

약액처리된 석탄회의 동적 감쇠특성

Dynamic Damping Characteristics of Grouthed Coal Ash

천 병 식* · 정 형 식* · 고 용 일** · 이 형 수***
Chun, Byung Sik · Chung, Hyoung Sik · Koh, Yong Il · Lee, Hyoung Soo

Abstract

The final purpose of this study is to examine the uses of coal ash, by-product from thermal power plant as a type of filling-embankment materials and the reuses of ash ponds. In this time, to investigate the dynamic properties, we made the test piece specimen with coal ashes, and obtained the damping ratio. In place(ash pond), the damping property by underground wall was investigated before and after soil improvements. The damping ratio of coal ash test piece specimen of 12% cement is the highest and that of 9% cement or chemical grout, that of 6% cement is in order. In same coal ash test piece, the damping ratio increases with decreasing the void ratio. In conclusion, it could be said that the damping ratio increases with the stiffness of materials. In the ash pond, the damping effect is the most when trench is set through the vibration wave propagation course, and when soil is improved the higher stiffness of the improved soil is, the more damping effect appeared. It is justified to obtain not only the dropping of permeability and the strength increase, but also the damping effect fairly by soil improvements.

요 지

화력발전소에서 부산되는 석탄회의 매립·성토재로서의 활용이나 폐기된 회사장의 재활용을 위한 연구의 일환으로, 석탄회의 동적성질을 구명하기 위하여 석탄회를 시료토로하여 진동감쇠비를 구하였으며, 현장(회사장)에서 지반개량 전후 지중벽에 의한 감쇠특성을 검토한 것이다. 석탄회에 시멘트 12%, 시멘트 9% 또는 약액(몰유리), 시멘트 6%를 섞은 공시체 순으로 감쇠비가 크고, 동일 시료의 경우 공극비가 작을수록 감쇠비가 증가하는 것으로 보아 재질의 강성 증대에 따라 감쇠비가 커짐을 알 수 있었다. 회사장에서는 진동전파경로 대체로 공구를 설치할 경우가 감쇠효과가 가장 크고, 지반을 개량할 경우는 개량지반의 강성이 클수록 감쇠효과가 있다. 이와같이 지반개량을 하게 되면 차수 및 강도증대효과 외에도 진동감쇠효과도 상당히 있는 것으로 판단된다.

*정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

**정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

***정회원 · 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

지반의 동적거동에 관한 연구는 지반의 반복재하 문제와 각종 차량의 공장가동, 건설공사시에 발생되는 각종 진동문제, 더 나아가서는 최근 몇년동안 세계 각국에서 발생한 지진문제등에 관련되어 앞으로 많이 제기되어야 할 과제이다^(1, 2).

우리나라의 경우 부족한 자원의 활용면에서 화력발전소의 산업폐기물인 석탄회(煤)의 매립·성토재료로서의 활용이나 폐기된 회사장의 재활용을 위한 연구의 일환^(3, 4)으로 이들의 동적 성질의 구명 또한 필요하다.

실내실험에서는 우리나라 5개 화력발전소(무연탄: 영동, 영월, 서천, 유연탄: 삼천포, 여수)의 석탄회(fly ash와 bottom ash)를 시료토로 하여 실내실험으로 진동특성을 분석하여 감쇠비를 구하였으며, 현장(회사장)실험에서는 지반개량 전후 지중벽에 의한 진동Level을 측정하여 감쇠특성을 검토하였다⁽⁵⁾.

2. 감쇠측정 이론

2.1 시간-진폭 그래프에 의한 감쇠측정

흙의 내부감쇠는 점성거동의 결과는 아니지만 점성감쇠를 갖는 1자유도계를 이용하면 흙에 실제로 발생하는 감쇠효과를 설명하기에 유리하다^(6, 7, 8).

점성감쇠를 갖는 1자유도계의 자유진동의 감쇠는 대수감소율(logarithmic decrement; δ)로 표현할 수 있다. 이 대수감소율은 자유감쇠진동의 진폭이 소멸되는 비를 나타내는데 이것은 2개의 연속된 진동진폭들(X_1, X_2)의 비를 자연대수(natural logarithm)로 나타낸 것으로 정의하며 다음 식과 같다.

$$\delta = \ln \frac{X_1}{X_2} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (1)$$

감쇠가 작다면($0 \leq D \leq 0.3$) 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta \approx 2\pi D \quad (2)$$

실제로 각가이 ... 전하다면 수 cycle 떨어진 두개의 진폭만 측정하여도 감쇠비는 구할 수 있는 것이다. 만일 어떤 진폭 X_1 과 $(m+1)$ cycle 떨어진 진폭 X_{m+1} 을 안다면 다음 식으로 부터 δ 를

구할 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{X_1}{X_{m+1}} \quad (3)$$

그리고 이 값을 식(1)이나 식(2)에 대입하면 감쇠비 D 를 구할 수 있다.

2.2 주파수 분석에 의한 감쇠비 측정^(9, 10)

힘 $F(t) = F_0 \cos \omega t$ 가 가해지는 감쇠 진동에서 확대계수, 증폭계수 또는 진폭비 (Q : magnification factor or amplification factor or amplitude ratio) X/δ_{st} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2D \omega/\omega_n]^2}} \quad (4)$$

여기서,

X : 물체의 진폭

$\delta_{st}(=F_0/K)$: 가해진 진동으로 인해 최대 힘을 받았을 때 물체의 정적 변위

ω_n : 물체의 고유 진동수

ω : 가해진 진동의 진동수

진동수비($r = \omega/\omega_n$)와 감쇠비(D)에 따른 증폭계수 Q 의 변화는 그림 1과 같다.

$$X \text{의 최대값; } \left[\frac{X}{\delta_{st}} \right]_{\max} = \frac{1}{2D\sqrt{1-D^2}} \quad (5)$$

(when $\omega/\omega_n = \sqrt{1-2D^2}$)

$$\omega = \omega_n \text{일때 } X \text{ 값; } \left[\frac{X}{\delta_{st}} \right]_{\omega=\omega_n} = \frac{1}{2D} \quad (6)$$

작은 값의 D 에 대해서는 다음식이 성립한다.

$$\left[\frac{X}{\delta_{st}} \right]_{\max} \approx \left[\frac{X}{\delta_{st}} \right]_{\omega=\omega_n} = \frac{1}{2D} = Q \quad (7)$$

증폭계수가 $Q/\sqrt{2}$ 로 떨어진 점 R_1 과 R_2 를 half power point라 하는데 (그림 2 참조)이 두점 R_1 과 R_2 에 해당하는 진동수의 차 ($\Delta\omega$)를 bandwidth라 하고 작은값의 감쇠비 D 에 대해서는 bandwidth $\Delta\omega$ 는 다음식으로 주어진다.

$$\Delta\omega = (\omega)_{R_2} - (\omega)_{R_1} = \omega_2 - \omega_1 = 2D\omega_n \quad (8)$$

식 (7)과 식(8)에서

$$Q = \frac{1}{2D} = \frac{\omega_n}{\omega_2 - \omega_1} \quad (9)$$

$$D = \frac{f_2 - f_1}{2f_n} \quad (10)$$

여기서, ω_1, ω_2 : R_1, R_2 에 해당하는 진동수
 f_1, f_2 : R_1, R_2 에 해당하는 주파수

표 1. SGR12호의 표준배합 및 성질

표준배합	A액	B액	합계
성질	구산소다3호 10L 물 10L	SGR12호 약액 2.3kg 흰색약액 2.0kg 회색약액 0.3kg 포틀랜드시멘트 6kg 물 16.8kl	40L
점도	38CPS	32CPS	-
색	회색현탁액		
비중	1.3		
Gel-Time(20°C)	50-70초		
Homogel 일축압축강도	5일후 1.0kg/cm ²		
Homogel 투수계수	1일후 3.7x10 ⁻⁷ cm/sec		

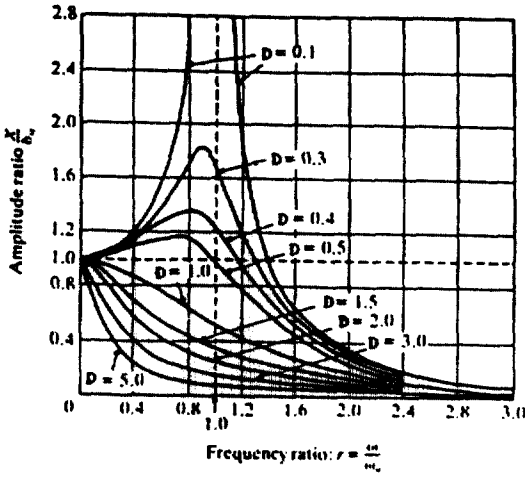


그림 1. r에 따른 X값의 변화

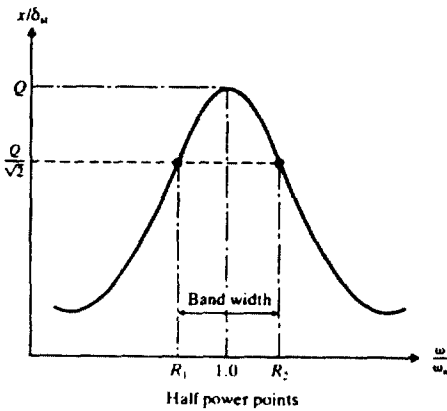


그림 2. 감쇠 진동의 응답곡선과 bandwidth

3. 실험

3.1 실내 실험

시료토로는 표준사, 석탄회 10종(비회 5종, 저회 5종)으로 총 11종류이고 시료토의 성형을 위해 보통포틀랜드시멘트와 SGR12호의 표준배합된 물유리 약액(표1 참조)을 사용하였다^(11, 12).

공시체들은 일정한 다짐에너지를 가하여 공시체의 크기를 $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ 로 제작하였다. 시멘트 배합은 중량백분율로 6%, 9%, 12% 3가지로 하였으며 물유리 약액을 섞은 공시체는 표준배합한 물유리 약액속의 시멘트양이 시멘트 6% 섞인 공시체의 시

사진 1. 석탄회 공시체의 진동 시험 광경

멘트중량과 같도록 하여 물유리 약액을 시료토와 혼합하였다. (각 시료에 대하여 4종류의 공시체 즉, 시멘트 6%, 시멘트 9%, 시멘트 12%, 물유리 약액) 공시체 제작 후 3일간 몰드내에서 기건양생을 시키고 몰드 탈형 후 다시 4일간 기건양생 시킨 후 1일간 노건조($110 \pm 5^\circ\text{C}$)시켰다.

이 공시체를 스폰지 위에 수평으로 놓고 Impact Hammer(PCB 4803 Unit)로 충격을 가하면 그때 발생하는 진동은 가속도 Pick-Up(Rion사 제작,

PV-90A)에 의해 측정되어 FFT Analyzer (Scientific-Atlanta사 제작, SD-375) 통하여 주파수 영역으로 바뀌어 전달함수가 만들어 진다⁽¹³⁾. 이와같은 여러차례의 충격신호를 평균한 전달함수가 구해지면^(14, 15) analog신호를 digital신호로 변환하여 IEEE-488 interface에 의해 micro computer에 실수부와 허수부로 나누어 전송 입력된다 (사진 1 참조). 이와같이 얻어진 Data를 이용하여 진동특성을 분석하고, 감쇠비(D)도 구하게 되는 것이다.

3.2 현장 실험

현장실험 장소로는 영동화력발전소의 회사장을 선정하여 진동 측정을 하였던 바 측정 장비로는 충격장치, Pick-up, Amplifier, 기록기등인데 충격장치는 4.5kg의 램머와 승용차 tire를 사용하였고, Pick-up은 Amplifier와 같이 1 set로 되어 있는 Vibration Pick-up(일본 Rion사 제작, 형식 PV-83)을 2개 사용하였으며, 기록기는 카세트 형식의 magnetic tape를 쓰는 Data Recorder(일본 Kyowa사 제작, 형식 RPT-501 AL)을 사용하였다.

현장실험 조건은 다음 4가지 경우로 나누었다. 첫째 회사장 원지반($\gamma_1=1.23t/m^3$), 두번째는 공구를 판 다음(폭 0.9m, 깊이 1.8m, 길이 3.4m), 세번째로는 이 공구에 느슨한 혼합시멘트 벽체를 형성하여($\gamma_1=1.39t/m^3$), 네번째는 좀더 단단한 혼합시멘트 벽체($\gamma_1=1.52t/m^3$)를 형성한 것이다(사진 2 참조).

한번의 충격에 대하여 2개의 Pick-up에 동시에 감지할 수 있도록 충격점과 2개의 Pick-up을 일직선상에 놓았다.



사진 2 현장(회사장) 시험 광경

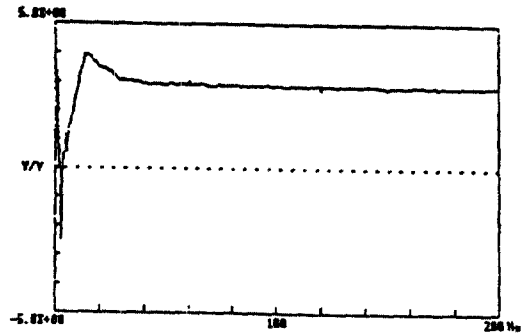


그림 3. 약액을 섞은 영동저희의 전달함수

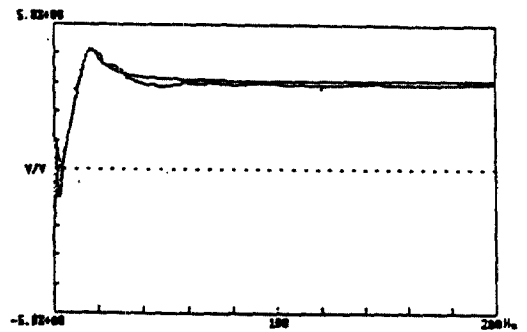


그림 4. 약액을 섞은 삼천포 비희의 전달함수와 curve fitting한 그래프

4. 실험결과 및 고찰

11개 시료에 시멘트 6%, 9%, 12%와 약액을 혼합시켜서 만든 각 공시체마다 약간은 다르지만 전반적인 전달함수의 형태는 그림 3과 같고, 그림 4는 이런 전달함수로부터 감쇠비를 구하기 위하여 curve fitting하여⁽¹⁷⁾ 전달함수와 함께 overlap시킨 것이다.

이와 같이 curve fitting된 전달함수는 주파수분석에 의한 방법으로 감쇠비가 구해진다. 이 결과는 표 2와 같다.

표 2중에서 혼합재의 배합에 따른 감쇠비 변화를 그래프로 그리면 그림 5와 같다. 시멘트를 배합한 경우는 시멘트의 배합비의 증대에 따라 감쇠비가 증대함을 알 수 있다. 그리고 표준사는 석탄회에 비해서 시멘트양에 따른 감쇠비변화가 커서 시멘트의 중량 백분율이 작을 때는 석탄회에 비해서 상당히 작은 감쇠비로 나타났으나 시멘트양의 증가에 따라

표 2 각 공시체의 감쇠비와 공극비

회종류	배합비 D, e값	6%시멘트		9%시멘트		12%시멘트		약액(SCR12호)	
		감쇠비	공극비	감쇠비	공극비	감쇠비	공극비	감쇠비	공극비
영월 비회		0.1282	0.6362	0.1314	0.6012	0.1446	0.5900	0.1503	—
여수 비회		0.1273	0.7018	0.1361	0.6692	0.1548	0.6230	0.1529	—
영동 비회		0.1536	0.5497	0.1590	0.5144	0.1782	0.5106	0.1720	—
서천 비회		0.1334	0.6011	0.1392	0.5219	0.1434	0.5134	0.1384	—
삼촌포 비회		0.1103	0.8874	0.1465	0.8417	0.1588	0.8010	0.1405	—
표 준 사		0.0855	0.6104	0.1451	0.5393	0.1799	0.4646	0.1506	—
영월 저회		0.1294	0.5979	0.1679	0.5557	0.1869	0.5336	0.1586	—
여수 저회		0.1629	0.9923	0.1820	0.9663	0.1860	0.9572	0.1712	—
영동 저회		0.1337	0.5478	0.1594	0.4028	0.1758	0.3864	0.1590	—
서천 저회		0.1493	0.5624	0.1509	0.5267	0.1620	0.5240	0.1501	—
삼촌포 저회		0.1141	0.8270	0.1503	0.8109	0.1809	0.7374	0.1401	—

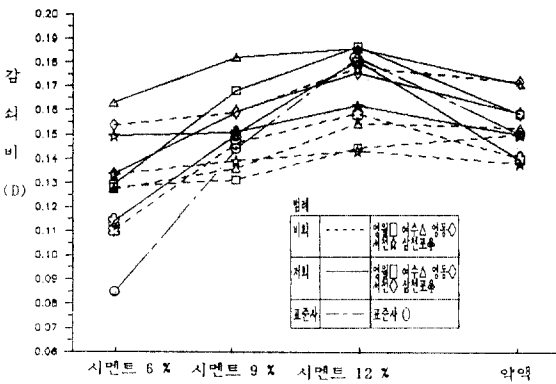


그림 5. 혼합재의 배합에 따른 감쇠비 변화

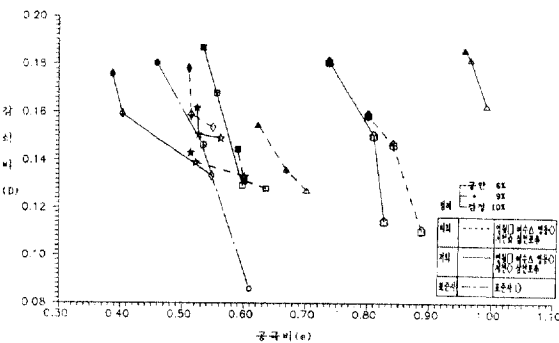


그림 6. 공극비 변화에 대한 감쇠비 변화

감쇠비가 급격히 증가하여 오히려 대부분의 석탄회 보다는 큰값을 보였다.

또 공극비의 변화에 대한 감쇠비의 변화는 그림 6과 같다. 동일 시료인 경우 공극비의 증가에 따라 감쇠비는 감소한다는 사실을 알수 있다.

현장에서는 회사장 원지반 및 두 측정 Pick-Up 사이에 공구 또는 시멘트 혼합체등을⁽¹⁸⁾만들고 두 Pick-up사이의 거리를 바꾸는 등 다양한 조건에서 가속도 Level을 측정하고 기록하였으며 좀 더 정확한 측정을 위해 실내에서 FFT Analyzer를 사용하여 가속도 Level을 구하였다. 측정조건 및 측정치는 표 3과 같다.⁽¹⁹⁾

표 3에서 보는 바와 같이 공구설치에 의한 감쇠 효과가 다른 경우보다 크게 나타났다.

5. 결 론

- 1) 전반적으로 시멘트 12%를 섞었을 때의 감쇠비가 가장 크고 시멘트 9% 또는 물유리 약액, 시멘트 6%를 섞었을 때의 순으로 감쇠비가 컸다.
- 2) 동일 시료인 경우 공극비의 감소에 따라 감쇠비는 증가한다.
- 3) 결국 동일 시료에 대해서는 강성의 증대에 따라 감쇠비 커짐을 알수 있었다.
- 4) 본 연구의 현장실험 결과로 보면 진동전파경로에 공구를 설치할 경우 가장 진동감쇠효과가 크

표 3 현장측정조건과 측정치

장 소	간 격	충격조건	평균 dB		충격 거 리 ↓:충격점, ▲:A점, ▼:B점	비 고
			A	B		
회 사 장	2 m	Tire	67.0	65.0	↓ ▲ ▼	$\gamma_t=1.23t/m^3$ $\gamma_d=1.17t/m^3$ $w = 5.3 \%$
		Rammer	66.0	64.0		
	2.5 m	Tire	66.3	64.2		
		Rammer	65.7	62.7		
	3 m	Tire	65.1	62.5		
		Rammer	65.3	62.1		
공 구	2 m	Tire	67.3	59.5	↓ ▲ ▼	공구의 폭 ; 0.9m 공구의 길이; 1.8m 공구의 길이; 3.4m
		Rammer	67.0	58.0		
	2.5 m	Tire	66.0	46.5		
		Rammer	66.0	54.9		
	3 m	Tire	65.0	55.0		
		Rammer	65.0	52.9		
단시 단멘 한트 혼벽 합체	2 m	Tire	67.5	63.7	↓ ▲ ▼	공구를 $\gamma_t=1.52$ t/m^3 로 중대됨 벽체의 폭 ; 0.9m 벽체의 길이; 1.8m 벽체의 길이; 3.4m
		Rammer	67.1	62.1		
	2.5 m	Tire	66.2	61.4		
		Rammer	66.0	59.8		
	3 m	Tire	65.1	59.9		
		Rammer	64.9	58.4		
느시 스멘 한트 혼벽 합체	2 m	Tire	66.9	63.9	↓ ▲ ▼	공구를 $\gamma_t=1.39$ t/m^3 로 할때 벽체의 폭; 0.9m 벽체의 길이; 1.8m 벽체의 길이; 3.4m
		Rammer	66.5	62.3		
	2.5 m	Tire	66.1	62.1		
		Rammer	66.0	61.5		
	3 m	Tire	65.0	60.7		
		Rammer	65.0	59.7		

고, 진동전파경로의 일부를 지반개량하였을 때는 그 개량지반의 강성이 클수록 감쇠효과가 크다.

5) 석탄회지반(회사장)의 지반 개량을 하게 되면 차수 및 강도증대효과 외에 감쇠효과도 상당히 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구비(과제번호 880607)지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 동 재단에 깊은 감사를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. Bobby O. Hardin and Vincent P. Drnevich, "Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 98, No.SM 7, Proc.Paper 9006, July, 1972, pp. 667~691.
2. Bobby O. Hardin and Vincent P. Drnevich, "Shear Modulus and Damping in Soils :

Measurement and Parameter effects", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 98, No.SM 6, Proc.Paper 8977, June, 1972, pp. 603~624.

3. 천병식, 고용일, 오민열, 권형석, "산업폐기물로 발생 되는 석탄회의 토질역학적 특성에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 10(1), 1990.3, pp. 115~123.
4. 천병식, 박홍규, "석탄회의 반복재하에 의해 변형특성", *대한토목학회논문집*, 10(1), 1990.3, pp. 125~134.
5. 五十嵐 和彦 外1人, "石炭灰盛土地盤の振動について," 第21回土質工學研究發表會講演集, 1985. 6, pp. 555~556.
6. S. Prakash, "*Soil Dynamics*", McGraw-Hill Book Co., 1981.
7. Richart, Hall and Woods, "*Vibrations of Soils and Foundations*", Prentice-Hall, Inc.(New Jersey), 1970. pp. 151~170.
8. Braja M. Das, "*Fundamentals of Soil Dynamics*", Elsevier, 1983.

9. Robert F. Stedel, Jr., "*An Introduction to Mechanical Vibrations*", 1979, pp.170~260.
10. Singiresu S. Rao, "*Mechanical Vibrations*", Addison Wesley, 1984, pp. 123~127.
11. 천병식, "기초지반개량공법", 건설연구사, 1987, pp. 86~112.
12. 한국 S.G.R공법협회, "SGR(Space Grouting Rocket System)공법", 1987.4.
13. 천병식·오재웅, "지반진동이론과 실제", 건설연구사, 1987, pp. 103~113.
14. Bendat, J.S., and Piersol, A.G., "*Random Data : Analysis and Measurement Procedures*", Wiley-Interscience, New York, 1971.
15. Julius S. Bendat, and Allan G.Piersol, "*Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*", Wiley-Interscience, New York, 1980.
16. D.E., Newland "An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis", Longman, London and Newtork, 1984.
17. D.J.Ewins, "*Model Testing Theory and Practice*", Research Studies Press LTD., 1984, pp. 153~196.
18. 木神 信昭 外1人, "地盤振動防振壁のシミュレーション", 第21回土質工學研究發表會 講演集, 1986.6, pp. 793~794.
19. Grant, F.S., and West,G.F., "*Interpretation Theory in Applied Geophysics*", McGraw-Hill Book Co.(New York), 1965.

(接受 : 1990. 9. 29)