

横川駅付近における杭打衝撃による地盤 ならびに建物の振動に関する一考察

最 上 幸 夫

A Study on the Vibrations of Earth and a Building under piling Impacts near Yokogawa Station

By
Sachio MOGAMI

Abstract

1. Vibration of Earth under piling Impacts and running Trains

The stratum near Yokogawa Station where the writer and the others investigated the vibrations is chiefly composed of silty sand and there are hard layers of gravels in 6 m and 18 m depth. The stratum in this neighbourhood is almost similar. The driving concrete pile is 45 cm in diameter and 18 m in length. The weight of drop hammer is 2500 kg and its drop height is about 2-3 m. We measured the vibrations of earth by running trains to compare with those under piling impacts. According to the measuring results, the natural frequency of earth is 9-15 cps, and its average value is about 13 cps. The relation between the amplitude and the distance from the origin of vibration is shown in Fig. 1.

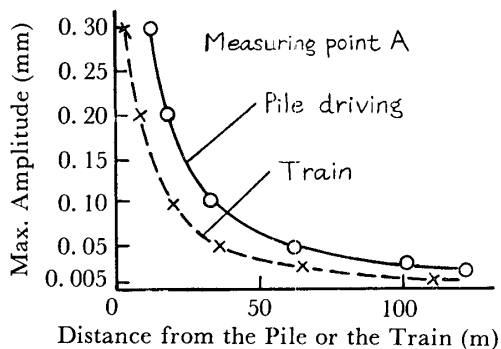


Fig. 1 Relation between Amplitude and Distance

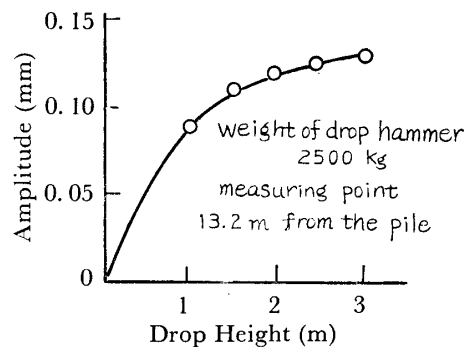


Fig. 2 Relation between Amplitude and Drop Height

The relation between the drop height and the amplitude at the point of 13.2 m from the driven pile is shown in Fig. 2.

Comparing both amplitudes of piling impacts and running trains, the magnitude of the former is about twice of the latter.

2. Vibrations of a Building (Yokogawa Apartment)

We measured the vibrations of the four-storied reinforced-concrete building in the nearest distance of 12 m from the driven pile. As the results the average value of measured amplitudes is 0.09 mm at the bottom of the building and is 0.07 mm at the top. According to the theoretical calculation the amplitude at the top of the building is 0.854 a, assuming the amplitude at the bottom as a. Therefore the result of the theoretical calculation is quite similar with the measured value.

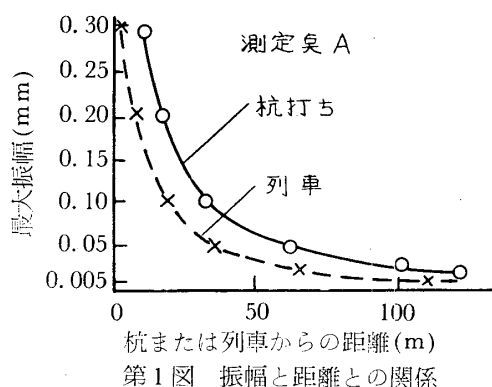
Calculating the stresses theoretically, σ_{max} is 0.43 kg/cm² at the bottom and is 0.23 kg/cm² at the top. So the values of stresses are very small. It is concluded that a concrete crack can't be produced by piling impacts if the concrete works are carefully done. Calculating the natural frequency of the column by longitudinal vibrations theoretically, its value is about 35.6 cps. However the natural frequency of the concrete slab on the roof is about 14.3 cps, and this value is quite similar to the value of earth, So I feel the danger of resonance. I should like to strengthen the supports of slab. Calculating accelerations in order to clear the influence on human bodies, I found that the values are almost similar to those of running trains in velocity of about 60 km/hr.

1. ま え が き

さきに著者らは国鉄下関工事局の依頼によって横川駅付近における杭打作業による地盤ならびに建物（4階建鉄筋コンクリート横川アパート）の振動調査を行い、それぞれの立場から報告書を提出したが¹⁾、本文は主として著者が分担した報告をとりまとめ、これに若干の考察と補足を行ったものである。

2. 杭打衝撃および走行列車による地盤振動

杭打衝撃による地盤の振動のみを測定したのではその影響の判定は一般に困難であるから、これと比較対照して判定を容易にするための資料として、現場すぐ近くの山陽本線の走行列車による地盤の振動を測定することにした。これらの測定結果²⁾によれば、杭打衝撃もしくは走行列車によってこの付近一帯の地盤に誘起される自然振動数は大体9～15CPSの範囲で13.5CPSが最も卓越しており、振動振幅と震源からの距離の関係を示せば、第1図のごとくなる。



このような場合の振動を地表面付近の表面波と仮定すれば、その振幅は一般に次式で表わされる³⁾。

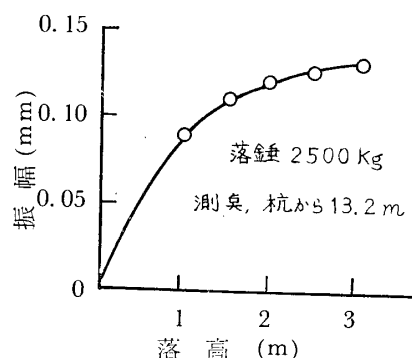
$$y = C \frac{1}{\sqrt{D}} e^{-\alpha D/L^2} = C \frac{1}{\sqrt{D}} e^{-\lambda D} \quad \dots(1)$$

ここに、 y ：地盤振動の振幅、 C ：地盤の定数、 α ：土地の性質によってきまる定数、 L ：波長、 D ：震源からの距離、 $\lambda = \alpha/L^2$ 。

式(1)によれば、振動の実測記録より C 、 λ などの値を求めることができる。第1図の結果より C 、 λ の値を求めてみると、次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} C &= 1.094 \times 10^{-3}(m^{3/2}), \quad \lambda = 0.0138(m^{-1}) \quad \dots\dots \text{杭打衝撃} \\ C &= 0.825 \times 10^{-3}(m^{3/2}), \quad \lambda = 0.0192(m^{-1}) \quad \dots\dots \text{列車振動} \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

したがってこれらの値を用いると、式(1)よりそれぞれの場合における任意距離の最大振幅を推定できる。この付近一帯の地層はほぼ一様とみなしうるから⁴⁾、一々振幅の実測を行わなくても上式を利用して任意点の振幅を推定してもそう大きい誤差はないものと考えられる。ただし杭打衝撃の実験式は落錘2500kg、落高2mの場合である。落高を変えた場合には杭打位置より13.2mの地点での実験結果は第2図のごとくなる。

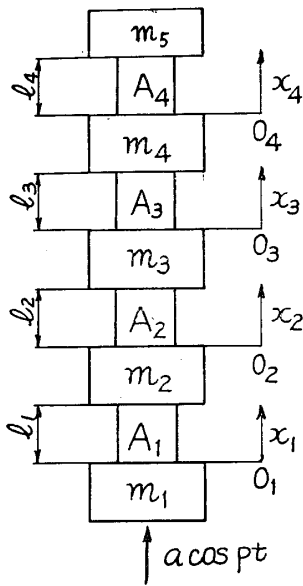


第2図 振幅と落高との関係

3. 建物の振動に対する解析ならびに考察

a. 建物（横川アパート）の振動に対する解析

著者らが調査した建物は鉄筋コンクリート造4階建の横川アパートである。杭の衝撃によって生ずる振動は主として上下振動であって水平振動はきわめて小さいので、ここでは上下振動のみについて考察する。一般に高層建築物の振動を厳密に取扱うことは、著しく複雑であるから、できるだけ単純化したモデルによって取扱うことにする。上下動のみを取扱う場合は建物の縦振動



第3図 建物振動の力学的モデル

について考えればよいから、第3図のモデルを仮定する。すなわち各階におけるハリや床板はその階の柱に集中質量として作用するものとし、壁はその上半部が柱の上部に、下半部は柱の下部に集中質量として作用するものと仮定する。1～4階の柱の断面積をそれぞれ $A_1 \sim A_4$ 、各階の柱の長さをそれぞれ $l_1 \sim l_4$ 、各階の座標を第3図のごとく $x_1 \sim x_4$ で表わし、コンクリートの弾性係数を E 、単位体積重量を w で表わせば、各階の柱の変位を $u_1 \sim u_4$ として各階の柱の縦振動の運動方程式は次式で表わされる。

$$EA_n \frac{\partial u_n}{\partial x_n} - \frac{wA_n}{g} \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} = 0 \quad (n=1 \sim 4) \quad \dots(3)$$

柱の下端に上下方向の地震動 $a \cos pt$ が作用するものとすれば、柱も同周期の振動を行うから、式(3)の解は次のごとくなる。

$$u_n = (C_n \cos \alpha x_n + D_n \sin \alpha x_n) \cos pt \quad \dots(4)$$

$$\text{ただし、} \quad n=1 \sim 4, \quad \alpha = p\sqrt{w/(gE)} \quad \dots(5)$$

ここに C_n, D_n は境界条件によってきまる値である。各階における境界条件は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} x_1 = 0: & \quad EA_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = m_1 \alpha^2 p \\ x_1 = l_1: & \quad EA_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = -m_2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \\ x_2 = 0: & \quad EA_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = -m_2 \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \right)_{x_1=l_1} \\ x_2 = l_2: & \quad EA_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = -m_3 \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \\ x_3 = 0: & \quad EA_3 \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = -m_3 \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \right)_{x_2=l_2} \\ x_3 = l_3: & \quad EA_3 \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = -m_4 \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \\ x_4 = 0: & \quad EA_4 \frac{\partial u_4}{\partial x_4} = -m_4 \left(\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \right)_{x_3=l_3} \\ x_4 = l_4: & \quad EA_4 \frac{\partial u_4}{\partial x_4} = -m_5 \frac{\partial^2 u_4}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots(6)$$

式(4)の C_n, D_n を式(6)の境界条件によって順次決定すれば、次のごとくなる。

$$D_1 = \frac{m_1 P^2}{EA_1 \alpha} a, \quad C_1 = \frac{EA_1 \alpha \cos \alpha l_1 - m_2 P^2 \sin \alpha l_1}{EA_1 \alpha \sin \alpha l_1 + m_2 P^2 \cos \alpha l_1} D_1 \quad \dots(7)$$

$$\left. \begin{aligned} D_2 &= D_1 \frac{A_1}{A_2} \frac{m_2 P^2}{EA_1 \alpha \sin \alpha l_1 + m_2 P^2 \cos \alpha l_1} \\ C_2 &= \frac{EA_2 \alpha \cos \alpha l_2 - m_3 P^2 \sin \alpha l_2}{EA_2 \alpha \sin \alpha l_2 + m_3 P^2 \cos \alpha l_2} D_2 \end{aligned} \right\} \quad \dots(8)$$

$$\left. \begin{aligned} D_3 &= D_2 \frac{A_2}{A_3} \frac{m_3 P^2}{EA_2 \alpha \sin \alpha l_2 + m_3 P^2 \cos \alpha l_2} \\ C_3 &= \frac{EA_3 \alpha \cos \alpha l_3 - m_4 P^2 \sin \alpha l_3}{EA_3 \alpha \sin \alpha l_3 + m_4 P^2 \cos \alpha l_3} D_3 \end{aligned} \right\} \dots(9)$$

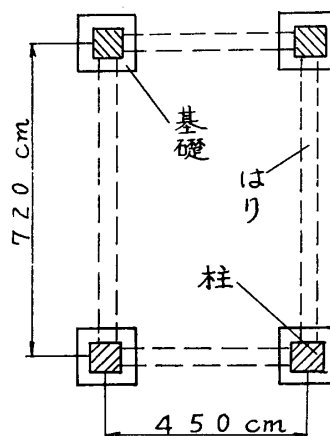
$$\left. \begin{aligned} D_4 &= D_3 \frac{A_3}{A_4} \frac{m_4 P^2}{EA_3 \alpha \sin \alpha l_3 + m_4 P^2 \cos \alpha l_3} \\ C_4 &= \frac{EA_4 \alpha \cos \alpha l_4 - m_5 P^2 \sin \alpha l_4}{EA_4 \alpha \sin \alpha l_4 + m_5 P^2 \cos \alpha l_4} D_4 \end{aligned} \right\} \dots(10)$$

以上式(7)~(10)によって各常数が決定される。計算に当っては、まず D_1 の値を求め、これを用いて C_1 の値がきまる。以下順次同様の計算を繰返して各常数の値が決定される。したがって各階の柱の変位(振幅)が求められ、応力は $E \partial u_n / \partial x_n (n=1 \sim 4)$ として計算される。以上の関係式を用いて横川アパートの場合について検討する。横川アパートの設計図を参照し、計算に必要な諸量を求めると第1表のごとくなる。

第 1 表

m_1	53.47	A_2 (cm ²)	15,440	l_1 (cm)	295
m_2	30.61	A_2 (")	11,930	l_2 (")	195
m_3	26.53	A_3 (")	11,700	l_3 (")	195
m_4	25.51	A_4 (")	11,700	l_4 (")	195
m_5	25.51	A_5 (")	11,700	l_5 (")	195

ただし、質量の単位は $\text{kg}, \text{cm}^{-1}, \text{sec}^2$ である。第1表の値は第4図に示す部分を一本の柱に換算したものである。すなわち第4図に示すようなブロックの下部に一樣な上下方向の地震動 $a \cos pt$ が作用するものと仮定し、4本の柱を一本にまとめて第3図のモデルにおきかえてある。実測結果によれば、振動数は 12.6CPS 程度であるから、この値を用いると、 $p = 2\pi \times 12.6 \approx 79$ となる。 $w = 2.4 \times 10^{-3} \text{kg/cm}^3$, $g = 980 \text{cm. sec}^{-2}$, $E = 14 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$ などの諸数値を用いると、 $\alpha = p\sqrt{w/(gE)} \approx 0.33 \times 10^{-3}$, $P^2 = 6241$ となり、これらの数値と第1表の値を用いて計算を行えば、屋上における振幅 $(u_4)x_4 = l_4$ の値は $0.854a$ (a は建物下端の振幅) となる。実測結果によると、かなり測定値にばらつきが見られるが、大体 $(0.5 \sim 0.6)a$ 程度の値がえられている。しかし建物下部での測定値は柱の近くの床板上での測定値で柱自体の振幅ではない。柱自体の振幅は床板上の値よりやや小さいものと考えられるから、理論計算による $0.854a$ はほぼ妥当な値と考えられよう。柱の最下端における測定最大振幅は実測結果より $a_{\max} = 0.2 \text{mm}$ と推定されるから、この値を用いて応力計算を行えば、柱の下端で $\sigma_{\max} = 0.43 \text{kg/cm}^2$, 柱の上端で $\sigma_{\max} = 0.23 \text{kg/cm}^2$ となり、応力値としてはかなり小さい。したがって建物の強度という点からはほとんど問題にならない程度であるが、振動時にはコンクリートに引張りと圧縮が交互に繰返されるから、もしコンクリートの施工に不十分な個所があると、ひびわれを生ずることも考えられる。しかし施工に十分注意し、普通程度に仕上げてあれば、まずこの程度の振動に対してはひびわれの発生はないものと思われ。



第4図 建物構造の一部(略図)

b. 建物の固有周期の算定

第2図に示したモデルの縦振動に対する固有周期の算定を行う。

振幅は前項式(4)によって表わされるから、この振幅の運動のエネルギー T 、位置のエネルギー V はそれぞれ次式で算出される。すなわち

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \frac{w}{g} \sum_{n=1}^4 A_n \int_0^{l_n} \left(\frac{\partial u_n}{\partial t} \right)^2 dx_n \\ V &= \frac{1}{2} E \sum_{n=1}^4 A_n \int_0^{l_n} \left(\frac{\partial u_n}{\partial x_n} \right)^2 dx_n \end{aligned} \right\} \dots(11)$$

式(11)より $T_{\max} = V_{\max}$ において固有振動数 p を決定する条件式を求めると、

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^4 \left\{ C_n^2 \left(\frac{l_n}{2} + \frac{\sin 2\alpha l_n}{4\alpha} \right) + C_n D_n \frac{1 - \cos 2\alpha l_n}{2\alpha} + D_n^2 \left(\frac{l_n}{2} - \frac{\sin 2\alpha l_n}{4\alpha} \right) \right\} = \\ \sum_{n=1}^4 \left\{ C_n^2 \left(\frac{l_n}{2} - \frac{\sin 2\alpha l_n}{4\alpha} \right) - C_n D_n \frac{1 - \cos 2\alpha l_n}{2\alpha} + D_n^2 \left(\frac{l_n}{2} + \frac{\sin 2\alpha l_n}{4\alpha} \right) \right\} \dots(12) \end{aligned}$$

式(12)より試算法によって P の値を決定することができる。横川アパートの場合に上式を適用し、第1表の諸数値および前項の計算に用いた諸値を用いて試算法を行えば、 $P = 223.7$ となる。したがって固有振動数は $223.7/2\pi = 35. \text{CPS}$ となる。これに対し地盤の振動数は $9 \sim 15 \text{CPS}$ 、平均約 13CPS であるから、柱については共振のおそれはないことになる。つぎに屋上における床板の固有周期について検討する。床板は $360 \times 450 \times 10 \text{cm}$ の鉄筋コンクリートスラブであるが、周辺を単純支持と仮定すれば、固有振動数は 14.3CPS 、周辺固定と仮定すれば、 26.8CPS となる。これに対して実測値は $10 \sim 12 \text{CPS}$ 程度となっているから、この場合床板は単純支持と仮定する方が実測に近い結果を与えることになる。いずれにしても $10 \sim 12 \text{CPS}$ の固有振動数では前記地盤の固有振動数 13CPS (平均値) ときわめて近い値を示すから、床板では共振現象を生ずる傾向があるものと考えられる。事実屋上の床板上で測定した振幅値がアパート近くの地盤の振幅値よりも大きい値 (その絶対値は小さいが) を示した測定例も見受けられた。したがって共振を防止するためには床板の支持状態を現在よりも強化し、固定状態に近くすることが望ましいものと考えられる。

c. 振動が人体に及ぼす影響

杭打作業が人体に及ぼす影響については騒音と衝撃が生ずる振動効果との二つに分けて検討すべきであるが、今回の調査では音響測定は実施しなかったため、ここでは振動のみについて検討する。

振動が人体に与える不快感の限度については、走行車両の振動について提唱した Janeway の研究⁵⁾がある。これによれば振動数 $6 \sim 20 \text{CPS}$ の範囲の振動では加速度が $0.033g$ がその限度とされている。したがってそれ以上の加速度が生ずる場合は人体に不快感を与えるわけであるが、その不快感の程度を表わす方法として後藤博士⁶⁾は Janeway の場合を基準として1にとり、これを乗心地係数1として表わし、営業線 (京阪神急行電鉄) の車両振動を測定した結果、乗心地係数は大体 $1.1 \sim 2.3$ の範囲内にあることを示している。

杭の衝撃による振動では衝撃の作用時間間隔がかなり大きく、車両振動のように連続的ではないから、車両の場合と同一規準で不快感の程度を表わすことは余り妥当とは思われないが、杭打衝撃に対する不快感の限界規準といったものは現在明確にされていないから、現在のところ一応後藤博士提案の乗心地係数によって不快感の程度を検討することにする。横川アパートの振動測定の結果から、杭打衝撃によって生ずる振幅および振動数の値を用い、加速度を算出し、乗心地

係数を求めてみると、1.22~2.70の範囲となり、前記走行車両による値よりもやや大きい程度の値がえられた。杭打衝撃の作用間隔の大きい点を考慮すれば、この程度の値であれば、大体車両振動による不快感と同程度であると考えて差支えないようである。

4. 結 論

横川駅付近における杭打作業による地盤ならびに建物の振動を調査した結果、えられた主な結論を述べると、およそ次のとおりである。

1) 付近一帯の地層はほぼ一様とみなしうるから、1カ所で振動測定を行えば、その測定結果は付近一帯の振動にほぼ適用して差支えない。(A, B 2地点での振幅、振動数の測定値に大差ないことが判明した)

2) このときの杭打衝撃および走行車両による振幅と距離との関係は式(1)、(2)の近似式によって表わしうる。

3) 杭打作業による地盤振動の振幅は走行車両による振幅の約2倍の値を示す。

4) 杭打衝撃によって生ずる振動が大きいのは地表より6m付近および18m付近の砂礫よりなる堅固な層に杭が貫入した場合である。

5) 落錘の高さを変化させた場合、落高が3m以上になれば、地震動の振幅は余り変化しない。この実験結果からみれば、落高を大きくする程、打込み能率が良くなり経済的となるように思われるが、余り大きくするとコンクリート杭の破壊を生ずるおそれがあり、やはり一定の限度があるものと考えられる。

6) 建物の振動については横川アパート(杭打ち現場より最短距離約13m)につき振動測定を行ったが、振幅は一般に小さい値を示し、理論計算による応力値はかなり小さいので、施工が普通程度であれば、杭打期間を考慮して、まずひびわれの生ずる心配はないものと考えられる。

7) 横川アパートの固有振動数については、柱部分では共振のおそれはないが、床板においてはほぼ地盤の固有周期と一致するから、共振を防止するためには床板の支持状態を一層強化する必要があると考えられる。

8) 杭打作業による建物の振動が人体に及ぼす影響については大体走行車両(50~60km/h速度)が人体に及ぼす影響と同程度であると考えて差支えない。

以上が今回われわれの行った調査報告の結論の概要である。

参 考 文 献 (その他)

- 1) 山陽本線横川駅構内路盤振動調査報告書
 第1部 振動測定結果 宇部工業短期大学 白井源慧
 第2部 理論的考察 山口大学工学部 最上幸夫
 第3部 地質的解析 山口大学工学部 三輪正房
 昭和37年2月10日 国鉄下関工事局提出。
- 2) 上掲 1), 第1部
- 3) 妹沢克惟: 振動学, 下巻 p. 634, 昭・24
- 4) 上掲 1), 第3部
- 5) R. N. Janeway: Vehicle Vibration Limits to Fit Passenger. S. A. E. Journ., Aug., 1948, pp. 48-49.
- 6) 後藤尚男・勝見 雅: ボギー車の振動, 乗り心地係数と軌道構造に関する実験の一考察, 鉄道線路第10巻 第9号, pp. 23-28.