

강제진동시험자료를 사용한 지반의 강성계수 추정 Identification of Soil Stiffness Using Forced Vibration Test Data

최준성* 이종세** 김동수*** 이진선****
Choi, Junseong* Lee, Jongseh** Kim, Dongsu*** Lee, Jinsun****

ABSTRACT

This paper presents an input and system identification technique for a free-field system using forced vibration data. Identification is carried out on geotechnical experiment site at Yong-jong Island where Incheon International Airport being constructed. The identified quantities are the input load as well as the shear moduli of the free-field soil regions. The dynamic response analysis on the free-field system is carried out using the finite element method incorporating the infinite element formulation for the unbounded layered soil medium. The criterion function for the parameter estimation is constructed using the frequency response amplitude ratios of the dynamic responses measured at several points of the free-field, so that the information on the input loading may be excluded. The constrained steepest descent method is employed to obtain the revised parameters. The simulated dynamic responses using the identified parameters and input load show excellent agreements with the measured responses.

1. 서론

지반의 물성을 정확하게 구하는 작업은 지반에 대한 영향을 필수불가결하게 고려해야하는 자유장 지반계의 동적해석에서 정밀한 동적응답을 산정하는데 매우 중요한 인자라고 할 수 있다. 그러나 지반 물성의 경우 매우 큰 불확실성으로 인해 실제설계에 응용되는 설계편람이나 동적해석에서 조차도 이 같은 인자는 상당히 과소평가되고 있는 실정에 있다^{1,2}. 이 같은 지반물성의 불확실성을 극복하기위한 방안으로 대부분이 현장시험과 실내시험에 기초한 지반조사가 일률적으로 이루어지고 있으며 지반공학의 발달과 함께 지반물성의 불확실성은 상당히 개선되어지고 있다. 그러나 아직도 지반의 물성중 특히 지반과 구조물의 동적응답에 가장 많은 영향을 미치고 있으며, 매우 중요한 물성이라고 할 수 있는 전단파 속도의 경우 특히 연약지반에 대해서는 상대적으로 그 물성을 규명하는데 상당히 많은 어려움을 지니고 있다. 지반에서 전단파속도를 추정하기 위한 시험방법으로는 표준관입시험에서부터 최근에는 상대적으로 정밀한 SASW법과 다운홀 및 크로스홀과 같은 동적시험방법이 사용되고 있다.

*한양대학교 토목환경공학과 계약교수
**한양대학교 토목환경공학과 교수
***한국과학기술원 건설·환경공학과 부교수
****한국과학기술원 건설·환경공학과 박사과정

SASW법과 다운홀 및 크로스홀 시험은 동해석이 반드시 요구되는 내진에 관련된 문제에서는 매우 중요하게 이루어지고 있는 시험이다. 이들 방법들을 사용할 경우 상대적으로 정확한 전단파 속도의 추정이 가능하나 시험자의 공학적인 판단에 의지해야하는 경우가 많고 특히 연약지반의 경우 동일한 층상에서도 지반 특성상 많은 산란된 범위의 값을 나타내게 된다^{[1][2]}. 이 같이 산란된 전단파속도를 직접적으로 유한요소법에 근거한 자유장 지반계의 동적해석방법에 적용하기도 쉽지 않으며 적용한 경우라도 그 값들이 지반에서 계측된 동적응답에 만족한 결과값을 나타내도록 하는 문제는 쉽지 않은 문제다. 따라서, 이들 시험방법들의 산란된 결과값에 근거하여 지반에서 계측된 동적응답을 만족하는 자유장 지반계의 해석모형을 보정할 수 있는 새롭고 효과적인 방법의 개발이 요구된다고 할 수 있다. 본 연구는 이와 같은 취지에서 지반에서 계측된 동적응답만을 사용하여 현장 시험시 가장 많은 불확실성을 내포하고 있는 지반의 미지강성을 합리적으로 추정하고 유한요소해석모형을 실용적으로 구할 수 있는 방법을 제안하였으며, 검증을 위해서는 영종도 국제공항의 시험부지에서서 계측된 강제진동시험자료가 사용 되었다. 추정된 미지강성값들은 전반적으로 SASW법과 다운홀 시험에 의해 구해진 값의 범위에서 중간정도에 해당되는 값이었으며, 추정된 미지강성값들을 사용하여 계산된 해석결과가 계측된 동적응답 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

2. 시험부지와 강제진동시험

2.1 시험부지

인천 국제공항의 건설이 한창 진행중인 영종도에서 지반에 대한 현장시험이 수행 되었으며, 그 위치는 그림 1에 나타낸 바와 같다. 시험부지는 그림 2에서 보는 바와 같이 약 5m에 이르는 매립토와 약 12 m의 실트질모래층 그리고 20 m 정도의 점토층과 그 아래로 모래층과 풍화암 등으로 구성되어 있다. 한편, 그 시험부지의 지반프로필에 대한 전단파 속도를 구하기 위한 SASW법과 다운홀 시험과 같은 동적 시험이 수행되었는데 그 시험결과는 매립토와 실트질 모래층에서 전단파속도가 최소 100m/sec에서 200m/sec까지의 값을 나타냈으며, 점토층에서는 250m/sec에서 350m/sec의 범위값을 보이고 있다. 이와 더불어 표준관입시험과 콘관입시험이 지반프로필을 구하기 위해 추가적으로 수행되었다.

2.2 강제진동시험

시험부지에서 지반응답의 계측에 필요한 지반진동을 발생시키기 위해 강제진동시험이 수행되었는데, 그 강제진동시험은 유압 동다짐에 의해 수행되었으며, 다짐기의 무게는 10톤이며 자유낙하높이는 1.2 m이다. 유압 동다짐에 의해 발생된 진동은 1Hz와 2Hz의 속도 트랜스듀서를 사용하여 그림 3과 같이 지표면위의 시험부지에서 계측되었다.

3. 무한요소를 사용한 유한요소의 모형화

미지계수 추정에 있어서 유한요소모형의 설정은 매우 중요한 단계이다. 특히, 자유장 지반 계에 대해서는 원역지반의 반무한성으로 인한 발산감쇠와 주파수 의존적인 특성을 주의깊게

고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 자유장 지반계를 그림 4와 같이 지반의 근역은 축대칭유한요소를 사용하고 지반의 원역은 축대칭 무한요소를 사용하여 모형화하였으며, 주파수의 의존적인 특징에 대해서는 복소응답해석법이 사용되었다. 구조물 위에서 강제진동을 받고 있는 자유장 지반계의 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_m^N(\omega) & \mathbf{S}_{mi}^N(\omega) \\ \mathbf{S}_m^N(\omega) & \mathbf{S}_{ii}^N(\omega) + \tilde{\mathbf{S}}_{ii}^F(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_n(\omega) \\ \mathbf{u}_i(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_n(\omega) \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{S}(\omega)$ 와 $\tilde{\mathbf{S}}(\omega)$ 는 동적강성행렬이고, 윗첨자 N 은 구조물과 근역지반영역이고 F 는 원역지반영역을 의미하며, 이래첨자 n 는 근역지반의 절점에서의 자유도이고 i 는 근역과 원역지반 사이의 경계면에 나타난 자유도이며, ω 는 각 가진주파수이다. 식 (1)에서 반무한 원역지반영역으로 방사되는 파의 변위장과 관련이 있는 동적강성행렬 $\tilde{\mathbf{S}}(\omega)$ 는 무한요소의 동적강성행렬을 조합하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{S}}^{(o)}(\omega) = (1 + j2h^{(o)})\mathbf{K}^{(o)}(\omega) - \omega^2\mathbf{M}^{(o)}(\omega) \quad (2)$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$ 이고 $h^{(o)}$ 는 o -번째 무한요소의 이력감쇠비이며, $\mathbf{K}^{(o)}(\omega)$ 와 $\mathbf{M}^{(o)}(\omega)$ 는 각각 다음과 같은 요소강성행렬과 질량행렬이다^[3,4].

4. 예비조사 및 동적응답의 보정

4.1 예비조사

일반적으로 유한요소법은 많은수의 작은영역으로 모형화되기 때문에 해석의 효율성을 위해 추정할 시스템을 제한된 수의 균질한 영역으로 나누는 작업이 필요하다. 이 같은 목적으로 지반프로필을 구하기 위한 표준관입시험과 콘관입시험결과에 대한 면밀한 조사로부터 그림 3과 4와 같은 5개의 균질한 영역으로 구분될 수 있는 자유장 지반계의 해석모형을 얻을 수 있었다. 여기서 견고한 점토질 아래의 지반층에 대해서는 고려하지 않았는데 이는 동적시험결과에 대한 전단파속도의 불확실성이 연약한지반에서 많이 발생하고 있기 때문이다. 또한, 지반 시험결과에 근거하여 구해진 5개의 균질한 영역에서의 단위질량과 포아송비 그리고 감쇠계수등을 표 1에 정리하여 나타내었으며, 각 영역에서 추정할 전단파 속도에 대한 범위값에 대해서도 SASW법과 다운홀 시험과 같은 동적 시험결과와의 면밀한 검토를 통해 표 1에 나타냈다.

4.2 동적응답의 보정

지반에 가해진 강제진동시험으로부터 지표면위의 그림 4에서 보인 각 지점 (A, B, C, D, E)에서 속도응답이 매 5회에 걸쳐 계측되었다. 본 연구에서는 계측시 수반될 수 있는 지반조건과

계측오차에 따른 속도응답의 왜곡을 최소화하기 위해 각 계측지점에서 계측된 각 속도응답에 식 (6)과 같이 Fourier 진폭의 평균을 취하여 목적함수의 구성에 필요한 응답자료를 구했다.

$$\dot{\bar{U}}(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\dot{U}_k(\omega)| \cdot e^{i\theta(\omega)} \quad (3)$$

$$\dot{U}_k(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{u}_k(t) e^{-i\omega t} dt \quad (k=1, \dots, N) \quad (4)$$

이고, $\dot{u}_k(t)$ 는 k -번째 계측점에서 계측된 지반속도기록이며, N 은 지반속도기록의 수로서 본 연구에서는 5이다. 그림5에서는 Fourier 진폭의 평균을 취해 속도응답의 비를 보정한 결과와 그렇지 않은 경우에 대한 비교결과를 보여주고 있다. 그 결과 속도응답의 보정을 통해 산란된 응답을 상당히 줄일 수 있음을 알 수 있다.

5. 미지계수 추정방법

자유장 지반계에서 강제진동 시험결과에 유한요소의 해석결과가 상관될 수 있도록 5개의 균질한 유한요소영역에 대한 탄성계수의 값이 보정된다. 그 계수들은 기본값인 \bar{G}_r 로 표현되며 초기추정값들로 취해지고 추정될 보정계수들인 p_r 은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$G_r = \bar{G}_r(1 + p_r), \quad |p_r| < 1 \quad (r=1, 2, \dots, N_p) \quad (5)$$

여기서 N_p 는 추정할 계수들의 수이며 본 연구에서는 N_p 가 5가 사용되었다. 결과적으로 강성계수 \mathbf{p} 에 의하여 각 가속도 ω_s 인 강제진동하에서 자유장 지반계의 추정된 주파수응답함수 $\mathbf{H}(\mathbf{p}, \omega_s)$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}(\mathbf{p}, \omega_s) = [\mathbf{S}(\mathbf{p}, \omega_s)]^{-1} \quad (6)$$

여기서

$$\mathbf{S}(\mathbf{p}, \omega_s) = \hat{\mathbf{K}}(\mathbf{p}, \omega_s) - \omega_s^2 \mathbf{M}(\omega_s) \quad (7)$$

여기서 $\mathbf{M}(\omega_s)$ 는 질량행렬이고 $\hat{\mathbf{K}}(\mathbf{p}, \omega_s)$ 는 이력감쇠 효과를 포함한 복소강성 행렬이며 그것은 식 (8)처럼 계수들의 선형조합형태로 표현할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{K}}(\mathbf{p}, \omega_s) = \bar{\mathbf{K}}(\omega_s) + \sum_{r=1}^{N_p} p_r \bar{\mathbf{K}}_r(\omega_s) \quad (8)$$

여기서 $\bar{\mathbf{K}}$ 는 p_r 이 0일때 기본값에 대한 강성행렬이고 $\bar{\mathbf{K}}_r$ 은 \bar{G}_r 의 기본값을 가진 r 번째 영역에 대한 강성행렬로서 나타내어진다.

합리적인 미지강성을 추정하기위해 설정한 제약조건들을 충족하면서 추정오차가 최소화될 수 있도록 본 연구에서는 식 (9)와 같은 제약최적화 문제를 정의 하였다.

$$\min_{\mathbf{p}} J(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N_{mp}-1} \sum_{j=1}^{N_{mp}-i} \sum_{s=1}^{N_{fs}} \left(1 - \frac{\ddot{y}_{i+j}(\omega_s)}{\ddot{y}_i(\omega_s)} \cdot \frac{H_i(\mathbf{p}, \omega_s)}{H_{i+j}(\mathbf{p}, \omega_s)} \right)^T \left(1 - \frac{\ddot{y}_{i+j}^*(\omega_s)}{\ddot{y}_i^*(\omega_s)} \cdot \frac{H_i^*(\mathbf{p}, \omega_s)}{H_{i+j}^*(\mathbf{p}, \omega_s)} \right) \quad (9)$$

식 (9)는 다음과 같은 상한계와 하한계를 지닌다.

$$G_{rl} \leq G_r \leq G_{ru} \quad (r=1,2,\dots,N_p) \quad (10)$$

여기서 G_{rl} 과 G_{ru} 는 표 1에서 보인것처럼 G_r 에 대한 상한계와 하한계이다. 식 (9)에서 $\mathbf{y}(\omega_s)$ 는 계측된 주파수 윗첨자 * 는 공액복소수를 나타내며 N_{fs} 는 오차함수의 계산에 사용된 표본주파수의 수이다. 그리고 \mathbf{W} 는 가중치를 포함하는 대각행렬이며 본 연구에서는 가중치가 모든 응답성분에서 균등하게 가중될 수 있도록 하기위해서 공진주파수의 응답에 제곱의 역이 취해졌다. 이상과 같은 제약조건을 갖는 최적화문제를 풀기위해 본 연구에서는 제약적 최속강하법을 사용하였다^[6].

6. 추정결과

미지계수의 추정은 자유장 지반에서 지표면위의 유압 동다짐에 의한 수직가진에 대한 강제진동시험자료를 사용하여 수행되었다. 미지계수추정을 위한 목적함수를 구성하고 있는 응답은 그림 4에서 보인 A,B,C,D점의 수직방향응답이 사용되었다. 7개의 응답주파수가 미지계수추정에 사용되었으며, 그것들은 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 Hz 이다. 표1에서 보인 각 지반영역에서 전단파 속도의 범위 값 중 최대값을 미지강성 추정을 위한 초기치로 사용하였으며, 표2에서 보는바와 같다. 그림 6은 반복과정 동안에 추정계수들의 추정오차에 대한 변화와 수렴과정을 보여주며 10번의 반복계산 이후에 최종적으로 수렴된 전단파속도의 값들이 초기 전단파속도와 그림2에서 보인 동적시험을 통해 구해진 각 지반영역별 평균 전단파속도들과 비교하여 표 2에 나타냈다. 그림 7은 그림4의 각 계측지점에서 계측된 주파수 응답함수비와 추정된 주파수 응답함수비를 비교하여 나타낸 것이다. 그 결과 본 연구에서 추정한 전단파속도를 사용하여 구해진 주파수 응답함수비가 계측된 주파수 응답비와 매우 유사하게 나타난 반면 추정을 위한 초기값으로 사용한 전단파속도 및 비교를 위해 동적시험을 통해 구해진 각 지반영역별 평균 전단파속도를 사용한 경우에 대해서는 상당한 불일치를 보여주고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 상대적으로 정밀하다고 판단되는 SASW법이나 크로스홀 및 다운홀 시험을 통해 얻어진 각 지층에서의 전단파 속도라 할지라도 연약지반의 경우 좀 더 합리적이고 엄밀한 해석모형을 설정하기 위해서는 지표면위에서 계측된 동적응답과의 상관성을 검토 할 필요가 있음을 알 수 있었다.

7. 결론

본 연구에서는 입력하중이 불확실한 강제진동시험자료에 상관된 자유장 지반계의 유한요소모형을 체계적으로 구할 수 있는 방법을 보였으며 그것을 영종도 국제공항 부지의

강제진동시험에 적용하였다. 그 결과 동적시험을 통해 구해진 각 지반영역별 평균 전단파속도들을 해석에 사용한 경우에서도 연약지반인 경우 지표면위에서 계측된 실측결과와 상당한 차이를 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 따라서 좀더 합리적이고 엄밀한 해석모형을 설정하기 위해서는 지표면위에서 계측된 동적응답과 상관될 수 있도록 추가적인 보정작업이 필요하다는 결론을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 BK21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. 최준성, 윤정방, 김재민, 이종세 (2000), “강제진동시험자료를 사용한 지반-구조물 상호작용계의 미지계수 추정”, 제20권, 제5-A호, pp831-841.
2. Yun, C-B., Choi, J-S., and Kim, J-M.(1999), 'Identification of the Hualien Soil-Structure Interaction System', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1999, 18 (6), 395-408.
3. 최준성, 이종세, 윤정방, 현창현 (2001), “지진응답자료를 사용한 지반-구조물 상호작용계의 미지계수 추정”, 제21권, 제5-A호, pp.739-752.
4. Choi, J.S., Yun, C.B. and Kim, J.M. (2001). “Earthquake response analysis of the Hualien large scale seismic test structure using updated soil-structure properties based on vibration test data.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, pp1-26.
5. Arora, J.S. (1989). *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, Inc.

표 1. 자유장 지반계의 지반물성과 전단파속도의 범위

| 지반 영역 | 전단파 속도의 범위 (m/sec) | 포아송비 (ν) | 단위질량 (kg/m ³) | 재료 감쇠비 (h) |
|------------|--------------------|----------|---------------------------|------------|
| Fill Sand | 100-200 | 0.48 | 2330 | 0.02 |
| Silty Sand | 100-200 | 0.48 | 2390 | 0.02 |
| Soft Clay | 250-350 | 0.48 | 1690 | 0.02 |
| Silty Clay | 250-350 | 0.48 | 1930 | 0.02 |
| Stiff Clay | 250-350 | 0.48 | 2420 | 0.02 |

표 2. 해석에 사용된 초기강성과 수렴된 미지강성

| 지반 영역 | 전단파 속도 (m/sec) | | |
|------------|----------------|-----|-------|
| | 수렴치 | 초기치 | 시험평균치 |
| Fill Sand | 147 | 200 | 100 |
| Silty Sand | 156 | 200 | 170 |
| Soft Clay | 256 | 350 | 230 |
| Silty Clay | 254 | 350 | 300 |
| Stiff Clay | 300 | 350 | 350 |

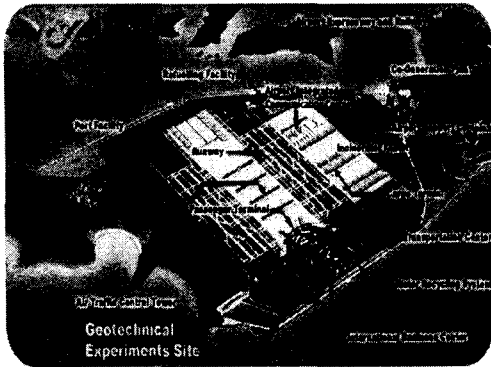


그림 1. 시험부지

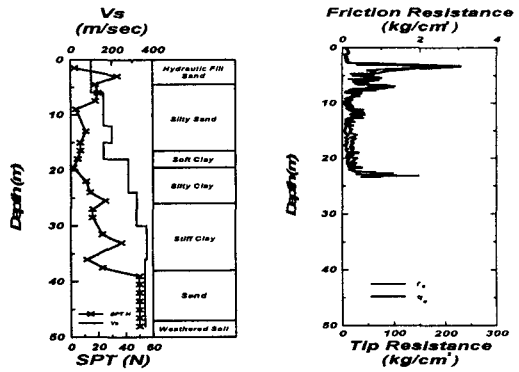


그림 2. 전단파속도의 깊이별 분포 및 관입시험결과

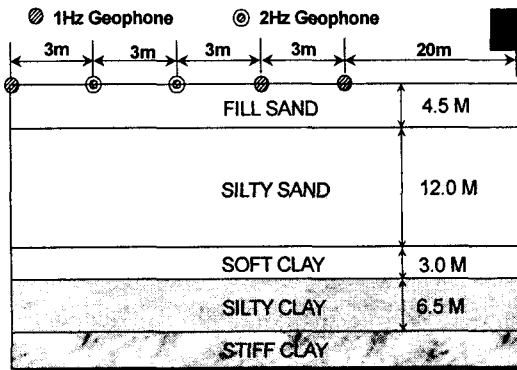


그림 3. 트랜스듀스의 분포와 지반프로필

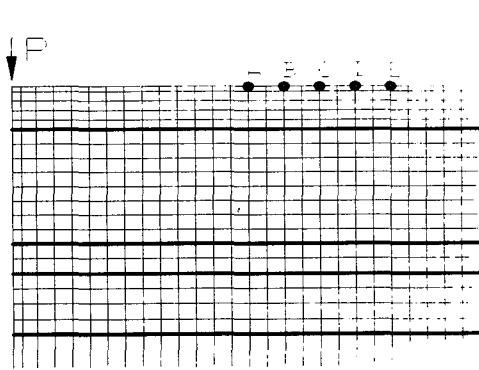


그림 4. 유-무한요소 해석모형

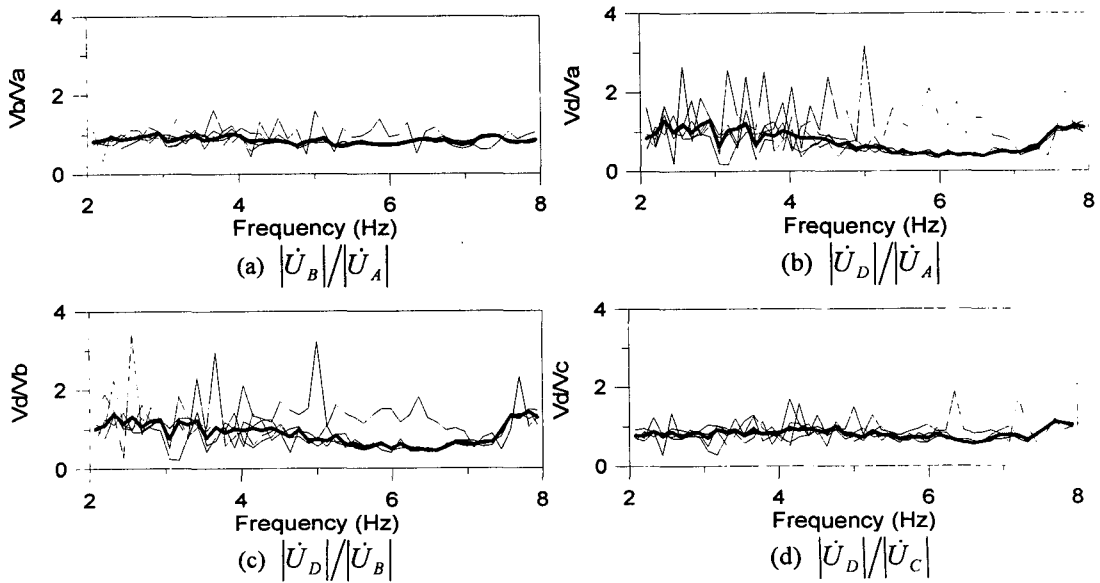


그림 5. 각 지점에서의 속도응답비 (— :보정전응답비, — :보정후응답비)

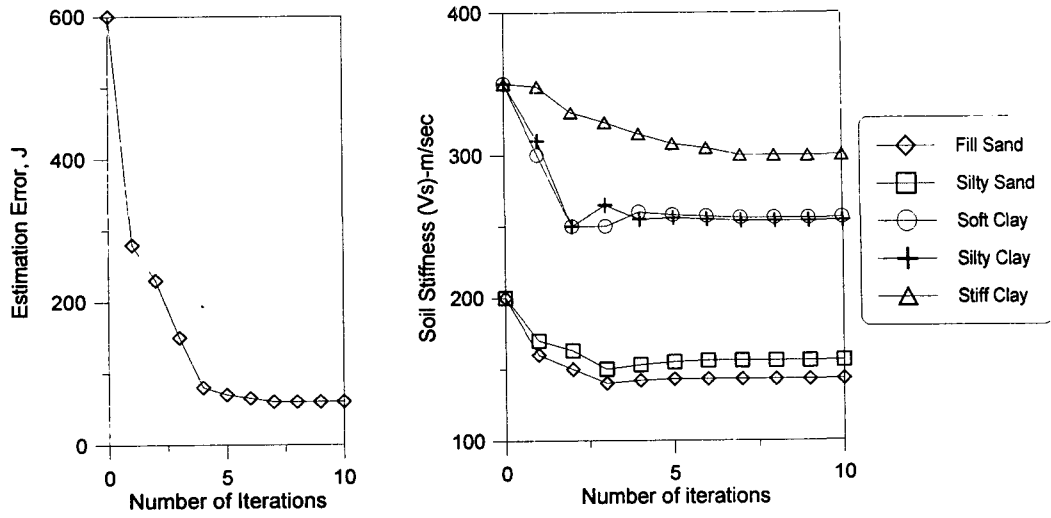


그림 6. 미지강성들에 대한 수렴과정 및 추정오차에 대한 추이도

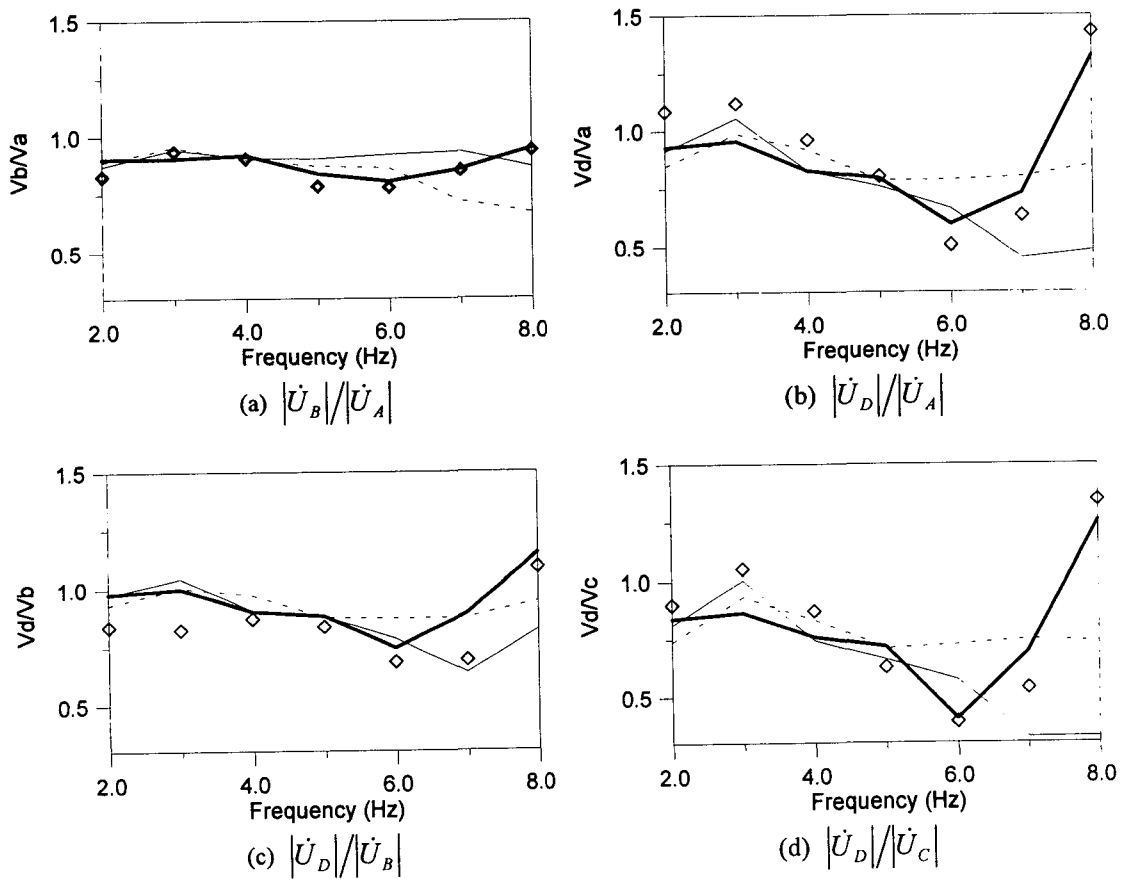


그림 7. 계측과 계산된 속도응답비의 비교

(◇ : 계측결과, — : 수렴강성, --- : 초기강성, : 시험평균강성)