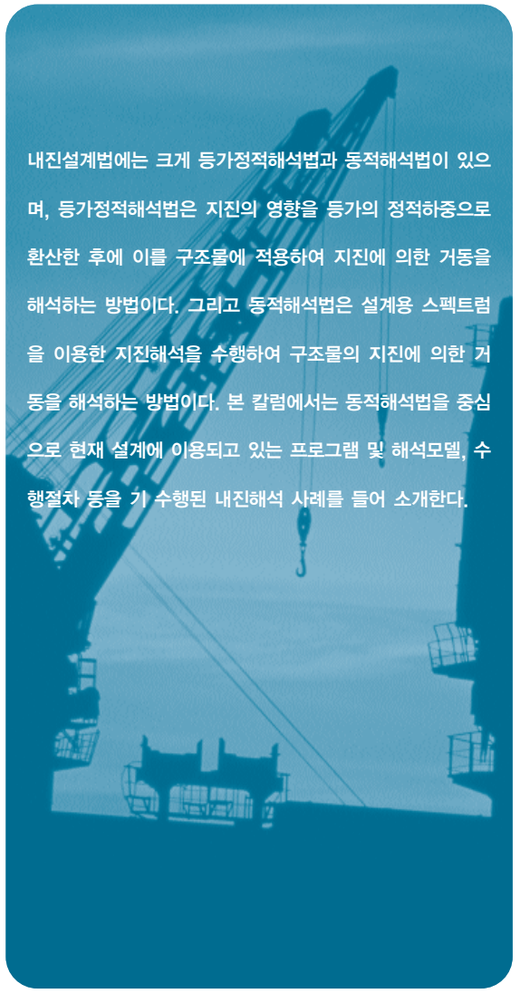
지반구조물의 동적수치해석을 통한 내진설계 소개

글 | 김 창 수 토목기술부 대리 02-3433-7767 | E-mail : conshot@ssyenc.com



내진설계법에는 크게 등가정적해석법과 동적해석법이 있으며, 등가정적해석법은 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 환산한 후에 이를 구조물에 적용하여 지진에 의한 거동을 해석하는 방법이다. 그리고 동적해석법은 설계용 스펙트럼을 이용한 지진해석을 수행하여 구조물의 지진에 의한 거동을 해석하는 방법이다. 본 칼럼에서는 동적해석법을 중심으로 현재 설계에 이용되고 있는 프로그램 및 해석모델, 수행절차 등을 기 수행된 내진해석 사례를 들어 소개한다.

1. 개 요

지반구조물 동적해석은 사면, 옹벽, 기초구조물 등 지반구조물의 동적거동을 상세하게 평가하기 위하여 수행한다. 동적해석법은 해석 모델링이 복잡하고 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있지만, 다양한 해석이 가능하고 구조물의 변형거동을 파악할 수 있다.

최근 1등급 이상의 중요 구조물에서는 지진 발생후의 구조물 변형량을 기준으로 설계하는 성능에 기초한 설계를 요구하고 있으므로 동해석을 수행하여 구조물의 변형거동을 분석하여야 한다. 동해석시 지반은 탄성모델 또는 Mohr-Coulomb 모델등을 이용하여 모델링하며 느슨한 포화 사질토 지반과 같이 지진시 지반내의 간극수압 증가가 예상되는 경우에는 간극수압의 증가에 따른 유효응력 감소 및 액상화 이후의 거동을 평가할 수 있는 모델이 적용되어야 한다.

동해석은 주파수 영역해석 또는 시간 영역해석을 수행할 수 있는데 주파수 영역해석은 지진응답특성을 평가하거나 지반의 탄성거동이 예상되는 경우에 주로 수행하며 시간 영역해석은 시간에 따른 지반의 강도감소나 소성거동이 예상되는 경우에 수행한다. 동해석시 입력 지진파는 장주기 및 단주기 특성을 포함한 2개 이상의 실지진기록과 표준설계 응답스펙트럼에 부합하는 인공가속도 시간 등 3개 이상의 지진파를 이용하도록 하고 있다.

이와 같은 동적해석을 중심으로 현재 설계에 이용되고 있는 프로그램 및 해석모델, 수행절차등을 기 수행된 내진해석 사례를 들어 소개하고, 한국지진공학회 기술강습회에 수록된 자료를 통해 이에대한 이해를 돕고자 한다.

2. 수치해석 프로그램 종류

수치해석 프로그램은 해석차원에 따라 1차원/2차원/3차원, 지반내 과잉간극 수압의 발생을 고려하는지의 여부에 따라 유효응력 해석/전응력 해석으로 나누어진다. 또한 해석법에 따라 주파수영역 해석/시간영역 해석등으로 나누기도 한다.

최근 국내에서 동해석에 이용되는 프로그램을 언급하면 다음과 같다.

2.1 SHAKE

(1) 개요 : 지반을 1차원 무한 수평지반으로 모델링한 후 지진파가 지반을 통과하면서 발생하는 지진응답을 평가하는 프로그램

(2) 특징 : 1차원/등가 선형해석/전응력 해석/주파수 영역해석

(3) 목적 : 깊이별 지반가속도를 산정하여 등가정적해석을 위한 설계지진계수 결정 및 액상화 평가에 이용되는 깊이별 최대 지진전단응력 산정, 2차원이나 3차원 동적해석을 위한 흙의 유효 동적 물성값 결정

2.2 FLUSH

(1) 개요 : 등가선형 유한요소해석법을 이용한 2차원 지반-구조물 상호작용 해석프로그램

(2) 특징 : 2차원/등가 선형해석/전응력 해석/주파수 영역해석

(3) 목적 : 2차원적 지형변화 특성을 고려하여 지반내 가속도 및 전단응력 산정, 구조물 변형을 평가

2.3 FLAC 2D/3D

(1) 개요 : 유한차분법을 적용한 범용 2차원 수치해석 프로그램

(2) 특징 : 2~3차원/탄소성해석/전응력-유효응력 해석/시간영역해석

(3) 목적 : 시공단계 및 지진하중을 고려한 구조물의 변형량 산정, 액상화 모델을 이용하여 지반내의 과잉간극수압 발생과 액상화 평가

2.4 FLIP

(1) 개요 : 일본에서 널리 사용되고 있으며, Iai 박사가 개발한 액상화 모델을 적용한 범용 2차원 유한요소해석 프로그램

(2) 특징 : 2차원/탄소성해석/유효응력 해석/시간 영역해석

(4) 목적 : 지진동을 고려한 안벽의 동적 변형량 산정, 액상화 모델을 이용하여 지반내의 과잉간극수압 발생과 액상화 평가

2.5 Pentagon 2D/3D

(1) 개요 : 범용 유한요소해석 프로그램으로서 사용자 편의성을 고려하여 요소망 작성과 해석결과의 출력이 용이함.

(2) 특징 : 2~3차원/탄소성해석/전응력-유효응력 해석/시간영역해석

(3) 목적 : 시공단계 및 지진하중을 고려한 구조물의 변형량 산정, 지반내 응력 및 구조물에 작용하는 하중 산정

2.6 SASSI 2000

(1) 개요 : 지반-구조물 동적상호 작용을 2차원/3차원으로 정밀하게 평가할 수 있는 프로그램

(2) 특징 : 2~3차원/탄성해석/전응력 해석/주파수 영역해석

(3) 목적 : 가속도 응답 및 구조물의 동적안정성 평가, 말뚝요소를 이용하여 말뚝의 동적안정성 평가

3. 입력 변수의 결정

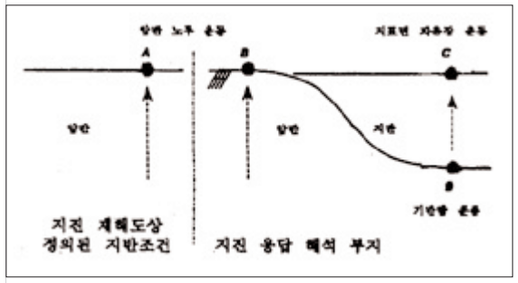
3.1 지진응답해석

지진응답해석은 지진파에 대한 지반의 응답(가속도,속도,변위응답)을 평가하는 것

(1) 기반암 운동과 기반암 노두 운동

기반암 노두 운동은 지반내 하부 기반암이 대기중에 노출되어 상부 구속응력이 없는 상태의 기반암에서의 운동을 의미한다. 현재 국내 설계지진운동을 규정하고 있는 "내진설계 기준연구, 건교부 1997"에서는 설계지진운동을 기반암 노두 운동으로서 정의하고 있다. SHAKE를 비롯한 지진응답 해석프로그램에서는 기반암 노두에서 정의된 지진파를 기반암에서의 운동(그림 1의 D 위치)으로 변환하기 위한 옵션을 제공하고 있으며, 이를 적용하여야 정확한 설계지진파의 입력이 된다.

〈그림1〉 기반암 노두운동과 기반암 운동



(2) 입력지진파의 종류

현재 국내에서 설계지진파는 장주기, 단주기 성분의 실지진기록을 수정한 지진기록을 포함하여 최소 3가지 이상의 기록을 사용하도록 규정하고 있다. 이때 실지진파의 최대가속도 크기가 설계지진의 최대크기와 같아지도록 지진파의 스케일을 조정하여야 한다. 인공지진파는 표준설계응답 스펙트럼을 만족하도록 생성한다.

(3) 지층두께의 분할

1차원 지진응답해석을 수행할 때 해석층의 두께가 해석결과에 영향을 미치므로 층두께를 적절히 분할하는 것이 중요하다. 층두께를 너무 크게 나누면 가속도 증폭현상을 과소평가할 수 없으며, 반대로 층두께를 너무 작게 나누면 오히려 증폭현상을 과대평가할 수 있다. 이러한 층분할의 영향은 사질토보다는 점성토 지반에서 두드러지게 나타나며, 층분할에 따른 가속도 크기차이가 최대 2배이상 될 수 있다는 연구결과가 있다. 일본 PHRI에서

는 두꺼운 균일한 층이 존재할 경우 다음과 같은 층분할 기준을 제시하고 있다.

해석지반 깊이가 10M 미만인 경우 : 지층을 2.0M 두께 이하로 분할

해석지반 깊이가 10M 이상인 경우 : 지층을 2.5M 두께 이하로 분할

(4) 최대 전단탄성계수 G_{max}값의 결정

G_{max}값은 구속압의 영향을 크게 받으며, 해석결과에 큰 영향을 미친다.

G_{max}값을 산정하는 방법은 다음과 같은 순서로 정확도를 가진다.

가. 탄성파 탐사의 전단파 속도 V_s값을 이용하는 방법 :

$$G_{max} = \rho V_s^2$$

나. 공진주 시험에서 얻어진 최소변형율에서의 전단탄성계수를 이용하는 방법

다. 표준관입시험(모래) 또는 일축압축강도(점성토)를 이용하여 산정하는 경험적 방법 :

$$G_{max} = 1400(N^{0.68}(kPa),\ G_{max} = 170 \times q_u(kPa)$$

3.2 기타 고려사항

(1) 경계조건

동적수치해석 프로그램에서는 지반구조물의 동적운동이 해석경계면의 강성에 영향을 받지 않도록 하기 위하여(지반의 반무한성을 고려하기 위하여) 여러가지 경계조건들을 제공하고 있다. 이러한 경계조건으로는 시간영역해석 에서 자유장 경계와 점성경계 등이 있으며, 주파수영역해석에서는 전달경계등을 사용하고 있다.

자유장 경계는 해석영역의 경계면이 자유장 지반운동을 하여 해석영역과 경계면간에 충돌로 발생하는 에너지를 흡수하는 역할을 한다.

(2) 전단탄성계수값의 결정

지반내 전단탄성계수값은 1차원 지진응답해석으로부터 지반내에 발생할 수 있는 전단변형율에 해당하는 유효 전단탄성계수값을 이용하는 것이 좋으며, G_{max}값에 적절한 감소계수를 곱하여 사용하기도 한다.

(3) 유효응력해석

지진시 지반내 과잉간극 수압의 발생 및 소산을 고려할 수 있는 여러가지 수치모델들이 제안되어 왔으나, 이들 모델을 적용하기 위해서는 많은 입력변수들이 필요하며 신뢰성있는 입력값을 결정하는 것이 필요하다.

(4) 동수압의 고려

지진시 중력식 안벽 또는 호안 전면의 물에 의하여 구조물에 동수압이 발생할 수 있으며 이 크기는 벽체에 작용하는 전체작용력의 20% 정도를 차지하기도 한다. 그러므로, 수치해석에서도 이러한 동수압을 고려해주어야 한다. 일반적으로 동수압은 Westergaard 식을 이용하여 산정하는데, 이 식으로부터 산정된 값을 추가 질량항으로 고려하여 구조체에 첨가하던지 지진가속도 시간이력을 입력하여 계산된 동수압을 구조물 전면에 작용시켜서 동수압을 고려한다.

4. 해석모델

4.1 등가선형 해석모델

등가선형해석은 탄성해석을 수행하여 지반 동적물성값의 비선형을 고려하는 것으로 다음의 순서로 수행된다.

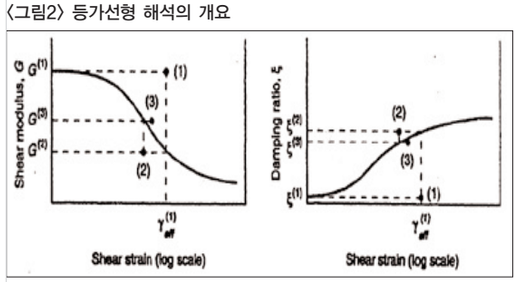
(1) 각 토층에 대하여 전단탄성계수와 감쇠비의 초기값을 가정한다. 일반적으로 초기 가정값은 모든 층에서 동일한 변형률을 가질 때의 값을 가정하며, 변형율이 최소일 때의 값을 초기값으로 한다.

(2) 전단탄성계수와 감쇠비의 초기 가정값을 적용하여 지진응답해석을 수행한 후 각 층의 변형률 이력곡선을 산정한다.

(3) 산정된 변형률 이력곡선 중 최대 변형률값을 이용하여 각 층의 유효변형률을 계산한다.

(4) 위에서 산정된 유효 변형률에 상응하는 감쇠비 및 전단탄성계수를 사용하여 다시 지진응답해석을 수행하여 각 층의 변형률 이력곡선을 산정한다.

〈그림2〉 등가선형 해석의 개요



4.2 비선형 해석모델

등가선형해석은 시간에 따른 지반동적물성값의 변화를 고려하지 못한다는 단점이 있다. 비선형 해석은 시간영역에서 직접적분을 수행하므로 비선형~비탄성 응력~변형율 모델을 사용하여 시간에 따른 지반물성값의 변화를 고려할 수 있다. 등가선형해석과 비선형 지진응답해석 특징을 비교해보면 다음과 같다.

(1) 등가선형 해석은 지반 물성값을 상수로 가정하므로 해석중 토층의 공진 진동수는 일정하다. 그러므로, 만일 강진 입력운동의 주파수와 토층의 공진 진동수가 일치하게 되면 비현실적인 큰 증폭이 발생할 수 있다. 실제에서는 진동동안 흙의 강성이 변화하기 때문에 이러한 큰 증폭이 발생하지는 않을 것이다.

(2) 등가선형해석에서는 유효전단변형율에 해당하는 전단탄성계수와 감쇠비값을 사용한다. 만일 최대 전단변형율이 나머지 시간에서의 전단변형율보다 훨씬 크다면 흙의 강도를 실제보다 작게 그리고 감쇠비를 실제보다 크게 평가할 수 있으며 전단변형율이 진동기간중 거의 일정하다면 반대의 결과를 줄 수 있다.

(3) 비선형 해석법은 진동중 과잉간극수압의 발생과 소산을 고려하는 유효응력해석에 이용할 수 있으나 등가선형해석은 이러한 해석을 수행할 수 없다.

(4) 비선형 해석은 신뢰성있는 응력-변형율 관계 또는 구성모델을 적용할 수 있다. 그러나, 이러한 비선형 해석에 이용되는 지반물성값은 등가선형 해석만큼 잘 정의 되어있지 않은 실정이다.

(5) 실제 지반운동의 비선형성이 얼마나 발생하느냐에 따라 등가선형해석과 비선형 해석의 결과가 차이가 난다. 변형율 수준이 낮은 경우(지반강성이 크거나 입력가속도 크기가 작은 경우)에는 두 종류의 해석이 거의 동일한 결과를 줄 것이다. 그러나, 변형율 수준이 높은 경우(지반이 연약하거나 입력가속도 크기가 큰 경우)에는 비선형 해석이 정확한 해석 결과를 줄 것이다. 국내는 중약진 지진구역으로서 설계지진 크기가 작기 때문에 변형이 크게 예상되는 연약지반이 아니라면 등가선형해석으로도 충분히 정확한 지진응답해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 액상화 모델

전세계적으로 액상화 현상을 고려할 수 있는 수치해석 모델은 정립되어 있지 않다. 최근 액상화 모델들을 이용한 많은 해석이 수행되고 있지만 과잉간극수압 발생을 고려하기 위해 많은 입력변수가 필요하고 적절한 입력값을 결정하는 것이 매우 어렵다. 그러므로, 적절한 해석결과를 얻기 위해서는 액상화 모델의 특징과 입력변수를 결정하는 방법을 정확히 파악하여야 한다. 최근 액상화 모델로서 많이 이용되는 FLAC의 Finn 모델과 FLIP의 액상화 모델의 특징을 간단히 설명하면 다음과 같다.

가. Finn 모델

전단파에 의한 전단응력이 흙요소에 작용하여 부피변형을 유발하고 이에 따라 과잉간극수압이 발생하는 양상을 수식화하기 위해 Martin등(1975)은 상대밀도 45%인 Crystal Silica Sand를 대상으로 K_o상태에서 비배수반복순수 전단시험을 실시하였다. 비배수 상태에서 포화된 흙요소에 전단변형이 가해지면, 흙 입자간의 미끄러짐으로 인해 부피가 감소하며 과잉간극수압이 발생하고 이로 인해 유효응력이 감소하면서 흙의 부피가 팽창하는 현상이 동시에 발생한다.

비배수 상태에서의 간극비의 변화(물의 압축량)는 배수상태에서의 흙요소의 부피변화량에서 간극수압으로 인한 흙요소의 부피팽창량을 뺀 값과 같다는 가정을 이용하여 각 전단변형 단계에서의 간극수압의 증분을 배수 전단시의 부피변형률의 증분과 제하곡선의 접선계수의 곱으로 나타낸다.

나. FLIP 모델

2차원 유효응력 해석 프로그램인 FLIP은 다중전단 구조에 기본을 둔 다중 전단 스프링 모델을 사용하고 있으며, 이 모델에서 사용하고 있는 유효응력 모델의 주요 입력변수는 〈표1〉과 같다. 입력변수는 아래표에 제시된 바와 같이 크게 모래의 변형특성을 규정하는 변수 4개와 과잉간극수압의 발생을 규정하는 변수 6개로 나누어진다. 마찬가지로 이러한 변수값들은 해석대상지반에 적절한 값을 이용하여야 한다.

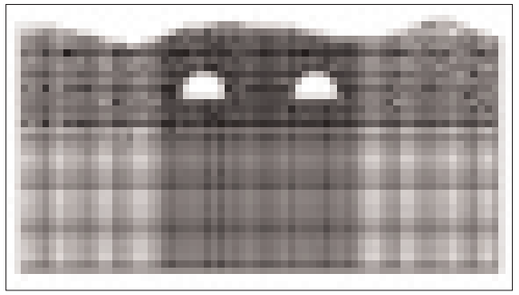
〈표1〉 FLIP에서의 유효응력 모델의 입력변수

분 류	모델 입력 변수	
동적변형특성	G_{ma}	전단탄성계수($\sigma_m' = \sigma_{ma}'$에 의한 값)
	K_{ma}	체적탄성계수($\sigma_m' = \sigma_{ma}'$에 의한 값)
	ϕ_f	내부마찰각
	h_{max}	이력감쇠의 상한치
액상화특성	ϕ_p	변상각(phase transformation angle)
	w_i	액상화 특성전체를 규정하는 입력변수
	p_1	액상화 특성의 전반을 규정하는 입력변수
	p_2	액상화 특성의 후반을 규정하는 입력변수
	c_1	액상화 발생의 하한값을 규정하는 입력변수
	S_1	액상화의 종국상태를 규정하는 입력변수

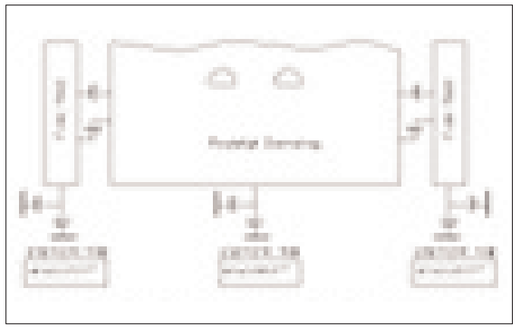
5. 동적수치해석 사례(NATM 터널 내진해석)

본 터널 시점부의 토피는 토사층으로 되어있어 0.154g의 지진가속도에도 갱구부의 상대변위에 의해 터널구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있으므로 내진해석을 수행한 경우로 울산광역시 및 경상남도 지역으로 **지진구역 Ⅰ에 해당되는 구역**이며, 도로터널은 **내진 1등급에 해당**된다. 따라서, 본 구간의 터널 내진설계시 적용할 가속도 계수는 **0.154g**(지진구역계수×위험도계수)이다.

〈그림3〉 해석모델링



〈그림4〉 해석개요



5.1 내진해석 프로그램(FLAC)

FLAC은 동적해석기능을 가지고 있으므로 평면변형률 또는 축대칭 문제에서 동적해석을 수행할 수 있으며 FLAC을 사용하여 동적해석을 수행하기 위해서는 1)외부하중과 경계조건 2)감쇠 3)해석모형에서의 파의 전파에 대한 고려가 있어야 한다.

동적하중으로 입력이 가능한 형태는 가속도 시간이력, 속도 시간이력, 응력 시간이력 또는 하중 시간이력이며 네가지 중의 하나로서 동적하중을 가할 수 있고 하중의 입력방향은 3가지 방향으로 해석이 가능하다.

FLAC은 개발된 목적이 지반 또는 암반위의 구조물을 해석하므로 항만구조물의 경우 적절한 해석방법이 될 수 있는 반면 대상이 되는 구조물을 자유롭게 모형화하기 어려운 점과, 정확한 해석을 위해서는 입력하중과 해석의 결과를 짧은 시간간격으로 나누어서 수행하여야 하므로 해석시간이 길어지는 단점이 있다.

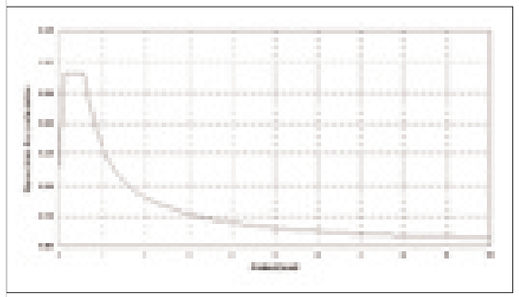
5.2 응답스펙트럼, 건교부 내진설계기준

터널시점부는 내진성능수준 1등급에 재현주기 1000년(붕괴방지수준), 상부 지반조건은 지반조사 결과를 바탕으로 단단한 토사지반(S_D)로 설정함.

$$C_a=0.16,\ C_v=0.23,\ T_s=C_v/2.5C_a,\ T_o=0.2T_s$$

재현주기 1000년에 대한 보정계수 1.4를 곱하여 시점부의 설계응답스펙트럼 산정

〈그림5〉 응답스펙트럼 산정결과



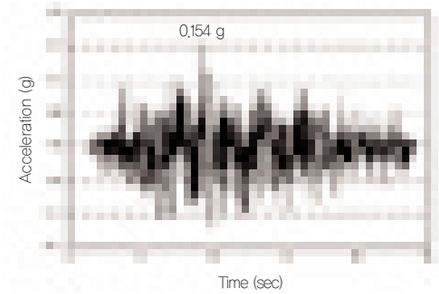
5.3 인공지진의 작성

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

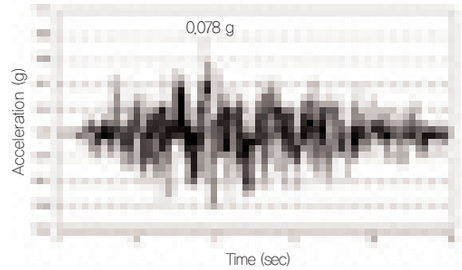
$$Z(t) = I(t)\Sigma A_i \sin(\omega_i t + \phi_i)$$

여기서, A_i, ω_i, ϕ_i는 각각 i번째 성분파의 진폭, 진동수(rad/sec), 위상각을 나타냄. 위상각은 0과 2π 사이에서 균일한 발생확률을 갖는 것으로 가정하여, 컴퓨터 내에서 난수발생기(random number generator)에 의해 만들어 지고, 진폭은 파워 스펙트럼과의 관계식에서 결정된다.

〈그림6〉 지표면 가속도 시간이력 곡선



〈그림7〉 기반면에서의 가속도 시간이력 곡선

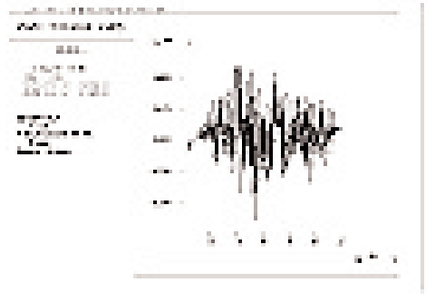


5.4 해석결과

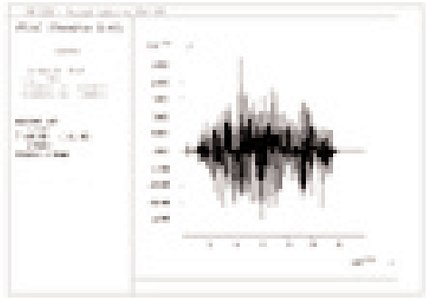
25초간 지진파 전파시 순간 최대천단변위는 시점부 0.018mm, 종점부 0.148mm 이며 실제로 라이닝에 추가하중으로 발생하는 영구 잔류천단변위는 시점부 0.001mm, 종점부 0.002mm로 지진하중으로 인한 추가천단변위의 영향은 없는 것으로 나타남.

내공변위의 경우 지진파 전파시 순간 최대내공변위는 시점부 12.58mm, 종점부 7.159mm이고 영구잔류 내공변위는 시점부 3.0mm, 종점부 2.0mm로, 실제로 지진하중에 의해서는 터널측면에 영향을 더 주는 것으로 나타남.

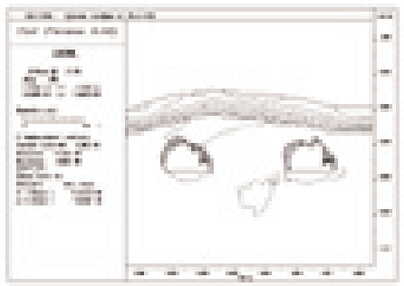
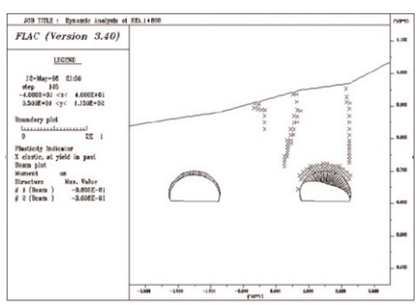
〈그림8〉 천단부 Y변위



〈그림9〉 천단부 Y속도



〈그림10〉 콘크리트 라이닝 전단력,수평변위



〈그림11〉 콘크리트 라이닝 모멘트,소성영역