

복합방진벽에 의한 Rayleigh파의 차단 Screening of Rayleigh Waves by Composite Barriers

이종세*
Lee, Jong Seh

손윤기**
Sohn, Yoon Kee

ABSTRACT

Based on the Green's function technique, an analytical approach is developed to examine the surface wave screening effectiveness of composite wave barriers. The composite barrier consists of a high velocity layer sandwiched between two thin layers of low shear velocity materials. The high velocity layer is represented by differential matrix operators which relate the wave fields on each side of the layer. The low velocity layers are modeled by non-rigid contact conditions which allow partial sliding at the interfaces. Screening ratio of barriers with various combination of material, geometric, and non-rigidity parameters are compared and discussed in some detail.

1. 서 론

지반으로 통해 전파되는 각종 지반 진동을 차단하기 위해 방진구, 방진벽, 방진판등 각종 방진 구조물이 제안되고 설치되어 왔으며, 근자에 와서 진동허용치의 감소 추세로 인해 보다 정밀한 방진기법의 필요성이 증가되고 있다. 그러나 이러한 중요성에도 불구하고 방진구조물-지반계의 진동전파 해석기술이 미흡하여 효과적인 방진구조물의 설계와 시공이 어려운 실정이다.

방진구조물의 방진효과와 관련하여 방진벽에 의한 표면파의 산란효과를 규명하기 위해 여러 이론적, 수치적 혹은 실험적 연구들이 수행되어왔다. Richart et al.(1970), Aboudi(1973), Leung et al.(1990), Ahmad and Al-Hussaini(1991), Lee and Its(1995)등이 연성채움재와 경성채움재를 이용한 방진벽의 표면파 산란효과를 조사한 바 있다. 방진벽의 방진효과를 향상시키기 위해 연성채움재와 경성채움재를 번갈아 사용한 복합 형태의 방진벽이 제안된바 있으나(McNeil et al.1965) 이러한 복합방진벽의 표면파 산란효과에 대한 연구는 매우 미흡한 상태이다.

본 논문에서는 복합 방진벽에 의한 표면파의 산란효과를 규명하기 위하여 Green함수기법에 근거한 해석기법을 개발하였다. 경성채움재는 미분행렬연산자를 이용하여 방진벽 양측의 표면파를 표현하였고 연성채움재의 경우 비강결(non-rigid contact)계면조건을 이용하여 경성채움재와 모재사이의 경계조건을 모델링 하였다. 수치해석을 통하여 파의 입사각과 물성, 방진벽의 폭 및 형상, 비강결 계면조건등이 산란효과에 미치는 영향을 조사 하였다.

*한양대학교 토목·환경공학과 부교수, 정회원

**한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

(주: 이 논문은 1995학년도 한양대학교 교내 연구비에 의하여 연구 되었음)

2. 표면파 산란이론

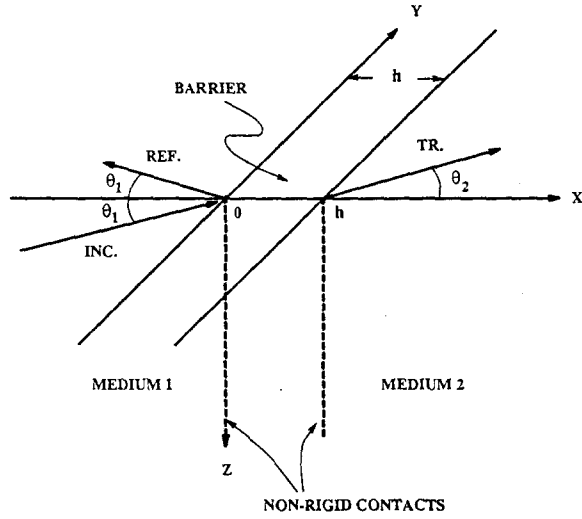


그림1. 이상화된 대상구조

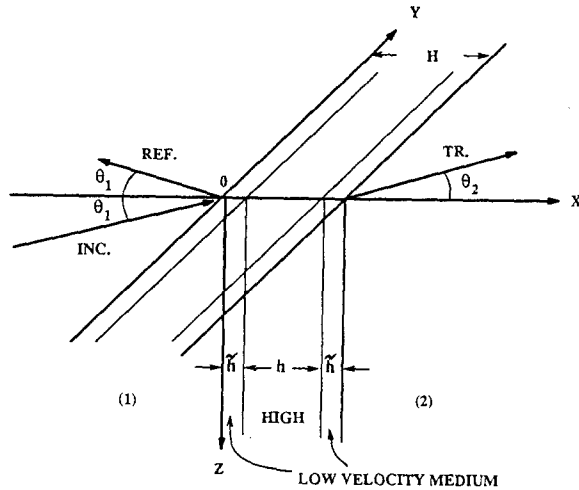


그림2. 복합 방진벽 모델

지반에 설치된 방진벽을 그림 1에서 보는 바와 같이 두 개의 4분 무한 영역사이에 삽입된 폭 H 의 반무한 판으로 모형화 할수 있다. 이 방진벽에 Rayleigh파가 θ_1 의 각으로 입사된다고 가정하면 이 방진벽 근처에서는 반사되는 표면파, 투과되는 표면파 그리고 여러 종류의 체적파들이 발생된다. 이때 변위와 응력벡터 $\mathbf{U}^{(k)}$ 와 $\mathbf{T}_x^{(k)}$ 를 다음과 같이 표현할수 있다.

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} \mathbf{U}^{(1)} \\ \mathbf{T}_x^{(1)} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \mathbf{u}^{(1)}(z) \\ \boldsymbol{\tau}^{(1)}(z) \end{Bmatrix} e^{i[\omega t - \xi^{(1)}(x \cos \theta_1 + y \sin \theta_1)]} \\
&+ \alpha \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{u}}^{(1)}(z) \\ \bar{\boldsymbol{\tau}}^{(1)}(z) \end{Bmatrix} e^{i[\omega t + \xi^{(1)}(x \cos \theta_1 - y \sin \theta_1)]} + \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_b^{ref} \\ \mathbf{T}_b^{ref} \end{Bmatrix} \\
\begin{Bmatrix} \mathbf{U}^{(2)} \\ \mathbf{T}_x^{(2)} \end{Bmatrix} &= \beta \begin{Bmatrix} \mathbf{u}^{(2)}(z) \\ \boldsymbol{\tau}^{(2)}(z) \end{Bmatrix} e^{i[\omega t - \xi^{(2)}(x \cos \theta_2 + y \sin \theta_2)]} + \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_b^{tr} \\ \mathbf{T}_b^{tr} \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\mathbf{u}^{(k)}$ 과 $\boldsymbol{\tau}^{(k)}$ 는 각각 Rayleigh파에서 변위와 응력에 대한 고유함수이며, $\xi^{(k)}$ 는 파동수, θ_2 는 투과파의 각, α 과 β 는 미지의 반사 및 투과계수이다.

여기서 우리는 방진벽과 모재의 계면이 비강결 이라고 가정하고, 이경우에 있어 계면에서의 연속 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}_n^{(1)}(0, y, z) &= \mathbf{U}_n(0, y, z), \\
\mathbf{T}_x^{(1)}(0, y, z) &= \mathbf{T}_x(0, y, z) \\
\mathbf{U}_t^{(1)}(0, y, z) + m \mathbf{T}_{xt}^{(1)}(0, y, z) &= \mathbf{U}_t(0, y, z), \\
\mathbf{U}_n^{(2)}(h, y, z) &= \mathbf{U}_n^{(2)}(h, y, z), \\
\mathbf{T}_x^{(2)}(h, y, z) &= \mathbf{T}_x(h, y, z), \\
\mathbf{U}_t(h, y, z) + m \mathbf{T}_{xt}(h, y, z) &= \mathbf{U}_t^{(2)}(h, y, z)
\end{aligned} \tag{2}$$

여기서 \mathbf{U} , \mathbf{T} 는 방진벽내에서의 응력과 변위를 나타낸다. 그리고 m 은 계면에서의 비강결 계면 계수로서 다음과 같이 정의 된다.

$$m = \lim_{h, \mu \rightarrow 0} \frac{\bar{h}}{\mu} \tag{3}$$

여기서 \bar{h} 은 모재와 경성 채움재 사이에 있는 연성채움재의 폭이고, $\bar{\mu}$ 는 연성채움재의 전단계수이다.

방진벽 내에서의 파의 변위와 응력은 방진벽 두께에 대한 Taylor 급수 확장을 통하여 소거할 수 있으므로 방진벽 양측의 접촉면에서의 변위와 응력장은 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{U}^{(2)}(h, y, z) \\ \mathbf{T}_x^{(2)}(h, y, z) \end{Bmatrix} = \mathbf{A} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}^{(1)}(0, y, z) \\ \mathbf{T}_x^{(1)}(0, y, z) \end{Bmatrix} \tag{4}$$

여기서 행렬미분 연산자 \mathbf{A} 는 재료의 탄성계수와 방진벽의 폭 뿐만 아니라 비강결 접촉조건 및 테일러 급수의 차수에 의해 결정되어진다. 위의 식을 이용하여 방진벽의 양쪽 경계면에서 각각 반사파와 투과파를 구할 수 있다. 그리고 경계면에서의 값을 이용하여 모재의 영역 1과 2의 임이의 점에서의 변위는 다음의 식으로 표현되는 정리에 의해 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} (\mathbf{U}^{\text{ref}}(x_1, y_1, z_1), \mathbf{I}) &= \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty [\mathbf{G}_1^1(x_1, y_1, z_1, 0, y, z) \mathbf{T}_x^{\text{ref}} \\ &\quad - \mathbf{P}(\mathbf{G}_1^1) \mathbf{U}^{\text{ref}}(0, y, z)] dy dz \\ (\mathbf{U}^{\text{tr}}(x_2, y_2, z_2), \mathbf{I}) &= \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty [\mathbf{G}_1^1(x_2, y_2, z_2, h, y, z) \mathbf{T}_x^{\text{tr}} \\ &\quad - \mathbf{P}(\mathbf{G}_2^1) \mathbf{U}^{\text{tr}}(h, y, z)] dy dz \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{G}_i^1 와 $\mathbf{P}(\mathbf{G}_i^1)$ 는 i 번째 반무한 영역에서의 Green함수와 그에 대응하는 응력을 나타낸다.

3. 산란계수

방진벽의 폭이 파장에 비해 작은 경우에, 변위 U 의 x 방향 성분을 다음과 같은 Taylor급수로 나타낼 수 있다.

$$U_x(h, y, z) = U_x(0, y, z) + hU_{x,x}(0, y, z) + \frac{h^2}{2} U_{x,xx}(0, y, z) \quad (6)$$

운동방정식, 응력-변형율의 관계, 그리고 계면에서의 연속조건을 이용하여 식 (6)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} U_x^{(2)} &= U_x^{(1)} + \frac{h}{\lambda + 2\mu} [T_{xx}^{(1)} - \lambda(U_{yy,y}^{(1)} + mT_{xy,y}^{(1)}) - \lambda(U_{zz}^{(1)} + mT_{xx,y}^{(1)})] \\ &\quad + \frac{h^2}{2(\lambda + 2\mu)} [-\rho\omega^2 U_x^{(1)} - T_{xy,y}^{(1)} - T_{xz,z}^{(1)} - \frac{\lambda}{\mu} (T_{xy,y}^{(1)} - \mu U_{x,yy}^{(1)}) - \frac{\lambda}{\mu} (T_{xz,z}^{(1)} - \mu U_{x,zz}^{(1)})] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 λ 와 μ 는 방진벽의 탄성계수이다. 변위와 응력장의 다른 성분들도 같은 방법을 이용하여 식 (4)와 같은 행렬식의 형태로 표현할 수 있다. 그러나 뒤에서 수행할 계산의 편의를 위해 식(4)를 다음과 같은 형태로 표현한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^{(2)}(h, y, z) &= \mathbf{Q}^{(U)} \mathbf{R}^{(1)}(0, y, z) + m \mathbf{T}_{xt}^{(2)}(h, y, z) \\ \mathbf{T}_x^{(2)}(h, y, z) &= \mathbf{Q}^{(T)} \mathbf{R}^{(1)}(0, y, z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^{(1)}(0, y, z) &= \overline{\mathbf{Q}}^{(U)} \mathbf{R}^{(2)}(h, y, z) - m \mathbf{T}_{xt}^{(1)}(0, y, z) \\ \mathbf{T}_x^{(1)}(0, y, z) &= \overline{\mathbf{Q}}^{(T)} \mathbf{R}^{(2)}(h, y, z) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{R}^{(1)}$ 과 $\mathbf{R}^{(2)}$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\mathbf{R}^{(1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}^{(2)} + m \mathbf{T}_{xt}^{(1)} \\ \mathbf{T}_x^{(2)} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R}^{(2)} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}^{(2)} - m \mathbf{T}_{xt}^{(2)} \\ \mathbf{T}_x^{(2)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

행렬 연산자 $\mathbf{Q}^{(U)}$ 와 $\mathbf{Q}^{(T)}$ 는 Its와 Lee(1993)에 자세히 표현되었다.

위의 행렬식으로부터 반사파의 변위를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^{ref}(0, y, z) &= \beta \overline{\mathbf{Q}}^{(U)} \mathbf{r}^{(2)} e^{-i\xi^{(2)}(h\cos\theta_2 + y\sin\theta_2)} + \overline{\mathbf{Q}}^{(U)} \mathbf{R}_b^{tr}(h, y, z) \\ &- (\mathbf{u}^{(1)} + m\tau_t^{(1)}) e^{-i\xi^{(1)}y\sin\theta_1} - \mathbf{U}_b^{ref} - m\alpha \overline{\tau}_t^{(1)} e^{-i\xi^{(2)}y\sin\theta_1} - m \mathbf{T}_{xt}^{ref} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서

$$\mathbf{r}^{(1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}^{(1)} + m\tau_t^{(1)} \\ \tau_t^{(1)} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{r}^{(2)} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}^{(2)} - m\tau_t^{(1)} & \tau_t^{(2)} \end{pmatrix}; \quad \overline{\mathbf{r}}^{(2)} = \begin{pmatrix} \overline{\mathbf{u}}^{(2)} + m\overline{\tau}_t^{(1)} \\ \overline{\tau}_t^{(2)} \end{pmatrix} \quad (11)$$

다른 장들도 유사한 방법을 통해 표현할 수 있다.

우리는 여기서 Green 함수와 함께 식(10)의 형태로 표현된 반사파와 투과파에 관한식을 식(5)에 대입하고, 결과식을 Stationary Phase방법을 이용하여 y 에 대해 적분했다. 이를 통해 다음과 같이 반사계수와 투과 계수를 결정하기 위한 연립 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha(\cos\theta_1 - Z^{(3)}) &= \beta e^{-i\xi^{(2)}h\cos\theta_2} Z^{(1)} + Z^{(2)} \\ \beta(\cos\theta_2 - Z^{(6)}) &= -e^{-i\xi^{(2)}h\cos\theta_2} Z^{(4)} - \alpha e^{i\xi^{(2)}h\cos\theta_2} Z^{(5)} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 $Z^{(1)} \sim Z^{(6)}$ 의 표현은 지면 관계상 생략하기로 한다.

4. 수치해석

위에서 제안한 해석기법을 이용하여 방진벽에 의한 표면파의 산란효과를 규명하기 위한 수치 실험을 수행하였다. 비강결 계면의 경우 $\bar{h} = 0.15l$ 의 값을 가질 때의 수치해석 결과가 초음파

실험결과와 잘 일치함을 이미 검증한바 있으나(Its et al. 1989) 본 연구에서는 이론해의 정확도를 위해 연성채움재층의 두께를 $\bar{h} = 0.05l$ 로 제한 하였다. 이러한 수치실험의 주요한 목적은 복합 방진벽을 이용하여 표면과 산란효과를 증진 시킬수 있음을 보여주기 위함이다. 따라서 이러한 방진벽의 기하적인 형태와 채움재의 물성에 따른 산란효과를 알아보기 위해서 다음과 같이 산란율을 정의 한다.

$$\gamma = \frac{|\alpha|}{|\beta|} \quad (15)$$

(1) 방진벽의 물성과 계면조건

방진벽으로 쓰이는 재료의 물성과 방진벽-지반 계면조건에 따른 산란율의 변동을 비교 하기위해 강결 계면조건을 갖는 연성방진벽(Rigid Low: RL), 강결 계면조건을 갖는 경성방진벽(Rigid High; RH), 그리고 비강결 계면을 갖는 경성방진벽(Non-Rigid High; NRH)등 세가지의 경우로 분리하여 수치계산이 수행 되었다. 표1은 수치예제에서 사용된 재료의 물성을 나타낸다.

표1. 수치예제에 사용된 재료의 탄성계수

영역	ρ (g/cm ³)	ν_s (km/s)	ν_p (km/s)
흙(모재)	2.0	0.5	2.0
콘크리트 (경성채움재)	2.4	1.35	2.38
벤토나이트 슬러리 (연성채움재)	3.0	2.5	4.0

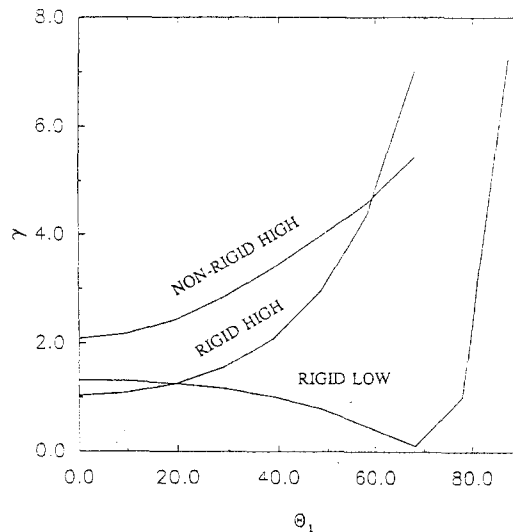


그림2. 채움재와 계면조건에 따른 산란율

그림에서 보는 바와 같이 입사각이 작은 경우는 RL가 RH에 비해 산란효과가 우수하나 입사각이 커지면 RH가 보다 우수하다. 그러나 NRH(복합방진벽)는 RH나 RL 즉, 경성채움재나 연성채움재를 사용한 단순 방진벽에 비해 입사각에 관계 없이(60° 이내에서) 산란효과가 우수한 것을 볼 수 있다.

(2) 비강결 계면조건

비강결 계면조건이 산란율에 미치는 영향을 조사하기 위해 수직으로 입사하는 표면파에 대해 강결조건 m 을 바꾸어 가며 그림3의에 나타난 결과를 얻었다. 연성채움재 층의 폭이 작을 때는 m 이 증가함에 따라 산란율이 다소 감소함을 알 수 있으나 연성채움재 층의 폭이 점차 증가함에 따라 층사이의 경계의 역할이 커지게 되며 점차로 산란율도 증가하게 됨을 알 수 있다.

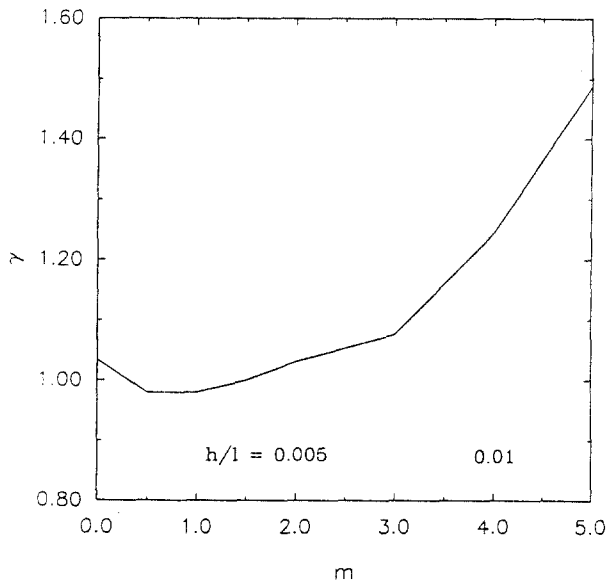


그림3 비강결 계면조건 m 에 따른 산란율의 변화

(3) 경성벽의 폭

경성벽의 폭에 따른 산란효과를 알아보기 위해서 연성채움재 층의 폭을 $\bar{h} = 0.05l$ 로 고정시킨 후 경성채움재의 층의 폭을 변화 시켜가며 산란율을 구하였다. 그림4에서 몇개의 h 값에 대한 산란율을 입사각의 함수로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 경성채움재의 폭은 산란율에 매우 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. h 값이 0인 경우 연성채움재를 사용한 단순방진벽으로 생각할 수 있으며, 이때의 산란율은 입사각이 증가함에 따라 단조로운 곡선을 그리며 점차로 감소한다. $\bar{h} = 0.025l$ 일 경우, 입사각이 70° 일 때 산란율이 최소가 됨을 알 수 있다. h 가 더 큰 값을 갖는 경우 입사각이 점차로 증가함에 따라 산란 계수도 따라서 증가함을 볼 수 있다.

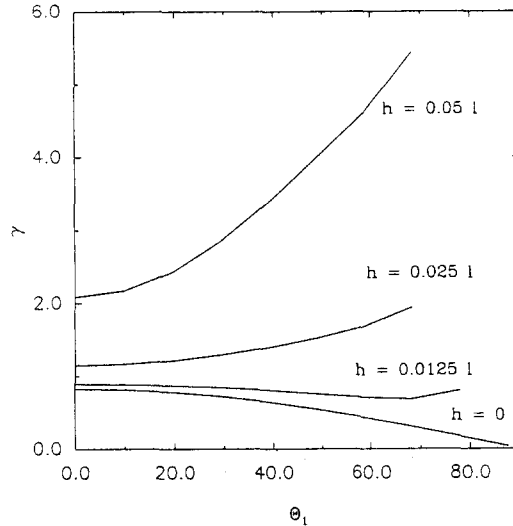


그림4. 복합 방진벽에서 경성채움재의 폭에 따른 산란율의 변화

5. 결론

본 연구에서는 반무한 탄성체내에 설치한 방진벽에 입사된 Rayleigh파의 산란효과를 분석하기 위한 해석 방법을 제안 하였으며 실제적인 적용예를 보였다. 특히 경성채움재와 연성채움재를 복합적으로 사용한 방진벽의 산란효과를 조사하기 위해 경성채움재의 양측에 설치된 연성벽을 경성벽과 모재 경계면에서 미끄러짐이 가능한 비강결 계면으로 모형화 하였다. 수치해석을 통하여 복합 방진벽이 경성채움재와 연성채움재중 한가지 재료를 사용한 단순 방진벽에 비하여 훨씬 효과적임이 판명되었다. 또한 모재로 사용되는 재료의 물성과 경성채움재의 물성의 차이가 더욱 클수록 방진벽을 통하여 얻을 수 있는 산란효과는 더욱 큰 것으로 밝혀 졌다.

6. 인용문헌

- Aboudi, J. (1973), "Elastic waves in half-space with thin barriers." J. Eng. Mech. Div., ASCE, EMI, pp.69-83.
- Ahmad, S. and T.M. Al-Hussaini (1991), "Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches." J. Geotech. Eng. Vol.117, pp.67-87.
- Aki, K. and P.G. Richards (1980), "Quantitative Seismology." Vol.1, Freeman, San Francisco.
- Its, E.N., E. N. Fronoba and A. G. Vasijeva (1989) Gerland Beitr Geophysik Vol.98, pp 317-327.
- Its, E.N. and J.S. Lee (1993), "Propagation of surface waves across a vertical barrier with non-rigid contacts." Int. J. Engin. Sci., Vol.31, pp.1151-1163.
- Its, E.N. and J.S. Lee (1995), "Surface waves of oblique incidence across deep infilled traenches." J. Eng. Mech. Vol.121, pp.482-486.
- Leung, K. L., Beskos, D. E., and Vardoulakis, I. G.(1990), "Vibration isolation using open or filled trenches." Computational Mech., Vol.7, pp.137-148.
- McNeill, R. L., Margason, B. E. and Bobcock, F. M., (1965), "The role of the soil dynamics in the design of stable test pads." Guidance and Control Conference., Minneapolis.
- Richart, F. E. Jr., Hall, J. R., and Woods, R. D.(1970), "Vibrations of soils and foundations." Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.