

현장시험을 통해 지반의 비선형 전단탄성계수를 산정하기 위한 역해석방법의 개발

Development of Inversion Analysis Framework to Determine Nonlinear Shear Moduli of Soils In Situ

안재훈*

Ahn, Jaehun

Abstract

The large scale shaker can be employed to measure linear and nonlinear shear moduli of soils in situ as a function of shear strain. The method involves applying dynamic loads on a surface foundation measuring the dynamic response of the soil mass beneath the foundation with embedded instrumentation. This paper focuses on the development of a framework of the inverse analysis for the interpretation of test data to estimate linear and nonlinear shear moduli of soils along with the necessity of the inverse analysis. The suggested framework is based on the nonlinear least squares but it uses two iterative loops to account for the nonlinear behavior of soil that sensors are not located. The validity of the suggested inversion framework is tested through a series of numerical parametric studies. An example use of the suggested inversion framework is also shown. Because the field condition may affect the accuracy of suggested method, it is important to conduct a preliminary inverse analysis to quantify the discrepancy between the estimated modulus and the baseline.

key words : Nonlinear shear modulus, dynamic soil property, inverse analysis, in situ test

요 지

지반의 비선형 전단탄성계수를 결정하기 위한 현장시험에서는, 먼저 지반과 원형기초에 지오폰을 설치하고, 기초에 대형 진동 발생장치를 이용하여 진동하중을 가한다. 이 때, 지오폰으로부터 지반과 기초의 거동을 측정하고, 본 거동을 분석하여 전단탄성계수와 해당 전단변형률을 결정할 수 있다. 본 논문에서는 현장시험결과로부터 지반의 선형, 비선형 전단탄성계수를 결정하기 위한 역해석 과정의 필요성과 그 개발에 초점을 맞추었다. 제안된 역해석 과정은 비선형 최소자승법을 근간으로 하며, 거동이 계측되지 않는 곳의 지반의 비선형성을 고려하기 위하여 이중 반복루프를 사용하였다. 역해석 과정의 적용성을 검토하기 위하여 일련의 수치해석을 수행하였으며, 또한 역해석 적용의 예제를 보였다. 제안된 방법은 현장지반의 전단탄성계수 분포의 변화가 극심하지 않은 경우에는 전반적으로 우수한 적용성을 보이지만, 해석대상 지반의 전단파속도 분포가 역해석의 정확성에 영향을 수 있으므로, 예비 역해석을 통해 산출될 오차를 정량화 하는 것이 필요하다.

핵심용어 : 비선형 전단탄성계수, 지반 동적 물성치, 역해석, 현장시험

1. 서 론

지반의 자유단에서의 지진해석 및 지반 구조물의 동적해석을 등가선형모델을 사용하여 수행할 경우, 전단변형률에 따른 지반의 비선형 전단탄성계수 값은 중요한 입력치로 작용한다. 지반의 비선형 전단탄성계수의 결정은 그동안 주로 실내시험을 통해서 산출하거나 혹은 실내시험을 바탕으로 한 문헌값들을 사용하여 왔다(Seed 등, 1970; 김동수, 1995). 실내시험시 시료의 교란과 현장조건의 불확실성으로 인하여 실내시험을 통해 산정한 탄성계수가 현장에 존재하는 물성치와 일

치하지 않을 수 있다는 것은 주지의 사실이지만, 시험장치와 기법의 한계 때문에 현장시험으로는 전단변형률에 따른 지반의 비선형 전단탄성계수를 구하기가 힘든 것이 사실이었다. 하지만, 최근에는 대형진동장치를 통해서, 현장에서 높은 범위의 변형률까지 진동을 부과함으로써, 현장시험기법을 통해 지반의 비선형 전단탄성계수를 구할 수 있게 되었다(Stokoe 등, 2006; Ahn, 2007). 본 현장시험에서는 그림 1에 나타난 것처럼 원형기초와 지중에 지오폰을 매입한 뒤, 기초 상에 일정량의 수직 정적하중을 가한 후, 다시 기초에 수평방향이나 수직방향으로 여러 단계의 주기적 진동하중을 가하게 된

*정회원 · 놀스캐롤라이나 주립대 계약교수 (E-mail: jahn4@ncsu.deu)

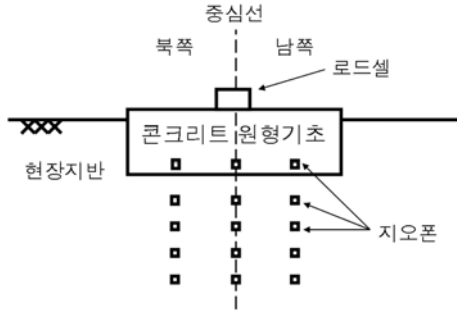


그림 1. 현장시험 설정

다. 이 때, 진동을 수평방향으로 가할 경우, 지반에 전파되는 전단파의 속도를 파동의 위상차를 통해 해석하여 지반의 전단탄성계수를 구할 수 있고, 해당 전단변형률은 각 층의 지오폰들의 상대적인 위치로부터 계산할 수 있다.

한편, 원형기초에 주기적 수직진동을 가하는 경우에도 지오폰으로부터 위상차 해석으로 전파속도를 측정하고 탄성계수를 구할 수 있지만, 이로부터 계산된 탄성계수가 의미하는 바는 분명하지 않다. 원형기초 하의 지반을 가상의 원통으로 가정한다면, 그림 2에 나타난 대로 원통의 측방향 변위가 완전히 구속된 조건 하에서는 원통에 전파되는 파동속도는 P파속도가 될 것이고(그림 2(a)), 측방향 구속이 존재하지 않을 경우에는 파동속도가 rod파속도가 될 것이다(그림 2(b)). 이 때, P파와 rod파의 속도로부터 계산된 탄성계수들은 각각 구속탄성계수와 영의 탄성계수에 해당할 것이다. 하지만 현장지반조건하에서 가상의 원통을 가정한다면, 가정된 원통은 그림 2(c)에 보여진대로 측방향 변위가 완전히 구속되거나 불구속되지 않은 상태에 있기 때문에, 이 경우에 구해진 탄성계수가 가지는 의미는 분명하지 않다. 따라서 원형기초를 수직으로 진동하는 경우에는 지반의 전단탄성계수를 구하기 위해 위상차 해석이 아닌 다른 접근방법이 필요하다고 하겠다. 본 논문의 목적은 현장시험에서 기초에 주기적 수직진동을 가할

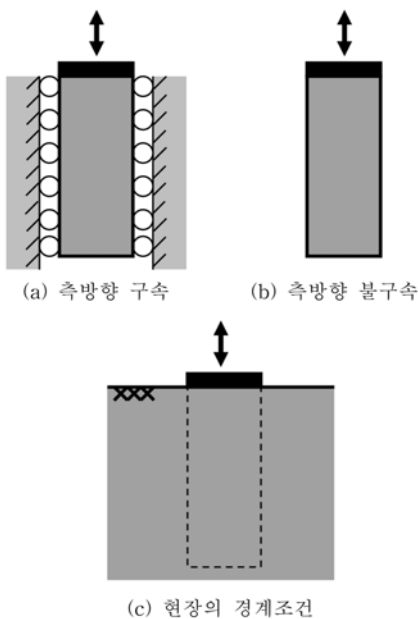


그림 2. 각기 다른 경계조건 하의 가상의 원통

경우, 예측된 지반과 원형기초의 거동으로부터 전단탄성계수를 구하는 방법을 개발하고 그 적용성을 타진하는 데에 있다.

2. 해석 방법

현장시험에서 원형기초에 진동을 수직으로 작용하는 경우에, 현장시험결과로부터 전단탄성계수를 계산하는 방법으로 역해석 방법을 제안하였으며, 본 절에서는 제안된 역해석 과정의 세부사항을 언급하였다.

2.1 역해석

시스템을 구성하는 해석적 혹은 수치적 모델이 존재하는 경우의 역해석에서, 전방해석은 시스템의 모델을 이용하여 입력치로부터 출력치를 계산하는 과정을 나타내고, 역해석은 반복적인 전방해석을 통하여 시스템을 나타내는 해석적 모델의 매개변수를 결정하는 방법을 나타낸다. 이와 같은 반복적인 계산을 통한 역해석의 과정이 그림 3에 묘사되어 있다. 본 그림에서 $G^{(n)}$ 은 n 번째 반복계산시의 전단탄성계수의 값들을 나타내고, d_m 와 d_c 는 각각 현장시험을 통해 측정된 변위와 전방해석을 통해 계산된 변위들을 나타내며, Φ 은 d_m 와 d_c 사이의 오차의 의미한다.

그림 3에 주어진 것처럼, 역해석에 해석대상 시스템과 해석 모델이 주어진 경우, 해석대상 시스템에서 측정된 출력치 d_m 와 전방해석을 통해 해석모델에서 계산된 d_c 가 일치하거나 둘 사이의 오차, 즉 Φ 가 충분히 작게 될 때까지 전단탄성계수 $G^{(n)}$ 을 바꾸어 가며 해석을 수행한다. 본 논문에서의 해석대상 시스템은 그림 1에 주어진 원형기초와 지반의 구조에 해당하며, 해석모델로는 선대칭 유한요소모델이 사용되었다. 선대칭 유한요소모델의 측단경계에는 현장에서의 파동전파조건을 모사하기 위해 Kausel 등(1975)에 의해 개발된 전달경계를 사용하였다. 반복해석시 다음 단계에서의 $G^{(n)}$ 을 정하기 위한 매개변수 산정 알고리즘으로는 비선형 최소자승법인 Levenberg-Marquardt 방법을 MATLAB 프로그램으로 작성하여 적용하였다(Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

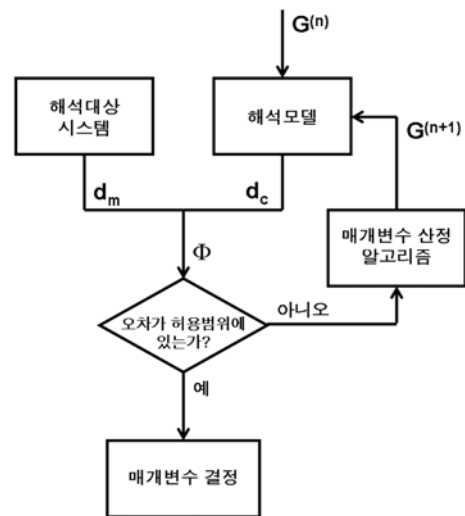


그림 3. 해석모델을 이용한 역해석 과정

2.2 제안된 역해석 과정

현장시험에서 지반에 수직진동을 가하고 그 거동을 측정할 경우, 측정된 지반의 거동을 이용하여 역해석으로 산정한 지반의 전단탄성계수와 감쇠비에는 여러 조합이 존재할 수 있다. 따라서 지반에 수직진동을 가할 경우의 시험결과만으로는 주어진 거동으로부터 전단탄성계수와 감쇠비의 효과를 분리하여 두 값 모두를 산정하는 것은 쉽지 않은 일이다. 본 논문에서는 역해석의 역할을 한정하여, 전방해석모델의 모든 영역에 감쇠비의 곡선을 설정하고, 이를 바탕으로 역해석을 통해 결정된 전단탄성계수의 곡선을 해석시 설정한 감쇠비의 곡선과 함께 제시하도록 한다. 하지만 향후 동일한 지반 하에 수평진동과 수직진동 시험의 결과가 모두 존재할 경우에, 수평진동 시험결과로부터 전단탄성계수를 결정하고, 수직진동 시험결과로부터 본 논문에 제안된 역해석 과정을 이용하여 현장지반의 감쇠비를 결정할 수 있을 것이다.

주어진 문제의 역해석에 사용된 전방해석모델의 세부사항이 그림 4에 제시되어 있다. 제안된 전방해석모델에는 그림에서와 같이 지반이 네 개의 상층부, 전이부, 하층부의 총 6개의 층으로 분류하였다. 원형기초의 반지름으로는 현장시험에서 사용되는 크기인 반지름 $r = 0.457 \text{ m}$ 가 사용되었으며, 상층부의 총 길이는 r , 전이부는 $2r$, 하층부는 $11r$ 로 설정하였다. 해석모델의 전 영역에는 크기 $r/4 = 0.114 \text{ m}$ 인 정사각형의 유한요소를 사용하였다. 해석에 사용될 동적하중의 진동수가 50 Hz 이고, 지반의 초기 전단파속도가 180 m/s 임을 감안할 때, 유한요소의 크기 0.114 m 는 지반에 발생하는 파동을 해석하기에 충분히 작은 크기로 판단된다. 상층부 각 층의 상하단의 작은 사각형은 그림 1의 지오폰이 매입된 계측점을 나타내며, 현장시험에서는 본 계측점에서 지반의 거동이 계측되고, 계측값을 역해석에 이용하여 네 개의 상층부에서 전단탄성계수를 결정하게 된다. 역해석시에는 그림 1에 제시된 15개의 계측점 중 한 번에 같은 열의 존재하는 5개의 계측점이 사용되며, 이로부터 네 개의 상층부 각각에 한 값의 전

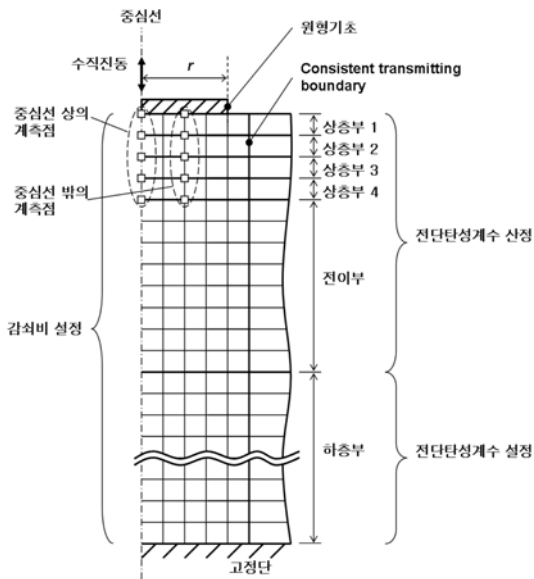


그림 4. 전방해석모델

단탄성계수를 계산한다.

역해석을 이용하여 네 개의 상층부에 지반의 전단탄성계수를 결정하기 위해서는, 전방해석모델의 계측점 이하의 지반에 전단탄성계수의 입력이 요구된다. 현장지반의 하층부의 선형 전단탄성계수의 값은 Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) 방법(Stokoe 등, 1994)과 같은 비파괴 시험으로 구할 수 있지만, 하층부 지반의 비선형 거동을 등가선형 방법으로 모사하기 위해서는 하층부의 정규화 전단탄성계수 감소곡선, 즉 G/G_{max} 곡선을 가정하여야 한다. 하지만 이 때 하층부에 가정된 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 상층부에서 산정되는 전단탄성계수 값에 영향을 미치지 않아야 한다. 역해석되는 상층부의 전단탄성계수가 하층부에 가정된 정규화 전단탄성계수로부터 받는 영향을 최소화하기 위하여 상층부와 하층부 사이에 전이구간을 설정하였으며, 주어진 전방해석모델을 적용하여 역해석을 수행할 경우에 하층부에 가정되는 정규화 전단탄성계수가 상층부에서 결정되는 전단탄성계수의 값에 영향을 미치는가의 여부가 수치해석을 통해 검토될 것이다.

하층부 지반의 비선형 거동을 상층부의 전단탄성계수 산정에 고려하기 위하여, 제안된 역해석 과정은 그림 3의 반복루프를 포함하는 또 하나의 큰 루프를 가지며, 해석순서는 다음과 같다.

1. 전방해석모델의 전 영역에 감쇠비 곡선을 설정한다.
2. SASW 시험을 통해 하층부의 초기 전단탄성계수를 결정하고, 또한 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 설정한다.
3. 비선형 최소자승법을 통하여, 전방해석모델의 변위 출력치가 현장시험결과의 계측치와 일치할 때, 상층부 1, 2, 3, 4와 전이부의 전단탄성계수를 구한다(그림 3의 반복루프).
4. 전방해석모델 전 영역의 전단변형률을 계산하고, 이에 따라 하층부의 전단탄성계수와 전 영역의 감쇠비를 재계산한다.
5. 상층부에 결정된 전단탄성계수의 값이 수렴할 때까지 과정 3과 4를 되풀이한다.
6. 상층부의 전단탄성계수를 결정한다.

3. 제안된 역해석 과정의 검증

본 절에서는 제안된 역해석 과정의 타당성을 평가하기 위해, 현장시험결과 대신 수치해석(전방해석모델)의 결과를 역해석에 적용하였다. 이 경우 수치해석에 사용된 전단탄성계수의 기준값과 역해석된 전단탄성계수를 비교할 수 있기 때문에, 이를 통해 제안된 역해석 과정의 타당성을 평가할 수 있다. 본 절에서는 먼저 지반의 초기 전단파속도의 분포와 하층부에 설정된 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 제안된 역해석의 적용성에 미치는 영향을 검토하였으며, 해석을 위해 그림 4의 기초 중심선 상의 5개의 계측점의 출력치를 사용하였다. 마지막으로, 중심선 밖의 계측점의 출력치를 역해석에 사용할 경우의 적용성을 검토하였다.

3.1 전단파속도 분포의 영향

현장지반의 초기조건에 따라 지반의 전단파속도의 분포, 즉 전단탄성계수의 분포는 달라진다. 또한, 현장시험에서 진동하중을 가하기 전에 재하하는 수직 정적하중으로 인해 지반에 발생하는 구속하중 역시 지반의 전단파속도 분포에 영향을 주게 된다. 따라서 현장조건과 구속하중에 따르는 지반의 전단파속도의 분포가 상층부의 전단탄성계수 산정에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 즉 제안된 역해석 과정의 적용성이 지반의 전단파속도 분포에 따라 달라지는가를 검토하기 위하여, 그림 5에 주어진 각기 다른 초기 전단파속도의 분포조건 S1, S2, S31, S32을 제안된 역해석 과정의 적용성 검증에 사용하였다.

해석조건 S1에서는 지반의 전단파속도 분포가 균일하다고 가정한다. 지반의 초기 전단파속도가 균일하더라도, 하층부의 전단파속도는 제안된 역해석 과정을 따르는 동안 발생하는 전단변형률에 따라서 변화할 것이다. 해석조건 S2는 현장시험에서 지반에 가해지는 수직 정적하중에 따라서 기초 하 지반의 전단탄성계수가 증가하는 경우를 나타낸다. 해석조건 S31과 S32는 하층부 지층에 따라 지반의 전단탄성계수가 계단형식으로 증가하는 지반을 모사하며, 해석조건 S32는 S31보다 전단탄성계수가 깊이에 따라 더 크게 증가하는 경우를 나타낸다.

그림 6에 각각의 해석조건하에 역해석된 전단탄성계수를 기

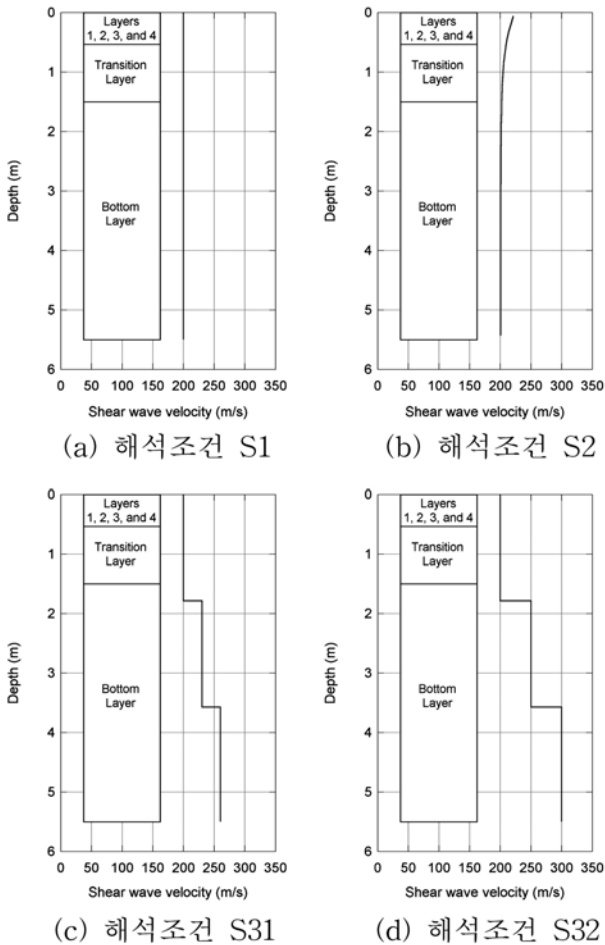
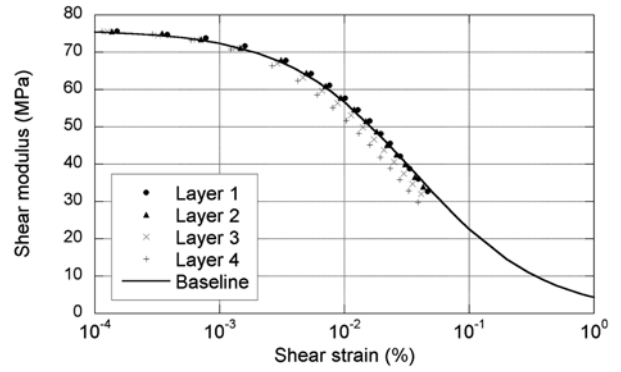
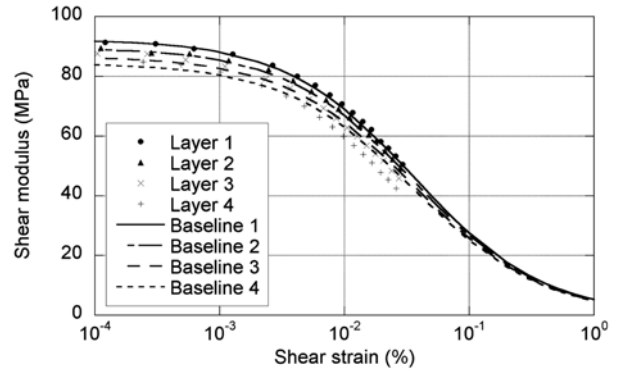


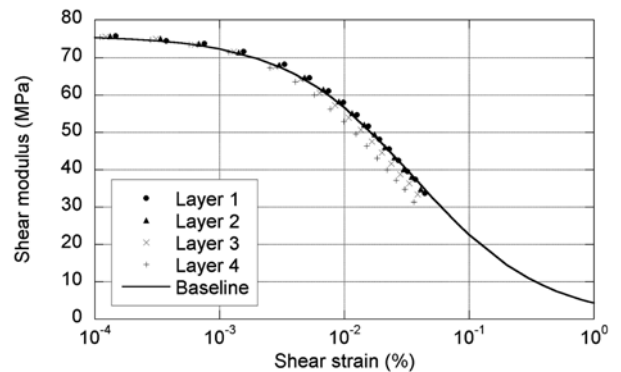
그림 5. 역해석에 사용한 전단파속도 분포



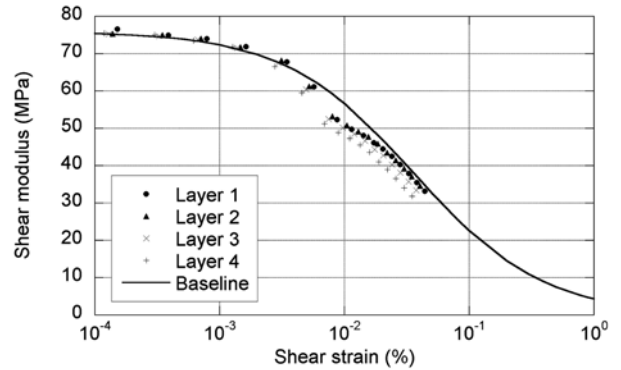
(a) 해석조건 S1



(b) 해석조건 S2



(c) 해석조건 S31



(d) 해석조건 S32

그림 6. 각기 다른 전단파속도 분포 하의 역해석 결과

준값과 함께 제시하였다. 제안된 역해석 과정이 주어진 문제에 적용성이 좋다면 역해석된 값과 기준값 사이의 오차가 크지 않아야한다. 그림 6(a)에 주어진, 지반의 분포가 균일한

해석조건 S1의 결과에서는, 상층 1과 2에서 역해석된 전단탄성계수의 값은 해석된 모든 전단변형률의 범위에서 그 기준값과 매우 근접하게 일치하는데 반해, 상층 3과 4에서는 재료의 비선형성이 커질수록 역해석값과 기준값의 오차가 증가하는 경향을 보이며, 상층 3과 4에서 역해석된 전단탄성계수는 전단변형률 $4 \times 10^{-2}\%$ 에서 최대 전단탄성계수 $G_{max} = 76 \text{ MPa}$ 의 각각 5%와 9%에 해당한다. 해석조건 S2는 상층부 1, 2, 3, 4에 각기 다른 전단탄성계수가 주어지는 유일한 경우이며, 그림 6(b)의 역해석 결과에 나타난 것처럼 기초에 가까운 층일수록 기초에 재하된 정적하중으로부터의 구속효과가 커서, 이에 따라 전단탄성계수의 기준값 또한 커지는 것을 확인할 수 있다. 상층부 1과 2에서 역해석된 전단탄성계수는 여전히 주어진 모든 범위에서 기준값과 매우 근접하는 경향을 보이며, 상층 3과 4에서는 비선형성이 커질수록 역해석 값과 기준값 사이의 오차가 증가하며 전단변형률 $2.7 \times 10^{-2}\%$ 에서 각각 상층 3과 4에 최대 전단탄성계수 값의 3%와 6%에 해당한다. 동일한 경향이 해석조건 S31 하에서도 반복되어 상층부 1과 2에서의 역해석 값과 기준값이 상층부 3과 4에서보다 더 나은 일치를 보인다. 이 때, 상층부 3과 4에서의 오차는 전단변형률 $3.8 \times 10^{-2}\%$ 에서 최대 전단탄성계수 값의 4%와 9%에 해당한다. 해석조건 S32의 결과에서는, 전단변형률이 $3 \times 10^{-3}\%$ 보다 작은 경우에는 역해석 값이 기준값에 근접하는 경향을 보이지만, 전단변형률이 $5 \times 10^{-3}\%$ 보다 커지는 경우에는 상층부 네 개의 모든 층에서 역해석된 전단탄성계수의 값이 기준값을 과소산정하기 시작한다. 특히, 상층부 4에서는 전단변형률값이 $6.8 \times 10^{-3}\%$ 일 때 오차가 최대 전단탄성계수의 15%에 이른다.

본 수치해석 결과로부터 논문에서 제안된 역해석 과정은, 전단탄성계수가 결정되는 층의 위치와 지반의 전단파속도 분포에 따라서 적용성이 달라짐을 알 수 있으며, 지반의 전단파속도의 분포가 해석조건 S32 처럼 극명하지 않은 경우에는 제안된 역해석 과정의 결과는 전반적으로 기준값에 근접하는 결과를 주는 것으로 나타난다. 역해석시에 발생하는 전단탄성계수의 역해석값과 기준값 사이의 오차는 지반의 현장조건을 이용한 예비 역해석을 수행함으로써 정량화 할 수 있으며, 다음 절에 본 예비 역해석을 해석예제와 더불어 설명하였다.

3.2 하층부 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 영향

하층부의 초기 전단파속도 분포, 즉 선형 전단탄성계수의 분포는 SASW 시험을 통해 결정될 수 있지만 비선형 전단탄성계수는 사전에 결정할 수 없으므로, 하층부 지반의 비선형 거동을 역해석에 고려하기 위해서는 하층부에 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 설정하여야 한다. 정규화 전단탄성계수의 값은 해당 지반에 일반적으로 권장되는 값을 사용할 수 있지만, 가정된 곡선 정규화 탄성계수 값이 반드시 현장지반 하층부의 물성치와 일치하는 것은 아니므로, 하층부에 가정된 정규화 전단탄성계수 값이 상층부의 전단탄성계수 역해석 결과에 미치는 영향이 있는가에 대한 검토가 필요하다. 따라서 본 절에서는 해석 전 영역에 그림 7에 주어진 정규화 전단탄성계수의 중간곡선을 적용하여 수치해석 수행하고 본 해석

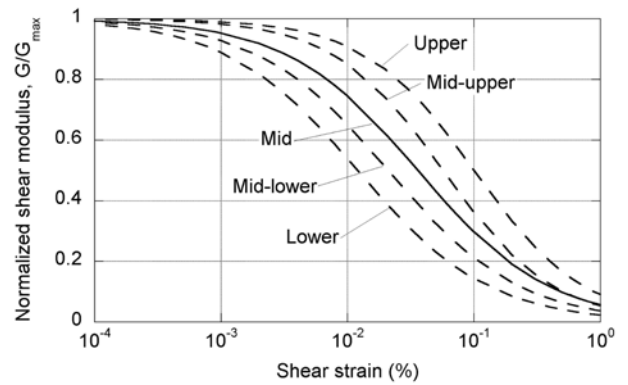


그림 7. 하층부에 적용한 정규화 전단탄성계수 감소곡선

의 입력치와 출력치를 이용하여 역해석을 수행하였으며, 역해석시에는 하층부에 고의적으로 실제의 정규화 전단탄성계수 값과는 다른 하위, 중하위, 중상위, 상위의 곡선을 설정함으로써, 하층부 정규화 전단탄성계수 값의 입력의 오차가 상층부의 전단탄성계수 역해석에 미치는 영향이 검토되었다. 그림의 중하위와 중상위 곡선은 Seed 등(1970)의 실내시험으로부터 제안된 사질토에 대한 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 범위를 토대로 하였으며, 하위와 상위의 곡선은 좀 더 극단적인 정규화 전단탄성계수 가정시의 오차를 모사하기 위해 제시하였다. 초기 전단파속도로는 그림 5(c)에 나타난 해석조건 S31의 전단파속도 분포를 사용하였다.

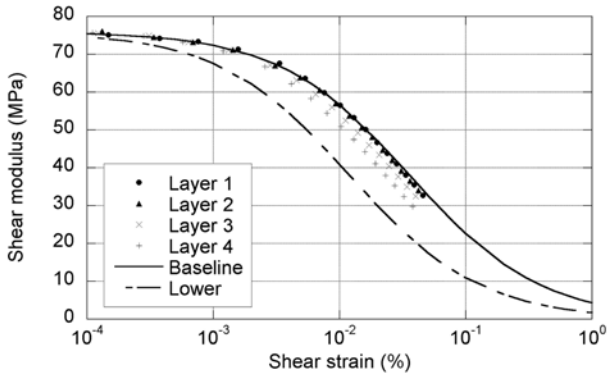
하층부에 실제와는 다른 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 설정한 경우에 역해석된 전단탄성계수의 결과를 그림 8에 제시하였다. 그림 8에 나타난 모든 경우에 있어서 역해석된 전단탄성계수의 결과와 기준값의 관계는 거의 변하지 않는 경향을 보이며, 따라서 하층부에 설정된 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 역해석의 결과에 미치는 영향은, 본 해석에 사용된 정규화 전단탄성계수의 범위에 한하여, 매우 작음을 알 수 있다. 또한, 모든 해석결과에서, 상층부 1과 2의 역해석값이 상층부 3과 4의 결과보다 더 기준값에 근접하는 경향이 반복되는 것을 알 수 있다.

3.3 계측점의 영향

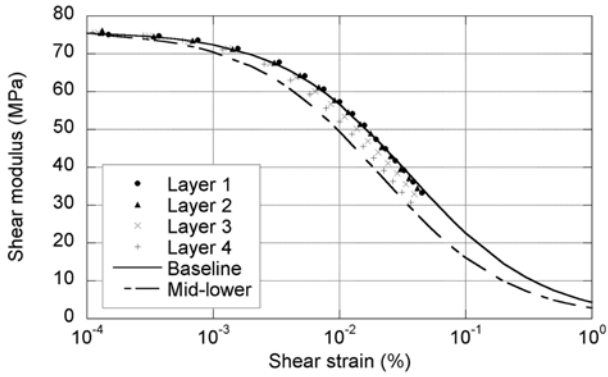
이제까지의 해석은 원형기초 중심선 상의 계측점의 거동을 바탕으로 수행하였으나, 실제로 현장시험에서는 그림 1에 나타난 대로 기초의 중심선 밖에서도 측정된다. 따라서 중심선 밖에서 측정된 지반과 기초의 거동 또한 제안된 역해석에 적용할 수 있는가를 검토하기 위하여, 중심선 밖에서 측정된 거동을 그림 5에 주어진 네 가지의 해석조건 S1, S2, S31, S32하에 역해석에 사용하였다. 본 해석 결과들은 기초의 중심선 상의 거동을 이용한 경우의 결과와 거의 일치하는 경향을 보였다. 실제로 해석결과들은 그림 6의 반복이라고 할 만큼 매우 유사했으며, 본 논문에는 결과를 보이지 않았다.

4. 역해석 적용의 예

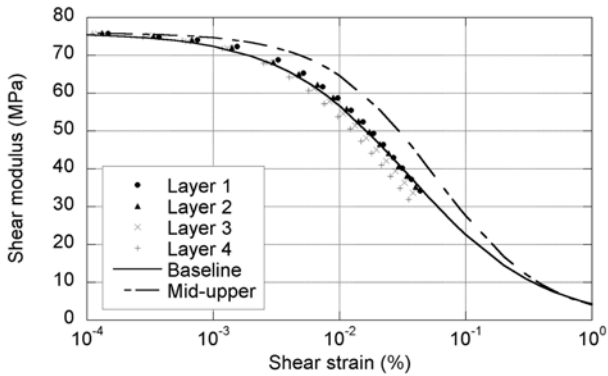
본 절에서는 제안된 역해석 과정이 현장시험에 적용되는 예를 보여주기 위하여 텍사스 A&M 대학 내의 National



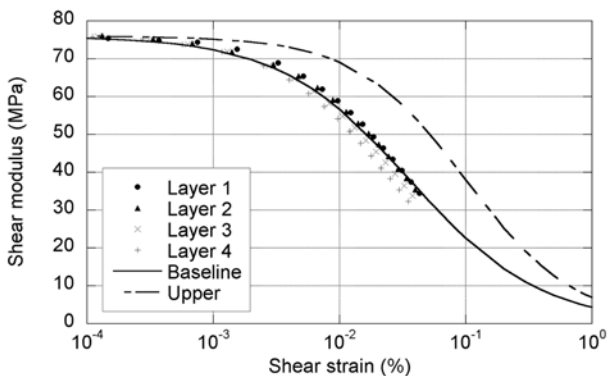
(a) 하위 곡선을 적용한 경우



(b) 중하위 곡선을 적용한 경우



(c) 중상위 곡선을 적용한 경우



(d) 상위 곡선을 적용한 경우

그림 8. 하층부에 각기 다른 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 적용한 역해석 결과

Geotechnical Experimentation Site (NGES) 현장의 실트질 사질토 지반에서 수행한 현장시험 결과를 분석하였다. SASW

방법으로 산정한 해석대상지반의 전단파속도의 분포가 그림 9에 주어졌으며, 전단파속도의 분포는 깊이 12.5 m에 이르기 까지 매우 균일한 것으로 나타났다. 지반의 밀도와 포아송비 등의 기본 물성치는 Briaud(1997)에 의해 보고된 값들을 이용하였다.

먼저 현장지반의 전단파속도 분포조건하에 수행될 역해석의 오차를 정량화하기 위하여, 현장지반의 전단파속도 분포를 사용하여 예비 역해석이 실시되었으며 해석결과를 그림 10에 제시하였다. 그림의 검은 사각형은 상층부 1, 2, 3, 4의 네 층에서 역해석된 전단탄성계수 평균값을 정규화한 값이며, 현장시험에서 발생하는 오차를 줄이기 위한 목적으로 현장시험 결과를 분석하는 경우에도 상층부 네 개 층으로부터 산정된 전단탄성계수의 평균값을 정규화 전단탄성계수 감소곡선 산정에 사용할 것이다. 그림 10에 주어진 정규화 전단탄성계수는 작은 전단변형을 범위에서는 기준값과 매우 근사한 일치

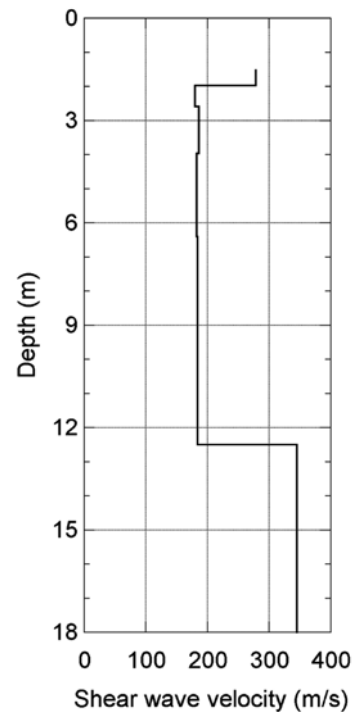


그림 9. NGES 현장의 전단파속도 분포 (Park, 2008)

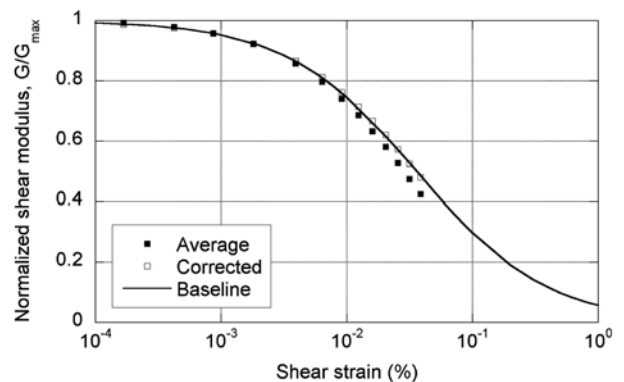


그림 10. NGES 현장의 전단파속도 분포를 바탕으로한 역해석 결과

5. 결 론

를 보이지만, 전단변형률이 증가함에 따라 혹은 정규화 전단탄성계수 값이 감소함에 따라 역해석값과 기준값 사이의 차이가 증가하는 경향을 나타낸다. 이로부터 역해석의 오차와 정규화 전단탄성계수 값의 관계를 그림 11에 제시하였으며, 역해석의 오차는 정규화 전단탄성계수 값이 감소함에 따라 선형에 가깝게 증가하는 경향을 보인다. 이에 기초하여 그림 11에 주어진대로 선형 보정식을 산정한 후 역해석 결과에 적용하였다. 그림 10의 흰 사각형에는 보정식을 통해 조정된 결과가 나와 있으며, 이 때의 정규화 전단탄성계수는 예상대로 기준값과 더 좋은 일치를 보여준다. 본 선형 보정식은 현장시험결과의 분석시에도 동일하게 적용될 것이다.

그림 12에는 현장시험의 역해석 결과를 선형 보정식을 이용하여 조정 후 제시하였다. 본 역해석은 전방해석의 전 요소에 Seed 등(1970)이 제안한 사질토 감쇠비의 중간곡선을 가정하여 수행하였으며, 역해석된 결과를 역시 같은 연구자들이 발표한 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 비교하였다. 그림 12의 북쪽, 중심, 남쪽은 그림 1에 묘사된대로 역해석에 사용된 현장시험의 계측점을 나타낸다. 주어진 결과에 따르면 현장시험으로부터 역해석한 정규화 전단탄성계수의 결과는 Seed 등(1970)의 문헌값에 비교하여 더 큰 전단변형률까지, 즉 전단변형률 $1.5 \times 10^{-3}\%$ 까지 선형 거동을 보이며, 이후 문헌값의 상위곡선을 따르다가 전단변형률 $6 \times 10^{-2}\%$ 이후부터는 중간곡선을 따르는 것으로 나타난다. 하지만 본 결과는 향후 더 많은 분석자료를 통해 보완해야 할 것으로 판단된다.

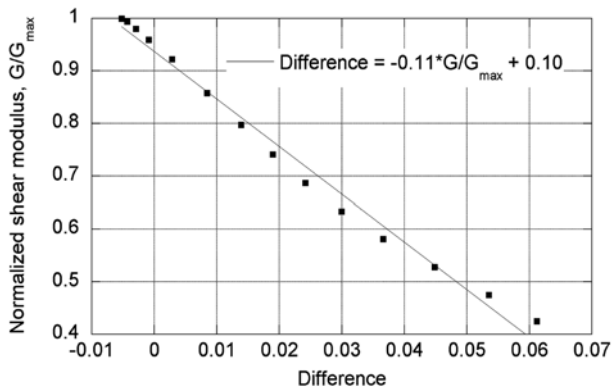


그림 11. 역해석값과 기준값의 편차

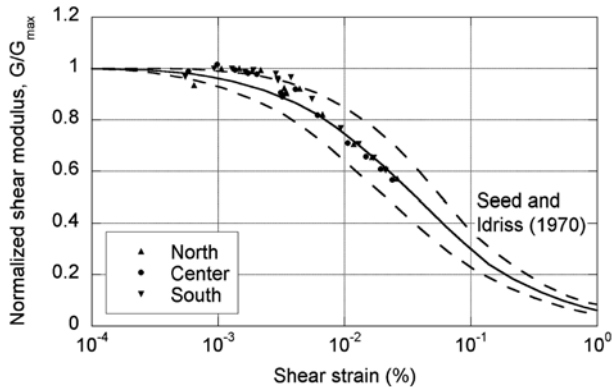


그림 12. NGES 사질토 지반의 역해석 결과

현장시험으로부터의 입력하중과 출력변위로부터 지반의 전단탄성계수를 결정하기 위한 역해석 과정이 제안되었다. 제안된 방법은 현장지반의 전단탄성계수 분포의 변화가 극심하지 않은 경우에는 전반적으로 우수한 적용성을 보이지만, 해석대상 지반의 전단파속도 분포에 따라서 그 적용성이 변할 수 있으므로, 해석대상 현장지반의 물성을 바탕으로 한 예비 역해석을 통해 현장시험결과의 분석시 산출될 오차를 예측, 정량화 하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 제안된 역해석 과정의 역할을, 가정된 감쇠비를 바탕으로 전단탄성계수를 결정하는 것으로 한정하였지만, 수평진동 시험결과로부터 전단탄성계수의 값이 얻어질 경우 수직진동 시험결과를 이용하여 역해석을 통해 감쇠비를 결정할 수 있다.

역해석 적용의 예로서 현장시험 결과의 일부를 해석하였으며, 현장시험을 통한 전단탄성계수 감소곡선의 경향은 향후 더 많은 분석자료를 통해 보완하여야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- 김동수 (1995) 공진주/비틀전단(RC/TS) 시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성. **한국지반공학회논문집**, 한국지반공학회, 제11권, 제1호, pp. 101-112.
- Ahn, J. (2007) *In situ determination of dynamic soil properties under an excited surface foundation*, Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- Briaud, J.-L. (1997) *The National Geotechnical Experimentation Sites at Texas A&M University: clay and sand*. Report No. NGES-TAMU-007, Texas A&M University, Texas, USA.
- Kausel, E. and Roesset, J.M. (1975) Dynamic Stiffness of Circular Foundations. *Journal of the Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 101, pp. 771-785.
- Levenberg, K. (1944) A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 2, pp. 164-168.
- Marquardt, D.W. (1963) An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441.
- Park, K. (2008) *Field measurement of the linear and nonlinear shear moduli of soils using dynamically loaded surface footings*, Ph.D. dissertation, The University of Texas, Austin, Texas, USA (in progress).
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970) *Moduli and damping factors for dynamic response analysis*. Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley.
- Stokoe, K.H., Kurtulus, A. and Park, K. (2006) Development of Field Methods to Evaluate the Nonlinear Shear and Compression Moduli of Soil. *Earthquake Geotechnical Engineering Workshop*, Christchurch, New Zealand.
- Stokoe, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A. and Roesset, J.M. (1994) Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method. *Geophysical Characterization of Sites*, XIII ICSMFE, New Delhi, India, Vol. 10.

- ◎ 논문접수일 : 2008년 03월 18일
- ◎ 심사의뢰일 : 2008년 03월 25일
- ◎ 심사완료일 : 2008년 06월 05일