

KDS 64 17 00 : 2019

내진

2019년 2월



건설기준 제·개정에 따른 경과 조치

이 기준은 발간 시점부터 사용하며, 이미 시공완료 또는 시행 중에 있는 설계용역이나 건설공사는 발주기관의 장이 필요하다고 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 기준을 그대로 사용할 수 있습니다.

건설기준 제·개정 연혁

- 이 기준은 건설기준 코드체계 전환에 따라 기존 건설기준(설계기준, 표준시방서)간 중복·상충을 비교, 검토하여 코드로 통합 정비하였다.
- 이 기준은 기존의 항만 및 어항 설계기준에 해당되는 부분을 통합 정비하여 기준으로 제정한 것으로 제·개정 연혁은 다음과 같다.

건설기준	주요내용	제·개정 (년.월)
항만설계기준	• 항만설계기준 제정 • 설계조건, 구역시설, 외곽시설, 계류시설, 기타시설, 준설 및 매립 등 기타항만공사에 관계되는 설계의 일반방침과 기준을 수록	제정 (1971.12)
항만설계기준	• 조사연구가 진전됨에 따라 국내기술향상에 도움이 되도록 개정	개정 (1979.12)
항만시설물 설계기준서	• 항만의 재개발, 워터프런트 개발사업 추진 전망에 따라 항만법 제26조에 근거하여 기술의 체계화, 표준화의 기준 수립 및 시설물의 안정성과 경제성을 고려하여 개정	개정 (1993.12)
항만 및 어항 설계기준	• 해양수산부가 새로 발족되어 항만 및 어항 설계기준·해설 및 항만시설의 기준에 관한 규칙과 어항관련 법규에서 정하는 어항시설에 대한 설계기준을 통합하고, 설계 및 시공과정과 시공이후 건설관리 및 시설물 유지관리 관련내용 신설하여 개정	개정 (1999.12)
항만 및 어항 설계기준	• 연안정비시설물을 포함하고 관련법령 및 최신기술 변화요인 반영, 항만시설장비의 안전성 제고를 위한 설계풍속 및 하중 계수 상향, 재추산 심해파의 적용근거 마련 등 개정	개정 (2005.12)
항만 및 어항 설계기준·해설	• 변화된 항만건설여건 반영과 태풍, 이상과랑 등 해양외력의 기후변화 대응, 선박 및 장비의 대형화, 저탄소 녹색성장, 항만재해 저감을 고려하고 해외 건설사업 진출에 도움이 될 수 있도록 국제 설계기준과 연계성 향상하여 개정	개정 (2014.04)
항만 및 어항 설계기준 설계코드(KDS 64 17 00)	• 건설기준 코드체계 전환에 따라 설계코드로 개편	제정 (2017.08)
항만 및 어항 설계기준 설계코드(KDS 64 17 00)	• 감사원 감사결과의 후속조치 일환으로 기존 및 신규 시설물의 내진설계기준 일원화하고, 지진수평가속도와 액상화 평가기준 등의 관련내용을 개정	개정 (2018.03)
항만 및 어항 설계기준 설계코드(KDS 64 17 00)	• 행안부 내진설계기준 공통적용사항을 반영	개정 (2019.2)

제 정 : 2017년 8월 16일 개 정 : 2019년 2월 일
 심 의 : 행정안전부 자문위원회
 소 관 부 서 : 해양수산부 항만기술안전과
 관련단체 (작성기관) : 한국항만협회

목 차

contents

1. 일반사항	1
1.1 목적	1
1.2 적용범위	1
1.3 참고기준	1
1.4 용어의 정의	2
1.5 기호의 정의	4
1.6 시설물의 구성	4
1.7 설계원칙	4
2. 조사 및 계획	7
2.1 입지조건	7
2.2 지반 및 지형 조사	7
3. 재료	12
4. 설계	12
4.1 설계일반	12
4.2 항만 및 어항 시설	62



KDS 64 17 00 내진

1. 일반사항

1.1 목적

이 기준은 항만 및 어항 시설물의 내진설계에서 필요한 최소한의 기술적 사항을 정하는 것을 목적으로 한다.

[해 설]

- (1) 본 기준은 현 단계에서의 최신 설계기술 및 관련 기준을 기반으로 작성되었으며 향후 새로운 설계기술이나 관련 기준이 발표되면 이를 참조하여 필요한 개정을 하는 것이 바람직하다.

1.2 적용범위

지진·화산재해대책법 시행령 제10조 제1항에 해당하는 항만 및 어항 시설물 중 항만 및 어항 기본시설인 외곽시설, 계류시설과 기능시설인 하역기계의 기초 및 초대형 석유탱커 시설, 해저파이프라인, 해상저유시설 등의 내진설계에 적용한다.

[해 설]

- (1) 1.2에서 정의된 시설은 이 기준을 따르고 그 외의 여타 시설은 각 시설의 내진설계기준을 따른다.

1.3 참고기준

1.3.1 관련법규

지진·화산재해대책법
항만법

1.3.2 관련기준

내진설계 일반(KDS 17 10 00)

1.3.3 관련표준

내용 없음

1.4 용어의 정의

(1) 이 기준에서 사용되는 주요 용어의 정의는 다음과 같으며, 이 기준에서 정의하지 않은 주요 용어의 정의는 KDS 17 10 00 (1.4 용어의 정의)에 따른다. • 내진 I 등급 : 지진 시 붕괴된다면 큰 재난이 발생하거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 큰 영향을 줄 수 있는 항만의 등급을 말한다. • 내진 II 등급 : 지진 시 붕괴된다면 재난이 크지 않거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 영향이 크지 않은 항만의 등급을 말한다. • 다중모드스펙트럼해석법(Multi-mode spectral analysis) : 여러 개의 진동모드를 사용하는 스펙트럼해석법을 말한다. • 단일모드 스펙트럼 해석법(Single-mode spectral analysis) : 하나의 진동모드만을 사용하는 스펙트럼해석법을 말한다. • 동수압(Hydrodynamic pressure) : 유체의 동적작용에 의해 구조물에 작용하는 동적압력을 말한다. • 동적해석법(Dynamic analysis) : 지반 및 구조물의 고유 진동 주거나 감쇠 특성 등의 동적 특성을 고려하여 그 응력 상태나 변형을 해석하는 것을 말한다. • 등가정적해석법(Equivalent static analysis method) : 지진의 영향을 정적하중으로 환산한 후에 이를 이용하여 정적해석을 수행함으로써 지진에 의한 구조물의 거동을 예측하는 방법을 말한다. • 등가선형해석(Equivalent linear analysis) : 재료의 비선형 하중-변위 이력 거동을 유효강성과 유효감쇠로 치환하여 선형으로 해석하는 방법을 말한다. • 모드중첩법(Mode superposition method) : 지진에 대한 구조물의 동적응답을 서로 직교성을 갖는 진동모드의 선형조합 형태로 구하는 방법을 말한다. • 소성거동(Plastic behavior) : 구조부재의 응답이 탄성상태를 초과하여 하중이 제거되더라도 원래 형상으로 되돌아가지 않는 거동을 말한다. • 시간영역해석(Time-domain analysis) : 계기지진과 또는 인공으로 합성된 지진파를 입력운동으로 하여 구조물의 동적응답을 시간영역에서 직접적분법으로 구하는 방법을 말한다. • 유효응력해석법(Effective stress analysis) : 지반내 흙의 유효응력을 대상으로 하는 해석법. 배수 과정을 고려한 하중 작용 조건에 대한 해석방법을 말한다. • 응답변위법(Response displacement method) : 기반면으로부터 발생된 지반운동으로
--

인하여 지중구조물에 발생된 가상의 변위와 주면전단력을 이용하여 지진해석을 수행하는 방법을 말한다.

- 응답수정계수(Response modification factor) (=반응수정계수) : 시스템 초과강도와 연성거동을 전제로 탄성지진력을 저감하는 계수를 말한다.
- 응답스펙트럼해석(Response spectrum analysis) : 응답스펙트럼을 사용하여 구조물 진동모드의 최대응답을 계산하는 방법을 말한다.
- 인공합성지진(Synthetic ground-motion) : 목표로 하는 파워스펙트럼이나 응답스펙트럼을 만족하도록 무작위 운동을 조합하여 만든 지진을 말한다.
- 연성계수 : 항만시설물의 연성거동을 전제로 탄성지진력을 저감하는 계수를 말한다.
- 전응력해석법(Total stress analysis) : 지반 내 흙의 전응력을 대상으로 하는 해석법. 배수 과정을 고려하지 않은 하중 작용 조건에 대한 해석방법을 말한다.
- 지진력 저항 시스템(Seismic load resistant system) : 지진력에 저항하도록 구성된 구조시스템을 말한다.
- 부지응답해석(Site response analysis) : 지진 시 시간영역 또는 주파수영역에서의 지반의 응답을 수치해석적으로 예측하는 것을 말한다.
- 진동대 실험(Shaking table test) : 구조물이나 구조부재를 진동대 위에 올려놓고 지진파를 입력하여 동적 거동특성을 확인하는 구조 실험을 말한다.
- 진동삼축시험(Cyclic triaxial test) : 지반의 동적물성치, 액상화 저항능력비 등을 산정하기 위해 시료에 구속압력을 가한상태에서 축방향으로 진동(반복)의 축차응력을 가하는 실내시험을 말한다.
- 주파수영역해석(Frequency-domain analysis) : 구조물과 지반의 동적응답을 주파수 영역에서 선형 또는 등가선형해석을 수행하는 것을 말한다.
- 최대전단탄성계수(Maximum shear Modulus) : 지반 내 흙이 전단력을 받아 전단 변형을 일으킬 때 전단 응력도와 전단 변형 사이의 비례 상수 중 최대 기울기의 값을 말한다.
- 평균응답 가속도값(A_{mean}) : 안벽배면지반에서 지진응답값의 평균값(지표면과 안벽 기초면 사이의 평균값)으로 배면지반에 대한 부지응답해석으로부터 구한다.
- 최대응답 가속도값(A_{max}) : 안벽배면지반의 지표면에서 지진응답 가속도의 최대값으로 배면지반에 대한 부지응답해석으로부터 구한다.
- 항만의 내진등급 : 항만이 붕괴되거나 기능의 마비됨에 따른 사회적인 영향을 감안하여 정한 내진등급으로 항만의 중요도에 따라서 내진Ⅰ등급, 내진Ⅱ등급으로 분류한다.

1.5 기호의 정의

내용 없음

1.6 시설물의 구성

- (1) 외곽시설 : 방파제, 호안 등
- (2) 계류시설 : 안벽, 소형선부두, 잔교 등
- (3) 초대형 석유탱커시설
- (4) 하역기계의 기초
- (5) 해저파이프라인
- (6) 해상저유시설
- (7) 기타 : 항만 및 어항 운영을 위하여 필요하다고 판단되는 시설

1.7 설계원칙

1.7.1 내진등급

- (1) 항만 및 어항 시설물의 내진등급은 시설물의 용도, 구조, 규모 등에 따라 다를 수 있으므로 일률적으로 적용될 성격이 아니며, 시설물의 사회적, 경제적 성격에 따라 기능측면을 고려하여 결정하여야 한다.
- (2) 항만 및 어항 시설물의 내진등급은 내진Ⅰ등급 및 내진Ⅱ등급으로 구분한다.
- (3) 내진Ⅰ등급은 다음과 같은 항만시설물에 적용한다.
 - ① 지진피해 시 많은 인명과 재산상의 손실을 줄 염려가 있는 시설물
 - ② 지진피해 시 심각한 환경오염을 줄 염려가 있는 시설물
 - ③ 지진재해 복구에 중요한 역할을 담당하는 시설물(지진재해 복구용 시설물)
 - ④ 국방상 또는 국가경제 차원에서 항만의 기능이 지속적으로 유지되어야 할 필요가 있는 시설물
 - ⑤ 지진피해 시 구조물의 복구가 곤란한 시설물
- (4) 어항 시설물과 내진Ⅰ등급으로 분류되지 않은 항만시설물은 내진Ⅱ등급으로 한다.
- (5) 다만, 항만 및 어항 시설물 중 지진피해에 대한 사회, 경제적 손실을 최소화할 수 있거나, 시설물의 기능상 재해복구 시까지 그 기능이 중단되어도 큰 무리가 없다고 판단되는 경우 내진설계를 생략할 수 있다.

[해설]

- (1) 항만의 내진등급은 내진 I 등급 및 내진 II 등급으로 구분한다. 다만, 항만시설물의 경우 모든 시설물에 대해 동일한 내진등급을 적용하기에는 무리가 있으므로 시설물의 사회적, 경제적 성격에 따라 기능측면을 고려하여 결정하는 것이 바람직하다.
- (2) 내진 I 등급 시설로는 다음과 같은 시설물을 예시할 수 있다.
- ① 유해물이나 위험물부두
 - ② 컨테이너 전용부두
 - ③ 군용시설로서 이용자의 판단에 따라 내진 I 등급으로 분류된 시설
 - ④ 침매터널, 해저 파이프라인 시설
 - ⑤ 갑문시설
- (3) 내진설계를 생략할 수 있는 시설물로는 다음 같은 시설을 예시할 수 있다.
- ① 외곽시설 중 침식대책시설, 매몰대책시설
 - ② 부잔교 및 부유식 항로표지시설(단, 연락교, 도교, 조절탑 등은 제외)
 - ③ 소규모 지방어항, 정주어항, 마을공동 어항 등의 시설
- (4) 매립용 호안은 배면 매립지의 이용성, 인접시설물과의 연관성 등에 따라 내진등급을 결정하여야 한다.
- (5) 지진재해 복구에 중요한 역할을 담당하는 시설물(지진재해 복구용 시설물 등)은 국가 지진재해 복구계획 등을 감안하여 내진 I 등급 시설물에 적용하는 지진력을 상회하는 지진력 하에서의 안전성, 복구성 및 사용성을 검토할 수 있다.

[참고]

항만구조물의 경우 큰 규모의 지진이 발생하여 구조물이 붕괴되어도 대규모 인명피해가 우려되지 않는 반면, 수출입 물류의 기능을 수행하는 항만의 경우에는 국가방재기본계획상 필요한 복구중심항으로서의 기능을 즉시 수행할 수 있도록 지진재해 복구용 시설을 설치할 필요가 있다. 예를 들어, 일본의 경우 1995년 고베지진 후 설계기준을 정비하여 (港灣の施設物の技術上の基準・同解説(일본항만협회, 2007) 큰 규모의 지진(L2)시 중요항만의 계류시설, 하역장비, 하역장 등 내륙의 복구지원에 필요한 시설은 지진발생시 수행할 역할에 따라 아래와 같은 내진성능을 요구하고 있다.

- (1) 상시 긴급물자수송대응을 위한 내진강화시설
지진 후 긴급물자의 수송 등이 가능한 상태. 지진 후 신속히 선박의 이용, 사람의 승강 및 긴급물자 등의 하역이 가능한 상태(상시 사용성 확보)
- (2) 간선회물수송대응을 위한 내진강화시설
지진 후 간선회물의 수송 등이 가능한 상태. 지진 후 경미한 복구 후 일정기간 중에 선박의 이용 및 간선회물의 하역이 가능한 상태(복구성 확보)
- (3) 긴급물자수송대응을 위한 내진강화시설

내진

지진 후 경미한 복구 후 긴급물자의 수송이 가능한 상태. 지진 후 일주일 정도 후에 긴급물자 등의 하역이 가능한 상태(복구성 확보)

1.7.2 내진등급에 따른 내진 성능수준

- (1) 항만 및 어항 시설물의 요구 내진 성능수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 분류한다.
- (2) 항만 및 어항 시설물은 표 (1.7-1)에서 규정한 평균재현주기를 갖는 설계지진수준에 대하여 기능수행수준과 붕괴방지수준에서 요구성능목표를 만족하여야 한다.

표 (1.7-1) 내진성능수준별 설계지진 수준

내진성능 수준	내진 I 등급	내진 II 등급
기능수행 수준	평균재현주기 100년	평균재현주기 50년
붕괴방지 수준	평균재현주기 1000년	평균재현주기 500년

[해설]

- (1) 항만 및 어항시설은 지진 시의 거동과 연계하여 흙 구조물, 벽체 구조물, 말뚝 구조물, 건축물 등으로 분류할 수 있다. 흙 구조물은 방파제와 호안의 기초 또는 전체 단면을 흙과 사석으로 시공한 구조물을 말한다. 벽체 구조물은 중력식 안벽, 널말뚝식 안벽, 셀식 안벽 및 갑문시설의 벽체 등을 포함한다. 말뚝 구조물은 잔교식 안벽, 돌핀, 도교, 연락교 등을 들 수 있다.
- (2) 기능수행 수준의 거동한계 규정은 다음과 같다.
 - ① 흙 구조물이나 벽체 구조물과 주변구조물 및 부속시설들이 탄성 또는 탄성에 준하는 거동을 할 정도의 변형만이 허용되도록 하여야 한다.
 - ② 말뚝 구조물은 지진 시 그 주변지반의 소성거동은 허용할 수 있으나 말뚝 구조물 자체와 그 위에 놓여있는 모든 구조물 및 부속시설이 탄성 또는 탄성에 준하는 거동을 하여야 한다.
 - ③ 항만 부지내의 지반에는 과도한 변형이 발생하여서는 안 되며 액상화로 인하여 항만의 기능수행에 지장이 초래되어서는 안 된다.
- (3) 붕괴방지 수준의 거동한계 규정은 다음과 같다.
 - ① 흙 구조물이나 벽체 구조물의 구조적 손상은 경미한 수준으로 제한되어야 하며, 영구 주변구조물 및 부속시설들이 탄성한계를 초과하는 소성거동은 허용되나 취성파괴가 발생하여서는 안 된다.
 - ② 말뚝 구조물은 지진하중 작용 시 탄성한계를 초과하는 소성거동을 허용하나, 이로 인하여 말뚝 구조물 자체나 상부 구조물에 취성파괴가 유발되어서는 안 된다.

- ③ 항만 부지내의 지반에는 과다한 변형이 발생하여서는 안 되며 액상화로 인하여 항만 시설이 수리불능의 피해를 입어서는 안 된다.
- (4) 항만시설의 내진성능수준은 상기에서처럼 기능수행수준과 붕괴방지수준의 2단계로 구분하고, 각 수준에 상응하는 설계지진력 수준을 적용하되, 잔교를 제외한 시설은 잠정적으로 기능수행수준을 생략한 상태에서 붕괴방지수준에 대한 설계만을 하여도 내진성능을 확보한 것으로 본다. 이러한 개념은 국내의 댐설계 등에서도 채택하고 있는 개념이다. 그런데 항만시설 중 국가적으로 중요한 시설은 붕괴방지 수준의 지진작용 시 붕괴방지 수준의 성능을 발휘해야 함은 물론 지진 후 내륙의 지진재해복구 지원 역할 및 국가 간선물류기능과 환적기능 유지역할도 수행해야하기 때문에 즉각적인 항만 고유기능발휘가 되도록 설계할 필요가 있다.

2. 조사 및 계획

2.1 입지조건

- (1) 항만 및 어항의 입지조건은 지진에 의한 사면파괴, 지반침하, 액상화 및 지진해일에 의한 항만 및 어항 시설물의 피해 등을 고려하여 결정한다.
- (2) 활성단층에 극히 인접한 지역이나 활성단층이 지나가는 지역이나 지진해일로 인해 피해가 발생한 지역에는 가능한 건설하지 않으며 부득이한 경우, 이에 대한 영향을 반영한다.
- (3) 액상화 및 과다한 지반침하 등의 발생가능성이 높은 곳은 가급적 피하고 부득이한 경우에는 액상화 대책공법을 마련한다.

2.2 지반 및 지형 조사

항만 및 어항 내진설계를 위해서는 지반의 동적물성을 파악하여야 하므로 이를 위해 원위치조사, 현장시험 및 실내시험에 사용되는 시료의 채취 등을 포함한 지반조사를 수행하여야 한다. 또한 현 지형을 정확하게 파악을 위해 필요시 측량 등 지형조사를 실시한다.

단, 이 기준에서 정하지 않은 사항에 대해서는 KDS 17 10 00(2.1 지반조사)에 따른다.

[해설]

- (1) 내진설계 시 지반물성을 파악하기 위해 다음과 같은 지반조사 및 실내시험을 수행하여야 한다.
 - ① 액상화 간이평가 및 지층층상구조와 입도분포 파악 등을 위한 표준관입시험, 콘관입시험, 탄성파탐사시험 및 교란시료 채취·분석
 - ※ 표준관입시험에 사용되는 장비는 반드시 에너지 효율이 검증되어야 한다.
 - ② 저 변형률에서의 하부지반의 전단탄성계수 등 동적거동특성 결정을 위한 탄성과 탐사
 - ③ 액상화 강도 결정을 위한 실내시험
 - ④ 중간~대 변형률에서 전단탄성계수 등 변형 및 강도특성을 결정하기 위한 실내시험
 - ⑤ 유효상재하중의 계산을 위한 실내시험
 - ⑥ 지반조사 및 실내시험에 대한 간격, 수량 등은 KDS 11 10 10 지반조사에서 규정하는 기준에 따라 실시하여야 한다.
 - ⑦ 기타 특별히 필요하다고 판단되는 조사
- (2) 내진 I 등급 시설물은 상기 지반조사와 실내시험을 모두 실시하여야 하나 대상지역의 지반특성이나 시설물 특성상 불필요하다고 판단되는 항목은 제외할 수 있다.
 내진 II 등급 시설물은 지반조사는 ①과 ②를 실시하나, 부득이하거나 불필요한 경우는 위의 ②항을 제외할 수 있다. 단, 액상화 상세평가가 필요한 경우는 ③항을 포함한다.
 또한, 내진설계 시 필요한 지반조사의 시기, 위치, 범위 및 수량 등은 대상지역의 지반 특성, 시설물의 규모 및 형식, 시험장비의 가용성 및 지반조사 비용 등을 종합적으로 판단하여 결정하며 대상지역 지반특성은 현장 및 실내시험 결과, 관련문헌 및 경험에 의한 방법 등을 적용하여 평가한다.
- (3) 지반조사의 내용은 내진설계 시 필요한 일반적인 지반조사 내용을 반영한 것으로 특별한 조사가 필요할 경우를 대비하여 예외조항[해설 (1)의 ⑦]을 두었다.
- (4) 관입시험으로는 표준관입시험과 콘관입시험을 사용할 수 있다. 표준관입시험을 통하여 관입저항값(N값), 입도분포 및 지반분류 등 물리적 시험을 위한 교란 시료 채취 등을 수행한다.
- (5) 콘관입시험은 연속적인 지반주상도를 얻는 장점이 있으며, 시험장비에 진동감지기를 설치하여 다운홀시험이 가능한 탄성과 콘관입시험(Seismic cone penetration test)을 활용할 수 있다.
- (6) 지진 시 지반거동평가를 위하여 각 층의 전단탄성계수, 감쇠비, 단위중량의 결정이 중요하다. 지반은 변형률 크기에 따라 탄성계수가 감소하는 비선형 거동을 보인다.
 선형한계 변형률 이하의 저변형률 영역($\gamma < 10^{-4}\%$)에서 지반의 선형거동을 측정하기 위하여 현장 탄성파기법이 사용되나, 비선형 거동 및 감쇠비 측정이 불가능하므로 변형률 변화에 따른 탄성계수의 비선형성과 감쇠비 측정을 위해서는 실내시험이 필요하다.

해설 표 (2.2-1) 지반조사 항목 및 간격

조사 항목		지반 종류	조사간격	조사목표
표준관입시험	SPT N 값	sand/sandy soil	1~2m	입도분포와 SPT N값을 이용한 액상화 예측
	교란시료채취	sand/sandy soil	1~2m	층상구조 및 입도분포 획득
탄성과 탐사	P파 속도 S파 속도	sand-clay	대상층	지진응답해석 저변형률에서의 전단탄성계수
액상화시험	액상화 강도	sand/sandy soil	대상층	진동삼축시험에서 액상화 강도
동적변형 시험	전단탄성계수 감쇠비	sand-clay	대상층	지진응답해석 중간-대변형률에서 변형특성
밀도시험	단위중량	sand-clay	각 층	유효상재하중의 계산

(7) 저변형률 영역의 지반의 전단파속도 주상도를 측정하기 위하여 시추공 내에서 수행되는 탄성파시험(크로스홀, 다운홀시험, SPS 검층 등)과 표면파시험을 사용한다.

내진 I 등급 구조물의 경우에는 시추공 내에서 수행되는 탄성파시험을 수행하여야 한다. 2개 이상의 탄성파시험을 이용하여 지반조사가 수행되었을 경우 대표 전단파속도 주상도를 결정한다. 탄성파시험이 수행된 지반조사 이후에 구조물이나 성토체의 시공에 의해 지반의 유효상재하중의 변화가 예상되는 경우는 유효상재하중의 변화를 고려하여 전단파속도의 크기를 수정하여 사용한다. 이 경우 일본의 항만설계기준 식을 참조할 수 있다(港灣の 施設の 技術上の 基準・解説, 일본항만협회, 2007).

$$V_s = V_{so} \left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_{vo}'} \right)^B \quad \text{해설 식 (2.2-1)}$$

여기서, V_s : 시공후의 전단파 속도(m/s)

V_{so} : 시공전의 전단파 속도(m/s)

σ_v' : 시공후의 유효상재압(kN/m²)

σ_{vo}' : 시공전의 유효상재압(kN/m²)

B : 사질토 및 소성지수 30이하 점성토 : 0.25, 소성지수 30이상 점성토 : 0.5

(8) 원위치 시험은 10⁻⁶ % 정도의 전단변형률 진폭에 대응하는 전단탄성계수만을 측정하는 경우에 한정된다. 전단변형 진폭이 큰 영역에서의 전단탄성계수 및 감쇠비를 측정하기까지는 아직 실용화되어 있지 않으나, 10⁻⁶ %의 경우는 원지반의 값을 직접 측정할 수 있다는 이점이 있다. 지반의 탄성계수는 시추공을 이용한 탄성과 탐사에 의해 측정된 탄성파속도로부터 다음과 같이 산정한다.

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{g} V_s^2 \quad \text{해설 식 (2.2-2)}$$

내진

$$E = 2(1 + \nu) G_0 \quad \text{해설 식 (2.2-3)}$$

$$\nu = \frac{2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 - 1}{2\left\{\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 - 1\right\}} \quad \text{해설 식 (2.2-4)}$$

여기서, V_p : 압축파속도 (m/s)

V_s : 전단파속도 (m/s)

G_0 : 미소변형 전단탄성계수 (kN/m²)

E : 영 계수 (kN/m²)

ν : 포아송비

γ_t : 습윤단위체적중량 (kN/m³)

g : 중력가속도 (9.8m/s²)

- ① 전단파속도 산정에 있어서 국내 지반을 대상으로 한 경험식(선창국, 2006)을 이용할 수 있다.

$$\text{사질토} : V_s = 6.046 q_t^{0.387} \quad \text{해설 식 (2.2-5)}$$

$$\text{점성토} : V_s = 24.289 q_t^{0.273} \quad \text{해설 식 (2.2-6)}$$

여기서, q_t : 콘관입 저항값(Cone tip resistance)(MPa)

- (9) 전단파속도를 측정하는 현장 탄성파시험이 불가능할 경우에는 경험식들을 적용할 수 있다. 그러나 이들 경험식은 데이터의 상당한 분산을 감수하고 제안된 식이므로 적용 시 주의하여야 한다.

- ① Hardin(1978)은 최대 전단탄성계수 예측식을 해설 식 (2.2-7)와 같이 모델화 하였다.

$$G_{\max} = A \cdot F(e) \cdot OCR^K \cdot P_a^{1-n} \cdot \bar{\sigma}_n \quad \text{해설 식 (2.2-7)}$$

여기서, $G_{\max}$: 최대 전단탄성계수(kpa)

$$F(e) : \frac{1}{0.3 + 0.7e^2}$$

OCR : 과압밀비

$$\bar{\sigma}_n : \text{유효 평균주응력} = \frac{\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3}{3} = \frac{1 + 2\bar{K}_0}{3} \cdot \bar{\sigma}_v \text{ (kpa)}$$

A : 무차원 계수 ≈ 625 (간극비 $0.4 < e < 1.2$ 일때)

n : 구속압 영향계수 ≈ 0.5 (간극비 $0.4 < e < 1.2$ 일때)

P_a : 대기압($\bar{\sigma}_n$ 와 동일한 단위)(98kPa)

K : 소성지수계수[참고 표 (2.2-2)]

해설 표 (2.2-2) 소성지수계수

PI	K
0	0
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
> 100	0.50

- ② Seed 등은 표준관입시험 N치로부터 사질토 지반의 최대 전단탄성계수의 추정을 해설 식 (2.2-8)와 같이 제안하였다.

$$z'$$

$$G_{\max} = 35 \times 1000 N_{60}^{0.34} \cdot (\bar{\sigma}_n)^{0.4} \quad \text{해설 식 (2.2-8)}$$

여기서, $G_{\max}$: 최대 전단탄성계수(psf)
 N_{60} : 에너지비 60%로 보정된 N값
 $\bar{\sigma}_n$: 유효 평균주응력(psf)이다.

- ③ 일본 향만기술연구소는 점성토 지반에서 일축 압축강도(q_u)와의 상관식 해설 식 (2.2-9)을 이용하며 사질토 지반에서 표준관입 저항값(N)과의 상관식 해설 식 (2.2-10)을 이용한다.

$$G_{\max} = 170 q_u \quad \text{해설 식 (2.2-9)}$$

$$G_{\max} = 144 N^{0.68} \quad \text{해설 식 (2.2-10)}$$

여기서, $G_{\max}$ 의 단위는 kgf/cm²
 q_u : 점성토의 1축 압축강도(kgf/cm²)

- ④ 국내 화강풍화토 지반의 최대전단탄성 계수의 예측은 추연욱(2001)이 제안한 평균유효응력 (σ_0')의 상관식 해설 식 (2.2-11)을 참고하여 결정 할 수 있다.

$$G_{\max} = 7933 (\sigma_0')^{0.65} \quad \text{해설 식 (2.2-11)}$$

여기서, $G_{\max}$: 최대전단탄성계수(kPa)
 σ_0' : 평균유효응력(kPa)

- (10) 내진 I 등급 향만구조물의 설계 시에는 지반의 비선형 거동을 측정하여야 한다.

이를 위하여 각 층에서 불교란 시료를 채취하고, 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 측정한다. 이때, 변형률 범위는 $10^{-4} \sim 10^{-1}\%$ 영역을 추천하며 시료가 채취된 깊이에서의 구속압 효과를 고려하기 위하여, 최소 3가지 구속압단계(현장 지반 평균주응력의 1/2, 현장 지반의 평균주응력, 현장 지반 평균주응력의 2배)에서 시험을 실시

내진

하고 시공 후에 구속압 정도를 고려하여 사용한다. 또한, 지반의 비선형 거동의 측정이 불가능할 경우에는 경험식을 적용할 수 있다.

- (11) 정적하중에 대한 전통적인 항만구조물의 설계 시에는 지지층의 위치를 확인하는 것이 중요하였으나, 내진설계에서는 지진 시 설계지반운동을 결정하기 위한 기반암의 위치를 확인하는 것이 중요하다. 일반적으로 설계지반운동은 기반암 지반의 지표면 자유장운동으로 정의되며 기반암 지반은 전단파속도 기준으로 760m/s 이상으로 표준관입시험의 N값을 이용한 경험식의 이용은 적절치 않다고 알려져 있다. 따라서 항만구조물의 설계를 위해서는 기반암 지반까지 시추 및 지반조사가 수행되어야 한다. 그러나 모든 시추를 기반암 지반까지 수행할 필요는 없으며 상세지반조사 초기에 설계지반운동 결정을 위한 대표적 시추위치를 선정하고, 선정된 시추공에서는 기반암 깊이까지 표준관입시험, 탄성파시험, 실내시험을 위한 시료 채취 등을 수행한다.
- (12) 내진설계 시 필요한 지반조사의 시기, 위치, 범위 및 수량 등은 일률적으로 정의하기 어려우므로 여러 가지 여건을 종합하여 판단한다.

3. 재료

내용 없음

4. 설계

4.1 설계일반

4.1.1 설계지반운동

내진설계 시 설계지반운동은 흔들림의 세기, 진동수 특성, 지속시간과 국지적인 토질조건이나 지질조건 등이 지반운동에 미치는 영향 등을 고려하여야 한다.

- (1) 설계지반운동은 다음과 같은 사항을 고려하여 결정한다.
- ① 설계지반운동은 구조물이 건설되기 전에 부지 정지작업이 완료된 지면에서의 지반운동으로 정의한다.
 - ② 대상지역의 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하여야 한다.
 - ③ 설계지반운동은 흔들림의 세기, 진동수 내용 및 지속시간 등 시설물의 내진 설계에 필요한 그 특성이 잘 표현되어야 한다.
- (2) 설계지반운동은 수평2축방향과 수직방향 성분으로 정의된다.
- (3) 설계지반운동의 수평2축방향 성분은 세기가 동일하다고 본다.
- (4) 설계지반운동의 수직방향 성분의 진동수 내용과 지속시간은 수평방향 성분과

동일하게 본다. 단, 특별히 별도로 정하는 경우는 예외로 한다.

(5) 암반상 유효수평지반가속도(설계 진도)는 아래와 같이 행정구역에 의한 방법으로 산정한다.

- ① 암반상 유효수평지반 가속도(설계 진도)(g 값) = (지진구역 계수 Z)×(위험도 계수 I)
단, 국가지진위험지도 상의 값을 사용가능하며, 그 값이 행정구역에 의한 방법으로 결정된 값의 80% 보다 작지 않아야 한다.
- ② 지진구역계수를 행정구역에 의한 방법으로 결정 시 지진구역별 지진구역 계수, 위험도 계수는 KDS 17 10 00 (4.2.1.1 지진구역 및 지진위험도)에 따른다.

[해 설]

(1) 지진구역계수를 행정구역에 의한 방법으로 결정시 지진구역은 다음과 같이 구분한다.

해설표 (4.1-1) 지진구역의 구분

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

* 강원 남부 : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백

** 강원 북부 : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

(2) 지진구역계수를 행정구역에 의한 방법으로 결정시 지진구역별 지진구역 계수는 다음과 같다.

해설표 (4.1-2) 지진구역 계수 (암반상 재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역 계수, $Z(g$ 값)	0.11	0.07

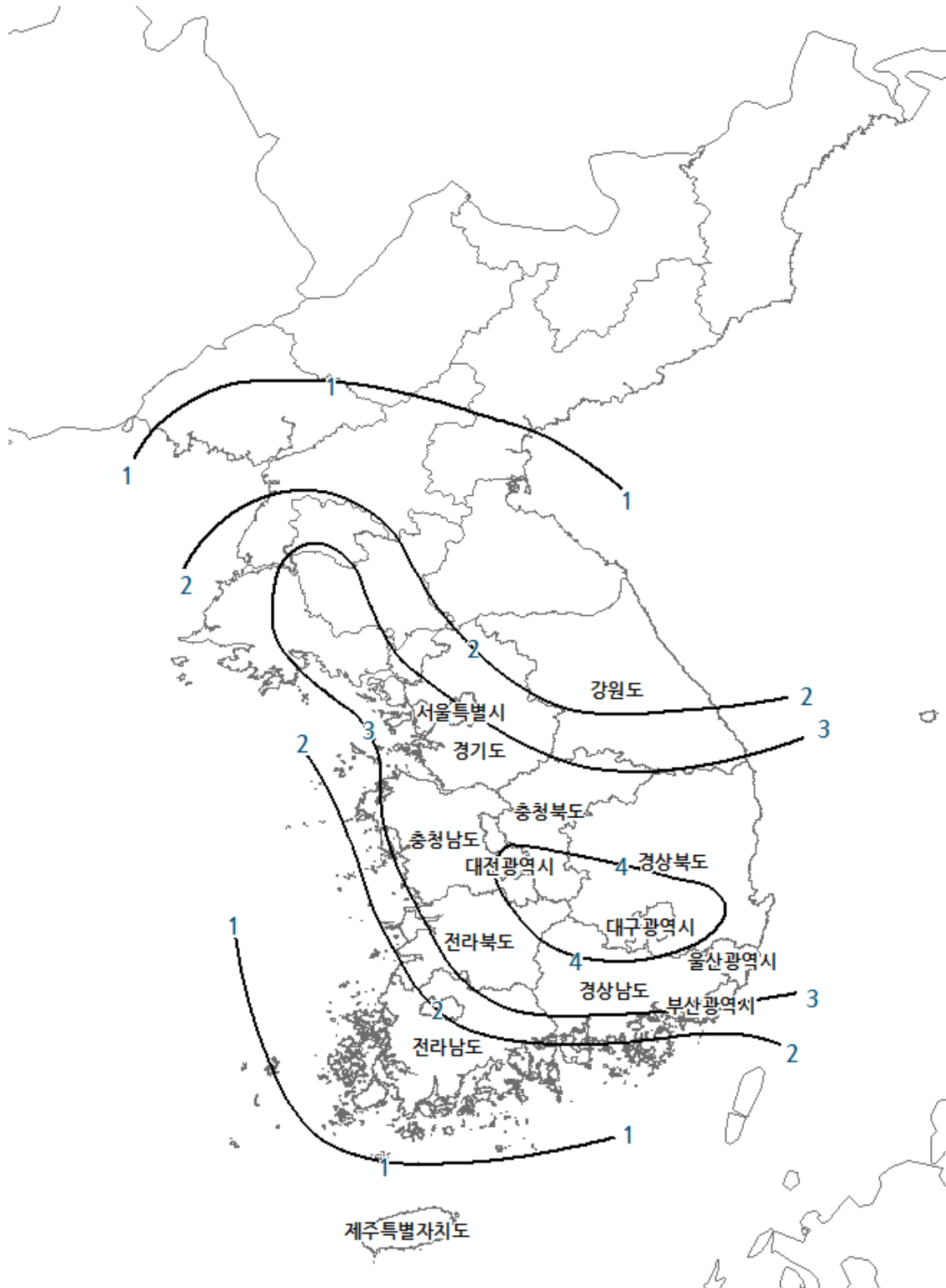
(3) 재현주기별 위험도 계수는 다음 값을 적용한다.

해설표 (4.1-3) 위험도 계수

재현주기(년)	50 년	100 년	200 년	500 년	1000 년	2400 년	4800 년
위험도 계수(I)	0.4	0.57	0.73	1.00	1.40	2.0	2.6

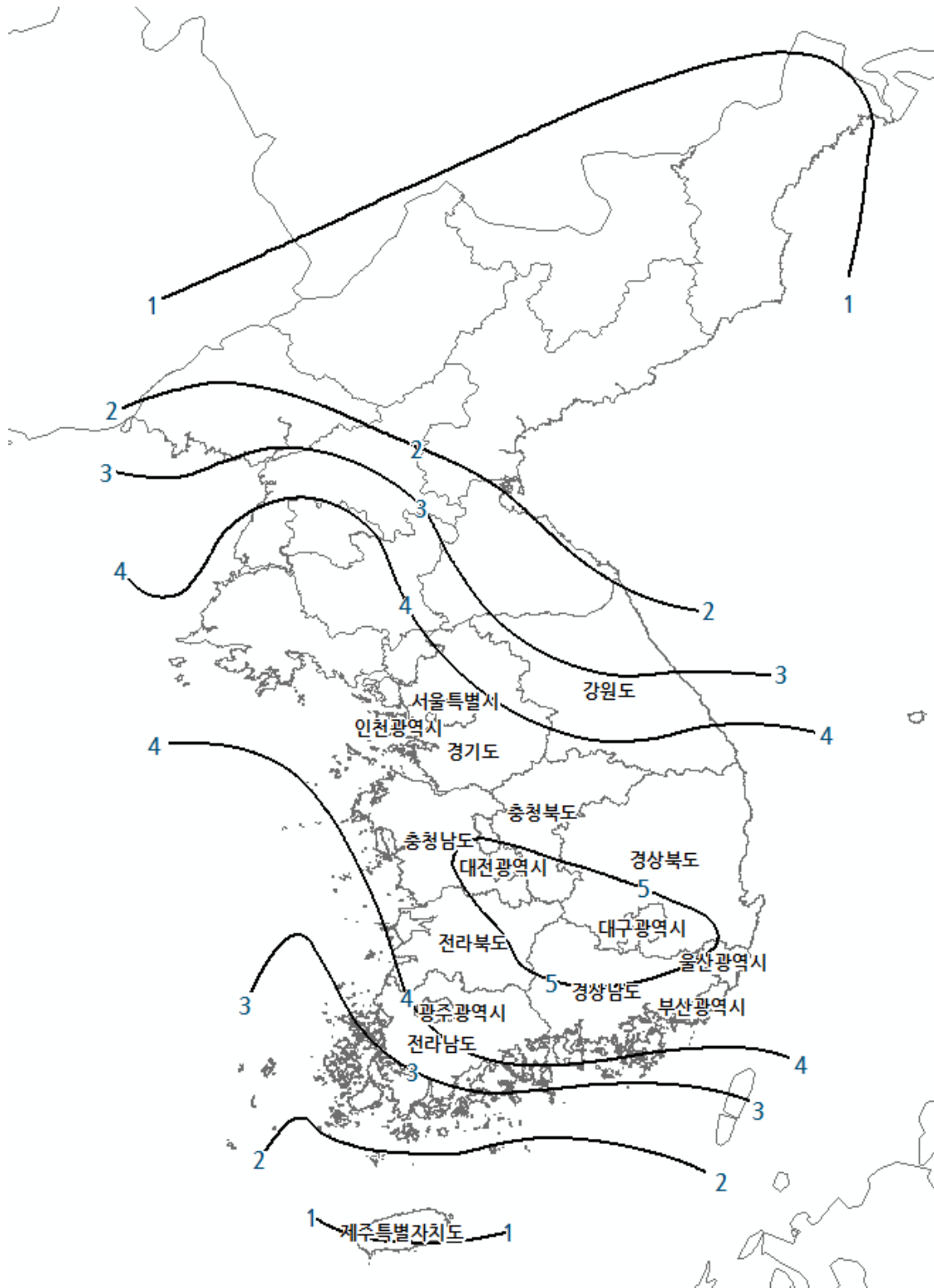
내진

(4) 우리나라의 각 재현주기별 국가지진위험지도는 해설 그림 (4.1-1)~(4.1-7)과 같다.



(5년 내에 발생확률 10%에 해당하는 가속도계수(%g))

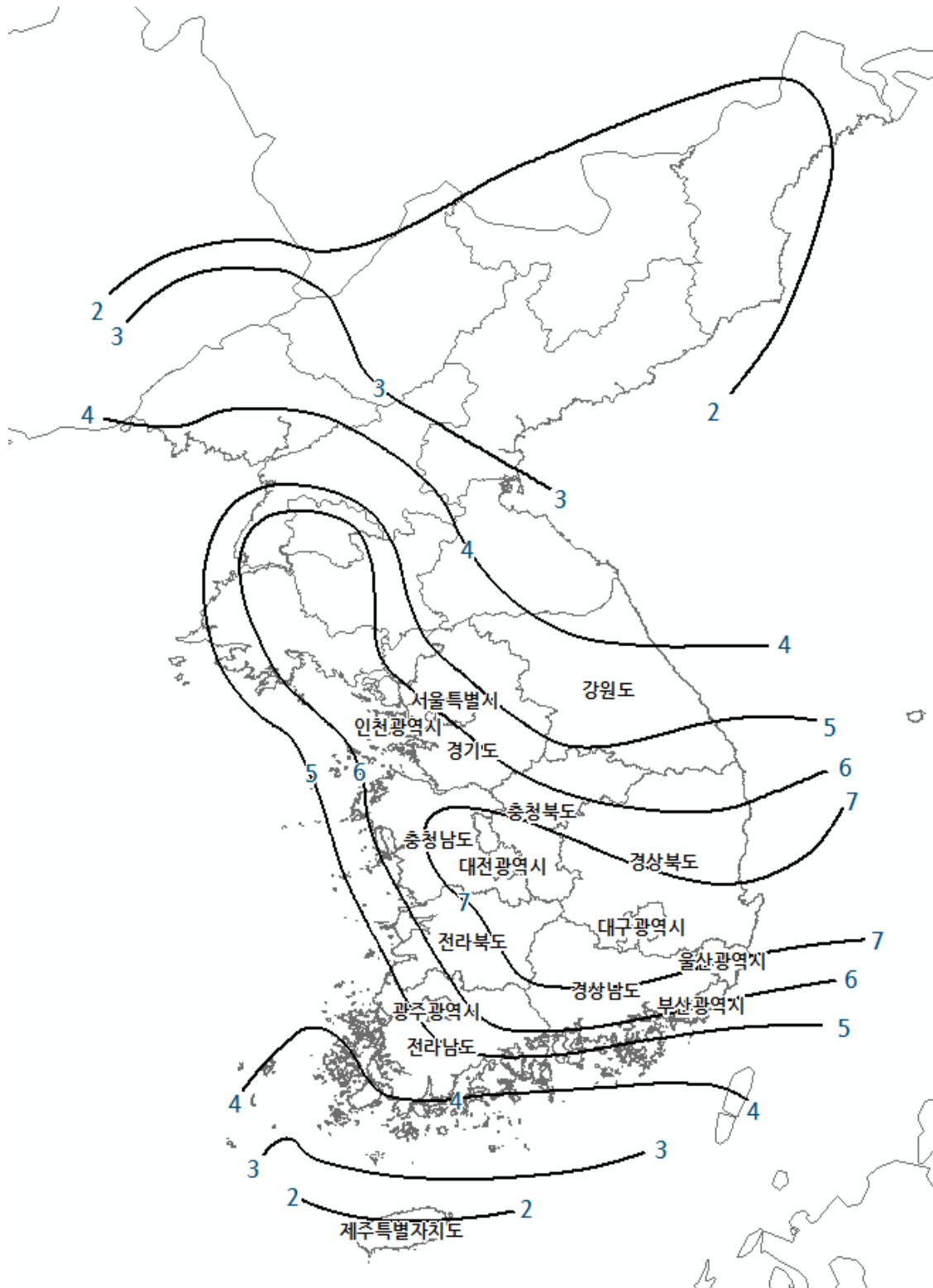
해설 그림 (4.1-1) 평균재현주기 50년 지진지반운동(소방방재청 공고 제2013-179호)



(10년 내에 발생확률 10%에 해당하는 가속도계수(%g))

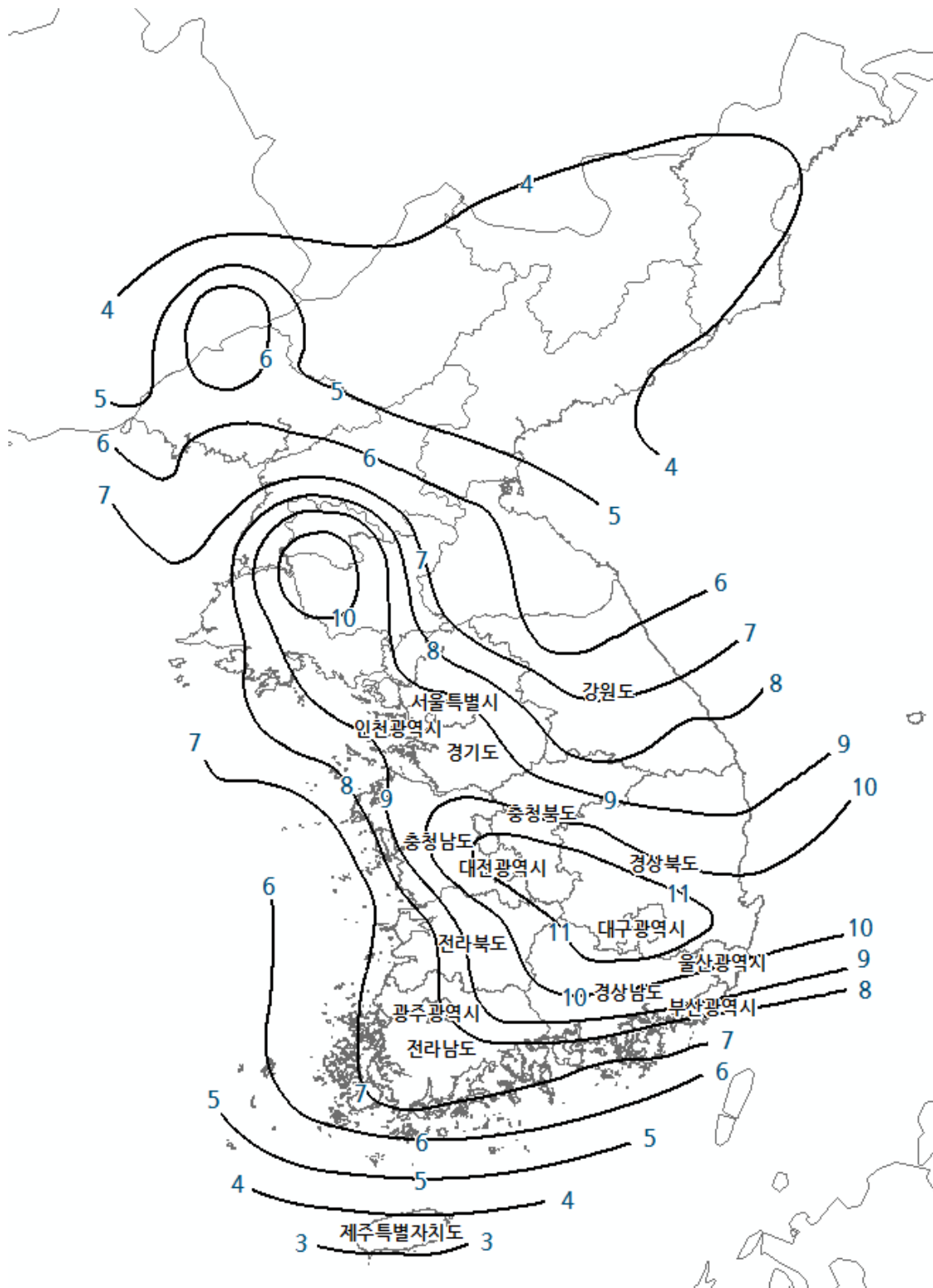
해설 그림 (4.1-2) 평균재현주기 100년 지진지반운동(소방방재청 공고 제2013-179호)

내진



(20년 내에 발생확률 10%에 해당하는 가속도계수(%g))

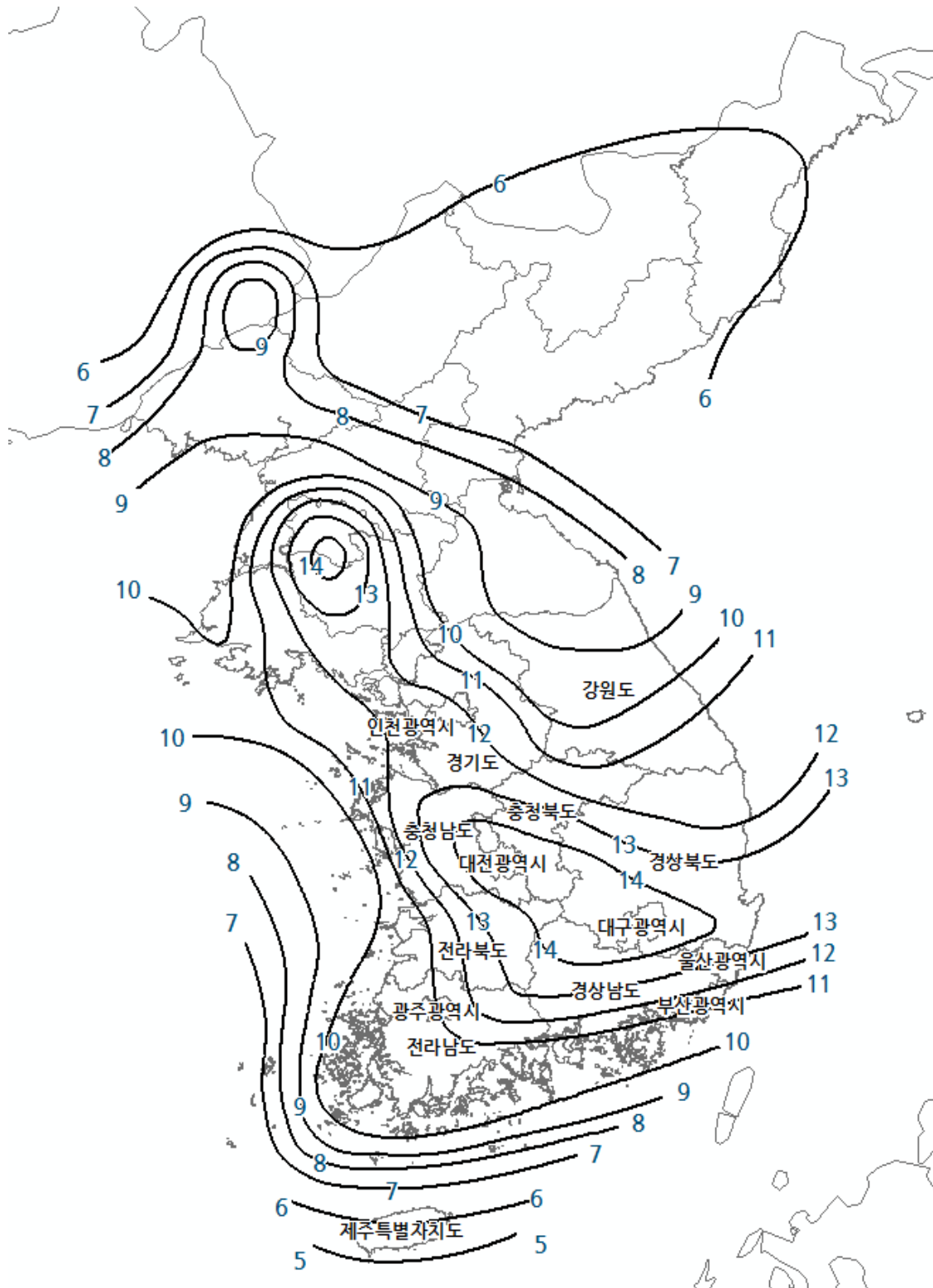
해설 그림 (4.1-3) 평균재현주기 200년 지진지반운동(소방방재청 공고 제2013-179호)



(50년 내에 발생확률 10%에 해당하는 가속도계수(%g))

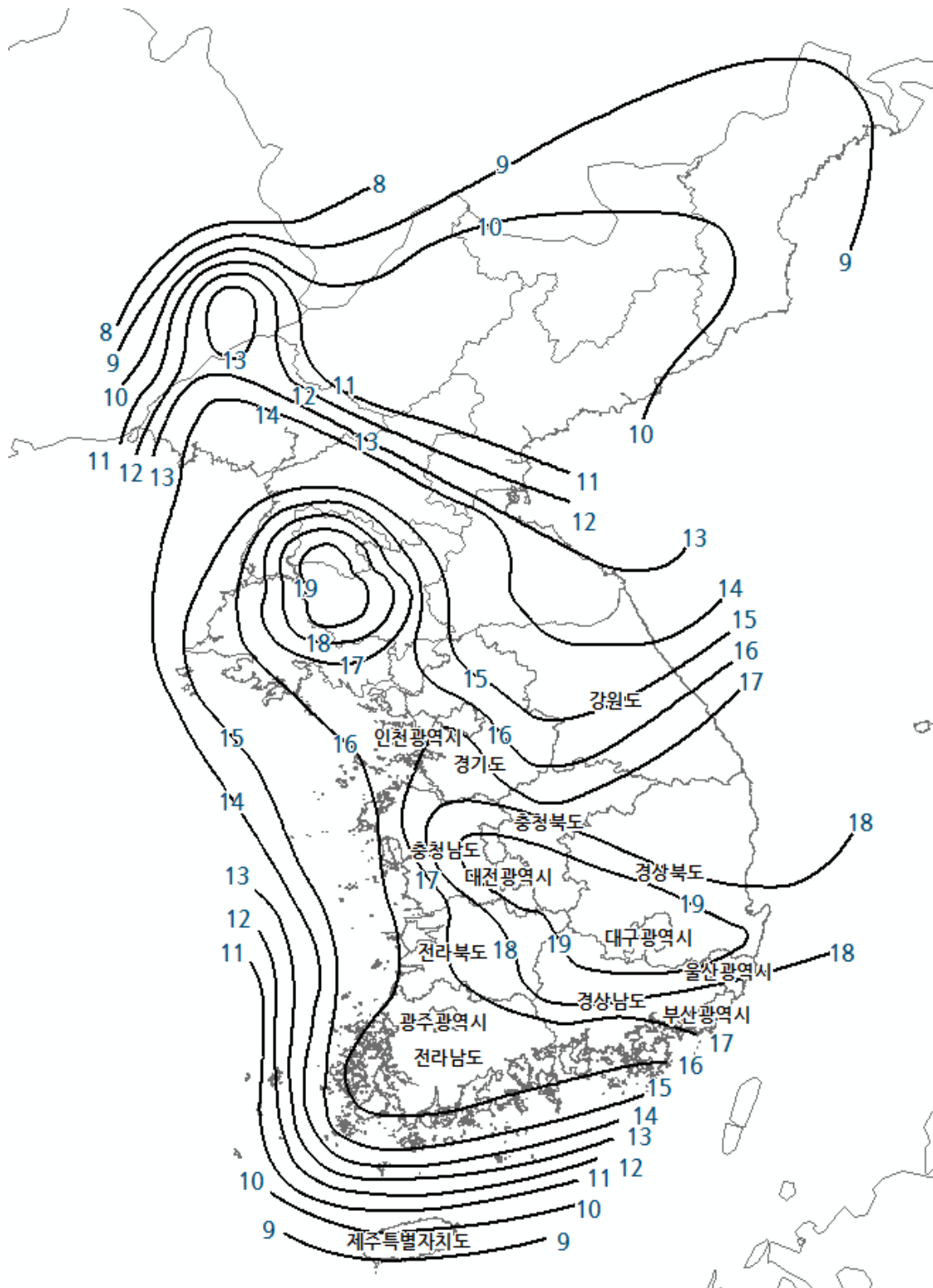
해설 그림 (4.1-4) 평균재현주기 500년 지진지반운동(소방방재청 공고 제2013-179호)

내진



(100년 내에 발생확률 10%에 해당하는 가속도계수(%g))

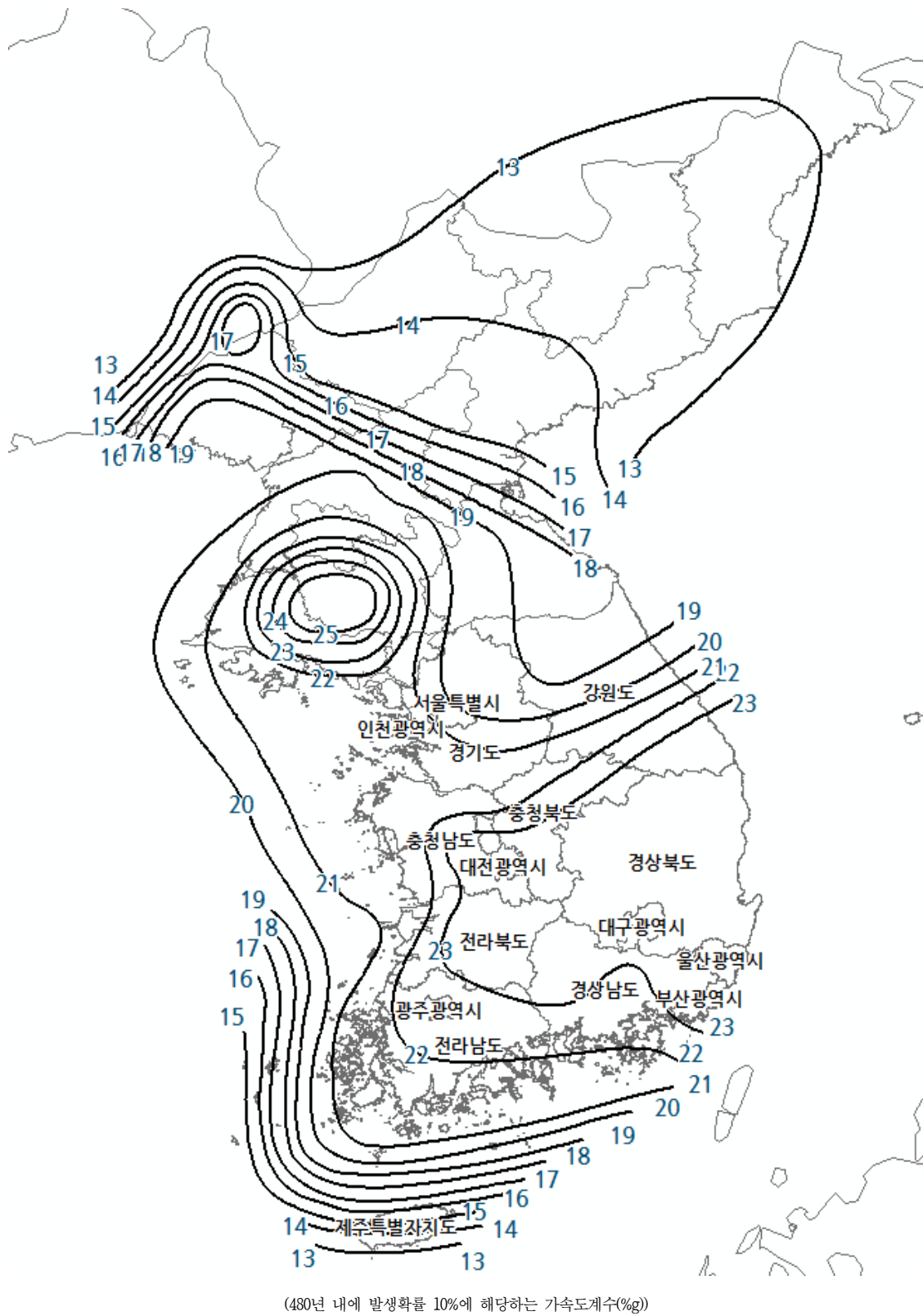
해설 그림 (4.1-5) 평균재현주기 1000년 지진지반운동(소방방재청 공고 제2013-179호)



(240년 내에 발생확률 10%에 해당하는 가속도계수(%g))

해설 그림 (4.1-6) 평균재현주기 2400년 지진지반운동(소방방재청 공고 제2013-179호)

내진



해설 그림 (4.1-7) 평균재현주기 4800년 지진지반운동(소방방재청 공고 제2013-179호)

4.1.2 지반분류

지반의 분류는 KDS 17 10 00(4.2.1.2 지반의 분류)에 따른다.

[해설]

- (1) 국지적인 토질조건, 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 다음 각 ①에서부터 ③까지를 따른다.
- ① 내진설계를 위한 지반분류는 기반암의 깊이(H)와 기반암 상부 토층의 평균 전단파속도($V_{S,Soil}$)에 근거한다.
- ② 지반은 해설 표 4.1-4과 같이 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 , S_6 등 6종류로 분류한다.
- ③ 토층의 평균 전단파속도($V_{S,Soil}$)는 탄성파시험 결과가 있을 경우 이를 우선적으로 적용한다.

해설 표 4.1-4 지반분류체계

지반 종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암* 깊이, H (m)	토층 평균 전단파속도, $V_{S,Soil}$ (m/s)
S ₁	암반 지반	1 미만	-
S ₂	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
S ₃	얕고 연약한 지반		260 미만
S ₄	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
S ₅	깊고 연약한 지반		180 미만
S ₆	부지 고유의 특성 평가 및 지반응답해석이 요구되는 지반		

* 전단파속도 760m/s 이상을 나타내는 지층

※ 기반암 깊이와 무관하게 토층 평균 전단파속도가 120m/s 이하인 지반은 S_5 지반으로 분류

(2) 지반분류 절차

① 개요

여기서는 지반을 S_1 부터 S_6 까지 6종으로 분류하는 절차를 기술한다.

② 정의

지반의 종류는 다음과 같이 정의된다.

S_1 : 전단파속도가 760m/s 이상인 기반암의 깊이(H)가 1m 미만인 지반

S_2 : $H \leq 20\text{m}$ 이고, $V_{S,Soil} \geq 260\text{m/s}$ 인, 기반암 깊이가 얕고 단단한 지반

S_3 : $H \leq 20\text{m}$ 이고, $V_{S,Soil} < 260\text{m/s}$ 인, 기반암 깊이가 얕고 연약한 지반

S_4 : $H > 20\text{m}$ 이고, $V_{S,Soil} \geq 180\text{m/s}$ 인, 기반암 깊이가 깊고 단단한 지반

S_5 : $H > 20\text{m}$ 이고, $V_{S,Soil} < 180\text{m/s}$ 인, 기반암 깊이가 깊고 연약한 지반

S_6 : 부지 고유의 특성 평가 및 지반응답해석이 요구되는 다음 경우에 속하는 지반

내진

- 가. 액상화가 일어날 수 있는 흙, 예민비가 8이상인 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용 시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
나. 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반(지층의 두께>3m)
다. 매우 높은 소성을 띤 점토지반(지층의 두께>7m이고, 소성지수(PI; Plasticity Index)>75)
라. 층이 매우 두껍고 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토(지층의 두께>36m)
마. 기반암이 깊이 50m를 초과하여 존재하는 지반
※ 예외: $V_{S,Soil}$ 이 120m/s 이하인 지반은 기반암 깊이에 관계없이 S_5 지반으로 분류한다.

부지 고유의 특성 평가 및 지반응답해석이 요구되는 지반, 즉 S_6 로 분류할 때는 상기 S_6 에 대한 정의에서 제시한 기준이 고려되어야 한다. 만약 해당 부지가 이 기준과 일치하면 그 부지는 지반 종류 S_6 으로 분류되어야 하며, 부지 고유의 특성 평가 및 지반응답해석이 이루어져야 한다.

(3) 기반암

① 기반암에 대한 정의

기반암은 전단파속도 760m/s 이상을 나타내는 지층이다.

② 토층 평균 전단파속도($V_{S,Soil}$)

$V_{S,Soil}$ 은 다음 공식에 따라 결정된다.

$$V_{S,Soil} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad \text{해설 식 (4.1-1)}$$

여기서, d_i : 기반암 깊이까지의 i 번째 토층의 두께, m

V_{si} : 기반암 깊이까지의 i 번째 토층의 전단파속도, m/s

(4) 표준관입시험 관입저항치의 전단파속도로의 변환

표준관입시험 관입저항치(SPT-N치)를 전단파속도로 변환할 수 있다. 변환에는 국내 지반에 대해 제안된 상관관계식(Sun et al. 2013*, 등)을 활용할 수 있다. 표준관입시험 시 단단한 암질에 도달하여 항타수가 50에 이르러도 30cm 깊이를 관입하지 못할 경우 50타수 이상의 N값은 선형적인 비례관계를 토대로 30cm 두께 관입 시 N값으로 환산한다. 이때 환산 N치의 최대값은 300이다.

※ Sun, C. G., Cho, C. S., Son, M., & Shin, J. S. (2013). Correlations between shear wave velocity and in-situ penetration test results for Korean soil deposits. Pure and Applied Geophysics, 170(3), 271-281.

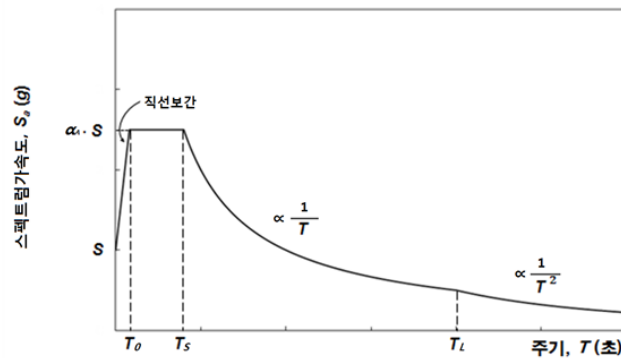
4.1.3 설계지반운동의 특성표현

설계지반운동의 특성표현은 KDS 17 10 00(4.2.1.4 설계지반운동의 특성 표현)에 따른다.

[해설]

(1) 암반지반 설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼

① 암반지반인 S_1 의 5% 감쇠비에 대한 수평설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼은 해설 그림 4.1-1과 같다.



해설 그림 4.1-1. 암반지반 수평설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼

가. 전이주기(절점주기)

해설 표 4.1-5 수평설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼 전이주기

구 분	α_A (단주기스펙트럼 증폭계수)	전이주기(sec)		
		T_0	T_S	T_L
수 평	2.8	0.06	0.3	3

해설 표 4.1-6 주기영역별 설계스펙트럼가속도(S_a)

주기(T, sec)	$0 \leq T \leq T_0$	$T_0 \leq T \leq T_S$	$T_S \leq T \leq T_L$	$T_L \leq T$
설계스펙트럼가속도 (S_a , g)	$(1+30T) \times S$	$2.8 \times S$	$\frac{0.84}{T} \times S$	$\frac{2.52}{T^2} \times S$

② 수직설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼은 다음과 같다.

가. 5% 감쇠비에 대한 수직설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼은 ①에 있는 수평설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼과 같은 전이주기를 갖는다.

나. 최대 유효 수평지반가속도에 대한 최대 유효 수직지반가속도의 비는 0.77이다.

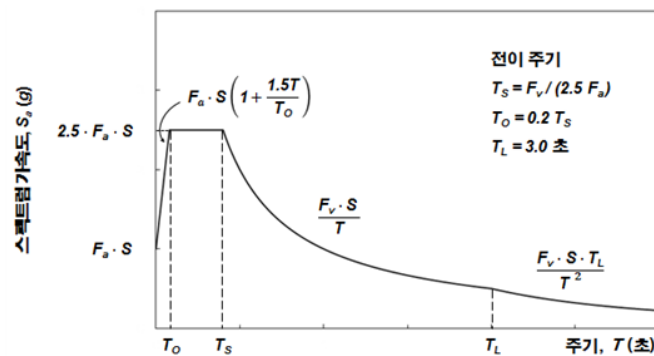
③ 표준설계응답스펙트럼에 대응하는 가속도시간이력 생성 기준, 감쇠비에 따른 스펙

내진

트럼 형상, 표준설계응답스펙트럼에 대응하는 비탄성응답스펙트럼은 행정안전부의 내진설계기준 공통적용사항을 적용할 수 있다.

(2) 토사지반 설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼

- ① 토사지반인 S2, S3, S4, S5 지반의 5% 감쇠비에 대한 수평설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼은 기반암의 스펙트럼 가속도와 지표면의 스펙트럼 가속도의 증폭비율을 의미하는 ‘지반증폭계수(F_a , F_v)’로부터 해설 그림 4.1-2와 같이 구할 수 있다.



해설 그림 4.1-2. 토사지반 수평설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼

가. 토사지반에서 감쇠비에 따른 스펙트럼 형상은 행정안전부의 내진설계기준 공통 적용사항을 적용할 수 있다.

- ② 유효수평지반가속도(S)의 값($S = Z \times I$)에 따라 단주기 지반증폭계수(F_a)와 장주기 지반증폭계수(F_v)는 해설 표 4.1-6을 이용하여 결정한다. 유효수평지반가속도(S)의 값이 중간 값에 해당할 경우 직선보간하여 결정한다.

해설 표 4.1-7 지반증폭계수

지반분류	단주기 증폭계수, F_a			장주기 증폭계수, F_v		
	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
S ₂	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
S ₃	1.7	1.5	1.3	1.7	1.6	1.5
S ₄	1.6	1.4	1.2	2.2	2.0	1.8
S ₅	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

- ③ 수직설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼은 다음과 같다.

가. 5% 감쇠비에 대한 S₂~S₅ 지반의 수직설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼은 ①에 있는 수평설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼과 같은 전이 주기를 갖는다.

나. 최대 유효 수평지반가속도에 대한 최대 유효 수직지반가속도의 비는 공학적 판단에 의해 값을 결정할 수 있다.

- ④ $S_2 \sim S_5$ 지반의 경우 해설 그림 4.1-2의 표준설계응답스펙트럼 대신 부지고유의 지반 응답해석을 이용하여 결정한 스펙트럼을 사용할 수 있다.
- ⑤ S_6 지반의 경우 부지고유의 지반응답해석을 이용하여 결정한 스펙트럼을 사용한다.
- ⑥ 가속도시간이력은 암반지반에 대해 작성된 가속도시간이력을 사용하여 지반응답해석을 통해 결정한다.

4.1.4 가속도 시간이력

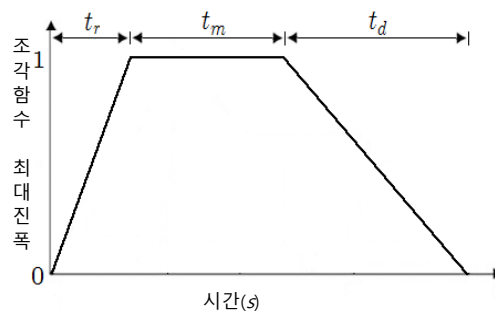
항만 및 어항 시설물의 가속도 시간이력은 행정안전부의 내진설계기준 공통적용사항에 따라 작성한 인공합성 가속도시간이력과 실지진기록을 활용한 가속도시간이력을 사용할 수 있다. 인공합성 가속도시간이력과 실지진기록을 활용한 가속도시간이력 사용시 KDS 17 10 00(4.2.1.4 설계지반운동의 특성 표현)에 따른다.

[해 설]

(1) 인공합성 가속도시간이력 작성

인공합성가속도시간이력의 포락함수에 대한 최소 요구조건은 다음과 같다.

- ① 시간이력의 절단(cut off) 진동수는 최소 50Hz 이상이어야 한다.
- ② 규모에 따른 구간선형 포락함수의 형상과 지속시간은 해설 그림4.1-8 및 해설 표 4.1-1과 같다.



해설 그림 4.1-8. 가속도시간이력의 구간선형 포락함수

해설 표 4.1-1. 가속도시간이력 구간선형 포락함수에 대한 지진규모별 지속시간

지진규모	상승시간 (t_r)	강진동지속시간 (t_m)	하강시간 (t_d)
7.0이상-7.5미만	2	12.5	13.5
6.5이상-7.0미만	1.5	9	10.5
6.0이상-6.5미만	1	7	9
5.5이상-6.0미만	1	5.5	8.0
5.0이상-5.5미만	1	5	7.5

- ③ 다수의 인공합성가속도시간이력으로부터 계산된 5% 감쇠비 응답스펙트럼의 평균은 전체 주기 영역에서 표준설계응답스펙트럼의 10%보다 작아서는 안 된다.
 - ④ 다수의 인공합성가속도시간이력으로부터 계산된 5% 감쇠비 응답스펙트럼의 평균은 0.04초와 10초 주기 영역에서 표준설계응답스펙트럼의 30%를 초과해서는 안 된다.
 - ⑤ 어떤 두 개의 가속도시간이력 간의 상관계수는 0.16을 초과할 수 없다.
 - ⑥ 여타 필요한 상세는 행정안전부의 내진설계기준 공통적용사항(2017.09)을 참조한다
- (2) 실지진기록을 활용한 가속도시간이력 작성
- ① 실지진 기록은 국내여건과 유사한 판 내부(intra-plate) 지역에서 계측된 기록을 선정한다. 이때, 관측소 하부지반이 S_1 지반 혹은 이에 준하는 보통암 지반에서 계측된, 고려하는 설계지진과 유사규모의 기록을 선정하여야 한다.
 - ② 선정된 지진기록은 S_1 지반의 수평설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼에 맞추어 수정 적용한다. 수정 시, 원본파형의 왜곡을 최소화하기 위해 기존파형의 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼에 맞추어 보정(Spectral Matching)하는 것을 추천한다. 이때, 설계 대상구조물의 탁월주기(dominant period)를 주 대상으로 보정하는 것이 바람직하다.
 - ③ 입력 지진기록 최대지반가속도(PGA; Peak Ground Acceleration)의 절대크기가 중요한 경우, 상기 절차로 보정된 지진기록에 대하여 최대지반가속도를 보정할 수 있다.
- (3) 가속도 시간이력을 사용하여 내진해석을 수행하는 경우 인공합성 가속도시간이력 또는 실지진기록을 표준설계응답스펙트럼에 맞추어 수정한 가속도시간이력을 포함하여 3개 이상의 시간이력을 사용한 해석 후 최대응답을 적용한다. 이때, 인공합성 가속도시간이력을 사용할 때는 국내의 지진규모가 규모 6.5 미만임을 감안하여 강진동지속시간 (t_m) 이 7초인 경우를 채택하여 과도한 에너지의 삽입을 방지할 필요가 있다. 인공합성 가속도시간이력 작성법을 사용하여 가속도시간이력을 작성하면 이는 판내부 지진의 단주기 및 장주기 영역을 모두 포괄하는 가속도시간이력이라 할 수 있다. 실지진기록을 활용한 가속도시간이력 작성 시 국내에서 관측된 파는 단주기 성분이 강하므로 구조물의 특성에 따라 해외에서 발생한 장주기 특성의 판내부 지진파를 사용할 수 있으며 이를 위해 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research, <http://peer.berkeley.edu>)등의 지진데이터베이스를 활용할 수 있다.

4.1.5 지반의 동적물성

항만 및 어항 시설물의 내진설계를 위하여 전단파속도 주상도, 지하수위, 지층구조와 지층별 두께를 나타낸 지층단면도, 현장원위치 조사, 현장시험 및 실내시험 등 지반조사 결과가 제공되어야 하며, 동적물성 산정을 위하여 지층별 전단파속도, 포화단위중량, 전단변형율에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비, 액상화 평가와 관련된 표준관입시험, 콘관입시험, 탄성파속도 측정값 등의 현장지반조사 결과와 실내진동시험 결과가 필요하다.

[해설]

- (1) 부지응답특성 평가에 필요한 지반의 동적 물성인 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 얻기 위하여 공진주시험, 진동삼축시험, 비틀전단시험을 사용한다.
이들 시험은 현장에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 수행하나 불교란 시료 채취가 어려운 경우에는 현장밀도를 고려하여 재 성형된 시료를 사용할 수도 있다.
시험시 변형률 크기가 크지 않은 경우($\gamma < 10^{-1}\%$), 시료에 가해지는 교란 정도가 미미하므로, 1개의 시료를 이용하여 여러 개의 구속압 단계의 시험을 실시하는 단계적 시험(Staged-testing)이 가능하다.
- (2) 부지응답특성 평가 시 실내시험을 실시하지 않을 경우 문헌의 자료를 이용할 수 있다.
- (3) 부지특성평가를 위해 필요한 지반 물성치를 획득하는 방법은 다음과 같이 3가지 방법이 있다.

① 현장 및 실내시험 결과를 이용하는 방법

이 방법은 가장 신뢰성 있는 방법으로 I 등급 구조물이나 중요구조물 설계 시 적용한다.

가. 현장시험을 통하여 대상지반의 깊이별 전단파속도(V_s) 주상도를 결정한다.

이때, 크로스홀시험, 다운홀시험, SPS 검증 및 표면파기법 등이 사용될 수 있다.

나. 대상지반을 층으로 나누고 각층의 밀도를 추정하여 현장시험에서 결정된 전단파속도로부터 저변형률 최대전단탄성계수(G_{max})를 결정한다.

다. 각층의 중앙에서 불교란 시료를 채취한다. 이때 시료에 교란이 발생되지 않도록 시료채취 및 운반 시 주의하여야 한다. 불교란 시료의 채취가 매우 어려운 경우에는 교란시료로 채취한다.

라. 실내 변형특성 평가시험을 수행하여 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 얻는다. 이때, 공진주시험, 진동삼축시험, 비틀전단시험을 사용할 수 있으며 변형률 범위는 $10^{-4} \sim 10^{-1}\%$ 를 추천한다.

마. 실내시험 결과로부터 현장 구속압 상태를 고려하여 각 층에 대표적인 변형률 크기에 따른 정규화전단탄성계수(G/G_{max})관계를 도출한다.

바. 현장에서 구한 최대전단탄성계수(G_{max})와 실내시험에서 구한 비선형관계($G/G_{max} \sim \log \gamma$)를 결합하여 각 층에서의 현장 비선형 전단탄성계수를 해설 식 (4.1-5)을 통해 결정한다.

$$G_{field} = (G/G_{max})_{\gamma, lab} \times (G_{max})_{field} \quad \text{해설 식 (4.1-5)}$$

사. 현장시험으로부터 감쇠비 측정이 불가능하므로, 실내시험에서 얻은 변형률 크기에 따른 감쇠비($D \sim \log \gamma$)관계를 사용한다.

② 현장시험 결과를 이용하는 방법

II 등급 구조물의 경우, 시험장비의 가용성 및 지반조사 비용의 제한 등으로 인하여

내진

현장시험만이 가능할 경우, 부지특성을 평가하기 위한 단계별 방법을 정리하면 다음과 같다.

가. ① 현장 및 실내실험을 이용하는 방법의 가, 나, 라의 단계를 수행한다.

이때 SASW 기법도 적용할 수 있다.

나. 각 층의 정규화전단탄성계수 감소곡선($G/G_{\max} \sim \log \gamma$)을 구하기 위하여 대상지반의 층상구조와 종류를 분류하여 문헌조사를 통한 상관관계로 적용할 수 있다.

다. 현장에서 구한 최대전단탄성계수와 문헌에서 구한 지반의 비선형 관계를 결합하여 각 층에서의 비선형 전단탄성계수를 해설 식 (4.1-5)을 적용하여 결정한다.

라. 변형률 크기에 따른 감쇠비($D \sim \log \gamma$) 관계를 결정하기 위하여 문헌조사를 이용한 상관관계를 사용한다.

③ 경험에 의한 방법

소규모 II등급 구조물의 경우 시험장비의 가용성 및 지반조사 비용의 제한 등으로 인하여 현장 탄성파시험 및 실내 변형특성시험을 수행할 수 없는 경우에는 경험적 방법에 의해 지반의 비선형 거동을 평가한다. 이 방법은 상당히 큰 오차를 유발할 수 있는 등 신뢰도에 문제가 있으며, 모든 경험적 상관식이 외국지반에 대한 시험결과로부터 유도되어 있으므로 국내지반에 대한 연구를 수행하여 이에 대한 검증을 통해 방법의 신뢰도를 증가시켜야 한다.

가. 지반조사 자료를 바탕으로 지반의 층상구조를 확인하고 각 층에서 지반자료(N 값, 단위중량, 지하수위, 간극비, 액·소성한계, 입도분포, 비중 등)를 얻는다.

나. 지반자료와의 경험적 상관관계를 이용하여 각 층의 최대전단탄성계수를 결정한다.

다. ② 현장실험 결과를 이용하는 방법의 나, 다, 라의 단계를 수행한다.

4.1.6 내진 해석법

- (1) 항만 및 어항 시설물은 설계지진수준에 대해 요구하는 내진성능수준을 확보하도록 하여야 한다. 단 도로, 철도, 건축물 및 이와 관련된 교량 등의 부속시설 중 항만 시설물과 기능이 연관되는 시설물은 항만시설물 이상의 내진등급을 적용하고, 해당 시설물의 기준에 준하는 내진설계를 수행한다.
- (2) 내진 해석법은 시설물의 내진성능 수준, 내진등급 및 지진거동특성에 따라 등가정적 해석법, 응답스펙트럼해석법, 동적 해석법을 적용할 수 있다.

[해 설]

내진설계 시에는 다음의 사항을 고려하여야 한다.

(1) 대상시설의 내진성능을 검토하는 경우

- ① 대상지역의 지진활동 정도와 지반조건, 대상으로 하는 지진 및 지진동 등
- ② 시설물의 내진등급 및 내진성능 수준
- ③ 시설물 이용상 지진 시 거동 한계

(2) 기초지반, 구조물 부재, 시설 간 연결부의 내진성능을 검토하는 경우

- ① 지반 구조물 시스템의 전체 안정성
- ② 구조물의 기초지반 활동, 전도 등에 대한 안정성
- ③ 액상화 현상이 기초지반의 안정성 및 상부구조물에 미치는 영향
- ④ 구조물의 부재응력
- ⑤ 기능상으로 본 구조물의 각 부분, 인접하는 구조물이나 지반과의 상대변위

(3) 내진 해석법에는 등가정적 해석법, 응답스펙트럼해석법과 동적 해석법이 있으며 진도 법으로 대표되는 등가정적 해석법은 지반 지진력을 정적인 관성력으로 간주하여 지반이나 구조물에 작용시켜 힘의 평형조건으로부터 안정성을 검토하는 방법이다. 응답스펙트럼 해석법은 구조물 기본모드의 진동주기를 구한 후 응답스펙트럼으로부터 탄성지진응답을 구하여 해석하는 방법으로 단일모드와 다중모드 해석법이 있다. 또한 동적 해석법은 구조물, 기초, 지반을 포함한 해석대상에 대해 시간영역 또는 진동수 영역에서 실지진기록을 입력하여 이에 대한 지반, 기초, 구조물의 응답을 산정하여 지진시 안전성을 검토하는데 활용하는 해석 방법이다.

(4) 내진 I 등급 시설물

- ① 기능수행 수준 및 붕괴방지 수준에서 동적해석방법에 의하여 시설물의 안전이나 부재력을 검토 하는 것이 바람직하나 다음의 경우는 예외로 할 수 있다.
 - 가. 배면이 토사로 매립되었거나 내부 속채움이 포함된 시설물로서 지진 시 토압 및 동수압이 시설물의 안전이나 부재력에 지배적인 경우 또는 일반적인 잔교 구조물 등은 등가정적 해석법을 적용할 수 있다.
 - 나. 지진 시 하중조건이나 재료의 특성 등에 따라 기능수행 수준에서의 시설물 안전이나 부재력이 붕괴방지 수준에서의 경우보다 덜 위험하다고 판단되는 경우는 기능수행 수준에서의 검토를 생략할 수 있다.
- ② 지반에 매설되는 관구조물 등의 변형은 지진 시 주변지반의 변위에 지배되므로 이를 고려하여 검토한다.

(5) 내진 II 등급 시설물

- ① 기능수행 수준 및 붕괴방지 수준에서 응답스펙트럼 해석법과 등가정적 해석법 등에 의하여 시설물의 안전이나 부재력을 검토한다.
- ② 지진 시 하중조건이나 재료의 특성 등에 따라 기능수행 수준에서의 시설물 안전이나 부재력이 붕괴방지 수준에서의 경우보다 덜 위험하다고 판단되는 경우는 기능수행 수준에서의 검토를 생략할 수 있다.
- ③ 고유진동주기가 비교적 짧고 감쇠성이 큰 시설물이 아닌 경우로 지진동의 탁월주기와 비교하여 시설물의 고유진동주기가 긴 경우나 높이 방향으로 진동이 증폭하기 쉬운 경우는 내진 II 등급 시설의 경우에도 시설물의 동적거동을 판단하여 설계지진력을 결정한다.

(6) 내진 I 등급 시설물의 경우에도 타당성 조사나 기본계획 단계 등에서는 등가정적 해석법을 적용하고, 기본설계 단계에서는 중요 시설부분에 대해서만 (4)항의 규정을 적용할 수 있다.

내진

- (7) 이 기준에서 규정하는 항만시설물의 내진성능수준은 최소한의 요구조건으로 시설물에 따라서는 보다 강화된 내진성능수준을 요구할 수 있다. 이 경우 설계자는 이론적 또는 실험적으로 신뢰성이 확보된 보다 발전된 설계기법으로 성능기반 내진설계를 수행할 수 있다.
- (8) 등가정적 해석법에서의 설계지진력은 다음의 ① 및 ②항 중 시설물에 불리하게 되는 지진력을 시설물의 중심에 작용시키는 것으로 한다.
- ① 지진력 = 자중 × 지진계수
- ② 지진력 = (자중 + 재하하중) × 지진계수
- 여기서, 지진계수 = 암반상 유효수평지반 가속도(설계 진도) × 단주기 증폭계수로부터 구하며, 이때, 단주기증폭계수는 지반조건에 따른 지진응답해석을 수행하여 결정하거나 표 4.1-6 지반증폭계수를 참조한다.
- (9) 항만시설물의 내진성능을 검토함에 있어서 동적해석방법을 적용하는 경우는 해석의 목적에 부합되는 적절한 방법을 선택하여야 하며, 동적해석법을 적용할 경우 구조물의 모델링, 재료정수의 설정, 입력지진동 선정 등은 실제의 현상을 적절히 재현할 수 있어야 한다.

[참 고]

- (1) 내진해석법에는 응력검토, 안전율, 변위를 고려한 해석법이 있지만, 변위를 고려한 해석법은 현행 기준에서는 채택하고 있지 않으며, 현재 연구가 진행중이므로 향후 연구결과가 나오면 변위를 고려한 해석법의 사용이 가능할 것이다. 또한, 동적해석은 지반 및 구조의 검토는 가능하나, 변위에 대한 검토는 수행할 수 없다. 변위를 고려한 해석법에서 가장 중요한 사항이 시설물의 중요도에 따른 허용변위이며 아래에 외국에서의 변위를 고려한 내진설계 수행시의 허용변위에 대해 소개하였다.
- ① 항만시설물의 허용변위는 시설물의 운영측면이나 안전측면이 모두 고려하여 결정하여야 하며, 허용변위량의 대소에 따라 건설비용 등에 큰 영향을 미칠 것이므로 신중하게 검토하여야 한다.
- ② 외국의 관련문헌에 따르면 일반적으로 다음과 같은 기준을 사용하고 있다.
- 가. Design criteria for earthquake hazard mitigation of navy piers and wharfs(US Navy.1997)
- 잔교하부 호안구조물의 경우(Newmark법 사용 시)
- 붕괴방지 수준에서의 허용범위 : 30cm (수평방향)
- 기능수행 수준에서의 허용범위 : 10cm (수평방향)
- 나. 港灣の施設の技術上の基準.同解説(일본항만협회, 1999) : 붕괴방지 지진작용 시에 크레인 미설치 부지의 경우

참고 표 (4.1-1) 공용의 관점에서 본 안벽 변형량 허용값

구 분	피해변형량 ; 최대 측방 변위량 또는 최대 에이프런 침하량			
구조형식	중력식 계선안		널말돌식 계선안	
안벽수심	(-) 7.5m 이상	(-) 7.5m 미만	(-) 7.5m 이상	(-) 7.5m 미만
공용가능	0 ~ 30cm	0 ~ 20cm	0 ~ 30cm	0 ~ 20cm
공용제한	30 ~ 100cm	20 ~ 50cm	30 ~ 50cm	20 ~ 30cm

참고 표 (4.1-2) 기능상의 관점에서 본 안벽 변형량 상한 허용값

구조물 본체	에이프런 전체 침하량 : 20~30cm
	경사 : 3~5°
	측방의 변위 : 20~30cm
에이프런	침하 : 에이프런상의 단차 : 3~10cm
	에이프런과 배후지의 단차 : 30~70cm
	경사 : 순경사 3~5%, 역경사 0%

다. Seismic design guidelines for port structures(International Navigation Association, 2001)(지진에 의한 인명피해 위험성이 없고, 위험물을 취급하지 않으며 레일상 크레인 미사용 시)

참고 표 (4.1-3) 피해 허용수준(Acceptable level of damage) 분류

피해 정도	구조물 피해	기능적 피해
수준 I : 사용가능 (Serviceable)	최소 또는 피해 전무	최소의 기능피해
수준 II : 복구가능 (Repairable)	복구 가능한 피해	단기간 기능수행 불가
수준 III : 붕괴임박 (Near collapse)	붕괴에 가까운 피해	장기간 기능수행 불가
수준 IV : 붕괴 (Collapse)	붕괴	붕괴에 따른 기능수행 불가

내진

참고 표 (4.1-4) 중력식 안벽의 파괴 기준

피해구분		수준 I	수준 II	수준 III	수준 IV
중력식 안벽	정규화된 잔류 수평변위 (d/H)*	1.5%** 이하	1.5~5%	5~10%	10% 이상
	바다 방향 잔류 기울기	3° 이하	3~5°	5~8°	8° 이상
에이프런	에이프런 상의 단차	0.03 ~ 0.1m 이하	N/A***	N/A	N/A
	에이프런과 배후지의 단차	0.3 ~ 0.7m 이하	N/A	N/A	N/A
	바다 방향 잔류 기울기	2 ~ 3° 이하	N/A	N/A	N/A

* d : 벽 상단에서의 잔류 수평 변위, H : 중력벽의 높이

** 대체 규정은 부등 수평변위의 측면에서 30cm 이하로 제한됨

*** 적용할 수 없을 때 생략

참고 표 (4.1-5) 말뚝지지 안벽의 파괴 기준

피해구분	수준 I	수준 II	수준 III	수준 IV
상판(Deck)과 배후지 사이의 부등침하	0.1 ~ 0.3m 이하	N/A	N/A	N/A
바다 방향 잔류 기울기	2 ~ 3° 이하	N/A	N/A	N/A

* 구조부재는 Seismic design guidelines for port structures(2001) 참조

참고 표 (4.1-6) 중공블록식 안벽의 파괴 기준

피해구분		수준 I	수준 II	수준 III	수준 IV
중공 블록식 안벽	정규화된 잔류 수평변위 (d/H)	1.5% 이하	1.5 ~ 5%	5 ~ 10%	10% 이상
	바다 방향 잔류 기울기	3° 이하	3 ~ 5°	5 ~ 8°	8° 이상
에이프런	에이프런 상의 단차	0.03 ~ 0.1m 이하	N/A	N/A	N/A
	에이프런과 배후지의 단차	0.03 ~ 0.7m 이하	N/A	N/A	N/A
	바다 방향 잔류 기울기	2 ~ 3° 이하	N/A	N/A	N/A

※ 구조부재는 Seismic design guidelines for port structures(2001) 참조

(2) 내진 I 등급 시설물의 시설물 안정과 부재력 검토 시 예외조항은 다음과 같은 경우에 해당한다.

- ① 중력식 안벽, 널말뚝식 안벽 등이나 직립식 혹은 혼성식 방파제와 같은 경우는 등가정적 해석법을 허용하며, 잔교식 안벽 등은 설계자의 판단에 따른다.

- ② 붕괴방지 수준 및 기능수행 수준에서의 상재하중 (특히 운영하중)은 발생빈도가 상이하므로 달리 적용할 수 있다.
- ③ 지진발생 시 강제운동으로 보기 어려운 잔교식 안벽의 경우, 내진Ⅱ등급 시설물도 시설물의 동적거동을 상세하게 판단하는 것이 바람직하다.
- ④ 중력식 안벽 등은 붕괴방지 수준의 경우만 검토하여도 시설물의 안전이나 부재력에 문제가 없는 것으로 판단되는 경우엔 기능수행 수준에서의 검토를 생략 가능하도록 예외 조항을 두었다. 잔교식 안벽(말뚝식 구조물) 등의 경우 허용응력설계법으로 하고, 기능수행 수준의 경우는 허용응력할증을 감안하여 검토하고, 붕괴방지 수준의 경우는 추가적으로 연성계수를 적용하여 부재력을 검토한다.
- (3) 내진Ⅱ등급 시설물의 경우는 기본적으로 등가정적 해석법으로 수행하며, 구조물 형태에 따른 내진성능수준별 검토는 상기의 ④와 같다.
- (4) 안벽과 같은 항만구조물에 대한 내진설계에 있어서는 일반적인 토목구조물에서와 같이 등가정적 해석법이 적용된다. 즉, 지진동의 탁월진동주기에 비하면 이들 구조물의 고유진동주기는 짧다고 보여 지므로 지진동에 이들 구조물은 강체와 같이 거동한다고 본다.
- (5) 등가정적 해석법에 의하면 지진 시 발생하는 최대 지진력이 마치 정적인 힘으로 지속적으로 작용하는 것으로 설계되므로, 이와 같은 설계법과 실제에 일어나는 현상과의 차이를 감안하여 지진 시에는 이상시 하중에 대한 재료의 안전율, 허용응력도 등을 상시와 달리 하고 있다.
- (6) 설계 진도는 암반지반을 기준으로 하고 있는 바, 대상지역의 지반종류별 특성을 감안하기 위한 단주기 증폭계수는 일반적으로 1차원 등가선형 지반응답해석(사용가능모델 사례 ; SHAKE)을 수행하면 결정가능하다.
- (7) 외국에서의 중력식 안벽의 변위를 고려한 해석방법
과거 지진하중 조건에만 의존하여 설계하던 방법 대신, 벽체구조물의 허용변위를 고려하여 설계하는 방법이 점점 일반화되고 있다. 등가정적 해석법 해석에서 사용되는 Mononobe-Okabe 방법과 Eurocode 방법들은 벽체구조물에 가해지는 지진력을 산정하는데 유용하게 이용될 수 있으나 변위에 대한 정보는 알 수 없다.
지진발생 후 벽체구조물이 제 기능을 발휘할 수 있는 지는, 지진 시 발생된 구조물의 영구변위의 크기에 좌우되는 경우가 많다. 따라서 내진설계 시 허용변위를 고려한 설계기법과 설계지진에 의한 벽체구조물의 영구변형을 예측하기 위한 해석을 수행할 필요가 있다.

① 영구변위 산정법

가. Richards-Elms 방법

Richards-Elms는 허용변위에 따른 벽체구조물의 내진설계방법을 제안하였다.

이 방법은 지진 시의 사면안정해석 방법으로 Newmark가 제안한 슬라이딩 블록 (Sliding block) 방법과 유사한 방법으로 벽체의 영구변위를 평가하는 방법이다. Richards-Elms는 영구변위 및 항복가속도(설계가속도)를 구하는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$N = A \left(\frac{0.087 V^2}{dAg} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{참고 식 (4.1-1)}$$

$$d = 0.087 \frac{V^2}{Ag(N/A)^4} \quad \text{참고 식 (4.1-2)}$$

여기서, d : 영구변위(m)

N : 항복가속도(m/sec²)

A : 최대지반가속도(m/sec²)

g : 중력가속도(9.8m/sec²)

V : 최대지반속도(m/sec)

일반적으로 허용변위는 구조물의 중요도(등급) 및 종류에 따라 설계시방서에 주어진다. 허용변위가 결정되면 벽체에 가해지는 지진계수를 수정하여 등가정적 해석법 해석을 수행한다.

또한 활동을 유발하는 항복가속도를 한계평형법에 의하여 계산하고, 설계지진력에 대한 영구변위를 참고 식 (4.1-2)를 이용하여 계산할 수 있다.

나. Whitman-Liao 방법

Richards-Elms 방법은 중력식 벽체구조물의 변위를 산정하는데 유용하나, 개발 과정에서 동적토압 문제에서 고려되어야 할 뒷채움재의 진동응답, 운동학적 요소들, 회전거동, 수직 가속도 등의 사항들을 무시하고 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 Whitman-Liao는 Richards-Elms 방법의 모델링 오류를 통계학적인 방법을 이용해 95%의 신뢰수준으로 영구변위를 초과하지 않는 항복가속도를 구하는 법을 다음과 같이 제안하였다.

$$N = A \left\{ 0.66 - \frac{1}{9.4} \ln \left(\frac{dAg}{V^2} \right) \right\} \quad (\text{단면설계시}) \quad \text{참고 식 (4.1-3)}$$

$$d = \frac{495 V^2}{Ag} \exp \left(-9.4 \frac{N}{A} \right) \quad (\text{설계된 단면에 대한 검토시}) \quad \text{참고 식 (4.1-4)}$$

Richards-Elms 방법과 Whitman-Liao 방법을 비교해보면, Whitman-Liao 방법은 지진 시 벽체구조물에 발생한 변위의 사례연구의 최적(Best-fit) 곡선을 나타내고 Richards-Elms 방법은 상한값을 나타낸다.

따라서 내진설계 시 Whitman-Liao 방법을 이용할 것을 추천하며, 보조수단으로 Richards-Elms 방법에서 계산된 영구변위는 중력식 벽체구조물이 경험할 수 있는 영구변위의 상한계 값으로 참고할 수 있다.

② 설계방법

허용변위를 고려하여 내진설계를 하는 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다.

가. 허용변위 d 를 결정한다. d 는 구조물의 종류 및 중요도(등급)에 따라 결정한다.

나. 항복가속도(설계가속도) N 을 허용변위로부터 계산한다.

다. 지진 시 작용되는 하중조합을 계산한다. 위에서 구한 항복가속도 N 을 수평지진

계수 (Kh)로 사용한다.

라. 위 다.항에서 계산된 하중조합을 지탱할 수 있는 중력식 벽체구조물을 등가정적 해석법과 동일하게 설계한다. 이 방법에서는 활동이 유발되는 것으로 가정하기 때문에 활동 이외의 검토사항에 대한 검토를 수행한다.

설계된 벽체의 영구변위를 예측하기 위해서는 중력식 벽체에 활동을 유발하는 항복가속도를 한계평형방법에 의하여 결정하고 Richards-Elms 방법과 Whitman-Liao 방법을 적용한다. 이때 Whitman-Liao의 방법은 평균값을 Richards-Elms 방법은 상한값을 제공한다.

③ 상기의 방법 사용 시의 허용변위, 안전율산정방법 및 필요한 안전율은 미국의 항만 설계기준(The seismic design of waterfront retaining structures, 1992. US Navy) 등을 참조한다.

(8) 동적해석방법은 재료의 특성, 모델형식 등에 따라 매우 다양하므로 실제 현상을 적절히 재현할 수 있는 방법을 선택할 필요가 있다.

참고 표 (4.1-7) 해석모델의 분류

해 석 법 (포화지반의 취급)	유효응력해석법, 전응력해석법
계산대상지역(차원)	1차원, 2차원, 3차원
재료특성	선형, 등가선형, 비선형
계산영역	시간영역해석법, 주파수영역해석법

① 수치계산에 의한 해석

가. 유효응력해석법과 전응력해석법

액상화의 예측.판정이라는 목적의 관점에서 보면, 동적해석은 유효응력법에 근거한 것과 전응력법에 근거한 것으로 나눌 수 있다. 지반이 액상화 되면 과잉간극수압이 발생하여, 유효응력이 감소한다. 그 결과 흙의 응력상태가 변화하기 때문에 흙의 복원력 특성이나 감쇠특성이 변화하고 지반의 응답특성도 변화한다.

유효응력해석법은 이와 같은 상태를 표현할 수 있어 지반에 발생하는 과잉간극수압을 계산에 의해 직접 구할 수 있다. 한편, 전응력해석법에서는 계산과정에서 과잉간극수압이 계산되지 않기 때문에, 유효응력의 변화에 의한 지진응답 변화가 고려될 수가 없다. 따라서 어느 정도 이상의 과잉간극수압비로 대략 0.5이상이 발생하는 경우에는 전응력법에 의한 계산결과는 실제의 지진응답과 꽤 다를 가능성이 크다. 따라서 설계실무에는 간편한 전응력해석법이 이용되는 경우가 많다. 일반적으로 유효응력해석에 의한 응답값(전단응력이나 가속도)은 전응력해석에 의한 응답값보다 전반적으로 작다고 알려져 있다. 이 경우에는 전응력해석은 설계상 안전 측의 결과를 주고 있다.

나. 계산대상 영역에 의한 분류

계산의 대상으로 하는 영역에 의한 해석에는 1차원에서 3차원까지의 해석법이 있다. 일반적으로, 평면적으로 넓은 곳에 수평으로 퇴적된 지층구조를 가지는 자연 지반을 대상으로 하는 경우에는 1차원 해석법이 이용되고 있다. 또, 안벽 등과 같이 안쪽 길이 방향으로 똑같다고 간주하는 구조물-지반계를 대상으로 하는 경우에는 2차원 해석법이 이용되고 있는 것이 일반적이다. 교대기초-지반계와 같은 경우, 3차원적 취급을 하는 것이 생각될 수 있으나, 모델화나 계산시간의 제약으로 인하여 3차원 해석은 중요구조물이나 연구목적으로 이용되는 것이 일반적이다.

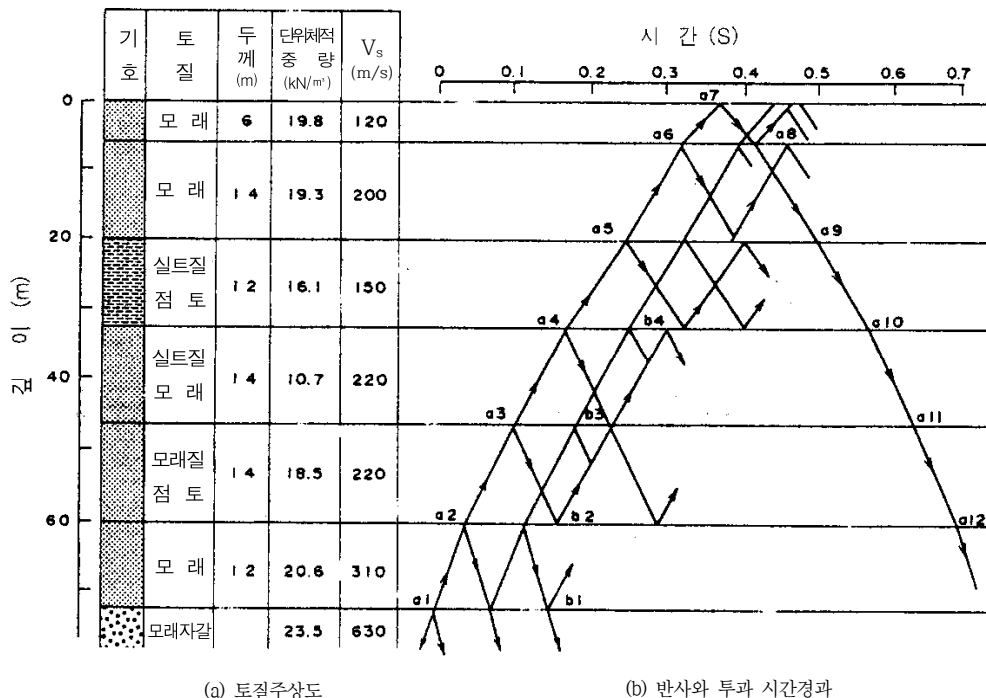
다. 일반적인 계산모델의 종류

(가) 1차원 부지응답 해석

이 방법은 지반을 수평한 토층의 겹침으로 간주하고, 지반에서부터 수직으로 입사한 전단파가 상방으로 진행하여 각 층의 경계에서 투과와 반사를 반복 하게 하는 것이다. 이 방법에는 흙의 응력-변형률 관계를 선형으로 취급하나, 유사해석으로 비선형성을 고려할 수 있는 등가선형해석법에 의해 1차원 부 지응답해석(SHAKE해석)이 널리 이용되고 있다(참고 그림 (4.1-1)).

(나) 유한요소모델

이 해석법은 지반을 유한개수의 요소로 분할하여 해석하는 것으로 지반분야뿐 아니라 엔지니어링 각 분야에서 이용되고 있다. 이 방법의 특징은 지반의 층 두께나 물성의 2차원적인 변화를 용이하게 표현할 수 있다.



참고 그림 (4.1-1) 중복반사 모델에 의한 지진파의 전파

② 동적해석모델을 선정함에 있어서 중요한 점은 해석의 목적에 부합되고, 실제의 현상을

적절히 재현할 수 있는가 하는 점이다. 이는 일률적으로 정의하기 어려우므로 각각의 경우에 따라 평가되어야 한다.

③ 동적해석법을 적용할 경우 항만시설물의 물에 의한 영향을 고려하는 것이 바람직하다.

(9) 내진설계가 수행되지 않은 1999년 이전에 설치된 기존시설물의 내진 평가 시 적용 안전율은 설계자의 판단에 따라 아래와 같이 적용할 수 있다.

참고 표 (4.1-8) 기준안전율

구 분	흙 및 사석 구조물	중력식 구조물	비 고
활 동	-	1.0	- 흙 및 사석 구조물 : 경사식 방파제, 호안 등 - 중력식 구조물 : 케이슨, 블록식, 셀식 직립제 등 - 기타 구조물 : 안정검토 내용에 맞는 안전율 채택
전 도	-	1.0	
편심 · 경사하중 지지력	-	1.0	
원호활동	1.0	1.0	

4.1.7 지진 시 토압

지진 시 토압은 주동 및 수동 상태와 흙의 종류에 따라 산정한다.

[해설]

(1) 겉보기 진도

수면 아래 흙의 지진 시 토압은 다음 식에 의해 구해지는 겉보기 진도를 이용하여 사질토 및 점성토의 토압을 산정한다.

$$k' = \frac{2(\sum \gamma_t h_i + \sum \gamma h_j + w) + \gamma h}{2[\sum \gamma h_i + \sum (\gamma - 10)h_j + w] + (\gamma - 10)h} k \quad \text{해설 식 (4.1-6)}$$

여기서, k' : 겉보기 진도

γ_t : 잔류수위 위 흙의 단위체적중량 (kN/m³)

h_i : 잔류수위 위 i층의 토층의 두께 (m)

γ : 물에 의해 포화된 흙의 공기 중 단위체적중량 (kN/m³)

h_j : 잔류수위 아래에서 토압을 산정하는 층보다 위인 j층의 토층 두께 (m)

w : 지표면의 단위면적당 재하하중 (kN/m²)

h : 잔류수위 아래 토압을 산정하는 토층두께 (m)

k : 진도

(2) 사질토의 토압

① 주동토압

지진 시 벽면에 작용하는 주동토압은 붕괴면이 수평면과 이루는 각을 통해 산정한다.

내진

$$P_{ai} = K_{ai} \left[\sum \gamma_i h_i + \frac{w \cos \Psi}{\cos(\Psi - \beta)} \right] \cdot \cos \Psi \quad \text{해설 식 (4.1-7)}$$

$$K_{ai} = \frac{\cos^2(\phi_i - \Psi - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \Psi \cos(\delta + \Psi + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_i + \delta) \sin(\phi_i - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \Psi + \theta) \cos(\Psi - \beta)}} \right]^2}$$

$$\cot(\zeta_i - \beta) =$$

$$- \tan(\phi_i + \delta + \Psi - \beta) + \sec(\phi_i + \delta + \Psi - \beta) \sqrt{\frac{\cos(\Psi + \delta + \theta) \sin(\phi_i + \delta)}{\cos(\Psi - \beta) \sin(\phi_i - \beta - \theta)}} \quad \text{해설 식}$$

(4.1-8)

② 수동토압

지진 시 벽면에 작용하는 수동토압은 붕괴면이 수평면과 이루는 각을 통해 산정한다.

$$P_{pi} = K_{pi} \left[\sum \gamma_i h_i + \frac{w \cos \Psi}{\cos(\Psi - \beta)} \right] \cos \Psi \quad \text{해설 식 (4.1-9)}$$

$$K_{pi} = \frac{\cos^2(\phi_i + \Psi - \theta)}{\cos^2 \Psi \cos \theta \cos(\delta + \Psi - \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi_i - \delta) \sin(\phi_i + \beta - \theta)}{\cos(\delta + \Psi - \theta) \cos(\Psi - \beta)}} \right]^2}$$

$$\cot(\zeta_i - \beta) =$$

$$\tan(\phi_i - \delta - \Psi + \beta) + \sec(\phi_i - \delta - \Psi + \beta) \sqrt{\frac{\cos(\Psi + \delta - \theta) \sin(\phi_i - \delta)}{\cos(\Psi - \beta) \sin(\phi_i + \beta - \theta)}} \quad \text{해설 식 (4.1-10)}$$

여기서, $P_{ai}, (P_{pi})$: i층하면의 벽면에 작용하는 주동 및 수동 토압 (kN/m^2)

ϕ_i : i층의 흙의 내부마찰각 ($^\circ$)

γ_i : i층의 흙의 단위체적중량 (kN/m^3)

h_i : i층의 두께 (m)

$K_{ai}, (K_{pi})$: i층의 주동 및 수동 토압계수

Ψ : 벽면이 연직과 이루는 각도 ($^\circ$)

β : 지표면이 수평과 이루는 각 ($^\circ$)

δ : 흙과 벽면과의 마찰각 ($^\circ$)

ζ_i : i층의 붕괴면이 수평과 이루는 각도 ($^\circ$)

w : 지표면에 단위면적당 재하하중 (kN/m^2)

θ : 지진합성각 $\theta = \tan^{-1}k(^\circ)$ 또는 $\theta = \tan^{-1}k'(^\circ)$ 로 표시한다.

k : 진도

k' : 겉보기 진도

(3) 점성토의 토압

지진 시 구조물의 벽면에 작용하는 토압 및 붕괴면이 수평면과 이루는 각도는 다음에 제시된 바와 같이 산정하는 것을 표준으로 한다.

① 주동토압

지진 시 벽면에 작용하는 주동토압과 붕괴면이 수평면과 이루는 각은 아래 공식을 통해 산정한다.

$$P_a = \frac{(\sum \gamma_i h_i + w) \sin(\zeta_a + \theta)}{\cos \theta \sin \zeta_a} - \frac{c}{\cos \zeta_a \sin \zeta_a} \quad \text{해설 식 (4.1-11)}$$

$$\zeta_a = \tan^{-1} \sqrt{1 - \frac{(\sum \gamma_i h_i + 2w)}{2c} \tan \theta} \quad \text{해설 식 (4.1-12)}$$

여기서, P_a : 주동토압 (kN/m²)
 γ_i : 흙의 단위체적중량 (kN/m³)
 h_i : 층의 두께 (m)
 w : 수평단위면적당 재하하중(kN/m²)
 c : 흙의 점착력 (kN/m²)
 θ : 지진합성각 $\theta = \tan^{-1} k(^{\circ})$ 또는 $\theta = \tan^{-1} k'(^{\circ})$ 로 표시한다.
 k : 진도
 k' : 겉보기 진도
 ζ_a : 붕괴면이 수평과 이루는 각도($^{\circ}$)

② 수동토압

지진 시 구조적 안정이 확보될 수 있도록 적절한 토압식에 의해 산정한다. 다만, 점성토의 지진 시 수동토압을 구하는 방법에 대해서는 불명확한 점이 많으므로 정적상태(평상시)의 토압산정식을 이용하는 것도 현 단계에서 가능하다.

③ 해저면 아래에서의 점성토의 지진 시 토압을 산출하는 경우 해저면에서는 겉보기 진도를 이용하여 토압을 구하지만 해저면 아래 10m 이하에서는 진도를 0으로 하여 토압을 구하여도 좋다. 단, 해저면 아래 10m에서의 토압이 해저면에서의 값보다 작은 경우에는 해저면에서의 값을 이용한다.

[참 고]

- (1) 지진 시 토압의 산정에 관하여 자유수면에 면한 벽체의 안정을 검토할 때에도 이를 이용하여 산출한 토압에 벽체 전면에 작용하는 동수압을 바다 쪽으로 작용시킨다.
- (2) 지진 시 수면 아래의 흙은 토립자와 물이 일체로 되어 운동한다고 가정하면 흙에 작용하는 지진력은 흙의 포화중량에 진도를 곱한 것으로 된다. 또한 수면하의 흙은 부력을 받으므로 흙에 작용하는 수직력은 흙의 수중중량이다. 따라서 수면 아래의 흙에 작용하는 지진 시 합력은 공기 중과 다르게 된다. 지진 시 토압을 산출하는 경우 수면 아래의 흙에 대해서는 지진합성각으로 도출한 겉보기 진도를 이용하면, 공기 중의 흙에 대해 도출된 지진 시 토압식에 의해 토압을 구하는 것이 가능하다. 또한, 수면 아래의 흙에

내진

대한 수직력에는 토압을 구하고자 하는 토층보다 위인 흙의 토층중량 및 재하하중이 들어가므로 겉보기 진도는 이들의 영향을 받는다.

- (3) 지진 시의 토압은 모노노베(Mononobe)·오까베(Okabe)가 제안한 이론의 사용을 우선 하며 이와 다른 국내외 연구사례가 적용사례를 포함하여 있는 경우, 이를 적용할 수 있다.
- (4) 벽면마찰각은 일반적으로 $\pm 15^\circ$ 이하 또는 뒤채움재의 내부마찰각(ϕ)의 1/2정도를 기준으로 한다.
- (5) 위의 토압식은 흙과 간극수가 일체가 되어 운동한다고 가정아래 제안된 식으로 액상화가 일어난 지반에는 적용할 수 없다. 이러한 경우에는 유효응력해석법을 이용한 동적해석 또는 모형실험 등으로 지진 시 안정성을 평가한다.

4.1.8 지진 시 동수압

지진시 동수압은 유체의 동적작용에 의해 구조물에 작용하는 동적압력으로 산정한다.

[해설]

- (1) 수중에 있는 구조물 및 시설의 내부공간의 일부 또는 전체를 물이 점하는 경우에서는 지진 시의 동수압은 다음의 식을 이용하여 산정한다.

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} k \gamma_w \sqrt{H \cdot y} \quad \text{해설 식 (4.1-13)}$$

여기서, P_{dw} : 동수압 (kN/m^2)
 k : 진도
 γ_w : 물의 단위체적중량 (kN/m^3)
 H : 수심 (m)
 y : 수면으로부터 동수압을 산정하는 점까지의 깊이 (m)

- (2) 동수압의 합력 및 작용점의 위치는 다음의 식을 이용하여 산정한다.

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{12} k \gamma_w H^2 \quad \text{해설 식 (4.1-14)}$$

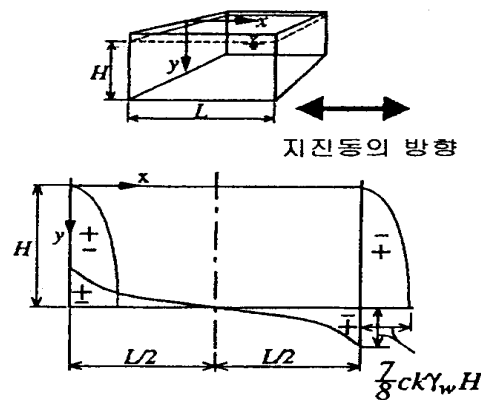
$$h_{dw} = \frac{3}{5} H \quad \text{해설 식 (4.1-15)}$$

여기서, P_{dw} : 동수압의 합력 (kN)
 h_{dw} : 수면에서 동수압 합력의 작용점까지 거리(m)

- (3) 동수압의 산정은 구조물의 강성, 전체로서의 안정조건 등 구조물의 특성을 고려하여야

한다.

- (4) 액체가 구조물 내부의 공간을 점하고 있는 경우에도 이 액체에 의한 동적 압력을 고려한다.
- (5) 현재 이용되고 있는 동수압 산정방법은 정상진동에 대한 동수압을 기준으로 한 것이다. 다른 외력 등의 위상관계를 고려하여 특히 필요한 경우에는 불규칙 진동에 대한 동수압을 산정하여 설계에 이용한다.
- (6) 구조물의 양측에 동수압이 작용하는 경우에는 동수압 합력의 합계는 2배로 된다.
- (7) 정방형의 공간을 점하는 물이 이 공간의 한 변과 평행한 방향으로 진동하는 지진동을 받는 때에 그 진동방향에 수직한 벽면에 작용하는 동수압은 해설 식 (4.1-13)에 의해 계산한다.[해설 그림 (4.1-9) 참조]



해설 그림 (4.1-9) 장방형 중공부의 물에 의한 동수압

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} c k \gamma_w \sqrt{H y}$$

해설 식 (4.1-16)

여기서, P_{dw} : 동수압 (kN/m²)

k : 설계진도

γ_w : 해수의 단위체적중량 (kN/m³)

y : 수면부터 동수압을 구하는 점까지의 깊이 (m)

H : 수심 (m)

L : 물이 점하는 공간의 진동방향의 길이 (m)

c : 보정계수

$$\frac{L}{H} < 1.5 \text{ 일 때, } c = \frac{L}{1.5H}$$

$$\frac{L}{H} \geq 1.5 \text{ 일 때, } c = 1.0$$

이 때, 저면에 작용하는 동수압은 다음의 식을 이용하여 산정한다.

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} c k \gamma_w H \cdot \frac{\cosh\left(\frac{\pi}{2} \frac{x}{H}\right) - \cosh\left(\frac{\pi}{2} \frac{L-x}{H}\right)}{1 - \cosh\left(\frac{\pi}{2} \frac{L}{H}\right)}$$

해설 식 (4.1-17)

내진

여기서, x : 진동방향에 수직한 벽면으로부터 동수압을 구하는 점까지의 거리(m)

(8) 동수압을 고려하지 않아도 되는 사례

- ① 구조물의 특성이 직접적으로 동수압을 고려하지 않고 설계해도 되는 경우
- ② 직접 동수압을 고려하지 않는 설계법을 이용하는 경우(충분한 실적을 필요로 한다)
구체적으로는 아래의 경우이다.
 - 가. 케이슨 속채움의 간극수에 의한 동수압
 - 나. 계선안벽 등의 뒤채움 및 매립토의 간극수에 의한 동수압
 - 다. 케이슨의 측벽 및 저판의 배근설계 시 동수압

4.1.9 하중조합 및 지진하중에 대한 기타사항

4.1.9.1 하중조합

항만 및 어항 시설물의 내진설계를 위한 설계지반운동의 재현주기가 50~1,000년 인 점을 고려하여 지진하중과 선박 접안력이나 폭풍 시 풍압 등 동시에 발생하는 빈도가 낮은 하중은 동시에 작용하지 않는 것으로 한다.

[해 설]

- (1) 지진하중은 다음 하중과 동시에 작용하지 않는 것으로 한다.
 - ① 선박 접안력
 - ② 폭풍 시 풍압
 - ③ 파력
 - ④ 충돌하중 및 충격하중
 - ⑤ 기타 발생빈도가 적어서 지진하중과 동시에 작용할 확률이 적은 하중
- (2) 지진 시 상재하중은 정상운영시의 상재하중을 운영실태 등을 고려하여 조정하여 사용한다.
- (3) 지진하중은 상재하중이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 조합되어야 한다.
- (4) 안벽 등의 상부의 궤도하중은 지진 시 구조물에 미치는 영향을 감안하여 검토되어야 한다.
- (5) 지진 시 기능수행 수준 및 붕괴방지 수준에 따른 상재하중의 크기는 대상시설물의 운영 형태, 시설물의 중요도 등에 따라 결정될 요소이다. 기능수행 수준에서는 평상시 하중의 50%, 붕괴방지수준에서는 평상시 하중의 25%를 적용하는 것을 표준으로 한다.
- (6) 중력식 안벽 등의 상부에 놓이는 크레인과 같은 궤도하중은 안벽구조물의 강성에 비하여 크레인 각주의 강성이 적으므로 지진발생 시 미치는 영향이 적은 경우가 있다. 이는 크레인의 구조특성 상 장주기 거동으로 중력식 안벽구조물과 공진하지 않기 때문이다.

4.1.9.2 허용응력의 할증 및 연성계수

- (1) 허용응력 설계법을 적용하는 경우, 기능수행 및 붕괴방지수준에서 허용응력 할증을 적용한다.
- (2) 붕괴방지 수준에서 시설물의 연성거동이 전제된다면 설계지진력 산정 시 연성계수를 적용할 수 있다.

[해설]

- (1) 붕괴방지 수준에서의 연성거동이 확보되는 경우 설계지진력은 탄성해석에서 구한 지진력을 연성계수로 나눈 값으로 한다. 다만, 축방향력과 전단력은 연성계수로 나누지 않는다.
- (2) 말뚝이 단주인 경우나 단주와 같이 거동하는 경우는 수정된 연성계수를 사용한다.
- (3) Design criteria for earthquake hazard mitigation of navy piers and wharfs(1997. US Navy)에 의하면 붕괴방지 수준에서의 부재력 검토 시 적용되는 연성계수는 다음과 같다.

해설 표 (4.1-2) 붕괴방지 수준에서의 연성계수

항만구조물	말뚝의 종류	허용변위 연성계수				
		콘크리트 말뚝			강말뚝	
		지반에서의 말뚝모멘트	말뚝 두부	경사 말뚝 두부	수직말뚝만 사용시	수직말뚝과 경사말뚝 혼용시
돌출잔교 (Finger pier) 및 디테치드 피어 (Detached pier)	PS콘크리트	1.5	3.0	1.5	-	-
	강재 또는 강재와 콘크리트 합성	-	-	-	5.0	3.0
횡잔교 (Marginal wharf)	PS콘크리트	2.0	5.0	2.5	-	-
	강재 또는 강재와 콘크리트 합성	-	-	-	5.0	3.0

[참고]

(1) 연성계수

기능수행 수준의 지진은 대상구조물에 발생하는 변형을 탄성한도 내에서 거동하도록 규정하지만, 붕괴방지 수준의 지진은 구조물에서 발생하는 소성변형을 허용한다.

연성거동이 보장되어 구조물이 비탄성 거동을 하게 되면 탄성거동을 하는 경우보다 부재력이 작아진다.

말뚝구조물의 경우 이를 고려하기 위하여 부재 설계 시 탄성해석으로 구한 탄성지진력을 연성계수를 사용하여 수정하게 된다. 즉 지진에 의한 탄성지진력을 연성계수로 나눈

값이 지진에 대한 설계부재력이 되며 다른 하중(고정하중, 활하중 등)에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안전성을 검토하면 된다.

연성계수는 두 가지 측면에서 고려할 수 있는데 하나는 말뚝의 최대곡률과 항복응력상태의 곡률의 비이고, 또 다른 하나는 말뚝의 최대 변위와 항복응력상태의 변위의 비이다. 이를 각각 곡률연성계수와 변위연성계수로 정의할 수 있으며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

① 곡률연성계수

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_{\max}}{\phi_y} \quad \text{참고 식 (4.1-5)}$$

여기서, $\phi_{\max}$: 최대소성변형 곡률
 ϕ_y : 항복상태 곡률

② 변위연성계수

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \quad \text{참고 식 (4.1-6)}$$

여기서, $\Delta_{\max}$ 는 소성변형과 탄성변형의 합을 의미하고 Δ_y 는 탄성변형을 의미한다. 해석적인 방법으로 연성계수를 구할 때 Δ_y 는 콘크리트 말뚝의 경우 철근이 최초로 항복하는 시점에서의 변위이고, 강말뚝인 경우는 부재가 최초로 항복을 하는 시점에서의 변위이다.

곡률연성계수와 변위연성계수 중 후자가 구조적인 접근에 더 용이하기 때문에 연성계수로는 변위연성계수를 사용하는 것이 일반적이다. 이 방법으로 각 구조물에 적합한 연성계수를 결정할 수 있으나 이 방법은 복잡한 절차를 필요로 하므로 해설 표 (4.1-2)와 같이 제시된 연성계수를 사용하여 설계에 적용할 수 있다.

특히, 지반 내에서 말뚝의 소성변형이 크게 일어나게 되면 보수가 어려워진다.

따라서 연성계수를 작게 하여 설계하여야 하고 말뚝두부에서의 소성변형은 보수가 용이하므로 큰 값의 연성계수를 사용할 수 있다. 돌출잔교 및 디테치드 피어의 연성계수가 횡잔교의 연성계수보다 작은 값을 가지는데 이는 돌출잔교 및 디테치드 피어의 말뚝 길이가 횡잔교의 말뚝길이보다 길기 때문이다. 연성계수는 말뚝의 길이에 반비례하기 때문에 말뚝의 길이가 길어지게 되면 연성계수의 값을 작게 제한하며, 경사 말뚝의 경우 연성을 감소시키는 경향이 있으므로 그 유무에 따라서 값이 달라질 수 있다. 따라서 경사말뚝을 설계할 때에는 말뚝두부의 연성이 충분히 확보되었는지 확인한다.

4.1.10 지반의 액상화

- (1) 항만 및 어항 시설물이 위치한 연안지역의 지반은 지진 시 지반 액상화가 발생하여 시설물에 피해를 줄 수 있으므로 이에 대한 영향을 고려하여야 한다.

- (2) 액상화의 예측 판정은 항만 및 어항 시설물의 내진등급에 관계없이 예비평가, 간이평가, 상세평가의 3단계로 구분하여 수행한다.
- (3) 액상화 예비평가는 수집한 관련 자료에 근거하여 지반의 액상화 가능성에 대하여 개괄적으로 판단하고, 액상화 가능성이 매우 낮을 경우에 액상화 평가는 생략이 가능하다.
- (4) 액상화 간이평가는 표준관입시험값, 콘관입시험값, 전단파속도 측정값 등 2가지 이상의 현장시험결과를 이용하고, 지반의 액상화 전단저항능력비와 지진시 발생하는 진동전단응력비의 비교를 통하여 안전율이 1.0이상이면 액상화에 대하여 안전한 것으로 판정하고, 액상화 상세평가는 생략할 수 있다.
- (5) 액상화 상세평가는 실내진동시험 등을 이용하고, 지반의 액상화 전단저항능력비와 지진시 발생하는 진동전단응력비의 비교를 통하여 안전율이 1.0이상이면 액상화에 대하여 안전한 것으로 판정한다.
- (6) 액상화 간이평가, 상세평가 결과 일부 지층에서 액상화에 대하여 불안정한 경우 액상화 발생 가능성 지수(Liquefaction Potential Index, LPI)를 이용하여 종합적으로 판정할 수 있다.
- (7) 액상화 상세평가결과로부터 액상화 대책이 필요한 경우에는 구조물의 기능유지를 위한 적절한 대책공법을 수립하여야 한다.

[해 설]

(1) 액상화의 예측 판정을 위한 액상화 평가

- ① 액상화의 예측 판정은 붕괴방지 수준에서 행한다.
- ② 설계지진 규모는 지진구역 I, II모두에 대하여 리히터 규모 6.5를 적용한다.
- ③ 액상화 평가를 생략할 수 있는 조건은 다음과 같다.

가. 지하수위 위의 지반

나. 대상지반심도가 20m 이상인 지반(단, 20m 이상인 지반이더라도 액상화가 발생하는 경우에 구조물에 중대한 손상이 생긴다고 판단되거나, 분명히 상부 20m 토층과 연관이 있는 층이라고 판단되는 경우는 액상화 예측 판정을 시행한다.)

다. 상대밀도가 80% 이상인 지반

라. 주상도상의 표준관입저항치(N)에 기초하여 산정된 $(N_1)_{60}$ 이 25 이상인 지반

마. 주상도상의 콘관입저항치에 기초하여 산정된 q_{c1} 이 13 MPa 이상인 지반

바. 주상도상의 전단파속도에 기초하여 산정된 V_{s1} 이 200 m/sec 이상인 지반

사. 지반조사 결과로부터 세립토 함유량(#200체 통과중량백분율)이 35% 이상인 경우, 원위치시험법에 따른 다음과 같은 지반

(가) $(N_1)_{60}$ 이 20 이상인 지반

(나) q_{c1} 이 7 MPa 이상인 지반

(다) V_{s1} 이 180 m/sec 이상인 지반

(2) 액상화 평가 시 고려사항

① 액상화 평가에 필요한 기본 자료는 다음과 같다.

가. 지질 및 지형에 대한 자료

나. 입도분포, 밀도, 지하수위

다. 변형률 수준에 따른 각 지층의 전단탄성계수와 감쇠비

라. 현장시험(예, 표준관입 시험값)이나 실내시험(예, 진동삼축시험 [cyclic triaxial test])자료

마. 설계 지진규모(최대 지반가속도와 지속시간)

② 대상지반의 주상도와 입도분포자료로부터 액상화 평가가 필요한 지역으로 판단되면 대상지반에 대해 지진응답해석을 수행한다. 지진응답해석은 변형률 수준별 전단탄성계수(G/G_{max}) 및 감쇠비(D)를 이용하며 표준설계응답 스펙트럼에 부합하는 실지진 및 인공지진 가속도 시간이력에 대하여 수행하여야 한다.

③ 지진응답해석을 통해서 대상지층의 최대 지반가속도를 산정한다.

④ 액상화 상세평가가 필요하다고 판단되는 경우에는 반드시 실내 변형특성 평가시험 결과를 이용하여 지진응답해석을 수행하고, 액상화 전단저항응력비는 진동삼축시험 결과를 이용한다.

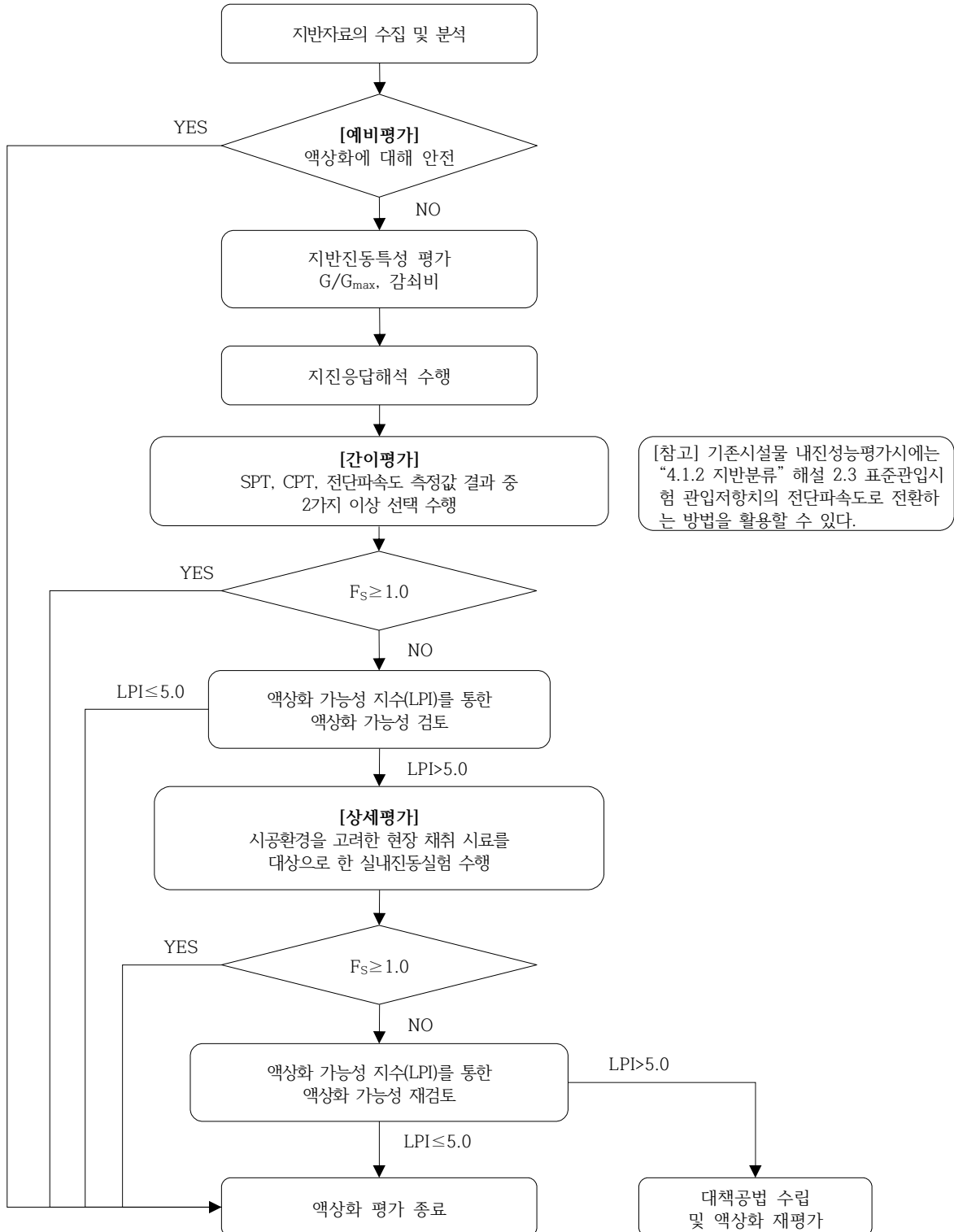
⑤ 기초지반위에 성토구조물이 놓인 경우, 성토부에 대한 액상화 평가는 반드시 실시한다.

(3) 액상화 대책

액상화 예측판정결과 액상화 대책이 필요한 경우에는 구조물의 기능유지를 위한 적절한 대책공법을 수행한다. 이 때, 연약지반 처리가 선행되는 경우, 이를 고려하여 대책 공법을 선정한다.

[참 고]

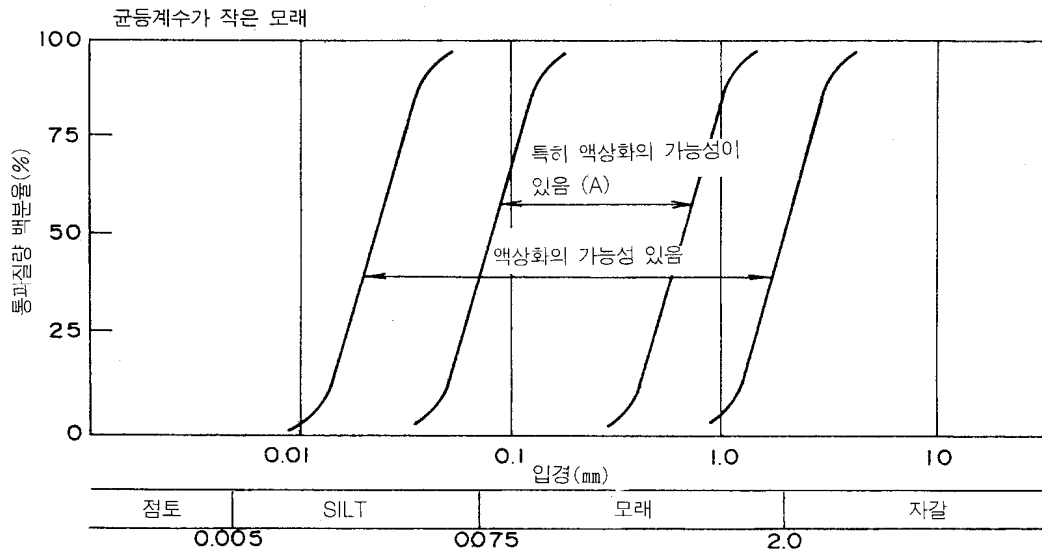
(1) 액상화 평가는 다음 과정에 따라 실시한다.



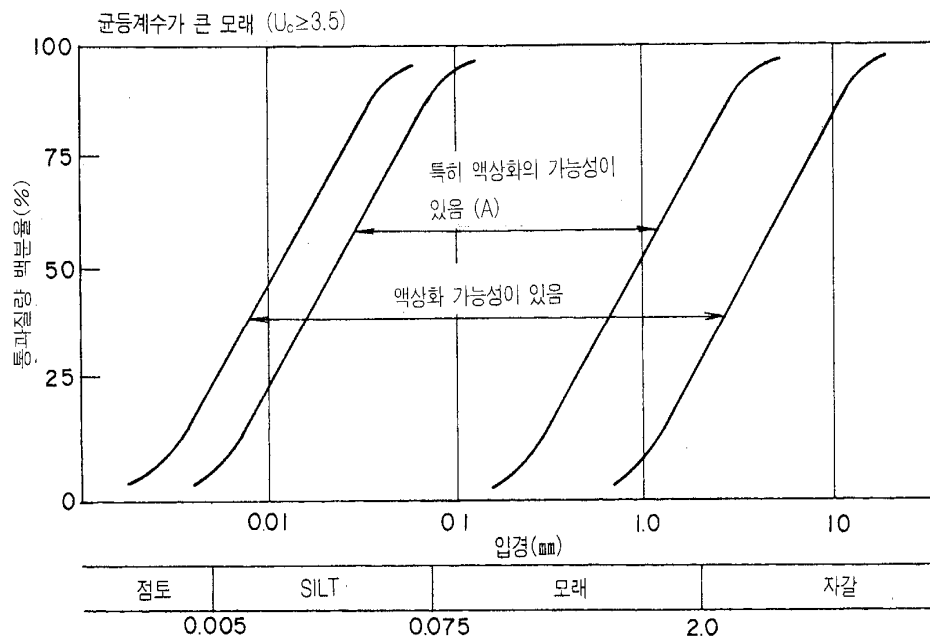
참고 그림 (4.1-2) 액상화 평가 흐름도

(2) 입도에 의한 예측판정

참고 그림 (4.1-3)를 이용하여 입도에 의한 흙의 분류를 한다. 이때, 균등계수의 대소에 따라 그림 (a), (b)로 구분한다. 균등계수의 대소는 $C_u = D_{60}/D_{10} = 3.5$ 가 기준이 된다. 참고 그림 (4.1-3)에서 C_u : 균등계수, D_{60} : 60%직경, D_{10} : 10%직경(유효경)이고 입도분포곡선이 액상화의 가능성이 있음의 범위 밖이면 액상화하지 않는 것으로 판정한다.



(a) 균등계수가 3.5보다 작은 사질토($C_u < 3.5$)



(b) 균등계수가 3.5보다 큰 사질토($C_u \geq 3.5$)

참고 그림 (4.1-3) 균등계수에 따른 흙 분류

(3) SPT-N 값을 이용한 액상화 간이평가

액상화 지역의 지반거동을 해석적이나 물리적으로 모형화하기 어려우므로 Seed·Idriss(1971)의 간편법을 국내 실정에 맞게 수정한 방법을 통해 액상화에 대한 안전율을 산정한다.

① 액상화에 대한 안전율은 지진 시 발생하는 지반 내 한 점의 진동전단응력비(CSR: Cyclic Stress Ratio, τ_d/σ_v')와 액상화 전단저항응력비(CRR: Cyclic Resistance Ratio, τ_l/σ_v')를 비교하여 산정한다.

② 지진력을 표현한 진동전단응력비(τ_d/σ_v')는 다음과 같이 산정한다.

$$\frac{\tau_d}{\sigma_v'} = 0.65 \left(\frac{A_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \right) \quad \text{참고 식 (4.1-7)}$$

여기서, $A_{\max}$: 액상화 평가 대상지반의 최대 지반가속도

g : 중력가속도

σ_v : 액상화 평가 깊이에서의 총 상재압

σ_v' : 액상화 평가 깊이에서의 유효 상재압

수정 Seed·Idriss의 방법은 지진응답해석을 수행하여 지반의 각층별 최대가속도($A_{\max}$)를 산정함으로써, 지반계수와 응력감소계수를 사용하지 않고 지반의 동적특성을 반영한 최대전단응력비를 필요한 깊이에서 직접 구하는 것이 특징이다. 단, 지진 응답해석 시 사용할 수 있는 지진파는 장주기 성분과 단주기 성분이 우세한 지진 모두를 고려할 수 있도록 선택하여야 한다.

③ 액상화 전단저항응력비(τ_l/σ_v') 산정 시에는 표준관입시험(SPT) 결과인 N값을 이용하는데 그 방법을 살펴보면 다음과 같다.

가. 상재하중에 대한 보정(C_N)

$$C_N = (P_a/\sigma_{vo}')^{0.5} \quad (\text{Liao and Whitman, 1986}) \quad \text{참고 식 (4.1-8)}$$

$$C_N = \frac{2.2}{(1.2 + \sigma_{vo}'/P_a)} \quad (\text{Kayen et al., 1992}) \quad \text{참고 식 (4.1-9)}$$

여기서, P_a : 1 atm (100kPa)

σ_{vo}' : 액상화 평가대상 깊이에서의 유효상재하중(kPa)

나. SPT 에너지비 60%에 대한 보정(C_E)

$$C_E = \frac{ER}{60} \quad \text{참고 식 (4.1-10)}$$

여기서, ER = 시험 시 에너지 효율

다. 룯드의 길이에 대한 보정(C_R)

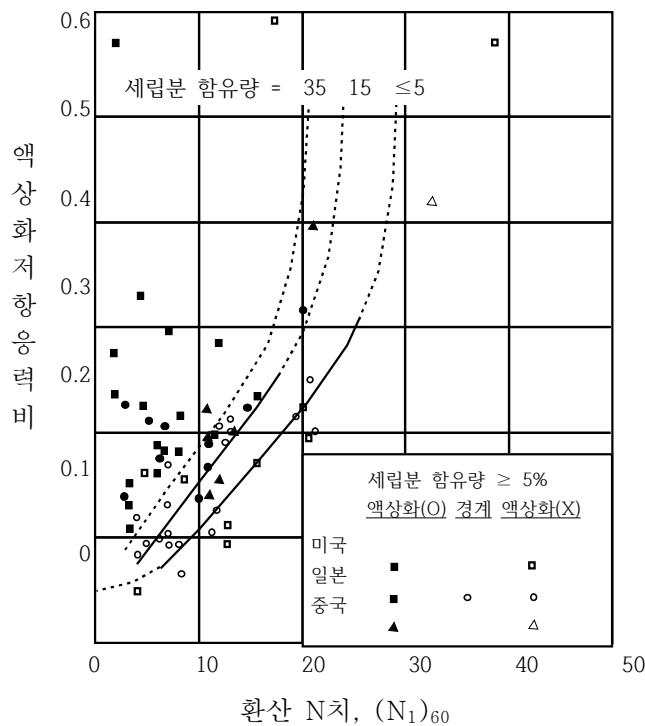
룯드의 길이가 3m 미만일 경우 0.75를 사용(Robertson·Wride(1998))하며, 룯드의 길이가 3m이상인 경우 SPT 결과를 이용한 액상화 간이평가시 참고 표 (4.1-9)을 참고한다.

라. 굴착홀 직경에 대한 보정(C_B) 및 샘플링 방법에 따른 보정(C_S)

표준관입시험의 N 치에 대한 보정계수는 참고 표 (4.1-9)을 참고할 수 있다.

마. 가.~라. 에서 구한 보정계수를 이용하여 환산 N 치, $(N_1)_{60}$ 을 구하는 식은 KDS 64 11 00 지반(2.4.1 표준관입시험)의 참고 식 (2.4-1)을 참고할 수 있다.

바. 산정된 환산 N 값으로부터 지진규모 7.5기준의 참고 그림 (4.1-4)을 이용하여 액상화 전단저항응력비를 산정한다. 참고 그림 (4.1-4)에서 액상화 전단저항응력비 산정 시 세립질 함유량을 고려할 수 있다.



참고 그림 (4.1-4) 환산 SPT-N치에 기초한 액상화 전단저항응력비 산정곡선 (지진 규모 = 7.5)

사. 산정식을 이용한 액상화 전단저항응력비를 산정할 경우 다음 참고 식 (4.1-11)을 이용한다.

$$\left(\frac{\tau_l}{\sigma_v'} \right)_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad \text{참고 식 (4.1-11)}$$

세립분 함유량이 5% 이상인 경우, 참고 식 (4.1-12)을 이용하여 산정된 $(N_1)_{60CS}$

값을 $(N_1)_{60}$ 부분에 대입하여 액상화 전단저항응력비를 산정한다. 이 때, 산정된 액상화 전단저항응력비는 지진규모 7.5에 대한 값이다.

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad \text{참고 식 (4.1-12)}$$

여기서, 세립질 함유량을 고려한 α 와 β 값은 참고 표 (4.1-11)에 제시되어 있으며 FC는 200번체 통과율이다.

아. 지진의 규모 $M=7.5$ 에서 구한 값에 지진의 규모에 대한 보정값(MSF)을 곱하여 $M=6.5$ 로 환산한다. 지진 규모에 따라 제안된 보정값(MSF)은 참고 표 (4.1-10)에 나타내었다. 본 설계기준에서는 보정값(MSF)으로 1.5를 추천한다.

$$CRR_{(M=6.5)} = CRR_{(M=7.5)} \times MSF \quad \text{참고 식 (4.1-13)}$$

자. 지반의 액상화 전단저항응력비와 지진 시 발생하는 진동전단응력비의 비교를 통해 참고 식 (4.1-14)과 같이 안전율을 산정함으로써 액상화를 평가한다.

$$F_S = \frac{\tau_l / \sigma_v'}{\tau_d / \sigma_v'} \quad \text{참고 식 (4.1-14)}$$

여기서, τ_d / σ_v' : 진동전단응력비(CSR: Cyclic Stress Ratio)

τ_l / σ_v' : 액상화 전단저항응력비(CRR: Cyclic Resistance Ratio)

참고 표 (4.1-9) 표준관입시험 N치에 대한 보정계수 (Robertson and Wride, 1998)

계 수	이용 장치	항 목	수 정
상재압	-	C_N	$C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^{0.5}$
상재압	-	C_N	$C_N \leq 2$
에너지 비	도넛 해머	C_E	0.5-1.0
에너지 비	안전 해머	C_E	0.7-1.2
에너지 비	자동 선단 도넛 해머	C_E	0.8-1.3
굴착흙 직경	65-115mm	C_B	1.0
굴착흙 직경	150mm	C_B	1.05
굴착흙 직경	200mm	C_B	1.15
로트 길이	3m이상-4m미만	C_R	0.75
로트 길이	4m이상-6m미만	C_R	0.85
로트 길이	6m이상-10m미만	C_R	0.95
로트 길이	10m이상-30m미만	C_R	1.0
샘플링 방법	표준 샘플러	C_S	1.0
샘플링 방법	선 없는 샘플러	C_S	1.1-1.3

내진

참고 표 (4.1-10) 지진의 규모에 대한 보정을 위한 보정값(MSF)

M_w	규모에 대한 보정계수				
	Seed·Idriss (1982)	Idriss (1996)	Ambraseys (1988)	Youd· Nobel P<32%	Arango (1996)
5.5	1.43	2.20	2.86	3.42	3.00
6.0	1.32	1.76	2.20	2.35	2.00
6.5	1.19	1.44	1.69	1.66	1.60
7.0	1.08	1.19	1.30	1.20	1.25
7.5	1.00	1.00	1.00	-	1.00
8.0	0.94	0.84	0.67	-	0.75
8.5	0.89	0.72	0.44	-	

참고 표 (4.1-11) 세립질 함유량을 고려한 보정계수 (Youd et al., 2001)

구분	$FC \leq 5\%$	$5\% \leq FC \leq 35\%$	$FC \geq 35\%$
α	0	$\exp[1.76 - (190/FC^2)]$	5
β	1	$[0.99 + (FC^{1.5}/1,000)]$	1.2

(4) CPT- q_c 값을 이용한 액상화 간이평가

콘 관입시험값을 이용하여 액상화 전단저항응력비(CRR)산정은 다음과 같이 산정할 수 있다.

- ① 유효상재압에 대한 보정을 위해 유효상재압 보정계수를 참고 식 (4.1-15)을 이용하여 산정한다.

$$C_q = \frac{1.8}{0.8 + \sigma'_0 / \sigma'_{ref}} \quad \text{참고 식 (4.1-15)}$$

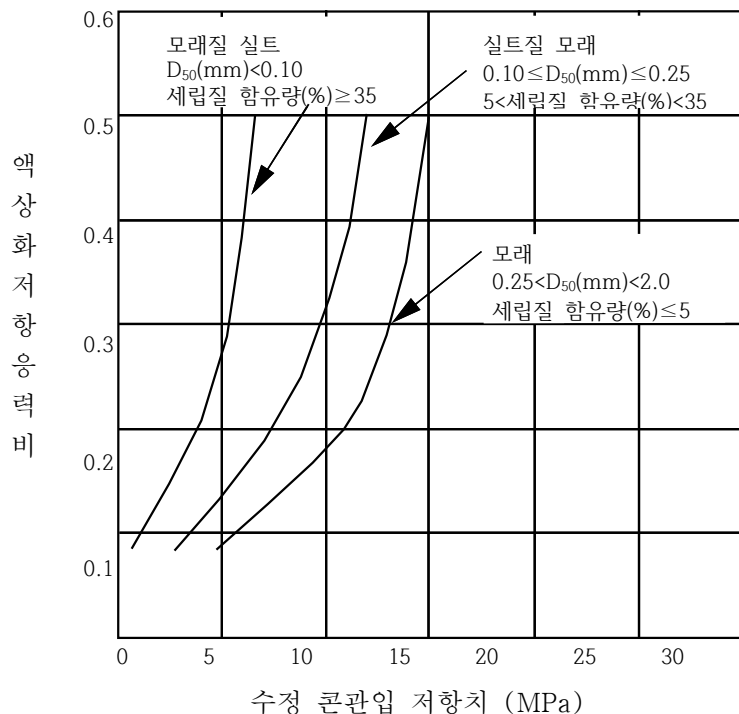
여기서, σ'_0 : 액상화 평가깊이에서의 총 유효상재압

σ'_{ref} : 대기압(100kPa)

- ② 보정계수를 사용하여 콘의 선단지지력 q_c 값을 보정한 q_{c1} 값을 다음과 같이 산정한다.

$$q_{c1} = C_q \cdot q_c \quad \text{참고 식 (4.1-16)}$$

- ③ 주어져 있는 세립분 함유량 및 입도 분포 특성과 위에서 산정된 q_{cl} 값을 Stark·Olson의 도표에 적용하여 $M=7.5$ 에 대한 액상화 전단저항응력비를 산정한다. Stark·Olson의 도표는 참고 그림 (4.1-5)과 같다.
- ④ 지진의 규모 $M=7.5$ 에서 구한 값에 지진의 규모에 대한 보정값(MSF)를 곱하여 $M=6.5$ 로 환산한다. 이때 환산은 참고 식 (4.1-13)과 참고 표 (4.1-10)을 이용한다.
- ⑤ 지반의 액상화 전단저항응력비가 산출되면 참고 식 (4.1-7)을 이용하여 지진 시 발생하는 진동전단응력비를 산정하고, 안전율을 참고 식 (4.1-14)로부터 구하고 액상화를 평가한다.



참고 그림 (4.1-5) 수정 콘관입저항치에 기초한 액상화 전단저항응력비 산정곡선
(Stark and Olson 방법, $M=7.5$)

(5) 전단파속도를 이용한 액상화 간이평가

지반의 전단파 속도를 이용하여 액상화 전단저항응력비 산정은 다음과 같이 수행할 수 있다.

- ① 유효상재압에 대해 보정된 V_s 값인 V_{s1} 을 다음과 같이 계산한다.

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{P_a}{\sigma'_0} \right)^{0.25} \quad \text{참고 식 (4.1-17)}$$

여기서, σ'_0 : 액상화 평가대상 깊이에서의 총 유효상재압

P_a : 대기압(100 kPa)

내진

- ② 주어진 세립분 함량에 따라 V_{s1C} 값을 산정한다.

세립분 함유량 < 5% 인 경우, $V_{s1C} = 215 \text{ m/s}$

세립분 함유량 $\geq 35\%$ 인 경우, $V_{s1C} = 200 \text{ m/s}$

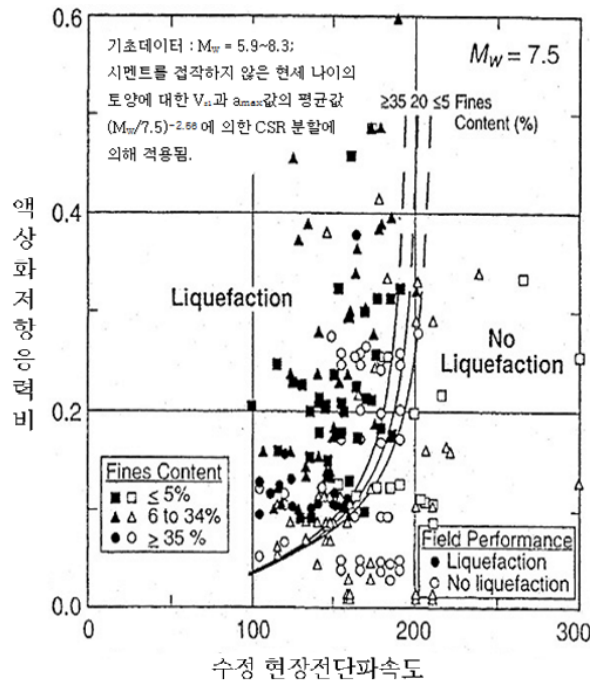
이 사이구간에서는 선형 보간을 실시한다.

- ③ 다음의 식에 V_{s1} 과 V_{s1C} 값을 대입하여 $M = 7.5$ 에 대한 액상화 전단저항능력비를 산정한다.

$$CRR = a \left(\frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left[\frac{1}{V_{s1C} - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1C}} \right] \quad \text{참고 식 (4.1-18)}$$

a, b : 곡선적합계수(Curve fitting parameter, a=0.022, b=2.8)

- ④ 참고 식 (4.1-18)에 기초하여 보정한 수정 현장전단파속도와 참고 그림 (4.1-6)을 이용하여 $M=7.5$ 에 대한 액상화 전단저항능력비를 산정할 수 있다.
- ⑤ 지진의 규모 $M=7.5$ 에서 구한 값에 지진의 규모에 대한 보정값(MSF)을 곱하여 $M=6.5$ 로 환산한다. 이때 환산은 참고 식 (4.1-13)과 참고 표 (4.1-10)을 이용한다.
- ⑥ 지반의 액상화 전단저항능력비가 산출되면 참고 식 (4.1-7)을 이용하여 지진 시 발생하는 진동전단응력비를 산정하고, 안전율을 참고 식 (4.1-14)로부터 구하고 액상화를 평가한다.



참고 그림 (4.1-6) 수정 현장전단파속도에 기초한 액상화 전단저항능력비 산정곡선 ($M=7.5$)

- (6) 액상화 간이평가 결과 안전율이 1.0이상인 지반은 액상화에 대해 안전하다고 판단하며, 안전율이 1.0 미만인 경우에는 상세평가를 후속하여 수행하고, 액상화 발생지층이 국한되는 경우 액상화 발생 가능성 지수(LPI)를 통하여 종합적으로 판단할 수 있다.

(7) 액상화 발생 가능성 지수 (Liquefaction Potential Index, LPI)

액상화 간이평가를 통해 매립지반이나 성토지반에 국부적으로 액상화 발생이 예측된 경우이거나 일부 국한된 원지반에서 액상화 발생이 예측된 경우에는 액상화 발생 가능성 지수(LPI)의 산정을 통해 지반의 액상화 발생 가능성을 종합적으로 평가할 수 있으며, 액상화 발생 가능성 지수(LPI)는 매립지반, 성토지반, 원지반에 대한 액상화 가능성을 평가하는데 적용해야 하며, 시설물의 안정성 평가를 위해서는 별도의 검토를 수행해야 한다.

액상화 가능성 지수는 표준관입저항치를 이용하여 액상화에 대한 재해도를 작성할 수 있도록 Iwasaki(1978)에 의해 제안되었으며, 식 참고(4.1-19)과 같이 액상화에 대한 안전율을 이용하여 대상 지점을 대표할 수 있도록 액상화 가능성 지수를 정량화하였다.

$$LPI = \int_0^{20} F(z) w(z) dz \quad \text{참고 식 (4.1-19)}$$

여기서, z : 대상지반의 심도

$F(z)$: 액상화에 대한 안전율(F_s)함수

$F(z) < 1.0$ 경우, $F(z)=1-F_s$

$F(z) \geq 1.0$ 경우, $F(z)=0$

$w(z)$: $10-0.5z$

$w(z)$ 는 가중치로서 지반 심도가 깊어질수록 유효구속압의 영향 등으로 액상화 발생 가능성이 낮아지는 것에 기초한 것으로 나타낸다. 위의 식으로 얻어지는 LPI의 범위는 0에서 100으로 LPI값에 따른 액상화 위험도 등급은 참고 표 (4.1-12)과 같다.

참고 표 (4.1-12) LPI 범위에 따른 액상화 피해정도

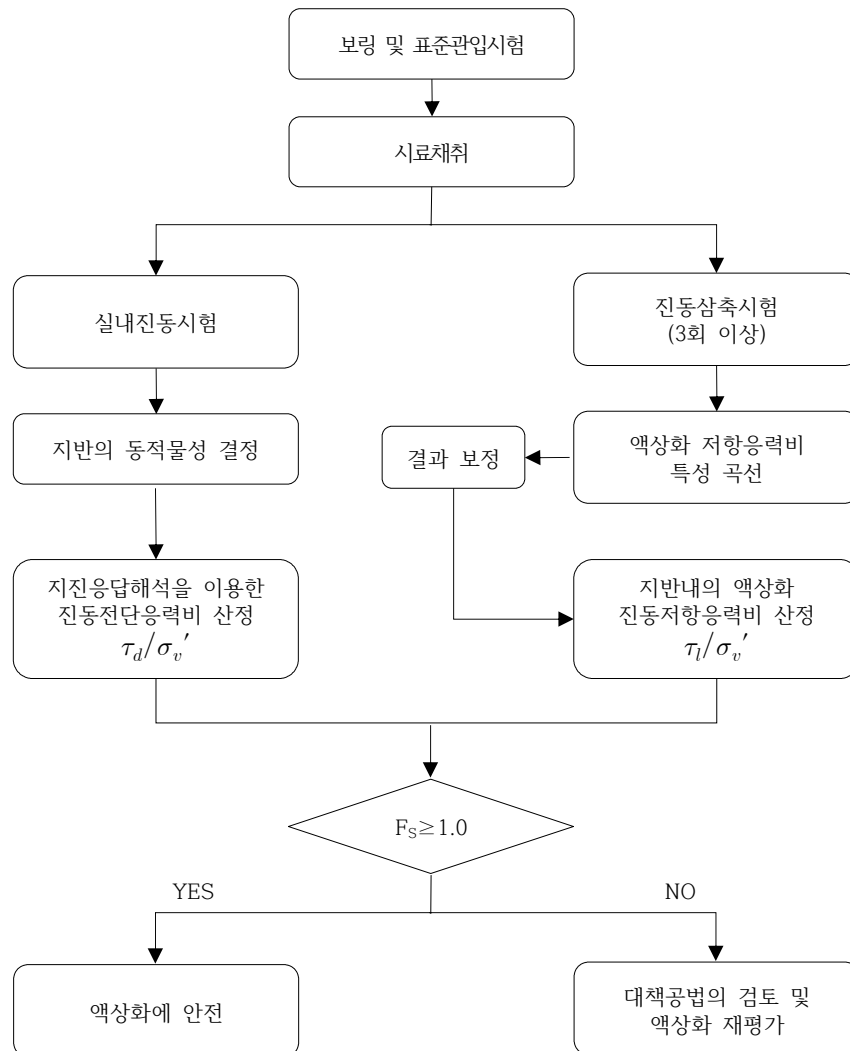
LPI 범위	액상화 위험도 등급
0	액상화 발생 가능성 없음
$0 < LPI \leq 5$	액상화 발생 가능성 낮음
$5 < LPI \leq 15$	액상화 발생 가능성 있음
$15 < LPI$	액상화 발생 가능성 높음

주) 「中部圏・近畿圏の内地地震に係る被害想定手法について」(중앙방재회의사무국, 2007)

액상화 발생 가능성 지수(LPI) 값이 $0 < LPI \leq 5$ 인 경우에도 시설물의 중요도, 특히, 특수구조물(위험물 매설관로 등)이 있는 경우 상세조사(평가)를 수행하여야 하며, 평가결과에 따라 액상화 대책 등을 수립하여야 한다.

(8) 액상화 상세평가

대상지반의 액상화 간이평가 결과 안전율이 1.0 미만이고 액상화 발생 가능성 지수 (LPI)값이 5이상인 경우에는 참고 그림 (4.1-7)과 같이 지진응답해석과 실내진동시험을 이용하여 액상화 상세평가를 수행한다.



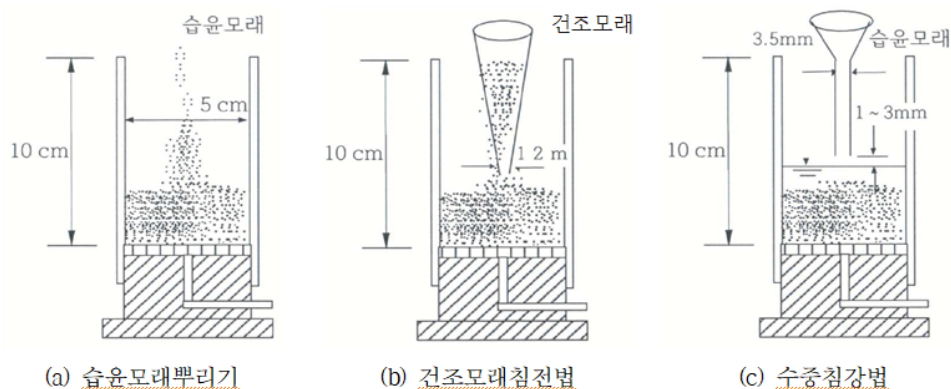
참고 그림 (4.1-7) 액상화 상세 평가방법의 순서도

- ① 액상화 상세평가는 참고 식 (4.1-7)을 이용하여 산정한 진동전단응력비와 진동삼축시험을 이용하여 산정한 액상화 전단저항응력비를 비교한 액상화 평가안전율을 그 기준을 삼는다. 특히 지진응답해석 시에는 공진주시험 또는 진동삼축시험 등의 실내진동시험을 이용하여 동적물성을 산정하고 이를 이용하도록 한다.
- ② 진동삼축시험을 수행하는 경우 다음과 같이 전단저항응력비를 구한다.
 - 가. 진동삼축시험 과정은 크게 네 단계로 구분한다. 첫 번째 단계는 현장상태를 그대로 재현할 수 있는 공시체를 제작하는 과정이다. 이러한 현장지반의 동적물성은 상대밀도, 응력상태, 결합구조, 변형률 이력 등의 여러 가지 여건에 의해 영향을 받는다.

그러나 액상화 평가를 위한 시험의 경우, 비교란 사질토의 채취가 어렵고 경제적 부담이 요구된다. 시료가 교란된 경우, 상대밀도나 응력상태는 실험실에서 재현이 가능하지만 그 밖의 여러 가지 요소들은 재현이 불가능하게 된다.

따라서 실험으로부터 정확한 동적물성을 얻기 위해서는 시료를 대상지반으로부터 채취할 때 교란이 되지 않게 채취하는 것이 바람직하다. 그러나 불교란 시료 채취가 어려운 경우에는 원하는 상대밀도와 입도분포 그리고 No.200체 통과 함유량에 맞춰서 재성형된 시료를 사용할 수 있다.

시료의 재성형 방법은 ASTM D4253-91, D4254-93 및 JGS 0541을 참조할 수 있으며, 일반적인 시료의 재성형방법은 참고 그림(4.1-8)와 같고 가급적 시료의 포화를 원활히 하기 위해서는 수중침강법 또는 건조모래침전법을 사용하는 것이 바람직하다.



참고 그림 (4.1-8) 시료의 재성형방법

두 번째 단계는 시료의 포화단계로서 시료의 포화도는 간극수압계수, B값을 확인하여 0.97 이상의 값을 가질 때 완전 포화된 것으로 간주하도록 한다.

세 번째 단계로 완전 포화된 시료에 등방 압밀과정을 통해 초기 유효구속압을 설정하여 주며, 체적 변형률이 일정해지는 시기까지 압밀 과정을 수행한다.

네 번째 단계는 완전 포화된 시료에 축응력을 반복적으로 가하는 단계이다. 가해진 축응력은 시료에 전단력을 가하게 되며, 이와 같은 원리로 지진력을 재현하게 된다. 이와 같은 시험과정을 통해 시료의 시간에 따른 간극수압, 변위, 응력 및 응력-변형률관계 곡선 등에 대한 자료를 얻도록 한다.

하중비를 변화시키면서 시험을 반복하며 세 가지 수준 이상의 하중비를 변화시키며, 시험을 수행하여 재하 횟수-하중비 관계곡선을 구해야 대상 지반의 지진에 대한 전단저항강도비를 획득할 수 있다.

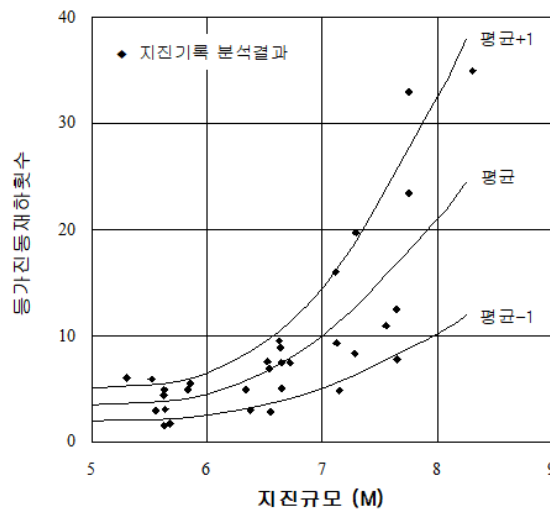
- 나. 액상화 전단저항응력비를 계산하기 위해 진동삼축시험 결과로부터 진동재하횟수에 따른 액상화 전단저항응력비 특성곡선을 산정한다. 진동삼축시험 결과를 이용하여 액상화 상세평가를 할 때에는 지진규모와 등가진동재하횟수와와의 관계를 산정한다.

내진

이와 관련하여 시드와 아드리스(Seed · Idriss)는 지진규모와 등가진동재하 횟수와의 관계를 참고 그림 (4.1-9)과 참고 표 (4.1-13)에 각각 나타내었다.

참고 표 (4.1-13)에 나타난 $0.65\tau_{\max}$ 는 불규칙한 지진하중을 실내시험에 사용하는 정현하중으로 변환하는 방법으로 여기서 $\tau_{\max}$ 는 실제 지진의 최대전단응력을 나타낸다(Seed et al, 1975).

진동삼축시험에서는 일반적으로 정현파의 진동하중을 주기적으로 재하하며 응력수준(또는 반복하중, deviator stress)에 따라 액상화 발생시기(반복횟수 변화, 지진규모 6.5에 해당하는 반복횟수 $N=10$ 회에 해당하는 액상화 저항응력비(축차응력/2×초기유효구속압))가 변화하므로 3회이상 진동삼축시험을 실시하여 산정한다(참고 그림 (4.1-9)).



참고 그림 (4.1-9) 지진규모와 가진동재하횟수 (Seed et al, 1975)

참고 표 (4.1-13) 지진규모별 등가진동재하횟수 (Seed et al, 1975)

지진규모	$0.65\tau_{\max}$ 에 대한 등가진동재하횟수
8.5	26
7.5	15
6.75	10
6.0	5 ~ 6
5.25	2 ~ 3

다. 진동삼축시험에서는 지진 및 현장상태의 표현을 위해 몇 가지 사항을 가정하고 시험을 수행하므로 특성곡선에 이용되는 진동삼축시험 결과에 지진방향성과 현장응력 상태를 고려하기 위한 보정작업이 필요하다. 보정방법의 내용을 요약하면

참고 표 (4.1-14)와 같다. 참고 표 (4.1-14)에 나타난 것과 같이 보정계수는 제안한 사람에 따라 식의 차이는 있지만, 궁극적으로 구하는 액상화 전단저항응력비 산정을 위한 보정내용은 유사하므로 이 기준에서는 참고 표 (4.1-14)에 나타난 바와 같이 국내 액상화 평가의 경우, 정현하중을 이용한 진동삼축시험이 일반적인 점을 고려하여 현장응력상태에 대한 보정과 주응력방향의 변화에 대한 보정만을 적용한다. 설계자는 현장여건에 맞는 보정계수를 산정하여 전단저항응력비 산출 후 참고 식 (4.1-7)과 비교하여야 한다.

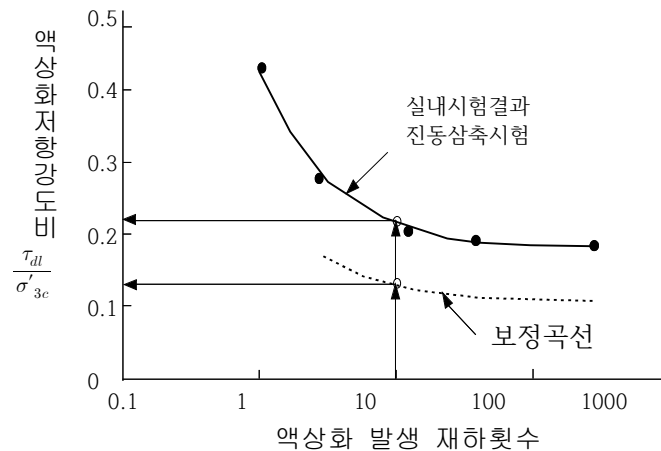
참고 표 (4.1-14) 진동삼축시험결과 보정 (PHRI, 1997)

구분	Seed·Idriss	Cumulative damage theory	Ishihara·Iwasaki
보정 계수	보정계수 = $C_r/0.65$ ($C_r:0.57(K_0=0.4)\sim 0.9$ or $1.0(K_0=1.0)$)	보정계수 = $0.9 \times (1+2K_0)/3$	보정계수 = $0.9/C_k \times (1+2K_0)/3$ 1. Ishihara $C_k = 0.55$ (충격형 : 최대전단응력의 60% 수준의 파가 3회 미만) or 0.7 (진동형 : 3회 이상) 2. Iwasaki $C_k = 0.63$
내용	- 현장응력상태에 따른 보정계수 : $(1+2K_0)/3$ - 지진파형에 따른 보정계수 : C_k - 주응력방향의 변화에 따른 보정 : 0.9		

※ Jacky 식 : $K_0=1-\sin \phi$ (ϕ : 내부마찰각, 사질토의 내부마찰각은 $25^\circ \sim 35^\circ$)

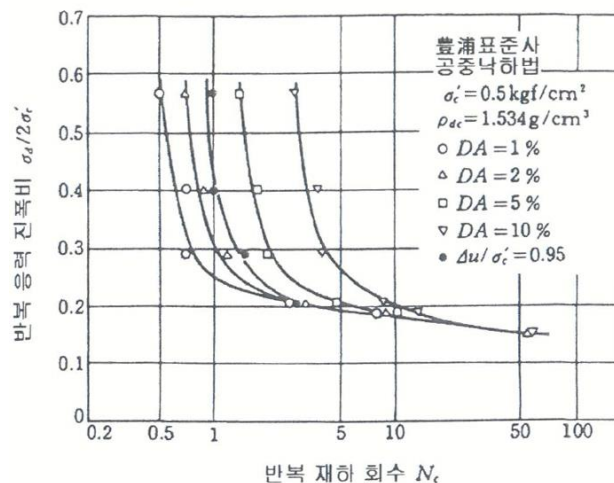
라. 액상화 상세평가 시에는 간이평가와는 달리 신뢰성 있는 정규화 전단탄성계수 (G/G_{max})와 감쇠비(Damping)값들을 사용한다. 즉, 문헌에 의한 경험식을 이용하는 간이평가와는 달리 공진주시험 등의 실내시험에 의해 지반의 동적 물성을 결정한다.

마. 액상화 전단저항응력비는 액상화 저항응력비 특성곡선에서 규정된 지진규모에 해당하는 진동재하횟수의 값으로부터 산정한다. 액상화 전단저항응력비를 산정하는 내용을 도시하면 참고 그림 (4.1-10)과 같다. 참고 그림 (4.1-10)은 정현하중이 재하된 진동삼축시험 결과를 바탕으로 액상화 평가를 위한 보정을 수행한 예이다. 참고 그림 (4.1-10)에서 5회의 진동삼축시험이 수행된 결과는 실선으로 표현되었으며 점선은 시험결과에 대해 보정계수를 적용하여 보정한 내용을 나타내고 있다. 최종 액상화 전단저항강도비는 국내 액상화 평가시 기준이 되는 지진규모 6.5에 해당하는 액상화 발생 재하횟수를 이용하여 산정하며 액상화 발생재하횟수는 10회를 통상적으로 사용한다.



참고 그림 (4.1-10) 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가 예 (PHRI, 1997)

바. 진동삼축시험은 반복 응력의 진폭에 따라 변형의 진행과 함께 단면적이 변화해 나가기 때문에 양진폭(Double Amplitude)이 증가할수록 시험의 오차가 커질 우려가 있다. 따라서 축변형률의 양진폭(DA)를 1%, 2%, 5% 및 10%에 대해 시험하고 참고 그림 (4.1-11)와 같이 그 결과의 경향을 확인하여 시험이 적절히 수행되었는지 확인하는 것이 필요하다.



참고 그림 (4.1-11) 양진폭(DA)의 변화에 따른 액상화 저항강도

사. 상세평가 시에도 간이평가와 마찬가지로 지진력에 의한 진동전단응력비를 산정하는데 예는 지진응답해석을 이용한 방법을 사용한다. 이 때, 시험에 의해 결정된 동적물성을 사용한다.

아. 상세평가 시 기준 안전율은 1.0이다. 이 때, 안전율이 1.0 이상인 경우, 액상화에 대해 안전한 것으로 판정하며 안전율이 1.0 미만 또는 액상화 발생지층이 국한되는 경우 액상화 발생 가능성 지수(LPI)를 통하여 종합적으로 판단할 수 있다. 상세평가 및 액상화 발생 가능성 지수 검토 결과 액상화에 대하여 불안정한

경우, 대책공법을 수행하거나 감소된 지반 물성 상태하에서의 지반과 구조물의 상호작용에 따른 거동분석을 실시하여 상부구조물이 액상화 지반상에서 안전성을 검토하여야 한다. 또한, 대책공법이 결정되면 공법시행 후의 지반을 대상으로 액상화 평가를 재수행하여야 한다.

(9) 유효응력개념의 수치해석은 액상화에 대한 상세평가방법이며, 설계계획상 지반-구조물의 동적해석으로 지반진동하에서의 시설물 변위를 평가하고자 하는 경우에 수행이 가능하다.

(10) 액상화 대책공법을 설계할 경우는 다음 사항을 결정할 필요가 있다.

- ① 대책공법
- ② 대책공법의 시공범위(평면 및 단면)
- ③ 대책공법의 구체적 설계

(11) 액상화 대책공법으로는 다음과 같은 방법이 있다.

- ① 과잉간극수압의 발생을 방지하는 방법
 - 가. 다짐
 - 나. 고결
 - 다. 치환
- ② 과잉간극수압을 소산하는 방법
 - 가. 배수공법(Drain재 설치)
 - 나. 치환
- ③ ① 및 ②방법을 병행 시행하는 방법

(12) 구조물의 기능을 유지하기 위하여 필요한 액상화 대책용 지반개량 범위의 결정에 있어서 다음과 같은 사항을 고려할 필요가 있다.

- ① 중력식 안벽
 - 가. 지지력에 대한 안정
 - 나. 배후의 토압에 의한 안정
 - 다. 에이프런의 침하
- ② 널말뚝식 안벽
 - 가. 널말뚝 본체의 안정
 - 나. 버팀공의 안정
 - 다. 에이프런의 침하
- ③ 잔교식 안벽 (직항식)
 - 가. 잔교본체의 안정
 - 나. 토류부의 안정
 - 다. 에이프런의 침하

(13) (12)에 나타난 안정 등의 검토 외에 원호활동에 대한 안정검토 시, 이를 확보하기 위한 개량범위를 검토해야 하는 경우, 원호활동해석은 KDS 64 11 00의 4.7에 따른다.

4.2 항만 및 어항 시설

4.2.1 항만 및 어항 시설물의 내진설계일반

- (1) 항만 및 어항 시설물은 지진하중이 포함된 하중조합에 대해서 요구 내진성능수준을 확보하여야 한다.
- (2) 비탈면은 전단파괴에 대한 안전을 확보하여야 하며 과도한 변형이 발생하지 않아야 하고 비탈면 제체 내에 액상화가 발생하지 않아야 한다.
- (3) 안벽 등 벽체구조물은 미끄러짐(활동) 파괴, 지지력 파괴, 전도 파괴, 전체 활동파괴 등에 대하여 안전해야 하며 앵커시스템은 지진 시 유발되는 토압 및 지반변형에 견딜 수 있어야 한다.
- (4) 벽체 구조물 배후 지반에 설치된 시설물에는 과도한 변형이 발생하지 않아야 하고 벽체의 구조적 요소들의 파괴도 일어나지 않아야 한다.
- (5) 잔교 등 말뚝구조물은 말뚝의 압축, 인장, 전단 등의 파괴에 안전해야 하며 지반 지지력을 확보해야 한다. 말뚝구조물 상부에 설치된 시설물에는 과도한 변형이 발생하지 않아야 한다.

[해설]

- (1) 지진하중에 대한 사면안정해석은 등가정적해석법, 동적해석법, 액상화에 따른 유동파괴 해석방법 등을 사용한다.
- (2) 벽체구조물의 설계를 위한 방법으로는 등가정적해석법, 동적해석방법 등이 있다.
- (3) 동적 토압의 크기와 합력의 작용점은 벽체의 항복형태에 영향을 받으며 정적 토압과 분리하여 고려한다.
- (4) 물과 접해있는 벽체에는 정수압, 지진발생에 의한 동수압을 고려하여야 하며 뒤채움재에 과잉간극수압이 발생할 수 있으므로 설계 시 이를 고려하여야 한다.
- (5) 지진 시 독립기초는 지지력, 전도, 활동에 대하여 안전하여야 하며 기초지반의 액상화, 지반강도 및 기초강성의 변화 등을 반영하여야 한다.
- (6) 말뚝기초의 내진설계 시에는 주변지반의 액상화 가능성, 말뚝머리의 횡방향 변위 및 침하, 말뚝재료의 파괴 가능성 등을 검토하여야 한다.

4.2.2 중력식 안벽(소형선부두 포함)

- (1) 설계지진에 대하여 미끄러짐(활동) 파괴, 전도 파괴, 지지력 파괴, 전체 활동 파괴 등에 대하여 안전하여야하며, 케이슨 등의 구조요소는 휨, 전단, 축력 등에 대해 안전하여야 한다.

- (2) 설계지진력하에서 등가정적해석법 등을 사용할 수 있으며 등가정적해석법 사용 시 구체에 작용하는 지진력은 배면지반에 대한 지진응답해석에 의한 평균응답 가속도값(A_{mean})를 적용한다.
- (3) 다음 시설물에 대해서는 감소된 값($\frac{1}{2}A_{\text{max}}$)을 적용한다.
- ① 중력식 안벽(소형선부두 포함)과 인접하여 인명 및 재산상의 피해가 발생할 수 있는 시설이 설치되지 않은 경우
 - ② 지진피해에 따라 항만 및 어항 기능이 저하되지 않는 경우
 - ③ 구조물의 중요성이 낮다고 판단되는 경우
- (4) 동적 해석이 필요한 경우 중력식 안벽(소형선부두 포함)과 기초지반 및 배후지반의 상호작용을 고려하여야 한다.

[해설]

- (1) 중력식 안벽 벽체구조물의 설계를 위한 방법으로는 등가정적 해석법, 동적 해석법 등이 있다.
- (2) 일반적으로 구조물의 중요도에 따라 내진등급을 부여하고 내진등급에 따라 해석방법을 달리한다. 항만구조물의 등급은 이 기준의 1.7설계원칙에 따르며 해설 표 (4.2-1)에 구조물의 내진등급별 해석방법을 요약하였다.

해설 표 (4.2-1) 중력식 벽체구조물의 내진등급별 설계 해석방법

내진등급	내진성능수준	해석방법
I 등급	붕괴방지수준	등가정적해석법
		동적해석법
II 등급	붕괴방지수준	등가정적해석법

(3) 하중 산정

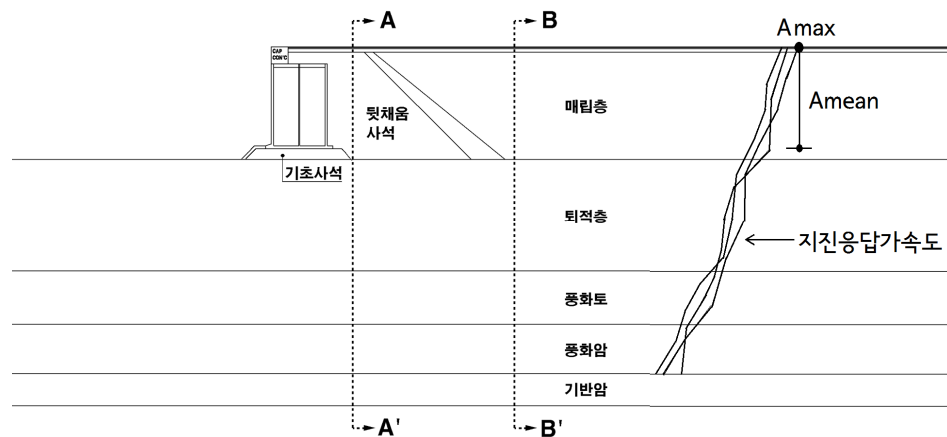
- ① 등가정적해석법으로 벽체구조물의 안정을 평가하기 위하여 정적하중, 지진 시 토압 증가, 지진 시 수압증가, 관성력 등을 결정하여야 하며, 이들 하중이 동일한 방향으로 작용된다고 가정한다.
- ② 지진 시 중력식 안벽 벽체에 작용하는 추가 외력과 하중은 이 기준의 4.1.7~4.1.9에 따른다.

(4) 설계지진력 의 결정

- ① 등가정적해석법 설계 시 설계지진력은 붕괴방지수준으로 결정하며, 4.1.1을 따른다.
- ② A_{mean} 는 안벽배면지반에서의 지진응답값의 평균값(지표면과 안벽기초면 사이의 평균값)

이다. A_{max} 는 안벽배면 지반의 최대 지진 응답가속도 값이다. A_{mean} 는 최소한 $\frac{1}{2} A_{max}$ 보다 커야 한다.

중력식안벽 배면의 지진응답해석에서 산정된 A_{mean} 과 A_{max} 는 지반 및 매립재의 전단 탄성계수 크기, 지진파의 주파수 특성, 동적 변형을 의존곡선의 특성 및 지층의 주상조건에 따라 값이 상이하게 나타난다. 이에 따라 안전측 설계를 위해 배면의 뒷채움 사석부와 매립부의 지진응답해석을 수행하여 얻은 지진응답가속도 중 큰 값을 적용한다.



해설 그림 (4.2-2) 중력식안벽의 지진응답해석 위치

- ③ 등가정적해석법을 이용한 중력식 안벽의 안정계산 시 연직지진계수(k_v)는 고려하지 않는다.

(5) 합력의 작용점

- ① 정적토압에 의한 힘의 작용점은 뒷채움부의 흙이 건조 사질토일 경우 벽체구조물의 상부에서부터 벽체 높이의 2/3아래 깊이에 있다. 지하수위가 있는 경우 수중단위중량과 지하수위를 고려하여 힘의 합력의 작용점을 계산해야 한다.
- ② 동적토압(지진에 의한 토압의 증가분)의 작용점은, 벽체구조물과 뒷채움부의 상대강성, 상대질량, 상대변위(이동)에 대한 상세 연구를 바탕으로 결정할 수 있으나, 이에 대한 연구 결과가 없을 경우에는 벽체의 중간 높이에 작용하는 것으로 가정할 수 있다.
- ③ 정수압에 의한 합력의 작용점은 지하수위 위치에서부터 포화층 높이의 2/3 아래 깊이에 있다.
- ④ 관성력은 케이슨과 케이슨 채움재의 중량 중심에 작용한다.

(6) 액상화 평가

- ① 외국의 항만구조물 지진피해사례를 보면, 피해상황의 주원인이 지반의 액상화임을 알 수 있다. 따라서 우선적으로 액상화 평가수행을 통해 기초지반과 배면지반의 안정성을 확보해야 한다. 상세내용은 4.1.10을 따른다.

- (7) 중요도가 높은 중력식 안벽에서 지진응답해석에 의해 구체에 작용하는 지진력을 결정할 때 평균응답 가속도값(A_{mean})을 사용토록 한 이유는 항만기능상 주요 계류시설 등

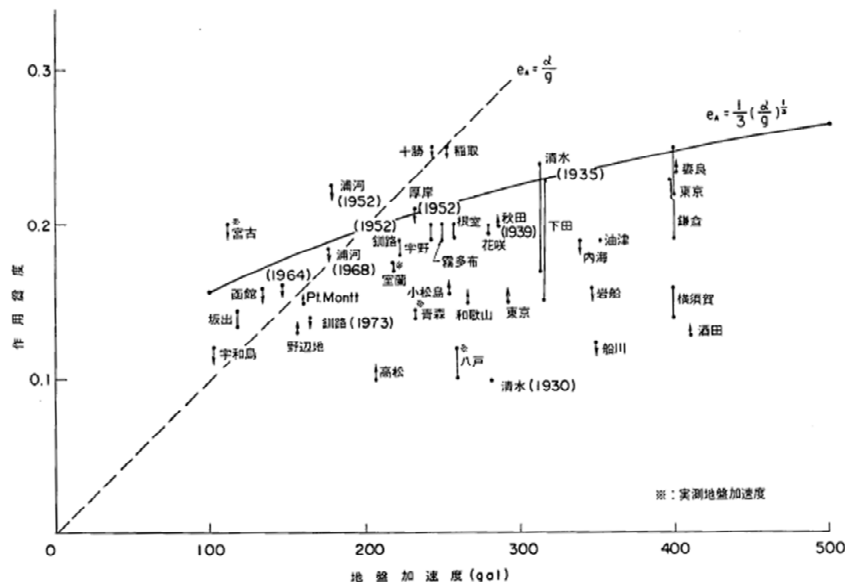
은 지진 시 붕괴방지수준의 성능을 발휘해야 함은 물론 지진 후 내륙의 지진재해복구 지원 역할 및 국가 간선물류기능과 환적기능의 역할을 수행하기 위한 즉각적인 항만 고유기능발휘가 필요하기 때문이다. 이러한 사항은 일본의 항만기준(港灣の施設の技術上の基準・同解説, 일본항만협회, 1999) 및 국내의 댐 설계기준(2011), 일본의 교량 설계기준(道路橋 示方書・同解説, 2012), 유럽표준(EU code 8 part 5 : EN 1998-5 2004) 등에서 주요 안벽 및 수리구조물, 교량 등에 요구되는 성능이다.

한편, A_{mean} 는 안벽배면 지반에서의 지진응답값의 평균값(지표면과 안벽기초면 사이의 평균값)을 취하는데 이는 지하암거 등 배면지반과 접하는 구조물에서 구조물과 배면지반이 접하는 부분에 작용하는 평균지진력을 구조물에 적용하는 점을 고려한 것이다(상수도시설 내진설계기준 연구(환경부, 1999)). 유럽표준(EU code 8 part 5 : EN 1998-5 2004)에서도 10m 이상의 옹벽 등에 동일한 개념을 사용하고 있다.

(8) A_{mean} 이 0.2g를 초과하면 아래와 같은 상한값(계수 값)을 취하는데,

$$\frac{1}{3} \left(\frac{A}{g} \right)^{\frac{1}{3}} : g \text{는 중력가속도} \quad \text{해설 식 (4.2-1)}$$

이처럼 주요 안벽구체에 작용하는 지진응답값에 상한값을 둔 이유는 「港灣の施設の技術上の基準・同解説, 일본항만협회, 1999」에서 실제 지진에 의한 피해를 입은 50여 개 항의 역 해석결과에 근거하여 지반지진력 0.2g까지는 지반지진력만큼의 지진력이 안벽에 작용하고 0.2g를 초과한 지반지진력이 작용하면 지반지진력보다 감소된 지진력이 안벽에 작용하도록 상한값을 정하고 있으므로 일본과 유사한 형태의 안벽을 설치하는 국내의 실정을 감안하여 이를 준용한 것이다.



해설 그림 (4.2-2) 「港灣の施設の技術上の基準・同解説, 일본항만협회, 1999」에서 주요 중력식 안벽 구체에 작용하는 지진력 상한값의 근거로 한 연구결과

(9) 감소된 가속도값($1/2A_{max}$)은 건축물, 하역시설(크레인 레일 포함) 등의 항만 및 어항 기능

내진

에 필수적이면서 지반변위 등을 고려하지 않는 시설물 등이 안벽에 인접하여 설치되지 않은 경우나 중요성이 낮은 안벽 등에 적용하며 항만 및 내진분야 전문가 등의 자문을 통해 적용여부를 결정하는 것이 바람직하다.

- (10) 중력식 안벽의 관성력산정을 위해 안벽의 단위중량 적용 시 수상은 전체단위중량(γ_t), 수중은 포화단위중량(γ_{sat})을 적용한다.

4.2.3 방파제

- (1) 설계지진에 대해 등가정적해석법 등을 사용할 수 있으며, 직립부의 경우 중력식안벽에 준해 안전성을 평가하며 경사면의 경우 비탈면활동파괴에 대한 안전성을 평가한다.

(2) 방파제에 작용하는 지진력은 $\frac{1}{2}A_{max}$ 를 적용한다. 다만, 지진발생시 인명피해가 예상되거나 항만 및 어항 운영상 막대한 지장을 초래하는 경우에는 A_{max} 를 적용할 수 있다. 여기서 A_{max} 는 기초지반 지표면에서의 지진응답 가속도 값이다.

[해설]

- (1) 제체의 단면이 활동안전성에 의하여 결정되는 방파제의 경우, 지진에 의하여 안정성이 저하되는 일은 거의 없으므로 지진 시의 안정성 검토는 생략할 수 있다.
- (2) 설치수심이 깊고 설계파고가 작으면서 연장이 긴 구조가 되는 경우에는 지진 시의 동수압에 의한 전도에 대하여 안정계산을 할 필요가 있다.
- 또한, 지진해일(쓰나미) 방파제의 경우 지진에 의하여 제체가 변형한 후에 지진해일이 내습할 가능성이 높으므로 지진 시의 안정성이 중요할 경우가 있다. 따라서 지진 시의 동수압에 의한 활동 및 전도에 대한 안정 계산 또는 동적해석의 수행을 통한 안정성 검토가 필요할 수 있다. 이 때, 지진 시의 동수압의 결정은 이 기준의 4.1.8에 따른다.
- (3) 지진발생 시 인명피해가 예상되거나 항만 및 어항 운영상 막대한 지장을 초래하는 경우에는 각 항만의 상황을 반영하여 항만 및 내진분야 전문가 등의 자문 통해 A_{max} 의 적용여부를 결정하는 것이 바람직하다.

4.2.4 호안

- (1) 설계지진력에 대해서 등가정적해석법 등을 사용할 수 있으며, 4.2.1 항만 및 어항 시설물의 내진설계일반의 안정성 평가를 따른다.
- (2) 호안에 작용하는 지진력은 $\frac{1}{2}A_{\max}$ 사용을 기본으로 한다. 다만, 지진발생시 인명 피해가 예상되거나 항만운영상 상당한 지장을 초래하는 경우에는 $A_{\max}$ 을 사용할 수 있다.

[해 설]

호안의 설계조건으로는 일반적으로 다음사항을 고려한다.

- (1) 파랑, 조위, 조류, 수심
- (2) 기초지반의 토질
- (3) 지진 및 지진력
- (4) 지진시의 동수압
- (5) 매립토 등의 성상
- (6) 매립지 및 호안의 이용조건
- (7) 월파의 허용도
- (8) 주변수역의 상황
- (9) 시공법(특히 체결공법)
- (10) 매립공법

단, 투기장 호안 등 매립완료시까지 상당한 시간이 소요되는 호안은 4.2.3 방파제에 준하여 호안에 작용하는 지진력을 고려해야 한다.

4.2.5 잔교식 안벽(소형선부두 포함)

- (1) 기능수행수준의 설계지진력에 대하여 주요 구성요소(부재)는 탄성 내에 거동하여야 하며 필요한 지반지지력을 확보하여야 한다.
- (2) 붕괴방지수준의 설계지진력에 대하여 주요 구성요소(부재)에 소성변형은 허용하지만 연성거동 한계내에 있어야 하며 필요한 지반지지력을 확보하여야 한다.
- (3) 기능수행 및 붕괴방지수준 지진력에 대한 안전성 검토는 등가정적해석법 등을 적용하며 중요도가 높은 구조물의 경우 잔교구조물과 기초지반의 상호작용을 고려한 동적해석을 수행한다.

내진

[해설]

- (1) 내진 I 등급 구조물의 경우, 단일모드 스펙트럼해석, 다중모드 스펙트럼해석 및 시간이력해석 중 적절한 방법을 선택하여 탄성해석 혹은 비탄성해석을 한다.
- (2) 내진 II 등급 구조물의 경우, 단일모드 스펙트럼해석 또는 다중모드 스펙트럼 해석을 사용한다.
- (3) 붕괴방지 수준의 경우, 구조부재의 소성변형을 적절히 고려할 수 있는 해석방법을 사용하여야 한다. 즉 비탄성해석을 직접 수행하여 설계 지진력을 구하거나 탄성해석에서 구한 부재력을 연성계수로 나누어 설계 지진력으로 사용한다. 연성계수는 해설 표 (4.1-2) 붕괴방지 수준에서의 연성계수의 값을 따른다. 다만, 정확한 해석을 하려면 비탄성해석을 수행하여야 하며 이 경우의 해석방법으로 동적 해석법을 사용할 수 있다.
- (4) 해석 방법은 구조물의 형태 및 구조물의 중요도에 따라서 결정하며 해설 표 (4.2-2)에 요약하였다.

해설 표 (4.2-2) 잔교식 안벽의 해석 방법

내진등급	해석방법	구조물 형태
I 등급	단일모드 스펙트럼해석 (탄성해석)	질량분포가 일정하고 일정한 정형구조를 가진 구조물로서 첫 번째 진동모드가 동적응답을 지배하는 경우
	다중모드 스펙트럼해석 (탄성해석)	비정형 구조물로서 진동모드간의 연계효과가 큰 구조물
	시간이력해석 (탄성해석, 비탄성해석)	기하학적인 형태가 복잡한 구조물중 규모면이나 건설비면에서 중요한 구조물
II 등급	단일모드 스펙트럼해석 (탄성해석)	질량분포가 일정하고 일정한 정형구조를 가진 구조물로서 첫 번째 진동모드가 동적응답을 지배하는 경우
	다중모드 스펙트럼해석 (탄성해석)	비정형 구조물로서 진동모드간의 연계효과가 큰 구조물

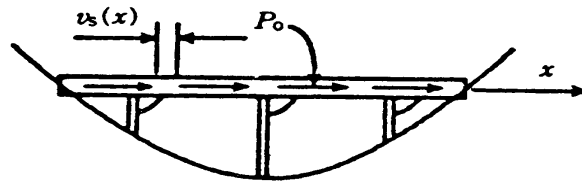
- (5) 주요 잔교는 지진 시 붕괴방지수준의 성능을 발휘해야 함은 물론 지진 후 내륙의 지진재해복구 지원 역할 및 국가 간선물류기능과 환적기능 유지역할을 위해 지진 후 즉각적인 항만고유기능발휘가 가능하도록 설계할 수 있다. 이를 위해 일본 등 외국의 사례를 참조할 수 있다.
- (6) 단일모드 스펙트럼 해석
 - ① 단일모드 스펙트럼 해석법은 구조물의 첫 번째 진동모드가 응답을 지배하는 구조물의 설계지진력을 계산하는데 사용한다.
 - ② 구조물의 진동주기를 구한 후 응답스펙트럼으로부터 탄성지진응답계수를 구하며 이로부터 등가정적하중을 구한다.
 - ③ 단일모드 스펙트럼해석법은 질량이나 강성이 급격히 변화하지 않는 구조물에 대하여 적용하는 방법이다.
 - ④ 이 방법은 구조물의 기본주기만을 가지고 지진력을 산정할 수 있는 간단한 방법으로서 구조형상이 불규칙하지 않을 경우에는 신뢰할 수 있는 방법이다.

- ⑤ 이 기준에서는 AASHTO의 단일모드 스펙트럼 해석법을 참조하였다. 단, 말뚝지지 항만구조물인 경우에는 말뚝이 조밀하고 균등하게 배열되어 있으므로 상부구조에 균등한 수평변위가 발생한다. 따라서 시간내에 부등수평 변위가 발생하는 교량과 같은 구조물에서의 변위 적분과정을 생략할 수 있어 계산이 비교적 간단하다. 등가 지진 하중을 구하는 방법은 다음과 같다.

가. 정적변위 $V_s(x)$ 의 계산

참고 해설 그림 (4.2-3)에서와 같이 분포하중 p_0 를 말뚝지지 구조물의 상판에 수평방향으로 재하하여 정적변위 $V_s(x)$ 를 구한다.

여기서 분포하중 p_0 는 구조물의 총연장에 재하되며 단위는 힘/단위길이를 하고 크기는 임의로 할 수 있다. 정적변위 $V_s(x)$ 는 길이 단위이다.



해설 그림 (4.2-3) 정적변위의 계산

나. α , β 및 γ 계산

구조물의 주기계산에 사용되는 α , 등가정적지진하중의 계산에 사용되는 β , 및 γ 는 안벽이나 잔교가 종방향 및 횡방향으로 말뚝이 조밀하게 배치되어 있는 점을 고려하면 다음 식으로 간단히 구할 수 있다.

$$\alpha = v_s L \quad \text{해설 식 (4.2-1)}$$

$$\beta = w v_s L \quad \text{해설 식 (4.2-2)}$$

$$\gamma = w v_s^2 L \quad \text{해설 식 (4.2-3)}$$

여기서, w : 구조물상부구조와 동적거동에 영향을 주는 하부구조의 단위길이당 고정하중

α , β 및 γ 의 단위는 각각 (길이²), (힘×길이), 및 (힘×길이²)이다. 구조물의 고정하중은 상부구조 및 하부구조체 뿐만 아니라 각종 부착물 등을 포함한다.

다. 구조물의 주기 계산

구조물의 주기 T 는 다음 식으로 구한다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{p_0 g \alpha}} \quad \text{해설 식 (4.2-4)}$$

여기서, g : 중력가속도 (길이/시간²)

라. 등가정적하중 계산

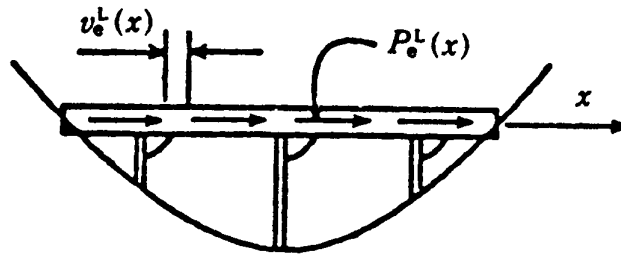
구조물의 기본진동모드에 상응하는 등가정적하중 $p_e(x)$ 은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$p_e = \frac{\beta C_s}{\gamma} w v_s \quad \text{해설 식 (4.2-5)}$$

여기서, C_s : 스펙트럼 가속도($2.5C_a$ 혹은 C_v/T)를 중력가속도 g 로 나눈 무차원 값

마. 구조물의 부재력 및 변위

해설 식 (4.2-5)에서 구한 등가정적하중 p_e 를 구조물에 재하하여 구조물의 부재력과 변위를 구한다[해설 그림 (4.2-4)].



해설 그림 (4.2-4) 등가정적하중

(7) 다중모드 스펙트럼해석

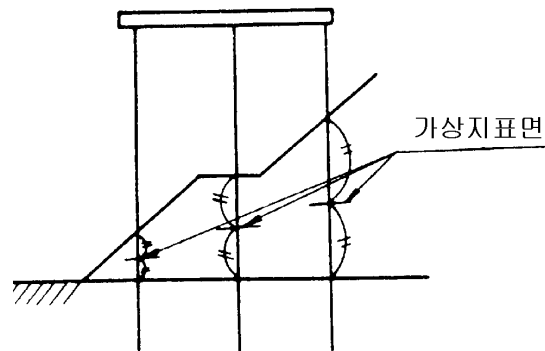
- ① 다중모드 스펙트럼 해석법은 동적해석 컴퓨터 프로그램을 사용하여야 한다.
- ② 이 방법은 각 진동모드에서 세 직교좌표계의 상관거동을 유발하는 불규칙한 형상의 구조물에 적용한다.
- ③ 이러한 구조물은 여러 개의 진동모드가 구조물의 총 거동에 복합적으로 영향을 주기 때문에 구조물의 종방향 및 횡방향에 영향을 주는 진동모드를 간단히 구별하기 어렵다. 따라서 공간 라멘구조물의 동적해석 프로그램을 사용하여 구조물의 거동에 영향을 주는 다중모드의 상관효과를 고려하여야 한다.

가. 구조물의 모형화

구조물이 종방향 및 횡방향으로 완전 대칭일 경우에는 2차원 라멘구조로 도형화할 수 있다. 완전 대칭이 아닌 구조물인 경우 3차원 공간라멘으로 모형화하는 것이 바람직하다. 구조물의 강성과 관성효과를 실제와 가깝게 이상화할 수 있도록 절점을 선정하여야 한다. 각 절점은 6개의 자유도 즉 3개의 변위와 3개의 회전자유도를 가지고 있어야 한다. 구조물의 질량은 상부구조 및 말뚝 등 관련하중을 포함하며 절점당 최소한 3개의 변위에 대한 집중질량으로 모형화하여야 한다. 집중질량을 절점에 적절히 분배함으로써 관성효과가 실제와 가깝게 반영되

도록 하여야 한다.

말뚝도 공간 라멘부재로 이상화하여야 한다. 일반적으로 기둥의 길이가 짧고 강성이 강한 기둥에 대해서는 중간 절점이 필요하지 않다. 길이가 길고 강성이 적은 기둥의 경우에는 3등분점에 절점을 두어야 한다. 말뚝의 하단은 가상지표면 아래 가상고정점 ($1/\beta$)에서 고정단으로 모형화할 수 있다. 가상지표면은 각 말뚝 축선 위의 위치에서 전면수심과 실경사면의 1/2 높이의 곳으로 본다[해설 그림 (4.2-5)].



해설 그림 (4.2-5) 가상지표면 결정

β 는 해설 식 (4.2-6)에 의하여 산정한다.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_H D}{4EI}} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad \text{해설 식 (4.2-6)}$$

여기서, K_H : 횡방향 지반반력계수 (N/cm)

D : 말뚝의 직경 또는 폭 (cm)

EI : 말뚝의 휨강성 ($\text{N}\cdot\text{cm}^2$)

횡방향 지반반력계수(K_H)는 횡방향 재하시험에 의해 구하는 것을 원칙으로 하나 실측할 수가 없을 때는 해설 식 (4.2-7)에 의하여 구할 수 있다.

$$K_H = 0.15N \quad \text{해설 식 (4.2-7)}$$

여기서, N : 지반의 $1/\beta$ 근처까지의 평균 N 치

$1/\beta$: 가상지표면에서 가상고정점까지의 거리 (cm)

말뚝 주변 지반을 스프링으로 모형화하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 보다 정밀한 해석을 수행할 수 있다. 그러나 잔교 전체의 모형화시에 말뚝에 지반 스프링을 추가하면 절점 수가 너무 많아지므로 지반스프링은 매우 특수한 경우에만 사용하는 것이 바람직하다.

나. 진동모드의 수

3차원 구조물의 주기, 진동형상 및 모드기여질량은 동적해석 프로그램을 사용하여 고려하고자 하는 방향에 대하여 구할 수 있다. 구조물의 해석시에 고려하여야 할 진동모드의 수는 첫 번째 모드에서부터 누적한 질량 참여율 값이 셋방향에 대하여 각각 90%이상이 되도록 정한다.

구조물의 전체모드를 사용하여도 동적해석 프로그램을 사용하면 계산시간이 많이 걸리지 않으므로 설계실무자는 전체모드를 사용하는 것이 편리할 것이다.

다. 모드 부재력과 변위의 조합

부재력과 변위는 동적해석 프로그램을 사용하여 각 모드별 응답성분을 조합하여 구할 수 있다. 대부분의 프로그램에는 조합하는 방법으로 제곱합평균근(SRSS; Square Root of Sum of Square) 및 완전 2차 조합(CQC; Complete Quadratic Combination)등이 사용되고 있다.

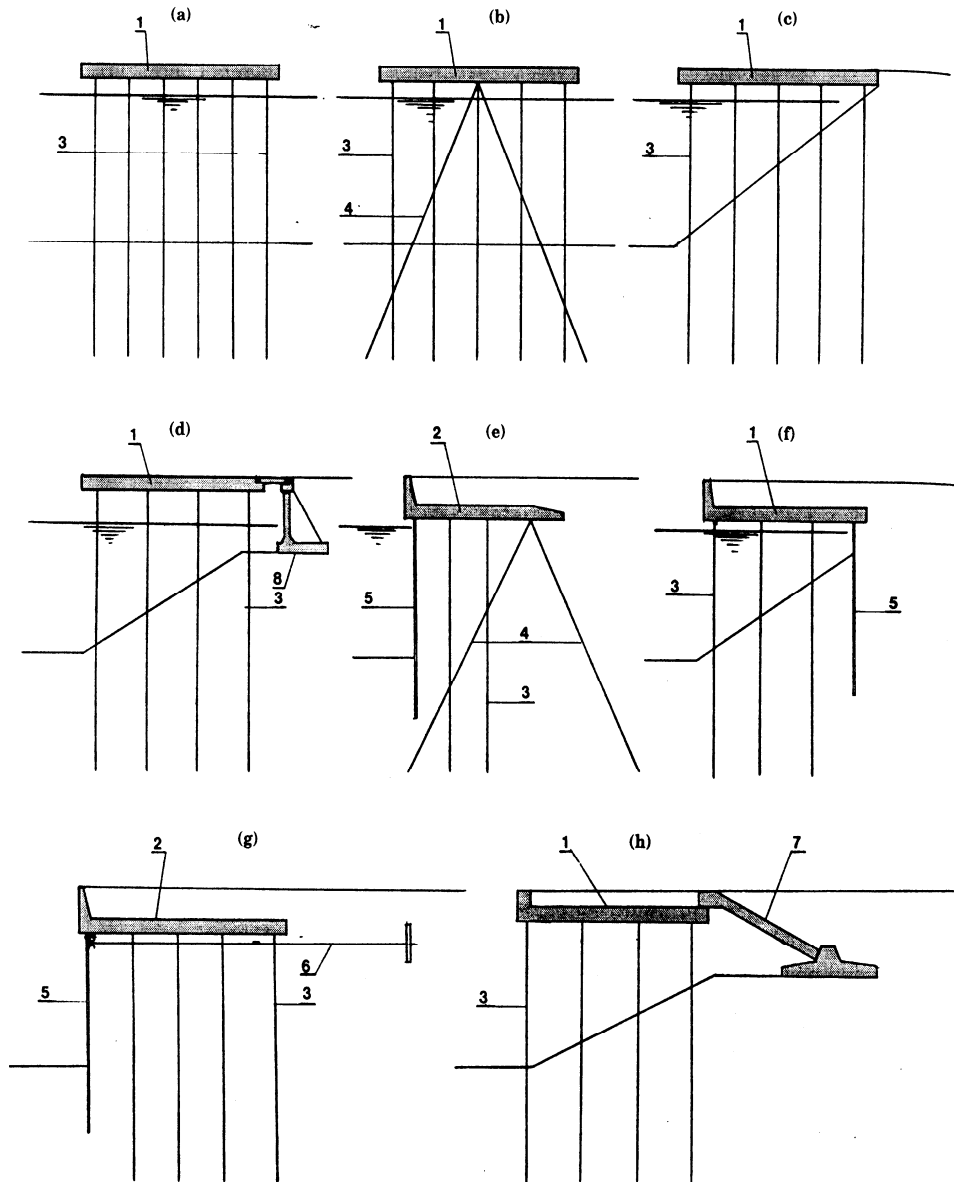
(8) 시간이력해석

- ① 시간이력해석방법은 시간과 노력이 많이 필요하기 때문에 구조물의 형태가 복잡하고 그 중요도가 매우 높은 구조물에 적용한다.
- ② 시간이력해석에 사용되는 구조물의 모형은 다중모드 스펙트럼해석에 사용한 모형과 동일한 모형을 사용하면 된다.
- ③ 입력지진으로 인공가속도 시간이력을 사용하되 응답스펙트럼과 잘 부합하는 가속도를 생성 사용하여야 한다.
- ④ 인공지진 외에도 스펙트럼과 잘 부합하도록 수정된 실지진기록을 포함한 최소 3가지 이상의 기록을 사용하여 동적해석을 수행하여야 한다.
- ⑤ 구조물의 부재력과 변위는 동적해석이 가능한 상용 프로그램을 사용하여 자동적으로 구할 수 있다.

(9) 설계요구사항

① 구조시스템

안벽은 수직말뚝으로 지지되는 모멘트 저항골조로 설계하는 것이 바람직하다. 수직말뚝으로 지지된 안벽은 유연하며 연성이 좋으며 육지쪽의 짧은 말뚝이 안벽에 작용하는 수평력을 주로 받게 된다. 경사말뚝으로 지지된 안벽의 경우 지진 시 경사말뚝과 상판의 연결부에서 파손이 쉽게 일어날 수 있으므로 경사말뚝의 설치는 가능한 지양되어야 한다. 잔교의 경우에는 말뚝의 비지지장이 길어지므로 횡방향 강성이 취약하다. 이 경우 필요에 따라서 부득이하게 경사말뚝을 설치할 수 있다. 이 때 말뚝과 상판과의 연결부의 배근과 상세는 안벽이 내진성능을 발휘할 수 있도록 충분한 강성과 연성을 확보하여야 한다. 수직말뚝 및 경사말뚝으로 지지된 안벽과 잔교를 해설 그림 (4.2-6)에 예시하였다.



(a) 수직말뚝으로 지지된 잔교; (b) 수직말뚝 및 경사말뚝으로 지지된 잔교;
 (c) 수직말뚝으로 지지된 잔교; (d) 수직말뚝으로 지지된 잔교; (e) 수직말뚝, 경사말뚝, 및 널말뚝으로 지지된 안벽;
 (f) 수직말뚝과 널말뚝으로 지지된 안벽; (g) 수직말뚝과 앵커로 지지된 안벽, (h) 수직말뚝과 앵커슬래브로 지지된 잔교.
 1-상판, 2-상부구조, 3-수직말뚝, 4-경사말뚝, 5-널말뚝, 6-앵커, 7-앵커슬래브, 8-토류벽

해설 그림 (4.2-6) 수직말뚝 및 경사말뚝으로 지지된 안벽과 잔교

② 활하중

지진해석 시 구조물의 사하중외에 크레인 등의 활하중을 고려할 수 있다.

③ 연성계수

붕괴방지수준의 지진에 대해서는 소성변형을 허용하므로 연성계수를 사용하여 설계 하중을 감소시킬 수 있다.

④ 액상화

상부구조를 지지하고 있는 말뚝을 설계할 경우 말뚝주변 지반의 액상화 발생가능성을 평가하여야 한다.

⑤ 제방의 변위

안벽 아래의 제방은 영구수평변위에 대하여 설계할 수 있다. 영구수평변위는 Newmark 방법이나 그 외의 해석방법을 사용하여 구할 수 있다. 미국의 경우, 허용변위는 기능수행수준의 경우 100mm, 붕괴방지수준의 경우 300mm를 채택하고 있다.

⑥ 크레인 레일

안벽에 직접 지지되어 있지 않은 크레인 레일은 독립적인 말뚝기초로 지지되어야 한다. 독립된 레일 기초는 지진 시 안벽의 변형으로 인한 레일간 상대 변위로 크레인의 운영에 차질이 발생하지 않도록 하여야 한다.

⑦ 구조부재와 연결부의 설계력

부재요소에 작용하는 붕괴방지수준의 설계지진력은 탄성지진력을 적절한 연성계수로 나눈 값을 사용한다. 여기서 탄성지진력은 종방향 및 횡방향 탄성지진력을 조합하여 구한 값이다. 지진력을 조합하여 안전측으로 만드는 이유는 지진운동의 불확실한 방향성으로 인하여 지진력이 동시에 두 방향으로 작용할 수 있기 때문이다.

위에서 구한 설계지진력은 다른 설계력과 함께 각각의 하중경우에 대하여 독립적으로 조합되어야 한다. 이 때 설계지진력의 부호는 양 또는 음중 하중이 최대가 되도록 취한다.

$$\text{최대하중} = 1.0(D + B + F + H + E_M)$$

해설 식 (4.2-11)

여기서, D : 고정하중

B : 부력

F : 유체압

H : 횡도압

E_M : 탄성지진력을 연성계수로 나눈 값

⑧ 강말뚝의 설계요구사항

허용응력설계법에서는 강말뚝의 허용응력을 50% 증가시킬 수 있다. 지진변위와 말뚝의 축력으로 인한 2차모멘트 즉 $P-\Delta$ 효과를 고려하여 말뚝을 설계하여야 한다.

⑨ 콘크리트말뚝의 설계요구사항

허용응력설계법에서는 콘크리트 말뚝의 허용응력을 33% 증가시킬 수 있다. 콘크리트말뚝의 설계요구사항은 시설물편 KDS 24 00 00 교량설계기준 등을 참조한다.

- (10) 이 기준에서 규정하는 항만시설물의 내진성능수준은 최소한의 요구조건으로 시설물에 따라서는 보다 강화된 내진성능수준을 요구할 수 있다. 이 경우 설계자는 이론적 또는 실험적으로 신뢰성이 확보된 보다 발전된 설계기법으로 성능기반 내진설계를 수행할 수 있다.

4.2.6 널말뚝식 안벽(소형선부두 포함)

- (1) 지진 시 널말뚝식 안벽(소형선부두 포함)의 안정성의 검토는 설계지진력하에서의 등가정적해석법 등을 사용하며 근입 깊이, 부재력, 전도, 활동, 변위 및 원호활동 등에 대하여 검토한다.
- (2) 널말뚝식 안벽의 구조형식에 따라 중력식 안벽, 잔교식 안벽 등의 규정에 준하여 내진안정성검토를 수행한다.

[해설]

- (1) 벽체구조물에 대한 내진해석방법으로는 등가정적해석법, 동적해석법 등이 있다. 등가정적해석법은 지진하중에 의해 작용되는 토압 및 수압을 등가정적 하중으로 대치하여 정적해석을 수행하는 방법이고, 동적해석법은 지진 시 벽체구조물의 변형 등을 산정하기 위하여 시간이력 해석을 수행하는 방법이다. 일반적으로 구조물의 중요도에 따라 내진등급을 부여하고, 내진등급에 따라 해석방법을 달리한다. 널말뚝식 안벽 구조물의 내진등급별 해석방법은 해설 표 (4.2-3)와 같다.

해설 표 (4.2-3) 널말뚝식 안벽의 내진등급별 해석방법

내진등급	내진성능수준	해석방법
Ⅰ 등급	붕괴방지수준	등가정적해석법
		동적해석법
Ⅱ 등급	붕괴방지수준	등가정적해석법

- (2) 이 기준에서 규정하는 항만시설물의 내진성능수준은 최소한의 요구조건으로 시설물에 따라서는 보다 강화된 내진성능수준을 요구할 수 있다. 이 경우 설계자는 이론적 또는 실험적으로 신뢰성이 확보된 보다 발전된 설계기법으로 성능기반 내진설계를 수행할 수 있다.

(3) 등가정적해석법

① 하중산정

등가정적해석법으로 벽체구조물의 안정을 평가하기 위하여 정적하중, 지진 시 토압 증가, 지진 시 수압증가, 관성력 등을 결정하여야 하며, 이들 하중이 동일한 방향으로 작용된다고 가정한다. 지진에 의한 토압 및 수압 증가는 이 기준의 4.1.7 및 4.1.8에 기술한 하중 산정기법을 이용하여 결정할 수 있다.

② 설계지진 가속도 결정

등가정적해석법 설계에서 설계지진가속도는 4.2.2 중력식 안벽을 준용한다.

③ 액상화 평가

외국의 항만구조물 지진피해사례를 보면, 피해상황의 주원인이 지반의 액상화임을 알 수 있다. 따라서 우선적으로 액상화 평가수행을 통해 지반의 안정성을 확보해야 한다.

④ 등가정적해석법 설계

앵커지지식 널말뚝을 등가정적해석법으로 설계하는 방법은 자유단 지지법과 Rowe의 모멘트 감소법의 병행시행을 추천하며, 설계 과정은 아래와 같다.

- 가. 정적하중조건에 대하여 앵커지지식 널말뚝은 안정해야 한다.
- 나. 벽체 배면 지반과 전면지반의 하중조합(동토압, 정수압, 동수압 등)을 계산한다. 이때 주동 및 수동영역의 원점은 벽체의 바닥으로 가정한다.
- 다. 벽체의 Tie-rod의 연결점에 대한 휨모멘트를 계산하여 벽체의 최소관입깊이를 계산한다.
- 라. 벽체에 작용하는 수평방향 힘의 평형을 고려하여 앵커가 부담하여야 할 저항력을 계산한다. 계산된 앵커의 저항력은 자유단지지 앵커 저항력이라고 한다.
- 마. 벽체의 깊이별 휨모멘트의 분포를 계산한다. 이때 계산된 최대 휨모멘트를 자유단지지 모멘트라고 한다.
- 바. 자유단지지 모멘트와 Rowe가 제안한 모멘트 감소계수의 곱으로 설계 휨모멘트를 계산한다.
- 사. 계산된 자유단지지 앵커 저항력에 안전율을 고려하여 설계하중을 결정한다.
- 아. 앵커블록의 양측에 걸리는 수동토압, 주동토압 및 수압을 고려한 수평방향 힘의 평형 방정식을 만족시키는 앵커 블록의 최소 크기를 결정한다.
- 자. Eurocode에 의하면 벽체 배면 지반의 주동췌기가 앵커 블록의 전면에서 작용하는 수동췌기와 만나지 않도록 벽체로부터 충분한 거리를 두고 앵커 블록을 설치한다. 지진하중조건인 주동 및 수동 파괴면이 정적하중조건에서보다 편평하기 때문에 Tie-rod는 설계 시 정적하중조건에 의한 설계보다 상당히 길게 계산되어야 한다. 벽체로부터 앵커까지의 거리 L_e 는 정적하중을 위해 요구되는 거리 L_s 보다 커야 한다. 이 거리는 아래의 식으로 산정할 수 있다.

$$L_e = L_s (1 + 1.5 a_{\max}) \quad \text{해설 식 (4.2-12)}$$

- 차. 등가정적해석법 설계가 수행된 후 Gazetas 등의 방법을 이용하여 설계결과를 평가할 수 있다.

(4) 동적해석법

- ① 동적해석법은 해석 시 모형이 복잡하고, 시간이 오래 걸리는 단점이 있지만 다양한 수치해석 모델의 적용이 가능하고 지진파의 시간이력 특성을 고려한 변형 해석이 가능하므로 중요구조물인 I 등급 구조물에서는 동적해석을 수행하는 것이 바람직하다.
- ② 입력지진은 4.1.4를 참고하여 산정한다.
- ③ 동적해석 시 기반암 상부의 모든 지반과 구조물을 모델링하여 해석하거나 기반암에서 기초지반까지는 1차원 동적응답해석을 수행한 후 기초지반 상부를 모델링하여 해석할 수 있다.

(5) 설계요구사항

벽체구조물의 경우 타 항만구조물의 경우와 동일하게 각 등급별로 붕괴방지수준에 대한 설계만으로 내진설계가 만족됨을 잠정적으로 허용하도록 한다.

우선, 정적 설계기준을 만족하여야 하며, 각 등급별로 다음의 기준을 만족하여야 한다.

① 내진 II 등급 구조물

가. 정적하중에 대하여 설계를 실시한다.

나. 등가정적해석법을 적용하여 붕괴방지수준에 대하여 내진설계를 수행한다.

다. 정적하중과 동적하중에 대한 안전율은 해설 표 (4.2-4)와 같다.

해설 표 (4.2-4) 정적하중과 동적하중에 대한 안전율 및 설계요구사항 비교

	정적하중	동적하중	비고
근입깊이	1.5	1.2	수동토압 계산시 전단강도에 고려
타이로드	2.5	1.67	부재력에 고려
	$f_{allow} = 0.4 \cdot f_{yield}$	$f_{allow} = 0.6 \cdot f_{yield}$	허용응력에 고려
버팀판	$f_{allow} = 0.65 \cdot f_{yield}$	$f_{allow} = 0.87 \cdot f_{yield}$	Rowe의 모멘트 감소법을 적용한 후 허용응력에 고려
앵커의 위치	L_s^*	$L_s(1 + 1.5a_{max})$	타이로드의 길이에 고려

* L_s 는 정적하중에 대한 앵커의 위치임

② 내진 I 등급 구조물

가. 정적하중에 대하여 설계를 실시한다.

나. 등가정적해석법을 적용하여 붕괴방지수준에 대하여 내진설계를 수행한다.

다. 액상화 평가를 수행하고 액상화 가능성이 있는 경우에는 벽체구조물의 안전성에 영향을 미치는 지반영역에서 액상화가 발생하지 않도록 지반개량을 실시하여야 한다.

4.2.7 초대형 석유탱커시설

- (1) 중량톤수 10만 톤급 이상의 초대형석유탱커시설의 고정식 계류시설, 송유도관 등을 지지하는 연락교 등은 내진 I 등급으로 적용한다.
- (2) 내진설계시 등가정적해석법 등을 사용하며 설계의 상세는 KDS 64 75 00 초대형 석유탱커를 적용한다.

[해설]

- (1) 고정식 계류시설의 경우, 지진으로 인해 기름의 대량유출 및 화재 등 2차 피해로 연계될 우려가 있으며, 계류시설 상에서는 비계선시에도 작업원이 활동하고 있는 점을 고려하여 내진 I 등급으로 위험도 계수 1.4를 적용하여 설계지반운동을 선정한다.
- (2) 고정식 계류시설의 기초지반의 액상화 발생점토는 이 기준에 따른다.

내진

- (3) 이 기준에서 규정하는 항만시설물의 내진성능수준은 최소한의 요구조건으로 시설물에 따라서는 보다 강화된 내진성능수준을 요구할 수 있다. 이 경우 설계자는 이론적 또는 실험적으로 신뢰성이 확보된 보다 발전된 설계기법으로 성능기반 내진설계를 수행할 수 있다.

4.2.8 하역기계의 기초

- (1) 케도주행식 하역기계 기초의 내진설계는 관련 시설물의 내진등급과 내진성능을 고려하여 결정한다.
- (2) 설계의 상세는 KDS 64 90 10 항만하역시설에 따른다.

[해설]

- (1) 하역기계의 기초에 작용하는 최대 차륜하중은 KDS 64 90 10의 4.1.2 표 (4.1-2)을 참고하여 바다 쪽과 육지 쪽의 최대 차륜하중이 동시 발생하는 것으로 하여 검토할 수 있다. 이 때 작업 시 및 지진 시에 의한 작용은 레일 전체에 작용하는 것으로 한다.
- (2) 하역기계의 강도계산 하중조합 설계기준은 정상 가동, 과하중 및 휴지 시에 예상되는 각종 하중조합에 의한 하역기계 구조물의 응력을 해석해야 하며, 가장 엄격한 하중 조합을 충족시킨다는 것을 입증해야 한다. 강도 하중조합기준에 명시한 하중 외에 하역기계의 강도에 영향을 미치는 다른 하중이 있다면 KDS 64 90 10의 4.1.2 표 (4.1-1)을 참고하여 그 하중을 포함한 하중조합으로 강도 해석을 하고 설계에 반영해야 한다.
- (3) 이 기준에서 규정하는 항만시설물의 내진성능수준은 최소한의 요구조건으로 시설물에 따라서는 보다 강화된 내진성능수준을 요구할 수 있다. 이 경우 설계자는 이론적 또는 실험적으로 신뢰성이 확보된 보다 발전된 설계기법으로 성능기반 내진설계를 수행할 수 있다.

4.2.9 해저 파이프라인

- (1) 해수 중에 있는 모든 도관 등에 대하여는 관성력 및 동수압을 고려하고 해저면 하에 매설되는 모든 도관 등에 대하여는 토압 및 지반의 변위에 의한 영향을 고려함과 동시에 필요에 따라 관성력 및 동수압을 고려한다. 또한, 해저지반의 액상화 발생가능성에 대해서도 검토하며 도관의 기립부에 대해서는 지진력을 반드시 고려하여야 한다.
- (2) 설계의 상세는 KDS 64 80 00 해저파이프라인을 적용한다.

[해설]

- (1) 지진에 의한 관성력은 구조물, 석유 및 토괴 등의 자중에 지진계수를 곱하여 구할 수가 있다. 또한, 관성력의 작용위치는 자중의 중심위치로 한다.
- (2) 내진성의 검토에 사용하는 설계 수평지진계수, 설계 연직지진계수 또는 암반노두에 고려하는 수평 지진구역계수 등에 대하여는 해당지역의 지진의 활동도, 지진 등의 특성 및 지반에서의 지진동의 증폭도 등을 충분히 고려하여 적절히 정하여야 한다.
- (3) 지반의 액상화에 대하여는 해저지반과 주변의 되메운 흙에 대하여 검토를 한다.
액상화에 의하여 해저 파이프라인이 부상할 것이 우려되며, 부상한 경우에도 파이프가 좌굴 또는 파단하지 않도록 검토하여야 한다.
- (4) 기립(Riser)부는 구조상 가장 큰 약점이 되는 부분으로 해면상 직립부가 되어 파랑 작용이나, 선박, 나무 등 표류물의 충돌가능성이 높다.
따라서 기립부 도관 주위를 둘러싼 방호공을 설치하는 것이 바람직하다. 기립부에 작용하는 외력 및 하중의 종류에는 다음과 같은 것이 있으므로 이들 중 필요한 것에 대하여 충분한 강도를 갖는 효과적인 구조로 하여야 한다.
- ① 내 압
 - ② 자 중
 - ③ 파 력
 - ④ 흐름의 힘
 - ⑤ 온도변화의 영향
 - ⑥ 지진력
 - ⑦ 선박 및 표류물 등에 의한 충격력
 - ⑧ 지지 구조물 및 기립부에서의 진동현상
 - ⑨ 풍압력
- (5) 이 기준에서 규정하는 항만시설물의 내진성능수준은 최소한의 요구조건으로 시설물에 따라서는 보다 강화된 내진성능수준을 요구할 수 있다. 이 경우 설계자는 이론적 또는 실험적으로 신뢰성이 확보된 보다 발전된 설계기법으로 성능기반 내진설계를 수행할 수 있다.
- (6) 일반적으로 수심에 비하여 도관의 지름이 적으므로 도관에 작용하는 동수압은 배제한 물이 갖는 관성력으로 생각하여 해설 식 (4.2-13)에 의하여 구하고, 작용방향은 관성력의 방향과 일치시킨다.

$$P_w = \frac{\pi}{4} k_i \gamma_w D^2 \quad \text{해설 식 (4.2-13)}$$

여기서, P_w : 지진동에 의한 동수압 (kN/m)

k_i : 설계 수평지진계수 k_h

또는 설계 연직지진계수 k_h

γ_w : 해수의 단위체적중량 (kN/m³)

D : 피복방식 등을 포함한 도관의 외경 (m)

내진

- (7) 도관 정상부에 작용하는 지진 시 토압은 이 기준에 따른다.
- (8) 지반의 지표면에서의 수평변위는 해설 식 (4.2-14)에 의하여 산정할 수가 있다.

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} S_v T k_{oh} \quad \text{해설 식 (4.2-14)}$$

여기서, U_h : 지표면 수평변위의 최대값 (m)
 S_v : 단위지진구역계수당의 응답속도값 (m/s)
 T : 표층지반의 고유주기 (s)
 k_{oh} : 암반노두에서의 수평지진구역계수

4.2.10 해상저유시설

- (1) 해상공간의 석유비축시설인 해상저유기지를 구성하는 시설별로 내진성능수준을 선정한 후 이를 토대로 내진과 관련된 안전성을 검토한다.
- (2) 내진설계는 4.2.2 중력식안벽(소형선부두 포함)과 4.2.5 잔교식 안벽(소형선부두 포함)등을 참조한다.

[해설]

- (1) 해상저유기지를 구성하는 하나의 시설이 지진에 의한 피해를 받는 경우에 어떠한 영향이 있는가는 각각의 그 시설마다 검토가 필요하다. 이 때문에 설계지진계수를 산정하는 때의 위험도계수는 일률적이지 않고, 지진 시에 예상되는 피해의 형태 및 피해의 정도, 피해에 의한 영향, 복구의 난이를 하나의 시설마다 고려한 후에 적절히 설정한다.
- (2) 등가정적해석법에 의한 내진설계의 타당성이 경험적으로 분명하지 않은 구조물에 대하여는 지진응답해석 등에 의한 검토를 수행한다.
- (3) 지반의 액상화 현상을 예측하고, 액상화 발생가능성이 높은 경우에는 적절한 대책을 강구한다.
- (4) 이 기준에서 규정하는 항만시설물의 내진성능수준은 최소한의 요구조건으로 시설물에 따라서는 보다 강화된 내진성능수준을 요구할 수 있다. 이 경우 설계자는 이론적 또는 실험적으로 신뢰성이 확보된 보다 발전된 설계기법으로 성능기반 내진설계를 수행할 수 있다.

[참고문헌]

- 1) 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(Ⅱ)
- 2) 서민우, 선창국, 오명학(2009), “액상화 가능 지수를 이용한 국내 서해안 지역의 액상화 평가”, 한국지진공학회논문집, 제13권, 제4호
- 3) 선창국(2006), “스프링식 횡방향 발진 크로스홀 탄성과 시험을 통한 지반 동적 특성의 합리적 산정”, 한국지진공학회 논문집, 10월 4호. pp. 1~13
- 4) 윤중구, 김동수, 방은석(2006) "국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답 스펙트럼 개선에 대한 연구 (Ⅰ) -국내 내진설계기준의 문제점 분석", 한국지진공학회논문집 제10권, 제2호
- 5) 건설부(1986), 구조물기초설계기준
- 6) 한국지반공학회(1997), 진동 및 내진설계
- 7) ASTM D 3999-91 (Reapproved), “Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus”
- 8) ASTM D 5311-92 (Reapproved), “Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil“
- 9) Braja M. Das(1982), "Fundamental of Soil Dynamics“
- 10) Eurocode 8 (1998-5:2004) “Design of structures for earthquake resistance” part 5
- 11) H.Bolton Seed, I.M. Idriss, Ignacio Arango(1983), “EVALUATION OF LIQUEFACTION POTENTIAL USING FIELD PERFORMANCE DATA”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.109, No.3, ASCE
- 12) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.(1972b), "Shear Modulus and Damping in Soil : Design Equation and Curves", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692.
- 13) Hardin, B. O.(1978), “The Nature of Stress-Strain Behavior of Soils” Proceedings Geotech. Eng. Div. Speciality Conference on Earthquake Eng and Soil Dynamics. Vol.1, ASCE. Pasadena. pp.3~90
- 14) International Navigation Association(2001), Seismic design guidelines for port structures
- 15) Kayen, R.E., Mitchell, J.K., Seed, R.B., Lodge, A., Nishio, S., Coutinho, R.(1992) “Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data”, Proc., 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake-Resistant Des. of Lifeline Fac. and Countermeasures for Soil Liquefaction, Vol. 1, pp177-204.
- 16) Kenji ISHIHARA(1995), “Soil Behavior in Earthquake Geotechnics”, pp.301-306

- 17) Kim, Dong-Soo, Jong-Ku Yoon(2006) "Development of new site classification system for the regions of shallow bedrock in Korea", Journal of earthquake engineering Vol.10, No.3
- 18) Liao, S.S.C., Whitman, R.V.(1986) "Catalogue of liquefaction and non-liquefaction occurrences during earthquakes", Res. Rep., Dept. of Civ. Engrg., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- 19) Lee, S.H., Sun, C.G., Yoon, J.K., Kim, D.S.(2012) "Development and verification of a new site classification system and site coefficients for regions of shallow bedrock in Korea", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 16, No.6
- 20) Port and Harbour Research Institute(1997), Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land
- 21) R.B. Seed., K.O. Cetin., R.E.S. Moss., A.M. Kammerer., J. Wu., J.M. Pestana., M.F. Riemer., R.B. Sancio., J.D. Bray., R.E. Kayen., A. Faris.(2003), "Recent Advances In Soil Liquefaction Engineering : A Unified and Consistent Framework" Earthquake Engineering Research Center (Report No. EERC 2003-06), 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar
- 22) Robertson, P.K., Wride, C.E.(1998) "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test", Can. Geotech. J., Ottawa, 35(3), pp442-459.
- 23) Robertson, P.K., Wride, C.E.(1998) "Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT", In proceedings of the 1996 NCEER workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.. Edited by T.L Youd and I.M.Idriss. NCEER-97-0022.
- 24) Seed, H.B., Idriss, I.M.(1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics Division, ASCE(SM9)
- 25) Seed, H.B., Idriss, I.M., Makdisi, F., Banerjee, N.(1975) "Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses", Rep. No. UCB/EERC 75-29, Earthquake Engrg. Res. Ctr., University of California, Berkeley, Calif.
- 26) Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K.(1986) "Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soil," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. GT11, pp. 1016-103.
- 27) Stark, T.D., Olson, S.M.(1995) "Liquefaction resistance using CPT and field case histories", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(12), pp856-869.
- 28) Steven L. Kramer(1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", pp.386-387
- 29) Sun, C. G.(2004) "Geotechnical information system and site amplification characteristics for earthquake ground motions at inland of the Korean Peninsula", Ph. D. Dissertation, Seoul National University

- 30) Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuko, F., and Yasuda, S..(1978) “A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan”, Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco, 885-896,
- 31) US Navy(1992), The Seismic Design of Waterfront Retaining Structures
- 32) US Navy(1997), Design Criteria for Earthquake Hazard Mitigation of Navy Piers and Wharfs
- 33) Youd, T.L., Idriss, I.M.(2001) “Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(4), pp297-313.
- 34) Vucetic, M., Dobry R.(1991), “Effect of soil plasticity on cyclic response”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.1
- 35) 社團法人 日本港灣協會, 港灣の 施設の 技術上の 基準.同解説, 1999년
- 36) 社團法人 日本港灣協會, 港灣の 施設の 技術上の 基準.同解説, 2007년
- 37) 財團法人 沿岸開發技術研究センター, 港灣構造物設計事例集. 1999년
- 38) 財團法人 沿岸技術研究センター, 港灣構造物設計事例集. 2007년
- 39) 岩崎敏男, 龍岡文鉛, 常田賢一, 安田 進(1980), “地震時地盤液状化の程度の予測について”, Japanese Geotechnical Society No.1164
- 40) 日本地盤工學會基準集 (2000), “Method for cyclic undrained triaxial test on soils” JGS 0541 : 2000
- 41) 中央防災會議事務局(平成19年11月) “中部圏・近畿圏の内陸地震に係る被害想定手法について”
- 42) 행정안전부(2017.09), 내진설계기준 공통적용사항

집필위원	분야	성명	소속	직급
	내진	배정주	한국시설안전공단	처장
		김동현	군산대학교	교수
		오세범	전남대학교	책임연구원
		고덕형	(주)한국항만기술단	부사장
		송영석	(주)세일종합기술공사	상무
		최충락	(주)평화엔지니어링	상무

행정안전부 자문위원회	분야	성명	소속	직급
	내진	김동수	한국과학기술원	교수
		김익현	울산대학교	교수
		김정환	부산대학교	교수
		조형익	한국지질자원연구원	선임연구원

해양수산부	성명	소속	직책
	오윤열	항만국	국장
	김우철	항만기술안전과	과장
	김태민	항만기술안전과	사무관
	우동규	항만기술안전과	주무관

설계기준
KDS 64 17 00 : 2019

내진

2019년 2월 발행

(관련단체)

한국항만협회

07271 서울시 영등포구 양산로 53(양평동 3가)

월드메르디앙 비즈센터 707호

☎ 02-2165-0132 E-mail : kpha@koreaports.or.kr

<http://www.koreaports.or.kr>

해양수산부

30110 세종특별자치시 다솜2로 94 (어진동)

정부세종청사 5동 항만기술안전과

☎ 044-200-5956

<http://www.mof.go.kr>