

물유리계 藥液을 使用한 固結土의 振動減衰特性

Damping Characteristics of Solidified Soils Using Water-glass Chemical Grout

千	柄	植*
Chun,	Byung	Sik
權	寧	仁**
Kwon,	Yung	In

Abstract

Damping characteristics of chemically treated soils were studied by the use of FFT Analyzer and Bandwidth method. Also Modal Analysis was performed for the solidified silty sand samples. The soil samples were made of gravelly sand, sand, and silty sand treated by water-glass chemical grouts,

As the result of the study, it was found that the chemical grouting could be used for the vibration diminutinn effect as well as cut-off effect and strength improvement by the fact that the damping ratio of chemically treated soils was highly increased as the damping ratio of solidified soil was 0.11~0.22 and rathier high values in compare with the damping ratio of common soils which was 0.01~0.10.

要 旨

本 研究은 자갈섞인 모래, 모래, 실트섞인 모래등 세 종류의 試料土에 임의로 配合된 물유리계 藥液으로 混合, 固結시켜서 一定期間 氣乾養生한 供試體에 대해 FFT analyzer 를 이용하여 推動減衰特性을 究明한 것이며 아울러 실트섞인 모래의 固結土에 대해서는 모우드 解析을 실시하여 藥液의 種類에 따른 減衰形의 變化狀에 대해서도 檢討하였다.

藥液을 使用한 試料土의 減衰比는 0.11~0.22로서 藥液을 사용하지 않은 一般土의 값인 0.01~0.10에 비해 현저한 減衰比의 增大效果가 있음을 알 수 있었다. 따라서 藥液注入의 主目的인 遮水效果 및 強度增大뿐만 아니라 防振目的으로도 使用할 수 있어 工費, 工期面에서 보다 效率的인 多目的의 藥液注入이 가능할 것으로 期待한다.

1. 序 論

都心地에서 운행되는 地下鐵 및 각종 차량으로 인해서 발생되는 振動, 衝擊力과 함께 都心

地 建設工事時에 발생하는 각종 重裝備의 稼動과, pile 및 earth anchor 등의 작업으로 인한 振動의 발생으로 隣接構造物의 균열, 침하 등의 피해가 날로 증가하고 있다.

本 研究에서는 軟弱地盤의 強度增大 및 遮水效果增大目的⁽¹⁾으로만 쓰이고 있는 地盤注內工

* 正會員·漢陽大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

** 正會員·漢陽大學校 大學院 土木工學科

법을 振動 및 衝擊力을 減少시키기 위한 防振目的⁽²⁾으로의 併用을 위해 藥液處理土의 減衰特性에 대해 檢討하고자 한다.

Barkan⁽³⁾에 의하면 소련에서는 1960 년경 發展所 機械基礎 地盤의 振動量이 許容值를 넘게 되어 그 振動量의 低減을 위해 물유리계 및 시멘트를 使用한 바 있다. 注入範圍는 機械基礎 아래 깊이 1.0m, 기초모서리 部分에서 30cm 폭으로 하였고 注入後의 振動量은 注入前에 비하여 약 50% 減少되었다.

Partos, Wood 및 Welsh⁽⁴⁾는 물유리계 약액에 의해 溶鑛爐의 振動에 의한 振動量을 許用值 이내로 줄일 수 있었다고 보고하였다. 또한 地盤材料의 置換, 生石灰 pile의 打設 등에 의한 地盤改良을 행하여 3~4dB 정도의 振動低減效果가 있었다.

국내에서의 첫 試驗施工으로서는 시멘트계 藥液을 사용하여 地中壁을 設置함으로써 高速道路邊에 위치한 建物の 過大한 振動量을 허용치 이내로 줄인 예도 있다.

한편 흙의 減衰特性에 관한 研究는 1960 년대 이후에 활발해졌다고 볼 수 있다.

Weissmann & Hart⁽⁶⁾, Hall & Richart⁽⁷⁾는 흙의 減衰容量은 흙의 飽和度와 흙 입자의 특성에 영향을 받는 것으로 발표하였다.

Taylor & Menzies⁽⁸⁾는 흙의 減衰는 周波數의 값에 의존하는 것으로 발표하였다.

de Graft-Johnson⁽⁹⁾은 다져진 kaolinite의

원통형 시료에 대해 軸方向의 自由振動試驗(free vibration test)을 한 결과 減衰容量은 含水比와 拘束應力이 증가함으로 인하여 증가하는 것으로 발표하였다.

Hampton⁽¹⁰⁾은 沈澱土에 대한 減衰容量을 測定한 결과 空隙比가 큰 flocculated soil이 空隙比가 작은 dispersed soil 보다 減衰容量이 크다고 발표하였다.

Kovacs, Seed & Chan⁽¹¹⁾은 軟弱粘土의 減衰比를 구하기 위해 cyclic triaxial test 와 free vibration test 를 실시하였고 두 방법에 의한 試驗結果에서 減衰는 變形幅에 영향을 받는다고 발표하였다.

Hardin & Drnevich⁽¹²⁾는 減衰比는 平均有效 主應力이 증가함에 따라 감소하며, 非粘性土는 飽和度의 영향을 거의 받지 않는 것으로 발표하였다.

2. 理論的 考察

일반적으로 振動의 減衰는 自由振動試驗(free vibration test) 또는 強制振動試驗(forced vibration test)에 의해 구해질 수 있으며 다음과 같다⁽¹³⁾.

自由振動試驗에서 振動系(vibration system)는 그 평형위치에서 일정량 변위된 狀態에서 진동하게 되며 시간-변위의 그래프는 그림 1과 같다.

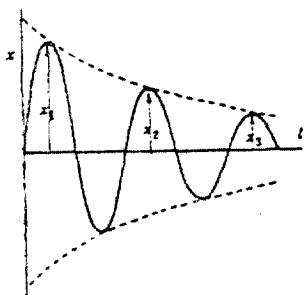


그림 1. 自由振動($\xi < 1.0$ 인 경우)

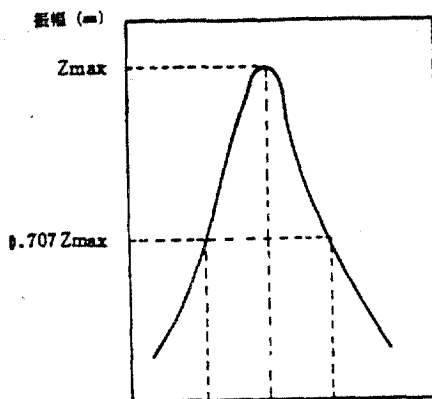


그림 2. Bandwidth 방법에 의한 減衰比 算定

이 때 振動系의 減衰比 ξ 는 다음과 같다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \log_e \frac{X_1}{X_2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \log_e \frac{X_1}{X_n} \quad (1)$$

또한 強制振動試驗에서는 振動系에 外力을 가하여 발생하는 시계열신호(time history record)를 周波數영역으로 변화하면 그림 2와 같은 周波數領域의 그래프를 얻을 수 있다.

이 때 減衰比 ξ 는 Bandwidth 방법에 의해 구해지며 다음과 같다.

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \frac{f_2 - f_1}{f_n} \quad (2)$$

여기서, f_n ; 그래프의 최대변위값(Z_{max})에서의 周波數

f_2 ; 그래프의 최대변위값의 0.707 배

(0.707 Z_{max})에서의 周波數

f_1 ; 그래프의 최대변위값의 0.707 배

(0.707 Z_{max})에서의 周波數

(단, $f_2 > f_1$)

한 편, A. Major⁽¹⁴⁾에 의하면 振動 및 衝擊力을 받고 있는 土木·建築構造物의 防振設計에서 고려되는 흙의 減衰는 radiation damping 과 material damping 이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi = \xi_r + \xi_m \quad (3)$$

여기서, ξ ; 흙의 減衰比

ξ_r ; radiation damping 에 의한 減衰比

ξ_m ; material " "

radiation damping(또는 geometrical damping)은 흙과 접촉한 振動體의 접촉면 형상 및

진동형상에 의한 減衰이며 彈性 半空間 理論 (elastic half space theory)을 적용하여 Lysmer & Richart⁽¹⁵⁾, Hall⁽¹⁶⁾, Whitman & Richart⁽¹⁷⁾에 의해 구해졌으며 다음과 같다.

한 편, 本 研究의 주안점이 될 material damping(internal damping)은 振動波가 흙을 통과 하면서 발생하게 되는 減衰로서 減衰의 대부분이 흙의 履歷現象(hysteresis)에 의해 발생한다⁽¹⁸⁾. 이 material damping 을 구하는 室內試驗方法으로는 resonant column test, cyclic triaxial test, cyclic simple shear test, cyclic torsional test 및 free vibration test⁽¹⁹⁾ 등이 있으나 本 研究에서는 FFT analyzer(fast fourier transform analyzer)⁽²⁰⁾를 이용하여 藥液處理土에 대해 impact hammer 및 transducer 를 使用하여 強制振動試驗을 행하고 이 때 얻어진 결과에 대해 Bandwidth 방법을 적용하여 藥液處理土의 減衰特性 및 모우드 해석에 의해서 振動減衰特性을 檢討하였다.

3. 實 驗

3.1 試料土

本 研究에서는 藥液處理土의 減衰特性을 檢討하기 위하여 試料土로서 자갈섞인 모래, 모래(漢江砂) 및 실트섞인 모래를 使用하였으며, 試料土의 物理的 性質과 粒徑加積曲線은 表 3 및 그림 3과 같다.

表 1. 質量比 B 및 減衰比 ξ_r

진 동 현 상	質 量 比	減 衰 比	비 고
Vertical	$B_s = \frac{1-\mu}{4} \cdot \frac{W}{\gamma \cdot r_0^3}$	$\xi_{rs} = \frac{0.425}{\sqrt{B_s}}$	Lysmer and Richart ⁽¹⁵⁾
Sliding	$B_s, B_\phi = \frac{7-8\mu}{32(1-\mu)} \cdot \frac{W}{\gamma r_0^3}$	$\xi_{rs} = \frac{0.288}{\sqrt{B_s}}$	Hall ⁽¹⁶⁾
Rocking	$B_\phi = \frac{3(1-\mu)}{8} \cdot \frac{I_\phi}{\rho r_0^5}$	$\xi_{r\phi} = \frac{0.15}{(1+B_\phi)\sqrt{B_\phi}}$	Hall ⁽¹⁶⁾
Torsional	$B_\phi = \frac{I_\phi}{\rho r_0^5}$	$\xi_{r\phi} = \frac{0.50}{1+2B_\phi}$	Whitman and Richart ⁽¹⁷⁾

단, W ; 振動體의 무게

ρ ; 흙의 質量= r/g

r_0 ; 等價 圓形基礎半徑(表 2)

I ; 質量 慣性모멘트(表 2)

表 2. 等價圓形半徑 r_0 및 質量貫性모멘트 I

振 動 形 狀	r_0	I
Vertical	$r_0 = \sqrt{\frac{BL}{\pi}}$	—
Sliding	$r_0 = \sqrt{\frac{BL}{\pi}}$	
Rodking	$r_0 = \sqrt[3]{\frac{BL^3}{3\pi}}$	$I_\theta = m \cdot \left(\frac{r_0^2}{4} + \frac{h^2}{3} \right)$
Torsional	$r_0 = \sqrt{\frac{BL(B^2+L^2)}{6\pi}}$	$I_\theta = \frac{m\pi r_0^2}{2}$

단, I_θ ; 基礎 바닥면에 대한 높이인 실린더의 質量 貫性모멘트

I_θ ; 수직축에 대한 質量 貫性모멘트

m ; $\pi \cdot r_0^2 \cdot h \gamma / g$

B ; 振動體가 흙과 接觸한 폭

L ; " " " 길이

表 3. 試料土의 物理的 性質

試 料	比 重	D_{60}	D_{10}	Cu	#200 체통과량	#4 체통과량	흙의 分類
A	2.67	1.3mm	0.4mm	3.3	0%	96%	자갈질모래
B	2.65	0.61	0.2	3.0	2	100	모래(漢江砂)
C	2.61	0.34	0.03	11.0	18	100	실트질모래

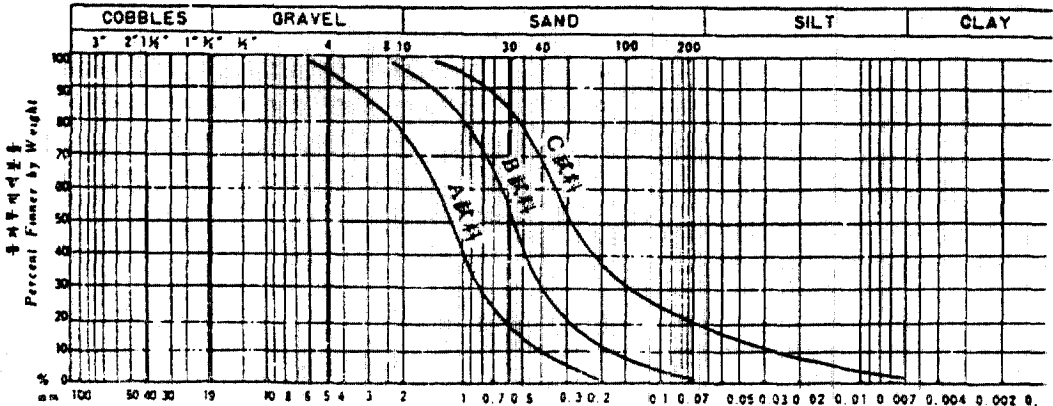


그림 3. 試料土의 粒徑加積曲線

3.2 混合劑

本 研究에서는 물유리계, 물유리·시멘트계, 시멘트계 등 3가지 약액이 사용되었으며 물유리계 藥液의 경우 물유리 3호, 分散劑, 硬化劑를 混合·溶解시켜 使用하였고 물유리·시멘트계 藥液의 경우 물유리계 藥液에 보통 포틀랜드 시멘트를 添加하여 使用하였다. 이 때 使用된 藥液의 gel-time은 물유리계 藥液의 경우 약 6분,

물유리·시멘트계 藥液의 경우 약 2분, 시멘트계 藥液의 경우 약 1시간 정도이며 配合示方例는 表 4와 같다.

3.3 供試體의 製作 및 養生

供試體는 조밀하게 다져진 藥液處理土의 減衰特性을 檢討하기 위해 供試體의 空隙率을 31%로 調整하였다.

供試體의 크기는 $\phi 15\text{cm} \times H7\text{cm}$ 로 하였으며,

表 4. 藥液의 示方配合例

	물 유 리 계 藥 液		물 유 리 · 시 멘 트		시 멘 트 계	
A 液	물유리 3호 물	100cc 100cc	물유리 3호 물	100cc 100cc	시 멘 트 물	120g 260cc
B 液	分 散 劑 硬 化 劑 물	3g 21g 160cc	分 散 劑 硬 化 劑 시 멘 트 물	3g 21g 30g 160cc	—	—

콘크리트 供試體 제작용 몰드($\phi 15\text{cm} \times H 30\text{cm}$)를 사용하여 藥液을 試料에 混合한 후 주어진 空隙比가 되도록 1.5kg의 다짐봉으로 각 층 15회 정도로 3층 다짐을 실시하였다.

養生方法은 供試體 제작 후 1일간 몰드내에서 固結시킨 후에 脫型하여 3일, 7일, 14일 후에 周波數分析을 하였다.

3.4 測定系 및 데이터 해석

本 研究에 使用된 測定系 및 데이터처리 계통도는 그림 4와 같다. impact hammer에 의한 振動을 加速度 픽업으로 測定하고(사진 1), FFT analyzer에 의해 受信된 信號를 모니터링하면서 IEEE-488 interface bus에 의해 A/D 變換된 데이터를 마이크로컴퓨터(PC9801)에 전송, 입력한다.

입력된 데이터는 line printer 및 X-Y plotter로 출력시킨다.

3.5 모우드 해석

固結土의 振動모우드에 대한 振動形을 알아보기 위하여 모우드해석(21,22)을 실시하였다. 그림

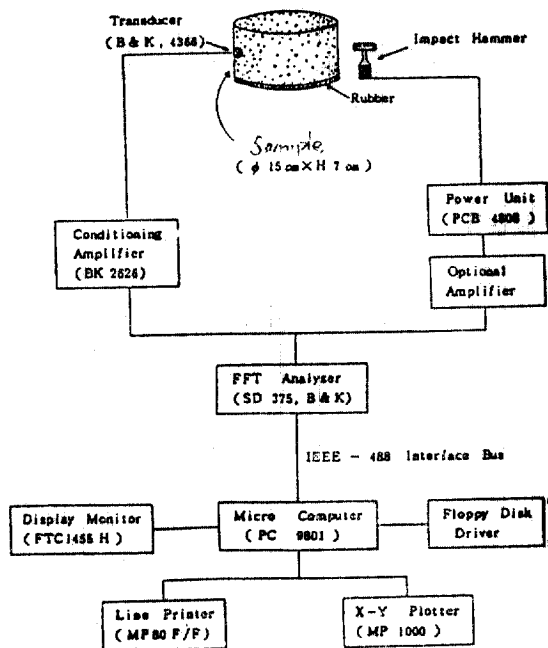


그림 4. 藥液處理土의 減衰比算定 및 모우드 解析을 위한 實驗系統圖

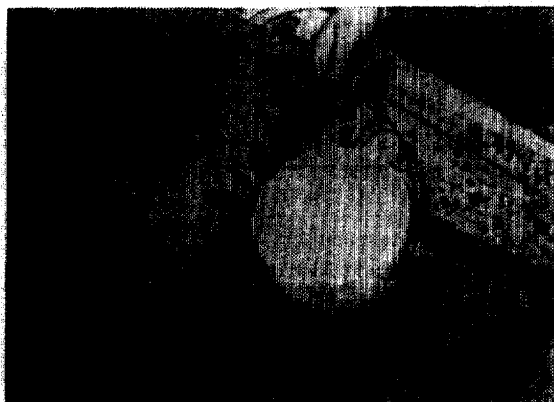


사진 1. Impact Hammer에 의한 振動測定 光景

5와 같이 transducer를 供試體의 윗쪽에 설치하고 impact hammer로 32개 점에 대해 그림과 같이 加振하여 500Hz까지의 傳達函數를 測定하였으며 각 測定點에 대한 ensemble average값은 10으로 하였다. 測定된 信號는 charge amp(PCB4808)와 conditioning amp(B&K 2626)을 통하여 增幅되어 FFT analyser에 入力되며 入力된 데이터는 IEEE-488 interface-bus에 의해 퍼스널 컴퓨터로 傳送된다. 傳送된 데이터는 개발된 프로그램에 의하여 여러 가지 계산과정을 수행한 후 振動形을 계산하여 出力한다.

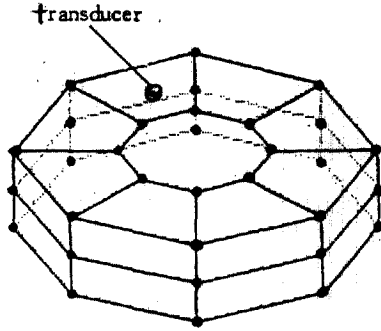


그림 5. 모드 해석을 위한 transducer의設置 및 加振點

4. 實驗結果 및 考察

이상과 같이 자갈질 모래, 모래, 실트질 모래의 3종류의 試料에 물유리계, 물유리·시멘트계, 시멘트계의 3종류의 藥液을 각각 混合, 固

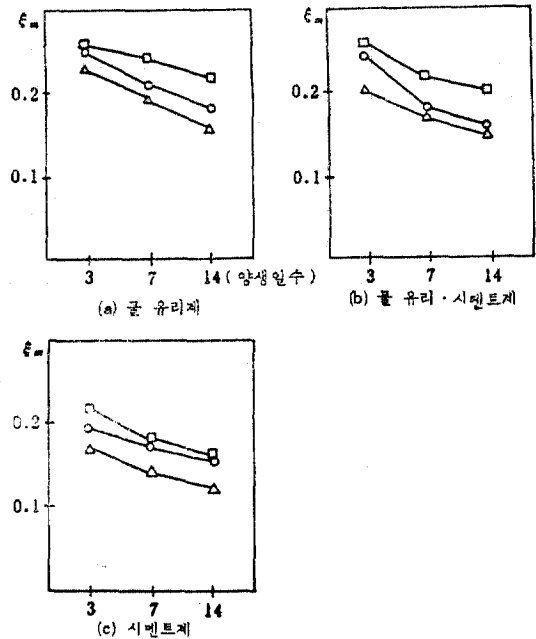
表 5. 藥液處理土의 減衰比 ξ_m

養生日數	試料	藥液		
		물유리계	물유리·시멘트계	시멘트계
3 일	자갈섞인 모래	0.25	0.24	0.19
	모래	0.23	0.20	0.17
	실트섞인 모래	0.26	0.25	0.22
7 일	자갈섞인 모래	0.21	0.18	0.17
	모래	0.19	0.17	0.14
	실트섞인 모래	0.24	0.22	0.18
14 일	자갈섞인 모래	0.18	0.16	0.15
	모래	0.16	0.15	0.11
	실트섞인 모래	0.22	0.20	0.16

結시켜서 3일, 7일, 14일간 氣乾養生한 供試體에 대해 FFT Analyzer를 이용하여 Bandwidth 방법으로 減衰比를 구한 값을 요약하면 表 5와 같다(부록 참조).

한편 藥液을 使用하기 이전의 일반 흙에 대한 減衰比의 값은 表 6과 같다. 表 5와 表 6을 비교해 보면 藥液處理土의 減衰比는 0.11~0.22로서 藥液를 使用하기 이전의 減衰比인 0.01~0.10에 비해 상당한 減衰比 增大가 있었다는 것을 알 수 있다.

또한 試料의 種類, 藥液의 種類, 養生日數 등



○ 자갈섞인 모래 △ 모래 □ 실트섞인 모래
그림 6. 試料土의 種類에 따른 減衰比의 變化

表 6. 흙의 종류에 따른 減衰比

흙의 종류	ξ_m	비고
건조모래 또는 자갈섞인 모래	0.03~0.07	Weissmann and Hart ⁽²⁷⁾
건조 또는 포화된 모래	0.01~0.03	Hall and Richart ⁽²⁸⁾
건조모래	0.03	Whitman ⁽²³⁾
건조 또는 포화된 모래나 자갈	0.05~0.06	Barkan ⁽²⁹⁾
점토	0.02~0.06	"
실트섞인 모래	0.03~0.10	Stevens ⁽²⁴⁾
건조모래	0.01~0.03	Hardin ⁽²⁵⁾

의 변화에 따른 減衰比의 변화는 다음과 같다.

4.2 藥液의 種類에 따른 減衰比의 變化

그림 7을 參考하면, 藥液의 種類에 따른 減衰比(ξ_m)의 값은 물유리계 藥液이 가장 크고 물유리·시멘트계·시멘트계 순서이다.

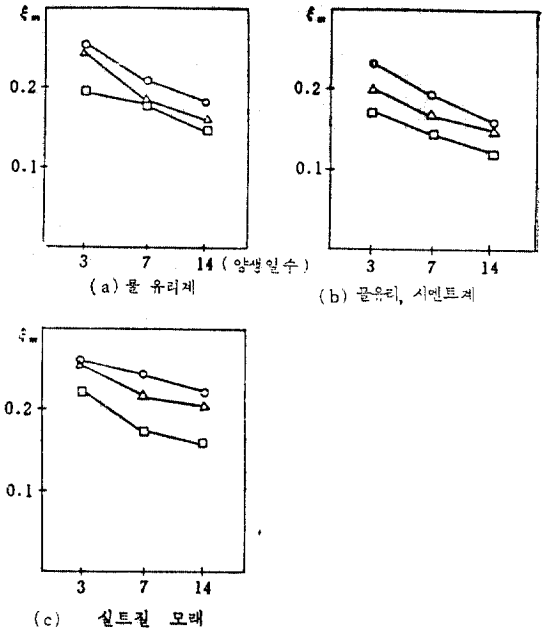
4.3 養生日數에 따른 減衰比의 變化

그림 8을 參考하면, 養生日數가 3일에서 7일, 14일로 增加함에 따라 減衰比(ξ_m)의 값이 減少함을 알 수 있으며, 이는 養生日數의 增加에 따른 強度增大 때문인 것으로 보인다. 養生日數가 14일이 초과되면 이와 같은 減少현상은 完滿해지며 28일이 지나게 되면서 거의 一定하게 될도 알 수 있었다.

4.4 모우드 해석 결과

물유리계, 물유리·시멘트계, 시멘트계 藥液을 處理한 실트취인 모래의 供試體를 14일 養生시켜 모우드 해석을 실시한 결과, 藥液處理土의 振動모우드는 87.5Hz 부근에서 1차 모우드가 존재한다고 볼 수 있으며 이때의 振動形을 퍼스널 컴퓨터에 의한 3차원 그래픽으로 작성하면 그림 9과 같다.

그림 9의 각 藥液에 대한 振動形을 比較해 보



○ 물유리계 △ 물유리·시멘트계 □ 시멘트계

그림 7. 藥液의 種類에 따른 減衰比의 變化

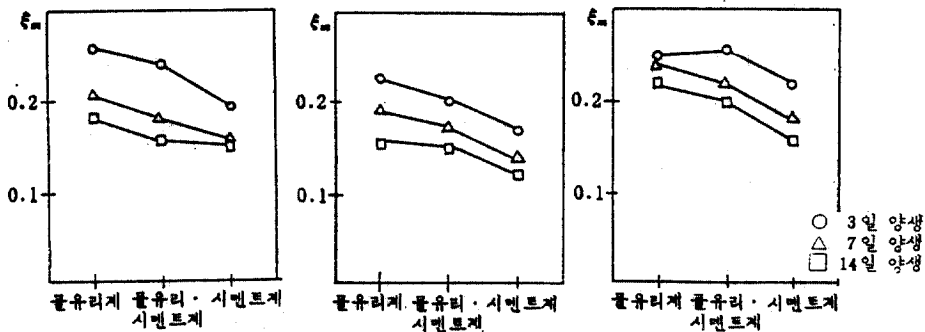


그림 8. 養生日數에 따른 減衰比의 變化

면, 물유리계 藥液에 의해 處理된 供試體가 전체적으로 진동베벨도 작고 대칭형상을 갖는 規則的인 振動形을 나타냄을 알 수 있으며, 이에 비해서 시멘트계 藥液의 경우 전체적인 진동베벨도 크고 不規則的인 振動形을 나타내며, 물유

리·시멘트계의 경우는 중간정도이다.

5. 結 論

(1) 藥液을 使用한 試料土의 減衰比는 0.11~0.22로서 藥液을 使用하기 이전의 減衰比인

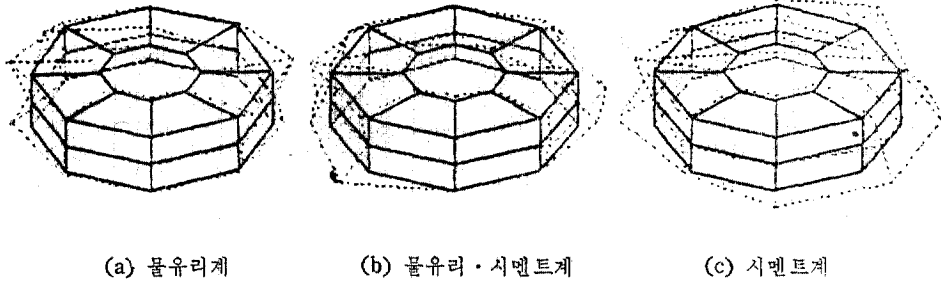


그림 9. 藥液處理土(실트섞인 모래)의 振動形(1 차모우드)

0.11~0.10 에 비해 현저한 減衰比 增大가 있었다.

(2) 試料土의 種類에 따른 減衰比는 실트섞인 모래가 가장 크고, 자갈섞인 모래, 모래의 순서였고 藥液의 種類에 따른 減衰比는 물유리계 藥液이 가장 크고, 물유리·시멘트계, 시멘트 순서였다.

(3) 養生日數가 3일에서 7일, 14일로 증가함에 따라 減衰比는 減少하였는 데 이는 藥液處理土의 強度增大 때문인 것으로 보인다.

(4) 모우드해석에 의한 藥液處理土(실트섞인 모래)의 3차원 振動形 평가에 의하면 물유리계 藥液이 전체적으로 진동레벨도 작고 대칭형상을 갖는 規則的인 振動形을 나타내며, 시멘트계 藥液의 경우 전체적인 振動레벨도 크고 不規則的이며, 물유리·시멘트계의 경우 중간 정도이다.

(5) 이상과 같이 藥液處理土는 일반 흙에 비해 높은 減衰比의 增大效果가 있으므로 현재까지의 藥液注入의 主目的인 遮水效果 및 強度增大外에 防振目的으로도 사용할 수 있어 工費, 工期面에서 보다 效率的인 多目的의 藥液注入이 可能할 것으로 보인다.

感謝의 말

本 研究는 1986~1988年 韓國科學財團의 研究費支援에 의해 수행중인 研究의 一部임을 밝히며 同財團에 深甚한 謝意를 表한다.

아울러 本 研究 遂行에 있어 여러 가지 편의를 제공해 주고 協助해준 本 大學 機械力學研究室 吳在應教授와, 大學院生 여러분에게도 感謝의 뜻을 전한다.

參 考 文 獻

1. 森麟, 田村昌仁, 千柄植, “砂質地盤における割裂發生機構”, 日本土木學會論文集 第388號/Ⅲ-8, 1987.12.
2. 千柄植, “藥液注入工法の 最近動向”, 大韓土質工學會誌, 제1권, 제2호, 1985.12.
3. D.D. Barkan, “Dynamics of Bases and Foundations”, McGraw-Hill Book Co., New York, 1962.
4. A. Partos, R.D. Woods, and J.P. Welsh, “Soil Modification for Relocation of Die Forging Operation”, *Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, ASCE, 1982, 2.
5. 千柄植, 吳在應, “地盤振動理論과 實際”, 建設研究社, 1987.8.
6. G.F. Weissmann and R.M. Hart, “The Damping Capacity of Some Granular Soil”, *ASTM STP* 305, 64th Annual Meeting, 1961.
7. J.R. Hall and F.E. Richart, “Dissipation of Wave Energy in Granular Soils”, *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 89(6), 1963.
8. P.W. Taylor and B.K. Menzies, “The Dynamic Characteristics of Dynamically Stressed Clay,” *Proceedings of the 4th Australian New Zealand Conference on SMFE*, Adelaide, Australia, 1963.
9. J.W.S. de Graft-Johnson, “The Damping Capacities of Compacted Kaolinite under Low Stress”, *Proceedings of the Symposium of Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*, Univ. of New Mexico Press, New

- Mexico, 1967.
10. L.D. Hampton, "Acoustic Properties of Sediments", *The Journal of the Acoustic Society of America*, 1967.
 11. W.D. Kovacs, H.B. Seed, and C.K. Chan, "Dynamic Moduli and Damping Ratio for a Soft Clay", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, 97(1), 1971.
 12. B.O. Hardin and V.P. Drnevich, "Shear Modulus and Damping in Soils Measurement and Parameter Effects", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, 98(6), 1972.
 13. S. Parakash, "Soil Dynamics", McGraw-Hill Book Co., 1981.
 14. A. Major, "Dynamics in Civil Engineering Vol I", Akademiai Kiado, Budapest, 1980.
 15. J. Lysmer and F.E. Richart, "Dynamic Response of Footings to Vertical Loading", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, 92(1), 1966.
 16. J.R. Hall, Jr., "Coupled Rocking and Sliding Oscillations of Rigid Circular Footings", *Proceedings International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*, Albuquerque, N.M., 1967.
 17. R.V. Whitman and F.E. Richart, "Design Procedures for Dynamically Loaded Foundations", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, 93(6), 1967.
 18. D.J. Dowrick, "Earthquake Resistant Design", John Wiley & Sons, 1977.
 19. Department of the Navy, "Soil Mechanics: Design Manual 7.1", Naval Facilities Engineering Command, 1982.5.
 20. Scientific-Atlanta, "User's Manual; SD 375 Dynamic Analyzer II", Scientific-Atlanta Spectral Dynamics Division, 1982.10.
 21. 오재웅, "구조물 모우드 해석의 기초와 응용", 회성출판사, 19868
 22. 오재웅, "냉장고 진단용 소프트웨어 개발에 관한 연구", 한양대학교 산업과학연구소, 1987.
 23. R.V. Whitman, "Stress-Strain-Time Behavior of Soil in One Dimensional Compression", Rep. R63~25, Dept. Civil Eng. MIT, 1963.
 24. H.W. Stevens, "Measurement of the Complex Moduli and Damping of Soils under Dynamic Loads", U.S. Army Cold Region Research and Eng. Laboratory, Hanover, N.H., Tech. Rep. No. 173, 1966.
 25. B.O. Hardin, "The Nature of Damping in Sands", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, 91(1), 1965.

附錄：藥液處理土의 減衰比를 구하기 위한 周波數 영역의 그래프

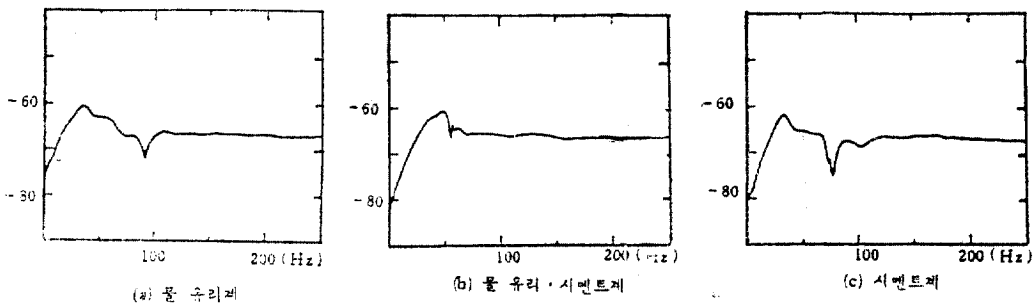
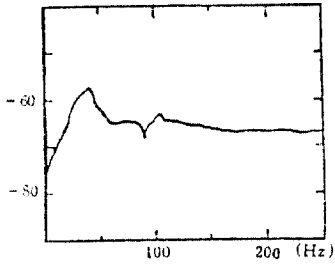
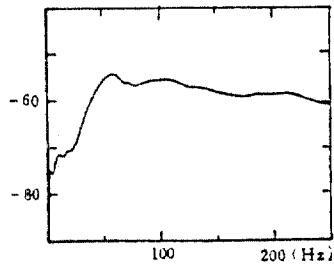


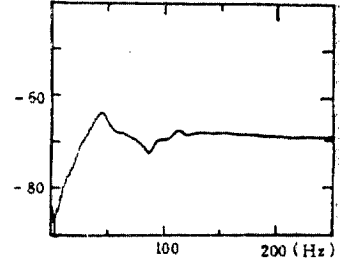
그림 A. 자갈취인 모래



(a) 물 유리제

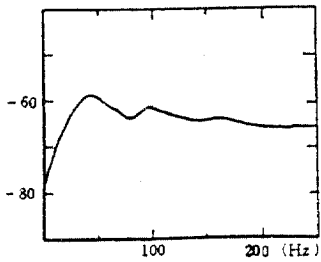


(b) 물 유리 · 시멘트제

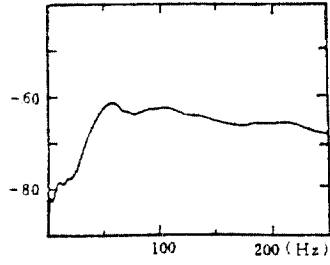


(c) 시멘트제

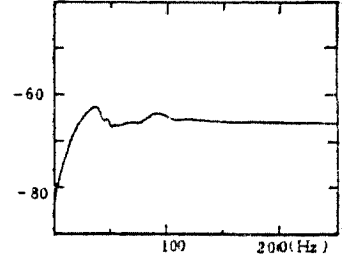
그림 B. 모래



(a) 물 유리제



(b) 물 유리 · 시멘트제



(c) 시멘트제

그림 C. 실트 섞인 모래

(接受: 1988. 1. 4)