

지반-구조물의 동적 상호작용 해석법(I)

Method for soil-structure dynamic interaction analysis(I)

황 성 춘* 심 형 섭** 오 병 현*** 박 성 진****
 Hwang, Seong-chun Shim, Hyung-seop Oh, Byung-hyun Park, Sung-jin

ABSTRACT

The development history of seismic design and analysis methods considering seismic force in soil-structure dynamic interaction are presented. Determination of seismic intensity in static analysis of both seismic and modified seismic methods is discussed and preferable method in future seismic design is proposed.

1. 서론

근래 들어 우리 나라를 포함하여 전세계적으로 빈발하는 지진 등으로 인해 지반과 구조체의 동적 메커니즘에의 관심이 높아지면서 이 분야에의 여러 이론의 개발 및 재해석과 평가가 이루어지고 있으며, 또한, 실무에서는 이와 같은 영향을 받아 해석 패키지들이 정력적으로 개발되어지고 있다. 동시에 지금까지 사용해 온 여러 해석 패키지들의 적용 방법과 적용한계, 바른 사용 방법 및 효율적으로 보다 실제 현상에 가깝게 표현하려고 하는 경향이 높아져 가는 추세를 부인할 수 없다. 그리고, 일반인은 물론 이 분야의 전문인조차 동적해석에 대해 추상적으로 받아 들이는 부분이 많은 것 또한 사실이다. 즉, 동적 해석의 텍스트에서 흔히 볼 수 있는 그 많은 복잡한 이론을 어떻게 실무에 도입해야 하는지, 혹은 지반 조건과 구조체의 중요도 혹은 조건에 따라 어떤 해석 모델을 사용해야 하는지, 일반적으로 동적해석은 비용과 시간이 많이 요구된다고 하는데 정적해석과 같은 방법으로서 동적해석과 같은 성과를 획득할 수는 없는지 등에 대해 의문을 가지고 있는 것이 일반적이라고 여겨진다.

따라서, 본 논문에서 내진설계법의 발달과정과 지진력을 고려한 해석의 방법들과 그 특징에 대해 언급하였다. 특히, 정적해석 방법인 진도법과 수정진도법의 진도를 결정하는데 있어서의 주의점과 향후 내진설계에 적용하는데 있어서 지향해야 할 방법 등에 대하여 서술하였다.

2. 내진설계법의 역사

내진설계라는 것은 지진으로부터 구조물을 보호하기 위한 방법을 설계에 반영하는 것이다. 이런 복잡한 지진현상을 구조물의 설계에 반영하는 것은 다분히 경험적인 것이 많다. 외국에 지진이 빈

* 경주대학교 토목공학과 조교수, 정회원
 ** 경주대학교 토목공학과 전임강사
 *** 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원
 **** 경남대학교 토목공학과 박사과정

번히 발생하는 나라에서는 필요에 의해 내진설계법이 발전하여 왔지만, 우리 나라에서는 지진의 피해에서 한 걸음 물러나 있었기 때문에 그간 지진과 내진설계에 대한 연구는 미온적이었다. 하지만 근래 세계 여러 나라에서 대지진에 대한 피해가 많이 발생하고, 국내에서도 미진지진하지만 지진이 빈번히 발생하기 때문에 이에 대한 연구의 필요성이 과거보다 깊어져 있다. 현재 국내의 여러 기관 또는 연구단체에서 내진설계법과 그에 대한 규정이 마련되고 있으나 아직 걸음마 단계에 머물고 있는 실정이다.

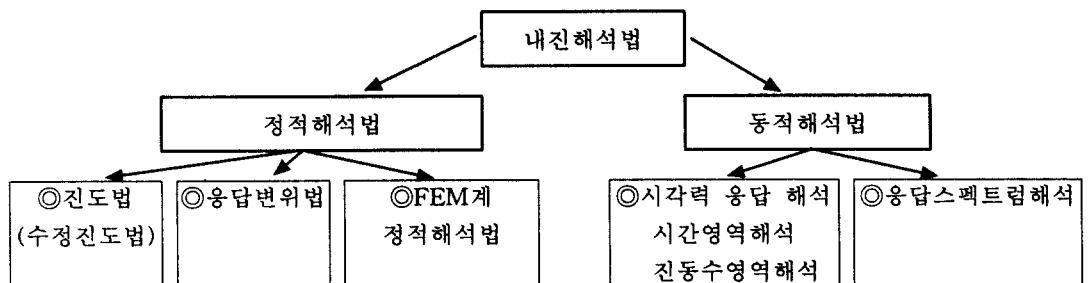
일본의 경우에는 지진이 빈번히 발생함에 따라 1891년부터 지진에 연구에 대한 필요성이 강조되면서, 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 이후 일본에서도 내진설계에서 주류를 이룬 것은 1915년 “家室耐震構造論”에서 제창한 진도법이다. 진도법에 의한 설계가 1978년까지 일본의 대부분의 설계에 적용되어 왔다. 그러나 그 이후에는 진도법만으로 설계를 하는 것은 문제가 있는 것으로 이를 보완한 수정진도법으로의 전환이 시작되었다. 1995년에 수정진도법에 대한 고려가 설계기준에 반영되게 되었다. 하지만, 한계평영법으로 진도법이나 수정진도법을 적용한다 하더라도 안전율 이외의 변위나 응답가속도 등의 결과는 알 수가 없다. 1998년 코베지진에서 안전율과 실제 구조물의 안정성이 반드시 비례하는 것은 아니라는 것을 알게 되었고, 이에 따라 안전율 뿐만 아니라 변위 등의 결과도 규명하여 종합적 판단이 이루어져야 한다는 주장에 따라 NEWMARK법으로 안전율과 변위를 모두 산출할 수 있는 방법이 제안되었다.

국내에서도 현재까지 진도법으로의 해석이 많이 이루어져 왔으나, 현재 국내의 몇몇 기관에서 수정진도법으로의 연구가 진행되고 있고, 그 기준도 마련하고 있다.

3. 해석방법의 일반

3.1 해석법의 종류

지진에 의한 구조물의 해석방법으로는 크게 정적해석법과 동적해석법으로 나눌 수 있다. 이 중에 정적해석법은 지진력을 정하중인 관성력으로 고려하는 방법으로 진도법이 있다. 현재에도 실무에서는 대부분이 이 방법을 사용하고 있는 실정이다. 그러나, 지진 하중은 대상 구조물의 특성, 특히 강성과 감쇄에 의해 지배되기 때문에, 그 특성을 도입한 방법이 사용되어야 할 것이다. 즉, 구조물의 특성을 고려하여 지진하중의 크기를 높이에 따라 다르게 적용하는 수정 진도법으로 적용하여야 할 것이다. 진도법은 강성이 높고 고유주기가 짧은 구조물의 내진 해석에, 수정진도법은 비교적 강성이 낮고 고유주기가 긴 구조물의 내진 해석에 주로 이용된다.



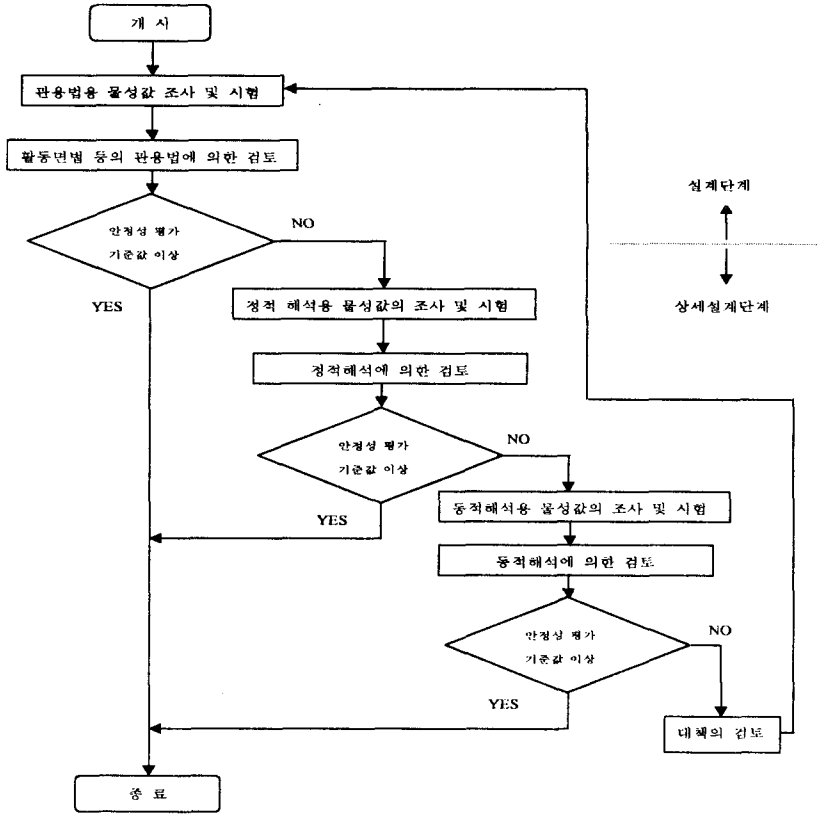


그림-1 설계시 해석 흐름도

그러나 이러한 정적해석의 결과는 동적해석에 의한 결과보다 위험하게 산출되는 경우가 많아 과한 설계가 이루어 질 가능성이 높으며, 또 지반의 성상이 복잡하고 각 지층의 진동특성이 탁월한 경우에는 정적해석결과와 동적해석의 결과가 큰 차이를 보일 수가 있다. 이들 정적 혹은 동적해석으로의 설계 과정에 대한 흐름도는 (그림-1)에서와 같다.

3.2 정적해석법

지진에 대한 구조물의 안전성을 평가하기 전에 정적인 상태에서의 응력상태를 평가해야 한다. 평상시의 응력상태에서 지진시의 응력상태로 변한다고 했을 때의 비교결과를 낼 필요가 있다. 또, 댐의 경우에는 축제 이후 제체배면에 담수가 되었을 때 제체내부의 침윤선을 확인하여 고려하여야 한다. 이와 같은 것은 현재의 상태가 어떤 변형을 (예를 들어, 압밀 등) 일으킨 이후가 되므로 현재의 안전성 평가에는 변형된 이후의 단면을 이용하여 안전성을 평가하여야 한다.

3.3 진도법

진도법이라고도 하는 것은 구조물에 작용하는 불규칙적인 진동인 지진력에 의한 영향을 해석하기 위하여 자중의 일부분을 수평 또는 수직력으로 재하하여 정적해석을 수행하는 방법이다. 지진

시 구조물의 안정이나 부재의 응력계산을 평상시의 해석과 같이 간단히 할 수 있기 때문에 외국의 많은 구조물의 내진설계에 채용되어 있는 실정이다. 이러한 방법에서는 설계지진 계수의 산정이 중요한 역할을 하는데 설계지진 계수의 선정을 위해서는 다음의 가정이 필요하다.

- 1) 지진은 정적외력으로서 구조물의 각부분의 질량에 작용한다.
- 2) 지진력의 크기는 질량에 비례한다. 수평방향 지진력의 크기를 중량으로 나눈값을 지진 계수라고 한다. 따라서 구하는 수평방향 지진력은 지진계수를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = \alpha \cdot m = \frac{\alpha \cdot W}{g} = K \cdot W \quad (1)$$

여기서 F: 관성력, α : 가속도, m: 질량, g: 중력가속도, W: 중량, K: 지진계수(설계진도)이다.

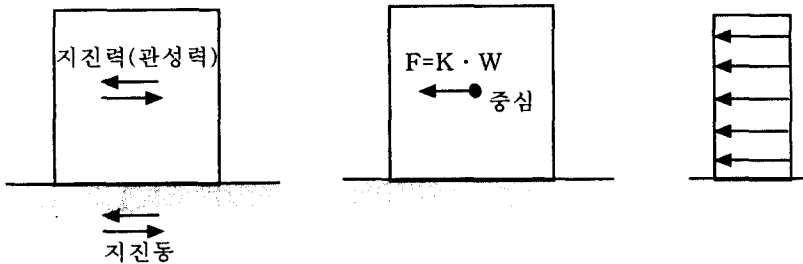


그림-2 진도법의 고려 방법

- 3) 지진계수의 값은 각 질량에 대하여 같은 크기이다.
 - 4) 지진시에 심한 연직진동을 받을 것으로 예상되는 구조물에 대해서는 연직방향의 지진력을 고려해야 한다. 그 크기를 정하는 방법은 수평진동의 경우와 동일하다.
- 이상의 가정을 기초로 한 해석기법을 유사정적해석법이라고 한다.

3.4 수정진도법

일반설계에서 진도는 구조물의 상부에서 저면에 까지 같다고 가정(진도법)한다. 그러나 이 가정은 지진시 높이가 높은 구조물의 관측의 정밀도에 의문이 생기게 된다. 모든 관측결과에 의하면, 상부진동은 하부진동에 비하여 크며, 그 비도 매우 크다. 그러므로 높이가 높은 구조물의 경우에 상부에 대하여 높은 값의 설계진도를 채택하는 것이 보다 더 합리적인 것이다.

더욱이, 같은 사면 내에서도 그 진도는 변화하고, 또 설계용 진도는 사면의 점착력에도 관계되어져야만 한다고 하는 사고가 점차로 확립되어져 왔다. 이와 같이 경우에 따라서는 예상되는 지진동이나 사면의 동적 특성을 고려하여 설계용 진도(그림-3)가 정해져야만 한다고 하는 생각으로부터 수정 진도법이 사용되어지게 되었다.

수정진도법에 있어서도 시간적으로 변화하는 지진력을 정적인 힘으로 치환하여 해석을 행하는 것으로, 정적해석의 일종이다. 다만, 지진동과 구조물의 동적성질을 입력하여 정적인 힘을 결정하는 것을 나타내기 때문에, 유사정적해석에 의한 내진설계법으로 분류되어 진다.

구조물의 응답가속도는 구조물의 고유주기에 따라 다르지만, 그 변화 양상은 입력 지진동에 의해

서도 영향을 받는다. 그 정도는 지진의 규모, 진앙거리와 지반의 영향을 가미한 응답 스펙트럼 그림으로서 표시되어진다. 게다가, 사면의 기본 고유주기를 구하

고, 그 주기에 대응하는 응답 배율을 응답스펙트럼 그림으로부터 구하여 이것을 지반 진도에 곱한 값을 설계 진도라 하면 사면의 동특성을 고려한 설계진도를 결정하는 것이 가능하다. 그리고, 이 진도를 결정 한 후에는 진도법과 같은 순서로 단면력과 응력 등을 구하는 것이 가능하다. 수정 진도법은 응답을 고려한 진도법이라고 불리워지며 비교적 장주기의 구조물에 적용한다.

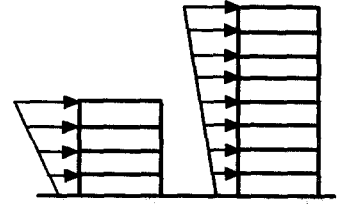


그림-3 수정진도

3.4.1 체체의 진력계수

진도법에서는 지반의 설계진도가 결정되면, 이것을 구조물에 작용시키켜 구조물의 계산이 가능하게 된다. 그러나 수정진도법에서는 구조물의 영향을 고려한 진도의 보정이 필요하게 된다. 90m 정도의 댐에 대하여 입력지진파를 파라메타로 하여 모드법에 의한 지진응답해석을 행하고 지진동의 증폭을 높이의 함수로 나타내면 (그림-4)의 얇은 실선과 같이 된다. 이것을 깊이 방향으로 계단형태로 설정하면 (그림-4)의 점선으로 된다. 또 계산은 지하일산감쇠(逸散減衰)와 비선형에 관한 이력감쇠를 합하여 20%의 감쇠를 생각하면, 즉 상하 움직임의 영향으로 원래의 파형을 10% 크게 입력하여 수정진동만의 해석을 진행하게 된다. 즉, 상술한 동적인 효과와 정적인 효과의 차를 감안하여, 위에서 저감율을 1/2로 설정하는 것이 (그림-4)의 굵은 실선으로 나타낸 것이다.

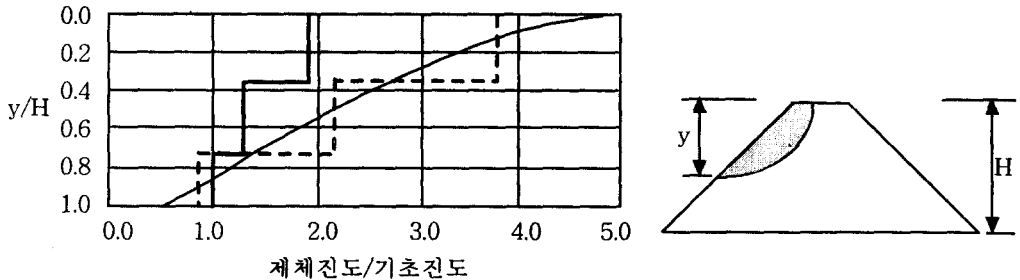


그림-4 지진동의 증폭

이 방법에서는 슬라이스에 작용시키는 관성력은 높은 함수로 되고 있는 것으로, 슬라이스마다 진도가 다르게 되면 계산이 불편하게 된다. 계산을 위해서는 슬라이스 전체에 같은 진도를 고려하는 것이 편리하다. (그림-4)의 분포에서 진력계수 즉, 활동토피 전체에 작용하는 관성력의 증력가속도에 대한 비를 구하면, (그림-5(a))와 같이 진력계수는 높이 방향으로 거의 직선적으로 변화하게 된다.

한편, 최대가속도를 0.2g로 조정 한 지진파를 이용한 비선형 지진응답해석프로그램에서 같은 형태로 계산을 행하여 활동활동토피에 발생하는 평균가속도를 구하고, 가속도 증폭을 구하고, 실제에 사용한 지진동에 대하여 과거의 사례를 참조하여 이것을 70~80%로 저감한 값을 채택하면 (그림-6)의 관계가 얻어진다.

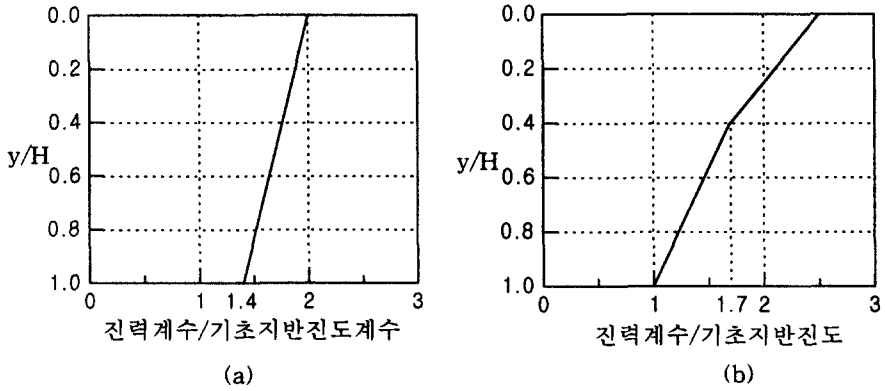


그림-5 진력계수의 분포

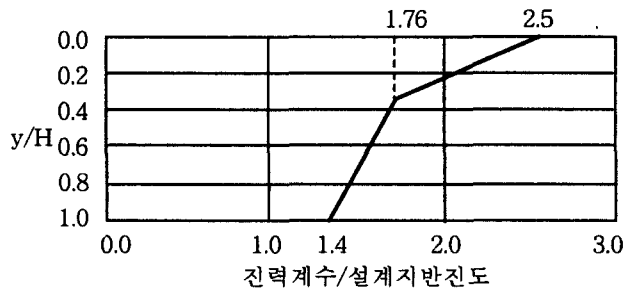


그림-6 제체의 지진계수

3.5 응답변위법

라이프라인이나 지하도 등의 지중구조물은 주변지반의 구속에 의한 자기(自己)진동이 억제되고, 또 주변 지반에 진동에너지가 확산하는 일산감쇠(逸散減衰)가 크고, 자기진동은 즉시 받게 된다. 이와같은 것으로부터 지진시 지하구조물의 움직임은 지반의 진동에 따라 발생하는 것이 되고, 지진의 영향으로는 주변지반의 상대변위가 지배적이게 된다. 이 때문에 지반의 변위를 강제적으로 구조물에서 고려하여 응력을 정적으로 계산하는 것이다.

응답변위법은 자연지반의 응답변위를 지반스프링으로 고려하여 구조물에 작용시켜 구조물의 주면전단력, 관성력 등을 가하여 응력을 계산한다.

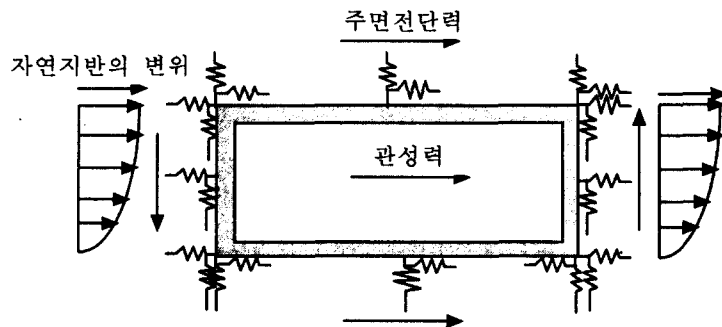


그림-4 응답변위법의 모델

3.6 동적해석방법

구조물의 형상이 단순하여 일차 진동모드가 탁월하고 고차모델의 영향을 무시할 수 있는 경우에는, 진도법이나 수정진도법에 의해 구조물의 실제의 지진시의 응답을 정밀도 있게 근사할 수 있다. 그러나 진동성상이 복잡한 구조물이나 댐과 같은 중요도가 높은 구조물에 대해서는 상세한 내진검토가 요구되기 때문에 동적해석법이 사용된다.

동적해석법은 대상으로 하는 구조물 혹은 구조물과 지반을 진동모델로 모델화 하여 지진입력으로 지진동과형 혹은 응답 스펙트럼을 입력하여 해석하는 방법이다. 이 방법은 등가정적해석법에 비해, 보다 실제 현상에 가까운 거동을 재현할 수 있고, 원리적으로 어떠한 구조물에도 적용할 수 있는 방법이다.

3.6.1 응답스펙트럼 해석 방법

응답스펙트럼 해석방법은 단자유도계에서 각각의 하중에 대한 구조물의 최대변위, 최대속도, 최대가속도 등의 응답을 나타낸 응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 응답의 구하는 방법이다. 응답스펙트럼 해석법은 시간이력응답 해석법에 비하여 다소 오차가 발생하는 근사적인 방법이지만 대형 구조물이거나 정밀한 결과를 원하지 않는 경우에는 간편하게 구조물의 동적특성을 비교적 잘 파악할 수 있다. 현재 대부분의 구조물에 대한 지진해석은 응답스펙트럼 해석법에 의하여 수행되고 있다.

3.6.2 시간이력 응답해석법

시간이력 응답해석은 모드 중첩법과 직접적분법으로 분류할 수 있다. 일반적으로 구조물이 탄성 거동을 하는 경우에는 모드 중첩법이 편리하게 사용되며 구조물이 비선형거동을 하는 경우에는 직접적분법이 사용된다.

3.6.3 주파수응답해석법

진동계의 운동방정식을 주파수영역에서 계산하여 구조물의 시각력응답을 구하는 방법이다. 시간영역에서 주파수영역으로, 또는 그 반대의 변환은 일반적으로 고속 푸리에 변환(FFT)이 사용된다. 최근에는 지반과 구조물의 상호작용을 고려한 지진응답해석을 실시하는 것이 종종 있다. 이 경우 지반탄력이 주파수에 의존하여 변화하는 복수강성으로 표현되기 때문에 이 해석법에 의하여 해석 할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문에서 내진설계법의 여러 가지 방법들에 대하여 살펴보았는데, 정적해석으로 내진설계를 실시하는 경우에도 많은 고려사항과 선택사항들이 있는 것을 알 수 있었으며, 그 방법의 선택에도 신중을 기하여야 할 것이다. 실제 지진응답해석과 같은 난해한 해석을 하지 않고도 정적해석만으로 내진설계를 한다하더라도 설계자가 오류를 범할 수 있는 여지가 많이 존재하고 있다. 현재 우리 나라가 지진에 대한 연구가 많이 진행되지 않은 상태에서 특별한 경우가 아니라면, 어렵고 시간이 많이 소모되는 응답해석보다 현재까지 많이 사용해왔던 정적해석 프로그램을 통하여 내진설

계기법의 토대를 마련하는 것이 순서일 것이라고 필자들은 생각한다.

참고문헌

1. 일본土木學會(1989), 動的解析と耐震設計(地震動・動的物性) Vol. 1, 技報堂出版
2. 元田良孝, 萩原良二(1999), 地震工學概論, 森北出版株式會社
3. 坂本忠彦(1998), ロックフィルダムの力學舉動と安定性評價に関する研究
4. Kokusho, T.(1987), In-situ dynamic soil properties and their evaluations, Proc. 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineerings, Vol. 2
5. Drnevich, V. P. and Massarsch, K. R.(1979), Sample disturbance and stress-strain behaviour, Proc ASCE, Vol. 105, No. GT9, pp. 1001 - 1016
6. Hardin, B. O. and Black, W. L.(1968), Vibration modulus of normally consolidated clay, Proc. ASCE. Vol. 94, No. SM2, pp 353 - 369
7. 오병현, 신동훈, 박성진, 황성춘(2000), 수정진도법에 의한 지진시의 사면안정해석에 관하여, 한국지진공학회