

디젤해머에 의한 콘크리트말뚝 杭打時 發生되는 地盤振動의 測定 및 影響評價

Measurement and Control of Ground Vibrations due to Precast
Concrete Pile-driving by Diesel Hammer

朴	鍊	洙*
Park,	Yeon	Soo
全	俊	秀**
Chon,	Chun	Su

Abstract

This Paper measures and analyzes ground vibrations induced during precast concrete pile-driving using diesel hammer at radii varying from 9m to 30m to evaluate effects of such vibrations associated with deep foundation piling operations near the residential or commercial areas.

From this study, characteristics for attenuation and frequency of the vibrations caused by pile-driving are established and the empirical equation for predicting peak velocity and acceleration levels are obtained. This equation can be used to predict the peak vibration levels and select the appropriate hammers for future projects where similar soil conditions to this test site are encountered.

要 旨

本 論文은 住居 및 商街構造物이 密集된 地域에서 構造物의 말뚝基礎工事를 위한 杭打作業時 야기되는 地盤振動의 影響을 評價하기 위해서 디젤해머로 PC콘크리트말뚝을 杭打하는 동안 發生되는 地盤振動을 杭打地點으로부터 振動測定距離를 變경시키면서 測定·分析하였다.

本 論文의 測定과 分析을 통하여 杭打振動의 減衰 및 周波數特性이 파악되었으며, 이로부터 杭打振動의 크기를 事前에 豫測할 수 있는 振動推定式의 유도 및 杭打機 選定을 비롯한 제반문제에 대하여 考察하였다.

1. 序 論

近來에 와서 大規模 建設工事に 杭打機등 여러

종류의 강력한 重機械를 사용함에 따라 각종 振動 문제가 激증하게 되었으며, 이에 대한 民願도 급격히 증가하고 있다^(1~4, 9~13). 특히 現場이 市街地에

*正會員·(株)大宇 엔지니어링 技術研究所 前任研究員

**正會員·(株)大宇 엔지니어링 技術研究所 所長

위치한 지역에서 構造物의 말뚝基礎工事와 土留壁工事를 위한 杭打作業은 振動 및 騒音문제를 야기시키는 사례가 많고^(2, 9), 빈번하게 建設의 障礙要因이 되고 있음에도 불구하고, 아직 이러한 狀況에 적절하게 대처할 수 있는 指針이 마련되어 있지 않은 실정이다^{(2-4), (9), (10)}. 또한 이러한 杭打振動문제는 통상 예기치 못한 사소한 상황에서부터 시작되어 상당한 불이익을 가져올 수도 있으므로, 杭打工事의 計劃, 設計, 施工의 전 과정에 걸쳐 세심하게 다룰 필요가 있다^(1-4, 9-13).

本 論文에서는 이러한 杭打振動의 影響을 評價하기 위해서, 부산시 민락동에 위치한 아파트 말뚝基礎工事시에 PC콘크리트말뚝(ϕ 300mm)을 디젤해머로 堆積層까지(N=35) 杭打하는 동안 발생한 地盤振動을 杭打地點으로부터 거리를 변경시키면서 測定·分析하였다.

2. 測定場所 및 地盤條件

杭打振動이 測定된 아파트現場은 부산시 민락동에 위치하고 있으며, 본 부지의 北方 약 1km지점에는 수영비행장이 있고, 南方 약 100m지점에는 진흥사가 있다. 그림 1은 아파트現場의 위치평면도로서 杭打振動은 No. 18지역에서 PC콘크리트말뚝이 디젤해머로 깊이 13m(N=35)의 堆積層까지 杭打하는 동안 測定하였다. 이 지역의 土層은 그림 2와 같이 수직적으로 地表面으로부터 埋立層, 堆積層, 風化岩層, 軟岩層 順으로 구성되어 있으며 이들 각

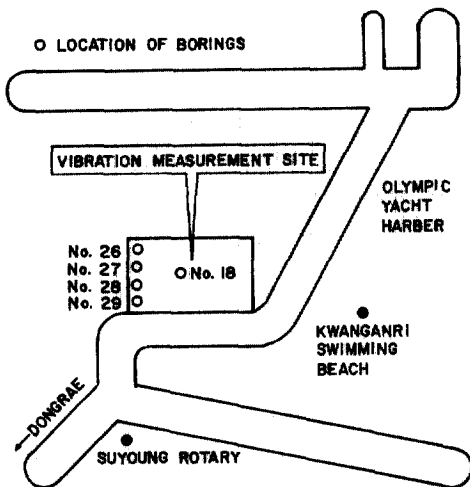


그림 1. Location of vibration measurement site

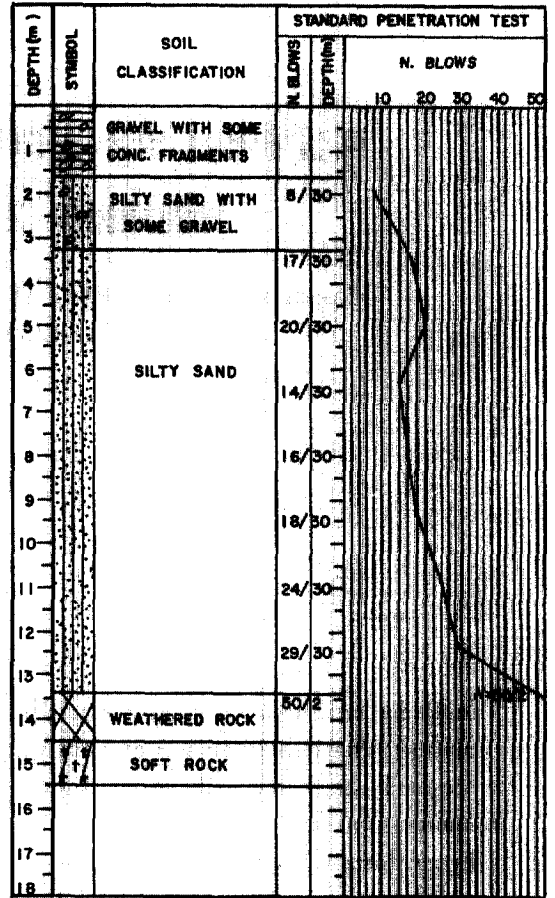


그림 2. Boring log

層에 대하여 要約 詳述하면 다음과 같다.

2.1 埋立層

本 層의 土質은 埋立層으로서 콘크리트, 모래, 자갈등의 혼합층으로 구성되어 있으며, 地表로부터 3.3m의 두께로 불규칙하게 분포하고 있다.

本 土層은 일반적으로 회색 및 황갈색을 띠며 전반적으로 中粒質의 모래로서 약간의 실트 및 모래를 함유하고 있다.

本 層에서 실시한 표준관입시험 N치는 8로서 느슨 내지 중간 정도의 相對密度를 가지고 있다.

2.2 堆積層

埋立層 下部에 깊게 分布하고 있는 堆積層은 隣接한 바다의 潮流에 의하여 堆積物이 流入, 供給되어 一次的으로 形成된 土層과 隣近의 丘陵地로부터 流水에 의하여 二次的으로 形成된 土層으로 분

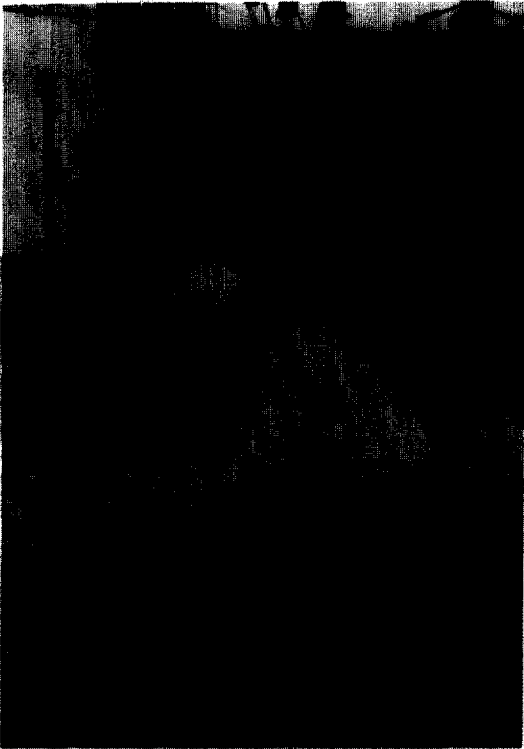
布하고 있다. 따라서 土層이 서로 混質되어 粒子의 분급형태로 발달하고 있지 않고 복잡한 分布 양상을 보인다.

構成土質은 실트 섞인 모래로 전체적으로는 모래층이 잘 발달하고 있으며, 層의 두께는 10.1m로 불규칙하게 발달하고 있다. N치는 14~40 정도로 중간 내지 견고한 상태이며, 말뚝은 이 層의 깊이 13m(N=35) 地點까지 杭打하였다.

3. 測定 및 結果分析

振動은 壓電形加速度計를 杭打地點으로부터 9~30m 사이의 地盤에 安着시켜 測定하였다. 이들 加速度計로부터의 신호는 사진 1과 같이 增幅機를 거쳐 增幅시키고 周波數 應答 범위가 DC~625Hz 인 4채널 FM데이터레코더의 磁氣테이프에 기록하였고, 現場用 FFT振動分析機를 사용하여 時間 및 周波數領域에서 分析하였다.

杭打振動은 그림 1의 No. 18지역에서 K35디젤해머로 PC콘크리트말뚝을 杭打하는 동안 加速度 및



寫眞 1. A scene of measurement and analysis of pile-driving vibrations

速度의 分布狀態, 거리에 따른 減衰形態, 그리고 周波數分布狀態를 알아보기 위해서 말뚝으로부터 거리 9m, 10m, 19m, 20m, 29m, 30m에 加速度計를 설치하여 地盤振動을 測定하였다. 杭打機 제원은 표 1과 같다.

표 1. Characteristics of K35 diesel hammer

Maker	Type	Weight of Ram(kg)	Drop Height(m)	Efficiency (ef)	Energy per Blow (ton·m)
Kobe	K35	3,500	1.5	1.00	10.5

표 1에서 해머의 타격당 에너지는 디젤해머이므로 다음 式을 사용하여 구하였다.

$$E = 2e_r W H \quad (1)$$

여기서, E : 해머의 정격에너지(ton·m)

W : 램의 무게(ton)

H : 램의 落下高(m)

e_r : 해머의 효율

그림 3은 콘크리트말뚝이 杭打되는 동안 거리 10m, 20m, 30m에서 각각 기록된 最大地盤加速度와 이것을 周波數領域에서 分析한 fourier frequency spectrum이다. 이 그림으로부터 디젤해머에 의한 杭打振動의 거리에 따라 減衰形態와 周波數形態를 알 수 있고, 1회 杭打時마다 發生되는 地盤振動의 지속시간이 1초이하임을 알 수 있다. 이러한 그림 3의 振動波形이 杭打할 때 마다 계속적으로 반복하여 기록되었다. 地盤振動速度는 測定된 加速度를 數值積分하여 구했다. 이와 같은 振動測定の 세부 사항 및 分析結果는 표2와 같다. 이번 杭打振動測定에서 發生된 最大 및 最小 速度는 각각 말뚝으로부터 9m 떨어진 곳에서 0.823cm/sec 그리고 30m 떨어진 곳에서 0.298cm/sec였으며, 杭打振動의 卓越振動數는 12~22Hz였다. 構造物의 固有振動數가 보통 10Hz이하임을 감안할 때⁽²⁾ 이들 杭打振動의 卓越振動數와 構造物의 固有振動數가 近接해 있지 않기 때문에 地盤振動의 共振 또는 增幅문제는 발생되지 않을 것으로 판단된다.

杭打振動의 推定式도 發破振動과⁽¹⁾ 마찬가지로 아직 理論的 展開가 완전히 이루어지지 않고 있지만 現在까지의 研究結果를 綜合해 보면, 杭打에너지의 제곱근(\sqrt{E})과 거리(D)가 最大地盤振動值

FOURIER FREQUENCY SPECTRUM

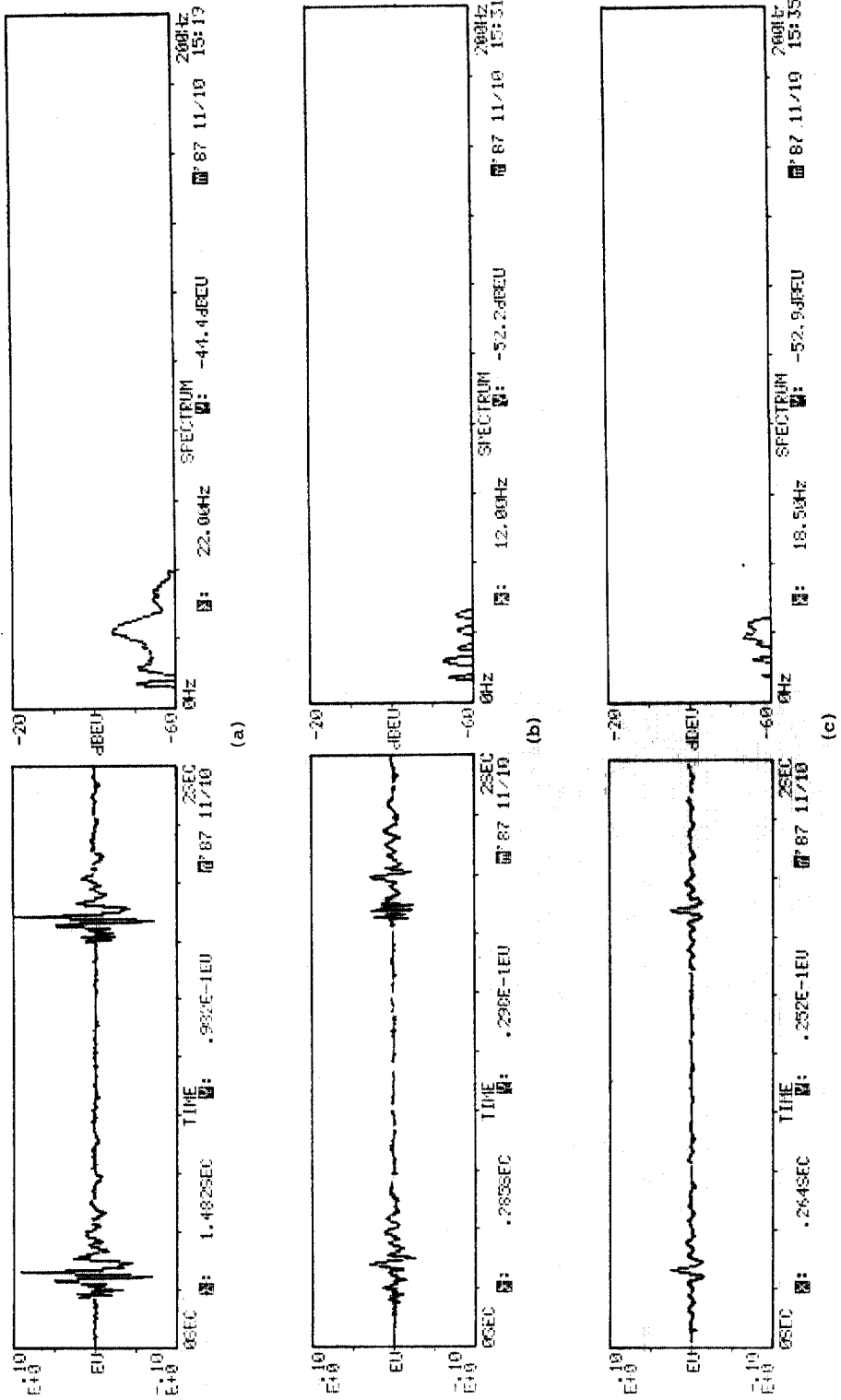


그림 3. Waveforms of ground acceleration and Fourier frequency spectrum recorded during pile-driving ;
 (a) 10m, (b) 20m, (c) 30m

표 2. Measurements and Analysis Results of Pile-driving Vibrations

Direction	Energy per Blow (ton · m)	Horizontal Distance (m)	Scaled Distance (m/√ton · m)	Peak Particle Velocity (cm/sec.)	Peak Acceleration (g)	Predominant Frequency (Hz)
Z	10.50	9	2.78	0.823	0.0983	18.00
Z	10.50	10	3.09	0.670	0.0982	22.00
Z	10.50	19	5.86	0.366	0.0398	12.00
Z	10.50	20	6.17	0.366	0.0298	12.00
Z	10.50	29	8.95	0.322	0.0313	19.00
Z	10.50	30	9.26	0.298	0.0252	18.50

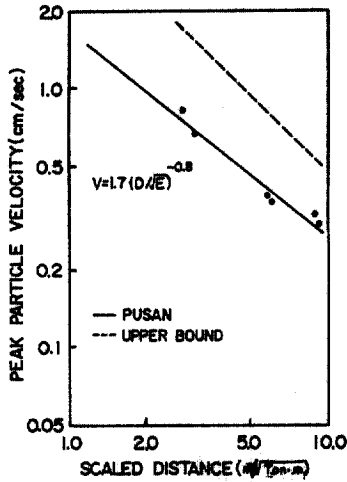


그림 4. Prediction of peak particle velocities according to scaled distances

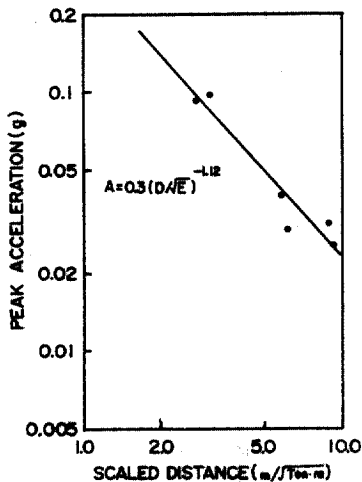


그림 5. Prediction of peak accelerations according to scaled distances

에 직접 연관되어 있으므로 이들 杭打에너지 및 거리, 杭打振動常數(K), 그리고 振動의 地盤減衰指數(α)를 고려한 다음과 같은 實驗式에 의해 最大振動值推定式을 나타낼 수 있다^(1, 3, 13).

$$V = K(D/\sqrt{E})^\alpha \quad (2)$$

여기서, V: 대상지점의 最大振動值(速度 = cm/sec, 加速度: g = 980cm/sec²)

D: 말뚝으로부터 대상지점까지의 거리 (m)

E: 해머의 에너지(Ton · m)

K: 말뚝의 종류에 따라 변하는 杭打振動常數

α: 地盤減衰指數

그림 4와 그림 5는 표2의 杭打振動速度와 加速度를 對數그래프(log-log graph)에 각각 圖示하고式(2)의 地盤振動推定式에 대하여 回歸分析을 수행한 것이다. 이 分析으로부터 본 杭打에서는 加速度가 速度보다 거리에 따른 振動值의 減衰量이 컸으며 加速度의 기본적인 추세는 振動해머에 의한 鎚打⁽²⁾와 비슷하였고, 수평거리 9m~30m에서 測定된 加速度의 크기는 0.0252g~0.0982g였다. 그리고 速度의 경우도 기본적인 減衰추세는 振動해머⁽²⁾와 비슷하였다.

위의 回歸分析 結果, 유도된 杭打振動速度와 加速度推定式은 다음과 같다.

$$V = 1.7(D/\sqrt{E})^{-0.8} \quad (3)$$

$$A = 0.3(D/\sqrt{E})^{-1.12} \quad (4)$$

여기서, V: 最大振動速度(cm/sec)

A: 最大振動加速度(g = 980cm/sec²)

D/√E: 換算距離(m/√Ton · m)

그림 4의 點線은 Wiss, Attewell, 그리고 Farmer의 研究結果로부터 유도된 杭打振動 速度의 上限值推定線으로, 杭打機 및 말뚝의 종류 그리고 地盤狀態등에 관계없이 杭打時 發生可能한 가장 큰 最大振動速度이다. 이 上限値는 杭打時 發生可能한 最大振動速度를 豫測하는 데에 사용할 수 있다.⁽³⁾ 이 上限値와 本 아파트杭打工事에서 유도된 推定式에 의한 振動速度를 比較해 보면 그림 4처럼 上限値가 훨씬 더 안전측에 있었으며, 구체적으로 같은 종류에 K35디젤해머를 사용했을 경우 수평거리 20m에서 上限値의 경우가 0.77cm/sec이고, 本 아파트工事의 推定式의 경우가 0.40cm/sec였다.

4. 評價 및 提言

杭打振動에 의한 構造物의 損傷 및 安全度의 評價도 發破振動⁽⁴⁾과 같이 最大地盤振動速度가 사용될 수 있으나, 아직 地下鐵의 發破振動처럼 振動速度規制規準値가 設定되어 있지 않은 狀態이다. 本 아파트 現場 주변에 밀집되어 있는 家屋 및 商街들이 대부분 老朽되어 있고 人爲적으로 被覆되어 있는 埋立層과 推積層에 基礎를 두고 있는 점을 감안하여 표3의 釜山地下鐵 發破振動許容値의 速度 0.5cm/sec를 사용하여 杭打振動의 影響을 다음과 같이 評價하였다.

표 3. Allowable blasting vibration values of the Pusan subway

Classification	Class I	Class II	Class III	Class IV
Vibration Values on Ground(cm/sec.)	0.2	0.5	1.0	1.0-4.0

Note : Structures are classified as followed ;
 Class I : Cultural Treasure
 Class II : Residential Structure
 Class III : Commercial Structure
 Class IV : Factory and Reinforced Concrete Structure

이 杭打地點(No. 18)으로부터 商街建물이 있는 도로변까지 最短距離가 80m이므로 式(3)의 速度推定式을 사용하여 地盤振動速度를 구해 보면 $V_{80} = 0.13\text{cm/sec}$ 로, 文化財地域에서의 振動許容値 0.2cm/sec 보다 작았으며, 測定된 杭打振動의 卓越振動數가 12~22Hz로 근처 商街 및 住宅構造物의 固有振動數(보통 10Hz이하)⁽²⁾와 比較해 볼 때 地盤振動과

隣接構造物과의 共振問題는 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 실제로, 本 지역의 杭打工事로 인해 隣接 商街 및 住宅에 거주하는 住民들로부터 民願이 발생하지 않았다. 그러나 隣接構造物과 10~50m 정도 떨어진 No. 26~No. 29 地域에서 디젤해머로 큰 크리트말뚝의 杭打時 騒音과 地盤振動에 대한 民願이 발생하였다. 隣接構造物과 10~50m 정도 떨어진 지역도 本 지역과 地盤狀態가 거의 비슷하였기 때문에, 여기서 유도된 杭打振動速度推定式으로 地盤振動의 크기를 推定해본 결과 振動速度가 $0.2\text{cm/sec} \sim 0.7\text{cm/sec}$ 정도로, 釜山地下鐵 發破振動許容値와 比較해 볼 때 결정적인 構造的損傷은 발생하지 않는다고 판단되나, 앞에서 설정한 地盤振動許容値 0.5cm/sec 를 초과하는 振動이 발생한다고 推定되므로 적절한 對策이 필요하다. 防振對策方法에는 여러가지가 있으나, 式(3)과 (5)를 살펴보면 杭打振動의 크기 V 는 杭打에너지의 제곱근 \sqrt{E} 에 직접 比較하기 때문에 해머에너지를 변경시키는 것이

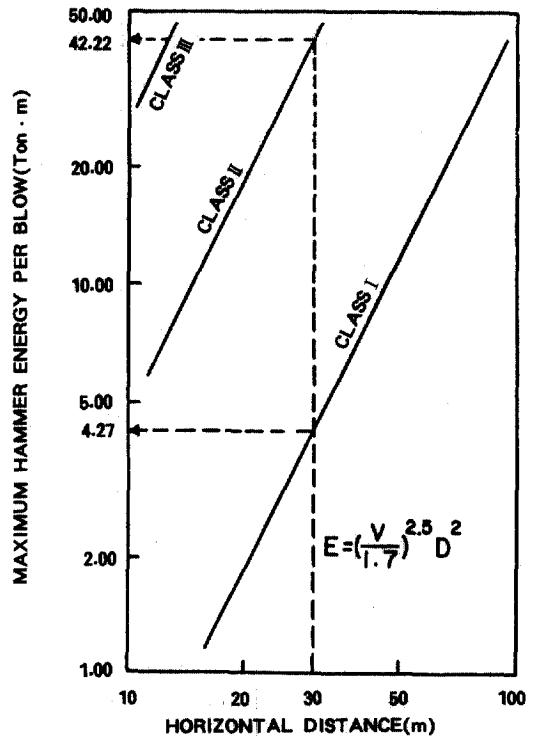


그림 6. Evaluation of maximum hammer energy per blow as a function of horizontal distances and classes of structures

편리하고 간단한 방법이다. 그림 6은 이와 같이 해머에너지를 수평거리와 構造物의 부류(class I ~ II)에 따라 評價하여 最大許容해머에너지를 구하고, 이 해머에너지에 부합되는 杭打機를 선정할 수 있다. 예를 들면, 杭打地點으로부터 30m 떨어진 곳에 class I의 構造物(文化財)가 존재한다면 4.27 ton·m의 타격당 杭打에너지가 사용될 수 있으므로, K35디젤해머(杭打에너지 10.5ton·m)는 적절하지 않고 安全性을 고려하여 K13디젤해머(杭打에너지 3.7ton·m)를 사용하여 杭打함이 타당하고, class II(住宅 및 아파트構造物)이 존재한다면 42.22ton·m의 杭打에너지가 사용될 수 있으므로 安全性을 고려하여 K150디젤해머(杭打에너지 39.5ton·m)가 安全하게 사용될 수 있다.

이와 같이 杭打에너지를 변경시켜 地盤振動을 감소시키는 방법은 효과적으로 杭打振動을 감소시킬 수 있으나, 杭打에너지가 너무 작은 杭打機를 사용했을 경우에는 杭打효과가 저하되어 전체 建設工程에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 地盤振動이 문제시 되는 지역에서 杭打振動을 감소시키고 최대의 杭打효과를 얻기 위해서는 이러한 杭打에너지輕減法과 말뚝의 종류 및 特性이 杭打에너지전파와 직접 연관성이 있으므로⁽³⁾ 에너지輕減효과 좋은 말뚝의 선정 그리고 防振溝등에 의한 杭打振動의 전달 경로상 대책등을 적절히 조합시켜 경제적이고 효과적인 最適杭打設計가 필요하다. 또한 杭打作業은 거의 모든 경우 騒音과 振動이 동시에 발생하고 이들을 분리해서 피해 정도를 판단하기가 어렵다. 따라서 騒音 및 振動이 매우 문제시되는 경우에는 無騒音·無振動基礎工法이 사용되어야 할 것이다.

5. 結 論

本 研究를 통하여 地表埋立層으로부터 堆積層(N=35회 지점)까지 디젤해머로 PC콘크리트말뚝을 杭打하는 동안 발생하는 最大地盤振動速度와 加速度推定式(式 (3)과 (4))의 유도와 杭打振動의 周波數分布狀態를 알아 보았다. 이들 推定式은 본 基礎工事와 비슷한 地盤條件에서 콘크리트말뚝의 杭打가 실시되는 경우, 事前에 발생될 수 있는 地盤振動值를 推定하여 振動문제를 評價하고 適切한 對應策을 강구하는데 사용할 수 있다. 그리고 이들 推定

式은 다른 종류의 地盤에 대해서는 물론 타당하다고 할 수 없으나, 杭打工事가 시작되기 전에 杭打에너지와 거리에 따른 最大振動值를 근사적으로 推定할 수 있다.

杭打作業은 거의 모든 경우 騒音과 振動이 동시에 발생하므로 이를 분리해서 피해 정도를 판단하기는 곤란하다. 따라서 防振對策은 騒音對策과 병행해서 실시해야 확실한 효과를 얻을 수 있으며, 施工時 보다는 計劃·設計時 모든 각도에서 신중히 검토하고 판단하여 綜合的인 對策을 수립해야 한다.

謝 辭

本 研究는 '87 (株)大宇 受託研究의 일부로, 研究費를 支援해준 (株)大宇에 深甚한 謝意를 표하는 바이다. 또한 現場計劃에 적극 協助하여 주신 (株)現代産業開發의 李德英 所長님께도 감사를 드린다.

參 考 文 獻

1. Wiss, J. F., "Construction Vibrations : State-of-the-Art", ASCE, Vol. 107, No. GT2, pp. 167~181, 1981.
2. Clough, G. W. and Chameau, J. L., "Measured Effects of Vibratory Sheetpile Driving", ASCE, Vol. 106, No. GT10, pp. 1082~1099, 1980.
3. Heckman, W. S. and Hagerty, J. H., "Vibrations Associated with Pile Driving", ASCE, Vol. 104, No. CO4, pp. 385~394, 1978.
4. Theissen, J. R. and Wood, W. C., "Vibrations in Structures Adjacent to Pile Driving", Dames & Moore, Engineering Bulletin 60, pp. 5~21, 1982.
5. Richart, Jr. F. E., Woods, R. D. and Hall, Jr. J. F., "Vibrations of Soil and Foundation", Prentice-Hall, 1969.
6. Moore, P. J., "Analysis and Design of Foundations for Vibrations", A. A. Balkema, 1985.
7. Prange, B., "Dynamic Response and Wave Propagation in Soils", A. A. Balkema, 1978.
8. Das, B. M., "Fundamentals of Soil Dynamics", Elsevier, 1982.
9. 中川泰次, 渡邊清治, "振動公害とその對策", 土と基礎, 1月, pp. 65~71, 1975.

10. 日本環境廳, “振動規制技術マニュアル”, 環境廳大氣保
全局特殊公害課編輯, 1977.
11. 工業火藥協會編, “發破ハンドブック”, 山海堂, 1976.

12. 守田榮, “公害防止の技術と法規(振動編)”, 産業公害防
止協會, 1978.
13. 江島淳, “地盤振動と対策”, 吉井書店, 1979.

(接受: 1988. 5. 16)