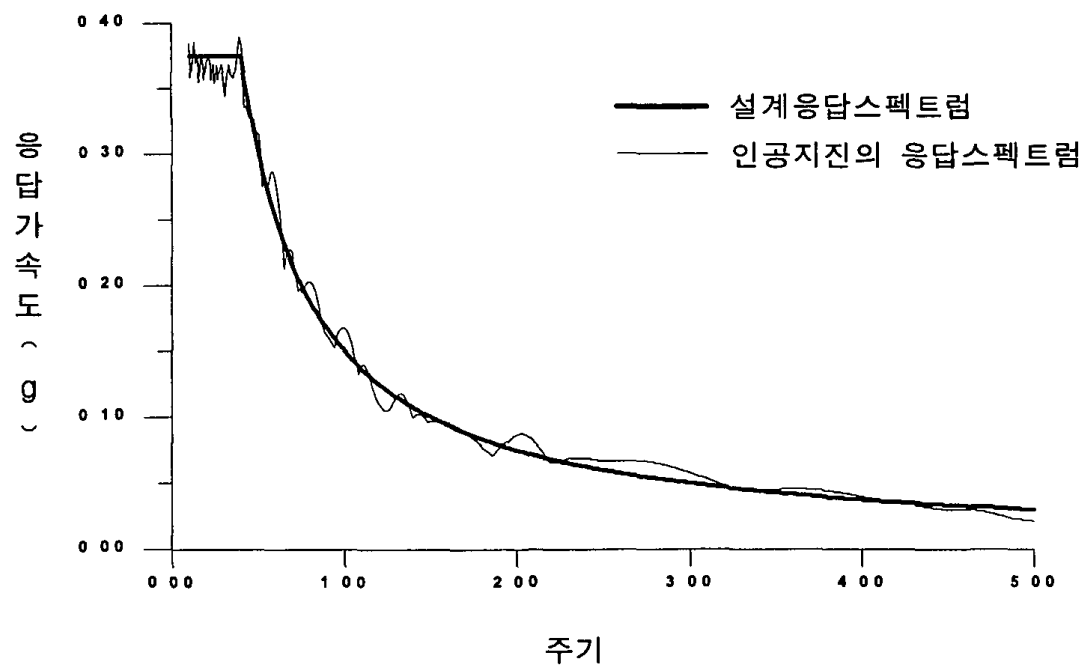
〈그림 A7〉 진도포락함수의 종류⁽⁸⁾

이와 같은 방법으로 생성된 인공지진의 가속도시간이력의 예는 다음의 〈그림 A 8〉과 같고 인공지진의 응답스펙트럼을 〈그림 2.2〉의 표준설계응답스펙트럼과 비교한 것은 〈그림 A9〉와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 인공적으로 생성시킨 지진기록은 표준응답스펙트럼에 잘 부합하는 기록임을 알 수 있다. 그러나 이와 같

이 인공적으로 합성된 지진기록을 이용하여 동적해석을 수행할 경우에는 실지진기록을 수정한 지진기록을 포함하여 최소 3가지 이상의 기록을 사용하여 동적해석을 수행한다



〈그림 A8〉 인공지진의 가속도 시간이력 예(0.15g)



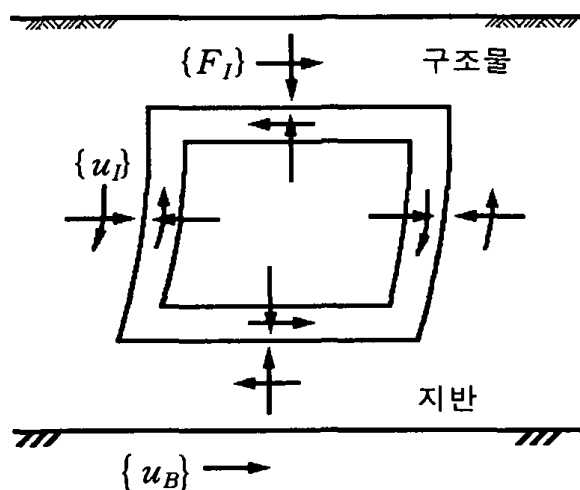
〈그림 A9〉 설계응답스펙트럼과 인공지진의 응답스펙트럼

A4. 응답 변위법^{(3) (10)}

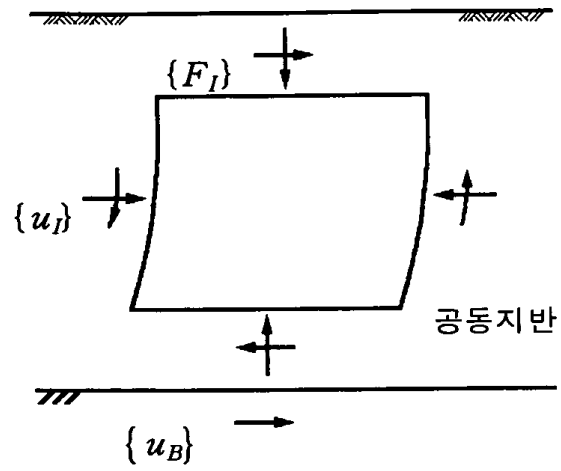
응답 변위법은 당초 선상 지중구조물이 지진에 의해 축 직각 방향으로 휘거나 혹은 축방향으로 늘어나거나 줄어드는 종단방향의 움직임에 대한 내진 계산법으로 이용되었으며 그후 비교적 규모가 큰 지중구조물이나 선상지중구조물의 횡단방향의 내진 계산법으로 등가정적해석법을 대신해 이용되는 경우가 많아지고 있다. 응답 변위법에서 구조물과 지반계가 지진에 의해 변형한 모형은 〈그림 A10〉과 같다. 이때 구조물과 지반의 접촉면에서는 상호작용이 일어난다. 지반쪽의 상호 작용력을 $\{F_I\}$ 이라 하면, 구조물쪽에서는 반대방향의 상호작용력이 발생하여 구조물 지반계의 평형상태가 유지된다. 또한 구조물과 지반의 접촉면을 완전부착상태라고 가정한다면, 접촉면의 변위는 $\{u_I\}$ 로 같다고 가정한다.

이 구조물-지반계를 〈그림 A11(a)〉와 〈그림 A11(b)〉와 같이 구조물 진동계와 구조물을 제외한 지반 진동계로 나눈다. 구조물에는 힘의 평형을 고려하여 변위 $\{u_I\}$ 와 상호작용력 $\{-F_I\}$ 을 작용시키고, 지반은 다시 〈그림 A12(a)〉와 〈그림 A12(b)〉와 같이 접촉면에서의 변위 $\{u_I\}$ 를 기반층에서의 지진동에 근거한 변위 $\{u_B\}$ (지반입사계)와 상호작용력 $\{F_I\}$ 에 근거한 $\{u_B\}$ (지반가진계)로 분리한다. 이를 정리하면 구조물-지반계는 다음과 같이 분류한다.

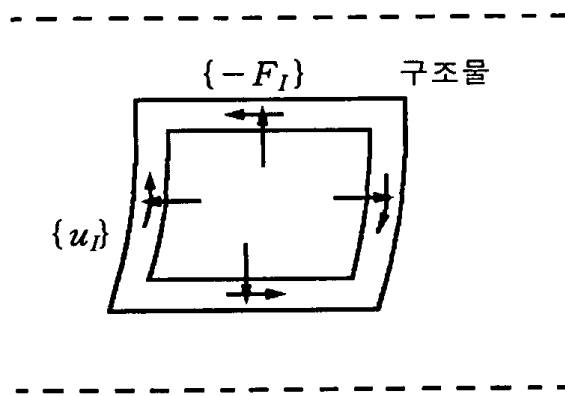
$$\text{구조물-지반계} \left\{ \begin{array}{l} \text{구조물 진동계} \\ \text{지반 진동계} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{지반입사계} \\ \text{지반가진계} \end{array} \right.$$



〈그림 A10〉 구조물-지반계⁽¹⁰⁾

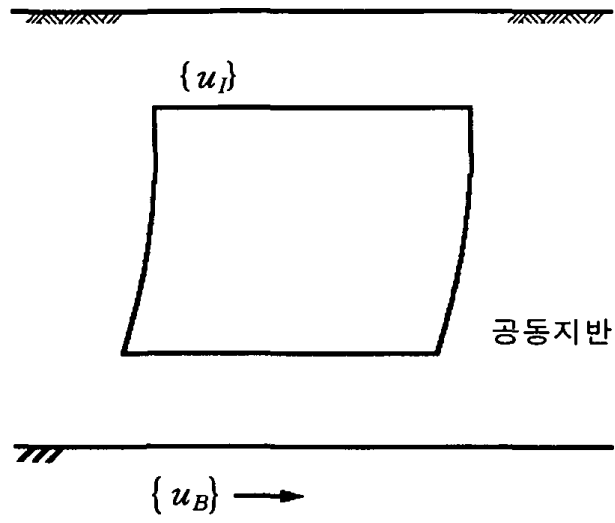


(a) 지반 진동계

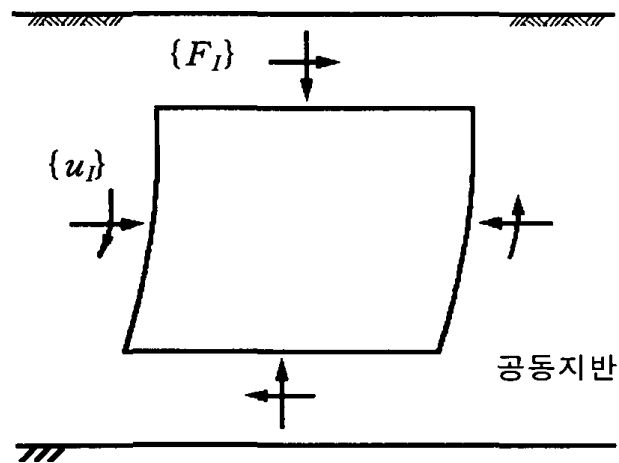


(b) 구조물 진동계

〈그림 A11〉 구조물-지반계의 분리⁽¹⁰⁾



(a) 지반 입사계



(b) 지반 가진계

〈그림 A12〉 지반 진동계의 분리⁽¹⁰⁾

지중구조물의 질량이 동일 체적의 지반질량보다 작다면, 구조물 자신의 관성력을 무시할 수 있고, 이에 따라 구조물 진동계를 이산형 모형으로 표현하면 운동방정식은 식 (A6) 과 같이 된다

$$\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SI}] \\ [K_{IS}] & [K_{II}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{u_S\} \\ \{u_I\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{0\} \\ \{-F_I\} \end{pmatrix} \quad (A6)$$

여기서 $[K_{SS}]$, $[K_{SI}]$, $[K_{IS}]$, $[K_{II}]$ 강성 매트릭스 요소

$\{u_I\}$ 구조물과 지반 사이의 접촉면에서의 변위벡터

$\{u_S\}$ 구조물과 지반 사이의 접촉면 이외의 구조물 변위벡터

I 구조물과 지반 사이의 접촉면에서의 절점

S 구조물과 지반 사이의 접촉면 이외의 절점

이다 접촉면에서의 변위 $\{u_I\}$ 는 다음 식 (A7) 과 같다

$$\{u_I\} = \{u_n\} + \{u_d\} \quad (A7)$$

지반 가진계에서의 힘 $\{F_I\}$ 과 변위 $\{u_d\}$ 와의 관계는 식 (A8) 과 같다

$$\{F_I\} = [k]\{u_d\} \quad (A8)$$

여기서 $[k]$ 는 지반 임피던스이다 식 (A7) 과 식 (A8) 에서 지반 가진계의 힘 식 (A9) 를 구한다

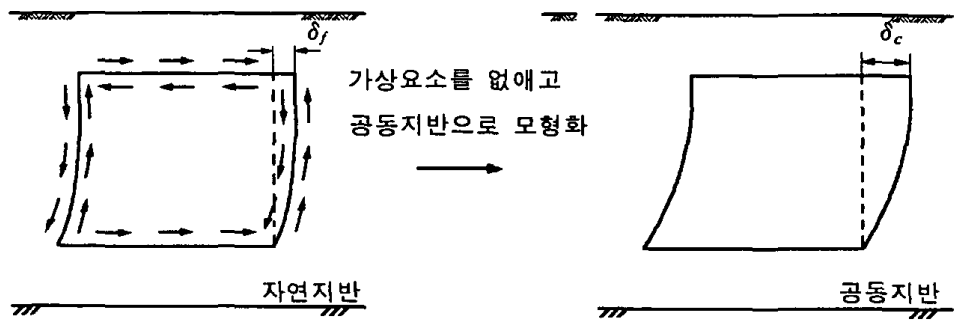
$$\{F_I\} = [k]\{u_d\} = -[k]\{u_n\} + [k]\{u\} \quad (A9)$$

이 지반 가진계의 힘을 식 (A8) 에 대입하여 식 (A10) 과 같은 관성력을 무시한 경우의 지반과 구조물이 이산화된 계 방정식을 얻는다

$$\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SI}] \\ [K_{IS}] & [k] + [K_{II}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{u_S\} \\ \{u_I\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{0\} \\ [k]\{u_n\} \end{pmatrix} \quad (A10)$$

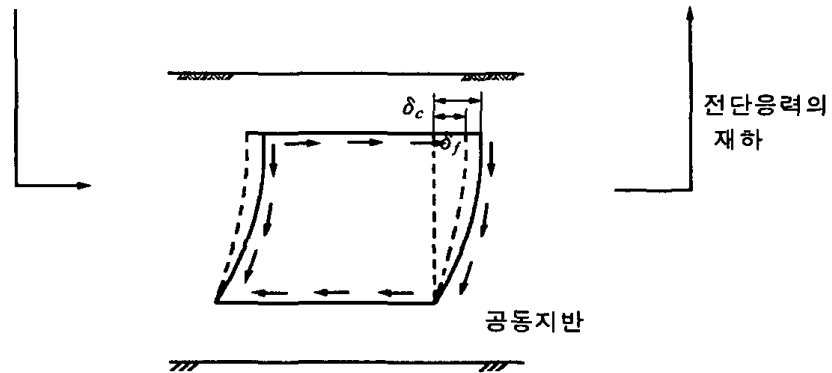
공동과 구조물이 없는 자연지반이 <그림 A13(a)> 에 나타난 바와 같이 전단방향

으로 변형이 발생되었을 경우, 이 지반의 내부에 가상영역이 점성 테두리로 존재한다고 하면, 전단응력이 영역의 안쪽과 바깥쪽에 작용하여 평형상태를 유지한다 이 전단응력에 의한 자연지반 내의 가상영역 위아래 끝단의 상대변위를 δ_f 라 하고 <그림 A13(b)>에 나타난 것처럼 가상영역을 제거하여 지반에 공동이 생겼다고 가정하면 가상영역에서 작용하고 있던 전단응력이 없어져서 힘의 불균형이 발생한다 따라서 공동은 요소 바깥쪽에 전단응력에 의해 경계의 응력이 0 이 되게 변형이 증가하며 이때 생기는 공동의 위아래 끝단의 상대변위를 δ_c 라 하면 이 변위가 식 (A7)의 $\{u_n\}$ 에 해당된다 즉 자연지반에 응답변위를 적용시키는 것은 <그림 A14>와 같이 주위를 지반탄성으로 지지된 구조모형에 지반의 변위를 작용시키고 구조물 주변에 전단응력을 가하는 것이다



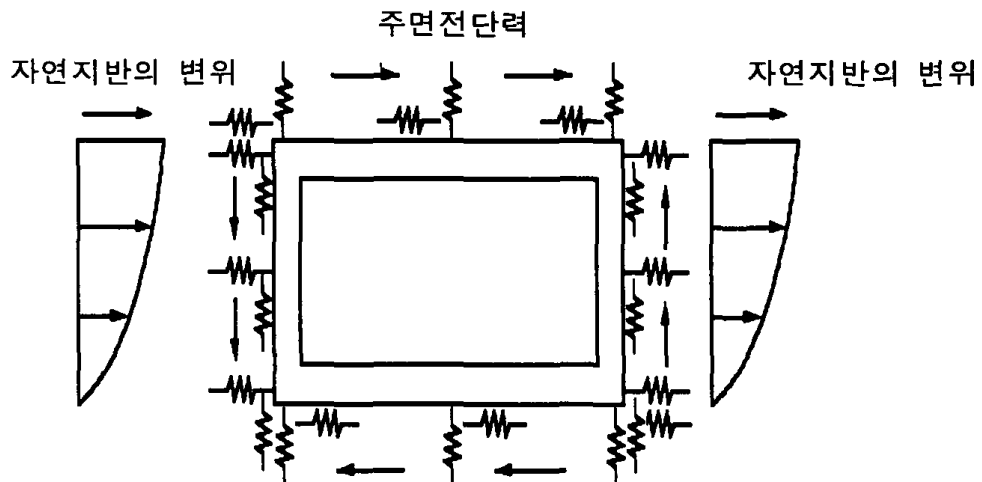
(a) 가상요소의 응력상태

(b) 응력개방상태



(c) 가상요소의 위아래 끝의 상대변위 $\delta_c^{(10)}$

〈그림 A13〉 변위의 산정방법



〈그림 A14〉 응답변위법의 구조모델과 하중⁽¹⁰⁾

A5. 기반면의 설계 응답속도

지반의 변위진폭 산정에 이용되는 기반면에서의 설계응답속도 S_v 는 23 절의 응답스펙트럼을 다음의 식을 이용, 속도응답스펙트럼으로 변환하여 사용하도록 한다
응답스펙트럼에 의하면 각 구간의 경계가 되는 주기는 다음 식과 같다

$$T_o = 0.2 T_s \quad (A11)$$

$$T_s = \frac{C_v}{2.5 C_a} \quad (A12)$$

위의 주기를 경계로 스펙트럼 가속도는 다음과 같은 식으로 나타낸다

$$S_a = \left[C_a + \left(\frac{2.5 C_a - C_a}{T_o} T_G \right) \right] g I \quad (0 \leq T_G < T_o) \quad (A13)$$

$$S_a = 2.5 C_a g I \quad (T_o \leq T_G < T_s) \quad (A14)$$

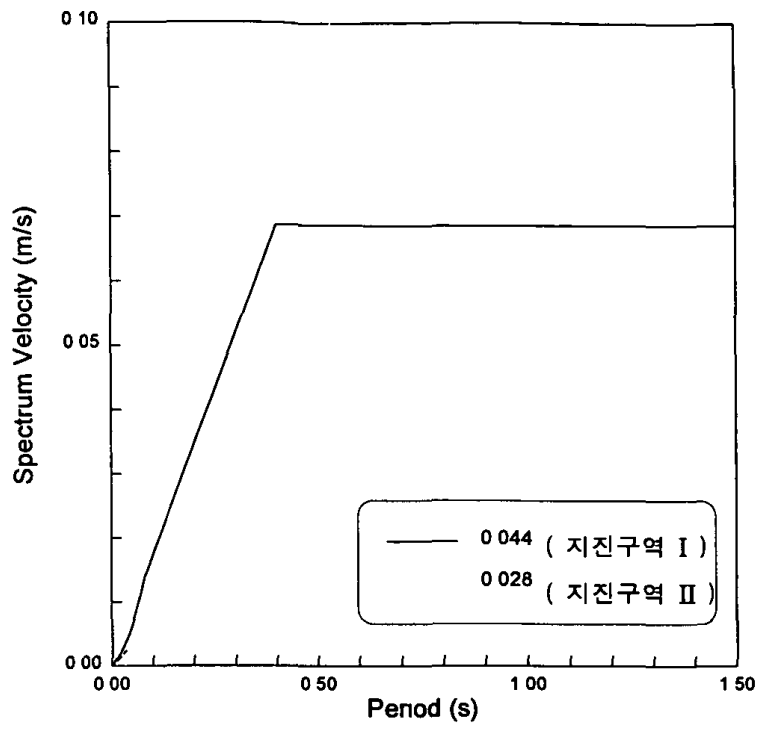
$$S_a = C_v / T_G g I \quad (T_G \geq T_s) \quad (A15)$$

응답변위법을 이용한 내진해석에서는 스펙트럼 속도를 사용하므로 위의 식은 아래와 같이 가속도-속도의 관계식을 이용하여 스펙트럼 속도를 구한다

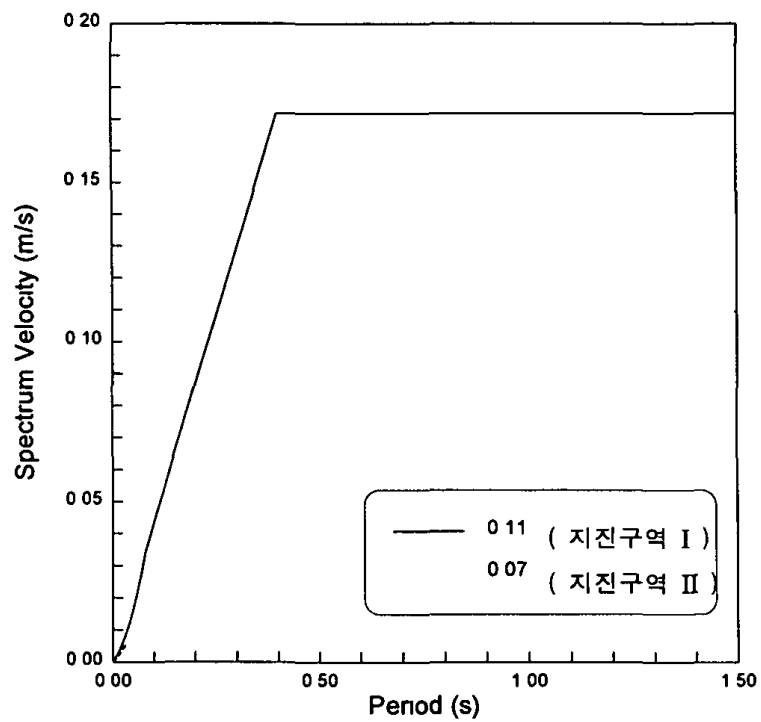
$$S_v = \frac{T_G}{2\pi} S_a \quad (A16)$$

여기서 T_G 표층지반의 고유주기 (sec)

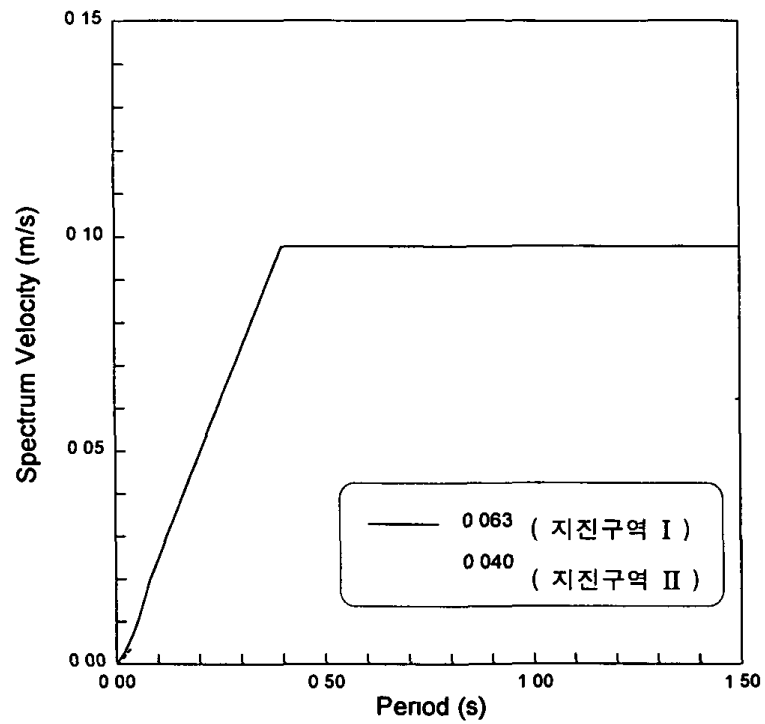
위의 식을 이용하여 각 등급과 성능수준에 따른 기반면의 설계 속도응답 스펙트럼을 구성하면 <그림 A15> ~ <그림 A20> 과 같다



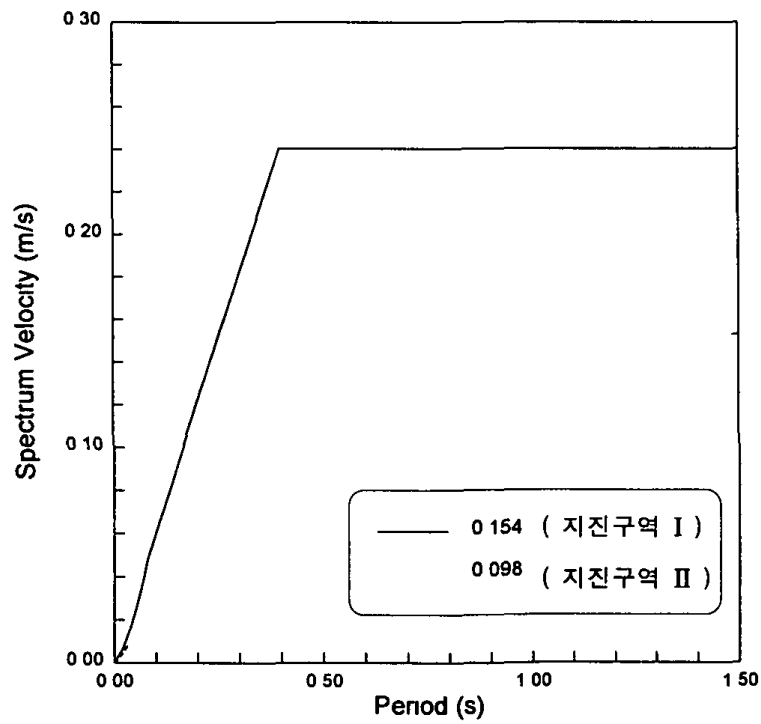
〈그림 A15〉 내진 2등급에 대한 기능수행수준의 속도응답스펙트럼



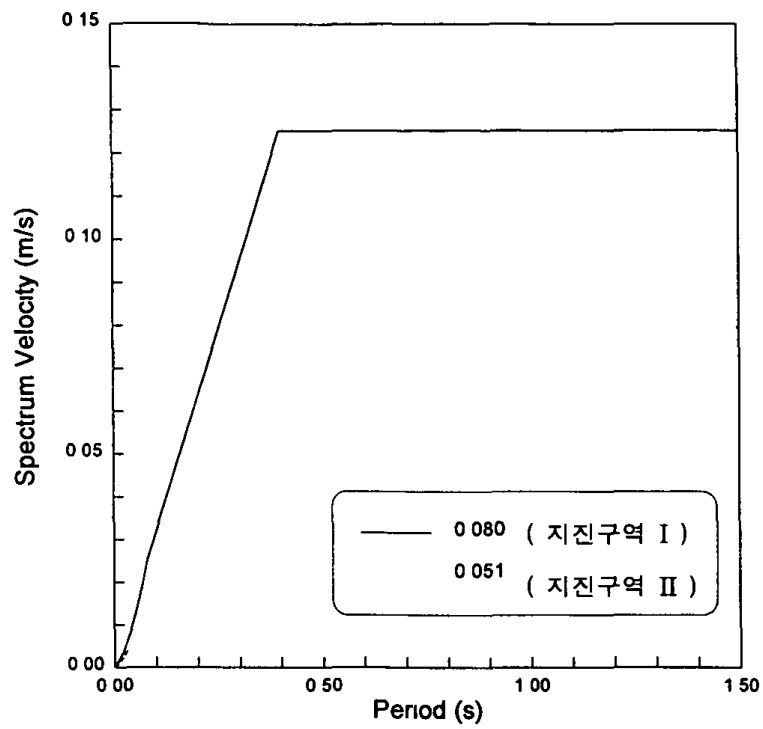
〈그림 A16〉 내진 2등급에 대한 붕괴방지수준의 속도응답스펙트럼



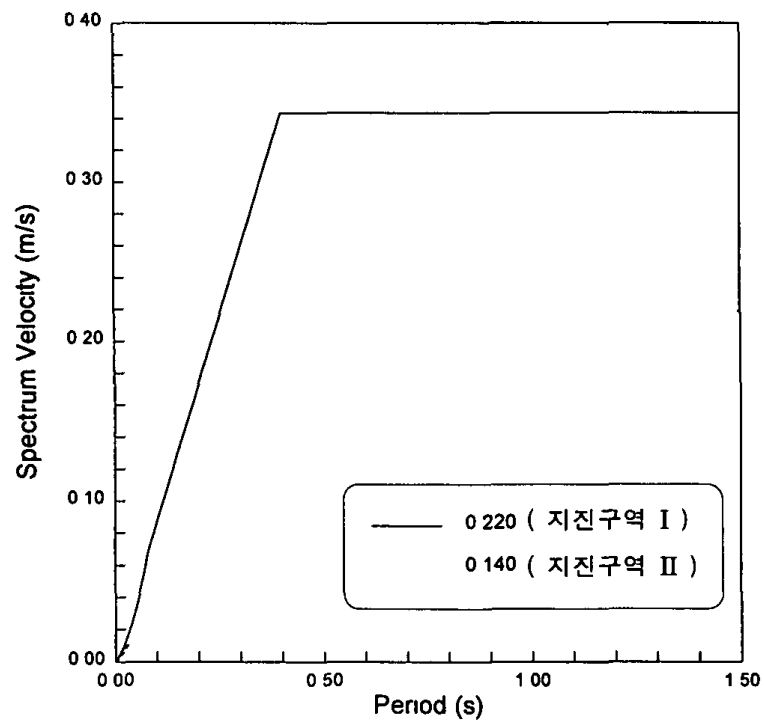
〈그림 A17〉 내진 1등급에 대한 기능수행수준의 속도응답스펙트럼



〈그림 A18〉 내진 1등급에 대한 붕괴방지수준의 속도응답스펙트럼



〈그림 A19〉 내진 특등급에 대한 기능수행수준의 속도응답스펙트럼



〈그림 A20〉 내진 특등급에 대한 붕괴방지수준의 속도응답스펙트럼

A6. 기반암의 위치에 따른 지진하중의 변화

본 지침의 설계예에서는 기반암의 위치를 지표면으로부터 약 30m 인 지점으로 가정하여 계산을 수행하였으나 기반암의 위치가 변화함에 따라 지진시 하중산정의 값이 변화하므로 이에 따른 영향을 검토해 볼 필요가 있다. 일반적으로 10m~20m 까지 지반조사가 수행되므로 기반암의 위치를 20m에서 50m까지 변화시켜가며 그 영향을 검토하였다.

내진설계해설의 〈그림 11〉에 사용된 지층을 기준으로 기반암과 접하는 층의 깊이를 변화시켜 기반암의 위치를 20m, 30m, 40m, 50m 로 가정하여 그 영향을 검토하였다.

기반암의 위치에 따라 영향을 받는 인자는 구체중심의 설계지진계수(K_{hav})와 지반의 고유특성치(T_G) 그리고 설계응답속도(S_v) 이다. 이러한 인자는 각각 지진시 관성력과 지진시 수평하중 그리고 지진시 주면전단력의 산정에 사용된다.

기반암의 깊이에 따른 구체중심에서의 설계지진계수의 변화는 〈표 A1〉과 같다.

〈표 A1〉 기반암 깊이에 따른 설계지진계수의 변화

기반암의 깊이 (m)	K_{hav}	변화율 (%)
20	0.085	0.00
30	0.087	2.24
40	0.088	3.37
50	0.089	4.04

※ 변화율은 기반암 깊이 20m를 기준으로 산정한 것이다

또한 지반의 고유특성치와 설계응답속도의 변화는 〈표 A2〉와 같다.

〈표 A2〉 기반암 깊이에 따른 지반의 고유특성치와 설계응답속도의 변화

기반암의 깊이 (m)	T_G	S_v	변화율 (%)
20	0.259	0.063	0.00
30	0.331	0.081	27.54
40	0.402	0.098	55.08
50	0.474	0.116	82.62

※ 변화율은 기반암 깊이 20m를 기준으로 산정한 것이다

〈표 A2〉를 살펴보면 설계지진계수의 변화량에 비해 지반의 고유특성치와 설계 응답속도의 변화량이 보다 크게 나타나는 것을 볼 수 있으나 이는 지진하중의 산정에 이용되면 다시 기반암의 깊이에 의한 영향으로 그 변화량이 감소하게 된다. 설계지진계수(K_{hav})는 식 (3.26)과 식 (3.27)에 의해 지진시 동수압과 관성력의 산정에 이용되며 지반의 고유특성치(T_G)와 설계응답속도(S_v)는 식 (3.19) 식 (3.20)~(3.22)에 의해 지진시 수평하중과 지진시 주면전단력의 산정에 이용된다.

지진시 동수압과 지진시 관성력은 설계지진계수에 비례하므로 〈표 A1〉에서 다른 변화율을 그대로 따르며 지진시 수평하중과 지진시 주면전단력은 기반암의 깊이의 변수가 영향을 주어 다음의 〈표 A3〉와 같이 변화하게 된다.

〈표 A3〉 기반암 깊이에 따른 지진하중의 변화

기반암의 깊이 (m)	지진시 관성력 변화율(%)	지진시 수평하중 변화율(%)	지진시 주면전단력 변화율(%)
20	0.00	0.00	0.00
30	2.24	-26.79	-27.33
40	3.37	-38.84	-39.46
50	4.04	-45.61	-46.22

※ 변화율은 기반암 깊이 20m를 기준으로 산정한 것이다

〈표 A3〉에 나타난 바와 같이 지진하중 중에 가장 큰 영향을 주는 지진시 수평하중은 기반암의 심도변화에 따라 비교적 큰 변화를 보이게 되며 이는 식 (3.6)에 의해 심도변화에 따른 지반의 변위진폭 값이 크게 변화하기 때문이다. 또한 지진시 수평하중은 기반암의 심도가 증가함에 따라 그 변화율의 감소량이 점차 줄어들게 된다. 그러므로 기반암의 위치에 대한 구체적인 실험치가 없을 경우에는 기반암의 위치를 낮게 가정하는 것이 보다 안전측이 된다.

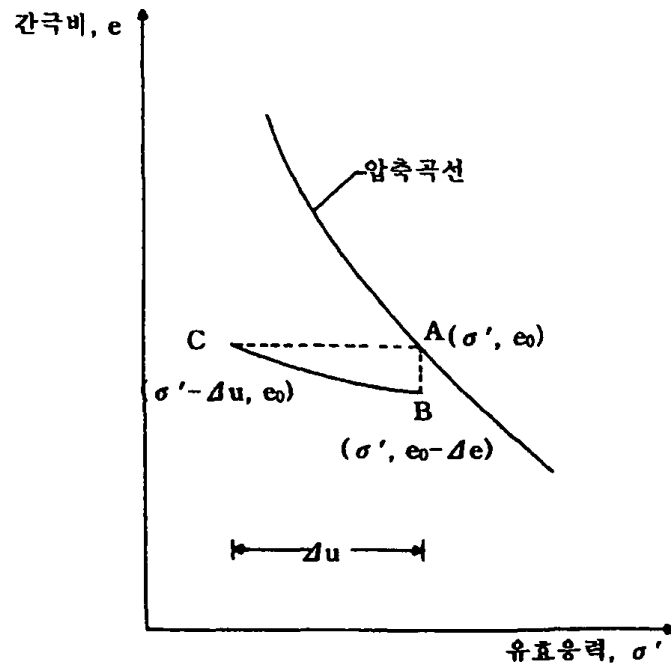
A7. 액상화 평가방법

■ 액상화 기본이론

1936년 Casagrande는 한계간극비의 개념(Critical Void Ratio)을 이용하여 액상화 현상을 설명하였다 즉, 액상화 현상은 한계간극비보다 큰 간극비로 느슨하게 놓여 있는 포화모래에 진동하중이 가해질때 모래의 부피가 감소하여 과잉간극수압이 발생함에 따라 발생한다고 주장하였다

액상화 현상은 일반적으로 지하수위보다 낮은 지층의 흙이 지진으로 인해 흙과 물이 일체가 되어 액체와 같은 성질을 갖는 현상으로 설명되어 왔다 즉 지반에 가해진 진동하중으로 간극수압은 상승하고 지반의 유효응력은 감소하여 그 결과, 포화사질토가 외력에 대해 전단저항을 잃게 되는 현상으로 정의된다

액상화 현상은 주로 느슨한 사질토에서 발생하는데 그 과정을 〈그림 A21〉에서 설명할 수 있다 그림에 나타난 바와 같이, 자유배수가 허용된 상태에서 압축곡선상의 A점의 응력과 간극비 상태를 초기상태로 놓고 하중을 재하하게 되면 Δe 만큼의 부피감소가 발생하여 B점으로 이동하게 된다 그러나 비배수상태를 유발하는 급작스런 진동하중이 재하되면 배수에 따른 부피감소가 없으므로 과잉간극수압(Δu) 증가와 함께 유효응력은 감소하여 응력상태는 C점방향을 향하게 되고 결국 과잉간극수압(Δu)이 초기응력과 같아짐에 따라 흙의 유효응력이 0이 된 상태에서 발생하는 것이라고 할 수 있다



〈그림 A21〉 비배수 조건에서 반복하중에 의한 간극수압 발생개념도

액상화 현상에 영향을 미치는 요소는 지진 및 지반에 관련된 것으로 구분할 수 있는데 지반에 관련된 영향인자를 살펴보면 다음과 같다

- i) 지반의 상대밀도
- ii) 흙의 입도분포 및 구조
- iii) 지반의 포화도
- iv) 지반의 과압밀도 및 정지토압계수
- v) 배수조건

지진에 관련된 영향인자는 다음과 같다

- i) 반복전단력의 파형
- ii) 반복전단력의 진폭 진동수
- iii) 반복전단력의 횟수 및 하중지속시간
- iv) 반복전단력의 방향

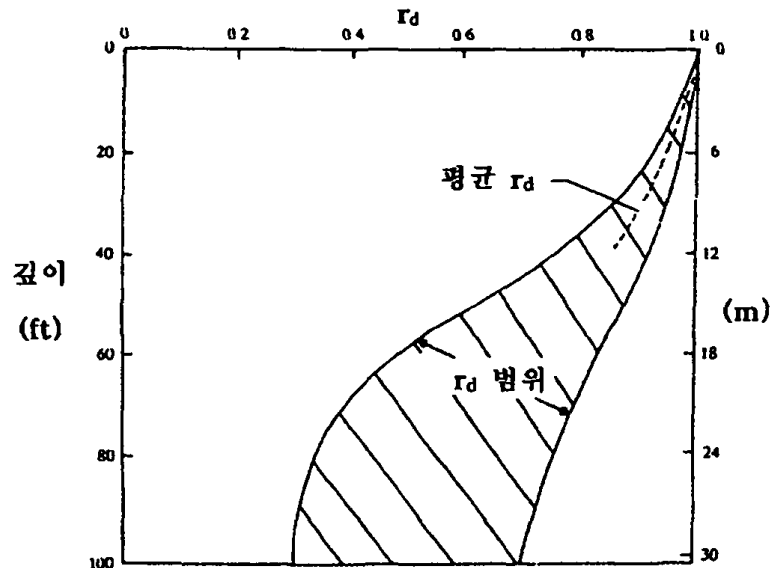
■ 액상화 평가방법

일반적으로 경험적인 액상화 평가방법의 근간을 이루는 이론은 Seed와 Idriss, Iwasaki와 Tatsuoka, Ishihara 등이 있는데 일반적으로 Seed와 Idriss 방법이 쓰인다. 특히, 이러한 경험적 방법의 장점은 동적해석을 수행하지 않고도 지하수위, 표준관입시험으로부터 얻어지는 N치, 입도분포, 지표면 최대수평가속도 등을 이용하여 손쉽게 액상화 평가를 수행할 수 있음에 따라 넓은 지역에 대한 평가수행이 용이하다는 점이다. 지표면 최대수평가속도로서 지점서 〈표 32〉의 지표면 설계수평지진계수도 사용가능하나 Shake등을 이용한 엄밀한 지진응답해석의 결과를 이용하는 것이 바람직하다.

Seed와 Idriss는 많은 실내시험 및 현장시험을 토대로 표준관입시험 결과인 N치를 이용하여 간편하게 액상화를 평가하는 방법을 제안하였다.

(1) 지진력의 표현 (지진응답해석 및 간편법으로 계산)

- ① 발생가능한 진도에 대해 지표면 최대수평가속도(a_{max})를 결정한다
- ② 해당해석깊이의 유효응력(σ'_v)과 전응력(σ_v)을 계산한다
- ③ 깊이에 따라 감소계수(r_d)를 구한다 〈그림 A22〉은 실험을 통하여 결정된 응력감소계수의 값을 보여주고 있다



〈그림 A22〉 다양한 지반조건에 대한 r_d 값의 범위

응력감소계수는 흙의 소성거동을 고려한 계수이며 1보다 작다. 제안된 깊이 (z)별 응력감소계수값은 $z \leq 9m$ 의 경우에는 $r_d = 1 - z/90$, $z \geq 9m$ 일 때는

$r_d = 0.9$ 를 사용한다

④ 진도에 따른 지진력을 식 (A17)과 같이 구한다

$$\frac{\tau_d}{\sigma_v'} = C_1 \times \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} r_d \quad (A17)$$

여기서, τ_d 는 반복전단응력(tf/m²), a_{\max} 는 지표면 최대수평가속도(m/sec²), g 는 중력가속도(9.81m/sec²), 그리고 σ_v 와 σ_v' 는 임의의 깊이에서의 전 상재압(tf/m²)과 유효상재압(tf/m²)이며 수정계수(C_1)의 산정식은 식 (A18)과 같다

$$C_1 = 0.65 \times (N_\ell / 20)^{0.2} \quad (A18)$$

N_ℓ 은 반복재하횟수로 Modified Mercalli(MM) 진도에 따라 6, 6.75, 7.5, 8.0, 8.5 일 때, 각각 5~6, 10, 15, 20, 26의 값이다

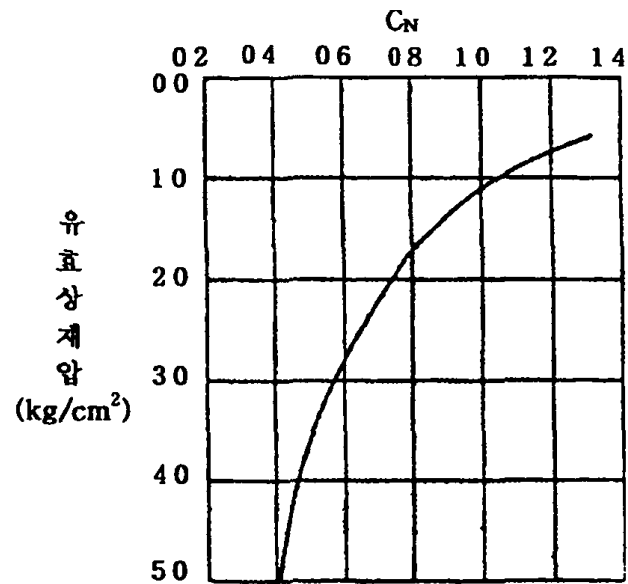
(2) 지반저항력의 표현

지반의 전단저항력을 산정함에 있어서 많은 실내시험 및 현장시험을 토대로 표준 관입시험 결과인 N 치를 이용하는데 그 방법을 살펴보면 다음과 같다

- ① 해당깊이의 표준관입시험결과 N 치와 보정계수(C_N)를 산정한다. 보정계수는 지반의 유효응력에 따라 결정되는데 식 (A19)와 같으며 도시하면 〈그림 A23〉과 같다

$$C_N = 0.77 \log \left(\frac{20}{\sigma_v'} \right) \quad (A19)$$

여기서, C_N 은 보정계수이며 σ_v' 은 유효상재압(kg/cm²)이다



〈그림 A23〉 C_N과 유효상재압과 상관관계

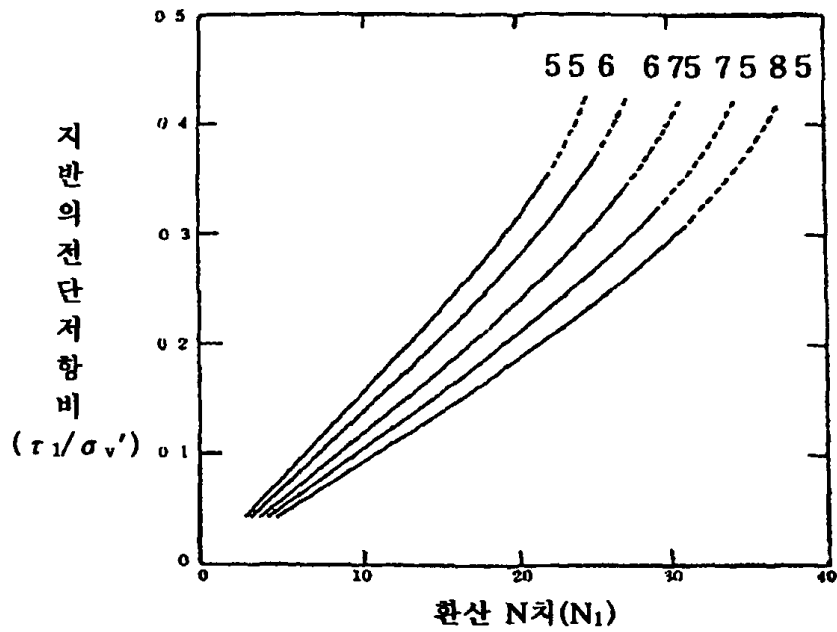
- ② 보정계수를 이용하여 표준관입저항치를 보정한 환산 N치를 산정한다. 일반적인 환산 N치 산정식은 식 (A20)과 같으며, 평균입경(D₅₀)이 0.15mm이하인 실트질 모래와 실트질 지반에서는 식 (A21)과 같이 수정하여 사용한다.

$$N_1 = N \cdot C_N \quad (A20)$$

$$N_1 = C_N \cdot (N + 7.5) \quad (A21)$$

여기서, N 은 표준관입시험(SPT) 결과이며 N_1 은 환산 N치이다.

- ③ 진도별로 유효상재압에 대한 전단저항비를 산정한 〈그림 A24〉는 다음과 같다.



〈그림 A24〉 환산 N 치와 전단저항비와의 관계

(3) 액상화평가

위에서 구한 전단응력비와 지반의 전단저항비의 비교를 통해 식 (A22)와 같이 안전율을 산정함으로써 액상화를 판단할 수 있다

$$F = \frac{\tau_1 / \sigma_v'}{\tau_d / \sigma_v'} \quad (A22)$$

여기서, τ_1 / σ_v' 는 반복전단저항비, τ_d / σ_v' 는 반복전단응력비, F 는 안전율을 의미하며 안전율이 1.0보다 작을 때 액상화발생 가능성이 있다고 판단한다

A8. 말뚝기초의 내진설계

■ 일반

- (1) 말뚝의 내진 설계시에는 우선 말뚝이 정적하중하에서 설계기준을 만족시키는지 검토할 필요가 있다
- (2) 정적하중하에서 설계기준을 만족시킨다고 판단이 되면 지진하중하에서의 말뚝 거동을 분석하기 위하여 다음과 같은 사항을 검토해야 한다

① 주변 지반의 액상화 가능성

지반에 액상화가 발생하면 지반의 전단저항력이 극도로 감소하여 말뚝기초에 큰 횡변위가 발생할 수 있으며 말뚝의 주면과 선단저항력이 감소되어 과다침하가 발생하기도 한다

② 말뚝머리의 횡변위

말뚝머리의 횡변위는 상부구조물에 치명적인 하중부담을 줄 수 있으므로 정량적인 분석이 필요하다 말뚝기초의 횡방향 변위를 정량적으로 구하는 방법은 등가정적해석(pseudo-static)법과 동적해석법이 있다 등가정적해석법에는 지반반력이론을 이용한 지반반력법과 탄성해석법이 있고 동적해석법에는 Prakash, Novak 등이 제안한 방법이 있다 현재는 등가정적해석법 중 p-y 곡선을 이용한 지반반력법이 많이 쓰이고 있다 횡방향 변위로 인한 파괴를 피하기 위해서는 말뚝기초를 연성으로 설계해야 한다

③ 경사말뚝의 안정성 검토

경사말뚝은 말뚝기초가 횡방향 하중에 효과적으로 저항하기 위해 비스듬히 시공된 말뚝으로서 횡방향 강성이 매우 크다 이렇게 강성이 큰 기초시스템은 지진 발생시 파괴되기 쉬운데 주로 확대기초(또는 말뚝 캡)와 경사말뚝의 연결부에서 파괴가 일어난다 그러므로 수직말뚝만으로 횡방향 하중을 지지하도록 설계하는 것이 바람직하다

④ 군말뚝 거동

동적수평하중하에서의 군말뚝 거동은 같은 하중에서의 단말뚝 해석을 한 다음 말뚝의 상호작용에 대한 정적해석을 통해서 판단한다 군말뚝 거동에 대한 일반적인 사항은 다음과 같다

- 수평하중에 대하여 말뚝간격이 하중방향과 하중방향에 대한 직각방향으로 각각 일정한 거리 이상 떨어지면 군말뚝 효과가 없어진다
- 동적수평하중을 받으면 정적수평하중하에서보다 변위는 증가하고 유효지반반력계수는 감소하게 된다 하중의 사이클이 증가할수록 지반의 변위는 더욱 증가하고 지반반력계수는 점점 더 감소한다
- 말뚝 캡이 지반내에 묻힌 군말뚝에서의 지반반력과 감쇠비는 말뚝 캡의 벽면마찰효과를 합쳐서 구한다 말뚝 캡이 지반내에 위치하면 말뚝과 흙과의 마찰력이 증대되어 군말뚝의 지반반력과 감쇠비는 증가하게 된다
- 비틀림을 받는 군말뚝에서는 기초중심과 가장자리 말뚝사이의 거리와 말뚝의 반경의 비가 클수록 말뚝의 비틀림 영향이 줄어든다 따라서, 말뚝의 비틀림은 많은 수의 작은 말뚝으로된 기초보다 적은 수의 큰 말뚝으로된 기초에서 큰 영향을 미치게 된다

■ 해석방법

(1) 개요

말뚝기초의 내진설계에서는 원칙적으로 등가정적해석법을 이용하며 2등급 구조물의 경우에는 붕괴방지수준에 대하여만 내진해석을 한다 1등급 구조물의 경우 특수한 상황하에 있는 말뚝기초에 대해서는 동적해석법이 필요할 수도 있다

〈표 A4〉 기초 구조물의 내진등급별, 성능수준별 내진설계방법

내진등급	내진성능수준	내진설계방법
1등급 구조물	붕괴방지수준	등가정적해석법 (필요시 동적해석법)
	기능수행수준	
2등급 구조물	붕괴방지수준	등가정적해석법

(2) 설계절차

말뚝기초에 대하여 등가정적해석시 적용되는 등가정적하중 산정법과 등가정적해석법을 이용한 말뚝기초의 설계기준 및 절차를 기술하였다 말뚝기초는 우선 정적하중하에서의 설계기준을 만족하여야 한다

① 하중산정

2절에서 제시된 방법을 통하여 구한 지진계수와 상부구조물의 자중을 곱하여 상부구조물의 무게중심에 작용하는 등가지진력을 산정한다 그리고 정하중과 등가정하중 그리고 기타하중을 조합하여 각 말뚝에 작용하는 수직력, 수평력 그리고 모멘트를 산정한다

② 말뚝의 해석

1등급 기능수행수준의 경우 말뚝의 등가정적해석법은 선형해석법인 도로교시방서 방법(chang 방법)을 이용하고 붕괴방지수준의 경우 지반의 비선형을 고려할 수 있는 p-y곡선법을 이용한다

③ 안정성 평가

1등급 기능수행수준은 말뚝이 탄성한도내에서 거동하는 상태로서, 말뚝의 허용변위량(Δ_s)은 말뚝 지름의 1%로 하는데 지름이 1,500mm이하인 말뚝은 허용변위량을 15cm로 한다 그리고 말뚝내부에 발생하는 최대모멘트에 대해 구조적으로 안정해야 한다

붕괴방지수준은 상부구조물에 대한 허용변위기준을 만족해야 한다 그리고 말뚝내부에 발생하는 최대모멘트를 말뚝의 연성을 고려해주기 위한 〈표 A5〉의 연성계수로 나눈다 이 값을 말뚝의 항복모멘트와 비교하여 말뚝의 안정성을 평가한다

만일 상부구조물에 대한 허용변위기준이 주어질 경우, 말뚝에 발생하는 변위는 이 기준을 만족해야 한다

〈표 A5〉 붕괴방지수준에서의 연성계수

말뚝의 종류	허용변위 연성계수		
	콘크리트 말뚝		강말뚝
	지반에서의 말뚝모멘트	말뚝 두부	수직말뚝
PS콘크리트	20	50	-
강재 또는 강재와 콘크리트 합성	-	-	50

× RC말뚝의 경우에는 콘크리트 덮개에 균열이 발생할 때의 연성계수를 사용하여 연성계수는 2가 된다

A9. 사면 안정화 방법

■ 안전율 유지법

안전율 유지법은 강우, 융설 등과 같은 물의 영향에 의하여 사면의 안전율이 감소하는 것을 방지함으로써 사면을 안정화하는 공법이다

(1) 배수공

사면 속에 물이 침투하면 지반의 강도를 저하시켜 사면의 활동을 촉진시킨다 따라서, 사면에 물이 침투하지 못하도록 하거나, 침투한 물을 지반으로부터 효율적으로 배제함으로써 사면의 안정성을 확보하는 방법이다

(2) 블록공

사면의 지표면을 공기 중에 노출된 상태로 방치하게 되면, 풍우나 지하수 등에 의하여 침식되어 붕괴하게 된다 따라서, 사면을 블록이나 격자모양 블록 등으로 덮어서 사면안정을 도모하는 공법이다

(3) 피복공

경사면을 식물, 인조섬유, 숯크리트 등으로 피복함으로써 우수에 의한 침식을 방지하여 경사면을 보호하는 공법이다

(4) 표층안정공

주입재를 주입하여 불안정한 토질의 안정도를 향상시키고 지하수나 침투수의 유입을 막아 사면지반이 불안정하게 되는 것을 막아주는 공법이다 주입재로는 크게 시멘트계(입자 그라우트), 시멘트 약액계(입자용액 그라우트), 약액계(용액 그라우트)로 나눌 수 있다

■ 안전율 증가법

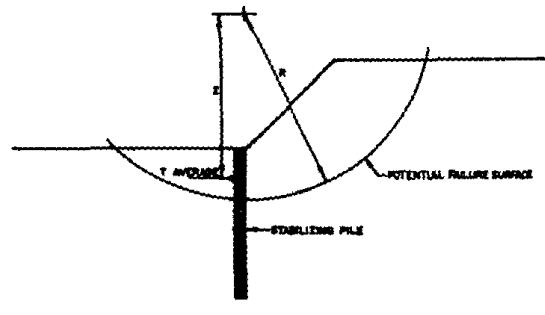
현장조사 등에 의하여 불안정한 것으로 판명된 사면은 안전율을 증가시킬 수 있는 대책이 마련되어야 할 것이다 이러한 대책으로는 두 가지 종류의 방법이 있다 하나는 사면의 활동에 저항하기 위한 저항력을 증가시켜 주는 방법이고, 다른 하나는 사면이 안전하도록 사면의 활동력을 감소시켜 주는 방법이다 우선 저항력 증가공법으로는 말뚝, 앵커, 옹벽, 흙 등을 사용하여 이들 재료의 전단, 휨, 인장, 압축 등의 역학적 저항 특성을 이용하는 물리적인 방법과 지반안정약액을 사용하여 직접 지반의 강도를 증가시켜 줌으로서 사면활동에 저항하도록 하는 화학적 방법을 들

수 있다 활동력 감소법으로는 사면상부의 흙을 제거시키는 절토공과 사면의 경사를 보다 완만하게 변경시키는 사면구배 방법을 들 수 있다

■ 저항력 증가법

(1) 말뚝공법

사면에서 활동이 예상되는 지점에 말뚝을 관통하여 부동지반까지 설치함으로써 사면의 활동하중을 말뚝의 수평저항으로 부동지반에 전달시키는 공법이다



〈그림 A25〉 사면의 활동을 억제하는 말뚝공법 개념도

(2) 앵커공법

고강도 강재를 앵커재로 하여 보링공 내에 삽입하여 그라우트 주입을 실시하여 앵커재를 지반에 정착시켜 앵커재 두부에 작용한 하중을 정착지반에 전달하여 사면을 안정시키는 공법이다

(3) 옹벽공

옹벽은 주로 자연사면 선단부에 도로를 축조하거나 주택단지를 조성할 경우 사용한다 그러나, 이 옹벽 자체로는 배면 자연사면의 안정을 기대할 수 없다 따라서, 이 경우는 반드시 배면사면의 안정성을 검토한 후 불안정으로 판단되면 말뚝공이나 앵커공 등으로 배면사면의 안정을 도모하여 준 후 옹벽을 설치하여야 한다

■ 활동력 감소법

(1) 절토공

절토공은 산사태 토괴중 활동하려는 토사를 제거하여 활동하중을 경감시켜 사면안정을 도모하는 공법이다

(2) 압성토공

이 공법은 산사태가 우려되는 자연사면의 선단부에 토사를 성토하여 활동에 저항할 수 있는 저항력을 증가시켜 주는 공법이다

A10. 용어정리

기반면

기반면은 지진시 설계지반운동을 결정하기 위한 기준면을 의미하며 내진설계시에는 이러한 기준면의 위치를 확인하는 것이 중요하다. 국내의 상위개념 내진설계기준에 의하면 설계지반운동의 기준면은 전단파속도를 기준으로 760~1500 m/s 범위의 보통암 지반이며 표준관입시험의 N 값으로부터의 결정은 어렵다고 기술되어 있다.

라이프라인

라이프라인은 물, 연료, 에너지, 정보, 그 밖에 인간생활에 필요한 생산물 및 배출물을 전달하는 역할을 수행하는 시설물을 총칭한다. 이와같은 기능을 수행하는 시설물은 전력시설, 가스시설, 송유시설, 통신시설, 상하수도시설, 교통시설, 항만, 공항 등이 있으며 인간생활에 필수적인 시설물이다. 넓은 범위로는 병원 등과 같은 인간의 생명을 다루는 시설물도 여기에 포함된다. 최근들어 라이프라인이 관심사가 되는 이유는 거대한 도시화로 인하여 구조물의 종류가 많아지고 규모가 거대해 졌으며 최근에 미국이나 일본에서 발생한 지진이 라이프라인 구조물에 대규모 피해를 입히는 경우가 자주 발생하였기 때문이다.

시간영역해석

실제의 지진기록 또는 인공합성된 지진기록을 이용하여 지진의 지속시간에 따라 구조물의 동적응답을 구하는 해석법이다.

설계응답스펙트럼

구조물의 동적 특성을 반영한 설계를 하기 위하여 사용되는 주기와 스펙트럼가속도 간의 함수이다. 지진계수 C_a 와 C_v 로부터 구하며 각각의 재현주기와 지진위험도에 따라 하나의 응답스펙트럼을 갖는다.

최대유효지반가속도

지진가속도는 최대지반가속도와 최대유효지반가속도가 있는데 최대유효지반가속도는 구조물에 실질적인 영향을 주지 않는 진동수가 높은 가속도 성분을 제외한 가속도 성분이다. 일반적으로 최대유효지반가속도는 최대지반가속도보다 작으며 설계에 적용할 때에는 최대유효지반가속도를 적용하는 것이 합리적이다.

속도응답스펙트럼

응답스펙트럼을 속도에 대한 함수로 표현한 것이며, 상위개념에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼은 가속도에 대한 함수이므로 이를 속도에 대한 함수로 바꾸어 표

현한 것이 속도응답스펙트럼이다

스펙트럼속도

속도응답스펙트럼 상에서의 주기별 속도를 의미한다

설계응답속도

실제로 내진설계에 사용되는 응답속도이며, 속도응답스펙트럼 상에서 지반의 특성치에 따라 구해진 스펙트럼속도를 설계응답속도로 정의할 수 있다

인공지진

인공지진의 사용 목적은 설계응답스펙트럼과 잘 부합되는 지진의 특성을 반영하기 위함이다 실제 지진기록은 대부분이 응답스펙트럼을 정확하게 반영하지 못한다 즉 장주기 성분과 단주기 성분을 모두 만족하는 경우가 드물다 따라서 정확한 동적해석을 위해서는 인공지진을 합성하여 설계에 반영할 필요가 있다 인공지진의 합성시 중요한 요소로는 최대지진가속도, 강진지속시간, 지진 지속시간, 진도 포락함수, 등이 있다

액상화

액상화는 포화사질토가 비배수 상태에서 급속한 재하를 받게 되어 과잉공극수압이 발생함과 동시에 유효응력이 감소한다 이로 인하여 전단응력이 감소하게 되어 액체처럼 유동하거나 축방퍼짐(Cyclic Mobility)과 같은 현상이 발생하게 된다

유동액상화는 토체내의 정적평형상태의 전단응력이 액상화 상태의 흙의 전단강도보다 큰 경우에 발생하는 현상으로서 이로 인한 대규모 변형은 실제로 정적전단응력에 의해서 일어난다 이 유동액상화는 유동파괴(Flow Failure)라고 하는 중대한 결과를 가져온다 유동액상화는 지진이 계속되는 동안이 끝난 후에 발생하고 느슨한 경사지에서 주로 발생한다 Cyclic Mobility 는 포화사질토가 일정한 함수비에서 반복하중을 받아서 일어나는 진행성 연화이다 이는 유동액상화와는 달리 정적전단응력이 액상화토의 전단강도보다 작은 상태에서 일어난다

액상화 지반 위에 기초한 구조물들은 액상화로 인한 전단응력 감소로 지지력을 잃게되며, 또한 축방퍼짐 현상으로 파이프라인과 같은 선상구조물들의 거동에 영향을 주게 된다

위험도계수 I

재현주기에 따라 달라지는 값으로 지진계수는 위험도계수와 지진구역계수에 따라 결정된다 지진구역계수는 500년 빈도의 지진에 대한 기준이므로 등급과 성능수준에 따라 재현주기가 변하는 것을 고려하기 위해 곱하여지는 factor 이다

지반-구조물 상호작용

지진과 같은 외부 진동하중에 의해 발생된 탄성파는 지반을 통하여 지상 및 지중 구조물에 도달하게 된다. 지반을 통하여 전달된 탄성파는 대상 구조물에 도달하면서 구조물의 동적응답에 영향을 미치며 구조물의 동적응답은 다시 주변지반에 영향을 미치게 되어 그 양상이 복잡하게 된다. 지반-구조물 상호작용 해석법은 서브스트럭처(sub-structure)법과 직접법이 있다.

지중구조물의 내진설계

지중구조물은 지반의 운동과 밀접한 관련이 있다. 지상구조물은 관성력을 고려하여 설계를 하지만 지중구조물은 주변의 지반보다 가벼운 경우가 대부분이므로 관성력보다는 지반의 운동에 의해 거동이 지배된다. 지진시 지반의 운동은 크게 지진파의 전달, 액상화, 단층, 산사태 등이 있다. 현재까지 미국과 일본에서 일반적으로 적용해온 설계법은 지진파의 전달을 고려하여 설계하는 방법이다. 특히 일본에서는 응답변위법을 사용하여 대부분의 지중구조물에 이 설계법을 적용하고 있다.

액상화, 단층, 산사태는 영구지반변형이라 부르며 단층의 경우 미국에서 설계법이 제시되어 있으며, 액상화에 대해서는 최근 미국과 일본 등에서 설계에 적용하려는 노력이 진행중이며, 특히 일본은 고베지진 이후에 액상화에 대한 관심이 고조되어 이를 설계에 적용하려는 노력이 활발하게 진행중에 있다.

지진구역

평균재현주기별 지진재해도를 각 행정단위별로 시설물에 효과적으로 적용하기 위해서 지역별 지반진동의 정도에 따라서 우리나라의 경기도와 강원도 남쪽을 두 개의 지진구역으로 설정한다. I 구역은 서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 경기, 강원남부, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남 북동부가 해당되고, II 구역은 강원 북부, 전남 남서부, 제주가 해당된다.

지진구역계수 : Z

재현주기에 따라 지진의 크기를 각 구역별로 나타낸 계수이다. I 구역에서는 0.11, II 구역에서는 0.07이다. 우리나라에서의 지진구역계수는 500년 재현주기에 해당하는 지진가속도로 결정된다.

지진계수 C_a, C_v

응답스펙트럼을 결정함에 있어서 구해지는 계수로서 C_a 는 지진의 가속도와 관련된 계수이고 C_v 는 지진의 속도와 관련된 계수이다.

지진재해도

한반도에서 각각 5, 10, 20, 50, 100, 250, 500 년 동안 초과확률 10%에 해당하는 가속도를 등치선의 형태로 나타낸 것

지진지반운동

지진시 지반의 운동은 동적인 자연현상으로 운동의 세기, 주파수 내용 및 지속시간의 세가지 측면에서 그 특성을 정의 할 수 있다 이러한 지반운동의 특성을 정량적으로 표현하는 방법은 시간이력, 응답스펙트럼, 지반운동의 최대값 등이 있다 시간이력은 지반운동의 특성인 세기, 주파수 내용 및 지속시간을 나타낼 수 있으며 응답스펙트럼은 지반운동의 세기, 주파수 내용을 표현하나 지속시간은 알 수 없다

전단파속도

지반의 동적특성을 나타내는 하나의 지표로서 국내 내진설계 기준 상위개념에서는 암질인 경우 360m/s 이상의 값을 갖는다 전단파 속도는 지반의 주기를 결정하거나, 지반의 변형률을 결정하 위해 필요한 요소이다 또한 실측치와 실험치로부터 N 치와 전단파속도간의 상관관계를 나타낼 수 있다

진도포락함수

인공지진의 형태를 결정하는데 사용된다 가속도 시간이력을 표현하면 정의된 진도포락함수에 따른 형태를 갖게된다 우리나라에서는 연구 자료가 불충분하므로 진앙지와 관측치가 먼 경우에 많이 사용되는 복합형을 사용하는 것이 타당하다

주파수영역해석

구조물과 지반의 주파수 특성을 이용하여 주파수에 따른 동적응답을 구하는 해석법이다

Free Field Boundary (자유장 경계)

일반적으로 수치해석은 유한영역에 대하여 수행되는데 유한영역의 경계에서 전달파의 반사가 이루어진다 이러한 반사파는 동해석 결과에 영향을 미치기 때문에 경계에서 전달파를 흡수하기 위한 경계조건이 필요하다 이렇게 유한영역의 경계에서 전달파를 흡수하는 경계조건을 Free Filed Boundary(자유장 경계)라 한다

Modified Mercalli(MM) 진도

MM진도는 지진의 진도를 나타내는 기준으로 지진의 진도를 12단계로 나누고 각 단계에 해당하는 현상으로서 진도를 판단할 수 있는 방법이다 지진의 진도를 나타내는 여러가지 방법들 중 가장 널리 쓰이고 있다